ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και
Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία με Θέμα:

«ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»

(‘AN OVERVIEW ON DECISION MAKING IN MAINTENANCE STRATEGIES FOR MECHANICAL ENGINEERING SYSTEMS’)

Ονοματεπώνυμο: Κολιοδέδε Μαρία

Επιβλέπων: Αντωνιάδης Ιωάννης, Καθηγητής Ε. Μ. Π.

Αθήνα 2020

Πρόλογος

Ο ρόλος της συντήρησης μηχανολογικών συστημάτων στη μακροπρόθεσμη αποδοτικότητα ενός οργανισμού είναι ευρέως αναγνωρισμένος από την επιστημονική κοινότητα. Πράγματι, κακοσυντηρημένος εξοπλισμός που αστοχεί συστηματικά υποδαυλίζει την απουσία διαθεσιμότητας, απώλειες σε ταχύτητα ή ακρίβεια και, ως εκ τούτου, τείνει να παράγει ελαττωματικά προϊόντα. Παράλληλα, η αναπόφευκτη αύξηση των κόστων παραγωγής περιστέλλει την αποδοτικότητα και έτσι τίθεται σε κίνδυνο η επιβίωση του οργανισμού. Το γεγονός αυτό οδηγεί τους ερευνητές και τους επαγγελματίες από κοινού στην ανάπτυξη στρατηγικών συντήρησης των μηχανολογικών συστημάτων και την εφαρμογή της βέλτιστης από αυτές, με σκοπό την απρόσκοπτη διοίκηση του οργανισμού.

Σε οποιαδήποτε διοικητική διαδικασία, η λήψη αποφάσεων καταλαμβάνει πολύ σημαντικές διαστάσεις. Τα μηχανολογικά συστήματα συνήθως τροφοδοτούνται με πελώριες ποσότητες δεδομένων που διατίθονται ταχέως στους ειδικούς και στους μηχανικούς των βιομηχανιών οι οποίοι, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν έχουν στη διάθεσή τους αρκετά εργαλεία υποστήριξης λήψης αποφάσεων. Επομένως, η ποιότητα των αποφάσεων του επιστημονικού δυναμικού ενός οργανισμού επαφίεται ως επί το πλείστον στην εμπειρία τους, εισάγοντας υποκειμενικότητα στη διαδικασία του προγραμματισμού διοίκησης μηχανολογικών συστημάτων, ιδιαίτερα στον τομέα της συντήρησης του εξοπλισμού.

Σκοπός της εργασίας είναι η επισκόπηση της πρόσφατης βιβλιογραφίας που αναφέρεται στο πλαίσιο λήψης αποφάσεων στις στρατηγικές συντήρησης μηχανολογικού εξοπλισμού σε συστήματα μίας ή πολλαπλών συνιστωσών. Αρχικά εξετάζεται ο ρόλος της συντήρησης στα συστήματα παραγωγής και επισημαίνεται η ανάγκη της μέγιστης εκμετάλλευσης κάθε μηχανής.

Έπειτα, γίνεται κατηγοριοποίηση των άρθρων που συγκεντρώθηκαν σε ομάδες ανάλογα με τον τομέα μελέτης και τις περιοχές εφαρμογής της διαδικασίας λήψης αποφάσεων συντήρησης στις οποίες εστιάζουν. Οι κατηγορίες αναλύονται και παρουσιάζονται επιγραμματικά τα εργαλεία των μεθόδων λήψης αποφάσεων.

Ακολούθως, αναπτύσσεται η συνεισφορά των επιστημονικών μελετών ανά τομέα και εξηγείται το αποτέλεσμα που συνάγεται από αυτές. Τέλος, παρατίθενται πέντε ολοκληρωμένα παραδείγματα από τις πιο προηγμένες θεωρίες και μελέτες περίπτωσης στο πλαίσιο λήψης αποφάσεων στις στρατηγικές συντήρησης μηχανολογικών συστημάτων. Η επιλογή τους έγινε με κριτήρια την τεχνολογία αιχμής στο δεδομένο πλαίσιο και την ικανότητά τους να συνδυάζουν και να συγχωνεύουν τους τέσσερις τομείς του πεδίου εφαρμογών της λήψης αποφάσεων συντήρησης μηχανολογικών συστημάτων.

Περιεχόμενα

Πρόλογος 2
Περιεχόμενα 3

1. Εισαγωγή 7

1. 1. Ο ρόλος της συντήρησης στα συστήματα παραγωγής 7
1. 2. Το πρόβλημα της ανεκμετάλλευτης κατάστασης μηχανής 9

2. Κατηγοριοποίηση των άρθρων 12

2. 1. Ομαδοποίηση των τμημάτων συντήρησης ανάλογα με τον τομέα μελέτης 12
2. 2. Τεχνικά εργαλεία των μεθόδων 18

3. Περιοχές εφαρμογής της λήψης αποφάσεων 20

3. 1. Τομέας Οργάνωσης και Δοίκησης 20

3. 1. 1. Διοίκηση Συντήρησης 20
3. 1. 2. Προγραμματισμός Συντήρησης 21
3. 1. 3. Επιλογή Πολιτικής 22
3. 1. 4. Ανάλυση Αποδοτικότητας 23

3. 2. Τομέας Ενοποίησης Συστήματος 23

3. 2. 1. Ανάθεση Εργασιών Συντήρησης σε Εξωτερικό Συνεργείο 23
3. 2. 2. Συντονισμένη Βελτιστοποίηση 24
3. 2. 3. Ενοποίηση Συστημάτων Πολλαπλών Επιπέδων 24
3. 2. 4. Βελτιστοποίηση Συστημάτων Πολλαπλών Καταστάσεων 25

3. 3. Τομέας Χρονοδρομολόγησης Συντήρησης 26

3. 3. 1. Υποβάθμιση Συστήματος και Συνιστωσών 26
3. 3. 2. Μεσοδιαστήματα Επιθεωρήσεων και Συντήρησης 26
3. 3. 3. Εκτίμηση Κόστους Συντήρησης 27
3. 3. 4. Διοίκηση Κύκλου Ζωής του Εξοπλισμού 28

3. 4. Τομέας Παρακολούθησης και Ανάλυσης 28

3. 4. 1. Ανάλυση της Διαδικασίας Παρακολούθησης 28
3. 4. 2. Πρόγνωση Ευρωστίας Εξοπλισμού 28
3. 4. 3. Ανάλυση Αξιοπιστίας 29
3. 4. 4. Ανάλυση Ρίσκου και Επιπτώσεων 30

4. Παράθεση και ανάλυση θεωριών λήψης αποφάσεων συντήρησης και μελετών περίπτωσης 30

Α. Υποστήρηξη λήψης αποφάσεων η οποία υποστηρίζεται από υπολογιστικό σύστημα διοίκησης συντήρησης 30

4Α. 1. Υπολογιστικά συστήματα διοίκησης συντήρησης (CMMS) 31
4Α. 2. Μεθοδολογία έρευνας 32
4Α. 3. Μοντέλο λήψης αποφάσεων από την εταιρία περίπτωσης 32
4Α. 4. Εφαρμογή του πλέγματος λήψης αποφάσεων συντήρησης στην εταιρία περίπτωσης 34
4Α. 5. Εφαρμογή της λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων και της τεχνικής ομαδοποίησης στην εταιρία περίπτωσης 38
4Α. 5. 1. Το εργαλείο TOPSIS 38
4Α. 5. 2. Τεχνική συσταδοποίησης k-means 42

Β. Ολοκληρωμένη λήψη αποφάσεων για προληπτική συντήρηση συστημάτων μετάδοσης κίνησης με ιμάντες 44

4Β. 1. Θεωρία 44
4Β. 2. Υπολογισμός του ρυθμού αστοχίας 45
4Β. 3. Αλγόριθμος λήψης αποφάσεων 47
4Β. 4. Προσομοίωση και σχόλια 49

Γ. Πλαίσιο λήψης αποφάσεων συντήρησης για εξοπλισμό γεώτρησης και παραγωγής υγρών και αερίων υδρογονανθράκων. 55

4Γ. 1. Ορισμός του δείκτη αξιολόγησης και των κριτηρίων βαθμολόγησης 55
4Γ. 2. Μοντέλο αξιολόγησης του επιπέδου σημαντικότητας του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής πετρελαιοειδών 61
4Γ. 2. 1. Ποσοτική αξιολόγηση με βάση τη μέθοδο Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP) 61

4Γ. 2. 2. Ανάλυση της απαλοιφής των υποκειμενικών παραγόντων σύμφωνα με την προσομοίωση Monte Carlo (MCS) 63
4Γ. 3. Θεμελίωση των αποφάσεων συντήρησης στο επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού 66
4Γ. 4. Μελέτη Περίπτωσης 69

Δ. Ανάπτυξη και εφαρμογή συστήματος λήψης αποφάσεων συντήρησης για στόλο αεροσκαφών. 74

4Δ. 1. Επεξεργασία πληροφοριών κατάστασης σε πραγματικό χρόνο 74
4Δ. 1. 1. Περιγραφή του προβλήματος 74
4Δ. 2. Θεωρία Νευρωνικού Δικτύου Ανάστροφης Μετάδοσης Σφάλματος 76
4Δ. 2. 1. Η δομή του νευρωνικού δικτύου 76
4Δ. 2. 2. Αλγόριθμος μάθησης ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος 78
4Δ. 2. 3. Εφαρμογή στη μελέτη περίπτωσης 79
4Δ. 3. Μέθοδος Αξιολόγησης Αξιοπιστίας Βασισμένη σε Πληροφορία Φόρτισης Πραγματικού Χρόνου 81
4Δ. 3. 1. Μέθοδος Τάσης – Διάρκειας Ζωής 81
4Δ. 3. 2. Μέθοδος Πιθανότητας Ανοχής σε Βλάβες (Probability-Damage-Tolerance ή PDT) 82
4Δ. 3. 3. Αξιολόγηση αξιοπιστίας 83
4Δ. 3. 4. Δεδομένα ανάπτυξης ρωγμής 84
4Δ. 3. 5. Μοντελοποίηση των u (dam) and σ (dam) 86
4Δ. 4. Μοντέλο λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων βασισμένο στη συντήρηση με βάση την κατάσταση 92
4Δ. 4. 1. Μοντέλο βελτιστοποίησης κόστους συντήρησης 93
4Δ. 4. 2. Μοντέλο βελτιστοποίησης διαθεσιμότητας για αεροπορικό στόλο 96
4Δ. 4. 3. Μοντέλο λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων βασισμένο στη συντήρηση υπό συνθήκες MODM-CBM 97
4Δ. 4. 4. Εφαρμογή στη μελέτη περίπτωσης 100
4Δ. 5. Ανάπτυξη του συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων συντήρησης MDMSS 101
4Δ. 5. 1. Εφαρμογή στο σύστημα 102
4Δ. 5. 2. Υποσυστήματα του MDMSS 103

Ε. Αναγνώριση των βέλτιστων αποφάσεων συντήρησης για σύνθετες δομές 106

4Ε. 1. Εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για προγραμματισμό προληπτικής συντήρησης 107
4Ε.2. Βελτιστοποίηση 110
4Ε. 2. 1. Μοντέλο βελτιστοποίησης 110
4Ε. 2. 2. Τεχνική επίλυσης 111
4Ε. 3. Αποτελέσματα 113
4Ε. 3. 1. Είσοδοι 113
4Ε. 3. 2. Αποτελέσματα και ανάλυση ευαισθησίας 115

5. Συμπεράσματα 119

6. Βιβλιογραφία 123

1. Εισαγωγή

Κάθε χώρα, κάθε οργάνωση, κάθε βιομηχανία, κάθε εταιρία αγωνίζεται για την παραγωγικότητα, και ιδιαίτερα η βιομηχανία του κατασκευαστικού τομέα. Το περιβάλλον μέσα στο οποίο δρουν και αναπτύσσονται οι κατασκευαστικές βιομηχανίες είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικό, αν και ο ανταγωνισμός πολλές φορές μένει άδηλος. Για να διακριθεί κανείς σε ένα τέτοιο ανταγωνιστικό περιβάλλον, πρέπει να είναι κατηγορηματικός στην ανάληψη τέτοιων πρωτοβουλιών ώστε να καθιστούν δυνατή τη μεταμόρφωση, την εκσυγχρόνηση και την ευδοκίμηση των κατασκευστικών εταιρειών μέσω της ψηφιοποίησης.

Η ψηφιοποίηση ή αλλιώς η ψηφιακή βιομηχανία χαρακτηρίζεται από μια σειρά τεχνολογικών εξελίξεων όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things (IoT)), τα μεγάλα δεδομένα (big data), ο αυτοματισμός και τα κυβερνο-υλικά συστήματα (cyber-physical systems (CPS)).

Η ιστορία της εκβιομηχάνισης χαρακτηρίζεται από την επιδίωξη του κέρδους και από καινοτομίες αιχμής που έγιναν με σκοπό την προαγωγή και την ενδυνάμωση της παραγωγικότητας. Ομοίως, η νέα εποχή εκβιομηχάνισης, αυτή τη φορά μέσω της ψηφιοποίησης, επιδιώκει επίσης κέρδη παραγωγικότητας για να είναι επάξια συναγωνισμού στην παγκόσμια βιομηχανία κατασκευών.

Η παραγωγικότητα οποιασδήποτε διαδικασίας διογκώνεται με την αύξηση της ταχύτητας ροής υλικών και συρρικνώνεται όταν υπάρχει ανέλιξη μεταβλητής που αφορά είτε σε απαιτήσεις της συνολικής διαδικασίας είτε κάποιου σταδίου της. Ο βιομηχανικός εξοπλισμός δεν είναι δυνατόν να λειτουργεί επ’ άπειρον, ούτε να παράγει άψογα αγαθά καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής του. Επομένως, η συντήρηση του εξοπλισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επισκευή και την αποκατάστασή του στην πρωτότυπη κατάσταση με σκοπό την απρόσκοπτη λειτουργία του εργοστασίου.

Παραδοσιακά, η συντήρηση του βιομηχανικού εξοπλισμού λογιζόταν ως υποσύστημα της παραγωγής με βασική επιδίωξη την επιμήκυνση χρήσιμου χρόνου λειτουργίας. Ωστόσο, η διοίκηση συντήρησης έχει υποστεί τόσες πολλές αλλαγές τον τελευταίο μισό αιώνα που έχει καταστεί στρατηγικά ουσιαστικός επιχειρηματικός σκοπός των κατασκευαστικών εταιριών. Επομένως, η συντήρηση παίζει μείζονα ρόλο στην απρόσκοπτη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα των παραγωγικών συστημάτων.

1. 1. Ο ρόλος της συντήρησης στα Συστήματα Παραγωγής

Ως σύστημα παραγωγής λογίζεται ένας συνδυασμός μηχανών και ανθρώπων οργανωμένων σε συγκεκριμένη διάταξη με αντικειμενικό σκοπό τη μετατροπή

πρώτων υλών σε προϊόν. Η διαμόρφωση του συστήματος παραγωγής επηρεάζει το ρυθμό παραγωγής, με άλλα λόγια τη διεκπεραιωτικότητά του.

Ειδικότερα, η επίδραση της μη διαθεσιμότητας ή της διακοπής λειτουργίας των μηχανών στην αναμενόμενη διεκπεραιωτικότητα διαφέρει ανάλογα με τη συστημική διάταξη. Για παράδειγμα, η αστοχία μίας μηχανής σε διάταξη σειράς χωρίς ασφάλεια οδηγεί σε απόφραξη ολόκληρου του συστήματος παραγωγής, διότι άλλες μηχανές είτε παρεμποδίζονται είτε στερούνται τροφοδοσίας. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε έλλειμμα λόγω αδράνειας. Όμως, όταν μια μηχανή αστοχεί σε παράλληλη διάταξη, μόνο ένα τμήμα του συτήματος χάνει την παραγωγική του ικανότητα. Παρ' όλο που οι λειτουργίες συντήρησης διαξάγονται σε μεμονομένες μηχανές, μπορούν εν δεινάμει να ενισχύσουν ή να υποβαθμίσουν την παραγωγικότητα ολόκληρου του συστήματος.

Ιστορικά, η διοίκηση συντήρησης ήταν εκ φύσεως αντιδραστική, αλλά η πρόληψη πιθανών αστοχιών των μηχανών είναι πολύ επιθυμητή. Όσον αφορά την ασφάλεια, το περιβάλλον, την παραγωγικότητα και την αξιοπιστία ενός συστήματος παραγωγής, είναι προτιμητέο να διεξάγεται προληπτική/προδραστική παρά αντιδραστική συντήρηση. Διεξάγονται επίσης περιστασιακές εργασίες συντήρησης για την βελτίωση της κατάστασης των μηχανών, όπως γέμιση ψυκτικού υγρού ή αντικατάσταση εργαλείου.

Παρ' όλα αυτά, τέλεια εξάλειψη μηχανικών αστοχιών δεν είναι δυνατή. Γι' αυτό, είναι σημαντική η διοίκηση προληπτικής και αντιδραστικής συντήρησης για την αποδοτικότητα του παραγωγικού συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συντήρηση μηχανών είναι μία από τις πιο πολυδάπανες υπηρεσίες σε ένα σύστημα παραγωγής. Ο όρος "διοίκηση συντήρησης" έχει γίνει σχεδόν ταυτόσημος με τη διοίκηση προληπτικής συντήρησης.

Οι έννοιες συντήρησης αναπτύχθηκαν για τη μείωση ή την εξάλειψη αστοχιών όπου αυτό είναι εφικτό. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν η συντήρηση αξιοπιστίας (reliability centered maintenance) που επικεντρώνεται στην επίτευξη της αξιοπιστίας του εξοπλισμού, και η ολική παραγωγική συντήρηση που επικεντρώνεται στην επίτευξη μηδενικών σφαλμάτων και μηδενικών βλαβών. Διάφορα μοντέλα διοίκησης προληπτικής συντήρησης εστιάζουν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επί του παρόντος, η προληπτική συντήρηση έχει μεγάλη ζήτηση εφόσον η εκ των προτέρων γνώση είναι επιθυμητή κατά τον προγραμματισμό προδραστικής συντήρησης. Οι μηχανικές αστοχίες είναι αναπόφευκτες, αναξαρτήτως καινοτομιών και τεχνολογικών εξελίξεων, επομένως είναι σημαντικό να μελετηθούν τόσο η προδραστική συντήρηση όσο και η αντιδραστική.

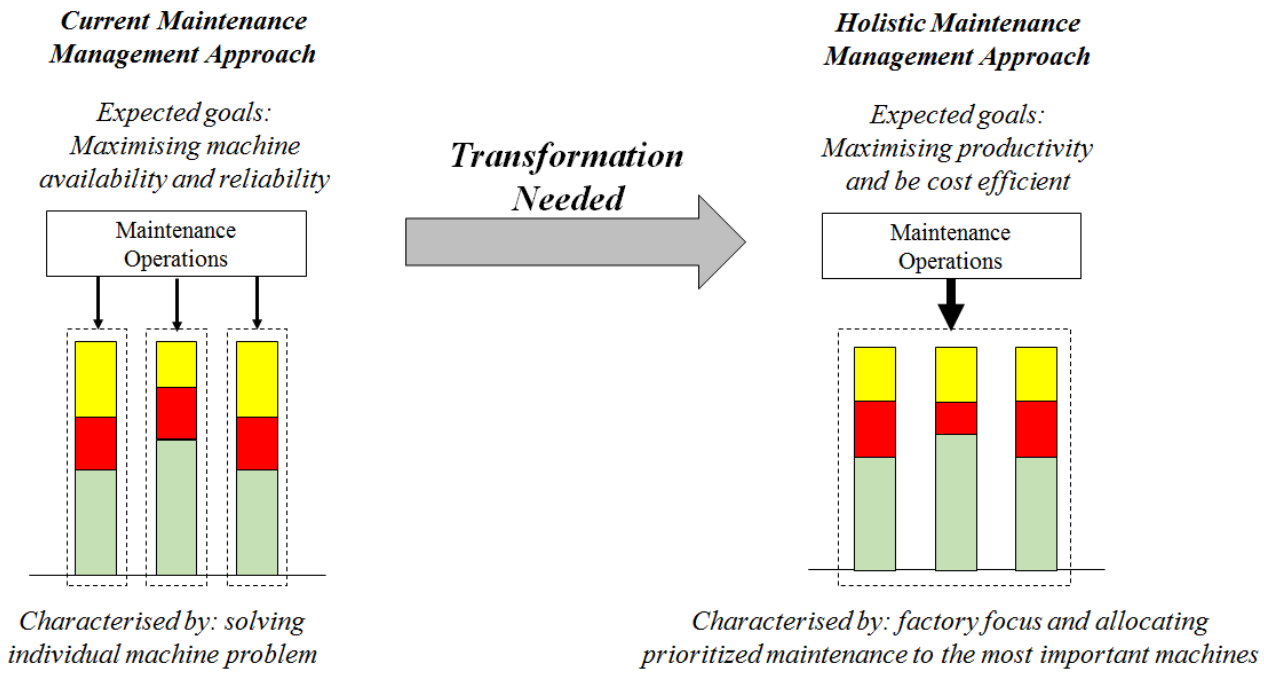
Οι κυμαινόμενες απαιτήσεις της αγοράς και η ανάγκη για μαζική παραγωγή ετερόκλιτων προϊόντων από τα παραγωγικά συστήματα έχουν δημιουργήσει περίπλοκα προβλήματα χρονοδρομολόγησης. Ένα απαιτητικό πρόγραμμα εργασιών

αποτελεί πρόβλημα χρονοδρομολόγησης συντήρησης. Η συντήρηση και η χρονοδρομολόγηση της παραγωγής είναι συνήθως δύο ξεχωριστές διαδικασίες στις κατασκευαστικές εταιρίες, που χαρακτηρίζονται από διαμάχες μεταξύ τους. Ωστόσο, η παραγωγή δε γίνεται να εξασφαλιστεί χωρίς συντήρηση των μηχανών. Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης όγκου και ποικιλίας, οι εταιρίες μετακινούνται προς την κατεύθυνση αύξησης του αυτοματισμού στα παραγωγικά τους συστήματα.

Με τη χρήση της ψηφιοποίησης (και ιδιαίτερα της αυξανόμενης ροπής προς τον αυτοματισμό), τα παραγωγικά συστήματα αναμένονται να λειτουργούν με πλήρη αυτονιμία και μικρή ανθρώπινη παράμβαση. Αναμένεται από ένα αυτοματοποιημένο σύστημα παραγωγής η συνεχής παραγωγή, αλλά όχι η αυτοεπισκευή όταν αυτό αστοχεί. Η ανθρώπινη παρέμβαση είναι χρήσιμη για τη λειτουργία της αυτόνομης παραγωγής. Επομένως, όσο πιο αυτόνομο καθίσταται το παραγωγικό σύστημα, τόσο πιο καίρια γίνεται η ανθρώπινη παρέμβαση στην εξασφάλιση της αποδοτικότητας των παραγωγικών συστημάτων. Αυτόνομη παραγωγή δε σημαίνει εξάλειψη της ανθρώπινης εξειδίκευσης. Αντιθέτως, η εξειδικευμένη ανθρώπινη παρέμβαση αποβαίνει κρίσιμη για την απρόσκοπτη λειτουργία.

Άρα, η συντήρηση μηχανών σε ένα παραγωγικό σύστημα είναι περίπλοκη και χρειάζεται δυναμική διοίκηση. Αυτό σημαίνει ότι οι αρμόδιοι για τη διοίκηση συντήρησης αντιμετωπίζουν πολύ περίπλοκες και ποικίλες ανάγκες σε ένα ιδιαίτερα απαιτητικό επιχειρηματικό περιβάλλον.

1. 2. Το πρόβλημα της ανεκμετάλλευτης κατάστασης μηχανής



Σχήμα 1: Η μεταμόρφωση της συντήρησης

Παρ’ όλο που οι διαχειριστές συντήρησης αντιμετωπίζουν καταστάσεις όπου η λήψη αποφάσεων είναι σύνθετη διαδικασία, οι οργανώσεις συντήρησης θεωρούνται ότι υπάρχουν απλώς για να παρέχουν διαθεσιμότητα και αξιοπιστία των μηχανών με αποτελεσματική διαχείρηση από πλευράς κόστους και ασφάλειας.

Εντούτοις, η σημασία της συντήρησης αυξάνεται σταθερά με την πάροδο των ετών και ενσκήπτει η ανάγκη προσέγγισης της συντήρησης με ολιστικό τρόπο που να εκλαμβάνει την εταιρία στο σύνολό της. Ακόμα και έτσι, ενώ η θεωρία συντήρησης είναι ανεπτυγμένη, υπάρχει ένα χάσμα ανάμεσα στην έρευνα και στην τρέχουσα βιομηχανική πρακτική.

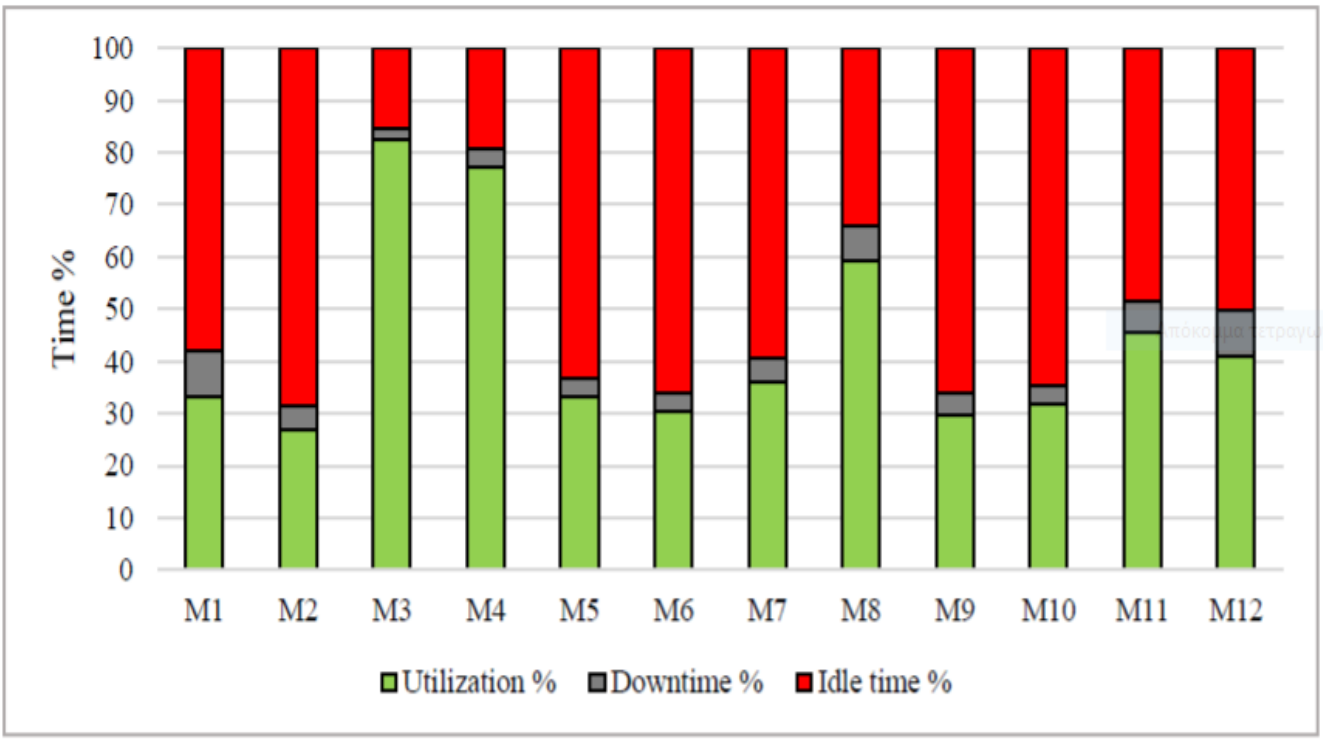
Αυτό το χάσμα παρατηρείται στη βιομηχανική πρακτική όπου ο προγραμματισμός των δράσεων συντήρησης γίνεται κυρίως σε απομόνωση, χωρίς να θεωρείται ολόκληρο το εργοστάσιο. Το πρόβλημα λοιπόν έγκειται στον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο μπορούν να συντήρηθουν παραπάνω από μία συνιστώσα του εξοπλισμού σε περιορισμένο χρονικό διάστημα. Το πρόβλημα απεικονίζεται στο **Σχήμα 1**, όπου φαίνονται οι τρέχουσες πρακτικές, η απαραίτητη μετατροπή και η μελλοντική επιθυμητή κατάσταση.

Οι μηχανικές αστοχίες και η συστημική διάταξη υποδεικνύουν ότι οι δυνατότητες των μηχανών του συστήματος παραγωγής δεν είναι πλήρως εκμεταλλεύσιμες. Οι άμεσοι χρόνοι εκτός λειτουργίας, προετοιμασίας, προγραμματισμένης προληπτικής συντήρησης και προγραμματισμένων διαλειμμάτων συντελούν στη μείωση των δυνατοτήτων της μηχανής.

Η πιο επιθυμητή κατάσταση της μηχανής είναι η αξιοποίησή της, ο χρόνος κατά τον οποίο η μηχανή παράγει. Η κατάσταση μη χρήσης μιας μηχανής, δηλαδή οι μη αξιοποιήσιμοι χρόνοι κατά τη διάρκεια ζωής μιας μηχανής, είναι οι περίοδοι στον κύκλο ζωής της κατά τις οποίες αυτή είναι σε τέλεια κατάσταση λειτουργίας αλλά δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή.

Η κατάσταση κατά την οποία μια μηχανή δεν χρησιμοποιείται φαίνεται στο **Σχήμα 2** όπου φαίνεται ένα δείγμα περίπτωσης χρήσης. Η γραμμή παραγωγής του Σχήματος συγκροτείται από δώδεκα μηχανές συνδεδεμένες σε σειρά. Επίσης φαίνονται οι χρονικές περίοδοι που αφιερώνει η κάθε μηχανή κατά τη διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής παρακάτω:

- το πράσινο τμήμα δείχνει τη χρήση μιας μηχανής, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η μηχανή παράγει.
- το γκρι τμήμα υποδεικνύει τον ολικό χρόνο εκτός λειτουργίας, όταν η μηχανή ήταν υπό επιδιόρθωση ή ανέμενε να επιδιορθωθεί.
- το κόκκινο τμήμα υποδικνύει τις απώλειες λόγω απραξίας της μηχανής, με άλλα λόγια την κατάσταση κατά την οποία η μηχανή δεν χρησιμοποιείται. Η συγκεκριμένη κατάσταση μηχανής προσφέρει συγκαλυμένες ευκαιρίες για βελτίωση της συντήρησης.



Σχήμα 2: Κατάσταση μη χρήσης μηχανής

Οι καταστάσεις μη χρήσης μηχανής προξενούνται από το γεγονός ότι είτε παρεμποδίζονται είτε στερούνται πρώτων υλών. Οι απώλειες λόγω απραξίας προσμετρώνται ως διατάραξη παραγωγής, αλλά οι οργανώσεις συντήρησης συνήθως δεν είναι υπεύθυνες για αυτές τις απώλειες, εφόσον δεν σχετίζονται με τη συντήρηση. Αυτές οι απώλειες συνιστούν χαμένο παραγωγικό χρόνο και επομένως μειωμένη παραγωγικότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος κατά τον οποίο οι μηχανές είναι αδρανείς δεν είναι ο ίδιος για όλες τις μηχανές της γραμμής παραγωγής. Αυτό συνεπάγεται ότι η κάθε μηχανή επηρεάζει την παραγωγή σε διαφορετικά επίπεδα.

Η αύξηση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας οποιασδήποτε μηχανής είναι ένας καλός τρόπος μείωσης του ελεύθερου χρόνου της μηχανής, αλλά δεν μειώνει αναγκαστικά τις απώλειες λόγω αδράνειας της συγκεκριμένης μηχανής. Επομένως, γνωρίζοντας το βαθμό κρισιμότητας της συμβολής κάθε μηχανής στο σύστημα ως όλον είναι σημαντική γαι την αύξηση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να παρέχονται ίσες προσπάθειες συντήρησης για όλες τις μηχανές, εφόσον η κάθε μία έχει διαφορετικές ανάγκες και διαφορετικό ρόλο στην παραγωγή. Συνάγεται με αυτόν τον τρόπο το συμπέρασμα ότι οι προσπάθειες συντήρησης πρέπει να ιεραρχούνται.

Οι αποφάσεις ιεράρχησης των δράσεων συντήρησης λοιπόν ενισχύουν την παραγωγικότητα του συστήματος όταν βασίζονται σε πληροφορίες που μεταφέρονται σε όλα τα ιεραρχικά επίπεδα ελέγχου και διοίκησης. Η λήψη αποφάσεων συντήρησης

είναι σύνθετη εργασία, επειδή εξαρτάται από την κατάσταση ευρωστίας της κάθε μηχανής, την υποβάθμιση ευρωστίας, το χρονοδιάγραμμα συντήρησης, τους ρυθμούς και τους στόχους παραγωγής καθώς και τα κόστη συντήρησης. Αυτοί οι παράγοντες δεν μπορούν να αξιολογηθούν από την εμπειρία και μόνο. Γι' αυτό, οι αρμόδιοι λήψης αποφάσεων χρειάζονται αρωγή για να βασίσουν τις αποφάσεις τους σχετικά με την προτεραιότητα δράσεων συντήρησης σε γεγονότα και επιστημονικές μεθόδους ώστε οι αποφάσεις τους να συντελέσουν στην αύξηση της παραγωγικότητας και της αξιοπιστίας και να λειτουργήσουν υποστηρικτικά ως προς τους αντικειμενικούς σκοπούς μιας κατασκευαστικής εταιρίας.

Η ανάγκη για συστηματική επισκόπιση της βιβλιογραφίας με θέμα τη λήψη αποφάσεων συντήρησης βασίζεται στην εν δυνάμει υποστήριξη που παρέχει η βιβιλιογραφική έρευνα στον τομέα αυτόν, επιτρέποντας καλύτερη στόχευση επαληθεύοντας τις τάσεις και την εξέλιξη των εργαλείων που χρειάζονται για την επίλυση των προβλημάτων που ενσκύπτουν.

2. Κατηγοριοποίηση των άρθρων

Όπως έχει διατυπωθεί εμφατικά παραπάνω, κύριος στόχος της εργασίας είναι η αναγνώριση των τάσεων της μοντελοποίησης και των μεθόδων λήψης αποφάσεων συντήρησης σε βιομηχανικό περιβάλλον. Επομένως, θεωρείται αρκετό ένα δείγμα που καλύπτει την τελευταία δεκαετία έρευνας με έμφαση στις πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις για την ανακάλυψη αυτών των τάσεων. Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης των στοιχείων από άρθρα προηγούμενων εργασιών από περασμένες δεκαετίες υποστηρικτικά προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης νέων μεθοδολογιών.

2. 1. Ομαδοποίηση των τμημάτων συντήρησης ανάλογα με τον τομέα μελέτης

Η ενδελεχής μελέτη των άρθρων και των παλαιότερων επισκοπήσεων επέτρεψε την εξακρίβωση συγκεκριμένων τμημάτων βιομηχανικής συντήρησης που έχουν σχέση με τα προβλήματα λήψης αποφάσεων. Οι συντάκτες επισημαίνουν στις εργασίες τους αρκετά από αυτά τα τμήματα αλλά δείχνουν σε μεγαλύτερο βάθος τεχνικές και βελτιώσεις σε κάποια από αυτά. Με πυξίδα τα παραπάνω, και για τη διευκόλυνση της αξιολόγησης κάθε άρθρου ατομικά, η μελέτη των ενεργειών συντήρησης διαχωρίζεται σε τέσσερις τομείς με κριτήριο την περιοχή δράσης.

Ο πρώτος τομέας, **Προγραμματισμός και Διοίκηση** (Management and Planning), καλύπτει τις περιοχές της Διοίκησης Συντήρησης, του Προγραμματισμού Συντήρησης, της Επιλογής Πολιτικής Συντήρησης και της Ανάλυσης Αποδοτικότητας

Συντήρησης. Η επισημοποίηση της γνώσης που παρέχουν οι μεθοδολογίες αυτού του τομέα χρησιμοποιούνται ως είσοδος στα μοντέλα λήψης αποφάσεων των υπολοίπων τομέων. Οι επιμέρους τομείς επιγραμματικά είναι:

• Διοίκηση Συντήρησης (Maintenance Management ή MM): Αυτό το τμήμα τονίζει τη σημαντικότητα της συνεχούς επανεξέτασης των εγκεκριμένων πολιτικών και μοντέλων λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιούνται για την επιλογή αυτών των πολιτικών και τον επακόλουθο προγραμματισμό. Συμπεριλαμβάνει όλα τα υπόλοιπα και αφορά τη συνεχή βελτίωση της απόδοσης ολόκληρης της διαδικασίας.

• Προγραμματισμός Συντήρησης (Maintenance Planning ή MP): Αυτό το τμήμα οριοθετεί τους περιορισμούς ανάμεσα στην επιλογή των πολιτικών συντήρησης και της επακόλουθης διοίκησης. Περιλαμβάνει μοντέλα που καθιστούν δυνατό τον καθορισμό των δράσεων συντήρησης βάσει των εγκεκριμένων πολιτικών και της πληροφορίας που σχετίζεται με τις επιπτώσεις και τους κινδύνους που εμπεριέχονται και παρέχονται για παράδειγμα μέσω μοντέλων προσομοίωσης.

• Επιλογή Πολιτικής Συντήρησης (Maintenance Policy Selection ή MPS): Αυτό το τμήμα περιλαμβάνει τα μοντέλα και τις μεθόδους για την αποτίμηση της καλύτερης πολιτικής προς έγκριση με βάση τη βιωσιμότητα, το επίπεδο οργανωτικής ωριμότητας και τη δυνατότητα για περαιτέρω μείωση κόστους.

• Ανάλυση Αποδοτικότητας Συντήρησης (Maintenance Efficiency Analysis ή MEA): Οι μέθοδοι και τα μοντέλα αυτού του τμήματος παρέχουν ποιοτική και ποσοτική πληροφορία με χρήση, για παράδειγμα, δεικτών απόδοσης. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα στον προγραμματισμό και τη διοίκηση συντήρησης.

Ο δεύτερος τομέας ονομάζεται **Ενοποίηση Συστημάτων (Systems Integration)** και καλύπτει τις περιοχές Ανάθεσης Συντήρησης σε Εξωτερικό Συνεργείο, Συντονισμένης Βελτιστοποίησης, Ενοποίησης Συστημάτων Πολλαπλών Επιπέδων και Βελτιστοποίησης Συστημάτων Πολλαπλών Καταστάσεων. Αυτός ο τομέας παρουσιάζει τα μοντέλα λήψης αποφάσεων που αφορούν τις διακριτές φάσεις της κατάστασης του εξοπλισμού, καθώς και την απαρίθμηση και την καταγραφή των δράσεων συντήρησης βάσει μοντέλων που καλύπτουν όλες τις συνιστώσες αυτού του εξοπλισμού. Επιπρόσθετα, σε αυτόν τον τομέα υπάρχει απερίφραστο ενδιαφέρον σχετικά με την επίτευξη βελτίωσης συντήρησης για την πραγμάτωση των αντικειμενικών σκοπών της διαδικασίας παραγωγής. Συγκεκριμένα:

• Ανάθεση Συντήρησης σε Εξωτερικό Συνεργείο (Maintenance Outsourcing ή MO): Τα μοντέλα που προτείνονται για αυτό το τμήμα περιλαμβάνουν την αξιολόγηση των σχετικών πόρων και κοστών έτσι ώστε οι ενέργειες συντήρησης να μπορούν να υλοποιηθούν με ανάθεση σε εξωτερικό συνεργάτη. Υπάρχει επίσης το μέλημα της εκτίμησης του χρόνου αντίδρασης για τη διενέργεια αυτών των δράσεων.

• Συντονισμένη Βελτιστοποίηση (Joint Optimization ή JO): Αυτό το τμήμα αντιστοιχεί στα μοντέλα που αφορούν τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων συντήρησης, δεδομένων των αντικειμενικών στόχων του συστήματος παραγωγής. Ενώ φαίνεται προφανές ότι σποραδικές βελτιώσεις επιφέρουν πάντα γενικές βελτιώσεις, αυτός ο ισχυρισμός δεν είναι αληθής. Για παράδειγμα, η βέλτιστη μείωση κόστους συντήρησης δεν επιτρέπει πάντα τη βελτιστοποίηση της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις στην παραγωγή και διανομή του τελικού προϊόντος. Επομένως, αξίζει να υπογραμμιστούν τα μοντέλα και οι μέθοδοι που αφορούν την επίτευξη αυτής της ισορροπίας μεταξύ των αντικειμενικών στόχων της συντήρησης και της παραγωγής.

• Ενοποίηση Συστημάτων Πολλαπλών Επιπέδων (Multi-Level systems Integration ή MLI): Αυτό το τμήμα απαρτίζεται από πολυεπίπεδα μοντέλα λήψης αποφάσεων τα οποία θεωρούν το πλήθος των συνιστωσών του συτήματος, και αναγνωρίζουν διακριτές ομάδες για τις δράσεις συντήρησης.

• Βελτιστοποίηση Συστημάτων Πολλαπλών Καταστάσεων (Multi-State Systems Optimization ή MSO): Αυτό το τμήμα καλύπτει τις μεθόδους και τα μοντέλα που εφαρμόζονται σε συστήματα που επιτρέπουν την αναγνώριση ενδιάμεσων σταδίων που περιγράφουν την κατάστασή τους.

Ο τρίτος τομέας, η **Χρονοδρομολόγηση Συντήρησης** (Maintenance Scheduling), αφορά τον ορισμό των μεσοδιαστημάτων μεταξύ των επιθεωρήσεων συντήρησης, και τα μοντέλα τους λαμβάνουν ως εισόδους τις προγενέστερες γνώσεις του πρώτου τομέα, οι οποίες συναθροίζονται με τον υπολογισμό των ρυθμών υποβάθμισης του συστήματος. Λεπτομερέστερα:

• Υποβάθμιση Συστήματος και Συνιστωσών (Systems and Components Degradation ή SCD): εδώ γίνεται χρήση των ρυθμών υποβάθμισης για την ελαχιστοποίηση των μακροπρόθεσμων κοστών, επιτρέποντας τη χρονοδρομολόγηση και την πρόβλεψη των δράσεων προληπτικής συντήρησης.

• Μεσοδιαστήματα Επιθεωρήσεων και Συντήρησης (Inspection and Maintenance Interval ή IMI): Αυτό το τμήμα αντιστοιχεί στις μεθόδους και τα μοντέλα που χρειάζονται για τον υπολογισμό και τον καθορισμό των καλύτερων μεσοδιαστημάτων ανάμεσα στις επιθεωρήσεις συντήρησης, σύμφωνα με ορισμένους αντικειμενικούς στόχους. Όπως και σε άλλα τμήματα, για την κρίση των βελτιώσεων που γίνονται ανά περίπτωση υπάρχει αξιόλογη ροπή για ζητήματα σχετικά με τη μείωση κόστους.

• Εκτίμηση Κόστους Συντήρησης (Maintenance Cost Estimation ή MCE): Παρ' όλο που υπάρχουν πολυπληθή μοντέλα που έχουν ως αντικείμενο τη μείωση κόστους, τα μοντέλα αυτού του τμήματος επιτρέπουν, επιπρόσθετα με τη συνήθη απλοποίηση, την εκτίμηση και τον υπολογισμό κοστών συντήρησης για ποικίλλες καταστάσεις και σενάρια.

• Διοίκηση Κύκλου Ζωής του Εξοπλισμού (Equipment Lifecycle Management ή ELM): Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζονται μοντέλα που ασχολούνται με την αξιολόγηση αποφάσεων ανάμεσα σε επισκευές και ανταλλαγές εξοπλισμού, καθώς και με την παροχή πληροφοριών που επιτρέπουν τον καθορισμό των καλύτερων προγνωστικών μεθόδων και εργαλείων.

Ο τέταρτος τομέας, **Παρακολούθηση και Ανάλυση** (Monitoring and Analysis), επικεντρώνεται στην ανάλυση και αξιολόγηση της κατάστασης και της αξιοπιστίας του εξοπλισμού. Επιπλέον, σε αυτόν τον τομέα παρουσιάζονται μεθοδολογίες που επιτρέπουν την αξιολόγηση των συνεπειών αλλαγής πολιτικής συντήρησης. Με αυτόν τον τρόπο, η γνώση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί από τον πρώτο τομέα, επανατροφοδοτώντας όλο το σύστημα και εισάγοντας μια διαδικασία συνεχούς βελτίωσης ανάμεσα στους τέσσερις τομείς. Επεξηγηματικά:

• Ανάλυση της Διαδικασίας Παρακολούθησης (Process Monitoring Analysis ή PMA): Σε αυτό το τμήμα γίνεται ουσιαστικά χρήση της πληροφορίας που σχετίζεται με τις περιοχές της Διοίκησης του Κύκλου Ζωής του Εξοπλισμού και της Πρόγνωσης Ευρωστίας της Μηχανής, εξασφαλίζοντας την εφαρμογή των καλύτερων τεχνικών παρακολούθησης. Κάποια από αυτά τα μοντέλα και τις μεθόδους επικεντρώνονται επίσης στις αυτόνομες δράσεις προσφέροντας βοήθεια στους διαχειριστές λήψης αποφάσεων.

• Πρόγνωση Ευρωστίας της Μηχανής (Machine Health Prognosis ή MHP): Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται σε αυτό το τμήμα παρέχουν εκτιμήσεις σχετικές με τη συχνότητα αστοχιών. Προγνωστικά και πιθανολογικά μοντέλα, σε συνδυασμό με την

ανάλυση ιστορικών δεδομένων, χρησιμοποιούνται συχνά επειδή παρέχουν την υποστήριξη που χρειάζεται για την πρόγνωση.

• Ανάλυση Αξιοπιστίας (Reliability Analysis ή RA): Σχετίζεται αυστηρά με το τμήμα Πρόγνωσης Ευρωστίας της Μηχανής. Οι μέθοδοι αυτού του τμήματος κάνουν χρήση πληροφορίας από τις συνθήκες του εξοπλισμού, επιτρέποντας, μέσω πιθανολογικών εργαλείων, τη μοντελοποίηση και την εξισορρόπηση μεταξύ αντικειμενικών στόχων κόστους και αξιοπιστίας.

• Ανάλυση Ρίσκου και Επιπτώσεων (Risk and Consequence Analysis): Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζονται μοντέλα λήψης αποφάσεων που ενέχουν κυρίως το συγκερασμό των προτιμήσεων του διαχειριστή λήψης αποφάσεων με θέματα οικονομικής φύσης. Τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα παρέχουν επίσης κατάταξη των κρίσιμων συνιστωσών του συστήματος.

Η παραπάνω ομαδοποίηση των επιμέρους τμημάτων στους τέσσερις τομείς έγινε από τους Ruschel et al. (2017) λαμβάνοντας υπ’ όψιν τις αλληλεπιδράσεις των τμημάτων και των συσχετίσεων μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, έγινε ποιοτική και ποσοτική ανάλυση δεδομένων στα άρθρα κάθε τμήματος εξειδίκευσης, υποδικνύοντας τους όρους που σχετίζονται με άλλα τμήματα.

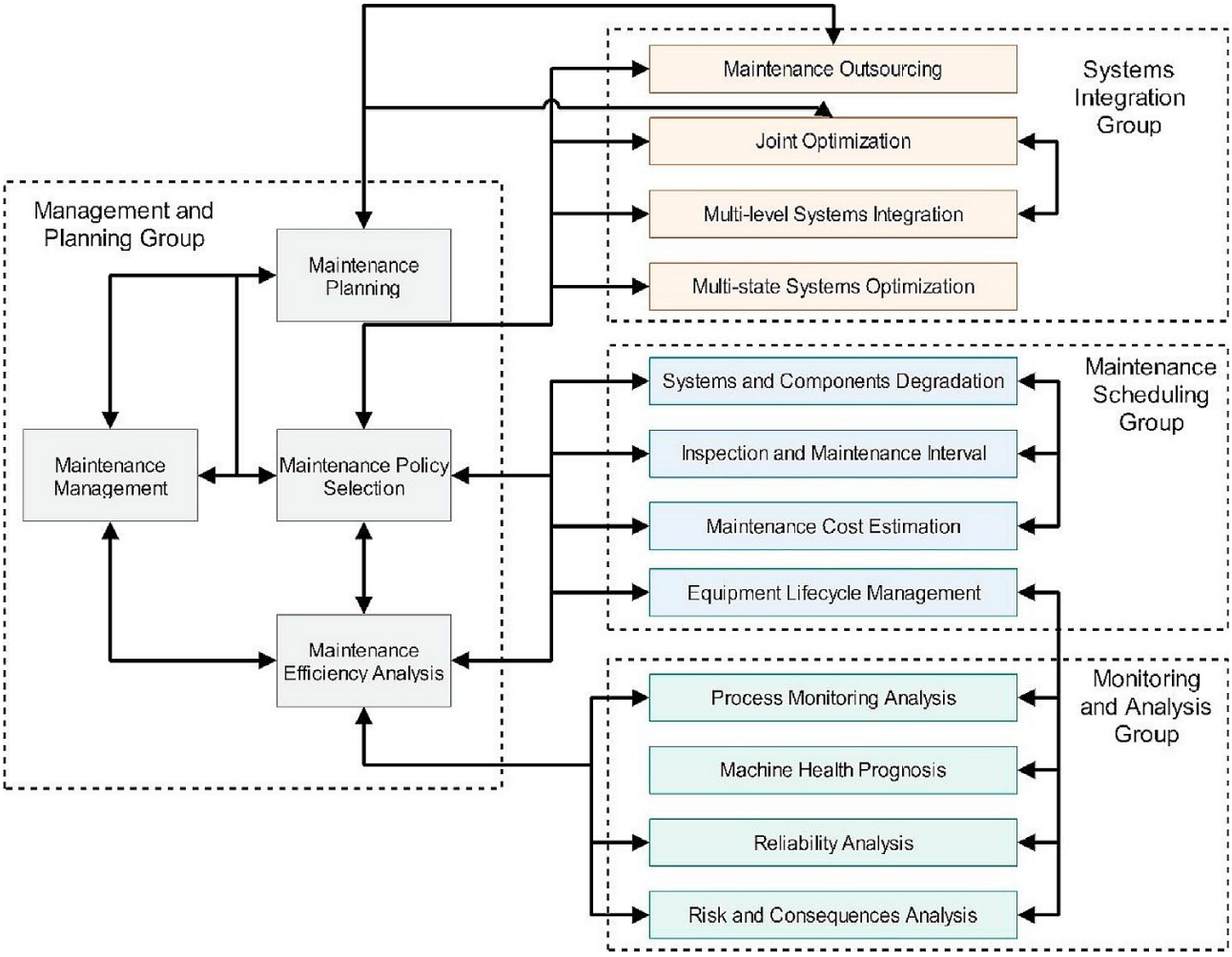
Από αυτήν την ανάλυση προέκυψε ένας πίνακας συσχέτισης, **Πίνακας 1**, που εμπεριέχει την ονοματολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω. Σε κάθε άρθρο συγκεκριμένου τμήματος λήψης αποφάσεων συντήρησης, παρατηρήθηκαν αναφορές σε άλλα τμήματα. Η σχέση μεταξύ δύο τμημάτων απορρέει διαιρώντας το πλήθος των άρθρων που σχετίζουν το δευτερεύον τμήμα με το συνολικό πλήθος των άρθρων στο τμήμα ενδιαφέροντος, όπου 0 είναι 0 τοις εκατό και 1 είναι 100 τοις εκατό. Δεν θεωρήθηκαν άρθρα για το Σύστημα Παραγωγής (Production System (PS)) διότι δεν είναι στο επίκεντρο μελέτης, γι’ αυτό τα αντίστοιχα πεδία στον πίνακα περιέχουν “X”. Ωστόσο υπάρχουν άρθρα σε άλλα τμήματα που αναφέρουν ή αναφέρονται σε συστήματα παραγωγής στα ποσοστά που φαίνονται στην τελευταία στήλη του πίνακα. Τα πεδία με έντονη γραφή υπαγορεύουν ισχυρή σχέση μεταξύ των τμημάτων. Τα πεδία με πλάγια γραφή αντιστοιχούν σε ενδιάμεση σχέση. Τελικά, τα πεδία με απλή γραφή αντιστοιχούν σε αδύναμη σχέση ή απουσία αυτής.

