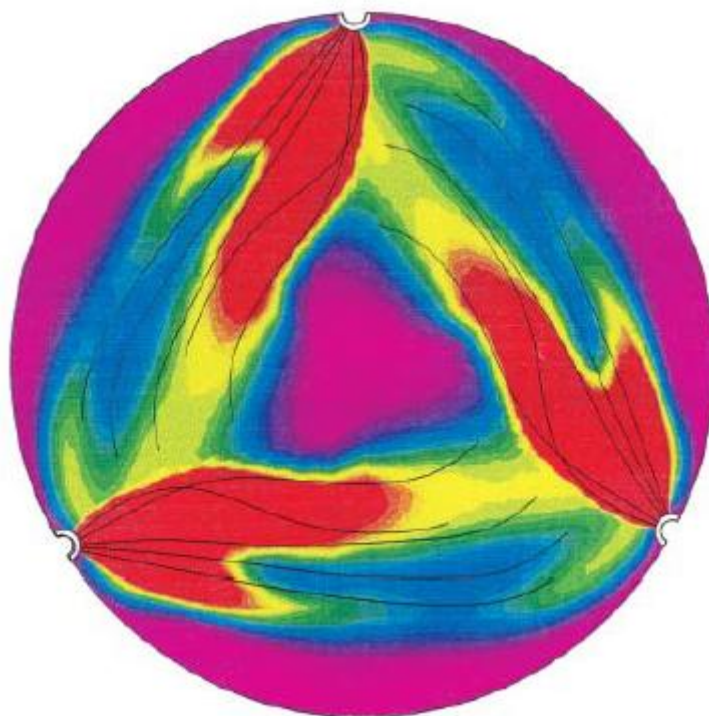


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Χριστίνας Μαλικούτη
ΑΜ: 08107042

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ
ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΚΑΥΣΗΣ
ΣΕ ΔΙΧΡΟΝΟ ΝΑΥΤΙΚΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ



Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Α. Καϊκτσίης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη: Ν. Κυρτάτος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χρ. Παπαδόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

*Πηγή: “Wärtsilä RT-flex96-C and RT-A96-C engine technology review” [1].

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας φτάνουν στο τέλος τους οι προπτυχιακές μου σπουδές στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Θα ήθελα λοιπόν, να ευχαριστήσω όλους εκείνους, οι οποίοι με βοήθησαν, άλλοι σε μεγαλύτερο και άλλοι σε μικρότερο βαθμό, στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Πρώτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που όλα αυτά τα χρόνια στήριξε τις επιλογές μου και πάντα προσπαθεί να μου δίνει τη σωστή καθοδήγηση. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Α. Καϊκτσή και στον επιστημονικό συνεργάτη κ. Κ. Αϊβαλή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν στο πλαίσιο της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες της Σχολής κ.κ. Π. Κοντούλη, Δ. Καζαγκά και Ε. Πανανάκη για τη βοήθειά τους. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ν. Κυρτάτο και το Λέκτορα κ. Χρ. Παπαδόπουλο, ως διδάσκοντες και μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου Φ. Παπούλια, Γ. Μιχαλάκο και Λ. Νικολόπουλο, για τη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κ. Αλέξανδρο Α. Λιβάνιο, Τεχνικό Διευθυντή της Prosperity Bay Shipping Co.Ltd., για τις χρήσιμες πληροφορίες και συμβουλές, που μου παρείχε, σε τεχνικά θέματα ναυτικών κινητήρων.

Οι αέριοι ρύποι που εκπέμπουν οι ναυτικοί κινητήρες Diesel αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization - IMO) και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν θεσπίσει καινούργια μέτρα και περιορισμούς για τις εκπομπές αερίων ρύπων, ώστε η λειτουργία των ναυτικών κινητήρων να αποβεί φιλικότερη για το περιβάλλον και τον άνθρωπο, χωρίς ταυτόχρονα να επηρεάζεται η αξιοπιστία και η απόδοσή αυτών. Σήμερα, η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) αποτελεί ένα αξιόπιστο μέσο για τη μελέτη και βελτίωση της θερμορρευστομηχανικής των ναυτικών κινητήρων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η ανάπτυξη αριθμητικού πλέγματος για την προσομοίωση του μεγάλου δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel RT-flex96C της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland, με διάμετρο και διαδρομή εμβόλου 0.96 m και 2.5 m, αντίστοιχα. Η μελέτη αυτή χωρίζεται σε δύο στάδια: (α) δημιουργία αριθμητικού πλέγματος για τη γεωμετρία του κινητήρα και (β) προσομοίωση της ροής και καύσης, για την περιοχή πλήρους φορτίου, με χρήση του κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3.

Αρχικά, η αποτύπωση της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης του κινητήρα και η δημιουργία του αρχικού αριθμητικού πλέγματος πραγματοποιείται μέσω της ρουτίνας δημιουργίας πλέγματος του κώδικα KIVA-3 (ρουτίνα “k3prep”). Η ρουτίνα χαρακτηρίζεται από κάποια μειονεκτήματα, και χρήζει βελτιώσεων. Για τον λόγο αυτόν, αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία μια εναλλακτική μεθοδολογία δημιουργίας αριθμητικών πλεγμάτων, η οποία περιλαμβάνει τη σύζευξη: (α) της ρουτίνας “k3prep”, (β) του λογισμικού GMSH, και (γ) του λογισμικού Octave. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε απέδωσε πληρέστερα τη γεωμετρία του κινητήρα RT-flex96C, και αποδείχτηκε εν γένει καταλληλότερο για αντίστοιχες εφαρμογές δημιουργίας πλέγματος σε εφαρμογές μεγάλων κινητήρων.

Στην παρούσα εργασία, έγινε μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος και χρονικού βήματος, στο πλαίσιο της οποίας χρησιμοποιήθηκαν, ως μέτρο σύγκρισης, και πειραματικά αποτελέσματα. Ακολούθως, μελετήθηκε η λειτουργία του κινητήρα RT-flex96C στην περιοχή του πλήρους φορτίου, συγκεκριμένα: (α) μια περίπτωση αναφοράς, χαρακτηριζόμενη από συνεχές προφίλ έγχυσης, (β) περιπτώσεις λειτουργίας στην περιοχή του πλήρους φορτίου, χαρακτηριζόμενες από διαφορετικά επίπεδα εγκάρσιας συστροφής του αέρα (swirl), και (γ) δύο περιπτώσεις χαρακτηριζόμενες από προέγχυση και κύρια έγχυση. Η παρούσα εργασία δημιουργεί τη βάση για περαιτέρω υπολογιστική μελέτη και βελτιστοποίηση του παρόντος δίχρονου ναυτικού κινητήρα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	I
ΣΥΝΟΨΗ.....	II
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΠΡΟΩΣΤΗΡΙΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	1
1.2 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ	2
1.2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	4
1.2.2 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO _x).....	6
1.2.3 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ (SO _x).....	7
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΧΡΟΝΟΣ ΝΑΥΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ DIESEL	9
2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	9
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΟΙΝΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	12
2.3 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΡΥΠΩΝ	14
2.3.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ NO _x	14
2.3.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΙΘΑΛΗΣ.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΧΡΟΝΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	16
3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C	16
3.1.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	17
3.1.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	19
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ	21
3.2.1 ΚΩΔΙΚΑΣ ΚΙΝΑ-3.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	24
4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ	24
4.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	26
4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΠΛΗΡΕΣ ΦΟΡΤΙΟ	33
4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ..	37
4.4.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ.....	38
4.4.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΖΙΜΟΥΘΙΑΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	39
4.4.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C	42
5.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	42
5.1.1 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	46
5.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΓΚΑΡΣΙΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ.....	48
5.2.1 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	52
5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	55
5.3.1 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΡΩΩΣΤΗΡΙΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Στη ναυτιλία, έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί διάφορες προωσθήριες εγκαταστάσεις, με σκοπό κυρίως την ελαχιστοποίηση του κόστους ανά μεταφορά τόνου φορτίου, για δεδομένη ακτίνα ενέργειας. Στη σύγχρονη εποχή που οι μηχανές εσωτερικής καύσης είναι το πλέον διαδεδομένο μέσο μετατροπής ενέργειας στις μεταφορές, η ναυτική μηχανολογία επικεντρώνεται στη χρήση εμβολοφόρων κινητήρων, κυρίως λόγω της υψηλής ενεργειακής τους απόδοσης. Στους εμβολοφόρους κινητήρες, αναπτύσσονται τέτοιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας εντός των κυλίνδρων, ώστε να συντελούν στην επίτευξη υψηλών βαθμών απόδοσης. Όλοι οι σύγχρονοι εμβολοφόροι κινητήρες είναι υπερπληρούμενοι, με αποτέλεσμα την υψηλή συγκέντρωση ισχύος.

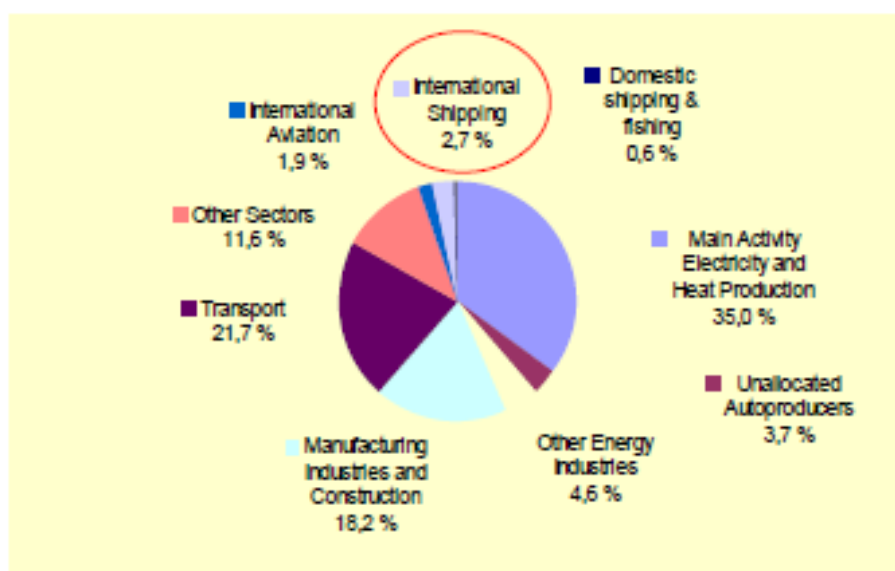
Στη ναυτιλία, χρησιμοποιούνται κυρίως κινητήρες Diesel, γιατί, εκτός των προτερημάτων τους ως εμβολοφόροι, δίνουν και τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί χαμηλής ποιότητας καύσιμο, μειώνοντας σημαντικά το κόστος λειτουργίας. Για δεδομένο καύσιμο, η ποιότητα της καύσης εξαρτάται από την πίεση έγχυσης και την πίεση εντός του κυλίνδρου, τη θερμοκρασία προθέρμανσης του καυσίμου και αυτή εντός του κυλίνδρου, το προφίλ έγχυσης, τον συνολικό λόγο καυσίμου-αέρα, καθώς και από τις ιδιαιτερότητες του τυρβώδους ροϊκού πεδίου, οι οποίες επηρεάζουν την ανάμιξη καυσίμου-αέρα [2].

Οι αργόστροφοι δίχρονοι κινητήρες Diesel έχουν κερδίσει ένα μεγάλο τμήμα της διεθνούς ναυτιλίας, με την αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύ να έχει αυξηθεί από 50% το 1970 σε 80% το 1998, για νέες κατασκευές. Αυτό οφείλεται στα κύρια πλεονεκτήματα των δίχρονων κινητήρων, που είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης (άνω του 50%) και το μειωμένο κόστος συντήρησης, στο οποίο συμβάλλει και η απουσία μειωτήρα. Ένας σημαντικός λόγος για την επικράτηση των δίχρονων κινητήρων είναι η εξάπλωση των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα οποία αντικαθιστούν τα πλοία γενικού φορτίου, σε συνδυασμό με τη μέχρι πριν λίγα χρόνια ανοδική τάση της ταχύτητας υπηρεσίας και του μεγέθους των πλοίων. Έτσι, αναμένεται περαιτέρω αύξηση του ποσοστού εγκατεστημένης ισχύος των δίχρονων ναυτικών κινητήρων [3].

Οι δίχρονοι ναυτικοί κινητήρες χαρακτηρίζονται από αυξημένα επίπεδα ρύπων (κυρίως: οξείδια του αζώτου και σωματίδια αιθάλης). Έτσι, η σύγχρονη έρευνα στους δίχρονους, και γενικότερα στους ναυτικούς, κινητήρες στρέφεται ολοένα και περισσότερο προς την κατεύθυνση της μείωσης των εκπομπών ρύπων, με παράλληλη αύξηση του βαθμού απόδοσης, ώστε τα πλοία να συμμορφώνονται με τους διεθνείς κανονισμούς.

1.2 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Τα εμπορικά πλοία αποτελούν το πλέον αποδοτικό από ενεργειακή άποψη μέσο μεταφοράς αγαθών, αναφορικά με την απαιτούμενη ενέργεια για δεδομένο μεταφερόμενο φορτίο και απόσταση. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το οφειλόμενο στη ναυτιλία ποσοστό εκπεμπόμενων αέριων ρύπων του θερμοκηπίου (κυρίως: διοξείδιο του άνθρακα) ανέρχεται στο 2.7% (διπλάσιο σε σχέση με το αντίστοιχο των αερομεταφορών), όπως φαίνεται στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 [4]. Το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί κατά 75% τα επόμενα 15 χρόνια, εξαιτίας της περαιτέρω ανάπτυξης του εμπορίου μέσω των θαλάσσιων μεταφορών. Άλλοι σημαντικοί ρύποι από τη δραστηριότητα των θαλάσσιων μεταφορών είναι τα οξείδια του αζώτου (περίπου 17% των συνολικών ρύπων παγκοσμίως), τα οξείδια του θείου και τα σωματίδια της αιθάλης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΕΚΠΟΜΠΗ CO₂ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΗΓΕΣ [4].

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization – IMO) έχει θεσπίσει κανονισμούς με σκοπό τη μείωση των ρύπων που εκπέμπουν οι ναυτικοί κινητήρες Diesel. Η πρωτοβουλία αυτή βασίζεται στο παγκόσμιο ενδιαφέρον για την προστασία του περιβάλλοντος. Τα περιθώρια της εν γένει μείωσης των ρύπων από τα πλοία είναι αυξημένα, εξαιτίας του ευρέος πεδίου για τη διείσδυση νέων τεχνολογιών σε αυτά, με στόχο τη συμμόρφωση με τους διεθνείς κανονισμούς.

Ειδικότερα, η διεθνής σύμβαση MARPOL 73/78 περιέχει το κεφάλαιο VI (Annex VI), το οποίο θέτει όρια εκπομπής ρύπων. Στο εν λόγω κεφάλαιο εισάγονται μηχανισμοί εκτίμησης της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου, και θέτονται ανώτατα όρια εκπομπής οξειδίων του αζώτου (NO_x) και θείου (SO_x) σε συγκεκριμένες περιοχές με αυξημένη ναυτιλιακή κυκλοφορία, αλλά και στην ανοικτή θάλασσα. Στις περιοχές ελεγχόμενων ρύπων (ECAs), που αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν έχουν θεσπιστεί ακόμη περιορισμοί για τις εκπομπές αιθάλης σύμφωνα με τον IMO. Ωστόσο, κανονισμοί ως προς τα σωματίδια αιθάλης εφαρμόζονται ήδη από τις τοπικές αρχές στις ακτές των ΗΠΑ και της Καραϊβικής.

Σημαντικό είναι ότι ολοένα και περισσότερες περιοχές χαρακτηρίζονται ως ECAs, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η λειτουργία πλοίων και στόλων. Ελεγχόμενες περιοχές ρύπων αναμένεται να χαρακτηριστούν η Μεσόγειος Θάλασσα, η Μαύρη Θάλασσα και οι ακτές του Χονγκ Κονγκ. Να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με μελέτη του Πανεπιστημίου του Χονγκ Κονγκ, στην περιοχή του Δέλτα του Pearl, περίπου 500 θάνατοι ετησίως οφείλονται στους αέριους ρύπους οξειδίων του θείου από πλοία. Συνεπώς ο χαρακτηρισμός μιας περιοχής ως ECA θα επιφέρει σημαντική βελτίωση στη δημόσια υγεία [5].

Οι παραπάνω κανονισμοί αναφέρονται σε πλοία που θα κατασκευαστούν μετά την προβλεπόμενη ημερομηνία εφαρμογής αυτών. Για υφιστάμενα πλοία, η μη εκπλήρωση των προδιαγραφών, παρόλο που δεν έχει τυπικό αντίκτυπο, μειώνει την αξία μεταπώλησης του πλοίου.

1.2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Οι μηχανισμοί ενεργειακής αποδοτικότητας σχετίζονται έμμεσα με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), οι οποίες συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου αποτελεί κριτήριο μέτρησης των εκπομπών CO₂. Οι μηχανισμοί ενεργειακής αποδοτικότητας είναι οι εξής:

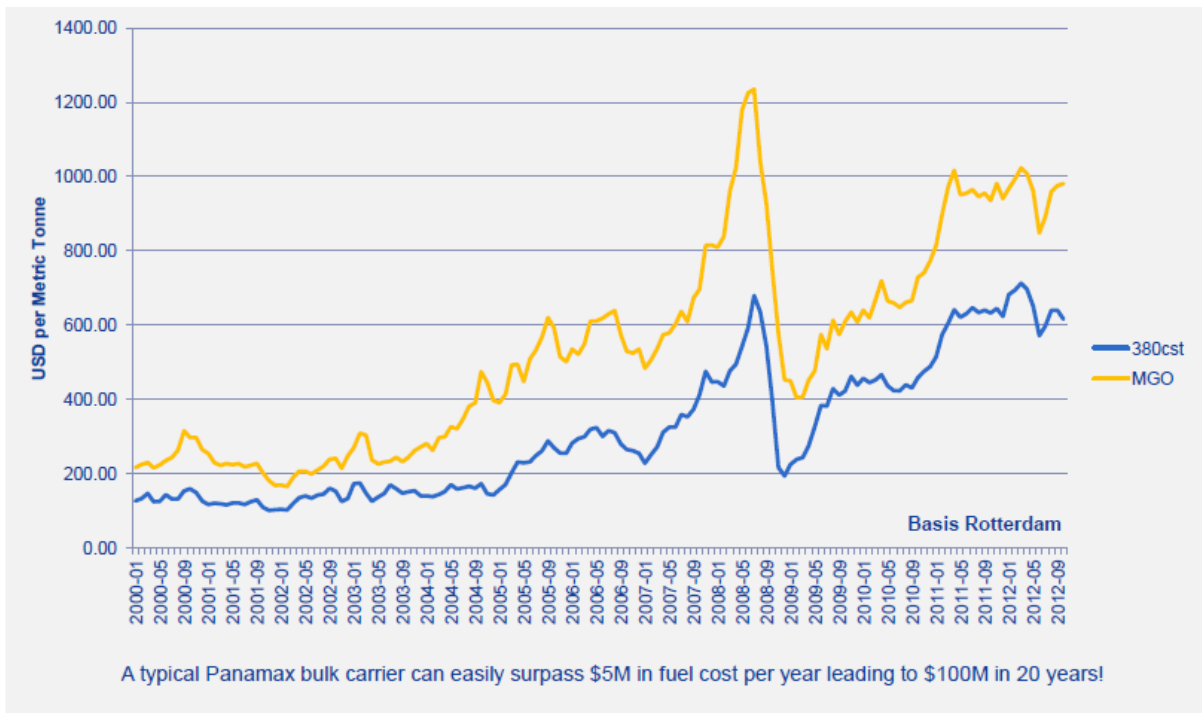
(α) Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Σχεδίασης (Energy Efficiency Design Index – EEDI) = (Ισχύς x Ειδική Κατανάλωση x μάζα παραχθέντος CO₂ ανά μάζα χρησιμοποιούμενου καυσίμου) / (Μεταφορική Ικανότητα x Ταχύτητα).

(β) Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Λειτουργίας (Energy Efficiency Operation Index – EEOI) = (Μάζα καταναλωθέντος καυσίμου x μάζα παραχθέντος CO₂ ανά μάζα χρησιμοποιούμενου καυσίμου) / (Μάζα Φορτίου x Απόσταση).

(γ) Σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP).

Οι επιτρεπόμενες τιμές αυτών των δεικτών εξαρτώνται από τη μεταφορική ικανότητα του πλοίου (deadweight). Αναμένεται ότι έως το 2018 τα όρια αυτά θα μειωθούν κατά περίπου 30%, δηλαδή θα απαιτηθεί αύξηση, κατά το ίδιο ποσοστό, της αποδοτικότητας του πλοίου [6].

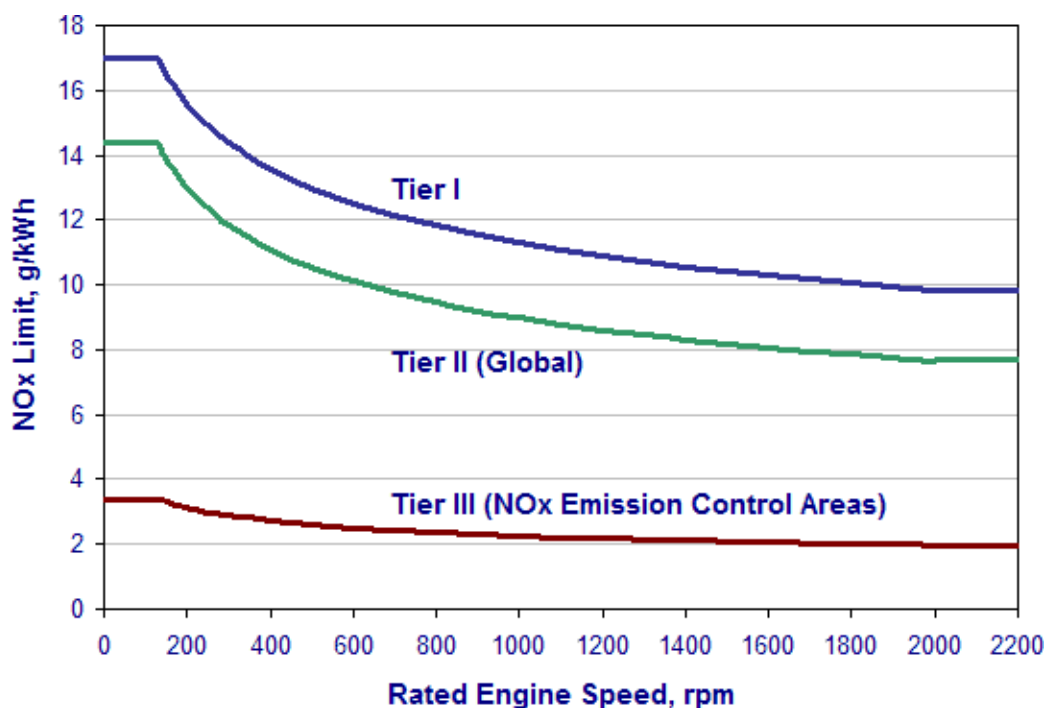
Εκτός όμως από την προστασία του περιβάλλοντος, η μείωση των εκπομπών ρύπων, κυρίως των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂), θα επιφέρει και σημαντική μείωση του κόστους λειτουργίας του πλοίου, καθώς το κόστος του καυσίμου αποτελεί σημαντικό ποσοστό του κόστους λειτουργίας του πλοίου (και πάνω από 80%). Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η ετήσια παγκόσμια κατανάλωση υγρών καυσίμων από εμπορικά πλοία εκτιμάται γύρω στα 335 εκατομμύρια τόνους, ενώ αναμένεται να αυξηθεί γύρω στα 45 εκατομμύρια τόνους (ανά έτος) έως το 2020. Επιπλέον, με την τιμή των βαρέων καυσίμων να κυμαίνονται σήμερα γύρω στα 750\$/t και των ελαφρύτερων γύρω στα 1000\$/t, το αντίστοιχο συνολικό ετήσιο κόστος καυσίμου ανέρχεται γύρω στα 230 δισεκατομμύρια δολάρια [7]. Η χρονική μεταβολή της τιμής του βαρέος καυσίμου (IFO380) και του ναυτιλιακού Diesel (MGO) από το 2000 έως το 2012 απεικονίζεται στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2 [7]. Κατά τα επόμενα χρόνια, αναμένεται συνεπώς τεράστια εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας, με ταυτόχρονη αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας του πλοίου.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΒΑΡΕΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (IFO380) ΚΑΙ ΤΟΥ ΝΑΥΤΙΑΙΑΚΟΥ DIESEL (MGO) , ΣΕ \$/T, ΑΠΟ ΤΟ 2000 ΕΩΣ ΤΟ 2012 [7].

1.2.2 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO_x)

Αναφορικά με τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x), τα επιτρεπόμενα όρια παρουσιάζονται στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3 [6]. Οι κανονισμοί επιβάλλουν τον περιορισμό κατά περίπου 75% έως το 2016 (με πιθανότητα παράτασης) για τις περιοχές ελεγχόμενων ρύπων (Emission Control Areas – ECAs), όσον αφορά στους αργόστροφους κινητήρες. Ο ΠΙΝΑΚΑΣ I παρουσιάζει τις ημερομηνίες εφαρμογής των κανονισμών και τα αντίστοιχα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών NO_x για αργόστροφους κινητήρες. Τα όρια των κανονισμών του IMO προκύπτουν ως σταθμισμένος μέσος όρος των εκπομπών σε συγκεκριμένα φορτία του κινητήρα.



