



Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram).

Τομέας: Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Επιβλέπων: Δημήτριος Μανωλάκος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021



Determination of average failure time (MTBF) - recovery (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) for the calculation of availability - reliability of aircraft components and failure curve (failure diagram).

Sector: Machining Technology

Supervisor: Dimitrios Manolakos Professor NTUA

Athens, September 2021

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ονοματεπώνυμο

Γεώργιος Σπυρίδης



Ευχαριστίες

Εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέπον Καθηγητή Κύριο Μανωλάκο Δημήτριο για τις γνώσεις και την βοήθεια που μου προσέφερε όχι μόνο κατά την διεκπεραίωση της Διπλωματικής Εργασίας αλλά καθ' όλη την πορεία μου στο Πολυτεχνείο.

Ευχαριστώ το Θεό που με αξίωσε να γνωρίσω εξαιρετικούς επιστήμονες, φοιτητές και φίλους με χαρακτήρα ανθρωποκεντρικό.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την υπομονή και κατανόηση που έδειξαν και δείχνουν στο δύσκολο δρόμο που ακολουθώ.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάλυση αξιοπιστίας ελικοπτέρου τύπου Bell OH-58 Kiowa Warrior που ανήκει πλέον στις Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις, βασιζόμενη στη συλλογή και στατιστική ανάλυση στοιχείων από βλάβες του εν λόγω συστήματος.

Η βασική ιδέα – στόχος είναι να μπορεί ο προϊστάμενος μιας γραμμής συντήρησης - παρακολούθησης ενός συστήματος ελικοπτέρου τύπου Bell OH-58 Kiowa Warrior, να καταγράφει άμεσα τις εργασίες και επισκευές που πραγματοποιούνται στο σύστημα, να ελέγχει με ακρίβεια τους χρόνους ολικής επισκευής, διάθεσης ανταλλακτικών και εργατωρών που δαπανήθηκαν, με τελικό στόχο να συλλέξει δεδομένα ιστορικού βλαβών που θα του προσφέρουν την ικανότητα πρόβλεψης του ποσοστού διαθεσιμότητας του συστήματος σε μελλοντικό χρόνο.

Η εργασία αυτή συνοδεύεται από δύο αρχεία στα οποία αναπτύσσουμε σε περιβάλλον Microsoft Excel δύο προγράμματα με τα οποία ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει τη διαθεσιμότητα του συστήματος και την καμπύλη αστοχίας αεροπορικών εξαρτημάτων, αντίστοιχα.

Στο πρώτο πρόγραμμα, αναπτύσσεται μια βάση δεδομένων από 270 αεροπορικά εξαρτήματα ταξινομημένα σε ζώνες συντήρησης σύμφωνα με τον κατασκευαστή, όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα απαραίτητα «Inputs» ώστε να λάβει χρήσιμες πληροφορίες και να υπολογίσει σημαντικούς δείκτες όπως το «MTTR», «MTBF» του συστήματος κτλ.

Στο δεύτερο πρόγραμμα αναπτύσσεται ένας υπολογιστής ανάπτυξης ρωγμών όπου ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει την καμπύλη αστοχίας αεροπορικών εξαρτημάτων μέσω της θεωρίας ανοχής σε βλάβη.

Η εργασία αυτή έγινε προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στα συνεργεία επισκευής ελικοπτέρων του Ελληνικού Στρατού για την σωστή και γρήγορη λήψη αποφάσεων, τη μεθοδική αντιμετώπιση των εργασιών συντήρησης-επισκευής, τη μείωση του χρόνου αναμονής για ανταλλακτικά και την επαύξηση της ασφάλειας και αξιοπιστίας των ελικοπτέρων.

Abstract

The present dissertation aims at the reliability analysis of a Bell OH-58 Kiowa Warrior helicopter that now belongs to the Hellenic Armed Forces, based on the collection and statistical analysis of data from failures of this system.

The basic idea – goal, for the maintenance manager, is to be able to record the work and repairs carried out in the system, to accurately control the times of the first repair, to control Logistics and employees spent, with the ultimate goal of collecting fault history data that will give him the ability to predict the availability of the system in the future.

This work is accompanied by two files developed in Microsoft Excel. In those programs, user can calculate the availability of the system and the failure component of aviation components, respectively.

The first program develops a database of 270 aircraft components classified into maintenance zones according to the manufacturer, where the user can enter the Inputs needed to obtain useful information and calculate important indicators such as MTTR, MTBF, etc.

The second program develops a crack calculator in which user can calculate the curved failure of aviation components through damage tolerance theory.

The work was done in order to be used in the helicopter repair crews of the Greek Army for the correct and fast decision making, the methodical treatment of the maintenance-repair work, the reduction of the waiting time for spare parts and the contact of the safety and reliability of the helicopters.

Ακρωνύμια - Σημασία

RIN: Retirement Index Number

MTTR: Mean Time to Repair

MTBF: Mean Time Between Failures

MTTF: Mean Time To Failure

LDT: Logistic Disposal Time

PT: Planned-Time

UT : Up-Time

DT : Down-Time

CDF : Cumulative Distribution Function

PDF : Probability Distribution Function

AMM: Aircraft Maintenance Manual

CMM: Component Maintenance Manual

FMEA: Failure Mode and Effect Analysis

LCC: Life Cycle Cost

FAA: Federal Aviation Administration

RCM: Reliability Centered Maintenance

LORA: Level of Repair Analysis

MTA: Maintenance Task Analysis

TPM: Total Productive Maintenance

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

SIF : Stress Intensity Factor

NDI: Non-Destructive Inspection

DLC: Design Load Cases

LEFM: Linear Elastic Fracture Mechanics

FALSTAFF: Fighter Aircraft Loading STANDARD For Fatigue

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Ευχαριστίες..... | 4 |
| Περίληψη..... | 5 |
| Abstract | 6 |
| Ακρωνύμια - Σημασία..... | 7 |
| LEFM : Linear Elastic Fracture Mechanics | 8 |
| FALSTAFF : Fighter Aircraft Loading STANDARD For Fatigue..... | 8 |
| 1. Εισαγωγή..... | 12 |
| 1.1 Πλαίσιο..... | 12 |
| 1.2 Σκοπός ερωτήματα και στόχοι..... | 13 |
| 1.3 Οριοθέτηση..... | 13 |
| 1.4 Διάρθρωση της Εργασίας | 13 |
| 2. Παρουσίαση Ελικοπτέρου Bell OH-58D (Kiowa) | 15 |
| 2.1 Γενικές Πληροφορίες | 15 |
| 2.2 Επιδόσεις [2] | 16 |
| 2.3 Βασικά Χαρακτηριστικά – Σκαρίφημα [2] | 16 |
| 2.4 Πρόγραμμα Συντήρησης..... | 17 |
| 3. Θεωρία αξιοπιστίας (Reliability Theory)..... | 22 |
| 3.1 Χρησιμότητα Αξιοπιστίας | 22 |
| 3.2 Θεωρητικό πλαίσιο | 23 |
| 3.2.1 Μέτρηση αξιοπιστίας..... | 23 |
| 3.2.2 Δείκτες μέτρησης αξιοπιστίας | 23 |
| 3.2.3 Ορολογία..... | 24 |
| 3.2.4 Διαθεσιμότητα - Συντηρησιμότητα | 26 |
| 3.2.5 Κατηγορίες Συντήρησης..... | 27 |
| 3.3 Μέθοδοι Ανάλυσης Αξιοπιστίας..... | 29 |
| 3.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι..... | 29 |
| 3.3.2 Ανάλυση με δέντρα βλαβών (Fault Tree Analysis)..... | 29 |
| 3.3.3 Διαγράμματα αιτίας- αποτελέσματος..... | 30 |
| 3.3.4 In-service data..... | 32 |
| 3.3.5 Προσέγγιση Markov..... | 32 |
| 4. Πιθανότητες και Στατιστικές Αναλύσεις..... | 34 |
| 4.1 Μαθηματικοί ορισμοί..... | 34 |
| 4.1.1 Μεταβλητές και βασικά μεγέθη στατιστικής..... | 34 |
| 4.1.2 Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και αθροιστικής κατανομής..... | 35 |
| 4.1.3 Αναμενόμενη τιμή | 36 |
| 4.1.4 Διακύμανση (Variance)..... | 36 |
| 4.2 Στατιστικές κατανομές..... | 37 |
| 4.2.1 Κανονική Κατανομή | 37 |
| 4.2.2 Διωνυμική Κατανομή..... | 37 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.3 | Κατανομή Poisson..... | 38 |
| 4.2.4 | Εκθετική Κατανομή..... | 39 |
| 4.2.5 | Κατανομή Rayleigh..... | 39 |
| 4.2.6 | Κατανομή Weibull..... | 40 |
| 4.3 | Ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων..... | 41 |
| 5. | Γραφική Ανάλυση Δεδομένων και Εύρεση Κατανομής..... | 44 |
| 5.1 | Μη - Παραμετρικές αναλύσεις Δεδομένων Ζωής (Data Life) | 44 |
| 5.1.1 | Μέθοδος Total Time on Test | 45 |
| 5.2 | Παραμετρικές αναλύσεις Δεδομένων Ζωής (Data Life)..... | 45 |
| 5.2.1 | Γραφική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων | 46 |
| 6. | Παρουσίαση Προγράμματος | 49 |
| 6.1 | Είσοδοι (Inputs)..... | 49 |
| 6.1.1 | Στο Στάδιο της Συλλογής Δεδομένων | 49 |
| 6.1.2 | Στο Στάδιο της Ανάλυσης Δεδομένων | 50 |
| 6.2 | Έξοδοι (Outputs) | 53 |
| 6.2.1 | Στο Στάδιο της Συλλογής Δεδομένων | 53 |
| 6.2.2 | Στο Στάδιο της Ανάλυσης Των Δεδομένων | 54 |
| 6.3 | Επεξήγηση Υπολογισμών | 57 |
| 6.3.1 | Ταξινόμηση Εξαρτημάτων Ανά Ζώνη Συντήρησης | 57 |
| 6.3.2 | Επεξήγηση Επιλογής Δεδομένων - Καταγραφής Χρόνων | 58 |
| 6.3.3 | Υπολογισμός MTTR - MTBF..... | 62 |
| 7. | Θραυσεομηχανική (Fracture Mechanics)..... | 64 |
| 7.1 | Εισαγωγή Στην Μηχανική Αστοχία Εξαρτημάτων | 64 |
| 7.2 | Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών..... | 65 |
| 7.2.1 | Θραύση | 65 |
| 7.2.2 | Συγκέντρωση Τάσεων σε Ασυνέχειες | 66 |
| 7.2.3 | Θεωρητική Αντοχή Θραύσης | 67 |
| 7.3 | Μηχανισμοί και Κατηγορίες Θραύσης | 69 |
| 7.3.1 | Τύποι Ανάπτυξης Ρωγμών | 69 |
| 7.3.2 | Διάδοση Ρωγμών | 70 |
| 7.3.3 | Κατηγορίες Θραύσης | 70 |
| 7.4 | Υπολογισμός Συγκέντρωσης Τάσεων Μέσω Του SIF..... | 71 |
| 7.4.1 | Ορισμός του Συντελεστή Έντασης Τάσης (SIF) | 71 |
| 7.5 | Κόπωση (Fatigue)..... | 73 |
| 7.5.1 | Χαρακτηριστικά Μεγέθη Κόπωσης | 73 |
| 7.5.2 | Είδη Κόπωσης | 74 |
| 7.5.3 | Αντοχή Σε Κόπωσης | 75 |
| 7.5.4 | Αντοχή Σε Θραύση (Fracture Toughness)..... | 77 |
| 8. | Ανοχή σε Βλάβη (Damage Tolerance)..... | 78 |
| 8.1 | Γενικά | 78 |
| 8.1.1 | Θεωρητική Προσέγγιση | 78 |
| 8.1.2 | Αρχικός Χαρακτηρισμός Ζημιάς | 79 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 8.1.3 | Απαιτήσεις Επιθεώρησης | 80 |
| 8.2 | Θεωρία Ανάπτυξης Ρωγμών | 81 |
| 8.2.1 | Κανόνας Miner | 81 |
| 8.2.2 | Εξάρτηση Μεγέθους Ρωγμών Και Αριθμού Κύκλων Φόρτισης..... | 82 |
| 8.2.3 | Ιστορικό Κόπωσης..... | 83 |
| 8.2.4 | Εξέλιξη Της Ρωγμής..... | 85 |
| 8.2.5 | Επίδραση λόγου τάσεων R Στο Ποσοστό Ανάπτυξης Ρωγμών..... | 86 |
| 8.2.6 | Εξίσωση Walker | 87 |
| 8.2.7 | Εξίσωση Nasgro..... | 89 |
| 8.2.8 | Κριτήρια Αποτυχίας | 90 |
| 9. | Παρουσίαση Υπολογιστή Ρωγμών..... | 92 |
| 9.1 | Είσοδοι (Inputs)..... | 92 |
| 9.1.1 | Ιδιότητες Υλικού..... | 92 |
| 9.1.2 | Γεωμετρία Ρωγμής – Πλάκας..... | 94 |
| 9.1.3 | Ιστορικό Φόρτισης | 96 |
| 9.2 | Έξοδοι (Outputs) | 98 |
| 9.2.1 | Ιστορικό φορτίσεων μέχρι την αποτυχία..... | 98 |
| 9.2.2 | Καμπύλη Αστοχίας (Failure Diagram) | 100 |
| 9.3 | Επεξήγηση Υπολογισμών | 101 |
| 9.3.1 | Υπολογισμός SIF Από Υπέρθεση Τάσεων..... | 101 |
| 9.3.2 | Πλάκα Με Ρωγμή Πάχους t Στο Κέντρο..... | 102 |
| 9.3.3 | Πλάκα Με Ρωγμή Στην Άκρη | 104 |
| 9.3.4 | Κυλινδρικό Εξάρτημα Με Ρωγμή..... | 106 |
| 9.4 | Μεθοδολογία Πρόβλεψης Αστοχίας | 108 |
| 10. | Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα | 111 |
| 11. | Κατάλογος Πινάκων | 113 |
| 12. | Κατάλογος Σχημάτων..... | 114 |
| 13. | Κατάλογος Εικόνων..... | 115 |
| 14. | Κατάλογος Αναφορών | 117 |
| 15. | Παράρτημα Ι | 121 |

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο

Στις σύγχρονες αεροπορικές βιομηχανίες και μονάδες συντήρησης ελικοπτέρων, ένα μεγάλο κομμάτι των μελετών επικεντρώνεται στην βελτιστοποίηση και αποδοτικότερη υποστήριξη των αεροπορικών μέσων τόσο από πλευράς αεροπορικών εξαρτημάτων όσο και από την παροχή εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού.

Η πολυσύνθετη εξίσωση που δημιουργείται ως προς τη σωστή λήψη αποφάσεων με τελικό σκοπό την επαύξηση της διαθεσιμότητας του συστήματος (System Availability), εμπεριέχει διάφορους παράγοντες όπως: ασφάλεια, οικονομία, εκπαίδευση, σύστημα τροφοδοσίας ανταλλακτικών, εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό, εγκαταστάσεις, συνεργασία με εξωτερικούς φορείς κ.α.

Ανά καιρούς γίνονται διάφορες έρευνες ως προς το μοντέλο συντήρησης το οποίο μπορεί μια αεροπορική βιομηχανία να υιοθετήσει όπως για παράδειγμα προβλεπτική συντήρηση (Preventing Maintenance), επιδιορθωτική συντήρηση (Corrective Maintenance) κ.α. Με τις ήδη υπάρχουσες μελέτες και τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτές, ο μελετητής μπορεί να κάνει μια πιο πρόχειρη εκτίμηση για το ποιο μοντέλο συντήρησης είναι καλύτερο για τη δική του περίπτωση, ωστόσο κάθε σύστημα που απαιτεί τεχνική υποστήριξη είναι διαφορετικό και συνεπώς, η πιο στοχευμένη έρευνα θα μας αποφέρει και καλύτερα αποτελέσματα.

Για το σκοπό αυτό έχουν εισαχθεί στην υποστήριξη συστημάτων κάποιοι δείκτες, που συνοδεύονται από την αντίστοιχη ορολογία, με τους οποίους μπορούμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα. Κάποιοι απ' αυτούς είναι ο MTTF (Μέσος Χρόνος Εμφάνισης Βλάβης) , ο MTTR (Μέσος Χρόνος Επισκευής Βλάβης) , ο LDT (Χρόνος Διάθεσης Υλικοτεχνικής Υποστήριξης) κ.α.

Με τη παρούσα μελέτη λοιπόν, δίνεται λύση στην πολυσύνθετη εξίσωση που δημιουργεί η ανάγκη τεχνικής υποστήριξης ενός συστήματος ελικοπτέρου τύπου Bell OH-58 Kiowa Warrior. Χρησιμοποιώντας τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία, ο προϊστάμενος μιας γραμμής τεχνικής συντήρησης μπορεί να καταχωρεί άμεσα τις εργασίες και επισκευές που πραγματοποιούνται στο σύστημα και να ελέγχει με ακρίβεια τους χρόνους ολικής επισκευής, διάθεσης ανταλλακτικών και των εργασιών που δαπανήθηκαν. Παράλληλα η καταγραφή και τήρηση των δεδομένων αυτών για εύλογο χρονικό διάστημα (100 και πάνω παρατηρήσεις), θα του προσφέρει την ικανότητα πρόβλεψης του ποσοστού διαθεσιμότητας του συστήματος σε μελλοντικό χρόνο.

Ακόμη στην εργασία αυτή αναπτύσσεται η θεωρία της ανοχής σε βλάβη (Damage Tolerance) σε αεροπορικά εξαρτήματα των πιο γνωστών κραμάτων που χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές κατασκευές. Έχει δηλαδή αναπτυχθεί ένας υπολογιστής ανάπτυξης ρωγμών (Crack Calculator) που μας βοηθάει στον προσδιορισμό της καμπύλης αστοχίας (failure diagram) διάφορων αεροπορικών εξαρτημάτων.

1.2 Σκοπός ερωτήματα και στόχοι

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάλυση της αξιοπιστίας και τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας σε ελικόπτερα τύπου Bell OH-58 Kiowa Warrior, βασιζόμενη στη συλλογή και στατιστική επεξεργασία στοιχείων από βλάβες του εν λόγω ελικοπτέρου.

Παράλληλα στοχεύει στη διερεύνηση της ανάπτυξης μικρό ρωγμών που καταγράφονται από επιθεωρήσεις βοηθώντας τους μηχανικούς των υλικών στην καλύτερη πρόβλεψη του χρόνου αστοχίας ενός εξαρτήματος μέσω της καμπύλης αστοχίας αυτών.

1.3 Οριοθέτηση

Στα δύο προγράμματα που έχουν δημιουργηθεί σε περιβάλλον Microsoft Excel και θα αναλύσουμε λεπτομερώς σε επόμενα κεφάλαια, υπάρχουν περιορισμοί.

Στο πρόγραμμα για την διαθεσιμότητα και αξιοπιστία του ελικοπτέρου και συγκεκριμένα στο φύλλο εργασίας «index of components» έχουν καταχωρηθεί περίπου διακόσια εβδομήντα εξαρτήματα του ελικοπτέρου Bell OH-58 Kiowa Warrior και οκτώ εργασίες συντήρησης οι οποίες προκύπτουν από το τεχνικό εγχειρίδιο του κατασκευαστή «BHT-206L4-MM-1». Παρ' όλα αυτά, ο χρήστης μπορεί πολύ εύκολα να συμπληρώσει επιπλέον εξαρτήματα που επιθυμεί να μελετήσει.

Όσον αφορά τον υπολογισμό της συνολικής αξιοπιστίας - διαθεσιμότητας του συστήματος που μελετάμε, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στην παρούσα εργασία δεν εξετάζεται το ποσοστό της κάθε ζώνης συντήρησης ως προς την επίδρασή της στη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος, αλλά γίνεται η υπόθεση ότι κάθε μια από τις δέκα ζώνες συντήρησης συμμετέχει κατά το ίδιο ποσοστό στη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος. Η παραδοχή αυτή είναι αποδεκτή ωστόσο στην πραγματικότητα όχι απολύτως αληθής, διότι μια βλάβη μπορεί να έχει την αιτία της σε συνδυασμό παραγόντων.

Συνεπώς η παραδοχή που κάναμε, στην πράξη σημαίνει, ότι οι δέκα ζώνες συντήρησης συνδέονται σε σειρά για τον υπολογισμό της συνολικής διαθεσιμότητας του συστήματος.

Όσον αφορά το πρόγραμμα υπολογισμού της καμπύλης αστοχίας των διαφόρων αεροπορικών εξαρτημάτων υπάρχουν περιορισμοί ως προς την επιλογή των κραμάτων που εξετάζονται αλλά πολύ περισσότερο ως προς τη γεωμετρία και την περίπτωση ρωγμής. Συγκεκριμένα οι περιπτώσεις που εξετάζουμε είναι: πλάκες με ρωγμή στην άκρη, πλάκες με ρωγμή στη μέση και κυλινδρικά εξαρτήματα με ρωγμή. Ωστόσο υπάρχουν πολλές ακόμα περιπτώσεις γεωμετρίας και ρωγμών που μπορεί να συναντήσουμε.

1.4 Διάρθρωση της Εργασίας

Η δομή της παρούσης διπλωματικής εργασίας διαμορφώνεται με τον τρόπο που παρουσιάζεται παρακάτω, έτσι ώστε να γίνει μία ομαλή εισαγωγή στην θεωρία αξιοπιστίας και στον τρόπο που μπορεί να εφαρμοστεί για ελικόπτερα τύπου Bell OH-58 Kiowa Warrior.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ελικόπτερο για το οποίο έχουμε αναπτύξει τα δύο προγράμματα με τους υπολογισμούς, έτσι ώστε ο αναγνώστης να έχει μια γενική εικόνα του συστήματος που αναλύουμε αλλά και των δυνατοτήτων αυτού. Δίνεται επίσης σκαρίφημα του ελικοπτερού με τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού, προκειμένου ο μελετητής να έχει αίσθηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας της εν λόγω αεροπορικής κατασκευής και παρατίθενται κάποια στοιχεία σχετικά με την συντήρηση του ελικοπτερού.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη θεωρία αξιοπιστίας και παρουσιάζεται η σχετική ορολογία αλλά και χρήσιμοι ορισμοί των δεικτών που θέλουμε να υπολογίσουμε. Επίσης γίνεται αναφορά στις μεθόδους ανάλυσης αξιοπιστίας συστημάτων και αναλύονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια υπενθύμιση των βασικών εννοιών της επιστήμης της στατιστικής και παρουσιάζονται οι πιο γνωστές στατιστικές κατανομές. Επίσης αναλύεται ο τρόπος δημιουργίας ιστογράμματος κατανομής συχνοτήτων και η χρησιμότητά του. Οι παραπάνω έννοιες στατιστικής αποτελούν βασικό υπόβαθρο για το χρήστη του προγράμματος αφού θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την προβλέψει του μοντέλου διαθεσιμότητας του συστήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι ανάλυσης των δεδομένων ζωής για την εύρεση της κατανομής που εκφράζει το σύστημα - ελικόπτερο που παρακολουθούμε.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια πρώτη γνωριμία του αναγνώστη με το πρόγραμμα υπολογισμού της αξιοπιστίας του ελικοπτερού. Παρουσιάζονται αναλυτικά παραδείγματα, τα «Inputs» και «Outputs» του προγράμματος ανά στάδιο μελέτης των δεδομένων. Ακόμη δίνονται αναλυτικές λεπτομέρειες σχετικά με το πώς έχει δημιουργηθεί το πρόγραμμα και τους ακριβείς υπολογισμούς που αυτό εκτελεί.

Στο έβδομο κεφάλαιο περνάμε στη θεωρία της Θραυσεομηχανικής προκειμένου να υποστηρίξουμε με όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο τα επόμενα κεφάλαια που αναφέρονται στην μηχανική αστοχία υλικών και ανάπτυξης ρωγμών.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη θεωρία ανοχής σε βλάβη μέσω της οποίας μπορούμε να υπολογίσουμε την ανάπτυξη ρωγμών και συνεπώς την καμπύλη αστοχίας διάφορων αεροπορικών εξαρτημάτων. Παρουσιάζονται ακόμη διάφορες προσεγγίσεις και εκφράσεις εξισώσεων υπολογισμού της ανάπτυξης ρωγμών για να μπορέσουμε να κάνουμε σύγκριση των μεθόδων και να βγάλουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα. Οι εξισώσεις που παρουσιάζονται προκύπτουν από διάφορες μελέτες και οι κάθε μια έχει τις δικές τις παραδοχές και προσεγγίσεις.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο υπολογιστής ανάπτυξης ρωγμών που εμπεριέχεται στο δεύτερο συνοδευτικό αρχείο «Excel» της εργασίας. Επίσης δίνονται αναλυτικές οδηγίες σχετικά με τον τρόπο χρήσης και τη λειτουργία του προγράμματος μέσα από εικόνες και παραδείγματα.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από όλη την ερευνητική προσπάθεια που έγινε στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας και προτείνονται ιδέες για μελλοντική εξέλιξη των προγραμμάτων που δημιουργήθηκαν.

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

2. Παρουσίαση Ελικοπτέρου Bell OH-58D (Kiowa)



Εικόνα 1: Παρουσίαση Ελικοπτέρου Bell OH-58D Kiowa Warrior. Πηγή [1]

2.1 Γενικές Πληροφορίες

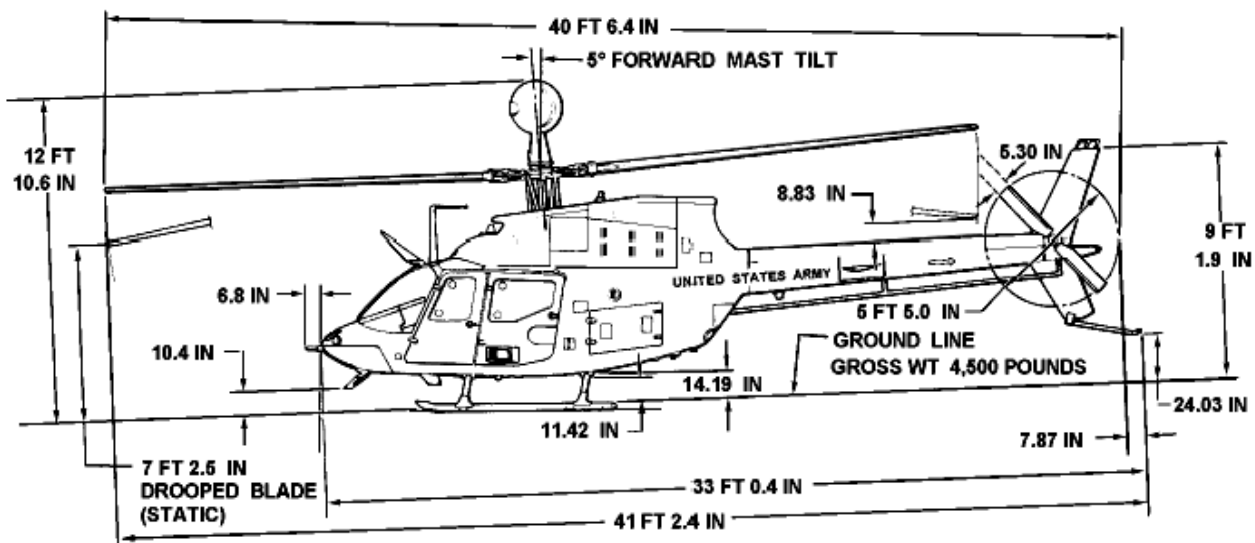
Το Bell OH-58D Kiowa Warrior ήταν το αποτέλεσμα του προγράμματος βελτίωσης του ελικοπτέρου στρατού «ΑΗΡ». Οι αναβαθμίσεις που έγιναν σε κιβώτιο και κινητήρα έδωσαν στο ελικοπτερο τη δύναμη που χρειαζόταν για τα προφίλ πτήσης «NAP-of-the-Earth», και ένας κύριος ρότορας τεσσάρων λεπίδων το έκανε πολύ πιο αθόρυβο από το OH-58C με δύο λεπίδες. Το OH-58D εισήγαγε το διακριτικό οπτικό σύστημα «Mast-Mounted Sight (MMS)» πάνω από το σύστημα του ρότορα, και ένα μικτό γυάλινο πιλοτήριο, με παραδοσιακά όργανα που αναγνωρίζονται ως «standby» για χρήση έκτακτης ανάγκης [2].

2.2 Επιδόσεις [2]

- Μέγιστη ταχύτητα πτήσης : $V_{max} = 240$ km/h
- Μέση ταχύτητα πτήσης : $V_{cruise} = 204$ km/h
- Εμβέλεια : $R = 556$ km
- Αυτονομία : 2 hours
- Ονομαστικό ύψος πτήσης : $H = 4575$ m

2.3 Βασικά Χαρακτηριστικά – Σκαρίφημα [2]

- Πλήρωμα : 2 πιλότοι
- Επιβάτες : 6 άτομα
- Μήκος : 12.85 m
- Ύψος : 3.93 m
- Καθαρό Βάρος (προσγείωσης) : $W_L = 1737$ kg
- Μεικτό βάρος (απογείωσης): $W_g = 2495$ kg
- Κινητήρας : 1 × Rolls-Royce T703-AD-700A turboshaft 650 hp (485 kW)
- Διάμετρος κύριου στροφείου : $D = 10.67$ m
- Επιφάνεια κύριου στροφείου: $S = 89.42$ m²











Σχήμα 1: Σκαρίφημα Ελικοπτέρου Bell OH 58D [1]

2.4 Πρόγραμμα Συντήρησης





















Το πρόγραμμα συντήρησης του ελικοπτέρου σύμφωνα με τον κατασκευαστή, περιλαμβάνει επιθεωρήσεις και γενικές επισκευές όπως κάθε άλλο ελικόπτερο. Ο κατασκευαστής του ελικοπτέρου προτείνει την αντικατάσταση διαφόρων εξαρτημάτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα για την ασφάλεια και καλύτερη λειτουργία του ελικοπτέρου. Ενδεικτικά παρατίθενται πίνακες με τους βασικούς περιορισμούς για τα πιο σημαντικά εξαρτήματα του ελικοπτέρου:

Πίνακας 1: Πρόγραμμα αντικατάστασης εξαρτημάτων από τον κατασκευαστή λόγω περιορισμών

Table 4-1. Airworthiness Limitations Schedule

| COMPONENT | PART NUMBER  | AIRWORTHINESS LIFE |
|----------------------------------|---|--|
| MAIN ROTOR HUB AND BLADES | | |
| Main Rotor Trunnion | 206-011-120-103/-105 |   24,000 RIN |
| Strap Retention Pin | 206-011-125-001 | 1200 hours |
| Main Rotor Grip | 206-011-132-113 | 4800 hours |
| Tension Torsion Strap | 206-011-147-007 |  1200 hours/24 months |
| Strap Retention Fitting | 206-011-150-105 | 2400 hours |
| Tension Torsion Strap | 206-011-154-103/-107 |  1200 hours/24 months |
| Latch Bolt | 206-011-260-101 |  1200 hours |
| Main Rotor Blade | 206-015-001-001/-103/-105/ -107/-109/-111/-113/115/-117/ -119/-121 |   4000 hours |

Πίνακας 2: Συνέχεια προγράμματος αντικατάστασης εξαρτημάτων από τον κατασκευαστή λόγω περιορισμών

| TC APPROVED |  | BHT-206L4-MM-1 |
|---|---|---|
| Table 4-1. Airworthiness Limitations Schedule (Cont) | | |
| COMPONENT | PART NUMBER  | AIRWORTHINESS LIFE |
| MAIN ROTOR HUB AND BLADES (CONT) | | |
| Main Rotor Blade | 206-015-001-125/-127/-129/-131 |  2300 hours |
| Tension Torsion Strap | 206-310-004-103 |  1200 hours/48 months |
| SWASHPLATE AND SUPPORT | | |
| Lower Cyclic Tube | 206-001-193-001 | 4800 hours |
| Swashplate Support Assembly | 206-010-445-113 | 14,400 hours |
| Collective Idler Link | 206-010-446-105 |  1200 hours |
| Collective Idler Link | 206-010-446-107 | 14,400 hours |
| Collective Lever | 206-010-447-105 |  1200 hours |
| Collective Lever | 206-010-447-109 | 14,400 hours |
| Collective Sleeve Assembly | 206-010-454-107/-109/-113 | 14,400 hours |
| POWER TRAIN | | |
| Tail Rotor Gearbox Duplex Bearing | 206-040-410-003/-005/-101 | 3000 hours |
| Main Rotor Mast | 206-040-535-105/-109 |    5000 hours/44,000 RIN |
| TAIL ROTOR HUB AND BLADES | | |
| Tail Rotor Yoke | 206-011-819-105/-109 | 5000 hours |
| Tail Rotor Blade | 206-016-201-001/-107/-113 |   2400 hours |
| Tail Rotor Blade | 206-016-201-127/-131/-135 |     2500 hours |
| Tail Rotor Yoke | 406-012-102-107/-113 | 5000 hours |
| AIRFRAME | | |
| Horizontal Stabilizer | 206-023-119-167 |  |
| MISCELLANEOUS KITS | | |
| High Landing Gear Crosstube | 206-053-109-ALL |  |
| Standard Landing Gear Crosstube | 206-053-119-ALL |  |
| Fixed Floats Landing Gear Aft Crosstube | 206-053-211-103 |  |
| Emergency Floats Reservoir | 1271226 |  15 years |
| Export Classification C, ECCN EAR99 | 25 JUN 2019 Rev. 23 | 4-00-00 Page 7 |

Πηγή: [1]

Λόγω των παραπάνω περιορισμών ο κατασκευαστής προτείνει τακτικές επιθεωρήσεις του συστήματος αλλά και γενικές ανακατασκευές. Η κατηγορίες επιθεωρήσεων και ανακατασκευών παρουσιάζονται παρακάτω [1]:

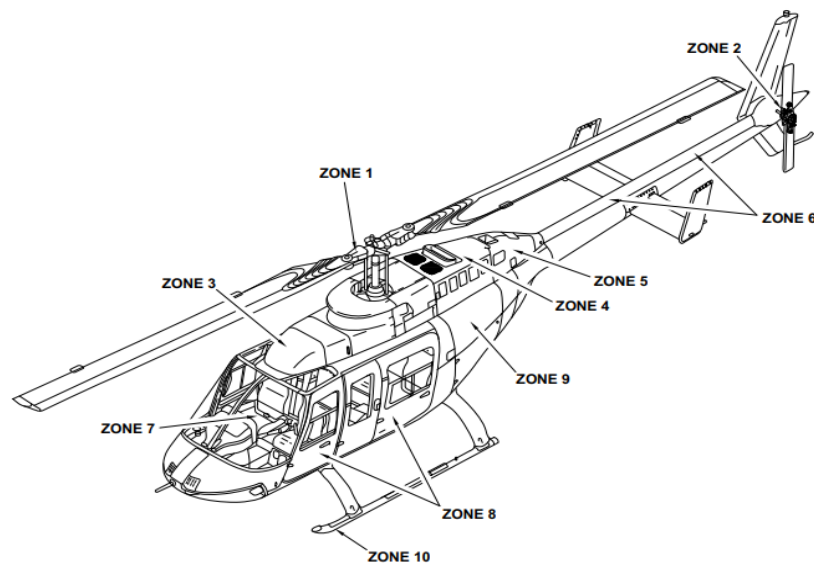
- Εβδομαδιαία επιθεώρηση
- Επιθεώρηση 100 ωρών
- Επιθεώρηση 1200 ωρών
- 12μηνιαία επιθεώρηση
- 12 μήνες λειτουργίας εξαρτημάτων
- 24μηνιαία επιθεώρηση
- Επιθεώρηση 60 μηνών
- Επιθεώρηση 600 ωρών ή 12 μηνών
- 1200 ώρες λειτουργίας εξαρτημάτων
- 1500 ώρες λειτουργίας εξαρτημάτων
- 2250 ώρες ή 60 μήνες συστατικού Λειτουργία
- 3000 ώρες λειτουργίας εξαρτημάτων

Επίσης για τη διευκόλυνση της παροχής τεχνικής υποστήριξης του ελικοπτερου, όλες οι εργασίες που αφορούν το ελικόπτερο είναι ταξινομημένες στις παρακάτω ζώνες συντήρησης [1] :

- Ζώνη 1^η - Κύριος κόμβος στροφένων και συνέλευση λεπίδων
- Ζώνη 2^η - Πλήρως ουρών στροφένων και συνέλευση λεπίδων
- Ζώνη 3^η - Εμπρόσθιο επάνω κατάστρωμα
- Ζώνη 4^η - Σταθμός παραγωγής ενέργειας
- Ζώνη 5^η - Πρύμνη επάνω κατάστρωμα

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

- Ζώνη 6^η - Το πίσω μέρος
- Ζώνη 7^η - Εσωτερικό καμπίνας
- Ζώνη 8^η – Εμπρόσθιο τμήμα ατράκτου
- Ζώνη 9^η - Πρυμναία άτρακτος
- Ζώνη 10^η - Σύστημα προσγείωσης



Zone 1 - Main rotor hub and blade assembly
Zone 2 - Tail rotor hub and blade assembly
Zone 3 - Forward top deck
Zone 4 - Power plant
Zone 5 - Aft top deck
Zone 6 - Tailboom
Zone 7 - Cabin interior
Zone 8 - Forward fuselage
Zone 9 - Aft fuselage
Zone 10 - Landing gear

Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση των ζωνών συντήρησης του ελικοπτήρου [1]

Τέλος ο κατασκευαστής καθορίζει ποιες ζώνες συντήρησης θα ελεγχθούν ανάλογα με την επιθεώρηση – συντήρηση που πραγματοποιείται κάθε φορά αλλά και τις ώρες πτήσης όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 3: Ζώνες συντήρησης ανάλογα με τις ώρες πτήσεις κατά την επιθεώρηση 100 ωρών

Table 5-1. 100-Hour Airframe Progressive Inspection Events

| AIRFRAME HOURS | EVENT NUMBER | MAINTENANCE ZONES |
|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| 25 | 1 | 1, 2, and 3 |
| 50 | 2 | 4 and 5 |
| 75 | 3 | 6 |
| 100 | 4 | 7, 8, 9, and 10 |

Πηγή: [1]

Πίνακας 4: Ζώνες συντήρησης ανάλογα με τις ώρες πτήσεις κατά την επιθεώρηση 300 ωρών

Table 5-2. 300-Hour Airframe Progressive Inspection Events

| AIRFRAME HOURS | EVENT NUMBER | MAINTENANCE ZONES |
|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| 50 | 1 | 1 and 2 |
| 100 | 2 | 3 |
| 150 | 3 | 4 |
| 200 | 4 | 5 and 6 |
| 250 | 5 | 7 and 8 |
| 300 | 6 | 9 and 10 |

Πηγή: [1]

3. Θεωρία αξιοπιστίας (Reliability Theory)

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται γενικές πληροφορίες και ορισμοί ώστε ο αναγνώστης να κατανοήσει τη θεωρία της αξιοπιστίας. Αναλύεται η χρησιμότητα της θεωρίας αξιοπιστίας και δίνεται τυπολόγιο υπολογισμού των βασικών μεγεθών αυτής. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή του αναγνώστη στο όρο της συντηρησιμότητας, τις γενικότερες κατηγορίες συντήρησης και εν τέλει, παρουσιάζονται οι κύριες μέθοδοι ανάλυσης αξιοπιστίας.

3.1 Χρησιμότητα Αξιοπιστίας

Οι απαιτήσεις της σύγχρονης τεχνολογίας και ιδιαίτερα των πολύπλοκων συστημάτων όπως τα διαστημικά, πυραυλικά και στρατιωτικά συστήματα, οδήγησε στην εξέλιξη της θεωρίας αξιοπιστίας η οποία πλέον είναι απαραίτητη και προσδίδει κύρος σε επιχειρήσεις, βιομηχανίες και οργανισμούς οι οποίοι την έχουν υιοθετήσει.

Η αξιοπιστία (Reliability) στο τομέα του «Reliability Engineering» μας βοηθά να μετρήσουμε το κατά πόσο ποιοτικό και αξιόπιστο είναι ένα προϊόν ή σύστημα, προσθέτοντας τη διάσταση του χρόνου στην εξίσωση ποιότητας.

Η θεωρία αξιοπιστίας δεν βοηθά μόνο τις βιομηχανίες να παράγουν πιο αξιόπιστα προϊόντα, αλλά ενημερώνει επίσης τις ομάδες συντήρησης για το πώς να τα συντηρήσουν με απώτερο στόχο την αύξηση του δείκτη «MTBF» (μέσος χρόνος μεταξύ αποτυχιών) και τη διάρκεια ζωής των συστημάτων. Με άλλα λόγια, δεν θέλουμε πλέον να γνωρίζουμε μόνο εάν το προϊόν μπορεί να εκτελέσει την προβλεπόμενη λειτουργία κατά τη στιγμή της αγοράς, αλλά να διασφαλίσουμε ότι το προϊόν λειτουργεί χωρίς σημαντικές δυσλειτουργίες υπό κανονικές συνθήκες και για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο.

