

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΑΔΑΜ

Διαστασιολόγηση Θαλάμου Καύσης
για Προκαταρκτικό Σχεδιασμό
Αεριοστροβίλων

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Τομέας: Ρευστών

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Μαθιουδάκης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ονοματεπώνυμο Δημήτριος Αδάμ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την δημιουργία γρήγορων και αξιόπιστων αλγορίθμων προκαταρκτικής διαστασιολόγησης θαλάμων καύσεως. Συγχρόνως, θα αξιοποιηθεί και πρόγραμμα μοντελοποίησης της καύσης για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών που προέκυψαν από την προκαταρκτική διαστασιολόγηση.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ο θάλαμος καύσης και στην συνέχεια μέσω αλγορίθμων και σχέσεων από την βιβλιογραφία διαστασιολογούνται αυτά τα στοιχεία. Παράλληλα, για το κάθε στοιχείο παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι διαστασιολόγησης του. Στην συνέχεια αφού έχει καθιερωθεί η διαδικασία της διαστασιολόγησης, πραγματοποιούνται και αριθμητικές εφαρμογές σε θαλάμους καύσεως αεροπορικών κινητήρων γνωστών διαστάσεων, ώστε να ερευνηθεί η ακρίβεια των αλγορίθμων. Επιπλέον λόγω της πληθώρας των μεταβλητών που επιλέγονται μέσω εμπειρικών στοιχείων πραγματοποιείται και μελέτη ευαισθησίας, προκειμένου να υπολογιστεί η επίρεια που έχουν στα αποτελέσματα.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται από την βιβλιογραφία ένας αλγόριθμος προκαταρκτικής διαστασιολόγησης που αποσκοπεί στην μείωση των εκπομπών ρύπων ενός υπάρχοντος θαλάμου καύσεως. Ο αλγόριθμος δέχεται ορισμένες διαστάσεις και γεωμετρίες και επανυπολογίζει μερικές από αυτές ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι για τις εκπομπές ρύπων. Επίσης θα υλοποιηθεί αυτός ο αλγόριθμος χαμηλών ρύπων σε θάλαμο καύσης ώστε υπολογιστούν οι ανανεωμένες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης της καύσης. Αφού καθιερωθούν οι βασικές ιδιότητες αυτού του προγράμματος ακολουθεί η χρήση του στα αποτελέσματα της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης, ώστε να πραγματοποιηθεί μια μελέτη λειτουργίας του θαλάμου καύσης. Επιπλέον πραγματοποιείται και μελέτη της εξάρτησης των επιδόσεων του θαλάμου καύσης (εκπομπές ρύπων και βαθμός απόδοσης) ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Τέλος πραγματοποιείται και μελέτη ως προς τα αποτελέσματα του αλγόριθμου χαμηλών ρύπων, μέσω της χρήσης αυτού του προγράμματος.

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is to create fast and reliable algorithms for the preliminary design of aero engine combustors. Simultaneously, software for modeling the combustion is utilized, in order to receive valuable information about the results of the preliminary design.

Initially, the different components of the combustor are presented and in continuation via different algorithms and semi-empirical equations that have been drawn from bibliography, the components are dimensionalized. In parallel, for each component, different methodologies for calculating its dimensions are presented. After the methodology of preliminary design has been established, the different algorithms are used for calculating the dimensions of known combustors, so the effectiveness of the preliminary design can be tested. Also, because the preliminary design depends on a lot of variables, for which all the information is empirical, a sensitivity study is carried out, so it can be tested how much each of them variables influence the results.

In the next chapter, from the bibliography an algorithm of preliminary design is presented, which aims in the reduction of the emissions, for an existing combustor. This algorithm receives dimensions and geometries, and it recalculates some of them, in order to achieve its emissions goals.

In the last chapter, the appropriate software for the modeling of the combustion is presented. After the basis of the software has been established, this software is utilized in order to examine the results of the preliminary design. Also, a study about the influence of design variables on the performance of the combustor is conducted. In the end an examination of the results of the algorithm that aims at reduced emissions is conducted.

Κατάλογος συμβόλων (Κεφάλαιο 2)

A	Εμβαδό επιφάνειας
AR	Λόγος επιφανειών διαχύτη
AR_{sweet}	Όριο βέλτιστου αριθμού λόγου επιφανειών του διαχύτη
C_d	Συντελεστής παροχής (απλές οπές ή plunged οπές)
C_p	Λόγος ανάκτησης πίεσης
C_{pideal}	Λόγος ιδανικής ανάκτησης πίεσης
f_{st}	Στοιχειομετρικός λόγος καυσίμου
H	Ύψος
L	Μήκος
\dot{m}	Παροχή μάζας
M	Αριθμός Mach
N_h	Αριθμός οπών
P	Στατική πίεση
P_t	Ολική πίεση
q	Δυναμική πίεση
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων
r	Ακτίνα
r	Ακτίνα
S'	Αδιάστατος αριθμός στροβιλισμού
T	Στατική θερμοκρασία
T_t	Θερμοκρασία
U	Ταχύτητα αέρα
Y	Βάθος διείσδυσης της δέσμης αέρος
Y_{max}	Μέγιστο βάθος διείσδυσης της δέσμης αέρος
α_{sw}	Γωνία στα ακροφύσια στροβιλισμού
α_{opt}	Βέλτιστος λόγος εμβαδών θαλάμου κάυσης
γ	Λόγος θερμοχωρητικότητας
ΔP	Πτώση ολικής πίεσης στον θάλαμο καύσης (δίχως τις θεμελιώδεις απώλειες)
ΔT_{max}	Μέγιστη μεταβολή θερμοκρασίας στον θάλαμο καυσίμου
ε_{PZ}	Ποσοστό καυσίμου που κήκε στην πρωτεύουσα ζώνη
η	Βαθμός
θ	Γωνία
μ	Ποσοστό μάζας αέρα
ρ	Πυκνότητα
τ_{PZ}	Παράμετρος καύσης πρωτεύουσας ζώνης
φ	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου με στοιχειομετρικό

Δείκτες (Κεφάλαιο 2)

<i>an</i>	Δακτύλιος
<i>at</i>	Διασκορπιστής
<i>diff</i>	Διαχύτης
<i>dz</i>	Ζώνη αραίωσης
<i>dome</i>	Θόλος
<i>L</i>	Μανδύας
<i>pz</i>	Πρωτεύουσα ζώνη
<i>ref</i>	Αναφορά στην κάθετη τομή
<i>sz</i>	Δευτερεύουσα ζώνη
<i>sw</i>	Συστροφέας

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	9
1.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	11
1.2	Δομή της εργασίας	12
2.	Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση	14
2.1	Θάλαμοι Καύσεως	14
2.2	Διαχύτης	16
2.3	Διαχωρισμός ροών	25
2.4	Εμβαδόν αναφοράς και μανδύα	28
2.5	Ρύγχος.....	34
2.6	Συστροφείς	34
2.7	Ζώνη ανακυκλοφορίας, αναφλεκτήρας & θόλος.....	37
2.8	Εσωτερικές περιοχές μανδύα	39
2.9	Εκτίμηση Βάρους.....	45
2.10	Συζήτηση επί της μεθοδολογίας διαστασιολόγησης	47
2.11	Αριθμητική εφαρμογή.....	48
2.11.1	Κινητήρας J79	49
2.11.2	Κινητήρας CFM56	55
2.11.3	Κινητήρες F100, JT9D & TF41	57
2.12	Μελέτη ευαισθησίας.....	59
2.13	Συμπεράσματα	67
3.	Σχεδιασμός Θαλάμων Καύσεως Χαμηλών Ρύπων	68
3.1	Αλγόριθμος σχεδιασμού	69
3.1.1	Δευτερεύουσα ζώνη.....	70
3.1.2	Πρωτεύουσα ζώνη.....	72
3.1.3	Διασκορπιστής.....	74
3.2	Αριθμητική Εφαρμογή.....	82
3.3	Αποτελέσματα για δεδομένα του κινητήρα CFM-56.....	83
3.4	Μελέτη ευαισθησίας του αλγόριθμου	86
3.5	Συμπεράσματα αλγόριθμου χαμηλών ρύπων	87
4.	Μοντελοποίηση της Καύσης	88
4.1	Λογισμικό Cantera.....	88
4.2	Μοντελοποίηση καύσης μέσω Cantera	88
4.3	Αποτελέσματα μοντελοποίησης καύσης	95
4.4	Σύγκριση Cantera με Αλγόριθμο χαμηλών ρύπων.....	112
4.5	Συμπεράσματα θερμοχημικής μοντελοποίησης.....	113

5. Σύνοψη-Συμπεράσματα	115
6. Βιβλιογραφία.....	117
7. Παράρτημα Α. Αξονικές τομές αεροπορικών κινητήρων	120
8. Παράρτημα Β. Προγραμματιστικός κώδικας	122
8.1 Κώδικας Matlab.....	122
8.1.1 Κώδικας 2 ^{ου} Κεφαλαίου.....	122
8.1.2 Κώδικας 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	128
8.2 Αλληλεπίδραση με Cantera.....	129
9. Παράρτημα Γ. Αρχεία εισόδου και εξόδου για τις περιπτώσεις εφαρμογής που παρουσιάστηκαν στην εργασία	132
9.1 Αρχεία για J79 (2.11.1)	132
9.1.1 Αρχεία εισόδου	132
9.1.2 Αρχεία εξόδου	133
9.2 Αρχεία για τον κινητήρα CFM56 (2.11.2).....	135
9.2.1 Αρχεία εισόδου για την μέθοδο του Lefebvre κατά την απογείωση.....	135
9.2.2 Αρχεία εξόδου για την μέθοδο του Lefebvre κατά την απογείωση	136
9.2.3 Αρχεία εισόδου για την μέθοδο του Fletcher κατά την απογείωση	137
9.2.2 Αρχεία εξόδου για την μέθοδο του Fletcher κατά την απογείωση	139
9.2.3 Αρχεία εισόδου για την μέθοδο του Fletcher κατά την πλεύση.....	140
9.2.3 Αρχεία εξόδου για την μέθοδο του Fletcher κατά την πλεύση	142

1. Εισαγωγή

Την σημερινή εποχή ένα και ίσως το πιο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα είναι η κλιματική αλλαγή. Ωστόσο τα επίπεδα του (CO_2) στην ατμόσφαιρα δεν ελαττώνονται με το πέρασμα του χρόνου, αλλά αυξάνονται εκθετικά [17]. Οι επιπτώσεις αυτής της αύξησης είναι ήδη εμφανείς, κυρίως μέσω της αύξησης της συχνότητας εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων (Τυφώνες κτλ.). Αυτό έχει σαν αποτελέσματα παγκόσμιοι οργανισμοί και κράτη να θέτουν όλο και πιο αυστηρές νομοθεσίες για τις εκπομπές καυσαερίων. Η αεροπορική βιομηχανία είναι υπεύθυνη για το 2.5% των ρύπων (CO_2) και εάν συμπεριληφθούν και άλλοι ρυπαντές, το ποσοστό των καυσαερίων αγγίζει το 3.5%, μικρό αλλά ζημιογόνο ποσοστό. Σαν αποτέλεσμα υπάρχει επιτακτική ανάγκη για καινοτόμους σχεδιασμούς θαλάμων καύσεως, οι οποίοι όχι μόνο θα έχουν αυξημένη απόδοση αλλά και μείωση των εκπομπών ρύπων.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα προτείνονται διάφορες λύσεις. Πρώτον υπάρχει η δυνατότητα καύσης εναλλακτικών καυσίμων (Βιομάζα, Υδρογόνο). Αεροπλάνα τα οποία οι κινητήρες τους καίνε υδρογόνο παράγουν μηδενικές ρύπους CO_2 και κατά 90% λιγότερους ρύπους NO_x και η Airbus αναφέρει ότι το 2035 θα παρουσιάσει τέτοιο αεροσκάφος. Επιπλέον η πρόσμιξη 50-50 κηροζίνης με βιομάζα προκαλεί μείωση των ρύπων κατά 50% με 70 %, σύμφωνα με έρευνα της NASA [25].

Ο σχεδιασμός ενός θαλάμου καύσεως είναι πολυσύνθετη και επίπονη διαδικασία. Ο πρώτος λόγος είναι διότι ο σχεδιασμός είναι απαραίτητο να εξασφαλίζει αρκετά κριτήρια, όπως ευστάθεια φλόγας, μέγιστη απόδοση, χαμηλές εκπομπές ρύπων κ.α. ακόμη και στις πιο αντίξοες συνθήκες. Αυτά τα κριτήρια τις περισσότερες φορές είναι αντικρουόμενα. Οι απαιτήσεις σχεδιασμού και οι ασυμφωνίες τους παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.1**.

Πίνακας 1.1 Αντικρουόμενες απαιτήσεις σχεδιασμού θαλάμου καύσεως [5]

Απαιτήσεις Σχεδιασμού	Ασυμφωνίες
Μέγιστος βαθμός απόδοσης καύσης	NO_x
Ελάχιστες απώλειες πίεσης	NO_x , κάπνα, πάλμωση
Ποιότητα θερμοκρασιακού προφίλ	Θερμοκρασία τοιχωμάτων, μεταβολή πίεσης, μήκος και ύψος
Μεγάλος χρόνος ζωής	Προφίλ θερμοκρασίας, CO και UC
Χαμηλά NO_x	CO, HC, έναυση, ευστάθεια
Απλή κατασκευή, μικρό βάρος και κόστος	Εκπομπές καυσαερίων, θερμοκρασία τοιχωμάτων, προφίλ θερμοκρασίας

Ο δεύτερος σχετίζεται με την περιπλοκότητα των φαινομένων στον θάλαμο καύσης. Πιο συγκεκριμένα για τον ακριβή και λεπτομερή σχεδιασμό ενός θαλάμου καύσεως, απαιτούνται αναλύσεις τρισδιάστατης τυρβώδους ροής σε περίπλοκες γεωμετρίες, φαινομένων μεταφοράς μάζας και ενέργειας, πολυφασικές ροές, μηχανική υλικών, χημική κινητική κ.α. Όλα τα προηγούμενα μαζί δημιουργούν ένα πεπλεγμένο

σύστημα σχεδιασμού, που απαιτεί αρκετές επαναλήψεις και δοκιμές μέχρι το τελικό σχέδιο. Μετέπειτα, απαιτείται και η κατασκευή του θαλάμου καύσεως και δοκιμή τη σε διάταξη δοκιμών (Rig test). Επομένως, με βάση τα προαναφερόμενα είναι ευκρινές το πόσο δαπανηρός (κόστος και χρόνος) είναι ο σχεδιασμός ενός θαλάμου καύσεως.

