



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βασίλειος Ι. Στρατσιαάνης**

**Διερεύνηση και βελτιστοποίηση μετέγχυσης καυσίμου  
σε δίχρονους ναυτικούς κινητήρες Diesel**

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων: Καϊκτσής Λ., Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη: Κυρτάτος Ν., Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φραγκόπουλος Χ., Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2014**



## **Ευχαριστίες**

Με τη διπλωματική μου εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.). Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου που με στηρίζουν και συμβουλεύουν όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Καϊκτσή Λ. και τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Κοντούλη Π. για την καθοδήγηση και βοήθεια που μου προσέφεραν στο πλαίσιο της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κυρτάτο Ν. και τον Καθηγητή κ. Φραγκόπουλο Χ. ως διδάσκοντες και μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας.



## Σύνοψη

Οι εκπομπές ρύπων αποτελούν ένα φλέγον ζήτημα στις μέρες μας, λόγω των σοβαρών επιδράσεων που αυτοί έχουν στο περιβάλλον, αλλά κυρίως στην ανθρώπινη υγεία. Για αυτόν τον λόγο, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν θεσπιστεί διάφοροι κανονισμοί μείωσης των ρύπων, οι οποίοι έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη βιομηχανία, και ειδικότερα στον τομέα των μεταφορών. Στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών, το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών ρύπων προέρχεται από τις μηχανές πρόωσης των πλοίων, όπως είναι οι κινητήρες Diesel. Οι κύριοι ρύποι των κινητήρων Diesel είναι το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξειδία του αζώτου (NOx) και του θείου (SOx) και, τέλος, τα σωματίδια αιθάλης (soot).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται υπολογιστικά αποτελέσματα που αφορούν στη μελέτη και βελτιστοποίηση της λειτουργίας δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel για προφίλ έγχυσης καυσίμου με παρουσία μετέγχυσης. Συγκεκριμένα, η μελέτη γίνεται για τον δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel RT-flex58T της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland, σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Το προφίλ έγχυσης με μετέγχυση αποτελείται από δύο παλμούς (κύρια έγχυση και μετέγχυση), και χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων αιθάλης, ενώ παράλληλα επιδιώχθηκε η ελαχιστοποίηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Για αυτόν τον σκοπό, έγινε χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3, ο οποίος χρησιμοποιείται για την αριθμητική προσομοίωση της ροής και καύσης σε εφαρμογές μηχανών εσωτερικής καύσης.

Αρχικά, το προφίλ έγχυσης παραμετροποιήθηκε ως προς τις ακόλουθες παραμέτρους: (α) την έναρξη της κύριας έγχυσης (Start Of Main Injection - SOMI), (β) το μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP), (γ) το ποσοστό μάζας του καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση επί του συνολικά εγχυόμενου (Post Mass Fraction - PoMF) και (δ) την ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της εγχυόμενης μάζας καυσίμου της περίπτωσης αναφοράς (η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχές προφίλ έγχυσης) και αυτής στην περίπτωση με μετέγχυση (Mass Reduction - MR). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εκτενής παραμετρική ανάλυση, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων σχεδίασης του προφίλ έγχυσης στις εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης, καθώς και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης των παραπάνω παραμέτρων, οι οποίες περιγράφουν το συνολικό προφίλ έγχυσης με παρουσία μετέγχυσης.

Για τη βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης καυσίμου με παρουσία μετέγχυσης, πραγματοποιήθηκε σύζευξη του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με τον κώδικα βελτιστοποίησης EASY, ο οποίος είναι βασισμένος σε εξελκτικούς αλγορίθμους. Το παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί πρόβλημα πολλαπλών στόχων (Multi-Objective Optimization - MOO). Εδώ, στόχος είναι η συστηματική ανίχνευση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών σχεδίασης του προφίλ έγχυσης με μετέγχυση, ώστε να ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων αιθάλης, καθώς και η ειδική

κατανάλωση καυσίμου. Το τελικό σύνολο των βέλτιστων λύσεων συνθέτει το μέτωπο Pareto.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή στρατηγικών έγχυσης με μετέγχυση συνιστά ένα χρήσιμο μέτρο για τη μείωση των εκπομπών ρύπων ενός δίχρονου ναυτικού κινήτηρα Diesel. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται ταυτόχρονη μείωση τόσο των οξειδίων του αζώτου, όσο και των σωματιδίων αιθάλης, χωρίς μεταβολή στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και στο ωφέλιμο έργο.

Για την κατά το δυνατό πλήρη κατανόηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων, γίνεται εκτενής χρήση οπτικοποίησης των υπολογισθέντων ροϊκών πεδίων, καθώς και χαρτών T - φ. Από την ανάλυση εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με την ανάμιξη αέρα-καυσίμου, καθώς και τη διεργασία της καύσης και την παραγωγή ρύπων.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	v
Σύνοψη.....	vii
Λίστα εικόνων.....	xi
Λίστα διαγραμμάτων.....	xii
Λίστα πινάκων.....	xvii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Ναυτιλία και ρύποι.....	1
1.2 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	2
2. Δίχρονος ναυτικός κινητήρας Diesel.....	5
2.1 Περιγραφή της λειτουργίας ενός δίχρονου κινητήρα.....	5
2.2 Σύστημα κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS).....	7
2.3 Σχηματισμός ρύπων.....	8
2.3.1 Γενικά.....	8
2.3.2 Οξείδια του αζώτου (NOx).....	9
2.3.3 Σωματίδια αιθάλης (soot).....	10
2.3.4 Επίδραση NOx και σωματιδίων αιθάλης στην ανθρώπινη υγεία.....	14
2.3.5 Κανονισμοί για τον περιορισμό αέριων ρύπων από τη ναυτιλία.....	15
2.3.6 Τεχνικές μείωσης των ρύπων.....	17
2.4 Μετέγχυση καυσίμου σε κινητήρες Diesel.....	19
3. Προσομοίωση κινητήρα και λογισμικό βελτιστοποίησης.....	23
3.1 KIVA-3 : Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	23
3.2 Χαρακτηριστικά κινητήρα.....	24
3.3 Περίπτωση αναφοράς.....	25
3.4 Θεωρία Βελτιστοποίησης.....	31
3.4.1 Μέθοδοι βελτιστοποίησης.....	31
3.4.2 Σύζευξη κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 και λογισμικού βελτιστοποίησης EASY.....	33
3.5 Χάρτες T-φ και οπτικοποίηση ροϊκών πεδίων.....	35
4. Παραμετρική ανάλυση μετέγχυσης καυσίμου σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα.....	37
4.1 Πρώτη παραμετρική ανάλυση.....	38
4.2 Δεύτερη παραμετρική ανάλυση.....	44
5. Βελτιστοποίηση προφίλ έγχυσης με μετέγχυση σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα.....	51
5.1 Διατύπωση των προβλημάτων βελτιστοποίησης.....	51
5.2 Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.....	54
5.2.1 Πρώτη περίπτωση (Σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης).....	54
5.2.2 Δεύτερη περίπτωση (Μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης).....	68
5.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων χωρίς περιορισμούς.....	83
5.3 Πρόβλημα με περιορισμούς.....	85
5.3.1 Πρώτη περίπτωση (Σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης).....	85
5.3.2 Δεύτερη περίπτωση (Μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης).....	99

5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με περιορισμούς .....	113
5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	115
5.4.1 Προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με και χωρίς περιορισμούς	115
5.4.2 Προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με και χωρίς περιορισμούς (σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης) .....	117
5.4.3 Προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με και χωρίς περιορισμούς (μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης) .....	135
6. Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	153
Βιβλιογραφία .....	155



## Λίστα εικόνων

Εικόνα 1 : Σχηματική παράσταση των φάσεων του κύκλου λειτουργίας δίχρονου κινητήρα Diesel (5)..6	
Εικόνα 2 : Φάσεις λειτουργίας αργόστροφου δίχρονου κινητήρα Diesel, συναρτήσει της γωνίας στροφάλου (6).....6	
Εικόνα 3: Διάταξη του συστήματος κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS) (7).....7	
Εικόνα 4: Σχηματισμός αρωματικών υδρογονανθράκων με δύο δακτυλίους (23).....12	
Εικόνα 5: Συσσωματώσεις σωματιδίων αιθάλης (aggregates) σε φλόγα διάχυσης (23). ....13	
Εικόνα 6 : Ορισμός γωνιών έγχυσης α και β. ....24	
Εικόνα 7 : Μέτωπο Pareto για πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων (49).....33	
Εικόνα 8 : Διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας (1). ....34	
Εικόνα 9: Στατικός χάρτης T – φ, για πίεση 60 bar και χρόνο ολοκλήρωσης 2 ms (53).....35	
Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση προφίλ έγχυσης καυσίμου με κύρια έγχυση και μετέγχυση, στο οποίο σημειώνονται οι μεταβλητές σχεδίασης των προβλημάτων βελτιστοποίησης: (I) έναρξη της κύριας έγχυσης (Start Of Main Injection - SOMI), (II) ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της εγχυόμενης μάζας καυσίμου της περίπτωσης αναφοράς και της συγκεκριμένης περίπτωσης (Mass Reduction - MR), (III) μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP), και (IV) ποσοστό μάζας καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση σε σχέση με το συνολικά εγχυόμενου (Post Mass Fraction - PoMF). ....52	
Εικόνα 11: Περίπτωση 1 (Case 1): Χάρτες T-φ και ισοϋψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για διάφορες τιμές της γωνίας στροφάλου.....67	
Εικόνα 12: Περίπτωση 2 (Case 2): Χάρτες T-φ και ισοϋψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για διάφορες τιμές της γωνίας στροφάλου.....82	
Εικόνα 13: Περίπτωση 3 (Case 3): Χάρτες T-φ και ισοϋψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για διάφορες γωνίες στροφάλου.....98	
Εικόνα 14: Περίπτωση 4 (Case 4): Χάρτες T-φ και ισοϋψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για διάφορες γωνίες στροφάλου.....112	
Εικόνα 15: Χάρτες T-φ των περιπτώσεων 1 και 3, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς.....122	
Εικόνα 16: Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 1 και 3, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.....126	
Εικόνα 17: Ισοϋψείς καμπύλες της συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 1 και 3, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.....130	
Εικόνα 18: Ισοϋψείς καμπύλες της πυκνότητας σωματιδίων αιθάλης στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 1 και 3, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.....134	
Εικόνα 19: Χάρτες T-φ των περιπτώσεων 2 και 4, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς.....140	
Εικόνα 20: Ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 2 και 4, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.....144	
Εικόνα 21: Ισοϋψείς καμπύλες της συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 2 και 4, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.....148	
Εικόνα 22: Ισοϋψείς καμπύλες της πυκνότητας σωματιδίων αιθάλης στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 2 και 4, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.....152	

## Λίστα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Αδιαστατοποιημένο προφίλ εγχύσεως καυσίμου στην περίπτωση αναφοράς.....	25
Διάγραμμα 2: Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλη πίεσης σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για την περίπτωση αναφοράς.....	27
Διάγραμμα 3: Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλη ρυθμού έκλυσης θερμότητας σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για την περίπτωση αναφοράς.....	28
Διάγραμμα 4: Υπολογισθείσα συγκέντρωση NOx σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου και μετρηθείσα τελική συγκέντρωση, για την περίπτωση αναφοράς.....	29
Διάγραμμα 5: Προφίλ έγχυσης για διάφορες τιμές της έναρξης της μετέγχυσης (20° - 40° CA), για σταθερό ποσοστό μετεγχυόμενης μάζας, PoMF = 10%. Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.....	39
Διάγραμμα 6: Προφίλ έγχυσης για σταθερή τιμή της έναρξης μετέγχυσης (40° CA), και μεταβαλλόμενο ποσοστό μετεγχυόμενης μάζας (5% - 15%). Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.....	39
Διάγραμμα 7: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών του παραγόμενου έργου ως ποσοστό αυτού της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και SoPol.....	40
Διάγραμμα 8: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ως ποσοστό αυτής της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και SoPol.....	41
Διάγραμμα 9: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών των τελικών συγκεντρώσεων οξειδίων του αζώτου ως ποσοστό της αντίστοιχης της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και SoPol.....	42
Διάγραμμα 10: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών των τελικών συγκεντρώσεων σωματιδίων αιθάλης ως ποσοστό της αντίστοιχης της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και SoPol.....	42
Διάγραμμα 11: Προφίλ έγχυσης για διάφορες τιμές του μεσοδιαστήματος μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (1° - 5° CA), για σταθερό ποσοστό μετεγχυόμενης μάζας, PoMF = 25%. Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.....	45
Διάγραμμα 12: Προφίλ έγχυσης για σταθερή τιμή του μεσοδιαστήματος μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (4° CA), και μεταβαλλόμενο ποσοστό μετεγχυόμενης μάζας (5% - 25%). Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.....	45
Διάγραμμα 13: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών του ωφέλιμου έργου ως ποσοστό αυτού της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP.....	46
Διάγραμμα 14: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ως ποσοστό αυτής της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP.....	47
Διάγραμμα 15: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών των τελικών συγκεντρώσεων οξειδίων του αζώτου ως ποσοστό της αντίστοιχης της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP.....	48
Διάγραμμα 16: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών των τελικών συγκεντρώσεων της αιθάλης ως ποσοστό αντίστοιχης της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP.....	49
Διάγραμμα 17: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 13), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 1 και 5, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση	

1 (Case 1) με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς. ....	55
Διάγραμμα 18: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 13), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 1 και 5, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 1 (Case 1) με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς. ....	56
Διάγραμμα 19: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Τα διαγράμματα της πρώτης σειράς απεικονίζουν την επίδραση του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP) στην ειδική κατανάλωση (SFOC), τις τελικές εκπομπές NO <sub>x</sub> , τις τελικές εκπομπές αιθάλης (soot), του ωφέλιμου παραγόμενου έργου και του ποσοστού της συνολικά εγχυόμενης μάζας του καυσίμου σε σχέση με αυτή της κατάστασης αναφοράς (100-MR). Τα διαγράμματα της δεύτερης σειράς απεικονίζουν αντίστοιχα την επίδραση του ποσοστού (επί του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου) του καυσίμου που εγχύεται κατά τη μετέγχυση. Οι στόχοι, το παραγόμενο έργο και η ποσοστιαία μείωση της εγχυόμενης μάζας έχουν κανονικοποιηθεί με τις αντίστοιχες τιμές της περίπτωσης αναφοράς. ....	57
Διάγραμμα 20: Προφίλ έγχυσης καυσίμου της περίπτωσης 1 (Case 1) και της περίπτωσης αναφοράς. ....	58
Διάγραμμα 21: Χρονική ιστορία της πίεσης για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	60
Διάγραμμα 22: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	60
Διάγραμμα 23: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	61
Διάγραμμα 24: Μεταβολή της εντροπίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	61
Διάγραμμα 25: Διάγραμμα T – s: Μεταβολή της μέσης χωρικά αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας συναρτήσει της εντροπίας, για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). ....	62
Διάγραμμα 26: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NO <sub>x</sub> συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	62
Διάγραμμα 27: Μεταβολή της μάζας σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	63
Διάγραμμα 28: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 10), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NO <sub>x</sub> ) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 0 και 4, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 2 (Case 2), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς. ....	68
Διάγραμμα 29: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 10), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (Soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 0 και 4, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 2 (Case 2), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς. ....	69
Διάγραμμα 30: Μεταβολή του ωφέλιμου έργου σε συνάρτηση με τις τελικές εκπομπές NO <sub>x</sub> , ως ποσοστά των αντίστοιχων τιμών της περίπτωσης αναφοράς, για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto. ....	71

Διάγραμμα 31: Μεταβολή των τελικών εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του ποσοστού του μετεγχυόμενου επί του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου (PoMF), ως ποσοστά των αντίστοιχων τιμών της περίπτωσης αναφοράς, για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto.....	71
Διάγραμμα 32: Μεταβολή της μέγιστης πίεσης συναρτήσει της αρχής της κύριας έγχυσης (SOMI) για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto. ....	72
Διάγραμμα 33: Προφίλ έγχυσης της περίπτωσης 2 (Case 2) και της περίπτωσης αναφοράς. ....	73
Διάγραμμα 34: Χρονική ιστορία της πίεσης για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	74
Διάγραμμα 35: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	75
Διάγραμμα 36: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	75
Διάγραμμα 37: Μεταβολή της εντροπίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	76
Διάγραμμα 38: Διάγραμμα T - s: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της εντροπίας εντός του κυλίνδρου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	76
Διάγραμμα 39: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NOx συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	77
Διάγραμμα 40: Μεταβολή της μάζας σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	77
Διάγραμμα 41: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI): Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, σημειώνονται η περίπτωση 1 (Case 1) και η περίπτωση 2 (Case 2). ....	83
Διάγραμμα 42: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI): Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, σημειώνονται η περίπτωση 1 (Case 1) και η περίπτωση 2 (Case 2). ....	84
Διάγραμμα 43: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 40), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 4 και 25, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 3 (Case 3), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς. ....	86
Διάγραμμα 44: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 40), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 4 και 25, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 3 (Case 3) με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς. ....	86
Διάγραμμα 45: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC) συναρτήσει της μεταβλητής GAP, για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto. Η ειδική κατανάλωση είναι εκφρασμένη ως ποσοστό της αντίστοιχης τιμής της περίπτωσης αναφοράς.....	87
Διάγραμμα 46: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης (SFOC) συναρτήσει του ποσοστού του μετεγχυόμενου καυσίμου (PoMF), για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto (γραμμική παρεμβολή). Η ειδική κατανάλωση είναι εκφρασμένη ως ποσοστό της αντίστοιχης τιμής της περίπτωσης αναφοράς. ....	88
Διάγραμμα 47: Προφίλ έγχυσης της περίπτωσης 3 (Case 3) και της περίπτωσης αναφοράς. ....	89

Διάγραμμα 48: Χρονική ιστορία της πίεσης, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	90
Διάγραμμα 49: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	91
Διάγραμμα 50: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	91
Διάγραμμα 51: Μεταβολή της εντροπίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	92
Διάγραμμα 52: Διάγραμμα T - s: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της εντροπίας, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). ....	92
Διάγραμμα 53: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NOx συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	93
Διάγραμμα 54: Μεταβολή της μάζας σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	93
Διάγραμμα 55: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 18), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις της γενιάς 8, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 4 (Case 4), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.....	99
Διάγραμμα 56: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 18), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις της γενιάς 8, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 4 (Case 4), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.....	100
Διάγραμμα 57: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για μεταβλητή παράμετρο SOMI: Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) συναρτήσει (α) του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP), και (β) του ποσοστού του καυσίμου της μετέγχυσης (PoMF), για λύσεις του μετώπου Pareto (Γενιά 18).....	101
Διάγραμμα 58: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για μεταβλητή παράμετρο SOMI: Τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) συναρτήσει (α) του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP), και (β) του ποσοστού του καυσίμου της μετέγχυσης (PoMF), για λύσεις του μετώπου Pareto (Γενιά 18). ....	102
Διάγραμμα 59: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για μεταβλητή παράμετρο SOMI: Τελική εκπομπή σωματιδίων αιθάλης (soot) συναρτήσει (α) του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP), και (β) του ποσοστού του καυσίμου της μετέγχυσης (PoMF), για λύσεις του μετώπου Pareto (Γενιά 18). ....	102
Διάγραμμα 60: Προφίλ έγχυσης της περίπτωσης 4 (Case 4) και της περίπτωσης αναφοράς. ....	103
Διάγραμμα 61: Χρονική ιστορία της πίεσης, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	105
Διάγραμμα 62: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	105
Διάγραμμα 63: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case) .....	106
Διάγραμμα 64: Μεταβολή της μέσης ειδικής εντροπίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	106
Διάγραμμα 65: Διάγραμμα T - s: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της μέσης ειδικής εντροπίας, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). ....	107
Διάγραμμα 66: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NOx συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). ....	107

Διάγραμμα 67: Μεταβολή της μάζας σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).....	108
Διάγραμμα 68: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Στο διάγραμμα σημειώνονται η περίπτωση 3 (Case 3) και η περίπτωση 4 (Case 4).....	113
Διάγραμμα 69: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική εκπομπή σωματιδίων αιθάλης (Soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Στο διάγραμμα σημειώνονται η περίπτωση 3 (Case 3) και η περίπτωση 4 (Case 4).....	114
Διάγραμμα 70: Προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς και με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Στο διάγραμμα σημειώνονται οι περιπτώσεις 1, 2, 3 και 4 (Case 1, 2, 3, 4).....	115
Διάγραμμα 71 : Προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς και με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική εκπομπή σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Στο διάγραμμα σημειώνονται οι περιπτώσεις 1, 2, 3 και 4 (Case 1, 2, 3, 4).....	116
Διάγραμμα 72: Προφίλ εγχύσεως των περιπτώσεων 1 και 3, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς. ....	118
Διάγραμμα 73: Προφίλ έγχυσης των περιπτώσεων 2 και 4, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς...	136

## **Λίστα πινάκων**

Πίνακας 1: Όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου (g/kWh) για αργόστροφους, μεσόστροφους και πολύστροφους ναυτικούς κινητήρες. Οι αναγραφόμενες χρονολογίες αντιστοιχούν στη χρονολογία κατασκευής του κινητήρα (29).....	15
Πίνακας 2: Όρια περιεκτικότητας των χρησιμοποιούμενων καυσίμων από τη ναυτιλία σε θείο (επί τοις εκατό κατά μάζα), συνοδευόμενα από τις χρονολογίες και περιοχές εφαρμογής τους (30). .....	16
Πίνακας 3 : Χαρακτηριστικά του κινητήρα RT-flex58T-B. ....	24
Πίνακας 4 : Προσήμανση των γωνιών έγχυσης α και β.....	25
Πίνακας 5: Δεδομένα αριθμητικής προσομοίωσης της περίπτωσης αναφοράς.....	26
Πίνακας 6: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: τιμές που αντιστοιχούν στο μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών (GAP), σε μοίρες γωνία στροφάλου, για κάθε περίπτωση προσομοίωσης (δεδομένες τιμές των μεταβλητών PoMF και SoPol). ....	38
Πίνακας 7: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: τιμές που αντιστοιχούν στην έναρξη της μετέγχυσης (SoPol), σε μοίρες γωνίας στροφάλου, για κάθε περίπτωση προσομοίωσης (δεδομένες τιμές των μεταβλητών PoMF και GAP).....	44
Πίνακας 8 : Προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, και επιμέρους περιπτώσεις του καθενός. Επίσης, παρουσιάζονται χαρακτηριστικές παράμετροι στο πλαίσιο του εξελικτικού αλγορίθμου.....	51
Πίνακας 9: Διάστημα δυνατών τιμών των μεταβλητών σχεδίασης του προφίλ έγχυσης με κύρια έγχυση και μετέγχυση, για τα προβλήματα βελτιστοποίησης με σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης...	53
Πίνακας 10: Διάστημα δυνατών τιμών των μεταβλητών σχεδίασης του προφίλ έγχυσης με κύρια έγχυση και μετέγχυση, για τα προβλήματα βελτιστοποίησης με μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης. ....	53
Πίνακας 11: Περιορισμοί που τίθενται στο δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης.....	53
Πίνακας 12: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης, της μέγιστης πίεσης και του έργου κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (Γενιά 13). Οι στόχοι και το έργο παρίστανται ως ποσοστά του αντίστοιχου μεγέθους της περίπτωσης αναφοράς. ....	56
Πίνακας 13: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (σταθερή SOMI): Στόχοι, ελεύθερες μεταβλητές, μέγιστη πίεση, έργο, καθώς και γωνία έναρξης της μετέγχυσης της περίπτωσης 1 (Case 1).....	58
Πίνακας 14: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης, της μέγιστης πίεσης και του έργου κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (Γενιά 10). Οι στόχοι και το έργο παρίστανται ως ποσοστά του αντίστοιχου μεγέθους της περίπτωσης αναφοράς. Η απόρριψη λύσεων έγινε με κριτήριο τη σημαντική μείωση της μέγιστης πίεσης.....	69
Πίνακας 15: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (μεταβλητή SOMI): Στόχοι, ελεύθερες μεταβλητές, μέγιστη πίεση, ωφέλιμο έργο, καθώς και γωνία έναρξης της μετέγχυσης της περίπτωσης 2 (Case 2).....	72
Πίνακας 16: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης και των περιορισμών κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (γενιά 40). Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και του ωφέλιμου έργου παρουσιάζονται ως ποσοστό του αντίστοιχου μεγέθους της περίπτωσης αναφοράς.....	87
Πίνακας 17: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Στόχοι, περιορισμοί, ελεύθερες μεταβλητές, καθώς και γωνία έναρξης της μετέγχυσης της περίπτωσης 3 (Case 3).....	88
Πίνακας 18: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων, των μεταβλητών σχεδίασης και των περιορισμών κάθε	

λύσης της τελευταίας γενιάς (Γενιά 18). Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και του ωφέλιμου έργου παρουσιάζονται ως ποσοστό του αντίστοιχου μεγέθους της περίπτωσης αναφοράς. ....	100
Πίνακας 19: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για μεταβλητή παράμετρο SOMI: Στόχοι, περιορισμοί, ελεύθερες μεταβλητές, καθώς και γωνία έναρξης της μετέγχυσης της περίπτωσης 4 (Case 4).....	103
Πίνακας 20: Προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς και με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Στόχοι, ελεύθερες μεταβλητές και περιορισμοί των περιπτώσεων 1, 2, 3 και 4 (Case 1, 2, 3, 4). *Σημείωση: οι περιπτώσεις 1 και 2 αντιστοιχούν σε προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. ....	116



# **1. Εισαγωγή**

## **1.1 Ναυτιλία και ρύποι**

Η εκπομπή ρύπων από τη βιομηχανική δραστηριότητα άρχισε να απασχολεί την παγκόσμια κοινότητα μετά τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, καθώς διαπιστώθηκαν οι σοβαρές επιπτώσεις που αυτοί έχουν στον άνθρωπο, αλλά και στο περιβάλλον. Προς αυτήν την κατεύθυνση λειτούργησαν συνεπικουρικά διάφορα γεγονότα ανά την υφήλιο, όπως για παράδειγμα η ομίχλη αιθάλης (The Great Smog) που εκδηλώθηκε το 1952 στο Λονδίνο, και το φωτοχημικό νέφος του Los Angeles τη δεκαετία του 1980. Έτσι, μέχρι σήμερα έχουν θεσπιστεί και συνεχίζονται να θεσπίζονται κανονισμοί που στόχο έχουν τη μείωση των παραγόμενων ρύπων. Η ναυτιλία, μέσω της οποίας μεταφέρεται ετησίως περίπου το 90% των παγκόσμιων αγαθών, δεν μπορούσε να μείνει ανεπηρέαστη από αυτήν την πολιτική μείωσης των ρύπων. Οι κανονισμοί που αφορούν στον περιορισμό της ρύπανσης που προέρχεται από τα πλοία περιέχονται στη σύμβαση MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships). Συγκεκριμένα, οι κανονισμοί που αφορούν στον περιορισμό της αέριας ρύπανσης από τα πλοία συμπεριλαμβάνονται στο έκτο κεφάλαιο της σύμβασης αυτής.

Οι δίχρονοι ναυτικοί κινητήρες Diesel αρχικά αντικατέστησαν τους ατμοστροβίλους ως κύρια πηγή πρόωσης λόγω της κατά πολύ βελτιωμένης απόδοσής τους, και κατά συνέπεια της μειωμένης κατανάλωσης καυσίμου. Πέραν αυτού όμως, έχει διαπιστωθεί η μεγάλη προσαρμοστικότητα των δίχρονων κινητήρων Diesel. Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή της εισαγωγής τους στην αγορά μέχρι και σήμερα έχουν βελτιωθεί προκειμένου να αυξηθεί η απόδοσή τους, και τις τελευταίες δύο δεκαετίες να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων από αυτούς. Οι κύριοι ρύποι που περιέχονται στις εκπομπές καυσαερίων δίχρονων ναυτικών κινητήρων Diesel είναι τα οξείδια του αζώτου (NOx), τα οξείδια του θείου (SOx), τα σωματίδια αιθάλης (soot), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες καθώς και το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα.

Η εφαρμογή της προαναφερθείσας περιβαλλοντικής πολιτικής είχε σημαντικό αντίκτυπο στη ναυτική βιομηχανία, αφού αυτή κλήθηκε να βρει τρόπους ώστε να μειώσει τους παραγόμενους ρύπους, και παράλληλα να βελτιώσει την ειδική κατανάλωση των ναυτικών κινητήρων. Σε αρχικό στάδιο, μελετήθηκαν και κατανοήθηκαν εις βάθος τα φαινόμενα που διέπουν την παραγωγή των ρύπων σε συνθήκες λειτουργίας ναυτικών κινητήρων. Σε δεύτερο στάδιο, προτάθηκαν και υλοποιήθηκαν νέες τεχνικές οι οποίες οδήγησαν στη ριζική αλλαγή τμημάτων των κινητήρων Diesel. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατάργηση του εκκεντροφόρου άξονα, και η αντικατάστασή του από σύστημα κοινού συλλέκτη (Common Rail System, CRS), που πλέον ελέγχει ηλεκτρονικά την έγχυση του καυσίμου.

Τέλος, η ανάπτυξη των υπολογιστών βοήθησε στην περαιτέρω κατανόηση των μηχανισμών σχηματισμού των διάφορων ρύπων, μέσω της εφαρμογής μεθόδων

υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD). Εφαρμόζοντας μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, είναι δυνατό να προκύψουν σημαντικά συμπεράσματα για τη θερμορευστομηχανική του κινητήρα, πριν τη διεξαγωγή σχετικών πειραμάτων.

## **1.2 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας**

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και βελτιστοποίηση στρατηγικών έγχυσης καυσίμου σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα Diesel, με στόχο τη μείωση των παραγόμενων ρύπων (οξειδία του αζώτου (NOx) και σωματίδια αιθάλης (soot)) και την ταυτόχρονη βελτίωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Συγκεκριμένα, μελετάται η στρατηγική έγχυσης καυσίμου διπλού παλμού που αποτελείται από την κύρια έγχυση συνοδευόμενη από μία μετέγχυση. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί συνέχεια της διερεύνησης που είχε γίνει σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες (1), (2), στις οποίες, όμως, μελετήθηκε η χρήση προέγχυσης μαζί με κύρια έγχυση.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, έγινε χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3. Εδώ, ο κώδικας χρησιμοποιείται για την αριθμητική προσομοίωση της ροής και καύσης σε κύλινδρο δίχρονου ναυτικού υπερπληρούμενου κινητήρα Diesel της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης καυσίμου με παρουσία μετέγχυσης, για λειτουργία στην περιοχή του πλήρους φορτίου. Το προφίλ έγχυσης ορίζεται σε συνάρτηση με κατάλληλες μεταβλητές σχεδίασης. Η βελτιστοποίηση αποβλέπει στην ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών NOx, των σωματιδίων αιθάλης και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC), που εκφράζονται με κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις. Τα προς μείωση μεγέθη, κατά συνέπεια και οι τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις, είναι αλληλοεξαρτώμενα. Έτσι, δημιουργείται ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (Multi Objective Optimisation - MOO), και αναζητούνται κατάλληλοι συνδυασμοί των μεταβλητών σχεδίασης που ελαχιστοποιούν τις τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις. Το σύνολο των βέλτιστων λύσεων συνιστά το μέτωπο Pareto. Για επιλεγθείσες βέλτιστες λύσεις, αναλύονται οι διεργασίες ροής και καύσης με χρήση κατάλληλων εργαλείων οπτικοποίησης.

Η δομή του κειμένου είναι η ακόλουθη:

- Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται αρχικά οι βασικές αρχές λειτουργίας του δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel. Στη συνέχεια, περιγράφεται η λειτουργία του συστήματος έγχυσης κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS). Ακολούθως, παρουσιάζονται οι μηχανισμοί σχηματισμού οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων αιθάλης σε ναυτικούς κινητήρες Diesel, και γίνεται αναφορά στους κινδύνους που οι ρύποι αυτοί ενέχουν για την ανθρώπινη υγεία. Τέλος, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την εφαρμογή μετέγχυσης σε κινητήρες Diesel.
- Στο κεφάλαιο 3, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του κινητήρα της παρούσας εργασίας, και γίνεται αναφορά στον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-

3, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε. Επίσης, παρουσιάζονται τα δεδομένα μιας περίπτωσης αναφοράς, η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχές προφίλ έγχυσης (κύρια έγχυση μόνο) και χρησιμοποιείται ως σημείο σύγκρισης για τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Τέλος, γίνεται αναφορά στις μεθόδους βελτιστοποίησης, καθώς και στη σύζευξη του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 με το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY, το οποίο κάνει χρήση εξελικτικών αλγορίθμων.

- Στο κεφάλαιο 4, πραγματοποιούνται δύο παραμετρικές αναλύσεις της επίδρασης των επιμέρους παραμέτρων που καθορίζουν τη μετέγχυση στους παραγόμενους ρύπους και στην ειδική κατανάλωση του κινητήρα. Τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης αποτελούν τη βάση για τον καθορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης.
- Στο κεφάλαιο 5, ορίζονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων της παρούσας μελέτης, συμπεριλαμβανόμενης της παραμετροποίησης του προφίλ έγχυσης καυσίμου με χρήση κατάλληλων μεταβλητών σχεδίασης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης, και αναλύονται αντιπροσωπευτικές λύσεις, με χρήση, μεταξύ άλλων, οπτικοποίησης του υπολογισθέντος εντός του κυλίνδρου πεδίου ροής.
- Τέλος, στο κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα, σε συνέχεια της παρούσας.



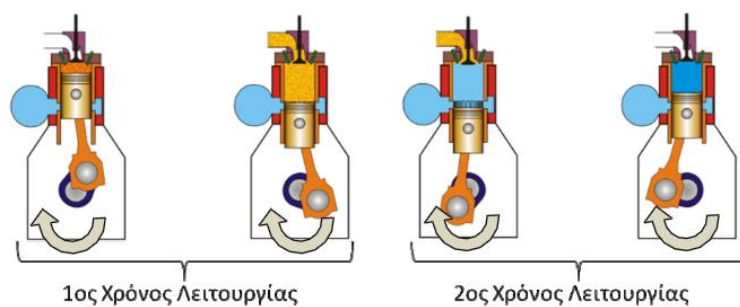
## 2. Δίχρονος ναυτικός κινητήρας Diesel

### 2.1 Περιγραφή της λειτουργίας ενός δίχρονου κινητήρα

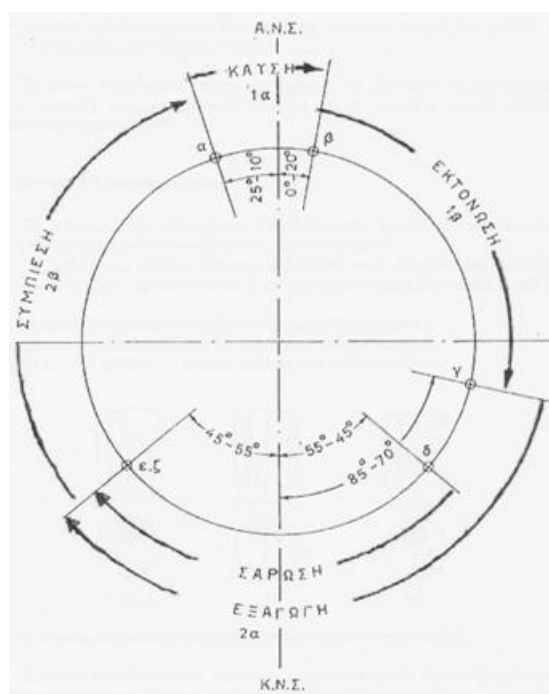
Δίχρονοι κινητήρες Diesel ονομάζονται οι κινητήρες που, όπως υποδηλώνει η ονομασία τους, συντελούν έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας σε δύο χρόνους. Χρόνος ονομάζεται η πλήρης παλινδρόμηση του εμβόλου. Η αναλυτική περιγραφή των δύο χρόνων λειτουργίας θα βασιστεί σε αργόστροφη μηχανή, όπως άλλωστε είναι και οι δίχρονοι ναυτικοί κινητήρες Diesel. Οι σύγχρονες ναυτικές δίχρονες μηχανές έχουν ταχύτητες περιστροφής κατά μέγιστο 167 RPM, σύμφωνα με τα στοιχεία μεγάλων κατασκευαστικών οίκων (3), (4).

- 1. Πρώτος χρόνος λειτουργίας (καύση – εκτόνωση - έναρξη εξαγωγής και σάρωσης):**  
Όταν το έμβολο βρίσκεται κοντά στο Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ), έχουν δημιουργηθεί εντός του κυλίνδρου τέτοιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, οι οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν την αυτανάφλεξη του καυσίμου. Κατά συνέπεια, τότε λαμβάνει χώρα η έγχυση του καυσίμου. Το εγχυόμενο καύσιμο διασπάται σε μικρά σταγονίδια, τα οποία, εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους, χαρακτηρίζονται από μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο, συνεπώς αυξάνεται η μεταφορά θερμότητας προς αυτά. Έτσι, τα σταγονίδια εξατμίζονται και καίγονται, οπότε κατά την κάθοδο του εμβόλου λαμβάνει χώρα πλέον η εκτόνωση των παραγόμενων από την καύση αερίων και η απόδοση ωφέλιμου έργου. Σε γωνίες περίπου 120° μετά το ΑΝΣ ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής, ώστε να ελαττωθεί εγκαίρως η πίεση των αερίων μέχρι τουλάχιστον την πίεση του αέρα πληρώσεως ενώ περίπου στις 140° μετά το ΑΝΣ αποκαλύπτονται οι θυρίδες εισαγωγής του αέρα. Η πίεση εντός του κυλίνδρου πλέον είναι μικρότερη από την πίεση του αέρα πληρώσεως, οπότε ο αέρας πλήρωσης εισέρχεται στον κύλινδρο μέσω των θυρίδων εισαγωγής, εκτοπίζει τα καυσαέρια που έχουν απομείνει μέσα στον κύλινδρο και τα ωθεί προς τη βαλβίδα εξαγωγής, η οποία παραμένει ακόμα ανοιχτή (απόπλυση κυλίνδρου).
- 2. Δεύτερος χρόνος λειτουργίας (τέλος σαρώσεως και εξαγωγής – συμπίεση):**  
Οι θυρίδες εισαγωγής παραμένουν ανοιχτές έως περίπου τις 230° μετά το ΑΝΣ. Το έμβολο αρχίζει να κινείται προς το ΑΝΣ ωθούμενο από τον στροφαλοφόρο άξονα, με πρόσληψη έργου. Περί τις 230°, το έμβολο καλύπτει πλήρως τις θυρίδες εισαγωγής και σταματάει η εισαγωγή αέρα στον κύλινδρο. Η βαλβίδα εξαγωγής εξακολουθεί να παραμένει ανοιχτή για λίγες μοίρες ακόμη, με στόχο την καλύτερη απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια. Με το κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής αρχίζει η συμπίεση του αέρα μέσω του ανερχόμενου εμβόλου προς το ΑΝΣ.

Όσα περιγράφησαν παραπάνω σχετικά με τη λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 1 και Εικόνα 2.



Εικόνα 1 : Σχηματική παράσταση των φάσεων του κύκλου λειτουργίας δίχρονου κινητήρα Diesel (5).

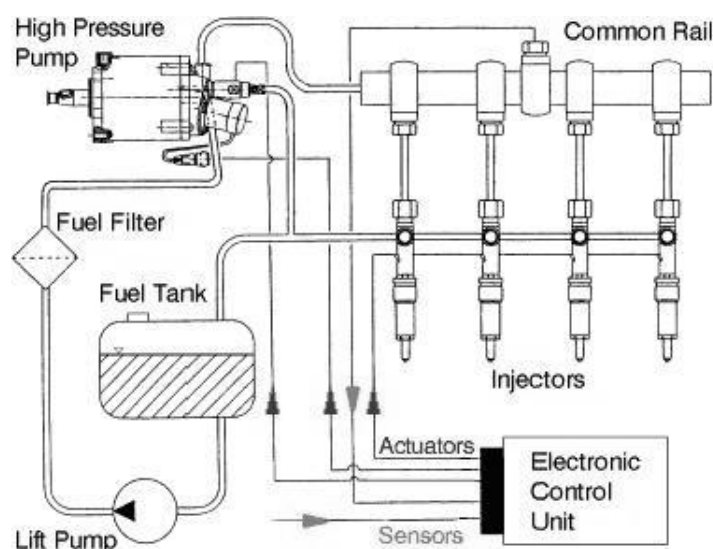


Εικόνα 2 : Φάσεις λειτουργίας αργόστροφου δίχρονου κινητήρα Diesel, συναρτήσεως της γωνίας στροφάλου (6).

Προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω η συγκέντρωση ισχύος των ναυτικών κινητήρων, οι κινητήρες εφοδιάζονται με στροβιλοϋπερπληρωτή, με στόχο να αυξηθεί η πίεση του αέρα πληρώσεως (υπερπλήρωση). Στη συνέχεια, ο αέρας πλήρωσης διέρχεται από ψυγείο πριν την εισαγωγή του στον κύλινδρο, με σκοπό να αυξηθεί η πυκνότητά του. Η εισαγωγή περισσότερης μάζας αέρα πληρώσεως επιτρέπει τη δυνατότητα έγχυσης περισσότερου καυσίμου, με αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος του κινητήρα χωρίς αλλαγή στις διαστάσεις.

## 2.2 Σύστημα κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS)

Στην πλειονότητα των ναυτικών κινητήρων χρησιμοποιούνται συστήματα μηχανικής έγχυσης. Σε αυτά, ο χρονισμός της έγχυσης εξαρτάται από μηχανικές παραμέτρους (έκκεντρα και στροφές της μηχανής), και επομένως η δυναμική μεταβολή του χρονισμού είναι αδύνατη. Προκειμένου να αρθούν αυτοί οι περιορισμοί στη ρύθμιση της εγχύσεως του καυσίμου, δημιουργήθηκε το σύστημα κοινού συλλέκτη, στο οποίο η έγχυση του καυσίμου ελέγχεται με ηλεκτρονικό τρόπο. Μια τυπική διάταξη ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Διάταξη του συστήματος κοινού συλλέκτη (Common Rail System - CRS) (7).

Πριν το καύσιμο καταλήξει στον κοινό συλλέκτη (common rail), η πίεσή του αυξάνεται μέσω μιας σειράς αντλιών. Ειδικότερα, αρχικά το καύσιμο από τη δεξαμενή αποθήκευσης μέσω της αντλίας χαμηλής πίεσης (lift pump) και διαμέσου ενός φίλτρου καταθλίβεται στην αντλία υψηλής πίεσης (high pressure pump). Η τελευταία αντλία αυξάνει την πίεση του καυσίμου (σε επίπεδο περί τα 1000 bar) και προμηθεύει τον κοινό συλλέκτη με καύσιμο υψηλής πίεσης. Ο συλλέκτης με τη σειρά του τροφοδοτεί τους εγχυτήρες, οι οποίοι ελέγχονται ηλεκτρονικά από μια κεντρική μονάδα (Electronic Control Unit - ECU). Λόγω της υψηλής μηχανικής καταπόνησης (πολύ υψηλές πιέσεις), ο συλλέκτης σχεδιάζεται με ιδιαίτερα υψηλές τιμές του συντελεστή ασφαλείας. Όταν οι εγχυτήρες ενεργοποιούνται ηλεκτρονικά, η βαλβίδα του εγχυτήρα ανοίγει και το καύσιμο εγχύεται στον κύλινδρο. Η χρονική στιγμή και η διάρκεια της έγχυσης καθορίζονται από την κεντρική μονάδα (ECU).

Τα πλεονεκτήματα του συστήματος κοινού συλλέκτη είναι τα παρακάτω (8):

1. Η αντλία υψηλής πίεσης και ο κάθε εγχυτήρας είναι μονάδες ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αυτό συμβάλει στην επίτευξη υψηλών πιέσεων και ταχυτήτων έγχυσης ανεξαρτήτως των στροφών της μηχανής (φορτίο).
2. Υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης κατά το δοκούν του χρονισμού της έγχυσης.

3. Υπάρχει δυνατότητα πραγματοποίησης πολλαπλών ψεκασμών στον ίδιο κύκλο λειτουργίας.
4. Ελαχιστοποιούνται οι διαφορές στην εγχυόμενη μάζα καυσίμου και στον χρονισμό της έγχυσης μεταξύ των κυλίνδρων.
5. Ελαχιστοποιούνται οι διαφορές της εγχυόμενης μάζας καυσίμου μεταξύ των διαδοχικών κύκλων.
6. Είναι δυνατόν να ρυθμιστεί ο χρονισμός κάθε εγχυτήρα ξεχωριστά.
7. Μειώνεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου.
8. Μειώνονται οι εκπομπές ρύπων.

Σε ναυτικούς κινητήρες, στο πλαίσιο αναπτυχθέντων συστημάτων κοινού συλλέκτη, περιλαμβάνεται ο ηλεκτρονικός έλεγχος του χρονισμού της βαλβίδας εξαγωγής των καυσαερίων, καθώς και της ενεργοποίησης της βαλβίδας του αέρα προεκκίνησης.

## **2.3 Σχηματισμός ρύπων**

### **2.3.1 Γενικά**

Στη ναυτιλία, όπως και σε όλους τους κλάδους των μεταφορών, η εκπομπή ρύπων αποτελεί ένα φλέγον ζήτημα, που χρήζει αντιμετώπισης. Όπως προαναφέρθηκε, στους κύριους ρύπους από ναυτικούς κινητήρες συγκαταλέγονται τα οξείδια του αζώτου (NOx), τα οξείδια του θείου (SOx), τα σωματίδια αιθάλης (soot), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, καθώς και το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα.

Από τους παραπάνω ρύπους, μόνο ο σχηματισμός των οξειδίων του θείου δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες της καύσης, αλλά από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται σχεδόν εξ ολοκλήρου για την πρόωση των πλοίων είναι το βαρύ καύσιμο (Heavy Fuel Oil - HFO), το οποίο δεν αποτελεί απόσταγμα του αργού πετρελαίου, αλλά είναι, κυρίως, το υπόλειμμα της κλασματικής απόσταξης. Έτσι, προκύπτει ότι το βαρύ καύσιμο είναι χαμηλής ποιότητας ως προς τη θερμογόνο ικανότητα, ενώ εμπεριέχει αρκετές ανεπιθύμητες προσμίξεις. Μία από αυτές τις προσμίξεις είναι και το θείο. Κατά την καύση, το θείο οξειδώνεται με συνέπεια να παράγεται διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), ένα ποσοστό του οποίου οξειδώνεται προς τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>).

Εν αντιθέσει με τα οξείδια του θείου, ο σχηματισμός των άλλων ρύπων εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης, και τις τοπικές τιμές της θερμοκρασίας και του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα, δηλαδή τις τοπικές συνθήκες που συντελείται η καύση.

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες δημιουργούνται κυρίως λόγω της ατελούς καύσης του καυσίμου σε περιοχές φτωχές σε οξυγόνο, δηλαδή με υψηλό τοπικό λόγο ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα. Επίσης, δεν επιτυγχάνεται τέλεια καύση όταν το καύσιμο προσκρούει στα κρύα τοιχώματα του κυλίνδρου. Ακόμη, η δημιουργία άκαυστων υδρογονοανθράκων ευνοείται όταν το καύσιμο εγχύεται σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απέχουν



αρκετά από τις αντίστοιχες υψηλές στο ΑΝΣ. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κινητήρες βελτιστοποιούνται σε σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί σε υψηλό φορτίο, ελάχιστο ποσό εκπομπής άκαυστων υδρογονοανθράκων επιτυγχάνεται σε υψηλά φορτία, συγκριτικά με λειτουργία σε χαμηλά φορτία.

Τα οξειδία του αζώτου και τα σωματίδια της αιθάλης, που αποτελούν τους κύριους ρύπους των κινητήρων Diesel, θα περιγραφούν αναλυτικότερα στις ακόλουθες υποπαραγράφους, καθώς αποτελούν κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

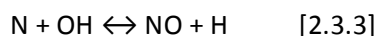
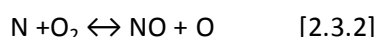
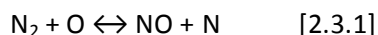
### **2.3.2 Οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>)**

Η γενική αναφορά NO<sub>x</sub> αντιστοιχεί κυρίως στο μονοξείδιο και διοξείδιο του αζώτου (NO και NO<sub>2</sub>). Τα NO<sub>x</sub> ως σύνολο αποτελούνται κυρίως από το μονοξείδιο του αζώτου (NO). Συγκεκριμένα, στους κινητήρες Otto το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) δεν παράγεται σχεδόν καθόλου, ενώ στους κινητήρες Diesel αυτό αποτελεί περίπου το 10 – 30 % του συνολικά εκπεμπόμενου μονοξειδίου του αζώτου (NO) (9).

Υπάρχουν δύο τρόποι σχηματισμού του μονοξειδίου του αζώτου:

1. Σχηματισμός θερμικού NO (thermal NO) στην περιοχή των καυσαερίων.
2. Σχηματισμός άμεσου NO (prompt NO) στην περιοχή της φλόγας.

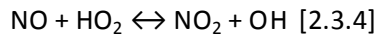
Το θερμικό NO είναι η κύρια πηγή NO<sub>x</sub>, αποτελεί το 80 – 95 % του συνολικά σχηματιζόμενου NO στον κινητήρα (9) και σχηματίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες, με περίσσεια αέρα στην περιοχή των καυσαερίων. Το άζωτο και το οξυγόνο είναι διαθέσιμα από τον αέρα της καύσης, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες είναι απαραίτητες λόγω της μεγάλης ενέργειας που απαιτείται για τη διάσπαση του διπλού δεσμού του μορίου του αζώτου (N<sub>2</sub>). Ειδικότερα, υψηλή θερμοκρασία σημαίνει υψηλή κινητική ενέργεια των μορίων, που συνάγει μεγάλο αριθμό ενεργών μοριακών συγκρούσεων. Πέραν της υψηλής θερμοκρασίας απαιτείται για τον σχηματισμό θερμικού NO και ύπαρξη ικανού χρόνου, ο οποίος υπάρχει στους μεγάλους δίχρονους αργόστροφους ναυτικούς κινητήρες Diesel. Ενδεικτικά, η δημιουργία θερμικού NO ξεκινάει πάνω από τους 1800 Κ. Τέλος, ο ρυθμός σχηματισμού NO αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Ο μηχανισμός δημιουργίας θερμικού NO περιγράφεται από τον διευρυμένο μηχανισμό Zeldovich, που αποτελείται από τις παρακάτω τρεις αμφίδρομες αντιδράσεις:



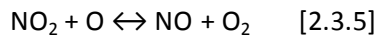
Στη προταθείσα αρχική του μορφή (από τον Zeldovich ) ο μηχανισμός περιελάμβανε μόνο τις δύο πρώτες αντιδράσεις, Και στη συνέχεια προστέθηκε και η τρίτη αντίδραση από τον Lavoie, αφού έγινε αντιληπτή η σπουδαιότητά της (9).

Το άμεσο NO σχηματίζεται στην περιοχή της φλόγας, όπως έχει αναφερθεί ήδη. Ο σχηματισμός του άμεσου NO προκύπτει από το υπάρχον άζωτο στον αέρα πληρώσεως και από τις ελεύθερες ρίζες υδρογονανθράκων που προκύπτουν στην περιοχή της φλόγας.

Όσον αφορά στο διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>), αυτό είναι ένα ισχυρό οξειδίο, πολύ πιο τοξικό από το NO και επιβλαβές για τον άνθρωπο. Το NO<sub>2</sub> σχηματίζεται από την ταχύρυθμη μετατροπή του NO σε αυτό, στις περιοχές της φλόγας, σύμφωνα με τον μηχανισμό (9):



Όμως, στην περιοχή των καυσαερίων το NO<sub>2</sub> μετατρέπεται και πάλι σε NO και O<sub>2</sub>, λόγω της αντίδρασης με το ατομικό οξυγόνο, γι' αυτό και η τελική συγκέντρωση του NO<sub>2</sub> είναι μικρή σε σχέση με αυτή του NO. Συνεπώς, ο λόγος των συγκεντρώσεων NO<sub>2</sub>/NO μειώνεται με την εξέλιξη της καύσης. Η αντίδραση μετατροπής NO<sub>2</sub> σε NO είναι:



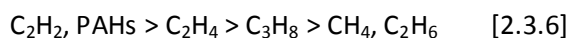
Ωστόσο, όταν τα καυσαέρια, τα οποία έχουν υψηλή θερμοκρασία, αναμιγνύονται γρήγορα με ψυχρότερο αέρα ή μίγμα καυσίμου-αέρα, λόγω του έντονου στροβιλισμού, σταματάει η μετατροπή NO<sub>2</sub> σε NO και έτσι ο λόγος των συγκεντρώσεων NO<sub>2</sub>/NO δεν μειώνεται περαιτέρω αλλά παραμένει σταθερός (9).

### **2.3.3 Σωματίδια αιθάλης (soot)**

Η δημιουργία σωματιδίων αιθάλης είναι μια σύνθετη διεργασία λόγω της περίπλοκης χημικής κινητικής που λαμβάνει χώρα (10). Μέχρι και σήμερα, δεν έχει προταθεί κάποιος κυρίαρχος και απλός μηχανισμός για την περιγραφή της παραγωγής των σωματιδίων αιθάλης. Έτσι, τα μοντέλα που έχουν προταθεί για την πρόβλεψη της παραγωγής αιθάλης είναι ημι-εμπειρικά. Παρά τις δυσκολίες λόγω περιπλοκότητας των διεργασιών της δημιουργίας της αιθάλης, στη βιβλιογραφία πλέον έχουν οριστεί τα στάδια σχηματισμού αυτής. Τα στάδια αυτά περιγράφονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

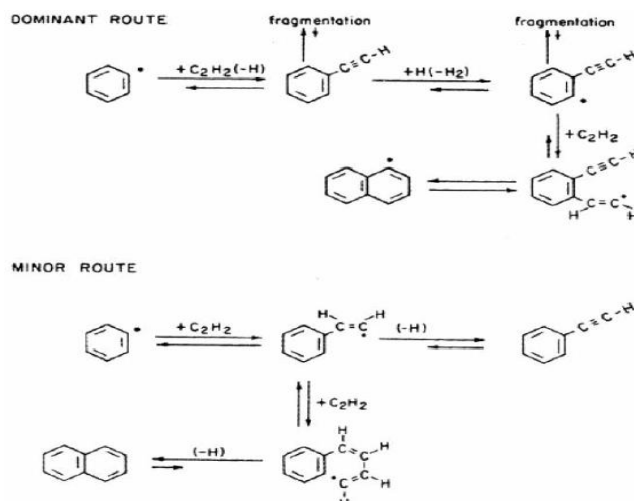
Το πρώτο στάδιο σχετίζεται με την έναρξη της διαδικασίας παραγωγής σωματιδίων αιθάλης, η οποία γίνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1200K, κυρίως μεταξύ των 1600K και 1700K (μέχρι τους 2000K) (11). Η δημιουργία της αιθάλης λαμβάνει χώρα λόγω της πυρόλυσης των υδρογονανθράκων. Η πυρόλυση σχετίζεται με την τοπική έλλειψη οξυγόνου και τις επικρατούσες υψηλές θερμοκρασίες. Η περιοχή στην οποία αρχίζει η διαδικασία παραγωγής της αιθάλης είναι κοντά στη ζώνη αντίδρασης της φλόγας από την πλευρά του καυσίμου (12), και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την πυρόλυση είναι ενδόθερμες, πράγμα που σημαίνει ότι εξαρτώνται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Για τον λόγο αυτόν, άλλωστε, τα ημι-εμπειρικά μοντέλα σχηματισμού αιθάλης θεωρούν κάποια θερμοκρασία ενεργοποίησης, μετά την υπέρβαση της οποίας αρχίζει η διαδικασία υπολογισμού της παραγόμενης αιθάλης. Προϊόντα της πυρόλυσης είναι ελεύθερες ρίζες και ακόρεστοι υδρογονάνθρακες. Συνεπώς, τα προϊόντα αυτά της πυρόλυσης θεωρούνται

πρόδρομοι της δημιουργίας των πρώιμων σωματιδίων αιθάλης (πυρήνες). Παραδείγματα τέτοιων προϊόντων είναι το ακετυλένιο ( $C_2H_2$ ), τα πολυακετυλένια ( $C_nH_{2n-2}$ ), το αιθυλένιο, το μεθάνιο (13) και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ή PAHs), ενώ δευτερεύοντα είναι οι ρίζες  $C_2$  και  $C_3$  (14). Η σημαντικότητα των προαναφερθέντων προδρόμων αιθάλης παρουσιάζεται παρακάτω σε φθίνουσα σειρά:



Οι PAHs και το ακετυλένιο είναι σχετικά σταθερές ενώσεις, όσον αφορά στην αποσύνθεσή τους σε απλούστερα στοιχεία, και αρκετά σταθερές κινητικά, συγκρινόμενες με τις παραφίνες ή ακόμα και με τις ολεφίνες. Πρόδρομοι, επίσης, της δημιουργίας αιθάλης είναι και αέρια (volatiles) από πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες που δημιουργούνται κατά τη φάση της πυρόλυσης και μέσω δευτερευουσών αντιδράσεων, οι οποίες επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως τη διάδοση της θερμότητας, τη θερμοκρασία και τη μεταφορά μάζας (15). Συνεπώς, τα πρώιμα σχηματιζόμενα σωματίδια (πυρήνες) αποτελούνται από πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, έχουν εξαιρετικά μικρό μέγεθος, περίπου 1 με 2 nm (13). Η μορφολογία αυτών των πυρήνων, η δημιουργία των οποίων έχει πιστοποιηθεί από μελέτες σε φλόγες για ποικίλα καύσιμα, έχει ερευνηθεί με δύο μεθόδους: τη μέθοδο SEM (Scanning Electron Microscopy) και τη μέθοδο TEM (Transmission Electron Microscopy). Σύμφωνα με τους Megaridis et al. (16) και Saito et al. (17), οι πυρήνες από τις φλόγες, στις οποίες χρησιμοποιείται για καύσιμο μεθάνιο και ελαφροί υδρογονάνθρακες, φαίνεται να έχουν ακανόνιστο σχήμα με αιχμηρές άκρες, ενώ τα ύστερα σωματίδια περιέχουν αλυσοειδείς συσσωματώσεις μεμονωμένων σφαιρικών σωματιδίων. Η εσωτερική δομή των σωματιδίων έχει επίσης μελετηθεί από τους Haynes et al. (18). Κοντά στις άκρες των σωματιδίων, μη επίπεδα στρώματα άνθρακα ακολουθούν το σχήμα της επιφάνειας των σωματιδίων. Στο εσωτερικό των πρώτων πυρήνων, δικτυωτές δομές φαίνεται να είναι τοποθετημένες, με μεγαλύτερη ή μικρότερη γεωμετρική αυστηρότητα, γύρω από συγκεκριμένα κέντρα. Έτσι, η γενική γεωμετρική δομή είναι δυνατό να χαρακτηρίζεται από επιμέρους σφάλματα. Από χημικής απόψεως, η αιθάλη αποτελείται κυρίως από άνθρακα. Ένα άλλο κύριο συστατικό της είναι το υδρογόνο. Στην αιθάλη, ο λόγος ατόμων άνθρακα προς τα άτομα υδρογόνου μπορεί να φτάσει μέχρι και 10, λόγω των διεργασιών της αφυδρογόνωσης (dehydrogenation) (19). Έτσι, αυτή η παραγωγή πυρήνων από τα αρχικά αντιδρώντα είναι που συνιστά την έναρξη της διαδικασίας του σχηματισμού αιθάλης. Με βάση τη βιβλιογραφία, φαίνεται ότι υπάρχει ομοιότητα στους χημικούς μηχανισμούς παραγωγής της αιθάλης, για διαφορετικού τύπου φλόγες. Από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορα συστήματα με διαφορετικά είδη φλογών προκύπτει ένα ενδιαφέρον φαινόμενο: Η παραγωγή αιθάλης αρχικά αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας αντίδρασης, και ακολούθως φθίνει με τον χρόνο. Προκειμένου να εξηγηθούν οι αρχές της μοριακής ανάπτυξης που αφορούν στη δημιουργία αιθάλης, έχουν προταθεί μηχανισμοί που περιλαμβάνουν ιόντα, αύξηση μεγέθους δακτυλίων, αλυσίδες πολυακετυλενίου, αντιδράσεις Diels-Alder και ουδέτερες ρίζες. Σύμφωνα με μια δημοσίευση των Glassman et al. (20) υπάρχει μια γενική αποδοχή στο ότι ο μηχανισμός που προτάθηκε από τους Frenklach et al. (21), (22) περιγράφει αρκετά πιστά τη χημική ιστορία της δημιουργίας πυρήνων αιθάλης. Σύμφωνα με το μοντέλο των Frenklach et al. (21), η έναρξη δημιουργίας πυρήνων (πρόδρομοι αιθάλης) αφορά στη δημιουργία του πρώτου αρωματικού δακτυλίου, τον σχηματισμό αρωματικών υδρογονανθράκων με δύο

δακτυλίου και την περαιτέρω μεγέθυνση των PAHs. Στη Εικόνα 4 απεικονίζεται ο σχηματισμός αρωματικών υδρογονανθράκων με δύο δακτυλίου (23).



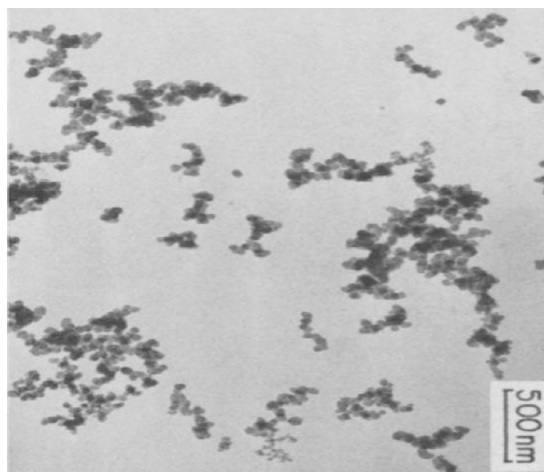
Εικόνα 4: Σχηματισμός αρωματικών υδρογονανθράκων με δύο δακτυλίου (23).

Το δεύτερο στάδιο αποτελεί η αύξηση της πολύ ενεργής επιφάνειας των πυρήνων (ισοδύναμα, του μεγέθους αυτών), πρώτον, με την επικάλυψη πάνω σε αυτές υδρογονανθράκων που έχουν συμπυκνωθεί από την αέρια φάση (ακετυλένιο) και δεύτερον, με την αφαίρεση ατόμων υδρογόνου (αφυδρογόνωση). Το στάδιο αυτό υποβοηθάται από το φαινόμενο της θερμοφορέσεως (thermophoresis), κατά το οποίο οι πυρήνες που μόλις έχουν δημιουργηθεί μετακινούνται από την περιοχή της αυτανάφλεξης σε περιοχές με περίσσεια καυσίμου, οι οποίες είναι πιο κρύες. Σε αυτό το στάδιο, οι παραπάνω αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα (σε εξαιρετικά μικρό χρονικό διάστημα), και έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους της επιφάνειας, μπορούν να πραγματοποιηθούν και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες που δημιουργήθηκαν οι πυρήνες. Επίσης, οι αντιδράσεις αυτές οδηγούν και στην αύξηση της μάζας των πυρήνων, ενώ ο αριθμός τους παραμένει σταθερός. Η υψηλή αντιδραστικότητα των επιφανειών είναι τέτοια, ώστε η ύπαρξη αιθάλης μπορεί να επιταχύνει την αποδόμηση του καυσίμου κατά την πυρόλυση. Η αντιδραστικότητα των επιφανειών βαίνει μειούμενη όσο το μέγεθος των επιφανειών αυξάνεται. Τέλος, το μέγεθος των μεγεθυμένων πυρήνων κυμαίνεται μεταξύ 15 – 30 nm (24), (11), ενώ ο αριθμός των πυρήνων παραμένει σταθερός.

Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει τις συγκρούσεις των πυρήνων μεταξύ τους, που έχουν ως αποτέλεσμα τη συσσωμάτωσή τους και κατ' επέκταση την αύξηση του μεγέθους τους και την ταυτόχρονη μείωση του αριθμού τους (απόκτηση τρισδιάστατης μορφής). Το μέγεθος των σωματιδίων σε αυτό το στάδιο είναι των μερικών δεκάδων νανομέτρων, ενώ το σχήμα τους είναι σφαιρικό. Για το στάδιο αυτό, τα προταθέντα υπολογιστικά μοντέλα κάνουν χρήση των ακόλουθων υποθέσεων, οι οποίες σε μεγάλο βαθμό μπορούν να θεωρηθούν ρεαλιστικές: α) κάθε σύγκρουση έχει ως αποτέλεσμα τη συσσωμάτωση, και β) όλα τα δημιουργούμενα σωματίδια είναι σφαιρικά.

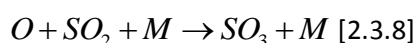
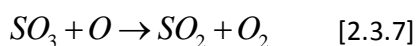
Το τέταρτο στάδιο περιγράφει τη συνένωση των σωματιδίων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αλυσίδων (συσσωματώσεις σωματιδίων - aggregates). Η τελευταία πρέπει

κυρίως να αποδοθεί στη χημική συνένωση των ριζών που δημιουργούνται εξαιτίας της αφυδρογόνωσης, και όχι σε συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων. Το μήκος των εν λόγω αλυσίδων μπορεί να φτάσει μέχρι και 100  $\mu\text{m}$ . Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται μεγέθυνση συσσωματώσεων σωματιδίων αιθάλης σε φλόγα διάχυσης (23).



Εικόνα 5: Συσσωματώσεις σωματιδίων αιθάλης (*aggregates*) σε φλόγα διάχυσης (23).

Το τελευταίο και πολύ σημαντικό στάδιο πριν τα σωματίδια εξαχθούν στην ατμόσφαιρα αποτελεί η οξείδωσή τους. Σε αυτό το στάδιο, σημαντικό ρόλο παίζουν η θερμοκρασία μέσα στον κύλινδρο, η τοπική συγκέντρωση του οξυγόνου και η συγκέντρωση των ελεύθερων ριζών υδροξυλίου ( $\text{OH}$ ). Αυξημένη θερμοκρασία βοηθά στην εκτενέστερη οξείδωση των σωματιδίων αιθάλης, διότι η σταθερότητα των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων στις υψηλές θερμοκρασίες είναι μειωμένη, και έτσι διασπώνται τα μόριά τους (*cracking*). Επίσης, η οξείδωση ευνοείται από τις υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου και υδροξυλίου, που αποτελούν κύρια οξειδωτικά της αιθάλης (25). Τέλος, την οξείδωση της αιθάλης επηρεάζει και η ύπαρξη του τριοξειδίου του θείου (13), καθώς αυτό αντιδρά με τις ελεύθερες ρίζες ατομικού οξυγόνου, δημιουργώντας μοριακό οξυγόνο:



### **2.3.4 Επίδραση NOx και σωματιδίων αιθάλης στην ανθρώπινη υγεία**

Τα οξείδια του αζώτου (NOx) αντιδρούν με υδρατμούς και αμμωνία, και σχηματίζουν ατμούς νιτρικού οξέος και άλλες ενώσεις. Οι εν λόγω, σε αέρια φάση, ενώσεις μπορούν να διεισδύσουν σε ευαίσθητους ιστούς των πνευμόνων, και σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις είναι δυνατό να προκαλέσουν πρόωρο θάνατο. Επίσης, η εισπνοή αυτών μπορεί να προκαλέσει ή και να επιδεινώσει αναπνευστικά νοσήματα, όπως το εμφύσημα και η βρογχίτιδα, καθώς και να επιδεινώσει υφιστάμενη καρδιοπάθεια. Επίσης, τα NOx αντιδρούν με πτητικές οργανικές ενώσεις παρουσία ηλιακού φωτός, σχηματίζοντας όζον σε χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας. Αυτό το όζον μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες παρενέργειες, όπως η φθορά πνευμονικών ιστών και η μείωση της πνευμονικής λειτουργίας, επί το πλείστον σε ευαίσθητους πληθυσμούς (παιδιά, ηλικιωμένοι, ασθματικοί). Επιπροσθέτως, τα NOx αντιδρούν με κοινές οργανικές χημικές ουσίες, σχηματίζοντας μια ευρεία ποικιλία τοξικών προϊόντων, μερικά από τα οποία μπορεί να προκαλέσουν μεταλλάξεις. Τέλος, το NO<sub>2</sub> μπορεί να γίνει επιβλαβές ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις (15 ppm), ενώ μπορεί ακόμη να επιφέρει και θανατηφόρα πνευμονική ίωση (150-200 ppm). Η τοξικότητά του οφείλεται κυρίως στη μικρή του διαλυτότητα, η οποία του επιτρέπει να διεισδύσει στο κατώτερο αναπνευστικό σύστημα. Εκτός από το αναπνευστικό σύστημα, αντιδρά με την αιμοσφαιρίνη του αίματος, με συνέπεια να εμποδίζεται η οξυγόνωση των ιστών.

