

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :

**«Προληπτική Συντήρηση Εξοπλισμού με Εφαρμογές
στη Ναυτιλία»**

ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : κ. ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της σύνταξης της διπλωματικής μου εργασίας και κλείνοντας τον κύκλο σπουδών στην Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης θεωρώ το λιγότερο αναγκαίο να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στα πρόσωπα εκείνα που στάθηκαν κοντά μου όλα αυτά τα χρόνια της φοίτησής μου. Αρχικά στους φίλους και συμφοιτητές μου για όλες εκείνες τις όμορφες στιγμές που περάσαμε και στις εμπειρίες που πα μοιραζόμαστε. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου τον κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο για την συμβολή του και την επικοινωνία μας κατά της διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, στους γονείς μου, την αδερφή μου και την γιαγιά μου για την πολύτιμη και πολύπλευρη στήριξή τους τόσο στις ευχάριστες αλλά και στις δυσάρεστες στιγμές όλων αυτών των χρόνων.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	7
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.2.....	8
ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	8
1.2.1 ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ.....	9
1.2.2 ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (PvM).....	9
1.2.3 ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (PdM).....	10
1.3.....	11
ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	13
ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	13
2.1.....	13
ΕΙΔΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ.....	13
2.2 ΤΜΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΟΥ.....	14
2.3.....	16
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	19
ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ.....	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2.....	20
ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ DT 5 ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ.....	20
3.3 ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ 5 ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ.....	22
3.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΥ DT.....	25

3.4.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ.....	25
3.4.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ (VE).....	26
3.4.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ (DD).....	26
3.4.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (Ss).....	27
3.4.5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΩΝ (CN).....	28
3.5.....	28
ΟΦΕΛΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ.....	28
3.5.1 ΟΦΕΛΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ.....	28
3.5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	31
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΥΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ.....	31
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	31
4.2 ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (PREVENTIVE MAINTENANCE). 32	
4.3.1 ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΕΙΑΣ (Prognostics and Health Management).....	32
4.3.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΓΕΙΑΣ (Health Condition Monitoring).....	34
4.3.3 ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΗΣ (Fault Diagnosis).....	38
4.3.4 ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΥΓΕΙΑΣ (Health Prognosis).....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	51
ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΒΕΛΠΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	51
5.1.....	51
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	51
5.2.....	52
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ.....	52
5.3.....	58
ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	58
5.4.....	62
ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	68
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ (CMMS).....	68
6.2.....	70
ΣΥΝΗΘΗ CMMS.....	70
6.3.....	74
ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΠΑΚΕΤΑ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	74
6.4.....	79
ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ (Maintenance Decision).....	79

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η περιγραφή του τρόπου με τον οποίο η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων (Digital Twin, DT) αξιοποιείται για την προληπτική συντήρηση εξοπλισμού, καθώς επίσης και πως η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή στον κλάδο της Ναυτιλίας. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη περιγραφή των κυρίαρχων προσεγγίσεων στην συντήρηση του εξοπλισμού και μία επισκόπηση των διαδικασιών συντήρησης που διέπουν την ναυτιλιακή βιομηχανία. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται η διαφοροποίηση της έννοιας προληπτικής συντήρησης σε περιοδική και προβλεπτική και διευκρινίζεται ότι το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας εστιάζει στην προβλεπτική. Παράλληλα, γίνεται αναφορά κύριων χαρακτηριστικών των πλοίων καθώς και των κύριων στοιχείων εξοπλισμού τους. Στην συνέχεια, περιγράφεται το ψηφιακό δίδυμο με έμφαση σε πέντε δομικά χαρακτηριστικά του και τις κύριες τεχνολογίες που τα υποστηρίζουν όπως αυτά παρουσιάζονται στην σύγχρονη βιβλιογραφία. Έπειτα ακολουθεί η ανάλυση της μεθόδου της προβλεπτικής συντήρησης με την έννοια : «Πρόγνωση και Διαχείριση Υγείας» (Prognostics and Health Management), περιγράφοντας αναλυτικά την διαδικασία και αναδεικνύοντας τον τρόπο που ενσωματώνεται η τεχνολογία του DT. Εδώ, παρουσιάζονται και οι τρεις κύριες τεχνικές :ανάλυση κραδασμών, θερμογραφία, υπέρηχοι, που εφαρμόζονται από την συγκεκριμένη μέθοδο. Τέλος γίνεται αναφορά στην ενσωμάτωση της προβλεπτικής συντήρησης σε επιχειρησιακό επίπεδο με ενδεικτικές εφαρμογές σύγχρονων ναυτιλιακών πληροφοριακών συστημάτων .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Τύποι συντήρησης

Εικόνα 2 Digital Twin πέντε διαστάσεων

Εικόνα 3 Τεχνολογίες υποστήριξης τμημάτων DT

Εικόνα 4 Relationship diagram of four parts of PHM

Εικόνα 5 Διάγραμμα διαδικασίας Health Condition Monitoring

Εικόνα 6 μοντέλο διάγνωσης βασισμένο στη γνώση (Inference engine)

Εικόνα 7 Different HSs: **(a)** one stage of specific equipment and **(b)** two stages of some systems and **(c)** three stages of bearings

Εικόνα 8 κατηγορίες μεθόδων πρόβλεψης RUL

Εικόνα 9 συνοπτική περιγραφή σταδίων διαδικασίας ανάλυσης κραδασμών

Εικόνα 10 vibration sensor

Εικόνα 11 αισθητήρες κραδασμών σε ηλεκτρική μηχανή

Εικόνα 12 διάγραμμα ταχύτητας κραδασμών σε ηλεκτροκινητήρα

Εικόνα 13 thermocouples

Εικόνα 14 θερμικές κάμερες

Εικόνα 15 εικόνα λογισμικού θερμογραφίας

Εικόνα 16 Μπλοκ διάγραμμα της γενικής δομής του έξυπνου αισθητήρα για διάγνωση σφαλμάτων με βάση την υπέρυθρη θερμογραφία

Εικόνα 17 Διάγραμμα εφαρμογής τεχνικής υπερήχων

Εικόνα 18 πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας

Εικόνα 19 couplant (συζευκτικό υλικό)

Εικόνα 20 A-Scan presentation

Εικόνα 21 B-Scan presentation

Εικόνα 22 C-Scan presentation

Εικόνα 23 ψηφιακή αποτύπωση μηχανής πλοίου με το λογισμικό Engine Hyper Cube

Εικόνα 24 screenshot User interface λογισμικού Engine Hyper Cube

Εικόνα 25 διαγραμματική απεικόνιση εφαρμογής συστήματος METIS CYBERSPACE TECHNOLOGY SA

Εικόνα 26 A: M/E, B : scrubbers, C: BWT

Εικόνα 27 screenshot λογισμικού CASSANDRA (DeepSea)

Εικόνα 28 διάγραμμα συνάρτησης κόστους και συνολικών βλαβών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση σε συνδυασμό με τον ολοένα και αυξανόμενο αριθμό νέων τεχνολογιών που την πλαισιώνουν, δημιούργησαν ένα νέο περιβάλλον επιχειρησιακού σχεδιασμού και στρατηγικής. Το περιβάλλον αυτό ευνοείται από το μειωμένο κόστος παραγωγής «έξυπνων» συσκευών και νέων μεθόδων. Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις ήταν αυτή της διασύνδεσης του πραγματικού με τον ψηφιακό χώρο, γεννώντας έτσι την έννοια των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twin), η εφαρμογή των οποίων σε συνδυασμό με τεχνολογίες αιχμής όπως big data analytics και τεχνητής νοημοσύνης, επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στην πλειονότητα των βιομηχανικών κλάδων.

Το πλαίσιο αυτό ευνοεί την ανάπτυξη και την διεύρυνση διάφορων σύγχρονων μεθόδων. Μια από αυτές τις μεθόδους είναι και η προβλεπτική συντήρηση, η οποία αποτελεί μια διαφορετική φιλοσοφία προσέγγισης των διαδικασιών συντήρησης της βιομηχανίας. Η ευκολία πρόσβασης σε σύγχρονες συσκευές και μεθόδους βελτιστοποίησης, δίνουν την δυνατότητα δημιουργίας ενός προγράμματος συντήρησης με σκοπό τον άμεσο εντοπισμό κάποιας δυσλειτουργίας, την πρόβλεψη της βλάβης καθώς και τον κατάλληλο προγραμματισμό των απαραίτητων ενεργειών συντήρησης. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους και καθίσταται αναγκαία για την εξασφάλιση ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον.

Η ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της ελληνικής οικονομίας, είναι ένας κλάδος που η εφαρμογή των παραπάνω τεχνολογιών και μεθόδων κρίνεται απαραίτητη. Η δυνατότητα πρόβλεψης πιθανών κινδύνων και δημιουργίας της βέλτιστης σχεδίασης θα βελτιώσει σημαντικά την ασφάλεια και τη λειτουργία. Με το στοιχείο του αγνώστου σημαντικά περιορισμένο, η έννοια του ψηφιακού διδύμου μπορεί να βοηθήσει τη ναυτιλιακή βιομηχανία να κάνει καλύτερη χρήση της ψηφιοποίησης και να περάσει σε μια «νέα εποχή». Με

τελικό χαρακτηριστικό την τελική βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας και αύξηση της επίγνωσης της κατάστασης.

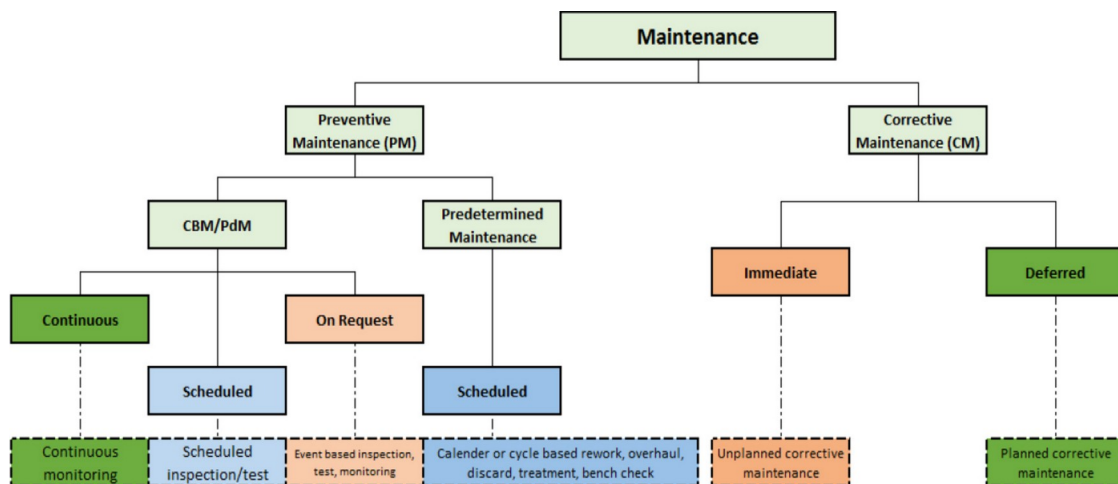
1.2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Γενικά εντοπίζονται δύο βασικές προσεγγίσεις στην διαδικασία συντήρησης εξοπλισμού : η προληπτική (Preventive Maintenance, PnM) και η επιδιορθωτική (Corrective Maintenance, CM) . Η προληπτική αναλύεται σε 2 επί μέρους κατηγορίες: την συντήρηση βάση κατάστασης (Condition Based Maintenance, CBM) και την περιοδική/προγραμματισμένη (scheduled) . Ο 20^{ος} αιώνας αποδείχθηκε σταθμός για τις εξελίξεις που έλαβαν χώρα γύρω από τις παραπάνω προσεγγίσεις. Η κυριότερη αλλαγή ήταν η μετάβασή από την φιλοσοφία της επιδιορθωτικής συντήρησης σε μία φιλοσοφία προληπτικής συντήρησης, με στόχο την πρόληψη της αστοχίας. Η ανάπτυξη βιομηχανικών συστημάτων παραγωγής σε συνδυασμό με την αύξηση της πολυπλοκότητας του εξοπλισμού κατέστησαν την αλλαγή αυτή αναγκαία.

Στη δεκαετία του 1970, η αμερικανική βιομηχανία άμυνας και αεροπορίας πρωτοστάτησε στο CBM, το οποίο εστίαζε στην παρακολούθηση της κατάστασης των εξαρτημάτων για την εκτέλεση συντήρησης όταν οι κρίσιμες παράμετροι υπερέβαιναν τα προκαθορισμένα εύρη. Την CBM διαδέχθηκε η Προβλεπτική Συντήρηση (Predictive Maintenance, PdM), η οποία αναλύει τις ιστορικές τάσεις για τον έγκαιρο εντοπισμό πιθανών βλαβών και τη βελτιστοποίηση των δραστηριοτήτων συντήρησης, οδηγώντας σε μειωμένο λειτουργικό κόστος.(V. J. Jimenez, 2020).

Και ενώ το η προβλεπτική φιλοσοφία έχει αποκτήσει μεγάλο έδαφος στις κατασκευές, την παραγωγή και τις αερομεταφορές, η ναυτιλιακή βιομηχανία έχει βασιστεί κυρίως σε προγράμματα περιοδικής συντήρησης (PnM), προγραμματίζοντας τη συντήρηση με βάση τις συστάσεις του κατασκευαστή και τις απαιτήσεις του νηογνώμονα. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να εγγυηθεί μηδενικές αστοχίες και συνεπάγεται κόστος χωρίς πρόσθετα οφέλη. Μόνο ένα μικρό ποσοστό πλοίων χρησιμοποιεί αυτήν τη στιγμή PdM στη στρατηγική συντήρησης, χωρίς διαθέσιμο μεγάλο αριθμό βιβλιογραφικών πηγών σχετικά με την ενσωμάτωση μιας φιλοσοφίας πρόβλεψης συντήρησης χρησιμοποιώντας ένα καθιερωμένο σχήμα προβλεπτικής συντήρησης (V. J. Jimenez, 2020) Ακολουθεί εικόνα με διάγραμμα των παραπάνω αναφερθέντων μεθοδολογιών συντήρησης :



ΕΙΚΟΝΑ 1. Τύποι συντήρησης (E. CEN , Maintenance terminology 13306 (2010), European Committee for Standardization, Brussels, 2001 European Standard .)

1.2.1 ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1, μία από τις συμβατικές μεθόδους συντήρησης είναι η επιδιορθωτική. Αυτός ο τύπος συντήρησης εξ ορισμού σηματοδοτεί την έναρξη ενεργειών συντήρησης μετά την εμφάνιση της βλάβης ακολουθώντας το δόγμα «λειτουργία έως την βλάβη» (Run To Failure). Με αυτόν τον τρόπο η συγκεκριμένη προσέγγιση τοποθετεί τις ενέργειες συντήρησης σε χρόνο μεταγενέστερο της βλάβης καθιστώντας ουσιαστικά ενέργειες επισκευής του εξοπλισμού.

Στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον και λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας των μηχανημάτων, η επιλογή μιας στρατηγικής επιδιορθωτικής συντήρησης δεν αποτελεί την βέλτιστη λύση, καθώς δεν προσφέρει δυνατότητα χρονοπρογραμματισμού εργασιών και ταυτόχρονα δημιουργείται αβεβαιότητα ως προς το χρονικό εύρος που θα παραμείνει εκτός λειτουργίας κάποιο σύστημα εξοπλισμού (Downtime). Ωστόσο, η εφαρμογή ενός τέτοιου προγράμματος συντήρησης μπορεί να κριθεί ως κατάλληλη επιλογή όταν ο εξοπλισμός που εφαρμόζεται δεν είναι κρίσιμος για την συνολική εύρυθμη λειτουργία.

1.2.2 ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (PvM)

Η περιοδική συντήρηση είναι η μέθοδος συντήρησης, η οποία λαμβάνει χώρα σε χρόνο προγενέστερο της βλάβης, ακολουθεί δηλαδή την φιλοσοφία «φτιάξε το πριν χαλάσει». Η συγκεκριμένη προσέγγιση λειτουργεί με την εκτέλεση εργασιών συντήρησης σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία συνήθως προκύπτουν

από τις οδηγίες και τις συστάσεις του κατασκευαστή, τα οποία προκύπτουν από ιστορικές παρατηρήσεις και το μοτίβο της συμπεριφοράς του εξοπλισμού.

Η βασική ιδέα που διέπει την παραπάνω μέθοδο είναι ότι το κάθε εξάρτημα ή σύστημα υποβαθμίζεται δομικά με την πάροδο του χρόνου, μέχρι την εμφάνιση αστοχίας. Η περιοδική συντήρηση εκτελείται ανεξάρτητα της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το σύστημα και ως εκ τούτου δεν λαμβάνει υπόψιν την απόδοσή του την δεδομένη χρονική στιγμή. Μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αντικατάσταση εξαρτημάτων ή συστημάτων τα οποία διέθεταν περισσότερο ωφέλιμο χρόνο ζωής. Το μειονέκτημα αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο στο συνολικό επιχειρησιακό κόστος καθώς ανεβάζει σημαντικά το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού.

Τέλος η πολυπλοκότητα του σύγχρονου εξοπλισμού καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την παρατήρηση και τον εντοπισμό μοτίβων συμπεριφοράς με τις απλές συμβατικές μεθόδους, δημιουργώντας την ανάγκη χρήσης μιας πιο αποτελεσματικής προσέγγισης.

1.2.3 ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (PdM)

Η PdM ως διάδοχος της συντήρησης βάσει κατάστασης φέρει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της κατάστασης λειτουργίας
- Χρήση ιστορικών δεδομένων
- Ανάλυση όλων των παραπάνω για την πρόβλεψη της αστοχίας

Με την δυνατότητα που παρέχεται από τους σύγχρονους αισθητήρες καθώς και άλλες « έξυπνες συσκευές », είναι η δυνατή η διαρκής παρακολούθηση της λειτουργίας του εξοπλισμού. Τα δεδομένα αυτά σε συνδυασμό με ιστορικά δεδομένα λειτουργίας καθώς και δεδομένα από άλλες αναλύσεις επεξεργάζονται ώστε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης βλάβης.

Εδώ ακολουθείται η φιλοσοφία « αν δεν είναι χαλασμένο, μην το φτιάξεις », με βασικό κίνητρο την ελαχιστοποίηση των περιττών ενεργειών συντήρησης και ταυτόχρονα την μείωση του συνολικού νεκρού χρόνου.

Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι το μεγάλο αρχικό κόστος επένδυσης (V. J. Jimenez, 2020), γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή σε συγκεκριμένα κρίσιμα συστήματα και εξαρτήματα του εξοπλισμού.

1.3

ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Η ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί έναν κλάδο με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που τον διαφοροποιεί από τους υπόλοιπους βιομηχανικούς κλάδους. Δραστηριοποιείται σε ένα πολυπαραγοντικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον, το θαλάσσιο περιβάλλον. Ταυτόχρονα απαρτίζεται ένα σημαντικά μεγάλο αριθμό εταιρειών οι οποίες διαθέτουν στόλους διαφορετικής ισχύος. Τις συνθήκες αυτού του περιβάλλοντος καλούνται να αντιμετωπίσουν και οι διαδικασίες συντήρησης, οι οποίες πρέπει να λάβουν την αντίστοιχη μορφή .

Το πλαίσιο αυτό καθιστά δυσκολότερη την ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων συντήρησης σε σχέση με άλλες βιομηχανίες. Ταυτόχρονα, η συντηρητική στάση που διατηρεί η ναυτιλιακή βιομηχανία απέναντι σε σύγχρονες τεχνολογίες και μεθόδους δεν ευνοούν την εγκαθίδρυση νέων προδιαγραφών συντήρησης.

Ωστόσο η ολοένα και διεύρυνση των εφαρμογών των νέων τάσεων σε συνδυασμό με την πρόοδο σε ερευνητικό επίπεδο, δημιουργούν ένα πρόσφορο έδαφος για μία ψηφιακή μετάβαση. Αυτή την στιγμή, η παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού των πλοίων, βασίζεται κυρίως σε αναλύσεις με απλές μεθόδους και δεδομένα καταγραφής που προέρχονται από τα συστήματα παρακολούθησης του πλοίου και από φορητές μη συγχρονισμένες συσκευές ανάλυσης. Έτσι ένα πρώτο βήμα που θα πρέπει να γίνει, είναι η εγκατάσταση τεχνολογιών αιχμής για την διαχείριση των δεδομένων.

Ένας ακόμα λόγος που καθιστά απαραίτητη την βελτίωση των διαδικασιών συντήρησης στη ναυτιλία, είναι η επικινδυνότητα που την χαρακτηρίζει. Η προστασία των ανθρώπινων ζωών καθώς και του θαλάσσιου περιβάλλοντος αποτελεί βασική προτεραιότητα του IMO (International Maritime Organization), που υπάγεται στον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών. Για την πραγματοποίηση του παραπάνω στόχου, ο IMO θεσπίζει μια σειρά κανονισμών με τους σημαντικότερους να είναι οι εξής :

- ISM (International Safety Management code) : με σκοπό την δημιουργία ενός κανονιστικού πλαισίου διαχείρισης διαδικασιών στις ναυτιλιακές εταιρείες, περιλαμβάνοντας και κανόνες που εξασφαλίζουν την αποτελεσματική συντήρηση. Το Άρθρο 10 του ISM αναλυτικότερα αναφέρει : Η εταιρεία θα πρέπει να καθιερώσει διαδικασίες για να διασφαλίσει ότι το πλοίο διατηρείται σε συμμόρφωση με τις διατάξεις των σχετικών κανόνων και κανονισμών και με οποιεσδήποτε πρόσθετες απαιτήσεις που μπορεί να καθοριστούν από την εταιρεία.

- SOLAS (Safety Of Life At Sea) :που εστιάζει στην ασφαλή κατασκευή του πλοίου καθώς και την εξασφάλιση του όλου του απαραίτητου εξοπλισμού και διαδικασιών ασφαλούς ναυσιπλοΐας.
- MARPOL (Marine Pollution Covention) : Η σύμβαση απαρτίζεται από κανονισμούς που έχουν ως στόχο την πρόληψη και την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης από τα πλοία και περιλαμβάνει έξι τεχνικά παραρτήματα. Στα περισσότερα παραρτήματα συμπεριλαμβάνονται ειδικά εδάφια με για αυστηρούς ελέγχους στα επιχειρησιακά απόβλητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

2.1

ΕΙΔΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ

Οι βασικοί λόγοι για την χρήση πλοίων είναι δύο:

- I. Η μεταφορά επιβατών (επιβατικά)
- II. Η μεταφορά αγαθών-εμπορευμάτων (εμπορικά-φορτηγά)

Τα επιβατικά πλοία χωρίζονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες: α) τα πλοία γραμμής και β) τα κρουαζιερόπλοια.

Τα εμπορικά πλοία ωστόσο επιμερίζονται σε περισσότερες κατηγορίες εξαιτίας της διαφοροποίησης του φορτίου που είναι σχεδιασμένα να φέρουν. Μία βασική κατηγοριοποίηση που θα μπορούσε να γίνει είναι η εξής:

1. Πλοία γενικού φορτίου
2. Πλοία μεταφοράς χύδην (χύμα) φορτίου
3. Πλοία μεταφοράς υγρού φορτίου
4. Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships)
5. Πλοία μεταφοράς αερίων
6. Πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων
7. Άλλες ειδικές κατηγορίες

Υποκατηγορίες αυτών είναι οι ακόλουθες :

- Δεξαμενόπλοια : για την μεταφορά κυρίως αργού πετρελαίου και άλλων υποπροϊόντων του
- LPG Carriers : για την μεταφορά υγροποιημένων πετρελαϊκών και χημικών αερίων
- LNG Carriers : για την μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου
- Reefer Ships : για την μεταφορά προϊόντων που απαιτούν ψύξη (π.χ. κρέατα, φρούτα κ.α.)
- Επιβατηγά πλοία – Ro/Ro : Μεταφορά ανθρώπων, αυτοκινήτων και φορτηγών

Μία άλλη κατηγοριοποίηση που μπορεί να γίνει είναι βάσει μεγέθους και μεταφορικής ικανότητας. Η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση πραγματοποιείται με σκοπό την συσχέτιση διαστάσεων και των λιμένων , καναλιών καθώς από τις διώρυγες που διέρχονται τα πλοία

Έτσι έχουμε :

- I. Handysize : μικρά δεξαμενόπλοια με μεταφορική ικανότητα 35.000-40.000 τόνων. Είναι κατάλληλα για προσέγγιση τόσο σε μικρά λιμάνια όσο και σε μεγαλύτερα. Αποτελούν την πλειοψηφία των ποντοπόρων πλοίων παγκοσμίως
- II. Sewaymax : Είναι τα μεγαλύτερα πλοία τα οποία μπορούν να διέλθουν από τις δεξαμενές του St. Lawrence Seaway
- III. Handymax/Supramax : σχετικά μικρά φορτηγά πλοία με μεταφορική ικανότητα <60.000 τόνους. Λόγω διαστάσεων είναι κατάλληλα για προσέγγιση σε πληθώρα λιμανιών.
- IV. Panamax/new Panamax : Τα συγκεκριμένα πλοία πληρούν τους κανονισμούς διαστάσεων για την διέλευση από την διώρυγα του Παναμά, ενώ η μεταφορική τους ικανότητα κυμαίνεται σε 65.000 τόνους.
- V. Aframax : Πρόκειται για δεξαμενόπλοια με μεταφορική ικανότητα 80.000-120.000 τόνους κατάλληλα για μικρές και μεσαίες αποστάσεις
- VI. Suezmax : Έχουν διαστάσεις κατάλληλες για την διέλευση από την διώρυγα του Σουέζ και η μεταφορική τους ικανότητα είναι μεταξύ 120.000-200.000 τόνους.
- VII. Q-Max (Qatar- max) : Είναι τα μεγαλύτερα πλοία LNG τα οποία μπορούν να προσεγγίσουν τερματικούς σταθμούς LNG στο Κατάρ και η μεταφορική τους ικανότητα είναι περίπου 266.000 κυβικά μέτρα φυσικού αερίου.
- VIII. Malaccamax : Διαθέτουν τις μέγιστες διαστάσεις για την διέλευση από το στενό Malacca της Σιγκαπούρης.
- IX. Capesize : Φορτηγά πλοία με μεταφορική ικανότητα από 150.000 τόνους έως 400.000 τόνους. Στην πλειονότητά τους μεταφέρουν άνθρακα και σίδηρο.
- X. VLCC και ULCC : Very Large Crude Carriers και Ultra Large Crude Carriers , με μεταφορική ικανότητα <320.000 τόνων και > 320.000 αντιστοίχως .

2.2 ΤΜΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΟΥ

Τα βασικά τμήματα ενός πλοίου είναι τα εξής :

1. Άγκυρα (anchor) : πρόκειται για ένα μεταλλικό αντικείμενο μεγάλου βάρους που είναι προσαρτημένο σε μια αλυσίδα και στερεώνεται σε συγκεκριμένο σημείο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, ενώ καθελκύεται κατά την πρόσδεση σε λιμένα για την ενίσχυση της σταθερότητας του πλοίου.
2. Πλώρη (bow) : Η πλώρη το μπροστινό τμήμα του πλοίου που διασχίζει το νερό κατά την κίνηση του πλοίου. Είναι απαραίτητη για την μείωση των αντιστάσεων που δέχεται το πλοίο από το νερό.