Η προκαταρκτική διαστασιολόγηση περιλαμβάνει τα αρχικά στάδια ανάλυσης και ανάπτυξης των βασικών παραμέτρων σχεδιασμού και χαρακτηριστικών του θαλάμου καύσεως. Η προκαταρκτική διαστασιολόγηση λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις και τους στόχους που έχει ο σχεδιασμός ενός θαλάμου καύσεως. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, αξιοποιούνται ημιεμπειρικές σχέσεις και δεδομένα που προέκυψαν από πειράματα και ανάλυση θαλάμων καύσεως που πραγματοποιήθηκαν σε θαλάμους καύσεως τα τελευταία ογδόντα χρόνια. Μέσω αυτών των σχέσεων και των δεδομένων καθίσταται ο χρόνος σχεδιασμού πολύ συντομότερος σχετικά με τον αναλυτικό σχεδιασμό. Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός μπορεί να φαίνεται αρκετά πιο απλοϊκός από τον αναλυτικό αλλά επιφέρει αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα εκτός του κόστους, Πιο συγκεκριμένα:

1^{ον} είναι δυνατόν στον προκαταρκτικό σχεδιασμό να εισαχθούν απλοϊκές μοντελοποιήσεις καινοτόμων δομικών στοιχείων του θαλάμου καύσεως π.χ. καινούργιες τεχνολογίες διαχυτών (vortex, hybrid), διαφορετικές διατάξεις διακτυλιοειδών θαλάμων καύσεως (double annular). Με την εισαγωγή αυτών των μοντελοποιήσεων η προκαταρκτική διαστασιολόγηση είναι ικανή σε πολύ σύντομο χρόνο να δώσει αποτελέσματα σχετικά με την τάση βελτίωσης των τιμών στόχων που επιφέρουν αυτές οι μοντελοποιήσεις στον θάλαμο καύσης.

2^{ον} η χρήση γρήγορων και αξιόπιστων θερμοχημικών μοντέλων καύσης (Cantera και ChemKin), επιτρέπει την περαιτέρω ανάλυση ενός υπάρχοντα θαλάμου καύσεως. Αυτή η ανάλυση επιτρέπει την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης. Επιπλέον η προαναφερόμενη ανάλυση στον σχεδιασμένο θάλαμο καύσεως, καθιστά δυνατή την υψηλής αξιοπιστίας μοντελοποίηση των περίπλοκων χημικών αντιδράσεων στον σχεδιασμένο θάλαμο καύσης. Η οποία μοντελοποίηση θα προσφέρει σημαντικές πληροφορίες, όπως θερμοκρασίες σε κάθε ζώνη του θαλάμου καύσεως, εκπομπές καυσαερίων, βαθμοί αποδόσεως καύσεως κ.α. Αυτά τα δεδομένα είναι μείζονος σημασίας, διότι προσφέρουν μια αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του θαλάμου καύσεως. Επιπλέον μέσω μετατροπών της γεωμετρίας των δομικών στοιχείων του θαλάμου καύσεως (π.χ. αριθμό, θέση και διάμετρο των οπών που τοποθετούνται στον μανδύα), καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της επίρειας αυτών των μετατροπών ως προς τους βαθμούς αποδόσεων και τις εκπομπές ρύπων. Τούτο προσφέρει μια εικόνα ως προς ποιες μεταβλητές σχεδιασμού είναι αναγκαίο να αλλαχθούν ώστε να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του θαλάμου καύσεως. Εξίσου σημαντικό είναι ότι μέσω αυτών των προγραμμάτων μοντελοποίησης της καύσης προσφέρεται η δυνατότητα μοντελοποίησης καύσης νέων γενιών καυσίμων (βιομάζα, υδρογόνο κ.α.), όπου έχει

ήδη αναφερθεί η σημαντικότητα αυτής της μοντελοποίησης.

1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται διαφορετικές μεθοδολογίες προκαταρκτικής διαστασιολόγησης βασισμένες σε ημιεμπειρικούς τύπους και δεδομένα θαλάμων καύσεως. Πιο συγκεκριμένα ο Mattingly [2002] παρουσιάζει μια σχετικά απλοϊκή βασισμένη σε αλγεβρικές σχέσεις διαστασιολόγηση θαλάμων καύσεων, η οποία μπορεί να αποτελέσει την βάση για την κατανόηση της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης και συγχρόνως αποτελείται από λεπτομερή ανάλυση της διαστασιολόγησης των οπών του μανδύα.

Ο Lefebvre [2010] παρουσιάζει μια πιο λεπτομερή διαδικασία διαστασιολόγησης, η οποία βασίζεται σε ημιεμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν από επεξεργασία δεκάδων θαλάμων καύσης διαφορετικών διαμορφώσεων και απαιτήσεων.

Οι Mellor [1990], Mellor & K. J. Fritsky [1990] και Connors, Barnes & Mellor [1996] στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση επικεντρώνονται περισσότερο στα φαινόμενα της θερμοχημείας και χημικής κινητικής, προφέροντας ημιεμπειρικές σχέσεις για τις εκπομπές καυσαερίων και για τον σχεδιασμό του διασκορπιστή.

Ο Rezvani [2010] στο διδακτορικό του συνδυάζει τις μεθόδους των Lefebvre και Mattingly για την διαστασιολόγηση του θαλάμου καύσεως και χρησιμοποιεί αναλυτικά μοντέλα χημείας μέσω προγράμματος για την ακριβή και αναλυτική μοντελοποίηση του. Συγχρόνως πραγματοποιεί πιστοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω προκαταρκτικής διαστασιολόγησης του CFM και σύγκρισης των αποτελεσμάτων των εκπομπών ρύπων με τις μετρημένες εκπομπές ρύπων.

Ο Bhupendra [2012] στο διδακτορικό του μελετάει αρχικά την προκαταρκτική διαστασιολόγηση συμβατικών θαλάμων καύσεως αξιοποιώντας τις αλγεβρικές σχέσεις του Lefebvre και των Mohammad & Jeng [2008], και στην συνέχεια προτείνει μεθοδολογίες προκαταρκτικής διαστασιολόγησης καινοτόμων θαλάμων καύσεως (Reverse flow annular combustor, Radially staged dual annular combustor, Axially staged dual annular combustor και Radially staged triple annular combustor). Επιπλέον παρέχει σχεδιαστικές λεπτομέρειες και μεθοδολογίες σχεδιασμού καινοτόμων διαχυτών.

Τέλος, ο Stuttaford [1997] στο διδακτορικό του χρησιμοποιεί προσέγγιση δικτύων για να υπολογίσει την ροή στον θάλαμο καύσεως, ώστε να αντιμετωπίσει τον υψηλό υπολογιστικό χρόνο της προσομοίωσής της μέσω υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD).

Με βάση την χρονολογία αλλά και την πληθώρα των δημοσιεύσεων, των βιβλίων και

των διδακτορικών που αναφέρθηκαν είναι σαφές ότι η προκαταρκτική διαστασιολόγηση αποτελεί ένα μείζον θέμα στον τομέα του σχεδιασμού αεριοστροβίλων. Οπότε, έχοντας μελετήσει αυτήν την βιβλιογραφία αποφασίστηκε να αξιοποιηθούν τα δεδομένα και οι ημιεμπειρικές σχέσεις που αναφέρονται, προκειμένου να δημιουργηθεί αλγόριθμος προκαταρκτικής διαστασιολόγησης. Η δομή της εργασίας που υλοποιεί αυτή τη δουλειά είναι η παρακάτω.

1.2 Δομή της εργασίας

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

- Αρχικά θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία και η υλοποίηση της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης του θαλάμου καύσεως, αξιοποιώντας και παρουσιάζοντας όλους τους δυνατούς τρόπους διαστασιολόγησης, έχοντας ως βάση τους Mattingly [2002], Lefebvre [2010], Mellor [1990] και Sawyer [1985]. Οι διαφορετικοί τρόποι διαστασιολόγησης σχετίζονται με τον υπολογισμό του εμβαδού αναφοράς, το εμβαδό του μανδύα, τα μήκη των ζωνών του θαλάμου καύσης και τον σχεδιασμό του συστροφέα. Στα αποτελέσματα θα πραγματοποιηθούν υπολογισμοί για γνωστούς θαλάμους καύσεως (J79 και CFM56), προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων και να αποφανθεί το πόσο καλή είναι η προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε. Επιπλέον θα πραγματοποιηθεί και μελέτη ευαισθησίας, όπου θα εξεταστεί η επίδραση της επιλογής της τιμής ορισμένων μεταβλητών ως προς το υπολογισμένο μήκος του θαλάμου καύσεως καθώς και το υπολογισμένο μήκος της πρωτεύουσας ζώνης.
- Στην συνέχεια παρουσιάζεται η προκαταρκτική διαστασιολόγηση με σκοπό την μείωση των εκπομπών ρύπων. Η μεθοδολογία βασίζεται στους Mellor & K. J. Fritsky [1990] και Connors, Barnes και Mellor [1996]. Η μεθοδολογία με βάση τον υπάρχοντα προκαταρκτικό σχεδιασμό υπολογίζει μέσω ημιεμπειρικών σχέσεων τις καινούργιες τιμές που λαμβάνουν τα μήκη της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ζώνης καθώς και τον αριθμό και διάμετρο των οπών της δευτερεύουσας ζώνης και της ζώνης αραίωσης.
- Στο τελευταίο στάδιο της προσέγγισης που αναπτύσσεται θα χρησιμοποιηθεί πρόγραμμα μοντελοποίησης της καύσης, προκειμένου να υπολογιστούν αναλυτικά οι εκπομπές καυσαερίων, θερμοκρασίες στις ζώνες του θαλάμου καύσεως και ο βαθμός απόδοσης της καύσεως. Ο λόγος που θα πραγματοποιηθεί μια τέτοια ανάλυση είναι, ώστε να εξεταστεί εάν οι στόχοι που τέθηκαν στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση επιτεύχθηκαν. Εφόσον παρουσιαστεί η μεθοδολογία της μοντελοποίησης, παρουσιάζονται οι μεταβολές των εκπομπών ρύπων συναρτήσει των παραμέτρων λειτουργίας του θαλάμου καύσεως, να πραγματοποιηθεί δηλαδή ανάλυση λειτουργίας του. Συγχρόνως θα πραγματοποιηθεί και σύγκριση των αποτελεσμάτων του σχεδιασμού χαμηλών ρύπων με αυτά του Cantera, προκειμένου να

διαπιστωθεί η ακρίβεια του αλγορίθμου.

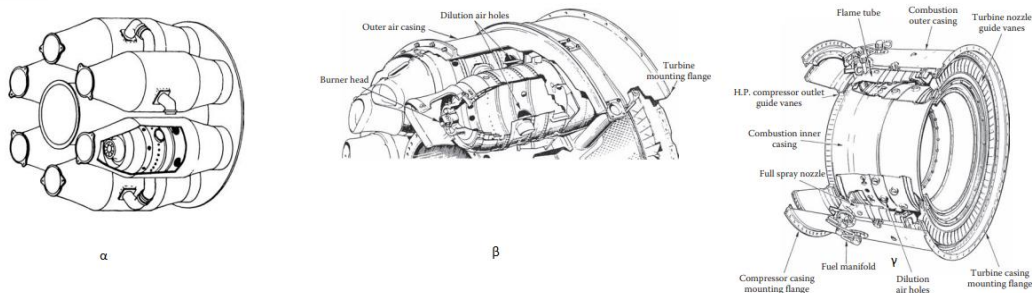
2. Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση

2.1 Θάλαμοι Καύσεως

Ο θάλαμος καύσης μαζί με τον συμπιεστή και τον στρόβιλο αποτελούν τα πιο βασικά στοιχεία ενός αεροπορικού κινητήρα. Ο θάλαμος καύσης τοποθετείται ανάμεσα στον συμπιεστή και στον στρόβιλο και η λειτουργία του είναι να προσδίδει θερμική ενέργεια στον αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή. Η ενέργεια προσδίδεται μέσω εξώθερμης χημικής αντίδρασης (καύση). Η καύση αυξάνει την ολική θερμοκρασία του αέρα και μετατρέπει τον αέρα σε καυσαέριο. Αυτή η αύξηση είναι απαραίτητη ώστε να εκτονωθεί ο αέρας στον στρόβιλο και μετέπειτα η θερμική ενέργεια που έχει παραμείνει να μετατραπεί σε κινητική ενέργεια στο ακροφύσιο, ώστε να <<δημιουργηθεί>> ώση για να προωθήσει το αεροσκάφος.