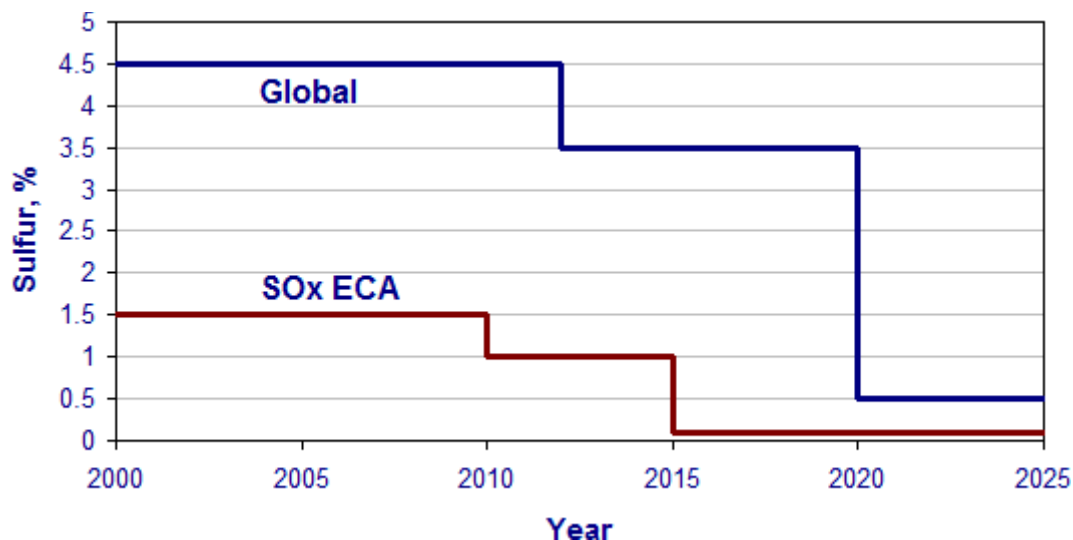
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΕΙΔΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΑ ΟΡΙΑ TIER I, II, III [6].

	Ημερομηνία Ισχύος	NO _x [gr/kWh]
Tier I	01/2000	17.0
Tier II	01/2011	14.4
Tier III (ECAs only)	01/2016	3.4

ΠΙΝΑΚΑΣ I: ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO_x) ΓΙΑ ΑΡΓΟΣΤΡΟΦΟΥΣ ΝΑΥΤΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ (RPM<130 RPM) [6].

1.2.3 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ (SO_x)

Οι εκπομπές SO_x από ναυτικούς κινητήρες οφείλονται αποκλειστικά στην περιεκτικότητα του θείου στο καύσιμο. Συνεπώς, ο IMO θέτει περιορισμούς στην περιεκτικότητα του θείου για δρομολόγια μέσα και έξω από τις περιοχές ECA. Τα όρια και οι αντίστοιχες ημερομηνίες εφαρμογής παρουσιάζονται στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4 [6]. Επίσης, οι κανονισμοί μπορούν να ικανοποιηθούν με εναλλακτικά μέτρα μείωσης εκπομπών SO_x, όπως συσκευές καθαρισμού αερίων εγκατεστημένες πριν την έξοδό τους στην ατμόσφαιρα (exhaust gas after-treatment scrubbers).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΤΑ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΑ ΟΡΙΑ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΘΕΙΟΥ ΣΤΟ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟ ΚΑΥΣΙΜΟ ΚΑΙ ΟΙ ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΥΤΩΝ [6].

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

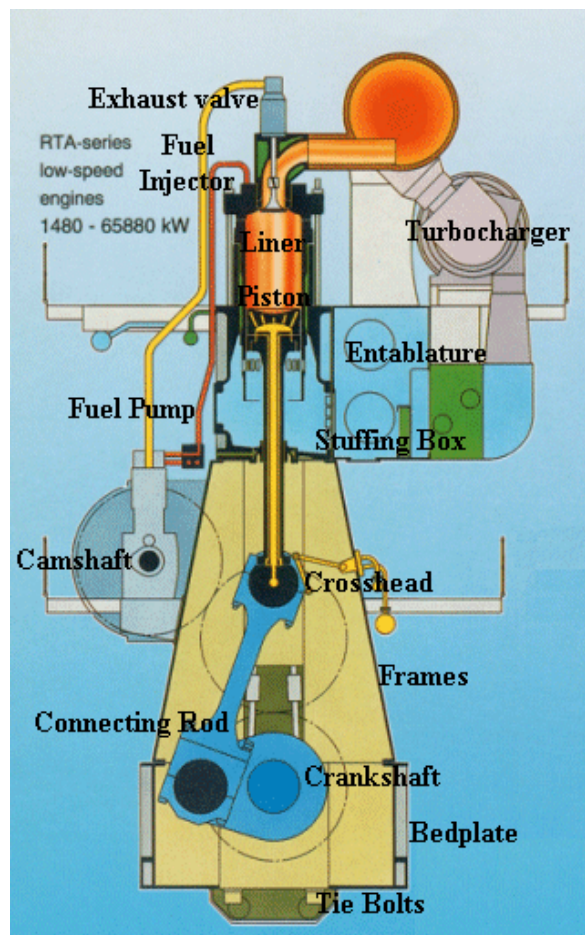
Η επιτακτική ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος ωθεί τους διεθνείς οργανισμούς και τις τοπικές αρχές να λάβουν μέτρα για τη μείωση της ρύπανσης από τη ναυτιλία. Συνεπώς, οι μηχανικοί και σχεδιαστές ναυτικών κινητήρων καταβάλλουν προσπάθειες με στόχο την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών μείωσης των εκπομπών ρύπων από τους κινητήρες Diesel, με ταυτόχρονη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν είτε τεχνικές που σχετίζονται με τη λειτουργία του κινητήρα, είτε τεχνικές που αφορούν στη μετεπεξεργασία των καυσαερίων πριν αυτά οδηγηθούν στην ατμόσφαιρα. Η ανάπτυξη πειραματικών διατάξεων για την αξιολόγηση των παραπάνω τεχνολογιών είναι αρκετά χρονοβόρα και δαπανηρή λόγω του μεγάλου μεγέθους των ναυτικών κινητήρων. Έτσι, η προκαταρκτική μελέτη με χρήση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) κρίνεται σήμερα απαραίτητη για τη μείωση του λειτουργικού κόστους των πειραμάτων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αναπτυχθεί το υπολογιστικό υπόβαθρο για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός μεγάλου δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel, με χρήση κώδικα CFD. Αντικείμενο της μελέτης είναι ο ναυτικός κινητήρας RT-flex96C της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland, ο οποίος έχει διάμετρο και διαδρομή εμβόλου 0.96 m και 2.5 m, αντίστοιχα. Αρχικά, αναπτύχθηκε μεθοδολογία δημιουργίας αριθμητικού πλέγματος για τη γεωμετρία του κινητήρα, και πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ως προς την πυκνότητά του και το απαιτούμενο χρονικό βήμα των υπολογισμών. Η ανάλυση ευαισθησίας εκτελέστηκε με σημείο αναφοράς πειραματικές μετρήσεις σε λειτουργία πλήρους φορτίου. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν περιπτώσεις λειτουργίας με χρήση προέγχυσης και κύριας έγχυσης, καθώς και η επίδραση της έντασης του εγκάρσιου στροβιλισμού του αέρα (swirl) στη λειτουργία του κινητήρα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επεξεργάστηκαν με κατάλληλο λογισμικό οπτικοποίησης του ροϊκού πεδίου για την καλύτερη ερμηνεία των διεργασιών ανάμιξης καυσίμου-αέρα και καύσης. Η σύγκριση της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα είναι ικανοποιητική. Η παρούσα εργασία αποτελεί τη βάση για περαιτέρω έρευνα της θερμορευστομηχανικής του κινητήρα με στόχο τη μείωση των εκπομπών ρύπων και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΧΡΟΝΟΣ ΝΑΥΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ DIESEL

2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο κινητήρας που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι δίχρονος ναυτικός κινητήρας Diesel. Οι δίχρονοι ναυτικοί κινητήρες είναι αργόστροφοι και η σύνδεση του εμβόλου με το διωστήρα επιτυγχάνεται μέσω βάρκτρου (Piston rod) και ζυγώματος (Crosshead). Η μετάδοση της κίνησης στην προπέλα δεν απαιτεί μειωτήρα στροφών. Όλοι οι ναυτικοί κινητήρες βασίζονται τη λειτουργία τους στην αρχή της υπερπλήρωσης για μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος. Η σάρωση του αέρα, ο οποίος εισέρχεται μέσω περιφερειακών θυρίδων, προσαρμοσμένων στο χιτώνιο, αποσκοπεί στη βίαιη απομάκρυνση των καυσαερίων μέσω μιας βαλβίδας εξαγωγής που είναι τοποθετημένη στην κεφαλή του κυλίνδρου. Επίσης, οι εγχυτήρες είναι συμμετρικά τοποθετημένοι στο πόμα. Η εγκάρσια τομή ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel, καθώς και τα βασικά εξαρτήματα, που τον απαρτίζουν, παρουσιάζονται στην ΕΙΚΟΝΑ 1 [8].



ΕΙΚΟΝΑ 1: ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΔΙΧΡΟΝΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL [8].

Στον δίχρονο κινητήρα Diesel, σε μια πλήρη περιστροφή του στροφάλου αντιστοιχούν δύο διαδρομές του εμβόλου. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των δύο χρόνων λειτουργίας μιας ναυτικής βραδύστροφης υπερπληρούμενης μηχανής.

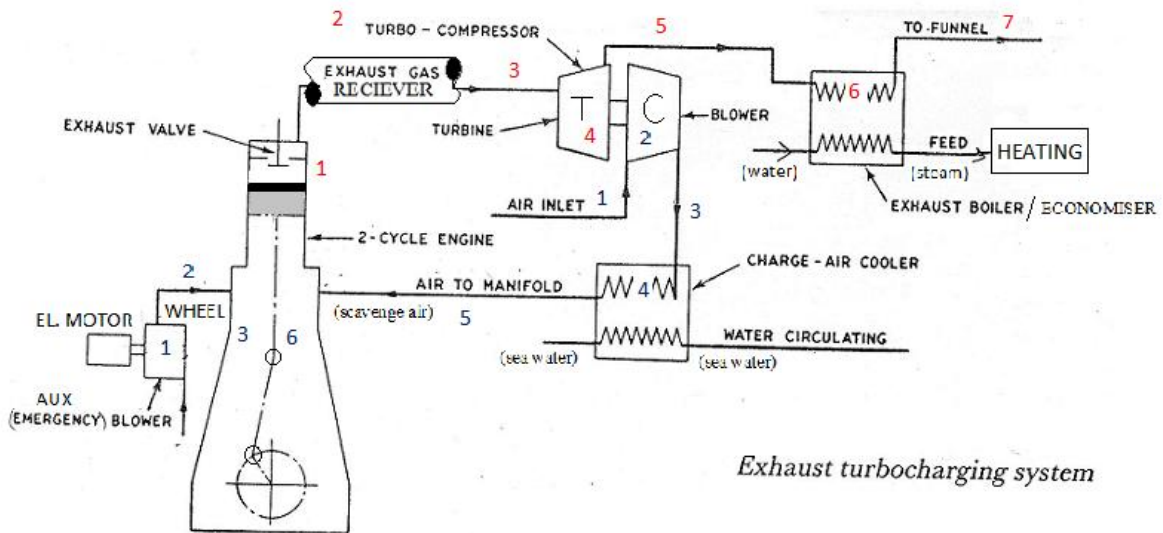
Πρώτος Χρόνος Λειτουργίας (Καύση – Εκτόνωση – Έναρξη Εξαγωγής και Σάρωσης)

Όταν το έμβολο βρίσκεται κοντά στο Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ), λαμβάνει χώρα η έγχυση του καυσίμου. Ο αέρας εντός του κυλίνδρου έχει συμπιεστεί και οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι τέτοιες, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η αυτανάφλεξη του καυσίμου. Ακολουθεί η καύση του εγχυόμενου καυσίμου, και στη συνέχεια τα παραγόμενα από την καύση αέρια εκτονώνονται. Κατά τη φάση της εκτόνωσης, αποδίδεται το ωφέλιμο έργο. Μετά το πέρας της εκτόνωσης, η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει και τα καυσαέρια οδεύουν στον οχετό εξαγωγής, και στη συνέχεια στον στροβιλοϋπερπληρωτή. Πριν το έμβολο κατέλθει στο Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ), αποκαλύπτονται οι θυρίδες εισαγωγής του αέρα. Η πίεση τώρα είναι μικρότερη από την πίεση του αέρα υπερπλήρωσης, οπότε πραγματοποιείται η λεγόμενη βίαιη απόπλυση του κυλίνδρου (σάρωση).

Δεύτερος Χρόνος Λειτουργίας (Πέρας Σάρωσης και Εξαγωγής – Συμπύεση)

Το έμβολο αρχίζει να κινείται προς το ΑΝΣ ωθούμενο από τον στροφαλοφόρο άξονα, με πρόσληψη έργου παραγόμενο από άλλο κύλινδρο. Ανεβαίνοντας από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ, το έμβολο καλύπτει πλήρως τις θυρίδες εισαγωγής. Παράλληλα, κλείνει και η βαλβίδα εξαγωγής των καυσαερίων. Ο κύλινδρος έχει πληρωθεί με αέρα, ενώ τα καυσαέρια έχουν απομακρυνθεί. Το έμβολο, ανερχόμενο προς το ΑΝΣ, συμπιέζει τον αέρα.

Στην ΕΙΚΟΝΑ 2 [9] απεικονίζεται το τυπικό διάγραμμα ροής της διάταξης ενός υπερπληρούμενου βραδύστροφου ναυτικού κινητήρα Diesel. Για την εκκίνηση του κινητήρα χρησιμοποιείται ο αέρας προκίνησης, ο οποίος είναι συμπιεσμένος και αποθηκευμένος σε φιάλες υψηλής πίεσης (starting air receivers). Στα χαμηλά φορτία, που η παροχή των καυσαερίων είναι μικρή και ο στρόβιλος του υπερπληρωτή δεν αποδίδει την απαιτούμενη ισχύ στον συμπιεστή, χρησιμοποιούνται συνήθως ηλεκτροκίνητοι βοηθητικοί συμπιεστές αέρα (Auxiliary air blowers) για την επίτευξη ικανοποιητικής πίεσης του αέρα σάρωσης. Η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής μετά τον συμπιεστή ρυθμίζεται με την παρουσία εναλλάκτη θερμότητας (air cooler). Ο έλεγχος της θερμοκρασίας στοχεύει στον καθορισμό της πυκνότητας του αέρα, ανεξαρτήτως των συνθηκών που επικρατούν μέσα στον κύλινδρο, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη μάζα του αέρα καύσης. Τα καυσαέρια, αφού αποδώσουν σημαντικό μέρος της θερμικής τους ενέργειας στον στρόβιλο του υπερπληρωτή, οδηγούνται στη συνέχεια σε έναν οικονομητήρα (economizer) πριν τη διαφυγή τους στην ατμόσφαιρα. Ο οικονομητήρας είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας για την παραγωγή κορεσμένου ατμού, ο οποίος χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως η προθέρμανση του βαρέος καυσίμου (HFO pre-heating).



ΕΙΚΟΝΑ 2: ΤΥΠΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΥΠΕΡΠΛΗΡΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΧΡΟΝΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ [9].

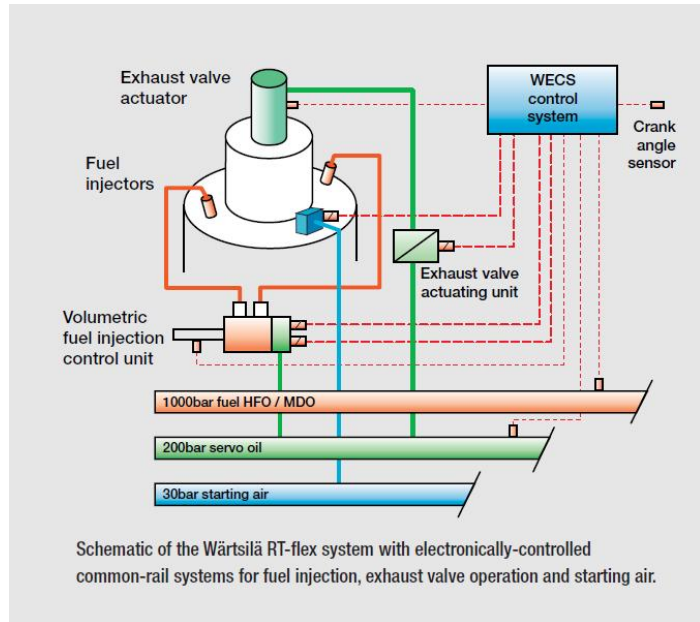
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΟΙΝΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Η έγχυση του καυσίμου γίνεται όταν το έμβολο βρίσκεται κοντά στο ΑΝΣ, όπου οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι υψηλές και ευνοείται η αυτανάφλεξη του καυσίμου (πέρασ συμπίεσης). Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα έγχυσης του καυσίμου σε βραδύστροφες δίχρονες μηχανές είναι το μηχανικό σύστημα (παρουσία εκκεντροφόρου άξονα - Camshaft) και το ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS).

Το σύστημα έγχυσης κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS) άρχισε να εφαρμόζεται στους ναυτικούς κινητήρες Diesel στις αρχές της πρώτης δεκαετίας του 21^{ου} αιώνα. Η σχηματική απεικόνιση του CRS φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 3. Βασικό πλεονέκτημα είναι η ανεξάρτηση της πίεσης έγχυσης από το σημείο λειτουργίας του κινητήρα.

Στο CRS, οι αντλίες υψηλής πίεσης καταθλίβουν το καύσιμο σε έναν κοινό συλλέκτη, και η πίεση μέσα σε αυτόν διατηρείται σχεδόν σταθερή (τάξης 1000 bar). Το καύσιμο μεταφέρεται από τον κοινό συλλέκτη στους εγχυτήρες κάθε κυλίνδρου, μέσω της ηλεκτρονικής μονάδας έγχυσης. Η ακριβής ρύθμιση της έγχυσης καθορίζεται ηλεκτρονικά από την κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του CRS σε σχέση με τα μηχανικά συστήματα έγχυσης είναι τα εξής:

- Επιτυγχάνεται υψηλή πίεση έγχυσης ανεξαρτήτως της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.
- Επιτυγχάνεται ακρίβεια στη ρύθμιση της ποσότητας του εγχυόμενου καυσίμου σε κάθε κύλινδρο.
- Υπάρχει δυνατότητα καθορισμού του χρονισμού της έγχυσης σε κάθε εγχυτήρα ξεχωριστά.
- Υπάρχει δυνατότητα πολλαπλών ψεκασμών σε κάθε κύκλο λειτουργίας.
- Επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε χαμηλά φορτία.
- Επιτυγχάνονται χαμηλά επίπεδα κραδασμών σε συνθήκες χαμηλών στροφών, λόγω της επιλεκτικής κατανομής του φορτίου στους κυλίνδρους.
- Ελαχιστοποιούνται οι διαφορές της εγχυόμενης μάζας καυσίμου μεταξύ των διαδοχικών κύκλων.
- Μειώνεται η ειδική κατανάλωση του καυσίμου.



ΕΙΚΟΝΑ 3: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΟΙΝΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ (COMMON-RAIL) ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ WÄRTSILÄ [1].

2.3 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΡΥΠΩΝ

Κατά την καύση βαρέος καυσίμου σε ένα ναυτικό κινητήρα Diesel, λαμβάνει χώρα η παραγωγή οξειδίων του αζώτου (NO_x), σωματιδίων αιθάλης (Soot), οξειδίων του θείου (SO_x) και άκαυστων υδρογονανθράκων (HC). Στους κινητήρες Diesel, οι σημαντικότεροι ρύποι, οι οποίοι σχετίζονται με την ποιότητα της καύσης, είναι τα NO_x και τα σωματίδια αιθάλης, των οποίων οι διεργασίες σχηματισμού θα αναλυθούν παρακάτω.

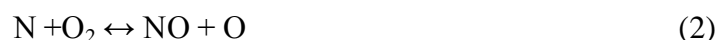
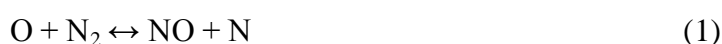
2.3.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ NO_x

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) αποτελούνται κυρίως από το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2). Η συγκέντρωση του NO σε πετρελαιομηχανές εσωτερικής καύσης κυμαίνεται από 80% έως 90% της συνολικής συγκέντρωσης των NO_x .

Το NO σχηματίζεται με 2 τρόπους:

- Σχηματισμός θερμικού NO (thermal NO) από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού (μοριακού) αζώτου σε υψηλές θερμοκρασίες στην περιοχή των καυσαερίων.
- Σχηματισμός άμεσου NO (prompt NO) στην περιοχή της φλόγας.

Ενδεικτικά, η δημιουργία του θερμικού NO ξεκινάει πάνω από τους 1800 K αφού απαιτείται υψηλή ενέργεια ενεργοποίησης ώστε να σπάσει ο ισχυρός τριπλός δεσμός του μορίου N_2 . Ο ρυθμός σχηματισμού NO αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Ο μηχανισμός δημιουργίας NO περιγράφεται από τον διευρυμένο μηχανισμό του Zeldovich, που αποτελείται από τις παρακάτω τρεις αμφίδρομες αντιδράσεις [10]:



Το άμεσο NO σχηματίζεται στην περιοχή της φλόγας από την αντίδραση ενδιάμεσων χημικών ενώσεων υδρογονανθράκων με ατομικό οξυγόνο και ελεύθερες ρίζες, και αντιστοιχεί στο 5-10% της συνολικής παραγωγής NO_x . Ρίζες υδρογονανθράκων όπως CH, CH_2 , C, C_2 σχηματίζονται στην περιοχή της φλόγας, και αντιδρούν με μοριακό άζωτο, σε υψηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ενδιάμεσες ομάδες χημικών ενώσεων, όπως HCN και CN. Ο μηχανισμός σχηματισμού των παραπάνω ενώσεων και τελικά άμεσου NO αποτελείται από τις παρακάτω αντιδράσεις [10]:





Το διοξείδιο του αζώτου NO_2 είναι ένα ισχυρό οξειδίο, πολύ πιο τοξικό από το NO και επιβλαβές για τον άνθρωπο. Στους κινητήρες Diesel, η συγκέντρωση του NO_2 κυμαίνεται σε 10-30% επί των συνολικών εκπομπών NO_x . Το NO_2 σχηματίζεται από την ταχύρρυθμη μετατροπή του NO σε αυτό, στις περιοχές της φλόγας, σύμφωνα με την αντίδραση [10]:



Όμως, στην περιοχή των καυσαερίων, το NO_2 μετατρέπεται και πάλι σε NO και O_2 , λόγω της αντίδρασης με το ατομικό οξυγόνο, γι' αυτό και η τελική συγκέντρωση του NO_2 είναι μικρή σε σχέση με αυτή του NO . Συνεπώς, ο λόγος των συγκεντρώσεων NO_2/NO μειώνεται με την εξέλιξη της καύσης. Η συγκεκριμένη αντίδραση είναι:



Όταν τα καυσαέρια, τα οποία έχουν υψηλή θερμοκρασία, αναμιγνύονται γρήγορα με ψυχρότερο αέρα ή μίγμα καυσίμου-αέρα, λόγω του έντονου στροβιλισμού, σταματάει η μετατροπή NO_2 σε NO και έτσι ο λόγος των συγκεντρώσεων NO_2/NO δεν μειώνεται περαιτέρω αλλά παραμένει σταθερός.

2.3.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΙΘΑΛΗΣ

Τα σωματίδια αιθάλης είναι στερεές συσσωματώσεις πλούσιες σε άνθρακα που σχηματίζονται υπό ειδικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, σε μίγματα καυσίμου-αέρα πλούσια σε καύσιμο. Ο σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης πραγματοποιείται τόσο κατά τη φάση της προαναμεμιγμένης καύσης, όσο και κατά τη φάση της καύσης διάχυσης. Οι εκπομπές αιθάλης είναι επιβλαβείς για τον άνθρωπο, και γίνονται αντιληπτές με γυμνό μάτι (σε αντίθεση με τα οξείδια του αζώτου) από το σκούρο χρώμα των καυσαερίων κατά την εξαγωγή (μαύρος καπνός). Σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό των σωματιδίων αιθάλης παίζει η ποιότητα του καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΧΡΟΝΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, προσομοιώνεται η λειτουργία του δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρούμενου Diesel κινητήρα RT-flex96C της κατασκευάστριας εταιρίας Wärtsilä Switzerland. Συνολικά έχουν κατασκευαστεί περίπου 300 τέτοιοι κινητήρες, κυρίως για εφαρμογές σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Συγκεκριμένα, η 14-κύλινδρη έκδοση έχει εγκατασταθεί στα E-class containerships της δανέζικης εταιρείας A. P. Moller-Maersk Group, τα οποία έχουν μεταφορική ικανότητα 14770 TEU [11]. Ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι εφοδιασμένος με σύστημα έγχυσης καυσίμου κοινού συλλέκτη. Έτσι, η λειτουργία του κινητήρα χαρακτηρίζεται από τα πλεονεκτήματα του ηλεκτρονικά ελεγχόμενου συστήματος έγχυσης, όπως αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Στην ΕΙΚΟΝΑ 4 φαίνεται ο κινητήρας RT-flex96C και πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στο οποίο έχει εγκατασταθεί ο εν λόγω κινητήρας [11].