Πίνακας 1

Μητρώο συσχέτισης των τμημάτων εφαρμογών για λήψη αποφάσεων βιομηχανικής συντήρησης.

	MM	MP	MPS	MEA	ELM	PMA	MHP	RA	SCD	MO	JO	MLI	MSO	RCA	MCE	IMI	PS
MM	**1.00**	**0.44**	**0.38**	**0.56**	*0.19*	*0.19*	*0.19*	*0.19*	0.13	0.06	*0.19*	0.13	0.13	*0.25*	**0.44**	*0.19*	**0.56**
MP	**0.47**	**1.00**	**0.40**	0.07	–	0.07	–	0.07	0.07	0.07	*0.27*	0.07	0.07	0.07	*0.07*	0.07	**0.40**
MPS	**0.29**	**0.38**	**1.00**	0.05	0.10	–	0.05	0.05	0.05	0.05	**0.33**	**0.38**	**0.29**	**0.33**	*0.24*	*0.24*	*0.19*
MEA	**0.26**	*0.04*	**0.35**	**1.00**	*0.22*	*0.22*	**0.26**	*0.17*	*0.17*	0.04	0.09	0.09	0.04	**0.26**	**0.26**	**0.35**	*0.09*
ELM	**0.67**	*0.33*	*0.33*	**0.67**	**1.00**	–	**0.67**	–	–	–	–	–	–	–	*0.33*	–	*0.33*
PMA	**0.67**	–	*0.33*	**0.67**	**0.67**	**1.00**	–	*0.33*	**0.67**	–	*0.33*	–	–	–	*0.33*	–	*0.33*
MHP	**0.27**	0.09	–	*0.36*	*0.18*	*0.18*	**1.00**	0.09	*0.18*	–	0.09	–	–	–	*0.18*	–	*0.18*
RA	**0.60**	0.20	0.20	**0.80**	*0.40*	*0.40*	*0.40*	**1.00**	0.20	–	–	–	–	–	0.20	–	*0.40*
SCD	**0.40**	*0.20*	*0.20*	**0.60**	**0.40**	–	–	–	**1.00**	–	–	*0.20*	–	–	*0.20*	–	*0.20*
MO	**1.00**	**1.00**	**1.00**	–	–	–	–	–	–	**1.00**	–	–	–	–	–	–	***1.00***
JO	*0.25*	*0.33*	**0.42**	0.08	–	0.08	–	0.08	–	–	**1.00**	*0.25*	0.08	0.08	*0.08*	–	*0.25*
MLI	**0.33**	*0.17*	**0.33**	*0.17*	–	*0.17*	–	*0.17*	–	–	**0.33**	**1.00**	–	–	*0.17*	*0.17*	**0.33**
MSO	**0.67**	*0.33*	**0.67**	*0.33*	*0.33*	–	–	*0.33*	*0.33*	–	–	–	**1.00**	–	*0.33*	–	**0.67**
RCA	**0.75**	*0.25*	**0.50**	**0.50**	*0.25*	*0.25*	*0.25*	0.25	*0.25*	–	*0.25*	–	*0.25*	**1.00**	*0.25*	**0.50**	*0.25*
MCE	**0.50**	0.13	**0.63**	*0.38*	0.13	0.13	0.13	–	0.13	–	0.13	0.13	0.13	–	**1.00**	*0.38*	*0.25*
IMI	**0.35**	*0.18*	**0.29**	**0.29**	0.06	0.12	0.12	0.12	0.12	–	0.06	–	–	–	*0.24*	**1.00**	*0.24*
OS	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Στο **Σχήμα 3**, υποδεικνύεται με βέλη η πιο σχετική (ισχυρή και μεσαία) σχέση μεταξύ των τμημάτων εφαρμογών στη λήψη αποφάσεων συντήρησης, σύμφωνα με το μητρώο συσχέτισης. Δεδομένων των αλληλεπιδράσεων που υπάρχουν, έγινε η ομαδοποίηση στους τέσσερις τομείς που περιγράφηκαν παραπάνω (παραλληλόγραμμα με κουκκίδες στο **Σχήμα 3**) ως τρόπος οργάνωσης. Επιπλέον, για να διατηρηθεί το σχήμα καθαρό, επέλεξαν να κρύψουν τις σχέσεις ανάμεσα στη Διοίκηση Συντήρησης και τα υπόλοιπα τμήματα που δεν ανήκουν στον τομέα Προγραμματισμού και Διοίκησης.



Σχήμα 3: Οι τομείς των τμημάτων εφαρμογών της λήψης αποφάσεων συντήρησης.

2. 2. Τεχνικά εργαλεία των μεθόδων

Παρακάτω ορίζονται κάποιες τεχνικές έννοιες που εντοπίζονται στο γενικό πλαίσιο των παραπάνω μεθοδολογιών.

• Μαρκοβιανή διαδικασία (ή αλυσίδα Markov) είναι η στοχαστική διαδικασία με διακριτές καταστάσεις στις οποίες η κατανομή πιθανότητας του επόμενου σταδίου εξαρτάται μόνο από το τρέχον στάδιο και όχι από τη διαδοχή των περιστατικών που προηγήθηκαν. Ως πιο γενικευμένη διαδικασία που εφαρμόζεται στη συντήρηση μηχανών ορίζεται η Μερικώς Παρατηρήσιμη Διαδικασία Markov, κατά την οποία γίνεται η υπόθεση ότι η δυναμική του συστήματος καθορίζεται από μια διαδικασία Markov αλλά δεν είναι δυνατή η παρατήρηση της υποκείμενης κατάστασης.

• Μη επιβαλλόμενος γενετικός αλγόριθμος ταξινόμησης (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) είναι ένας εξελικτικός αλγόριθμος που παράγει βέλτιστες λύσεις σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης.

• Η δομή k ανά N (k-out-of-N structure) αναφέρεται σε σύστημα N συνιστωσών που λειτουργεί εάν λειτουργούν τουλάχιστον k από τις N συνιστώσες του, ή αστοχεί εάν τουλάχιστον k από τις N συνιστώσες του αστοχήσουν.

• Διαδικασία Γάμμα: μια συνεχούς χρόνου στοχαστική διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση ομαλούς επιδείνωσης μιας μεταβλητής.

• Γενικευμένη Διαδικασία Ανανέωσης (Generalized Renewal Process (GRP)): διαδικασία μοντελοποίησης της κατάστασης του συστήματος και της συσχετισμένης αποτελεσματικότητας των επισκευών κατά την οποία εισάγεται η έννοια της εικονικής ηλικίας στις συνιστώσες του.

• Προσομοίωση Monte Carlo: μια στοχαστική διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή γεγονότων βλαβών. Στο εννοιολογικό πλαίσιο της συντήρησης δεν χρησιμοποιείται γεννήτρια τυχαίων αριθμών αλλά η προσομοίωση διέπεται από κατανομή που προσαρμόζεται στα ιστορικά δεδομένα βλαβών δευτερογενών σύνθετων κατασκευών.

• Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων (MCDM): κλάδος της επιχειρησιακής έρευνας που αποτιμά με κατηγορηματικό τρόπο πολλαπλά αντικρουόμενα κριτήρια για τη λήψη αποφάσεων.

• Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process): μια δομημένη τεχνική επιλογής οργάνωσης και ανάλυσης περίπλοκων αποφάσεων για την εμπειρική διερεύνηση κατάταξης διαφορετικών παραγόντων που συντελούν στις βέλτιστες στρατηγικές συντήρησης.

• Συνάρτηση Copula: συνάρτηση κατανομής πολλαπλών τυχαίων μεταβλητών για την οποία η κατανομή οριακής πιθανότητας είναι ομοιόμορφη για κάθε μεταβλητή. Χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της δομής εξάρτησης του συνόλου τυχαίων μεταβλητών χωριστά από τις συναρτήσεις κατανομής οριακής πιθανότητας.

• Μοντέλο Αναλογικών Κινδύνων (Proportional Hazards Model): χρησιμοποιείται στην ανάλυση αξιοπιστίας χρησιμοποιώντας συμμεταβλητές για την περιγραφή διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας, και στη βελτιστοποίηση συντήρησης

συνδυάζοντας τα δεδομένα ηλικίας και παρακολούθησης κατάστασης ώστε να αναπαραστήσει πιο πιστά την κατάσταση ευρωστίας του εξοπλισμού και την πιθανότητα αστοχίας.

• Διαδραστική Ασαφής Γραμμική Μέθοδος Ανάθεσης (Interactive Fuzzy Linear Assignment Method): μέθοδος που χρησιμοποιεί ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα για την κατάταξη στρατηγικών συντήρησης, με επιλογή διόθωσης των ενδιάμεσων λύσεων από τους διαχειριστές.

• Εναπομένουσα χρήσιμη διάρκεια ζωής (Remaining Useful Life (RUL)): ορίζεται ως η χρονική διάρκεια που απομένει πριν την αστοχία ενός συστήματος με δεδομένη πιθανότητα αστοχίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται η συνεισφορά των πιο σύγχρονων εφαρμογών λήψης αποφάσεων συντήρησης στους αντίστοιχους τομείς και τμήματα ταξινόμησης.

3. Περιοχές εφαρμογής της λήψης αποφάσεων:

3. 1. Τομέας Οργάνωσης και Δοίκησης

3. 1. 1. Διοίκηση Συντήρησης:

Οι Bashiri et al. (2011) ανέπτυξαν μια διαδραστική προσέγγιση η οποία λαμβάνει υπ’ όψιν τις προτιμήσεις των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων συντήρησης σε ότι αφορά τα κριτήρια με τα οποία γίνεται η επιλογή της βέλτιστης τακτικής συντήρησης. Οι πληροφορίες σχετικά με τις προτιμήσεις αυτές δίνονται σταδιακά ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι εύλογο και τα δεδομένα που χρησιμοποιεί η μέθοδος για την κατάταξη των πολιτικών συντήρησης είναι όχι μόνο ποσοτικά αλλά και ποιοτικά, ανάλογα με τα κριτήρια που έχουν καθοριστεί από τους υπεύθυνους. Η ποιοτική πληροφορία εισάγεται με τη μορφή ασαφών μεταβλητών ενώ η κατάταξη των πολιτικών συντήρησης εκπονείται με βάση τη γραμμική μέθοδο ανάθεσης, ειδικά τροποποιημένη ώστε να είναι συμβατή με τη λογική της ασάφειας.

Οι Bousdekis et al. (2015) εκπόνησαν μια συστηματική επισκόπηση στον κλάδο της λήψης αποφάσεων συντήρησης υπό συνθήκες και πρότειναν ένα πλαίσιο εργασίας στο οποίο παρέχονται διάφοροι τύποι προτάσεων συντήρησης διαδικτυακά. Ειδικά, αναπτύσσεται και υλοποιείται ένα προδραστικό σύστημα υποστήριξης λήψης

αποφάσεων το οποίο λειτουργεί με χρήση πληροφορίας από αισθητήρες που καταγράφουν ενδείξεις σε πραγματικό χρόνο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενσωμάτωσης όλων των υπολοίπων τομέων συντήρησης στη Διοίκηση Συντήρησης αποτελεί η μελέτη των Tang et al. (2015) το προτεινόμενο πλαίσιο της οποίας περιλαμβάνει δείκτες αξιολόγησης κριτηριών, μεθόδους εξάλειψης υποκειμενικότητας και δέντρα λήψης αποφάσεων συντονισμένα με σκοπό την επιστημονική διοίκηση συντήρησης με κέντρο την αξιοπιστία. Οι μέθοδοι αυτές επαληθεύτηκαν σε εξοπλισμό εξόρυξης και παραγωγής πετρελαιοειδών.

3. 1. 2. Προγραμματισμός Συντήρησης:

Στο μοντέλο πολλαπλών αντικειμενικών στόχων των Lin et al. (2017) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν στο σχεδιασμό συντήρησης αεροπορικού στόλου με απλό και εύληπτο τρόπο με τη βοήθεια του διαγράμματος Gantt, όπου φαίνεται η χρονική πορεία υλοποίησης κάθε ενέργειας συντήρησης. Ο χρήστης που μπορεί να κάνει μετατροπές στον προγραμμτισμό σύροντας τη μπάρα Gantt που αντιπροσωπεύει το αεροσκάφος που τον ενδιαφέρει.

Οι Laks et al. (2018) παρουσίασαν ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων συντήρησης που αναγνωρίζει τις κοστολογικά βέλτιστες αποφάσεις συντήρησης για δεδομένη περίοδο προγραμματισμού. Το σύστημα μοντελοποιείται με τη γενικευμένη διαδικασία ανανέωσης για την εξασφάλιση της δράσης συντήρησης πριν παρέλθει ένα κρίσιμο όριο και προσομοιώνεται με τη μέθοδο Monte Carlo για την εκπόνηση αριθμητικής μελέτης περίπτωσης.

Ταυτόχρονα, η μελέτη των Khatab et al. (2018) πραγματεύεται την ανάθεση εργασιών συντήρησης σε πολλαπλούς τεχνίτες και πολλαπλά επισκευαστικά κανάλια από κοινού, προτείνοντας σε κάθε περίπτωση τις βέλτιστες δράσεις συντήρησης ανάλογα με τον προϋπολογισμό, το είδος και την ποιότητα της εργασίας που θα πραγματοποιηθεί καθώς και το επίπεδο δεξιοτήτων του ανθρώπινου δυναμικού.

Στο πλαίσιο που προτείνεται από τους Liu et al. (2019) διευρύνεται ο τομέας της πρόγνωσης βελτιώνοντας την προβλεψιμότητα της αστοχίας των εδράνων των ραούλων μεταφορικών ταινιών και την ακρίβεια της διάγνωσης των αστοχιών των ραούλων, και η αποτελεσματικότητά του καταδεικνύεται με τη διεξαγωγή προσομοίωσης. Τέλος το έργο των Do et al. (2019) επικεντρώνεται στην προσαρμογή της ποιότητας των επιθεωρήσεων που συντελούν στη βελτιστοποίηση συντήρησης υπό συνθήκες, οι οποίες αποτελούν σημαντικό κομμάτι του προγραμματισμού συντήρησης.

3. 1. 3. Επιλογή Πολιτικής:

Οι Bashiri et al. (2011) πρότειναν διαδραστική λύση στο πρόβλημα επιλογής της κατάλληλης στρατηγικής συντήρησης, ενσωματώνοντας τη γνώμη των ειδικών για την επιλογή κριτηρίων με στόχο την καλύτερη κατάταξη των πολιτικών συντήρησης. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η προσέγγισή τους βασίζεται στη λογική της μεθόδου γραμμικής ανάλυσης αναθεωρημένης με τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνει όχι μόνο μεταβλητές για την αναπαράσταση των ποσοτικών δεδομένων που αφορούν στο σύστημα αλλά και ασαφείς μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τα ποιοτικά δεδομένα του συστήματος. Οι ειδικοί μπορούν να επεμβαίνουν σε κάθε στάδιο λύσης, προσαρμόζοντας τις παραμέτρους που κρίνονται σχετικές, αλλάζοντας την πορεία που ακολουθείται για την ταξινόμηση και επομένως την τελική μορφή της πολιτικής που θα επιλεχθεί.

Στη μελέτη των Hong et al. (2014) το πρόβλημα επιλογής της βέλτιστης πολιτικής συντήρησης διατυπώθηκε βάσει του κανόνα ελάχιστου αναμενόμενου κόστους για λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και των κανόνων στοχαστικής κυριαρχίας για τη διαχείριση της διάθεσης του ειδικού ως προς την ανάληψη ρίσκου σε ό,τι αφορά τη συχνότητα των επιθεωρήσεων. Το μοντέλο από το οποίο προκύπτει η πιθανολογική ανάλυση των επιδόσεων του συστήματος και η επιλογή των βέλτιστων στρατηγικών συντήρησης ενσωματώνει την εξάρτηση μεταξύ στοχαστικής φθοράς ή υποβάθμισης των συνιστωσών του συστήματος μέσω συναρτήσεων copula.

Οι Do et al. (2015) προτείνουν μια ευπροσάρμοστη πολιτική προδραστικής συντήρησης υπό συνθήκες που βοηθά στην κατάλληλη επιλογή ποιότητας δράσεων συντήρησης στην περίπτωση κατά την οποία κρίνεται απαραίτητη, για κάθε φορά που επιθεωρείται το σύστημα. Η επιλογή πολιτικής επαφίεται ουσιαστικά σε δύο κύριες αποφάσεις: πότε να ληφθούν προληπτικές ή διορθωτικές δράσεις συντήρησης και πότε να λάβει χώρα η επιθεώρηση.

Οι Rastegari et al. (2016) τονίζουν την ανάγκη της ανάλυσης αποφάσεων στα Αυτοματοποιημένα Συστήματα Διοίκησης Συντήρησης (Computerized Maintenance Management System’s (CMMS)). Τα αποτελέσματα καταδεικύουν την καταλληλότερη απόφαση συντήρησης για κάθε μία από τις επιλεγμένες μηχανές ή συνιστώσες τους σύμφωνα με παράγοντες όπως η συχνότητα βλαβών, ο χρόνος εκτός λειτουργίας, και το κόστος επισκευής. Οι μηχανές ομαδοποιούνται σύμφωνα με τους παράγοντες αυτούς και κάθε ομάδα τοποθετείται στο Πλέγμα Λήψης Αποφάσεων. Ανάλογα με τη θέση που καταλαμβάνει η ομάδα στο πλέγμα, της επιβάλλεται διαφορετικός τύπος συντήρησης.

Οι Nguyen et al. (2019) παρουσιάζουν μια δυναμική πολιτική επιθεώρησης και συντήρησης υπό συνθήκες που βασίζεται σε μερικώς παρατηρήσιμες διαδικασίες Markov. Η πολιτική αυτή συγκρίνεται με την κλασική πολιτική συντήρησης υπό

συνθήκες, και με πολιτικές στις οποίες είτε η πολιτική συντήρησης είτε η πολιτική επιθεωρήσεων παραμένουν σταθερές, και υπογραμμίζονται τα οφέλη της απέναντι στις υπόλοιπες όταν το κόστος επιθεώρησης είναι τέτοιο ώστε η μείωσή του να γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από τη μείωση της ποιότητας επιθεώρησης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η ανάπτυξη του λογισμικού ανοικτού κώδικα ANDURIL, μιας εργαλειοθήκης της MatLab, από τους Leontaris et al. (2018), το οποίο στοχέυει στην εκμαίευση και το συνδυασμό των κρίσεων των ειδικών. Είναι προσβάσιμο στη σελίδα **https://github.com/ElsevierSoftwareX/SOFTX_2018_39**. Έχει δοκιμαστεί σε πραγματική εφαρμογή όπου βρέθηκε ότι αναπαράγει τα αποτελέσματα του λογισμικού κλειστού κώδικα EXCALIBUR, ενώ τονίζονται τα πλεονεκτήματα που παρέχονται στο χρήστη όταν είναι διαθέσιμος ο πηγαίος κώδικας για πρακτική εξάσκηση.

1. 3. 4. Ανάλυση Αποδοτικότητας:

Οι Tang et al. (2015) όρισαν οκτώ δείκτες αξιολόγησης και αντίστοιχα κριτήρια βαθμολόγησης για την ποσοτικοποίηση της υποκειμενικής αξιολόγησης των επιπέδων σημαντικότητας του εξολπισμού με σκοπό την εφαρμογή τους στη λήψη αποφάσεων συντήρησης με κέντρο την αξιοπιστία. Ακολούθως υπολογίζονται οι τιμές των επιπέδων σημαντικότητας με τη βοήθεια γραμμικού μαθηματικού μοντέλου με συντελεστές βαρύτητας και διατυπώθηκε η μέθοδος υπολογισμού με βάρη για κάθε δείκτη αξιολόγησης σύμφωνα με την αναλυτική ιεραρχική διαδικασία. Διεξήχθη επίσης διαδικασία βαθμολόγησης κατά την οποία απαλείφθηκε η υποκειμενικότητα των δεικτών αυτών.

Παράλληλα, οι Do et al. (2015) ανέλυσαν τις επιπτώσεις των δράσεων τέλειας και ατελούς συντήρησης σε ένα σύστημα, με επιλογή του παράγοντα βελτίωσης υποβάθμισης ως αποτελεσματικού δείκτη αποδοτικότητας. Ακόμα, διερεύνησαν διάφορες αναλύσεις ευαισθησίας του προτεινόμενου μοντέλου ως προς τις παραμέτρους που αφορούν το πλήθος ατελών δράσεων συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, το κόστος ατελούς συντήρησης και την επίδραση της ατελούς συντήρησης στην ταχύτητα υποβάθμισης του εξοπλισμού.

3. 2. Τομέας Ενοποίησης Συστήματος

3. 2. 1. Ανάθεση Εργασιών Συντήρησης σε Εξωτερικό Συνεργείο:

Σύμφωνα με τους Chaabane et al. (2018), που ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της επιλεκτικής συντήρησης σε συστήματα πολλαπλών συνιστωσών, όταν το

επιτρέπει ο προϋπολογισμός συντήρησης του συστήματος είναι προτιμότερη η χρήση εξωτερικού συνεργείου που απαρτίζεται από τεχνίτες υψηλών δεξιοτήτων με έναν επαρκή συνδυασμό με τους υπαλλήλους της ίδιας της επιχείρησης. Όσο ο προϋπολογισμός συρρικνώνεται, το μοντέλο τους υποδεικνύει τη χρήση των εσωτερικών υπαλλήλων, σημειώνοντας ωστόσο ότι αυτή η πρακτική ελλοχεύει τη διακύβευση της μέγιστης αξιοπιστίας που μπορεί να επιτευχθεί από το σύστημα.

Σε παρόμοιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Khatab et al. (2018) η μελέτη των οποίων έδειξε ότι η ενσωματωμένη προσέγγιση της επιλεκτικής συντήρησης και του προβλήματος ανάθεσης παρέχει πιο αποδοτικές λύσεις υπό τις έννοιες του κόστους και της συστημικής αξιοπιστίας. Η μέθοδος που χρησιμοποίησαν και οι δύο μελέτες για να καταλήξουν στα συμπεράσματά τους είναι κοινή και στηρίζεται στη διατύπωση ενός προβλήματος μη γραμμικού προγραμματισμού.

3. 2. 2. Συντονισμένη Βελτιστοποίηση:

Οι Khatab et al. (2018) συνέβαλαν στο τμήμα της συντονισμένης βελτιστοποίησης προτείνοντας διατυπώσεις της επιλεκτικής πολιτικής συντήρησης σε συστήματα πολλαπλών συνιστωσών με πολλαπλούς επιδιορθωτές. Το σύστημα εκτελεί διάφορες αποστολές που χωρίζονται από προγραμματισμένα διαλείμματα στα οποία πραγματοποιούνται οι εργασίες συντήρησης. Στο πλαίσιο της συντονισμένης βελτιστοποίησης της επιλεκτικής συντήρησης, η πολιτική που προτείνεται περιλαμβάνει από κοινού τη βελτιστοποίηση τεσσάρων αντί για δύο κλασικές αποφάσεις επιλεκτικής συντήρησης: την επιλογή του συνόλου των συνιστωσών που θα συντηρηθούν, την επιλογή των εργασιών συντήρησης που θα δεχθεί η κάθε συνιστώσα ανάλογα με το επίπεδο βελτίωσης αξιοπιστίας που χαρακτηρίζει την κάθε μία, το πλήθος των τεχνιτών που θα αξιοποιήσει ή θα προσλάβει και την ανάθεση εργασιών συντήρησης σε κάθε έναν από αυτούς.

Οι Laks et al. (2018) πρότειναν μια μέθοδο συντήρησης που βελτιστοποιεί το κόστος συντήρησης ενώ παράλληλα διατηρεί την κατάσταση αξιοπιστίας του συστήματος σε ένα προκαθορισμένο όριο ή πιο κάτω. Στη μέθοδο των Bousdekis et al. (2018) επιχειρείται η συντονισμένη βελτιστοποίηση αναμενόμενων απωλειών λαμβάνοντας ως παραμέτρους το χρόνο προγραμματισμού εργασιών και τα σχετικά κόστη, με τα οποία υπολογίζονται οι βέλτιστοι χρόνοι εφαρμογής προαπαιτούμενων και αντιμετωπιζουσών δράσεων. Αργότερα, οι Nguyen et al. (2019) πρότειναν μια δυναμική πολιτική υπό συνθήκες όπου θεωρούνται διαφορετικά επίπεδα ποιότητας επιθεώρησης σχετικά όχι μόνο με τις επιπτώσεις τους στους παρατηρούμενους θορύβους αλλά και με το σχετικό τους κόστος.

3. 2. 3. Ενοποίηση Συστημάτων Πολλαπλών Επιπέδων:

Στην εργασία των Tiang et al. (2011) διερευνάται η συντήρηση υπό συνθήκες σε συστήματα πολλαπλών επιπέδων όπου υπάρχει οικονομική εξάρτηση ανάμεσα σε διαφορετικές συνιστώσες που υπόκεινται σε παρακολούθηση κατάστασης. Επειδή η προληπτική αντικατάσταση επιβάλλει πάγιες δαπάνες, όπως την αποστολή συνεργείου στο εργοτάξιο, θα ήταν πιο οικονομική η αντικατάσταση πολλών συνιστωσών την ίδια χρονική περίοδο. Αναπτύσσεται αλγόριθμος για την ακριβή εκτίμηση του κόστους αντικατάστασης ο οποίος ελέγχεται σε δύο πραγματικά παραδείγματα κατά τα οποία παρακολουθούνται οι κραδασμοί σε συστήματα με δύο και τρία ρουλεμάν αντίστοιχα, τα αποτελέσματα των οποίων δείχνουν ότι η πολιτική συντήρησης υπό προϋποθέσεις με το μοντέλο αναλογικών κινδύνων είναι πιο αποδοτική και οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος αντικατάστασης, όταν υπάρχει οικονομική εξάρτηση των συνιστωσών με μείωση κόστους ανάλογη της ισχύος της μεταξύ τους εξάρτησης.

Η μελέτη των Hong et al. (2014) επικεντρώνεται στη βέλτιστη λήψη αποφάσεων συντήρησης για συστήματα με συνιστώσες που εκτίθενται σε εξαρτημένες στοχαστικές υποβαθμίσεις. Η εξάρτηση των συνιστωσών αναπαριστάται με χρήση συνάρτησης copula, για την ελαστικότητα και την απλότητά της στη μοντελοποίηση πολυδιάστατων εξαρτημένων τυχαίων και στοχαστικών μεταβλητών και επειδή επιτρέπει την παραμετρική διερεύνηση για την αναγνώριση της επιρροής της δομής εξάρτησης και της συσχέτισης στις βέλτιστες στρατηγικές συντήρησης. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε αριθμητική εφαρμογή και υποβλήθηκε σε ανάλυση ευαισθησίας σε συστήματα έως πέντε συντιστωσών συνδεδεμένες παράλληλα ή σε σειρά.

Το μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων συντήρησης των Lin et al. (2017) εφαρμόζεται σε αεροπορικό στόλο και προτείνει κατάλληλο σχεδίο λήψης αποφάσεων συντήρησης πολλαπλών αντικειμενικών στόχων, για ταυτόχρονη μείωση του κόστους και διατήρηση υψηλού επιπέδου ετοιμότητας. Οι Khatab et al. (2018) όπως έχει αναφερθεί λύνουν με μη γραμμικό προγραμματισμό το πρόβλημα της επιλεκτικής συντήρησης για συστήματα με πολλαπλές συνιστώσες, κατά το οποίο επιλέγονται οι σημαντικότερες συνιστώσες προς αντικατάσταση ή επιδιόρθωση, με αντικειμενικό στόχο την εύρεση αποδοτικότερων λύσεων από την άποψη του κόστους και του επιπέδου συστημικής αξιοπιστίας.

3. 2. 4. Βελτιστοποίηση Συστημάτων Πολλαπλών Καταστάσεων:

Οι Khatab et al. (2018) δεν θεωρούν μόνο το πρόβλημα πολλαπλών συνιστωσών αλλά και πολλαπλών συστημικών καταστάσεων, κατά τις οποίες τα επίπεδα συντήρησης - και κατ’ επέκταση αξιοπιστίας - των συνιστωσών είναι

διακριτά. Οι ενέργειες συντήρησης που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα είναι τέλειες ή ατελείς, με τις τέλειες ενέργειες να επαναφέρουν το σύστημα/συνιστώσα στην κατάσταση που χαρακτηρίζεται σαν καινούργιο/α, ενώ οι ατελείς ενέργειες βελτιώνουν την κατάσταση του συστήματος/συνιστώσας ανάλογα με το συντελεστή μείωσης ηλικίας που επιβάλλεται.

Οι Bousdekis et al. (2018) διακριτοποιούν τη λειτουργία του συστήματος με μοντέλο διακριτού χρόνου όπου οι μεταβάσεις από τη μία κατάσταση στην άλλη γίνονται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές για να γίνει χρήση της διαδικασίας Markov, της οποίας η λύση καταδεικνύει τη βέλτιστη ενέργεια σε κάθε κατάσταση. Χρησιμοποιούν πληροφοριακό σύστημα σε πραγματικό χρόνο όπου οι ροές δεδομένων μοντελοποιούνται ως Μαρκοβιανό ιεραρχικό μοντέλο όπου οι καταστάσεις και οι μεταβάσεις μαθαίνονται αυτόματα και συγκροτούνται σε αλυσίδες Markov.

Στην εργασία των Nguyen et al. (2019) προσαρμόζεται το μεσοδιάστημα επιθεώρησης ανάλογα με το παρατηρούμενο επίπεδο κατάστασης συστημικής υποβάθμισης. Η εξέλιξη του συστήματος θεωρείται ότι υπόκειται σε συνεχή υποβάθμιση που παρακολουθείται με επιθεώρηση. Η συνεχής υποβάθμιση διακριτοποιείται κατά τη μοντελοποίηση για τις ανάγκες της λήψης αποφάσεων, οπότε προκύπτουν οι ενδιάμεσες συστημικές καταστάσεις οι οποίες μοντελοποιούνται με μερικώς παρατηρήσιμη διαδικασία Markov. Στόχος της μεθόδου είναι η στενότερη σύνδεση της ανωτέρου επιπέδου διαδικασίας λήψης αποφάσεων συντήρησης με την υλική επιδείνωση του συστήματος προς συντήρηση.

3. 3. Τομέας Χρονοδρομολόγησης Συντήρησης

3. 3. 1. Υποβάθμιση Συστήματος και Συνιστωσών:

Οι Hong et al. (2014), Do et al. (2015), και Nguyen et al. (2019) μελετούν τη διαδικασία στοχαστικής υποβάθμισης των συνιστωσών ενός συστήματος και την διατυπώνουν χρησιμοποιώντας τη διαδικασία Γάμμα, υποθέτοντας ότι ο ρυθμός υποβάθμισης είναι σταθερός και η υποβάθμιση έχει ανεξάρτητες βαθμίδες προσαύξησης. Χαρακτηριστικό της διαδικασίας Γάμμα είναι η μονοτονία της που είναι γνησίως αύξουσα, όπως η συμπεριφορά που παρατηρείται στις περισσότερες διαδικασίες υλικής υποβάθμισης.

3. 3. 2. Μεσοδιαστήματα Επιθεωρήσεων και Συντήρησης:

Τα μεσοδιαστήματα επιθεωρήσεων και συντήρησης είναι μεταβλητές απόφασης, όπως φαίνεται από τη μελέτη των Hong et al. (2014). Η βέλτιστη τιμή τους προκύπτει ως εκροή της μεθόδου λήψης αποφάσεων, χρησιμοποιώντας ως εργαλείο το κριτήριο του ελάχιστου αναμενόμενου δείκτη κόστους και των κανόνων στοχαστικής κυριαρχίας. Ομοίως, στο μοντέλο των Do et al. (2015) το μεσοδιάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικά σημεία επιθεώρησης ορίζεται σε συμφωνία με την πολιτική επιθεώρησης που βασίζεται στη χρήσιμη εναπομένουσα διάρκεια ζωής, όπου η συστημική αξιοπιστία ξεπερνά ή είναι ίση με το απαιτούμενο όριο. Το μεσοδιάστημα μπορεί ακόμα να θεωρηθεί σταθερό, όπως συμβαίνει στην εργασία των Liu et al. (2019), όπου όμως αναφέρεται ότι υπάρχει ανάγκη επέκτασης του προτεινόμενου πλαισίου για να συμπεριλάβει τη βελτιστοποίηση των μεσοδιαστημάτων ανάμεσα στις επιθεωρήσεις.

3. 3. 3. Εκτίμηση Κόστους Συντήρησης:

Η εκτίμηση του κόστους συντήρησης καθώς και η ελαχιστοποίησή του είναι βασικό μέλημα κάθε μελέτης γιατί το κόστος είναι το κύριο κριτήριο το οποίο συμβάλλει καθοριστικά στη λήψη αποφάσεων συντήρησης. Οι Tiang et al. (2011) επιχείρησαν να υπολογίσουν το κόστος που επιφέρει η συντήρηση πολλαπλών συνιστωσών στο σύστημα με ακρίβεια, το οποίο είναι σημαντικό για την εύρεση της τάσης του κόστους ως συνάρτηση των οριακών τιμών ρίσκου και επομένως εύρεσης της βέλτιστης πολιτικής συντήρησης υπό συνθήκες που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο κόστος. Ωστόσο, ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι υπολογιστικά εντατικός, ειδικά όταν το πλήθος των συνιστωσών είναι μεγάλο.

Οι Do et al. (2015) σημείωσαν ότι δεν θεωρείται έκπληξη το αποτέλεσμα που απορρέει από τη μέθοδό τους, ότι δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο συστημικής αξιοπιστίας, τόσο μεγαλύτερο κόστος συντήρησης επιφέρεται. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Khatab et al. (2018) οι οποίοι θεώρησαν τη συνάρτηση κόστους, η οποία περιλαμβάνει πάγια και μεταβαλλόμενα κόστη, ως την αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης στο πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού που διατύπωσαν και έλυσαν.

Οι Nguyen et al. (2019) πρότειναν ένα μοντέλο κόστους για την αξιολόγηση των επιδόσεων της προτεινόμενης πολιτικής συντήρησης και επιθεώρησης το οποίο επιτρέπει την επιλογή από διαφορετικές μορφές συνάρτησης κόστους επιθεώρησης σε σχέση με την ποιότητα επιθεώρησης, ανάλογα με το συντελεστή μορφής που θα χρησιμοποιηθεί. Η συνάρτηση είναι φθίνουσα για κάθε τιμή του συντελεστή μορφής και ανάλογα με το ρυθμό μείωσης του κόστους σε σχέση με το ρυθμό μείωσης της ποιότητας επιθεώρησης προκύπτει η βέλτιστη λύση πολιτικής συντήρησης.

3. 3. 4. Διοίκηση Κύκλου Ζωής του Εξοπλισμού:

Οι Do et al. (2015) χρησιμοποιούν την εναπομένουσα χρήσιμη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού ως προγνωστικό εργαλείο σύμφωνα με το οποίο λαμβάνονται αποφάσεις συντήρησης για το πλήθος των ατελών δράσεων συντήρησης για κάθε κύκλο ζωής του συστήματος. Οι Lin et al. (2017) υπολογίζουν την πιθανότητα αστοχίας συνιστωσών με μοντέλο βασισμένο στην εξάπλωση ρωγμής και στη θεωρία τάσης – διάρκειας ζωής. Και στις δύο περιπτώσεις η διοίκηση του κύκλου ζωής του εξοπλισμού χρησιμεύει για τη διαχείρηση του προβλήματος αξιοπιστίας.

3. 4. Τομέας Παρακολούθησης και Ανάλυσης

3. 4. 1. Ανάλυση της Διαδικασίας Παρακολούθησης:

Οι Tian et al. (2011) επέλεξαν να παρακολουθήσουν την εντατική κατάσταση του πλαισίου φτερού του αεροσκάφους, το οποίο υπόκειται σε τυχαία δυναμικά φορτία, κατά τη διάρκεια πτήσεων, σε πραγματικό χρόνο. Τα συστήματα παρακολούθησης κόπωσης του πλαισίου έχουν προσαρμοστεί επάνω στο πλαίσιο και είναι μετρητές τάνυσης (strain gauge).

Οι Bousdekis et al. (2018) ισχυρίζονται ότι η ανάκυψη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things (IoT)) και το πρότυπο της Βιομηχανίας 4.0 επιτρέπουν τη βελτίωση των δυνατοτήτων των εταιριών για παρακολούθηση και εκτενή χρήση υλικών και εικονικών αισθητήρων. Στο πληροφοριακό σύστημα που προτείνουν η συλλογή και η επεξεργασία δεδομένων γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Το επίπεδο παρακολούθησης πραγματικού χρόνου της αρχιτεκτονικής δομής του πληροφοριακού συστήματος εφαρμόζεται ως κατανεμημένο σύστημα επεξεργασίας δεδομένων που βασίζεται σε στοιχεία οργανωμένα σε συγκεκριμένη τοπολογία.

Οι Nguyen et al. (2019) διερευνούν την ποιότητα της διαδικασίας παρακολούθησης, η οποία χαρακτηρίζεται από θόρυβο στην παρατήρηση του επιπέδου υποβάθμισης του συστήματος όπως καταγράφεται από μια επιθεώρηση. Θεωρείται ότι το σφάλμα που υπεισέρχεται στην επιθεώρηση και την καθιστά ατελή ακολουθεί κανονική κατανομή, και μελετάται ο τρόπος που τα διαφορετικά επίπεδα ποιότητας επιθεωρήσεων επιδρούν όχι μόνο πάνω στο θόρυβο των παρατηρήσεων αλλά και στο σχετικό τους κόστος.

3. 4. 2. Πρόγνωση Ευρωστίας Εξοπλισμού:

Στην εργασία των Tian et al. (2011) η συλλογή πληροφοριών πραγματικού χρόνου από τους αισθητήρες είναι δεδομένα παραμόρφωσης, επομένως χρειάζεται διαδικασία μετατροπής των δεδομένων παραμόρφωσης σε πληροφορία φόρτισης. Θεωρήθηκε ότι αν χρησιμοποιηθεί η κλασική μηχανική για την ολοκλήρωση της μετατροπής του σήματος, θα υπεισέλθει υπολογιστικό σφάλμα, επειδή υπάρχει συγκέντρωση τάσεων γύρω από την κεντρική οπή του πλαισίου φτερού, καθώς επίσης και δυσκολία στον καθορισμό ακριβούς μηχανικού μοντέλου. Ως συνέπεια αυτού, επιλέγεται η χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος (BP-ANN) για να διευκολύνει τη διαδικασία μετατροπής του σήματος.

Οι Bousdekis et al. (2018) αντιμετώπισαν το πρόβλημα της πρόγνωσης σε πραγματικό χρόνο με ένα σύστημα πολλαπλών μεγεθών για την ταυτόχρονη ανάλυση πολύπλοκων ροών δεδομένων. Μοντελοποιεί τις ροές δεδομένων ως ιεραρχικό Μαρκοβιανό μοντέλο με την αυτόματη μάθηση των καταστάσεων και των μεταβάσεων, συναθροίζοντάς τες σε μια ιεραρχία αλυσίδων Markov. Η έξοδός του είναι ένα γεγονός πρόβλεψης για τη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της εμφάνισης αστοχίας μαζί με τις παραμέτρους της που εισάγονται ως πληροφορία στο μοντέλο λήψης αποφάσεων.

3. 4. 3. Ανάλυση Αξιοπιστίας:

Οι Tang et al (2015) όρισαν τρεις από τους οκτώ δείκτες αξιολόγησης της σημαντικότητας του εξοπλισμού εξόρυξης και παραγωγής περελαιοειδών με όρους αξιοπιστίας. Αυτοί είναι η επιρροή της αστοχίας στην ασφάλεια του προσωπικού και του περιβάλλοντος, η επιρροή της αστοχίας στις λειτουργίες του συστήματος και ο μέσος ρυθμός αστοχίας του εξοπλισμού. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το επίπεδο σημαντικότητας κάθε δείκτη και η λήψη αποφάσεων έγινε με τη βοήθεια δέτρων απόφασης συντήρησης.

Οι Lin et al. (2017) πρότειναν μια μέθοδο αξιοπιστίας βασισμένη σε πληροφορίες φόρτισης πραγματικού χρόνου για τη δομική αξιοπιστία αεροσκαφών. Σύμφωνα με αυτή, συνδυάζονται η γραμμική αθροιστική φθορά της μεθόδου διάρκειας ζωής υπό τάση και το μοντέλο διάγνωσης ρωγμής για πλήρη χρήση της πληροφορίας φόρτισης σε πραγματικό χρόνο που συλλέγεται από Συστήματα Παρακολούθησης Ευρωστίας και Χρήσης (Health and Usage Monitoring Systems (HUMS)).

Οι Laks et al. (2018) έκαναν ανάλυση αξιοπιστίας χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του επιδιορθώσιμου συστήματος, ειδικότερα τηε γενικευμένης διαδικασίας ανανέωσης (Generalized Renewal Process (GRP)), όπου εισάγεται η έννοια της εικονικής ηλικίας για τη μοντελοποίηση της κατάστασης του συστήματος και της σχετικής αποτελεσματικότητας επιδοόρθωσης. Το πρόγραμμα συντήρησης

που απορρέει βελτιστοποιεί το κόστος συντήρησης ενώ παράλληλα κρατά την κατάσταση αξιοπιστίας του συστήματος σε ή κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο.

Στο προτεινόμενο πλαίσιο των Liu et al. (2019) που αφορά τη λήψη αποφάσεων συντήρησης για τα ράουλα σε συστήματα μετάδοσης κίνησης με ιμάντες, η θεωρητική εκτίμηση αξιοπιστίας αλληλεπιδρά με τα δεδομένα παρακολούθησης κατάστασης, το οποίο οδηγεί σε συνεχή διόρθωση της πρόρρησης του ρυθμού αστοχίας των ραούλων και στην περαιτέρω ενημέρωση της παραμέτρου ανώτατου ορίου.

3. 4. 4. Ανάλυση Ρίσκου και Επιπτώσεων:

Οι Hong et al. (2014) λαμβάνουν υπ' όψιν τη διάθεση ανάληψης ρίσκου από το διαχειριστή λήψης αποφάσεων, συμπεριλαμβάνοντας στο μοντέλο διατύπωσης του προβλήματος βέλτιστης απόφασης κανόνες στοχαστικής κυριαρχίας. Οι κανόνες στοχαστικής κυριαρχίας διατυπώνονται με βάση την κατανομή πιθανότητας αβέβαιης απόδοσης αναπαριστώντας το όφελος μείον το κόστος και υπαγορεύεται ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων αντί για μία μοναδική βέλτιστη λύση. Έτσι παρέχεται ένα εύρος προτιμώμενων βέλτιστων μεσοδιαστημάτων επιθεώρησης για συντήρηση υπό συνθήκες στους διαχειριστές λήψης αποφάσεων που είτε ψάχνουν ή αποστρέφονται το ρίσκο.

4. Παράθεση και ανάλυση θεωριών λήψης αποφάσεων συντήρησης και μελετών περίπτωσης

Α. Υποστήρηξη λήψης αποφάσεων η οποία υποστηρίζεται από υπολογιστικό σύστημα διοίκησης συντήρησης

Σύμφωνα με τον Rastegari (2016) η δυνατότητα ανάλυσης αποφάσεων συνήθως απουσιάζει στα υπάρχοντα υπολογιστικά συστήματα διοίκησης συντήρησης Computerized Maintenance Management Systems (CMMS) και τα δεδομένα που συλλέγονται στα συστήματα δεν αξιοποιούνται πλήρως. Πώς να αξιοποιηθεί η σωρεία δεδομένων για να παρέχονται κατευθυντήριες γραμμές στους μηχανικούς συντήρησης και στους διευθυντές ώστε να λαμβάνονται κατάλληλες αποφάσεις συντήρησης ήταν πάντα μια κρίσιμης σημασίας ερώτηση.

Για τη δυνατότητα υποστήριξης αποφάσεων, ο σκοπός της εργασίας είναι η παροχή και η διερεύνηση τριών διαφορετικών τεχνικών λήψης αποφάσεων οι οποίες μπορούν να συσχετιστούν με τα CMMS και να προσθέσουν αξία στα συλλεχθέντα

δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι μεταξύ άλλων μια μέθοδος λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων Multiple Criteria Decision Making (MCDM) με την ονομασία TOPSIS, η τεχνική ομαδοποίησης k-means, και ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων το οποίο ονομάζεται Πλέγμα Λήψης Αποφάσεων και είναι δανεισμένο από την προϋπάρχουσα βιβλιογραφία.

Τα αποτελέσματα καταδεικύουν την πιο κατάλληλη απόφαση συντήρησης για κάθε μία από τις επιλεγμένες μηχανές ή συνιστώσες τους ανάλογα με παράγοντες όπως η συχνότητα βλαβών, ο χρόνος εκτός λειτουργίας και το κόστος της επισκευής. Τελικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις διαφορετικές τεχνικές λήψης αποφάσεων συγκρίνονται και σχολιάζονται πιθανές βελτιώσεις που χρειάζεται να γίνουν για την αύξηση των δυνατοτήτων των μοντέλων λήψης αποφάσεων.

4Α. 1. Υπολογιστικά συστήματα διοίκησης συντήρησης (CMMS)

Η αυξανόμενη ποσότητα διαθέσιμων πληροφοριών και η αναπτυσσόμενη ανάγκη διαθεσιμότητάς της σε πραγματικό χρόνο για τη λήψη αποφάσεων κάνει επιτακτική την ανάγκη των CMMS για αρωγή στη διοίκηση συντήρησης. Τα παραδοσιακά συστήματα συντήρησης με εκτενείς ομάδες εκθέσεων στις οποίες το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε δεδομένα παραγωγικότητας αντικαθίστανται από δυναμικά αιτήματα που δημιουργούνται στη στιγμή και υποβάλλονται online με απαντήσεις σε δευτερόλεπτα παρά σε μέρες. Τα συστήματα CMMS παρέχουν τα εξής:

- υποστήριξη της συντήρησης με βάση την κατάσταση
- παρακολούθηση και καταγραφή της κίνησης των εξαρτημάτων
- επιτρέπουν στους χειριστές γρηγορότερη αναφορά σφαλμάτων
- βελτίωση της επικοινωνίας ανάμεσα στο προσωπικό χειρισμού και συντήρησης των μηχανών
- πληροφορίες ιστορικού αναγκαίες για την ανάπτυξη προγραμμάτων προληπτικής συντήρησης
- πληροφορίες συντήρησης στους υπεύθυνους συντήρησης με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο των τμημάτων τους
- λογιστικές πληροφορίες μηχανών ώστε να διευκολύνονται οι αποφάσεις επένδυσης κεφαλαίου.

Η συλλογή δεδομένων και η ανάλυσή τους κατά κάποιο τρόπο προσφέρεται από πακέτα CMMS που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, αλλά αυτά τα πακέτα δεν έχουν ενσωματωμένη την ανάλυση λήψης αποφάσεων. Αυτή η έλλειψη υποστήριξης αποφάσεων αποτελεί σαφές πρόβλημα, διότι στη συστηματική και αποτελεσματική συντήρηση είναι καθοριστική η λήψη αποφάσεων οι οποίες είναι κατάλληλες για τις συγκεκριμένες περιστάσεις της μηχανής, του εργοστασίου ή της οργάνωσης.

4Α. 2. Μεθοδολογία έρευνας

Τα μοντέλα που παρέχονται συνδέονται με CMMS ώστε να προσθέσουν αξία στα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο σύστημα παρέχοντας δυνατότητες λήψης αποφάσεων. Η εμπειρική βάση της μελέτης ήταν μία μελέτη περίπτωσης ενός μεγάλου κατασκευαστικού εργοταξίου στη Σουηδία. Τα προϊόντα της εταιρίας είναι κιβώτια ταχυτήτων, με όγκο παραγωγής 95.000 προϊόντων ανά έτος. Αυτή η έρευνα διεξήχθη στα πλαίσια ενός παγκόσμιου έργου σε μεγάλο κατασκευαστικό εργοτάξιο στη Σουηδία για να αναπτυχθεί ένα νέο σύστημα διοίκησης συντήρησης για την εταιρία.

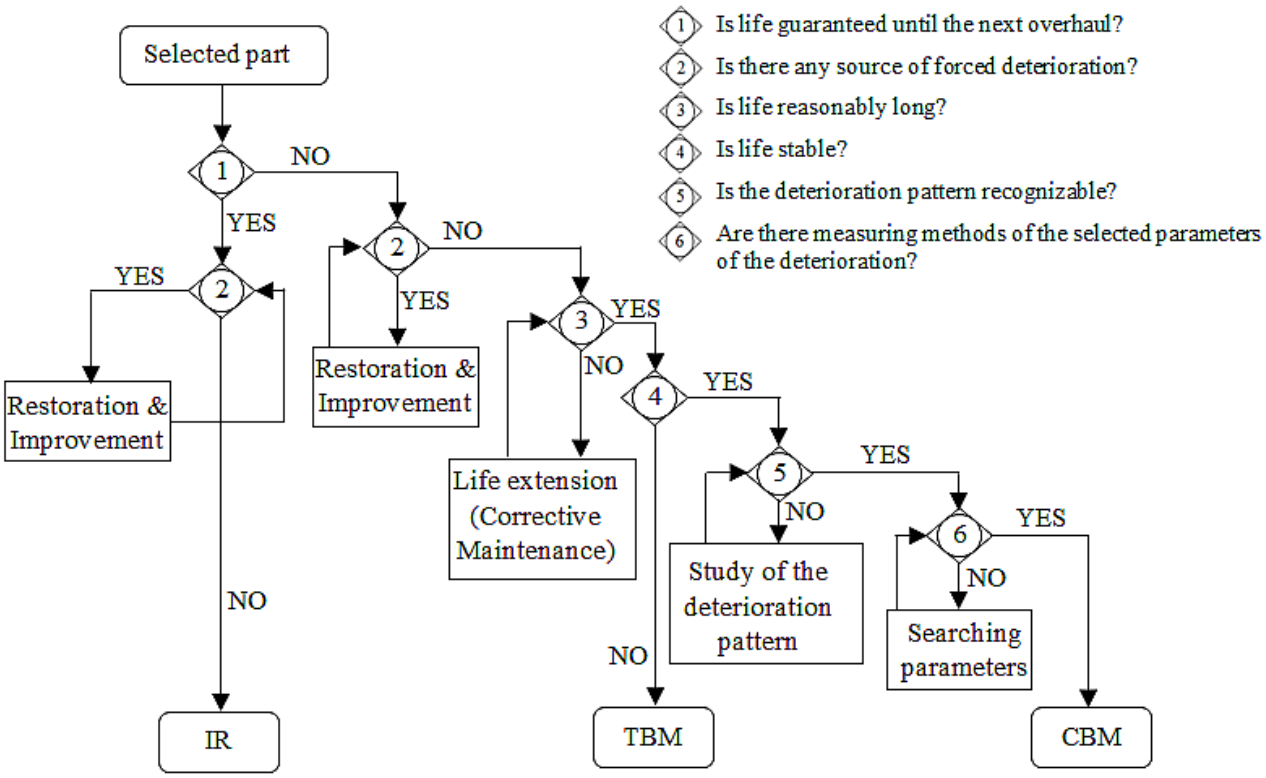
Τα δεδομένα από τις κύριες μελέτες συλλέχθηκαν μέσω ανάλυσης εγγράφων συμπληρωματικά με διαλόγους με μηχανικούς συντήρησης και διευθυντές της εταιρίας για την επαλήθευση των δεδομένων. Διάφορα έγγραφα μεταξύ άλλων η βάση δεδομένων για Επείγουσες Εντολές Εργασιών (Emergency Work Orders (EWO)), έλεγχοι συντήρησης, στρατηγικές συντήρησης και δραστηριότητες συντήρησης μελετήθηκαν στην εταιρία περίπτωσης.

Η έρευνα επικεντρώθηκε στα υλικά περιουσιακά στοιχεία της εταιρίας (μηχανές, κινητήρες, αντλίες κλπ) ενώ τα κτίρια, οι υπηρεσίες και το λογισμικό αποκλείστηκαν. Τα αποτελέσματα εστιάζονται στη λήψη αποφάσεων συντήρησης σύμφωνα με του κύριους παράγοντες της μελέτης περίπτωσης, και ακολουθούνται από σχόλια πάνω στα εφαρμοζόμενα μοντέλα λήψης αποφάσεων.