Οι θάλαμοι καύσης συναντώνται σε τρεις κύριες διατάξεις **Σχήμα 2.1:**

- i. *Σωληνοειδής (can type)* με θαλάμους διατεταγμένους περιφερειακά
- ii. *Σωληνο-δακτυλιοειδής (cannular ή tuboannular)* όπου οι έξοδοι οδηγούνται σε ενιαίο δακτυλιοειδή αγωγό.
- iii. *Δακτυλιοειδής (annular)*

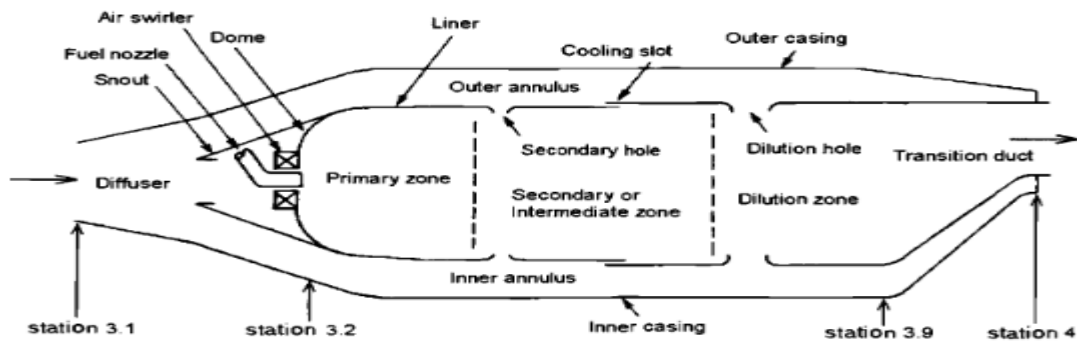


Σχήμα 2.1: Διαφορετικές διατάξεις θαλάμων καύσεως: (α) Σωληνοειδής, (β) Σωληνοδακτυλιοειδής, (γ) Δακτυλιοειδής

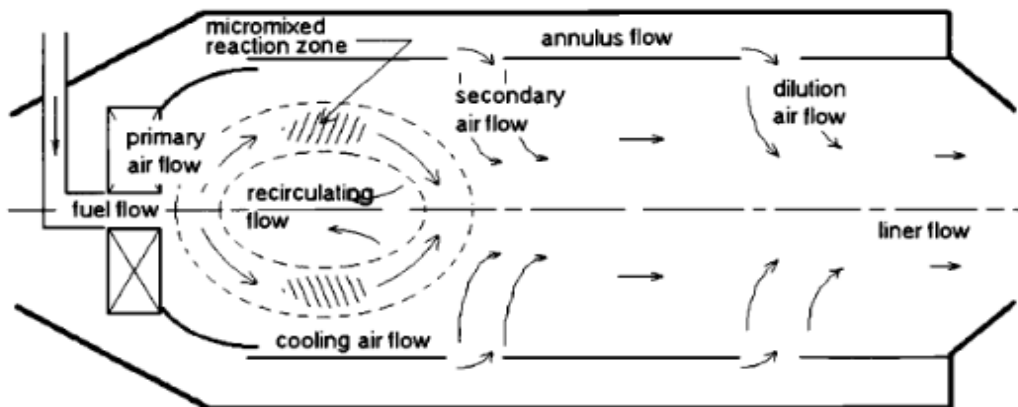
Η παρούσα εργασία σχετίζεται με τον σχεδιασμό δακτυλιοειδών θαλάμων καύσης,

επειδή η πλειοψηφία των ημιεμπερικών σχέσεων και δεδομένων είναι για δακτυλιοειδείς θαλάμους καύσεως. Παρόλα αυτά η μεθοδολογία σχεδιασμού είναι δυνατόν να εφαρμοστεί και για τους άλλους δύο τύπους θαλάμου καύσεως εφαρμόζοντας τις κατάλληλες μετατροπές στις εξισώσεις που θα παρουσιαστούν στο Κεφαλαίου 2.3.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προκαταρκτική διαστασιολόγηση είναι απαραίτητο να κατανοηθεί ποια είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που απαρτίζουν τον θάλαμο καύσης. Επιπλέον, πρέπει να οριστούν και οι διαδρομές των ροών της ροής. Αυτά τα δεδομένα δίνονται από το **Σχήμα 2.2** και το **Σχήμα 2.3** που ακολουθούν.



Σχήμα 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θαλάμου καύσης από [1]



Σχήμα 2.3: Διαδρομές των ροών στον θάλαμο καύσης

Με βάση το **Σχήμα 2.2** διακρίνονται τα εξής δομικά στοιχεία ενός θαλάμου καύσεως

- i. *Διαχύτης (Diffuser)*: Αποκλίνουντα τοιχώματα με στόχο την μείωση της ταχύτητας στην έξοδο του συμπιεστή. Απαραίτητο στοιχείο του είναι οι μικρές απώλειες ολικής πίεσης.
- ii. *Ρύγχος (Snout)*: Τοποθετείτε ανάμεσα στον διαχύτη και στην πρωτεύουσα ζώνη και χρησιμοποιείται για την διαμέριση του αέρα στα κομμάτια του μανδύα (liner flow) και του κελύφους (annulus flow).
- iii. *Θόλος (Dome)*: Βρίσκεται στο μπροστινό μέρος του θαλάμου καύσης, έχει σκοπό να διατηρεί την ευστάθεια της φλόγας, περιορίζοντας την ζώνης

- ανακυκλοφορίας στην πρωτεύουσα ζώνη.
- iv. *Μανδύες (Liners)*: Λεπτά μεταλλικά τοιχώματα που εκτείνονται μεταξύ του θόλου και του συγκλίνοντος ακροφυσίου του στροβίλου. Σκοπό έχουν να προστατεύσουν το περίβλημα της μηχανής και τους εσωτερικούς άξονες από τις υψηλές θερμοκρασίες καύσης, επιπλέον έχουν οπές περιφερειακά προκειμένου να πραγματοποιείται η αραίωση και η ψύξη.
- v. *Περιβλήματα (Casings)*: Κελύφη της μηχανής για να αναλαμβάνουν αξονικά φορτία.
- vi. *Εγχυτήρας καυσίμου (Fuel injector)*: Εξάρτημα εισαγωγής καυσίμου στην πρωτεύουσα ζώνη.
- vii. *Αναφλεκτήρας (Igniter)*: Μπουζί που βρίσκεται στην πρωτεύουσα ζώνη.
- viii. *Διασκορπιστής (Atomizer)*: Διαμερίζει το καύσιμο σε μικρά σταγονίδια προκειμένου να καταστεί δυνατή η καύση του υγρού καυσίμου.
- ix. *Συστροφέας (Air swirler)*: Μετατρέπει το αξονικό προφίλ της ταχύτητας σε περιφερειακό, προκειμένου να δημιουργηθούν ζώνες ανακυκλοφορίας.
- x. *Οπές δευτερεύουσας ζώνης (Secondary zone holes)*: Οπές που εντοπίζονται στην αρχή της δευτερεύουσας ζώνης.
- xi. *Οπές ζώνης αραίωσης (Dilution zone holes)*: Οπές που εντοπίζονται στην αρχή της ζώνης αραίωσης.

Επιπλέον από το **Σχήμα 2.2** στο εσωτερικό του μανδύα παρατηρούνται τρεις ζώνες:

- i. *Πρωτεύουσα ζώνη (Primary zone)*: Η πρωτεύουσα ζώνη έχει αφετηρία την έξοδο του συστροφέα και καταλήγει στις οπές της δευτερεύουσας ζώνης. Αυτή η ζώνη χαρακτηρίζεται από έντονη ανακυκλοφορία, προκειμένου να καεί το μεγαλύτερο μέρος του καυσίμου.
- ii. *Δευτερεύουσα ζώνη (Secondary zone)*: Η δευτερεύουσα ζώνη τροφοδοτείται από το ενδιάμεσο ρεύμα μέσω των οπών της δευτερεύουσας ζώνης. Σε αυτήν την ζώνη η τροφοδότηση αέρα βοηθάει στην καύση των άκαυστων (CO) που εξέρχονται από την πρωτεύουσα ζώνη.
- iii. *Ζώνη αραίωσης (Dilution zone)*: Η ζώνη αραίωσης τροφοδοτείται με αέρα μέσω των οπών της ζώνης αραίωσης. Η ζώνη αυτή σαν σκοπό έχει την μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων ώστε αυτά να εισέλθουν με την κατάλληλη θερμοκρασία στην πρώτη βαθμίδα του στροβίλου.

Ο αλγόριθμος της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης θα υπολογίσει τις προαναφερόμενες γεωμετρίες με αφετηρία τον διαχύτη και μετέπειτα θα ακολουθήσει η διαστασιολόγηση των άλλων δοκιμών στοιχείων που αναφέρθηκαν σε αυτό το Κεφάλαιο. Στο πέρας της διαστασιολόγησης θα πραγματοποιηθεί και εκτίμηση του βάρους του θαλάμου καύσεως, με βάση τις διαστάσεις που υπολογίστηκαν.

2.2 Διαχύτης

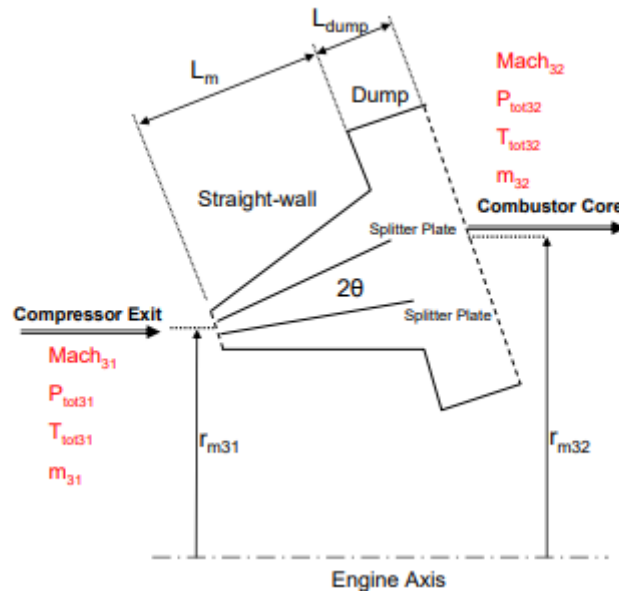
Όπως αναφέρθηκε η αφετηρία του αλγόριθμου της προκαταρκτικής είναι η διαστασιολόγηση του διαχύτη. Η είσοδος του διαχύτη είναι η θέση 3.1 και η έξοδος του είναι η θέση 3.2 (**Σχήμα 2.2**). Η λειτουργία του διαχύτη είναι να μειώσει την ταχύτητα του αέρα από την έξοδο του συμπιεστή σε τέτοια τιμή, ώστε ο θάλαμος καύσης να παρουσιάζει την βέλτιστη απόδοση. Η μείωση της ταχύτητας αρχικά αυξάνει την ευστάθεια της φλόγας, το οποίο συνεπάγεται ότι δεν θα εμφανιστεί το φαινόμενο blow-off (σβήσιμο φλόγας). Επιπλέον η υψηλή ταχύτητα της ροή οδηγεί σε μεγαλύτερες θεμελιώδεις απώλειες ολικής πίεσης στον θάλαμο καύσης ($dlogp_t$ ανάλογο του M^2), όπου η αύξηση των απωλειών αυτών οδηγεί σε αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, μη επιθυμητό αποτέλεσμα. Επιπροσθέτως μικρές απώλειες ολικής πίεσης στον διαχύτη επιτρέπουν την αξιοποίηση αυτού του <<πλεονάσματος>> ολικής πίεσης που δημιουργήθηκε, ώστε να βελτιωθεί η ανάμιξη του αέρα με το καυσαέριο στον θάλαμο καύσης.

Μια σημαντική σχεδιαστική μεταβλητή του διαχύτη είναι το μήκος του, διότι το μεγάλο μήκος του διαχύτη οδηγεί σε αυξημένο βάρος και μήκος του αεροπορικού κινητήρα μη επιθυμητό στις αεροπορικές κατασκευές. Όμως, επειδή υψηλός αριθμός Mach εισόδου απαιτεί μεγάλο μήκος διαχύτη για μικρές απώλειες, είναι καίριο να σχεδιαστεί ένας διαχύτης ο οποίος θα διατηρεί μια ισορροπία μεταξύ μικρού μήκους και μικρής πτώσης ολικής πίεσης.

Παρακάτω παρατίθενται οι γενικές απαιτήσεις που υπάρχουν από έναν διαχύτη στον θάλαμο καύσης:

- i. Χαμηλές απώλειες ολικής πίεσης. Γενικά οι απώλειες ολικής πίεσης απαιτείται να είναι μικρότερες του 40% της δυναμικής πίεσης εισόδου.
- ii. Μικρό μήκος, μπορεί να χρησιμοποιεί και διαχωριστής μεταξύ στον δύο πλακών του διαχύτη για να μειωθεί το μήκος του.
- iii. Να μην εμφανιστεί αποκόλληση της ροής, ειδικά στην περίπτωση που υπάρχει και dump στον διαχύτη.
- iv. Ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας ακτινικά και περιφερειακά.
- v. Δυναμική ευστάθεια ροής σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του θαλάμου καύσεως.
- vi. Μη ευαισθησία στις μεταβολές της ροής της εξόδου του συμπιεστή.

Στην συνέχεια παρατίθεται το **Σχήμα 2.4** που δείχνει τα δεδομένα εισόδου του σχεδιασμού του διαχύτη.



Σχήμα 2.4: Δεδομένα σχεδιασμού διαχύτη από [5]

- Είδος διαχύτη (straight walled, dump, Vortex-controlled, Hybrid)
- r_h : Στην έξοδο του συμπιεστή (3.1)
- r_t : Στην έξοδο του συμπιεστή (3.1)
- \dot{m} : Στην έξοδο του συμπιεστή (3.1)
- P_t : Στην έξοδο του συμπιεστή (3.1)
- T_t : Στην έξοδο του συμπιεστή (3.1)
- $M_{3.2}$: Στην έξοδο του διαχύτη (3.2 & $0.05 \leq M_{3.2} \leq 1$ [2])
- AR_{sweet} : Όριο βέλτιστου αριθμού λόγου επιφανειών στη θέση 3.2 και 3.1
- 2θ : Γωνία που τοποθετούνται οι πλάκες του διαχύτη

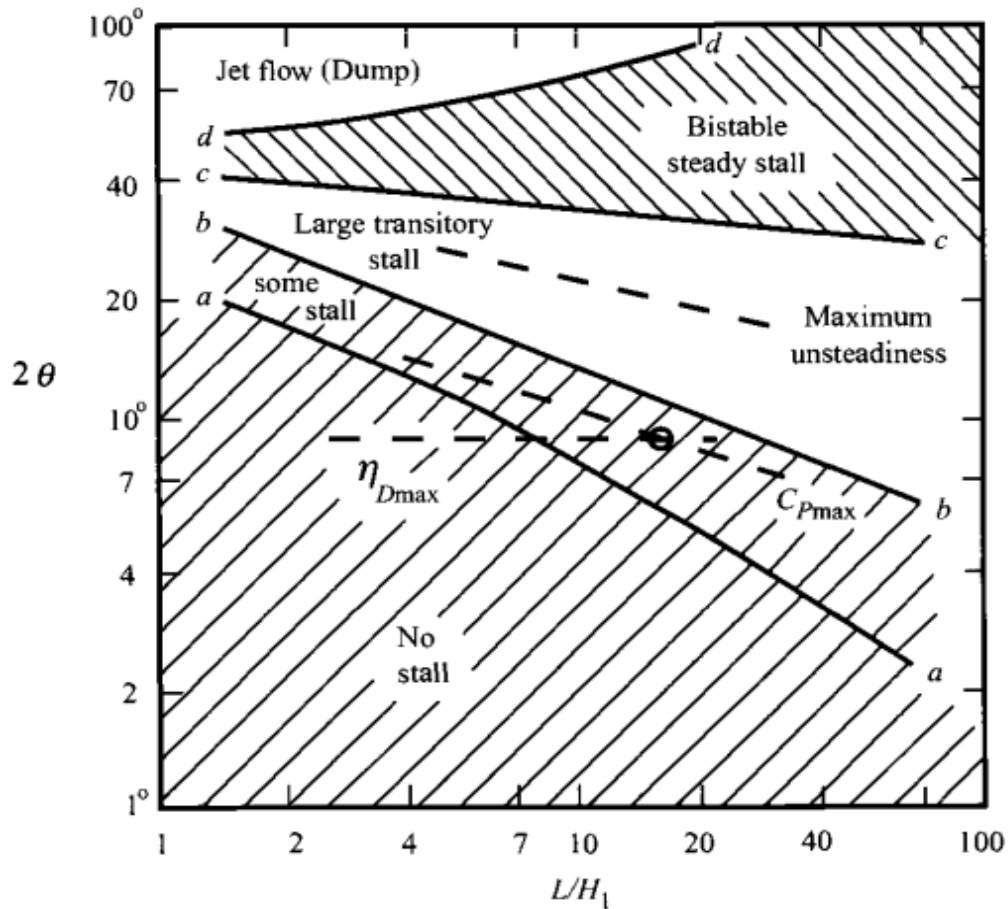
Σαν μεταβλητές σχεδιασμού μπορεί να επιλεγούν, το είδος του διαχύτη (Dump, Vortex-controlled, Hybrid) και ο αριθμός των διαχωριστικών πλακών ανάμεσα στον διαχύτη. Γνωρίζοντας αυτά τα δεδομένα προκύπτει μέσω απλών γεωμετρικών σχέσεων και το μήκος του διαχύτη. Αυτές οι μεταβλητές θα επιλεγούν έτσι ώστε να έχουμε τις μικρότερες δυνατές απώλειες στον διαχύτη.