Τα σωματίδια αιθάλης προκαλούν πολύ σοβαρά προβλήματα υγείας κυρίως λόγω του ότι περιέχουν αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθός τους, τόσο και πιο σοβαρή είναι η επίδρασή τους στην ανθρώπινη υγεία, διότι μπορούν με μεγαλύτερη ευκολία να διεισδύσουν στο ανθρώπινο σώμα μέσω της αναπνευστικής οδού. Πιο συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί ότι συμβάλλουν στην εμφάνιση της στεφανιαίας νόσου και προσβάλλουν το κυκλοφορικό σύστημα με οξείες αγγειακές δυσλειτουργίες, και με την εμφάνιση θρόμβων και αθηρωματικής πλάκας. Τέλος, προκαλούν καρκίνο, διότι μέσω των αρτηριών μεταφέρονται σε διάφορα όργανα του σώματος (συκώτι, σπλήνα κτλ.), όπου και επικάθονται (26). Επιπροσθέτως, λόγω του μικρού τους μεγέθους μπορούν να εισχωρήσουν στους πνεύμονες, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο φλεγμονές και καρκινογενέσεις.

Προφανώς, από τα παραπάνω προκύπτει ότι η επίδραση των NOx και των σωματιδίων αιθάλης είναι εντονότατη και πολύ σοβαρή για τον ανθρώπινο οργανισμό, και χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Για αυτόν τον λόγο, οι διεθνείς οργανισμοί έχουν κινητοποιηθεί ώστε να θεσπιστεί ένα πλαίσιο κανονισμών, με ανώτατα επιτρεπόμενα όρια σε εκπομπές ρύπων.

### 2.3.5 Κανονισμοί για τον περιορισμό αέριων ρύπων από τη ναυτιλία

Πέραν της προστασίας της ανθρώπινης ζωής, η οποία είναι πρωτεύουσας σημασίας, μεγάλη σημασία έχει επίσης η προστασία του περιβάλλοντος. Έτσι, έχουν θεσπιστεί διεθνώς αυστηροί κανονισμοί αναφερόμενοι στις εκπομπές αερίων ρύπων από πλοία. Συγκεκριμένα, προβλέπεται στο πλαίσιο των κανονισμών η σταδιακή μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> και CO<sub>2</sub>. Για τους ρύπους αυτούς, τα όρια που έχουν τεθεί μέχρι και σήμερα αναφέρονται είτε σε παγκόσμιο επίπεδο, είτε σε συγκεκριμένες περιοχές ελέγχου των ρύπων (Emission Control Areas - ECAs), στις οποίες τα επιτρεπόμενα όρια είναι πιο αυστηρά. Ως περιοχές ελέγχου των ρύπων (ECAs) ορίζονται θαλάσσιες περιοχές με αυξημένη ναυτική κίνηση, όπως λιμάνια και δίαυλοι, και περιοχές ιδιαίτερου περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος (27). Αντίστοιχοι κανονισμοί για τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης δεν έχουν ακόμα τεθεί, αλλά αναμένονται στο εγγύς μέλλον. Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO) έχει αρχίσει ήδη μελέτες προς αυτή την κατεύθυνση, ενώ πρώτες σχετικές εργασίες λαμβάνουν χώρα στις επιτροπές του IMO BLG 12-17 (Bulk Liquids and Gases) (28).

Αναφορικά με τις εκπομπές NO<sub>x</sub>, ο IMO, με το παράρτημα VI της σύμβασης MARPOL, έχει επιβάλει συγκεκριμένα όρια για τις εκπομπές NO<sub>x</sub> από τους ναυτικούς κινητήρες Diesel. Ο Πίνακας 1 περιλαμβάνει τα μέγιστα όρια NO<sub>x</sub> συναρτήσει της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα μελλοντικά όρια του Tier III θα έχουν εφαρμογή μόνο εντός των περιοχών ελέγχου των ρύπων (ECAs).

Tier	Date	NO <sub>x</sub> Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	45 · n <sup>-0.2</sup>	9.8
Tier II	2011	14.4	44 · n <sup>-0.23</sup>	7.7
Tier III	2016†	3.4	9 · n <sup>-0.2</sup>	1.96

† In NO<sub>x</sub> Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).

*Πίνακας 1: Όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου (g/kWh) για αργόστρωτους, μεσόστρωτους και πολύστρωτους ναυτικούς κινητήρες. Οι αναγραφόμενες χρονολογίες αντιστοιχούν στη χρονολογία κατασκευής του κινητήρα (29).*

Οι εκπομπές SO<sub>x</sub> μπορούν να ελεγχθούν μέσω της περιεκτικότητας των ναυτιλιακών καυσίμων σε θείο. Σε αντιστοιχία, ο Πίνακας 2 περιλαμβάνει τα όρια περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο που έχουν θεσπιστεί από τον IMO, τόσο για πλεύση εντός των περιοχών ελέγχου των ρύπων (ECAs), όσο και για πλεύση στην ανοικτή θάλασσα.

Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SOx ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010.07	1.0%	
2012	0.1%	3.5%
2015		0.5%
2020 <sup>a</sup>		

a - alternative date is 2025, to be decided by a review in 2018

Πίνακας 2: Όρια περιεκτικότητας των χρησιμοποιούμενων καυσίμων από τη ναυτιλία σε θείο (επί τοις εκατό κατά μάζα), συνοδευόμενα από τις χρονολογίες και περιοχές εφαρμογής τους (30).

Τέλος, στο πλαίσιο της σύμβασης MARPOL, προτείνονται δείκτες και διαδικασίες ενεργειακής αποδοτικότητας για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, οι οποίες συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, έχουν προταθεί ο δείκτης EEDI (Energy Efficiency Design Index) και η διαδικασία SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan).



### **2.3.6 Τεχνικές μείωσης των ρύπων**

Οι τεχνικές με τις οποίες μπορούν να περιοριστούν οι εκπομπές ρύπων από τους κινητήρες μπορούν να κατανεμηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει εξωτερικές τεχνικές επεξεργασίας των καυσαερίων, ενώ η δεύτερη εσωτερικές τεχνικές, οι οποίες επιδρούν στη διεργασία της καύσης.

Στο πλαίσιο των τεχνικών που εντάσσονται στην πρώτη κατηγορία, λαμβάνει επεξεργασία των καυσαερίων μακριά από τον κινητήρα, συγκεκριμένα στον οχετό εξαγωγής, πριν τα καυσαέρια οδηγηθούν στην ατμόσφαιρα. Στην αγορά υπάρχουν αρκετές προτάσεις για τη μετεπεξεργασία των καυσαερίων, με στόχο τη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> και σωματιδίων αιθάλης. Πρώτον, μια υποσχόμενη τεχνική για τη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> είναι η παρεμβολή καταλύτη (Selective Catalytic Reduction - SCR) στο σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο την ουρία, η οποία αντιδρά με τα NO<sub>x</sub> των καυσαερίων, παράγοντας αμμωνία. Η μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> μπορεί να φτάσει μέχρι και 95% (31), ικανοποιώντας τις απαιτήσεις των κανονισμών. Δεύτερον, μια άλλη εξωτερική τεχνική συνίσταται στην τοποθέτηση συσκευών καταιονισμού των καυσαερίων (Exhaust Gas Scrubbers - EGS), για τη δραστική μείωση τόσο των εκπομπών SO<sub>x</sub>, όσο και των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στον καταιονισμό των καυσαερίων με θαλασσινό ή γλυκό νερό παρουσία μέσου ουδετεροποίησης των οξέων. Ένα τέτοιο σύστημα επιτυγχάνει τη δραστική μείωση των εκπομπών SO<sub>x</sub>, ενώ παράλληλα οι εκπομπές σωματιδίων αιθάλης μπορούν να μειωθούν κατά τουλάχιστον 75%. Μια τρίτη εξωτερική τεχνική είναι η χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων (Electrostatic Precipitators - ESPs), η οποία δεσμεύει την αιθάλη. Εν προκειμένω, γίνεται χρήση της ιδιότητας των σωματιδίων αιθάλης να φορτίζονται με στατικό ηλεκτρισμό σε ροές υψηλής ταχύτητας. Συνεπώς, με τη χρήση των ESPs, τα σωματίδια αιθάλης διέρχονται από κατάλληλες φορτισμένες πλάκες, οι οποίες τα δεσμεύουν. Κατά αυτόν τον τρόπο, η αιθάλη παρακρατείται σε ποσοστά που κυμαίνονται μεταξύ 50 και 85% κατά μάζα, και δεν εκλύεται στην ατμόσφαιρα (τα ποσοστά αυτά αναφέρονται σε μετρήσεις που έχουν ληφθεί σε τετράχρονους ναυτικούς κινητήρες, ενώ αξίζει να αναφερθεί ότι τέτοιες μετρήσεις δεν έχουν πραγματοποιηθεί σε μεγάλους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες). Μια τέταρτη εξωτερική τεχνική είναι η τοποθέτηση μηχανικών φίλτρων (Diesel Particulate Filters - DPF), η οποία έχει εισαχθεί από την αυτοκινητοβιομηχανία. Το συγκεκριμένο σύστημα απαιτεί κατάλληλη διάταξη αυτομάτου ελέγχου παράκαμψης των φίλτρων σε συνθήκες λειτουργίας που δεν απαιτείται η χρήση αυτών, με σκοπό να αποφεύγονται μειονεκτήματα, όπως ο συχνός περιοδικός καθαρισμός και η αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου λόγω σημαντικής πτώσης πίεσης στον οχετό εξαγωγής. Μια τελευταία εξωτερική τεχνική μείωσης της εκπομπών σωματιδίων αιθάλης είναι οι καταλύτες οξειδωσης (Diesel Oxidation Catalysts - DOCs), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Με χρήση ατών, έχουν αναφερθεί επίπεδα μείωσης των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης μεταξύ 20% και 40% (32).

Στο πλαίσιο των τεχνικών που εντάσσονται στη δεύτερη κατηγορία, εφαρμόζονται προηγμένες μέθοδοι για τον έλεγχο της διεργασίας της καύσης σε κάθε κύλινδρο του κινητήρα. Οι τεχνικές αυτές στοχεύουν κυρίως στη μείωση των εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης. Μια τέτοια εσωτερική τεχνική είναι η υιοθέτηση στρατηγικών πολλαπλών εγχύσεων σε έναν κύκλο λειτουργίας του κινητήρα. Οι στρατηγικές αυτές είναι εφικτές μέσω συστημάτων με ηλεκτρονικά ελεγχόμενη έγχυση, όπως τα συστήματα κοινού συλλέκτη (CRS). Πρόσφατες υπολογιστικές μελέτες έχουν δείξει ότι, με χρήση κατάλληλου προφίλ έγχυσης σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα, είναι εφικτή η μείωση μέχρι και 20% στις εκπομπές NOx, χωρίς μείωση της ωφέλιμης ισχύος (33). Αντίστοιχα, είναι εφικτή η μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης, με χρήση μετέγχυσης. Επίσης, κατάλληλος χρονισμός των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής, καθώς και η χρήση προηγμένων συστημάτων υπερπλήρωσης, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών NOx (κύκλος Miller, υπερπλήρωση δύο βαθμίδων). Μια άλλη εσωτερική τεχνική μπορεί να συνίσταται στη χρήση εγχυτήρων νέας γενιάς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από σχεδόν μηδενικό νεκρό όγκο (sacless injectors). Η χρήση τέτοιων εγχυτήρων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, ενώ, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, μπορεί να υπάρξει και συμβολή στη μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης (34). Μια άλλη εσωτερική τεχνική για τη μείωση των εκπομπών NOx είναι η ανακυκλοφορία των καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation - EGR). Συγκεκριμένα, με την επαναεισαγωγή τμήματος των καυσαερίων στον κύλινδρο επιτυγχάνεται αύξηση της μέσης θερμοχωρητικότητας του μίγματος, αλλά και μείωση των τοπικών τιμών της συγκέντρωσης του μοριακού οξυγόνου. Έτσι, επιτυγχάνεται μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων και επιβραδύνεται σημαντικά ο ρυθμός παραγωγής οξειδίων του αζώτου, με τελικό αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των εκπομπών NOx. Μια άλλη υποσχόμενη εσωτερική τεχνική για τη μείωση των εκπομπών NOx είναι η εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης. Η χρήση νερού μειώνει δραστικά τις εκπομπές NOx για τους εξής λόγους:

- Το νερό χαρακτηρίζεται από υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ειδική θερμοχωρητικότητα όλου του μίγματος στον θάλαμο καύσης. Έτσι, η θερμοκρασία στην κύρια ζώνη της καύσης είναι χαμηλή, και δεν ενεργοποιείται σε μεγάλο βαθμό ο μηχανισμός σχηματισμού NOx.
- Η περιεκτικότητα σε μοριακό οξυγόνο του όλου μίγματος στον θάλαμο καύσης μειώνεται, με αποτέλεσμα αντίστοιχη μείωση στις τοπικές τιμές της συγκέντρωσης του μοριακού οξυγόνου. Έτσι, επιβραδύνεται ο ρυθμός σχηματισμού θερμικού NO.

Η εισαγωγή του νερού στο θάλαμο καύσης μπορεί να επιτευχθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

1. Σε μορφή μίγματος με το καύσιμο (γαλάκτωμα - emulsion).
2. Με απευθείας έγχυση του νερού από ξεχωριστούς εγχυτήρες.
3. Σε μορφή μίγματος με τον αέρα εισαγωγής.

## **2.4 Μετέγχυση καυσίμου σε κινητήρες Diesel**

Όπως προαναφέρθηκε, η εισαγωγή των συστημάτων έγχυσης κοινού συλλέκτη (CRS) στη ναυτική τεχνολογία ήταν επαναστατική αναφορικά με την έγχυση καυσίμου, καθώς πλέον ο χρονισμός της έγχυσης είναι ανεξάρτητος από το φορτίο του κινητήρα. Επίσης, δίδεται η δυνατότητα εφαρμογής στρατηγικών πολλαπλών εγχύσεων, όπως ακριβώς έχει ήδη γίνει στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Στόχος των πολλαπλών εγχύσεων είναι η μείωση των εκπομπών ρύπων του κινητήρα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εκπονείται μια υπολογιστική μελέτη της επίδρασης της έγχυσης διπλού παλμού στους ρύπους και την απόδοση ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel. Ειδικότερα, η στρατηγική αυτή έγχυσης αποτελείται από μία κύρια έγχυση, κατά την οποία εγχύεται το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του καυσίμου, η οποία ακολουθείται από μία δεύτερη έγχυση καυσίμου (μετέγχυση). Οι παράμετροι που καθορίζουν το συνολικό προφίλ έγχυσης παίζουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του κινητήρα. Η διακοπή της έγχυσης έχει ως απόρροια η μετέγχυση να λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες. Έτσι, εφαρμογή μιας τέτοιας στρατηγικής έγχυσης αναμένεται, πρώτα από όλα, να περιορίσει τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τοπικές θερμοκρασίες (εξαιτίας της εκτόνωσης του μίγματος), και κατ' επέκταση τη δημιουργία NO<sub>x</sub>, η οποία εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Όσον αφορά στην παραγωγή σωματιδίων αιθάλης, η ύπαρξη μεσοδιαστήματος μεταξύ της κύριας έγχυσης και της μετέγχυσης αναμένεται να μειώσει τις τιμές του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (μείωση του ρυθμού παραγωγής σωματιδίων αιθάλης), ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της καύσης του μετεγχυόμενου καυσίμου αναμένεται να ενισχύσει τους ρυθμούς οξειδωσης των σωματιδίων. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω αναμενόμενες τάσεις, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε αρχικά μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με την επίδραση των παραμέτρων της έγχυσης καυσίμου με παρουσία μετέγχυσης σε κινητήρες Diesel.

Οι Poorghasemi et al. (35) μελέτησαν την επίδραση προφίλ έγχυσης διπλού παλμού, το οποίο χαρακτηρίζεται από μία κύρια έγχυση και μία μετέγχυση, στις εκπομπές NO<sub>x</sub> και σωματιδίων αιθάλης ενός τετράχρονου ταχύστροφου κινητήρα Diesel. Τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης εργασίας επισημαίνουν τη σημαντική μείωση στις εκπομπές NO<sub>x</sub> και σωματιδίων αιθάλης, όταν το 25% του συνολικού καυσίμου εγχύεται κατά τη μετέγχυση, με κατάλληλη επιλογή της αρχής της μετέγχυσης. Παρατηρήθηκε μείωση στις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης χάρις την καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα κατά το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των δύο παλμών έγχυσης. Επίσης, η ταυτόχρονη μείωση στις εκπομπές NO<sub>x</sub> σχετίστηκε με την καύση του μετεγχυόμενου καυσίμου μακριά από το ANΣ πράγμα που συμβάλλει σε μείωση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών. Επιπροσθέτως, εξήχθη το συμπέρασμα ότι η αύξηση της πίεσης έγχυσης συμβάλλει δραστικά στη μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης, λόγω του αυξημένου ρυθμού οξειδωσης αυτών. Ο λόγος που αυτό συμβαίνει είναι, κατά τους συγγραφείς της εργασίας (35), η βελτιωμένη εξάτμιση του spray του καυσίμου, και κατ' επέκταση η καλύτερη ανάμιξή του με τον αέρα.

Μια άλλη σχετική εργασία είναι αυτή των Jeftic et al. (36), στην οποία μελετήθηκε η επίδραση της μετέγχυσης στη συμπεριφορά ενός τετράχρονου ταχύστροφου κινητήρα Diesel, όταν η μετέγχυση λαμβάνει χώρα αρκετά μακριά από το πέρας της κύριας έγχυσης. Αξιοσημείωτο είναι ότι η μάζα του εγχυόμενου καυσίμου στην περίπτωση αναφοράς διατηρήθηκε σταθερή για την κύρια έγχυση, ενώ κατά τη μετέγχυση εγχύθηκε επιπλέον μάζα καυσίμου. Οι παρατηρήσεις των συγγραφέων επισημαίνουν ίδια επίπεδα εκπομπών NO<sub>x</sub>, συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς, δηλαδή εγχυόμενη μάζα καυσίμου κατά τη μετέγχυση δεν συνέβαλε στη δημιουργία NO<sub>x</sub>. Ακόμη, για τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης, σε αντίθεση με αυτές των NO<sub>x</sub>, παρατηρήθηκε μείωση. Αυτή η μείωση αποδόθηκε στο γεγονός ότι η καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου συνέβαλε στην περαιτέρω οξείδωση της παραχθείσας αιθάλης. Οι συγγραφείς της εργασίας (36) τονίζουν ιδιαίτερα τη σημασία της επιλογής της έναρξης της μετέγχυσης, συγκεκριμένα ότι η κατάλληλη επιλογή αυτής συμβάλλει στην καλύτερη ανάμιξη του μετεγχυόμενου καυσίμου με τον αέρα (δημιουργία νέων περιοχών πλούσιων σε οξυγόνο μπροστά από τον εγχυτήρα). Ωστόσο, με την αύξηση της χρονικής απόστασης των δύο παλμών, μειώνεται το αποδιδόμενο έργο.

Οι Meloni et al. (37) μελέτησαν την επίδραση στρατηγικών έγχυσης διπλού και τριπλού παλμού στη διαδικασία της καύσης και στους παραγόμενους ρύπους ενός τετράχρονου ταχύστροφου κινητήρα Diesel. Η χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 4 μοίρες, ενώ η μάζα καυσίμου ανά παλμό μεταβαλλόταν. Είναι πολύ ενδιαφέρον ότι ιδιαίτερα θετικά συμπεράσματα εξήχθησαν για την περίπτωση χρήσης διπλού παλμού με παρουσία μετέγχυσης, όταν το μετεγχυόμενο καύσιμο ήταν 30 – 35% του συνολικά εγχυόμενου. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ταυτόχρονη μείωση στις εκπομπές NO<sub>x</sub> και σωματιδίων αιθάλης, διότι τα επίπεδα θερμοκρασίας μέσα στον κύλινδρο ήταν τέτοια που δεν συνέβαλαν στον σχηματισμό NO<sub>x</sub>, ενώ ευνοούσαν την οξείδωση της ήδη παραχθείσας αιθάλης.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εργασία είναι αυτή των Han et al. (38), στην οποία κατέστη εφικτή η σημαντική μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης σε τετράχρονο ταχύστροφο κινητήρα Diesel, με ταυτόχρονη διατήρηση σταθερών επιπέδων εκπομπών NO<sub>x</sub>. Αυτό επιτεύχθη με την έγχυση του 25% του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου κατά τη μετέγχυση. Τα αποτελέσματα αυτά ερμηνεύθηκαν από τους συγγραφείς με τη βελτιωμένη ανάμιξη καυσίμου - αέρα κατά το μεσοδιάστημα των δύο παλμών, η οποία οδηγεί στη μείωση των τοπικών τιμών του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα.

Τέλος, στην εργασία των Mohan et al. (39) παρουσιάζεται μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις διάφορες στρατηγικές πολλαπλών εγχύσεων που έχουν προταθεί. Όσον αφορά στην εφαρμογή της στρατηγικής διπλής εγχύσεως (κύρια έγχυση με μία μετέγχυση), υπογραμμίζεται η μεγάλη σημασία της χρονικής διαφοράς της αρχής της μετέγχυσης από το πέρας της κύριας έγχυσης. Επίσης, τονίζεται ότι, για προφίλ δύο παλμών με μετέγχυση χαρακτηριζόμενο από σύντομο μεσοδιάστημα μεταξύ των παλμών, προκύπτει μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης. Ακόμη, η αύξηση του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών μειώνει το παραγόμενο έργο, και αυξάνει τις εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων. Τέλος, στην εργασία (39) αναφέρεται ότι η αυξημένη πίεση έγχυσης συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης, αλλά ταυτόχρονα επιφέρει αύξηση των εκπομπών NO<sub>x</sub>. Αυτό οφείλεται στην εντονότερη

διάσπαση του spray, και κατά συνέπεια στην ταχύτερη εξάτμιση και καλύτερη ανάμιξή του με τον αέρα πληρώσεως. Έτσι, η καύση λαμβάνει χώρα με τοπικές τιμές του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου–αέρα εγγύτερα της στοιχειομετρικής αναλογίας. Κατά συνέπεια, προκύπτουν υψηλά επίπεδα θερμοκρασιών, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ρυθμός σχηματισμού NO<sub>x</sub>, αλλά και ο ρυθμός οξειδωσης της παραχθείσας αιθάλης.

Συγκεντρωτικά, από την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι οι παράμετροι που καθορίζουν την επιτυχημένη εφαρμογή στρατηγικής έγχυσης με παρουσία μετέγχυσης είναι οι ακόλουθες:

- Το ποσοστό μάζας καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση.
- Η χρονική απόσταση μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της αρχής της μετέγχυσης (μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών).

Όταν η επιλογή των παραπάνω παραμέτρων είναι η κατάλληλη, η χρήση της συγκεκριμένης στρατηγικής έγχυσης μπορεί να συμβάλει στην ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> και σωματιδίων αιθάλης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην έναρξη της μετέγχυσης, ώστε να μην προκαλείται μείωση στο παραγόμενο έργο του κινητήρα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία αρχικά μελετάται παραμετρικά η επίδραση της διαφοροποίησης του προφίλ έγχυσης με μετέγχυση στις εκπομπές ρύπων (NO<sub>x</sub> και σωματίδια αιθάλης) και στην ειδική κατανάλωση ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται για την κατάστρωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, συγκεκριμένα για τον καθορισμό του πεδίου ορισμού των μεταβλητών σχεδίασης του προφίλ έγχυσης καυσίμου.



### **3. Προσομοίωση κινητήρα και λογισμικό βελτιστοποίησης**

#### **3.1 KIVA-3 : Ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής**

Τα τελευταία χρόνια, ακολουθώντας τη ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics - CFD) αρχίζει να αποτελεί ένα ολοένα και ισχυρότερο εργαλείο στα χέρια των ερευνητών και των μηχανικών. Η εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής υποστηρίζει τον μηχανικό να κατανοήσει καλύτερα τα φαινόμενα ροής και καύσης που λαμβάνουν χώρα μέσα στον κύλινδρο ενός κινητήρα. Επιπλέον, σε συνδυασμό με μεθόδους βελτιστοποίησης, η εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορεί να συμβάλει στον αποδοτικότερο σχεδιασμό ενός κινητήρα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3, ο οποίος έχει αναπτυχθεί από το Los Alamos National Laboratory (40). Ο κώδικας KIVA-3 επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις διατήρησης της συμπιεστής ροής με παρουσία χημικών αντιδράσεων. Περιλαμβάνει έναν επιμέρους κώδικα δημιουργίας υπολογιστικών πλεγμάτων για πολύπλοκες γεωμετρίες. Οι κύριες εξισώσεις επίλυσης είναι η εξίσωση της συνέχειας, η εξίσωση της ορμής και η εξίσωση της ενέργειας. Αυτές οι εξισώσεις διακριτοποιούνται στο χώρο και το χρόνο με χρήση μεθόδων χαμηλής τάξεως.

Ο κώδικας περιλαμβάνει μοντέλα ψεκασμού καυσίμου (spray), έναυσης, καύσης και σχηματισμού ρύπων (NOx και σωματιδίων αιθάλης). Συγκεκριμένα, το μοντέλο του ψεκασμού καυσίμου περιλαμβάνει έναν κλιμακωτό μηχανισμό διάσπασης των σταγονιδίων του καυσίμου (41), (42), ενώ ταυτόχρονα η μοντελοποίηση της έναυσης βασίζεται σε επίλυση μιας κατάλληλης εξίσωσης μεταφοράς (43). Η μοντελοποίηση του σχηματισμού NOx βασίζεται σε έναν εκτενή μηχανισμό, που είναι περαιτέρω επέκταση του διευρυμένου μηχανισμού Zeldovich (44). Τέλος, η δημιουργία σωματιδίων αιθάλης βασίζεται σε ένα φαινομενολογικό μοντέλο, στο οποίο ο στιγμιαίος ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον ρυθμό παραγωγής όσο και του ρυθμού οξείδωσης των σωματιδίων αιθάλης (45).

### **3.2 Χαρακτηριστικά κινητήρα**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 η λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland. Ο Πίνακας 3 περιλαμβάνει χαρακτηριστικά του κινητήρα RT-flex58T-B, καθώς και στοιχεία για τη λειτουργία στην περιοχή του πλήρους φορτίου.

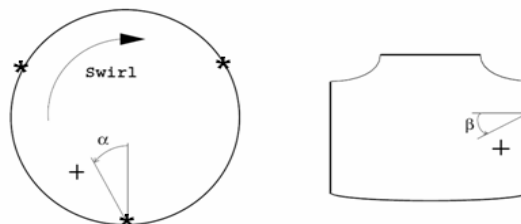
Τύπος	RT-flex58T-B
Διάμετρος εμβόλου	580 mm
Διαδρομή εμβόλου	2416 mm
Ταχύτητα περιστροφής	105 RPM
Μέση ταχύτητα εμβόλου	8.46 m/s
Κλείσιμο βαλβίδας εξαγωγής (από ΑΝΣ)	-96°
Άνοιγμα βαλβίδας εξαγωγής (από ΑΝΣ)	120°
Σύστημα εγχύσεως	Common Rail System - CRS
Αριθμός εγχυτήρων	3
Μέση ενδεικνύμενη πίεση	19 bar
Μέγιστη ισχύς πέδης ανά κύλινδρο	2125 KW

*Πίνακας 3 : Χαρακτηριστικά του κινητήρα RT-flex58T-B.*

Σε πλήρες φορτίο ο κινητήρας λειτουργεί με περίσσεια αέρα, και συγκεκριμένα με συνολικό λόγο ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα  $\phi_{total}=0.511$ .

Ο κάθε κύλινδρος διαθέτει 3 εγχυτήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι συμμετρικά, ανά 120°, στην περιφέρεια του πώματος του κυλίνδρου. Το ακροφύσιο του κάθε εγχυτήρα φέρει 5 οπές, από τις οποίες εγχύεται υπό γωνία το καύσιμο, με σκοπό τον καλύτερο διασκορπισμό του στον θάλαμο καύσης.

Στην Εικόνα 6 ορίζονται οι γωνίες έγχυσης  $\alpha$  και  $\beta$ , οι οποίες καθορίζουν την κατεύθυνση της έγχυσης από κάθε οπή. Επίσης, ο Πίνακας 4 περιλαμβάνει την προσήμανση της κατεύθυνσης της έγχυσης από κάθε οπή του εγχυτήρα, όπως αυτή ορίζεται από την Εικόνα 6. Παρατηρείται γενικά ότι, στον παρόντα εγχυτήρα, η κατεύθυνση της έγχυσης ταυτίζεται με την αντίστοιχη του εγκάρσιου στροβιλισμού. Ως εγκάρσιος στροβιλισμός ορίζεται η εισαγωγή αέρα σάρωσης στον θάλαμο καύσης με σημαντική εφαπτομενική συνιστώσα του διανύσματος της ταχύτητας. Με την ύπαρξη εγκάρσιου στροβιλισμού επιτυγχάνεται καλύτερη απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια και καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα, κατά συνέπεια επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα καύσης.



*Εικόνα 6 : Ορισμός γωνιών έγχυσης  $\alpha$  και  $\beta$ .*

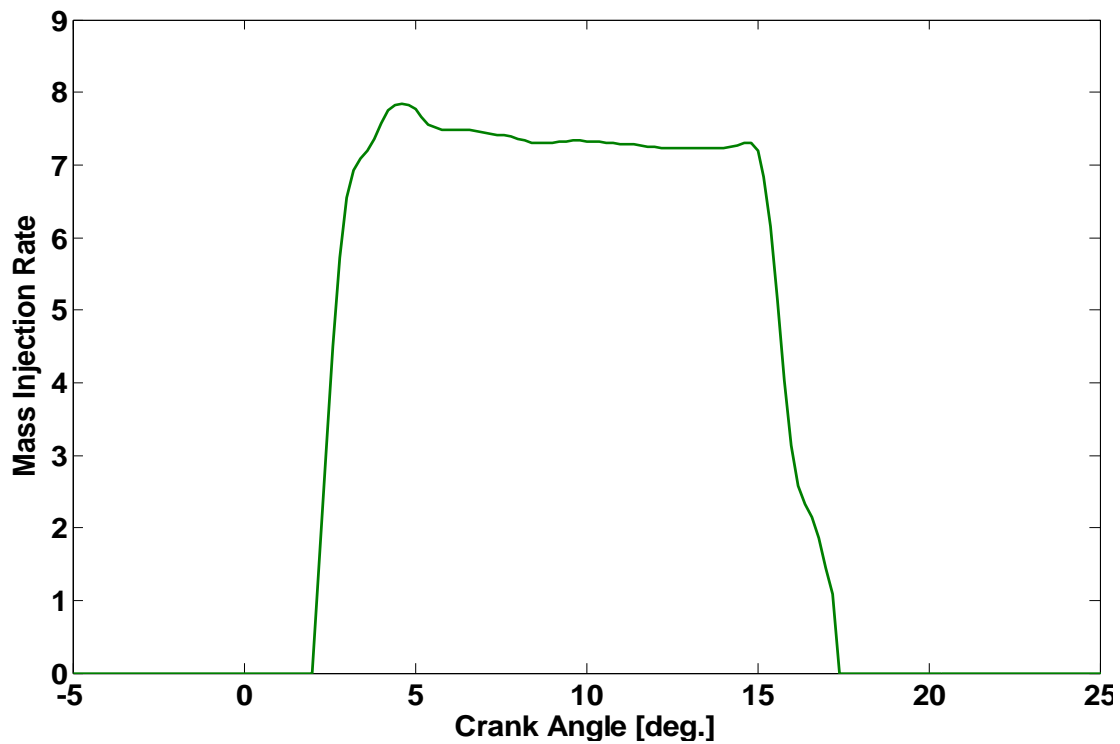


Αριθμός Οπής	1	2	3	4	5
Γωνία α	-	+	+	+	+
Γωνία β	+	+	+	+	+

Πίνακας 4 : Προσήμανση των γωνιών έγχυσης α και β.

### 3.3 Περίπτωση αναφοράς

Στην παρούσα εργασία μελετάται η χρήση διαφορετικών προφίλ έγχυσης με παρουσία μετέγχυσης, σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά μιας περίπτωσης αναφοράς, η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχές προφίλ έγχυσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, το προφίλ έγχυσης είναι κοινό για τους τρεις εγχυτήρες. Το (συνεχές) προφίλ της περίπτωσης αναφοράς, το οποίο παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1, έχει ως αρχή τις 2 μοίρες γωνίας στροφάλου μετά το άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ) και διάρκεια 15.2 μοίρες,



Διάγραμμα 1: Αδιαστατοποιημένο προφίλ εγχύσεως καυσίμου στην περίπτωση αναφοράς.

Στο Διάγραμμα 1 το προφίλ εγχύσεως παρουσιάζεται αδιαστατοποιημένο ως προς τη συνολική εγχυόμενη μάζα καυσίμου:

$$\text{Mass Injection Rate} = \frac{dm}{d\phi} \cdot \frac{100}{m_{tot}} \quad [3.3.1]$$

όπου  $\frac{dm}{d\phi}$  είναι η παροχή εγχυόμενης μάζας καυσίμου ανά γωνία στροφάλου (gr/CA) και  $m_{tot}$  είναι η συνολική εγχυόμενη μάζα καυσίμου (gr).

Για το προφίλ εγχύσεως της περίπτωσης αναφοράς ισχύουν τα ακόλουθα:

1. Διάστημα 2 – 5 ° : σε αυτό το διάστημα παρατηρείται μια 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.
2. Διάστημα 5 – 15 ° : εδώ ο ρυθμός έγχυσης παραμένει πρακτικά σταθερός, κάτι που οφείλεται στη μεγάλη διάρκεια έγχυσης.
3. Διάστημα 15 – 17.2 ° : στο τελευταίο αυτό διάστημα λαμβάνει χώρα ο βαθμιαίος μηδενισμός του ρυθμού έγχυσης, που αντιστοιχεί στο κλείσιμο της βελόνας του εγχυτήρα.

Ο Πίνακας 5 περιλαμβάνει τις συνθήκες λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της περίπτωσης 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

Πίνακας 5: Δεδομένα αριθμητικής προσομοίωσης της περίπτωσης αναφοράς.

Η ένταση του εγκάρσιου στροβιλισμού (Swirl Number) ορίζεται ως ο λόγος της γωνιακής ταχύτητας στροβιλισμού του αέρα προς την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής:

$$SN = \frac{\omega_{swirl}}{\omega_{engine}} \quad [3.3.2]$$

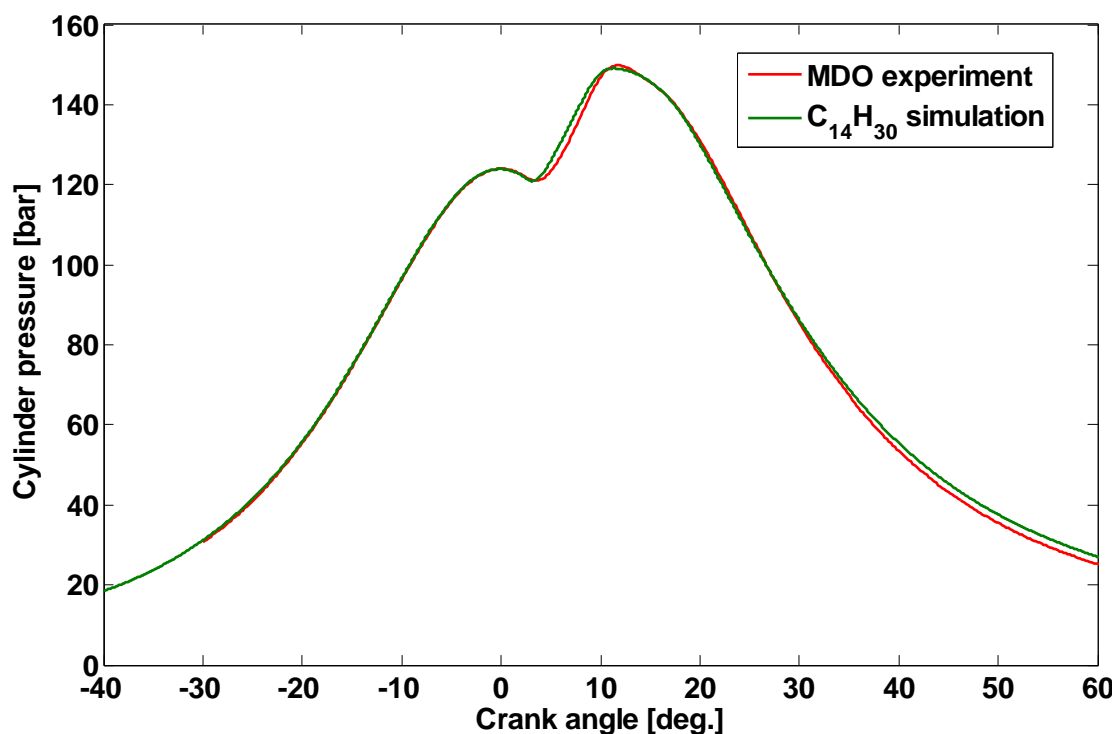
όπου  $\omega_{swirl}$  είναι η γωνιακή ταχύτητα στροβιλισμού του αέρα [rad/s] και  $\omega_{engine} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$

είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής [rad/s] και τέλος, N είναι η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής (RPM). Ο παρών κινητήρας εργάζεται για ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα έντασης του εγκάρσιου στροβιλισμού.

Ο εγκάρσιος στροβιλισμός του αέρα πλήρωσης υπάρχει προκειμένου να γίνεται καλύτερη απόπλυση των καυσαερίων, καθώς και καλύτερη ανάμιξη αέρα-καυσίμου. Στον κώδικα KIVA-3, οι συνιστώσες της ταχύτητας που αντιστοιχούν στην εγκάρσια συστροφή ορίζονται στην αρχή της συμπίεσης με τη βοήθεια μιας συνάρτησης Bessel. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα  $\omega_{swirl}$  αντιστοιχεί σε γραμμικό προφίλ συναρτήσεως της ακτίνας, το οποίο χαρακτηρίζεται από την ίδια τιμή της 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 ολόκληρο τον όγκο εντός ενός κυλίνδρου, με σκοπό να υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης έγχυσης μεταβλητού χρονισμού μεταξύ των εγχυτήρων, δυνατότητα που προσφέρεται χάρις το σύστημα κοινού συλλέκτη (CRS). Το υπολογιστικό πλέγμα, όπως αυτό έχει ελεγχθεί και αξιολογηθεί από προγενέστερες μελέτες (1), 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. Συνολικά, η προσομοίωση περιλαμβάνει τις φάσεις της συμπίεσης, της καύσης και της εκτόνωσης (χωρίς τη διεργασία απόπλυσης). Η αντιστοιχία των συγκεκριμένων φάσεων σε μοίρες γωνίας στροφάλου είναι από  $-96^{\circ}$  CA μέχρι  $120^{\circ}$  CA, με σημείο αναφοράς το ANΣ.

Οι αρχικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (Πίνακας 5) της περίπτωσης αναφοράς προέκυψαν από προγενέστερες μελέτες (1) με διαδικασία δοκιμής και επαλήθευσης, συγκρίνοντας κάθε φορά την υπολογισθείσα καμπύλη πίεσης με την αντίστοιχη πειραματική. Τα πειραματικά δεδομένα αντιστοιχούν στον κινητήρα RT-flex58T-B, ο οποίος βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της Wärtsilä Switzerland, και χρησιμοποιεί ως καύσιμο ναυτιλιακό ντίζελ (Marine Diesel Oil - MDO). Στις προαναφερθείσες εργασίες, αλλά και στην παρούσα, οι θερμοφυσικές ιδιότητες του καυσίμου προσεγγίζονται με αυτές του δεκατετρανίου ( $C_{14}H_{30}$ ). Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η υπολογισθείσα καμπύλη πίεσης για την περίπτωση αναφοράς, συγκρινόμενη με τα πειραματικά δεδομένα.



Διάγραμμα 2: Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλη πίεσης σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για την περίπτωση αναφοράς.

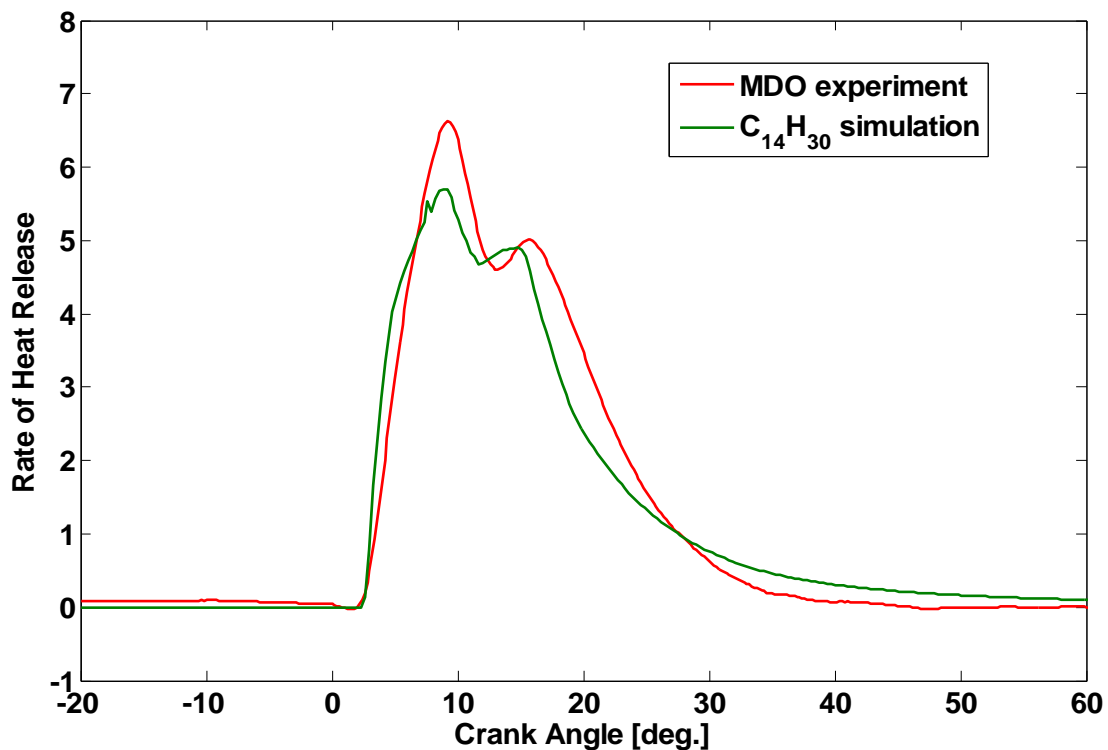
Στο Διάγραμμα 3 παρουσιάζεται η πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλη ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Rate Of Heat Release - ROHR). Η πειραματική καμπύλη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας βασίζεται στη μετρηθείσα πίεση, η οποία δίνεται ως

δεδομένο σε θερμοδυναμικό κώδικα προσομοίωσης της διεργασίας (Dr. G. Weisser). Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας έχει αδιαστατοποιηθεί με τον εξής τρόπο:

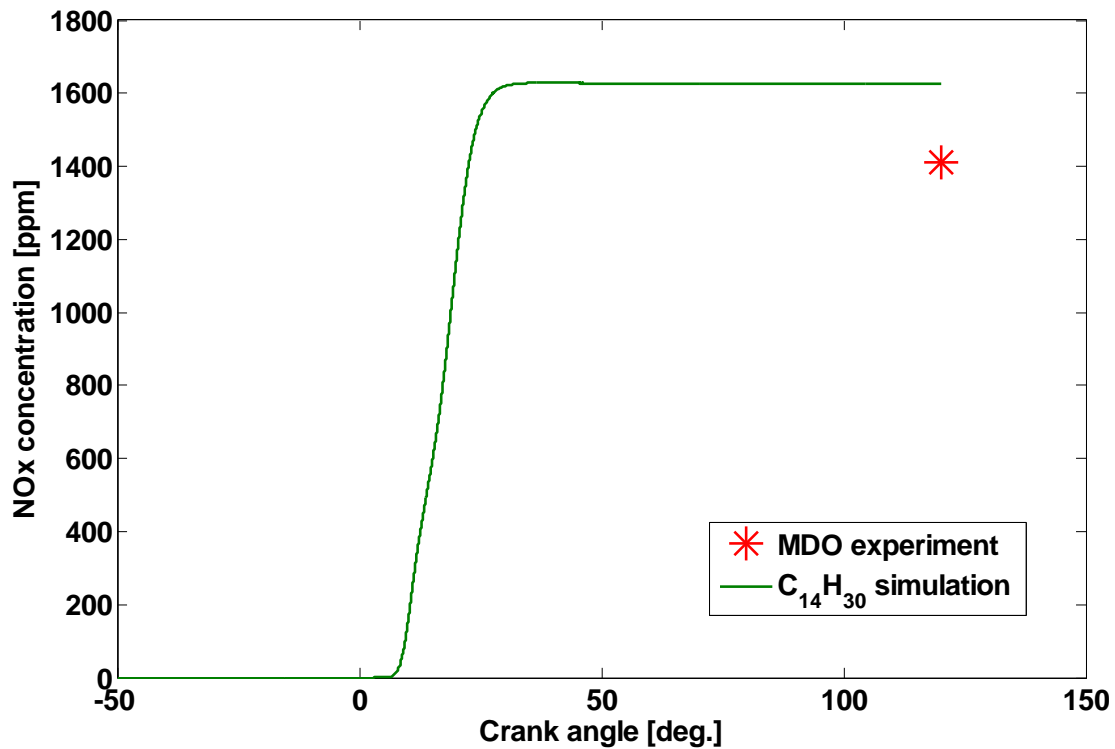
$$ROHR = \frac{d(Q_{chem})}{d\phi} \cdot \frac{100}{Q_{chem,tot}} \quad [3.3.3]$$

όπου  $Q_{chem}$  είναι η εκλυόμενη θερμότητα της καύσης (Joule) και  $Q_{chem,tot}$  είναι η συνολική εκλυόμενη θερμότητα της καύσης (Joule). Στο Διάγραμμα 3, οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν δύο τοπικά μέγιστα, από τα οποία το τελευταίο αποδίδεται στην αλληλεπίδραση των δεσμών του καυσίμου ενός εγχυτήρα με τα προϊόντα της καύσης του προηγούμενου εγχυτήρα, που μεταφέρονται στην περιοχή του επόμενου λόγω του έντονου εγκάρσιου στροβιλισμού. Στην αλληλεπίδραση αυτή συμβάλλει και η δημιουργία τύρβης από τη δέσμη του εγχυόμενου καυσίμου, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη διάρκεια έγχυσης.

Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζεται η υπολογισθείσα χρονική ιστορία της συγκέντρωσης  $NO_x$ , ενώ απεικονίζεται και η πειραματική τελική συγκέντρωση. Η υπολογισθείσα τελική συγκέντρωση (1620 ppm) βρίσκεται σε ικανοποιητική συμφωνία με την πειραματική τιμή των μετρήσεων (1410 ppm) της κατασκευάστριας εταιρείας Wärtsilä Switzerland.



Διάγραμμα 3: Πειραματική και υπολογισθείσα καμπύλη ρυθμού έκλυσης θερμότητας σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για την περίπτωση αναφοράς.



Διάγραμμα 4: Υπολογισθείσα συγκέντρωση NOx σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου και μετρηθείσα τελική συγκέντρωση, για την περίπτωση αναφοράς.

Από τα Διαγράμματα 2, 3, 4 προκύπτει ικανοποιητική σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα αντίστοιχα πειραματικά. Η σύγκριση είναι πολύ καλή αναφορικά με την καμπύλη της πίεσης, και λιγότερο για τη χρονική μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Συγκεκριμένα, ο προβλεπόμενος ρυθμός καύσης μετά το πέρας της έγχυσης είναι βραδύτερος, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο πειραματικό. Έτσι, η συνολική διάρκεια της καύσης στην προσομοίωση είναι μεγαλύτερη. Η υπολογισθείσα τελική συγκέντρωση NOx είναι επίσης σε καλή συμφωνία με την αντίστοιχη πειραματική.

Τέλος, για τον υπολογισμό του σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Hirogasu et al. (45). Το μοντέλο αυτό περιγράφει τον ρυθμό μεταβολής της τελικής μάζας της αιθάλης με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{dm_{s,f}}{dt} - \frac{dm_{s,ox}}{dt} \quad [3.3.4]$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης περιγράφει τον ρυθμό σχηματισμού της αιθάλης, και ο δεύτερος τον ρυθμό οξείδωσής της. Συγκεκριμένα, έχουμε:

$$\frac{dm_{s,f}}{dt} = A_f \cdot m_{f,v} \cdot p^{0.5} \cdot e^{-\frac{E_{s,f}}{R \cdot T}} \quad [3.3.5]$$

$$\frac{dm_{s,ox}}{dt} = A_{ox} \cdot m_s \cdot \frac{p_{O_2}}{p} \cdot p^{1.8} \cdot e^{-\frac{E_{s,ox}}{R \cdot T}} \quad [3.3.6]$$

όπου  $m_{f,v}$  είναι η μάζα του ατμοποιημένου καυσίμου,  $m_s$  η μάζα σωματιδίων,  $p_{O_2}$  η μερική πίεση του μοριακού οξυγόνου,  $E_{s,f}$  και  $E_{s,ox}$  είναι ενέργειες ενεργοποίησης με τιμές 52335

$\text{kJ/kmol}$  και  $58615 \text{ kJ/kmol}$ , αντίστοιχα,  $R$  η γενική σταθερά των αερίων, ενώ  $p$ ,  $T$  είναι η επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία, αντίστοιχα. Τέλος, όσον αφορά στις σταθερές  $A_f$  και  $A_{ox}$ , η ρύθμιση των τιμών τους έγινε σε προηγούμενη διπλωματική εργασία (46), σύμφωνα με τις κατευθύνσεις στην εργασία (47). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι τιμές αμφότερων των σταθερών διατηρήθηκαν όμοιες με τις υποδείξεις της εργασίας (46).

### **3.4 Θεωρία Βελτιστοποίησης**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αρχικά μια παραμετρική μελέτη της επίδρασης της στρατηγικής έγχυσης διπλού παλμού στη λειτουργία δίχρονου ναυτικού κινητήρα, τα αποτελέσματα της οποίας λαμβάνονται υπόψη στη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Οι προς βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση) στόχοι του προβλήματος είναι οι ακόλουθοι τρεις:

1. Τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx)
2. Τελική συγκέντρωση σωματιδίων αιθάλης (soot)
3. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC)

Η βελτιστοποίηση των παραπάνω στόχων θα επιδιωχθεί μέσω έγχυσης διπλού παλμού (κύρια έγχυση και μετέγχυση). Οι μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι οι παράμετροι που καθορίζουν το συνολικό προφίλ έγχυσης, και αποτελούν τις παραμέτρους από τις οποίες εξαρτώνται οι στόχοι. Τέλος, η μελέτη βελτιστοποίησης περιέχει και προβλήματα με περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται με την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία του κινητήρα.

#### **3.4.1 Μέθοδοι βελτιστοποίησης**

Γενικά, μια μέθοδος βελτιστοποίησης είναι μια διαδικασία μέσω της οποίας γίνεται η ανίχνευση των βέλτιστων λύσεων ενός προβλήματος. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης διακρίνονται σε αιτιοκρατικές (deterministic) και στοχαστικές (stochastic).

Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν τη γενικευμένη έννοια της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης (στόχος), τιμές της οποίας καλούνται να υπολογίσουν ή να προσεγγίσουν. Κρίσιμο σημείο των αιτιοκρατικών μεθόδων είναι ότι ενέχουν τον κίνδυνο η λύση που θα προκύψει ως βέλτιστη να είναι τοπικό ακρότατο και όχι ολικό. Επίσης, κοινό χαρακτηριστικό τους είναι ότι η ανίχνευση της βέλτιστης λύσης ξεκινά από μια αρχική λύση, και συνεχίζεται υπολογίζοντας και χρησιμοποιώντας πληροφορίες για την πρώτη ή δεύτερη παράγωγο ως προς τις μεταβλητές σχεδίασης. 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.

Οι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν στοιχεία τυχαίας ή οργανωμένα τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Κύρια χαρακτηριστικά των στοχαστικών μεθόδων είναι η εν γένει αυξημένη απαίτηση υπολογιστικής ισχύος, και το ευρύ πεδίο εφαρμογής τους. Στο πλαίσιο των στοχαστικών μεθόδων, είναι περισσότερο πιθανή η εύρεση του ολικού ακρότατου (και όχι ενός τοπικού) της αντικειμενικής συνάρτησης. Το πρόβλημα του εγκλωβισμού σε τοπικό ακρότατο αντιμετωπίζεται πρώτον με τη μη χρήση αιτιοκρατικών κριτηρίων βελτίωσης της τρέχουσας λύσης και δεύτερον με την αξιολόγηση πολλών υποψήφιας λύσεων σε κάθε κύκλο βελτίωσης των λύσεων.

## 1. Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των εξελικτικών αλγορίθμων (ΕΑ), όπως άλλωστε και κάθε στοχαστικής μεθόδου, είναι ο χειρισμός πληθυσμών υποψήφιων λύσεων, και όχι μίας μεμονωμένης λύσης ανά επανάληψη. Η 'εξέλιξη', στην οποία οφείλουν το όνομά τους αυτοί οι αλγόριθμοι, είναι μια διαδικασία οργανωμένης ανίχνευσης ενός συνόλου λύσεων από ένα σύνολο πιθανών λύσεων. Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό των εξελικτικών αλγορίθμων είναι ότι η εξέλιξη του πληθυσμού των λύσεων από γενιά σε γενιά καθορίζεται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Ένα τρίτο χαρακτηριστικό είναι η δυναμική διαδοχή των πληθυσμών των λύσεων, με τη δημιουργία νέων υποψήφιων λύσεων και εξαφάνιση άλλων με βάση την τιμή καταλληλότητά τους.

Στα πλεονεκτήματα των εξελικτικών αλγορίθμων συγκαταλέγονται η ευκολία προσαρμογής τους σε διαφορετικά προβλήματα και η δυνατότητά τους να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Αντιθέτως, ένα μειονέκτημά τους είναι ότι ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης απαιτεί συνήθως μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων, κάτι που προφανώς σημαίνει υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Στο πλαίσιο των εξελικτικών αλγορίθμων, δημιουργείται αρχικά ένας πληθυσμός των υποψήφιων λύσεων, ο οποίος αξιολογείται και εξελίσσεται σε νέο πληθυσμό υποψήφιων λύσεων (απόγονοι) από προκαθορισμένο αριθμό γονέων. Η αξιολόγηση βασίζεται στις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων (στόχων). Ο πληθυσμός των απογόνων αποτελείται πιθανότατα από καλύτερα άτομα. Από τους απόγονους επιλέγονται οι γονείς της νέα γενιάς, ίδιου αριθμού με της προηγούμενης. Σε κάθε γενιά υπάρχει ένα προκαθορισμένο σύνολο ατόμων, τα οποία μετά από την αξιολόγηση, χαρακτηρίζονται ως επίλεκτα. Τα επίλεκτα άτομα αποτελούν τους γονείς της επόμενης γενιάς. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης, το οποίο 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.

## 2. Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

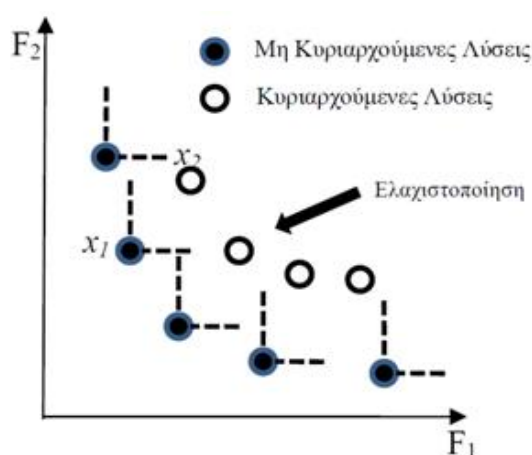
Καθώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελεί πρόβλημα πολλαπλών στόχων, δηλαδή έχει περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις (στόχους), απαιτείται η εφαρμογή πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Υπάρχουν δύο τρόποι αντιμετώπισης τέτοιου είδους προβλημάτων.

Πρώτον, με κατασκευή μιας αντικειμενικής συνάρτησης, με γραμμικό συνδυασμό των επιμέρους και χρήση κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας. Η αξιολόγηση που γίνεται με αυτόν τον τρόπο έχει ως μειονέκτημα ότι κάθε συντελεστής βαρύτητας είναι συνδεδεμένος με την επιρροή του αντίστοιχου στόχου στην εύρεση της «βέλτιστης λύσης» στο πρόβλημα, οπότε μια λάθος επιλογή αυτών των συντελεστών μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερο καλές λύσεις.

Δεύτερον, για την αξιολόγηση της κάθε προκύπτουσας γενιάς λύσεων εισάγεται η έννοια του μετώπου Pareto (Pareto front). Ουσιαστικά το μέτωπο Pareto είναι μια



σηματική αναπαράσταση των στόχων που διευκολύνει την επιλογή των καλύτερων (μη κυριαρχούμενων) λύσεων (48). Παράδειγμα μετώπου Pareto φαίνεται στην Εικόνα 7 για πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων. Η φύση του μετώπου Pareto (τελευταία γενιά) παρέχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ λύσεων με διαφορετικές τιμές της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης, ανάλογα με την απόφαση του χρήστη.



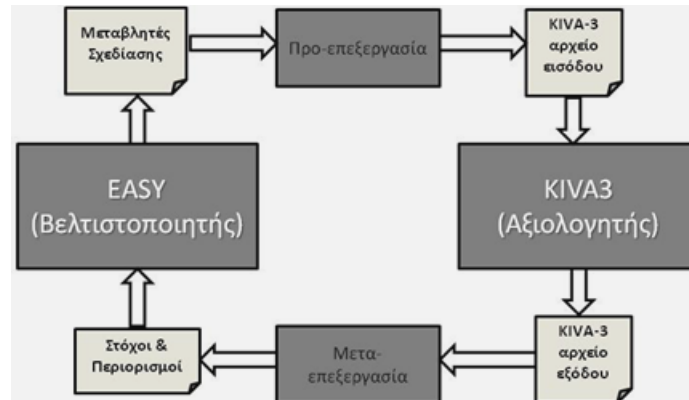
Εικόνα 7 : Μέτωπο Pareto για πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων (49).

### **3.4.2 Σύζευξη κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 και λογισμικού βελτιστοποίησης EASY**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση των μεταβλητών έγχυσης του κινητήρα RT-flex58T-B προκειμένου να ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα οι εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης, καθώς επίσης και η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Εδώ, θεωρείται προφίλ έγχυσης αποτελούμενο από κύρια έγχυση και μετέγχυση. Για να καταστεί εφικτή η εν λόγω βελτιστοποίηση έγινε σύζευξη του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής KIVA-3 με το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY (50), (51), το οποίο κάνει χρήση εξελικτικών αλγορίθμων. Έτσι, το λογισμικό EASY χρησιμοποιείται ως βελτιστοποιητής (optimizer), ενώ ο κώδικας KIVA-3 ως αξιολογητής (evaluator). Για τη σύζευξη μεταξύ των δύο λογισμικών αναπτύχθηκαν κατάλληλες ρουτίνες, οι οποίες άντλησαν στοιχεία από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες (1), (49), (52). Η συνολική υπολογιστική διαδικασία, όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα ροής της, παρουσιάζεται στην Εικόνα 8. Οι ρουτίνες που αναπτύχθηκαν αποτελούν κατάλληλες ρουτίνες προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας. Αναλυτικότερα:

- Ρουτίνα προεπεξεργασίας: Δέχεται ως είσοδο τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης (αρχείο εξόδου του λογισμικού EASY), υπολογίζει και σχεδιάζει το προφίλ έγχυσης (injection profile), και δημιουργεί το αρχείο εισόδου του κώδικα KIVA-3.
- Ρουτίνα μετεπεξεργασίας: Υπολογίζει τους στόχους (τελικές συγκεντρώσεις NOx και σωματιδίων αιθάλης, ειδική κατανάλωση καυσίμου), καθώς και τις τιμές των εκάστοτε περιορισμών, βασισμένη στο αρχείο εξόδου του κώδικα KIVA-3. Αυτή η πληροφορία μεταφέρεται στο λογισμικό EASY για τη συνέχιση της διαδικασίας (δημιουργία του πληθυσμού της επόμενης γενιάς).

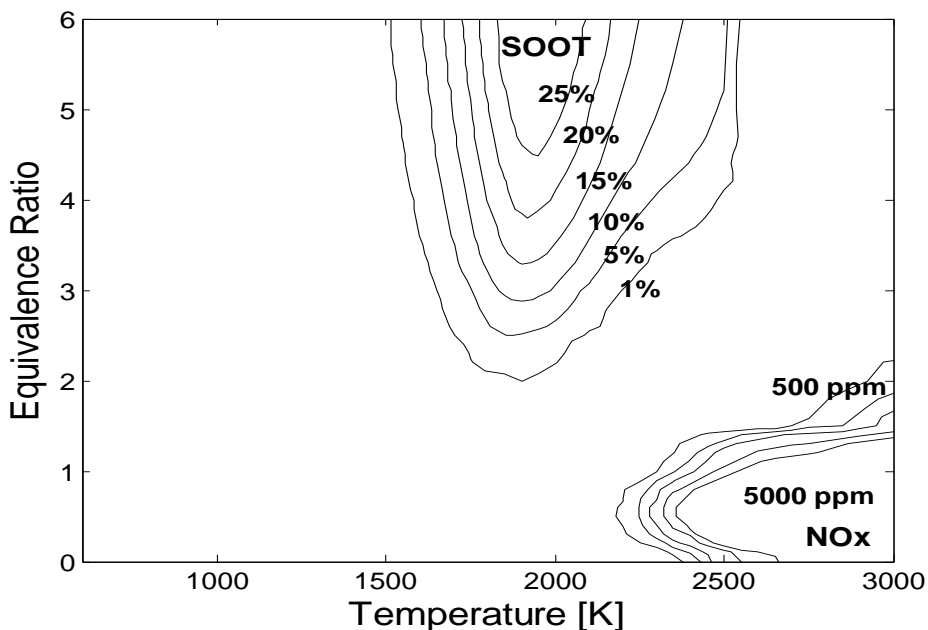
Συγκεντρωτικά, λοιπόν, ολόκληρος ο κύκλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης αποτελείται από τα εξής στάδια: την κατασκευή του προφίλ έγχυσης του καυσίμου και του αρχείου εισόδου (προεπεξεργασία) για το σύνολο των λύσεων της παρούσας γενιάς, την αξιολόγηση των εν λόγω λύσεων (ΚΙΝΑ-3), τον υπολογισμό των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών από το αρχείο εξόδου (μετεπεξεργασία), και, τέλος, την επιλογή των καλύτερων λύσεων, και, με βάση αυτές, τη δημιουργία των ατόμων της επόμενης γενιάς (EASY). Η διαδικασία σταματά όταν πληρούται το τεθέν κριτήριο τερματισμού.



Εικόνα 8 : Διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας (1).

### 3.5 Χάρτες T-φ και οπτικοποίηση ροϊκών πεδίων

Η μελέτη του σχηματισμού οξειδίων του αζώτου (NOx) και σωματιδίων αιθάλης (soot) για διαφορετικά σημεία εντός του κυλίνδρου μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τις τιμές της τοπικής θερμοκρασίας (T) και του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα (φ). Αποτελέσματα για τη δημιουργία NOx και σωματιδίων αιθάλης για συγκεκριμένες συνθήκες (T, φ) και δεδομένη πίεση μπορούν να ληφθούν με τη βοήθεια προσομοιώσεων χημικής κινητικής (μηδενικής διάστασης), μετά το πέρας μικρού χρονικού διαστήματος. Για ένα μεγάλο εύρος αρχικών συνθηκών, οι «χάρτες T - φ» απεικονίζουν τα αποτελέσματα (συγκεντρώσεις NOx και σωματιδίων αιθάλης) σε μορφή ισοϋψών καμπυλών. Στην περίπτωση προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, οι τοπικές τιμές των T και φ (αυτές που αντιστοιχούν σε κάθε υπολογιστικό κελί) μπορούν να τοποθετηθούν σε κατάλληλους χάρτες T - φ, με σκοπό την καλύτερη ποιοτική κατανόηση και ερμηνεία της διεργασίας της καύσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Όταν στην παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιείται ένας μόνο χάρτης T - φ (αποτελέσματα χημικής κινητικής για μία μόνο τιμή της πίεσης (53)), γίνεται αναφορά σε «στατικούς χάρτες T - φ». Όταν οι χάρτες αναφέρονται σε περισσότερες από μία πιέσεις (54), ονομάζονται «δυναμικοί χάρτες T - φ». Παρόλα αυτά, οι χάρτες παραμένουν ποιοτικά όμοιοι για διαφορετικές τιμές της πίεσης. Γι' αυτό, καθώς και για λόγους απλοποίησης, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία μόνον ένας («στατικός») χάρτης, ο οποίος προκύπτει για συνθήκες πίεσης 60 bar και χρόνο ολοκλήρωσης 2 ms (53). Ο συγκεκριμένος χρόνος των 2 ms αντιστοιχεί σε 1.3 °CA για τη δεδομένη ταχύτητα περιστροφής των 105 RPM του κινητήρα. Στην Εικόνα 5.2, απεικονίζεται ο στατικός χάρτης T - φ που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 9: Στατικός χάρτης T - φ, για πίεση 60 bar και χρόνο ολοκλήρωσης 2 ms (53).

Στους χάρτες T - φ διακρίνονται δύο περιοχές, οι οποίες αντιστοιχούν σε συνθήκες σχηματισμού NOx και σωματιδίων αιθάλης. Σημειώνεται ότι τα αναπαριστάμενα αποτελέσματα σχετικά με τα σωματίδια αιθάλης αντιστοιχούν μόνο στην παραγωγή και όχι

στην οξείδωση αυτών, με συνέπεια τα συνολικά συμπεράσματα αναφορικά με τον σχηματισμό τους να είναι ποιοτικά.

Επιπροσθέτως, τα υπολογιστικά αποτελέσματα, με βάση τα οποία προκύπτει το συνολικό ροϊκό πεδίο συναρτήσει του χρόνου, μπορούν να επεξεργαστούν με χρήση κατάλληλου λογισμικού οπτικοποίησης. Έτσι, είναι δυνατή η καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία της ροής και καύσης. Συγκεκριμένα, είναι δυνατό να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με την ανάμιξη καυσίμου-αέρα, τη χρονική εξέλιξη της καύσης, και την παραγωγή ρύπων.

#### **4. Παραμετρική ανάλυση μετέγχυσης καυσίμου σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα**

Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα από προγενέστερες μελέτες της βιβλιογραφίας, τα οποία παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.4, στο παρόν Κεφάλαιο διερευνάται παραμετρικά η επίδραση της στρατηγικής έγχυσης με μετέγχυση στις εκπομπές των κυριων ρύπων (NOx και σωματίδια αιθάλης) και στην ειδική κατανάλωση ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα, ο οποίος παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.2. Η επίδραση της μετέγχυσης στη λειτουργία ενός ναυτικού κινητήρα εξαρτάται σημαντικά από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Το ποσοστό μάζας καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση επί του συνολικά εγχυόμενου (Post Mass Fraction - PoMF).
- Η έναρξη της μετέγχυσης (Start of Post Injection - SoPoi). Πρέπει να τονιστεί ότι σημαντική πληροφορία αποτελεί και η χρονική απόσταση μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της αρχής της μετέγχυσης (μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών - GAP).

Η παρούσα διερεύνηση περιλαμβάνει δύο παραμετρικές αναλύσεις, οι οποίες αφορούν στα εξής:

- Σε αμφότερες τις αναλύσεις, η αρχή της κύριας έγχυσης (Start of Main Injection - SOMI) διατηρήθηκε σταθερή και ίση με  $2^\circ$  CA, όπως και στην περίπτωση αναφοράς (βλέπε §3.3). Επίσης, η συνολική εγχυόμενη μάζα διατηρήθηκε σταθερή και ίση με αυτή που αντιστοιχεί στην περίπτωση αναφοράς (βλ. Ενότητα 3.3).
- Πρώτη παραμετρική ανάλυση: για διάφορες τιμές του PoMF, μεταβάλλεται σημαντικά η SoPoi ( $GAP > 3^\circ$  CA).
- Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: για διάφορες τιμές του PoMF, η μεταβλητή GAP λαμβάνει τιμές  $1^\circ - 5^\circ$  CA.

