



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

---

**Θεωρητική και Πειραματική Διερεύνηση της Αποκοπής Υπερπληρωτή σε 2-Χ  
Κινητήρες Ντήζελ**

---

**Διπλωματική Εργασία**

**Κωνσταντίνος Μάλλης**

Επιβλέπων: Δημήτριος Χουντάλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2015

---

---

---

---

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης που έχει η αποκοπή του ενός από τους δύο υπερπληρωτές του μελετώμενου ναυτικού κινητήρα, στις βασικές λειτουργικές παραμέτρους του. Η μέθοδος του Turbocharger Cut-Out, χρησιμοποιείται στο ευρύτερο πλαίσιο του slow steaming, της πλεύσης σε χαμηλές ταχύτητες. Η αργή πλεύση, εκτός των οικονομικών οφελών που προσφέρει στην ναυτιλία, δύναται να προκαλέσει τεχνικά προβλήματα στον κινητήρα, για τα οποία καλούμαστε να βρούμε λύσεις. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με πρόγραμμα προσομοίωσης, του οποίου εξετάστηκε σε πρώτη φάση η προβλεπτική ικανότητα κι αφού εξασφαλίστηκε η ομαλή λειτουργία του, κατασκευάστηκαν συγκριτικά διαγράμματα, τα οποία μας δίνουν μια εικόνα για το πως επιδρά η αποκοπή του υπερπληρωτή στη μηχανή. Στη συνέχεια, εντοπίζουμε το βασικό μειονέκτημα της αποκοπής υπερπληρωτή, το οποίο είναι η αύξηση της πίεσης καύσης και προσπαθούμε με την μεταβολή του χρονισμού έγχυσης να μειώσουμε την πίεση αυτή. Η μελέτη αυτή, έγινε στα φορτία 25% και 40%.

---

---

---



**National Technical University of Athens**

School of Mechanical Engineering

Department of Thermal Engineering

Laboratory of Internal Combustion Engines

---

**Theoretical and Experimental Investigation of T/C Cutout in Two Stroke Diesel Engines**

---

**Diploma Thesis**

**Konstantinos Mallis**

Supervisor: Dimitrios Hountalas, Professor NTUA

Athens, 2015

---

---

---

---

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική μελέτη, με τίτλο «Θεωρητική και Πειραματική Διερεύνηση της Αποκοπής Υπερπληρωτή σε 2-Χ Κινητήρες Ντήζελ» και στην Αγγλική «Theoretical and Experimental Investigation of T/C Cutout in two Stroke Diesel Engines» φέρνει εις πέρας την φοίτηση μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωση μου να ευχαριστήσω όλους όσους συντέλεσαν στην ολοκλήρωση της παρακάτω εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Χουντάλα για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς επίσης και τον κ. Νικόλαο Σακελλαρίδη, υποψήφιο διδάκτορα, για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και συμβουλές του, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την ηθική και υλική υποστήριξη, την οποία μου προσέφερε απλόχερα και τα πέντε χρόνια φοίτησής μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

---





---

## Περιεχόμενα

<b>1.Υπερπλήρωση</b>	<b>1</b>
1.1 Ορισμός Υπερπλήρωσης .....	1
1.2 Ιστορία της υπερπλήρωσης .....	3
1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης .....	3
1.4 Επισκόπηση των μεθόδων υπερπλήρωσης .....	4
<b>2.Εισαγωγή στην πρακτική του slow steaming</b>	<b>10</b>
2.1 Ορισμός του slow steaming .....	10
2.2 Ιστορική αναδρομή του slow steaming .....	11
2.3 Πλεονεκτήματα του slow steaming .....	13
2.4 Μειονεκτήματα της μεθόδου .....	14
2.5 Επικρατούσες απόψεις για την εφαρμογή της μεθόδου .....	14
2.6 Συσχετισμός slow steaming και κατανάλωσης καυσίμου .....	15
2.7 Είδη slow steaming .....	18
<b>3.Τεχνικά προβλήματα από την εφαρμογή της μεθόδου slow steaming</b>	<b>21</b>
<b>4.Μέθοδοι αντιμετώπισης τεχνικών προβλημάτων</b>	<b>24</b>
4.1 Μετασκευές στο ήδη υπάρχον σύστημα .....	26
4.2 Σύστημα αποκοπής στροβίλο-υπερπληρωτή(Turbocharger cut-out) .....	31
4.2.1 Οφέλη από την αποκοπή ενός ή περισσότερων υπερπληρωτών .....	34

---



---

<b>5. Παρουσίαση του λογισμικού προσομοίωσης</b>	<b>36</b>
5.1 Προσομοίωση κινητήρα .....	37
5.2 Παρουσίαση Δοκιμών Θαλάσσης .....	39
<b>6. Εξέταση προβλεπτικής ικανότητας του λογισμικού προσομοίωσης</b>	<b>42</b>
6.1 Έλεγχος προβλεπτικής ικανότητας λογισμικού κατά την κανονική λειτουργία του κινητήρα .....	43
6.2 Έλεγχος προβλεπτικής ικανότητας λογισμικού κατά τη λειτουργία με T/C Cut-Out .....	49
<b>7. Επίδραση στις βασικές παραμέτρους λειτουργίας της αποκοπής υπερπληρωτή</b>	<b>56</b>
<b>8. Σύγκριση των τιμών της προσομοίωσης με τις αντίστοιχες των δοκιμών θαλάσσης</b>	<b>67</b>
<b>9. Διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής του χρονισμού έγχυσης</b>	<b>73</b>
9.1 Διερεύνηση για λειτουργία στο 25% του Ονομαστικού Φορτίου .....	73
9.2 Διερεύνηση για λειτουργία στο 40% του Ονομαστικού Φορτίου .....	76
<b>10. Αποτίμηση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα</b>	<b>80</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>83</b>

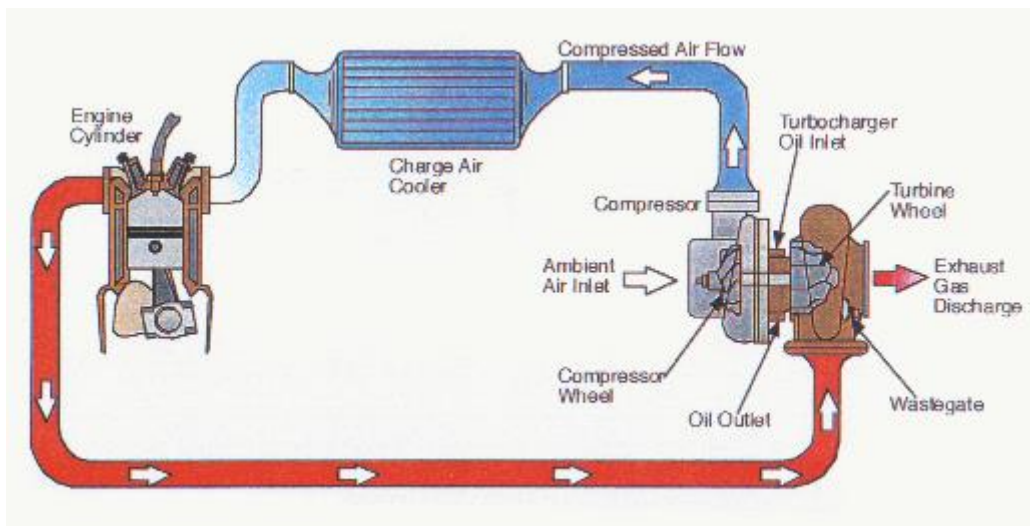
---

# Κεφάλαιο 1

## Υπερπλήρωση

### 1.1 Ορισμός υπερπλήρωσης

Ως υπερπλήρωση σε μια Μηχανή Εσωτερικής Καύσης ορίζουμε την αύξηση της γόμωσης (της πλήρωσης) του κυλίνδρου, εξωτερικά του κυλίνδρου με τη χρήση μηχανικού μέσου (υπερπληρωτής) και άρα της ισχύος του κινητήρα σε επίπεδα μεγαλύτερα από αυτά του αντιστοίχων διαστάσεων 4-X κινητήρα φυσικής αναπνοής. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη ενός υπερπληρωμένου κινητήρα.



Σχήμα 1.1: Τυπική διάταξη ενός υπερπληρωμένου κινητήρα

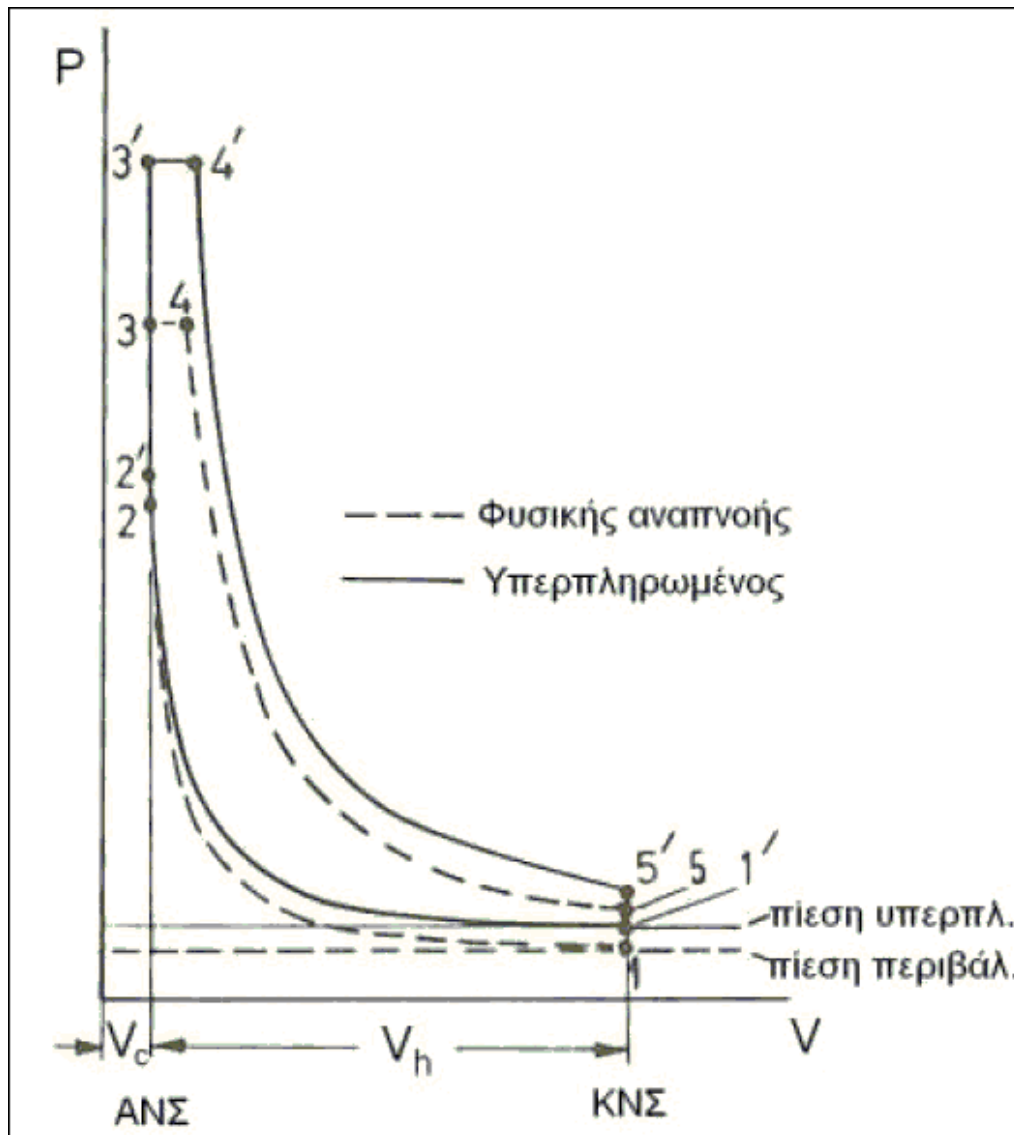
Η ισχύς ενός κινητήρα είναι, γενικά, ανάλογη με την ποσότητα του καυσίμου που μπορεί να καεί σε αυτόν, άρα και με την παροχή του αναρροφώμενου αέρα. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της ισχύος ενός δεδομένου κινητήρα, χωρίς την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του. Και οι 2 αυτοί παράγοντες (η υπερπλήρωση και η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής) αυξάνουν την παροχή του αναρροφώμενου από τον κινητήρα αέρα, και συνεπώς την ποσότητα καυσίμου που μπορεί να καεί, συνεπώς και την ισχύ του.

Και στις δύο περιπτώσεις, όμως, υπάρχουν τεχνολογικά όρια όσον αφορά την περαιτέρω αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος, η οποία δίνεται από την σχέση

$$P_e = zV_H \frac{n}{30K} = zA_e s \bar{p} \frac{n}{30K} = zA_e \bar{p} \frac{c_e}{K}$$

Με τη χρήση της υπερπλήρωσης, λοιπόν, αλλά και ταυτοχρόνως με την ενδιάμεση ψύξη (cooling) του αέρα επιτυγχάνεται αρχικά αύξηση της πυκνότητάς του, στην συνέχεια αύξηση της παροχής του αναρροφούμενου αέρα, που οδηγεί σε αύξηση της ποσότητας του καυσίμου που μπορεί να καεί, και

συνεπώς σε αύξηση της ισχύος του κινητήρα. Έτσι, ένας υπερπληρωμένος κινητήρας ίδιων διαστάσεων με έναν αντίστοιχο φυσικής αναπνοής μπορεί να επιτύχει σημαντικά υψηλότερη ισχύ.



Σχήμα 1.2: Συγκριτικό διάγραμμα του ιδανικού κύκλου ενός κινητήρα φυσικής αναπνοής με έναν υπερπληρωμένο κινητήρα

## 1.2 Ιστορία της υπερπλήρωσης

Η ιστορία της υπερπλήρωσης των μηχανών εσωτερικής καύσης πηγαίνει πίσω στον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Ένα από τα πρώτα, αν όχι το πρώτο, δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σχετικής με την υπερπλήρωση, ανήκει στους αδελφούς Philander και Francis Marion Roots της εταιρίας Roots Blower Company (με έδρα το Connersville στην πολιτεία της Indiana των Η.Π.Α.), οι οποίοι σχεδίασαν μία αντλία αέρα για χρήση σε υψικάμινους το 1860.

Ο πρώτος πλήρως λειτουργικός υπερπληρωτής σχεδιάστηκε από τον Dugald Clerk, ο οποίος τον χρησιμοποίησε στην πρώτη δίχρονη μηχανή εσωτερικής καύσης το 1878. Ο Gottlieb Daimler κατοχύρωσε με τη σειρά του Γερμανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας DRP 34926 για την υπερπλήρωση κινητήρων εσωτερικής καύσης το 1885, ενώ ο Louis Renault σχεδίασε ένα φυγοκεντρικό υπερπληρωτή, τον οποίο και πατεντάρισε στη Γαλλία το 1902. Ένα από τα πρώτα υπερπληρούμενα αγωνιστικά αυτοκίνητα κατασκευάστηκε από τον Lee Chadwick στο Pottstown της Pennsylvania των Η.Π.Α. το 1908. Το αυτοκίνητο φέρεται να επιτύγχανε ταχύτητες της τάξης των 160χλμ/ώρα.

Τα πρώτα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής με υπερπλήρωση υπήρξαν τα Mercedes 6/25/40 hp και Mercedes 10/40/65 hp. Και τα δύο μοντέλα εισήλθαν στην αγορά το 1921 και είχαν υπερπληρωτές τύπου Roots. Απέκτησαν δε την ονομασία "Kompressor" (από το Γερμανικό όρο για το συμπιεστή), η οποία είναι μέχρι τις μέρες μας σε χρήση από τη Mercedes-Benz για μοντέλα της που εφαρμόζουν μηχανική υπερπλήρωση.

Στις 24 Μαρτίου του 1878, ο Heinrich Krigar από τη Γερμανία κατοχύρωσε την πατέντα #4121 για τον πρώτο κοχλιωτό συμπιεστή, ενώ αργότερα το ίδιο έτος (στις 16 Αυγούστου) έλαβε και την πατέντα #7116 μετά από μετατροπές για τη βελτίωση της αρχικής του σχεδίασης. Τα σχέδιά του δείχνουν συναρμολόγηση με ρότορα διπλού λοβού με τους δύο κοχλίες να έχουν περίπου το ίδιο σχήμα.

Σχεδόν μισό αιώνα αργότερα, το 1935, ο Alf Lysholm, εργαζόμενος της Σουηδικής εταιρίας Ljungstroms Angturbin AB (αργότερα γνωστής ως Svenska Rotor Maskiner AB και SRM από το 1951), κατοχύρωσε ευρεσιτεχνία υπερπλήρωσης με πέντε θηλυκούς και τέσσερις αρσενικούς ρότορες, καθώς επίσης και τη μέθοδο καταργασίας του ρότορα αυτού του τύπου.

## 1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης

Τα βασικά **πλεονεκτήματα** της υπερπλήρωσης, για δεδομένη εξαγόμενη ισχύ από έναν κινητήρα, είναι:

- μικρότερος φυσικός όγκος (μικρότερος αριθμός κυλίνδρων, μικρότερο μέγεθος κινητήρα, αγγλική ορολογία: 'downsizing').
- χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα εξαγόμενης ισχύος, ειδικά για μεγαλύτερων διαστάσεων κινητήρες.
- χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
- μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη ειδική μάζα.
- μικρότερο ποσοστό τριβών λόγω του μικρότερου αριθμού κυλίνδρων.
- μειωμένος θόρυβος στην εξαγωγή λόγω του στροβίλου των καυσαερίων.
- ειδικά σε κινητήρες diesel, μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης λόγω αυξημένων θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου.

Αντιθέτως, τα μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης είναι τα εξής:

- πιο αργή επιτάχυνση συγκριτικά με αντίστοιχους κινητήρες φυσικής αναπνοής (αναφέρεται κυρίως σε συστήματα στρόβιλο-υπερπλήρωσης).
- υψηλότερη θερμική και μηχανική καταπόνηση στα εσωτερικά του κυλίνδρου.
- αυξημένες εκπομπές ρύπων ιδιαίτερα κατά την διάρκεια μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα (κυρίως σε συστήματα στρόβιλο-υπερπλήρωσης).

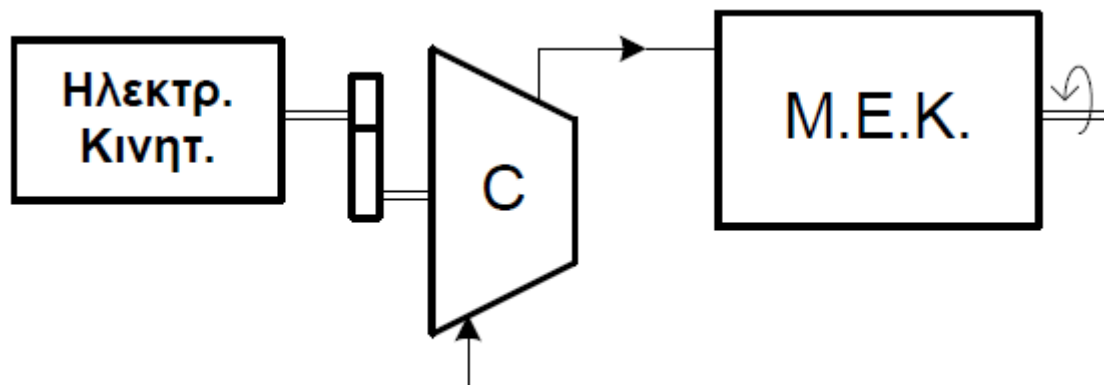
#### 1.4 Επισκόπηση των μεθόδων υπερπλήρωσης

Η υπερπλήρωση είναι μια μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται αρκετά χρόνια και καθ' όλη τη διάρκεια της εξέλιξής της, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια, με βάση τα οποία, τα συστήματα υπερπλήρωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με:

- 1) Τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης.
- 2) Το σχεδιασμό του συμπιεστή.
- 3) Τη σύνδεση της μονάδας υπερπλήρωσης με τον κινητήρα ή του τρόπου μεταφοράς της ισχύος.
- 4) Το είδος του κινητήρα.

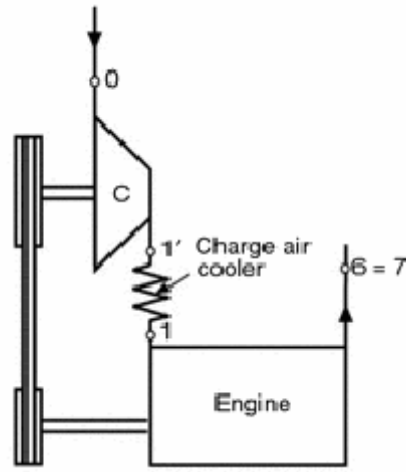
##### 1) Τρόπος κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης.

1.1) Εξωτερικά κινούμενος (από βοηθητικό κινητήρα ή ηλεκτροκινητήρα), ή αλλιώς εξωτερική υπερπλήρωση. Χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα υπερπλήρωσης αεροπορικών κινητήρων, ορισμένων κινητήρων Diesel, καθώς και για τη σάρωση 2-X κινητήρων φυσικής αναπνοής. (Σχήμα 1.3)



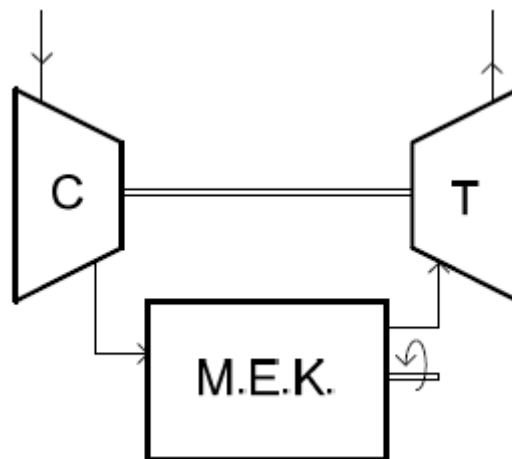
Σχήμα 1.3: Σύστημα υπερπλήρωσης με συμπιεστή κινούμενο από εξωτερικό ηλεκτροκινητήρα

1.2) Κινούμενος από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (απορρόφηση μηχανικού έργου συγκεκριμένη μέθοδος, ονομάζεται μηχανική υπερπλήρωση. Χρησιμοποιείται σε κινητήρες Otto αυτοκινήτων με ή χωρίς ενδιάμεσο ψυγείο αέρα, με σταθερή (συνήθως) ή μεταβλητή σχέση μετάδοσης κίνησης. (Σχήμα 1.4)



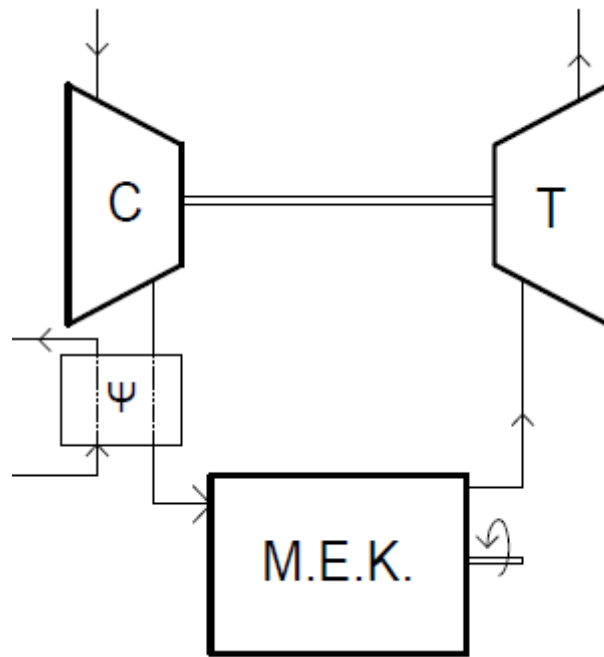
Σχήμα 1.4: μονογραμμικό σχήμα μηχανικής υπερπλήρωσης

1.3) Κινούμενος από στρόβιλο καυσαερίου, η γνωστή και ως στρόβιλο-υπερπλήρωση · μονοβάθμια χωρίς ή με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα ή διβάθμια. Είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος υπερπλήρωσης με σχεδόν καθολική χρήση σε κινητήρες οχημάτων, βιομηχανικούς και ναυτικούς. (Σχήματα 1.5, 1.6 και 1.7)

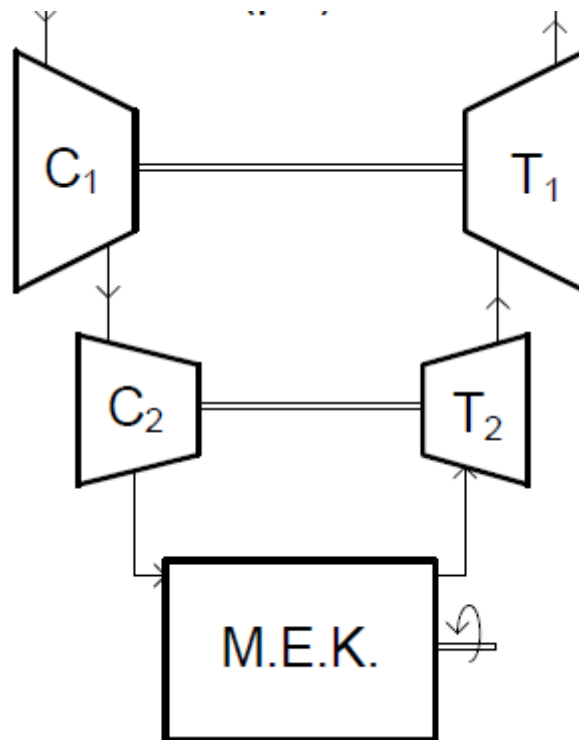


Σχήμα 1.5: Μονοβάθμια υπερπλήρωση χωρίς ψυγείο



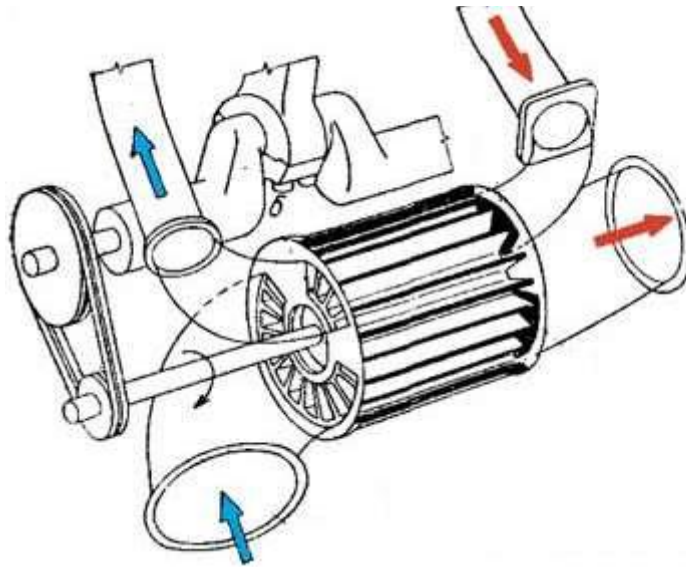


Σχήμα 1.6: Μονοβάθμια υπερπλήρωση με ενδιάμεσο ψυγείο



Σχήμα 1.7: Διβάθμια υπερπλήρωση

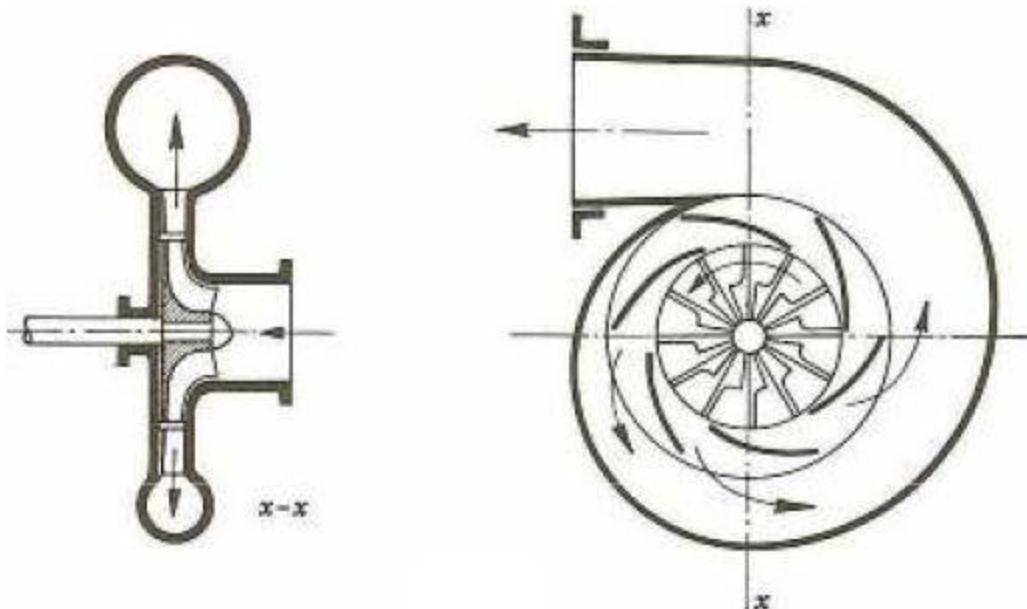
1.4) Χωρίς τη χρήση συμπιεστή, αλλά με συμπίεση μέσω κύματος πίεσης που προέρχεται από την αποτόνωση του καυσαερίου σε δρομέα με πτερύγια, π.χ. σύστημα Comprex της εταιρίας Brown Boveri & Co. Ltd. (Σχήμα 1.8)



Σχήμα 1.8: Σύστημα υπερπλήρωσης με τη μέθοδο Complex

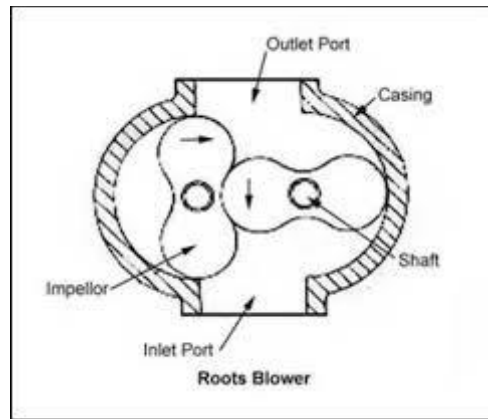
## 2) Σχεδιασμός του συμπιεστή.

2.1) Τύπου δυναμικής ροής – αεροδυναμικός συμπιεστής αξονικής, ακτινικής ή μεικτής ροής (Σχήμα 1.9).

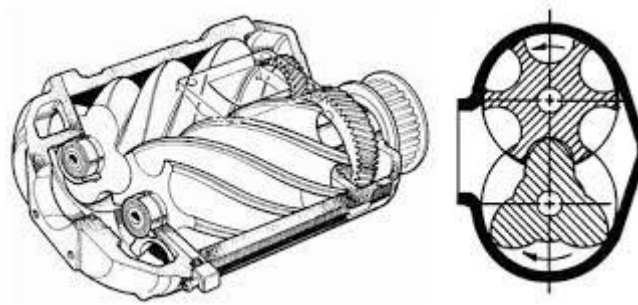


Σχήμα 1.9: Φυγοκεντρικός συμπιεστής δυναμικής ροής

2.2) Θετικής εκτόπισης (Σχήμα 1.10, 1.11) με παλινδρομικό ή περιστρεφόμενο έμβολο, όπως π.χ. στην περίπτωση του λοβοειδούς ανεμιστήρα (Roots blower) ή του κοχλιοειδούς συμπιεστή (Lysholm).



