



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας

Διάγνωση και προσομοίωση βλαβών σε τετράχρονο κινητήρα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραγιάννης - Ζενετζιδάκης Μιχάλης

Επιβλέπων: **Καθηγητής Ν. Π. Κυρτάτος**

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: **Επικ. Καθηγητής Γ. Παπαλάμπρου**

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: **Επικ. Καθηγητής Χρ. Παπαδόπουλος**

Ζωγράφου, Ιούλης 2019

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία είχε σαν σκοπό τη μοντελοποίηση βλαβών που συχνά εντοπίζονται σε ναυτικούς κινητήρες που χρησιμοποιούνται είτε για την πρόωση των πλοίων είτε ως γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η προσομοίωση έγινε στο θερμοδυναμικό κώδικα πρόβλεψης επιδόσεων κινητήρων MOtor THERmodynamics (MO.THER.), ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας του ΕΜΠ, και οδήγησε στην ανάπτυξη ενός διαγνωστικού εργαλείου για την ανίχνευση βλαβών.

Για την προσομοίωση των βλαβών μελετήθηκε ο τετράχρονος κινητήρας L16/24 της MAN, που είχε μοντελοποιηθεί σε προηγούμενο στάδιο. Τα φορτία που προσομοιώθηκαν ήταν 50%, 75%, 86%, για να συμπεριλάβουμε και χαμηλά και ψηλά φορτία, λαμβάνοντας υπόψη ότι επειδή χρησιμοποιείται κυρίως ως γεννήτρια, τα χαμηλότερα φορτία συνήθως αποφεύγονται. Οι βλάβες που προσομοιώθηκαν ήταν: βραδυπορία και προπορεία έγχυσης καυσίμου, καύσιμο κακής ποιότητας, διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής, διαφυγή αερίων λόγω μεγάλου διακένου μεταξύ ελατηρίων και χιτωνίου, ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης, λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής (νωρίτερο ή βραδύτερο άνοιγμα και κλείσιμο, κρατώντας ίδια χρονική διάρκεια), φραγμένο φίλτρο συμπιεστή, ρυπασμένος συμπιεστής, ρυπασμένος στρόβιλος. Αυτές επελέγησαν γιατί εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα στους κινητήρες, είναι χαρακτηριστικές για τα υποσυστήματα στα οποία εμφανίζονται, σχετίζονται με τη συντήρηση και την επιθεώρηση των διαφόρων μερών της μηχανής και λόγω της φύσης τους μπορούν να προσομοιωθούν έμμεσα στο θερμοδυναμικό κώδικα.

Θεωρήθηκε αναγκαία η προσομοίωση δύο διαφορετικών περιπτώσεων για κάθε βλάβη, εκ των οποίων η μία αναπαριστά μικρής κλίμακας βλάβη, ενώ η άλλη σημαντικό πρόβλημα για τον κινητήρα.

Οι παράμετροι λειτουργίας που εξετάσαμε, μπορούν να μετρηθούν σε πραγματικό χρόνο σε μία μηχανή και οδηγούν σε ασφαλή συμπεράσματα για τις τάσεις μεταβολής τους σε περίπτωση βλάβης: μέγιστη θερμοκρασία κυλίνδρου, πίεση συμπίεσης και καύσης, πίεση και θερμοκρασία αέρα πλήρωσης, πίεση και θερμοκρασία καυσαερίων πριν το στρόβιλο, ειδική κατανάλωση καυσίμου στον κινητήρα, στροφές υπερπληρωτή, θερμοκρασία έδρας βαλβίδας.

Επίσης ορίστηκαν κάποιες τιμές μεταβολών των παραμέτρων οι οποίες θεωρούνται ως ελάχιστες για να υποθέσουμε ότι πραγματικά έχουμε μεταβολή, διαφορετικά τις θεωρούμε αμελητέες.

Από την προσομοίωση συμπεραίνουμε ότι οι συνέπειες που επιφέρουν οι περισσότερες βλάβες διαφέρουν κυρίως ως προς την έκτασή τους ανάμεσα στα ψηλά και τα χαμηλά φορτία, καθώς για τα φορτία 86% και 75% υπήρχε συμφωνία, όμως το φορτίο 50% είχε περισσότερες αμελητέες μεταβολές των παραμέτρων που εξετάσαμε και ελάχιστες αντίθετες συνέπειες σε σχέση με τα μεγάλα φορτία. Ως ένα αρχικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι το νέο σημείο λειτουργίας του υπερπληρωτή παίζει σημαντικό ρόλο στο αντίστοιχο του κινητήρα. Ένα άλλο συμπέρασμα είναι ότι η πίεση και η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν ακολουθούν πάντα και οι δύο τη μεταβολή του ενεργειακού περιεχομένου των καυσαερίων, καθώς εξαρτώνται από την πίεση και τη θερμοκρασία αντίστοιχα του κυλίνδρου που μπορεί να έχουν αντίθετη τάση. Φαίνεται επίσης ότι η πίεση είναι αυτή που τελικά επηρεάζει περισσότερο τις στροφές του υπερπληρωτή, παρά η θερμοκρασία των καυσαερίων. Ακόμα ο λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου επηρεάζει σημαντικά τις θερμοκρασίες του κυλίνδρου. Πλουσιότερο μείγμα συνεπάγεται αυξημένες θερμοκρασίες, ενώ φτωχότερο μειωμένες. Τέλος η πίεση και η θερμοκρασία του αέρα πλήρωσης ακολουθούν τις ίδιες τάσεις, που επιβεβαιώνεται και θεωρητικά, αφού από την καταστατική εξίσωση των αερίων είναι ανάλογα ποσά. Μοναδική εξαίρεση η περίπτωση βλάβης στο ψυγείο του αέρα και της διαφυγής αερίων από τα ελατήρια του εμβόλου.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αναπτύχθηκε διαγνωστικό εργαλείο στο περιβάλλον εργασίας της Matlab, για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη ανίχνευση μιας τυχαίας βλάβης. Το διαγνωστικό εργαλείο επικοινωνεί με το χρήστη, ο οποίος εισάγει τις μεταβολές που προξενεί μία τυχαία βλάβη σε 10 παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα. Στη συνέχεια ο κώδικας τυπώνει στην οθόνη τις πιθανές βλάβες, των οποίων τα αποτελέσματα ταιριάζουν τουλάχιστον για 8 από τις 10 μεταβολές στις παραμέτρους που εισήχθησαν από το χρήστη.

Φαίνεται ότι η επιλογή των 10 παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα είναι σωστή, καθώς κάθε βλάβη έχει έναν μοναδικό συνδυασμό που οδηγεί εύκολα στη διάγνωσή της. Υπάρχουν δηλαδή ελάχιστες επικαλύψεις κι αυτό δε συμβαίνει σε καμία βλάβη και για τις 10 παραμέτρους. Ωστόσο επειδή σκοπός είναι το διαγνωστικό εργαλείο να επεκταθεί σε περισσότερους κινητήρες, αφήνει ένα περιθώριο λάθους σε 2 παραμέτρους, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε διάγνωση που δέχεται ως πιθανές δύο-τρεις βλάβες, με διαφορετικές όμως πιθανότητες. Η εμπειρία του χρήστη σε συνδυασμό με τη γνώση της κατάστασης της μηχανής λύνει εύκολα αυτό το ζήτημα.

Abstract

The diploma thesis focused on the simulation of damages frequently detected in marine engines whether they are used for the main propulsion or as generators. The simulation was conducted in the engine performance prediction thermodynamic code MOrthermodynamics (MO.THER.), developed in Laboratory of Marine Engineering of NTUA, and helped in the development of a diagnostic tool for damages' detection.

The four-stroke engine L16/24, that has been previously modeled, was studied for the simulation of damages. The loads examined were 50%, 75% and 86%, in order to include high and low loads, reminded that for generators, like L16/24 engine, lower loads are usually avoided. The simulated malfunctions were: injection delay and advanced injection of fuel, fuel oil of poor quality, leakages from the exhaust valve, blow-by, contaminated charge air cooler, wrongly changed exhaust valve timing (earlier and later opening and closing, with the same duration), clogged compressor filter, fouled compressor, fouled turbine. This choice was made because these faults frequently appear on the engines, they are representative of the sub-system they affect, they have also liaison with the maintenance and the survey of engine's components and most of them could be simulated indirectly in the thermodynamic code.

The simulation of each damage included two cases, from whom the one represented a minor and the other one a major problem for the engine.

The examined operational parameters can be measured during sailing and give us accurate details in case of engine malfunction: maximum temperature of cylinder, compression and combustion pressure, pressure and temperature of charge air, exhaust gas pressure and temperature, break specific fuel consumption, T/C speed, valve seat temperature.

We have set some minimum values of parameter deviations in order to separate the cases where a real change in parameter is observed. If the value of change is lower, then the result of the damage on this parameter is supposed to be negligible.

The simulation gave us the opportunity to observe that malfunctions' consequences differ between high and low loads, mainly in their magnitude. The results were the same for 86% and 75%; however 50% load had a large number of parameters that their changes were negligible and in some others the results were opposite. The simulation showed that the new operational point of turbocharger plays an important role in the new engine's condition. Furthermore, exhaust gas pressure and temperature don't always agree with the increase or decrease of the energy included in exhaust gases, because there are related with the pressure and temperature of cylinder. It seems that it is the pressure of exhaust gases that mainly affects the operation of turbocharger, increasing or decreasing its speed. The equivalence ratio is directly connected with cylinder's temperature. Rich mixture rises the temperature, while poor mixture decreases it. Finally charge air pressure and temperature follow the same trends, which is also theoretically confirmed, as they are connected with the equation of state of gases. Cooler's malfunction and blow-by are exceptions.

Based on the results of simulation, a diagnostic tool was developed in Matlab, having as main purpose the detailed detection of a random malfunction. The user contacts with the diagnostic tool, giving the qualitative changes that a random damage provokes in 10 operational parameters of the engine. The diagnostic code prints the possible damages whom the results are similar with at least 8 out of 10 changes of the parameters that have been given as input from the user.

The choice of the 10 parameters mentioned, seems to be successful, as each malfunction has a unique combination of them which leads to the damage detection. However the target

of the diploma thesis was the development of a diagnostic tool that could be applied in different engines. So the code gives a margin of two parameters that could differ from the series of changes provoked by a well-known damage, giving a diagnosis that usually includes 2-3 possible different malfunctions, but with also different possibilities for each of them. User's experience combined with the knowledge of engine components' condition easily indicates which damage is more possible to take place.

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω το διευθυντή του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας του ΕΜΠ, κ. Νικόλαο Κυρτάτο, για την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας και τις υποδείξεις του, καθώς και για την παραχώρηση άδειας χρήσης του θερμοδυναμικού κώδικα MOtor THERmodynamics, για την πρόβλεψη των επιδόσεων κινητήρων υπό βλάβη.

Στην εξοικείωσή μου με το MO.THER. βοήθησε ο Υ.Δ. Μιχάλης Φωτεινός, τον οποίο ευχαριστώ θερμά.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τον κ. Στράτο Τζάνο, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου, ο οποίος με βοήθησε στη μοντελοποίηση των βλαβών και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσής τους.

*Αφιερώνεται σε αυτούς που επιλέγουν
να θέσουν την επιστήμη τους στην
υπηρεσία του λαού και των αναγκών του*

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract.....	4
Ευχαριστίες.....	6
Περιεχόμενα	8
Κεφάλαιο 1. Προσομοίωση - Χρήση μοντέλων	11
1.1 Εισαγωγή	11
1.2 Μοντέλα προσομοίωσης κινητήρων	11
1.3 MOtor THERmodynamics	11
1.3.1 Βασικές εξισώσεις στο MO.THER.....	12
1.4 Ο κινητήρας L16/24 στο MO.THER.....	13
Κεφάλαιο 2. Προσομοίωση βλαβών στο MO.THER.....	15
2.1 Βραδυπορία - Προπορεία έγχυσης καυσίμου	15
2.1.1 Περιγραφή συστήματος μεταφοράς και έγχυσης καυσίμου	15
2.1.2 Βλάβες που εμφανίζονται στις αντλίες πετρελαίου (μεταφοράς ή έγχυσης καυσίμου):	17
Ελατήρια εσωτερικού αντλίας.....	17
Σπηλαίωση	17
Βαλβίδα αναρρόφησης.....	18
Κατακαθίσεις (Sludge).....	18
2.1.3 Προσομοίωση.....	18
2.2 Κακής ποιότητας καύσιμο	18
2.2.1 Βλάβες που συνδέονται με το καύσιμο και την καύση του.....	18
Εγχυτήρες.....	18
Θερμοκρασία - ιξώδες καυσίμου	19
Επιπτώσεις κακής ποιότητας καυσίμου και υψηλών θερμοκρασιών στα έμβολα και τα ελατήρια.....	19
Κρουστική καύση.....	19
Καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (ULSFO)	20
Νερό στον κύλινδρο.....	21
2.2.2 Προσομοίωση.....	22
2.3 Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	23
2.3.1 Βλάβες που σχετίζονται με τις βαλβίδες εξαγωγής	23
2.3.2 Προσομοίωση.....	23
2.4 Διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων ή χιτωνίου	24
2.4.1 Ρόλος ελατηρίων εμβόλου	24
2.4.2 Διαφυγή αερίων	24
2.4.3 Προσομοίωση.....	24

2.5 Ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης.....	24
2.5.1 Βλάβες στο ψυκτικό μέσο.....	25
2.5.2 Βλάβες στο ψυχόμενο μέσο	25
2.5.3 Προσομοίωση.....	26
2.6 Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής.....	26
2.6.1 Χρονισμός βαλβίδων	26
2.6.2 Προσομοίωση.....	26
2.7 Ρυπασμένο φίλτρο συμπιεστή ή προβλήματα στο σύστημα του αέρα.....	27
2.7.1 Ρόλος φίλτρου συμπιεστή - προβλήματα στο φίλτρο και τις σωληνώσεις του αέρα.....	27
2.7.2 Προσομοίωση.....	27
2.8 Ρυπασμένος συμπιεστής	27
2.8.1 Πάλμωση συμπιεστή	27
2.8.2 Προσομοίωση.....	28
2.9 Ρυπασμένος στρόβιλος - αυξημένες φθορές.....	28
2.9.1 Αιτίες ρύπανσης-φθορών και τρόποι αντιμετώπισης	28
2.9.2 Σύστημα λίπανσης και σύνδεσή του με βλάβες στον υπερπληρωτή	29
Αντλία - Φίλτρο λαδιού	29
By-pass βαλβίδα.....	30
Ψυγείο λαδιού.....	30
2.9.3 Προσομοίωση.....	30
Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	31
3.1 Παράθεση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων	32
3.1.1 Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	32
3.1.2 Προπορεία έγχυσης καυσίμου	33
3.1.3 Κακή ποιότητα καυσίμου	34
3.1.4 Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής.....	35
3.1.5 Διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων	37
3.1.6 Ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης	38
3.1.7α Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδας εξαγωγής (νωρίτερο άνοιγμα-κλείσιμο)	39
3.1.7β Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδας εξαγωγής (αργότερο άνοιγμα-κλείσιμο)	40
3.1.8 Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή.....	41
3.1.9 Ρυπασμένος συμπιεστής	42
3.1.10 Ρυπασμένος στρόβιλος.....	43
Κεφάλαιο 4ο. Συμπεράσματα και επιβεβαίωση θεωρίας.....	44
4.1 Θεωρία	44
4.1.1 Θερμοκρασία καυσαερίων.....	44
4.1.2 Στροφές υπερπληρωτή	44

4.2 Εξαγωγή συμπερασμάτων για την σύνδεση των μεταβολών των παραμέτρων λειτουργίας της μηχανής λόγω βλαβών.....	45
4.2.1 Σύνδεση πίεσης, θερμοκρασίας καυσαερίων και στροφών τούρμπο, μέσα από την προσομοίωση που έγινε.....	45
4.2.2 Σύνδεση των στροφών του υπερπληρωτή με την πίεση του αέρα πλήρωσης.....	47
4.2.3 Πίεση και θερμοκρασία του αέρα πλήρωσης	48
4.2.4 Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (λ) & Θερμοκρασία κυλίνδρου και βαλβίδας...	48
4.3 Διαγράμματα πίεσης κυλίνδρου σε σχέση με τη γωνία στροφάλου.....	49
4.3.1 Λόγος P_{max}/P_{comp}	50
4.3.2 Παράθεση ενδεικτικών διαγραμμάτων	50
Κεφάλαιο 5ο. Διάγνωση.....	55
5.1 Διαγνωστικά εργαλεία	55
5.2 Ανάπτυξη διαγνωστικού εργαλείου, που συνδέεται με την προσομοίωση βλαβών	56
5.2.1 Περιγραφή περιβάλλοντος εργασίας του προγράμματος	56
5.2.2 Εφαρμογή του κώδικα διάγνωσης.....	57
5.3 Πλεονεκτήματα του διαγνωστικού εργαλείου	63
5.4 Μειονεκτήματα του διαγνωστικού εργαλείου.....	64
5.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	65
Παράρτημα Α. Παράμετροι του βασικού μοντέλου στο MO.THER. και πώς μεταβλήθηκαν για την προσομοίωση των βλαβών	67
Παράρτημα Β. Μεταβολή % του καυσίμου που ζητά ο κινητήρας για να δώσει την ίδια ισχύ με την κατάσταση χωρίς βλάβη:.....	69
Παράρτημα Γ. Μεταβολές των 10 παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε μία βλάβη για ψηλά και χαμηλά φορτία	71
Παράρτημα Δ. Κώδικας διάγνωσης γραμμένος σε Matlab, που συνδέεται με την προσομοίωση των βλαβών (2 εκδοχές)	73
Βιβλιογραφία.....	78

Κεφάλαιο 1. Προσομοίωση - Χρήση μοντέλων

1.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των Η/Υ έδωσε τη δυνατότητα για ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης συστημάτων, που ανήκουν σε διάφορους κλάδους της επιστήμης, με σκοπό (1):

- Τη λεπτομερέστερη κατανόηση της δομής και της λειτουργίας τους
- Τη διερεύνηση των παραγόντων-κλειδιών από τους οποίους εξαρτάται κυρίως η λειτουργία ενός συστήματος, ώστε η διενέργεια πειραμάτων σε μεταγενέστερο χρόνο να γίνει πιο εύστοχη και με λιγότερο κόστος.
- Τη βελτιστοποίησή τους
- Την περαιτέρω ανάπτυξή τους
- Τη μεταβολή παραμέτρων για την πρόβλεψη τη συμπεριφοράς τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα

Βασικό πλεονέκτημα της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης είναι η πρόβλεψη της λειτουργίας ή των επιδόσεων ενός συστήματος, με πολύ καλή ακρίβεια, χωρίς να χρειάζεται η κατασκευή του ίδιου του συστήματος και η χρήση του ως πειραματικό, διαδικασία η οποία απαιτεί πολύ χρόνο και μεγάλη αρχική επένδυση.

1.2 Μοντέλα προσομοίωσης κινητήρων

Βασικός στόχος της μοντελοποίησης των μηχανών είναι η καλύτερη κατανόηση των φυσικών και χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία τους. Για την προσομοίωση της λειτουργίας των κινητήρων χρησιμοποιούνται μοντέλα που περιγράφουν τα φαινόμενα (1):

- ✓ Των θερμοδυναμικών μεταβολών εντός του κυλίνδρου
- ✓ Της ροής των ρευστών
- ✓ Της μεταφοράς θερμότητας
- ✓ Της καύσης
- ✓ Του σχηματισμού των εκπεμπόμενων αερίων

Τα μοντέλα αυτά είναι δύο ειδών:

- Ρευστοδυναμικά, που βασίζονται στην ανάλυση της κίνησης του ρευστού στη μηχανή και λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα γεωμετρίας της ροής, γι αυτό και χαρακτηρίζονται ως πολυδιάστατα
- Θερμοδυναμικά, που βασίζονται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας

1.3 MOtor THERmodynamics

Το MO.THER. είναι ένα θερμοδυναμικό μοντέλο πρόβλεψης επιδόσεων κινητήρων. Είναι μοντέλο "όγκων ελέγχου", μηδενικής διάστασης (0D), δηλαδή θεωρούμε ότι τα διάφορα στοιχεία της μηχανής (μηχανοστάσιο, περιβάλλον, κύλινδρος, πολλαπλή εισαγωγής και πολλαπλή εξαγωγής) αντιστοιχίζονται σε όγκους ελέγχου, με ομοιόμορφες ιδιότητες εντός των ορίων τους και σταθερό ρυθμό μεταβολής σε κάθε χρονικό βήμα ("ωσεί-σταθερός", "quasi-steady"). Οι διαφορετικοί όγκοι ενώνονται μεταξύ τους μέσω βαλβίδων και θυρίδων, η ροή μέσα από τις οποίες θεωρείται επίσης ωσεί-σταθερή (2; 3). Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος εισάγονται στην προσομοίωση μέσα από τους χάρτες επίδοσής τους.

1.3.1 Βασικές εξισώσεις στο MO.THER.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας εκφράζεται συναρτήσει των παρακάτω μεγεθών, μετά από επίλυση της εξίσωσης της διατήρησης ενέργειας:

$$\dot{T} = f(\dot{U}, \dot{H}, \dot{\phi}, \dot{Q}, \dot{W}) \quad (1)$$

Όπου:

- ✓ \dot{U}, \dot{H} : οι ρυθμοί μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας και της ενθαλπίας αντίστοιχα δίνονται από στοιχεία για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των μειγμάτων αέρα-καυσίμου
- ✓ $\dot{\phi}$: ο ρυθμός μεταβολής του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα δίνεται αθροίζοντας τις ανταλλαγές καυσίμου και αέρα κάθε χρονική στιγμή
- ✓ \dot{Q} : ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας εξαρτάται από την ενέργεια που απελευθερώνει το καύσιμο και από τις απώλειες λόγω της μετάδοσης της θερμότητας
- ✓ \dot{W} : η ροή του έργου εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής του όγκου ελέγχου που βασίζεται στη γεωμετρία του κινητήρα και τη στιγμιαία πίεση

Η ροή μάζας μεταξύ των συνδεδεμένων όγκων ελέγχου εκφράζεται συναρτήσει των παρακάτω μεγεθών μέσα από την επίλυση της σχέσης για μονοδιάστατη συμπιεστή ροή σε μία στένωση αγωγού:

$$\dot{m} = f(P, T, g, R, A_{flow}, C_d) \quad (2)$$

Όπου:

- ✓ P, T : στιγμιαίες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας κάθε όγκου
- ✓ g, R : συντελεστής αδιαβατικής μεταβολής και σταθερά των αερίων αντίστοιχα - ιδιότητες του μείγματος
- ✓ A_{flow} : διατομή της στενώσεως
- ✓ C_d : συντελεστής ροής που ισούται με το λόγο:

$$\frac{\text{Πραγματική ροή μάζας}}{\text{Θεωρητική παροχή υπολογισμένη βάσει της πραγματικής διατομής}} \quad (3)$$

Επίσης εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης μάζας σε κάθε χρονικό βήμα για τις ανταλλαγές που λαμβάνουν χώρα σε κάθε όγκο:

$$\dot{m} = \sum \dot{m}_j \quad (4)$$

Τέλος εφαρμόζεται η καταστατική εξίσωση για τον υπολογισμό της πίεσης:

$$P = f(m, R, T, V) \quad (5)$$

Όπου:

- ✓ m, R, T, V : η στιγμιαία μάζα, σταθερά των αερίων, θερμοκρασία και ο στιγμιαίος όγκος

Οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται αριθμητικά για τον κάθε όγκο, για μοίρες γωνίας στροφάλου από 0.1° και πάνω. Τέλος χρησιμοποιούνται υπό-μοντέλα για την καύση, τις απώλειες λόγω τριβών και τη μεταφορά θερμότητας.

Στο περιβάλλον εργασίας του MO.THER., για την ίδια, τυχαία μηχανή που επιλέγουμε, μπορούν να προσομοιωθούν διαφορετικές καταστάσεις, διαφορετικά φορτία και διαφορετικοί

τρόποι σύνδεσης των στοιχείων μεταξύ τους. Μπορούν δηλαδή να γίνουν αλλαγές στη δομή ή τη ρύθμιση του κινητήρα και να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.

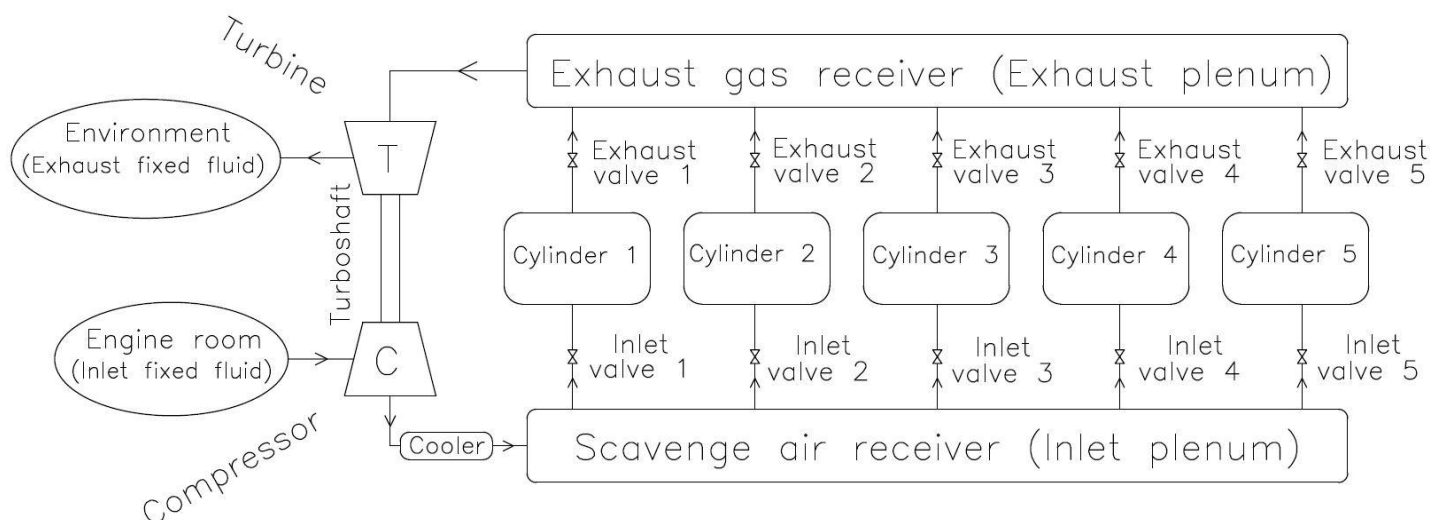
1.4 Ο κινητήρας L16/24 στο MO.THER.

Η μηχανή L16/24 της MAN έχει προσομοιωθεί σε προηγούμενο στάδιο από το Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας (ENM) για τα φορτία 86%, 75.9%, 50.8%, 40.1% και 25.8%. Τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1. Βασικά χαρακτηριστικά μοντελοποιημένης μηχανής

MAN L16/24	
Κύλινδροι	5
Διάμετρος εμβόλου	160 mm
Διαδρομή εμβόλου	240 mm
Μέγιστη ισχύς	500 kW
Μέγιστες στροφές	1200 rpm
Μέση ταχύτητα εμβόλου	9.6 m/sec
Μέση πραγματική πίεση στο μέγιστο φορτίο	20.7 bar
Υπερπληρούμενος	

Η δομή του κινητήρα στο MO.THER. είναι ίδια για όλα τα φορτία και φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Εικόνα 1. Δομή κινητήρα στο MO.THER.

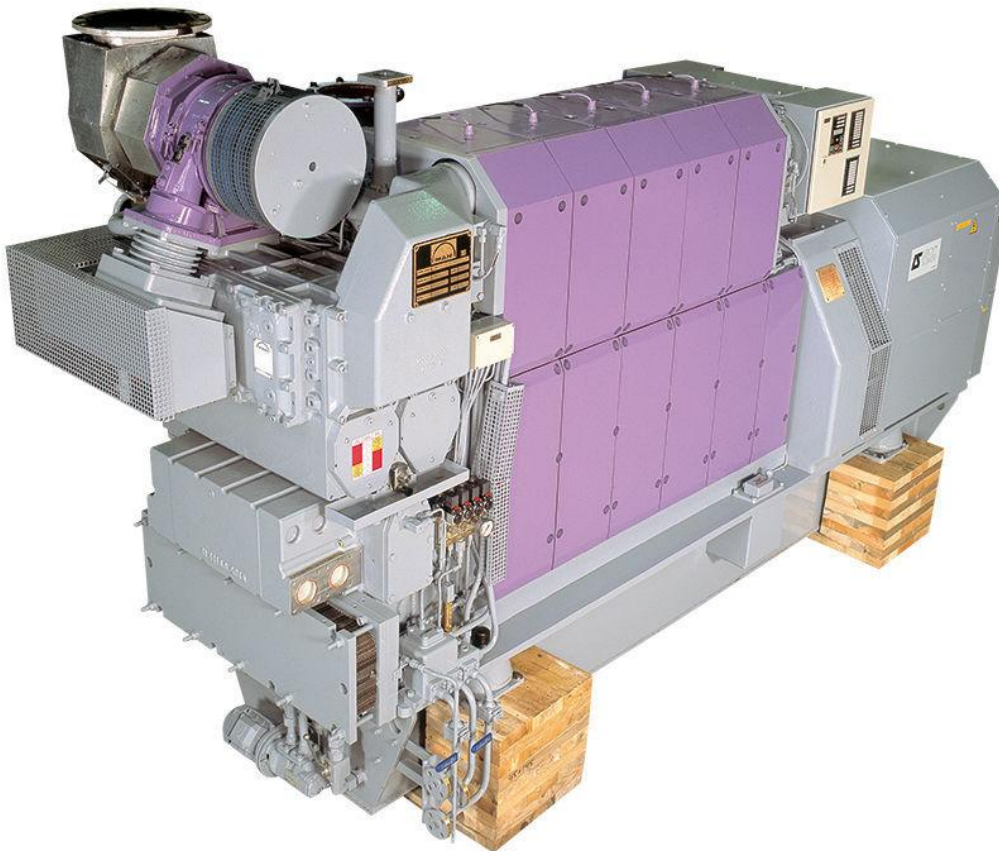
Πιο συγκεκριμένα, στο περιβάλλον του MO.THER. περιέχονται:

- 5 σύνολα που αποτελούνται από 1 κύλινδρο, 1 βαλβίδα εισαγωγής και 1 εξαγωγής το καθένα
- Πολλαπλή εισαγωγής, η οποία συνδέεται με τους κυλίνδρους μέσω των βαλβίδων εισαγωγής
- Πολλαπλή εξαγωγής, η οποία συνδέεται με τους κυλίνδρους μέσω των βαλβίδων εξαγωγής
- 1 σύνολο αποτελούμενο από το συμπιεστή, το στρόβιλο και τον κοινό τους άξονα. Συνδέεται με τις πολλαπλές εισαγωγής και εξαγωγής.

- Το στροφαλοφόρο άξονα
- 2 ρευστά με σταθερές ιδιότητες που αντιστοιχούν στο μηχανοστάσιο και το περιβάλλον.