Η αναγκαιότητα ανάπτυξης μοντέλων υπολογισμού της αξιοπιστίας ενός συστήματος αυξάνεται όταν πρόκειται για θέματα ασφάλειας της ανθρώπινης ζωής αλλά και υπέρογκα κόστη. Επίσης όταν πρόκειται για την ορθή διαχείριση και λήψη αποφάσεων πάνω σε πολύπλοκα συστήματα, καταλαβαίνουμε ότι η μέτρηση της αξιοπιστίας είναι βαρύνουσας σημασίας.

Εύλογα λοιπόν συμπεραίνουμε ότι η ανάπτυξη ενός μοντέλου υπολογισμού της αξιοπιστίας για ένα πολύπλοκο και κοστοβόρο σύστημα όπως το ελικόπτερο τύπου Bell OH-58 Kiowa Warrior συντελεί στην βελτίωση της ασφάλειας των χειριστών, στην καλύτερη διαχείριση των δαπανών, την πρόβλεψη και έγκαιρη παραλαβή ανταλλακτικών, αλλά και στην μεθοδευμένη παρακολούθηση του συστήματος.

3.2 Θεωρητικό πλαίσιο

Η θεωρία αξιοπιστίας «Reliability Theory» ασχολείται με τη διεπιστημονική χρήση πιθανοτήτων, στατιστικών στοιχείων και στοχαστικών μοντέλων, σε συνδυασμό με τεχνικές γνώσεις για το σχεδιασμό και την επιστημονική κατανόηση των μηχανικών αστοχιών και επιτρέπει τη μελέτη των διαφόρων πτυχών της αξιοπιστίας [3].

Από ποιοτική άποψη, η αξιοπιστία μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα του αντικειμένου - συστήματος να παραμείνει λειτουργικό. Ποσοτικά, η αξιοπιστία καθορίζει την πιθανότητα να μην συμβεί διακοπή λειτουργίας στο σύστημα κατά τη διάρκεια ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος [3].

3.2.1 Μέτρηση αξιοπιστίας

Η αξιοπιστία μπορεί να μετρηθεί με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το ποια είναι τα δεδομένα μέτρησης που έχει επιλέξει ο μελετητής και αποτελούν τα κύρια χαρακτηριστικά της σύμφωνα με τον ορισμό της αξιοπιστίας [4].

Συγκεκριμένα μπορεί να μετρηθεί ως:

- Ο Μέσος χρόνος έως την αποτυχία (MTTF).
- Ο Αριθμός βλαβών ανά μονάδα χρόνου (ποσοστό αποτυχίας λ).
- Η πιθανότητα το στοιχείο να μην αποτύχει σε χρονικό διάστημα $(0, t]$ (πιθανότητα επιβίωσης).
- Η πιθανότητα ότι το στοιχείο είναι σε θέση να λειτουργήσει τη στιγμή t (διαθεσιμότητα τη στιγμή t).

3.2.2 Δείκτες μέτρησης αξιοπιστίας

Οι βασικότεροι δείκτες με τους οποίους ο μελετητής μπορεί να ποσοτικοποιήσει την αξιοπιστία ενός συστήματος παρουσιάζονται παρακάτω [4]:

- **MTTR (Mean Time To Repair):** Ορίζεται ως ο μέσος χρόνος αποκατάστασης των βλαβών του συστήματος. Υπολογίζεται ως το πηλίκο του συνολικού «Down Time» του συστήματος προς τον αριθμό των βλαβών N_f . Πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος και υποδηλώνει αποτελεσματικό και άμεσο σύστημα συντήρησης [5].

- **MTBF (Mean Time Between Failure):** Ορίζεται ως ο μέσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών αστοχιών και αποτελεί σημαντικό δείκτη προβλεπτικότητας στη συντήρηση, καθώς η αύξηση του MTBF αποδεικνύει την βελτίωση της ποιότητας των ενεργειών αποκατάστασης των εξαρτημάτων ενός συστήματος. Υπολογίζεται ως το πηλίκο [5]:

$$\frac{PT - DT}{N_f}$$

- **MTTF (Mean Time To Failure):** Βασική παράμετρος αξιοπιστίας για μη επισκευάσιμα συστήματα. Είναι ο μέσος εκτιμώμενος χρόνος μέχρι την πρώτη αστοχία ενός συστήματος. Πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος.

Η διαφορά του MTBF από το MTTF είναι ότι ο πρώτος δείκτης χρησιμοποιείται για επισκευάσιμα εξαρτήματα ενώ ο δεύτερος για μη – επισκευάσιμα [6].

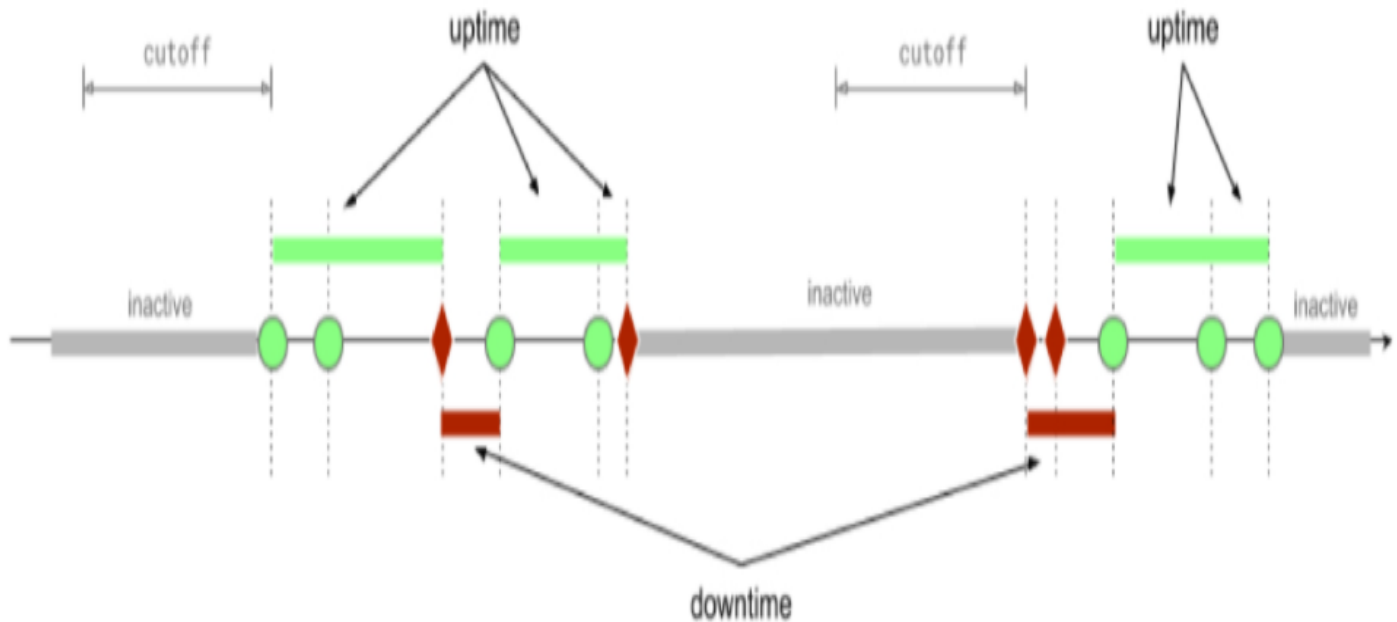
3.2.3 Ορολογία

Η βασικότερη ορολογία που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της αξιοπιστίας παρουσιάζεται παρακάτω [7]:

- **Up Time (UT):** Είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σύστημα είναι διαθέσιμο «Run as New» [5]. Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται σε [h : min]
- **Down Time (DT):** Είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο συμβαίνει μια βλάβη στο σύστημα και διαρκεί μέχρι την αποκατάσταση της βλάβης συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου των Logistics [5]. Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται σε [h : min]
- **Ο αριθμός των αστοχιών N_f (Number of Failures):** Είναι το πλήθος των βλαβών που παρατηρούνται σε ένα σύστημα συνολικά μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα «Planned Time» [5].
- **Planned Time (PT):** Καθορισμένος χρόνος παρακολούθησης του συστήματος. Είναι με άλλα λόγια το χρονικό διάστημα που σκοπεύουμε να παρατηρήσουμε το σύστημα. Στην παρούσα εργασία υπολογίζεται σε [h : min]. Ο σχεδιαζόμενος χρόνος παρατήρησης (Planned Time) υπολογίζεται από τη διαφορά:
[Χρόνος Λήξη παρακολούθησης συστήματος – Χρόνος έναρξη παρακολούθησης συστήματος] [5]

- Η έναρξη παρακολούθησης συστήματος: Ορίζεται από τον μελετητή και είναι η αρχική χρονική στιγμή ($t=0$) κατά την οποία ξεκινά να παρατηρεί και να καταγράφει δεδομένα και αστοχίες για το εξεταζόμενο σύστημα.
- Η λήξη παρακολούθησης συστήματος: Ορίζεται επίσης από τον μελετητή και είναι η χρονική στιγμή που ολοκληρώνεται η καταγραφή των παρατηρήσεων.

Στο σημείο αυτό, σκόπιμο είναι να παρουσιαστούν οι παραπάνω ορισμοί σε σχηματική μορφή για την καλύτερη εμπέδωσή τους.



Εικόνα 2: Εικονική επεξήγηση των χρονικών διαστημάτων «Uptime» και «Downtime» [8]

Επίσης παραθέτουμε ένα συγκεντρωτικό τυπολόγιο των βασικών μεγεθών - δεικτών που καλούμαστε να υπολογίσουμε κατά την ανάλυση αξιοπιστίας ενός συστήματος:

Maintenance metric cheat sheet

Asset performance maintenance metrics

Mean time to repair

$$\text{MTTR} = \text{Maintenance time} \div \text{Cases of maintenance}$$

Mean time between failures

$$\text{MTBF} = \frac{\# \text{ of operational hours}}{\# \text{ of failures}}$$

Availability

$$\text{Availability} = \frac{\text{Total run time}}{\text{Production time of asset}}$$

Production quality

$$\text{Quality} = \frac{\# \text{ of useable units}}{\text{Total units started}}$$

Asset performance

$$\text{Performance} = \frac{\text{System throughput}}{\text{Maximum possible throughput}}$$

Overall equipment effectiveness

$$\text{OEE} = \text{Availability} \times \text{Performance} \times \text{Quality}$$

Maintenance percentage of replacement asset value

$$\text{MPRAV} = \frac{\text{Maintenance costs}}{\text{Replacement asset value}} \times 100$$

Εικόνα 3: Τυπολόγιο υπολογισμών βασικών μεγεθών-δεικτών της θεωρίας αξιοπιστίας [5]

3.2.4 Διαθεσιμότητα - Συντηρησιμότητα

Η συνάρτηση αξιοπιστίας, γνωστή και ως συνάρτηση επιβίωσης, καθορίζεται από την πιθανότητα ότι ένα σύστημα (ή προϊόν) θα είναι λειτουργικό για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t . Η συνάρτηση αξιοπιστίας $R(t)$, ορίζεται ως [4]:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

όπου $F(t)$ είναι η πιθανότητα να αποτύχει το σύστημα τη χρονική στιγμή t .

Το $F(t)$ είναι η συνάρτηση κατανομής αστοχίας ή συνάρτηση αναξιοπιστίας.

Εάν η τυχαία μεταβλητή t έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) $f(t)$, η έκφραση αξιοπιστίας είναι

[4]:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

Η διαθεσιμότητα (Availability) ενός συστήματος είναι ένας ευρύτερος όρος, που εκφράζει την αναλογία της παρεχόμενης υπηρεσίας προς την αναμενόμενη υπηρεσία.

Η διαθεσιμότητα ενός σημείου A συμβολίζεται με $P_A(t)$ και είναι ένα χαρακτηριστικό ενός αντικειμένου που εκφράζεται από την πιθανότητα ότι το αντικείμενο θα εκτελέσει την απαιτούμενη λειτουργία του υπό δεδομένες συνθήκες στο A.

Για ένα δεδομένο στοιχείο, η διαθεσιμότητα σημείου $P_A(t)$ μπορεί να οριστεί ως [9]:

$$P_A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Ο ρυθμός κινδύνου ή ποσοστό βλάβης $\lambda(t)$ περιγράφεται μαθηματικά από:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Συντηρησιμότητα (Maintainability) είναι η ικανότητα ενός αντικειμένου, υπό καθορισμένες συνθήκες χρήσης, να διατηρείται ή να αποκαθίσταται σε μια κατάσταση στην οποία μπορεί να εκτελέσει τις απαιτούμενες λειτουργίες του, όταν πραγματοποιείται συντήρηση υπό καθορισμένους όρους και χρησιμοποιώντας καθορισμένες διαδικασίες και πόρους (BS4778). Ο όρος «Συντηρησιμότητα» είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη διαθεσιμότητα του αντικειμένου [3].

3.2.5 Κατηγορίες Συντήρησης

Τα εξαρτήματα που αποτυγχάνουν σε ένα σύστημα και αντικαθίστανται κατηγοριοποιούνται στη διορθωτική συντήρηση. «Η διορθωτική συντήρηση περιλαμβάνει τον αρχικό εντοπισμό και απομόνωση των βλαβών (διάγνωση), την πρόσβαση αποσυναρμολόγησης, την αφαίρεση και αντικατάσταση (ή επισκευή) ελαττωματικού εξαρτήματος και την επανασυναρμολόγηση, ρύθμιση και/ή ευθυγράμμιση (όπως απαιτείται) και τελικό έλεγχο και επαλήθευση της σωστής απόδοσης του συστήματος». [10]

Άλλος τύπος συντήρησης είναι η προγραμματισμένη συντήρηση, η οποία μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στην προληπτική συντήρηση. Αυτός ο τύπος συντήρησης περιλαμβάνει, «την παροχή

συστηματικής επιθεώρησης, ανίχνευσης, συντήρησης ή πρόληψης επικείμενων βλαβών μέσω περιοδικών αντικαταστάσεων» [10]

Στο πλαίσιο της ανάλυσης της συντηρησιμότητας ενός συστήματος υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την ακριβή πρόβλεψη προτύπων συντηρησιμότητας. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν:

- **Συντήρηση με επίκεντρο την αξιοπιστία (RCM)** [3]: Σύμφωνα με τους Blanchard και Fabrycky, "η συντήρηση με επίκεντρο την αξιοπιστία είναι μια συστηματική προσέγγιση για την ανάπτυξη ενός εστιασμένου, αποτελεσματικού και οικονομικά αποδοτικού προγράμματος προληπτικής συντήρησης και σχεδίου ελέγχου για ένα σύστημα ή προϊόν". Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως για διαδικασίες συνεχούς βελτίωσης σε προγράμματα προληπτικής συντήρησης. Στη δεκαετία του 1960, η αεροπορική βιομηχανία ανέπτυξε τη μέθοδο συντήρησης με επίκεντρο την αξιοπιστία. Σύμφωνα με τους Blanchard και Fabrycky, «Μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα δομημένο δέντρο αποφάσεων που οδηγεί τον αναλυτή σε προσαρμοσμένη λογική προσέγγιση για να οριοθετήσει το πιο εφαρμόσιμο έργο προληπτικής συντήρησης».
- **Ανάλυση επιπέδου επισκευής (LORA)** [3]: Όταν εξετάζουμε το σχεδιασμό του συστήματος, είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε εάν αξίζει να επισκευάσουμε ορισμένα μέρη ή να τα απορρίψουμε όταν αποτύχουν. Όταν λαμβάνεται απόφαση για επισκευή, θα πρέπει να καθοριστεί το επίπεδο συντήρησης (ενδιάμεση ή συντήρηση προμηθευτή/αποθήκη).
- **Ανάλυση εργασιών συντήρησης (MTA)** [3]: Το MTA χωρίζεται έχοντας κατά νου τους ακόλουθους στόχους: Πρώτον, η ανάγκη είναι να προσδιοριστούν οι πόροι που είναι απαραίτητοι για την υποστήριξη του συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει επίπεδο δεξιοτήτων τεχνικών, εξαρτήματα που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της επισκευής, εργαλεία, τυχόν απαιτήσεις χειρισμού και εγκατάστασης, καθώς και τυχόν πόρους υπολογιστών. Το επόμενο βήμα είναι η αξιολόγηση της συντηρησιμότητας του σχεδίου. Το MTA είναι ένα μεγάλο εργαλείο αξιολόγησης για τη μέτρηση της υποδομής υποστήριξης. Επιτρέπει την ανατροφοδότηση η οποία με τη σειρά της μπορεί να παρέχει συνεχείς αλλαγές σχεδιασμού που επιτρέπουν τη συνεχή βελτίωση των διαδικασιών και των προϊόντων.
- **Συνολική παραγωγική συντήρηση (TPM)** [3]: Η συνολική παραγωγική συντήρηση εισήχθη από τους Ιάπωνες για να αντιπροσωπεύει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του κύκλου ζωής που καθιστά τη συντήρηση πιο οικονομική. Αυτή η ιδέα επικεντρώνεται στην ιδέα ότι πολλά εργοστάσια λειτουργούν καλά κάτω από τις δυνατότητές τους, κυρίως λόγω των απωλειών παραγωγής που σχετίζονται με τον χρόνο διακοπής και συντήρησης των εργοστασίων. Αυτό σημαίνει ότι το κόστος των προϊόντων αυξάνεται και έχει αρνητικό αντίκτυπο στους καταναλωτές και την αγορά. Αυτό οδήγησε τους Ιάπωνες να προσπαθήσουν να μειώσουν το κόστος και η συντήρηση ήταν ο κύριος στόχος της ευκαιρίας.

3.3 Μέθοδοι Ανάλυσης Αξιοπιστίας

3.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι

Στις μεθόδους αυτές για την πρόβλεψη της αξιοπιστίας, χρησιμοποιείτε μια προσέγγιση με φιλοσοφία «bottom-up» δηλαδή κάθε εξάρτημα αντιμετωπίζεται ξεχωριστά στην προσπάθεια να υπολογιστεί το ποσοστό αστοχίας λ για κάθε ένα από αυτά. Αφού υπολογιστούν οι πιθανότητες αστοχίες για τα επιμέρους εξαρτήματα, συνθέτουμε τη συνολική πιθανότητα που εκφράζει ολόκληρο το σύστημα. Η προσέγγιση αυτή έχει καλύτερα αποτελέσματα κυρίως σε ηλεκτρολογικά εξαρτήματα [9].

Τα μειονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι:

- Απαιτείται πλούσια πηγή πληροφοριών αλλά και συνεχής ανανέωσή της.
- Είναι συντηρητική μέθοδος που περιορίζει τις δυνατότητες του συστήματος στην πράξη αφού η προβλέψεις που μας δίνει είναι αρκετά απαισιόδοξες.
- Ο αυξανόμενος αριθμός εξαρτημάτων σε ένα σύστημα δημιουργεί μεγάλη πολυπλοκότητα.

Το πιο συνηθισμένο εργαλείο που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των αναλυτικών μεθόδων πρόβλεψης αξιοπιστίας ενός περίπλοκου μηχανικού συστήματος είναι το NPRD 2011 (το οποίο αντικαθιστά το NPRD-95) που αναπτύχθηκε από το κέντρο ανάλυσης πληροφοριών αξιοπιστίας (RIAC) [11].

Το NPRD-2011 περιέχει βάση δεδομένων με τις τιμές λ (Failure Rate) για μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτρικών, ηλεκτρομηχανολογικών και μηχανικά εξαρτήματα. Η βάση δεδομένων περιέχει δεδομένα που λαμβάνονται από τη μακροχρόνια παρακολούθηση από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 [11].

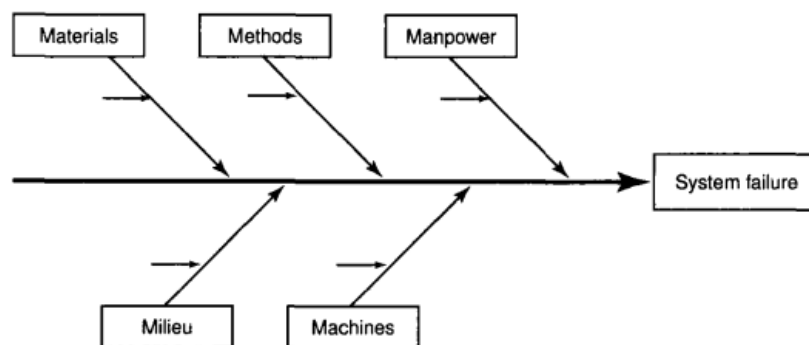
3.3.2 Ανάλυση με δέντρα βλαβών (Fault Tree Analysis)

Η ανάλυση δέντρου βλαβών (Fault Tree Analysis) αποτελεί μια κύρια αναλυτική μέθοδο με φιλοσοφία bottom up η οποία απαιτεί το διαχωρισμό του συστήματος σε επιμέρους υποσυστήματα και του κάθε υποσυστήματος σε επιμέρους εξαρτήματα [4]. Στη συνέχεια τα επιμερούς αυτά μικρότερα τμήματα πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα με λογικές πύλες (άλγεβρα Boolean) ανάλογα με το ποια είναι η αλληλεξάρτησή τους. Όπως καταλαβαίνουμε η υλοποίηση της μεθόδου αυτής είναι αρκετά δύσκολη ιδιαίτερα για περίπλοκα συστήματα γι αυτό και απαιτεί ειδικά λογισμικά όπως το Reliasoft.

Ένα διάγραμμα αιτίας και αποτελέσματος έχει κάποιες ομοιότητες με ένα δέντρο σφάλματος, αλλά είναι λιγότερο δομημένο και δεν έχει τους ίδιους δυαδικούς περιορισμούς με ένα δέντρο σφάλματος.

Για την κατασκευή ενός διαγράμματος αιτίας και αποτελέσματος, ξεκινάμε με μια βλάβη του συστήματος ή ένα ατύχημα που μπορεί να ταυτίζεται με το ΚΟΡΥΦΑΙΟ συμβάν σε ένα δέντρο σφάλματος. Εν συντομία, η βλάβη του συστήματος (αστοχία) περιγράφεται από ένα κουτί που τοποθετείται στο δεξί άκρο του διαγράμματος, ως «κεφαλή του ψαριού». Στη συνέχεια σχεδιάζουμε την κεντρική σπονδυλική στήλη ως παχιά γραμμή που δείχνει προς το κουτί (κεφάλι) από αριστερά. Οι κύριες κατηγορίες πιθανών αιτιών καλούνται στη συνέχεια ως κόκαλα η σπονδυλική στήλη. Κατά την ανάλυση τεχνικών συστημάτων, είναι οι ακόλουθες πέντε κατηγορίες (5M) [4]:

- Εργατικό δυναμικό
- Μέθοδοι
- Υλικά
- Μηχανήματα
- Περιβάλλον



Εικόνα 5: Γενική μορφή διαγράμματος αιτίας- αποτελέσματος [4]

Το διάγραμμα αιτίας και αποτελέσματος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποσοτικές αναλύσεις, αλλά γενικά θεωρείται ότι αποτελεί εξαιρετικό βοήθημα για την επίλυση προβλημάτων και την απεικόνιση του δυναμικού αιτίες βλάβης του συστήματος ή ατυχήματος.

3.3.4 In-service data

Η χρήση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο κατά τη λειτουργία και συντήρηση του συστήματος είναι ο καλύτερος τρόπος αξιολόγησης των μηχανικών εξαρτημάτων για την πρόβλεψη των ποσοστών αστοχίας λ . Κατά τη συλλογή δεδομένων αστοχίας θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα εξαρτήματα υπόκεινται σε παρόμοιο φορτίο και περιβαλλοντικές συνθήκες [4].

Ο ρόλος του μηχανικού αξιοπιστίας είναι να διασφαλίζει ότι τα καταχωρημένα δεδομένα που έχουμε συλλέξει έχουν ληφθεί σε σταθερές συνθήκες λειτουργία του συστήματος. Οποιοδήποτε σημαντική διαφοροποίηση στη χρήση εξαρτημάτων μπορεί να ακυρώσει τη σύγκριση. Ωστόσο, όταν η μέθοδος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους, είναι ιδανική.

Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η δημιουργία δεδομένων αξιοπιστίας εξαρτημάτων κατά τη λειτουργία είναι μια μακρά και δύσκολη διαδικασία [4].

3.3.5 Προσέγγιση Markov

Αυτή η προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα που περιγράφονται από μια κατανομή με σταθερό ρυθμό αστοχίας λ , όπως η εκθετική κατανομή και λαμβάνει υπόψη την παρούσα κατάσταση του συστήματος. Για να εφαρμοστεί η προσέγγιση Markov πρέπει οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος να είναι σταθερές καθ' όλο το διάστημα παρακολούθησης του [4].

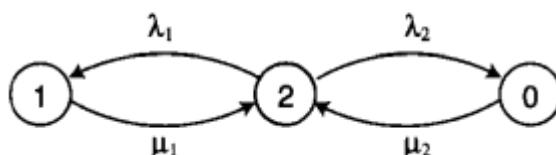
Σε μια προσέγγιση Markov, δίνονται δύο καταστάσεις ενός συστήματος:

- λειτουργικό σύστημα
- σύστημα σε αποτυχία.

Για κάθε κατάσταση, δίνονται τα λεγόμενα ποσοστά μετάβασης κατάστασης:

- λ = ποσοστό αστοχίας
- μ = ποσοστό επισκευής.

Τα παραπάνω ποσοστά ονομάζονται μετάβαση κατάστασης αφού αντιπροσωπεύουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα κατά τη διέλευση από τη μία κατάσταση στην άλλη [9].



Σχήμα 3: Διάγραμμα μετάβασης κατάστασης Markov μιας δομής σειράς δύο εξαρτημάτων όπου η αποτυχία του ενός στοιχείο αποτρέπει την αποτυχία του άλλου εξαρτήματος [4].

Υποθέτοντας ένα σταθερό ποσοστό βλάβης (MTTF) και επισκευής (MTTR), που καθορίζουν μια εκθετική κατανομή και μετά την εκτέλεση μερικών υπολογισμών που βρίσκονται στο [4], ολοκληρώνεται ότι η διαθεσιμότητα του συστήματος:

$$R(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} * e^{-(\lambda + \mu)t}$$

Έτσι λαμβάνουμε μια συνάρτηση αξιοπιστίας χρησιμοποιώντας τη διαδικασία Markov, υποθέτοντας σταθερά ποσοστά κίνδυνου.

4. Πιθανότητες και Στατιστικές Αναλύσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε βασικές πιθανολογικές και στατιστικές κατανομές. Ορίζονται και αναλύονται οι έννοιες της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDF), της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF), της συνάρτησης κινδύνου (Hazard function) και της μέσης αναμενόμενης τιμής για κάθε μια από τις πιο γνωστές κατανομές. Ακόμη αναπτύσσουμε την έννοια του ιστογράμματος κατανομής συχνοτήτων. Όλες οι παραπάνω έννοιες είναι πολύ σημαντικές για την διαδικασία αναγνώρισης μια άγνωστης κατανομής «Fitting Distribution» που θα ασχοληθούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

4.1 Μαθηματικοί ορισμοί

4.1.1 Μεταβλητές και βασικά μεγέθη στατιστικής

Μεταβλητή είναι κάθε μέγεθος το οποίο υποβάλλεται σε μεταβολή. Εάν η μεταβολή είναι τυχαία, δηλαδή το πιθανοσύνολο από το οποίο προέρχεται το δείγμα των τιμών υφίσταται μόνο τυχαίες μεταβολές, τότε η μεταβλητή ονομάζεται στατιστική ή στοχαστική. Κατά τη στατιστική ανάλυση ενός τεχνολογικού πειράματος, δηλαδή κατά τη στοχαστική διαδικασία η οποία γίνεται προκειμένου να αντληθούν συμπεράσματα για το πιθανοσύνολο από το δείγμα, υπεισέρχονται μεταβλητές, συστηματικές και τυχαίες [12].

Ανεξάρτητες μεταβλητές είναι οι μεταβλητές τις οποίες ο ερευνητής μπορεί, από φυσικής πλευράς, να μεταβάλλει κατά τη βούλησή του σε ένα πείραμα. Παράδειγμα ανεξάρτητης μεταβλητής είναι η μέτρηση του ιξώδους ενός ρευστού σε σωλήνα υπό διαφορετικές θερμοκρασίες [12].

Εξαρτημένη μεταβλητή είναι κάθε μεταβλητή που μεταβάλλεται, όπως υπαγορεύεται από το φυσικό φαινόμενο, εξαιτίας της μεταβολής κάποιας ανεξάρτητης μεταβλητής [12].

Τα ασυνεχή μεγέθη ή ασυνεχής στοχαστικές μεταβλητές είναι οι μεταβλητές στις οποίες η φύση του μεγέθους επιτρέπει στη μεταβλητή να λαμβάνει μόνο διακεκριμένες τιμές [12] π.χ το πλήθος των προσγειώσεων αεροπλάνων σε μία ώρα σε ένα αεροδρόμιο: 0, 1, 2, 3, 5, ...12

Αντίθετα συνεχής μεγέθη ή συνεχής στοχαστικές μεταβλητές είναι τα μεγέθη στα οποία η φύση του μεγέθους επιτρέπει στη μεταβλητή να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή, μέσα στο πεδίο ορισμού της [12] π.χ. η θερμοκρασία σε ένα δωμάτιο: 10 - 35 °C

Δείγμα πληθυσμού είναι ένα περιορισμένο πλήθος από τον πληθυσμό το οποίο υφίσταται πράγματι επεξεργασία (μέτρηση). Το μέγεθος του πλήθους αυτού (καθαρός αριθμός) ονομάζεται μέγεθος δείγματος [12].

Πιθανοσύνολο είναι το σύνολο των τιμών από τη μέτρηση ενός μεγέθους του πληθυσμού [12].

Τέλος δείγμα πιθανοσυνόλου ή δείγμα είναι το σύνολο των τιμών από τη μέτρηση ενός μεγέθους ενός δείγματος του πληθυσμού [12].

Η συχνότητα μιας τιμής ενός συνεχούς μεγέθους είναι προφανώς απειροστή, εφόσον το μέγεθος μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μέσα στο πεδίο ορισμού του. Εισάγεται όμως η έννοια συχνότητας φ_i μιας πεπερασμένης περιοχής τιμών Δx_i ή κλάσης i [12] :

$$\varphi_i = \frac{n_i}{N} \text{ όπου } \sum_1^v \varphi_i = 1 \text{ και } N = \sum_1^v n_i$$

Όπου

n_i : το πλήθος των τιμών της συνεχούς μεταβλητής που εμπίπτει στην κλάση i , δηλαδή το πλήθος των τιμών στο διάστημα x_i ως $x_i + \Delta x_i$

v : το πλήθος των κλάσεων

N : το μέγεθος δείγματος

Ως πυκνότητα συχνότητας f_i μιας κλάσης i ορίζεται η ανά μονάδα μετρούμενου μεγέθους συχνότητα φ_i της κλάσης [12] :

$$f_i = \frac{\varphi_i}{\Delta x_i}$$

Επίσης εισάγεται ο ορισμός της μέση τιμή δείγματος [12]:

$$\bar{x} = \sum_1^v \frac{n_i x_i}{N} = \sum_1^v \varphi_i x_i$$

Και της τυπική απόκλιση δείγματος [12]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^v n_i (x_i - \bar{x})^2}$$

4.1.2 Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και αθροιστικής κατανομής

Για μια συνεχή τυχαία μεταβλητή, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function) PDF ορίζεται από [13]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

όπου t είναι ο χρόνος (δηλαδή, μια συνεχής τυχαία μεταβλητή)

και $f(t)$ είναι συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (στην θεωρία αξιοπιστίας, αναφέρεται συχνά ως συνάρτηση πυκνότητας αστοχίας)

Η $F(t)$ είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function) CDF και εκφράζεται ως [13]:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx \quad (2)$$

$$\text{Με } F(\infty) = 1$$

Συνήθως, στην θεωρία αξιοπιστίας, η CDF γράφεται απλά ως:

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx$$

4.1.3 Αναμενόμενη τιμή

Η αναμενόμενη τιμή, $E(t)$, μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής ορίζεται από [13]:

$$E(t) = m = \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt \quad (3)$$

όπου $E(t)$ είναι η αναμενόμενη τιμή της συνεχούς τυχαίας μεταβλητής t και m είναι η μέση τιμή.

Ομοίως, η αναμενόμενη τιμή $E(t)$ μιας διακριτής τυχαίας μεταβλητής t εκφράζεται από [13]:

$$E(t) = \sum_{j=1}^k t_j f(t_j) \quad (3a)$$

όπου K είναι ο συνολικός αριθμός διακριτών τιμών της τυχαίας μεταβλητής t

4.1.4 Διακύμανση (Variance)

Η διακύμανση $\sigma^2(t)$ μιας τυχαίας μεταβλητής t εκφράζεται:

$$\sigma^2 = \int_0^{+\infty} t^2 f(t) dt - m^2 \quad (4)$$

όπου m είναι η μέση τιμή.

Στην θεωρία αξιοπιστίας, η διακύμανση είναι κοινώς γνωστή ως μέσο χρόνος αποτυχίας MTTF [13].

4.2 Στατιστικές κατανομές

4.2.1 Κανονική Κατανομή

Είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες συνεχείς τυχαίες κατανομές μεταβλητών και κατά καιρούς αναφέρεται ως κατανομή Gaussian. Ανακαλύφθηκε από τον De Moivre το 1733 [14].

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής εκφράζεται ως [13]:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], -\infty < t < +\infty$$

όπου σ και μ είναι οι παράμετροι κατανομής (δηλαδή, τυπική απόκλιση και μέση τιμή, αντίστοιχα).

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας στην εξίσωση (2) λαμβάνουμε:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx$$

όπου $F(t)$ είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής.

Η αντικατάσταση της εξίσωσης $f(t)$ στην εξίσωση (3) δίνει την ακόλουθη έκφραση για τη μέση τιμή διανομής [13]

$$E(t) = m = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} t * \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt = \mu$$

4.2.2 Διωνυμική Κατανομή

Αυτή η διακριτή τυχαία κατανομή μεταβλητών χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου κάποιος ασχολείται με τις πιθανότητες έκβασης, όπως ο αριθμός των εμφανιζόμενων παρατηρήσεων (π.χ. αποτυχίες) σε μια ακολουθία δεδομένου αριθμού δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα, κάθε δοκιμή έχει δύο πιθανά

αποτελέσματα (π.χ. επιτυχία ή αποτυχία), αλλά η πιθανότητα κάθε δοκιμής παραμένει αμετάβλητη ή σταθερή. Η κατανομή είναι επίσης γνωστή ως διανομή Bernoulli [15].

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής εκφράζεται από:

$$f(y) = \frac{n!}{y!(n-y)!} p^y q^{n-y}, \text{ για } y=0, 1, 2, \dots, n$$

Όπου: y είναι ο αριθμός μη επαναλαμβανόμενων (π.χ., αποτυχίες) σε ένα σύνολο n δοκιμών,

p είναι η πιθανότητα εμφάνισης μιας δοκιμής (π.χ., επιτυχία)

q είναι η πιθανότητα μη εμφάνισης (π.χ., αποτυχία).

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής δίνεται από:

$$F(y) = \sum_{i=0}^y \frac{n!}{i!(n-i)!} p^i q^{n-i}$$

όπου $F(y)$ είναι η πιθανότητα y ή λιγότερων μη εμφανίσεων (π.χ. αποτυχίες) σε n δοκιμές.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3a) και την εξίσωση $f(y)$ παίρνουμε την αναμενόμενη τιμή ή τον μέσο όρο της κατανομής:

$$E(y) = np$$

4.2.3 Κατανομή Poisson

Είναι μια άλλη διακριτή τυχαία κατανομή μεταβλητών που χρησιμοποιείται σε καταστάσεις στις οποίες εμφανίζονται πολλά γεγονότων του ίδιου τύπου. Πιο συγκεκριμένα, η κατανομή χρησιμοποιείται όταν ο αριθμός των δυνατών γεγονότων είναι μεγάλος αλλά η πιθανότητα εμφάνισης σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα είναι μικρή.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας κατάστασης η εμφάνιση ελαττωμάτων ενός συστήματος. Η κατανομή πήρε το όνομά της από τον Simeon Poisson (1781-1840), έναν Γάλλο μαθηματικός και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του εκφράζεται με [13] :

$$f(y) = \frac{\lambda^y e^{-\lambda}}{y!}, \text{ για } y=0, 1, 2, \dots$$

Όπου λ είναι η παράμετρος της κατανομής

Η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (CDF)

$$F(Y) = \sum_{i=0}^y \frac{\lambda^i e^{-\lambda}}{i!}$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3) και την εξίσωση $f(y)$, την αναμενόμενη τιμή ή τον μέσο όρο της κατανομής είναι:

$$E(y) = \lambda$$

4.2.4 Εκθετική Κατανομή

Είναι μια από τις απλούστερες συνεχής, τυχαίας μεταβλητών κατανομές, σε ευρεία κλίμακα που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, ιδιαίτερα σε μελέτες αξιοπιστίας [16]. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής εκφράζεται με [13].

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \lambda > 0$$

όπου t είναι ο χρόνος και λ είναι η παράμετρος κατανομής.

Με αντικατάσταση της εξίσωσης $f(t)$ στην εξίσωση (2) δίνει την ακόλουθη έκφραση για τη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση $f(t)$ και την εξίσωση (3) παίρνουμε την ακόλουθη έκφραση για τη μέση τιμή της κατανομής:

$$E(t) = m = \frac{1}{\lambda}$$

Η συνάρτηση κινδύνου (Hazard Function) είναι [17]:

$$Z_T(t) = \frac{f(t)}{F(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})} = \lambda$$

Στην εκθετική κατανομή η συνάρτηση κινδύνου είναι σταθερή με το χρόνο.

4.2.5 Κατανομή Rayleigh

Είναι μια συνεχής, τυχαίας μεταβλητής κατανομή, που χρησιμοποιείται συχνά στη θεωρία του ήχου και σε μελέτες αξιοπιστίας. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας εκφράζεται με [13] :

$$f(t) = \frac{2}{a^2} t e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^2}, \quad t \geq 0, \quad a > 0$$

όπου a είναι η παράμετρος κατανομής.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2) και την έκφραση της $f(t)$ λαμβάνουμε την ακόλουθη αθροιστική συνάρτηση κατανομής:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^2}$$

Εισάγοντας την εξίσωση $f(t)$ στην εξίσωση (3) δίνει την ακόλουθη εξίσωση για τη μέση τιμή διανομής:

$$E(t) = m = a\Gamma$$

όπου $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση γάμμα και εκφράζεται με

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} t^{y-1} e^{-t} dt, \quad y > 0$$

4.2.6 Κατανομή Weibull

Αυτή η συνεχής, τυχαίας μεταβλητής κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιπροσωπεύσει πολλά διαφορετικά φυσικά φαινόμενα.

Η συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας της κατανομής ορίζεται από [13] :

$$f(t) = \frac{\theta t^{\theta-1}}{\beta^\theta} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\theta} \quad t \geq 0, \quad \theta > 0, \quad \beta > 0$$

όπου θ και β είναι παράμετροι σχήματος και κλίμακος της κατανομής, αντίστοιχα.

Εισάγοντας την εξίσωση $f(t)$ στην εξίσωση (2) παίρνουμε την ακόλουθη εξίσωση για την αθροιστική συνάρτηση κατανομής:

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

Η εκθετική και η κατανομή Rayleigh είναι οι ειδικές περιπτώσεις της κατανομής Weibull για $\theta = 1$ και 2 , αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3) και την εξίσωση $f(t)$ παίρνουμε την ακόλουθη έκφραση για τη μέση τιμή κατανομής Weibull:

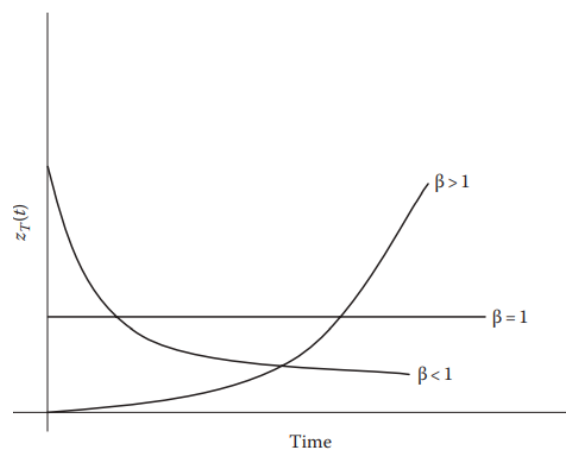
$$E(t) = m = \beta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\theta}\right)$$

Η συνάρτηση κινδύνου (Hazard Function) είναι [17]:

$$Z_T(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\theta \beta}$$

Το παρακάτω παρέχει μια απεικόνιση της συνάρτησης κινδύνου Weibull. Παρατηρούμε ότι με τη ρύθμιση $\beta = 1$, λαμβάνουμε την εκθετική κατανομή ως ειδική περίπτωση και συνεπώς έχουν συνεχή συνάρτηση κινδύνου. Σημειώνουμε ότι η συνάρτηση κινδύνου είναι μονότονη αυξάνεται όταν $\beta > 1$ και μειώνεται μονοτονικά όταν $\beta < 1$.