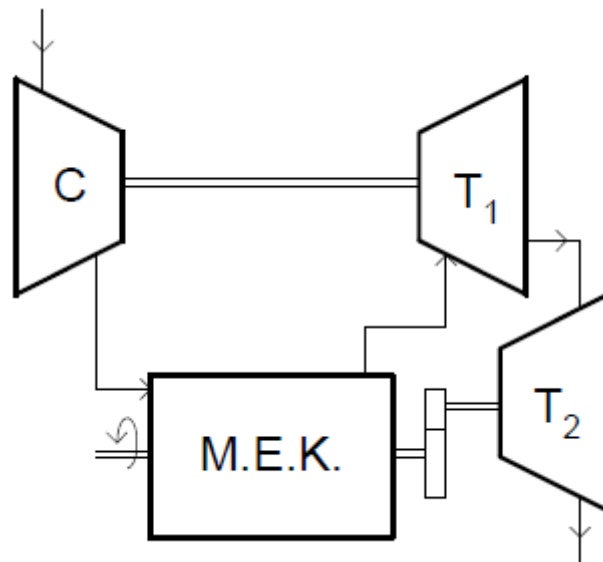
Σχήμα 1.10



Σχήμα 1.11

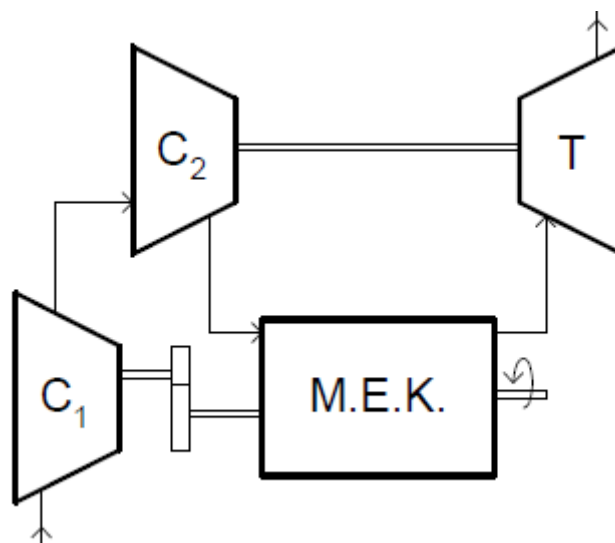
### 3) Σύνδεση μονάδας υπερπλήρωσης και κινητήρα και μεταφορά ισχύος.

- 3.1) Συμπιεστής συζευγμένος στη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα · η ισχύς εξάγεται από την άτρακτο του κινητήρα χωρίς τη χρήση στροβίλου, όπως αναφέραμε και πριν, η μέθοδος αυτή ονομάζεται μηχανική υπερπλήρωση.
- 3.2) Συμπιεστής συζευγμένος με τον ελεύθερα περιστρεφόμενο στρόβιλο αποτόνωσης καυσαερίου · η εξαγόμενη ισχύς παράγεται μόνο από την άτρακτο του κινητήρα, η γνωστή στρόβιλο-υπερπλήρωση.
- 3.3) Συμπιεστής και στρόβιλος μηχανικά συζευγμένοι. Επίσης, η άτρακτος του κινητήρα είναι συζευγμένη σε στρόβιλο ισχύος. Οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται σύνθετοι (turbo-compound engines). Χρήση σε κινητήρες αεροσκαφών. (Σχήμα 1.12)



Σχήμα 1.12: Σύνθετη στρόβιλο-υπερπλήρωση (turbo-compound) με στρόβιλο ισχύος

3.4) Συμπιεστής και άτρακτος του κινητήρα μηχανικά συζευγμένοι μεταξύ τους με επιπλέον ζεύγος στρόβιλο-υπερπλήρωσης· οι δύο συμπιεστές συνδεδεμένοι σε σειρά. Χρήση σε 2-X στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες καθώς και σε κινητήρες οχημάτων για τη βελτίωση της μεταβατικής τους λειτουργίας. (Σχήμα 1.13)



Σχήμα 1.13: συνδυασμένη υπερπλήρωση, με δύο συμπιεστές σε σειρά, ο ένας θετικής εκτόπισης συζευγμένος στη στροφαλοφόρο άτρακτο και ο άλλος σε ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης

3.5) Συμπιεστής και άτρακτος του κινητήρα μηχανικά συζευγμένοι μεταξύ τους· εξαγόμενη ισχύς μόνο από την άτρακτο του στρόβιλου → στρόβιλος με αεριογόνο (gas generator). Είχε χρήση, κυρίως, σε μονάδες ισχύος με σύστημα ελευθέρων εμβόλων.

#### 4) Είδος του κινητήρα.

4.1) 4-X ή 2-X κινητήρας.

4.2) Κινητήρας Otto ή Diesel.

## Κεφάλαιο 2

### Εισαγωγή στην πρακτική του slow steaming

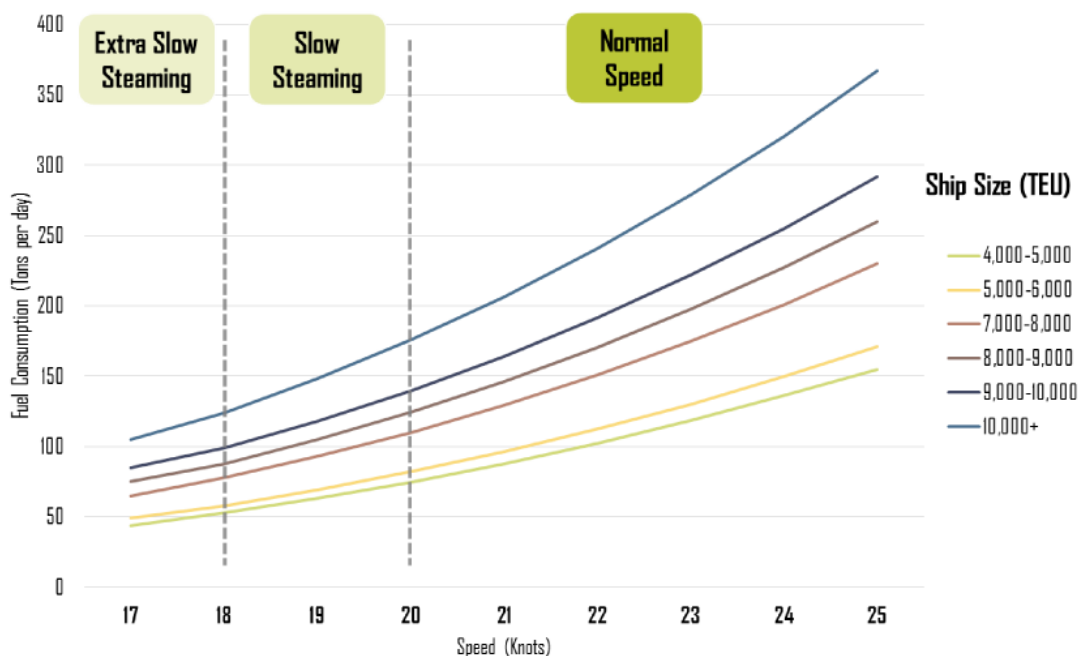
#### 2.1 Ορισμός του slow steaming

Ο όρος «αργή πλεύση» ή Slow steaming αναφέρεται στην πρακτική την οποία ακολουθούν τα τελευταία χρόνια οι ναυτιλιακές εταιρίες, κατά την οποία το πλοίο λειτουργεί σε διάφορα σκέλη του ταξιδιού σε χαμηλά ή πολύ χαμηλά φορτία.

Με αυτήν την τεχνική επιτυγχάνεται μείωση της κατανάλωσης και συνεπώς μέγιστη οικονομία καυσίμου ανά ναυτικό μίλι με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Μάλιστα, με μείωση της ταχύτητας του πλοίου κατά 20%, μπορούμε να επιτύχουμε μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου μέχρι και κατά 50%.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, το πλοίο κινείται με ταχύτητα η οποία κυμαίνεται μεταξύ

12-19 κόμβων, έναντι της συνηθισμένης των 20-24 κόμβων, ενώ υπάρχουν περιπτώσεις πλεύσης σε ταχύτητες της τάξης των 14-17 κόμβων(super-slow steaming). Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ισχύος της μηχανής, αλλά και της κατανάλωσης καυσίμου, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 2.1.

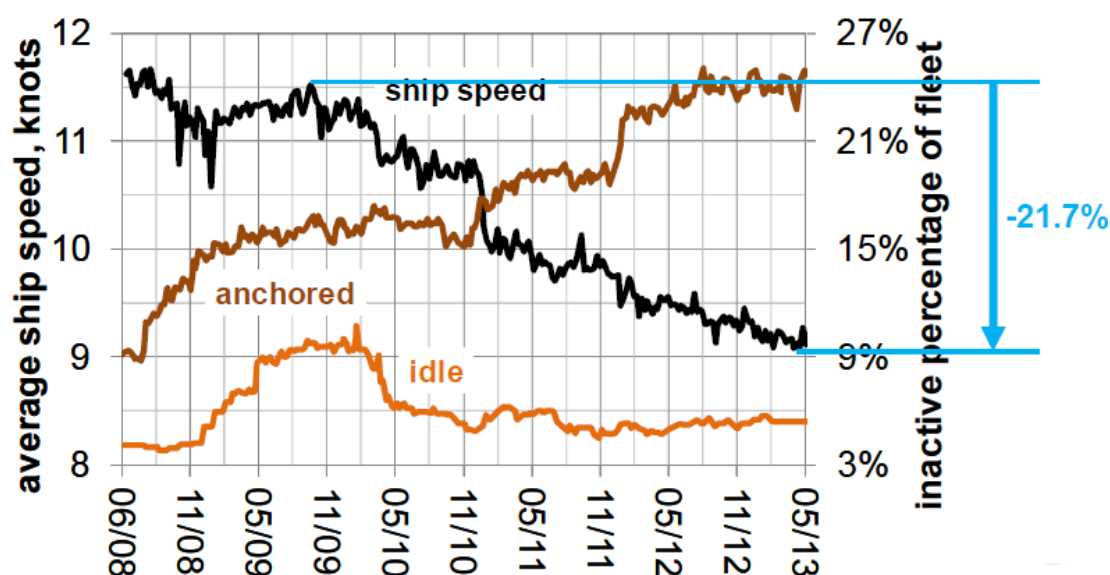


Σχήμα 2.1: Επίδραση της ταχύτητας πλεύσης στην κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του μεγέθους του πλοίου.

## 2.2 Ιστορική αναδρομή του slow steaming

Η πρακτική του slow steaming εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από την ναυτιλιακή εταιρία Maersk Lines την περίοδο της οικονομικής κρίσης, το 2008, περίοδος κατά την οποία η τιμή του πετρελαίου αυξήθηκε σημαντικά. Την ίδια περίοδο, η κινητικότητα στο παγκόσμιο εμπόριο μειώθηκε αισθητά, με αποτέλεσμα να παρουσιαστεί πλεονάζουσα μεταφορική ικανότητα στην ναυτιλιακή βιομηχανία. Ένας άλλος παράγοντας ο οποίος συνέβαλε στην ανάπτυξη της μεθόδου αυτής, είναι η μείωση της αξίας των πλοίων. Οι παράγοντες αυτοί, άσκησαν μεγάλη πίεση σε όλους τους φορείς του παγκοσμίου εμπορίου, οι οποίοι έπρεπε να προσαρμοστούν έγκαιρα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να υπάρξει μια καθυστέρηση σε όλα τα είδη εμπορικών κινήσεων, με ακυρώσεις παραγγελιών, δημιουργία νέων, παραγγελία νέων πλοίων και την απόσυρση μέρους του ήδη υπάρχοντος στόλου. Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, εκτός από τη μείωση των εξόδων πλεύσης (καύσιμα και εκπομπές ρύπων), έγινε εφικτή και η χρησιμοποίηση μεγάλου κομματιού του ανενεργού, υπό άλλες συνθήκες, στόλου (Σχήμα 2.2).

Market developments – vessel speed and fleet utilisation

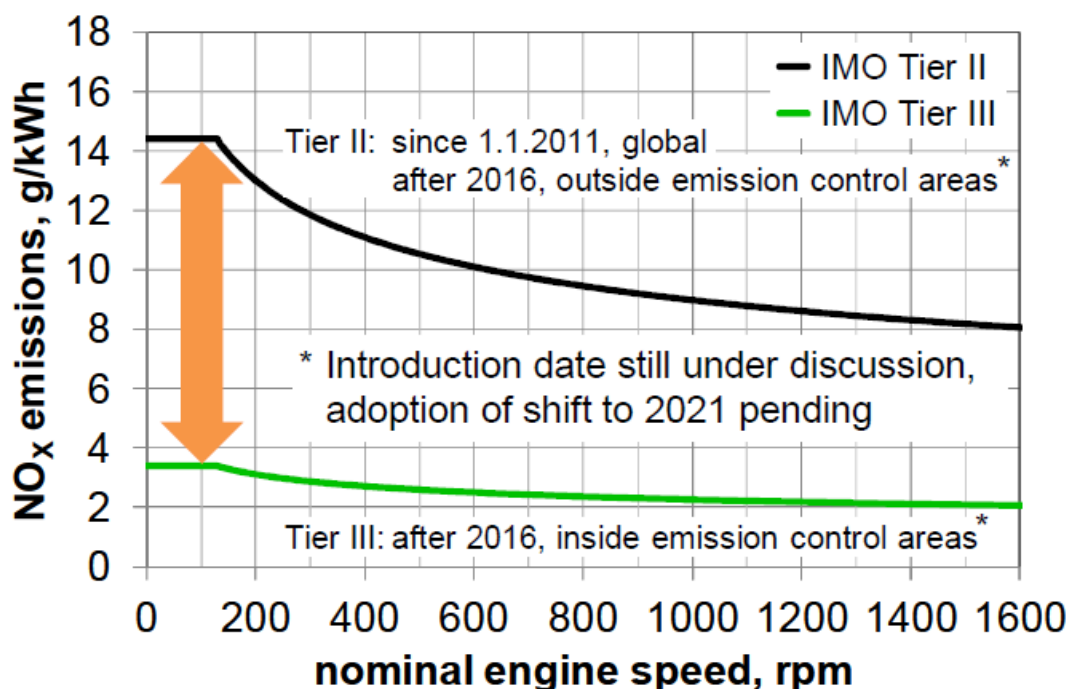


Σχήμα 2.2: Εξέλιξη της αγοράς- Ταχύτητα πλεύσης και εκμετάλλευση του στόλου

Αρχική πρόβλεψη ήταν πως όταν επανερχόταν η οικονομία και η κινητικότητα στο διεθνές εμπόριο, οι ναυτιλιακές εταιρείες θα γυρνούσαν στις προηγούμενες ταχύτητες πλεύσης. Όμως, λόγω της αυξανόμενης ανησυχίας που επικρατεί στην παγκόσμια κοινότητα για τη ρύπανση του περιβάλλοντος από τις εκπομπές ρυπαντών, οι οποίες είναι ανάλογες της ποσότητας καίόμενου καυσίμου, όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.3, το

slow steaming υιοθετήθηκε πλήρως από τις εταιρίες, μια πεπατημένη η οποία ακολουθείται, πλέον, ευρέως.

### Annex VI of MARPOL 73/78, Regulation 13 (Nitrogen oxides)

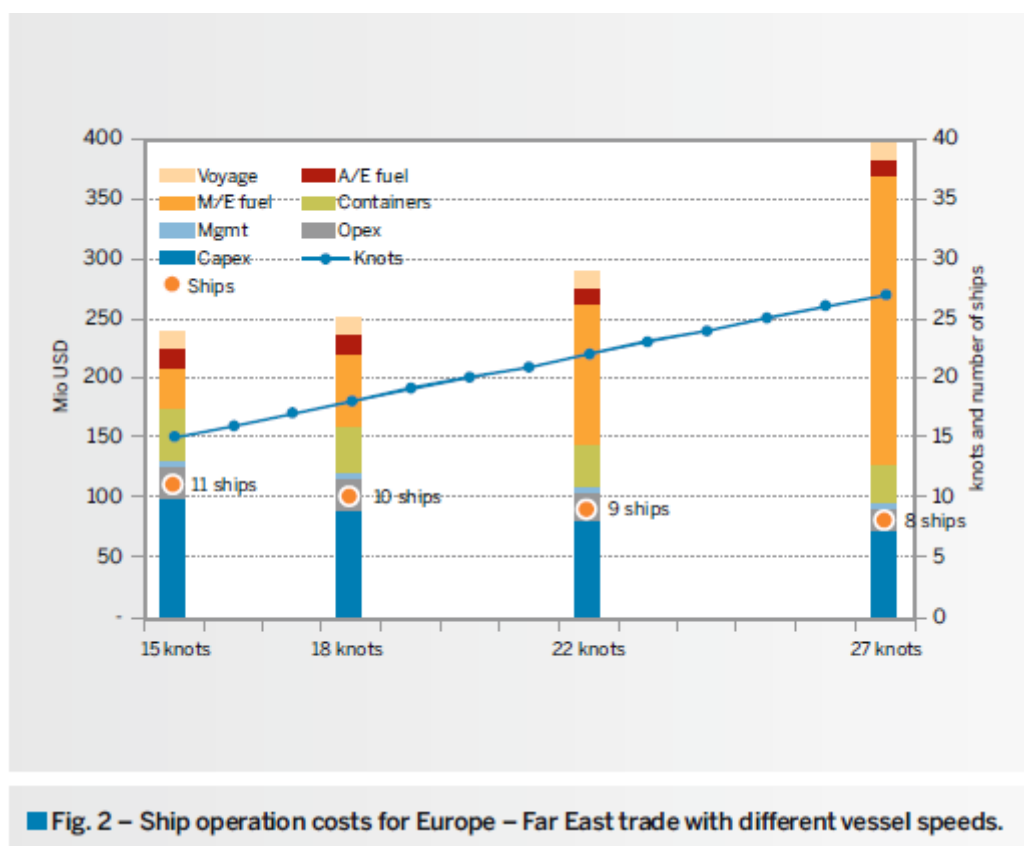


Σχήμα 2.3: Επιτρεπόμενα όρια εκπομπής NO<sub>x</sub> συναρτήσει της ονομαστικής ταχύτητας του πλοίου

Σήμερα, λοιπόν, η πρακτική του slow steaming βρίσκει ευρεία εφαρμογή και σύμφωνα με έρευνα η οποία διεξήχθη από τη νορβηγική εταιρία Maersk περίπου το 80% των διαδρομών από Ασία για Ευρώπη πραγματοποιούνται από πλοία που την εφαρμόζουν. Σύμφωνα με έρευνα, την οποία πραγματοποίησε η κατασκευάστρια εταιρία MAN Diesel & Turbo, οι 149 από τους 200 αντιπροσώπους ναυτιλιακών εταιριών, ισχυρίστηκαν πως έχουν ενσωματώσει το slow steaming στον στόλο τους.

Η κατασκευάστρια ναυτικών κινητήρων Wartsila υποστηρίζει πως με τη μείωση της ταχύτητας πλεύσης από τους 27 στους 18 κόμβους, υπάρχει οικονομία κατά 59% στην κατανάλωση καυσίμου, λαμβάνοντας υπόψη και τη μεγαλύτερη διάρκεια του ταξιδιού, λόγω της μικρότερης ταχύτητας.

Επιπλέον στοιχεία προκύπτουν από τις εκθέσεις της Maersk η οποία υπολογίζει ότι, μπορεί να εξοικονομήσει 4000 μετρικούς τόνους καυσίμου σε ένα ταξίδι της διαδρομής Ευρώπη-Σιγκαπούρη με την εφαρμογή του slow steaming. Σε μία τυπική τιμή των 600-700 δολαρίων ανά τόνο, προκύπτει οικονομία 2.4-2.8 εκατομμυρίων δολαρίων από την εφαρμογή του slow steaming σε ένα τυπικό ταξίδι.



Σχήμα 2.4: Κόστος ταξιδιού Ευρώπη – Ασία συναρτήσεως της ταχύτητας πλεύσης.

### 2.3 Πλεονεκτήματα του Slow Steaming

Η μέθοδος έχει βοηθήσει αρκετά τις ναυτιλιακές εταιρίες να βελτιώσουν τις επιδόσεις τους και ταυτόχρονα να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων. Συγκεκριμένα, για κάθε τόνο καυσίμου που εξοικονομείται, μειώνονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά τρεις τόνους και η κατανάλωση του λιπαντικού ελαίου του κυλίνδρου, μειώνεται κατά την ίδια ποσότητα, γεγονός το οποίο μειώνει τις εκπομπές στερεών σωματιδίων.

Παρότι προκύπτουν κάποια προβλήματα με την αυξημένη διάρκεια πλεύσης και κάποιες αρνητικές επιπτώσεις στον κινητήρα, συνολικά τα οφέλη από την εφαρμογή της μεθόδου είναι περισσότερα και τα ξεπερνούν, τουλάχιστον προς ώρας.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του slow steaming είναι:

- Μεγάλη οικονομία καυσίμου.
- Μείωση εκπομπής ρύπων (CO<sub>2</sub> και SO<sub>x</sub>).
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία κατά την πλεύση.



## 2.4 Μειονεκτήματα της μεθόδου

Παρά τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή, όπως ακριβώς αναφέραμε και παραπάνω, προκύπτουν κάποια προβλήματα από την εφαρμογή του Slow Steaming.

Έτσι, έχουμε:

- Μεγαλύτερη διάρκεια του ταξιδιού, επομένως και περισσότερα έξοδα ναύλωσης του πλοίου.
- Αυξημένη κατανάλωση καυσίμου ανά ταξίδι, από τις βοηθητικές μονάδες που λειτουργούν στο πλοίο.
- Απαίτηση για περισσότερα πλοία στην ίδια γραμμή, για την ακριβή παράδοση όλου του εμπορεύματος.
- Συχνότερος έλεγχος και επισκευές από το πλήρωμα.

## 2.5 Επικρατούσες απόψεις για την εφαρμογή της μεθόδου

Σήμερα, η μέθοδος βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην ναυτιλιακή βιομηχανία και όπως αναφέρουμε παραπάνω προσφέρει πολλαπλά οικονομικά οφέλη για τις ναυτιλιακές εταιρίες. Έτσι, πέρα από την προφανή μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, προκύπτει και το επιπλέον όφελος της μείωσης του αδρανή στόλου.

- Παρά τα σημαντικά αυτά πλεονεκτήματα υπάρχει ένας προβληματισμός από τους ιδιοκτήτες των φορτίων, οι οποίοι ισχυρίζονται πως λόγω της μειωμένης ταχύτητας πλεύσης, αυξάνεται και ο χρόνος παράδοσης των φορτίων τους. Συγκεκριμένα, για μείωση της ταχύτητας πλεύσης από τους 27 στους 22 κόμβους, αυξάνεται ο χρόνος του ταξιδιού από την Ασία στην Ευρώπη, κατά 3 – 4 ημέρες, ενώ για μείωση της ταχύτητας στους 18 κόμβους, παρατηρείται αύξηση μιας εβδομάδας. Για κάποια αγαθά αυτό απαιτεί αλλαγές στον προγραμματισμό της αποθήκευσης και της διανομής από τον ιδιοκτήτη, ενώ μπορεί να αυξήσει το κόστος των αγαθών που βρίσκονται «σε εξέλιξη». Υπάρχουν κάποιες απόψεις που προσπαθούν να αντικρούσουν αυτούς τους ισχυρισμούς αναφέροντας ότι η πιο αργή ταχύτητα δεν συνεπάγεται απαραίτητα καθυστέρηση στην παράδοση καθώς μειώνεται η κυκλοφοριακή συμφόρηση στα λιμάνια και δίνεται η δυνατότητα για καλύτερο προγραμματισμό του ταξιδιού
- Από τη μεριά των μεταφορέων, εφόσον θέλουν να διατηρήσουν την εβδομαδιαία τους λειτουργία σε ένα δρομολόγιο, θα πρέπει να προσθέσουν πλοία στον στόλο τους. Αυτό, όμως, έχει θετικό αντίκτυπο στην παρούσα κατάσταση καθώς εκμεταλλεύονται τα ανενεργά πλοία. Οι μεταφορείς επωφελούνται αναμφισβήτητα από την εφαρμογή του slow steaming, καθώς έχουν μεγάλο κέρδος από τη μεγάλη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Το κέρδος τους το υπολογίζουμε λαμβάνοντας υπόψη το επιπλέον κόστος που προκύπτει από την προσθήκη πλοίων στον στόλο. Έτσι, υπολογίζεται ότι η συνολική οικονομία που επιτυγχάνεται από την εφαρμογή της πρακτικής, είναι της τάξεως του 10% - 25%, αναλόγως του ποσοστού των πλοίων ενός στόλου που την χρησιμοποιούν.

- Από την μεριά των πλοιοκτητριών εταιριών, είναι υποχρεωμένες να παρέχουν στους μεταφορείς, πλοία τα οποία πληρούν τις προδιαγραφές των μεταφορέων, συμπεριλαμβάνοντας και τις οδηγίες για την ταχύτητα των πλοίων και την εφαρμογή του slow steaming, και θα είναι πλήρως λειτουργικά και συντηρημένα. Έτσι, κύριος στόχος των εταιριών πρέπει να είναι:
  - Να έχουν ελκυστικά πλοία για την αγορά, τα οποία θα πληρούν τις προδιαγραφές των φορέων και θα δύνανται να τους προσφέρουν μεγάλα κέρδη.
  - Να διατηρήσουν σε καλή κατάσταση και με διαχρονική αξία τα πλοία τους. Το ενδιαφέρον της πλοιοκτήτριας εταιρίας εναπόκειται στο να εκπληρώσει μια ποικιλία απαιτήσεων από τους φορείς, τους ιδιοκτήτες, όπως και από νομικά πρόσωπα, στο χαμηλότερο δυνατό κόστος.

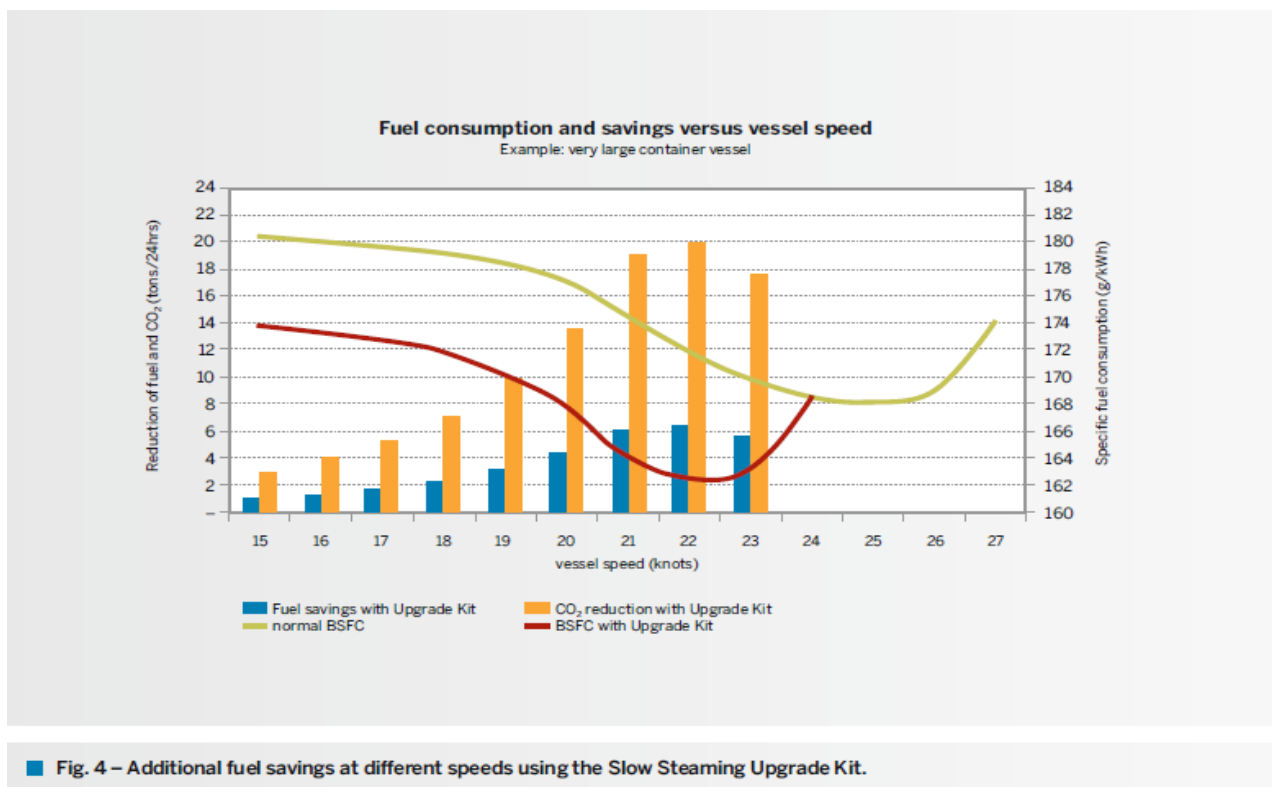
Παρατηρούμε, λοιπόν, πως τα οφέλη από την εφαρμογή του slow steaming είναι πολλά και για τον λόγο αυτόν, προβλέπεται πως θα καθιερωθεί πλήρως ως μέθοδος πλεύσης.

## 2.6 Συσχετισμός slow steaming και κατανάλωσης καυσίμου

Για καλύτερη κατανόηση των πλεονεκτημάτων της μεθόδου, θα αναλύσουμε τον λόγο για τον οποίο εμφανίζεται αυτή η μείωση στην κατανάλωση. Για αρχή να σημειώσουμε πως η τιμή στο πετρέλαιο έχει αυξηθεί ραγδαία την τελευταία δεκαετία. Κύριος παράγοντας για αυτό είναι η οικονομική κρίση. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του τόνου από το 2005 και μετά παρουσιάζει ανοδική πορεία αγγίζοντας το τρίτο τετράμηνο του 2008 τα 780 \$/τόνο, ενώ την περίοδο που διανύουμε η τιμή του πετρελαίου έχει μειωθεί στο επίπεδο των 600\$/τόνο. Κατανοούμε, λοιπόν, πως η κατανάλωση καυσίμου είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος του ταξιδιού των εμπορικών πλοίων. Είναι, λοιπόν, σημαντική η ελαχιστοποίηση της, χωρίς να επηρεάζεται ο χρόνος παράδοσης και ο όγκος μεταφερόμενων φορτίων.

Επιπλέον, να επισημάνουμε πως επιπλέον κόστος για τον πλοιοκτήτη αποτελεί και ο κάθε τόνος εκπομπής CO<sub>2</sub>. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε τόνο καυσίμου που αγοράζει, πληρώνει και 3 τόνους εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα.

Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να εξηγήσουμε πως επηρεάζει η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου και συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, την κατανάλωση καυσίμου. Για λόγους εποπτείας παραθέτουμε το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.5: Μείωση κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης

### Ο νόμος της έλικας

Το σύνηθες σύστημα πρόωσης ενός εμπορικού πλοίου μεγάλου βυθίσματος είναι ο δίχρονος ναυτικός κινητήρας diesel που δίνει κίνηση σε προπέλα σταθερού βήματος μέσω άξονα με ή χωρίς την χρησιμοποίηση μειωτήρα. Λόγω της άμεσης αυτής σχέσης της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής της προπέλας, παρατηρούμε πως για τη μείωση της ταχύτητας του πλοίου, απαιτείται μείωση της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής.