Οι μεταβλητές εξόδου είναι οι εξής:

- L_D : Μήκος διαχύτη
- $A_{3.2}$: Εμβαδό στην έξοδο του διαχύτη
- $P_{t3.2}$: Ολική πίεση στην έξοδο του διαχύτη

Το **Σχήμα 2.5**, παρουσιάζει τις περιοχές λειτουργίας ενός διαχύτη (straight-walled), όπου όπως είναι αναμενόμενο, για να αποφευχθούν οι αποκολλήσεις επιβάλλεται μικρή γωνία (2θ). Στο [1] προτείνεται γωνία για μέγιστο βαθμό απόδοσης ($2\theta = 9^\circ$), ενώ η αναφορά [3] προτείνει περαιτέρω διερεύνηση με γωνίες ($6^\circ \leq 2\theta \leq 12^\circ$). Στην παρούσα εργασία θα ακολουθηθεί η φιλοσοφία της αναφοράς [3], όπου και η γωνία των πλακών είναι σχεδιαστική μεταβλητή. Αυτή η επιλογή γίνεται διότι δίνεται

μεγαλύτερη ελευθερία στον σχεδιασμό του διαχύτη.

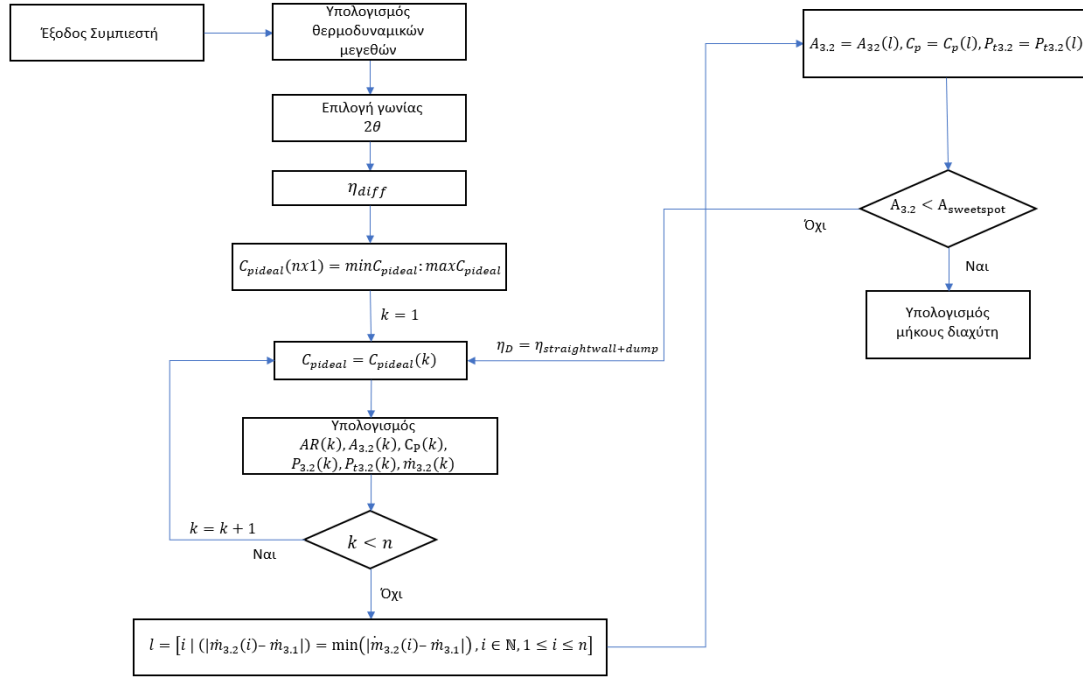


Σχήμα 2.5: Περιοχές λειτουργίας του διαχύτη από [1]

Ο σχεδιασμός του διαχύτη θα πραγματοποιηθεί, όπως αναφέρθηκε, για το εύρος τιμών ($6^\circ \leq 2\theta \leq 12^\circ$), όπου, με τον αλγόριθμο που πρόκειται να παρουσιασθεί υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγεί η γωνία με τις ελάχιστες απώλειες. Σε αυτόν τον αλγόριθμο από τα δεδομένα που είναι προαπαιτούμενα υπολογίζεται ο $M_{3,1}$, σε περίπτωση που δεν δίνεται μέσω της εξίσωσης της παροχής της μάζας (Εξίσωση (2.1)).

$$m = \frac{AP_t}{\sqrt{T_t}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} M \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (2.1)$$

Ακολουθεί ο αλγόριθμος σχεδιασμού του διαχύτη σε μορφή λογικού διαγράμματος, όπου μετέπειτα πραγματοποιείται επεξήγηση του κάθε βήματος του αλγορίθμου, μέσω των κατάλληλων εξισώσεων.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής σχεδιασμού διαχύτη

Παρατίθενται οι εξισώσεις για τον υπολογισμό απαραίτητων θερμοδυναμικών μεγεθών, προκειμένου να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος.

$$T = T_t \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{-1} \quad (2.2)$$

$$U = \frac{M}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (2.3)$$

$$P = P_t \left(\frac{T}{T_t} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.4)$$

Οι εξισώσεις του βρόχου του αλγόριθμου του **Σχήματος 2.6** είναι οι εξής:

$$C_p = \frac{P_2 - P_1}{q_1} \quad (2.5)$$

$$q_1 = \frac{1}{2} \rho_1 V_1^2 \quad (2.6)$$

$$C_{pideal} = \frac{(P_2 - P_1)_{isen}}{q_1} = 1 - \frac{1}{AR^2} \quad (2.7)$$

$$AR = \frac{A_{3.2}}{A_{3.1}} = \sqrt{\frac{1}{1 - C_{pideal}}} \quad (2.8)$$

$$C_p = \eta_{diff} C_{pideal} \quad (2.9)$$

$$P_{3.2} = P_{3.1} + C_p P_{dyn3.1} \quad (2.10)$$

$$(1) \rightarrow m_{3.2} \rightarrow \varepsilon$$

Στην περίπτωση όπου $A_{3.2} > A_{sweet}$, η εξίσωση του βαθμού απόδοσης από [1] είναι η εξής:

$$\eta_D = \frac{\left(\eta_{diff} AR^2 \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_m} \right)^2 \right) + 2 \left(AR \left(\frac{A_1}{A_m} \right) - 1 \right) \right)}{AR^2 - 1} \quad (2.11)$$

Για τον διαχύτη με τις πλάκες σε γωνία $2\theta^\circ$ από [5]:

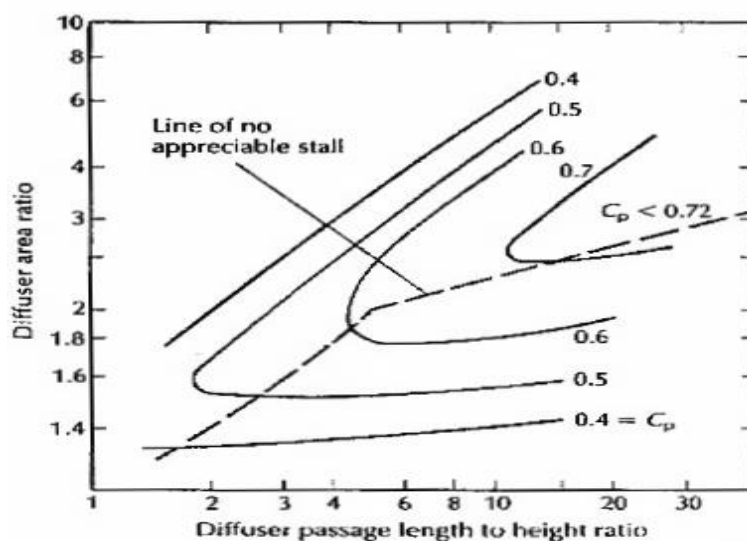
$$\eta_{diff} = 1.1138 - 0.017701(2\theta) - 4(2\theta)^2 - 9.3068(2\theta)^3 + 1.5722 \cdot 10^{-9}(2\theta)^2 \quad (2.12)$$

Σε αυτόν τον αλγόριθμο η αφετηρία είναι η γνώση των χαρακτηριστικών της ροής στην έξοδο του συμπιεστή (\dot{m}, P_t, T_t), αλλά και της γεωμετρίας στην έξοδο του συμπιεστή (r_h, r_t). Επακολούθως, υπολογίζονται τα απαραίτητα ροϊκά μεγέθη μέσω των εξισώσεων (2.2),(2.3) και (2.4). Έπειτα επιλέγεται η τιμή της γωνίας 2θ μεταξύ του εύρους που αναφέρθηκε. Επιπλέον γίνεται υπόθεση για τα όρια των τιμών που λαμβάνει η μεταβλητή C_{pideal} και δημιουργείτε ένα διάνυσμα μήκους n , όπου αυτό το διάνυσμα περιέχει τις τιμές του C_{pideal} που βρίσκονται στα όρια αυτά. Στην συνέχεια η μεταβλητή k λαμβάνει την τιμή 1 και ο αλγόριθμος μέσω των σχέσεων (2.5),(2.6),(2.7),(2.8),(2.9) και (2.10) υπολογίζεται τις μεταβλητές του αλγόριθμου. Μέσω αυτών των μεγεθών υπολογίζεται η παροχή του αέρα (2.1) στην έξοδο του διαχύτη. Στην συνέχεια ανανεώνεται η τιμή του k και επαναλαμβάνεται ο βρόχος μέχρι το k να ισούται με το μήκος του διανύσματος του C_{pideal} . Σαν αποτελέσματα λαμβάνονται διανύσματα ($1 \times n$) των μεταβλητών του αλγόριθμου. Τελικά η μεταβλητή l λαμβάνει την τιμή για την οποία η απόλυτη διαφορά των παροχών ($|\dot{m}_{3.2}(l) - \dot{m}_{3.1}|$) είναι η μικρότερη. Αφού έχει υπολογιστεί η μεταβλητή l , το επόμενο βήμα είναι να επιλεγούν οι τιμές των $A_{3.2}(l), C_p(l), P_{t3.2}(l)$.

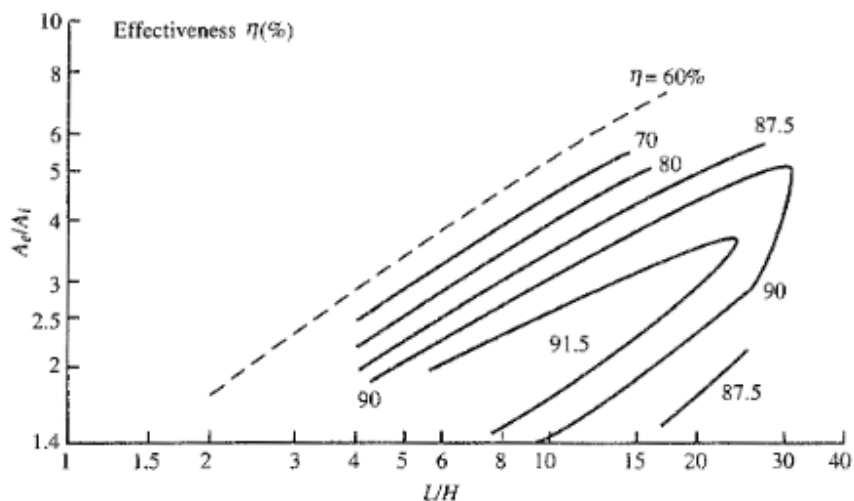
Στην συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση της τιμής $A_{3.2}$ με την A_{sweet} . Εάν είναι μεγαλύτερο το εμβαδό $A_{3.2}$ τότε κρίνεται απαραίτητο η εισαγωγή dump μετά τον διαχύτη και χρησιμοποιείται η εξίσωση $A_m = AR_{sweet} \cdot A_{3.1}$. Η ύπαρξη του dump επιβάλλει και την επικαιροποίηση του βαθμού απόδοσης και επαναλαμβάνεται η μέθοδος. Μέθοδος Newton Raphson ή σταθερού σημείου δεν υλοποιήθηκε λόγω θεμάτων σύγκλισης.

Η αρχικοποίηση του C_{pideal} , θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση

(2.9), το Σχήμα 2.7 και το Σχήμα 2.8.



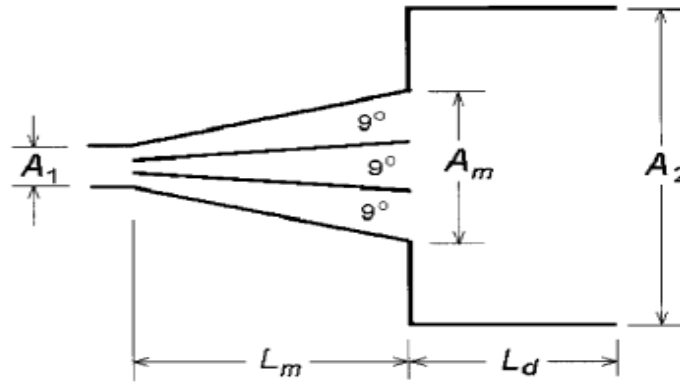
Σχήμα 2.7: C_p του διαχύτη συναρτήσει γεωμετρικών αδιάστατων μεταβλητών από [2]



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα βαθμού απόδοσης διαχύτη συναρτήσει αδιάστατων γεωμετρικών στοιχείων από [7]

Παρατηρείται ότι το μέγιστο C_p είναι $C_p = 0.72$. Επιπλέον γνωρίζοντας ότι τιμές $\eta_{Diff} < 85\%$ αποφεύγονται λόγω μεγάλων απωλειών ολικής πίεσης, είναι βέβαιο ότι το C_{pideal} δεν πρόκειται να υπερβεί την μονάδα και επιπλέον είναι πάντα μεγαλύτερο του 0.