(A)



(B)

ΕΙΚΟΝΑ 4: Ο ΝΑΥΤΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ RT-FLEX96C ΚΑΙ ΤΟ ΠΛΟΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ “ΕΜΜΑ ΜΑΕΡΣΚ”, ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΧΕΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΕΙ [11].

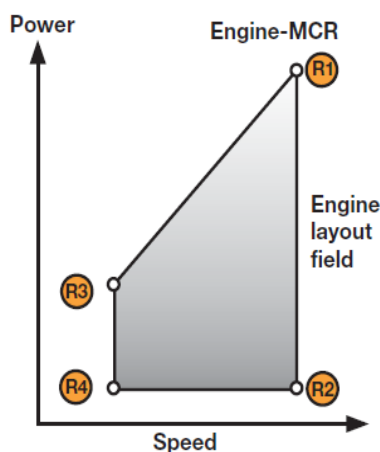
3.1.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα RT-flex96C παρουσιάζονται στον ΠΙΝΑΚΑ ΙΙ:

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΜΒΟΛΟΥ	960 mm
ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΕΜΒΟΛΟΥ	2500 mm
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	102 RPM
ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ	Common Rail System - CRS
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ	3
ΜΕΣΗ ΕΝΔΕΙΚΝΥΜΕΝΗ ΠΙΕΣΗ	18.60 bar
ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΜΒΟΛΟΥ	8.50 m/s
ΜΕΓΙΣΤΗ ΙΣΧΥΣ ΠΕΔΗΣ / ΚΥΛΙΝΔΡΟ	5720 KW

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C [1].

Στην ΕΙΚΟΝΑ 5(A) παρουσιάζεται το διάγραμμα φόρτισης του κινητήρα RT-flex96C, το οποίο αποτυπώνει την επιτρεπόμενη περιοχή φόρτισης του κινητήρα. Η μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση αντιστοιχεί στο σημείο R1 (Maximum Continuous Rate - MCR), ενώ η ελάχιστη στο σημείο R4. Η σκιασμένη περιοχή υποδεικνύει το χωρίο βελτιστοποίησης της λειτουργίας του κινητήρα. Παράλληλα, στην ΕΙΚΟΝΑ 5(B) παρατίθενται οι τιμές της ισχύος για κάθε ακραίο σημείο του διαγράμματος φόρτισης συναρτήσει του αριθμού των κυλίνδρων.



(A)

RATED POWER: PROPULSION ENGINES								
Cyl.	Output in kW/bhp at							
	102 rpm				92 rpm			
	R1		R2		R3		R4	
	kW	bhp	kW	bhp	kW	bhp	kW	bhp
6	36 180	49 200	25 320	34 440	32 580	44 280	25 320	34 440
7	42 210	57 400	29 540	40 180	38 010	51 660	29 540	40 180
8	48 240	65 600	33 760	45 920	43 440	59 040	33 760	45 920
9	54 270	73 800	37 980	51 660	48 870	66 420	37 980	51 660
10	60 300	82 000	42 200	57 400	54 300	73 800	42 200	57 400
11	66 330	90 200	46 420	63 140	59 730	81 180	46 420	63 140
12	72 360	98 400	50 640	68 880	65 160	88 560	50 640	68 880
13	78 390	106 600	54 860	74 620	70 590	95 940	54 860	74 620
14	84 420	114 800	59 080	80 360	76 020	103 320	59 080	80 360

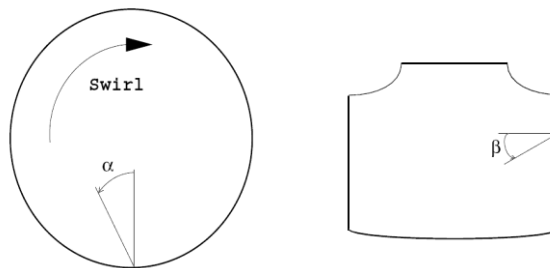
(B)

ΕΙΚΟΝΑ 5: (Α) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ, (Β) ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΠΕΛΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΑΡΙΘΜΟ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ [1].

Ο κινητήρας διαθέτει 3 εγχυτήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι συμμετρικά, ανά 120°, στην περιφέρεια του πάματος του κυλίνδρου. Το ακροφύσιο του κάθε εγχυτήρα φέρει 5 οπές, με τις οποίες επιτυγχάνεται η υπό γωνία έγχυση του καυσίμου, με στόχο τον καλό διασκορπισμό αυτού στον θάλαμο καύσης.

Στην ΕΙΚΟΝΑ 6 ορίζονται οι γωνίες έγχυσης α και β οι οποίες καθορίζουν την κατεύθυνση της έγχυσης. Τα πλήρη στοιχεία του εγχυτήρα, καθώς και πειραματικά δεδομένα, μάς παρασχέθηκαν από την κατασκευάστρια εταιρία (Dr. German Weisser, προσωπική επικοινωνία). Η προσήμανση των γωνιών έγχυσης α και β δίνεται στον ΠΙΝΑΚΑ ΙΙΙ.

Παρατηρείται ότι εν γένει η κατεύθυνση της έγχυσης ταυτίζεται με την αντίστοιχη του εγκάρσιου στροβιλισμού του αέρα. Ο εγκάρσιος στροβιλισμός προκύπτει από την εισαγωγή αέρα σάρωσης στον θάλαμο καύσης με σημαντική εφαπτομενική συνιστώσα στο διανύσμα της ταχύτητας. Με τον εγκάρσιο στροβιλισμό επιτυγχάνεται καλύτερη απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια και καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα. Συνεπώς, επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα καύσης.



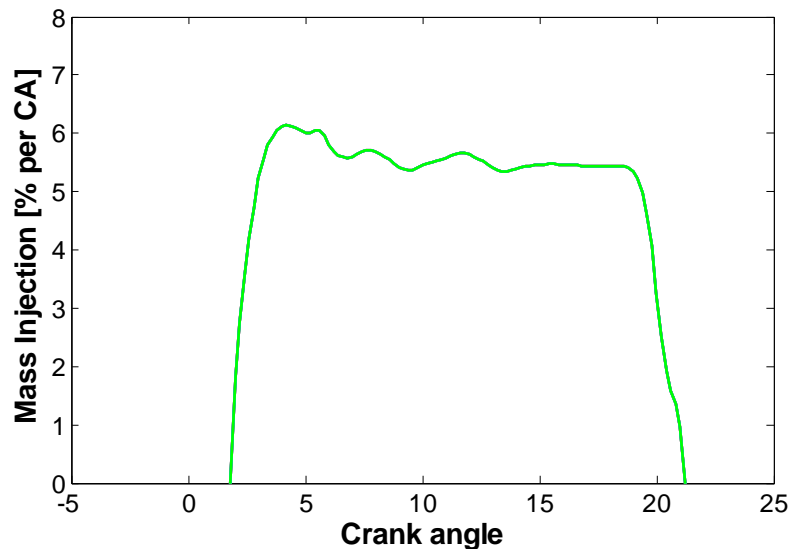
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΟΡΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΩΝ ΕΓΧΥΣΗΣ Α ΚΑΙ Β.

A/A οπής	1	2	3	4	5
πρόσημο γωνίας α	-	+	+	+	+
πρόσημο γωνίας β	+	+	+	+	+

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ: ΠΡΟΣΗΜΑΝΣΗ ΤΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΕΓΧΥΣΗΣ Α ΚΑΙ Β.

3.1.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5 παρουσιάζεται το προφίλ έγχυσης του καυσίμου του κινητήρα RT-flex96C σε πλήρες φορτίο, το οποίο βασίζεται σε πειραματικές μετρήσεις της εταιρείας Wärtsilä Switzerland. Στην αρχή της έγχυσης παρατηρείται μια έντονη κλίση έως γωνία 5° που καταλήγει σε ταλάντωση μικρού πλάτους. Αυτή η συμπεριφορά αντιστοιχεί στο άνοιγμα και τη σταθεροποίηση της βελόνας του εγχυτήρα. Στη συνέχεια, το καύσιμο εγχύεται μέχρι να επέλθει ο βαθμιαίος μηδενισμός του ρυθμού έγχυσης, που αντιστοιχεί στο κλείσιμο της βελόνας του εγχυτήρα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΠΛΗΡΕΣ ΦΟΡΤΙΟ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C ΟΠΩΣ ΜΕΤΡΗΘΗΚΕ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.

Στο παραπάνω διάγραμμα, το προφίλ παρουσιάζεται αδιαστατοποιημένο ως προς τη συνολική εγχυόμενη μάζα καυσίμου:

$$\text{Mass Injection} = \frac{dm}{d\phi} \cdot \frac{100}{m_{tot}}$$

Όπου,

$$\frac{dm}{d\phi}, \text{ παροχή εγχυόμενης μάζας καυσίμου ανά γωνία στροφάλου } \left[\frac{\text{gr}}{^\circ \text{CA}} \right].$$

m_{tot} , συνολική εγχυόμενη μάζα καυσίμου [gr].

Ως συνέπεια της αδιαστατοποίησης του προφίλ, η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη του διαγράμματος λαμβάνει την τιμή 100. Το προφίλ έγχυσης είναι ίδιο και για τους 3 εγχυτήρες, με συνέπεια η συνολική μάζα του καυσίμου να κατανέμεται ισόποσα στους τρεις εγχυτήρες. Στον ΠΙΝΑΚΑ IV καταγράφονται τα χαρακτηριστικά του προφίλ έγχυσης.

ΕΝΑΡΞΗ ΕΓΧΥΣΗΣ (από ΑΝΣ)	1.8°
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΓΧΥΣΗΣ (από ΑΝΣ)	19.4°

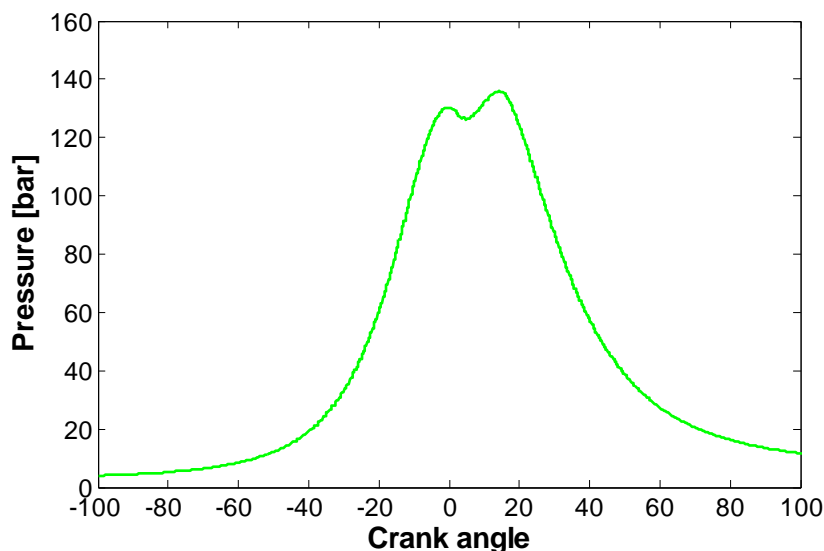
ΠΙΝΑΚΑΣ IV: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΕΓΧΥΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.

Οι αρχικές συνθήκες της εισαγωγής του αέρα στον κύλινδρο (πίεση και θερμοκρασία) καθώς και οι γωνίες στροφάλου για τις οποίες λαμβάνει χώρα η έναρξη της συμπίεσης και το πέρας της εκτόνωσης σε πλήρες φορτίο παρουσιάζονται στον ΠΙΝΑΚΑ V.

ΠΙΕΣΗ ΑΕΡΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΝ ΚΥΛΙΝΔΡΟ	3.94 bar
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΝ ΚΥΛΙΝΔΡΟ	309 K
ΕΝΑΡΞΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ (από ΑΝΣ)	-105.1°
ΠΕΡΑΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ (από ΑΝΣ)	121°

ΠΙΝΑΚΑΣ V: ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΓΩΝΙΕΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΠΟΥ ΟΡΙΖΟΥΝ ΤΟ ΚΛΕΙΣΤΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.

Επιπρόσθετα, η πειραματική καμπύλη της πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου σε συνθήκες πλήρους φορτίου απεικονίζεται στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. Η πίεση συμπίεσης είναι ίση με 130 bar, ενώ η μέγιστη πίεση καύσης με 136 bar.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΣΕ ΠΛΗΡΕΣ ΦΟΡΤΙΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C, ΟΠΩΣ ΜΕΤΡΗΘΗΚΕ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.

3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Για την ανάλυση ενός ροϊκού φαινομένου απαιτείται η επίλυση των βασικών εξισώσεων διατήρησης: α) διατήρηση της μάζας, β) διατήρηση της ορμής, και γ) διατήρηση της ενέργειας. Πιο σύνθετα φαινόμενα όπως η τύρβη, η καύση και η ροή πολλαπλών φάσεων είναι εξαιρετικά δυσχερές να επιλυθούν, είτε λόγω αδυναμίας μαθηματικής περιγραφής του φυσικού φαινομένου είτε λόγω μεγάλου υπολογιστικού κόστους της αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων. Συνεπώς, τέτοια σύνθετα προβλήματα επιλύονται με χρήση αριθμητικής προσομοίωσης (numerical simulation), σε συνδυασμό με επιμέρους φυσικά μοντέλα. Η εφαρμογή της αριθμητικής προσομοίωσης στο πεδίο των ρευστών ονομάζεται Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics - CFD). Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται διακριτοποίηση του χώρου μέσα στον οποίο δρα το ρευστό σε επιμέρους περιοχές, όπως οι πεπερασμένοι όγκοι. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τα φυσικά φαινόμενα μετατρέπονται σε αλγεβρικές, ενώ τα συστήματα των αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν επιλύονται με τη χρήση H/Y. Ο H/Y έχει μειώσει σημαντικά το κόστος της σχετικής έρευνας, καθώς μελέτες βελτιστοποίησης πραγματοποιούνται πια ευκολότερα, γρηγορότερα και χωρίς το κόστος πειραμάτων (ή με σημαντικό περιορισμό αυτού). Ο κλάδος της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

Η δομή μιας μελέτης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής περιλαμβάνει τα παρακάτω μέρη:

- Ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει το υπό μελέτη φυσικό φαινόμενο.
- Επιλογή μεθόδου διακριτοποίησης που προσδιορίζει τον τρόπο επίλυσης του παραπάνω μοντέλου. Οι κύριες μέθοδοι είναι αυτές των: πεπερασμένων διαφορών (Finite Differences - FD), πεπερασμένων όγκων (Finite Volume - FV), πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element - FE), καθώς και η υβριδική πεπερασμένων στοιχείων (Control Volume Based-Finite Element Method CV-FEM).
- Επιλογή συστήματος συντεταγμένων (καρτεσιανές, σφαιρικές, κυλινδρικές).
- Επιλογή και κατασκευή του πλέγματος (δομημένο, μη δομημένο, υβριδικό). Η επιλογή αυτή προσδιορίζει τη μορφή και τον τρόπο παραγωγής των όγκων υπολογισμού ανάλογα με τις ανάγκες προσέγγισης γεωμετρικών λεπτομερειών.
- Διακριτοποίηση των εξισώσεων, διαμόρφωση συστήματος/συστημάτων αλγεβρικών εξισώσεων
- Επίλυση του συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων.
- Εφαρμογή κριτηρίου σύγκλισης επί της αριθμητικής μεθόδου [12].

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία θα επικεντρωθούμε κυρίως στην ανάπτυξη και υλοποίηση μεθοδολογίας για τη δημιουργία πλέγματος για τη γεωμετρία της προωστήριας μηχανής RT-flex96C. Η προσομοίωση της ροής και της καύσης για τη συγκεκριμένη μηχανή πραγματοποιείται με χρήση μιας τροποποιημένης έκδοσης του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3, ο οποίος περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

3.2.1 ΚΩΔΙΚΑΣ KIVA-3

Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 [13] αποτελεί νεότερη έκδοση του κώδικα KIVA. Ο κώδικας επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις διατήρησης της συμπιεστής ροής παρουσία χημικών αντιδράσεων. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του κώδικα KIVA-3, σε σχέση με τις δύο παλαιότερες εκδόσεις του, είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργεί ξεχωριστά τρισδιάστατα δομημένα πλέγματα (structured meshes), τα οποία στη συνέχεια μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους (block structured mesh). Η δυνατότητα αυτή της σύζευξης, έχει το πλεονέκτημα της δημιουργίας αριθμητικών πλεγμάτων τα οποία προσεγγίζουν καλύτερα την υπό μελέτη γεωμετρία (ναυτικές μηχανές, θάλαμοι καύσης σταθερού όγκου κλπ.). Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η αποφυγή παραμόρφωσης (distortion) των κελιών σε δυναμικά πλέγματα. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίζει ξεχωριστά τις οριακές συνθήκες των επιμέρους τμημάτων του πλέγματος (τοιχώματα σταθερής θερμοκρασίας, προφίλ ταχυτήτων κλπ.). Τα παραπάνω πλεονεκτήματα συμβάλλουν σε λύσεις που προσεγγίζουν καλύτερα την προσομοίωση των φαινομένων ροής και καύσης.

Ο κώδικας KIVA-3 απαρτίζεται από μια σειρά υπο-προγραμμάτων σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Ένα τμήμα από τις αντίστοιχες υπο-ρουτίνες αντιστοιχεί σε φυσικά μοντέλα τα οποία αποδίδουν φαινόμενα όπως: α) η πρωτογενής και δευτερογενής διάσπαση της δέσμης του καυσίμου (primary and secondary spray breakup models), β) η εξάτμιση του καυσίμου (evaporation model), γ) η έναυση (ignition model), δ) η καύση (combustion model).

Η διαδικασία που ακολουθείται για την προσομοίωση με τον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 απεικονίζεται στην ΕΙΚΟΝΑ 7, και είναι η εξής:

- Σχηματισμός των τριών αρχείων εισαγωγής:
 - Αρχείο αριθμητικού πλέγματος (tape17): δημιουργείται από τον κώδικα “k3prep”, ο οποίος δέχεται ως αρχείο εισόδου μια λίστα σημείων που περιγράφουν τη γεωμετρία του θαλάμου καύσης με τις αντίστοιχες οριακές συνθήκες (αρχείο “iprep”).
 - Αρχείο παραμέτρων λειτουργίας (αρχείο “tape10”): περιλαμβάνει όλες τις μεταβλητές που περιγράφουν τα κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα (διαστάσεις, ταχύτητα περιστροφής, θερμοκρασίες τοιχωμάτων, προφίλ έγχυσης καυσίμου κλπ.), καθώς και μεταβλητές που αφορούν στη ρύθμιση των μοντέλων των φυσικών διεργασιών .
 - Αρχείο σταθερών που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις επίλυσης του ροϊκού πεδίου (αρχείο “tape11”).

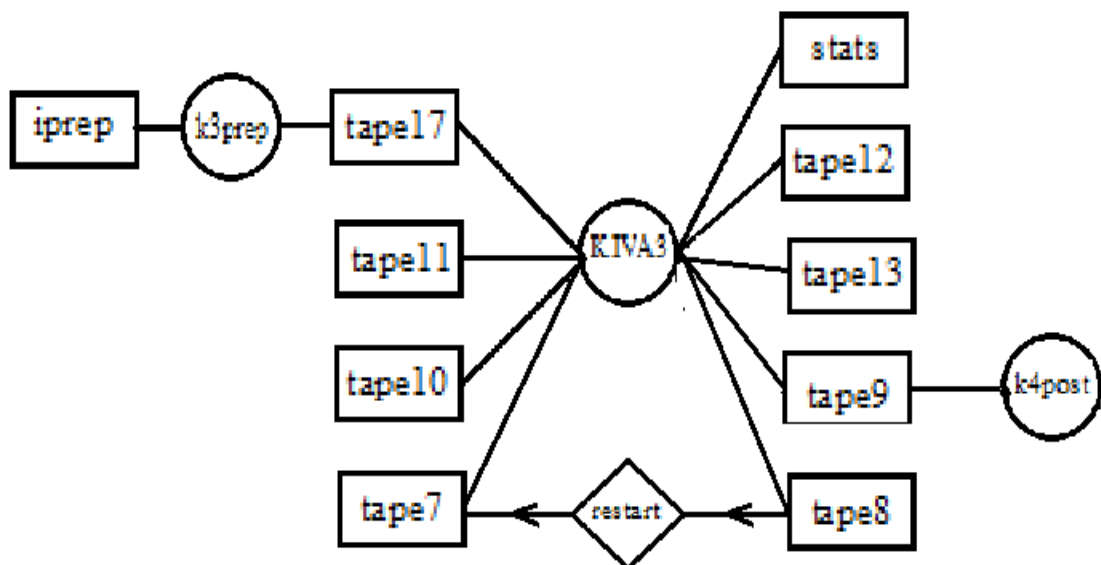
- Εκτέλεση της προσομοίωσης, με χρήση του εκτελέσιμου αρχείου.

Μετά το πέρας της προσομοίωσης, η ανάλυση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει την επεξεργασία μεγεθών που χαρακτηρίζουν συνολικά τις διεργασίες, καθώς και την οπτικοποίηση των υπολογισθέντων ροϊκών πεδίων με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Συγκεκριμένα, το αρχείο “tape13” περιλαμβάνει σε πινακοποιημένη μορφή τη χρονική

ιστορία των θερμοδυναμικών μεγεθών όπως μέση πίεση, μέση θερμοκρασία, ρυθμός έκλυσης θερμότητας, χωρικά μέσες τιμές συγκεντρώσεων κλπ. Επίσης, το αρχείο “stats” αποδίδει τις θερμοκρασίες κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου, με σκοπό την αποτύπωση της θερμικής καταπόνησης.

Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων σχετίζεται με τις τοπικές τιμές των θερμοδυναμικών και ροϊκών μεγεθών, οι οποίες περιλαμβάνονται στο δημιουργούμενο αρχείο “tape9”. Η επεξεργασία γίνεται με χρήση του προγράμματος “k4post”.

Ο έλεγχος της προσομοίωσης πραγματοποιείται με χρήση του αρχείου εξόδου “tape12”, που περιέχει πληροφορίες για την πορεία των υπολογισμών. Τέλος, στο πλαίσιο της εκτέλεσης, υπάρχει η δυνατότητα επανεκκίνησης (restart), ώστε η προσομοίωση να μην γίνεται αναγκαστικά από την αρχή της συμπίεσης. Κατά την επανεκκίνηση, το αρχείο των αποτελεσμάτων “tape8” μετονομάζεται σε “tape7”, και αποτελεί αρχείο εισαγωγής για την επανεκκίνηση, αντικαθιστώντας το αρχείο πλέγματος “tape17”.

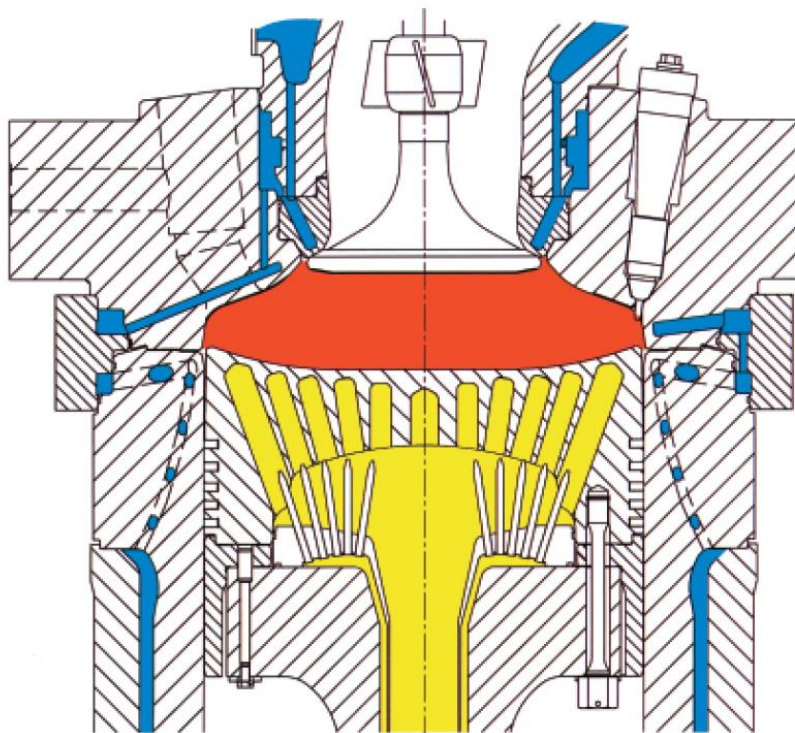


ΕΙΚΟΝΑ 7: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΙΒΑ-3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

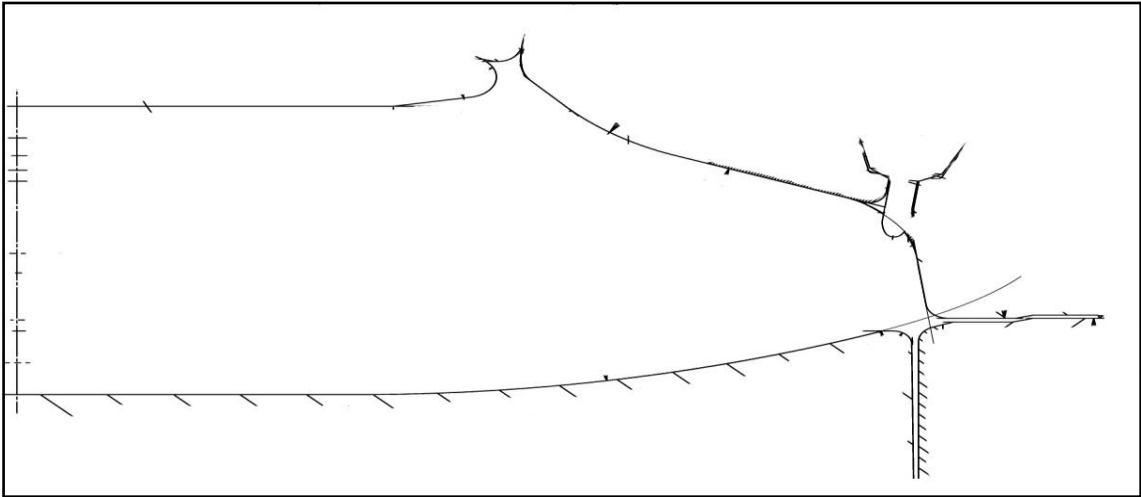
4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ

Ο θάλαμος καύσης των μηχανών εσωτερικής καύσης οριοθετείται από το έμβολο, το χιτόνιο και την κυλινδροκεφαλή. Σε έναν σύγχρονο δίχρονο ναυτικό κινητήρα, η εξαγωγή των καυσαερίων γίνεται διαμέσου μίας μεγάλης κεντρικής βαλβίδας. Η διαμήκης τομή ενός τυπικού κυλίνδρου μεγάλου δίχρονου ναυτικού κινητήρα παρουσιάζεται στην ΕΙΚΟΝΑ 8 [1], στην οποία ο θάλαμος καύσης διακρίνεται με πορτοκαλί χρώμα.