Οι κύλινδροι, οι πολλαπλές εισαγωγής-εξαγωγής και τα ρευστά με σταθερές ιδιότητες θεωρούνται αποδέκτες ροής, ενώ οι βαλβίδες, το ψυγείο -που περιλαμβάνεται στο συμπιεστή- ο συμπιεστής και ο στρόβιλος θεωρείται ότι ελέγχουν τη ροή.

Η έννοια της προσομοίωσης βλαβών και η σύγκριση με την πραγματική κατάσταση προσφέρουν τη δυνατότητα αλλαγής των εκάστοτε εμπλεκόμενων παραμέτρων σε κάθε βλάβη, αφήνοντας ίδιες όλες τις υπόλοιπες, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης και της λειτουργίας του κινητήρα, με βλάβη ή χωρίς.



Εικόνα 2. Η γεννήτρια L16/24 της MAN

Κεφάλαιο 2. Προσομοίωση βλαβών στο MO.THER.

Η προσομοίωση περιλάμβανε 10 βλάβες που συχνά εμφανίζονται σε κινητήρες Diesel. Για κάθε βλάβη, εξετάστηκαν 2 περιπτώσεις, που αντιστοιχούσαν σε μικρού και μεγάλου μεγέθους βλάβη αντίστοιχα. Για τη σύγκριση με την κατάσταση χωρίς βλάβη, αυξήσαμε το εγγεόμενο καύσιμο. Αυτό έγινε γιατί σε περίπτωση βλάβης όπου συνεχίζεται κανονικά η λειτουργία της μηχανής, η παραγόμενη ισχύς θέλουμε να ναι ίδια με την αρχική κατάσταση, για να επιτύχουμε την ίδια ταχύτητα, για παράδειγμα, στο πλοίο.

Η προσομοίωση έγινε για τα 3 υψηλότερα φορτία του κινητήρα που ήταν διαθέσιμα: 86%, 75.9% και 50.8%. Ως υψηλά φορτία θεωρήθηκαν τα δύο πρώτα, ενώ το 50.8% αντιπροσωπεύει τα χαμηλά φορτία. Επίσης έγινε προσομοίωση για ορισμένες βλάβες σε χαμηλότερο φορτίο - 40.1% - ώστε να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματά τους σε σχέση με το φορτίο 50.8%. Επειδή η L16/24 όμως χρησιμοποιείται συνήθως ως γεννήτρια και το φορτίο 50% ξεπερνιέται προς τα κάτω σε σπάνιες περιπτώσεις, το φορτίο 40.1% δεν συμπεριλήφθηκε στα αποτελέσματα της προσομοίωσης που παραθέτουμε στη συνέχεια.

Οι βλάβες που προσομοιώθηκαν είναι:

2.1 Βραδυπορία - Προπορεία έγχυσης καυσίμου

2.1.1 Περιγραφή συστήματος μεταφοράς και έγχυσης καυσίμου

Το σύστημα καυσίμου χωρίζεται σε 3 κύρια μέρη:

1. Υποσύστημα μεταφοράς
2. Υποσύστημα καθαρισμού και προετοιμασίας για την εισαγωγή στον κύλινδρο
3. Υποσύστημα παροχής και έγχυσης

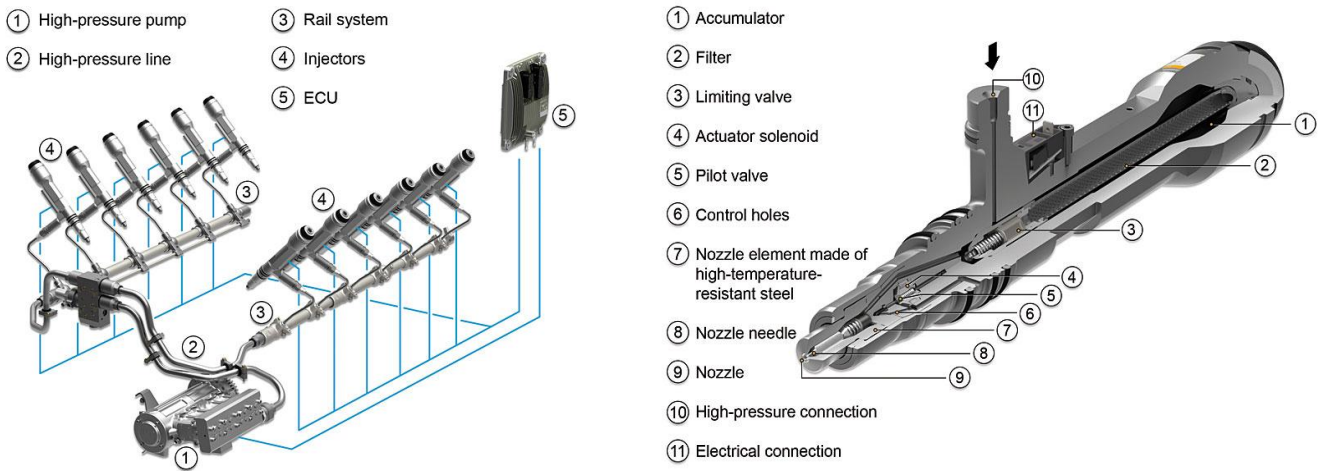
Το καύσιμο βρίσκεται αποθηκευμένο στις δεξαμενές πετρελαίου. Το μέρος που πρόκειται να καταναλωθεί αρχικά μεταφέρεται στις δεξαμενές κατακαθίσεως (settling tanks), όπου απομακρύνονται στερεά μικροσωματίδια, η λάσπη των καταλοίπων και το νερό που μπορεί να περιέχει υπό μορφή γαλακτώματος. Σ' αυτή τη δεξαμενή, το βαρύ, κυρίως, καύσιμο θερμαίνεται και τα πρόσθετα που δε μπορούν να καούν, μένουν στον πυθμένα της δεξαμενής και απομακρύνονται μέσω αντλίας (sludge pump). Στη συνέχεια το καύσιμο περνάει μέσα από διαχωριστές, όπου φυγοκεντρίζεται και μεταφέρεται στη δεξαμενή ημερήσιας καταναλώσεως (service tank), μέσω αντλιών οι οποίες είναι συχνά εφοδιασμένες με φίλτρο.

Από τη δεξαμενή ημερήσιας κατανάλωσης, το βαρύ καύσιμο μεταφέρεται σε προθερμαντήρα, όπου θερμαίνεται για να συνεχίσει στο μετρητή ιξώδους. Πριν από τον μετρητή, το καύσιμο περνάει από το τελευταίο φίλτρο (4). Μόλις η θερμοκρασία του καυσίμου γίνει κατάλληλη, αυτό οδηγείται σε σωληνώσεις υψηλής πίεσης (common rail pipes), μέσω αντλιών υψηλής πίεσης. Έτσι όλοι οι κύλινδροι δέχονται καύσιμο ίδιας πίεσης, το οποίο μετά το common rail μεταφέρεται στον εγχυτήρα. Όπως γίνεται φανερό, το όλο σύστημα περιλαμβάνει αρκετές αντλίες που είναι υπεύθυνες για την κυκλοφορία του καυσίμου προς τους κυλίνδρους.

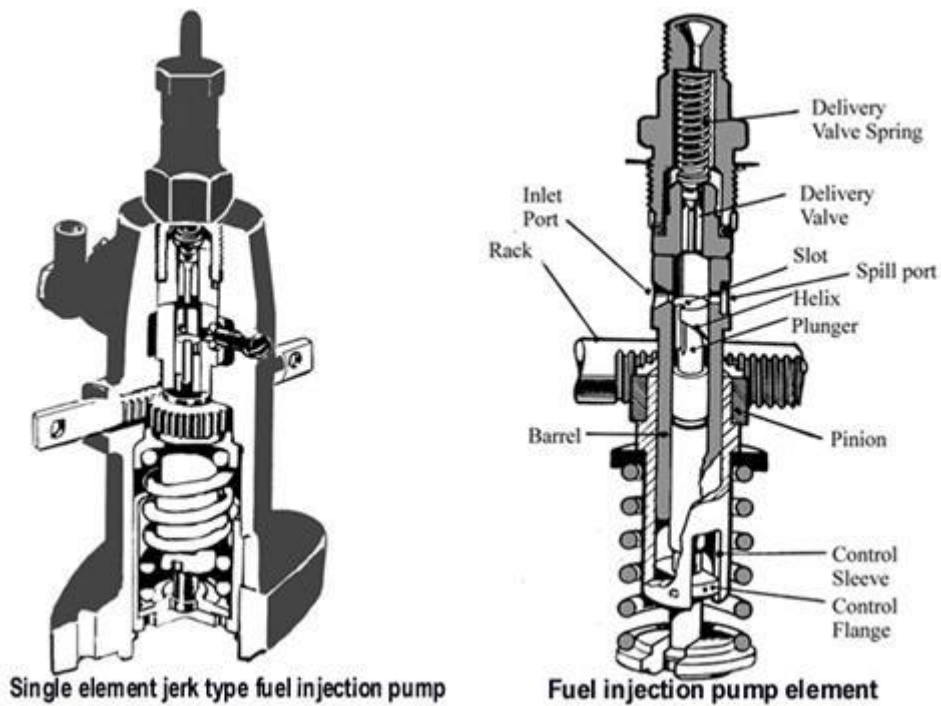
Η στιγμή της έναυσης του μείγματος είναι πολύ σημαντική τόσο για την απόδοση της καύσης, όσο και για την παραγόμενη ισχύ. Τα διαγράμματα της πίεσης του κυλίνδρου σε σχέση με τη γωνία στροφάλου μπορούν να δώσουν σημαντικά στοιχεία για προβλήματα που αφορούν τη στιγμή της έναυσης.

Οι δύο παραπάνω βλάβες σχετίζονται με την καύση και αφορούν κυρίως τη λειτουργία της αντλίας έγχυσης καυσίμου ή του εγχυτήρα. Η ποσότητα του καυσίμου και η σωστή χρονική στιγμή έγχυσης είναι οι δύο σημαντικότερες παράμετροι για αποδοτικότερη καύση. Η πρώτη

ελέγχεται μέσω του κανόνα καυσίμου, συχνά χειροκίνητα. Μεγάλο ρόλο παίζει και η αξιοπιστία του συστήματος έγχυσης, ώστε να μην υπάρχουν διαρροές και η έγχυση να σταματάει χωρίς επίσταση (3). Ο χρονισμός της έγχυσης ελέγχεται μέσω του εκκεντροφόρου άξονα για τον συγκεκριμένο κινητήρα. Μέσω, αυτού ενεργοποιείται το έμβολο της αντλίας τη στιγμή της έγχυσης και μέσω ενός κύματος πίεσης, περίπου 1200 bar, ανοίγει η ακίδα του εγχυτήρα και εισάγεται καύσιμο στον κύλινδρο. Τυχών λανθασμένος χρονισμός του εκκεντροφόρου ή πιθανή σχετική περιστροφή των έκκεντρών του έχει ως αποτέλεσμα την έγχυση του καυσίμου σε μη βέλτιστη χρονική στιγμή. Στις ηλεκτρονικές μηχανές, ο χρονισμός των αντλιών ελέγχεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων. Οπότε η αντίστοιχη βλάβη σε τέτοιες μηχανές είναι η λανθασμένη χρονική επιλογή της έγχυσης του καυσίμου.



Εικόνες 3 και 4. Σωληνώσεις υψηλής πίεσης (common rail pipes) και εγχυτήρας ηλεκτρονικά ελεγχόμενος (5)



Εικόνα 5. Αντλία έγχυσης καυσίμου (χρονισμός ελεγχόμενος από εκκεντροφόρο άξονα) (6)

2.1.2 Βλάβες που εμφανίζονται στις αντλίες πετρελαίου (μεταφοράς ή έγχυσης καυσίμου):

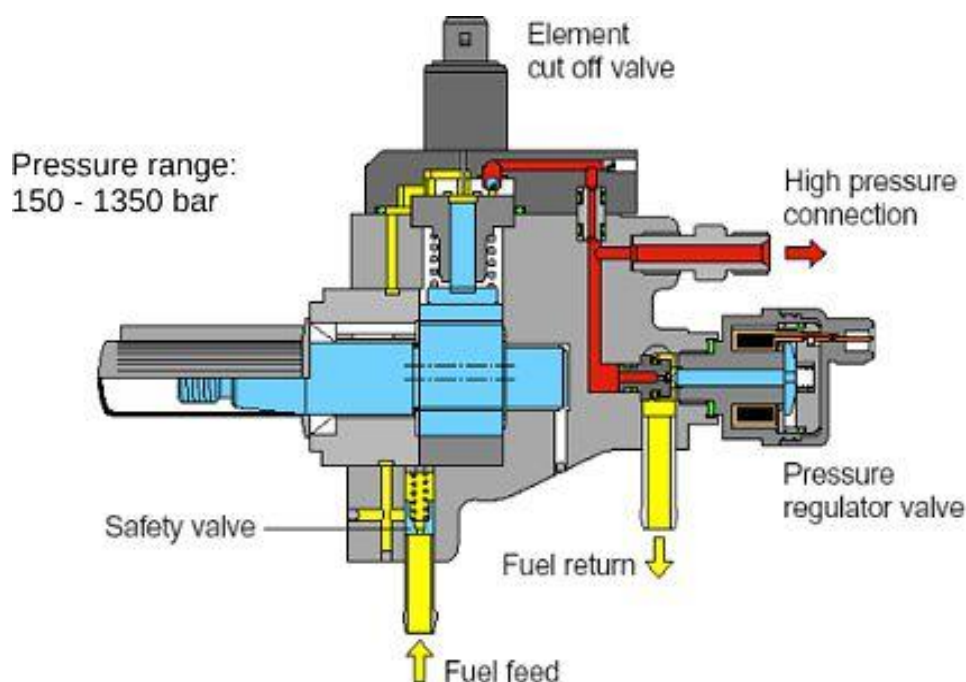
Ελατήρια εσωτερικού αντλίας

Έχει παρατηρηθεί αστοχία των ελατηρίων στο εσωτερικό της αντλίας έγχυσης, καθώς λειτουργούν σε συνθήκες πολύ υψηλής πίεσης - 1200 bar - και υποφέρουν συχνά από σπηλαίωση, λόγω κυμάτων πίεσης μεταξύ του common rail και της αντλίας (7). Πιθανή αστοχία των ελατηρίων ή μείωση της ελαστικότητάς τους, δηλαδή της δυνατότητας επαναφοράς, μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένο χρονοισμό εισαγωγής του καυσίμου στον κύλινδρο ή αισθητή μείωση της ποσότητάς του.

Σπηλαίωση

Από σπηλαίωση κινδυνεύουν επίσης ο εμβολίσκος και η βαλβίδα αναρρόφησης της αντλίας, όπου η πίεση γίνεται χαμηλότερη, λόγω των μεγάλων ταχυτήτων που παρατηρούνται. Αποτέλεσμα είναι η μείωση της ικανότητας αναρρόφησης της αντλίας, που σημαίνει μειωμένη ροή καυσίμου προς τον κύλινδρο. Ακόμη λόγω της διάβρωσης από τη σπηλαίωση, μικρά κομμάτια που αποκολλώνται από μέρη της αντλίας μπορεί να φράξουν τις οπές του εγχυτήρα ή να εμποδίσουν την κίνηση του ελατηρίου και του εμβολίσκου (8). Αν η διάβρωση προχωρήσει περαιτέρω, θα προκληθούν διαρροές πετρελαίου κι η πίεσή του θα ελαττωθεί σημαντικά.

Η σπηλαίωση γενικότερα γίνεται αντιληπτή από το θόρυβο και τις δονήσεις που προκαλεί, ενώ μειώνει σημαντικά την απόδοση της αντλίας. Σε περίπτωση που η σπηλαίωση ανιχνευθεί νωρίς, πρέπει να μειωθεί η ταχύτητα της αντλίας (9).



Εικόνα 6. Αντλία πετρελαίου υψηλής πίεσης (10)

Ενέργειες για να αποφευχθεί η σπηλαίωση:

- ✓ Αύξηση της πίεσης του συστήματος
- ✓ Αύξηση της κυκλοφορίας του ρευστού
- ✓ Μείωση της θερμοκρασίας του συστήματος

Βαλβίδα αναρρόφησης

Η βαλβίδα αναρρόφησης είναι υπεύθυνη για την εισαγωγή του καυσίμου στην αντλία. Η ροή του καυσίμου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πίεση στην έξοδο της αντλίας. Στην περίπτωση που η βαλβίδα είναι προβληματική -για παράδειγμα κολλημένη- η πίεση του καυσίμου θα είναι χαμηλή, δημιουργώντας προβλήματα στην καύση.

Κατακαθίσεις (Sludge)

Μία πολύ συχνή αιτία βλαβών των αντλιών και των φίλτρων του καυσίμου είναι οι κατακαθίσεις. Συχνά ευθύνονται η προμήθεια πετρελαίου κακής ποιότητας, η δημιουργία στρωματώσεων πετρελαίου εντός των δεξαμενών ημερήσιας κατανάλωσης ή η χαμηλή στάθμη τους, που έχουν σαν συνέπεια η αντλία να αναρροφά τις κατακαθίσεις. Έτσι η αντλία κινδυνεύει να μπλοκαριστεί (4).

2.1.3 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση, υποθέσαμε ότι έχουμε βραδύτερη και νωρίτερη έγχυση καυσίμου κατά 4 και 6 μοίρες γωνίας στροφάλου. Για μικρότερες γωνίες τα αποτελέσματα των βλαβών ήταν αμελητέα, ενώ μεγαλύτερες γωνίες είναι δύσκολο να συναντήσουμε, καθώς τότε έχουμε πολύ σημαντική βλάβη και η λειτουργία του κινητήρα πιθανώς να αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα (knocking ή misfiring). Στο (11) προτείνεται νωρίτερη και βραδύτερη έγχυση καυσίμου κατά 6 μοίρες γωνίας στροφάλου.

2.2 Κακής ποιότητας καύσιμο

Ο κινητήρας χρησιμοποιεί καύσιμο Diesel. Η προμήθειά του καυσίμου γίνεται συνήθως από διαφορετικά σημεία ανά τον κόσμο, με αποτέλεσμα η ποιότητά του να μην είναι σταθερή. Κακή ποιότητα συνεπάγεται προβληματική καύση, η οποία καταρχάς χαρακτηρίζεται από υστέρηση ανάφλεξης, που εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό κετανίου του καυσίμου. Στη συνέχεια εντοπίζεται υψηλότερος ρυθμός καύσης και σε λανθασμένο χρονικά σημείο, καθώς το καύσιμο είναι ασταθές λόγω σύστασης ή προσθήκης πολλών άκαυστων σωματιδίων στο περιεχόμενό του (μεταλλικά άλατα ή λόγω της παρουσίας καταλύτη κατά την κλασματοποίηση του αργού πετρελαίου). Λόγω του απότομου ρυθμού καύσης οι πιέσεις στον κύλινδρο αυξάνονται σημαντικά, με ορατό τον κίνδυνο κτυπήματος του κινητήρα (knocking), που χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλές πιέσεις και στο διάγραμμα των πιέσεων παρουσιάζονται σαν καρδιογράφημα. Τέλος έχουμε μεγαλύτερη διάρκεια καύσης, που σημαίνει πολύ χαμηλότερη εκμετάλλευση του ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου.

Στην προσομοίωση στο θερμοδυναμικό μοντέλο του MO.THER. εστιάζουμε στην κακή καύση. Ωστόσο το καύσιμο κακής ποιότητας έχει διαβρωτική επίδραση σε όλα τα μέρη του συστήματος του καυσίμου, στις σωληνώσεις μεταφοράς του, στις αντλίες, οι οποίες, και λόγω της υψηλότερης πίεσης που έχουν να διαχειριστούν, υφίστανται μια σειρά από καταπονήσεις. Ακόμα τα περισσότερα στοιχεία της μηχανής επηρεάζονται από επικαθίσεις του άκαυστου περιεχομένου ενός κακής ποιότητας καυσίμου. Οι ανωμαλίες που προκαλούνται από τέτοιου είδους καύσιμο μπορούν να εμφανιστούν και λόγω ύπαρξης βλαβών στο σύστημα των διαχωριστών ή των φίλτρων καυσίμου.

2.2.1 Βλάβες που συνδέονται με το καύσιμο και την καύση του

Εγχυτήρες

Οι εγχυτήρες έρχονται σε επαφή με πολύ υψηλές θερμοκρασίες λόγω καύσης, αλλά και με τα προϊόντα της. Συνεπώς επικαθίσεις άνθρακα μπορεί να βουλώσουν μερικώς ή ολικώς τον

εγχυτήρα. Σε περίπτωση μερικώς βουλωμένου εγχυτήρα, η ποσότητα του καυσίμου παραμένει σταθερή, καθώς εξαρτάται από τη ρύθμιση που έχει γίνει για να επιτυγχάνεται συγκεκριμένη ισχύς. Συνεπώς οι μερικώς βουλωμένες οπές προκαλούν αύξηση της ταχύτητας του ψεκασμού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία hot spots στην επιφάνεια του εμβόλου, καίγοντάς το, λόγω αδυναμίας απαγωγής θερμότητας από το νερό ή το λάδι που μπορεί να παίζει ρόλο ψυκτικού στην κορώνα του εμβόλου. Σε περίπτωση που ο εγχυτήρας φτάνει σε σημείο να μη μπορεί να ρίξει καύσιμο στον κύλινδρο, οδηγούμαστε σε αποτυχία καύσης (Misfiring) (12). Η μικρότερη διάμετρος των φραγμένων οπών του εγχυτήρα αυξάνει την πίεση στο εσωτερικό του, οδηγώντας σε ρηγματώσεις (3).

Θερμοκρασία - ιξώδες καυσίμου

Οι μηχανές που καίνε Diesel δε χρειάζονται προθερμαντήρες για το καύσιμο, καθώς αποθηκεύεται και εγχέεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε σχέση με το κοινό ναυτιλιακό καύσιμο, αυτό είναι ένα πλεονέκτημα, καθώς αποφεύγονται βλάβες που συνδέονται με τη θέρμανση του καυσίμου, όπως είναι η προβληματική λειτουργία του προθερμαντήρα και η μη βέλτιστη επιλογή θερμοκρασίας που επηρεάζει άμεσα το ιξώδες.

Αντίθετα, το βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο χρειάζεται θέρμανση ώστε να φτάσει σε κατάλληλο ιξώδες και να εισαχθεί στον κύλινδρο. Υπερβολικά ψηλή θερμοκρασία σημαίνει πολύ μικρό ιξώδες και ενέχει τον κίνδυνο εξάτμισης μέσα στον εγχυτήρα, ενώ μειώνεται αισθητά η πίεση του καυσίμου, η οποία επηρεάζει σημαντικά το διασκορπισμό του καυσίμου (για παράδειγμα το μήκος του σπρέι). Επίσης η μεγαλύτερη θερμοκρασία ευθύνεται για συγκέντρωση θερμικών τάσεων στον εγχυτήρα. Πολύ χαμηλή θερμοκρασία από την άλλη αυξάνει το ιξώδες, δημιουργώντας προβλήματα ροής στο καύσιμο. Και σ αυτή την περίπτωση η διασπορά του καυσίμου δεν είναι βέλτιστη, με κακές συνέπειες στην καύση (9; 3).

Επιπτώσεις κακής ποιότητας καυσίμου και υψηλών θερμοκρασιών στα έμβολα και τα ελατήρια

Γενικότερα οι μεγάλες θερμοκρασίες πρέπει να αποφεύγονται στον κύλινδρο, γιατί καταπονούν το έμβολο και τα ελατήρια. Εκτός από τα hot spots που αναφέρθηκαν πριν, τα ελατήρια του εμβόλου, και συγκεκριμένα το 1ο, είναι ευάλωτα στις υψηλές θερμοκρασίες, καθώς αν ξεπεραστούν κάποια όρια, το λάδι χάνει μέρος της λιπαντικής του ικανότητας και το ελατήριο κολλάει και φθείρεται έντονα, όπως και το χιτώνιο (13).

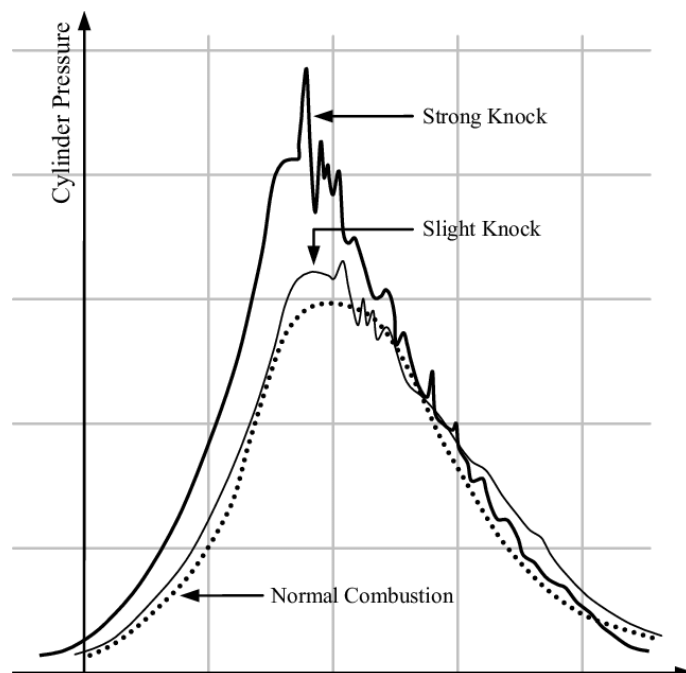
Ακόμα το "κακό" καύσιμο, που είτε μπορεί να έχει χαμηλό αριθμό κετανίου είτε να υπάρχει πρόβλημα στον καθαρισμό του - για παράδειγμα φραγμένα φίλτρα καθαρισμού είτε πολύ γρήγορη ροή του πετρελαίου μέσα από αυτά - έχουν επίσης ως αποτέλεσμα το κάψιμο της κορώνας του εμβόλου λόγω καύσης στην επιφάνειά της καυσίμου κακής ποιότητας, η οποία δημιουργεί τοπικά πολύ υψηλές θερμοκρασίες (14).

Κρουστική καύση

Το φαινόμενο της κρουστικής καύσης - κτυπήματος του κινητήρα αποτελεί κίνδυνο για τη λειτουργία του. Γι αυτό το λόγο οι κύλινδροι είναι εφοδιασμένοι με μετρητές πίεσης, οι οποίοι όταν εντοπίσουν μεγάλες πιέσεις ή μεγάλο ρυθμό αύξησής τους, ειδοποιούν για κίνδυνο κτυπήματος.

Στους κινητήρες diesel, η έναυση του μείγματος συμβαίνει μέσα από την αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης στον κύλινδρο, καθώς ο αέρας και το καύσιμο αναμειγνύονται και συμπιέζονται, όταν το έμβολο κατευθύνεται προς το άνω νεκρό σημείο. Χαρακτηρίζονται δηλαδή από αυτανάφλεξη του μείγματος. Όταν η αυτανάφλεξη δε γίνεται με ελεγχόμενο τρόπο, δηλαδή σε περίπτωση καυσίμου κακής ποιότητας ή πολύ υψηλών θερμοκρασιών

στον κύλινδρο, η έναυση του μείγματος γίνεται ταυτόχρονα σε διαφορετικά σημεία του θαλάμου καύσεως με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κρουστικά κύματα πίεσης που καταστρέφουν το έμβολο, τους εγχυτήρες, την κεφαλή του κυλίνδρου, τις βαλβίδες.



Εικόνα 7. Διαγράμματα πίεσης κινητήρα σε κανονική λειτουργία και σε κτύπημα (15)

Παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση κρουστικής καύσης:

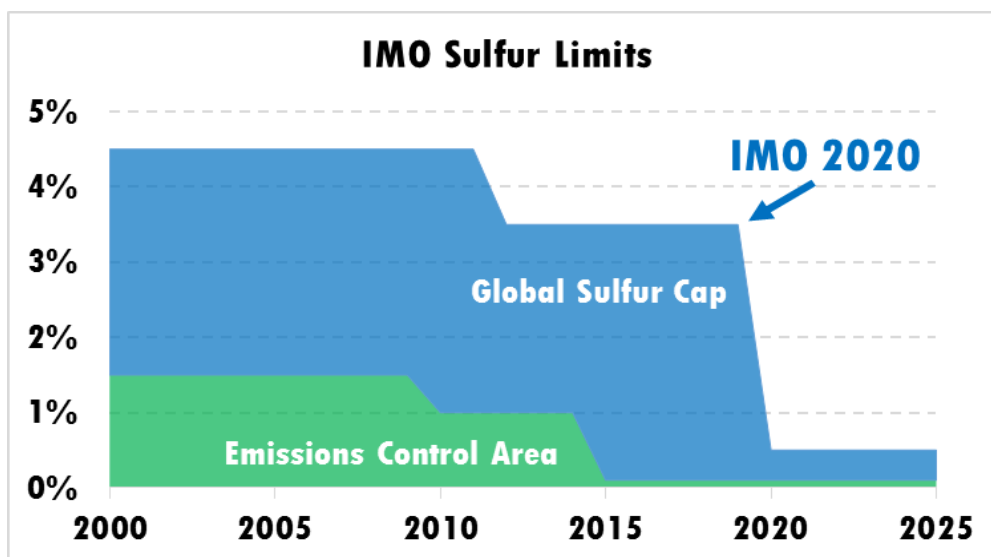
- ✓ Σχεδίαση θαλάμου καύσης, η οποία πρέπει να αποθαρρύνει τη δημιουργία hot-spot
- ✓ Λόγος αέρα καυσίμου: όσο πιο πλούσιο το μείγμα τόσο περισσότερος ο κίνδυνος του knocking
- ✓ Καύσιμο κακής ποιότητας συνεπάγεται χαμηλή αντίσταση στην κρουστική καύση, καθώς όπως και η αργοπορία στην έγχυση καυσίμου, δημιουργούν "λίμνες" καυσίμου μέσα στον κύλινδρο, το οποίο αργά να αυταναφλεγεί, αλλά μόλις γίνει η έναυση, η αύξηση της πίεσης είναι πολύ γρηγορότερη.
- ✓ Θερμοκρασία του αέρα πλήρωσης κυλίνδρου: όσο μεγαλύτερες είναι οι θερμοκρασίες που επικρατούν στον κύλινδρο - που εξαρτώνται από την θερμοκρασία εισαγωγής του αέρα σε μεγάλο βαθμό - τόσο περισσότερο ευνοείται η κρουστική καύση.
- ✓ Η έγχυση του καυσίμου και η ομοιομορφία του λόγου αέρα-καυσίμου: αν ο διασκορπισμός δεν είναι βέλτιστος ή παρατηρείται μεγάλη ανομοιομορφία - συγκέντρωση περισσότερου αέρα από τη μία ή καυσίμου από την άλλη, εντός του θαλάμου καύσης- τότε δημιουργούνται hot-spots στην κορώνα του εμβόλου ή ακόμα και στα τοιχώματα του κυλίνδρου.
- ✓ Λόγος συμπίεσης: η τάση για κρουστική καύση είναι μεγαλύτερη όσο επικρατούν μεγαλύτερες πιέσεις στον κύλινδρο.

Καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (ULSFO)

Η αλλαγή στα επιτρεπόμενα όρια των εκπεμπόμενων ρύπων στη ναυτιλία τα τελευταία χρόνια επηρεάζει σημαντικά τους κινητήρες. Από τη μία γίνεται προσπάθεια για εισαγωγή νέων τεχνολογιών που προωθούν το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και μέχρι στιγμής συνδέονται ως επί το πλείστον με τα πλοία μεταφοράς LNG, ενώ από την άλλη πολλά πλοία έχουν αρχίσει να εφοδιάζονται με συσκευές - αποθιωτές των καυσαερίων (scrubbers).

Ωστόσο το υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης, όσο και οι αμφιβολίες για τη μελλοντική αύξηση της τιμής των "καθαρότερων" καυσίμων από το 2020, οδηγούν σε μία 3η διέξοδο. Τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, που χρησιμοποιούνται σήμερα κυρίως από πλοία που εισέρχονται σε περιοχές ελέγχου εκπομπών ρύπων (Sulfur Emission Control Areas). Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει πιστοποίηση για αυτού του είδους το καύσιμο από τον IMO, γι αυτό και οι κατασκευαστές συστήνουν ιδιαίτερη προσοχή στην προμήθειά του, καθώς πρόκειται για ένα πολύ ασταθές καύσιμο.

Ακόμα, η μειωμένη περιεκτικότητα σε θείο, οδηγεί με λιγότερες τριβές των κινούμενων μερών - ελατήρια και χιτώνια - με αποτέλεσμα να καταστρέφεται το φιλμ του λαδιού και να τρώγονται τα έμβολα και τα ελατήρια με το χιτώνιο.



Εικόνα 8. Όρια εκπομπών οξειδίων του θείου (16)

Νερό στον κύλινδρο

Το αργό πετρέλαιο, και ορισμένες φορές τα αποστάγματά του, περιέχουν θαλασσινό νερό. Ακόμα, σε περίπτωση αστοχίας υλικού - ραγισμένη κεφαλή κυλίνδρου, σπασμένη έδρα βαλβίδας, νερό στο καύσιμο λόγω κακής λειτουργίας των διαχωριστών, διαρροή νερού από τον υδρόψυκτο εγχυτήρα ή από ραγισμένο χιτώνιο - στον κύλινδρο θα εμφανιστεί νερό. Με την έναυση του μείγματος, το νερό θα εξατμιστεί, βάζοντας εμπόδια στην καύση λόγω της παρουσίας ατμού. Στην επόμενη συμπίεση του αέρα μέσα στον κύλινδρο, ο ατμός συμπυκνώνεται λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας. Όταν η πίεση μέσα στον κύλινδρο γίνει χαμηλότερη από την πίεση ατμοποίησης, δημιουργούνται φυσαλίδες κενού. Όταν η πίεση αυξηθεί και πάλι, οι φυσαλίδες σπάζουν και τεράστια κύματα πίεσης καταστρέφουν την επιφάνεια του εσωτερικού του κυλίνδρου και του εμβόλου (12).

Ακόμη το φαινόμενο "hydrolock" είναι συνέπεια της παρουσίας νερού εντός του κυλίνδρου. Ο συμπυκνωμένος ατμός σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας δυσκολεύει την κίνηση του εμβόλου προς το άνω νεκρό σημείο, δημιουργώντας αντίθετες δυνάμεις που απορροφώνται από το διωστήρα, τα κουζινέτα του και το στροφαλοφόρο άξονα. Ως συνέπεια, ο διωστήρας μπορεί να λυγίσει, έχοντας καταστροφικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του κινητήρα. Η σχεδίαση και το υλικό του διωστήρα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποκλείεται το φαινόμενο του λυγισμού από οποιαδήποτε αιτία (13).



Εικόνα 9. Λυγισμός διωστήρα μεγάλου ναυτικού κινητήρα (17)

2.2.2 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση της καύσης κακής ποιότητας καυσίμου μεταβάλλαμε το υπάρχον μοντέλο καύσης της μηχανής, ώστε από μονή S-curve, να γίνει διπλή, με σκοπό η 1η να παρουσιάζει υψηλό ρυθμό καύσης και σύντομη διάρκεια, ενώ η 2η να ξεκινάει λίγες μοίρες γωνίας στροφάλου αργότερα, να χει μικρότερο ρυθμό καύσης και μεγαλύτερη διάρκεια.

Για όλα τα φορτία επιλέξαμε υστέρηση ανάφλεξης και αυξημένη συνολική διάρκεια καύσης κατά 3 και 4 μοίρες.

Σύμφωνα με τους Stringer, Wolfer και Hiroyasu, όπως επίσης αναφέρονται στο (1), για τους κινητήρες υψηλού λόγου συμπίεσης, η υστέρηση ανάφλεξης ενός συνηθισμένου καυσίμου υπολογίζεται στα 0.3-0.5 msec, ενώ για κινητήρες χαμηλού λόγου συμπίεσης στα 1.9-2.6 msec.

Η γεννήτρια L16/24 της MAN έχει λόγο συμπίεσης C.R.=16, που θεωρείται ενδιάμεσος, οπότε παραθέτουμε τους υπολογισμούς που έγιναν για να επιλέξουμε πόσες μοίρες θα αργήσει η έναυση του μείγματος:

Στο φορτίο 86%:

- ✓ οι στροφές του στροφαλοφόρου άξονα είναι 1136 rpm
- ✓ και αντιστοιχούν σε $\frac{1136 \text{ rounds}/\text{min}}{60 \text{ sec}/\text{min}} = 18.93 \text{ rps}$
- ✓ που σημαίνουν $18.93 \text{ rounds}/\text{sec} * 360 \text{ CAD}/\text{round} = 6816 \text{ CAD}/\text{sec}$

Συνεπώς:

- ✓ 3 CAD αντιστοιχούν σε $\frac{3 \text{ CAD}}{6816 \text{ CAD}/\text{sec}} = 0.44 \text{ msec}$
- ✓ 4 CAD αντιστοιχούν σε $\frac{4 \text{ CAD}}{6816 \text{ CAD}/\text{sec}} = 0.59 \text{ msec}$

Οι χρόνοι αυτοί θεωρήθηκαν λογικοί, καθώς αντιστοιχούν στο 40-60% περίπου της φυσιολογικής υστέρησης ανάφλεξης του καυσίμου.

2.3 Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής

2.3.1 Βλάβες που σχετίζονται με τις βαλβίδες εξαγωγής

Οι βαλβίδες εξαγωγής έρχονται σε επαφή με τα θερμά καυσαέρια, τα οποία τις διαβρώνουν λόγω της σύστασης και της θερμοκρασίας τους. Συχνά υποφέρουν από βλάβες, όπως (18):

- Μεταβολή της γεωμετρίας της έδρας ή της βάσης της βαλβίδας, λόγω επικαθίσεων από προϊόντα της καύσης είτε από άκαυστα περιεχόμενα του καυσίμου.
- Οι βαλβίδες εξαγωγής είναι υδρόψυκτες και αν η ψυκτική ικανότητα του νερού είναι χαμηλή, μπορεί να υπερθερμανθούν λόγω αυξημένης θερμοκρασίας κυλίνδρου. Αν μάλιστα η βλάβη στη βαλβίδα είναι μεγάλη (βαθύ ράγισμα), υπάρχει κίνδυνος να πλημμυρίσει ο κύλινδρος ψυκτικό και πρέπει να σταματήσει εντελώς η λειτουργία της μηχανής, ώστε να απομονωθεί ο προβληματικός κύλινδρος (19; 20).
- Βλάβη στο μηχανισμό της βαλβίδας, για παράδειγμα στο πνευματικό ελατήριο που είναι υπεύθυνο για το άνοιγμα και το κλείσιμό της, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ελαττωματική επαφή της με την έδρα είτε το λανθασμένο χρονισμό της.
- Υπερφόρτωση του κινητήρα έχει ως συνέπεια αυξημένες θερμοκρασίες στον κύλινδρο και τη βαλβίδα, προκαλώντας πιθανώς τη διαστολή της.

Για να αποφευχθεί η συγκέντρωση τάσεων σε συγκεκριμένες περιοχές της βάσης της βαλβίδας, στο μίσχο της συχνά τοποθετούνται περύγια, τα οποία λόγω της ροής των καυσαερίων κατά τη διάρκεια που μένει ανοιχτή, την περιστρέφουν οπότε καταπονείται ενιαία (3). Αντί των περυσίων, μπορεί να τοποθετηθεί μηχανισμός περιστροφής της βαλβίδας (13).

Ωστόσο δεν είναι λίγες οι φορές που λόγω της μεγάλης καταπόνησης η βαλβίδα τρώγεται ή καίγεται είτε σπάει ένα τμήμα της βάσης της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε διαρροές από τον κύλινδρο που έχει πρόβλημα, προς την πολλαπλή εξαγωγής.



Εικόνα 10. Βαλβίδες εξαγωγής μετά από αρκετές ώρες χρήσης (21)

Στην παραπάνω εικόνα γίνεται σύγκριση της καταπόνησης 3 βαλβίδων. Στην 1η περίπτωση βλέπουμε τη δημιουργία hot spots, λόγω αυξημένης καταπόνησης σε συγκεκριμένες περιοχές. Στη 2η περίπτωση η βαλβίδα είναι έτοιμη να αστοχήσει. Στην 3η περίπτωση βλέπουμε τη φυσιολογική καταπόνηση της βαλβίδας περιφερειακά.

2.3.2 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση υποθέσαμε ότι η βαλβίδα εξαγωγής παραμένει ανοιχτή συνεχώς τουλάχιστον κατά 1% και 1.5% του μέγιστου ανοίγματός της. Δοκιμάσαμε και μεγαλύτερη διαρροή, ωστόσο η μεγάλη αύξηση της ροής των καυσαερίων προς την πολλαπλή εξαγωγής είχε ως συνέπεια ο στρόβιλος να ισορροπεί σε σημείο έξω από το χάρτη του.

2.4 Διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων ή χιτωνίου

2.4.1 Ρόλος ελατηρίων εμβόλου

Για την απομόνωση του θαλάμου καύσεως του κυλίνδρου, το έμβολο είναι εφοδιασμένο περιφερειακά με δύο συνήθως ελατήρια στεγάνωσης και ένα ελατήριο απόξεσης. Η κίνηση του εμβόλου καταπονεί τα ελατήρια, τα οποία έρχονται συνεχώς σε επαφή με το χιτώνιο και τις αυλακώσεις του εμβόλου, με αποτέλεσμα να φθείρονται. Επίσης τα προϊόντα της καύσης δημιουργούν επικαθίσεις πάνω στα ελατήρια και τα διαβρώνουν, αυξάνοντας περισσότερο τις τριβές με το χιτώνιο, προκαλώντας ακόμα και σπάσιμο των ελατηρίων (19; 12).

Τα ελατήρια του εμβόλου, εκτός από τη στεγανοποίηση του κυλίνδρου, παίζουν σημαντικό ρόλο και στην ομοιόμορφη κατανομή του λαδιού στα τοιχώματα του κυλίνδρου, λόγω της παλινδρομικής τους κίνησης, ενώ το ελατήριο απόξεσης "τραβάει" την περίσσεια λαδιού, αν υπάρχει. Ακόμη μεταφέρουν τη θερμότητα από το έμβολο στο χιτώνιο, το οποίο ψύχεται με νερό και απάγει μεγάλο μέρος της θερμότητας. Οι αυξημένες τριβές με τα τοιχώματα, ιδιαίτερα κατά την εκκίνηση της μηχανής, οδηγούν στην προσεγγιζόμενη επιλογή υλικού για την κατασκευή των ελατηρίων, με έμφαση στην αντοχή τους. Επίσης τα υλικά που επιλέγονται έχουν ικανότητες αυτολιπάνσεως, καθώς στο άνω και κάτω νεκρό σημείο, αλλά και κατά την εκκίνηση το έλαιο λίπανσης δεν είναι αρκετό για να βοηθήσει την κίνηση του εμβόλου, όταν η ταχύτητά του είναι μηδενική ή σχεδόν μηδενική.

2.4.2 Διαφυγή αερίων

Αν παρατηρηθεί μεγάλη φθορά στα ελατήρια και δεν αντικατασταθούν σύντομα, θα υπάρξει διαφυγή αερίων από τον κύλινδρο προς το στροφαλοθάλαμο. Τα αέρια αυτά περιέχουν ενώσεις άνθρακα σε μεγάλο βαθμό και έρχονται σε επαφή με το έλαιο λίπανσης του στροφαλοθαλάμου, ενώ παράλληλα αυξάνουν πολύ την πίεσή του με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των βαλβίδων ανακουφίσεως. Παλιότερα τα αέρια αυτά, μέσω του εξαερισμού του στροφαλοθαλάμου περνούσαν στο μηχανοστάσιο και από εκεί στο περιβάλλον. Όμως με τις νέες νομοθεσίες περί ρύπων, τα αέρια, αφού καθαριστούν πρώτα από το περιεχόμενο του ελαίου λίπανσης, εισάγονται στην πολλαπλή εισαγωγής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται και η αύξηση της πίεσης του στροφαλοθαλάμου (1; 13).

2.4.3 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση τοποθετήσαμε μία βαλβίδα εντός του κυλίνδρου που έρχεται σε επαφή με την πολλαπλή εισαγωγής και μένει συνεχώς ανοιχτή κατά 3 και 6 mm².

2.5 Ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης

Ο αέρας που συμπιέζεται από το συμπιεστή του υπερπληρωτή έχει αυξημένη θερμοκρασία. Όσο πιο ψηλή είναι η θερμοκρασία του αέρα που τελικά θα μπει στον κύλινδρο για να γίνει η καύση, τόσο λιγότερη θα είναι η πυκνότητά του, καθώς σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση των αερίων - λαμβάνοντας τον αέρα ως τέλειο αέριο - η πυκνότητα και η θερμοκρασία είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα. Η πυκνότητα είναι ευθέως ανάλογη με τη μάζα του αέρα, συνεπώς αυξημένη θερμοκρασία συνεπάγεται μειωμένη μάζα. Για να μπορέσει να γίνει η καύση με βέλτιστο τρόπο απαιτείται συγκεκριμένος λόγος αέρα-καυσίμου, βασισμένος στις μάζες.

Για να μπορέσει να εγχυθεί περισσότερο καύσιμο και να απελευθερωθεί περισσότερη ενέργεια κατά την καύση, χρειάζεται και περισσότερη μάζα αέρα. Το ψυγείο αέρα πλήρωσης δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής περισσότερης μάζας αέρα, μέσω της ψύξης του. Τα καινούρια

συστήματα ψύξης περιλαμβάνουν ένα κεντρικό ψυγείο που ψύχεται με θαλασσινό νερό. Από αυτό ξεκινούν σωλήνες γλυκού νερού που κατευθύνονται στα υπόλοιπα ψυγεία, του αέρα πλήρωσης, του λαδιού, του χιτωνίου και όπου αλλού χρειάζεται. Συνεπώς η διάβρωση κατά κύριο λόγο αποτελεί κίνδυνο για το κεντρικό ψυγείο. Ωστόσο ρύπανση ή διαρροές μπορεί να λάβουν χώρα και στα άλλα ψυγεία.

Οι βλάβες των συστημάτων ψύξης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- i. Βλάβες στο υποσύστημα του ψυκτικού μέσου (γλυκό ή θαλασσινό νερό)
- ii. Βλάβες στο υποσύστημα του ψυχόμενου μέσου (γλυκό νερό, αέρας, λάδι ή κάποιο στοιχείο του κινητήρα)

Για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου της διάβρωσης που προκαλεί το θαλασσινό νερό στα συστήματα ψύξης, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα για λιγότερη συντήρηση, τα τελευταία χρόνια προτιμάται η δομή με ένα κεντρικό ψυγείο που ψύχει γλυκό νερό μέσω της κυκλοφορίας θαλασσινού νερού. Στη συνέχεια το γλυκό νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο για τις ανάγκες του κινητήρα, με μεγαλύτερη ευχέρεια στη ρύθμιση της θερμοκρασίας των διαφόρων συστημάτων.

2.5.1 Βλάβες στο ψυκτικό μέσο

- Διάβρωση σωληνώσεων λόγω υγρασίας ή διαρροών. Σε περίπτωση ύπαρξης υψηλής υγρασίας του περιβάλλοντος του εναλλάκτη θερμότητας, η διαφορά θερμοκρασίας δημιουργεί στις σωληνώσεις μία κατάσταση όμοια με αυτή που δημιουργείται όταν βάλουμε παγάκια σε ένα άδειο ποτήρι το καλοκαίρι. Η υγρασία κι η μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά δημιουργεί υδρατμούς στην εξωτερική επιφάνεια των σωληνώσεων, οι οποίοι λειτουργούν διαβρωτικά.
- Ρύπανση του ψυγείου. Μικροσωματίδια και μικρόβια έχουν διαβρωτική επίδραση στο εσωτερικό των σωληνώσεων και μειώνουν την αποδοτικότητα του ψυγείου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται αντιρρυπαντικά σπρέυ και συνίσταται η συχνή επιθεώρηση και καθαρισμός των ψυγείων.
- Βλάβη στο θερμοστάτη. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του ψυκτικού και κυρίως του ψυχόμενου μέσου χρησιμοποιούνται θερμοστάτες. Αν υπάρξει κάποιο πρόβλημα με αυτούς, η θερμοκρασία των μερών του κινητήρα ή του αέρα και του λαδιού πιθανώς να αυξηθούν και να οδηγήσουν σε αστοχία υλικού και σε προβλήματα στη λειτουργία του κινητήρα. Από την άλλη μεριά, αν εισαχθεί πολύ κρύος αέρας στον κύλινδρο - πράγμα που μπορεί να συμβεί και κατά την εκκίνηση του κινητήρα - υπάρχει πιθανότητα να υποστεί το χιτώνιο θερμικό σοκ και να οδηγηθεί σε ρηγμάτωση. Επισημαίνεται ότι στο κεντρικό ψυγείο, τη λειτουργία του θερμοστάτη συνοδεύει μία by-pass σωληνώση για το φρέσκο νερό σε περίπτωση που το νερό της θάλασσας πέσει κάτω από τους 25-30 °C. By-pass βαλβίδες υπάρχουν και στα υπόλοιπα ψυγεία, ώστε η πίεσή τους να διατηρείται σταθερή (9).
- Το χιτώνιο ψύχεται με γλυκό νερό, το οποίο κυκλοφορεί στο εσωτερικό του. Σε περίπτωση ρηγμάτωσης ή διαρροής άλλης αιτίας, τα αέρια της καύσης κυκλοφορούν μαζί με το ψυκτικό μέσο, ρυπαίνοντας όλο το υποσύστημα του νερού και ανεβάζουν τη θερμοκρασία του.

2.5.2 Βλάβες στο ψυχόμενο μέσο

- Το ψυγείο του αέρα πλήρωσης συχνά πάσχει από διαρροές που μειώνουν τη ροή και την πίεσή του. Η σχετικά μεγάλη και σταθερή πίεση που δέχεται μαζί με τη μεγάλη θερμοκρασία στην οποία εκτίθεται διευκολύνουν την κόπωση των μετάλλων, λόγω διαστολών.

- Ο αέρας περνώντας από το συμπιεστή στο ψυγείο χάνει ένα πολύ μικρό μέρος της πίεσής του λόγω απωλειών. Επικαθίσεις, σκόνης και μικρόβια δημιουργούν προβλήματα στο εσωτερικό των σωληνώσεων και αυξάνουν τις απώλειες πίεσης του αέρα πριν εισαχθεί στον κύλινδρο.

2.5.3 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση ρυπασμένου ψυγείου αέρα πλήρωσης στο (22) προτείνεται η μείωση της απόδοσης του ψυγείου κατά 30%. Στην προσομοίωσή μας μειώθηκε κατά 30% και 50%.

Σημειώνεται ότι η απόδοση του ψυγείου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\varepsilon = \frac{T_{air_in} - T_{air_out}}{T_{air_in} - T_{water_in}} \quad (6)$$

Αν οι συνθήκες του αέρα στην εισαγωγή και του ψυκτικού νερού μένουν ίδιες, η απόδοση του ψυγείου επηρεάζει άμεσα και σημαντικά τη θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο.

Η πτώση της πίεσης διαμέσου του ψυγείου είναι ίση με:

$$\Delta p = K * \left(\frac{m}{A}\right)^2 * R * \frac{T_{in}}{2 * P_{in}} \quad (7)$$

Επειδή αυτή αφορά κάποια $mbar$, η προσομοίωσή της σε περίπτωση βλάβης δεν έβγαλε κάποια αποτελέσματα που να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε, καθώς η επίδραση στις εξεταζόμενες παραμέτρους ήταν αμελητέα.

2.6 Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής

2.6.1 Χρονισμός βαλβίδων

Ο χρονισμός των βαλβίδων ελέγχεται στο συγκεκριμένο κινητήρα μέσω εκκεντροφόρου άξονα, ο οποίος έχει τη μισή περιστροφική ταχύτητα σε σχέση με το στροφαλοφόρο άξονα. Στις ηλεκτρονικές μηχανές χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, όπως αντίστοιχα συμβαίνει για τις αντλίες καυσίμου.

Συνεπώς λανθασμένη επιλογή χρονισμού των βαλβίδων είτε σχετική περιστροφή του εκκεντροφόρου κρατούν ίδια τη χρονική διάρκεια του ανοίγματος των βαλβίδων, ωστόσο σε διαφορετική χρονική στιγμή. Ακόμη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο μηχανισμός των βαλβίδων μπορεί να υποστεί ζημιά και να μεταθέτει το άνοιγμα και το κλείσιμο των βαλβίδων σε άλλη χρονική στιγμή.

Σε αρκετές μηχανές με εκκεντροφόρο είναι εγκατεστημένες υδραυλικές διατάξεις που μπορούν να ελέγξουν την κίνηση του εκκεντροφόρου άξονα, οπότε να ρυθμίσουν αντίστοιχα το χρονισμό των βαλβίδων, σε συνάρτηση με το φορτίο (13).

2.6.2 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση υποθέσαμε ότι:

- Οι βαλβίδες εξαγωγής ανοίγουν 10 και 15 μοίρες γωνίας στροφάλου νωρίτερα - και αντίστοιχα κλείνουν 10 και 15 μοίρες νωρίτερα.
- Οι βαλβίδες εξαγωγής ανοίγουν 15 και 20 μοίρες γωνίας στροφάλου αργότερα - και αντίστοιχα κλείνουν 15 και 20 μοίρες αργότερα.

2.7 Ρυπασμένο φίλτρο συμπιεστή ή προβλήματα στο σύστημα του αέρα

2.7.1 Ρόλος φίλτρου συμπιεστή - προβλήματα στο φίλτρο και τις σωληνώσεις του αέρα

Ο συμπιεστής του υπερπληρωτή αναρροφά αέρα από το μηχανοστάσιο. Με σκοπό να εμποδιστούν σκόνης ή μικροαντικείμενα - βίδες, θραύσματα φλαντζών - από το να εισέλθουν στον κύλινδρο, ο συμπιεστής είναι εφοδιασμένος με φίλτρο στην εισαγωγή. Ωστόσο μία συχνή βλάβη των υπερπληρωτών είναι η ρύπανση αυτού του φίλτρου, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μειωμένη ροή αέρα προς το συμπιεστή, μεγαλύτερη πτώση της πίεσής του, καθώς περνάει μέσα από το φίλτρο, αλλά και υπερθέρμανση του υπερπληρωτή. Γι αυτό επιβάλλεται η συχνή επιθεώρηση και καθαρισμός του φίλτρου.

Η πολλαπλή εισαγωγή συνδέεται με τους κυλίνδρους με κλαπέτα, τα οποία με την πάροδο του χρόνου μαζεύουν σκόνη και μικροσωματίδια, τα οποία εμποδίζουν την εισαγωγή του αέρα στους κυλίνδρους, προκαλώντας παρόμοια αποτελέσματα με το ρυπασμένο φίλτρο του συμπιεστή. Ακόμα διαρροές στο σύστημα αέρα ή ένα μπλοκαρισμένο ψυγείο από την πλευρά του αέρα μειώνουν την παροχή του προς το συμπιεστή ή τον κύλινδρο.

2.7.2 Προσομοίωση

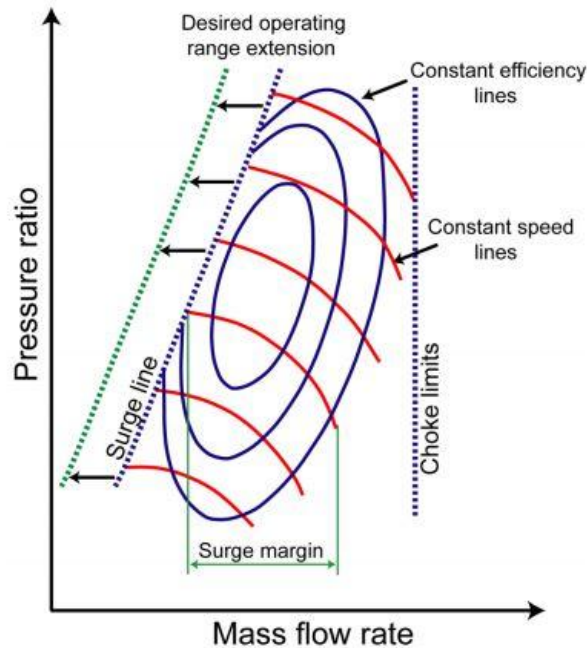
Για την προσομοίωση υποθέσαμε ότι η ροή αέρα προς το συμπιεστή είναι μικρότερη κατά 25% και 30%.

2.8 Ρυπασμένος συμπιεστής

Παρά την παρουσία του φίλτρου, ο συμπιεστής υφίσταται και αυτός ρύπανση, σε μικρότερο όμως βαθμό σε σχέση με το φίλτρο του, η οποία επηρεάζει τα πτερύγιά του. Κύρια αιτία είναι τα μεταλλικά στοιχεία που περιέχονται στον αέρα του μηχανοστασίου. Η αλλαγή στη γεωμετρία του στροφείου και των πτερυγίων λόγω των επικαθίσεων, οδηγεί σε ταλαντώσεις και αστάθεια του συμπιεστή (19).

2.8.1 Πάλμωση συμπιεστή

Φαινόμενα πάλμωσης του υπερπληρωτή έχουμε όταν η παροχή αέρα προς αυτόν είναι πολύ χαμηλή. Όλες οι βλάβες που οδηγούν σε χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίων είτε μειωμένη παροχή αέρα οδηγούν σε λειτουργία του συμπιεστή πολύ κοντά στη γραμμή πάλμωσης, δημιουργώντας τον κίνδυνο στιγμιαίας αναστροφής της ροής, άρα και του υπερπληρωτή. Άλλες αιτίες πάλμωσης μπορεί να είναι η απομόνωση ενός προβληματικού κυλίνδρου, η υψηλή θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής, με συνέπεια τη μειωμένη παροχή αέρα, μεγάλο αντικείμενο που φράσσει τη ροή αέρα προς το συμπιεστή. Ακόμα, η απότομη μείωση του φορτίου του κινητήρα, σε περίπτωση ελιγμών, μπορεί να οδηγήσει σε πάλμωση του συμπιεστή. Η λειτουργία κοντά στη γραμμή πάλμωσης δημιουργεί πολύ ισχυρό θόρυβο και ταλαντώσεις, που χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση τέτοιου είδους βλάβης. Πρέπει όμως να μη συγχέεται με βλάβες στο αξονικό σύστημα και τα έδρανα που επίσης χαρακτηρίζονται από ισχυρές ταλαντώσεις και έντονους θορύβους.



Εικόνα 11. Χάρτης συμπίεστή, όπου φαίνεται η γραμμή πάλμωσης (surge line) και η επιθυμητή διεύρυνσή της για μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας

2.8.2 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση στο (23) προτείνεται μείωση της ροής μάζας και της απόδοσης του συμπίεστή κατά 5 και 2.5 % αντίστοιχα. Εμείς υποθέσαμε ότι η ροή μάζας προς το συμπίεστή και η απόδοσή του μειώνονται κατά 12%-6% και 15%-7.5%, δηλαδή με αναλογία 1 προς 2. Κρατήσαμε ίδια αναλογία, αλλά μεγαλώσαμε την επήρεια που έχει η βλάβη στο συμπίεστή, επειδή το (23) αναφέρεται σε αεριοστρόβιλους, ενώ εμείς μελετάμε τι γίνεται στους υπερπληρωτές, που είναι μικρότεροι σε μέγεθος και δε σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή ισχύος, η οποία γίνεται στο θάλαμο καύσης του κάθε κυλίνδρου. Μικρότερης κλίμακας βλάβες προσομοιώθηκαν, ωστόσο τα αποτελέσματά τους ήταν αμελητέα.

2.9 Ρυπασμένος στρόβιλος - αυξημένες φθορές

2.9.1 Αιτίες ρύπανσης-φθορών και τρόποι αντιμετώπισης

Τα καυσαέρια από όλους τους κυλίνδρους συλλέγονται στην πολλαπλή εξαγωγής και από εκεί περνούν στο στρόβιλο. Τα καυσαέρια έχουν εξαιρετικά ισχυρή διαβρωτική δράση, λόγω της σύστασης και της θερμοκρασίας τους. Ακόμα μπορεί να περιέχουν σωματίδια αιθάλης, άκαυστο μείγμα αέρα-καυσίμου και άλλα άκαυστα σωματίδια που μπορεί να περιέχει το βαρύ κυρίως καύσιμο (αλουμίνιο, πυρίτιο - cat fines). Η ενθαλπία των καυσαερίων μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια στο στρόβιλο μέσω των πτερυγίων και του δαχτυλιδιού του, τα οποία υποφέρουν συχνά από επικαθήσεις αιθάλης και μικροσωματιδίων, τα οποία και τα διαβρώνουν και συχνά σπάνε κομμάτια τους ή φράσσουν, δημιουργώντας φαινόμενα πάλμωσης.

Οι επικαθήσεις στον ρότορα και τα πτερύγια αυξάνουν τη ροπή αδράνειας του στρόβιλου και επηρεάζουν σημαντικά την υστέρηση του υπερπληρωτή (19). Αυξημένη ροπή αδράνειας έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη καθυστέρηση του τούρμπο σε συνθήκες επιβράδυνσης ή επιτάχυνσης. Στην 1η περίπτωση δίνεται εντολή για λιγότερο καύσιμο στους κυλίνδρους, ενώ ο υπερπληρωτής στέλνει περισσότερο αέρα απ όσο χρειάζεται η μηχανή, λόγω της

προηγούμενης κατάστασης, με αποτέλεσμα το μείγμα να είναι φτωχότερο και η απόδοση του κινητήρα πιο χαμηλή. Στη 2η περίπτωση αυξάνεται το καύσιμο στους κυλίνδρους, ενώ το τούρμπο δεν προλαβαίνει να στείλει περισσότερο αέρα, κάνοντας το μείγμα πλούσιο, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες εκπομπές ρύπων, μαύρο καπνό στην πλευρά της εξάτμισης και μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση μέχρι την ισορροπία του κινητήρα στη νέα κατάσταση.