Με τον όρο dump που αναφέρθηκε, εννοείται με βάση το Σχήμα 2.9 το, <<άνοιγμα>> 90 μοιρών που υπάρχει μετά τον διαχύτη ευθειών πλακών μήκους L_m . Η μεταβλητή L_d είναι το μήκος αυτού του <<ανοίγματος>>. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και διαχωριστική/διαχωριστικές πλάκα/πλάκες (Σχήμα 2.9) στον διαχύτη ώστε, να μειωθεί το μήκος του διαχύτη. Εάν χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός πλακών (splitters) ώστε να μειωθεί αρκετά το μήκος, αυξάνεται αρκετά το κόστος και το βάρος της κατασκευής που είναι απαγορευτικό. Οπότε, είναι δόκιμο να χρησιμοποιηθεί ένας μικρός αριθμός πλακών. Το τελικό μήκος είναι ο λόγος του μήκους χωρίς τις διαχωριστικές πλάκες προς τον αριθμό των διαχωριζόμενων ροών.



Σχήμα 2.9: Διάταξη διαχύτη για την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται dump γεωμετρία

Όπως αναφέρθηκε στην περίπτωση που δεν ισχύει η ανισότητα $A_{32} > A_{sweet}$ χρησιμοποιείται και dump, όμως υπάρχει και η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και dump χωρίς να ισχύει η ανισότητα, όπου, σε αυτήν στην περίπτωση, χρησιμοποιείται η εξής εξίσωση για τον προσδιορισμό του A_m :

$$A_m = A_1 \cdot AR \cdot \eta_{Dm} \quad (2.13)$$

Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθεί dump οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της γεωμετρίας είναι οι εξής:

$$H_2 = \frac{ARH_1r_{m1}}{r_{m2}} \quad (2.14)$$

$$\frac{L_{diff}}{H_1} = \frac{r_{m1}}{r_{m2}} \frac{A_{32}/A_{31} - 1}{2 \tan(\theta)} \quad (2.15)$$

Ενώ στην περίπτωση που κριθεί απαραίτητο ή επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί dump, τότε θα χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις:

$$H_m = H_1 \frac{A_m r_{m1}}{A_{31} r_{m2}} \quad (2.16)$$

$$\frac{L_m}{H_1} = \frac{r_{m1}}{r_{mm}} \frac{A_m/A_{31} - 1}{2 \tan(\theta)} \quad (2.17)$$

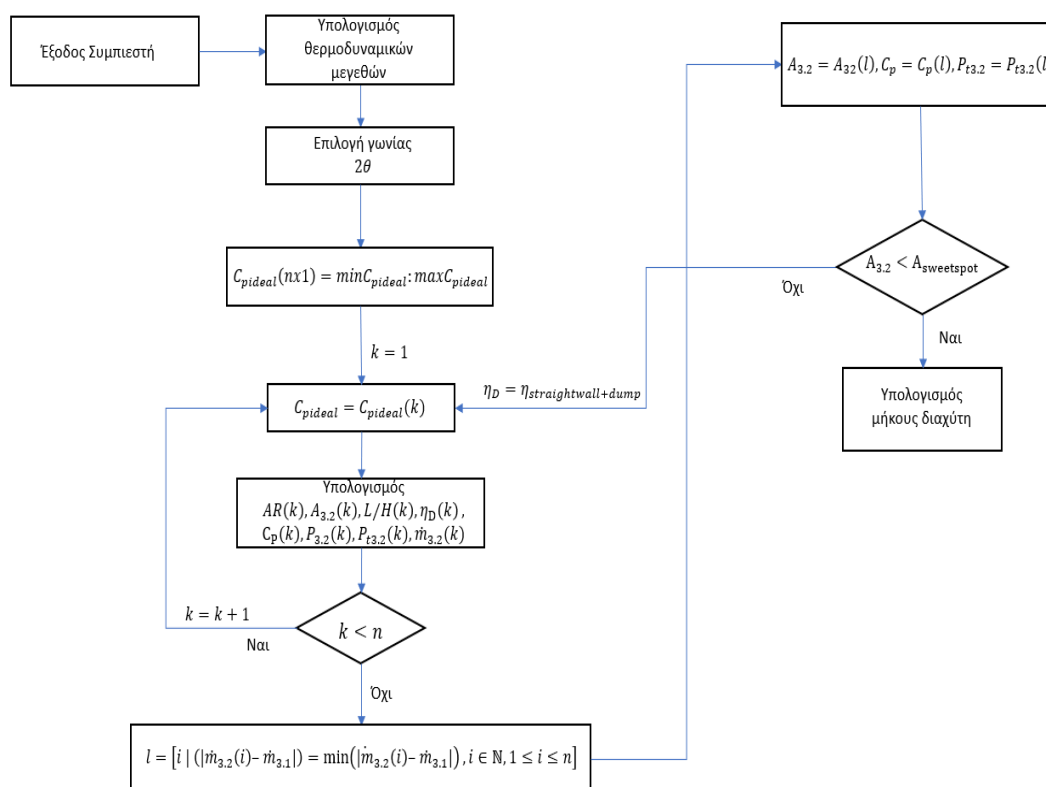
$$H_2 = \frac{ARH_1r_{m1}}{r_{m2}} \quad (2.18)$$

$$L_d = H_2 - H_m \quad (2.19)$$

$$L_{diff} = L_m + L_{Dump} \quad (2.20)$$

Οπότε έχουν υπολογιστεί όλα τα απαραίτητα μεγέθη για την διαστασιολόγηση του διαχύτη.

Μια εναλλαγή του αλγόριθμου για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην διαστασιολόγηση του διαχύτη είναι να μην χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (2.12) για τον βαθμό απόδοσης του διαχύτη ευθειών πλακών, διότι είναι συνάρτηση μόνο του (2θ) . Υπάρχει η δυνατότητα να ψηφιοποιηθεί το **Σχήμα 2.8** για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης συναρτήσει περισσότερων μεταβλητών $(AR, L/H)$. Η αλλαγή στον αλγόριθμο θα είναι η εξής: Υποθέτοντας το C_{pideal} , υπολογίζεται το $AR, L/H$ και χρησιμοποιούνται τα δεδομένα από το **Σχήμα 2.8**, προκειμένου να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης. Ο ανανεωμένος αλγόριθμος είναι ο εξής:

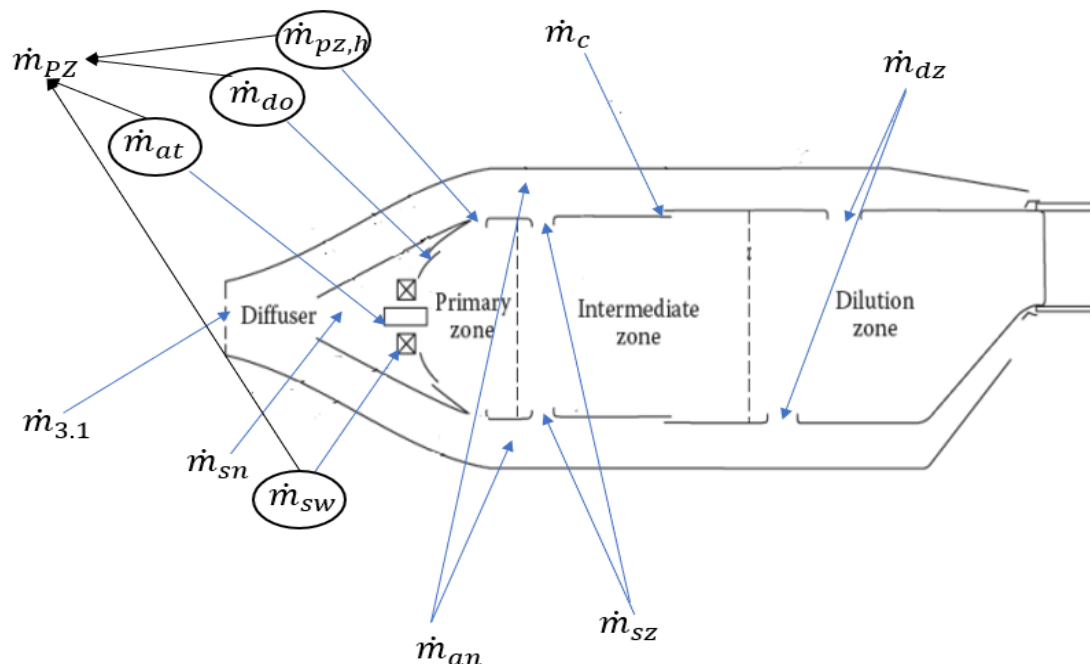


Σχήμα 2.10: Βελτιωμένος αλγόριθμος διαστασιολόγησης

Η αλλαγή είναι ότι ο βαθμός απόδοσης του διαχύτη υπολογίζεται μέσα στον βρόχο, υπολογίζοντας πρώτα τα $(AR, L/H)$ αξιοποιώντας, το ψηφιοποιημένο **Σχήμα 2.8**.

2.3 Διαχωρισμός ροών

Μετά την διαστασιολόγηση του διαχύτη ακολουθεί ο αλγόριθμος του διαχωρισμού των ροών. Σε αυτόν τον αλγόριθμο πραγματοποιείται εκτίμηση των κλασμάτων μάζας αέρα που εισέρχονται σε κάθε ζώνη του θαλάμου καύσεως (**Σχήμα 2.11**). Ο αέρας αρχικά μέσω του ρύγχους (snout) διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα.



Σχήμα 2.11: Ροές στον θάλαμο καύσης

Το πρώτο ρεύμα αέρα εισέρχεται στον ρύγχος (\dot{m}_{sn}) και μετέπειτα διαχωρίζεται σε άλλες τρεις ροές. Η πρώτη οδηγείται στον θόλο (\dot{m}_{do}) όπου και χρησιμοποιείται για την ψύξη του μέσω οπών που βρίσκονται στον θόλο και στην συνέχεια εισέρχεται στην πρωτεύουσα ζώνη όπου συμμετέχει και στην καύση. Η δεύτερη ροή εισέρχεται στον συστροφέα (\dot{m}_{sw}), όπου λαμβάνει χώρα η μετατροπή του προφίλ της ταχύτητας. Τέλος, η τρίτη ροή εισέρχεται στον διασκορπιστή (\dot{m}_{at}) όπου συμβάλει στην σταγονοποίηση του υγρού καυσίμου. Αθροιστικά αυτές οι τρεις ροές αποτελούν περίπου του 50 % του αέρα που εισέρχεται στην πρωτεύουσα ζώνη (\dot{m}_{PZ}).

Το δεύτερο ρεύμα αέρα οδηγείται στον εσωτερικό και εξωτερικό δακτύλιο (\dot{m}_{an}), όπου και εισέρχεται στον θάλαμο καύσης μέσω οπών. Αυτό το ρεύμα αέρα αποτελείται από τέσσερις ροές. Η πρώτη ροή εισέρχεται στην πρωτεύουσα ζώνη και αθροιστικά με το ρεύμα αέρα που εισέρχεται στο ρύγχος αποτελούν τον ονομαζόμενο αέρα της πρωτεύουσας ζώνης. Η δεύτερη ροή, ονομαστικά μάζα αέρα δευτερεύουσας ζώνης (\dot{m}_{SZ}), εισέρχεται στον θάλαμο καύσης μέσω οπών στο τέλος της πρωτεύουσας ζώνης. Η τρίτη ροή, ονομαστικά μάζα αέρα ζώνης αραίωσης, εισέρχεται στον θάλαμο καύσης (\dot{m}_{DZ}) μέσω οπών στο τέλος της δευτερεύουσας ζώνης. Τέλος, η τέταρτη ροή είναι αυτή που αξιοποιείται για την ψύξη του αέρα (\dot{m}_c), και εισέρχεται μέσω σχισμών στον θάλαμο καύσης, οι οποίες σχισμές εκτείνονται σε

όλο τον μανδύα.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μεταβλητές σχεδιασμού καθώς και η μεθοδολογία υπολογισμού των κλαμάτων αέρα.

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα για τον υπολογισμό του διαχωρισμού της ροής είναι οι εξής:

- \dot{m}_f : Παροχή μάζας καυσίμου
- f_{st} : Στοιχειομετρικός λόγος αέρα-καυσίμου
- T_g : Θερμοκρασία καυσαερίων στην πρωτεύουσα ζώνη
- ε_{PZ} : Ποσοστό καυσίμου που κήκε στην πρωτεύουσα ζώνη
- T_m : Θερμοκρασιακή αντοχή μεταλλικών τοιχωμάτων μανδύα
- Είδος Ψύξης: Φιλμ ή ψύξη μέσω διαπνοής ή ψύξη μέσω έκχυσης αέρα
- T_{t4} : Ολική θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο

Ακολουθούν οι υποθέσεις που γίνονται για να υπολογιστούν οι μεταβλητές για τις οποίες δεν έχουμε στοιχεία:

Η θερμοκρασία (T_g) υποτίθεται είτε κατευθείαν είτε μέσω το τ_{PZ} εξίσωση (2.21), από Mattingly [1] για κινητήρες της δεκαετίας του 50 ισχύει $\tau_{PZ} \sim 4$. Γενικά η υπόθεση αυτή γίνεται μέσω εμπειρικών δεδομένων από παρόμοιας γενιάς κινητήρες, όπου είναι γνωστή η θερμοκρασία (T_g). Επιπλέον, γίνεται υπόθεση ως προς την τιμή ε_{PZ} , ο Mattingly [1] αναφέρει ότι οι τιμές του ε_{PZ} είναι μεγαλύτερες του 0.7 ($\varepsilon_{PZ} > 0.7$). Αξίζει να αναφερθεί ότι μετά το πέρας της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης, εφόσον χρησιμοποιηθεί θερμοχημική μοντελοποίηση της καύσης, υπολογίζεται αναλυτικά η μεταβλητή (T_g).

$$\tau_{PZ} = \frac{T_g}{T_{t3.2}} \quad (2.21)$$

Στην περίπτωση που είναι γνωστή η παροχή καυσίμου ή η θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσεως θα αξιοποιηθεί η απλοποιητική εξίσωση (2.22), προκειμένου να υπολογιστεί και η άλλη μεταβλητή.

$$\dot{m}_f = \frac{C_{pt}T_{t4}\dot{m}_3}{H_u - C_{pt}T_{t4}} - \frac{C_{pc}T_{t3}\dot{m}_3}{H_u - C_{pt}T_{t4}} \quad (2.22)$$

Για την θερμοκρασία αντοχής των τοιχωμάτων του μανδύα T_m γίνεται υπόθεση βάσει γνωστών υλικών για τα τοιχώματα του μανδύα.

