



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Ν. Ανδρεάδης

**Βελτιστοποίηση παραμέτρων έγχυσης σε
δίχρονους ναυτικούς κινητήρες Diesel**

Εξεταστική επιτροπή:

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

Μέλη: Ν. Κυρτάτος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χρ. Παπαδόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2008

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου με την παρούσα διπλωματική εργασία στην Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων του Ε.Μ.Π., θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που, καταβάλλοντας φιλότιμες προσπάθειες, διατηρούν ακόμα υψηλό το επίπεδο των σπουδών στο Ε.Μ.Π και μας δίνουν την δυνατότητα να μετάσχουμε στις ερευνητικές δραστηριότητες.

Μεταξύ αυτών, ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λ. Καϊκτσή και τον Επιστημονικό Συνεργάτη κ. Χρ. Χρυσάκη αφού χωρίς την καθοδήγηση και τη βοήθειά τους η περάτωση της διπλωματικής εργασίας και του αντίστοιχου ερευνητικού έργου θα ήταν αδύνατη. Επίσης ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κ. Γιαννάκογλου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών για την προσφορά του λογισμικού Εξελικτικών Αλγορίθμων EASY, καθώς και για τις ουσιώδεις συζητήσεις που είχαμε σε θέματα βελτιστοποίησης. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ν. Κυρτάτο και τον Λέκτορα κ. Χρ. Παπαδόπουλο ως διδάσκοντες και μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ όλους τους φίλους συναδέλφους μου για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Σύνοψη

Βασική συνιστώσα για τη μόλυνση του περιβάλλοντος και την επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου αποτελούν οι εκπομπές ρύπων, τόσο από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας της ξηράς, όσο και από τις εγκαταστάσεις πρόωσης των πλοίων. Το αυξημένο ενδιαφέρον κατά την τελευταία δεκαετία για τα προβλήματα της μόλυνσης του περιβάλλοντος και, επιπρόσθετα, η επιβολή των κανονισμών περιορισμού της μόλυνσης του αέρα από τα πλοία επηρεάζουν την πορεία εξέλιξης των ναυτικών κινητήρων Diesel.

Οι πρόσφατοι κανονισμοί αναφορικά με τις συγκεντρώσεις ρύπων στα καυσαέρια των ναυτικών κινητήρων υποχρεώνουν τους κατασκευαστές να διερευνήσουν μεθόδους για τη μείωσή τους. Οι κλασσικές μέθοδοι μείωσης των κύριων ρύπων (οξειδία του αζώτου και σωματίδια αιθάλης) οι οποίες χρησιμοποιούνται στους μικρότερους πετρελαιοκινητήρες της αυτοκινητοβιομηχανίας (όπως ανακυκλοφορία καυσαερίων και χρήση καταλυτών) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα σε ναυτικούς κινητήρες, εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο. Μία εναλλακτική μέθοδος, επίσης προερχόμενη από τον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας, είναι η χρήση πολλαπλών ψεκασμών του καυσίμου. Η τελευταία καθίσταται εφικτή με την πρόσφατη εγκατάσταση συστημάτων έγχυσης κοινού συλλέκτη (Common Rail Systems), που έχει αυξήσει δραματικά τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος έγχυσης καυσίμου.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζουμε υπολογιστικά αποτελέσματα που αφορούν στη μελέτη και βελτιστοποίηση της θερμορευστομηχανικής δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel. Θεωρούμε προφίλ έγχυσης καυσίμου με παρουσία προέγχυσης, το οποίο βελτιστοποιείται με στόχο την ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου και αύξηση του βαθμού απόδοσης. Εδώ, χρησιμοποιούμε μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, σε σύζευξη με έναν εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, διατυπώνεται ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης, στο οποίο το τελικό σύνολο βέλτιστων λύσεων προσδιορίζεται με βάση το μέτωπο Pareto. Οι μεταβλητές σχεδίασης αποτελούνται από παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την προέγχυση, την κύρια έγχυση και τη συνολικά εγχυόμενη μάζα, ενώ τίθεται ο περιορισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης στον κύλινδρο.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης συνέκλινε σε δύο εναλλακτικές στρατηγικές, με χαρακτηριστικά τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά περίπου 15% και την ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού απόδοσης τάξης 2%:

1. Προέγχυση ποσότητας καυσίμου περίπου 10%-15% της συνολικής, σε γωνία στροφάλου περί τις 30° πριν το Άνω Νεκρό Σημείο. Εδώ, η καθυστέρηση έναυσης είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα η καύση του καυσίμου της προέγχυσης να λαμβάνει χώρα με φλόγα προανάμιξης.
2. Προέγχυση ποσότητας καυσίμου περίπου 8-11% της συνολικής, σε γωνία στροφάλου περί τις 10° πριν το Άνω Νεκρό Σημείο. Στην περίπτωση αυτή, η καθυστέρηση έναυσης ελαχιστοποιείται, και η καύση του καυσίμου της προέγχυσης πραγματοποιείται με φλόγα διάχυσης.

Με χρήση οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, αναλύονται και ερμηνεύονται οι θερμοχημικές διεργασίες που αντιστοιχούν στις βέλτιστες λύσεις.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	ii
Σύνοψη	iii
Περιεχόμενα	iv
Κατάλογος Εικόνων	v
Κατάλογος Διαγραμμάτων	vi
Κατάλογος Πινάκων	vii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Εκπομπές Ρύπων Ναυτικών Κινητήρων και Κανονισμοί	1
1.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση: Μείωση Δημιουργίας Ρύπων στον Κύλινδρο	2
1.3 Αντικείμενο της Παρούσας Εργασίας	5
2 Αρχή Λειτουργίας και Χαρακτηριστικά Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα Diesel ...	7
2.1 Λειτουργία Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα Diesel	7
2.2 Σύστημα Έγχυσης Κοινού Συλλέκτη (Common Rail System - CRS)	9
2.3 Χαρακτηριστικά του Κινητήρα RT-flex58T-B	12
3 Προσομοιώσεις Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	15
3.1 Επισκόπηση του Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3	15
3.2 Μοντέλα Φυσικών Διεργασιών	16
3.3 Αριθμητική Προσομοίωση για Λειτουργία σε Συνθήκες Αναφοράς	16
4 Θεωρία Βελτιστοποίησης	20
4.1 Διατύπωση του Γενικού Προβλήματος	20
4.2 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης	20
4.2.1 Αιτιοκρατικές Μέθοδοι	21
4.2.1.1 Μέθοδοι Ανίχνευσης κατά Γραμμή	21
4.2.1.2 Μέθοδος Ανίχνευσης κατά Περιοχές Εμπιστοσύνης	23
4.2.2 Μη Αιτιοκρατικές Μέθοδοι	24
4.2.2.1 Μέθοδος Αναρρίχησης Λόφου και Παραλλαγές Αυτής	25
4.2.2.2 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	28
4.2.3 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση	36
4.4 Σύζευξη Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3 και Λογισμικού Βελτιστοποίησης EASY	40
4.4.1 Παράμετροι Βελτιστοποίησης και Υπολογιστικό Κόστος	41
5 Αποτελέσματα	43
5.1 Διατύπωση του Προβλήματος	43
5.1.1 Μεταβλητές Σχεδίασης και Χώρος Αναζήτησης Λύσεων	43
5.1.2 Συναρτήσεις Στόχων	44
5.1.3 Περιορισμοί	45
5.1.4 Σύνοψη του Προβλήματος	45
5.1.5 Προφίλ Έγχυσης και Προέγχυσης	45
5.2 Ανάλυση Διεργασιών Καύσης με Χρήση Χαρτών T – φ	49
5.3 Αποτελέσματα Προβλήματος χωρίς Περιορισμούς	51
5.4 Αποτελέσματα Προβλήματος με Περιορισμό στη Μέγιστη Πίεση	64
5.5 Αποτελέσματα Προβλήματος με Περιορισμούς στη Μέγιστη Πίεση και στο Ωφέλιμο Έργο	68
6 Συμπεράσματα	70
Πηγές	72

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων του κύκλου λειτουργίας δίχρονου ναυτικού κινητήρα.....	8
Εικόνα 2.2: Κύκλος λειτουργίας δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρούμενου ναυτικού κινητήρα.....	9
Εικόνα 2.3: Τυπική διάταξη συστήματος έγχυσης κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS).....	10
Εικόνα 2.4: Εγκατάσταση CRS, σε κινητήρα RT-flex της εταιρίας Wärtsilä Switzerland [23].....	12
Εικόνα 2.5: Σκαριφηματική παράσταση διάταξης δικτύου υψηλής πίεσης στο CRS του κινητήρα RT-flex της εταιρίας Wärtsilä Switzerland [23].....	12
Εικόνα 2.6: Ορισμός γωνιών έγχυσης $\hat{\alpha}$ και $\hat{\beta}$	13
Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση αξιολόγησης των απογόνων.....	31
Εικόνα 4.2: Σχηματική ανανέωση του συνόλου των επιλέκτων $S^{g,e}$ με όσα μέλη του $S^{g,\lambda}$ αξίζουν, με κριτήριο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.....	31
Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της ανανέωσης των απογόνων. Επιλεγμένα άτομα από το σύνολο των επιλέκτων $S^{g,e}$ αντικαθιστούν μέλη του συνόλου των απογόνων $S^{g,\lambda}$	32
Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση της επιλογής του συνόλου γονέων της επόμενης γενιάς από τα τρέχοντα σύνολα γονέων και απογόνων.....	33
Εικόνα 4.5: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας αναπαραγωγής - διασταύρωσης μεταξύ των γονέων, και μετάλλαξη έτσι ώστε να προκύψει το νέο σύνολο των απογόνων.....	33
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα Ροής Εξελικτικού Αλγορίθμου.....	34
Εικόνα 4.7: Απεικόνιση του μετώπου Pareto για την περίπτωση δύο στόχων.....	37
Εικόνα 4.8: Διάγραμμα Ροής Εξελικτικού Αλγορίθμου για προβλήματα πολλαπλών στόχων.....	40
Εικόνα 4.9: Σχηματική απεικόνιση της υπολογιστικής διαδικασίας.....	41
Εικόνα 5.1: Σχηματική παράσταση προφίλ εγχύσεως με προέγχυση. Τρεις μεταβλητές σχεδίασης (έναρξη προέγχυσης - SOPI, έναρξη της κύριας έγχυσης - SOMI και ποσοστό μάζας προέγχυσης - PMF) δείχνονται από τα βέλη της Εικόνας.....	44
Εικόνα 5.2: Στατικός χάρτης T – φ, για συνθήκες πίεσης 60 bar και χρόνο 2ms [42].	50
Εικόνα 5.3: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: χάρτες T-φ για την περίπτωση A , σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.....	55
Εικόνα 5.4: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: χάρτες T-φ για την περίπτωση B, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.....	56
Εικόνα 5.5: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης NO _x στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για την περίπτωση A, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.....	57
Εικόνα 5.6: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: περιοχές σχηματισμού αιθάλης (που αντιστοιχούν σε τιμές της συνάρτησης παραγωγής αιθάλης $f>3$), για τις περιπτώσεις A και B, για διάφορες τιμές της γωνίας στροφάλου.....	59
Εικόνα 5.7: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: οπτικοποίηση της υγρής δέσμης καυσίμου και ισοϋψείς καμπύλες του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου αέρα στο επίπεδο	

των εγχυτήρων για τις περιπτώσεις A και B. Εδώ παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα της φάσης πριν την κύρια έγχυση του καυσίμου. 60

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Προφίλ έγχυσης του καυσίμου στην περίπτωση αναφοράς.	16
Διάγραμμα 3.2: Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλες πίεσης σε συνθήκες αναφοράς, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου.	19
Διάγραμμα 3.3: Πειραματικές και υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας και αθροιστικής έκλυσης θερμότητας σε συνθήκες αναφοράς, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου.	19
Διάγραμμα 5.1: Αρχικό προφίλ έγχυσης αναφοράς και προσεγγιστικό προφίλ με σταθερό άνοιγμα της βαλβίδας, παρόμοιο με το αρχικό.	46
Διάγραμμα 5.2: Ταχύτητα του εγχυόμενου καυσίμου για το προφίλ αναφοράς και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.	46
Διάγραμμα 5.3: Μεταβολή της πίεσης στον κύλινδρο, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για το αρχικό και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.	47
Διάγραμμα 5.4: Μεταβολή της χωρικά μέσης θερμοκρασίας μέσα στον κύλινδρο, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για το αρχικό και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.	47
Διάγραμμα 5.5: Μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για το αρχικό και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.	48
Διάγραμμα 5.6: Μεταβολή της χωρικά μέσης συγκέντρωσης NO_x , συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για το αρχικό και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.	48
Διάγραμμα 5.7: Υπολογιστικά προφίλ έγχυσης με προέγχυση, και το πειραματικό προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς. Η τιμή του ποσοστού μάζας προέγχυσης $PMF=30\%$ είναι εκτός των ορίων της παρούσας μελέτης, και το αντίστοιχο προφίλ παρουσιάζεται για λόγους οπτικοποίησης.	49
Διάγραμμα 5.8: Μέτωπο Pareto στο οποίο απεικονίζονται οι δύο στόχοι (κανονικοποιημένες τιμές τελικής συγκεντρώσεις NO_x και SFOC) για αντιπροσωπευτικές γενιές, για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται επίσης η περίπτωση αναφοράς.	51
Διάγραμμα 5.9: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: προφίλ έγχυσης με προέγχυση και υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, B, C, D, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.	53
Διάγραμμα 5.10: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, B, C, D και για την περίπτωση αναφοράς.	54
Διάγραμμα 5.11: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: μέγιστη θερμοκρασία, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για τα υπολογιστικά κελιά κοντά στο πάμα του κυλίνδρου, για την περίπτωση αναφοράς και τις περιπτώσεις A, B, C, D.	62
Διάγραμμα 5.12: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: Μέγιστη θερμοκρασία, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για τα υπολογιστικά κελιά κοντά στη βαλβίδα, για την περίπτωση αναφοράς και τις περιπτώσεις A, B, C, D.	63
Διάγραμμα 5.13: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: Μέγιστη θερμοκρασία, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για τα υπολογιστικά κελιά κοντά στο έμβολο, για την περίπτωση αναφοράς και τις περιπτώσεις A, B, C, D.	64

Διάγραμμα 5.14: Τελικά μέτωπα Pareto (κανονικοποιημένες τιμές συγκέντρωσης NO _x , και SFOC) για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, και για το πρόβλημα με περιορισμό στη μέγιστη πίεση. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και η περίπτωση αναφοράς.....	65
Διάγραμμα 5.15: Πρόβλημα με περιορισμό στη μέγιστη πίεση: προφίλ έγχυσης με προέγχυση και υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης για τις περιπτώσεις E, F, G, H, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.	66
Διάγραμμα 5.16: Πρόβλημα με περιορισμό στη μέγιστη πίεση: υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας για τις περιπτώσεις E, F, G, H και για την περίπτωση αναφοράς	67
Διάγραμμα 5.17: Τελικά μέτωπα Pareto (κανονικοποιημένες τιμές συγκέντρωσης NO _x και SFOC) για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, για το πρόβλημα με περιορισμό στην πίεση, και για το πρόβλημα με περιορισμό στην πίεση και το έργο.	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Κανονισμοί εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO _x) για αργόστροφους κινητήρες (RPM<130 RPM) σύμφωνα με τον οργανισμό IMO (International Maritime Organization).	1
Πίνακας 2-1: Βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα RT-flex58T-B.	13
Πίνακας 2-2: Προσέγγιση των γωνιών έγχυσης $\hat{\alpha}$ και $\hat{\beta}$ της Εικόνα 2.6.	14
Πίνακας 3-1: Δεδομένα αριθμητικής προσομοίωσης στην περίπτωση αναφοράς.	17
Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά συστοιχίας υπολογιστών Σχολής NMM.	42
Πίνακας 5-1: Εύρος μεταβλητών σχεδίασης	44
Πίνακας 5-2: Παράμετροι έγχυσης, κανονικοποιημένες τιμές της συγκέντρωσης NO _x και SFOC, και μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου για τις περιπτώσεις A, B, C, D του Διαγράμματος 5.8, και για την περίπτωση αναφοράς.	52
Πίνακας 5-3: Παράμετροι έγχυσης, κανονικοποιημένες τιμές της συγκέντρωσης NO _x και SFOC, και μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου για τις περιπτώσεις E, F, G, H του Διαγράμματος 5.14, και για την περίπτωση αναφοράς.	65
Πίνακας 5-4: Παράμετροι έγχυσης, κανονικοποιημένες τιμές της συγκέντρωσης NO _x , και SFOC, και μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου για τις περιπτώσεις I, J, K, L του Διαγράμματος 5.17, και για την περίπτωση αναφοράς.	69

1 Εισαγωγή

1.1 Εκπομπές Ρύπων Ναυτικών Κινητήρων και Κανονισμοί

Το αυξημένο ενδιαφέρον κατά την τελευταία δεκαετία για τα προβλήματα της μόλυνσης του περιβάλλοντος και, επιπρόσθετα, η επιβολή των κανονισμών περιορισμού της μόλυνσης του αέρα από τα πλοία επηρεάζουν την πορεία εξέλιξης των ναυτικών κινητήρων Diesel.

Συγκεκριμένα, το 2002 η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέφρασε την ανησυχία της, θέτοντας μία σειρά μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος και της παγκόσμιας υγείας, τα οποία αφορούν και στη ναυτιλία [1]. Οι περιορισμοί σχετίζονται με τη συγκέντρωση εκπομπών ρύπων και αφορούν -μεταξύ άλλων- σε ποντοπόρα πλοία.

Σε διεθνές επίπεδο, το κεφάλαιο VI του κανονισμού της MARPOL το οποίο υιοθετήθηκε από τον οργανισμό IMO (International Maritime Organization) το 1997, θέτει περιορισμούς στους εκπεμπόμενους ρύπους από τα πλοία. Το κεφάλαιο VI θέτει όρια στις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) και οξειδίων του αζώτου (NO_x). Επιπλέον, προβλέπει αυστηρότερους κανονισμούς για τις εκπομπές SO_x σε παράκτιες περιοχές και περιοχές κοντά σε λιμάνια (Emission Control Areas- ECA) [2]. Σε αυτές, η περιεκτικότητα του χρησιμοποιούμενου καυσίμου σε θείο δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 15,000 ppm. Σε συμφωνία με τους παραπάνω κανονισμούς, η επιτροπή για την Προστασία του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environment Protection) κατέληξε, τον Απρίλιο του 2008, σε τρία επίπεδα κανονισμών (Tiers) για τους νέους κινητήρες. Ανάλογα με τη χρονολογία κατασκευής τους, οι κινητήρες θα πρέπει να είναι συμβατοί με το αντίστοιχο επίπεδο κανονισμών, (βλ. Πίνακας 1-1) για αργόστροφους κινητήρες ($RPM < 130$). Το τρίτο επίπεδο αφορά μόνο στις περιοχές ECA, όπως αυτές ορίστηκαν ανωτέρω. Από τον Πίνακα 1-1 προκύπτει ότι οι εκπομπές NO_x πρέπει να ελαττωθούν κατά 15% έως το 2011, και 80% έως το 2016 στις περιοχές ECA. Οι κανονισμοί που αφορούν στα οξείδια του θείου δεν έχουν ανακοινωθεί ακόμη, ωστόσο αναμένονται στο εγγύς μέλλον.

Πίνακας 1-1: Κανονισμοί εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) για αργόστροφους κινητήρες ($RPM < 130$ RPM) σύμφωνα με τον οργανισμό IMO (International Maritime Organization).

	Ημερομηνία Εγκατάστασης	NO_x [g/kWh]
Tier I	01/2000	17.0
Tier II	01/2011	14.4
Tier III (ECA only)	01/2016	3.4

Για τους ναυτικούς κινητήρες Diesel, η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), που συντελεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, είναι αναπόφευκτη, ωστόσο, λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης πρόωσης, η εκπομπή ανά μονάδα ωφέλιμου έργου είναι σχετικά μικρή. Επίσης, η εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα (CO) είναι πολύ μικρή, διότι οι κινητήρες Diesel λειτουργούν με περίσσεια αέρα [3].

Οι σημαντικότεροι ρύποι των ναυτικών κινητήρων Diesel είναι τα οξείδια του αζώτου (μονοξείδιο και διοξείδιο του αζώτου - NO_x) και τα σωματίδια της αιθάλης (soot). Επιπρόσθετοι ρύποι είναι οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) και τα οξείδια του θείου (SO_x). Οι εκπομπές ρύπων συμβάλλουν στη θέρμανση του πλανήτη (φαινόμενο θερμοκηπίου), στον σχηματισμό όξινης βροχής και αιθαλομίχλης (νέφος), και αποτελούν αιτίες για προβλήματα υγείας του ανθρώπινου οργανισμού, όπως αναπνευστικά και κυκλοφορικά προβλήματα, και καρκινογενέσεις. Αξιοσημείωτο είναι ότι η εκπομπή NO_x από ναυτικούς κινητήρες αναλογεί στο 15% της συνολικής παγκόσμιας έκλυσης NO_x από την ανθρώπινη δραστηριότητα [4].

Οι προσπάθειες των κατασκευαστών κινητήρων στην κατεύθυνση της μείωσης των ρύπων αποβλέπουν στη συμμόρφωση προς τους εκάστοτε κανονισμούς. Στο πλαίσιο της σχετικής έρευνας, η αριθμητική προσομοίωση των διεργασιών ροής και καύσης στους κινητήρες Diesel με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) αποτελεί σήμερα ένα βασικό εργαλείο της σχετικής έρευνας, με στόχο την επίτευξη βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας και την ελαχιστοποίηση των εκπεμπόμενων ρύπων.

1.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση: Μείωση Δημιουργίας Ρύπων στον Κύλινδρο

Σημαντικές μελέτες της βιβλιογραφίας αφορούν σε κινητήρες αυτοκινήτων, και έχουν ως αντικείμενο την εύρεση εναλλακτικών στρατηγικών έγχυσης για τη μείωση των εκπεμπομένων ρύπων. Αρχικά, οι τεχνικές έγχυσης με προέγχυση που εφαρμόστηκαν σε κινητήρες Diesel αυτοκινήτων είχαν αποκλειστικό σκοπό τη μείωση του θορύβου κατά τη διάρκεια της αυτανάφλεξης. Οι μετέπειτα αναλύσεις στηρίχθηκαν, τόσο σε πειραματικές εργασίες, όσο και σε υπολογιστικές, με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Συγκεκριμένα, έχει μελετηθεί η χρήση πολλαπλών εγχύσεων ανά κύκλο της μηχανής με σκοπό την καλύτερη ανάμιξη καυσίμου-αέρα, τη βελτίωση των συνθηκών καύσης, και συνεπώς τη μειωμένη εκπομπή ρύπων [5-9]. Μία πρόσφατη έρευνα υποδεικνύει ότι οι εγχύσεις με προέγχυση σε πετρελαιοκινητήρες υπόσχονται σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων σε NO_x, με μικρή επίπτωση στη συγκέντρωση των σωματιδίων της αιθάλης, αρκεί να επιτευχθεί ο κατάλληλος χρονισμός της προέγχυσης [5]. Η μείωση απορρέει κυρίως, από τη βελτιωμένη ανάμιξη αέρα – καυσίμου, καθώς και από τη μείωση του ποσού της εκλυόμενης θερμότητας καύσης στον κύλινδρο κατά τα πρώτα στάδια της καύσης. Η συγκεκριμένη έρευνα [5] βασίστηκε, τόσο σε πειραματικά δεδομένα, όσο και σε υπολογιστικά, με χρήση του κώδικα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3V. Οι πειραματικές μετρήσεις κατοπτρίζουν τη ρεαλιστική υλοποίηση της τεχνικής έγχυσης με προέγχυση, ενώ το υπολογιστικό τμήμα παρέχει πληροφορία για τις συνθήκες και τους μηχανισμούς δημιουργίας των οξειδίων του αζώτου και των σωματιδίων αιθάλης. Τα πειράματα έγιναν σε τετράχρονη μηχανή Diesel αυτοκινήτου. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης [5], τα πειράματα εκτελέστηκαν για αριθμό στροφών μηχανής ίσο με 1500 RPM, και επικεντρώθηκαν σε δύο περιπτώσεις: (α) αρχή της κύριας έγχυσης στις -7° γωνίας στροφάλου για μέση ενδεικνύμενη πίεση p_{me}=3.25 bar, (β) αρχή της κύριας έγχυσης στις -3.3° για μέση ενδεικνύμενη πίεση p_{me}=7 bar. Οι τιμές της χρονικής διαφοράς - σε μοίρες στροφάλου - μεταξύ έναρξης προέγχυσης και κύριας έγχυσης καί για τις δύο περιπτώσεις ήταν 15°, 21°, 26°, 36° και 46°. Επιπλέον, η συνολική εγχυόμενη

μάζα καυσίμου διατηρήθηκε σταθερή, ενώ το ποσοστό της μάζας προέγχυσης ως προς τη συνολική κυμάνθηκε από 20% έως 50%. Πρέπει να σημειωθεί ότι, με αύξηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ της έναρξης της προέγχυσης και της κύριας έγχυσης, αυξανόταν το ποσοστό μάζας της προέγχυσης. Η πειραματική ανάλυση κατέδειξε ότι καί στις δύο περιπτώσεις (που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της μέσης πραγματικής ενδεικνύμενης πίεσης), όσο η χρονική απόσταση μεταξύ της έναρξης της προέγχυσης και της κύριας έγχυσης αυξάνεται, τόσο η συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου μειώνεται. Για έναρξη της προέγχυσης 46° πριν την κύρια έγχυση, η μείωση, συγκρινόμενη με την περίπτωση της απλής έγχυσης, αγγίζει το ~40% (για $p_{me}=7$ bar) ή το ~10% (για $p_{me}=3.25$ bar). Σημειώνεται επίσης ότι, για χρονική απόσταση 15°, η συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με την απλή έγχυση, διότι η γωνία έναρξης της κύριας έγχυσης, η οποία κρατήθηκε σταθερή, δεν ήταν η βέλτιστη. Έτσι, για μεγάλες χρονικές διαφορές (46°), η μείωση στην τελική συγκέντρωση NO_x φτάνει το ~60%, σε σύγκριση με μικρότερες διαφορές (15°).

Αναφορικά με τη συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης, η πειραματική ανάλυση της έρευνας [5] έδειξε ότι, για μικρές διαφορές προέγχυσης – κύριας έγχυσης, η συγκέντρωση μειώνεται, ενώ, καθώς η χρονική διαφορά μεγαλώνει, η συγκέντρωση αυξάνει. Με αυτή την τάση συμφωνούν και τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Γενικά, η συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης επηρεάζεται από τη χρονική διαφορά προέγχυσης – κύριας έγχυσης, και από τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής. Τέλος, σε σχέση με την απόδοση της μηχανής, η συγκεκριμένη έρευνα έδειξε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνει με αύξηση της χρονικής διαφοράς προέγχυσης – κύριας έγχυσης. Συγκεκριμένα, για μικρές χρονικές διαφορές, η ειδική κατανάλωση αυξάνει, σταθεροποιείται για ενδιάμεσες χρονικές διαφορές, και τέλος, τείνει να μειωθεί για πολύ μεγάλες διαφορές. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά σχετίζεται με την έκλυση θερμότητας, σύμφωνα με την οποία η πίεση πριν το ANΣ είναι μεγαλύτερη, με συνέπεια τη μείωση του ωφέλιμου έργου.

Μία άλλη πρόσφατη έρευνα [6] υποστηρίζει ότι τεχνικές έγχυσης με προέγχυση μπορούν να μειώσουν την ειδική κατανάλωση, με μικρή, όμως, επίδραση στη συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης και μη αμελητέα αύξηση στη συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου. Η συγκεκριμένη έρευνα βασίστηκε, αποκλειστικά, σε πειραματικές μετρήσεις σε ένα μονοκύλινδρο πετρελαιοκινητήρα. Ο κινητήρας δοκιμάστηκε σε διαφορετικούς αριθμούς στροφών και φορτία. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών:

- Η συνολική εγχυόμενη μάζα καυσίμου παρέμεινε σταθερή σε κάθε κύκλο λειτουργίας, με αποτέλεσμα το ωφέλιμο έργο να είναι συνάρτηση μόνο της ειδικής κατανάλωσης.
- Η έναρξη της κύριας έγχυσης παρέμεινε, σε όλες τις δοκιμές, σταθερή.
- Η επιλογή της χρονικής διαφοράς σε μοίρες γωνίας στροφάλου μεταξύ προέγχυσης και κύριας έγχυσης έγινε με βάση τον αριθμό των στροφών: χαμηλές στροφές – μικρή χρονική απόσταση.

Η γενική διαπίστωση στη συγκεκριμένη πειραματική έρευνα ήταν η μείωση της ειδικής κατανάλωσης, σε όλες τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές. Η μείωση αυτή σχετίζεται με τη μάζα του καυσίμου που αντιστοιχεί στην προέγχυση. Ταυτόχρονα, η εξάρτηση της ειδικής κατανάλωσης από τη χρονική διαφορά προέγχυσης – κύριας έγχυσης δεν φαίνεται να είναι μονοσήμαντη, αν και μεγάλη χρονική απόσταση αντιστοιχεί σε μείωση της ειδικής κατανάλωσης. Οι δοκιμές με μέγιστο φορτίο

κατέδειξαν ότι δεν υπάρχει σημαντική επίδραση της εν λόγω χρονικής διαφοράς στις συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου και αιθάλης.

Πρόσφατα, η σχετική έρευνα έχει επεκταθεί και στον τομέα των ναυτικών κινητήρων. Οι Yoon et al. [10], εκτελώντας προσομοιώσεις (υπολογιστικής ρευστοδυναμικής) αλλά και πειράματα, μελέτησαν την επίδραση διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών (όπως γεωμετρία εμβόλου και γωνίες εγχυτήρων) και παραμέτρων του προφίλ έγχυσης της μηχανής στις εκπομπές NO_x. Πειράματα οπτικοποίησης της δέσμης του καυσίμου έγιναν σε θάλαμο σταθερού όγκου σε υψηλή πίεση, έτσι ώστε να επιβεβαιωθούν τα υπολογιστικά αποτελέσματα που αφορούν στα χαρακτηριστικά της δέσμης όπως γωνία της δέσμης και βάθος διείσδυσης. Οι επιδράσεις δύο διαφορετικών γεωμετριών των ακροφυσίων έγχυσης και του ρυθμού έγχυσης καυσίμου μελετήθηκαν προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές NO_x. Η μελέτη κατέδειξε μείωση στη συγκέντρωση NO_x κατά 23.7%, με παράλληλη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά 0.71%.

Οι Struckmeier et al. [11] διερεύνησαν τη δυνατότητα χρήσης ενός καυσίμου χαμηλότερου αριθμού κετανίου (Light Cycle Oil - LCO), σε σχέση με το ναυτιλιακό Diesel (Marine Diesel Oil - MDO) που χρησιμοποιείται σε ναυτικούς κινητήρες. Το εναλλακτικό καύσιμο χρησιμοποιήθηκε, ώστε να καταστεί εφικτή η έγχυση αρκετά νωρίς στον κύκλο λειτουργίας, λόγω της αντιστοιχούσας μεγαλύτερης καθυστέρησης έναυσης (Ignition Delay Period). Ο σκοπός ήταν να επιτευχθεί έναυση και καύση μερικώς ομογενούς γόμωσης (PCCI-Partially Homogeneous Charge Compression Ignition). Η πειραματική αυτή μελέτη κατέδειξε μείωση της τελικής συγκέντρωσης NO_x κατά 10%, καθώς επίσης και μείωση της ειδικής κατανάλωσης τάξεως 1.5%.

Στην έρευνα των Kontoulis et al. [12-14] η οποία αφορούσε στη μελέτη εναλλακτικών στρατηγικών έγχυσης (με παρουσία προέγχυσης) σε βραδύστροφο ναυτικό κινητήρα με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, βρέθηκε ότι η επιλογή κατάλληλης έναρξης και διάρκειας προέγχυσης μπορεί να μειώσει την ειδική κατανάλωση του καυσίμου, αφού η όλη διεργασία λαμβάνει χώρα σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (υψηλή ενεργειακή στάθμη), με συνέπεια την αύξηση του ωφέλιμου έργου. Για κατάλληλο συνδυασμό έναρξης και χρονικής διάρκειας της προέγχυσης, η συγκέντρωση NO_x δεν επηρεάστηκε, ενώ η συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης έτεινε να ελαττωθεί. Επιπλέον, η μετατόπιση της κύριας έγχυσης σε μεγαλύτερες τιμές γωνίας στροφάλου μετά το ANΣ, με στόχο να τηρείται ο περιορισμός της μέγιστης πίεσης και να μην καταπονείται μηχανικά ο κινητήρας, οδήγησε σε σημαντική μείωση των NO_x, σε βάρος όμως του ωφέλιμου έργου. Τέλος κατέστη σαφές ότι οι εκπομπές NO_x και σωματιδίων αιθάλης ακολουθούν αντίρροπες τάσεις, δηλαδή η μείωση των NO_x συνεπάγεται αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων αιθάλης, ενώ αντίστροφα ενδεχόμενη μείωση των εκπομπών σε σωματίδια αιθάλης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης NO_x.

Πρόσφατα, έχει αρχίσει η εισαγωγή μεθόδων βελτιστοποίησης οι οποίες βασίζονται κυρίως σε εξελικτικούς αλγορίθμους, με στόχο τη συστηματική μεταβολή και βελτιστοποίηση των παραμέτρων έγχυσης που επιδρούν στην απόδοση του κινητήρα και τον σχηματισμό ρύπων. Εν προκειμένω, ο βαθμός απόδοσης και οι τελικές συγκεντρώσεις ρύπων λαμβάνονται ως συναρτήσεις στόχων. Τα προβλήματα αυτά

αντιμετωπίζονται άλλοτε ως ενός στόχου [15-17] και άλλοτε ως πολλαπλών στόχων, με χρήση της τεχνικής του μετώπου Pareto (Pareto Front Technique) [18-19].

Στο παραπάνω πλαίσιο, οι Reitz et. al. [15] συνδύασαν των κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3V με ένα γενετικό αλγόριθμο προκειμένου να μελετήσουν διαφορετικές στρατηγικές έγχυσης, που περιλαμβάνουν έως πέντε παλμούς έγχυσης στον ίδιο κύκλο, σε κινητήρα Diesel αυτοκινήτου. Επιπλέον, μελέτησαν τις επιδράσεις της έντασης του εγκάρσιου στροβιλισμού (Swirl Ratio), καθώς και της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation - EGR). Οι συναρτήσεις στόχων ήταν τρεις: οι συγκεντρώσεις NO_x και SO_x , καθώς και η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο, το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε ως ενός στόχου, συνδυάζοντας με συντελεστές βαρύτητας τους τρεις στόχους, καταλήγοντας έτσι σε μία συνάρτηση προς βελτιστοποίηση (Merit Function). Μετά από σημαντικό αριθμό αξιολογήσεων πιθανών στρατηγικών έγχυσης, βρέθηκε ότι η έγχυση με δύο παλμούς (στις -50° πριν το ΑΝΣ και στις 13° μετά το ΑΝΣ) αποτελεί τη βέλτιστη λύση για λειτουργία του συγκεκριμένου κινητήρα σε μερικό φορτίο.