3. Προωθητές πλώρης (bow thrusters) : είναι ειδικός εξοπλισμός ενσωματωμένος στις δύο πλευρές της πλώρης για αύξηση της ικανότητας του πλοίου να πραγματοποιεί μανούβρες, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στην προσέγγιση λιμένων. Αυτοί οι προωθητές τροφοδοτούνται ως επί το πλείστον ηλεκτρικά χρησιμοποιώντας έναν πρωταρχικό κινητήρα συνδεδεμένο στον άξονα της πτερωτής χρησιμοποιώντας ένα συγκρότημα κωνικού γραναζιού. Για ορισμένα πλοία τροφοδοτούνται επίσης υδραυλικά όπου η ηλεκτρική επιλογή δεν είναι δυνατή ή δεν είναι εφικτή.
4. Υπερκατασκευή (Superstructure) : είναι το τμήμα του πλοίου στο οποίο βρίσκονται τα δωμάτια διαμονής των ναυτικών, καθώς επίσης γραφεία και χώροι αναψυχής και η γέφυρα.
5. Πρωραίο κατάστρωμα (Foredeck) : το κομμάτι του πλοίου από την υπερκατασκευή μέχρι την πλώρη. Εδώ βρίσκονται οι ωφέλιμοι χώροι του πλοίου καθώς και ο απαραίτητος εξοπλισμός για την λειτουργία τους.
6. Γάστρα/κύτος (hull) : αποτελεί το τμήμα του πλοίου εκείνο που επεκτείνεται κάτω από την υδατογραμμή και περικλείει τα υπόλοιπα τμήματα προστατεύοντάς τα από την εισροή νερού.
7. Καρίνα (keel) : Η καρίνα είναι ένα μέρος του κύτους του πλοίου που είναι υπεύθυνο για την παροχή αντοχής στη δομή του πλοίου. κατανέμοντας την τάση και το φορτίο εξίσου κατά μήκος των διαμηκών πλευρών του.
8. Μηχανοστάσιο (Engine room) : Ένα μηχανοστάσιο είναι η «καρδιά» του πλοίου που βρίσκεται στο χαμηλότερο κατάστρωμα στο πίσω μέρος του πλοίου. Περιέχει σημαντικά μηχανήματα όπως την κύρια μηχανή, το βοηθητικό κινητήρα, άξονες, λέβητα, γεννήτρια γλυκού νερού, αεροσυμπιεστή, θερμαντήρα, καθαριστή, αποτεφρωτή, αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας, μηχανήματα συνεργείου κ.λπ. Όλα τα μηχανήματα στο μηχανοστάσιο είναι καλά διαχωρισμένα σε διαφορετικά σημεία σε τρία διαφορετικά καταστρώματα που ονομάζονται βοηθητικό κατάστρωμα (utility deck) , κατάστρωμα εξαερισμού (weather deck) και κατάστρωμα μηχανημάτων (machinery deck). Όλα τα μηχανήματα στον κινητήρα μπορούν να ελεγχθούν από ένα δωμάτιο ελέγχου που ονομάζεται Engine Control Room ή ECR εν συντομία.
9. Καπνοδόχος (Funnel) : είναι το σημείο από το οποίο απελευθερώνονται τα διάφορα καυσάερια στην ατμόσφαιρα. Η διατομή ή το πλάτος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα της παραγωγής καυσαερίων του μηχανοστασίου.
10. Γέφυρα (Bridge) : το σημείο της υπερκατασκευής από όπου πραγματοποιούνται όλες οι ενέργειες για την πλοήγηση και την λειτουργία του πλοίου.
11. Προπέλα (Propeller) : Η προπέλα , συνήθως κατασκευασμένη από μεταλλικά στοιχεία , είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε κατά τον στροβιλισμό της να δίνεται η απαραίτητη πρόωση στο πλοίο. Συνδέεται με τον κινητήρα του πλοίου μέσω άξονα .

12. Πηδάλιο (Rudder) : Απαραίτητο για την εξυπηρέτηση της ανάγκης αλλαγής κατεύθυνσης πλεύσης του πλοίου.

Εκτός από τα παραπάνω εντοπίζονται και τα παρακάτω συστήματα :

- Τα συστήματα ναυσιπλοΐας
- Τα συστήματα τηλεπικοινωνιών (εσωτερικά συστήματα επικοινωνίας, ραντάρ)
- Τα συστήματα ασφαλείας (σωστικές λέμβοι, φουσκωτά βαρελάκια κλπ.)
- Τα συστήματα πυρανίχνευσης και πυρασφάλειας
- Τα συστήματα πρόληψης ρύπανσης θαλάσσης

Τα ανωτέρω είναι τα κυριότερα τμήματα στα οποία συνήθως διαιρείται ένα πλοίο αλλά είναι δυνατόν να υπάρχουν κάποια συστήματα ακόμα αναλόγως με τον τύπο του πλοίου και με το είδος του συστήματος συντήρησης που κάθε εταιρεία θέλει να εφαρμόσει.

Η παρούσα εργασία θα επικεντρωθεί στη μελέτη της συντήρησης του βασικού μηχανολογικού εξοπλισμού ενός πλοίου.

2.3

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Γενικά , ο εξοπλισμός ενός πλοίου μπορεί να διακριθεί στις κύριο και βοηθητικό. Στον κύριο εξοπλισμό περιλαμβάνονται οι κύριες μηχανές πρόωσης, ηλεκτρογεννήτριες, ηλεκτρολογικά συστήματα, σωληνώσεις συστήματα ψύξης, συστήματα πυρόσβεσης, εξοπλισμός φορτίου, σταθεροποιητές καθώς και διάφορα συστήματα ελέγχου. Ο βοηθητικός εξοπλισμός περιλαμβάνει συστήματα τα οποία υποστηρίζουν τον κύριο εξοπλισμό . Αναλυτικότερα, περιλαμβάνονται εναλλακτικές θερμότητας, άξονες μετάδοσης κίνησης, κιβώτια ταχυτήτων, γερανοί καθώς και συστήματα διαχείρισης υδάτων έρματος και αποβλήτων.

Η μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας θα επικεντρωθεί στον μηχανολογικό εξοπλισμό που συναντάται τόσο στα κύρια συστήματα του πλοίου τα οποία και χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής καθώς αποτελούν συστήματα κρίσιμα για την συνολική λειτουργία του πλοίου, όσο και στα βοηθητικά.

Μια κατηγοριοποίηση του μηχανολογικού εξοπλισμού που μπορεί να γίνει είναι η εξής :

- I. Μηχανές εσωτερικής καύσης και μηχανήματα πρόωσης

Εδώ περιλαμβάνονται οι ΜΕΚ οι οποίες διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες : α) εμβολοφόρες παλινδρομικές, β) αεριοστροβιλικές και γ) περιστροφικές. Ανάλογα με τις επιχειρησιακές ανάγκες δύνανται να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω.

Βασικά στοιχεία των ΜΕΚ είναι τα παρακάτω :

- Κορμός
- Βάση
- Σκελετός
- Σώματα κυλίνδρων
- Χιτώνια
- Συνδέτες
- Πώματα κυλίνδρων
- Βαλβίδες
- Ελατήρια βαλβίδας
- Έμβολα
- Διωστήρας
- Ελατήρια εμβόλων
- Στροφαλοφόρος άξονας
- Εκκεντροφόρος άξονας
- Τριβείς
- Εξοπλισμός μετάδοσης κίνησης : καδένες, τραπεζοειδή μάντες και οδοντωτοί τροχοί.

II. Μειωτήρες στροφών

Αποτελούν βοηθητικό εξοπλισμό , με σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας της προπέλας με την κατάλληλη ταχύτητα. Αυτό πραγματοποιείται με μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής του άξονα μετάδοσης της μηχανής.

Στους μειωτήρες στροφών χρησιμοποιούνται απλές ή διπλές ελικοειδής οδοντώσεις, ενώ παρατηρείται επάνω τους και η λεγόμενη βαθμίδα μειώσεως. Για να επιτευχθεί μείωση των στροφών, πρέπει ο τροχός με την μικρή διάμετρο και τον μικρότερο αριθμό δοντιών να συνδεθεί στο πηνίο της μηχανής του πλοίου. Από την άλλη μεριά, ο τροχός με την μεγάλη διάμετρο και τον μεγαλύτερο αριθμό δοντιών πρέπει να συνδεθεί με τον ελικοφόρο άξονα. Ύστερα επιτυγχάνεται η μείωση, με λόγο που φτάνει το 4/1 (Mikelis, 2006)

III. Μηχανολογικός εξοπλισμός βοηθητικών συστημάτων

Εκτός από τις μηχανές και τα συστήματα μετάδοσης κίνησης, άξιος αναφοράς είναι και ο μηχανολογικός εξοπλισμός των βοηθητικών συστημάτων.

Συγκεκριμένα :

- Ρεβέρσες

- Vibration dumper
- Ψυγεία νερού και λαδιού
- Ναυτικά υδραυλικά τιμόνια
- Προπέλες
- Μηχανικοί και υδραυλικοί δυναμολήπτες
- Υδρολίπαντα κουζινέτα
- Κόπλερ
- Υδατοπαγίδες
- Φίλτρα μηχανής
- Μετρητές καυσίμου
- Διαχωριστήρες
- Αντλίες νερού
- Bow thrusters
- Αεροσυμπιεστές
- Αντλίες κύτους
- Βαρούλκα πρόσδεσης
- Πηδαλιούχα μηχανήματα
- Προθερμαντήρες
- Αυτόματες ρυθμιστές ελέγχου
- Μειωτήρες πίεσης
- Θερμοστάτες
- Αντλίες κυκλοφορίας
- Αντλίες παροχών
- Αντλίες λαδιού
- Αντλίες μεταγίσεως πετρελαίου
- Αντλίες ψύξεως κυλίνδρων
- Αεροφυλάκια
- Έλικες χειρισμών
- Αντλίες πυρκαγιών
- Μηχανήματα ψύξης
- Συστήματα HVAC
- Αποστακτήρες
- Εναλλακτήρες θερμότητας
- Λέβητες
- Εγχυτήρες
- αεροκώδωνες

(Μπουρδουβάλης Α., Παβέλης Χ., Πτυχιακή εργασία, Πειραιάς, 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ

3.1 Εισαγωγή

Η Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0) είναι η νέα σύγχρονη ψηφιακή τάση που κυριαρχεί στις κατασκευές εξαιτίας της προόδου που παρουσιάζεται στις τεχνολογίες του Δικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things), στην πληροφορική νέφους (cloud computing) και στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence). Σε αυτό το σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον , όπως αυτό διαμορφώνεται αξιοποιώντας τις παραπάνω τις τεχνολογίες , κρίνεται απαραίτητη η υιοθέτηση νέων στρατηγικών ανάπτυξης . Η μικτή μορφή των συστημάτων , τόσο φυσική όσο και ψηφιακή , αποκτά όλο και περισσότερο έδαφος. Σε αυτήν την κατεύθυνση καλείται να συμβάλλει και η τεχνολογία των Ψηφιακών Διδύμων (DT Digital Twins) .

Η ιδέα του «διδύμου» δεν είναι καινούρια καθώς πρωτοεμφανίστηκε στο πρόγραμμα APOLLO της NASA στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όπου κατασκευάστηκαν ταυτόχρονα δύο ακριβώς ίδια διαστημικά σκάφη. Το ένα από αυτά χρησιμοποιήθηκε για το ταξίδι των αστροναυτών , ενώ το άλλο παρέμεινε στο κέντρο επιχειρήσεων της NASA , και τροφοδοτούνταν με πραγματικά δεδομένα από το «αδελφικό» σκάφος, προκειμένου να ελέγχεται η απόδοση του άλλου. Είναι φανερό λοιπόν ότι τα απλά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν εκείνη την εποχή είχαν μεγάλη επιτυχία. Παρόλο το σύγχρονο της εποχής μας η θεμελιώδης ιδέα παραμένει ακόμα και τώρα ίδια. Είναι μια επίδειξη ενός φυσικού αντικειμένου που ονομάζεται «δίδυμο» και το οποίο δίνει σε κάποιον την δυνατότητα να ελέγξει την κατάστασή του , να αναλύσει ζητήματα και να ελέγξει λειτουργίες από απόσταση. (Ποντίκης, 2020)

Ένας πρώτος και ευρέως γνωστός ορισμός δόθηκε το 2002 από τον Michael Grieves στο πλαίσιο μιας παρουσίασης για την διαχείριση του κύκλου ζωής των προϊόντων. (‘ *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*’, 2019). Σύμφωνα με αυτόν , το Ψηφιακό Δίδυμο (DT) περιγράφεται ως ένα ψηφιακό πληροφοριακό σύστημα που αντιστοιχεί σε ένα φυσικό σύστημα, λειτουργεί ως ανεξάρτητη οντότητα και συνδέεται με το εν λόγω φυσικό σύστημα. Η ψηφιακή αναπαράσταση θα πρέπει, ιδανικά, να περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες σχετικά με το στοιχεία του συστήματος που θα μπορούσαν ενδεχομένως να ληφθούν μέσω ενδεδειγμένων επιθεωρήσεών του στον πραγματικό κόσμο.

Ένας ακόμα ορισμός με απήχηση στην ακαδημαϊκή κοινότητα δίνεται από τον Glaessgen, Stargel (2012): «το Digital Twin είναι μια ολοκληρωμένη πολλαπλής κλίμακας και πολλαπλών φυσικών λειτουργιών πιθανολογική προσομοίωση της λειτουργίας ενός σύνθετου προϊόντος η οποία χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, τεχνολογία αισθητήρων κ.λπ., για να αντικατοπτρίσει τη λειτουργία του φυσικού προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του» . Διάφορες εταιρείες κολοσσοί έχουν δώσει επίσης τους δικούς τους ορισμούς αναφορικά με το DT. Συγκεκριμένα η General Electric το περιγράφει ως παροχή με με λογισμικό αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου βασισμένη σε μια πλατφόρμα και η οποία επιτρέπει σε εταιρείες να αντιλαμβάνονται καλύτερα , να προβλέπουν και να βελτιστοποιούν την απόδοση κάθε ενός αντικειμένου. (‘ *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*’, 2019).

Με τον όρο «Ψηφιακό Δίδυμο» ουσιαστικά περιγράφεται ο ψηφιακός αντικατοπτρισμός ενός φυσικού αντικειμένου, με σκοπό την παρακολούθησή του και την εξαγωγή διαφόρων συμπερασμάτων για την κατάσταση λειτουργίας. Αν και μια βασική λειτουργία ενός DT είναι η παροχή πληροφοριών, το DT είναι κάτι παραπάνω από απλά δεδομένα , καθώς περιλαμβάνουν αλγόριθμους επεξεργασίας δεδομένων και πρόβλεψης προκειμένου να εξυπηρετήσουν τον παραπάνω βασικό σκοπό τους.

Μέχρι πρόσφατα, ο τεράστιος όγκος δεδομένων που απαιτείται για την λειτουργία ενός DT, καθιστούσε την συγκεκριμένη τεχνολογία μη εφαρμόσιμη για την μεγαλύτερη πλειοψηφία των επιχειρήσεων, εξαιτίας του υψηλού κόστους επεξεργασίας , αποθήκευσης των δεδομένων και της δικτυακής υποδομής. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια τα παραπάνω κόστη έχουν μειωθεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό καθιστώντας την τεχνολογία των DT οικονομικά βιώσιμη για ολοένα και περισσότερες επιχειρήσεις και οργανισμούς. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις αυξημένες δυνατότητες, έχουν οδηγήσει σε εκθετικές αλλαγές που μπορούν να επιτρέψουν τον συνδυασμό της τεχνολογίας πληροφοριών (Information Technology - IT) και της τεχνολογίας λειτουργιών (Operation Technology - OT) για να επιτρέψουν τη δημιουργία και τη χρήση ενός Digital Twin (‘ *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*’, 2019)

Η μεθοδολογία των DT είναι ικανή να επιφέρει λύσεις σε διάφορα φυσικά ζητήματα των εταιρειών γρηγορότερα ανιχνεύοντάς τα νωρίτερα, προβλέποντας τα αποτελέσματα αποφάσεων σε πολύ υψηλότερο βαθμό ακρίβειας, σχεδιάζοντας και κατασκευάζοντας καλύτερα προϊόντα και, τελικά, στην καλύτερη εξυπηρέτηση των πελατών τους.

3.2

ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ DT 5 ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Η αναφορά σε έννοια «ψηφιακού διδύμου», πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά σε ακαδημαϊκό επίπεδο το 2003 από τον Grieves. Το μοντέλο αυτό περιέγραφε ουσιαστικά ένα DT τριών χαρακτηριστικών – διαστάσεων :

1. Το αντικείμενο στον φυσικό χώρο
2. Το αντικείμενο στον ψηφιακό χώρο
3. Την διασύνδεση δεδομένων και πληροφοριών μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού χώρου.

Το φυσικό αντικείμενο υφίσταται στον φυσικό (πραγματικό χώρο), όπου και λειτουργεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες και εκτελεί συγκεκριμένες διαδικασίες. Το ψηφιακό αντικείμενο είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση του πραγματικού αντικειμένου, η οποία φέρει τα χαρακτηριστικά του. Για την σωστή μοντελοποίηση του ψηφιακού αντικειμένου απαιτείται ένας μεγάλος όγκος δεδομένων και πληροφοριών που περιγράφουν τις διαστάσεις, τον τρόπο καθώς και τις συνθήκες λειτουργίας που διέπουν το φυσικό αντικείμενο. Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στο ψηφιακό αντικείμενο όπου στην συνέχεια είναι δυνατή η περεταίρω ανάλυση τους με διάφορα εργαλεία και αλγορίθμους, με στόχο την εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας, η οποία θα μεταβιβαστεί στο φυσικό αντικείμενο ώστε να πραγματοποιηθούν τυχόν τροποποιήσεις για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του. Είναι λοιπόν προφανής η ανάγκη για διαρκή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού χώρου.

Αν και παρατηρούνται διαφοροποιήσεις ,αναφορικά με τον ακριβή ορισμό και περιγραφή ενός ψηφιακού διδύμου, τόσο σε επίπεδο ακαδημαϊκό όσο και σε βιομηχανικό, τέσσερα δομικά χαρακτηριστικά είναι ευρέως αποδεκτά. Τα μοντέλα, τα δεδομένα, οι συνδέσεις και οι υπηρεσίες αποτελούν τον πυρήνα του DT.(‘ *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*’, 2019)

Πιο αναλυτικά τα δομικά στοιχεία ενός σύγχρονου ψηφιακού διδύμου είναι :

- Μοντέλα
- Δεδομένα
- Υπηρεσίες
- διασυνδέσεις

Είναι γενικά παραδεκτό ότι με την ταχύτατη ανάπτυξη τεχνολογιών αιχμής στην σύγχρονη εποχή , το ψηφιακό δίδυμο καλείται να καλύψει νέες απαιτήσεις που εντοπίζονται σε τέσσερεις άξονες : εφαρμογές, τεχνολογία, μοντελοποίηση αντικειμένου και μέθοδος μοντελοποίησης. Το DT αρχικά αναπτύχθηκε για

στρατιωτικές εφαρμογές της αεροναυπηγικής, ωστόσο η χρήση του έχει διευρυνθεί και σε άλλα πεδία εφαρμογών όπως η αυτοκινητοβιομηχανία , οι κατασκευές και η υγεία. Έτσι νέες απαιτήσεις έχουν κάνει την εμφάνιση τους όπως υψηλού επιπέδου υπηρεσίες , ανάλυση απαιτήσεων χρήστη και ταχύτεροι χρόνοι διαθεσιμότητας των υπηρεσιών. Ταυτόχρονα υιοθετώντας νέες τεχνολογίες πληροφοριακών συστημάτων , διαδικτύου των πραγμάτων (IoT), πληροφορική νέφους (cloud computing), ανάλυση μεγάλων δεδομένων και τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (AI) , δημιουργούνται νέοι τρόποι ανάπτυξης και εγκατάστασης ψηφιακών διδύμων, που αποσκοπούν σε μία μεγαλύτερη συγχώνευση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού χώρου. Το αντικείμενο που μοντελοποιείται από το DT απαιτεί την ενσωμάτωση δεδομένων από διάφορους χώρους για να αποκτήσει μια πιο ακριβή και λεπτομερή πληροφόρηση, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται ένα φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον αλληλεπίδρασης .

Όλα τα παραπάνω καθιστούν επιτακτική την ανάγκη επέκταση του τρισδιάστατου ψηφιακού διδύμου σε ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο αυτό των πέντε διαστάσεων.

3.3 ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ 5 ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Διάφορες μελέτες προτείνουν μοντέλα 5 βασικών χαρακτηριστικών για την πληρέστερη περιγραφή των Ψηφιακών Διδύμων της σύγχρονης εποχής, οι οποίες συνοψίζονται στην παρακάτω έκφραση :

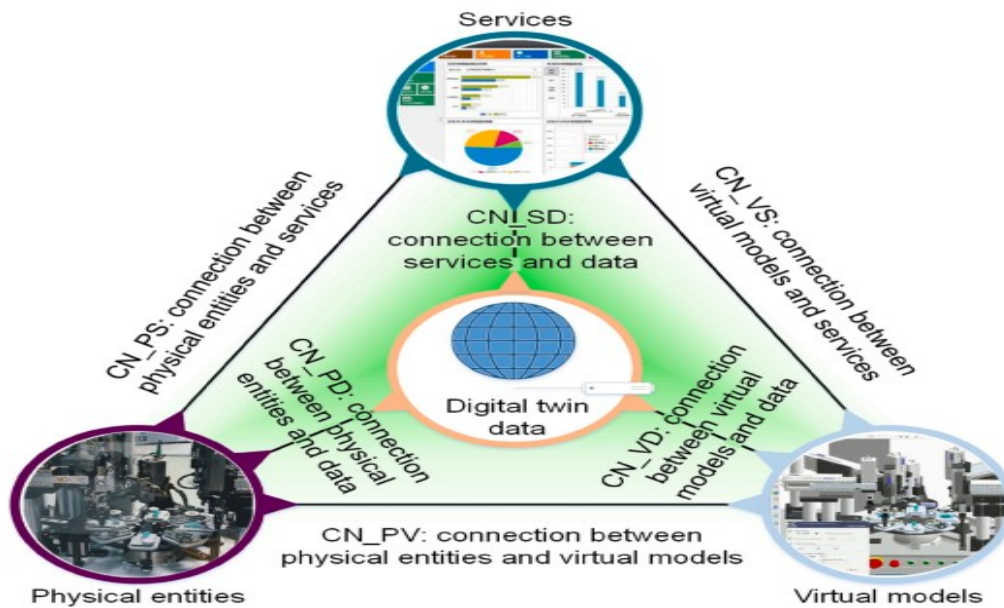
$$M_{DT}=(PE, VE, Ss, DD, CN)$$

Όπου :

- PE, Physical Entity : το φυσικό αντικείμενο
- VE, Virtual Entity : το ψηφιακό αντικείμενο
- Ss, Services : παρεχόμενες υπηρεσίες
- DD, Digital twin Data : τα δεδομένα που αξιοποιούνται
- CN, Connections : οι διασυνδέσεις μεταξύ των παραπάνω

(Digital Twin Driven Smart Manufacturing 2019)

Η παραπάνω μοντελοποίηση απεικονίζεται στην συνέχεια :



ΕΙΚΟΝΑ 2. (DT 5 διαστάσεων , <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>)

Μια σημαντική διαφορά που εντοπίζεται σε σχέση με το μοντέλο των 3 διαστάσεων είναι η προσθήκη του τμήματος δεδομένων (DD) το οποίο δίνει την δυνατότητα αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων καθώς επίσης επιτρέπει και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ φυσικού και ψηφιακού αντικείμενου αλλά και μεταξύ δεδομένων που έχουν προκύψει κατά την διάρκεια χρήσης κάποιων υπηρεσιών .

Φυσικό αντικείμενο (PE)

Η βάση του ψηφιακού διδύμου είναι το φυσικό αντικείμενο όπως αυτό λειτουργεί στον φυσικό χώρο. Τα φυσικά αντικείμενα μπορεί να είναι ένα απλό εξάρτημα, ένα σύστημα αποτελούμενο από διάφορα εξαρτήματα ή ακόμα και μια διαδικασία. Ανάλογα λοιπόν το φυσικό αντικείμενο χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι για την μοντελοποίηση της κατάστασης λειτουργίας του και της συμπεριφοράς του .

Ψηφιακό Αντικείμενο (VE)

Αποτελεί το ψηφιακό αντίγραφο του φυσικού αντικείμενου, το οποίο δημιουργείται ουσιαστικά με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση της κατάστασης του φυσικού αντικείμενου, για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών.

Τα χαρακτηριστικά του VE συνοψίζονται στην εξής εξίσωση :

$$VE=(G_v, P_v, B_v, R_v)$$

(Digital Twin Driven Smart Manufacturing 2019)

Το G_v εκφράζει την μοντελοποίηση των γεωμετρικών διαστάσεων του PE, γεγονός που επιτυγχάνεται με την χρήση σχεδιαστικών λογισμικών όπως Autocad, Siemens NX κ.α. Το P_v , που περιλαμβάνει φυσικούς μηχανισμούς και τις απαραίτητες μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τον αντικείμενο. Το B_v αντιπροσωπεύει το μοντέλο συμπεριφοράς του αντικείμενου στο φυσικό χώρο, καθώς και τις

προβλεπόμενες αντιδράσεις του σε τυχόν αλλαγές των συνθηκών. Τέλος το Rn σε σύνολα κανονισμών που διέπουν το φυσικό αντικείμενο, προερχόμενα από ιστορικά του δεδομένα. Οι κανόνες αυτοί (π.χ. συσχετίσεις, περιορισμοί και συμπεράσματα) επιτρέπουν στο VE να αξιολογεί, να βελτιστοποιεί και να προβλέπει (Q. Qi , F. Tao, T. Hu, N. Anwer, A. Liu, , Y. Wei , L. Wang , A. Y.C. Nee, 2021).

Δεδομένα Ψηφιακού Διδύμου (DD)

Τα δεδομένα του DT αποτελούν ένα από τα πιο κρίσιμα τμήματά του καθώς με βάση αυτά τα δεδομένα μοντελοποιείται, αναλύεται και εξάγονται τα χρήσιμα για την διαδικασία λήψης αποφάσεων, συμπεράσματα για το φυσικό αντικείμενο. Εδώ περιλαμβάνονται τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο, ιστορικά δεδομένα, δεδομένα που έχουν προκύψει μετά από ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου καθώς και δεδομένα κάποιου χρήστη ειδικού στο γνωστικό που γίνεται η ανάλυση.

Υπηρεσίες (Ss)

Το τμήμα των υπηρεσιών αποτελεί και τον σκοπό κατασκευής ενός ψηφιακού διδύμου. Εδώ εντοπίζονται τα αποτελέσματα αναλύσεων και προσομοιώσεων από τα συλλεγμένα δεδομένα. Το κομμάτι των υπηρεσιών αποτελεί και την διεπαφή του χρήστη με το ψηφιακό δίδυμο παρέχοντας του δυνατότητες αλλαγής παραμέτρων για το ψηφιακό μοντέλο αλλά και μια εποπτική εικόνα για το φυσικό αντικείμενο και τις τυχόν μεταβολές στην συνολική κατάσταση λειτουργίας του.

Διασυνδέσεις (CN)

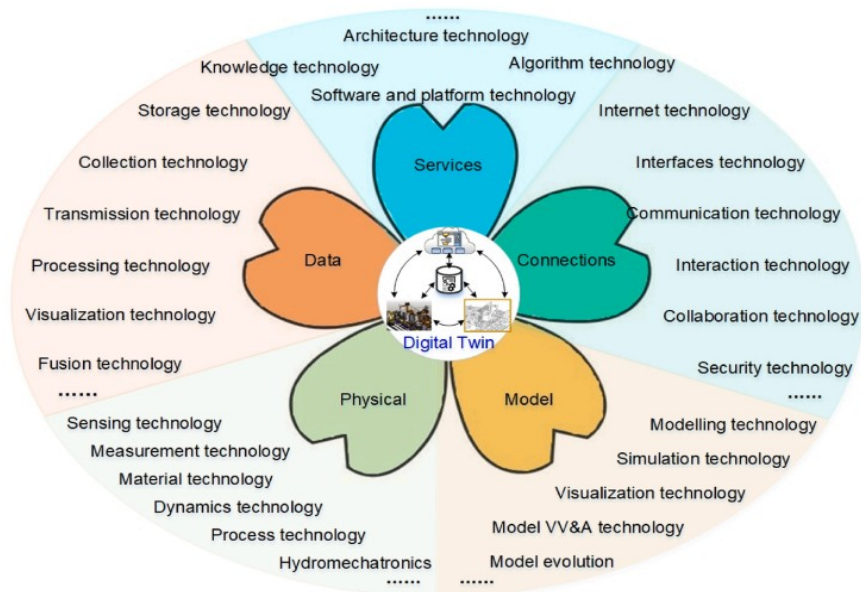
Αποτελείται από έξι τμήματα ως εξής:

CN=(CN_SD, CN_PD, CN_VD , CN_PS, CN_VS,CN_PV)

- 1) CN_SD :σύνδεση μεταξύ υπηρεσιών και δεδομένων (Ss-DD)
- 2) CN_PD : σύνδεση μεταξύ φυσικού αντικειμένου και δεδομένων (PE-DD)
- 3) CN_VD : σύνδεση μεταξύ ψηφιακού αντικειμένου και δεδομένων (VE-DD)
- 4) CN_PS : σύνδεση μεταξύ φυσικού αντικειμένου και υπηρεσιών (PE-SS)
- 5) CN_VS : σύνδεση μεταξύ ψηφιακού αντικειμένου και υπηρεσιών (VE-Ss)
- 6) CN_PV : σύνδεση μεταξύ φυσικού αντικειμένου και ψηφιακού (PE-VE)

Όλες οι παραπάνω συνδέσεις είναι προφανώς αμφίροπες (Q. Qi , F. Tao, T. Hu, N. Anwer, A. Liu, , Y. Wei , L. Wang , A. Y.C. Nee, 2021).