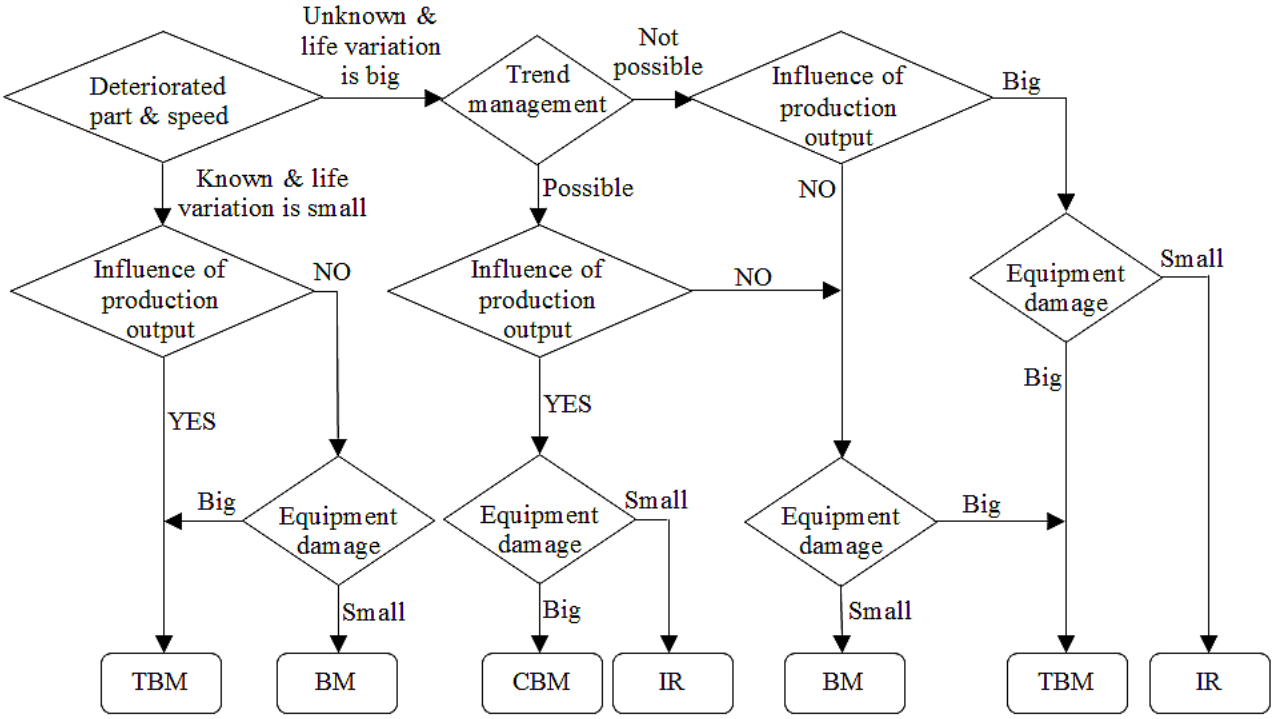
4Α. 3. Μοντέλο λήψης αποφάσεων από την εταιρία περίπτωσης

Θεωρούνται δύο μοντέλα λήψης αποφάσεων που βρέθηκαν στην εταιρία περίπτωσης. Το ένα φαίνεται στο **Σχήμα 3**, η οποία βασίζεται στην απόδοση της παραγωγής. Το άλλο μοντέλο βασίζεται στην τεχνική σκοπιά η οποία υποδεικνύεται στο **Σχήμα 4**. Επιπλέον, υπάρχουν κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή κατάλληλων πολιτικών συντήρησης στην εταιρία. Εδώ για παράδειγμα είναι περιπτώσεις επιλογής συντήρησης υπό συνθήκες:

- Όταν λάβει χώρα μια βλάβη, θα επηρεάσει σημαντικά την παραγωγικότητα.
- Συχνά συμβαίνουν ακανόνιστες βλάβες.
- Οι βλάβες δεν αποτρέπονται από κανονική επιθεώρηση και συντήρηση.
- Το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδιχικές βλάβες είναι σχετικά μεγάλο.
- Η διαδικασία υποβάθμισης είναι σχετικά αργή.



Σχήμα 3. Το διάγραμμα ροής λήψης αποφάσεων συντήρησης από τη σκοπιά της παραγωγικότητας.



Σχήμα 4. Το διάγραμμα ροής λήψης αποφάσεων από τεχνική σκοπιά.

4Α. 4. Εφαρμογή του πλέγματος λήψης αποφάσεων συντήρησης στην εταιρία περίπτωσης

Χρησιμοποιείται το μοντέλο με την ονομασία Πλέγμα Λήψης Αποφάσεων (Decision Making Grid (DMG)). Το μοντέλο βασίζεται στην αναγνώριση των σημαντικών κριτηρίων συμπεριλαμβανομένου του χρόνου παύσης δραστηριοτήτων, της συχνότητας εμφάνισης βλαβών και του κόστους. Το DMG έπειτα προτείνει διαφορετικές πολιτικές συντήρησης βάσει της κατάστασης μέσα στο πλαίσιο όπως φαίνεται από το **Σχήμα 5**.

Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει για την υλοποίηση του πλέγματος λήψης αποφάσεων είναι η ανάλυση κριτηρίων. Ο σκοπός αυτής της φάσης είναι ο καθορισμός μιας ανάλυσης Pareto δύο σημαντικών κριτηρίων: του χρόνου εκτός λειτουργίας και της συχνότητας των βλαβών. Ο χρόνος εκτός λειτουργίας μπορεί να αντικατασταθεί από το μέσο χρόνο για επισκευή (Mean Time To Repair (MTTR)), και η συχνότητα εμφάνισης βλάβης από το μέσο χρόνο ανάμεσα στις αστοχίες (Mean Time Between Failures (MTBF)). Ο στόχος είναι η αξιολόγηση της κατάστασης των μηχανών με τη χειρότερη απόδοση για συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

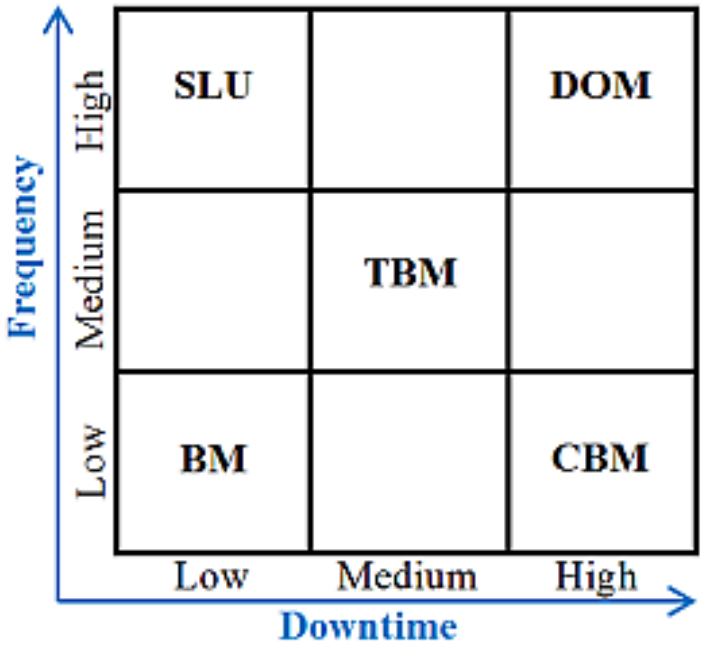
Οι μηχανές στην εταιρία περίπτωσης κατηγοριοποιούνται στα επίπεδα AA, A, B και C, το οποίο ονομάζεται μητρώο μηχανών. Σε αυτήν την ταξινόμηση, οι μηχανές AA είναι οι πιο κρίσιμες. Στον **Πίνακα 1** δίνεται η ανάλυση κριτηρίων στα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων EWO και τους μηχανικούς συντήρησης για τις μηχανές AA. Δείχνει ότι το 53% των συνολικών χρόνων παύσης λειτουργίας της εταιρίας κατά τη διάρκεια των έξι μηνών του χρόνου μαζί με το 54% του πλήθους των βλαβών προέρχονται από αστοχίες των μηχανών AA.

Οι μηχανές χειρότερων επιδόσεων και στα δύο κριτήρια ταξινομούνται και ομαδοποιούνται σε υπο-ομάδες Υψηλών, Μέτριων και Χαμηλών επιδόσεων. Είναι προφανές ότι η μηχανές με τους αριθμούς 8527784 και 87843 είναι οι χειρότερες επειδή έχουν τον μεγαλύτερο χρόνο παύσης λειτουργιών και και τη μεγαλύτερη συχνότητα βλαβών. Ωστόσο, κατά την ανάλυση κριτηρίων πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν διαφορετικά ζητήματα όπως η αναλυτική ιεραρχική διαδικασία των ελαττωμάτων που σχετίζονται με το μηχανικό σύστημα και τις συνιστώσες του, καθώς και η εκπόνηση περισσότερης μαθηματικής ανάλυσης για να πλησιάσουμε σε ένα ακριβές εύρος για κάθε επίπεδο.

Πίνακας 1.

Ανάλυση κριτηρίων από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων EWO.

	AA Machines' Name	Downtime (hrs)	AA Machines' Name	Frequency (No. of breakdowns)	
High	8527784	179,18	86301	13	High
	87843	131,83	88157	12	
	86588	104,31	8527784	12	
	86300	103,36	86588	12	
Medium	8531809	69,99	87843	12	
	86301	66,42	8531809	11	
	88157	57,41	8528618	10	
	8527783	57,36	87842	7	Medium
	8531801	50,55	8527783	6	
Low	87842	41,46	86587	5	
	8528618	36,78	86300	5	
	86587	34,77	8531802	4	Low
	8531802	23,94	8531801	2	
	8528609	6,12	8528609	2	
	Sum of AA Machines	963,48	Sum of AA Machines	113	
	Sum of All	1818,13	Sum of All	208	
	Percentage	53%	Percentage	54%	



Σχήμα 5. Το πλέγμα λήψης αποφάσεων.

Το επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση των μηχανών στο πλέγμα λήψης αποφάσεων (**Σχήμα 5**) ώστε να προταθούν αποφάσεις σχετικά με τη διοίκηση των υλικών περιουσιακών στοιχείων. Με την τοποθέτηση των μηχανών στο πλέγμα λήψης αποφάσεων, διαδικασία που ονομάζεται χαρτογράφηση αποφάσεων (decision mapping), το μοντέλο υποδεικνύει ποια πολιτική συντήρησης πρέπει να επιλεχθεί για κάθε μηχανή (**Σχήμα 6**).

Για παράδειγμα, η μηχανή υπ' αριθμό 87843, η οποία έχει την υψηλότερη διακοπή και την υψηλότερη συχνότητα αστοχίας, στην πάνω δεξιά περιοχή, είναι η μηχανή με τις χειρότερες επιδόσεις και η ενέργεια που πρέπει να υλοποιηθεί, ή ο κανόνας που εφαρμόζεται είναι η συντήρηση επανασχεδιασμού design-out maintenance (DOM), και ο σχεδιασμός της μηχανής θα πρέπει να τροποποιηθεί αναλόγως. Από την άλλη πλευρά, στην περιοχή κάρω αριστερά, η μηχανή με τον αριθμό 8528609 που έχει την ελάχιστη διακοπή και συχνότητα αστοχίας μπορεί να λειτουργεί μέχρι την εμφάνιση αστοχίας (διορθωτική συντήρηση).

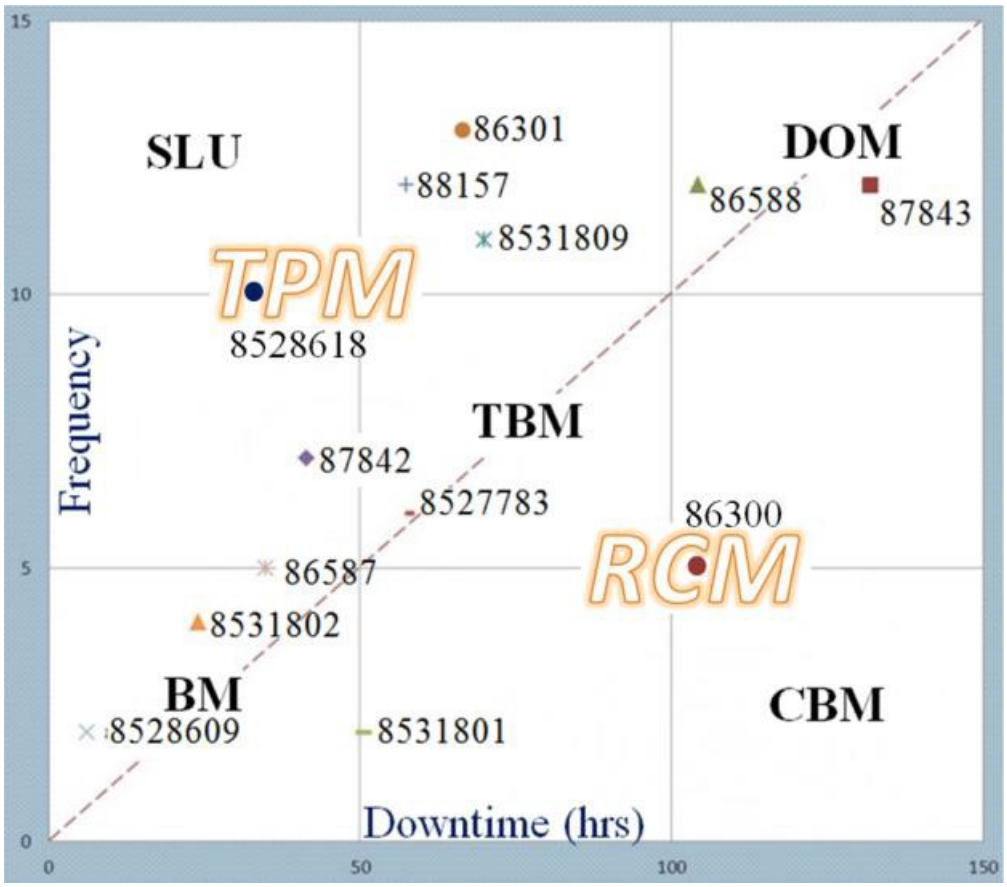
Η περιοχή πάνω αριστερά, όπου η καταλληλότερη πολιτική είναι η ενίσχυση του επιπέδου δεξιοτήτων (SLU), χαρακτηρίζεται από βλάβες υψηλής συχνότητας με μικρό χρόνο διακοπής και δείχνει ότι οι διακοπές λειτουργίας ήταν πολλαπλές για περιόδους μικρής χρονικής διάρκειας. Επομένως, η συντήρηση της μηχανής είναι μάλλον εύκολη αποστολή που μπορεί να υλοποιηθεί από τους χειριστές μετά από αναβάθμιση των επιπέδων δεξιοτήτων τους.

Οι μηχανές των οποίων οι επιδόσεις είναι τοποθετημένες στην κάτω – δεξιά περιοχή είναι προβληματικές μηχανές. Η χαμηλή συχνότητα βλαβών δείχνει μεν ότι οι μηχανές δεν υφίστανται συχνά βλάβη, αλλά ο μεγάλος χρόνος διακοπής λειτουργίας για την επισκευή τους καταδεικνύει σοβαρή αστοχία. Συνεπώς, η κατάλληλη δράση για αυτές τις μηχανές είναι η συντήρηση υπό συνθήκες για την ανάλυση των βλαβών και την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανών.

Εάν μία μηχανή τοποθετείται σε περιοχή με μέτριο χρόνο διακοπής λειτουργίας ή μέτριας συχνότητας εμφάνισης βλάβης, η κατάλληλη πολιτική είναι η συντήρηση βάσει χρόνου λειτουργίας (Time-Based Maintenance (TBM)). Ωστόσο, κάποιες φορές δύο μηχανές είναι ακριβώς ίδιες και εκτελούν την ίδια δουλειά στο ίδιο περιβάλλον αλλά τοποθετούνται σε διαφορετικά πλέγματα.

Οι μηχανικοί συντήρησης θα πρέπει να επιδίδονται σε περισσότερη ανάλυση σύμφωνα με τις έννοιες συντήρησης όπως η συντήρηση ολικής παραγωγικότητας (Total Productive Maintenance (TPM)) και η συντήρηση αξιοπιστίας (Reliability-Centered Maintenance (RCM)) ώστε να επιλέξει την κατάλληλη πολιτική συντήρησης. Επιπροσθέτως, σε μερικές περιπτώσεις δύο μηχανές τοποθετούνται κοντά ή μεσα στα όρια δύο διαφορετικών πλεγμάτων. Οι έννοιες της συντήρησης σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμεύουν ως προς το ποια απόφαση πρέπει να παρθεί. Για

παράδειγμα, όταν η διακοπή είναι μεγάλη αλλά η συχνότητα της βλάβης μικρή, η ανάλυση τύπου RCM θεωρείται ότι μειώνει το χρόνο μη διαθεσιμότητας.

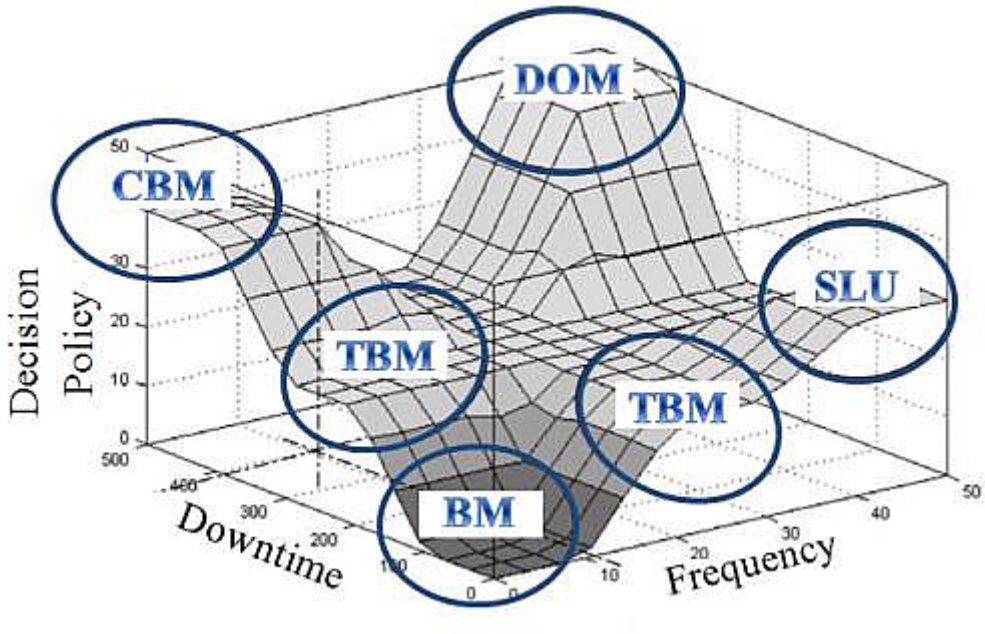


Σχήμα 6. Πλέγμα λήψης αποφάσεων για τις μηχανές ΑΑ της εταιρείας περίπτωσης.

Το προτεινόμενο μοντέλο αυτής της ενότητας δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης λήψης αποφάσεων για το σύστημα προσθέτοντας αξία στα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο CMMS. Για ένα πιο λογικό μοντέλο και χρήση δεδομένων για την επιλογή της πολιτικής συντήρησης, πρέπει να θεωρηθεί συνάρτηση κόστους. Για το λόγο αυτό, η εταιρία χρειάζεται να έχει δεδομένα από το ιστορικό κοστών όπως το κόστος αστοχιών για την παραγωγή και το κόστος συντήρησης. Με τη θεώρηση ανάλυσης κριτηρίων κόστους και επιδόσεων, το μοντέλο αναπαρίσταται από μια τρισδιάστατη ασαφή επιφάνεια, κάθε περιοχή της οποίας καταδεικνύει ποια πολιτική συντήρησης πρέπει να επιλεχθεί (**Σχήμα 7**).

Σε αυτό το μοντέλο η υπόθεση είναι ότι η συνάρτηση κόστους των πολιτικών συντήρησης είναι γραμμική και ακολουθεί τη σχέση: DOM > CBM > SLU > TBM > BM. Επισημαίνεται επίσης ότι η ανάλυση κριτηρίων που διεξήχθη σε αυτήν την ενότητα είναι σε επίπεδο μηχανής. Για να υλοποιηθεί ένα πιο ακριβές μοντέλο λήψης αποφάσεων, αυτή η ανάλυση κριτηρίων πρέπει να πραγματοποιηθεί σε επίπεδο συνιστώσας. Και βέβαια, το επίπεδο ελαττωμάτων στην Αναλυτική Ιεραρχική

Διαδικασία (Analytical Hierarchy Process ή AHP) πρέπει να τεθεί σε προτεραιότητα και να αναλυθεί ανάλογα με τις συνιστώσες.



Σχήμα 7. Η ασαφής επιφάνεια αποφάσεων με εμφανείς τις περιοχές διαφορετικών στρατηγικών συντήρησης.

4Α. 5. Εφαρμογή της λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων και της τεχνικής ομαδοποίησης στην εταιρία περίπτωσης

Σε αυτήν την ενότητα, χρησιμοποιείται η λογική του πλαισίου λήψης αποφάσεων σε συνδυασμό με δύο μαθηματικές μεθόδους για την κατάταξη και κατηγοριοποίηση των μηχανών της εταιρίας περίπτωσης και των εξαρτημάτων τους στις σχετικές με αυτές ομάδες πολιτικής συντήρησης.

4Α. 5. 1. Το εργαλείο TOPSIS

Το εργαλείο λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων που είναι πιο ευρέως γνωστό ονομάζεται TOPSIS, και χρησιμοποιείται για την κατάταξη των μηχανών και των εξαρτημάτων τους. Ο βασικός μηχανισμός αυτής της προσέγγισης είναι ο υπολογισμός της απόστασης από κάθε εναλλακτική σε μία θετική-ιδανική λύση Positive-Ideal Solution (PIS) και σε μία αρνητική-ιδανική λύση Negative-Ideal Solution (NIS) που ορίζονται σε χώρο n-διαστάσεων , όπου n το πλήθος των κριτηρίων στο πρόβλημα απόφασης. Η εναλλακτική που εκλέγεται θα πρέπει να έχει τη μικρότερη διανυσματική απόσταση από την PIS και τη μεγαλύτερη διανυσματική

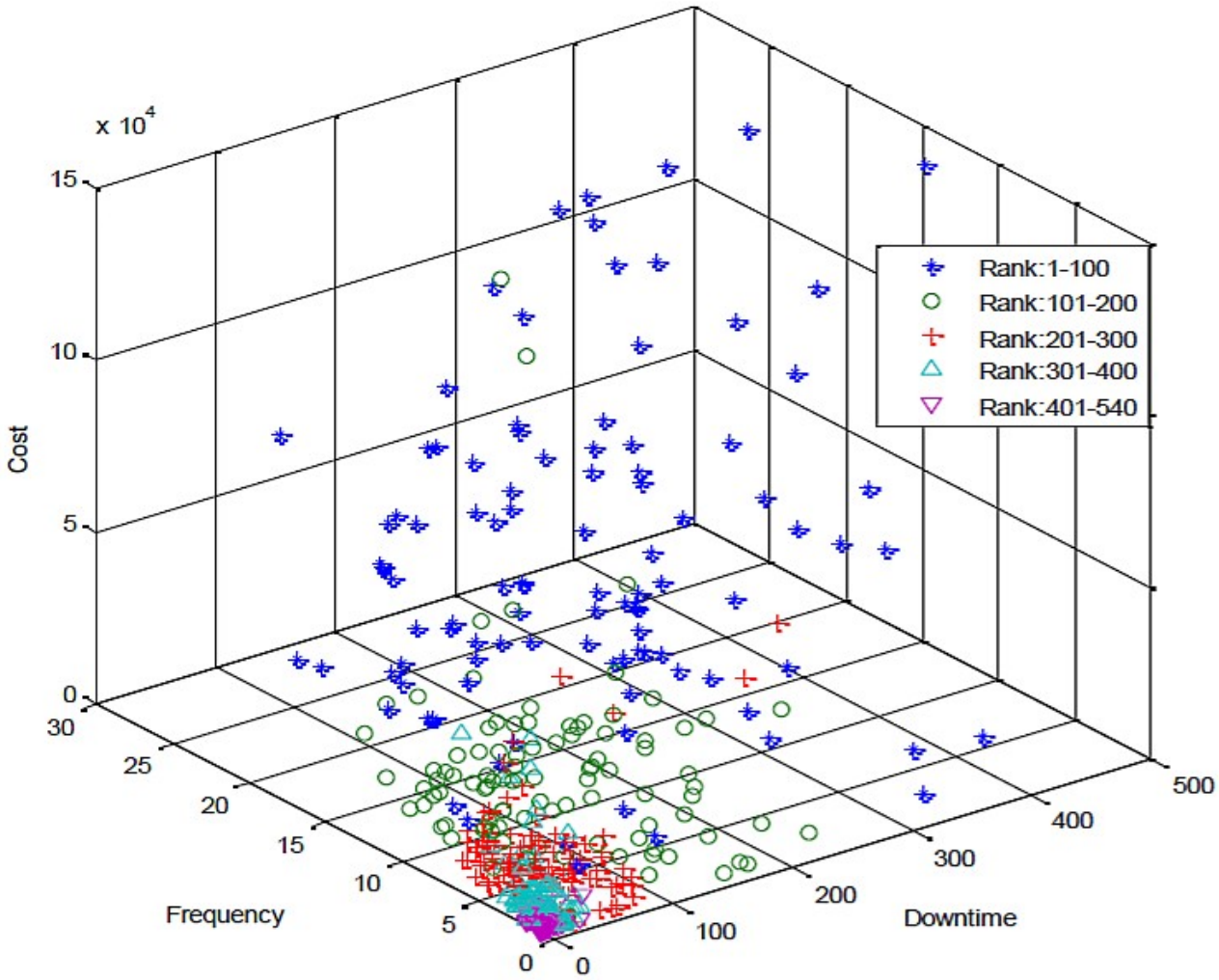
απόσταση από τη NIS. Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος TOPSIS. Με τη μέθοδο TOPSIS, οι μηχανές κατατάσσονται βάσει τριών κριτηρίων συμπεριλαμβανομένων του χρόνου μη διαθεσιμότητας, του κόστους και της συχνότητας εμφάνισης βλαβών.

Χάριν απλότητας, οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων θεωρούνται ίσοι. Βάσει των απόψεων των μηχανικών που είναι αυθεντίες στη συντήρηση, οι μηχανές που έχουν καταταχθεί χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες και παρουσιάζονται στο **Σχήμα 8**. Σύμφωνα με αυτές τις κατηγορίες, θεωρούνται πέντε διαφορετικές πολιτικές συντήρησης. Οι παραμετρικές ρυθμίσεις της κάθε κατηγορίας συνοψίζονται στον **Πίνακα 2**.

Πίνακας 2

Σύνοψη κατηγοριών των μηχανών.

		min		
Category	Rank	DT	Cost	Fr.
1	1-100	28.53	6558	1
2	101-200	3.89	980	1
3	201-300	4.05	29.5	1
4	301-400	2.2	163.3	1
5	401-540	0.31	32.67	1
All	1-540	0.31	29.56	1
		Max		
Category	Rank	DT	Cost	Fr.
1	1-100	469.83	149086	30
2	101-200	296.21	102501	26
3	201-300	275.31	47162	11
4	301-400	108.01	31890	12
5	401-540	47.74	8695.8	5
All	1-540	469.83	149086	30
		Average		
Category	Rank	DT	Cost	Fr.
1	1-100	205.24	57390	14.1
2	101-200	95.80	20783	7.64
3	201-300	45.44	10371	4.33
4	301-400	18.33	5757.8	2.59
5	401-540	5.36	1389.4	1.25
All	1-540	68.95	17823	5.64



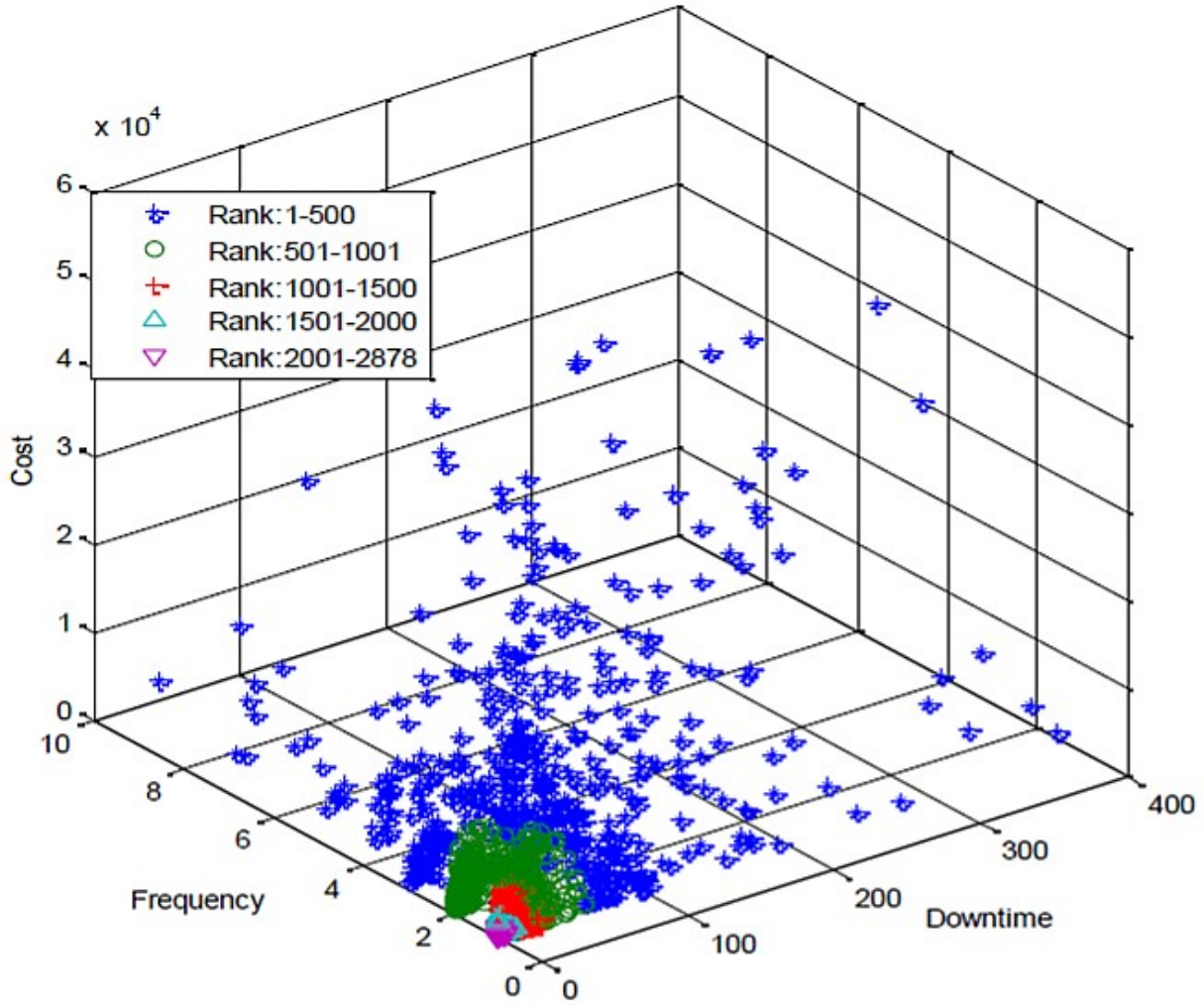
Σχήμα 8. Οι μηχανές διατεταγμένες με τη μέθοδο TOPSIS με χρήση τριών κριτηρίων.

Το ολικό πλήθος των μηχανών είναι 540. Για να υπάρξει καλύτερη διερεύνηση των δεδομένων, κατατάσσονται και τα εξαρτήματά τους βάσει των τριών κριτηρίων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μετά από εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS με ίσους συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων, λήφθηκαν οι κατατάξεις των εξαρτημάτων που συνοψίζονται στον **Πίνακα 3**. Όλα τα εξαρτήματα χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 9**.

Πίνακας 3

Σύνοψη κατηγοριών των εξαρτημάτων.

		min		
Category	Rank	DT	Cost	Fr.
1	1-500	1.36	163.4	1
2	501-1000	0.08	163.3	1
3	1001-1500	0.50	29.56	1
4	1501-2000	0.10	1	1
5	2001-2800	0.19	1	1
All	1-2878	0.10	1	1
		Max		
Category	Rank	DT	Cost	Fr.
1	1-500	382.5	59083	9
2	501-1000	59.17	12395	2
3	1001-1500	29.58	6209.6	1
4	1501-2000	13.24	2629.7	1
5	2001-2800	7.330	1423.2	1
All	1-2878	382.5	59083	9
		Average		
Category	Rank	DT	Cost	Fr.
1	1-500	66.45	13426	2
2	501-1000	15.90	4180.9	1.5
3	1001-1500	10.53	3084.4	1
4	1501-2000	5.093	1664.0	1
5	2001-2800	2.413	749.21	1
All	1-2878	16.55	4042.9	1.3



Σχήμα 9. Τα εξαρτήματα διατεταγμένα με τη μέθοδο TOPSIS με χρήση τριών κριτηρίων.

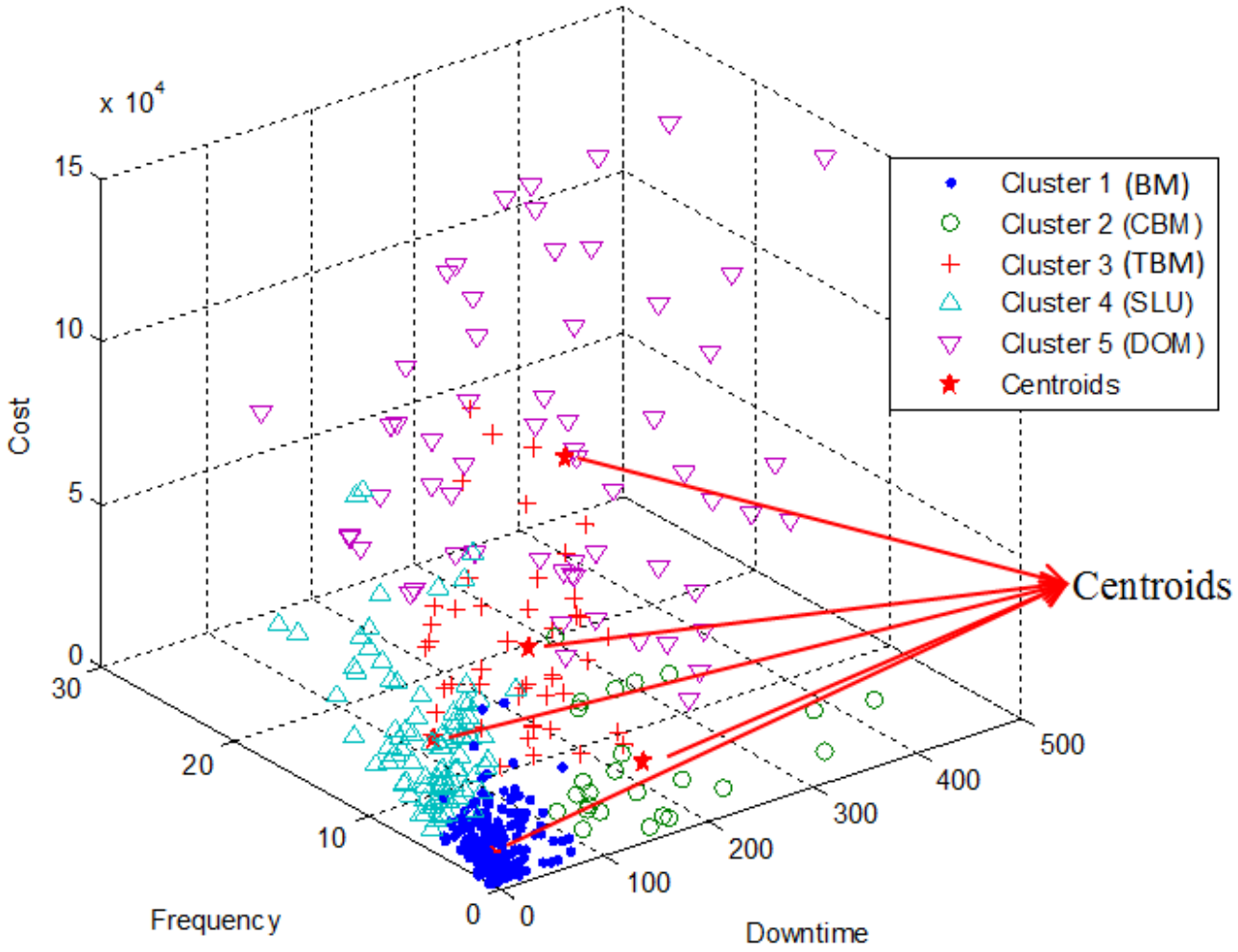
Με βάση την κατηγορία των μηχανών και των εξαρτημάτων, οι μηχανικοί συντήρησης ή οι διευθυντές μπορούν να αποφασίσουν πιο εύκολα ποια απόφαση είναι η καταλληλότερη. Για παράδειγμα μια μηχανή της πρώτης κατηγορίας που έχει το μεγαλύτερο χρόνο μη διαθεσιμότητας με την υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης βλαβών και κόστους, είναι μια προβληματική μηχανή. Συνεπώς, η συντήρηση υπό συνθήκες είναι μια καλή ενέργεια να δράσει κανείς. Ωστόσο, ακόμα χρειάζεται η εκπόνηση περισσότερης ανάλυσης όπως η ανάλυση αστοχιών πριν την εφαρμογή.

4Α. 5. 2. Τεχνική συσταδοποίησης k-means

Η τεχνική k-means χρησιμοποιείται για τη συσταδοποίηση (ομαδοποίηση) των μηχανών βάσει των τριών κριτηρίων. Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για έναν αριθμό διαφορετικών μέσων και το βέλτιστο πλήθος των συστάδων καθορίστηκε να είναι

πέντε σύμφωνα με τον υπολογισμό του δείκτη περιγράμματος Silhouette Index. Κάθε συστάδα (ομάδα) αντιπροσωπεύεται από μοναδικό αντιπρόσωπο, ο ποίος αντανακλά τα χαρακτηριστικά της συστάδας. Οι αντιπρόσωποι (κεντροειδείς) λαμβάνονται από τα δεδομένα βάσει δύο κριτηρίων διαφορετικής πολιτικής συντήρησης (**Σχήμα 5**).

Σύμφωνα με το **Σχήμα 5**, τα δεδομένα των μηχανών χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**. Το κριτήριο του κόστους παίζει ρόλο στον αλγόριθμο συσταδοποίησης, το οποίο λογίζεται ως το μέσο κόστος των μηχανών σε κάθε συστάδα. Οι αντιπρόσωποι κάθε συστάδας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2**. Το αποτέλεσμα της τεχνικής ομαδοποίησης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 10**, όπου σε κάθε ομάδα έχει ανατεθεί συγκεκριμένη πολιτική συντήρησης.



Σχήμα 10. Οι μηχανές κατά ομάδες με την τεχνική ομαδοποίησης k-means.

Συμπερασματικά επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την καταλληλότερη απόφαση συντήρησης που ταιριάζει σε κάθε μία από τις επιλεγμένες μηχανές σύμφωνα με παράγοντες που περιλαμβάνουν τη συχνότητα βλβών, το χρόνο μη διαθεσιμότητας και το κόστος επισκευής. Η προετοιμασία των μοντέλων λήψης

αποφάσεων για την εταιρία περίπτωσης με τη χρήση δεδομένων που συλλέχθηκαν από συστήματα CMMS καθιστά σαφή την υλοποιησιμότητα και την πρακτικότητα της εφαρμογής των μοντέλων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις ιδέες των μηχανικών αποκάλυψε ότι η χρήση διαφόρων μαθηματικών εργαλείων λήψης αποφάσεων αυξάνει την ικανότητα ανάλυσης αποφάσεων, βοηθώντας τους μηχανικούς συντήρησης και τους υπεύθυνους να καταλήγουν σε καταλληλότερες αποφάσεις συντήρησης.

Μολαταύτα, τα προτεινόμενα εργαλεία χρειάζονται περαιτέρω πρακτικό έλεγχο σε ποικίλλες μελλοντικές εφαρμογές. Με βάση τα εμπειρικά αποτελέσματα, συνάγεται το συμπέρασμα ότι δεν είναι δυνατή η αυτόνομη χρήση των αποτελεσμάτων των μοντέλων λήψης αποφάσεων, αντίθετα θα πρέπει να αναλυθούν περισσότερο σε ό,τι αφορά την ιεράρχηση και τον χαρακτηρισμό των διαφόρων τύπων αστοχίας και τις κύριες συνιστώσες που συντελούν στις αστοχίες αυτές.

Β. Ολοκληρωμένη λήψη αποφάσεων για προληπτική συντήρηση συστημάτων μετάδοσης κίνησης με ιμάντες

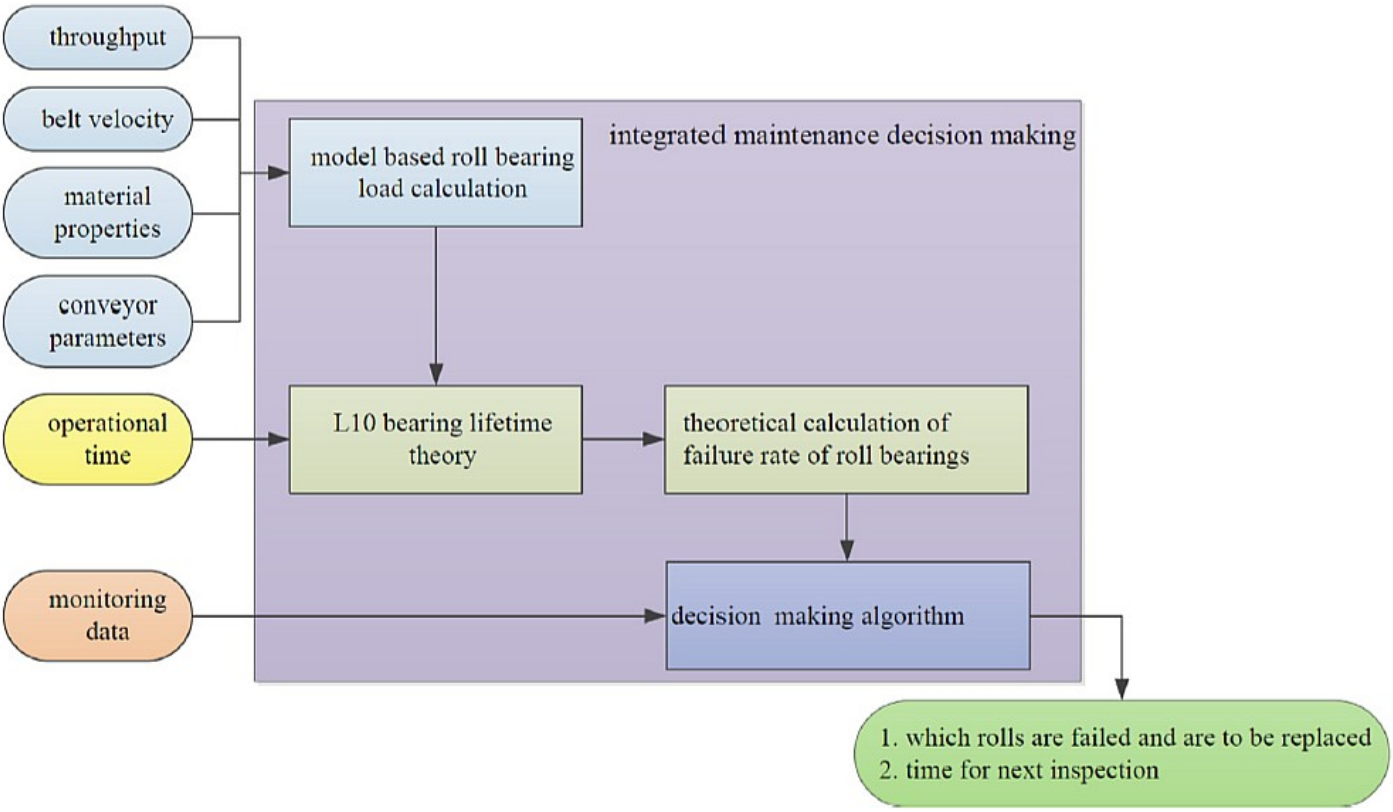
Το ζητούμενο της πρακτικής εφαρμογής των Liu et al. (2019) είναι η ανάπτυξη ενός πλαισίου ολοκληρωμένης λήψης αποφάσεων για τα ράουλα ιμάντων μεταφοράς. Τα συστήματα ιμάντων μεταφοράς χρησιμοποιούνται ευρέως για την απρόσκοπτη μεταφορά ασυσκεύαστων υλικών. Οι δραστηριότητες συντήρησης είναι ουσιώδεις ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των συστημάτων αυτών.

Οι Liu et al. ενσωματώνουν τις πληροφορίες από τις λειτουργικές συνθήκες, την εκτίμηση αξιοπιστίας των ραούλων και τα δεδομένα από την παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού για να ληφθούν αποφάσεις με ακρίβεια. Στο προτεινόμενο πλαίσιο η παράμετρος παρακολούθησης μπορεί να μεταβάλλεται σύμφωνα με τις συνθήκες λειτουργίας πραγματικού χρόνου και τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων αξιοπιστίας. Παρουσιάζεται μία μελέτη προσομοίωσης που καταδικνύει την αποτελεσματικότητα του πλαισίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το πλαίσιο αυτό μπορεί να συντελέσει σε ακριβέστερη λήψη αποφάσεων συντήρησης σε σύγκριση με τις συμβατικές προσεγγίσεις.

4Β. 1. Θεωρία

Αν υποτεθεί ότι υπάρχει διαθέσιμο σύστημα παρακολούθησης της κατάστασης των ραούλων μέσα σε ένα σύστημα ιμάντων μεταφοράς, οι αποφάσεις για την προληπτική συντήρηση των ραούλων περιλαμβάνουν: τη διάγνωση για το ποια στοιχεία πρόκειται να αστοχήσουν και τον καθορισμό του χρονικού διαστήματος για την επόμενη επιθεώρηση. Το πλαίσιο που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 11** αφορά τη

διαδικασία που προτείνεται για την επίτευξη προληπτικής συντήρησης των συστημάτων με ιμάντες μεταφοράς. Είσοδοι θεωρούνται η διαμεταγωγή (ταχύτητα μεταφοράς υλικού), η ταχύτητα του ιμάντα και ο χρόνος λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο που λαμβάνονται από ένα σύστημα ενδοεπιχειρησιακού σχεδιασμού (ERP system), και δεδομένα που αποκτήθηκαν από την παρακολούθηση της κατάστασής του. Οι έξοδοι του πλαισίου θα είναι οι απαντήσεις στις ερωτήσεις που αφορούν το ποια ράουλα θα αστοχήσουν, και πότε θα είναι η επόμενη φορά που θα επιθεωρηθούν.



Σχήμα 11. Πλαίσιο ολοκληρωμένης λήψης αποφάσεων συντήρησης.

4Β. 2. Υπολογισμός του ρυθμού αστοχίας

Για ένα πληθυσμό πανομοιότυπων εδράνων υπό τις ίδιες συνθήκες εργασίας χρησιμοποιούν τη σχέση μεταξύ της αξιοπιστίας, της ονομαστικής διάρκειας ζωής L_{10} , και της χρονικής διάρκειας λειτουργίας. Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής $F_{TC}(t)$ για την αστοχία των ένσφαιρων τριβέων είναι:

$$F_{TC}(t)=1-R_B(t)=1-\exp\left(-0.1053\left(L_S(t)/L_{10,m}\right)^{10/9}\right) \quad (1)$$

όπου $R_B(t)$ είναι η αξιοπιστία των εδράνων, $L_{10,m}$ είναι η ονομαστική διάρκεια ζωής των εδράνων του μεταφορέα και $L_S(t)$ είναι η χρονική διάρκεια που το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία και υπολογίζεται ως:

$$L_S(t)=\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{P_{NG,j}}{P_m}\right)^3 T_j \qquad (2)$$

όπου $P_{NG,j}$ είναι η ακτινική δύναμη σε ένα κεντρικό έδρανο που αντιστοιχεί στο j-οστό επίπεδο διαμεταγωγής του μεταφορέα. T_j είναι το αντίστοιχο υποσύνολο του χρόνου λειτουργίας $t=\sum_{j=1}^{N} T_j$, N είναι το συνολικό πλήθος των επιπέδων διαμεταγωγής που καταγράφηκαν στο σύστημα ERP, P_m είναι η ακτινική δύναμη στο κεντρικό έδρανο σύμφωνα με τη χωρητικότητα σχεδιασμού του μεταφορέα. Εάν η διαμεταγωγή και η ταχύτητα του μεταφορέα ιμάντων κρατηθούν σταθερές, η εξίσωση (2) απλοποιείται ως εξής:

$$L_S(t)=\left(\frac{P_{NG}}{P_m}\right)^3 t \qquad (3)$$

Επιπλέον, εισάγεται ένας όρος σφάλματος ε(t) στο θεωρητικό υπολογισμό του ρυθμού αστοχίας ανάμεσα σε δύο διαδοχικές επιθεωρήσεις τις χρονικές στιγμές t_{i-1} και t_i . Συνεπώς, ο ρυθμός αστοχίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$h'_{TC}(t_i)=\int_{t_{i-1}}^{i} F_{TC}(t)\,dt+\varepsilon(t_{i-1}) \qquad (4)$$

Με σταθερή διαμεταγωγή και ταχύτητα ιμάντα, αντικαθιστώντας την εξ. (1) στην εξ. (4) παίρνουμε:

$$h'_{TC}(t_i)=\exp\left(-0.1053\left(\frac{L_S(t_{i-1})}{L_{10,m}}\right)^{10/9}\right)-\exp\left(-0,1053\left(\frac{L_S(t_i)}{L_{10,m}}\right)^{10/9}\right)+\varepsilon(t_{i-1}) \qquad (5)$$

Εξαιτίας της ανακρίβειας του κλασικού υπολογισμού της διάρκειας ζωής των εδράνων με τη χρήση της L_{10} , μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτό το πλαίσιο τροποποιημένοι υπολογισμοί της ονομαστικής διάρκειας ζωής. Ωστόσο θεωρείται ότι ο όρος σφάλματος $\varepsilon(t_i)$ σε αυτό το πλαίσιο είναι ικανός να εξαλείψει την ανακρίβεια της εκτίμησης αξιοπιστίας.

4Β. 3. Αλγόριθμος λήψης αποφάσεων

Το **Σχήμα 12** δείχνει τον αλγόριθμο λήψης απόφασης του πλαισίου του **Σχήματος 11**. Για την επεξήγηση του αλγορίθμου λαμβάνονται ως παράδειγμα τα κεντρικά έδρανα. Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι είναι διαθέσιμο ένα πλήθος ιστορικών επιθεωρήσεων τις χρονικές στιγμές $t_1, t_2, \ldots, t_j$.

Για την αρχικοποίηση του αλγορίθμου, το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός του διορθωμένου ρυθμού αστοχίας $h'_{TC}(t_i)$ για κάθε επιθεώρηση. Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του ρυθμού αστοχίας $h_{CM}(t_i)$ από τα δεδομένα παρακολούθησης κατάστασης ως εξής:

$$h_{CM}(t_i) = \frac{\text{πλήθος εδράνων που υπερβαίνουν το όριο } TH(t_{i-1}) \text{ τη στιγμή } t_i}{\text{συνολικό πλήθος εδράνων}} = \int_{TH_{t_{i-1}}}^{+\infty} f_{t_i}(x)dx \quad (6)$$

όπου $f_{t_i}(x)$ είναι η συνάρτηση σχετικής συχνότητας της παραμέτρου προς παρακολούθηση τη χρονική στιγμή t_i .