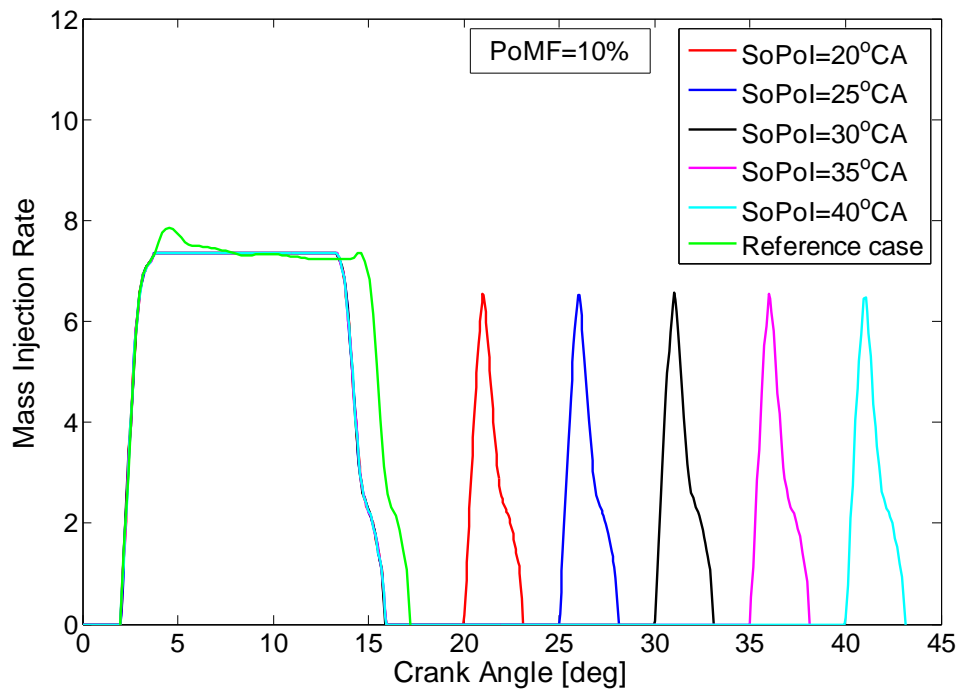
Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης των παραμέτρων που περιγράφουν το συνολικό προφίλ έγχυσης με μετέγχυση (Κεφάλαιο 5).

## **4.1 Πρώτη παραμετρική ανάλυση**

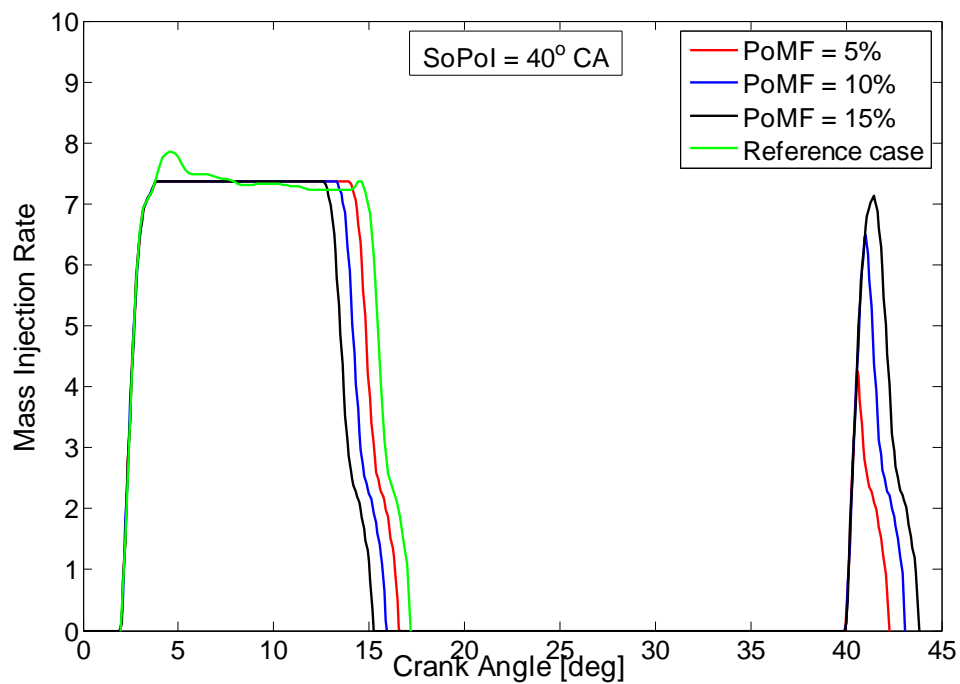
Όπως προαναφέρθηκε, οι δύο από τις βασικές μεταβλητές σχεδίασης ενός προφίλ έγχυσης με παρουσία μετέγχυσης είναι οι μεταβλητές PoMF και SoPol (ή, ισοδύναμα, η παράμετρος GAP). Σκοπός της πρώτης παραμετρικής ανάλυσης είναι η μεταβολή των τιμών των συγκεκριμένων μεταβλητών σχεδίασης, προκειμένου να εξακριβωθεί η επίδραση αυτής της μεταβολής στη λειτουργία ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα (NOx, σωματίδια αιθάλης και SFOC). Τονίζεται ότι, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, διατηρείται αμετάβλητη η μάζα του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου, καθώς και η αρχή της κύριας έγχυσης ( $SOMI = 2^\circ CA$ ). Ο Πίνακας 6 περιλαμβάνει τις τιμές (σε μοίρες γωνίας στροφάλου) που αντιστοιχούν στο μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών (GAP), για κάθε περίπτωση προσομοίωσης (PoMF και SoPol). Το Διάγραμμα 5 απεικονίζει τα προφίλ έγχυσης για σταθερή τιμή του ποσοστού της μετεγχυόμενης μάζας (PoMF = 10%), και μεταβαλλόμενη τιμή της γωνίας έναρξης της μετέγχυσης. Σημειώνεται ότι, στο τμήμα της κύριας έγχυσης μετά το πλήρες άνοιγμα και πριν την αρχή του κλεισίματος της βαλβίδας του εγχυτήρα, ο ρυθμός έγχυσης θεωρείται σταθερός. Όπως προκύπτει από σχετική διερεύνηση, η συγκεκριμένη απλοποίηση έχει αμελητέα επίδραση στα αποτελέσματα. Το Διάγραμμα 6 απεικονίζει τα προφίλ έγχυσης για σταθερή τιμή της έναρξης της μετέγχυσης (SoPol =  $40^\circ CA$ ), και μεταβαλλόμενη τιμή του ποσοστού της μετεγχυόμενης μάζας. Τόσο στο Διάγραμμα 5, όσο και στο Διάγραμμα 6, παρουσιάζεται και το (συνεχές) προφίλ της περίπτωσης αναφοράς.

PoMF (%)	SoPol ( $^\circ CA$ )				
	20 $^\circ$	25 $^\circ$	30 $^\circ$	35 $^\circ$	40 $^\circ$
5	3.43 $^\circ$	8.43 $^\circ$	13.43 $^\circ$	18.43 $^\circ$	23.43 $^\circ$
10	4.1 $^\circ$	9.1 $^\circ$	14.1 $^\circ$	19.1 $^\circ$	24.1 $^\circ$
15	4.77 $^\circ$	9.77 $^\circ$	14.77 $^\circ$	19.77 $^\circ$	24.77 $^\circ$

*Πίνακας 6: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: τιμές που αντιστοιχούν στο μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών (GAP), σε μοίρες γωνία στροφάλου, για κάθε περίπτωση προσομοίωσης (δεδομένες τιμές των μεταβλητών PoMF και SoPol).*



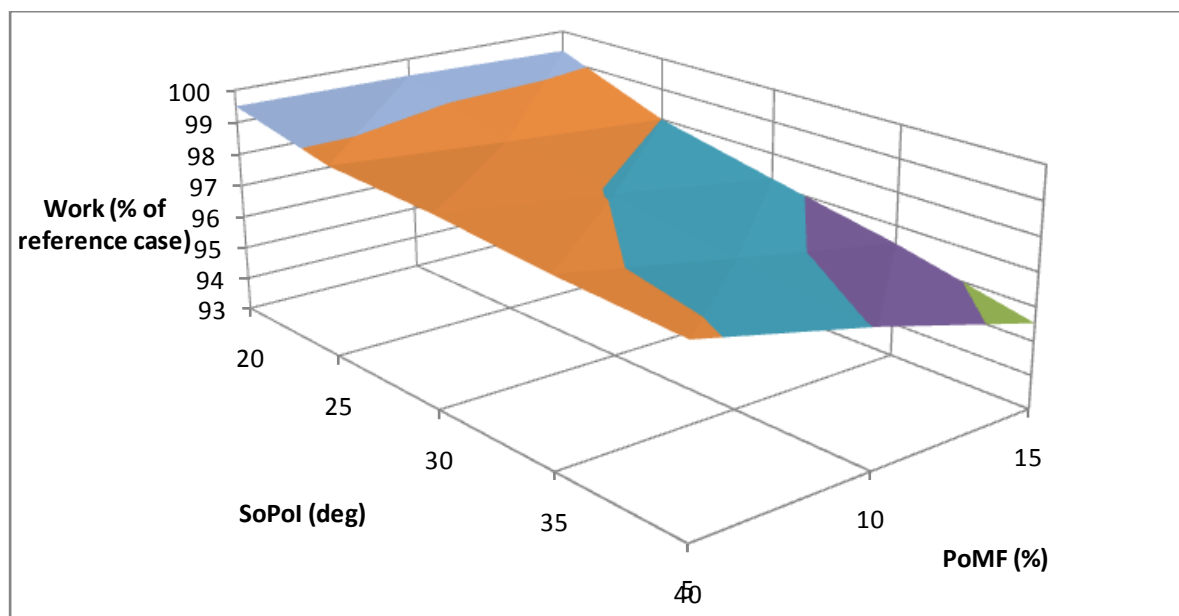
Διάγραμμα 5: Προφίλ έγχυσης για διάφορες τιμές της έναρξης της μετέγχυσης (20° - 40° CA), για σταθερό ποσοστό μετεγχυόμενης μάζας, PoMF = 10%. Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.



Διάγραμμα 6: Προφίλ έγχυσης για σταθερή τιμή της έναρξης μετέγχυσης (40° CA), και μεταβαλλόμενο ποσοστό μετεγχυόμενης μάζας (5% - 15%). Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.

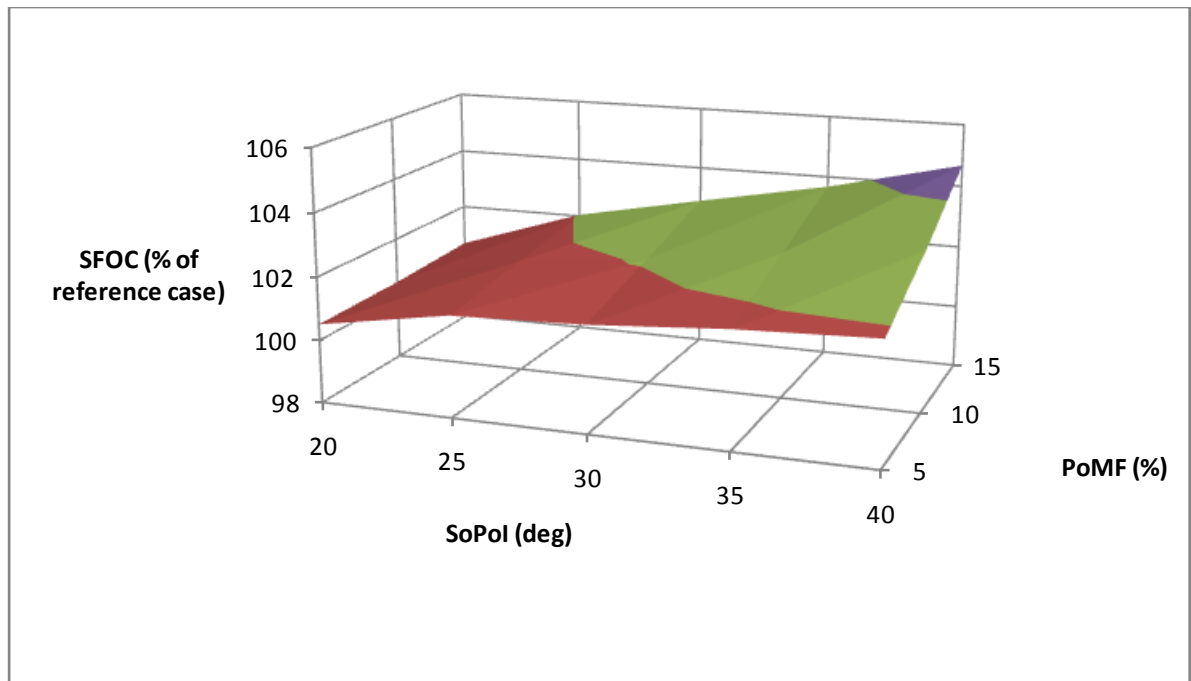
Στο Διάγραμμα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή του παραγόμενου έργου συναρτήσει των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών, PoMF και SoPol. Σημειώνεται ότι οι τιμές του παραγόμενου έργου έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την αντίστοιχη τιμή της περίπτωσης αναφοράς. Από το Διάγραμμα 7 προκύπτει ότι το ωφέλιμο έργο μειώνεται με αύξηση τόσο της έναρξης της μετέγχυσης (SoPol), όσο και του ποσοστού μάζας της μετέγχυσης (PoMF). Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι η καύση σημαντικής ποσότητας καυσίμου λαμβάνει χώρα σε επίπεδα πίεσης και θερμοκρασίας σαφώς μειωμένα από τα αντίστοιχα της περίπτωσης αναφοράς, στην οποία η διεργασία της καύσης ολοκληρώνεται εγγύτερα προς το ΑΝΣ.

Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζεται, σε αντιστοιχία προς το Διάγραμμα 7, η μεταβολή της ανηγμένης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (συνολικά εγχυόμενη μάζα καυσίμου προς το ωφέλιμο έργο στο κλειστό τμήμα του κύκλου), συναρτήσει των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών, PoMF και SoPol. Οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την αντίστοιχη τιμή της περίπτωσης αναφοράς. Από το Διάγραμμα 8 προκύπτει ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου, ως αντιστρόφως ανάλογη του έργου για σταθερή εγχυόμενη μάζα καυσίμου, είναι αύξουσα συνάρτηση των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών, PoMF και SoPol.



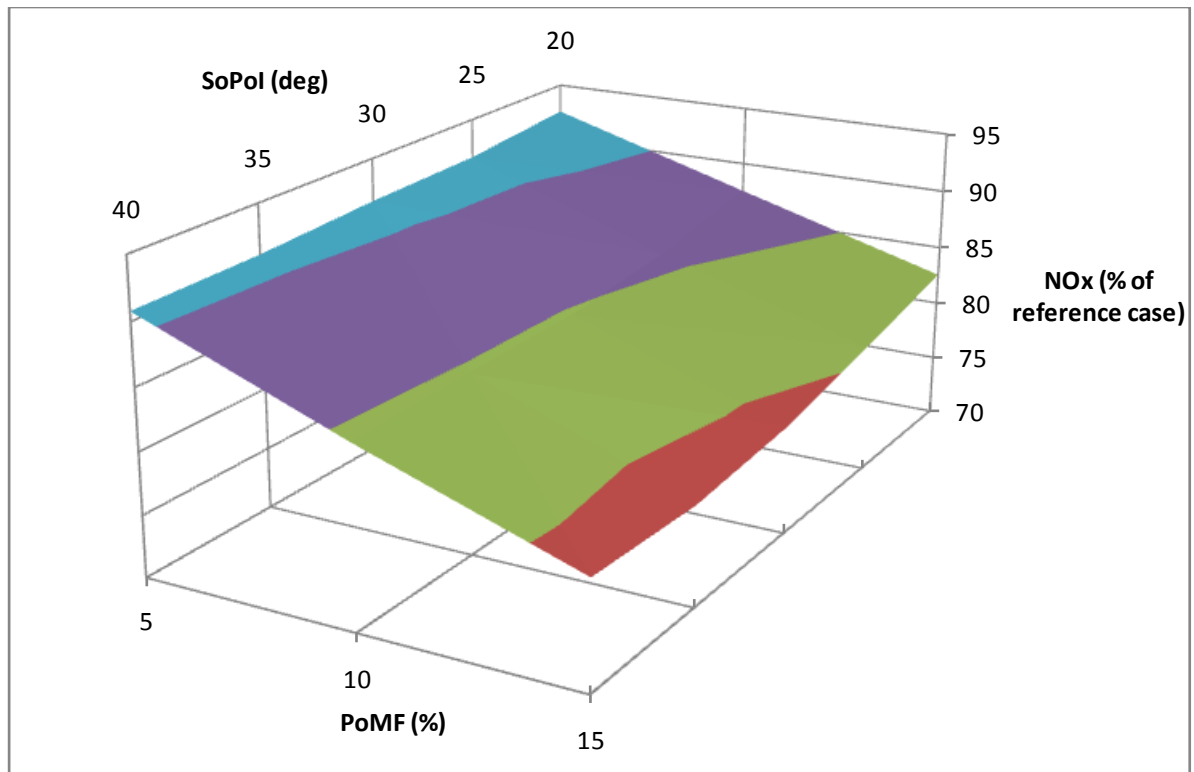
Διάγραμμα 7: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών του παραγόμενου έργου ως ποσοστό αυτού της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και SoPol.



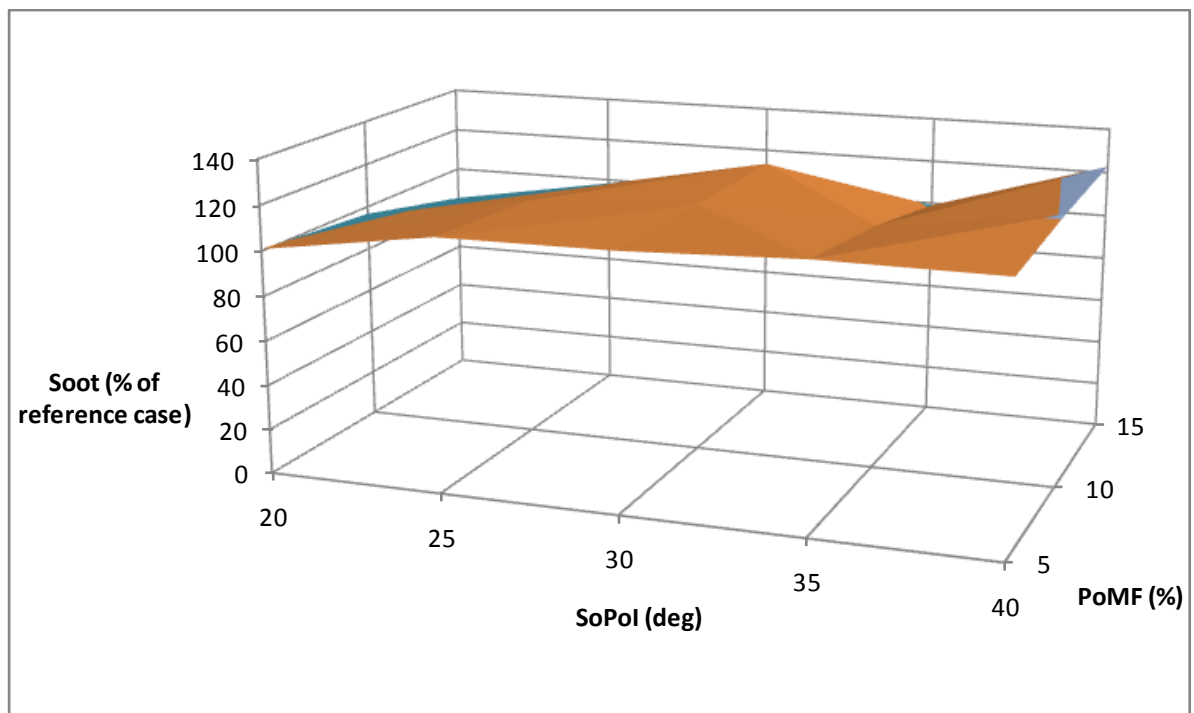


Διάγραμμα 8: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ως ποσοστό αυτής της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσεως των μεταβλητών PoMF και SoPol.

Στο Διάγραμμα 9 παρουσιάζεται η μεταβολή των τελικών συγκεντρώσεων NOx συναρτήσεως των μεταβλητών PoMF και SoPol. Οι τελικές εκπομπές NOx έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τις αντίστοιχες εκπομπές NOx της περίπτωσης αναφοράς. Στο Διάγραμμα 9 παρατηρείται ότι, με την παρουσία μετέγχυσης, οι εκπομπές NOx μειώνονται, ενώ δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από την έναρξη της μετέγχυσης (SoPol), αλλά από τη μάζα καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση (PoMF) (ισοδύναμα: από το ποσοστό που αφαιρείται από την κύρια έγχυση). Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την καύση του καυσίμου της μετέγχυσης δεν ευνοούν τον σχηματισμό NOx. Αναφορικά με την τελική συγκέντρωση σωματιδίων αιθάλης, παρατηρείται μικρή αύξηση, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς (Διάγραμμα 10). Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι και οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές (SoPol, PoMF) τείνουν να αυξήσουν τα τελικά επίπεδα της συγκέντρωσης σωματιδίων αιθάλης. Η αύξηση αυτή, παρατηρούμενη κυρίως για μεγάλες τιμές της γωνίας έναρξης της μετέγχυσης, σχετίζεται με τον χαμηλό ρυθμό οξειδωσης της αιθάλης, λόγω των χαμηλών συνθηκών θερμοκρασίας που επικρατούν στον κύλινδρο μετά το πέρας της κύριας έγχυσης. Έτσι, η αιθάλη που σχηματίστηκε κατά τη μετέγχυση δεν οξειδώνεται επαρκώς. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι από τα παραπάνω προκύπτει η αντίρροπη τάση εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης. Τονίζεται επίσης η σημαντική μείωση του ωφέλιμου έργου, ειδικά για μεγάλες τιμές της γωνίας έναρξης της μετέγχυσης και του ποσοστού του καυσίμου της μετέγχυσης.



Διάγραμμα 9: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών των τελικών συγκεντρώσεων οξειδίων του αζώτου ως ποσοστό της αντίστοιχης της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και SoPol.



Διάγραμμα 10: Πρώτη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών των τελικών συγκεντρώσεων σωματιδίων αιθάλης ως ποσοστό της αντίστοιχης της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και SoPol.

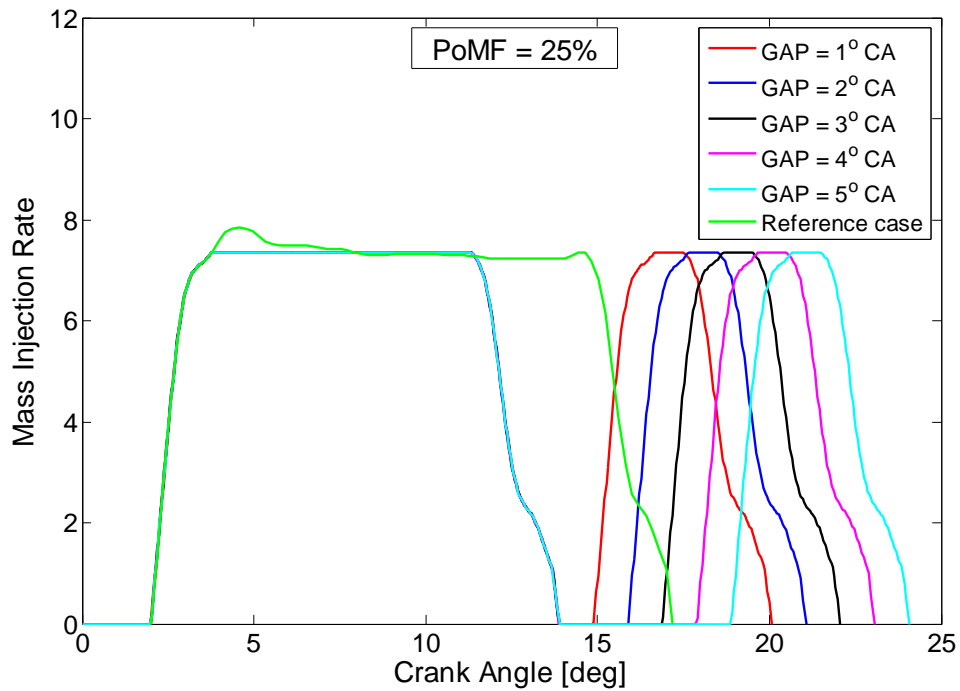
Συνοψίζοντας, για τις περιπτώσεις της παρούσας παραμετρικής ανάλυσης (για τις οποίες η έναρξη της μετέγχυσης - ισοδύναμα: το μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP) - αντιστοιχεί σε μετέγχυση αρκετά μετατοπισμένη σε σχέση με το πέρασ της κύριας έγχυσης), εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με τη λειτουργία του κινητήρα. Συγκεκριμένα, το παραγόμενο έργο (και η ειδική κατανάλωση καυσίμου) επηρεάζονται αρνητικά, επειδή σημαντικές ποσότητες καυσίμου καίγονται σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Επίσης, υπάρχει μια αντίρροπη τάση μεταξύ των τελικών συγκεντρώσεων NOx και σωματιδίων αιθάλης. Πολλές από τις περιπτώσεις για τις οποίες η τάση αυτή παρατηρείται αντιστοιχούν σε κύκλους λειτουργίας με πολύ χαμηλή τιμή παραγόμενου έργου. Συνεπώς, για να διερευνηθεί η συσχέτιση μεταξύ των κύριων εκπομπών του κινητήρα για αντιπροσωπευτικότερες περιπτώσεις, λαμβάνει χώρα μια δεύτερη παραμετρική ανάλυση, οι περιπτώσεις της οποίας χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές του μεσοδιαστήματος μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP). Οι περιπτώσεις αυτές αναμένεται να μην υπολείπονται σημαντικά, ως προς το ωφέλιμο έργο, από την περίπτωση αναφοράς.

## 4.2 Δεύτερη παραμετρική ανάλυση

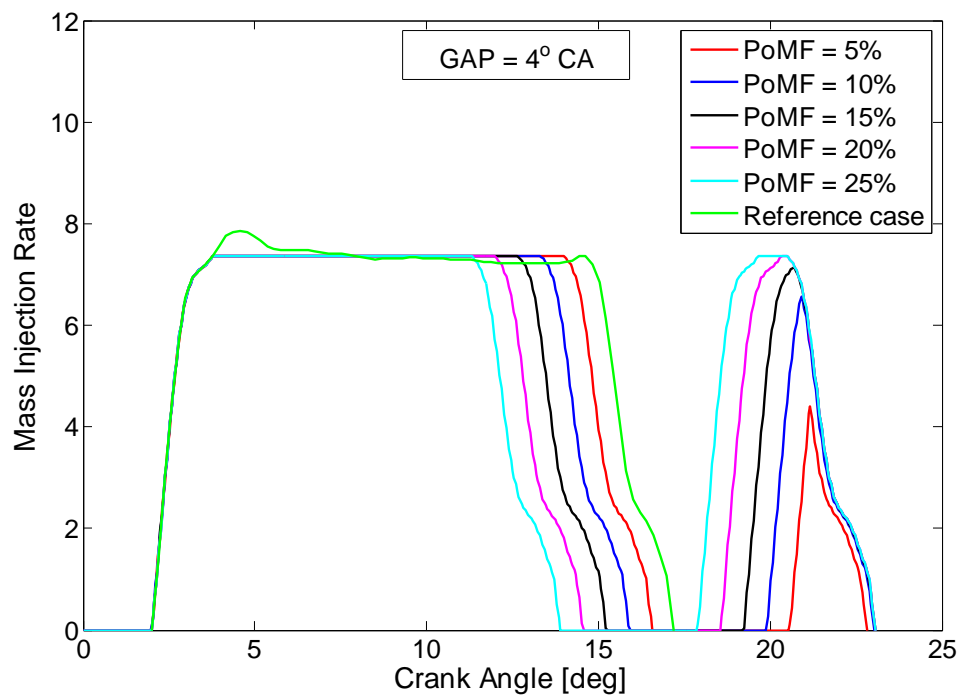
Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα της πρώτης παραμετρικής ανάλυσης (Ενότητα 4.1), μια δεύτερη παραμετρική διερεύνηση λαμβάνει χώρα, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδραση της μετέγχυσης στις εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης, για περιπτώσεις που το ωφέλιμο έργο δεν είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό της περίπτωσης αναφοράς. Έτσι, επιλέγεται τώρα ένα μικρό εύρος τιμών για το μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP). Όπως στην πρώτη παραμετρική ανάλυση, έτσι και στη δεύτερη, η μάζα του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου και η αρχή της κύριας έγχυσης διατηρήθηκαν οι ίδιες με αυτές της περίπτωσης αναφοράς. Ο Πίνακας 7 περιλαμβάνει τις τιμές (σε μοίρες γωνίας στροφάλου) που αντιστοιχούν στην έναρξη της μετέγχυσης (SoPol), για κάθε περίπτωση προσομοίωσης (PoMF και GAP). Το Διάγραμμα 11 απεικονίζει τα προφίλ έγχυσης για σταθερή τιμή του ποσοστού της μετεγχυόμενης μάζας (PoMF = 25%), και μεταβαλλόμενο μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP). Το Διάγραμμα 12 απεικονίζει τα προφίλ έγχυσης για για σταθερό μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών (GAP = 4° CA), και μεταβαλλόμενη τιμή του ποσοστού της μετεγχυόμενης μάζας. Τόσο στο Διάγραμμα 11, όσο και στο Διάγραμμα 12, παρουσιάζεται και το προφίλ της περίπτωσης αναφοράς.

PoMF (%)	GAP (° CA)				
	1°	2°	3°	4°	5°
5	17.57°	18.57°	19.57°	20.57°	21.57°
10	16.9°	17.9°	18.9°	19.9°	20.9°
15	16.23°	17.23°	18.23°	19.23°	20.23°
20	15.56°	16.56°	17.56°	18.56°	19.56°
25	14.89°	15.89°	16.89°	17.89°	18.89°

Πίνακας 7: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: τιμές που αντιστοιχούν στην έναρξη της μετέγχυσης (SoPol), σε μοίρες γωνίας στροφάλου, για κάθε περίπτωση προσομοίωσης (δεδομένες τιμές των μεταβλητών PoMF και GAP).



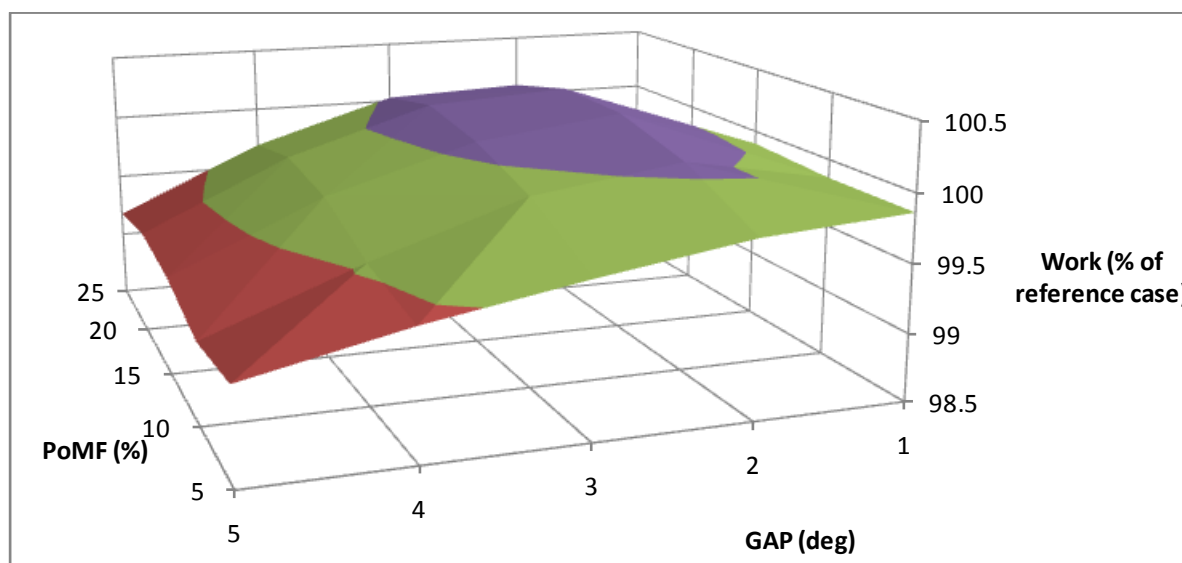
Διάγραμμα 11: Προφίλ έγχυσης για διάφορες τιμές του μεσοδιαστήματος μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (1° - 5° CA), για σταθερό ποσοστό μετεγχυόμενης μάζας, PoMF = 25%. Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.



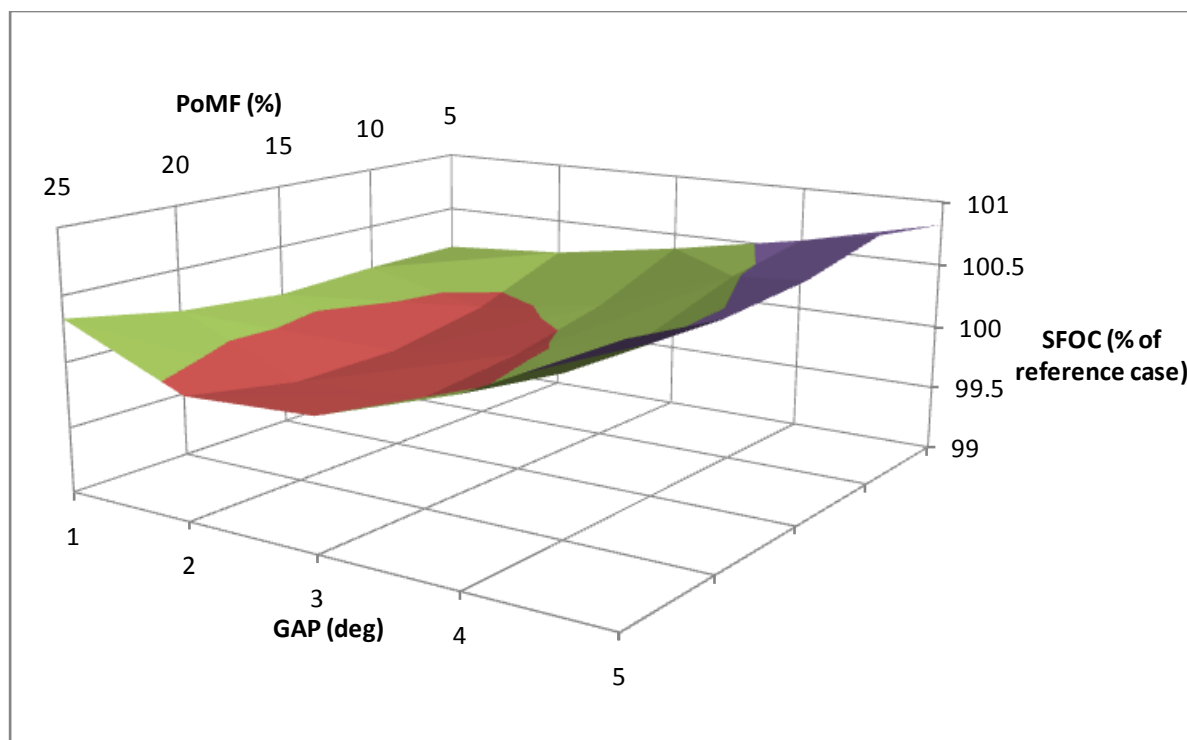
Διάγραμμα 12: Προφίλ έγχυσης για σταθερή τιμή του μεσοδιαστήματος μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (4° CA), και μεταβαλλόμενο ποσοστό μετεγχυόμενης μάζας (5% - 25%). Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.

Στο Διάγραμμα 13 παρουσιάζεται η μεταβολή του παραγόμενου έργου συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών, PoMF και GAP. Οι τιμές του παραγόμενου έργου έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την αντίστοιχη τιμή της περίπτωσης αναφοράς. Όπως αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 13, η μικρή μεταβολή του εύρους της μεταβλητής GAP της παρούσας διαρεύνησης επιφέρει πολύ μικρές μεταβολές στο ωφέλιμο έργο, συγκεκριμένα  $\pm 0,5\%$  σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Θετική μεταβολή του ωφέλιμου έργου παρατηρείται για τιμές της μεταβλητής GAP περί τις με 2 - 3 μοίρες γωνίας στροφάλου, και τιμές της μετεγχυόμενης μάζας περί το 15% της συνολικά εγχυόμενης μάζας καυσίμου. Το ωφέλιμο έργο μειώνεται σαφώς για τιμές της μεταβλητής GAP μεγαλύτερες των 4 μοιρών.

Σε αντίστοιχια προς το Διάγραμμα 13, στο Διάγραμμα 14 παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP. Επειδή η συνολική εγχυόμενη μάζα είναι σε όλες τις περιπτώσεις σταθερή, η κατανομή της ειδικής κατανάλωσης προκύπτει αντιστρόφως ανάλογη αυτής του ωφέλιμου έργου.



Διάγραμμα 13: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών του ωφέλιμου έργου ως ποσοστό αυτού της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP.



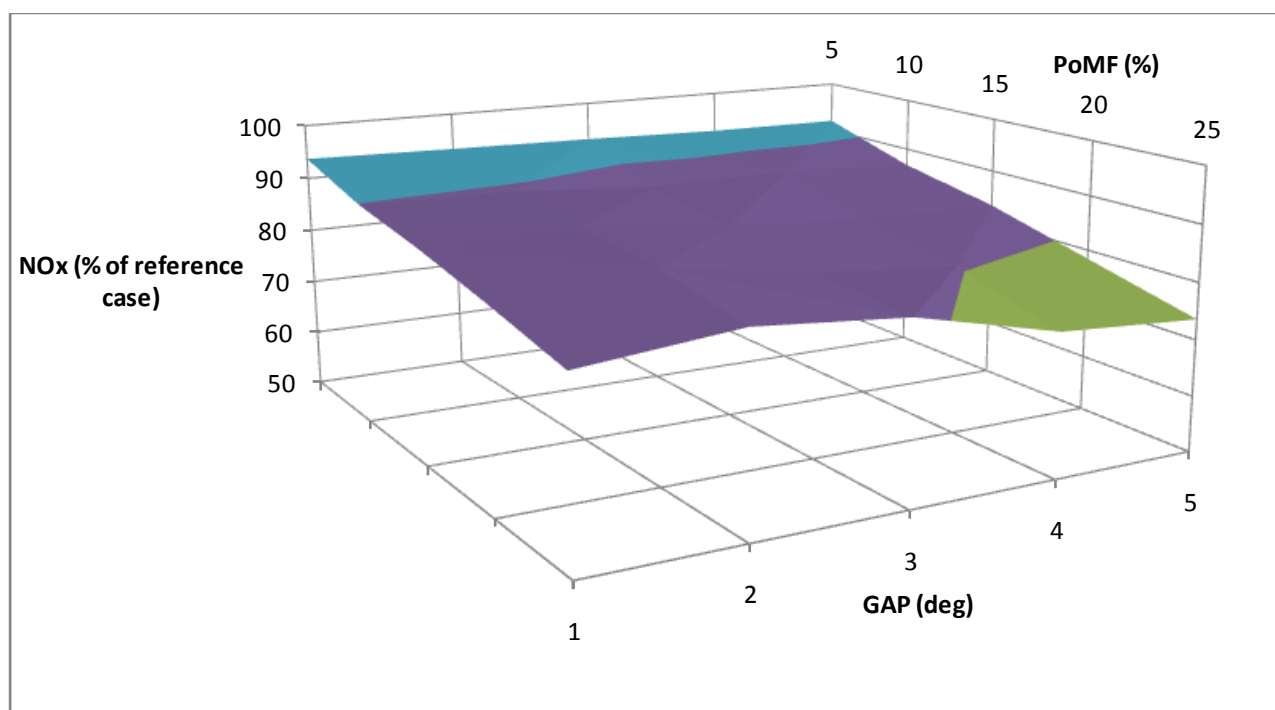
Διάγραμμα 14: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ως ποσοστό αυτής της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP.

Στο Διάγραμμα 15 παρουσιάζεται η μεταβολή των τελικών συγκεντρώσεων NOx συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP. Καί σε αυτό το διάγραμμα οι τελικές συγκεντρώσεις NOx έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την αντίστοιχη τιμή της περίπτωσης αναφοράς. Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 15, οι εκπομπές NOx μειώνονται μέχρι και περίπου 25%, για τιμές των μεταβλητών σχεδίασης GAP και PoMF μεγαλύτερες από 4 μοίρες και 20%, αντίστοιχα. Αυτό πρέπει να αποδοθεί στις αναπτυσσόμενες σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες κατά την καύση του καυσίμου της μετέγχυσης, οι οποίες δεν ευνοούν τον σχηματισμό NOx.

Στο Διάγραμμα 16 παρουσιάζεται η μεταβολή των τελικών συγκεντρώσεων σωματιδίων αιθάλης, κανονικοποιημένες ως προς την τιμή της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP. Λαμβάνοντας υπόψη και τα αποτελέσματα αναφορικά με τις τελικές εκπομπές NOx, προκύπτουν οι ακόλουθες τάσεις. Πρώτον, συνδυασμοί των μεταβλητών PoMF και GAP για τους οποίους προκύπτει μείωση των τελικών εκπομπών NOx επιφέρουν ταυτόχρονα αύξηση της τελικής συγκέντρωσης σωματιδίων αιθάλης. Συγκεκριμένα, για τιμές των μεταβλητών PoMF και GAP μεταξύ 5% - 10% και 4 - 5 μοίρες, αντίστοιχα, οι τελικές εκπομπές NOx μειώνονται κατά 15%, ενώ οι αντίστοιχες των σωματιδίων αιθάλης είναι αυξημένες κατά μέγιστο 10%. Έτσι, στη συγκεκριμένη περιοχή τιμών των μεταβλητών σχεδίασης, διαπιστώνεται η αντίρροπη τάση μεταξύ των τελικών συγκεντρώσεων των δύο ρύπων. Ωστόσο, για άλλους συνδυασμούς των τιμών των δύο μεταβλητών σχεδίασης, συγκεκριμένα για τιμές της μεταβλητής PoMF από 15% έως 25%, και της μεταβλητής GAP από 2 έως 5 μοίρες, παρατηρείται ταυτόχρονη

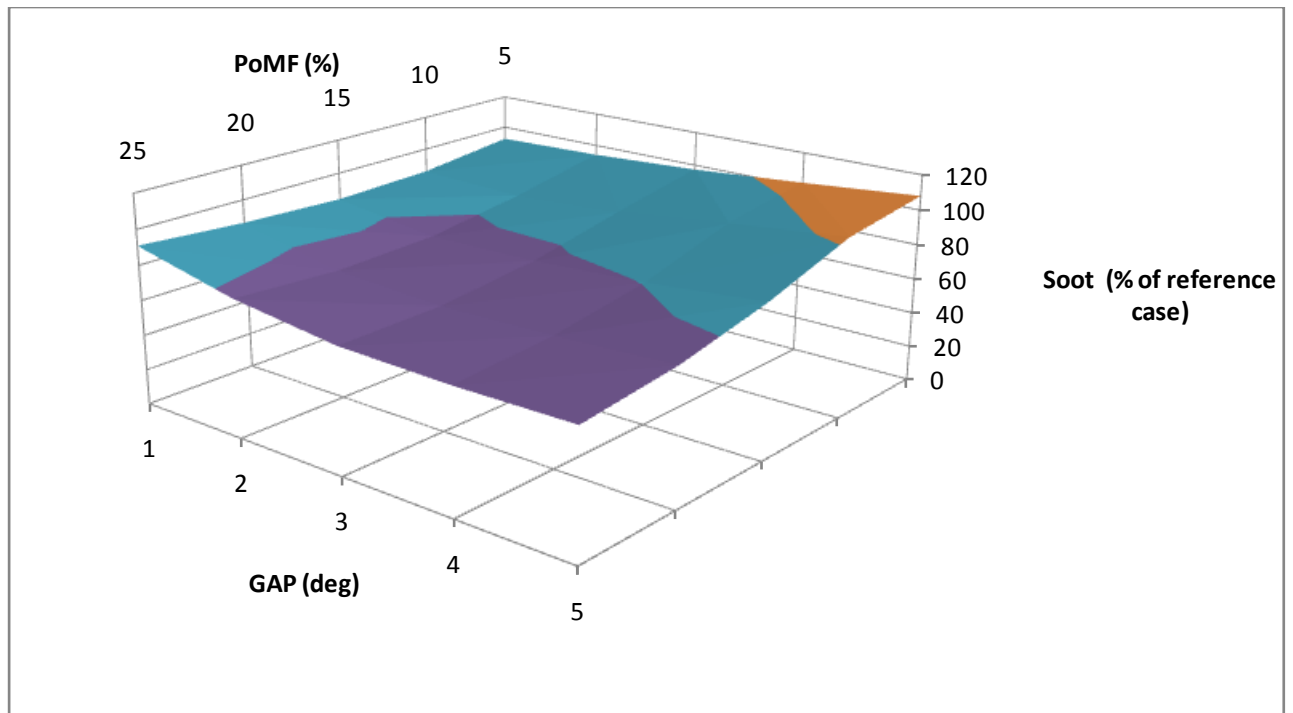
μείωση τόσο της τελικής συγκέντρωσης NOx (κατά μέγιστο 25%), όσο και αυτής των σωματιδίων αιθάλης (κατά μέγιστο 30%).

Συνοψίζοντας, οι δύο μεταβλητές σχεδίασης, PoMF και GAP, των οποίων η επίδραση στη λειτουργία του δίχρονου ναυτικού κινητήρα μελετήθηκε παραμετρικά, παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στην τελική συγκέντρωση των εκπομπών NOx και αιθάλης, όσο και στην επίτευξη του επιθυμητού ωφέλιμου έργου. Τα συμπεράσματα της παραμετρικής ανάλυσης έδειξαν ότι υπάρχουν περιθώρια ταυτόχρονης μείωσης των τελικών εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης δίχρονου ναυτικού κινητήρα, χωρίς να επηρεαστεί σημαντικά η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Συνεπώς, η εύρεση κατάλληλων τιμών των μεταβλητών σχεδίασης μπορεί να αντιμετωπιστεί στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης του συνολικού προφίλ έγχυσης του κινητήρα, θεωρώντας προφίλ με κύρια έγχυση και μετέγχυση. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης του παρόντος Κεφαλαίου, στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η διατύπωση και η επίλυση του παρόντος προβλήματος βελτιστοποίησης του προφίλ έγχυσης του κινητήρα στην περιοχή του πλήρους φορτίου, με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων.



Διάγραμμα 15: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών των τελικών συγκεντρώσεων οξειδίων του αζώτου ως ποσοστό της αντίστοιχης της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP.





Διάγραμμα 16: Δεύτερη παραμετρική ανάλυση: Απεικόνιση των τιμών των τελικών συγκεντρώσεων της αιθάλης ως ποσοστό αντίστοιχης της περίπτωσης αναφοράς, συναρτήσει των μεταβλητών PoMF και GAP.



## **5. Βελτιστοποίηση προφίλ έγχυσης με μετέγχυση σε δίχρονο ναυτικό κινητήρα**

### **5.1 Διατύπωση των προβλημάτων βελτιστοποίησης**

Στο παρόν Κεφάλαιο, διατυπώνονται και επιλύονται δύο προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων (Multi Objective Optimisation - MOO) του προφίλ έγχυσης καυσίμου δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel, για λειτουργία στην περιοχή του πλήρους φορτίου. Εδώ, θεωρούνται προφίλ έγχυσης με παρουσία κύριας έγχυσης και μετέγχυσης, ενώ για τη διατύπωση των προβλημάτων λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 4. Η βελτιστοποίηση γίνεται σε σχέση με τους κύριους ρύπους (οξειδία του αζώτου, σωματίδια αιθάλης) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Συγκεκριμένα, τα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης που επιλύονται είναι τα ακόλουθα:

- Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.
- Πρόβλημα βελτιστοποίησης με τους ακόλουθους περιορισμούς: (α) το ωφέλιμο έργο ανά κύκλο να αντιστοιχεί σε αυτό της περίπτωσης αναφοράς, και (β) η μέγιστη πίεση του κύκλου λειτουργίας να μην υπερβαίνει το όριο των 150 bar (για λόγους μηχανικής αντοχής).

Καθένα από τα δύο προβλήματα επιλύθηκε τόσο για σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης (αυτή της περίπτωσης αναφοράς: SOMI = 2° CA), όσο και για μεταβλητή (δύο επιμέρους προβλήματα). Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει συνοπτικά τα προβλήματα βελτιστοποίησης που θεωρήθηκαν και τις επιμέρους περιπτώσεις τους, καθώς και σημαντικές παράμετροι στο πλαίσιο του εξελικτικού αλγορίθμου.

<b>Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς</b>		<b>Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς στο παραγόμενο έργο και τη μέγιστη πίεση</b>	
<b>Περίπτωση 1<sup>η</sup>:</b> Σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης, SOMI = 2° CA	<b>Περίπτωση 2<sup>η</sup>:</b> Μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης	<b>Περίπτωση 1<sup>η</sup>:</b> Σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης, SOMI = 2° CA	<b>Περίπτωση 2<sup>η</sup>:</b> Μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης
Γονείς 18, Απόγονοι 72 Πιθανότητες: Διασταύρωσης 0.95 Μετάλλαξης 0.33			

*Πίνακας 8 : Προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, και επιμέρους περιπτώσεις του καθενός. Επίσης, παρουσιάζονται χαρακτηριστικές παράμετροι στο πλαίσιο του εξελικτικού αλγορίθμου.*

Στην παρούσα εργασία, η διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων του προφίλ έγχυσης με παρουσία μετέγχυσης περιλαμβάνει τα εξής:

1. Στόχοι (Objectives): Το πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί ένα πρόβλημα πολλαπλών στόχων, στο οποίο επιλέχθηκαν οι ακόλουθοι τρεις στόχοι: (α) η ειδική κατανάλωση του καυσίμου του κινητήρα (SFOC), (β) η τελική συγκέντρωση οξειδίων

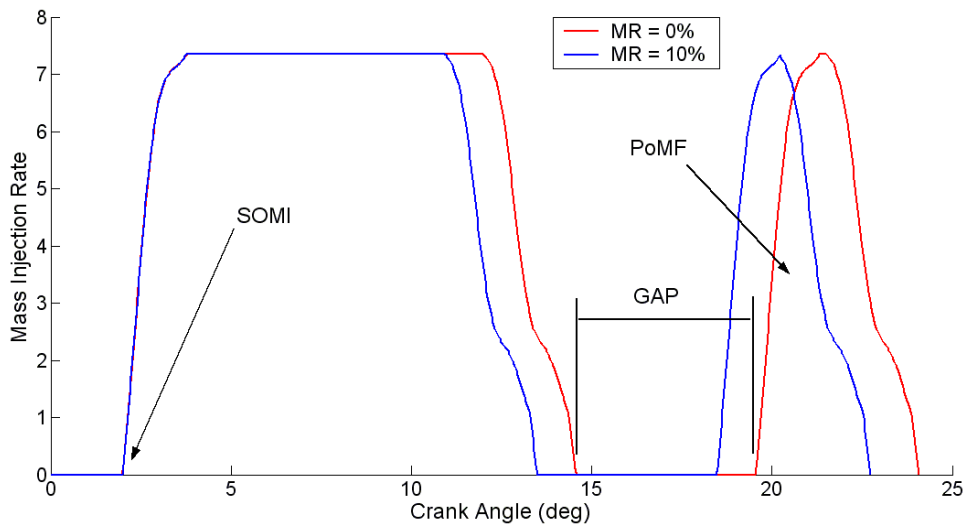
του αζώτου (NO<sub>x</sub>), και (γ) η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot). Οι συγκεκριμένοι τρεις στόχοι αποτελούν ουσιαστικά τις αντικειμενικές συναρτήσεις, των οποίων οι τιμές θα βελτιστοποιηθούν (ελαχιστοποιηθούν) σε κάθε πρόβλημα.

2. Ελεύθερες μεταβλητές (Free Variables): Οι ελεύθερες μεταβλητές αποτελούν τις μεταβλητές σχεδίασης του προφίλ έγχυσης του καυσίμου. Το προφίλ έγχυσης με μετέγχυση παραμετροποιήθηκε ως προς τις εξής μεταβλητές σχεδίασης: (I) έναρξη κύριας έγχυσης (Start Of Main Injection - SOMI), (II) ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της εγχυόμενης μάζας καυσίμου της περίπτωσης αναφοράς ( $m_{ref}$ ) και αυτής στην εκάστοτε κατάσταση ( $m$ ) (Mass Reduction - MR), όπου

$$MR = 100\% * \frac{m_{ref} - m}{m_{ref}} \quad [5.1.1]$$

(III) μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP), και (IV) ποσοστό μάζας καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση σε σχέση με το συνολικά εγχυόμενο (Post Mass Fraction - PoMF).

Στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται σχηματικά οι μεταβλητές σχεδίασης, οι οποίες παραμετροποιούν το προφίλ έγχυσης του καυσίμου με παρουσία κύριας έγχυσης και μετέγχυσης. Τέλος, επισημαίνεται πως, όταν η συνολικά εγχυόμενη μάζα διαφέρει από αυτή της περίπτωσης αναφοράς (είναι δηλαδή μειωμένη), η μέγιστη ταχύτητα έγχυσης διατηρείται σταθερή με αυτή της περίπτωσης αναφοράς, δηλαδή η πίεση στον κοινό συλλέκτη θεωρείται αμετάβλητη.



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση προφίλ έγχυσης καυσίμου με κύρια έγχυση και μετέγχυση, στο οποίο σημειώνονται οι μεταβλητές σχεδίασης των προβλημάτων βελτιστοποίησης: (I) έναρξη της κύριας έγχυσης (Start Of Main Injection - SOMI), (II) ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της εγχυόμενης μάζας καυσίμου της περίπτωσης αναφοράς και της συγκεκριμένης περίπτωσης (Mass Reduction - MR), (III) μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP), και (IV) ποσοστό μάζας καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση σε σχέση με το συνολικά εγχυόμενο (Post Mass Fraction - PoMF).

Ανάλογα με το πρόβλημα προς επίλυση, και λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης (Κεφάλαιο 4), οι μεταβλητές σχεδίασης λαμβάνουν τιμές σε

καθορισμένα διαστήματα. Ο Πίνακας 9 και ο Πίνακας 10 περιλαμβάνουν τα διαστήματα τιμών των μεταβλητών σχεδίασης (SOMI, MR, PoMF, GAP), για τα προβλήματα βελτιστοποίησης με σταθερή και μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης, αντίστοιχα.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΡΧΗ ΚΥΡΙΑΣ ΕΓΧΥΣΗΣ				
	Μεταβλητή σχεδίασης	Συντόμευση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
I	Αρχή της κύριας έγχυσης (Σταθερή)	SOMI	2.0° CA	2.0° CA
II	Ποσοστιαία μείωση μάζας του καυσίμου	MR	0.0%	10.0%
III	Ποσοστό του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου που εγχύεται κατά τη μετέγχυση	PoMF	1.0%	40.0%
IV	Μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης	GAP	1.0° CA	10.0° CA

Πίνακας 9: Διάστημα δυνατών τιμών των μεταβλητών σχεδίασης του προφίλ έγχυσης με κύρια έγχυση και μετέγχυση, για τα προβλήματα βελτιστοποίησης με σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΑΡΧΗ ΚΥΡΙΑΣ ΕΓΧΥΣΗΣ				
	Μεταβλητή σχεδίασης	Συντόμευση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
I	Αρχή της κύριας έγχυσης	SOMI	0.1° CA	10.0° CA
II	Ποσοστιαία μείωση μάζας του καυσίμου	MR	0.0%	10.0%
III	Ποσοστό του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου που εγχύεται κατά τη μετέγχυση	PoMF	1.0%	40.0%
IV	Μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης	GAP	1.0° CA	10.0° CA

Πίνακας 10: Διάστημα δυνατών τιμών των μεταβλητών σχεδίασης του προφίλ έγχυσης με κύρια έγχυση και μετέγχυση, για τα προβλήματα βελτιστοποίησης με μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης.

3. Περιορισμοί: Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης επιβάλλονται περιορισμοί για το ωφέλιμο έργο και τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση. Ο Πίνακας 11 περιλαμβάνει τις επιτρεπόμενες οριακές τιμές των μεγεθών που υπόκεινται σε περιορισμό.

	Τιμή	Μέγεθος υπό περιορισμό
1	150.0	Μέγιστη πίεση (bar)
2	100%	Ωφέλιμο έργο (ανηγμένο στην περίπτωση αναφοράς)

Πίνακας 11: Περιορισμοί που τίθενται στο δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Οι περιορισμοί που τίθενται εμφανώς αποβλέπουν στην καταπόνηση του κινητήρα εντός των προδιαγραφών του κατασκευαστή, καθώς και στη διατήρηση της

αποδιδόμενη μηχανικής ισχύος στα επίπεδα του σχεδιασμού αναφοράς (συνεχές προφίλ έγχυσης).

## **5.2 Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς**

### **5.2.1 Πρώτη περίπτωση (Σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης)**

Το σύνολο των λύσεων που προέκυψαν για την πρώτη περίπτωση (σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI) του πρώτου προβλήματος (πρόβλημα χωρίς περιορισμούς) παρουσιάζεται στην παρούσα παράγραφο. Λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των στόχων (τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις), οι λύσεις παρουσιάζονται σε δύο επιμέρους διαγράμματα. Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 17 παρουσιάζεται το μέτωπο Pareto (Γενιά 13) για την τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και την ειδική κατανάλωση (SFOC), ενώ στο Διάγραμμα 18 για τις τελικές εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (soot) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Καί οι τρεις στόχοι έχουν κανονικοποιηθεί με τις αντίστοιχες τιμές της περίπτωσης αναφοράς. Στα εν λόγω διαγράμματα συμπεριλαμβάνονται και λύσεις από επιλεγμένες άλλες γενιές (Γενιές 1 και 5). Ο Πίνακας 12 περιλαμβάνει τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων, των μεταβλητών σχεδίασης και των περιορισμών κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (Γενιά 13). Τόσο στα διαγράμματα, όσο και στον πίνακα, διακρίνεται η επιλεχθείσα περίπτωση 1 (Case 1), η οποία χαρακτηρίζεται από ταυτόχρονη μείωση σε εκπομπές NOx και αιθάλης (39.9% και 44.4%, αντίστοιχα), καθώς και στην ειδική κατανάλωση του κινητήρα (1.5%). Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση στις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης είναι η μεγαλύτερη που επιτυγχάνεται μεταξύ των λύσεων.

Στο Διάγραμμα 19 απεικονίζονται επιμέρους διαγράμματα με διάφορες συσχετίσεις μεταξύ στόχων και μεταβλητών σχεδίασης, που συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση των μετώπων Pareto. Η πρώτη σειρά διαγραμμάτων αφορά στη σχέση της μεταβλητής σχεδίασης GAP με την ειδική κατανάλωση, τα NOx, τα σωματίδια αιθάλης, το έργο και την ποσοστιαία μείωση εγχυόμενης μάζας. Η δεύτερη σειρά διαγραμμάτων αφορά στη σχέση της μεταβλητής PoMF με τα προαναφερθέντα μεγέθη.

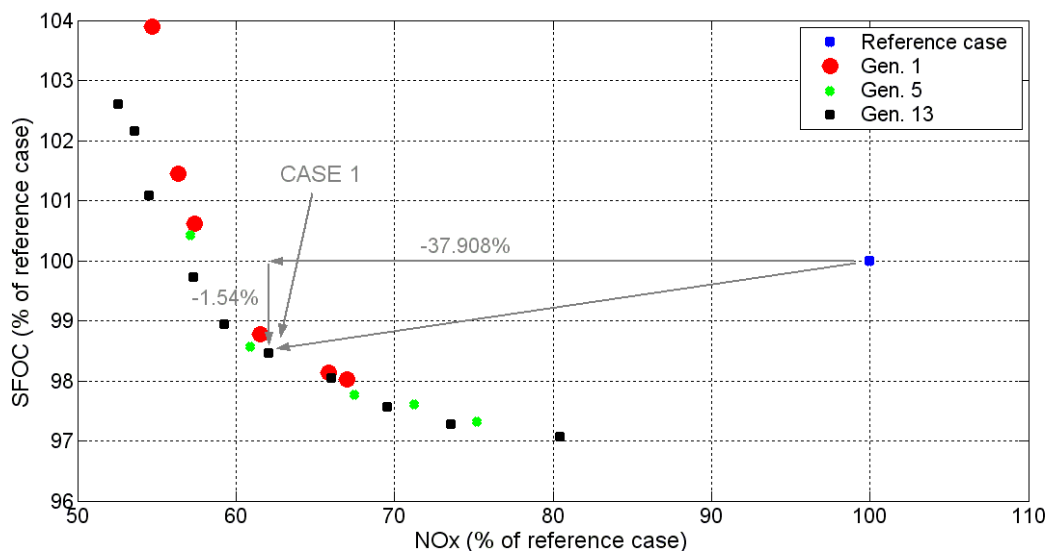
Όσον αφορά στο μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών (GAP), παρατηρώντας την πρώτη σειρά διαγραμμάτων στο Διάγραμμα 19, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Με την αύξηση του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών, το παραγόμενο έργο μειώνεται, και αυξάνεται αντίστοιχα η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Η συνολικά εγχυόμενη μάζα ενώ δεν επηρεάζει αυτή την τάση (η μείωσή της στο παρόν πρόβλημα προκύπτει σχεδόν σταθερή και ίση με 10%). Εντούτοις, η μείωση της εγχυόμενης μάζας καυσίμου μειώνει πολύ τα επίπεδα του ωφέλιμου έργου. Έτσι, όταν η μετέγχυση λαμβάνει χώρα πολύ αργότερα στον κύκλο λειτουργίας, όπου τα επίπεδα πίεσης και θερμοκρασίας είναι χαμηλά, η καύση του μετεγχυόμενου καυσίμου δεν συμβάλλει σημαντικά στην απόδοση ωφέλιμου έργου.
2. Με την αύξηση του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών, οι τελικές συγκεντρώσεις οξειδίων αζώτου μειώνονται. Συνεπώς, η καύση του μετεγχυόμενου

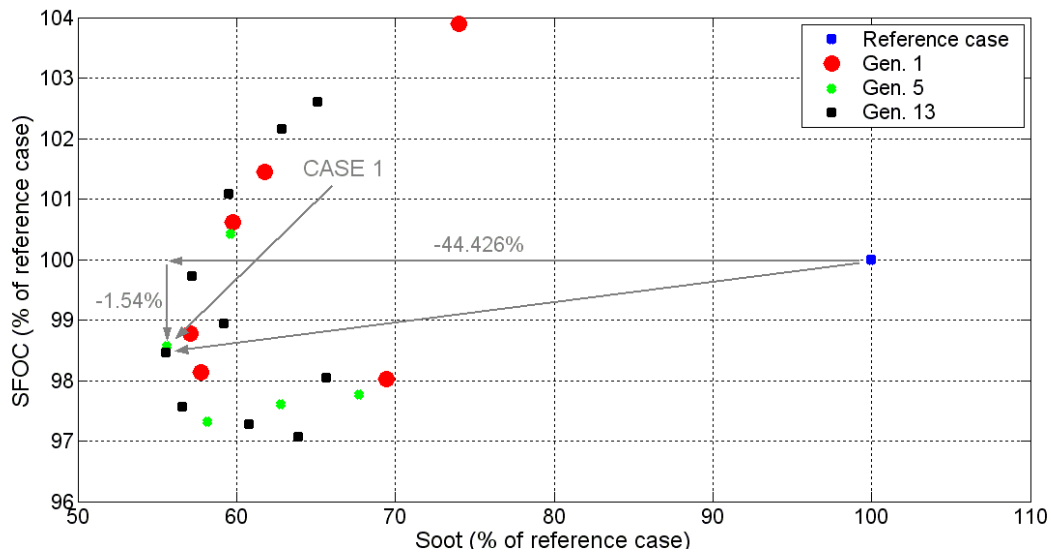
καυσίμου αρκετά μακριά από το ANΣ δεν συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας σε επίπεδα τέτοια που να ευνοούν τον σχηματισμό NOx.

3. Παρατηρείται ότι η επίδραση του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών στις τελικές εκπομπές αιθάλης δεν είναι μονοτονική. Συγκεκριμένα, οι τελικές εκπομπές σωματιδίων αιθάλης μειώνονται για τιμή του μεσοδιαστήματος μέχρι 5 μοίρες, ενώ μετά από αυτή την τιμή αυξάνονται εκ νέου. Η τάση αυτή ερμηνεύεται από τα επίπεδα θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου, και τους αντίστοιχους ρυθμούς οξείδωσης της αιθάλης. Όταν η μετέγχυση απομακρύνεται αρκετά από την κύρια έγχυση, η καύση του μετεγχυόμενου καυσίμου δεν συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας σε επίπεδα τέτοια που να ευνοούν την οξείδωση της αιθάλης. Ακόμη οι μειωμένες τελικές εκπομπές αιθάλης ερμηνεύονται και από μειωμένη κατά ένα μεγάλο ποσοστό εγχυόμενη μάζα καυσίμου (περίπου 10%).

Όσον αφορά στο ποσοστό του συνολικού καυσίμου που εγχύεται στη μετέγχυση (PoMF), από τη δεύτερη σειρά γραφημάτων στο Διάγραμμα 19, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η επίδραση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου στην ειδική κατανάλωση, τις εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης, το ωφέλιμο έργο και την ποσοστιαία μείωση εγχυόμενης μάζας είναι παρόμοια με αυτή του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών.



Διάγραμμα 17: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 13), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 1 και 5, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 1 (Case 1) με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.

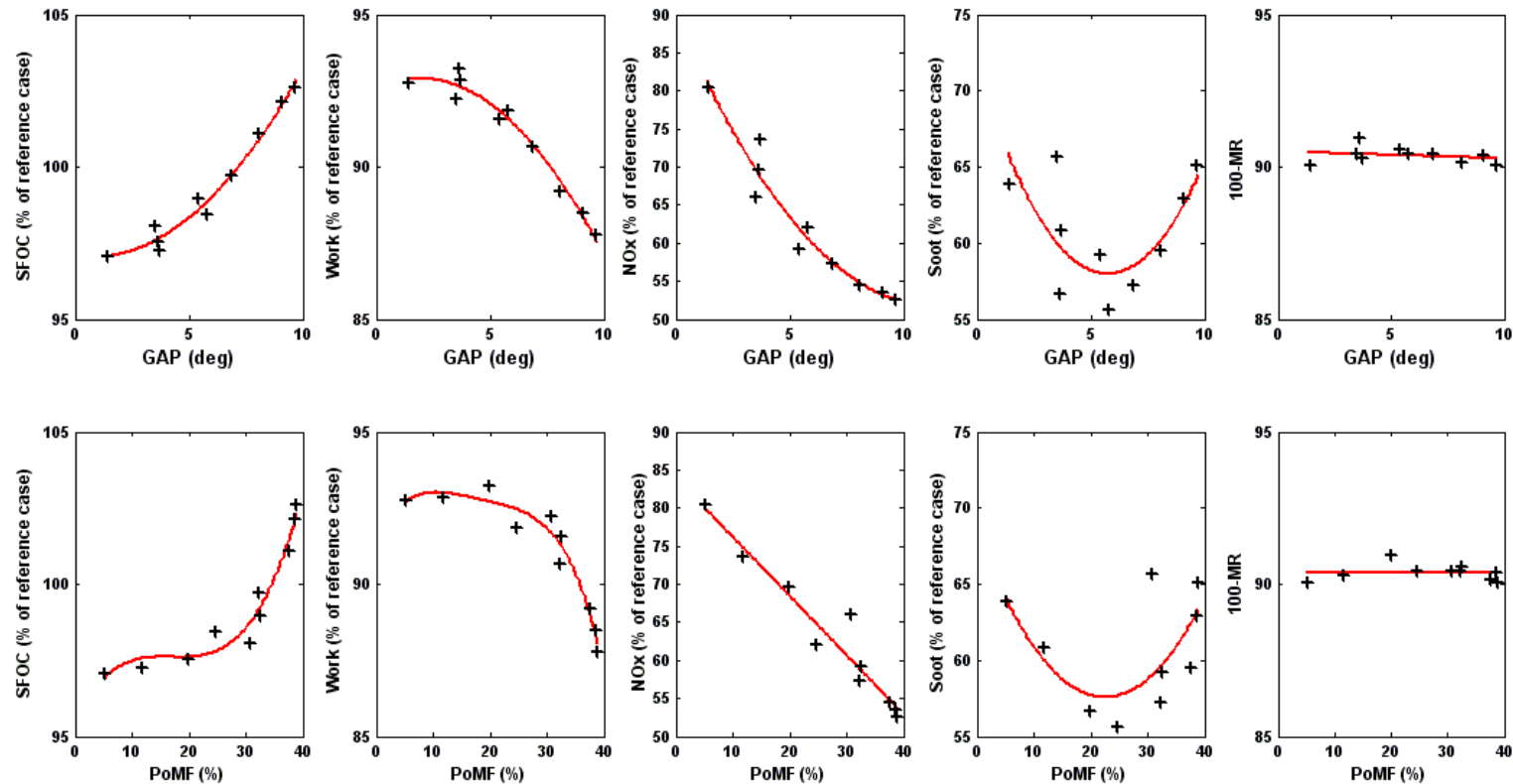


Διάγραμμα 18: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 13), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 1 και 5, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 1 (Case 1) με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.

Γενιά 13	Στόχοι (Objectives)			Ελεύθερες μεταβλητές (Free Variables)				
	SFOC [%]	NOx [%]	Soot [%]	MR [%]	PoMF [%]	GAP [° CA]	Μέγιστη πίεση [bar]	Έργο [%]
<b>Περίπτωση 1</b>	<b>98.460</b>	<b>62.093</b>	<b>55.574</b>	<b>9.560</b>	<b>24.636</b>	<b>5.768</b>	<b>148.720</b>	<b>91.855</b>
	101.079	54.505	59.529	9.863	37.560	8.091	147.680	89.175
	102.153	53.590	62.894	9.599	38.589	9.067	147.510	88.495
	102.592	52.587	65.117	9.971	38.818	9.639	147.430	87.755
	98.936	59.289	59.241	9.413	32.413	5.408	148.290	91.561
	97.068	80.437	63.897	9.971	5.194	1.431	148.730	92.749
	97.268	73.560	60.812	9.707	11.674	3.727	148.700	92.829
	97.555	69.575	56.619	9.052	19.947	3.630	148.680	93.227
	98.037	66.006	65.671	9.570	30.660	3.499	148.530	92.241
	99.717	57.307	57.215	9.570	32.261	6.868	148.370	90.687

Πίνακας 12: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης, της μέγιστης πίεσης και του έργου κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (Γενιά 13). Οι στόχοι και το έργο παρίστανται ως ποσοστά του αντίστοιχου μεγέθους της περίπτωσης αναφοράς.