Οι αλλαγές στη γεωμετρία του στροβίλου τον "βαραίνουν", αυξάνουν τη ροπή αδράνειάς του, μειώνουν τις στροφές του, δημιουργώντας πρόβλημα τόσο στη ροή των καυσαερίων, όσο και στην απόδοσή του.

Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές συνιστούν στεγνό καθαρισμό των πτερυγίων του στροβίλου καθημερινά σε λειτουργία με μειωμένες στροφές (για παράδειγμα με τρίμματα κελύφους καρύδας που μοιάζει με ματσακόνισμα, συνοδεύει αέρα υπό πίεση) και πλύσιμο με εκτόξευση νερού εβδομαδιαία (24).

Τέλος και οι δίοδοι διαφυγής των καυσαερίων υφίστανται χημική διάβρωση λόγω των προϊόντων της καύσης, με αποτέλεσμα φαγωμένες εσωτερικές επιφάνειες σωληνώσεων και αύξηση των τριβών.



Εικόνα 12. Αυξημένες φθορές στα πτερύγια στροφείου πιθανώς από είσοδο αντικειμένου ή λόγω τριβών με το κάλυμμα (25)

2.9.2 Σύστημα λίπανσης και σύνδεσή του με βλάβες στον υπερπληρωτή

Πολύ σημαντική για τη λειτουργία του υπερπληρωτή είναι η κυκλοφορία λαδιού, καθώς πέρα από τη μείωση των τριβών, συνεισφέρει στην ψύξη και τον καθαρισμό των μηχανικών του μερών. Συνεπώς ορισμένες βλάβες στο σύστημα λίπανσης μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του στροβίλου, αλλά και του υπερπληρωτή συνολικότερα.

Τέσσερα είναι τα κύρια μέρη του συστήματος λίπανσης που ευθύνονται για δυσλειτουργίες:

Αντλία - Φίλτρο λαδιού

Μία μπλοκαρισμένη αντλία ή φίλτρο λαδιού έχουν ως συνέπεια τη μείωση της παροχής λαδιού στα μηχανικά μέρη του κυλίνδρου και του υπερπληρωτή, καθώς και τη μειωμένη πίεσή του. Μικροσωματίδια, μέταλλα, σκόνες και υψηλό ιξώδες λαδιού είναι οι κύριες αιτίες του φραγμένου φίλτρου. Επειδή η λίπανση στην πλειοψηφία των εδράνων και στους άξονες είναι δυναμική, μειωμένη πίεση και παροχή σημαίνει καταστροφή του στρώματος λαδιού, αύξηση των τριβών και των φθορών στα πληττόμενα μέρη του κινητήρα. Επίσης η ψυκτική ικανότητα του λαδιού είναι μειωμένη. Ιδιαίτερα στους υπερπληρωτές τα φαινόμενα είναι πιο έντονα λόγω των υψηλών ταχυτήτων που συχνά συνοδεύονται από δονήσεις και ταλαντώσεις (3;

26). Ακόμη, διαρροές από την αντλία λαδιού ή/και από το σύστημα του καυσίμου, έχουν σαν αποτέλεσμα τη μίξη λαδιού-πετρελαίου. Έτσι το σημείο ανάφλεξης του ελαίου λίπανσης είναι χαμηλότερο και κινδυνεύουμε από έκρηξη στο στροφαλοθάλαμο, γι αυτό είναι σημαντική η κατά το δυνατόν γρηγορότερη ανίχνευση της μίξης πετρελαίου και λαδιού, ώστε να σταματήσει η λειτουργία του κινητήρα (27).

By-pass βαλβίδα

Για την αποφυγή της μειωμένης κυκλοφορίας του λιπαντικού σε περίπτωση φραγμένου φίλτρου, το σύστημα του λαδιού είναι εφοδιασμένο με by-pass βαλβίδα που προσπερνά το φίλτρο όταν αυτό είναι σημαντικά ρυπασμένο και η πτώση της πίεσης του λαδιού που περνά μέσα απ αυτό υπερβεί κάποιο όριο. Σε αυτή την περίπτωση το λάδι εισέρχεται ακαθάριστο στον κύλινδρο, κυκλοφορώντας μέταλλα ή άλλα μικροσωματίδια στη ροή του, αυξάνοντας τις τριβές. Ωστόσο, σε σύγκριση με την εξαιρετικά μειωμένη παροχή που θα επέφερε η απουσία της by-pass βαλβίδας το αποτέλεσμα είναι σίγουρα πολύ καλύτερο. Στην περίπτωση που η βαλβίδα κολλήσει ή σπάσει, τότε είτε η προσπάθεια του λαδιού να περάσει από το φίλτρο θα οδηγήσει στο σπάσιμό του είτε το λάδι θα περνάει συνέχεια από το by-pass, κι έτσι θα αυξάνονται συνεχώς οι τριβές και οι θερμοκρασίες.

Ψυγείο λαδιού

Το υψηλό ιξώδες επηρεάζει εξίσου την κυκλοφορία του λαδιού μέσα από το φίλτρο του. Μεγάλη αντίσταση στη ροή ενεργοποιεί αυτόματα τη by-pass βαλβίδα. Το ιξώδες εξαρτάται από τη θερμοκρασία του λαδιού, οπότε ενδεχόμενη βλάβη στο ψυγείο επηρεάζει σημαντικά τη ροή του. Επίσης κατά την εκκίνηση της μηχανής που το λιπαντικό είναι ακόμα κρύο, το ιξώδες του είναι υψηλό. Όταν η by-pass βαλβίδα ανοίγει το λάδι κατευθύνεται αμέσως στο ψυγείο, το οποίο σε αυτή την περίπτωση υποφέρει από συσσώρευση μικροσωματιδίων που ρίχνουν την απόδοσή του και αυξάνουν τη θερμοκρασία του λαδιού, με αποτέλεσμα λεπτότερο στρώμα λαδιού και μεγαλύτερες φθορές από τριβές.

2.9.3 Προσομοίωση

Για την προσομοίωση της βλάβης στο στρόβιλο, αλλά και στις διόδους των καυσαερίων, υποθέσαμε ότι η ικανότητα εισρόφησης τους και η απόδοση της τουρμπίνας είναι μειωμένες κατά 12% και 15%. Το (23) προτείνει και πάλι μείωση της ροής των καυσαερίων από 0% μέχρι 5% και της απόδοσης κατά 0% με 2.5%. Στο (22) μειώνονται και τα δύο κατά 10%.



Εικόνες 13 και 14. Αριστερά κατεστραμμένο καλώδιο απόσβεσης ταλαντώσεων αξονικού στροβίλου μαζί με φθαρμένα πτερύγια και δεξιά κατεστραμμένο δαχτυλίδι στροβίλου (28).

Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για τη σύγκριση της κατάστασης με και χωρίς βλάβη καταγράφηκαν οι εξής παράμετροι λειτουργίας του κινητήρα:

1. Ισχύς κινητήρα
2. Μέση πραγματική πίεση κυλίνδρου
3. Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (λ)
4. Μέγιστη θερμοκρασία στον κύλινδρο
5. Πίεση συμπίεσης
6. Πίεση καύσης
7. Γωνία στροφάλου που επιτυγχάνεται η πίεση καύσης
8. Πίεση αέρα πλήρωσης
9. Θερμοκρασία αέρα πλήρωσης
10. Πίεση καυσαερίων
11. Θερμοκρασία καυσαερίων πριν το στρόβιλο
12. Θερμοκρασία καυσαερίων μετά το στρόβιλο
13. Ειδική κατανάλωση καυσίμου στον κινητήρα
14. Στροφές υπερπληρωτή
15. Θερμοκρασία έδρας βαλβίδας

Από αυτές αξιοποιήθηκαν για τη σύγκριση των δύο καταστάσεων οι παρακάτω παράμετροι, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν στον κινητήρα άμεσα και εύκολα, οδηγώντας σε ασφαλή μονοπάτια για τη διάγνωση της εκάστοτε βλάβης. Υπενθυμίζεται ότι στην υπό βλάβη κατάσταση αυξήσαμε το εγχεόμενο καύσιμο ώστε η ισχύς να είναι ίδια με την αρχική κατάσταση. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι σημαντικές μεταβολές, πάνω και κάτω από τις οποίες θεωρήθηκε αύξηση ή μείωση αντίστοιχα της εκάστοτε παραμέτρου.

1. Μέγιστη θερμοκρασία στον κύλινδρο
2. Πίεση συμπίεσης
3. Πίεση καύσης
4. Πίεση αέρα πλήρωσης
5. Θερμοκρασία αέρα πλήρωσης
6. Πίεση καυσαερίων
7. Θερμοκρασία καυσαερίων πριν το στρόβιλο
8. Ειδική κατανάλωση καυσίμου στον κινητήρα
9. Στροφές υπερπληρωτή
10. Θερμοκρασία έδρας βαλβίδας

Πίνακας 2. Μεταβολές παραμέτρων που θεωρούνται σημαντικές

Α/Α	Παράμετρος	Σημαντικές μεταβολές	
		Ψηλά φορτία	Χαμηλά φορτία
1.	Μέγιστη θερμοκρασία στον κύλινδρο	± 50 °C	± 50 °C
2.	Πίεση συμπίεσης	± 4 bar	± 3 bar
3.	Πίεση καύσης	± 4 bar	± 3 bar
4.	Πίεση αέρα πλήρωσης	± 0.2 bar	± 0.2 bar
5.	Θερμοκρασία αέρα πλήρωσης	± 5 °C	± 4 °C
6.	Πίεση καυσαερίων	± 0.2 bar	± 0.2 bar
7.	Θερμοκρασία καυσαερίων πριν το στρόβιλο	± 10 °C	± 10 °C
8.	Ειδική κατανάλωση καυσίμου στον κινητήρα	± 1 gr/kWh	± 1 gr/kWh
9.	Στροφές υπερπληρωτή	± 400 rpm	± 400 rpm
10.	Θερμοκρασία έδρας βαλβίδας	± 7 °C	± 7 °C

3.1 Παράθεση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

3.1.1 Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου

Το βασικό αποτέλεσμα που αναμένουμε από τη βραδύτερη έγχυση καυσίμου είναι μείωση της μέγιστης καύσης σε συνδυασμό με την καλύτερη λειτουργία του υπερπληρωτή, που θα συνεισφέρει στην αύξηση της πίεσης συμπίεσης και της πίεσης του αέρα πλήρωσης.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα προσομοίωσης βραδύτερης έγχυσης καυσίμου

Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} beforeT/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Βραδυπορία 4 μοιρών	-	+	-	+	0	0	0	+	+	0
	Βραδυπορία 6 μοιρών	-	+	-	+	0	+	0	+	+	-
75.9 %	Βραδυπορία 4 μοιρών	-	+	-	+	0	0	0	+	+	0
	Βραδυπορία 6 μοιρών	-	+	-	+	0	+	0	+	+	-
50.8 %	Βραδυπορία 4 μοιρών	0	+	-	0	0	0	+	+	+	0
	Βραδυπορία 6 μοιρών	-	+	-	0	0	0	+	+	+	0

Υψηλά φορτία

- Το καύσιμο εγχέεται πιο αργά, έτσι ο κινητήρας δεν εκμεταλλεύεται επαρκώς την πίεση που επιτυγχάνεται λόγω της συμπίεσης.
- Το μίγμα είναι πιο φτωχό, καθώς ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου αυξάνεται 5-10%, γι αυτό η θερμοκρασία κυλίνδρου και βαλβίδας πέφτουν (75-130 °C και 4-8 °C) .
- Η χαμένη ενέργεια προς το τούρμπο είναι μεγαλύτερη, γι αυτό και η πίεση των καυσαερίων είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση των 6 μοιρών 0.2-0.22 bar, ενώ η αύξηση της πίεσης για τις 4 μοίρες είναι αμελητέα, 0.15 bar.
- Αποτέλεσμα είναι η αύξηση των στροφών του τούρμπο (1600-2100 rpm) και της πίεσης του αέρα πλήρωσης (0.2-0.4 bar).
- Η απόδοση του ψυγείου είναι ίδια, γι αυτό και παρατηρούμε μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα (αυξημένη πίεση συνδέεται με αυξημένη θερμοκρασία), που όμως είναι αμελητέα, της τάξης των 3-4°C.
- Η θερμοκρασία των καυσαερίων παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη. Λόγω της αύξησης της ενέργειας των καυσαερίων, θα περιμέναμε η θερμοκρασία τους να είναι αυξημένη. Ωστόσο φαίνεται ότι η μειωμένη μέγιστη θερμοκρασία που επικρατεί στον κύλινδρο (70-130°C) επιδρά στη θερμοκρασία των καυσαερίων κρατώντας τη ουσιαστικά αμετάβλητη για τα μεγάλα φορτία. Όσο χαμηλώνουμε φορτίο ωστόσο, η θερμοκρασία τους μειώνεται.
- Λόγω της μεγαλύτερης πίεσης του αέρα πλήρωσης, η πίεση συμπίεσης είναι μεγαλύτερη (10-20 bar) κι επιτυγχάνεται λίγες μοίρες γωνίας στροφάλου αργότερα.
- Η μέγιστη πίεση όμως είναι μικρότερη (10-20 bar) λόγω της χειρότερης καύσης.

Χαμηλά φορτία

Η διαφορά με τα ψηλά φορτία εστιάζεται στα μικρότερα αποτελέσματα που προκαλεί η συγκεκριμένη βλάβη. Δηλαδή όλες οι παράμετροι λειτουργίας που εξετάζονται ακολουθούν την ίδια τάση των μεγάλων φορτίων, με εξαίρεση τη θερμοκρασία των καυσαερίων που είναι

αισθητά υψηλότερη (18-20 °C) σε σχέση με την κατάσταση χωρίς βλάβη. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω της μικρότερης μείωσης της μέγιστης θερμοκρασίας στον κύλινδρο (30-60 °C).

3.1.2 Προπορεία έγχυσης καυσίμου

Η βλάβη αυτή περιμένουμε να έχει αντίθετα αποτελέσματα από τη βραδύτερη έγχυση, δηλαδή αυξημένη πίεση καύσης, που προκύπτει από την καλύτερη απόδοση της μηχανής, άρα και μειωμένες στροφές τούρμπο και πιέσεις συμπίεσης και αέρα πλήρωσης.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα προσομοίωσης νωρίτερης έγχυσης καυσίμου

Προπορεία έγχυσης καυσίμου		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} before T/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Προπορεία 4 μοιρών	+	-	+	0	0	0	0	-	-	+
	Προπορεία 6 μοιρών	+	-	+	0	0	0	0	-	-	+
75.9 %	Προπορεία 4 μοιρών	+	-	+	0	0	0	0	-	-	+
	Προπορεία 6 μοιρών	+	-	+	0	0	0	0	-	-	+
50.8 %	Προπορεία 4 μοιρών	+	-	+	0	0	0	0	-	0	+
	Προπορεία 6 μοιρών	+	-	+	0	0	0	0	-	0	+

Ίδια αποτελέσματα για χαμηλά και ψηλά φορτία

- Το καύσιμο εγχέεται πιο νωρίς, έτσι την πίεση συμπίεσης ακολουθεί μεγάλη αύξηση λόγω της νωρίτερης έγχυσης του καυσίμου.
- Το καύσιμο που εγχέεται ώστε να επιτευχθεί η ίδια ισχύς είναι λιγότερο, λιγότερος όμως και ο αέρας πλήρωσης. Παρατηρούμε ότι το μείγμα είναι πιο πλούσιο (2.5-7%), κάτι που εξηγεί τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες που επικρατούν στον κύλινδρο και στη βαλβίδα εξαγωγής (75-130 °C και 6-14 °C).
- Η καύση ξεκινάει νωρίτερα, άρα η χαμένη ενέργεια προς το τούρμπο είναι μικρότερη, γι αυτό η πίεση των καυσαερίων είναι μικρότερη, ωστόσο δεν υπερβαίνει τα 0.09-0.1 bar.
- Οι στροφές του τούρμπο πέφτουν, όπως και η πίεση του αέρα πλήρωσης, χωρίς όμως αυτή να ξεπερνάει τα 0.2 bar.
- Η απόδοση του ψυγείου είναι ίδια, γι αυτό και παρατηρούμε μικρή μείωση της θερμοκρασίας του αέρα της τάξεως των 2-3 °C.
- Η θερμοκρασία των καυσαερίων παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη. Λόγω της μείωσης της ενέργειας των καυσαερίων, θα περιμέναμε η θερμοκρασία τους να είναι μειωμένη. Ωστόσο φαίνεται ότι η αυξημένη θερμοκρασία που επικρατεί στον κύλινδρο (70-140°C) επιδρά στη θερμοκρασία των καυσαερίων κρατώντας τη ουσιαστικά αμετάβλητη για τα μεγάλα φορτία. Όσο χαμηλώνουμε φορτίο ωστόσο, η θερμοκρασία τους αυξάνεται περισσότερο, χωρίς όμως η μεταβολή να υπερβαίνει τους 10 °C.
- Λόγω της μικρότερης πίεσης του αέρα, η πίεση συμπίεσης είναι μικρότερη (15-20 bar) κι επιτυγχάνεται ορισμένες μοίρες γωνίας στροφάλου νωρίτερα.
- Η μέγιστη πίεση όμως είναι μεγαλύτερη (15-20 bar) λόγω της καλύτερης καύσης.

3.1.3 Κακή ποιότητα καυσίμου

Το "κακό" καύσιμο έχει μειωμένη απόδοση καύσης, καθώς η έναυση αργεί πολύ και η διάρκεια της καύσης είναι μεγάλη. Άρα αναμένεται καλύτερη λειτουργία του υπερπληρωτή και πολύ αυξημένες μέγιστες πιέσεις στον κύλινδρο, λόγω της ασταθούς, μη ελεγχόμενης καύσης του.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα προσομοίωσης κακής ποιότητας καυσίμου

Κακή ποιότητα καυσίμου		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} beforeT/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Περίπτωση 1η	-	+	+	0	0	0	0	+	+	0
	Περίπτωση 2η	-	+	+	0	0	0	0	+	+	0
75.9 %	Περίπτωση 1η	-	+	+	0	0	0	0	+	+	0
	Περίπτωση 2η	-	+	+	0	0	0	0	+	+	0
50.8 %	Περίπτωση 1η	-	+	+	0	0	0	0	+	+	0
	Περίπτωση 2η	-	+	+	0	0	0	0	+	+	0

Υψηλά φορτία

- Η έναυση του μείγματος γίνεται πιο αργά κι η καύση έχει μεγαλύτερη διάρκεια, ενώ ο ρυθμός αύξησης της πίεσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος.
- Ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητος, ωστόσο η μέγιστη θερμοκρασία του κυλίνδρου πέφτει, ενώ της βαλβίδας παραμένει σταθερή. Το φαινόμενο της κρουστικής καύσης δεν μπόρεσε άμεσα να προσομοιωθεί, καθώς δεν υπάρχει τέτοια πρόβλεψη στο θερμοδυναμικό μοντέλο. Δηλαδή η προσομοίωση είναι πιο πολύ ποιοτική και εστιάζει στην απότομη αύξηση των πιέσεων.
- Η χαμένη ενέργεια προς το τούρμπο είναι ελαφρώς μεγαλύτερη, κι αυτό φαίνεται από την πολύ μικρή αύξηση στην πίεση και τη θερμοκρασία των καυσαερίων.
- Αποτέλεσμα είναι η αύξηση των στροφών του τούρμπο.
- Η απόδοση του ψυγείου είναι ίδια, γι αυτό και παρατηρούμε μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του, που όμως είναι αμελητέα.
- Η πίεση συμπίεσης είναι μεγαλύτερη (5-10 bar).
- Η μέγιστη πίεση όμως είναι πολύ μεγαλύτερη (15 bar) λόγω της κρουστικής καύσης.

Χαμηλά φορτία

Σε θεωρητικό επίπεδο υπάρχουν δύο περιπτώσεις συνεπειών από την καύση κακής ποιότητας καυσίμου. Αν ο αριθμός κετανίου είναι αρκετά μικρότερος από το συνιστώμενο η καύση αρχίζει σχεδόν μετά το άνω νεκρό σημείο ή ακόμα και στη φάση της εκτόνωσης. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μην αυξάνεται η πίεση καύσης, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της καύσης λαμβάνει χώρα στη φάση που το έμβολο κατεβαίνει κι η πίεση στον κύλινδρο εν γένει πέφτει, όπως συμβαίνει στην προσομοίωση. Αν όμως ο αριθμός κετανίου είναι τέτοιος, ώστε η καύση να γίνεται στο τέλος της φάσης της συμπίεσης, τότε οι πιέσεις στον κύλινδρο αυξάνουν αρκετά, με κίνδυνο να "χτυπήσει" ο κινητήρας (29). Στην προσομοίωση, η έγχυση του καυσίμου στην κατάσταση χωρίς βλάβη γίνεται ήδη αργά σχετικά (713-716 μοίρες γωνίας στροφάλου), οπότε ενδεχόμενη υστέρηση ανάφλεξης λόγω κακής ποιότητας καυσίμου αυξάνει πολύ την πίεση στη φάση όμως της εκτόνωσης.

3.1.4 Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής

Το βασικό αποτέλεσμα που περιμένουμε να δούμε είναι οι αυξημένες πιέσεις των καυσαερίων, καθώς τα καυσαέρια του κυλίνδρου που υφίσταται τη βλάβη περιέχουν πολύ περισσότερη ενέργεια. Ο κύλινδρος με βλάβη θα έχει μικρότερες πιέσεις, ενώ οι υπόλοιποι κύλινδροι θα έχουν αυξημένες λόγω περισσότερου αέρα και καυσίμου.

Πίνακας 6. Αποτελέσματα προσομοίωσης διαρροής από τη βαλβίδα εξαγωγής

Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} beforeT/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Διαρροή 1% κύλινδρος με βλάβη	0	-	-	+	+	+	-	+	+	+
	Διαρροή 1% κύλινδρος χωρίς βλάβη	-	+	+	+	+	+	-	+	+	0
	Διαρροή 1.5% κύλινδρος με βλάβη	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+
	Διαρροή 1.5% κύλινδρος χωρίς βλάβη	-	+	+	+	+	+	-	+	+	0
75.9 %	Διαρροή 1% κύλινδρος με βλάβη	0	-	-	+	+	+	-	+	+	+
	Διαρροή 1% κύλινδρος χωρίς βλάβη	-	+	+	+	+	+	-	+	+	0
	Διαρροή 1.5% κύλινδρος με βλάβη	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+
	Διαρροή 1.5% κύλινδρος χωρίς βλάβη	-	+	+	+	+	+	-	+	+	0
50.8 %	Διαρροή 1% κύλινδρος με βλάβη	+	-	-	+	+	0	+	+	+	+
	Διαρροή 1% κύλινδρος χωρίς βλάβη	-	+	+	+	+	0	+	+	+	0
	Διαρροή 1.5% κύλινδρος με βλάβη	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
	Διαρροή 1.5% κύλινδρος χωρίς βλάβη	-	+	+	+	+	+	+	+	+	0

Υψηλά φορτία - Κύλινδρος με βλάβη

- i. Στον κύλινδρο με τη διαρροή, η μέση πραγματική πίεση μειώνεται αισθητά (6-9 bar), λόγω της διαρροής.
- ii. Το μίγμα είναι πιο πλούσιο (30-40%), γι αυτό και η θερμοκρασία στον κύλινδρο αυξάνεται (20-70°C), όχι όμως όσο θα περιμέναμε λόγω των διαρροών. Η θερμοκρασία στην έδρα της βαλβίδας αυξάνεται κατά 70°C.
- iii. Η χαμένη ενέργεια προς το τούρμπο είναι αρκετά μεγάλη, γι αυτό και η πίεση των καυσαερίων είναι επίσης αρκετά μεγαλύτερη (0.4-0.6 bar).
- iv. Αποτέλεσμα είναι η μεγάλη αύξηση των στροφών του τούρμπο και της πίεσης του αέρα πλήρωσης (0.4-1 bar).
- v. Η απόδοση του ψυγείου είναι ίδια, γι αυτό και παρατηρούμε αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα (6-11°C).

- vi. Η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώνεται (10-20°C) για τα μεγάλα φορτία, παρόλο που η ενθαλπία τους είναι αυξημένη. Πιθανώς υπάρχει κάποια συσχέτιση με τη μικρότερη από την αναμενόμενη αύξηση στη θερμοκρασία του κυλίνδρου.
- vii. Η πίεση συμπίεσης μειώνεται λόγω των διαρροών (3-9 bar). Το ίδιο και η μέγιστη πίεση (8-18 bar).

Υψηλά φορτία - Κύλινδρος χωρίς βλάβη

- i. Στον κύλινδρο χωρίς διαρροή η μέση πραγματική πίεση αυξάνεται 1-2 bar, καθώς αυξάνεται η μάζα του αέρα πλήρωσης και το καύσιμο που εγχέεται.
- ii. Ωστόσο η μεγάλη αύξηση της πίεσης του αέρα εισαγωγής κάνει το μείγμα φτωχότερο (10-20%) και η θερμοκρασία του κυλίνδρου πέφτει (80-130 °C), ενώ η θερμοκρασία της βαλβίδας υφίσταται μια αμελητέα αύξηση μέχρι 5 °C.
- iii. Η πίεση συμπίεσης είναι μεγαλύτερη 25-35 bar λόγω της μεγάλης πίεσης του αέρα πλήρωσης. Το ίδιο συμβαίνει και για τη μέγιστη πίεση λόγω της καλύτερης καύσης.

Χαμηλά φορτία - Κύλινδρος με βλάβη

- i. Στον κύλινδρο με τη διαρροή, η μέση πραγματική πίεση μειώνεται (4-7 bar) λόγω της διαρροής.
- ii. Το μίγμα είναι πιο πλούσιο (45-50%), γι αυτό και η θερμοκρασία στον κύλινδρο αυξάνεται πολύ περισσότερο σε σχέση με τα ψηλά φορτία (150-230°C). Η θερμοκρασία στην έδρα της βαλβίδας αυξάνεται κατά 60 °C.
- iii. Η χαμένη ενέργεια προς το τούρμπο είναι μεγάλη, γι αυτό και η πίεση των καυσαερίων είναι επίσης μεγαλύτερη (όμως μέχρι 0.2 bar).
- iv. Αποτέλεσμα είναι η μεγάλη αύξηση των στροφών του τούρμπο και της πίεσης του αέρα πλήρωσης (0.2-0.4 bar).
- v. Η απόδοση του ψυγείου είναι ίδια, γι αυτό και παρατηρούμε αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα (5-8°C).
- vi. Η θερμοκρασία των καυσαερίων αυξάνεται αισθητά (20°C). Πιθανώς και εδώ υπάρχει κάποια συσχέτιση με την αύξηση στη θερμοκρασία του κυλίνδρου.
- vii. Η πίεση συμπίεσης μειώνεται λόγω των διαρροών (8-11 bar). Το ίδιο και η μέγιστη πίεση (14-20 bar).

Χαμηλά φορτία - Κύλινδρος χωρίς βλάβη

- i. Στον κύλινδρο χωρίς διαρροή η μέση πραγματική πίεση αυξάνεται 1-2 bar, καθώς αυξάνεται η μάζα του αέρα πλήρωσης και το καύσιμο που εγχέεται.
- ii. Ωστόσο η μεγάλη αύξηση της πίεσης του αέρα εισαγωγής κάνει το μείγμα φτωχότερο (3-8%) και η θερμοκρασία του κυλίνδρου πέφτει (30-60 °C), ενώ η θερμοκρασία της βαλβίδας υφίσταται μια αμελητέα αύξηση μέχρι 5-6 °C.
- iii. Η πίεση συμπίεσης είναι μεγαλύτερη 9-14 bar λόγω της μεγάλης πίεσης του αέρα πλήρωσης. Το ίδιο συμβαίνει και για τη μέγιστη πίεση (12-18 bar) λόγω της καλύτερης καύσης.

Συμπερασματικά, η διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής εμφανίζει διαφορά ανάμεσα στα χαμηλά και τα ψηλά φορτία στη θερμοκρασία των καυσαερίων (στα ψηλά φορτία μειώνεται, ενώ στα χαμηλά αυξάνεται). Ακόμα η αύξηση στη θερμοκρασία του κυλίνδρου χωρίς βλάβη είναι αισθητά μεγαλύτερη στα μικρά φορτία, που μπορεί να εξηγηθεί μερικώς από τη μεγαλύτερη μείωση του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου και τη μειωμένη αύξηση στην πίεση του αέρα εισαγωγής, που οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση στην πίεση συμπίεσης και τελικά στη μέγιστη πίεση του κυλίνδρου που έχει τη διαρροή.

3.1.5 Διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων

Η βλάβη αυτή μοιάζει με τη διαρροή από τις βαλβίδες, καθώς επηρεάζει διαφορετικά τον υπό βλάβη κύλινδρο και τους υπόλοιπους. Αναμένουμε μειωμένες πιέσεις στον κύλινδρο με βλάβη και αυξημένη θερμοκρασία αέρα πλήρωσης, καθώς η διαφυγή των αερίων γίνεται προς την πολλαπλή εισαγωγής.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα προσομοίωσης διαφυγής αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων ή χιτωνίου

Διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} before T/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Διαρροή 3 mm ² κύλινδρος με βλάβη	0	-	-	0	+	0	+	0	+	+
	Διαρροή 3 mm ² κύλινδρος χωρίς βλάβη	0	0	0	0	+	0	+	0	+	0
	Διαρροή 6 mm ² κύλινδρος με βλάβη	+	-	-	0	+	0	+	0	+	+
	Διαρροή 6 mm ² κύλινδρος χωρίς βλάβη	+	0	0	0	+	0	+	0	+	0
75.9 %	Διαρροή 3 mm ² κύλινδρος με βλάβη	0	-	-	0	+	0	+	0	+	+
	Διαρροή 3 mm ² κύλινδρος χωρίς βλάβη	0	0	0	0	+	0	+	0	+	0
	Διαρροή 6 mm ² κύλινδρος με βλάβη	+	-	-	0	+	0	+	0	+	+
	Διαρροή 6 mm ² κύλινδρος χωρίς βλάβη	+	0	0	0	+	0	+	0	+	0
50.8 %	Διαρροή 3 mm ² κύλινδρος με βλάβη	+	-	-	0	+	0	+	0	+	+
	Διαρροή 3 mm ² κύλινδρος χωρίς βλάβη	+	0	0	0	+	0	+	0	+	0
	Διαρροή 6 mm ² κύλινδρος με βλάβη	+	-	-	0	+	0	+	0	+	+
	Διαρροή 6 mm ² κύλινδρος χωρίς βλάβη	+	0	0	0	+	0	+	0	+	0

Όλα τα φορτία - Κύλινδρος με βλάβη

- Στον κύλινδρο με τη διαρροή η μέση πραγματική πίεση μειώνεται 1-1.5 bar, ενώ η θερμοκρασία του αέρα πλήρωσης αυξάνεται αισθητά (6-15 °C), γιατί η διαφυγή των αερίων κατευθύνεται προς την πολλαπλή εισαγωγής, για να μην αυξηθούν οι εκπομπές ρύπων.
- Το μίγμα είναι πλουσιότερο (16-26%) και η μέγιστη θερμοκρασία του κυλίνδρου αυξάνεται (35-120 °C). Η θερμοκρασία της βαλβίδας εξαγωγής αυξάνεται αισθητά (15-26 °C).
- Η πίεση των καυσαερίων μειώνεται ελάχιστα (0.02-0.03 bar), λόγω των χαμηλότερων πιέσεων που επικρατούν στον κύλινδρο. Η θερμοκρασία των καυσαερίων αυξάνεται αρκετά, λόγω των ανεβασμένων θερμοκρασιών του αέρα πλήρωσης και του κυλίνδρου, αλλά και λόγω της αύξησης του ενεργειακού περιεχομένου του κυλίνδρου (12-33 °C). Οι στροφές του τούρμπο μειώνονται κατά 50-260 rpm, που θεωρείται αμελητέα μεταβολή. Συνεπώς το αξιοπρόσεκτο είναι ότι παρά τη μεγάλη σχετικά

- αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων, η λειτουργία του υπερπληρωτή δε φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά.
- iv. Για το λόγο αυτό η πίεση του αέρα πλήρωσης μένει αμετάβλητη.
 - v. Η πίεση συμπίεσης και η μέγιστη πίεση φαίνεται ότι μειώνονται (3-7 bar), λόγω των διαρροών.