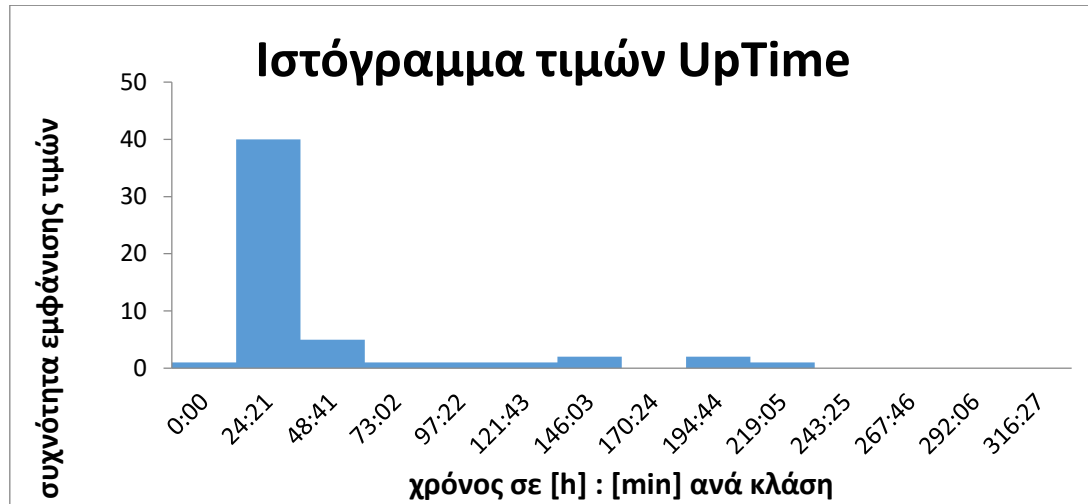
Η κατανομή Weibull χρησιμοποιείται πολύ ευρέως στη μοντελοποίηση αξιοπιστίας. Έχει τα πλεονεκτήματα της ευελιξίας στη μοντελοποίηση διαφόρων τύπων συμπεριφοράς κινδύνου



Σχήμα 4: Μεταβολή συνάρτησης κινδύνου κατανομής Weibull για τις χαρακτηριστικές τιμές της παραμέτρου β [17]

4.3 Ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων

Ένα ιστόγραμμα είναι μια γραφική παράσταση σε μορφή ραβδογράμματος ενός πίνακα συχνοτήτων ή συχνότητας κατανομή. Ένα παράδειγμα ιστογράμματος που προέκυψε από τα δεδομένα ζωής που έχουμε συλλέξει σχετικά με τις αποτυχίες στο ελικόπτερο Bell OH 58 Kiowa Warrior για περίοδο 6 μηνών, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6: Μορφή ιστογράμματος

Για να δημιουργήσουμε το ιστογράμμα για τα παραπάνω δεδομένα, πρέπει να διαιρέσουμε το εύρος των δεδομένων σε κλάσεις (ίσα διαστήματα) που καλύπτουν όλα τα σημεία των δεδομένων στο εύρος κλάσεις που θα είναι τα δεδομένα. Ο διαχωρισμός των κλάσεων είναι σημαντικός, καθώς αν επιλέξουμε πολύ μικρό εύρος κλάσης δεν θα αποκαλυφθεί το σχήμα των δεδομένων ενώ μεγάλος αριθμός θα είχε ως αποτέλεσμα μια επίπεδη εμφάνιση κατανομής.

Ο Sturges [18] έδειξε ότι η καλύτερη οπτική γραφική αναπαράσταση μπορεί να επιτευχθεί κατά τον προσδιορισμό του αριθμού των παρατηρήσεων σε κλάσεις ίσων αποστάσεων k όπου

$$K = 1 + 3 \log_{10} n$$

και n είναι ο αριθμός του δείγματος

Πίνακας 5: Παράδειγμα τρόπου διαχωρισμού των δεδομένων σε κλάσεις

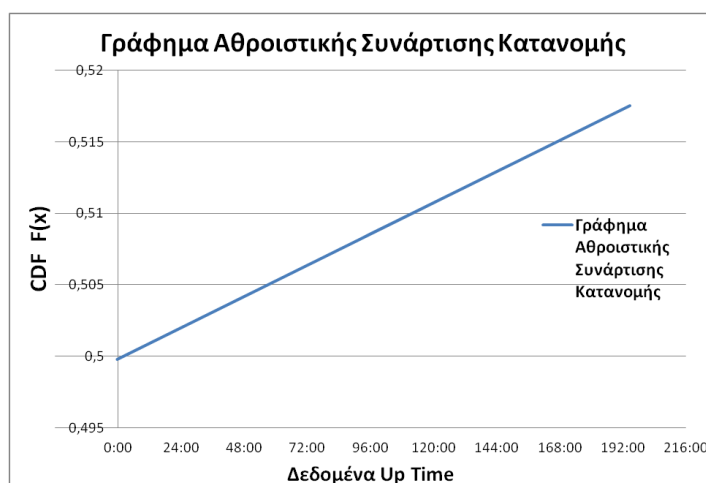
| Αριθμός κλάσεων K | Μέγιστος Χρόνος Λειτουργίας [h] : [min] | Ελάχιστος Χρόνος Λειτουργίας [h] : [min] | Εύρος δείγματος [h] : [min] | Εύρος κάθε κλάσης [h] : [min] |
|---------------------|---|--|-----------------------------|-------------------------------|
| 8 | 194:44 | 0:00 | 194:44 | 24:20 |

Η κατανομή συχνότητας είναι μια γραφική ή αριθμητική περιγραφή ενός συνόλου δεδομένων. Ο στόχος είναι η παρουσίαση των πληροφοριών που προκύπτουν από τα δεδομένων με συνοπτική μορφή και με τέτοιο τρόπο ώστε, εάν είναι πιθανό, εμφανίζεται το γενικό σχήμα της κατανομής.

Πίνακας 6: Παράδειγμα πίνακα κατανομής συχνοτήτων

| Κλάσεις | Συχνότητα εμφάνισης |
|---------|---------------------|
| 0:00 | 1 |
| 24:21 | 40 |
| 48:41 | 5 |
| 73:02 | 1 |
| 97:22 | 1 |
| 121:43 | 1 |
| 146:03 | 2 |
| 170:24 | 0 |
| 194:44 | 2 |
| 219:05 | 1 |
| 243:25 | 0 |
| 267:46 | 0 |
| 292:06 | 0 |
| 316:27 | 0 |

Τέλος για το παραπάνω αριθμητικό παράδειγμα, η γνωστή συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (CDF) έχει την ακόλουθη μορφή.



Εικόνα 7: Παράδειγμα αθροιστικής συνάρτησης κατανομής

5. Γραφική Ανάλυση Δεδομένων και Εύρεση Κατανομής

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε στους τρόπους ανάλυσης των δεδομένων ζωής για την επίτευξη του τελικού μας σκοπού που είναι η εύρεση της κατανομής που τα περιγράφει. Αναλύονται οι πιο γνωστές προσεγγίσεις αναγνώρισης και τελικού υπολογισμού μιας άγνωστης κατανομής με τις οποίες ο μελετητής πρέπει να είναι εξοικειωμένος προκειμένου να επιλέξει την κατάλληλη και να εξάγει ασφαλέστερα συμπεράσματα. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζετε με βήματα η διαδικασία που ακολουθήσαμε προκειμένου να βρούμε την κατανομή των δεδομένων ωρών λειτουργίας του συστήματος Bell OH 58 D Kiowa Warrior.

5.1 Μη - Παραμετρικές αναλύσεις Δεδομένων Ζωής (Data Life)

Οι στατιστικές αναλύσεις δεδομένων που πραγματοποιούνται χωρίς την αρχική υπόθεση μιας λογικής κατανομής, που ενδεχομένως να προσεγγίζει την ανάλυση, ονομάζονται μη παραμετρικές [17].

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι βασίζονται στην ανάλυση των παρατηρούμενων δεδομένων βλάβης. Τα δεδομένα αποτυχίας συλλέγονται είτε κατά τη λειτουργία ενός πληθυσμού συσκευών-συστημάτων, είτε λαμβάνονται μέσω ελεγχόμενης δοκιμής ενός δείγματος του προς εξέταση συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιούμε στατιστικές μεθόδους για τη εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων κατανομής ζωής ή για την εκτίμηση της αξιοπιστίας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένα μοντέλα όπως στην παραμετρική ανάλυση [17].

Το κύριο πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι δεν απαιτούν καμία υπόθεση σχετικά με την ταυτότητα ή τη μορφή της κατανομής ζωής. Δηλαδή δεν χρειάζεται να υποθεθεί κανένας δυνητικός περιορισμός στη συμπεριφορά της κατανομής. Επίσης, για περιπτώσεις στις οποίες η επιλογή του μοντέλου κατανομής ζωής είναι δύσκολη, όπως στην περίπτωση που η συνάρτηση αποτυχίας (Hazard function) δεν είναι μονότονη, η χρήση μη παραμετρικών μεθόδων επιτρέπει στον μελετητή να αποφύγει εντελώς το θέμα της επιλογής μοντέλου [17].

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των μη παραμετρικών μεθόδων είναι ότι επιτρέπει στο μελετητή να αναλύσει ομαδοποιημένα σύνολα από δεδομένα ζωής, βγάζοντας επιμέρους συμπεράσματα για κάθε ομάδα και επιπλέον είναι αξιόπιστη ακόμη και αν στην κάθε ομάδα δεδομένων προς ανάλυση, δεν έχουν παρατηρηθεί όλες οι αστοχίες που εμφάνισε το σύστημα [17].

Το βασικό μειονέκτημα της χρήσης μη παραμετρικών μεθόδων είναι ότι περιέχουν λιγότερες πληροφορίες από αυτές που λαμβάνονται με παραμετρική ανάλυση [17]. Στις μη παραμετρικές αναλύσεις ο υπολογισμός των παρακάτω δεικτών είναι απαραίτητος:

- Η μέση τιμή δείγματος \bar{x}
- Η τυπική απόκλιση δείγματος s
- Η διακύμανση του δείγματος s^2

- Ο συντελεστής παραλλαγής δείγματος $CV = \frac{s}{\bar{x}}$

5.1.1 Μέθοδος Total Time on Test

Μια αρκετά ισχυρή μη παραμετρική μέθοδος για τον απλό προσδιορισμό της συμπεριφοράς της συνάρτησης κινδύνου (Hazard Rate) έχει αναπτυχθεί από τους Barlow και Campo [19] και εξηγείται πολύ αποτελεσματικά από τον Klefsjo [20]. Η μέθοδος είναι γνωστή ως Total Time on Test (TTT).

Η βασική ιδέα της μεθόδου στηρίζεται στον ισχυρισμό ότι για οποιαδήποτε κατανομή δεδομένων ζωής (Data life) που έχουν πεπερασμένο μέσο όρο, η σχέση μεταξύ της μέσης τιμής και της συνάρτησης κινδύνου (Hazard Function) που εξάγονται από αυτά τα δεδομένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν τη συμπεριφορά της κατανομής. Δηλαδή ο χαρακτηρισμός της κατανομής μπορεί να γίνει με μια εμπειρική αναπαράσταση της κατανομής της ζωής με βάση δεδομένα δοκιμής.

5.2 Παραμετρικές αναλύσεις Δεδομένων Ζωής (Data Life)

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας ονομάζονται παραμετρικές διότι επικεντρώνονται σε μια αρχική εκτίμηση των παραμέτρων μιας υποτιθέμενης κατανομής [17].

Συγκεκριμένα, οι παραμετρικές στατιστικές μέθοδοι για την ανάλυση δεδομένων αξιοπιστίας ξεκινούν με μια υπόθεση της μορφής της κατανομής της ζωής του εξαρτήματος - συστήματος. Συνήθως, η επιλογή της κατανομής βασίζεται στην εμπειρία με παρόμοιους τύπους εξαρτημάτων ή κατανόηση των φαινομένων που καθορίζουν την αποτυχία του εξαρτήματος [17].

Σε ορισμένες περιπτώσεις, θεωρείται ένα γενικό μοντέλο όπως η κατανομή Weibull ή η κατανομή Gamma επειδή γενικά στις κατανομές που εκφράζονται από δύο παραμέτρους, καθίσταται πιο εφικτό να επιτευχθεί αναπαράσταση των δεδομένων αστοχίας. Μόλις υποτεθεί μια λογική κατανομή που εκφράζει τα δεδομένα ζωής, χρησιμοποιούνται οι στατιστικές μέθοδοι προκειμένου να εκτιμηθούν οι παράμετροι αυτών των κατανομών.

Είναι πολύ σημαντικό στη μηχανική αξιοπιστίας να προσδιοριστεί ποια κατανομή ταιριάζει καλύτερα σε ένα σύνολο δεδομένων. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται (Fitting Distribution) και γίνεται είτε με γραφικές μεθόδους εκτίμησης είτε με διάφορα προγράμματα ανάλυσης δεδομένων όπως το Minitab, το EasyFit/mathWave, και Analytic Solver Platform του Microsoft Excel.

5.2.1 Γραφική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων

Οι γραφικές μέθοδοι εκτίμησης βασίζονται στην αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF), της προς εξέταση κατανομής. Οι άξονες σχεδίασης των πιθανοτήτων της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής μετασχηματίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η αθροιστική συνάρτηση κατανομής που προκύπτει από τα δεδομένα που συλλέχτηκαν να σχηματίζουν μια ευθεία γραμμή.

Επομένως, εάν τα γραφικά δεδομένα μπορούν να προσαρμοστούν με ευθεία γραμμή, τα δεδομένα ταιριάζουν στην κατάλληλη κατανομή [21].

Εάν τα δεδομένα δοκιμής που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εκτιμώμενων τιμών της αξιοπιστίας σχεδιάζονται ως συνάρτηση του χρόνου, το γράφημα που προκύπτει θα παρέχει εκτιμώμενες τιμές για τις παραμέτρους της κατανομής που εκφράζουν την συνάρτηση κινδύνου (Hazard Function) [17].

Ανάλογα με το γράφημα που προκύπτει κάθε φορά μπορούμε να κάνουμε γραφική συσχέτιση των δεδομένων με μια γνωστή κατανομή. Η διαδικασία που ακολουθήσαμε σε αυτή τη μελέτη περιγράφεται παρακάτω:

1. Χωρίζουμε τα δεδομένα του δείγματος σε κλάσεις και υπολογίζουμε τη συχνότητα εμφάνισης των δεδομένων σε κάθε κλάση.
2. Κατασκευάζουμε το ιστόγραμμα από τα παραπάνω δεδομένα.
3. Συμπληρώνουμε τα επιπλέον σημεία μετά από κάθε μια νέα δειγματοληψία, ώστε να έχουμε γενική εποπτεία για την εξέλιξη της κατανομής.
4. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα δεδομένα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $p(s)$ για κάθε κλάση και κατασκευάζουμε τη γραφική παράσταση της $p(s)$.
5. Η χάραξη γίνεται σε ορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και οι κλίμακες είναι κατ' αρχήν γραμμικές.
6. Η χάραξη, μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληψίας οδηγεί σε συμπεράσματα ως προς το είδος της κατανομής.
7. Έπειτα επιλέγουμε μια υποθετική κατανομή η οποία ταιριάζει με την άγνωστη έως τώρα κατανομή. Επιλέγεται εμπειρικά ανάλογα με την μορφή της άγνωστης κατανομής από τη λίστα των γνωστών λόγω εμπειρίας κατανομών που αναλύθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.

8. Η σχεδίαση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF) της υποθετικής κατανομής, στο ίδιο γράφημα μαζί με τα πειραματικά σημεία, δίνει μια οπτική ένδειξη ως προς την ορθότητα της διαδικασίας που ακολουθούμε.
9. Στη συνέχεια επιλέγουμε τις παραμέτρους κατανομής έτσι ώστε οι δυο γραφικές παραστάσεις (της άγνωστης κατανομής και της εμπειρικής συνάρτησης) να ταυτίζονται όσο περισσότερο γίνεται.
10. Έπειτα αφαιρούμε τα ζεύγη δεδομένων των δύο γραφικών παραστάσεων και υπολογίζουμε το τετράγωνο της διαφοράς του κάθε ζεύγους.
11. Αθροίζουμε τα τετράγωνα των διαφορών και εν τέλει έχουμε το συνολικό σφάλμα της άγνωστης κατανομής με την υποθετική. Το συνολικό σφάλμα που προέκυψε αποτελεί το κελί αναφορά προς ελαχιστοποίηση.
12. Χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα του Excel από τα add ins για επίλυση και βελτιστοποίηση, ελαχιστοποιούμε το συνολικό σφάλμα βρίσκοντας τους κατάλληλους συντελεστές που οδηγούν την εμπειρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας σε απόλυτη ταύτιση με την άγνωστη κατανομή.
13. Τελικά με τη διαδικασία αυτή εξάγουμε την γενική μορφή της κατανομής με τους απαραίτητους συντελεστές.
14. Για κάθε νέα παρατήρηση, τα αντίστοιχα δεδομένα εισάγονται στο γράφημα και ο χρήστης το μόνο που έχει να κάνει είναι να δώσει εκ νέου την εντολή στο Excel για επίλυση.
15. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των παρατηρήσεων και συνεπώς και δεδομένων στο γράφημα τόσο πιο αξιόπιστη και ρεαλιστική θα είναι η εκτίμηση της κατανομής.

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

6. Παρουσίαση Προγράμματος

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε το πρόγραμμα υπολογισμού της συνολικής διαθεσιμότητας του ελικοπτερού Bell OH-58 Kiowa Warrior Warrior. Θα δοθούν εικόνες και παραδείγματα από το αρχείο excel που συνοδεύει αυτήν την εργασία προκειμένου ο μελετητής να εξοικειωθεί με αυτό και θα γίνει ανάλυση των υπολογισμών που εκτελεί το πρόγραμμα.

6.1 Είσοδοι (Inputs)

6.1.1 Στο Στάδιο της Συλλογής Δεδομένων

Τα δεδομένα που καταχωρούνται από το χρήστη (inputs) είναι κελιά του Excel επισήμασμένα με ανοιχτό πορτοκαλί χρώμα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η αρχική όψη του προγράμματος με επισήμασμένα με κόκκινα πλαίσια των κελιών που εισάγει ο χρήστης. Τονίζεται ότι σ' αυτά τα κελιά, και μόνο, ο χρήστης μπορεί να κάνει διορθώσεις, αν το επιθυμεί, πληκτρολογώντας «delete».

| Οδηγίες για το Χρήστη | | | | | | | | | | Όρισε τον/τις μέσους έτη/ες παρακολούθησης του συστήματος | Όρισε τον/τις έτη/ες μήνες παρακολούθησης του συστήματος | Συνολικός χρόνος παρακολούθησης συστήματος (Planned Time) [h] / [min] | Συνολικός χρόνος μη διαθεσιμότητας συστήματος (Down Time) [h] / [min] | Συνολικός χρόνος διαθεσιμότητας συστήματος (Up Time) [h] / [min] | Αριθμός Αποτυχιών ME | Μέσος χρόνος επισκευών του συστήματος (MTTR) | Μέσος χρόνος ανίχνευσης σε δυο διαδοχικές αστοχίες του συστήματος (MTBF) |
|--|---|--------------------|---------------------------------------|------------------------|---|----------------------|------------------------------|---------------------------------|---|---|--|---|---|--|----------------------|--|--|
| 1. Όρισε τον αρχικό και τελικό χρόνο παρακολούθησης του συστήματος που επιθυμείς στα κελιά J2, K2. 2. Εάν προκύψει κάποια βλάβη/αστοχία, επίλεξε από τη λίστα που σχηματίζεται, έναν συντήρησι και αντίστοιχο κωδικό. 3. Κατά την παραλαβή ανταλλακτικών ή την ολοκλήρωση της επισκευής εισάγετε "ok" στο αντίστοιχο κελί. 4. Οι παραρτημένες ερωτήσεις απαντώνται αυτόματα καθώς συμπληρώνεται το αντίστοιχο inputs. 5. Τονίζεται ότι, είσογοί (inputs) από το χρήστη, πρέπει να γίνονται μόνο στα πορτοκαλί κελιά. 6. Σε περίπτωση που κανείς μια λάθος καταχώρηση, κελιά παύσει δείξει στο ημερί και, ONLY στις στήλες G, I, L, K, L, M. | | | | | | | | | | 0:00 | 0:00 | 0:00 | 0 | #N/A!D1 | #N/A!D1 | | |
| Αίδον αριθμός παραρτημάτων | Επιλογή Εργασίας Συντήρησης ή Επισκευής | Επιλογή είσογματος | Ημέρα/ώρα βλάβης ή έναρξης συντήρησης | Παραλαβή ανταλλακτικών | Ημερομηνία/ώρα ολοκλήρωσης των εργασιών | Ολοκλήρωση Επισκευών | Χρόνος διάθεσης υλικών (LDT) | Ημέρα/ώρα ολοκλήρωσης Επισκευής | Διάρκεια επισκευής της κάθε βλάβης (DownTime) | Διαφοροποίηση συστήματος ανα 2 διαδοχικές βλάβες (UpTime) | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Εικόνα 8: Αρχική όψη του προγράμματος με τα inputs να σημειώνονται με κόκκινα πλαίσια.

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Ως πρώτο βήμα έναρξης της παρακολούθησης του συστήματος, ο χρήστης καλείται να ορίσει τον αρχικό και τελικό χρόνο. Η χρονική διάρκεια παρακολούθησης του συστήματος πρέπει να είναι τουλάχιστον έξι μήνες προκειμένου ο μελετητής να συλλέξει ικανοποιητικό αριθμό παρατηρήσεων. Σε περίπτωση που υπερβούμε το τελικό χρόνο παρακολούθησης του συστήματος και δεν έχουμε συλλέξει ικανοποιητικό αριθμό παρατηρήσεων, φυσικά έχουμε τη δυνατότητα να επεκτείνουμε το χρόνο.

Η χρονική περίοδος που παρακολουθούμε το σύστημα ονομάζεται «Planned Time» και ορίζεται όπως φαίνεται με κόκκινο πλαίσιο στην παρακάτω εικόνα :

| Αύξων αριθμός παρατηρήσεων | Επιλογή Εργασίας Συντήρησης ή Επισκευής | Επιλογή εξαρτήματος | Ημ/νία-ώρα έναρξης συντήρησης | Παραλαβή ανταλλακτικών | Ημερομηνία/ώρα ολοκλήρωσης των Logistics | Ολοκλήρωση Επισκευής | Χρόνος διάθεσης υλικών (LDT) | Ημ/νία-ώρα ολοκλήρωσης Επισκευής | Διάρκεια επισκευής της κάθε βλάβης (DownTime) |
|----------------------------|---|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------|--|----------------------|------------------------------|----------------------------------|---|
| 1 | SCHEDULED_INSPECTIONS | Weekly_inspection | 26/5/21 17:21 | ok | 26/5/21 17:23 | ok | 0:02 | 26/5/21 17:26 | 0:05 |
| 2 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Mast nut | 26/5/21 17:27 | ok | 26/5/21 17:34 | ok | 0:06 | 26/5/21 17:37 | 0:09 |
| 3 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Trunnion | 26/5/21 17:39 | ok | 26/5/21 18:49 | ok | 1:10 | 27/5/21 10:28 | 16:49 |
| 4 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper | 27/5/21 11:04 | ok | 27/5/21 11:05 | ok | 0:00 | 27/5/21 11:10 | 0:05 |
| 5 | FORWARD_DECK | top deck | 27/5/21 11:21 | ok | 27/5/21 12:13 | ok | 0:52 | 27/5/21 12:46 | 1:24 |
| 6 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Mast nut | 27/5/21 15:24 | ok | 27/5/21 15:46 | ok | 0:21 | 27/5/21 15:57 | 0:32 |
| 7 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper | 27/5/21 17:17 | ok | 27/5/21 17:18 | ok | 0:00 | 27/5/21 17:36 | 0:19 |
| 8 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Mast nut | 29/5/21 15:46 | ok | 29/5/21 19:50 | ok | 4:04 | 29/5/21 20:24 | 4:38 |
| 9 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Pillow blocks | 31/5/21 10:13 | ok | 31/5/21 11:08 | ok | 0:54 | 31/5/21 11:44 | 1:30 |
| 10 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Yoke | 31/5/21 12:13 | ok | 31/5/21 12:14 | ok | 0:00 | 31/5/21 13:25 | 1:11 |
| 11 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Trunnion and trunnion caps | 31/5/21 16:14 | ok | 31/5/21 16:22 | ok | 0:08 | 31/5/21 17:23 | 1:09 |
| 12 | POWER_PLANT | engine pan | 31/5/21 17:49 | ok | 31/5/21 18:10 | ok | 0:21 | 31/5/21 21:27 | 3:38 |
| 13 | POWER_PLANT | airframe fuel filter | 1/6/21 17:14 | ok | 1/6/21 17:38 | ok | 0:24 | 1/6/21 18:30 | 1:16 |
| 14 | POWER_PLANT | rotor brake | 1/6/21 18:31 | ok | 1/6/21 19:11 | ok | 0:40 | 1/6/21 21:43 | 3:12 |
| 15 | POWER_PLANT | engine inlet bellmouth | 1/6/21 22:04 | ok | 2/6/21 7:40 | ok | 9:36 | 2/6/21 9:37 | 11:33 |
| 16 | CABIN_INTERIOR | flight control tubes inside roof beam | 2/6/21 10:07 | ok | 2/6/21 10:29 | ok | 0:21 | 2/6/21 10:56 | 0:48 |

Εικόνα 9: Επεξήγηση τρόπου ορισμού του Planned Time σε κόκκινο πλαίσιο και εμφάνιση ιστορικού παρατηρήσεων

6.1.2 Στο Στάδιο της Ανάλυσης Δεδομένων

Αφού συγκεντρώσουμε ικανοποιητικό αριθμό δεδομένων, πάνω από εκατό παρατηρήσεις, μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση της αξιοπιστίας του συστήματος.

Ο χρήστης σ' αυτό το στάδιο της ανάλυσης θα πρέπει να εισάγει στην κατάλληλη θέση μια εμπειρική κατανομή συχνότητας η οποία θα έχει δύο άγνωστους παραμέτρους. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η θέση εισαγωγής και ένα παράδειγμα από μια κατανομή Weibull που έχουμε επιλέξει προκειμένου να κάνουμε γραφική συσχέτιση των παρατηρήσεων (UP-Time) με κατανομή Weibull.

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

| Αριθμός κλάσεων K | Μέγιστος Χρόνος Λειτουργίας [h] : [min] | Ελάχιστος Χρόνος Λειτουργίας [h] : [min] | Εύρος δείγματος [h] : [min] | Εύρος κάθε κλάσης [h] : [min] | Scale factor a | Shape factor b | Συνολικό σφάλμα |
|-------------------|---|--|-----------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| 8 | 194:44 | 0:00 | 194:44 | 24:20 | 2,00 | 1,00 | 0,0066 |

| Κλάσεις | Συχνότητα εμφάνισης | PDF p(s) | Fitting to Weibull Dist | Διαφορές | τετράφωνα διαφορών |
|---------|---------------------|----------|-------------------------|----------|--------------------|
| 0:00 | 1 | 0,019 | 0,000879629 | 0,0181 | 0,0003 |
| 24:21 | 40 | 0,758 | 0,724791607 | 0,0336 | 0,0011 |
| 48:41 | 5 | 0,095 | 0,066140368 | 0,0287 | 0,0008 |
| 73:02 | 1 | 0,019 | 0,000578514 | 0,0184 | 0,0003 |
| 97:22 | 1 | 0,019 | 5,74771E-07 | 0,0190 | 0,0004 |
| 121:43 | 1 | 0,019 | 6,84106E-11 | 0,0190 | 0,0004 |
| 146:03 | 2 | 0,038 | 9,9884E-16 | 0,0379 | 0,0014 |
| 170:24 | 0 | 0,000 | 1,81178E-21 | 0,0000 | 0,0000 |
| 194:44 | 2 | 0,038 | 4,1137E-26 | 0,0379 | 0,0014 |
| 219:05 | 1 | 0,019 | 1,17487E-35 | 0,0190 | 0,0004 |
| 243:25 | 0 | 0,000 | 4,23471E-44 | 0,0000 | 0,0000 |
| 267:46 | 0 | 0,000 | 1,93091E-53 | 0,0000 | 0,0000 |
| 292:06 | 0 | 0,000 | 1,11575E-63 | 0,0000 | 0,0000 |
| 316:27 | 0 | 0,000 | 8,18118E-75 | 0,0000 | 0,0000 |

Εικόνα 10: Παράδειγμα εισαγωγής εμπειρικής συνάρτησης για συσχέτιση με τους καταγεγραμμένους χρόνους (Up Time)

Οι δύο άγνωστοι συντελεστές που ψάχνουμε αποτελούν επίσης inputs για το χρήστη ώστε μετά από λίγες δοκιμές συντελεστών να εμφανιστεί στο γράφημα της συσχέτισης μια σχετική σύγκλιση της υποτιθέμενης κατανομής με τα δεδομένα της πραγματικής κατανομής. Παραπάνω εμφανίζονται τα inputs που αφορούν τους δύο συντελεστές.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα στη στήλη «Fitting to Weibull Dist» έχει χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση του Excel :

«WEIBULL(U8:U21;\$Z\$3;\$AA\$3;FALSE)»

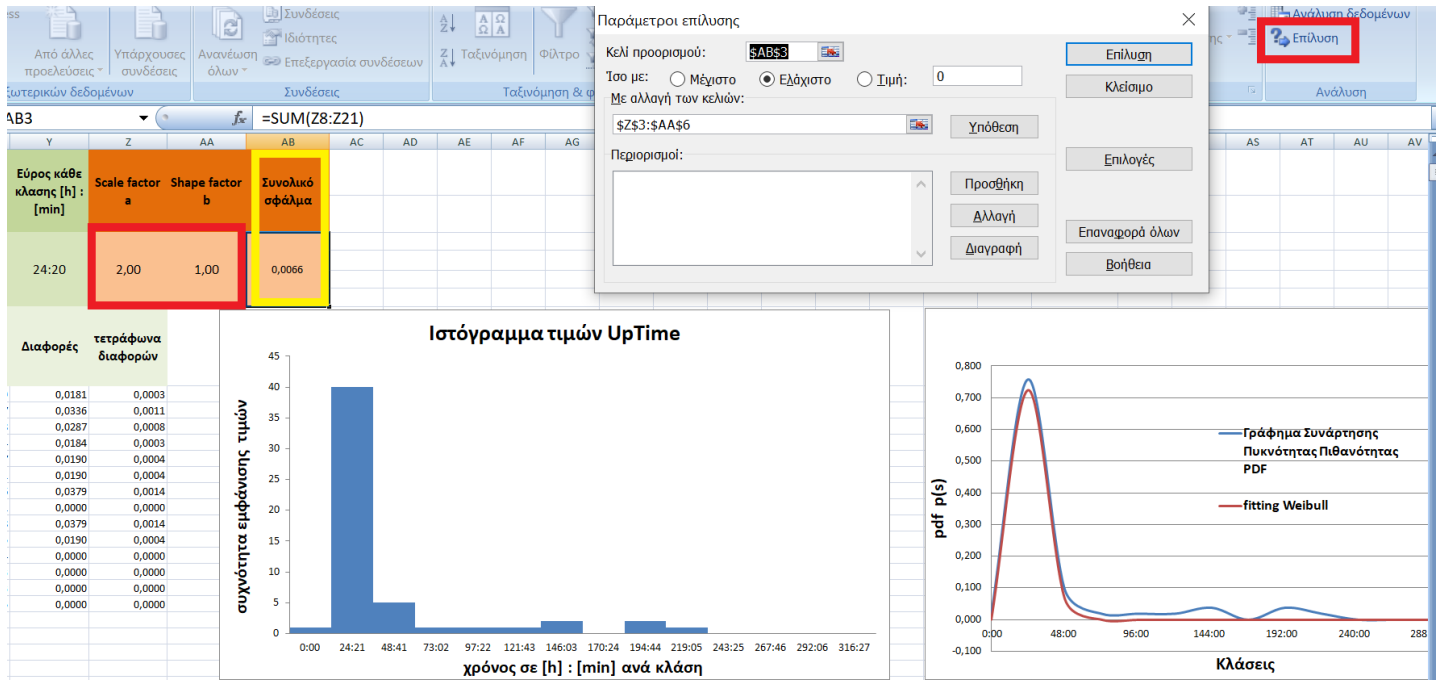
Παρόμοιες συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για «fitting Distribution» μπορούμε να βρούμε στο Microsoft Excel και για άλλες κατανομές. Το δύσκολο είναι να βρούμε ποια κατανομή ταιριάζει καλύτερα στην περίπτωση μας. Ένα παράδειγμα ελέγχου καλύτερης προσαρμογής κατανομής (Goodness of Fit Test) δίνεται στο παράρτημα Ι στο τέλος της εργασίας.

Τέλος τα «inputs» ολοκληρώνονται με την τελική επίλυση του προβλήματος από το πρόγραμμα με επίλυση ενός κλασικού προβλήματος βελτιστοποίησης και εύρεση των τελικών συντελεστών που έχουν την βέλτιστη γραμμική συσχέτιση με τα πραγματικά δεδομένα.

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης γίνεται όταν ο χρήστης δώσει στο πρόγραμμα τις παρακάτω εντολές:

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

- Με ενεργοποίηση από τα add-ins του Excel της εντολής «Επίλυση» εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 11: Εμφάνιση της εντολής «Επίλυση» προς ελαχιστοποίηση του κελιού προορισμού

- Στόχος του χρήστη είναι να ελαχιστοποιήσει το κελί προορισμού (φαίνεται με κίτρινο πλαίσιο) δηλαδή το συνολικό σφάλμα που προκύπτει από τα τετράγωνα των διαφορών των επιμέρους εκτιμήσεων.
- Δίνοντας την εντολή «Επίλυση» το πρόγραμμα μας υπολογίζει τους ιδανικούς συντελεστές (φαίνονται σε κόκκινο πλαίσιο) που ψάχνουμε.

Συνεπώς έχουμε κατασκευάσει μια συνάρτηση κατανομής που περιγράφει την αξιοπιστία του συστήματος. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η συνάρτηση αξιοπιστίας μεταβάλλεται με το χρόνο σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση :

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{B}\right)^\theta}$$

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Για συντελεστή σχήματος $\theta=1$ και συντελεστή κλίμακος $\beta=2$ έχουμε:

$$R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{2}\right)^1}$$

6.2 Έξοδοι (Outputs)

6.2.1 Στο Στάδιο της Συλλογής Δεδομένων

Οι έξοδοι (Outputs) που μας παρέχει το σύστημα είναι γενικά τα κελία του Excel με γαλάζιο πλαίσιο. Συγκεκριμένα στην παρακάτω εικόνα φαίνονται σε κόκκινο πλαίσιο τα «outputs» του προγράμματος.

| Παρακολούθηση του συστήματος συνολικά | | | | Ορισμός ημερών/ώρας έναρξης παρακολούθησης του συστήματος | Ορισμός ημερών/ώρας λήξης παρακολούθησης του συστήματος | Συνολικός χρόνος παρακολούθησης (Planned Time) [h] : [min] | Συνολικός χρόνος διαθεσιμότητας συστήματος (Down Time) [h] : [min] | Συνολικός χρόνος διαθεσιμότητας (Up Time) [h] : [min] | Αριθμός Απολαών W | Μέσος χρόνος επικοινωνίας του συστήματος (MTTR) [h] : [min] | Μέσος χρόνος ανίχνευσης σε δυο διαδοχικές αστοχίες του συστήματος (MTBF) [h] : [min] | Διαθεσιμότητα Συστήματος R(t) (Availability) | | | |
|---------------------------------------|--|--|--|---|---|--|--|---|-------------------|---|--|--|---------|-------------|----------|
| Οδηγίες, κατά σειρά, για το Χρήστη | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| 2 | | | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | | |
| 3 | | | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | | |
| 4 | | | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | | | |
| 5 | | | | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | | | |
| 6 | | | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | | | |
| 7 | | | | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | | | |
| 8 | | | | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | | | |
| 9 | | | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | |
| 10 | | | | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | | | |
| 11 | | | | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | |
| 12 | | | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | | | |
| 13 | | | | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | | | |
| 14 | | | | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | | | |
| 15 | | | | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | | | |
| 16 | | | | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | | | |
| 17 | | | | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | | |
| 18 | | | | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | | | |
| 19 | | | | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | | | |
| 20 | | | | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | | | |
| 21 | | | | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | | | |
| 22 | | | | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | | | |
| 23 | | | | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | | | |
| 24 | | | | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | | | |
| 25 | | | | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | | | |
| 26 | | | | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | | | |
| 27 | | | | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | | | |
| 28 | | | | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | | | |
| 29 | | | | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | | | |
| 30 | | | | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | | | |
| 31 | | | | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | | | |
| 32 | | | | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | | | |
| 33 | | | | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | | | |
| 34 | | | | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | | | |
| 35 | | | | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | | | |
| 36 | | | | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | | | |
| 37 | | | | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | | | |
| 38 | | | | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | | | |
| 39 | | | | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | | | |
| 40 | | | | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | | | |
| 26/5/21 17:21 | | | | ok | 26/5/21 17:21 | ok | 0:00 | 26/5/21 17:28 | 0:00 | 0:00 | 11:21 | 1 | 0,47301 | 1,22224547 | 0,74924 |
| 26/5/21 17:27 | | | | ok | 26/5/21 17:34 | ok | 0:06 | 26/5/21 17:37 | 0:09 | 0:02 | 0:01 | 2 | 0,00082 | 1,16464349 | 1,16382 |
| 26/5/21 17:39 | | | | ok | 26/5/21 18:49 | ok | 1:10 | 27/5/21 10:28 | 16:49 | 15:38 | 0:02 | 3 | 0,00142 | 1,12197090 | 1,12055 |
| 27/5/21 11:04 | | | | ok | 27/5/21 11:05 | ok | 0:00 | 27/5/21 11:10 | 0:05 | 0:05 | 0:35 | 4 | 0,02492 | 1,09033826 | 1,06544 |
| 27/5/21 11:21 | | | | ok | 27/5/21 12:13 | ok | 0:52 | 27/5/21 12:46 | 1:24 | 0:32 | 0:10 | 5 | 0,00745 | 1,06893905 | 1,05949 |
| 27/5/21 15:24 | | | | ok | 27/5/21 15:46 | ok | 0:21 | 27/5/21 15:57 | 0:32 | 0:11 | 2:38 | 6 | 0,11034 | 1,04893867 | 0,99325 |
| 27/5/21 17:17 | | | | ok | 27/5/21 17:18 | ok | 0:00 | 27/5/21 17:36 | 0:19 | 0:18 | 1:19 | 7 | 0,05541 | 1,03873693 | 0,98132 |
| 29/5/21 15:46 | | | | ok | 29/5/21 19:50 | ok | 4:04 | 29/5/21 20:24 | 4:38 | 0:34 | 46:09 | 8 | 1,92319 | 1,02721539 | -0,89598 |
| 31/5/21 10:13 | | | | ok | 31/5/21 11:08 | ok | 0:54 | 31/5/21 11:44 | 1:30 | 0:35 | 37:49 | 9 | 1,57574 | 1,020216165 | -0,55558 |
| 31/5/21 12:13 | | | | ok | 31/5/21 12:14 | ok | 0:00 | 31/5/21 13:25 | 1:11 | 1:10 | 0:29 | 10 | 0,02062 | 1,01493612 | 0,99432 |
| 31/5/21 16:14 | | | | ok | 31/5/21 16:22 | ok | 0:08 | 31/5/21 17:23 | 1:09 | 1:01 | 1:45 | 11 | 0,07346 | 1,01104695 | 0,99761 |
| 31/5/21 17:49 | | | | ok | 31/5/21 18:10 | ok | 0:21 | 31/5/21 21:27 | 3:38 | 3:17 | 0:25 | 12 | 0,01747 | 1,00819712 | 0,99072 |
| 1/6/21 17:34 | | | | ok | 1/6/21 17:38 | ok | 0:24 | 1/6/21 18:30 | 3:12 | 0:52 | 19:46 | 13 | 0,82419 | 1,00607257 | 0,18188 |
| 1/6/21 18:31 | | | | ok | 1/6/21 19:11 | ok | 0:40 | 1/6/21 21:49 | 3:12 | 2:32 | 0:00 | 14 | 0,00055 | 1,00448657 | 1,00395 |
| 1/6/21 22:04 | | | | ok | 2/6/21 17:40 | ok | 9:36 | 2/6/21 9:37 | 11:33 | 1:57 | 0:20 | 15 | 0,01422 | 1,00333270 | 0,98911 |
| 2/6/21 10:07 | | | | ok | 2/6/21 10:29 | ok | 0:21 | 2/6/21 10:56 | 4:48 | 0:26 | 0:29 | 16 | 0,02067 | 1,00246892 | 0,98180 |
| 2/6/21 10:57 | | | | ok | 2/6/21 12:02 | ok | 1:05 | 2/6/21 15:37 | 4:39 | 3:34 | 0:01 | 17 | 0,00076 | 1,00182902 | 1,00107 |
| 2/6/21 17:58 | | | | ok | 2/6/21 18:58 | ok | 1:00 | 2/6/21 19:18 | 1:20 | 0:19 | 2:20 | 18 | 0,09773 | 1,00135497 | 0,90363 |
| 4/6/21 9:23 | | | | ok | 4/6/21 9:59 | ok | 0:36 | 4/6/21 10:20 | 0:56 | 0:20 | 38:05 | 19 | 1,58604 | 1,00103379 | -0,58594 |
| 6/6/21 11:40 | | | | ok | 6/6/21 12:08 | ok | 0:28 | 6/6/21 12:58 | 1:17 | 0:49 | 49:20 | 20 | 2,05562 | 1,00074363 | -1,05488 |
| 7/6/21 8:50 | | | | ok | 7/6/21 8:56 | ok | 1:05 | 7/6/21 11:27 | 2:36 | 1:30 | 19:52 | 21 | 0,82790 | 1,000595009 | 0,17266 |
| 7/6/21 11:55 | | | | ok | 7/6/21 13:35 | ok | 1:39 | 7/6/21 15:44 | 4:48 | 2:08 | 0:28 | 22 | 0,01966 | 1,00040811 | 0,98075 |
| 7/6/21 17:29 | | | | ok | 7/6/21 21:59 | ok | 4:30 | 7/6/21 23:00 | 5:30 | 1:00 | 1:45 | 23 | 0,07319 | 1,00030234 | 0,92711 |
| 8/6/21 11:08 | | | | ok | 8/6/21 13:34 | ok | 2:45 | 8/6/21 15:00 | 3:51 | 1:05 | 12:08 | 24 | 0,59603 | 1,00022398 | 0,49419 |
| 8/6/21 16:04 | | | | ok | 8/6/21 16:31 | ok | 0:06 | 8/6/21 19:49 | 3:45 | 3:38 | 1:04 | 25 | 0,04449 | 1,00016593 | 0,95568 |
| 9/6/21 12:21 | | | | ok | 9/6/21 22:31 | ok | 1:04 | 9/6/21 22:31 | 1:05 | 0:00 | 1:36 | 26 | 0,06728 | 1,00012292 | 0,93284 |
| 9/6/21 12:12 | | | | ok | 9/6/21 13:06 | ok | 0:53 | 9/6/21 14:51 | 2:38 | 1:45 | 13:41 | 27 | 0,57024 | 1,00009106 | 0,42985 |
| 9/6/21 15:35 | | | | ok | 9/6/21 15:56 | ok | 0:21 | 9/6/21 17:18 | 1:43 | 1:22 | 0:43 | 28 | 0,03003 | 1,00006746 | 0,97004 |
| 9/6/21 19:00 | | | | ok | 9/6/21 19:22 | ok | 0:22 | 9/6/21 22:08 | 3:08 | 2:45 | 1:41 | 29 | 0,07061 | 1,00004998 | 0,92944 |
| 10/6/21 11:18 | | | | ok | 10/6/21 11:53 | ok | 0:34 | 10/6/21 16:03 | 4:45 | 4:10 | 13:09 | 30 | 0,54847 | 1,00003702 | 0,45157 |
| 10/6/21 16:35 | | | | ok | 10/6/21 17:07 | ok | 0:32 | 10/6/21 17:44 | 1:08 | 0:36 | 0:31 | 31 | 0,02188 | 1,00002743 | 0,97815 |
| 10/6/21 18:13 | | | | ok | 10/6/21 18:42 | ok | 0:28 | 10/6/21 18:43 | 0:29 | 0:00 | 0:29 | 32 | 0,02051 | 1,00002032 | 0,97951 |
| 11/6/21 10:15 | | | | ok | 11/6/21 12:25 | ok | 0:52 | 11/6/21 12:25 | 2:10 | 1:17 | 15:32 | 33 | 0,64751 | 1,00001505 | 0,35251 |

Εικόνα 12: Απεικόνιση της αυτόματης καταγραφής των επιθυμητών δεδομένων που χρειαζόμαστε «outputs» σε κόκκινα πλαίσια.