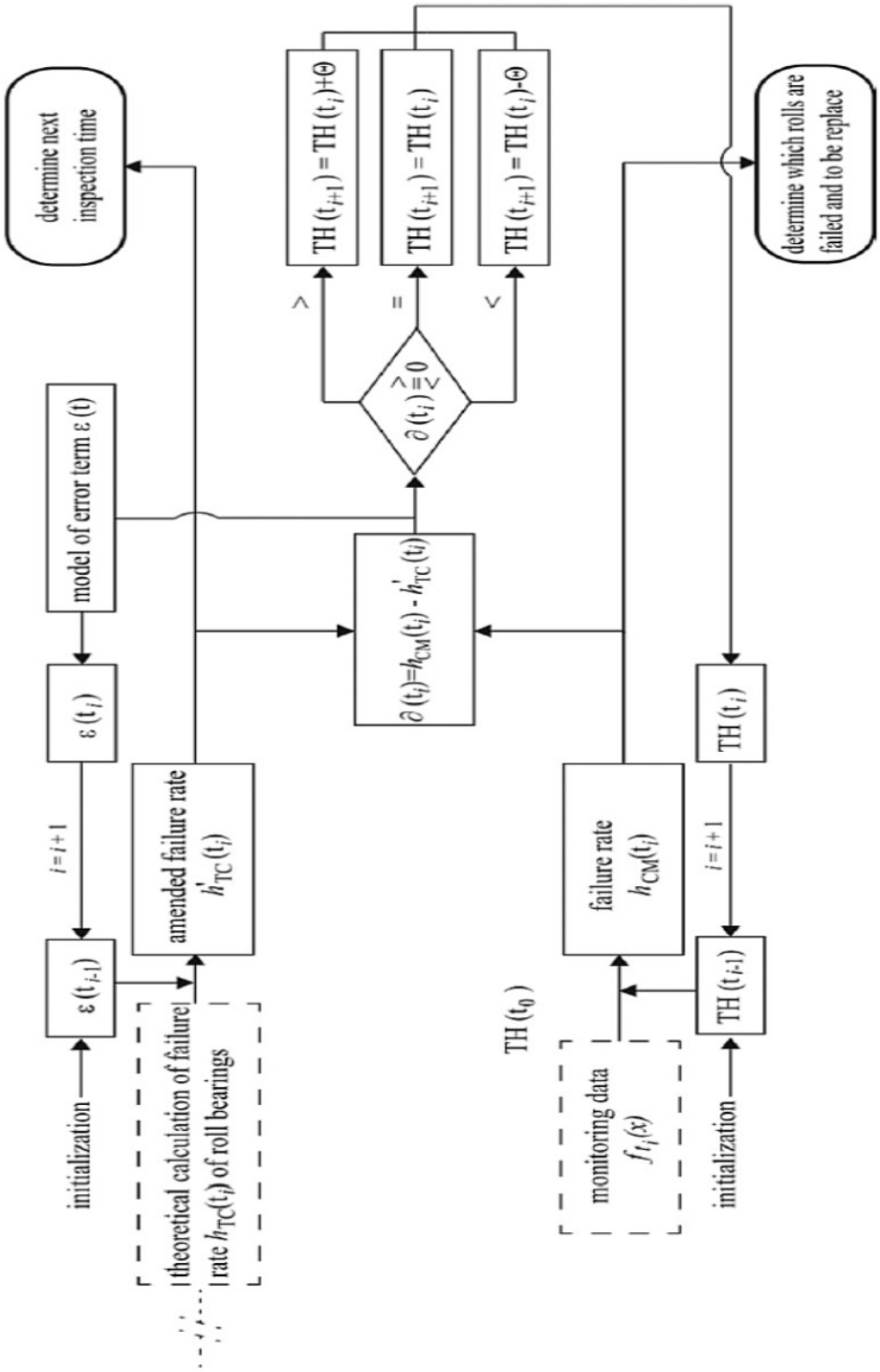
Συνεπώς, η απόκλιση $\partial(t_i)$ ανάμεσα στο ρυθμό αστοχίας του υπολογισμού της αξιοπιστίας $h_{CM}(t_i)$ και του ρυθμού αστοχίας των δεδομένων που παρακολουθούνται $h'_{TC}(t_i)$ συνάγεται ως:

$$\partial(t_i) = h_{CM}(t_i) - h'_{TC}(t_i) \quad (7)$$

Γνωρίζοντας τους όρους σφάλματος $\varepsilon(t_0), \varepsilon(t_1), \varepsilon(t_2), \ldots, \varepsilon(t_{i-1})$ και της απόκλισης $\partial(t_i)$, ο όρος σφάλματος $\varepsilon(t_i)$ υπολογίζεται με χρήση κατάλληλου μοντέλου (π.χ. γραμμικού ή εκθετικού μοντέλου). Το σφάλμα $\varepsilon(t_i)$ που προκύπτει χρησιμοποιείται παρακάτω για το θεωρητικό υπολογισμό του ρυθμού αστοχίας $h'_{TC}(t_{i+1})$ τη χρονική στιγμή t_{i+1} .

Αντιθέτως, η οριακή τιμή $TH(t_i)$ μπορεί επίσης να ενημερώνεται ανάλογα με την απόκλιση $\partial(t_i)$. Για παράδειγμα, εάν $\partial(t_i) > 0$, η οριακή τιμή $TH(t_{i+1})$ ενημερώνεται σε υψηλότερη τιμή $TH(t_{i+1}) = TH(t_i) + \Theta$ για χρονική στιγμή διάγνωσης t_{i+1} . Εάν $\partial(t_i) < 0$, η οριακή τιμή $TH(t_{i+1}) = TH(t_i) - \Theta$ μπορεί να προσδιοριστεί για χρόνο t_{i+1} . Στο θεωρούμενο πλαίσιο, οι διαγνώσεις της αστοχίας των ραούλων επιτυγχάνεται με ένα όριο που ενημερώνεται συνεχώς. Μετά από επιθεώρηση τη χρονική στιγμή t_i , η διάγνωση επιτυγχάνεται ελέγχοντας τα έδρανα των οποίων οι τιμές της παραμέτρου που παρακολουθείται ξεπερνούν την

οριακή τιμή $TH(t_i)$. Ο καθορισμός της επαναληπτικής επιθεώρησης, ή αλλιώς του χρονικού διαστήματος που θα περάσει μεχρι την επόμενη επιθεώρηση, γίνεται με τον υπολογισμό του ρυθμού αστοχίας. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται μία ποικιλία προσεγγίσεων, όπως η Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic).



Σχήμα 12. Ο αλγόριθμος του πλαισίου ολοκληρωμένης λήψης αποφάσεων συντήρησης.

4Β. 4. Προσομοίωση και σχόλια

Για την επαλήθευση της αποτελεσματικότητας του πλαισίου που αναλύθηκε διεξήχθη μελέτη προσομοίωσης. Θεωρώντας ότι ο μηχανισμός αστοχίας των ραούλων στους μεταφορικούς ιμάντες διαφέρει ανάλογα την εφαρμογή και την ένταση της χρήσης από πολύ εντατική έως μεσαίας και ελαφριάς έντασης, ο σκοπός του πλαισίου αυτού περιορίζεται σε μεταφορές για εργασίες ελαφράς έως μεσαίας έντασης (δηλαδή για τη μεταφορά άνθρακα ή σίτου).

Επιπλέον, οι μετρήσεις κραδασμών και οι ακουστικές εκπομπές μπορούν να ανιχνεύσουν τις αστοχίες που εκδηλώνονται στα έδρανα σε πρωτύτερο στάδιο από ότι οι θερμοκρασιακές μετρήσεις. Παρ' όλα αυτά, αν αναλογιστεί κανείς την εγκατάσταση και τις δυνατότητες των αισθητήρων, την ικανότητα ερμηνείας του σήματος, και την έγκαιρη διεξαγωγή των κατάλληλων ενεργειών, η μέτρηση της θερμοκρασίας θεωρείται ως η πιο αποτελεσματική λύση παρακολούθησης για τα ράουλα.

Επομένως η παράμετρος που επιλέγεται σε αυτήν την προσομοίωση ως παράμετρος παρακολούθησης της συστημικής κατάστασης είναι η θερμοκρασία. Η ρύθμιση των παραμέτρων συνοψίζεται στον **Πίνακα 4**.

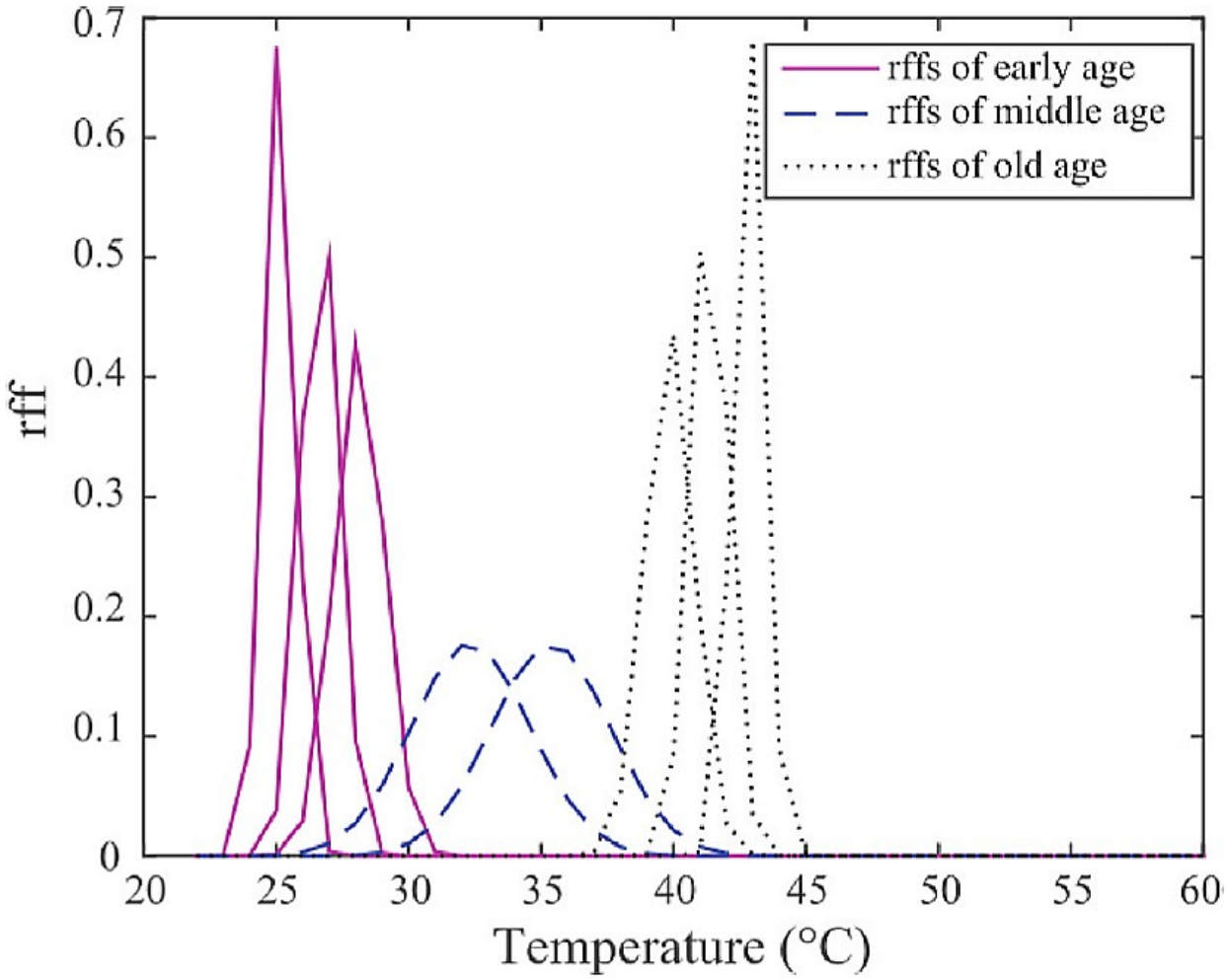
Πίνακας 4

Ρύθμιση παραμέτρων για την προσομοίωση.

Parameters	Values	Parameters	Values
Conveyor central length (km)	10	Idler spacing (m)	2
Transported material	Coal	Number of upper idler frames	5001
Design capacity (t/h)	6000	Design lifetime of conveyor (year)	10
Throughput (t/h)	5000	Operational time (hours/day)	20
Belt velocity (m/s)	5	Operational days (days/year)	360
Belt width (m)	2	Roll bearing size	6306
Belt weight (kg/m)	93.2	Rotational speed of rolls (rpm)	600

Η αρχική τιμή του θερμοκρασιακού ορίου τέθηκε στους 40 °C κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Ως αντικείμενο μελέτης της προσομοίωσης επιλέχθηκαν τα κεντρικά έδρανα. Για την αναπαράσταση της εξέλιξης της θερμοκρασίας των εδράνων σε βάθος χρόνου, η θερμοκρασία των 10,002 κεντρικών εδράνων τέθηκε

αυθαίρετα με τέτοιο τρόπο ώστε οι συναρτήσεις σχετικών συχνοτήτων τους να παρουσιάζουν μοτίβα όπως στο **Σχήμα 13**. Οι προσομοιωμένες μετρήσεις θερμοκρασιών από κάθε επιθεώρηση υποτίθεται ότι ακολουθούν κανονική κατανομή.



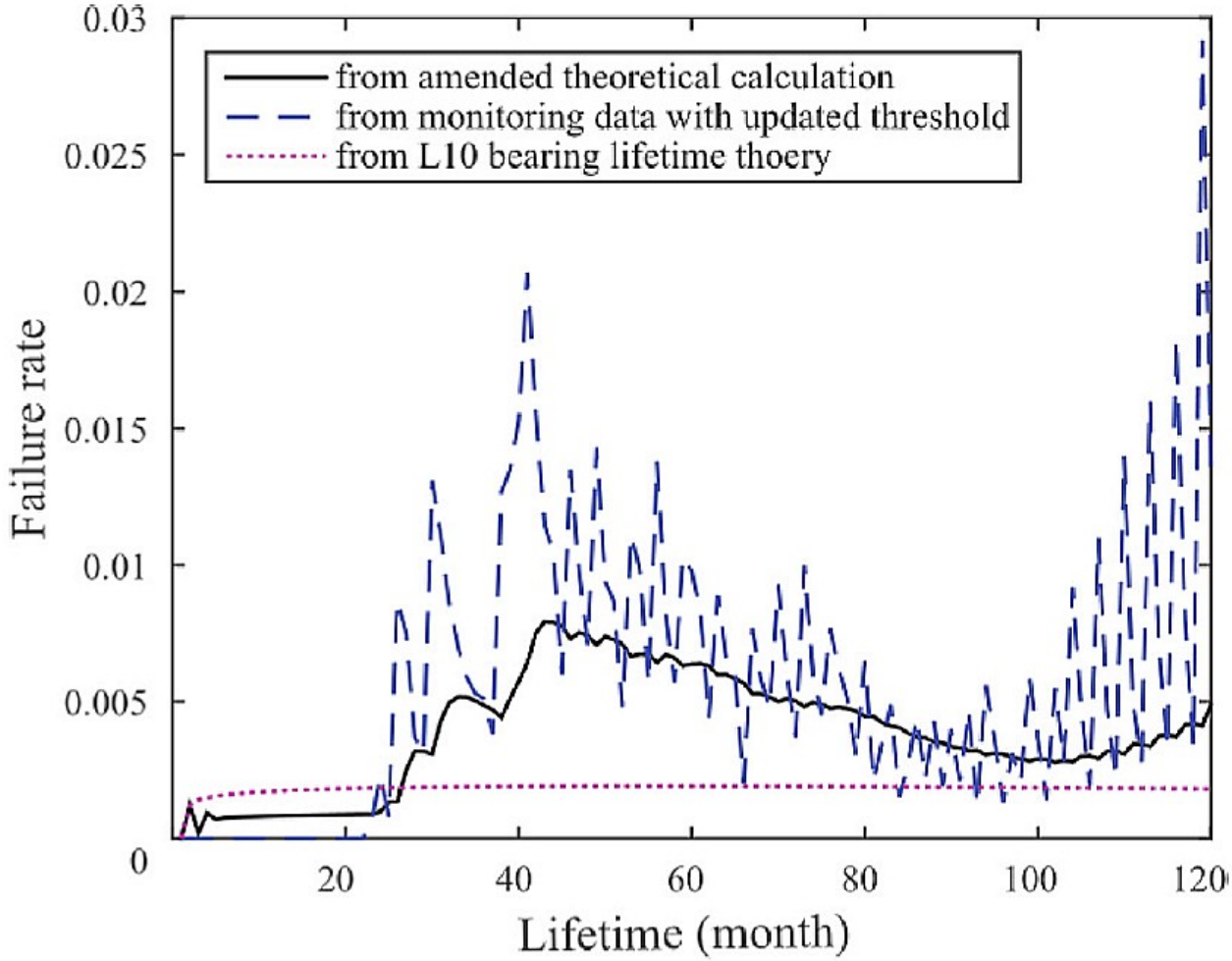
Σχήμα 13. Προσομοίωση θερμοκρασιακής κατανομής για έδρανα σε διαφορετικό χρόνο χρήσης
Σημείωση: με rff επισημαίνεται η συνάρτηση σχετικής συχνότητας (relative frequency functions)

Για τη μελέτη προσομοίωσης, εφαρμόζεται σταθερή χρονική περίοδος επιθεώρησης του 1 μήνα. Σχετικά με τον όρο σφάλματος ε (t) στο πλαίσιο, θεωρείται γραμμικό μοντέλο της μορφής $\varepsilon(t_i)=\alpha_{1,i}+\alpha_{2,i}\cdot t_i$. Αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε Matlab (Mathworks, version 2014) για την διεξαγωγή των δύο παραμέτρων $\alpha_{1,i}$ και $\alpha_{2,i}$ βάσει των όρων σφάλματος $\varepsilon(t_0),\varepsilon(t_1),\varepsilon(t_2),\ldots,\varepsilon(t_i)$ και της απόκλισης $\partial(t_i)$. Η στοιχειώδης προσαύξηση του θερμοκρασιακού ορίου Θ καθορίζεται στους 0.3 °C κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στο **Σχήμα 14** απεικονίζονται οι ρυθμοί αστοχίας από το διορθωμένο θεωρητικό υπολογισμό του πλαισίου όπως περιγράφηκε στη θεωρία, κατά την παρακολούθηση των δεδομένων με ενημερωμένο άνω όριο, και μόνο με την απλή εφαρμογή της θεωρίας ονομαστικής διάρκειας ζωής L10 αντίστοιχα. Τους πρώτους 23 μήνες, ο ρυθμός αστοχίας που προκύπτει από τη θεωρία ονομαστικής διάρκειας ζωής είναι ο υψηλότερος.

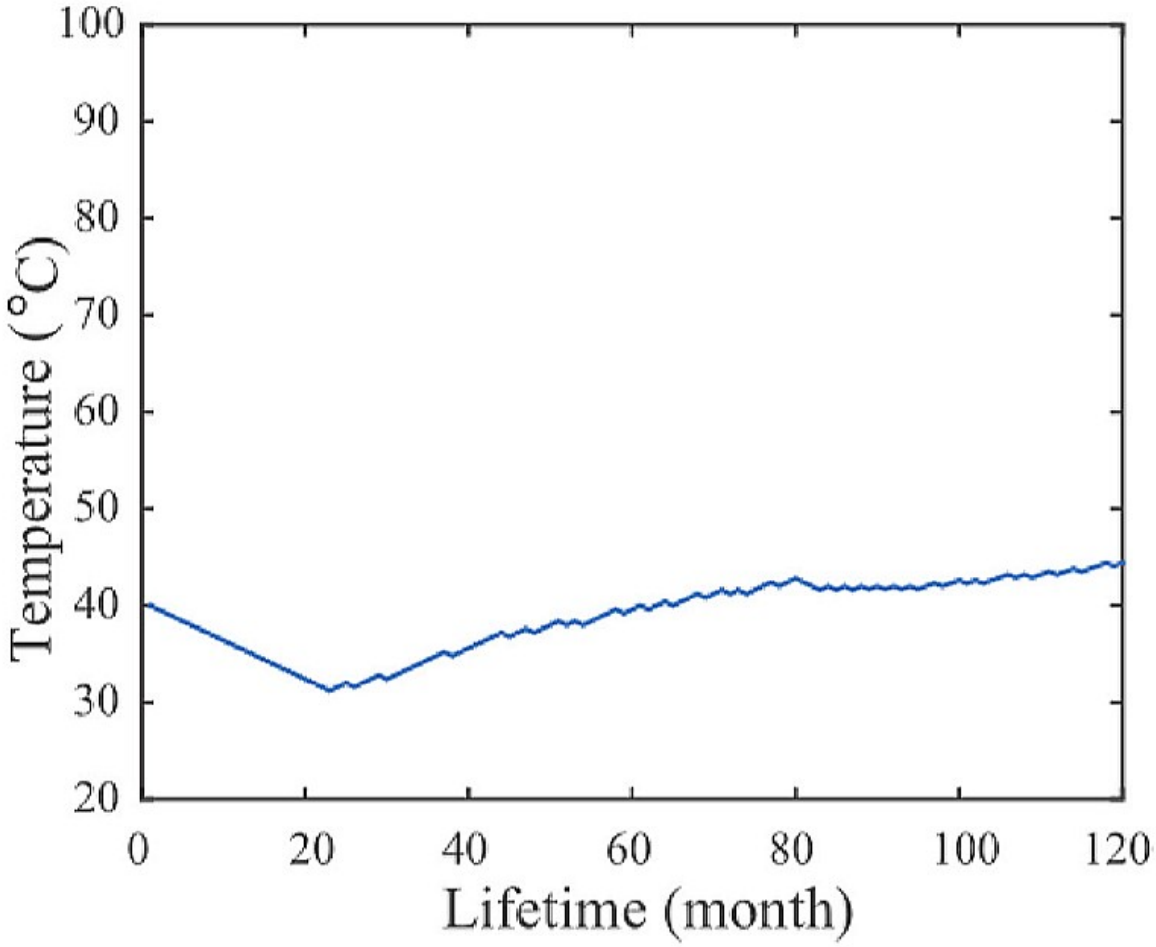
Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η συνάρτηση σχετικής συχνότητας της θερμοκρασίας συγκεντρώνεται σε μία χαμηλή περιοχή (<32 °C στο **Σχήμα 13**), το οποίο σημαίνει ότι η θερμοκρασία πολύ λίγου αριθμού εδράνων ξεπερνά την οριακή τιμή. Άρα, ο ρυθμός αστοχίας είναι πολύ μικρός. Μετά από 23 μήνες, ο ρυθμός αστοχίας από την παρακολούθηση κατάστασης αυξάνεται πάνω από αυτόν που δίνει η θεωρία L10.

Παρατηρείται επίσης ότι ο ρυθμός αστοχίας που εξάγεται από την παρακολούθηση κατάστασης μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ταυτόχρονη μεταβολή τόσο των προσομοιούμενων θερμοκρασιακών μετρήσεων όσο και στην οριακή τιμή. Ο ρυθμός αστοχίας από τη θεωρία L_{10} είναι σχεδόν σταθερός στο 0.2 τοις εκατό. Την ίδια στιγμή, ο ρυθμός αστοχίας από το διορθωμένο θεωρητικό υπολογισμό παρατηρείται να αλλάζει πιο ομαλά σε σύκριση με αυτόν από την παρακολούθηση κατάστασης. Από το **Σχήμα 14**, συνάγεται απρόσκοπτα το συμπέρασμα ότι ο ρυθμός αστοχίας από το διορθωμένο θεωρητικό υπολογισμό στο προτεινόμενο πλαίσιο είναι πιο ακριβής από αυτόν της θεωρίας L_{10} .



Σχήμα 14. Ρυθμοί αστοχίας κυλινδρικών εδράνων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Το **Σχήμα 15** απεικονίζει την ενημέρωση του κατώτατου θερμοκρασιακού ορίου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Κατά του πρώτους 23 μήνες, το κατώφλι μειώνεται γραμμικά από την αρχική τιμή των 40 °C έως τους 31,2 °C. Έπειτα, το κατώφλι παρατηρείται να αυξάνεται και καταλήγει στους 44,5 °C μετά από 120 μήνες όταν και περατώνεται η προσομοίωση. Η παρατήρηση σχετίζεται με την προκαθορισμένη τιμή των 40 °C και τη θερμοκρασιακή κατανομή ανάμεσα στα ράουλα που θεωρήθηκε για αυτή τη μελέτη προσομοίωσης. Όσον αφορά στους πρώτους 23 μήνες, υπάρχει πολύ μικρός αριθμός ραούλων που ξεπερνά την κατώτερη οριακή τιμή. Σε αυτήν την περίπτωση, η κατώτερη οριακή τιμή διορθώνεται προς τα κάτω.



Σχήμα 15. Εξέλιξη της οριακής θερμοκρασιακής τιμής κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Παράλληλα με την πάροδο του χρόνου προσομοίωσης, περισσότερα έδρανα υπερβαίνουν τα θερμοκρασιακά όρια παρά τον δείκτη αξιοπιστίας. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η οριακή τιμή ενημερώνεται με συνεχή τρόπο προς αυξανόμενες τιμές. Το **Σχήμα 15** δείχνει ότι η ενημέρωση του ορίου με δεδομένη αρχική τιμή, πραγματικά δεδομένα και θεωρητικό υπολογισμό είναι δυνατή.

Στο **Σχήμα 16** παρουσιάζεται η σύγκριση της αθροιστικής κατανομής των αστοχιών των εδράνων που προκύπτουν από το προτεινόμενο πλαίσιο με τη συμβατική προσέγγιση με σταθερό κατώφλι (40 °C) και με τη θεωρία L_{10} . Στην πραγματικότητα, η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της ανίχνευσης της αστοχίας και της αντικατάστασης των ραούλων μπορεί να κυμαίνεται σε εύρος ωρών ή ημερών. Παρ' όλα αυτά, η χρονική καθυστέρηση δεν είναι στους σκοπούς αυτής της μελέτης. Με την υπόθεση της άμεσης αντικατάστασης των ραούλων που αστόχησαν, οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής είναι ίσες με το ποσοστό της των ραούλων που χρειάστηκε να αντικατασταθούν προς το συνολικό πληθυσμό.

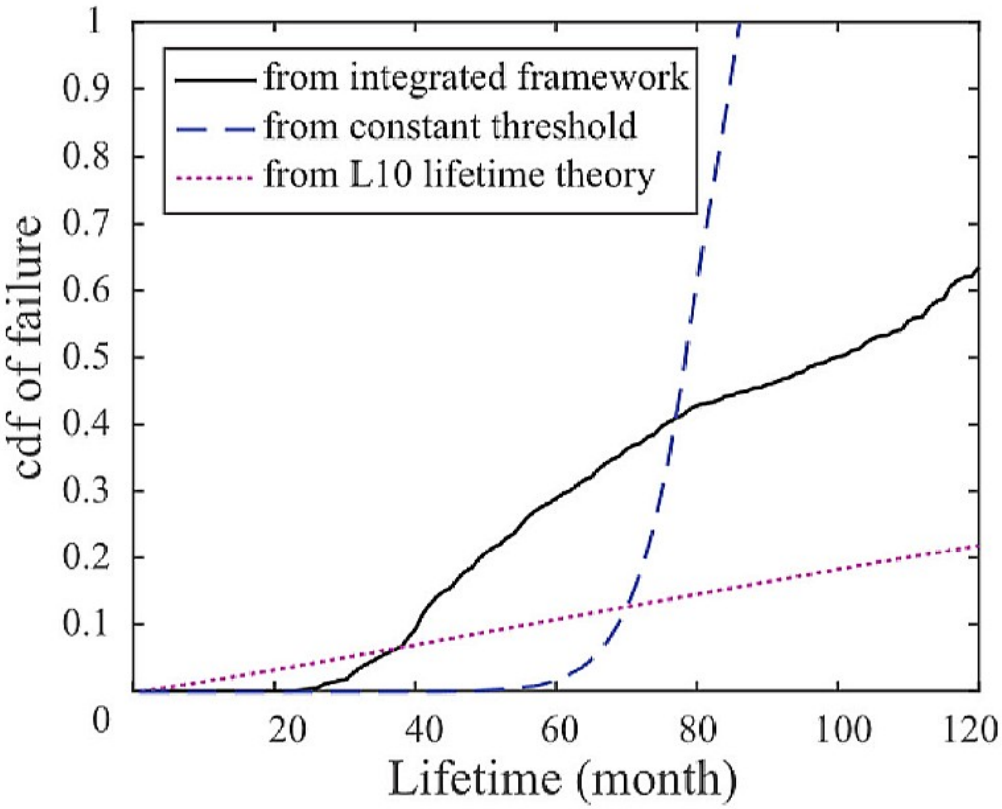
Στο ίδιο σχήμα, γενικώς, παρατηρείται ότι η συνάρτηση κατανομής από τη θεωρία L_{10} (κουκκίδες) αυξάνει γραμμικά σε 120 μήνες, η συνάρτηση κατανομής

από το προτεινόμενο πλαίσιο (συνεχής γραμμή) αυξάνει προοδευτικά ενώ αυτή από τη συμβατική προσέγγιση (παύλες) παραμένει πολύ χαμηλή κατά τους πρώτους 60 μήνες και στη συνέχεια αυξάνεται δραματικά προτού φτάσει το 100% των ραούλων προς αντικατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι εάν η οριακή τιμή είχε κρατηθεί σταθερή στους 40 °C, όλα τα έδρανα των ραούλων θα έπρεπε να είχαν αντικατασταθεί πριν περάσουν 86 μήνες.

Από την άλλη, το προτεινόμενο πλαίσιο καταδεικνύει ότι το ποσοστό των ραούλων που χρήζουν αντικατάστασης μεχρι τους 86 μήνες είναι 45%. Αυτό υποδεικνύει ότι η ιδέα της ενημέρωσης της οριακής τιμής μπορεί να εξοικονομήσει έως και 55% των αντικαταστάσεων των εδράνων συγκριτικά με τη συμβατική προσέγγιση.

Από το **Σχήμα 16** φαίνεται ότι η συνάρτηση κατανομής του πλαισίου είναι σχεδόν 62% στους 120 μήνες. Συμπεραίνει κανείς λοιπόν ότι σε 10 χρόνια πρόκειται να αντικατασταθεί το 62% του συνολικού πλήθους των στοιχείων κύλισης των ραούλων. Ταυτόχρονα, η θεωρία L_{10} δείχνει ότι μόνο το 22% των εδράνων των ραούλων θα αντικατασταθούν.

Η πρακτική συντήρησης με σταθερό θερμοκρασιακό όριο δείχνει ότι όλα τα ράουλα πρέπει να αντικατασταθούν μετά από 86 μήνες. Επομένως, είναι λογικός ο ισχυρισμός ότι το πλαίσιο για ενσωματωμένη λήψη αποφάσεων παρέχει μία ακριβέστερη και οικονομικά αποδοτικότερη απόφαση σχετικά με τις αστοχίες των στοιχείων κύλισης των ραούλων. Ως συνέπεια αυτού, εφαρμόζοντας το πλαισίο, τα κόστη συντήρησης θα ελαχιστοποιηθούν ενώ εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των συστημάτων μεταφοράς με ιμάντες.



Σχήμα 16. Αθροιστικές αστοχίες κυλινδρικών εδράνων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. (cdf: συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function))

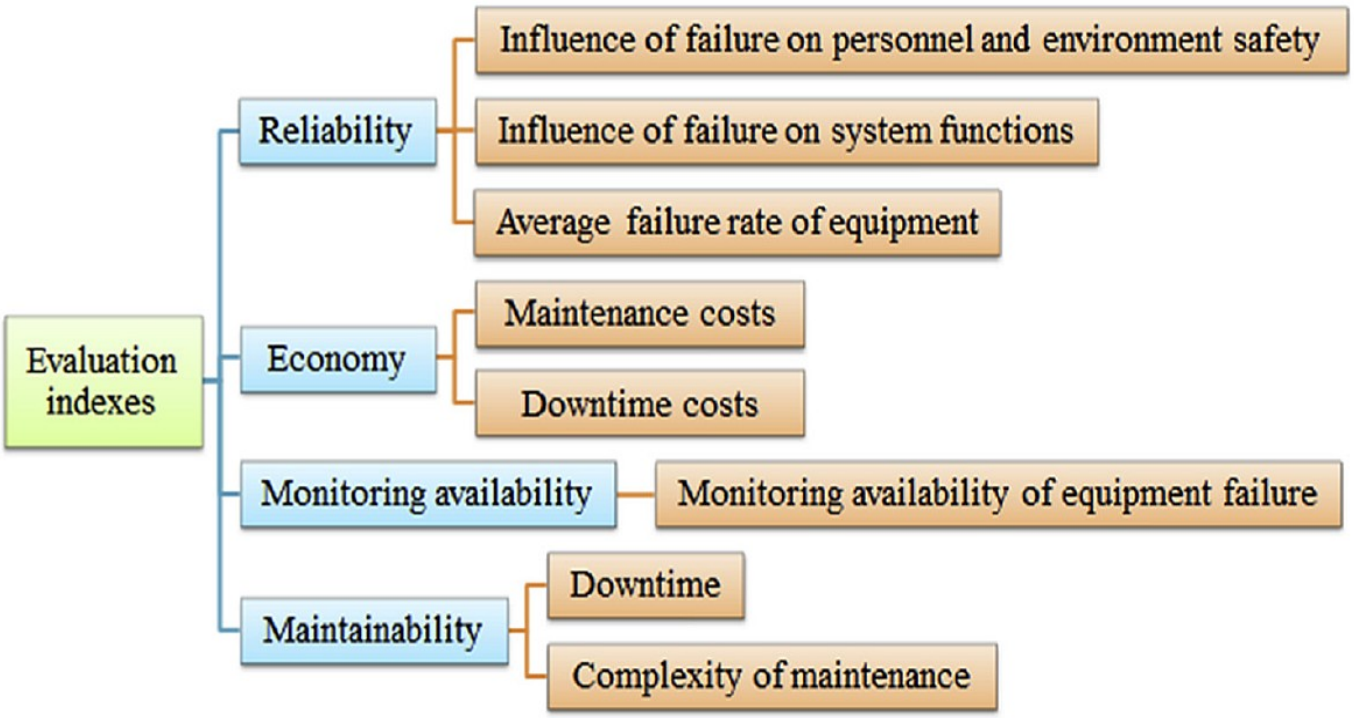
Γ. Πλαίσιο λήψης αποφάσεων συντήρησης για εξοπλισμό γεώτρησης και παραγωγής υγρών και αερίων υδρογονανθράκων.

Η μελέτη των Tang et al. (2015) αφορά την ανάπτυξη μιας μεθόδου λήψης αποφάσεων συντήρησης για εξοπλισμό γεώτρησης και παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου στο λεκανοπέδιο της περιοχής Tarim της Κίνας, με εμβάθυνση στα χαρακτηριστικά της διαδικασίας γεώτρησης και παραγωγής. Το πλαίσιο προτείνεται για τη λήψη των αποφάσεων συντήρησης της μονάδας ελέγχου του αποτροπέα εκρήξεων του εξοπλισμού εξόρυξης και βασίζεται στα διαφορετικά επίπεδα σημαντικότητας των συνιστωσών του. Σε όλη την έκταση του πλαισίου λήψης αποφάσεων συντήρησης, καταρτίζονται πιο λογικές και αποτελεσματικές μέθοδοι συντήρησης του εξοπλισμού καθώς και οι πιο ασφαλείς και αξιόπιστες για τη λειτουργία παραγωγής υγρών και αέριων υδρογονανθράκων.

4Γ. 1. Ορισμός του δείκτη αξιολόγησης και των κριτηρίων βαθμολόγησης

Οι παράγοντες επιρροής τους επιπέδου σημαντικότητας του εξοπλισμού μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες: παράγοντες αξιοπιστίας, οικονομικοί παράγοντες, παράγοντες διαθεσιμότητας παρακολούθησης και παράγοντες συντηρησιμότητας.

Αυτές οι τέσσερις κατηγορίες υποδιαιρούνται περαιτέρω σε οκτώ παράγοντες επιρροής, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 17**. Αυτοί οι οκτώ παράγοντες λογίζονται ως δείκτες αξιολόγησης του επιπέδου σημαντικότητας του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου.



Σχήμα 17. Οι δείκτες αξιολόγησης του επιπέδου σημαντικότητας του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής πετρελαιοειδών.

Για να καθοριστεί το επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού με μαθηματικές μεθόδους, είναι σημαντικό να οριστούν τα βαθμολογικά κριτήρια ώστε να ποσοτικοποιηθεί το επίπεδο επιρροής του κάθε δείκτη αξιολόγησης. Για διαφορετικό εξοπλισμό ή διαφορετικά συστήματα του εξοπλισμού, οι συντελεστές βαρύτητας των δεικτών αξιολόγησης θα πρέπει να διαφέρουν.

Επομένως, υπάρχει ένα σχετικό επίπεδο σημαντικότητας ανάμεσά τους. Ο ορισμός και η θεμελιώδης κλίμακα του σχετικού επιπέδου σημαντικότητας καταρτίζονται στον **Πίνακα 5**. Τα σχετικά επίπεδα σημαντικότητας των οκτώ δεικτών αξιολόγησης βαθμονομούνται αναφορικά με τον **Πίνακα 5**.

Πίνακας 5.

Ορισμός και θεμελιώδης βαθμολογία του σχετικού επιπέδου σημαντικότητας.

Definition	Score
Equally important	1
Moderately important	3
Strongly important	5
Very strongly important	7
Extremely important	9
Intermediately important	2, 4, 6, 8

Έπειτα, καταρτίζονται τα κριτήρια βαθμολόγησης των οκτώ δεικτών αξιολόγησης βάσει των επισκοπήσεων που συντάχθηκαν από τους μηχανικούς συντήρησης και το προσωπικό λειτουργίας του πεδίου έρευνας. Τα επίπεδα επιρροής των δεικτών αξιολόγησης ταξινομούνται σε τρείς έως πέντε βαθμίδες αναλόγως με τα σχετικά τους χαρακτηριστικά και βαθμολογούνται με ένα σύστημα σώρευσης μορίων με μέγιστο το 10. Οι ορισμοί των επιπέδων επιρροής και των κριτηρίων βαθμολόγησης για τους δείκτες αξιολόγησης του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής υγρών και αέριων καυσίμων είναι ως εξής:

Επιρροή αστοχίας στο προσωπικό και περιβαλλοντική ασφάλεια (S)

Η αστοχία του εξοπλισμού μπορεί να επιφέρει κάποιες καταστροφές (όπως για παράδειγμα διαρροή και εξάπλωση δηλητηριώδους αερίου, φωτιές, και εκρήξεις) στην περιοχή κατάτη διάρκεια της εξερεύνησης και ανάπτυξης κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Αυτές οι καταστροφές θα επηρεάσουν την ασφάλεια του προσωπικού και τη μόλυνση του περιβάλλοντος. Ωστόσο, τα πιθανά επίπεδα επιρροής τους θα πρέπει να θεωρούνται στην περίπτωση αστοχίας του εξοπλισμού. Τα κριτήρια βαθμολόγησης των επιπέδων αυτών φαίνοται στον **Πίνακα 6**.

Πίνακας 6

Κριτήρια βαθμολόγησης του δείκτη S.

S/N	Influence level	Score
1	No influence	0–2
2	Slight influence	3–4
3	Greater influence	5–8
4	Significant influence	9–10

Επιρροή αστοχίας στις συστημικές λειτουργίες (SF)

Όταν συμβαίνουν αστοχίες εξοπλισμού, η επιρροή σε λειτουργίες του συνολικού συστήματος θα πρέπει να είναι μείζωνος ανησυχίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας γεώτρησης και παραγωγής. Ο ορισμός των επιπέδων επιρροής και των κριτηρίων βαθμονόμησης της SF δίνονται από τον **Πίνακα 7**.

Πίνακας 7

Κριτήρια βαθμολόγησης του δείκτη SF.

S/N	Influence level	Score
1	No impact	0–2
2	Slight impact	3–4
3	Obvious decline	5–8
4	Complete loss	9–10

Μέσος ρυθμός αστοχίας (FR) του εξοπλισμού

Ο μέσος χρόνος μεταξύ αστοχιών (MTBF) του εξοπλισμού μπορεί να υπολογιστεί από τις καταχωρήσεις αστοχιών τους που διορθώθηκαν από τους χειριστές και τους επισκευαστές και από τις βάσεις δεδομένων αξιοπιστίας για το σχετικό εξοπλισμό. Στον **Πίνακα 8**, φαίνονται το αριθμητικό εύρος των μέσων χρόνων μεταξύ αστοχιών και τα κριτήρια βαθμολόγησης του μέσου ρυθμού αστοχίας.

Πίνακας 8

Κριτήρια βαθμολόγησης για το δείκτη MBTF.

S/N	MTBF(hrs)	Score
1	>7000	0–2
2	3000–7000	3–4
3	1000–3000	5–6
4	300–1000	7–8
5	<300	9–10

Κόστη συντήρησης (MC)

Σύμφωνα με πληθώρα έρευνας για τη συντήρηση και επισκευή εξοπλισμού στο πεδίο των πετρελαιοειδών, αυτοί οι παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της δομικής πολυπλοκότητας, του χρόνου συντήρησης, των κοστών των ανταλλακτικών, και της τοποθεσίας του συνεργείου συντήρησης θα πρέπει να συνυπολογίζονται στα κόστη συντήρησης του εξοπλισμού εξόρυξης και παραγωγής. Τα κριτήρια βαθμολόγησης των κοστών συντήρησης φαίνονται στον **Πίνακα 9**.

Πίνακας 9

Κριτήρια βαθμολόγησης του δείκτη MC

S/N	Maintenance costs (US$)	Score
1	<1600	0–2
2	1600–16,000	2–4
3	16 000–80,000	5–6
4	80 000–160,000	7–9
5	>160,000	10

Απώλειες λόγω μη διαθεσιμότητας (DL)

Αυτός ο δείκτης αξιολόγησης αναφέρεται στις οικονομικές απώλειες που ενσκύπτουν από τη μη διαθεσιμότητας του εξοπλισμού λόγω προγραμματισμένης ή έκτακτης διακοπής λειτουργίας. Η διακοπή λειτουργίας καταλογίζει οικονομικές απώλειες στη συντήρηση ή αντικατάσταση στις λειτουργίες εξόρυξης πετρελαίου. Τα κριτήρια βαθμολόγησης των απωλειών διαθεσιμότητας φαίνονται στον **Πίνακα 10**.

Πίνακας 10

Κριτήρια βαθμολόγησης για το δείκτη DL.

<S/N	Economic loss	Score
1	Very small	0–2
2	Small	3–6
3	Large	7–8
4	Huge	9–10

Διαθεσιμότητα παρακολούθησης (MA) αστοχίας του εξοπλισμού

Η διαθεσιμότητα παρακολούθησης αστοχίας του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής αξιολογείται βάσει των πιθανοτήτων παρακολούθησης της αστοχίας του εξοπλισμού, της πολυπλοκότητας παρακολούθησης, του κόστους παρακολούθησης κλπ. Τα κριτήρια βαθμολόγησης της διαθεσιμότητας παρακολούθησης αστοχίας φαίνονται στον **Πίνακα 11**.

Πίνακας 11

Κριτήρια βαθμολόγησης για το δείκτη MA.

S/N	Monitoring availability	Score
1	High	0–4
2	Low	5–7
3	No monitoring	8–10

Χρόνος εκτός λειτουργίας (DT)

Στη διαδικασία συντήρησης και επισκευής του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής, ο χρόνος εκτός λειτουργίας περιλαμβάνει το χρόνο (σε εργατοώρες) αδράνειας, συντήρησης και επανεκκίνησης. Τα κριτήρια βαθμολόγησης του χρόνου εκτός λειτουργίας σε συνδυασμό με την πραγματική κατάσταση του εργοταξίου, παρατίθενται στον **Πίνακα 12**.

Πίνακας 12

Κριτήρια βαθμολίγησης για το δείκτη DT.

S/N	Man-hours (hrs)	Score
1	<2	0–2
2	2–4	3–4
3	4–8	5–6
4	8–24	7–8
5	>24	9–10

Πολυπλοκότητα συντήρησης (M)

Αυτός ο δείκτης αξιολόγησης υπόκειται στο βαθμό δυσκολίας συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης του εξοπλισμού, το βαθμό πολυπλοκότητας της δομής του, το βαθμό δυσκολίας της εφαρμογής (όπως το ύψος, ο περιβάλλον χώρος κ.ά.), και το επίπεδο προμήθειας ανταλλακτικών. Τα κριτήρια βαθμολόγησης της πολυπλοκότητας συντήρησης φαίνονται στον **Πίνακα 13**.

Πίνακας 13

Κριτήρια βαθμολόγησης για το δείκτη Μ.

S/N	Man-hours (hrs)	Score
1	<12	0–2
2	12–24	3–4
3	24–72	5–6
4	>72	7–10

4Γ. 2. Μοντέλο αξιολόγησης του επιπέδου σημαντικότητας του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής πετρελαιοειδών

4Γ. 2. 1. Ποσοτική αξιολόγηση με βάση τη μέθοδο Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP)

Σύμφωνα με τα κριτήρια βαθμολόγησης του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής που αναλύθηκαν παραπάνω, προκύπτουν οι βαθμολογίες των οκτώ δεικτών αξιολόγησης μετά από την υποκειμενική αξιολόγηση του εξοπλισμού. Αλλά δεν υπάρχει η δυνατότητα του άμεσου καθορισμού των επιπέδων σημαντικότητας του εξοπλισμού από αυτές τις βαθμολογίες των δεικτών αξιολόγησης. Για την επίπτευξη αυτού του σκοπού, παρατίθεται ένα γραμμικό μαθηματικό μοντέλο με συντελεστές βαρύτητας για τον υπολογισμό της συνολικής βαθμολογίας των οκτώ δεικτών αξιολόγησης, με την ονομασία Index, ως εξής:

$$\text{Index} = \sum_{i=1}^{n} m_i \alpha_i \qquad (8)$$

όπου

n- το συνολικό πλήθος των δεικτών αξιολόγησης,

m_i - η βαθμολογία του i-οστού δείκτη αξιολόγησης, και

α_i - ο συντελεστής βαρύτητας του i-οστού δείκτη αξιολόγησης.

Βρέθηκε ότι οι συντελεστές βαρύτητας κάθε δείκτη αξιολόγησης για διαφορετικό εξοπλισμό ή διαφορετικά συστήματα εξοπλισμού διαφέρει από την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου. Όπως δείχνει η εξίσωση (8), ο συντελεστής βαρύτητας του δείκτη αξιολόγησης α_i σε όλες τις παραμέτρους υπολογισμού μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στο αποτέλεσμα του συνολικού δείκτη Index, ο οποίος λογίζεται ως το επίπεδο σηματικότητας του εξοπλισμού.

Για τον υπολογισμό του δείκτη Index, πρώτα καθορίζεται ο συντελεστής βαρύτητας κάθε δείκτη αξιολόγησης α_i . Η αναλυτική ιεραρχική διαδικασία είναι μια θεωρία μέτρησης μέσω συγκρίσεων κατά ζεύγη που στηρίζεται στις κρίσεις ειδικών για την εξαγωγή κλιμάκων προτεραιότητας. Γι' αυτό το λόγο, η AHP συνάδει με την περίπτωση μελέτης, και η ροή υπολογισμού της δίνεται παρακάτω:

<u>Βήμα 1:</u> Κατασκευή του μητρώου κρίσεων D μέσω συκρίσεων κατά ζεύγη στο σύνολο των δεικτών αξιολόγησης:

$$D=\begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nn} \end{bmatrix} \qquad (9)$$

όπου u_{ij} είναι το επίπεδο σχετικής σημαντικότητας του i-οστού δείκτη αξιολόγησης ως προς τον j-οστό δείκτη αξιολόγησης, και u_{ji} είναι το επίπεδο σχετικής σημαντικότητας του j-οστού δείκτη αξιολόγησης ως προς τον i-οστό δείκτη αξιολόγησης. Επομένως, η αριθμητική τιμή του u_{ji} είναι ο αντίστοφος του u_{ij} , συγκεκριμένα $u_{ij}=\frac{1}{u_{ji}}$. Ο **Πίνακας 5** δείχνει τον ορισμό και τη θεμελιώση κλίμακα του επιπέδου σχετικής σημαντικότητας.

<u>Βήμα 2:</u> Υπολογισμός της μέγιστης ιδιοτιμής l_{max} του μητρώου κρίσεων D με χρήση του συστήματος ομογενών γραμμικών εξισώσεων ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} (u_{11}-\lambda)\omega_1+u_{12}\omega_2+\dots+u_{1n}\omega_n=0 \\ u_{21}\omega_1+(u_{22}-\lambda)\omega_2+\dots+u_{2n}\omega_n=0 \\ \dots \\ u_{n1}\omega_1+u_{n2}\omega_2+\dots+(u_{nn}-\lambda)\omega_n=0 \end{Bmatrix} \qquad (10)$$

Βήμα 3: Καθορισμός του ιδιοδιανύσματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη ιδιοτιμή lmax, το οποίο δίνεται από την

$$W=(\omega_1,\omega_2,\ldots,\omega_n) \tag{11}$$

Βήμα 4: Έλεγχος συμβατότητας του μητρώου κρίσεων D:

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{12}$$

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{13}$$

όπου

CR – ο δείκτης τυχαίας συμβατότητας του μητρώου κρίσεων.
CI – ο δείκτης γενικής συμβατότητας του μητρώου κρίσεων.
RI – ο δείκτης μέσης τυχαίας συμβατότητας του μητρώου κρίσεων.

Για το μητρώο κρίσεων, η τυπική τιμή του δείκτη μέσης τυχαίας συμβατότητας RI δίνεται στον **Πίνακα 14**.

Πίνακας 14

Ητυπική τιμή του δείκτη μέσης τυχαίας συμβατότητας RI.

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0.00	0.00	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41

Βήμα 5: Διόρθωση της συμβατότητας του μητρώου κρίσεων D και καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας των δεικτών αξιολόγησης.

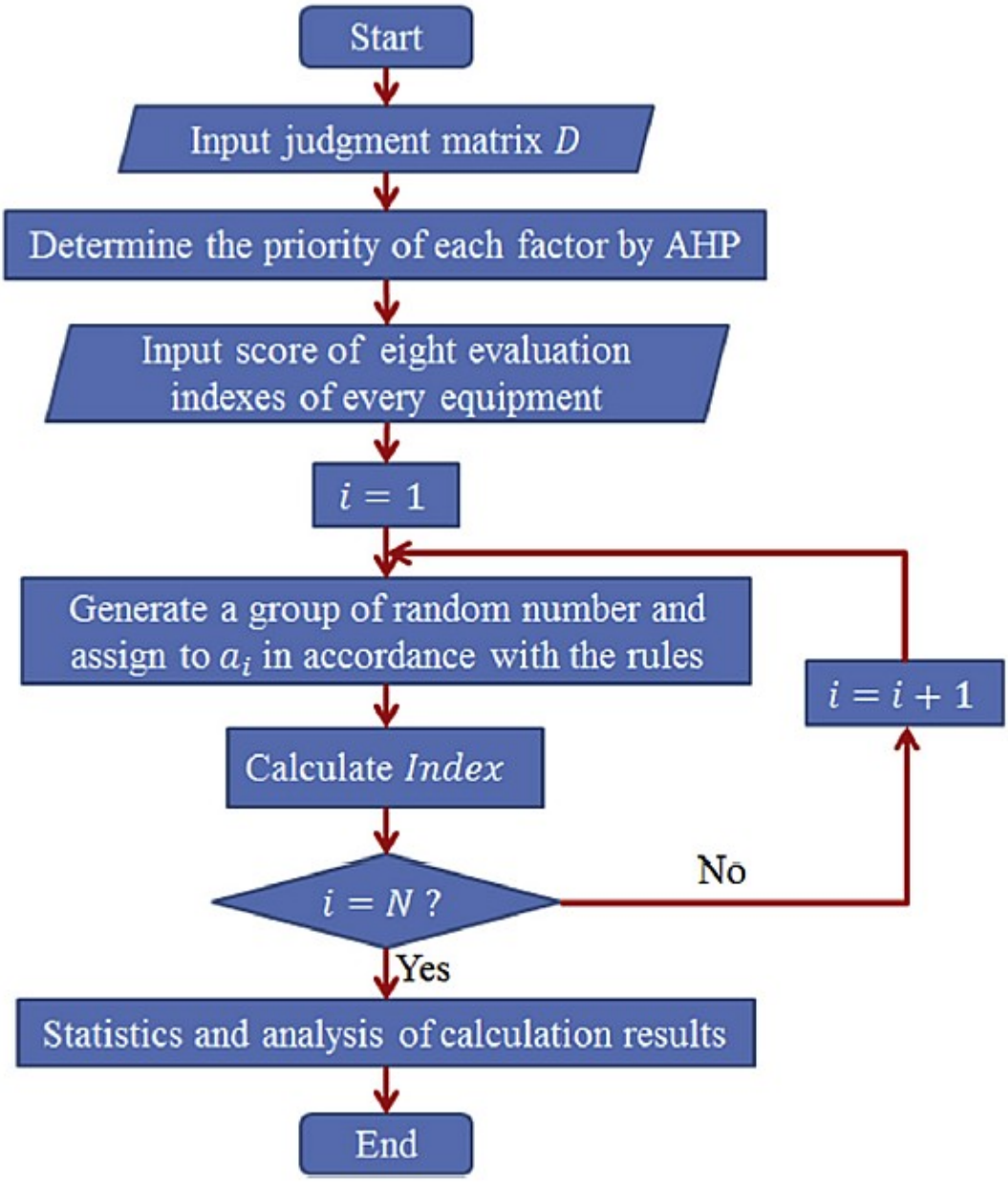
Εάν CR < 0.1, η συμβατότητα του μητρώου κρίσεων D είναι ικανοποιητική, εάν όχι, το μητρώο κρίσεων D θα πρέπει να διορθωθεί έως ότου η συμβατότητα να πληρεί την παραπάνω απαραίτητη προϋπόθεση. Τότε, κάθε τιμή του ιδιοδιανύσματος $W=(\omega_1,\omega_2,\ldots,\omega_n)$ αντιστοιχεί στο συντελεστή βαρύτητας του κάθε δείκτη αξιολόγησης.