Όλα τα φορτία - Κύλινδρος χωρίς βλάβη

- i. Η διαφορά στον κύλινδρο χωρίς βλάβη είναι η αμελητέα αύξηση στη θερμοκρασία της βαλβίδας εξαγωγής, της τάξεως των 3-6 °C.
- ii. Οι πιέσεις μένουν σχεδόν αμετάβλητες (η πίεση συμπίεσης πέφτει μέχρι 1 bar, ενώ η πίεση καύσης ανεβαίνει μέχρι 1 bar)
- iii. Οι μέγιστες θερμοκρασίες του κυλίνδρου αυξάνονται περισσότερο σε σχέση με τα μεγάλα φορτία.

Στη 2η περίπτωση των 6 mm² ισοδύναμης επιφάνειας διαφυγής, ο συμπιεστής κινείται στα όρια της πάλμωσης.

3.1.6 Ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης

Οι αυξημένες θερμοκρασίες του κυλίνδρου, του αέρα στην εισαγωγή και των καυσαερίων της βλάβης αυτής δε θα πρέπει να συγχέονται με αυτές της διαφυγής αερίων (blow-by), καθώς οι πιέσεις δε θα χαρακτηρίζονται από μεγάλη αυξομείωση. Παρόμοια αποτελέσματα θα περιμέναμε κι από την αυξημένη θερμοκρασία του αέρα του μηχανοστασίου.

Πίνακας 8. Αποτελέσματα προσομοίωσης ρυπασμένου ψυγείου αέρα πλήρωσης

Ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης		T _{max_cyl}	P _{comp}	P _{max}	P _{ch_air}	T _{ch_air}	P _{exh}	T _{exh before T/C}	T/C speed	BSFC	T _{valve}
86 %	Ρύπανση 30%	+	0	0	0	+	0	+	+	+	+
	Ρύπανση 50%	+	0	0	0	+	0	+	+	+	+
75.9 %	Ρύπανση 30%	+	0	0	0	+	0	+	+	+	+
	Ρύπανση 50%	+	0	0	0	+	0	+	+	+	+
50.8 %	Ρύπανση 30%	+	0	0	0	+	0	+	0	+	0
	Ρύπανση 50%	+	0	0	0	+	0	+	0	+	0

Όλα τα φορτία

- i. Λόγω της βλάβης στο ψυγείο, ο αέρας πλήρωσης έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία, άρα μικρότερη πυκνότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μείγμα να γίνεται πιο πλούσιο, κατά 3-12% και η μέγιστη θερμοκρασία στον κύλινδρο να είναι αρκετά ανεβασμένη (50-140°C). Η θερμοκρασία της βαλβίδας επίσης αυξάνεται κατά 8-14 °C για τα μεγάλα φορτία και 3-5 °C για τα μικρά.
- ii. Οι θερμοκρασίες των καυσαερίων είναι επίσης μεγαλύτερες 25-60 °C, ενώ οι πιέσεις τους παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες - πέφτουν περίπου 0.02-0.05 bar. Ως αποτέλεσμα οι στροφές το τούρμπο αυξάνονται κατά 300-700 rpm για τα μεγάλα φορτία και 100 rpm για τα μικρότερα.
- iii. Λόγω της μικρότερης απόδοσης του ψυγείου, η θερμοκρασία του αέρα πλήρωσης αυξάνεται αισθητά, κατά 11-40 °C, αναλογικά με την αύξηση του φορτίου.

- iv. Η πίεση του αέρα πλήρωσης αυξάνεται ελάχιστα, κατά 0.05-0.15 bar, σε αντίθεση με τη μείωση που περιμέναμε λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας του. Αυτό εξηγείται, καθώς το πλουσιότερο μείγμα και οι ψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών του τούρμπο και τελικά το σύστημα ισορροπεί σε ελαφρώς μεγαλύτερες πιέσεις.
- v. Λόγω της καλύτερης λειτουργίας του τούρμπο και της εισαγωγής περισσότερου καυσίμου για να πετύχουμε την ίδια ισχύ, οι πιέσεις συμπίεσης και καύσης αυξάνονται κατά 1-3 bar, για τα μεγάλα φορτία, ενώ για τα μικρά δεν υφίστανται κάποια μεταβολή.

3.1.7α Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδας εξαγωγής (νωρίτερο άνοιγμα-κλείσιμο)

Από αυτή τη βλάβη αναμένουμε, λόγω του νωρίτερου ανοίγματος των βαλβίδων, οι θερμοκρασίες των καυσαερίων να είναι μεγαλύτερες. Βέβαια ο χρονισμός των βαλβίδων δε γίνεται πάντα σε σημείο τέτοιο ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απόδοση, αλλά σχετίζεται και με τις εκπομπές ρύπων, συνεπώς δε γνωρίζουμε αν ο αρχικός χρονισμός ήταν ο καταλληλότερος για μέγιστη απόδοση.

Πίνακας 9. Αποτελέσματα προσομοίωσης για νωρίτερο χρονισμό βαλβίδων εξαγωγής

Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδας εξαγωγής (νωρίτερο άνοιγμα-κλείσιμο)		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} before T/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Νωρίτερος χρονισμός κατά 10 μοίρες	0	-	0	0	0	0	+	-	0	0
	Νωρίτερος χρονισμός κατά 15 μοίρες	0	-	0	0	0	0	+	-	0	0
75.9 %	Νωρίτερος χρονισμός κατά 10 μοίρες	0	-	0	0	0	0	+	-	0	0
	Νωρίτερος χρονισμός κατά 15 μοίρες	0	-	0	0	0	0	+	-	0	0
50.8 %	Νωρίτερος χρονισμός κατά 10 μοίρες	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0
	Νωρίτερος χρονισμός κατά 15 μοίρες	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0

Όλα τα φορτία

- i. Οι βαλβίδες εξαγωγής ανοίγουν και κλείνουν νωρίτερα, κρατώντας ίδια τη διάρκεια που μένουν ανοιχτές.
- ii. Ανοίγοντας νωρίτερα τις βαλβίδες, ο κύλινδρος δεν εκμεταλλεύεται όλη την ενέργεια από το καύσιμο, γι αυτό και η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι αισθητά ψηλότερη (20-30 °C).
- iii. Ωστόσο η πίεση των καυσαερίων είναι ελαφρώς μικρότερη (0.1 bar), γεγονός που φαίνεται να επηρεάζει αρκετά τον υπερπληρωτή, αφού παρατηρούμε ότι οι στροφές στις οποίες ισορροπεί ο υπερπληρωτής είναι σημαντικά χαμηλότερες (κατά 600-1200 rpm).
- iv. Το μείγμα είναι πιο πλούσιο, καθώς ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου μειώνεται 2-6%, γι αυτό και η μέγιστη θερμοκρασία στον κύλινδρο και στη βαλβίδα εξαγωγής αυξάνονται κατά 20-45 °C και 1-4 °C αντίστοιχα.

- v. Οι μειωμένες στροφές του υπερπληρωτή έχουν σαν αποτέλεσμα την ελάχιστα μειωμένη πίεση το αέρα (0.02-0.05 bar), ενώ η θερμοκρασία του παραμένει αμετάβλητη (μικρότερη κατά 1 °C)
- vi. Γι αυτό το λόγο η πίεση συμπίεσης πέφτει (1.5-5 bar), ενώ και η πίεση καύσης μειώνεται, αλλά αμελητέα (1-3 bar).
- vii. Επισημαίνεται ότι οι μεταβολές στα μικρότερα φορτία συμβαίνουν σε μικρότερη κλίμακα.

3.1.7β Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδας εξαγωγής (αργότερο άνοιγμα-κλείσιμο)

Η βλάβη αυτή περιμένουμε να έχει αντίθετα αποτελέσματα από το νωρίτερο χρονισμό, συνεπώς και μειωμένες θερμοκρασίες καυσαερίων.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα προσομοίωσης για αργότερο χρονισμό βαλβίδων εξαγωγής

Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδας εξαγωγής (αργότερο άνοιγμα-κλείσιμο)		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} beforeT/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Αργότερος χρονισμός κατά 15 μοίρες	-	+	+	+	0	+	-	+	0	0
	Αργότερος χρονισμός κατά 20 μοίρες	-	+	+	+	0	+	-	+	+	0
75.9 %	Αργότερος χρονισμός κατά 15 μοίρες	-	+	+	+	0	+	-	+	0	0
	Αργότερος χρονισμός κατά 20 μοίρες	-	+	+	+	0	+	-	+	+	0
50.8 %	Αργότερος χρονισμός κατά 15 μοίρες	0	0	0	0	0	0	-	+	0	0
	Αργότερος χρονισμός κατά 20 μοίρες	0	0	0	0	0	0	-	+	+	0

Όλα τα φορτία

- i. Αργότερο άνοιγμα σημαίνει μειωμένες θερμοκρασίες καυσαερίων (15-50 °C), που συνδυάζονται με μεγαλύτερες πιέσεις (0.05-0.25 bar), οι οποίες οδηγούν σε σημαντική αύξηση των στροφών του τούρμπο (700-1800 rpm).
- ii. Ο αέρας πλήρωσης έχει σαν συνέπεια μεγαλύτερη πίεση κατά 0.03-0.3 bar, ενώ η θερμοκρασία του αυξάνεται ελάχιστα (1-3 °C), λόγω της μεγαλύτερης πίεσης.
- iii. Εισάγεται περισσότερος αέρας στον κύλινδρο και περισσότερο καύσιμο με αποτέλεσμα τελικά το μείγμα να είναι φτωχότερο κατά 1-10% και η μέγιστη θερμοκρασία κυλίνδρου να πέφτει σημαντικά (10-70 °C). Η θερμοκρασία της βαλβίδας ωστόσο παραμένει αμετάβλητη (μικρότερη κατά 1 °C)
- iv. Λόγω της εισαγωγής περισσότερου αέρα και καυσίμου αυξάνονται οι πιέσεις συμπίεσης και καύσης κατά 2-11 bar
- v. Επισημαίνεται ότι οι μεταβολές στα μικρότερα φορτία συμβαίνουν σε μικρότερη κλίμακα, γι αυτό και οι πολύ χαμηλές παραπάνω τιμές μεταβολής στο εύρος που παραθέτουμε.

3.1.8 Φραγμένο φίλτρο συμπίεστή

Λόγω της μειωμένης ροής αέρα προς το συμπίεστή περιμένουμε χαμηλότερη πίεση σάρωσης και συμπίεσης.

Πίνακας 11. Αποτελέσματα προσομοίωσης για φραγμένο φίλτρο συμπίεστή

Φραγμένο φίλτρο συμπίεστή		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} beforeT/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Φραγμένο κατά 25%	+	-	-	-	0	0	+	+	+	0
	Φραγμένο κατά 30%	+	-	-	-	0	0	+	+	+	+
75.9 %	Φραγμένο κατά 25%	+	-	-	-	0	0	+	+	+	0
	Φραγμένο κατά 30%	+	-	-	-	0	0	+	+	+	+
50.8 %	Φραγμένο κατά 25%	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0
	Φραγμένο κατά 30%	+	-	-	0	0	0	+	+	+	0

Όλα τα φορτία

- Η ροή του αέρα εμποδίζεται λόγω του φραγμένου φίλτρου, γι αυτό και η πίεσή του πέφτει (0.07-0.45 bar), όπως και η θερμοκρασία του, αμελητέα όμως (1-2 °C)
- Το μείγμα είναι πλουσιότερο (3.5-20%) λόγω της εισαγωγής περισσότερου καυσίμου και της μείωσης της μάζας του αέρα, γι αυτό και οι θερμοκρασίες στον κύλινδρο αυξάνονται (30-170 °C), ενώ οι θερμοκρασίες της βαλβίδας αυξάνονται ελαφρώς (2.5-8 °C).
- Η χαμένη ενέργεια των καυσαερίων είναι πολύ μεγαλύτερη. Αυτό γίνεται κατανοητό λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας τους (15-80 °C), καθώς η πίεσή τους ελαφρώς πέφτει (0.02-0.2 bar) λόγω των μικρότερων πιέσεων του κυλίνδρου. Έτσι οι στροφές του τούρμπο αυξάνονται (900-1200 rpm).
- Οι πιέσεις συμπίεσης και καύσης είναι σαφώς μικρότερες (2-17 bar), αφού η πίεση του αέρα πέφτει σημαντικά.

Αξιοπρόσεκτο σε αυτή τη βλάβη είναι ότι ενώ αυξάνονται οι στροφές του υπερπληρωτή, η πίεση του αέρα μειώνεται, λόγω της μειωμένης ροής προς το συμπίεστή.

3.1.9 Ρυπασμένος συμπίεστης

Αναμένουμε περίπου ίδια αποτελέσματα με το φραγμένο φίλτρο, ωστόσο ο συνδυασμός μειωμένης ροής αέρα και απόδοσης συμπίεστη μας προϊδεάζει για αδύναμη λειτουργία του υπερπληρωτή.

Πίνακας 12. Αποτελέσματα προσομοίωσης για ρυπασμένο ή φθαρμένο συμπίεστη

Ρυπασμένος συμπίεστης		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} before T/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Ρύπανση 12%-6%	+	-	-	-	0	0	+	-	+	0
	Ρύπανση 15%-7.5%	+	-	-	-	0	0	+	-	+	0
75.9 %	Ρύπανση 12%-6%	+	-	-	-	0	0	+	-	+	0
	Ρύπανση 15%-7.5%	+	-	-	-	0	0	+	-	+	0
50.8 %	Ρύπανση 12%-6%	+	0	0	0	0	0	+	-	+	0
	Ρύπανση 15%-7.5%	+	0	0	0	0	0	+	-	+	0

Όλα τα φορτία

- i. Λόγω της ρύπανσης του συμπίεστη, καταρχάς εμποδίζεται η ροή διαμέσου των πτερυγίων του και κατά δεύτερον μειώνεται η ικανότητά του να εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια που του προσδίδει ο στρόβιλος μέσω του κοινού τους άξονα.
- ii. Συνεπώς τα αποτελέσματα της βλάβης αυτής είναι ίδια με αυτά του φραγμένου φίλτρου, μόνο που οι στροφές του υπερπληρωτή μειώνονται (700-1300 rpm) στην περίπτωση του ρυπασμένου συμπίεστη. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί μέσω της μικρότερης αύξησης της θερμοκρασίας των καυσαερίων (20-50 °C), σε συνδυασμό με τη μειωμένη απόδοση του συμπίεστη λόγω της ρύπανσης. Αυτό επίσης περιμένουμε να συμβεί και στην πραγματική βλάβη, καθώς η ρύπανση όπως εξηγήσαμε αρχικώς, κάνει πιο "βαρύ" τον συμπίεστη, άρα ρίχνει τις στροφές του.
- iii. Δηλαδή η διαφορά με το φραγμένο φίλτρο είναι ότι το φίλτρο επηρεάζει μόνο τον αέρα που εισάγεται στο συμπίεστη, ενώ βλάβη στο στροφείο επηρεάζει συνολικά τη λειτουργία του συμπίεστη, και συνεπώς ολόκληρου του υπερπληρωτή.

3.1.10 Ρυπασμένος στρόβιλος

Ο στρόβιλος γίνεται πιο "βαρύς" συνεπώς η λειτουργία του τούρμπο δυσχεραίνεται, άρα οι στροφές του πέφτουν.

Πίνακας 13. Αποτελέσματα προσομοίωσης για ρυπασμένο στρόβιλο

Ρυπασμένος στρόβιλος		T_{max_cyl}	P_{comp}	P_{max}	P_{ch_air}	T_{ch_air}	P_{exh}	T_{exh} before T/C	T/C speed	BSFC	T_{valve}
86 %	Ρύπανση 12%	+	-	0	0	0	+	+	-	+	0
	Ρύπανση 15%	+	-	0	0	0	+	+	-	+	0
75.9 %	Ρύπανση 12%	+	-	0	0	0	+	+	-	+	0
	Ρύπανση 15%	+	-	0	0	0	+	+	-	+	0
50.8 %	Ρύπανση 12%	0	0	0	0	0	0	+	0	+	0
	Ρύπανση 15%	0	0	0	0	0	0	+	0	+	0

Υψηλά φορτία

- Ο στρόβιλος επειδή ρυπαίνεται έχει χαμηλότερη απόδοση και χαμηλότερη ικανότητα να εκμεταλλευτεί τη ροή των καυσαερίων (swallowing capacity).
- Η πτώση των στροφών αρχικά μειώνει τον αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο, ενώ το καύσιμο αυξάνεται. Όμως η χαμένη ενέργεια προς τα καυσαέρια αυξάνεται, με αποτέλεσμα η πίεση και η θερμοκρασία των καυσαερίων να αυξάνονται (0.2-0.3 bar και 30-50 °C αντίστοιχα).
- Ο στρόβιλος όμως δε μπορεί να εκμεταλλευτεί αυτή την ενέργεια με αποτέλεσμα οι στροφές να πέφτουν αισθητά (400-900 rpm) και η πίεση του αέρα ουσιαστικά να μένει ίδια (αμελητέα μείωση της τάξης του 0.01 bar).
- Η απόδοση του ψυγείου είναι ίδια, γι αυτό και παρατηρούμε μείωση της θερμοκρασίας του αέρα (1-2°C).
- Το μείγμα λόγω της έγχυσης περισσότερου καυσίμου γίνεται πλουσιότερο (4-7.5%) κι η μέγιστη θερμοκρασία στον κύλινδρο αυξάνεται 50-70 °C, ενώ της βαλβίδας μένει πρακτικά σταθερή (αυξημένη κατά 3-6 °C)

Χαμηλά φορτία

Εντοπίζεται σημαντική διαφορά στις στροφές του υπερπληρωτή. Ενώ στα μεγάλα φορτία οι στροφές μειώνονται αισθητά, στα μικρά φορτία μένουν σχεδόν αμετάβλητες, με μια ελάχιστη αύξηση (100 rpm). Η μικρή αυτή αύξηση συνοδεύεται από αμελητέα μεταβολή στην πίεση των καυσαερίων (αύξηση 0.1 bar), ενώ οι θερμοκρασίες των καυσαερίων αυξάνονται (10-15 °C). Βλέπουμε δηλαδή ότι η χαμένη ενέργεια προς τα καυσαέρια είναι μικρότερη στα χαμηλά φορτία (όπως αναμένεται), αλλά οι στροφές του τούρμπο μένουν σταθερές.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η λειτουργία υπό βλάβη στο στρόβιλο στα χαμηλά φορτία επηρεάζει πολύ λιγότερο τον κινητήρα σε σχέση με τα μεγάλα φορτία, και μάλιστα η καλύτερη λειτουργία του τούρμπο κρατάει σχεδόν αμετάβλητο το λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (πτώση 0.6-0.9%), οπότε και οι θερμοκρασίες στον κύλινδρο μένουν αμετάβλητες (5-10 °C ψηλότερες)

Κεφάλαιο 4ο. Συμπεράσματα και επιβεβαίωση θεωρίας

4.1 Θεωρία

4.1.1 Θερμοκρασία καυσαερίων

Ισορροπία ενέργειας στον κύλινδρο:

$$\dot{m}_f * h_f + \dot{m}_{ch_a} * h_{ch_a} = P_b + \dot{Q}_C + \dot{Q}_{misc} + \dot{m}_e * h_e \quad (8)$$

Όπου:

\dot{m}_f, h_f : ρυθμός έγχυσης και ενθαλπία καυσίμου

\dot{m}_{ch_a}, h_{ch_a} : ροή και ενθαλπία αέρα εισαγωγής

P_b : παραγόμενη ισχύς

\dot{Q}_C : ισχύς που καταναλώνεται για ψύξη

\dot{m}_e, h_e : ροή και ενθαλπία καυσαερίων

\dot{Q}_{misc} : υπόλοιπη ισχύς (ακτινοβολία, απώλειες)

Τα καυσαέρια είναι τμήμα της χαμένης ενέργειας της καύσης. Συνεπώς, σε περίπτωση βλάβης, η καύση και η απελευθέρωση ενέργειας από το καύσιμο δεν δίνουν τη μέγιστη ισχύ, οπότε αυξάνεται το ενεργειακό περιεχόμενο των καυσαερίων (χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις βλάβες στον υπερπληρωτή που είναι ξεχωριστό κεφάλαιο και την προπορεία έγχυσης καυσίμου, που δίνει μεγαλύτερη ισχύ, αλλά δεν προτιμάται λόγω αυξημένων πιέσεων, θερμοκρασιών και εκπομπών). Αυξημένη ενθαλπία καυσαερίων σημαίνει μεγαλύτερη πίεση ή/και θερμοκρασία τους.

4.1.2 Στροφές υπερπληρωτή

Ισχύς στροβίλου:

$$\dot{W}_T = \dot{m}_e * c_{p_e} * T_e * \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_e} \right)^{\frac{\gamma_e - 1}{\gamma_e}} \right] * \frac{1}{n_T} \quad (9)$$

Όπου:

\dot{W}_T : ισχύς παραγόμενη από το στρόβιλο

\dot{m}_e, c_{p_e}, T_e : ροή, ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία καυσαερίων

P_a : ατμοσφαιρική πίεση

P_e : πίεση καυσαερίων

γ_e : αδιαβατικός συντελεστής για τα καυσαέρια

n_T : βαθμός απόδοσης στροβίλου

Συνεπώς η ισχύς της τουρμπίνας είναι ανάλογη της ροής, της θερμοκρασίας και της πίεσης των καυσαερίων κατά κύριο λόγο. Η ισχύς του στροβίλου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την

ταχύτητα του υπερπληρωτή. Άρα παρατηρούμε σύνδεση ανάμεσα στην κατάσταση των καυσαερίων και τις στροφές του υπερπληρωτή.

Ισχύς συμπίεστή:

$$\dot{W}_C = \dot{W}_T * n_m \quad (10)$$

Όπου:

\dot{W}_C : ισχύς συμπίεστή

\dot{W}_T : ισχύς στροβίλου

n_m : μηχανικός βαθμός απόδοσης αξονικού συστήματος υπερπληρωτή

Η ισχύς του συμπίεστή είναι ανάλογη της ισχύος της τουρμπίνας, λαμβάνοντας υπόψη κάποιες απώλειες του κοινού αξονικού τους συστήματος.

$$\dot{W}_C = \dot{m}_a * c_{p_a} * T_a * \left[\left(\frac{P_{ch_a}}{P_a} \right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right] * \frac{1}{n_c} \quad (11)$$

Όπου:

\dot{W}_C : ισχύς συμπίεστή

\dot{m}_a, c_{p_a}, T_a : ροή, ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία αέρα

P_a : ατμοσφαιρική πίεση

P_{ch_a} : πίεση αέρα πλήρωσης κυλίνδρου

γ_a : αδιαβατικός συντελεστής για τον αέρα

n_c : βαθμός απόδοσης συμπίεστή

Η ροή, η θερμοκρασία και η πίεση του αέρα πλήρωσης είναι ανάλογες προς την ισχύ του συμπίεστή, άρα ανάλογη και προς τις στροφές του τούρμπο, λόγω όσων αναφέρθηκαν πριν. Συνεπώς υπάρχει σύνδεση μεταξύ των στροφών του τούρμπο και της κατάστασης του αέρα πλήρωσης.

4.2 Εξαγωγή συμπερασμάτων για την σύνδεση των μεταβολών των παραμέτρων λειτουργίας της μηχανής λόγω βλαβών.

Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων που ακολουθούν μειώσαμε τις τιμές των σημαντικών αποκλίσεων, πάνω ή κάτω από τις οποίες θεωρείται ότι αυξάνεται ή μειώνεται η τιμή της παραμέτρου που εξετάζουμε κάθε φορά, σε σχέση με τους πίνακες της προσομοίωσης.

4.2.1 Σύνδεση πίεσης, θερμοκρασίας καυσαερίων και στροφών τούρμπο, μέσα από την προσομοίωση που έγινε

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται οι μεταβολές που προκαλούν οι βλάβες:

1. Στην πίεση και τη θερμοκρασία των καυσαερίων
2. Στην πίεση των καυσαερίων και στις στροφές του υπερπληρωτή
3. Στη θερμοκρασία των καυσαερίων και τις στροφές του υπερπληρωτή

- ✓ Με πορτοκαλί χρώμα οι βλάβες που έχουν ίδιο αποτέλεσμα
- ✓ Με μπλε χρώμα οι βλάβες που έχουν αντίθετο αποτέλεσμα
- ✓ Με λευκό χρώμα οι βλάβες που η μεταβολή της πίεσης, της θερμοκρασίας ή των στροφών του υπερπληρωτή είναι αμελητέα

Πίνακας 14. Σύγκριση των τάσεων των μεταβολών που προκαλούν οι βλάβες μεταξύ της πίεσης, της θερμοκρασίας καυσαερίων και των στροφών του υπερπληρωτή

Πίεση και θερμοκρασία καυσαερίων		Υψηλά φορτία	Χαμηλά φορτία
	1.	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου
2.	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου
3.	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο
4.	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής
5.	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο
6.	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα
7.	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
8.	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
9.	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή
10.	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής
11.	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος

Πίεση καυσαερίων και στροφές υπερπληρωτή		Υψηλά φορτία	Χαμηλά φορτία
	1.	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου
2.	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου
3.	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο
4.	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής
5.	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο
6.	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα
7.	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
8.	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
9.	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή
10.	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής
11.	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος

Θερμοκρασία καυσαερίων και στροφές υπερπληρωτή		Υψηλά φορτία	Χαμηλά φορτία
	1.	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου
2.	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου
3.	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο
4.	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής
5.	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο
6.	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα
7.	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
8.	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
9.	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή
10.	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής
11.	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι:

Η πίεση και η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν μεταβάλλονται πάντα το ίδιο

Η αύξηση του ενεργειακού περιεχομένου των καυσαερίων δε συνεπάγεται ταυτόχρονη αύξηση και των δύο, καθώς επηρεάζονται και από τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες του κυλίνδρου.

Για παράδειγμα ένα πιο πλούσιο μείγμα μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των θερμοκρασιών του κυλίνδρου, που θα επηρεάσουν τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Οι πιέσεις στον κύλινδρο όμως μπορεί να είναι μειωμένες και τελικά οι πιέσεις των καυσαερίων να μειώνονται. Αυτό συμβαίνει κυρίως στις βλάβες που αφορούν τον υπερπληρωτή.

Οι στροφές του υπερπληρωτή φαίνεται να ακολουθούν περισσότερο την τάση της πίεσης των καυσαερίων, παρά της θερμοκρασίας τους

Και μάλιστα για όλα τα φορτία. Όπως περιγράψαμε πριν, οι στροφές του υπερπληρωτή έχουν άμεση εξάρτηση από τη ροή, την πίεση και τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Στις 6 από τις 11 βλάβες, η αύξηση ή η μείωση της πίεσης των καυσαερίων φαίνεται να είναι αυτή που καθορίζει την αύξηση ή μείωση αντίστοιχα των στροφών του τούρμπο, ενώ μόνο για 2 από τις 11 συμβαίνει το αντίθετο. Από την άλλη μεριά, 5 στις 11 βλάβες έχουν αντίθετη μεταβολή στη θερμοκρασία των καυσαερίων και των στροφών του υπερπληρωτή.

4.2.2 Σύνδεση των στροφών του υπερπληρωτή με την πίεση του αέρα πλήρωσης

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται οι μεταβολές που προκαλούν οι βλάβες στις στροφές του τούρμπο και στην πίεση του αέρα πλήρωσης:

- ✓ Με πορτοκαλί χρώμα οι βλάβες που έχουν ίδιο αποτέλεσμα
- ✓ Με μπλε χρώμα οι βλάβες που έχουν αντίθετο αποτέλεσμα
- ✓ Με λευκό χρώμα οι βλάβες που η μεταβολή της πίεσης του αέρα πλήρωσης ή των στροφών του υπερπληρωτή είναι αμελητέα

Πίνακας 15. Σύγκριση των τάσεων των μεταβολών που προκαλούν οι βλάβες μεταξύ της πίεσης του αέρα και των στροφών του υπερπληρωτή

Πίεση αέρα πλήρωσης και στροφές υπερπληρωτή		Υψηλά φορτία	Χαμηλά φορτία
	1.	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου
	2.	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου
	3.	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο
	4.	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής
	5.	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο
	6.	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα
	7.	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
	8.	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
	9.	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή
	10.	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής
	11.	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος

Είναι κάτι που αναμένεται, καθώς αύξηση των στροφών του υπερπληρωτή συνεπάγεται ανεβασμένη λειτουργία του συμπιεστή, καθώς αναρροφά περισσότερο αέρα και τον συμπιέζει περισσότερο σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο αέρας στην εισαγωγή να έχει αυξημένη πίεση.

Ωστόσο στη βλάβη του φραγμένου φίλτρου συμπιεστή φαίνεται ότι οι ανεβασμένες στροφές του συμπιεστή δεν αρκούν για να αποκαταστήσουν τη ροή του αέρα προς το συμπιεστή, η οποία λόγω του φραγμένου φίλτρου είναι σημαντικά μειωμένη. Γι αυτό και τελικά η πίεση του αέρα είναι μικρότερη σε σχέση με την κατάσταση χωρίς βλάβη. Οι κατασκευαστές προτείνουν καθαρισμό του φίλτρου σε περίπτωση που το φράξιμο φτάνει το 50%.