3.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΥ DT



ΕΙΚΟΝΑ 3. (τεχνολογίες υποστήριξης, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>)

3.4.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, η ψηφιακή αναπαράσταση ενός αντικειμένου είναι μια συνεχής και δυναμική διαδικασία. Το βασικό χαρακτηριστικό που διέπει αυτήν την διαδικασία είναι συνεχής συλλογή και χρήση δεδομένων. Η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου δεν επαρκεί αν αντικατοπτρίζει μια χρονική στιγμή ή ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, αλλά απαιτείται η συνεχής τροφοδοσία με δεδομένα ώστε ανά πάσα στιγμή να είναι ενημερωμένο με τις εκάστοτε συνθήκες του φυσικού αντικειμένου . έτσι λοιπόν έμφαση πρέπει να δοθεί σε τεχνολογίες συλλογής μετρήσεων παραμέτρων όπως η πίεση η θερμοκρασία, η ταχύτητα καθώς και σε τεχνολογίες μηχανικής. (Q. Qi , F. Tao, T. Hu, N. Anwer, A. Liu, , Y. Wei , L. Wang , A. Y.C. Nee, 2021).

Κάποιες από τις σημαντικότερες τεχνολογίες που υποστηρίζουν την λειτουργία του DT είναι οι εξής :

- RFID (Radio Frequency Identification
- WSN (Wireless Sensor Network) : αποτελεί συστοιχίες αυτόνομων αισθητήρων οι οποίοι συλλέγουν λειτουργικά δεδομένα του PE
- Τεχνολογίες ενσωμάτωσης συστημάτων : καθιστούν εφικτή την ενσωμάτωση μικροαισθητήρων και ελεγκτών σε διάφορα σημεία του PE.

3.4.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ (VE)

Όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου απαιτούνται διεργασίες σε τέσσερις άξονες .

Πιο αναλυτικά :

- Για την μοντελοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (Gv) του PE, γίνεται χρήση λογισμικών τρισδιάστατης σχεδίασης CAD (Autocad, Solidworks, Siemens NX κ.α.)
- Για την περιγραφή των φυσικών μηχανισμών (Pv) που διέπουν το PE, εφαρμόζονται λογισμικά που προσφέρουν δυνατότητες θερμοδυναμικής ρευστοδυναμικής και δυναμικής ανάλυσης και προσομοίωσης με λογισμικά CAE (Computer Aided Engineering) όπως το Matlab , ANSYS κ.α.
- Η αναπαράσταση τω συμπεριφορικών χαρακτηριστικών (Bv) επιτυγχάνεται με χρήση μαθηματικών εργαλείων όπως διαφορικές εξισώσεις, θεωρία γραφημάτων και δικτύων κ.α.
- Η μοντελοποίηση των κανόνων (Rv), περιλαμβάνει αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης όπως τα δέντρα αποφάσεων ,διαιρώντας τα δεδομένα σε υποσύνολα και στην συνέχεια δημιουργώντας κανόνες για την ταξινόμησή τους, καθώς και αλγόριθμοι gradient boosting οι οποίοι λειτουργούν προσθέτοντας δέντρα αποφάσεων, εκπαιδευμένα από τα σφάλματα των προηγούμενων δέντρων (*Digital Twin Driven Smart Manufacturing’ 2019*).

Τέλος περιλαμβάνονται τεχνολογίες για την επαλήθευση , την επικύρωση και διαπίστευση (VVA) των μοντέλων για την διατήρηση της ακρίβειας και της ευαισθησίας της ψηφιακής οντότητας.

3.4.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ (DD)

Τα δεδομένα ως το κρισιμότερο τμήμα του DT ενσωματώνει τεχνολογίες υλισμικού (hardware), λογισμικού (software), και διασυνδέσεων (network) (Q. Qi , F. Tao, T. Hu, N. Anwer, A. Liu, , Y. Wei , L. Wang , A. Y.C. Nee, 2021).

Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες που υποστηρίζουν την λειτουργία των δεδομένων παρουσιάζονται στην συνέχεια :

- Συστήματα αποθήκευσης δεδομένων : ο μεγάλος όγκος δεδομένων πραγματικού χρόνου σε συνδυασμό με την τακτική χρήση και ιστορικών δεδομένων καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για εγκατάσταση ενός συστήματος αποθήκευσης δεδομένων. Μερικά από αυτά τα συστήματα είναι τα εξής : DFS (distributed file storage), noSQL database και cloud storage.

- τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων : περιλαμβάνονται ενσύρματες (wire) και ασύρματες (wireless) τεχνολογίες με χαρακτηριστικότερες : Near Field Communication (NFC), ZigBee, GPRS/CDMA, δορυφορικά συστήματα κ.α.
- Συστήματα επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων : στα συστήματα αυτά συγκαταλέγονται τεχνολογίες και εργαλεία προεπεξεργασίας και συγχώνευσης, ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων. Σημαντικό ρόλο για τις παραπάνω διεργασίες παίζουν οι μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης και αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης.
- Πρωτόκολλα ασφαλείας : τόσο για την μετάδοση όσο και για την ασφαλή αποθήκευση των δεδομένων

(Q. Qi , F. Tao, T. Hu, N. Anwer, A. Liu, , Y. Wei , L. Wang , A. Y.C. Nee, 2021).

3.4.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (Ss)

Οι κύριες τεχνολογίες που αξιοποιούνται για την δημιουργία και την διατήρηση των υπηρεσιών (Ss) του DT είναι οι εξής :

- Διαχείριση Πόρων : Περιλαμβάνει την συλλογή, ταξινόμηση και οργάνωση των πόρων του DT, προερχόμενους από τα μοντέλα, από αλγορίθμους καθώς και από δεδομένα.
- Περιγραφή υπηρεσίας : μεταφράζει τους διάφορους πόρους σε υπηρεσίες με ψηφιακές περιγραφές, όπου αναφέρονται βασικές πληροφορίες για την λειτουργία αυτών των πόρων.
- Οπτικοποίηση υπηρεσιών : Δημιουργεί μια υψηλής ποιότητας οπτική εικόνα των υπηρεσιών
- Αναζήτηση υπηρεσιών : Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ομοιότητας και αντιστοίχισης επιτυγχάνεται η καλύτερη και ευκολότερη αναζήτηση των διάφορων υπηρεσιών από τον χρήστη.
- HMI (Human Machine Interface) : Το διαδραστικό περιβάλλον χρηστή-μηχανής επιτρέπει την απευθείας αλληλεπίδραση του χρήστη με τις υπηρεσίες.

(Digital Twin Driven Smart Manufacturing' 2019).

3.4.5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΩΝ (CN)

Η διαρκής επικοινωνία και αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων τμημάτων είναι απαραίτητη για την αδιάκοπη και ορθή λειτουργία του DT. Μερικές βασικές τεχνολογίες για αυτήν την διαδικασία παρατίθενται παρακάτω :

- Application Programming Interface (API) : Ενσωματώνει την επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων λογισμικών και μοντέλων του ψηφιακού χώρου.
- Πρωτόκολλα επικοινωνίας : απαραίτητα για την μετατροπή ποικίλων μορφών πρωτοκόλλων επικοινωνίας σε ένα ενιαίο , για την απλοποίηση της πολυπλοκότητας του συστήματος.
- Ασύρματη επικοινωνία : συσκευές και τεχνολογίες που μπορούν να επιτρέψουν την ασύρματη επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων και πληροφοριών.
- Πρωτόκολλα ασφαλείας επικοινωνιών

(*Digital Twin Driven Smart Manufacturing*’ 2019).

3.5

ΟΦΕΛΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ

3.5.1 ΟΦΕΛΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ

Όπως έχει ήδη περιγράψει παραπάνω, τα ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins) με την δυνατότητα ψηφιοποίησης ενός φυσικού αντικειμένου και των διαφόρων ιδιοτήτων του καθώς και την ενσωμάτωσή του σε ένα διευρυμένο πληροφοριακό σύστημα. Αποτελούν μία τεχνολογία με μεγάλη αξία για την σύγχρονη εποχή, με ένα ευρύ φάσμα πεδίων εφαρμογής.

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη των DT είναι η ικανότητά του να βελτιώνει την διαδικασία σχεδιασμού. Ειδικότερα, δημιουργώντας ένα ψηφιακό αντίγραφο ενός φυσικού συστήματος γίνεται η εφικτή η προσομοίωση και ο πειραματισμός σε διάφορα λειτουργικά σενάρια χωρίς να χρειάζεται η ανάπτυξη πρωτοτύπου (*Ποντίκης 2020*). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου και του κόστους ανάπτυξης του προϊόντος και ταυτόχρονα επιτρέπει στους μηχανικούς να εντοπίσουν εγκαίρως τυχόν σχεδιαστικές αστοχίες πριν την κατασκευή του φυσικού αντικειμένου.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η δυνατότητα εκτέλεσης προβλεπτικής συντήρησης. Συγκεκριμένα, με την διαρκή παρακολούθηση, σε πραγματικό χρόνο, της κατάστασης και της απόδοσης ενός συστήματος, και συγκρίνοντας αυτά τα δεδομένα με δεδομένα του ψηφιακού μοντέλου μπορούν να ανιχνευθούν πιθανές αστοχίες προτού αυτές λάβουν χώρα. Έτσι οι ομάδες συντήρησης μπορούν να προβούν σε στοχευμένες διορθωτικές ενέργειες, ώστε να

αποφευχθούν καθυστερήσεις στην λειτουργία και ταυτόχρονα να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του συστήματος, μειώνοντας ταυτόχρονα το συνολικό κόστος λειτουργίας.

Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτιστοποίηση πολύπλοκων συστημάτων. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που λαμβάνονται, το DT μπορεί να αναδείξει τον βέλτιστο τρόπο λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος, καθώς και τις απαραίτητες ενέργειες και ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν. Παράλληλα, διευκολύνεται η επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων τμημάτων μιας εταιρείας μέσω διασύνδεσης του ψηφιακού διδύμου και πληροφοριακών συστημάτων. Επιτυγχάνεται έτσι, η βέλτιστη διαχείριση των επιχειρησιακών πόρων με την ταυτόχρονη μείωση του λειτουργικού κόστους (Ποντίκης 2020).

Είναι φανερό λοιπόν η υψηλή αξία των ψηφιακών διδύμων σε επίπεδο επιχειρήσεων και οργανισμών, καθώς μπορεί να αποτελέσει κομβικό σημείο στην στρατηγική ανάπτυξή τους. Το DT επεκτείνει σημαντικά τις διάφορες παραγωγικές διαδικασίες τόσο σε επίπεδο κατασκευών όσο και σε επίπεδο παροχής υπηρεσιών. Η τεχνολογία των DT αποτελεί μια μακροπρόθεσμη επενδυτική στρατηγική της οποίας η εφαρμογή ολοένα και διευρύνεται.

3.5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα οφέλη των DT όπως αναλύθηκαν έρχονται να καλύψουν ένα μεγάλο φάσμα αναγκών. Όπως έχει προαναφερθεί η τεχνολογική πρόοδος της σύγχρονης εποχής έχει καταστήσει τα ψηφιακά δίδυμα βιώσιμα για πολλές επιχειρήσεις. Η διευκόλυνση της πρόσβασης σε αυτήν την τεχνολογία έχει βοηθήσει στην εφαρμογή της σε πολλούς και διαφορετικούς κλάδους και βιομηχανίες.

- Βιομηχανική παραγωγή : Η χρήση των DT έχει επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στο συγκεκριμένο κλάδο. Η δυνατότητα παρακολούθησης και βελτίωσης της λειτουργίας αυξάνουν την παραγωγικότητα και ταυτόχρονα μειώνουν το κόστος. Στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον και προς περαιτέρω μείωση του συνολικού κόστους, απαιτείται η δυνατότητα πρόβλεψης των διαθέσιμων πόρων, παράλληλα περιβαλλοντικά και οικονομικά δεδομένα συνδυάζονται με λειτουργικά για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση των διαδικασιών. Τις παραπάνω προκλήσεις μπορούν να αντιμετωπίσουν με μεγάλη αποτελεσματικότητα τα DT.
- Κλάδος υγείας : Ο συγκεκριμένος κλάδος απαιτεί μεγάλη ακρίβεια τόσο στη διάγνωση όσο και στην θεραπεία του ασθενούς. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού χρειάζεται η βέλτιστη διαχείριση των πόρων του εκάστοτε νοσοκομείου. Τα ψηφιακά δίδυμα δίνουν την δυνατότητα στους γιατρούς και το νοσηλευτικό προσωπικό καθώς και το προσωπικό διοίκησης να έχουν την συνολική εικόνα του νοσοκομείου σε πραγματικό χρόνο, ενώ ταυτόχρονα τους επιτρέπει να βελτιώσουν την οργάνωση παρέχοντας πληροφορίες

σχετικά με την διαχείριση πόρων (όπως διαθέσιμες κλίνες και εξοπλισμός) και του ανθρώπινου δυναμικού (οργάνωση βάρδιας, καθορισμός αναγκών σε προσωπικό).

- Έξυπνες πόλεις : Τα ψηφιακά δίδυμο μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμο εργαλείο στην βελτίωση του σχεδιασμού μιας πόλης. Με την ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT και αισθητήρων μπορεί να βελτιωθούν διαδικασίες όπως η μείωση καταναλισκόμενης ενέργειας, μείωση εκπομπών ρύπων, καθώς και καλύτερη διαχείριση πόρων από τις αρχές.
- Αυτοκίνητα και οδηγική εμπειρία : Μέσω DT μπορούν να συλλεχθούν δεδομένα της λειτουργικής κατάστασης του οχήματος, καθώς και των συνθηκών λειτουργίας τα οποία μετά από αναλύσεις και προσομοιώσεις μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για την αποφυγή αστοχιών κατά την διαδικασία παραγωγής τους, την δημιουργία καλύτερων προδιαγραφών ασφαλείας και την συνολική βελτίωση της οδηγικής εμπειρίας.

(Ποντίκης , 2020).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΥΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προβλεπτική συντήρηση (Predictive maintenance) είναι η συντήρηση που συντελείται με συστηματική επιτήρηση της κατάστασης του εξοπλισμού μέσω περιοδικών επιθεωρήσεων και μετρήσεων και αντικατάσταση εξαρτημάτων λίγο πριν αστοχήσουν. (‘Συντήρηση μηχανολογικού εξοπλισμού στη βιομηχανία παραγωγής πλαστικών προϊόντων για τρόφιμα’,2017)

Η προβλεπτική συντήρηση βασίζεται στην ιδέα ότι ορισμένα χαρακτηριστικά του μηχανήματος μπορούν να παρακολουθούνται και τα συγκεντρωμένα δεδομένα να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή μιας εκτίμησης σχετικά με την υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή του εξοπλισμού. Ως εκ τούτου, αυτού του είδους η πολιτική συντήρησης συνεπάγεται αρκετές σημαντικές βελτιώσεις στη διαδικασία κατασκευής και συντήρησης που μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος λειτουργίας . Πρώτον, η προβλεπτική συντήρηση μπορεί να μειώσει τον αριθμό των περιττών δραστηριοτήτων συντήρησης καθώς δεν βασίζεται σε περιοδικά διαστήματα συντήρησης που συνδέονται με τη μέση διάρκεια ζωής (προληπτική συντήρηση). Έτσι, δυνητικά μειώνεται ο συνολικός αριθμός των δραστηριοτήτων συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής ενός μηχανήματος. Δεύτερον, όχι μόνο μπορούν να αποφευχθούν οι πολύ πρώιμες δραστηριότητες συντήρησης, αλλά και οι πολύ καθυστερημένες δραστηριότητες καθώς ο εξοπλισμός μπορεί να αποτύχει πριν από το επόμενο διάστημα περιοδικής συντήρησης, καθώς τα διαστήματα βασίζονται στη μέση διάρκεια ζωής που πιθανότατα περιλαμβάνει σημαντικές θετικές αλλά και αρνητικές αποκλίσεις από τον μέσο όρο. Για παράδειγμα, λόγω της ειδικής δομής στην οποία ένα συγκεκριμένο εξάρτημα εγκαθίσταται σε μεγαλύτερες μηχανές. Τόσο η μείωση της περιττής συντήρησης όσο και η μείωση των θανατηφόρων βλαβών έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας του εξοπλισμού και τη μείωση του χρόνου διακοπής της λειτουργίας. Επομένως, ανάλογα με την ακρίβεια της προβλεπτικής μεθόδου που εφαρμόζεται, η προβλεπτική συντήρηση μπορεί να θεωρηθεί ως συνολική βελτίωση της απόδοσης σε αντίθεση με τις συμβατικές πολιτικές συντήρησης. (‘A Survey on Predictive Maintenance for Industry 4.0’,2020)

Για την υλοποίηση της στρατηγικής της προβλεπτικής συντήρησης είναι απαραίτητη η ύπαρξη συγκεκριμένων τεχνικών και μεθοδολογιών σε ένα ενιαίο περιβάλλον ,όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Τα Ψηφιακά Δίδυμα παρέχουν το απαραίτητο περιβάλλον,

ενσωματώνοντας τις απαραίτητες τεχνολογίες και διαδικασίες. Με αυτόν τον τρόπο η τεχνολογία των DT γίνεται η πλατφόρμα στην οποία στήνεται και λειτουργεί αποδοτικά η παραπάνω μεθοδολογία συντήρησης.

4.2 ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (PREVENTIVE MAINTENANCE)

Ενώ η φιλοσοφία της Προληπτικής Συντήρησης αφορά περισσότερο τις εξαρτώμενες από το χρόνο αστοχίες, η Προβλεπτική Συντήρηση ασχολείται με τα τυχαία και ξαφνικά εμφανιζόμενα προβλήματα τα οποία προσπαθεί να εντοπίσει και να διορθώσει εγκαίρως. Αν και οι αστοχίες δεν είναι δυνατό να ελεγχθούν πλήρως, με την εγκατάσταση αυτής της μεθόδου συντήρησης μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι τυχαία εμφανιζόμενες αστοχίες και οι επιπτώσεις τους. Η μεγάλη και κύρια διαφοροποίηση της από την προληπτική συντήρηση (Preventive maintenance) είναι ότι χρησιμοποιεί μεθόδους, οι οποίες βοηθούν να καθοριστεί η κατάσταση του εξοπλισμού με απώτερο σκοπό την εκδήλωση ενεργειών συντήρησης όταν απαιτείται και όχι ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η προσέγγιση λοιπόν της προβλεπτικής συντήρησης συμβάλλει στην εξοικονόμηση πόρων αφού η συντήρηση δεν ακολουθεί ένα πρόγραμμα ρουτίνας, αλλά ακολουθεί την λειτουργική κατάσταση του εξοπλισμού. Ένα ακόμη πολύ σημαντικό βήμα που αφορά στις λειτουργικές παραμέτρους της προβλεπτικής συντήρησης είναι ο καθορισμός των.

- Τι μετράμε (Σωστή επιλογή του μεγέθους προς μέτρηση)
- Κάθε πότε θα μετράμε (Επιλογή της περιοδικότητας)
- Που και πως θα μετρήσουμε (Τρόπο μέτρησης)

(‘Συντήρηση μηχανολογικού εξοπλισμού στη βιομηχανία παραγωγής πλαστικών προϊόντων για τρόφιμα’,2017)

4.3.1 ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΓΕΙΑΣ (Prognostics and Health Management)

Καθώς η αυτοματοποίηση και η ευφυΐα των πλοίων συνεχίζουν να βελτιώνονται, οι παραδοσιακοί τρόποι συντήρησης πλοίων αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις. Η εξάρτηση από την ανθρώπινη εμπειρία και γνώση στα συστήματα παρακολούθησης συναγερμού πλοίων (Alarm Monitoring System) δεν μπορεί πλέον να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις αξιολόγησης κατάστασης των μηχανικών συντήρησης. Οι στρατηγικές προληπτικής συντήρησης που βασίζονται σε τεχνολογίες πρόγνωσης και διαχείρισης υγείας (Prognostics and Health Management) έχουν γίνει μια νέα τάση

στην έξυπνη λειτουργία και συντήρηση (Operation & Maintenance, O&M) για ναυτιλιακά συστήματα και εξοπλισμό (Marine Systems And Equipment, MSAE).

Τα συστήματα PHM, που αναπτύχθηκαν αρχικά για στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές, επεκτείνονται γρήγορα σε θαλάσσιους και άλλους τομείς. Η τεχνολογία PHM έχει μελετηθεί ευρέως και εφαρμόζεται σε κινητήρες ντίζελ πλοίων και περιστρεφόμενα μηχανήματα. Ένα βιώσιμο πλαίσιο συστήματος PHM παρέχει παρακολούθηση κατάστασης, έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων και απομόνωση οποιουδήποτε κόμβου στο σύστημα. Ένα αποτελεσματικό μοντέλο PHM μπορεί να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων O&M με την παρακολούθηση της κατάστασης υγείας, την εκτέλεση αξιολογήσεων υγείας, την πρόβλεψη της απόδοσης και την εφαρμογή στρατηγικών συντήρησης. Η ανάπτυξη του PHM είναι ιδιαίτερα επείγουσα για έξυπνα και μη επανδρωμένα πλοία για τη βελτίωση της ολοκληρωμένης διαχείρισης της παρακολούθησης κατάστασης υγείας HCM (Health Condition Monitoring), της αξιολόγησης υγείας, της FD, της πρόβλεψης απόδοσης και της υλοποίησης συντήρησης.

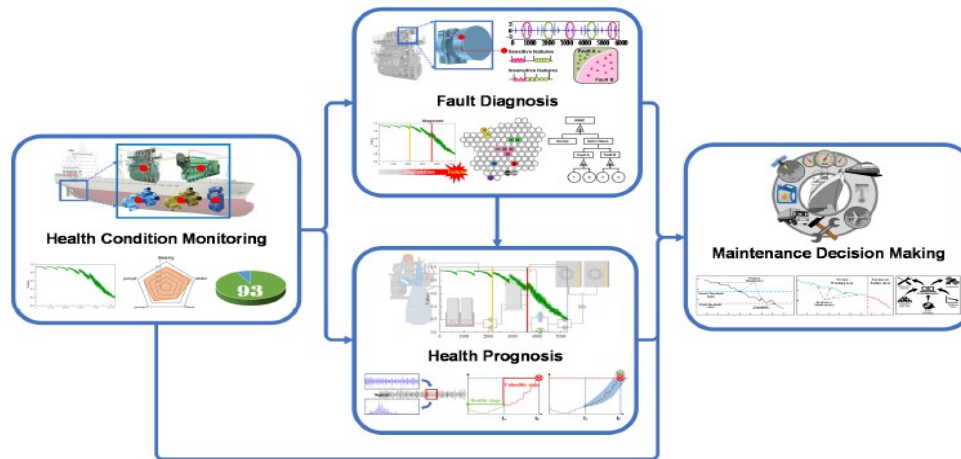
Αρχικά, η διαδικασία HCM είναι η λήψη παραμέτρων κατάστασης του πλοίου, η πραγματοποίηση ηλεκτρονικής παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο του μηχανικού συστήματος και η πλήρης αξιολόγηση της κατάστασης και η ανίχνευση ανωμαλιών. Το HCM αποτελείται από τρεις βασικές διαδικασίες, την απόκτηση δεδομένων, την επεξεργασία δεδομένων και την παρακολούθηση κατάστασης. Με την ευφυή τεχνολογία και τη σύγχρονη τεχνολογία ανίχνευσης, συλλέγονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων πλοίων. Τα δεδομένα που συλλέγονται επί του σκάφους περιλαμβάνουν πλοήγηση, αντίληψη κατάστασης MSAE και περιβαλλοντικά δεδομένα. Η επεξεργασία δεδομένων θα πρέπει πρώτα να διασφαλίζει την ακρίβεια και την ακεραιότητα των δεδομένων και στη συνέχεια να εξάγει και να συνάγει πολύτιμα και ουσιαστικά δεδομένα για τη διαχείριση της υγείας από έναν μεγάλο αριθμό πιθανώς διαταραγμένων και πολύπλοκων στην κατανόηση δεδομένων. Η παρακολούθηση κατάστασης πραγματοποιεί έγκαιρη προειδοποίηση, συναγερμό και ανίχνευση ανωμαλιών σύμφωνα με διαδικτυακά δεδομένα.

Στη συνέχεια, με βάση τα μη φυσιολογικά προβλήματα του HCM, η FD εστιάζει στους τρόπους αστοχίας και τις αιτίες τους και καταδεικνύει τη σχέση μεταξύ των δεδομένων παρακολούθησης και της βλάβης. Μετά από αυτό, η υλοποίηση της HP είναι να ληφθούν τα δεδομένα αστοχίας των μηχανικών συστήμα μέσω HCM και FD, και στη συνέχεια καθιερώνεται το μοντέλο υποβάθμισης (Degradation Model, DM) για να ολοκληρωθεί πρόβλεψη χρόνου ζωής. Αυτό το τμήμα εστιάζει στην εξέλιξη της διαδικασίας σφάλματος και εκτιμά την μελλοντική συμπεριφορά μέσω των απαραίτητων μοντέλων για την πραγματοποίηση της αξιολόγησης κινδύνου αποτυχίας και την αλλαγή της στρατηγικής ελέγχου.

Το HP (Health Prognosis) αποτελείται γενικά από κατασκευή HI (Health Indicators), τμήμα HS και πρόβλεψη υπολειπόμενου χρόνου ζωής RUL (Remaining Useful Life). Τέλος, η λήψη αποφάσεων συντήρησης (Maintenance Decision, MD) γίνεται σύμφωνα με τα αποτελέσματα των HCM, FD και HP. Εδώ περιγράφεται η

προσέγγιση του O&M για τον τρόπο διατήρησης της υγείας και της ασφάλειας των περιουσιακών στοιχείων σε έναν ολόκληρο κύκλο ζωής. (*Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy*, Dalian Maritime University, China 2022)

Στο ακόλουθο διάγραμμα που ακολουθεί περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία PHM :



ΕΙΚΟΝΑ 4. (Relationship diagram of four parts of PHM, <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/2/72>)

4.3.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΓΕΙΑΣ (Health Condition Monitoring)

Η παρακολούθηση της υγείας του εξοπλισμού αποτελεί την θεμελιώδη διεργασία της PHM. Σε αυτό τα διάφορα δεδομένα συλλέγονται από τους αισθητήρες αποθηκεύονται και αναλύονται ώστε να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση λειτουργίας του MSAE.

Η υλοποίηση του HCM συνοψίζεται ως εξής :

ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ:

- ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
- ΜΕΤΑΦΟΡΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ:

- ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

- ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ



EIKONA 5. (στάδια διαδικασίας *Health Condition Monitoring*)

ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων αποτελείται από συσκευές, εξοπλισμό και αποθήκευση για τη συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων. Χρησιμοποιεί αισθητήρες για να λαμβάνει παραμέτρους κατάστασης MSAE και να τις μεταδίδει σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας δεδομένων για ανάλυση. Τα κοινά σήματα περιλαμβάνουν θερμοκρασία, πίεση, τάση, ρεύμα και ταχύτητα. Τα δεδομένα κωδικοποιούνται και κοινοποιούνται σύμφωνα με το πρωτόκολλο, στη συνέχεια ταξινομούνται, υποβάλλονται σε επεξεργασία και αποθηκεύονται για ανάλυση.

a. Συλλογή Δεδομένων (Data Collection)

Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν δεδομένα πλοήγησης όπως ταχύτητα πλεύσης, ταχύτητα ανέμου, βαθικά, γωνία πηδαλίου. Επίσης σημασία έχουν και τα μετεωρολογικά δεδομένα καθώς και δεδομένα GPS. Τέλος, συλλέγονται δεδομένα του MSAE προερχόμενα από αισθητήρες, από καταχωρημένες μετρήσεις και πειραματικές δοκιμές που πιθανώς έχουν πραγματοποιηθεί. Η ολοένα και μεγαλύτερη συγχώνευση έξυπνων αισθητήρων και δικτύων αισθητήρων μπορεί να διευρύνει και να επιταχύνει την συγκεκριμένη διαδικασία.

b. Μετάδοση Δεδομένων (Data Transmission)

Η μετάδοση των δεδομένων ανάλογα με την τοποθεσία που συλλέγονται κατηγοριοποιείται σε τοπική (local data transmission) και σε απομακρυσμένη (remote data transmission).

Για την περίπτωση τοπικής μετάδοσης δεδομένων εφαρμόζονται τεχνολογίες δικτύων Ethernet, CAN bus (Controller Area Network), ZigBee (πρωτόκολλο ασύρματης μετάδοσης δεδομένων) .