ΕΙΚΟΝΑ 8: ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ ΔΙΧΡΟΝΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ [1].

Η δημιουργία αριθμητικού πλέγματος για την προσομοίωση του υπό μελέτη κινητήρα RT-flex96C απαιτεί την ψηφιοποίηση της εγκάρσιας τομής του κινητήρα. Η ψηφιοποίηση αυτή έγινε εδώ με χρήση του σχεδιαστικού πακέτου Rhinoceros, για κάθε επιμέρους τμήμα του θαλάμου καύσης. Συνεπώς, η δημιουργία και η αποτύπωση του προφίλ του εμβόλου, του πάματος και της βαλβίδας εξαγωγής έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή του αριθμητικού πλέγματος. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε κατά τη ψηφιοποίηση σε απότομες μεταβολές της γεωμετρίας, όπως η έδραση της βαλβίδας και η περιοχή του εγχυτήρα. Επίσης, η τεχνική της εξομάλυνσης κρίθηκε απαραίτητη για την καλύτερη απόδοση της γεωμετρίας και την αποφυγή παραμορφώσεων στα όρια του πλέγματος. Το συνολικό προφίλ του θαλάμου καύσης, μετά την εξομάλυνση, φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 9. Σημειώνεται ότι το αριθμητικό πλέγμα περιλαμβάνει και τον όγκο εμβολισμού, ο οποίος υπολογίζεται με βάση τη διάμετρο (bore) και τη διαδρομή (stroke) του εμβόλου.



ΕΙΚΟΝΑ 9: ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C.

4.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

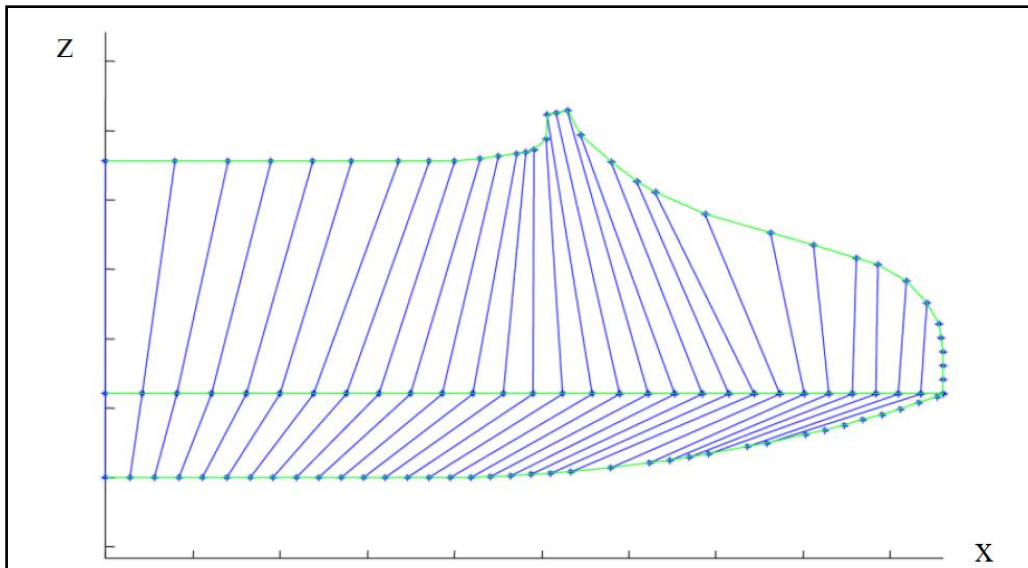
Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 περιλαμβάνει το πρόγραμμα “k3prep” με το οποίο ο χρήστης μπορεί να δημιουργεί τρισδιάστατα δομημένα πλέγματα. Η τεχνική δημιουργίας βασίζεται στη σύζευξη ξεχωριστών πλεγμάτων για καλύτερη προσέγγιση πολύπλοκων γεωμετριών (block structured mesh generation). Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε αρχικά το πρόγραμμα “k3prep” για τη δημιουργία του αριθμητικού πλέγματος του κινητήρα RT-flex96C, με χρήση των ακόλουθων μεθοδολογιών:

1. Δημιουργία δύο (2) ξεχωριστών πλεγμάτων και σύζευξη αυτών: το πρώτο πλέγμα αφορά στο χωρίο που ορίζεται από τη βαλβίδα εξαγωγής και το πώμα, ενώ το δεύτερο στον όγκο εμβολισμού (περιλαμβάνεται και το προφίλ του εμβόλου).
2. Δημιουργία τριών (3) ξεχωριστών πλεγμάτων και σύζευξη αυτών: το πρώτο πλέγμα αφορά στο χωρίο που ορίζεται από τη βαλβίδα εξαγωγής και το πώμα, το δεύτερο στον όγκο εμβολισμού (χωρίς να περιλαμβάνεται το προφίλ του εμβόλου) και το τρίτο στο χωρίο που ορίζεται από το προφίλ του εμβόλου.
3. Δημιουργία τεσσάρων (4) ξεχωριστών πλεγμάτων και σύζευξη αυτών: το πρώτο πλέγμα αφορά στο χωρίο που ορίζεται από τη βαλβίδα εξαγωγής και το πώμα, το δεύτερο στην έδραση της βαλβίδας, το τρίτο στον όγκο εμβολισμού (χωρίς να περιλαμβάνεται το προφίλ του εμβόλου) και το τέταρτο στο χωρίο που ορίζεται από το προφίλ του εμβόλου.

Για καθεμία από τις παραπάνω τεχνικές, έγινε εκτενής αξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των κελιών, τα σημεία αποτύπωσης των προφίλ, τον λόγο συμπίεσης, το χρονικό βήμα και τη συνολική διάρκεια της προσομοίωσης. Σημαντικά συμπεράσματα εξήχθησαν αναφορικά με τον τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα “k3prep” διαχειρίζεται τα δεδομένα εισόδου όπως τα προφίλ της γεωμετρίας και τον αριθμό των κελιών στις τρεις διαστάσεις. Συγκεκριμένα, η διαδικασία δημιουργίας κάθε πλέγματος χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω:

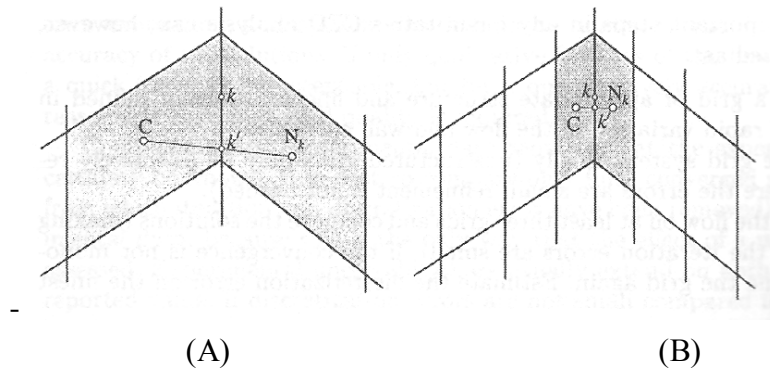
- Δημιουργία κελιών στην ακτινική διεύθυνση, “x” (ακτινική), με βάση τα σημεία που αποτυπώνουν τη γεωμετρία του προφίλ.
- Δημιουργία κελιών στην αξονική διεύθυνση, “z”, με καμπύλες που ακολουθούν τη γεωμετρία (γραμμές ροής δυναμικού).
- Δημιουργία κελιών με μορφολογία διαφορετική από τη ζητούμενη εξαεδρική, όπως κελιά μορφής τριγωνικού πρίσματος, σε σημεία της γεωμετρίας με απότομες μεταβολές του προφίλ (tent elements).

Το πρώτο χαρακτηριστικό αποτελεί μειονέκτημα στη διαδικασία της δημιουργίας πλέγματος, καθώς πρέπει να γίνει λεπτομερής μελέτη για την επιλογή των σημείων των προφίλ. Η επιλογή πρέπει να είναι τέτοια ώστε να προσεγγίζεται κατά το βέλτιστο δυνατό η γεωμετρία, ενώ ταυτόχρονα τα σημεία πρέπει να αποτελούν παράλληλα και τους κόμβους του πλέγματος. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να εξαχθεί από την ΕΙΚΟΝΑ 10.



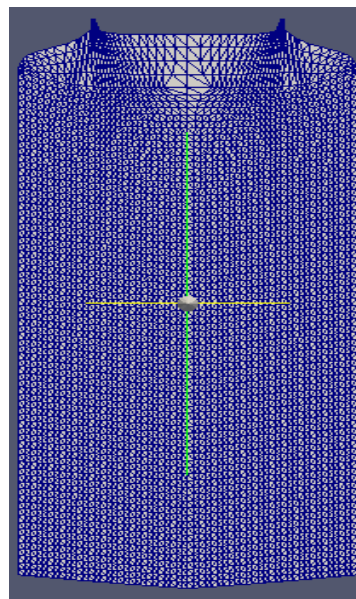
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΕΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ, Χ. Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΩΝ ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΙΖΕΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΡΟΛΟ ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ.

Το δεύτερο από τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχει ως απόρροια το φαινόμενο της παραμόρφωσης των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος (distorted cells), ιδιαίτερα σε γεωμετρίες με έντονες μεταβολές (εσοχές). Συγκεκριμένα, η παραμόρφωση των κελιών επηρεάζει αρνητικά το βασικό μέτρο ποιότητας του πλέγματος, που είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου διεπιφάνειας μεταξύ δύο κελιών και του κέντρου της νοητής γραμμής που ενώνει τα κέντρα τους. Επιπροσθέτως, η ελαχιστοποίηση της απόστασης αυτής εξασφαλίζει ορθογωνικότητα και ομοιογένεια μεταξύ των κελιών. Λαμβάνοντας υπόψη την ΕΙΚΟΝΑ 11(A), στην οποία διακρίνονται δύο γειτονικά κελιά με κέντρα C και N_k , αντίστοιχα, η βέλτιστη υπολογιστικά μορφή κελιού προκύπτει όταν το κέντρο της επιφάνειας επαφής τους k συμπίπτει με το k' (κέντρο της ευθείας CN_k). Το φαινόμενο της παραμόρφωσης διορθώνεται με την περαιτέρω διακριτοποίηση του πλέγματος όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 11(B). Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνεχής αύξηση του αριθμού των υπολογιστικών κελιών, με στόχο την επίτευξη απόλυτης ορθογωνιότητας, δεν ενδείκνυται, διότι αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος. Σε κάθε περίπτωση, η διακριτοποίηση πρέπει να είναι επαρκής, ώστε να είναι ακριβή τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [12].



ΕΙΚΟΝΑ 11: ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ (Α) ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΚΑΙ (Β) ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ [12].

Η παραπάνω εκτενής μελέτη οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η τεχνική δύο πλεγμάτων μειώνει την επίδραση των παραπάνω μειονεκτημάτων. Η εγκάρσια τομή πλέγματος που αντιστοιχεί στον κύλινδρο του ναυτικού κινητήρα RT-flex96C, με χρήση της τεχνικής των δύο πλεγμάτων, παρουσιάζεται στην ΕΙΚΟΝΑ 12. Στο συγκεκριμένο πλέγμα, διαπιστώθηκε στους υπολογισμούς το πρόβλημα μη αμελητέας απόκλισης από τον πραγματικό λόγο συμπίεσης του κινητήρα, με επιπτώσεις στα υπολογιζόμενα μεγέθη. Έτσι, κρίθηκε αναγκαία η ανάγκη για τη δημιουργία ενός περισσότερο κατάλληλου πλέγματος. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, κρίθηκε αναγκαίο η μεθοδολογία να περιλαμβάνει και γραφικό περιβάλλον (Graphical User Interface - GUI), δυνατότητα που δεν προσφέρει το πρόγραμμα “k3prep”.



ΕΙΚΟΝΑ 12: ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΤΟΝ ΚΥΛΙΝΔΡΟ ΤΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C, ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΗΚΕ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΥΟ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ.

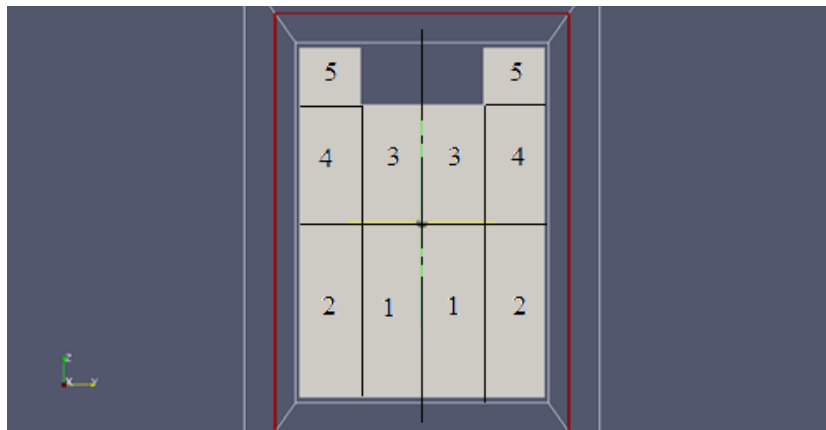
Η νέα μεθοδολογία δημιουργίας πλέγματος περιλαμβάνει τη χρήση τριών διαφορετικών λογισμικών, τα οποία συνεργάζονται κατάλληλα μεταξύ τους. Ο μοναδικός περιορισμός που τέθηκε είναι η διατήρηση της μορφής του αρχείου εξόδου “tape17”, το οποίο θα αποτελέσει αρχείο εισόδου για τον κώδικα KIVA-3. Τα τρία λογισμικά είναι τα εξής:

- k3prep: το πρόγραμμα δημιουργίας πλέγματος του κώδικα KIVA-3. Χρησιμοποιείται μόνο στην αρχή για τον καθορισμό της τοπολογίας των ξεχωριστών πλεγμάτων (initialization of block structure).
- GMSH: πρόγραμμα δημιουργίας πλέγματος [14].
- Octave: ελεύθερο λογισμικό, με ομοιότητες με το λογισμικό MATLAB. Σε αυτό το αναπτύχθηκαν προγράμματα σύζευξης των δύο παραπάνω λογισμικών.

Η μεθοδολογία αναπτύχθηκε με στόχο να δημιουργείται ένα πλέγμα που να αποτελείται από πέντε (5) επιμέρους πλέγματα (Blocks), τα οποία μετά από τη σύζευξή τους αποτυπώνουν τη γεωμετρία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα. Τα πέντε (5) επιμέρους πλέγματα είναι τα εξής:

- Block1: το εσωτερικό τμήμα του όγκου εμβολισμού.
- Block2: το εξωτερικό τμήμα του όγκου εμβολισμού.
- Block3: το εσωτερικό τμήμα του θαλάμου καύσης.
- Block4: το εξωτερικό τμήμα του θαλάμου καύσης.
- Block5: η περιοχή έδρασης της βαλβίδας εξαγωγής.

Η διάταξη των πέντε παραπάνω πλεγμάτων φαίνεται σε τομή στην ΕΙΚΟΝΑ 13.



ΕΙΚΟΝΑ 13: ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΠΕΝΤΕ ΞΕΧΩΡΙΣΤΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΙΧΡΟΝΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.

Η δημιουργία του πλέγματος, όπως αυτή αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, περιγράφεται λεπτομερώς στη συνέχεια.

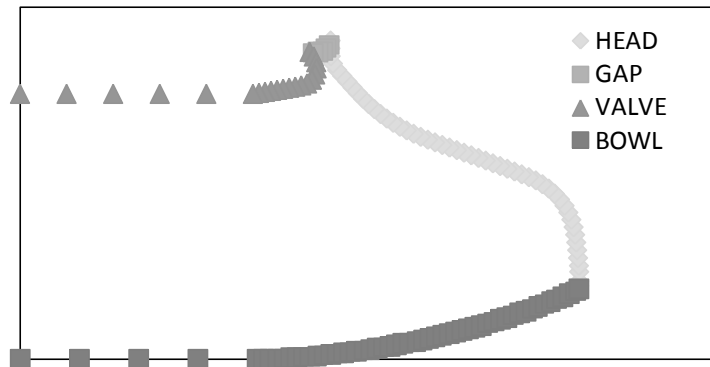
Αρχικά, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα “k3prep” του κώδικα KIVA-3, με σκοπό να οριστεί η επιθυμητή τοπολογία των πέντε επιμέρους πλεγμάτων, καθώς και οι οριακές τους

συνθήκες. Έτσι, δημιουργείται ένα ‘ψευδοπλέγμα’, το οποίο θα αναφέρεται εφεξής ως ‘πλέγμα τοπολογίας’ (βλ. ΕΙΚΟΝΑ 13). Το πλέγμα τοπολογίας αποθηκεύεται στο αρχείο “tape17”. Στη συνέχεια, γίνεται χρήση μιας σειράς προγραμμάτων σε περιβάλλον Octave, ώστε το πλέγμα τοπολογίας να μετατραπεί στο ζητούμενο πλέγμα. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται σύζευξη με το λογισμικό δημιουργίας πλέγματος GMSH. Η σειρά εκτέλεσης, καθώς και οι στόχοι των επιμέρους προγραμμάτων έχουν ως εξής:

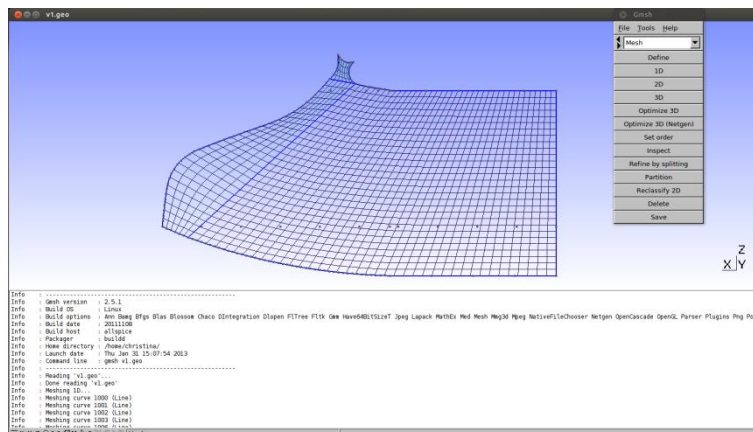
1. **“readverts.m”**: αποθηκεύει τον αριθμό των κελιών σε κάθε διεύθυνση. Ο αριθμός των κελιών συμπίπτει με αυτόν του πλέγματος τοπολογίας (αρχείο “iprep”).
2. **“head_creation.m” και “squish_creation.m”**: λαμβάνουν ως δεδομένα εισόδου τα προφίλ της γεωμετρίας του εμβόλου, του πώματος, της βαλβίδας και της έδρασης αυτής (βλ. ΕΙΚΟΝΑ 14). Σημειώνεται ότι τα προφίλ έχουν προκύψει με χρήση κατάλληλου λογισμικού σχεδίασης (βλ. Παρ.4.1), και έχουν αποθηκευτεί σε μορφή δεδομένων (αρχείο .dat). Επίσης, τα εν λόγω προγράμματα λαμβάνουν ως δεδομένο εισόδου και τον αριθμό των κελιών σε κάθε διεύθυνση, όπως αυτός αποθηκεύτηκε στο προηγούμενο βήμα. Η έξοδος των προγραμμάτων συνίσταται από τα αρχεία εντολών “squish.geo” και “head.geo”, τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από το λογισμικό GMSH (scripts). Η λειτουργία του λογισμικού GMSH αναλύεται στη συνέχεια.
3. **“nodes.m”**: λαμβάνει ως δεδομένο εισόδου τις συντεταγμένες των κόμβων που αντιστοιχούν στα πέντε επιμέρους πλέγματα και δημιουργήθηκαν από το λογισμικό GMSH, και τις αποθηκεύει σε πινακοποιημένη μορφή.
4. **“rotational_converter.m”**: αποτελεί το βασικό πρόγραμμα της παρούσας ανάπτυξης, δημιουργώντας με χρήση κατάλληλου μετασχηματισμού το τελικό τρισδιάστατο πλέγμα. Εν προκειμένω, λαμβάνεται υπόψη ο αριθμός των κελιών στην αξιμουθιακή κατεύθυνση. Οι προκύπτουσες συντεταγμένες των κόμβων αποθηκεύονται σε πινακοποιημένη μορφή.
5. **“analyse17.m”**: λαμβάνει ως αρχείο εισόδου το αρχείο “tape17”, το οποίο αντιστοιχεί στο πλέγμα τοπολογίας, και αποδίδει κατάλληλα αρχεία εξόδου, με την τοπολογία του πλέγματος σε μορφή πινάκων.
6. **“intro_to_tape17.m”**: λαμβάνει ως πληροφορία εισόδου τους δημιουργηθέντες πίνακες με τις συντεταγμένες των κόμβων του αριθμητικού πλέγματος και τις οριακές συνθήκες (από τα προγράμματα “rotational_converter.m” και “analyse17.m”, αντίστοιχα) και δημιουργηθεί το τελικό αρχείο πλέγματος “tape17”.

Το λογισμικό GMSH είναι ένα πρόγραμμα δημιουργίας αριθμητικών πλεγμάτων με γραφικό περιβάλλον (βλ. ΕΙΚΟΝΑ 15), το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δομημένων και μη δομημένων πλεγμάτων. Στην παρούσα εργασία, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα αρχεία εντολών για τη δημιουργία πλέγματος, βασισμένα στο γεωμετρικό προφίλ του θαλάμου καύσης δίχρονου ναυτικού κινητήρα. Συγκεκριμένα, τα αρχεία εντολών είναι τα “squish.geo” και “head.geo”, με τα οποία δημιουργείται ένα αρχικό διδιάστατο αξονοσυμμετρικό πλέγμα. Τα αντίστοιχα αρχεία εξόδου (κατάληξη .msh) περιέχουν τις συντεταγμένες των κόμβων του πλέγματος σε μορφή ASCII. Τα αρχεία εξόδου διαβάζονται από τα προγράμματα Octave, όπως αναλύθηκαν παραπάνω.

Η ΕΙΚΟΝΑ 16 απεικονίζει το τελικό επιφανειακό πλέγμα του ναυτικού κινητήρα RT-flex96C.



ΕΙΚΟΝΑ 14: ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ: ΕΜΒΟΛΟ (BOWL), ΠΩΜΑ (HEAD), ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΔΡΑΣΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ (GAP), ΒΑΛΒΙΔΑ ΕΞΑΓΩΓΗΣ (VALVE).



ΕΙΚΟΝΑ 15: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GMSH.



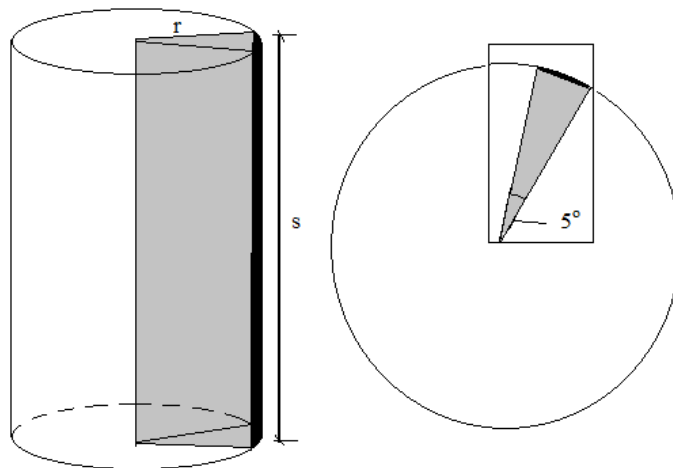
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΤΕΛΙΚΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C.

Η παραπάνω μεθοδολογία δημιουργίας πλεγμάτων είναι υπολογιστικά αποδοτική, και παρέχει τη δυνατότητα αποτύπωσης όλων των λεπτομερειών σε γεωμετρίες σύγχρονων δίχρονων ναυτικών κινητήρων. Το αποτέλεσμα της παρούσας ανάπτυξης βασίζεται στην αξιοποίηση του γραφικού περιβάλλοντος του λογισμικού GMSH, και στην επιτευχθείσα αποσύζευξη του γεωμετρικού προφίλ του θαλάμου καύσης και του αριθμού των κελιών του πλέγματος.