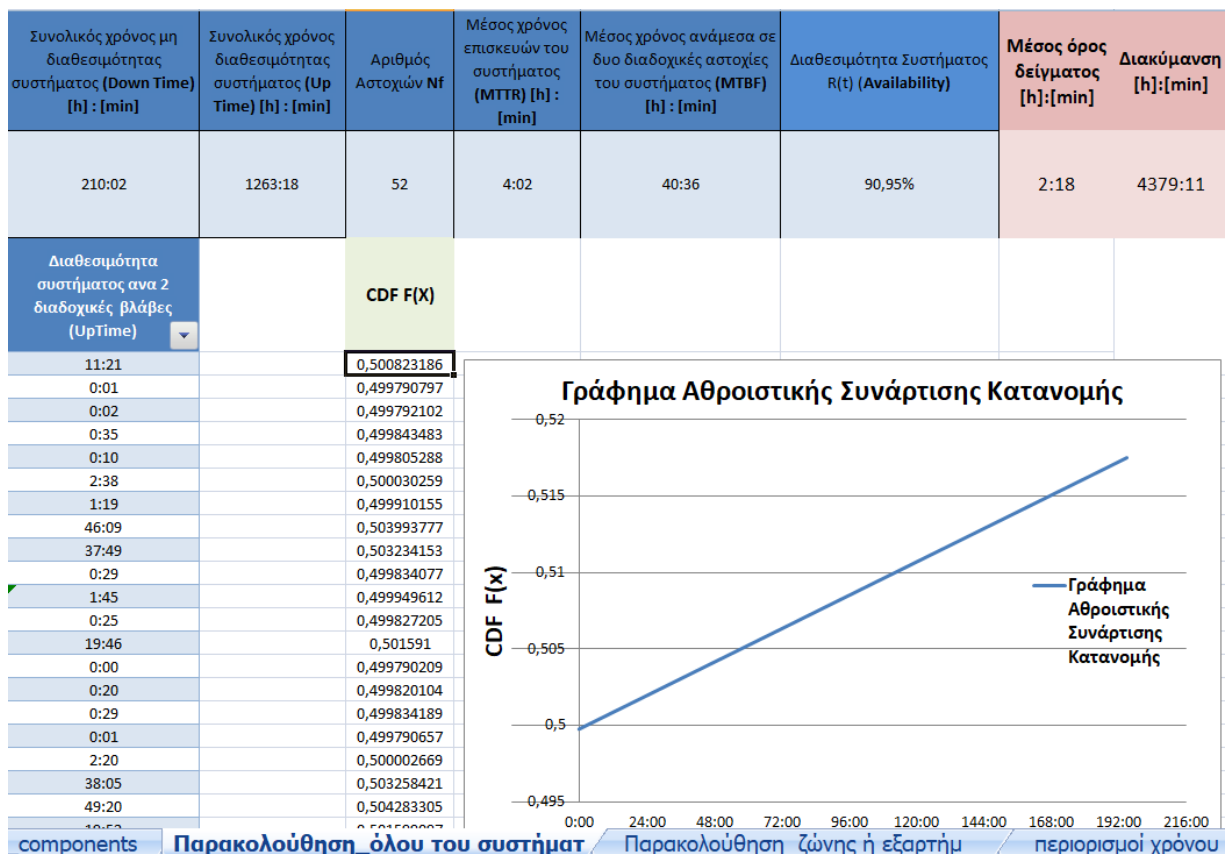
Τα «outputs» των παρατηρήσεων (κάθετες στήλες) συμπληρώνονται αυτοματοποιημένα κάθε φορά που ο χρήστης καταχωρεί το ακριβώς αριστερό «Input».

Τα «outputs» των υπολογιζόμενων δεικτών του συστήματος (οριζόντια στήλη) ανανεώνονται αυτόματα κάθε φορά που καταχωρούμε νέα δεδομένα.

6.2.2 Στο Στάδιο της Ανάλυσης Των Δεδομένων

Τα «outputs» που λαμβάνουμε κατά το στάδιο της ανάλυσης των δεδομένων είναι συνοπτικά τα παρακάτω:

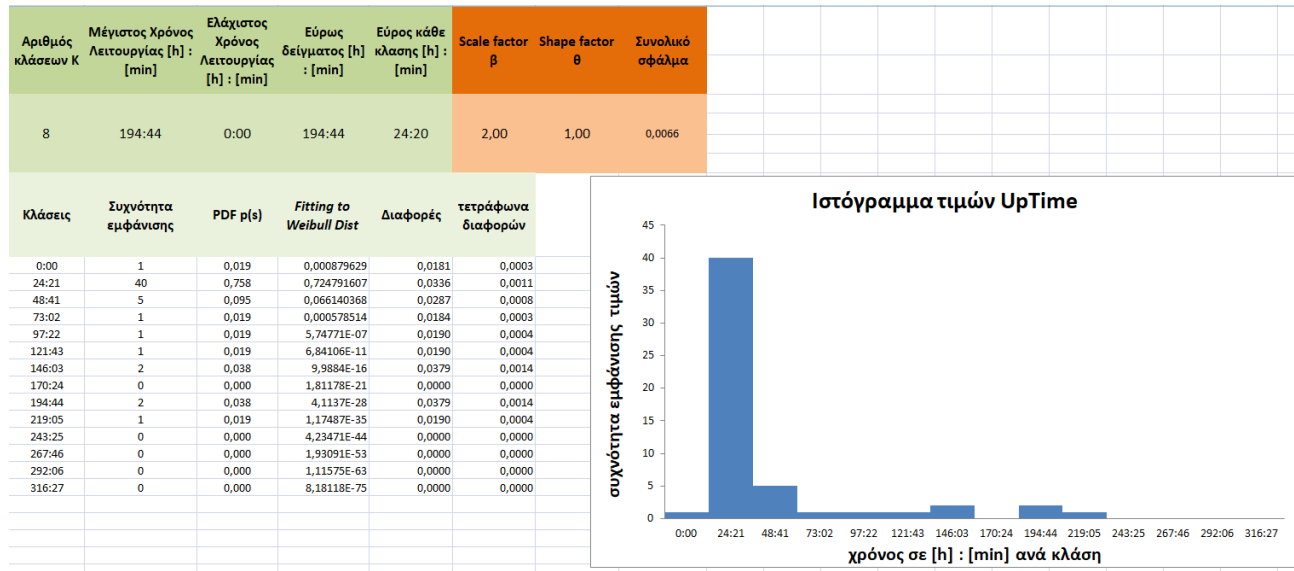
- Μέσος όρος δείγματος και διακύμανση όπως φαίνεται παρακάτω
- Δεδομένα αθροιστικής συνάρτησης κατανομής $F(t)$ και γραφική παράσταση αυτής



Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Εικόνα 13: Εμφάνιση των Outputs \bar{x} , s , CDF που προκύπτουν από το πρόγραμμα

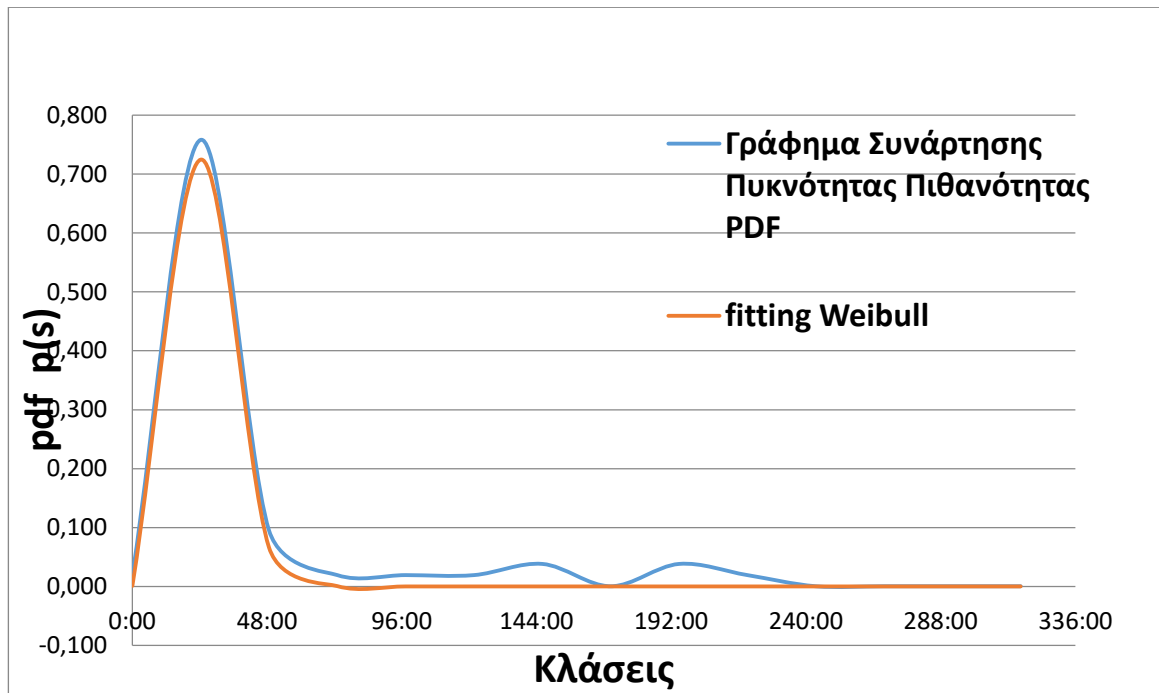
- Επίσης το πρόγραμμα μας δίνει ένα ιστόγραμμα κατανομής συχνοτήτων με τα δεδομένα να χωρίζονται αυτόματα, σε κλάσεις. Οι κλάσεις χωρίζονται σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει στην υποενότητα 4.3 και φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 14: Αυτόματος διαχωρισμός των δεδομένων (Up Time) σε κλάσεις και δημιουργία ιστογράμματος κατανομής συχνοτήτων

Κάθε φορά που προσθέτουμε καινούρια δεδομένα στα «inputs» κατά το στάδιο της συλλογής δεδομένων, το ιστόγραμμα ανανεώνεται αυτόματα.

- Ακόμη «Outputs» του προγράμματος αποτελούν οι στήλες : διαφορές, τετράγωνα διαφορών και συνολικό σφάλμα. Οι στήλες αυτές συμπληρώνονται αυτόματα μετά την είσοδο της συνάρτησης αναδρομής (fitted distribution). Οι υπολογισμοί αυτοί είναι απαραίτητοι προκειμένου να βρούμε τις διαφορές των πραγματικών δεδομένων με τα υποθετικά και να συνθέσουμε το συνολικό σφάλμα.
- Τέλος το πρόγραμμα μας δίνει τη γραφική συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας (PDF) των δεδομένων ζωής και την αντίστοιχη (PDF) της υποθετικής κατανομής σε κοινό γράφημα για την μεταξύ τους συσχέτιση.



Εικόνα 15: : Γραφική συσχέτιση δεδομένων ζωής PDF με μπλε και υποθετικής PDF με κόκκινο.

Όλα τα παραπάνω «outputs» είναι απαραίτητα για την επίτευξη του τελικού μας στόχου που είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων της κατανομής και η εξαγωγή της $R(t)$.

6.3 Επεξήγηση Υπολογισμών

6.3.1 Ταξινόμηση Εξαρτημάτων Ανά Ζώνη Συντήρησης

Στο φύλλο «excel» που συνοδεύει αυτήν την εργασία, αναπτύσσεται μια βάση δεδομένων από τα περισσότερα αεροπορικά εξαρτήματα που μπορεί να συναντήσουμε σε ένα ελικόπτερο τύπου Bell OH-58D Kiowa Warrior. Τα αεροπορικά αυτά εξαρτήματα έχουν βρεθεί από το τεχνικό εγχειρίδιο (**BHT-206L4-MM-1**) της κατασκευάστριας εταιρείας και έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με αυτή.

Η ταξινόμηση, σύμφωνα με τη κατασκευάστρια εταιρεία, περιλαμβάνει δέκα ζώνες συντήρησης οι οποίες τοποθετήθηκαν σε πίνακες στο «Microsoft Excel» και κάθε πίνακας περιλαμβάνει τα αντίστοιχα αεροπορικά εξαρτήματα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

την ομαλή λειτουργία του συστήματος απαιτείται η ομαλή λειτουργία όλων των ζωνών. Αυτό συνεπάγεται ότι η αξιοπιστία του συστήματος είναι ίση με το γινόμενο της αξιοπιστίας κάθε ζώνης.

Χρησιμοποιώντας τα φίλτρα του προγράμματος, μπορούμε να αναλύσουμε τα δεδομένα που συλλέγονται για κάθε ζώνη συντήρησης ξεχωριστά. Στις παρακάτω εικόνες εμφανίζεται η συλλογή και ανάλυση δεδομένων μιας μόνο ζώνης συντήρησης:

| Αύξον αριθμός παρατηρήσεων | Επιλογή Εργασίας Συντήρησης ή Επισκευής | Επιλογή εξαρτήματος | Ημ/νία-ώρα βλάβης ή έναρξης συντήρησης | Παραλαβή ανταλλακτικών | Ημερομηνία/ώρα ολοκλήρωσης των Logistics | Ολοκλήρωση Επισκευής | Χρόνος διάθεσης υλικών (LDT) | Ημ/νία-ώρα ολοκλήρωσης Επισκευής | Διάρκεια επισκευής της κάθε βλάβης (DownTime) | Εργατοώρες (Time to Repair) | Διαθεσιμότητα συστήματος ανα 2 διαδοχικές βλάβες (UpTime) |
|----------------------------|---|-----------------------------------|--|------------------------|--|----------------------|------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------------|---|
| 4 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper | 27/5/21 11:04 | ok | 27/5/21 11:05 | ok | 0:00 | 27/5/21 11:10 | 0:05 | 0:05 | 0:35 |
| 7 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper | 27/5/21 17:17 | ok | 27/5/21 17:18 | ok | 0:00 | 27/5/21 17:36 | 0:19 | 0:18 | 1:19 |
| 10 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Yoke | 31/5/21 12:13 | ok | 31/5/21 12:14 | ok | 0:00 | 31/5/21 13:25 | 1:11 | 1:10 | 0:29 |
| 11 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Trunnion and trunnion caps | 31/5/21 16:14 | ok | 31/5/21 16:22 | ok | 0:08 | 31/5/21 17:23 | 1:09 | 1:01 | 1:45 |
| 34 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Feathering bearings | 11/6/21 15:48 | ok | 12/6/21 9:27 | ok | 17:38 | 12/6/21 13:17 | 21:28 | 3:49 | 3:22 |
| 37 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper | 14/6/21 14:18 | ok | 14/6/21 14:44 | ok | 0:25 | 14/6/21 16:36 | 2:17 | 1:51 | 2:17 |
| 38 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Tail Rotor Gearbox Duplex Bearing | 14/6/21 16:37 | ok | 14/6/21 17:55 | ok | 1:17 | 14/6/21 18:58 | 2:20 | 1:02 | 0:00 |
| 39 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Balance wheel | 15/6/21 19:53 | ok | 16/6/21 9:59 | ok | 14:06 | 16/6/21 11:15 | 15:21 | 1:15 | 24:55 |
| 46 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Pitch horns | 31/7/21 19:42 | ok | 1/8/21 8:45 | ok | 13:03 | 1/8/21 9:31 | 13:49 | 0:46 | 0:57 |
| 50 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | tail rotor blades | 11/8/21 10:09 | ok | 11/8/21 20:03 | ok | 9:53 | 11/8/21 21:49 | 11:39 | 1:46 | 131:16 |
| 51 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Pitch horns | 17/8/21 10:06 | ok | 17/8/21 11:48 | ok | 1:41 | 17/8/21 14:57 | 4:50 | 3:08 | 132:17 |

Εικόνα 17: Ενεργοποίηση φίλτρου για τη συλλογή δεδομένων της ζώνης συντήρησης «Tail Rotor Assembly»

Με απλή αντιγραφή-επικόλληση μεταφέρουμε τα δεδομένα στη καρτέλα «Παρακολούθηση ζώνης ή εξαρτήματος» που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

| Πίνακας παρακολούθησης μιας μόνο ζώνης συντήρησης ή ενός εξαρτήματος | | | | Ορισμός ημ/νία-ώρας έναρξης παρακολούθησης του συστήματος | Ορισμός ημ/νία-ώρας λήξης παρακολούθησης του συστήματος | Συνολικός χρόνος παρακολούθησης εξαρτήματος (Planned Time) [h] : [min] | Συνολικός χρόνος μη διαθέσιμότητας εξαρτήματος (Down Time) [h] : [min] | Συνολικός χρόνος διαθεσιμότητας εξαρτήματος (Up Time) [h] : [min] | Αριθμός Απογώνιων (M) | Μέσος χρόνος επισκευών του εξαρτήματος (MTTR) | Μέσος χρόνος εκπτώσεως σε δύο διαδοχικές αστοχίες του εξαρτήματος (MTBF) | Διαθεσιμότητα Συστήματος (Availability) |
|---|--|--|--|---|---|--|--|---|-----------------------|---|--|---|
| 1. Χρησιμοποιώντας τα φίλτρα του πίνακα ολόκληρου του συστήματος (φίλτρο_1), μπορείτε να συγκεντρώσετε μόνο τα δεδομένα που επιθυμείτε για μελέτη. 2. Στη συνέχεια μεταφέρετε τα δεδομένα στον παρακάτω πίνακα με απλό copy-paste στη σωστή θέση. 3. Για ευκολία, κατά την επιλογή δεδομένων, αφού έχετε ενεργοποιήσει το φίλτρο που επιθυμείτε, επιλέξτε ως το πρώτο κελί πάνω αριστερά, πείτε «τις ημ/νίες-ώρας βλάβης και έπειτα στις ημ/νίες-ώρας βλάβης». 4. Μπορείτε με delete να οφθαλπίσετε όλα τα δεδομένα του κόκκινου πίνακα καθ' όσον εδών δεν υπάρχει συντήρησης στα κελιά. | | | | 26/5/21 0:00 | 31/8/21 0:00 | 2322:00 | 74:34 | 299:19 | 11 | 6:46 | 204:18 | 96,789% |

| Αύξον αριθμός παρατηρήσεων | Επιλογή Εργασίας Συντήρησης ή Επισκευής | Επιλογή εξαρτήματος | Ημ/νία-ώρα βλάβης ή έναρξης συντήρησης | Παραλαβή ανταλλακτικών | Ημερομηνία/ώρα ολοκλήρωσης των Logistics | Ολοκλήρωση Επισκευής | Χρόνος διάθεσης υλικών (LDT) | Ημ/νία-ώρα ολοκλήρωσης Επισκευής | Διάρκεια επισκευής της κάθε βλάβης (DownTime) | Εργατοώρες (Time to Repair) | Διαθεσιμότητα συστήματος ανα 2 διαδοχικές βλάβες (UpTime) |
|----------------------------|---|------------------------------|--|------------------------|--|----------------------|------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------------|---|
| 4 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper | 27/5/21 11:04 | ok | 27/5/21 11:05 | ok | 0:00 | 27/5/21 11:10 | 0:05 | 0:05 | 0:35 |
| 7 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper | 27/5/21 17:17 | ok | 27/5/21 17:18 | ok | 0:00 | 27/5/21 17:36 | 0:19 | 0:18 | 1:19 |
| 10 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Yoke | 31/5/21 12:13 | ok | 31/5/21 12:14 | ok | 0:00 | 31/5/21 13:25 | 1:11 | 1:10 | 0:29 |
| 11 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Trunnion and trunnion caps | 31/5/21 16:14 | ok | 31/5/21 16:22 | ok | 0:08 | 31/5/21 17:23 | 1:09 | 1:01 | 1:45 |
| 34 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Feathering bearings | 11/6/21 15:48 | ok | 12/6/21 9:27 | ok | 17:38 | 12/6/21 13:17 | 21:28 | 3:49 | 3:22 |
| 37 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper | 14/6/21 14:18 | ok | 14/6/21 14:44 | ok | 0:25 | 14/6/21 16:36 | 2:17 | 1:51 | 2:17 |
| 38 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rotor Gearbox Duplex Bearing | 14/6/21 16:37 | ok | 14/6/21 17:55 | ok | 1:17 | 14/6/21 18:58 | 2:20 | 1:02 | 0:00 |
| 39 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Balance wheel | 15/6/21 19:53 | ok | 16/6/21 9:59 | ok | 14:06 | 16/6/21 11:15 | 15:21 | 1:15 | 24:55 |
| 46 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Pitch horns | 31/7/21 19:42 | ok | 1/8/21 8:45 | ok | 13:03 | 1/8/21 9:31 | 13:49 | 0:46 | 0:57 |
| 50 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | tail rotor blades | 11/8/21 10:09 | ok | 11/8/21 20:03 | ok | 9:53 | 11/8/21 21:49 | 11:39 | 1:46 | 131:16 |
| 51 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Pitch horns | 17/8/21 10:06 | ok | 17/8/21 11:48 | ok | 1:41 | 17/8/21 14:57 | 4:50 | 3:08 | 132:17 |

Εικόνα 18: Ανάλυση αξιοπιστίας δεδομένων ζώνης «Tail Rotor Assembly» με το φύλλο υπολογισμών «Παρακολούθηση ζώνης ή εξαρτήματος»

Όπως είπαμε παραπάνω, στόχος του χρήστη είναι να ορίσει αρχικά ένα διάστημα παρακολούθησης του συστήματος (**Planned Time**) π.χ. 6 μήνες , και έπειτα κάθε φορά που θα πραγματοποιείται μια εργασία συντήρησης ή επισκευής, ο κάτοχος και χρήστης του προγράμματος θα πρέπει να ανοίγει το αρχείο καταχώρησης εργασιών και να εισάγει τα inputs στα αντίστοιχα κελία.

Η εισαγωγή πληροφοριών γίνεται στον πίνακα με πολύ εύκολο τρόπο καθώς οι ζώνες συντήρησης και τα αντίστοιχα εξαρτήματα κάθε ζώνης καταχωρούνται επιλέγοντας από μια λίστα τύπου «**drop down List**». Στην εικόνα που ακολουθεί εμφανίζεται η λίστα επιλογής των δέκα ζωνών επισκευής και της ζώνης συντήρησης (έντεκα επιλογές):

| Αύξον αριθμός παρατηρήσεων | Επιλογή Εργασίας Συντήρησης ή Επισκευής |
|----------------------------|---|
| 1 | SCHEDULED_INSPECTIONS |
| 2 | POWER_PLANT |
| 3 | AFT_TOP_DECK |
| 4 | TAILBOOM |
| 5 | CABIN_INTERIOR |
| 6 | FORWARD_FUSELAGE |
| 7 | AFT_FUSELAGE |
| 8 | LANDING_GEAR |
| 9 | SCHEDULED_INSPECTIONS |
| 10 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY |
| 11 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY |

index_of_components Παρακολούθηση_όλου του συστήματος

Εικόνα 19: Τρόπος επιλογής ζώνης συντήρησης-επισκευής με τη βοήθεια λίστα «drop down List».

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Όσον αφορά τα επιμέρους εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται κάθε ζώνη συντήρησης, αυτά έχουν εισαχθεί στις ζώνες συντήρησης που ανήκει το καθ' ένα κατ' αντιστοιχία, για να διευκολύνεται η εύρεση τους από το χρήστη. Δηλαδή η λίστα που αναπτύσσεται κατά την εύρεση ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι τύπου «dependable drop down list». Στην παρακάτω εικόνα

| Αύξον αριθμός παρατηρήσεων | Επιλογή Εργασίας Συντήρησης ή Επισκευής | Επιλογή εξαρτήματος |
|----------------------------|---|---------------------------------------|
| 1 | SCHEDULED_INSPECTIONS | Weekly_inspection |
| 2 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Mast nut |
| 3 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Trunnion |
| 4 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Trunnion |
| 5 | FORWARD_DECK | top deck |
| 6 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Mast nut |
| 7 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Rubber bumper |
| 8 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Mast nut |
| 9 | MAIN_ROTOR_SYSTEM | Pillow blocks |
| 10 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Yoke |
| 11 | TAIL_ROTOR_ASSEMBLY | Trunnion and trunnion caps |
| 12 | POWER_PLANT | engine pan |
| 13 | POWER_PLANT | airframe fuel filter |
| 14 | POWER_PLANT | rotor brake |
| 15 | POWER_PLANT | engine inlet bellmouth |
| 16 | CABIN_INTERIOR | flight control tubes inside roof beam |
| 17 | CABIN_INTERIOR | instrument panel |
| 18 | CABIN_INTERIOR | roof beam access panels |
| 19 | FORWARD_FUSELAGE | Hinges |

Εικόνα 20: : Στην ζώνη « MAIN ROTOR SYSTEM» η λίστα εξαρτημάτων προς επιλογή είναι διαφορετική σε σχέση με τη λίστα εξαρτημάτων από την ζώνη «POWER PLANT»

Στη συνέχεια, ο χρήστης το μόνο που έχει να κάνει είναι να ανοίγει το πρόγραμμα και να εισάγει στα αντίστοιχα κελία στις εργασίες που ολοκληρώνονται διαδοχικά. Δηλαδή εισάγοντας «οκ» τη στιγμή που παραλαμβάνει κάποιο ανταλλακτικό απαραίτητο για την ολοκλήρωση της επισκευής, και στη συνέχεια ξανά «οκ» ακριβώς μετά την ολοκλήρωση της επισκευής. Έτσι ολοκληρώνεται και κλίνει μια εργασία ενώ έχουν καταγραφεί αυτόματα οι χρόνοι που δαπανήθηκαν για την παραλαβή των ανταλλακτικών, την ολοκλήρωση της επισκευής κτλ.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η αυτόματη καταχώρηση ημερομηνία και ώρας γίνεται από απλές συναρτήσεις του «Excel» ενώ η ενεργοποίηση της καταγραφής γίνεται με λογικά τέστ στο «Excel». Ένα παράδειγμα της έκφρασης που χρησιμοποιείται φαίνεται παρακάτω:

`IF(D8<>""; IF(E8<>""; E8;NOW()); "")`

Συνεπώς με αυτή την απλή διαδικασία καταγράφονται από το πρόγραμμα οι ακριβείς χρόνοι ανά επισκευαστικό στάδια (Διάγνωση Βλάβης - Παραγγελία Ανταλλακτικών - Τελική Επισκευή).

6.3.3 Υπολογισμός MTTR - MTBF

Η συλλογή αξιόπιστων δεδομένων χρόνου είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία που μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τους δείκτες που εκφράζουν την συνολική αξιοπιστία του συστήματος. Στον επόμενο πίνακα εμφανίζονται υπολογισμένοι οι απαραίτητοι δείκτες για την ανάλυση αξιοπιστίας του συστήματος:

Πίνακας 7: Παράδειγμα υπολογισμένων δεικτών του συστήματος

| Συνολικός χρόνος παρακολούθησης συστήματος (Planned Time) [h] : [min] | Συνολικός χρόνος μη διαθεσιμότητας συστήματος (Down Time) [h] : [min] | Συνολικός χρόνος διαθεσιμότητας συστήματος (Up Time) [h] : [min] | Αριθμός Αστοχιών Nf | Μέσος χρόνος επισκευών του συστήματος (MTTR) [h] : [min] | Μέσος χρόνος ανάμεσα σε δυο διαδοχικές αστοχίες του συστήματος (MTBF) [h] : [min] | Διαθεσιμότητα Συστήματος R(t) (Availability) |
|---|---|--|---------------------|--|---|--|
| 2322:00 | 201:42 | 1798:11 | 51 | 3:57 | 41:34 | 91,31% |

Ο συνολικός χρόνος παρακολούθησης του συστήματος «Planned Time» υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα ως η διαφορά :

[Χρόνος Λήξη παρακολούθησης συστήματος – Χρόνος έναρξη παρακολούθησης συστήματος]

Ο συνολικός χρόνος μη διαθεσιμότητας του συστήματος (Down-Time DT) είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο συμβαίνει μια βλάβη στο σύστημα και διαρκεί μέχρι την αποκατάσταση της βλάβης συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου των «Logistics». Το συνολικό «Down-Time» του συστήματος είναι το άθροισμα των επιμέρους χρονικών διαστημάτων που το σύστημα δεν είναι διαθέσιμο «Down».

Συνεπώς:

- $DT = \text{SUM}(\text{Πίνακας12}[\text{Διάρκεια επισκευής της κάθε βλάβης (Down-Time)}])$
- Τα επιμέρους χρονικά διαστήματα που υπολογίζονται στη στήλη (Down-Time DT) υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα με την εντολή:

=IF(J9<>"";IF(K9<>"";K9;(J9-E9));"")

Όπου: J9: ημ/νια- ώρα ολοκλήρωσης της επισκευής
E9: ημ/νια- ώρα βλάβης

Ο συνολικός χρόνος διαθεσιμότητας «Up-Time UT» είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σύστημα είναι διαθέσιμο (Run as New). Το πρόγραμμα υπολογίζει το συνολικό «Up-Time» του συστήματος, αθροίζοντας τα επιμέρους χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές βλάβες (από τη στιγμή που ολοκληρώνεται μία επισκευή μέχρι τη στιγμή που το σύστημα θα ξανά εμφανίζει βλάβη).

Συνοψώς:

- $UP = \text{SUM}(\text{Πίνακας}_{12}[\text{Διαθεσιμότητα συστήματος ανά 2 διαδοχικές βλάβες (UpTime)}])$
- Τα επιμέρους χρονικά διαστήματα που υπολογίζονται στη στήλη Εργατώρες (Time to Repair) υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα με την εντολή:

$=\text{IF}(J9<>"";\text{IF}(L9<>"";L9;(E9-J8));"")$

Όπου: J8: ημ/νια- ώρα ολοκλήρωσης της επισκευής

E9: ημ/νια- ώρα βλάβης της αμέσως επόμενης εμφάνισης βλάβης

Οι συνολικός αριθμός αστοχιών (Number of failures N_f) είναι ο αριθμός των αστοχιών που παρατηρούνται συνολικά για το σύστημα μέσα στο χρόνο παρακολούθησης (Planned Time).

Ο μέσος χρόνος επισκευών του συστήματος (MTTR) είναι ουσιαστικά ο μέσος χρόνο αποκατάστασης των βλαβών του συστήματος. Υπολογίζεται ως το πηλίκο του συνολικού «Down Time» του συστήματος προς τον αριθμό των βλαβών N_f .

Ο μέσος χρόνος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αποτυχίες του συστήματος (MTBF) είναι στην πράξη ο μέσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών αστοχιών και υπολογίζεται ως το πηλίκο:

$$\frac{PT - DT}{N_f}$$

Τέλος η διαθεσιμότητα του συστήματος $R(t)$ υπολογίζεται κατά προσέγγιση ως :

$$R(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Στο σημείο αυτό να πούμε ότι μια σωστότερη και πιο ακριβής εκτίμηση της διαθεσιμότητας του συνολικού συστήματος είναι η εύρεση των επιμέρους διαθεσιμοτήτων κάθε ζώνης και ο υπολογισμός του παρακάτω γινομένου:

$$R(t)_{tot} = R(t)_1 * R(t)_2 \dots R(t)_{10}$$

Αυτή η λύση ωστόσο απαιτεί περισσότερα δεδομένα.

7. Θραυσεομηχανική (Fracture Mechanics)

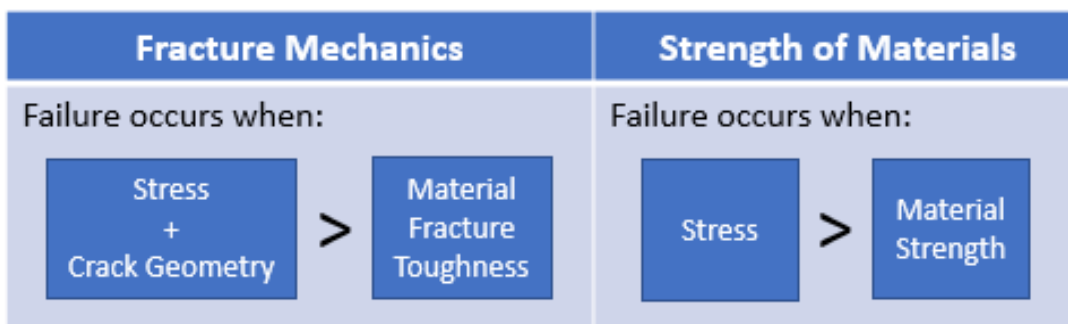
Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε μερικές από τις βασικές αρχές που διέπουν την μηχανική συμπεριφορά μεταλλικών υλικών που περιέχουν ρήγματα (cracks). Θα εξετάσουμε δηλαδή τις βασικές αρχές του κλάδου της μηχανικής που ασχολείται με τη θραύση και είναι γενικότερα γνωστός με τον όρο θραυσεομηχανική (fracture mechanics).

7.1 Εισαγωγή Στην Μηχανική Αστοχία Εξαρτημάτων

Στη μηχανική αστοχία, ένας παράγοντας έντασης τάσης υπολογίζεται ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης, του μεγέθους ρωγμών και της γεωμετρίας εξαρτήματος. Η αστοχία εμφανίζεται όταν ο παράγοντας έντασης τάσης υπερβεί τη σκληρότητα του σημείου θραύσης του υλικού. Σε αυτό το σημείο η ρωγμή θα αναπτυχθεί με γρήγορο και ασταθές τρόπο μέχρι τη θραύση.

Η παραδοσιακή προσέγγιση για το σχεδιασμό και την ανάλυση ενός εξαρτήματος γίνεται με τη χρήση εννοιών αντοχής υλικών. Στην περίπτωση αυτή, υπολογίζονται οι τάσεις που οφείλονται στην εφαρμοζόμενη φόρτιση. Η αστοχία εκτιμάται ότι θα συμβεί όταν η εφαρμοζόμενη τάση υπερβεί την αντοχή του υλικού (είτε αντοχή απόδοσης είτε τελική αντοχή, ανάλογα με τα κριτήρια αστοχίας).

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται σχηματικά οι δυο προσεγγίσεις που περιγράψαμε παραπάνω και οι οποίες οδηγούν σε αστοχία του εξαρτήματος.



Εικόνα 21: Συνθήκες που πρέπει να ισχύουν ώστε να επέλθει αστοχία του εξαρτήματος. Πηγή [22]

Η μηχανική αστοχία είναι σημαντική για τους παρακάτω λόγους:

- Οι ρωγμές εμφανίζονται πολύ πιο συχνά από ό, τι αναμένουμε. Οι ρωγμές μπορεί είτε να προϋπάρχουν σε ένα μέρος, είτε να αναπτυχθούν λόγω κόπωσης και υψηλής τάσης.

- Συνήθως, καθώς αυξάνεται η αντοχή ενός υλικού, μειώνεται η αντοχή του σε θραύση. Η διαίσθηση πολλών μηχανικών να προτιμούν υλικά υψηλότερης αντοχής μπορεί να οδηγήσει σε μη ασφαλή λειτουργία [22].
- Η παράβλεψη της μηχανικής θραύσης μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία εξαρτημάτων σε φορτία κάτω από το αναμενόμενο χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση αντοχής των υλικών.
- Η αστοχία λόγω ψαθυρής θραύσης είναι γρήγορη, καταστροφική και μη προβλέψιμη.

7.2 Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών

Η μηχανική αστοχία των υλικών είναι μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη και τη διάγνωση της αποτυχίας ενός εξαρτήματος με μια υπάρχουσα ρωγμή ή ελάττωμα. Η παρουσία ρωγμής σε ένα εξάρτημα αυξάνει την τάση κοντά στην ρωγμή και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία πριν από αυτήν που προβλέφθηκε χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους αντοχής των υλικών.

7.2.1 Θραύση

Θραύση (fracture) ονομάζεται ο διαχωρισμός, ή θρυμματισμός, ενός στερεού σώματος σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, κάτω από την επίδραση μηχανικών τάσεων. Η διαδικασία της θραύσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο διακριτά στάδια:

- την πυρήνωση (initiation) και
- την προώθηση (propagation) ρηγμάτων [23].

Η θραύση των υλικών γενικά διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Την όλκιμη (ductile)
- Την ψαθυρή (brittle).

Η όλκιμη θραύση χαρακτηρίζεται από το μεγάλο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό, πριν και κατά τη διάρκεια προώθησης των ρηγμάτων, τα οποία τελικά επιφέρουν τη θραύση.

Αντίθετα, η ψαθυρή θραύση χαρακτηρίζεται από την μεγάλη ταχύτητα με την οποία προωθούνται τα ρήγματα στο υλικό, χωρίς να προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση. Η πιθανότητα εμφάνισης ψαθυρής

θραύσης αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας, με αύξηση της ταχύτητας φόρτισης και με την παρουσία εγκοπών ή άλλων ασυνεχειών στο υλικό.

Η ψαθυρή θραύση, ακριβώς επειδή συμβαίνει ακαριαία και χωρίς προειδοποίηση, είναι συνήθως ιδιαίτερα καταστροφική και ο σχεδιασμός κατασκευών πρέπει να γίνεται με βασικό κριτήριο την αποφυγή της [24].