Αφού έχουν καθοριστεί οι αυθαίρετες μεταβλητές σειρά έχει ο υπολογισμός των κλασμάτων μάζας ο οποίος γίνεται σύμφωνα με τον Mattingly [1].

Αρχικά υπολογίζεται ο συνολικός λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου (FAR) προς τον στοιχειομετρικό λόγο (FAR_{st}).

$$\varphi_4 = \frac{\dot{m}_f}{f_{st}\dot{m}_{3.1}} \quad (2.23)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασιακή αύξηση του αέρα στον θάλαμο καύσης.

$$\Delta T_{max} = \frac{T_{t4} - T_{t3.1}}{\varphi_4} \quad (2.24)$$

Εφόσον έχει πραγματοποιηθεί η υπόθεση για την θερμοκρασία T_g , υπολογίζεται στην συνέχεια ο λόγος ισοδυναμίας αέρα καυσίμου της δευτερεύουσας ζώνης (FAR_{SZ}) προς τον στοιχειομετρικό λόγο αέρα καυσίμου.

$$\varphi_{SZ} = \frac{T_g - T_{t3.1}}{\Delta T_{max}} \quad (2.25)$$

Στην συνέχεια το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του λόγου ισοδυναμίας αέρα καυσίμου της πρωτεύουσας ζώνης (FAR_{PZ}) προς τον στοιχειομετρικό λόγο αέρα καυσίμου (FAR_{st}).

$$\varphi_{PZ} = \frac{\varphi_{SZ}}{\varepsilon_{PZ}} \quad (2.26)$$

Γνωρίζοντας τις μεταβλητές φ_{PZ} και φ_{SZ} , υπολογίζονται στην συνέχεια τα κλάσματα μάζας αέρα της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ζώνης:

$$\mu_{PZ} = \frac{\varphi_4}{\varphi_{PZ}} \quad (2.27)$$

$$\mu_{SZ} = \frac{\varphi_4}{\varphi_{SZ}} - \mu_{PZ} \quad (2.28)$$

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του κλάσματος μάζας που είναι απαραίτητο για την ψύξη των τοιχωμάτων του μανδύα. Υπάρχουν διαφορετικά επίπεδα τεχνολογίας ψύξης, όπου για το καθένα ο απαραίτητος λόγος αέρα ψύξης προς τον συνολικό (μ_C) είναι:

$$\mu_C = \frac{1}{6} \left(\frac{T_g - T_m}{T_m - T_{t3.1}} \right) \quad \text{film cooling} \quad (2.29)$$

$$\mu_C = \frac{1}{25} \left(\frac{T_g - T_m}{T_m - T_{t3.1}} \right) \quad \text{transpiration or effusion cooling} \quad (2.30)$$

Οπότε, επιλέγοντας το είδος ψύξης ανάλογα με το επίπεδο της τεχνολογίας του

θαλάμου καύσεως και το υλικό του μανδύα υπολογίζεται το κλάσμα αέρα που είναι απαραίτητο για την ψύξη του μανδύα.

Αφότου έχουν καθοριστεί τα προηγούμενα κλάσματα μάζας αέρα, το επόμενο και τελικό βήμα είναι ο υπολογισμός του κλάσματος αέρα της ζώνης αραιώσης, από την αρχή διατήρησης της μάζας:

$$\mu_{DZ} = 1 - \mu_{PZ} - \mu_{SZ} - \mu_C \quad (2.31)$$

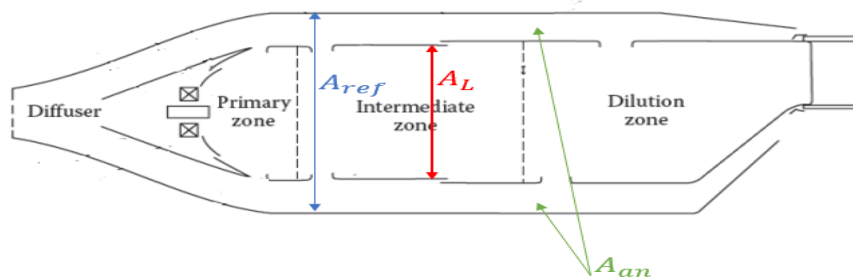
Εδώ πραγματοποιείται έλεγχος εάν το ποσοστό αέρα για την αραιώση είναι αρνητικό. Στην περίπτωση που το ποσοστό είναι αρνητικό, τότε υπάρχουν δύο δυνατότητες επίλυσης του προβλήματος:

- i. Αλλαγή στην θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την πρωτεύουσα ζώνη (T_g).
- ii. Αύξηση της θερμοκρασίας αντοχής του υλικού του μανδύα, δηλαδή επιλογή που ισχυρού υλικού.

Το επόμενο βήμα είναι η διαστασιολόγηση του κελύφους και του μανδύα.

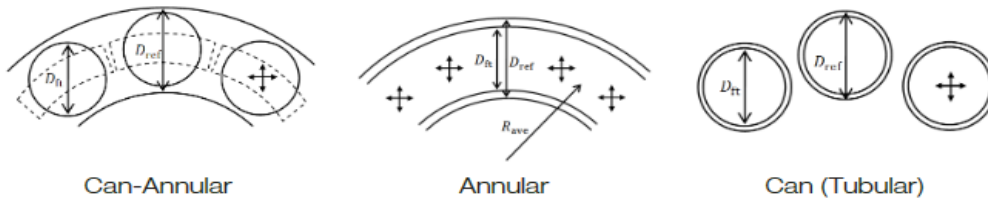
2.4 Εμβαδόν αναφοράς και μανδύα

Το εμβαδόν αναφοράς (A_{ref}) (Σχήμα 2.12) ορίζεται ως το μέγιστο εμβαδό του δακτυλίου που προκύπτει από την τομή κάθετα από τον κεντρικό άξονα του θαλάμου καύσεως. Γεωμετρικά είναι από το κάτω κέλυφος έως το άνω κέλυφος (from inner casing to outer casing) (Σχήμα 2.2). Το εμβαδό του μανδύα (A_L) ορίζεται σύμφωνα με το Σχήμα 2.12., παρομοίως και το εμβαδό των δακτυλίων (A_{an}). Ο υπολογισμός του εμβαδού αναφοράς πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την σχέση που προτείνει ο Lefebvre [3] και συγχρόνως αξιοποιώντας ημιεμπειρικά δεδομένα σχετικά με τις απώλειες του θαλάμου καύσεως. Επιπλέον, θα αναφερθούν και άλλες δύο μεθοδολογίες διαστασιολόγησης του εμβαδού.



Σχήμα 2.12: Εμβαδό αναφοράς (A_{ref}) θαλάμου καύσης

Για την κάθε διάταξη θαλάμου καύσεως το ύψος ή διάμετρος αναφοράς ορίζεται σύμφωνα με το Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Εμβαδό αναφοράς θαλάμου καύσεως

Το **Σχήμα 2.13** για το ύψος του μανδύα χρησιμοποιεί την ονομασία D_{ft} (*flame tube*), ενώ στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η ονομασία H_L . Αντίστοιχα η μεταβλητή R_{ave} ονομάζεται στην εργασία r_m .

Επομένως το εμβαδό αναφοράς υπολογίζεται από τους εξής τύπους:

$$A_{ref} = \frac{\pi D_{ref}^2}{4} \quad (\text{Σωληνοειδής και Σωληνο – Δακτυλιοειδής}) \quad (2.32)$$

$$A_{ref} = 2\pi D_{ref} r_m \quad (\text{Δακτυλιοειδής}) \quad (2.33)$$

Για το ύψος του μανδύα ισχύουν παρομοίως οι σχέσεις:

$$A_L = \frac{\pi H_L^2}{4} \quad (\text{Σωληνοειδής και Σωληνο – Δακτυλιοειδής}) \quad (2.34)$$

$$A_L = 2\pi H_L r_m \quad (\text{Δακτυλιοειδής}) \quad (2.35)$$

Ενώ για το εμβαδό των δακτυλίων χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$A_{an} = A_{ref} - A_L \quad (2.36)$$

Για τον υπολογισμό του εμβαδού αναφοράς, όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιείται αεροδυναμική θεώρηση, όπου σύμφωνα με τον Lefebvre [3]:

$$A_{ref} = \left[\frac{R}{2} \left(\frac{\dot{m}_3 T_3^{0.5}}{P_3} \right)^2 \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \left(\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} \right)^{-1} \right]^{0.5} \quad (2.37)$$

Για τις τιμές των μεταβλητών $\Delta P_{3-4}/q_{ref}$ και $\Delta P_{3-4}/P_3$ της εξίσωσης (2.37) αξιοποιείται ο **Πίνακας 2.1**.

Πίνακας 2.1: Τιμές αδιάστατων μεταβλητών του θαλάμου καύσεως από [3]

Type of Chamber	$\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3}$	$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}}$	$\frac{m_3 T_3^{0.5}}{A_{ref} P_3}$
Tubular	0.07	37	0.0036
Tuboannular	0.06	28	0.0039
Annular	0.06	20	0.0046

Για την περίπτωση θαλάμων καύσεως διατάξεως σωληνοειδής και σωληνο-δακτυλιοειδής η εξίσωση (2.37) υπολογίζει το συνολικό εμβαδό των <<σωλήνων>> οπότε, προκειμένου να υπολογιστεί το εμβαδό του κάθε σωλήνα χρησιμοποιείται η εξής εξίσωση:

$$A'_{ref} = \frac{A_{ref}}{n_{cans}} \quad (2.38)$$

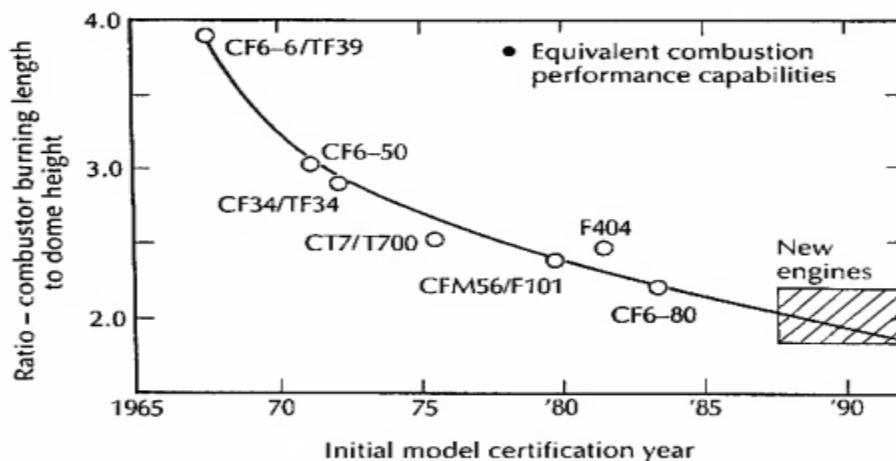
Επιπλέον ο προσδιορισμός του q_{ref} γίνεται μέσω των εξισώσεων:

$$U_{ref} = \frac{m_3}{\rho_3 A_{ref}} \quad (2.39)$$

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho_3 U_{ref}^2 \quad (2.40)$$

Επιπλέον, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι ειδικά η τιμή της αδιάστατης μεταβλητής $\Delta P_{3-4}/q_{ref}$ σε αρκετούς δακτυλιοειδείς θαλάμους καύσεως δεν έχει την τιμή που προτείνεται. Αυτή η παρατήρηση προέκυψε από βιβλιογραφικές έρευνες και ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν και προτείνεται η παρακάτω μεθοδολογία υπολογισμού της.

Από Mellor [2] δίνεται το εξής σχήμα:



Σχήμα 2.14: Λόγος μήκους θαλάμου καύσεως προς ύψος μανδύα συναρτήσετις χρονιάς πιστοποίησης

Μέσω του **Σχήματος 2.14** γνωρίζοντας και την χρονιά πιστοποίησης ενός κινητήρα υπάρχει η ικανότητα μέσω της επόμενης εξίσωσής να υπολογιστεί η αδιάστατη μεταβλητή $\Delta P_L/q_{ref}$:

$$L_L = -\frac{H_L}{0.05} \left(\frac{\Delta P_L}{q_{ref}} \right)^{-1} \frac{1}{\ln(1 - PF)} \quad (\text{Δακτυλιοειδής}) \quad (2.41)$$

$$L_L = -\frac{H_L}{0.07} \left(\frac{\Delta P_L}{q_{ref}} \right)^{-1} \frac{1}{\ln(1 - PF)} \quad (\text{Σωληνο – Δακτυλιοειδής}) \quad (2.42)$$

Η πτώση πίεσης ΔP_L είναι η πτώση πίεσης στον μανδύα και ισχύει:

$$\Delta P_L = \Delta P_{3-4} - \Delta P_{diff} \quad (2.43)$$

Οπότε, από το **Σχήμα 2.14** είναι γνωστός ο λόγος L_L/H_L , για την τιμή PF είναι γνωστό ότι κυμαίνεται μεταξύ $0.20 < PF < 0.30$, οπότε είναι δυνατό με βάση τα προηγούμενα να πραγματοποιηθεί μια εκτίμηση της τιμής του $\Delta P_L/q_{ref}$, υπολογίζοντας τα όρια που κυμαίνεται η τιμή και χρησιμοποιώντας την μέση τιμή.

Στην συνέχεια μέσω της εξίσωσης (2.43), αφού είναι γνωστή η πτώση ολική πίεση στον θάλαμο καύσης (ΔP_{3-4}), σε συνδυασμό και με την υπολογισμένη από τον αλγόριθμο του διαχύτη πτώση ολικής πίεσης του διαχύτη (ΔP_{diff}), υπολογίζεται η πτώση ολικής πίεση στον μανδύα ΔP_L . Οπότε, μέσω της γνώσης της τιμής $\Delta P_L/q_{ref}$ και του ΔP_L υπολογίζεται η μεταβλητή q_{ref} . Τελικά με την γνώση της τιμής της μεταβλητής q_{ref} υπολογίζεται η μεταβλητή $\Delta P_{3-4}/q_{ref}$.