Σε αντίθεση με την προηγούμενη μελέτη, οι Hiroyasu et. al. [18] αντιμετώπισαν το πρόβλημα της μείωσης των εκπομπών NO_x και SO_x , καθώς και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ως πρόβλημα πολλαπλών στόχων, με χρήση της μεθοδολογίας του μετώπου Pareto. Έτσι, παρουσιάστηκε ένα πιο ολοκληρωμένο σύνολο βέλτιστων λύσεων. Η τελική βέλτιστη λύση ήταν δυνατό να επιλεγεί ανάλογα με τη βαρύτητα που δίνεται εκ των υστέρων σε καθέναν από τους τρεις στόχους. Στη συγκεκριμένη έρευνα, αναπτύχθηκε εξελικτικός αλγόριθμος, βασισμένος σε γνωστές μεθόδους, που προσαρμόστηκε ώστε να είναι ο ενδεικνυόμενος για το πρόβλημα. Ο εξελικτικός αυτός αλγόριθμος δεν συνδυάστηκε με κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής αλλά με θερμοδυναμικό μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε. Στη μελέτη βελτιστοποιήθηκε το προφίλ έγχυσης καυσίμου, ώστε να ρυθμιστεί κατάλληλα ο χρονισμός έγχυσης σε ένα κινητήρα Diesel αυτοκινήτου. Σημειώνεται εδώ ότι, στις τελευταίες δύο μελέτες [15, 18], δεν αναφέρονται μειώσεις επί τις εκατό (%) στους στόχους, διότι η βελτιστοποίηση αφορά στον εξ αρχής σχεδιασμό του χρονισμού έγχυσης, και όχι στη βελτιστοποίηση ενός ήδη υπάρχοντα κινητήρα.

1.3 Αντικείμενο της Παρούσας Εργασίας

Επεκτείνοντας την εργασία των Kontoulis et al [12-14], στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται μία μέθοδος βελτιστοποίησης βασισμένη σε εξελικτικούς αλγορίθμους, σε σύζευξη με τον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3. Ο τελευταίος χρησιμοποιείται στην αριθμητική προσομοίωση της ροής και καύσης σε κύλινδρο δίχρονο βραδύστροφο υπερπληρούμενο κινητήρα Diesel της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland. Στόχος μας είναι η συστηματική ανίχνευση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών σχεδίασης (εδώ: παράμετροι του προφίλ έγχυσης καυσίμου), καθώς και η ερμηνεία των θερμοχημικών διεργασιών εντός του κυλίνδρου που αντιστοιχούν σε αυτές. Η βελτιστοποίηση γίνεται για την περιοχή του πλήρους φορτίου, με στόχο τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών NO_x . Επειδή υπάρχει σαφής εξάρτηση μεταξύ του βαθμού απόδοσης του κινητήρα και των εκπομπών NO_x , το παρόν πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα πολλαπλών στόχων (Multi - Objective Optimization problem), με τις βέλτιστες λύσεις να προκύπτουν, με βάση τη μέθοδο της κυριαρχίας κατά Pareto.

Επειδή οι κανονισμοί για τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης αναμένεται να ανακοινωθούν στο προσεχές μέλλον (αλλά και εξαιτίας της σημασίας τους), μελετούμε επίσης την επίδραση των βέλτιστων παραμέτρων έγχυσης στον σχηματισμό σωματιδίων αιθάλης μέσω των «χαρτών T - φ» (χάρτες θερμοκρασίας - λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία αναπτύχθηκε αρχικά από τους Kamimoto et al. [20], και στη συνέχεια από τους Bergman και Golovitchev [21]. Οι χάρτες T - φ είναι ισοϋψείς καμπύλες συγκεντρώσεων παραγόμενων NO_x και σωματιδίων αιθάλης, όπως προκύπτουν από συστηματικές σειρές αριθμητικών προσομοιώσεων χημικής κινητικής για διάφορους συνδυασμούς T - φ, υπό σταθερή πίεση. Σημειώνουμε ότι, αναφορικά με την υπολογιζόμενη συγκέντρωση σωματιδίων αιθάλης, οι υπολογισμοί χημικής κινητικής λαμβάνουν υπόψη μόνο τον σχηματισμό και όχι την οξειδωσή τους. Ο συγκεκριμένος περιορισμός πρέπει να λαμβάνεται προσεκτικά υπόψη στην ερμηνεία των προκύπτων αποτελεσμάτων με χρήση των «χαρτών T - φ».

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής: στο *Κεφάλαιο 2*, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel, καθώς και η λειτουργία του συστήματος έγχυσης κοινού συλλέκτη. Επίσης, αναφέρονται σημαντικά δεδομένα του κινητήρα που βελτιστοποιείται στην παρούσα εργασία. Στο *Κεφάλαιο 3*, γίνεται αναφορά στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3, και παρουσιάζονται βασικά δεδομένα της αριθμητικής προσομοίωσης, καθώς και αποτελέσματα για μία περίπτωση αναφοράς (χωρίς προέγχυση καυσίμου). Στο *Κεφάλαιο 4*, παρουσιάζονται μέθοδοι βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένων αιτιοκρατικών και μη αιτιοκρατικών μεθόδων, με ιδιαίτερη έμφαση στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους. Επίσης, περιγράφεται η σύζευξη μεταξύ του κώδικα KIVA-3 και του λογισμικού βελτιστοποίησης EASY. Στο *Κεφάλαιο 5*, διατυπώνεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης που μελετάται στην παρούσα εργασία, και παρουσιάζονται και αναλύονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα. Τέλος, στο *Κεφάλαιο 6*, παρατίθενται τα συμπεράσματα που απορρέουν από την παρούσα διπλωματική εργασία, και γίνεται αναφορά σε κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, σε συνέχεια της παρούσας.

2 Αρχή Λειτουργίας και Χαρακτηριστικά Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα Diesel

2.1 Λειτουργία Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα Diesel

Εξ' ορισμού, οι δίχρονοι κινητήρες χρειάζονται δύο χρόνους για να ολοκληρώσουν τον πλήρη κύκλο λειτουργίας τους.

Η αναλυτική περιγραφή των δύο χρόνων λειτουργίας θα βασιστεί σε ναυτική βραδύστροφη υπερπληρούμενη μηχανή. Η υπερπλήρωση, εκτός από την αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος, μειώνει σημαντικά την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Η υπερπλήρωση επιτυγχάνεται μέσω ενός ανεξάρτητου στροβιλοϋπερπληρωτή, που λειτουργεί βάσει ενός ανοιχτού κύκλου αεριοστροβίλου, στον οποίο ο κύλινδρος μπορεί να θεωρηθεί ως ο θάλαμος καύσης.

Η σάρωση της μηχανής πραγματοποιείται μέσω περιφερειακών θυρίδων, προσαρμοσμένων στο χιτώνιο, και μίας βαλβίδας εξαγωγής που είναι τοποθετημένη στο πώμα του κυλίνδρου (ευθύγραμμη σάρωση). Επίσης, οι εγχυτήρες είναι συμμετρικά τοποθετημένοι στο πώμα. Στον κύλινδρο παλινδρομεί το έμβολο, το οποίο μέσω του βάκτρου και του ζυγώματος συνδέεται με τον διωστήρα, και αυτός με τη σειρά του με τον στροφαλοφόρο άξονα.

1^{ος} Χρόνος Λειτουργίας (καύση – εκτόνωση - έναρξη εξαγωγής και σάρωσης)

- Λίγο πριν το ΑΝΣ (Ανω Νεκρό Σημείο) (355° περίπου) και καθώς το έμβολο έχει συμπιέσει τον αέρα έτσι ώστε ο τελευταίος να έχει συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κατάλληλες για την αυτανάφλεξη του καυσίμου, εγχύεται το καύσιμο μέσα στον κύλινδρο από τους εγχυτήρες. Το καύσιμο διασπάται σε μικρά σταγονίδια. Εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους, τα σταγονίδια χαρακτηρίζονται από μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο, συνεπώς αυξάνεται η μεταφορά θερμότητας προς αυτά, εξατμίζονται και καίγονται αφού το έμβολο έχει περάσει το ΑΝΣ μέχρι τις 20° περίπου (ίσως και λίγο αργότερα, όπως π.χ στην περίπτωση του κινητήρα της παρούσας διπλωματικής). Από τη θέση αυτή του εμβόλου μέχρι και τις 110° περίπου μετά το ΑΝΣ, συνεχίζεται η εκτόνωση των παραγόμενων από την καύση αερίων. Κατά τη φάση της καύσης και της εκτόνωσης, λαμβάνει χώρα η απόδοση του ωφέλιμου έργου.
- Καθώς το έμβολο κατέρχεται, στις 110° περίπου ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής, και λίγο αργότερα, στις 125° περίπου αποκαλύπτονται οι θυρίδες σάρωσης (ή εισαγωγής).

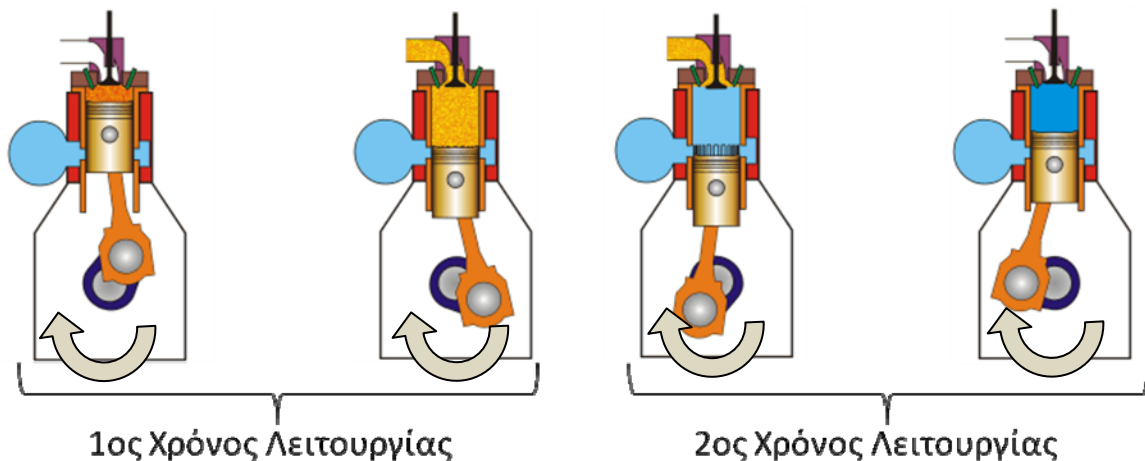
2^{ος} Χρόνος Λειτουργίας (πέρας σάρωσης και εξαγωγής – συμπίεση)

- Το έμβολο βρίσκεται στο Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ) (στις 180° μετά το ΑΝΣ) και έχει αποκαλύψει τις θυρίδες εισαγωγής, οι οποίες μένουν ανοιχτές περίπου έως τις 225° μετά το ΑΝΣ. Κατά το διάστημα αυτό, συμπιεσμένος αέρας από τον υπερπληρωτή εισέρχεται στον κύλινδρο μέσω των θυρίδων, και ωθεί τα καυσαέρια εκτός του κυλίνδρου. Η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει μετά το

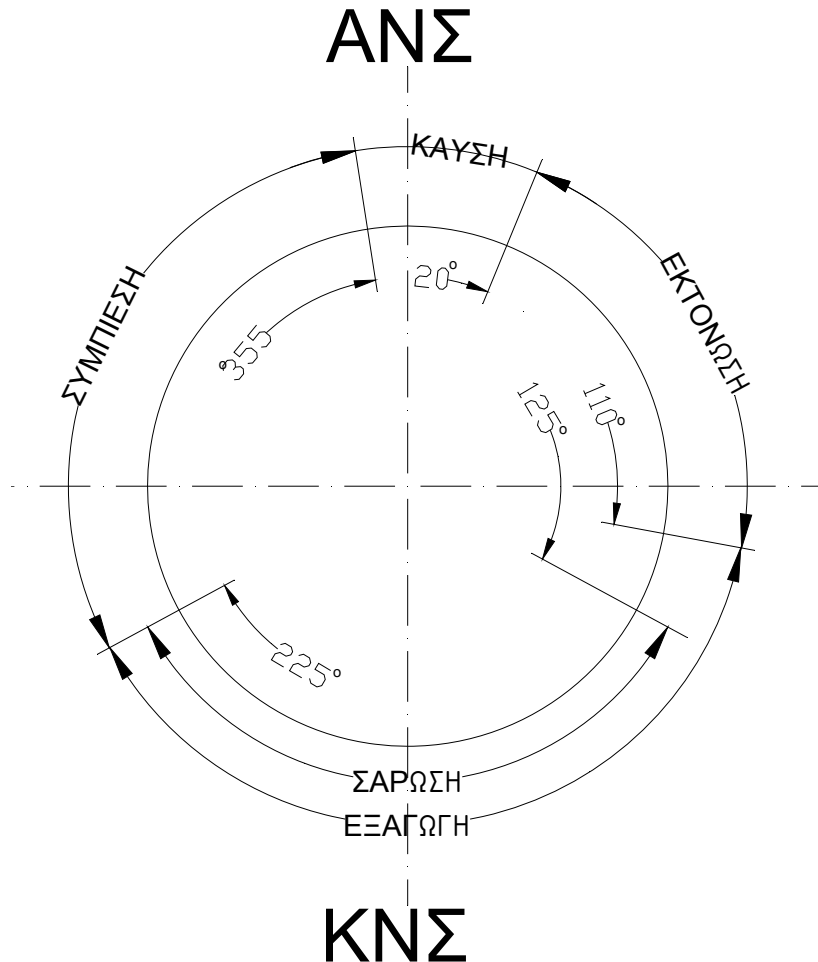
πέρας της σάρωσης. Ωστόσο, ορισμένοι κατασκευαστές επιτρέπουν στη βαλβίδα εξαγωγής να παραμένει ανοικτή μέχρι και 240° - 270° μετά το ΑΝΣ. Η διαδικασία εξαγωγής των καυσαερίων με τη βοήθεια του αέρα εισαγωγής καλείται *απόπλυση* του κυλίνδρου.

- Με τον στροφαλοφόρο να κινείται με ωρολογιακή φορά και το έμβολο να κατευθύνεται προς το ΑΝΣ (βλ. Εικόνα 2.1), ο αέρας εντός του κυλίνδρου συμπιέζεται. Επειδή μεταφέρεται ενέργεια στο ρευστό, η πίεση και η θερμοκρασία του αυξάνονται. Τη στιγμή που το έμβολο πλησιάζει πολύ κοντά στο ΑΝΣ η πίεση είναι πάνω από 100 bar (στα υψηλά φορτία) και η θερμοκρασία πάνω από 500° C. Κατά τη φάση της συμπίεσης έχουμε, προφανώς, κατανάλωση έργου.

Τα παραπάνω φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 2.1, ενώ στην Εικόνα 2.2 αποτυπώνεται ο κύκλος λειτουργίας βραδύστροφου δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel.



Εικόνα 2.1: Σχηματική παράσταση των φάσεων του κύκλου λειτουργίας δίχρονου ναυτικού κινητήρα.



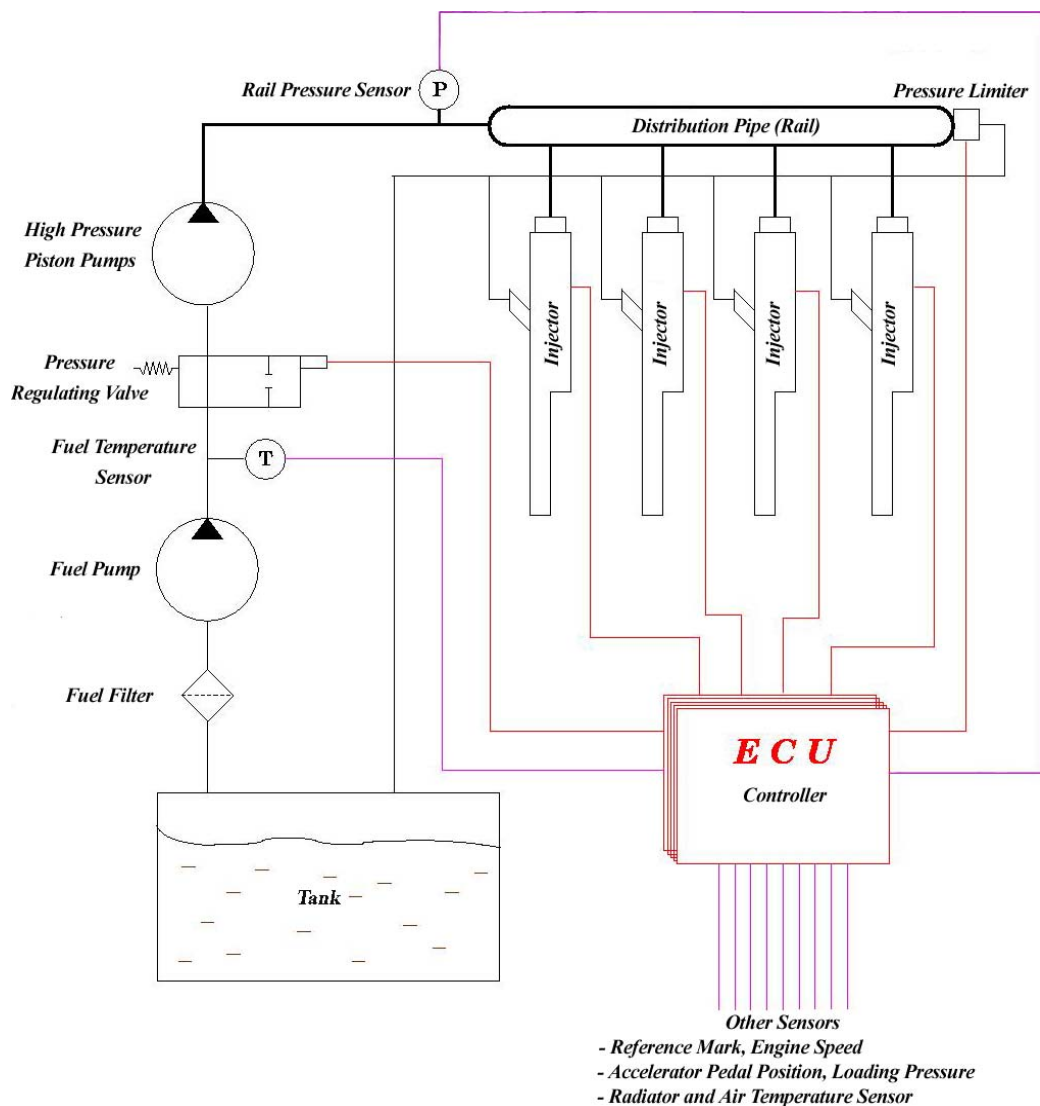
Εικόνα 2.2: Κύκλος λειτουργίας δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρούμενου ναυτικού κινητήρα.

2.2 Σύστημα Έγχυσης Κοινού Συλλέκτη (Common Rail System - CRS)

Κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούμε στο σύστημα έγχυσης κοινού συλλέκτη, διότι αποτελεί το βασικότερο προαπαιτούμενο για την παρούσα μελέτη. Σε αντίθεση με τα συστήματα μηχανικής έγχυσης, όπου ο χρονισμός της έγχυσης εξαρτάται από μηχανικές παραμέτρους (έκκεντρα και στροφές της μηχανής), και επομένως η μεταβολή του χρονισμού είναι πολύ περιορισμένη, στα συστήματα έγχυσης κοινού συλλέκτη ο χρονισμός ρυθμίζεται ηλεκτρονικά. Χωρίς αυτόν τον βαθμό ελευθερίας θα ήταν αδύνατη η μεταβολή των παραμέτρων του προφίλ έγχυσης ώστε να επιτύχουμε βελτιωμένη απόδοση του κινητήρα και μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Μία τυπική διάταξη ενός συστήματος έγχυσης κοινού συλλέκτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3. Η αντλία χαμηλής πίεσης (Fuel Pump) καταθλίβει το καύσιμο από τη δεξαμενή καυσίμου στην αντλία υψηλής πίεσης (High Pressure Pump). Η τελευταία αυξάνει την πίεση του καυσίμου, και αυτό οδηγείται στον συλλέκτη (Rail Unit) ο οποίος βρίσκεται σε υψηλή πίεση. Ο συλλέκτης τροφοδοτεί τους εγχυτήρες με καύσιμο υψηλής πίεσης. Οι εγχυτήρες ελέγχονται ηλεκτρονικά από μικροεπεξεργαστές. Όταν οι εγχυτήρες ενεργοποιούνται, μία υδραυλική βαλβίδα ανοίγει, και το καύσιμο εγχύεται στον κύλινδρο. Βασικό πλεονέκτημα του CRS είναι ότι η αντλία υψηλής πίεσης και ο εγχυτήρας είναι μονάδες ανεξάρτητες μεταξύ τους,

με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται υψηλή πίεση (και ταχύτητα) έγχυσης σε οποιοδήποτε εύρος στροφών, και, επιπλέον, να είναι εφικτή η δυνατότητα ελέγχου της λειτουργίας του κάθε εγχυτήρα ξεχωριστά.



Εικόνα 2.3: Τυπική διάταξη συστήματος έγχυσης κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS).

Τα κυριότερα προτερήματα του CRS σε σχέση με τα μηχανικά συστήματα έγχυσης είναι τα ακόλουθα [22]:

- Η υψηλή πίεση έγχυσης επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.
- Η υψηλή πίεση έγχυσης είναι ανεξάρτητη της μάζας του εγχυόμενου καυσίμου.
- Ακρίβεια στη ρύθμιση της ποσότητας του εγχυόμενου καυσίμου.
- Ευελιξία στον καθορισμό του χρονισμού έγχυσης.
- Δυνατότητα πολλαπλών ψεκασμών σε έναν κύκλο λειτουργίας.
- Ελαχιστοποίηση των διαφορών στην εγχυόμενη μάζα καυσίμου και στον χρονισμό της έγχυσης μεταξύ των κυλίνδρων.
- Ελαχιστοποίηση των διαφορών της εγχυόμενης μάζας καυσίμου μεταξύ των διαδοχικών κύκλων.

- Δυνατότητα ανεξάρτητου χρονισμού έγχυσης μεταξύ των εγχυτήρων ενός κυλίνδρου.
- Δυνατότητα καθορισμού του χρονισμού της βαλβίδας εξαγωγής των καυσαερίων

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται με συντομία το σύστημα CRS της κατασκευάστριας εταιρίας Wärtsilä Switzerland.

Αυτό αποτελείται από τις εξής μονάδες [23]:

Μονάδα αγωγών (Rail Unit), η οποία περιλαμβάνει τους αγωγούς του καυσίμου, του ελαίου χρήσης (servo – oil) και του ελαίου ελέγχου (control oil). Η μονάδα αυτή τοποθετείται κατά μήκος των κυλίνδρων στο ύψος των πωμάτων.

Μονάδα παροχής (Supply Unit), η οποία περιλαμβάνει τις αντλίες υψηλής πίεσης καυσίμου και ελαίου, σε διάταξη V, και τοποθετείται συνήθως στο προωαίο ή πρυμναίο τμήμα του στροφαλοφόρου άξονα της μηχανής.

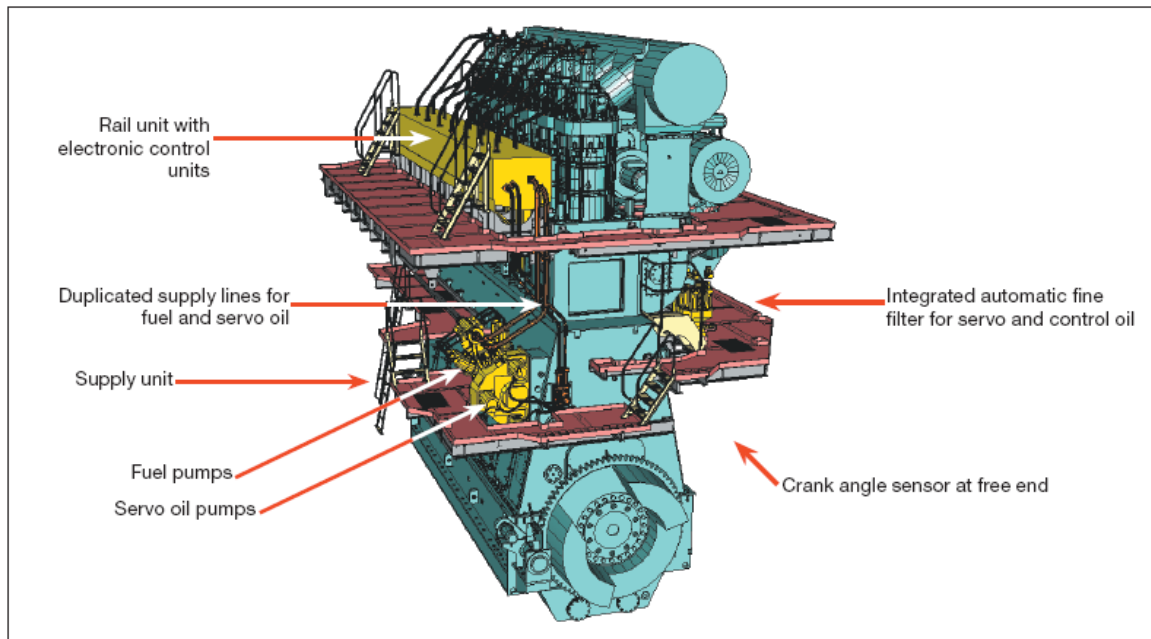
Ολοκληρωμένη αυτόματη εγκατάσταση φίλτρων ελαίου (Integrated Automatic Fine Oil Filter).

Μονάδα ενεργοποίησης και ελέγχου λειτουργίας βαλβίδας εξαγωγής των καυσαερίων (Exhaust Valve Actuator & Control Unit).

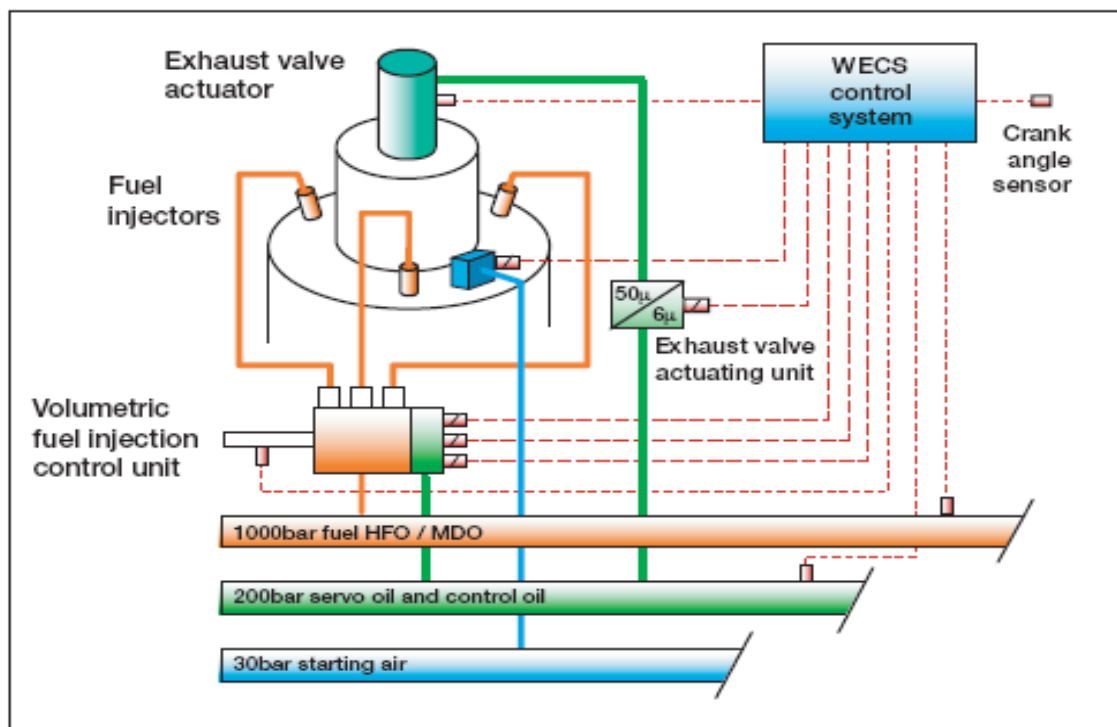
Ολοκληρωμένη ηλεκτρονική μονάδα έγχυσης (Injection Control Unit), ελέγχου λειτουργίας μηχανής (Engine Control Unit) και ανάγνωσης γωνίας στροφαλοφόρου.

Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται μία τυπική εγκατάσταση του CRS στον δίχρονο ναυτικό κινητήρα RT-flex. Σε συμφωνία με τη γενική περιγραφή του συστήματος CRS, το συγκεκριμένο σύστημα αποτελεί ένα δίκτυο ρευστών υψηλής πίεσης, το οποίο, όμως, υποστηρίζεται από αντίστοιχα δίκτυα ρευστών χαμηλής πίεσης. Συγκεκριμένα, το δίκτυο καυσίμου, το οποίο μεσολαβεί μεταξύ της δεξαμενής ημερήσιας κατανάλωσης και της μονάδας παροχής του CRS, είναι ένα δίκτυο χαμηλής πίεσης, τάξεως 10 bar, το οποίο περιλαμβάνει τοπικά φίλτρα, τροφοδοτικές αντλίες, προθερμαντήρες, φυγοκεντρικούς καθαριστές, ομογενοποιητές και ιξωδόμετρα. Επίσης, το λάδι που προορίζεται για χρήση και έλεγχο στο CRS είναι το ίδιο λάδι που χρησιμοποιεί η μηχανή για την κύρια λίπανσή της. Συνεπώς, το επιμέρους δίκτυο ελαίου, μεταξύ ελαιολεκάνης και μονάδας παροχής του CRS, είναι ένα δίκτυο χαμηλής πίεσης το οποίο περιλαμβάνει τοπικά φίλτρα, τροφοδοτικές αντλίες, ψυγεία και ιξωδόμετρα. Η σκαριφηματική απεικόνιση της διάταξης του δικτύου υψηλής πίεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.

Ανακεφαλαιώνοντας, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά, μπορούμε να πούμε ότι το σύστημα έγχυσης κοινού συλλέκτη (CRS) προσφέρει βελτιωμένη λειτουργία σε χαμηλές στροφές, γρήγορη επιτάχυνση, ισορροπία φορτίου μεταξύ των κυλίνδρων, πλήρη έλεγχο φορτίου, χαμηλή κατανάλωση καυσίμου, καλύτερη ποιότητα καύσης σε όλο το εύρος στροφών και φορτίου, χαμηλά επίπεδα εκπομπών των κύριων ρύπων (σωματίδια αιθάλης και οξειδία του αζώτου), καθώς και λιγότερες επικαθίσεις εξανθρακωμάτων, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερα διαστήματα ανάμεσα σε διαδοχικές συντηρήσεις.



Εικόνα 2.4: Εγκατάσταση CRS, σε κινητήρα RT-flex της εταιρίας Wärtsilä Switzerland [23].



Εικόνα 2.5: Σκαριφηματική παράσταση διάταξης δικτύου υψηλής πίεσης στο CRS του κινητήρα RT-flex της εταιρίας Wärtsilä Switzerland [23].

2.3 Χαρακτηριστικά του Κινητήρα RT-flex58T-B

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν και βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι έγχυσης στον δίχρονο βραδύστροφο υπερπληρούμενο κινητήρα Diesel RT-flex58T-B της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα αναγράφονται στον Πίνακα 2-1.

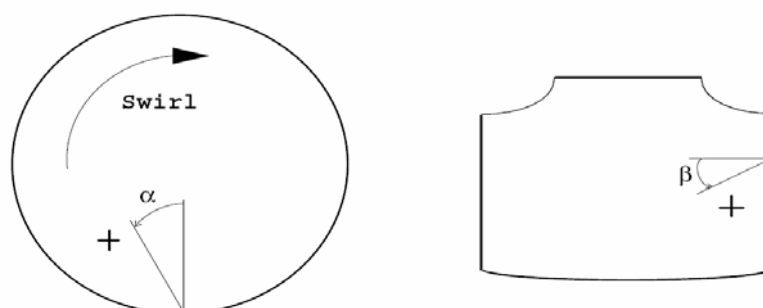
Πίνακας 2-1: Βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα RT-flex58T-B.

Τύπος	RT-flex58T-B
Διάμετρος Εμβόλου	580 mm
Διαδρομή Εμβόλου	2416 mm
Ταχύτητα Περιστροφής	105 RPM
Μέση Ταχύτητα Εμβόλου	8.46 m/s
Έναρξη Συμπίεσης (από ΑΝΣ)	-96°
Πέρας Εκτόνωσης (από ΑΝΣ)	120°
Σύστημα Έγχυσης	Κοινού Συλλέκτη - CRS
Αριθμός Εγχυτήρων/ Οπές ανά Εγχυτήρα	3/5
Έναρξη Έγχυσης	2°
Διάρκεια Έγχυσης	15.2°
Μέση Ενδεικνύμενη Πίεση	19 bar
Μέγιστη Ισχύς ανά Κύλινδρο	2125 KW

Ο κινητήρας λειτουργεί με περίσσεια αέρα, και συγκεκριμένα με συνολικό λόγο ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα, $\phi_{total} = 0.511$ [14].

Ο κινητήρας διαθέτει τρεις εγχυτήρες τοποθετημένους συμμετρικά ανά 120° στην περιφέρεια του πώματος του κυλίνδρου. Το ακροφύσιο του κάθε εγχυτήρα φέρει πέντε οπές, με σκοπό τον καλύτερο διασκορπισμό του καυσίμου στον θάλαμο καύσης.

Η κατεύθυνση έγχυσης καθορίζεται από τις γωνίες έγχυσης, $\hat{\alpha}$ και $\hat{\beta}$, όπως αυτές ορίζονται στην Εικόνα 2.6. Η προσήμανση της κατεύθυνσης της έγχυσης από κάθε οπή του εγχυτήρα, όπως αυτή ορίζεται στην Εικόνα 2.6, αναγράφεται στον Πίνακα 2-2. Παρατηρείται ότι, γενικά, η κατεύθυνση της έγχυσης ταυτίζεται με την αντίστοιχη του εγκάρσιου στροβιλισμού. Με τον όρο εγκάρσιος στροβιλισμός εννοείται η εισαγωγή του αέρα σάρωσης στον κύλινδρο με εφαπτομενική συνιστώσα ταχύτητας. Με την ύπαρξη εγκάρσιου στροβιλισμού επιτυγχάνεται καλύτερη απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια και καλύτερη ανάμιξη αέρα – καυσίμου, με αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα καύσης. Η καλύτερη ποιότητα καύσης υποδηλώνει όσο το δυνατό μεγαλύτερη εκμετάλλευση της εκλυόμενης ενέργειας του καυσίμου, χαμηλές εκπομπές ρύπων (οξειδία του αζώτου, σωματίδια αιθάλης) και καθαρότητα του κυλίνδρου (απουσία εξανθρακωμάτων).