Για την απομακρυσμένη μετάδοση χρησιμοποιούνται θαλάσσιους δορυφόρους, υπεράκτιους σταθμούς βάσης και άλλα δίκτυα και πρωτόκολλα επικοινωνίας για την επίτευξη μετάδοσης δεδομένων από το πλοίο στην ακτή. Δεδομένα αποθηκευμένα στο πλοίο μεταδίδονται στο κέντρο δεδομένων στην ξηρά με τεχνολογίες μετάδοσης

που θα επιλεγεί από την εταιρεία. Συνήθως, η εταιρεία επιλέγει ανάλογα με το κόστος επικοινωνίας και τον επείγοντα χαρακτήρα των δεδομένων. Συνήθεις τεχνολογίες απομακρυσμένης μετάδοσης στην ναυτιλία είναι το AIS (Automatic identification System), maritime satellites, GPS, τεχνολογία επικοινωνίας ευρέος φάσματος.

c. Αποθήκευση Δεδομένων (Data storage)

Η διαδικασία συνεχούς παρακολούθηση του εξοπλισμού έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα την διαρκή παραγωγή ενός όγκου δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά ανάλογα με τις πηγές από όπου συλλέγονται καθώς και από τις ανάγκες του εκάστοτε λογισμικού παρακολούθησης είτε μεταδίδονται άμεσα σε άλλα κέντρα δεδομένων, είτε παραμένουν αποθηκευμένα στο πλοίο για κάποιο χρονικό διάστημα.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (Data Processing)

Όπως έχει αναλυθεί και παραπάνω, τα δεδομένα αφού συλλεχθούν πρέπει να επεξεργαστούν ώστε να παρέχουν κατάλληλες πληροφορίες. Η διαδικασία επεξεργασίας περιλαμβάνει : α) την προεπεξεργασία των δεδομένων, β) την επεξεργασία χαρακτηριστικού και γ) την συγχώνευση δεδομένων.

a. Προεπεξεργασία δεδομένων (Data Preprocessing)

Η λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη για την τελική διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με την συντήρηση του MSAE. Ωστόσο, αυτά τα δεδομένα είναι επιρρεπή σε σφάλματα λόγω σφαλμάτων μέτρησης, προβλημάτων χειροκίνητης καταγραφής, σφαλμάτων στη διαδικασία μετάδοσης και αποθήκευσης. Η προεπεξεργασία των δεδομένων του πλοίου είναι απαραίτητη για την αποφυγή εσφαλμένης εκτίμησης των συνθηκών υγείας του MSAE και την αποφυγή καταστροφικών ατυχημάτων. Οι τρεις συνηθισμένες μέθοδοι προεπεξεργασίας είναι ο καταλογισμός δεδομένων (data imputation), ο εντοπισμός ακραίων τιμών (outlier detection) και η διαγραφή πλεονάζοντων δεδομένων (redundant data deletion) . Ο καταλογισμός δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την αύξηση της ποιότητας του αρχικού συνόλου δεδομένων και τη βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων για έξυπνες υπηρεσίες O&M. Οι ακραίες τιμές στα δεδομένα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κρίση των συνθηκών υγείας και πρέπει να φιλτράρονται εκ των προτέρων κατά την ανάλυση. Τα πλεονάζοντα δεδομένα στο πλοίο περιλαμβάνουν διπλά δεδομένα και σύντομους κύκλους απόκτησης δεδομένων, που αυξάνουν τους υπολογισμούς του συστήματος και επηρεάζουν την ανάλυση του μοντέλου.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟΥ (Feature Processing)

Η επεξεργασία χαρακτηριστικών είναι ένα πρόγραμμα για την ανακάλυψη των χρήσιμων λειτουργιών για ταξινόμηση και αναγνώριση από πολλά χαρακτηριστικά. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε επίσης να συμπίεσει τη διάσταση του χαρακτηριστικού χώρο, δηλαδή να αποκτήσει μια ομάδα χαρακτηριστικών ταξινόμησης «λίγα αλλά ωραία» με χαμηλή πιθανότητα σφάλματος ταξινόμησης.

Η επεξεργασία χαρακτηριστικών περιλαμβάνει : 1) την επιλογή του χαρακτηριστικού (feature selection) και 2) την εξαγωγή του (feature extraction)

Η επιλογή του χαρακτηριστικού γίνεται ανάλογα τα εκάστοτε κριτήρια αξιολόγησης και για αυτό απαιτούνται αλγόριθμοι ανάλυσης μεγάλων δεδομένων όπως : Pearson correlation method, K-means clustering algorithm, Fuzzy C-means clustering algorithm.

Η διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών πραγματοποιείται με σκοπό την δημιουργία νέων χαρακτηριστικών ανάλυσης που θα βασίζονται στα αρχικά χαρακτηριστικά που εμπεριέχονται στα δεδομένα. Για την συγκεκριμένη διεργασία εφαρμόζονται μέθοδοι μείωσης διαστάσεων όπως η PCA (Principal Component Analysis), KPCA (Kernel Principal Component Analysis), καθώς και μέθοδοι εκχύλισης αποσύνθεσης (decomposition extraction).

ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΗ ΔΕΔΔΟΜΕΝΩΝ (Data Fusion)

Τα μηχανήματα πλοίων είναι πολύπλοκα και επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, καθιστώντας δύσκολη την έκφραση της συνολικής κατάστασης λειτουργίας χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο σύνολο δεδομένων. Η συγχώνευση δεδομένων είναι μια μέθοδος που συνδυάζει πολλαπλές πληροφορίες από έναν ή διαφορετικούς τύπους αισθητήρων σε ένα νέο και πιο εκφραστικό κριτήριο αξιολόγησης. Η διαδικασία συγχώνευσης μπορεί να χωριστεί σε :

- συγχώνευση σε επίπεδο δεδομένων,
- σε επίπεδο χαρακτηριστικών και σε
- επίπεδο απόφασης.

Έχουν εφαρμοστεί διαφορετικές μέθοδοι συγχώνευσης για την ανίχνευση σφαλμάτων και τη διαχείριση της υγείας των μηχανημάτων του πλοίου, όπως μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων (Support Vector Machines) και νευρωνικά δίκτυα BP. Πριν από τη συγχώνευση δεδομένων, τα δεδομένα πρέπει να κανονικοποιηθούν για να διασφαλιστεί ότι κάθε δεδομένα θα έχει ίση συνεισφορά και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι κανονικοποίησης στους ερευνητικούς τομείς. Ωστόσο, οι περισσότερες μέθοδοι χρησιμοποιούν την υψηλή απόδοση ως κύριο κριτήριο αξιολόγησης και η δυνατότητα εφαρμογής και η ασφάλεια των μεθόδων πρέπει να βελτιωθούν.

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (Condition Monitoring)

Η παρακολούθηση κατάστασης είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη διάκριση κανονικών και μη φυσιολογικών καταστάσεων ή για την ανακάλυψη πολύτιμων πληροφοριών καταγράφοντας και εμφανίζοντας τις συνθήκες λειτουργίας, την κατάσταση ανώμαλης συναγερμού και την παροχή δεδομένων για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Η παραδοσιακή μέθοδος βασίζεται σε παραμέτρους συναγερμού ή χειροκίνητη αναγνώριση. Η παρακολούθηση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως online και offline, τοπική και απομακρυσμένη, δεδομένα και βίντεο, σε επίπεδο εξοπλισμού και σε επίπεδο συστήματος.

- Η παρακολούθηση σε επίπεδο εξοπλισμού συχνά ενσωματώνει διάφορες μεθόδους παρακολούθησης με διάφορα δεδομένα και παραμέτρους (π.χ. παρακολούθηση δεδομένων δονήσεων και θερμοκρασίας)
- Η παρακολούθηση σε επίπεδο συστήματος εστιάζει σε μεγάλο εξοπλισμό ή συνδυασμένα συστήματα, όπως το σύστημα πρόωσης πλοίου και συστήματα ψύξης, λίπανσης και καυσίμου.

Εργαλεία οπτικοποίησης, όπως καμπύλες, γραφήματα και γραφήματα ραντάρ, χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κατάσταση της υγείας του εξοπλισμού ή του συστήματος. Η έξυπνη παρακολούθηση κατάστασης έχει αναπτυχθεί για τη βελτίωση της απόδοσης. Εργαλεία οπτικοποίησης, όπως γραφήματα και πίνακες τοπολογίας χαρτογράφησης αυτο-οργάνωσης, χρησιμοποιούνται για την εμφάνιση της ομαδοποίησης δεδομένων κρίσιμων παραμέτρων απόδοσης. Ένα παράδειγμα σπονδυλωτής λύσης συστήματος είναι το SeaPerformer, που εφαρμόζεται σε μεγάλο αριθμό εμπορικών πλοίων. Η τεχνολογία έχει εφαρμοστεί σε διάφορους εξοπλισμούς, συμπεριλαμβανομένων των ναυτικών κινητήρων ντίζελ, των συστημάτων προώθησης θαλάσσιων αεριοστρόβιλων και του AMS πλοίων για την υποστήριξη αποτελεσματικών O&M.

4.3.3 ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΗΣ (Fault Diagnosis)

Η διάγνωση βλαβών, ως στάδιο της PHM, αποσκοπεί στην εύρεση, τον διαχωρισμό και την αναγνώριση βλαβών και αστοχιών του MSAE. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται γενικά με τέσσερεις προσεγγίσεις οι οποίες και διαμορφώνουν σε αυτό το στάδιο το περιβάλλον του ψηφιακού διδύμου.

Συγκεκριμένα :

- Μοντέλο Φυσικής (Physics-based Model)
- Μοντέλο Γνώσης (Knowledge-based Model)
- Μοντέλο Δεδομένων (Data-driven Model)
- Υβριδικά Μοντέλα (Hybrid models)

ΜΟΝΤΕΛΟ ΦΥΣΙΚΗΣ (Physics-based Model)

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε μοντέλα φυσικής στην ανίχνευση σφαλμάτων κατασκευάζουν μαθηματικά μοντέλα βασισμένα σε μηχανισμούς αστοχίας. Αυτά τα μοντέλα αναλύουν τη δυναμική της διαδικασίας για να δημιουργήσουν υπολειμματικά σήματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τη διαφορά μεταξύ εκτιμώμενων και μετρούμενων τιμών. Αυτά τα υπολειμματικά σήματα αξιολογούνται για τον εντοπισμό μη φυσιολογικών συνθηκών στη διαδικασία παρακολούθησης.

Ορισμένες κοινές μέθοδοι FD που βασίζονται σε μοντέλα περιλαμβάνουν:

- γραφήματα δεσμών (bond graphs),
- χώρο ισοτιμίας (parity space),
- εκτίμηση παραμέτρων (parameter estimation) και
- παρατηρητές κατάστασης.

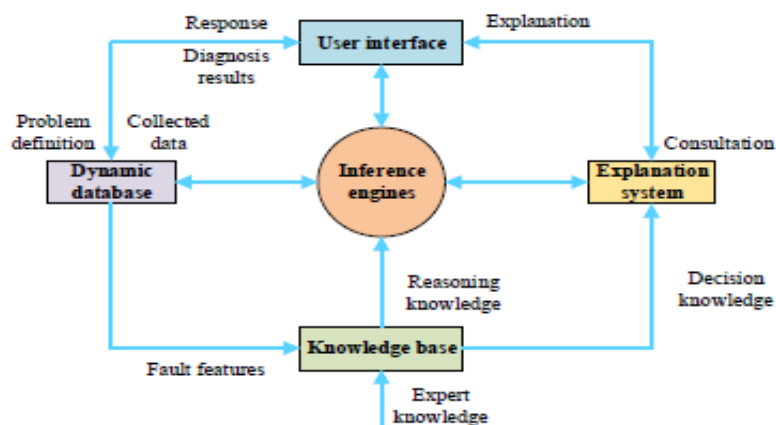
Ωστόσο, η δημιουργία ακριβών μαθηματικών μοντέλων του MSAE είναι αρκετές φορές δύσκολη διαδικασία εξαιτίας πολλών αστάθμητων παραγόντων του περιβάλλοντος λειτουργίας, γεγονός που περιορίζει την πρακτική εφαρμογή συστημάτων FD που βασίζονται σε μοντέλα φυσικής στον ναυτικό εξοπλισμό.

Μοντέλα φυσικής βρίσκουν εφαρμογή για αναγνώριση σφαλμάτων σε συστήματα πλοίου όπως το σύστημα προώθησης, την μηχανή (κυρίως σε μηχανές Diesel), καθώς και σε συστήματα κυκλοφορίας υδάτων.

Μοντέλα γνώσης (Knowledge-based Model)

Οι μέθοδοι ανίχνευσης σφαλμάτων που βασίζονται στη γνώση περιλαμβάνουν τη χρήση γνώσεων διάγνωσης σε επίπεδο ειδικού για τον εντοπισμό της κατάστασης σφάλματος. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται σε ποιοτικά μοντέλα που βασίζονται σε προηγούμενη γνώση και χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος αναζήτησης για τη διεξαγωγή της διαδικασίας ανίχνευσης σφαλμάτων. Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος ανίχνευσης σφαλμάτων που βασίζεται στη γνώση περιλαμβάνουν:

- μια βάση γνώσεων ειδικών (expert knowledge base),
- μια δυναμική βάση δεδομένων (dynamic database),
- μηχανές συμπερασμάτων (inference engines),
- μια διεπαφή χρήστη (User Interface) και
- ένα σύστημα επεξήγησης (explanation system)



ΕΙΚΟΝΑ 6. (μοντέλο γνώσης (inference engine), <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/2/72>)

Η «καρδιά» του συστήματος είναι το ειδικό σύστημα ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιεί αυτά τα στοιχεία για να εκτελέσει την εργασία ανίχνευσης σφαλμάτων με βάση τις ειδικές γνώσεις και τα ποιοτικά μοντέλα.

Τα μοντέλα διάγνωσης που βασίζονται στη γνώση για την ανίχνευση σφαλμάτων ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες:

- rule-based reasoning (συλλογισμός βάσει κανόνων),
- fuzzy logic-based reasoning (συλλογισμός βασισμένος σε ασαφή λογική),
- neural network-based reasoning (συλλογισμός βασισμένος σε νευρωνικά δίκτυα)
- case-based reasoning (συλλογισμός βάσει περιπτώσεων).

1. Το rule-based reasoning χρησιμοποιεί προκαθορισμένους κανόνες για τη λήψη αποφάσεων και ήταν επιτυχής στη διάγνωση κινητήρων ντίζελ πλοίων, φυγοκεντρικών αντλιών, υδραυλικών συστημάτων και ρουλεμάν. Ωστόσο, απαιτεί μεγάλο αριθμό κανόνων για τη διατήρηση υψηλής ακρίβειας, καθιστώντας το αναποτελεσματικό για πολύπλοκα MSAE.

2. Το fuzzy logic-based reasoning επιτρέπει την ανάλυση ανακριβών και μη αριθμητικές πληροφορίες και έχει εφαρμοστεί σε συστήματα ισχύος, κινητήρες σκούτερ, ρουλεμάν και συστήματα ταχυτήτων. Η ακρίβειά του επηρεάζεται από τη δυσκολία απόκτησης ενός ασαφούς συνόλου δεδομένων.

3. Το neural network-based reasoning χρησιμοποιεί τις ικανότητες εκμάθησης, συσχέτισης και μνήμης των νευρωνικών δικτύων για τη διάγνωση μηχανών εσωτερικής καύσης και ρουλεμάν, αλλά απαιτεί επαρκή δεδομένα σφάλματος για εκπαίδευση.

4. Το case-based reasoning χρησιμοποιείται ευρέως στην αποφυγή σύγκρουσης πλοίων και στο σχεδιασμό του πλοίου, αλλά δεν έχει ακόμη εφαρμοστεί στη διάγνωση σφαλμάτων MSAE.

ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (Data driven Models)

Οι μέθοδοι FD που βασίζονται σε δεδομένα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στο MSAE λόγω της προσαρμοστικότητας και της ικανότητάς τους να δημιουργούν σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων μέτρησης και της υγείας του MSAE. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν δύο βήματα: ένα μοντέλο εκπαίδευσης που βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα και ένα διαδικτυακό FD που βασίζεται σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. οι κύριες μέθοδοι FD που βασίζονται σε δεδομένα είναι οι εξής :

- Η επεξεργασία σήματος (signal Processing),
- η πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση (Multivariable Statistical Analysis)
- η μηχανική μάθηση (Machine Learning).

1. Επεξεργασία σήματος (signal Processing)

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες μέθοδοι επεξεργασίας σήματος για τη δημιουργία συμπτωμάτων σφάλματος από ορισμένα από τα συλλεγόμενα και επεξεργασμένα σήματα που μεταφέρουν πληροφορίες σφάλματος. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη διάγνωση βλαβών. Τα συμπτώματα σφάλματος μπορούν να χαρακτηριστούν από χαρακτηριστικά όπως το πλάτος, ο μέσος όρος, η οριακή τιμή, η μερική παράγωγος και η φασματική πυκνότητα ισχύος. Οι υπάρχουσες μέθοδοι FD που βασίζονται σε ανάλυση σήματος για MSAE μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- δηλαδή μεθόδους βάση τον χρόνο (time domain),
- μεθόδους βάσει συχνότητας (frequency domain) και
- μεθόδους συχνότητας χρόνου (time-frequency domain)

Οι μέθοδοι επεξεργασίας σήματος θα μπορούσαν να κοστίσουν πολλούς ανθρώπινους και οικονομικούς πόρους δεδομένου ότι απαιτούν εξειδικευμένη εμπειρία, εκτεταμένους υπολογιστικούς πόρους και πόρους αποθήκευσης των επιλεγμένων χαρακτηριστικών, περιορίζοντας τις πρακτικές εφαρμογές τους στο PHM.

2. ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (Multivariate Statistical analysis)

Για την συγκεκριμένη προσέγγιση ανάλυσης χρησιμοποιούνται κατά βάση η α) PCA (Principal Component Analysis) και β) η ICA (Independent Component Analysis).

α) PCA

Η ανάλυση σε κύριες συνιστώσες (Principal Component Analysis), αποτελεί μια τεχνική ανάλυσης δεδομένων που χρησιμοποιείται για να μειώσει τη διάσταση των δεδομένων και να βρει τις πιο σημαντικές συνιστώσες που επηρεάζουν τη διακύμανση στα δεδομένα. Η PCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απομακρύνει τον θόρυβο από τα δεδομένα και να βελτιώσει την απόδοση της ανίχνευσης βλαβών.

Η χρήση της PCA έχει προταθεί για την διαδικασία ανεύρεσης βλαβών σε καπάκια κυλίνδρων ναυτικής μηχανής Diesel (Zhan, Y.L.,2007), καθώς και για κατασκευή ταξινομητών αισθητήρων επί του πλοίου για ανίχνευση ρύπων νερού (*A novel PCA-based approach for building on-board sensor classifiers for water contaminant detection. Pattern. Recognit. Lett. 2020*).

β) ICA

Η ανάλυση συνισταμένων ανεξάρτητων συστάδων (ICA) είναι μια μέθοδος σήματος και επεξεργασίας δεδομένων που χρησιμοποιείται για την απομόνωση των ανεξάρτητων συνισταμένων από ένα συνολικό σήμα ή μία συλλογή από σήματα. Σε αντίθεση με τη μέθοδο PCA, η ICA μπορεί να απομονώσει τις ανεξάρτητες πηγές που

συνεισφέρουν στον συνολικό σήμα, αντί να απομακρύνει τις διακυμάνσεις που σχετίζονται με συγκεκριμένες μεταβλητές

,

3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ (Machine Learning)

Τα τελευταία χρόνια η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται για την ανεύρεση σφαλμάτων του MSAE με δύο κύριες μεθόδους :

a) Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Network)

Το μοντέλο FD που βασίζεται σε ANN έχει ισχυρή ικανότητα αυτομάθησης. Μπορεί να αποκτήσει γνώσεις διάγνωσης από τα δεδομένα εισόδου και να πραγματοποιήσει αναγνώριση μοτίβων σφαλμάτων.

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά διαδεδομένη στην ανεύρεση σφαλμάτων σε εξοπλισμό όπως : ρότορας , υδραυλικά συστήματα, ρουλεμάν και κιβώτιο ταχυτήτων (διαφορικά γρανάζια).

Παρά την επιτυχία των διαφόρων μεθόδων Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ANN) στη διάγνωση μηχανικών βλαβών (FD), έχουν επίσης μειονεκτήματα. Καθώς οι παράμετροι των συνθηκών εισόδου αυξάνονται, η πολυπλοκότητα του μοντέλου αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της εκπαίδευσης και να οδηγήσει σε υπερπροσαρμογή. Επιπλέον, τα μοντέλα FD που βασίζονται σε ANN βασίζονται στην αρχή του «μαύρου κουτιού», στερούνται δηλαδή, χαρτογράφησης φυσικών διεργασιών και εμποδίζουν λογικές εξηγήσεις ορισμένων αποτελεσμάτων.

b) Μέθοδος SVM (Support Vector Machine)

Πρόκειται για μέθοδο επιβλεπόμενης μάθησης, η οποία χρησιμοποιεί ένα υπερεπίπεδο χωρίς περιθώριο για τη διαχωριστική επίλυση προβλημάτων ανάλογα με την κλάση, μέσω της εύρεσης ενός υπερεπιπέδου που διαχωρίζει τις κλάσεις με το μεγαλύτερο δυνατό περιθώριο. Η μέθοδος αυτή επίσης χρησιμοποιείται για προβλέψεις και δυαδική ταξινόμηση.

Η παραπάνω μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για διάγνωση βλάβη σε καπάκι κυλίνδρου ναυτικής μηχανής (Zhan , 2007).

Η επιτυχία του FD που βασίζεται σε δεδομένα εξαρτάται από επαρκή και ποιοτικά δεδομένα. Εάν τα ιστορικά δεδομένα είναι ανεπαρκή, εφαρμόζονται φυσικές μέθοδοι ή μέθοδοι που βασίζονται στη γνώση για τη συμπλήρωση της FD που βασίζεται σε δεδομένα.

ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (Hybrid Approach)

Μια μεμονωμένη μέθοδος FD έχει περιορισμούς και επομένως ένα υβριδικό μοντέλο που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα διαφορετικών μοντέλων μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της διάγνωσης και τον ορθολογισμό της απόφασης.

Η φυσική μοντελοποίηση και οι μέθοδοι που βασίζονται σε δεδομένα μπορούν να συνδυαστούν για τα περιστρεφόμενα μηχανήματα FD, ενώ ο συνδυασμός προσομοίωσης δεδομένων και μεθόδων μηχανικής εκμάθησης εποπτευόμενης και χωρίς επίβλεψη έχει χρησιμοποιηθεί για πλοία του πολεμικού ναυτικού.

Άλλες υβριδικές μέθοδοι FD έχουν επίσης καθιερωθεί, συμπεριλαμβανομένης μίας που βασίζεται στην πολλαπλή μάθηση και το δάσος απομόνωσης για θαλάσσιους κινητήρες ντίζελ και μία που συνδυάζει ICA, μετασχηματισμό Fourier (Short Time Fourier Transformation), PCA και ασαφές νευρωνικό δίκτυο για παρακολούθηση κατάστασης κινητήρων ντίζελ θαλάσσης και FD.

4.3.4 ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΥΓΕΙΑΣ (Health Prognosis)

Σκοπός του HP είναι ο υπολογισμός του υπολειπόμενου χρόνου ζωής μηχανολογικού εξοπλισμού, χρησιμοποιώντας την τάση υποβάθμισης (degradation trend) από πληροφορίες του HCM. Εξυπηρετεί την βελτιστοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε θέματα συντήρησης, αξιοπιστίας και ασφάλειας λειτουργίας του MSAE.

Η διαδικασία HP πραγματοποιείται σε τρία τμήματα : α) κατασκευή HI (Health Indicator). β) κατάσταση υγείας (Health State), γ) πρόβλεψη υπολειπόμενου ωφέλιμου χρόνου ζωής (Remaining Useful Life)

ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΓΕΙΑΣ (Health Indicator)

Ένας κρίσιμος παράγοντας για την αποτελεσματική πρόβλεψη της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής (RUL) των παρακολουθούμενων συστημάτων είναι η απόκτηση ενός σαφούς δείκτη υγείας (HI) που αντικατοπτρίζει πλήρως τη δυναμική υποβάθμιση της απόδοσης. Ένα κατάλληλο HI βοηθά στην οπτικοποίηση δεδομένων, χαρακτηρίζει τις συνθήκες υγείας σε όλο τον κύκλο ζωής και έχει μια φαινομενική μονοτονική τάση. Οι μορφές έκφρασης και οι μέθοδοι κατασκευής των HI διαφέρουν για διάφορες συσκευές, με ορισμένες να έχουν κυρίαρχα χαρακτηριστικά υποβάθμισης που μπορούν να ταξινομηθούν ως μεμονωμένος τύπος HI (Single HI). Ωστόσο, η στήριξη σε μία παράμετρο αισθητήρα συχνά οδηγεί σε αναξιόπιστη ανάλυση πρόβλεψης. Ο συνδυασμός πολλαπλών διαθέσιμων σημάτων αισθητήρων για την κατασκευή ενός συνθετικού HI (Synthesized HI) αξιολογεί με ακρίβεια τη διαδικασία υποβάθμισης και αποφεύγει τη σπατάλη δεδομένων παρακολούθησης.

1. Μεμονωμένος HI (Single HI)

Το Single HI είναι μια αξιόπιστη και εύκολη μέθοδος για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης υγείας ενός συστήματος παρακολούθησης όταν υπάρχει ένας πλήρης μηχανισμός υποβάθμισης που σχετίζεται με τον εξοπλισμό ή το σύστημα που θα μπορούσε να αναπαρασταθεί από ένα μόνο σήμα αισθητήρα. Στατιστικά

χαρακτηριστικά όπως το μέσο τετράγωνο της ρίζας (RMS), η λοξότητα και η κύρτωση που εξάγονται από χρονοσειρές δεδομένων παρακολούθησης μπορούν να χρησιμεύσουν ως μεμονωμένα HI. Το RMS παρακολουθεί την πρόοδο των σφαλμάτων, ενώ η λοξότητα και η κύρτωση αντιπροσωπεύουν τη συμμετρία και την κορυφή της κατανομής του σήματος, αντίστοιχα

Διάφορες μελέτες (Malhi,A.,2011) έχουν χρησιμοποιήσει στατιστικά χαρακτηριστικά που εξάγονται από σήματα πεδίου χρόνου και συχνότητας, όπως τιμές κορυφής, RMS, κύρτωση και πυκνότητα ισχύος, ως μεμονωμένο HI για την πρόβλεψη του RUL εξοπλισμού όπως ρουλεμάν (Huang, Z,2017, Zhang, Z.2015), συμπιεστές, γρανάζια, ρουλεμάν ώθησης και αντλίες. Άλλες μελέτες (Hu L., 2015) πρότειναν δείκτες που βασίζονται σε μοντέλα όπως η απώλεια θερμότητας και το έλλειμμα ισχύος για την παρακολούθηση της υποβάθμισης της απόδοσης του αεριοστροβίλου. Ωστόσο, οι περιορισμοί ενός μόνο HI στην περιγραφή των χαρακτηριστικών αποδόμησης πολύπλοκων συστημάτων περιορίζουν την εφαρμογή του σε MSAE.

2. Σύνθετος HI (Synthesized HI)

Προκειμένου να περιγραφούν αποτελεσματικά τα χαρακτηριστικά υποβάθμισης σύνθετων συστημάτων, είναι απαραίτητο να συντεθούν δείκτες υγείας (HI) με τη συγχώνευση πολλαπλών σημάτων αισθητήρων που σχετίζονται με την υποβάθμιση σε μία διάσταση. Οι μέθοδοι κατασκευής HI μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως βασισμένες στη βελτιστοποίηση ή σε μη βελτιστοποίηση. Οι διαφορετικές μέθοδοι συγχώνευσης για τη σύνθεση HI περιλαμβάνουν τη συγχώνευση σε επίπεδο δεδομένων και τη συγχώνευση σε επίπεδο χαρακτηριστικών.

Η συγχώνευση σε επίπεδο δεδομένων συνδυάζει άμεσα μετρημένες πληροφορίες πολλαπλών αισθητήρων σε ένα συνθετικό HI για να περιγράψει με ακρίβεια την κατάσταση της υγείας του συστήματος, ενώ η συγχώνευση σε επίπεδο χαρακτηριστικών ενσωματώνει πληροφορίες χαρακτηριστικών που δημιουργούνται από ανεξάρτητες μεθόδους ανάλυσης.