4.2.3 Πίεση και θερμοκρασία του αέρα πλήρωσης

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται οι μεταβολές που προκαλούν οι βλάβες στην πίεση και τη θερμοκρασία του αέρα πλήρωσης:

- ✓ Με πορτοκαλί χρώμα οι βλάβες που έχουν ίδιο αποτέλεσμα
- ✓ Με μπλε χρώμα οι βλάβες που έχουν αντίθετο αποτέλεσμα
- ✓ Με λευκό χρώμα οι βλάβες που η μεταβολή της πίεσης ή της θερμοκρασίας του αέρα πλήρωσης είναι αμελητέα

Πίνακας 16. Σύγκριση των τάσεων των μεταβολών που προκαλούν οι βλάβες μεταξύ της πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα πλήρωσης

Πίεση και θερμοκρασία αέρα πλήρωσης		Υψηλά φορτία	Χαμηλά φορτία
	1.	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου
2.	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου
3.	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο
4.	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής
5.	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο
6.	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα
7.	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
8.	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
9.	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή
10.	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής	Ρυπασμένος συμπιεστής
11.	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος

Η αύξηση της πίεσης του αέρα πλήρωσης από το συμπιεστή οδηγεί σε αυξημένη θερμοκρασία του, γι αυτό και χρησιμοποιείται ψυγείο μετά το συμπιεστή, ώστε να ρίξει τη θερμοκρασία του και να αυξηθεί η πυκνότητα, άρα και η μάζα του. Βλάβες που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση της πίεσης του αέρα πλήρωσης, αυξάνουν ή μειώνουν αντίστοιχα και τη θερμοκρασία του, καθώς υποθέτουμε ότι η απόδοση του ψυγείου του αέρα παραμένει ίδια (εκτός αν έχει υποστεί βλάβη).

Υποθέτοντας τον αέρα πλήρωσης ως τέλειο αέριο, εφαρμόζουμε την καταστατική εξίσωση των αερίων προς επιβεβαίωση των παραπάνω:

$$pV = mRT \quad \text{ή} \quad \rho = \frac{p}{R * T} \quad (12)$$

4.2.4 Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου (λ) & θερμοκρασία κυλίνδρου και βαλβίδας

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται οι μεταβολές που προκαλούν οι βλάβες στο λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου και τη θερμοκρασία στον κύλινδρο

- ✓ Με πορτοκαλί χρώμα οι βλάβες που έχουν ίδιο αποτέλεσμα
- ✓ Με μπλε χρώμα οι βλάβες που έχουν αντίθετο αποτέλεσμα
- ✓ Με λευκό χρώμα οι βλάβες που η μεταβολή του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου ή της μέγιστης θερμοκρασίας κυλίνδρου είναι αμελητέα

Πίνακας 17. Σύγκριση των τάσεων των μεταβολών που προκαλούν οι βλάβες μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας του κυλίνδρου και του λόγου ισοδυναμίας αέρα καυσίμου

Λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου και μέγιστη θερμοκρασία κυλίνδρου		Υψηλά φορτία	Χαμηλά φορτία
	1.	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου
	2.	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	Προπορεία έγχυσης καυσίμου
	3.	Κακής ποιότητας καύσιμο	Κακής ποιότητας καύσιμο
	4.	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής
	5.	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο
	6.	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα
	7.	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
	8.	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής
	9.	Φραγμένο φίλτρο συμπίεστή	Φραγμένο φίλτρο συμπίεστή
	10.	Ρυπασμένος συμπίεστής	Ρυπασμένος συμπίεστής
11.	Ρυπασμένος στρόβιλος	Ρυπασμένος στρόβιλος	

Επιβεβαιώνεται ότι ο λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου, που δείχνει αν το μείγμα είναι πλουσιότερο ή φτωχότερο από τη στοιχειομετρική αναλογία, επηρεάζει τη μέγιστη θερμοκρασία του κυλίνδρου, άρα και συνολικά τις θερμοκρασίες που επικρατούν στον κύλινδρο. Πιο συγκεκριμένα:

Όταν ο λόγος ισοδυναμίας είναι σημαντικά μειωμένος (βραδυπορία έγχυσης καυσίμου, κύλινδρος με διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής, ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης, φραγμένο φίλτρο συμπίεστή, ρυπασμένος συμπίεστής ή στρόβιλος), οι θερμοκρασίες του κυλίνδρου είναι αυξημένες σημαντικά, λόγω πλουσιότερου μείγματος. Μικρότερη, αλλά στην ίδια βάση, είναι η επίδραση του λόγου αέρα-καυσίμου και στην έδρα της βαλβίδας εξαγωγής.

Όταν το μείγμα είναι φτωχότερο (προπορεία έγχυσης καυσίμου και αργότερος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής) οι θερμοκρασίες πέφτουν.

Μαζί με την παραπάνω διαπίστωση, σημειώνουμε ότι οι περισσότερες βλάβες έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου.

4.3 Διαγράμματα πίεσης κυλίνδρου σε σχέση με τη γωνία στροφάλου

Τα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν την πίεση του κυλίνδρου σε σχέση με τη γωνία στροφάλου, κοντά στο άνω νεκρό σημείο, λίγο πριν και λίγο μετά την έγχυση του καυσίμου και την καύση.

Παραθέτουμε διαγράμματα βλαβών για τις οποίες μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα. Στις υπόλοιπες βλάβες που προσομοιώθηκαν τα διαγράμματα είναι πολύ κοντινά με την κατάσταση χωρίς βλάβη. Επίσης τα διαγράμματα αφορούν τα φορτία 86% και 50%. Τα διαγράμματα παρήχθησαν με τη βοήθεια κώδικα στο πρόγραμμα Matlab από τα αρχεία που εξάγαμε από τις προσομοιώσεις στο MO.THER.

4.3.1 Λόγος P_{max}/P_{comp}

Μεγάλη σημασία δίνεται στο πηλίκο $\frac{P_{max}}{P_{comp}}$ για 3 λόγους:

1. Συνδέεται με το βαθμό απόδοσης της καύσης, άρα και του κινητήρα

Η μέγιστη πίεση είναι συνάρτηση του ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου, δε συνδέεται άμεσα όμως με την απόδοση του κινητήρα, καθώς η μέση πραγματική πίεση του κυλίνδρου είναι αυτή που μας δείχνει συνολικά την ενέργεια που απελευθερώνεται από το καύσιμο.

Για παράδειγμα ένα καύσιμο κακής ποιότητας μπορεί να επιτύχει πολύ μεγάλες μέγιστες πιέσεις στον κύλινδρο, μέχρι και να προκαλέσει κτύπημα κυλίνδρου, ωστόσο η μέση πίεση στον κύλινδρο είναι πολύ πιο χαμηλή, αν δεν αλλάξουμε το εγχεόμενο καύσιμο.

Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος $\frac{P_{max}}{P_{comp}}$ τόσο καλύτερη απόδοση έχει το καύσιμο και ο κινητήρας, γιατί:

$$n_{th} = \frac{\text{Παραγόμενο έργο}}{\text{Ενέργεια που δίνεται}} \quad (13)$$

Η ενέργεια που δίνεται στον κινητήρα αποτελείται από:

- ✓ Τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου, που αποτελεί το μέτρο της ενέργειας που μετατρέπεται από χημική σε θερμική κατά την καύση του
- ✓ Την ενέργεια που προσδίδει ο αέρας πλήρωσης

2. Συνδέεται με την καταπόνηση των εδράνων του άξονα, των κουζινέτων του διωστήρα και του εμβόλου, των ελατηρίων των εμβόλων

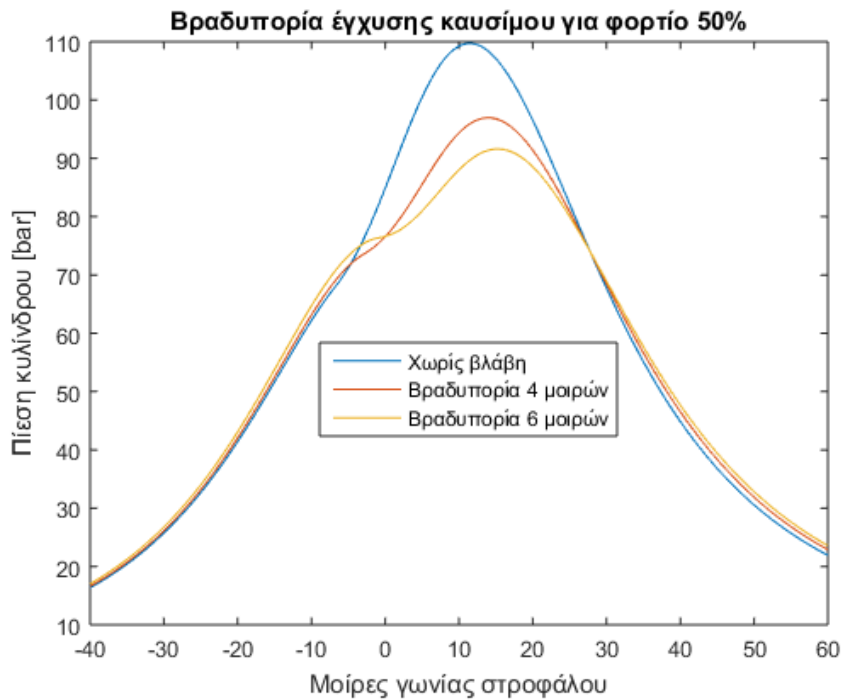
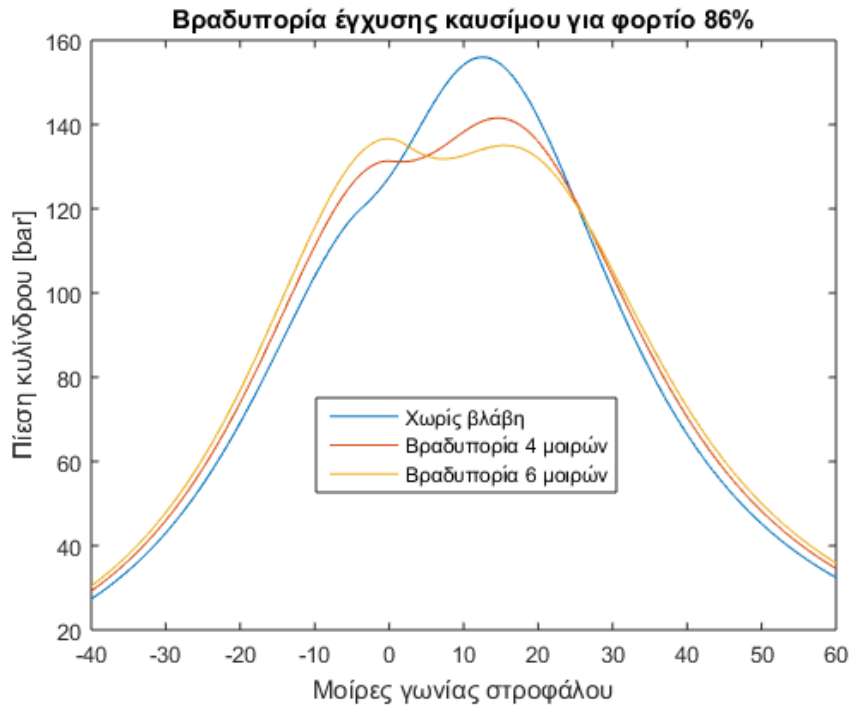
Όσο μεγαλύτερες πιέσεις δέχονται τα μέρη του κυλίνδρου, τόσο πιο εύκολα υφίστανται φθορές, ρωγμές, λυγισμό. Για συνηθισμένες μηχανές Diesel προτείνεται ο λόγος $\frac{P_{max}}{P_{comp}}$ να μην ξεπερνάει το 1.5 (30)

3. Τέλος συνδέεται με τις εκπομπές ρύπων και συγκεκριμένα με τα οξείδια του αζώτου (NOx)

Ο σχηματισμός τους ευνοείται σε μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες κυλίνδρου. Πειράματα, μάλιστα, έδειξαν ότι τα NOx είναι ευθέως ανάλογα με το λόγο $\frac{P_{max}}{P_{comp}}$, ο οποίος εξετάστηκε όμως σε επίπεδο σχεδίασης κι όχι παρουσία κάποιας βλάβης (31).

4.3.2 Παράθεση ενδεικτικών διαγραμμάτων

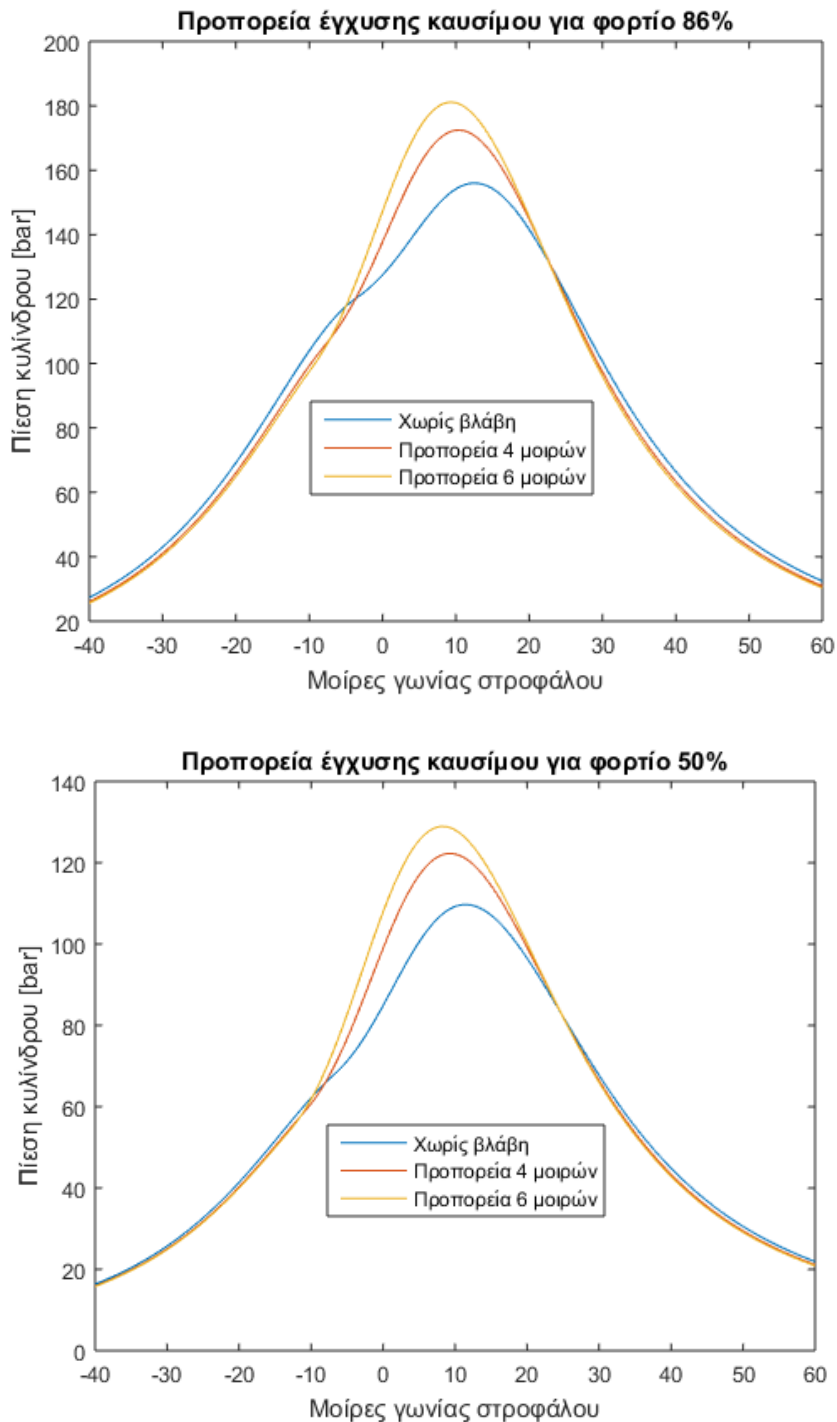
Για την καλύτερη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας (χωρίς βλάβη, με μικρή ή μεγάλη βλάβη) εστιάζουμε στην περιοχή του διαγράμματος γύρω από το άνω νεκρό σημείο τη στιγμή της έγχυσης. Γι αυτό επιλέξαμε να δείξουμε τις διαφορές των διαγραμμάτων για γωνίες 40 μοιρών πριν το άνω νεκρό σημείο και 60 μοιρών μετά το άνω νεκρό σημείο.



Διάγραμμα 1. Πίεση-γωνία στροφάλου για βραδυπορία έγχυσης καυσίμου σε 86% και 50% φορτίο

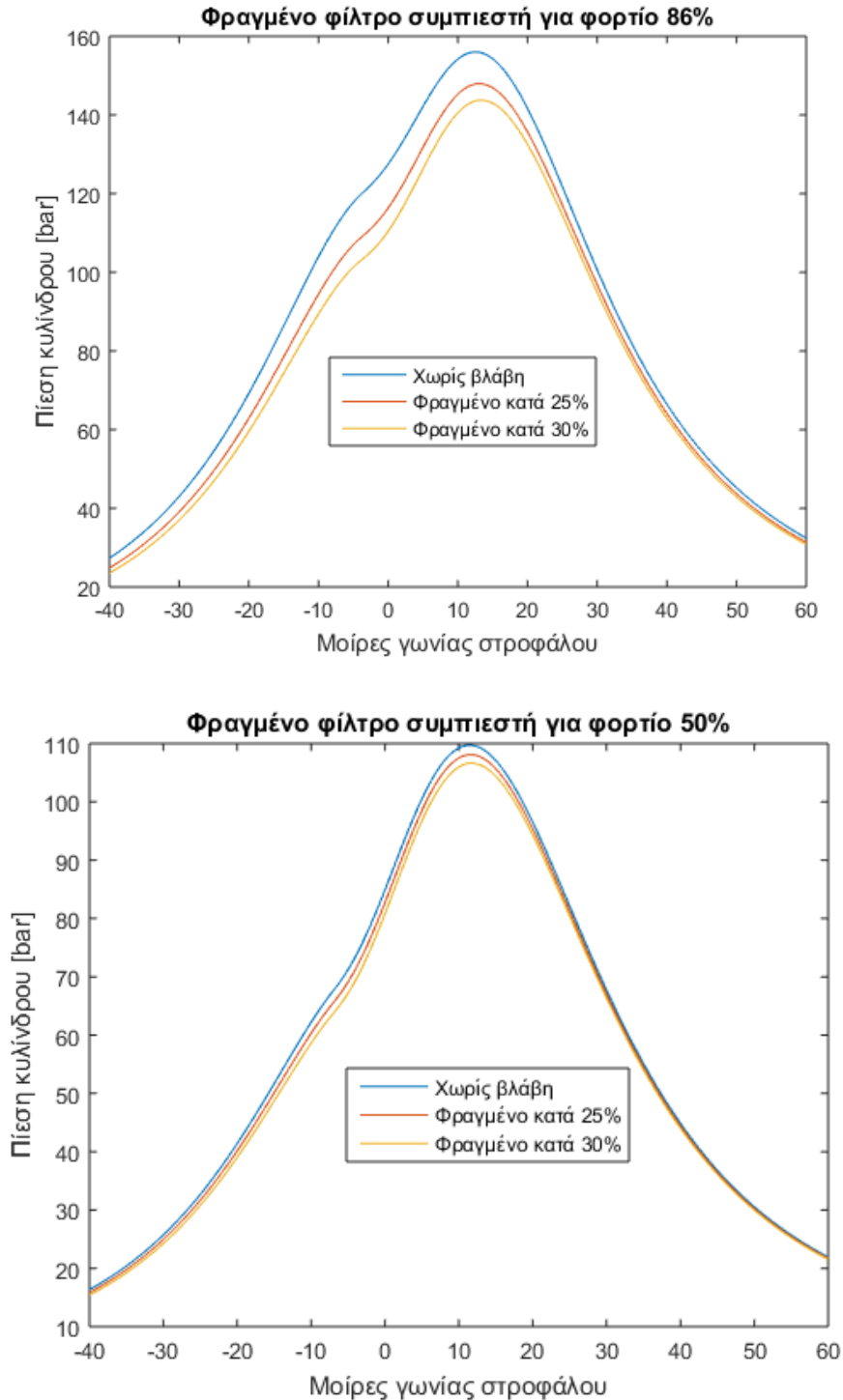
Παρατηρούμε ότι, για τις βλάβες της βραδυπορίας έγχυσης καυσίμου και της κακής ποιότητας καυσίμου, ο λόγος $\frac{p_{max}}{p_{comp}}$ μειώνεται αισθητά 20-35%, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα φορτία. Η απόδοση του κινητήρα είναι εμφανώς μειωμένη, καθώς για να παράξει την ίδια ισχύ χρειάζεται περισσότερο καύσιμο.

Ειδικά για τη βλάβη των 6 μοιρών πιο αργής έγχυσης καυσίμου στο φορτίο 86%, παρατηρούμε ότι η πίεση καύσης είναι μικρότερη από την πίεση συμπίεσης, που σημαίνει ότι η καύση γίνεται τόσο αργοπορημένα που η πίεση του κυλίνδρου έχει πέσει αισθητά και η κατάσταση προσομοιάζει σε misfiring.



Διάγραμμα 2. Πίεση-γωνία στροφάλου για προπορεία έγχυσης καυσίμου σε 86% και 50% φορτίο

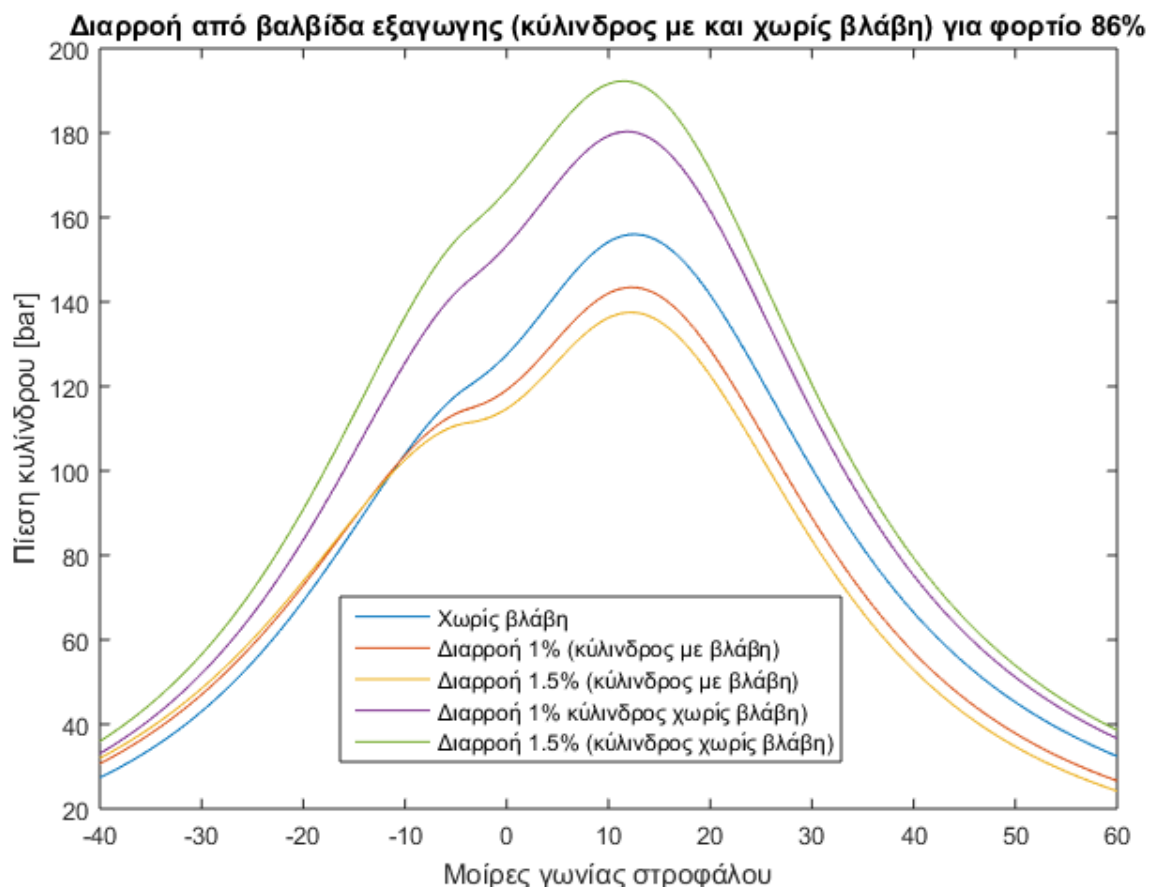
Παρατηρείται απότομη αύξηση της πίεσης, καθώς την πίεση συμπίεσης διαδέχεται γρηγορότερα η απελευθέρωση ενέργειας λόγω καύσης, οπότε η πίεση φαίνεται συνεχώς να αυξάνεται. Ο λόγος $\frac{p_{max}}{p_{comp}}$ αυξάνεται αισθητά 20-30% σ όλα τα φορτία. Για το λόγο αυτό δεν προτιμάται η νωρίτερη έγχυση, παρόλο που ο κινητήρας έχει καλύτερες επιδόσεις.



Διάγραμμα 3. Πίεση-γωνία στροφάλου για φραγμένο φίλτρο συμπίεστή σε 86% και 50% φορτίο

Παρατηρείται ένα ομοιόμορφο off-set προς μικρότερες πιέσεις στο διάγραμμα. Το ίδιο συμβαίνει στις βλάβες του ρυπασμένου συμπιεστή και στροβίλου, με μικρότερο όμως εύρος.

Στις βλάβες του ψυγείου και του χρονισμού των βαλβίδων το off-set είναι πολύ μικρότερο, κάπου και αμελητέο.



Διάγραμμα 4. Πίεση-γωνία στροφάλου για διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής σε 86% φορτίο

Παρατηρούμε ότι ο κύλινδρος με τη βλάβη στη βαλβίδα εξαγωγής έχει διάγραμμα πίεσης που μοιάζει πολύ με αυτό της αργότερης έγχυσης καυσίμου, ωστόσο η πίεση συμπίεσης είναι μικρότερη από την κατάσταση χωρίς βλάβη, ενώ μετά από την πίεση συμπίεσης ακολουθείται off-set προς χαμηλότερες πιέσεις. Ο κύλινδρος χωρίς βλάβη παρουσιάζει off-set προς πολύ μεγαλύτερες πιέσεις που φτάνουν ακόμα και τα 200 bar, καθώς και ο αέρας, αλλά και το εγχέόμενο καύσιμο έχουν μεγαλύτερη μάζα. Οι τόσο μεγάλες πιέσεις ενδέχεται να οδηγήσουν σε κτύπημα κυλίνδρου ή/και να προκαλέσουν φθορές και αστοχίες σε εξαρτήματά του (κουζινέτα διωστήρα, πύρος εμβόλου, έμβολο και διωστήρας).

Κεφάλαιο 5ο. Διάγνωση

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία, αλλά και σε πολλές βιομηχανικές μονάδες, βασίζονται σε συνεχή λειτουργία. Ένα πλοίο μπορεί να εκτελεί δρομολόγιο 15-20 ημερών, χωρίς να συναντήσει κάποιο λιμάνι. Αυτό σημαίνει ότι η ζήτηση για ισχύ προώσεως είναι συνεχής και η μηχανή καταπονείται σημαντικά. Για το λόγο αυτό, μία πιθανή βλάβη:

- ✓ Συνεπάγεται κάποιο κόστος για την επισκευή της, είτε σε υπερωρίες προσωπικού είτε σε αμοιβές εξωτερικού συνεργείου
- ✓ Προκαλεί ζημιά στην πλοιοκτήτρια εταιρεία λόγω των ναύλων που πιθανώς θα χαθούν από την έλλειψη αξιοπιστίας του βαποριού ή απλώς από τη στάση για τις αναγκαίες επισκευές
- ✓ Κρύβει κινδύνους για το πλήρωμα, καθώς φωτιά ή έκρηξη μπορεί να στοιχίσουν ζωές, αλλά και προβλήματα στον κινητήρα μπορεί να οδηγήσουν σε εμπόδια στην πρόωση του πλοίου, για παράδειγμα σημαντική μείωση της ταχύτητας προώσεως σε συνθήκες κακοκαιρίας, μέχρι παντελή ακυβερνησία του πλοίου σε περίπτωση που η μηχανή δε μπορεί να λειτουργήσει, όπως έγινε πρόσφατα σε κρουαζιερόπλοιο στη Νορβηγία
- ✓ Πιο συγκεκριμένα για τις γεννήτριες, που εξετάζουμε στην προσομοίωση, μία βλάβη που τις θέτει εκτός λειτουργίας μπορεί να αφήσει το πλοίο χωρίς ρεύμα και νερό

Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων έχουν αναπτυχθεί προγράμματα που βοηθούν στην παρακολούθηση της προγραμματισμένης συντήρησης το πλοίου (Planned Maintenance Systems), αλλά και διαγνωστικά εργαλεία, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση της βλάβης σε αρχικό στάδιο.

5.1 Διαγνωστικά εργαλεία

Τα διαγνωστικά εργαλεία χωρίζονται κατά βάση σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Διάγνωση με βάση μοντέλα

Φτιάχνονται μοντέλα για συγκεκριμένα υποσυστήματα του κινητήρα, για παράδειγμα διαρροές και βλάβες στο σύστημα του αέρα, βλάβες του συστήματος έγχυσης, βλάβες στον υπερπληρωτή, διαφυγή αερίων από τον κύλινδρο (32; 33; 34; 22).

Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται για τη διάγνωση που βασίζεται στην παρακολούθηση της κατάστασης επιλεγμένων παραμέτρων λειτουργίας (condition monitoring). Αυτή μελετά τις ποιοτικές μεταβολές των παραμέτρων που εξετάζονται για ορισμένο χρονικό διάστημα και μέσα από το συνδυασμό τους αντιστοιχίζει τα αποτελέσματα της βλάβης με αυτά κάποιας γνωστής βλάβης που υπάρχει στη βάση δεδομένων.

2. Διάγνωση μέσω βάσης δεδομένων-χρήση της στατιστικής και των πιθανοτήτων

Χρησιμοποιούνται νευρωνικά δίκτυα - για παράδειγμα στη διάγνωση βλαβών του συστήματος καυσίμου και της καύσης (35). Τα νευρωνικά δίκτυα, εφοδιασμένα με τις ικανότητες της αυτομάθησης και της ανάλυσης της μη γραμμικής συμπεριφοράς των κινητήρων αποτελούν ένα χρήσιμο και ταχύτατα αναπτυσσόμενο μέσο για τη διάγνωση της προβληματικής λειτουργίας ενός κινητήρα.

Τα δίκτυα Bayes ανήκουν επίσης σ αυτή την κατηγορία. Μέσω σχέσεων συνδυασμένων πιθανοτήτων, δημιουργούνται γραφικά μοντέλα τα οποία συνδέουν μεταβλητές μεταξύ τους, προσπαθώντας να ανακαλύψουν ποια αιτία είναι κυρίαρχη για ένα πρόβλημα, μέσα από μία

σειρά γνωστών αιτιών. Τέτοια εργασία είναι η (36) που αφορά βλάβες στο σύστημα του αέρα και των καυσαερίων.