7.2.2 Συγκέντρωση Τάσεων σε Ασυνέχειες

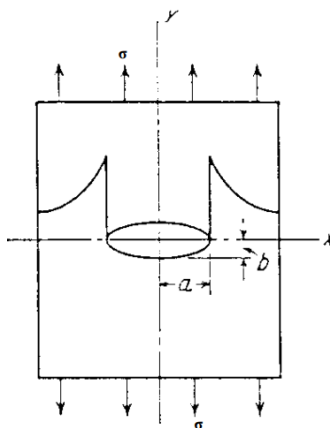
Η ύπαρξη μιας γεωμετρικής ασυνέχειας σε ένα υλικό, όπως για παράδειγμα μία τρύπα ή μία εγκοπή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ανομοιόμορφης κατανομής των τάσεων κοντά στην περιοχή της ασυνέχειας. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στην ασυνέχεια οι τάσεις έχουν πολύ μεγαλύτερη τιμή, από ότι σε σημεία του υλικού που βρίσκονται μακριά από την ασυνέχεια. Επομένως, στις περιοχές ασυνέχειας του υλικού εμφανίζεται συγκέντρωση τάσεων (stress concentration).

Η ποσοτικοποίηση της συγκέντρωσης τάσεων γίνεται με τη χρήση ενός θεωρητικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων, K_t . Γενικά, ο συντελεστής K_t εκφράζει τον λόγο της μέγιστης τάσης που εμφανίζεται κοντά στην ασυνέχεια, ως προς την τάση που επικρατεί μακριά από αυτήν. Ο συντελεστής K_t ορίζεται ως εξής:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

Εκτός του ότι μία ασυνέχεια δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων κοντά της, μεταβάλλει τοπικά και την εντατική κατάσταση του υλικού. Ακόμη δηλαδή και αν γενικά στο υλικό η εντατική κατάσταση είναι απλός μονοαξονικός εφελκυσμός, κοντά στην ασυνέχεια η εντατική κατάσταση γίνεται σύνθετη (διαξονική ή τριαξονική).

Μία ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι αυτή του παρακάτω Σχήμα 5, όπου έχουμε ένα έλασμα σε μονοαξονικό εφελκυσμό, στο οποίο υπάρχει ελλειψοειδής εγκοπή με ημιάξονες a και b [23].



Σχήμα 5: Έλασμα με ελλειψοειδή εγκοπή σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Πηγή [24]

Η μέγιστη τάση στα άκρα της εγκοπής δίδεται από τη σχέση:

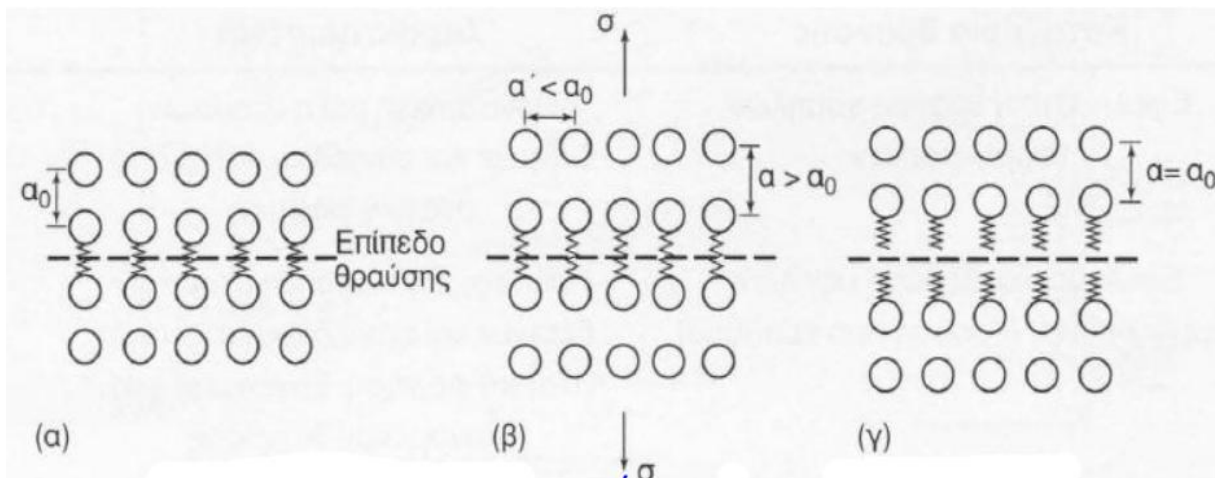
$$\sigma_{max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right)$$

Παρατηρούμε ότι όταν $a = b$ (όταν δηλαδή έχουμε κυκλική οπή) τότε $\sigma_{max} = 3\sigma$,

Δυστυχώς, αναλυτικές λύσεις για τον καθορισμό της συγκέντρωσης τάσεων υπάρχουν διαθέσιμες μόνο για πολύ απλές γεωμετρίες ασυνεχειών και για σχετικά απλές εντατικές καταστάσεις, σαν αυτή που είδαμε παραπάνω.

7.2.3 Θεωρητική Αντοχή Θραύσης

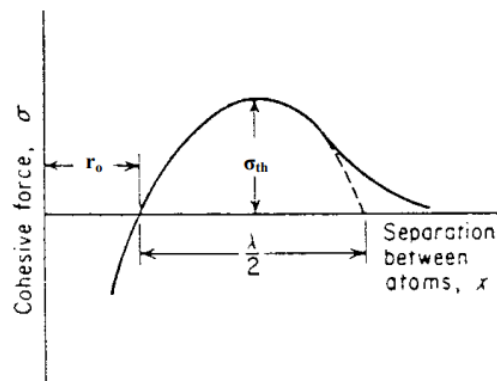
Τα μεταλλικά υλικά έχουν τεράστια τεχνολογική αξία, επειδή καταφέρνουν να συνδυάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό υψηλή μηχανική αντοχή και ολκιμότητα. Γενικά, η υψηλή αντοχή των μετάλλων οφείλεται στις δυνάμεις συνοχής (cohesive forces) που αναπτύσσονται μεταξύ των ατόμων τους. Οι δυνάμεις συνοχής είναι ουσιαστικά οι δυνάμεις του χημικού δεσμού μεταξύ των ατόμων, οι οποίες αντιστέκονται στις εξωτερικές δυνάμεις και προσπαθούν να συγκρατήσουν τα άτομα στις θέσεις ισορροπίας τους [24].



Εικόνα 22: Ατομικό μοντέλο θραύσης υπό την επίδραση εφελκυστικής τάσης.

(α) δομή ισορροπίας, (β) η ενδοατομική απόσταση ισορροπίας a_0 διαταράσσεται λόγω της επιβολής εφελκυστικής τάσης, (γ) κατά τη θραύση, η τάση αποσύρεται και τα άτομα επιστρέφουν στην αρχική απόσταση ισορροπίας, ενώ τα επίπεδα θραύσης έχουν πλέον δημιουργηθεί.

Δύο άτομα κανονικά ισορροπούν σε απόσταση r_0 (θέση ισορροπίας), όπου εκεί η δύναμη συνοχής μηδενίζεται. Αν κάποιος προσπαθήσει να απομακρύνει τα άτομα από τη θέση αυτή, επιβάλλοντας για παράδειγμα ένα εξωτερικό εφελκυστικό φορτίο, τότε ο χημικός δεσμός που τα συνδέει προβάλλει αντίσταση και η δύναμη συνοχής αυξάνεται Σχήμα 6. Σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση διαχωρισμού η δύναμη συνοχής παίρνει μία μέγιστη τιμή (σ_{th}). Αν η απόσταση των ατόμων αυξηθεί ακόμη περισσότερο, η δύναμη συνοχής μειώνεται και μετά από κάποια απόσταση μηδενίζεται, γεγονός που υποδηλώνει το “σπάσιμο” του δεσμού.



Σχήμα 6: Μεταβολή δύναμης συνοχής δύο ατόμων ανάλογα με την απόσταση που τα χωρίζει πηγή [23]

Επομένως, η σ_{th} εκφράζει ουσιαστικά την θεωρητική αντοχή σε θραύση ενός υλικού. Για να πραγματοποιηθεί η θραύση πρέπει η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση να ξεπεράσει την σ_{th} .

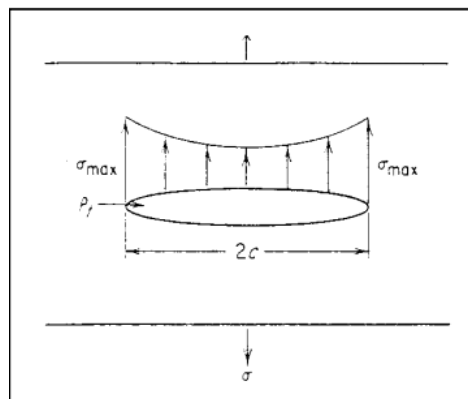
Η θεωρητική αντοχή σε θραύση των περισσότερων υλικών έχει υπολογιστεί προσεγγιστικά σε $\sigma_{th} \approx E/10$, όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού [24].

Στην πραγματικότητα όμως, τα περισσότερα υλικά υφίστανται θραύση σε τάσεις από 10 έως και 1000 φορές μικρότερες από την σ_{th} . Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα πραγματικά υλικά περιέχουν ρήγματα, στα οποία εμφανίζεται μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Έτσι, παρότι γενικά σε μία κατασκευή οι τάσεις μπορεί να είναι πολύ μικρότερες από την σ_{th} , κοντά στα ρήγματα οι τοπικές τάσεις είναι δυνατόν να ξεπερνούν την σ_{th} , με αποτέλεσμα να επέρχεται ψαθυρή θραύση του υλικού [24].

Το πόσο πολύ εξασθενεί την αντίσταση ενός υλικού σε θραύση η παρουσία ρηγμάτων μπορεί να φανεί με ένα απλό παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα μεγάλο έλασμα που καταπονείται σε μονοαξονικό εφελκυσμό, στο οποίο υπάρχει ένα ελλειψοειδές ρήγμα Σχήμα 7. Το ρήγμα έχει μήκος $2a$ και η ακτίνα καμπυλότητας στις αιχμές του είναι ρ_t . Σύμφωνα με τα όσα είπαμε σε προηγούμενη παράγραφο, κοντά στο ρήγμα υπάρχει συγκέντρωση τάσεων. Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στις αιχμές του ρήγματος και ισούται με:

$$\sigma_{max} = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{\alpha}{\rho_t}} \right) \approx 2\sigma \sqrt{\frac{\alpha}{\rho_t}}$$

Επομένως, εάν το ρήγμα είναι αρκετά αιχμηρό (δηλαδή αν $\rho_t \ll \alpha$) η σ_{max} μπορεί εύκολα να πάρει πολύ μεγάλη τιμή, ακόμη και αν η τάση (σ) μακριά από το ρήγμα είναι μικρή [24].

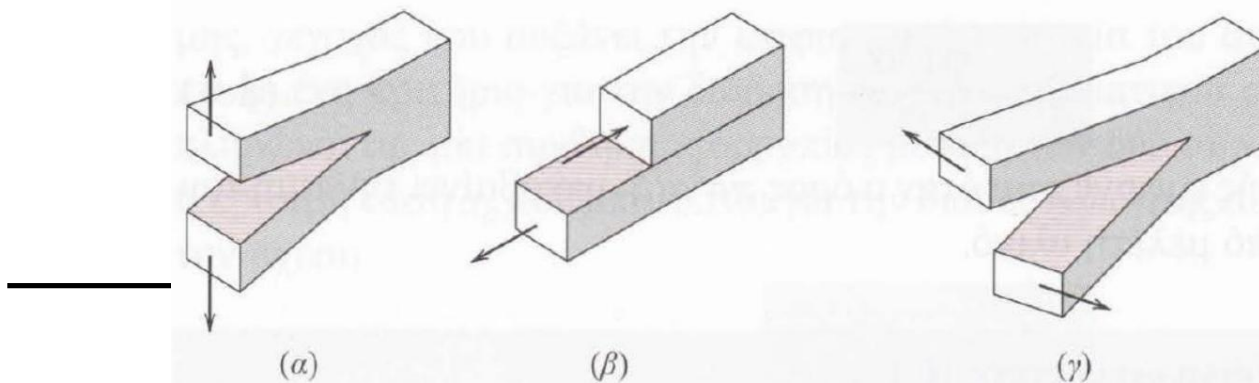


Σχήμα 7: Έλασμα με ελλειψοειδές ρήγμα που καταπονείται σε μονοαξονικό εφελκυσμό,

7.3 Μηχανισμοί και Κατηγορίες Θραύσης

7.3.1 Τύποι Ανάπτυξης Ρωγμών

Οι τρεις τύποι μετατόπισης των επιφανειών ρωγμής φαίνονται στο επόμενο σχήμα [23]:



Εικόνα 23: (α) Τύπος I, ανοικτός (ή τύπος διάνοιξης) ή εφελκυστικός τύπος, (β) τύπος II, τύπος ολίσθησης και (γ) τύπος III, αποσχιστικός τύπος

7.3.2 Διάδοση Ρωγμών

Μία ρωγμή κατά τη διάδοση της στο εσωτερικό του υλικού ακολουθεί:

- Ενδοκρυσταλλική πορεία (transgranular path)
- Περικρυσταλλική πορεία (intergranular path)
- Συνδυασμό ενδοκρυσταλλικής-περικρυσταλλικής πορείας.

Στην ενδοκρυσταλλική θραύση, η ρωγμή οδεύει αποκλειστικά στο εσωτερικό των κόκκων, ακολουθώντας χαρακτηριστικά επίπεδα ελαττωμένης αντοχής μέσα στους κόκκους.

Στην περικρυσταλλική θραύση, η ρωγμή οδεύει πάνω στα όρια των κόκκων, αφήνοντας το εσωτερικό τους ανέπαφο. Η πορεία αυτή ακολουθείται όταν υπάρχει διαφοροποίηση στην αντοχή των ορίων σε σύγκριση με εκείνη του εσωτερικού των κόκκων. Πολύ συχνά, μια ρωγμή μπορεί να ακολουθεί μικτή πορεία κατά την επέκτασή της [24].

7.3.3 Κατηγορίες Θραύσης

Ένα υλικό μπορεί να υποστεί θραύση κατά πολλούς τρόπους, πάντα σε συνάρτηση με τις εξωτερικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία, καταπόνηση, ρυθμός παραμόρφωσης αλλά και εξωτερικό περιβάλλον. Οι κύριες κατηγορίες θραύσης παρουσιάζονται παρακάτω:

- Εφελκυστική θραύση
- Εφελκυστική θραύση υψηλών θερμοκρασιών ή θραύση ερπυσμού
- Κόπωση
- Περιβαλλοντική θραύση

Η εφελκυστική θραύση είναι ο διαχωρισμός, κάτω από την επίδραση στατικής φόρτισης, ατομικών δεσμών και επιπέδων, τα οποία ονομάζονται επίπεδα θραύσης. Εάν η διαδικασία αυτή συντελείται σε υψηλή θερμοκρασία, τότε υποβοηθείται από τις μετακινήσεις ατόμων λόγω διάχυσης και ονομάζεται εφελκυστική θραύση υψηλών θερμοκρασιών ή θραύση από ερπυσμό [24].

Όταν η φόρτιση που υφίσταται το υλικό μεταβάλλεται με το χρόνο (περιοδική ή κυκλική μεταβολή της τάσης), η θραύση του ονομάζεται θραύση από κόπωση. Πολλές φορές, η θραύση αυτή συντελείται για τιμές τάσεων κάτω από το όριο διαρροής του υλικού.

Η περιβαλλοντική θραύση οφείλεται στη συνέργεια της τάσης και του περιβάλλοντος λειτουργίας. Τέτοιες περιπτώσεις θραύσης που συναντώνται πολύ συχνά είναι [24]:

- η ψαθυροποίηση από το υδρογόνο
- η ψαθυροποίηση λόγω υγρού μετάλλου
- η διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση

7.4 Υπολογισμός Συγκέντρωσης Τάσεων Μέσω Του SIF

Όπως αναλύσαμε και προηγουμένως, οι ρωγμές δρουν αυξητικά στην τάση που δέχεται ένα εξάρτημα. Η τάση αυτή κατανέμεται γύρω από τη ρωγμή στον περιβάλλοντα χώρο του υλικού και προκαλεί πλαστική παραμόρφωση τοπικά. Αυτή η περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης ονομάζεται πλαστική ζώνη. Η πλαστική παραμόρφωση προκαλεί άμβλυνση του άκρου ρωγμής που αυξάνει την ακτίνα καμπυλότητας.

Λόγω των προβλημάτων της μοναδικότητας της τάσης που αναπτύσσεται σε κάθε φόρτιση και συνακόλουθη ανάπτυξη πλαστικής ζώνης, η χρήση της μεθοδολογίας της συγκέντρωσης τάσεων καθιστά δύσκολη στην προσέγγιση του προβλήματος.

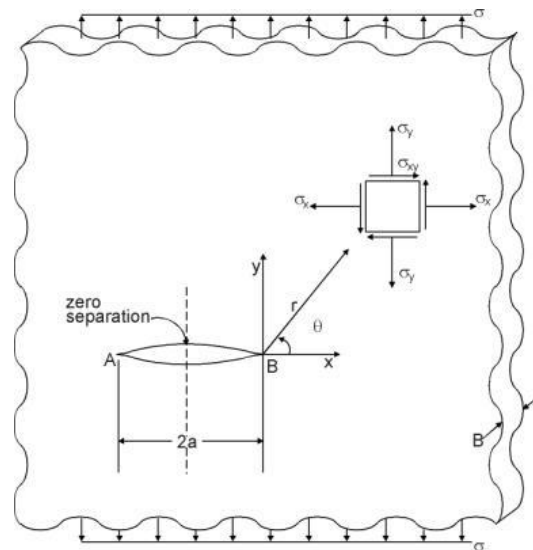
Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί άλλες μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό των τάσεων κοντά στο άκρο της ρωγμής. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται σήμερα είναι ο υπολογισμός ενός παράγοντα έντασης τάσης Κ_c.

Ο παράγοντας έντασης τάσης είναι μια χρήσιμη ιδέα για το χαρακτηρισμό του πεδίου τάσης κοντά στο άκρο της ρωγμής.

7.4.1 Ορισμός του Συντελεστή Έντασης Τάσης (SIF)

Για τη φόρτωση λειτουργίας Ι **Εικόνα 23**, οι γραμμικές-ελαστικές τάσεις προς την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης κοντά σε ένα ιδανικά αιχμηρό άκρο ρωγμής, μπορούν να υπολογιστούν ως συνάρτηση της θέσης σε σχέση με το άκρο ρωγμής που εκφράζεται σε πολικές συντεταγμένες ως:

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots$$



Σχήμα 8: Βοηθητικό σχήμα απεικόνισης πολικών συντεταγμένων των τάσεων που αναπτύσσονται στην άκρη μιας ρωγμής. πηγή [25]

Στο σημείο αυτό μπορούμε να ορίσουμε έναν συντελεστή $K = \sigma\sqrt{\pi a}$ ο οποίος αποκαλείται συντελεστής έντασης τάσης (SIF). Ο συντελεστής έντασης τάσης για μια ρωγμή λειτουργίας l γράφεται ως K_{IC} .

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση για τον συντελεστή έντασης τάσης, η αρχική εξίσωση τάσης σ_y κοντά στην ιδανικά αιχμηρή άκρη ρωγμής μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots$$

Και για $\theta=0$ προκύπτει:

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}}$$

Για την επέκταση της περίπτωσης του ιδανικού αιχμηρού άκρου ρωγμών σε καταστάσεις με πραγματικές γεωμετρικές ρωγμών, ο παράγοντας έντασης τάσης μπορεί να γενικευθεί ως εξής:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Όπου:

a είναι το μέγεθος της ρωγμής και

Y είναι ένας γεωμετρικός παράγοντας χωρίς διάσταση που εξαρτάται από τη γεωμετρία της ρωγμής, τη γεωμετρία του τμήματος και τη διαμόρφωση φόρτωσης.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι επειδή οι εξισώσεις που περιγράφουν το γραμμικό-ελαστικό πεδίο τάσης χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της σχέσης του παράγοντα έντασης τάσης παραπάνω, η έννοια του παράγοντα έντασης τάσης ισχύει μόνο εάν η περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης κοντά στο άκρο της ρωγμής είναι μικρή [22].

7.5 Κόπωση (Fatigue)

Η θραύση από κόπωση θεωρείται ως η πλέον σοβαρή περίπτωση αστοχίας εξαρτημάτων μηχανών αλλά και κατασκευών, διότι μπορεί να συμβεί υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής (κατασκευής) και χωρίς υπερφόρτωση. Είναι ιδιαίτερα ύπουλη περίπτωση αστοχίας, διότι συμβαίνει χωρίς κάποια εμφανή προειδοποίηση.

Εάν οι συνθήκες λειτουργίας δεν είναι κανονικές, αλλά συνδυάζονται με πρόσθετες επιβαρυντικές καταστάσεις (π.χ. υπερφορτίσεις του εξαρτήματος ή ύπαρξη διαβρωτικού περιβάλλοντος), η πιθανότητες αστοχίας του εξαρτήματος από κόπωση αυξάνονται σημαντικά.

Σύμφωνα με τον περισσότερο αποδεκτό διεθνώς ορισμό της αστοχίας από κόπωση: Πρόκειται για το φαινόμενο, το οποίο οδηγεί στη θραύση ενός εξαρτήματος, μετά από καταπόνηση του σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση, σε τάση, η μέγιστη τιμή της οποίας δεν υπερβαίνει την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού [24].

Η εξέλιξη της θραύσης από κόπωση γίνεται σε τρία διακριτά στάδια [24]:

- Στάδιο I: Έναρξη (origin) του φαινομένου
- Στάδιο II: Προώθηση (propagation) της ρωγμής
- Στάδιο III: Τελική θραύση

7.5.1 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Κόπωσης

- Μέγιστη τάση σ_{max}

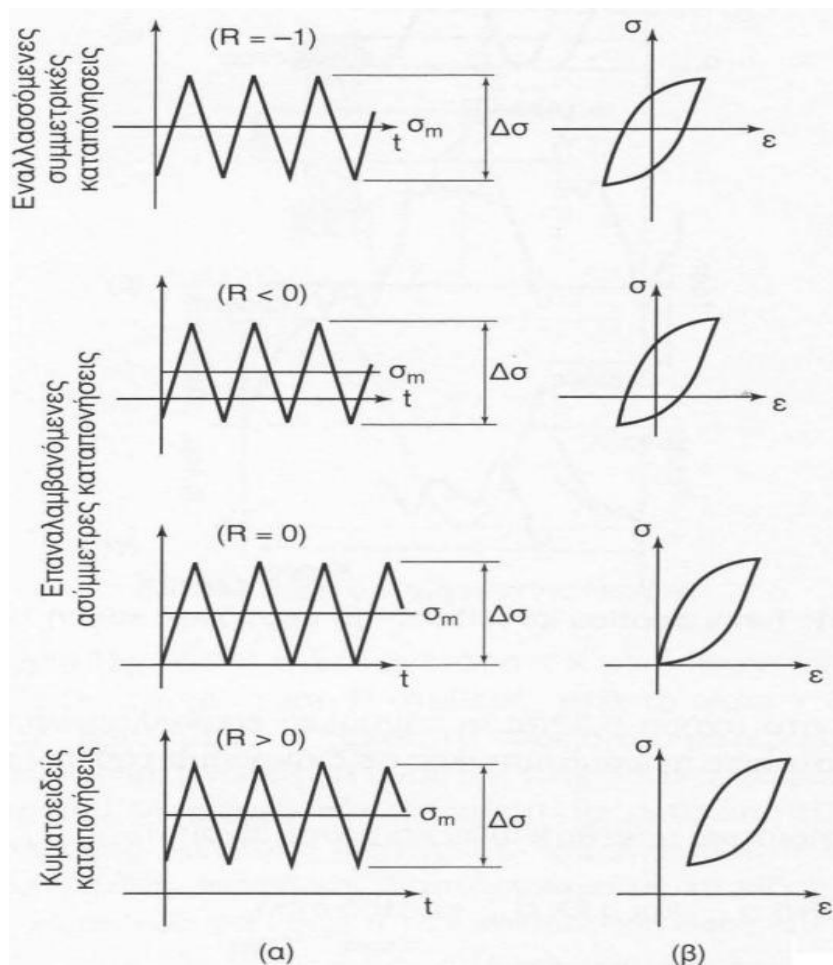
Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

- Ελάχιστη τάση σ_{min}
- Μέση Τάση $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$
- Πλάτος Εναλλασσόμενης τάσης $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$
- Μεταβολή Καταπόνησης $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$
- Λόγος Καταπόνησης $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$
- Συχνότητα Φόρτισης f

7.5.2 Είδη Κόπωσης

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά μεγέθη των επιβαλλόμενων φορτίων, οι δοκιμές κόπωσης διακρίνονται σε:

- Εναλλασσόμενες συμμετρικές, όταν $\sigma_m = 0$ και $R = -1$
- (Ασύμμετρες επαναλαμβανόμενες, όταν $0 < \sigma_m < \sigma_a$ και $-1 < R < 0$ ή $\sigma_m = \sigma_a$ και $R = 0$)
- Κυματοειδείς, όταν $\sigma_m > \sigma_a$ και $0 < R < 1$.



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών ειδών κόπωσης

7.5.3 Αντοχή Σε Κόπωση

Τα δοκίμια που υποβάλλονται σε κυκλική κόπωση, για διάφορα επίπεδα εύρους της καταπόνησης (σ_α), δίνουν καμπύλες της μορφής $\sigma_\alpha = f(N_f)$ ή $\sigma_\alpha = f(\log N_f)$ Σχήμα 10



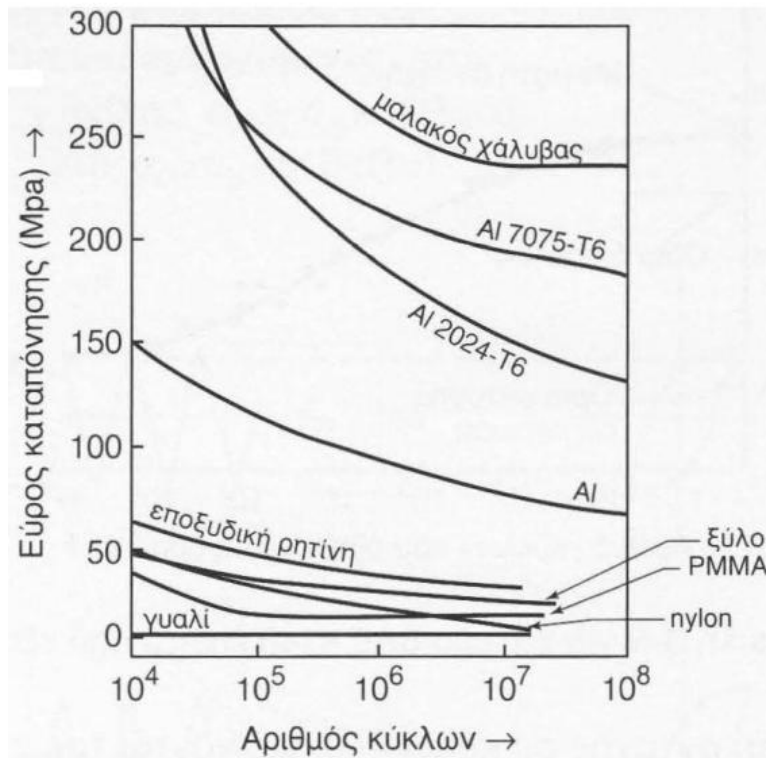
Σχήμα 10: Παράδειγμα καμπύλης Wohler με σημειωμένα τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού

Μια τέτοια καμπύλη ονομάζεται καμπύλη S-N (Stress-Number of cycles) ή καμπύλη του Wöhler. Το N_f παριστάνει τον αριθμό κύκλων που απαιτείται για τη θραύση του δοκιμίου σε δεδομένη τιμή της τάσης.

Σε μια καμπύλη αντοχής σε κόπωση διακρίνονται τρεις ζώνες :

- Ζώνη ολιγοκυκλικής κόπωσης, κατά την οποία η διάρκεια ζωής του δοκιμίου είναι σύντομη ($N_f < 10^2$ κύκλοι). Πριν τη θραύση το δοκίμιο υπόκειται σε σημαντική πλαστική παραμόρφωση.
- Ζώνη κόπωσης ή περιορισμένης αντοχής. Η θραύση επέρχεται μετά από έναν αριθμό κύκλων, που αυξάνεται καθώς η επιβαλλόμενη τάση ελαττώνεται ($10^2 < N_f < 10^6$ κύκλοι).
- Ζώνη απεριόριστης αντοχής ή ζώνη ασφαλείας. Η θραύση αποκλείεται να συμβεί, υπό το καθεστώς μικρών καταπονήσεων, ακόμη και έπειτα από μεγάλο αριθμό κύκλων ($N_f > 10^6$ κύκλοι).

Για πολλά υλικά, κυρίως στους χάλυβες, αλλά και σε κράματα Ti, Mg, μερικά κράματα Al-Mg, παρατηρείται στην καμπύλη του Wöhler μια οριζόντια ασυμπτωτική περιοχή, που προσδιορίζει το όριο αντοχής σε κόπωση σ_d του υλικού. Σε ένα υλικό που υποβάλλεται σε κυκλική καταπόνηση τιμής μικρότερης της σ_d δεν παρατηρείται θραύση από κόπωση **Σχήμα 11** [23].



Σχήμα 11: Απεικόνιση των ασυμπτωτικών περιοχών της καμπύλης Wohler για τα πιο γνωστά μέταλλα
Πηγή [24]

7.5.4 Αντοχή Σε Θραύση (Fracture Toughness)

Ένα υλικό μπορεί να αντισταθεί στην ένταση της εφαρμοζόμενης τάσης έως μια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή πάνω από την οποία η ρωγμή θα αναπτυχθεί με ασταθή τρόπο και θα συμβεί αστοχία. Αυτή η κρίσιμη ένταση τάσης είναι η αντοχή στη θραύση του υλικού.

Η αντοχή σε θραύση ενός υλικού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η περιβαλλοντική θερμοκρασία, η περιβαλλοντική σύνθεση (δηλ. αέρας, γλυκό νερό, αλμυρό νερό κ.λπ.), ο ρυθμός φόρτισης, το πάχος του υλικού, η επεξεργασία υλικού και ο προσανατολισμός ρωγμών προς την κατεύθυνση των κόκκου [22].

Οι τιμές αντοχής σε θραύση για πολλά κοινά υλικά μηχανικής βρίσκονται στη βάση δεδομένων (material index) του υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών που θα παρουσιάσουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

8. Ανοχή σε Βλάβη (Damage Tolerance)

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με τη θεωρία ανοχής σε βλάβη προκειμένου να υπολογίσουμε την καμπύλη αστοχίας αεροπορικών εξαρτημάτων, περνώντας μέσα από τον υπολογισμό της διάδοσης ρωγμών στο εξάρτημα που υποβάλλεται σε κόπωση.

8.1 Γενικά

8.1.1 Θεωρητική Προσέγγιση

Μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου τα αεροπορικά μέσα που παρέμειναν σε επιχειρησιακή κατάσταση, άρχισαν να εμφανίζουν αστοχίες που σχετίζονται με την κόπωση. Έτσι αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την αποτροπή των διαφόρων αστοχιών. Η πρώτη μέθοδος ήταν η ασφαλής ζωή (Safe Life) η οποία λαμβάνει υπόψη μόνο τα προβλήματα ζωής της κόπωσης, και γι αυτό έχει σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις [26].

Στην προσπάθεια να αποκτηθεί ένα ασφαλές, αλλά οικονομικά βιώσιμο μηχανικό εξάρτημα χρειαζόταν μια διαφορετική προσέγγιση, και έτσι στη δεκαετία του '70 δημιουργήθηκε η θεωρία ανοχής σε βλάβη (Damage Tolerance). Ορίζεται συνήθως ως «η ικανότητα της αεροπορικής κατασκευής να δέχεται φορτία λόγω κόπωσης, διάβρωσης ή τυχαίας ζημιάς έως ότου παρουσιαστεί μία ζημιά ή δυσλειτουργία» [27].

Στη θεωρία «Damage Tolerance», ο μηχανικός των υλικών θεωρεί ένα εξάρτημα το οποίο έχει ήδη ένα ελάττωμα και εξελίσσεται οδηγώντας τελικά στην αστοχία του [28]. Αυτή η θεωρία μπορεί να φαίνεται πολύ συντηρητική, αλλά αναλύσεις θραύσεων σε πολλές περιπτώσεις έχουν δείξει ότι η αρχική κατασκευή είναι μια σημαντική πηγή προέλευσης μιας μελλοντικής ζημιάς. Συνεπώς, η εξέταση των αρχικών ατελειών του εξαρτήματος για τυχόν ρωγμές είναι απολύτως απαραίτητη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του εξαρτήματος [28].

Η ανοχή ζημιών περιγράφεται από τρεις παράγοντες :

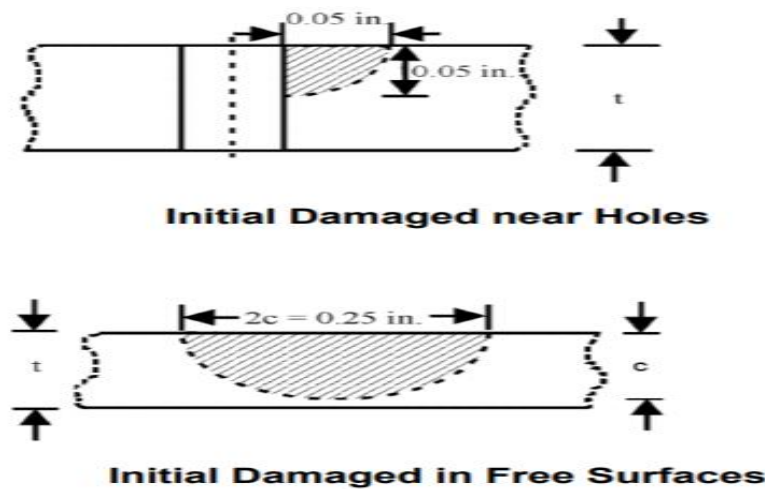
- Παραμένουσα αντοχή: Καθορίζει τη μέγιστη ζημιά, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητα πολλαπλών ρωγμών, που η δομή μπορεί να αντέξει κάτω από καθορισμένες συνθήκες ασφαλούς φόρτισης.
- Διάδοση ρωγμών: Καθορίζει τη χρονική περίοδο κατά την οποία αναπτύσσεται μια ρωγμή από ένα καθορισμένο ανιχνεύσιμο μήκος έως το επιτρεπόμενο μήκος που καθορίζεται από τις απαιτήσεις υπολειμματικής αντοχής.

- Ανίχνευση ζημιών: Αυτή καθορίζει τις μεθόδους επιθεώρησης και τα διαστήματα για τη διασφάλιση της έγκαιρης ανίχνευσης ρωγμών και άλλων ζημιών.

Η σχετική σημασία αυτών των παραγόντων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χρησιμοποιούμενο υλικό, το επίπεδο φορτίου της κατασκευής και την απαιτούμενη διάρκεια ζωής του αεροσκάφους [25].

8.1.2 Αρχικός Χαρακτηρισμός Ζημιάς

Σύμφωνα με τη θεωρία «Damage Tolerance», από την έναρξη της λειτουργίας ενός εξαρτήματος υπάρχει μια αρχική ζημιά. Η Εικόνα 24 απεικονίζει παραδείγματα ζημιών που ένας μηχανικός υλικών πρέπει να αντιληφθεί κατά τον προσδιορισμό του υπολειπόμενου χρόνου ζωής ενός εξαρτήματος.

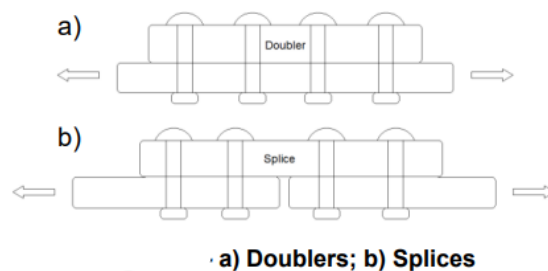


Εικόνα 24: Απεικόνιση του σχήματος και μήκους ζημιών για αεροπορικό πάνελ πάχους έως 0,05 in πάνω και 0,25 in κάτω. πηγή [29]

Αν το πάχος του πάνελ είναι μικρότερο από το πάχος 0,05 in ή 0,125 in για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, τότε θα πρέπει ο μηχανικός υλικών να θεωρήσει μια διαμπερή ρωγμή (through crack) κατά των υπολογισμών της ανάπτυξης ρωγμής [29].

Οι μέθοδοι εντοπισμού μικροζημιών σε μία μηχανολογική δομή είναι οι επιθεωρήσεις NDI «Non-Destructive Inspection» όπως η οπτική επιθεώρηση, η επιθεώρηση με χρήση διεισδυτικού υγρού και η επιθεώρηση με ρεύμα Eddy [29]. Ωστόσο ακόμα και με αυτές τις μεθόδους η αρχική ζημιά δεν είναι πιθανό να εντοπιστεί, αν είναι πολύ μικρή.

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι οι ρωγμές κοντά σε τρύπες της μηχανολογικής δομής συνήθως ξεκινούν από επιφανειακές φθορές, γεγονός που είναι πολύ σημαντικό όσον αφορά επιφανειακή κατάσταση των οπών από τις οποίες διέρχονται τα πιρτσίνια-ιλώσεις που ενώνουν τα διαδοχικά αεροπορικά πάνελς [30]. Στο παρακάτω σχήμα παραθέτουμε τους βασικούς τρόπους συνένωσης δυο διαδοχικών αεροπορικών πάνελς.



Σχήμα 12: Τρόποι διασύνδεσης δύο διαδοχικών αεροπορικών πάνελ. Πηγή [29]

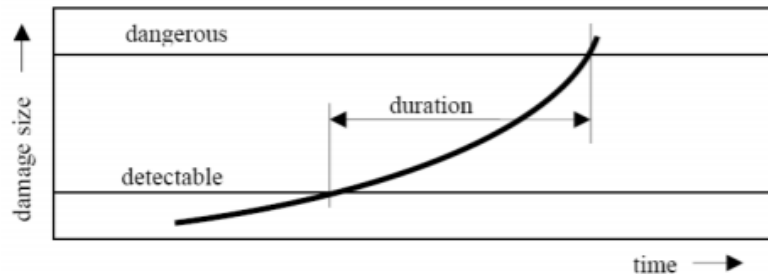
Οι «Splices» επιτρέπουν τη μεταφορά φορτίου μεταξύ των εμπλεκόμενων εξαρτημάτων, ενώ οι «Doubles» παραλαμβάνουν τα φορτία της κατασκευής, μειώνοντας την τάση που δέχονται τα υπόλοιπα εμπλεκόμενα εξαρτήματα [31].

Η αρχική ζημιά αναπτύσσεται προς τη χειρότερη δυνατή κατεύθυνση, συνήθως κάθετα στο φορτίο που εφαρμόζεται, για τη λειτουργία θραύσης I, που είναι η πιο κρίσιμη. Ωστόσο, η πιο κοινή κατάσταση που παρατηρείται είναι δύο ρωγμές που αναπτύσσονται σε αντίθετες πλευρές μιας τρύπας.

Η φέρουσα μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει μια μηχανολογική δομή είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Οι πολλαπλές ζημιές Multiple Site Damage (MSD) οδηγούν σε μία σημαντική μείωση της ζωής ενός εξαρτήματος.

8.1.3 Απαιτήσεις Επιθεώρησης

Ο στόχος μιας επιθεώρησης είναι η ανίχνευση μιας αναπτυσσόμενης ρωγμής, επομένως ο ορισμός του χρόνου της αρχικής και των μελλοντικών επιθεωρήσεων είναι πολύ σπουδαίος. Οι επιθεωρήσεις πρέπει να γίνονται εντός μιας περιόδου όπου η ρωγμή είναι ανιχνεύσιμη και ακίνδυνη για τη δομή. Στόχος του μηχανικού των υλικών είναι να προσδιορίζει τη συχνότητα επανάληψης των επιθεωρήσεων ανάλογα με το μέγεθος της ζημιάς που εντοπίζει κάθε φορά ώστε να αποφευχθεί εγκαίρως η λειτουργία του εξαρτήματος σε επικίνδυνη περιοχή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 13: Ορισμός αρχικού χρόνου επιθεώρησης και μελλοντικών επιθεωρήσεων ώστε να αποφευχθεί η λειτουργία σε επικίνδυνη περιοχή. Πηγή [32].

Μόλις εντοπιστεί η ρωγή, υιοθετείται μια διαδικασία επισκευής. Μόνο οι μεγάλες επιθεωρήσεις επιτρέπουν την αποσυναρμολόγηση εξαρτημάτων για την καλύτερη οπτική παρατήρηση. Οι οπτικές επιθεωρήσεις πρέπει να γίνονται από έμπειρους τεχνίτες με κατάλληλο φωτισμό, μεγεθυντικούς φακούς και άλλα όργανα.

Οι επιθεωρήσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- λεπτομερείς οπτικές επιθεωρήσεις
- γενικές οπτικές επιθεωρήσεις.

Σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους NDI, οι οπτικές επιθεωρήσεις έχουν πολύ χαμηλό κόστος. Αναμένεται ότι οι εκπαιδευμένοι επιθεωρητές θα είναι ικανοί να ανιχνεύσουν ρωγμές μεγαλύτερες από 2 in στις γενικές οπτικές επιθεωρήσεις και μεγαλύτερες από 0,25 in στις λεπτομερείς οπτικές επιθεωρήσεις [33] [34].