Οι περισσότερες μέθοδοι συγχώνευσης χρησιμοποιούν γραμμικούς συνδυασμούς αρχικών σημάτων αισθητήρων, αλλά τα μη γραμμικά μοντέλα γίνονται όλο και πιο δημοφιλή λόγω πολύπλοκων συστημάτων με πολλαπλές πηγές και διάφορους παράγοντες υποβάθμισης. Τα μη γραμμικά μοντέλα συγχώνευσης περιλαμβάνουν νευρωνικά δίκτυα βαθιάς περιστροφής πολλαπλών επιπέδων, αποσύνθεση πακέτων κυματιδίων σε εμπειρική λειτουργία σε συνδυασμό με νευρωνικά δίκτυα χαρτογράφησης αυτοοργάνωσης, μοντέλα μείγματος Gauss και αμφίδρομα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα. Η αυτόματη κατασκευή HI που βασίζεται στον γενετικό προγραμματισμό είναι επίσης μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για τη μελλοντική σύνθεση HI.

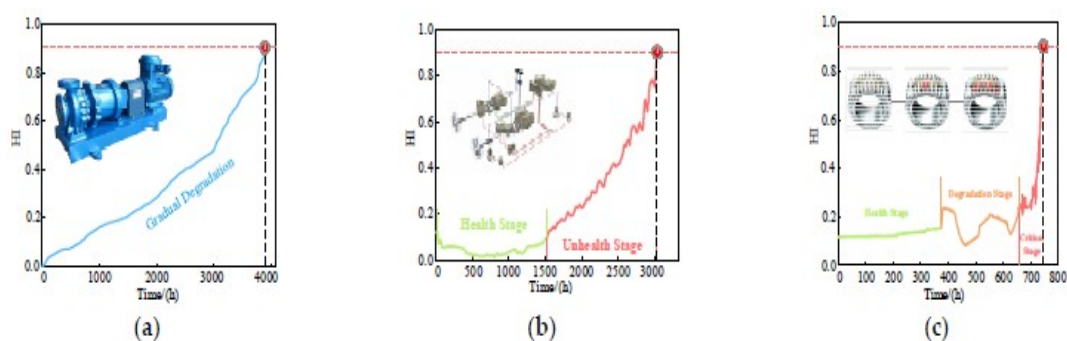
ΤΜΗΜΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΤΑΔΙΟΥ ΥΓΕΙΑΣ (Health Stage Division)

Η χρήση του HI στην κατασκευή καμπυλών υποβάθμισης επιτρέπει την αναγνώριση διαφορετικών σταδίων στον κύκλο ζωής, που αντιστοιχούν σε διάφορους βαθμούς

σοβαρότητας σφάλματος. Αυτή η κατηγοριοποίηση επιτρέπει την εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων πρόβλεψης FD και RUL σε συγκεκριμένα στάδια. Το τμήμα αυτό εστιάζει στη διαδικασία της διαίρεσης σταδίων υποβάθμισης και στον προσδιορισμό των σημείων έναρξης και λήξης της υποβάθμισης.

Τα HI μπορούν να χωρίσουν την υποβάθμιση του MSAE σε διαφορετικά στάδια, τα οποία καθοδηγούν τις μεθόδους πρόβλεψης RUL. Η βιβλιογραφία προτείνει τρεις μορφές HS:

- a) απλή,
- b) δύο,
- c) πολλαπλών σταδίων



EIKONA 7. (Different HSs: (a) one stage of specific equipment and (b) two stages of some systems and (c) three stages of bearings, <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/2/72>)

Το a) δείχνει μόνο μια σταδιακά αυξανόμενη τάση από την υγεία στην αποτυχία, υποδεικνύοντας μόνο ένα HS στη διαδικασία αποδόμησης. Επομένως, μπορεί να μοντελοποιηθεί με μονό μοντέλο υποβάθμισης και η πρόβλεψη RUL μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Η τάση υποβάθμισης στο b) δείχνει δύο διαφορετικά στάδια, το HS στην αρχή της λειτουργίας και του σταδίου βλάβης μετά από μια περίοδο λειτουργίας.

Τα περισσότερα MSAE χωρίζονται σε δύο στάδια: στάδιο σταθερής και στάδιο ταχείας αύξησης των ελαττωμάτων. Οι ερευνητές έχουν εφαρμόσει μεθόδους υποβάθμισης δύο σταδίων για να διακρίνουν τα δεδομένα υγείας από τα υποβαθμισμένα δεδομένα για την ακρίβεια πρόβλεψης RUL. Η ανάλυση πρόβλεψης σφάλματος και RUL θα πρέπει να πραγματοποιείται όταν το σύστημα και ο εξοπλισμός αρχίζουν να αποτυγχάνουν για να αποφευχθεί η περιττή μοντελοποίηση και υπολογισμός για την ανάλυση δεδομένων HS. Το HS χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της αρχικής υποβάθμισης του μηχανήματος και την καθοδήγηση της έναρξης της πρόβλεψης RUL.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα c), Η διαίρεση σε δύο στάδια μπορεί να μην είναι αρκετή για να αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση του μηχανήματος όταν αλλάζουν οι συνθήκες λειτουργίας ή οι τρόποι αστοχίας. Έτσι μπορεί να χρειαστούν τρία ή

περισσότερα HS. Οι μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει αλγόριθμους ομαδοποίησης, ταξινόμησης τεχνητής νοημοσύνης και πολλαπλά μοντέλα για να αναπαραστήσουν τη διαδικασία υποβάθμισης του εξοπλισμού με διαφορετικά HS

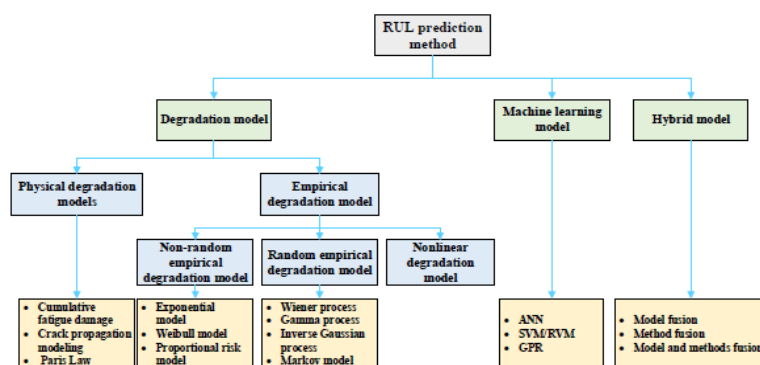
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΥΠΟΛΕΙΠΟΜΕΝΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ (RUL prediction)

Η πρόβλεψη RUL εκτιμά την αναμενόμενη υπολειπόμενη διάρκεια ζωής ενός εξαρτήματος ή συστήματος πριν από τη συντήρηση ή την αντικατάσταση. Παίζει κρίσιμο ρόλο στο σύστημα PHM και CBM. Για το MSAE, η ακριβής πρόβλεψη RUL μπορεί να καθοδηγήσει την προγνωστική συντήρηση για να μειώσει την απρογραμμάτιστη συντήρηση, να αποτρέψει πιθανούς κινδύνους για την ασφάλεια και να ελαχιστοποιήσει τις οικονομικές απώλειες. Για την πρόβλεψη RUL μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσες και έμμεσες μέθοδοι. Το πρώτο υπολογίζει απευθείας το RUL με βάση το ιστορικό του μηχανήματος και τις τρέχουσες πληροφορίες, ενώ το δεύτερο καθορίζει το όριο αστοχίας, καθιερώνει το μοντέλο HI και κατάστασης υγείας και υπολογίζει το χρόνο που το HI φτάνει στο όριο. Οι μέθοδοι πρόβλεψης RUL μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις τύπους:

- μεθόδους μοντέλων υποβάθμισης,
- μεθόδους μοντέλων μηχανικής μάθησης
- μεθόδους υβριδικών μοντέλων,

που βασίζονται σε διαφορετικές τεχνολογίες και μεθοδολογίες.

Οι ικανότητες αυτογνωσίας και αυτο-πρόβλεψης της νοημοσύνης πλοίων βασίζονται στην ακριβή πρόβλεψη RUL, καθιστώντας την την τελευταία τεχνική διαδικασία και τον απώτερο στόχο του HP. Στο παρακάτω διάγραμμα συνοψίζονται οι πρακτικές που εφαρμόζονται για την πρόβλεψη του RUL



ΕΙΚΟΝΑ 8. (μέθοδοι πρόβλεψης RUL, <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/2/72>)

1. Μοντέλο Υποβάθμισης (Degradation Model)

Το μοντέλο ονομαστικής ζωής που χρησιμοποιείται στο μοντέλο φυσικής υποβάθμισης (physical degradation model) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της διαδικασίας αποδόμησης. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από το πόσο καλά

γίνεται κατανοητή η φυσική διαδικασία και τα πιθανά χαρακτηριστικά υποβάθμισης του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, το εμπειρικό μοντέλο υποβάθμισης (Empirical Degradation model) είναι μια προσέγγιση που βασίζεται σε δεδομένα που βασίζεται στη στατιστική ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων παρακολούθησης.

a) Physical Degradation Model

Η πρόβλεψη RUL χρησιμοποιώντας το μοντέλο φυσικής υποβάθμισης απαιτεί την εξέταση των διαφορετικών τρόπων λειτουργίας και των περιβαλλοντικών συνθηκών του εξοπλισμού. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τη φυσική έννοια της υποβάθμισης του εξοπλισμού για να δημιουργήσει έναν τρόπο αστοχίας που υπολογίζει το RUL.

Η μοντελοποίηση διάδοσης ρωγμών (Crack propagation modeling) είναι μια κοινή πρόβλεψη που βασίζεται στο φυσικό μοντέλο. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα πρόβλεψης του RUL από τη δυναμική του μηχανισμού υποβάθμισης του εξοπλισμού. Ωστόσο, τα μοντέλα υποβάθμισης ποικίλλουν ανάλογα με τον εξοπλισμό ή τα συστήματα και η διαδικασία μοντελοποίησης απαιτεί επαγγελματικές γνώσεις και υποθέσεις. Τα μαθηματικά μοντέλα είναι συχνά πολύπλοκα και απαιτούν έναν ισχυρό υπολογιστικό λύτη και υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Το μοντέλο φυσικής υποβάθμισης χρησιμοποιείται κυρίως για τη μοντελοποίηση πρόβλεψης RUL απλού εξοπλισμού όπως ο ανεμιστήρας, το ρουλεμάν και η αντλία στην πρακτική εφαρμογή του MSAE, καθώς μπορεί να είναι δύσκολο να κατανοήσουμε πλήρως την πραγματική φυσική διαδικασία υποβάθμισης και να δημιουργήσουμε ένα ακριβές φυσικό μοντέλο για πιο πολύπλοκο εξοπλισμό.

b) Empirical Degradation model

Το εμπειρικό μοντέλο υποβάθμισης, γνωστό και ως μοντέλο υποβάθμισης που βασίζεται σε μια στατιστική μέθοδο, είναι ένα μοντέλο μηχανισμού αποδόμησης που συνοψίζει τη διαδικασία μακροπρόθεσμης χρήσης. Μπορεί να λάβει την κατανομή πιθανοτήτων της ζωής ή της υπολειπόμενης ζωής μοντελοποιώντας τα δεδομένα παρακολούθησης και είναι βολικό να ποσοτικοποιήσει την αβεβαιότητα της ζωής ή της υπολειπόμενης ζωής.

Το μοντέλο μπορεί να χωριστεί σε :

- μη τυχαίο εμπειρικό μοντέλο υποβάθμισης
- στοχαστικό εμπειρικό μοντέλο υποβάθμισης.

Το μη τυχαίο μοντέλο αγνοεί τον εσωτερικό μηχανισμό της υποβάθμισης του εξοπλισμού και υιοθετεί τυπικές καμπύλες κατανομής, ενώ το στοχαστικό μοντέλο εξετάζει πλήρως την επίδραση της αβεβαιότητας στη διαδικασία υποβάθμισης.

Πολλά στοχαστικά εμπειρικά μοντέλα αποικοδόμησης έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη RUL, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας Wiener, της διαδικασίας γάμμα, της αντίστροφης διαδικασίας Gaussian και του μοντέλου Markov. Ωστόσο,

αυτά τα μοντέλα έχουν περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένης της εξάρτησης από την υπόθεση Markov, της δυσκολίας στη λήψη δειγμάτων εκπαίδευσης και της δυσκολίας στην εξήγηση του μηχανισμού υποβάθμισης όταν τα αποτελέσματα είναι ανακριβή. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να καθιερωθεί ένα μη γραμμικό μοντέλο αποδόμησης για την περιγραφή της διαδικασίας αποδόμησης των μηχανημάτων.

Έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι για την αντιμετώπιση της μη γραμμικής υποβάθμισης, συμπεριλαμβανομένου του εκθετικού μοντέλου, των συντελεστών επιτάχυνσης, του μοντέλου του Παρισίου Ερντογάν και ενός προσαρμοστικού μη γραμμικού μοντέλου πρόβλεψης. Ωστόσο, η στατιστική μέθοδος έχει περιορισμούς, όπως η επιρροή πολλαπλών μηχανισμών αστοχίας και η αναντιστοιχία μεταξύ της κατανομής αστοχίας εξαρτημάτων και της κατανομής του μοντέλου, που επηρεάζουν την ακρίβεια της πρόβλεψης RUL.

2. Μοντέλο μηχανικής μάθησης (Machine Learning Model)

Η μηχανική μάθηση είναι μια δημοφιλής μέθοδος πρόβλεψης RUL λόγω της πολυπλοκότητας και της ποικιλομορφίας του MSAE. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε μοντέλα έχουν περιορισμούς. Τα σύγχρονα συστήματα αισθητήρων και η τεχνολογία αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων έχουν κάνει τη μηχανική εκμάθηση δημοφιλή. Οι συνήθεις μέθοδοι είναι :

- a) Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN)
- b) SVM/RVM
- c) GPR

a) ANN

Μοντέλα νευρωνικών δικτύων όπως το ANN και η βαθιά μάθηση έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη RUL. Τα μοντέλα ANN έχουν χρησιμοποιηθεί για ακριβή πρόβλεψη RUL των αντλιών και των ρουλεμάν. Τα μοντέλα βαθιάς μάθησης όπως το διπλό CNN και το LSTM έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη RUL.

Η μέθοδος ANN χρησιμοποιεί επεξεργασία σήματος για την εξαγωγή χαρακτηριστικών υποβάθμισης του εξοπλισμού και μαθαίνει τη σχέση χαρτογράφησης μεταξύ δεικτών υγείας και χαρακτηριστικών υποβάθμισης για την πρόβλεψη RUL. Ωστόσο, τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων είναι μοντέλα «μαύρου κουτιού» και απαιτούν μεγάλο αριθμό δεδομένων εκπαίδευσης, μειώνοντας την ικανότητα γενίκευσής τους σε διαφορετικές καταστάσεις.

b) SVM/RVM

Οι μέθοδοι SVM ελαχίστων τετραγώνων, OC-SVM και SVM πολλαπλών κλάσεων έχουν χρησιμοποιηθεί στην πρόβλεψη RUL. Ωστόσο, το SVM έχει ορισμένους περιορισμούς όπως ο καθορισμός του συντελεστή ποινής και η συνάρτηση πυρήνα.

Η μηχανή διανυσμάτων συνάφειας (RVM) είναι μια εναλλακτική μέθοδος του SVM που έχει τα πλεονεκτήματα της αυτόματης εκτίμησης πολύπλοκων παραμέτρων, της απεριόριστης χρήσης οποιασδήποτε συνάρτησης πυρήνα και της δημιουργίας εξόδου πιθανότητας. Το RVM έχει τρεις διαφορετικούς αλγόριθμους εκπαίδευσης:

- διαδοχική αραιή Bayesian μάθηση,
- επαναληπτική μάθηση MacKay και
- επαναληπτικό αλγόριθμο εκμάθησης προσδοκιών-Μεγιστοποίησης.

Το RVM είναι ένα μοντέλο αραιής πιθανότητας που βασίζεται σε Bayesian εκπαίδευση που μπορεί να αντιμετωπίσει υψηλών διαστάσεων, μη γραμμικά και μικρά δείγματα και να παρέχει πρόβλεψη πιθανοτήτων. Είναι κατάλληλο για την επίλυση προβλημάτων πρόβλεψης με πολλαπλές αβεβαιότητες σε MSAE και δύσκολο να ληφθούν δείγματα εκπαίδευσης.

c) GPR (Gaussian process regression)

Η παλινδρόμηση διαδικασίας Gauss (GPR) είναι μια μη παραμετρική μέθοδος που δεν απαιτεί μια προκαθορισμένη δομή μοντέλου και είναι επωφελής για αναξιόπιστα, θορυβώδη ή ελλιπή δεδομένα στην πρόβλεψη ζωής. Το GPR έχει εφαρμοστεί για την πρόβλεψη της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής (RUL) των ρουλεμάν και των μπαταριών.

Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένου του μετασχηματισμού κυματιδίων, της αποσύνθεσης εμπειρικού τρόπου και της ανάλυσης τιμής κορυφής, μεταξύ άλλων. Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης έχουν υψηλή ευελιξία και χαμηλές απαιτήσεις για λεπτομερείς φυσικές γνώσεις, καθιστώντας τις κατάλληλες για σύνθετο εξοπλισμό όπως οι κινητήρες ντίζελ στο MSAE. Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις στον ακριβή καθορισμό των ορίων ασφαλείας λόγω της μη γραμμικής υποβάθμισης και της έλλειψης συνόλων δεδομένων τρέχοντας σε σφάλμα για αλγόριθμους εκπαίδευσης.

3. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ (Hybrid Model)

Η υβριδική μέθοδος συνδυάζει μοντέλα υποβάθμισης και μοντέλα πρόγνωσης για να ξεπεράσει τους περιορισμούς μιας μεμονωμένης μεθόδου για την ακριβή πρόβλεψη της κατάστασης της υγείας. Αυτή η προσέγγιση αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και ελαχιστοποιεί τις αδυναμίες κάθε μεθόδου. Οι υβριδικές μέθοδοι μπορούν να λάβουν διαφορετικές μορφές, συμπεριλαμβανομένης της

- συγχώνευσης μοντέλων αποδόμησης,
- συγχώνευσης μεθόδων πρόβλεψης και
- συγχώνευσης μοντέλων υποβάθμισης και μεθόδων πρόβλεψης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΒΕΛΠΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

5.1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οργανισμοί σε διάφορους τομείς βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ομαλή λειτουργία του εξοπλισμού τους για να εξασφαλίσουν τη βέλτιστη παραγωγικότητα, να μειώσουν το χρόνο διακοπής λειτουργίας και να διατηρήσουν ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών πρόβλεψης συντήρησης έχει καταστεί ζωτικής σημασίας για τον περιορισμό απρόβλεπτων αστοχιών και τη μεγιστοποίηση της λειτουργικής αποτελεσματικότητας. Μεταξύ των διαθέσιμων τεχνικών πρόβλεψης συντήρησης, η ανάλυση κραδασμών, η θερμογραφία και οι δοκιμές υπερήχων έχουν αναδειχθεί ως οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις λόγω της ευελιξίας, της ακρίβειας και της οικονομικής αποδοτικότητάς τους.

Η ανάλυση κραδασμών χρησιμεύει ως ένα ανεκτίμητο εργαλείο για την αξιολόγηση της υγείας και της απόδοσης των μηχανημάτων. Παρακολουθώντας τη συχνότητα, το πλάτος και την ένταση των κραδασμών που εκπέμπονται από περιστρεφόμενο εξοπλισμό, όπως κινητήρες, αντλίες και τουρμπίνες, οι επαγγελματίες συντήρησης μπορούν να εντοπίσουν και να διαγνώσουν πιθανά σφάλματα ή ανωμαλίες προτού κλιμακωθούν σε καταστροφικές βλάβες. Οι κραδασμοί μπορεί να υποδεικνύουν κακές ευθυγραμμίσεις, ανισορροπίες, ελαττώματα ρουλεμάν, φθορά των δοντιών του κιβωτίου ταχυτήτων και άλλα υποκείμενα ζητήματα, επιτρέποντας στις ομάδες συντήρησης να λαμβάνουν προληπτικά μέτρα όπως λίπανση, προσαρμογές ευθυγράμμισης ή έγκαιρες επισκευές για την αποφυγή δαπανηρών βλαβών και τη βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού.

Η θερμογραφία, από την άλλη πλευρά, εκμεταλλεύεται τις αρχές της υπέρυθρης απεικόνισης για να ανιχνεύσει διακυμάνσεις στις επιφανειακές θερμοκρασίες. Αυτή η μη καταστροφική τεχνική δοκιμών επιτρέπει στο προσωπικό συντήρησης να εντοπίσει μη φυσιολογικά μοτίβα θερμότητας που μπορεί να υποδηλώνουν υποκείμενα σφάλματα, ηλεκτρικά προβλήματα ή προβλήματα μόνωσης σε εξοπλισμό ή ηλεκτρικά συστήματα. Με τη λήψη λεπτομερών θερμικών εικόνων, η θερμογραφία βοηθά τις ομάδες συντήρησης να εντοπίσουν τα hot spots, χαλαρές συνδέσεις, ελαττωματικά εξαρτήματα ή επικείμενες ηλεκτρικές βλάβες, επιτρέποντάς τους έτσι να επέμβουν προληπτικά και να αποτρέψουν πιθανούς κινδύνους, απρογραμμάτιστες διακοπές λειτουργίας ή καταστροφικά γεγονότα όπως πυρκαγιές.

Οι δοκιμές με υπερήχους συμπληρώνουν την ανάλυση κραδασμών και τη θερμογραφία παρέχοντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της κατάστασης του μηχανήματος. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας για τον εντοπισμό και την ανάλυση κρυφών ελαττωμάτων, διαρροών ή ανωμαλιών στον εξοπλισμό, ανεξάρτητα από την οπτική τους εμφάνιση. Οι αισθητήρες υπερήχων είναι ικανοί στην ανίχνευση μηχανικών βλαβών όπως ελαττώματα ρουλεμάν, προβλήματα λίπανσης, διαρροές βαλβίδων και διαρροές αέρα ή αερίου, ακόμη και σε περίπλοκες κατασκευές ή δυσπρόσιτες περιοχές. Καταγράφοντας και αναλύοντας υπερηχητικά σήματα, οι επαγγελματίες συντήρησης μπορούν να προσδιορίσουν με ακρίβεια τη φύση και τη σοβαρότητα των ελαττωμάτων, επιτρέποντάς τους να σχεδιάσουν στοχευμένες ενέργειες συντήρησης και να αποφύγουν δαπανηρές βλάβες ή επικίνδυνες καταστάσεις.

Η εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου σχεδίου προγνωστικής συντήρησης βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε αυτές τις τεχνικές. Αξιοποιώντας την ανάλυση κραδασμών, τη θερμογραφία και τις δοκιμές υπερήχων, οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί μπορούν να μεταβούν από τις προσεγγίσεις αντιδραστικής ή προληπτικής συντήρησης σε μια προληπτική στρατηγική που δίνει έμφαση στην παρακολούθηση της κατάστασης και στη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων.

Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει να παρέχει μια γενική επισκόπηση της ανάλυσης κραδασμών, της θερμογραφίας και των δοκιμών με υπερήχους ως τις απαραίτητες τεχνικές για την εφαρμογή ενός προγνωστικού σχεδίου συντήρησης. Θα εμβαθύνει

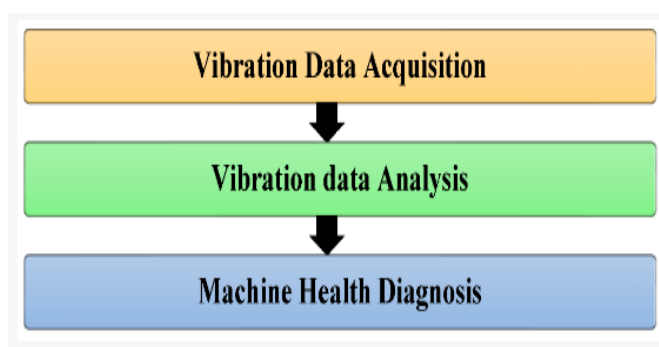
στις βασικές αρχές, τη μεθοδολογία, τις απαιτήσεις εξοπλισμού και τα πεδία εφαρμογής κάθε τεχνικής.

5.2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ

Η ανάλυση κραδασμών είναι μια διαδικασία που παρακολουθεί τα επίπεδα και τα μοτίβα των σημάτων δόνησης μέσα σε ένα εξάρτημα, μηχανή ή δομή, για την ανίχνευση μη φυσιολογικών κραδασμών και την αξιολόγηση της συνολικής κατάστασης του αντικειμένου δοκιμής. (TWI Global)

Η μηχανική δόνηση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κίνηση που παράγεται από μηχανικά μέρη λόγω της επίδρασης εξωτερικών ή εσωτερικών δυνάμεων σε αυτά τα μέρη. Κάθε στοιχείο του εξοπλισμού μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα ή περισσότερα συστήματα αποσβεστήρα-μάζας-ελατηρίου που υπόκειται σε μια ασκούμενη δύναμη. Το πλάτος της δόνησης είναι συνάρτηση των παραμέτρων του συστήματος και του μεγέθους της διεγερτικής δύναμης. Όταν το μηχανήμα είναι νέο, το επίπεδο κραδασμών είναι χαμηλό αφού δεν υπάρχει χαλαρότητα ή φθορά, δηλ. οι ακαμψίες και οι παράγοντες απόσβεσης είναι υψηλοί. Επίσης, οι ασκούμενες δυνάμεις είναι χαμηλές γενικά γιατί δεν υπάρχει ακόμα μηχανικό πρόβλημα. Όπως η μηχανή αλλοιώνεται, δημιουργείται φθορά και χαλαρότητα και επίσης, μπορεί να υπάρχουν δυνάμεις που παράγονται λόγω κάποιων σφαλμάτων όπως η ανισορροπία και οι κακές ευθυγραμμίσεις. Έτσι η μηχανική δόνηση γίνεται υψηλή και επομένως, η διαδικασία συντήρησης θα πρέπει να λάβει χώρα για να μειωθούν οι κραδασμούς και να ανακτηθεί η ομαλή και απρόσκοπτη λειτουργία. (Jafaar Alsalaet, 2012).



ΕΙΚΟΝΑ 9. (περιγραφή σταδίων διαδικασίας ανάλυσης κραδασμών, <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/12/1113>)

Όλες οι περιστρεφόμενες μηχανές παράγουν κραδασμούς που μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την ακρίβεια της ευθυγράμμισης και της ισορροπίας του άξονα, την κατάσταση των ρουλεμάν ή των γραναζιών και την επίδραση του συντονισμού. Η μέτρηση κραδασμών είναι μια αποτελεσματική και μη παρεμβατική μέθοδος για την παρακολούθηση της κατάστασης του μηχανήματος για κάθε φάση λειτουργίας. Η ανάλυση κραδασμών χρησιμοποιείται κυρίως σε περιστρεφόμενο εξοπλισμό όπως τουρμπίνες ατμού και αερίου, αντλίες, κινητήρες, συμπιεστές, μηχανές χαρτιού, ελασματουργεία, εργαλειομηχανές και κιβώτια ταχυτήτων. Ο παλινδρομικός εξοπλισμός όπως οι μεγάλοι κινητήρες ντίζελ και οι συμπιεστές απαιτούν επιπρόσθετες τεχνικές για συνολική παρακολούθησή τους. Ένα σύστημα ανάλυσης κραδασμών αποτελείται συνήθως από :

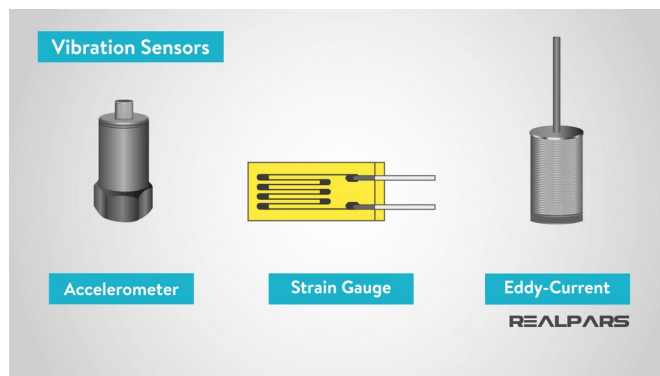
- Έναν αισθητήρα σήματος (transducer)
- Έναν αναλυτή σήματος (signal analyzer)
- Υπολογιστικό σύστημα για αποθήκευση και ανάλυση δεδομένων

(*Vibration Analysis and Diagnostic Guide*, 2012)

ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Παρατηρούνται δύο κατηγορίες εξοπλισμού παρακολούθησης κραδασμών :

1. Προεγκατεστημένοι αισθητήρες



ΕΙΚΟΝΑ 10. (αισθητήρες κραδασμών, <https://realpars.com/vibration-sensor/>)

Οι κραδασμοί μπορούν να μετρηθούν μέσω διαφόρων τύπων αισθητήρων. Με βάση διαφορετικούς τύπους δονήσεων, υπάρχουν αισθητήρες σχεδιασμένοι για τη μέτρηση της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, με διαφορετικές τεχνολογίες μέτρησης, όπως πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες (PZT), μικροηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες (MEMS), ανιχνευτές εγγύτητας, δονόμετρο λέιζερ Doppler και πολλά άλλα. Είναι συνήθως εξοπλισμένα με συστήματα συνεχούς online παρακολούθησης, όπου οι αισθητήρες είναι μόνιμα εγκατεστημένοι σε κατάλληλες θέσεις και συνδέονται με εξοπλισμό συλλογής και ανάλυσης δεδομένων. Τα δεδομένα δόνησης συλλέγονται αυτόματα και μπορούν να εμφανιστούν τοπικά ή να μεταφερθούν σε κεντρικό

υπολογιστή με λογισμικό διαχείρισης βάσης δεδομένων. Αυτό παρέχει έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων και προστατευτική δράση με τη μορφή συναγερμών ή αυτόματης απενεργοποίησης. Πολλαπλές τοπικές μονάδες παρακολούθησης μπορούν να συνδεθούν σε έναν κεντρικό υπολογιστή, επιτρέποντας την παρακολούθηση μηχανημάτων σε διαφορετικές τοποθεσίες από ένα μέρος. Το λογισμικό ανάλυσης κραδασμών/διαχείρισης βάσης δεδομένων μπορεί επίσης να συνδεθεί σε πολλούς υπολογιστές για παρακολούθηση κατάστασης από πολλούς χρήστες.