Εικόνα 2.6: Ορισμός γωνιών έγχυσης $\hat{\alpha}$ και $\hat{\beta}$.

Πίνακας 2-2: Προσήμανση των γωνιών έγγυσης $\hat{\alpha}$ και $\hat{\beta}$ της Εικόνα 2.6.

Αριθμός οπής	1	2	3	4	5
Γωνία α	-	+	+	+	+
Γωνία β	+	+	+	+	+

3 Προσομοιώσεις Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

3.1 Επισκόπηση του Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3

Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 [26-27] αποτελεί νεότερη έκδοση του κώδικα KIVA ο οποίος δημιουργήθηκε το 1985. Ο κώδικας επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις διατήρησης της συμπιεστής ροής με παρουσία χημικών αντιδράσεων. Για την περιγραφή επιμέρους διεργασιών όπως πρωτογενής και δευτερογενής διάσπαση δέσμης καυσίμου, εξάτμιση, έναυση και μεταφορά θερμότητας γίνεται χρήση επιμέρους φυσικών μοντέλων.

Ο κώδικας KIVA-3 περιλαμβάνει έναν επιμέρους κώδικα δημιουργίας υπολογιστικών πλεγμάτων (K3PREP). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ανεξάρτητος κώδικας δημιουργίας πλεγμάτων. Ο ορισμός ενός προβλήματος περιλαμβάνει τη δημιουργία κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος, και την εισαγωγή των δεδομένων στα αρχεία εισόδου. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει την επεξεργασία παραμέτρων που χαρακτηρίζουν συνολικά τις διεργασίες (όπως πίεση, ρυθμός έκλυσης θερμότητας, χωρικά μέσες τιμές συγκεντρώσεων), καθώς και την οπτικοποίηση των υπολογισθέντων ροϊκών πεδίων με χρήση κατάλληλου λογισμικού.

Οι κύριες εξισώσεις οι οποίες επιλύονται είναι η εξίσωση της συνέχειας, η εξίσωση της ορμής και η εξίσωση της εσωτερικής ενέργειας. Αυτές οι εξισώσεις διακριτοποιούνται στον χώρο και στον χρόνο με χρήση μεθόδων χαμηλής τάξεως. Κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού επιμερίζεται σε τρία στάδια.

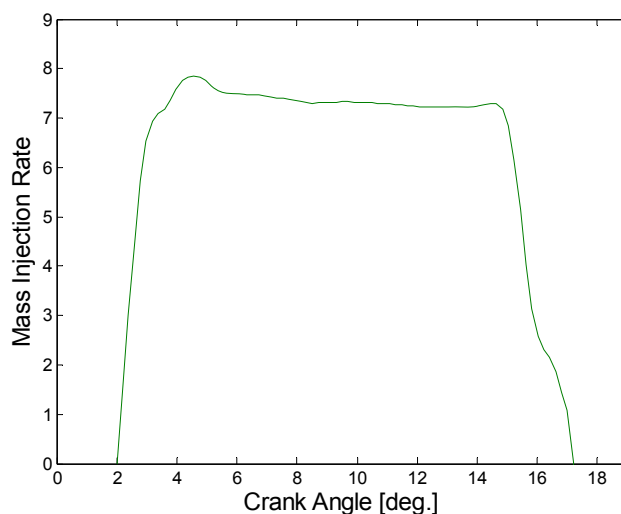
- Στο πρώτο στάδιο υπολογίζονται οι μετατοπίσεις των σταγονιδίων της δέσμης του καυσίμου, οι πιθανές συγκρούσεις μεταξύ τους, καθώς και η ατμοποίησή τους.
- Στο δεύτερο στάδιο υπολογίζονται όροι που έχουν σχέση με την παράγωγο της πίεσης στην εξίσωση της ορμής, καθώς και οι όροι ταχύτητας στην εξίσωση της μάζας και της ενέργειας. Οι τελευταίες υπολογίζονται με βάση τον αλγόριθμο SIMPLE. Ο αλγόριθμος SIMPLE είναι μία επαναληπτική διαδικασία, η οποία αποτελείται από δύο στάδια: αρχικά ορίζεται μία αρχική πίεση για το δεύτερο στάδιο, p^B , και χρησιμοποιώντας αυτή την τιμή υπολογίζοντας τις υπόλοιπες ποσότητες. Κατόπιν, οι υπολογισθείσες τιμές για τους όρους διάχυσης κρατούνται σταθεροί και στη συνέχεια οι διακριτοποιημένες εξισώσεις επιλύονται για τους διορθωμένους όρους της πίεσης. Τέλος, οι προβλεφθείσες και υπολογισθείσες τιμές για την πίεση συγκρίνονται, και αν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης τότε αρχίζει το τρίτο στάδιο. Διαφορετικά, επαναλαμβάνεται η διαδικασία χρησιμοποιώντας την υπολογισθείσα τιμή της πίεσης ως καινούργια αρχική τιμή.
- Στο τρίτο στάδιο το πεδίο ροής «παγώνει» και προσαρμόζεται στο καινούριο μεταβληθέν πλέγμα. Το πλέγμα μεταβάλλεται λόγω της κίνησης του εμβόλου και επομένως στο τρίτο στάδιο μεταφέρεται η πληροφορία από τα κελιά που αποκόπτονται προς τα υπόλοιπα κατά την ανοδική κίνηση εμβόλου. Στην καθοδική κίνηση του εμβόλου η πληροφορία μεταφέρεται από τα υπάρχοντα κελιά προς τα υπολογιστικά κελιά που δημιουργούνται.

3.2 Μοντέλα Φυσικών Διεργασιών

Επειδή ο κώδικας KIVA-3 είναι ανοιχτός (open - source) μπορούν, να γίνουν τροποποιήσεις, κυρίως στα επιμέρους μοντέλα των φυσικών διεργασιών. Οι τροποποιήσεις στον κώδικα που χρησιμοποιήσαμε περιλαμβάνουν μοντέλα ψεκασμού καυσίμου (spray), έναυσης, καύσης και σχηματισμού NO_x. Συγκεκριμένα, το μοντέλο του ψεκασμού καυσίμου περιλαμβάνει έναν κλιμακωτό μηχανισμό διάσπασης των σταγονιδίων του καυσίμου [28-29], ενώ ταυτόχρονα η μοντελοποίηση της έναυσης βασίζεται σε επίλυση μίας κατάλληλης εξίσωσης μεταφοράς [30]. Η μοντελοποίηση του σχηματισμού NO_x βασίζεται σε έναν εκτενή μηχανισμό, που είναι περαιτέρω επέκταση του διευρυμένου μηχανισμού Zeldovich [31]. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται εδώ είναι το δεκατετράνιο (C₁₄H₃₀) Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του συγκεκριμένου κώδικα έχει διαπιστωθεί σε συγγενείς με την παρούσα έρευνες του Τομέα Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. [24-25].

3.3 Αριθμητική Προσομοίωση για Λειτουργία σε Συνθήκες Αναφοράς

Στη παρούσα παράγραφο, παρουσιάζονται υπολογιστικά αποτελέσματα για μία περίπτωση αναφοράς που χαρακτηρίζεται από συνεχές προφίλ έγχυσης του καυσίμου. Το προφίλ έγχυσης που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, βασίζεται σε μετρήσεις της κατασκευάστριας εταιρείας Wärsilä Switzerland, και παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.1.



Διάγραμμα 3.1: Προφίλ έγχυσης του καυσίμου στην περίπτωση αναφοράς.

Το συγκεκριμένο προφίλ είναι κοινό για τους τρεις εγχυτήρες του κινητήρα, και αντιστοιχεί σε γωνία έναρξης έγχυσης 2° και διάρκεια 15.2°.

Στο Διάγραμμα 3.1, το προφίλ παρουσιάζεται αδιαστατοποιημένο ως προς τη συνολική εγχυόμενη μάζα καυσίμου:

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

όπου,

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

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

Ως συνέπεια της αδιαστατοποίησης του προφίλ, στο Διάγραμμα 3.1 η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη λαμβάνει την τιμή 100.

Η περιγραφή του παραπάνω προφίλ έγχυσης παρουσιάζει ενδιαφέρον, διότι από αυτήν απορρέουν συμπεράσματα για την περαιτέρω προσπάθεια προσέγγισής του. Διακρίνεται ότι στις πρώτες 3° της διάρκειας της έγχυσης υπάρχει μία έντονη κλίση του προφίλ, που καταλήγει σε ταλάντωση μικρού πλάτους. Αυτή η συμπεριφορά αντιστοιχεί στην κίνηση της βελόνας του εγχυτήρα κατά το άνοιγμά της, και τη σταθεροποίησή της στη θέση έγχυσης. Στη συνέχεια, για τις επόμενες 10° της έγχυσης, ο ρυθμός έγχυσης παραμένει πρακτικά σταθερός. Το γεγονός ότι παρατηρείται σταθεροποίηση του ρυθμού έγχυσης του καυσίμου οφείλεται στη μεγάλη διάρκεια έγχυσης. Στις τελευταίες 2.2° λαμβάνει χώρα ο βαθμιαίος μηδενισμός του ρυθμού έγχυσης, που αντιστοιχεί στο κλείσιμο της βελόνας του εγχυτήρα. Στον Πίνακα 3-1, παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της περίπτωσης αναφοράς.

Πίνακας 3-1: Δεδομένα αριθμητικής προσομοίωσης στην περίπτωση αναφοράς.

Πίεση αέρα εισαγωγής στον κύλινδρο	3.52 bar
Θερμοκρασία αέρα εισαγωγής στον κύλινδρο	330 K
Θερμοκρασία χιτωνίου	500 K
Θερμοκρασία πώματος	500 K
Θερμοκρασία βαλβίδας εξαγωγής	500 K
Θερμοκρασία κεφαλής εμβόλου	650 K

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η εισαγωγή του αέρα από της θυρίδες δημιουργεί μία δομή εγκάρσιου στροβιλισμού εντός του κυλίνδρου. Η ένταση του εγκάρσιου στροβιλισμού (*Swirl Number*) ορίζεται ως ο λόγος της γωνιακής ταχύτητας στροβιλισμού του αέρα προς τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής.

$$SN = \frac{\omega_{Swirl}}{\omega_{engine}}$$

όπου,

ω_{Swirl} , γωνιακή ταχύτητα στροβιλισμού του αέρα [Hz],

$\omega_{engine} = \frac{2 * \pi * N}{60}$, γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής [Hz],

N , ταχύτητα περιστροφής της μηχανής [RPM].

Οι συνιστώσες της ταχύτητας που αντιστοιχούν στην εγκάρσια συστροφή ορίζονται στην αρχή της συμπίεσης με τη βοήθεια μίας συνάρτησης Bessel. Σημειώνεται ότι η τιμή ω_{Swirl} αντιστοιχεί σε γραμμικό προφίλ σε συνάρτηση της ακτίνας, το οποίο χαρακτηρίζεται από την ίδια τιμή της γωνιακής στροφορμής με αυτό που καθορίστηκε με τη συνάρτηση Bessel. Η περιγραφή του προφίλ των ταχυτήτων του εγκάρσιου στροβιλισμού με τη βοήθεια της συνάρτησης Bessel αποδίδει την

επίδραση των τοιχωμάτων του κυλίνδρου, στην κατανομή της περιφερειακής ταχύτητας.

Η προσομοίωση περιλαμβάνει ολόκληρη τη γεωμετρία του κυλίνδρου (360°), με σκοπό τη δυνατότητα προσομοίωσης έγχυσης μεταβλητού χρονισμού μεταξύ των εγχυτήρων, δυνατότητα που προσφέρεται από το CRS. Το υπολογιστικό πλέγμα, όπως αυτό έχει ελεγχθεί και αξιολογηθεί από προγενέστερες μελέτες [24, 25], αποτελείται από περίπου 85,000 κελιά στο σημείο έναρξης της συμπίεσης, όπου το έμβολο έχει καλύψει τις θυρίδες σάρωσης, και η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστή. Η προσομοίωση περιλαμβάνει μόνο τις φάσεις της συμπίεσης, της καύσης και της εκτόνωσης (χωρίς τη διαδικασία απόπλυσης). Η αντιστοιχία των συγκεκριμένων φάσεων σε μοίρες γωνίας στροφάλου είναι από -96° μέχρι 120°, με σημείο αναφοράς το ΑΝΣ.

Οι αρχικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (βλ. Πίνακας 3-1), που αντιστοιχούν στις συνθήκες αναφοράς, προέκυψαν από διαδικασία δοκιμής και επαλήθευσης, συγκρίνοντας την υπολογισθείσα κάθε φορά καμπύλη πίεσης με αντίστοιχη πειραματική. Τα πειραματικά δεδομένα αντιστοιχούν σε κινητήρα RT-flex58T-B, ο οποίος χρησιμοποιεί καύσιμο Diesel, και βρίσκεται στο ερευνητικό κέντρο της Wärtsilä Switzerland στο Winterthur. Στο Διάγραμμα 3.2 και στο Διάγραμμα 3.3, παρουσιάζονται οι υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης και ρυθμού έκλυσης θερμότητας (και αθροιστικής έκλυσης θερμότητας) (Rate Of Heat Release – ROHR), αντίστοιχα, και συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Η πειραματική καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας βασίζεται στη μετρηθείσα πίεση, η οποία δίδεται ως δεδομένο σε θερμοδυναμικό κώδικα προσομοίωσης της διεργασίας (G. Weisser, προσωπική επικοινωνία). Σημειώνεται ότι οι τιμές του ρυθμού έκλυσης θερμότητας έχουν αδιαστατοποιηθεί ως εξής:

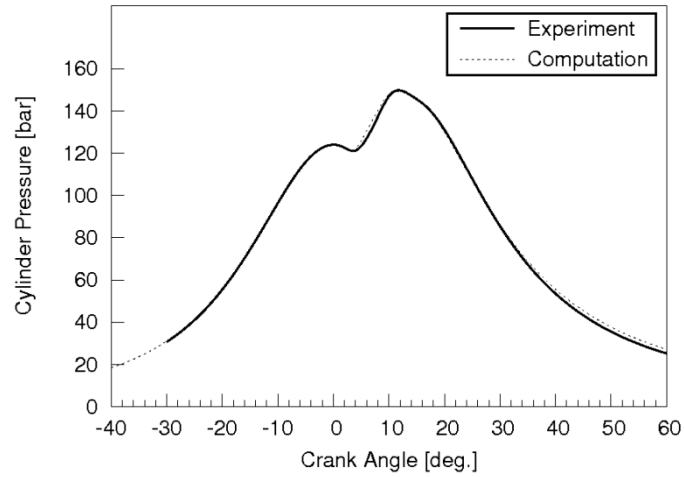
$$ROHR = \frac{d(Q_{chem})}{d(CA)} \cdot \frac{100}{Q_{chem,tot}}$$

Όπου,

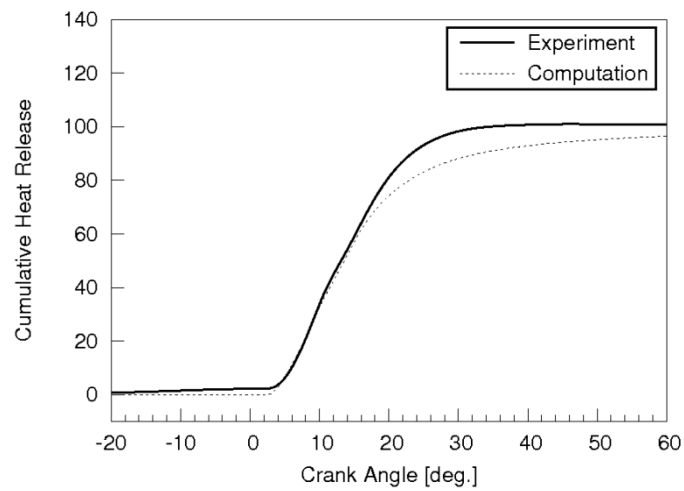
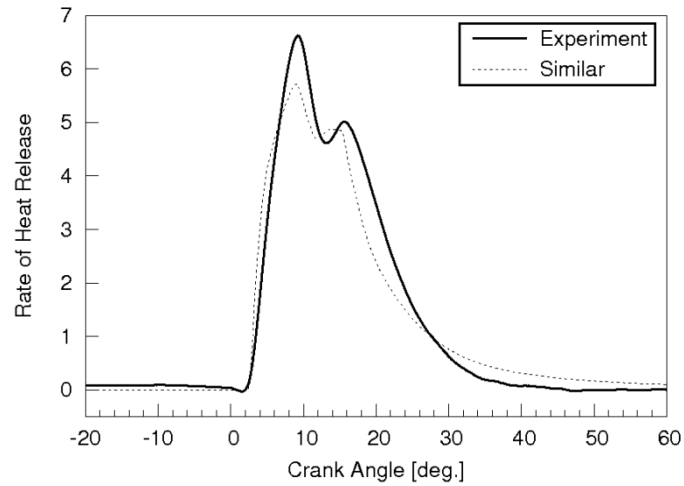
Q_{chem} , εκλυόμενη θερμότητα καύσης [J],

$Q_{chem,tot}$, συνολικά εκλυόμενη θερμότητα καύσης [J].

Αν και η σύγκριση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης είναι πολύ καλή όσον αφορά στην πίεση, οι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας υποδεικνύουν ότι, στην προσομοίωση, η καύση εξελίσσεται, στα τελευταία της στάδια, με αργό ρυθμό σε σύγκριση με το πείραμα. Η συμπεριφορά αυτή έχει ως επακόλουθο τη συγκριτικά μεγαλύτερη διάρκεια της όλης διεργασίας της καύσης κατά την προσομοίωση (βλ. Διάγραμμα 3.3). Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι η υπολογιζόμενη τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (1620 ppm) βρίσκεται σε ικανοποιητική συμφωνία με την πειραματική τιμή των 1410 ppm των μετρήσεων της Wärtsilä Switzerland. Σημειώνεται ότι, στους υπολογισμούς μας, το ποσοστό NO στη τελική συγκέντρωση NO_x είναι περίπου 96%, και το υπόλοιπο (μόλις 4%) είναι NO₂.



Διάγραμμα 3.2: Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλες πίεσης σε συνθήκες αναφοράς, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου.



Διάγραμμα 3.3: Πειραματικές και υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας και αθροιστικής έκλυσης θερμότητας σε συνθήκες αναφοράς, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου.

4 Θεωρία Βελτιστοποίησης

4.1 Διατύπωση του Γενικού Προβλήματος

Σε ένα γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, αναζητείται ένα διάνυσμα μεταβλητών σχεδίασης \vec{x} το οποίο ικανοποιεί k περιορισμούς, οι οποίοι περιέχονται σε ένα διάνυσμα \vec{g} και βελτιστοποιεί (ελαχιστοποιεί στα προβλήματα ελαχιστοποίησης) ένα διάνυσμα \vec{F} με M αντικειμενικές συναρτήσεις. Αυτό φορμαλιστικά διατυπώνεται ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \vec{F}(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_M(\vec{x}))^T \\ \vec{x} \in X = \{ \vec{x} \in \mathfrak{R}^N \} \\ \vec{g}(\vec{x}) \leq 0, (g_1(\vec{x}), g_2(\vec{x}), \dots, g_k(\vec{x})) \end{array} \right\}$$

όπου οι αντικειμενικές συναρτήσεις $\vec{F}(\vec{x})$ αλλά και οι συναρτήσεις των περιορισμών $\vec{g}(\vec{x})$ είναι συναρτήσεις του διανύσματος των μεταβλητών σχεδίασης:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_i(\vec{x}) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_N), i = 1, \dots, M \\ g_j(\vec{x}) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_N), j = 1, \dots, k \end{array} \right\}$$

Στην περίπτωση που $M = 1$ αναφερόμαστε σε προβλήματα ενός στόχου, ενώ για $M \geq 2$ αναφερόμαστε σε προβλήματα πολλαπλών στόχων και σε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (Multiobjective Optimization Problems).

4.2 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Η μέθοδος βελτιστοποίησης είναι το εργαλείο που ανιχνεύει τον χώρο των υποψηφίων λύσεων και οδηγεί (έξυπνα και γρήγορα, εάν είναι μία πραγματικά αποτελεσματική μέθοδος) στον εντοπισμό της βέλτιστης, από όλες τις υποψήφιες λύσεις.

Από την πλευρά των μεθόδων βελτιστοποίησης, βασική είναι η διάκριση σε αιτιοκρατικές (deterministic) και στοχαστικές (stochastic) μεθόδους. Μία αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τη γενικευμένη έννοια της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης, τιμές της οποίας καλείται να υπολογίσει ή να προσεγγίσει. Από την άλλη κύριο χαρακτηριστικό των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι ότι χρησιμοποιούν στοιχεία τυχαίας ή οργανωμένα τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης.

Η διαφορά των δύο προσεγγίσεων (τουλάχιστον σε προβλήματα ρευστοδυναμικής) είναι ότι η ανάπτυξη μίας αιτιοκρατικής μεθόδου βελτιστοποίησης απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο επένδυσης από την πλευρά του μηχανικού - προγραμματιστή, ενώ είναι δυσκολότερα επεκτάσιμη σε άλλα παρεμφερή προβλήματα (λ.χ όταν αλλάζει η αντικειμενική συνάρτηση). Γενικά, οι αιτιοκρατικές μέθοδοι συγκλίνουν γρήγορα στη βέλτιστη λύση, με τον κίνδυνο όμως η λύση αυτή να είναι τοπικό και όχι το ολικό βέλτιστο, ανάλογα με το σημείο εκκίνησης. Από την άλλη πλευρά, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι περισσότερο γενικοί, με την έννοια ότι εύκολα προσαρμόζονται σε διαφορετικούς τύπους προβλημάτων, και είναι συνήθως περισσότερο αργοί από τις αιτιοκρατικές μεθόδους βελτιστοποίησης, με κέρδος όμως το να μπορούν να εντοπίσουν το ολικό ακρότατο ανεξάρτητα από τη λύση ή τις λύσεις με τις οποίες εκκινούν.

4.2.1 Αιτιοκρατικές Μέθοδοι

4.2.1.1 Μέθοδοι Ανίχνευσης κατά Γραμμή

Η βασική αρχή των επαναληπτικών μεθόδων ανίχνευσης κατά γραμμή [32] είναι η δημιουργία της επόμενης προσέγγισης \vec{x}^{-n+1} της λύσης χρησιμοποιώντας τη τρέχουσα \vec{x}^{-n} και μία κατεύθυνση ανίχνευσης \vec{p}^{-n} (search direction), σύμφωνα με το σχήμα

$$\vec{x}^{-n+1} = \vec{x}^{-n} + \eta \vec{p}^{-n},$$

όπου η είναι μία βαθμωτή ποσότητα που ρυθμίζει το μήκος του βήματος (step length) στην κατεύθυνση \vec{p}^{-n} . Ο άνω δείκτης n συμβολίζει τον αριθμό της επανάληψης ή του βήματος. Οι διαφορές μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων ανίχνευσης κατά γραμμή συνίστανται κυρίως στον υπολογισμό της κατεύθυνσης ανίχνευσης \vec{p}^{-n} , και δευτερευόντως στον τρόπο υπολογισμού του η . Ανάλογα με την παραλλαγή της μεθόδου που χρησιμοποιείται, η τιμή του η μπορεί να είναι σταθερή με τις επαναλήψεις ή, αφού έχει ήδη επιλεγεί η κατεύθυνση ανίχνευσης \vec{p}^{-n} , να υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε βήμα. Στην τελευταία περίπτωση, είναι ορθότερο να ξαναγραφεί η προηγούμενη σχέση ως:

$$\vec{x}^{-n+1} = \vec{x}^{-n} + \eta^n \vec{p}^{-n}$$

Και να διατυπωθεί μαθηματικά το ζητούμενο ως:

$$\min_{\eta^n > 0} F\left(\vec{x}^{-n} + \eta^n \vec{p}^{-n}\right)$$

Έχοντας προεπιλέξει την κατεύθυνση ανίχνευσης \vec{p}^n , η παραπάνω σχέση ενέχει ένα νέο μονοπαραμετρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο σχετίζεται με την εύρεση της ελάχιστης τιμής της $F(\vec{x})$ στη συγκεκριμένη κατεύθυνση, με άγνωστο το η^n .

Ακολουθως, παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένες μέθοδοι ανίχνευσης κατά γραμμή. Εδώ, θα θεωρήσουμε ότι τα προβλήματα βελτιστοποίησης δεν υπόκεινται σε περιορισμούς.

Η Μέθοδος της Απότομης Καθόδου

Στη μέθοδο της απότομης καθόδου (steepest descent method) [32], η εφαρμογή της τελευταίας σχέσης ανανέωσης της τιμής του διανύσματος \vec{x} γίνεται επιλέγοντας ως κατεύθυνση ανίχνευσης \vec{p}^n το αντίθετο του τοπικού διανύσματος κλίσης της συνάρτησης $F(\vec{x}^n)$. Αφού η κλίση, δηλαδή το διάνυσμα $\nabla F(\vec{x})$, δείχνει σε κάθε σημείο την κατεύθυνση της μέγιστης μεταβολής της τιμής $F(\vec{x})$, η επιλογή του διανύσματος

$$\vec{p}^n = -\nabla F(\vec{x}^n)$$

ως κατεύθυνση ανίχνευσης της βέλτιστης λύσης έχει προφανή λόγο την ταχεία σύγκλιση προς το ακρότατο. Για λόγους πληρότητας, παραθέτουμε το ανάπτυγμα Taylor

$$F(\vec{x}^n + \eta^n \vec{p}^n) = F(\vec{x}^n) + \eta^n \vec{p}^{nT} \nabla F(\vec{x}^n) + O(\eta^{n^2})$$

όπου, το πρόσημο του δεύτερου όρου στο δεξιό μέλος (αρνητική ποσότητα για $\eta^n > 0$) δικαιολογεί και την επιλογή της προηγούμενης σχέσης.

Χαρακτηριστικό της μεθόδου της απότομης καθόδου είναι ότι απαιτεί, σε κάθε νέα θέση, τον υπολογισμό της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης, και πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί πληροφορία για το μητρώο Hess (δευτερες παράγωγοι). Η απόδοσή της μεθόδου εξαρτάται από την αρχική λύση \vec{x}^0 , το η^n , και, προφανώς, τη μορφή της συνάρτησης. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική για απλά προβλήματα, αλλά γίνεται ιδιαίτερα αργή και αναποτελεσματική σε πολύπλοκα προβλήματα (π.χ σε προβλήματα ρευστοδυναμικής).

Η Μέθοδος Newton

Η μέθοδος Newton [32] αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους αντιπροσώπους της κατηγορίας των μεθόδων ανίχνευσης κατά γραμμή. Για τη θεμελίωση της αρκεί να γραφεί το ανάπτυγμα Taylor με διατήρηση του όρου της δεύτερης τάξης. Ισχύει η προσέγγιση (θεωρούμε προς το παρόν ότι $\eta^n = \eta = 1$, παραδοχή που θα σχολιάσουμε στη συνέχεια)

$$F(\vec{x} + \vec{p}) \approx F(\vec{x}) + \vec{p}^T \nabla F(\vec{x}) + \frac{1}{2} \vec{p}^T \nabla^2 F(\vec{x}) \vec{p}$$

Η απαίτηση μηδενισμού της πρώτης παραγώγου της $F(\vec{x} + \vec{p})$ ως προς \vec{p} δίνει

$$\nabla F(\vec{x}) + \nabla^2 F(\vec{x}) \vec{p} = 0$$

που καθορίζει την κατεύθυνση ανίχνευσης για την τρέχουσα επανάληψη ως:

$$\vec{p} = -\left(\nabla^2 F(\vec{x})\right)^{-1} \nabla F(\vec{x})$$

Η τελευταία σχέση γράφτηκε με την προϋπόθεση ότι το μητρώο Hess $\nabla^2 F(\vec{x})$ είναι

θετικά ορισμένο. Αν αυτό δεν ισχύει, η κατεύθυνση \vec{p} δεν ορίζεται, αφού δεν μπορεί να υπολογιστεί ο αντίστροφος του μητρώου Hess.

Προφανής διαφορά ανάμεσα στη μέθοδο της απότομης καθόδου και στη μέθοδο Newton είναι ότι η τελευταία απαιτεί τον υπολογισμό του μητρώου Hess της αντικειμενικής συνάρτησης. Η ανάγκη αυτή εισάγει μεγαλύτερες υπολογιστικές δυσκολίες, αλλά και αυξημένο υπολογιστικό κόστος κατά την εφαρμογή της. Η μέθοδος Newton αξίζει να χρησιμοποιείται εάν μπορεί να προκαλέσει αισθητά ταχύτερη σύγκλιση.

Θεωρητικά, αλλά και πρακτικά, στις περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου Newton, δεν υπεισέρχεται η βαθμωτή ποσότητα η^n ($\eta = 1$) που καθορίζει το μέγεθος του βήματος κατά την κατεύθυνση \vec{p} .

4.2.1.2 Μέθοδος Ανίχνευσης κατά Περιοχές Εμπιστοσύνης

Η μέθοδος ανίχνευσης κατά περιοχές εμπιστοσύνης [32] αποτελεί την εναλλακτική μέθοδο της ανίχνευσης της βέλτιστης λύσης κατά γραμμή. Θα θεωρήσουμε ότι τα προβλήματα που μας απασχολούν δεν υπόκεινται σε περιορισμούς.

Η βασική αρχή της επαναληπτικής μεθόδου ανίχνευσης κατά περιοχές εμπιστοσύνης, ως εργαλείο βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης $F(\vec{x})$ $x \in R^N$, στηρίζεται στην επαναληπτική δημιουργία ενός διαρκώς ανανεούμενου τοπικού μοντέλου της $F(\vec{x})$, έστω του $\varphi^n(\vec{x})$, στη γειτονία της βέλτιστης λύσης, και στη χρήση του, ώστε, βήμα προς βήμα, να προσεγγίζεται η βέλτιστη λύση. Στα παραπάνω, n είναι ο δείκτης των βημάτων ή επαναλήψεων.

Η συνηθέστερη τεχνική για τη δημιουργία του μοντέλου είναι μία συνάρτηση τετραγωνικής μορφής. Έτσι, αν \bar{x}^n είναι η τρέχουσα λύση, δημιουργείται η $\varphi^n(\bar{x})$ ή, καλύτερα, $\varphi^n(\bar{x} + \bar{p})$ ως:

$$\varphi^n(\bar{x} + \bar{p}) = F(\bar{x}^n) + \bar{p}^T \nabla F(\bar{x}^n) + \frac{1}{2} \bar{p}^T \nabla^2 F(\bar{x}^n) \bar{p}$$

Η παραπάνω σχέση είναι το ανάπτυγμα Taylor ως προς το \bar{x}^n . Με βάση αυτή τη σχέση, το πρόβλημα διατυπώνεται ως:

$$\min \varphi(\bar{x} + \bar{p}), \quad (\bar{x} + \bar{p}) \in T(\bar{x}^n)$$

όπου $T(\bar{x}^n)$ είναι η περιοχή εμπιστοσύνης γύρω από το \bar{x}^n . Η περιοχή εμπιστοσύνης ορίζεται συνήθως από μία νόρμα, άρα είναι ο χώρος γύρω από το \bar{x}^n που καθορίζεται από τη σχέση

$$\|\bar{p}\| \leq \Delta,$$

με το Δ να καλείται ακτίνα περιοχής εμπιστοσύνης (trust region radius).

Στις μεθόδους ανίχνευσης κατά γραμμή, υπολογίζεται η τρέχουσα λύση \bar{x}^n , η κατεύθυνση ανίχνευσης \bar{p}^n , και, με γνωστή την κατεύθυνση αναζήτησης της λύσης, υπολογίζεται το μήκος του βήματος. Αντίθετα, στη μέθοδο ανίχνευσης κατά περιοχές εμπιστοσύνης, πρώτα υπολογίζεται η μέγιστη ακτίνα Δ στο σημείο \bar{x}^n , άρα πρώτα καθορίζεται η απόσταση από το \bar{x}^n όπου αναζητείται η λύση, και κατόπιν υπολογίζεται η κατεύθυνση αναζήτησης.

4.2.2 Μη Αιτιοκρατικές Μέθοδοι

Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι που παρουσιάστηκαν παραπάνω έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι η ανίχνευση της βέλτιστης λύσης ξεκινά από μία αρχική λύση, και συνεχίζεται υπολογίζοντας και χρησιμοποιώντας πληροφορίες για την πρώτη ή δεύτερη παράγωγο ως προς τις ελεύθερες μεταβλητές. Η γενικότερη λογική της απότομης καθόδου μπορεί να θεωρηθεί ως ο αντιπροσωπευτικότερος (αλλά όχι ο ταχύτερος) τρόπος βελτίωσης της λύσης, ανάμεσα στα διαδοχικά εκτελούμενα βήματα. Κατά τα βήματα αυτά, η λύση βελτιώνεται συνεχώς, με χρήση καθαρά αιτιοκρατικών διαδικασιών. Έτσι, όλες οι προηγούμενες μέθοδοι που αναφέρθηκαν κατηγοριοποιούνται ως αιτιοκρατικές. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών είναι ότι βασίζονται σε μία λύση ανά επανάληψη, δηλαδή ο αλγόριθμος παρακολουθεί και βελτιώνει μία λύση από επανάληψη σε επανάληψη. Ο τρόπος αυτός ανίχνευσης της βέλτιστης λύσης ενέχει τον κίνδυνο εγκλωβισμού της λύσης σε

κάποιο τοπικό, αντί του καθολικού βέλτιστου. Είναι προφανές ότι, σε μεγάλο βαθμό, ο εγκλωβισμός της λύσης σε τοπικό ακρότατο, εξαρτάται από την αρχική λύση.

Οι μη αιτιοκρατικές μέθοδοι προσπαθούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα του εγκλωβισμού σε τοπικό ακρότατο των αιτιοκρατικών μεθόδων. Θα αναφέρουμε δύο βασικές δράσεις που μπορούν να αναληφθούν σε αυτή την κατεύθυνση.

- Μια πρώτη αντιμετώπιση του προβλήματος είναι η μη χρήση αιτιοκρατικών κριτηρίων βελτίωσης της τρέχουσας λύσης. Ταυτόχρονα με αυτά, μπορούν να χρησιμοποιούνται και στοχαστικά κριτήρια, δηλαδή να επέλθει τυχαιότητα στη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Η με οποιονδήποτε τρόπο εισαγωγή και χρήση τυχαιότητας σε έναν αλγόριθμο ανίχνευσης βέλτιστων λύσεων αρκεί για να τον κατατάξει στους στοχαστικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης (stochastic optimization algorithms). Η στοχαστικότητα κατά την ανίχνευση του χώρου των λύσεων είναι η βασική διαδικασία που αποτρέπει την παγίδευση σε τοπικά ακρότατα, και δίνει ευκαιρίες ανίχνευσης και άλλων υποπεριοχών του πεδίου ορισμού για την εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης. Αναμενόμενο είναι αυτό να αντιστοιχεί σε υψηλότερο υπολογιστικό κόστος, το οποίο χαρακτηρίζει γενικά τις στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης.
- Μία άλλη αντιμετώπιση του προβλήματος συνίσταται στο να εγκαταλειφθεί η αρχή ότι ο αλγόριθμος παρακολουθεί και βελτιώνει μία μόνο λύση, και αντί αυτού να προτείνονται σχήματα στα οποία ο αλγόριθμος διαχειρίζεται πολλές υποψήφιες λύσεις ανά επανάληψη. Ο πλουραλισμός αυτός αυξάνει μεν το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, αλλά παρέχει μεγαλύτερη σιγουριά ότι η λύση που τελικά θα βρεθεί θα είναι το ολικό ελάχιστο. Μέθοδοι που διαχειρίζονται πολλές λύσεις ανά επανάληψη ονομάζονται μέθοδοι βελτιστοποίησης σε πληθυσμούς λύσεων (population-based optimization methods).