Μελετώντας τη θεωρία πρόωσης του πλοίου, συμπεραίνουμε πως η συνολική αντίσταση λόγω πλεύσης είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου, δηλαδή:

$$R=c \cdot v^2$$

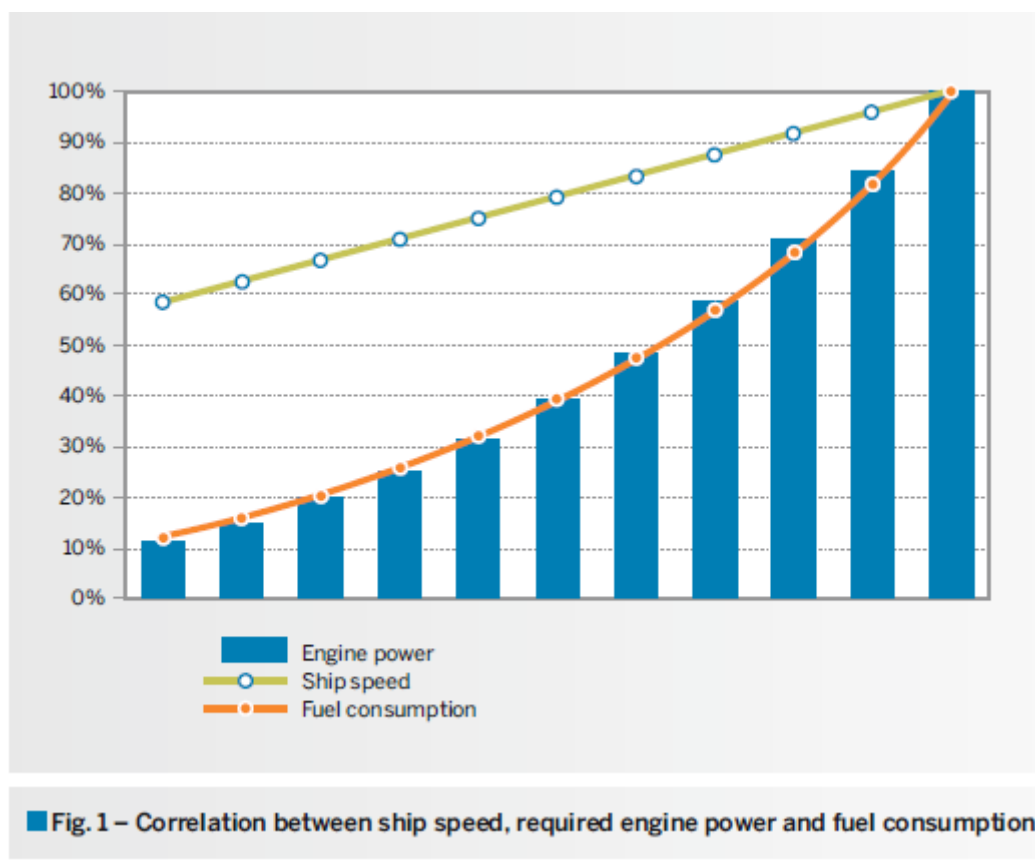
Επομένως, η απαιτούμενη ισχύ για να υπερνικήσει αυτή την αντίσταση, είναι:

$$P_R=R \cdot v = c \cdot v^3$$

Όμως, για ένα πλοίο με προπέλα, όπως αναφέραμε, η ταχύτητα πλεύσης είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής, επομένως:

$$P = \alpha \cdot n^3$$

Παρατηρούμε λοιπόν πως η ισχύς που απαιτεί ο κινητήρας είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας περιστροφής του. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, με μια μικρή μείωση της ταχύτητας περιστροφής τη έλικας, να επιτυγχάνουμε μεγάλη μείωση της απαιτούμενης ισχύος για κίνηση και επομένως της κατανάλωσης καυσίμου της μηχανής. Ο νόμος της έλικας, είναι ο λόγος για τον οποίον το slow steaming, δηλαδή η μείωση της ταχύτητας πλεύσης, έχει τόσο πολλά οικονομικά οφέλη.



Σχήμα 2.6: Συσχέτιση ταχύτητας πλεύσης με την απαιτούμενη ισχύ της μηχανής.

## 2.7 Είδη Slow Steaming

Το Slow Steaming εφαρμόζεται πλέον σε μεγάλη κλίμακα από όλες τις ναυτιλιακές εταιρίες, προσφέροντας, όπως αναφέραμε παραπάνω, μεγάλα οικονομικά οφέλη. Κύριος πυλώνας της μεθόδου είναι η μείωση της ταχύτητας πλεύσης. Έτσι, αναλόγως με το ποσό της μείωσης αυτής, παρατηρούμε και διαφορετικό είδος εφαρμογής. Έτσι έχουμε:

- Μειωμένη ταχύτητα

Εύρος λειτουργίας της μηχανής χαμηλότερα από το ονομαστικό φορτίο, περίπου στο 60 % του φορτίου. Μέχρι την εποχή του slow steaming, θεωρούταν το κατώτατο όριο συνεχόμενης λειτουργίας για τους μεγάλους ναυτικούς κινητήρες

- Moderate slow steaming

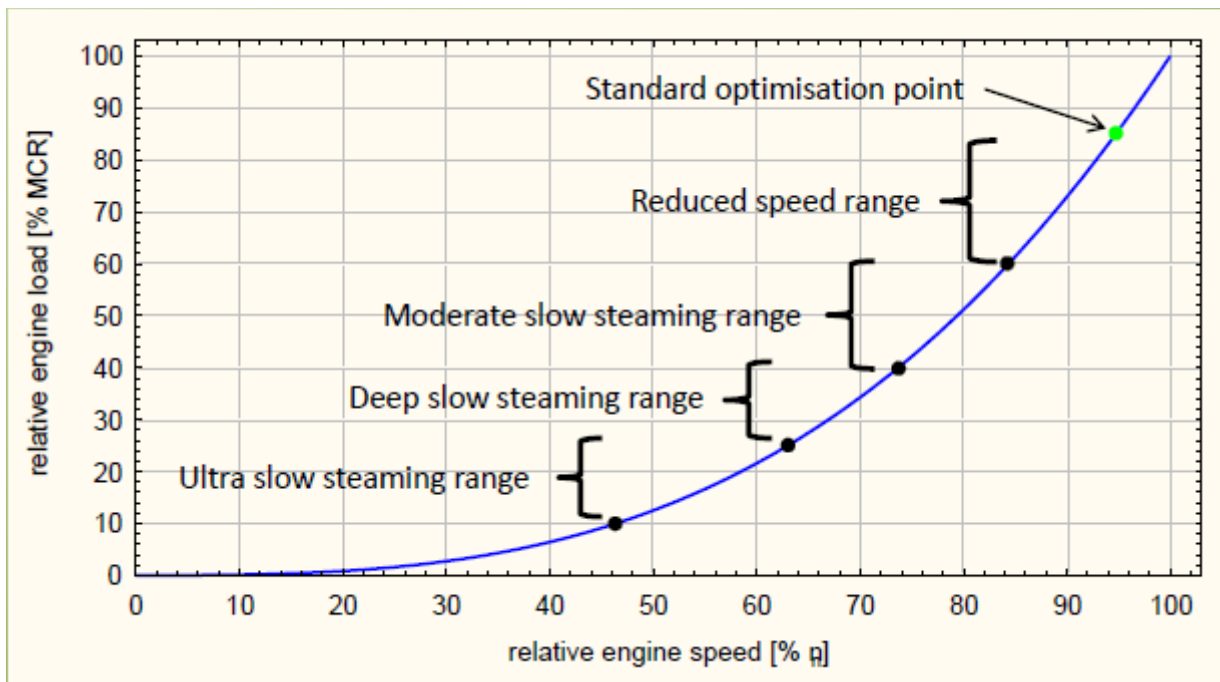
Εύρος λειτουργίας της μηχανής, για αυτήν την περίπτωση, είναι το 40 % - 60 % του φορτίου. Οι βοηθητικοί φυσητήρες τίθενται σε λειτουργία στο κατώτερο όριο του παραπάνω εύρους φορτίου.

- Deep slow steaming

Εύρος λειτουργίας της μηχανής από 20 % έως 40 %. Οι βοηθητικοί φυσητήρες βρίσκονται σε μόνιμη λειτουργία και το βοηθητικό boiler τίθεται συχνά σε λειτουργία για να ενισχύσει την μειωμένη απόδοση του οικονομητήρα.

- Ultra slow steaming.

Εύρος λειτουργίας της μηχανής από 10 % έως 20% - 25 %. Οι βοηθητικοί φυσητήρες και το boiler βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία. Η θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον δεν επαρκεί για την λειτουργία της γεννήτριας φρέσκου νερού.



Σχήμα 2.8: Ταχύτητα πλεύσης και απαιτούμενη ισχύς για τις διάφορες μορφές του slow steaming

## Συμπέρασμα

Για να καταλήξουμε, λαμβάνοντας υπόψη την σημερινή κατάσταση στη ναυτιλιακή βιομηχανία, η επιτυχής ενσωμάτωση της αργής πλεύσης στο πρόγραμμα πλεύσης των ναυτιλιακών εταιριών, απαιτεί την υποστήριξη μεγάλης μερίδας ανθρώπων της βιομηχανίας.

Καθώς η συνολική διάρκεια της μεταφοράς εμπορευμάτων θα αυξηθεί εξαιτίας του slow steaming, απαιτείται μεγάλη κινητοποίηση για να πειστούν οι πελάτες, σχετικά με τα πλεονεκτήματα της πρακτικής. Επιπλέον, οι ναυπηγοί μηχανικοί πρέπει να εκπαιδευτούν και να ενημερωθούν γύρω από την μέθοδο και τις διάφορες πτυχές του slow steaming, για να εγκαταλείψουν τους μέχρι τώρα ενδοιασμούς τους.

Καθώς το κόστος του καυσίμου παρουσιάζει ανοδική πορεία και η πίεση για μείωση των εκπομπών άνθρακα αυξάνει, οι ναυτιλιακές εταιρίες κάνουν μεγάλη προσπάθεια να ενσωματώσουν τις νέες τεχνολογίες οι οποίες θα τις βοηθήσουν να μειώσουν τις εκπομπές ρυπαντών, διατηρώντας ταυτόχρονα τα οφέλη τους.

Η πρακτική του slow steaming έχει βοηθήσει τις εταιρίες να πετύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα κάνοντας κάποιες αλλαγές στο σύστημά τους. Εάν λάβουμε υπόψη τις απαιτήσεις της αγοράς και τις παροντικές οικονομικές συνθήκες, φαίνεται πως το slow steaming θα είναι ο κανόνας στο μέλλον.

## Κεφάλαιο 3

### Τεχνικά προβλήματα από την εφαρμογή της μεθόδου slow steaming

Κάθε Μηχανή Εσωτερικής Καύσης, έχει ένα συγκεκριμένο εύρος φορτίου, στο οποίο η απόδοση της βελτιστοποιείται. Γνωρίζουμε, πως οι κινητήρες των πλοίων αγγίζουν την βέλτιστη απόδοση τους, στο εύρος 75%-85% του μέγιστου ονομαστικού φορτίου τους. Έτσι, η κατασκευή, το ταίριασμα με τα επιμέρους υποσυστήματα και η λειτουργία της μηχανής, γίνεται με βάση αυτό το σημείο. Πιο συγκεκριμένα:

-Το μέγεθος του λέβητα των καυσαερίων επιλέγεται με βάση την θερμοκρασία τους και την παροχή μάζας τους σε αυτό το εύρος λειτουργίας. Η λειτουργία σε χαμηλά φορτία καθιστά αυτό το σύστημα ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας μη αποδοτικό, με αποτέλεσμα να παράγεται μικρότερη ποσότητα ατμού.

-Η επιφάνεια συναλλαγής του ψύκτη του αέρα σάρωσης επιλέγεται με βάση το θερμικό του φορτίο σε αυτό το εύρος λειτουργίας. Κατά τη λειτουργία σε χαμηλό φορτίο, το ψυκτικό νερό πρέπει να παρακάμπτει τον ψύκτη για να διατηρηθεί η βέλτιστη θερμοκρασία του αέρα σάρωσης.

Στην περίπτωση του slow steaming, η μηχανή λειτουργεί σε χαμηλά φορτία, εκτός του σημείου σχεδίασης, για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπου το συνολικό σύστημα δεν είναι βελτιστοποιημένο, με αποτέλεσμα να προκύπτουν διάφορα τεχνικά προβλήματα.

Τα προβλήματα αυτά, αποτελούσαν στην αρχή το βασικό εμπόδιο για τις κατασκευάστριες εταιρίες, για την εφαρμογή της μεθόδου. Όμως, πάρα τις όποιες ανησυχίες, πλέον έχουν βρεθεί τρόποι αντιμετώπισης των ζητημάτων αυτών, δίνοντας πλέον τη δυνατότητα να λειτουργήσει η μηχανή σε όλο το εύρος φορτίων, για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Τα προβλήματα που προκύπτουν είναι αρκετά, και σε περίπτωση μη λήψης των απαραίτητων μέτρων, δύνανται να επηρεάσουν την λειτουργία του κινητήρα. Τεχνικά προβλήματα παρουσιάζονται σε όλο το πλοίο, αλλά τα πιο έντονα είναι αυτά κυρίως στον κινητήρα του και γενικά στο μηχανοστάσιο.

Πιο συγκεκριμένα:

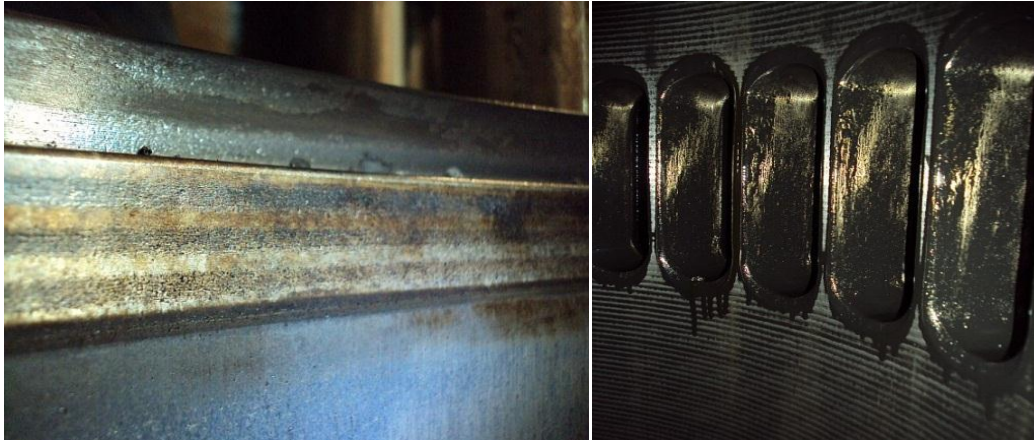
- Η χαμηλή παροχή αέρα αυξάνει την πιθανότητα αρκετά υψηλής θερμοκρασίας καυσαερίων, επομένως και των επιμέρους συστημάτων.
- Η λειτουργία σε χαμηλά φορτία, συνεπάγεται χαμηλές θερμοκρασίες. Προκύπτει, λοιπόν, ο κίνδυνος εμφάνισης ψυχρής διάβρωσης (cold corrosion). Η αρκετά χαμηλή θερμοκρασία των καυσαερίων, έχει ως αποτέλεσμα, την μη ικανοποιητική θέρμανση των χιτωνίων του θαλάμου καύσης. Αυτό, αν συνδυαστεί με την υψηλή υγρασία την οποία έχει ο αέρας στην θάλασσα, έχει ως αποτέλεσμα με την έγχυση του καυσίμου, δημιουργούνται θειικά οξέα, τα οποία είναι αρκετά διαβρωτικά. Στο σχήμα 3.1 εντοπίζουμε την ζημιά που προκαλείται στον κύλινδρο εξαιτίας της ψυχρής διάβρωσης.





Σχήμα 3.1: Αποτέλεσμα της ψυχρής διάβρωσης στον κύλινδρο

- Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης του εισερχόμενου αέρα, η ατμοποίηση του εγγεόμενου καυσίμου, δεν είναι η ιδανική κι έτσι η καύση του δεν είναι τέλεια. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, την αύξηση των εκπομπών CO και HC, καθώς και αυξημένη ρύπανση του κινητήρα από τις εναποθέσεις του μη καιόμενου άνθρακα.
- Η επιλογή του συστήματος στροβίλου-υπερπληρωτή, γίνεται με βάση την ενθαλπία των καυσαερίων σε συγκεκριμένο εύρος, γύρω από το ονομαστικό φορτίο της μηχανής. Επομένως, εφόσον ο υπερπληρωτής δεν εργάζεται στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, η απόδοση του δεν είναι η βέλτιστη, με αποτέλεσμα, να μην προσδίδει την απαραίτητη πίεση του αέρα σάρωσης. Έτσι, η καύση είναι ατελής στον θάλαμο καύσης, αυξάνοντας τις επικαθίσεις άνθρακα.
- Οι χαμηλές στροφές του κινητήρα, απαιτούν μεγάλη αναλογικά ποσότητα λιπαντικού στον κύλινδρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη περίσσειας λαδιού εντός του θαλάμου καύσης, γεγονός το οποίο ενισχύει την ρύπανση του κινητήρα, καθώς και των επιμέρους υποσυστημάτων του, όπως τα συστήματα εξαγωγής των καυσαερίων, τους υπερπληρωτές, αλλά και τον χώρο εισαγωγής του αέρα σάρωσης, καθώς, ποσότητα του λαδιού καίγεται, δημιουργώντας κοκ. Τις επιπτώσεις της ύπαρξης περίσσειας λιπαντικού ελαίου τις παρατηρούμε στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Αποτέλεσμα της καύσης του λιπαντικού λαδιού στον δακτύλιο του πιστονιού (αριστερά) και στον χώρο εισαγωγής του αέρα σάρωσης.

Εκτός, των παραπάνω προβλημάτων, τα οποία επικεντρώνονται στον κινητήρα και τα επιμέρους συστήματά του, προβλήματα προκύπτουν κι έξω από αυτόν. Έτσι, παρατηρούνται:

- Υψηλές απώλειες απόδοσης στην έλικα του πλοίου, καθώς είναι σχεδιασμένη για λειτουργία σε συγκεκριμένες και υψηλές στροφές.
- Η γάστρα του πλοίου, είναι επικαλυμμένη, με ένα ειδικό υλικό, για την αποφυγή της ανάπτυξης μικροοργανισμών. Όμως, καθώς αυτή η επίστρωση λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο πεδίο ταχυτήτων, κι εμείς κινούμαστε έξω από αυτό, είναι πιθανή η εμφάνιση μικροοργανισμών, καθώς και η αύξηση των απωλειών τριβής.

## Κεφάλαιο 4

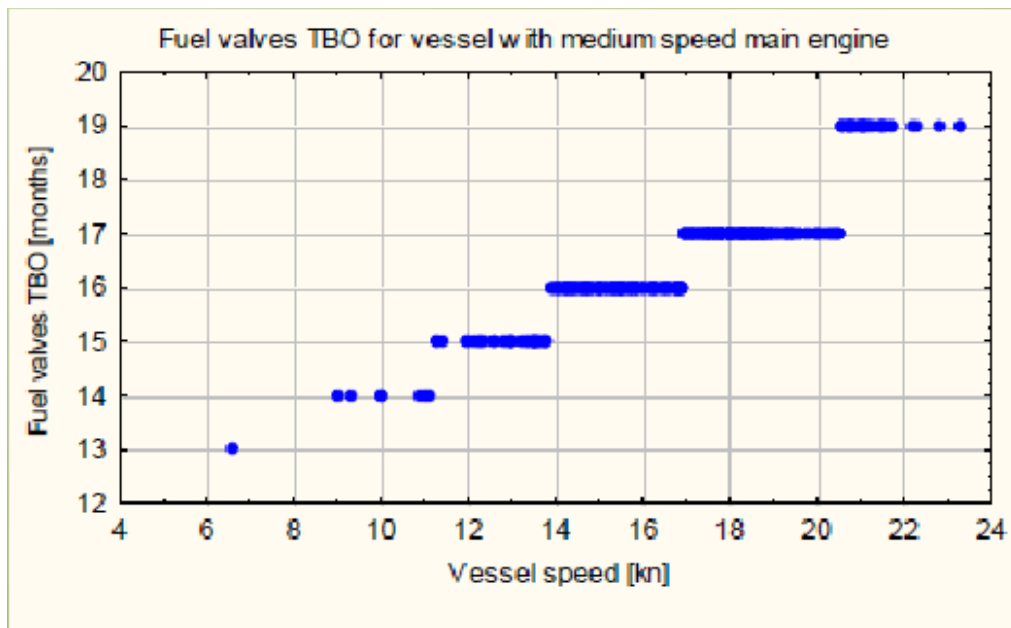
### Μέθοδοι αντιμετώπισης τεχνικών προβλημάτων

Όπως αναφέραμε παραπάνω, κατά τη λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλά φορτία, δηλαδή κατά την εφαρμογή της μεθόδου του slow steaming, προκύπτουν αρκετά προβλήματα, τα οποία, εν γένει, είναι ικανά να επηρεάσουν την λειτουργία του και εν συνεχεία και την πλεύση του πλοίου, προκαλώντας έτσι, μεγάλα οικονομικά προβλήματα.

Είναι σημαντικό, λοιπόν, να βρεθούν τεχνικές, με τις οποίες θα αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, για να εξασφαλίσουμε αξιόπιστη συνεχή λειτουργία σε χαμηλό φορτίο.

Η εφαρμογή του slow steaming είναι αρκετά νέα σαν μέθοδος, οπότε δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη μεγάλη ποικιλία λύσεων. Ωστόσο, οι κατασκευαστές δίνουν κάποιες λύσεις, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί εμπειρικά, με σκοπό τον μετριασμό των ανωτέρω τεχνικών προβλημάτων. Έτσι:

- Η θερμοκρασία του καυσίμου, θα πρέπει να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, για να διατηρείται η τιμή του ιξώδους. Έτσι η ατμοποίηση και η σταγονοποίηση του καυσίμου θα παραμένει στα επιθυμητά επίπεδα.
- Συχνός έλεγχος των δαχτυλιδιών του πιστονιού για θραύση ή έλλειψη ελαστικότητας.
- Διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού ψύξης στους 36 °C, για να διατηρηθεί η βέλτιστη θερμοκρασία του αέρα σάρωσης, με σκοπό την αποφυγή εμφάνισης ψυχρής διάβρωσης. Επιπλέον, διατήρηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού νερού του μανδύα στο άνω όριο των 85-90 °C, μειώνοντας τη συμπύκνωση του νερού αλλά και τις θερμικές καταπονήσεις.
- Ο έλεγχος του ακροφυσίου του εγχυτήρα θα πρέπει να είναι συχνότερος, καθώς οι χαμηλότερες θερμοκρασίες συνεπάγονται μειωμένη ατμοποίηση, με αποτέλεσμα να μένουν κατάλοιπα. Πιο συγκεκριμένα, για 2-X κινητήρες, είναι απαραίτητος ο έλεγχος και ο καθαρισμός των ακροφυσίων κάθε 16000 ώρες λειτουργίας, ενώ για τους 4-X, η τιμή αυτή μειώνεται στο μισό, δηλαδή τις 8000 ώρες. Στην περίπτωση της μειωμένης ταχύτητας πλεύσης, το χρονικό αυτό διάστημα μειώνεται κατά 1000 – 4000 ώρες.



Σχήμα 4.1: Χρονικό διάστημα μεταξύ ελέγχου των βαλβίδων συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου.

- Είναι σημαντικό η θερμοκρασία των καυσαερίων μετά τον κύλινδρο να παραμένει στην περιοχή των 250 °C για να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισης ψυχρής διάβρωσης. Εάν, η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη αυτής της τιμής, θα πρέπει να αυξηθεί το φορτίο της μηχανής.
- Ο ρυθμός τροφοδοσίας του ελαίου του κυλίνδρου είναι ανάλογος του φορτίου. Επομένως, καθώς εργαζόμαστε σε χαμηλά φορτία, είναι απαραίτητος ο συχνότερος έλεγχος με στόχο να αποφευχθεί η περίσσεια ή η έλλειψη λαδιού.
- Η συνεχής λειτουργία της μηχανής σε χαμηλό φορτίο δημιουργεί επικαθίσεις άκαυστου λαδιού και καυσίμου στην πολλαπλή εξαγωγής, δημιουργώντας έτσι κίνδυνο ανάφλεξης στον χώρο του στροβίλου απειλώντας την ακεραιότητά του. Η περιοδική αύξηση του φορτίου στοχεύει στην απομάκρυνση αυτών των καταλοίπων μειώνοντας τον κίνδυνο ανάφλεξης. Προτείνεται, λοιπόν, η αύξηση του φορτίου περιοδικά (δύο φορές την εβδομάδα και για μικρό χρονικό διάστημα (για μία ώρα), όσο το δυνατόν υψηλότερα (πάνω από το 70% του φορτίου) με στόχο την απομάκρυνση των εναποθέσεων.

Η εφαρμογή της πρακτικής αυτής, έχει και κάποιες επιπτώσεις. Αυτές είναι οι εξής:

- Αύξηση της καθημερινής μέσης κατανάλωσης καυσίμου.
- Αυξάνει την θερμική φόρτιση του κινητήρα.
- Αυξάνει τις ώρες εργασίας του προσωπικού.
- Αυξάνει την πιθανότητα φθοράς της μηχανής κατά την επιτάχυνση του κινητήρα.



Σχήμα 4.2: Περιοδική αύξηση του φορτίου για μικρά χρονικά διαστήματα

- Σχετικά με τη γάστρα του πλοίου, προτείνεται ο συχνότερος έλεγχός της αλλά και καθαρισμός της. Επιπλέον, συνιστάται συχνότερος υποβρύχιος καθαρισμός και γυάλισμα της προπέλας του πλοίου.

#### 4.1 Μετασκευές στο ήδη υπάρχον σύστημα

Πέρα από τις υπάρχουσες προτάσεις που έχουν αναπτυχθεί εμπειρικά από την εφαρμογή της μεθόδου του slow steaming, οι εταιρείες προτείνουν και λύσεις οι οποίες αφορούν μετασκευές στο ήδη υπάρχον σύστημα. Αυτές οι μετασκευές, στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης της μηχανής, όταν λειτουργεί στα χαμηλά φορτία. Οι προηγούμενες προτάσεις, στόχευαν στον εντοπισμό και την αποφυγή των πιθανών προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν από τη λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες. Αντίθετα, οι μετασκευές αυτές, στοχεύουν στην βελτίωση της απόδοσης, μειώνοντας ταυτόχρονα και την ειδική κατανάλωση καυσίμου της μηχανής. Κάποιες από τις μετασκευές που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Εγχυτήρες ολίσθησης
- Ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα έγχυσης λιπαντικού
- Στρόβιλοι Μεταβλητής Γεωμετρίας (Variable Geometry Turbine)
- Σύστημα Παράκαμψης Καυσαερίων (Exhaust Gas Bypass)
- Ρύθμιση Ελέγχου του Κινητήρα (Engine Control Tuning)

Παρακάτω, παραθέτουμε έναν πίνακα, τον οποίο μας τον παρέχει η κατασκευάστρια εταιρία ναυτικών κινητήρων MAN Diesel & Turbo και μας ενημερώνει για την επίδραση που έχουν οι παραπάνω μετασκευές στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα.

		SFOC Change [g/kWh]				
SFOC optimised load range	Tuning methods	35%	50%	65%	80%	100%
High load (85–100%)	Standard $L_1$ engine	3.5	-1	-3.5	-3.5	0
Part load (50–85%)	ECT	2.5	-2	-4.5	-4.5	3
	VT	0.5	-4	-6.5	-4.5	0.5
	EGB	0.5	-4	-6.5	-4.5	1.5
Low load (25–70%)	ECT	1	-3.5	-6	-3.5	1.5
	VT	-1.5	-6	-8.5	-3.5	0.5
	EGB	-1.5	-6	-8.5	-3.5	1.5

Σχήμα 4.3:

Πιο αναλυτικά, λοιπόν, έχουμε:

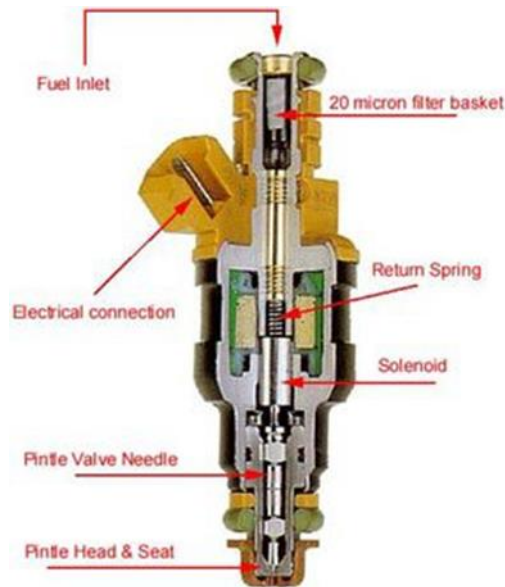
- Εγχυτήρες ολίσθησης



Σχήμα 4.4: Εγχυτήρας καυσίμου τύπου ολίσθησης.

Κατά την έγχυση του καυσίμου, με συμβατικούς εγχυτήρες, ένα ποσοστό του καυσίμου, παραμένει εντός του εγχυτήρα. Αυτή η ποσότητα, όταν η διαφορά πίεσης μεταξύ εγχυτήρα και κυλίνδρου είναι η κατάλληλη, κινείται προς τον κύλινδρο, με αποτέλεσμα να συμβαίνει μια ανεπιθύμητη έγχυση. Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τύπο εγχυτήρα, βελτιώνουμε την ποιότητα της έγχυσης και μειώνουμε τη ρύπανση που προκαλείται στον κύλινδρο, αλλά και στη διαδρομή του καυσαερίου. Την τυπική διάταξη του εγχυτήρα ολίσθησης την παρατηρούμε στο σχήμα 4.5.



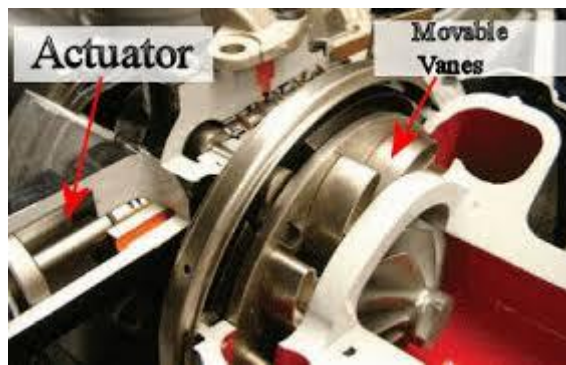


Σχήμα 4.5: Εγχυτήρας καυσίμου τύπου ολίσθησης.

- Ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα έγχυσης λιπαντικού

Ένα από τα προβλήματα που προκύπτουν από τη λειτουργία της μηχανής σε χαμηλά φορτία, είναι η λανθασμένη δοσολογία λιπαντικού ελαίου στον κύλινδρο. Χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα, μπορούμε να πετύχουμε τον βέλτιστο χρονισμό και διανομή του λιπαντικού ελαίου.

- Στρόβιλοι Μεταβλητής Γεωμετρίας



Σχήμα 4.6: Στρόβιλος Μεταβλητής Γεωμετρίας. Απεικόνιση επενεργητή και οδηγών περυγίων.

Η συγκεκριμένη μετασκευή, αφορά κυρίως την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος υπερπλήρωσης στα μερικά φορτία. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, έναν στρόβιλο μεταβλητής γεωμετρίας, αντιμετωπίζουμε τα προβλήματα λειτουργίας του στρόβιλου. Την αδυναμία πρόσδοσης της απαραίτητης πίεσης σαρώσεως, λόγω της χαμηλής ενθαλπίας των καυσαερίων, την ατελή και μη αποδοτική καύση στον θάλαμο καύσης και πολλά άλλα προβλήματα.

Η λειτουργία της συγκεκριμένης μετασκευής βασίζεται στους επενεργητές, όργανα τα οποία ελέγχουν τα οδηγά περυγία του στρόβιλου, λαμβάνοντας ως είσοδο τις στροφές και το φορτίο της μηχανής. Όταν ο κινητήρας εργάζεται σε χαμηλά φορτία, τα οδηγά περυγία είναι σχεδόν κλειστά, μειώνοντας την μετωπική επιφάνεια μέσα από την οποία διέρχονται και επιταχύνοντάς τα, έτσι ώστε να πέσουν στα περυγία του

στροβίλου με μεγάλη ταχύτητα και να στρέψουν γρηγορότερα την περωτή του. Στα μεγάλα φορτία, όταν η παροχή των καυσαερίων είναι πολύ μεγάλη, τα οδηγά πτερύγια ανοίγουν τελείως, για να μην υπάρξει στραγγαλισμός της ροής. Παρουσιάζουμε τη συγκεκριμένη διαδικασία στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.7: Ροή καυσαερίων ανάλογα με τη θέση των οδηγών πτερυγίων. Αριστερά πλήρως ανοικτά και δεξιά πλήρως κλειστά.