Ο άλλος τρόπος υπολογισμού του εμβαδού αναφοράς είναι μέσω του χημικού τρόπου με την εξίσωση (2.44)

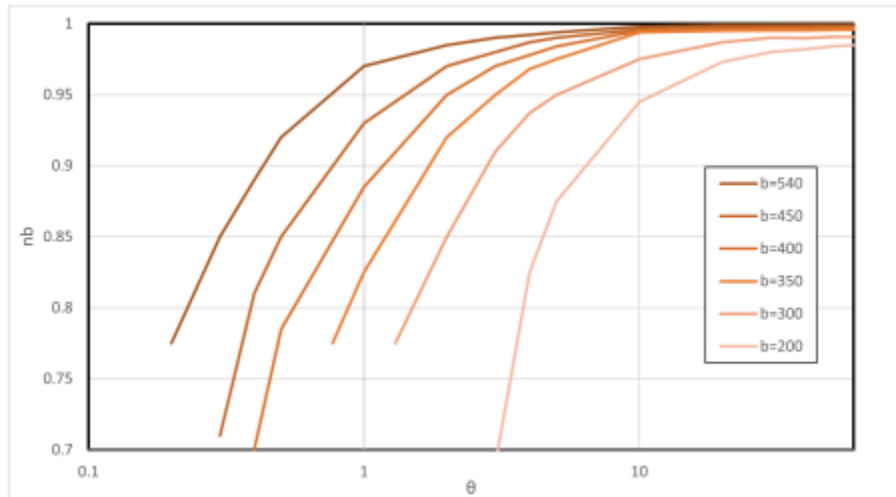
$$A_{ref} = \left(\frac{\dot{m}_3 \theta}{(4/\pi)^{\frac{3}{8}} P_3^{1.75} e^{\frac{T_3}{b}}} \right)^{8/11} \quad (2.44)$$

Η μεταβλητή (b) υπολογίζεται μέσω των σχέσεων:

$$b = 245(1.39 + \ln \varphi_{PZ}) \quad 0.5 < \varphi_{PZ} < 1.0 \quad (2.45)$$

$$b = 170(2.00 - \ln \varphi_{PZ}) \quad 1.0 < \varphi_{PZ} < 1.4 \quad (2.46)$$

Για την μεταβλητή (φ_{PZ}) μέσω του Fletcher [19] είναι γνωστό ότι το σημείο σχεδιασμού λαμβάνει την τιμή $\varphi_{PZ} \sim 1.05$. Η μεταβλητή (θ) υπολογίζεται μέσω υπόθεσης του βαθμού απόδοσης και του σχήματος που ακολουθεί:



Σχήμα 2.15: Χάρτης εκτίμησης βαθμού απόδοσης ΘΚ συναρτήσει της μεταβλητής θ

Η αναφορά [18] προτείνει τον υπολογισμό του A_{ref} και με τις δύο μεθόδους και την επιλογή της τιμής που είναι μεγαλύτερη.

Επιπροσθέτως ο Fletcher [19] προτείνει την εξής εξίσωση για τον υπολογισμό του εμβαδού αναφοράς:

$$A_{an} = \frac{\dot{m}_{an} \sqrt{T_{an}}}{Q \cdot P_{an}} \quad (2.47)$$

$$Q = \sqrt{\frac{\gamma}{R}} M \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (2.48)$$

Όπου σύμφωνα με την αναφορά [19] στο αρχικό στάδιο θα θεωρηθεί ότι $T_{an} = T_{t32}$, $P_{an} = P_{t32}$ και Q από την εξίσωση (2.29). Για τον αριθμό *Mach* γίνεται η υπόθεση ότι $M_{an} = 0.1$ από [19]. Επιπλέον ο Mellor [2] αναφέρει ότι η ταχύτητα στον δακτύλιο (V_{an}) είναι μεταξύ 30 m/s και 60 m/s. Οπότε υπάρχει και η δυνατότητα να επιλεγεί μια ταχύτητα μεταξύ αυτών των ορίων και να υπολογιστεί ο αριθμός M_{an} , μέσω των εξισώσεων (2.2) & (2.3).

Επόμενο στάδιο είναι ο υπολογισμός του εμβαδού του μανδύα, όπου θα αναφερθούν δυο μεθοδολογίες σύμφωνα με τον Mattingly [1] και Lefebvre [3].

Σύμφωνα με τον Mattingly [1], ο υπολογισμός του εμβαδού του μανδύα πραγματοποιείται με κριτήριο την μεγιστοποίηση του λόγου διείσδυσης των δεσμών αέρα που εισέρχεται στις οπές αραίωσης προς την διάμετρο αυτών των δεσμών αέρα και προτείνεται η εξής σχέση για τον βέλτιστο λόγο των εμβαδών αναφοράς και μανδύα:

$$\alpha_{opt} = 1 - \left(\frac{1 - \dot{m}_{sn} - \dot{m}_c}{\dot{m}_r} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\Delta P_L}{q_r} \right)_{MB}^{-\frac{1}{3}} \quad (2.49)$$

Ο Lefebvre [3] αναφέρει ότι στην άνω και κάτω περιοχή του δακτυλίου είναι απαραίτητο η στατική πίεση να έχει μεγάλη τιμή ώστε οι διεισδύσεις των δεσμών αέρα να είναι αποτελεσματικές. Αυτό σημαίνει ότι το εμβαδό του μανδύα δεν πρέπει να έχει μεγάλες τιμές ώστε να μην επιταχύνεται η ροή και ως αποτέλεσμα να μειώνεται η στατική πίεση. Οπότε, λαμβάνοντας τα προηγούμενα υπόψη προτείνει την εξής σχέση:

$$\alpha_{opt} = 1 - \left[\frac{(1 - \dot{m}_{sn})^2 - \lambda}{\Delta P_{34}/q_{ref} - \lambda r^2} \right]^{1/3} \quad (2.50)$$

Στον σχεδιασμό θα επιλεγεί μία από τις δύο. Αξίζει να αναφερθεί ότι και ο Mellor [2] προτείνει την σχέση του Lefebvre (2.29) και επιπλέον παρατηρήθηκε ότι είναι πιο συνεπής στα αποτελέσματα, στις περιπτώσεις που η μεταβλητή $\Delta P_{34}/q_{ref}$ λαμβάνει τις τιμές του **Πίνακα 2.1**. Επιπλέον από τις βιβλιογραφικές αναφορές προκύπτει ότι η μεταβλητή α_{opt} λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.65 και 0.75. Οπότε είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται ένας έλεγχος και αν χρειαστεί να επιλεγούν κατάλληλες τιμές μεταβλητών στον υπολογισμό του διαχωρισμού των ροών, που προκαλούν την μεταβλητή α_{opt} να λαμβάνει τιμές μεταξύ των ορίων.

Στην μεθοδολογία διαστασιολόγησης σύμφωνα με τον Fletcher [19], όπως αναφέρθηκε διαστασιολογείται το εμβαδό των δακτυλίων (A_{an}) και όχι το εμβαδό (A_{ref}). Οπότε, εφόσον επιλεγεί η μέθοδος του Fletcher [19] και υπολογιστεί το A_{an} , υπολογίζοντας και το α_{opt} , μέσω της σχέσης που ακολουθεί υπολογίζονται τα εμβαδά.

$$A_{ref} = A_{an} + A_L \quad (2.51)$$

Για τις άγνωστες μεταβλητές των σχέσεων (2.29 & 2.30) ισχύει:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_r} = \mu_{SZ} + \mu_{DZ} + \frac{\mu_{PZ}}{2} \quad (2.52)$$

$$q_r = P_{t3.2} - P_{3.2} \quad (2.53)$$

$$r = A_{31}/A_{ref} \quad (2.54)$$

$$\lambda = (P_{t3.1} - P_{t3.2})/q_{31} \quad (2.55)$$

Η μεταβλητή (λ) για αεροδυναμικά <<καθαρούς>> διαχύτες λαμβάνει την τιμή 0.15, ενώ για διαχύτες που έχουν και dump λαμβάνει την τιμή 0.45. Στην περίπτωση που

χρησιμοποιείται διαχύτης ελεγχόμενων δινών το (λ) λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.05 και 0.15.

Τέλος, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί έλεγχος για τον ελάχιστο αριθμό πτώσης της ολικής πίεσης. Αυτός ο έλεγχος είναι καίριο να πραγματοποιηθεί προκειμένου να είναι επιτεύξιμη η ψύξη των πρώτων βαθμίδων του στροβίλου:

$$\left(\frac{\Delta P_t}{q_{ref}}\right)_{min} = \left(\frac{\dot{m}_{PZ}}{\dot{m}_{3.1}}\right)^2 \left(\frac{A_{ref}}{A_L}\right)^2 \tau_{PZ}(2\tau_{PZ} - 1) \quad (2.56)$$

2.5 Ρύγχος

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.1 μετά τον διαχύτη, διαστασιολογείται το ρύγχος (Snout) όπου, όπως αναφέρθηκε, σκοπός του είναι να ελέγχει την ροή που εξέρχεται από τον διάχυτη χωρίζοντας σε δύο μέρη (μανδύα και δακτύλιο). Ο σχεδιασμός του βασίζεται στην αναφορά [11] όπου για τον υπολογισμό του εμβαδού του στην κάθετη τομή δίνεται ο τύπος:

$$A_{snout} = A_{de} \frac{\dot{m}_{sn}}{\dot{m}_{3.1}} \frac{1}{C_{d,s}} \quad (2.57)$$

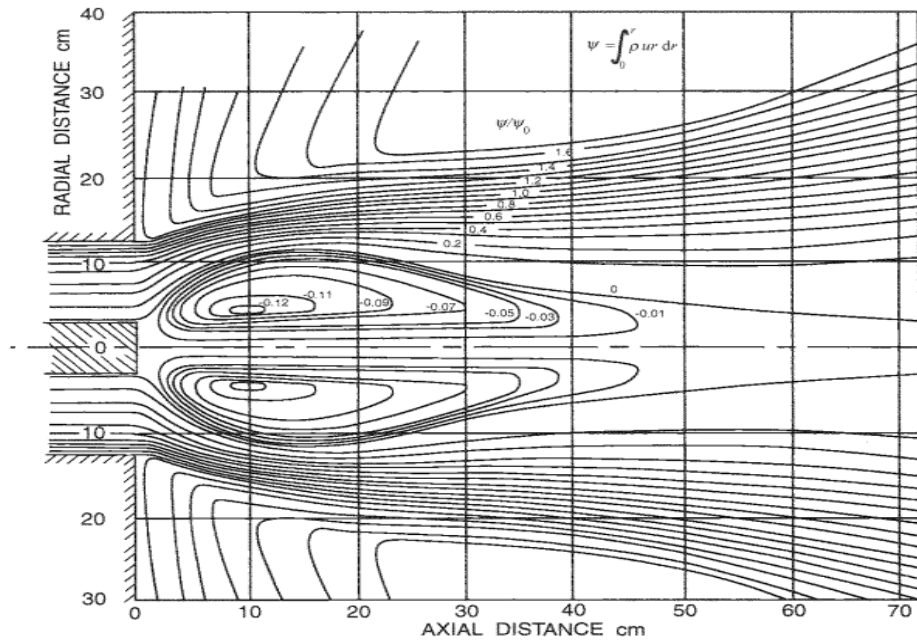
Ο συντελεστής $C_{d,s}$ θεωρείται ότι για ομοιόμορφη ροή προσεγγίζει την μονάδα. Η παροχή \dot{m}_{sn} για κλασικούς θαλάμους καύσεως είναι περίπου το 50% της παροχής της πρωτεύουσας ζώνης. Για τον υπολογισμό του A_{snout} , πραγματοποιείται υπόθεση για το ύψος του ρύγχους. Αυτή η υπόθεση γίνεται με βάση εμπειρικά στοιχεία από κινητήρες, πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ομοιότητα από μεσημβρινές τομές, προφανώς διατηρώντας τον περιορισμό $H_1 < H_{sn} < H_L$. Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.57) υπολογίζεται το A_{de} , οπότε υπολογίζεται και σε ποιο μήκος του διαχύτη τοποθετείται το ρύγχος.

Επιπλέον, η πτώση ολικής πίεσης στο ρύγχος υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$\frac{\Delta P_{sn}}{q_{ref}} = 0.25 \left(\frac{A_{ref}}{A_{de}}\right)^2 \quad (2.58)$$

2.6 Συστροφείς

Η λειτουργία των συστροφέων είναι να μετατρέψουν το προφίλ ταχύτητας της ροής που εισέρχεται στην πρωτεύουσα ζώνη, από αξονικό σε περιφερειακό. Επιτυγχάνοντας αυτήν την μετατροπή, δημιουργούνται στην πρωτεύουσα ζώνη περιοχές ανακυκλοφορίας. Στο **Σχήμα 2.16** φαίνονται οι περιοχές ανακυκλοφορίας που δημιουργεί ο συστροφέας.



Σχήμα 2.16: Γραμμές ροής συστροφέα για δακτυλοειδή θάλαμο καύσης από [1]

Αυτή η περιοχή ανακυκλοφορίας μεταφέρει τα υψηλής θερμοκρασίας καυσαέρια πίσω στο μέτωπο της φλόγας αυξάνοντας την ευστάθεια της φλόγας και εμποδίζοντας το φαινόμενο blow-off. Επιπλέον, η ανακυκλοφορία μεταφέρει στο μέτωπο της φλόγας ένα ποσοστό καυσίμου που δεν είχε καεί αρχικά.

Το αρχικό βήμα του σχεδιασμού των συστροφέων είναι ο υπολογισμός της ολικής πτώσης πίεσης, μέσω της εξίσωσης:

$$\frac{\Delta P_{sw}}{q_{ref}} = \frac{\Delta P_{34}}{q_{ref}} - \frac{\Delta P_{sn}}{q_{ref}} - \frac{\Delta P_{diff}}{q_{ref}} \quad (2.59)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το εμβαδό που έχει ο κάθε συστροφέας μέσω της σχέσης από τον Lefebvre [3].

$$\frac{\Delta P_{sw}}{q_{ref}} = K_{sw} \left(\left(\frac{A_{ref}}{A_{sw}} \right)^2 \sec^2 \beta_{sw} - \left(\frac{A_{ref}}{A_L} \right)^2 \right) \frac{\dot{m}_{sw}}{\dot{m}_3} \quad (2.60)$$

Για την παροχή \dot{m}_{sw} ο Mellor [2] συστήνει ότι πρέπει να λαμβάνει τιμές μεταξύ του:

$$3\% < \dot{m}_{sw} < 12\% \quad (2.61)$$

οπότε επιλέγεται μια τιμή μέσα σε αυτό το όριο. Επιπλέον για τις τιμές των μεταβλητών K_{sw} και β_{sw} , όπου οι αναφορές [3] και [2] συστήνουν τις τιμές:

$$30^\circ < \beta_{sw} < 60^\circ \quad (2.62)$$

$K_{sw} = 1.3$ για ευθύγραμμο πτερύγια και $K_{sw} = 1.15$ για καμπυλωτά πτερύγια.