Η εργασία (37) βασίζεται στην ασαφή λογική. Μέσω της ανάλυσης και του συνδυασμού των σημάτων που λαμβάνονται από τον κινητήρα, γίνεται διάγνωση βλαβών στα έδρανα του κινητήρα. Η ασαφής λογική βασίζεται σε δύο κυρίως μηχανισμούς (38):

- ✓ Του προσεγγιστικού συλλογισμού (καθώς οι λογικές προτάσεις δεν έχουν απόλυτες τιμές αλήθειας ή ψεύδους), που αποτελεί απεικόνιση της προσεγγιστικής συλλογιστικής που ακολουθεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος
- ✓ Της εξαγωγής μη-αυστηρού συμπεράσματος (γι αυτό και ονομάζεται ασαφής)

Τέλος, παραθέτουμε τη μέθοδο ανάλυσης των δονήσεων και των ήχων που προκαλούν στον κινητήρα τυχούσες βλάβες (39; 7). Μετατροπείς υψηλών συχνοτήτων δονήσεων (της τάξεως των 35-45 kHz) ή συσκευές ανίχνευσης υπερήχων χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση των δονήσεων και των υπερήχων σε πιθανές βλάβες, όπως αυξημένες τριβές και φθαρμένη επιφάνεια χιτωνίου, διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων, προβληματική έγχυση καυσίμου. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να μας δώσει ακριβή στοιχεία για την κατάσταση των μηχανικών εξαρτημάτων της μηχανής ανά πάσα στιγμή και βοηθάει στην πρόβλεψη και στη βελτίωση της συντήρησης.

5.2 Ανάπτυξη διαγνωστικού εργαλείου, που συνδέεται με την προσομοίωση βλαβών

Η προσομοίωση των βλαβών έγινε με σκοπό την ανάπτυξη ενός διαγνωστικού εργαλείου που βασίζεται στα αποτελέσματα αυτής. Το αναπτυχθέν εργαλείο εμπίπτει στην κατηγορία αυτών που βασίζονται σε βάση δεδομένων και συγκεκριμένα στη μελέτη της ποιοτικής μεταβολής παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα (condition monitoring).

Στο διαγνωστικό εργαλείο που αναπτύξαμε με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab, εισάγαμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των βλαβών με τη μορφή δύο πινάκων, έναν για τα μεγάλα φορτία και έναν για τα μικρά, καθώς όπως διαπιστώσαμε κατά την προσομοίωση, τα αποτελέσματα των βλαβών διαφέρουν κυρίως στην έκτασή τους ανάλογα με το αν το φορτίο είναι μικρό ή μεγάλο.

Για κάθε βλάβη έχουμε δύο περιπτώσεις, που αντιστοιχούν σε μικρής και μεγάλης έκτασης βλάβη. Η 2η διαχωρίζεται στη διάγνωση από την 1η, επειδή σε παρένθεση αναγράφεται ότι πρόκειται για μείζον πρόβλημα (major problem). Με την κατηγοριοποίηση αυτή ενισχύεται η πρόληψη μεγάλου μεγέθους βλαβών. Εξάλλου προσομοιώθηκαν βλάβες κατά τις οποίες η λειτουργία του κινητήρα μπορεί να συνεχισθεί, που όμως πιθανή επέκτασή τους, μπορεί να θέσει τη μηχανή εκτός λειτουργίας.

Τα παρακάτω στιγμιότυπα δείχνουν την εισαγωγή των μεταβολών μιας τυχαίας βλάβης στο διαγνωστικό εργαλείο και ο κώδικας μάς δείχνει ποια βλάβη μπορεί να είναι αυτή και σε πόσες παραμέτρους τα αποτελέσματα της τυχαίας βλάβης ταυτίζονται με τα αποτελέσματα κάθε πιθανής βλάβης. Έτσι αφήνεται ένα περιθώριο εφαρμογής του διαγνωστικού εργαλείου και σε άλλους παρόμοιους, με τον L16/24 της MAN, τετράχρονους κινητήρες.

5.2.1 Περιγραφή περιβάλλοντος εργασίας του προγράμματος

Για την ευκολότερη επεξεργασία και σύγκριση των ποιοτικών μεταβολών, στους πίνακες που εισάγονται στο πρόγραμμα η αύξηση της τιμής μιας παραμέτρου συμβολίζεται με +1, η μείωση με -1 και η αμελητέα μεταβολή με 0.

Από το χρήστη ζητείται να δώσει το μέγεθος του φορτίου, αν είναι μεγάλο ή μικρό, για να φορτώσει το πρόγραμμα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το συγκεκριμένο φορτίο. Στη συνέχεια του ζητείται για κάθε μία παράμετρο να δώσει την ποιοτική μεταβολή της, αν αυξάνεται, μειώνεται ή μένει στάσιμη ('+', '-', '0'). Ως σημαντικές αποκλίσεις πάνω και κάτω από τις οποίες θεωρείται ότι μεταβάλλεται η τιμή μίας παραμέτρου λειτουργίας, ορίζονται οι ίδιες που έχουμε παραθέσει στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, και για τα μικρά και τα μεγάλα φορτία διαφοροποιούνται μόνο ως προς τις πιέσεις συμπίεσης και καύσης. Αφού ο χρήστης δώσει τις ζητούμενες μεταβολές, το πρόγραμμα τις λαμβάνει ως γραμμή ενός πίνακα. Στη συνέχεια τις μετατρέπει σε +1, -1, 0 ώστε να συγκρίνει τη γραμμή του δοθέντος πίνακα με όλες τις γραμμές των πινάκων από την προσομοίωση για το εξεταζόμενο φορτίο. Κάθε φορά που βρίσκει μία ίδια μεταβολή, τοποθετεί σε νέο πίνακα τον αριθμό 1 στην αντίστοιχη θέση με τον πίνακα της προσομοίωσης, διαφορετικά τοποθετεί τον αριθμό 0. Μόλις ολοκληρωθεί η σύγκριση, γίνεται το άθροισμα των αριθμών κάθε γραμμής του νέου πίνακα. Αν αυτό ξεπερνάει το 7, το πρόγραμμα εμφανίζει τις πιθανές βλάβες που αντιστοιχούν στα δεδομένα που εισήγαγε ο χρήστης, καθώς θέλουμε να εμφανίζονται οι βλάβες που έχουν ίδιες μεταβολές για τουλάχιστον 8 παραμέτρους από τις 10 που εξετάζουμε. Μαζί με τη διάγνωση της βλάβης, το πρόγραμμα μας εμφανίζει και πόσες παράμετροι είναι ίδιες με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Σε μία άλλη εκδοχή που δουλέψαμε, ο κώδικας ζητάει τις τιμές των παραμέτρων πριν και μετά τη βλάβη, οπότε υπολογίζει αυτόματα τις μεταβολές και συνεχίζει στη διάγνωση. Αυτό βοηθάει στην περαιτέρω αυτοματοποίηση και την ενδεχόμενη σύνδεση με τους αισθητήρες του κινητήρα για άμεσα αποτελέσματα.

5.2.2 Εφαρμογή του κώδικα διάγνωσης

Ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα από την εφαρμογή του κώδικα:

1. Σε περίπτωση που οι μεταβολές είναι μηδενικές, το πρόγραμμα εμφανίζει μήνυμα ότι δεν υπάρχει βλάβη:

```

Command Window
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'low'
Enter damage results in Tmax(cylinder) (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pmax (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pcharge (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Tcharge (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pexh (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Texh (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in T/C speed (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in BFSC (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Tvalve (+,-,0) and press enter: '0'
Damage
-----
'There is no damage'

```

Εικόνα 15. Input και output για μηδενικές μεταβολές

2. Σε περίπτωση που μία βλάβη προκαλεί αποτελέσματα που δεν ταυτίζονται με αυτά κάποια βλάβης που εξετάσαμε, το πρόγραμμα εμφανίζει μήνυμα ότι δεν αναγνωρίζει τη βλάβη:

```

Command Window
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'low'
Enter damage results in Tmax(cylinder) (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Pmax (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Pcharge (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Tcharge (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Pexh (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Texh (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in T/C speed (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in BFSC (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Tvalve (+,-,0) and press enter: '0'
      Damage
      _____
      'Unknown damage'

```

Εικόνα 16. Input και output για άγνωστη βλάβη

- Εισάγουμε στο πρόγραμμα τα αποτελέσματα μιας βλάβης που μοιάζει με τη βραδυπορία έγχυσης καυσίμου, για μεγάλα φορτία. Το πρόγραμμα μας απαντάει πως η πιθανή βλάβη είναι η βραδυπορία έγχυσης καυσίμου, ωστόσο μία παράμετρος της άγνωστης βλάβης δεν ακολουθεί τη μεταβολή της αντίστοιχης για τη βραδύτερη έγχυση:

```

Command Window
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'high'
Enter damage results in Tmax(cylinder) (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Pmax (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Pcharge (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Tcharge (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pexh (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Texh (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in T/C speed (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in BFSC (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Tvalve (+,-,0) and press enter: '-'
      Damage
      _____
      'Injection delay'

With same results in 9 out of 10 parameters examined
      Damage
      _____
      'Injection delay (major problem)'

With same results in 9 out of 10 parameters examined

```

Εικόνα 17. Input και output για πιθανή βλάβη τη βραδύτερη έγχυση καυσίμου

- Εισάγουμε στο πρόγραμμα τα αποτελέσματα μιας βλάβης που ταυτίζεται με το κατά πολύ φραγμένο φίλτρο συμπιεστή, για μεγάλα φορτία:

Command Window

```
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'high'  
Enter damage results in Tmax(cylinder) (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and press enter: '-'  
Enter damage results in Pmax (+,-,0) and press enter: '-'  
Enter damage results in Pcharge (+,-,0) and press enter: '-'  
Enter damage results in Tcharge (+,-,0) and press enter: '0'  
Enter damage results in Pexh (+,-,0) and press enter: '0'  
Enter damage results in Texh (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in T/C speed (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in BFSC (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in Tvalve (+,-,0) and press enter: '+'
```

Εικόνα 18. Input για πιθανή βλάβη στο φίλτρο του συμπιεστή

Το πρόγραμμα μας απαντάει ότι και οι δύο πιθανές βλάβες συνδέονται με το συμπιεστή:

Command Window

```
Damage  
-----  
'Clogged compressor filter '  
With same results in 9 out of 10 parameters examined
```

```
Damage  
-----  
'Clogged compressor filter (major problem)'  
With same results in 10 out of 10 parameters examined
```

Damage

```
-----  
'Fouled compressor '  
With same results in 8 out of 10 parameters examined
```

Damage

```
-----  
'Fouled compressor (major problem)'  
With same results in 8 out of 10 parameters examined
```

Εικόνα 19. Output για πιθανές βλάβες στο συμπιεστή

Συνεπώς πρέπει να ελέγξουμε πρώτα το φίλτρο του συμπιεστή, που υπάρχει ταύτιση των μεταβολών και στις 10 εξεταζόμενες παραμέτρους, κι αν τελικά δεν έχει βλάβη, να προβούμε σε καθαρισμό και επιθεώρηση του συμπιεστή.

5. Εισάγουμε στο πρόγραμμα τα αποτελέσματα μιας βλάβης που ταυτίζεται με το κατά πολύ αργότερο χρονισμό των βαλβίδων εξαγωγής, για μεγάλα φορτία:

Command Window

```
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'high'  
Enter damage results in Tmax(cylinder) (+,-,0) and press enter: '-'  
Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in Pmax (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in Pcharge (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in Tcharge (+,-,0) and press enter: '0'  
Enter damage results in Pexh (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in Texh (+,-,0) and press enter: '-'  
Enter damage results in T/C speed (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in BFSC (+,-,0) and press enter: '+'  
Enter damage results in Tvalve (+,-,0) and press enter: '0'
```

Εικόνα 20. Input για πιθανό αργότερο χρονισμό βαλβίδων

Το πρόγραμμα μας απαντά ότι οι πιθανές βλάβες είναι διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής και αργότερος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής:

Command Window	Damage
<hr/> 'Exhaust valve leaking - Cylinder without damage' With same results in 9 out of 10 parameters examined <hr/> Damage <hr/> 'Exhaust valve leaking - Cylinder without damage (major problem)' With same results in 9 out of 10 parameters examined	<hr/> 'Exhaust valve timing +CAD' With same results in 9 out of 10 parameters examined <hr/> Damage <hr/> 'Exhaust valve timing +CAD (major problem)' With same results in 10 out of 10 parameters examined

Εικόνα 21. Output για πιθανές βλάβες στο χρονισμό των βαλβίδων

Ελέγχουμε αν τα αποτελέσματα είναι παρόμοια σε όλους τους κυλίνδρους ή διαφοροποιούνται αισθητά για κάποιον. Το πιθανότερο είναι η βλάβη να συνδέεται με το χρονισμό των βαλβίδων εξαγωγής.

- Εισάγουμε τα αποτελέσματα μιας βλάβης που μοιάζει με την προπορεία έγχυσης καυσίμου, για μικρά φορτία, και το πρόγραμμα μας δίνει ως πιθανή βλάβη μόνο αυτήν:

```

Command Window
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'low'
Enter damage results in Tmax(cylinder) (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Pmax (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Pcharge (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Tcharge (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pexh (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Texh (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in T/C speed (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in BFSC (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Tvalve (+,-,0) and press enter: '+'

      Damage
      _____

      'Advanced injection'

With same results in 8 out of 10 parameters examined

              Damage
              _____

      'Advanced injection (major problem) '

With same results in 8 out of 10 parameters examined
  
```

Εικόνα 22. Input και output για πιθανή βλάβη τη νωρίτερη έγχυση καυσίμου

7. Στα μικρά φορτία οι μεταβολές πολλών παραμέτρων είναι αμελητέες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται πολλές πιθανές βλάβες αν έχουμε σημαντικές μεταβολές μόνο σε 2 ή 3 παραμέτρους. Για παράδειγμα έχουμε μία βλάβη που ταιριάζει ακριβώς με πρόβλημα στο στρόβιλο. Την εισάγουμε στον κώδικα για διάγνωση και μας βγάζει σαν πιθανές βλάβες άλλες 6:

```

Command Window
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'low'
Enter damage results in Tmax(cylinder) (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pmax (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pcharge (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Tcharge (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Pexh (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Texh (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in T/C speed (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in BFSC (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Tvalve (+,-,0) and press enter: '0'

```

```

Command Window
Damage
-----
'Clogged compressor filter '
With same results in 8 out of 10 parameters examined

Damage
-----
'Fouled compressor '
With same results in 8 out of 10 parameters examined

Damage
-----
'Blocked turbine'
With same results in 10 out of 10 parameters examined

```

```

Command Window
Damage
-----
'Blocked turbine (major problem)'
With same results in 10 out of 10 parameters examined

Damage
-----
'Fouled cooler '
With same results in 8 out of 10 parameters examined

Damage
-----
'Fouled cooler (major problem) '
With same results in 8 out of 10 parameters examined

```

```

Command Window
Damage
-----
'Blow-by - Cylinder without damage'
With same results in 8 out of 10 parameters examined

Damage
-----
'Blow-by - Cylinder with damage (major problem) '
With same results in 8 out of 10 parameters examined

Damage
-----
'Exhaust valve timing -CAD'
With same results in 8 out of 10 parameters examined

```

```

Damage
-----
'Exhaust valve timing -CAD (major problem) '
With same results in 8 out of 10 parameters examined

Damage
-----
'Exhaust valve timing +CAD'
With same results in 8 out of 10 parameters examined

Damage
-----
'Exhaust valve timing +CAD (major problem) '
With same results in 8 out of 10 parameters examined

```

Εικόνες 23 και 24. Input για πιθανή βλάβη στο στρόβιλο και output για 7 πιθανές βλάβες

Αντιλαμβανόμαστε όμως ότι είναι εύκολο να συμπεράνουμε για ποια βλάβη πρόκειται πιθανότατα, καθώς καταρχάς η μόνη με πλήρη ταύτιση στις μεταβολές είναι η βλάβη στο στρόβιλο. Ακόμα βλάβη στο ψυγείο θα έδινε μεγάλες θερμοκρασίες στον αέρα πλήρωσης, ενώ blow-by θα είχε διαφορετικά αποτελέσματα σε έναν κύλινδρο σε σχέση με τους υπόλοιπους. Με μία γρήγορη εξέταση του υπερπληρωτή μπορούμε να αντιληφθούμε αν φταίει ο συμπιεστής, το φίλτρο του είτε ο στρόβιλος. Αν δεν εντοπίσουμε κάποια βλάβη στο τούρμπο, τότε εξετάζουμε το χρονισμό των βαλβίδων.

8. Εισάγουμε τα αποτελέσματα μιας βλάβης που μοιάζει με αυτή της διαφυγής αερίων, για μικρά φορτία και κύλινδρο που έχει βλάβη:

```

Command Window
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'low'
Enter damage results in Tmax(cylinder) (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Pmax (+,-,0) and press enter: '-'
Enter damage results in Pcharge (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Tcharge (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Pexh (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in Texh (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in I/C speed (+,-,0) and press enter: '0'
Enter damage results in BFSC (+,-,0) and press enter: '+'
Enter damage results in Tvalve (+,-,0) and press enter: '0'

```

Εικόνα 25. Input για πιθανή βλάβη διαφυγής αερίων από τον κύλινδρο προς το στροφαλοθάλαμο

Το πρόγραμμα μας δείχνει σαν πιθανές βλάβες άλλες 2, που όμως ξεχωρίζουν εύκολα, αφού το blow-by έχει διαφορετικά αποτελέσματα για τον κύλινδρο υπό βλάβη και ίδια για όλους τους υπόλοιπους:

<pre> Command Window Damage ----- 'Clogged compressor filter (major problem)' With same results in 8 out of 10 parameters examined Damage ----- 'Fouled cooler ' With same results in 8 out of 10 parameters examined Damage ----- 'Fouled cooler (major problem)' With same results in 8 out of 10 parameters examined </pre>	<pre> Command Window 'Blow-by - Cylinder with damage' With same results in 9 out of 10 parameters examined Damage ----- 'Blow-by - Cylinder without damage' With same results in 8 out of 10 parameters examined Damage ----- 'Blow-by - Cylinder with damage (major problem)' With same results in 9 out of 10 parameters examined Damage ----- 'Blow-by - Cylinder with damage (major problem)' With same results in 8 out of 10 parameters examined </pre>
--	---

Εικόνα 26. Output για 3 πιθανές βλάβες

9. Τέλος φαίνεται η διαφορετική εκδοχή του διαγνωστικού εργαλείου, όπου ο χρήστης εισάγει τις τιμές πριν και μετά τη βλάβη. Ο κώδικας αυτόματα τυπώνει ότι η πιθανή δυσλειτουργία είναι η βραδύτερη έγχυση καυσίμου:

```
Command Window
Enter "high" or "low" for the load examined for damage and press enter: 'high'
Enter Tmax(cylinder) [K] without damage and press enter: 1800
Enter Pcomp [bar] without damage and press enter: 70
Enter Pmax [bar] without damage and press enter: 120
Enter Pcharge [bar] without damage and press enter: 2.5
Enter Tcharge [K] without damage and press enter: 325
Enter Pexh [bar] without damage and press enter: 2.3
Enter Texh [K] without damage and press enter: 700
Enter I/C speed [rpm] without damage and press enter: 32000
Enter BSFC [gr/kWh] without damage and press enter: 170
Enter Tvalve [K] without damage and press enter: 450

Enter Tmax(cylinder) [K] after damage and press enter: 1760
Enter Pcomp [bar] after damage and press enter: 76
Enter Pmax [bar] after damage and press enter: 114
Enter Pcharge [bar] after damage and press enter: 2.8
Enter Tcharge [K] after damage and press enter: 326
Enter Pexh [bar] after damage and press enter: 2.4
Enter Texh [K] after damage and press enter: 709
Enter I/C speed [rpm] after damage and press enter: 32600
Enter BSFC [gr/kWh] after damage and press enter: 172
Enter Tvalve [K] after damage and press enter: 452

      Damage
      _____
      'Injection delay'

With same results in 8 out of 10 parameters examined
```

Εικόνα 27. Διαφορετική εκδοχή του διαγνωστικού εργαλείου

5.3 Πλεονεκτήματα του διαγνωστικού εργαλείου

Σύνδεση με τη συντήρηση του κινητήρα

Η διάγνωση που βασίζεται στην παρατήρηση των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσής της με τη συντήρηση της μηχανής, καθώς σε συνδυασμό με την εμπειρία του μηχανικού, οι αποκλίσεις των τιμών των παραμέτρων οδηγούν σε ασφαλή συμπεράσματα για τη χρονική διάρκεια μεταξύ των επισκευών ή της αλλαγής εξαρτημάτων του κινητήρα.

Αυτοματοποίηση

Επίσης μπορεί να συνδεθεί απευθείας με τις μετρήσεις των αισθητήρων της μηχανής και να προειδοποιεί έγκαιρα για την πιθανότητα εμφάνισης μιας βλάβης, χωρίς να χρειάζεται η επικοινωνία του χρήστη με τον κώδικα για την εισαγωγή των στοιχείων.

"Ελαφρύ" πρόγραμμα

Το περιβάλλον του Matlab είναι απλό, εύχρηστο και αποτελεσματικό, προσφέροντας τη δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης του διαγνωστικού εργαλείου και επέκτασής του σε άλλους κινητήρες και άλλες βλάβες. Η βάση δεδομένων απαιτεί πολύ μικρή υπολογιστική δύναμη και συνολικά το πρόγραμμα δεν επιβαρύνει παρά ελάχιστα άλλα προγράμματα που πιθανώς τρέχουν παράλληλα.

Ακρίβεια-Πολλές εξεταζόμενες παράμετροι

Η πληθώρα των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για την αξιολόγηση της κατάστασης της μηχανής προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια στη διάγνωση, χωρίς να δίνεται προσοχή μόνο σε 2-3 παραμέτρους (συνηθίζεται για παράδειγμα η επιμονή στην παρακολούθηση των θερμοκρασιών του κυλίνδρου και των καυσαερίων), που ουσιαστικά δεν μπορούν να αποτελέσουν ασφαλές κριτήριο για το ποια βλάβη πρόκειται, αλλά ενημερώνουν ουσιαστικά για την ύπαρξη κάποιας βλάβης. Παράλληλα το περιθώριο που αφήνεται για διαφορά στα αποτελέσματα 1-2 παραμέτρων λειτουργίας μεγαλώνει το εύρος εφαρμογής και μειώνει την πιθανότητα μη ανίχνευσης μιας βλάβης λόγω ελάχιστα διαφορετικής συμπεριφοράς του κινητήρα.

Διάγνωση για βλάβες σε διαφορετικά υποσυστήματα του κινητήρα

Οι βλάβες που εντάσσονται στη βάση δεδομένων δεν περιορίζονται σε κάποιο υποσύστημα της μηχανής (αέρα εισαγωγής ή έγχυση καυσίμου για παράδειγμα). Έτσι δε χρειάζεται συνδυασμός παραπάνω του ενός μοντέλων για την ανίχνευση κάποιας βλάβης, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο για τη διάγνωση. Η εφαρμογή δηλαδή του προγράμματος είναι ευρεία.

5.4 Μειονεκτήματα του διαγνωστικού εργαλείου

Έμμεση προσομοίωση των βλαβών

Η προσομοίωση γίνεται σε θερμοδυναμικό μοντέλο πρόβλεψης επιδόσεων κινητήρων μηδενικής διάστασης, οπότε οι βλάβες προσομοιώνονται έμμεσα, μέσα από την προβληματική λειτουργία των στοιχείων του κινητήρα που αυτές επηρεάζουν. Δηλαδή από τη στιγμή που το φίλτρο για παράδειγμα του συμπιεστή δεν λαμβάνεται υπόψη με κάποιο τρόπο στην προσομοίωση του κινητήρα, προχωρούμε σε μεταβολή του χάρτη του συμπιεστή, για να προσομοιώσουμε τη δυσκολία της ροής του αέρα μέσα από αυτό. Συνεπώς χρειάζεται προσοχή και δοκιμές στους παράγοντες που μεταβάλλουμε στην προσομοίωση, ώστε να ανταποκρίνονται όσο περισσότερο γίνεται στην πραγματική κατάσταση.

Περιορισμός στις προσομοιώσεις

Υπάρχει δυσκολία στην προσομοίωση βλαβών στα συστήματα του ελαίου λιπάνσεως, στα έδρανα ή στα μηχανικά μέρη των συστημάτων του κινητήρα (για παράδειγμα σπασμένο έμβολο αντλίας). Αυτές χρειάζεται να εισαχθούν στο διαγνωστικό εργαλείο με άλλο τρόπο (εμπειρικό παραδείγματος χάρη)

Βλάβες με παρόμοιες συνέπειες είναι δύσκολο να διαχωριστούν στην προσομοίωση

Επίσης βλάβες που έχουν ίδια ή παρόμοια αποτελέσματα στον κύλινδρο είναι δύσκολο να ανιχνευτούν. Ένας εγχυτήρας με διαρροή και ένα σπασμένο έμβολο αντλίας μπορεί να δημιουργούν το ίδιο πρόβλημα στην έγχυση, αλλά πρόκειται για πολύ διαφορετικές βλάβες. Το ίδιο ισχύει και για μία βλάβη στο ψυγείο του αέρα και την βλάβη που μπορεί να προκαλεί η πολύ αυξημένη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής από το μηχανοστάσιο ή του νερού που ψύχει τον αέρα.

Σημείο ισορροπίας κινητήρα-υπερπληρωτή

Η προσομοίωση αφορά τον κινητήρα L16/24. Ορισμένες μεταβολές των παραμέτρων που εξετάζουμε είναι αναμενόμενο να διαφέρουν σε άλλους τετράχρονους κινητήρες, ακόμα κι αν προσομοιώνουμε τις βλάβες με ακριβώς τον ίδιο τρόπο. Για παράδειγμα οι 4 ή 6 μοίρες αργότερης έγχυσης καυσίμου μπορεί να επηρεάζουν λιγότερο έναν κινητήρα με τις διπλάσιες στροφές λειτουργίας. Το γεγονός ότι εξετάζουμε κινητήρα υπερπληρούμενο πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς το νέο σημείο ισορροπίας του κινητήρα και του υπερπληρωτή παίζουν σημαντικό ρόλο στις μεταβολές των πιέσεων, των θερμοκρασιών, κλπ. Στους κινητήρες φυσικής αναπνοής τα αποτελέσματα είναι περισσότερο αναμενόμενα, καθώς βλάβες που δεν έχουν σχέση για παράδειγμα με το σύστημα αέρα, δεν θα επηρεάσουν τον αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο, ενώ στους υπερπληρωμένους κινητήρες οποιαδήποτε βλάβη θα διαταράξει τη λειτουργία του τούρμπο και αυτή η διαταραχή θα έχει συνέπειες και στον αέρα πλήρωσης και στο μείγμα αέρα-καυσίμου και τελικά στις πιέσεις και τις θερμοκρασίες που εξετάζουμε. Έτσι ένα μειονέκτημα της διάγνωσης που λαμβάνει υπόψη δεδομένα από συγκεκριμένο κινητήρα είναι ότι δε μπορεί να εφαρμοστεί γενικότερα στους κινητήρες χωρίς πιθανές λανθασμένες εκτιμήσεις, εκτός κι αν μετά από πολλές προσομοιώσεις ή δεδομένα από πραγματικές καταστάσεις προβληματικών κινητήρων βγει ένα γενικότερο συμπέρασμα για τις τάσεις στις μεταβολές.

5.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για την επαλήθευση της προσομοίωσης θα μπορούσε να γίνει κάποια σύγκριση με αποτελέσματα βλαβών σε πραγματικό κινητήρα, όσο γίνεται κοντινό σε διαστάσεις και συμπεριφορά με τον L16/24. Έτσι θα μπορούσαν να επιλεγούν πιο κατάλληλες μεταβολές σε παραμέτρους που αντιστοιχούν σε πιθανές βλάβες ώστε να ταυτίζονται τα αποτελέσματα. Επίσης η βάση δεδομένων θα μπορούσε να διευρυνθεί με νέες βλάβες.

Θα μπορούσαν επίσης να προσομοιωθούν οι ίδιες βλάβες σε έναν μεγαλύτερο κινητήρα ώστε να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα για τη μικρή μηχανή που εξετάσαμε και να βγουν συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο επιδρά το μέγεθος και η ισχύς κάθε κινητήρα στην εκδήλωση των βλαβών. Έτσι θα μπορούσε να γενικευτεί το διαγνωστικό μοντέλο για μεγαλύτερο εύρος τετράχρονων κινητήρων.

Για την ακόμα μεγαλύτερη γενίκευση του διαγνωστικού εργαλείου, θα μπορούσαν να προσομοιωθούν δυσλειτουργίες σε δίχρονους ναυτικούς κινητήρες, σε κινητήρες αερίου ή άλλους τύπους κινητήρων και να εξαχθούν συμπεράσματα για την ενδεχόμενη διαφορετική συμπεριφορά κάθε μηχανής σε περίπτωση ίδιας βλάβης.

Η ανάπτυξη πλατφόρμας επικοινωνίας μεταξύ χρήστη και προγράμματος θα το έκανε ακόμα πιο εύχρηστο σε σχέση με την τωρινή προγραμματιστική δομή.

Η επικοινωνία του διαγνωστικού εργαλείου με τα προγράμματα μηχανοργάνωσης των επισκευών και της συντήρησης θα μπορούσε να αυξήσει την ακρίβεια της διάγνωσης, για παράδειγμα να γνωρίζει το πρόγραμμα τότε έγινε το τελευταίο overhauling στον υπερπληρωτή, τότε καθαρίστηκαν οι εγχυτήρες, το ψυγείο.

Τα διαγράμματα της πίεσης του κυλίνδρου σε σχέση με τη γωνία στροφάλου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν κομμάτι της διάγνωσης, μέσα από τη σύγκρισή τους με αυτά που παίρνουμε από τον κινητήρα σε πραγματικό χρόνο. Βέβαια εδώ μπαίνει το εμπόδιο ότι οι πιέσεις και η μορφή των καμπυλών διαφέρουν τόσο από κινητήρα σε κινητήρα, όσο και από κύκλο σε κύκλο μέσα στον ίδιο κύλινδρο -για παράδειγμα στις μηχανές αερίου το φαινόμενο είναι έντονο, οπότε πρέπει με κάποιο τρόπο να γίνει σύγκριση της μορφής των διαγραμμάτων

και όχι άμεση σύγκριση των τιμών. Θα μπορούσαν για παράδειγμα να συγκρίνονται και οι παράγωγοι των πιέσεων σε κάθε χρονική στιγμή.

Η προσομοίωση θα μπορούσε να συνεχιστεί για τον ίδιο κινητήρα και για περισσότερες από μία βλάβες, με κάποια συσχέτιση μεταξύ τους. Δηλαδή το κακής ποιότητας καύσιμο για παράδειγμα δεν επηρεάζει μόνο την καύση, αλλά περιέχει πολλά μικροσωματίδια που είναι άκαυστα, συνδέεται με το σχηματισμό αιθάλης και ως ένα βαθμό ευθύνεται και για τη ρύπανση του στροβίλου του υπερπληρωτή. Αν συνεχίσει ο κινητήρας να καίει το ίδιο καύσιμο μπορούν αυτές οι δύο βλάβες να εμφανιστούν ταυτόχρονα στον κινητήρα και θα ήταν χρήσιμο να βλέπαμε τα αποτελέσματά τους. Ή οι αυξημένες θερμοκρασίες από νωρίτερη έγχυση του καυσίμου να συνδυαστούν με βλάβη στο ψυγείο του αέρα πλήρωσης ή αυξημένη θερμοκρασία του μηχανοστασίου, που δεν έχουν κοινή αιτία.