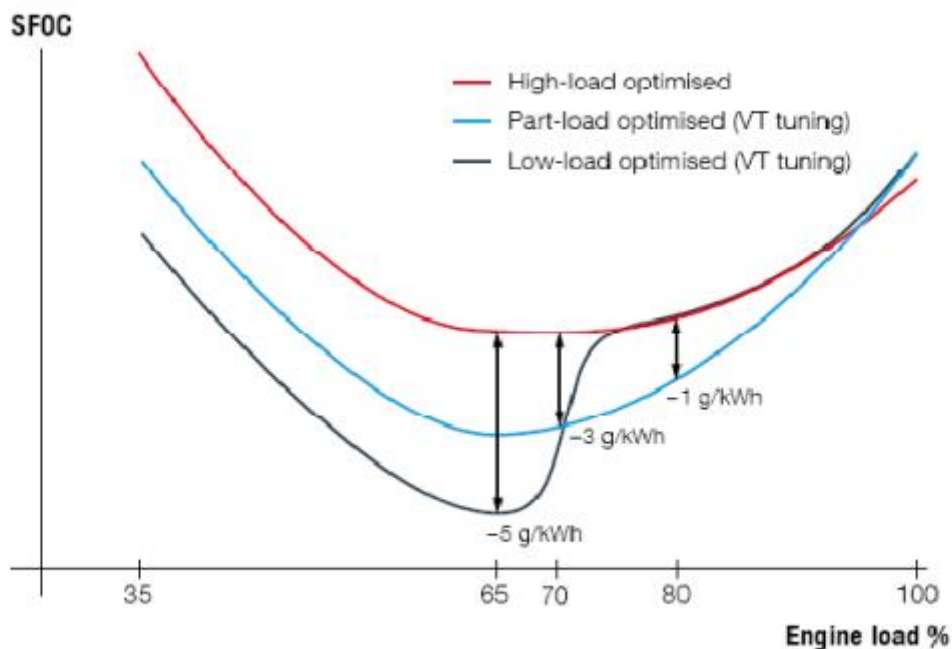


Figure 2. Fuel oil consumption (SFOC) in different optimisation modes

Σχήμα 4.8: Ειδική κατανάλωση καυσίμου για διάφορα φορτία λειτουργίας και για διάφορα ανοίγματα των οδηγών πτερυγίων

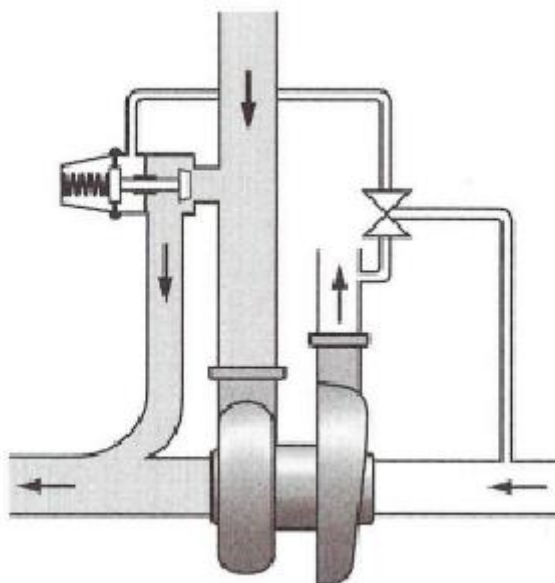
- Σύστημα παράκαμψης καυσαερίων

Για να επιτύχουμε τη βέλτιστη απόδοση στα χαμηλά φορτία, επιλέγουμε την χρησιμοποίηση ενός στροβίλου μικρότερης διαμέτρου, ο οποίος θα αποκρίνεται καλύτερα στις χαμηλές στροφές, προσδίδοντας και την κατάλληλη πίεση σάρωσης.

Στις υψηλές στροφές όμως, ο συγκεκριμένος στρόβιλος οδηγείται σε υπερτάχυνση, λόγω της μεγάλης παροχής μάζας. Έτσι, οι κατασκευαστές προτείνουν τη χρησιμοποίηση ενός συστήματος παράκαμψης των καυσαερίων, έτσι ώστε από ένα φορτίο και πέρα να παρακάμπτει μέρος της παροχής καυσαερίων τον στρόβιλο.



Η χρήση του συστήματος αυτού, απαιτεί την σύζευξη του στροβιλο-υπερπληρωτή σε χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Αποτελείται από μια βαλβίδα που επιτρέπει στα καυσαέρια να παρακάμψουν το στρόβιλο. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος. Παρατηρούμε πως η πίεση υπερπλήρωσης λειτουργεί ως διάφραγμα, ανοίγοντας τη βαλβίδα παράκαμψης των καυσαερίων όταν η πίεση υπερπλήρωσης φτάσει σε ένα προδιαγεγραμμένο όριο. Μια τυπική διάταξη του συστήματος παράκαμψης καυσαερίων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9.



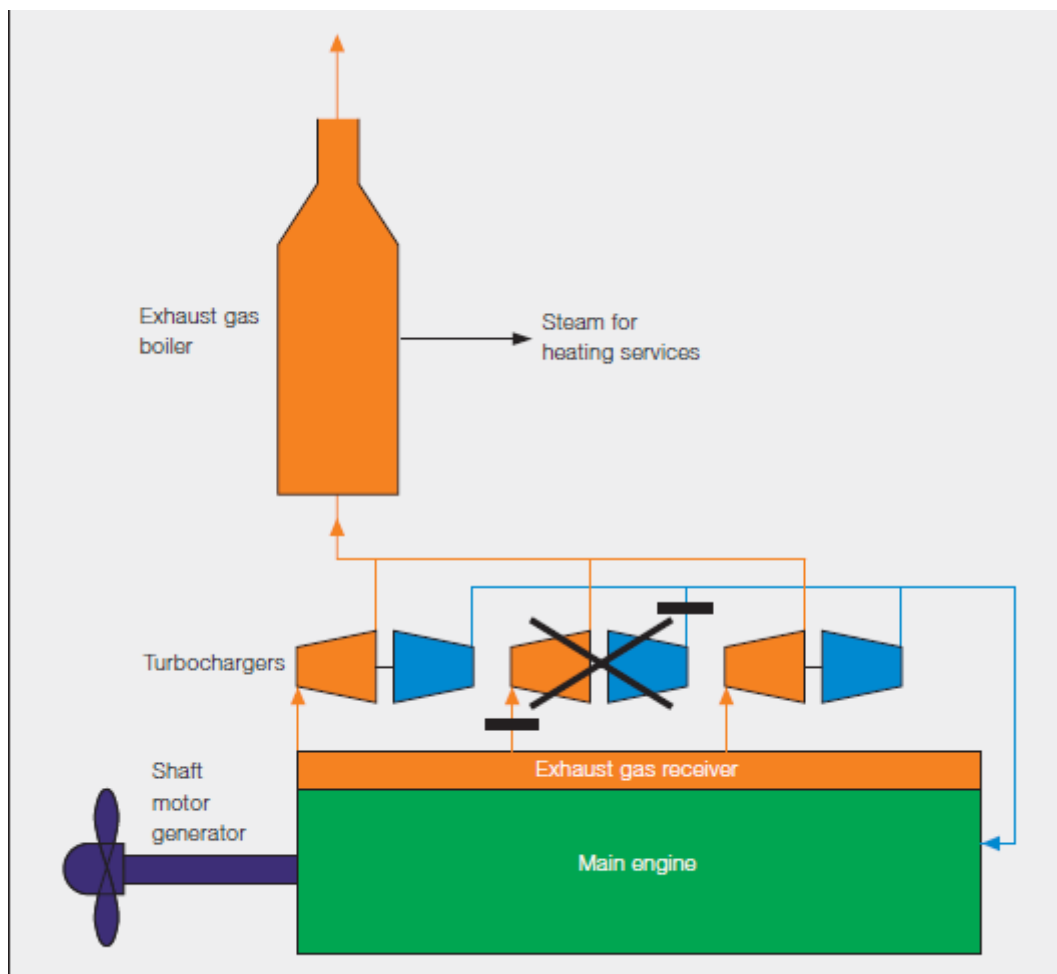
Σχήμα 4.9: Σύστημα παράκαμψης καυσαερίων

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειώσουμε πως οι περισσότερες καταγεγραμμένες βλάβες, οι οποίες οφείλονται στην εφαρμογή της πρακτικής του slow steaming, συμβαίνουν όχι κατά τη λειτουργία της μηχανής σε χαμηλά φορτία, αλλά όταν η μηχανή επιστρέφει στην κανονική της λειτουργία.

Για να αποφευχθεί, λοιπόν, η οποιαδήποτε βλάβη όταν η μηχανή λειτουργήσει ξανά στο κανονικό φορτίο, πρέπει να ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα. Αυτά είναι τα εξής:

- Συχνή εμφύσηση της αιθάλης που συσσωρεύεται στο σύστημα παράκαμψης των καυσαερίων.
- Αποφυγή της συμπίκνωσης του ψυκτικού νερού στον ψύκτη αέρα και διατήρηση της θερμοκρασίας του αέρα σάρωσης στους 40 °C – 45°C.
- Συχνότερος καθαρισμός του λέβητα καυσαερίων.
- Συνεχής λειτουργία του βοηθητικού φυσητήρα για αποφυγή υψηλών θερμοκρασιών καυσαερίων κατά την περίοδο της αποκοπής του υπερπληρωτή και μέχρι την επανένταξή του στο σύστημα. Η θερμοκρασία των καυσαερίων πρέπει να διατηρείται αυστηρά κάτω από τους 450 °C, καθώς υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης θερμής διάβρωσης και καύσης των βαλβίδων του καυσαερίου.

## 4.2 Σύστημα αποκοπής στροβίλο-υπερπληρωτή (Turbocharger cut-out)



Example of a cut-out arrangement (principle drawing).

Σχήμα 4.10: Παράδειγμα διάταξης συστήματος αποκοπής υπερπληρωτή.

Μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους αντιμετώπισης των προβλημάτων και ίσως η σημαντικότερη από τις μετασκευές για βελτίωση της απόδοσης κατά την εφαρμογή της μεθόδου του slow steaming είναι η αποκοπή του συστήματος στροβίλου-υπερπληρωτή.

Η λειτουργία του στροβίλο-υπερπληρωτή είναι βελτιστοποιημένη στα υψηλά φορτία λειτουργίας, έτσι, καθώς το πλοίο εφαρμόζει τη μέθοδο του slow steaming, γεγονός το οποίο συνεπάγεται χαμηλές στροφές του κινητήρα -άρα και χαμηλό φορτίο- ο στροβίλο-υπερπληρωτής δεν μπορεί να λειτουργήσει στη βέλτιστη απόδοση, καθώς η ενέργεια των καυσαερίων δεν επαρκεί για να τον στρέψει. Έτσι, αδυνατεί να παράγει την επιθυμητή πίεση υπερπλήρωσης. Η μειωμένη, αυτή, πίεση υπερπλήρωσης, είναι γεγονός ανεπιθύμητο για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα, καθώς δεν δημιουργούνται οι ιδανικές συνθήκες καύσης.

Να σημειωθεί πως η μέθοδος της αποκοπής του στροβίλο-υπερπληρωτή αφορά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερα ζεύγη στροβίλου-υπερπληρωτή και αποκόπτουμε τη λειτουργία ενός ή περισσότερων ζευγών.

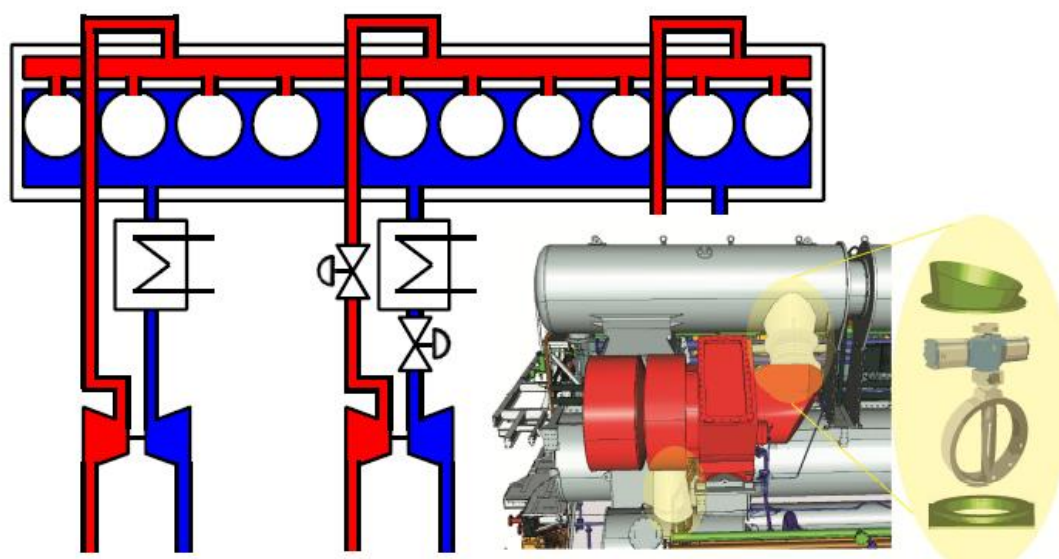
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετούμε τη λειτουργία και την εφαρμογή της μεθόδου σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα diesel MAN B&W 6S70MCC.

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού είναι η αποκοπή του ενός από τους δύο υπερπληρωτές όταν η μηχανή λειτουργεί σε μερικά φορτία έτσι ώστε ο παραμένον υπερπληρωτής να δέχεται πολύ μεγαλύτερη παροχή μάζας καυσαερίων στον στρόβιλο του, παράγοντας έτσι περισσότερη ισχύ για να καταναλώσει ο συμπιεστής. Το αποτέλεσμα είναι η πρόσδοση κατάλληλης πίεσης υπερπλήρωσης από τον συμπιεστή η οποία οδηγεί σε βελτίωση των συνθηκών καύσης, γεγονός το οποίο συνεπάγεται μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί τρόποι. Και στις δύο περιπτώσεις, η αποκοπή του υπερπληρωτή περιορίζει τη λειτουργία του σε μεγάλο εύρος φορτίων, απαιτώντας διάφορες τροποποιήσεις στη μηχανή. Έτσι έχουμε:

- Μόνιμη αποκοπή

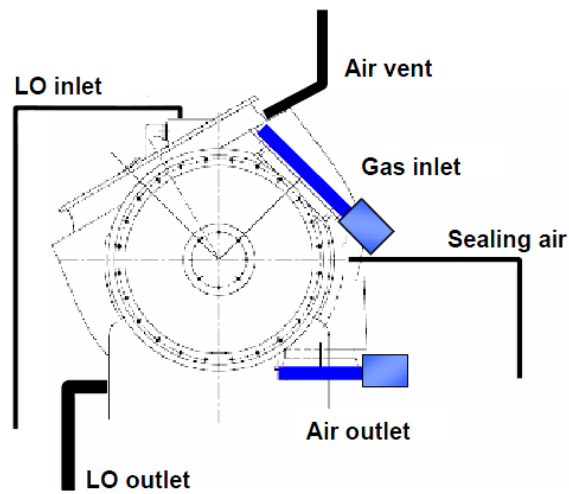
Κατά τη μόνιμη αποκοπή, αποκόπτουμε ένα ή περισσότερα ζεύγη σε μόνιμη βάση. Βέβαια, αυτή η εκδοχή συνίσταται για περιπτώσεις υπερπλήρωσης με πάνω από δύο ζευγάρια υπερπληρωτών καθώς αν εφαρμοζόταν στο ένα από τα δύο ζεύγη θα μειωνε κατά πολύ το εύρος λειτουργίας της μηχανής με αποτέλεσμα να μειωθεί σε μόνιμη βάση η μέγιστη ταχύτητα του πλοίου. Ο τρόπος εφαρμογής της αποκοπής είναι με τοποθέτηση τυφλής πλάκας (Blind plate) στην είσοδο και στην έξοδο του στρόβιλου αλλά και στην έξοδο του συμπιεστή. Στο σχήμα 4.11 παραθέτουμε ένα σύστημα στο οποίο αποκόπτεται ο ένας από τους δύο υπερπληρωτές.



Σχήμα 4.11: Μόνιμη αποκοπή του ενός υπερπληρωτή της μηχανής

- Ελεγχόμενη αποκοπή

Πρόκειται για μία πιο ελεγχόμενη εφαρμογή της μεθόδου και για αυτόν το λόγο βρίσκει πιο ευρεία εφαρμογή. Βασικό της πλεονέκτημα είναι πως δύναται να βελτιώσει τη λειτουργία της μηχανής σε μεγαλύτερο εύρος φορτίου από τη μόνιμη εκδοχή. Η αποκοπή, επιτυγχάνεται με τη χρήση βαλβίδων αυτομάτου ελέγχου (Swing valves) οι οποίες τοποθετούνται στην έξοδο του συμπιεστή και στην είσοδο του στρόβιλου. Έτσι, εμποδίζεται η παροχή αέρα και καυσαερίου. Να σημειώσουμε πως κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το υψηλό κόστος των βαλβίδων που χρησιμοποιούνται καθώς και η ύπαρξη του συστήματος αυτομάτου ελέγχου.



Σχήμα 4.12: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης αποκοπής του υπερπληρωτή με βαλβίδες αυτομάτου ελέγχου (ελεγχόμενη αποκοπή)

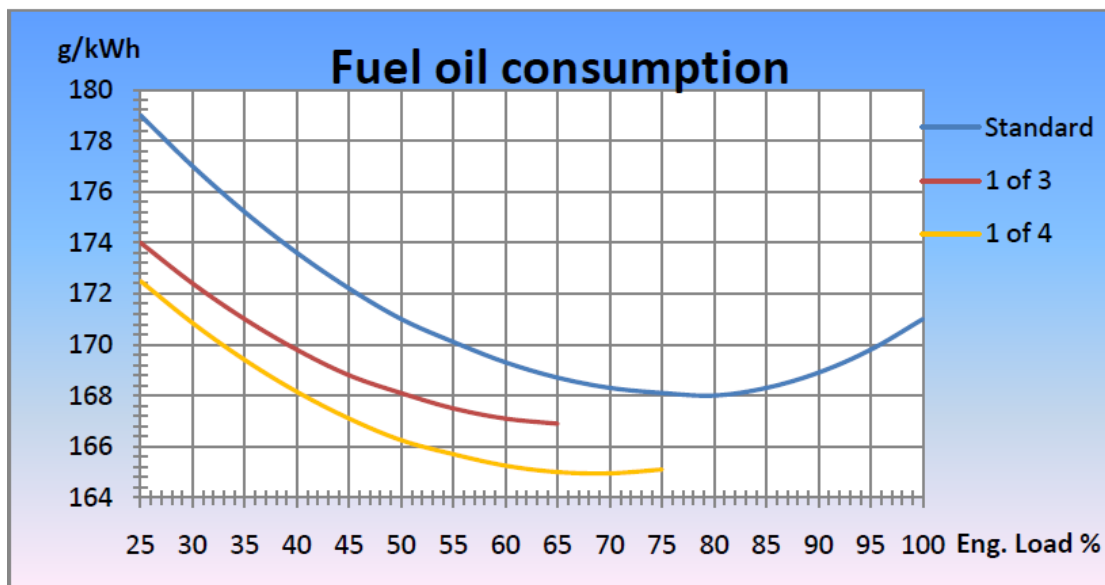


Η λύση της μόνιμης αποκοπής με την τοποθέτηση της τυφλής πλάκας είναι αρκετά πιο οικονομική σε σχέση με την ελεγχόμενη αποκοπή με τη χρήση βαλβίδων αυτόματου ελέγχου. Χαρακτηριστικά οι τιμές για να γίνει η κάθε μία μετασκευή, με βάση τον τιμοκατάλογο της εταιρίας MAN Diesel, είναι 14.000 € και 132.000 € αντίστοιχα.

#### 4.2.1 Οφέλη από την αποκοπή ενός ή περισσότερων υπερπληρωτών

Τα οφέλη της μετασκευής αυτής είναι αρκετά σημαντικά για την οικονομία της μηχανής, αλλά και για την καλύτερη λειτουργία της. Πιο συγκεκριμένα, αποκόπτοντας τον ένα υπερπληρωτή, πετυχαίνουμε:

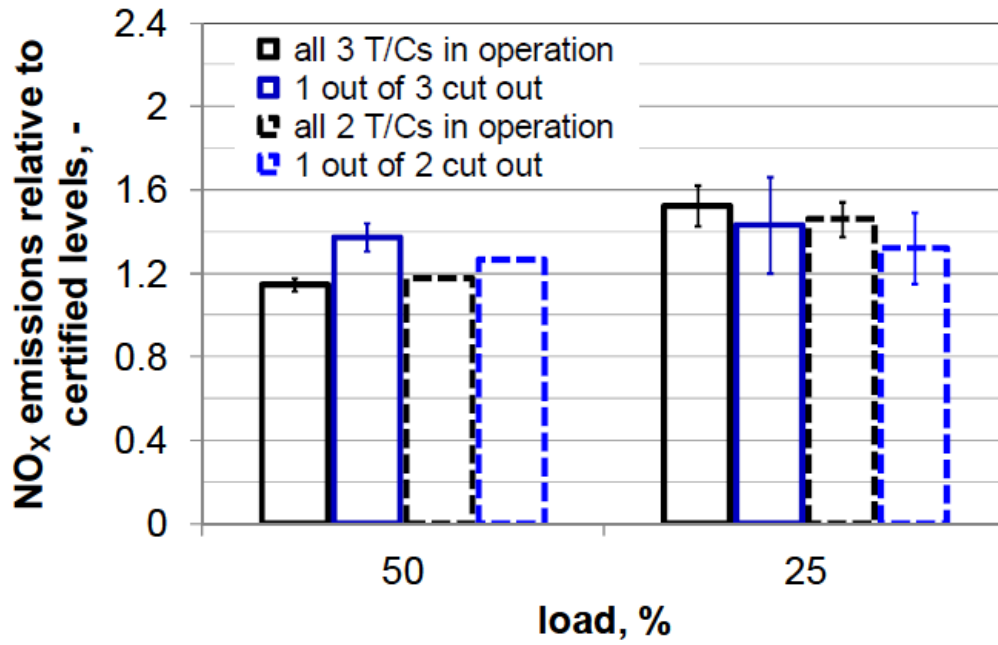
- Αύξηση της πίεσης σάρωσης, στα χαμηλά φορτία, βελτιώνοντας τις συνθήκες καύσης εντός του κυλίνδρου κι επομένως μειώνοντας τις εκπομπές άνθρακα.
- Μεγάλη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Όπως παρατηρούμε και στο παρακάτω σχήμα, η αποκοπή ενός υπερπληρωτή, μειώνει, ανάλογα με το φορτίο της μηχανής, την ειδική κατανάλωση καυσίμου της μηχανής. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, η μετασκευή αυτή είναι αποδοτική για λειτουργία στο εύρος φορτίου 25%-75%. Στο σχήμα 4.14 απεικονίζεται η επίδραση της αποκοπής του υπερπληρωτή στην ειδική κατανάλωση καυσίμου της μηχανής.



Σχήμα 4.14: Κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του φορτίου με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή

- Μείωση της θερμικής φόρτισης των εξαρτημάτων από τη μείωση της θερμοκρασία των καυσαερίων μετά την αποκοπή του υπερπληρωτή.

- NO<sub>x</sub> emissions impact of turbocharger cut-out



Σχήμα 4.15: Απεικόνιση Συμπεριφοράς της εκπομπής NO<sub>x</sub> συναρτήσει του φορτίου και με εφαρμογή του T/C Cut-Out

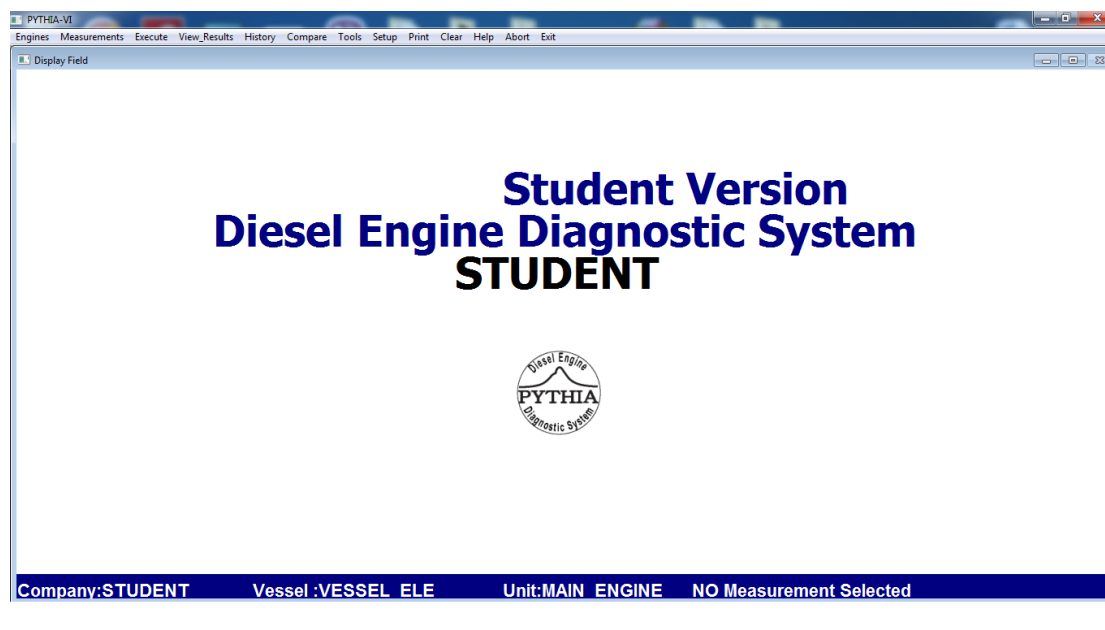
## Κεφάλαιο 5

### Παρουσίαση του λογισμικού προσομοίωσης.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα σε κανονικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες με αποκομμένο τον ένα υπερπληρωτή είναι μέρος του λογισμικού διάγνωσης κινητήρων Diesel (Engine Diagnostic System, EDS) το οποίο έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο ΜΕΚ από τον κ. Δ.Χουντάλα, Καθηγητή ΕΜΠ.

Μία από τις λειτουργίες του, την οποία και χρησιμοποιούμε στα πλαίσια της εργασίας αυτής, είναι η προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα. Για να γίνει η βαθμονόμηση του συστήματος, χρησιμοποιούνται μετρήσεις που έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια εργοστασιακών δοκιμών του κινητήρα (shop tests) και κατά τη διάρκεια των δοκιμών πλεύσης (sea trials). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας θερμοδυναμικό μοντέλο προσομοίωσης, το λογισμικό προβλέπει τη λειτουργία του κινητήρα σε διάφορες συνθήκες.

Το περιβάλλον του λογισμικού, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Περιβάλλον Λογισμικού

## 5.1 Προσομοίωση κινητήρα

Η επιλογή που χρησιμοποιούμε από το μενού των επιλογών, είναι αυτή με την ένδειξη Tools και στη συνέχεια την επιλογή Engine Simulator(Προσομοιωτής). Έτσι, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει τη λειτουργία του κινητήρα σε κανονικές συνθήκες αλλά και με αποκοπή του υπερπληρωτή. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι η εξής:

- Αρχικά ο χρήστης καλείται να ορίσει την κατάσταση λειτουργίας του κάθε υποσυστήματος του κινητήρα για μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση, όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 5.2. Να σημειώσουμε, πως συμπληρώνοντας τις κατάλληλες παραμέτρους, μας δίνεται η δυνατότητα να λάβουμε υπόψη και πιθανές βλάβες σε κάποια από τα υποσυστήματα του κινητήρα.

Σχήμα 5.2: Μενού επιλογής κατάστασης βασικών υποσυστημάτων της μηχανής

- Έπειτα, ζητείται, από το χρήστη, να γίνει η συμπλήρωση των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα. Εμείς, συμπληρώνουμε τα πεδία τα οποία αφορούν το φορτίο (Load %) στο οποίο θα λειτουργήσει ο κινητήρας, καθώς και την χρήση ή μη του συστήματος αποκοπής του υπερπληρωτή. Στη συνέχεια, διαλέγοντας την επιλογή “Calculate”, το λογισμικό κάνει χρήση των δεδομένων από τις εργοστασιακές δοκιμές (shop tests) για να υπολογίσει τα βασικά δεδομένα λειτουργίας της μηχανής



Engine Operating Conditions for Simulator

<b>Options for Operating Data Source</b> <input type="checkbox"/> Enter Manually <input checked="" type="checkbox"/> Estimate from Shop Tests <span>Calculate</span> <input type="checkbox"/> Use Shop Test Fuel <span>New Fuel</span>		<b>Ambient Conditions</b> Engine Room Air Temperature (C) <span>27.2</span> Engine Room Pressure (mbar) <span>1013.1</span> A/C Water Inlet Temp. (C) <span>24.0</span> ISO Conditions <input type="checkbox"/> Y/N	
<b>Operating Data</b> Engine Speed (rpm) <span>60.0</span> Engine Load (%) <span>28.8</span> Injection Timing (deg) <span>0</span> Fuel Rack Position (mm) <span>56.1</span> Fuel Flow Rate (kg/h) <span>986.3</span> Boost Pressure-Gauge (bar) <span>0.47</span> Boost Air Temperature (C) <span>22.5</span> Exhaust Pressure-Gauge (bar) <span>0.41</span> Exhaust Back Pressure (mmW) <span>37.0</span> <input type="checkbox"/> Blower ON/OFF		<b>Component Simulation</b> <input type="checkbox"/> Enable Fuel Rack Simulation <input checked="" type="checkbox"/> Enable T/C Simulation <input type="checkbox"/> Cutoff T/C:1 <input type="checkbox"/> Cutoff T/C:2 <input type="checkbox"/> Cutoff T/C:3 <input type="checkbox"/> Manually Define T/C and A/C Efficiencies Wastegate Flow (%) <span>0.0</span> Compressor Efficiency (%) <span>89.8</span> Turbine Efficiency (%) <span>70.8</span> A/C Effectiveness (%) <span>100.0</span> <input type="checkbox"/> Calibrate Turbine Efficiency <span>Save Data</span> <input type="checkbox"/> Calibrate Compressor Efficiency <input type="checkbox"/> Calibrate Overall T/C Efficiency	
<b>Engine Control</b> <input type="checkbox"/> Vary Exhaust Valve Timing Using Engine MAP <input type="checkbox"/> Vary Inlet Valve Timing Using Engine MAP <input type="checkbox"/> Vary Injection Pressure Using Engine MAP <input type="checkbox"/> Exhaust Valve: Vary Timing Only <input type="checkbox"/> Inlet Valve: Vary Timing Only		Exh. Valve Opening Variation (deg) <span>0.0</span> Exh. Valve Closing Variation (deg) <span>0.0</span> Inl. Valve Opening Variation (deg) <span>0.0</span> Inl. Valve Closing Variation (deg) <span>0.0</span> Mean Injection Pressure (bar) <span>500.0</span>	

Run Cancel

Σχήμα 5.3: Μενού Επιλογής Βασικών Λειτουργικών Παραμέτρων της Μηχανής

- Στη συνέχεια γίνεται η προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα και το πρόγραμμα μας παρέχει όλα τα λειτουργικά δεδομένα της μηχανής μας.

ENGINE OUTPUT : CURRENT & REFERENCE CONDITIONS

CYLINDER PERFORMANCE DATA	
	Simulation
Engine Load (%)	24.5
Fuel Rack Position (-)	54.3
Total Fuel Consumption (kg/h)	868.2
Power Output (kW)	4575.5
Firing Pressure (bar)	84.6
Compression Pressure (bar)	49.0
bsfc (g/kWh:Reference Heating Value)	189.8

INLET SYSTEM	
Scavenging Pressure-gauge (bar)	0.36
Scavenging Air Temperature (C)	24.0
A/C: Air Temperature In (C)	58.8
A/C: Pressure Drop (mmW)	85.5
Air Filter Pressure Drop (mmW)	8.3
Air Flow (kg/h)	36884.6
Exhaust Flow (kg/h)	37757.2

EXHAUST SYSTEM	
Exhaust Manifold Pressure-Gauge (bar)	0.29
Cylinder Exhaust Temperature (C)	245.3
Turbine Inlet Temperature (C)	308.4
Turbine Outlet Temperature (C)	280.0
Turbine Speed (rpm)	7269.4
Exhaust Backpressure (mmW)	34.0

User: STUDENT

Vessel: VESSEL\_ELE

Unit: MAIN\_ENGINE

Engine Name: 6S70MC-C8

Engine S/N: CE0224A

Measurement:

Reference Heating Value (kcal/kg): 10247.6

ISO Fuel Correct for LHV

Correct Present Performance to ISO Conditions

Print Close

Σχήμα 5.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης.

## 5.2 Παρουσίαση δοκιμών θαλάσσης

Μία επιπλέον δυνατότητα, την οποία μας παρέχει το πρόγραμμα προσομοίωσης, είναι η πρόσβαση σε κάποιες μετρήσεις, οι οποίες έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια της πλεύσης του πλοίου. Τις μετρήσεις αυτές, τις χρησιμοποιούμε για να κρίνουμε τον βαθμό στον οποίο ο κατασκευαστής μας έχει δώσει αληθή μεγέθη για τις βασικές λειτουργικές παραμέτρους του κινητήρα. Η διαδικασία που ακολουθούμε για να δούμε τις μετρήσεις είναι η εξής:

- Αρχικά, από την μπάρα εντολών, στην κορυφή του παραθύρου, διαλέγουμε την επιλογή “Measurements” και στη συνέχεια την επιλογή “Select Measurement”. Παρουσιάζεται, λοιπόν, το παρακάτω παράθυρο.