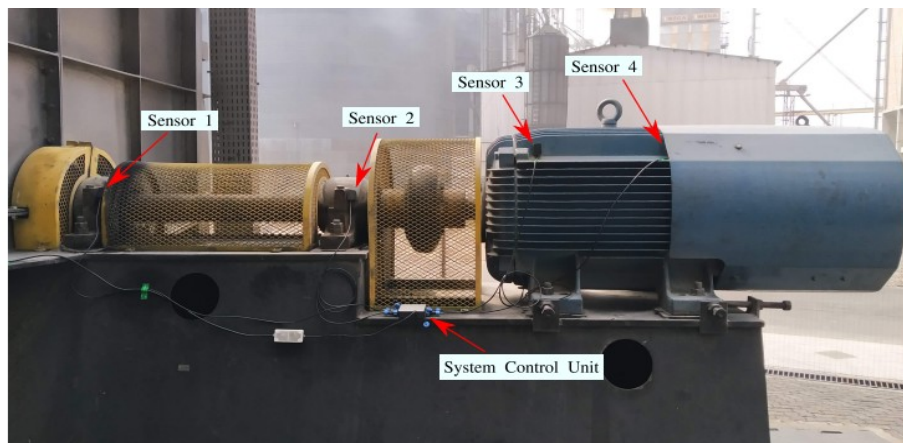
2. Φορητές Συσκευές Ανίχνευσης

Εδώ κατατάσσονται τα συστήματα Single, Dual Channel καθώς και συστήματα χειρός.

Για τα πρώτα δύο είναι γνωστό ότι μπορούν να συλλέξουν να αναλύσουν δεδομένα κραδασμών και να απεικονίσουν στον χρήστη κυματομορφα χρονοδιαγράμματα .

Τα συστήματα χειρός είναι απλά στη χρήση και φθηνά. Παρέχουν μια άμεση απεικόνιση των επιπέδων δόνησης που μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό των επιπέδων αν είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Τυπικά τροφοδοτούνται με μπαταρία, συνήθως χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρο και μπορούν να παρέχουν δεδομένα για την επιτάχυνση, την ταχύτητα, τη μετατόπιση και την κατάσταση ρουλεμάν.

Παρακάτω, παρουσιάζεται παράδειγμα εφαρμογής συστήματος παρακολούθησης κραδασμών σε ηλεκτρική μηχανή βιομηχανίας :



ΕΙΚΟΝΑ 11. (αισθητήρες κραδασμών σε ηλεκτρική μηχανή, <https://www.mdpi.com/2673-4117/4/3/102>)

Ανάλυση Δεδομένων

Μετά την συλλογή των δεδομένων (σημάτων), λαμβάνει χώρα η ανάλυσή τους, η οποία εστιάζει στους παρακάτω 3 άξονες

I. Ανάλυση με βάση τον χρόνο (Time Domain Analysis)

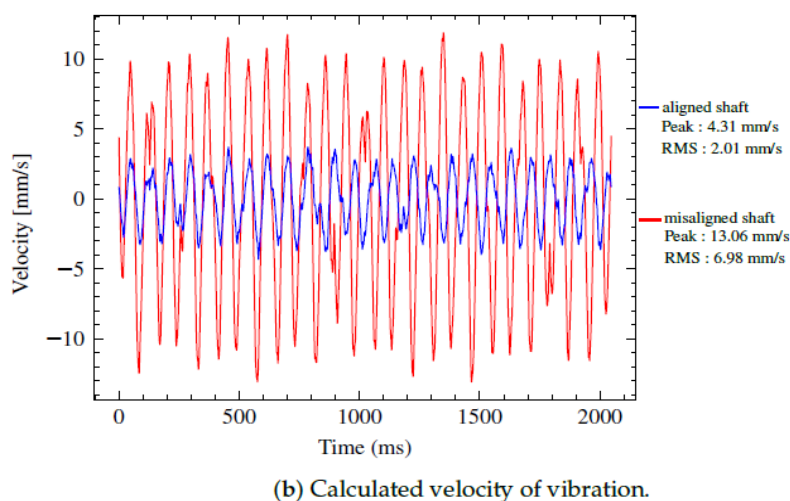
Πρόκειται για μία από τις απλούστερες μεθόδους ανάλυσης κραδασμών, καθώς δίνει την δυνατότητα για εύκολη και γρήγορη οπτικοποίηση και κατανόηση της κατάστασης του παρακολουθούμενου στοιχείου, με βάση το προερχόμενο από τους αισθητήρες σήμα. (Romanssini, M.; de Aguirre, P.C.C.; Compassi-Severo, L.; Girardi, A.G., 2023).

Ωστόσο, η περαιτέρω ανάλυση των σημάτων κραδασμών με βάση τον χρόνο απαιτεί και την αξιοποίηση μεθόδων όπως :

- Peak, για εντοπισμό απλών αστοχιών
- RMS (Root Mean Square), για ανίχνευση προβλημάτων εξισορρόπησης
- Kurtosis
- CRF (Crest Factor), για εντοπισμό προβλημάτων φθοράς σε γρανάζια και ρουλεμάν

(Romanssini, M., de Aguirre, P.C Compassi-Severo, L.; Girardi, A.G., 2023).

Ακολουθεί ένα παράδειγμα χρονικής ανάλυσης κραδασμών σε ηλεκτροκινητήρα :



ΕΙΚΟΝΑ 12. (διάγραμμα ταχύτητας κραδασμών, <https://doi.org/10.3390/eng4030102>)

II. Ανάλυση βάσει συχνοτήτων (Frequency Domain Analysis)

Η ανάλυση των συχνοτήτων του συλλεγόμενου σήματος συμβάλλει στην καλύτερη αποτύπωση της κατάστασης του εξοπλισμού καθώς δύνανται να μελετηθούν χαρακτηριστικά του σήματος που δεν αναλύονται χρονικά.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη τεχνική είναι τα παρακάτω :

- Fast Fourier Transform (FFT)
Κάθε στοιχείο του εξοπλισμού φέρει το δικό του σήμα συχνότητας κραδασμών, με αυτόν τον τρόπο γίνεται πιο εύκολος ο εντοπισμός της πηγής του προβλήματος. Η FFT αποτελεί το εργαλείο για την μετατροπή σημάτων χρόνου σε σήματα συχνότητας, ευνοώντας την παραπάνω διαδικασία.

- Cepstrum Analysis
Καθιστά ευκολότερη την διαδικασία εντοπισμού φθοράς και βλαβών σε ρουλεμάν και δόντια γραναζιών όπου παράγονται χαμηλές αρμονικά σχετιζόμενες συχνότητες.
- Envelope Analysis
Αξιοποιείται για την εκκαθάριση των χαμηλών συχνοτήτων σημάτων από «θορύβους» .
- Power Spectral Density (PSD)
Προσφέρεται για την ποσοτικοποίηση και σύγκριση μεταξύ σημάτων διαφορετικών στοιχείων ή διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας.

III. Ανάλυση συχνότητας - χρόνου (Time-Frequency Domain Analysis)

Επειδή τα παραγόμενα σήματα αρκετές φορές έχουν συχνότητες που μεταβάλλονται με το χρόνο, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή μιας πιο ολοκληρωμένης μεθόδου ανάλυσης. Με την συγκεκριμένη μέθοδο επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη ανάλυση τόσο σε χρόνο όσο και σε συχνότητα πράγμα που είναι αναγκαίο για την ανάλυση μη στατικών σημάτων.

Προς αυτή την κατεύθυνση αξιοποιούνται μέθοδοι όπως οι παρακάτω :

- Short-Time Fourier Transform (STFT)
Αποτελεί μια βελτιωμένη «έκδοση» της μεθόδου FFT, η οποία επιτρέπει την ανάλυση μη στατικών κυμάτων, διαιρώντας το αρχικό κύμα σε πολλά μικρότερα τμήματα, με την υπόθεση ότι τοπικά είναι στατικά.
- Wavelet Transform (WT)
Όπως και η προηγούμενη μέθοδος που αναφέρθηκε, έτσι και η WT χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με την FFT, καθώς είναι ικανή να εντοπίσει χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά και ταυτόχρονα να βοηθήσει στην οπτικοποίηση του σήματος που αναλύεται με την χρήση διαγραμμάτων (scalograms).
- Wigner–Ville Distribution (WVD)
Η μέθοδος WVD, διαιρεί το αρχικό σήμα σε στοιχειώδη κυματοσυναρτήσεις με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά χρόνου και συχνότητας, δίνοντας την δυνατότητα για ταυτόχρονη παράλληλη ανάλυση.
- Hilbert—Huang Transform (HHT)
Η HHT κατά την εφαρμογή της σε περιστροφικά συστήματα εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα όπως η δυνατότητα ανάλυση τόσο μη στατικών όσο και μη γραμμικών σημάτων, η δυνατότητα παρατήρησης παροδικών φαινομένων και ο χαμηλός υπολογιστικός φόρτος.

(Romanssini, M., de Aguirre, P.C Compassi-Severo, L.; Girardi, A.G., 2023)

- Κατάσταση ρότορα

Μερικές από τις συνηθέστερες ενδείξεις αστοχίας στον ρότορα είναι η μείωση της ακαμψίας του και ταυτόχρονα μείωση συχνότητας κραδασμών. Πιθανές αιτίες αποτελούν η έλλειψη εξισορρόπησης, η καταστροφή της ράβδου του ρότορα και η κακή ευθυγράμμιση με τον στάτορα.

- Κατάσταση ρουλεμάν

Είναι δυνατόν να εντοπιστούν αστοχίες όπως υπερθέρμανση, υπερφόρτωση, κακή ευθυγράμμιση, ύπαρξη άλμης και λανθασμένη τοποθέτηση

- Κατάσταση κιβωτίου ταχυτήτων

Με την εφαρμογή της μεθόδου εδώ μπορούν να εντοπιστούν βλάβες όπως μεγάλη φθορά κάποιου ρουλεμάν, με αποτέλεσμα την αλλαγή στην ταχύτητα δονήσεων.

- Κατάσταση αντλίας

Προβλήματα ευθυγράμμισης, ύπαρξη φυσαλίδων καθώς και κολλημένα περιστρεφόμενα μέρη μπορούν και παρατηρούνται με την ανάλυση κραδασμών. (*OCEAN technical and mechanical servises*).

5.3

ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

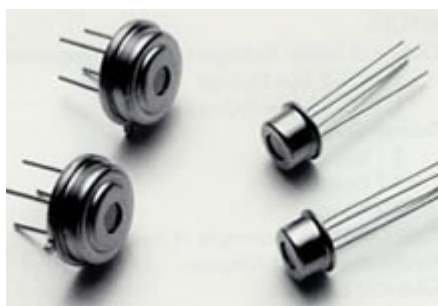
Οι μέθοδοι θερμικής μη καταστροφικής δοκιμής (NDT) περιλαμβάνουν τη μέτρηση ή τη χαρτογράφηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας καθώς η θερμότητα ρέει μέσα από ένα αντικείμενο. Η πιο βασική μέθοδος είναι η λήψη μετρήσεων σημείου με ένα θερμοστοιχείο, το οποίο μπορεί να εντοπίσει θερμά σημεία όπως ένα ρουλεμάν με αυξημένη τριβή. Τα προηγμένα συστήματα θερμικής απεικόνισης μπορούν γρήγορα και μη επεμβατικά να συλλέγουν θερμικές πληροφορίες σε μια ευρεία περιοχή. Αυτά τα συστήματα δημιουργούν εικόνες ροής θερμότητας και όχι φωτός, καθιστώντας τη θερμική απεικόνιση έναν γρήγορο και οικονομικό τρόπο λεπτομερούς ανάλυσης της θερμοκρασίας (*Iowa State University*).

Η θερμική ενέργεια είναι ένα υποπροϊόν σχεδόν όλης της μετατροπής ενέργειας και μεταφέρεται από τις θερμότερες σε ψυχρότερες περιοχές μέχρι να επιτευχθεί η θερμική ισορροπία. Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας περιλαμβάνουν αγωγιμότητα, συναγωγή και ακτινοβολία. Η υπέρυθη ακτινοβολία έχει μήκος κύματος μεγαλύτερο από το ορατό φως και ανιχνεύεται από υπέρυθρες κάμερες, οι οποίες μπορούν να ανιχνεύσουν και να εμφανίσουν υπέρυθη ενέργεια. Κάθε αντικείμενο του οποίου η θερμοκρασία είναι πάνω από 0°K εκπέμπει υπέρυθη

ενέργεια, η οποία είναι ανιχνεύσιμη από αισθητήρες. Η εκπομπή είναι ένα μέτρο της απόδοσης μιας επιφάνειας στη μεταφορά υπέρυθρης ενέργειας και είναι ο λόγος της θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται από μια επιφάνεια προς την ενέργεια που εκπέμπεται από ένα τέλειο μαύρο σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Το ανθρώπινο δέρμα είναι σχεδόν ένα τέλειο μαύρο σώμα με ικανότητα εκπομπής 0,98. Η χαμηλή εκπομπή μπορεί να κάνει τα όργανα υπέρυθρων να υποδεικνύουν χαμηλότερη θερμοκρασία από την πραγματική θερμοκρασία επιφάνειας. Οι χειριστές μπορούν να προσαρμόσουν την ικανότητα εκπομπής ενός αντικειμένου που μετράται ή να χρησιμοποιήσουν χρώματα ψεκασμού, πούδρες, ταινία ή "κουκκίδες εκπομπής" για να βελτιώσουν την ικανότητα εκπομπής (Khyati S. , Samia N., Steve D., 2022).

Όσον αναφορά την διαδικασία της θερμογραφίας , η οποία για να πραγματοποιηθεί απαιτείται ο εξής εξοπλισμός :

a) Ανιχνευτές θερμότητας (thermal detectors)



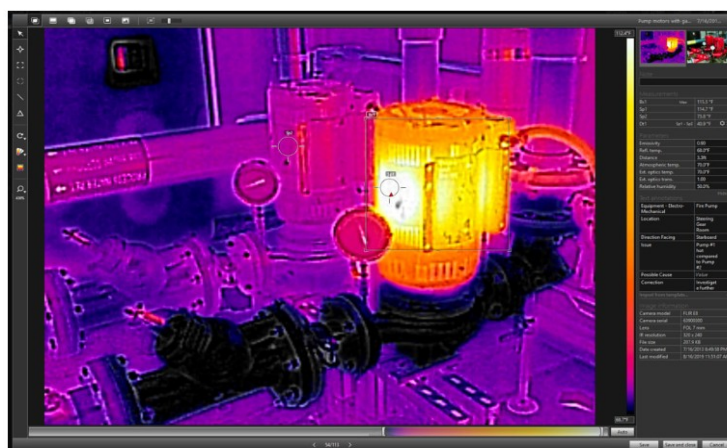
ΕΙΚΟΝΑ 13. (ανιχνευτές θερμότητας, https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Thermography/IR_Detectors.xhtml)

Οι θερμικοί ανιχνευτές διατίθενται σε διάφορους τύπους, συμπεριλαμβανομένων των ευαίσθητων στη θερμότητα επιστρώσεων, των θερμοηλεκτρικών συσκευών και των πυροηλεκτρικών συσκευών. Χρησιμοποιούνται για μέτρηση θερμοκρασίας σε διάφορες εφαρμογές, από οικιακές συσκευές μέχρι βιομηχανικούς φούρνους έως πυραύλους. Συνήθως χρησιμοποιούνται θερμοστοιχεία και θερμοηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες παράγουν ηλεκτρική απόκριση με βάση μια αλλαγή θερμοκρασίας στον αισθητήρα. Μικροσκοπικοί θερμικοί αισθητήρες, όπως μικροβολόμετρα, χρησιμοποιούνται σε φορητά συστήματα απεικόνισης υψηλής τεχνολογίας

b) Απεικονιστικές τεχνολογίες (Imaging technologies)



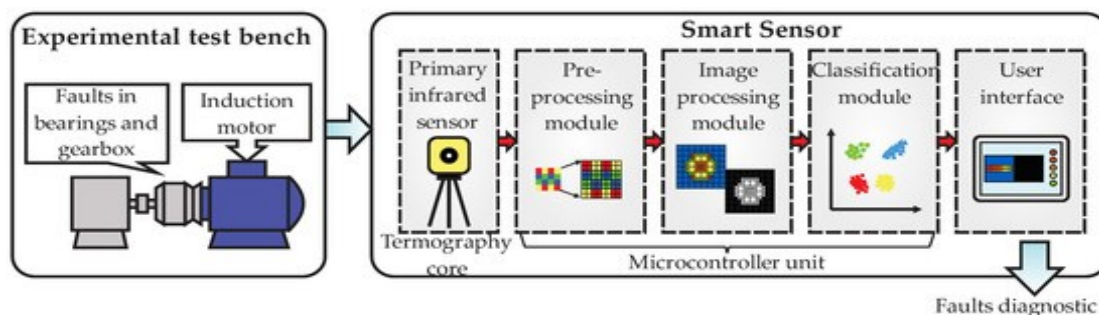
ΕΙΚΟΝΑ 14. (thermal imaging cameras, <https://irinfo.org/08-01-2016-hazouri/>)



ΕΙΚΟΝΑ 15. (εικόνα λογισμικού θερμικής απεικόνισης, <https://www.pilothousemarineservices.com/thermal-imaging.html>)

Ο εξοπλισμός θερμικής απεικόνισης χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση της ακτινοβολούμενης υπέρυθρης ενέργειας και τη μετατροπή των δεδομένων σε αντίστοιχους χάρτες θερμοκρασίας. Αυτά τα συστήματα μπορούν να παράγουν εικόνες σε κλίμακα του γκρι με καυτά αντικείμενα που εμφανίζονται με λευκά και ψυχρά αντικείμενα με μαύρο, με τις ενδιάμεσες θερμοκρασίες να εμφανίζονται ως διαβαθμίσεις του γκρι. Οι συσκευές θερμικής απεικόνισης μπορούν επίσης να προσθέσουν χρώμα στις εικόνες, να δημιουργήσουν δεδομένα θερμοκρασίας και να παρέχουν ενδείξεις θερμοκρασίας στην οθόνη. Οι συστοιχίες εστιακού επιπέδου (Focal Plane Arrays) είναι ένας άλλος τρόπος για την παραγωγή θερμικών εικόνων χωρίς κινούμενα μηχανικά μέρη. Αυτά τα συστήματα θερμικής απεικόνισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια ποικιλία εφαρμογών, όπως παρακολούθηση εξοπλισμού και ανίχνευση ελαττωμάτων (Iowa State University).

Η εφαρμογή της θερμογραφίας στην προβλεπτική συντήρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί αξιοποιώντας το παρακάτω μοντέλο έξυπνου αισθητήρα :



ΕΙΚΟΝΑ 16. (δομή έξυπνου αισθητήρα, Alvarado-Hernandez, A.I., Zamudio-Ramirez, I., Jaen-Cuellar, A.Y., Osornio-Rios, R.A., Donderis Quiles, V. Antonino-Daviu, J.A., 2022).

Όπως γίνεται φανερό η παραπάνω δομή αποτελείται από δύο βασικά τμήματα:

- i. Εξοπλισμός υπό εξέταση (Experimental Test Bench)
- ii. Προβλεπτική συντήρηση με την δομή Smart Sensor

Το διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη: τη διαδικασία (process) και τη διάγνωση βλαβών. Στην διεργασία περιλαμβάνεται κάποιος επαγωγικός κινητήρας με ρουλεμάν κύλισης για τα περιστρεφόμενα στοιχεία καθώς και ένα κιβώτιο ταχυτήτων. Περιβαλλοντικοί παράγοντες σε συνδυασμό με την κόπωση από την σε βάθος χρόνου λειτουργία, οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας και πτώση της απόδοσης συγκεκριμένων στοιχείων του κινητήρα. Ανιχνεύοντας και αναλύοντας τις θερμοκρασιακές μεταβολές που προκύπτουν κατά την λειτουργία μπορούν και εντοπίζονται αστοχίες και πιθανές βλάβες τόσο στα κύρια όσο και στα βοηθητικά συστήματα του κινητήρα αλλά και του συνόλου της διάταξης που παρακολουθείται.

Ο πυρήνας της παραπάνω διάταξης είναι ο αισθητήρας υπέρυθρων για την συλλογή θερμικών εικόνων και πληροφοριών. Στην συνέχεια στην μονάδα του μικροελεγκτή λαμβάνει χώρα η ανάλυσή τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την απόδοσή τους καθώς και τον εντοπισμό πιθανών αστοχιών.

Πιο συγκεκριμένα ο μικροελεγκτής διενεργεί : 1) την προεπεξεργασία της εικόνας 2) την επεξεργασία και 3) ανίχνευση και ταξινόμηση σφαλμάτων. Στην προεπεξεργασία συλλέγονται τα δεδομένα από τους αισθητήρες και δημιουργείται μια εικόνα του θερμοκρασιακού προφίλ κάθε περιοχής. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η επεξεργασία, όπου και αναπροσαρμόζεται η προηγούμενη εικόνα κατάλληλα και ταυτόχρονα αναδεικνύονται τα 'hot spots', ανάλογα με τις περιοχές ενδιαφέροντος (Regions Of Interest). Έπειτα, δημιουργούνται κατάλληλοι στατιστικοί δείκτες με σκοπό την εξαγωγή κατάλληλων χαρακτηριστικών. Τέλος, ακολουθεί η ανίχνευση και ταξινόμηση των σφαλμάτων, διαδικασία η οποία γίνεται τμηματικά. Πρώτα ο πίνακας υψηλών διαστάσεων μειώνεται με κατάλληλές αλγοριθμικές μεθόδους με κυριότερη την PCA. Ενσωματώνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτή σε μέθοδο Deep Neural Network (DNN), ολοκληρώνεται η διαδικασία ταξινόμησης. Ο εντοπισμός των σφαλμάτων πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής χρήστη (User Interface) σε μορφή αναφοράς διαγνωστικών πληροφοριών, που είναι εύκολα ερμηνεύσιμες. (Alvarado-Hernandez, A.I., Zamudio-Ramirez, I., Jaen-Cuellar, A.Y., Osornio-Rios, R.A., Donderis Quiles, V. Antonino-Daviu, J.A.,2022).

ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

- Συστήματα συνεχούς ρεύματος (DC)

- Ηλεκτρικοί πίνακες συνεχούς ρεύματος, μπαταρίες και συνδεδεμένα καλώδια
- Εξοπλισμός DC (ηλεκτρονικά, βαρούλκα, φώτα)
- Συστήματα Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC)
- Εξοπλισμός AC (inverters, ψύξη, A/C)

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

- Ηλεκτροκινητήρες
- Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης
- Ρουλεμάν (κινητήρες, άξονας κ.λπ.)
- Δεξαμενές - Σωληνώσεις - Βαλβίδες
- Σύστημα εξάτμισης και εξαρτήματα

5.4

ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Η τεχνική υπερήχων εμφανίστηκε την περίοδο του μεσοπολέμου, κατά την οποία η τεχνολογία των σόναρ (sonar) , ξεκίνησε να βρίσκει εφαρμογή στην ιατρική επιστήμη για διαγνωστικούς σκοπούς. Η χρήση υπερήχων ενίσχυσε την απεικονιστική ικανότητα και ανέπτυξε δυνατότητες εντοπισμού βλαβών (όπως καρκινικούς όγκους και εσωτερικές αιμορραγίες και αργότερα στην εγκυμοσύνη) χωρίς κάποιον κίνδυνο για την υγεία των ασθενών. Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής στα πλαίσια της βιομηχανίας , ξεκίνησε στον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο σαν μέθοδος εντοπισμού αστοχίας στην φάση περάτωσης της κατασκευής. Η διάδοση του ελέγχου με υπερήχους συνεχίστηκε και κατέστη εφικτός ο εντοπισμός ολοένα και μικρότερου μεγέθους αστοχιών

Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί ακόμα μία μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί στο περιβάλλον του ψηφιακού διδύμου. Με την μέθοδο αυτή γίνεται εφικτός ο εντοπισμός και αξιολόγηση αστοχιών, ο χαρακτηρισμός υλικών καθώς και η διαστασιολόγησή τους.

Στην ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί πολύτιμο εργαλείο εντοπισμού βλαβών. Τα πλοία ως βαριές μεταλλικές κατασκευές , μπορούν να υποστούν διάφορες βλάβες. Η γάστρα καθώς και διάφοροι άξονες και γρανάζια , αποτελούν κομβικής σημασίας στοιχεία για ένα πλοίο, και είναι απαραίτητη η τακτική παρακολούθησή τους. Ωστόσο λόγω των θέσεων τους μέσα στην κατασκευή, καθώς και της ανάγκης για συνέχιση της αδιάκοπης λειτουργίας του πλοίου, οι κλασσικές μέθοδοι δεν επαρκούν. Με την τεχνική ανάλυση των υπερήχων και με την χρήση απαραίτητου εξοπλισμού, όπως θα περιγραφεί παρακάτω, δύνανται να εντοπιστούν πιθανές αστοχίες όπως φθορά των εξαρτημάτων και πιθανή διάβρωση .

Η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται με την ανάπτυξη ποσοτικών θεωριών και μοντέλων, μαζί με την ενσωμάτωση περιγραφών μοντέλων. Έχουν αναδυθεί συστήματα απεικόνισης υψηλής ανάλυσης και πολλαπλοί τρόποι μέτρησης και το πεδίο επεκτείνεται σε νέους τομείς όπως η κατασκευή και ο έλεγχος διεργασιών. Τα προηγμένα εργαλεία προσομοίωσης που έχουν σχεδιαστεί για δυνατότητα επιθεώρησης θα συμβάλουν σε αυξημένες εφαρμογές μηχανικής του μη καταστρεπτικού ελέγχου και οι τεχνικοί θα πρέπει να επεκτείνουν τη βάση γνώσεων τους για να πραγματοποιήσουν αξιολογήσεις σε αυτούς τους τομείς.