8.2 Θεωρία Ανάπτυξης Ρωγμών

8.2.1 Κανόνας Miner

Στην ελαστική περιοχή, είναι σημαντικό να καθορισθεί ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης K_{IC} ο οποίος εκφράζει την ένταση των τάσεων και τη σοβαρότητα τους, κοντά στην άκρη της ρωγμής. Αυτός ο παράγοντας χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την αντοχή ενός υλικού σε πιθανές ρωγμές λόγω κόπωσης [35].

Ορίζεται ως:

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Όπου

- α : το μήκος της ρωγμής
- σ : η συγκεντρώσεις τάσεων
- Y : ο παράγοντας γεωμετρικού σχήματος.

Επίσης η οριακή τιμή του K_{IC} εξαρτάται από το κάθε υλικό ενώ όταν η ρωγμή φτάνει στο κρίσιμο μέγεθος της, παρατηρείται θραύση του υλικού [35].

Κύρια αιτία της θραύσης είναι η κόπωση η οποία καταπονεί το υλικό λόγω των επαναλαμβανόμενων κυκλικών φορτίσεων, και έχει δύο σημαντικές και ξεχωριστές φάσεις, την έναρξη ρωγμών και την ανάπτυξη ρωγμών [36].

Προκειμένου να προβλεφθεί η ζωή κόπωσης ενός υλικού, πρέπει να καθοριστεί ένα διάγραμμα, που ονομάζεται καμπύλη Wöhler (S-N). Η γραμμή που σύρεται σε αυτό δείχνει το κρίσιμο επίπεδο τάσης και τον αριθμό κύκλων για να αποτύχει ένα υλικό λόγω των επιπτώσεων της κόπωσης.

Ο κανόνας του Miner είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τον προσδιορισμό της ζημιάς που ένα μηχανολογικό εξάρτημα μπορεί να αντέξει μετά από κόπωση και εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που γνωρίζουμε τα όρια κόπωσης ενός υλικού και τα οποία ορίζονται από την καμπύλη S-N.

Ο κανόνας του Miner θεωρεί ότι η ικανότητα ενός εξαρτήματος να απορροφά τάσεις από κόπωση είναι αθροιστική. Συνεπώς ο κανόνας διατυπώνεται ως το άθροισμα των επιμέρους καταπονήσεων όπως παρακάτω:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$$

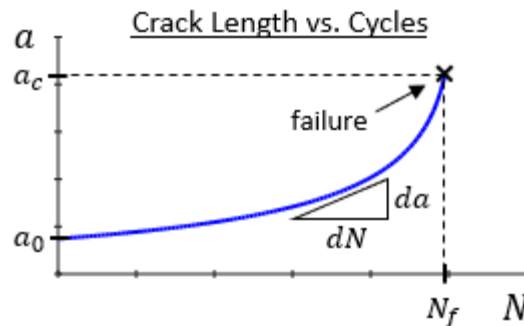
όπου :

- n είναι ο αριθμός των κύκλων που πραγματοποιούνται από το εξάρτημα και
- N ο μέγιστος αριθμός κύκλων που μπορεί να αντέξει το εξάρτημα

Για σκοπούς σχεδιασμού ενός εξαρτήματος επιλέγεται συχνά αυτό το άθροισμα να ισούται με μονάδα, αλλά η τιμή του μπορεί να κυμαίνεται από 0,61 έως 1,45 [36].

8.2.2 Εξάρτηση Μεγέθους Ρωγμών Και Αριθμού Κύκλων Φόρτισης

Μια τυπική γραφική παράσταση που δείχνει την ανάπτυξη μιας ρωγμής παρέχεται στο παρακάτω σχήμα:



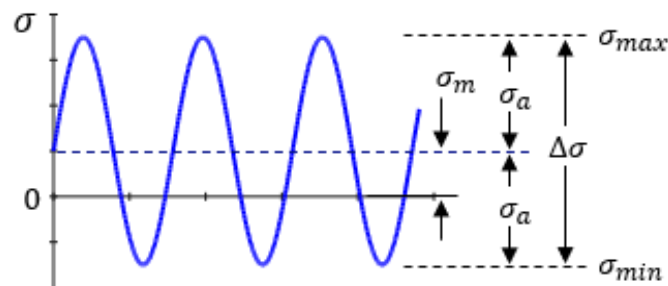
Σχήμα 14: Μέγεθος ρωγμών έναντι κύκλων. Πηγή [37]

Το μέγεθος ρωγμής a εμφανίζεται ως συνάρτηση των κύκλων φόρτισης N του εφαρμοζόμενου φορτίου. Ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμών $\frac{da}{dN}$ είναι η στιγμιαία κλίση της καμπύλης ανάπτυξης ρωγμών.

Παρατηρούμε ότι η ρωγμή αρχικά αναπτύσσεται πολύ αργά, αλλά η ανάπτυξη επιταχύνεται (δηλ. αυξάνεται το $\frac{da}{dN}$) καθώς αυξάνεται το μέγεθος της ρωγμής. Ο λόγος για αυτήν την επιτάχυνση της ανάπτυξης της ρωγμής είναι ότι ο ρυθμός ανάπτυξης εξαρτάται από τον παράγοντα έντασης τάσης στο άκρο της ρωγμής και ο παράγοντας έντασης τάσης εξαρτάται από το μέγεθος της ρωγμής. Καθώς η ρωγμή μεγαλώνει, αυξάνεται ο παράγοντας έντασης τάσης, οδηγώντας σε ταχύτερη ανάπτυξη. Η ρωγμή μεγαλώνει μέχρι να φτάσει σε κρίσιμο μέγεθος και να εμφανιστεί αστοχία.

8.2.3 Ιστορικό Κόπωσης

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις τάσεις που ασκούνται με μια ορισμένη κυκλική συχνότητα. Για απλότητα, το σχήμα δείχνει σταθερές τιμές μέγιστων και ελάχιστων τάσεων. Ωστόσο, η φόρτωση σε ένα ρεαλιστικό σενάριο μπορεί να είναι λιγότερο ομοιόμορφη και μπορεί επίσης να αποτελείται από διάφορα εύρη τάσεων [37].



Όπου:

- σ_{max} είναι η μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης

- σ_{min} είναι η ελάχιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης
- σ_m είναι η μέση τάση
- σ_a είναι το εύρος τάσης
- $\Delta\sigma$ είναι το εύρος τάσης.

Τα μεγέθη που πρέπει να υπολογίσουμε για μια πλήρη περιγραφή του ιστορικού των τάσεων είναι ο αριθμός επαναλαμβανόμενων κύκλων, η συχνότητα που επιβάλλονται καθώς επίσης και τα τρία μεγέθη που φαίνονται παρακάτω:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Ο λόγος τάσης R είναι μια σημαντική ποσότητα και ορίζεται από :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Ο παράγοντας έντασης τάσης είναι συνάρτηση της γεωμετρίας και της εφαρμοζόμενης τάσης:

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

όπου

- σ είναι η εφαρμοζόμενη τάση,
- a είναι το μέγεθος της ρωγμής
- Y είναι μία παράμετρος γεωμετρίας χωρίς διάσταση που εξαρτάται από τη γεωμετρία της ρωγμής, τη γεωμετρία του τμήματος και τη διαμόρφωση φόρτωσης.

Οι τιμές Y και a εξαρτώνται από τη γεωμετρία, οπότε για μια συγκεκριμένη γεωμετρία ρωγμών, ο συντελεστής έντασης τάσης είναι ανάλογος με την εφαρμοζόμενη τάση.

Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε τα ακόλουθα:

- Μέγιστος συντελεστής έντασης τάσης : $K_{max} = Y\sigma_{max}\sqrt{\pi a}$
- Ελάχιστος συντελεστής έντασης τάσης: $K_{min} = Y\sigma_{min}\sqrt{\pi a}$
- Εύρος συντελεστή έντασης τάσης : $\Delta K = K_{max} - K_{min}$

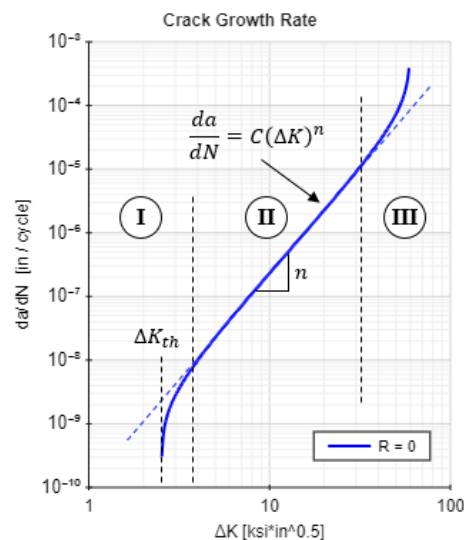
- Λόγος συντελεστή έντασης τάσης : $R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$

Αν οι ορισμοί για τη μέγιστη και την ελάχιστη ένταση τάσης αντικατασταθούν από τον ορισμό για το εύρος έντασης τάσης, μπορεί να ληφθεί ένας νέος χρήσιμος ορισμός για το εύρος έντασης τάσης:

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

8.2.4 Εξέλιξη Της Ρωγμής

Όταν ένα εύρος έντασης τάσης ΔK εφαρμόζεται σε ένα υλικό για ορισμένο αριθμό κύκλων ΔN , αυτό ωθεί τη ρωγή να μεγαλώνει σε μήκος κατά μια συγκεκριμένη ποσότητα Δa . Ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής σε ένα συγκεκριμένο εύρος έντασης τάσης δίνεται τότε από την αναλογία $\Delta a / \Delta N$. Ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμών σε ένα υλικό έχει τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και ποικίλλει μεταξύ των διαφόρων υλικών [37].



Σχήμα 15: Μορφή καμπύλης ανάπτυξης ρωγμών για συγκεκριμένο υλικό. Πηγή [37]

Σε αυτό το σχήμα, ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής και το εύρος έντασης τάσης ΔK απεικονίζονται σε κλίμακα log-log. Σε μια γραφική παράσταση log-log, υπάρχει συνήθως μια ευθεία περιοχή $\frac{da}{dN}$ σε ένα εύρος τιμών ΔK . Αυτή η ευθεία περιοχή φαίνεται στο **Σχήμα 15** εντός της περιοχής II και ορίζεται από την καμπύλη του Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n$$

Όπου:

- C είναι μια σταθερά του υλικού όσον αφορά το ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών
- n είναι η κλίση σε κλίμακα log-log.

Η τιμή n είναι χωρίς διάσταση, αλλά το C έχει μονάδες είτε (in / κύκλο) / (ksi \sqrt{in})ⁿ ή (mm / κύκλο) / (MPa \sqrt{m})ⁿ [37]. Σημειώνεται ότι οι μονάδες του C εξαρτώνται από την τιμή του n.

Υπάρχουν συνήθως «ουρές» στο άνω και κάτω άκρο της καμπύλης του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμής.

Η «ουρά» στο κάτω άκρο για μικρές τιμές της έντασης ΔK (περιοχή I) πλησιάζει μια κατακόρυφη ασύμπτωτη που ονομάζεται κατώφλι ανάπτυξης ρωγμής κόπωσης, ΔK_{th} . Η ανάπτυξη ρωγμών συνήθως δεν συμβαίνει όταν η ένταση τάσης ΔK είναι κάτω από το όριο κατωφλίου [37].

Η «ουρά» στο άνω άκρο της καμπύλης για μεγάλες τιμές έντασης ΔK (περιοχή III) προσεγγίζει επίσης μια κατακόρυφη ασύμπτωτη. Όταν ο λόγος έντασης τάσης R είναι ίσος με μηδέν, που αντιστοιχεί σε φόρτιση μηδενικής έντασης, η κατακόρυφη ασύμπτωτη στην άνω περιοχή III της καμπύλης είναι η κρίσιμη ένταση τάσης για το υλικό. Οι ρωγμές σε αυτήν την περιοχή αναπτύσσονται με γρήγορο και ασταθές τρόπο έως ότου συμβεί αστοχία.

Ο Forman πρότεινε μια διαφορετική λύση που λαμβάνει υπόψη τον λόγο τάσεων R και την τάση θραύσης του υλικού [36]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_f \Delta K^{m_f}}{(1 - R)K_{IC} - \Delta K}$$

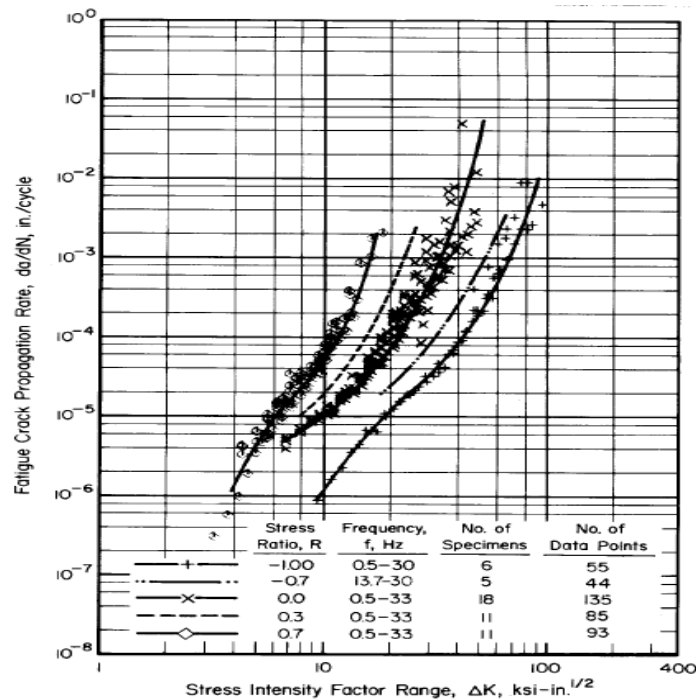
Όπου :

C και m είναι σταθερές υλικού, οι οποίες είναι διαφορετικές για κάθε νόμο ανάπτυξης ρωγμών, ακόμη και αν καλύπτει το ίδιο σύνολο δεδομένων για το υλικό [35]

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι παραπάνω εκφράσεις του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμών έχουν κατασκευαστεί για να περιγράφουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις, και δεν έχουν φυσική αξία. Συνεπώς ο μόνος τρόπος για τον ακριβή υπολογισμό του συντελεστή έντασης τάσης συναρτήσει του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμών $\frac{da}{dN}$, είναι η πειραματική δοκιμασία των υλικών.

8.2.5 Επίδραση λόγου τάσεων R Στο Ποσοστό Ανάπτυξης Ρωγμών

Καθώς ο λόγος τάσεων R αυξάνεται, ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμών σε ένα υλικό αυξάνεται και το αντίστροφο. Αυτό το φαινόμενο αποδεικνύεται από τα παρακάτω στοιχεία ανάπτυξης για ένα φύλλο κράματος αλουμινίου 7075-T6.



Σχήμα 16 : Καμπύλες ανάπτυξης ρωγμών για τιμές του λόγου τάσης R που κυμαίνονται από -1 (φορτίο πλήρους αντιστροφής) έως +0,7. Στα παραπάνω δεδομένα μπορεί να φανεί ότι η αύξηση του R έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του ρυθμού ανάπτυξης της ρωγμής. Πηγή [38]

8.2.6 Εξίσωση Walker

Η εξίσωση Walker είναι μια γενίκευση της εξίσωσης του Paris για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του λόγου τάσεων R στον ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών. Η εξίσωση Walker έχει την ακόλουθη μορφή [37]:

$$\frac{da}{dN} = C_0 \left(\frac{1}{(1-R)^{1-\gamma}} * \Delta K \right)^n$$

Όπου:

- R είναι ο λόγος τάσης,
- ΔK είναι το εύρος έντασης τάσης
- n είναι η κλίση σε κλίμακα log-log.
- Η τιμή γ είναι μια σταθερά υλικού που δείχνει πόσο έντονα ο λόγος τάσης R επηρεάζει το ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών στο υλικό.
- C₀ είναι η σταθερά αναχαιτίσης C για την περίπτωση όπου ο λόγος τάσης R = 0.

Η εξίσωση Walker μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{da}{dN} = C_0 * (\overline{\Delta K})^n$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι της ίδιας μορφής με την εξίσωση του Paris, εκτός από το ότι η τιμή C_0 χρησιμοποιείται για τη σταθερά αναχαίτισης σε αναλογία τάσης $R = 0$.

Επίσης χρησιμοποιεί μια τιμή $\overline{\Delta K}$ που αντιπροσωπεύει την επίδραση του λόγου τάσης R . Η τιμή $\overline{\Delta K}$ ονομάζεται ισοδύναμο εύρος έντασης τάσης μηδενικής έντασης (δηλ. $R = 0$) και είναι το εύρος έντασης τάσης που προκαλεί τον ίδιο ρυθμό αύξησης ρωγμών με τον πραγματικό λόγο έντασης τάσης ΔK .

Ορίζεται ως:

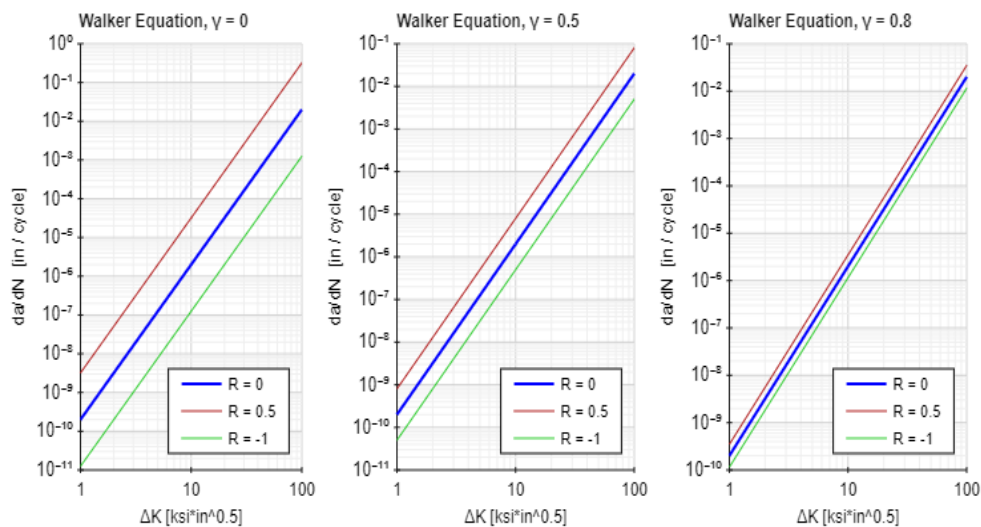
$$\overline{\Delta K} = \frac{\Delta K}{(1 - R)^{1-\gamma}}$$

Αυτή η μορφή είναι παρόμοια με τη μορφή της εξίσωσης του Paris, με την εξαίρεση ότι η σταθερά υλικού C είναι συνάρτηση του λόγου τάσης R . Χρησιμοποιώντας αυτήν τη μορφή της εξίσωσης, μπορεί να φανεί ότι η σταθερά υλικού C οριστεί ως:

$$C = \frac{C_0}{(1 - R)^{n(1-\gamma)}}$$

Ο όρος γ στην εξίσωση Walker είναι μια σταθερά υλικού που δείχνει πόσο έντονα ο λόγος τάσης R επηρεάζει το ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών στο υλικό. Σύμφωνα με τον Dowling [39], πολλά μέταλλα έχουν μια τυπική τιμή γ περίπου 0,5 αλλά η τιμή μπορεί να ποικίλει οπουδήποτε από περίπου 0,3 έως σχεδόν 1,0.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει ρυθμούς ανάπτυξης ρωγμών για ένα συγκεκριμένο υλικό για διάφορες αναλογίες τάσης R και για διάφορες τιμές γ . Τα διαγράμματα αντιστοιχούν σε τιμές $\gamma = 0, 0,5$ και $0,8$, αντίστοιχα.



Σχήμα 17: Σύγκριση του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμών, για ένα συγκεκριμένο υλικό, για διάφορες τιμές των μεγεθών γ , R . Πηγή [37]

Μπορεί να φανεί στα γραφήματα ότι για μια τιμή $\gamma=0$, η τιμή του λόγου τάσης R έχει πολύ ισχυρή επίδραση στον ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών. Καθώς το γ για το υλικό αυξάνεται, η επίδραση του λόγου τάσης R αυξάνεται ασθενέστερα. Για τιμή $\gamma=0,8$ όπως φαίνεται, ο λόγος τάσης R έχει πολύ μικρή επίδραση στον ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή του συντελεστή γ για ένα υλικό μπορεί να εξαρτάται από το εάν ο λόγος τάσης R είναι θετικός ή αρνητικός. Όταν ο λόγος τάσης R είναι αρνητικός, υπάρχει ένα στοιχείο συμπίεσης στο φορτίο. Σε πιο εύθραυστα υλικά, η συμπίεση φόρτωσης τείνει να μην συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη ρωγμών.

Επομένως, η τιμή του γ για ψαθυρά υλικά μπορεί να είναι πιο κοντά στο 0 για $R < 0$ που θα τείνει να επιβραδύνει τον ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών για το συμπίεστικό τμήμα του φορτίου.

Ωστόσο, στα περισσότερα όλκιμα υλικά, η φόρτιση με θλιπτικές τάσεις τείνει να συμβάλλει στην ανάπτυξη ρωγμών και έτσι η τιμή του γ για $R < 0$ μπορεί να είναι παρόμοια με την τιμή του γ για $R \geq 0$.

8.2.7 Εξίσωση Nasgro

Η εξίσωση NASGRO είναι η πιο γενική εξίσωση ανάπτυξης ρωγμών. Αντιπροσωπεύει τον λόγο τάσης R, το κλείσιμο ρωγμών και τις «ουρές» στο άνω και κάτω άκρο της καμπύλης του ρυθμού ανάπτυξης.

Η εξίσωση NASGRO φαίνεται παρακάτω [37]:

$$\frac{da}{dN} = C_0 * \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left[1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right]^p}{\left[1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right]^q}$$

όπου

- R είναι ο λόγος τάσης
- f είναι η συνάρτηση κλεισίματος ρωγμών Newman,
- ΔK είναι το εύρος έντασης τάσης,
- C_0 είναι η σταθερά αναχαίτισης C για την περίπτωση όπου ο λόγος τάσης $R = 0$
- n είναι η κλίση σε κλίμακα log-log.
- Η τιμή K_{max} είναι η μέγιστη ένταση τάσης στο εύρος ΔK
- ΔK_{th} είναι το εύρος έντασης τάσης κατωφλίου στην αναλογία τάσης R που εξετάζεται.
- Η τιμή K_c είναι η κρίσιμη ένταση στρες.

Οι τιμές p και q είναι εμπειρικοί συντελεστές που καθορίζουν την καμπυλότητα της καμπύλης ρυθμού ανάπτυξης στις περιοχές I και III. Οι τιμές τους επιλέγονται ώστε να ταιριάζουν με την καμπύλη ρυθμού ανάπτυξης στα πειραματικά δεδομένα. Ο συντελεστής p ελέγχει την καμπύλη στην περιοχή I (χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης-κατώφλι) και q ελέγχει την καμπύλη στην περιοχή III (υψηλού ρυθμού ανάπτυξης).

Η συνάρτηση ταχύτητας ανάπτυξης ρωγμής f ορίζεται ως ο λόγος ρωγμής:

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}}$$

Όπου:

- K_{op} : Συντελεστής έντασης τάσης στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης της ρωγμής
- K_{max} : Μέγιστος συντελεστής έντασης τάσης

Η συνάρτηση ταχύτητας ανάπτυξης ρωγμής f χρησιμοποιείται για μοντελοποίηση της επίδρασης διαφόρων μηχανισμών κλεισίματος ρωγμών και προτάθηκε από το Newman [40] με βάση προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων.

Η ακόλουθη αναλυτική προσέγγιση για τη λειτουργία ανοίγματος ρωγμών είναι:

$$f = A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3$$

- $A_0 = (0,825 - 0,34a + 0,05a^2) * \left[\cos \left(\frac{\pi * \sigma_{max}}{2\sigma_F} \right) \right]^{\frac{1}{a}}$
- $A_1 = (0,415 - 0,071a) * \frac{\sigma_{max}}{\sigma_F}$
- $A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3$
- $A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$

Στους υπολογισμούς με τη εξίσωση Nasgro δίνουμε τις παρακάτω τιμές στα μεγέθη:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_F} = 0,3 \text{ και } a = 3$$

καθώς αυτές οι τιμές εκφράζουν την κατά προσέγγιση κατάσταση παραμόρφωσης επιπέδου και σε μεγάλο βαθμό την ελαστική συμπεριφορά ρωγμών σύμφωνα με [41], [42].

8.2.8 Κριτήρια Αποτυχίας

Κατά την εφαρμογή της εξίσωσης NASGRO, χρησιμοποιείται ως κριτήριο αστοχίας ο παράγοντας έντασης τάσης. Καθώς μεγαλώνει μια ρωγμή, ο παράγοντας έντασης τάσης στο άκρο ρωγμής αυξάνεται. Η αποτυχία εμφανίζεται όταν ο παράγοντας έντασης τάσης υπερβεί την κρίσιμη ένταση τάσης K_c του υλικού.

Για παχιά δοκίμια, η τιμή του K_c θα μπορούσε να είναι η αντοχή θραύσης του επιπέδου καταπόνησης, αλλά θα μπορούσε επίσης να είναι η κρίσιμη ένταση τάσης για το συγκεκριμένο πάχος του δοκιμίου [22].

Στην περίπτωση κυκλικής εφαρμοζόμενης τάσης (κόπωση), ο συντελεστής έντασης τάσης πρέπει να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέγιστη τιμή τάσης στο εύρος τάσης [22]. Αυτός ο παράγοντας μέγιστης έντασης τάσης K_{max} πρέπει να συγκριθεί με το K_c για τον προσδιορισμό της αστοχίας.

9. Παρουσίαση Υπολογιστή Ρωγμών

Έχοντας αναλύσει τις αρχές και τις διάφορες προσεγγίσεις (εξισώσεις Paris, Walker, Nasgro) της θεωρίας ανάπτυξης ρωγμών στο κεφάλαιο 8, μπορούμε να προχωρήσουμε στην ενότητα αυτή, στην παρουσίαση του προγράμματος υπολογισμού ανάπτυξης ρωγμών το οποίο έχει αναπτυχθεί σε λογισμικό Microsoft Excel. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος και οι τύποι και συναρτήσεις που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίησή του. Τέλος θα δοθούν οδηγίες για την ορθή χρήση και εξοικείωση με αυτό.

9.1 Είσοδοι (Inputs)

Οι απαιτούμενες είσοδοι στον υπολογιστή ρωγμών σχετίζονται με:

- Ιδιότητες υλικών
- Γεωμετρία ρωγμών
- Γεωμετρία πλάκας
- Ιστορικό φόρτισης

Τονίζεται ότι οι τέσσερις είσοδοι πρέπει να καταχωρηθούν από το χρήστη κατά τη σειρά που παρουσιάζονται παρακάτω.

9.1.1 Ιδιότητες Υλικού

Όσον αφορά τις ιδιότητες του υλικού, ο μελετητής θα πρέπει να μπορεί να αναγνωρίσει το κράμα του δοκιμίου – πάνελ που εξετάζεται, ώστε να επιλέξει το κατάλληλο υλικό από την βάση δεδομένων (materials Index) που δίνεται.

Η βάση δεδομένων με τα πιο γνωστά και συνήθως χρησιμοποιούμενα κράματα που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα του Excel:

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Πίνακας 8: Τα παρακάτω στοιχεία που συνθέτουν τη βάση δεδομένων με τα υλικά έχουν αντληθεί σύμφωνα με τις επόμενες αναφορές [43], [44], [45], [7], [46].

| Material Name | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|--------|--------|---|--------|---------------------------------|--------|--------|--|
| B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | |
| Material Name | Mechanical Properties | | | | Fracture Properties | | | Fatigue Crack Growth Properties | | | | | |
| | Yield Strength (Mpa) | Elastic Modulus (Mpa) | Ultimate Strength (Mpa) | Percent Elongation (%) | K1C (MPa*mm ^{0,5}) | Ak | Bk | C0 (mm/cycle) / (MPa*mm ^{0,5}) ⁿ | p | ΔKth,1 (MPa*mm ^{0,5}) | n | a | |
| Titanium 6Al-4V, ELI | 758,4200 | 113.760,0000 | 827,3700 | 10,0000 | 2.432,3942 | 1,0000 | 0,5000 | 0,0981000000 | 0,2500 | 54,5543 | 3,5300 | 0,7500 | |
| Inconel 625 | 455,0500 | 205.460,0000 | 917,0000 | 30,0000 | 3.474,7133 | 1,0000 | 0,5000 | 0,0118428000 | 0,5000 | 91,3876 | 3,8000 | 0,5000 | |
| AISI 316 Stainless Steel | 241,3200 | 193.050,0000 | 551,5800 | 35,0000 | 6.949,7428 | 0,7500 | 0,5000 | 0,0256689000 | 0,2500 | 63,9365 | 3,4000 | 0,2500 | |
| Aluminum 2024 | 358,5300 | 72.390,0000 | 455,0500 | 10,0000 | 972,9703 | 1,0000 | 0,7500 | 0,4939350000 | 0,5000 | 25,7131 | 3,3000 | 1,0000 | |
| 15-5PH Stainless Steel | 999,7400 | 196.500,0000 | 1.068,7000 | 12,0000 | 2.084,9228 | 0,7500 | 0,5000 | 0,2469680000 | 0,2500 | 68,4521 | 3,3000 | 0,2500 | |
| 17-4PH Stainless Steel | 999,7400 | 196.500,0000 | 1.068,7000 | 12,0000 | 2.084,9228 | 0,7500 | 0,5000 | 0,0262201000 | 0,2500 | 63,9365 | 3,2500 | 0,5000 | |
| Aluminum 2014 | 434,3700 | 72.390,0000 | 489,5300 | 6,0000 | 694,9743 | 1,0000 | 1,0000 | 0,2847380000 | 0,5000 | 26,7557 | 2,9600 | 0,5000 | |
| Aluminum 6061 | 241,3200 | 68.260,0000 | 262,0000 | 9,0000 | 938,2169 | 1,0000 | 1,0000 | 0,3086680000 | 0,5000 | 26,0606 | 3,3000 | 1,0000 | |
| Aluminum 7075 | 434,3700 | 71.028,0000 | 503,3200 | 6,0000 | 868,7099 | 1,0000 | 1,0000 | 0,7555330000 | 0,5000 | 24,3233 | 3,4500 | 0,7500 | |
| Aluminum 7475 | 475,7400 | 71.710,0000 | 537,7900 | 12,0000 | 1.216,2129 | 1,0000 | 1,5000 | 0,1206430000 | 0,5000 | 22,2385 | 2,8000 | 1,0000 | |
| ASTM A286 Stainless Steel | 655,0000 | 200.640,0000 | 965,2700 | 12,0000 | 3.474,7133 | 0,7500 | 0,5000 | 0,0061336000 | 0,2500 | 104,2419 | 3,3000 | 0,2500 | |
| Inconel 718 | 1.034,2000 | 202.710,0000 | 1.241,1000 | 12,0000 | 2.779,8655 | 1,0000 | 0,2500 | 0,0180862000 | 0,2500 | 72,9709 | 3,6000 | 1,0000 | |

Πηγή [37]

Τονίζεται ότι οι μονάδες που χρησιμοποιήσαμε για τις ιδιότητες των υλικών και όλους τους υπολογισμούς του προγράμματος, είναι σε (mm / cycle) / (MPa√m)ⁿ [37]. Σημειώνεται ότι οι μονάδες του C εξαρτώνται από την τιμή του n.

Οι μετατροπές από (in / κύκλο) / (ksi√in)ⁿ σε (mm / cycle) / (MPa√m)ⁿ έγιναν με τη βοήθεια διαδικτυακού μετατροπέα μεγεθών σύμφωνα με την αναφορά [47].

Ο χρήστης με απλή αντιγραφή από τη βάση δεδομένων της γραμμής που αντιπροσωπεύει το υλικό που εξετάζεται, διαλέγει το κράμα που επιθυμεί κάθε φορά και το τοποθετεί στην κατάλληλη θέση του

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών με επικόλληση. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η επιλογή και τοποθέτηση στην κατάλληλη θέση του κράματος «Titanium 6Al-4V, ELI» ως inrut στον υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών:

Center Through Crack in Plate

Εισαγωγή διαστάσεων ρωγμής πλάκας

| | |
|----------------------------|--------|
| ημι-μήκος ρωγμής a (mm) | 0,05 |
| απόσταση b (mm) | 4 |
| πάχος πλάκας t (mm) | 2 |
| Geometry factor tension Yt | 1,0254 |
| Geometry factor bending Yb | 0,5127 |
| a/t (mm) | 3,1139 |

Mechanical Properties

| Material Name | Yield Strength (Mpa) | Elastic Modulus (Mpa) | Ultimate Strength of (Mpa) | Percent Elongation (%) | K1C (Mpa*mm ^{0.5}) | Ak | Bk | Co (mm/cycle) / (Mpa*mm ^{0.5}) ^{1/n} | p | ΔKth,1 (Mpa*mm ^{0.5}) | slope n | q |
|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|--------|--------|---|--------|---------------------------------|---------|--------|
| Titanium 6Al-4V, ELI | 756,4200 | 113.760,0000 | 827,3700 | 10,0000 | 2.432,3942 | 1,0000 | 0,5000 | 0,0891200000 | 0,2500 | 54,5543 | 3,5300 | 0,7500 |

FORMAN EQUATION

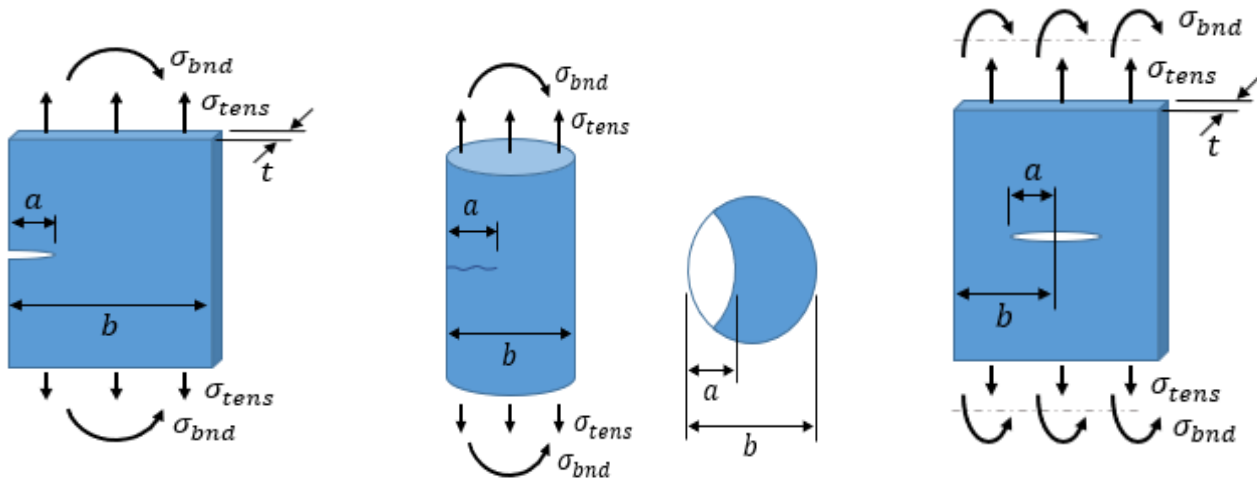
| α/α μετρήσεων | αριθμός κύκλων κόπωσης N | μεγιστή τάση εφελκουσμού (MPa) | ελάχιστη τάση εφελκουσμού (MPa) | μεγιστή καμπυτή τάση (MPa) | ελάχιστη τάση καμψής (MPa) | N (αριθμός κύκλων) | a(mm) | Kmax | Kmin | ΔK | R | C | da/dN (mm) | da (mm) | κριτήριο αστοχίας a/a' | N (αριθμός κύκλων) | a(mm) |
|---------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|-------------|------------|------------|---------|--------|-------------|--------------|-------------|------------------------|--------------------|-------|
| 12 | 1 | 200 | 600 | 500 | 480 | 200 | 0,05000 | 353,5705 | 300,7381 | 52,8 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00011197 | 0,024394603 | 200 | 0,0500 | |
| 13 | 2 | 400 | 600 | 500 | 480 | 400 | 0,074394603 | 431,2624 | 366,6379 | 64,4 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00006658 | 0,026631473 | 400 | 8,1711 | |
| 14 | 3 | 800 | 600 | 500 | 480 | 800 | 0,101027076 | 502,5855 | 427,4865 | 75,1 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00003587 | 0,028693308 | 800 | 21,6323 | |
| 15 | 4 | 200 | 800 | 720 | 740 | 200 | 0,129720384 | 778,9738 | 713,5138 | 65,5 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00079458 | 0,158915788 | 200 | 38,7546 | |
| 16 | 5 | 400 | 800 | 720 | 740 | 400 | 0,188636172 | 1.161,9679 | 1.064,3235 | 97,6 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00057142 | 0,22859705 | 400 | 83,0021148919 | |
| 17 | 6 | 800 | 800 | 720 | 740 | 800 | 0,517205876 | 1.555,4300 | 1.424,7216 | 130,7 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00044521 | 0,356164287 | 800 | 165,345566789 | |
| 18 | 7 | 2000 | 500 | 400 | 480 | 2.000 | 0,873370163 | 1.256,9056 | 1.036,0979 | 220,8 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00001971 | 0,039429977 | 2.000 | 296,2426146651 | |
| 19 | 8 | 4000 | 500 | 400 | 420 | 4.000 | 0,912800014 | 1.284,9651 | 1.059,2180 | 225,7 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00001015 | 0,040617787 | 4.000 | 337,2384025905 | |
| 20 | 9 | 8000 | 500 | 400 | 420 | 8.000 | 0,953417927 | 1.313,2432 | 1.062,5383 | 230,7 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00000523 | 0,04187134 | 8.000 | 377,4153778469 | |
| 21 | 10 | 2000 | 800 | 600 | 700 | 2.000 | 0,995289266 | 2.085,1835 | 1.541,2226 | 544,0 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00002802 | 0,056047612 | 2.000 | 418,8250543949 | |
| 22 | 11 | 4000 | 800 | 600 | 700 | 4.000 | 1,051336878 | 2.143,0908 | 1.584,0236 | 559,1 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00001699 | 0,067723386 | 4.000 | 496,9496315503 | |
| 23 | 12 | 8000 | 800 | 600 | 700 | 8.000 | 1,119065265 | 2.211,0437 | 1.634,2497 | 576,8 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00001115 | 0,089113996 | 8.000 | 587,7103059843 | |
| 24 | 13 | 2000 | 900 | 600 | 800 | 2.000 | 1,20827926 | 2.597,1605 | 1.698,1434 | 899,0 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00003063 | 1,20827926 | 2.000 | 700,3169977660 | |
| 25 | 14 | 4000 | 900 | 600 | 800 | 4.000 | 2,416558521 | 3.672,9396 | 2.401,5374 | 1.271,4 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00000222 | 2,416558521 | 4.000 | #API# | |
| 26 | 15 | 8000 | 900 | 600 | 800 | 8.000 | 4,833117042 | 5.194,3210 | 3.396,2668 | 1.798,0 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00000054 | 4,833117042 | 8.000 | #API# | |
| 27 | 16 | | | | | | | | | | | | | | | #API# | |
| 28 | 17 | | | | | | | | | | | | | | | #API# | |
| 29 | 18 | | | | | | | | | | | | | | | #API# | |
| 30 | 19 | | | | | | | | | | | | | | | #API# | |
| 31 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | #API# | |
| 32 | 21 | | | | | | | | | | | | | | | #API# | |
| 33 | 22 | | | | | | | | | | | | | | | #API# | |

Εικόνα 25: Παράδειγμα επιλογής και καταχώρησης στο πρόγραμμα υλικού ως αρχικό inrut

9.1.2 Γεωμετρία Ρωγμής – Πλάκας

Η γεωμετρία ρωγμών και η γεωμετρία της πλάκας του δοκιμίου, μετρείται από το μελετητή με τα κατάλληλα εργαλεία σε χιλιοστά (mm). Συγκεκριμένα οι απαραίτητες διαστάσεις για κάθε περίπτωση ξεχωριστά εμφανίζονται αναλυτικά στα επόμενα σχήματα:

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης



Σχήμα 18: Παρουσίαση των τριών περιπτώσεων για τις οποίες το πρόγραμμα υπολογίζει την ανάπτυξη ρωγμών

Αφού ο χρήστης αναγνωρίσει ποια περίπτωση από τις τρεις παραπάνω θέλει να εξετάσει και αφού μετρήσει τις διαστάσεις, τοποθετεί στα κατάλληλα κελία τα μετρούμενα μεγέθη. Στην παρακάτω εικόνα παραθέτουμε ένα παράδειγμα ορθής τοποθέτησης των εν λόγω γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

13 Titanium 6Al-4V, ELI

| Center Through Crack in Plate | | Mechanical Properties | | | | | | Fracture Properties | | | |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|--------|--------|---|--------|--|--|
| Material Name | Yield Strength (Mpa) | Elastic Modulus (Mpa) | Ultimate Strength of (Mpa) | Percent Elongation (%) | K1C (Mpa*mm ^{0.5}) | Ak | Bk | Co (mm/cycle) / (MPa*mm ^{0.5}) ^{1/n} | p | | |
| Titanium 6Al-4V, ELI | 758,4200 | 113.760,0000 | 827,3700 | 10,0000 | 2.432,3942 | 1,0000 | 0,5000 | 0,0981000000 | 0,2500 | | |

| εισαγωγή ιστορικού φόρτισης | | | | | | FORMAN EQUATION | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|-------------|------------|------------|---------|--------|-------------|------------|-------------|--------------------------------------|
| a/a μετρήσεων | αριθμός κύκλων κόπωσης N | μεγιστή τάση εφελκυσμού (MPa) | ελάχιστη τάση εφελκυσμού (MPa) | μέγιστη καμπυλιότητα (MPa) | ελάχιστη τάση κάμψης (MPa) | N (αριθμός κύκλων) | a(mm) | Kmax | Kmin | ΔK | R | C | da/dN (mm) | da (mm) | κρίτήριο αστοχίας a > a _f |
| 11 | 1 | 200 | 600 | 500 | 540 | 200 | 0,05000 | 353,5705 | 300,7381 | 52,8 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00012197 | 0,024394603 | |
| 12 | 2 | 400 | 600 | 500 | 540 | 400 | 0,074394603 | 431,2824 | 366,8379 | 64,4 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00006658 | 0,026632473 | |
| 13 | 3 | 800 | 600 | 500 | 540 | 800 | 0,101027076 | 502,5855 | 427,4865 | 75,1 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00003587 | 0,028693008 | |
| 14 | 4 | 200 | 800 | 720 | 780 | 200 | 0,129720384 | 778,9738 | 713,5138 | 65,5 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00079458 | 0,158915788 | |
| 15 | 5 | 400 | 800 | 720 | 780 | 400 | 0,288636172 | 1.161,9679 | 1.064,3235 | 97,6 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00057142 | 0,228569705 | |
| 16 | 6 | 800 | 800 | 720 | 780 | 800 | 0,517205876 | 1.555,4300 | 1.424,7216 | 130,7 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00044521 | 0,356164287 | |
| 17 | 7 | 2000 | 500 | 400 | 480 | 2.000 | 0,873370163 | 1.256,9056 | 1.036,0979 | 220,8 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00001971 | 0,039429977 | |
| 18 | 8 | 4000 | 500 | 400 | 480 | 4.000 | 0,912800014 | 1.284,9651 | 1.059,2280 | 225,7 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00001015 | 0,040617787 | |
| 19 | 9 | 8000 | 500 | 400 | 480 | 8.000 | 0,953417927 | 1.313,2432 | 1.082,5383 | 230,7 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00000523 | 0,04187134 | |
| 20 | 10 | 2000 | 800 | 600 | 700 | 2.000 | 0,995289266 | 2.085,1835 | 1.541,2226 | 544,0 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00002802 | 0,056047612 | |
| 21 | 11 | 4000 | 800 | 600 | 700 | 4.000 | 1,051336878 | 2.143,0908 | 1.584,0236 | 559,1 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00001693 | 0,067728386 | |
| 22 | 12 | 8000 | 800 | 600 | 700 | 8.000 | 1,119065265 | 2.211,0437 | 1.634,2497 | 576,8 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00001115 | 0,089213996 | |
| 23 | 13 | 2000 | 900 | 600 | 800 | 2.000 | 1,20827926 | 2.597,1605 | 1.698,1434 | 899,0 | 0,6538 | 0,638056206 | - | 1,20827926 | |
| 24 | 14 | 4000 | 900 | 600 | 800 | 4.000 | 2,416558521 | 3.672,9396 | 2.401,5374 | 1.271,4 | 0,6538 | 0,638056206 | - | 2,416558521 | |
| 25 | 15 | 8000 | 900 | 600 | 800 | 8.000 | 4,833117042 | 5.194,3210 | 3.396,2868 | 1.798,0 | 0,6538 | 0,638056206 | - | 4,833117042 | FAILURE |
| 26 | 16 | | | | | | 9,666234083 | | | | | | | | |

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Εικόνα 26: Τοποθέτηση μετρούμενων διαστάσεων ως δεύτερο input στο πρόγραμμα

Όταν ο χρήστης, καταχωρήσει τις τιμές a , b , t σε χιλιοστά (mm), η αριθμομηχανή υπολογίζει αυτόματα τους γεωμετρικούς παράγοντες Y_t και Y_b αλλά και το τελικό μήκος ρωγμής a_f που εμφανίζεται σε κίτρινο πλαίσιο. Το a_f είναι πολύ σημαντικό καθώς αποτελεί το κριτήριο αστοχίας. Οι υπολογισμοί που γίνονται θα αναλυθούν στη συνέχεια.