Test Date			Test Data				Measured Parameters		
No.	Date:	Time:	Load (%)	Power (kW)	Speed (rpm)	Oper. Hours (h)	Pcyl	Pinl	Tinl
1	Nov-25-13	07:17:18	11.4	2148.0	48.0	-----	Y	N	N
2	Nov-25-13	09:36:30	14.9	2808.7	55.0	-----	Y	N	N
3	Nov-26-13	00:45:20	25.0	0.0	60.0	-----	Y	N	N
4	Nov-26-13	02:53:30	90.0	0.0	91.0	-----	Y	N	N
5	Nov-26-13	03:24:08	90.0	0.0	91.0	-----	Y	N	N
6	Nov-26-13	04:49:24	100.0	0.0	94.0	-----	Y	N	N
7	Nov-26-13	05:32:52	75.0	14101.8	85.5	-----	Y	N	N
8	Nov-26-13	06:05:58	49.2	9255.1	74.9	-----	Y	N	N
9	Nov-26-13	06:26:54	29.0	5418.5	63.8	-----	Y	N	N
10	Nov-26-13	06:46:00	20.0	0.0	50.0	-----	Y	N	N
11	Nov-26-13	12:00:04	75.0	14300.0	86.0	-----	Y	N	N
12	Nov-26-13	13:53:46	90.0	0.0	91.0	-----	Y	N	N
13	Nov-26-13	18:02:20	105.2	19300.0	94.0	-----	Y	N	N
14	Nov-26-13	22:23:34	35.0	6100.0	64.0	-----	Y	N	N
15	Nov-26-13	23:05:06	20.0	0.0	55.0	-----	Y	N	N

Total No. of Measurements:

OK Cancel

Σχήμα 5.5: Διαθέσιμες μετρήσεις των επιδόσεων της μηχανής από τις Δοκιμές Θαλάσσης(Sea Trials)

- Στο παραπάνω παράθυρο, παρατηρούμε πως το πρόγραμμα μας παρέχει δεδομένα από διάφορες μετρήσεις σε μεγάλο εύρος φορτίων λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε διαθέσιμες δοκιμές θαλάσσης για φορτία που ξεκινούν από το 11% του ονομαστικού και φτάνουν μέχρι το 100%. Εάν επιλέξουμε ένα από αυτά τα φορτία, μπορούμε να δούμε τις μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια της πλεύσης για τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας της μηχανής.

ENGINE OPERATING DATA

General Information  
 Company: STUDENT Vessel: VESSEL\_ELE Unit: MAIN\_ENGINE Engine S/N: CE0224A Engine Name: 6S70MC-C8 Meas. No.: 1

General Operation Data  
 Date: Nov-25-13 Speed (rpm): 48.0 E/R Temperature (C): 26.0 GPS Speed (kn): 9.40 Vessel and NAVI Data  
 Power-Torque Meter (kW): 2148.0 Load (%): 11.0 E/R Pressure (mbar): 1013.0 Speed Through Water (kn): 9.40  
 Fuel Dens. 15C (kg/m3): 841.3 Fuel Temp. (C): N/A Fuel Oil Type: N/A Ballast/Laden (-): Ballast  
 H. Value (kcal/kg): 10200.0 Fuel Sulfur (%): N/A Calc. HV from Density and Sulfur % Slip (Prop-Log/Log): 0.1 Calc

Cylinder Data  

Cylinder No.	1	2	3	4	5	6	Mean
Exh. Gas Temp. (C)	213.0	219.0	221.0	218.0	216.0	211.0	216.3
Fuel Pump Index (-)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
VIT Index (-)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Gas Exchange System

Turbocharger Data  
 Blower ON   
 Turbocharger Speed (rpm): 3572.0 3540.0  
 Scav. Air Pressure-Gauge (bar): 0.13 0.13  
 Exh. Man. Pressure-Gauge (bar): 0.11 0.11 Calculate  
 Exh. Back Pressure (mmW): 0.0 0.0  
 Turbine Inlet Temp. (C): 229.0 242.0  
 Turbine Outlet Temp. (C): 210.0 211.0

Air Cooler Data  
 Air Temperature Before Cooler (C): 0.0 0.0  
 Scav. Air Temperature-A/C Out (C): 42.0 42.0  
 Water Temperature In (C): 0.0 0.0  
 Water Temperature Out (C): 0.0 0.0  
 Pressure Drop (mmW): 0.0 0.0  
 Air Filter Pressure Drop (mmW): 0.0 0.0

Absolutely Necessary Values: Scavenging Air Pressure (bar)  
 Scav. Air Temperature-A/C Out (C)  
 N/A: Not Available (Not provided yet by user)

If Exh. pressure is not measured enter Scav. Pressure and click "Calculate". Save Exit Print

Σχήμα 5.6: Αποτελέσματα Βασικών Παραμέτρων Λειτουργίας Μηχανής για την προεπιλεγμένη Δοκιμή Θαλάσσης

## Κεφάλαιο 6

### Εξέταση προβλεπτικής ικανότητας του λογισμικού προσομοίωσης

Για να επιβεβαιώσουμε την ομαλή λειτουργία του λογισμικού, θα εξετάσουμε την ικανότητα πρόβλεψης, ελέγχοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε κανονική λειτουργία, αλλά και σε λειτουργία με αποκοπή του υπερπληρωτή.

Στη συνέχεια, για να προσδιορίσουμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, κατασκευάζουμε συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των εργοστασιακών δοκιμών του κινητήρα και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Η διαδικασία που θα ακολουθήσουμε, είναι η εξής:

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα, υπολογίζουμε διάφορες λειτουργικές παραμέτρους που αφορούν τον κινητήρα. Αυτές είναι οι παρακάτω:

- Ειδική κατανάλωση καυσίμου (bsfc)
- Πίεση συμπίεσης (CP:Compression Pressure)
- Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του κυλίνδρου (CT:Cylinder Temperature)
- Ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (ES:Engine Speed)
- Υπερπίεση καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου (EB:Exhaust Backpressure)
- Πίεση καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγής (EMP:Exhaust Manifold Pressure)
- Μέγιστη πίεση καύσεως (FP:Firing Pressure)
- Παραγόμενη ισχύς (P:Power)
- Πίεση αέρα σάρωσης (SP:Scavenging Pressure)
- Θερμοκρασία καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου (TIT:Turbine Inlet Temperature)
- Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου (TOT:Turbine Outlet Temperature)
- Ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή (TS:Turbine Speed)

Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για τα φορτία: 25%, 40%, 50%, 75%, 85%, 100%, 110% για κανονική λειτουργία του κινητήρα. Και για φορτία: 25%, 35%, 40%, για λειτουργία με αποκοπή του ενός από τους δύο υπερπληρωτές.

Σε αυτό το σημείο, χρήσιμο είναι να παραθέσουμε τα βασικά στοιχεία του κινητήρα τον οποίο εξετάζουμε:

Type	Number of Cylinders	Number of Turbochargers	Bore	Stroke	Name
Two Stroke Diesel Engine	6	2	700 mm	Superlong	MAN B&W 6S70MCC

## 6.1 Έλεγχος προβλεπτικής ικανότητας λογισμικού κατά την κανονική λειτουργία του κινητήρα

Κατασκευάζουμε, για εποπτικούς λόγους, έναν πίνακα, ο οποίος περιέχει όλες τις υπολογισμένες τιμές των ζητούμενων μεγεθών από την χρήση του λογισμικού προσομοίωσης κατά την κανονική λειτουργία του κινητήρα:

<i>Load(%)</i>	<i>bsfc(g/kWh)</i>	<i>CP(bar)</i>	<i>CT(°C)</i>	<i>ES(rpm)</i>	<i>EB(Pa)</i>	<i>EMP(bar)</i>	<i>FP(bar)</i>	<i>P(kW)</i>	<i>SP(bar)</i>
24.5	189,8	49	245,3	57,3	333,4	0,29	84,6	4575,5	0,36
39.9	178,3	72,8	238,8	67	827,7	0,89	113,4	7487,1	1,02
49.9	177	85,9	256	72,2	1185,6	1,23	124,8	9432,1	1,38
74.5	175,6	110,8	294,1	82,7	2043,6	1,84	143,9	13906,5	2,05
85	175,1	119,2	310,2	86,2	2359,4	2,07	154	15673,4	2,29
101	175	136,9	345,5	91	3018,4	2,58	163,4	18856,8	2,84
109	179,5	152,4	391,2	93,9	3507,7	3,11	151,2	20349,5	3,38

<i>Load(%)</i>	<i>TIT(°C)</i>	<i>TOT(°C)</i>	<i>TS(rpm)</i>
24.5	308,4	280	7269
39.9	304	231,2	10187
49.9	326,2	232,6	11551
74.5	376,5	248,9	14009
85	396,1	257,2	14750
101	432	269,7	15965
109	464,8	280,5	16692

Σχήμα 6.1: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης κατά την κανονική λειτουργία του κινητήρα

Στους παρακάτω πίνακες παραθέτουμε τις τιμές για τα παραπάνω μεγέθη όπως αυτές δίνονται από τις εργοστασιακές δοκιμές του κινητήρα για κανονική λειτουργία και για λειτουργία με αποκοπή.

<i>Load(%)</i>	<i>bsfc(g/kWh)</i>	<i>CP(bar)</i>	<i>CT(°C)</i>	<i>ES(rpm)</i>	<i>EB (Pa)</i>	<i>EMP (bar)</i>	<i>FP(bar)</i>	<i>P (kW)</i>	<i>SP (bar)</i>
24.5	186,6	47	259	57,2	274,6	0,38	81,2	4619	0,43
39.9	177,4	81,2	263,2	72,2	1225,8	1,09	114,2	9261	1,25
49.9	174,1	113,3	274,2	82,6	2059,3	1,94	142,7	13852	2,15
74.5	173,5	124,8	286,3	86,1	2451,6	2,16	154,5	15736	2,41

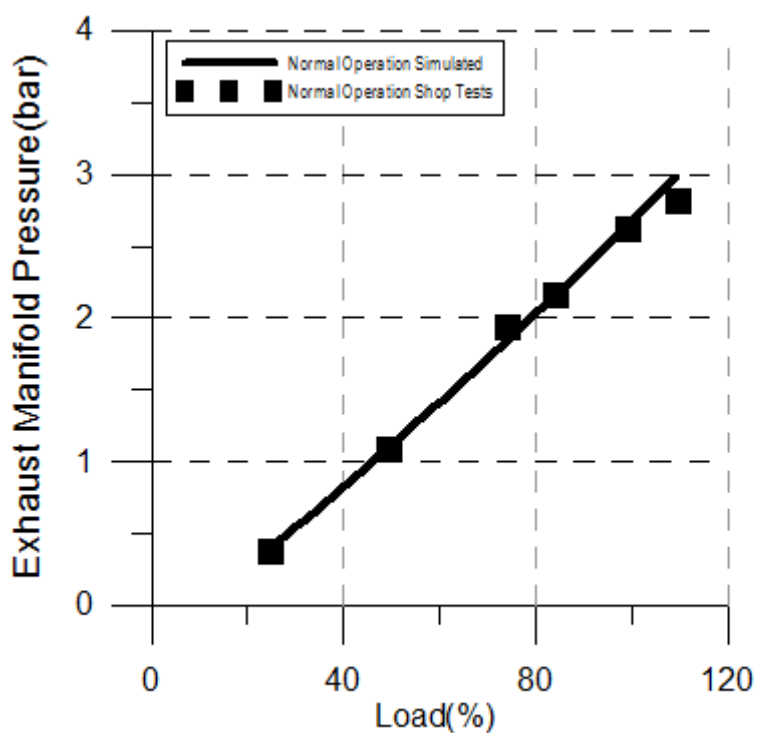
85	176	143,5	308,5	91	2990,9	2,62	159,3	18550	2,89
101	176,2	158	335	93,9	3775,5	2,82	159,7	20462	3,11
109	186,6	47	259	57,2	274,6	0,38	81,2	4619	0,43

<i>Load(%)</i>	<i>TIT(°C)</i>	<i>TOT(°C)</i>	<i>TS(rpm)</i>
24.5	289	241,5	6836
39.9	337,5	235,5	11235
49.9	360	216	13676
74.5	376,5	222,5	14343
85	411	235,5	15402
101	441,5	255	15912
109	289	241,5	6836

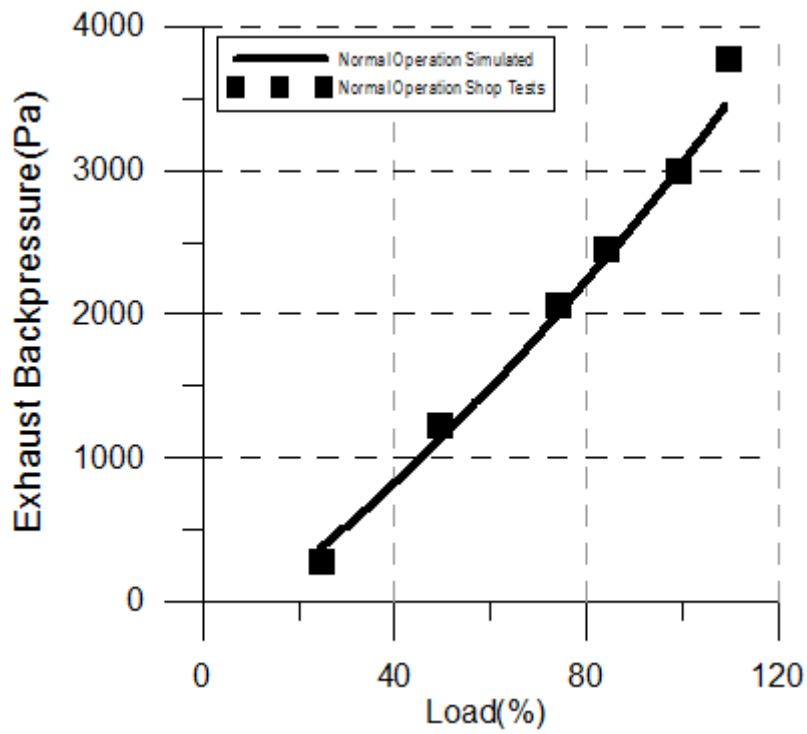
Σχήμα 6.2: Πίνακας με τις Εργοστασιακές Δοκιμές(Shop Tests) για την κανονική λειτουργία του κινητήρα

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα αποτελέσματά μας σε ένα γράφημα, μαζί με τα δεδομένα των εργοστασιακών δοκιμών και συγκρίνουμε. Προκύπτουν, λοιπόν, τα παρακάτω διαγράμματα

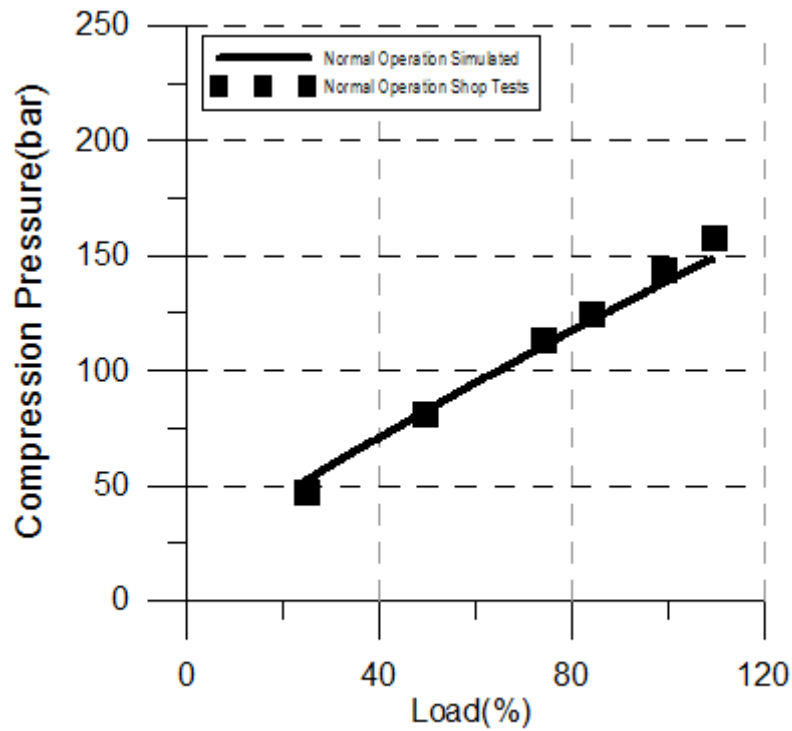
Για την κανονική λειτουργία του κινητήρα, έχουμε:



Σχήμα 6.3: Συγκριτικό διάγραμμα Πίεσης Καυσαερίων στην Πολλαπλή Εξαγωγή.

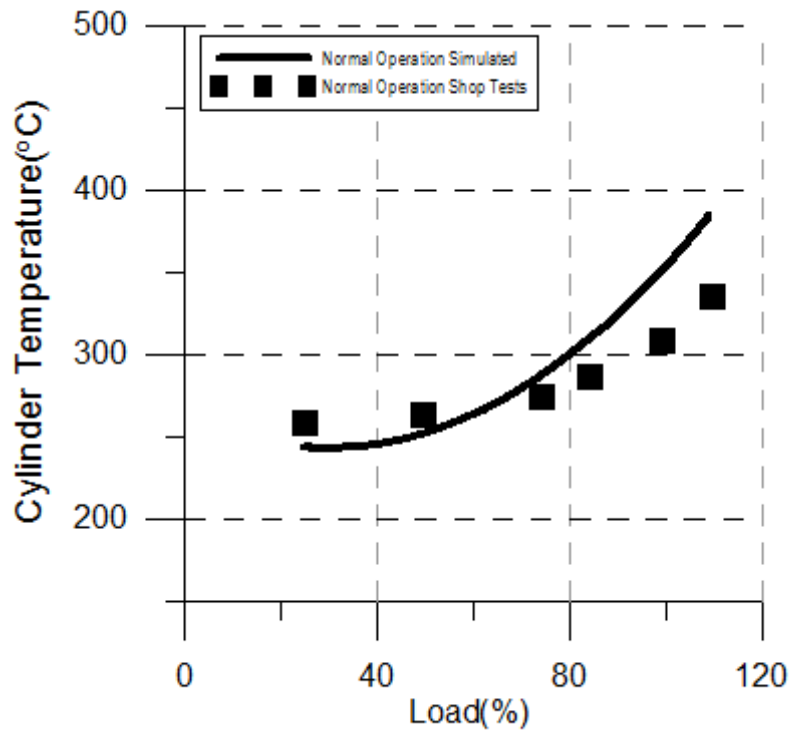


Σχήμα 6.4: Συγκριτικό διάγραμμα Υπερπίεσης Καυσαερίων στην Έξοδο του Κυλίνδρου.

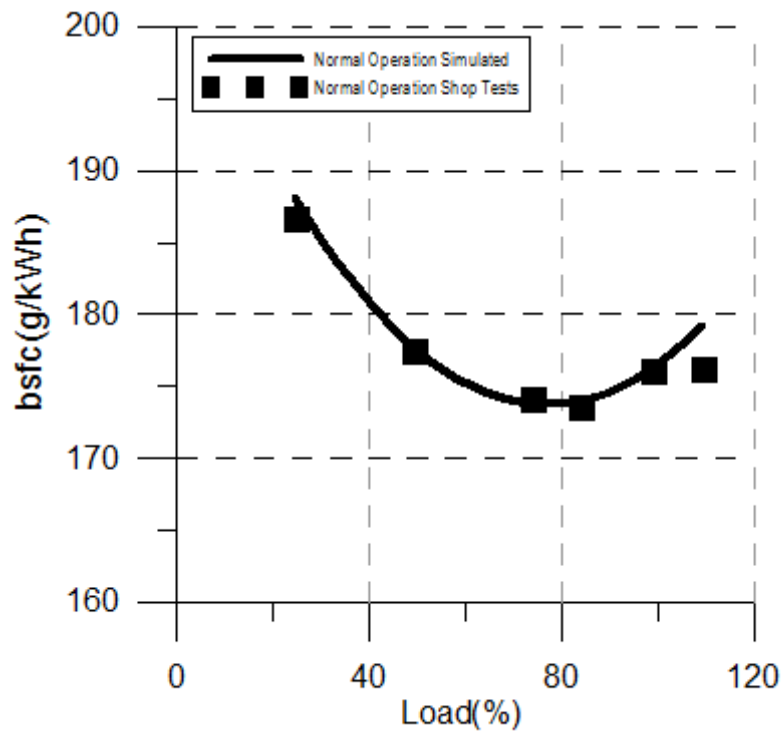


Σχήμα 6.5: Συγκριτικό διάγραμμα Πίεσης Συμπίεσης

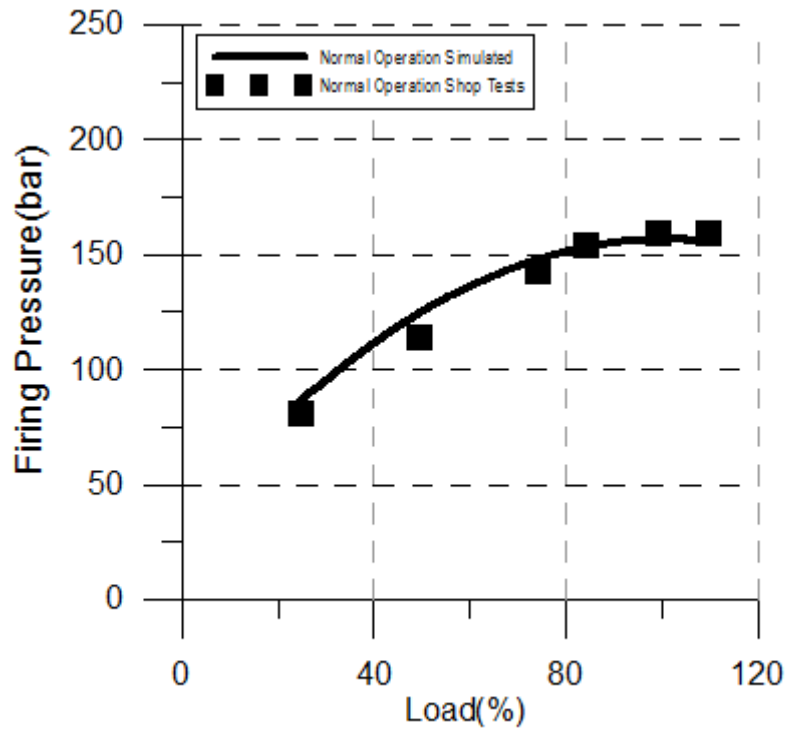




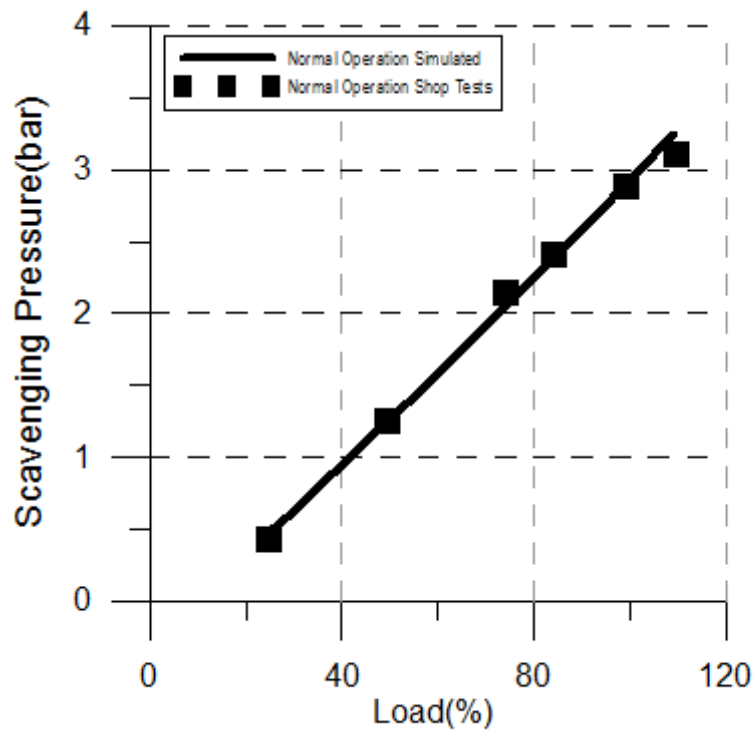
Σχήμα 6.6: Συγκριτικό διάγραμμα Θερμοκρασίας Καυσαερίων στην Έξοδο του Κυλίνδρου.



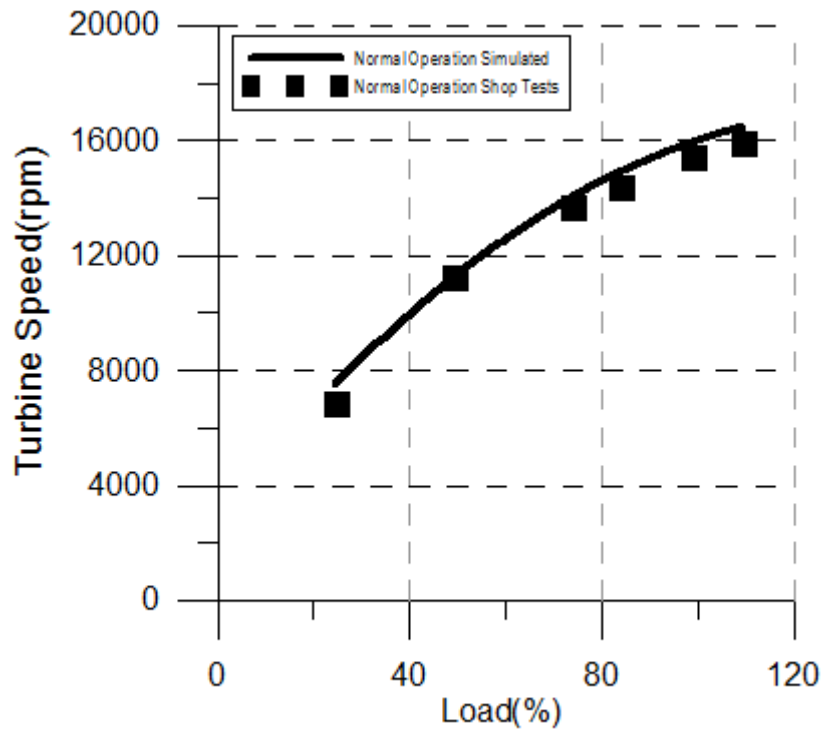
Σχήμα 6.7: Συγκριτικό διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.



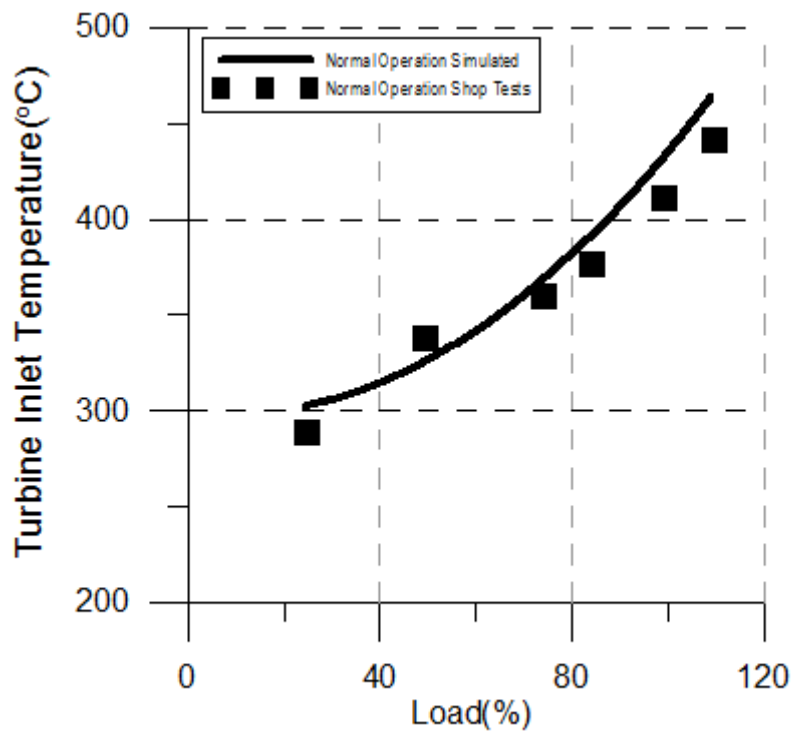
Σχήμα 6.8: Συγκριτικό διάγραμμα Μέγιστης Πίεσης Καύσεως.



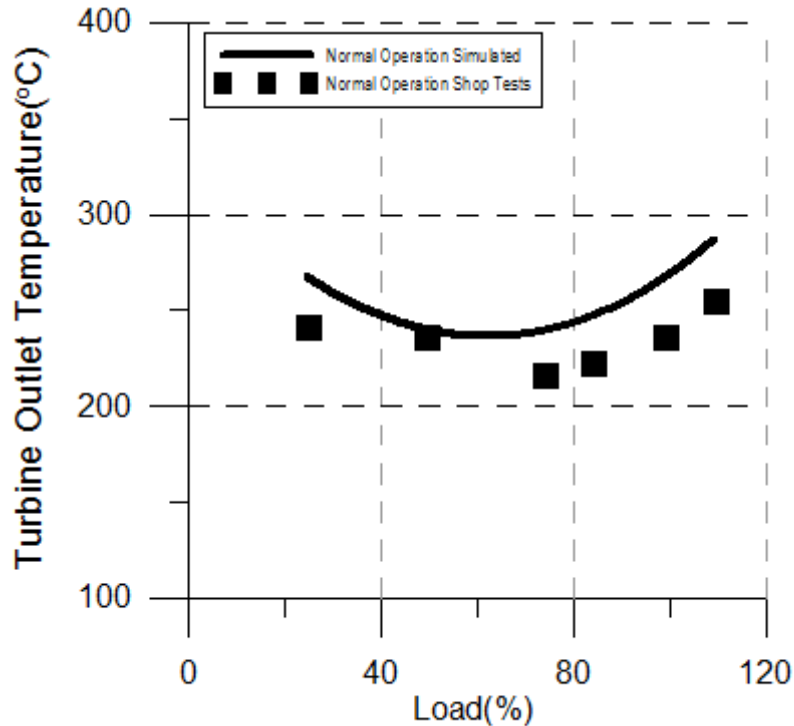
Σχήμα 6.9: Συγκριτικό διάγραμμα Πίεσης Σάρωσης Κυλίνδρου.



Σχήμα 6.10: Συγκριτικό διάγραμμα Ταχύτητας Περιστροφής του Υπερπληρωτή.



Σχήμα 6.11: Συγκριτικό Διάγραμμα Θερμοκρασίας Καυσαερίων στην Είσοδο του Στροβίλου.



Σχήμα 6.12: Συγκριτικό Διάγραμμα Θερμοκρασίας Καυσαερίων στην Έξοδο του Στροβίλου.

## 6.2 Έλεγχος προβλεπτικής ικανότητας λογισμικού κατά τη λειτουργία με T/C Cut-Out

Κάνουμε την ίδια διαδικασία προσομοίωσης, αυτή τη φορά για λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.

<u>Load(%)</u>	<u>bsfc(g/kWh)</u>	<u>CP(bar)</u>	<u>CT(°C)</u>	<u>ES(rpm)</u>	<u>EB (Pa)</u>	<u>EMP (bar)</u>	<u>FP(bar)</u>	<u>P (kW)</u>	<u>SP (bar)</u>
24.5	184,3	74,6	326,8	54,3	290,2688402	1,06	105,9	4711,3	1,1
34.9	181,1	89,6	362,3		414,8098629	1,48	123,7	6509,9	1,53
39.9	180,1	97,5	374,4	67	496,2028147	1,7	131,2	7410,7	1,76
<u>Load(%)</u>	<u>TIT(°C)</u>	<u>TOT(°C)</u>							
24.5	360,6	286,6							
34.9	400,8	299,7							
39.9	414,5	300,3							

Σχήμα 6.13: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης κατά τη λειτουργία με αποκοπή του ενός από τους δύο υπερπληρωτές.

Και οι εργοστασιακές τιμές για λειτουργία με T/C Cut-Out.