4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΠΛΗΡΕΣ ΦΟΡΤΙΟ

Η δημιουργία πλέγματος για την προσομοίωση στον ναυτικό κινητήρα RT-flex96C βασίστηκε στο λογισμικό που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Η τελική επιλογή ενός πλέγματος εξαρτάται από την αξιολόγησή, ώστε: (α) να επιτυγχάνεται η σωστή τιμή του λόγου συμπίεσης του κινητήρα, και (β) για κατάλληλες αρχικές συνθήκες, να επιτυγχάνεται ανεξαρτησία πλέγματος (grid-independent results), και η καμπύλη της χρονικής μεταβολής της πίεσης κατά τη συμπίεση να είναι πολύ κοντά στην αντίστοιχη πειραματική.

Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του κινητήρα, όλα τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν χαρακτηρίζονταν από σχετικά υψηλό αριθμό κελιών (άνω των 100,000). Για την ταχεία προσέγγιση του κατάλληλου πλέγματος ώστε αυτό να αντιστοιχεί στην ορθή τιμή του λόγου συμπίεσης, καθώς και για την ταχεία σύγκλιση στις κατάλληλες αρχικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, χρησιμοποιήθηκε πλέγμα που αντιστοιχεί σε «υπολογιστικό σφήνα», με ένα κελί στην αζιμουθιακή κατεύθυνση, με εύρος 5° (ΕΙΚΟΝΑ 17).



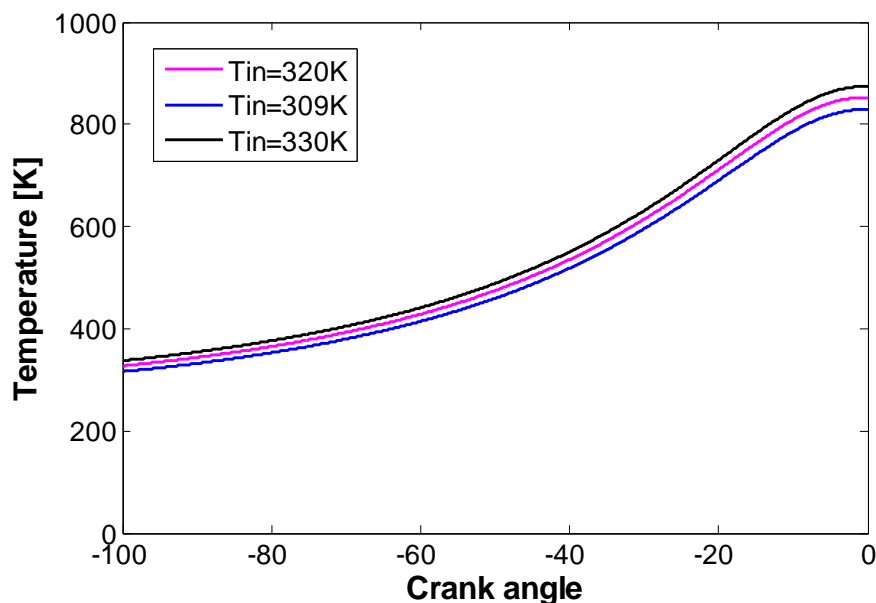
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΣΦΗΝΑ».

Οι δοκιμές αξιολόγησης που αφορούν στον όγκο εμβολισμού κατέληξαν σε ελάχιστη απόκλιση της τάξης του 0.1%, η οποία οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η θεωρούμενη από τον κώδικα KIVA-3 γεωμετρία προσεγγίζεται μέσω της σύνδεσης των οριακών κόμβων του πλέγματος με ευθύγραμμα τμήματα. Αναφορικά με τον επίσημο όγκο, η απόκλιση ήταν πρακτικά μηδενική.

Στο πλαίσιο του υπολογισμού των αρχικών συνθηκών, έγινε χρήση μιας διαδικασίας δοκιμής και επαλήθευσης, στο πλαίσιο της οποίας υπολογίζεται η «κρύα ροή» στη φάση της συμπίεσης (έως το ΑΝΣ). Εδώ, μελετάται το κλειστό τμήμα του κύκλου (με αρχή τις -105.1° γωνίας στροφάλου που αντιστοιχούν στο κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής). Σε κάθε δοκιμή,

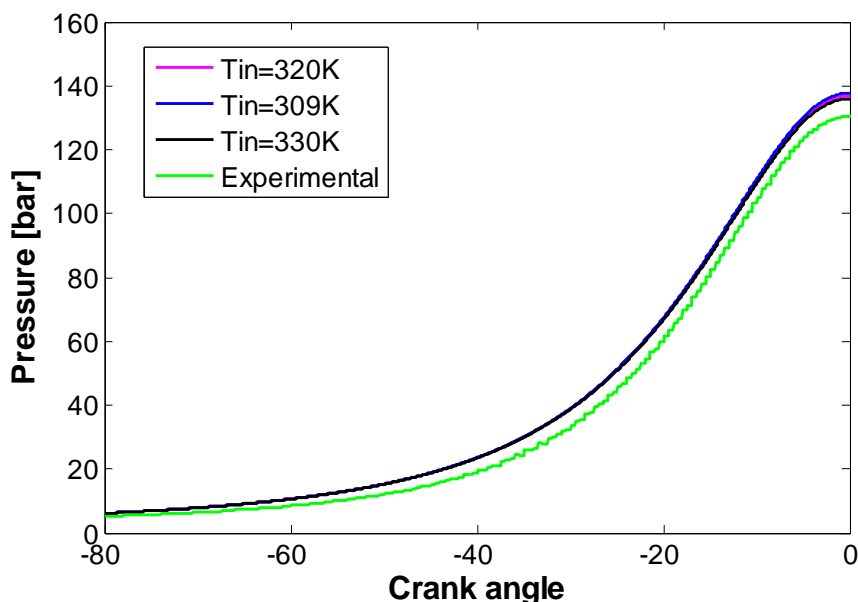
θεωρείται ότι στην αρχή της συμπίεσης το μίγμα αποτελείται από καθαρό ατμοσφαιρικό αέρα (μηδενικό ποσοστό παραμένουτος καυσαερίου). Η παραδοχή αυτή εισάγει κάποιο μικρό σφάλμα. Στόχος της διαδικασίας είναι η εύρεση κατάλληλων αρχικών συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας, ώστε η υπολογιζόμενη τιμή της πίεσης στο ΑΝΣ να είναι πολύ κοντά στην αντίστοιχη πειραματική (βλ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6).

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7 παρουσιάζεται η υπολογισθείσα χρονική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του αέρα εντός του κυλίνδρου, για διαφορετικές θερμοκρασίες εισαγωγής του αέρα (scavenge air temperature), με αρχική πίεση αέρα (scavenge air pressure) σταθερή, ίση με την πειραματική τιμή των 3.94 bar.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: Η ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΑΕΡΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΡΧΙΚΗ ΠΙΕΣΗ, ΙΣΗ ΜΕ 3.94 BAR.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8 παρουσιάζεται η αντίστοιχη η υπολογισθείσα χρονική μεταβολή της πίεσης εντός του κυλίνδρου, καθώς και η αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Παρατηρείται ότι εμφανίζεται απόκλιση μεταξύ της προσομοίωσης και του πειράματος, και δεν προβλέπεται η τιμή της πίεσης συμπίεσης στο ΑΝΣ.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: Η ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΠΙΕΣΗ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ, ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΡΧΙΚΗ ΠΙΕΣΗ, ΙΣΗ ΜΕ 3.94 BAR.

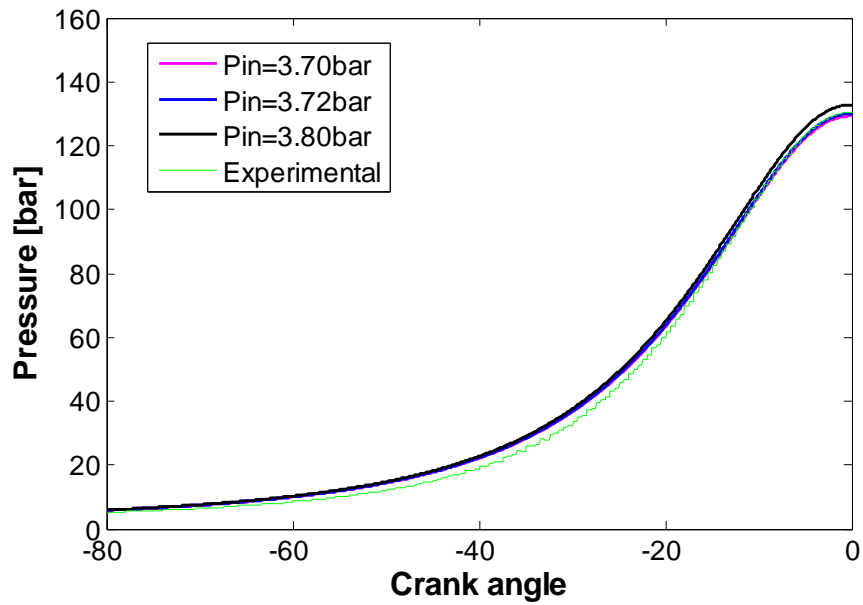
Από τα παραπάνω αποτελέσματα απορρέει ότι η αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει σημαντικά την πίεση στο ΑΝΣ. Έτσι, η αρχική θερμοκρασία διατηρήθηκε σταθερή, ίση με την πειραματική τιμή των 309K, και έγινε μεταβολή της αρχικής πίεσης.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9 απεικονίζεται η χρονική μεταβολή της πίεσης εντός του κυλίνδρου, για διαφορετικές τιμές της αρχικής πίεσης. Παρατηρείται ότι η τιμή των 3.72 bar προβλέπει ικανοποιητικά την πειραματική τιμή της πίεσης συμπίεσης στο ΑΝΣ.

Συνεπώς, οι τελικές τιμές των αρχικών συνθηκών του αέρα εισαγωγής που επιλέγονται είναι:

- Πίεση αέρα: 3.72 bar
- Θερμοκρασία αέρα: 309K

Οι τιμές αυτές διατηρήθηκαν σταθερές σε όλες τους υπολογισμούς που ακολουθούν.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΠΙΕΣΗ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΕΡΤΙΚΕΣ ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ, ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ, ΙΣΗ ΜΕ 309Κ. ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ.

4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα τελικά υπολογιστικά αποτελέσματα πρέπει να είναι ανεξάρτητα από την πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος και την τιμή του χρονικού βήματος. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε πλέγμα (Initial grid), με την εξής διαμέριση:

- Block 1: $n_x=39$, $n_y=72$, $n_z=50$
- Block 2: $n_x=6$, $n_y=72$, $n_z=50$
- Block 3: $n_x=39$, $n_y=72$, $n_z=29$
- Block 4: $n_x=6$, $n_y=72$, $n_z=29$
- Block 5: $n_x=6$, $n_y=72$, $n_z=4$

Όπου,

n_x : ο αριθμός των κελιών στην ακτινική διεύθυνση, x

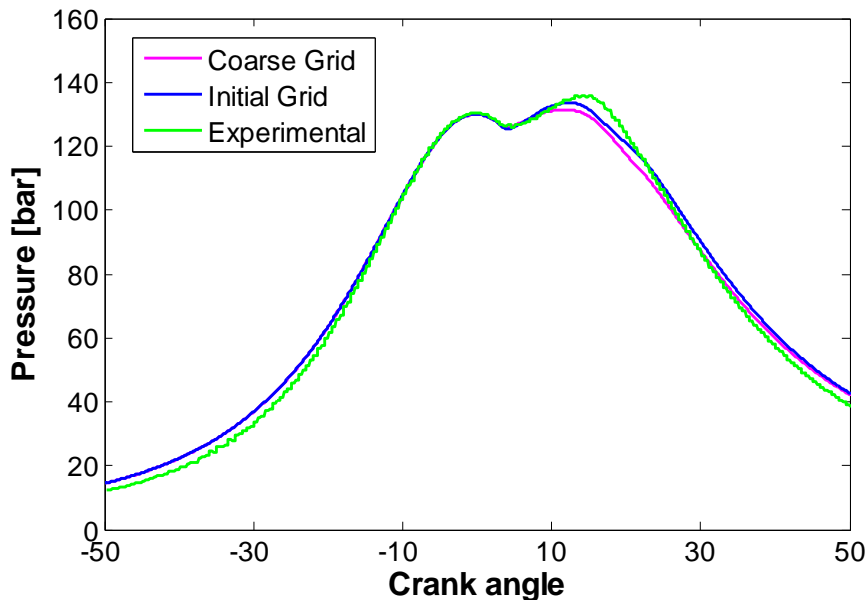
n_y : ο αριθμός των κελιών στην αζιμουθιακή διεύθυνση, y

n_z : ο αριθμός των κελιών στην αξονική διεύθυνση, z

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν πλέγματα με υποδιπλάσιο (Αραιό πλέγμα - Coarse grid) και διπλάσιο (Πυκνό πλέγμα - Fine grid) αριθμό κελιών σε καθεμία από τις τρεις διευθύνσεις, κρατώντας κάθε φορά τη διακριτοποίηση στις άλλες δύο ίδια με αυτή του αρχικού πλέγματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

4.4.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ

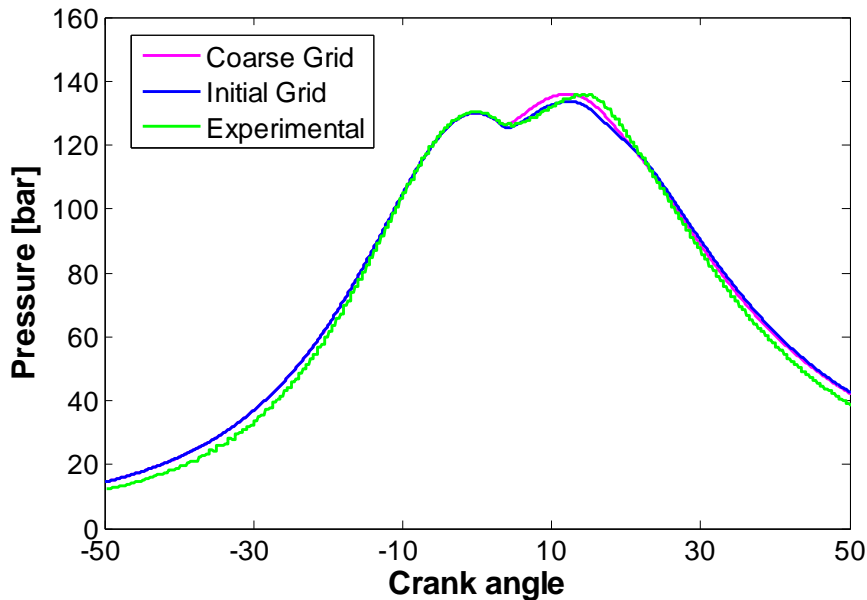
Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη χρονική ιστορία της πίεσης εντός του κυλίνδρου, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου n_x . Τα αποτελέσματα αφορούν στο αρχικό (Initial grid) και στο αραιό πλέγμα (Coarse grid), ενώ παρουσιάζεται και η αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Η εκτέλεση της προσομοίωσης για το πυκνό πλέγμα (Fine grid) δεν συνέκλινε. Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10 παρατηρείται ότι καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων επιτυγχάνεται με το αρχικό πλέγμα (Initial grid).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΠΙΕΣΗ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ, ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ. ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ.

4.4.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΖΙΜΟΥΘΙΑΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ

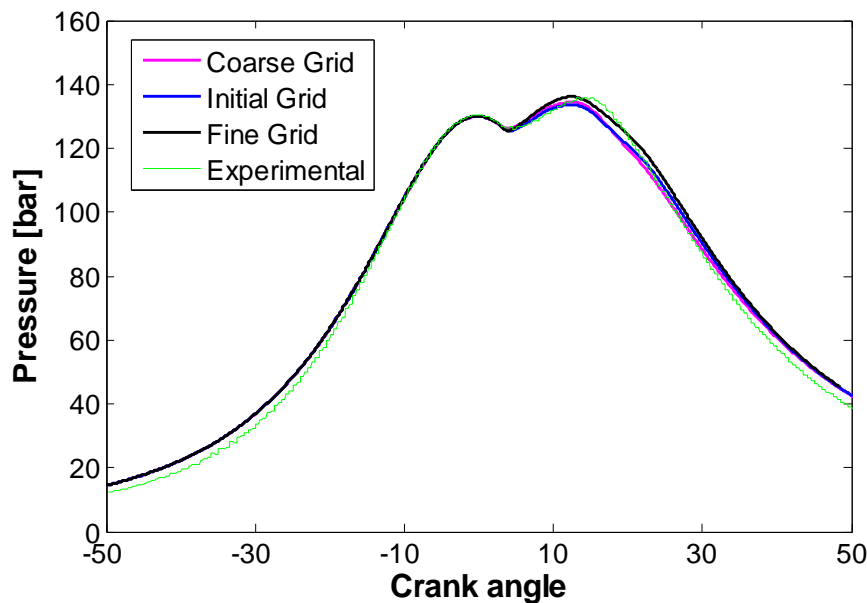
Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη χρονική ιστορία της πίεσης εντός του κυλίνδρου, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ny . Τα αποτελέσματα αφορούν στο αρχικό (Initial grid) και στο αραιό πλέγμα (Coarse grid), ενώ παρουσιάζεται και η αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Η εκτέλεση της προσομοίωσης για το πυκνό πλέγμα (Fine grid) δεν συνέκλινε. Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11 παρατηρείται ότι καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων επιτυγχάνεται με το αραιό πλέγμα (Coarse grid).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΠΙΕΣΗ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ, ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΖΙΜΟΥΘΙΑΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ. ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ.

4.4.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη χρονική ιστορία της πίεσης εντός του κυλίνδρου, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου nz . Τα αποτελέσματα αφορούν στο αρχικό (Initial grid), το αραιό πλέγμα (Coarse grid) και το πυκνό πλέγμα (Fine grid), ενώ παρουσιάζεται και η αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Παρατηρείται ότι καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων επιτυγχάνεται από το πυκνό πλέγμα (Fine grid).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΠΙΕΣΗ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ, ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ. ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ.

Από την παραπάνω μελέτη αναφορικά με την επίδραση της πυκνότητας του πλέγματος, διαπιστώνεται ότι επιτυγχάνεται καλή σύγκλιση για την καμπύλη της πίεσης, για τα ακόλουθα πλέγματα:

- το αραιό πλέγμα στην αξιμουθιακή διεύθυνση (130,000 κελιά)
- το αρχικό πλέγμα (260,000 κελιά)
- το πυκνό πλέγμα στην αξονική διεύθυνση (500,000 κελιά)

Στην παρούσα εργασία σημαντικό κριτήριο για την τελική επιλογή του υπολογιστικού πλέγματος ήταν και ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος. Ο υπολογιστικός χρόνος εξαρτάται και από την τιμή του χρονικού βήματος. Η μελέτη για την επίδραση του χρονικού βήματος υπολογισμού βασίστηκε σε προγενέστερη διερεύνηση για τον κινητήρα RT-flex58T-B. Εν προκειμένω, καλή σύγκλιση για την καμπύλη της πίεσης προέκυψε για τιμές του χρονικού βήματος περί την τιμή $\Delta t = 2.0 \times 10^{-5}$ s, η οποία αντιστοιχεί περίπου σε 79 χρονικά βήματα ανά μοίρα γωνίας στροφάλου. Οι κινητήρες RT-flex58T-B και RT-flex96C

χαρακτηρίζονται από τον ίδιο αριθμό στροφών στο πλήρες φορτίο. Έτσι, είναι πιθανό η τιμή του χρονικού βήματος $\Delta t = 2 \times 10^{-5}$ s να είναι κατάλληλη και για τον υπό μελέτη κινητήρα RT-flex96C. Η υπόθεση αυτή επαληθεύτηκε με εκτέλεση προσομοίωσης για τιμές $\Delta t = 2.0 \times 10^{-5}$ s και $\Delta t = 1.5 \times 10^{-5}$ s. Οι δύο προσομοιώσεις πρακτικά κατέληξαν στα ίδια αποτελέσματα. Η τιμή χρονικού βήματος $\Delta t = 2 \times 10^{-5}$ s επιλέχθηκε για τους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας.

Η προσομοίωση της λειτουργίας του ναυτικού κινητήρα RT-flex96C σε πλήρες φορτίο με πλέγμα 500,000 κελιών και 260,000 κελιών απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, τάξης μερικών ημερών. Έτσι, η χρήση πλέγματος με 130,000 κελιά είναι συμφέρουσα, διότι προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα στο 1/5 του υπολογιστικού χρόνου, σε σύγκριση με το πλέον πυκνό πλέγμα. Ωστόσο, το αραιό πλέγμα των 130,000 κελιών χαρακτηρίζεται από μικρό αριθμό κελιών στην αζιμουθιακή κατεύθυνση (36 κελιά), με αποτέλεσμα να μην προσεγγίζεται ικανοποιητικά ο όγκος εμβολισμού. Συνεπώς, δημιουργήθηκε ένα ακόμη πλέγμα, με συνολικό αριθμό κελιών περί τα 130,000, αλλά με μεγαλύτερο σε σχέση με το προαναφερθέν αριθμό κελιών στην αζιμουθιακή διεύθυνση ($n_y=72$). Το πλέγμα αυτό θεωρήθηκε ως το τελικό, και χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της θερμορευστομηχανικής του κινητήρα RT-flex96C στην περιοχή του πλήρους φορτίου. Τα χαρακτηριστικά του εν λόγω πλέγματος παρουσιάζονται στον ΠΙΝΑΚΑ VI.

	Ξεχωριστά πλέγματα (Blocks)					Πλέγμα (σύζευξη blocks)
	1	2	3	4	5	
Κατεύθυνση	Αριθμός κελιών					
Ακτινική	37	3	37	3	3	40
Αζιμουθιακή	72	72	72	72	72	72
Αξονική	31	31	14	14	4	49
Σύνολο κελιών	82,584	6,696	37,296	3,024	864	130,464
	Απόκλιση μεταξύ υπολογισμών και πειράματος					
Όγκος στο ANΣ	0.02%					
Όγκος στο ΚΝΣ	0.12%					
Λόγος συμπίεσης	0.12%					

ΠΙΝΑΚΑΣ VI: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ RT-FLEX96C

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται υπολογιστικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του κινητήρα RT-flex96C στην περιοχή του πλήρους φορτίου, συγκεκριμένα για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- (α) Λειτουργία με συνεχές προφίλ έγχυσης (περίπτωση αναφοράς)
- (β) Λειτουργία με συνεχές προφίλ έγχυσης και διαφοροποίηση της έντασης εγκάρσιου στροβιλισμού
- (γ) Λειτουργία με εφαρμογή τεχνικής προέγχυσης

Τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου πλέγματος παρουσιάζονται στον ΠΙΝΑΚΑ VI. Η τιμή χρονικού βήματος είναι $\Delta t = 2 \times 10^{-5}$ s. Σημειώνεται ότι, για τον συγκεκριμένο κινητήρα, για λόγους αντοχής, η μέγιστη πίεση δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή των 141 bar.

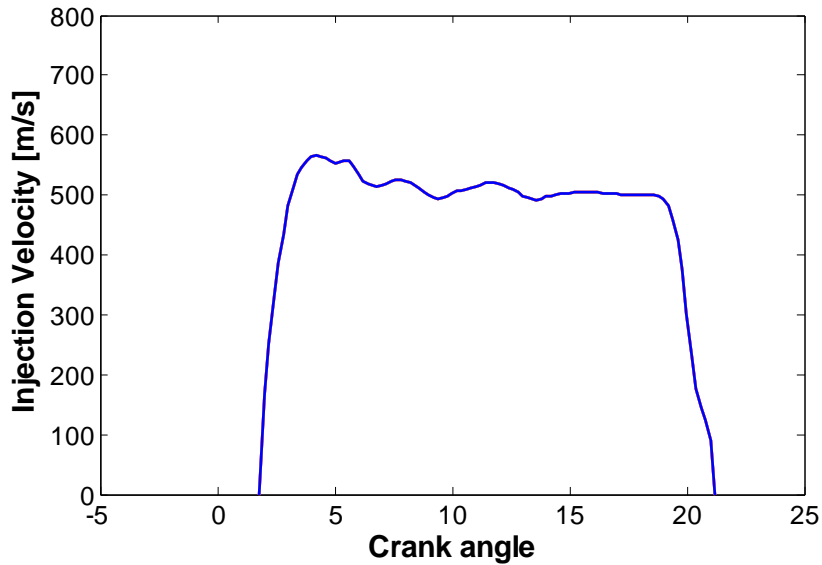
5.1 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η περίπτωση αναφοράς χαρακτηρίζεται από συνεχές προφίλ έγχυσης. Τιμές σημαντικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση παρουσιάζονται στον ΠΙΝΑΚΑ VII.