9.1.3 Ιστορικό Φόρτισης

Τέλος ο χρήστης απαιτείται να εισάγει το ιστορικό φόρτισης. Ο υπολογιστής ανάπτυξης ρωγμών λαμβάνει υπόψη το εκάστοτε ιστορικό τάσεων που εφαρμόζεται κάθε φορά στο τμήμα. Το ιστορικό τάσεων αποτελείται από ένα ή περισσότερα εύρη τάσεων.

Το εύρος τάσης ορίζεται από το χρήστη καταχωρώντας τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της τάσης εφελκυσμού, τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τάσης κάμψης και έναν αριθμό κύκλων που σχετίζονται με το εύρος. Ένας μόνο κύκλος του εύρους τάσης εναλλάσσει την τάση από την ελάχιστη τάση εφελκυσμού και κάμψης προς τη μέγιστη τάση εφελκυσμού και κάμψης.

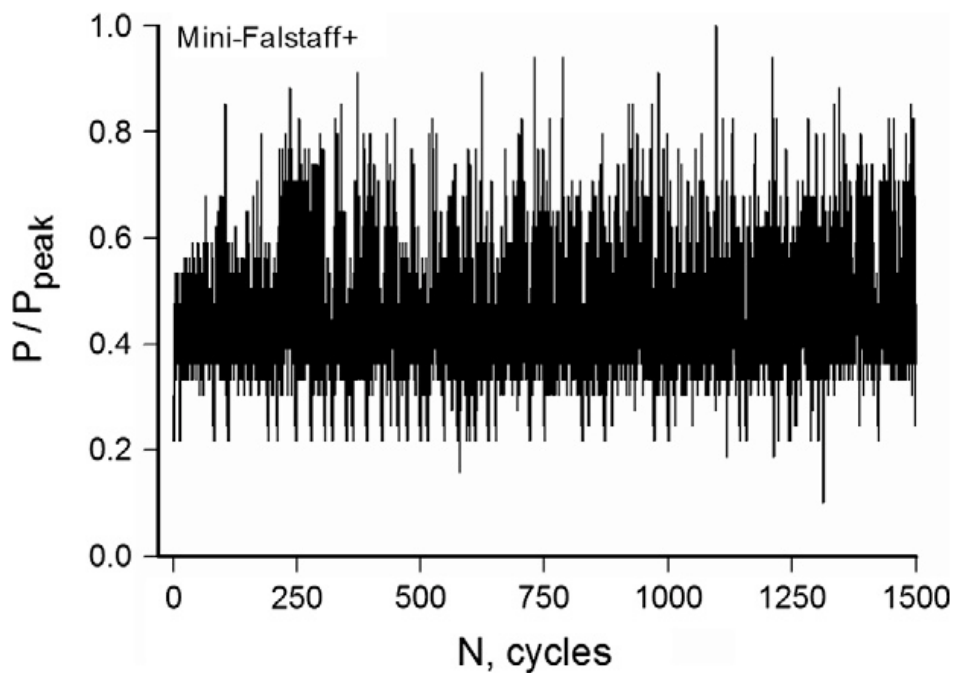
Το ιστορικό τάσεων εκτελείται επανειλημμένα μέχρι την αποτυχία. Ο αριθμός των κύκλων που χρειάστηκε για να αποτύχει το εξάρτημα αναφέρεται μαζί με τον αριθμό των επαναλήψεων του ιστορικού τάσεων. Ένα παράδειγμα ιστορικού τάσεων παρουσιάζεται παρακάτω το οποίο αποτελείται από δεκαπέντε

| Center Through Crack in Plate | | Mechanical Properties | | | | | Fracture Properties | | | | | | | | |
|--|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------|------------|------------|---------------------------------|--------|-------------|--------------|-------------|---------------------------|
| | | Material Name | Yield Strength (Mpa) | Elastic Modulus (Mpa) | Ultimate Strength sigmaF (Mpa) | Percent Elongation (%) | K1C (Mpa*mm^0.5) | Ak | Bk | Co (mm/cycle) / (Mpa*mm^0.5)^n | P | | | | |
| Εισαγωγή διαστάσεων ρωγμής-πλάκας ημι-μήκος ρωγμής a (mm) 0,05 απόσταση b (mm) 4 πάχος πλάκας t (mm) 2 Geometry factor tension Y_t 1,0254 Geometry factor bending Y_b 0,5127 a_f (mm) 3,1139 | | Titanium 6Al-4V, ELI | 758,4200 | 113.760,0000 | 827,3700 | 10,0000 | 2.432,3942 | 1,0000 | 0,5000 | 0,0981000000 | 0,2500 | | | | |
| εισαγωγή ιστορικού φόρτισης | | FORMAN EQUATION | | | | | | | | | | | | | |
| a/a πρήσεων | αριθμός κύκλων κόπωσης N | μεγιστή τάση εφελκυσμού [MPa] | ελάχιστη τάση εφελκυσμού [MPa] | μεγιστή καμπτική τάση [MPa] | ελάχιστη τάση κάμψης [MPa] | N (αριθμός κύκλων) | a[mm] | Kmax | Kmin | ΔK | R | C | da/dN [mm] | da [mm] | κριτήριο αστοχίας ai > af |
| 1 | 200 | 600 | 500 | 540 | 480 | 200 | 0,05000 | 353,5705 | 300,7381 | 52,8 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00012197 | 0,024394603 | |
| 2 | 400 | 600 | 500 | 540 | 480 | 400 | 0,074394603 | 431,2824 | 366,8379 | 64,4 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00006658 | 0,026532473 | |
| 3 | 800 | 600 | 500 | 540 | 480 | 800 | 0,101027076 | 502,5855 | 427,4865 | 75,1 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00003587 | 0,028693308 | |
| 4 | 200 | 800 | 720 | 780 | 740 | 200 | 0,129720384 | 778,9738 | 713,5138 | 65,5 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00079458 | 0,158915788 | |
| 5 | 400 | 800 | 720 | 780 | 740 | 400 | 0,288636172 | 1.161,9679 | 1.064,3235 | 97,6 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00057142 | 0,228569705 | |
| 6 | 800 | 800 | 720 | 780 | 740 | 800 | 0,517205876 | 1.555,4300 | 1.424,7216 | 130,7 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00044521 | 0,356164287 | |
| 7 | 2000 | 500 | 400 | 480 | 420 | 2.000 | 0,873370163 | 1.256,9056 | 1.036,0979 | 220,8 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00001971 | 0,039429977 | |
| 8 | 4000 | 500 | 400 | 480 | 420 | 4.000 | 0,91280014 | 1.284,9651 | 1.059,2280 | 225,7 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00001015 | 0,040617787 | |
| 9 | 8000 | 500 | 400 | 480 | 420 | 8.000 | 0,953417927 | 1.313,2432 | 1.082,5383 | 230,7 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00000523 | 0,04187134 | |
| 10 | 2000 | 800 | 600 | 700 | 500 | 2.000 | 0,995289266 | 2.085,1835 | 1.541,2226 | 544,0 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00002802 | 0,056047612 | |
| 11 | 4000 | 800 | 600 | 700 | 500 | 4.000 | 1,051336878 | 2.143,0908 | 1.584,0236 | 559,1 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00001693 | 0,067728386 | |
| 12 | 8000 | 800 | 600 | 700 | 500 | 8.000 | 1,119065265 | 2.211,0437 | 1.634,2497 | 576,8 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00001115 | 0,089213996 | |
| 13 | 2000 | 900 | 600 | 800 | 500 | 2.000 | 1,20827926 | 2.597,1605 | 1.698,1434 | 899,0 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00003063 | 1,20827926 | |
| 14 | 4000 | 900 | 600 | 800 | 500 | 4.000 | 2,416558521 | 3.672,9396 | 2.401,5374 | 1.271,4 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00000222 | 2,416558521 | |
| 15 | 8000 | 900 | 600 | 800 | 500 | 8.000 | 4,833117042 | 5.194,3210 | 3.396,2868 | 1.798,0 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00000054 | 4,833117042 | FAILURE |

περιοχές τάσεων.

Εικόνα 27: Εισαγωγή ιστορικού τάσεων ως τρίτο input στο πρόγραμμα

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι ο ακριβής προσδιορισμός των τάσεων που δέχεται ένα συγκεκριμένο πάνελ - δοκίμιο του ελικοπτέρου δεν είναι μια εύκολη διαδικασία και απαιτούνται ειδική αισθητήρες όπως τα επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gauges). Επίσης λόγω του φαινομένου της τύρβης, υπάρχει μεγάλη αστάθεια στις τάσεις και για το λόγο αυτό μια κανονικοποίηση των τάσεων σε ένα ανάλογο φάσμα φορτίων είναι απαραίτητη. Ανάλογα με την αποστολή του ελικοπτέρου, τις ώρες πτήσεις και την καταγραφή των ελιγμών που πραγματοποιούνται, μπορούμε να συνθέσουμε το φάσμα φορτίων που το ελικόπτερο έχει δεχθεί. Ενδεικτικά στο επόμενο σχήμα παραθέτουμε το πιο γνωστό βιομηχανική φάσμα φορτίων «Falstaff Spectrum» το οποίο προσομοιώνει τα φορτία που ασκούνται για μαχητικό αεροσκάφος.



Σχήμα 19: Απεικόνιση φάσματος φορτίου Falstaff. Πηγή [48]

Τα φάσματα φορτίων κατασκευάζονται από ειδικά προγράμματα όπως το AFGROW εισάγοντας το ιστορικό φόρτισης όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 27**.

9.2 Έξοδοι (Outputs)

Μετά την καταχώρηση όλων των εισόδων στον υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών, ο χρήστης λαμβάνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Τον αριθμό των κύκλων που μπορούν να επιτευχθούν πριν από την αποτυχία του εξαρτήματος,
- Τον αριθμό των επιμέρους ιστορικών τάσεων που επαναλήφθηκαν πριν από την αποτυχία
- Μια γραφική παράσταση της αύξησης του μεγέθους ρωγμών για κάθε ιστορικό φόρτισης (τάσεις και κύκλους) που προστίθεται.

Οι πιθανές αιτίες αποτυχίας είναι:

- Υπέρβαση κρίσιμης έντασης τάσης (η ένταση τάσης στο τμήμα έχει υπερβεί την ένταση κρίσιμης τάσης-σκληρότητα κατάγματος- του υλικού)
- Υπέρβαση του τελικού μήκους ρωγμής του υλικού α_f
- Υπέρβαση των διαστάσεων (το μέγεθος της ρωγμής έχει ξεπεράσει το κρίσιμο μήκος ρωγμής.)

9.2.1 Ιστορικό φορτίσεων μέχρι την αποτυχία

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους υπολογισμούς του προγράμματος:

Πίνακας 9: Πληροφορίες που προκύπτουν ως output όσον αφορά τον συνολικό αριθμό κύκλων N και των τάσεων κατά μέσο όρο που έχουν ασκηθεί στο εξάρτημα που εξετάζουμε.

| Σύνολο κύκλων N μέχρι αστοχία | Μ.Ο εφελκιστικών τάσεων (Mpa) | Μ.Ο ελάχιστων εφελκιστικών τάσεων (Mpa) | Μ.Ο μέγιστων καμπτικών τάσεων (Mpa) | Μ.Ο ελάχιστων καμπτικών τάσεων (Mpa) |
|-------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 44800 | 720 | 564 | 660 | 528 |

Ο χρήστης ακόμη λαμβάνει πληροφορίες που συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα:

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

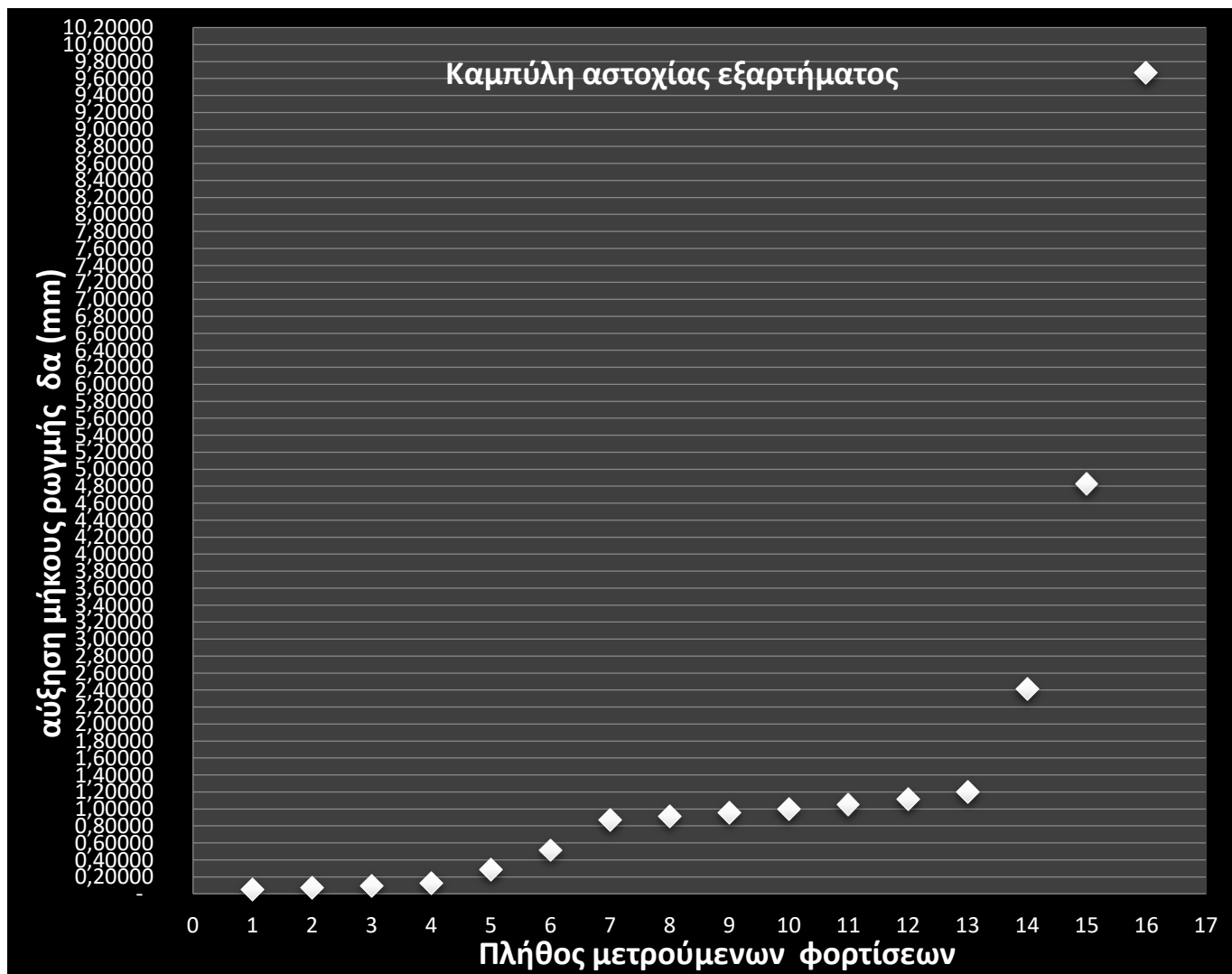
Πίνακας 10: Παρουσίαση των υπολογισμών που εκτελεί αυτόματα ο υπολογιστής ανάπτυξης ρωγμών. Κάθε γραμμή αποτελεί έναν κύκλο υπολογισμών από την εισαγωγή (input) του ιστορικού φόρτισης έως την ανάπτυξη ρωγμής da που αυτό (το ιστορικό φορτίων) επιφέρει.

| FORMAN EQUATION | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------|------------|------------|---------|--------|-------------|--------------|-------------|------------------------------|
| N (αριθμός κύκλων) | a(mm) | Kmax | Kmin | ΔK | R | C | da/dN (mm) | da (mm) | κριτήριο αστοχίας ai > af |
| 200 | 0,05000 | 353,5705 | 300,7381 | 52,8 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00012197 | 0,024394603 | |
| 400 | 0,074394603 | 431,2824 | 366,8379 | 64,4 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00006658 | 0,026632473 | |
| 800 | 0,101027076 | 502,5855 | 427,4865 | 75,1 | 0,8506 | 2,810673969 | 0,00003587 | 0,028693308 | |
| 200 | 0,129720384 | 778,9738 | 713,5138 | 65,5 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00079458 | 0,158915788 | |
| 400 | 0,288636172 | 1.161,9679 | 1.064,3235 | 97,6 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00057142 | 0,228569705 | |
| 800 | 0,517205876 | 1.555,4300 | 1.424,7216 | 130,7 | 0,9160 | 7,762639078 | 0,00044521 | 0,356164287 | |
| 2.000 | 0,873370163 | 1.256,9056 | 1.036,0979 | 220,8 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00001971 | 0,039429977 | |
| 4.000 | 0,91280014 | 1.284,9651 | 1.059,2280 | 225,7 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00001015 | 0,040617787 | |
| 8.000 | 0,953417927 | 1.313,2432 | 1.082,5383 | 230,7 | 0,8243 | 2,112287242 | 0,00000523 | 0,04187134 | |
| 2.000 | 0,995289266 | 2.085,1835 | 1.541,2226 | 544,0 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00002802 | 0,056047612 | |
| 4.000 | 1,051336878 | 2.143,0908 | 1.584,0236 | 559,1 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00001693 | 0,067728386 | |
| 8.000 | 1,119065265 | 2.211,0437 | 1.634,2497 | 576,8 | 0,7391 | 1,051191114 | 0,00001115 | 0,089213996 | |
| 2.000 | 1,20827926 | 2.597,1605 | 1.698,1434 | 899,0 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00003063 | 1,20827926 | |
| 4.000 | 2,416558521 | 3.672,9396 | 2.401,5374 | 1.271,4 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00000222 | 2,416558521 | |
| 8.000 | 4,833117042 | 5.194,3210 | 3.396,2868 | 1.798,0 | 0,6538 | 0,638056206 | - 0,00000054 | 4,833117042 | FAILURE |
| | 9,666234083 | | | | | | | | |

Όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο αστοχίας εμφανίζεται, όπως φαίνεται και στον Πίνακας 10, το μήνυμα «Failure».

9.2.2 Καμπύλη Αστοχίας (Failure Diagram)

Ένα παράδειγμα της γραφικής παράστασης που λαμβάνουμε ως έξοδο (output) σχετικά με την εξέλιξη του μήκους ρωγμής, παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 20: Εξέλιξη της καμπύλης αστοχίας εξαρτήματος που έχει υποβληθεί σε 16 φάσματα φορτίων κόπωσης. Στον κάθετο άξονα εμφανίζεται η αύξηση της ρωγμής, σε mm, που επιφέρει το καθ' ένα από τα 16 αυτά φάσματα φορτίων.

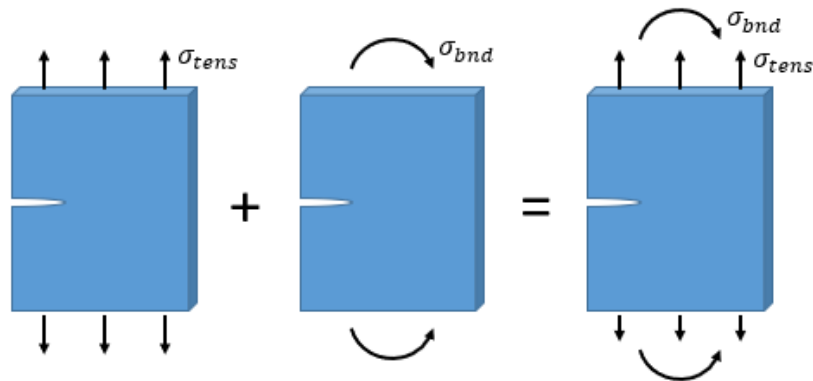
9.3 Επεξήγηση Υπολογισμών

Όπως αναλύσαμε και στο Κεφάλαιο 8, οι δυσκολίες που αντιμετωπίζουμε στη θεωρία ανοχής σε βλάβη είναι ο προσδιορισμός του παράγοντα έντασης τάσης (Stress Intensity Factor) αλλά και η τεράστια γκάμα περιπτώσεων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών που μπορεί κάποιος μελετητής να συναντήσει.

9.3.1 Υπολογισμός SIF Από Υπέρθυση Τάσεων

Επειδή η έννοια του παράγοντα έντασης τάσης προϋποθέτει γραμμική ελαστική συμπεριφορά υλικού, οι λύσεις του παράγοντα έντασης τάσης μπορούν να συνδυαστούν με υπέρθεση τάσεων για την εξεύρεση λύσεων σε πιο περίπλοκα προβλήματα.

Για παράδειγμα, η λύση του παράγοντα έντασης τάσης για μια τεντωμένη πλάκα με ένα άκρο μπορεί να συνδυαστεί με τη λύση για μια ραγισμένη πλάκα με ένα άκρο σε κάμψη, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 28 Υπέρθυση εφελκυστικών και καμπτικών τάσεων. Πηγή [37]

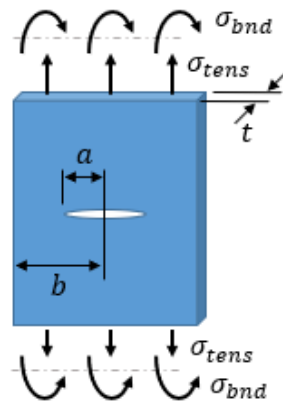
Ο συντελεστής έντασης τάσης για την υπέρθεση τάσεων είναι:

$$K = (Y_t * \sigma_t + Y_b * \sigma_b) * \sqrt{\pi * a}$$

9.3.2 Πλάκα Με Ρωγμή Πάχους t Στο Κέντρο

Σ' αυτή τη περίπτωση προβλήματος τα inputs που απαιτούνται είναι κατά σειρά τα παρακάτω [49] :

- Ιδιότητες υλικού από «Materials Index»
- a : αρχικό μήκος ρωγμής
- t : πάχος πλάκας
- σ_t : εφελκυστική τάση
- σ_b : καμπτική τάση



Εικόνα 29 : Απεικόνιση της περίπτωσης ενός αεροπορικού πάνελ με ρωγμή στο κέντρο, που υπολογίζεται από των υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών

Στην περίπτωση αυτή, μετά την είσοδο των απαραίτητων δεδομένων ο υπολογιστής ρωγμών κάνει αυτόματα τους παρακάτω υπολογισμούς σύμφωνα με τη μεθοδολογία πρόβλεψης ανάπτυξης ρωγμών κατά Forman [50]:

$$1. Y_t = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2b}\right)}$$

$$2. Y_b = \frac{Y_t}{2}$$

$$3. K = (Y_t * \sigma_t + Y_b * \sigma_b) * \sqrt{\pi * \alpha}$$

$$4. \alpha_f = \frac{K_{IC}^2}{\pi \sigma_F^2}$$

$$5. K_{max} = Y \sigma_{max} \sqrt{\pi \alpha}$$

$$6. K_{min} = Y \sigma_{min} \sqrt{\pi \alpha}$$

$$7. \Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi \alpha}$$

$$8. R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$$

$$9. C = \frac{C_0}{(1-R)^{n(1-\gamma)}}$$

$$10. \frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^P}{(1-R) K_c - \Delta K}$$

$$11. da = \frac{da}{dN} * N$$

$$12. a_{i+1} = a_i + da$$

Στο υπολογισμό του βήματος 12, ολοκληρώνεται η πορεία ανάπτυξης της ρωγμής για τον πρώτο αριθμό κύκλων φόρτισης που όπως είπαμε περιγράφεται από τις εφελκυστικές και καμπτικές τάσεις που έχουμε εισάγει.

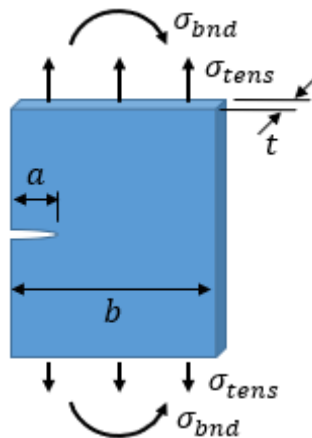
Εισάγοντας επιπλέον ιστορικό φόρτισης (κύκλους – τάσεις) επαναλαμβάνονται οι παραπάνω υπολογισμοί μέχρι τη συνθήκη $a_i > a_f$ όπου και το πρόγραμμα μας εμφανίζει το μήνυμα « FAILURE» λόγω της συνθήκης :

« =IF(Q12="";""; (IF(Q12<\$G\$8;"";IF(Q12>\$G\$8;"FAILURE";)))) »

9.3.3 Πλάκα Με Ρωγμή Στην Άκρη

Εδώ τα inputs που απαιτούνται είναι κατά σειρά τα παρακάτω [39] :

- Ιδιότητες υλικού από «Materials Index»
- σ_t : εφελκυστική τάση
- σ_b : καμπτική τάση
- a : μήκος αρχικής ρωγμής
- b : μήκος πλάκας κατά τη διεύθυνση ανάπτυξης της ρωγμής



Εικόνα 30: Απεικόνιση της περίπτωσης ενός αεροπορικού πάνελ με ρωγμή στην άκρη, που υπολογίζεται από των υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών

Στην περίπτωση αυτή, μετά την είσοδο των απαραίτητων δεδομένων ο υπολογιστής ρωγμών κάνει αυτόματα τους παρακάτω υπολογισμούς σύμφωνα με τη μεθοδολογία πρόβλεψης ανάπτυξης ρωγμών κατά Forman:

$$1. Y_t = 0,265(1 - a)^4 + \frac{0,857+0,265a}{(1-a)^{\frac{3}{2}}}$$

$$2. Y_b = \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha} * \tan \frac{\pi\alpha}{2}} * \left[\frac{0,923+0,199(1-\sin\frac{\pi\alpha}{2})^4}{\cos\frac{\pi\alpha}{2}} \right]$$

$$3. \alpha_f = \frac{K_{IC}^2}{\pi\sigma_F^2}$$

$$4. K = (Y_t * \sigma_t + Y_b * \sigma_b) * \sqrt{\pi * \alpha}$$

$$5. K_{max} = Y\sigma_{max}\sqrt{\pi\alpha}$$

$$6. K_{min} = Y\sigma_{min}\sqrt{\pi\alpha}$$

$$7. \Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi\alpha}$$

$$8. R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$$

$$9. C = \frac{C_0}{(1-R)^{n(1-\gamma)}}$$

$$10. \frac{da}{dN} = \frac{C\Delta K^P}{(1-R)K_c - \Delta K}$$

$$11. da = \frac{da}{dN} * N$$

$$12. a_{i+1} = a_i + da$$

Στο υπολογισμό του βήματος 12, ολοκληρώνεται η πορεία ανάπτυξης της ρωγμής για το πρώτο αριθμό κύκλων φόρτισης που όπως είπαμε περιγράφεται από τις εφελκιστικές και καμπτικές τάσεις που έχουμε εισάγει.

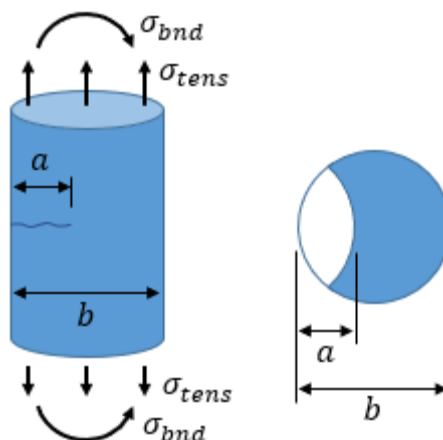
Εισάγοντας επιπλέον ιστορικό φόρτισης (κύκλους – τάσεις) επαναλαμβάνονται οι παραπάνω υπολογισμοί μέχρι τη συνθήκη $a_i > a_f$ όπου και το πρόγραμμα μας εμφανίζει το μήνυμα « FAILURE» λόγω της συνθήκης :

« =IF(Q12="";"";(IF(Q12<\$G\$8;"";IF(Q12>\$G\$8;"FAILURE";)))) »

9.3.4 Κυλινδρικό Εξάρτημα Με Ρωγμή

Σ' αυτή τη περίπτωση προβλήματος τα inputs που απαιτούνται είναι κατά σειρά τα παρακάτω [49] :

- Ιδιότητες υλικού από «Materials Index»
- σ_t : εφελκυστική τάση
- σ_b : καμπτική τάση
- a : αρχικό μήκος ρωγμής
- b : διάμετρος κυλίνδρου



Εικόνα 31: Απεικόνιση της περίπτωσης ενός κυλινδρικού εξαρτήματος με ρωγμή, που υπολογίζεται από των υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών

Στην περίπτωση αυτή, μετά την είσοδο των απαραίτητων δεδομένων ο υπολογιστής ρωγμών κάνει αυτόματα τους παρακάτω υπολογισμούς σύμφωνα με τη μεθοδολογία προβλέψεις ανάπτυξης ρωγμών κατά Forman:

$$1. \beta = \frac{\pi}{2} * \frac{\alpha}{2}$$

$$2. G = 0,92 \left(\frac{2}{\pi} \right) * \sec(\beta) * \sqrt{\frac{\tan \beta}{\beta}}$$

$$3. H = 1 - \sin \beta$$

$$4. Y_t = G * (0,752 + 1,286 * \beta + 0,37H^3)$$

$$5. Y_b = G * (0,923 + 0,199H^4)$$

$$6. \alpha_f = \frac{K_{IC}^2}{\pi \sigma_F^2}$$

$$7. K = (Y_t * \sigma_t + Y_b * \sigma_b) * \sqrt{\pi * \alpha}$$

$$8. K_{max} = Y \sigma_{max} \sqrt{\pi \alpha}$$

$$9. K_{min} = Y \sigma_{min} \sqrt{\pi \alpha}$$

$$10. \Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi \alpha}$$

$$11. R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$$

$$12. C = \frac{C_0}{(1-R)^{n(1-\gamma)}}$$

$$13. \frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^P}{(1-R) K_c - \Delta K}$$

$$14. da = \frac{da}{dN} * N$$

$$15. a_{i+1} = a_i + da$$

Στο υπολογισμό του βήματος 15, ολοκληρώνεται η πορεία ανάπτυξης της ρωγμής για το πρώτο αριθμό κύκλων φόρτισης που όπως είπαμε περιγράφεται από τις εφελκιστικές και καμπτικές τάσεις που έχουμε εισάγει.

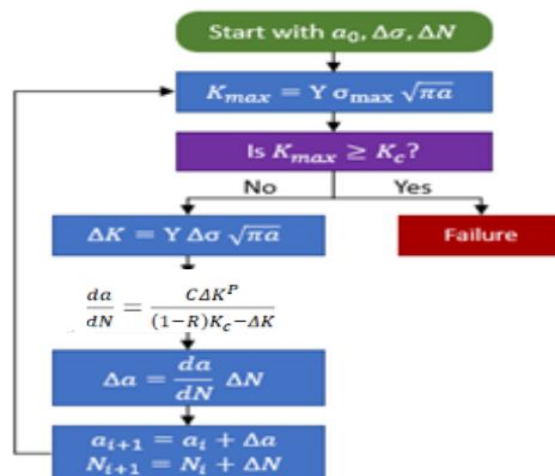
Εισάγοντας επιπλέον ιστορικό φόρτισης (κύκλους – τάσεις) επαναλαμβάνονται οι παραπάνω υπολογισμοί μέχρι τη συνθήκη $a_i > a_f$ όπου και το πρόγραμμα μας εμφανίζει το μήνυμα « FAILURE» λόγω της συνθήκης :

« =IF(Q12="";"";(IF(Q12<\$G\$8;"";IF(Q12>\$G\$8;"FAILURE";)))) »

9.4 Μεθοδολογία Πρόβλεψης Αστοχίας

Η διάρκεια ζωής ενός εξαρτήματος μέχρι την αστοχία, εκφράζεται συνήθως ως ο αριθμός κύκλων που χρειάζεται για την ανάπτυξη της ρωγμής από κάποια αρχική κατάσταση μέχρι την κρίσιμη κατάσταση. Υπάρχουν κλειστές εκφράσεις για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής ενός εξαρτήματος για απλές περιπτώσεις (π.χ. Miner).

Ωστόσο, σε γενικές γραμμές είναι απαραίτητη η χρήση αριθμητικών μεθόδων για τον προσδιορισμό της αναμενόμενης διάρκειας ζωής ενός εξαρτήματος. Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών κατά την εφαρμογή της εξίσωσης Forman περιγράφεται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 21: Σχηματική επεξήγηση του αλγορίθμου που χρησιμοποιείτε στους υπολογισμούς. Πηγή [37]

Στη διαδικασία που φαίνεται παραπάνω, το αρχικό μέγεθος ρωγμής είναι γνωστό ή το υποθέτουμε. Το εφαρμοζόμενο εύρος τάσης $\Delta\sigma$ είναι επίσης γνωστό και επιλέγεται ένα μέγεθος βήματος για τον αριθμό κύκλων ΔN .

Το πρώτο βήμα είναι να υπολογίσουμε τον παράγοντα έντασης τάσης για το τρέχον μέγεθος ρωγμής στη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση :

$$K_{max} = Y\sigma_{max}\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

Στη συνέχεια ελέγχουμε για την συνθήκη-κριτήριο αστοχίας. Εάν το K_{max} υπερβεί την κρίσιμη ένταση τάσης του υλικού K_c , τότε πληρούται η συνθήκη αστοχίας και η αριθμητική μέθοδος διακόπτεται, διαφορετικά συνεχίζεται για τον προσδιορισμό της ανάπτυξης ρωγμών για την τρέχουσα επανάληψη. Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός το εύρος έντασης τάσης:

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Χρησιμοποιώντας το υπολογισμένο εύρος έντασης τάσης και μία από τις σχέσεις ανάπτυξης ρωγμών (για παράδειγμα, την εξίσωση Forman ή WALKER ή NASGRO) υπολογίζουμε τον ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C\Delta K^P}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (3\alpha)$$

$$\frac{da}{dN} = C_o \left(\frac{1}{(1-R)^{1-\gamma}} * \Delta K \right)^n \quad (3\beta)$$

$$\frac{da}{dN} = C_o * \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left[1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right]^p}{\left[1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right]^q} \quad (3\gamma)$$

Χρησιμοποιούμε τον ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών που βρήκαμε παραπάνω μαζί με το μέγεθος του βήματος κύκλου για να προσδιορίσουμε τη σταδιακή ανάπτυξη της ρωγμής για αυτήν την επανάληψη:

$$\Delta a = \frac{da}{dN} \Delta N \quad (4)$$

Σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένο πρόγραμμα υπολογισμού ανάπτυξης ρωγμών, σε όλους τους υπολογισμούς έχει χρησιμοποιηθεί βήμα κύκλου $\Delta N=1$.

Τελευταίο βήμα της αριθμητικής μεθόδου είναι ο προσδιορισμός του νέου μεγέθους ρωγμής που είναι:

$$a_{i+1} = a_i + \Delta a \quad (5)$$

Αυτό το νέο μέγεθος ρωγμής χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την επόμενη επανάληψη της αριθμητικής μεθόδου. Η ρωγμή αναπτύσσεται επαναληπτικά έως ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη αστοχίας.

Ο συνολικός αριθμός κύκλων που έγιναν μέχρι να παρουσιαστεί αποτυχία, δηλαδή ο αριθμός κύκλων που χρειάστηκε για να αυξηθεί η ρωγμή στο κρίσιμο μέγεθος, είναι ουσιαστικά η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του εξαρτήματος.

10. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Έχοντας ολοκληρώσει το ερευνητικό μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας από τις διάφορες πηγές που βρήκαμε αλλά και τον συνδυασμό τους με γνώσεις των μαθημάτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, καταφέραμε να κατασκευάσουμε προγράμματα για την ανάλυση αξιοπιστίας συστήματος ελικοπτέρου και των υπολογισμό της καμπύλης αστοχίας διαφόρων αεροπορικών εξαρτημάτων αυτού.

Όσον αφορά το πρόγραμμα ανάλυσης της αξιοπιστίας του ελικοπτέρου, πρόκειται για ένα πρόγραμμα που στόχο έχει να εκτιμήσει την αξιοπιστία - διαθεσιμότητα του συστήματος υπολογίζοντας τη συνάρτηση αξιοπιστίας $R(t)$. Έχοντας υπολογίσει την $R(t)$ ουσιαστικά έχουμε στα χεριά μας ένα μοντέλο προβλέψεις της πιθανότητας να είναι το ελικόπτερο διαθέσιμο σε μελλοντικό χρόνο. Σαφώς η πρόβλεψη αυτή έχει παραδοχές αφού θεωρούμε ότι οι συνθήκες λειτουργίας του ελικοπτέρου παραμένουν σταθερές.