Είναι λογικό οι δύο παραπάνω τρόποι να μπορούν να συνδυασθούν μεταξύ τους, επομένως δημιουργείται μία κατηγορία στοχαστικών μεθόδων βασισμένων σε πληθυσμούς λύσεων. Σε αυτή την κατηγορία μεθόδων ανήκουν οι *εξελικτικοί αλγόριθμοι (evolutionary algorithms)*.

4.2.2.1 Μέθοδος Αναρρίχησης Λόφου και Παραλλαγές Αυτής

Θεωρώντας ότι η βελτιστοποίηση λαμβάνει τη μορφή προβλήματος μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης, αναλύουμε τώρα τον αλγόριθμο αναρρίχησης λόφου. Το ότι αναφερόμαστε σε μεγιστοποίηση δεν είναι περιοριστικό. Μπορούμε εύκολα να τροποποιήσουμε τον αλγόριθμο σε ένα σχήμα κατάβασης λόφου, και με αυτόν, να λύσουμε προβλήματα ελαχιστοποίησης. Είναι όμως βασικό να υπογραμμίσουμε ότι ο αλγόριθμος που ακολουθεί είναι μία τοπική μέθοδος ανίχνευσης.

Ο απλούστερος και γενικότερος αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου με τοπική ανίχνευση έχει τη μορφή:

- Βήμα 1: Αρχικοποιείται ο μετρητής κύκλων, $n=0$, και επιλέγεται τυχαία η αρχική λύση \vec{x}^n στον χώρο αναζήτησης λύσεων Ω . Υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στο \vec{x}^n .
- Βήμα 2: Εντοπίζονται όλες οι λύσεις στη γειτονιά της τρέχουσας λύσης \vec{x}^n , για καθεμία από τις οποίες υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, και εντοπίζεται η καλύτερη (αυτή, δηλαδή, με τη μεγαλύτερη τιμή F) από αυτές, έστω η $\vec{x}^\#$.
- Βήμα 3: Αν η $\vec{x}^\#$ υπερτερεί της \vec{x}^n , τότε $\vec{x}^n \leftarrow \vec{x}^\#$, $n \leftarrow n+1$ και ο αλγόριθμος συνεχίζει από το βήμα 2.
- Βήμα 4: Ο αλγόριθμος τερματίζει με βέλτιστη λύση την \vec{x}^n .

Θέματα όπως ο καθορισμός της γειτονιάς $\Gamma(\vec{x}^n)$ της τρέχουσας λύσης \vec{x}^n , ή το τι σημαίνει «όλες οι λύσεις» στη γειτονιά ενός σημείου δεν διευκρινίζονται γιατί έτσι κι αλλιώς ο παραπάνω αλγόριθμος αφήνει μεγάλα περιθώρια αυτοσχεδιασμού.

Παρατηρούμε ότι η μοναδική διαδικασία με υπολογιστικό κόστος είναι η εύρεση της αντικειμενικής συνάρτησης για κάποια λύση \vec{x} , και θα αυτό θα συμβολίζεται εφεξής στους αλγορίθμους που θα ακολουθήσουν ως *αξιολόγηση*(\vec{x}). Επειδή αναφερόμαστε σε προβλήματα μεγιστοποίησης, συγκρίσεις όπως αυτή του βήματος 3 θα συμβολίζονται πλέον ως $\vec{x}^\# > \vec{x}^n$. Για τον ίδιο λόγο, η καλύτερη λύση σε ένα σύνολο Γ θα συμβολίζεται ως $\max_\Gamma(\vec{x})$. Την απόδοση τυχαίας τιμής, μέσω μίας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, σε μία μεταβλητή, λ.χ τη x , θα συμβολίζουμε ως $x \leftarrow$ *τυχαία επιλογή*. Τέλος, οι άλλοι δείκτες (π.χ $\vec{x}^\#$) συμβολίζουν ειδικές προσωρινές λύσεις.

Με την εισαγωγή ενός εξωτερικού βρόχου στον παραπάνω αλγόριθμο βελτιστοποίησης, ώστε να ξεκινά από διαφορετικές λύσεις και να καταλήγει καταγράφοντας ως βέλτιστη την καλύτερη από τις «βέλτιστες» λύσεις που προέκυπταν σε κάθε κύκλο, δημιουργείται ο αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου με επανεκκίνηση (iterated hill climber). Ο αλγόριθμος περιγράφεται ακολούθως:

- Βήμα 1: $k \leftarrow 0$, $\vec{x}^* \leftarrow$ *ακραία κακή επιλογή*
- Βήμα 2: $n \leftarrow 0$, $\vec{x}^n \leftarrow$ *τυχαία επιλογή*, *αξιολόγηση*(\vec{x}^n).
- Βήμα 3: $\Gamma \leftarrow$ *γειτονιά*(\vec{x}^n), *αξιολόγηση*($\vec{x} : \forall \vec{x} \in \Gamma$), $\vec{x}^\# \leftarrow \max_\Gamma(\vec{x})$
- Βήμα 4: Αν $\vec{x}^\# > \vec{x}^n$ τότε: $\left[\vec{x}^n \leftarrow \vec{x}^\#, n \leftarrow n+1, \rightarrow \text{βήμα 3} \right]$
- Βήμα 5: (αλλιώς) $\vec{x}^{*,k} \leftarrow \vec{x}^n$
- Βήμα 6: Αν $\vec{x}^{*,k} > \vec{x}^*$, τότε $\left[\vec{x}^* \leftarrow \vec{x}^{*,k}, k \leftarrow k+1, \rightarrow \text{βήμα 2} \right]$

Εδώ k είναι ο μετρητής του εξωτερικού βρόχου, δηλαδή των κύκλων. Ο εσωτερικός βρόχος (από το βήμα 2 έως το βήμα 4) υπολογίζει ένα τοπικό ακρότατο, σε κάθε εκτέλεσή του. Στο βήμα 6 ενεργοποιείται ένα κριτήριο σύγκλισης που τερματίζει το συνολικό αλγόριθμο ή επιστρέφει στο βήμα 1. Με τον τελεστή *ακραία κακή επιλογή* προσδίδουμε στην τιμή καταλληλότητας του διανύσματος \vec{x}^* της αναζητούμενης βέλτιστης λύσης μία πολύ μικρή τιμή στην αρχική φάση του αλγόριθμου μεγιστοποίησης.

Η εισαγωγή στοχαστικότητας στους παραπάνω αλγορίθμους μπορεί να γίνει πολύ εύκολα. Ας σημειωθεί αρχικά ότι ο αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου με επανεκκίνηση περιέχει ήδη στοιχεία στοχαστικότητας αφού κάθε εξωτερικός κύκλος ξεκινά με μία νέα, τυχαία επιλεγμένη, αρχική λύση.

Στη συνέχεια θα τροποποιηθεί ο αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου και θα εισαχθούν στοιχεία στοχαστικότητας ώστε να προκύψει ο στοχαστικός αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου ο οποίος περιγράφεται παρακάτω:

- Βήμα 1: $n \leftarrow 0$, $\vec{x}^- \leftarrow$ τυχαία επιλογή, αξιολόγηση $\left(\vec{x}^-\right)$.
- Βήμα 2: $\vec{x} \left(\in \Gamma \left(\vec{x}^- \right) \right) \leftarrow$ τυχαία επιλογή, αξιολόγηση $\left(\vec{x}\right)$,

$$p \leftarrow \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{F(\vec{x}^-) - F(\vec{x})}{T}}} \right), T \leftarrow$$
 τυχαίος $[0,1]$
- Βήμα 3: Αν $T < p$ τότε: $\left[\vec{x}^- \leftarrow \vec{x} \right]$
- Βήμα 4: (αλλιώς) $\vec{x}^* \leftarrow \max \left(\vec{x}^*, \vec{x} \right)$, $n \leftarrow n + 1$, \rightarrow βήμα 2

Η τέλεση τυχαίος $[0,1]$ εκφράζει την τυχαία επιλογή ενός πραγματικού αριθμού στο διάστημα $[0,1]$, μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Η ποσότητα p που ορίζεται στο βήμα 2 αποτελεί μία πιθανότητα η τιμή της οποίας εξαρτάται από την απόκλιση του βαθμού καταλληλότητας μεταξύ των 2 τελευταίων διαθέσιμων λύσεων \vec{x}^- και \vec{x} . Η ποσότητα T στον παρονομαστή της σχέσης παραμένει σταθερή, και ρυθμίζει τα επίπεδα τιμής της πιθανότητας. Παρατηρούμε ότι ο στοχαστικός αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου δεν χρειάζεται εξωτερικό βρόχο. Εδώ, το ρόλο της επανεκκίνησης διαδραματίζει η δυνατότητα αποδοχής ως νέου επίκεντρου ανίχνευσης \vec{x}^- της νέας λύσης \vec{x} , ακόμη και αν η τελευταία δεν είναι καλύτερη της \vec{x}^- . Παρατηρούμε ακόμη ότι δεν ανιχνεύεται όλη η γειτονιά αλλά, στο βήμα 2, επιλέγεται τυχαία ένα στοιχείο της για αξιολόγηση και σύγκριση με το \vec{x}^- .

Το βασικότερο στοιχείο του παραπάνω αλγορίθμου είναι η επιλογή κατά το βήμα 3. Με δεδομένα το παλιό κέντρο ανίχνευσης \vec{x}^- και την τυχαία επιλεγμένη γειτονική του λύση \vec{x} , υπάρχουν δύο περιπτώσεις στις οποίες το \vec{x} διαδέχεται το \vec{x}^- ως νέο κέντρο ανίχνευσης:

1. Οποτεδήποτε το \vec{x} υπερτερεί του \vec{x}^n .
2. Με μία μικρή πιθανότητα, έστω και αν το \vec{x} υστερεί. Η πιθανότητα αυτή είναι ανάλογη της διαφοράς καταλληλότητας μεταξύ \vec{x}^n και \vec{x} , σε τρόπο ώστε η πιθανότητα αυτή να μειώνεται όσο χειρότερη είναι η λύση \vec{x} συγκριτικά με το \vec{x}^n .

Το να επιτρέπεται το νέο επίκεντρο \vec{x}^n να μην ταυτίζεται με τη μέχρι τώρα βέλτιστη λύση είναι μία «έξυπνη» τεχνική ώστε η λύση να ξεφεύγει από τα τοπικά ακρότατα.

Μερικές ακόμη μη αιτιοκρατικές μέθοδοι που δεν θα αναλυθούν εδώ, είναι οι:

- Ανίχνευση με απαγορεύσεις (Tabu Search)
- Αλγόριθμος Simplex
- Προσομοιούμενη Ανόπτηση (Simulated Annealing)

4.2.2.2 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Εισαγωγή

Από τη δεκαετία του 1990 και έκτοτε, η γεωμετρική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και το προσιτό κόστος των μεγάλων και γρήγορων υπολογιστών συνετέλεσαν στην ευρεία αποδοχή και χρήση των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, με έναν από τους βασικότερους εκπροσώπους, τους Εξελικτικούς Αλγορίθμους Βελτιστοποίησης (Evolutionary Algorithms - EA) [32-34].

Βασικό γνώρισμα των EA είναι ότι χειρίζονται *πληθυσμούς υποψηφίων λύσεων*, και όχι μία μεμονωμένη λύση ανά επανάληψη, όπως άλλες στοχαστικές μέθοδοι που αναλύθηκαν προηγουμένως. Οι EA, ενώ αρχικά αναπτύχθηκαν για την επίλυση προβλημάτων ενός στόχου, με κατάλληλες μετατροπές που θα αναλυθούν στη συνέχεια μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα πολλαπλών στόχων. Εν προκειμένω υπερτερούν σε σχέση με άλλες μεθόδους επειδή χειρίζονται έναν πληθυσμό ατόμων και, με την ολοκλήρωσή τους, αποδίδουν ένα σύνολο λύσεων.

Η «εξέλιξη» είναι μία διαδικασία ανίχνευσης «βέλτιστων» λύσεων μέσα σε έναν μεγάλο πληθυσμό πιθανών λύσεων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη θεωρία της εξέλιξης που συναντάμε στη βιολογία. Στη βιολογία, το τεράστιο σύνολο των πιθανών λύσεων είναι το σύνολο των πιθανών γενετικών ακολουθιών, και οι επιθυμητές «βέλτιστες» λύσεις είναι οργανισμοί οι οποίοι είναι ικανοί να επιζήσουν και να αναπαραχθούν στο εξελισσόμενο περιβάλλον τους. Η «εξέλιξη» αποτελεί έναν τρόπο σχεδιασμού καινοτόμων λύσεων σε περίπλοκα προβλήματα. Για παράδειγμα, το ανοσοποιητικό σύστημα των θηλαστικών είναι μία βέλτιστη εξελιγμένη λύση για το πρόβλημα εισβολής μικροβίων στο σώμα τους.

Με τον όρο «εξέλιξη» χαρακτηρίζουμε την αυτόματη διαδικασία της προσαρμογής κάθε συστήματος στο περιβάλλον. Ο όρος «περιβάλλον» περιλαμβάνει το σύνολο των εξωτερικών συνθηκών που επηρεάζουν το σύστημα. Οι EA είναι υπολογιστικά μοντέλα τα οποία, με χρήση αντίστοιχης με τη φύση διαδικασίας προσαρμογής στο περιβάλλον, επιλύουν προβλήματα. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούν στοχαστικούς μηχανισμούς εξέλιξης προερχόμενους από τη φύση, και βασίζονται

στις αρχές εξέλιξης των ειδών όπως διατυπώθηκαν αρχικά από τον Δαρβίνο περί το 1859. Οι ΕΑ προσομοιώνουν μερικώς και με απλούστερο τρόπο την εξέλιξη φυσικών πληθυσμών.

Σύμφωνα με τη θεωρία του Δαρβίνου, τα άτομα ενός πληθυσμού ανταγωνίζονται για την απόκτηση πόρων όπως στέγη, τροφή καθώς και για την προσέλκυση συντρόφου. Τα επιτυχημένα άτομα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγηθούν σε αναπαραγωγή και να διαιωνισθούν. Αυτή η φυσική επιλογή έχει ως επακόλουθο τα γονίδια των επιτυχημένων ατόμων ή των ατόμων που έχουν προσαρμοστεί καλύτερα στο περιβάλλον να επιβιώνουν, και με την πάροδο των γενεών τα χαρακτηριστικά τους να μεταφέρονται σε μεγαλύτερο αριθμό απογόνων. Ο συνδυασμός καλών χαρακτηριστικών από επιτυχημένους γονείς μπορεί να παράγει, ενδεχομένως, απογόνους με χαρακτηριστικά καλύτερα από αυτά των γονέων. Με τον τρόπο αυτό, οι φυσικοί πληθυσμοί εξελίσσονται και προσαρμόζονται στο εκάστοτε περιβάλλον.

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης για να χαρακτηριστεί εξελικτικός είναι τα εξής:

- Να χρησιμοποιεί πληθυσμούς ατόμων και όχι μεμονωμένα άτομα.
- Η εξέλιξη του πληθυσμού από γενιά σε γενιά να καθορίζεται από την τιμή καταλληλότητας (προβλήματα μεγιστοποίησης) ή την τιμή κόστους των ατόμων (προβλήματα ελαχιστοποίησης) με βάση την αντικειμενική συνάρτηση.
- Να λαμβάνει χώρα δυναμική διαδοχή πληθυσμών, με τη δημιουργία νέων ατόμων και εξαφάνιση άλλων με βάση την τιμή καταλληλότητάς τους.
- Κατά την εξέλιξη από γενιά σε γενιά, να υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών από τους γονείς στους απογόνους, αλλά και στοχαστική εμφάνιση νέων χαρακτηριστικών.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ΕΑ που οδήγησαν στη γρήγορη και ευρεία επικράτησή τους σε πολλές κατηγορίες προβλημάτων είναι τα εξής:

- Το ενδιαφέρον, μη αυστηρά μαθηματικό, υπόβαθρό τους.
- Η ευκολία με την οποία προσαρμόζονται σε κάθε νέο πρόβλημα με μόνη προϋπόθεση την ύπαρξη προγραμματισμένου λογισμικού αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης.
- Η δυνατότητά τους να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα.

Μειονέκτημα των εξελικτικών αλγορίθμων είναι ότι ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης απαιτεί συνήθως μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων, γεγονός που είναι επαχθές όταν κάθε αξιολόγηση (λ.χ κάθε αξιολόγηση ενός υποψηφίου προφίλ έγχυσης σε πρόβλημα βελτιστοποίησης σε κινητήρα Diesel) γίνεται με χρονοβόρο λογισμικό (όπως οι κώδικες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής).

Περιγραφή ενός Εξελικτικού Αλγορίθμου

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, οι ΕΑ [32-34] χειρίζονται πληθυσμούς λύσεων. Κατά την εξέλιξη, που είναι η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης, ένας πληθυσμός μ υποψηφίων λύσεων (γονείς, κατά τη γενετική ορολογία) εξελίσσεται

στον πληθυσμό των λ απογόνων. Αυτοί οι απόγονοι είναι νέες λύσεις, που προκύπτουν από τους μ γονείς, με ενδεχομένως καλύτερα χαρακτηριστικά. Από τους λ απογόνους, και ανάλογα με την καταλληλότητά τους, επιλέγονται οι μ γονείς της επόμενης γενιάς. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Κριτήρια σύγκλισης μπορεί να είναι:

1. Η μη περαιτέρω βελτίωση της λύσης μετά από έναν αριθμό αξιολογήσεων ή γενεών.
2. Η ομογενοποίηση του πληθυσμού.
3. Η ανάλωση του διαθέσιμου υπολογιστικού χρόνου.

Τα παραπάνω μπορούν να περιγραφούν αυστηρότερα. Σε κάθε γενιά g ενός ΕΑ, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι συνυπάρχουν τρία διακριτά σύνολα ατόμων. Συγκεκριμένα, υπάρχουν το σύνολο των γονέων $S^{g,\mu}$ με μ μέλη, των απογόνων $S^{g,\lambda}$ με λ μέλη, και των επίλεκτων $S^{g,e}$ με e μέλη. Το σύνολο $S^{g,e}$ αποθηκεύει τα επίλεκτα (καλύτερα) άτομα (δηλαδή υποψήφιες λύσεις) που έχουν προκύψει από τη διαδικασία εξέλιξης μέχρι την τρέχουσα γενιά. Ο σκοπός ύπαρξης του συνόλου των επίλεκτων είναι διπλός. Ο πρώτος λόγος είναι ότι, όταν σταματήσει η εξέλιξη, το σύνολο αυτό περιλαμβάνει τις «βέλτιστες» λύσεις. Ένας δεύτερος λόγος είναι ότι, κατά την εξέλιξη, χρησιμοποιείται πληροφορία από αυτό το σύνολο για την ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών. Η ενίσχυση αυτή αποτελεί τον λεγόμενο «ελιτισμό» στους ΕΑ.

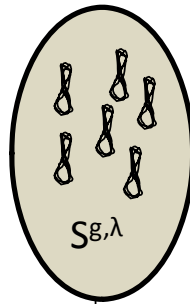
Ακολουθώς θα περιγραφεί ο αλγόριθμος για προβλήματα ενός στόχου. Σε άλλη ενότητα, θα εξηγήσουμε τις τροποποιήσεις που υφίσταται ο αλγόριθμος για την εφαρμογή του σε προβλήματα πολλαπλών στόχων.

- **Βήμα 1:** Επιλέγονται από τον χρήστη βασικές παράμετροι της μεθόδου, όπως το μέγεθος των δύο βασικών πληθυσμών $S^{g,\mu}$ και $S^{g,\lambda}$, με άλλα λόγια οι τιμές των παραμέτρων μ και λ . Επίσης, επιλέγονται και άλλες παράμετροι οι οποίες είναι δευτερευούσης σημασίας. Θέτουμε $g = 0$ συμβολίζοντας έτσι την αρχικοποίηση, τη λεγόμενη και *μηδενική γενιά*. Επιλέγονται τυχαία τα μέλη του αρχικού πληθυσμού, $S^{0,\lambda}$.
- **Βήμα 2:** Αξιολογούνται τα λ άτομα του συνόλου $S^{g,\lambda}$. Σχηματικά το βήμα αυτό περιγράφεται από τη διαδικασία

$$y(\vec{x}) = F(\vec{x}), \quad \forall \vec{x} \in S^{g,\lambda}$$

και φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Αν πρόκειται για πρόβλημα βελτιστοποίησης στη θερμορευστομηχανική, και για απαιτούνται την αξιολόγηση αριθμητικές επιλύσεις των εξισώσεων διατήρησης, με στόχο τον προσδιορισμό των αγνώστων σε όλα τα υπολογιστικά κελιά-το τμήμα αυτό του αλγόριθμου είναι το σημαντικά μεγαλύτερο (πρακτικά ολόκληρο) τμήμα του υπολογιστικού κόστους [34].

Σύνολο Απογόνων



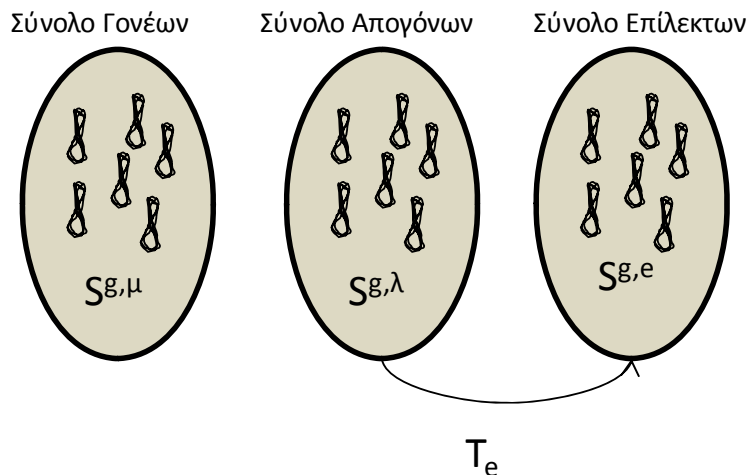
$$\bar{y} = \vec{F}(\bar{x})$$

Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση αξιολόγησης των απογόνων.

- **Βήμα 3:** Ανανεώνεται το σύνολο των επιλέκτων $S^{g,e}$ με όσα μέλη του $S^{g,\lambda}$ αξίζουν, με κριτήριο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή με τα μέλη αυτά που έχουν καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με κάποια μέλη (ή όλα) του συνόλου $S^{g,e}$. Σχηματικά

$$S^{g+1,e} = T_e(S^{g,\lambda} \cup S^{g,e})$$

όπου με T_e συμβολίζεται ο τελεστής εντοπισμού των επίλεκτων μελών. Η διαδικασία φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 4.2. Αν αναφερόμαστε σε πρόβλημα ενός στόχου, η απλούστερη εκδοχή αυτού του τελεστή είναι να εντοπίζει το καλύτερο άτομο από τα σύνολα των ελίτ και των απογόνων ($S^{g,\lambda}$, $S^{g,e}$). Προφανώς, υπάρχει πάντα η περίπτωση κανένας από τους λ να μην υπερτερεί της τρέχουσας βέλτιστης λύσης που αποτελεί και το μοναδικό στοιχείο του συνόλου των ελίτ. Τότε το σύνολο $S^{g,e}$ παραμένει ως έχει, και αυτό είναι ένδειξη ότι ο ΕΑ δεν κατάφερε να βελτιώσει την λύση κατά την τελευταία γενιά. Ο ΕΑ δεν είναι υποχρεωτικό να βελτιώνει την λύση σε κάθε γενιά. Σε προβλήματα πολλαπλών στόχων το σύνολο $S^{g,e}$ μπορεί να περιέχει περισσότερα του ενός (πλήθος e) στοιχεία.

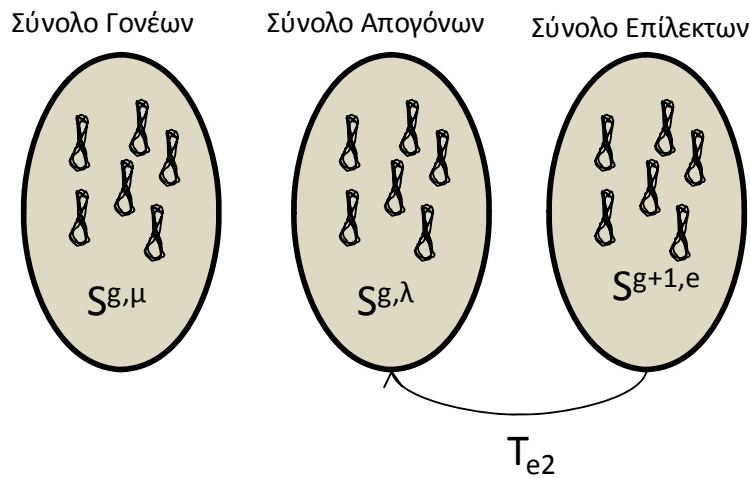


Εικόνα 4.2: Σχηματική ανανέωση του συνόλου των επιλέκτων $S^{g,e}$ με όσα μέλη του $S^{g,\lambda}$ αξίζουν, με κριτήριο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

- **Βήμα 4:** Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλεκτικότητας ή ελιτισμού, με τον οποίο (συνήθως τυχαία επιλεγμένα) άτομα από το σύνολο των επιλέκτων $S^{g,e}$ αντικαθιστούν μέλη του συνόλου των απογόνων $S^{g,\lambda}$. Συνήθως αντικαθιστώνται τα χειρότερα. Σχηματικά

$$S^{g,\lambda} = T_{e2}(S^{g,\lambda} \cup S^{g+1,e})$$

όπου με T_{e2} συμβολίζεται ο τελεστής ελιτισμού. Σχηματικά το βήμα αναπαριστάται στην Εικόνα 4.3. Με τον ελιτισμό αποφεύγεται (δεν αποκλείεται) μία γενιά να δώσει βέλτιστη λύση χειρότερη από αυτή της προηγούμενης γενιάς.

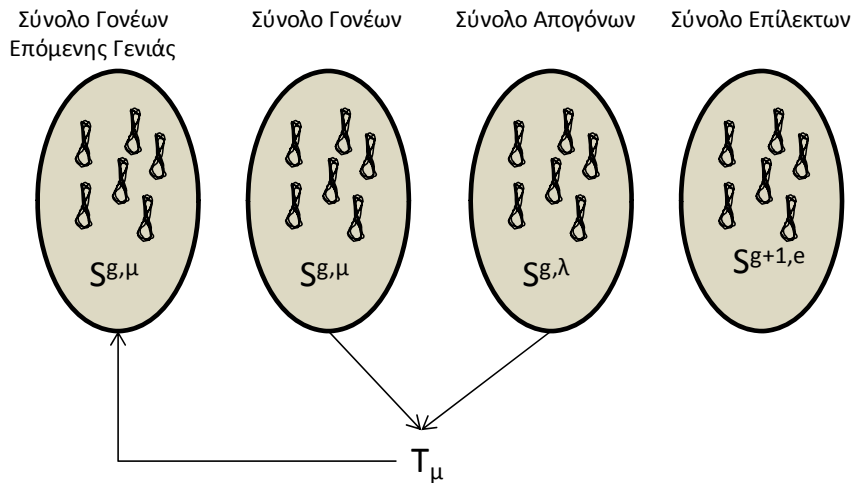


Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της ανανέωσης των απογόνων. Επιλεγμένα άτομα από το σύνολο των επιλέκτων $S^{g,e}$ αντικαθιστούν μέλη του συνόλου των απογόνων $S^{g,\lambda}$.

- **Βήμα 5:** Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής γονέων T_μ με τη βοήθεια του οποίου επιλέγεται το σύνολο των μελών του νέου πληθυσμού γονέων $S^{g+1,\mu}$. Για τον σχηματισμό του χρησιμοποιούνται οι τρέχοντες πληθυσμοί γονέων $S^{g,\mu}$ και απογόνων $S^{g,\lambda}$. Σχηματικά

$$S^{g+1,\mu} = T_\mu(S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda})$$

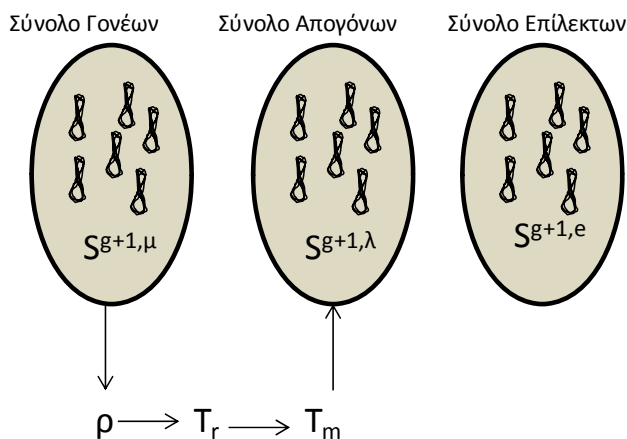
Όπου με T_μ συμβολίζεται ο τελεστής επιλογής γονέων. Το βήμα αυτό αναπαρίσταται στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση της επιλογής του συνόλου γονέων της επόμενης γενιάς από τα τρέχοντα σύνολα γονέων και απογόνων.

- Βήμα 6:** Σε αυτό το βήμα εκτελείται η διαδικασία αναπαραγωγής για τη δημιουργία του συνόλου απογόνων της επόμενης γενιάς $S^{g+1,λ}$. Για τη δημιουργία καθενός από τα $λ$ άτομα επιλέγονται τυχαία $ρ$ (συνήθως $ρ=2$, αλλά δεν αποκλείεται να είναι παραπάνω π.χ όταν τρεις γονείς δημιουργούν τρεις απογόνους) μέλη από το σύνολο γονέων $S^{g+1,μ}$. Για κάθε σύνολο $ρ$ γονέων που επιλέχθηκαν, εφαρμόζονται διαδοχικά διάφοροι τελεστές, μεταξύ των οποίων οι πλέον γνωστοί είναι ο τελεστής διασταύρωσης $T_μ$ (crossover operator) και ο τελεστής μετάλλαξης T_m (mutation operator). Σχηματικά

$$S^{g+1,λ} = T_m \left(T_r \left(S^{g+1,μ} \cup S^{g,λ} \right) \right)$$

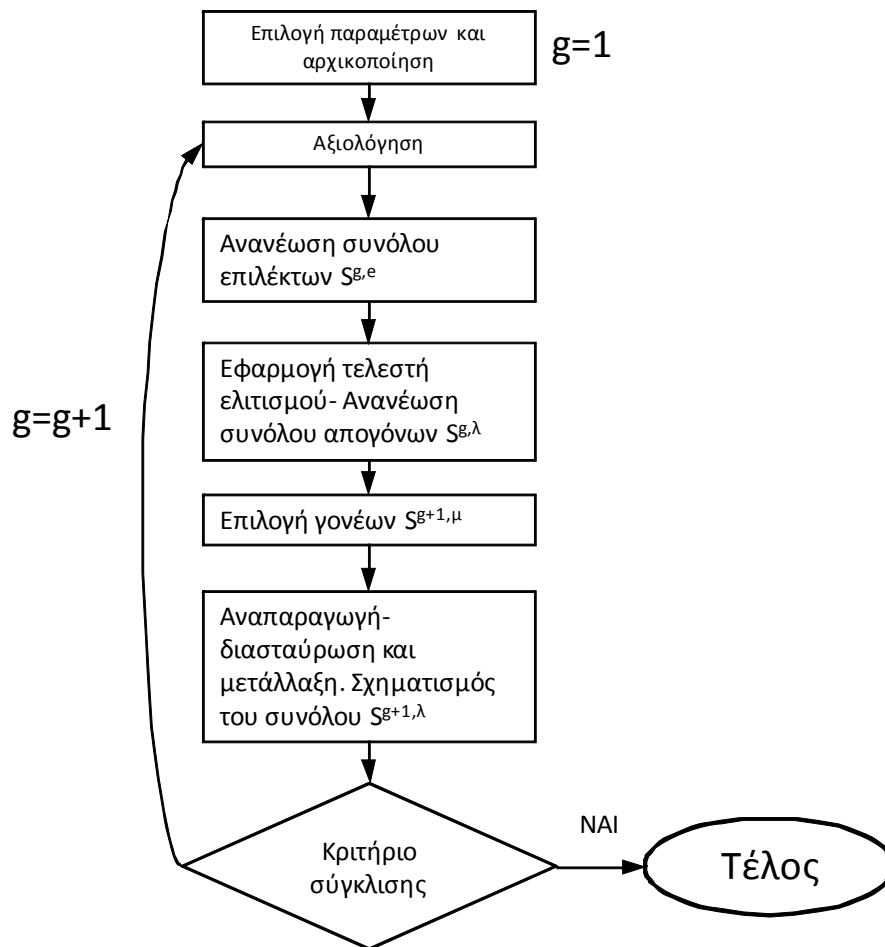


Εικόνα 4.5: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας αναπαραγωγής - διασταύρωσης μεταξύ των γονέων, και μετάλλαξη έτσι ώστε να προκύψει το νέο σύνολο των απογόνων.

Το βήμα αυτό αναπαρίσταται στην Εικόνα 4.5.

- Βήμα 7:** Εφαρμόζεται το κριτήριο σύγκλισης, και αν η μέθοδος θεωρείται ότι δεν έχει συγκλίνει, αρχίζει μία νέα γενιά, δηλαδή επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 έως 6, θέτοντας $g \leftarrow g + 1$

Τα παραπάνω βήματα 1-7 αναπαρίστανται σε διάγραμμα ροής στην Εικόνα 4.6:



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα Ροής Εξελικτικού Αλγορίθμου.

Κωδικοποίηση Μεταβλητών Σχεδίασης

Στους ΕΑ χρησιμοποιείται η δυαδική κωδικοποίηση των μεταβλητών σχεδίασης, την οποία θα περιγράψουμε σύντομα.

Αν \vec{x} είναι το διάνυσμα των ελεύθερων μεταβλητών με N συνιστώσες (x_1, x_2, \dots, x_N) , η δυαδική κωδικοποίηση απαιτεί τον καθορισμό ενός κατώτατου ορίου $x_{i,L}$, ενός ανώτατου ορίου $x_{i,U}$, αλλά και του πλήθους n_i των δυαδικών ψηφίων ανά μεταβλητή i , $i \in N$. Το πλήθος n_i καθορίζει την ακρίβεια της διακριτοποίησης της i -οστής μεταβλητής, που δίνεται από τη σχέση

$$\delta_{x_i} = \frac{x_{i,U} - x_{i,L}}{2^{n_i} - 1}$$

Η συνένωση των δυαδικών συστοιχιών όλων των μεταβλητών (γονιδίων στη γενετική ορολογία) δημιουργεί την ενιαία δυαδική συστοιχία (χρωμόσωμα), που περιγράφει συνολικά κάθε υπογήφια λύση. Για παράδειγμα, αν $N=3$, $n_1=5$, $n_2=7$, $n_3=6$, ένα χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι το

$$\underbrace{100101}_{x_1} \underbrace{1100111}_{x_2} \underbrace{010010}_{x_3}$$

όπου η τιμή που αντιστοιχεί λ.χ στη μεταβλητή σχεδίασης x_1 είναι η

$$x_1 = x_{1,L} + \frac{x_{1,U} - x_{1,L}}{2^n - 1} \text{int}(10010)$$

όπου $\text{int}(10010)$ είναι ο ακέραιος που αντιστοιχεί στη δυαδική συστοιχία 10010.