Ένταση εγκάρσιου στροβιλισμού (Swirl Number – Sn)	6.7
Πίεση αέρα εισαγωγής στον κύλινδρο	3.72 bar
Θερμοκρασία αέρα εισαγωγής στον κύλινδρο	309 K

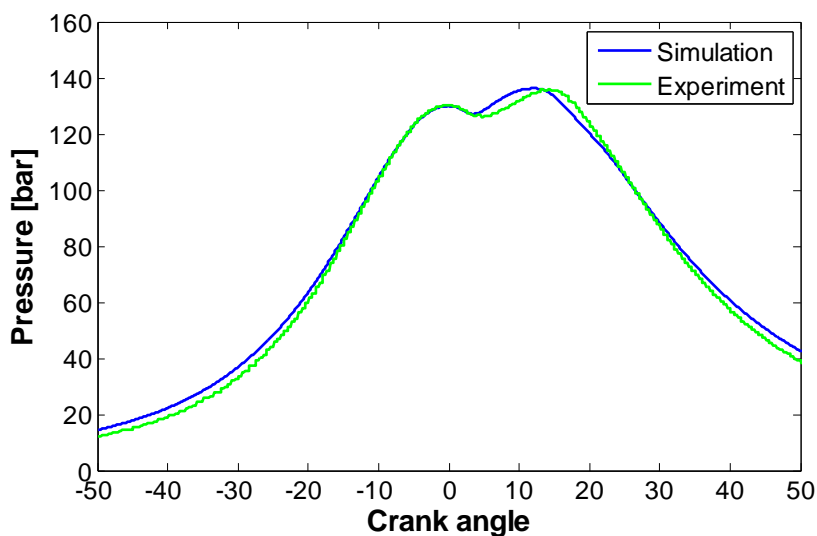
ΠΙΝΑΚΑΣ VII: ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

Το προφίλ έγχυσης καυσίμου αντιστοιχεί σε πειραματικά προσδιορισθέν (βλ. Ενότητα 3.1.2). Η λειτουργία γίνεται με καύσιμο diesel. Εδώ, οι θερμοφυσικές ιδιότητες του καυσίμου προσεγγίζονται με αυτές του δεκατετρανίου ($C_{14}H_{30}$). Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13 παρουσιάζεται το προφίλ της ταχύτητας έγχυσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου. Διαπιστώνεται η ταχύτητα έγχυσης είναι τάξης 500 m/s.



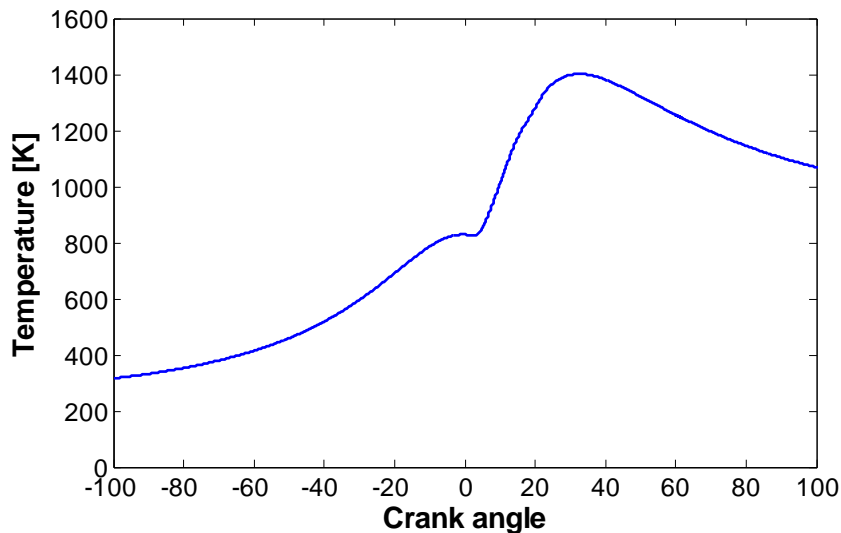
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΠΛΗΡΕΣ ΦΟΡΤΙΟ.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14 παρουσιάζεται η υπολογισθείσα καμπύλη πίεσης, η οποία συγκρίνεται με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Η σύγκριση μεταξύ των δύο καμπυλών υποδεικνύει ότι η προσομοίωση της λειτουργίας προσεγγίζει ικανοποιητικά την πειραματική. Συγκεκριμένα, η πίεση στο ΑΝΣ προβλέπεται με ακρίβεια από την προσομοίωση, αν και οι τιμές της πίεσης στα αρχικά στάδια της συμπίεσης διαφέρουν από τις αντίστοιχες πειραματικές. Τόσο στο πείραμα, όσο και στην προσομοίωση, η μέγιστη πίεση καύσης είναι ίση με 136 bar, και δεν ξεπερνά το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο των 141 bar.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15 απεικονίζεται η χρονική ιστορία της μέσης θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16 παρουσιάζεται η καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Rate Of Heat Release – ROHR). Σημειώνεται ότι οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας έχουν αδιαστατοποιηθεί ως εξής:

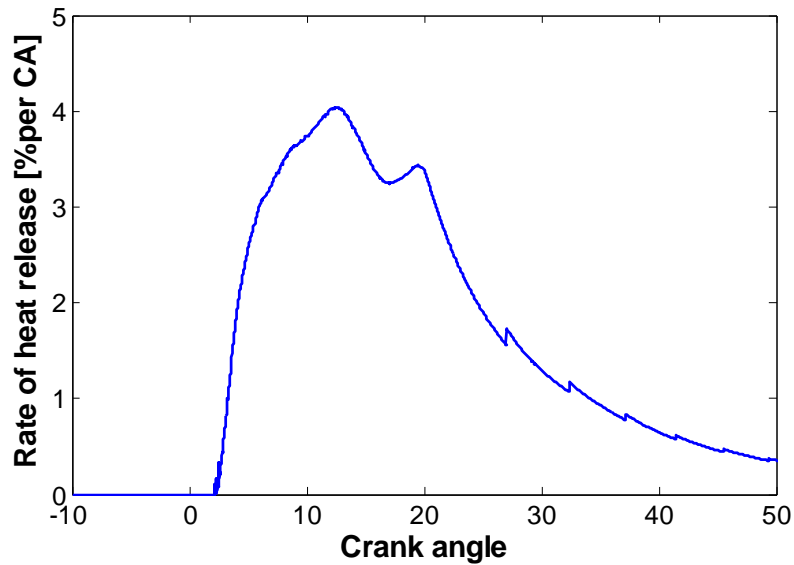
$$ROHR = \frac{d(Q_{chem})}{d(CA)} \cdot \frac{100}{Q_{chem,tot}}$$

Όπου,

Q_{chem} , εκλυόμενη θερμότητα λόγω της καύσης

$Q_{chem,tot}$, συνολικά εκλυόμενη θερμότητα λόγω της καύσης

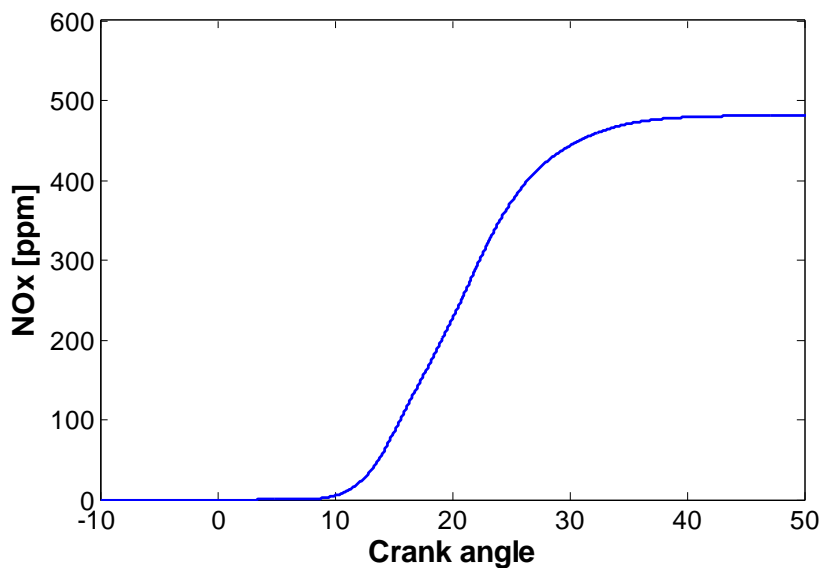
Παρατηρείται ότι η έναυση του καυσίμου λαμβάνει χώρα λίγο μετά την έγχυσή του, περί τις 3° μετά το ΑΝΣ. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας χαρακτηρίζεται από δύο κορυφές, λόγω του έντονου εγκάρσιου στροβιλισμού του αέρα. Η πρώτη κορυφή δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα καυσαέρια από παρασύρονται από τη ροή του αέριο μίγματος, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονο εγκάρσιο στροβιλισμό, και οδηγούνται στην περιοχή του επόμενου εγχυτήρα. Έτσι, τα καυσαέρια καταλαμβάνουν περιοχές, όπου υπήρχε οξυγόνο, με συνέπεια τη μείωση του διαθέσιμου για την καύση οξυγόνου, και κατ' επέκταση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Ωστόσο, η έγχυση του καυσίμου δεν έχει τερματιστεί, και έτσι αποτελεί αιτία παραγωγής τύρβης, με αποτέλεσμα διαθέσιμο οξυγόνο να οδηγείται σε περιοχές πλούσιες σε καύσιμο. Έτσι, δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες καύσης, η οποία συντελεί εκ νέου σε αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (δεύτερη κορυφή).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΥΘΜΟΥ ΕΚΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

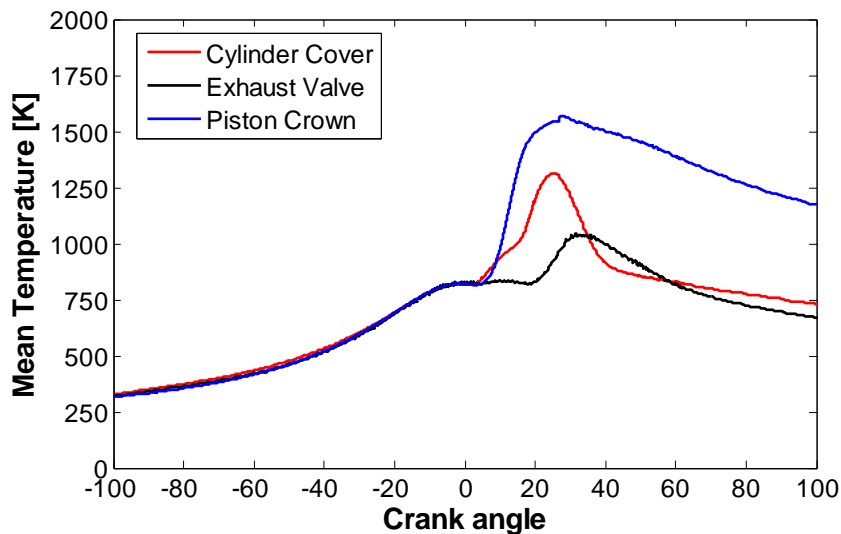
Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου (NO_x).

Παρατηρείται ότι η παραγωγή NO_x λαμβάνει χώρα μετά τις 10° γωνίας στροφάλου. Μετά τις 30° που τα επίπεδα θερμοκρασίας είναι χαμηλά εξαιτίας της εκτόνωσης, ο σχηματισμός NO_x σταματά και η συγκέντρωσή τους σταθεροποιείται. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη πειραματική τιμή της τελικής συγκέντρωσης NO_x.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ NO_x ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

Η θερμική καταπόνηση του κινητήρα μπορεί να εκτιμηθεί μελετώντας τη χρονική ιστορία της θερμοκρασίας σε κελιά πολύ κοντά στα τοιχώματα. Έτσι, στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18 παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία για τα υπολογιστικά κελιά που βρίσκονται πολύ κοντά στο τοίχωμα του πώματος, της βαλβίδας εξαγωγής και της κεφαλής του εμβόλου. Διαπιστώνεται ότι η περιοχή με τη μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση είναι αυτή του εμβόλου.

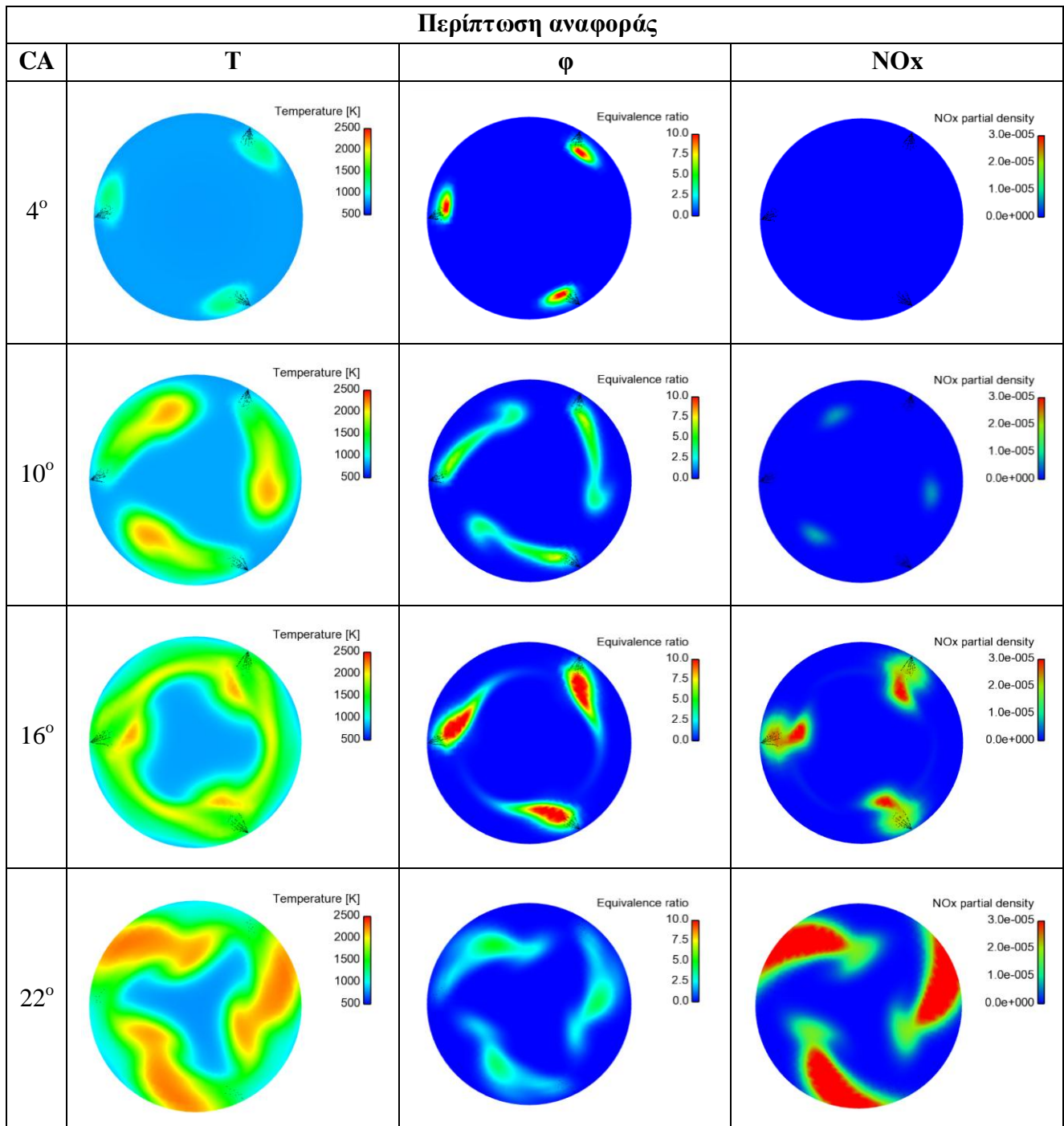


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΛΙΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΠΩΜΑΤΟΣ, ΤΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΤΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

5.1.1 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η οπτικοποίηση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων προσφέρει σημαντική πληροφορία για την κατανόηση της θερμορευστομηχανικής του κινητήρα. Συγκεκριμένα, πληροφορίες για το πεδίο ροής, την ανάμιξη καυσίμου-αέρα και την καύση συμβάλλουν στην καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, και προσφέρουν δυνητικά προτάσεις βελτίωσης της συνολικής διεργασίας.

Στην ΕΙΚΟΝΑ 18 απεικονίζονται ισοϋνείς καμπύλες της θερμοκρασίας, του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (ϕ) και του κλάσματος μάζας NO_x , για συνθήκες πλήρους φορτίου. Οι καμπύλες αφορούν στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων και αντιστοιχούν σε αντιπροσωπευτικές χρονικές στιγμές, εντός των ορίων της έγχυσης καυσίμου. Συγκεκριμένα, στις 4° , έχει ήδη εκκινήσει η καύση, και τα επίπεδα θερμοκρασίας δεν ευνοούν τον σχηματισμό NO_x . Στις 10° , ο έντονος εγκάρσιος στροβιλισμός οδηγεί το μέτωπο των καυσαερίων από τον ένα εγχυτήρα στην περιοχή του επόμενου εγχυτήρα. Έτσι, η επίδραση των καυσαερίων με τους εγχυτήρες είναι εμφανής στις 16° , με αποτέλεσμα την εμφάνιση της δεύτερης κορυφής στην καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, λίγο αργότερα (βλ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16). Ο σχηματισμός NO_x είναι έντονος στα τελευταία στάδια της έγχυσης, και οφείλεται στις διατηρούμενες τοπικά υψηλές θερμοκρασίες.



ΕΙΚΟΝΑ 18: ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ: ΙΣΟΥΨΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ, ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ – ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΑΖΑΣ NO_x, ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΩΝ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ.

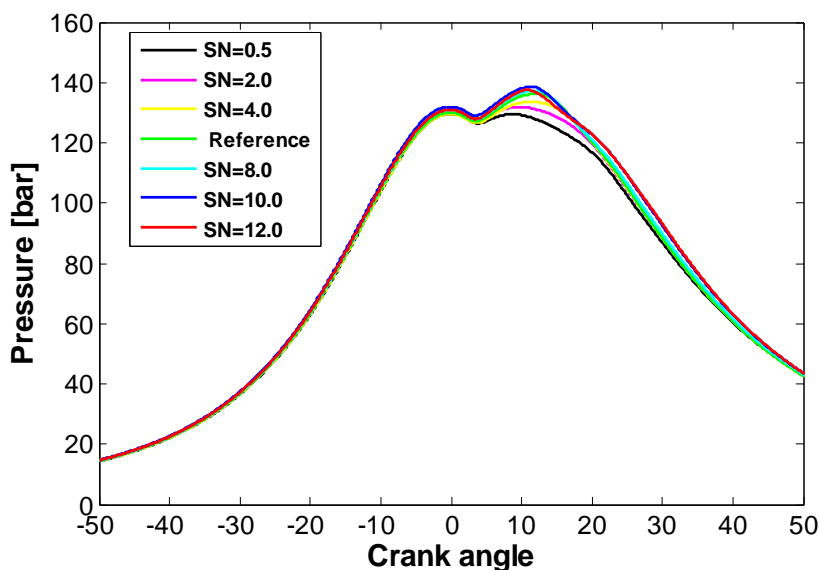
5.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΓΚΑΡΣΙΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ

Στην παρούσα Ενότητα μελετάται η επίδραση της έντασης του εγκάρσιου στροβιλισμού του αέρα στη λειτουργία του κινητήρα RT-flex96C σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Η ένταση του εγκάρσιου στροβιλισμού ποσοτικοποιείται με τον αριθμό swirl, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος μιας αντιπροσωπευτικής τιμής της γωνιακής ταχύτητας του στροβιλισμού προς τη γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα ($SN = \omega_{swirl} / \omega_{engine}$). Οι τιμές του μεγέθους SN (swirl number) οι οποίες εξετάστηκαν περιλαμβάνονται στον ΠΙΝΑΚΑ VIII. Η περίπτωση αναφοράς αντιστοιχεί σε $SN=6.7$. Η παρούσα διερεύνηση θα έχει ως σημείο σύγκρισης την περίπτωση αναφοράς.

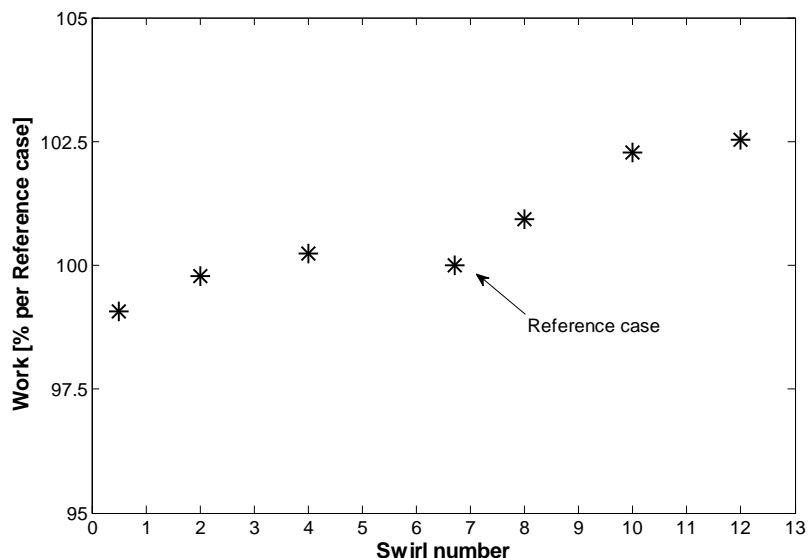
ΕΝΤΑΣΗ ΕΓΚΑΡΣΙΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ (Swirl Number – SN)						
0.5	2.0	4.0	6.7 (Περίπτωση Αναφοράς)	8.0	10.0	12.0

ΠΙΝΑΚΑΣ VIII: ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SWIRL ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19 παρουσιάζεται η πίεση συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τις διαφορετικές τιμές SN του αέρα. Παρατηρείται ότι η καμπύλη της πίεσης μέχρι το ΑΝΣ δεν αλλάζει, για όλα τα επίπεδα της έντασης του εγκάρσιου στροβιλισμού. Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται σημαντικά κατά τη διάρκεια της καύσης, και συγκεκριμένα παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση της μέγιστης πίεσης. Εν γένει, η μέγιστη πίεση αυξάνει με αύξηση του SN, γεγονός που αποτυπώνεται σε αντίστοιχη αύξηση της τιμής του ωφέλιμου έργου του κλειστού τμήματος του κύκλου (ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20). Οι παρούσες διαπιστώσεις επιβεβαιώνουν τη σημαντική επίδραση της τιμής του μεγέθους SN στη λειτουργία του κινητήρα.

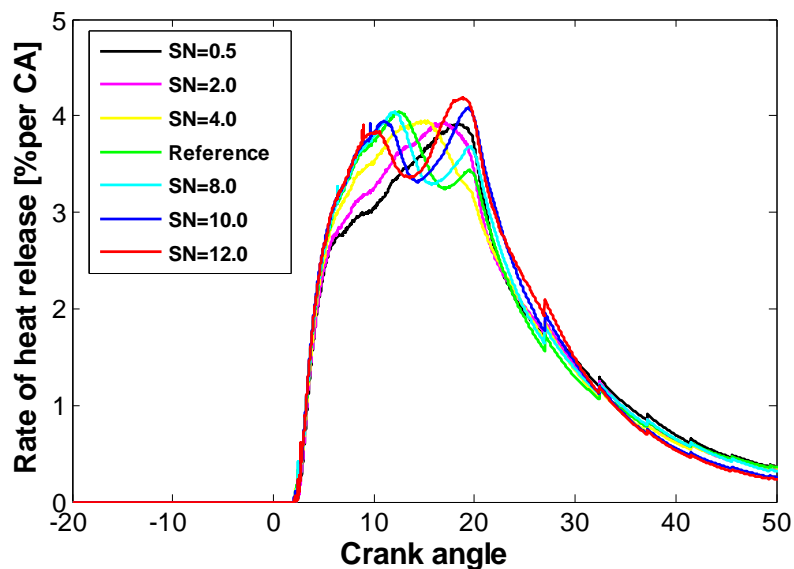


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΓΚΑΡΣΙΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ.



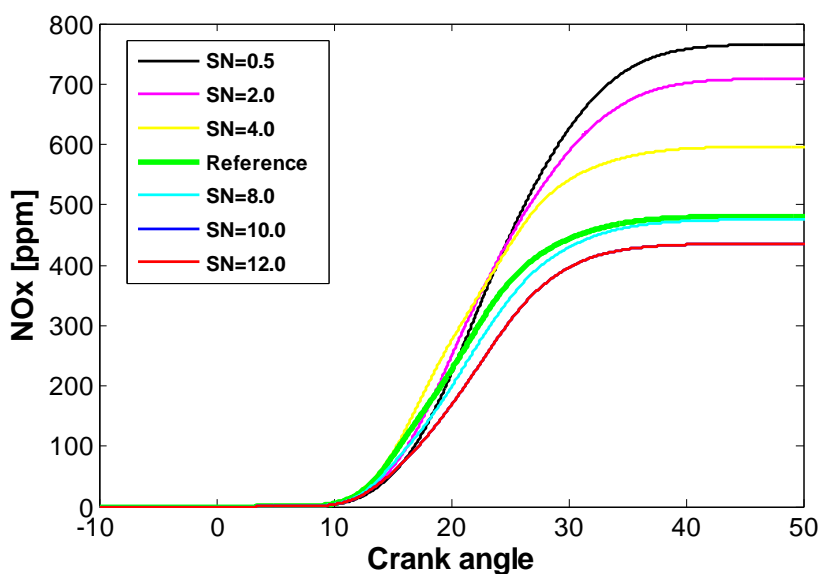
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20 : ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΩΦΕΛΙΜΟ ΕΡΓΟ, ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ SWIRL.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21 παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για τις διαφορετικές τιμές του SN. Αξιοσημείωτο είναι ότι, για τιμές μικρότερες από αυτές της περίπτωσης αναφοράς, οι καμπύλες χαρακτηρίζονται μόνο από μία κορυφή. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι δεν υφίσταται έντονη αλληλεπίδραση των καυσαερίων με τη ροή του spray, στην περιοχή εγγύς των εγχυτήρων. Επίσης, η καύση σημαντικής ποσότητας καυσίμου λαμβάνει χώρα αρκετές μοίρες γωνίας στροφάλου μετά την έναρξη της έγχυσης, με τη μεγαλύτερη τιμή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας να προκύπτει περί τις 20° . Αυτό συμβαίνει διότι η απουσία έντονου εγκάρσιου στροβιλισμού του αέρα επιδρά στη μεταφορά θερμότητας προς τα σταγονίδια που δημιουργήθηκαν μετά τη διάσπαση της δέσμης του καυσίμου, και κατά συνέπεια στον ρυθμό εξάτμισης, καθώς και στον ρυθμό ανάμιξης καυσίμου-αέρα. Το αντίθετο ισχύει για μεγάλες τιμές του SN, με αποτέλεσμα έντονους ρυθμούς έκλυσης θερμότητας αμέσως μετά την έναρξη της έγχυσης, καθώς και την έντονη αλληλεπίδραση της ροής του αέριου μίγματος με το spray.