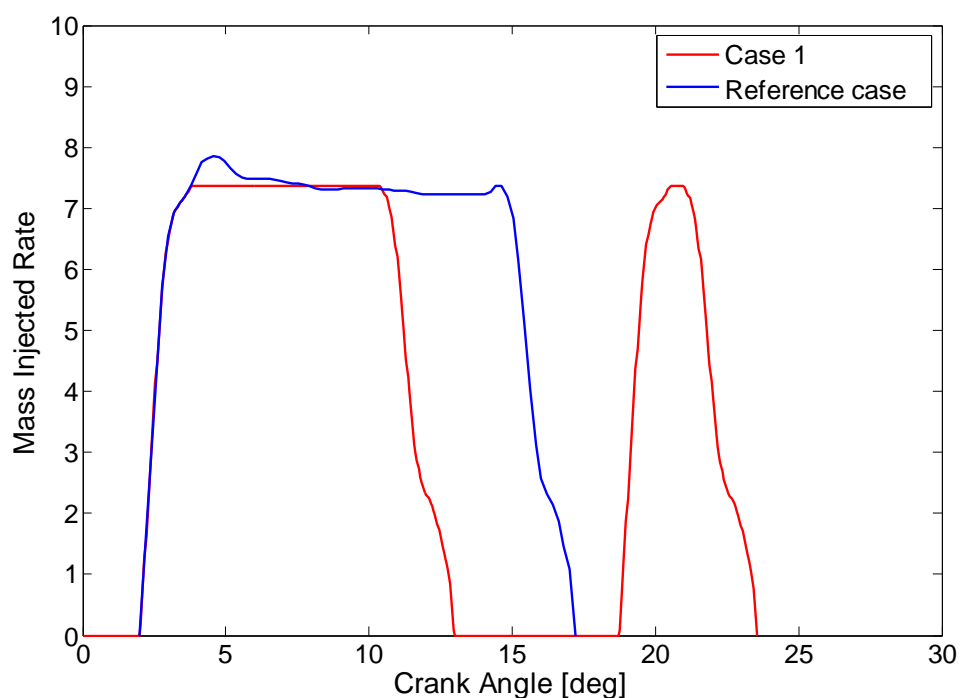


Διάγραμμα 19: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Τα διαγράμματα της πρώτης σειράς απεικονίζουν την επίδραση του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP) στην ειδική κατανάλωση (SFOC), τις τελικές εκπομπές NOx, τις τελικές εκπομπές αιθάλης (soot), του ωφέλιμου παραγόμενου έργου και του ποσοστού της συνολικά εγχυόμενης μάζας του καυσίμου σε σχέση με αυτή της κατάστασης αναφοράς (100-MR). Τα διαγράμματα της δεύτερης σειράς απεικονίζουν αντίστοιχα την επίδραση του ποσοστού (επί του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου) του καυσίμου που εγχύεται κατά τη μετέγχυση. Οι στόχοι, το παραγόμενο έργο και η ποσοστιαία μείωση της εγχυόμενης μάζας έχουν κανονικοποιηθεί με τις αντίστοιχες τιμές της περίπτωσης αναφοράς.

Ακολουθως παρουσιάζεται η θερμορευστομηχανική ανάλυση της επιλεχθείσας περίπτωσης 1 (Case 1), η οποία χαρακτηρίζεται από ταυτόχρονη μείωση όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς. Ο Πίνακας 13 περιλαμβάνει τις αντίστοιχες τιμές των στόχων, των περιορισμών, των ελεύθερων μεταβλητών και της έναρξης της μετέγχυσης. Το προφίλ εγχύσεως της επιλεχθείσας περίπτωσης 1, σε σύγκριση με αυτό της περίπτωσης αναφοράς, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 20.

Στόχοι (Objectives)				
SFOC	NOx	Αιθάλη (soot)		
98.460 %	62.093 %	55.574 %		
Μέγιστη πίεση		Ωφέλιμο έργο		
148.720 bar		91.855 %		
Ελεύθερες μεταβλητές (free variables)				
SOMI	MR	PoMF	GAP	SoPoI
2° CA	9.56 %	24.636 %	5.768° CA	18.74° CA

Πίνακας 13: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (σταθερή SOMI): Στόχοι, ελεύθερες μεταβλητές, μέγιστη πίεση, έργο, καθώς και γωνία έναρξης της μετέγχυσης της περίπτωσης 1 (Case 1).



Διάγραμμα 20: Προφίλ έγχυσης καυσίμου της περίπτωσης 1 (Case 1) και της περίπτωσης αναφοράς.

Στο Διάγραμμα 21 παρουσιάζεται η χρονική ιστορία της πίεσης μέσα στον κύλινδρο για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Παρατηρείται ότι η μέγιστη πίεση ικανοποιεί το όριο των 150 bar, αν και το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν έχει αντίστοιχο περιορισμό. Έτσι, η τιμή της μέγιστης πίεσης αποτελεί και αυτή κριτήριο επιλογής της συγκεκριμένης περίπτωσης. Σημειώνεται ότι δεν παρατηρείται εκ νέου αύξηση της πίεσης, παρά την καύση του καυσίμου της μετέγχυσης.

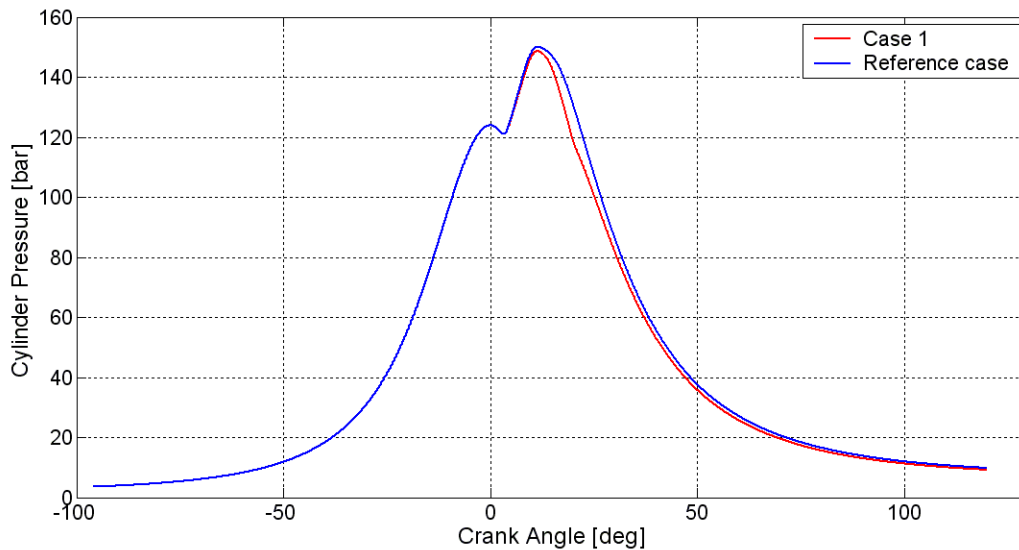
Στο Διάγραμμα 22 παρουσιάζεται η μέση χωρική θερμοκρασία που αναπτύσσεται εντός του κυλίνδρου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην περίπτωση 1 είναι σαφώς μειωμένη σε σχέση με αυτή της περίπτωσης αναφοράς. Έτσι, η καύση του καυσίμου της μετέγχυσης δεν συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου.

Στο Διάγραμμα 23 παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Παρατηρείται ότι ο αδιαστατοποιημένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας για την περίπτωση 1 είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της περίπτωσης αναφοράς στο χρονικό παράθυρο που αντιστοιχεί στην καύση του καυσίμου της κύριας έγχυσης. Αυτή η αύξηση δικαιολογείται λαμβάνοντας υπόψη τη μειωμένη κατά 10% συνολικά εγχυόμενη μάζα καυσίμου στην περίπτωση 1 (MR = 10%). Στη συνέχεια, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας μειώνεται δραστικά για την περίπτωση 1, και αυξάνει εκ νέου λόγω της καύσης του καυσίμου της μετέγχυσης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι όλη η εγχυόμενη μάζα καυσίμου καίγεται κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Συνεπώς, η καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου δεν συμβάλλει στην αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του κυλίνδρου, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς.

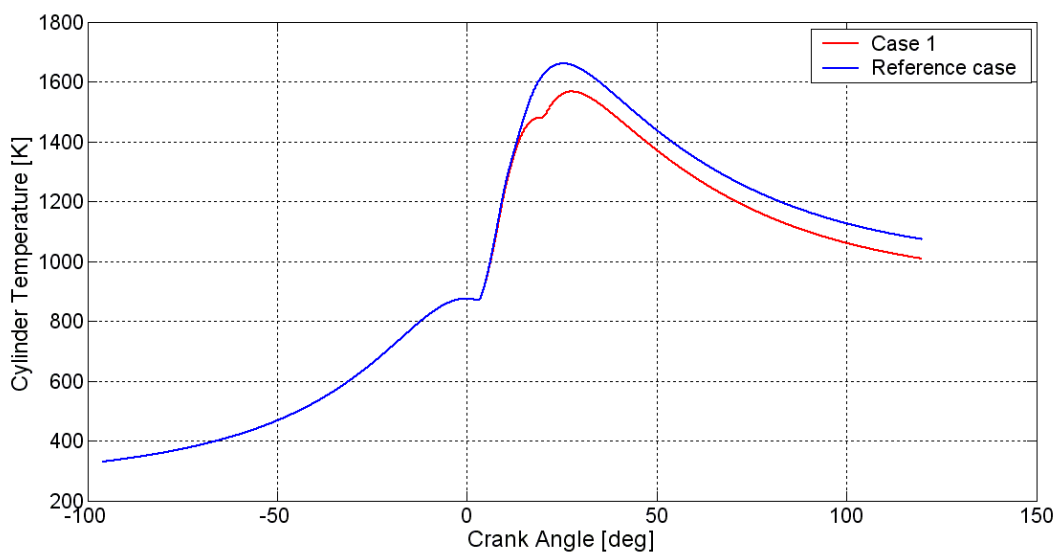
Στο Διάγραμμα 24 και στο Διάγραμμα 25 παρουσιάζονται η μεταβολή της εντροπίας σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, και το διάγραμμα T-s, αντίστοιχα, για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Σε αμφότερα τα διαγράμματα παρατηρούνται μειωμένα επίπεδα εντροπίας και θερμοκρασίας στην περίπτωση 1, τα οποία αντιστοιχούν σε μειωμένα επίπεδα ωφέλιμου έργου. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 25, δεν υφίσταται ισεντροπική συμπίεση και εκτόνωση. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης δεν υφίστανται ισεντροπικές μεταβολές, καθώς, πρώτον, δεν υπάρχει απόλυτη στεγανότητα μεταξύ χιτωνίου και ελατηρίων του εμβόλου, με συνέπεια να υπάρχει διαρροή εργαζόμενου μέσου (ροές blow-by), και, δεύτερον, υπάρχει έντονη συναλλαγή θερμότητας του εργαζόμενου μέσου με τα τοιχώματα του κυλίνδρου (55). Στην παρούσα προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα, η διαρροή εργαζόμενου μέσου δεν λαμβάνεται υπόψη, κατά συνέπεια οι μεταβολές εντροπίας οφείλονται σχεδόν αποκλειστικά στην ανταλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα.

Στο Διάγραμμα 26 και στο Διάγραμμα 27 παρουσιάζεται η χρονική ιστορία σχηματισμού NO<sub>x</sub> και σωματιδίων αιθάλης, αντίστοιχα, για την περίπτωση 1 (Case 1), καθώς και για την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Στα δύο διαγράμματα αποτυπώνεται η μείωση των εκπεμπόμενων τελικών συγκεντρώσεων NO<sub>x</sub> και σωματιδίων αιθάλης για την περίπτωση 1 συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς (39.9% και 44.4%,

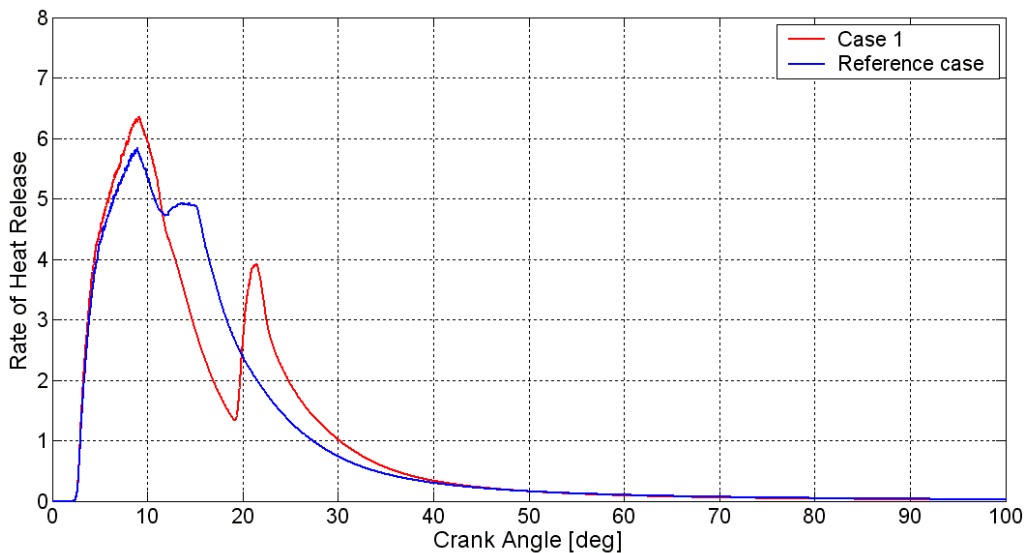
αντίστοιχα). Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου δεν συμβάλλει στην αύξηση των επιπέδων της θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου σε επίπεδα που να ευνοούν τον σχηματισμό NOx, αλλά παράλληλα είναι τέτοια που διατηρεί τον ρυθμό οξείδωσης της αιθάλης. Επίσης, σημειώνεται ότι στη μείωση της παραγόμενης στην περίπτωση 1 ποσότητας σωματιδίων αιθάλης συμβάλλει η αντίστοιχη μείωση της συνολικά εγχυόμενης μάζας (περίπου κατά 10% σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς).



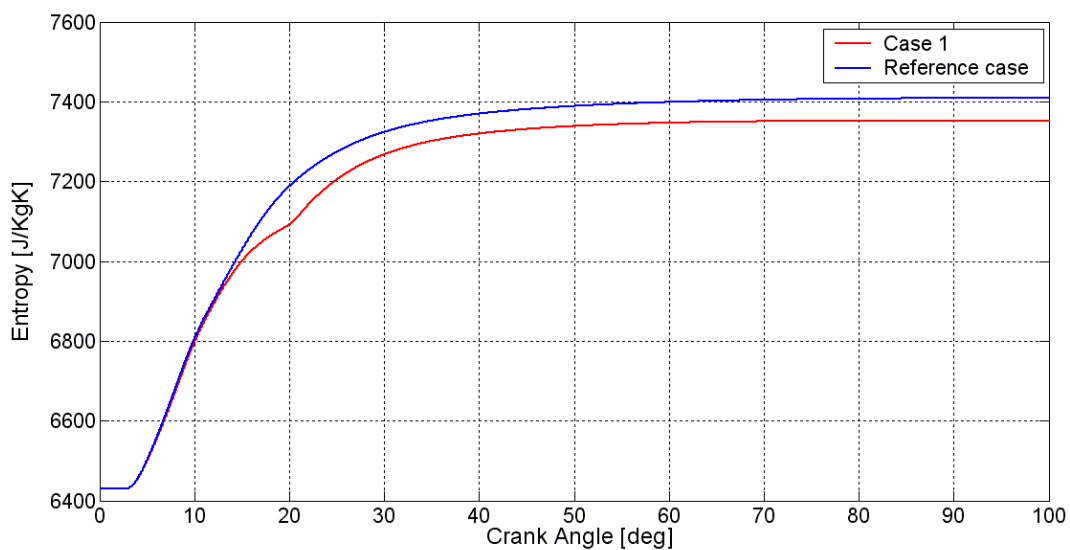
Διάγραμμα 21: Χρονική ιστορία της πίεσης για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



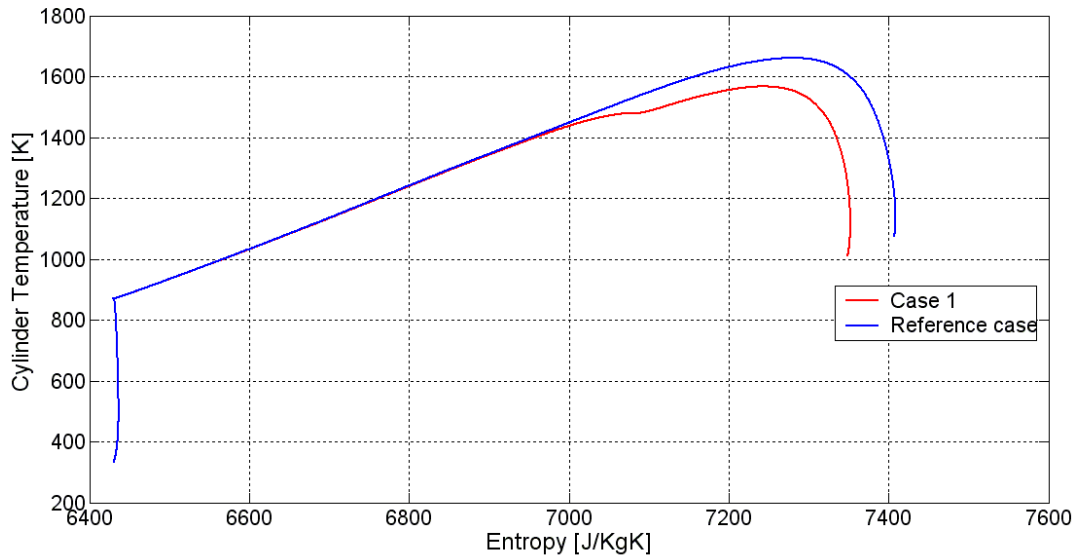
Διάγραμμα 22: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



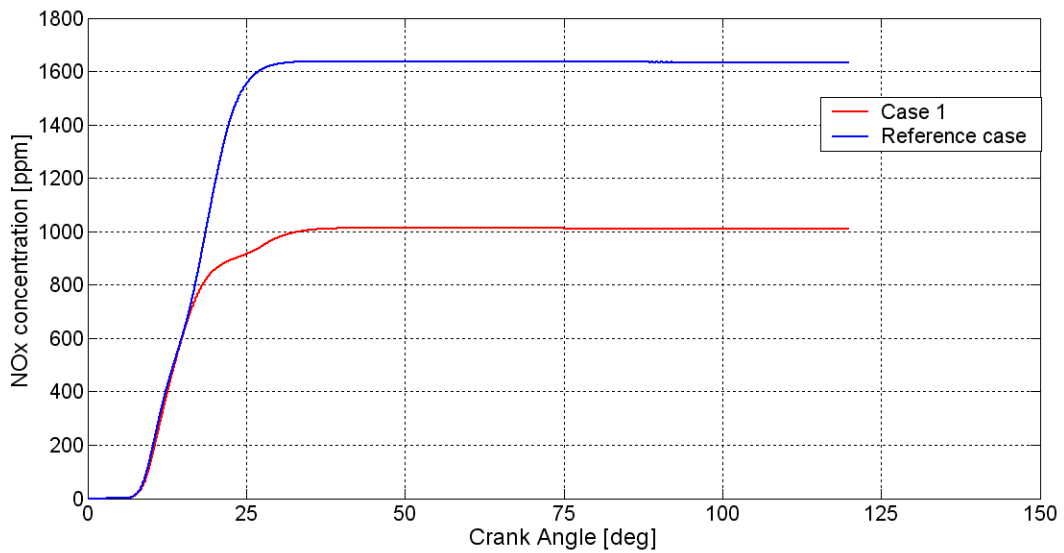
Διάγραμμα 23: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



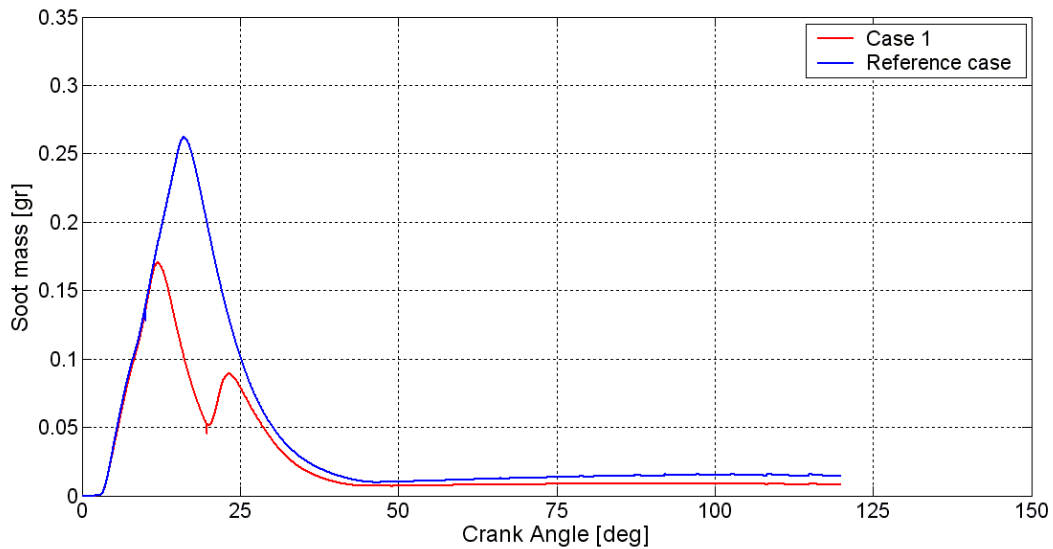
Διάγραμμα 24: Μεταβολή της εντροπίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



Διάγραμμα 25: Διάγραμμα  $T - s$ : Μεταβολή της μέσης χωρικά αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας συναρτήσει της εντροπίας, για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

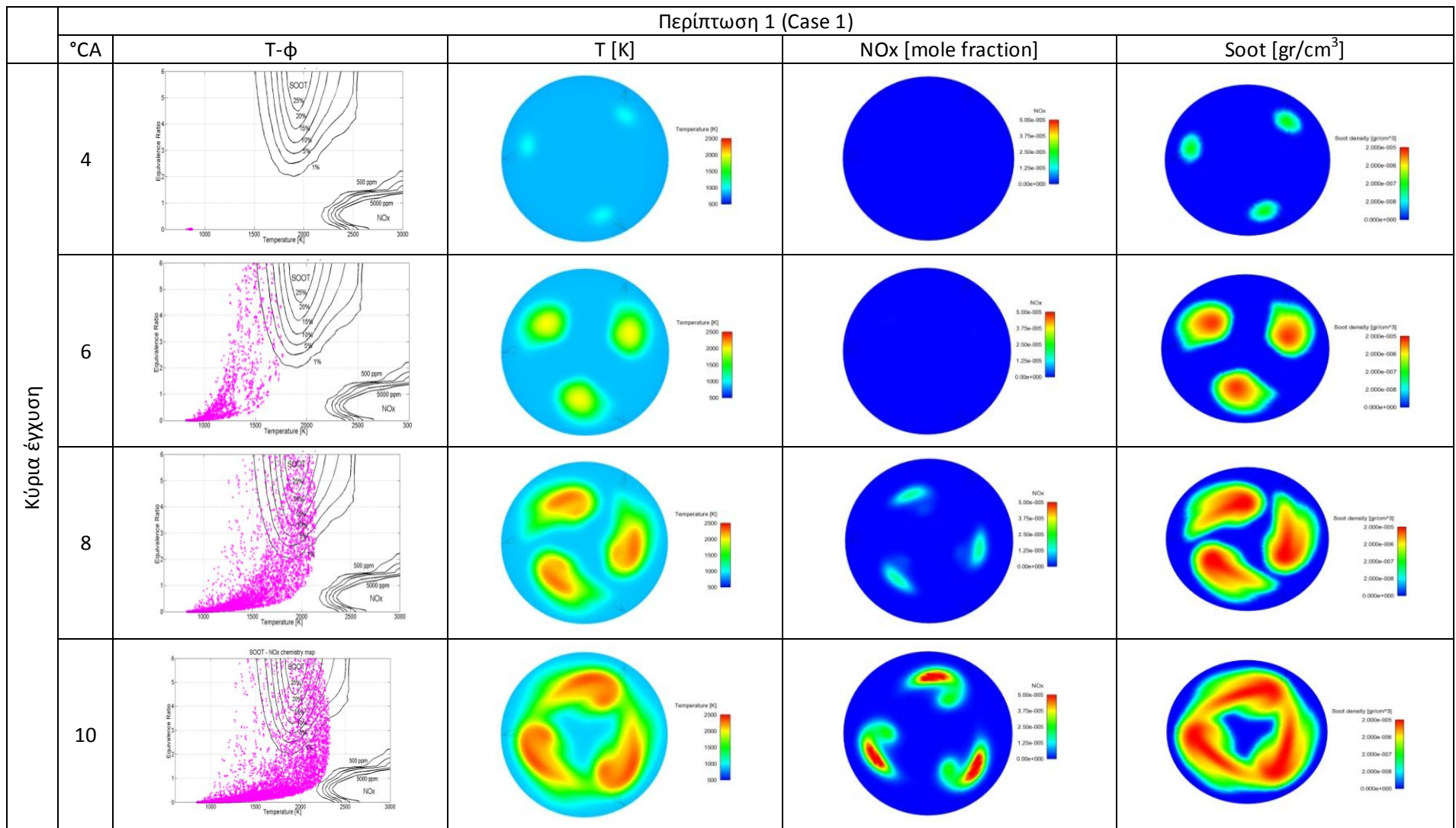


Διάγραμμα 26: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NOx συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

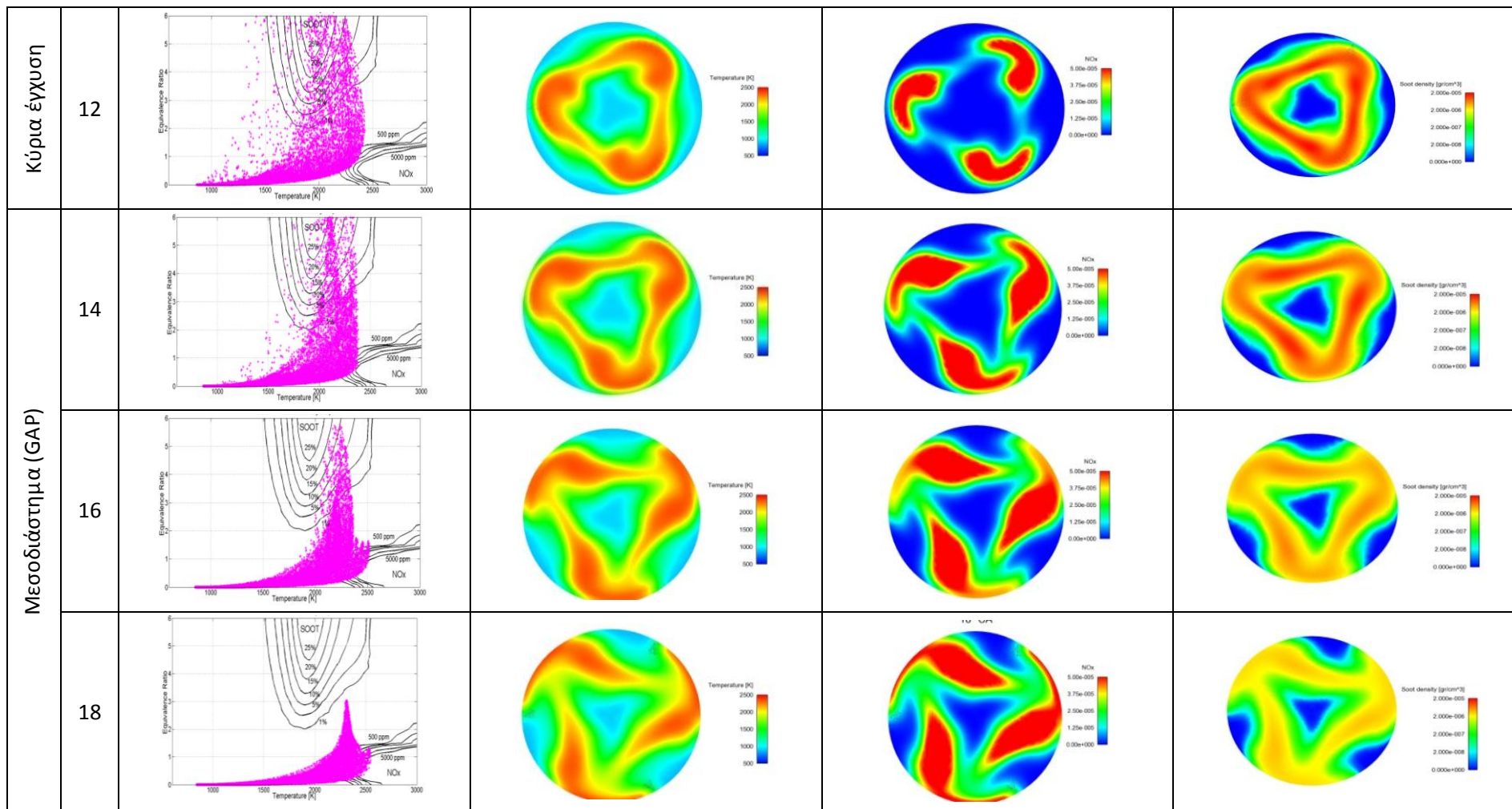


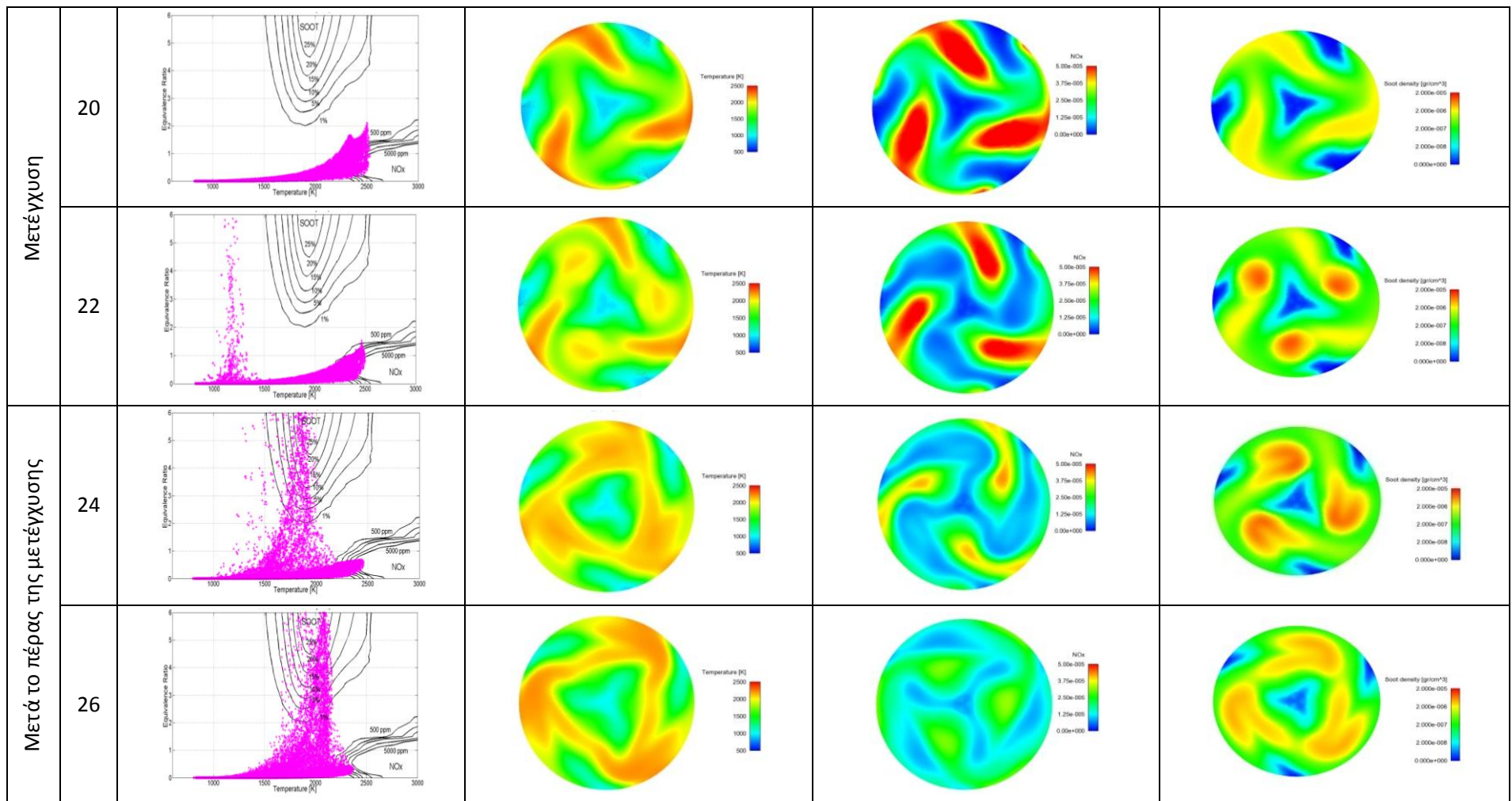
Διάγραμμα 27: Μεταβολή της μάζας σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 1 (Case 1) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

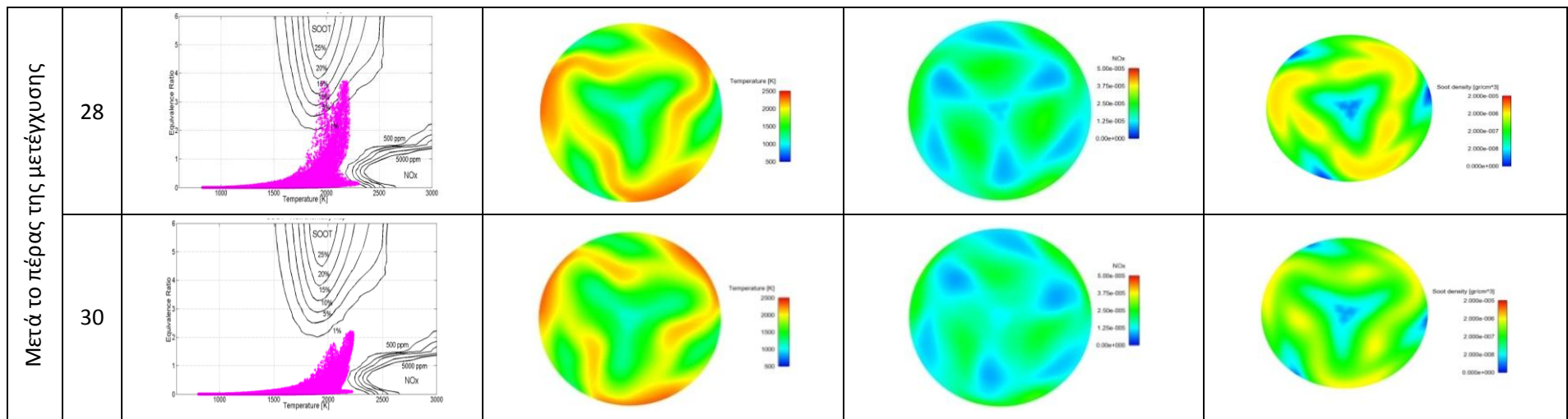
Στην Εικόνα 11 παρουσιάζονται για την περίπτωση 1 (Case 1) οι χάρτες T-φ και οι ισοϋψείς καμπύλες, στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για αντιπροσωπευτικές τιμές της γωνίας στροφάλου. Τα στιγμιότυπα που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν στο χρονικό παράθυρο το οποίο περιλαμβάνει την έγχυση του καυσίμου και μεγάλο μέρος της διεργασίας της καύσης (2-30 μοίρες). Υπενθυμίζεται ότι, για την περίπτωση 1, η κύρια έγχυση λαμβάνει χώρα στο διάστημα 2 - 13 μοιρών, ενώ η μετέγχυση στο διάστημα 19 - 23 μοιρών (βλέπε Διάγραμμα 20). Κατά αυτόν τον τρόπο, μεγάλη ποσότητα του καυσίμου, που αντιστοιχεί στην κύρια έγχυση, καίγεται, και κατ' επέκταση η τοπική θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης αυξάνεται, συμβάλλοντας στον σχηματισμό NOx. Κατά τη διάρκεια του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (14-18 μοίρες) τα επίπεδα των θερμοκρασιών παραμένουν υψηλά, ευνοώντας την παραγωγή NOx, αλλά τα επίπεδα αιθάλης μειώνονται αισθητά, διότι συνεχίζεται η καύση με χαμηλούς λόγους ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα. Στη συνέχεια, η καύση κατά τη διάρκεια της μετέγχυσης δεν αυξάνει περαιτέρω τις τοπικές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα να μην δημιουργούνται επιπλέον NOx. Ωστόσο, τα σωματίδια αιθάλης αυξάνονται, λόγω της έγχυσης νέου καυσίμου, αφού αυξάνονται οι τοπικοί λόγοι ισοδυναμίας αέρα - καυσίμου. Μετά το πέρας της μετέγχυσης, οι τοπικές θερμοκρασίες συνεχίζουν να είναι χαμηλές, και δεν ευνοούν το σχηματισμό NOx. Ωστόσο, ο ρυθμός οξείδωσης της αιθάλης διατηρείται, με αποτέλεσμα τη μειωμένη τελική συγκέντρωσή της (βλ. Διάγραμμα 27).







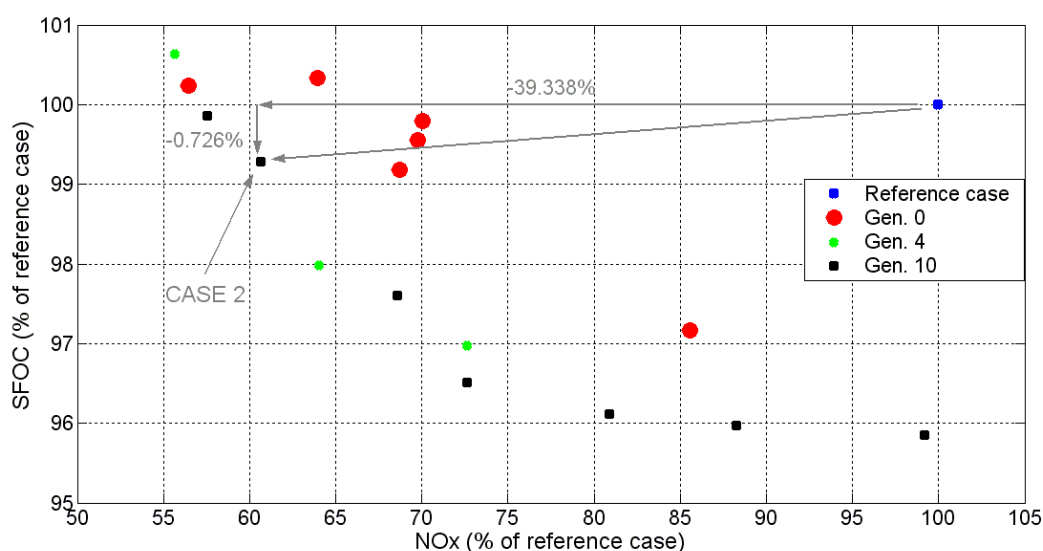




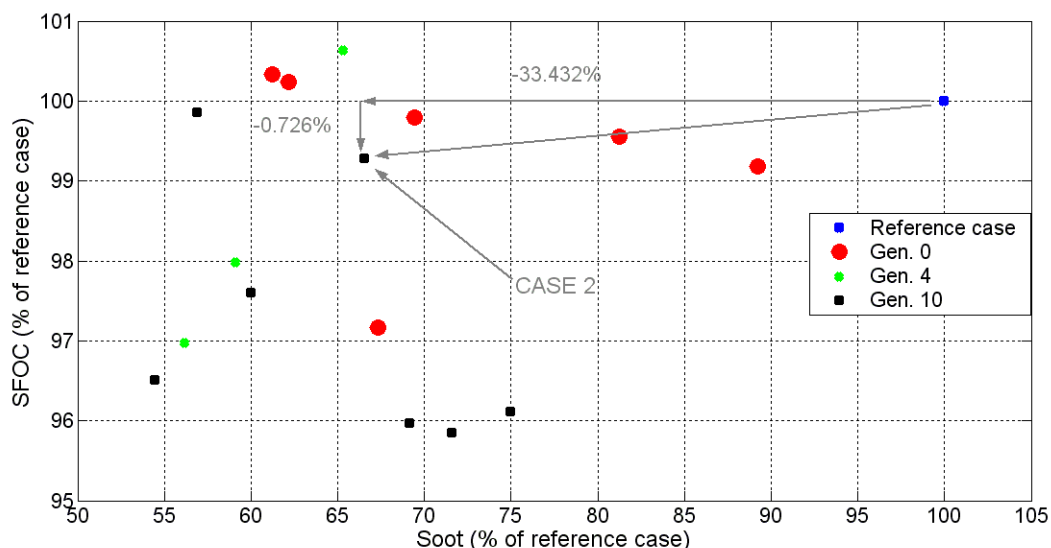
Εικόνα 11: Περίπτωση 1 (Case 1): Χάρτες T-φ και ισοϋψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για διάφορες τιμές της γωνίας στροφάλου.

### 5.2.2 Δεύτερη περίπτωση (Μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης)

Το σύνολο των λύσεων που προέκυψαν για τη δεύτερη περίπτωση (μη σταθερή τιμή της παραμέτρου SOMI) του πρώτου προβλήματος (πρόβλημα χωρίς περιορισμούς) παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων περιλαμβάνει τρεις στόχους, οι λύσεις παρουσιάζονται σε δύο επιμέρους διαγράμματα. Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 28 παρουσιάζεται το μέτωπο Pareto (Γενιά 10) ως προς την τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ενώ στο Διάγραμμα 29 ως προς τις τελικές εκπομπές σωματισίων αιθάλης (soot) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Καί οι τρεις στόχοι έχουν κανονικοποιηθεί με τις αντίστοιχες τιμές της περίπτωσης αναφοράς. Στο Διάγραμμα 28 και στο Διάγραμμα 29 συμπεριλαμβάνονται και λύσεις από επιλεγμένες γενιές (αρχική Γενιά και Γενιά 4). Ο Πίνακας 14 περιέχει τις τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης και των περιορισμών κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (Γενιά 10). Σημειώνεται ότι κάποιες λύσεις απορρίφθηκαν και δεν παρουσιάζονται στα μέτωπα Pareto, με κριτήριο την τιμή της μέγιστης πίεσης, συγκεκριμένα όταν αυτή είναι πολύ χαμηλή εξαιτίας της μεγάλης τιμής της έναρξης της κύριας έγχυσης ( $SOMI > 3^\circ CA$ ). Επιπλέον, στα δύο διαγράμματα και στον πίνακα σημειώνεται η περίπτωση 2 (Case 2), η οποία χαρακτηρίζεται από ταυτόχρονη μείωση και των τριών στόχων. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης μειώνονται κατά 39.3% και 33.4%, αντίστοιχα, ενώ η ειδική κατανάλωση καυσίμου παρουσιάζει μείωση 0.7%.



Διάγραμμα 28: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 10), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 0 και 4, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 2 (Case 2), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.



Διάγραμμα 29: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 10), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (Soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 0 και 4, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 2 (Case 2), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.

Γενιά 10	Στόχοι (Objectives)			Ελεύθερες μεταβλητές (Free variables)				Μέγιστη πίεση [bar]	Έργο [%]
	SFOC [%]	NOx [%]	Soot [%]	SOMI [° CA]	MR [%]	PoMF [%]	GAP [° CA]		
	96.105	80.912	74.954	0.206	9.775	26.428	1.484	161.950	93.881
	96.506	72.657	54.466	0.516	9.306	24.103	4.801	159.790	93.978
<b>Περίπτωση 2</b>	<b>99.274</b>	<b>60.662</b>	<b>66.569</b>	<b>1.677</b>	<b>9.120</b>	<b>39.924</b>	<b>5.320</b>	<b>149.530</b>	<b>91.544</b>
	95.841	99.195	71.589	0.158	8.847	1.343	7.264	162.590	95.109
<b>Απόρριψη</b>	<b>105.696</b>	<b>47.480</b>	<b>73.826</b>	<b>3.874</b>	<b>7.752</b>	<b>37.179</b>	<b>9.613</b>	<b>134.680</b>	<b>87.277</b>
	95.972	88.259	69.156	0.361	9.335	7.443	4.581	160.980	94.470
	99.856	57.566	56.927	1.145	9.824	38.170	7.669	153.570	90.306
	97.603	68.586	59.999	1.610	8.788	27.191	3.683	151.540	93.452
<b>Απόρριψη</b>	<b>101.826</b>	<b>55.094</b>	<b>63.364</b>	<b>4.397</b>	<b>8.201</b>	<b>26.809</b>	<b>5.073</b>	<b>131.340</b>	<b>90.152</b>
<b>Απόρριψη</b>	<b>102.003</b>	<b>53.975</b>	<b>68.209</b>	<b>4.377</b>	<b>8.729</b>	<b>31.842</b>	<b>4.977</b>	<b>131.510</b>	<b>89.478</b>

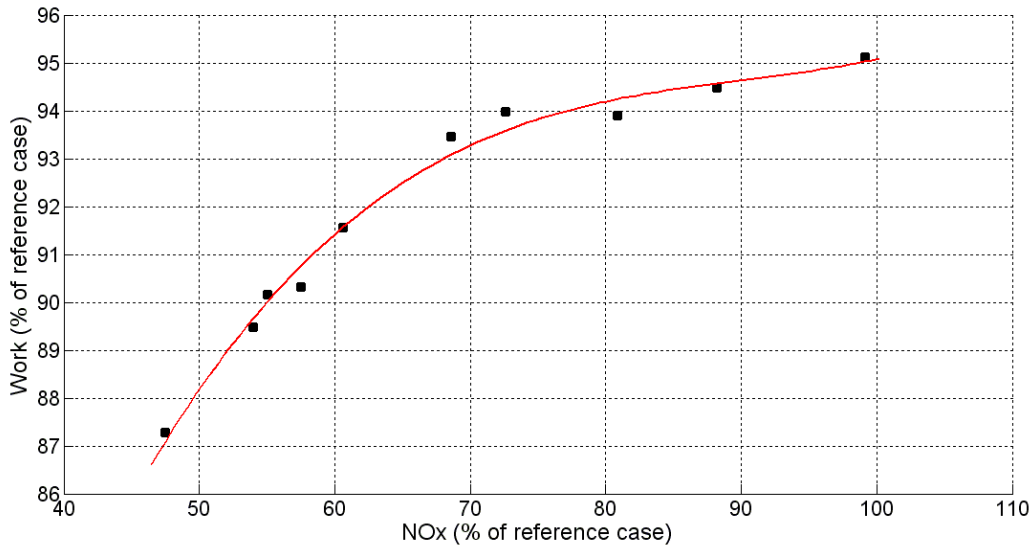
Πίνακας 14: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης, της μέγιστης πίεσης και του έργου κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (Γενιά 10). Οι στόχοι και το έργο παρίστανται ως ποσοστά του αντίστοιχου μεγέθους της περίπτωσης αναφοράς. Η απόρριψη λύσεων έγινε με κριτήριο τη σημαντική μείωση της μέγιστης πίεσης.

Στο Διάγραμμα 30 παρουσιάζεται η σχέση του παραγόμενου έργου με τις εκπομπές NOx. Καί σε αυτό το διάγραμμα οι τιμές έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τις αντίστοιχες της περίπτωσης αναφοράς. Παρατηρείται ότι η επιθυμητή μείωση των τελικών εκπομπών NOx συνοδεύεται από μείωση του παραγόμενου έργου για όλες τις λύσεις στο μέτωπο Pareto. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η συνολική μείωση της εγχυόμενης μάζας του καυσίμου (MR), ώστε να προκύψουν κατάλληλα συμπεράσματα για την τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Συγκεκριμένα, η περίπτωση 2 (Case 2) χαρακτηρίζεται από μειωμένο έργο, αλλά και μειωμένη ειδική κατανάλωση, διότι περιλαμβάνει σημαντική μείωση της συνολικά εγχυόμενης μάζας καυσίμου, ως προς την περίπτωση αναφοράς (MR = 9.12%).

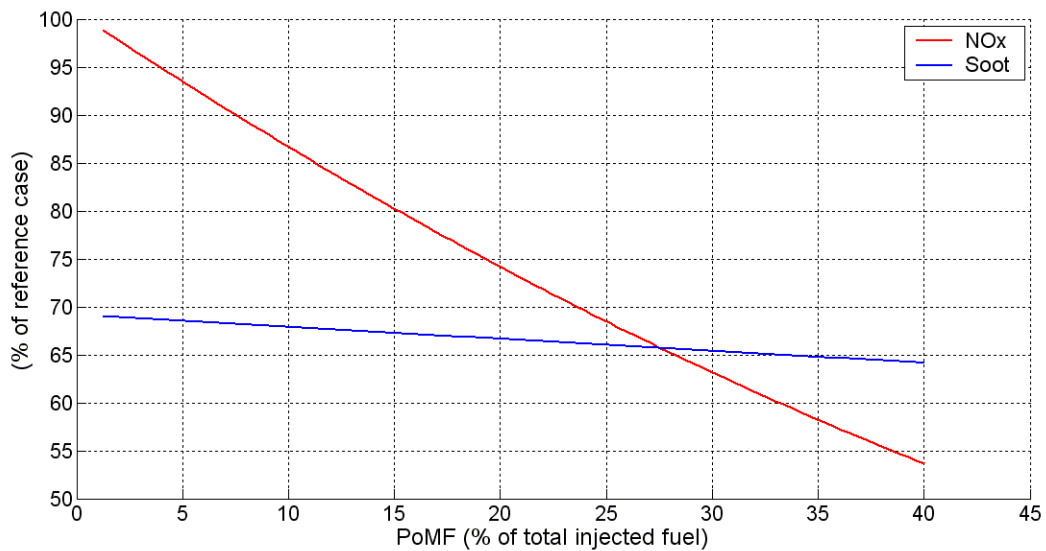
Στο Διάγραμμα 31 παρουσιάζεται η μεταβολή των τελικών εκπομπών NOx και σωματισίων αιθάλης, σε συνάρτηση με το ποσοστό του μετεγχυόμενου (επί του συνολικά εγχυόμενου) καυσίμου (PoMF). Καί σε αυτό το διάγραμμα οι τιμές έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τις αντίστοιχες της περίπτωσης αναφοράς. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ποσοστού του μετεγχυόμενου καυσίμου, μειώνονται οι εκπομπές, τόσο των NOx όσο και των σωματιδίων αιθάλης. Ωστόσο, η εξάρτηση αυτή είναι πιο έντονη για τις εκπομπές NOx, διότι σημαντικό ποσοστό του καυσίμου καίγεται μακριά από το ANΣ, όπου τα επίπεδα της θερμοκρασίας είναι σαφώς μειωμένα.

Στο Διάγραμμα 32 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης πίεσης, σε συνάρτηση με την αρχή της κύριας έγχυσης. Παρατηρείται ότι η μέγιστη πίεση ελαττώνεται μονοτονικά με την αύξηση της γωνίας έναρξης της κύριας έγχυσης. Αντίστοιχα, παρατηρείται σημαντική μείωση του ωφέλιμου έργου για μεγάλες τιμές της γωνίας έναρξης της κύριας έγχυσης (SOMI > 3° CA). Οι λύσεις αυτές απορρίπτονται ως μη ενδιαφέρουσες (Πίνακας 14).

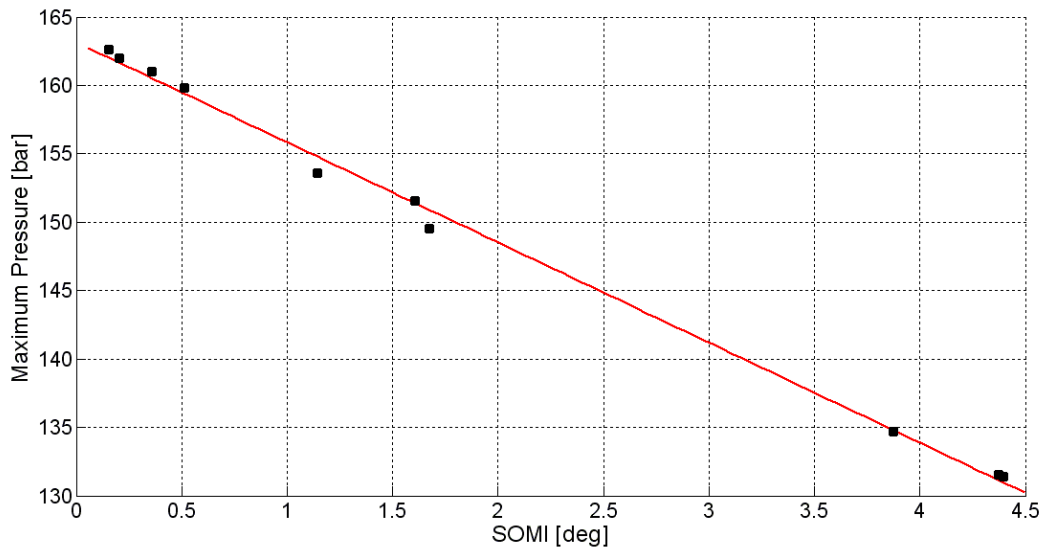
Τέλος, μια γενικότερη παρατήρηση είναι ότι, όπως και στο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς με σταθερή την αρχή της κύριας έγχυσης, η μείωση της συνολικά εγχυόμενης μάζας καυσίμου είναι σημαντική (κυμαίνεται μεταξύ 8% και 10%). Αυτό έχει προφανώς αρνητική επίδραση στο ωφέλιμο έργο, ενώ αντίστοιχα περιορίζει τις τελικές εκπομπές σωματιδίων αιθάλης.



Διάγραμμα 30: Μεταβολή του ωφέλιμου έργου σε συνάρτηση με τις τελικές εκπομπές NOx, ως ποσοστά των αντίστοιχων τιμών της περίπτωσης αναφοράς, για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto.



Διάγραμμα 31: Μεταβολή των τελικών εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του ποσοστού του μετεγχυόμενου επί του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου (PoMF), ως ποσοστά των αντίστοιχων τιμών της περίπτωσης αναφοράς, για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto.



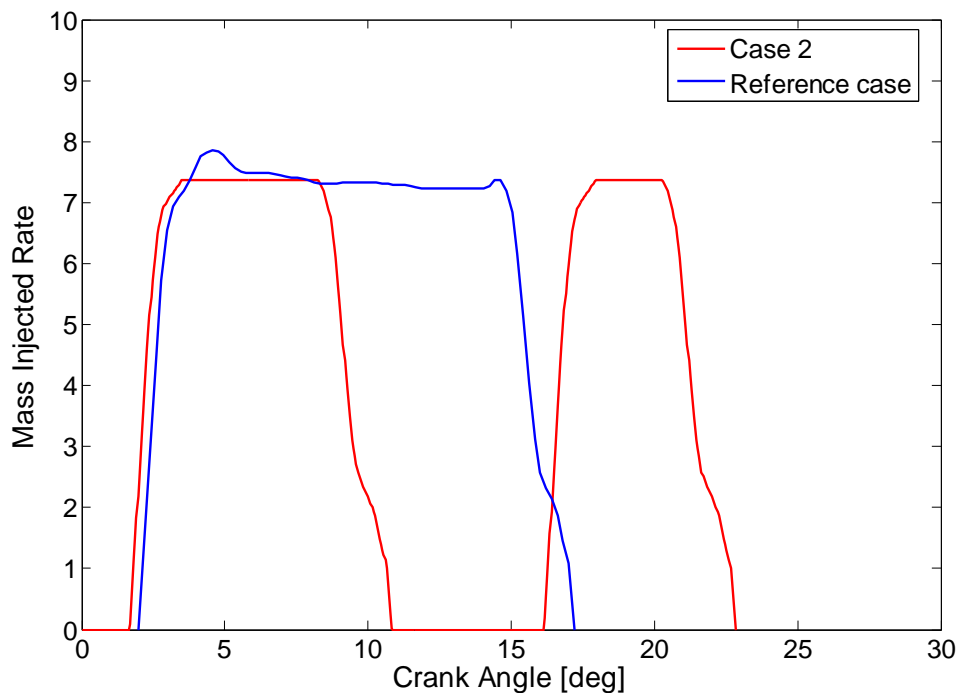
Διάγραμμα 32: Μεταβολή της μέγιστης πίεσης συναρτήσει της αρχής της κύριας έγχυσης (SOMI) για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η θερμορευστομηχανική ανάλυση της επιλεχθείσας περίπτωσης 2 (Case 2). Ο Πίνακας 15 περιλαμβάνει τις τιμές των στόχων, των περιορισμών, των ελεύθερων μεταβλητών και της έναρξης της μετέγχυσης για την επιλεχθείσα περίπτωση 2. Το προφίλ έγχυσης της επιλεχθείσας περίπτωσης 2, καθώς και αυτό της περίπτωσης αναφοράς, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 33. Σημειώνεται ότι η έναρξη της κύριας έγχυσης της περίπτωσης 2 (Case 2) λαμβάνει χώρα νωρίτερα από την περίπτωση αναφοράς, ενώ η μάζα του καυσίμου της μετέγχυσης αντιστοιχεί στο περίπου 40% της συνολικά εγχυόμενης. Τέλος, η έναρξη της μετέγχυσης αντιστοιχεί περίπου στο πέρας της έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.

Στόχοι (Objectives)				
SFOC	NOx	Σωματίδια αιθάλης (Soot)		
99.274 %	60.662 %	66.569 %		
Μέγιστη πίεση		Ωφέλιμο έργο		
149.53 bar		91.544 %		
Ελεύθερες μεταβλητές (Free variables)				
SOMI	MR	PoMF	GAP	SoPol
+ 1.677° CA	9.12 %	39.924 %	5.32° CA	16.15° CA

Πίνακας 15: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (μεταβλητή SOMI): Στόχοι, ελεύθερες μεταβλητές, μέγιστη πίεση, ωφέλιμο έργο, καθώς και γωνία έναρξης της μετέγχυσης της περίπτωσης 2 (Case 2).





Διάγραμμα 33: Προφίλ έγχυσης της περίπτωσης 2 (Case 2) και της περίπτωσης αναφοράς.

Στο Διάγραμμα 34 παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Η λύση αυτή (περίπτωση 2) επιλέχθηκε γιατί, πέρα από τις σημαντικές μειώσεις που εμφανίζει στις εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης, καθώς και στην ειδική κατανάλωση του καυσίμου, η μέγιστη αναπτυσσόμενη πίεση είναι πολύ κοντά στη μέγιστη επιτρεπόμενη (149.53 bar). Η πίεση διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, λόγω του γεγονότος ότι η αρχή της κύριας έγχυσης του καυσίμου είναι πλησίον του ANΣ (1.68° CA). Μετά την επίτευξη της μέγιστης πίεσης παρατηρείται ότι η πίεση της περίπτωσης 2 (Case 2) υπολείπεται σημαντικά αυτής της περίπτωσης αναφοράς.

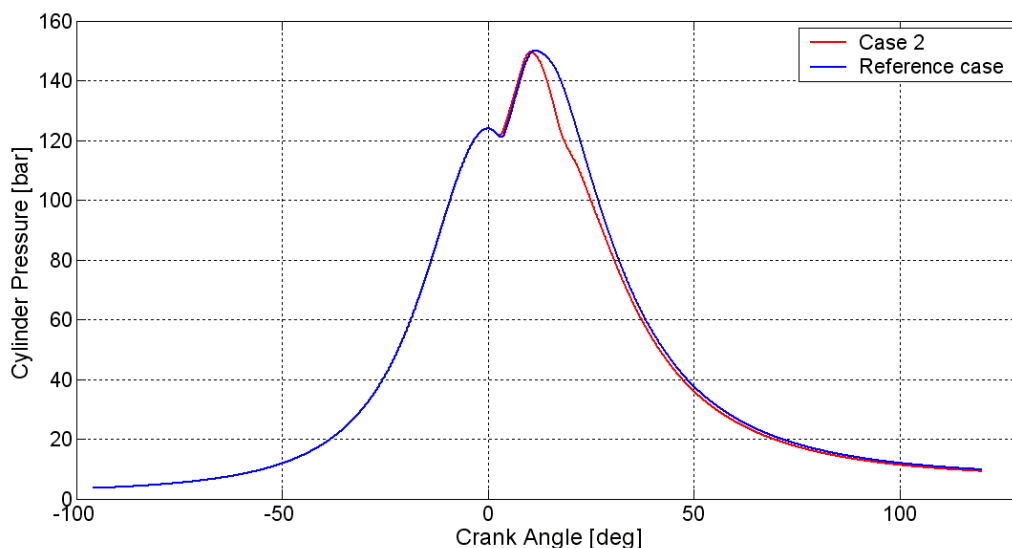
Στο Διάγραμμα 35 παρουσιάζεται η μέση χωρική θερμοκρασία που αναπτύσσεται εντός του κυλίνδρου, σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή της περίπτωσης αναφοράς. Έτσι, συμπεραίνεται ότι η καύση λόγω μετέγχυσης δεν συμβάλλει ιδιαίτερα στην αύξηση της θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου.

Στο Διάγραμμα 36 παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Εξαιτίας της μειωμένης κατά συνολικά 9% εγχυόμενης μάζας καυσίμου στην περίπτωση 2 (MR = 9%), στα πρώτα στάδια της καύσης ο αδιαστατοποιημένος ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι υψηλότερος από τον αντίστοιχο της περίπτωσης αναφοράς. Στη συνέχεια, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας μειώνεται δραστικά για την περίπτωση 2, εξαιτίας του σημαντικού μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP = 5.32° CA). Ακολούθως, παρατηρείται έντονη αύξηση του ρυθμού της έκλυσης θερμότητας, η οποία αντιστοιχεί στην καύση σημαντικής ποσότητας μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου (περίπου 40% της

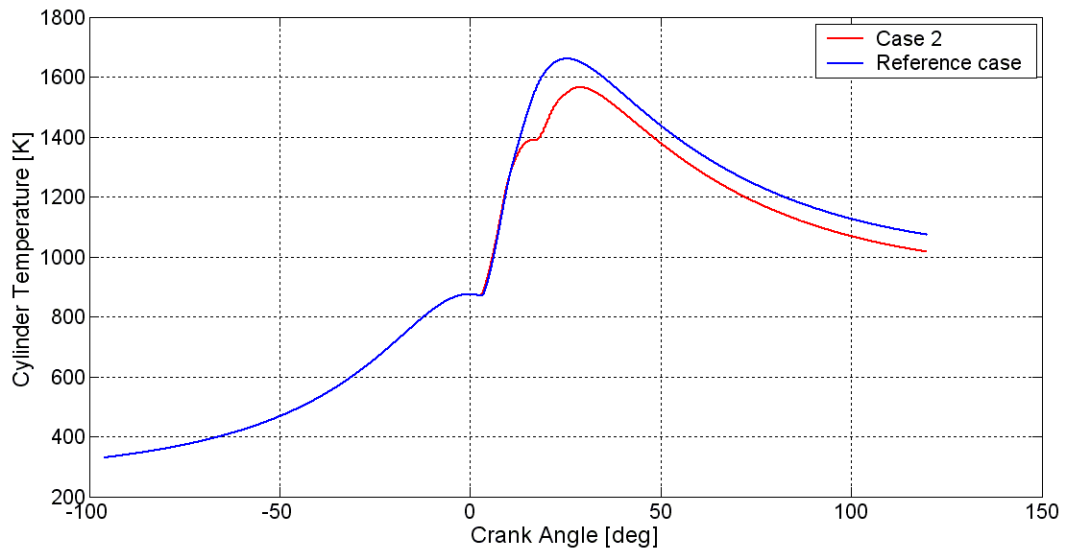
συνολικής). Σημειώνεται ότι όλη η εγχυόμενη μάζα καυσίμου καίγεται κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, και κατά συνέπεια η καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου δεν συμβάλλει στην αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του κυλίνδρου, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς.

Στο Διάγραμμα 37 και στο Διάγραμμα 38 παρουσιάζονται η μεταβολή της εντροπίας σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, και το διάγραμμα T-s, αντίστοιχα, για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Στα δύο διαγράμματα παρατηρούνται για την περίπτωση 2 μειωμένα επίπεδα εντροπίας και θερμοκρασίας, που αντιστοιχούν σε μειωμένα επίπεδα ωφέλιμου έργου.

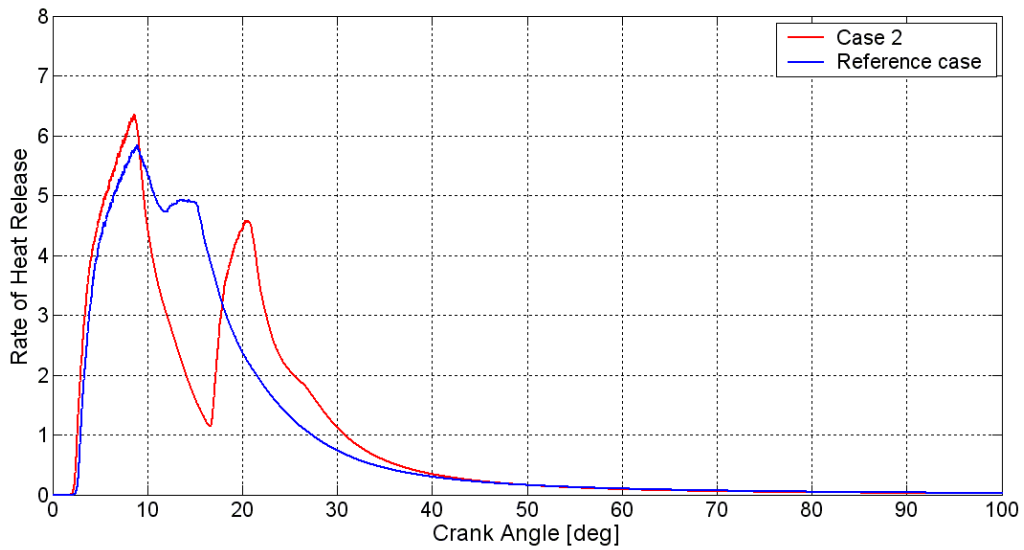
Στο Διάγραμμα 39 και στο Διάγραμμα 40 παρουσιάζονται η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης NOx και της μάζας των σωματιδίων αιθάλης, αντίστοιχα, για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Σε αμφότερα τα διαγράμματα διαπιστώνεται η μείωση των τελικών συγκεντρώσεων των εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης για την περίπτωση 2, συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς (39.3% και 33.3%, αντίστοιχα). Η ταυτόχρονη αυτή μείωση δικαιολογείται και στην περίπτωση αυτή από την παρουσία της μετέγχυσης. Συγκεκριμένα, η καύση του μετεγχυόμενου καυσίμου δεν συμβάλλει στη σημαντική περαιτέρω αύξηση των τοπικών θερμοκρασιών, με αποτέλεσμα να μην σχηματίζονται επιπλέον NOx. Ωστόσο, η οξείδωση της αιθάλης δεν επηρεάζεται. Τέλος, σημειώνεται ότι στη μείωση των τελικών εκπομπών σωματιδίων αιθάλης στην περίπτωση 2 συμβάλλει και η κατά 9% μείωση της συνολικά εγχυόμενης μάζας καυσίμου, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς.