Τελεστές Επιλογής Γονέων

Αναφέρθηκε ήδη ότι ο τελεστής επιλογής γονέων T_μ δημιουργεί το σύνολο γονέων $S^{g+1,\mu}$ της επόμενης γενιάς, επιλέγοντας άτομα από τα σύνολα απογόνων $S^{g,\lambda}$ και γονέων $S^{g,\mu}$ της τρέχουσας γενιάς. Πρέπει να τονιστεί ότι η συμμετοχή του $S^{g,\mu}$ στην επιλογή γονέων δεν είναι υποχρεωτική, και εδώ θα θεωρήσουμε ότι

$$S^{g+1,\mu} = T_\mu(S^{g,\lambda})$$

Η διαδικασία επιλογής γονέων αναλαμβάνει να δώσει μεγαλύτερες πιθανότητες στα άτομα του $S^{g,\lambda}$ με καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (ή συνάρτησης καταλληλότητας στα προβλήματα με πολλούς στόχους) να συμμετάσχουν στη δημιουργία απογόνων. Αντίθετα, οι λιγότερο κατάλληλες από τις τρέχουσες λύσεις έχουν μικρότερες πιθανότητες να συμμετάσχουν στο σύνολο $S^{g+1,\mu}$. Συνεπώς, η επιλογή βασίζεται στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.

Τελεστές Διασταύρωσης

Η διασταύρωση συνδυάζει δύο τυχαία επιλεγμένους γονείς για να δημιουργήσει ισόποσους απογόνους. Όπως προαναφέραμε, μπορούμε να συναντήσουμε διασταυρώσεις στις οποίες συμμετέχουν και παραπάνω από δύο γονείς. Στη δυαδική κωδικοποίηση, η λεγόμενη διασταύρωση ενός σημείου (single-point crossover) αρχικά επιλέγει τυχαία μία θέση μεταξύ δύο διαδοχικών ψηφίων ενός χρωμοσώματος. Στη συνέχεια επιλέγει τυχαία δύο γονείς από το τρέχον σύνολο των γονέων, τους οποίους και διασταυρώνει, δηλαδή εναλλάσσει τα δύο μέρη εκατέρωθεν της θέσης διασταύρωσης, παράγοντας έτσι δύο απογόνους.

Παραδείγματος χάριν, παρουσιάζεται η διασταύρωση ενός σημείου για δύο γονείς, τους

$$\begin{array}{c} 10001010011110 \\ 00011001110110 \end{array}$$

έστω ότι έτυχε ως θέση διασταύρωσης το τέλος του πέμπτου δυαδικού ψηφίου, δηλαδή

10001|010011110

00011|001110110

Επομένως, οι δύο απόγονοι που προκύπτουν είναι οι

10001001110110

00011010011110

Γενικότερα, υπάρχουν και άλλα σχήματα διασταύρωσης, όπως η διασταύρωση δύο σημείων (κατά αντιστοιχία με τη διασταύρωση ενός σημείου), η ομοιόμορφη διασταύρωση και άλλες που δεν θα σχολιαστούν περαιτέρω.

Τελεστές Μετάλλαξης

Ο τελεστής μετάλλαξης εφαρμόζεται σε κάθε νέο απόγονο που προέκυψε από την εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης. Η μετάλλαξη στοχεύει στην εισαγωγή νέου γενετικού υλικού στον πληθυσμό των απογόνων με (συνήθως) πολύ μικρή πιθανότητα P_m . Στη δυαδική κωδικοποίηση, η μετάλλαξη επιτρέπει να αντιστραφεί το δυαδικό ψηφίο που θα επιλεγεί. Ενδεικτικά, αν το κριτήριο για τη μετάλλαξη ενεργοποιηθεί για το έβδομο ψηφίο του πρώτου από τους δύο απογόνους που σχηματίστηκαν στο παράδειγμα της διασταύρωσης, δηλαδή του

10001001110110

Ο μεταλλαγμένος απόγονος γίνεται

10001011110110

4.2.3 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Τα προβλήματα στα οποία έχουμε αναφερθεί μέχρι τώρα είναι προβλήματα ενός στόχου. Στο παρόν υποκεφάλαιο, θα επεκτείνουμε την ανάλυση σε προβλήματα πολλαπλών στόχων. Οι επόμενοι ορισμοί, μαθηματικές διατυπώσεις και θεωρήματα θα υποστηρίζουν, στη συνέχεια, την ενασχόλησή μας με προβλήματα πολλαπλών στόχων. Για M στόχους, το πρόβλημα βελτιστοποίησης στοχεύει στην ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των συνιστωσών της διανυσματικής αντικειμενικής συνάρτησης $\vec{F}(\vec{x})$, $\vec{x} \in R^N$, $F: R^N \rightarrow R^M$.

Μία συνήθης πρακτική επίλυσης τέτοιων προβλημάτων είναι η θεώρηση μίας αλληλεπίδρασης μεταξύ των στόχων, σε συνδυασμό με κάποιους σταθερούς συντελεστές, που ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν τη βαρύτητα του κάθε στόχου. Με τον τρόπο αυτό το πρόβλημα εκφυλίζεται σε πρόβλημα ενός στόχου, και επιλύεται με τις μεθόδους που αναλύθηκαν μέχρι τώρα. Δηλαδή:

$$\min F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + \dots + w_M F_M$$

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι κάθε συντελεστής βαρύτητας είναι συνδεδεμένος με την επιρροή του αντίστοιχου στόχου στην εύρεση της «βέλτιστης λύσης» στο πρόβλημα. Μία λάθος επιλογή αυτών των συντελεστών μπορεί να οδηγήσει τη λύση σε λιγότερο καλές λύσεις, σε σύγκριση με τις προκύπτουσες για θεώρηση των στόχων ως ανεξάρτητων μεταξύ τους.

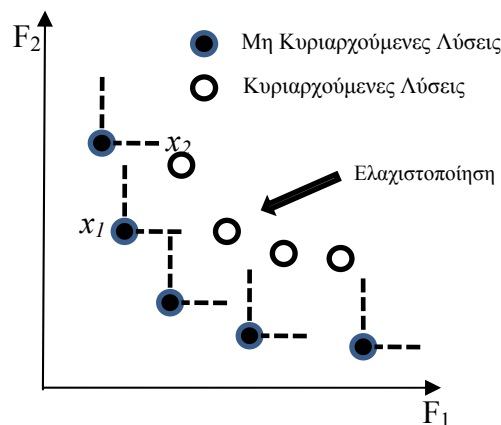
Για τον παραπάνω λόγο, θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία τη μέθοδο του μετώπου Pareto (Pareto Front) ή μετώπου μη κυριαρχούμενων λύσεων. Στη συνέχεια, δίνεται ο ορισμός της βέλτιστης λύσης κατά Pareto και της συναφούς έννοιας της κυριαρχίας:

Η λύση \vec{x}_1 κυριαρχεί της λύσης \vec{x}_2 και αυτό θα συμβολίζεται με

$$\vec{x}_1 \prec \vec{x}_2$$

όταν και μόνο όταν ισχύει ότι $F_m(\vec{x}_1) \leq F_m(\vec{x}_2)$, $\forall m = 1, \dots, N$ και συγχρόνως υπάρχει τουλάχιστον ένας στόχος από αυτούς (έστω ο k) για τον οποίο η τελευταία σχέση ισχύει μόνο ως ανισότητα, δηλαδή $F_k(\vec{x}_1) < F_k(\vec{x}_2)$. [33]

Στην Εικόνα 4.7 απεικονίζεται εποπτικά ένα πρόβλημα δύο στόχων, με τα διανύσματα \vec{x} των μεταβλητών σχεδίασης να ανήκουν στο R^N . Εδώ απεικονίζεται ο διδιάστατος χώρος (το επίπεδο δηλαδή) των στόχων ή αντικειμενικών συναρτήσεων. Η τιμή του N είναι αδιάφορη για τον σχολιασμό και την κατανόηση του σχήματος. Από την Εικόνα 4.7, γίνεται άμεσα αντιληπτό γιατί η λύση \vec{x}_1 κυριαρχεί της λύσης \vec{x}_2 . Με βάση την έννοια της κυριαρχίας, σε ένα σύνολο διαθέσιμων λύσεων ενός προβλήματος, μπορούμε να ορίσουμε ως μέτωπο Pareto (Pareto Front) το υποσύνολο των λύσεων στις οποίες δεν κυριαρχεί καμία άλλη (μη κυριαρχούμενες λύσεις) [33-37].



Εικόνα 4.7: Απεικόνιση του μετώπου Pareto για την περίπτωση δύο στόχων.

Δύο μέλη του μετώπου Pareto είναι αδύνατο να συγκριθούν. Σε ένα πρόβλημα δύο στόχων, αναμένεται γενικά μία λύση να υπερτερεί ως προς τον ένα στόχο, και να υστερεί ως προς τον άλλο, συγκριτικά με άλλη που συμπεριφέρεται αντιστρόφως. Για τον λόγο αυτό, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που στηρίζονται στο μέτωπο Pareto βρίσκουν ολοένα ευρύτερη εφαρμογή. Όλες οι παραπάνω μέθοδοι αποτελούν απλά

παραλλαγές, στηριζόμενες στη διατύπωση του EA που χρησιμοποιείται για έναν στόχο, ορίζοντας όμως μία διαφορετική «αντικειμενική συνάρτηση», βασισμένη στην έννοια της κυριαρχίας των λύσεων. Υπάρχουν πολλές εκφράσεις για την αντικειμενική συνάρτηση η οποία οδηγεί τον EA στον υπολογισμό ενός μετώπου βέλτιστων λύσεων κατά Pareto. Αυτός ο υπολογισμός της νέας αντικειμενικής συνάρτησης είναι και η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των μεθόδων (ή αλγορίθμων) βελτιστοποίησης για πολλούς στόχους.

Για να γνωρίσουμε τις μεθόδους συγκρότησης ενιαίας αντικειμενικής συνάρτησης, πρέπει πρώτα να καταγράψουμε τις απαιτήσεις από το μέτωπο Pareto που θα υπολογίσει η εκάστοτε μέθοδος. Οι απαιτήσεις αυτές είναι:

1. Το υπολογιζόμενο μέτωπο να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο βέλτιστο δυνατό.
2. Με το πεπερασμένο πλήθος λύσεων που προφανώς θα περιέχει, το μέτωπο να καλύπτει το μέγιστο εύρος του πραγματικού μετώπου, με ικανή παρουσίαση σημείων - λύσεων σε κάθε τμήμα του.

Επίσης, οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι πρέπει να χαρακτηρίζονται από δύο δυνατότητες (ικανότητες):

1. Δυνατότητα Εξερεύνησης (Exploration), ώστε να εξερευνούν με τον καλύτερο και συγχρόνως οικονομικότερο τρόπο τον χώρο των υποψήφιων λύσεων, χωρίς να εγκλωβίζονται εύκολα σε τοπικά ακρότατα.
2. Δυνατότητα Εκμετάλλευσης (Exploitation), ώστε να εκμεταλλεύονται με τον καλύτερο τρόπο κάθε πληροφορία που έχει αποκτηθεί μέχρι τώρα και με τη βοήθειά της, να προσεγγίζουν αποδοτικά τη βέλτιστη λύση.

Οι αλγόριθμοι διαφέρουν και ως προς τη βαρύτητα που δίνουν σε κάθε μία από τις παραπάνω δύο δυνατότητες. Γεγονός είναι ότι οι δύο πρέπει να βρίσκονται σε μία ισορροπία, ώστε ο αλγόριθμος να ανιχνεύει επαρκώς τη βέλτιστη λύση χωρίς να εγκλωβίζεται σε κάποιο τοπικό ακρότατο, αλλά παράλληλα να εκμεταλλεύεται την ήδη καταβληθείσα «υπολογιστική προσπάθεια».

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τον αλγόριθμο ο οποίος χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

Ο Αλγόριθμος SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm)

Όπως προαναφέρθηκε, όλοι οι αλγόριθμοι διαφέρουν ως προς την απόδοση της «αντικειμενικής συνάρτησης», η οποία εφεξής θα αναφέρεται ως *τιμή κόστους* και θα συμβολίζεται με Φ . Εδώ, θα παρουσιάσουμε τον αλγόριθμο SPEA2 [38] σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζουμε το Φ . Οι τρόποι υπολογισμού της «αντικειμενικής συνάρτησης» έχουν σημασία, διότι με βάση αυτήν ιεραρχούνται τα άτομα της εκάστοτε γενιάς, και επί αυτών εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής γονέων ώστε να προκύψει η επόμενη γενιά. Συνεπώς, η βαθμολόγηση των ατόμων με βάση την εκάστοτε μέθοδο είναι σημαντική για την πορεία του EA.

Για τη βαθμολόγηση των ατόμων της τρέχουσας γενιάς, χρησιμοποιούνται τα σύνολα $S^{g,e}$, $S^{g,\lambda}$. Η ισχύς του κάθε ατόμου της τρέχουσας γενιάς, αλλά και του συνόλου των ελίτ, ορίζεται:

$$S(i) = \left| \left\{ j \mid j \in (S^{g,e} \cup S^{g,\lambda}) \wedge i \succ j \right\} \right|$$

Η ισχύς του κάθε ατόμου ταυτίζεται με τον αριθμό των μελών (που ανήκουν στα δύο παραπάνω σύνολα) στα οποία κυριαρχεί. Με βάση αυτές τις τιμές, προσδίδεται στα μέλη μία ενδιάμεση τιμή κόστους:

$$R(i) = \sum_{j \in (S^{g,\lambda} \cup S^{g,e}), j > i} S(j)$$

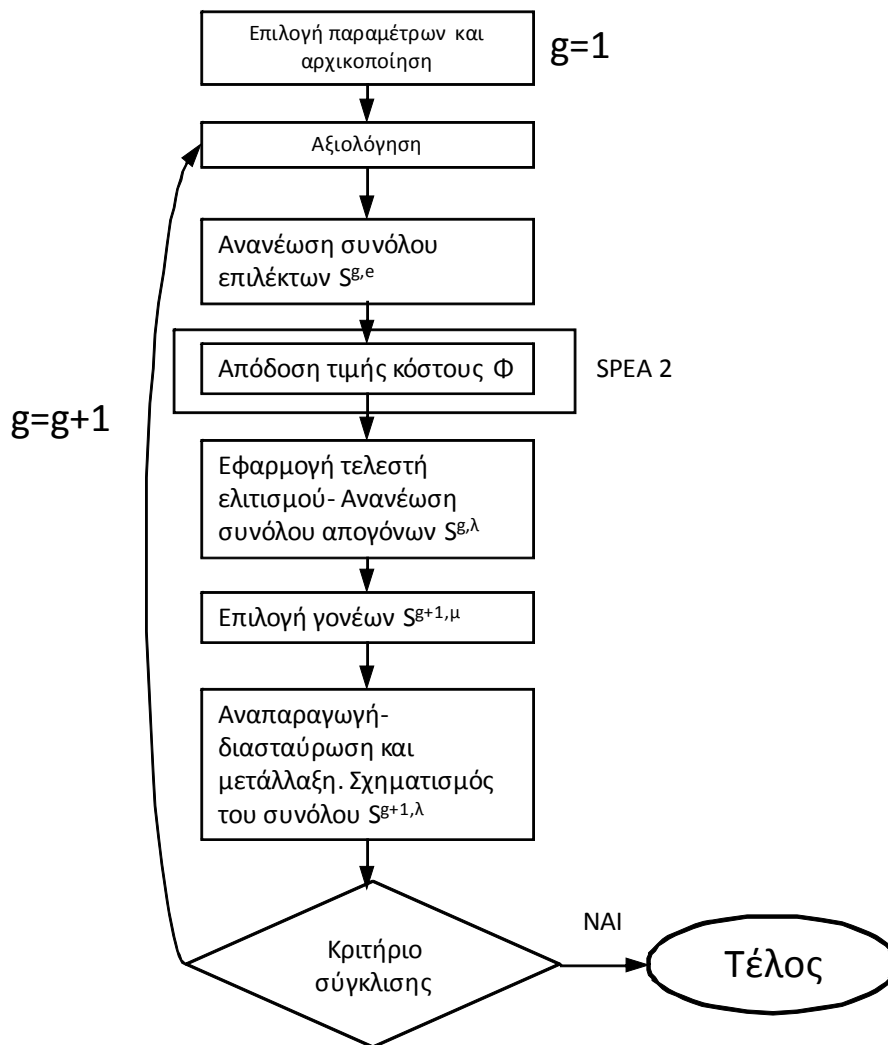
Η ενδιάμεση τιμή κόστους είναι το άθροισμα των ισχύων των μελών από τα οποία κυριαρχείται. Διευκρινίζεται εδώ ότι, όσο μικρότερη είναι η ενδιάμεση τιμή κόστους, τόσο «καλύτερο» είναι το εκάστοτε άτομο. Δηλαδή, ένα άτομο με $R(i) = 0$ είναι μη κυριαρχούμενο, ενώ αντίθετα ένα άτομο με μεγαλύτερη τιμή κυριαρχείται από περισσότερα μέλη.

Η τελική τιμή της συνάρτησης κόστους δίνεται από τη σχέση

$$\Phi(i) = R(i) + D(i)$$

όπου $D(i)$ είναι μία τιμή που υποδηλώνει πόσα άτομα βρίσκονται πλησίον του ατόμου i στο πεδίο των στόχων. Όσο μικρότερη είναι η τιμή $D(i)$, τόσο μακρύτερα βρίσκονται τα άλλα άτομα από το i -οστό άτομο και επομένως αυτό προτιμάται περισσότερο (του αποδίδεται μικρότερη τελική τιμή κόστους). Το γεγονός αυτό διευκολύνει το μέτωπο, ώστε να καλύπτει το μέγιστο δυνατό εύρος (Front Spreading), που όπως προαναφέρθηκε είναι ένας από τους δύο βασικούς στόχους κάθε τέτοιου αλγορίθμου.

Στην Εικόνα 4.8, συνοψίζεται, με τη μορφή Διαγράμματος Ροής η διαδικασία ενός ΕΑ για προβλήματα πολλαπλών στόχων. Σε σύγκριση με το διάγραμμα ροής για τον ΕΑ ενός στόχου (Εικόνα 4.6) το βήμα που προστίθεται είναι αυτό της απόδοσης της τιμής κόστους Φ (Εικόνα 4.8). Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος SPEA2 εφαρμόζεται στη βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης με παρουσία προέγχυσης δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel.



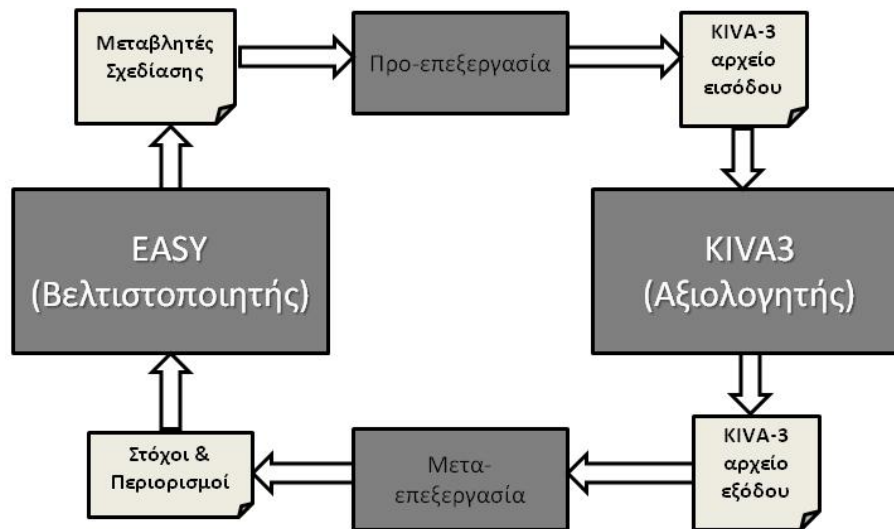
Εικόνα 4.8: Διάγραμμα Ροής Εξελικτικού Αλγόριθμου για προβλήματα πολλαπλών στόχων.

4.4 Σύζευξη Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής KIVA-3 και Λογισμικού Βελτιστοποίησης EASY

Προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε τις παραμέτρους έγχυσης του κινητήρα RT-flex58T-B, ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 συζεύχθηκε με το λογισμικό εξελικτικών αλγορίθμων EASY [39-41]. Στην παρούσα μελέτη, το λογισμικό EASY χρησιμοποιείται ως βελτιστοποιητής (Optimizer) και ο κώδικας KIVA-3 ως αξιολογητής (Evaluator). Με άλλα λόγια, οι υπολογισμοί υπολογιστικής ρευστοδυναμικής αντιστοιχούν στο στάδιο *αξιολόγηση* του αλγόριθμου που περιγράψαμε στην θεωρία βελτιστοποίησης. Το λογισμικό EASY αναλαμβάνει τα υπόλοιπα βήματα του εξελικτικού αλγόριθμου. Όπως προαναφέραμε, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των Εξελικτικών Αλγορίθμων είναι η προσαρμοστικότητά τους σε διαφορετικού τύπου προβλήματα. Στην παρούσα εργασία, αναπτύχθηκαν κατάλληλες ρουτίνες προ-επεξεργασίας και μετ-επεξεργασίας έτσι ώστε να μεταφέρεται η πληροφορία μεταξύ των δύο χρησιμοποιούμενων υπολογιστικών εργαλείων.

- Ρουτίνα προ-επεξεργασίας: δέχεται ως είσοδο τις μεταβλητές σχεδίασης (αρχείο εξόδου του λογισμικού EASY), υπολογίζει το προφίλ έγχυσης και δημιουργεί το αρχείο εισόδου του κώδικα KIVA-3.

- Ρουτίνα μετ-επεξεργασίας: υπολογίζει τους στόχους (εδώ: τελική συγκέντρωση NO_x, SFOC), καθώς και τις τιμές των περιορισμών (εδώ: μέγιστη πίεση, ωφέλιμο έργο), βασισμένη στα αρχεία εξόδου (output) του κώδικα KIVA-3. Αυτή η πληροφορία μεταφέρεται στο λογισμικό EASY για τη συνέχιση του αλγορίθμου (αξιολόγηση).



Εικόνα 4.9: Σχηματική απεικόνιση της υπολογιστικής διαδικασίας.

4.4.1 Παράμετροι Βελτιστοποίησης και Υπολογιστικό Κόστος

Το μήκος της δυαδικής συστοιχίας των μεταβλητών σχεδίασης καθορίστηκε στα 10 bits. Συνεπώς το συνολικό μήκος της δυαδικής συστοιχίας της κάθε υποψήφιας λύσης είναι $4 \times 10 = 40$ bits. Το πλήθος των απογόνων (ή πληθυσμού) ήταν 65 άτομα, ενώ χρησιμοποιήθηκαν 20 γονείς σε κάθε γενιά για τη δημιουργία του επόμενου πληθυσμού. Τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης χρησιμοποιήθηκαν έτσι ώστε να προκύψουν οι απόγονοι μετά την επιλογή των γονέων. Η προσομοίωση θεωρήθηκε περατωθείσα με την ολοκλήρωση 13 γενεών ($13 \times 65 = 845$ υποψήφιας λύσεις). Η απόφαση υπαγορεύθηκε από τα ληφθέντα αποτελέσματα, τα οποία κατέδειξαν αμελητέα πρόοδο μετά τις 7-8 γενιές.

Η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης απαιτεί περίπου 10 ώρες σε έναν τυπικό σύγχρονο υπολογιστή. Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής δεν είναι παράλληλος κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να είναι δυνατό να τρέξει μόνο σε ένα πυρήνα. Εάν υποτεθεί ότι επιλύαμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε έναν υπολογιστή μονού πυρήνα τότε θα απαιτούνταν $845 \times 10 / 24 = 352$ μέρες. Είναι σαφές ότι ένα τέτοιο πρόβλημα βελτιστοποίησης (όπως και τα περισσότερα που σχετίζονται με υπολογιστική ρευστοδυναμική) απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η συστοιχία υπολογιστών (cluster) “Hydra” της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, ώστε με χρήση καταναμημένου υπολογισμού (distributed computing), 64 υπολογιστικοί πυρήνες αξιολογούν παράλληλα 64 άτομα. Με αυτόν τον τρόπο απαιτήθηκαν 10 ώρες για τη αξιολόγηση μίας γενιάς. Τα χαρακτηριστικά του cluster φαίνονται στον Πίνακα 4-1. Η συνολική υπολογιστική διαδικασία απεικονίζεται στην Εικόνα 4.9.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά συστοιχίας υπολογιστών Σχολής NMM.

HYDRA CLUSTER					
Server					
# of Nodes	CPU Frequency [GHz]	Cores/Node	Cores	Memory/Node [Gb]	Memory [Gb]
1	2.3	8	8	8	8
Compute Nodes					
9	1.8	4	36	4	36
7	2.2	4	28	4	28
1	1.8	8	8	10	10
Total					
18			80		82

Σε κάθε γενιά, το λογισμικό EASY, το οποίο τρέχει στον διακομιστή (server) αναθέτει στους κόμβους υπολογισμού (compute nodes) την αξιολόγηση ορισμένων ατόμων με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3. Όταν η αξιολόγηση τελειώσει, οι κόμβοι υπολογισμού επιστρέφουν στο λογισμικό EASY τα αντίστοιχα αποτελέσματα, και το EASY δημιουργεί τη νέα γενιά και την αναθέτει εκ νέου προς αξιολόγηση στους κόμβους υπολογισμού.

5 Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έγχυσης πραγματοποιήθηκε για τρεις διατυπώσεις του προβλήματος. Στο πρώτο πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν επιβλήθηκε ο περιορισμός για τη μέγιστη πίεση ενώ στο δεύτερο πρόβλημα ενσωματώθηκε ο περιορισμός της μέγιστης πίεσης ($p_{\max} = 150 \text{ bar}$). Τέλος στο τρίτο πρόβλημα, επιβλήθηκε, επιπλέον της μέγιστης πίεσης, ο περιορισμός της διατήρησης του ωφέλιμου έργου της περίπτωσης αναφοράς. Σημειώνουμε ότι τα αποτελέσματα του προβλήματος χωρίς περιορισμό στην πίεση παρουσιάζουν ενδιαφέρον καί για τη βελτιστοποίηση σε μερικό φορτίο, όπου τα επίπεδα πίεσης είναι χαμηλότερα.

5.1 Διατύπωση του Προβλήματος

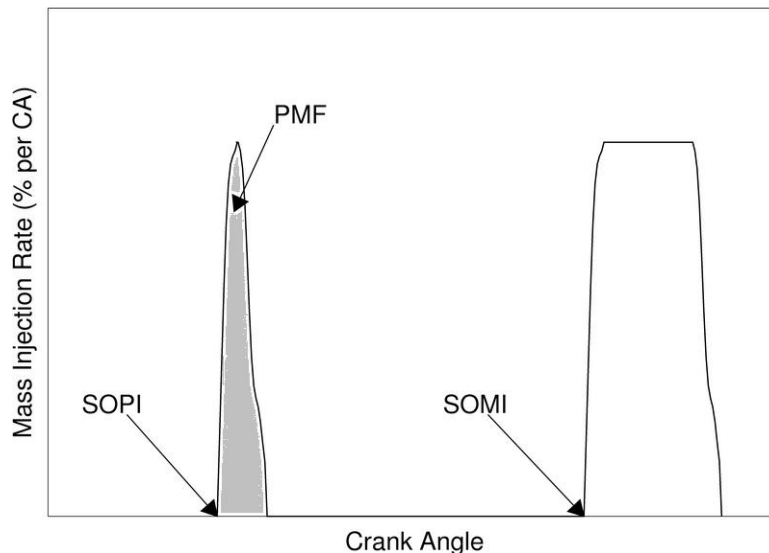
Για λόγους που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4, το εργαλείο επίλυσης του παρόντος προβλήματος βελτιστοποίησης είναι οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (EA). Για τον ορισμό του προβλήματος, πρέπει να καθοριστούν οι μεταβλητές σχεδίασης (Design Variables- \bar{x}), ο χώρος αναζήτησης (Search Space), οι στόχοι (Objective Functions- \bar{F}), καθώς και οι περιορισμοί (Constraints- \bar{g}).

5.1.1 Μεταβλητές Σχεδίασης και Χώρος Αναζήτησης Λύσεων

Στην παρούσα εργασία επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης του κινητήρα RT-flex58T-B σε πλήρες φορτίο. Το αδιαστατοποιημένο προφίλ παραμετροποιήθηκε έτσι ώστε να περιγράφεται από τρεις μεταβλητές σχεδίασης (βλ. Εικόνα 5.1): έναρξη της προέγχυσης (Start Of Pilot Injection - SOPI), έναρξη της κύριας έγχυσης (Start Of Main Injection - SOMI), και κλάσμα μάζας καυσίμου της προέγχυσης ως προς τη συνολική μάζα του εγχυόμενου καυσίμου (Pilot Mass Fraction - PMF). Επιπρόσθετα, η συνολική εγχυόμενη μάζα ήταν μεταβλητή, επομένως έγινε χρήση μίας ακόμη μεταβλητής σχεδίασης, η συνολική μείωση μάζας (Mass Reduction - MR). Η μεταβλητή MR εκφράζει την ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στη συνολική εγχυόμενη μάζα στην κατάσταση αναφοράς και σε μία τυχαία περίπτωση ως εξής:

$$MR = \frac{m_{ref} - m_{tot, inj}}{m_{ref}} \cdot 100\%$$

όπου το $m_{tot, inj}$ είναι η συνολική εγχυόμενη μάζα σε μία τυχαία περίπτωση και m_{ref} η εγχυόμενη μάζα στην περίπτωση αναφοράς.



Εικόνα 5.1: Σχηματική παράσταση προφίλ εγχύσεως με προέγχυση. Τρεις μεταβλητές σχεδίασης (έναρξη προέγχυσης - SOPI, έναρξη της κύριας έγχυσης - SOMI και ποσοστό μάζας προέγχυσης - PMF) δείχνονται από τα βέλη της Εικόνας.

Ο καθορισμός του χώρου αναζήτησης λύσεων για κάθε μεταβλητή σχεδίασης καθορίστηκε από την εμπειρία που υπάρχει σε παρόμοιες μελέτες για μικρότερες μηχανές [12-14] καθώς και από προηγούμενες μελέτες στην ίδια μηχανή [12-14]. Τα όρια των μεταβλητών σχεδίασης δίνονται στον Πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1: Εύρος μεταβλητών σχεδίασης

Μεταβλητές Σχεδίασης (Design Variables)	Εύρος	
	Min	Max
Start Of Pilot Injection, SOPI [° CA aTDC]	-40	-5
Start Of Main Injection, SOMI [° CA aTDC]	1	5
Pilot Mass Fraction, PMF [% of total injected mass]	4	20
Mass Reduction, MR [% of reference case]	0	4

Άλλες πιθανές μεταβλητές σχεδίασης, όπως ο αριθμός και ο προσανατολισμός των οπών των εγχυτήρων, δεν διαφοροποιήθηκαν υπόψη στην παρούσα εργασία, ώστε οι χρησιμοποιούμενες μεταβλητές να σχετίζονται μόνο με τη θερμορευστομηχανική του προβλήματος. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό οι «βέλτιστες» λύσεις να επαληθευτούν πειραματικά στον υπάρχοντα κινητήρα του ερευνητικού κέντρου της Wärtsilä Switzerland, σε μελλοντικά πειράματα.

5.1.2 Συναρτήσεις Στόχων

Στο παρόν πρόβλημα χρησιμοποιήθηκαν δύο στόχοι, η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου NO_x ανηγμένη στη συγκέντρωση στην κατάσταση αναφοράς, καθώς και μία προσέγγιση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Oil Consumption - *SFOC*), επίσης ανηγμένη στην τιμή του μεγέθους στην κατάσταση αναφοράς. Για τον υπολογισμό της προσεγγιστικής τιμής της ειδικής κατανάλωσης

καυσίμου, υπολογίζεται το ολοκλήρωμα του ωφέλιμου έργου $(\int p \cdot dV)$ για το υπολογισθέν τμήμα του κύκλου του κινητήρα (από τις -96° CA μέχρι της 120° CA). Η ειδική κατανάλωση προσεγγίζεται με τον λόγο της συνολικής εγχυόμενης μάζας προς το παραπάνω ολοκλήρωμα του έργου, και αδιαστατοποιείται με τον αντίστοιχο λόγο στην κατάσταση αναφοράς.

5.1.3 Περιορισμοί

Στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής, η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση στον κύλινδρο είναι 150 bar, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική μηχανική καταπόνηση των στοιχείων της μηχανής. Στο πρώτο πρόβλημα προς βελτιστοποίηση, το συγκεκριμένο όριο παραβλέφθηκε, ώστε να αξιολογηθούν σε πρώτο επίπεδο οι δυνατότητες του ΕΑ σε σύζευξη με τον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (KIVA-3). Επιπρόσθετα, με τον τρόπο αυτό συμπεριλαμβάνεται στο τελικό σύνολο ένας μεγαλύτερος αριθμός πιθανών λύσεων (στρατηγικών έγχυσης). Στο δεύτερο πρόβλημα προς βελτιστοποίηση ο περιορισμός της πίεσης (150 bar) λήφθηκε υπόψη, ενώ στο τρίτο πρόβλημα προστέθηκε ο περιορισμός του ωφέλιμου έργου, έτσι ώστε αυτό να μην υπολείπεται του έργου της περίπτωσης αναφοράς.