Βήμα 6: Υπολογισμός της συνολικής βαθμολογίας των δεικτών αξιολόγησης Index με τη βοήθεια της εξίσωσης (8) εισάγοντας ως παραμέτρους το συντελεστή βαρύτητας και τη βαθμολογία κάθε δείκτη αξιολόγησης. Η συνολική βαθμολογία αναπαριστά το επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού. Εν τέλει, σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, πραγματοποιήθηκε η ποσοτικοποίηση του συντελεστή βαρύτητας των οκτώ δεικτών αξιολόγησης του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής πετρελαιοειδών και υπολογίστηκε το επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού.

4Γ. 2. 2. Ανάλυση της απαλοιφής των υποκειμενικών παραγόντων σύμφωνα με την προσομοίωση Monte Carlo (MCS)

Σε αυτό το πλαίσιο, οι βαθμολογίες των δεικτών αξιολόγησης δόθηκαν απευθείας από τον ειδικό ή το μηχανικό συντήρησης στη διαδικασία βαθμολόγησης βάσει των κριτηρίων βαθμολόγησης. Επομένως, η βαθμολογία και το επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού μπορεί να υπόκειται σε επιρροές από υποκειμενικούς παράγοντες και ατομικές διαφορές ανάμεσα στους ειδικούς. Αυτό θα μπορούσε να συντελέσει σε σφάλματα των αποτελεσμάτων του επιπέδου σημαντικότητας του εξοπλισμού. Σύμφωνα με τη μελέτη και ανάλυση παρόμοιων προβλημάτων, το παραπάνω πρόσκομμα μπορεί να αντιμετωπισθεί με χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo.

Αφού οι συντελεστές βαρύτητας α_i επιλυθούν με την αναλυτική ιεραρχική διαδικασία, χρησιμοποιώντας πολλούς υπολογισμούς προσομοίωσης με την προσέγγιση Monte Carlo για το αποτέλεσμα του προηγούμενου βήματος θα απαλοιφεί αποτελεσματικά η επιρροή των υποκειμενικών παραγόντων. Με την εφαρμογή της προσέγγισης προσομοίωσης Monte Carlo και της αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας το επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Το λογικό σχηματικό διάγραμμα της προσομοίωσης Monte Carlo φαίνεται στο **Σχήμα 18**.



Σχήμα 18. Το λογικό σχηματικό διάγραμμα της προσομοίωσης Monte Carlo.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 18**, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσομοίωσης Monte Carlo παράγονται οκτώ τυχαίοι αριθμοί που ανήκουν στο διάστημα [0, 1]. Αυτά τα τυχαία νούμερα λογίζονται ως οι συντελεστές βαρύτητας των οκτώ δεικτών αξιολόγησης και σε αυτούς εκχωρείται η σειρά προτεραιότητας που προκύπτει από την αναλυτική ιεραρχική διαδικασία του προηγούμενου βήματος. Επεξηγηματικά, για κάθε σύνολο τυχαίων αριθμών, ο μέγιστος τυχαίος αριθμός ανατίθεται στην κορυφαία προτεραιότητα, ο ελάχιστος στη χαμηλότερη προτεραιότητα, και οι υπόλοιποι τυχαίοι αριθμοί στους υπόλοιπους δείκτες αξιολόγησης.

Έπειτα, κατά τον υπολογισμό της προσομοίωσης Monte Carlo, η συνολική βαθμολογία όλων των δεικτών αξιολόγησης του εξοπλισμού μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (8), και έτσι λαμβάνεται και κατατάσσεται το επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού σύμφωνα με το δείκτη Index. Μετά από N υπολογισμούς προσομοίωσης, λαμβάνονται αρκετές τιμές κατάταξης για τον ίδιο εξοπλισμό βάσει των διαφορετικών επιπέδων σημαντικότητάς τους. Κατόπιν, όταν η αθροιστική συχνότητα της ακολουθίας του επιπέδου σημαντικότητας ενός τεμαχίου εξοπλισμού πλησιάζει το 1, καθορίζεται το επίπεδο σημαντικότητας αυτού του μέρους του εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο γρήγορα φτάσει τη μονάδα η αθροιστική συχνότητα του τεμαχίου, τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού.

4Γ. 3. Θεμελίωση των αποφάσεων συντήρησης στο επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού

Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία που δείχνουν τη σειρά προτεραιότητας του εξοπλισμού, μπορεί να κατασκευαστεί το διάγραμμα αθροιστικών συχνοτήτων τους. Βάσει της αρχής η οποία ορίζει την κατασκευή του διαγράμματος αθροιστικής συχνότητας, το ποσοστό του εμβαδού στη δεξιά πλευρά της καμπύλης μπορεί να θεωρηθεί ως μία άλλη αναπαράσταση του επιπέδου σημαντικότητας του εξοπλισμού. Μεγαλύτερο ποσοστό καταδεικνύει υψηλότερο επίπεδο σημαντικότητας.

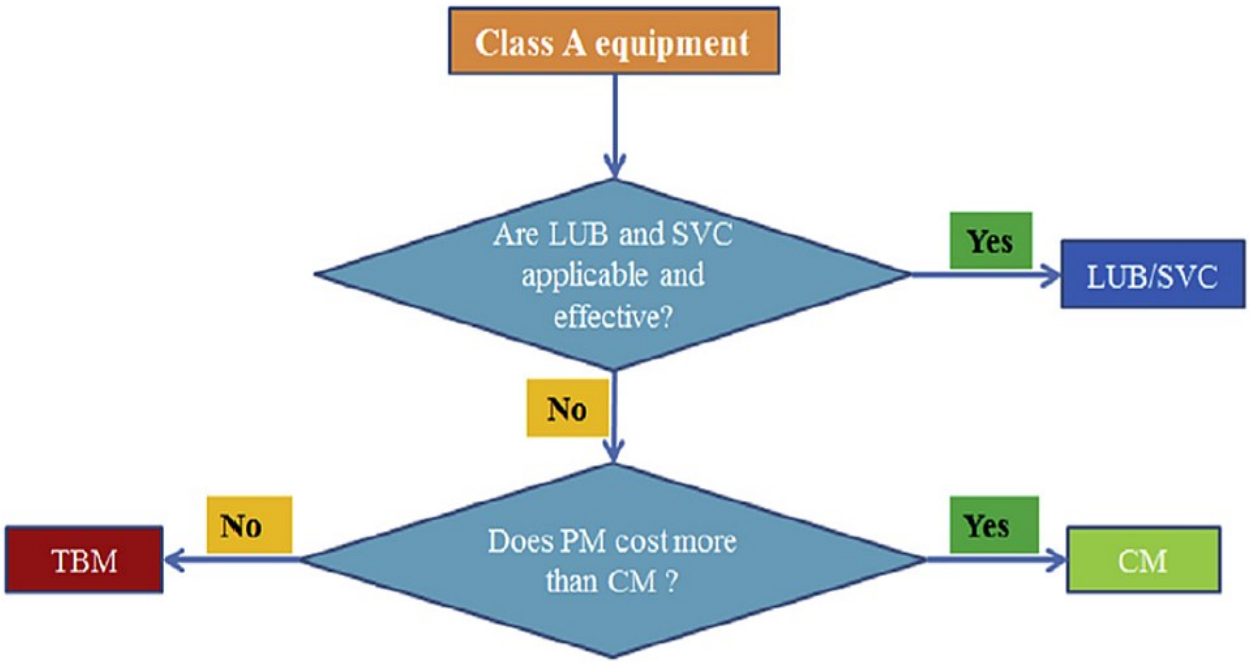
Στηριζόμενοι στα διαφορετικά ποσοστά εμβαδού για τις καμπύλες του εξοπλισμού, δηλαδή τα διαφορετικά επίπεδα σημαντικότητας ανάμεσά τους, ο εξοπλισμός γεώτρησης και παραγωγής μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες: Ομάδα A (Class A) εξοπλισμού με ποσοστό εμβαδού καμπύλης 0 – 25%, Ομάδα B (Class B) εξοπλισμού με ποσοστό εμβαδού καμπύλης 25% - 65% και Ομάδα C (Class C) εξοπλισμού με ποσοστό εμβαδού καμπύλης 65% - 100%.

Από επιτόπιες έρευνες και από τη σχετική βιβλιογραφία, οι υπάρχουσες μέθοδοι συντήρησης του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής πετρελαιοειδών περιλαμβάνουν τη λίπανση (LUB), την επισκευή (SVC), τη διορθωτική συντήρηση (CM), τη συντήρηση με βάση το χρόνο (TBM), την ανίχνεση κρυφής αστοχίας (HFD), και τη συντήρηση με βάση την κατάσταση (CBM).

Για να υλοποιηθούν αποτελεσματικά αυτές οι μέθοδοι συντήρησης, αναλύονται ο τρόπος πρωτογενούς βλάβης, η επίδρασή της και το αίτιο της αστοχίας για κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες εξοπλισμού πριν από τον καθορισμό των δέντρων λήψης αποφάσεων συντήρησης (MDMTs) του εξοπλισμού γεώτρησης και παραγωγής. Έπειτα, τα δέντρα λήψης αποφάσεων συντήρησης του συνολικού εξοπλισμού καθορίζονται αναφέροντας το λογικό διάγραμμα απόφασης της

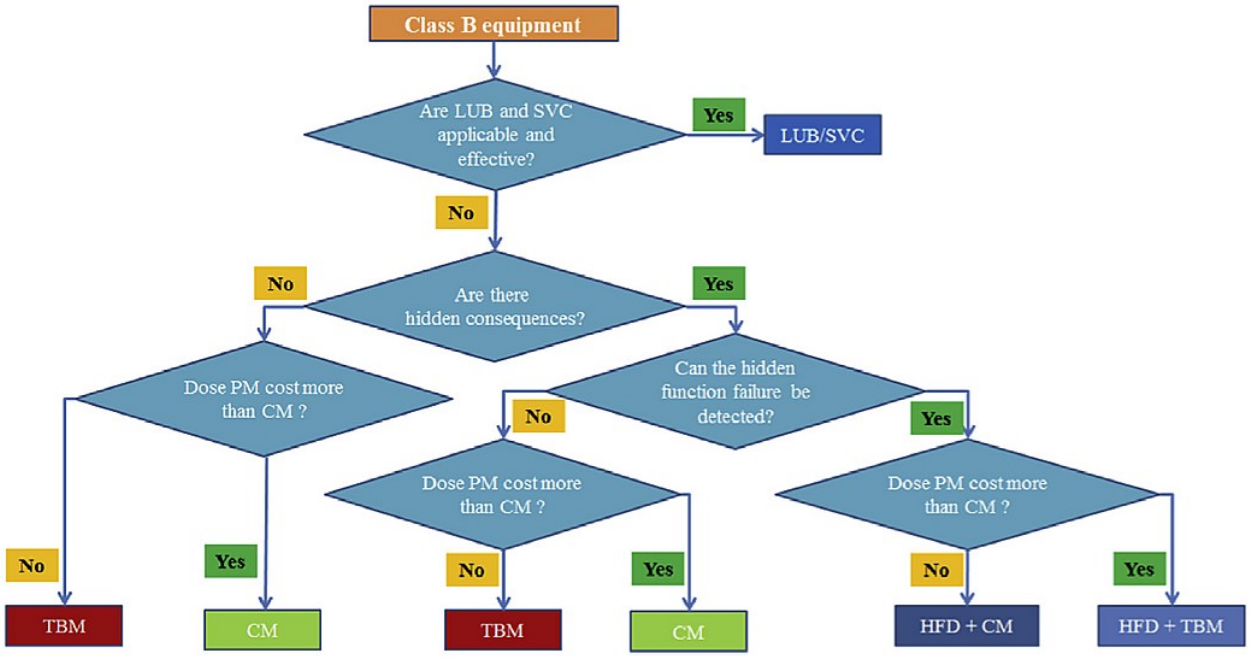
συντήρησης με κέντρο την αξιοπιστία (RCM). Τα δέντρα λήψης αποφάσεων συντήρησης του εξοπλισμού λοιπόν περγράφονται λεπτομερειακά παρακάτω:

(i) Η αστοχία του εξοπλισμού Ομάδας Α έχει μικρή ή καθόλου επιρροή στην καθολική λειτουργία του συστήματος γεώτρησης και παραγωγής ή επιφέρει λιγότερα κόστη συντήρησης. Η αύξηση του αποθέματος ανταλλακτικών ή η μείωση της συχνότητας αστοχιών του εξοπλισμού Ομάδας Α δεν επηρεάζει τη διαδικασία γεώτρησης και παραγωγής πετρελαίου και αερίων καυσίμων. Οι κατάλληλες στρατηγικές συντήρησης για τον εξοπλισμό Ομάδας Α είναι τέσσερις, συγκεκριμένα η λίπανση, η επισκευή, η διορθωτική συντήρηση, και η συντήρηση με βάση το χρόνο. Ένα δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης για τον εξοπλισμό Ομάδας Α φαίνεται στο **Σχήμα 19**.



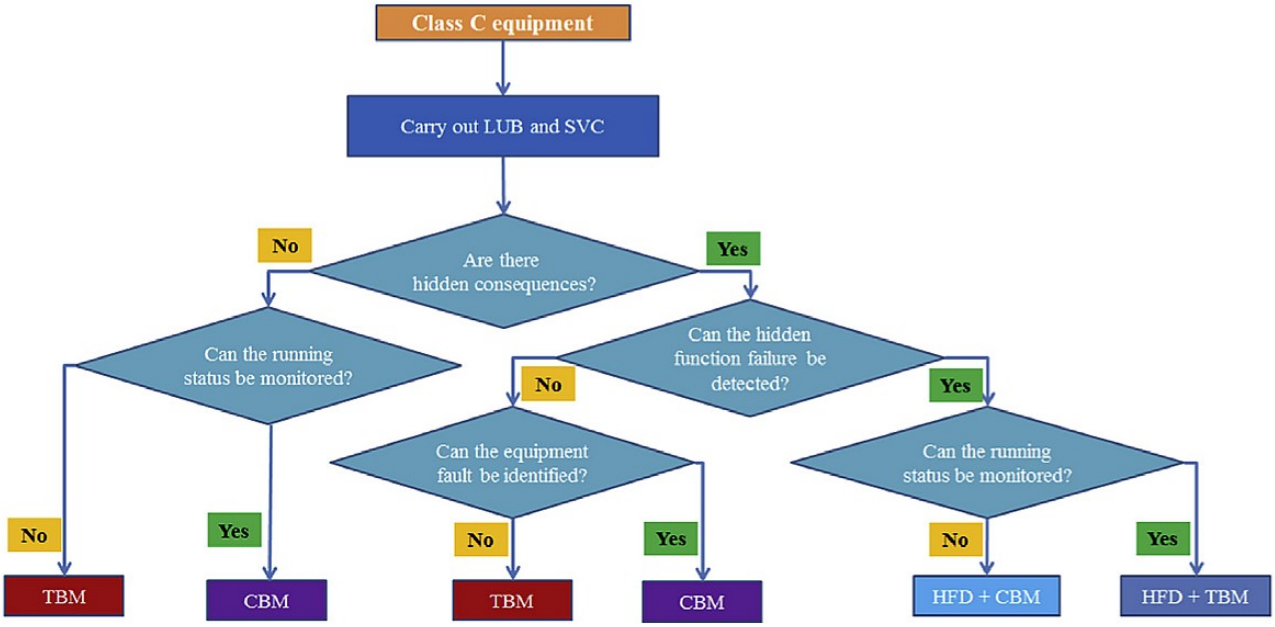
Σχήμα 19. Δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης για τον εξοπλισμό Ομάδας Α.

(ii) Όταν αστοχεί ο εξοπλισμός της ομάδας Β, προξενούνται κατά κανόνα πιο σκληρές επιπτώσεις, αλλά συνήθως αυτές δεν επηρεάζουν την ασφάλεια των εργαζομένων ή το περιβάλλον. Η συχνότητα βλαβών του εξοπλισμού Ομάδας Β μπορεί να μειωθεί μέσω εύλογων στρατηγικών συντήρησης οι οποίες μπορεί να επιφέρουν υψηλότερα κόστη συντήρησης. Ένα δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης για τον εξοπλισμό Ομάδας Β με τις κατάλληλες στρατηγικές συντήρησης, οι οποίες περιλαμβάνουν τη λίπανση, την επισκευή, τη συντήρηση με βάση το χρόνο, τη διορθωτική συντήρηση και την ανίχνευση κρυφής αστοχίας, φαίνονται στο **Σχήμα 20**.



Σχήμα 20. Το δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης για τον εξοπλισμό Ομάδας Β.

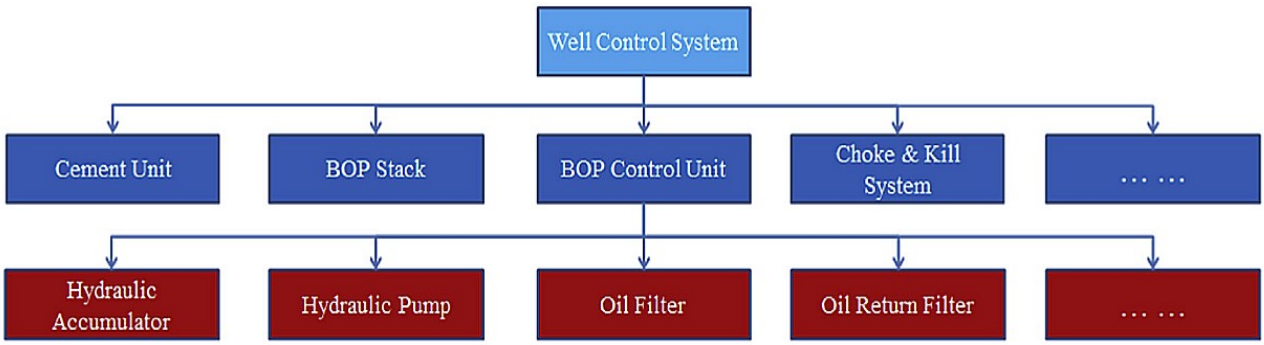
(iii) Η αστοχία του εξοπλισμού Ομάδας C μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια του προσωπικού, να μολύνει το περιβάλλον ή να προκαλέσει σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις. Για την εξασφάλιση της λειτουργικής αξιοπιστίας και της οικονομίας συντήρησης του εξοπλισμού Ομάδας C, η συχνότητα βλαβών πρέπει να μειωθεί επενδύοντας σε προηγμένες μεθόδουν συντήρησης με αύξηση του αντίστοιχου κόστους. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει το δέντρο απόφασης του **Σχήματος 21**, υιοθετώντας ως στρατηγικές συντήρησης τη λίπανση (LUB), την επισκευή (SVC), τη συντήρηση με βάση το χρόνο (TBM), την ανίχνεση κρυφής αστοχίας (HFD), και τη συντήρηση με βάση την κατάσταση (CBM).



Σχήμα 21. Το δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης για τον εξοπλισμό Ομάδας C.

4Γ. 4. Μελέτη Περίπτωσης

Οι καταγραφές χρήσης και συντήρησης συστήματος ελέγχου πετρελαιοπηγής σε λειτουργίες γεώτρησης συλλέχθηκαν από το συνεργείο γεώτρησης μιας εταιρίας πετρελαιοειδών στα κοιτάσματα της περιοχής Tarim. Αναλύθηκαν τα επίπεδα σημαντικότητας και οι μέθοδοι συντήρησης με το πλαίσιο λήψης αποφάσεων συντήρησης για τον εξοπλισμό γεώτρησης και παραγωγής. Αρχικά, καθορίστηκε ένα δέντρο ιεραρχίας του συστήματος ελέγχου της πετρελαιοπηγής αναλύοντας τον αντίστοιχο εξοπλισμό του, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 22**.



Σχήμα 22. Το δέντρο ιεραρχίας του συστήματος ελέγχου της πετρελαιοπηγής.

Για να υπολογιστεί το σχετικό επίπεδο σημαντικότητας των οκτώ δεικτών αξιολόγησης, οι καταγραφές λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού στο

σύστημα ελέγχου της πετρελαιοπηγής συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν από τη σχετική βάση δεδομένων. Έπειτα, η σύγκριση κατά ζεύγη μεταξύ των οκτώ δεικτών αξιολόγησης καταρτίθηκε από το μηχανικό και υπεύθυνο συντήρησης. Η βαθμολογία κάθε σύγκρισης κατά ζεύγη λήφθηκε αναφορικά με τον **Πίνακα 5**. Αφού βρέθηκαν οι βαθμολογίες, κατασκευάστηκε το μητρώο κρίσεων D με την εξίσωση (9) ως ακολούθως:

$$D=\begin{bmatrix} 1 & 6 & 7 & 7 & 8 & 8 & 9 & 9 \\ 1/6 & 1 & 7 & 5 & 6 & 6 & 7 & 7 \\ 1/7 & 1/7 & 1 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1/2 & 2 \\ 1/7 & 1/5 & 4 & 1 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 1/8 & 1/6 & 3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 2 \\ 1/8 & 1/6 & 3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/2 & 2 \\ 1/9 & 1/7 & 2 & 1/4 & 1/3 & 2 & 1 & 4 \\ 1/9 & 1/7 & 1/2 & 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

Εισάγοντας το μητρώο D στην εξίσωση (10) στο λογισμικό της Matlab, υπολογίστηκε η μέγιστη χαρακτηριστική τιμή l_{max} :

$$l_{max}=8.9204$$

Το ιδιοδιάνυσμα που σχετίζεται με τη μέγιστη ιδιοτιμή λήφθηκε από την εξίσωση (11) ως εξής:

$$W=\begin{pmatrix} 0.4696 & 0.2345 & 0.0289 & 0.0950 & 0.0627 & 0.0401 & 0.0458 & 0.0236 \end{pmatrix}$$

Και η συμβατότητα του μητρώου κρίσεων D επαληθεύθηκε με τη βοήθεια των εξισώσεων (12) και (13):

CI = 0.1315
CR = 0.0923<0.1

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι το μητρώο κρίσεων D που κατασκευάστηκε μέσω συγκρίσεων κατά ζεύγη για οκτώ δείκτες αξιολόγησης ικανοποιεί την απαίτηση συμβατότητας. Επομένως, καθορίστηκαν οι συντελεστές βαρύτητας και οι προτεραιότητες των οκτώ δεικτών αξιολόγησης για τον εξοπλισμό του συστήματος ελέγχου της πετρελαιοπηγής, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 15**.

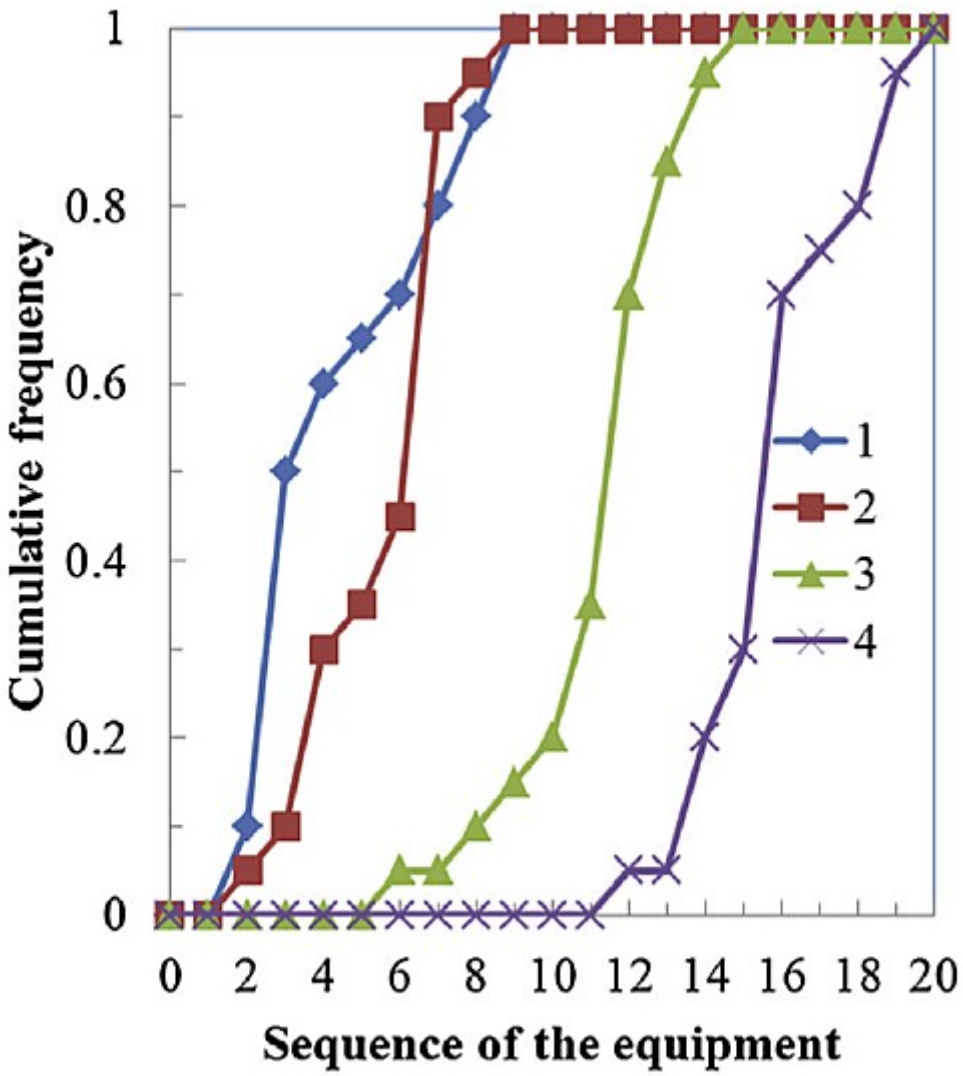
Πίνακας 15

Οι συντελεστές βαρύτητας και οι προτεραιότητες των οκτώ δεικτών αξιολόγησης.

S/N	Factor	Weight	Priority
1	S	0.4696	1
2	SF	0.2345	2
3	FR	0.0289	7
4	MC	0.0950	3
5	DL	0.0627	4
6	MA	0.0401	6
7	DT	0.0458	5
8	M	0.0236	8

Σύμφωνα με το λογικό σχηματικό διάγραμμα της προσομοίωσης Monte Carlo που φαίνεται στο **Σχήμα 18**, διενεργήθηκε ο υπολογισμός της προσομοίωσης προγραμματιστικά με τη χρήση του λογισμικού Matlab. Κατά την υπολογιστική διαδικασία με την προσομοίωση Monte Carlo, τα διαστήματα προσομοίωσης τέθηκαν ως N = 2.000, και προέκυψε το σύνολο δεδομένων που συμπεριλαμβάνει 2.000 ακολουθίες για ένα μοναδικό τεμάχιο εξοπλισμού. Έπειτα από μια σειρά υπολογισμών σε όλον τον εξοπλισμό ελέγχου της πετρελαιοπηγής, εφαρμόστηκε η στατιστική προσέγγιση για την επεξεργασία αυτών των δεδομένων για την ακολουθία του εξοπλισμού κατά την προσομοίωση.

Τελικά, το διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας της ακολουθίας για το επίπεδο σημαντικότητας του εξοπλισμού ελέγχου της πετρελαιοπηγής, συμπεριλαμβανομένων του Υδραυλικού Συσσωρευτή, της Υδραυλικής Αντλίας, των Φίλτρου Αναρρόφησης Πετρελαίου και Φίλτρου Επιστροφής Πετρελαίου, χαράχθηκε στο **Σχήμα 23**.



1-Υδραυλικός Συσσωρευτής, 2-Υδραυλική Αντλία, 3-Φίλτρο Αναρρόφησης Πετρελαίου, 4-Φίλτρο Επιστροφής Πετρελαίου

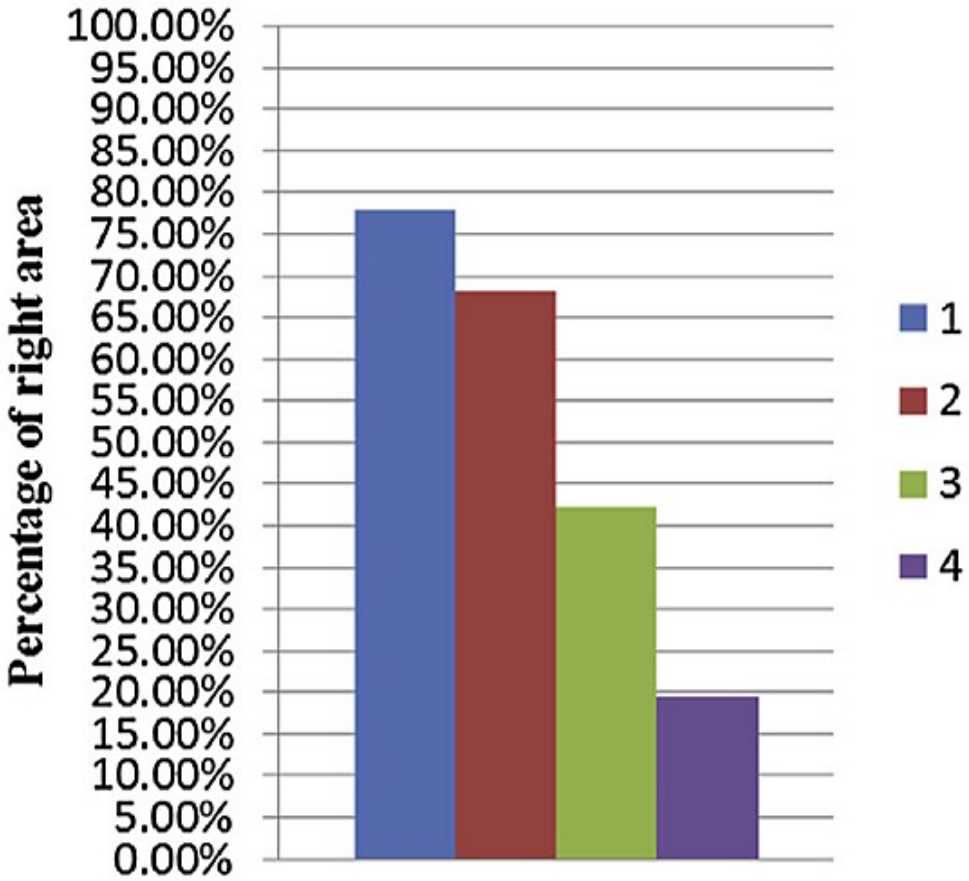
Σχήμα 23. Αθροιστικές συχνότητες της ακολουθίας του εξοπλισμού

Στο **Σχήμα 23**, η αθροιστική συχνότητα τόσο του Υδραυλικού Συσσωρευτή όσο και της Υδραυλικής Αντλίας φτάνει τη μονάδα όταν η ακολουθία του εξοπλισμού είναι στο “8”. Ωστόσο, η αθροιστική συχνότητα του Υδραυλικού Συσσωρευτή αυξάνεται πιο γρήγορα από εκείνη της Υδραυλικής Αντλίας πριν φτάσει την τιμή 0.8, κάτι το οποίο καταδεικνύει ότι το επίπεδο σημαντικότητας του Υδραυλικού Συσσωρευτή είναι υψηλότερο από αυτό της Υδραυλικής Αντλίας.

Η αθροιστική συχνότητα της Υδραυλικής Αντλίας παρουσιάζει μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης από εκείνες του Φίλτρου Αναρρόφησης Πετρελαίου και του Φίλτρου Επιστροφής Πετρελαίου. Συνεπώς, η ακολουθία του επιπέδου σημαντικότητας έχει ως εξής:

Υδραυλικός Συσσωρευτής, Υδραυλική Αντλία, Φίλτρο Αναρρόφησης Πετρελαίου και Φίλτρο Επιστροφής Πετρελαίου. Επιπρόσθετως, το ποσοστό του εμβαδού στη δεξιά

πλευρά κάθε καμπύλης αθριστικής συχνότητας μπορεί να ληφθεί βάσει του **Σχήματος 23**. Έπειτα οι λόγοι των εμβαδών τους δίνονται με τη μορφή ιστογραμμάτων στο **Σχήμα 24**.



1-Υδραυλικός Συσσωρευτής, 2-Υδραυλική Αντλία, 3-Φίλτρο Αναρρόφησης Πετρελαίου, 4-Φίλτρο Επιστροφής Πετρελαίου

Σχήμα 24. Ποσοστά εμβαδών του εξοπλισμού

Ο λόγος εμβαδών του Υδραυλικού Συσωρευτή είναι μεταξύ 65% και 100% στο **Σχήμα 24**, οπότε κατηγοριοποιείται ως εξοπλισμός Ομάδας C. Ο Υδραυλικός Συσσωρευτής θα πρέπει να υιοθετήσει ως στρατηγικές συντήρησης την ανίχνευση κρυφής αστοχίας (HFD) και τη συντήρηση βασισμένη στην κατάσταση (CBM) σύμφωνα με το δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης για τον εξοπλισμό Ομάδας C όπως φαίνεται στο **Σχήμα 21**. Η Υδραυλική Αντλία είναι επίσης εξοπλισμός Ομάδας C όπως συμπαιρένεται από το λόγο εμβαδών της καμπύλης της, ο οποίος είναι μεγαλύτερος από 65% στο **Σχήμα 24**.

Σύμφωνα με το δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης του **Σχήματος 21**, στην Υδραυλική Αντλία εφαρμόστηκαν οι στρατηγικές ανίχνευσης κρυφής αστοχίας (HFD) και συντήρησης βασισμένη στην κατάσταση (CBM). Το Φίλτρο

Αναρρόφησης Πετρελαίου ανήκει στον εξοπλισμό Ομάδας Β επειδή ο λόγος εμβαδών του βρίσκεται στο διάστημα 25% – 65%.

Από το δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης για τον εξοπλισμό Ομάδας Β του **Σχήματος 20**, το Φίλτρο Αναρρόφησης Πετρελαίου θα πρέπει να φροντίζεται κατά τις μεθόδους ανίχνευσης κρυφής αστοχίας (HFD) και διορθωτικής συντήρησης. Ο λόγος εμβαδών του Φίλτρου Επιστροφής Πετρελαίου είναι μικρότερος από 25%, επομένως είναι εξοπλισμός Ομάδας Α. Οι μέθοδοι συντήρησης που πρέπει να ακολουθηθούν είναι η επισκευή (SVC) και η διορθωτική συντήρηση, αναφορικά με το δέντρο λήψης αποφάσεων συντήρησης του **Σχήματος 19**.

Τελικά, αναπτύχθηκαν και εκτελέστηκαν η στρατηγική και η μέθοδος συντήρησης για τον Υδραυλικό Συσσωρευτή, την Υδραυλική Αντλία,και τα Φίλτρα Αναρρόφησης και Επιστροφής Πετρελαίου. Από τις επισκοπήσεις των ειδικών και των μηχανικών συντήρησης για τις μεθόδους συντήρησης του παραπάνω εξοπλισμού, το πλαίσιο της λήψης αποφάσεων για τον εξοπλισμό γεώτρησης και παραγωγής πετρελαίου θεωρείται εύλογο και αποδοτικό.

Δ. Ανάπτυξη και εφαρμογή συστήματος λήψης αποφάσεων συντήρησης για στόλο αεροσκαφών.

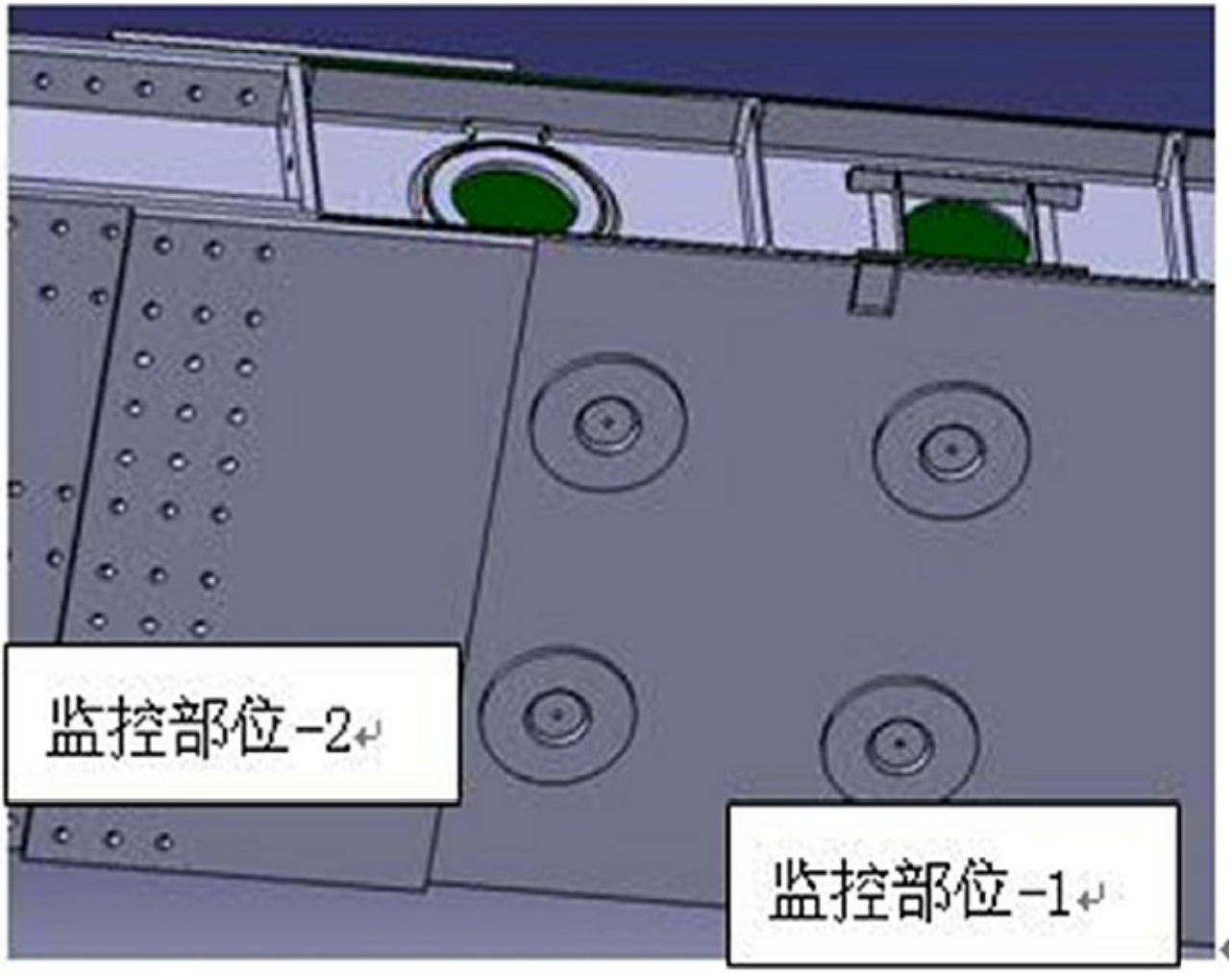
Στην εργασία των Lin et al. (2017) εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατή η καθιέρωση μίας νέας μεθόδου αξιολόγησης αξιοπιστίας, κατά την οποία συνδυάζονται η γραμμική αθροιστική φθορά της μεθόδου διάρκειας ζωής υπό τάση και το μοντέλο διάγνωσης ρωγμής της μεθόδου πιθανότητας ανοχής σε βλάβες για πλήρη χρήση της πληροφορίας φόρτισης σε πραγματικό χρόνο που συλλέγεται από Συστήματα Παρακολούθησης Ευρωστίας και Χρήσης (Health and Usage Monitoring Systems (HUMS)). Τα HUMS κάνουν χρήση εννοιών από τη συντήρηση υπό προϋποθέσεις για τη μείωση απρογραμμάτιστων αστοχιών και κοστών συντήρησης.

4Δ. 1. Επεξεργασία πληροφοριών κατάστασης σε πραγματικό χρόνο

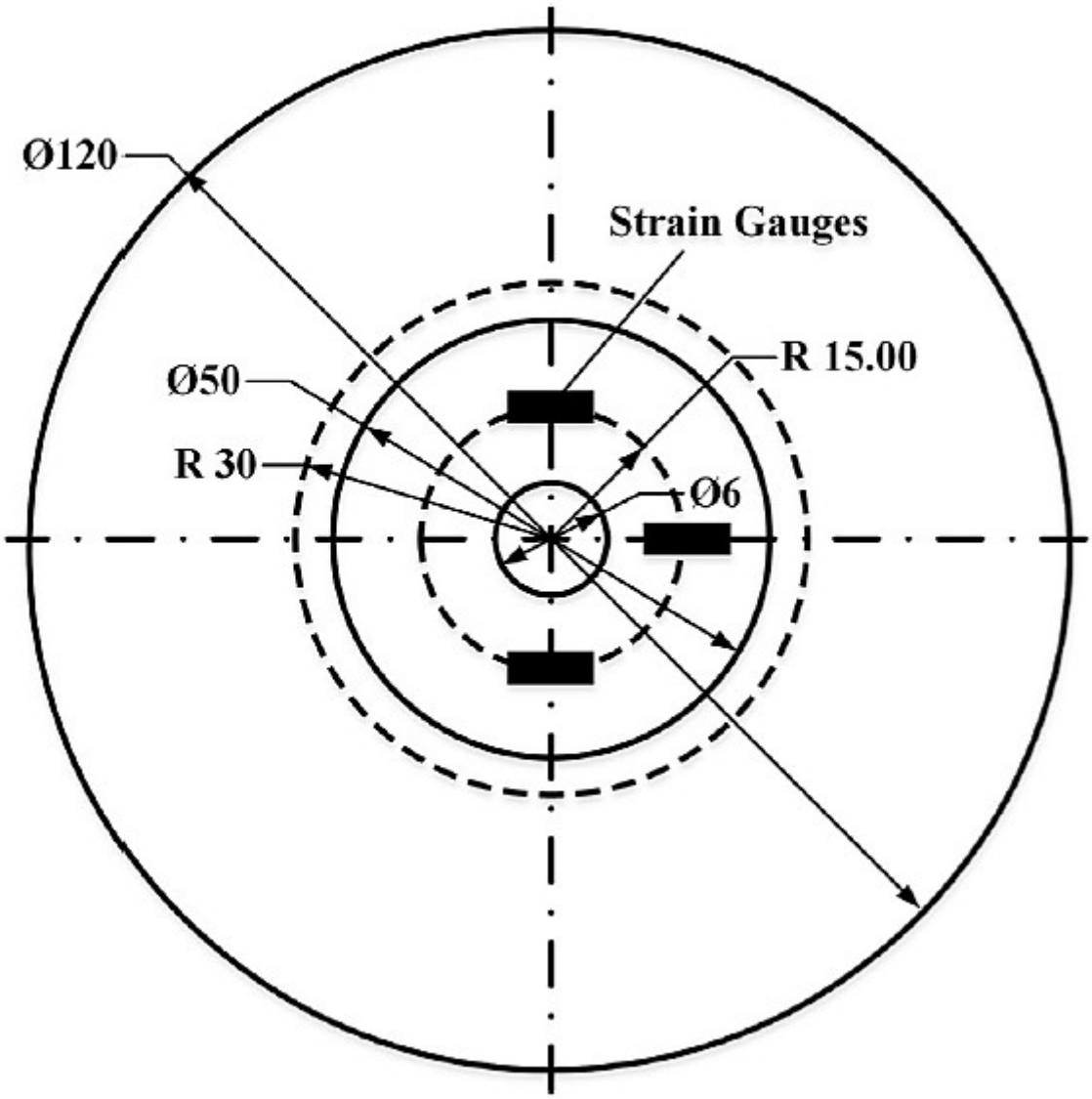
4Δ. 1. 1. Περιγραφή του προβλήματος

Το **Σχήμα 25** δείχνει δύο τομές του πλαισίου φτερού το οποίο είναι μια τυπική δομή αεροσκάφους όπου έχουν προσαρμοστεί συστήματα παρακολούθησης κόπωσης, όπως υπόκεινται στα τυχαία δυναμικά φορτία κατά τη διάρκεια πτήσεων. Οι συγκεκριμένες τοποθεσίες των επιμηκυνσιόμετρων (strain gauge) για τις δύο τομές φαίνονται στο **Σχήμα 26**.

Αφού η συλλογή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες είναι δεδομένα παραμόρφωσης, χρειάζεται μια διαδικασία μετατροπής των δεδομένων παραμόρφωσης σε πληροφορία φόρτισης. Αν χρησιμοποιηθεί η κλασική μηχανική για την ολοκλήρωση την μετατροπής του σήματος, θα υπεισέλθει υπολογιστικό σφάλμα, επειδή υπάρχει συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων γύρω από την κεντρική οπή του πλαισίου φτερού, καθώς επίσης και δυσκολία στον καθορισμό ακριβούς μηχανικού μοντέλου. Ως συνέπεια αυτού, χρησιμοποιείται τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος (BP-ANN) τη διαδικασία μετατροπής του σήματος.



Σχήμα 25. Τομές παρακολούθησης του πλαισίου φτερού του αεροσκάφους.



Σχήμα 26. Οι περιοχές τοποθέτησης των επιμηκυνσιόμετρων.

4Δ. 2. Θεωρία Νευρωνικού Δικτύου Ανάστροφης Μετάδοσης Σφάλματος

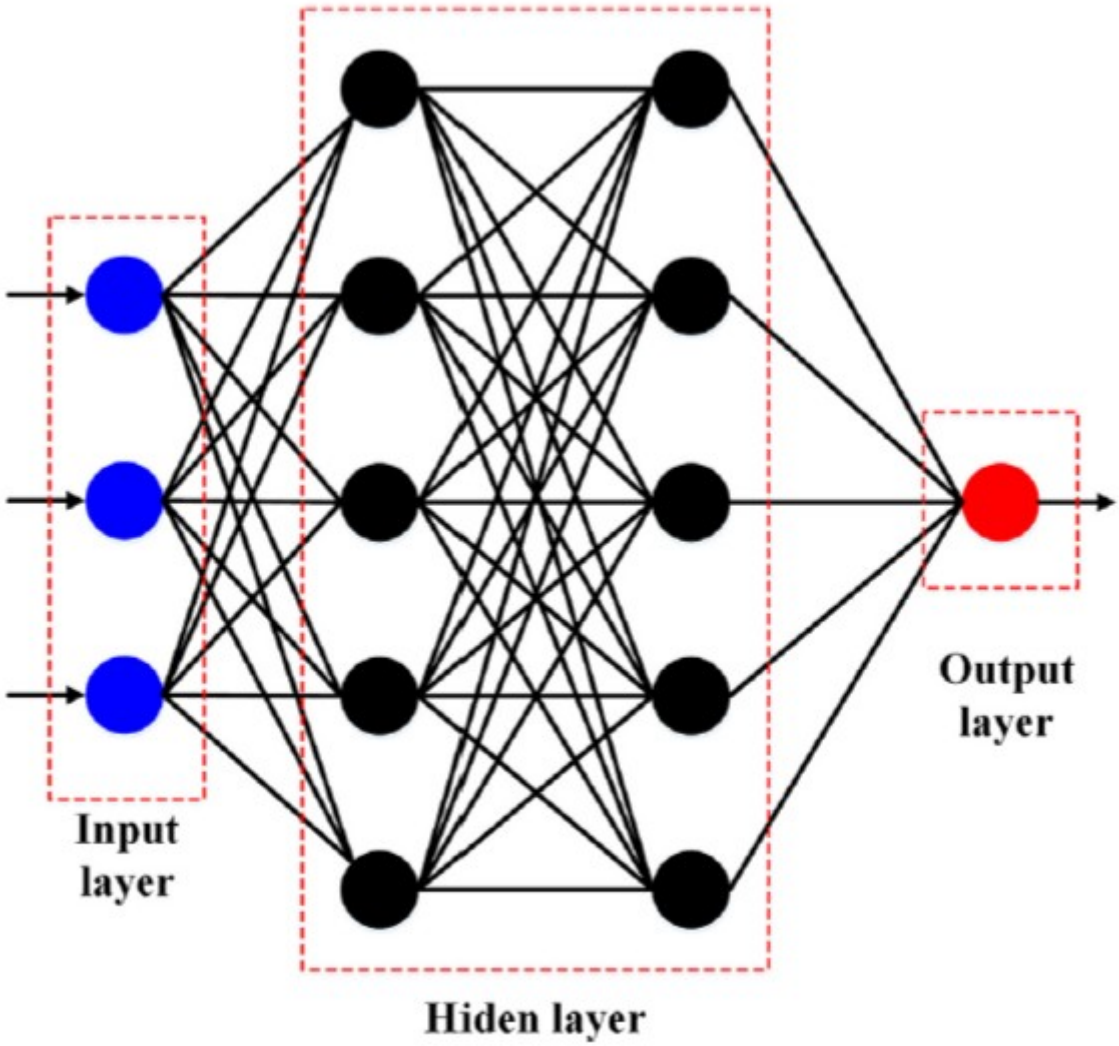
4Δ. 2. 1. Η δομή του Νευρωνικού δικτύου

Το νευρωνικό δίκτυο ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος νευρωνικού δικτύου σε εφαρμογή. Συμπεριλαμβάνει το επίπεδο εισόδου, τα κρυφά επίπεδα, και το επίπεδο εξόδου. Ένα νευρωνικό δίκτυο ανάστροφης μετάδοσης με δύο κρυφά επίπεδα φαίνεται στο **Σχήμα 27**. Κάθε κυψέλη του δικτύου είναι ένας νευρώνας. Για τα επίπεδα εισόδου, η είσοδος του νευρώνα είναι η έξοδός του. Για τα κρυφά επίπεδα και τα επίπεδα εισόδου η συνολική είσοδος του j-οστού νευρώνα είναι:

$$s_j = \sum_{i=1}^{n} w_{ji} y_i - \theta_j \tag{14}$$

όπου το i αναφέρεται στο νευρώνα του προηγούμενου δικτύου που συνδέεται με τον j-οστό νευρώνα, θ_j είναι το κατώφλι του j-οστού νευρώνα, και w_{ij} είναι ο συντελεστής βαρύτητας που συνδέει τον i-οστό και τον j-οστό νευρώνα. Ως συνάρτηση ενεργοποίησης του δικτύου χρησιμοποιείται η σιγμοειδής καμπύλη, και η συνολική έξοδος του j-οστού νευρώνα είναι:

$$y_i = f(s_j) = \frac{1}{1+e^{-s_j}} \tag{15}$$



Σχήμα 27. Η δομή νευρωνικού δικτύου ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος με δύο κρυφά επίπεδα.