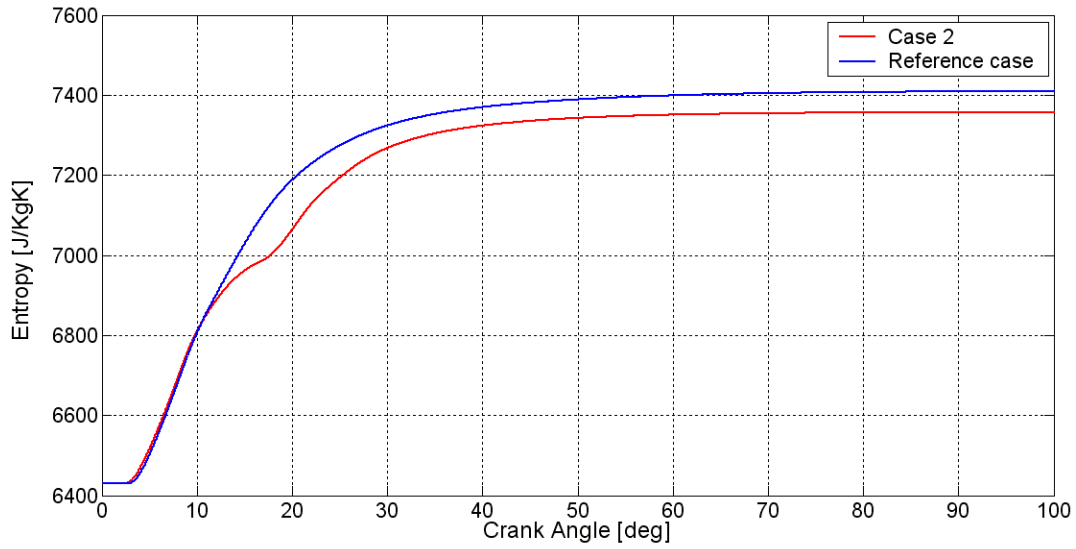
Διάγραμμα 34: Χρονική ιστορία της πίεσης για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



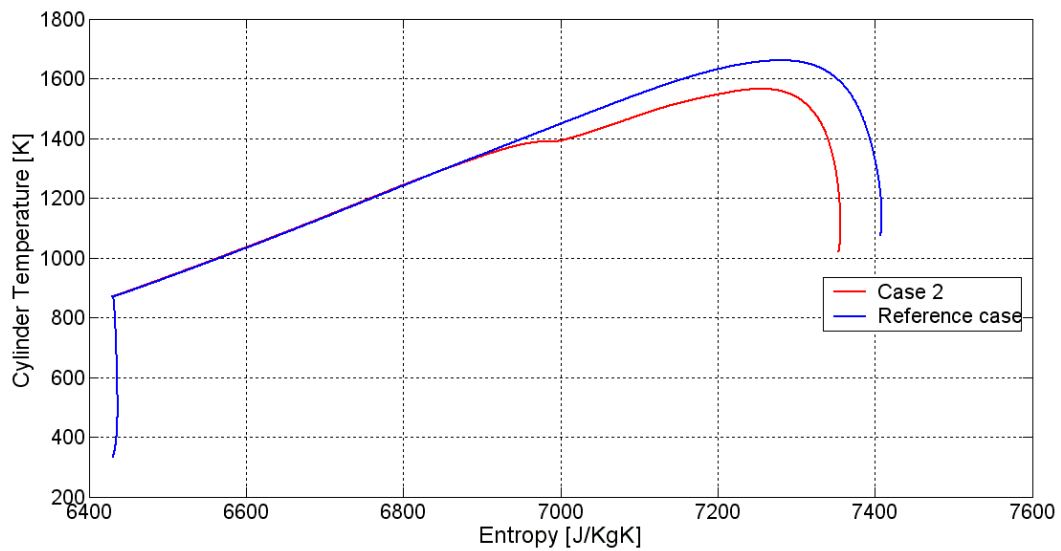
Διάγραμμα 35: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας εντός του κυλίνδρου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



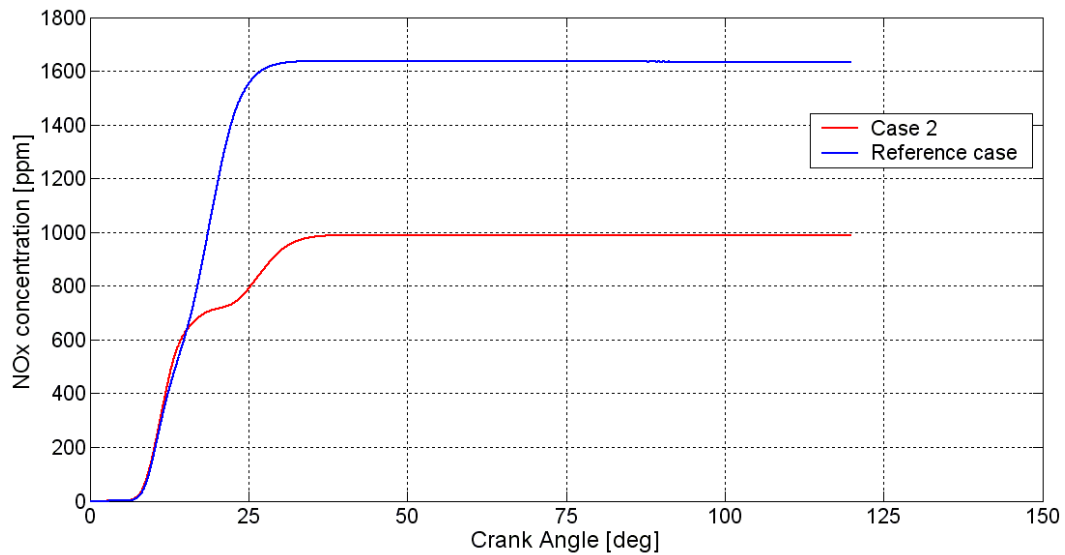
Διάγραμμα 36: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



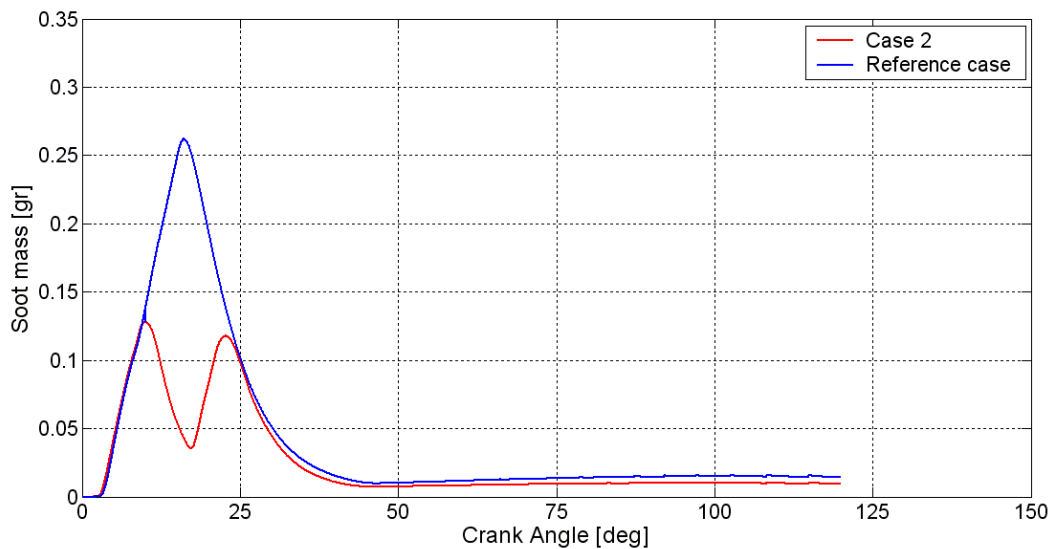
Διάγραμμα 37: Μεταβολή της εντροπίας συναρτήσει της γωνίας στρόφαλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



Διάγραμμα 38: Διάγραμμα  $T - s$ : Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της εντροπίας εντός του κυλίνδρου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



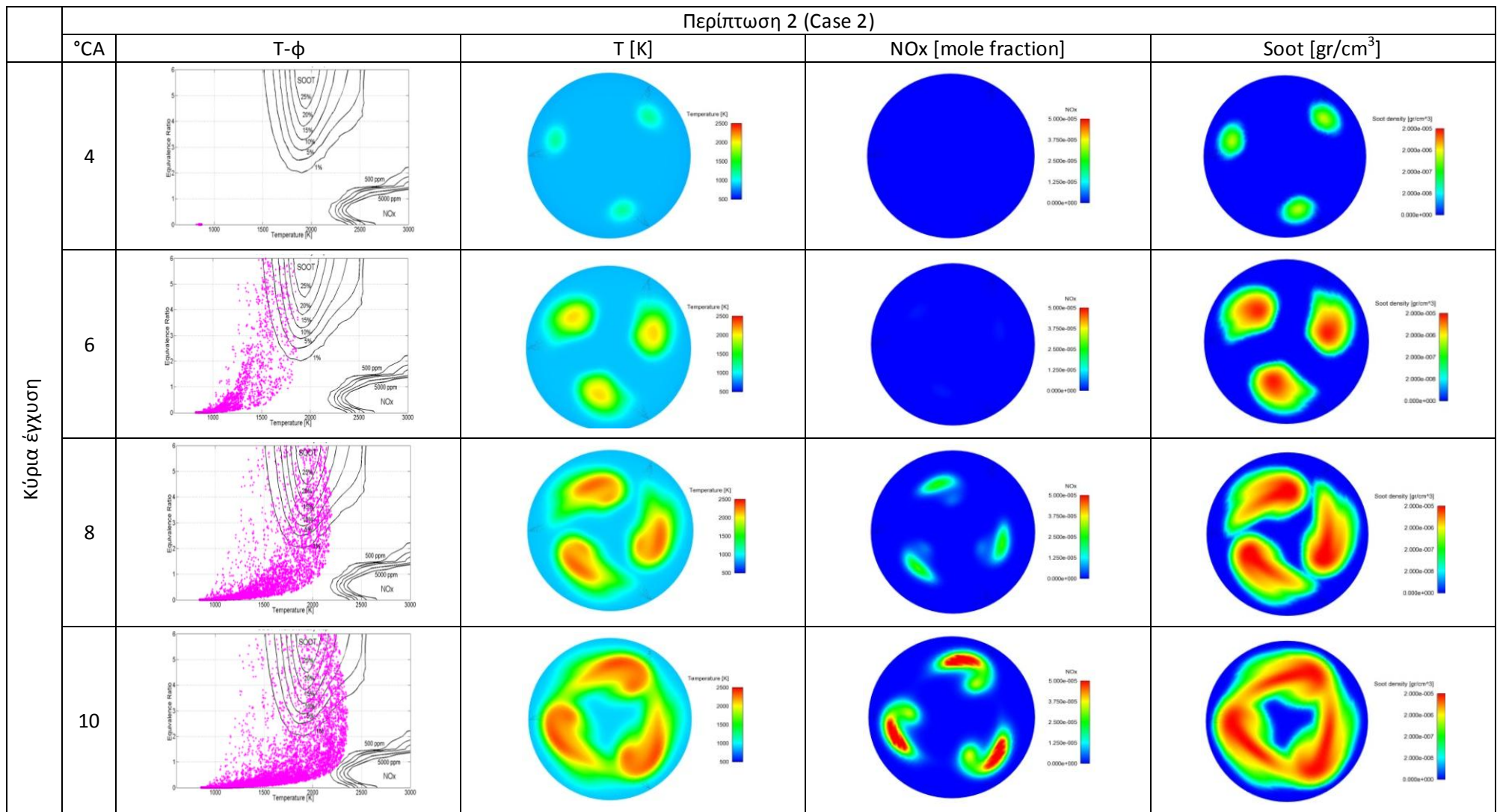
Διάγραμμα 39: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NOx συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

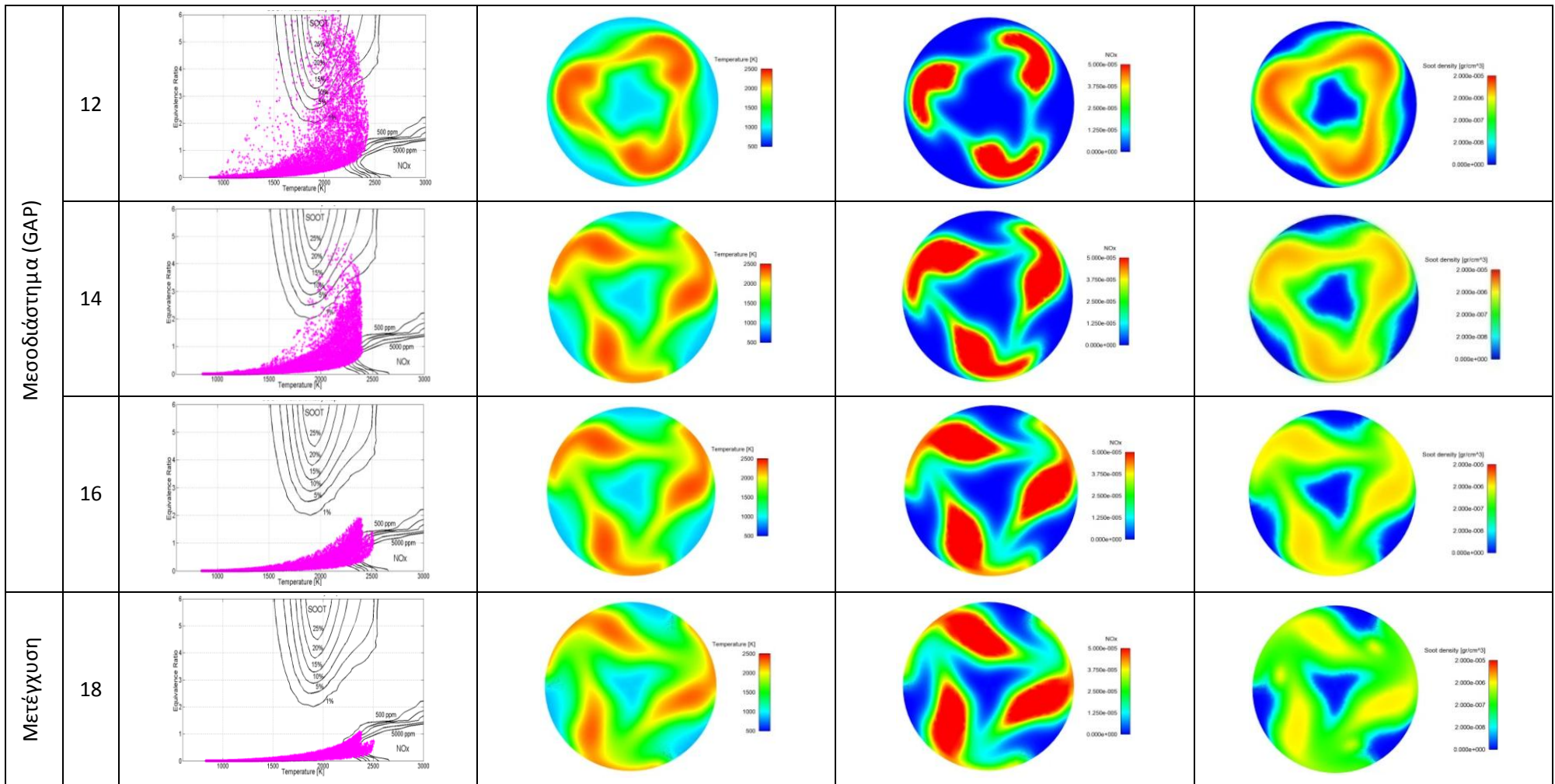


Διάγραμμα 40: Μεταβολή της μάζας σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 2 (Case 2) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

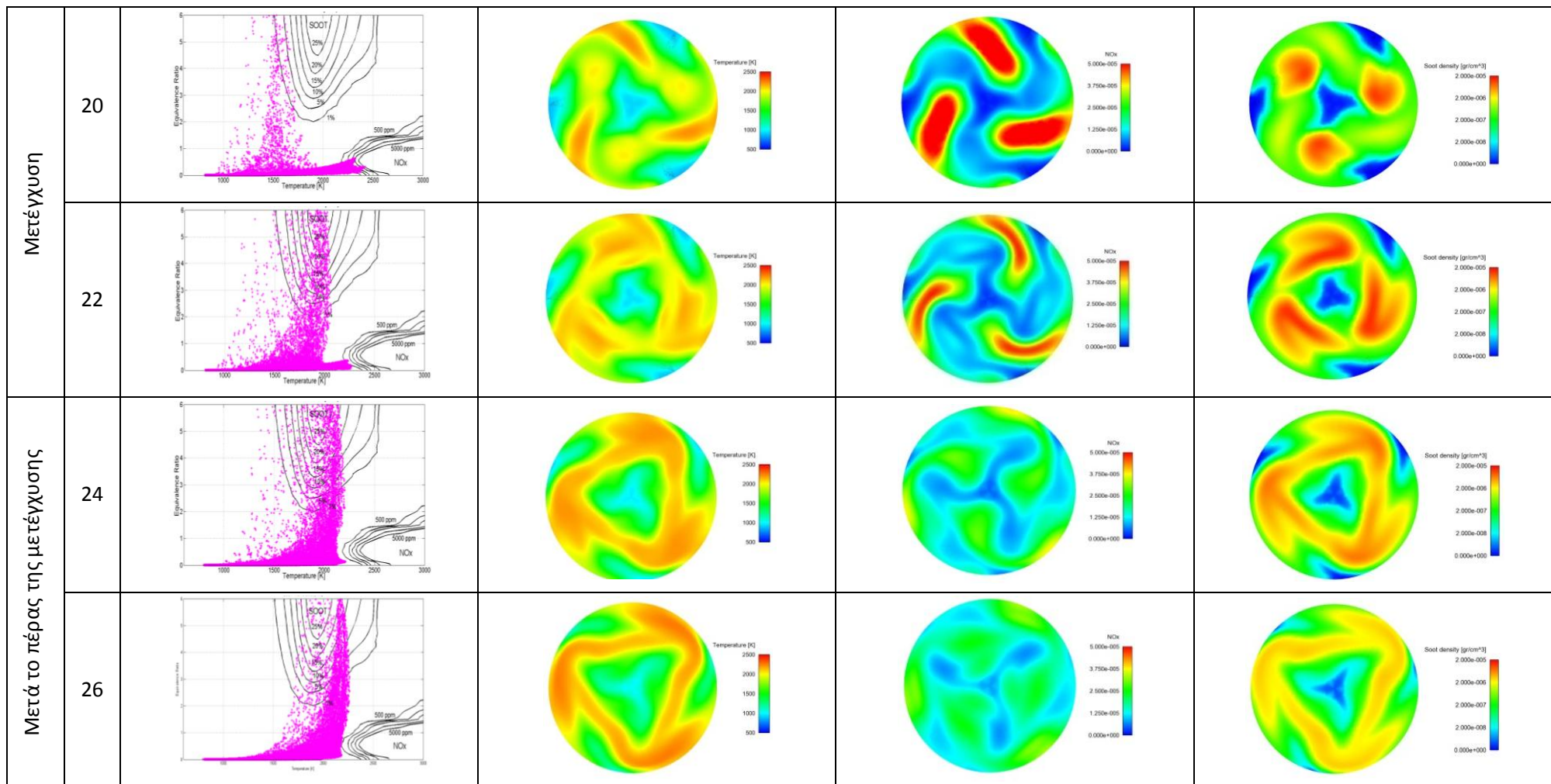
Στην Εικόνα 12 παρουσιάζονται οι χάρτες T-φ και οι ισούψειες καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για αντιπροσωπευτικές γωνίες στροφάλου της περίπτωσης 2 (Case 2). Τα στιγμιότυπα που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν σε χρονικό παράθυρο το οποίο περιλαμβάνει την έγχυση του καυσίμου και σημαντικό μέρος της διεργασίας της καύσης (2-30 μοίρες). Υπενθυμίζεται ότι, για την περίπτωση 2, η κύρια έγχυση λαμβάνει χώρα μεταξύ 1.7 και 11 μοιρών, ενώ η μετέγχυση

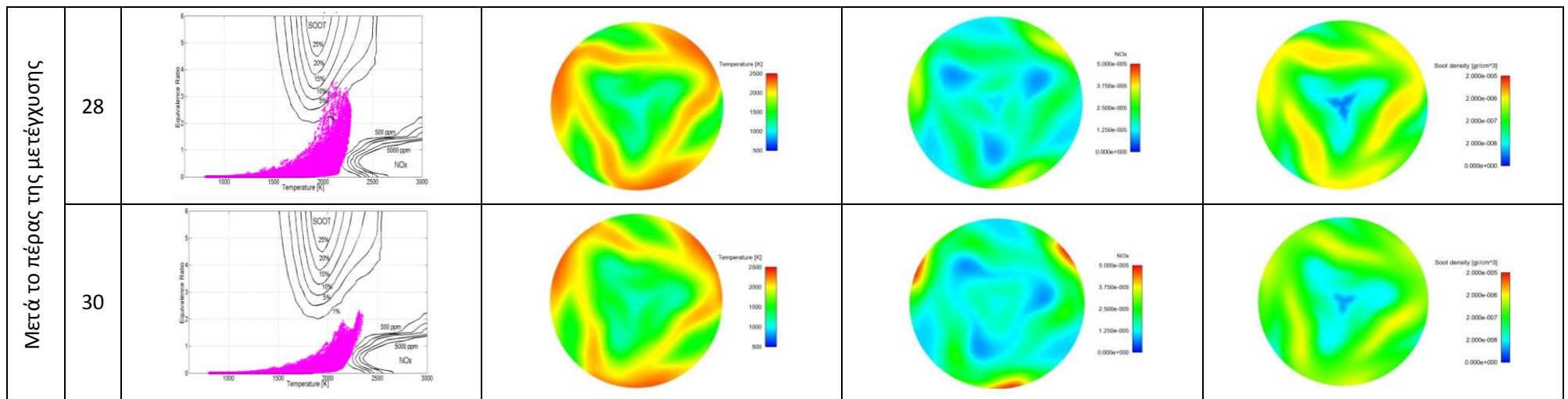
μεταξύ 16.2 και 23 μοιρών (βλέπε Διάγραμμα 33). Έτσι, η μεγαλύτερη ποσότητα του καυσίμου (60%) της κύριας έγχυσης καίγεται έντονα, με αποτέλεσμα τον σημαντικό σχηματισμό NOx. Κατά τη διάρκεια του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (12-16 μοίρες), τα επίπεδα των θερμοκρασιών παραμένουν υψηλά και συνεχίζουν να ευνοούν την παραγωγή NOx, αλλά οι τοπικοί λόγοι ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα είναι σχετικά χαμηλοί, με αποτέλεσμα χαμηλά επίπεδα παραγωγής σωματιδίων αιθάλης. Στη συνέχεια, το υπόλοιπο καύσιμο (40%) εγχύεται κατά τη διάρκεια του δεύτερου παλμού και καίγεται σε περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας, που δεν ευνοεί τον σχηματισμό NOx. Ο ρυθμός οξείδωσης της αιθάλης διατηρείται υψηλός, με αποτέλεσμα χαμηλά επίπεδα στην εξαγωγή (βλ. Διάγραμμα 40).







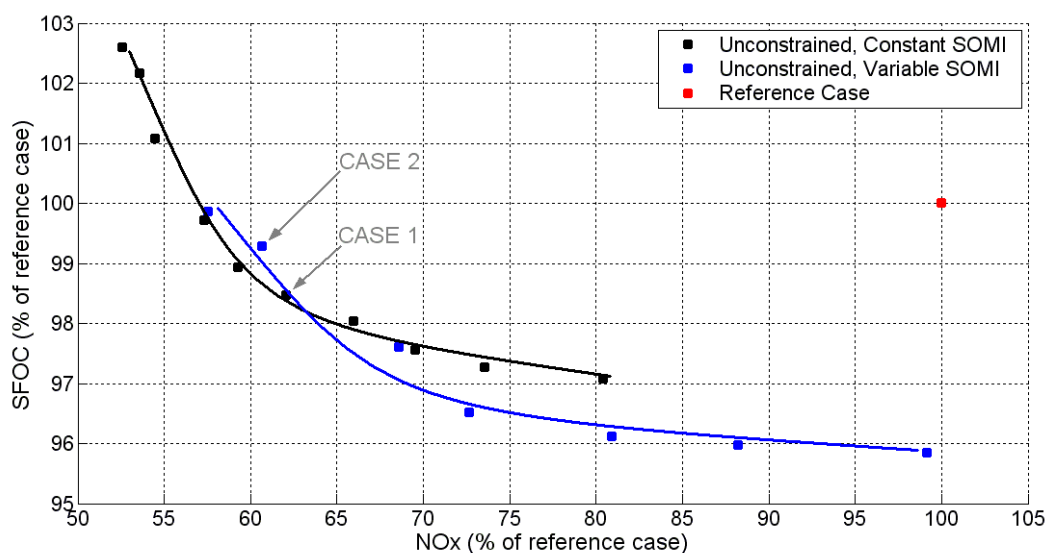




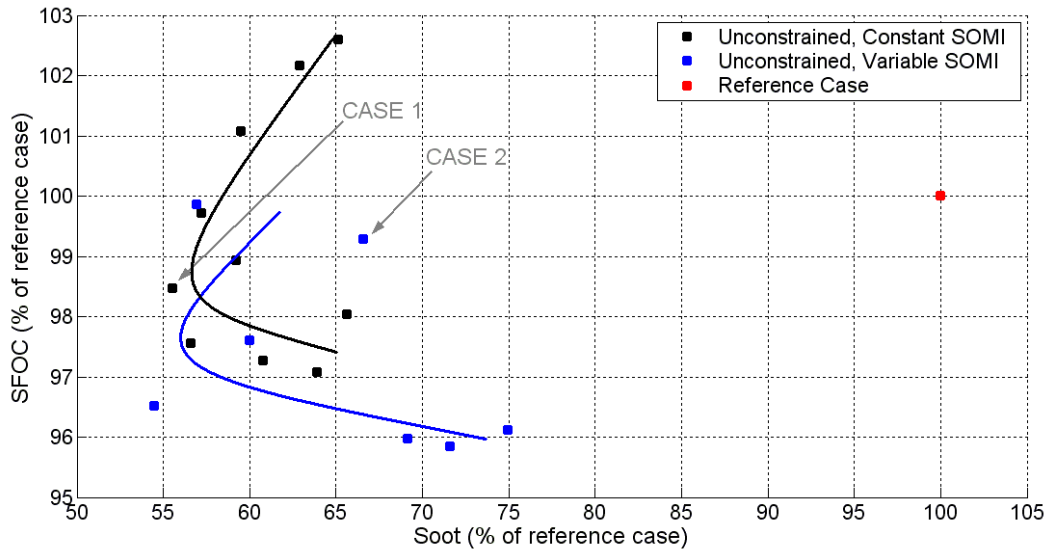
Εικόνα 12: Περίπτωση 2 (Case 2): Χάρτες T-φ και ισοψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για διάφορες τιμές της γωνίας στροφάλου.

### 5.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων χωρίς περιορισμούς

Στο Διάγραμμα 41 και στο Διάγραμμα 42 απεικονίζονται τα μέτωπα Pareto του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων χωρίς περιορισμούς. Υπενθυμίζεται ότι το κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει δύο επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης, που αντιστοιχούν σε σταθερή και μεταβλητή γωνία έναρξης της κύριας έγχυσης (SOMI). Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 41 φαίνεται το μέτωπο Pareto για την τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) στα προβλήματα βελτιστοποίησης με σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI. Επίσης, στο Διάγραμμα 42 παρουσιάζεται το αντίστοιχο μέτωπο Pareto, με παραμέτρους την τελική συγκέντρωση των σωματιδίων της αιθάλης (Soot) και την ειδική κατανάλωση (SFOC). Σε αμφότερα τα διαγράμματα παρατηρείται ότι συγκεντρωτικά υφίσταται μια διεύρυνση του πεδίου λύσεων για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς στην παράμετρο SOMI. Ακόμα, επιβεβαιώνεται το περιθώριο βελτίωσης της λειτουργίας του κινητήρα (ταυτόχρονη μείωση εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης), όταν αυτός λειτουργεί με προφίλ έγχυσης με μετέγχυση (δύο παλμοί), σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχές προφίλ έγχυσης (ένας παλμός).



Διάγραμμα 41: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI): Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, σημειώνονται η περίπτωση 1 (Case 1) και η περίπτωση 2 (Case 2).



Διάγραμμα 42: Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI): Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, σημειώνονται η περίπτωση 1 (Case 1) και η περίπτωση 2 (Case 2).

## **5.3 Πρόβλημα με περιορισμούς**

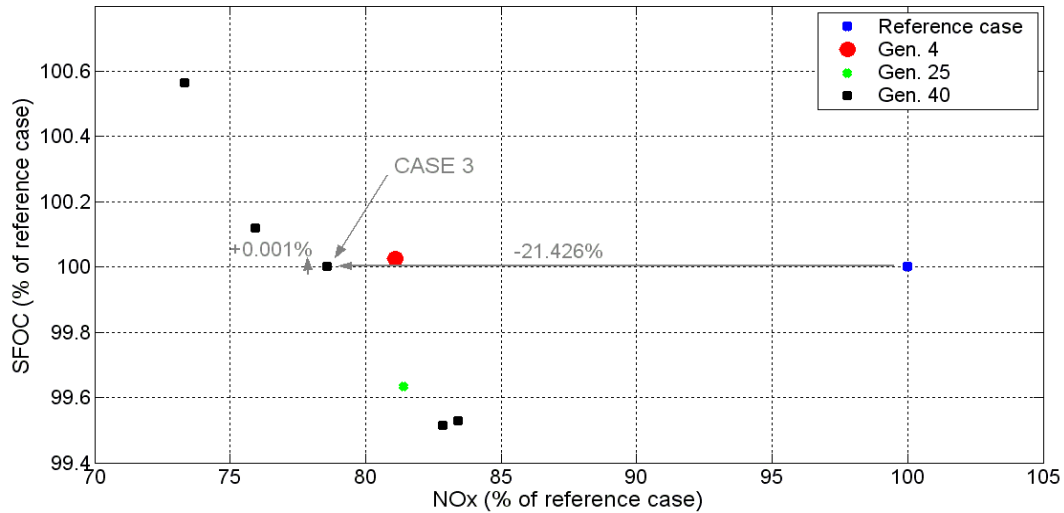
### **5.3.1 Πρώτη περίπτωση (Σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης)**

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι λύσεις που προέκυψαν για το δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης (χαρακτηριζόμενο από περιορισμούς στο ωφέλιμο έργο και τη μέγιστη πίεση), και συγκεκριμένα για την περίπτωση που η μεταβλητή SOMI λαμβάνει σταθερή τιμή (πρώτη περίπτωση). Επειδή το πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τρεις στόχους, οι λύσεις παρουσιάζονται σε δύο επιμέρους διαγράμματα. Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 43 παρουσιάζονται λύσεις επιλεγμένων γενιών (Γενιές 4 και 25), καθώς και το μέτωπο Pareto (Γενιά 40) για την τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και την ειδική κατανάλωση (SFOC), ενώ στο Διάγραμμα 44 οι αντίστοιχες λύσεις για τις τελικές εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (soot) με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Όλες οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι κανονικοποιημένες ως προς τις αντίστοιχες τιμές της περίπτωσης αναφοράς. Ο Πίνακας 16 περιλαμβάνει τις τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης και των περιορισμών κάθε λύσης του μετώπου Pareto (Γενιά 40). Ακόμη, η επιλεχθείσα περίπτωση 3 (Case 3) του μετώπου Pareto σημειώνεται τόσο στα δύο διαγράμματα, όσο και στον πίνακα. Η περίπτωση 3 χαρακτηρίζεται από ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης (21.4% και 30.5%, αντίστοιχα), ενώ η ειδική κατανάλωση παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς.

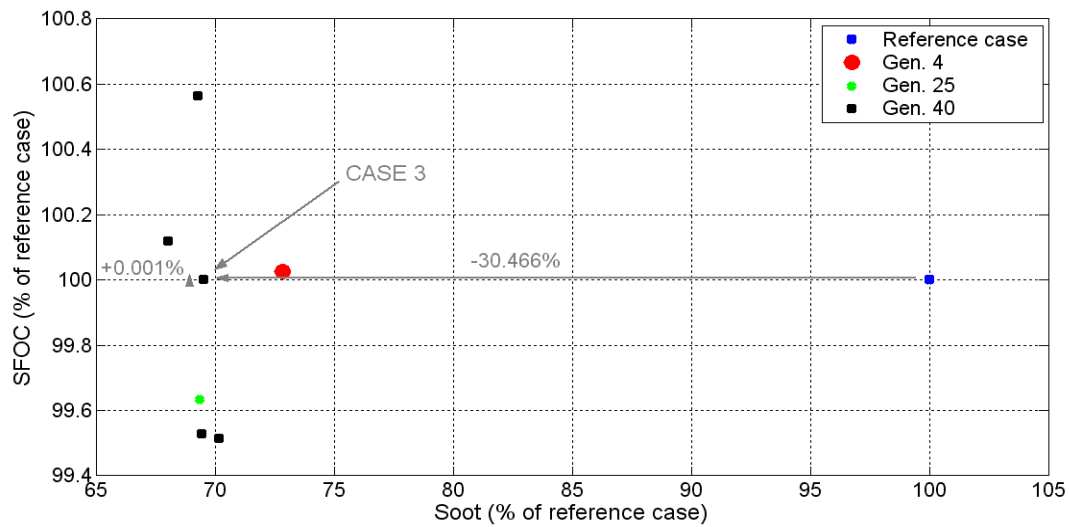
Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται στη συνέχεια διαγράμματα, στα οποία οι στόχοι συσχετίζονται με τις μεταβλητές σχεδίασης.

Στο Διάγραμμα 45 απεικονίζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP) για τις λύσεις της τελευταίας γενιάς. Παρατηρείται πως η ειδική κατανάλωση παραμένει σταθερή συναρτήσει της μεταβλητής GAP. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι το έργο παραμένει αμετάβλητο εξαιτίας του υπάρχοντος περιορισμού, και ότι η ποσοστιαία μείωση της μάζας του καυσίμου είναι σχεδόν μηδενική (κατά μέγιστο 1%), προκειμένου να αποφευχθεί μείωση του ωφέλιμου έργου. Για αυτόν τον λόγο, άλλωστε, οι τιμές του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών δεν ξεπερνούν τις 4 μοίρες.

Στο Διάγραμμα 46 απεικονίζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει του ποσοστού της μάζας του καυσίμου που εγχύεται κατά τη μετέγχυση (PoMF), για τις λύσεις του μετώπου Pareto. Παρατηρείται ότι η ειδική κατανάλωση διατηρείται σταθερή σε συνάρτηση με το ποσοστό του καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση. Το ποσοστό καυσίμου της μετέγχυσης είναι πάντα τέτοιο ώστε η τιμή του έργου, και κατ' επέκταση η τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, να διατηρούνται αμετάβλητες σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Πρέπει να σημειωθεί ακόμη ότι όλες οι λύσεις στο μέτωπο Pareto χαρακτηρίζονται από σχεδόν ίδια συνολικά εγχυόμενη μάζα καυσίμου με αυτή της περίπτωσης αναφοράς (MR≈0%).



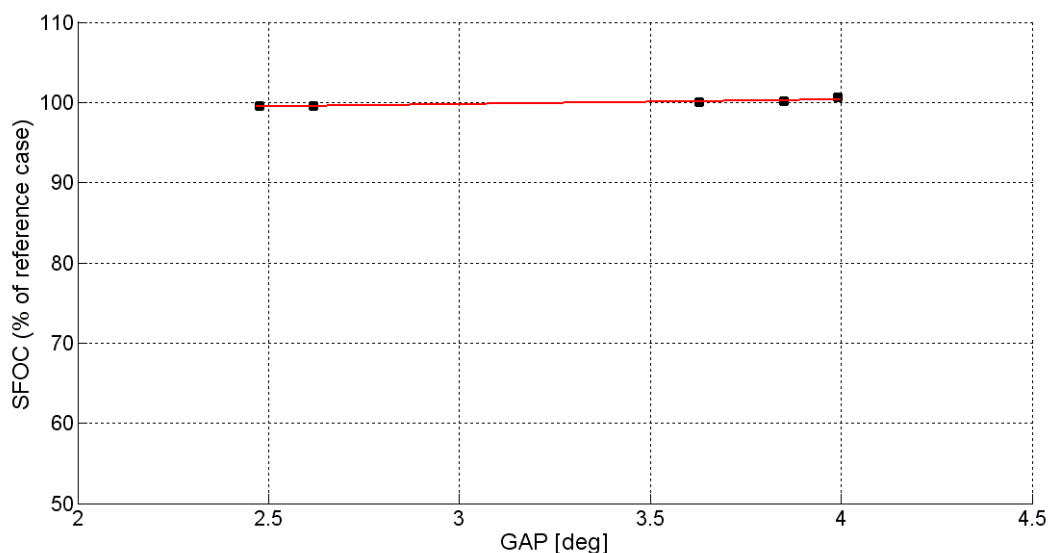
Διάγραμμα 43: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 40), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 4 και 25, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 3 (Case 3), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.



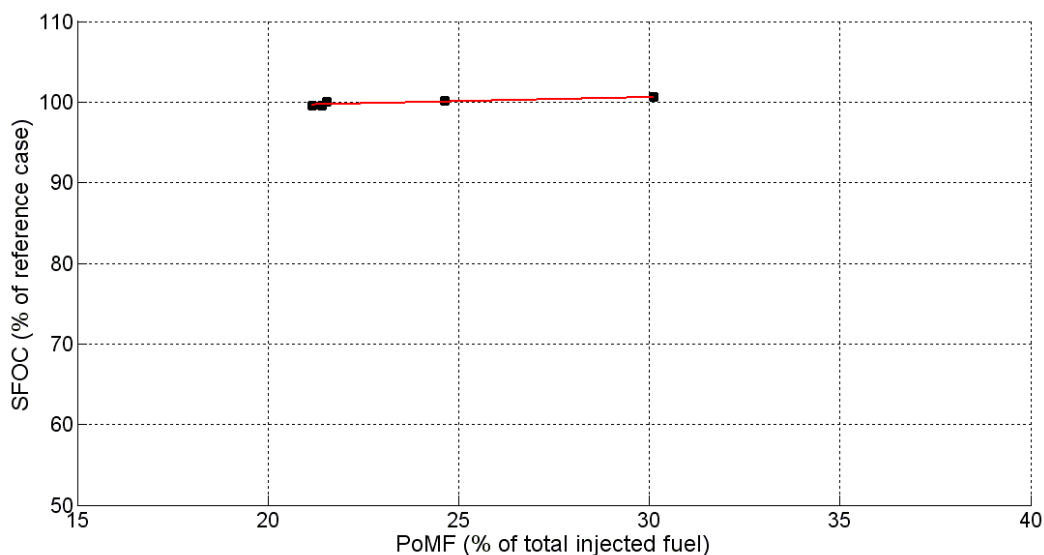
Διάγραμμα 44: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 40), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις των επιλεγμένων γενιών 4 και 25, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 3 (Case 3) με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.

Γενιά 40	Στόχοι (Objectives)			Ελεύθερες μεταβλητές (Free variables)			Περιορισμοί (Constraints)	
	SFOC [%]	NOx [%]	Soot [%]	MR [%]	PoMF [%]	GAP [deg]	Μέγιστη πίεση [bar]	Έργο [%]
Σχόλια	99.527	83.418	69.471	0.968	21.167	2.619	148.71	99.5
	100.563	73.350	69.275	0.049	30.126	3.991	148.75	99.4
<b>Περίπτωση 3</b>	<b>100.001</b>	<b>78.574</b>	<b>69.534</b>	<b>0.254</b>	<b>21.548</b>	<b>3.630</b>	<b>148.73</b>	<b>99.7</b>
	100.120	75.947	68.048	0.411	24.636	3.850	148.64	99.5
	99.514	82.858	70.194	1.026	21.434	2.478	148.75	99.5

Πίνακας 16: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης και των περιορισμών κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (γενιά 40). Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και του ωφέλιμου έργου παρουσιάζονται ως ποσοστό του αντίστοιχου μεγέθους της περίπτωσης αναφοράς.



Διάγραμμα 45: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC) συναρτήσει της μεταβλητής GAP, για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto. Η ειδική κατανάλωση είναι εκφρασμένη ως ποσοστό της αντίστοιχης τιμής της περίπτωσης αναφοράς.



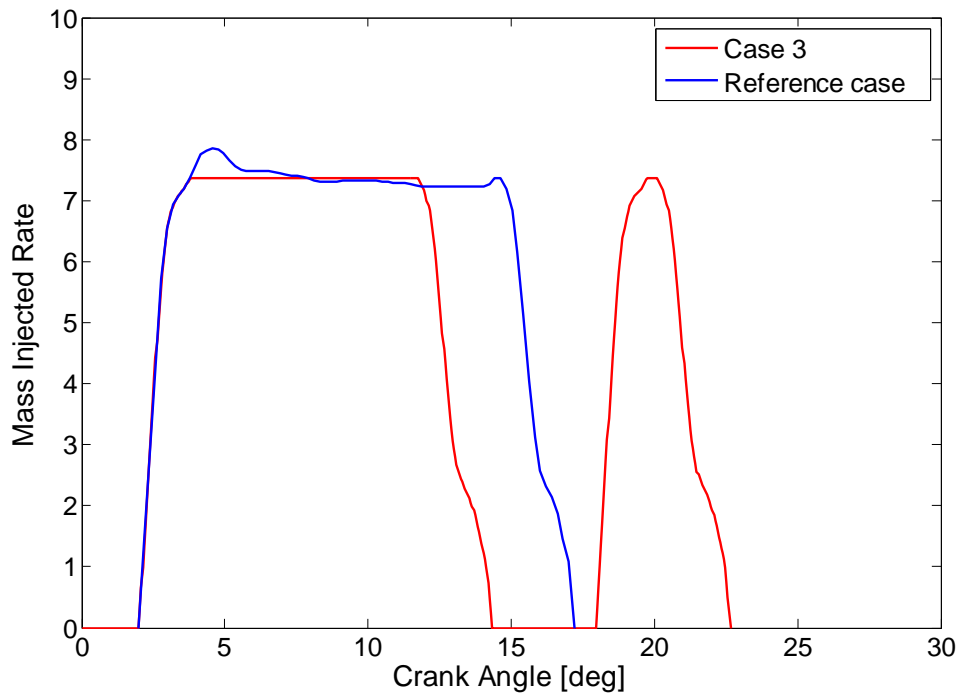
Διάγραμμα 46: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης (SFOC) συναρτήσει του ποσοστού του μετεγχυόμενου καυσίμου (PoMF), για όλες τις λύσεις του μετώπου Pareto (γραμμική παρεμβολή). Η ειδική κατανάλωση είναι εκφρασμένη ως ποσοστό της αντίστοιχης τιμής της περίπτωσης αναφοράς.

Ακολουθεί η ρευστοθερμοδυναμική ανάλυση της επιλεγθείσας περίπτωσης 3 (Case 3). Ο Πίνακας 17 περιλαμβάνει τις τιμές των στόχων, των περιορισμών, των ελεύθερων μεταβλητών και της έναρξης της μετέγχυσης για την επιλεγθείσα περίπτωση 3. Επίσης, στο Διάγραμμα 47 απεικονίζεται το προφίλ έγχυσης της περίπτωσης 3, καθώς και αυτό της περίπτωσης αναφοράς.

Στόχοι (Objectives)				
SFOC	NOx	Αιθάλη (Soot)		
100.00 %	78.57 %	69.53 %		
Περιορισμοί (Constraints)				
Μέγιστη πίεση		Ωφέλιμο έργο		
148.73 bar		99.7 %		
Ελεύθερες μεταβλητές (Free variables)				
SOMI	MR	PoMF	GAP	SoPoI
2° CA	0.25 %	21.55 %	3.63° CA	17.95° CA

Πίνακας 17: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με σταθερή τιμή της μεταβλητής SOMI: Στόχοι, περιορισμοί, ελεύθερες μεταβλητές, καθώς και γωνία έναρξης της μετέγχυσης της περίπτωσης 3 (Case 3).





Διάγραμμα 47: Προφίλ έγχυσης της περίπτωσης 3 (Case 3) και της περίπτωσης αναφοράς.

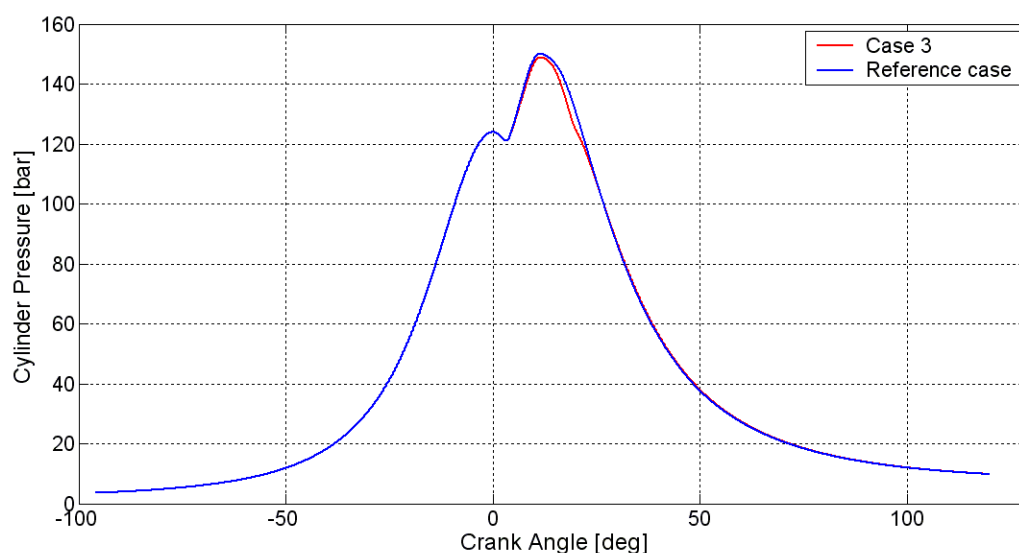
Στο Διάγραμμα 48 παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Προφανώς, η μέγιστη πίεση ικανοποιεί το άνω όριο των 150 bar, εφόσον έχει τεθεί περιορισμός σε αυτή. Μικρή μείωση στην αναπτυσσόμενη πίεση της περίπτωσης 3 παρατηρείται κατά το μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών, στο οποίο δεν λαμβάνει χώρα έγχυση καυσίμου.

Στο Διάγραμμα 49 παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία που αναπτύσσεται εντός του κυλίνδρου σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασία που αναπτύσσεται δεν διαφέρει ιδιαίτερα σε σχέση με αυτή της περίπτωσης αναφοράς. Ωστόσο, μικρή μείωση της μέσης θερμοκρασίας παρατηρείται κατά το μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών.

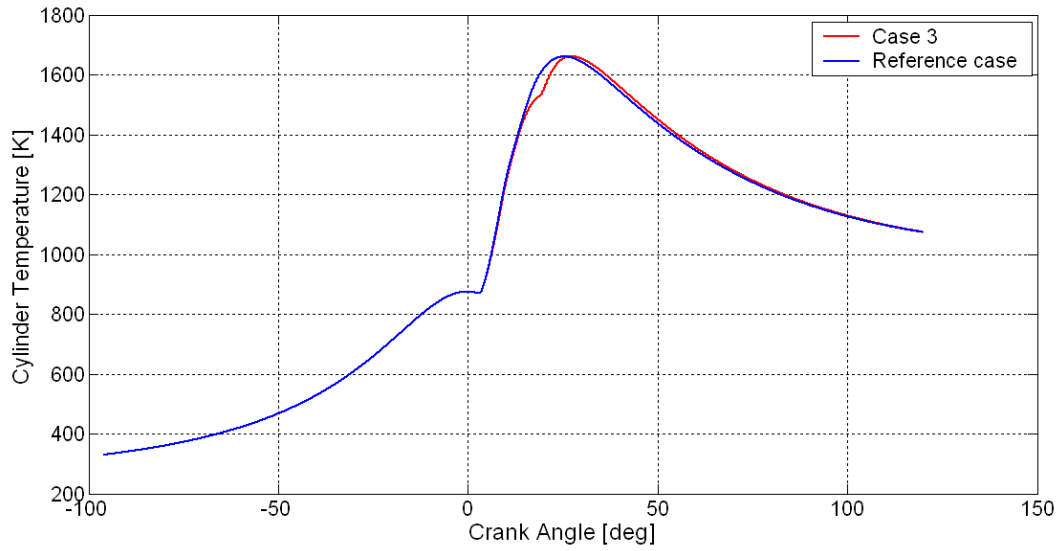
Στο Διάγραμμα 50 παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Παρατηρείται ότι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας για την περίπτωση 3 είναι όμοιος με τον αντίστοιχο της περίπτωσης αναφοράς στο χρονικό παράθυρο της καύσης της ποσότητας καυσίμου που αντιστοιχεί στην κύρια έγχυση. Αυτό δικαιολογείται καθώς η συνολικά εγχυόμενη μάζα καυσίμου και για τις δύο περιπτώσεις είναι σχεδόν η ίδια ( $MR \approx 0.25\%$ ). Στη συνέχεια, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας μειώνεται σημαντικά για την περίπτωση 3, και αυξάνει εκ νέου λόγω της μετέγχυσης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι όλη η ποσότητα του καυσίμου καίγεται κατά τη διάρκεια του κύκλου. Και στην περίπτωση αυτή, η καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου δε συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του κυλίνδρου.

Στο Διάγραμμα 51 και στο Διάγραμμα 52 παρουσιάζονται η μεταβολή της εντροπίας σε συνάρτηση με τη γωνία στρόφαλου, και το διάγραμμα T-s, αντίστοιχα, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Στην περίπτωση 3, παρατηρείται ότι η μεταβολή της εντροπίας δεν διαφέρει ιδιαίτερα από αυτήν της περίπτωσης αναφοράς. Η διαπίστωση αυτή συνάδει με την ύπαρξη παρόμοιων τιμών ωφέλιμου έργου στην παρούσα περίπτωση και στην περίπτωση αναφοράς.

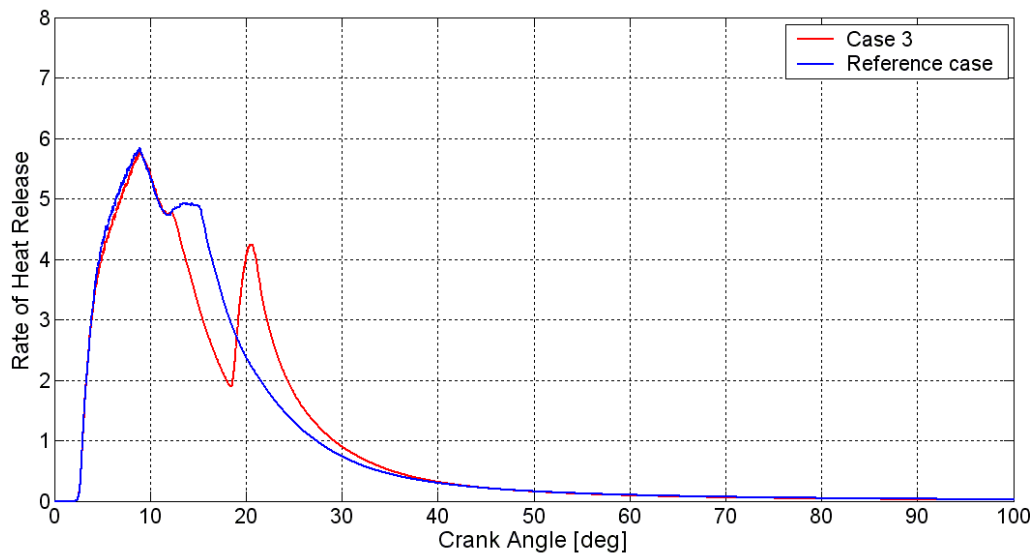
Τέλος, στο Διάγραμμα 53 και στο Διάγραμμα 54 παρουσιάζονται η χρονική μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NOx και της μάζας σωματισίων αιθάλης, αντίστοιχα, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται πως επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων τελικών συγκεντρώσεων των NOx και αιθάλης σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς (21.4% και 30.5%, αντίστοιχα). Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου δεν συμβάλλει στην αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας σε επίπεδα που να ευνοούν την αύξηση του σχηματισμού NOx, όπως στην περίπτωσης αναφοράς. Ωστόσο, οι τοπικές θερμοκρασίες διατηρούν τα επίπεδα του ρυθμού οξείδωσης των σωματιδίων αιθάλης.



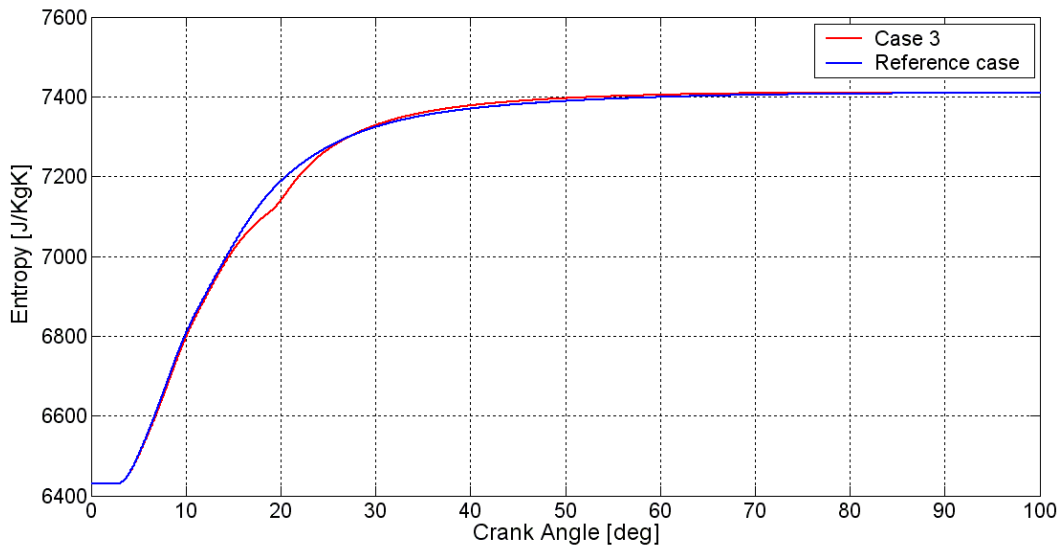
Διάγραμμα 48: Χρονική ιστορία της πίεσης, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



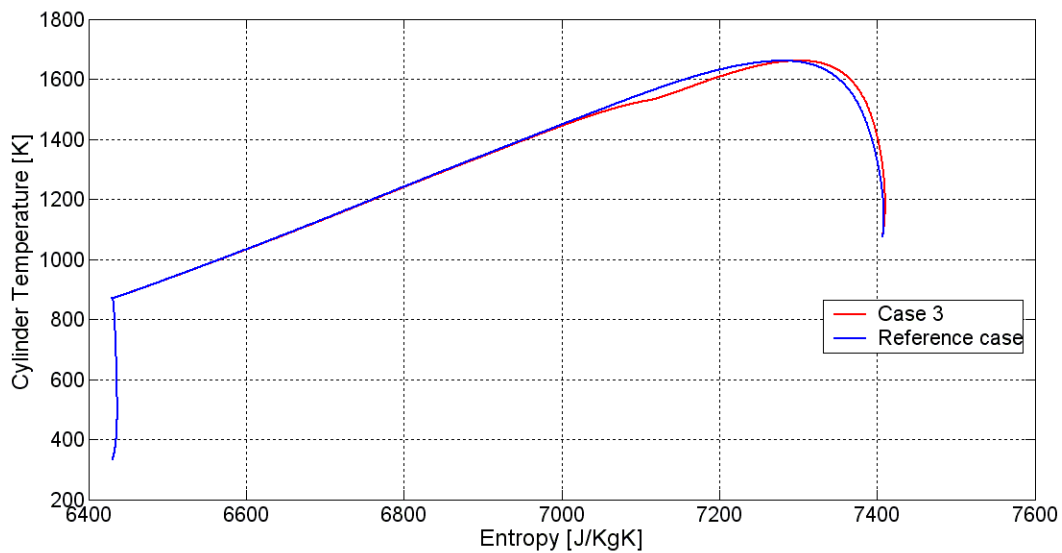
Διάγραμμα 49: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



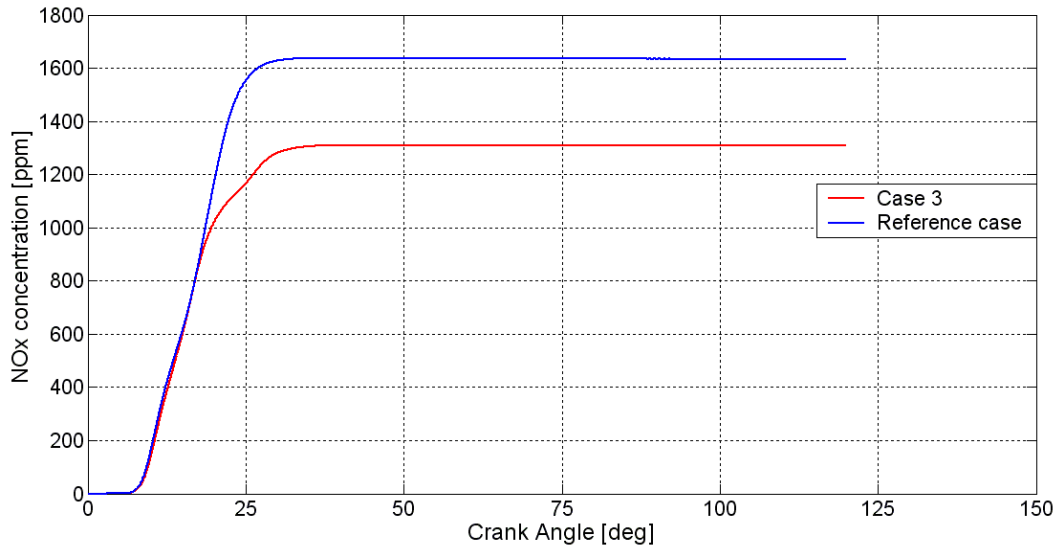
Διάγραμμα 50: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



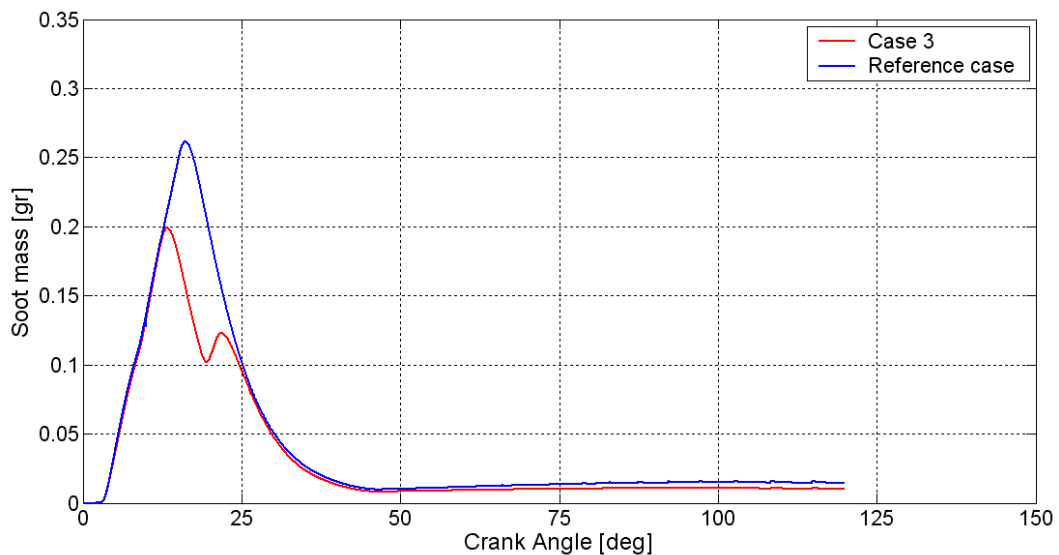
Διάγραμμα 51: Μεταβολή της εντροπίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



Διάγραμμα 52: Διάγραμμα  $T - s$ : Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της εντροπίας, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



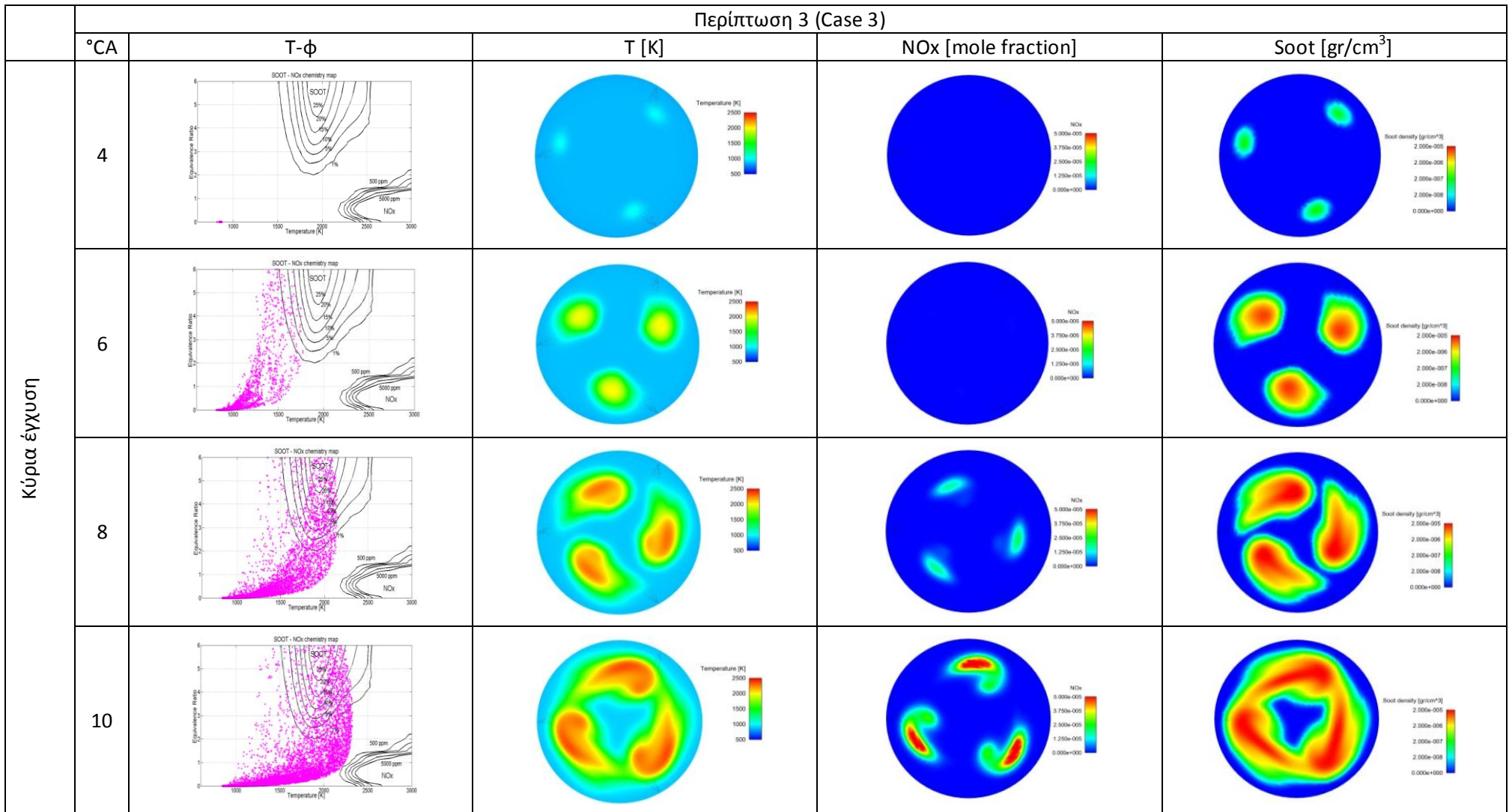
Διάγραμμα 53: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NOx συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

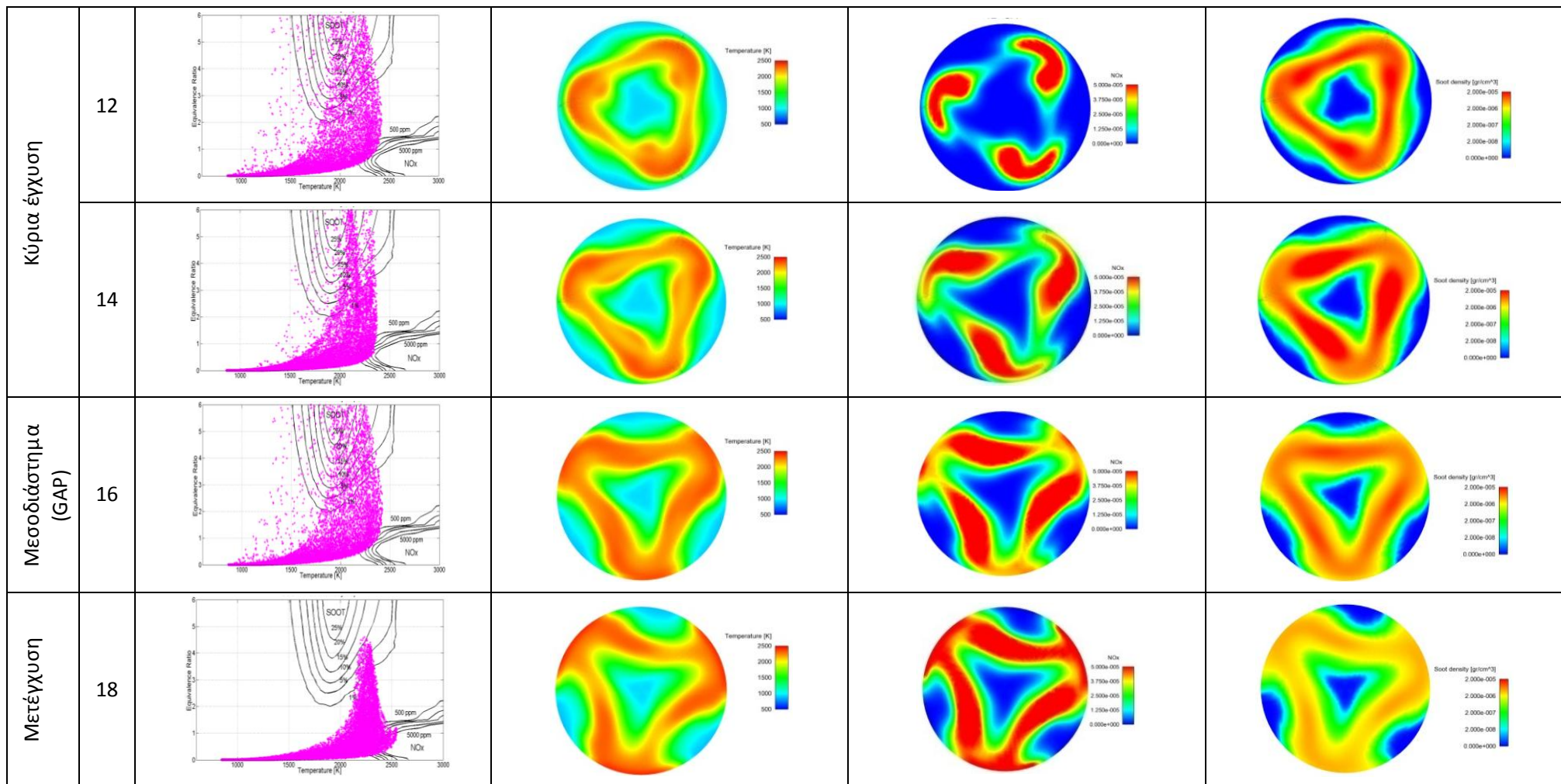


Διάγραμμα 54: Μεταβολή της μάζας σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 3 (Case 3) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

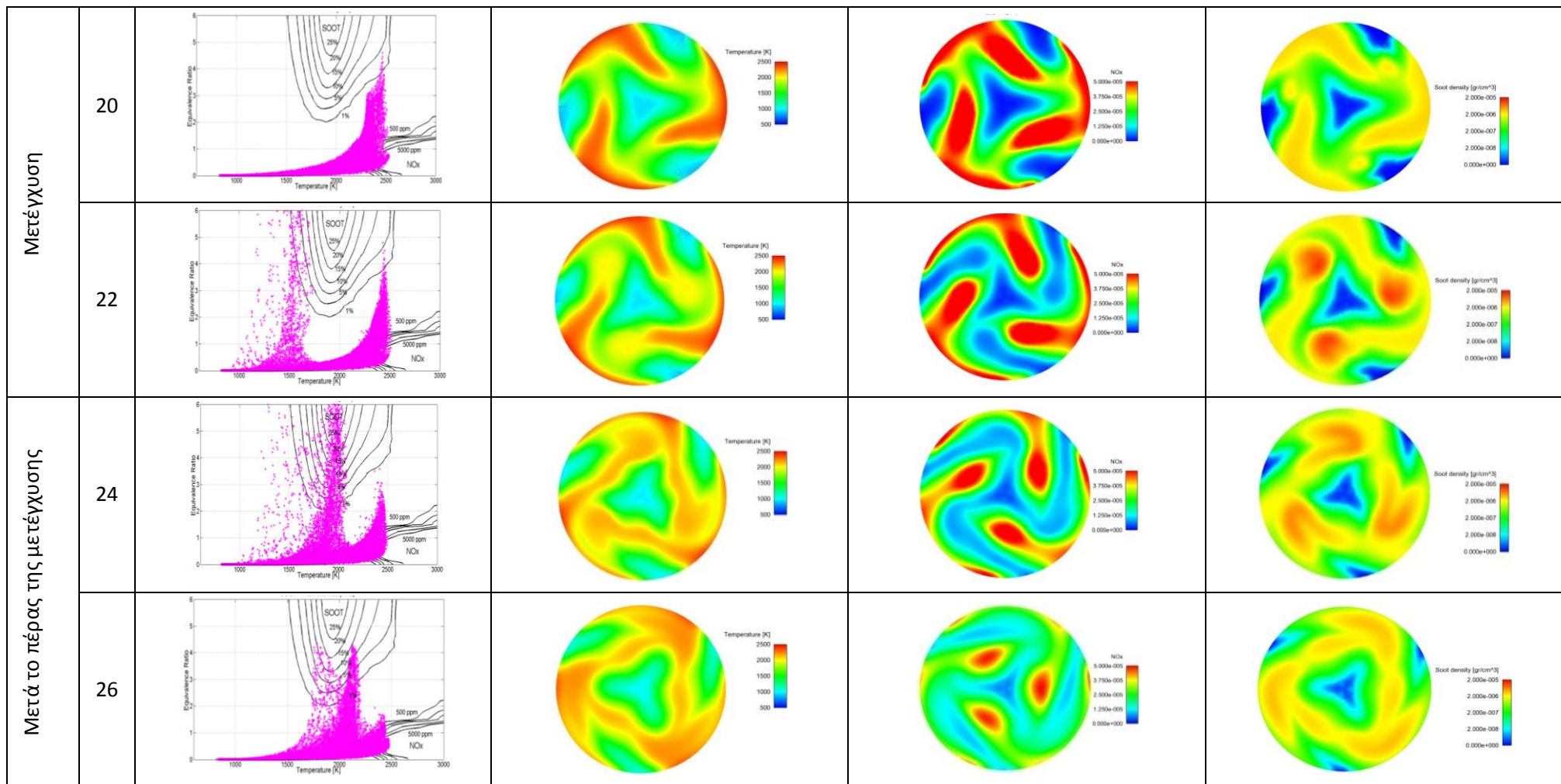
Στην Εικόνα 13 παρουσιάζονται για την περίπτωση 3 (Case 3) οι χάρτες T-φ και οι ισοϋψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης για αντιπροσωπευτικές τιμές της γωνίας στροφάλου. Στην περίπτωση 3, η κύρια έγχυση πραγματοποιείται από τις 2 μέχρι τις 14.3 μοίρες, ενώ η μετέγχυση από τις 18 μέχρι τις 22.5 μοίρες (βλ. Διάγραμμα 47). Το μεγάλο ποσοστό καυσίμου που εγχύεται κατά την κύρια έγχυση (80% του συνολικά εγχυόμενου) καίγεται με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλών

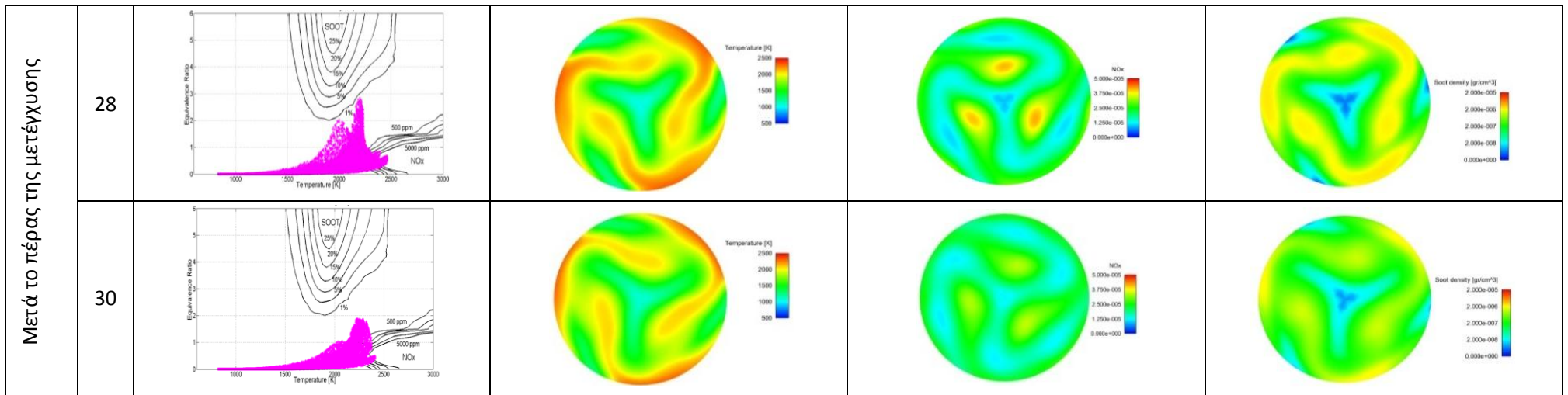
θερμοκρασιών, οι οποίες συμβάλλουν στη δημιουργία NOx. Στο μεσοδιάστημα, που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο παλμών (βλ. στιγμιότυπα των 16 και 18 μοιρών), παρατηρείται ότι μόνο τα επίπεδα των σωματιδίων αιθάλης μειώνονται, σε αντίθεση με αυτά των NOx. Με την έναρξη της μετέγχυσης, παρατηρείται στιγμιαία αύξηση της παραγωγής σωματιδίων αιθάλης, η οποία οφείλεται στις μεγάλες τιμές του τοπικού λόγου ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα (έγχυση νέου καυσίμου). Μετά το πέρας της μετέγχυσης, παρατηρείται σταδιακή μείωση των ρύπων, η οποία σχετίζεται με τα επίπεδα θερμοκρασίας και λόγου ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα (24 έως και 30 μοίρες). Η μείωση του σχηματισμού NOx οφείλεται στο γεγονός ότι η μάζα του μετεγχυόμενου καυσίμου καίγεται αρκετά μακριά από το ANΣ, με τα αναπτυσσόμενα επίπεδα θερμοκρασίας να είναι μειωμένα. Ωστόσο, ο ρυθμός οξείδωσης της αιθάλης διατηρείται, με αποτέλεσμα τις χαμηλές τελικές συγκεντρώσεις αιθάλης (βλ. Διάγραμμα 54).