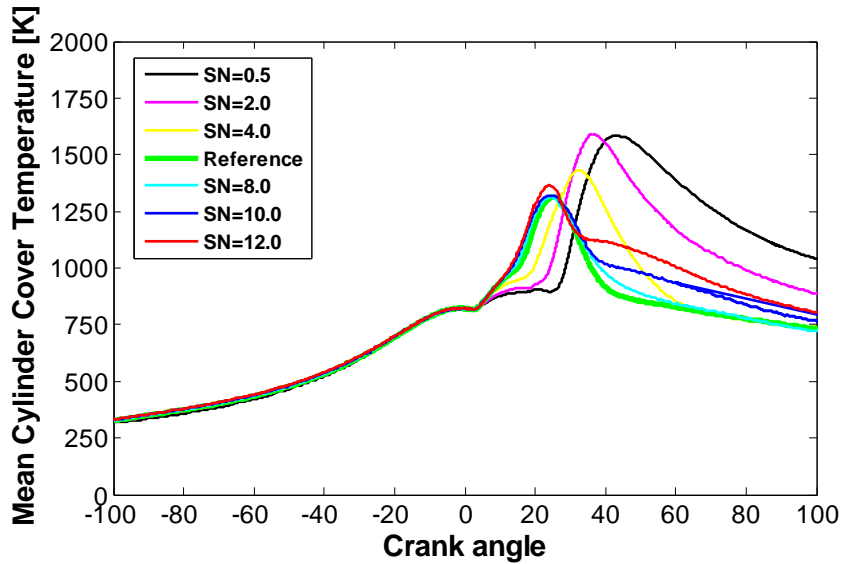
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΥΘΜΟΥ ΕΚΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SWIRL.

Η χρονική ιστορία σχηματισμού NO_x παρουσιάζεται στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22. Παρατηρείται ότι ο σχηματισμός είναι περισσότερο έντονος για μικρές τιμές του SN, γεγονός που θα πρέπει να αποδοθεί στους χαμηλότερους ρυθμούς ανάμιξης, με αποτέλεσμα τιμές του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα εγγύτερους προς τη μονάδα, και κατά συνέπεια τοπικά υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας.

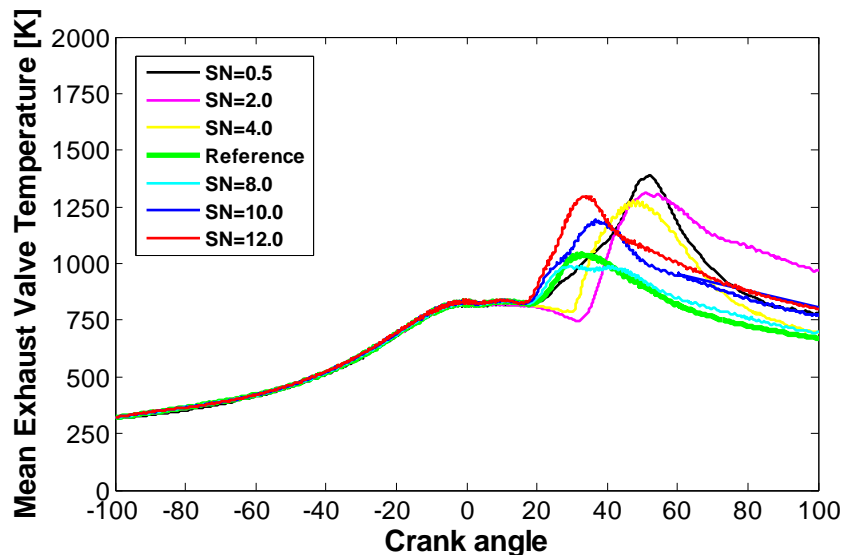


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ NO_x ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SWIRL.

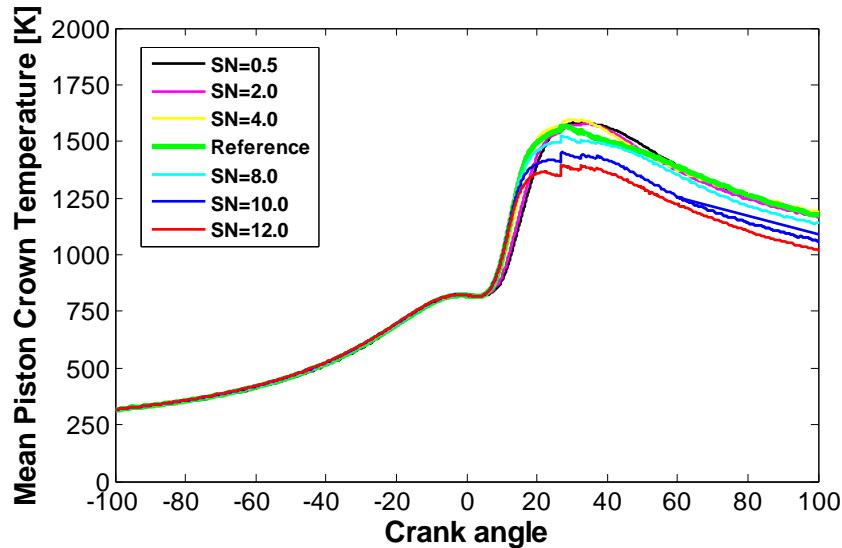
Στα ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 23, 24 και 25 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας σε κελιά κοντά στο πώμα, στη βαλβίδα εξαγωγής και στο έμβολο, αντίστοιχα, για διαφορετικές τιμές του swirl. Παρατηρούμε ότι τα θερμικά φορτία μειώνονται με αύξηση του SN. Αυτό πρέπει να αποδοθεί στην εντονότερη φυγοκέντρωση του (βαρύτερου σε σχέση με τα καυσαέρια) αέρα, η συγκέντρωση του οποίου αυξάνεται στις περιοχές εγγύς των τοιχωμάτων. Από τα ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 23, 24 και 25 προκύπτει ότι η μείωση των θερμικών φορτίων είναι εντονότερη για τις περιοχές εγγύς της βαλβίδας και του πώματος.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΛΙΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΠΩΜΑΤΟΣ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SWIRL.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΛΙΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SWIRL.

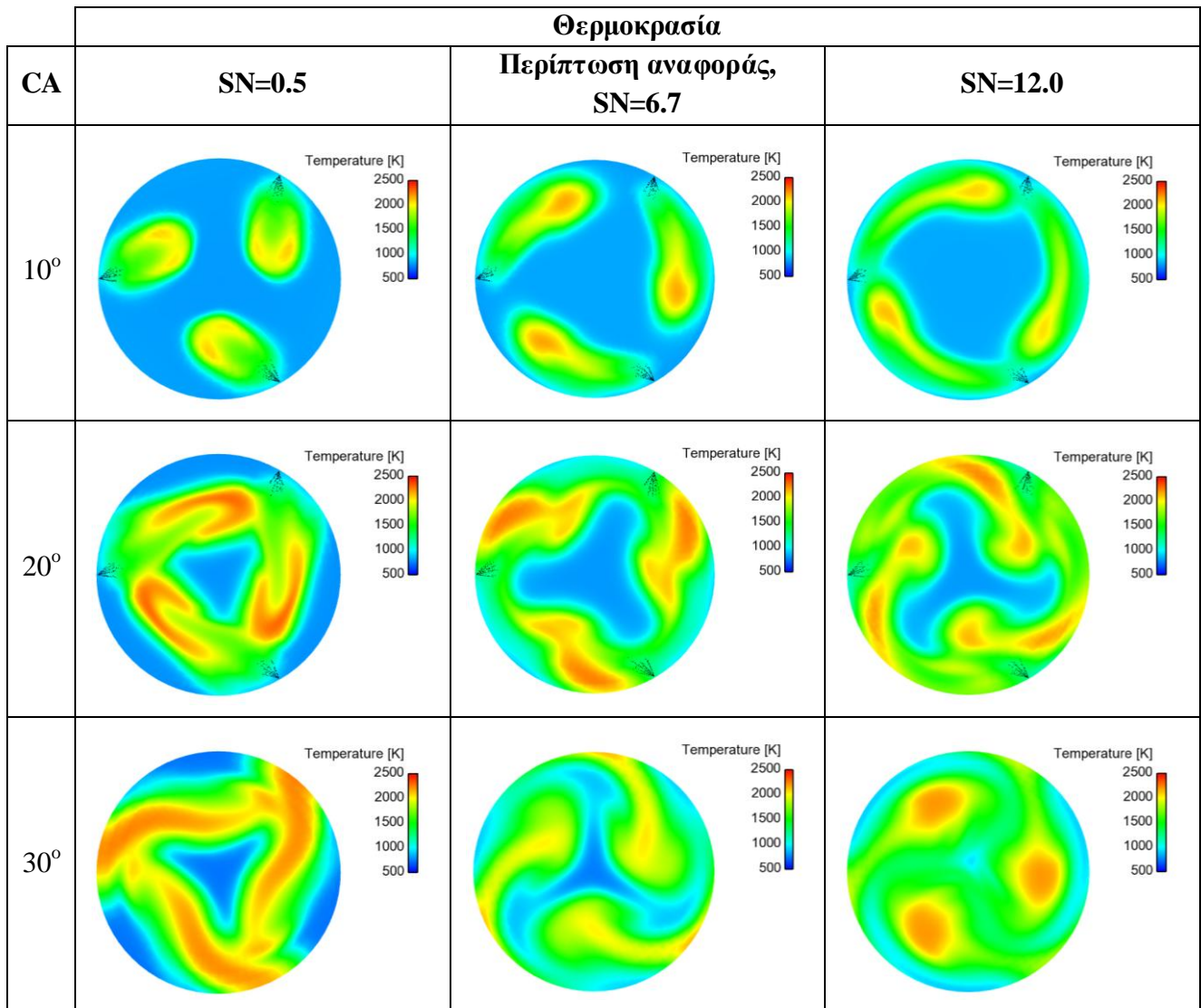


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 25: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΛΙΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΤΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SWIRL.

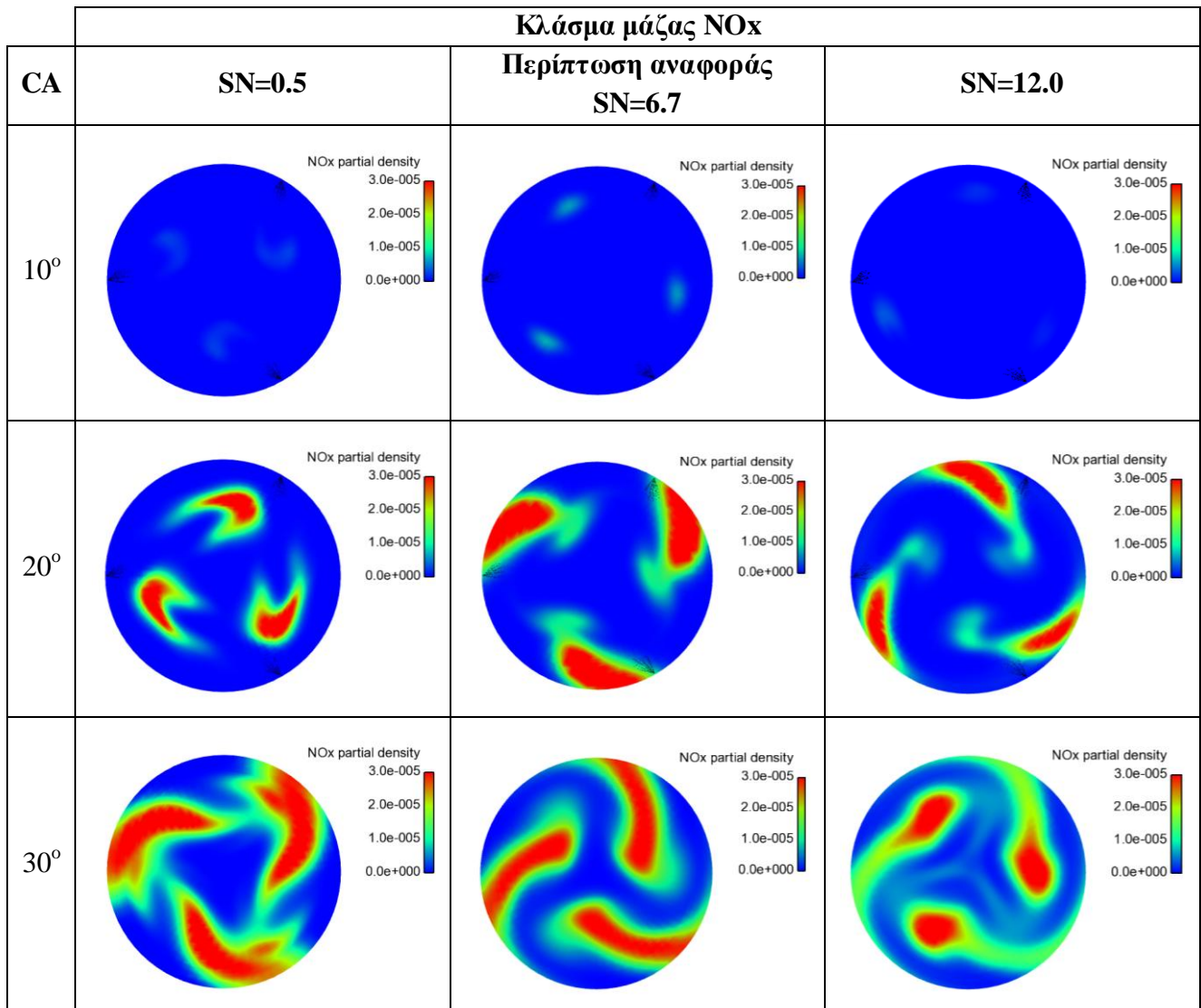
5.2.1 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην ΕΙΚΟΝΑ 19 παρουσιάζονται ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για διαφορετικές γωνίες στροφάλου, για τιμές του αριθμού swirl 0.5, 6.7 (περίπτωση αναφοράς) και 12, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι για τη μικρή τιμή του SN, η κατεύθυνση της φλόγας είναι προς το κέντρο του κυλίνδρου, ενώ όσο αυξάνεται το SN η διεργασία της καύσης οδηγείται προς την περιφέρεια. Στις 10°, τα επίπεδα της θερμοκρασίας είναι υψηλότερα για τις μεγαλύτερες τιμές του SN, διότι ευνοείται η γρήγορη εξάτμιση και ανάμιξη, που με τη σειρά τους συντελούν στην ταχύτερη καύση του μίγματος. Στις 20°, αποτυπώνεται ο διαφορετικός τρόπος αλληλεπίδρασης μεταξύ της δέσμης των καυσαερίων και του spray. Επίσης, η κατανομή της θερμοκρασίας διαφέρει αισθητά και για τις τρεις περιπτώσεις στις 30°.

Στην ΕΙΚΟΝΑ 20 απεικονίζονται οι αντίστοιχες ισοϋψείς καμπύλες του κλάσματος μάζας NOx. Παρατηρείται ότι ο σχηματισμός NOx δεν ευνοείται μέχρι τις 10°, ενώ στις 20° και 30° οι περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα NOx είναι μεγαλύτερες για χαμηλά επίπεδα SN. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί με προηγούμενη παρατήρηση, σύμφωνα με την οποία η τελική συγκέντρωση NOx μειώνεται με την αύξηση του SN (βλ. και ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22).



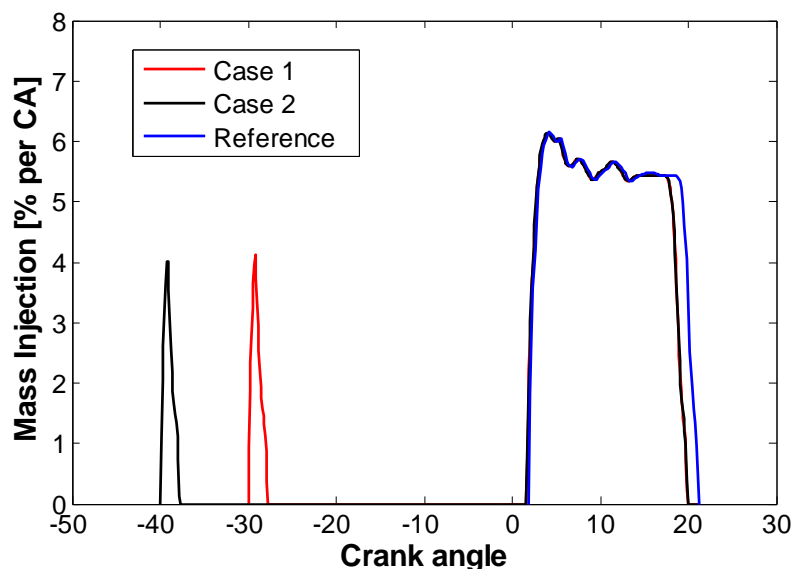
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΙΣΟΨΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΩΝ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SWIRL ΙΣΕΣ ΜΕ 0.5, 6.7 (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ) ΚΑΙ 12, ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ.



ΕΙΚΟΝΑ 20: ΙΣΟΥΨΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΑΖΑΣ NO_x ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΩΝ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ SWIRL ΙΣΕΣ ΜΕ 0.5, 6.7 (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ) ΚΑΙ 12, ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ.

5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η χρήση προηγμένων τεχνικών έγχυσης σε δίχρονους ναυτικούς κινητήρες, όπως αυτή της προέγχυσης (Pilot Injection), αποσκοπεί στη μείωση των εκπομπών NOx. Πρόσφατες υπολογιστικές μελέτες για τον κινητήρα RT-flex58B-T επιβεβαιώνουν τη συγκεκριμένη μείωση, με διατήρηση των επιπέδων ειδικής κατανάλωσης καυσίμου [15], [16], [17]. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα πρώτα αποτελέσματα έγχυσης καυσίμου με παρουσία προέγχυσης για τον κινητήρα RT-flex96C. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στα προφίλ έγχυσης που παρουσιάζονται στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 26. Τα βασικά χαρακτηριστικά των προφίλ έγχυσης, όπως η αρχή της προέγχυσης (Start Of Pilot Injection – S.O.P.I.) και η αρχή της κύριας έγχυσης (Start Of Main Injection – S.O.M.I.), παρουσιάζονται στον ΠΙΝΑΚΑ ΙΧ. Το ποσοστό μάζας του εγχυόμενου κατά την προέγχυση καυσίμου (Pilot Mass Fraction) είναι 5% καί για τα δύο προφίλ. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης με προέγχυση συγκρίνονται με αυτά της περίπτωσης αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί στη λειτουργία σε πλήρες φορτίο που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.1.



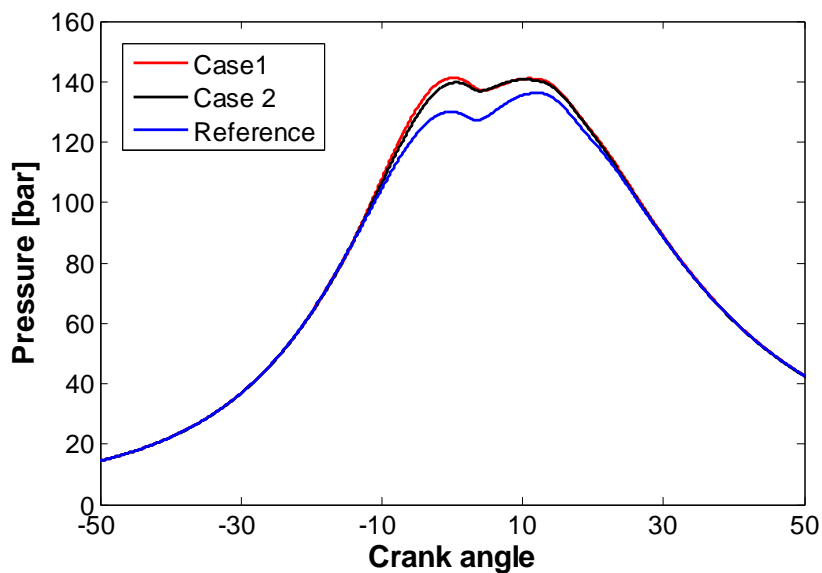
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 26: ΠΡΟΦΙΛ ΕΓΧΥΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ 1 ΚΑΙ 2, ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

	Περίπτωση Αναφοράς	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2
S.O.P.I. [° CA ATDC]	-	-30	-40
S.O.M.I. [° CA ATDC]	1.8	1.8	1.8

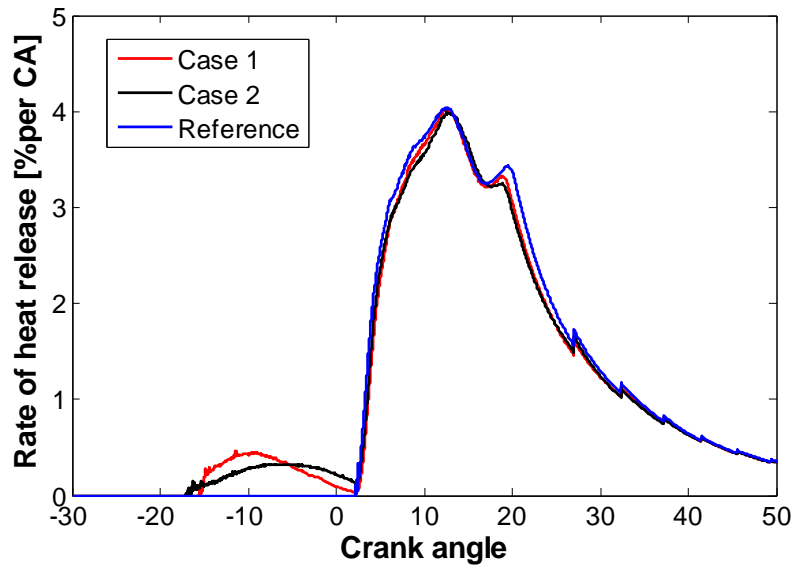
ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΧ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΡΟΦΙΛ ΕΓΧΥΣΗΣ.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 27 παρουσιάζονται οι υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης για τις περιπτώσεις προέγχυσης, και συγκρίνονται με αυτή της περίπτωσης αναφοράς. Τα επίπεδα πίεσης είναι μεγαλύτερα για τις περιπτώσεις προέγχυσης, χωρίς να γίνεται υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης των 141bar. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η καύση του καυσίμου της προέγχυσης έχει ως αποτέλεσμα αυξημένα επίπεδα πίεσης, πριν από την κύρια έγχυση.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 28 παρουσιάζονται οι καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας, για τις περιπτώσεις προέγχυσης και την περίπτωση αναφοράς. Παρατηρείται ότι το καύσιμο αυταναφλέγεται μετά τις -20° , και στις δύο περιπτώσεις. Η μεγάλη καθυστέρηση έναυσης έχει ως αποτέλεσμα την επαρκή ανάμιξη καυσίμου-αέρα, με αποτέλεσμα την καύση προανάμιξης για το καύσιμο της προέγχυσης. Αυτό αποτυπώνεται στη μορφή της καμπύλης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας πριν από το ΑΝΣ. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας δεν διαφέρει στο τμήμα που αφορά στο καύσιμο της κύριας έγχυσης, και χαρακτηρίζεται από δύο τοπικά μέγιστα.

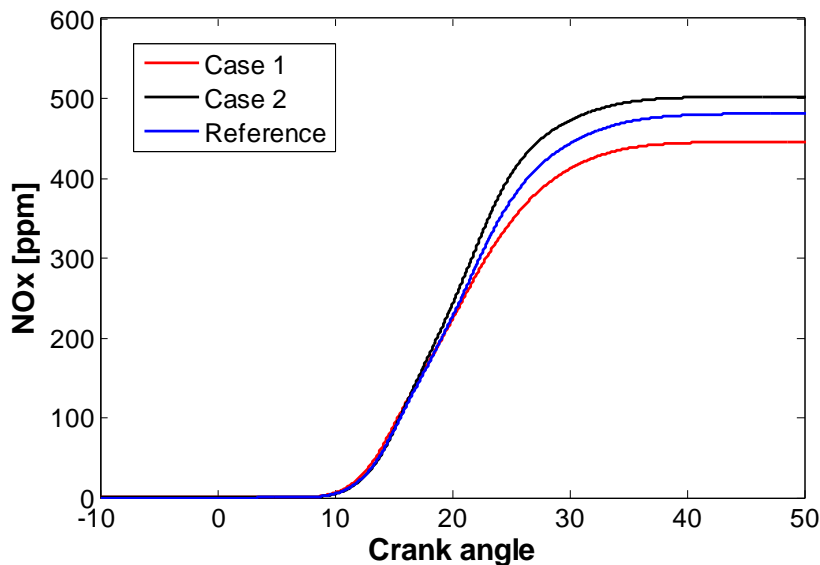


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 27: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.