4Δ. 2. 2. Αλγόριθμος μάθησης ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος

Το νευρωνικό δίκτυο ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος είναι ένα τυπικό είδος δικτύου με τροφοδότηση προς τα εμπρός, η διαδικασία μάθησης του οποίου μπορεί να διαχωριστεί σε δύο φάσεις, την προσθιοδρομική φάση και την οπισθοδρομική φάση. Η βασική θεωρία του BP-ANN είναι να προσαρμόσει τους συντελεστές βαρύτητας και τα κατώφλια με στόχο την ελαχιστοποίηση της παραμέτρου σφάλματος πρόβλεψης ως εξής:

$$E=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2} \qquad (16)$$

όπου n είναι το πλήθος των νευρώνων στο επίπεδο εξόδου, x και y είναι αντίστοιχα η πραγματική τιμή της εξόδου και η αναμενόμενη τιμή του επιπέδου εξόδου, και E είναι το σφάλμα πρόβλεψης. Η διαδικασία μάθησης τερματίζεται όταν το E είναι μικρότερο από μία προκαθορισμένη τιμή ε. Οι βασικοί κανόνες ενημέρωσης των συντελεστών βαρύτητας και των κατωφλιών από το επίπεδο εξόδου προς ένα κρυφό επίπεδο είναι:

$$w_{jk}(t+1)=w_{jk}(t)+\eta E_k o_j \qquad (17)$$

$$\theta_{jk}(t+1)=\theta_{jk}(t)+\eta E_k o_j \qquad (18)$$

όπου το t αναφέρεται στην t-οστή επανάληψη, w_{kj} είναι η τιμή του συντελεστή βαρύτητας του j-οστού νευρώνα στο κρυφό επίπεδο προς τον k-οστό νευρώνα στο επίπεδο εξόδου, E_k είναι το σφάλμα του k-οστού νευρώνα του επιπέδου εξόδου, o_j είναι η τιμή εξόδου του j-οστού νευρώνα στο κρυφό επίπεδο και η είναι ο ρυθμός μάθησης. Οι παραπάνω κανόνες ενημέρωσης μπορούν να επεκταθούν στους συντελεστές βαρύτητας και στα κατώφλια από το επίπεδα εισόδου στο κρυφό επίπεδο. Η διαδικασία του BP-ANN είναι η εξής:

(α) Αρχικοποίηση του νευρωνικού δικτύου.

(β) Κάθε δομικό μοτίβο ενσωματώνεται ως εξής:
1) Υπολογίζονται τα σφάλματα πρόβλεψης του επιπέδου εξόδου και των κρυφών επιπέδων.
2) Προσαρμόζονται οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας και των κατωφλιών του επιπέδου εξόδου και των κρυφών επιπέδων.

(γ) Εάν ικανοποιούνται τα κριτήρια διακοπής, τότε διακόπτεται ο αλγόριθμος και η έξοδος είναι το ΕΡ. Διαφορετικά, επιστροφή στο (β).

4Δ. 2. 3. Εφαρμογή στη μελέτη περίπτωσης

Καθορίζεται το νευρωνικό δίκτυο για την ολοκλήρωση της μετατροπής του σήματος. Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης των κρυφών επιπέδων και του επιπέδου εξόδου είναι οι συναρτήσεις Logsig και Purelin αντίστοιχα, και η δομή του BP-ANN φαίνεται στο **Σχήμα 27**. Ο **Πίνακας 16** δείχνει 25 δεδομένα μικρο-παραμορφώσεων και τα αντίστοιχα δεδομένα τάσεων που προέκυψαν από μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Τέσσερα δεδομένα μικρο-παραμορφώσεων (τα 3, 6, 12 και 18) επιλέχθηκαν ως δοκιμαστικά δεδομένα και τα υπόλοιπα 25 είναι τα δεδομένα εκπαίδευσης. Το αποτέλεσμα πρόβλεψης του BP-ANN είναι ορατό στον **Πίνακα 17**. Το αποτέλεσμα πρόβλεψης καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα και την εφαρμοσιμότητα του BP-ANN που καθορίστηκε. Βάσει του BP-ANN τα δεδομένα μικρο-παραμόρφωσης μετατράπηκαν σε δεδομένα φόρτισης.

Πίνακας 16

25 δεδομένα μικροπαραμόρφωσης.

No.	Strain gauge 1/$\mu\varepsilon$	Strain gauge 2/$\mu\varepsilon$	Strain gauge 3/$\mu\varepsilon$	Stress/GPa
1	2.84	2.53	−44.1	198
2	5.5	4.91	−85.4	384
3	**8.26**	**7.36**	**−128**	**577**
4	11.0	9.81	−171	769
5	13.8	12.3	−213	961
6	**16.5**	**14.7**	**−256**	**1150**
7	19.3	17.2	−299	1350
8	25.2	21.3	−341	1540
9	2.75	2.45	−42.7	192
10	5.36	4.59	−76.9	369
11	8.11	7.04	−120	561
12	**10.9**	**9.49**	**−162**	**754**
13	13.6	11.9	−205	946
14	16.4	14.4	−248	1140
15	18.8	16.2	−290	1330
16	24.1	20.9	−333	1520
17	2.46	2.22	−25.7	162
18	**5.43**	**4.75**	**−81.1**	**377**
19	7.97	6.27	−111	546
20	10.7	9.17	−154	739
21	13.5	11.6	−196	931
22	16.2	14.1	−239	1120
23	19	16.5	−282	1320
24	23.4	19	−325	1510
25	4.27	5.21	−68.4	354

Πίνακας 17

Τα αποτελέσματα πρόβλεψης του νευρωνικού δικτύου.

No.	Observed value/GPa	BP-ANN/GPa	Prediction error
3	577	575.2	0.31%
6	1150	1145.5	0.39%
12	754	755.8	0.23%
18	377	376.3	0.18%

4Δ. 3. Μέθοδος Αξιολόγησης Αξιοπιστίας Βασισμένη σε Πληροφορία Φόρτισης Πραγματικού Χρόνου

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, τα αεροσκάφη έχουν εξοπλιστεί με εναέρια συστήματα παρακολούθησης κόπωσης. Αυτά τα συστήματα τυπικά συλλέγουν δεδομένα κόπωσης που χρησιμοποιούνται απλά για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής υπό τάση ή το διάστημα επιθεώρησης του πλαισίου του αεροσκάφους, όμως, η ακριβής τιμή αξιοπιστίας του πλαισίου δεν μπορεί να καθοριστεί σύμφωνα με τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν.

Οι μέθοδοι πιθανότητας ανοχής σε βλάβες (PDT) δεν αξιοποιούν πλήρως τις πληροφορίες φόρτισης που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο για την αξιολόγηση αξιοπιστίας, παρά το γεγονός ότι το ζήτημα της υψηλής αξιοπιστίας μπορεί να αντιμετωπιστεί με αξιοποίηση των δεδομένων φόρτισης. Επομένως, είναι αναγκαία η κατασκευή μιας σύνδεσης μεταξύ της μεθόδου διάρκειας ζωής υπό τάση και της μεθόδου PDT, κατά την οποία συνδυάζονται η ικανότητα συλλογής πληροφορίας φόρτισης της μεθόδου διάρκειας ζωής υπό τάση και η ικανότητα υπολογισμού αξιοπιστίας της μεθόδου PDT.

4Δ. 3. 1. Μέθοδος Τάσης – Διάρκειας Ζωής

Η μέθοδος τάσης – διάρκειας ζωής συσχετίζει με άμεσο τρόπο τα φορτία κατά τη χρήση με μια ασφαλή διάρκεια ζωής λειτουργίας βάσει γραμμικών FCD (αθροιστικές βλάβες λόγω κόπωσης). Σύμφωνα με τις γραμμικές FCD, κάθε κύκλος φόρτισης θεωρείται ότι προκαλεί ένα συγκεκριμένο ποσό φθοράς το οποίο μπορεί να αθροιστεί γραμμικά και η δομή αστοχεί όταν η FDC φτάνει την τιμή 1. Η γραμμική FCD περιγράφεται από την εξίσωση:

$$D=\sum_i dam_i \tag{19}$$

$$dam_i=\frac{n_i}{N_i} \tag{20}$$

όπου n_i (i = 1, 2,..., k) είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης που εφαρμόζεται τάση S_i . N_i είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης έως την αστοχία υπό τάση S_i , dam_i είναι η τιμή της FCD εξαιτίας των κύκλων φόρτισης n_i . Η αστοχία πραγματοποιείται όταν D ≥1.

4Δ. 3. 2. Μέθοδος Πιθανότητας Ανοχής σε Βλάβες (Probability-Damage-Tolerance ή PDT)

Το μοντέλο υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας που βασίζεται στο μοντέλο εξάπλωσης ρωγμής της μεθόδου PDT φαίνεται στο **Σχήμα 28** και ορίζεται στην εξίσωση (8):

$$PoF(t)=\iint f_{\alpha}(\alpha|t)f_{a_c}(a_c)\,da\,da_c \qquad (21)$$

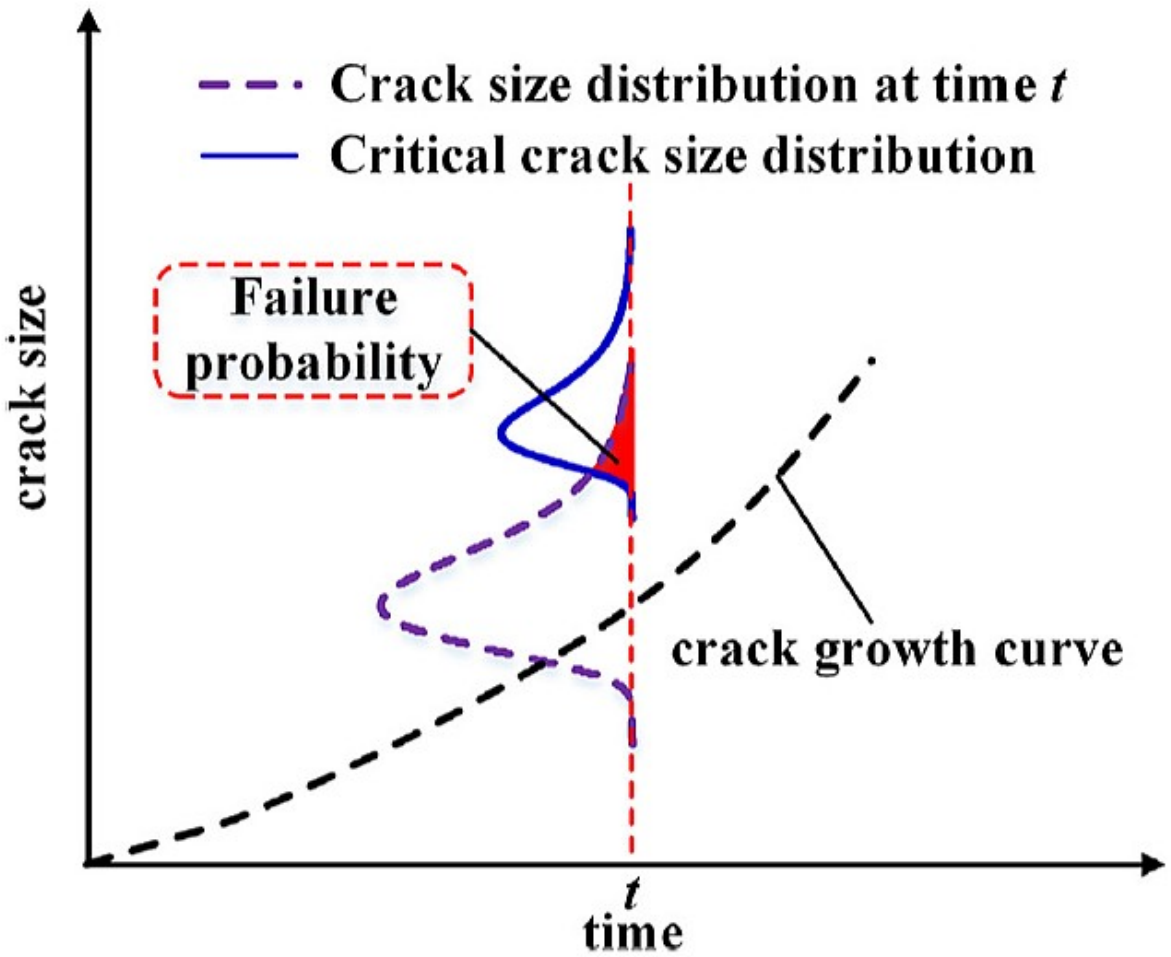
όπου $f_{a_c}(a_c)$ είναι η κατανομή του κρίσιμου μεγέθους ρωγμής, a_c . $f_a(a|t)$ είναι η κατανομή μεγέθους ρωγμής, α, σε χρόνο t.

Η ανεξάρτητη μεταβλητή T μπορεί να θεωρηθεί ως είτε κύκλοι φόρτισης, είτε ώρες πτήσης. Η $f_a(a|t)$ υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αρχικά πραγματικά ελαττώματα, α_0 , τη χρονική στιγμή μηδέν και εξελίσσοντάς τα βάσει ενός στοχαστικού μοντέλου ανάπτυξης ρωγμής λόγω κόπωσης. Από τα πιθανολογικά και στοχαστικά μοντέλα που έχουν προταθεί επιλέχθηκε η παρακάτω στοχαστική μοντελοποίηση της ανάπτυξης ρωγμής από κόπωση των Yang και Manning μετά από επιθεωρήσεις μετάδοσης ρωγμής σε οπές στερέωσης αεροσκαφών υπό φασματική φόρτιση:

$$\frac{d\alpha(t)}{dt}=X(t)Q[a(t)]^b \qquad (22)$$

όπου X(t) μία στατική τυχαία διαδικασία της οποίας ο λογάριθμος ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή τη μονάδα, Q και b σταθερές που παίρνουν την τιμή τους από την παρατήρηση της εξάπλωσης της ρωγμής. Σύμφωνα με τους Yang και Manning, η δομή πιθανότητας της στοχαστικής διαδικασίας εξάπλωσης της ρωγμής λόγω κόπωσης μπορεί να βρεθεί αναλυτικά. Η $f_a(a|t)$ βρίσκεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση (22) και περγράφεται ως εξής:

$$f_a(a|t)=[(1-b)XQ(t)+a_0^{-b+1}]^{b-1} \qquad (23)$$



Σχήμα 28. Σχηματική αναπράσταση του μοντέλου ανάπτυξης ρωγμής.

4Δ. 3. 3. Αξιολόγηση αξιοπιστίας

Το πλήθος των κύκλων φόρτισης n_{ij} κατά τους οποίους εφαρμόζεται τάση S_{ij} κατά την i-οστή πτήση μπορούν να βρεθούν από τα συστήματα παρακολούθησης κόπωσης, όπου j είναι ο αριθμός των διαφόρων τάσεων κατά την i-οστή πτήση και t είναι ο χρόνος πτήσης της i-οστής πτήσης. Τότε ο συνολικός χρόνος πτήσης είναι $t=\sum_i t_i$ και ο συνολικός αρθμός κύκλων φόρτισης είναι $n=\sum_i \sum_j n_{ij}$. Σαφώς, υπάρχει μια σχέση αντιστοιχίας ανάμεσα στα t και n. Η $f_a(a|t)$ μετασχηματίζεται στην $f_a(a|n)$. Σύμφωνα με τη μέθοδο τάσης – διάρκειας ζωής, λαμβάνεται η επόμενη σχέση:

$$dam=\sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \qquad (24)$$

όπου N_{ij} είναι το πλήθος των κύκλων φόρτισης έως την αστοχία με τάση S_{ij} . Είναι προφανές ότι υπάρχει σχέση μεταξύ dam και n, ή αλλιώς, κάθε ολικός χρόνος πτήσης t αντιστοιχεί σε ένα ολικό αριθμό κύκλων φόρτισης n και κάθε κύκλος φόρτισης n αντιστοιχεί σε μία FCD dam. Αντιστοίχως, λαμβάνεται η εξίσωση (25):

$$f_a(a|dam) \simeq f_a(a|t) \tag{25}$$

Τελικά, εισάγοντας στην εξίσωση (25) στην εξίσωση (21), λαμβάνεται η εξίσωση (26):

$$\mathrm{PoF}(\mathrm{dam}) = \iint \mathrm{f}_{\alpha}(\alpha|\mathrm{dam})\mathrm{f}_{\alpha_c}(\alpha_c)\,\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\alpha_c \tag{26}$$

Από την εξίσωση (26), εάν μπορεί να ληφθεί η κατανομή μεγέθους της ρωγμής ως συνάρτηση της FCD dam (εξίσωση (17)), καταρτίζεται μία νέα μέθοδος αξιολόγηση αξιοπιστίας βάσισμένη σε πληροφορίες πραγματικού χρόνου. Θεωρείται ότι η κατανομή του μεγέθους ρωγμής σε συγκεκριμένους κύκλους φόρτισης είναι πιθανότερο να ακολουθεί λογαριθμική κανονική κατανομή ως εξής:

$$\mathrm{f}_{\alpha}(\alpha|\mathrm{n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\alpha\sigma(\mathrm{n})}\exp\left(\left(\frac{\ln\alpha - \mathrm{u}(\mathrm{n})}{\sigma(\mathrm{n})}\right)^2\right) \tag{27}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (25), φαίνεται ότι η κατανομή μεγέθους ρωγμής στην FCD dam γράφεται ως εξής:

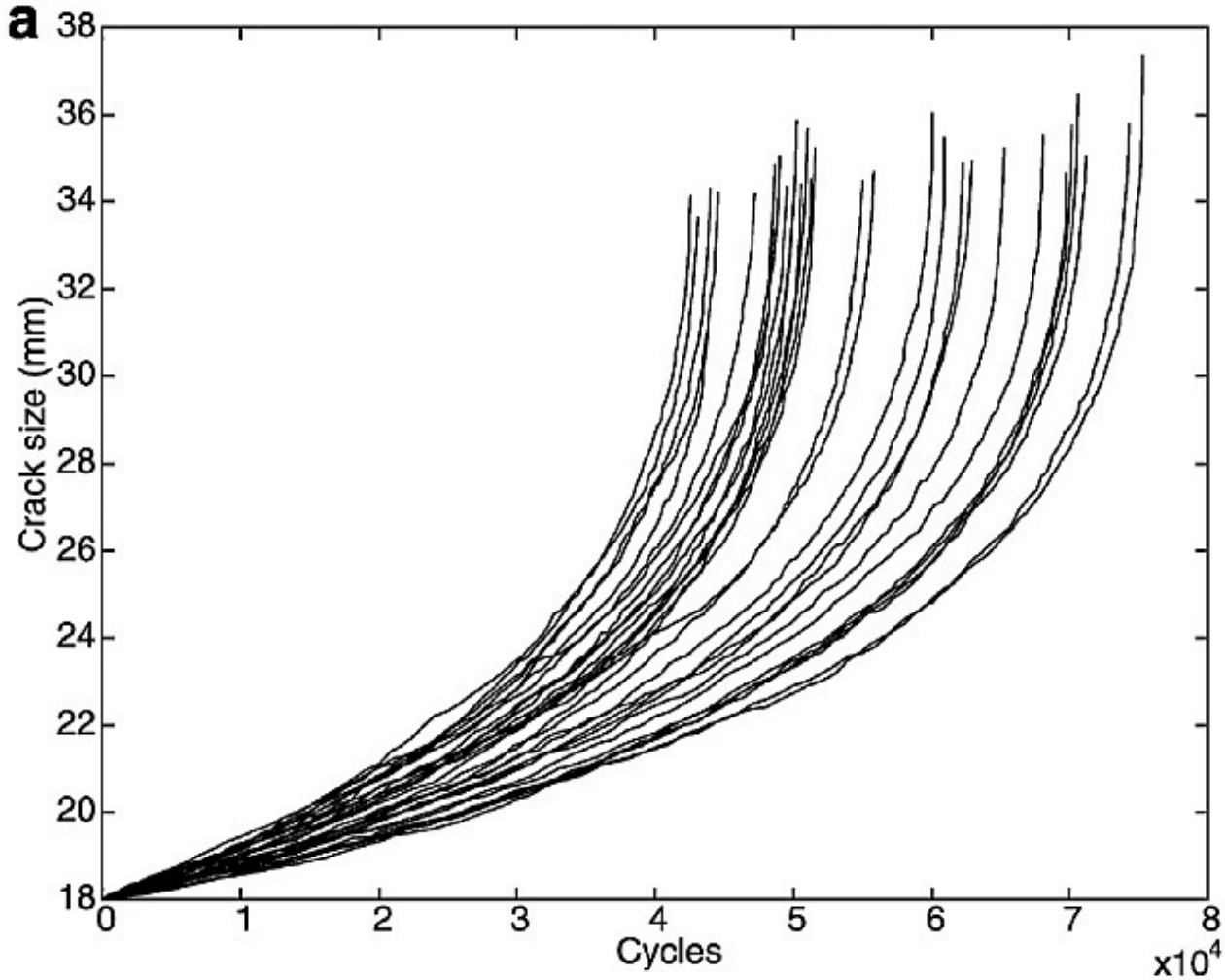
$$\mathrm{f}_{\alpha}(\alpha|\mathrm{dam}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\alpha\sigma(\mathrm{dam})}\exp\left(\left(\frac{\ln\alpha - \mathrm{u}(\mathrm{dam})}{\sigma(\mathrm{dam})}\right)^2\right) \tag{28}$$

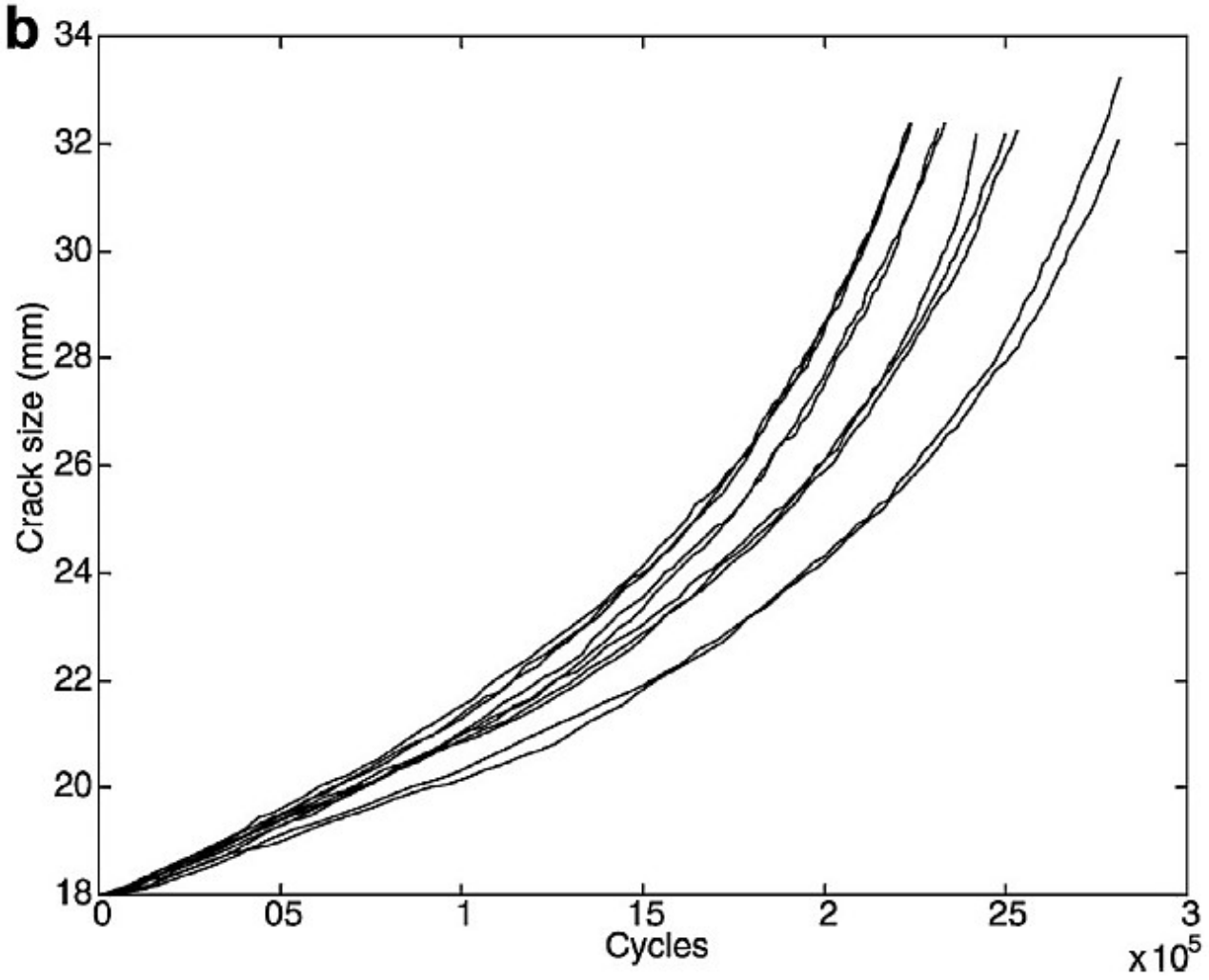
Εάν οι u (dam) και σ (dam) ορίζονται, τότε λαμβάνεται η πιθανότητα αστοχίας της δομής στην dam. Για να κατασκευαστούν τα δύο μοντέλα, u (dam) and σ (dam), είναι αναγκαία η ανάλυση των δεδομένων ανάπτυξης της ρωγμής από την οπτική της στατιστικής.

4Δ. 3. 4. Δεδομένα ανάπτυξης ρωγμής

Χρησιμοποιήθηκαν δύο σύνολα δεδομένων ανάπτυξης ρωγμής φόρτισης σταθερού πλάτους τα οποία είναι τα αποτελέσματα προφασικής έρευνας δομικής αξιοπιστίας αεροσκαφών. Το υλικό του πειράματος είναι κράμα αλουμινίου 2024-T351 το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή αεροσκαφών.

Το πρώτο σύνολο, με όνομα CA1 (constant-amplitude loading set 1), συνίσταται από 30 δείγματα. Αυτά υπέστησαν έλεγχο υπό ημιτονοειδές φορτίο με $p_{peak}=4.5\,kN$ και $p_{trough}=0.9\,kN$, ή λόγο τάσεων, $R=\frac{p_{trough}}{p_{peak}}=0.2$, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τάσεις που ταλαντώνονται ανάμεσα σε 14.08 MPa και 70.41 MPa. Το δεύτερο σύνολο συνίσταται από 10 δείγματα και έχει όνομα CA2. Δέχεται φορτίο με $p_{peak}=6.118$ και $p_{trough}=3.882$ kN, ή R = 0.63. Οι καμπύλες που δηλώνουν την εξέλιξη των ρωγμών λόγω κόπωσης για τα στοιχεία του πειράματος φαίνονται στο **Σχήμα 29**.





Σχήμα 29. Εμπειρικές καμπύλες ανάπτυξης ρωγμής για κάθε σύνολο δεδομένων **a** για το CA1 και **b** για το CA2.

4Δ. 3. 5. Μοντελοποίηση των u (dam) and σ (dam)

α) Μοντελοποίηση της u (dam)

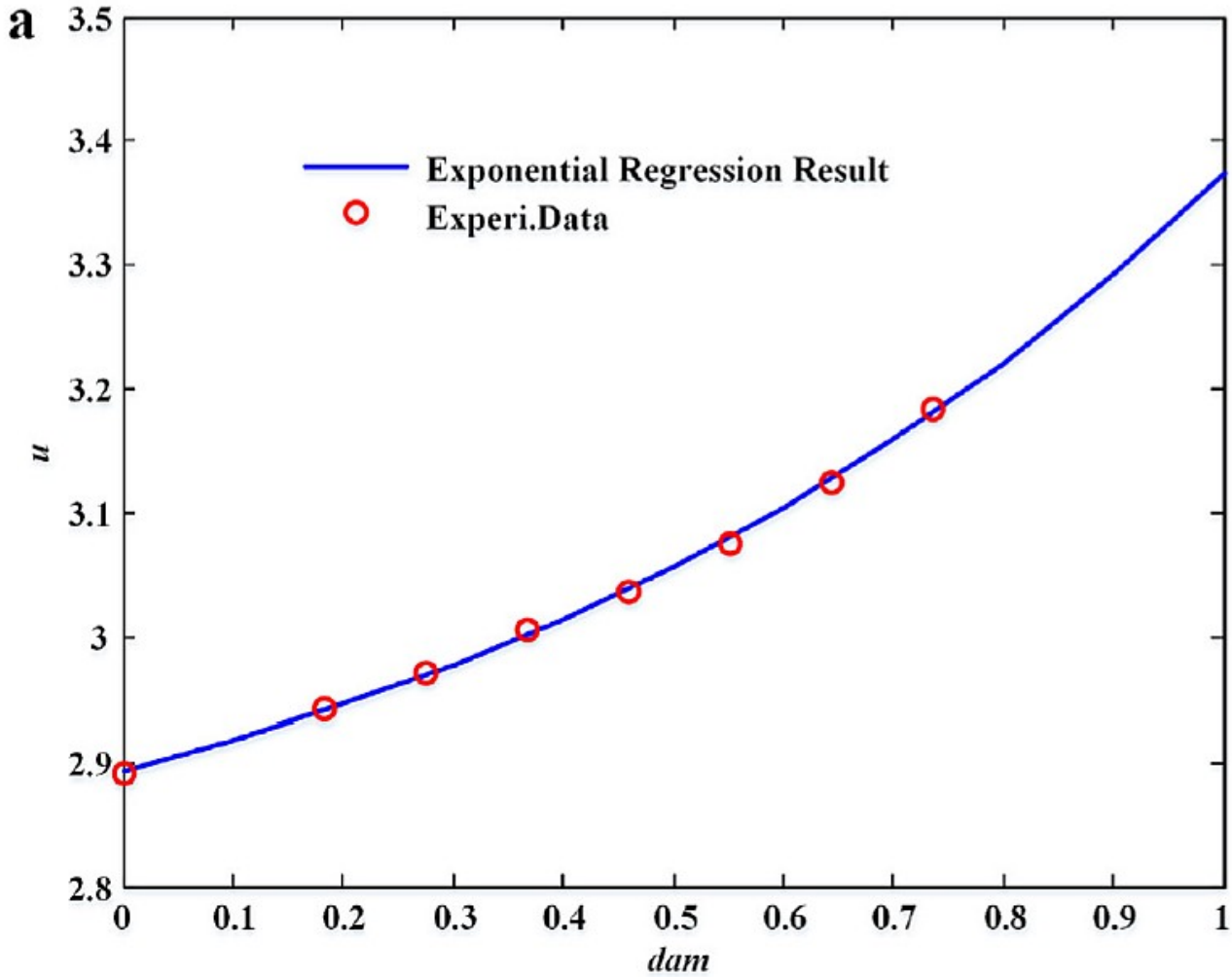
Οι μέσοι κύκλοι φόρτισης στην αστοχία υπολογίζονται ως ο μέσος όρος των κύκλων φόρτισης αστοχίας όλων των δειγμάτων, και τα αποτελέσματα είναι $N_{CA1}=54,356$ και $N_{CA2}=230,645$. Τα στατιστικά αποτελέσματα του μέσου όρου (u) της λογαριθμικής κανονικής κατανομής πιθανότητας του μεγέθους ρωγμής σε διάφορα dam, για τα CA1 και CA2 φαίνονται στον **Πίνακα 18**.

Βάσει της ανάλυσης των δεδομένων που φαίνονται στον **Πίνακα 18**, η τάση της u ως συνάρτηση της dam περιγράφεται από μοντέλο εκθετικής παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα παλινδρόμησης για τα CA1 και CA2 φαίνονται στα **Σχήματα 30α** και **30β**, αντίστοιχα. Από το **Σχήμα 30**, είναι ξεκάθαρο ότι το εκθετικό μοντέλο είναι επαρκές για την περιγραφή της σχέσης u (dam).

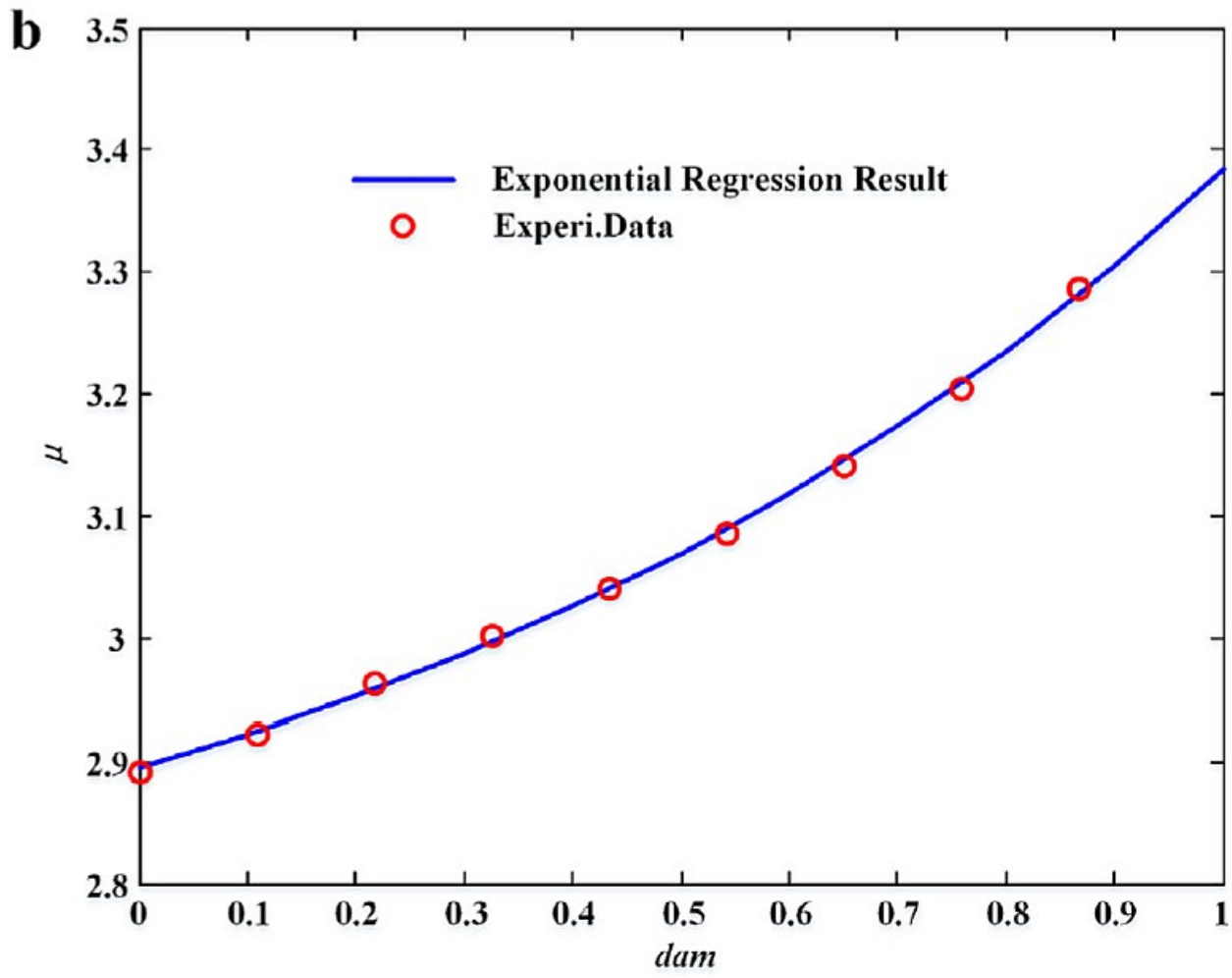
Πίνακας 18

Οι τιμές των u για κάθε τιμή των dam.

dam	0.1840	0.2760	0.3679	0.4599	0.5519	0.6439	0.7359
μ	2.9424	2.9718	3.0055	3.0373	3.0753	3.1253	3.1831
dam	0.1084	0.2168	0.3252	0.4336	0.5420	0.6504	0.8671
μ	2.9224	2.9630	3.0006	3.0413	3.0858	3.1409	3.2859



Σχήμα 30a. Αποτελέσματα παλινδρόμησης της u για το σύνολο δεδομένων CA1.



Σχήμα 30b. Αποτελέσματα παλινδρόμησης της u για το σύνολο δεδομένων CA2.

β) Μοντελοποίηση της σ (dam)

Η τυπική απόκλιση (σ) της λογαριθμικής κανονικής κατανομής πιθανότητας του μεγέθους ρωγμής σε διαφορετικά dam για τα CA1 και CA2 φαίνονται στον **Πίνακα 19**. Η εκτίμηση της τάσης της τυπικής απόκλισης ως συνάρτηση του dam πραγματοποιείται με το εκθετικό μοντέλο παλινδρόμησης σύμφωνα με τα δεδομένα που φαίνονται στον **Πίνακα 4**.

Πίνακας 19

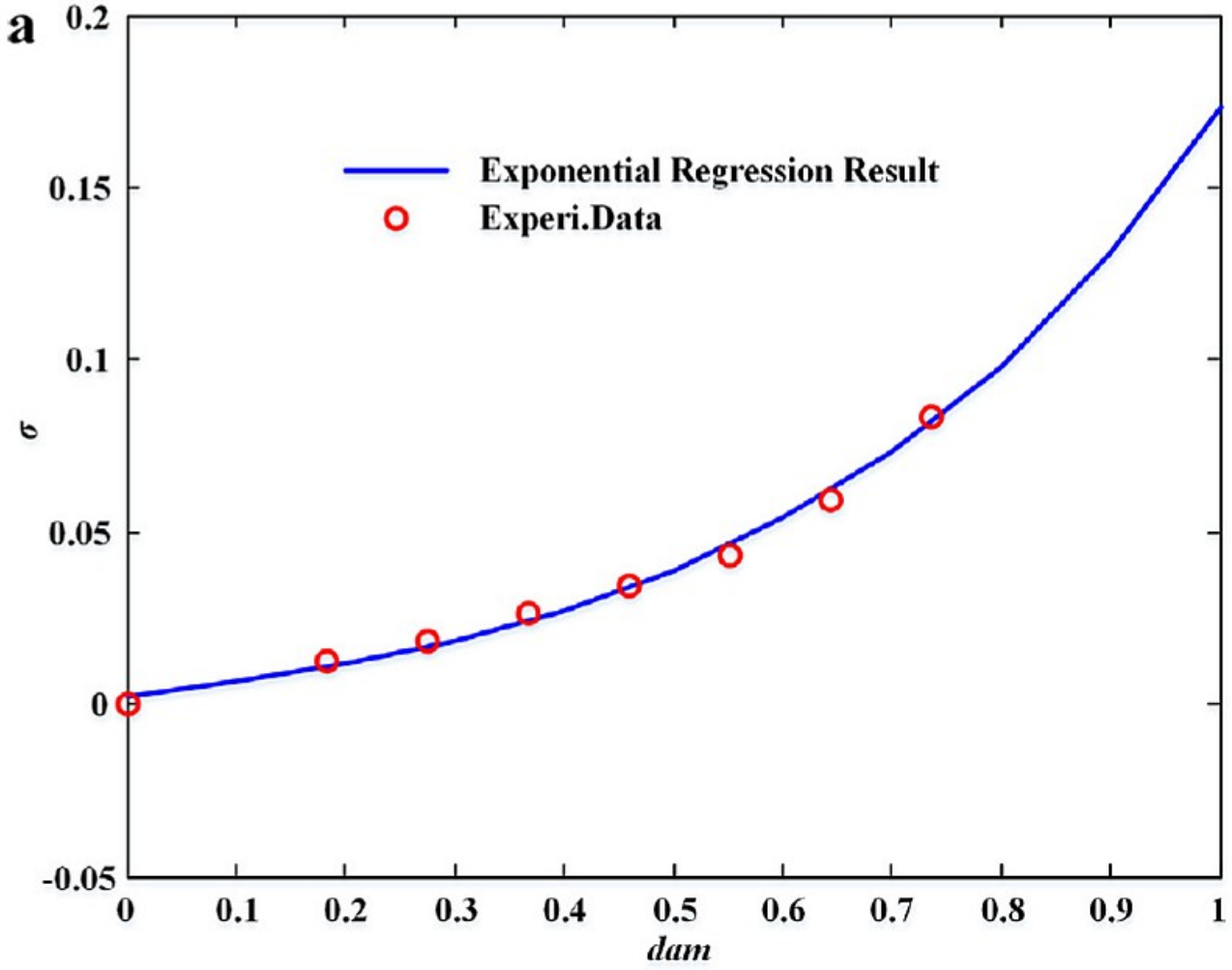
Η *σ* για διαφορετικές dam.

CA1	*dam*	0.1840	0.2760	0.3679	0.4599	0.5519	0.6439	0.7359
	σ	0.0122	0.0187	0.0261	0.0346	0.0434	0.0592	0.0836
CA2	*dam*	0.1084	0.2168	0.3252	0.4336	0.5420	0.6504	0.8671
	σ	0.0055	0.0093	0.0129	0.0196	0.0270	0.0339	0.0437

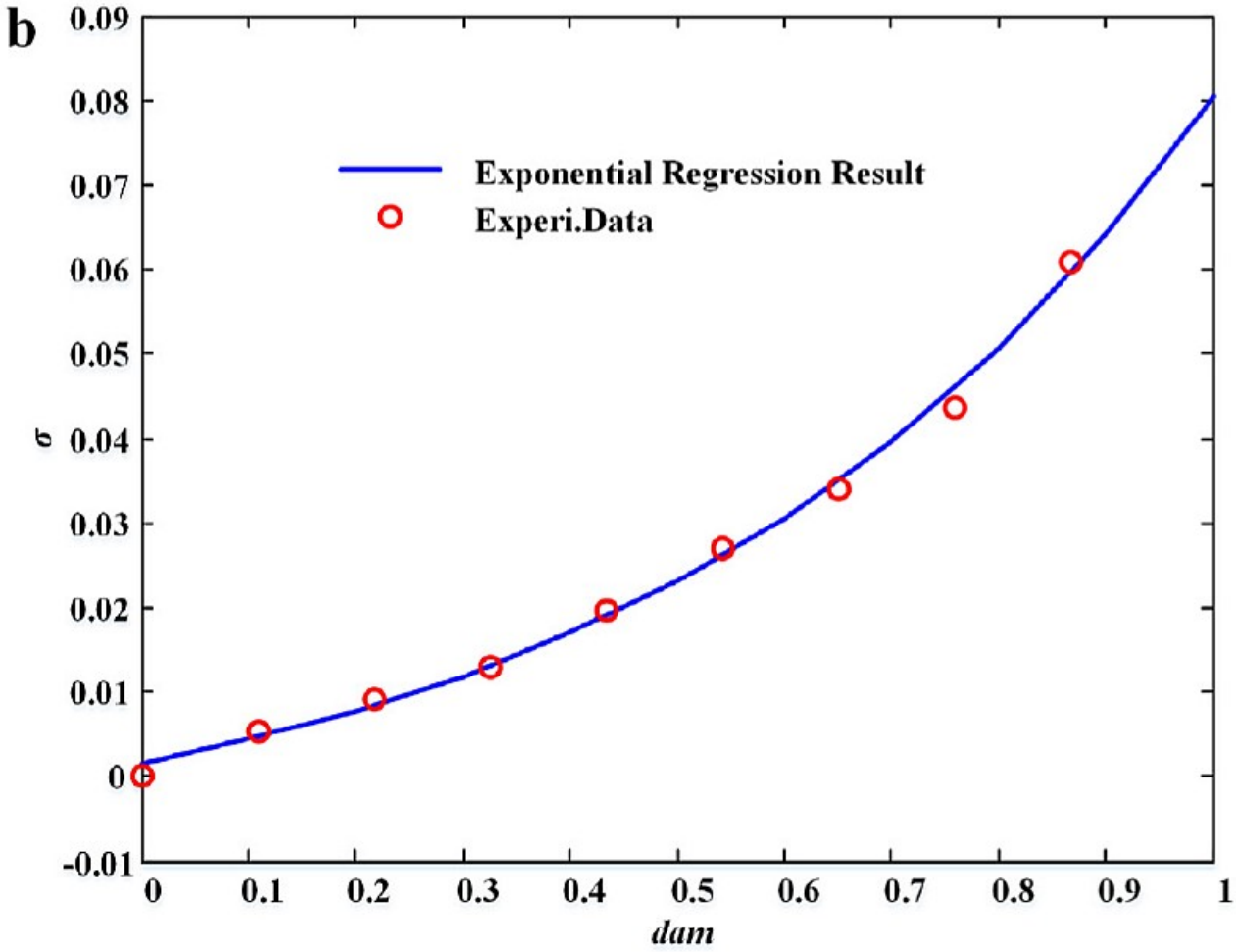
Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης φαίνονται στο **Σχήμα 31**, από το οποίο φαίνεται καθαρά ότι το εκθετικό μοντέλο είναι καλή προσέγγιση για τη συνάρτηση σ (dam). Σύμφωνα με τα παραπάνω μοντέλα u (dam) and σ (dam), καθίσταται μια νέα μέθοδος αξιολόγησης αξιοπιστίας βασισμένη σε πληροφορία φόρτισης πραγματικού χρόνου η οποία περιγράφεται από την εξίσωση (29) και απεικονίζεται λεπτομερειακά στο **Σχήμα 32**.

$$PoF(dam_1) = \int_{a_c} \int_{a} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, a\sigma(dam_1)} \exp\left(-\left(\frac{lna - \mu(dam_1)}{\sigma(dam_1)}\right)^2\right) f_{a_c}(a_c)\, da\, da_c \qquad (29)$$

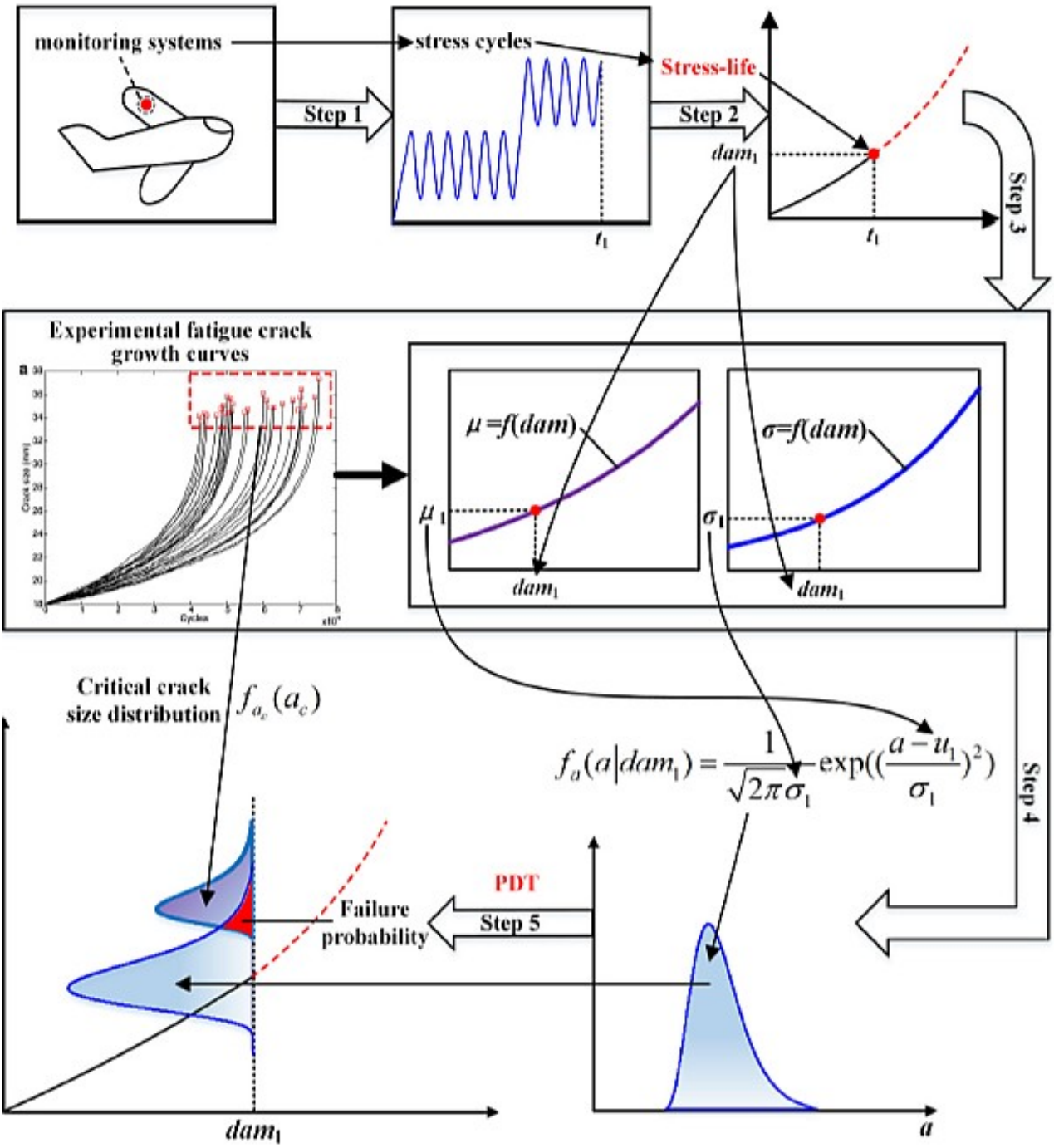
όπου η dam_1 υπολογίζεται και αθροίζεται γραμμικά από τη μέθοδο τάσης – διάρκειας ζωής σύμφωνα με πληροφορίες φόρτισης πραγματικού χρόνου που παρέχονται κατά τη διάρκεια της πτήσης. $f_{a_c}(a_c)$ είναι η κατανομή του κρίσιμου μεγέθους ρωγμής a_c και καθορίζεται από πειράματα κόπωσης.



Σχήμα 31a. Αποτελέσματα παλινδρόμησης της u για το σύνολο δεδομένων CA1.



Σχήμα 31b. Αποτελέσματα παλινδρόμησης της u για το σύνολο δεδομένων CA2.



Σχήμα 32. Η μέθοδος αξιολόγησης αξιοπιστίας που βασίζεται σε πληροφορία φόρτισης πραγματικού χρόνου.

4Δ. 4. Μοντέλο λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων βασισμένο στη συντήρηση με βάσει την κατάσταση

Το πλήθος των αισθητήρων παρακολούθησης κόπωσης που εφαρμόζονται σε κύριες δομές για τη συλλογή πληροφοριών φόρτισης συνεχώς αυξάνεται, το ίδιο και

οι πληροφορίες που εξάγονται από αυτούς για τον καθορισμό των χρόνων αστοχίας των δομών. Επιπλέον, η ανάπτυξη του προγράμματος συντήρησης αεροσκαφών περνά από την παραδοσιακή διορθωτική συντήρηση και την προληπτική συντήρηση στη συντήρηση βάσει κατάστασης. Επομένως, είναι εύλογη η ανάπτυξη μοντέλου λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων για έναν αεροπορικό στόλο βασισμένο στη συντήρηση βάσει κατάστασης.

4Δ. 4. 1. Μοντέλο βελτιστοποίησης κόστους συντήρησης

Το μοντέλο βελτιστοποίησης κόστους συντήρησης συνίσταται σε δύο υπο-μοντέλα: (1) το μοντέλο ανεκμετάλλευτης χρήσιμης εναπομένουσας διάρκειας ζωής και (2) το μοντέλο κόστους επισκευής ρωγμής.

(1) Μοντέλο ανεκμετάλλευτης εναπομένουσας διάρκειας ζωής f (dam | t_{repair}):

Η αντικατάσταση για λόγους ασφάλειας της κύριας δομής που δεν επιδέχεται επισκευή όταν εμφανίζονται μικρές ρωγμές, θα έχει ως αποτέλεσμα ανεκμετάλλευτη εναπομένουσα διάρκεια ζωής λόγω του γεγονότος ότι ο χρόνος αστοχίας δεν μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια. Ακόμα, η επισκευή της δομής που επιδέχεται διόρθωση όταν εμφανίζονται μικρές ρωγμές θα προκαλέσει επίσης ενακμετάλλευτη διάρκεια ζωής εφόσον η επισκευή της δομής μπορεί να αλλάξει την κατανομή των τάσεων και να επιταχύνει τη φθορά.

Επομένως, η αντικατάσταση ή η επιδιόρθωση της δομής όταν πλησιάζει την αστοχία μπορεί να μειώσει την κατασπατάληση χρήσιμης εναπομένουσας διάρκειας ζωής. Το **Σχήμα 33** δείχνει τη βλάβη της δομής ως συνάρτηση των ωρών πτήσης. Στο **Σχήμα 33a**, dam είναι η βλάβη της δομής τη στιγμή επισκεύης της (t_{repair}). Η καμπύλη με κόκκινες κουκκίδες αντιπροσωπεύει τη σπατάλη της χρήσιμης εναπομένουσας διάρκειας ζωής. Συμφωνα με τις αναλύσεις αυτές το μοντέλο της ανεκμετάλλευτης χρήσιμης διάρκειας ζωής διέπεται από την εξίσωση (30).

$$f\left(dam|t_{repair}\right)=C_{structure}\times\left(1-dam\left(t_{repair}\right)\right) \qquad (30)$$

όπου $C_{structure}$ είναι ένας συντελεστής που αντιπροσωπεύει το κόστος που συνεπάγεται από τη σπατάλη της χρήσιμης εναπομένουσας διάρκειας ζωής ανά βλάβη και t_{repair} είναι η χρονική στιγμή που πρέπει να επισκευαστεί η κατασκευή.