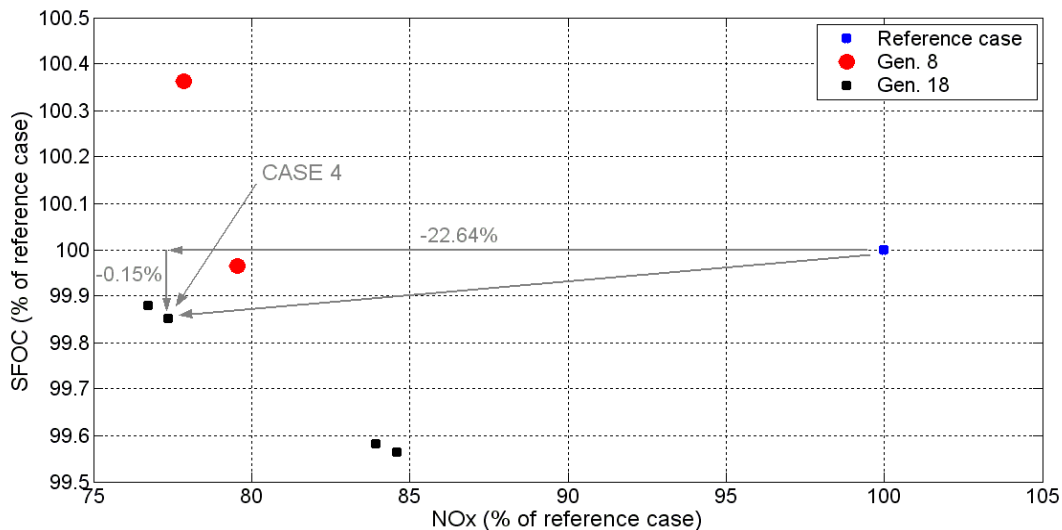




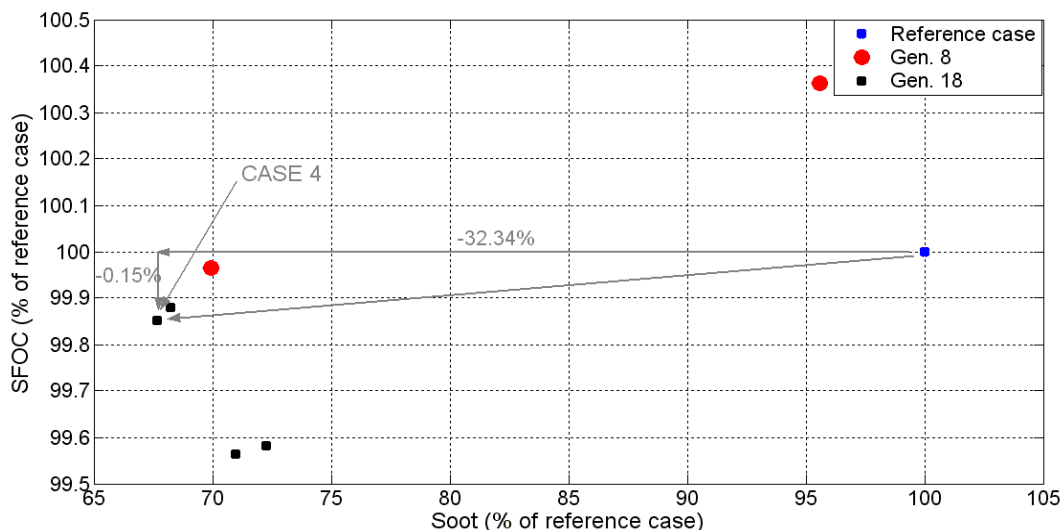
Εικόνα 13: Περίπτωση 3 (Case 3): Χάρτες T-φ και ισοψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για διάφορες γωνίες στροφάλου.

### 5.3.2 Δεύτερη περίπτωση (Μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης)

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται το σύνολο των λύσεων που προέκυψε για τη δεύτερη περίπτωση του προβλήματος με περιορισμούς για το παραγόμενο έργο και τη μέγιστη πίεση, συγκεκριμένα για μεταβλητή παράμετρο SOMI. Επειδή το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει τρεις στόχους, οι λύσεις παρουσιάζονται σε δύο επιμέρους διαγράμματα. Στο Διάγραμμα 55 παρουσιάζονται λύσεις επιλεγμένης γενιάς (Γενιά 8), καθώς και το τελικό μέτωπο Pareto (Γενιά 18) για την τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ενώ στο Διάγραμμα 56 οι αντίστοιχες τιμές για τις τελικές εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (soot) με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Και οι τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τις αντίστοιχες τιμές της περίπτωσης αναφοράς. Ο Πίνακας 18 περιλαμβάνει τις τιμές των στόχων, των μεταβλητών σχεδίασης και των περιορισμών κάθε λύσης του μετώπου Pareto (Γενιά 18). Στον ίδιο πίνακα σημειώνεται η περίπτωση 4 (Case 4), στην οποία οι εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης είναι μειωμένες κατά 22.6% και 32.3%, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης, του παραγόμενου έργου και της μέγιστης πίεσης παραμένουν σχεδόν σταθερές, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες της περίπτωσης αναφοράς.



Διάγραμμα 55: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 18), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις της γενιάς 8, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 4 (Case 4), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.



Διάγραμμα 56: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπο Pareto (Γενιά 18), στο οποίο απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Επίσης, απεικονίζονται οι λύσεις της γενιάς 8, όπως και η επιλεγμένη περίπτωση 4 (Case 4), με τις αντίστοιχες μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων ως προς την περίπτωση αναφοράς.

Γενιά 18	Στόχοι (Objectives)			Ελεύθερες μεταβλητές (Free variables)				Περιορισμοί (Constraints)	
	SFOC [%]	NOx [%]	Soot [%]	SOMI [° CA]	MR [%]	PoMF [%]	GAP [° CA]	Μέγιστη πίεση [bar]	Έργο [%]
Σχόλια	99.879	76.725	68.244	1.852	0.665	27.572	3.639	149.88	99.5
	99.563	84.596	71.000	1.997	0.674	17.660	2.742	148.65	99.8
<b>Περίπτωση 4</b>	<b>99.851</b>	<b>77.362</b>	<b>67.662</b>	<b>1.871</b>	<b>0.567</b>	<b>24.408</b>	<b>3.815</b>	<b>149.72</b>	<b>99.6</b>
	99.581	83.922	72.269	1.987	1.017	16.554	3.129	148.73	99.4

Πίνακας 18: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, με μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων, των μεταβλητών σχεδίασης και των περιορισμών κάθε λύσης της τελευταίας γενιάς (Γενιά 18). Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και του ωφέλιμου έργου παρουσιάζονται ως ποσοστό του αντίστοιχου μεγέθους της περίπτωσης αναφοράς.

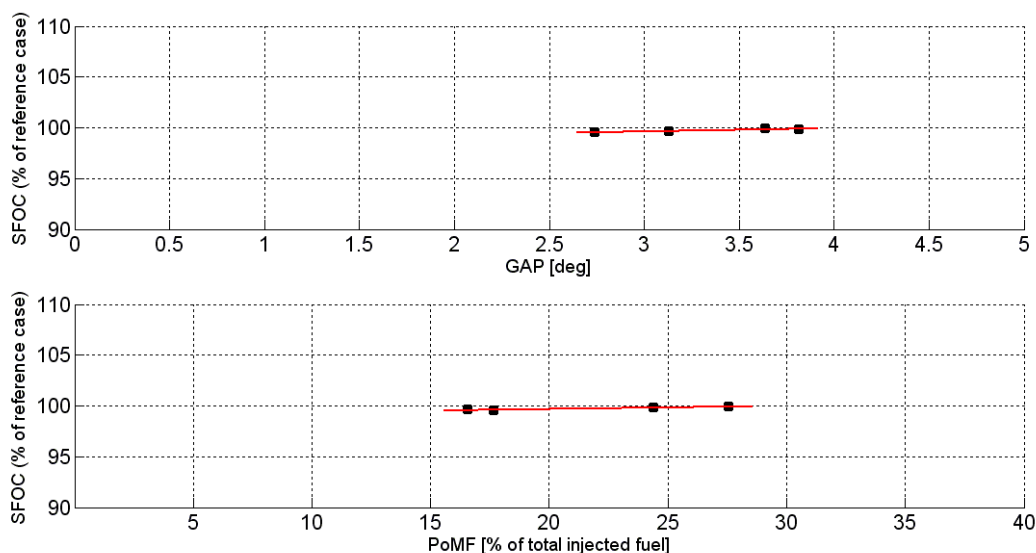
Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται στη συνέχεια διαγράμματα, στα οποία οι αντικειμενικές συναρτήσεις συσχετίζονται με τις μεταβλητές σχεδίασης.

Στο Διάγραμμα 57 παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) συναρτήσεως του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP) και του ποσοστού του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου που εγχύεται κατά τη μετέγχυση (PoMF). Παρατηρείται ότι η επίτευξη ειδικής κατανάλωσης όμοιας με αυτή της περίπτωσης αναφοράς σχετίζεται με συγκεκριμένο εύρος τιμών των μεταβλητών GAP και PoMF. Συγκεκριμένα, η ειδική κατανάλωση του κινητήρα δεν αλλάζει, όταν το προφίλ έγχυσης παρουσιάσει μετέγχυση χαρακτηριζόμενη από ποσοστό μάζας καυσίμου μετέγχυσης 16.5 - 27.5% και μεσοδιάστημα

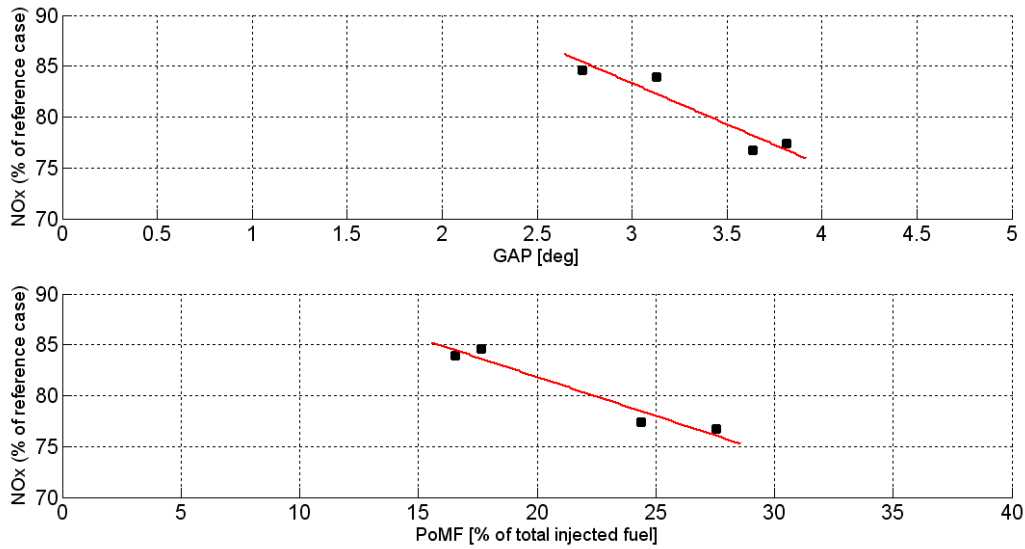
μεταξύ των δύο παλμών 2.7 - 3.8 μοίρες. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της ειδικής κατανάλωσης δεν επηρεάζεται από τη μείωση της συνολικά εγχυόμενης μάζας καυσίμου ( $MR \leq 1\%$ ), ενώ καλύπτεται και ο περιορισμός για το ωφέλιμο έργο. Επίσης, η αρχή της κύριας έγχυσης (SOMI) δεν μεταβάλλεται σημαντικά συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς (SOMI = 2° CA, Πίνακας 18).

Στο Διάγραμμα 58 απεικονίζεται η τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) συναρτήσει του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP) και του ποσοστού του καυσίμου που εγχύεται της μετέγχυσης (PoMF). Παρατηρείται ότι η τελική συγκέντρωση NOx, η οποία σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερη από αυτή της περίπτωσης αναφοράς, φθίνει (μείωση κατά 15 - 23%) με την αύξηση αμφότερων των μεταβλητών GAP και PoMF. Η συγκεκριμένη φθίνουσα τάση των NOx δικαιολογείται από την καύση σημαντικού ποσοστού μάζας καυσίμου (PoMF > 16.5%) μακριά από το ANΣ (GAP > 2.7° CA), σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας, οι οποίες δεν ευνοούν τον σχηματισμό NOx.

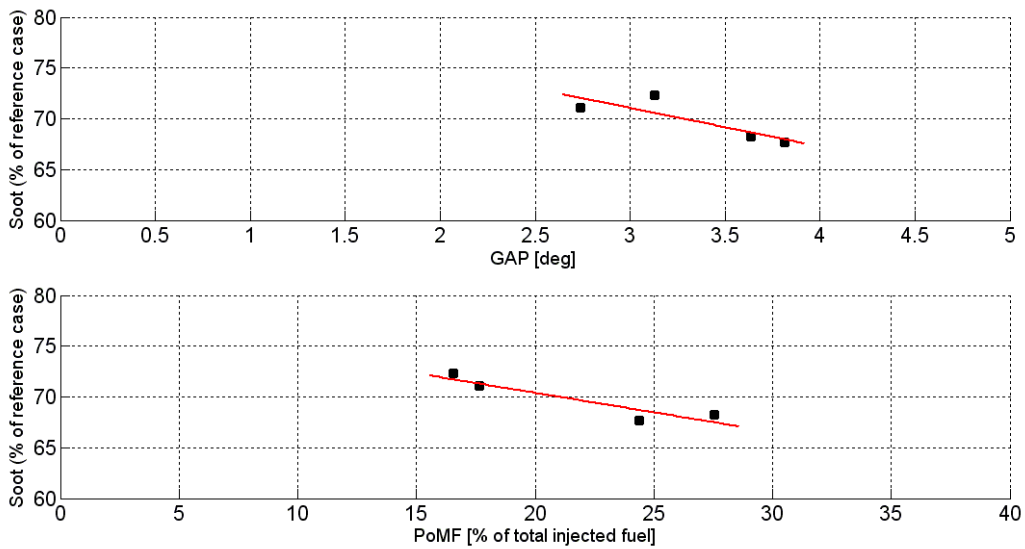
Στο Διάγραμμα 59 παρουσιάζονται τα τελικά επίπεδα των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης (Soot) συναρτήσει του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP) και του ποσοστού του συνολικά εγχυόμενου καυσίμου που εγχύεται κατά τη μετέγχυση (PoMF). Παρατηρείται ότι και τα σωματίδια αιθάλης ακολουθούν φθίνουσα τάση (28 - 32% μείωση) με την αύξηση των τιμών των μεταβλητών GAP και PoMF. Η συγκεκριμένη φθίνουσα τάση των τελικών εκπομπών αιθάλης αποδίδεται στην καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου, η οποία συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του κυλίνδρου σε τέτοια επίπεδα που διατηρούν τον ρυθμό οξείδωσης της αιθάλης.



Διάγραμμα 57: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για μεταβλητή παράμετρο SOMI: Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) συναρτήσει (α) του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP), και (β) του ποσοστού του καυσίμου της μετέγχυσης (PoMF), για λύσεις του μετώπου Pareto (Γενιά 18).



Διάγραμμα 58: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για μεταβλητή παράμετρο SOMI: Τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) συναρτῆσει (α) του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP), και (β) του ποσοστού του καυσίμου της μετέγχυσης (PoMF), για λύσεις του μετώπου Pareto (Γενιά 18).

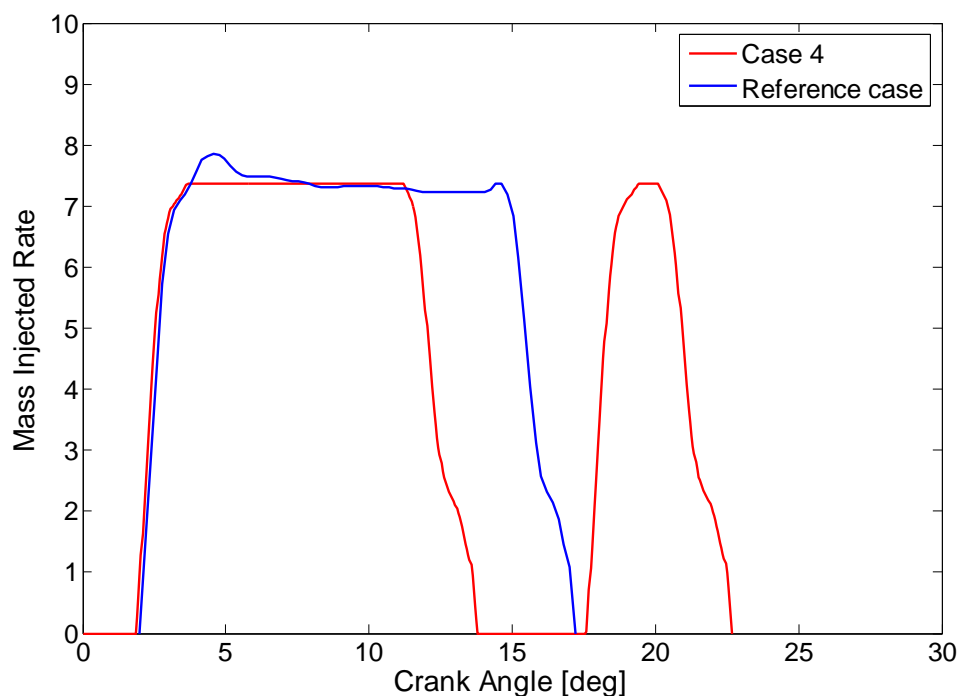


Διάγραμμα 59: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για μεταβλητή παράμετρο SOMI: Τελική εκπομπή σωματιδίων αιθάλης (soot) συναρτῆσει (α) του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών (GAP), και (β) του ποσοστού του καυσίμου της μετέγχυσης (PoMF), για λύσεις του μετώπου Pareto (Γενιά 18).

Ακολουθεί η θερμορευστομηχανική ανάλυση της επιλεχθείσας περίπτωσης 4 (Case 4). Ο Πίνακας 19 περιλαμβάνει τις τιμές των στόχων, των περιορισμών, των ελεύθερων μεταβλητών και της έναρξης της μετέγχυσης για την επιλεχθείσα περίπτωση 4. Το προφίλ της έγχυσης της επιλεχθείσας περίπτωσης 4 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 60, από κοινού με αυτό της περίπτωσης αναφοράς. Επισημαίνεται ότι η αρχή της κύριας έγχυσης της περίπτωσης 4 (Case 4) είναι νωρίτερα από την περίπτωση αναφοράς. Τέλος, η αρχή της μετέγχυσης συμπίπτει περίπου με το πέρας της έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς.

Στόχοι (Objectives)				
SFOC	NOx	Αιθάλη (Soot)		
99.851 %	77.362 %	67.662 %		
Περιορισμοί (Constraints)				
Μέγιστη πίεση		Παραγόμενο έργο		
149.72 bar		99.6 %		
Ελεύθερες μεταβλητές (Free variables)				
SOMI	MR	PoMF	GAP	SoPoI
+ 1.871 CA	0.57 %	24,408 %	3.815 CA	17.59 CA

Πίνακας 19: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για μεταβλητή παράμετρο SOMI: Στόχοι, περιορισμοί, ελεύθερες μεταβλητές, καθώς και γωνία έναρξης της μετέγχυσης της περίπτωσης 4 (Case 4).



Διάγραμμα 60: Προφίλ έγχυσης της περίπτωσης 4 (Case 4) και της περίπτωσης αναφοράς.

Στο Διάγραμμα 61 παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Για την περίπτωση 4, η μέγιστη πίεση είναι μικρότερη των 150 bar, ικανοποιώντας τον τεθέντα περιορισμό, παρόλο που η κύρια έγχυση εκκινά λίγο νωρίτερα σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Έτσι, η μέγιστη πίεση διατηρείται σε υψηλά επίπεδα (149.72 bar), ενώ παρατηρείται μικρή μείωση της πίεσης κατά τη διάρκεια του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών, στο οποίο δεν λαμβάνει χώρα έγχυση καυσίμου.

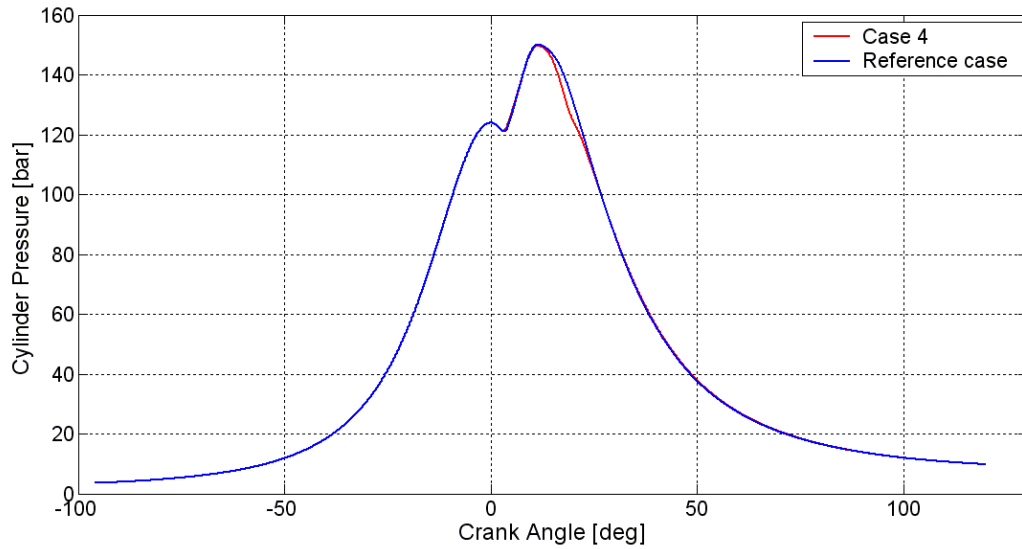
Στο Διάγραμμα 62 παρουσιάζεται η μέση χωρική θερμοκρασία που αναπτύσσεται εντός του κυλίνδρου σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Οι μέσες θερμοκρασίες των δύο περιπτώσεων συμπίπτουν, με εξαίρεση την περιοχή των 14 – 26 μοιρών, η οποία αντιστοιχεί στο μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών της περίπτωσης 4. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται μικρή μείωση της μέσης θερμοκρασίας για την περίπτωση 4.

Στο Διάγραμμα 63 παρουσιάζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Στα αρχικά στάδια της καύσης, τα οποία αντιστοιχούν στην κύρια έγχυση, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας είναι παρόμοιος και για τις δύο περιπτώσεις, διότι οι συνολικά εγχυόμενη μάζα καυσίμου είναι σχεδόν η ίδια ( $MR = 0.57\%$ ). Για την περίπτωση 4, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας μειώνεται δραστικά, λόγω της μικρής διάρκειας της κύριας έγχυσης και της παρουσίας του μεσοδιαστήματος έως τον επόμενο (τελικό) παλμό. Στη συνέχεια, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αυξάνει εκ νέου λόγω της μετέγχυσης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι όλη η ποσότητα του καυσίμου καίγεται κατά τη διάρκεια του κύκλου. Συνεπώς, η καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου δεν συμβάλλει ιδιαίτερα στην αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

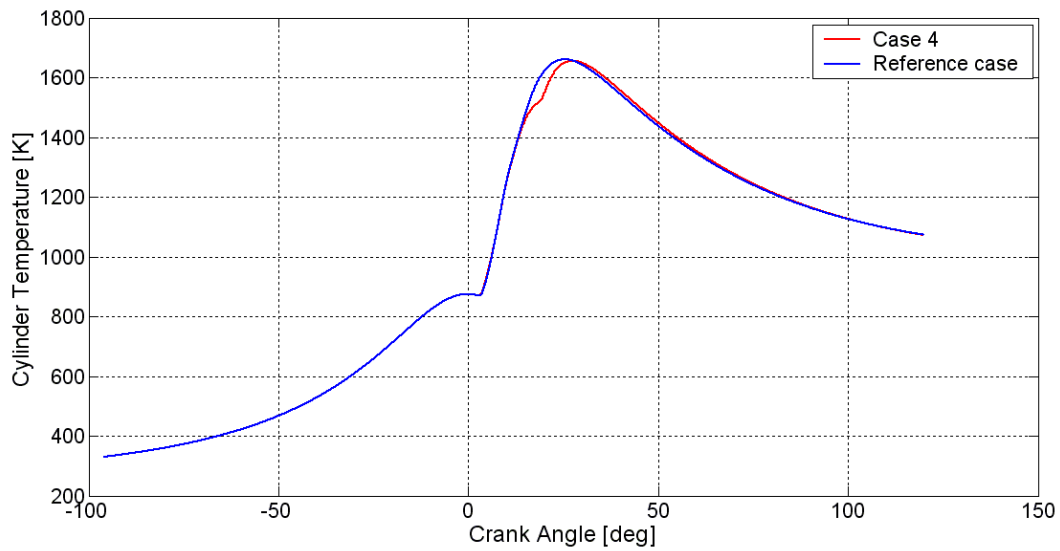
Στο Διάγραμμα 64 και στο Διάγραμμα 65 παρουσιάζονται η μεταβολή της μέσης ειδικής εντροπίας σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου, και το διάγραμμα T-s, αντίστοιχα, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Παρατηρείται ότι η εντροπία δεν διαφέρει ιδιαίτερα από αυτή της κατάστασης αναφοράς, σε συμφωνία με τον περιορισμό αναφορικά με το ωφέλιμο έργο.

Στο Διάγραμμα 66 και στο Διάγραμμα 67 παρουσιάζεται η χρονική ιστορία της μεταβολής της συγκέντρωσης NOx και της μάζας των σωματιδίων αιθάλης, αντίστοιχα, για την περίπτωση 4 (Case 4), αλλά και την περίπτωση αναφοράς (Reference case). Η μείωση τόσο των NOx όσο και των σωματιδίων αιθάλης είναι ιδιαίτερα σημαντική, ίση με 22.6% και 32.4%, αντίστοιχα, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Η ταυτόχρονη μείωση των δύο ρύπων οφείλεται στην ύπαρξη της μετέγχυσης και του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών. Η μείωση αυτή σχετίζεται με την καύση της μετεγχυόμενης μάζας καυσίμου, η οποία δεν συμβάλλει στην αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας σε επίπεδα που να ευνοούν την αύξηση του σχηματισμού NOx, όπως στην περίπτωση αναφοράς, διατηρώντας ταυτόχρονα ικανοποιητικά επίπεδα του ρυθμού οξειδωσης των σωματιδίων αιθάλης.

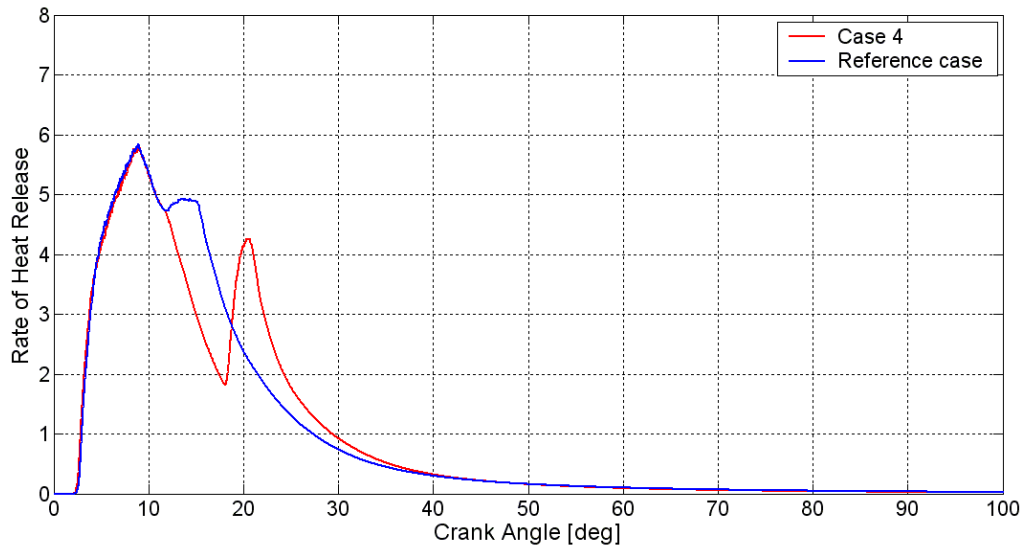




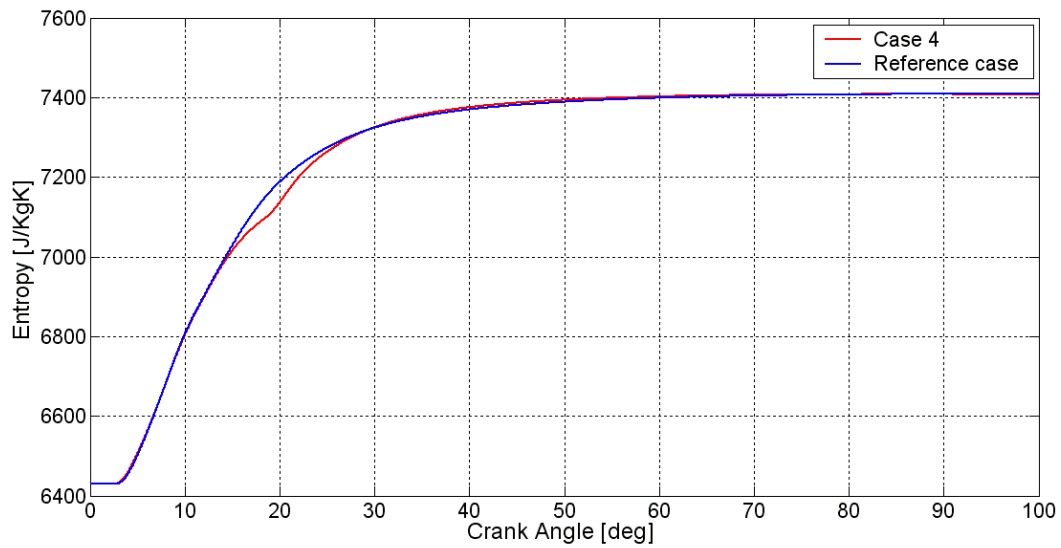
Διάγραμμα 61: Χρονική ιστορία της πίεσης, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



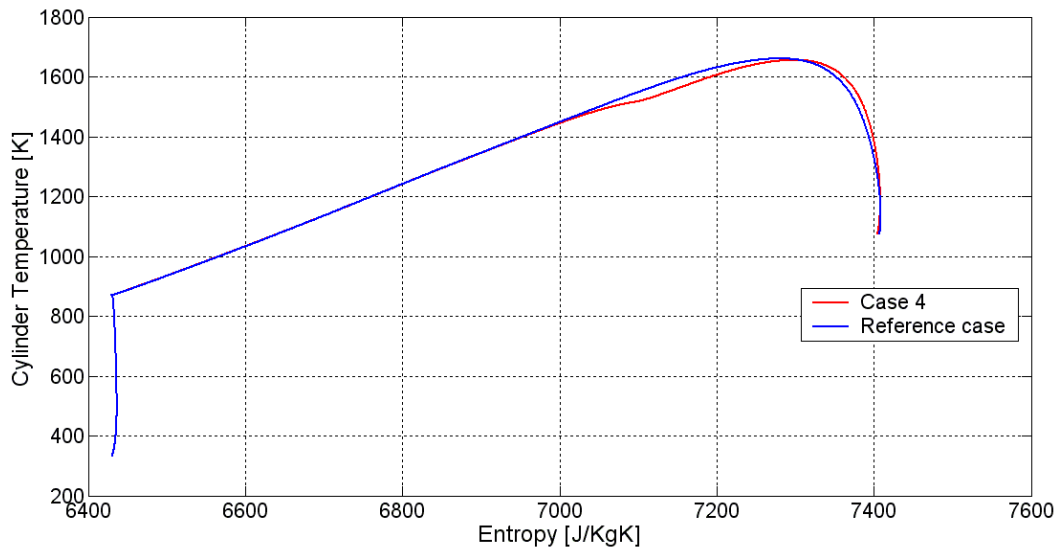
Διάγραμμα 62: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της γωνίας στρόφαλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



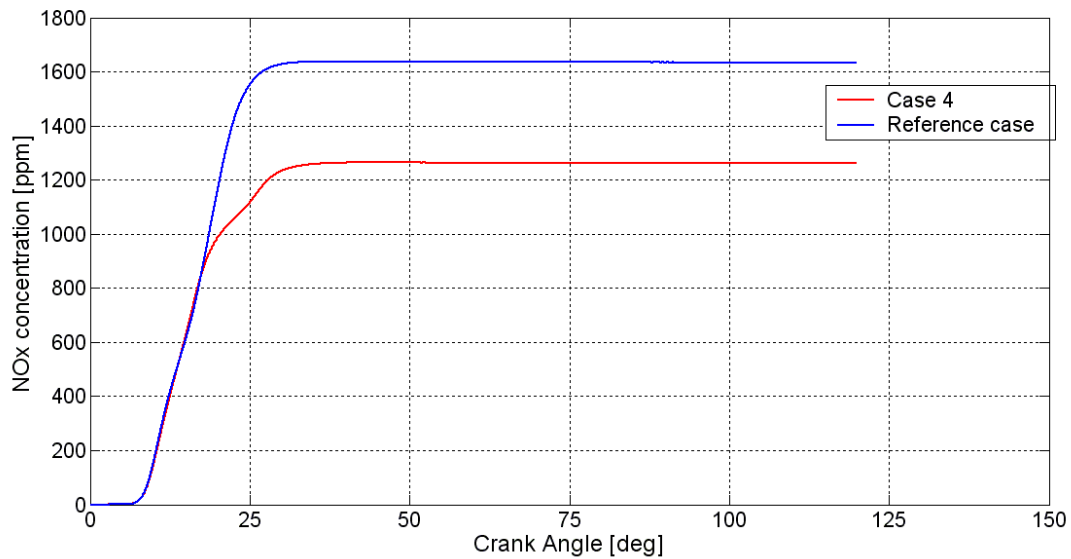
Διάγραμμα 63: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



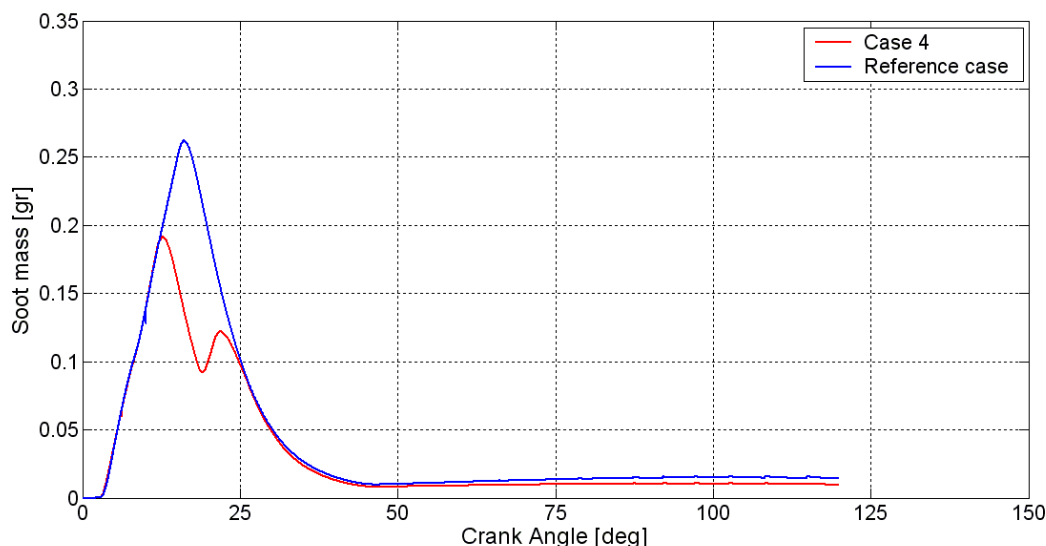
Διάγραμμα 64: Μεταβολή της μέσης ειδικής εντροπίας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



Διάγραμμα 65: Διάγραμμα  $T - s$ : Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας συναρτήσει της μέσης ειδικής εντροπίας, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).



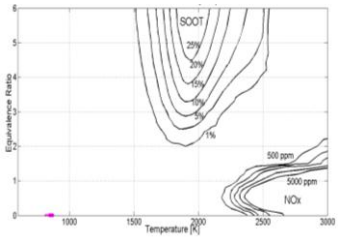
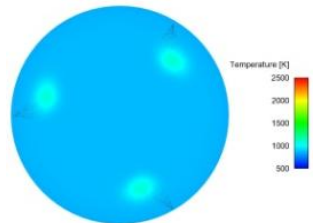
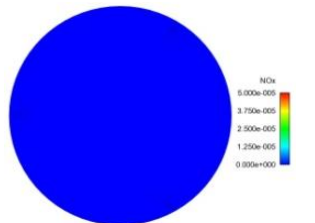
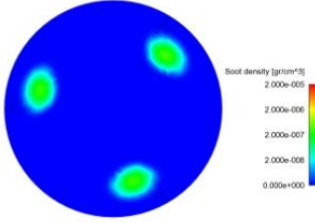
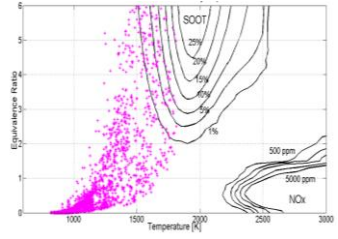
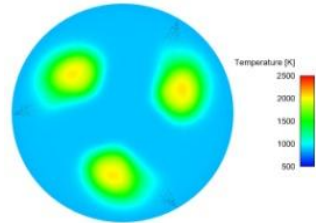
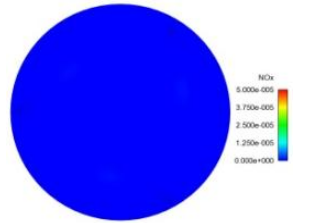
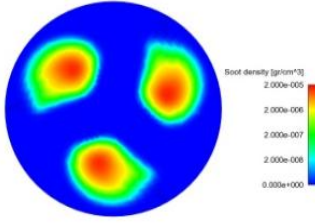
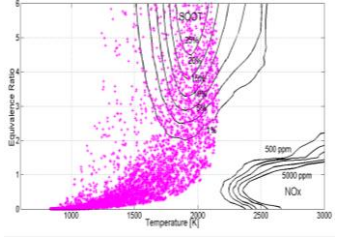
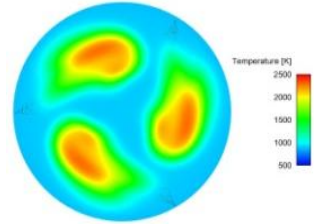
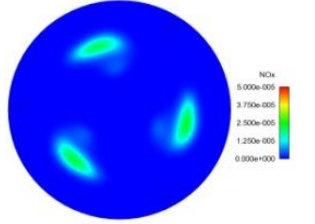
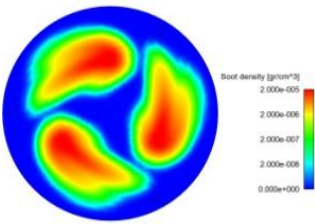
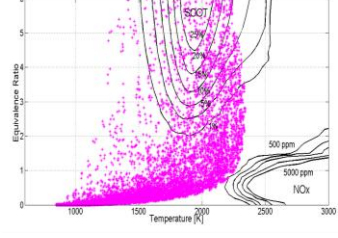
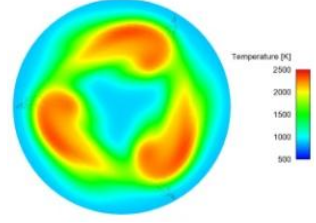
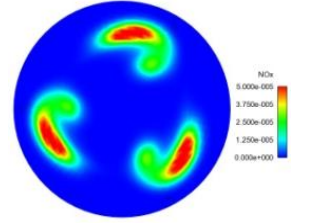
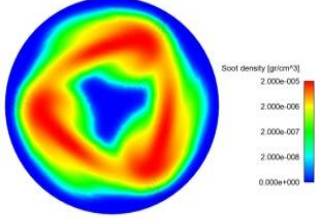
Διάγραμμα 66: Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης NOx συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

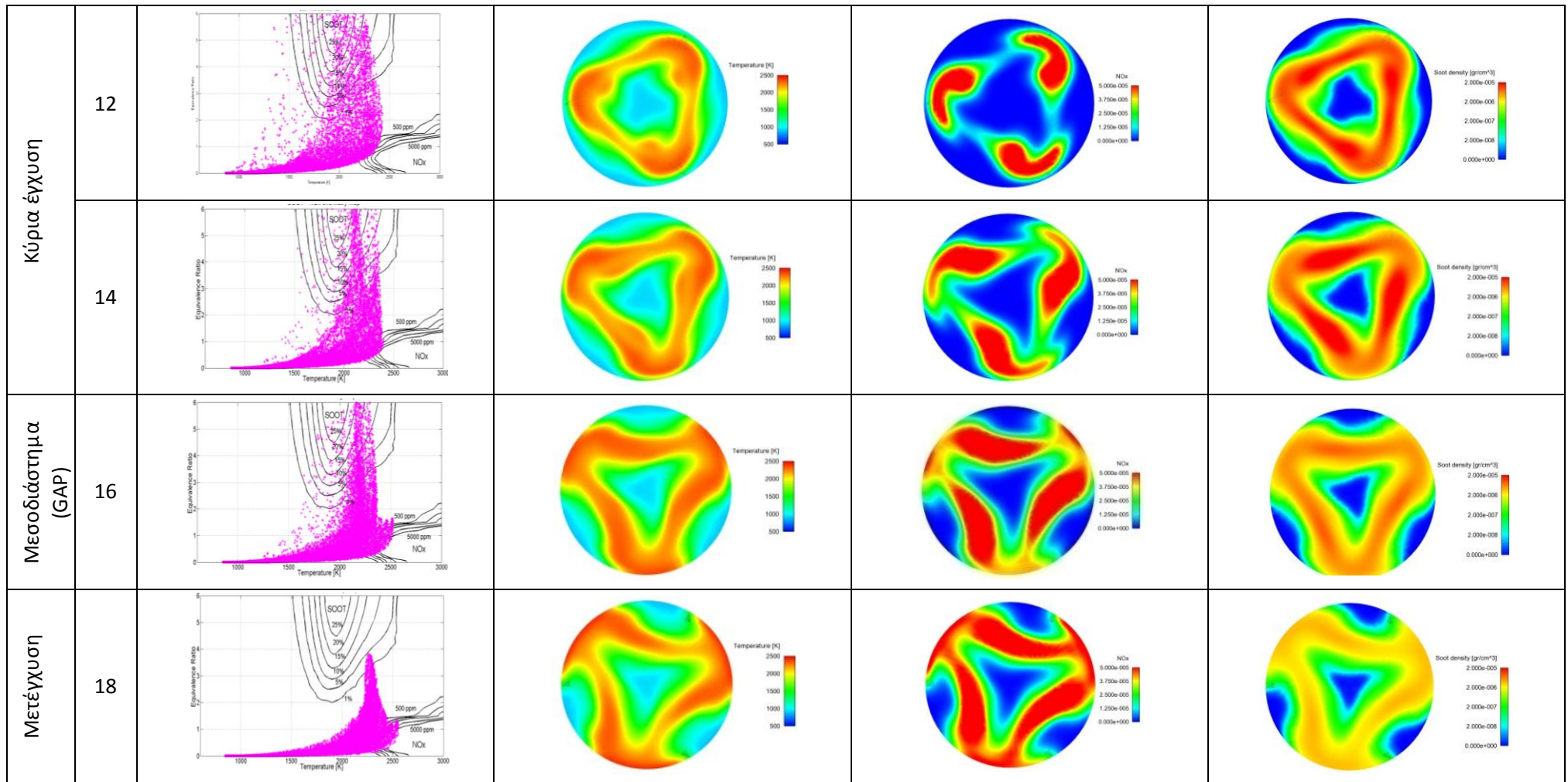


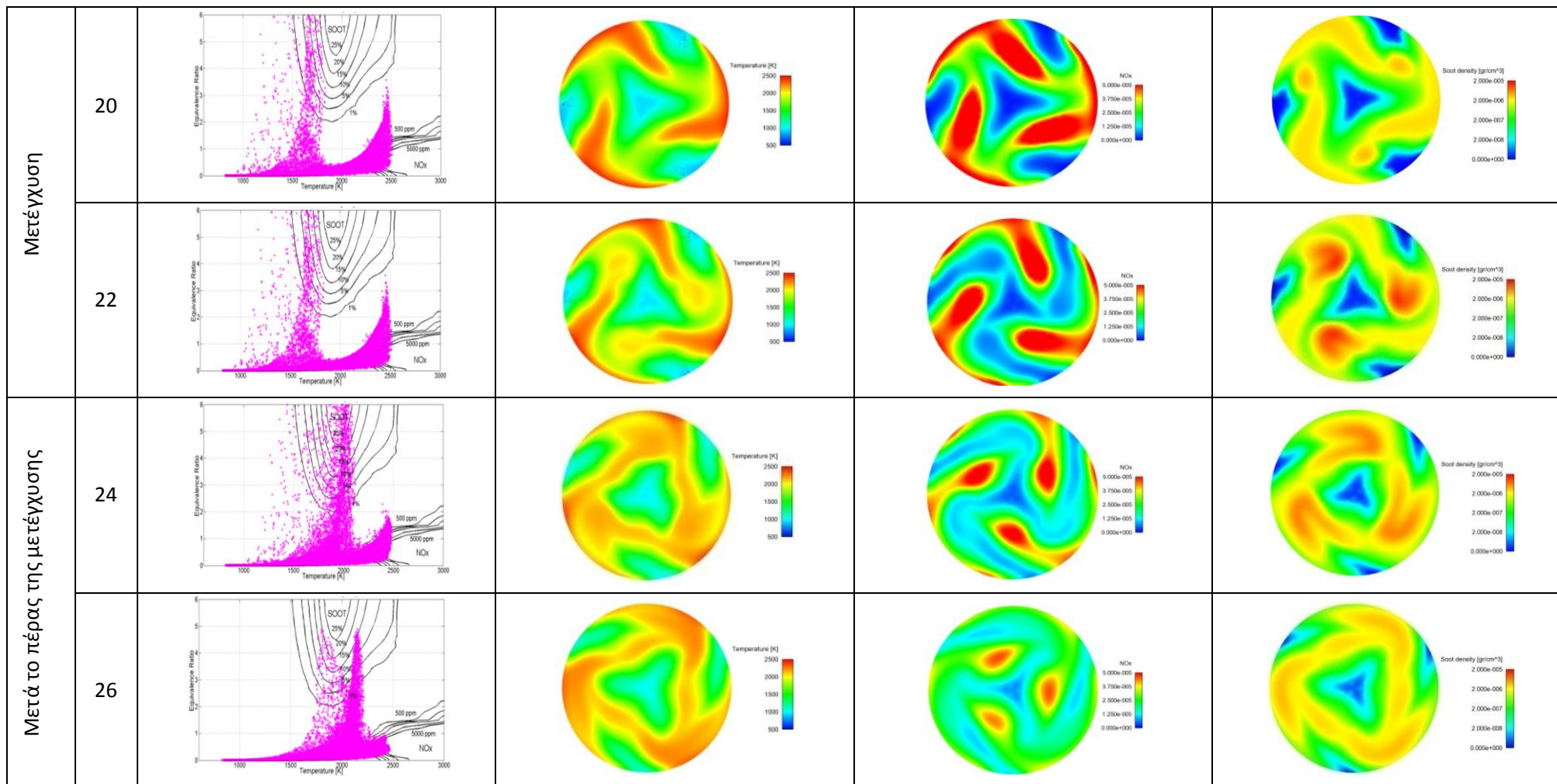
Διάγραμμα 67: Μεταβολή της μάζας σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4) και την περίπτωση αναφοράς (Reference case).

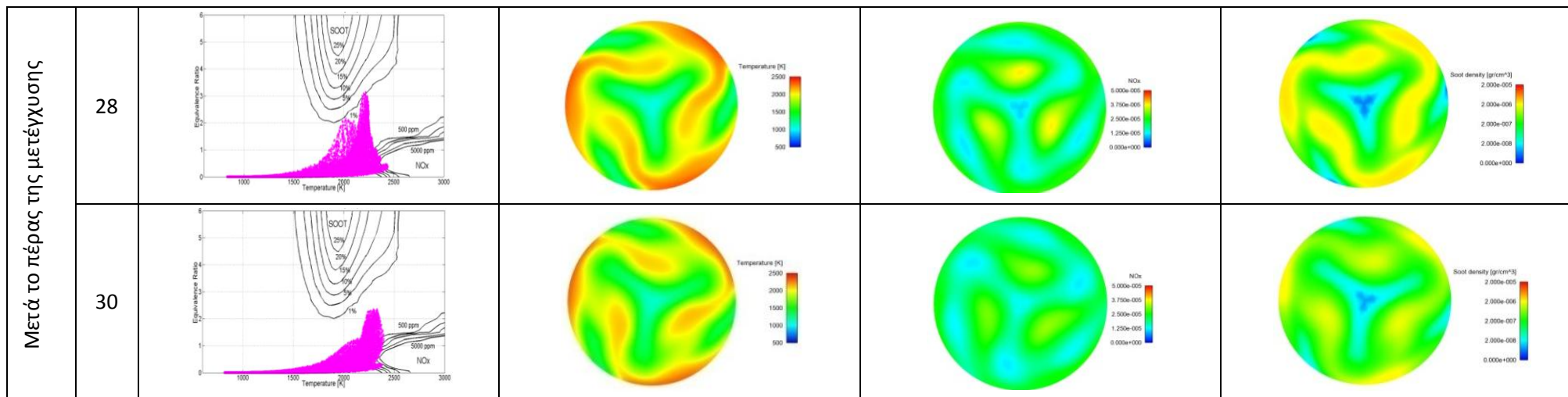
Στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται οι χάρτες T-φ και οι ισούψειες καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για αντιπροσωπευτικές τιμές της γωνίας στροφάλου, για την περίπτωση 4 (Case 4). Τα στιγμιότυπα που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν στο χρονικό διάστημα που περιλαμβάνει την αρχή της κύριας έγχυσης και σημαντικό μέρος της διεργασίας της καύσης (2-30 μοίρες). Η κύρια έγχυση λαμβάνει χώρα μεταξύ των 1.9 και 13.7 μοιρών, ενώ η μετέγχυση μεταξύ των 17.6 και 22.7 μοιρών (βλ. Διάγραμμα 60). Τα στιγμιότυπα που αντιστοιχούν στην κύρια έγχυση χαρακτηρίζονται από υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες ευνοούν τον σχηματισμό NOx. Οι θερμοκρασίες αυτές αναπτύσσονται εξαιτίας της καύσης μεγάλου ποσοστού του καυσίμου (75% του συνολικά εγχυόμενου) κοντά στο ANΣ. Στη συνέχεια, παρεμβάλλεται το μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών, στο οποίο μόνο τα επίπεδα των σωματιδίων αιθάλης φθίνουν με τον χρόνο, σε αντίθεση με αυτά των NOx. Με την έναρξη της μετέγχυσης παρατηρείται αύξηση της παραγωγής σωματιδίων αιθάλης, λόγω των μεγάλων τοπικών τιμών του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα. Μετά το πέρας της μετέγχυσης, παρατηρείται σταδιακή μείωση του σχηματισμού ρύπων, η οποία σχετίζεται με τα επίπεδα θερμοκρασίας και λόγου ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα (24 έως και 30 μοίρες). Η μείωση του σχηματισμού NOx οφείλεται στο γεγονός ότι η μάζα του μετεγχυόμενου καυσίμου καίγεται σε χαμηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (μακριά από το ANΣ), με αποτέλεσμα τα επίπεδα θερμοκρασίας να είναι μειωμένα. Ο ρυθμός οξείδωσης της αιθάλης παραμένει σχετικά υψηλός, γεγονός που συμβάλλει στις χαμηλές τελικές συγκεντρώσεις σωματιδίων αιθάλης (βλ. Διάγραμμα 67).

Περίπτωση 4 (Case 4)

	°CA	T-φ	T [K]	NOx [mole fraction]	Soot [gr/cm <sup>3</sup> ]
Κύρια έγχυση	4				
	6				
	8				
	10				





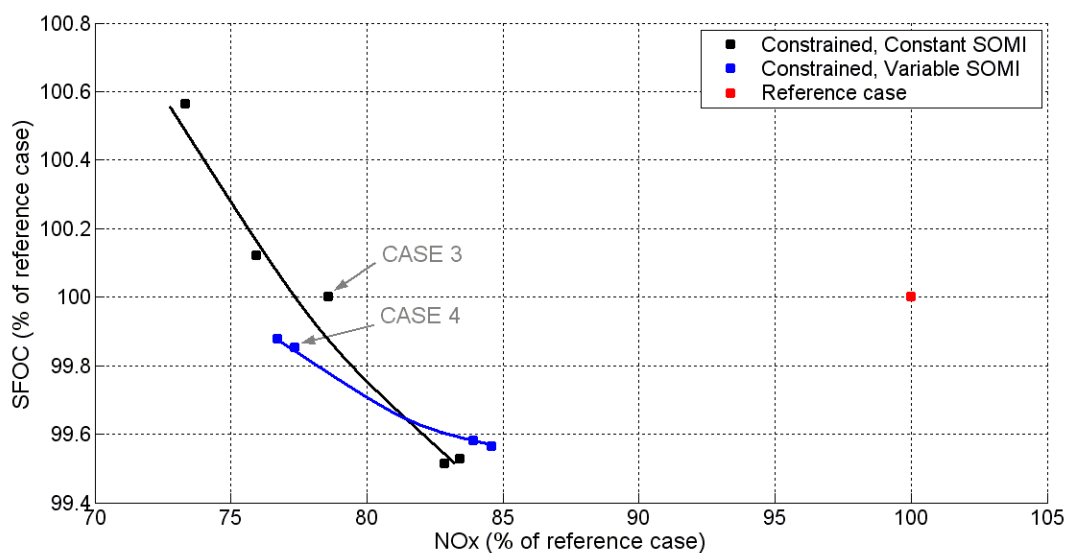


Εικόνα 14: Περίπτωση 4 (Case 4): Χάρτες T-φ και ισοψείς καμπύλες στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων της θερμοκρασίας, του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου και της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης, για διάφορες γωνίες στροφάλου.

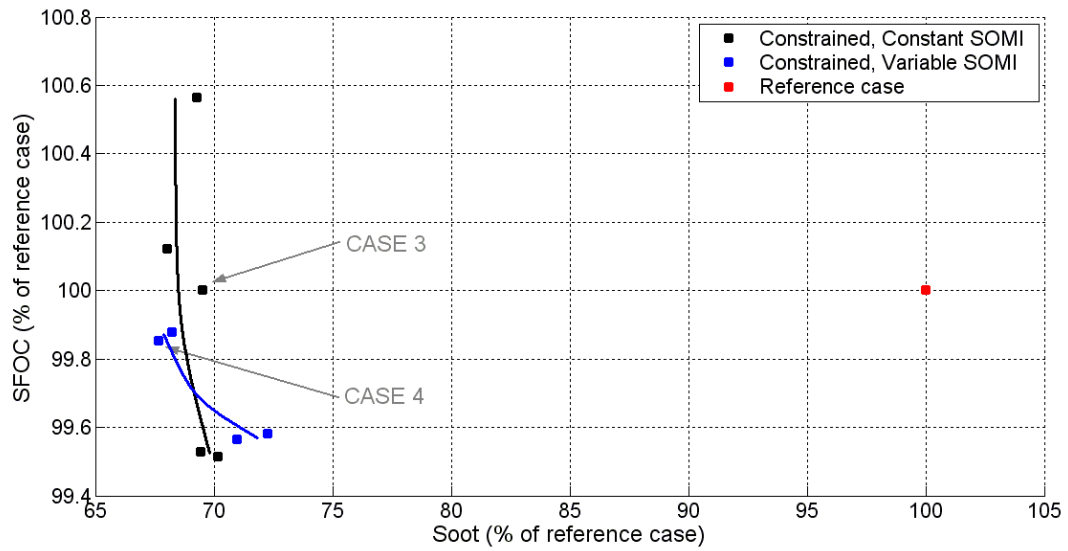


### 5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με περιορισμούς

Στο Διάγραμμα 68 και στο Διάγραμμα 69 απεικονίζονται τα μέτωπα Pareto του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με περιορισμούς. Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 68 παρουσιάζεται το μέτωπο Pareto για την τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και την ειδική κατανάλωση (SFOC), για τα προβλήματα βελτιστοποίησης με σταθερή και μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης (SOMI). Επίσης, στο Διάγραμμα 69 παρουσιάζεται το αντίστοιχο μέτωπο Pareto για την τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Σε αμφότερα τα διαγράμματα σημειώνονται οι περιπτώσεις 3 και 4. Συμπεραίνεται ότι υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης μείωσης των εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης, με διατήρηση του παραγόμενου έργου και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (MR < 1%). Ενώ η μεταβολή στην ειδική κατανάλωση είναι πολύ μικρή, μπορεί να επιτευχθεί μείωση μέχρι 26.7% στις εκπομπές NOx και 31% στις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης για προφίλ έγχυσης με μετέγχυση (δύο παλμοί), σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχές προφίλ έγχυσης (ένας παλμός). Τέλος, σημειώνεται ότι όλες οι λύσεις στα προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς χαρακτηρίζονται από τιμές έναρξης της κύριας έγχυσης πολύ κοντά σε αυτή της περίπτωσης αναφοράς (2 μοίρες μετά το ANΣ).



Διάγραμμα 68: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Στο διάγραμμα σημειώνονται η περίπτωση 3 (Case 3) και η περίπτωση 4 (Case 4).

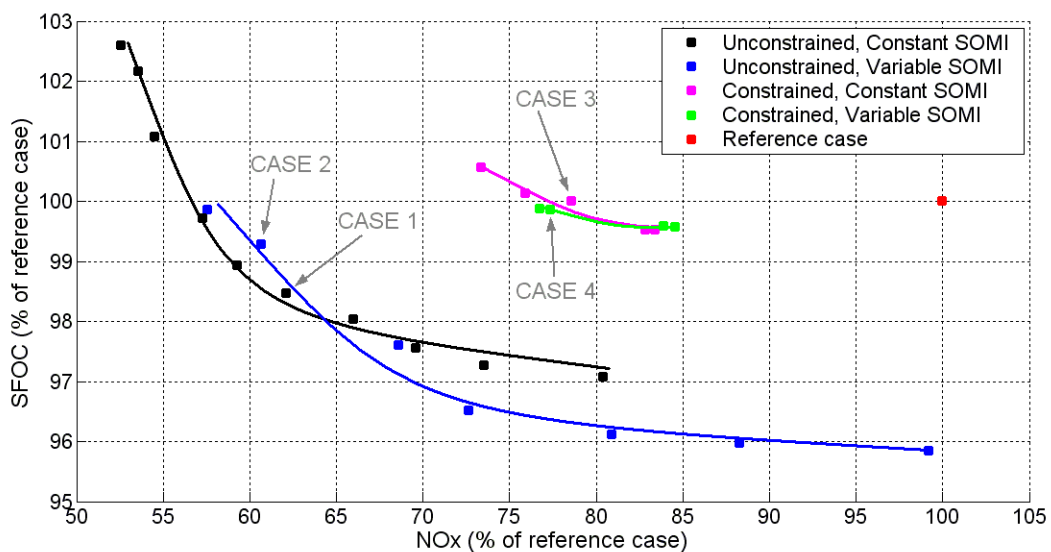


Διάγραμμα 69: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική εκπομπή σωματιδίων αιθάλης (Soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Στο διάγραμμα σημειώνονται η περίπτωση 3 (Case 3) και η περίπτωση 4 (Case 4).

## 5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

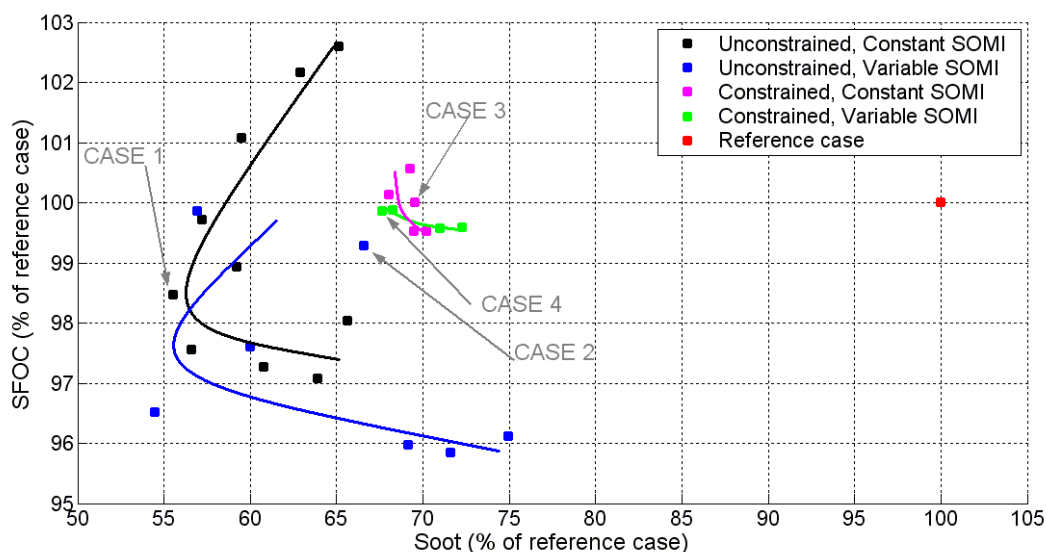
### 5.4.1 Προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με και χωρίς περιορισμούς

Στο Διάγραμμα 70 και στο Διάγραμμα 71 απεικονίζονται τα μέτωπα Pareto των προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με και χωρίς περιορισμούς. Το κάθε πρόβλημα περιλαμβάνει μέτωπα Pareto που αντιστοιχούν σε σταθερή ή μεταβλητή έναρξη της κύριας έγχυσης (SOMI). Λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων, οι λύσεις παρουσιάζονται σε δύο επιμέρους διαγράμματα. Συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 70 παρουσιάζονται τα μέτωπα Pareto κάθε προβλήματος για την τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Επίσης, στο Διάγραμμα 71 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μέτωπα Pareto για την τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot) και την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Καί στα δύο διαγράμματα σημειώνονται οι επιλεγθείσες περιπτώσεις 1, 2, 3 και 4 (Case 1, 2, 3, 4). Ο Πίνακας 20 περιλαμβάνει τις τιμές των στόχων, των ελεύθερων μεταβλητών και των περιορισμών των περιπτώσεων 1, 2, 3 και 4 (Case 1, 2, 3, 4). Παρατηρείται ότι τα μέτωπα Pareto του προβλήματος βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς περιλαμβάνουν περισσότερες και καλύτερες λύσεις από τα μέτωπα Pareto του προβλήματος βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Τονίζεται ότι στα προβλήματα χωρίς περιορισμούς οι λύσεις χαρακτηρίζονται από μειωμένο παραχθέν έργο (συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς), το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, ως ένα επιπλέον στοιχείο, πέραν της ειδικής κατανάλωσης. Όλες οι λύσεις χαρακτηρίζονται από σημαντική μείωση των εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, και συνεπώς η εφαρμογή στρατηγικών έγχυσης με μετέγχυση μπορεί να αποτελέσει ένα ουσιαστικό μέτρο για τη μείωση των εκπομπών ρύπων ενός δίχρονου ναυτικού κινήτηρα.



Διάγραμμα 70: Προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς και με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NOx) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ως

ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Στο διάγραμμα σημειώνονται οι περιπτώσεις 1, 2, 3 και 4 (Case 1, 2, 3, 4).



Διάγραμμα 71 : Προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς και με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Μέτωπα Pareto, στα οποία απεικονίζονται η τελική εκπομπή σωματιδίων αιθάλης (soot) και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) ως ποσοστό της περίπτωσης αναφοράς. Στο διάγραμμα σημειώνονται οι περιπτώσεις 1, 2, 3 και 4 (Case 1, 2, 3, 4).