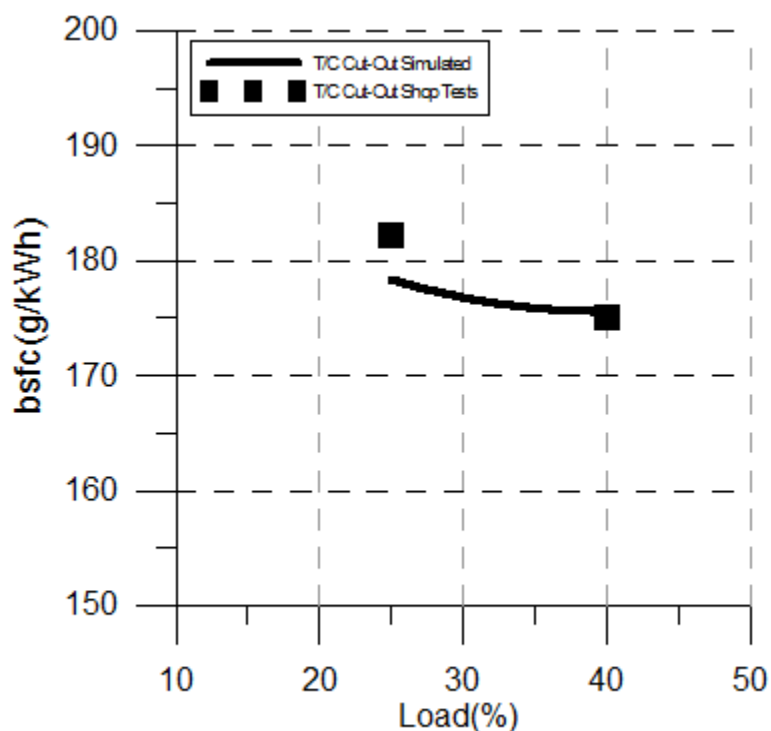
<i>Load(%)</i>	<i>bsfc(g/kWh)</i>	<i>CP(bar)</i>	<i>CT(°C)</i>	<i>ES(rpm)</i>	<i>EB (Pa)</i>	<i>EMP (bar)</i>	<i>FP(bar)</i>	<i>P (kW)</i>	<i>SP (bar)</i>
24.5	182,3	73,7	274	57,5	230	0,99	105,5	4668	1,06
39.9	175,1	108,7	315	67	220	1,86	139	7419	1,98

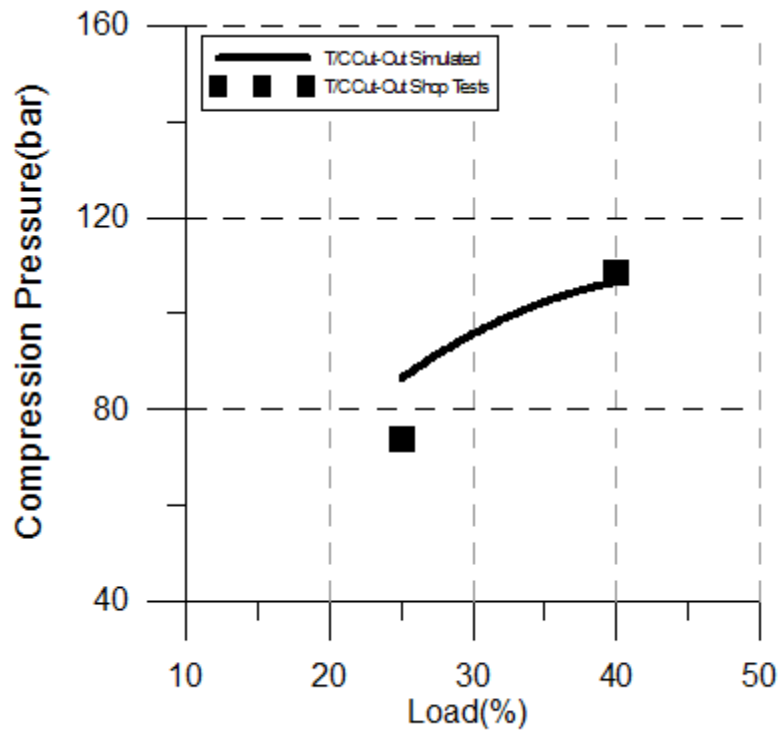
<i>Load(%)</i>	<i>TIT(°C)</i>	<i>TOT(°C)</i>	<i>TS(rpm)</i>
24.5	310	230	11412
39.9	345	220	14185

Σχήμα 6.14: Πίνακας με τις Εργοστασιακές Δοκιμές (Shop Tests) για τη λειτουργία με αποκοπή του ενός από τους δύο υπερπληρωτές.

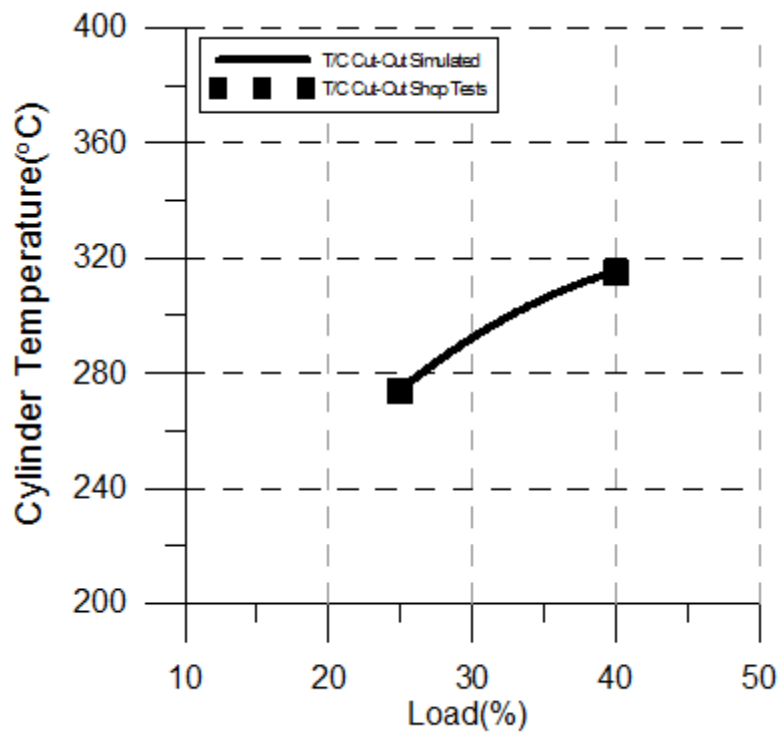
Στη συνέχεια παραθέτουμε τα ίδια διαγράμματα για λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή:



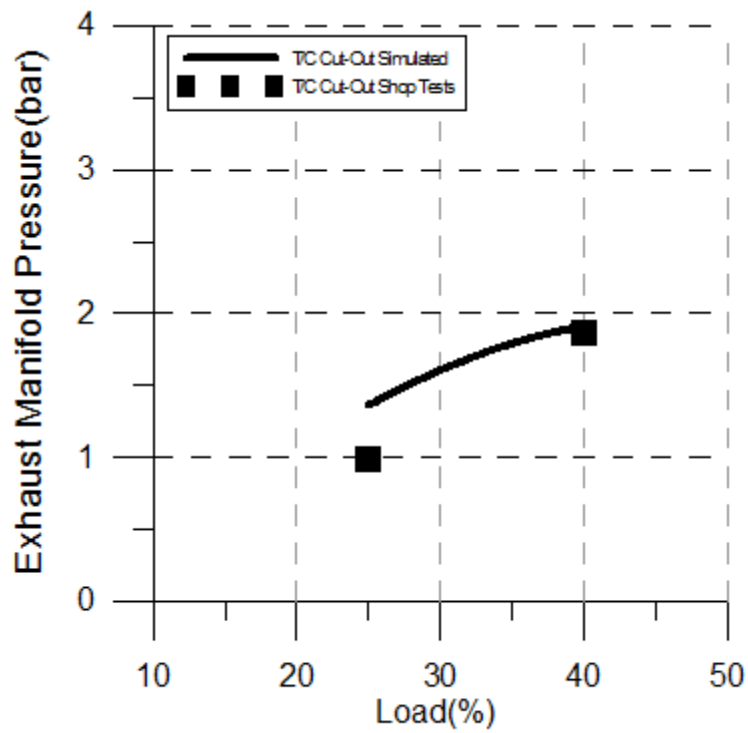
Σχήμα 6.15: Συγκριτικό διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.



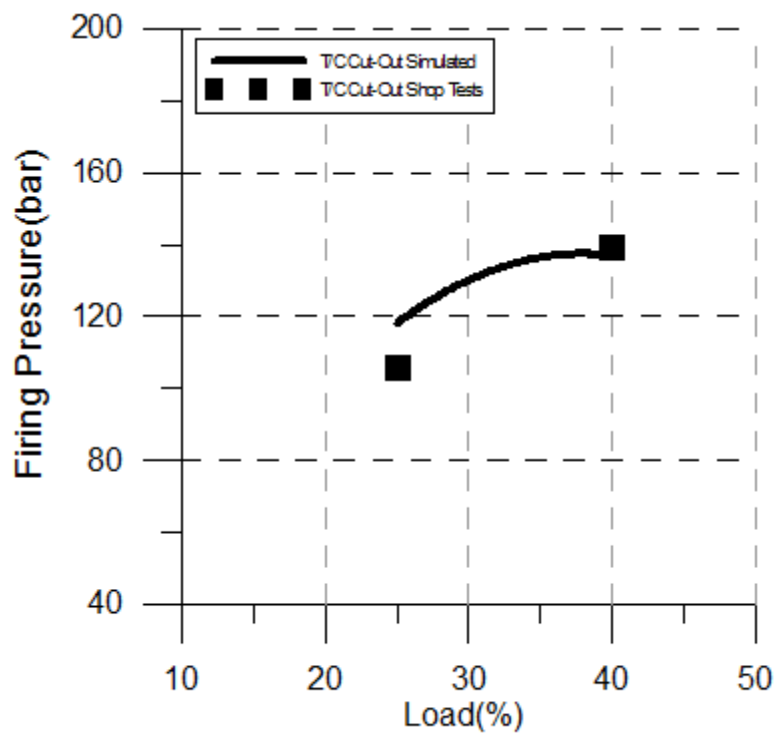
Σχήμα 6.16: Συγκριτικό διάγραμμα πίεσης συμπίεσης .Λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.



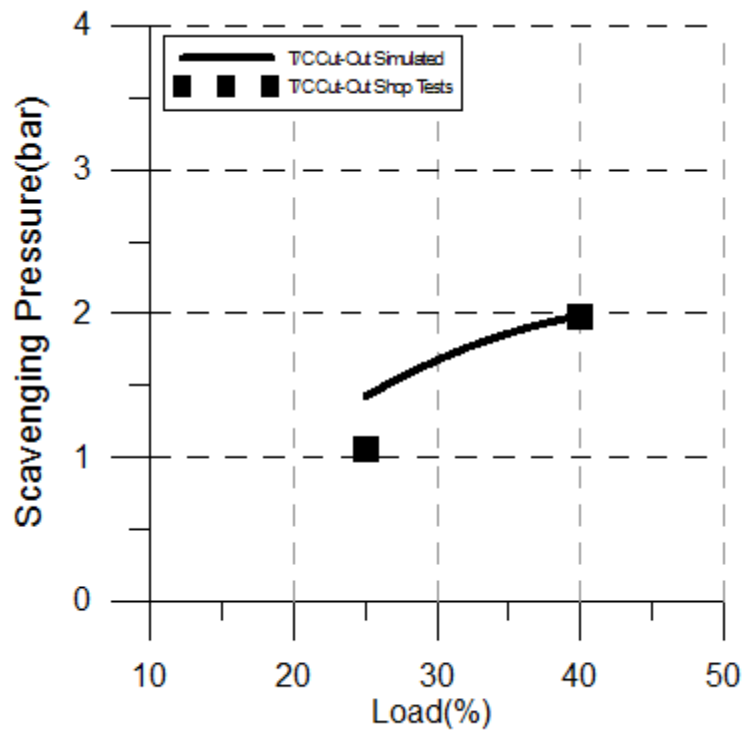
Σχήμα 6.17: Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας καυσαερίων στην έξοδο του κυλίνδρου. Λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.



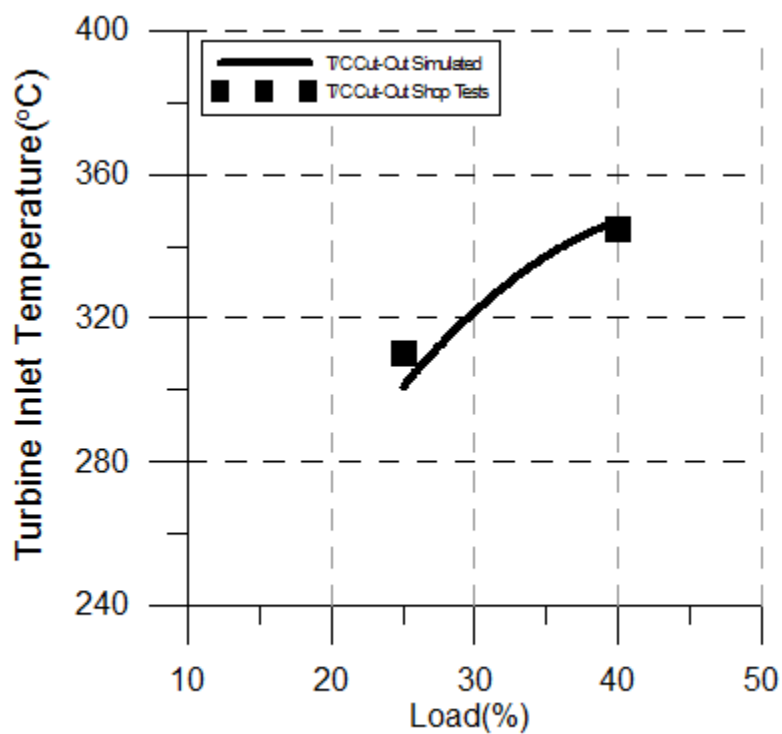
Σχήμα 6.18: Συγκριτικό διάγραμμα πίεσης καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγή. Λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.



Σχήμα 6.19: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης πίεσης καύσης. Λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.

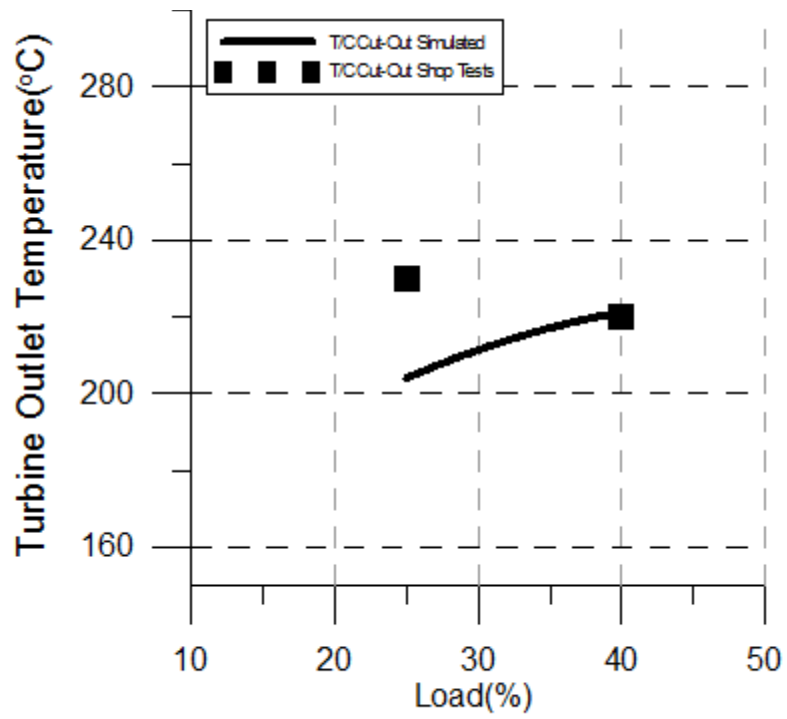


Σχήμα 6.20: Συγκριτικό διάγραμμα πίεσης σάρωσης. Λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.



Σχήμα 6.21: Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου. Λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.





Σχήμα 6,22: Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου. Λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.

### Συμπεράσματα

Από τη σύγκριση των βασικών λειτουργικών παραμέτρων της μηχανής με τις δεδομένες εργοστασιακές δοκιμές, παρατηρούμε πως η πλειοψηφία αυτών παρουσιάζουν μικρή απόκλιση. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πως το λογισμικό προσομοίωσης μας παρέχει ακριβείς προβλέψεις για τη λειτουργία της μηχανής με ή χωρίς την εφαρμογή της μεθόδου του T/C Cut-Out.

Να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο, πως κάποιες παράμετροι παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση κι αυτό παρατηρείται κυρίως στην προσομοίωση με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή.

Πιο συγκεκριμένα:

- Όσον αφορά την ειδική κατανάλωση καυσίμου, όταν αποκόπτουμε τον έναν υπερπληρωτή, παρουσιάζεται απόκλιση όταν η μηχανή λειτουργεί στο 40% του ονομαστικού φορτίου της. Η απόκλιση αυτή είναι της τάξης του 4%.
- Μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζει η θερμοκρασία του κυλίνδρου, κατά τη λειτουργία με εφαρμογή του T/C Cut-Out. Παρατηρούμε υπερεκτίμηση της παραμέτρου από το πρόγραμμα προσομοίωσης κατά 10%.
- Την ίδια συμπεριφορά έχουν και οι καμπύλες της θερμοκρασίας στην είσοδο και στην έξοδο του στροβίλου. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς το λογισμικό προσομοίωσης υπερεκτιμά τις θερμοκρασίες

Να σημειώσουμε σ αυτό το σημείο, πως πάντα υπάρχει η πιθανότητα ύπαρξης σφάλματος στις εργοστασιακές δοκιμές για τη μέτρηση των παραπάνω παραμέτρων, είτε λόγω δυσλειτουργίας των οργάνων είτε λόγω ανθρώπινου λάθους.

## Κεφάλαιο 7

### Επίδραση στις βασικές παραμέτρους λειτουργίας της αποκοπής υπερπληρωτή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, θεωρείται ωφέλιμο να μελετήσουμε την επίδραση που έχει η εφαρμογή του T/C Cut-Out σε διάφορες βασικές λειτουργικές παραμέτρους του κινητήρα. Για να μελετήσουμε την επίδραση αυτή, θα χρησιμοποιήσουμε την προσομοίωση που μας προσφέρει το λογισμικό, εξετάζοντας τα παραπάνω μεγέθη στα φορτία 20% - 50% με βήμα 5% και παραθέτοντάς τα σε ένα συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με αποκοπή υπερπληρωτή. Έτσι, στην αρχή κατασκευάζουμε τον παρακάτω πίνακα, ο οποίος μας παρέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα βασικά λειτουργικά μεγέθη του κινητήρα.

Για την κανονική λειτουργία του κινητήρα, έχουμε:

<i>Load(%)</i>	<i>bsfc(g/kWh)</i>	<i>CP(bar)</i>	<i>CT(°C)</i>	<i>EMP(bar)</i>	<i>FP(bar)</i>	<i>SP(bar)</i>	<i>P(kW)</i>	<i>TIT(°C)</i>	<i>TOT(°C)</i>	<i>TS(rpm)</i>
20	196,7	47,5	258,7	0,27	75	0,33	4381,3	327,5	301,3	7091,8
30	184,7	57,6	232,4	0,51	94,7	0,6	5541,4	294,9	248,8	8588
40	178,3	72,8	238,8	0,89	113,4	1,02	7487,1	304	231,2	10186,9
50	177	85,9	256	1,23	124,8	1,38	9432,1	326,2	232,6	11551

Σχήμα 7.1: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης για κανονική λειτουργία της μηχανής.

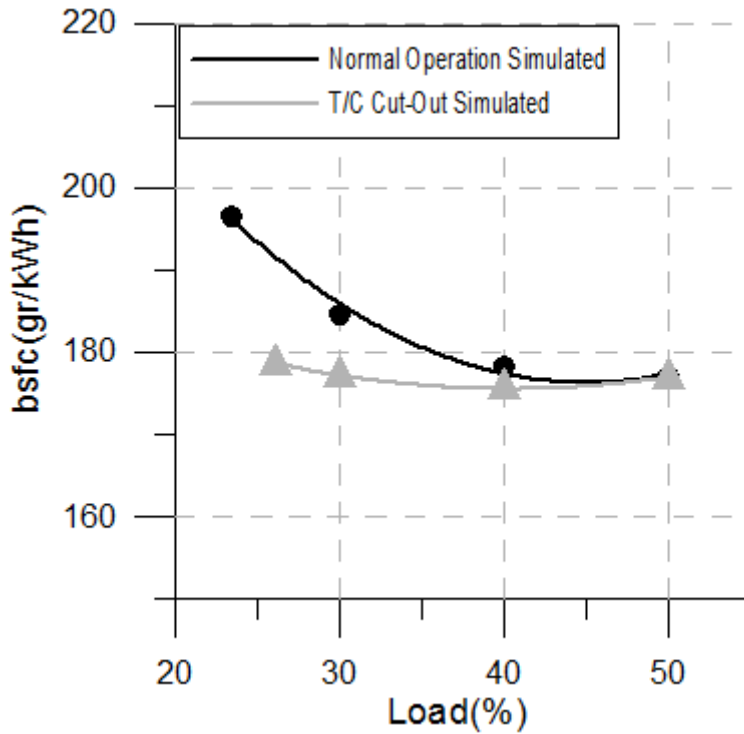
Όμοια, για λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή, υπολογίζουμε:

<i>Load(%)</i>	<i>bsfc(g/kWh)</i>	<i>CP(bar)</i>	<i>CT(°C)</i>	<i>EMP(bar)</i>	<i>FP(bar)</i>	<i>SP(bar)</i>	<i>P(kW)</i>	<i>TIT(°C)</i>	<i>TOT(°C)</i>	<i>TS(rpm)</i>
20	178,6	85,7	272,6	1,34	116,9	1,4	4862,3	299	203,4	11765,8
30	177,1	94,6	290,3	1,58	126,2	1,64	5796,7	319,7	210,7	12757,5
40	175,5	110,6	322,1	2,02	143,6	2,09	7605,5	355,5	223,9	14343,1
50	176,9	130,9	359,3	2,61	159,3	2,69	9435,8	394,9	237,3	15737,7

Σχήμα 7.2: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης για λειτουργία της μηχανής με αποκοπή του ενός από τους δύο υπερπληρωτές..

Και, με τη βοήθεια των παραπάνω πινάκων, κατασκευάζουμε τα ζητούμενα συγκριτικά διαγράμματα.

- Ειδική κατανάλωση καυσίμου

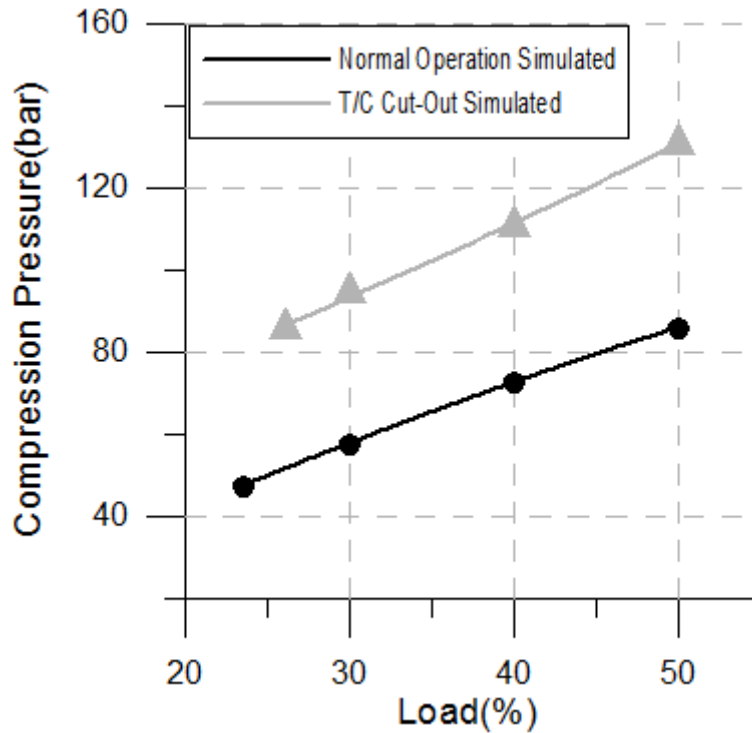


Σχήμα 7.3: Συγκριτικό διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Η πιο χαρακτηριστική παράμετρος, η οποία αποδεικνύει την επίδραση που έχει η αποκοπή του ενός υπερπληρωτή στην οικονομία της μηχανής. Παρατηρούμε, πως η αποκοπή μειώνει την ειδική κατανάλωση καυσίμου της μηχανής σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής, με την πιο σημαντική μείωση να εμφανίζεται στο 25%. Σε αυτό το φορτίο λειτουργίας, η μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου είναι στο 8%.

Επιπλέον, με την παραπάνω καμπύλη, φαίνεται πως το σημείο στο οποίο έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί η εν λόγω μηχανή. Από τη μορφή της καμπύλης, παρατηρούμε πως το βέλτιστο σημείο λειτουργίας με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή είναι γύρω από την περιοχή των 25%.

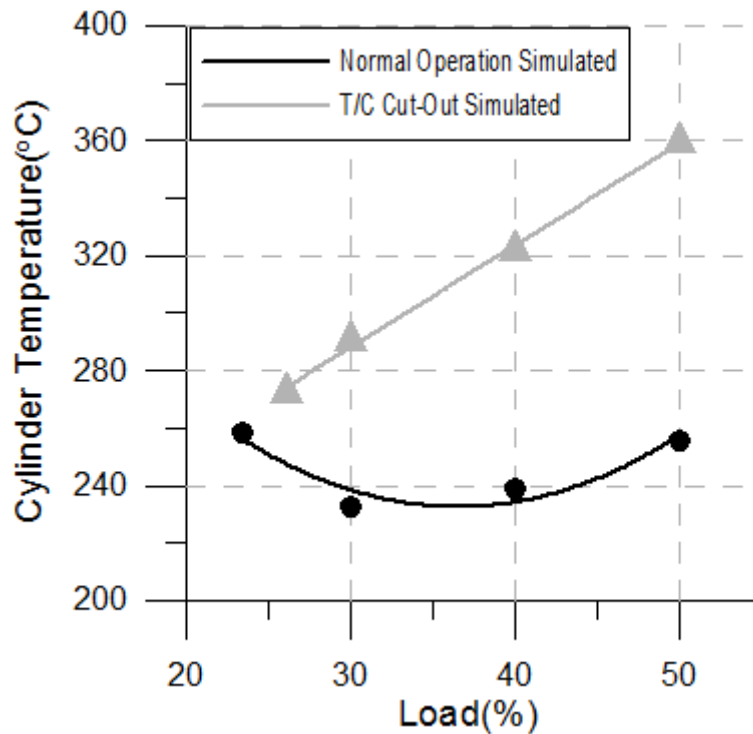
- Πίεση Συμπίεσης



Σχήμα 7.4: Συγκριτικό διάγραμμα πίεσης συμπίεσης μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Παρατηρούμε, πως η ποσοστιαία αύξηση της πίεσης συμπίεσης του κυλίνδρου, είναι αρκετά μεγάλη και μάλιστα αγγίζει το 75% για τιμές του φορτίου λειτουργίας γύρω στο 40%. Είναι αρκετά λογική αυτή η αύξηση της πίεσης, καθώς στον στρόβιλο περνάει σχεδόν η διπλάσια μάζα αέρα. Στο παραπάνω σχήμα, βλέπουμε κι έναν από τους λόγους που χρησιμοποιούμε την αποκοπή υπερπληρωτή, κι αυτός είναι η βελτίωση των συνθηκών καύσης κατά τα χαμηλά φορτία.

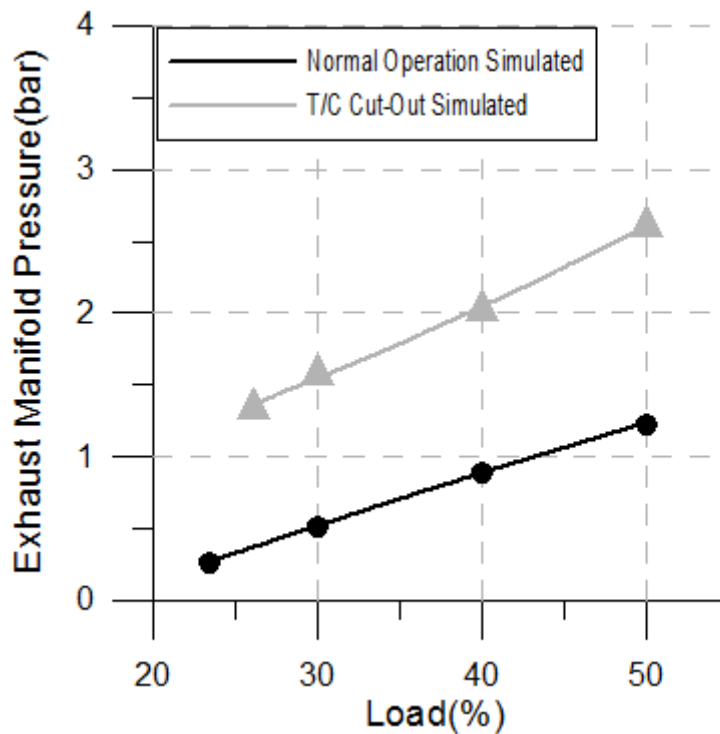
- Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του κυλίνδρου



Σχήμα 7.5: Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του κυλίνδρου+ μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε πως η αποκοπή του υπερπληρωτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του κυλίνδρου. Μάλιστα, η ποσοστιαία αύξηση της τιμής αυτής, αγγίζει μέχρι και το 15%. Να σημειώσουμε, επίσης, πως η αύξηση αυτή γίνεται πιο απότομη από το 40% και πάνω, σημείο στο οποίο, όπως αναφέραμε παραπάνω, σταματούν να λειτουργούν οι βοηθητικοί φυσητήρες.

- Πίεση Καυσαερίων στην Πολλαπλή Εξαγωγή

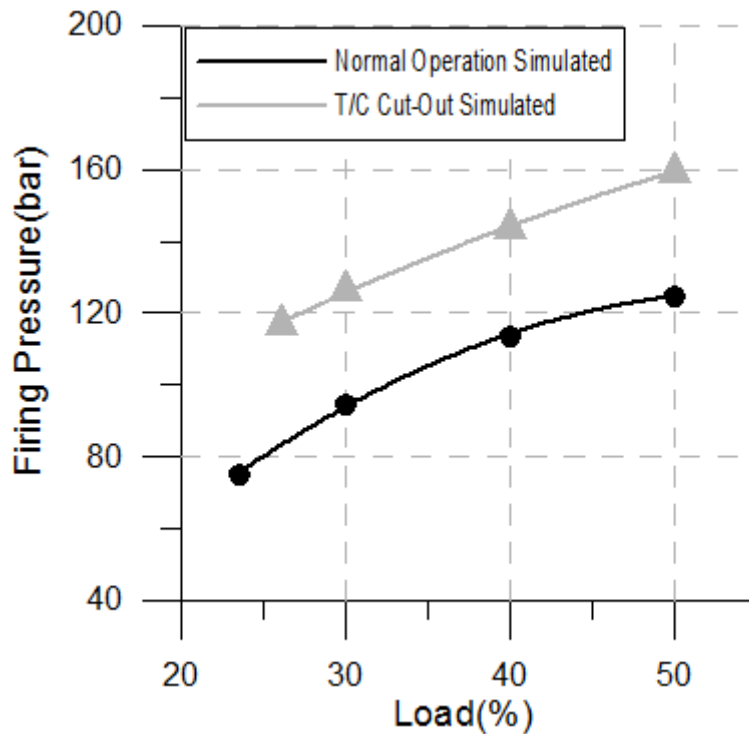


Σχήμα 7.6: Συγκριτικό διάγραμμα πίεσεως καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγή μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Όπως είναι αναμενόμενο, η πίεση των καυσαερίων, ακολουθεί τη συμπεριφορά της καμπύλης της πίεσης σάρωσης. Η αυξημένη πίεση καυσαερίων, είναι αυτή που εκμεταλλεύεται ο στρόβιλος του συστήματος για να λειτουργεί σε μεγαλύτερο λόγο πίεσης από την κανονική λειτουργία του κινητήρα και να παράγει μεγαλύτερο έργο για να κινήσει το συμπιεστή.

Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε αύξηση της πίεσης των καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγή κατά 170%.

- Μέγιστη Πίεση Καύσεως



Σχήμα 7.3: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης πίεσης καύσεως μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

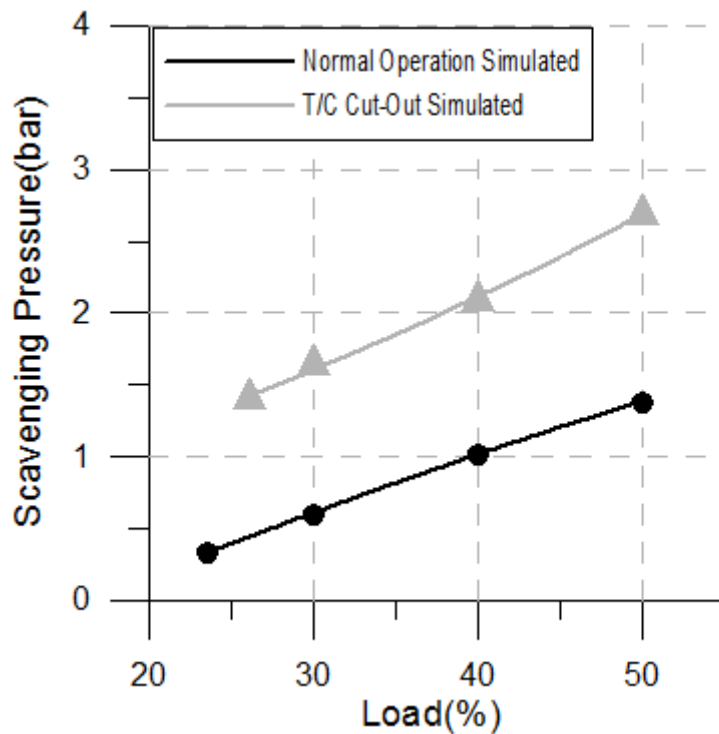
Η αποκοπή υπερπληρωτή αυξάνει μοιραία τη μέγιστη πίεση καύσεως, καθώς ο κύλινδρος εμπεριέχει μεγαλύτερη μάζα αέρα σε σχέση με την κανονική λειτουργία της μηχανής, αυξάνοντας έτσι την πίεση συμπίεσης του. Έτσι, λοιπόν, όταν γίνει η ανάφλεξη του καυσίμου, η πίεση της καύσης αυξάνεται απότομα. Αυτό, είναι και το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αποκοπής του υπερπληρωτή. Καθώς, η παρατεταμένη λειτουργία σε αυξημένες πιέσεις δύναται να προκαλέσει ζημιές στη μηχανή.

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε αύξηση μέχρι και 36% της μέγιστης πίεσης καύσεως και γενικά σταθεροποιείται στην γύρω στο 30%. Να παρατηρήσουμε πως γενικά, η πίεση καύσης για κάθε φορτίο λειτουργίας με αποκοπή του υπερπληρωτή, αντιστοιχεί στην ίδια πίεση καύσης για διπλάσιο φορτίο όταν η μηχανή λειτουργεί κανονικά.

Να παρατηρήσουμε, επίσης, πως η μορφή της καμπύλης της μέγιστης πίεσης καύσεως, έχει την ίδια συμπεριφορά με αυτήν της πίεσης συμπίεσης. Αυτό το γεγονός, είναι αναμενόμενο, καθώς η πίεση καύσης εξαρτάται από την πίεση συμπίεσης και από την ποσότητα καυσίμου που καίγεται, η οποία εν γένει παραμένει σταθερή για κάθε περίπτωση λειτουργίας (με ή χωρίς αποκοπή του υπερπληρωτή).



- Πίεση Σάρωσης

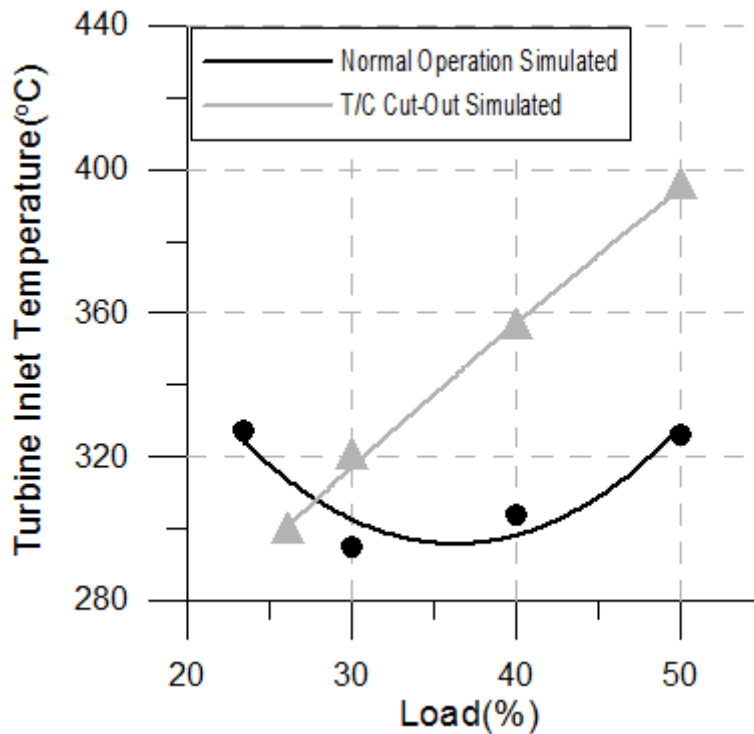


Σχήμα 7.8: Συγκριτικό διάγραμμα πίεσεως σάρωσης μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Η επίδραση της αποκοπής του ενός υπερπληρωτή στην πίεση σάρωσης της μηχανής είναι αρκετά σημαντική. Όπως αναφέραμε παραπάνω, η λειτουργία σε χαμηλά φορτία, δημιουργεί το βασικό πρόβλημα μη ύπαρξης επαρκούς ποσότητας αέρα στον κύλινδρο, με αποτέλεσμα η καύση να είναι ατελής. Παρατηρούμε, όμως, πως εφαρμόζοντας τη μέθοδο του T/C Cut-Out, καταφέρνουμε να αυξήσουμε αισθητά την πίεση σάρωσης, βελτιώνοντας και την ποιότητα της καύσης. Αποκόπτοντας τον έναν υπερπληρωτή, καταφέρνουμε να διπλασιάσουμε την πίεση σάρωσης του κινητήρα.

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, συμπεραίνουμε πως η αύξηση της πίεσεως σάρωσης φτάνει περίπου το 180% για λειτουργία στο 40% του ονομαστικού φορτίου και πιο συγκεκριμένα η αύξηση είναι 1,5 bar.

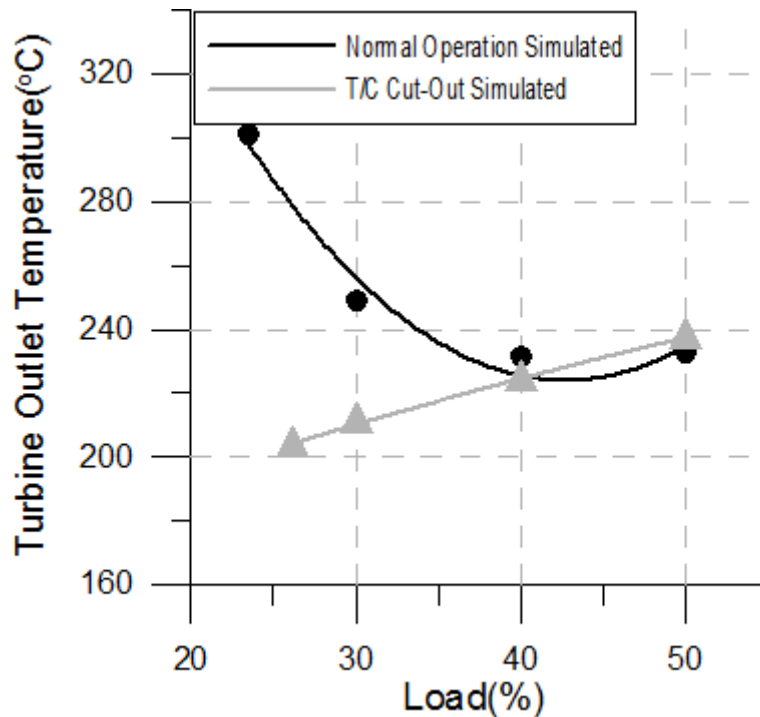
- Θερμοκρασία Καυσαερίων στην Είσοδο του Στροβίλου



Σχήμα 7.9: Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Παρατηρούμε πως η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου, συμπεριφέρεται όπως και η θερμοκρασία τους στην έξοδο του κυλίνδρου. Γεγονός αναμενόμενο, καθώς η αυξημένη πίεση στον κύλινδρο οδηγεί μετά την καύση σε αυξημένες θερμοκρασίες. Η υψηλή, αυτή, θερμική φόρτιση είναι και ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του T/C Cut-Out.

- Θερμοκρασία Καυσαερίων στην Έξοδο του Στροβίλου

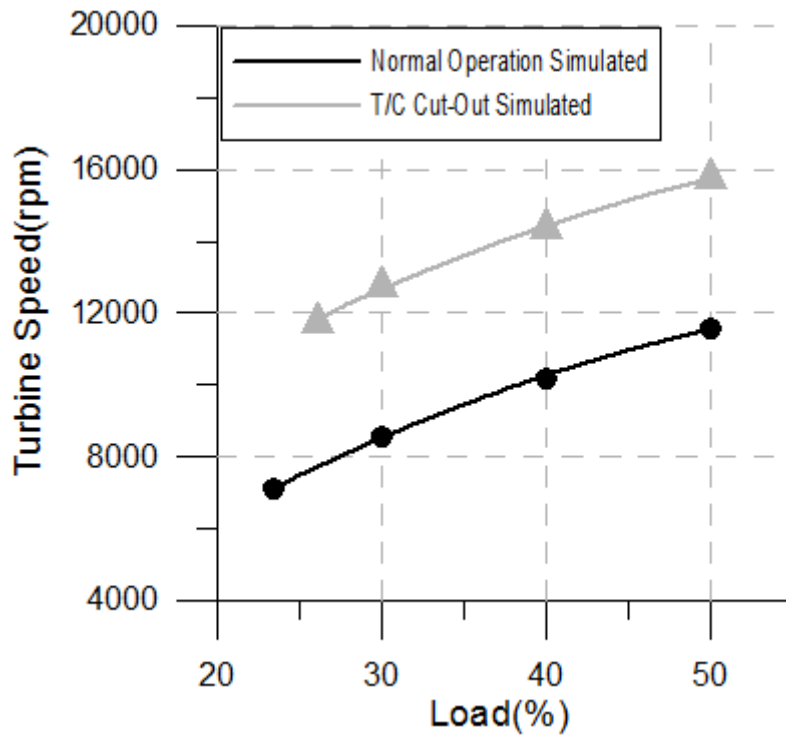


Σχήμα 7.10: Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Παρατηρούμε πως στα χαμηλά φορτία η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου είναι μικρότερη όταν αποκόπτουμε τον έναν υπερπληρωτή. Επιπλέον, εάν συγκρίνουμε τη πτώση της θερμοκρασίας στις δύο περιπτώσεις λειτουργίας, παρατηρούμε πως αυτή είναι μεγαλύτερη κατά τη λειτουργία με T/C Cut-Out σε σχέση με την κανονική λειτουργία της μηχανής, γεγονός το οποίο επαληθεύει την παραγωγή μεγαλύτερου έργου από τον υπερπληρωτή, το οποίο βοηθάει στη λειτουργία του συστήματος στροβίλο-υπερπληρωτή σε υψηλότερους λόγους πίεσης.

Συγκεκριμένα, στο 25% του ονομαστικού φορτίου, η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι μειωμένη κατά 40%, ενώ στο 50% είναι περίπου στα ίδια επίπεδα.

- Ταχύτητα Περιστροφής Στροβίλου

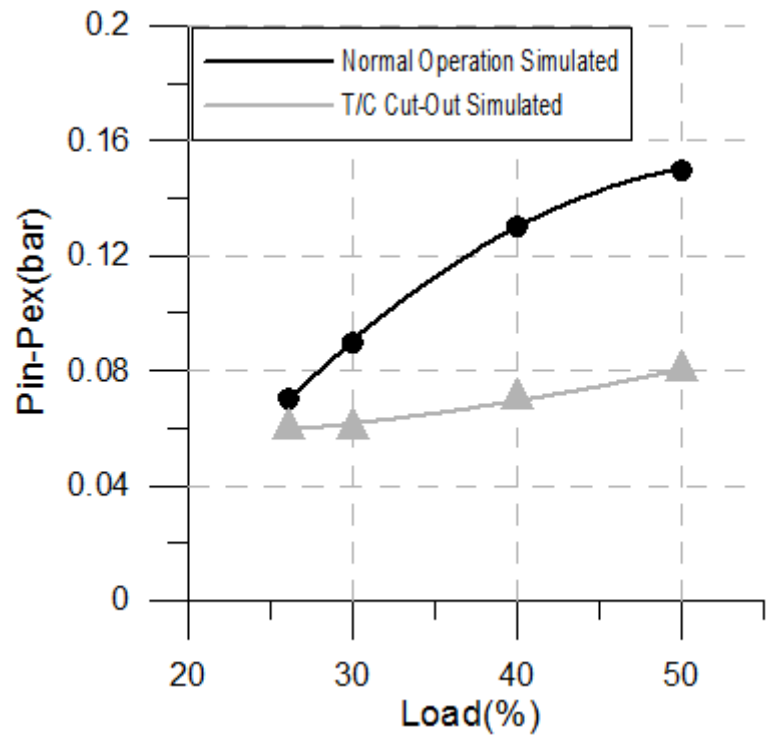


Σχήμα 7.11: Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής υπερπληρωτή μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Πλέον στο σύστημα λειτουργεί ο ένας υπερπληρωτής από τους δύο. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα να δέχεται εκείνος όλη την παροχή μάζας αέρα που απαιτείται για να λειτουργήσει η μηχανή στο ζητούμενο φορτίο. Παρατηρούμε, λοιπόν, πως η ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή είναι σχεδόν η διπλάσια από την ταχύτητα περιστροφής των δύο υπερπληρωτών κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.

Για αυτόν τον λόγο, υπολογίζουμε πως η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου αυξάνεται κατά 70% στο 25% του φορτίου, ενώ στο 40% η αύξηση αυτή μειώνεται στο 35%.

- Διαφορά Πίεσης Εισόδου και Εξόδου στον κύλινδρο



Σχήμα 7.12: Συγκριτικό διάγραμμα διαφοράς πίεσης εισόδου-εξόδου στον κύλινδρο, μεταξύ της κανονικής λειτουργίας και της λειτουργίας με T/C Cut-Out.

Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε πως η διαφορά της πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο του κυλίνδρου είναι μειωμένη κατά τη λειτουργία με αποκοπή του ενός υπερπληρωτή. Η παράμετρος αυτή, χαρακτηρίζεται αρκετά σημαντική, καθώς μας παρέχει μια εικόνα για την ποιότητα της απόπλυσης η οποία συμβαίνει στον κύλινδρο. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη η τιμή της διαφοράς αυτής, τόσο περισσότερη ροή αέρα υπάρχει από την είσοδο στην έξοδο του κυλίνδρου με αποτέλεσμα να συμβαίνει καλύτερη απόπλυση του κυλίνδρου.

## Κεφάλαιο 8

### Σύγκριση των τιμών της προσομοίωσης με τις αντίστοιχες των δοκιμών θαλάσσης

Στην παράγραφο αυτή, συγκρίνουμε τις τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση λειτουργίας με το λογισμικό, για τις ταχύτητες και τα αντίστοιχα φορτία που έχουμε μετρήσει κατά τις Δοκιμές Θαλάσσης, με τις αντίστοιχες τιμές που έχουμε λάβει κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πλοίου.

Τα μεγέθη τα οποία συγκρίνουμε είναι τα παρακάτω:

- Πίεση καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγής(Exhaust Manifold Pressure)
- Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του κυλίνδρου(Cylinder Temperature)
- Παραγόμενη Ισχύς(Power)
- Πίεση Αέρα Σάρωσης(Scavenging Pressure)
- Ταχύτητα Περιστροφής Κινητήρα(Engine Speed)
- Ταχύτητα Περιστροφής Στροβίλου(Turbine Speed)
- Θερμοκρασία Καυσαερίων στην Είσοδο του Στροβίλου(Turbine Inlet Pressure)
- Θερμοκρασία Καυσαερίων στην Έξοδο του Στροβίλου(Turbine Outlet Pressure)

Κατασκευάζουμε, λοιπόν, τον παρακάτω πίνακα για εποπτικούς λόγους:

Αρχικά για την περίπτωση της κανονικής λειτουργίας του πλοίου. (Σχήμα 8.1)

	<i>Load(%)</i>	<i>CT(°C)</i>	<i>ES(rpm)</i>	<i>EMP(bar)</i>	<i>P(kW)</i>	<i>SP(bar)</i>	<i>TIT(°C)</i>	<i>TOT(°C)</i>	<i>TS(rpm)</i>
<i>Simulation</i>	29	275,8	60	0,42	5411	0,48	334	262,8	7826,4
<i>Simulation</i>	50	287,4	75	1,07	9330,5	1,19	365,1	249,7	11582
<i>Simulation</i>	75	290,3	86	1,86	13846,5	2,07	370	230	14000
<i>Simulation</i>	100	345,5	93,8	2,59	18661	2,87	432	256,9	15812,1
<i>Sea Trials</i>	29	312	60,2	0,49	5418	0,62	350	280	8580
<i>Sea Trials</i>	50	330	72,4	1,05	9329	1,24	370	260	11720
<i>Sea Trials</i>	75	335	82,6	1,9	14300	2,14	380	238	14173
<i>Sea Trials</i>	100	360	90,9	2,73	19300	3	430	260	15500

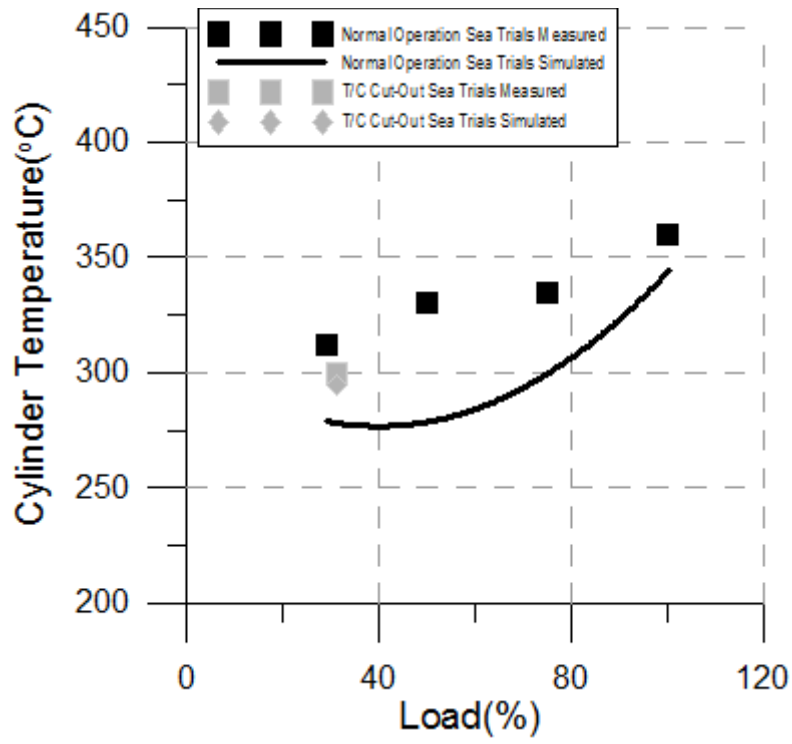
Σχήμα 8.1: Πίνακας βασικών λειτουργικών παραμέτρων. Τιμές κατά την κανονική λειτουργία του κινητήρα με προσομοίωση και πειραματικά μετρημένες

Και στη συνέχεια για λειτουργία με αποκοπή ενός από τους δύο υπερπληρωτές. (Σχήμα 8.2)

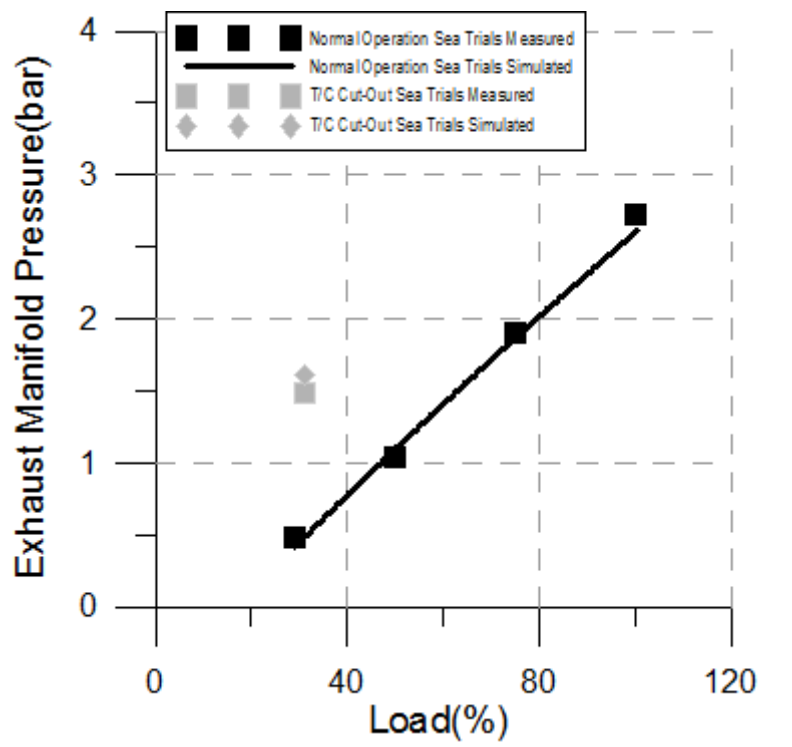
	<i>Load(%)</i>	<i>CT(°C)</i>	<i>ES(rpm)</i>	<i>EMP(bar)</i>	<i>P(kW)</i>	<i>SP(bar)</i>	<i>TIT(°C)</i>	<i>TOT(°C)</i>	<i>TS(rpm)</i>
<i>Simulation</i>	<i>31</i>	<i>295</i>	<i>60.2</i>	<i>1.61</i>	<i>5958.2</i>	<i>1.67</i>	<i>324.9</i>	<i>213.9</i>	<i>12892.4</i>
<i>Sea Trials</i>	<i>31</i>	<i>300</i>	<i>63.9</i>	<i>1,49</i>	<i>5903</i>	<i>1,55</i>	<i>331</i>	<i>220</i>	<i>12900</i>

Σχήμα 8.2: Πίνακας βασικών λειτουργικών παραμέτρων. Τιμές, κατά τη λειτουργία του κινητήρα με T/C Cut-Out, με προσομοίωση και πειραματικά μετρημένες

Παρακάτω, παραθέτουμε τα συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των δεδομένων τιμών από τις δοκιμές θαλάσσης και των υπολογισμένων από το λογισμικό προσομοίωσης.

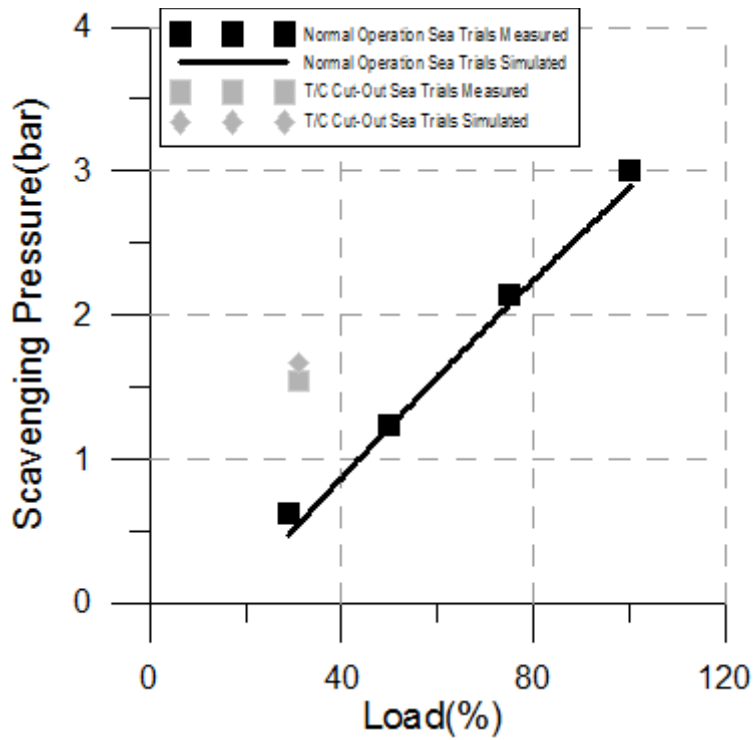


Σχήμα 8.3: Συγκριτικό διάγραμμα Θερμοκρασίας καυσαερίων στην έξοδο του κυλίνδρου

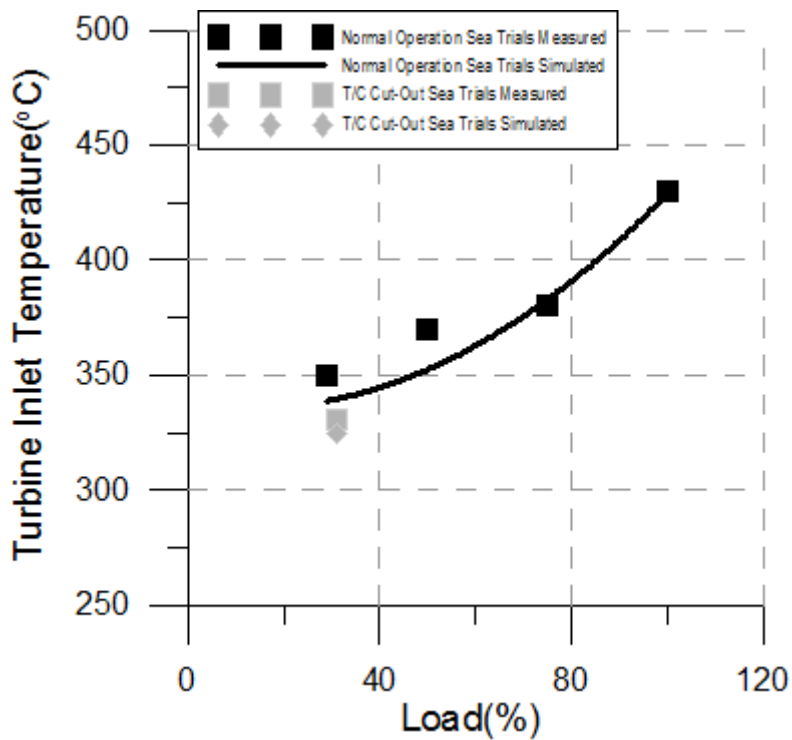


Σχήμα 8.4: Συγκριτικό διάγραμμα πίεσης καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγής

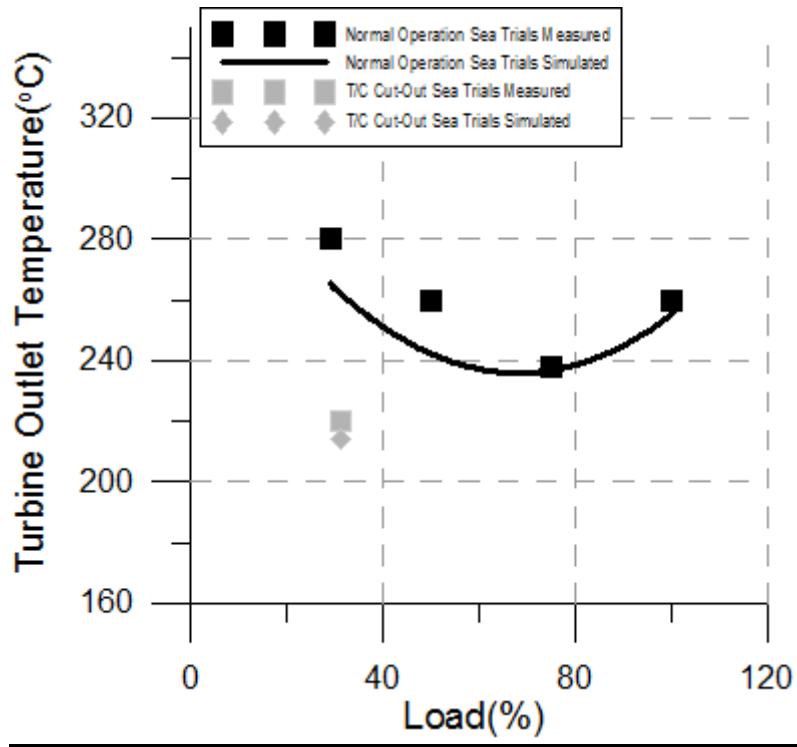




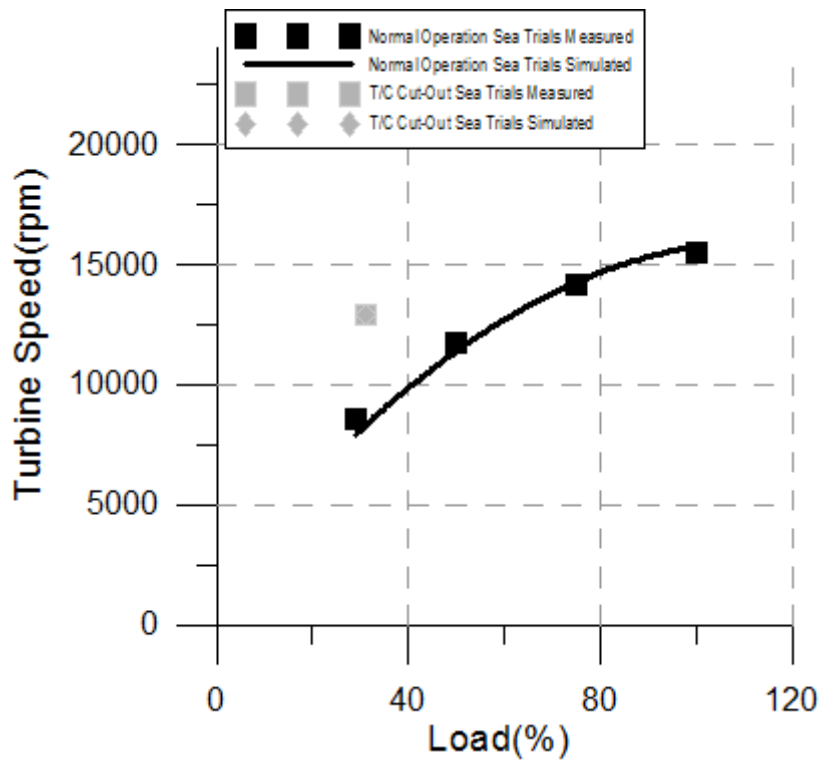
Σχήμα 8.5: Συγκριτικό διάγραμμα πίεσης σάρωσης κυλίνδρου



Σχήμα 8.6: Συγκριτικό διάγραμμα Θερμοκρασίας καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου



Σχήμα 8.7: Συγκριτικό διάγραμμα Θερμοκρασίας καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου



Σχήμα 8.8: Συγκριτικό διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής υπερπληρωτή

## Συμπεράσματα

Στα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε πως οι μετρημένες τιμές, των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων, κατά τις δοκιμές θαλάσσης συμπίπτουν με αυτές που υπολογίζουμε με το λογισμικό προσομοίωσης για τις αντίστοιχες τιμές του φορτίου λειτουργίας, με ή χωρίς την αποκοπή του ενός υπερπληρωτή. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πως το πακέτο προσομοίωσης μας παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με τη λειτουργία του κινητήρα, όχι μόνο υπό συνθήκες εργαστηριακών δοκιμών, αλλά και κατά τη διάρκεια της πλεύσης του πλοίου.

Όπως παρατηρούμε σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα, οι τιμές που υπολογίζουμε από το πακέτο προσομοίωσης πλησιάζουν αρκετά, αυτές που μας παρέχει το λογισμικό προσομοίωσης και είναι υπολογισμένα από μετρήσεις κατά τη διάρκεια πλεύσης.