(2) Μοντέλο κόστους επισκευής ρωγμής φ(a):

Διαφορετικές συνιστώσες, διαφορετικές δομές και διαφορετικές διαστάσεις ρωγμών απαιτούν διαφορετικά μέσα επιδιόρθωσης. Οι βασικές δομές του κελύφους αεροσκάφους συχνά σχεδιάζονται ώστε να είναι επισκευάσιμα. Το **Σχήμα 33b** παρουσιάζει ένα παράδειγμα μέσων αντικατάστασης δομής που υπόκειται σε διαφορετικούς βαθμούς βλάβης. T_{design} είναι η προδιαγεγραμμένη διάρκεια ζωής του αεροσκάφους. Διαφορετικές βλάβες αντιστοιχούν σε διαφορετικά μέσα επιδιόρθωσης και αυτά με τη σειρά τους αντιστοιχούν σε διαφορετικά κόστη επισκευής. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 33b**, δεν υπάρχει ανάγκη να επισκευαστεί η κατασκευή της οποίας η βλάβη είναι μεταξύ 0 και dam_1 .

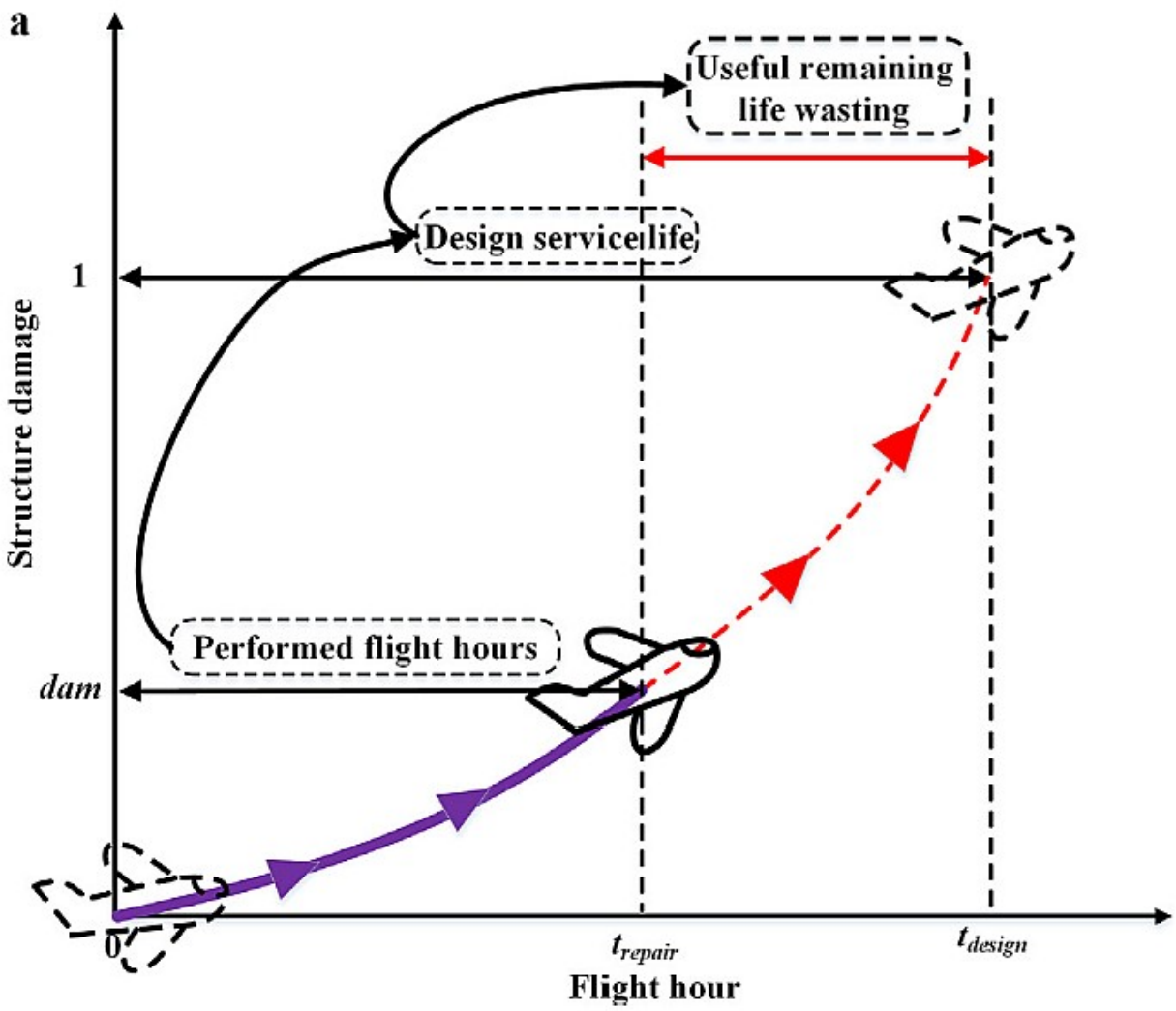
Η μέθοδος ανοίγματος οπής (stop drill method) ή η τεχνολογία μπαλώματος εφαρμόζεται όταν το επίπεδο της βλάβης είναι μεταξύ dam_1 και dam_2 , και το κόστος επισκευής είναι c_1 . Απαιτείται αναδιαμόρφωση όταν το επίπεδο βλάβης αναπτύσσεται και ανήκει στο διάστημα (dam_2 , dam_3], και το κόστος επισκευής είναι c_2 . Η κατασκευή χρήζει αντικατάστασης όταν το επίπεδο βλάβης αυξηθεί και περάσει στο διάστημα (dam_3 , 1], και το κόστος είναι c_3 . Σύμφωνα με τις παραπάνω αναλύσεις, το μοντέλο κόστους επισκευής διέπεται από την εξίσωση (31):

$$\varphi(\mathrm{dam})=\begin{cases} 0\,(0\leqslant \mathrm{dam}<\mathrm{dam}_1) \\ c_1\,(\mathrm{dam}_1\leqslant \mathrm{dam})<\mathrm{dam}_2 \\ c_2\,(\mathrm{dam}_2\leqslant \mathrm{dam})<\mathrm{dam}_3 \\ c_3\,(\mathrm{dam}_2\leqslant \mathrm{dam}\leqslant 1) \end{cases} \tag{31}$$

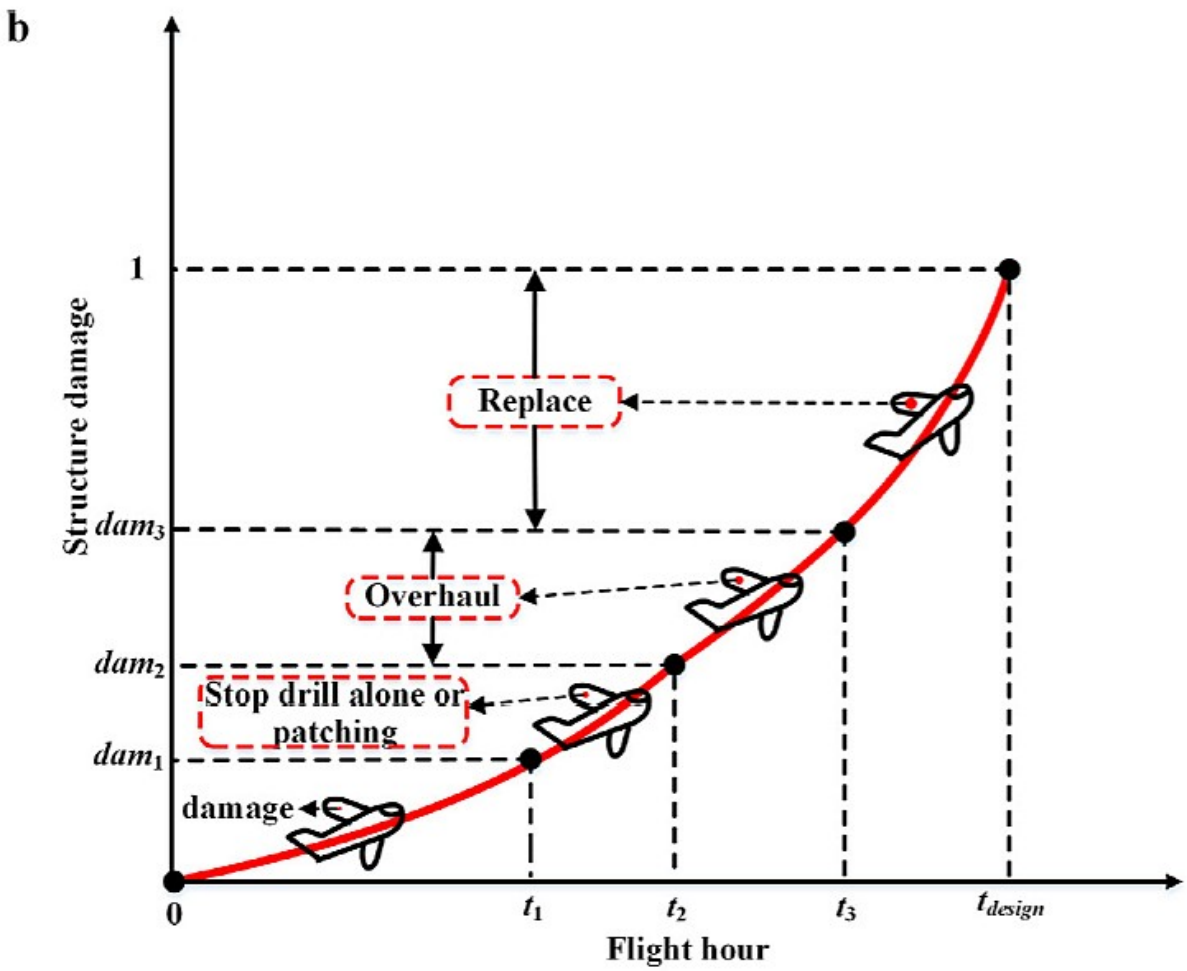
όπου dam είναι η βλάβη της κατασκευής και c_1 , c_2 και c_3 είναι τα κόστη επιδιόρθωσης. Το μοντέλο βελτιστοποίησης κόστους για τις δομές του αεροσκάφους περιγράφεται από την εξίσωση (32) σύμφωνα με τα παραπάνω δύο υπομοντέλα.

$$\begin{aligned} &\text{ελαχιστοποίηση του } \mathrm{Mc}(t)=\sum_{i=1}^{ns}\left(f(\mathrm{dam}_i(t))+\varphi(\mathrm{dam}_i(t))\right) \\ &\text{υπό τον περιορισμό: } \mathrm{PoF}_i(\mathrm{dam}_i(t))\leq 10^{-7} \quad \text{για } i=1,\ldots,ns \end{aligned} \tag{32}$$

όπου ns είναι το πλήθος των δομών που είναι εξοπλισμένες με συστήματα πρακολούθησης, t είναι ο χρόνος που χρειάζεται για την επιδιόρθωση των δομών ns (δηλαδή οι κατασκευές θα επιδιορθωθούν σε μία περίοδο εκτός λειτουργίας), $\mathrm{dam}_i(t)$ είναι η αθροιστική βλάβη λόγω κόπωσης (FCD) της i-οστής δομής τη χρονική στιγμή t, και $\mathrm{PoF}_i(\mathrm{dam}_i(t))$ είναι η πιθανότητα αστοχίας της i-οστής δομής τη χρονική στιγμή t.



Σχήμα 33. a) Η βλάβη της δομής ως συνάρτηση των ωρών πτήσης.



Σχήμα 33. b) Οι μέθοδοι επισκευής της δομής σε διαφορετικούς βαθμούς βλάβης.

4Δ. 4. 2. Μοντέλο βελτιστοποίησης διαθεσιμότητας για αεροπορικό στόλο

Το μοντέλο αυτό έχει στόχο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των επικαλυπτόμενων χρονικών διαρκειών δύο οποιωνδήποτε επισκευών αεροσκαφών ενός στόλου (δηλαδή τη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητάς του), και περιγράφεται από την εξίσωση (33):

$$\min Ol(t_1, t_2, \ldots, t_l) = \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{k=1, k \neq i} \delta(t_{i+j}, t_k)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\delta(t_{i+j}, t_k) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t_{i+j} - t_k \leq d_k < 0 \text{ ή } t_{i+j} - t_k > d_k \\ 0, & t_{i+j} - t_k \end{cases} \quad \text{για } i, k = 1, \ldots, l, k \neq i \qquad (33)$$

$$PoF_i(dam_i(t_i)) \leq 10^{-7}, \quad \text{για } i = 1, \ldots, l$$

$$R_S = \{t_1, t_2, \ldots t_l\}$$

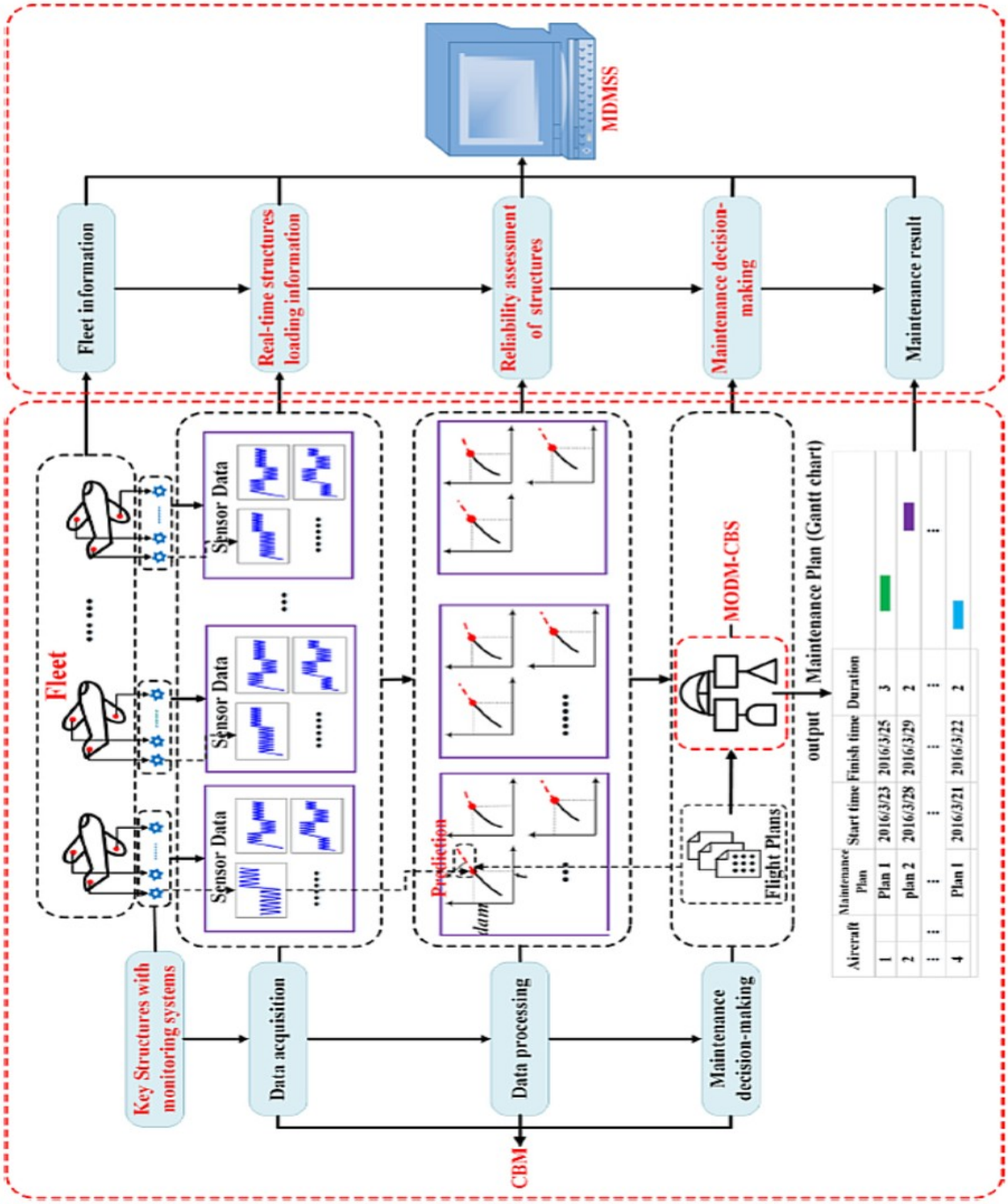
$$R_D = \{d_1, d_2, \ldots, d_l\}$$

όπου l είναι το πλήθος των αεροσκαφών του στόλου, t_i (i = 1, …, l) είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επισκευή του i-οστού αεροσκάφους, R_S είναι ένα σύνολο t_i d_i (i = 1, …, l) είναι ο χρόνος επισκευής που δαπανάται μέχρι την ανάληψη του i-οστού αεροσκάφους (δηλαδή ο χρόνος επισκευής καθορίζεται από το επίπεδο βλάβης της κατασκευής, τη δομική πολυπλοκότητα, τα εγχειρίδια συντήρησης και την εμπειρία συντήρησης), και R_D είναι το σύνολο χρονικών διαρκειών d_i κάθε τύπου συντήρησης. $PoF_i(dam_i(t_i))$ είναι η πιθανότητα αστοχίας του i-οστού αερισκάφους τη χρονική στιγμή t_i και καθορίζεται από τη δομή που έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας.

4Δ. 4. 3. Μοντέλο λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων βασισμένο στη συντήρηση υπό συνθήκες MODM-CBM

Αντικειμενικός στόχος του μοντέλου MODM-CBM είναι ο προγραμματισμός ενός σχεδίου συντήρησης για την ελαχιστοποίηση των κόστων συντήρησης και η διατήρηση ενός υψηλού επιπέδου ετοιμότητας με πλήρη εκμετάλλευση της πληροφορίας κατάστασης των δομών. Το **Σχήμα 34α** δείχνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων συντήρησης για αεροπορικό στόλο, και κάθε αεροσκάφος έχει διάφορα βασικά χαρακτηριστικά εφοδιασμένα με συστήματα παρακολούθησης.

Όπως φάνηκε στο **Σχήμα 34α**, η βλάβη της κατασκευής εκτιμάται μέσω επεξεργασίας των δεδομένων φόρτισης που παρέχονται από το σύστημα παρακολούθησης. Το μοτίβο που ακολουθεί η βλάβη της κατασκευής (dam) προβλέπεται σε συμφωνία με τα προγράμματα πτήσεων και δεδομένα από το ιστορικό βλαβών, και ορίζονται οι $PoF_i(dam_i(t))$ της εξίσωσης (24) και $PoF_i(dam_i(t_i))$ της εξίσωσης (25). Το μοντέλο MODM – CBM του στόλου καθορίζεται συνδυάζοντας τα παραπάνω μοντέλα βελτιστοποίησης κόστους συντήρησης και βελτιστοποίησης διαθεσιμότητας.

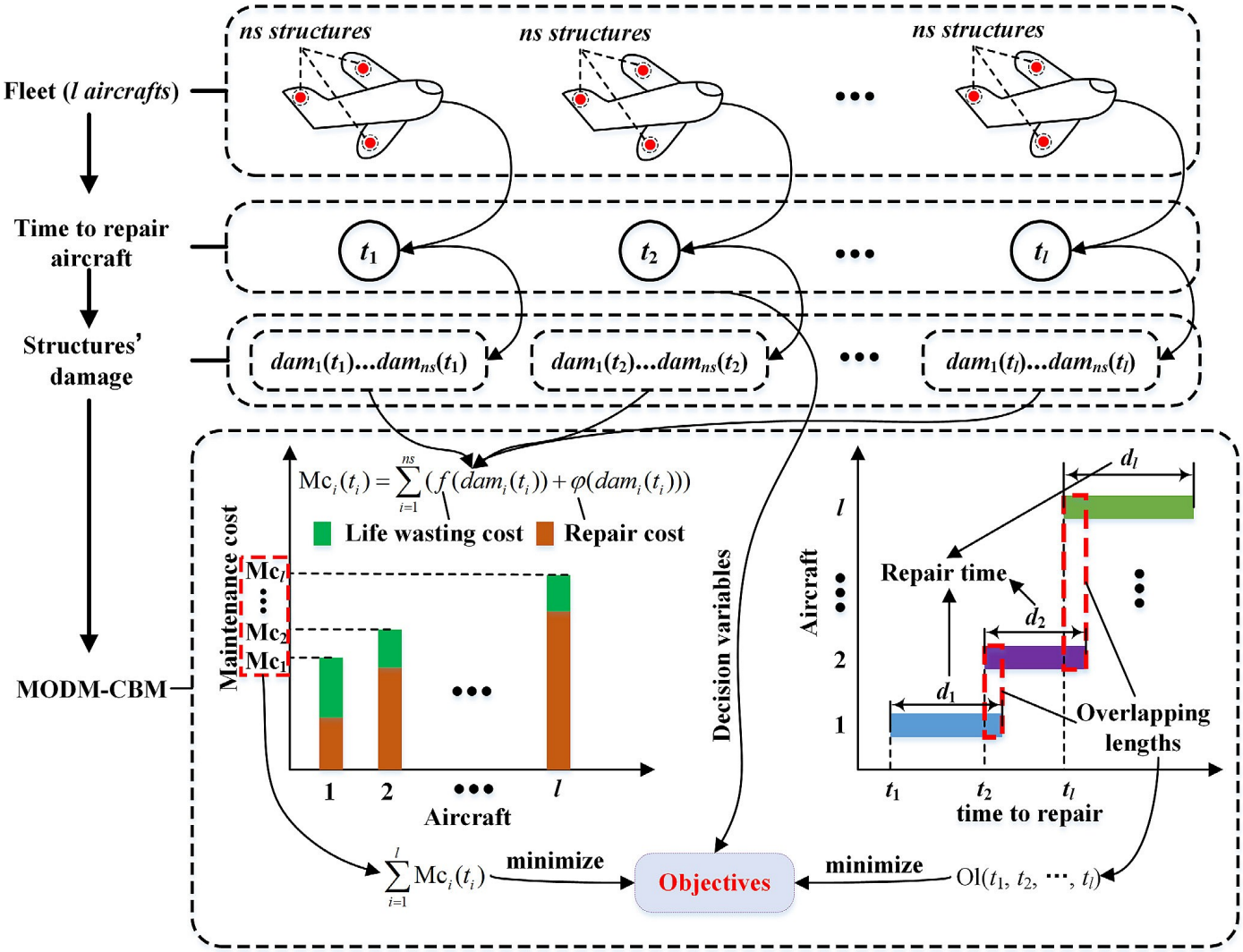


Σχήμα 34α. Η διαδικασία λήψης αποφάσεων συντήρησης για αεροπορικό στόλο.

Η διαδικασία συνδυασμού φαίνεται στο **Σχήμα 34β**. Το μοντέλο MODM – CBM περιγράφεται ως εξής:

$$\min F(t_1, t_2, \ldots, t_l) = \left(\sum_{i=1}^{l} Mc_i(t_i), Ol(t_1, t_2, \ldots, t_l)\right) \quad (34)$$
$$\text{υπό τον περιορισμό}: PoF_i(dam_i(t_i)) \le 10^{-7} \quad \text{για} \quad i = ,\ldots, l$$

όπου $Mc_i(t_i)$ είναι το μοντέλο βελτιστοποίησης κόστους συντήρησης του i-οστού αεροσκάφους, $Ol(t_1, t_2, \ldots, t_l)$ είναι το μοντέλο βελτιστοποίησης διαθεσιμότητας για το i-οστό αεροσκάφος, και $PoF_i(dam_i(t_i))$ η πιθανότητα που ορίστηκε παραπάνω.



Σχήμα 34β. Η διαδικασία συνδυασμού των μοντέλων βαλτιστοποίησης κόστους συντήρησης και βελτιστοποίησης διαθεσιμότητας.

4Δ. 4. 4. Εφαρμογή στη μελέτη περίπτωσης

Υποθέσεις και δεδομένα

Για την ανάπτυξη και την επαλήθευση του μοντέλου θεωρείται στόλος 10 αεροσκαφών. Κάθε αεροσκάφος αποτελείται από 3 διακεκριμένες δομές (A, B και C) με προβλέψιμη χρήσιμη εναπομένουσα διάρκεια ζωής (RULs) σύμφωνα με το μοντέλο αξιοπιστίας που προτείνεται στην ίδια εργασία. Οι RULs και η τρέχουσες τιμές βλάβης των 10 αεροσκαφών παρατίθενται στον **Πίνακα 20**. Οι μέθοδοι επισκευής, οι χρόνοι και τα κόστη των δομών με διαφορετικές βλάβες δίνονται στον **Πίνακα 21**. Το κατώφλι της πιθανότητας αστοχίας PoF της δομής είναι 10^{-7} . Ο παράγοντας $C_{structure}$ στην εξίσωση (25) για τις δομές A, B, και C είναι αντίστοιχα 2700, 4100 and 2800.

Πίνακας 20

Οι τιμές της χρήσιμης εναπομένουσας διάρκειας ζωής και της τρέχουσας βλάβης των 10 αεροσκαφών.

Aircraft	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RULs	A	520.2	421.5	386.4	615.3	482.6	561.3	673.2	496.2	522.3	564.3
	B	574.3	516.4	516.4	651.5	570.5	617.5	697.5	574.9	596.6	622.8
	C	494.9	399.1	364.5	601.7	453.4	550.1	686.0	474.0	514.3	542.0
Damage	A	0.551	0.660	0.695	0.424	0.595	0.499	0.329	0.579	0.549	0.496
	B	0.426	0.512	0.512	0.285	0.432	0.352	0.176	0.425	0.389	0.342
	C	0.621	0.712	0.742	0.501	0.662	0.562	0.384	0.642	0.601	0.571

Πίνακας 21

Μέθοδοι επισκευής, χρόνοι και κόστη της δομής με διαφορετικά επίπεδα βλάβης.

Structure	A			B			C		
Damage	0.4–0.6	0.6–0.8	0.8–1	0.4–0.5	0.5–0.7	0.7–1	0.4–0.6	0.6–0.8	0.8–1
Method	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Time (day)	7	20	14	7	28	14	7	22	14
Cost (yuan)	2000	4000	5400	2800	6200	8200	2400	4600	5600

Αποτελέσματα και ανάλυση

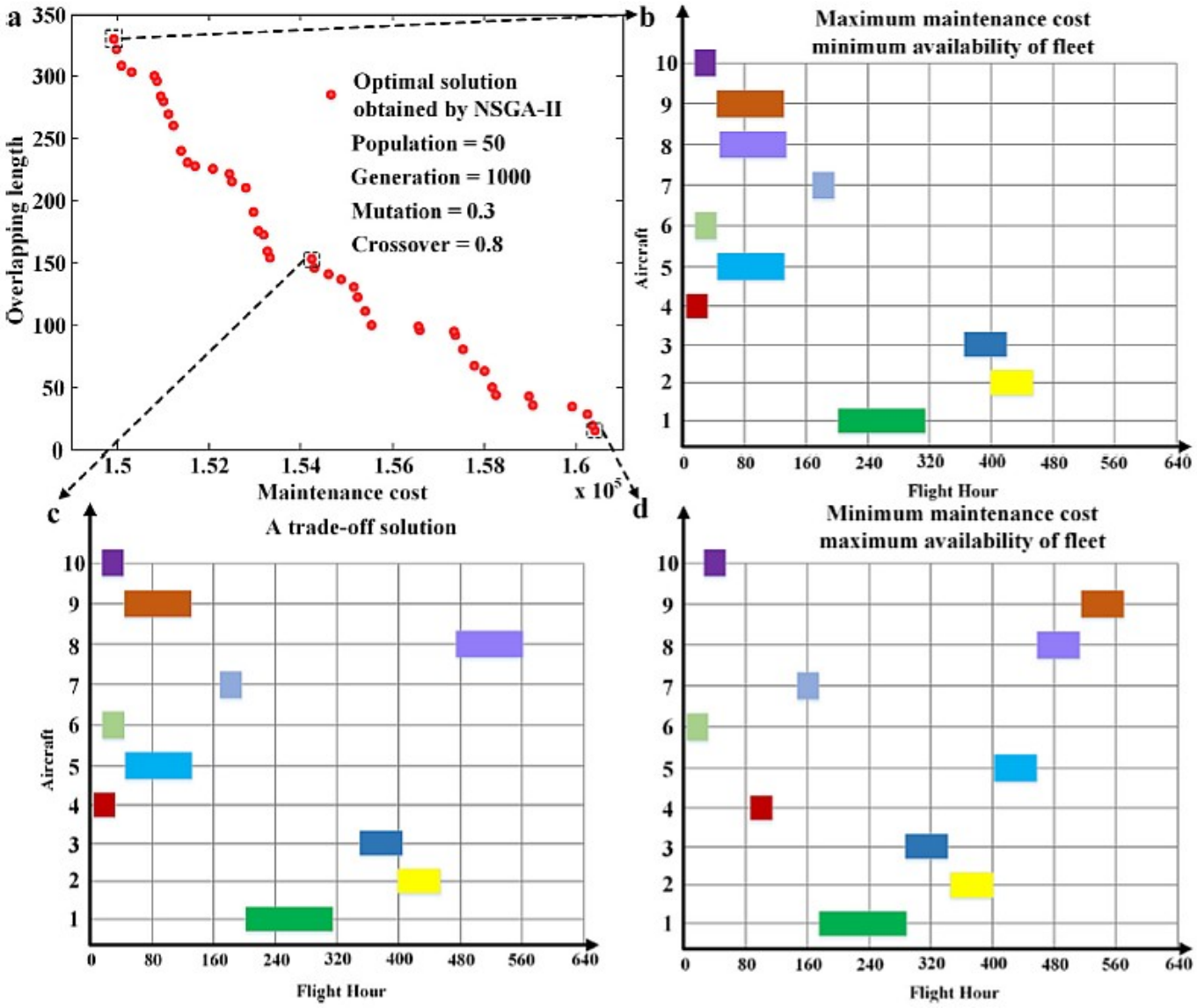
Διάφορες μέθοδοι, όπως η αναζήτηση branch-and-bound, ο ακέραιος προγραμματισμός, ο δυναμικός προγραμματισμός, καθώς και ευρετικές τεχνικές διερευνήθηκαν για το πρόβλημα λήψης αποφάσεων συντήρησης με πολλαπλούς

στόχους. Παρόλα αυτά, αυτές οι τεχνικές απαιτούν εξειδικευμένη γνώση του τομέα στον οποίο υπόκειται το πρόβλημα, και ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται δραματικά με το μέγεθος του προβλήματος.

Επιρόσθετα, κάποιες λύσεις που παρήχθησαν μπορεί να είναι “παγιδευμένες” σε περιοχή τοπικού βέλτιστου. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι πολλαπλών στόχων ξεπερνούν τις ελλείψεις των παραδοσιακών μεθόδων. Ανάμεσά τους, ο ελιτιστικός γενετικός αλγόριθμος μη επιβαλλόμενης ταξινόμησης (NSGA-II) εκλέχθηκε για την επίλυση του μοντέλου. Το βέλτιστο αποτέλεσμα του μοντέλου που λήφθηκε από τον NSGA-II φαίνεται στο **Σχήμα 35a**. Τρεις από τις μη επιβαλλόμενες λύσεις απεικονίζονται σε διαγράμματα Gantt και παρουσιάζονται στα **Σχήματα 35b**, **c** και **d**, αντίστοιχα.

Το **Σχήμα 35b** δείχνει πληροφορίες συντήρησης του στόλου όταν ελαχιστοποιείται το κόστος χωρίς να λογίζεται η διαθεσιμότητα του στόλου (αντικειμενικός στόχος του προτεινόμενου μοντέλου είναι η βελτιστοποίηση και των δύο συνιστωσών του προβλήματος).

Το **Σχήμα 35d** δείχνει πληροφορίες συντήρησης του στόλου όταν μεγιστοποιείται η διαθεσιμότητα, χωρίς οικονομικούς περιορισμούς. Η συμβιβαστική λύση απεικονίζεται στο **Σχήμα 35c**. Ο αρμόδιος για τη λήψη αποφάσεων μπορεί να εκλέξει κατάλληλη λύση ανάλογα με την πηγή πληροφοριών συντήρησης για τη διασφάλιση του εξοπλισμού και τια απαιτήσεις των εργασιών.



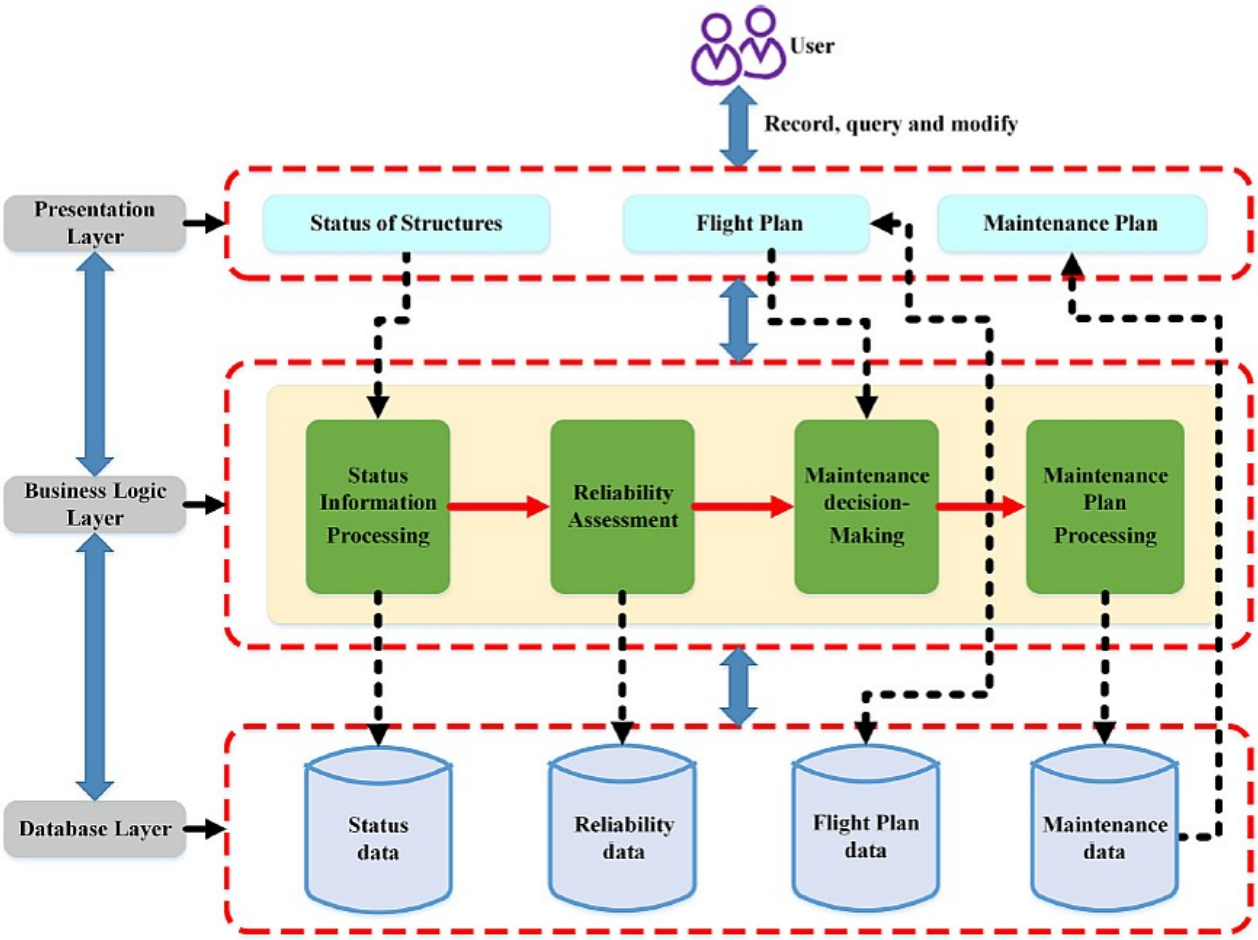
Σχήμα 35.

a) Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της προτεινόμενης μεθόδου από τον αλγόριθμο NSGA-II
b) Η πληροφορία συντήρησης του στόλου όταν ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος συντήρησης αλλά όχι και η διαθεσιμότητα του στόλου.
c) Μία μέση λύση.
d) Η πληροφορία συντήρησης του στόλου όταν μεγιστοποιείται η διαθεσιμότητα του στόλου αλλά όχι το συνολικό κόστος συντήρησης.

4Δ. 5. Ανάπτυξη του συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων συντήρησης MDMSS

Το σύστημα υποστήριξης λήψης αποφάσεων συντήρησης, MDMSS, αναπτύσσεται για τις ανάγκες λήψης αποφάσεων αεροπορικού στόλου. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 30**, το MDMSS καλύπτει την επεξεργασία της απόκτησης δεδομένων (πληροφορίες κατάστασης αεροσκάφους πραγματικού χρόνου), την επεξεργασία των δεδομένων (αξιολόγηση αξιοπιστίας των κατασκευών των αεροσκαφών) και τη λήψη αποφάσεων συντήρησης, καθώς επίσης και τις βάσεις δεδομένων.

Το πλαίσιο του MDMSS είναι ένα τυπικό σύστημα 3 επιπέδων βασισμένο σε Java Swing, και η γενική του δομή φαίνεται στο **Σχήμα 36**. Το MDMSS αναπτύχθηκε ενσωματώνοντας τους MyEclipse 10.0 and SQL Server σε λειτουργικό σύστημα Windows. Το σύστημα υλοποιεί τη διοίκηση πληροφορίας, την αξιολόγηση αξιοπιστίας των κατασκευών, και τη λήψη αποφάσεων συντήρησης. Με Win32 API, δίνεται το UI καλώντας επιπλέον πρόγραμμα. Τα δεδομένα αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων και διαχειρίζονται από κώδικα SQL. Οι συνδέσεις ανάμεσα στα υποσυστήματα γίνονται στη βάση του κύριου ενσωματωμένου κώδικα του συστήματος.

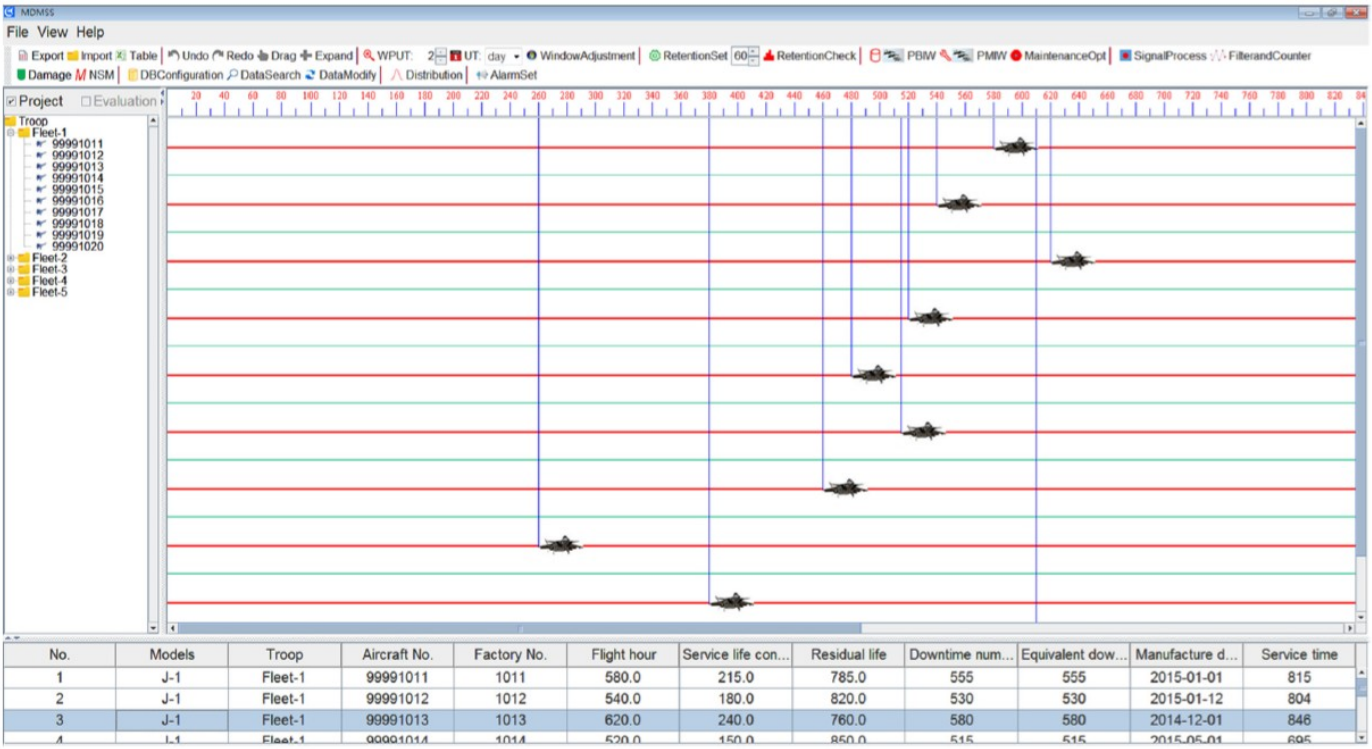


Σχήμα 36. Η γενική δομή του συστήματος υποστήριξης λήψης αποφάσεων συντήρησης.

4Δ. 5. 1. Εφαρμογή στο σύστημα

Σκιαγράφημα του MDMSS:

Το MDMSS καλύπτει ολόκληρη τη διαδικασία από τη συλλογή των πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο έως τη λήψη αποφάσεων συντήρησης του στόλου. Όπως φάνηκε στο **Σχήμα 37**, το βασικό παράθυρο του MDMSS εμφανίζεται όταν ο χρήστης συνδέεται στο σύστημα, και στο πάνω μέρος του παραθύρου, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις βασικές κατηγορίες του συστήματος. Οι βασικές πληροφορίες των στόλων που είναι αποθηκευμένες στη βάση δεδομένων φαίνονται με μορφή δέντρου (τοποθετημένες στη δεξιά πλευρά του παραθύρου). Εάν ο χρήστης επιλέξει τον κόμβο δέντρου, τότε θα εμφανιστούν οι βασικές πληροφορίες του στόλου που αναπαριστάται από τον κόμβο.



Σχήμα 37. Το κύριο παράθυρο του MDMMS.

4Δ. 5. 2. Υποσυστήματα του MDMSS

Το σύστημα περιλαμβάνει τέσσερα βασικά υποσυστήματα: το υποσύστημα επεξεργασίας πληροφοριών κατάστασης πραγματικού χρόνου, το υποσύστημα λήψης αποφάσεων, και το υποσύστημα διαχείρισης εγγράφων. Για το σκοπό της εργασίας θα αναπτυχθεί το υποσύστημα που σχετίζεται με τη λήψη αποφάσεων.

Υποσύστημα λήψης αποφάσεων συντήρησης:

Αυτό το σύστημα είναι ο πυρήνας του MDMSS, και τα υπόλοιπα υποσυστήματα είναι βοηθητικά ως προς αυτό. Είναι σχεδιασμένο για να ενσωματώνει τη διαδικασία απόκτησης δεδομένων (πληροφορίες κατάστασης αεροσκάφους πραγματικού χρόνου), την επεξεργασία των πληροφοριών (αξιολόγηση αξιοπιστίας καταστευών) και της λήψης αποφάσεων συντήρησης.

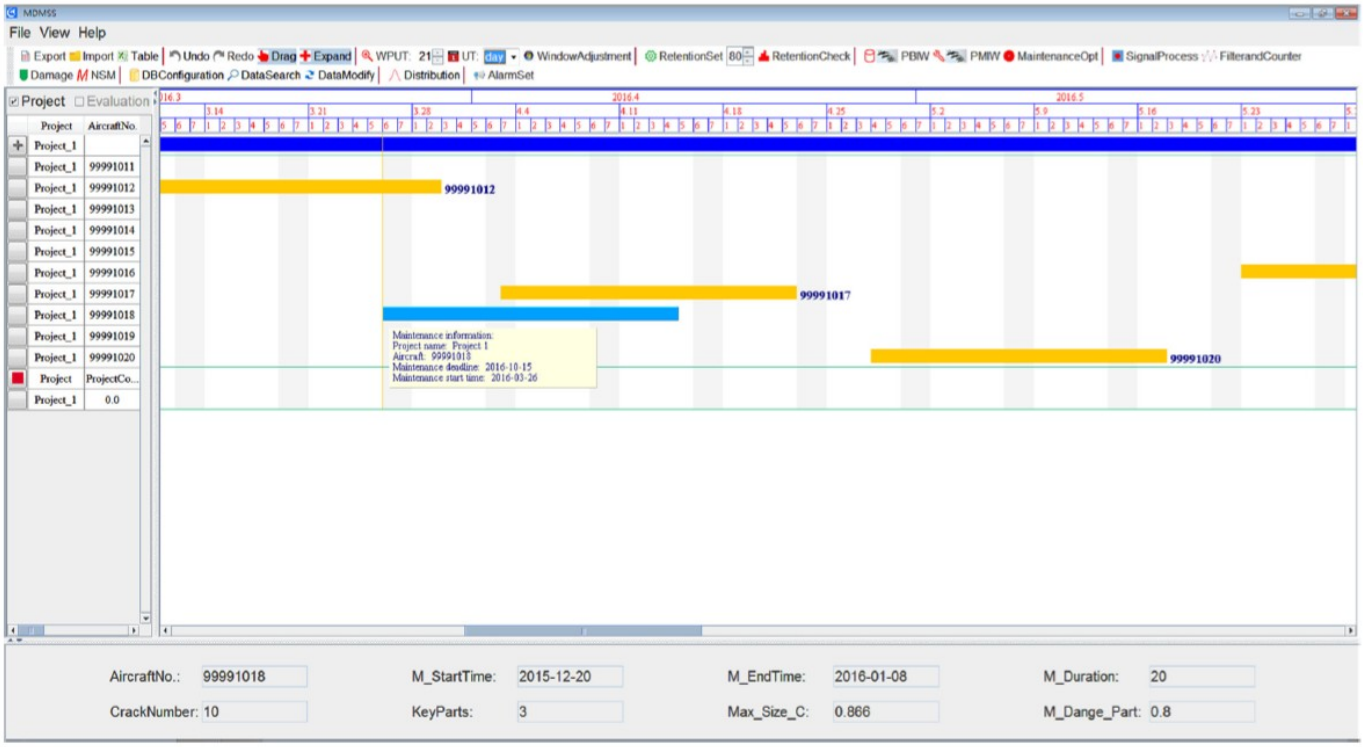
Επιπλέον, απλοποιεί την πολύπλοκη διαδικασία της διοίκησης στόλου. Αυτό το υποσύστημα έχει τις ακόλουθες λειτουργικές ενότητες: είσοδο πληροφορίας σχετικά με την αξιοπιστία του στόλου, μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της λήψης αποφάσεων συντήρησης, παρουσίαση του σχεδίου συντήρησης, και προσαρμογή του σχεδίου συντήρησης. Οι λειτουργικές ενότητες του υποσυστήματος λήψης αποφάσεων περιγράφονται λεπτομερειακά ακολούθως:

• Είσοδος πληροφορίας αξιοπιστίας του στόλου: η πληροφορία αξιοπιστίας των κατασκευών κάθε αεροσκάφους του στόλου, που χρειάζεται για να καταστρωθεί το πλάνο συντήρησης, εισάγεται από το χρήστη.

• Μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της λήψης αποφάσεων συντήρησης: καθορίζεται το μοντέλο λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων για το στόλο σύμφωνα με την πληροφορία αξιοπιστίας του, και έπειτα βελτιστοποιείται από τον NGSA-II ο οποίος κωδικοποιήθηκε και ενσωματώθηκε στην ενότητα.

• Παρουσίαση του σχεδίου συντήρησης: Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης του παραπάνω μοντέλου λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων παρουσιάζονται με ένα διάγραμμα Gantt που φαίνεται στο **Σχήμα 38**.

• Προσαρμογή του σχεδίου συντήρησης: Ο αρμόδιος για τη λήψη αποφάσεων (ο χρήστης) μπορεί να προσαρμόσει το σχέδιο συντήρησης του στόλου σύροντας το στοιχείο του διαγράμματος που αντιπροσωπεύει το αεροσκάφος προς προσαρμογή. Η διαδικασία φαίνεται στο **Σχήμα 38**.



Σχήμα 38. Η παρουσίαση της διεπαφής του σχεδίου συντήρησης.

Ε. Αναγνώριση των βέλτιστων αποφάσεων συντήρησης για σύνθετες δομές

Η εργασία των Laks et al. (2018) προτείνει ένα υποστηρικτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων το οποίο αναγνωρίζει τις αποφάσεις συντήρησης βέλτιστου κόστους για δεδομένη χρονική περίοδο προγραμματισμού. Παράλληλα, η κατάσταση αξιοπιστίας της κάθε συνιστώσας βρίσκεται πάνω από ένα δεδομένο ελάχιστο επίπεδο αξιοπιστίας, δηλαδή εφαρμόζεται πολιτική ορίου αστοχίας. Το εργαλείο αναπτύχθηκε για την υποστήρηξη της λήψης απόφασης μεταξύ δύο εναλλακτικών: επισκευή ή αντικατάσταση σύνθετων συνιστωσών που είναι πιθανόν να υπόκεινται σε βλάβη από πρόσκρουση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθετων δομών είναι η τελευταία γενιά αεροσκαφών αερομεταφορών ευρείας ατράκτου, όπως το Boeing B787 και το Airbus A350 XWB.

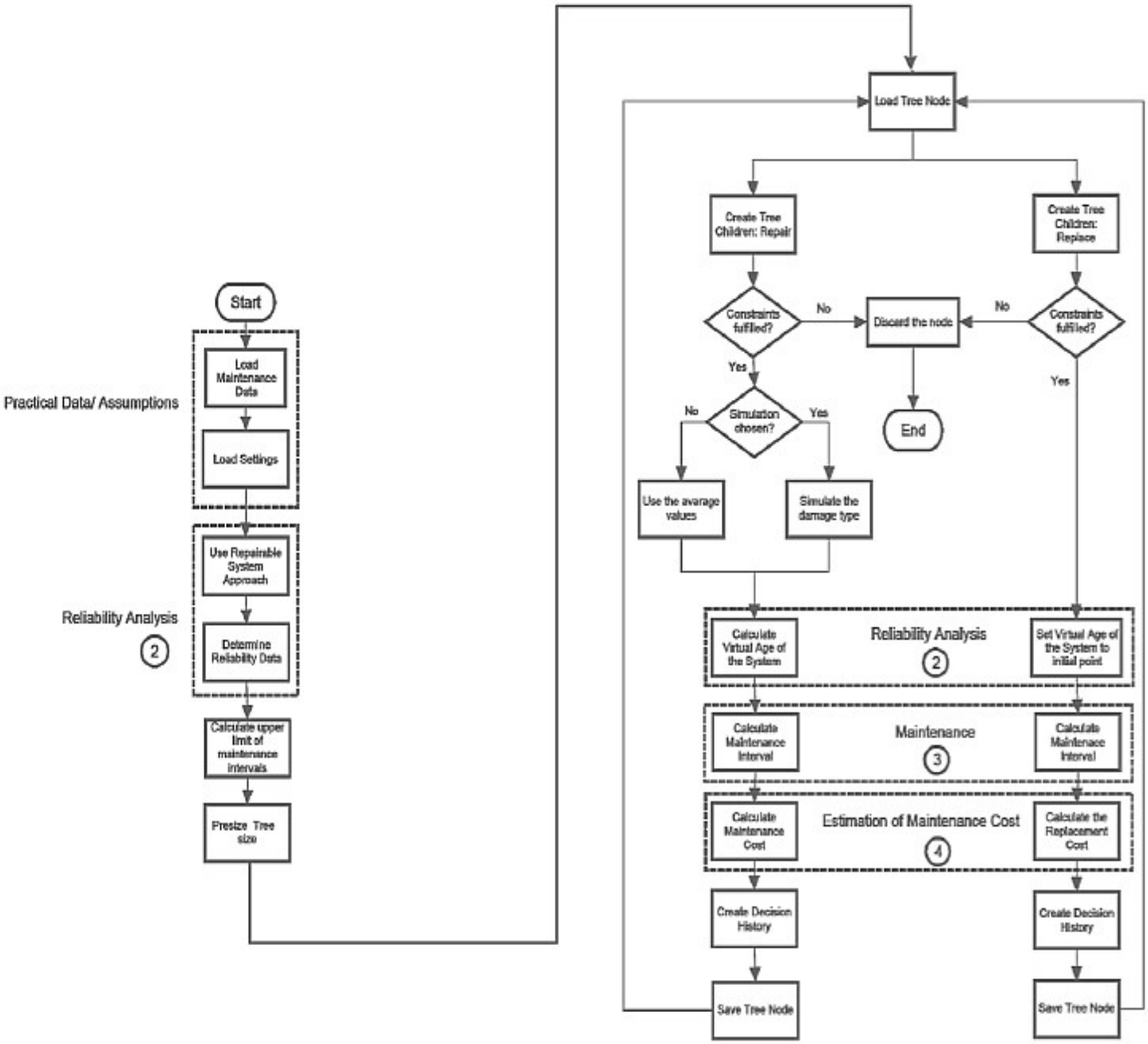
Ως κεντρικό κομμάτι του εργαλείου, ορίζεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους το οποίο και επιλύεται με τη χρήση του αλγορίθμου δέντρου αναζήτησης με ευρετικούς περιορισμούς. Η εφαρμογή σε περίπτωση μελέτης που χρησιμοποιεί ιστορικά δεδομένα βλαβών και μεταγενέστερη προσομοίωση δείχνει τη δυναμική του εργαλείου ως προς την ανίχνευση των αποφάσεων συντήρησης ελαχίστου κόστους. Το εργαλείο υποστήρησης αποφάσεων ενσωματώνει ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων για μελέτη της λήψης αποφάσεων προληπτικής συντήρησης σε βάθος .