Περίπτωση (Case)	Στόχοι (Objectives)			Ελεύθερες μεταβλητές (Free variables)				Περιορισμοί (Constraints)	
	SFOC [%]	NOx [%]	Soot [%]	SOMI [° CA]	MR [%]	PoMF [%]	GAP [° CA]	Μέγιστη πίεση [bar]	Έργο [%]
1*	98.460	62.093	55.574	2 (σταθ.)	9.560	24.636	5.768	148.720	91.9
2*	99.274	60.662	66.569	1.677	9.120	39.924	5.320	149.530	91.5
3	100.001	78.574	69.534	2 (σταθ.)	0.254	21.548	3.630	148.73	99.7
4	99.851	77.362	67.662	1.871	0.567	24.408	3.815	149.72	99.6

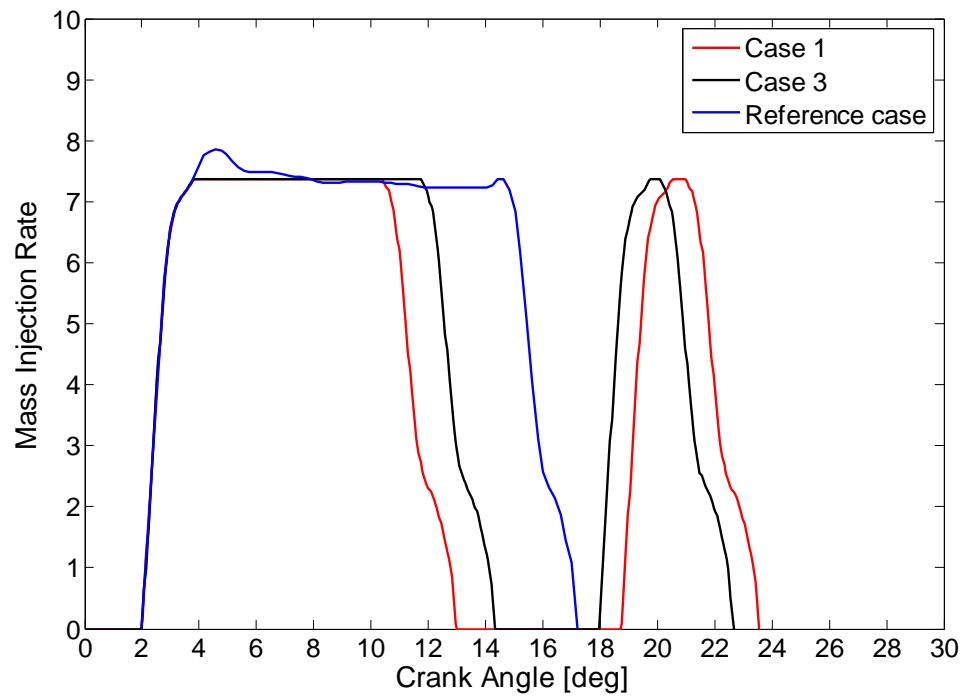
Πίνακας 20: Προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς και με περιορισμούς, για σταθερή και μεταβλητή τιμή της παραμέτρου SOMI: Στόχοι, ελεύθερες μεταβλητές και περιορισμοί των περιπτώσεων 1, 2, 3 και 4 (Case 1, 2, 3, 4). \*Σημείωση: οι περιπτώσεις 1 και 2 αντιστοιχούν σε προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.

#### **5.4.2 Προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με και χωρίς περιορισμούς (σταθερή αρχή της κύριας έγχυσης)**

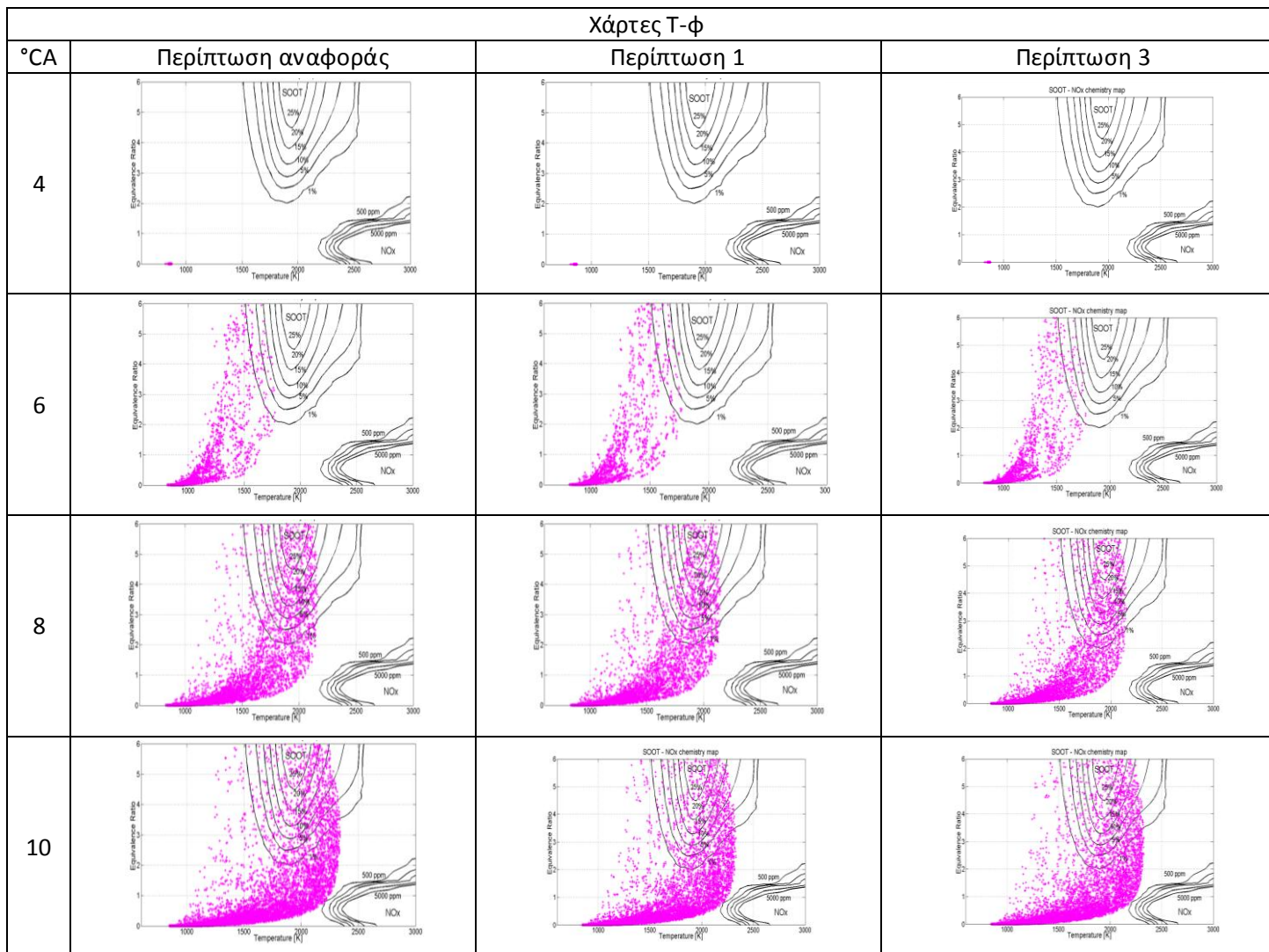
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η σύγκριση των περιπτώσεων 1 (χωρίς περιορισμούς, βλ. παράγραφο 5.2.1) και 3 (με περιορισμούς, βλέπε παράγραφο 5.3.1), οι οποίες χαρακτηρίζονται από σταθερή έναρξη της κύριας έγχυσης ( $SOMI = 2^\circ CA$ , ίδια με αυτή της περίπτωσης αναφοράς). Στο Διάγραμμα 72 απεικονίζονται τα προφίλ έγχυσης των περιπτώσεων 1 και 3, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς. Η σύγκριση γίνεται με σχετική οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της περίπτωσης αναφοράς. Τα στιγμιότυπα που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν σε χρονικό παράθυρο το οποίο περιλαμβάνει την έγχυση του καυσίμου και κύριο τμήμα της διεργασίας της καύσης (2-30 μοίρες).

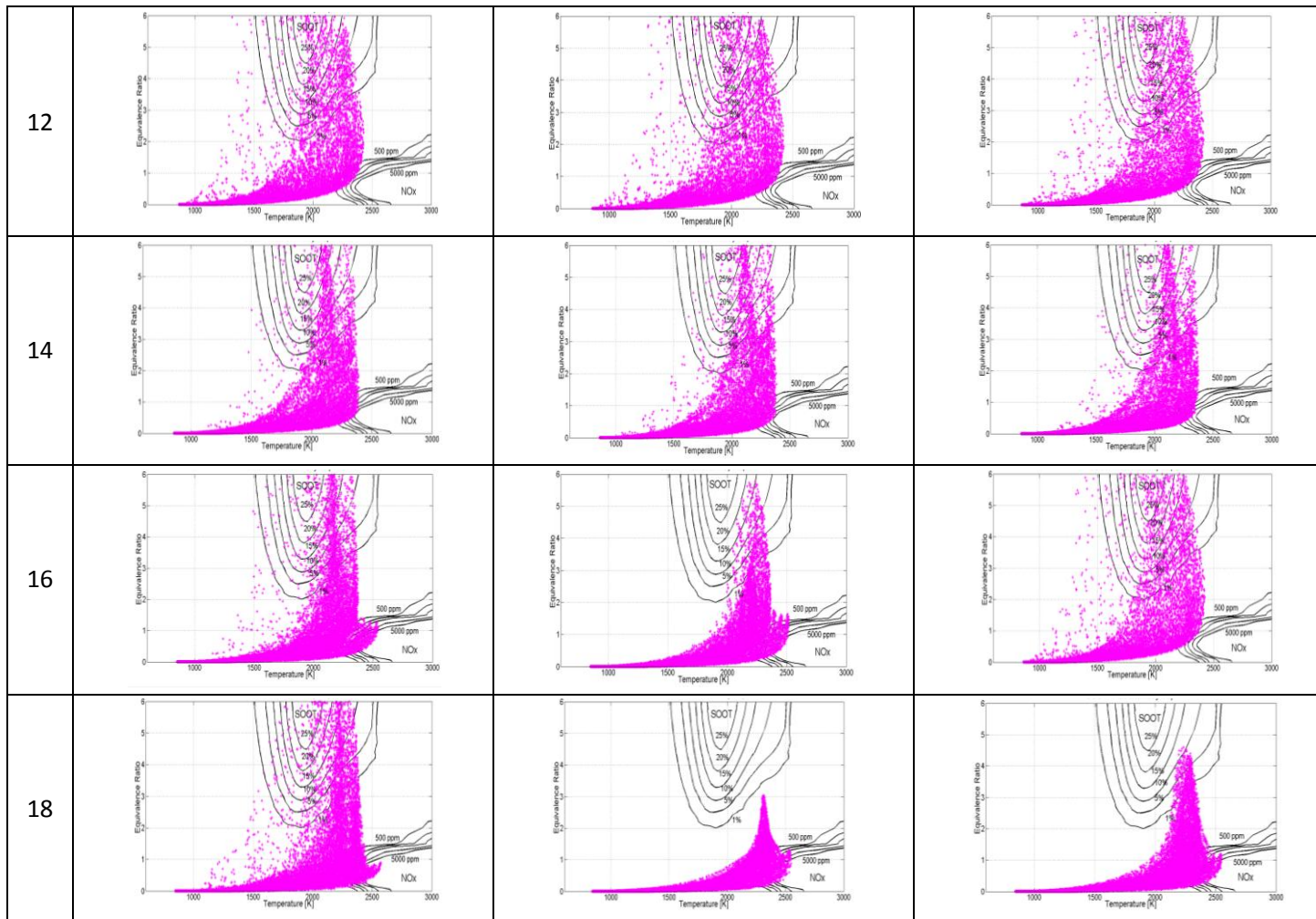
Στην Εικόνα 15 παρουσιάζονται οι χάρτες  $T - \phi$ , ενώ στην Εικόνα 16 οι ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων. Επίσης, η Εικόνα 17 περιλαμβάνει τις αντίστοιχες ισοϋψείς καμπύλες του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου, και η Εικόνα 18 της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης. Σημειώνεται ότι η περίπτωση 1 και η περίπτωση 3 επιτυγχάνουν μείωση στις τελικές εκπομπές  $NO_x$  κατά 40% και 21%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς. Επίσης, οι αντίστοιχες μειώσεις των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης είναι, για τις περιπτώσεις 1 και 3, 44% και 30%, αντίστοιχα. Τονίζεται ότι οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου για τις δύο περιπτώσεις (1 και 3) πρακτικά δεν διαφέρουν, ωστόσο, η περίπτωση 1 χαρακτηρίζεται από μειωμένο παραγόμενο έργο (Πίνακας 20). Παρατηρείται ότι, για όλες τις περιπτώσεις, δεν υπάρχουν διαφορές στο χρονικό παράθυρο από 4 μέχρι 14 μοίρες, το οποίο αντιστοιχεί στην κύρια έγχυση. Στη συνέχεια, στα στιγμιότυπα των 16, 18 και 20 μοιρών γωνίας στροφάλου, κατά τα οποία έχει μεσολαβήσει η διακοπή της έγχυσης για τις περιπτώσεις 1 και 3, παρατηρείται ότι τα επίπεδα της θερμοκρασίας διατηρούνται υψηλά, σε αντίθεση με τους τοπικούς λόγους ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα. Έτσι, στις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, για τις περιπτώσεις 1 και 3 τα επίπεδα  $NO_x$  είναι παρόμοια με αυτά της περίπτωσης αναφοράς, ενώ τα επίπεδα σωματιδίων αιθάλης αισθητά χαμηλότερα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφορές στα επίπεδα τοπικών συνθηκών ( $T, \phi$ ) και ρύπων μεταξύ των περιπτώσεων 1 και 3 οφείλονται στο μεγαλύτερο μεσοδιάστημα μεταξύ των δύο παλμών (GAP) της περίπτωσης 1. Η μετέγχυση σημαντικού ποσοστού μάζας καυσίμου ( $POMF \approx 25\%$ ), λαμβάνει χώρα, και για τις δύο περιπτώσεις, μετά το πέρας της έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς. Συνεπώς, η μετέγχυση λαμβάνει χώρα σε χρονικό σημείο αρκετά μακριά από το ΑΝΣ, στο οποίο τα επίπεδα θερμοκρασίας είναι αρκετά χαμηλότερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η καύση της μετεγχυόμενης μάζας του καυσίμου να μην συμβάλλει στη σημαντική περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στα στιγμιότυπα των 22 έως και 30 μοιρών. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι εκπομπές  $NO_x$  είναι τελικά μειωμένες για τις περιπτώσεις με μετέγχυση. Επιπροσθέτως, κατά τη διάρκεια της μετέγχυσης αυξάνονται οι τοπικοί λόγοι ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα, όπως διακρίνεται στα στιγμιότυπα 22, 24 και 26. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης. Όμως, η καύση που αντιστοιχεί στη μετέγχυση, με την αντίστοιχη τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, συμβάλλει στη διατήρηση του ρυθμού οξείδωσης των σωματιδίων αιθάλης. Έτσι, οι τελικές

εκπομπές σωματιδίων αιθάλης είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες της περίπτωσης αναφοράς.

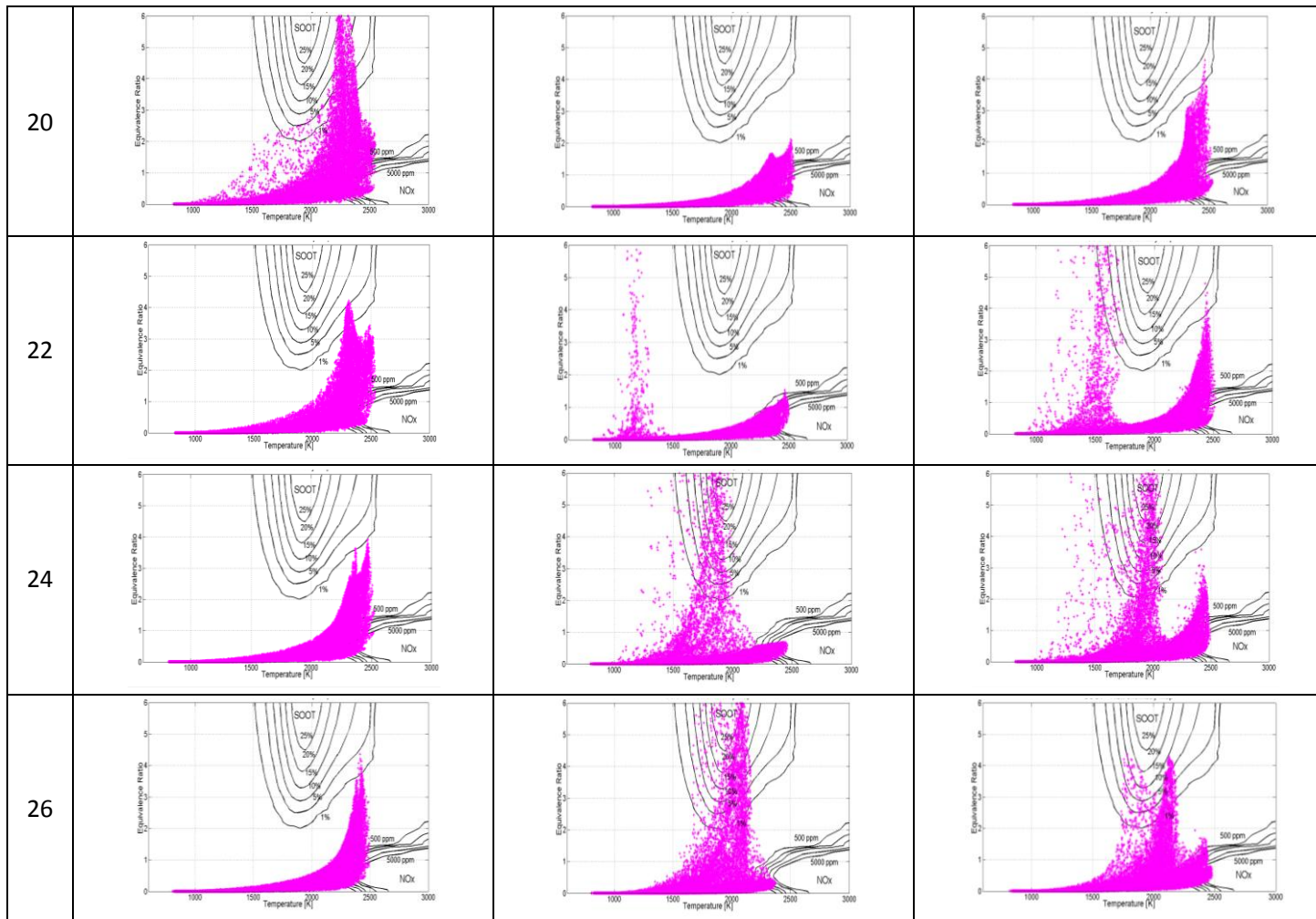


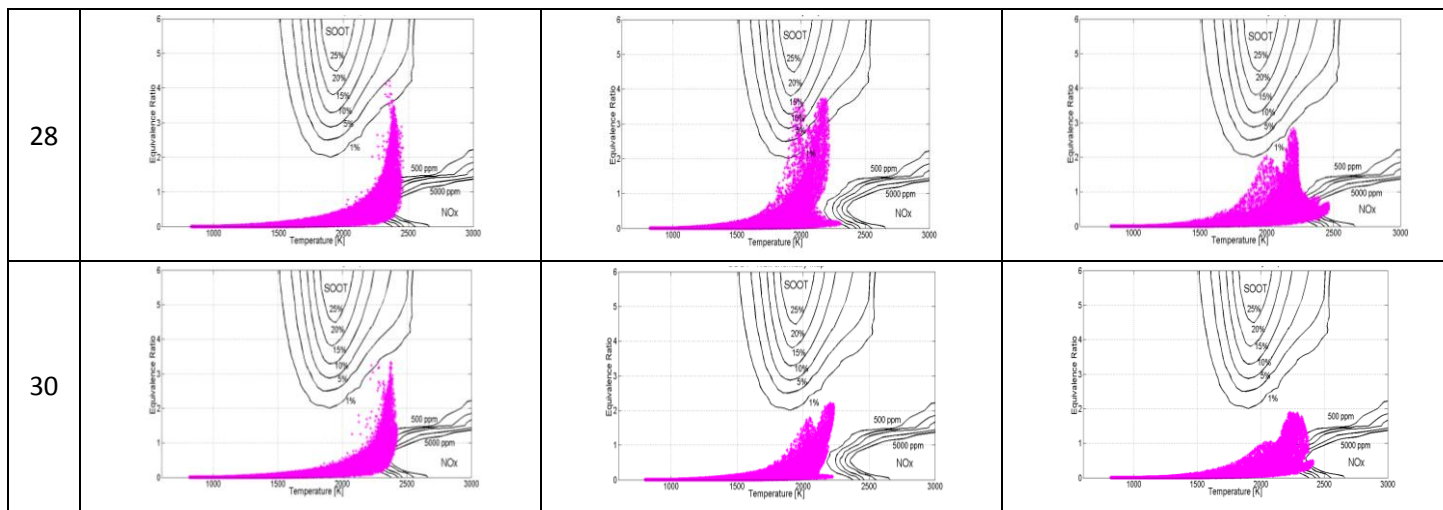
Διάγραμμα 72: Προφίλ εγχύσεως των περιπτώσεων 1 και 3, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς.



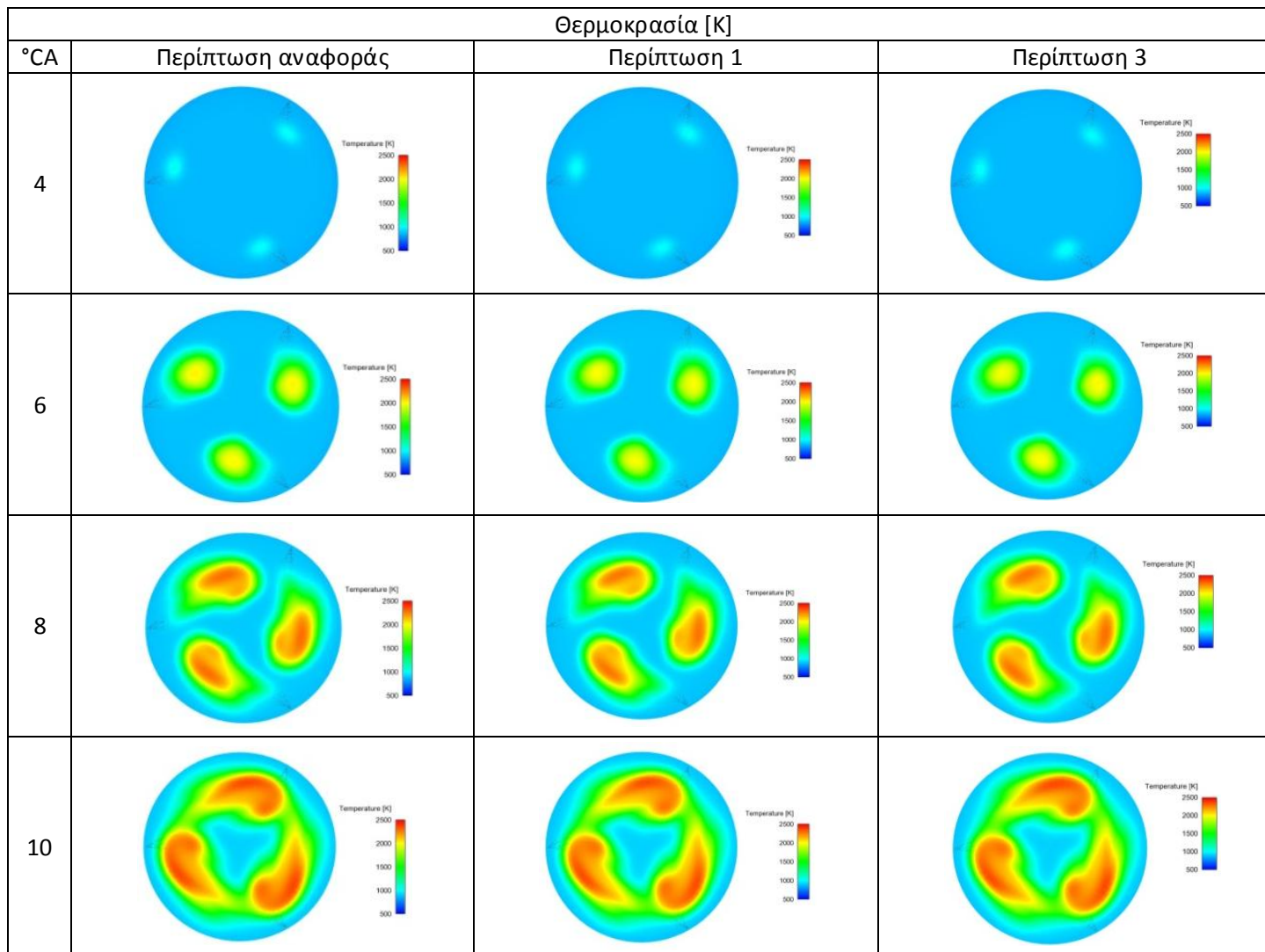


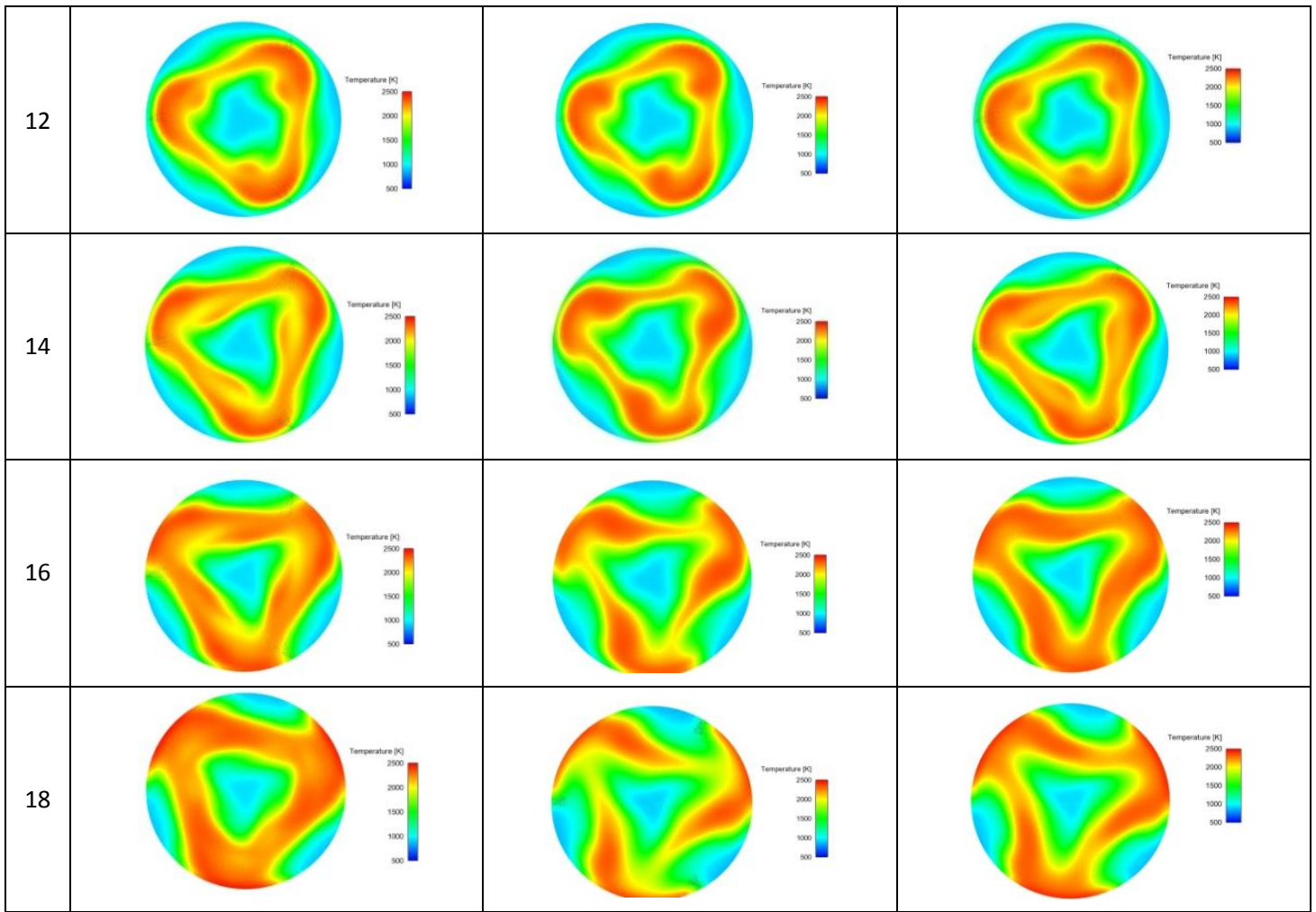


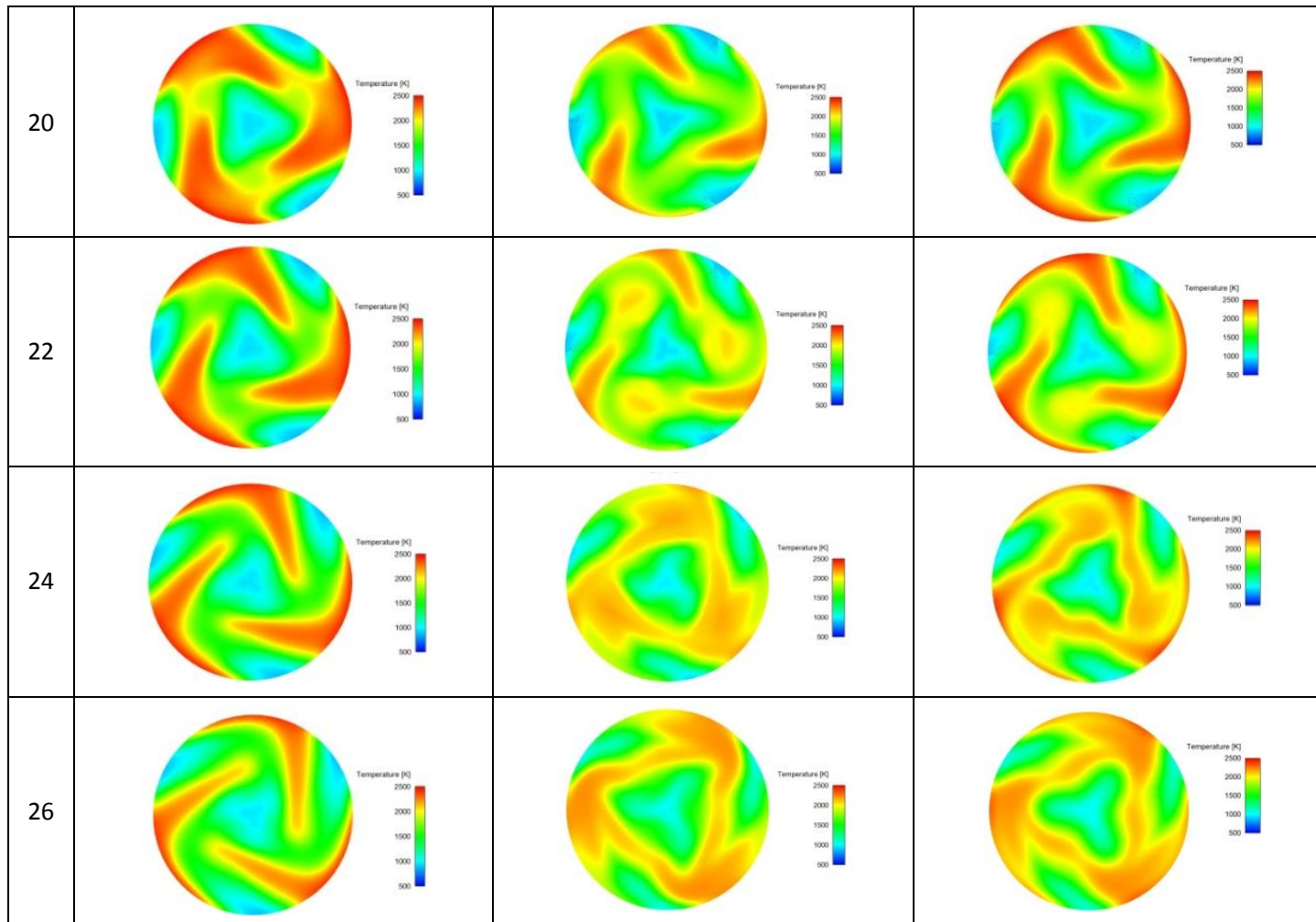


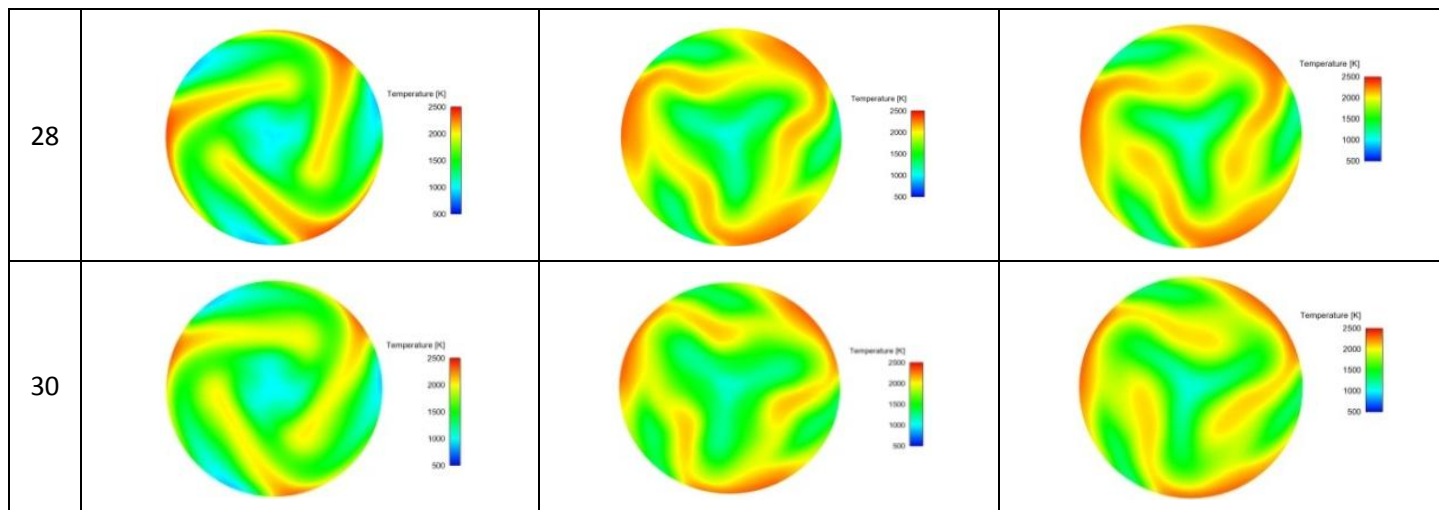


Εικόνα 15: Χάρτες T-f των περιπτώσεων 1 και 3, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς.

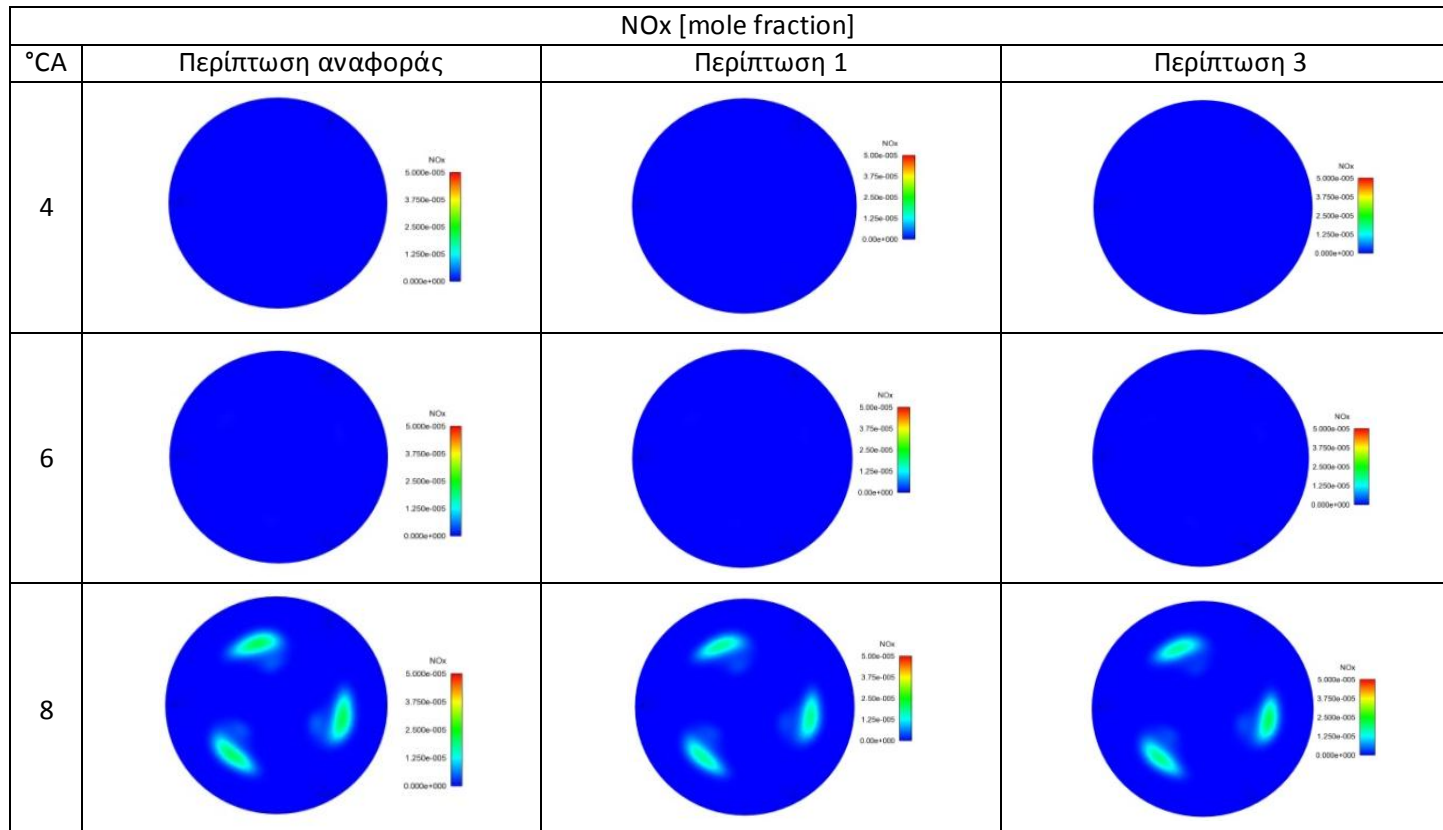


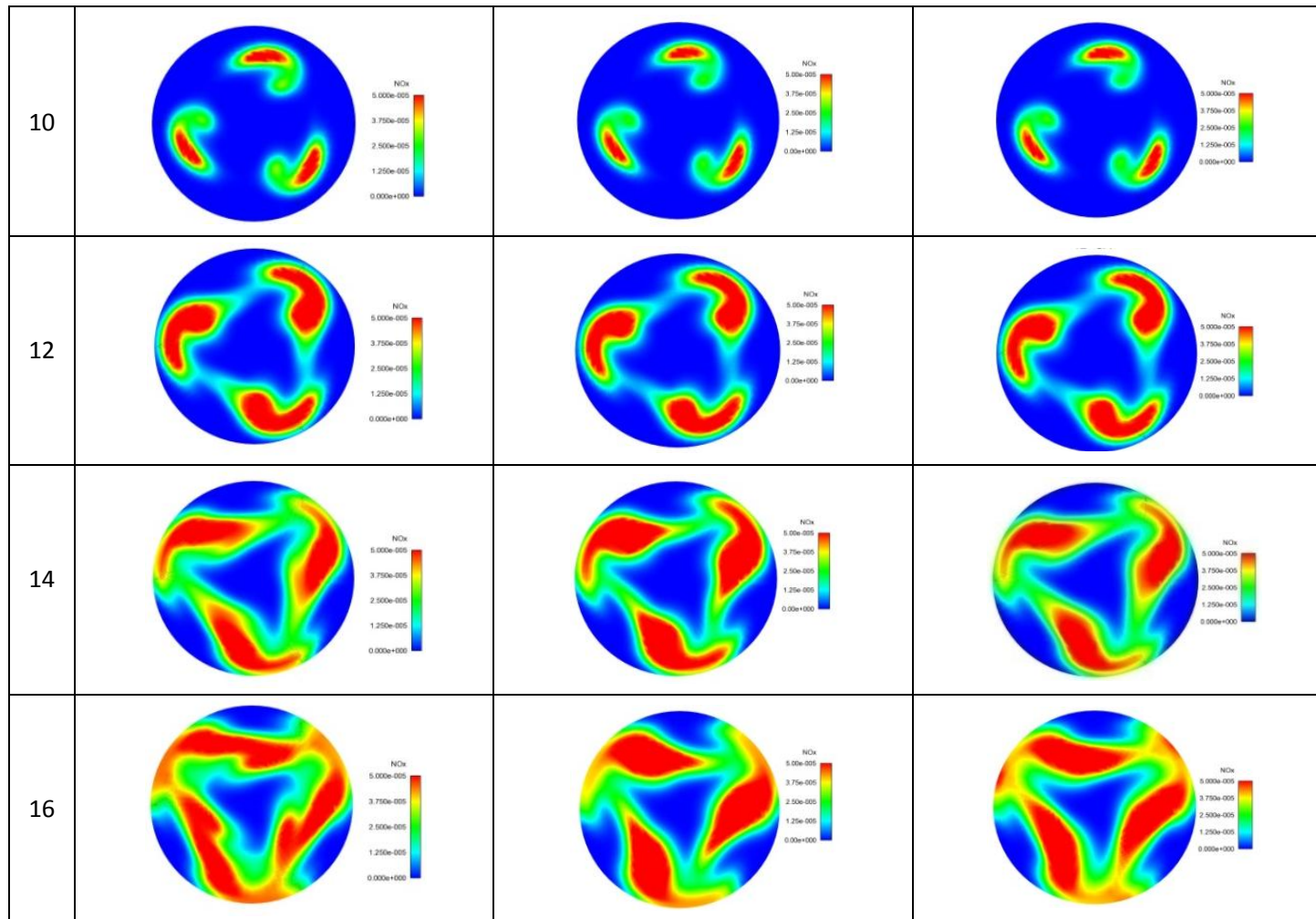




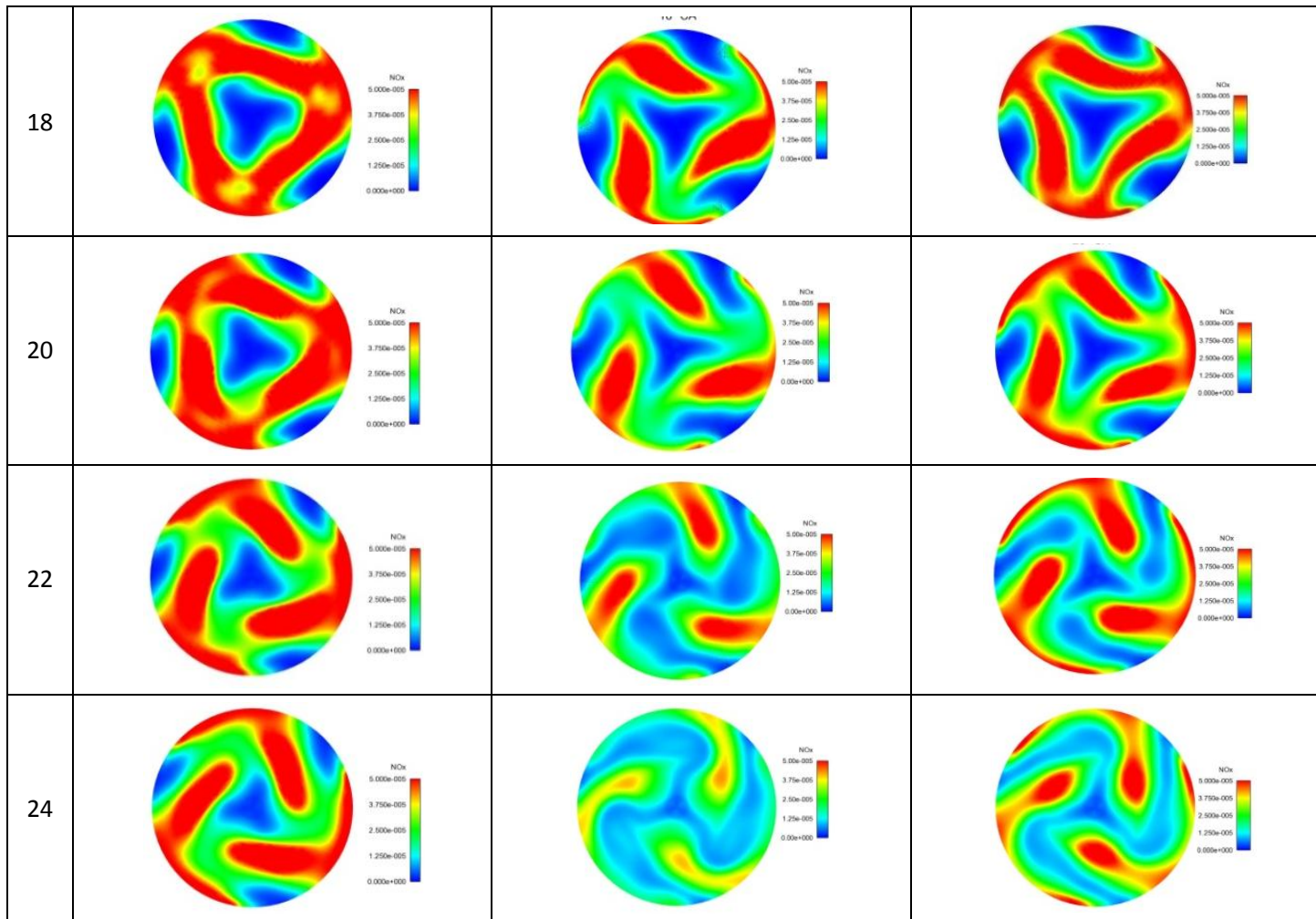


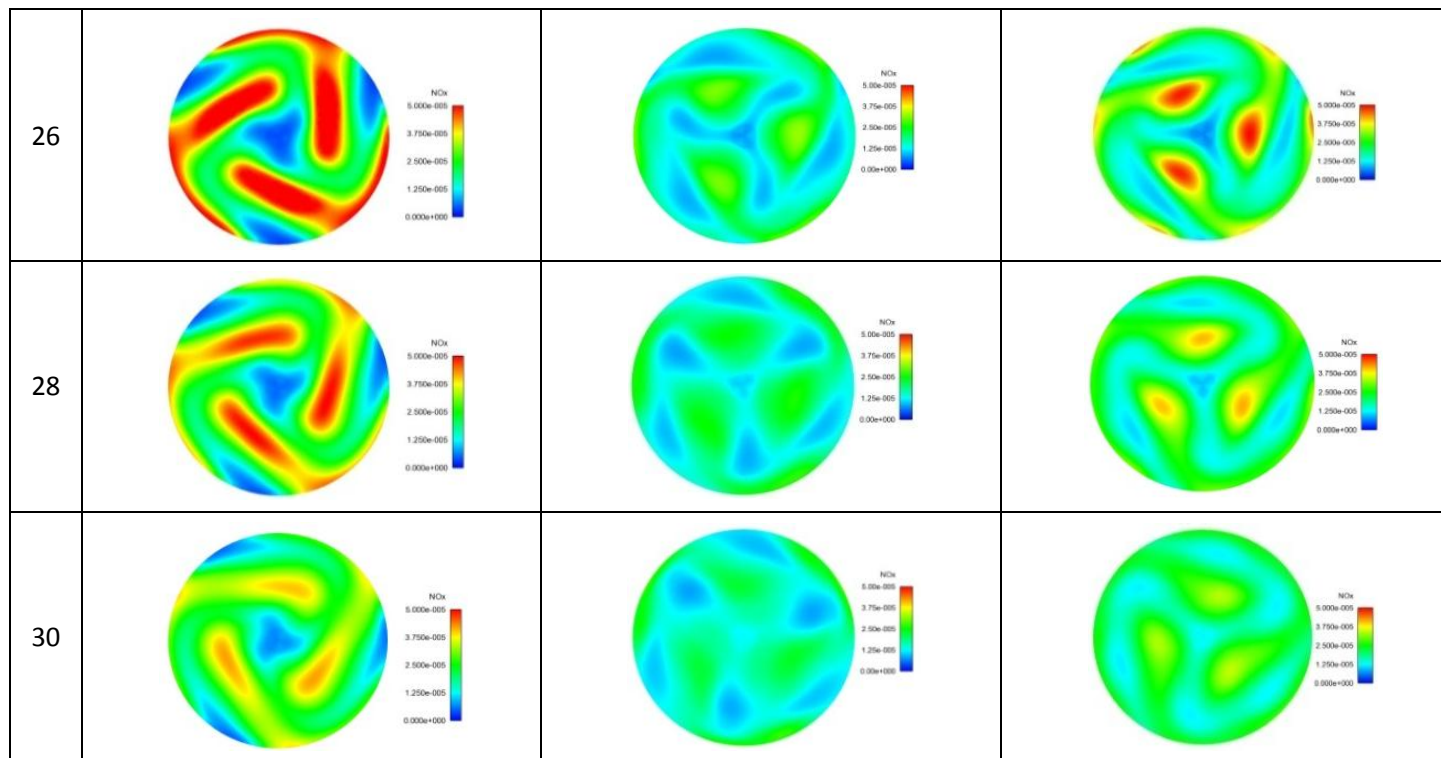
Εικόνα 16: Ισοψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 1 και 3, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.



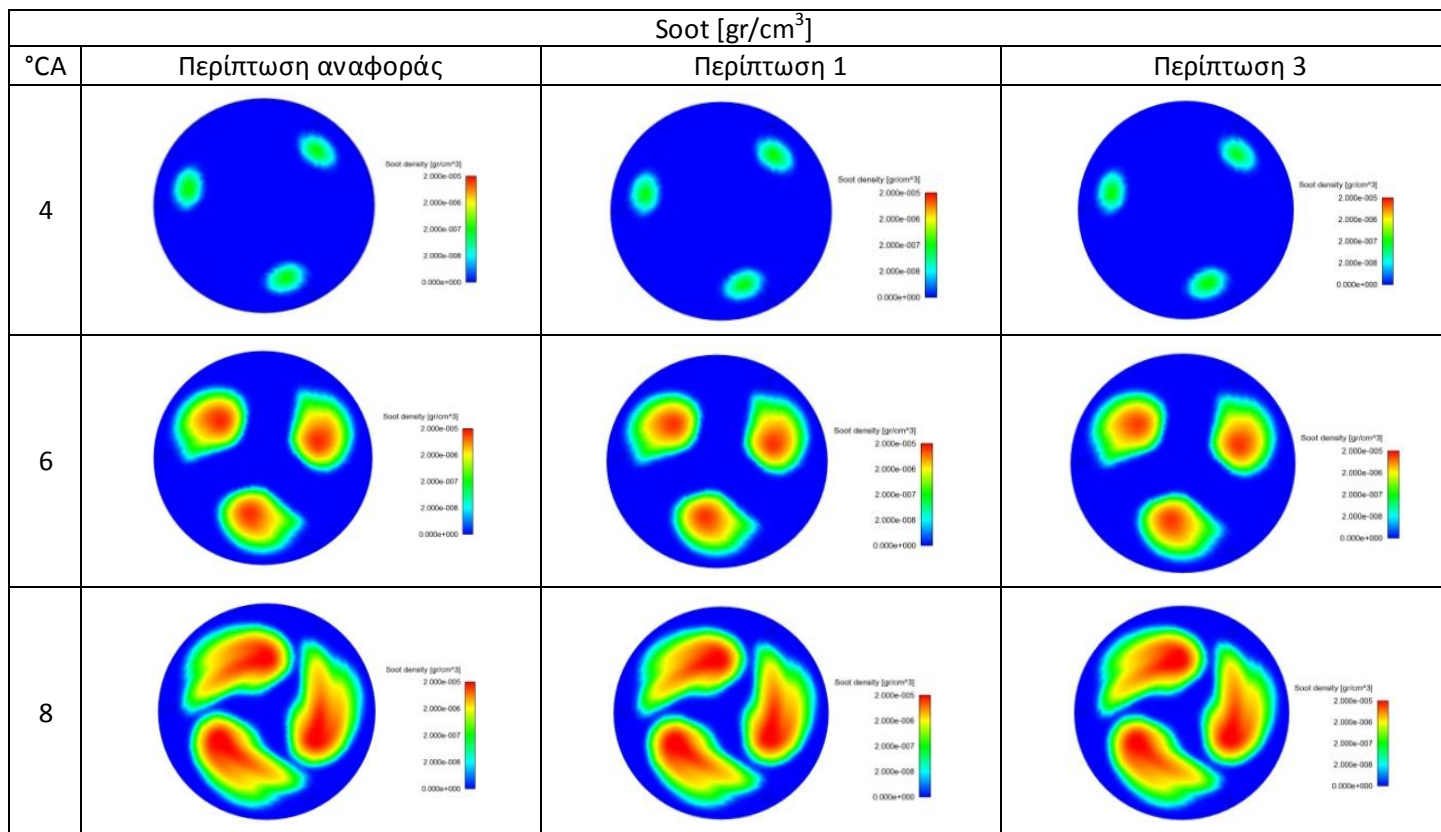


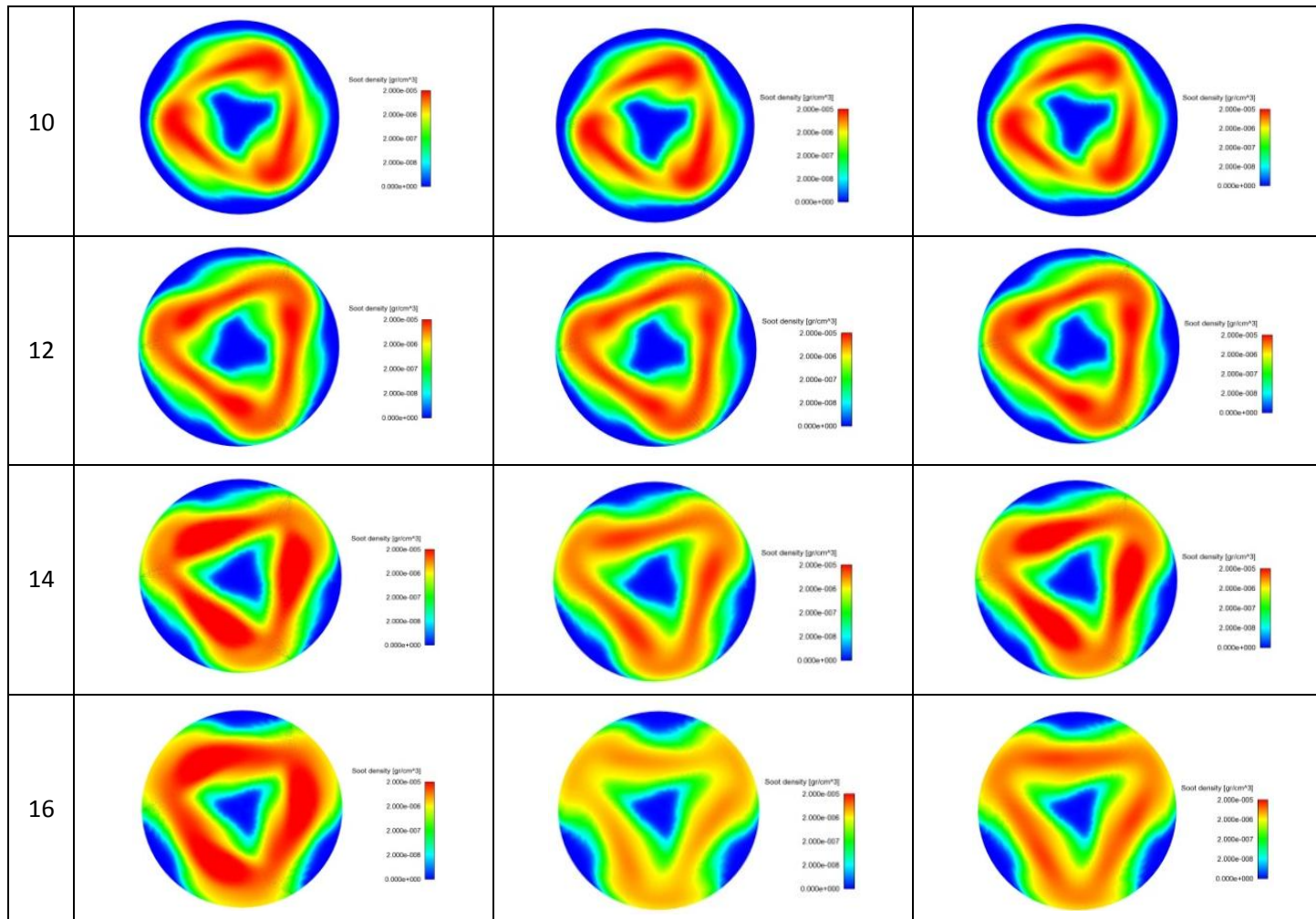


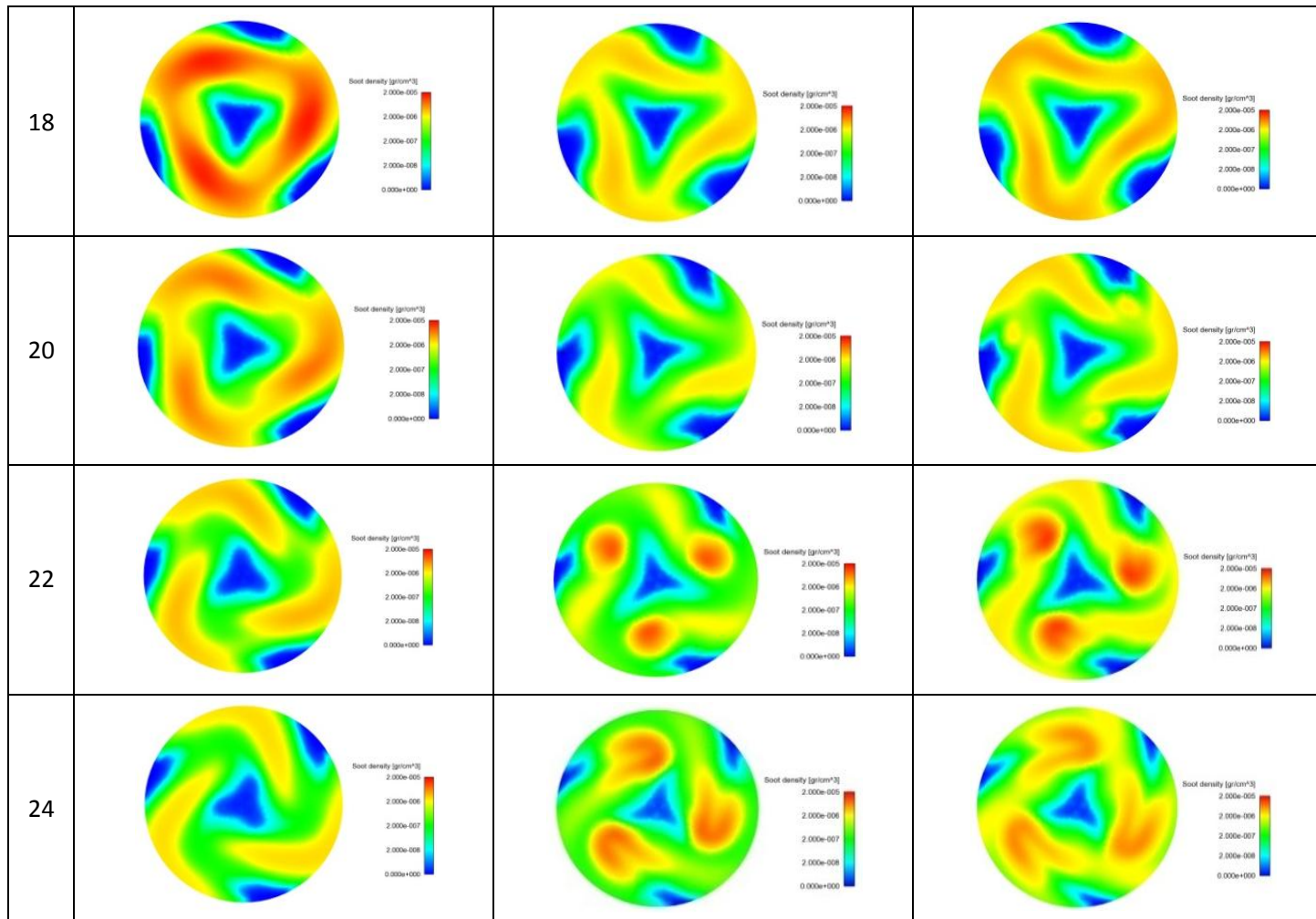


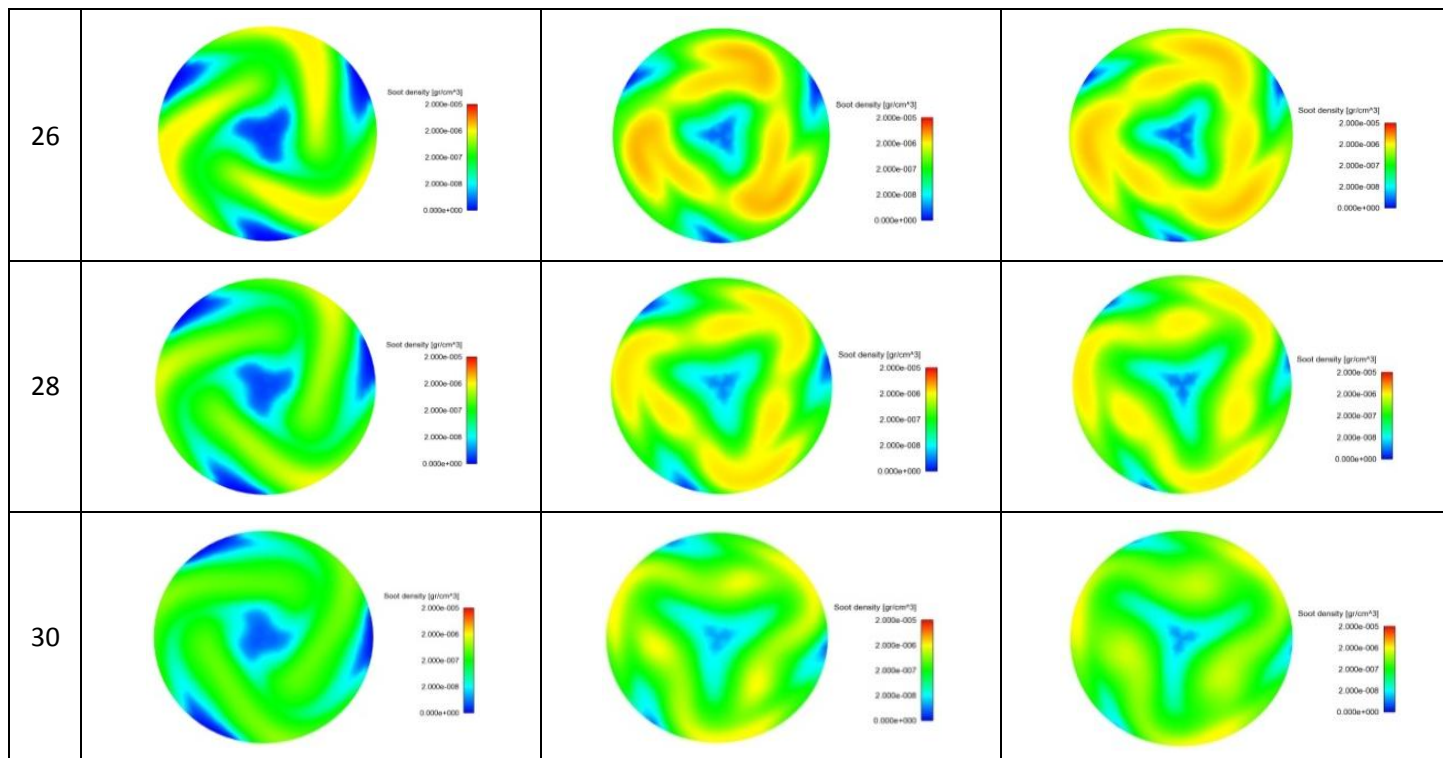


Εικόνα 17: Ισοϋψείς καμπύλες της συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 1 και 3, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.









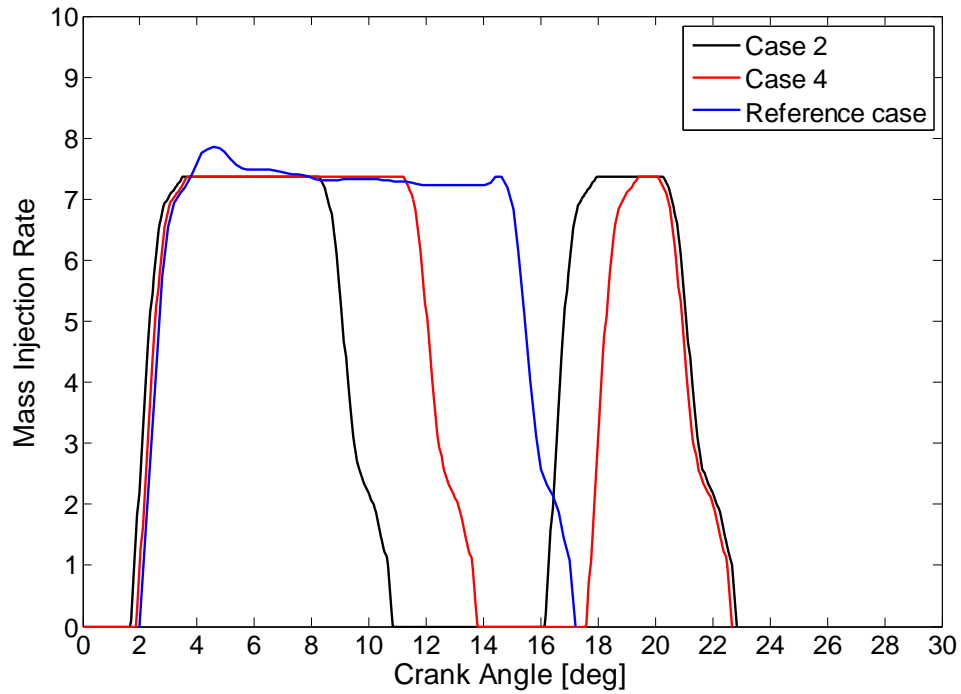
Εικόνα 18: Ισοΰψείς καμπύλες της πυκνότητας σωματιδίων αιθάλης στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 1 και 3, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.

### **5.4.3 Προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με και χωρίς περιορισμούς (μεταβλητή αρχή της κύριας έγχυσης)**

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η σύγκριση των περιπτώσεων 2 (πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, βλ. παράγραφο 5.2.2) και 4 (πρόβλημα με περιορισμούς, βλ. παράγραφο 5.3.2), οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεταβλητή έναρξη της κύριας έγχυσης (SOMI). Στο Διάγραμμα 73 απεικονίζονται τα προφίλ έγχυσης των περιπτώσεων 2 και 4, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς. Η σύγκριση των δύο περιπτώσεων γίνεται με χρήση οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της περίπτωσης αναφοράς. Τα στιγμιότυπα που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν στο χρονικό παράθυρο το οποίο περιλαμβάνει την έγχυση του καυσίμου και το κύριο τμήμα της διεργασίας της καύσης (2-30 μοίρες).