Η τεχνική υπερήχων βασίζεται σε υψηλής συχνότητας ηχητικά κύματα, υπερήχους, που κυμαίνονται από 0,15 MHz-0,2 MHz, ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και υψηλότερης συχνότητας έως 50 MHz. Ουσιαστικά, τα υπερηχητικά κύματα εκπέμπονται από έναν μετατροπέα (transducer) σε ένα αντικείμενο και τα κύματα που επιστρέφουν αναλύονται. Συνήθως, ο μορφοτροπέας συνδέεται με το αντικείμενο που επιθεωρείται με ένα συζευκτικό υλικό, όπως γέλη, λάδι ή νερό. Ωστόσο, οι τεχνικές χωρίς επαφή (π.χ. ηλεκτρομαγνητικοί ακουστικοί μετατροπείς) λειτουργούν χωρίς αυτό το συζευκτικό υλικό. Εάν υπάρχει μια ακαθαρσία ή μια ρωγμή, ο ήχος θα αναπηδήσει από αυτά και θα φανεί στο επιστρεφόμενο σήμα. Προκειμένου να δημιουργηθούν υπερηχητικά κύματα, ένας μετατροπέας περιέχει έναν λεπτό δίσκο από κρυσταλλικό υλικό με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες, όπως ο χαλαζίας. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια εφαρμόζεται σε πιεζοηλεκτρικά υλικά, αρχίζουν να δονούνται, χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική ενέργεια για να δημιουργήσουν κίνηση. Επειδή τα κύματα ταξιδεύουν προς κάθε κατεύθυνση από την πηγή, για να μην πάνε τα κύματα προς τα πίσω στον μορφοτροπέα και να παρεμβαίνουν στη λήψη των επιστρεφόμενων κυμάτων, ένα απορροφητικό υλικό τοποθετείται πίσω από τον κρύσταλλο. Έτσι, τα υπερηχητικά κύματα ταξιδεύουν μόνο προς τα έξω.

object ➡ couplant ➡ transducer ➡ diagnostic machine

EIKONA 17. (Διάγραμμα εφαρμογής τεχνικής υπερήχων,
(<https://blog.infraspeak.com/ultrasonic-analysis/>)

Σύμφωνα με την TWI (The Welding Institute) ο έλεγχος με υπερήχους μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας δύο βασικές μεθόδους :

1. Αντανάκλαση (pulse-echo mode). Με τη δοκιμή παλμικής ηχούς, ο ίδιος μορφοτροπέας εκπέμπει και λαμβάνει την ενέργεια του ηχητικού κύματος. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί σήματα ήχου σε μια διεπαφή, όπως το πίσω

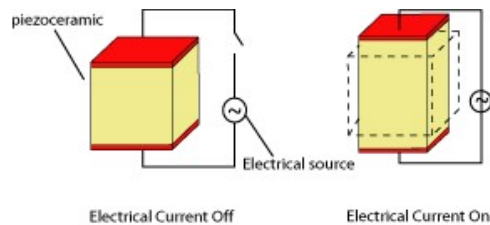
μέρος του αντικειμένου ή μια ατέλεια, για να αντανakλά τα κύματα πίσω στον καθέτηρα. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ως γραμμικό διάγραμμα, με ένα πλάτος στον άξονα y που αντιπροσωπεύει την ένταση και την απόσταση ή το χρόνο της ανάκλασης στον άξονα x , δείχνοντας το βάθος του σήματος μέσω του υλικού.

2. Δοκιμή μέσω μετάδοσης χρησιμοποιεί έναν πομπό για να στείλει τα κύματα υπερήχων από μια επιφάνεια και έναν ξεχωριστό δέκτη για να λάβει την ηχητική ενέργεια που έχει φτάσει στην αντίθετη πλευρά του αντικειμένου. Οι ατέλειες στο υλικό μειώνουν την ποσότητα του ήχου που λαμβάνεται, επιτρέποντας τον εντοπισμό της θέσης των ελαττωμάτων.

ΒΑΣΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

i. Πιεζοηλεκτρικοί Μετατροπείς

Ο έλεγχος με υπερήχους βασίζεται στη μετατροπή των ηλεκτρικών παλμών σε μηχανικούς κραδασμούς και αντίστροφα. Το ενεργό στοιχείο του μορφοτροπέα, ένα πολωμένο υλικό, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστική. Όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο, τα πολωμένα μόρια ευθυγραμμίζονται, προκαλώντας δίπολα και αναγκάζοντας το υλικό να αλλάξει διαστάσεις (ηλεκτροστένωση). Τα μόνιμα πολωμένα υλικά όπως ο χαλαζίας ή το τιτανικό βάριο δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο όταν υποβάλλονται σε μηχανική δύναμη (piezoelectric φαινόμενο). (Iowa State University).

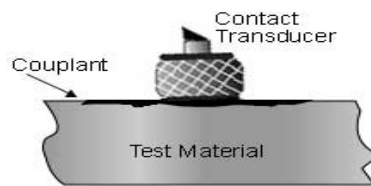


ΕΙΚΟΝΑ 18. (piezoelectric μετατροπέας,

<https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/immersion.xhtml>)

ii. Συζευκτικό υλικό (couplant)

Το συζευκτικό υλικό είναι ένα υλικό (συνήθως υγρό) που διευκολύνει τη μετάδοση υπερηχητικής ενέργειας από τον μορφοτροπέα στο δοκιμαστικό δείγμα. Το συζευκτικό υλικό μετατοπίζει τον αέρα και καθιστά δυνατή τη λήψη περισσότερης ηχητικής ενέργειας στο δείγμα δοκιμής, έτσι ώστε να μπορεί να ληφθεί ένα χρησιμοποιήσιμο υπερηχητικό σήμα. (Iowa State University,)



ΕΙΚΟΝΑ 19. (couplant,

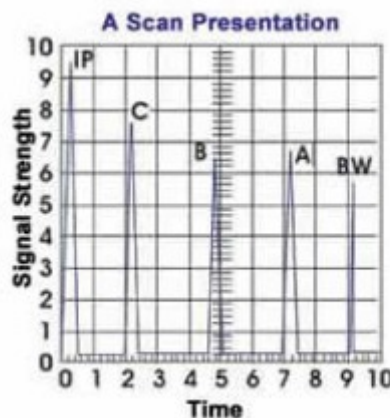
<https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/transducermodeling.xhtml>)

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

Η επεξεργασία σήματος είναι μια τεχνική που βοηθά στην κατανόηση των πληροφοριών που περιέχονται στα λαμβανόμενα δεδομένα υπερήχων. Ο τομέας χρόνου χρησιμοποιείται για την προβολή σημάτων που μετρούνται με παλμογράφο, ενώ ο τομέας συχνότητας χρησιμοποιείται για την προβολή του περιεχομένου συχνότητας του σήματος. Η θεωρία Fourier δηλώνει ότι οποιαδήποτε σύνθετη περιοδική κυματομορφή μπορεί να αναλυθεί σε ένα σύνολο ημιτονοειδών με διαφορετικά πλάτη, συχνότητες και φάσεις. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ανάλυση Fourier και το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο πλατών, φάσεων και συχνοτήτων για κάθε ημιτονοειδές. Η συχνότητα ή η φάση ενός ημιτονοειδούς που απεικονίζεται σε διάγραμμα σε σχέση με το πλάτος ονομάζεται φάσμα.

Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να απεικονιστούν με διάφορους τρόπους προκειμένου να αναλυθούν. Σύμφωνα με το Iowa State University, οι τρεις σημαντικότεροι είναι οι ακόλουθοι :

- **A-scan :**



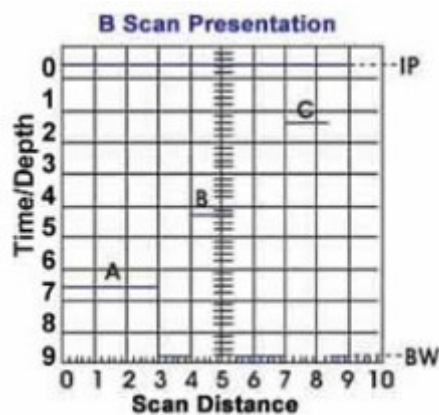
ΕΙΚΟΝΑ 20. (A-scan,

<https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.xhtml>)

είναι ένα γράφημα που δείχνει την ποσότητα της ενέργειας υπερήχων που λαμβάνεται με την πάροδο του χρόνου. Ο κατακόρυφος άξονας δείχνει τη σχετική ποσότητα ενέργειας, ενώ ο οριζόντιος άξονας εμφανίζει τον χρόνο που έχει παρέλθει. Το σήμα μπορεί να εμφανιστεί στη φυσική του μορφή ραδιοσυχνότητας ή ως θετικό ή αρνητικό μισό του σήματος RF. Το μέγεθος

του ανακλώμενου σημείου μπορεί να εκτιμηθεί συγκρίνοντας το πλάτος του σήματος από ένα άγνωστο με αυτό από ένα γνωστό. Το βάθος του σημείου μπορεί να προσδιοριστεί από τη θέση του σήματος στην οριζόντια σάρωση. Η παρουσίαση A-scan μπορεί επίσης να υποδεικνύει τη θέση και το βάθος των ελαττωμάτων ή των ανακλαστήρων σε ένα υλικό. Ο αρχικός παλμός (IP) είναι πρώτος και μεγαλύτερος, ενώ η ένδειξη backwall (BW) είναι ο τελευταίος και μικρότερος. Οι ενδιάμεσοι παλμοί (C , B) αποτελούν ενδείξεις αστοχίας ενώ ο παλμός A αντιστοιχεί στην επιφάνεια ανάκλασης A.

- **B-scan :**

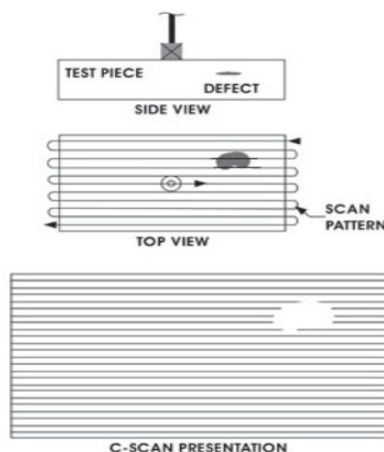


EIKONA 21 (B-scan ,

<https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.xhtml>)

Η σάρωση B είναι μια όψη σε τομή ενός υλικού, που εμφανίζει τον χρόνο στον κατακόρυφο άξονα και τη θέση του μορφοτροπέα (transducer) στον οριζόντιο άξονα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του βάθους και των κατά προσέγγιση διαστάσεων ενός ανακλαστήρα. Η σάρωση B ενεργοποιείται από μια πύλη που είναι εγκατεστημένη στη σάρωση A, δημιουργώντας ένα σημείο στη σάρωση B κάθε φορά που ενεργοποιείται η πύλη. Οι ανακλαστήρες μέσα στο υλικό ενεργοποιούν την πύλη. Οι περιορισμοί αυτής της τεχνικής περιλαμβάνουν την κάλυψη μικρότερων ανακλαστήρων από μεγαλύτερους κοντά στην επιφάνεια. Η εικόνα σάρωσης B εμφανίζει γραμμές που αντιπροσωπεύουν ελαττώματα παρόμοιου μήκους και βάθους εντός του υλικού.

- **C-scan :**



ΕΙΚΟΝΑ 22 (c-scan,

<https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.xhtml>)

Η παρουσίαση C-scan παρέχει μια προβολή τύπου κάτοψης των χαρακτηριστικών του δείγματος δοκιμής, στην οποία το επίπεδο σχεδίου σάρωσης του μορφοτροπέα δημιουργεί το επίπεδο εικόνας. Οι πύλες συλλογής δεδομένων στη σάρωση A καταγράφουν το πλάτος σήματος ή τον χρόνο σε τακτά χρονικά διαστήματα, εμφανίζοντας το σχετικό πλάτος σήματος ή το χρόνο πτήσης ως απόχρωση του γκρι ή χρώματος. Αυτή η παρουσίαση παρέχει μια λεπτομερή εικόνα των χαρακτηριστικών που αντανακλούν και διασκορπίζουν τον ήχο πάνω και μέσα στο δοκιμαστικό κομμάτι. Οι σαρώσεις υψηλής ανάλυσης παράγουν λεπτομερείς εικόνες.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Μια εφαρμογή που έχει εξελιχθεί παράλληλα με τη νέα γενιά ανιχνευτών είναι η παρακολούθηση βάσει κατάστασης (CBM) του περιστρεφόμενου και μη περιστρεφόμενου εξοπλισμού. Και στις δύο περιπτώσεις, παράγονται δυνάμεις τριβής με υπερηχητικές υπογραφές υψηλής συχνότητας, οι οποίες συχνά δεν εντοπίζονται εξαιτίας θορύβων του περιβάλλοντος που βρίσκεται τοποθετημένος ο εξοπλισμός. Τυχόν αποκλίσεις και διαφοροποιήσεις στις τιμές των παραπάνω συχνοτήτων αποτελούν ενδείξεις μιας πιθανής επικείμενης αστοχίας ή βλάβης.

Τα σήματα χρόνου μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμη πηγή πληροφοριών για την κατάσταση υγείας ρουλεμάν με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Ο συγκεκριμένος τύπος εξοπλισμού είναι δυσκολότερο να ελεγχθεί με τεχνικές όπως η ανάλυση κραδασμών και για αυτό ενδείκνυται η χρήση υπερήχων. Γενικά ο έλεγχος με υπερήχους μπορεί να εντοπίσει αυξημένες δυνάμεις τριβής και θρυμματισμούς, μη ημιτονοειδή γεγονότα τα οποία αναλύονται καλύτερα με βάση τον χρόνο. Το UT είναι μια τεχνική με χαμηλό κόστος και προσφέρει μεγαλύτερη ευκολία ανίχνευσης αστοχίας σε μεγαλύτερο φάσμα μηχανημάτων, διαμορφώνοντας με αυτόν τον τρόπο μια πρώτη εικόνα της κατάστασης υγείας του υπό παρακολούθηση εξοπλισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ (CMMS)

Σύμφωνα με το Διεθνές Πρότυπο Διαχείρισης Ασφάλειας (Κώδικας ISM), ο πλοιοκτήτης οφείλει να διασφαλίσει την διατήρηση την αξιοπιστία και την ορθή λειτουργία τόσο της γάστρας και της γενικότερης κατασκευής όσο και των μηχανημάτων. Κάθε εταιρεία αποφασίζει ποιο σύστημα προγραμματισμένης συντήρησης θα επιλεγεί: είτε ηλεκτρονικά, έντυπα ή συνδυασμένα. Το μηχανογραφημένο σύστημα συντήρησης θα αναφέρεται σε λογισμικό που βασίζεται πρόγραμμα συντήρησης, το οποίο συνήθως εγκαθίσταται και επί του σκάφους και στο γραφείο του διαχειριστή. (*Computerized Planned Maintenance System Software Models, Goran Gašpar, Igor Poljak, Josip Orović, 2018*)

Το πληροφοριακό σύστημα συντήρησης (Computerized Maintenance Management System) είναι ένα λογισμικό το οποίο συγκεντρώνει δεδομένα συντήρησης, διευκολύνει τις διαδικασίες και αυτοματοποιεί κάποιες εργασίες με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης. Με την χρήση του παραπάνω λογισμικού επιτυγχάνεται η βελτιστοποιούνται οι διαδικασίες και αυξάνεται η διαθεσιμότητα και η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού

Η έγκριση για τέτοιο λογισμικό δίνεται από τους νηογνώμονες που επικεντρώνονται κυρίως στη διαχείριση ενός λειτουργικού πλάνου συντήρησης. Υπάρχουν διάφορες εταιρείες λογισμικού προγραμματισμένης συντήρησης. Μερικές φορές οι ναυτιλιακές εταιρείες αναπτύσσουν τα δικά τους ολοκληρωμένα πλάνα συντήρησης που πρέπει ωστόσο, να αναγνωριστούν και να εγκριθούν από τους νηογνώμονες . Επιπλέον, ακόμη και οι νηογνώμονες προσφέρουν τις εκδόσεις τους λογισμικού προγραμματισμένης συντήρησης.

Η συγχώνευση της τεχνολογίας ψηφιακών διδύμων με ένα ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης συντήρησης (CMMS) έχει τεράστιες δυνατότητες να φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι οργανισμοί διαχειρίζονται και διατηρούν τα περιουσιακά τους στοιχεία. Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα εικονικό αντίγραφο ενός φυσικού περιουσιακού στοιχείου ή συστήματος που συλλαμβάνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και προσομοιώνει τη συμπεριφορά του, επιτρέποντας προγνωστικές πληροφορίες και ανάλυση. Όταν ενσωματώνονται σε ένα CMMS, τα ψηφιακά δίδυμα ενισχύουν τις δυνατότητες των παραδοσιακών συστημάτων διαχείρισης συντήρησης παρέχοντας μια δυναμική και περιεκτική άποψη των περιουσιακών στοιχείων, διευκολύνοντας την προληπτική συντήρηση και βελτιστοποιώντας την κατανομή πόρων.

Με την ενσωμάτωση του DT σε ένα CMMS, οι οργανισμοί μπορούν να δημιουργήσουν μια εικονική αναπαράσταση κάθε φυσικού περιουσιακού στοιχείου στο οικοσύστημά τους συντήρησης. Αυτό το ψηφιακό δίδυμο περιλαμβάνει βασικά χαρακτηριστικά, όπως προδιαγραφές εξοπλισμού, συνθήκες λειτουργίας, ιστορικά αρχεία συντήρησης και δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η συγχώνευση επιτρέπει στις ομάδες συντήρησης να παρακολουθούν την απόδοση του στοιχείου, να προβλέπουν πιθανές αστοχίες και να εκτελούν ανάλυση βασικών αιτιών σε εικονικό περιβάλλον πριν από την εφαρμογή οποιωνδήποτε φυσικών παρεμβάσεων.

Η ικανότητα του Digital Twin να προσομοιώνει τη συμπεριφορά του MSAE επιτρέπει στους επαγγελματίες συντήρησης να αξιολογούν διαφορετικές στρατηγικές συντήρησης και να προβλέπουν τον αντίκτυπο διαφόρων σεναρίων στην απόδοση του ενεργητικού. Για παράδειγμα, μπορούν να προσομοιώσουν τις επιπτώσεις διαφορετικών χρονοδιαγραμμάτων συντήρησης, αντικαταστάσεων εξαρτημάτων ή περιβαλλοντικών παραγόντων στη συνολική υγεία του περιουσιακού στοιχείου και να προβλέψουν την υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή του. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους οργανισμούς να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με δραστηριότητες συντήρησης, να προγραμματίζουν επισκευές ή αντικαταστάσεις την πιο κατάλληλη στιγμή και να αποφεύγουν δαπανηρές διακοπές ή διακοπές λειτουργίας.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση των DT με το CMMS διευκολύνει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τη συντήρηση βάσει συνθηκών. Καθώς το ψηφιακό δίδυμο λαμβάνει συνεχώς δεδομένα από αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι σε φυσικά στοιχεία, μπορεί να συγκρίνει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο με το προσομοιωμένο μοντέλο για να ανιχνεύσει αποκλίσεις, ανωμαλίες ή πιθανές αστοχίες. Οι ομάδες συντήρησης μπορούν να ρυθμίσουν αυτοματοποιημένες ειδοποιήσεις ή ενεργοποιητές στο CMMS, επιτρέποντάς τους να αντιμετωπίζουν προληπτικά τα αναδυόμενα ζητήματα και να λαμβάνουν προληπτικά μέτρα προτού κλιμακωθούν σε κρίσιμες αστοχίες. Αυτή η δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο βελτιστοποιεί τον προγραμματισμό συντήρησης, μειώνει τον κίνδυνο απρόβλεπτου χρόνου διακοπής λειτουργίας και βελτιώνει την αξιοπιστία του στοιχείου.

Η συγχώνευση της ψηφιακής διπλής τεχνολογίας με ένα CMMS ενισχύει επίσης τις δυνατότητες ανάλυσης δεδομένων και αναφοράς. Ο πλούτος των δεδομένων που συλλέγονται από το ψηφιακό δίδυμο, μαζί με τα ιστορικά αρχεία συντήρησης και τα λειτουργικά δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στο CMMS, μπορούν να αξιοποιηθούν για τον εντοπισμό προτύπων, τάσεων και συσχετίσεων. Οι προηγμένες τεχνικές ανάλυσης, όπως η μηχανική μάθηση και η προγνωστική μοντελοποίηση, μπορούν να εφαρμοστούν στο ενσωματωμένο σύνολο δεδομένων, επιτρέποντας στους οργανισμούς να αποκτήσουν πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την απόδοση των στοιχείων, να εντοπίσουν πιθανούς τρόπους αστοχίας και να αναπτύξουν βελτιστοποιημένες στρατηγικές συντήρησης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει συνοπτική παράθεση και περιγραφή των πιο συνηθισμένων συστημάτων διαχείρισης προγραμματισμένης συντήρησης (CMMS) που χρησιμοποιούνται στην Ναυτιλία, καθώς και κάποιων εμπορικά διαθέσιμων πακέτων προβλεπτικής συντήρησης.

6.2

ΣΥΝΗΘΗ CMMS

Υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα συστήματα διαχείρισης συντήρησης από τα οποία μπορεί μια ναυτιλιακή εταιρεία να επιλέξει. Τα παρακάτω που θα παρουσιαστούν αποτελούν κάποιες από τις πιο συνηθισμένες επιλογές (Παπαδόπουλος Φ., Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 2017).

AMOS (SPECTEC)

Το Amos είναι ένα λογισμικό ανάπτυξης εταιρείας SPECTEC για τη συντήρηση πλοίων. Αυτό το λογισμικό παρέχει πρόσβαση σε μεγάλο όγκο πληροφοριών σχετικά με τη συντήρηση και την αγορά ανταλλακτικών για τα πλοία.

- Το Amos είναι εύκολο στη χρήση και περιλαμβάνει καινοτομίες στον τομέα της συντήρησης.
- Προσφέρει αυτοματισμούς και είναι προσαρμόσιμο ανάλογα με τις ανάγκες.

Το Amos περιλαμβάνει τέσσερις ενότητες:

1. Διαχείριση Διαδικασιών Συντήρησης,
2. Διαχείριση Ανταλλακτικών,
3. Παραγγελίες και
4. Έλεγχος Προϋπολογισμού.

Οι λειτουργίες συντήρησης στο πρόγραμμα Amos χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες.

- I. Η προγραμματισμένη συντήρηση περιλαμβάνει τις περιοδικές εργασίες και τις ειδικές εντολές εργασίας. Η περιοδική συντήρηση περιγράφει τις εργασίες που πραγματοποιούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα, ενώ οι ειδικές εντολές εργασίας είναι μοναδικές και καταγράφονται για μελλοντική χρήση.
- II. Η συντήρηση λόγω βλάβης αφορά τις εργασίες που απαιτούνται λόγω αποτυχίας. Το Amos παρέχει σημαντική βοήθεια στη μείωση των βλαβών που οφείλονται σε κακή συντήρηση.
- III. Η συντήρηση με βάση την κατάσταση του εξοπλισμού αποτελεί καινοτομία του Amos, καθώς παρέχει ζωντανές πληροφορίες για τη συντήρηση του εξοπλισμού, βοηθώντας στη βελτιστοποίησή της.

PMS (AST)

Το πρόγραμμα συντήρησης της AST προσφέρει στις πλοιοκτήτριες εταιρίες και το πλήρωμα τη δυνατότητα προγραμματισμού της συντήρησης ενός πλοίου. Το πρόγραμμα λειτουργεί με ένα πρωτότυπο στο πλοίο και ένα αντίγραφο με περιορισμένες λειτουργίες στην εταιρεία. Η εταιρεία μπορεί να κάνει αλλαγές στο πρόγραμμα και να επικοινωνήσει τις αλλαγές στο πλοίο μέσω αρχείου ενημέρωσης.

Το πρόγραμμα διαθέτει έναν τομέα προγραμματισμένης συντήρησης με δομή δέντρου που περιλαμβάνει εξοπλισμό και μηχανήματα που χρήζουν συντήρησης. Μια οπτική ένδειξη κατάστασης με χρώματα δίνει πληροφορίες για κάθε εργασία. Οι εργασίες ανατίθενται με εντολές εργασίας και μια περιγραφή της εργασίας καταγράφεται στην εντολή. Τα πιστοποιητικά του πλοίου εμφανίζονται σε μια λίστα με οπτική ένδειξη της κατάστασής τους, και αντίγραφα αποθηκεύονται ως αρχεία PDF. Υπάρχουν επίσης προαιρετικές ενότητες λογισμικού :

- Μονάδα συστήματος ανταλλακτικών και αναλώσιμων
- Πρόβλεψη συντήρησης και μονάδα ανάλυσης κραδασμών
- Σύστημα αναφοράς ελαττωμάτων
- Προδιάγραφες ναυπηγείου
- Ενότητα αποθεμάτων προμηθευτή πλοίου
- Ενότητα αιτημάτων

DAMOS CMMS (DAMEN GROUP)

Το DAMOS CMMS (Damen GROUP) είναι ένα πακέτο λογισμικού πιστοποίησης κατηγορίας, σχεδιασμένο να είναι φιλικό προς το χρήστη. Παρέχει

- a. μια επισκόπηση των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων συντήρησης,
- b. της κατανομής πόρων και
- c. του ιστορικού συντήρησης

Επιπλέον, χάρη στο σύστημα ενοτήτων που διαθέτει , γίνεται εφικτή η προσθήκη μερικών ακόμα δυνατοτήτων όπως :

- Σύστημα επικοινωνίας μεταξύ γραφείου και πλοίου
- Αναφορά κόστους και έλεγχος προϋπολογισμού
- Αγορά ανταλλακτικών

Τέλος, άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι το DAMOS CMMS διαθέτει πιστοποίηση από Νορβηγικούς και Βρετανικούς νηογνώμονες.

K-FLEET (Kongsberg)

Το λογισμικό k-fleet maintenance της εταιρίας Kongsberg Gruppen είναι ένα σύστημα διαχείρισης προγραμματισμένης συντήρησης που παρέχει συνολικό έλεγχο των διαδικασιών συντήρησης. Σχεδιάστηκε ως ένα εργαλείο για τη διαχείριση της προγραμματισμένης συντήρησης σε κεντρικούς και αποκεντρωμένους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένης της σύνδεσης της κατάστασης των εργασιών με τη διαχείριση στα σημεία ελέγχου και των συναφών εργασιών. Είναι μέρος του λογισμικού K-fleet και μπορεί να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις κάθε τύπου πλοίου. Τα βασικά του χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- τη διαχείριση των σχεδίων συντήρησης και των επιθεωρήσεων,
- εύκολη ενημέρωση των ωρών λειτουργίας του εξοπλισμού,
- πρόσβαση σε ιστορικό εργασιών, στατιστικά στοιχεία,
- έλεγχο της συντήρησης, τροποποιήσεις βάσεων δεδομένων κ.α.

Αυτό το λογισμικό πληροί τις απαιτήσεις της OCIMF (Oil Companies International Marine Forum) για τη διαχείριση και την αυτοαξιολόγηση των δεξαμενόπλοιων (Tanker Management and Self-Assessment, TMSA) και παρέχει αναφορές κωδικών κατάστασης για ανάλυση και συνεχή βελτίωση.

Επιπλέον, προσφέρει γραφική προβολή της προηγούμενης, τρέχουσας και μελλοντικής συντήρησης, επισκόπηση του κρίσιμου εξοπλισμού και των σχετικών εργασιών συντήρησης, καθώς και οπτική ειδοποίηση για εκπρόθεσμες εργασίες συντήρησης. Η εφαρμογή παρέχει πληθώρα επιλογών ελέγχου για την παρακολούθηση και εγγραφή υπο-εργασιών, με δυνατότητα φιλτραρίσματος, δημιουργίας αναφορών και εξαγωγής σε διάφορες μορφές. Το k-fleet maintenance αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο διαχείρισης συντήρησης που επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση του εξοπλισμού και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών συντήρησης για την απρόσκοπτη λειτουργία των πλοίων.

Marad maintenance (Mara soft)

Το Marad maintenance (Mara soft) είναι ένα σύστημα διαχείρισης συντήρησης που χρησιμοποιείται για να καταγράφονται και να παρακολουθούνται οι πληροφορίες συντήρησης του εξοπλισμού. Τα τμήματα εξοπλισμού ομαδοποιούνται και συνδέονται με δεδομένα σχετικά με τον χρόνο συντήρησης και τις ώρες λειτουργίας. Επιπλέον, μπορούν να συνδεθούν κάρτες εργασίας και έγγραφα σε κάθε τμήμα εξοπλισμού.

Το σύστημα προσφέρει λειτουργίες όπως :

- συνοπτικοί κατάλογοι εργασιών συντήρησης,
- περίληψη ωρών λειτουργίας, διορθωτική συντήρηση,
- σύνδεση εγγράφων και σύνδεση με το σύστημα διαχείρισης αποθεμάτων.

Το Marad Inventory είναι μια επιπλέον λειτουργία που συγκεντρώνει δεδομένα από το Marad maintenance και επιτρέπει τη διαχείριση αποθεμάτων και προμηθευτών.

Marine Planned Maintenance (Marine Software ltd)

Το Marine Planned Maintenance είναι ένα πρόγραμμα της εταιρείας Marine Software Ltd που έχει εγκριθεί από το νορβηγικό νηογνώμονα DNV-GL.

Αυτό το σύστημα περιλαμβάνει προγραμματισμένες κάρτες εργασιών συντήρησης (PM Job Card) που καλύπτουν τον εξοπλισμό των πλοίων. Κάθε κάρτα εργασίας περιέχει ρουτίνες εργασίας, πρόγραμμα συντήρησης και ιστορικό εργασιών. Το σύστημα δημιουργεί καταλόγους εργασιών συντήρησης με ληξιπρόθεσμες και εκπρόθεσμες εργασίες και επιτρέπει τη δημιουργία λίστας με εργασίες που πρόκειται να ολοκληρωθούν.