Τέλος η διάγνωση θα μπορούσε να επεκταθεί και για άλλα συστήματα του πλοίου (σωληνώσεις, υδραυλικά, λοιπούς μηχανισμούς) ή κατασκευαστικά στοιχεία (διάβρωση μεταλλικής κατασκευής, στροφαλοφόρος άξονας), για τα οποία όμως χρειάζονται αντίστοιχα μοντέλα και αντίστοιχη εξέταση παραμέτρων, ώστε η επιθεώρηση που γίνεται σήμερα στις επισκευές, να γίνεται με αυτόματο τρόπο καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού ή ανά τακτά χρονικά διαστήματα, χωρίς να χρειάζεται η ανθρώπινη επίβλεψη σε τόσο μεγάλο βαθμό.

Παράρτημα Α. Παράμετροι του βασικού μοντέλου στο ΜΟ.ΤΗΕR. και πώς μεταβλήθηκαν για την προσομοίωση των βλαβών

Πίνακας 18. Παράμετροι λειτουργίας του κινητήρα όπως ρυθμίστηκαν χωρίς και με βλάβη

A/A	Βλάβη	Φορτίο	Περίπτωση	Παράμετρος που αλλάζει	χωρίς βλάβη	με βλάβη
1	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	86%	1η	Start of phenomenon	716 CAD	720 CAD
			2η	Start of phenomenon	716 CAD	(722) CAD
		75.9%	1η	Start of phenomenon	714 CAD	718 CAD
			2η	Start of phenomenon	714 CAD	720 CAD
		50.8%	1η	Start of phenomenon	713 CAD	717 CAD
			2η	Start of phenomenon	713 CAD	719 CAD
2	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	86%	1η	Start of phenomenon	716 CAD	712 CAD
			2η	Start of phenomenon	716 CAD	710 CAD
		75.9%	1η	Start of phenomenon	714 CAD	710 CAD
			2η	Start of phenomenon	714 CAD	708 CAD
		50.8%	1η	Start of phenomenon	713 CAD	709 CAD
			2η	Start of phenomenon	713 CAD	707 CAD
3	Κακής ποιότητας καύσιμο	86%	1η	Start of phenomenon	716 CAD	719 CAD
				Combustion duration	55 CAD	58 CAD
			2η	Start of phenomenon	716 CAD	720 CAD
				Combustion duration	55 CAD	59 CAD
		75.9%	1η	Start of phenomenon	714 CAD	717 CAD
				Combustion duration	60 CAD	63 CAD
			2η	Start of phenomenon	714 CAD	718 CAD
				Combustion duration	60 CAD	64 CAD
		50.8%	1η	Start of phenomenon	713 CAD	715 CAD
				Combustion duration	50 CAD	52 CAD
			2η	Start of phenomenon	713 CAD	716 CAD
				Combustion duration	50 CAD	53 CAD
4	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής	86%	1η	Exhaust valve area	0	0.000033 m ²
			2η	Exhaust valve area	0	0.000049 m ²
		75.9%	1η	Exhaust valve area	0	0.000033 m ²
			2η	Exhaust valve area	0	0.000049 m ²
		50.8%	1η	Exhaust valve area	0	0.000033 m ²
			2η	Exhaust valve area	0	0.000049 m ²
5	Διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων ή χιτωνίου	86%	1η	Blow-by valve area	0	3 mm ²
			2η	Blow-by valve area	0	6 mm ²
		75.9%	1η	Blow-by valve area	0	3 mm ²
			2η	Blow-by valve area	0	6 mm ²
		50.8%	1η	Blow-by valve area	0	3 mm ²
			2η	Blow-by valve area	0	6 mm ²
6	Ρυπασμένο φυγείο αέρα πλήρωσης	86%	1η	Efficiency	0.690	0.483
			2η	Efficiency	0.690	0.345
		75.9%	1η	Efficiency	0.710	0.497
			2η	Efficiency	0.710	0.355
		50.8%	1η	Efficiency	0.609	0.426
			2η	Efficiency	0.609	0.305

A/A	Βλάβη	Φορτίο	Περίπτωση	Παράμετρος που αλλάζει	χωρίς βλάβη	με βλάβη
7α	Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής	86%	1η	Valve timing	-	-10 CAD
			2η	Valve timing	-	-15 CAD
		75.9%	1η	Valve timing	-	-10 CAD
			2η	Valve timing	-	-15 CAD
		50.8%	1η	Valve timing	-	-10 CAD
			2η	Valve timing	-	-15 CAD
7β	Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής	86%	1η	Valve timing	-	+15 CAD
			2η	Valve timing	-	+20 CAD
		75.9%	1η	Valve timing	-	+15 CAD
			2η	Valve timing	-	+20 CAD
		50.8%	1η	Valve timing	-	+15 CAD
			2η	Valve timing	-	+20 CAD
8	Ρυπασμένο φίλτρο συμπίεστη	86%	1η	Corrected mass flow rate	-	-25%
			2η	Corrected mass flow rate	-	-30%
		75.9%	1η	Corrected mass flow rate	-	-25%
			2η	Corrected mass flow rate	-	-30%
		50.8%	1η	Corrected mass flow rate	-	-25%
			2η	Corrected mass flow rate	-	-30%
9	Ρυπασμένος - Φθαρμένος συμπίεστης	86%	1η	Corrected mass flow rate	-	-12%
				Efficiency	-	-6%
			2η	Corrected mass flow rate	-	-15%
				Efficiency	-	-7.5%
		75.9%	1η	Corrected mass flow rate	-	-12%
				Efficiency	-	-6%
			2η	Corrected mass flow rate	-	-15%
				Efficiency	-	-7.5%
		50.8%	1η	Corrected mass flow rate	-	-12%
				Efficiency	-	-6%
			2η	Corrected mass flow rate	-	-15%
				Efficiency	-	-7.5%
10	Ρυπασμένος - Φθαρμένος στρόβιλος	86%	1η	Swallowing capacity	-	-12%
				Efficiency	-	-12%
			2η	Swallowing capacity	-	-15%
				Efficiency	-	-15%
		75.9%	1η	Swallowing capacity	-	-12%
				Efficiency	-	-12%
			2η	Swallowing capacity	-	-15%
				Efficiency	-	-15%
		50.8%	1η	Swallowing capacity	-	-12%
				Efficiency	-	-12%
			2η	Swallowing capacity	-	-15%
				Efficiency	-	-15%

Παράρτημα Β. Μεταβολή % του καυσίμου που ζητά ο κινητήρας για να δώσει την ίδια ισχύ με την κατάσταση χωρίς βλάβη:

Πίνακας 19. Μεταβολή % στο εγγεόμενο καύσιμο μετά από βλάβη

Βλάβες		Φορτίο	Αλλαγή % στο εγγεόμενο καύσιμο
1	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου 4 μοιρών	86%	1.70
		75.9%	1.24
		50.8%	1.52
	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου 6 μοιρών	86%	2.83
		75.9%	2.33
		50.8%	2.37
2	Προπορεία έγχυσης καυσίμου 4 μοιρών	86%	-0.89
		75.9%	-0.42
		50.8%	-0.08
	Προπορεία έγχυσης καυσίμου 6 μοιρών	86%	-0.95
		75.9%	-0.53
		50.8%	0.29
3	Κακής ποιότητας καύσιμο 1	86%	0.75
		75.9%	0.93
		50.8%	1.78
	Κακής ποιότητας καύσιμο 2	86%	0.94
		75.9%	1.13
		50.8%	2.13
4	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής 1%	86%	6.82
		75.9%	6.38
		50.8%	7.57
	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής 1.5%	86%	9.57
		75.9%	9.06
		50.8%	10.11
5	Διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων ή χιτωνίου 3 mm ²	86%	2.04
		75.9%	1.90
		50.8%	2.03
	Διαφυγή αερίων λόγω φθαρμένων ελατηρίων ή χιτωνίου 6 mm ²	86%	2.97
		75.9%	2.93
		50.8%	3.38
6	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης 30%	86%	0.79
		75.9%	0.88
		50.8%	0.61
	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα πλήρωσης 50%	86%	1.28
		75.9%	1.49
		50.8%	1.04

Βλάβες		Φορτίο	Αλλαγή % στο εγχεόμενο καύσιμο
7a	Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής (νωρίτερο άνοιγμα 10 μοιρών)	86%	-0.02
		75.9%	0.52
		50.8%	0.23
	Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής (νωρίτερο άνοιγμα 15 μοιρών)	86%	0.07
		75.9%	0.63
		50.8%	0.53
7b	Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής (αργότερο άνοιγμα 10 μοιρών)	86%	0.84
		75.9%	0.17
		50.8%	0.77
	Λανθασμένος χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής (αργότερο άνοιγμα 15 μοιρών)	86%	1.37
		75.9%	0.71
		50.8%	1.05
8	Ρυπασμένο φίλτρο συμπιεστή 25%	86%	1.71
		75.9%	0.96
		50.8%	0.63
	Ρυπασμένο φίλτρο συμπιεστή 30%	86%	2.75
		75.9%	1.92
		50.8%	1.26
9	Ρυπασμένος συμπιεστής 12%	86%	1.16
		75.9%	1.50
		50.8%	0.83
	Ρυπασμένος συμπιεστής 15%	86%	1.66
		75.9%	1.72
		50.8%	1.05
10	Ρυπασμένος στρόβιλος 12%	86%	1.76
		75.9%	1.96
		50.8%	0.75
	Ρυπασμένος στρόβιλος 15%	86%	2.23
		75.9%	2.43
		50.8%	1.02

Παρατηρούμε ότι:

1. Σε 5 από τις 11 βλάβες, η μικρότερη μεταβολή στο καύσιμο, κατ' απόλυτη τιμή, είναι για το φορτίο 50.8%
2. Σε 4 από τις 11 βλάβες, η μικρότερη μεταβολή στο καύσιμο, κατ' απόλυτη τιμή, είναι για το φορτίο 75.9%
3. Σε 2 από τις 11 βλάβες, η μικρότερη μεταβολή στο καύσιμο, κατ' απόλυτη τιμή, είναι για το φορτίο 86%

Παράρτημα Γ. Μεταβολές των 10 παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε μία βλάβη για ψηλά και χαμηλά φορτία

Πίνακας 20. Μεταβολές παραμέτρων λειτουργίας έπειτα από βλάβη για ψηλά φορτία

A/A	Βλάβη	Μεταβολές παραμέτρων										
		Εύρος	T _{max_cyl}	P _{comp}	P _{max}	P _{ch_air}	T _{ch_air}	P _{exh}	T _{exh} beforeT/C	BSFC	T/C speed	T _{valve}
			°C ή K	bar	bar	bar	°C ή K	bar	°C ή K	gr/kWh	rpm	°C ή K
1.	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	min	-70	10	-10	0.20	3	0.15	0	2	1500	-5
		max	-125	20	-20	0.35	5	0.20	-10	4.5	3000	-10
2.	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	min	75	-15	15	-0.15	-2	-0.10	0	-1	-1000	5
		max	135	-25	25	-0.20	-3	-0.15	10	-1.5	-2000	15
3.	Κακής ποιότητας καύσιμο	min	-60	5	10	0.05	0	0	0	1.5	500	0
		max	-90	10	15	0.10	1	0.05	-2	2	1000	0
4.	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής κύλινδρος με βλάβη	min	25	-2	-10	0.65	5	0.40	-5	10	4500	70
		max	75	-10	-20	1	10	0.65	-20	15	7000	75
	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής κύλινδρος χωρίς βλάβη	min	-80	25	25	0.65	5	0.40	-5	10	4500	2
		max	-135	40	40	1	10	0.65	-20	15	7000	5
5.	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο κύλινδρος χωρίς βλάβη	min	35	-5	-5	0	5	0	10	3.5	0	25
		max	80	-10	-10	-0.02	15	-0.05	30	5	-100	30
	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο κύλινδρος χωρίς βλάβη	min	15	0	0	0	5	0	10	3.5	0	3
		max	65	-1	1	-0.02	15	-0.05	30	5	-100	5
6.	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	min	80	1	0	0.05	25	0	35	1.5	500	10
		max	140	5	2	0.15	50	-0.05	60	2.5	1000	15
7.	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	min	20	-5	-2	-0.05	0	-0.05	15	0	-500	0
		max	50	-5	-5	-0.10	-1	-0.10	40	1	-1500	5
8.	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	min	-30	5	5	0.15	2	0.20	-25	0.5	1500	0
		max	-75	10	10	0.30	3	0.25	-50	2	3000	-3
9.	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	min	55	-5	-5	-0.15	0	-0.05	30	2	800	4
		max	170	-20	-10	-0.40	-1	-0.20	80	4.5	1500	10
10.	Ρυπασμένος συμπιεστής	min	70	-5	-5	-0.20	0	-0.10	30	2	-1000	4
		max	105	-10	-10	-0.30	0	-0.15	50	3	-2000	5
11.	Ρυπασμένος στρόβιλος	min	40	-3	-1	-0.05	-1	0.15	30	3	-700	4
		max	75	-5	-5	-0.15	-1	0.30	50	4.5	-1500	5

Πίνακας 21. Μεταβολές παραμέτρων λειτουργίας έπειτα από βλάβη για χαμηλά φορτία

A/A	Βλάβη	Μεταβολές παραμέτρων										
		Εύρος	T _{max_cyl}	P _{comp}	P _{max}	P _{ch_air}	T _{ch_air}	P _{exh}	T _{exh} beforeT/C	BSFC	T/C speed	T _{valve}
			°C ή K	bar	bar	bar	°C ή K	bar	°C ή K	gr/kWh	rpm	°C ή K
1.	Βραδυπορία έγχυσης καυσίμου	min	-40	5	-15	0.05	1	0.02	20	2.5	500	-5
		max	-70	10	-20	0.10	2	0.05	20	4.5	1500	-7
2.	Προπορεία έγχυσης καυσίμου	min	70	-10	15	-0.05	-1	-0.03	-5	0	-800	5
		max	110	-15	20	-0.06	-2	-0.03	-5	0.5	-1200	15
3.	Κακής ποιότητας καύσιμο	min	-50	4	10	0	0	0	2	3	0	4
		max	-70	5	10	0	1	0	5	4	150	4
4.	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής κύλινδρος με βλάβη	min	160	-5	-15	0.25	5	0.15	25	13.5	3500	55
		max	240	-10	-20	0.40	8	0.20	20	18	6000	55
	Διαρροή από τη βαλβίδα εξαγωγής κύλινδρος χωρίς βλάβη	min	-30	8	10	0.25	5	0.15	25	13.5	3500	5
		max	-60	15	20	0.40	8	0.20	20	18	6000	5
5.	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο κύλινδρος χωρίς βλάβη	min	50	-3	-5	0	7	-0.02	15	4	-200	15
		max	120	-5	-6	0	15	-0.03	35	6	-250	15
	Διαφυγή αερίων από ελατήρια-χιτώνιο κύλινδρος χωρίς βλάβη	min	50	-1	0	0	7	-0.02	15	4	-200	3
		max	100	-1	0	0	15	-0.03	35	6	-250	6
6.	Ρυπασμένο ψυγείο αέρα	min	50	0	0	0	11	0	15	1	0	3
		max	80	0	0	0	19	0	30	2	0	5
7.	Νωρίτερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	min	20	-1	-1	-0.03	0	-0.03	20	0.5	-500	1
		max	30	-1	-1	-0.03	-1	-0.04	30	1	-800	2
8.	Αργότερο άνοιγμα βαλβίδων εξαγωγής	min	0	1	1	0.02	0.5	0.04	-15	1.5	500	0
		max	-20	2	2	0.05	1	0.10	-25	2	1500	0
9.	Φραγμένο φίλτρο συμπιεστή	min	40	-2	-2	-0.05	-1	-0.02	15	1	800	2
		max	70	-5	-3	-0.10	-1	-0.03	35	2.5	900	4
10.	Ρυπασμένος συμπιεστής	min	50	-3	-2	-0.05	-1	-0.03	20	1.5	-700	2
		max	60	-3	-3	-0.10	-1	-0.03	30	2	-800	3
11.	Ρυπασμένος στρόβιλος	min	0	0	1	0	0	0.10	10	1.5	150	1
		max	10	0	1	0	1	0.15	20	2	150	2

Παράρτημα Δ. Κώδικας διάγνωσης γραμμένος σε Matlab, που συνδέεται με την προσομοίωση των βλαβών (2 εκδοχές)

1η εκδοχή

```
clear all
close all
clc
%Input data from simulation of high loads
diagnosis1=fullfile('C:\Users\sony\Desktop\diagnosis.xlsx');
high_loads=xlsread(diagnosis1,'high');
low_loads=xlsread(diagnosis1,'low');
damages=readtable(diagnosis1,'Range','A1:A29');

% Give the results of an unknown damage
load=input('Enter "high" or "low" for the load examined for damage
and press enter: ');
Unknown_damage(1,1)=input('Enter damage results in Tmax(cylinder)
(+,-,0) and press enter: ');
Unknown_damage(1,2)=input('Enter damage results in Pcomp (+,-,0) and
press enter: ');
Unknown_damage(1,3)=input('Enter damage results in Pmax (+,-,0) and
press enter: ');
Unknown_damage(1,4)=input('Enter damage results in Pcharge (+,-,0)
and press enter: ');
Unknown_damage(1,5)=input('Enter damage results in Tcharge (+,-,0)
and press enter: ');
Unknown_damage(1,6)=input('Enter damage results in Pexh (+,-,0) and
press enter: ');
Unknown_damage(1,7)=input('Enter damage results in Texh (+,-,0) and
press enter: ');
Unknown_damage(1,8)=input('Enter damage results in T/C speed (+,-,0)
and press enter: ');
Unknown_damage(1,9)=input('Enter damage results in BSFC (+,-,0) and
press enter: ');
Unknown_damage(1,10)=input('Enter damage results in Tvalve (+,-,0)
and press enter: ');

%"Translation" of +,-,0 to +1,-1,0 for comparison with the simulation
%results which are given in this form
syn='+';
meion='-';
for ii=1:length(Unknown_damage)
    positive_result(1,ii)=strcmp(Unknown_damage(1,ii),syn);
    negative_result(1,ii)=strcmp(Unknown_damage(1,ii),meion);
    if positive_result(1,ii)>0.5
        Damage_result(1,ii)=1;
    elseif negative_result(1,ii)>0.5
        Damage_result(1,ii)=-1;
    else
        Damage_result(1,ii)=0;
    end
end

%Choosing which of the two tables will be used depending on the load
%and diagnosis
high_loads_for_compare='high';
low_loads_for_compare='low';
string_comparison(1,1)=strcmp(load,high_loads_for_compare);
```

```

string_comparison(1,2)=strcmp(load,low_loads_for_compare);

%diagnosis with at least 8/10 results
m=0;
d=1;
damage=zeros(26,10);
damage_sum=sum(abs(Damage_result));

if damage_sum==0
    disp(damages(28,1))
    m=1;
elseif string_comparison(1,1)>0.5
    for k=1:26
        for ii=1:10
            if Damage_result(1,ii)==high_loads(k,ii)
                damage(k,ii)=1;
            end
        end
    end
    S=sum(damage,2);
    for b=1:26
        if S(b,1)>7
            disp(damages(b,1))
            for_print=['With same results in ',num2str(S(b,1)), ' out of
10 parameters examined'];
            disp(for_print)
            disp(' ')
            m=1;
            d=d+1;
        end
    end
end

elseif string_comparison(1,2)>0.5
    for k=1:26
        for ii=1:10
            if Damage_result(1,ii)==low_loads(k,ii)
                damage(k,ii)=1;
            end
        end
    end
    S=sum(damage,2);
    for b=1:26
        if S(b,1)>7
            disp(damages(b,1))
            for_print=['With same results in ',num2str(S(b,1)), ' out of
10 parameters examined'];
            disp(for_print)
            disp(' ')
            m=1;
            d=d+1;
        end
    end
end

if m==0
    disp(damages(27,1))
end

```

2η εκδοχή

```
clear all
close all
clc
%Input data from simulation of high loads
diagnosis1=fullfile('C:\Users\sony\Desktop\diagnosis.xlsx');
high_loads=xlsread(diagnosis1,'high');
low_loads=xlsread(diagnosis1,'low');
damages=readtable(diagnosis1,'Range','A1:A29');

% Give the results without damage
load=input('Enter "high" or "low" for the load examined for damage
and press enter: ');
Without_damage(1,1)=input('Enter Tmax(cylinder) [K] without damage
and press enter: ');
Without_damage(1,2)=input('Enter Pcomp [bar] without damage and press
enter: ');
Without_damage(1,3)=input('Enter Pmax [bar] without damage and press
enter: ');
Without_damage(1,4)=input('Enter Pcharge [bar] without damage and
press enter: ');
Without_damage(1,5)=input('Enter Tcharge [K] without damage and press
enter: ');
Without_damage(1,6)=input('Enter Pexh [bar] without damage and press
enter: ');
Without_damage(1,7)=input('Enter Texh [K] without damage and press
enter: ');
Without_damage(1,8)=input('Enter T/C speed [rpm] without damage and
press enter: ');
Without_damage(1,9)=input('Enter BSFC [gr/kWh] without damage and
press enter: ');
Without_damage(1,10)=input('Enter Tvalve [K] without damage and press
enter: ');
disp(' ');

% Give the results of an unknown damage
Unknown_damage(1,1)=input('Enter Tmax(cylinder) [K] after damage and
press enter: ');
Unknown_damage(1,2)=input('Enter Pcomp [bar] after damage and press
enter: ');
Unknown_damage(1,3)=input('Enter Pmax [bar] after damage and press
enter: ');
Unknown_damage(1,4)=input('Enter Pcharge [bar] after damage and press
enter: ');
Unknown_damage(1,5)=input('Enter Tcharge [K] after damage and press
enter: ');
Unknown_damage(1,6)=input('Enter Pexh [bar] after damage and press
enter: ');
Unknown_damage(1,7)=input('Enter Texh [K] after damage and press
enter: ');
Unknown_damage(1,8)=input('Enter T/C speed [rpm] after damage and
press enter: ');
Unknown_damage(1,9)=input('Enter BSFC [gr/kWh] after damage and press
enter: ');
Unknown_damage(1,10)=input('Enter Tvalve [K] after damage and press
enter: ');

% Change
Change(1,1)=Unknown_damage(1,1)-Without_damage(1,1);
Change(1,2)=Unknown_damage(1,2)-Without_damage(1,2);
```



```

Change(1,3)=Unknown_damage(1,3)-Without_damage(1,3);
Change(1,4)=Unknown_damage(1,4)-Without_damage(1,4);
Change(1,5)=Unknown_damage(1,5)-Without_damage(1,5);
Change(1,6)=Unknown_damage(1,6)-Without_damage(1,6);
Change(1,7)=Unknown_damage(1,7)-Without_damage(1,7);
Change(1,8)=Unknown_damage(1,8)-Without_damage(1,8);
Change(1,9)=Unknown_damage(1,9)-Without_damage(1,9);
Change(1,10)=Unknown_damage(1,10)-Without_damage(1,10);

% Important changes high load
Imp_change_high(1,1)=50;
Imp_change_high(1,2)=4;
Imp_change_high(1,3)=4;
Imp_change_high(1,4)=0.2;
Imp_change_high(1,5)=5;
Imp_change_high(1,6)=0.2;
Imp_change_high(1,7)=10;
Imp_change_high(1,8)=1;
Imp_change_high(1,9)=400;
Imp_change_high(1,10)=7;

% Important changes low load
Imp_change_low(1,1)=50;
Imp_change_low(1,2)=3;
Imp_change_low(1,3)=3;
Imp_change_low(1,4)=0.2;
Imp_change_low(1,5)=4;
Imp_change_low(1,6)=0.2;
Imp_change_low(1,7)=10;
Imp_change_low(1,8)=1;
Imp_change_low(1,9)=400;
Imp_change_low(1,10)=7;

%Choosing which of the two tables will be used depending on the load
and
%diagnosis
high_loads_for_compare='high';
low_loads_for_compare='low';
string_comparison(1,1)=strcmp(load,high_loads_for_compare);
string_comparison(1,2)=strcmp(load,low_loads_for_compare);

if string_comparison(1,1)>0.5
    for jj=1:length(Change)
        if Change(1,jj)>Imp_change_high(1,jj)
            Damage_result(1,jj)=1;
        elseif Change(1,jj)<=-Imp_change_high(1,jj)
            Damage_result(1,jj)=-1;
        else
            Damage_result(1,jj)=0;
        end
    end
else
    for jj=1:length(Change)
        if Change(1,jj)>Imp_change_low(1,jj)
            Damage_result(1,jj)=1;
        elseif Change(1,jj)<=-Imp_change_low(1,jj)
            Damage_result(1,jj)=-1;
        else
            Damage_result(1,jj)=0;
        end
    end
end

```

```

    end
end

%diagnosis with at least 8/10 results
m=0;
d=1;
damage=zeros(26,10);
damage_sum=sum(abs(Damage_result));

if damage_sum==0
    disp(damages(28,1))
    m=1;
elseif string_comparison(1,1)>0.5
    for k=1:26
        for ii=1:10
            if Damage_result(1,ii)==high_loads(k,ii)
                damage(k,ii)=1;
            end
        end
    end
    S=sum(damage,2);
    for b=1:26
        if S(b,1)>7
            disp(damages(b,1))
            for_print=['With same results in ',num2str(S(b,1)),' out of
10 parameters examined'];
            disp(for_print)
            disp(' ')
            m=1;
            d=d+1;
        end
    end
end

elseif string_comparison(1,2)>0.5
    for k=1:26
        for ii=1:10
            if Damage_result(1,ii)==low_loads(k,ii)
                damage(k,ii)=1;
            end
        end
    end
    S=sum(damage,2);
    for b=1:26
        if S(b,1)>7
            disp(damages(b,1))
            for_print=['With same results in ',num2str(S(b,1)),' out of
10 parameters examined'];
            disp(for_print)
            disp(' ')
            m=1;
            d=d+1;
        end
    end
end

if m==0
    disp(damages(27,1))
end

```

Βιβλιογραφία

1. **Heywood, J.** *Internal combustion engine fundamentals*. Singapore : McGraw Hill, 1988.
2. **NTUA, Laboratory of Marine Engineering.** *MOTOR THERMODYNAMICS Users Manual Version 2.1*. Ζογράφου : s.n., 2013.
3. **Κυρτάτος, Νικόλαος Π.** *Ναυτικοί Κινητήρες Diesel*. s.l. : ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1993.
4. **Z. Feng, Z. Chen, Y. Wang.** *Online monitoring and fault diagnosis of ship propulsion systems* .
5. [Ηλεκτρονικό] <http://www.mtu-report.com>.
6. [Ηλεκτρονικό] <http://www.splashmaritime.com.au>.
7. **Defense technical information center.** *Failure modes and predictive diagnostics considerations of diesel engines* .
8. **MAN Energy Solutions.** *Service Experience - Small bore four stroke engines*. Copenhagen : MAN Energy Solutions, 2012.
9. **L. Jackson, T. Morton.** *Reed's general engineering knowledge for marine engineers*. London : Adlard Coles Nautical, 2003.
10. [Ηλεκτρονικό] <https://www.dieselnet.com>.
11. **Benvenuto G, Campora U.** *Performance prediction of a faulty marine diesel engine under different governor settings*. Naples : 2nd International conference on marine research and transportation, 2007.
12. [Ηλεκτρονικό] <https://www.diesel-engine-motor-service.com/>.
13. **R.van Basshuysen, F.Schafer.** *Internal combustion engine Handbook*. Warrendale : SAE International, 2004.
14. [Ηλεκτρονικό] <https://www.marineinsight.com>.
15. **Mohamed Anas, R. J. Paling, W. H. Nailon, D. R. S. Cumming.** *Real-time combustion knock processing using a single instruction multiple data automotive PowerPC system-on-a-chip*. Universities of Edinburgh, Glasgow, Heriot-Watt, and Strathclyde, Scotland, 2004.
16. [Ηλεκτρονικό] <https://mansfield.energy/market-news/impact-of-imo-2020-on-fuel-prices/>.
17. [Ηλεκτρονικό] <http://www.pistonheads.com>.
18. [Ηλεκτρονικό] <http://marineshelf.blogspot.com/2012/10/exhaust-valve-defects.html> .
19. **Z. Korczewski, M. Zacharewicz.** *Introduction to diagnostic investigation of marine diesel engines at limited monitoring susceptibility*.
20. [Ηλεκτρονικό] <https://www.mpr.com/uploads/news/energy-cs-07.pdf> .
21. [Ηλεκτρονικό] <http://www.csobeech.com/exhaust-valves.html>.
22. **Kyrtatos, N. P.** *A microcomputer based diesel engine simulator for advanced ship propulsion monitoring and control systems*. *Naval engineers journal*. 1989.

23. **Zwebek A., Pilidis P.** Degradation Effects on Combined Cycle Power Plant Performance—Part III: Gas and Steam Turbine Component Degradation Effects. *Journal of engineering of gas turbines and power*. 2003, 105.
24. *Uptime Anytime - Introducing the L23/30H Mk 3 version.* **MAN Energy Solutions.** Αθήνα : MAN Energy Solutions, 2019.
25. [Ηλεκτρονικό] <https://www.dragzine.com/>.
26. [Ηλεκτρονικό] <https://www.machinerylubrication.com>.
27. [Ηλεκτρονικό] <https://www.brighthubengineering.com>.
28. [Ηλεκτρονικό] <http://www.marinediesels.info/>.
29. **Heywood, J.** *Internal combustion engine fundamentals*. Singapore : McGraw-Hill, 1988.
30. **J.M. Gomes Antunes, R. Mikalsen, A.P. Roskilly.** An investigation of hydrogen-fuelled HCCI engine performance and operation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008.
31. **T. Tetsuya, M. Takahisa, G. Satoru.** Development of emission control technology to reduce level of NOx and fuel consumption in marine diesel engines. *IHI Engineering Review*.
32. **Ceccarelli, Riccardo.** *Model-based fault detection in Diesel engines air-path*. Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble, 2012.
33. **M.Nyberg, T.Stutte.** Model based diagnosis for air path of an automotive diesel engine. *Control engineering practice*. 2004, 12.
34. **M. Sachenbacher, P. Struss.** Task-dependent qualitative domain abstraction. *Artificial intelligence*. 2005, 162.
35. **F. Kimmich, A.Schwarte, R.Isermann.** Fault detection for modern diesel engines using signal and process model-based methods. *Control engineering practice*. 2005, 13.
36. **A. Pernestal, H. Wettig, T. Silander, M. Nyberg.** A bayesian approach to learning in fault isolation. 2008.
37. *Fault detection and identification of marine diesel engine using expert knowledge and fuzzy logic approach.* I. **Golub, R. Antonic, A. Cibilic, Z. Kulenovic.** Dubai : s.n., 2012.
38. Εισαγωγή στην ασαφή λογική - ασαφή σύνολα - συναρτήσεις συμμετοχής. [συγγρ. βιβλίου] Π. Μαστοροκώστας. 2015.
39. **R. Nowicki, R. Slowinski, J. Stefanowski.** Evaluation of vibroacoustic diagnostic symptoms by means of the rough sets theory. *Computers in industry*. 1992, 20.
40. [Ηλεκτρονικό] <https://highwayandheavyparts.com/>.