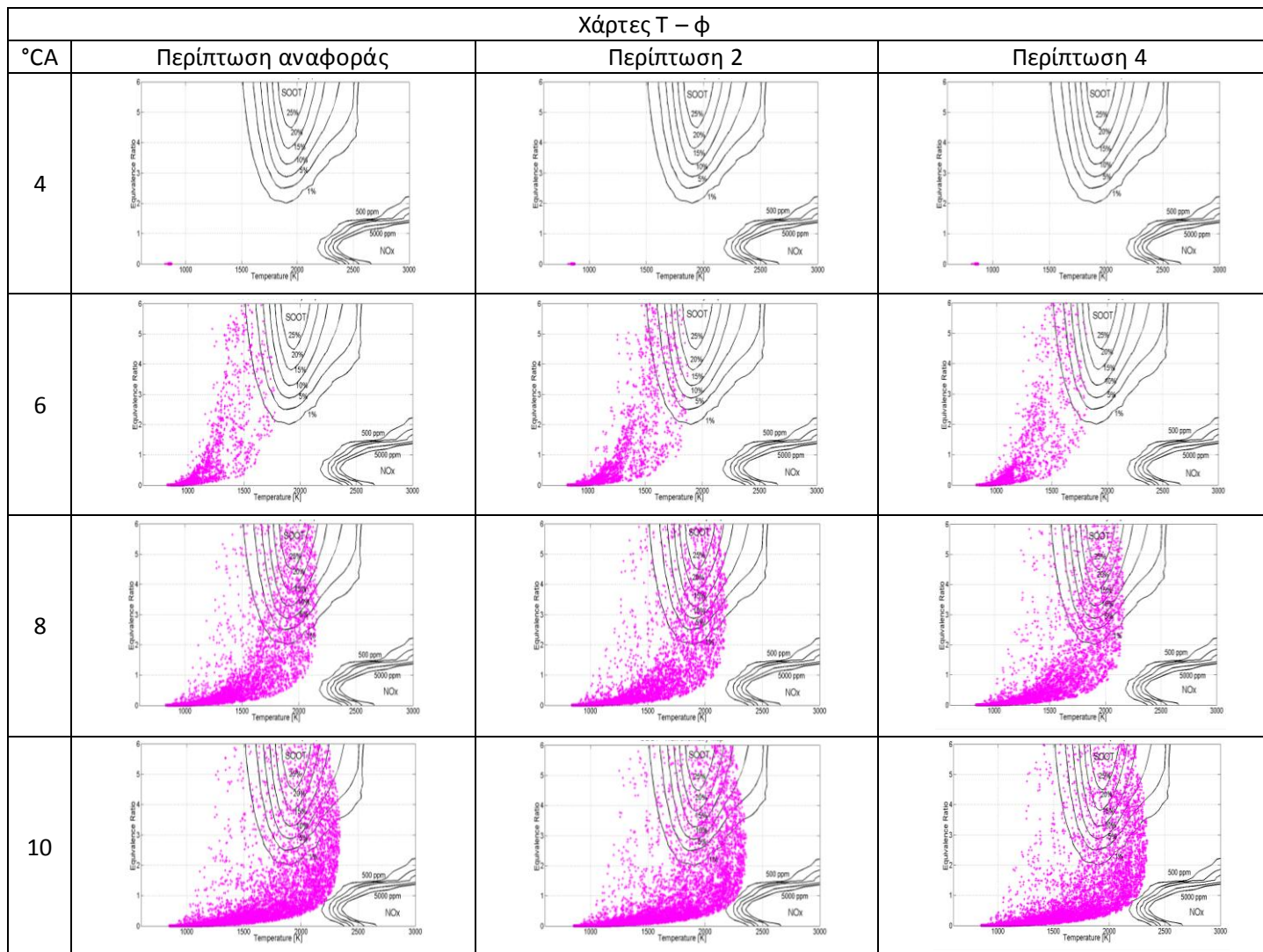
Στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται οι χάρτες T – φ, ενώ στην Εικόνα 20 οι ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων. Επίσης, στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες του μοριακού κλάσματος των οξειδίων του αζώτου, και στην Εικόνα 22 αυτές της πυκνότητας των σωματιδίων αιθάλης. Σημειώνεται ότι, στην περίπτωση 2 και στην περίπτωση 4, η μείωση στις τελικές εκπομπές NOx σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς είναι 40% και 23%, αντίστοιχα. Επίσης, οι σχετικές μειώσεις των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης είναι 33% και 32%, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης για τις δύο περιπτώσεις (2 και 4) πρακτικά δεν διαφέρουν, ωστόσο, η περίπτωση 2 χαρακτηρίζεται από μειωμένο ωφέλιμο έργο (Πίνακας 20). Παρατηρείται ότι, στο χρονικό διάστημα από 4 μέχρι και 10 μοίρες, το οποίο αντιστοιχεί σε όλες της περιπτώσεις στην κύρια έγχυση, δεν υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στις θεωρούμενες τρεις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι τοπικές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται ευνοούν τον σχηματισμό NOx. Σημειώνεται ότι, στην περίπτωση 2, η κύρια έγχυση τερματίζει περίπου στις 11 μοίρες μετά το ANΣ, διαρκώντας αισθητά λιγότερο σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση 2, η επίδραση της μικρότερης διάρκειας της κύριας έγχυσης γίνεται αντιληπτή στα στιγμιότυπα για γωνίες στροφάλου 12, 14 και 16 μοίρες. Στα συγκεκριμένα στιγμιότυπα, αποτυπώνονται τα μειωμένα επίπεδα σωματιδίων αιθάλης, τα οποία σχετίζονται με τις χαμηλές τιμές του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα. Ωστόσο, τοπικά η θερμοκρασία παραμένει σε υψηλά επίπεδα, ευνοώντας τον σχηματισμό NOx. Στην περίπτωση 4, η επίδραση του μεσοδιαστήματος μεταξύ των δύο παλμών στη διεργασία της καύσης αποτυπώνεται μόνο στο στιγμιότυπο των 18 μοιρών, αφού η συγκεκριμένη περίπτωση χαρακτηρίζεται από μικρότερο μεσοδιάστημα ( $GAP = 2.8^\circ CA$ ) και ποσοστό καυσίμου μετέγχυσης ( $RoMF = 24\%$ ), σε σύγκριση με την περίπτωση 2 ( $GAP = 5.3^\circ CA$ ,  $RoMF = 40\%$ ). Τα επίπεδα NOx είναι μεγαλύτερα για την περίπτωση 4 σε σύγκριση με την περίπτωση 2, όπως φαίνεται στο στιγμιότυπο των 18 μοιρών. Στην περίπτωση 4, η μετέγχυση ξεκινά με το πέρας της κύριας έγχυσης της περίπτωσης αναφοράς, σε αντίθεση με την περίπτωση 2. Όμως, αμφότεροι οι παλμοί μετέγχυσης σταματούν την ίδια χρονική στιγμή. Καί για τις δύο περιπτώσεις με παρουσία μετέγχυσης, η καύση της μετεγχυόμενης μάζας του καυσίμου δεν συμβάλλει σημαντικά στην περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, συνεπώς και στις εκπομπές NOx, γεγονός που αποτυπώνεται στα στιγμιότυπα των 22 έως και 30 μοιρών. Επιπροσθέτως, κατά τη διάρκεια της μετέγχυσης αυξάνονται οι τοπικοί λόγοι ισοδυναμίας καυσίμου –

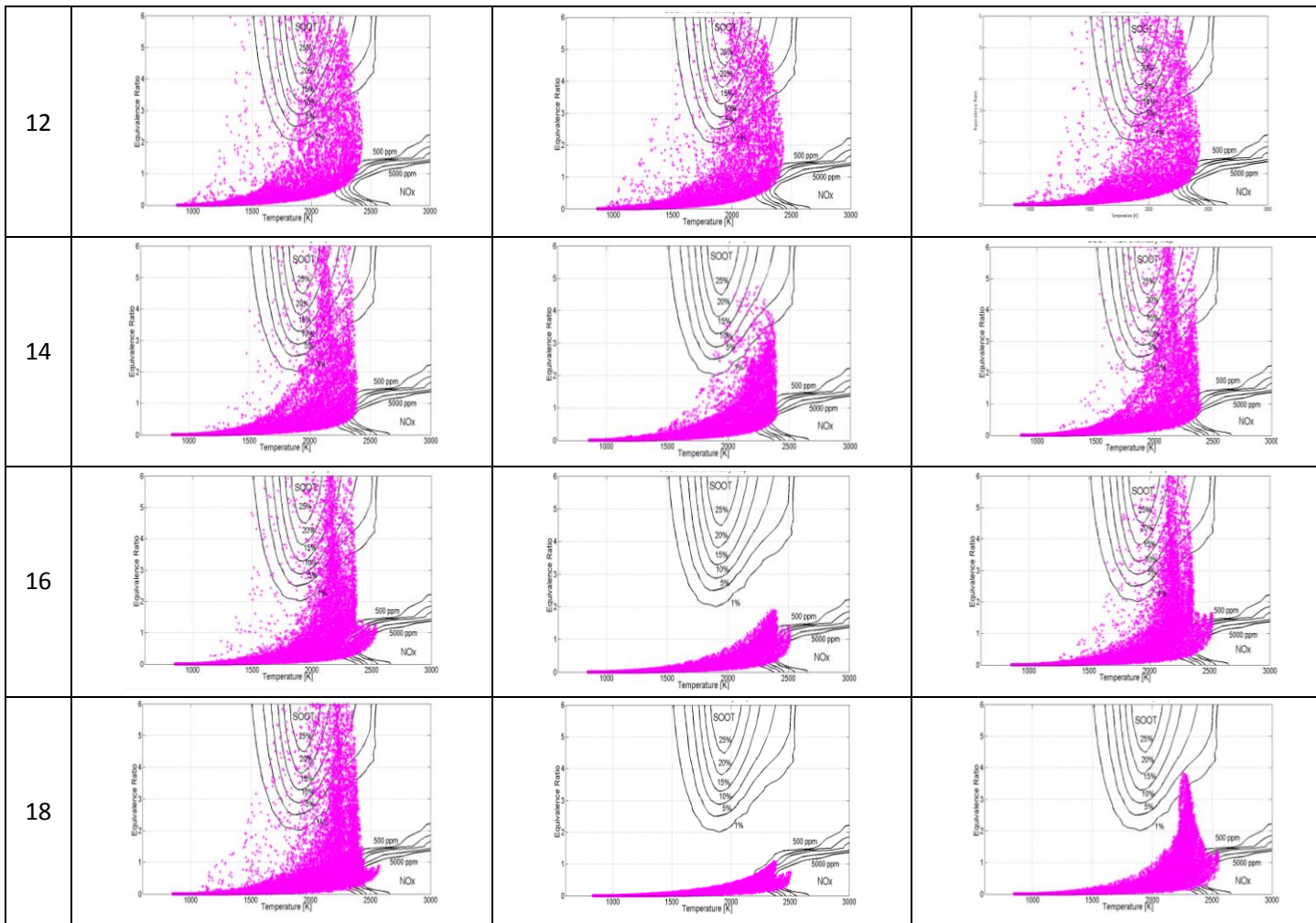
αέρα, όπως διακρίνεται στα στιγμιότυπα των 20 έως και 28 μοιρών. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης. Όμως, η καύση του καυσίμου της μετέγχυσης συμβάλλει στη διατήρηση του ρυθμού οξείδωσης της αιθάλης. Έτσι, τα τελικά επίπεδα εκπομπών σωματιδίων αιθάλης είναι χαμηλότερα από τα αντίστοιχα της περίπτωσης αναφοράς.

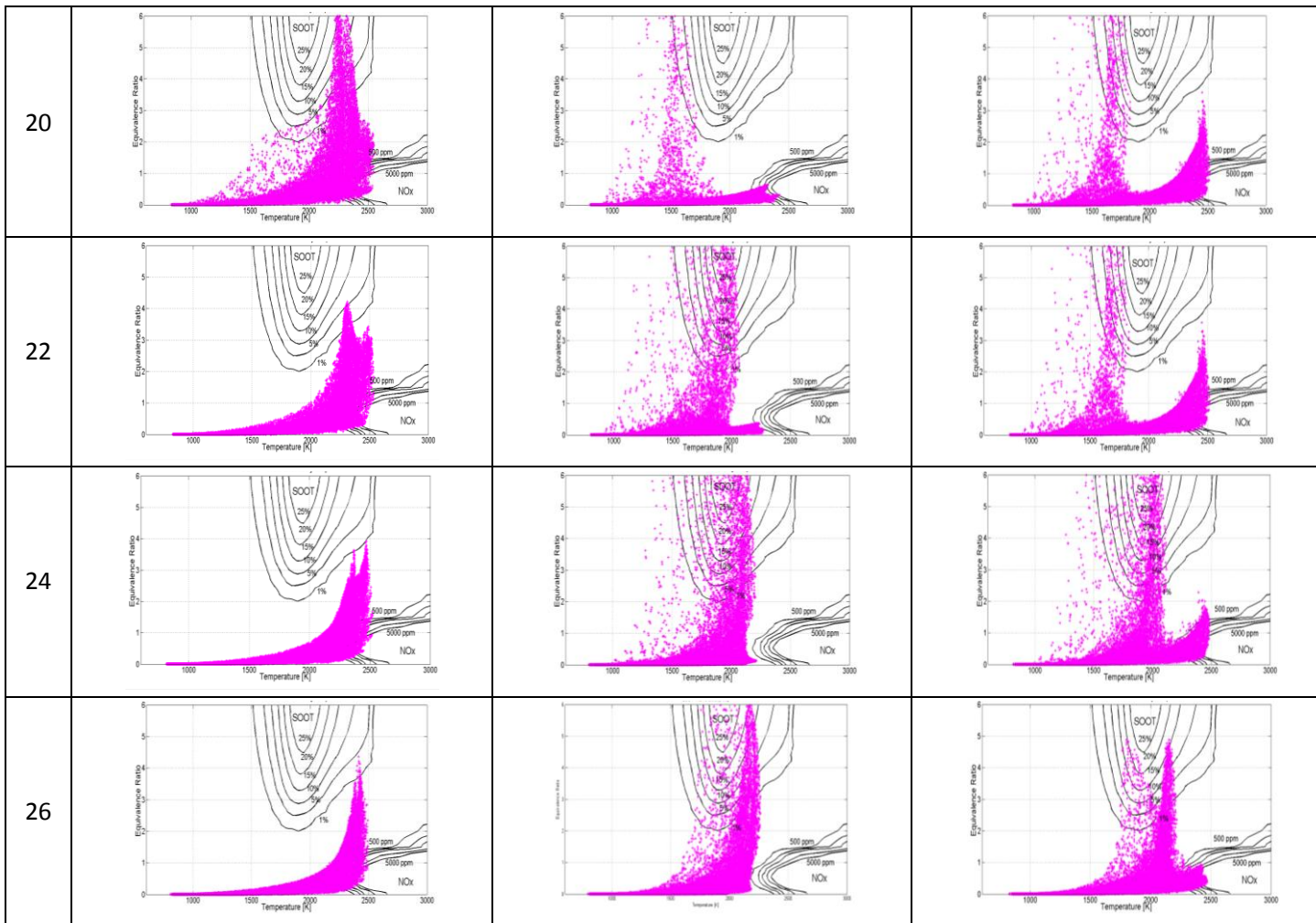


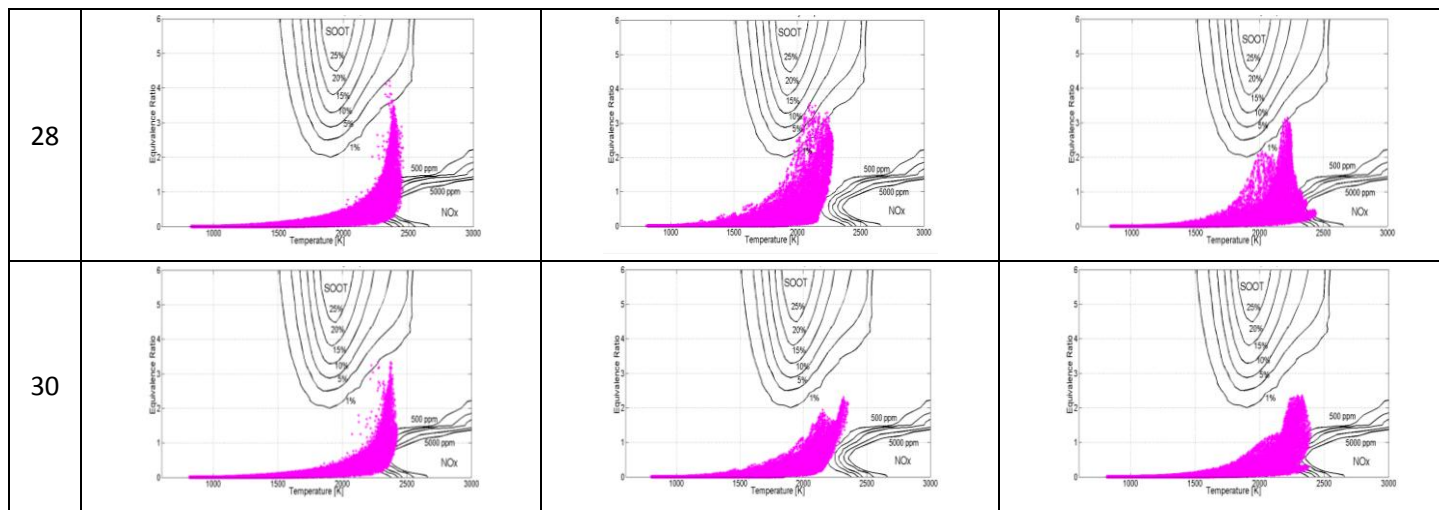
Διάγραμμα 73: Προφίλ έγχυσης των περιπτώσεων 2 και 4, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς.



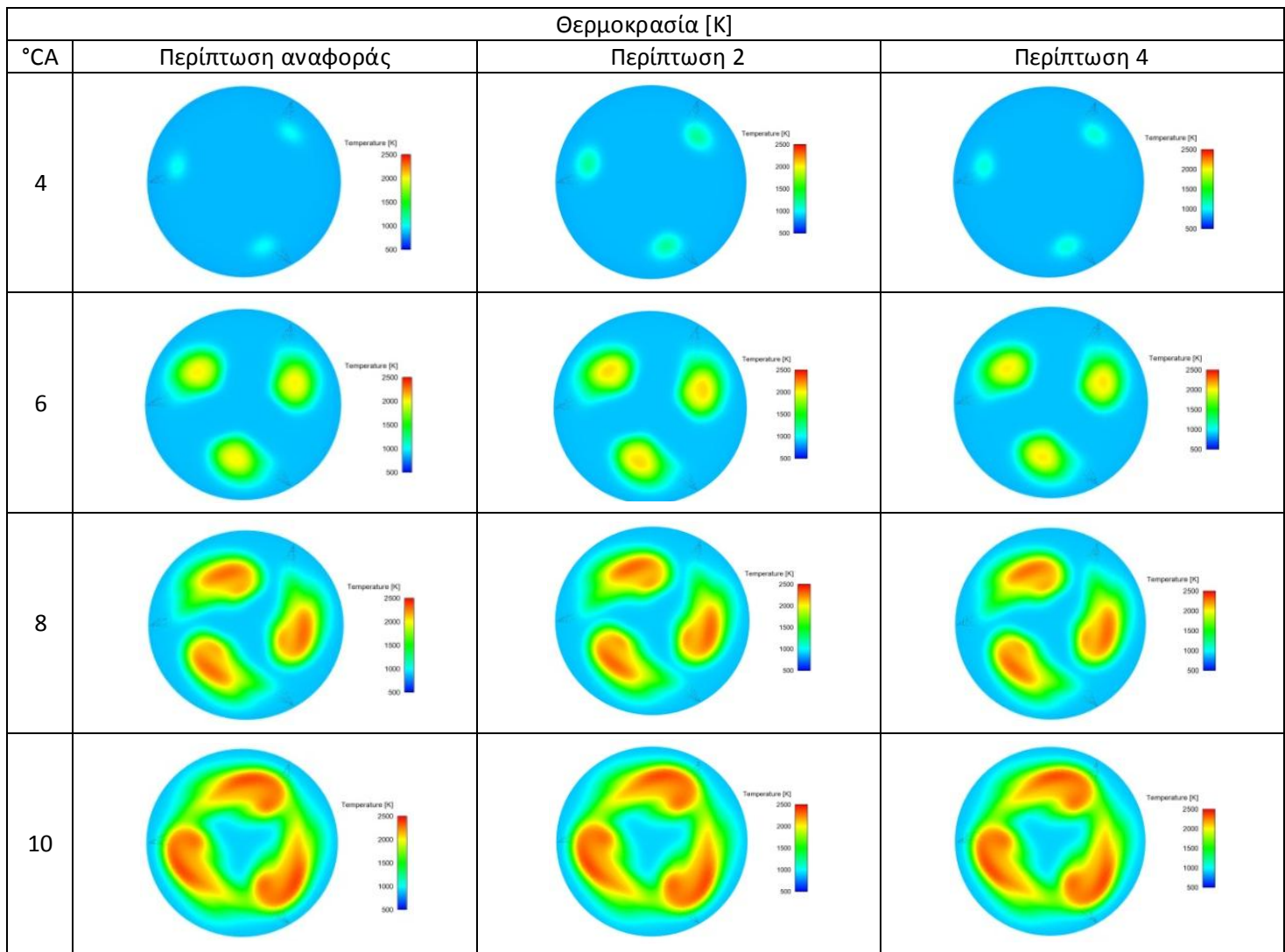


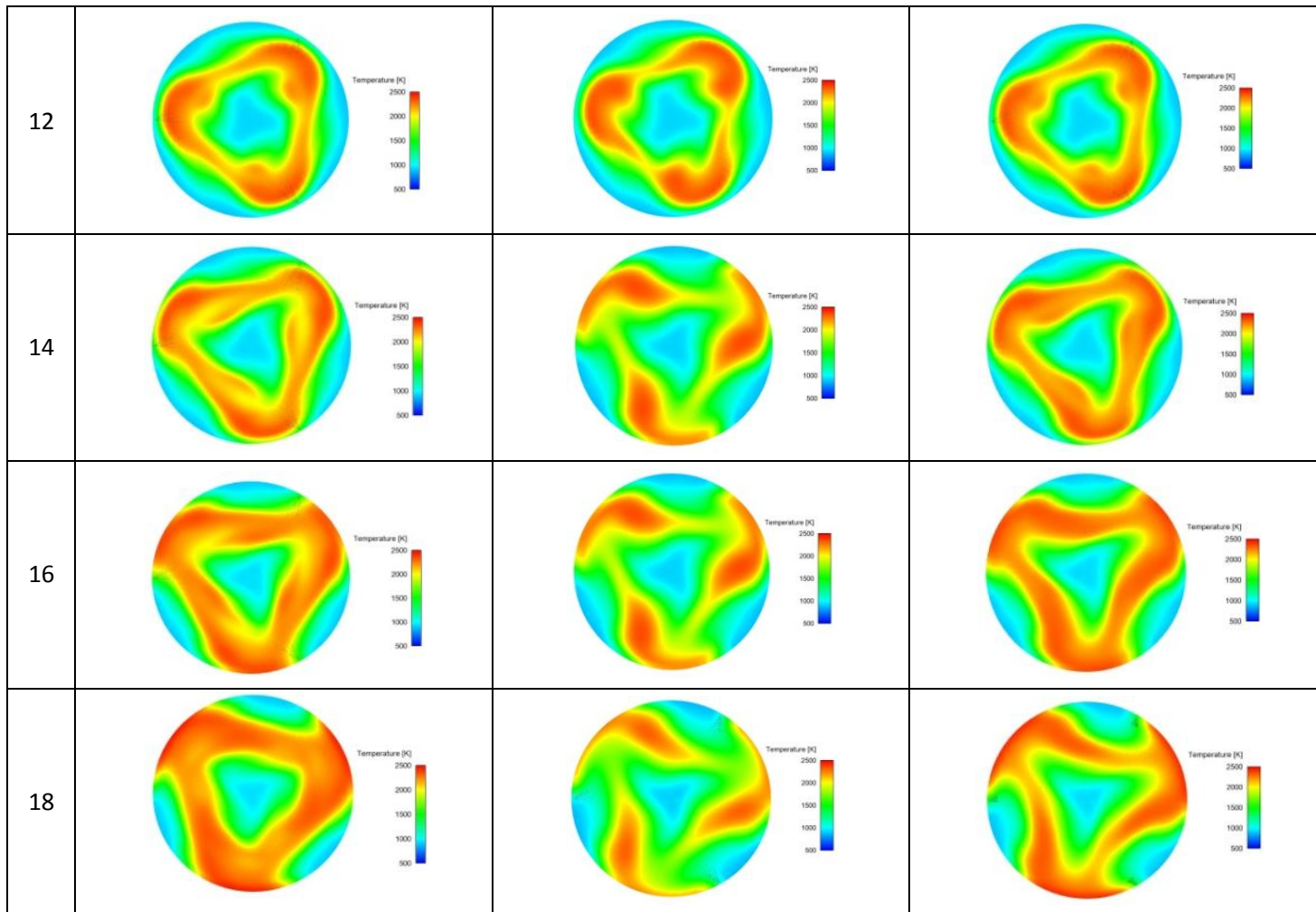




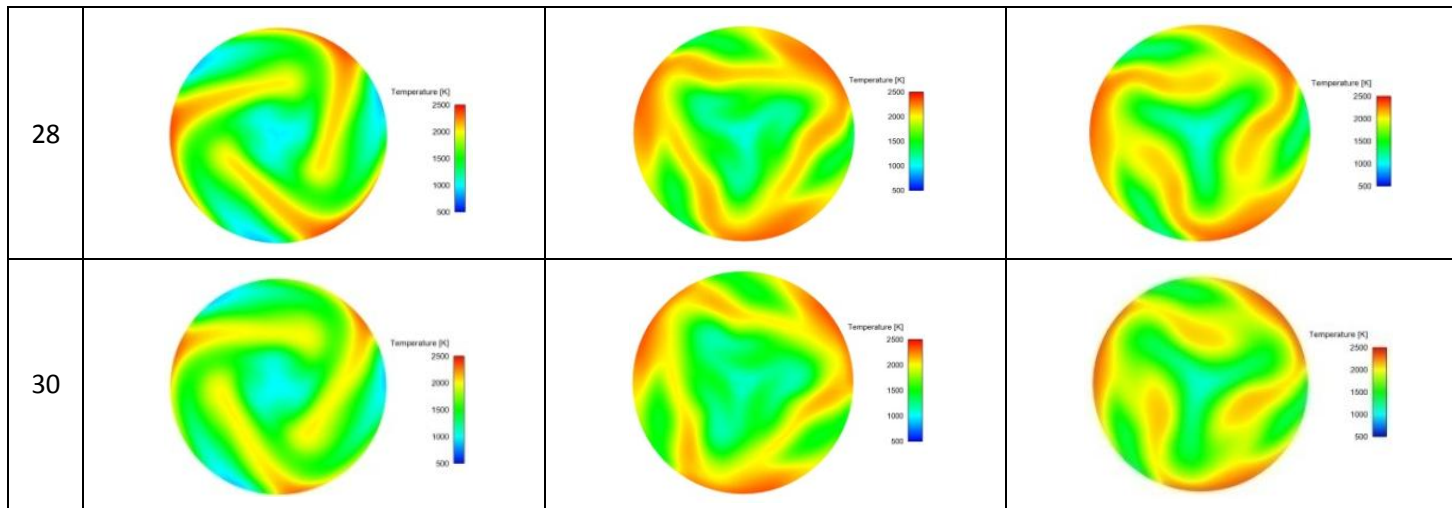


Εικόνα 19: Χάρτες T-φ των περιπτώσεων 2 και 4, καθώς και της περίπτωσης αναφοράς.



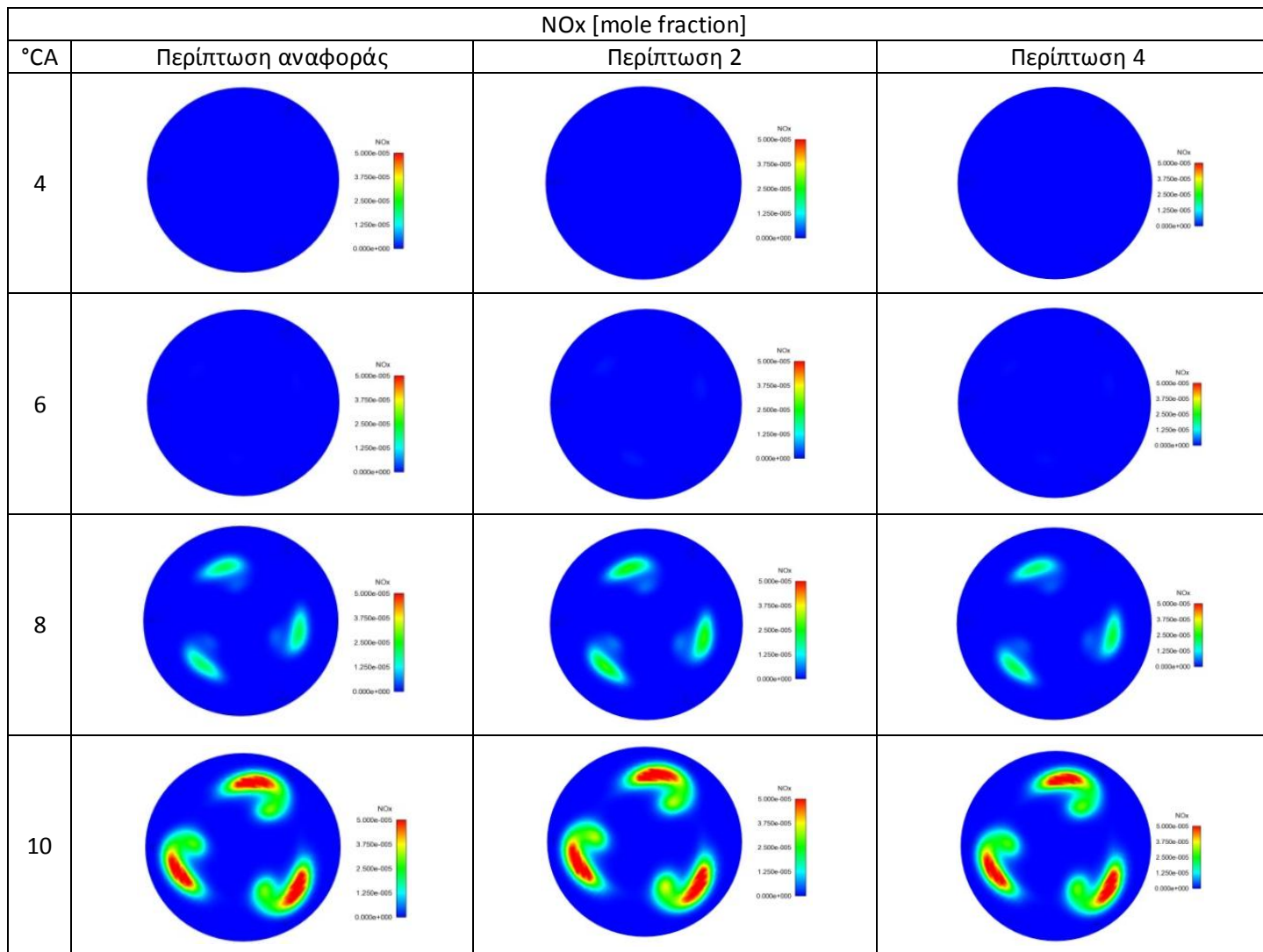


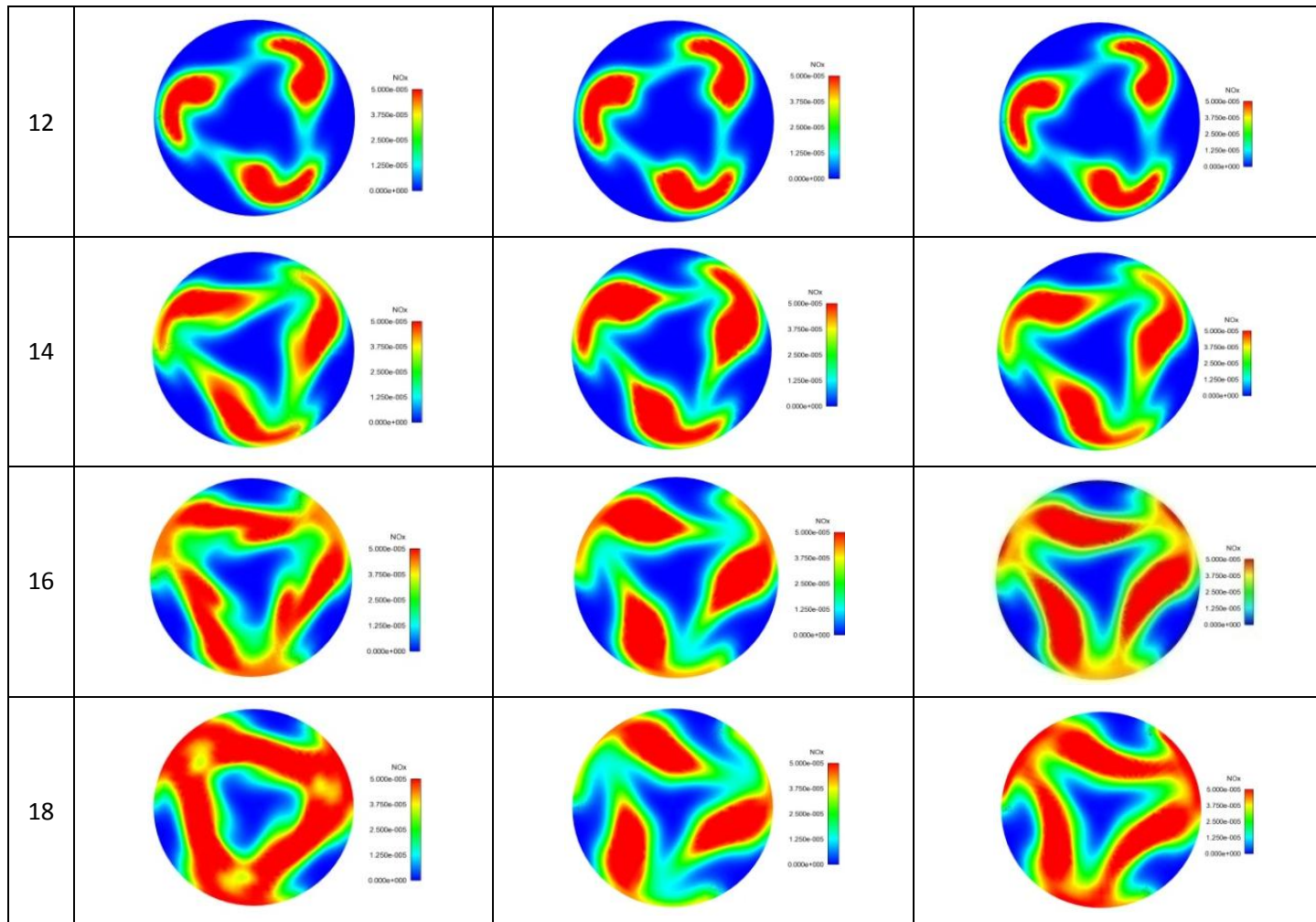


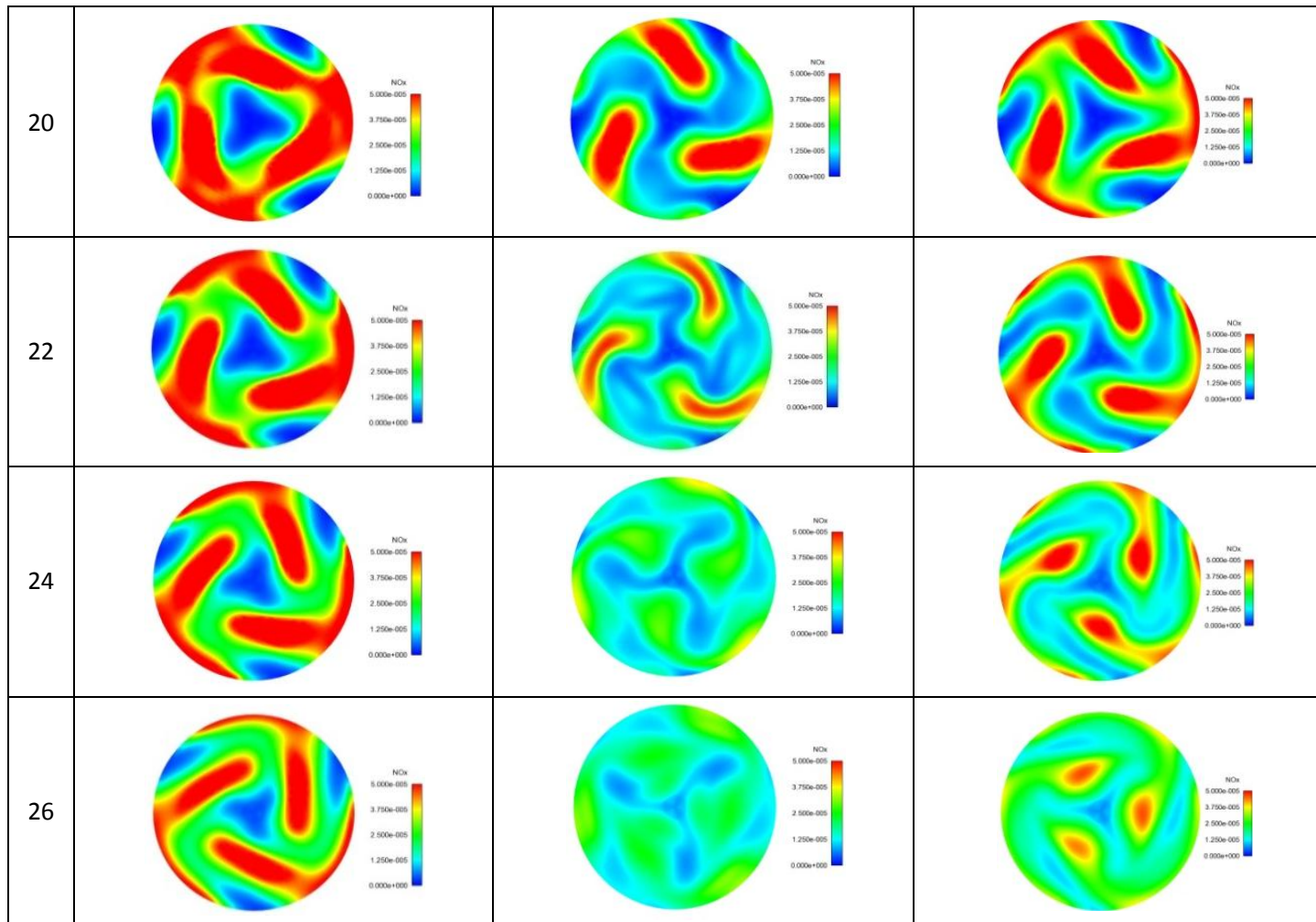


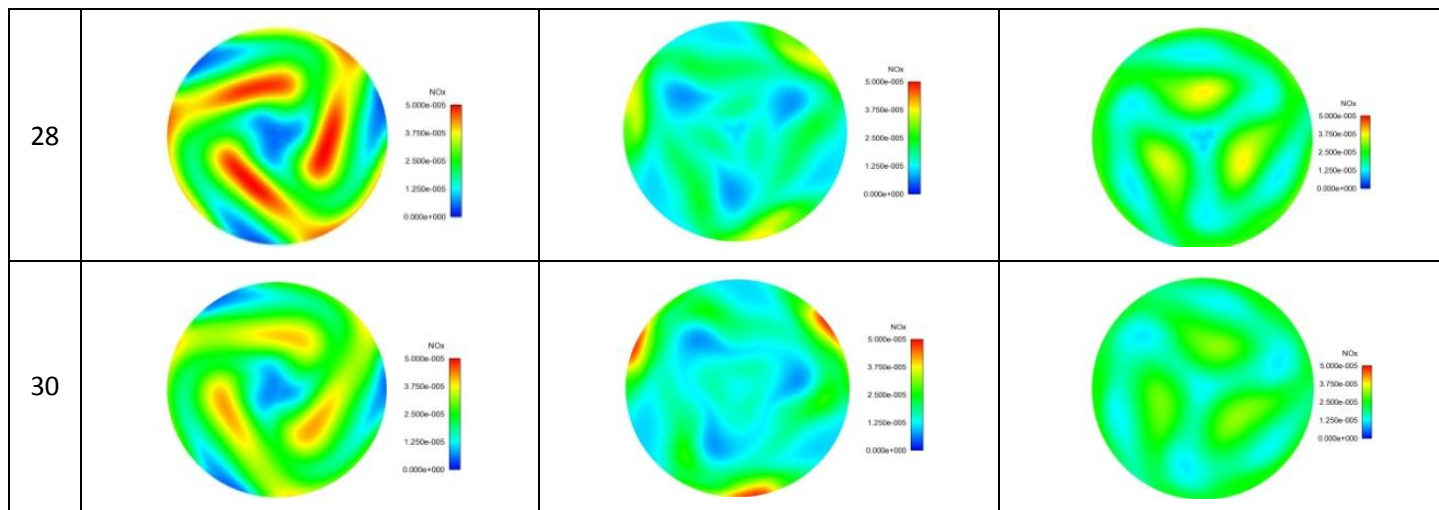
Εικόνα 20: Ισοψείς καμπύλες της θερμοκρασίας στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 2 και 4, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.



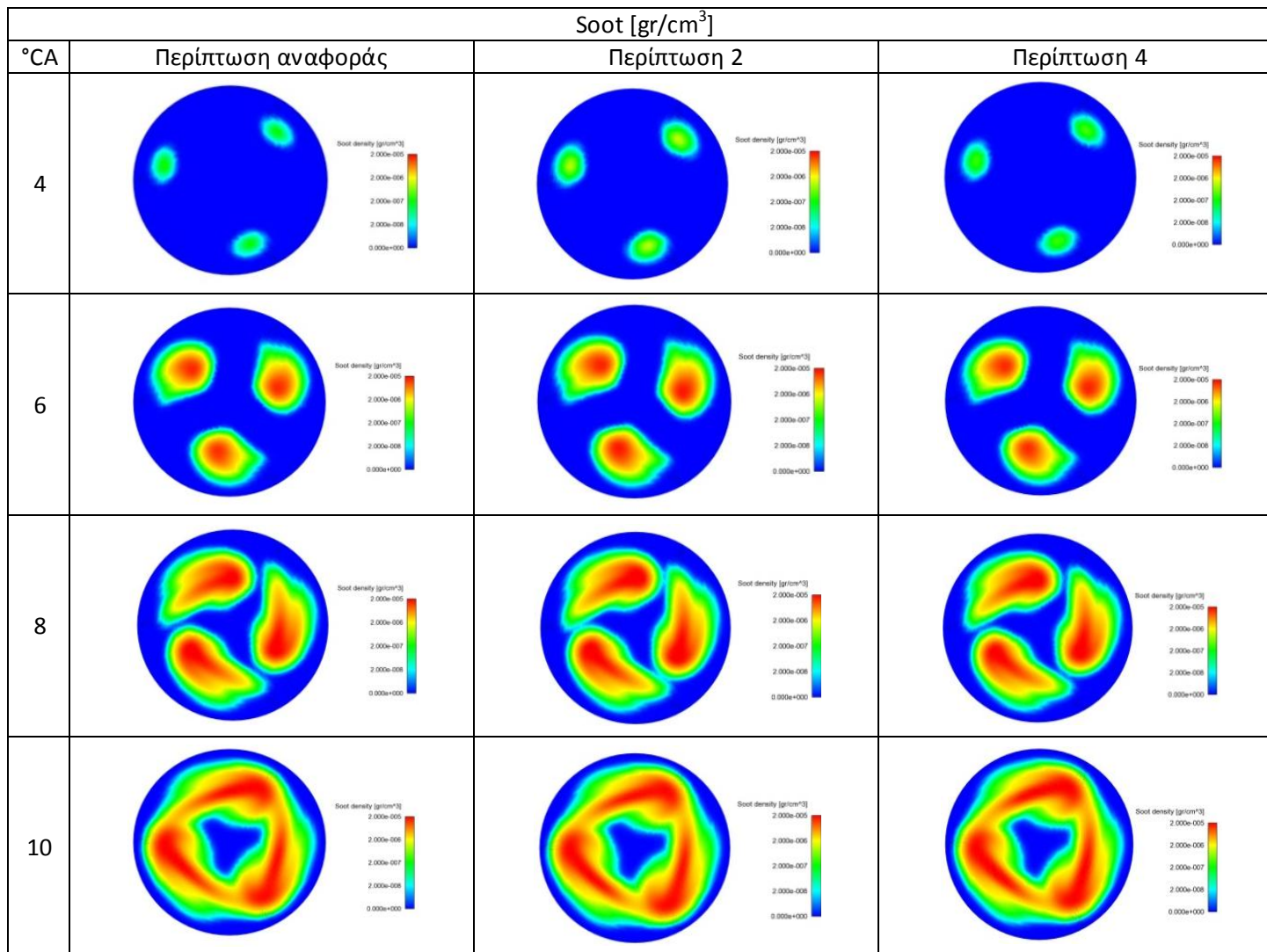


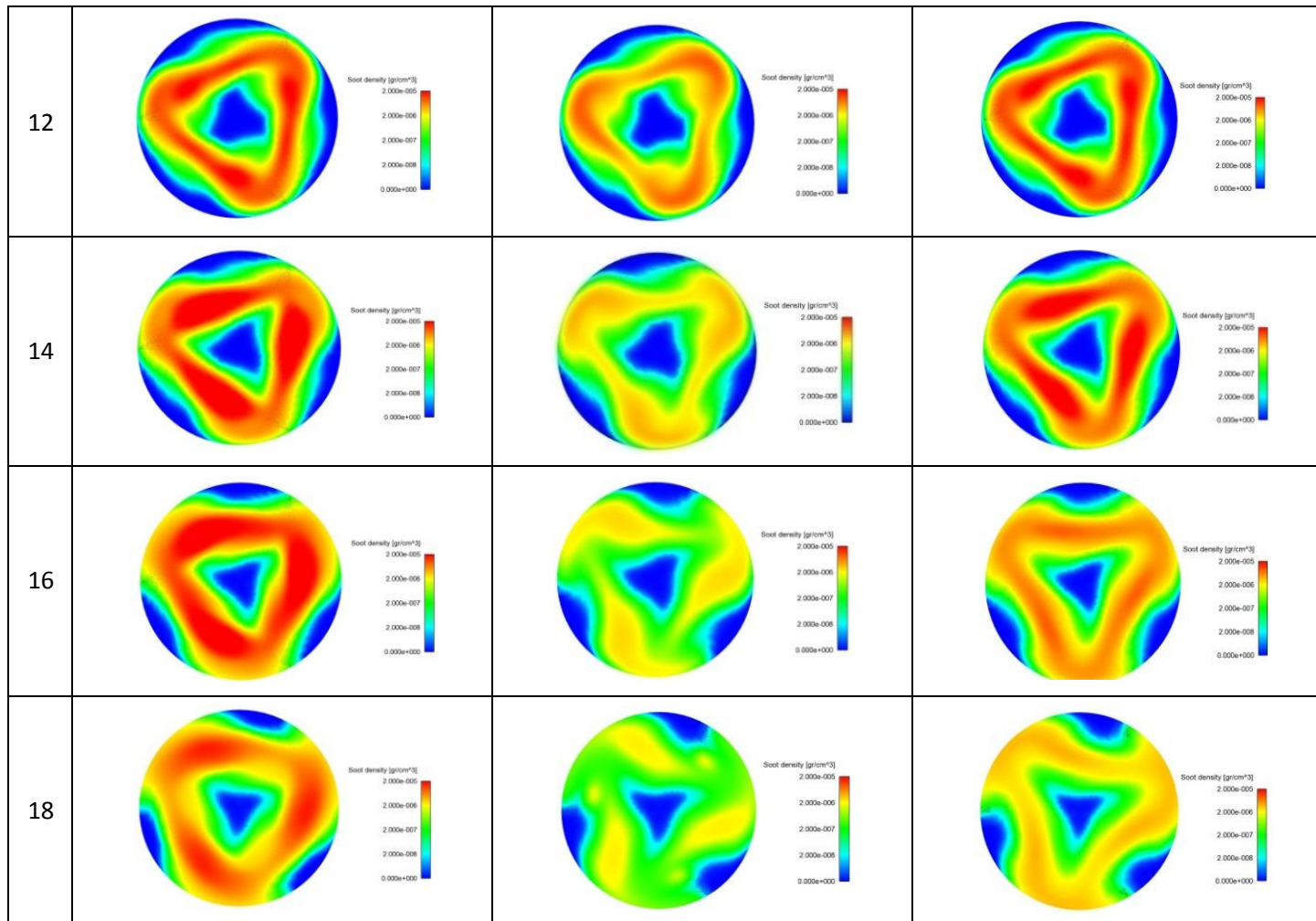


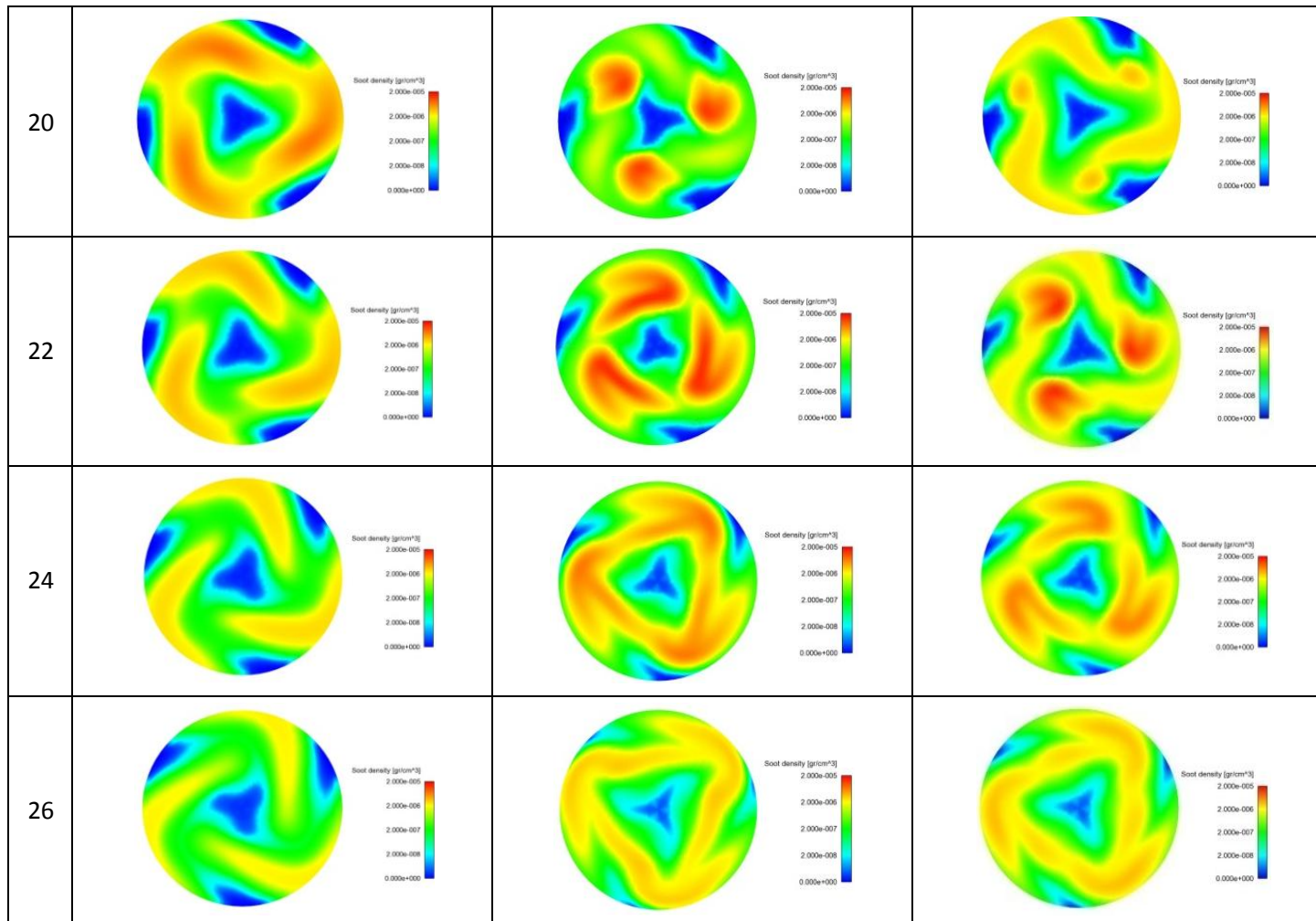


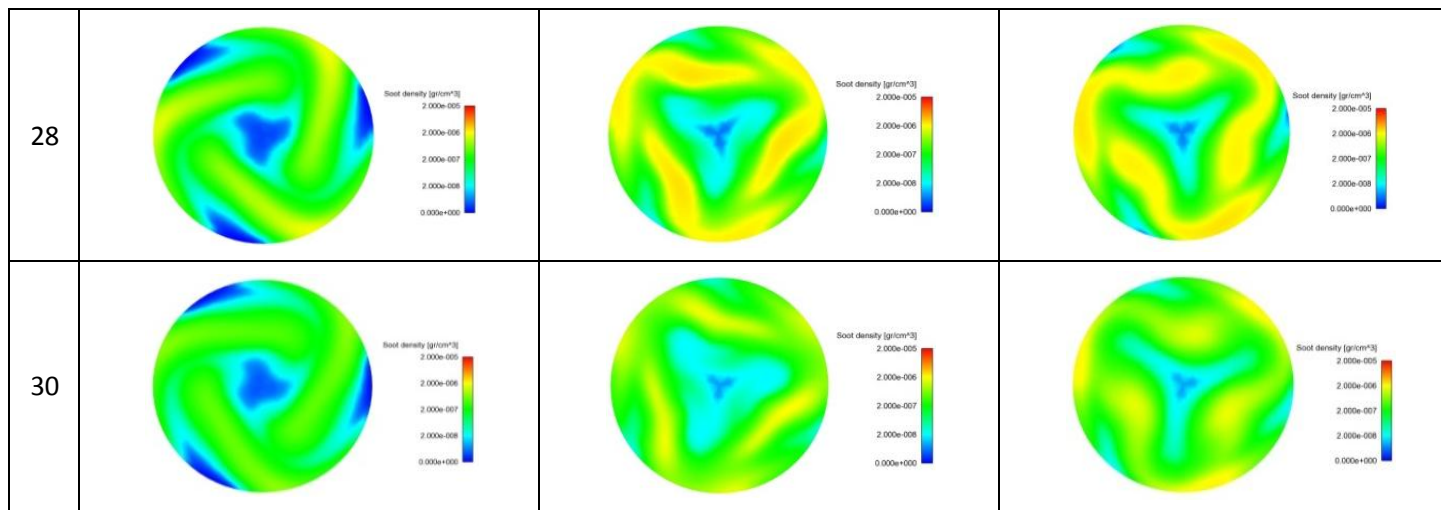


Εικόνα 21: Ισοψείς καμπύλες της συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 2 και 4, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.









Εικόνα 22: Ισοϋψείς καμπύλες της πυκνότητας σωματιδίων αιθάλης στο οριζόντιο επίπεδο των εγχυτήρων, για τις περιπτώσεις 2 και 4, καθώς και για την περίπτωση αναφοράς.



## **6. Συμπεράσματα – Προτάσεις**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και βελτιστοποιήθηκε προφίλ έγχυσης παρουσίας μετέγχυσης (δύο παλμοί) ενός δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel, σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Η παρούσα μελέτη αφορά στην προσομοίωση του κινητήρα RT-flex58T της εταιρείας Wärtsilä Switzerland, με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Βασικό βήμα στην παρούσα εργασία ήταν ο σχεδιασμός του προφίλ έγχυσης με μετέγχυση, ο οποίος περιελάμβανε τις εξής δύο βασικές παραμέτρους: (α) το ποσοστό καυσίμου που εγχύεται κατά τη μετέγχυση επί του συνολικά εγχυόμενου, και (β) τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην έναρξη της μετέγχυσης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτενής παραμετρική ανάλυση για την επίδραση των παραμέτρων σχεδίασης του προφίλ έγχυσης στις εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης, καθώς και στην ειδική κατανάλωση του κινητήρα. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά μιας περίπτωσης αναφοράς, η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχές προφίλ έγχυσης (έναν παλμό). Η παραμετρική ανάλυση κατέληξε σε δύο σημαντικά συμπεράσματα, με δεδομένο ότι η κύρια έγχυση συμβαίνει κοντά στο ANΣ (+2° CA). Πρώτον, όταν η μετέγχυση (δεύτερος παλμός) λαμβάνει χώρα αρκετά μακριά από το πέρας της κύριας έγχυσης (πρώτος παλμός), τότε επιβεβαιώνεται η αντίρροπη τάση μεταξύ των εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης (μείωση NOx και αύξηση αιθάλης), με σημαντικές απώλειες σε ωφέλιμο έργο. Δεύτερον, όταν μάζα του καυσίμου της μετέγχυσης, σε ποσοστό έως 25% της συνολικά εγχυόμενης, εγχύεται πλησίον του πέρατος της κύριας έγχυσης (με μεσοδιάστημα μικρότερο από 5° CA), τότε είναι εφικτή η ταυτόχρονη μείωση NOx (κατά μέγιστο 25%) και σωματιδίων αιθάλης (κατά μέγιστο 30%), χωρίς σημαντικές απώλειες σε ωφέλιμο έργο. Έτσι, τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης αποτελούν κίνητρο για τη βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης, με στόχο την ταυτόχρονη μείωση των ρύπων και τη διατήρηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, επιλύθηκαν συνολικά τέσσερα προβλήματα βελτιστοποίησης, των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την περίπτωση αναφοράς. Για την επίλυση πραγματοποιήθηκε σύζευξη του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με κατάλληλο λογισμικό βελτιστοποίησης, βασισμένο σε εξελικτικούς αλγόριθμους. Τα προς επίλυση προβλήματα βελτιστοποίησης ήταν πολλαπλών στόχων (Multi Objective Optimisation – MOO), με τις βέλτιστες λύσεις να προκύπτουν από μέτωπα Pareto. Οι τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ακόλουθες: (Α) η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), (Β) η τελική συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου (NOx), και (Γ) η τελική συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης (soot). Η βελτιστοποίηση αφορούσε ουσιαστικά στον προσδιορισμό των μεταβλητών σχεδίασης (ελεύθερες μεταβλητές) του προφίλ έγχυσης με μετέγχυση, οι οποίες ήταν οι εξής: (i) η έναρξη κύριας έγχυσης (Start Of Main Injection - SOMI), (ii) το μεσοδιάστημα μεταξύ του πέρατος της κύριας έγχυσης και της έναρξης της μετέγχυσης (GAP), (iii) το ποσοστό της μάζας καυσίμου που αντιστοιχεί στη μετέγχυση (Post Mass Fraction - PoMF), και (iv) η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της εγχυόμενης μάζας καυσίμου της περίπτωσης αναφοράς και αυτής στην περίπτωση με μετέγχυση (Mass Reduction - MR). Σε δύο από αυτά τα προβλήματα δεν τέθηκαν περιορισμοί, ενώ στα άλλα δύο τέθηκαν, προκειμένου το παραγόμενο έργο να διατηρείται

στο επίπεδο της περίπτωσης αναφοράς, και η μέγιστη πίεση να μην ξεπερνά ένα ανώτατο όριο, για λόγους αντοχής. Επίσης, τόσο στα δύο προβλήματα χωρίς περιορισμούς όσο και σε αυτά με περιορισμούς, η διάκριση των προβλημάτων έγκειται στο γεγονός ότι η έναρξη της κύριας έγχυσης διατηρήθηκε σταθερή στο ένα πρόβλημα, και μεταβλητή στο άλλο.

Εξαιτίας της ύπαρξης τριών αντικειμενικών συναρτήσεων, τα μέτωπα Pareto παρουσιάζονται σε δύο επίπεδα, στον χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Τα μέτωπα Pareto για τα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς περιλαμβάνουν μεγαλύτερο πλήθος λύσεων, καθώς και καλύτερες λύσεις συγκριτικά με τα προβλήματα με περιορισμούς. Συγκεκριμένα, οι μειώσεις στις εκπομπές NOx, αλλά και σε αυτές των σωματιδίων αιθάλης είναι της τάξης του 40%, οι οποίες επιτυγχάνονται για ποσοστό καυσίμου στη μετέγχυση μεγαλύτερο του 25%, και για μεσοδιάστημα μεταξύ των παλμών μεγαλύτερο των 5 μοιρών. Ωστόσο, στα προβλήματα χωρίς περιορισμούς οι λύσεις χαρακτηρίζονται από μειωμένο ωφέλιμο έργο ( κατά περίπου 8%), σε αντιστοιχία με τη συνολικά μικρότερη εγχυόμενη μάζα (κατά περίπου 10%), σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Από την άλλη πλευρά, για τα προβλήματα με περιορισμό στο ωφέλιμο έργο και τη μέγιστη πίεση, εξάγονται ασφαλή και σημαντικά συμπεράσματα και για τους τρεις στόχους της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, υπάρχουν λύσεις (προφίλ έγχυσης), στις οποίες επιτυγχάνεται ταυτόχρονη μείωση στην τελική συγκέντρωση NOx (κατά 22%) και στις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης (κατά 30%), σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Τα συγκεκριμένα προφίλ έγχυσης χαρακτηρίζονται από ποσοστό καυσίμου της μετέγχυσης 22%, και μεσοδιάστημα μεταξύ των παλμών περί τις 3.6 μοίρες γωνίας στροφάλου. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται από τα αντίστοιχα της παραμετρικής ανάλυσης. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εκτενής ανάλυση της θερμορευστομηχανικής των βέλτιστων λύσεων, για την καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Εδώ, έγινε χρήση οπτικοποίησης των υπολογισθέντων ροϊκών πεδίων, καθώς και χαρτών T - φ. Διαπιστώθηκε ότι η μείωση του σχηματισμού NOx οφείλεται στο γεγονός ότι η καύση του καυσίμου της μετέγχυσης αντιστοιχεί σε χαμηλά τοπικά επίπεδα θερμοκρασίας. Ο ρυθμός οξειδωσης των σωματιδίων αιθάλης διατηρείται υψηλός, συμβάλλοντας στην επίτευξη χαμηλών τελικών συγκεντρώσεων για αυτά. Συνολικά, η χρήση βέλτιστων στρατηγικών έγχυσης με παρουσία κύριας έγχυσης και μετέγχυσης μπορεί να αποτελέσει ουσιαστικό μέτρο για τη μείωση των κύριων ρύπων από δίχρονους ναυτικούς κινητήρες Diesel.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα μπορούσαν να αποτελέσει εφιαλτήριο για περαιτέρω έρευνα. Ειδικότερα, θα ήταν σημαντικό να μελετηθεί η επίδραση στρατηγικών έγχυσης με τρεις ή και περισσότερους παλμούς, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η επίδρασή τους στις εκπομπές ρύπων και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα. Ακόμη, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η υιοθέτηση ενός περισσότερο λεπτομερούς μοντέλου παραγωγής και οξειδωσης των σωματιδίων αιθάλης. Τέλος, μια ουσιαστική συνεισφορά θα συνίστατο στη βελτιστοποίηση του προφίλ έγχυσης για βαρύ ναυτιλιακό καύσιμο (Heavy Fuel Oil – HFO) διαφόρων ποιοτήτων, και στον προσδιορισμός των επιπτώσεων από τη χρήση βαρέος καυσίμου στη θερμορευστομηχανική του κινητήρα.

## Βιβλιογραφία

1. **Ανδρεάδης, Ν.Π.** Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Έγχυσης σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2008.
2. **Κοντούλης, Π.** Υπολογιστική Μελέτη Εναλλακτικών Στρατηγικών Έγχυσης Σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2008.
3. **Turbo, MAN Diesel &.** *Marine engine IMO Tier II programme 3rd Edition*. Technical Report, 2011.
4. **Wärtsilä.** *Ship power product catalogue 2nd Edition*. Technical Report, 2011.
5. [http://www.marinediesels.info/Basics/the\\_2\\_stroke\\_engine\\_explanation.htm](http://www.marinediesels.info/Basics/the_2_stroke_engine_explanation.htm).
6. **Τζιφάκης, Α.Χ.** *Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως*. Ίδρυμα Ευγενίδη, 1999.
7. <http://www.maviproduct.ro/Articole-tehnice/Motor-Common-Rail--eID47.html>.
8. **Mazevski, W., Khair, M.** *Diesel Emissions and Their Control*. SAE International, 2006.
9. **Καϊκτοής, Λ.** *Καύση, Σημειώσεις του μαθήματος, Μέρος 2ο*. ΕΜΠ, 2010.
10. **Smith, O. I.** *Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emissions*. Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 7, pp 275-291, Pergamon Press Ltd., 1981.
11. **Wagner, Gg. H.** *Soot Formation in Combustion*. Symposium (International) on Combustion, Elsevier, 1979.
12. **Kennedy I. M., Kolbmann W., Chen J. Y.** *A model for soot formation in a laminar diffusion flame*. Combustion and Flame, Vol. 81, Issue 1, pp. 73-85, 1990.
13. **Haynes, B.S., Wagner, H. Gg.** *Soot formation*. Prog. Energy Combustion Sci. Vol.7, pp 229-273, Pergamon Press Ltd., 1981.
14. **Westlund, A.** *Measuring and predicting transient diesel engine emissions*. KTH CICERO, 2009.
15. **Ma, J.** *Soot formation during coal pyrolysis*. Dissertation, Brigham Young University, 1996.
16. **Megaridis, C. M. and Dobbins, R. A.** *Comparison of soot Growth and Oxidation in Smoking and Non-Smoking Ethylene Diffusion Flames*. Combustion Science and Technology, Vol. 66, Issue 1, 1989.
17. **Saito, K., Gordon, A. S., Williams, F. A. and Stickle, W. F.** *A Study of the Early History of Soot Formation in Various Hydrocarbon Diffusion Flames*. Combustion Science and Technology 01, 80, pp 103-119, 1991.
18. **Haynes, B. S.** *Soot and Hydrocarbons in Combustion*. Fossil Fuel Combustion-A Source Book, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
19. **Kleiveland, R. N.** *Modelling of Soot Formation and Oxidation in Turbulent Diffusion Flames*. Sintef Energy Research, 2005.
20. **Glassman, I.** *Soot Formation in Combustion Processes*. Symposium (International) on Combustion 01, DOI:10.1016/S0082-0784(89)80036-0, 1989.
21. **Frenklach, M., Clary, D. W., Gardiner, W. C. and Stein, S. E.** *Detailed Kinetic Modeling of Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene*. Symposium (International) on Combustion, Vol. 20, Issue 1, pp. 887-901, 1985.
22. **Frenklach, M., Clary, D. W., Gardiner, W. C., Stein, S. E.** *Effect of Fuel Structure on Pathways to Soot*. Symposium (International) on Combustion, Vol. 21, Issue 1, pp. 1067-1076, 1988.

23. **Qingan, Z.** *Detailed modeling of soot formation/oxidation in laminar coflow diffusion flames.* Dissertation, University of Toronto, 2009.
24. **Slowik, J. G., Stainken, K., Davidovits, P., Williams, L. R., Jayne, J. T., Kolb, C. E., Worsnop, D.R., Rudich, Y., DeCarlo, P.F. and Jimenez, J.L.** *Particle Morphology and Density Characterization by Combined Mobility and Aerodynamic Diameter Measurements. Part 2: Application to Combustion-Generated Soot Aerosols as a Function of Fuel Equivalence Ratio.* *Aerosol Science and Technology*, 38:1206-1222, 2004.
25. **Frenklach, M., Wang, H.** *Detailed Modeling of Soot Particle Nucleation and Growth.* Symposium (International) on Combustion, Vol. 23, Issue 1, pp. 1559-1566, 1991.
26. **Kirchen, P.** *Steady-State and Transient Diesel Soot Emissions: Development of a Mean Value Soot Model and Exhaust-Stream and In-Cylinder Measurements.* ETH, 1978.
27. **IMO.** *MARPOL 73/78 Annex VI: Prevention of Air Pollution from Ships.* 2004.
28. **IMO.** *Report To The Maritime Safety Committee And The Marine Environment Protection Committee. Sub-Committee On Bulk Liquids And Gases, 12th session,* 2008.
29. <http://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php#nox>.
30. <http://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php#s>.
31. **Παπαλάμπρου, Γ.** *Ειδικά συστήματα ελέγχου πλοίου.* ΕΜΠ, 2012.
32. **US-EPA.** *Diesel Oxidation Catalyst General Information.* Technical Bulletin, 2010.
33. **Pananakis, E., Kontoulis, P., Chryssakis, C., Kaiktsis L.** *Investigation of Fuel Injection Strategies for Partially Premixed Compression Ignition Combustion in Two-Stroke Marine Diesel Engines.* NTUA, 2013.
34. **Lack, D.A., Elliot, R.** *Investigation of appropriate control measures (abatement technologies) to reduce Black Carbon emissions from international shipping.* University Boulder, 2012.
35. **Poorghasemi, K., Ommi, F., Yaghmaei, H. and Namaki, A.** *An investigation on effect of high pressure post injection on soot and NO emissions in a DI diesel engine.* *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (1), pp 269-281, 2012.
36. **Jeftic, M., Yu, S., Han, X., Reader, G.T., Wang, M. and Zheng, M.** *Effects of Postinjection Application with Late Partially Premixed Combustion on Power Production and Diesel Exhaust Gas Conditioning.* *Journal of Combustion*, Vol. 2011, 2011.
37. **Meloni, R., Naso, V.** *An Insight into the Effect of Advanced Injection Strategies on Pollutant Emissions of a Heavy-Duty Diesel Engine.* Energies, University of Rome, 2013.
38. **Han, Z., Uludogan, A., Hampson, G.J. and Reitz, R.D.** *Mechanism of Soot and NOx Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine.* Engine Research Center, University of Wisconsin-Madison, 1996.
39. **Mohan, B., Yang, W., Chou, S.K.** *Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines - A review.* Elsevier, 2013.
40. **Amsden, A.A.** *KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries.* Los Alamos National Laboratory LA-12503-MS, 1993.
41. **Weisser, G., Tanner, F.X.** *Simulation of Liquid Jet Atomization for Fuel Sprays by Means of a Cascade Drop Breakup Model.* SAE Technical Paper Series 980808, 1998.
42. **Tanner, F.X.** *Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays.* SAE International 970050, 1997.
43. **Weisser, G., Tanner, F., Boulouchos, K.** *Modeling of Ignition and Early Flame Development with Respect to Large Diesel Engine Simulation.* SAE Technical 981451, 1998.

44. **Weisser, G.** *Modelling of Combustion and Nitric Oxide Formation for Medium-Speed DI Diesel Engines: a Comparative Evaluation of Zero- and Three-Dimensional Approaches.* Dissertation, ETH, 2001.
45. **Hiroyasu, H., Kadota, T., Arai, M.** *Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions", Part 1: Combustion Modeling.* JSME 26, pp. 569-575, 1983.
46. **Δουλαδέρης, Κ.** *Υπολογιστική μελέτη σχηματισμού σωματιδίων αιθάλης.* ΕΜΠ, 2010.
47. **Stiesch, G.** *Modeling Engine Spray and Combustion Processes.* Springer, 2003.
48. **Thevenin, D., Janiga, G.** *Optimization and Computational Fluid Dynamics.* Springer Verlag, 2008.
49. **Παπανάκης, Ε.Ι.** *Διερεύνηση Στρατηγικών Έγχυσης Καυσίμου για Καύση Μερικώς Ομογενοποιημένου Μίγματος σε Δίχρονους Ναυτικούς Κινητήρες Diesel.* ΕΜΠ, 2011.
50. <http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/EASY/>.
51. **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, Issues 33-40, pp. 2963-2975, 2008.
52. **Ζομπανάκης, Γ.Α.Μ.** *Μελέτη και Βελτιστοποίηση Φαινομένων Καύσης σε Δίχρονο Ναυτικό Κινητήρα Diesel.* ΕΜΠ, 2010.
53. **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, pp. 223-247, 2002. Τόμ. 3.
54. **Bergman, M., Golovitchev, V.I.** *Application of Transient Temperature vs. Equivalence Ratio Emission Maps to Engine Simulations.* SAE Technical 2007-01-1086, 2007.
55. **Ρακόπουλος, Κ.** *Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.* Εκδόσεις Φούντας, 2004.