Το σύστημα είναι συνδεδεμένο με συστήματα μέτρησης ωρών λειτουργίας και εκδίδει προβλέψεις λήξης βάσει των μετρήσεων. Επιπλέον, παρέχει ενότητες για αναφορές ασφαμάτων, πληροφορίες πλοίου και μεταφορά δεδομένων μέσω email ή εξωτερικής συσκευής μνήμης.

Τέλος, μπορεί να συνδεθεί με συστήματα ανάλυσης κραδασμών για την προγραμματισμένη λήψη μετρήσεων και την καθοδήγηση σε διορθωτικές ενέργειες.

Ship Manager Technical (DNV GL)

Το ShipManager Technical της DNV GL είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης πλοίων που επικεντρώνεται στην προγραμματισμένη και μη προγραμματισμένη συντήρηση, την αναφορά ασφαμάτων και τη διαχείριση τεχνικών στοιχείων και δεδομένων. Παρέχει βελτιστοποίηση της διαχείρισης της συντήρησης των πλοίων μέσω της κεντρικής διαχείρισης του εξοπλισμού και των εργασιών συντήρησης.

Το λογισμικό προσφέρει επίσης

- προετοιμασία και τεκμηρίωση προγραμματισμένων και μη προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης,
- καθορίζει και προγραμματίζει εργασίες με βάση την αντικατάσταση και κατηγοριοποιεί θέσεις εργασίας και άλλα στοιχεία.
- παρέχει αυτόματες ενημερώσεις για τα αποθέματα και διαχειρίζεται ελαττώματα,
- διατηρεί αρχεία κύκλου ζωής για τον εξοπλισμό.

Το ShipManager Technical βελτιώνει την απόδοση και την ασφάλεια του στόλου μέσω αποτελεσματικής τεχνικής διαχείρισης.

Star Maintenance (Star Information Systems)

Το πρόγραμμα Star Maintenance της Star Information Systems είναι ένα λογισμικό συντήρησης που υποστηρίζει το προσωπικό πλοίου στον προγραμματισμό, την αναφορά εργασίας, τον έλεγχο αποθεμάτων και των προμηθειών.

- Λειτουργεί αυτόνομα ή σε συνδυασμό με άλλα προϊόντα της εταιρίας για ασφάλεια και αποδοτικότητα πλοίου.
- Παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες και οδηγίες για τις εργασίες συντήρησης σύμφωνα με τα πρότυπα της εταιρίας και τους διεθνείς κανονισμούς.
- Παρουσιάζει όλες τις εργασίες στον πίνακα εργασιών του πλοίου για επισκόπηση των επικείμενων εργασιών.
- Επιτρέπει τον έλεγχο των αποθεμάτων και τον προγραμματισμό των ανεφοδιασμού. Τα δεδομένα αναπαράγονται μέσω του συστήματος αναπαραγωγής της εταιρίας, προσφέροντας πλήρη επισκόπηση και συντήρηση του στόλου.
- Παρέχει επίσης οδηγίες και ενημερώσεις για τον εξοπλισμό του πλοίου και την ανταλλαγή γνώσεων.

6.3

ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΠΑΚΕΤΑ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Με την ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως του ψηφιακού διδύμου τα πληροφοριακά συστήματα μπορούν να αποκτήσουν δυνατότητες και λειτουργίες, πολύτιμες για την επιχειρησιακή λειτουργία του στόλου και την βελτιστοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων στην ναυτιλιακή βιομηχανία.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τεχνολογικές πρόοδοι της σύγχρονης εποχής καθιστούν ολοένα και ευκολότερη την δημιουργία ολοκληρωμένων λύσεων συντήρησης στον χώρο της ναυτιλίας. Σε αυτό το πλαίσιο, η διάθεση εμπορικών πακέτων προβλεπτικής συντήρησης έχει αποκτήσει αυξανόμενη σημασία. Τα εμπορικά πακέτα παρέχουν εξειδικευμένες λύσεις που συνδυάζουν λογισμικό, δεδομένα και τεχνογνωσία για την πρόβλεψη και την αποτροπή βλαβών. Αυτό επιτρέπει στις ναυτιλιακές εταιρίες να βελτιστοποιήσουν τη συντήρηση του στόλου τους, μειώνοντας την ανεπαρκή λειτουργία και τον κίνδυνο ακινησίας.

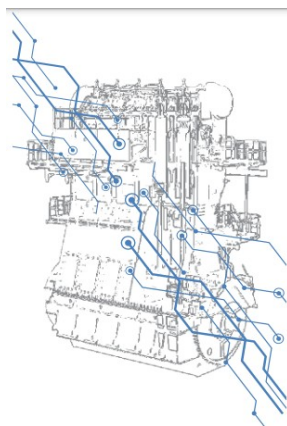
Τέτοιου είδους λύσεις είναι δυνατό να παρέχονται από εξωτερικούς συνεργάτες των ναυτιλιακών εταιρειών καθώς και διάφορες start ups οι οποίες ενισχύουν την παρουσία τους στον χώρο αυτόν. Παρακάτω θα γίνει μια αναφορά σε μερικά από τα διαθέσιμα εμπορικά πακέτα όπως αυτά παρέχονται από εξωτερικούς συνεργάτες.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι πρόκειται για ενδεικτική αναφορά κάποιων από τους σημαντικότερους παρόχους οι οποίοι δεν αποτελούν μοναδικούς και αποκλειστικούς παρόχους τέτοιων λύσεων. Η αναφορά έχει σκοπό την ανάδειξη της αξιοποίησης της τεχνολογίας των DT σε εμπορικό επίπεδο.

1. Engine Hyper Cube (Propulsion Analytics)

Η Propulsion Analytics είναι μια καινοτόμος εταιρεία στον τομέα της διαχείρισης επιδόσεων και ενεργειακής απόδοσης για τη ναυτιλιακή βιομηχανία. Η εταιρεία προσφέρει προϊόντα και υπηρεσίες με επίκεντρο την διαχείριση απόδοσης του κινητήρα και έχει πρωτοπορήσει με την χρήση μοντέλων θερμοδυναμικής προσομοίωσης σε συνδυασμό με τεχνικές μηχανικής μάθησης, για αξιολόγηση απόδοσης, διάγνωση βλαβών και βελτιστοποίηση.

Το Engine Hyper Cube αξιοποιώντας το θερμοδυναμικό ψηφιακό αντίγραφο του κινητήρα σε λειτουργία, αντικατοπτρίζει τις φυσικές σχέσεις όλων των πρωταρχικών παραμέτρων (θερμοκρασίες, πιέσεις, κ.λ.) και τις προκύπτουσες τιμές απόδοσης (ροπή, κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές) καθώς και πώς αυτά επηρεάζονται από τις συνθήκες περιβάλλοντος, το φορτίο, την ταχύτητα και τον τύπο καυσίμου σε οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας.



ΕΙΚΟΝΑ 23. (λογισμικό Engine Hyper Cube, https://propulsionanalytics.com/wp-content/uploads/2022/06/Engine_Hyper_Cube_Leaflet.pdf)

Με την χρήση του παραπάνω μοντέλου απεικονίζεται αποτελεσματικά η λειτουργική κατάσταση της μηχανής του πλοίου. Η λειτουργική κατάσταση απεικονίζεται με δείκτες και διαγράμματα από το προσφερόμενο λογισμικό της εταιρείας.



ΕΙΚΟΝΑ 24. (UI του engine hypercube, <https://propulsionanalytics.com/performance-management/>)

Αναλυτικά προσφέρονται τα εξής :

- Προβολή (dashboard) της συνολικής κατάστασης σκάφους/κινητήρα
- KPI για την υγεία και την απόδοση καυσίμου εξαρτημάτων
- Λεπτομερής διάγνωση πιθανών βλαβών (κινητήρας & αισθητήρες) και προτεινόμενες ενέργειες
- Οι οικονομικές επιπτώσεις των βλαβών που εντοπίστηκαν
- Ανάλυση χρονοδιαγράμματος για έναν αριθμό παραμέτρων κινητήρα
- Σύγκριση αδελφού σκάφους/κινητήρα

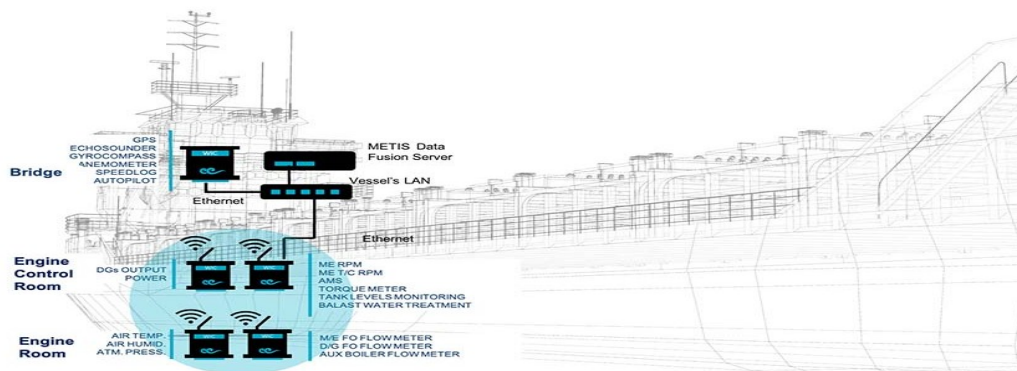
2. METIS CYBERSPACE TECHNOLOGY SA

Πρόκειται για εταιρεία που ιδρύθηκε το 2016 και ειδικεύεται στον τομέα της Απόκτησης Δεδομένων, της παρακολούθησης απόδοσης σε πραγματικό χρόνο και του ευφών αναλύσεων για τη Ναυτιλιακή Βιομηχανία, χρησιμοποιώντας τεχνικές Μηχανικής Μάθησης και Τεχνητής Νοημοσύνης (<https://www.metis.tech/about/>).

Η συγκεκριμένα εταιρεία παρέχει ολοκληρωμένες λύσεις και ψηφιακές υπηρεσίες στον χώρο της ναυτιλίας. Οι λύσεις στον τομέα της συντήρησης εστιάζουν στην παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο συγκεκριμένου εξοπλισμού των πλοίων. Συγκεκριμένα, τα τμήματα εξοπλισμού που παρακολουθούνται αφορούν:

- την μηχανή (Main Engine),
- γεννήτριες (Diesel generators),
- scrubbers
- Συστήματα επεξεργασίας νερού έρματος (Ballast Water Treatment)

Για την παρακολούθηση του εξοπλισμού αυτού είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συγκεκριμένων αισθητήρων σε διάφορα σημεία του πλοίου.



ΕΙΚΟΝΑ 25. (σύστημα METIS, <https://www.metis.tech/metis-ship-connect/>)

Ο εξοπλισμός του πλοίου στον οποίο συνδέονται συχνότερα οι παραπάνω αισθητήρες και οι κρίσιμες μετρήσεις που παρακολουθούνται περιλαμβάνουν:

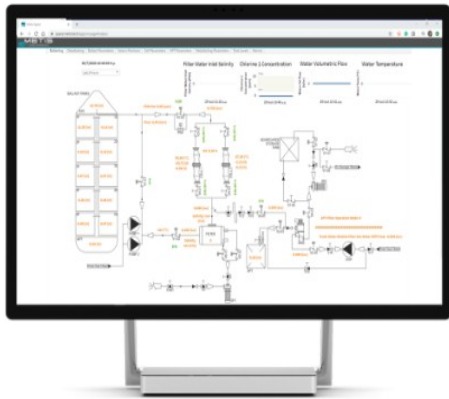
- GPS
- ηχοβολή
- γυροσκοπική πυξίδα
- ανεμόμετρο
- ταχύτητα
- σύστημα αυτόματης πλοήγησης
- μετρητής ροπής
- μετρητής ροής λέβητα
- Main Engine rpm
- ισχύς εξόδου γεννήτριας
- παρακολούθηση επιπέδου δεξαμενής
- θερμοκρασία του αέρα
- υγρασία αέρα.
- ατμ. πίεση
- σύστημα bwt
- scrubbers

Στην συνέχεια προβάλλονται τα αποτελέσματα ανάλυσης για την αξιοποίησή τους από τους τεχνικούς :



A

B



C

EIKONA 26 (A:M/E,B:scrubbers,C:BWT, <https://www.metis.tech/machinery-monitoring/>)

3. CASSANDRA (DeepSea)

Η DeepSea είναι μια εταιρεία που ιδρύθηκε το 2017, με σκοπό την χρήση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης στον χώρο της ναυτιλίας

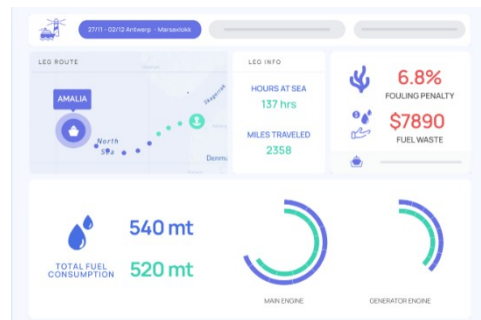
Με το πακέτο της CASSANDRA εστιάζει στην ολοκληρωμένη παρακολούθηση τόσο του εξοπλισμού του πλοίου αλλά και ολόκληρου του στόλου.

Αναλυτικότερα προσφέρονται τα εξής :

- Συγκριτική αξιολόγηση στόλου και μοντελοποίηση πλήρους απόδοσης
- Παρακολούθηση εκπομπών
- Ανάλυση γάστρας, κύριας μηχανής, λεβήτων & βοηθητικού εξοπλισμού
- Σύστημα αυτοματοποιημένων ειδοποιήσεων και αναφορών κατάστασης

(<https://www.deepsea.ai/cassandra/>)

Τα dashboard με τα αποτελέσματα της παρακολούθησης και της ανάλυσης είναι της παρακάτω μορφής :



6.4

ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ (Maintenance Decision)

Σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των περιουσιακών στοιχείων, η απόφαση συντήρησης σκιαγραφεί την προσέγγιση των λειτουργιών και της συντήρησης προς τη διασφάλιση της υγείας και της ασφάλειάς τους. Αυτό περιλαμβάνει μια σειρά διαδικασιών επισκευής, όπως επιθεώρηση, επισκευή, συντήρηση και ανανέωση συστημάτων, υποσυστημάτων και εξαρτημάτων. Για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της συντήρησης και της μείωσης του κόστους, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές στρατηγικές συντήρησης, συμπεριλαμβανομένων διορθωτικών, προληπτικών και προγνωστικών προσεγγίσεων.

Το PHM είναι μια στρατηγική συντήρησης που χρησιμοποιεί παρακολούθηση κατάστασης σε πραγματικό χρόνο και διάγνωση σφαλμάτων για τη λήψη αποφάσεων συντήρησης με βάση την κατάσταση υγείας του MSAE. Αυτή η προσέγγιση στοχεύει στη μείωση του κόστους, των ανταλλακτικών, του χρόνου διακοπής λειτουργίας του συστήματος και του χρόνου συντήρησης ολοκληρώνοντας τις εργασίες συντήρησης όταν χρειάζεται.

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες, μέθοδοι και τεχνικές, της προβλεπτικής συντήρησης αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε επιχειρησιακό επίπεδο. Ο κατάλληλος προγραμματισμός εργασιών συντήρησης σε συνδυασμό με την ακρίβεια του εντοπισμού της αστοχίας, όπως αυτά προσφέρονται από την συγκεκριμένη μέθοδο, μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμα εργαλεία για μια ναυτιλιακή εταιρεία προσδίδοντάς ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες.

Ένα πρόγραμμα προβλεπτικής συντήρησης, μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο επενδυτικής στρατηγικής για το επιχειρησιακό τμήμα μιας εταιρείας εξαιτίας του αυξημένου αρχικού κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας. Από την πρώτη ημέρα αγοράς του ακριβού εξοπλισμού μιας διαγνωστικής τεχνολογίας για τις ανάγκες της Προβλεπτικής Συντήρησης ή του συμβολαίου με τον εξωτερικό συνεργάτη που την αναλαμβάνει οι υπεύθυνοι παρακολούθησης του προγράμματος της Προβλεπτικής Συντήρησης πρέπει να μπορούν συνεχώς να δικαιολογούν τις δαπάνες για τα κεφάλαια και το ανθρώπινο δυναμικό που αυτό δεσμεύει (Τσώλη Α., 2007).

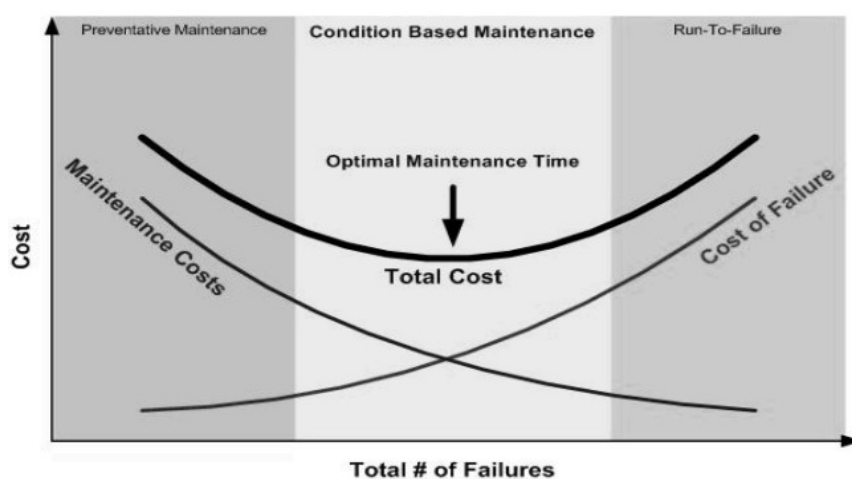
Για να αξιολογηθεί λοιπόν μια τέτοια επένδυση ως συμφέρουσα, είναι απαραίτητο να αναλυθεί η μείωση που δύναται να επιφέρει στα λειτουργικά έξοδα της εταιρείας. Συγκεκριμένα πρέπει να υπολογιστεί η μείωση που ενδέχεται να επιφέρει στο άμεσο και το έμμεσο κόστος κατά την εφαρμογή του. Έπειτα πρέπει να αφαιρεθεί το

συνολικό κόστος του προγράμματος προβλεπτικής συντήρησης για να εξεταστεί αν υπάρχει καθαρό κέρδος (Τσώλη Α., 2007).

Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ευνοϊκά αποτελέσματα από την εφαρμογή προγραμμάτων προβλεπτικής συντήρησης σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους. Συγκεκριμένα σε υπεράκτιες γεωτρήσεις πετρελαίου, σε εφαρμογή στο κιβώτιο ταχυτήτων του μηχανήματος γεώτρησης βρέθηκε μείωση κόστους συντήρησης ύψους 38%. Σε εφαρμογή σε μηχανές χύτευσης αυτοκινητοβιομηχανίας παρατηρήθηκε μείωση αστοχιών και 29% βελτίωση του υπό επεξεργασία μετάλλου σκραπ. Ακόμα, λαμβάνοντας ενδείξεις σε πτέρυγα εμπορικού αεροσκάφους, βελτιώθηκε κατά 22% ο απαιτούμενος χρόνος συντήρησης. Τέλος σε εφαρμογή σε βιομηχανία μετάλλου βρέθηκε αύξηση χρόνου ζωής κατά 60 % και παράλληλη μείωση του νεκρού χρόνου του εξοπλισμού (Α. Bousdekis, D. Apostolou, G. Mentzas, 2020).

Τέλος κάποιες μελέτες έχουν δείξει ότι ένα πρόγραμμα προβλεπτικής συντήρησης μπορεί να επεκτείνει τα διαστήματα των κύκλων γενικής επισκευής και συντήρησης έως και 50% και να εξοικονομήσει μεταξύ 25% και 45% του κόστους συντήρησης. Παρά την αποτελεσματικότητά του, μόνο το 10% της ναυτιλιακής βιομηχανίας χρησιμοποιεί CBM λόγω της πολυπλοκότητας των πλοίων και του υψηλού επιπέδου τεχνικής εμπειρογνωμοσύνης που απαιτείται για την ανάλυση συστήματος και τη λήψη αποφάσεων συντήρησης (P. Zhang, Z. Gao, L. Cao, F. Dong, Y. Zou, K. Wang, Yuewen Zhang, P. Sun, 2022).

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η διαφοροποίηση του κόστους συντήρησης και του κόστους αστοχίας (νεκρού χρόνου λόγω βλάβης του εξοπλισμού) συναρτήσει του αριθμού των βλαβών που λαμβάνουν χώρα, ανά στρατηγική συντήρησης (Κέμμος Μ., 2015) :



ΕΙΚΟΝΑ 28. (συνάρτηση κόστους και συνολικών βλαβών, Κέμμος Μ., 2015)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *'Developing a predictive maintenance model for vessel machinery'*, Veronica Jaramillo Jimenez, Nouredine Bouhmala, Anne Haugen Gausdal, Department of Maritime Operations, University of South-Eastern Norway Kristiania University College, 2020.
2. *'the internet of big things: digital twins at work in maritime and energy'*, Øyvind Smogeli, DNV GL, 2017.
3. *'Μεθοδολογίες Συντήρησης μηχανών και σύγχρονες τάσεις'*, διπλωματική εργασία, Τσώλη Α., Ε.Μ.Π. Αθήνα, 2007.
4. *'Συντήρηση μηχανολογικού εξοπλισμού στη βιομηχανία παραγωγής πλαστικών προϊόντων για τρόφιμα'*, διπλωματική εργασία, Μπιλαλής Σ., Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας Πάτρα, 2017.
5. *'Δια βίου κόστος εκμετάλλευσης εμπορικών πλοίων'* διπλωματική εργασία, Παπαμιχαήλ Τσαμπικου Γ., Ε.Μ.Π. Αθήνα, 2016.
6. *'Σχεδιασμός και υλοποίηση εφαρμογής Labview για την επιτήρηση καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων των αισθητήρων ενός πλοίου'*, πτυχιακή εργασία Μπουρδουβάλης Α., Παβέλης Χ., Πειραιάς, 2018.
7. <https://www.marineinsight.com/guidelines/parts-of-a-ship/> (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Μάρτιος 2023).

8. <https://maritimesa.org/grade-10/terminology-parts-of-ships-and-equipment-aboard-ships/> (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Μάρτιος 2023).
9. 'Digital Twin Driven Smart Manufacturing', FEI TAO, MENG ZHANG, A.Y.C. NEE, 2019.
10. 'τεχνολογία ψηφιακών διδύμων: συστήματα και βιομηχανικές εφαρμογές', διπλωματική εργασία, Ποντίκης Ι., Αθήνα 2020.
11. 'New Technologies for Maintenance', Jay Lee, Haixia Wang, Khairy A. H. Kobbacy, D. N. Prabhakar Murthy, Cincinnati USA, 2008.
12. 'Advances of Digital Twins for Predictive Maintenance', Yingchao Youa, Chong Chena, Fu Hua, Ying Liua, Ze Jia, 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, 2022.
13. Zhang, P.; Gao, Z.; Cao, L.; Dong, F.; Zou, Y.; Wang, K., Zhang, Y., Sun, P. 'Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy', *Machines* 2022, 10, 72. <https://doi.org/10.3390/machines10020072>
14. A novel PCA-based approach for building on-board sensor classifiers for water contaminant detection. *Pattern. Recognit. Lett.* **2020**.
15. <https://ocean-me.com/vibration-analysis-in-maintenance/> (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Μάρτιος 2023).
16. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/vibration-analysis> (ημ/νια επίσκεψης Απρίλιος 2023).
17. 'Vibration Analysis and Diagnostic Guide', Jaafar Alsalaet, University of Basrah, 2012.
18. 'Vibration Image Representations for Fault Diagnosis of Rotating Machines: A Review', Hosameldin Osman Abdallah Ahmed, Asoke Kumar Nandi, <https://doi.org/10.3390/machines10121113>, *Machines* 2022.
19. 'Towards the Automation of Infrared Thermography Inspections for Industrial Maintenance Applications', Pablo Venegas, Eugenio Ivorra, Mario Ortega, Sáez de Ocáriz, <https://doi.org/10.3390/s22020613>, *Sensors* 2022.
20. 'Infrared Thermography Smart Sensor for the Condition Monitoring of Gearbox and Bearings Faults in Induction Motors', Alvaro Ivan Alvarado-Hernandez, Israel Zamudio-Ramirez, Arturo Yosimar Jaen-Cuellar, Roque Alfredo Osornio-Rios, Vicente Donderis-Quiles, Jose Alfonso Antonino-Daviu, <https://doi.org/10.3390/s22166075>, *Sensors* 2022.
21. <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Thermography/index.xhtml> (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Απρίλιος 2023).
22. <https://irinfo.org/08-01-2016-hazouri/> (ημ/νια επίσκεψης Απρίλιος 2023).
23. <https://www.pilothousemarineservices.com/thermal-imaging.html>, (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Απρίλιος 2023).

24. <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/index.shtml>, (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Απρίλιος 2023).
25. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/ultrasonic-testing>, (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Απρίλιος 2023).
26. <https://www.reliableplant.com/Read/29739/ultrasound-predictive-maintenance>, (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Απρίλιος 2023).
27. <https://aimcontrolgroup.com/en/marine-ultrasonic-testing.html>, (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Απρίλιος 2023).
28. <https://www.wndti.gr/el/programmata-ekpaidefsis/ekpaidefsi-stous-mke/elegxos-yperixoi-ut/#ut-tofd>, (ημ/νια επίσκεψης ιστοσελίδας Απρίλιος 2023).
29. 'Προγράμματα συντήρησης στην λειτουργική διαχείριση των πλοίων', πτυχιακή εργασία, Παπαδόπουλος Φ., Πανεπιστήμιο Αιγαίου 2017.
30. 'Επισκευαστικές εργασίες και προγράμματα συντήρησης στα πλοία', πτυχιακή εργασία, Φώτος Ν., Πανεπιστήμιο Αιγαίου 2021.
31. 'Computerized Planned Maintenance System Software Models', Goran Gašpar, Igor Poljak, Josip Orović, 2018.
32. Abd Kadir Mahamad, S. Saon , T. Hiyama, 'Predicting remaining useful life of rotating machinery based artificial neural network', Department of Computer Science and Electrical Engineering, Kumamoto University Japan, 2010.
33. Qinglin Qi, Fei Tao, Tianliang Hu, Nabil Anwer, Ang Liu, Yongli Wei, Lihui Wang, A.Y.C. Nee, Enabling technologies and tools for digital twin, Journal of Manufacturing Systems, Volume 58, Part B, 2021.
34. Y. -L. Zhan, Z. -B. Shi, T. Shwe and X. -Z. Wang, "Fault Diagnosis of Marine Main Engine Cylinder Cover Based on Vibration Signal," 2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Hong Kong, China, 2007.
35. Onur Surucu, Stephen Andrew Gadsden, John Yawney, Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances, Expert Systems with Applications, 2023.
36. 14th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME '20 Overview on hybrid approaches to fault detection and diagnosis: Combining data-driven, physics-based and knowledge-based models Yannick Wilhelma,b,*, Peter Reimanna,c, Wolfgang Gauchelb, Bernhard Mitschanga, 2021.
37. Calabrese, F., Regattieri, A., Bortolini, M., Gamberi, M., Pilati, F. Predictive Maintenance: A Novel Framework for a Data-Driven, Semi-Supervised, and Partially Online Prognostic Health Management Application in Industries. Appl. Sci. 2021.
38. Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah Karganroudi, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., Adda, M. On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. Appl. Sci. 2022.

39. Kang Z, Catal C, Tekinerdogan B. : *Remaining Useful Life (RUL) Prediction of Equipment in Production Lines Using Artificial Neural Networks*. Sensors (Basel). 2021.
40. Carlos Ferreira, Gil Gonçalves, *Remaining Useful Life prediction and challenges: A literature review on the use of Machine Learning Methods*, Journal of Manufacturing Systems, Volume 63, 2022.
41. Juan Carlos A. Jauregui Correa, Alejandro A. Lozano Guzman, in *Mechanical Vibrations and Condition Monitoring*, 2020.
42. Michael S. Forsthoffer, in *Forsthoffer's More Best Practices for Rotating Equipment*, 2017
43. (Alvarado-Hernandez, A.I., Zamudio-Ramirez, I., Jaen-Cuellar, A.Y., Osornio-Rios, R.A., Donderis Quiles, V. Antonino-Daviu, J.A., 2022.
44. Romanssini, M.; de Aguirre, P.C.C.; Compassi-Severo, L.; Girardi, A.G. *A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery* 2023
45. A. Bousdekis, D. Apostolou and G. Mentzas, "Predictive Maintenance in the 4th Industrial Revolution: Benefits, Business Opportunities, and Managerial Implications," in *IEEE Engineering Management Review*, vol. 48, no. 1, pp. 57-62, 1 Firstquarter, march 2020.