5.1.4 Σύνοψη του Προβλήματος

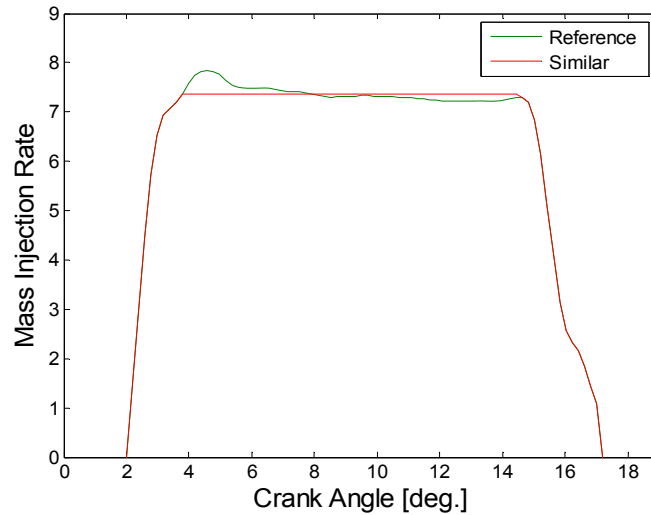
Χρησιμοποιώντας τους ίδιους συμβολισμούς που χρησιμοποιήσαμε στο Κεφάλαιο 4, το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει την ακόλουθη μαθηματική έκφραση:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \bar{F}(\bar{x}) = ([NO_x(\bar{x})], SFOC(\bar{x}))^T \\ \bar{x} = (SOPI, SOMI, PMF, MR) \\ \bar{g}(\bar{x}) \leq 0 \\ \bar{g} = \left(\underbrace{\frac{P_{\max} - P_{ref}}{\text{Πρόβλημα 2}}}_{\text{Πρόβλημα 2}}, \underbrace{1 - \frac{Work Output}{Work Output_{ref}}}_{\text{Πρόβλημα 3}} \right) \end{array} \right.$$

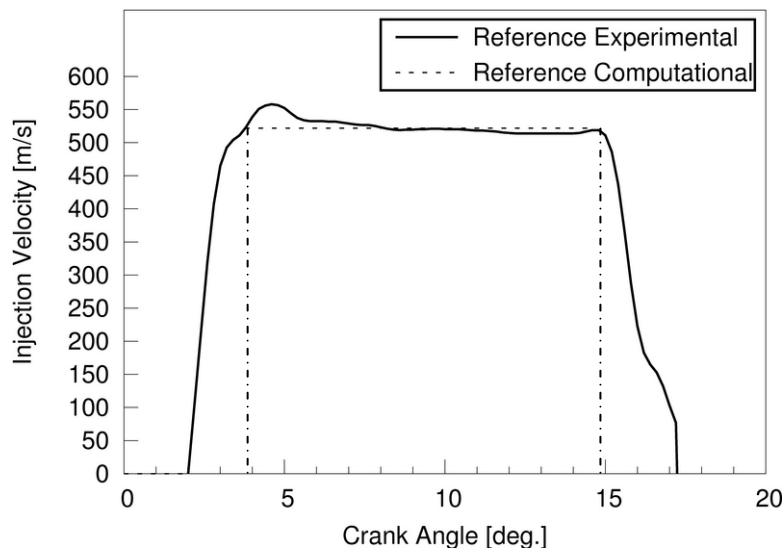
5.1.5 Προφίλ Έγχυσης και Προέγχυσης

Η αναλυτική περιγραφή της μορφής του αρχικού προφίλ έγχυσης σε αδιάστατη μορφή επιτρέπει την προσέγγισή του με το προφίλ που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 5.1. Το προσεγγιστικό προφίλ στο Διάγραμμα 5.1 είναι παρόμοιο με αυτό της κατασκευάστριας εταιρείας Wartsilä Switzerland, αφού έχει την ίδια διάρκεια έγχυσης, ενώ το άνοιγμα και κλείσιμο της βελόνας του εγχυτήρα είναι πανομοιότυπα. Η σημαντικότερη, όμως, ομοιότητά τους είναι ότι αντιστοιχούν στην ίδια σχεδόν ταχύτητα έγχυσης καυσίμου, (βλ. Διάγραμμα 5.2), με αποτέλεσμα ο διασκορπισμός και η διάχυση του καυσίμου στον συμπιεσμένο αέρα, να παραμένουν

ίδια και στις δύο περιπτώσεις . Από την άλλη πλευρά, η διαφορά των δύο προφίλ εντοπίζεται στο γεγονός ότι, στο προσεγγιστικό προφίλ, η βαλβίδα δεν ταλαντώνεται κατά το άνοιγμά της, και συνεχίζει να παραμένει σταθερά ανοιχτή κατά τη διάρκεια της έγχυσης.



Διάγραμμα 5.1: Αρχικό προφίλ έγχυσης αναφοράς και προσεγγιστικό προφίλ με σταθερό άνοιγμα της βαλβίδας, παρόμοιο με το αρχικό.

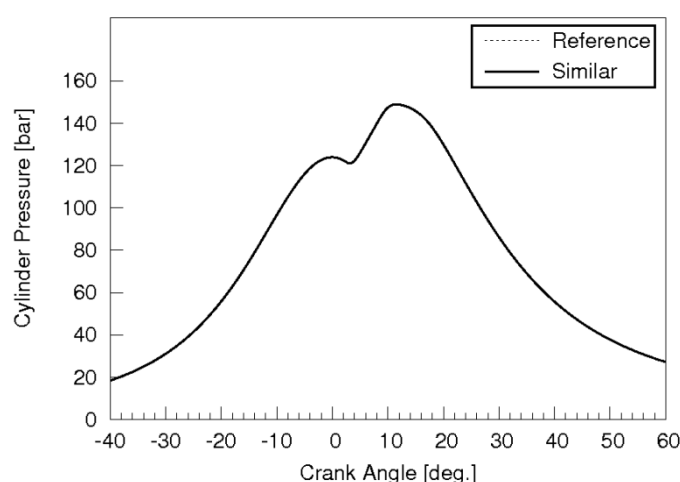


Διάγραμμα 5.2: Ταχύτητα του εγχυόμενου καυσίμου για το προφίλ αναφοράς και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.

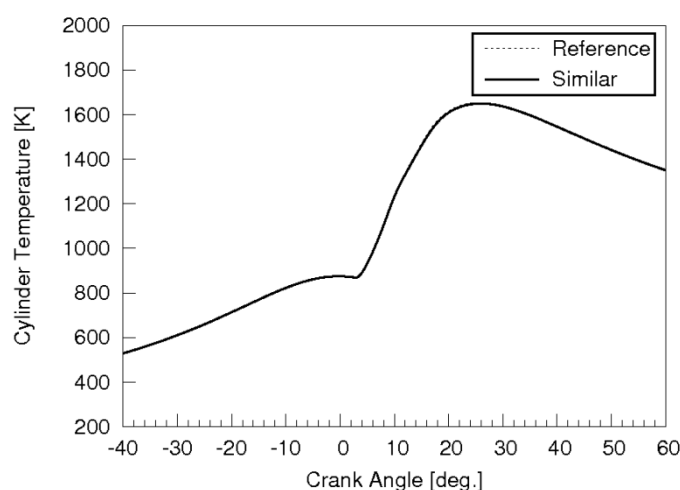
Η συγκεκριμένη μορφή του νέου προφίλ έγχυσης είναι ιδιαίτερα εύχρηστη, διότι είναι δυνατή η προσομοίωση της περιοχής που αντιστοιχεί στο σταθερό άνοιγμα της βελόνας του εγχυτήρα με ένα παραλληλόγραμμο, σχήμα που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη εγχυόμενη μάζα καυσίμου. Έτσι, το νέο προφίλ μπορεί εύκολα να μετασχηματίζεται, δηλαδή να αφαιρείται μάζα από τη συγκεκριμένη περιοχή, και να εγχύεται σε οποιαδήποτε γωνία στροφάλου, ικανοποιώντας την απαίτηση κάποιας στρατηγικής έγχυσης με προέγχυση. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται, σε μορφή διαγραμμάτων, η υπολογιστική ανάλυση της λειτουργίας του κινητήρα που

προσομοιώθηκε με το συγκεκριμένο προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης καυσίμου. Στα ίδια διαγράμματα, παρατίθενται και τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στο αρχικό προφίλ έγχυσης, με σκοπό τη σύγκριση.

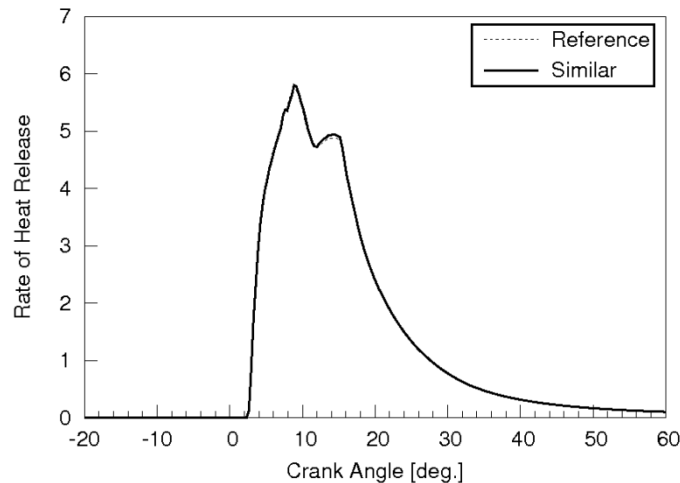
Στο Διάγραμμα 5.3 και στο Διάγραμμα 5.4 παρουσιάζονται η πίεση και η χωρικά μέση θερμοκρασία, αντίστοιχα, που επικρατούν στον κύλινδρο, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου. Η απόλυτη ταύτιση της χρονικής ιστορίας, τόσο της πίεσης, όσο και της θερμοκρασίας για τα δύο προφίλ έγχυσης είναι εμφανής. Στο Διάγραμμα 5.5 και στο Διάγραμμα 5.6 παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης της θερμότητας και η χωρικά μέση συγκέντρωση NO_x , αντίστοιχα, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου. Τα αποτελέσματα εξακολουθούν να είναι πανομοιότυπα για τα δύο προφίλ έγχυσης. Επιπλέον, πρέπει να τονισθεί ότι και το ωφέλιμο έργο ανά κύκλο είναι το ίδιο για τα δύο προφίλ έγχυσης.



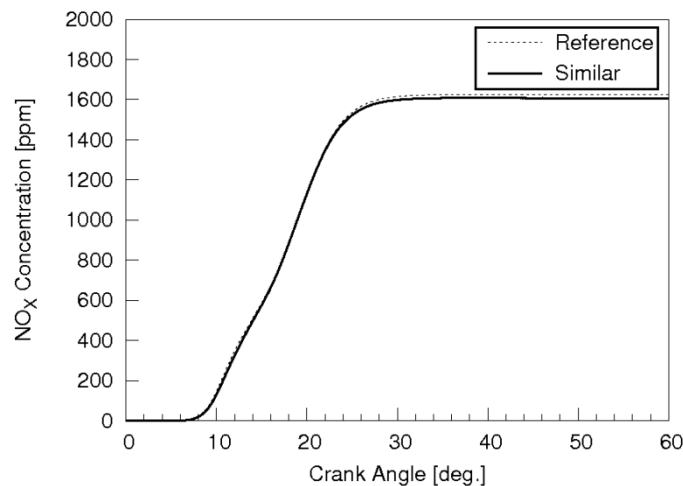
Διάγραμμα 5.3: Μεταβολή της πίεσης στον κύλινδρο, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για το αρχικό και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.



Διάγραμμα 5.4: Μεταβολή της χωρικά μέσης θερμοκρασίας μέσα στον κύλινδρο, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για το αρχικό και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.



Διάγραμμα 5.5: Μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για το αρχικό και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.

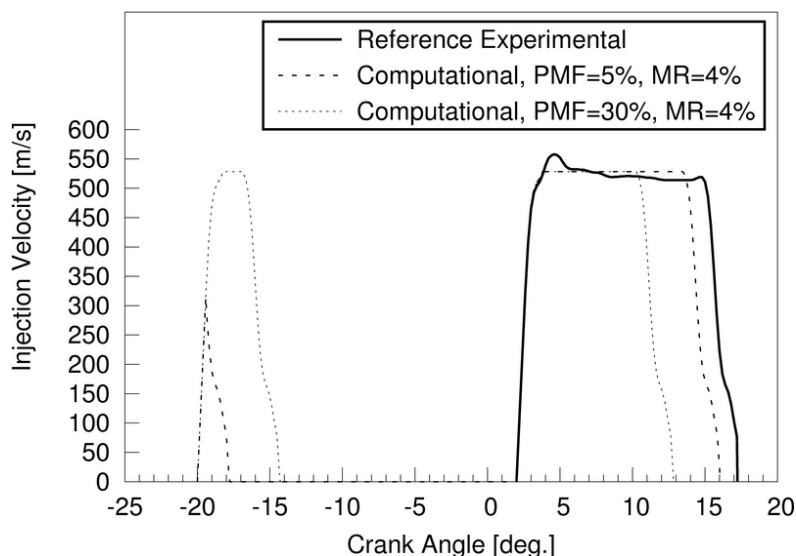


Διάγραμμα 5.6: Μεταβολή της χωρικά μέσης συγκέντρωσης NO_x , συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για το αρχικό και το προσεγγιστικό προφίλ έγχυσης.

Τα προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν πρόβλημα υπολογίστηκαν βάσει των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης σε κάθε ξεχωριστή υποψήφια λύση. Όπως προαναφέρθηκε, η συνολική εγχυόμενη μάζα ήταν διαφορετική για κάθε υποψήφια λύση (μεταβλητή σχεδίασης MR), αλλά η μέγιστη ταχύτητα έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς διατηρήθηκε σε όλα τα δημιουργούμενα προφίλ έγχυσης. Επομένως, ως απόρροια της διατήρησης της μάζας, η διάρκεια της κύριας έγχυσης προσαρμόστηκε κατάλληλα σε κάθε υποψήφια λύση.

Σε προηγούμενες μελέτες [12-14], το σχήμα του προφίλ της προέγχυσης ήταν τριγωνικό. Το συγκεκριμένο σχήμα είναι αρκετά ρεαλιστικό λόγω της μικρής διάρκειας προέγχυσης στις περισσότερες περιπτώσεις, ωστόσο δεν είναι απόλυτα ακριβές. Στις παρούσες προσομοιώσεις, το προφίλ προέγχυσης διαμορφώθηκε έτσι ώστε να έχει το ίδιο άνοιγμα και κλείσιμο με το προφίλ έγχυσης στην περίπτωση αναφοράς ώστε να ληφθούν υπόψη τα πραγματικά χαρακτηριστικά έγχυσης του κινητήρα. Έτσι, δεδομένης της μέγιστης ταχύτητας έγχυσης, η διάρκεια προέγχυσης

καθορίστηκε με βάση τη μάζα της προέγχυσης. Στο Διάγραμμα 5.7 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά προφίλ έγχυσης με παρουσία προέγχυσης.



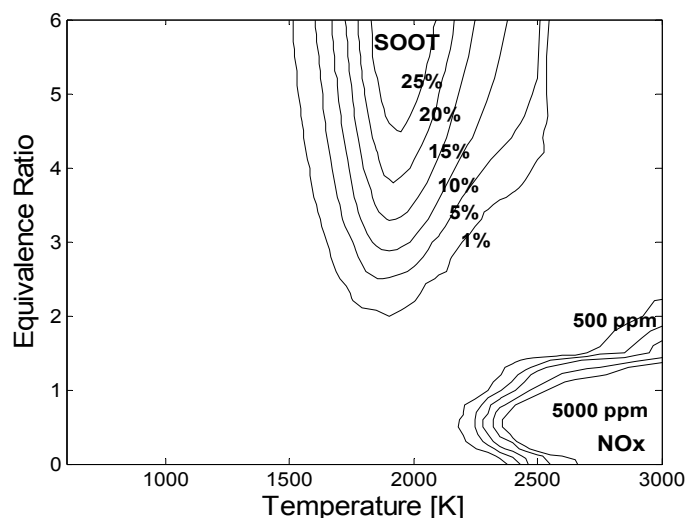
Διάγραμμα 5.7: Υπολογιστικά προφίλ έγχυσης με προέγχυση, και το πειραματικό προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς. Η τιμή του ποσοστού μάζας προέγχυσης PMF=30% είναι εκτός των ορίων της παρούσας μελέτης, και το αντίστοιχο προφίλ παρουσιάζεται για λόγους οπτικοποίησης.

5.2 Ανάλυση Διεργασιών Καύσης με Χρήση Χαρτών $T - \phi$

Η κατανόηση του μηχανισμού σχηματισμού των κύριων ρύπων κατά τη διεργασία της καύσης προϋποθέτει τη γνώση των τοπικών θερμοκρασιών, T , και των αντίστοιχων λόγων ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα, ϕ (equivalence ratio). Με τη βοήθεια προσομοιώσεων χημικής κινητικής (μηδενικής διάστασης) μπορούν να ληφθούν για τον κάθε συνδυασμό $T - \phi$ και δεδομένη πίεση, αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε συγκέντρωση δημιουργηθέντων ρύπων (εδώ: NO_x και σωματίδια αιθάλης), μετά την παρέλευση μικρού χρόνου. Η απεικόνιση των υπολογισθέντων συγκεντρώσεων σε διαγράμματα $T - \phi$ με τη μορφή ισούψων καμπυλών δίνει τους «χάρτες $T - \phi$ ». Έτσι, στην περίπτωση προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, η διεργασία της καύσης σε μηχανές εσωτερικής καύσεως μπορεί να αναλυθεί ποιοτικά τοποθετώντας τις τοπικές (αυτές που αντιστοιχούν σε κάθε υπολογιστικό κελί) τιμές T και ϕ στους χάρτες. Όταν η παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιεί έναν μόνο χάρτη $T - \phi$ (αποτελέσματα χημικής κινητικής για μία μόνο τιμή της πίεσης) [42], γίνεται αναφορά σε «στατικούς χάρτες $T - \phi$ ». Όταν οι χάρτες αναφέρονται σε περισσότερες από μία πιέσεις [21], ονομάζονται «δυναμικοί χάρτες $T - \phi$ ». Στην πραγματικότητα, οι χάρτες παραμένουν ποιοτικά όμοιοι για μεταβολές της πίεσης. Για τον λόγο αυτό, αλλά και για λόγους απλοποίησης, στην παρούσα ανάλυση, χρησιμοποιείται μόνον ένας («στατικός») χάρτης, ο οποίος προκύπτει για συνθήκες πίεσης 60 bar και χρόνο 2 ms [42]. Ο συγκεκριμένος χρόνος των 2ms αντιστοιχεί σε 1.3 °CA για τη δεδομένη ταχύτητα περιστροφής των 105 RPM του κινητήρα. Στην Εικόνα 5.2, απεικονίζεται ο (στατικός) χάρτης $T - \phi$, στον οποίο διακρίνονται δύο περιοχές, οι οποίες αντιστοιχούν σε συνθήκες σχηματισμού NO_x και αιθάλης. Η περιοχή σχηματισμού των NO_x βρίσκεται στο δεξιό άκρο της Εικόνα 5.2, με τις παριστάμενες ισούψειες καμπύλες να αντιστοιχούν σε συγκεντρώσεις NO_x , οι οποίες κυμαίνονται από 500 ppm έως 5000 ppm. Η περιοχή της παραγωγής σωματιδίων αιθάλης οριοθετείται από ισούψειες καμπύλες συγκέντρωσης αιθάλης ως

ποσοστό % της συνολικής μάζας. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι τα παριστάμενα αποτελέσματα αντιστοιχούν μόνο στον σχηματισμό αιθάλης (και όχι και την οξείδωση της), με συνέπεια τα συμπεράσματα αναφορικά με τον σχηματισμό σωματιδίων αιθάλης να είναι ποιοτικά.

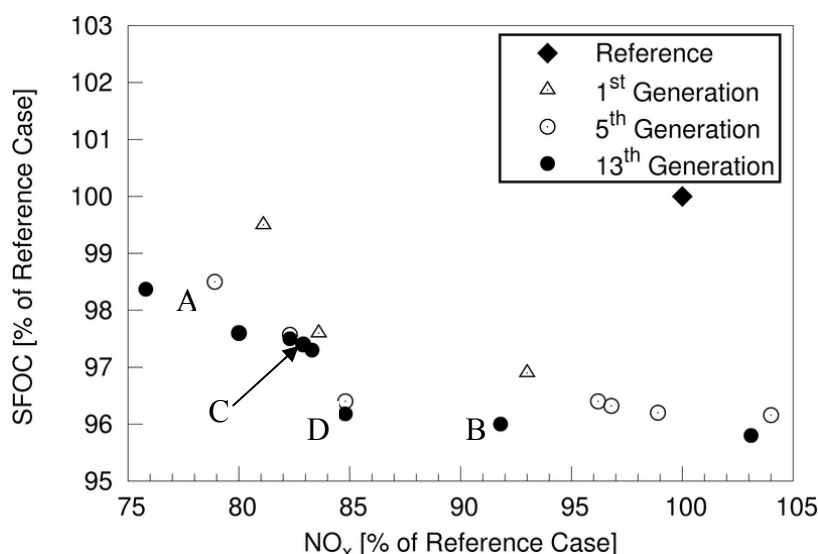
Σημειώνεται ότι εδώ η χρήση των χαρτών T-φ γίνεται για την απόκτηση ποιοτικής πληροφορίας για τη δημιουργία σωματιδίων αιθάλης, αφού στον κώδικα KIVA-3 που χρησιμοποιούμε δεν έχει ακόμη περιληφθεί αντίστοιχο μοντέλο. Επιπρόσθετα, οι χάρτες T-φ είναι ένα καλό εργαλείο για την επιβεβαίωση της καλής λειτουργίας του μοντέλου δημιουργίας NO_x. Τέλος, η χρήση των χαρτών είναι υποβοηθητική της κατανόησης των διεργασιών ατμοποίησης και καύσης του καυσίμου.



Εικόνα 5.2: Στατικός χάρτης T – φ, για συνθήκες πίεσης 60 bar και χρόνο 2ms [42].

5.3 Αποτελέσματα Προβλήματος χωρίς Περιορισμούς

Για διατύπωση του προβλήματος χωρίς επιβολή περιορισμών, το τελικό μέτωπο Pareto, κάποια ενδιάμεσα αποτελέσματα καθώς και η κατάσταση αναφοράς παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.8.



Διάγραμμα 5.8: Μέτωπο Pareto στο οποίο απεικονίζονται οι δύο στόχοι (κανονικοποιημένες τιμές τελικής συγκεντρώσεως NO_x και SFOC) για αντιπροσωπευτικές γενιές, για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται επίσης η περίπτωση αναφοράς.

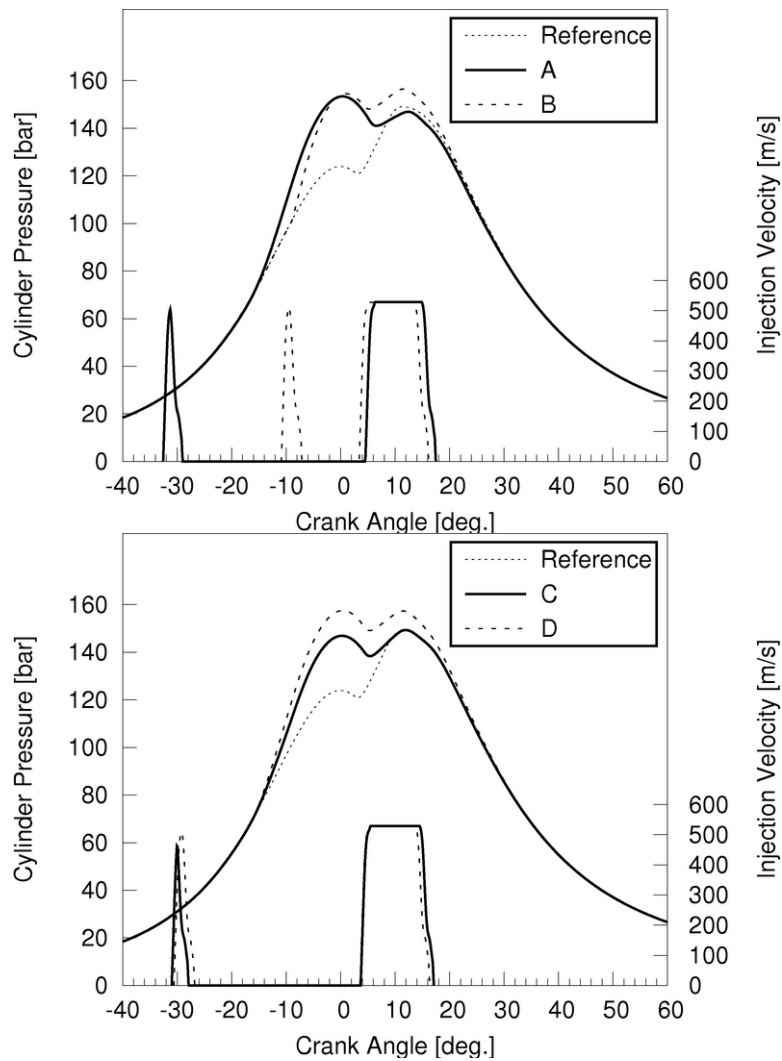
Από το Διάγραμμα 5.8 προκύπτει ότι η απόδοση της μηχανής μπορεί να βελτιωθεί αισθητά, τόσο αναφορικά με τις εκπομπές NO_x, όσο και με την ειδική κατανάλωση καυσίμου, εφόσον εφαρμοστεί μία προσεκτικά επιλεγμένη στρατηγική έγχυσης. Επιπρόσθετα, είναι εμφανές ότι υπάρχει σαφής εξάρτηση μεταξύ των δύο στόχων, επομένως η τελική επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής έγχυσης εξαρτάται από τις εκάστοτε ανάγκες λειτουργίας της μηχανής. Συνεπώς, εδώ αποτυπώνεται ένα σημαντικό πλεονέκτημα της επίλυσης προβλημάτων πολλαπλών στόχων με χρήση του μετώπου Pareto, ότι όλες οι λύσεις διατηρούνται, και επομένως μπορεί να επιλεγεί οποιαδήποτε από αυτές, αναλόγως με τον στόχο στον οποίο επιθυμούμε να δοθεί βαρύτητα. Επί παραδείγματι, εάν δοθεί βαρύτητα στη μείωση των εκπομπών NO_x τότε η περίπτωση A είναι η κατάλληλη προς επιλογή. Αντίθετα, αν η μείωση της ειδικής κατανάλωσης είναι ο κύριος στόχος τότε θα επιλεγεί περίπτωση B του Διάγραμμα 5.8, η οποία, ωστόσο, αντιστοιχεί σε μικρή (8.1%) μείωση της τελικής συγκέντρωσης NO_x. Είναι κατανοητό, βέβαια, ότι οι δύο αυτές λύσεις είναι «ακραίες». Σε συνήθεις πρακτικές εφαρμογές, μία ενδιάμεση λύση είναι συνήθως προτιμότερη, όπως η περίπτωση C, όπου οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου NO_x είναι μειωμένες κατά 17.6% με παράλληλη μείωση στην ειδική κατανάλωση κατά 2.4%. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, η μείωση στις εκπομπές NO_x κατά 15% είναι απαραίτητη για τους ναυτικούς κινητήρες Diesel που θα εγκατασταθούν μετέπειτα του 2011. Επομένως, εάν αυτό συνδυαστεί με μείωση της ειδικής κατανάλωσης κατά 2.4% προκύπτει ένα συνολικά πολύ ικανοποιητικό αποτέλεσμα, δεδομένης της μεγάλης ισχύος των κινητήρων. Επιπρόσθετα, η περίπτωση C τυγχάνει να έχει μέγιστη πίεση μικρότερη της επιτρεπόμενης τιμής των 150 bar (υπενθυμίζεται ότι αναφερόμαστε στο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς). Εναλλακτικά, μπορεί να επιλεγεί η περίπτωση D που χαρακτηρίζεται από μείωση στη συγκέντρωση NO_x κατά 15.2% και βελτίωση στην κατανάλωση καυσίμου κατά 3.6%. Βέβαια, η περίπτωση D έχει μέγιστη πίεση 152 bar, υπερβαίνοντας (σε αντίθεση με την περίπτωση C) το όριο των

150 bar. Συγκεντρωτικά, οι παράμετροι του προφίλ εγχύσεως (μεταβλητές σχεδίασης), οι στόχοι, καθώς και η μέγιστη πίεση για τις περιπτώσεις A, B, C, D φαίνονται στον Πίνακα 5-2.

Πίνακας 5-2: Παράμετροι έγχυσης, κανονικοποιημένες τιμές της συγκέντρωσης NO_x και SFOC, και μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου για τις περιπτώσεις A, B, C, D του Διάγραμμα 5.8, και για την περίπτωση αναφοράς.

	Ref.	A	B	C	D
Μεταβλητές Σχεδίασης					
SOP1 [° CA aTDC]	-	-32.6	-10.9	-31	-30.6
SOMI [° CA aTDC]	2	4.5	3.4	3.7	3.6
PMF [% of total injected mass]	-	13.7	15.4	10.3	15.3
MR [%]	-	3.9	3.7	3.7	3.5
Στόχοι					
NO _x [%]	100	75.8	91.9	82.4	84.8
SFOC [%]	100	98.4	96.0	97.6	96.4
Πίεση Κυλίνδρου					
Max. Pressure [bar]	149.8	152.5	156.5	149.0	152.0

Στον Πίνακα 5-2 φαίνεται ότι, με εξαίρεση την περίπτωση B όπου η μείωση των NO_x είναι οριακή, οι τιμές έναρξης της προέγχυσης κυμαίνονται περί τις -30°, ενώ το ποσοστό μάζας προέγχυσης είναι τάξης 10%-15% της συνολικής μάζας εγχύσεως. Επιπρόσθετα, μία μείωση της τάξεως του 3.5%-3.9% της συνολικής εγχυόμενης μάζας, επιτυγχάνεται για όλες τις περιπτώσεις. Η έναρξη της κύριας εγχύσεως είναι από 3.4°-4.5°, καθυστερημένη σε σχέση με τις 2° της κατάστασης αναφοράς. Η μείωση των NO_x είναι ερμηνεύσιμη, αφού η καύση λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, πιο αργά στη φάση της εκτόνωσης, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Σημειώνουμε ότι, εν γένει, η καθυστέρηση της κύριας έγχυσης μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη ειδική κατανάλωση, εάν δεν εφαρμοστεί κατάλληλα. Όσον αφορά στο παραγόμενο έργο, οι περιπτώσεις B, D παραμένουν ανεπηρέαστες, ενώ μειώσεις 1.4% και 2.3% υπολογίσθηκαν για τις περιπτώσεις A και C, αντίστοιχα.



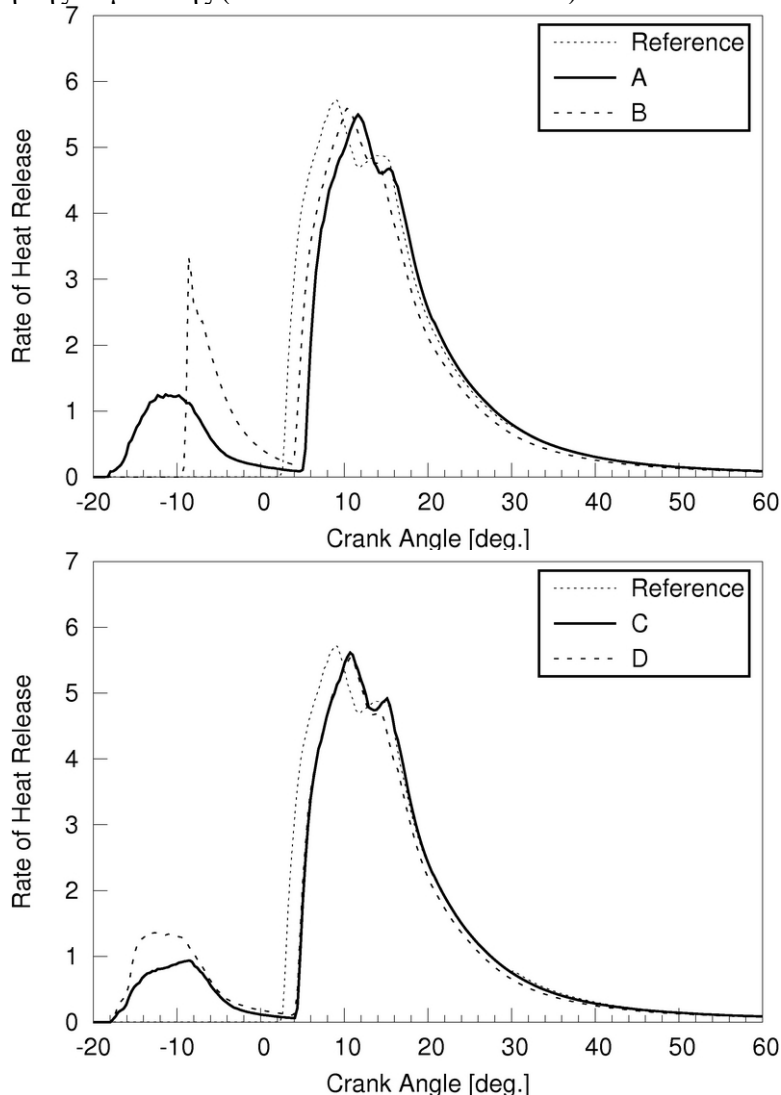
Διάγραμμα 5.9: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: προφίλ έγχυσης με προέγχυση και υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, B, C, D, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.

Περαιτέρω ανάλυση των περιπτώσεων A, B, C και D παρέχει σημαντική πληροφορία αναφορικά με την επίδραση των παραμέτρων έγχυσης στην καύση και στον σχηματισμό ρύπων σε μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες. Στο Διάγραμμα 5.9, παρουσιάζονται τα προφίλ έγχυσης, καθώς και τα διαγράμματα της πίεσης για τις περιπτώσεις A-B και C-D. Στο Διάγραμμα 5.10 φαίνονται οι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας για τις ίδιες περιπτώσεις. Σε όλα τα σχήματα, περιλαμβάνονται επίσης τα αποτελέσματα της κατάστασης αναφοράς, προς σύγκριση.

Στα Διάγραμμα 5.9 και Διάγραμμα 5.10 αποτυπώνεται ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της διεργασίας καύσης. Συγκεκριμένα λόγω του σημαντικού ποσοστού της μάζας προέγχυσης μία έκλυση θερμότητας λαμβάνει χώρα πριν το ANΣ (που έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία αύξηση της πίεσης μέσα στον κύλινδρο), και ολοκληρώνεται λίγο πριν την έναρξη της κύριας έγχυσης. Η κύρια έγχυση καθυστερεί σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, κάτι που έχει ως φυσικό επακόλουθο την καθυστέρηση της κύριας φάσης έκλυσης θερμότητας. Επομένως, στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέγιστη πίεση στον κύλινδρο παρατηρείται λίγο πριν το ANΣ. Το γεγονός αυτό τείνει να μειώσει το συνολικό ωφέλιμο έργο του

κινητήρα, αλλά η μείωση αναπληρώνεται (μερικώς η ολικώς) κατά τη φάση της εκτόνωσης. Ωστόσο, η συνολική εγχυόμενη μάζα είναι σαφώς μειωμένη, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, οδηγώντας σε μειωμένη ειδική κατανάλωση.