Το εν λόγω πρόγραμμα μας υπολογίζει επίσης χρήσιμους δείκτες αξιοπιστίας αλλά και χρονικά διαστήματα σημαντικά για μια επιχείρηση η οποία έχει αναλάβει την τεχνική υποστήριξη ενός τέτοιου συστήματος. Για παράδειγμα, η καταγραφή των εργατωρών που δαπανήθηκαν ή ο χρόνος αναμονής για ανταλλακτικά είναι σημαντικές πληροφορίες που πρέπει να καταγράφονται από την επιχείρηση προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν αδυναμίες στη γραμμή συντήρησης με απώτερο στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας της επιχείρησης. Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα που δημιουργήσαμε, όλες αυτές οι σημαντικές πληροφορίες καταγράφονται αυτόματα, και επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα αναβάθμισης του προγράμματος ώστε να υπολογίζει και κόστη ή έξοδα της επιχείρησης όσον αφορά την διάθεση ανταλλακτικών και τις εργατώρες.

Όσον αφορά τους υπολογισμούς που γίνονται στο πρόγραμμα και την κατασκευή του ιστογράμματος, το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει στο παράδειγμα που παραθέσαμε στο κεφάλαιο 6 είναι πολύ ικανοποιητικό, δεδομένου ότι εξάγονται κοινά αποτελέσματα με γνωστά εμπορικά προγράμματα όπως το EasyFit.

Επιπλέον, εκτός της καλής ανάλυσης των δεδομένων ζωής που μας παρέχει, λειτουργεί ως ένα χρήσιμο εργαλείο μάνατζμεντ, για το συντονισμό της συντήρησης και επισκευών που πραγματοποιούνται στο σύστημα Bell OH 58D Kiowa Warrior. Αποτελεί ακόμη εργαλείο βελτιστοποίησης της απόδοσης του συστήματος συντήρησης όσον αφορά τον τομέα της προμήθειας ανταλλακτικών (Logistics) και τον τομέα των επισκευών από το τεχνικό προσωπικό. Τέλος συνδυάζει απλότητα και αμεσότητα χαρακτηριστικά σημαντικά για τον χρήστη.

Οι περιορισμοί που συναντά το πρόγραμμα ανάλυσης της αξιοπιστίας του ελικοπτέρου είναι όχι τόσο η εύρεση δεδομένων αλλά περισσότερο η ικανοποιητική συλλογή ικανού αριθμού δεδομένων ζωής που υπολογίζεται σε χρονική διάρκεια περίπου ενός χρόνου. Επίσης, ακόμη κι αν υπολογίσουμε την αξιοπιστία του συστήματος έχοντας καταγράψει για παράδειγμα εκατό παρατηρήσεις, θα συνεχίσουμε την περαιτέρω καταγραφή δεδομένων προκειμένου να συλλέξουμε ικανοποιητικό αριθμό δεδομένων για κάθε ζώνη συντήρησης. Σε μεταγενέστερο χρόνο λοιπόν, σκόπιμο είναι να ξανά υπολογίσουμε την αξιοπιστία του συστήματος, αυτή τη φορά χρησιμοποιώντας τις επιμέρους αξιοπιστίες της κάθε ζώνης συντήρησης. Υποθέτοντας δηλαδή ότι οι ζώνες συντήρησης είναι συνδεδεμένες σε σειρά, με το γινόμενο τους να μας βγάζει την συνολική αξιοπιστία του συστήματος. Η δεύτερη προσέγγιση προφανώς απαιτεί χρονικό διάστημα πέραν του ενός χρόνου.

Εν συνεχεία αναπτύξαμε ένα πρόγραμμα για τον υπολογισμό της καμπύλης αστοχίας διαφόρων αεροπορικών εξαρτημάτων μέσω της θεωρίας ανοχής σε βλάβη (Damage Tolerance). Αυτό αποτελεί ένα χρήσιμο βοήθημα για γρήγορους υπολογισμούς και πρόβλεψη της εξέλιξης ρωγμής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το παράδειγμα που παρουσιάστηκε είναι λογικά και συμφωνούν με γνωστά εμπορικά προγράμματα.

Η εύρεση και ανάλυση μιας ρωγμής που βρέθηκε πάνω σε μια αεροπορική κατασκευή αποτελεί ξεχωριστό πρόβλημα για το μηχανικό ο οποίος πρέπει να κατηγοριοποιήσει την εν λόγω περίπτωση και εφόσον υπάγεται σε μια από τις τρεις περιπτώσεις που αναπτύξαμε στον υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών, μπορεί να κάνει προβλέψεις. Σε αντίθετη περίπτωση οι υπολογισμοί δεν καλύπτονται από το πρόγραμμα και πρέπει να γίνουν από το μηχανικό. Ωστόσο η καταχώρηση, σταδιακά, όλο και περισσότερων περιπτώσεων στο πρόγραμμα θα βοηθήσει στην συμπλήρωση των πιο συχνά συναντούμενων περιπτώσεων ανάπτυξης ρωγμών.

Το πρόγραμμα υπολογισμού της διάδοσης ρωγμών που αναπτύξαμε αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση του χρόνου ζωής διαφόρων εξαρτημάτων που υφίστανται κόπωση. Έρχεται να συμπλήρωσε τις διαδικασίες επιθεώρησης NDI, αφού μια καλή εκτίμηση της διάδοσης μιας ρωγμής που εντοπίστηκε μας βοηθάει στην καλύτερη αντιμετώπιση και πρόληψη αστοχιών. Εν τέλει εξοικονομείται χρόνος και χρήμα ενώ παράλληλα αυξάνεται η αξιοπιστία των πιο ευπαθών εξαρτημάτων και συνεπώς αυξάνεται και η διαθεσιμότητα ολόκληρου του συστήματος.

Και τα δύο προγράμματα που αναπτύξαμε απαιτούν καλή πληροφόρηση ώστε ο χρήστης να μπορεί να εισάγει τα απαραίτητα «inputs» με το πρόγραμμα υπολογισμού της εξέλιξης μιας ρωγμής να απαιτεί αρκετά πιο εξειδικευμένες μεθόδους όσον αφορά τον υπολογισμό του φάσματος φορτίου δηλαδή της κόπωσης που δέχεται κάποιο εξάρτημα κατά τη λειτουργίας του. Συνεπώς ανάλογα με τις προτεραιότητες της κάθε επιχείρησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία βελτιστοποίησης

Τέλος να αναφέρουμε ότι τα δύο αυτά προγράμματα δημιουργήθηκαν για την άμεση χρησιμοποίηση τους σε συνεργεία επισκευής ελικοπτέρων των Ενόπλων Δυνάμεων. Η αξιοποίηση των δυνατοτήτων που παρέχουν, θα δώσει λύσεις σε καίρια προβλήματα που αντιμετωπίζονται στα εν λόγω συνεργεία και θα αναβαθμίσει την μέχρι πρότινος φιλοσοφία συντήρησης που ακολουθείται.

11. Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 1: Πρόγραμμα αντικατάστασης εξαρτημάτων από τον κατασκευαστή λόγω περιορισμών | 17 |
| Πίνακας 2: Συνέχεια προγράμματος αντικατάστασης εξαρτημάτων από τον κατασκευαστή λόγω περιορισμών | 18 |
| Πίνακας 3: Ζώνες συντήρησης ανάλογα με τις ώρες πτήσεις κατά την επιθεώρηση 100 ωρών..... | 21 |
| Πίνακας 4: Ζώνες συντήρησης ανάλογα με τις ώρες πτήσεις κατά την επιθεώρηση 300 ωρών..... | 21 |
| Πίνακας 5: Παράδειγμα τρόπου διαχωρισμού των δεδομένων σε κλάσεις | 42 |
| Πίνακας 6: Παράδειγμα πίνακα κατανομής συχνοτήτων | 43 |
| Πίνακας 7: Παράδειγμα υπολογισμένων δεικτών του συστήματος..... | 62 |
| Πίνακας 8: Τα παρακάτω στοιχεία που συνθέτουν τη βάση δεδομένων με τα υλικά έχουν αντληθεί σύμφωνα με τις επόμενες αναφορές [43], [44], [45], [7], [46]. | 93 |
| Πίνακας 9: Πληροφορίες που προκύπτουν ως output όσον αφορά τον συνολικό αριθμό κύκλων N και των τάσεων κατά μέσο όρο που έχουν ασκηθεί στο εξάρτημα που εξετάζουμε..... | 98 |
| Πίνακας 10: Παρουσίαση των υπολογισμών που εκτελεί αυτόματα ο υπολογιστής ανάπτυξης ρωγμών. Κάθε γραμμή αποτελεί έναν κύκλο υπολογισμών από την εισαγωγή (input) του ιστορικού φόρτισης έως την ανάπτυξη ρωγμής da που αυτό (το ιστορικό φορτίων) επιφέρει. | 99 |
| Πίνακας 11: Δεδομένα ζωής σε [h] [min] και σε μορφή αριθμών αντίστοιχα | 121 |

12. Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 1: Σκαρίφημα Ελικοπτέρου Bell OH 58D [1]..... | 16 |
| Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση των ζωνών συντήρησης του ελικοπτέρου [1] | 20 |
| Σχήμα 3: Διάγραμμα μετάβασης κατάστασης Markov μιας δομής σειράς δύο εξαρτημάτων όπου η αποτυχία του ενός στοιχείου αποτρέπει την αποτυχία του άλλου εξαρτήματος [4]..... | 33 |
| Σχήμα 4: Μεταβολή συνάρτησης κινδύνου κατανομής Weibull για τις χαρακτηριστικές τιμές της παραμέτρου β [17]..... | 41 |
| Σχήμα 5: Έλασμα με ελλειψοειδή εγκοπή σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Πηγή [24] | 66 |
| Σχήμα 6: Μεταβολή δύναμης συνοχής δύο ατόμων ανάλογα με την απόσταση που τα χωρίζει πηγή [23] | 68 |
| Σχήμα 7: Έλασμα με ελλειψοειδές ρήγμα που καταπονείται σε μονοαξονικό εφελκυσμό, | 69 |
| Σχήμα 8: Βοηθητικό σχήμα απεικόνισης πολικών συντεταγμένων των τάσεων που αναπτύσσονται στην άκρη μιας ρωγμής. πηγή [25] | 72 |
| Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών ειδών κόπωσης..... | 75 |
| Σχήμα 10: Παράδειγμα καμπύλης Wohler με σημειωμένα τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού | 76 |
| Σχήμα 11: Απεικόνιση των ασυμπτωτικών περιοχών της καμπύλης Wohler για τα πιο γνωστά μέταλλα Πηγή [24]..... | 77 |
| Σχήμα 12: Τρόποι διασύνδεσης δύο διαδοχικών αεροπορικών πάνελ. Πηγή [29]..... | 80 |
| Σχήμα 13: Ορισμός αρχικού χρόνου επιθεώρησης και μελλοντικών επιθεωρήσεων ώστε να αποφευχθεί η λειτουργία σε επικινδυνη περιοχή. Πηγή [32]..... | 81 |
| Σχήμα 14: Μέγεθος ρωγμών έναντι κύκλων. Πηγή [37] | 83 |
| Σχήμα 15: Μορφή καμπύλης ανάπτυξης ρωγμών για συγκεκριμένο υλικό. Πηγή [37]..... | 85 |
| Σχήμα 16 : Καμπύλες ανάπτυξης ρωγμών για τιμές του λόγου τάσης R που κυμαίνονται από -1 (φορτίο πλήρους αντιστροφής) έως +0,7. Στα παραπάνω δεδομένα μπορεί να φανεί ότι η αύξηση του R έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του ρυθμού ανάπτυξης της ρωγμής. Πηγή [38] | 87 |
| Σχήμα 17: Σύγκριση του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμών, για ένα συγκεκριμένο υλικό, για διάφορες τιμές των μεγεθών γ , R. Πηγή [37] | 88 |
| Σχήμα 18: Παρουσίαση των τριών περιπτώσεων για τις οποίες το πρόγραμμα υπολογίζει την ανάπτυξη ρωγμών..... | 95 |
| Σχήμα 19: Απεικόνιση φάσματος φορτίου Falstaff. Πηγή [48]..... | 97 |
| Σχήμα 20: Εξέλιξη της καμπύλης αστοχίας εξαρτήματος που έχει υποβληθεί σε 16 φάσματα φορτίων κόπωσης. Στον κάθετο άξονα εμφανίζεται η αύξηση της ρωγμής, σε mm, που επιφέρει το καθ' ένα από τα 16 αυτά φάσματα φορτίων. | 100 |
| Σχήμα 21: Σχηματική επεξήγηση του αλγορίθμου που χρησιμοποιείτε στους υπολογισμούς. Πηγή [37] | 109 |

13. Κατάλογος Εικόνων

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 1: Παρουσίαση Ελικοπτέρου Bell OH-58D Kiowa Warrior. Πηγή [1]..... | 15 |
| Εικόνα 2: Εικονική επεξήγηση των χρονικών διαστημάτων «Uptime» και «Downtime» [8] | 25 |
| Εικόνα 3: Τυπολόγιο υπολογισμών βασικών μεγεθών-δεικτών της θεωρίας αξιοπιστίας [5] | 26 |
| Εικόνα 4: Παράδειγμα ανάλυσης με δέντρο βλαβών στο πρόγραμμα Reliasoft..... | 30 |
| Εικόνα 5: Γενική μορφή διαγράμματος αιτίας- αποτελέσματος [4]..... | 31 |
| Εικόνα 6: Μορφή ιστογράμματος | 42 |
| Εικόνα 7: Παράδειγμα αθροιστικής συνάρτησης κατανομής | 43 |
| Εικόνα 8: Αρχική όψη του προγράμματος με τα inputs να σημειώνονται με κόκκινα πλαίσια. | 49 |
| Εικόνα 9: Επεξήγηση τρόπου ορισμού του Planned Time σε κόκκινο πλαίσιο και εμφάνιση ιστορικού παρατηρήσεων | 50 |
| Εικόνα 10: Παράδειγμα εισαγωγής εμπειρικής συνάρτησης για συσχέτιση με τους καταγεγραμμένους χρόνους (Up Time)..... | 51 |
| Εικόνα 11: Εμφάνιση της εντολής «Επίλυση» προς ελαχιστοποίηση του κελιού προορισμού | 52 |
| Εικόνα 12: Απεικόνιση της αυτόματης καταγραφής των επιθυμητών δεδομένων που χρειαζόμαστε «outputs» σε κόκκινα πλαίσια. | 53 |
| Εικόνα 13: Εμφάνιση των Outputs x, s, CDF που προκύπτουν από το πρόγραμμα | 55 |
| Εικόνα 15: Αυτόματος διαχωρισμός των δεδομένων (Up Time) σε κλάσεις και δημιουργία ιστογράμματος κατανομής συχνοτήτων | 56 |
| Εικόνα 16: : Γραφική συσχέτιση δεδομένων ζωής PDF με μπλε και υποθετικής PDF με κόκκινο. | 57 |
| Εικόνα 17: Φύλλο εργασίας «Index_of_components» στο οποίο φαίνονται όλα τα εξαρτήματα που μπορεί ο χρήστης να επιλέξει ταξινομημένα ανά ζώνη συντήρησης. | 58 |
| Εικόνα 18: Ενεργοποίηση φίλτρου για τη συλλογή δεδομένων της ζώνης συντήρησης «Tail Rotor Assembly» | 59 |
| Εικόνα 19: Ανάλυση αξιοπιστίας δεδομένων ζώνης «Tail Rotor Assembly» με το φύλλο υπολογισμών «Παρακολούθηση ζώνης ή εξαρτήματος» | 60 |
| Εικόνα 20: Τρόπος επιλογής ζώνης συντήρησης-επισκευής με τη βοήθεια λίστα «drop down List»..... | 60 |
| Εικόνα 21: : Στην ζώνη « MAIN ROTOR SYSTEM» η λίστα εξαρτημάτων προς επιλογή είναι διαφορετική σε σχέση με τη λίστα εξαρτημάτων από την ζώνη «POWER PLANT» | 61 |
| Εικόνα 22: Συνθήκες που πρέπει να ισχύουν ώστε να επέλθει αστοχία του εξαρτήματος. Πηγή [22] | 64 |
| Εικόνα 23: Ατομικό μοντέλο θραύσης υπό την επίδραση εφελκυστικής τάσης. | 67 |
| Εικόνα 24: (α) Τύπος I, ανοικτός (ή τύπος διάνοιξης) ή εφελκυστικός τύπος, (β) τύπος II, τύπος ολίσθησης και (γ) τύπος III, αποσχιστικός τύπος | 70 |
| Εικόνα 25: Απεικόνιση του σχήματος και μήκους ζημιών για αεροπορικό πάνελ πάχους έως 0,05 in πάνω και 0,25 in κάτω. πηγή [29] | 79 |
| Εικόνα 26: Παράδειγμα επιλογής και καταχώρησης στο πρόγραμμα υλικού ως αρχικό input | 94 |
| Εικόνα 27: Τοποθέτηση μετρούμενων διαστάσεων ως δεύτερο input στο πρόγραμμα | 96 |
| Εικόνα 28: Εισαγωγή ιστορικού τάσεων ως τρίτο input στο πρόγραμμα | 97 |
| Εικόνα 29 Υπέρθυση εφελκυστικών και καμπτικών τάσεων. Πηγή [37] | 101 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 30 : Απεικόνιση της περίπτωσης ενός αεροπορικού πάνελ με ρωγμή στο κέντρο, που υπολογίζεται από των υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών | 102 |
| Εικόνα 31: Απεικόνιση της περίπτωσης ενός αεροπορικού πάνελ με ρωγμή στην άκρη, που υπολογίζεται από των υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών | 104 |
| Εικόνα 32: Απεικόνιση της περίπτωσης ενός κυλινδρικού εξαρτήματος με ρωγμή, που υπολογίζεται από των υπολογιστή ανάπτυξης ρωγμών | 106 |
| Εικόνα 33: Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό EasyFix προς ανάλυση | 122 |
| Εικόνα 34: Ιστόγραμμα συχνοτήτων των δεδομένων και προσαρμογή της συναρτησης πυκνότητας πιθανότητας για κατανομή Weibull | 123 |
| Εικόνα 35: Παρουσίαση όλων των κατανομών για τις οποίες εξετάστηκε η προσαρμογή με τα δεδομένα ζωής και εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων για κάθε μια, με τους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερο fitting | 124 |
| Εικόνα 36: Αριθμητικά αποτελέσματα στατιστικών τέστ για πιστοποίηση της καταλληλότερης κατανομής | 125 |

14. Κατάλογος Αναφορών

- [1] Bell, «Maintenance manual volume 1 general information,» Post office box, Texas, 1994.
- [2] «https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_OH-58_Kiowa#OH-58D».
- [3] E. J. Tiefel, «Optimizing maintenance interval: An Analysis of Embraer's E Jet Moisture Seal,» Embry Riddle Aeronautical University, December 2013.
- [4] M. Rausand, SYSTEM RELIABILITY Theory second edition, Nantes Cedex 3 France: A JOHN WILEY & SONS, INC, 2004.
- [5] Fiix A ROCKWELL AUTOMATION COMPANY, «A Guide to Maintenance Metrics».
- [6] J. L. R. d. Oliveira, Developing a reliability program for maintenance and operation, Lisboa, Portugal: Departamento de Engenharia Aeroespacial, 1096-001 .
- [7] MIL-HDBK-5J, « "Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures,,» σε *Department of Defense Handbook*, January 2003.
- [8] H. e. a. NSDI20, «Meaningful availability,» *the morning paper*, p. 20, 26 February 2020.
- [9] G. KARADIMAS, «RELIABILITY ANALYSIS/ MAPPING FOR MARINE VESSELS:,» NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS, ATHENS , JULY 2010.
- [10] B. F. Blanchard, System Engineering and Analysis, Upper Saddle River: Pearson, 2011.
- [11] Q. S. Incorporated, Non Electronic parts reliability data, Utica, NY, 2016.
- [12] Σ. Σιμόπουλος, Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνίο Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 1989.
- [13] B. Dhillon, Reliability, Quality and Safety for Engineers, New York Washington, D.C.: CRC Press, 2005.
- [14] J. K. C. a. O. D. Patel, Handbook of Statistical Distributions, New York: Marcel Dekker, 1976.
- [15] E. H., An Introduction to the History of Mathematics, New York: Rinehart & Winsto, 1976.
- [16] D. D.J, «An analysis of some failure data,» *JSTOR*, τόμ. 258, αρ. 47, p. pp. 113–150, June 1952.
- [17] J. A. NACHLAS, Probabilistic Models and Maintenance Methods Second edition, New York: CRC PRESS, 2017.

- [18] H. Sturges, «The choice of a class interval,» *Journal of American Statisticians*, pp. 65-69, 1926.
- [19] R. E. C. R. .. Barlow, Total time on test processes and applications to failure data analysis. In *Reliability and Fault Tree Analysis*, eds. Philadelphia: N. D. Singpurwalla, PA: SIAM, pp. 451–481., (1975).
- [20] B. Klefsjo, «On aging properties and total time on test transforms,» (1982).
- [21] S. G. P. Jayant V Deshpante, *Life Data Statistical Models and Methods (Second Edition)*, World Scientific Publishing Company, 2015.
- [22] <https://mechanicalc.com/reference/fatigue-crack-growth/Failure Criteria>.
- [23] Δημήτριος Μανωλάκος Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, «Σημειώσεις στο Μαθημα Αστοχία Υλικών,» σε *Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών*, Αθήνα.
- [24] Μανωλάκος Δημήτριος - Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, «Σημειώσεις Μαθήματος Αστοχία Υλικών,» σε *Astochia-2*, Αθήνα.
- [25] USAF Damage Tolerant Design Handbook.
- [26] OGMA, Aircraft Structural Repair for Engineers Part III.
- [27] J. H. HEIDA και F. P. GROOTEMAN, *Airframe Inspection Reliability using Field Inspection Data*, Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium (NLR), 1998.
- [28] «Damage Tolerance Design Handbook,» USAF, 1979.
- [29] B. V. G. Lourenço, «Damage Tolerance Design for Wing Components – Procedure Standardization».
- [30] R. J. H. WANHILL και M. F. J. KOOLLOOS, *Fatigue and Corrosion in Aircraft Cabin*, Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium (NLR), 2000.
- [31] M. C.-Y. NIU, *Airframe Stress Analysis and Sizing*, Hong Kong: Conmilit Press, 1997.
- [32] S. SWIFT, *A Collective Approach to Aircraft Structural Maintenance Programs*, Civil Aviation Safety Authority, 2008.
- [33] *Damage Tolerance Design Handbook.*, USAF, 1979.
- [34] H. e. a. ASADA, *Practical Evaluation of Crack Detection Capability for Visual Inspection in Japan*, National Aerospace Laboratory and Civil Aviation Bureau, 1993.
- [35] D. BROEK, *The Practical Use of Fracture*, 1988: Kluwer Academic Publishers.

- [36] J. SCHIJVE, *Fatigue of Structures and Materials.*, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [37] <https://mechanicalc.com/reference/fatigue-crack-growth>.
- [38] MIL-HDBK-5J.
- [39] N. E. Dowling, «MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS».
- [40] J. Maierhofer, R. Pippan, H.-P. Gänser by Elsevier Ltd, «International Journal of Fatigue,» *Ελσεwier*, 16 May 2013.
- [41] N. JC., A crack opening stress equation for fatigue crack growth, *Int J Fract*, 1984.
- [42] M. Forschungskuratorium, *Fracture mechanics proof of strength for engineering components* 3rd edition, Frankfurt: VDMA Verlag, 2009.
- [43] A.-7. 673, «Plane Strain Fracture Toughness (KIC) Data Handbook for Metals,» σε *Army Materials and Mechanics Research Center*, 1973 December.
- [44] AFRL-VA-WP-TR-2003-3002, « "USAF Damage Tolerant Design Handbook;» σε *Guidelines for the Analysis and Design of Damage Tolerant Aircraft Structures,* ", November 2002.
- [45] F. A. A. US Department of Transportation, « "Fatigue Crack Growth Database for Damage Tolerance Analysis",» σε *DOT/FAA/AR-05/15*, August 2005.
- [46] Sanford, R.J., "Principles of Fracture Mechanics," 1st Edition.
- [47] https://www.zentech.co.uk/zencrack_support_unitconversion.htm.
- [48] Y. Y. a, Application of a strip-yield model to predict crack growth under variable-amplitude and spectrum loading – Part 1: Compact specimens, Ohio: Aerospace Institute at NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH 44135, USA, 3 July 2011..
- [49] AFRL-VA-WP-TR-2003-3002, « "USAF Damage Tolerant Design Handbook: Guidelines for the Analysis and Design of Damage Tolerant Aircraft Structures," » USAF, 2002.
- [50] AFRL-VA-WP-TR-2003-3002, « "USAF Damage Tolerant Design Handbook: Guidelines for the Analysis and Design of Damage Tolerant Aircraft Structures," » USAF , 2002.
- [51] Institute of Risk Management, «About Risk Management, Institute of Risk Management,» Institute of Risk Management - IRM, 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.theirm.org/about/risk-management>. [Πρόσβαση 6 2 2017].
- [52] S. M. BEDEN, S. ABDULLAH και A. ARIFFIN, Review of Fatigue Crack Propagation Models for Metallic

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Components, European Journal of Scientific Research, 2009.

[53]

15. Παράρτημα I

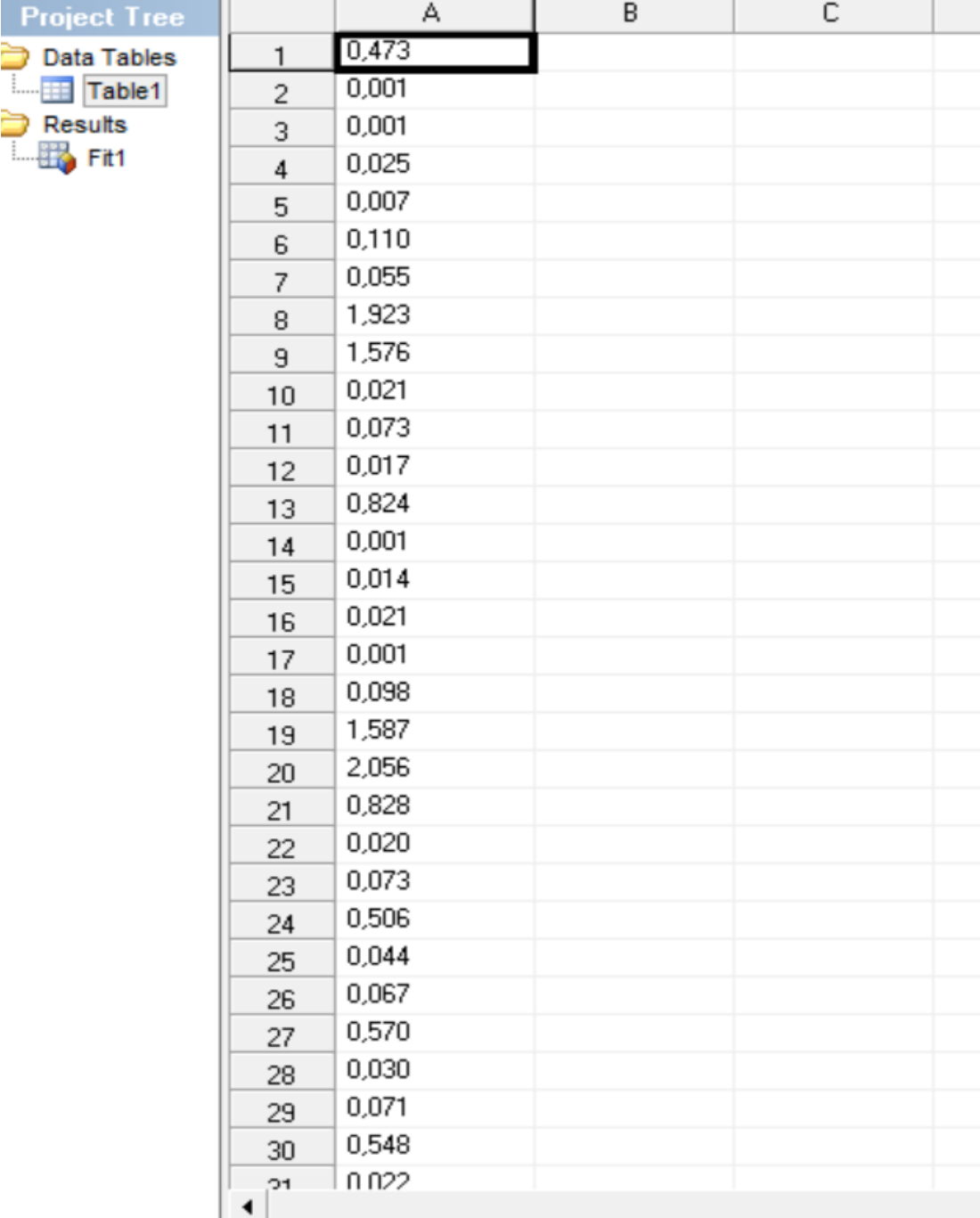
Μετατροπή δεδομένων ζωής σε αριθμούς ώστε να μπορεί να γίνει η ανάλυση στο EasyFit. Το Excel «καταλαβαίνει» τα μεγέθη σε [h] : [min] που αναλύουμε και τα ποσοτικοποιεί σε μορφή αριθμών.

Πίνακας 11: Δεδομένα ζωής σε [h] [min] και σε μορφή αριθμών αντίστοιχα

| Διαθεσιμότητα συστήματος ανα 2 διαδοχικές βλάβες (UpTime) | |
|--|-------|
| 11:21 | 0,473 |
| 0:01 | 0,001 |
| 0:02 | 0,001 |
| 0:35 | 0,025 |
| 0:10 | 0,007 |
| 2:38 | 0,110 |
| 1:19 | 0,055 |
| 46:09 | 1,923 |
| 37:49 | 1,576 |
| 0:29 | 0,021 |
| 1:45 | 0,073 |
| 0:25 | 0,017 |
| 19:46 | 0,824 |
| 0:00 | 0,001 |
| 0:20 | 0,014 |
| 0:29 | 0,021 |
| 0:01 | 0,001 |
| 2:20 | 0,098 |
| 38:05 | 1,587 |
| 49:20 | 2,056 |
| 19:52 | 0,828 |
| 0:28 | 0,020 |
| 1:45 | 0,073 |
| 12:08 | 0,506 |
| 1:04 | 0,044 |
| 1:36 | 0,067 |
| 13:41 | 0.570 |

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

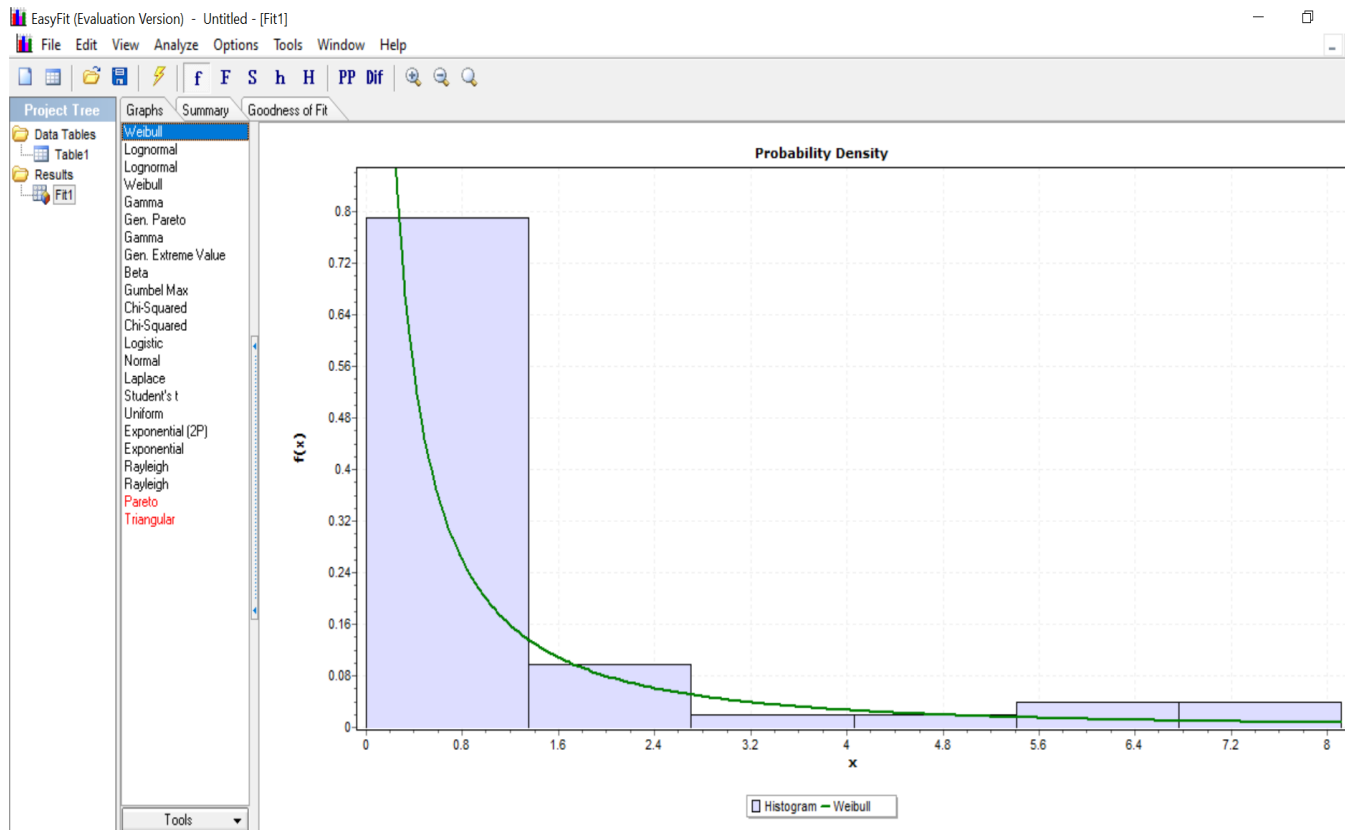
Μεταφορά των δεδομένων στο λογισμικό



| | A | B | C | |
|----|-------|---|---|--|
| 1 | 0,473 | | | |
| 2 | 0,001 | | | |
| 3 | 0,001 | | | |
| 4 | 0,025 | | | |
| 5 | 0,007 | | | |
| 6 | 0,110 | | | |
| 7 | 0,055 | | | |
| 8 | 1,923 | | | |
| 9 | 1,576 | | | |
| 10 | 0,021 | | | |
| 11 | 0,073 | | | |
| 12 | 0,017 | | | |
| 13 | 0,824 | | | |
| 14 | 0,001 | | | |
| 15 | 0,014 | | | |
| 16 | 0,021 | | | |
| 17 | 0,001 | | | |
| 18 | 0,098 | | | |
| 19 | 1,587 | | | |
| 20 | 2,056 | | | |
| 21 | 0,828 | | | |
| 22 | 0,020 | | | |
| 23 | 0,073 | | | |
| 24 | 0,506 | | | |
| 25 | 0,044 | | | |
| 26 | 0,067 | | | |
| 27 | 0,570 | | | |
| 28 | 0,030 | | | |
| 29 | 0,071 | | | |
| 30 | 0,548 | | | |
| 31 | 0,022 | | | |

Εικόνα 32: Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό EasyFix προς ανάλυση

Ανάλυση δεδομένων για προσαρμογή με κατανομή (Fitting Distribution)



Εικόνα 33: Ιστόγραμμα συχνοτήτων των δεδομένων και προσαρμογή της συναρτησης πυκνότητας πιθανότητας για κατανομή Weibull

Παρατηρούμε ότι η κατανομή Weibull, όντος ταιριάζει καλύτερα από όλες τις υπόλοιπες κατανομές για τα δεδομένα ζωής που έχουμε αναλύσει.

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Οι παράμετροι που ψάχνουμε σημειώνονται σε κόκκινο πλαίσιο όπως φαίνεται παρακάτω

EasyFit (Evaluation Version) - Untitled - [Fit1]

File Edit View Analyze Options Tools Window Help

Project Tree: Data Tables (Table1), Results (Fit1)

| | Graphs | Summary | Goodness of Fit |
|----|--------------------|---|-----------------|
| 3 | Chi-Squared | $\nu=1$ | |
| 4 | Exponential | $\lambda=0.98788$ | |
| 5 | Exponential (2P) | $\lambda=0.98788 \quad \gamma=-1.0000E-14$ | |
| 6 | Gamma | $\alpha=0.33855 \quad \beta=3.0486$ | |
| 7 | Gamma | $\alpha=0.28642 \quad \beta=3.5343$ | |
| 8 | Gen. Extreme Value | $k=0.61493 \quad \sigma=0.39471 \quad \mu=0.17362$ | |
| 9 | Gen. Pareto | $k=0.54889 \quad \sigma=0.51509 \quad \mu=-0.12957$ | |
| 10 | Gumbel Max | $\sigma=1.4748 \quad \mu=0.16101$ | |
| 11 | Laplace | $\lambda=0.74768 \quad \mu=1.0123$ | |
| 12 | Logistic | $\sigma=1.0428 \quad \mu=1.0123$ | |
| 13 | Lognormal | $\sigma=2.4267 \quad \mu=-1.9654$ | |
| 14 | Lognormal | $\sigma=2.4267 \quad \mu=-1.9654$ | |
| 15 | Normal | $\sigma=1.8915 \quad \mu=1.0123$ | |
| 16 | Rayleigh | $\sigma=0.80767$ | |
| 17 | Rayleigh | $\sigma=1.5202$ | |
| 18 | Student's t | $\nu=2$ | |
| 19 | Uniform | $a=-2.2638 \quad b=4.2884$ | |
| 20 | Weibull | $\alpha=0.43788 \quad \beta=0.39484$ | |
| 21 | Weibull | $\alpha=0.46866 \quad \beta=0.45773$ | |
| 22 | Pareto | no fit | |
| 23 | Triangular | no fit | |

Εικόνα 34: Παρουσίαση όλων των κατανομών για τις οποίες εξετάστηκε η προσαρμογή με τα δεδομένα ζωής και εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων για κάθε μια, με τους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερο fitting

Προσδιορισμός μέσου χρόνου εμφάνισης βλαβών (MTBF) - αποκατάστασης (MTTR) - Logistic Disposal Time (LDT) για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας - αξιοπιστίας των αεροπορικών εξαρτημάτων και της καμπύλης αστοχίας (failure diagram). – Γεώργιος Σπυρίδης

Η πιστοποίηση των τριών επικρατέστερων κατανομών που ταιριάζουν καλύτερα στα δεδομένα ζωής που αναλύουμε φαίνεται στο κόκκινο πλαίσιο. Το πρόγραμμα εκτελεί τα παρακάτω στατιστικά tests:

- Kolmogorov Smirnov
- Anderson Darling
- Chi Squared

EasyFit (Evaluation Version) - Untitled - [Fit1]

File Edit View Analyze Options Tools Window Help

Graphs Summary Goodness of Fit

Goodness of Fit - Summary

| # | Distribution | Kolmogorov Smirnov | | Anderson Darling | | Chi Squared | |
|----|--------------------|--------------------|------|------------------|------|-------------|------|
| | | Statistic | Rank | Statistic | Rank | Statistic | Rank |
| 14 | Lognormal | 0.0958 | 1 | 2.6544 | 3 | 3.8053 | 2 |
| 13 | Lognormal | 0.0958 | 2 | 2.6544 | 2 | 3.8053 | 3 |
| 20 | Weibull | 0.10318 | 3 | 2.4796 | 1 | 5.084 | 5 |
| 7 | Gamma | 0.12982 | 4 | 2.7599 | 5 | 9.3257 | 8 |
| 21 | Weibull | 0.13739 | 5 | 2.6964 | 4 | 4.8353 | 4 |
| 6 | Gamma | 0.17782 | 6 | 3.2572 | 7 | 13.115 | 13 |
| 1 | Beta | 0.19169 | 7 | 3.5223 | 9 | 22.488 | 16 |
| 9 | Gen. Pareto | 0.19931 | 8 | 2.8917 | 6 | 8.4481 | 7 |
| 8 | Gen. Extreme Value | 0.23272 | 9 | 3.3507 | 8 | 9.7983 | 9 |
| 3 | Chi-Squared | 0.27861 | 10 | 7.3145 | 11 | 13.434 | 14 |
| 2 | Chi-Squared | 0.27861 | 11 | 7.3145 | 12 | 13.434 | 15 |
| 15 | Normal | 0.291 | 12 | 8.3801 | 14 | 10.744 | 10 |
| 12 | Logistic | 0.29397 | 13 | 8.134 | 13 | 11.72 | 11 |
| 10 | Gumbel Max | 0.30857 | 14 | 6.5145 | 10 | 8.184 | 6 |
| 11 | Laplace | 0.30996 | 15 | 8.692 | 15 | 12.462 | 12 |
| 19 | Uniform | 0.32628 | 16 | 21.845 | 17 | N/A | |
| 5 | Exponential (2P) | 0.43549 | 17 | 26.352 | 18 | 57.234 | 17 |
| 4 | Exponential | 0.43549 | 18 | 28.099 | 19 | 57.234 | 18 |
| 18 | Student's t | 0.48077 | 19 | 10.98 | 16 | 1.3124 | 1 |
| 16 | Rayleigh | 0.55424 | 20 | 99.465 | 20 | 62.968 | 19 |

Εικόνα 35: Αριθμητικά αποτελέσματα στατιστικών tests για πιστοποίηση της καταλληλότερης κατανομής