Μικρές αποκλίσεις παρουσιάζονται μόνο κατά τη λειτουργία της μηχανής σε χαμηλά φορτία, μικρότερα του 25%. Αυτό οφείλεται στη μείωση της προβλεπτικής ικανότητας του λογισμικού στην περιοχή αυτή, καθώς υπάρχει έλλειψη πειραματικών στοιχείων σχετικά με τη λειτουργία του στρόβιλου και του συμπιεστή γύρω από την περιοχή αυτή. Έτσι, η βαθμονόμηση είναι αδύνατη σε αυτό το εύρος φορτίων.

Πιο συγκεκριμένα:

- Για την θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του κυλίνδρου, παρατηρούμε μια απόκλιση της τάξης του 9% στο 30% του ονομαστικού φορτίου λειτουργίας και μια απόκλιση της τάξης του 6% στο 45%.
- Για την θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο, η απόκλιση αυτή είναι μικρότερη και πιο συγκεκριμένα στο 5% για λειτουργία στο 30%, ενώ στο 45% η απόκλιση είναι 6%.
- Τέλος, μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρούμε στην θερμοκρασία εξόδου από το στρόβιλο. Εδώ, στο 30% του ονομαστικού φορτίου, η απόκλιση είναι 12%, ενώ στο 45%, έχουμε απόκλιση της τάξης του 9%.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πως το πρόγραμμα προσομοίωσης, έχει την ικανότητα να προβλέπει τη λειτουργία της μηχανής, όταν αυτή λειτουργεί κανονικά αλλά και με αποκοπή του κινητήρα, κατά τη διάρκεια της πλεύσης του πλοίου.

## Κεφάλαιο 9

### Διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής του χρονισμού έγχυσης

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της εφαρμογής της πρακτικής της μεθόδου του T/C Cut-Out, είναι η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας στον κύλινδρο, αλλά και η μεγάλη αύξηση της πίεσης καύσης. Οι δύο αυτές λειτουργικές παράμετροι, δύνανται να προκαλέσουν μεγάλα προβλήματα στη λειτουργία του κινητήρα, καθώς οι υψηλές τιμές τους δηλώνουν την έντονη καταπόνηση του κυλίνδρου και την ανεπιθύμητη μείωση των διαθέσιμων εργατωρών του.

Για αυτόν τον λόγο, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, θα εξετάσουμε την επίδραση την οποία έχει η μεταβολή του χρονισμού έγχυσης του καυσίμου στον κύλινδρο, με τελικό σκοπό τη μείωση της μέγιστης πίεσης καύσεως και επομένως της καταπόνησης του κινητήρα.

Η διαδικασία την οποία ακολουθούμε είναι η εξής:

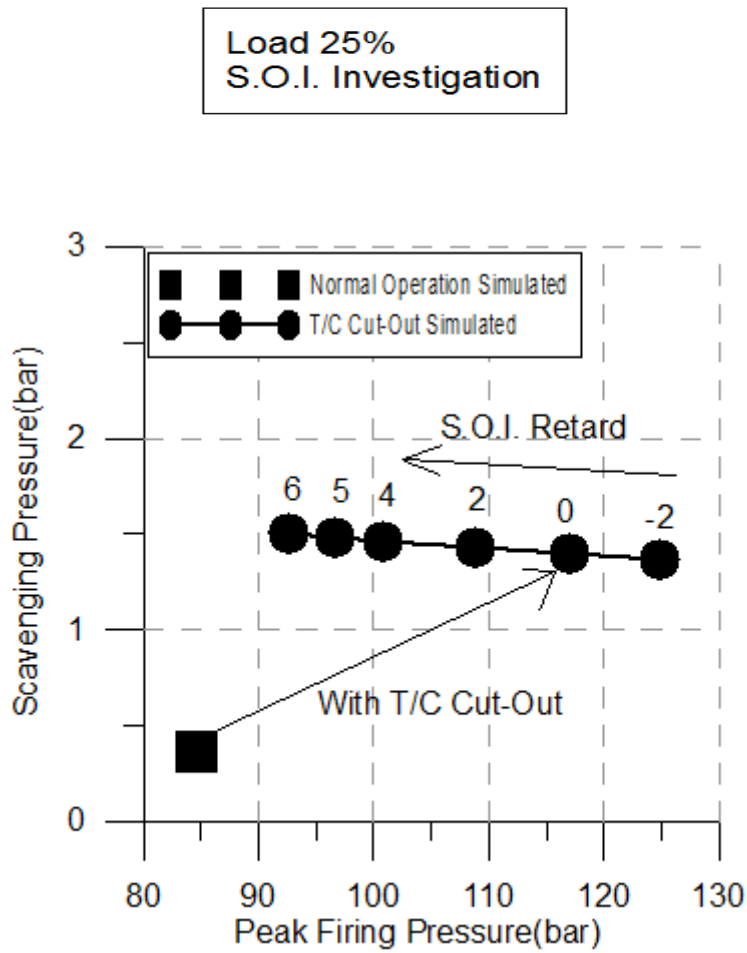
Με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης, υπολογίζουμε τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα, κατά την κανονική λειτουργία του, αλλά και κατά την εφαρμογή της αποκοπής του ενός από τους δύο υπερπληρωτές. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τα φορτία 25% και 40%. Στη συνέχεια για εποπτικούς λόγους παραθέτουμε τον αντίστοιχο πίνακα.

#### 9.1 Διερεύνηση για λειτουργία στο 25% του Ονομαστικού Φορτίου

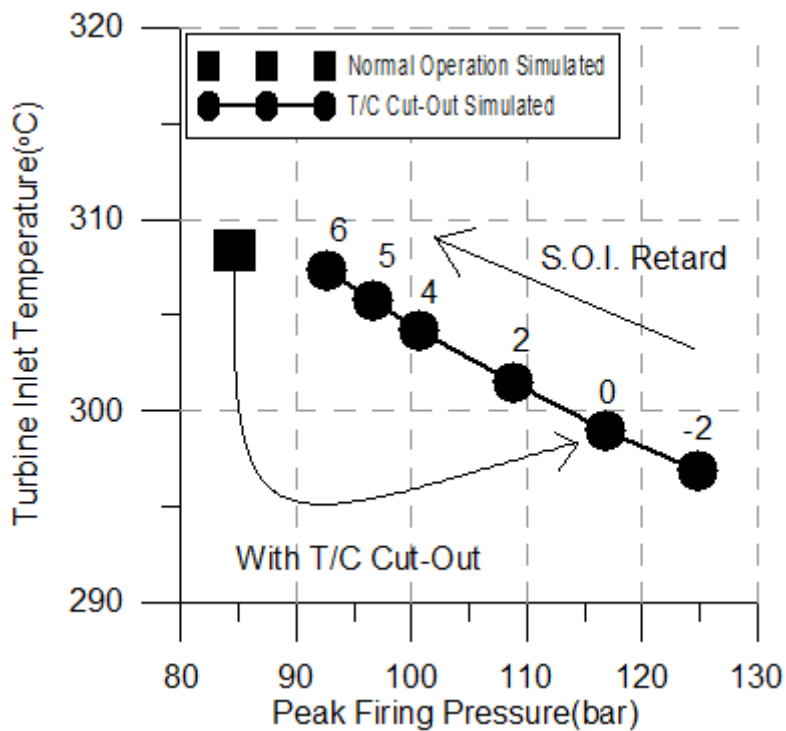
Έτσι, για λειτουργία στο 25% του ονομαστικού φορτίου:

	<i>Load(%)</i>	<i>S.O.I.(°)</i>	<i>FP(bar)</i>	<i>TIT(°)</i>	<i>SP(bar)</i>	<i>bsfc(g/kWh)</i>	<i>Δbsfc</i>	<i>TS(rpm)</i>
<i>Normal Operation</i>	25	0	84,6	308,4	0,36	189,8	0	7269,4
<i>T/C Cut-Out</i>	25	-2	124,9	296,9	1,37	177	-12,8	11658,4
<i>T/C Cut-Out</i>	25	0	116,9	299	1,4	178,6	-11,2	11765,8
<i>T/C Cut-Out</i>	25	2	108,8	301,5	1,43	180,8	-9	11893
<i>T/C Cut-Out</i>	25	4	100,7	304,2	1,46	183,8	-6	12036,5
<i>T/C Cut-Out</i>	25	5	96,6	305,8	1,48	185,6	-4,2	12115,3
<i>T/C Cut-Out</i>	25	6	92,6	307,3	1,5	187,6	-2,2	12195,1

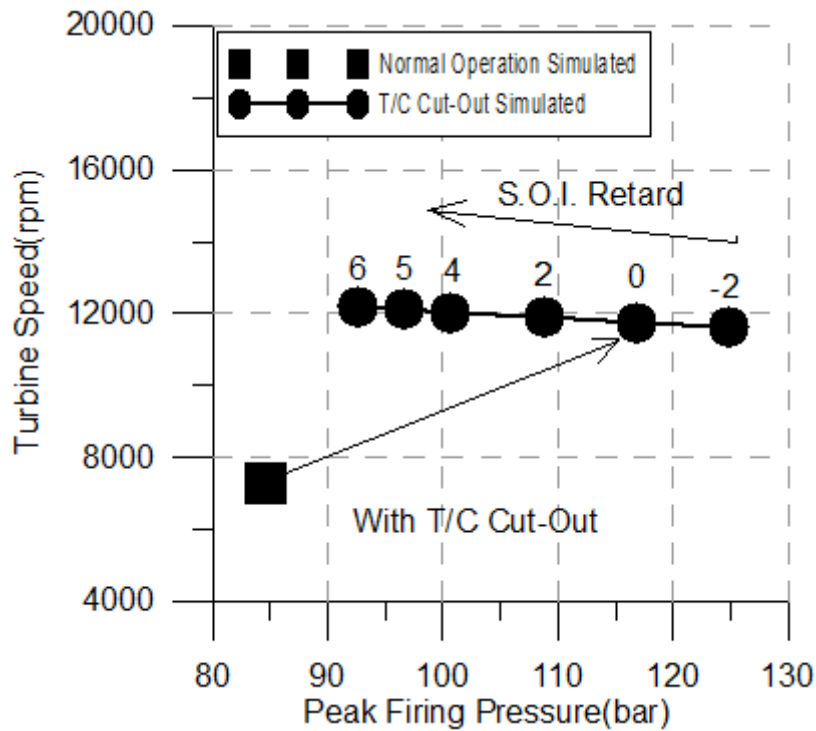
Σχήμα 9.1: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης για το 25% του φορτίου, για διαφορετικές χρονικές στιγμές έναρξης της έγχυσης καυσίμου.



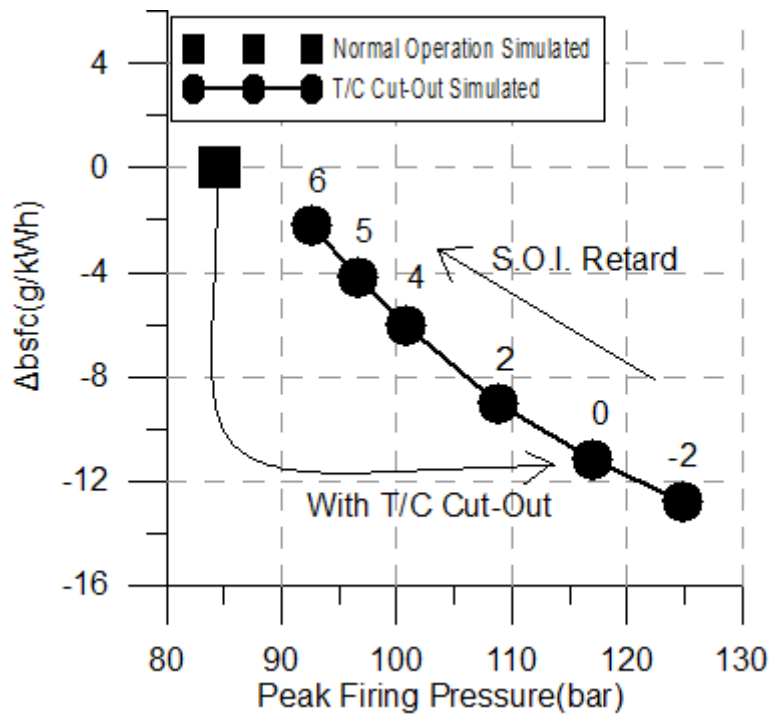
Σχήμα 9.2: Διάγραμμα επίδρασης μεταβολής χρονισμού έγχυσης στην πίεση σάρωσης συναρτήσει της μέγιστης πίεσης καύσης.



Σχήμα 9.3: Διάγραμμα επίδρασης μεταβολής χρονισμού έγχυσης στην θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου συναρτήσει της μέγιστης πίεσης καύσης.



Σχήμα 9.4: Διάγραμμα επίδρασης μεταβολής χρονισμού έγχυσης στην ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή συναρτήσει της μέγιστης πίεσης καύσης.



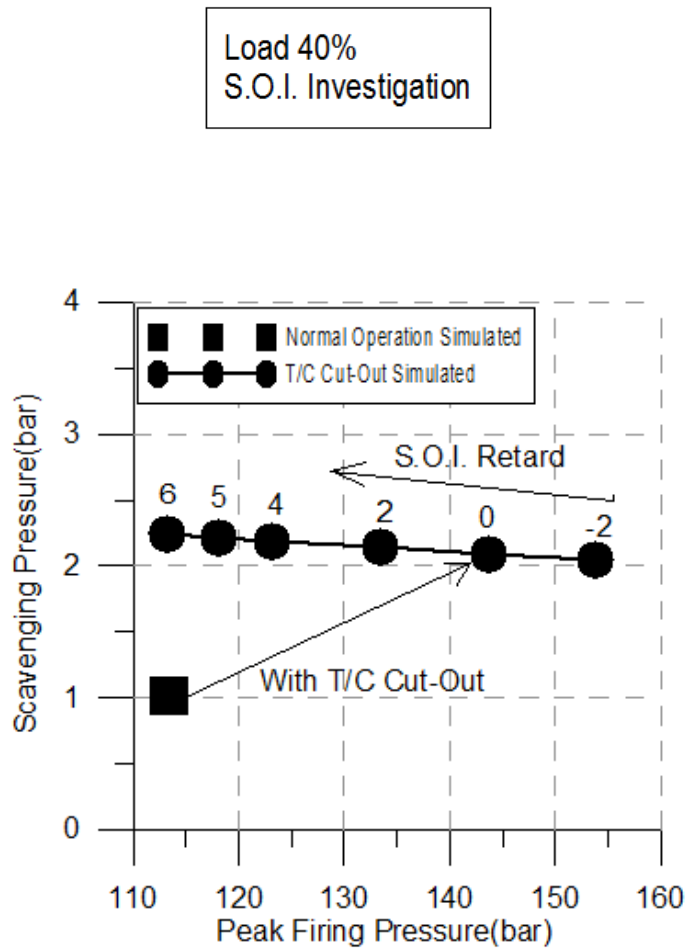
Σχήμα 9.5: Διάγραμμα επίδρασης μεταβολής χρονισμού έγχυσης στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της μέγιστης πίεσης καύσης.

## 9.2 Διερεύνηση για λειτουργία στο 40% του Ονομαστικού Φορτίου

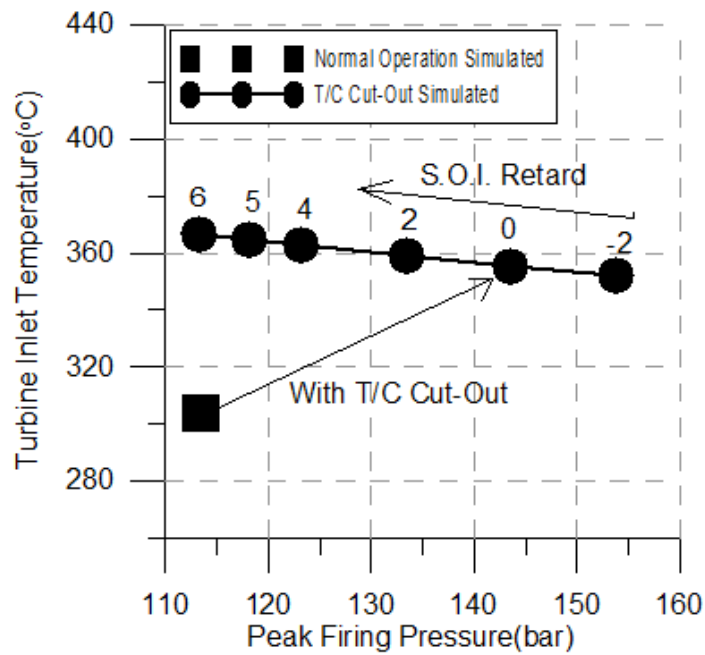
Όμοια για λειτουργία της μηχανής στο 40 % του ονομαστικού φορτίου:

	<u>Load(%)</u>	<u>S.O.I.(°)</u>	<u>FP(bar)</u>	<u>TIT(°)</u>	<u>SP(bar)</u>	<u>bsfc(g/kWh)</u>	<u>Δbsfc</u>	<u>TS(rpm)</u>
<i>Normal Operation</i>	40	113,4	304	1,02	178,3	0	10186,9	113,4
<i>T/C Cut-Out</i>	40	153,8	352,3	2,05	173,5	-4,8	14212,9	153,8
<i>T/C Cut-Out</i>	40	143,6	355,5	2,09	175,5	-2,8	14343,1	143,6
<i>T/C Cut-Out</i>	40	133,4	358,8	2,14	178,2	-0,1	14486,5	133,4
<i>T/C Cut-Out</i>	40	123,2	362,6	2,19	181,6	3,3	14641,4	123,2
<i>T/C Cut-Out</i>	40	118,1	364,6	2,22	183,6	5,3	14723,1	118,1
<i>T/C Cut-Out</i>	40	113,2	366,7	2,25	185,7	7,4	14806,7	113,2

Σχήμα 9.6: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης για το 40% του φορτίου, για διαφορετικές χρονικές στιγμές έναρξης της έγχυσης καυσίμου .

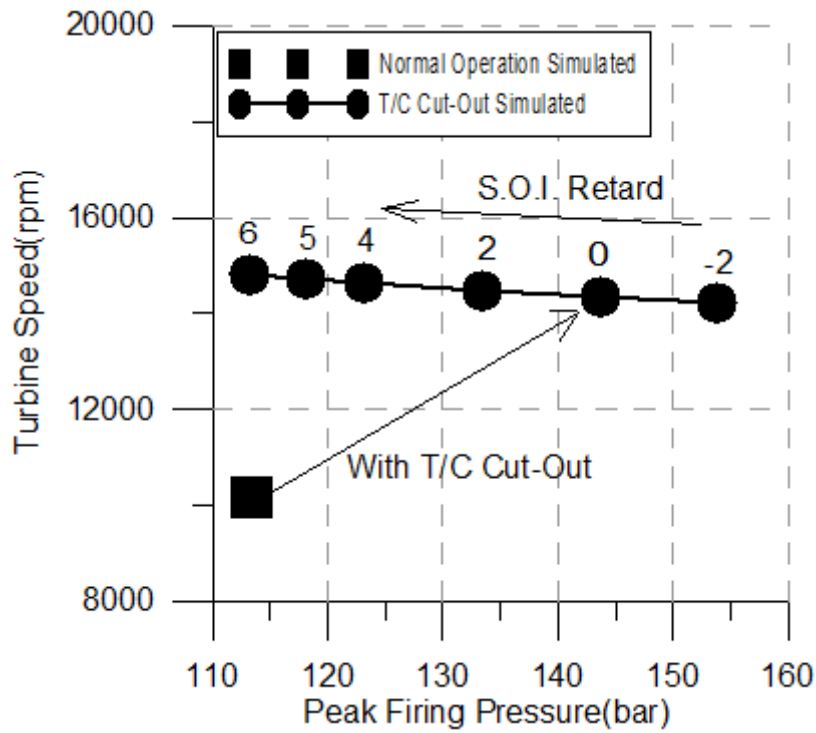


Σχήμα 9.7: Διάγραμμα επίδρασης μεταβολής χρονισμού έγχυσης στην πίεση σάρωσης συναρτήσει της μέγιστης πίεσης καύσης.

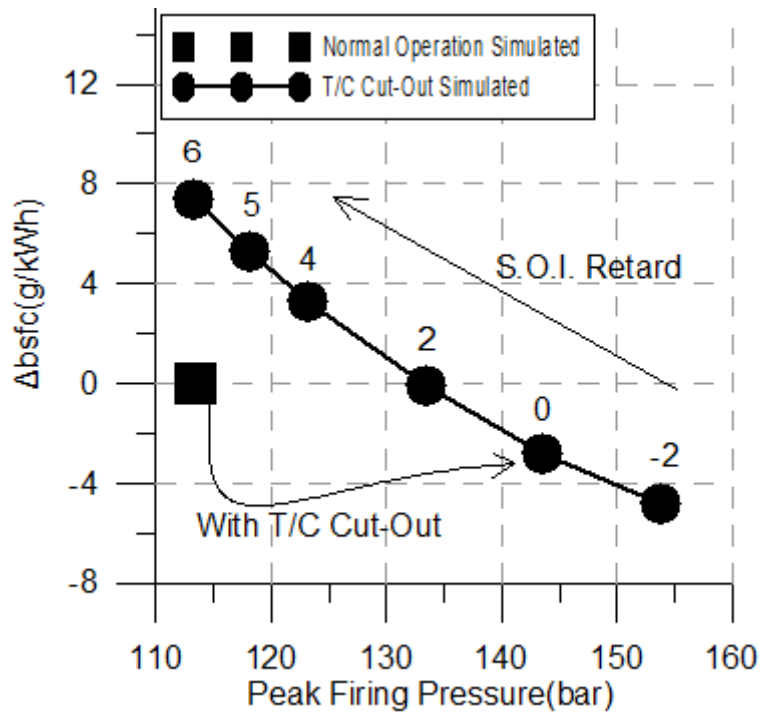


Σχήμα 9.8: Διάγραμμα επίδρασης μεταβολής χρονισμού έγχυσης στην θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου συναρτήσει της μέγιστης πίεσης καύσης.





Σχήμα 9.9: Διάγραμμα επίδρασης μεταβολής χρονισμού έγχυσης στην ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή συναρτήσει της μέγιστης πίεσης καύσης.



Σχήμα 9.10: Διάγραμμα επίδρασης μεταβολής χρονισμού έγχυσης στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της μέγιστης πίεσης καύσης.

## Συμπεράσματα

Για τη λειτουργία στο 25% του ονομαστικού φορτίου, παρατηρούμε πως με την αποκοπή του υπερπληρωτή έχουμε αύξηση της μέγιστης πίεσης καύσης κατά 40%. Για αυτόν τον λόγο, μεταβάλλουμε το χρονισμό της έγχυσης του καυσίμου στον κύλινδρο. Παρατηρούμε πως:

- Η πίεση σάρωσης, δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, για έγχυση κατά τη χρονική στιγμή  $6^\circ$  γωνίας στροφάλου, έχουμε αύξηση της πίεσης κατά 6%, ενώ η μείωση της μέγιστης πίεσης καύσης είναι 26% σε σχέση με την έγχυση καυσίμου κατά τη χρονική στιγμή  $0^\circ$  γωνίας στροφάλου.
- Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου αυξάνει κατά 3% με την ίδια αλλαγή της χρονικής στιγμής της έγχυσης.
- Η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου παραμένει σταθερή με τη μεταβολή της χρονικής στιγμής της έγχυσης.

Για λειτουργία στο 40% του ονομαστικού φορτίου της μηχανής, παρατηρούμε πως με την αποκοπή του υπερπληρωτή παρουσιάζεται αύξηση της μέγιστης πίεσης καύσης κατά 26%. Έτσι, μεταβάλλοντας το χρονισμό της έγχυσης του καυσίμου στον κύλινδρο από τη χρονική στιγμή 0 γωνίας στροφάλου σε 6 γωνίας στροφάλου, πετυχαίνουμε μείωση της μέγιστης πίεσης καύσης κατά 26% επαναφέροντάς την στα επίπεδα της κανονικής λειτουργίας του κινητήρα. Παρατηρούμε, όμως, πως:

- Η πίεση σάρωσης αυξάνεται κατά 7,5% με τη μεταβολή του χρονισμού έγχυσης του καυσίμου.
- Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου αυξάνει κατά 3% με την ίδια αλλαγή της χρονικής στιγμής της έγχυσης.
- Η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου μεταβάλλεται κατά 3% με τη μεταβολή της χρονικής στιγμής της έγχυσης.

Παρατηρούμε, λοιπόν, πως μπορούμε να αντισταθμίσουμε το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αποκοπής του υπερπληρωτή, την αύξηση της μέγιστης πίεσης καύσης, μεταβάλλοντας τη χρονική στιγμή της έναρξης της έγχυσης του καυσίμου. Μοναδικό κόστος, από τη μεταβολή αυτή, είναι η αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, η οποία κατά τη λειτουργία στο 40% του φορτίου είναι σημαντική.

## Κεφάλαιο 10

### Αποτίμηση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μια θεωρητική αλλά και πειραματική διερεύνηση στη λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel υπό συνθήκες αποκοπής του ενός από τους δύο υπερπληρωτές του. Η συγκεκριμένη μέθοδος, εφαρμόζεται στα πλαίσια της πρακτικής του slow steaming, δηλαδή της πλεύσης σε χαμηλές ταχύτητες και επομένως της λειτουργίας του κινητήρα σε χαμηλά φορτία. Σκοπός της τεχνικής αυτής, είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου αλλά και της εκπομπής ρύπων.

Για να πετύχουμε τη προαναφερθείσα διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης το οποίο έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο MEK του ΕΜΠ, το οποίο, πριν τη χρήση για την πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας του κινητήρα, το αξιολογήθηκε όσον αφορά την προβλεπτική του ικανότητα. Η συγκεκριμένη αξιολόγηση, πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που μας παρέχει το πρόγραμμα με δεδομένα τα οποία ελήφθησαν από εργοστασιακές δοκιμές (shop tests) και από δοκιμές κατά τη διάρκεια της πλεύσης (sea trials).

Με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης, το οποίο βασίζει τη λειτουργία του σε υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα για τη λειτουργία της μηχανής, προσδιορίστηκε η συμπεριφορά και να υπολογίστηκαν οι τιμές βασικών λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα, όπως η πίεση σάρωσης, η μέγιστη πίεση καύσης κλπ. Να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο, πως παρουσιάζεται μείωση της προβλεπτικής ικανότητας του λογισμικού σε φορτία χαμηλότερα του 25%, λόγω έλλειψης πειραματικών στοιχείων για βαθμονόμηση στην περιοχή αυτή. Λαμβάνοντας ως δεδομένες τις εργοστασιακές δοκιμές του κινητήρα καθώς και τις δοκιμές τις οποίες κάναμε κατά τη διάρκεια πλεύσης, κάναμε σύγκριση με τις τιμές που μας παρέχει το λογισμικό της προσομοίωσης και οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι ο βαθμός αξιοπιστίας του είναι ικανοποιητικός.

Στη συνέχεια, εφόσον έχουμε καταλήξει στο παραπάνω συμπέρασμα, προσδιορίσαμε τα οφέλη και τη γενικότερη επίδραση την οποία μας παρέχει η αποκοπή του ενός από τους δύο υπερπληρωτές, προσομοιώνοντας τη λειτουργία του κινητήρα εφαρμόζοντας το T/C Cut-Out και χωρίς αυτό. Όπως αναφέρεται λεπτομερέστερα στο κεφάλαιο 7, η εφαρμογή της πρακτικής του T/C Cut-Out, μειώνει σε μεγάλο βαθμό την ειδική κατανάλωση καυσίμου της μηχανής και βελτιώνει την ποιότητα της καύσης στα χαμηλά φορτία, καθώς αυξάνει την πίεση σάρωσης και συμπίεσης του κινητήρα. Βασικό του μειονέκτημα, όμως, είναι η μεγάλη αύξηση της μέγιστης πίεσης καύσης, η οποία συνεπάγεται αύξηση των θερμοκρασιών και της θερμικής φόρτισης του κινητήρα και των επιμέρους υποσυστημάτων του.

Έπειτα, με δεδομένο ότι η εφαρμογή της μεθόδου του T/C Cut-Out, αυξάνει δραματικά τη μέγιστη πίεση καύσης, διερευνήσαμε το κατά πόσο μπορεί να μεταβληθεί η πίεση αυτή, μεταβάλλοντας το χρονισμό έγχυσης του καυσίμου στον κύλινδρο. Τις απαραίτητες τιμές για τα βασικά λειτουργικά μεγέθη που παρουσιάζονται, τις πήραμε προσομοιώνοντας τη λειτουργία του κινητήρα στο λογισμικό προσομοίωσης, για συγκεκριμένα φορτία και για διάφορες γωνίες στροφάλου κατά της οποίες ξεκινά η έγχυση (Start Of Injection). Στο κεφάλαιο 9 αναλύουμε αναλυτικά τις επιπτώσεις τις οποίες έχει η αποκοπή του υπερπληρωτή στην μέγιστη πίεση καύσης. Στη συνέχεια, μεταβάλλουμε τον χρονικό σημείο έναρξης της έγχυσης (προπορεία έγχυσης) και παρατηρούμε πως και για τα δυο φορτία λειτουργίας τα οποία

διερευνήσαμε, δηλαδή το 25% και το 40% μείωση της προπορείας (δηλαδή καθυστέρηση στην έγχυση) έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Η μέγιστη πίεση καύσης μειώνεται.
- Η πίεση σάρωσης αυξάνεται.
- Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου αυξάνεται.
- Η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται.

Ύστερα από όλη αυτή τη διερεύνηση, μπορούμε πλέον να συμπεράνουμε τα οφέλη που προσφέρει η εφαρμογή της μεθόδου του slow steaming στην παγκόσμια οικονομία. Εάν αναλογιστούμε πως οι φυσικοί πόροι και πιο συγκεκριμένα τα καύσιμα τα οποία απαιτούνται για την κίνηση είναι πεπερασμένα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η αργή πλεύση θα είναι μία πολύ σημαντική αλλαγή στην παγκόσμια ναυτιλία, η οποία αποτελεί πλέον τον κανόνα που πρόκειται να εφαρμοσθεί από τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Παρατηρούμε πως με τη μέθοδο του T/C Cut-Out, κάνουμε εφικτή την εφαρμογή της πρακτικής του slow steaming και πετυχαίνουμε αυτό που ζητούν οι ναυτιλιακές εταιρίες, δηλαδή μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών ρύπων. Το μόνο «τίμημα» από τη μέθοδο αυτή, είναι η αυξημένη πίεση καύσης και η αυξημένη θερμική φόρτιση των διαφόρων υποσυστημάτων του κινητήρα. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, όπως μελετήσαμε, μπορούμε να μεταβάλλουμε το χρονικό σημείο της έναρξης της έγχυσης του καυσίμου στον κύλινδρο, η οποία μειώνει αισθητά την μέγιστη πίεση καύσης με ελάχιστη μεταβολή των υπόλοιπων λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα.



## Βιβλιογραφία

1. *Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.*, Κ.Δ. Ρακόπουλος, Εκδόσεις «Γρ.Φούντας», Αθήνα 1998
2. *Καύση-Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.*, Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας, Εκδόσεις «Γρ. Φούντας», Αθήνα 1998
3. “Slow steaming – a viable long-term option?”, A.Wiesmann, Wärtsilä Services, February 2010
4. On Modeling of a Ship Propulsion System for Control Purposes, A.T. Karlsen, Master of Science in Engineering Cybernetics, June 2012
5. Chief engineer's hands-on experience of slow steaming operation, P. Kowalak
6. DOOSAN T/C Cut-Out System, Doosan Engine
7. Turbocharger Cut-off System Benefits Engine Performance, MAN Diesel Press Release, July 2009
8. “Slow steaming and turbocharger cut-out”, R. Baechi, *ABB Charge!*, February 2012, p. 20-21
9. “Study of Slow Steaming Practices in the Global Shipping Industry”, *Diesel Facts*, February 2012, p.8
10. “More versatile operation while assuring compliance with regulation”, MAN Diesel & Turbo
11. “Slow Steaming: The full story”, MAERSK
12. “The guide to slow steaming on ships”, Chief Engineer M. Sanguri, Marine Insight, December 2012
13. “Current Trends in the Development of Large Two-Stroke Marine Diesel Engines in the Light of Significantly Changing Market Requirements and Environmental Regulations”, SNAME Greece TM3 2013/14 / German Weisser, November 2013
14. *Encyclopedia of the History of Technology*, I.McNeil, London: Routledge, 1990