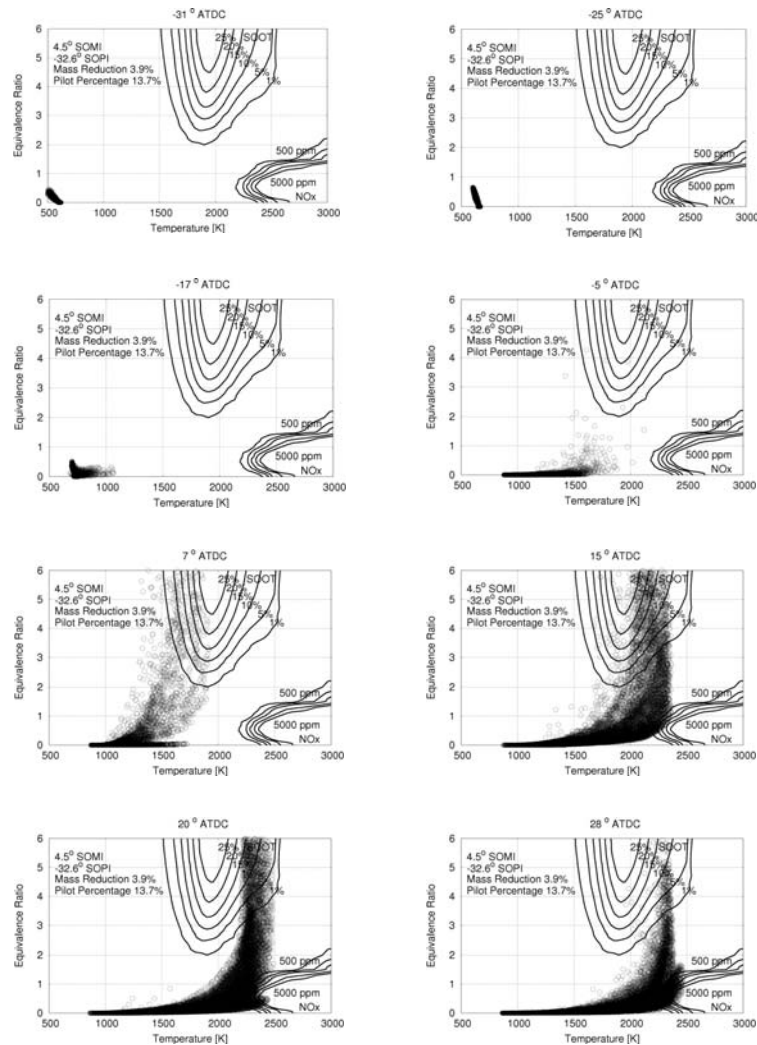
Η μεγάλη περίοδος καθυστέρησης έναυσης για το πρώτο μέρος της καύσης στις περιπτώσεις A, C και D δείχνει ότι υπάρχει επαρκής χρόνος για την ανάμιξη του αέρα με το καύσιμο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ομογενούς μίγματος. Έτσι στις τρεις αυτές περιπτώσεις η καύση πριν το ANΣ γίνεται με φλόγα προανάμιξης. Αυτό αποτυπώνεται στις καμπύλες του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Διάγραμμα 5.10) και μπορεί να επιβεβαιωθεί συγκρίνοντας τους χάρτες T-φ για τις περιπτώσεις A και B κατά τη φάση της συμπίεσης (Εικόνα 5.3 και Εικόνα 5.4).



Διάγραμμα 5.10: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτήσεως της γωνίας στροφάλου για τις περιπτώσεις A, B, C, D και για την περίπτωση αναφοράς.

Η Εικόνα 5.3 δείχνει ότι, στην περίπτωση A, κατά τη διάρκεια της προέγχυσης τα επίπεδα της πίεσης αλλά και της θερμοκρασίας (περίπου 30 bar και 600 K, αντίστοιχα) δεν βοηθούν την ταχεία διάσπαση και εξάτμιση του καυσίμου. Επομένως σε σχέση με την περίπτωση B δημιουργείται ένα περισσότερο ομογενές μείγμα. Στην περίπτωση B, όπου το καύσιμο εγχύεται σε αισθητά θερμότερο περιβάλλον (περίπου

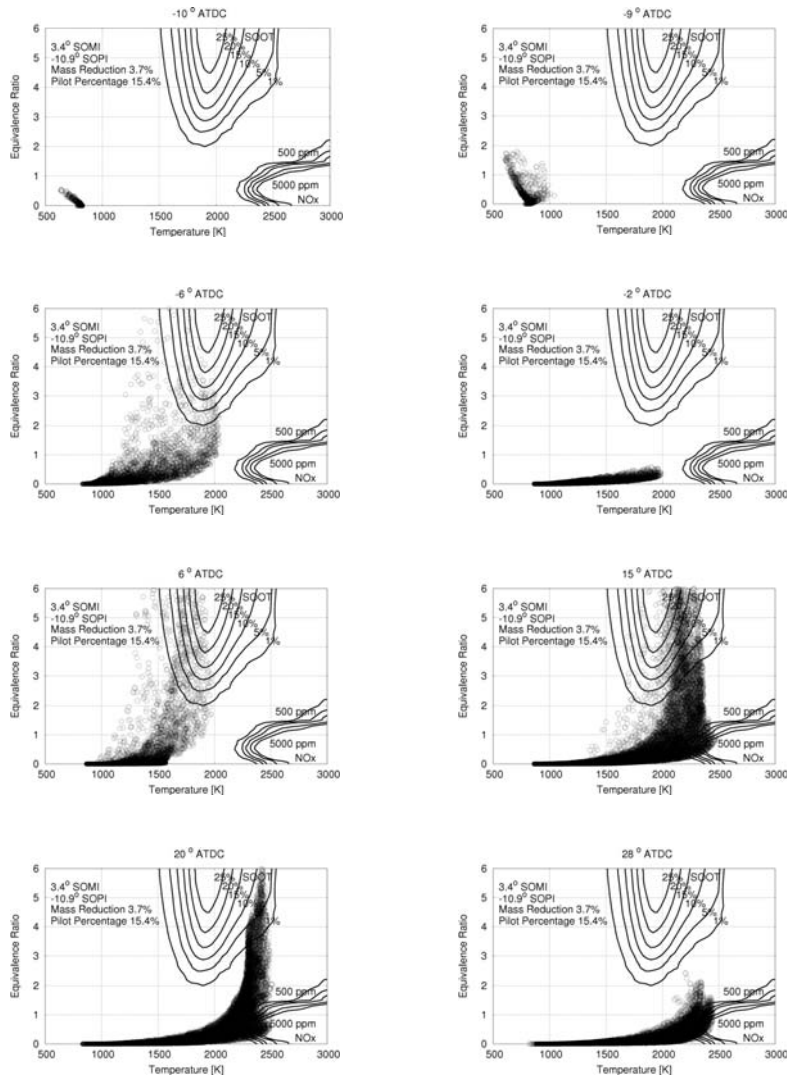
800 K, 90 bar), γεγονός που συνεπάγεται τη ταχεία εξάτμιση και έναυση του καυσίμου. Στην περίπτωση B, η καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι πολύ απότομη (αντιπροσωπευτική φλόγας διάχυσης), και παρατηρείται δημιουργία αιθάλης σε μία μικρή περιοχή του θαλάμου καύσης (Εικόνα 5.4). Και στις δύο περιπτώσεις, οι θερμοκρασίες στο πρώτο στάδιο της καύσης είναι μικρότερες από 2000 K, κάτι που αποτρέπει τον σχηματισμό NO_x . Σημειώνουμε ότι, κυρίως λόγω της περιορισμένης εξάτμισης, είναι πιθανό στις περιπτώσεις που η προέγχιση γίνεται πολύ νωρίς, να υπάρχουν επικαθίσεις καυσίμου στα τοιχώματα (wall wetting). Το σημείο αυτό θα διερευνηθεί περαιτέρω στη συνέχεια.



Εικόνα 5.3: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: χάρτες T-φ για την περίπτωση A, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.

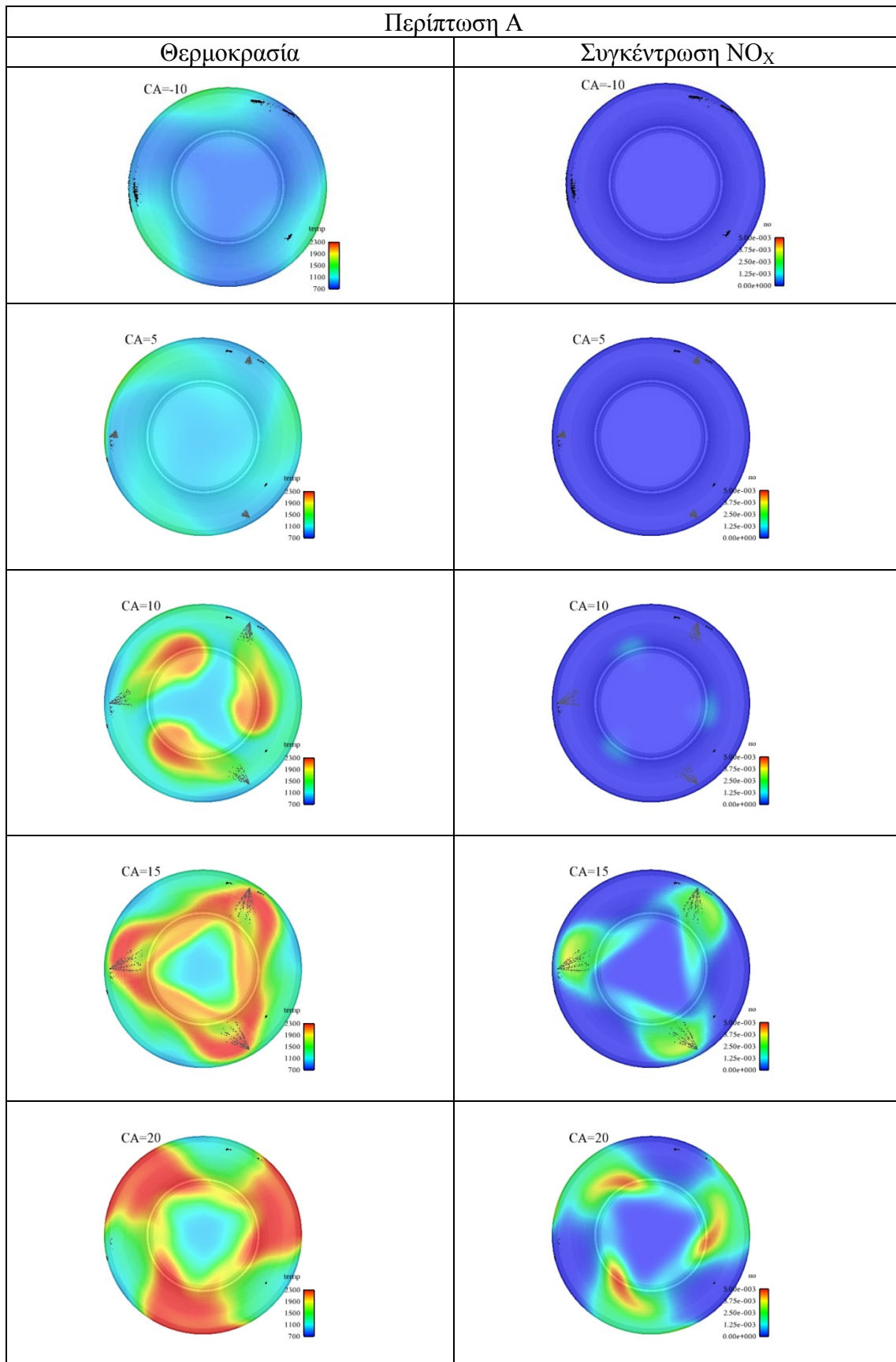
Η κύρια έγχυση, ξεκινά στις 4.5° για την περίπτωση A, και στις 3.4° για την περίπτωση B. Και στις δύο περιπτώσεις, λόγω της ήδη υψηλής θερμοκρασίας στον κύλινδρο, η καύση αρχίζει μετά από μία μικρή καθυστέρηση έναυσης. Η εξέλιξη της καύσης είναι και στις δύο περιπτώσεις παρόμοια (όπως φαίνεται στις καμπύλες του ρυθμού έκλυσης θερμότητας στο Διάγραμμα 5.10). Στην περίπτωση A, ένα μεγαλύτερο μέρος του θαλάμου καύσης έχει συνθήκες που ευνοούν τη δημιουργία σωματιδίων αιθάλης, και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με την περίπτωση B. (Εικόνα 5.3, Εικόνα 5.4). Αυτό αποτελεί μία ένδειξη ότι η δημιουργία

αιθάλης είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση A, ενώ η οξείδωση των σωματιδίων αιθάλης ξεκινά αργότερα, οδηγώντας σε συνολικά υψηλότερα επίπεδα αιθάλης στα καυσαέρια. Από την άλλη πλευρά, είναι εμφανές ότι στην περίπτωση A, λόγω της καθυστερημένης έναρξης της κύριας έγχυσης, οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση B, κάτι που συνεπάγεται χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών NO_x.



Εικόνα 5.4: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: χάρτες T-φ για την περίπτωση B, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.

Για τη λεπτομερέστερη ανάλυση της διεργασίας σχηματισμού NO_x, παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.5, οι ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας και συγκέντρωσης NO_x στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για την περίπτωση A.



Εικόνα 5.5: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης NO_x στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για την περίπτωση A, σε επιλεγμένα χρονικά στιγμιότυπα.

Στο στάδιο της προέγχυσης, οι θερμοκρασίες εντός του κυλίνδρου αυξάνονται μέχρι περίπου 1500 K, γεγονός που αποτρέπει τον σχηματισμό NO_x, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.3. Στη συνέχεια, μετά την έναρξη της κύριας έγχυσης και αφού αρχίσει η καύση, οι θερμοκρασίες ξεπερνούν τους 2300 K (π.χ 10° μετά το ANΣ), με αποτέλεσμα να αρχίζει ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου. Η διαδικασία σχηματισμού δεν είναι άμεση, αλλά υπάρχει μία μικρή χρονική καθυστέρηση μεταξύ της ανόδου της θερμοκρασίας και της εμφάνισης σημαντικών συγκεντρώσεων NO_x, της τάξης των 3°-4° (5-6 ms). Στη συνέχεια, στις περιοχές όπου η θερμοκρασία διατηρείται μεγαλύτερη των 2300 K, υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση NO_x. Μία πρόσθετη παρατήρηση με βάση την Εικόνα 5.5 είναι ότι, στις περιοχές που ατμοποιείται το υγρό καύσιμο, παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας, λόγω απορρόφησης της ενθαλπίας εξάτμισης.

Περαιτέρω ανάλυση της διαδικασίας σχηματισμού αιθάλης μπορεί να βασιστεί στην Εικόνα 5.6, όπου διακρίνεται η σύγκριση τρισδιάστατων περιοχών σχηματισμού αιθάλης μέσα στον θάλαμο καύσης για τις περιπτώσεις A και B. Οι συγκεκριμένες εικόνες βασίζονται σε ισουψείς καμπύλες μίας συνάρτησης f , η οποία περιγράφει την περιοχή σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης του στατικού χάρτη $T - \varphi$. Ο καθορισμός της εν λόγω συνάρτησης σχετίζεται, τόσο με την παρατηρηθείσα γραμμική εξάρτηση της σχηματιζόμενης αιθάλης από τον λόγο ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα, φ (βλ. Εικόνα 5.2), όσο και με την παραβολική εξάρτηση της σχηματιζόμενης αιθάλης από την αντίστοιχη θερμοκρασία του μίγματος καυσίμου – αέρα. Η παραβολική συνάρτηση, που συσχετίζει τη θερμοκρασία με τον σχηματισμό αιθάλης, είναι προφανώς της μορφής:

$$y(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$$

όπου,
 y , T , η παραβολική συνάρτηση και η τοπική θερμοκρασία του μίγματος καυσίμου – αέρα, αντίστοιχα.

Οι συντελεστές a , b και c προκύπτουν από την επίλυση του συστήματος 3×3 των γραμμικών εξισώσεων, σύμφωνα με τα ακόλουθα ζεύγη τιμών (παραμετροποίηση του στατικού χάρτη $T - \varphi$):

$$(T_1, y_1) = (1500, 0)$$

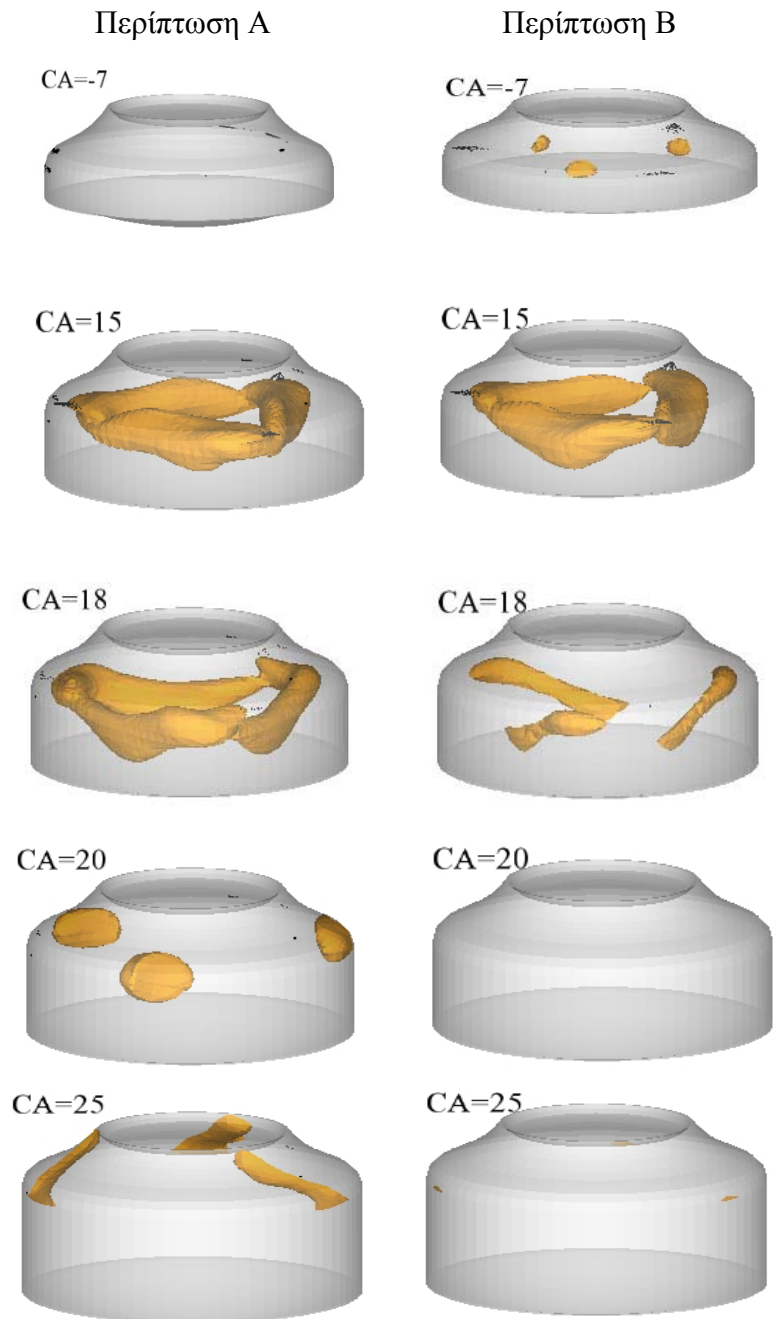
$$(T_2, y_2) = (2000, 1)$$

$$(T_3, y_3) = (2500, 0)$$

Συνεπώς, για θερμοκρασίες μικρότερες από 1500 K και υψηλότερες από 2500 K, δεν υφίσταται σχηματισμός σωματιδίων αιθάλης, ενώ η μέγιστη επίδραση παρατηρείται για θερμοκρασίες της τάξεως των 2000 K. Από τον προσδιορισμό των συντελεστών a , b και c , και αφού συμπεριληφθεί η γραμμική εξάρτηση της σχηματιζόμενης αιθάλης από το φ , προκύπτει η συνάρτηση παραγωγής σωματιδίων αιθάλης f :

$$f = \varphi \cdot \left(-\frac{1}{250000} \cdot T^2 + \frac{1}{62.5} \cdot T - 15 \right)$$

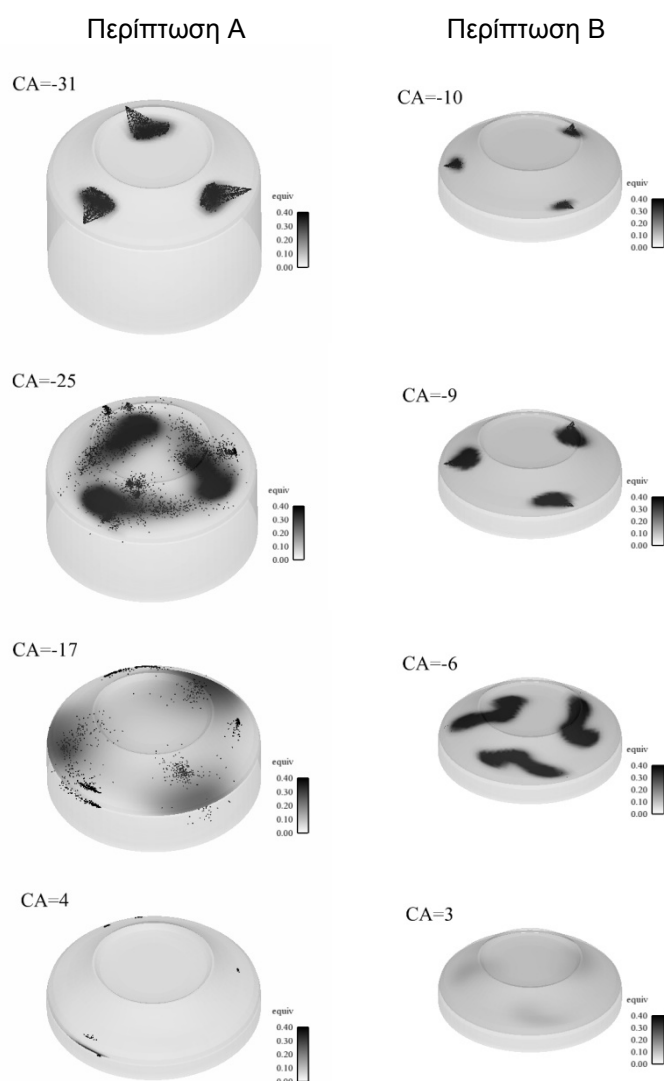
Όταν η συνάρτηση λαμβάνει τιμή $f = 3$, δημιουργείται μία ισοεπιφάνεια μέσα στον θάλαμο καύσης η οποία εσωκλείει όλες τις τιμές $f > 3$. Αυτές αντιστοιχούν σε περιοχές του χάρτη με συγκεντρώσεις σωματιδίων αιθάλης υψηλότερες από 5%. Εδώ, επιλέγεται το ποσοστό του 5% ως οριακή τιμή πάνω από την οποία η συγκέντρωση σωματιδίων αιθάλης θεωρείται σημαντική.



Εικόνα 5.6: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: περιοχές σχηματισμού αιθάλης (που αντιστοιχούν σε τιμές της συνάρτησης παραγωγής αιθάλης $f > 3$), για τις περιπτώσεις A και B, για διάφορες τιμές της γωνίας στροφάλου.

Στην Εικόνα 5.6 αποτυπώνεται η διαφορά στη διαδικασία δημιουργίας αιθάλης στις δύο περιπτώσεις, A και B. Στην περίπτωση B όπου η έναρξη της προέγχυσης λαμβάνει χώρα στις -10.9° , σαφώς αργότερα σε σχέση με την περίπτωση A, οι συνθήκες (φ και T) ευνοούν τον σχηματισμό αιθάλης, σε πολύ μικρές ωστόσο

περιοχές. Είναι όμως ενδιαφέρον το γεγονός ότι, όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση A οι περιοχές σχηματισμού αιθάλης είναι μεγαλύτερες (ειδικά μετέπειτα των 18°), ενώ έχουν και μεγαλύτερη διάρκεια σε σχέση με την περίπτωση B. Ενώ στην περίπτωση B η δημιουργία αιθάλης έχει περατωθεί στις 20°, στην περίπτωση A συναντάμε τέτοιες περιοχές ακόμη και μέχρι τις 25°. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη δημιουργία περιοχών υψηλού φ στα τοιχώματα του κυλίνδρου, όπου υπάρχουν επικαθίσεις καυσίμου κατά τη φάση της προέγχυσης. Σημειώνεται, επίσης, ότι στην περίπτωση B επικρατούν υψηλότερες θερμοκρασίες (υψηλά NO_x), επομένως διευκολύνεται η διαδικασία οξείδωσης των σωματιδίων αιθάλης. Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση B τα τελικά επίπεδα συγκέντρωσης αιθάλης είναι χαμηλότερα σε σχέση με την περίπτωση A.

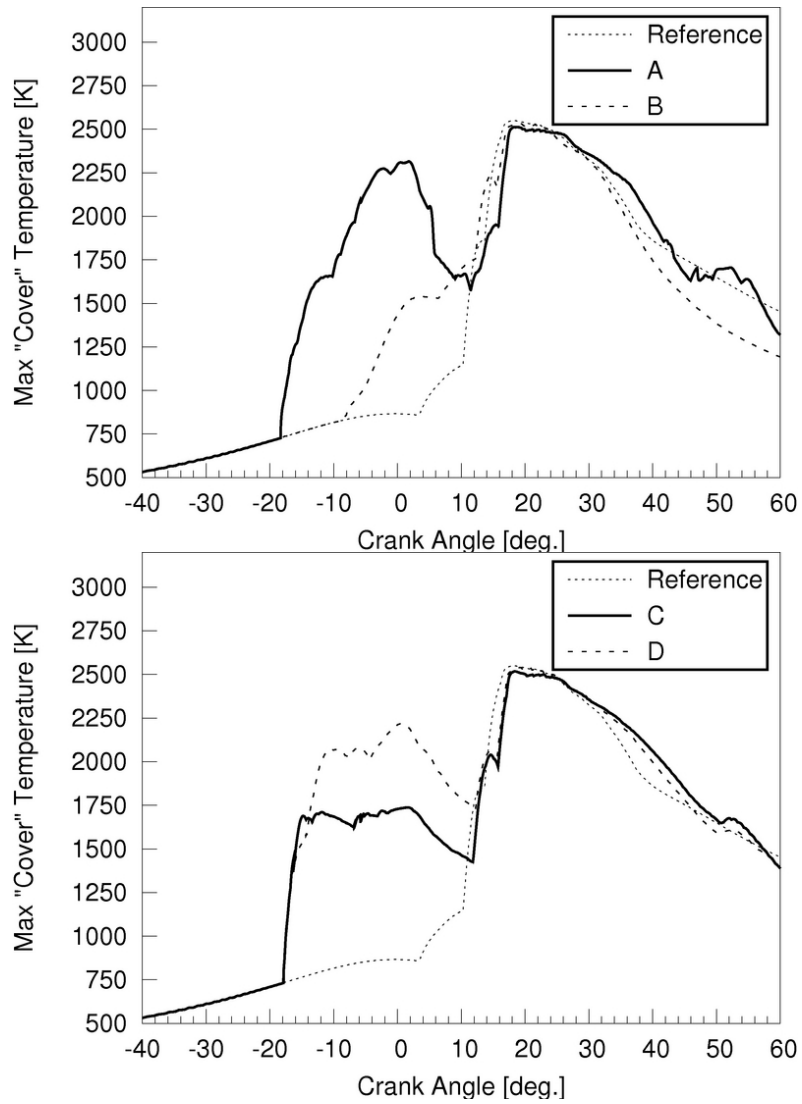


Εικόνα 5.7: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: οπτικοποίηση της υγρής δέσμης καυσίμου και ισοϋψείς καμπύλες του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου αέρα στο επίπεδο των εγχυτήρων για τις περιπτώσεις A και B. Εδώ, παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά στιγμιότυπα της φάσης πριν την κύρια έγχυση του καυσίμου.

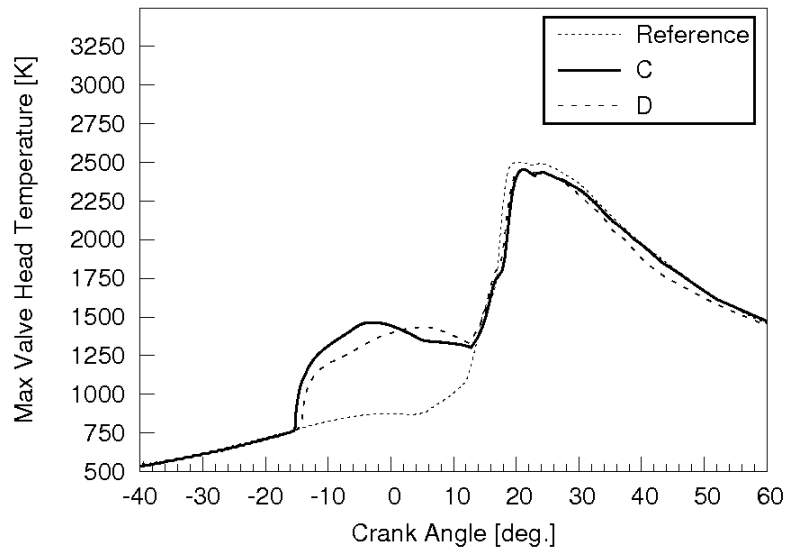
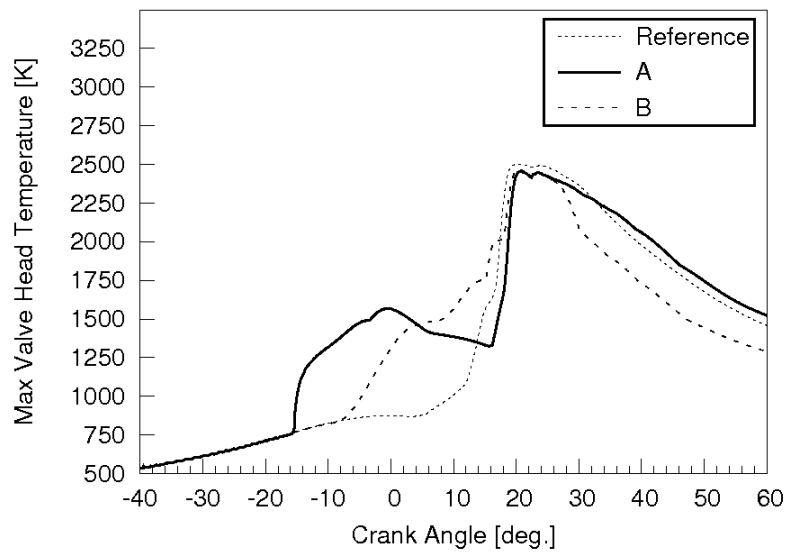
Περαιτέρω πληροφορίες για τις θερμορευστομηχανικές διεργασίες μπορούν να αποκτηθούν με οπτικοποίηση των υπολογισθέντων πεδίων ροής. Στην Εικόνα 5.7, συγκρίνονται οι περιπτώσεις A και B, σε επιλεγείσες χρονικές στιγμές πριν την κύρια

έγχυση. Εδώ, το υγρό καύσιμο αναπαρίσταται με μαύρες κουκκίδες, ενώ παρουσιάζεται και ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα του κυλίνδρου, στο ύψος των εγχυτήρων. Στην Εικόνα 5.7 φαίνεται ότι στην περίπτωση A, η δέσμη καυσίμου διεισδύει πολύ περισσότερο εντός του κυλίνδρου, σε σύγκριση με την περίπτωση B, και δημιουργείται ένα πιο ομογενές μείγμα. Παρ' όλα αυτά είναι εμφανές ότι ένα μέρος του καυσίμου δεν εξατμίζεται και φτάνει έως τα τοιχώματα του κυλίνδρου, δημιουργώντας υγρά φιλμ. Αυτά τα φιλμ καυσίμου δεν εξατμίζονται γρήγορα, και φαίνεται να παραμένουν στο τοίχωμα μέχρι την έναρξη της κύριας έγχυσης. Σε αυτές τις περιοχές είναι πιθανή η δημιουργία σωματιδίων αιθάλης που όμως δεν αναμένεται να συμβάλλουν στην τελική συγκέντρωση, λόγω της οξειδωσής τους στο δεύτερο (και κύριο) στάδιο της καύσης. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε στις οπτικοποιήσεις για την περίπτωση C, με υγρά φιλμ μικρότερου μεγέθους λόγω της μικρότερης μάζας προέγχυσης. Υπογραμμίζεται στο σημείο αυτό ότι τα υγρά φιλμ μπορεί να είναι αιτία παραγωγής άκαυστων υδρογονανθράκων, καθώς και μόλυνσης του λιπαντικού ελαίου.

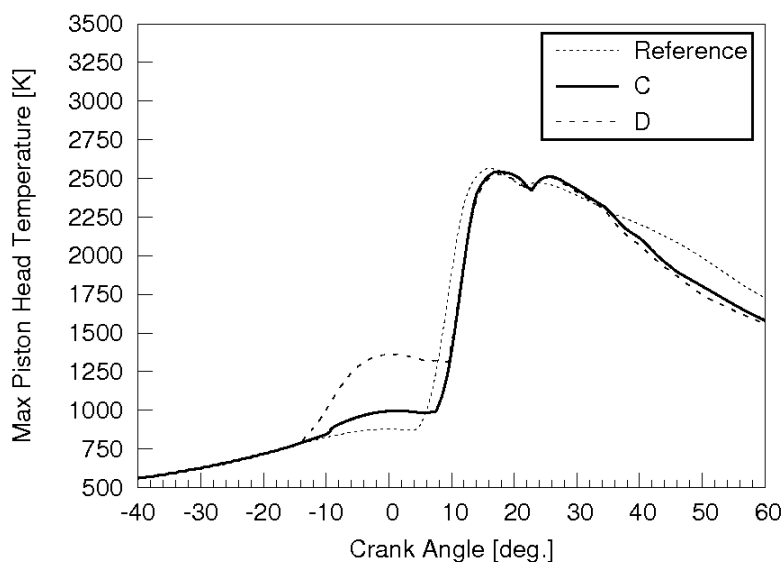
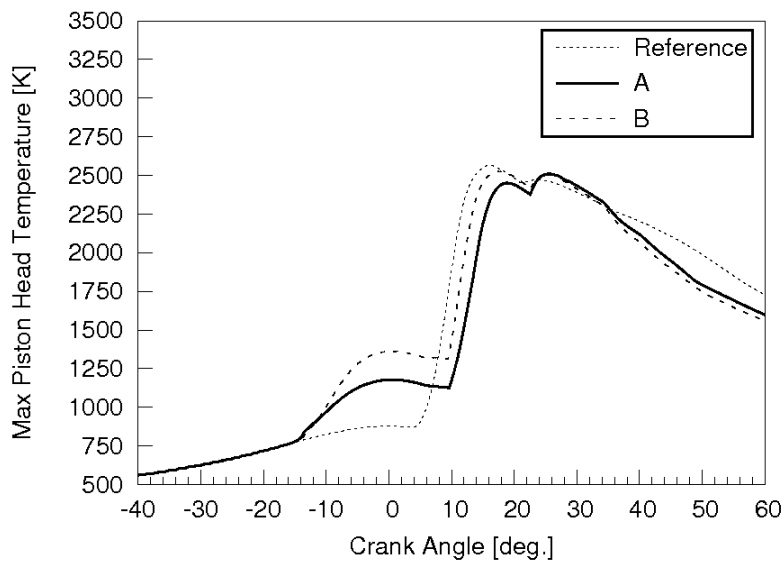
Ένα περαιτέρω μειονέκτημα σχετιζόμενο με τη δημιουργία υγρών φιλμ στα τοιχώματα του κυλίνδρου είναι τα αυξημένα θερμικά φορτία στην περιοχή του πώματος του κυλίνδρου. Στο Διάγραμμα 5.11, παρουσιάζεται η μέγιστη θερμοκρασία των κελιών που βρίσκονται δίπλα στο πώμα, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου. Για την περίπτωση A όπου η προέγχυση γίνεται πολύ νωρίς, το θερμικό φορτίο του πώματος αυξάνεται σημαντικά, αφού το καύσιμο που προεγχύεται καίγεται εγγύς του τοιχώματός του. Παρόλο που οι παρατηρούμενες μέγιστες θερμοκρασίες είναι μικρότερες από αυτές του κυρίου σταδίου της καύσης, ο χρόνος στον οποίο τα τοιχώματα του κυλίνδρου είναι εκτεθειμένα σε μεγάλες θερμοκρασίες (μεγαλύτερες των 1500 K) είναι σημαντικά αυξημένος. Τέλος, όπως προκύπτει από τα Διάγραμμα 5.12 και Διάγραμμα 5.13, η θερμική φόρτιση της βαλβίδας και του εμβόλου δεν διαφοροποιείται αισθητά, επειδή οι δέσμες καυσίμου δεν προσκρούουν επί αυτών.