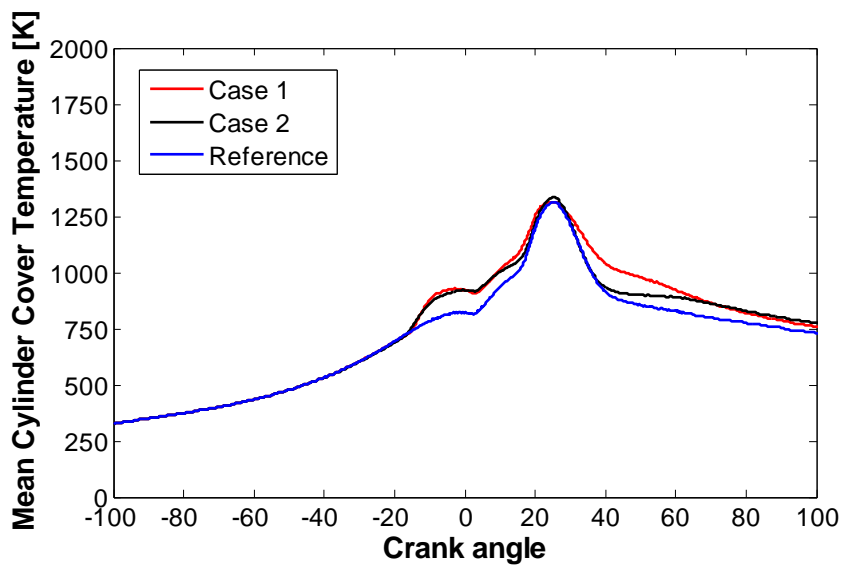
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 28: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΥΘΜΟΥ ΕΚΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

Στο ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 29 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για τις περιπτώσεις προέγχυσης και την περίπτωση αναφοράς. Ακόμη και στις περιπτώσεις της προέγχυσης, δεν λαμβάνει χώρα σχηματισμός NO_x πριν το ΑΝΣ. Ποιοτικά, οι καμπύλες είναι παρόμοιες. Σε μία από τις περιπτώσεις της προέγχυσης, παρατηρείται μείωση της τελικής συγκέντρωσης NO_x, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς.

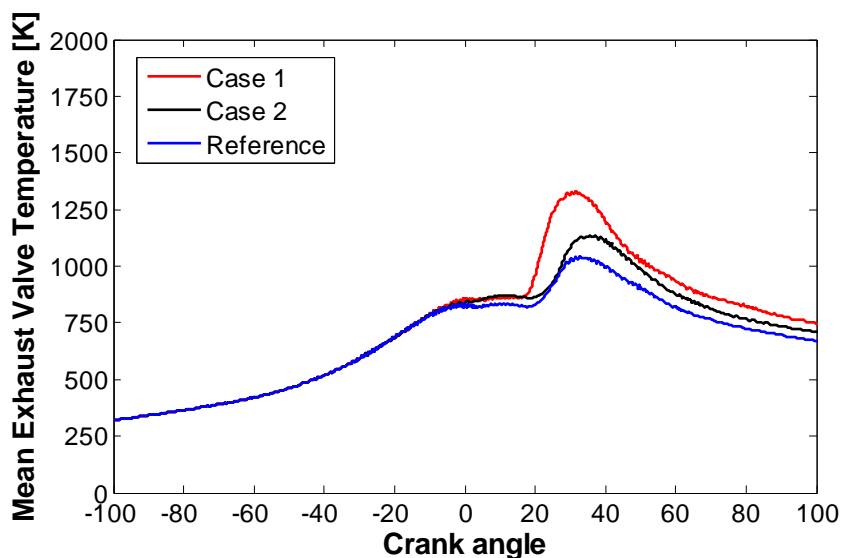


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 29: ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ NO_x ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

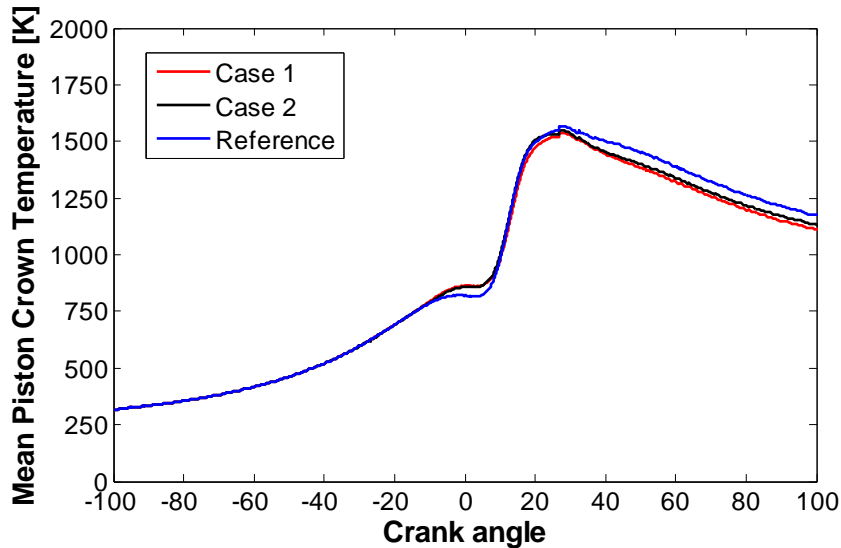
Στα ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 30, 31 και 32 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας σε κελιά κοντά στο πώμα, στη βαλβίδα εξαγωγής και στο έμβολο, αντίστοιχα, για τις περιπτώσεις προέγχυσης και την περίπτωση αναφοράς. Επιβεβαιώνεται ότι, στις περιπτώσεις της προέγχυσης, τα θερμικά φορτία πριν το ΑΝΣ είναι αυξημένα. Παρατηρείται ότι, με εξαίρεση τη βαλβίδα εξαγωγής, δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση της θερμικής φόρτισης ανάμεσα στις θεωρούμενες τρεις περιπτώσεις.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 30: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΛΙΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΠΩΜΑΤΟΣ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.



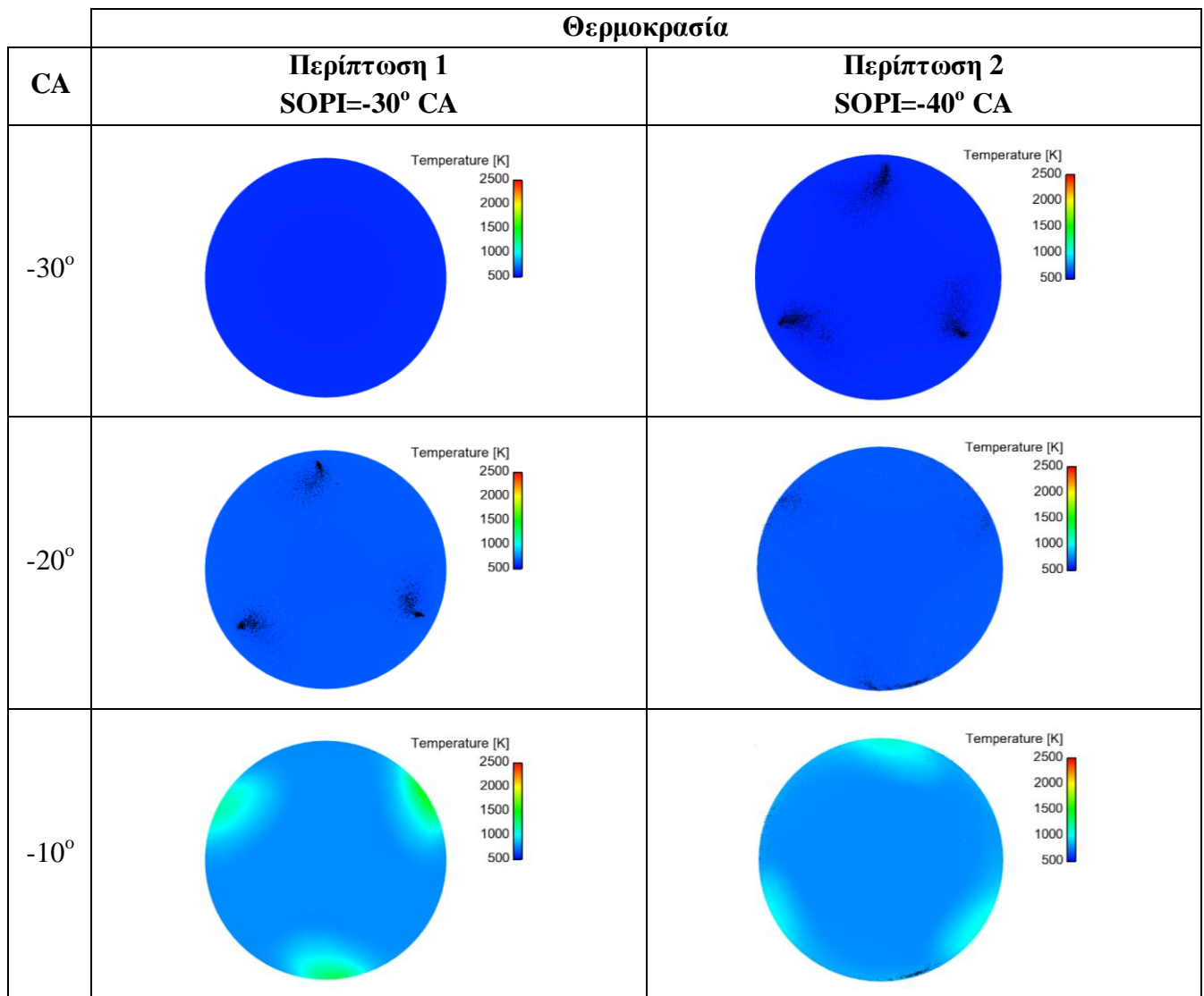
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 31: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΛΙΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.



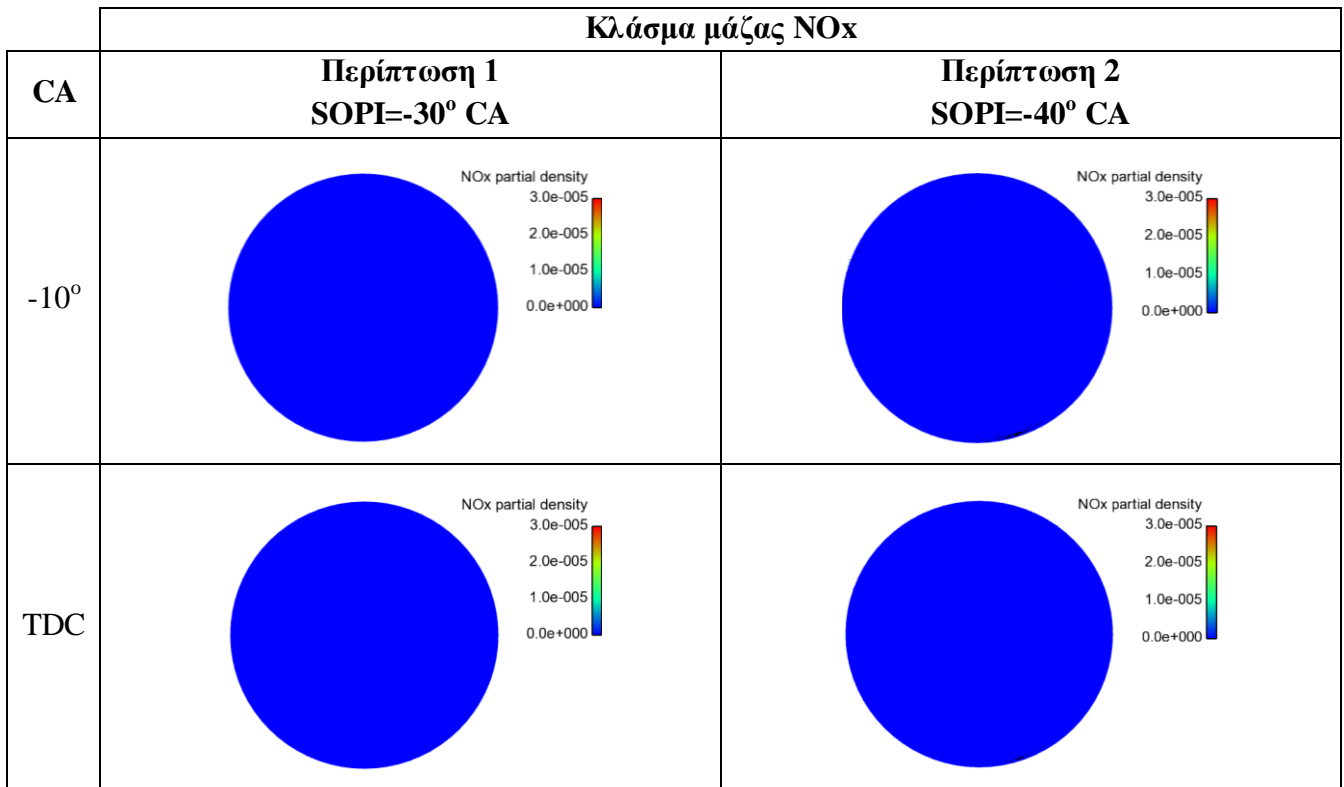
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 32: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΛΙΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΤΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

5.3.1 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

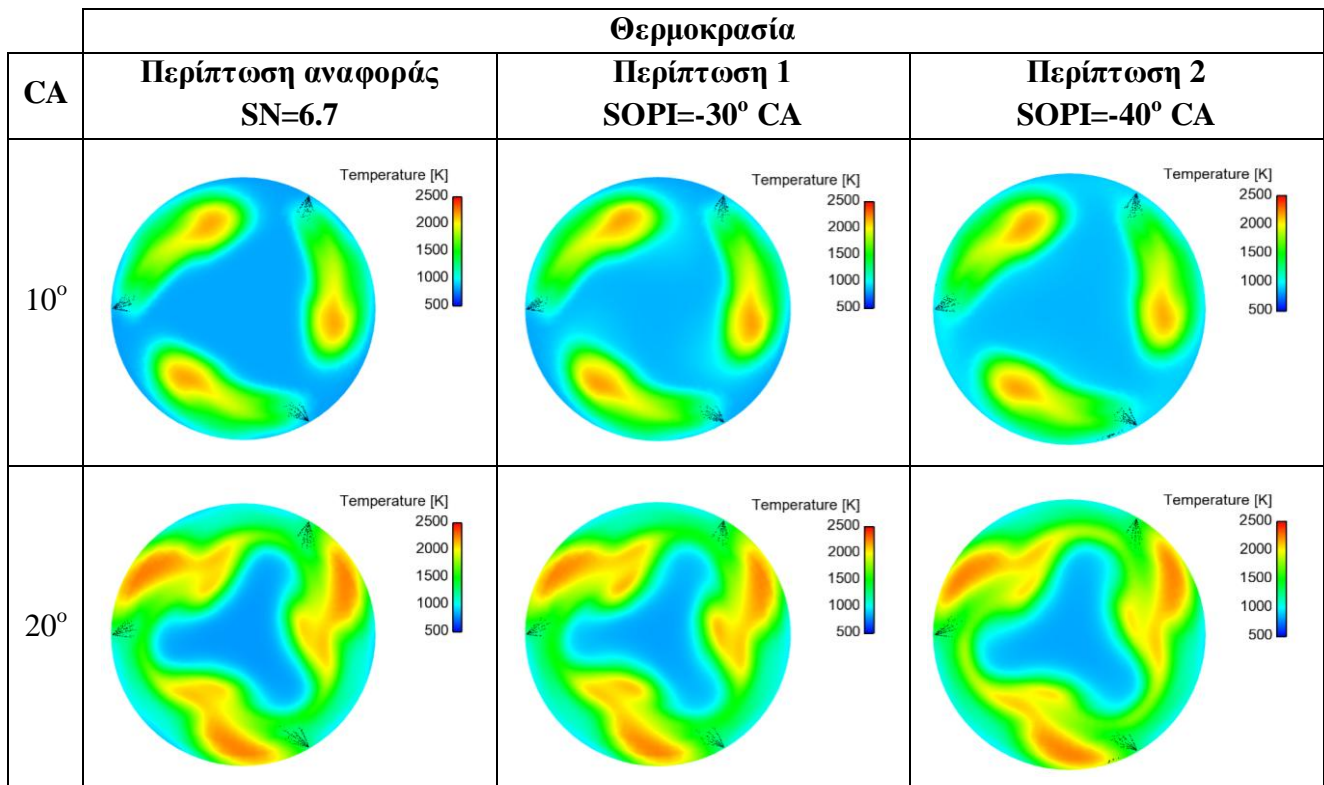
Στην ΕΙΚΟΝΑ 21 απεικονίζονται οι ισοϋνείς καμπύλες της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για διάφορες τιμές της γωνίας στροφάλου πριν το ΑΝΣ, για τις περιπτώσεις προέγχυσης. Παρατηρούμε ότι το καύσιμο που εγχύεται στις -30° (Περίπτωση 1) έχει εξατμιστεί περισσότερο έως τις -20° , σε σύγκριση με το αντίστοιχο που εγχύεται στις -40° (Περίπτωση 2). Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της πρόσπτωσης καυσίμου που εγχύεται νωρίτερα στα τοιχώματα. Η πρόσπτωση καυσίμου στα τοιχώματα έχει ως αποτέλεσμα την καύση εγγύς αυτών. Συνεπώς, προκύπτουν αυξημένα θερμικά φορτία, και παραγωγή άκαυστων και σωματιδίων αιθάλης. Από την ΕΙΚΟΝΑ 22 επιβεβαιώνεται ότι δεν λαμβάνει χώρα σχηματισμός NO_x πριν το ΑΝΣ (βλ. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 29). Από την ΕΙΚΟΝΑ 23 επιβεβαιώνεται ότι η καύση του καυσίμου της κύριας έγχυσης είναι ποιοτικά παρόμοια για τις εξεταζόμενες τρεις περιπτώσεις (βλ. και ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 28).



ΕΙΚΟΝΑ 21: ΙΣΟΨΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΩΝ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΠΡΙΝ ΤΟ ΑΝΣ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ.



ΕΙΚΟΝΑ 22: ΙΣΟΥΨΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΑΖΑΣ NO_x, ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΩΝ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ, ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ.



ΕΙΚΟΝΑ 23: ΙΣΟΥΨΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΩΝ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ ΜΕΤΑ ΤΟ ΑΝΣ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΓΧΥΣΗΣ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία δημιουργίας αριθμητικού πλέγματος για γεωμετρίες σύγχρονων δίχρονων ναυτικών κινητήρων. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε στη δημιουργία πλέγματος για τον κινητήρα RT-flex96C της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland.

Η ανάπτυξη λογισμικού στηρίχθηκε στα ακόλουθα υπολογιστικά εργαλεία: (α) το πρόγραμμα “k3prep” του κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3, (β) το λογισμικό δημιουργίας πλεγμάτων GMSH, και (γ) το λογισμικό Octave. Το συνολικό υπολογιστικό πακέτο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιείται ως εξής: Αρχικά, γίνεται χρήση του προγράμματος “k3prep”, για τον ορισμό της τοπολογίας του αριθμητικού πλέγματος. Στη συνέχεια, με χρήση του λογισμικού GMSH εισάγεται η γεωμετρία του κυλίνδρου, και δημιουργείται διδιάστατο αξονοσυμμετρικό πλέγμα. Τέλος, με χρήση του αναπτυχθέντος σε περιβάλλον Octave κώδικα, επεκτείνεται το υπάρχον πλέγμα στην αζιμουθιακή διεύθυνση. Έτσι, δημιουργείται το τελικό πλέγμα, σε μορφή συμβατή με τον κώδικα KIVA-3.

Κύριο χαρακτηριστικό του αναπτυχθέντος συνολικού λογισμικού είναι η ύπαρξη γραφικού περιβάλλοντος. Έτσι, υπάρχει έλεγχος (και συνεπώς δυνατότητα προσαρμογής) των δημιουργούμενων πλεγμάτων, κατά τη διάρκεια της δημιουργίας αυτών. Συνολικά, το αναπτυχθέν λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος, για περίπλοκες γεωμετρίες σύγχρονων δίχρονων κινητήρων.

Το αναπτυχθέν λογισμικό εφαρμόστηκε στη δημιουργία μιας σειράς αριθμητικών πλεγμάτων για τη γεωμετρία του κινητήρα RT-flex96C. Για μια περίπτωση λειτουργίας στην περιοχή του πλήρους φορτίου, για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα (καμπύλη πίεσης), μελετήθηκε αρχικά η επίδραση της πυκνότητας του πλέγματος στα αριθμητικά αποτελέσματα, καθώς και η επίδραση της τιμής του χρονικού βήματος. Στη συνέχεια, μελετήθηκε η θερμορευστομηχανική του κινητήρα για τις ακόλουθες περιπτώσεις: (α) μια περίπτωση αναφοράς, χαρακτηριζόμενη από συνεχές προφίλ έγχυσης, (β) περιπτώσεις λειτουργίας στην περιοχή του πλήρους φορτίου, χαρακτηριζόμενες από διαφορετικά επίπεδα εγκάρσιας συστροφής του αέρα (swirl), και (γ) δύο περιπτώσεις χαρακτηριζόμενες από προέγχυση και κύρια έγχυση.

Για την περίπτωση αναφοράς, διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα. Η μελέτη της λειτουργίας για διαφορετικά επίπεδα swirl κατέδειξε ότι η λειτουργία δεν είναι αποδοτική για χαμηλά επίπεδα εγκάρσιας συστροφής. Η λειτουργία του κινητήρα είναι ικανοποιητική για επίπεδα swirl ίσα ή μεγαλύτερα της περίπτωσης αναφοράς, που αντιστοιχούν στον βασικό σχεδιασμό του κινητήρα. Για την περίπτωση της χρήσης προέγχυσης, διαπιστώθηκε το δυναμικό μείωσης οξειδίων του αζώτου. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η προέγχυση ήταν αρκετά νωρίς σε σχέση με το Άνω Νεκρό Σημείο, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την πρόσπτωση του καυσίμου στα τοιχώματα. Η λειτουργία του παρόντος κινητήρα με (βελτιστοποιημένη) χρήση προέγχυσης καυσίμου χρήζει συστηματικής περαιτέρω διερεύνησης.

Το αναπτυχθέν λογισμικό δημιουργίας πλέγματος είναι εν γένει αποδοτικό. Εντούτοις, επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση της αποδοτικότητάς του, στο πλαίσιο: (α) Αποσύζευξης από το πρόγραμμα “k3rgr” (β) Τροποποίησης της μεθοδολογίας, ώστε η θεωρούμενη γεωμετρία να διακριτοποιείται ακόμη ακριβέστερα, με δημιουργία και συνένωση περισσότερων από πέντε επιμέρους πλεγμάτων.

Αναφορικά με τη μελέτη της θερμορευστομηχανικής του κινητήρα, η παρούσα ανάπτυξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για μελέτες βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, μπορεί να γίνει, για την υπάρχουσα μελέτη του κινητήρα, βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης, με χρήση πιλοτικής έγχυσης, κύριας έγχυσης και μετέγχυσης. Η εν λόγω μελέτη μπορεί να περιλάβει και την κατάλληλη προσαρμογή των γωνιών έγχυσης του καυσίμου. Τέλος, με επέκταση του αναπτυχθέντος λογισμικού δημιουργίας πλέγματος, θα ήταν εφικτές μελέτες βελτιστοποίησης, με συνυπολογισμό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://www.wartsila.com>
- [2] Καϊκτσής, Λ., “Καύση”, Σημειώσεις Ε.Μ.Π, 2006.
- [3] Hengeveld, J., Schenk, C., Aabo, K., “The Role of Temperature and Pressure in Wear Processes in Low Speed Diesel Engines”, Shell Marine Products.
- [4] Sala, S., “Energy Efficiency and the Shipping Industry”, Delta marine.
- [5] <http://shipandbunker.com>
- [6] <http://www.imo.org>
- [7] “Panel Energy Efficiency”, Ετήσια Συνάντηση Ε.Λ.Ι.Ν.Τ, 2012
- [8] <http://basicsofmarineengineering.blogspot.gr/>
- [9] Taylor, D.A., “Introduction to Marine Engineering”, Butterworth-Heinemann, Revised 2nd Edition.
- [10] Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W., “Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation” 4th Edition.
- [11] <http://ngureco.hubpages.com/hub/Worlds-Biggest-Engine-Most-Powerful-Engine-Emma-Maersks-170-Million-Investment-Worlds-Largest-Ship>.
- [12] Ferziger, J.H. and Peric, M., “Computational Methods for Fluid Dynamics”, 3rd edition, Springer 2002.
- [13] Amsden, A.A., “KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries”, Los Alamos National Laboratory LA – 12503-MS, 1993.
- [14] Geuzaine, C. and Remacle, J.F., “Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 79(11), pp. 1309-1331, 2009.
- [15] Kontoulis, P., Chryssakis, C., Kaiktsis, L., “Evaluation of Pilot Injections in a Large Two-Stroke Marine Diesel Engine, Using CFD and T-φ Mapping”, COMODIA 2008, Sapporo, Japan, July 2008.
- [16] Andreadis, P., Zompanakis, A., Chryssakis, C., Kaiktsis, L., “Effects of the Fuel Injection Parameters on the Performance and Emissions Formation in a Large-Bore Marine Diesel Engine”, International Journal Engine Research, Vol. 12, 2011.
- [17] Pananakis, E., Kontoulis, P., Chryssakis, C., Kaiktsis, L., “Investigation of Fuel Injection Strategies for Partially Premixed Compression Ignition Combustion in Two-Stroke Marine Diesel Engines”, ILASS, Chania, Greece, 2013.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

- KIVA-3
- GMSH
- PARAVIEW
- OCTAVE
- MATLAB
- RHINOCEROS
- AUTOCAD
- MICROSOFT OFFICE