4Ε. 1. Εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για προγραμματισμό προληπτικής συντήρησης

Οι Laks et al. ανέπτυξαν ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων ικανό να ενσωματώνει το αποτέλεσμα των μοντέλων αξιοπιστίας για επισκευάσιμα συστήματα και των μοντέλων κόστους διακεκριμένων γεγονότων. Ακόμα, ενσωματώνει μία προσέγγιση βελτιστοποίησης στοχοθετημένη προς την δομημένη ανακάλυψη του χώρου λύσεων.

Λογική και ροή

Η λογική του εργαλείου υποστήρηξης αποφάσεων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 39**. Το σημείο εκκίνησης είναι η διαθεσιμότητα δεδομένων συντήρησης, όπου για δεδομένη συνιστώσα τα δεδομένα συντήρησης απαριθμούνται ως η βλάβη που εμφανίστηκε, το είδος της επισκευής και ο χρόνος αστοχίας.



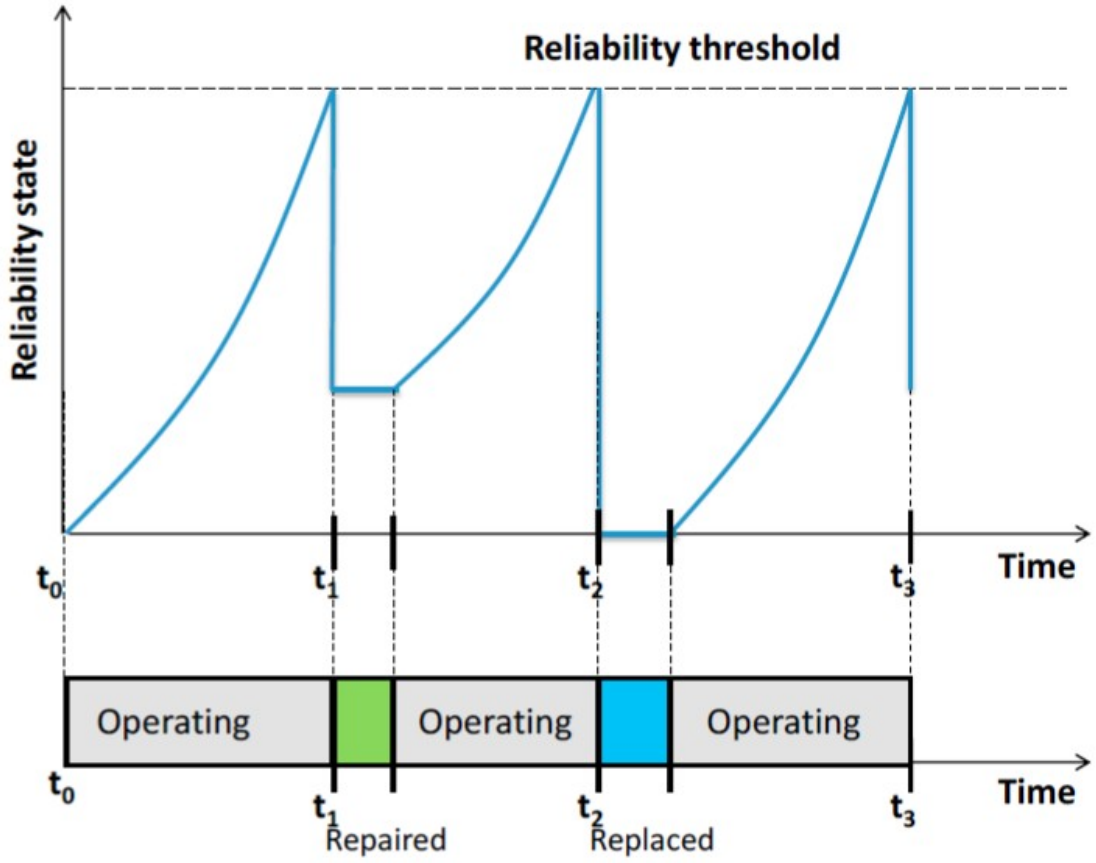
Σχήμα 39. Διάγραμμα ροής του εργαλείου υποστήριξης απόφασης

Βάσει των δεδομένων αυτών επικρατούν οι παράμετροι αξιοπιστίας. Η ανάλυση αξιοπιστίας εκτελείται με προσέγγιση επισκευάσιμου συστήματος, συγκεκριμένα τη Διαδικασία Γενικευμένης Ανανέωσης (Generalized Renewal Process (GRP)), όπου εισάγεται η ιδέα της πραγματικής ηλικίας στο μοντέλο της κατάστασης του συστήματος και στη συσχετισμένη αποτελεσματικότητα επισκευών. Στην ουσία, η πραγματική ηλικία 0 αντιστοιχεί σε νέα συνιστώσα, με επακόλουθη χρήση να αντανακλάται με αύξηση της πραγματικής ηλικίας. Μεταγενέστερες διαδικασίες επισκευής μπορούν να “γυρίσουν το χρόνο πίσω”. Με πλήρως

αποτελεσματική επισκευή, η συνιστώσα επισκευάζεται και η κατάστασή της περιγράφεται σαν καινούργια.

Ωστόσο, οι επισκευές μπορεί να είναι λιγότερο από 100% αποτελεσματικές, επαναφέροντας την πραγματική ηλικία μόνο εν μέρει. Στηριζόμενοι στο ιστορικό γεγονότων (π.χ. χρόνους αστοχίας ή χρόνους περιστατικών βλάβης), το μοντέλο GRP μπορεί να δώσει μία εκτίμηση για τη συνάρτηση έντασης λ(t) και τις συσχετιζόμενες παραμέτρους της, με χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo για εκτίμηση παραμέτρων.

Για τη σύνδεση ανάμεσα στην ανάλυση αξιοπιστίας και τη μετέπειτα βελτιστοποίηση του προγραμματισμού, το εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων υλοποιείται με τη χρήση τριών καταστάσεων: σε λειτουργία, έχει επισκευαστεί και έχει αντικατασταθεί. Για να τηρηθεί η πολιτική ορίου αστοχίας, η αλλαγή μεταξύ καταστάσεων πυροδοτείται από τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή της συνάρτησης έντασης λm, όποτε η συνάρτηση έντασης της συνιστώσας λ(t) πλησιάζει τη λm. Η πολιτική απεικονίζεται στο **Σχήμα 40**, συμπεριλαμβανομένων των αποφάσεων επισκευής και αντικατάστασης.



Σχήμα 40. Πολιτική ορίου αστοχίας και επίδραση επισκευής / αντικατάστασης.

4Ε. 2. Βελτιστοποίηση

Οι συνιστώσες του προβλήματος βελτιστοποίησης μπορούν να γίνουν αντιληπτές από την παρακάτω περιγραφή:

"Για δεδομένη χρονική περίοδο, να βρεθεί σχέδιο συντήρησης το οποίο βελτιστοποιεί το κόστος της προληπτικής συντήρησης, ενώ ταυτόχρονα κρατά την κατάσταση αξιοπιστίας του συστήματος τουλάχιστον ίση με ένα προκαθορισμένο όριο".

4Ε. 2. 1. Μοντέλο Βελτιστοποίησης

Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί που τη διέπουν δηλώνονται ως εξής:

$$\min C(D,t) \tag{35}$$

όπου D = Απόφαση Συντήρησης, με

$$t_i = \sum_{n=1}^{i} \left(1-\frac{1}{\alpha}\right)^{i-1} + t_{maintenance} \tag{36}$$

$$t_l = f(\lambda(t)) \tag{37}$$

$$t_{maintenance} = f(D) \tag{38}$$

όπου t_1 είναι ο χρόνος του πρώτου γεγονότος συντήρησης, το οποίο εξαρτάται τόσο από τη συνάρτηση έντασης που προκύπτει από την ανάλυση αξιοπιστίας όσο και από τη μέγιστη τιμή της συνάρτησης έντασης.

Η χρονική στιγμή t_i αναπαριστά το i-οστό γεγονός αξιοπιστίας όπου μια συνιστώσα επαναφέρεται στην πραγματική της ηλικία, η οποία εξαρτάται από τον παράγοντα βελτίωσης α (επίσης γνωστό ως αποτελεσματικότητα επισκευής). $t_{maintenance}$ είναι η χρονική διάρκεια που απαιτείται για να υλοποιηθεί το γεγονός συντήρησης, το οποίο μπορεί να είναι μία δράση επισκευής ή αντικατάστασης, και εξαρτάται επομένως από από την απόφαση συντήρησης.

Για την αξιολόγηση κόστους, λογίζονται τα κόστη αντικατάστασης και επισκευής για την προληπτική συντήρηση. Τα κόστη αντικατάστασης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$RC = \overline{RC}(1+r)^t \tag{39}$$

όπου $\overline{RC}$ τα συνολικά κόστη της δραστηριότητας αντικατάστασης συν την τιμή αγοράς της συνιστώσας, και r το ποσοστό πληθωρισμού που υπεισέρχεται κατά τη διάρκεια λειτουργίας t.

$$\overline{RC} = RC_{purchase} + RC_{installation} \tag{40}$$

Τα κόστη επισκευής υπολογίζονται με τη βοήθεια της σχέσης:

$$MC = \overline{MC}(1+m)^t \tag{41}$$

όπου $\overline{MC}$ το σταθερό κόστος επισκευής, το οποίο μετέπειτα αυξάνεται με ρυθμό πληθωρισμού m.

4Ε. 2. 2. Τεχνική επίλυσης

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος δέντρου αναζήτησης. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, αναζητείται ο χώρος κατάστασης ενός δεδομένου προβλήματος διατρέχοντας προκαθορισμένες δομές του. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η εξαγωγή συνδυαστικών λύσεων. Η λογική του αλγορίθμου παρουσιάζεται παρακάτω ως ψευδο-αλγόριθμος. Ο πραγματικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε σε Matlab R2014b.

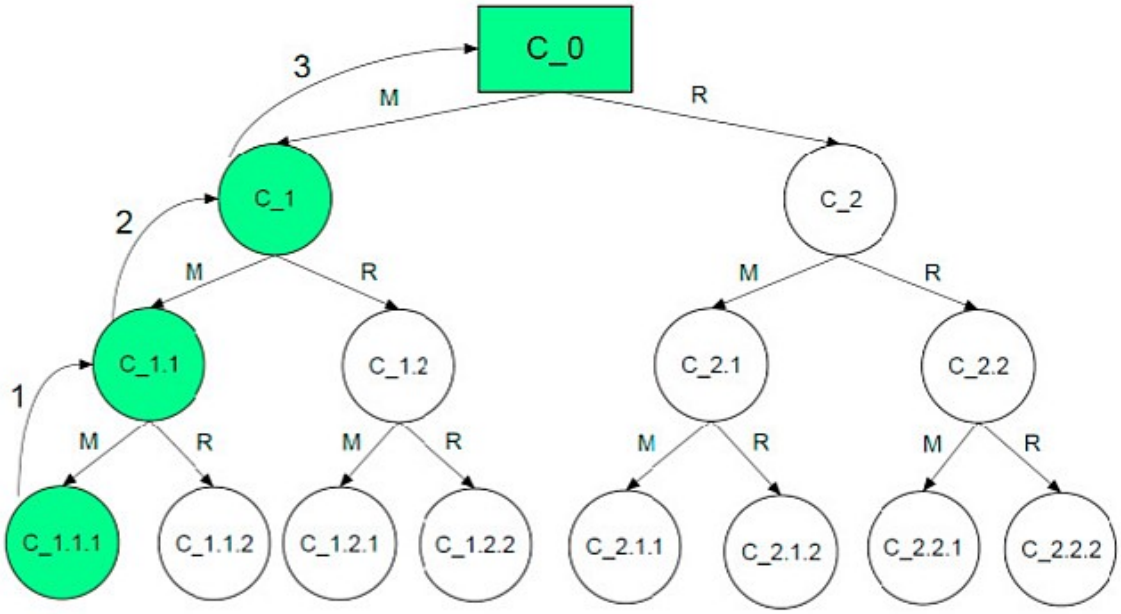
```
Create initial node
Calculate the upper limit of maintenance events - n

for i = 1 : n
        for j = 1 : 2^i
                Create Node
                        if ((condition 1)) & ((condition 2)) &. . .& ((condition n))
                                Save Node
                        else
                                Branch Node

                        end
        end
end
```

Γενικό παράδειγμα του δυαδικού δέντρου αναζήτησης δίνεται στο **Σχήμα 41**. Για διατήρηση της συνοπτικότητας, φαίνεται μόνο το αποτέλεσμα από τη συνάρτηση ανταμοιβής *C*, ή αλλιώς την αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή είναι η συνάρτηση που πρέπει να βελτιστοποιηθεί (π.χ. συνάρτηση κόστους). Οι αποφάσεις συμβολίζονται

με τα γράμματα R για αντικατάσταση (replacement) και M για επισκευή (repair). Με χρήση αναδρομικής επανάληψης, υπολογίζεται η συνολική ανταμοιβή (η πορεία της πράσινης γραμμής στο **Σχήμα 41**).



Σχήμα 41. Συμμετρικό δυαδικό δένδρο με αναδρομική επανάληψη

Αναδρομική επανάληψη σημαίνει ότι ξεκινώντας από τον τελικό κόμβο, η συνολική ανταμοιβή υπολογίζεται ακολουθώντας το μοναδικό μονοπάτι προς τον αρχικό κόμβο. Οι τιμές των κόμβων αθροίζονται στη συνολική ανταμοιβή της λύσης, όπως φαίνεται από την εξίσωση (42):

$$C_{sol,1} = C_{1.1.1} + C_{1.1} + C_1 + C_0 \qquad (42)$$

Για να ανακαλυφθεί ο πλήρης χώρος καταστάσεων και να βρεθεί η βέλτιστη λύση, αυτή η διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί για κάθε διαδρομή. Το σύνολο των λύσεων C_{sol} εμπεριέχει κάθε δυνατό μονοπάτι, το οποίο μπορεί να φανεί χρήσιμο για την εξακρίβωση της βέλτιστης λύσης:

$$C_{sol} = \min[C_{sol,j}] \qquad (43)$$

Για να περιοριστεί το πλήθος των πιθανών επιλογών (και επομένως ο χώρος αναζήτησης και ο αντίστοιχος υπολογιστικός χρόνος), μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρετικές μέθοδοι ώστε να περιοριστεί η αναζήτηση.

Ο αλγόριθμος δέντρου αναζήτησης έχει ενσωματωθεί στο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την επίλυση του προαναφερθέντος προβλήματος βελτιστοποίησης. Το αποτέλεσμα του εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων αποτελείται από τη λύση ελάχιστου κόστους, η οποία περιλαμβάνει μια αλληλουχία από δραστηριότητες συντήρησης (επισκευή ή αντικατάσταση σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές), με συσχετιζόμενο ολικό κόστος (το οποίο ουσιαστικά είναι το άθροισμα των αποφάσεων επισκευής και αντικατάστασης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής μιας συνιστώσας).

4Ε. 3. Αποτελέσματα

4Ε. 3. 1. Είσοδοι

Το εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab. Στη βάση του εργαλείου αυτού, πραγματοποιήθηκε αριθμητική μελέτη περίπτωσης για την εξέταση και την επαλήθευση της λειτουργικότητάς του. Ο **Πίνακας 22** παρουσιάζει τις εισόδους και ο **Πίνακας 23** τις σχέσεις των εισόδων σε σχέση με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα.

Πίνακας 22

Γενικές ρυθμίσεις του DST

	Description	Values	Units
General Settings	Planning Period	15/30	months
	Option for damage simulation	on/off	-
Reliability Parameters	Improvement factor	1-15	-
	Initial failure rate	10^{-5}	-
	Maximal failure rate	10^{-4}	-
Maintenance Data	Component age	0	months
	Time of the first maintenance	1-8	months
	Time to repair	0.2	months
	Time to replace	0.4	months
Probability of damage occurrence	Debond	20	%
	Delamination	25	%
	Through Damage	5	%
	Surface Damage	40	%
	Heat Damage	10	%
Cost Parameters	Cost Coefficient	1-10	-
	Initial Cost	0	man-hours
	Cost for repair	50	man-hours
	Cost for replacement	50-500	man-hours
	Inflation rate	4	%/year
Search Heuristics	Max. numb. of repairs[1]	5	-
	Max. numb. of replacements [1]	1	-

Για κάποιες μεταβλητές, οι τιμές μπορεί να μεταβάλλονται μέσα σε ένα διάστημα (όπως για παράδειγμα ο παράγοντας βελτίωσης, ο οποίος μεταβάλλεται από 1 (παλιό) έως 10 (ιδιαίτερα αποτελεσματική επισκευή αλλά όχι σαν καινούργιο), ο χρόνος της πρώτης συντήρησης, ο συντελεστής κόστους). Αναφορικά με το τελευταίο παράδειγμα, ο συντελεστής κόστους εισάγεται για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ του κόστους αντικατάστασης και του κόστους επισκευής. Επίσης, υπάρχουν καταχωρήσεις που αξίζουν ιδιαίτερη σημείωση:

1. Η εναλλακτική της προσομοίωσης βλάβης: μια προσομοίωση Monte Carlo που παράγει γεγονότα βλαβών κατά την πάροδο του χρόνου μπορεί να ενσωματωθεί. Η συνάρτηση κατανομής που θα διέπει την προσομοίωση Monte Carlo βασίζεται σε εκείνη την κατανομή που ταιριάζει καλύτερα τα ιστορικά δεδομένα των γεγονότων βλάβης σε δευτερεύουσες σύνθετες δομές (π.χ. πτερύγια ή πήχεις)

2. Πιθανότητα συμβάντος βλάβης: η προσομοίωση Monte Carlo παράγει γεγονότα βλαβών, αλλά αυτά πρέπει να μεταφραστούν σε κόμβους αστοχίας. Θεωρούνται πέντε τρόποι αστοχίας: αποκόλληση, διαστρωματικός διαχωρισμός, ολική βλάβη, επιφανειακή βλάβη, θερμική βλάβη). Κάθε ένας από αυτούς σχετίζεται με μία συγκεκριμένη (σταθερή) πιθανότητα εμφάνισης. Οι πιθανότητες εμφάνισης

παράγονται στη βάση ιστορικών δεδομένων από περιστατικά πρόσκρουσης και τις ανάλογες συνέπειες.

3. Ευρετικές μέθοδοι αναζήτησης: Για αυτές υποθέτουμε ότι μία σύνθετη συνιστώσα μπορεί να επισκυαστεί πέντε φορές στη σειρά πριν αντικατασταθεί. Επιπρόσθετα, γίνεται η υπόθεση ότι δεν υφίσταται βέλτιστη λύση όταν συμβαίνει αντικατάσταση της συνιστώσας δύο συνεχόμενες φορές. Η υπόθεση αυτή δεν είναι έγκυρη στην περίπτωση που το κόστος αντικατάστασης και το κόστος επισκευής είναι σχεδόν ίσα. Και οι δύο υποθέσεις χρησιμοποιούνται για να γίνουν οι διακλαδώσεις αντίστοιχων συνδυασμών και έτσι επιτρέπεται η επίλυση μακροχρόνιων προβλημάτων προγραμματισμού.

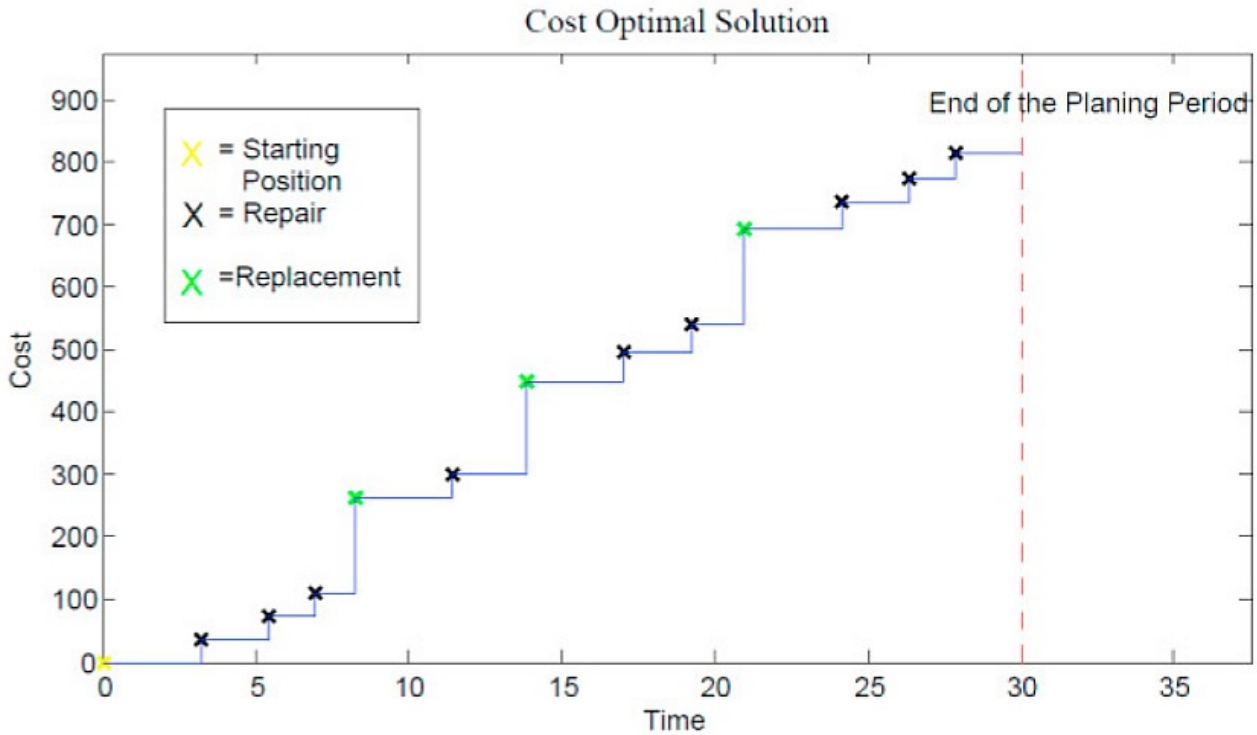
Πίνακας 23

Ρυθμίσεις μελέτης περίπτωσης DST

	Description	Values	Units
General Settings	Planning Period	**30**	months
	Option for damage simulation	**on**	-
Reliability Parameters	Improvement factor	**3**	-
	Initial failure rate	10^{-5}	-
	Maximal failure rate	10^{-4}	-
Maintenance Data	Component age	0	months
	Time of the first maintenance	3	months
	Time to repair	0.2	months
	Time to replace	0.4	months
Damage type probability	Debond	20	%
	Delamination	25	%
	Through Damage	5	%
	Surface Damage	40	%
	Heat Damage	10	%
Cost Parameters	Initial Cost	0	man-hours
	Inflation rate	4	%
	Cost for replacement	150	man-hours
	Cost for repair: Debond	37	man-hours
	Cost for repair: Delamination	45	man-hours
	Cost for repair: Through Damage	120	man-hours
	Cost for repair: Surface Damage	50	man-hours
	Cost for repair: Heat Damage	54	man-hours
Search Heuristics	Max. numb. of repairs[3]	5	-
	Max. numb. of replacements [3]	1	-

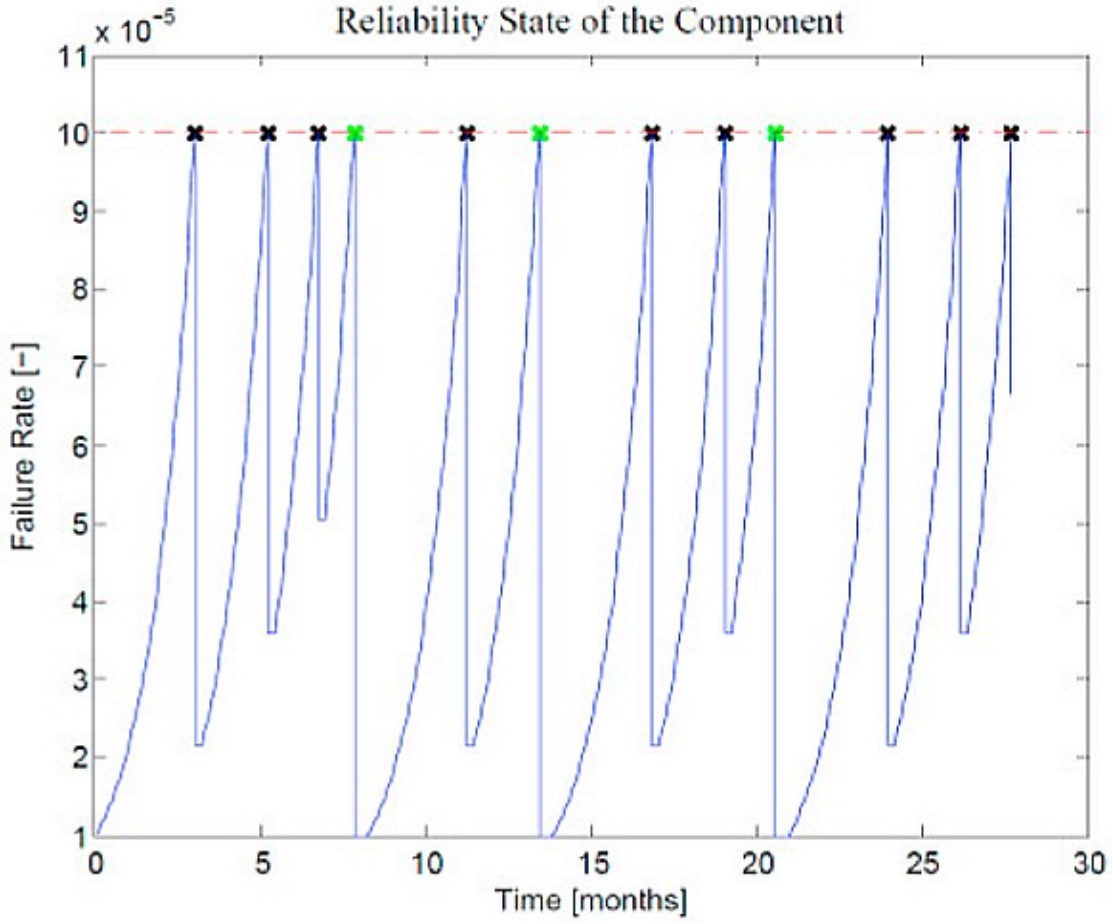
4Ε. 3.2. Αποτελέσματα και ανάλυση ευαισθησίας

Με τις παραμέτρους ρυθμισμένες όπως φαίνονται στον **Πίνακα 23**, η προσομοίωση Monte Carlo για βλάβες έχει εκτελεστεί 100 φορές ανά κρούσμα βλάβης, βοηθώντας στην εξαγωγή ενός αποδεκτού φάσματος πιθανοτήτων για κάθε τύπο βλάβης. Το **Σχήμα 42** αναδεικνύει το βέλτιστο αποτέλεσμα κόσους. Εδώ, η προτεινόμενη βέλτιστη λύση μπορεί να παρατηρηθεί ως αλληλουχία αποφάσεων επισκευής και αντικατάστασης, με τη σειρά MMMRMRMMRMMM, όπου M η απόφαση επισκευής και R η απόφαση αντικατάστασης. Τα αντίστοιχα κόστη και οι αντίστοιχοι χρόνοι φαίνονται στο γράφημα του **Σχήματος 42**.



Σχήμα 42. Λύση βέλτιστου κόστους

Το **Σχήμα 43** δείχνει τη συμπεριφορά της αξιοπιστίας που προκύπτει ως αποτέλεσμα της παρόδου του χρόνου, με ξεκάθαρη αναπαράσταση της πολιτικής ορίου αστοχίας, καθώς και την επίδραση της αποδοτικότητας επισκευών (δηλαδή του παράγοντα βελτίωσης) στο ρυθμό αστοχίας.



Σχήμα 43. Η συμπεριφορά της αξιοπιστίας στη βέλτιστη λύση

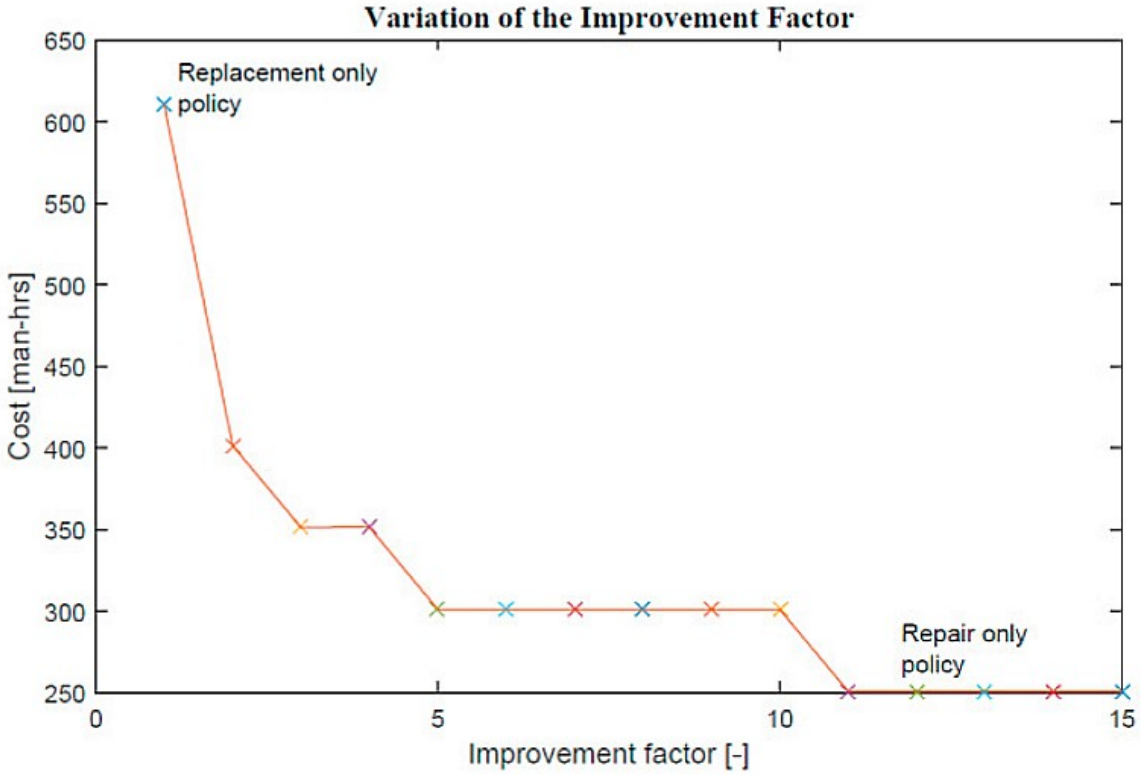
Για τη διερεύνηση της επίδρασης των ρυθμίσεων των παραμέτρων, εκτελέστηκε συστηματική ανάλυση ευαισθησίας. Ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αναφέρεται η διακύμανση του παράγοντα βελτίωσης. Στον **Πίνακα 24** φαίνονται οι σχετικές είσοδοι, όπου ο παράγοντας βελτίωσης μελετάται μέσα στο εύρος 1 – 15. για να επιτραπεί πλήρης αναζήτηση, οι ευρετικοί περιορισμοί παραλείπονται από την ανάλυση.

Πίνακας 24

Ρυθμίσεις ανάλυσης ευαισθησίας

	Description	Values	Units
General Settings	Planning Period	15	months
	Option for damage simulation	off	-
Reliability Parameters	Improvement factor	**1-15**	-
	Initial failure rate	10^{-5}	-
	Maximal failure rate	10^{-4}	-
Maintenance Data	Component age	0	months
	Time of the first maintenance	3	months
	Time to repair	0.2	months
	Time to replace	0.4	months
Cost Parameters	Cost Coefficient	**3**	-
	Initial Cost	0	man-hours
	Cost for repair	50	man-hours
	Cost for replacement	150	man-hours
	Inflation rate	4	%/year

Η έξοδος της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζεται στο **Σχήμα 44**. Αύξηση του παράγοντα βελτίωσης αντιστοιχεί σε αύξηση της ποιότητας επισκευής, το οποίο οδηγεί σε αύξηση της προτίμησης για αποφάσεις επισκευής. Στις άκρες του διαστήματος του παράγοντα βελτίωσης αναγνωρίζονται δύο διακριτές λύσεις, οι πολιτική αποκλειστικών επισκευών και η πολιτική αποκλειστικών αντικαταστάσεων.



Σχήμα 44. Ευαισθησία του παράγοντα βελτίωσης

5. Συμπεράσματα

Η εξέλιξη των παραγωγικών διαδικασιών την τελευταία δεκαετία έχει επίδραση στον τρόπο προγραμματισμού και διοίκησης της συντήρησης. Η ανάγκη για μείωση του κόστους μεταφράζεται σε ανάγκη για ελάττωση των ενδιάμεσων αποθεμάτων και αύξηση του επιπέδου αξιοπιστίας του εξοπλισμού, γεγονός που οδηγεί σε περαιτέρω ενσωμάτωση του μηχανολογικού εξοπλισμού στη διαδικασία διαχείρησης πόρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι προσωρινές διακοπές λειτουργίας ή οι ατομικές χρονοκαθυστερήσεις των μηχανολογικών συστημάτων του εξοπλισμού να καθίστανται αρνητική επιρροή στην όλη διαδικασία. Επομένως, νέες πολιτικές συντήρησης αναδύονται για να καλύψουν αυτήν την ανεπιθύμητη συμπεριφορά.

Αυτού του είδους οι πολιτικές απαιτούν προσπάθειες για την εξασφάλιση της αφοσίωσης όλων των συμμετεχόντων, από το προσωπικό υπεύθυνης λειτουργίας των εγκαταστάσεων παραγωγής έως τη διοίκηση. Γενικά, υπάρχει ευθύς προβληματισμός υπέρ της βελτιστοποίησης των διαδικασιών συντήρησης σε συντονισμό με την ολότητα του παραγωγικού συστήματος, μέσω του προγραμματισμού συντήρησης, της επιλογής των κατάλληλων πολιτικών για κάθε περίπτωση και της ανάλυσης της αποδοτικότητας.

Ωστόσο, οι βελτιώσεις της συντήρησης δεν καταλήγουν πάντα σε βελτιώσεις της παραγωγικής διαδικασίας, ειδικά όταν ο καθολικός στόχος είναι η ελάττωση των κοστών συντήρησης. Εκφράζεται η άποψη ότι η μείωση της χρονικής διάρκειας της συντήρησης, του πλήθους των επιθεωρήσεων και η αύξηση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού δεν είναι αρκετά εάν η μείωση των κοστών που εμπεριέχονται σε αυτές τις διαδικασίες δεν συνυπολογίζεται στην απαιτούμενη προσπάθεια. Οι μέθοδοι και τα εργαλεία της συντονισμένης βελτιστοποίησης καταλήγουν να κερδίζουν σημαντικό έδαφος σε αυτό το γενικό πλαίσιο, ως τρόπος εξασφάλισης της μείωσης κόστους και στα δύο σύμπαντα, με ενοποίηση της αναλυτικής διαδικασίας, της παρακολούθησης και του χρόνου διοίκησης. Συμπερασματικά, υπάρχει αυξημένη χρήση των ιεραρχικών μοντέλων για τον ορισμό της διάταξης των δράσεων εφαρμογής, συγκρίνοντας τις ανάγκες του παραγωγικού συστήματος με αυτές των παρεμβάσεων συντήρησης, με ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

Αυτές οι τάσεις αναφέρονται εννοιολογικά στην ολική βελτίωση της παραγωγικότητας, ως κεντρικό προβληματισμό της διαδικασίας. Η βιβλιογραφία ακόμα αναδεικνύει κάποια προβλήματα σε ό,τι αφορά την επίτευξη των στόχων υπό αυτές τις συνθήκες. Σε μια απόπειρα να ανταποκριθούν στην ανάγκη συνεχούς και αδιάλειπτης λειτουργίας και μέτρησης της κατάστασης του εξοπλισμού, κάποιες προτάσεις έχουν ακόμα πολύπλοκα μοντέλα, εκθέτοντας τις δυσκολίες και τα προσκόμματα του ορισμού δεικτών και δημιουργίας μεθόδων μετατροπής πληροφορίας σε γνώση.

Η ροπή προς συντονισμένες βελτιώσεις ανάμεσα στο παραγωγικό σύστημα και τη συντήρηση, είναι που θα επιφέρει νέες μελλοντικές μεθοδολογίες. Οι εναπομένουσες δυσκολίες και προκλήσεις υπερνικούνται ενσωματώνοντας τις κύριες μεθοδολογίες σε ένα πλαίσιο. Με αυτόν τον τρόπο αναμένεται ότι θα υπάρχει συνεχής ροή πληροφορίας στο σύνολο των μοντέλων λήψης αποφάσεων, με χρήση των καλύτερων αποτελεσμάτων ενός συγκεκριμένου σταδίου ως είσοδο μοντέλων σε κάποιο άλλο στάδιο. Αυτό θα εξασφάλιζε, για παράδειγμα, ότι τα αποτελέσματα που υποδεικνύουν χαμηλή αξιοπιστία συλλογής δεδομένων σε επίπεδο μηχανολογικών εγκαταστάσεων μπορούν να συνδράμουν σε διορθωτικές δράσεις σε αυτό το ζήτημα, αποτρέποντας την είσοδο ελλιπούς πληροφορίας σε προγνωστικά μοντέλα και τελικά ψευδείς εκτιμήσεις και έτσι τη διακύβευση όλων των επακόλουθων αποφάσεων, όπως για παράδειγμα την επιλογή πολιτικών συντήρησης ή τον καθορισμό χρονικών διαστημάτων μεταξύ των επιθεωρήσεων.

Παράλληλα, δεδομένης της αυξανόμενης χρήσης προληπτικών και πιθανοκρατικών μοντέλων στις θεωρημένες μεθοδολογίες της τελευταίας δεκαετίας, όσο και της εκτεταμένης ποσοστιαίας χρήσης των πολιτικών προληπτικής συντήρησης και συντήρησης με βάση την κατάσταση, υπάρχει σημαντική ζήτηση για την ανάπτυξη και την πρόοδο των τεχνολογιών παρακολούθησης πραγματικού χρόνου, με στόχο την εγγύηση μεγαλύτερης αξιοπιστίας των μετρούμενων αποτελεσμάτων. Η ενοποίηση αυτών των εργαλείων, υποβοηθούμενων από τη χρήση υπολογιστικών συστημάτων και γενετικών αλγορίθμων, είναι ικανή να εξελίξει και να βελτιστοποιήσει τα μοντέλα αυτόνομα.

Τα θεωρηθέντα άρθρα που απαρτίζουν την κατηγορία της Δοίκησης και Προγραμματισμού παρουσιάζουν εντονότερους προβληματισμούς σχετικά με την επισημοποίηση της γνώσης. Παρουσιάζουν, μεταξύ άλλων, μεθόδους για ποσοτική και ποιοτική ανάλυση της πληροφορίας, με σκοπό την αξιολόγηση και τη συνεχή βελτίωση των πολιτικών συντήρησης και επομένως, καθιστούν ικανές τις προδραστικές ενέργειες συντήρησης. Ωστόσο, είναι ακόμα πιθανή η παρατήρηση παρουσίας κενών κατά την ανάλυση των μοντέλων που σχετίζονται με αυτές τις προδραστικές δράσεις και κατά την εκλογή της καλύτερης πολιτικής.

Ένα από τα στοιχεία που υποστηρίζουν αυτόν τον ισχυρισμό βρίσκεται στη σύγκριση ανάμεσα στους τομείς Χρονοδρομολόγησης Συντήρησης και Ενοποίησης Συστημάτων, όπου υπάρχει η παρουσία αποτελεσματικών μοντέλων για τον καθορισμό των μεσοδιαστημάτων επιθεώρησης συντήρησης, αλλά συγκεκριμένα για διαφορετικό τύπο εξοπλισμού. Επιπλέον, σε ό,τι αφορά ζητήματα προδραστικότητας, ο τομέας της Παρακολούθησης και Ανάλυσης ασχολείται κυρίως με την παρουσίαση μεθόδων αυτοματοποίησης των μοντέλων λήψης αποφάσεων, ελαττώνοντας την επιρροή του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων και των προτιμήσεών του, ακόμα και σε

καταστάσεις όπου η πληροφορία που σχετίζεται με τη συμπεριφορά του συστήματος και των συνιστωσών του είναι ελλιπής.

Για την σύνθεση της προέλευσης και της ροής πληροφοριών μεταξύ των μοντέλων και της παροχής βελτιώσεων, υφίσταται η ανάγκη να αναφερθούν κάποιες δυσκολίες που είναι ακόμα παρούσες στις σύγχρονες μεθοδολογίες. Πρώτη από αυτές είναι ο προβληματισμός που υπάρχει σε κάποιες μεθοδολογίες σχετικά με την επισημοποίηση της γνώσης και της πληροφορίας σε συνδυασμό με τα δεδομένα που παράγονται από τα μετρητικά συστήματα. Αυτό καταδεικνύει ότι υπάρχουν ακόμα δυσκολίες σχετικά με τη σωστή διαχείρηση αυτών των δεδομένων.

Δεύτερον, υπάρχει ανάγκη βελτίωσης της ενοποίησης της ποιοτικής εκτίμησης του προβλήματος, η οποία είναι φανερά συνδεδεμένη με τις προτιμήσεις του ανθρώπου που λαμβάνει τις αποφάσεις, με την ποσοτική, η οποία πηγάζει από την αυτόματη λήψη δεδομένων. Αυτό αναφέρεται στην επισημοποίηση της πληροφορίας που επισημάνθηκε προηγουμένως, όπου παρά την τάση για αυτόνομες αποφάσεις, η δυσκολία της σωστής διαχείρησης των δεδομένων ενέχει τις προτιμήσεις του υπέυθυνου λήψης αποφάσεων ως βασικό και απροσπέλαστο βήμα στη ρύθμιση παραμέτρων των μοντέλων λήψης αποφάσεων.

Επιπρόσθετα, η εστίαση κάποιων μεθοδολογιών στη μείωση των κοστών συντήρησης συχνά παραβλέπει άλλες παραμέτρους όπως η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού ή το συνολικό κόστος παραγωγής. Με τον προτεινόμενο τρόπο, είναι πιθανή η επιτυχία της μείωσης του κόστους των εργασιών συντήρησης, αλλά έχει αντίκτυπο στους άλλους αντικειμενικούς στόχους.

Αντικειμενικός στόχος αυτής της εργασίας είναι η επισήμανση και ο ορισμός των κυρίων σταδίων που εμπεριέχουν τη λήψη αποφάσεων στα μηχανολογικά συστήματα σύμφωνα με τις περιοχές εφαρμογής, επιτρέποντας συνεχείς βελτιώσεις καθ’ όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Οι παράμετροι που απορρέουν από την κρίση της αυθεντίας (δηλαδή οι προτιμήσεις του υπέυθυνου λήψης αποφάσεων) και από τη βάση δεδομένων λειτουργούν ως εισροές στα μοντέλα που επιφορτίζονται με διάφορες εργασίες.

Κατά το στάδιο της ανάλυσης, οι προγνώσεις, οι διαγνώσεις και οι εκτιμήσεις γίνονται πάνω σε ποικίλλα θέματα όπως τα κόστη που εμπεριέχονται, οι ρυθμοί υποβάθμισης του συστήματος, η πιθανότητα αστοχιών, η ανάλυση ρίσκου, η ευρωστία των μηχανών και η συνεχής επαλήθευση της αξιοπιστίας αυτών των μοντέλων και μετρητικών συστημάτων καθώς και της συλλογής δεδομένων. Η πληροφορία παραδίδεται ως υποστήριξη των εισόδων των μοντέλων για την εκλογή της καλύτερης πολιτικής συντήρησης και επερχόμενου προγραμματισμού και διοίκησης.

Δεδομένης της βέλτιστης πολιτικής συντήρησης για κάθε περίπτωση, είναι πιθανή η ρύθμιση παραμέτρων των μοντέλων που είναι υπεύθυνα για τον καθορισμό

των χρονικών διαστημάτων που μεσολαβούν ανάμεσα στις προληπτικές επιθεωρήσεις των μηχανών. Αυτό το στάδιο ενοποιεί τους αντικειμενικούς στόχους συντήρησης με το παραγωγικό σύστημα. Η αποτελεσματικότητα του προγράμματος συντήρησης που ορίζεται από αυτή τη διαδικασία επαληθεύεται από μοντέλα συντονισμένης βελτιστοποίησης ανάλογα με τους διαφορετικούς τύπους εξοπλισμού που είναι παρόντες στο σύστημα.

Οι εργασίες συντήρησης πραγματοποιούνται στο σύστημα με ταυτόχρονη καταγραφή νέων δεδομένων ώστε να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στα μοντέλα πρόγνωσης, διάγνωσης και εκτίμησης. Με αυτόν τον τρόπο, τα προγενέστερα ορθά αποτελέσματα, που μπορεί να προκύπτουν για παράδειγμα από συλλογιστική βάσει περιπτώσεων (case-based reasoning ή CBR), αναμένεται να βελτιώνονται από τα μοντέλα για την εκ νέου λήψη αποφάσεων. Επομένως, αυξάνοντας την αξιοπιστία των προγνωστικών μοντέλων, διευρύνεται το πλήθος των διαθέσιμων προδραστικών προτάσεων, και αναμένονται οι δράσεις συντήρησης πολύ πριν από τα συμβάντα αστοχίας. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι επαναληπτική με συνεχή τρόπο με στόχο τη βελτίωση των μοντέλων με ολοένα και πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η λήψη αποφάσεων συντήρησης έχει άμεση επιρροή στη διοίκηση ολόκληρης της παραγωγικής διαδικασίας. Παρατηρείται αυξημένη τάση προς την κατεύθυνση της αναζήτησης της διαλειτουργικότητας μεταξύ των διοικητών και των ομάδων συντήρησης και παραγωγής, όπου η πληροφορία και η γνώση πρέπει να διατίθενται με τρόπο κατανοητό σε όλα τα επίπεδα. Αυτός ο διαμερισμός της πληροφορίας καθιστά δυνατές τις συλλογικές βελτιώσεις, διευκολύνοντας εξυπνότερες λύσεις σε όλους τους τομείς. Ως αποτέλεσμα, οι μέθοδοι που εφαρμόζονται προς την κατεύθυνση της προόδου των διαφόρων πολιτικών λήψης αποφάσεων διευρύνονται.

Επόμενη εξέλιξη των εννοιολογικών ιδεών εστιάζει σε πολιτικές προληπτικής συντήρησης και συντήρησης βάσει της κατάστασης. Παρατηρούνται προσπάθειες κανονικοποίησης διαδικασιών, στις οποίες η εξέλιξη των πληροφοριακών συστημάτων παρέχει μηχανές με ικανότητες αυτοδιάγνωσης, παράγοντας αυτόνομες αποφάσεις χωρίς την ανθρώπινη παρεμβολή. Αυτή η οπτική γίνεται πιθανή από την παρατήρηση του μεγάλου αριθμού δεδομένων και πληροφορίας που εξάγεται απευθείας από τον μηχανολογικό εξοπλισμό, σε σχέση με την πληροφορία που παρέχεται από την κρίση της αυθεντίας.

Εν κατακλείδι, η αυτοματοποίηση της διαγνωστικής, της παρακολούθησης του εξοπλισμού, των εντολών εργασίας, της αγοράς ανταλλακτικών και της κατάταξης των απαραίτητων ενεργειών για τις βέλτιστες επιθεωρήσεις συντήρησης, έχουν ως απόρροια τη συγκέντρωση του ενδιαφέροντος συμμετοχής ανθρώπινης δέσμευσης στην καλύτερη γνώση του συστήματος, απαιτώντας αυξημένες και συνεχείς επαγγελματικές δεξιότητες.

6. Βιβλιογραφία

Bashiri, M., Badri, H., Hejazi, T.H., 2011. Selecting optimum maintenance strategy by fuzzy interactive linear assignment method. Applied Mathematical Modelling, 35, 152–164.

Bousdekis, A., Magoutas, B., Apostolou, D., Mentzas, G., 2015. A proactive decision making framework for condition-based maintenance. Industrial Management & Data Systems, 115(7), 1225-1250. <https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2015-0071>

Bousdekis, A., Papageorgiou, N., Magoutas, B., Apostolou, D., Mentzas, G., 2018. Enabling condition-based maintenance decisions with proactive event driven computing. Computers in Industry, 100, 173–183.

Chaabane, K., Khatab, A., Aghezzaf, E.H., Diallo, C., Venkatadri, U., 2018. Outsourcing selective maintenance problem in failure prone multi-component systems, IFAC PapersOnLine, 55(11), 525–530.

Do, P., Voisin, A., Levrat, E., Iung, B., 2015. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. Reliability Engineering and System Safety, 133, 22–32.

Gopalakrisgnan, M., 2018. Data-Driven Decision Support for Maintenance Prioritisation Connecting Maintenance to Productivity, PhD Thesis. Chalmers University of Technology, Sweden.

Hong, H.P., Zhou, W., Zhang, S., Ye, W., 2014. Optimal condition-based maintenance decisions for systems with dependent stochastic degradation of components. Reliability Engineering and System Safety, 21, 276–288.

Khataba, A., Diallob, C., Venkatadrib, U., Liub, Z., Aghezzafc, E.H., 2018. Optimization of the joint selective maintenance and repairperson assignment problem under imperfect maintenance. Computers & Industrial Engineering, 125, 413–422.

Laksa, P., Verhagen, W.J.C., 2018. Identification of optimal preventive maintenance decisions for composite components. Transportation Research Procedia, 29, 202–212.
Leontaris, G., Morales–Napoles, O., 2018. ANDURIL — A MATLAB toolbox for ANalysis and Decisions with UnceRtaInty: Learning from expert judgments. SoftwareX, 7, 313–317.

Lin, L., Luo, B., Zhong, S., 2017. Development and application of maintenance decision-making support system for aircraft fleet. Advances in Engineering Software, 114, 192–207.

Liu, X., He, D., Lodewijks, G., Pang, Y., Mei, J., 2019. Integrated decision making for predictive maintenance of belt conveyor systems. Reliability Engineering and System Safety, 188, 347–351.

Nguyen, K.T.P., Do, P., Huynh, K.T., Bérenguer, C., Grall, A., 2019. Joint optimization of monitoring quality and replacement decisions in condition-based maintenance. Reliability Engineering and System Safety, 189, 177–195.

Medina–Oliva, G., Weber, P., Iung, B., 2015. Industrial system knowledge formalization to aid decision making in maintenance strategies assessment. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 37, 343–360.

Rastegari, A., Mobin, M., 2016. Maintenance Decision Making, Supported By Computerized Maintenance Management System, 10.1109/RAMS.2016.7448086.

Ruschel, E., Alves, E., de Freitas, E., 2017. Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review. Journal of Manufacturing Systems, 45, 180–194.

Tang, Y., Zou, Z., Jing, J., Zhang, Z., Xie, C., 2015. A framework for making maintenance decisions for oil and gas drilling and production equipment. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 26, 1050–1058.

Tian, Z., Liao, H., 2011. Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model. Reliability Engineering and System Safety, 96, 581–589.