Διάγραμμα 5.11: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: μέγιστη θερμοκρασία, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για τα υπολογιστικά κελιά κοντά στο πάμα του κυλίνδρου, για την περίπτωση αναφοράς και τις περιπτώσεις A, B, C, D.



Διάγραμμα 5.12: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: μέγιστη θερμοκρασία, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για τα υπολογιστικά κελιά κοντά στη βαλβίδα, για την περίπτωση αναφοράς και τις περιπτώσεις A, B, C, D.

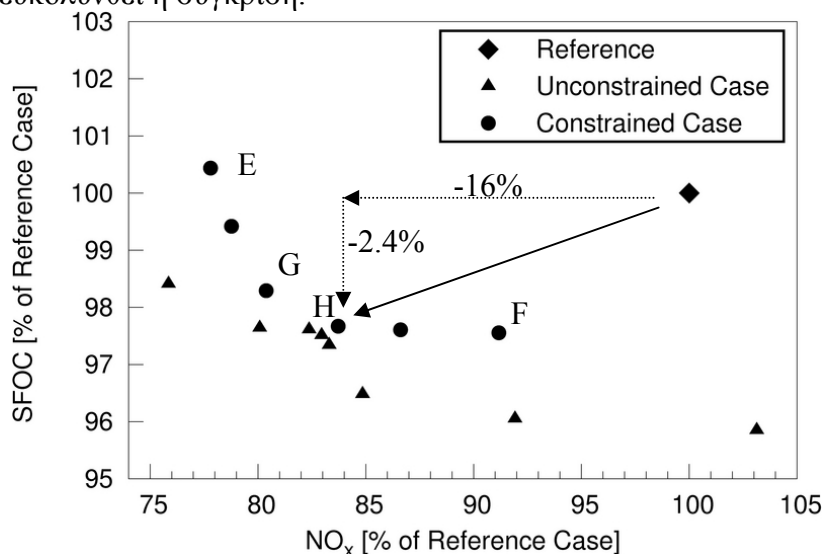


Διάγραμμα 5.13: Πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: μέγιστη θερμοκρασία, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για τα υπολογιστικά κελιά κοντά στο έμβολο, για την περίπτωση αναφοράς και τις περιπτώσεις A, B, C, D.

5.4 Αποτελέσματα Προβλήματος με Περιορισμό στη Μέγιστη Πίεση

Σε συμφωνία με τον περιορισμό μέγιστης πίεσης (150 bar) που επιβάλλεται από τον κατασκευαστή, επιλύσαμε ένα δεύτερο πρόβλημα, με περιορισμούς. Επειδή οι περισσότερες καλές λύσεις στο πρόβλημα βρίσκονται (όπως και στα περισσότερα προβλήματα) στα όρια των περιορισμών, η μέγιστη αποδεκτή τιμή για την πίεση ήταν, κατά τη διαδικασία σύγκλισης, 152 bar (αντί για 150 bar). Με τον τρόπο αυτό, ο αλγόριθμος κατευθύνεται καλύτερα και γρηγορότερα στις βέλτιστες λύσεις, αφού, κατά τη διαδοχή των γενεών, διατηρεί άτομα ευρισκόμενα και λίγο εκτός

περιορισμού. Ωστόσο, οι τελικές επιλεγείσες λύσεις είναι σύμφωνες με το όριο των 150 bar που θέτει ο κατασκευαστής του κινητήρα. Τα αποτελέσματα του προβλήματος με περιορισμούς παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.14. Στο ίδιο Διάγραμμα φαίνονται και τα αποτελέσματα του προβλήματος χωρίς περιορισμούς, ώστε να διευκολυνθεί η σύγκριση.



Διάγραμμα 5.14: Τελικά μέτωπα Pareto (κανονικοποιημένες τιμές συγκέντρωσης NO_x, και SFOC) για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, και για το πρόβλημα με περιορισμό στη μέγιστη πίεση. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και η περίπτωση αναφοράς.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.14, με επιβολή του περιορισμού της μέγιστης πίεσης, οι προκύπτουσες λύσεις είναι λιγότερο καλές. Συγκεντρωτικά, οι παράμετροι του προφίλ εγχύσεως (μεταβλητές σχεδίασης), οι στόχοι καθώς και η μέγιστη πίεση για τις περιπτώσεις E, G, H, F παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3.

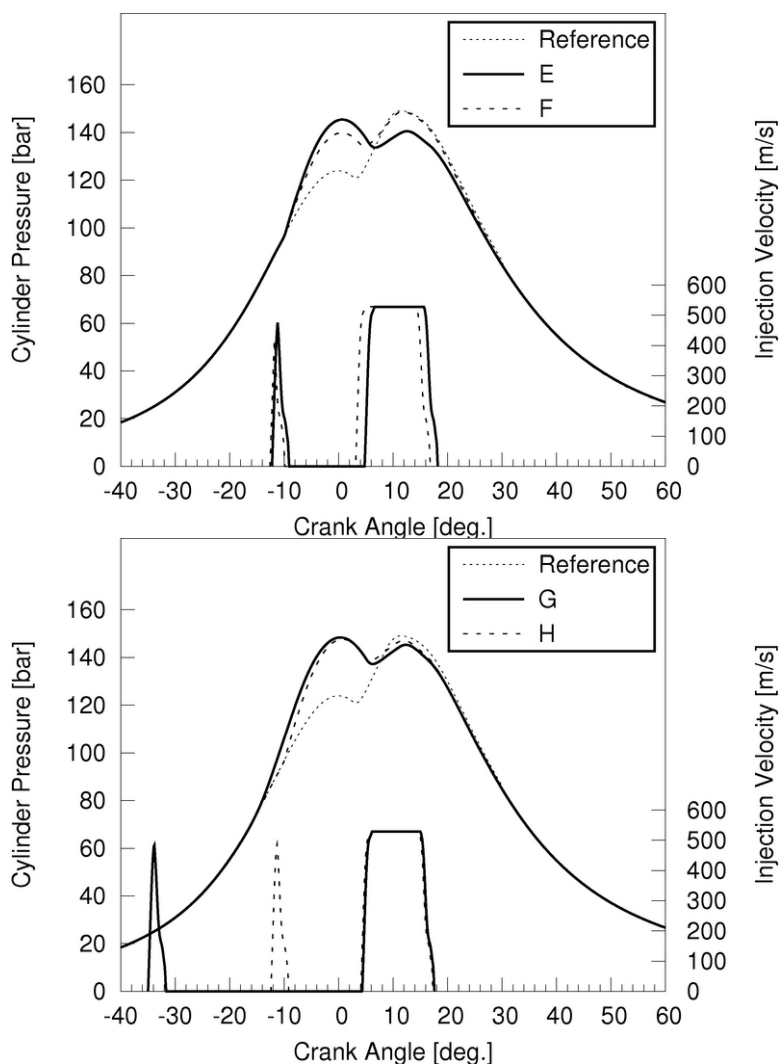
Πίνακας 5-3: Παράμετροι έγχυσης, κανονικοποιημένες τιμές της συγκέντρωσης NO_x και SFOC, και μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου για τις περιπτώσεις E, F, G, H του Διάγραμμα 5.14, και για την περίπτωση αναφοράς.

	Ref.	E	F	G	H
Μεταβλητές Σχεδίασης					
SOP1 [° CA aTDC]	-	-12.2	-12.6	-35.0	-12.4
SOM1 [° CA aTDC]	2	4.8	3.1	4.3	4.1
PMF [% of total injected mass]	-	10.5	7.8	11.6	11.6
MR [%]	-	3.4	3.8	3.6	3.7
Στόχοι					
NO _x [%]	100	77.8	91.1	80.4	83.7
SFOC [%]	100	100.4	97.5	98.2	97.6
Πίεση Κυλίνδρου					
Max. Pressure [bar]	149.8	145.4	148.8	149.2	147.7

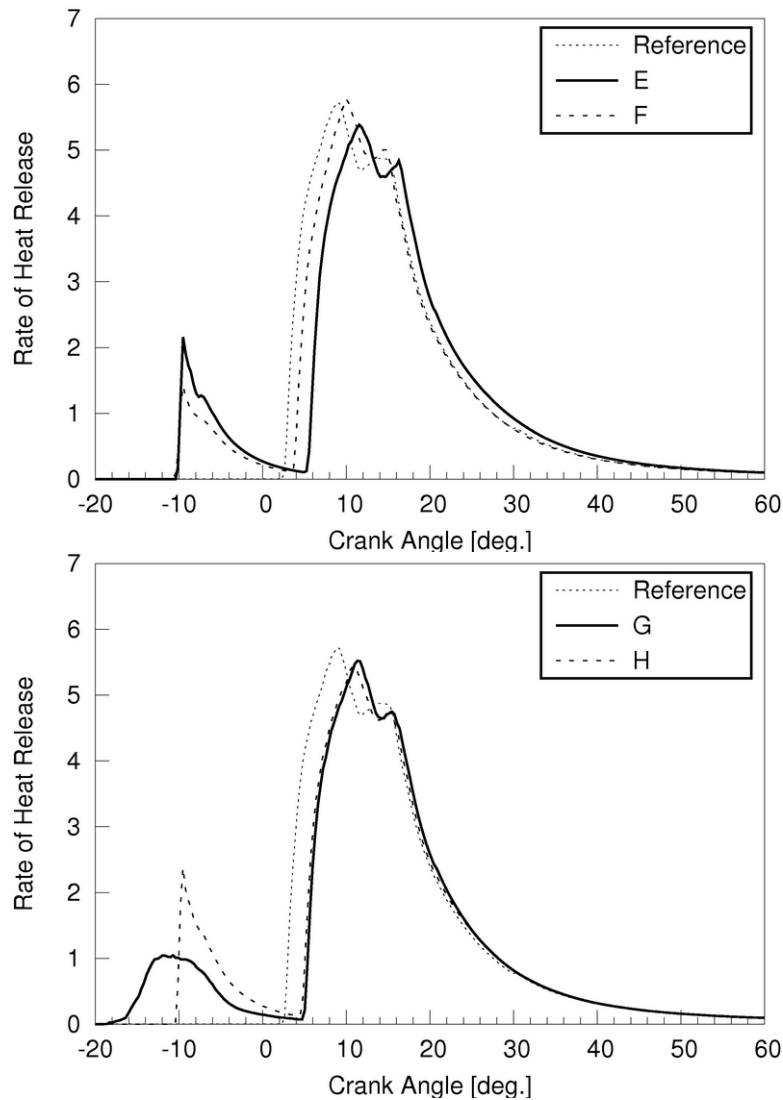
Από τον Πίνακα 5-3, προκύπτει ότι όπως και στο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, για να μειωθεί ο σχηματισμός NO_x, πρέπει να καθυστερήσει η έναρξη της κύριας έγχυσης. Ωστόσο, μία σημαντική διαφορά εδώ είναι ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, η έναρξη της προέγχυσης προκύπτει περί τις -12° (με εξαίρεση την περίπτωση G που είναι παρόμοια με την περίπτωση C του προβλήματος χωρίς

περιορισμούς). Επίσης, για να διατηρηθεί η πίεση κάτω από τα 150 bar, το ποσοστό του καυσίμου που προεγχύθηκε μειώθηκε σε 8%-12% (ενώ στο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς ήταν εγγύς του 15%). Αναφορικά με το ωφέλιμο έργο, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, υπολογίστηκε μείωση 3.8% για την περίπτωση E, ενώ για τις περιπτώσεις F,G και H υπολογίστηκαν μειώσεις της τάξεως του 1.5%.

Οι υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης για τις περιπτώσεις E, F, G, H, καθώς και τα αντίστοιχα προφίλ έγχυσης φαίνονται στο Διάγραμμα 5.15, ενώ οι καμπύλες του ρυθμού έκλυσης θερμότητας φαίνονται στο Διάγραμμα 5.16.



Διάγραμμα 5.15: Πρόβλημα με περιορισμό στη μέγιστη πίεση: προφίλ έγχυσης με προέγχυση και υπολογισθείσες καμπύλες πίεσης για τις περιπτώσεις E, F, G, H, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.



Διάγραμμα 5.16: Πρόβλημα με περιορισμό στη μέγιστη πίεση: υπολογισθείσες καμπύλες ρυθμού έκλυσης θερμότητας για τις περιπτώσεις E, F, G, H και για την περίπτωση αναφοράς.

Οι διεργασίες καύσης, όπως αποτυπώνονται στα διαγράμματα πίεσης και ρυθμού έκλυσης θερμότητας, είναι όμοιες με αυτές των αντίστοιχων περιπτώσεων στο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, και αρκετά διαφορετικές σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Είναι ενδιαφέρον, ότι, δεδομένου του περιορισμού στη μέγιστη πίεση, ο εξελικτικός αλγόριθμος συνέκλινε σε διαφορετική στρατηγική, χαρακτηριζόμενη από καθυστερημένη έναρξη της προέγχισης, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μείωση των NO_x και της ειδική κατανάλωσης.

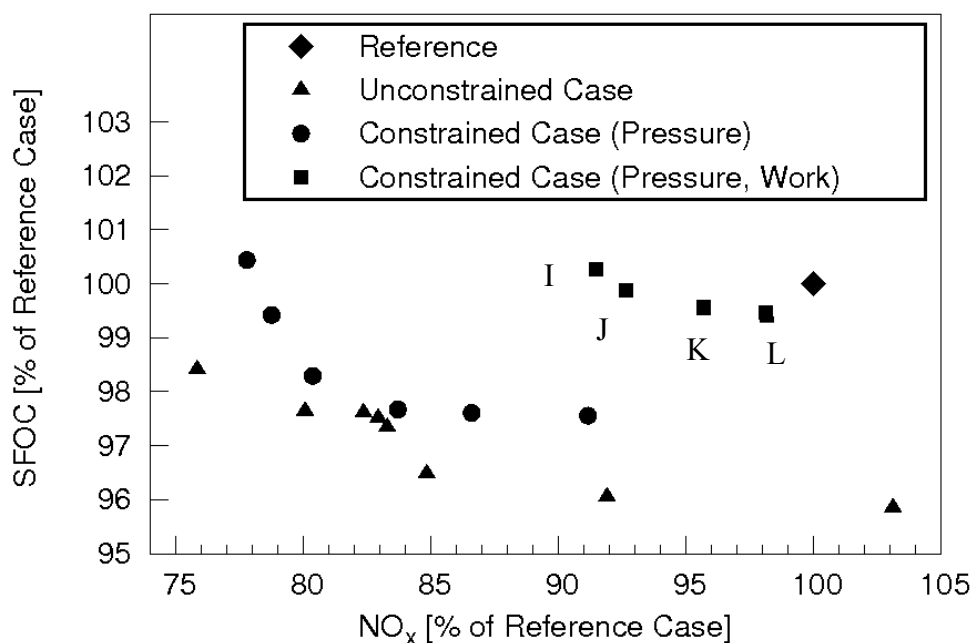
Σημειώνουμε ότι η περίπτωση H εμφανίζεται ως η πλέον κατάλληλη για εφαρμογές αφού η μείωση των αντίστοιχων NO_x είναι 16.3% (ικανοποιώντας τις απαιτήσεις των κανονισμών για το 2011), ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται ένα σημαντικό κέρδος της τάξεως του 2.4% στην οικονομία καυσίμου. Είναι ενδιαφέρον ότι οι μειώσεις αυτές είναι της ίδιας τάξης μεγέθους που επιτεύχθηκαν με εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών σε μεγάλους κινητήρες Diesel [10-11].

5.5 Αποτελέσματα Προβλήματος με Περιορισμούς στη Μέγιστη Πίεση και στο Ωφέλιμο Έργο

Προκειμένου να διασφαλίσουμε ότι το ωφέλιμο έργο δεν υπολείπεται του αντίστοιχου της περίπτωσης αναφοράς, τοποθετήθηκε ένας σχετικός επιπλέον περιορισμός. Η εξελικτική διαδικασία κατέδειξε ότι ο περιορισμός αυτός είναι ο πλέον «σφιχτός». Αρχικά θέσαμε μέγιστες αποδεκτές αποκλίσεις στους περιορισμούς μεγέθους 1%, όπως κάναμε και στο προηγούμενο πρόβλημα. Μετά την πρώτη γενιά, κανένα άτομο δεν ικανοποιούσε τα «χαλαρά» όρια των περιορισμών, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να σχηματιστεί σύνολο γονέων, και κατ' επέκταση η επόμενη γενιά. Ο εξελικτικός αλγόριθμος σταμάτησε. Σε τέτοιες περιπτώσεις, δύο διορθωτικές ενέργειες μπορούν να επιλεγούν, ώστε ο αλγόριθμος να μην τερματίζει:

- Αύξηση του αριθμού των μελών του πληθυσμού. Μεγαλύτερος πληθυσμός αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη πιθανότητα επιβίωσης και εξέλιξης κάποιων ατόμων.
- Περαιτέρω διεύρυνση των «χαλαρών» ορίων των περιορισμών. Έτσι, μερικά από τα μη αποδεκτά (πριν) άτομα μπορούν να εξελιχθούν.

Εμείς επιλέξαμε τη δεύτερη λύση. Προφανώς ο συνδυασμός των δύο προτάσεων είναι δυνατός. Σημειώνουμε ότι οι δύο λύσεις ενισχύουν σημαντικά την εξερεύνηση (exploration) σε σχέση με την εκμετάλλευση (exploitation).



Διάγραμμα 5.17: Τελικά μέτωπα Pareto (κανονικοποιημένες τιμές συγκέντρωσης NO_x και SFOC) για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, για το πρόβλημα με περιορισμό στην πίεση, και για το πρόβλημα με περιορισμό στην πίεση και το έργο.

Τα τελικά αποτελέσματα της παρούσας βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.17. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 5.17, όταν επιβάλλεται και ο περιορισμός του έργου, οι λύσεις είναι κατά πολύ χειρότερες, και συνολικά το

μέτωπο Pareto πολύ συρρικνωμένο. Συγκεντρωτικά, οι παράμετροι του προφίλ εγχύσεως (μεταβλητές σχεδίασης), οι στόχοι καθώς και η μέγιστη πίεση για τις περιπτώσεις I, J, K, L παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4.

Πίνακας 5-4: Παράμετροι έγχυσης, κανονικοποιημένες τιμές της συγκέντρωσης NO_x, και SFOC, και μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου για τις περιπτώσεις I, J, K, L του Διάγραμμα 5.17, και για την περίπτωση αναφοράς.

	Ref.	I	J	K	L
Μεταβλητές Σχεδίασης					
SOPI [° CA aTDC]	-	-34.9	-24.2	-12.7	-28.8
SOMI [° CA aTDC]	2	3.3	3.8	3.3	2.5
PMF [% of total injected mass]	-	5.9	10.9	3.7	10.8
MR [%]	-	0.2	0.3	0.2	1
Στόχοι					
NO _x [%]	100	91.5	92.7	95.7	98.1
SFOC [%]	100	100.3	99.9	99.6	99.5
Πίεση Κυλίνδρου					
Max. Pressure [bar]	149.8	146.7	149.2	149.5	149.7

Σε σύγκριση με τα άλλα δύο προβλήματα, παρατηρούμε ότι, για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός του έργου, τα περισσότερα μέλη του μετώπου Pareto έχουν μέγιστη πίεση πολύ κοντά στον περιορισμό της μέγιστης πίεσης. Επιπλέον, για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός του έργου, η μεταβλητή MR (ποσοστιαία μείωση της συνολικής μάζας καυσίμου) έχει ελαττωθεί κατά μία τάξη μεγέθους. Επειδή το έργο παραμένει ίδιο, η σχετική μείωση της ειδικής κατανάλωσης είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με τα άλλα δύο προβλήματα. Επιπρόσθετα, η σχετική μείωση στα NO_x είναι το πολύ 8.5%, σαφώς μικρότερη, σε σχέση με τα προηγούμενα προβλήματα. Αυτό συμβαίνει επειδή η κύρια έγχυση αρχίζει νωρίτερα, σε σχέση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις των άλλων δύο προβλημάτων. Το τελευταίο έχει ως επακόλουθο να αυξηθεί η πίεση λίγο μετά το Άνω Νεκρό Σημείο, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται το ίδιο ωφέλιμο έργο με την περίπτωση αναφοράς.

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε, με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και Εξελικτικών Αλγορίθμων, η επίδραση εναλλακτικών στρατηγικών έγχυσης στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) και αιθάλης (soot), καθώς και στον βαθμό απόδοσης δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel, στην περιοχή του πλήρους φορτίου. Μία πρώτη προσπάθεια μείωσης των εκπεμπόμενων ρύπων έγινε με εισαγωγή προέγχυσης από τους Kontoulis et. al [12-14]. Εκεί, οι μεταβλητές του προβλήματος περιέλαβαν τον χρόνο έναρξης και τη διάρκεια της προέγχυσης, και μελετήθηκε η επίδρασή τους στον βαθμό απόδοσης του κινητήρα, στις εκπομπές ρύπων, στη μέγιστη πίεση στον κύλινδρο, καθώς και στα επίπεδα των θερμικών φορτίων του κινητήρα, ενώ για τη λεπτομερή κατανόηση των διεργασιών χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία οπτικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων.

Χρησιμοποιώντας την αποκτηθείσα γνώση από την παραπάνω έρευνα, έγινε στην παρούσα εργασία μία συστηματικότερη προσπάθεια βελτίωσης της λειτουργίας του κινητήρα, με χρήση Εξελικτικών Αλγορίθμων σε σύζευξη με τον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3. Έτσι, κατέστη εφικτή η αύξηση του αριθμού των μεταβλητών σχεδίασης (παραμέτρων έγχυσης), αλλά και του εύρους διακύμανσης των τιμών τους. Εδώ, οι μεταβλητές σχεδίασης, περιέλαβαν, επιπλέον των παραμέτρων ελέγχου της προέγχυσης, τον χρόνο έναρξης της κύριας έγχυσης, καθώς και τη συνολική μάζα του εγχυόμενου καυσίμου.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώθηκε ως πολυκριτηριακό (με κριτήρια την τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου και τον βαθμό απόδοσης), και οι βέλτιστες λύσεις δόθηκαν από τον Εξελικτικό Αλγόριθμο με τη μορφή μετώπου Pareto. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε σε πρώτη φάση χωρίς επιβολή περιορισμών, ενώ σε δεύτερη φάση επιβλήθηκε περιορισμός στη μέγιστη πίεση στον κύλινδρο, η οποία υπαγορεύεται από κατασκευαστικούς λόγους. Τέλος, σε τρίτη φάση, προστέθηκε ο περιορισμός του ωφέλιμου έργου, ώστε όλες οι λύσεις να μην υπολείπονται σε ωφέλιμο έργο, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς.

Επειδή το πρόβλημα είναι πολύ απαιτητικό σε υπολογιστικό κόστος, ρυθμίστηκε κατάλληλα μία συστοιχία υπολογιστών (Cluster) με 80 πυρήνες, και αξιολογήθηκαν συνολικά περί τις 1000 πιθανές λύσεις (προφίλ έγχυσης) για κάθε πρόβλημα, σε αποδεκτό χρονικό διάστημα.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης συνέκλινε, στις περιπτώσεις χωρίς περιορισμό στο έργο, σε δύο εναλλακτικές στρατηγικές, με χαρακτηριστικό τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά περίπου 15%, και την ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού απόδοσης, τάξης 2%:

1. Προέγχυση ποσότητας καυσίμου περίπου 10%-15% της συνολικής, σε γωνία στροφάλου περί τις 30° πριν το Άνω Νεκρό Σημείο. Η καθυστέρηση έναυσης για το καύσιμο της προέγχυσης είναι αρκετά μεγάλη, ώστε η καύση του να λαμβάνει χώρα με φλόγα προανάμιξης. Η μεθοδολογία παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι μία ποσότητα καυσίμου προσκρούει στα τοιχώματα του κυλίνδρου, και δημιουργεί υγρές επικαθήσεις, με αποτέλεσμα την αύξηση των θερμικών φορτίων.

2. Προέγχυση μίας ποσότητας 8-11% του καυσίμου, σε γωνία στροφάλου περί τις 10° πριν το Άνω Νεκρό Σημείο. Στην περίπτωση αυτή, η καθυστέρηση έγχυσης ελαχιστοποιείται, και η καύση του καυσίμου της προέγχυσης πραγματοποιείται με φλόγα διάχυσης.

Επιπρόσθετα, προέκυψε ότι, όταν επιβάλλονται και οι δύο περιορισμοί (μέγιστη πίεση και ωφέλιμο έργο), οι βέλτιστες λύσεις είναι πολύ λιγότερο βελτιωμένες, συγκρινόμενες με αυτές των άλλων δύο προβλημάτων. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι χρειάζεται να θυσιαστεί περίπου 1%-2% ωφέλιμο έργο, ώστε να επιτευχθεί σημαντική μείωση στις εκπομπές των ρύπων και παράλληλα να μειωθεί η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Με βάση τα παρόντα αποτελέσματα, η εφαρμογή των παραπάνω στρατηγικών έγχυσης ικανοποιεί τους κανονισμούς για τους εκπεμπόμενους ρύπους από τα πλοία, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Η συνολική μείωση κατά 15% στις εκπομπές NO_x στην περιοχή του πλήρους φορτίου είναι σημαντική, ωστόσο είναι επιθυμητό να εξαχθούν συμπεράσματα για τις εκπομπές ρύπων σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα, δηλαδή να εκτιμηθεί ο βαθμός στον οποίο παρόμοιες στρατηγικές έγχυσης καυσίμου έχουν θετικές επιπτώσεις σε διαφορετικά φορτία. Σημειώνουμε, επίσης, ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου στην πράξη βαρέος καυσίμου είναι διαφορετικές σε σχέση με το καύσιμο που χρησιμοποιούμε στις προσομοιώσεις, με πιθανές επιπτώσεις στα συμπεράσματα που εδώ εξήχθηκαν. Τέλος, υπενθυμίζουμε ότι, στην παρούσα εργασία, η τελική συγκέντρωση σωματιδίων αιθάλης δεν χρησιμοποιήθηκε ως στόχος βελτιστοποίησης.

Με βάση τα παραπάνω, αναδεικνύεται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των παραμέτρων έγχυσης σε μερικό φορτίο, όπου οι συνθήκες λειτουργίας (πίεση, θερμοκρασία) είναι πολύ διαφορετικές. Εν προκειμένω, η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης μπορεί να αποτελέσει τον τρίτο στόχο του προβλήματος βελτιστοποίησης, ενόψει και των αναμενόμενων νέων κανονισμών. Επιπρόσθετα, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να επιλυθεί, με εισαγωγή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ναυτικού καυσίμου, το οποίο χρησιμοποιείται στην πράξη. Τέλος, οι μεταβλητές σχεδίασης μπορούν να περιλάβουν περαιτέρω δυνατότητες του συστήματος έγχυσης κοινού συλλέκτη, όπως η διαφοροποίηση του προφίλ έγχυσης μεταξύ των εγχυτήρων στον ίδιο κύλινδρο.

Πηγές

1. European Commission Directorate General Environment, "Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments", August 2005
2. International Maritime Organization, "MARPOL 73/78 Annex VI: Prevention of Air Pollution from Ships", August 2004
3. Κυρτάτος, Ν. Π., "Ναυτικοί Κινητήρες Diesel – Θέματα Σχεδίασης και Λειτουργίας", Εκδόσεις Συμμετρία, 1993
4. Lloyds Register, "Marine Exhaust Emission Research Programme, Phase II Summary Report", 1992
5. Chryssakis, C.A., Hagen, J.R., Knafl, A., Hamosfakidis, V., Filipi, Z.S., Assanis, D.N., "In-Cylinder Reduction of PM and NOX Emissions from Diesel Combustion with Advanced Injection Strategies", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 41, No. 1-4, pp. 83-102, 2006
6. Benajes, J., Molina, S., Garcia, J.M, "Influence of Pre- and Post-Injection on the Performance and Pollutant Emissions in a HD Diesel Engine", SAE Technical Paper Series 2001-01-0526, 2001
7. Ishikawa, N., Uekusa, T., Nakada, T., Hariyoshi, R. "DI Diesel Emission Control by Optimized Fuel Injection", SAE Technical Paper Series 2004-01-0117, 2004
8. Payri, F., Benajes, J., Pastor, J.V., Molina, S. "Influence of the Post-Injection Pattern on Performance, Soot and NOx emissions in a HD Diesel Engine", SAE Technical Paper Series 2002-01-0502, 2002
9. Garcia, J.M., Molina, S.A., Benajes J., "Influence of Pre - and Post - Injection on the Performance and Pollutant Emissions in a HD Diesel Engine", SAE Technical Paper Series 2001-01-0526, 2001
10. Yoon, W.H., Kim, B.S., Kim, K.D., Lee, Y.S., Ghal. S.H., "Optimization of Piston Bowl Shape, Fuel Injection Nozzle and Fuel Injection Rate for the Reduction of NO_x Emissions in a Medium-Speed Diesel Engine", COMODIA 2008, Sapporo, Japan, July 2008
11. Struckmeier, D., Tsuru, D., Kawauchi, S., Shinnosuke O., Tajima, H., "Visualization of the PCCI Combustion of Light Cycle Oil (LCO) in Diesel Engines", COMODIA 2008, Sapporo, Japan, July 2008
12. Kontoulis, P., Chryssakis, C., Kaiktsis, L., "Analysis of Combustion and Emissions in a Large Two-Stroke Marine Diesel Engine, Using CFD and T-φ Mapping", 18th Int. Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting at the SAE Congress, Detroit, MI, April 13, 2008
13. 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
14. Κοντούλης, Ι.Π., "Υπολογιστική Μελέτη Εναλλακτικών Στρατηγικών Έγχυσης σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel", Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2008
15. Liu, Y., Reitz, R.D., "Optimizing HSDI Diesel Combustion and Emissions Using Multiple Injection Strategies", SAE Technical Paper Series 2005-01-0212, 2005

16. Senecal, P.K., Reitz, R.D., “Simultaneous Reductions of Engine Emissions and Fuel Consumption Using Evolutionary Algorithms and Multi-Dimensional Spray and Combustion Modeling”, SAE Technical Paper Series 2000-01-1890, 2000
17. Tanner, F.X., Srinivasan, S., “Optimization of an Asynchronous Fuel Injection System in Diesel Engines by Means of a Micro-Evolutionary Algorithm and an Adaptive Gradient Method”, SAE Technical Paper Series 2008-01-0925, 2008
18. Hiroyasu, T., Miki, M., Kamiura, J., Watanabe, S., Hiroyasu, H., “Multi-Objective Optimization of Diesel Engine Emissions and Fuel Economy using Genetic Algorithms and Phenomenological Model”, SAE Technical Paper Series 2002-01-2778, 2002
19. Shi, Y., Reitz, R.D., “Assessment of Optimization Methodologies to Study the Effects of Bowl Geometry, Spray Targeting and Swirl Ratio for a Heavy-Duty Diesel Engine Operated at High-Load”, SAE Technical Paper Series 2008-01-0949, 2008
20. Kamimoto, T., Bae, M., “High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines”, SAE Technical Paper Series 880423, 1988
21. Bergman, M., Golovitchev, V.I., “Application of Transient Temperature vs. Equivalence Ratio Emission Maps to Engine Simulations”, SAE Technical Paper Series 2007-01-1086, 2007
22. Mazevski, W., Khair, M., “Diesel Emissions and Their Control”, SAE International, 2006
23. Wartsila Switzerland Ltd, “The Sulzer RT–flex Common Rail System Described”, Wartsila paper, 2004
24. Kaiktsis, L., “Numerical Simulation of Flow and Combustion in the RTA58T Engine of Wartsila NSD”, Technical Report, 2001
25. Κοτρογιάννης, Ν.Α., “ Αριθμητική Προσομοίωση Φαινομένων Ροής και Καύσης σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2006
26. Amsden, A.A., O’Rourke P.J., Butler T.D., “KIVA II – A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays”, Los Alamos National Laboratory LA-11560-MS, 1989
27. Amsden, A.A., “KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries”, Los Alamos National Laboratory LA-12503-MS, 1993
28. Tanner, F.X., “Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays”, SAE Technical Paper Series 970050, 1997
29. Tanner, F.X., Weisser, G., “Simulation of Liquid Jet Atomization for Fuel Sprays by Means of a Cascade Drop Breakup Model“, SAE Technical Paper Series 980808, 1998
30. Weisser, G., Tanner, F., Boulouchos, K., “Modeling of Ignition and Early Flame Development with Respect to Large Diesel Engine Simulation”, SAE Technical Paper Series 981451, 1998
31. Weisser G., “Modelling of Combustion and Nitric Oxide Formation for Medium-Speed DI Diesel Engines: a Comparative Evaluation of Zero- and Three-Dimensional Approaches”, Ph.D., Thesis, ETH Zurich, Switzerland, 2001
32. Chong, E., Zak, S., “An Introduction to Optimization”, John Wiley & Sons, 2001
33. Tan, K.C., Khor, E.F., Lee, T.H., “Multiobjective Evolutionary Algorithms and Applications”, Springer Verlag, London, 2005
34. Thevenin, D., Janiga, G., “Optimization and Computational Fluid Dynamics”, Springer Verlag, Berlin, 2008

35. Cantu-Paz, E., "A Survey of Parallel Genetic Algorithms.", *Calculateurs Paralleles*, 10(2), 1998
36. Coello, C. A., "Handling Preferences in Evolutionary Multiobjective Optimization: A Survey", 2000 Congress on Evolutionary Computation, volume 1, pages 30–37, 2000
37. Fonseca, C.M, and Fleming, P.J., "An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization", *Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-16, 1995
38. Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L., "SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization", *Evolutionary Methods for Design, Optimization, and Control*, Barcelona, Spain 2002
39. <http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/EASY/>
40. Karakasis, M., Giannakoglou, K.C., "On the Use of Metamodel-Assisted Multi-Objective Evolutionary Algorithms", *Engineering Optimization*, Vol. 38(8), pp. 941-957, 2006
41. Kampolis, I.C., Giannakoglou, K.C., "A Multilevel Approach to Single- and Multi-Objective Aerodynamic Optimization", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197, pp. 2963-2975, 2008
42. Kitamura, T., Ito, T., Senda, J., Fujimoto, H., "Mechanism of Smokeless Diesel Combustion with Oxygenated Fuels Based on the Dependency of the Equivalence Ratio and Temperature on Soot Particles Information", *International Journal of Engine Research*, Vol. 3, No 4, pp. 223-247, 2002