Αφού υπολογιστεί το εμβαδό του κάθε συστροφέα, ακολουθεί ο υπολογισμός της ακτίνας ποδός και κεφαλής του συστροφέα, όπου ο Khandewal [15] προτείνει την εξής σχέση:

$$A_{sw} = \pi(r_{t,sw}^2 - r_{h,sw}^2) - n_v v_t (r_{t,sw} - r_{h,sw}) \quad (2.63)$$

Για τις άγνωστες μεταβλητές από τον Mellor [2] δίνεται το εύρος του πάχους του κάθε ακροφυσίου (v_t) που κυμαίνεται μεταξύ 0.7 mm και 1.5 mm. Ο αριθμός των ακροφυσίων του κάθε συστροφέα, σύμφωνα με τον Mellor [2], λαμβάνει τιμή μεταξύ 8 και 16.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι μεταβλητές $r_{h,sw}$ και $r_{t,sw}$ χρειάζεται μια ακόμη εξίσωση, η οποία προκύπτει από δεδομένα από άλλους θαλάμους καύσεως. Η σχέση είναι:

$$0.05D_{ref} < r_{at} < 0.075D_{ref} \quad (2.64)$$

Οπότε, επιλέγοντας μια τιμή για την ακτίνα του ψεκαστήρα μέσω της σχέσης (2.64), υπολογίζεται η ακτίνα ποδός των συστροφένων μέσω της σχέσης:

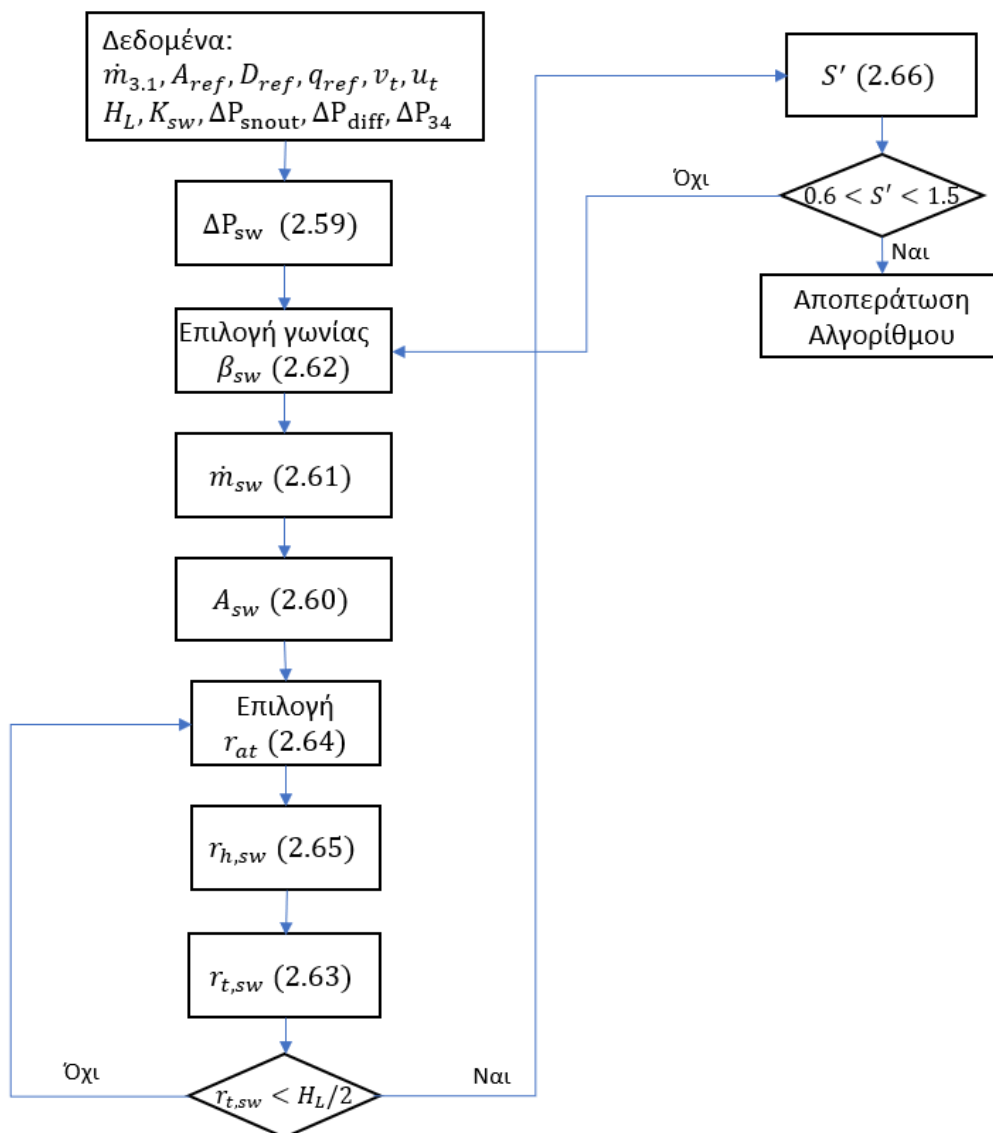
$$r_{h,sw} = r_{at} + v_t \quad (2.65)$$

Στην συνέχεια λύνεται η μη γραμμική εξίσωση (2.63) και προσδιορίζεται έτσι το $r_{t,sw}$. Είναι προφανές ότι πρέπει να γίνει σύγκριση του $r_{t,sw}$ με το $H_L/2$ και στην περίπτωση όπου το $r_{t,sw}$ είναι μεγαλύτερο, πρέπει να μειωθεί η ακτίνα που επιλέχθηκε για τον ψεκαστήρα (r_{at}) και να επανυπολογιστούν οι ακτίνες μέχρι να ισχύει η ανισότητα $r_{t,sw} < H_L/2$. Αφότου υπολογιστεί η γεωμετρία των συστροφένων, το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί ο αδιάστατος αριθμός συστροφής (S') μέσω της σχέσης:

$$S' = \frac{2}{3} \tan \beta_{sw} \frac{1 - \left(\frac{r_{h,sw}}{r_{t,sw}}\right)^3}{1 + \left(\frac{r_{h,sw}}{r_{t,sw}}\right)^3} \quad (2.66)$$

Σύμφωνα με τον Mattingly [1], προκειμένου να επιτευχθεί ανακυκλοφορία, είναι απαραίτητο να ισχύει $S' > 0.6$. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Lilley [16], η διάμετρος και το μήκος της ζώνης ανακυκλοφορίας αυξάνεται μέχρι την τιμή $S' = 1.5$. Τιμές μεγαλύτερες από αυτές οδηγούν σε αύξηση της διαμέτρου και σε μείωση του μήκους της ζώνης ανακυκλοφορίας, οπότε τελικά $0.6 < S' < 1.5$. Στην περίπτωση όπου στην υλοποίηση το αλγόριθμο προκύψει τιμή S' μη επιτρεπτή, επιλέγεται διαφορετική γωνία β_{sw} .

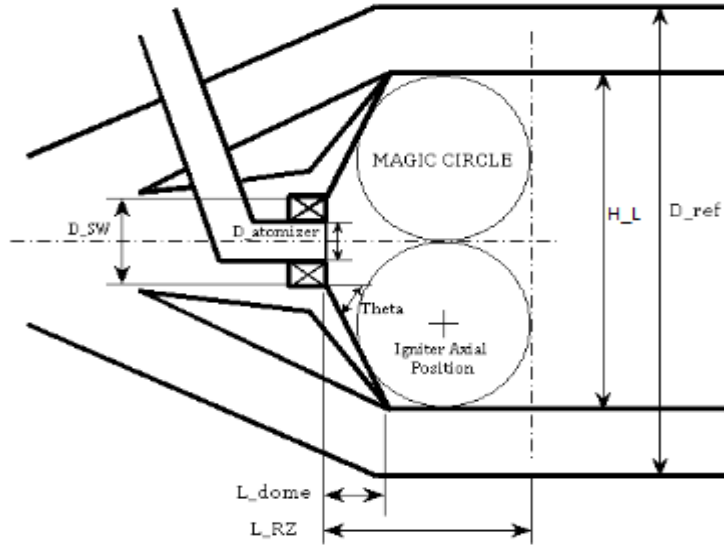
Παρατίθεται σε διάγραμμα ροής ο αλγόριθμος σχεδιασμού των συστροφένων:



Σχήμα 2.17: Αλγόριθμος σχεδιασμού συστροφέων

2.7 Ζώνη ανακυκλοφορίας, αναφλεκτήρας & θόλος

Το επόμενο στάδιο της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης είναι η διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων της πρωτεύουσας ζώνης. Αυτό θα επιτευχθεί υπολογίζοντας το μήκος της ζώνης ανακυκλοφορίας, την θέση που τοποθετείται ο αναφλεκτήρας, το μήκος και τη γωνία του θόλου. Η προαναφερόμενη γεωμετρία φαίνεται στο **Σχήμα 2.18**. Οι κύκλοι <<Magic Circle>> ορίζουν την ζώνη ανακυκλοφορίας και έχουν σαν σκοπό να σκιαγραφήσουν τα μοτίβα της ανακυκλοφορίας. Σχεδιάζονται έχοντας σαν διάμετρο το μισό ύψος του μανδύα ($H_L/2$), ενώ συγχρόνως πρέπει να εφάπτονται στον μανδύα, στον κεντρικό άξονα και στον θόλο.



Σχήμα 2.18 Γεωμετρία δομικών στοιχείων πρωτεύουσας ζώνης

Ο αναφλεκτήρας (igniter) τοποθετείται στην θέση όπου το μείγμα αέρα-καυσίμου είναι πλούσιο. Προτείνεται από [11] ο αναφλεκτήρας να τοποθετηθεί εκεί όπου οι <<Magic Circles>> εφάπτονται με τα τοιχώματα του μανδύα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.18**. Οπότε τελικά το μήκος προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$L_{ig} = \frac{H_L}{4} \left(1 + \cot \left(\frac{\pi - \theta_{do}}{2} \right) \right) + L_{do} - \frac{H_L}{4} \quad (2.67)$$

Για την γωνία θ_{dome} είτε με βάση εμπειρικά στοιχεία θα θεωρηθεί 60° , είτε θα χρησιμοποιηθεί η εξής εξίσωση:

$$\theta_{do} = \cos^{-1} \left[\frac{H_L(2D_{sw} - H_L) + (H_L - 4L_{RZ})\sqrt{H_L^2 - 4H_LD_{sw} + 4D_{sw}^2 - 8H_LL_{RZ} + 16L_{RZ}^2}}{2H_L^2 - 4H_LD_{sw} + 4D_{sw}^2 - 8H_LL_{RZ} + 16L_{RZ}^2} \right] \quad (2.68)$$

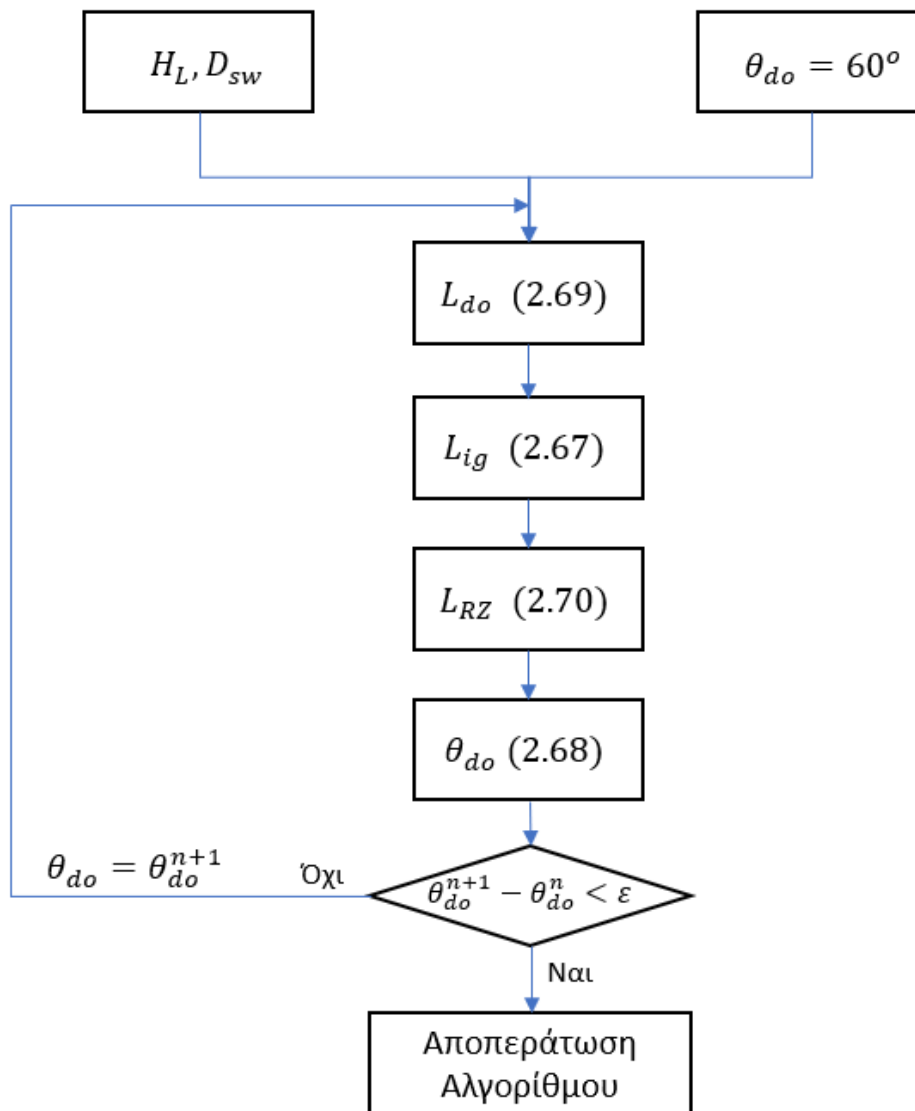
Και για το μήκος του θόλου θα αξιοποιηθεί η εξής εξίσωση:

$$L_{do} = \frac{H_L - D_{sw}}{2 \tan(\theta_{do})} \quad (2.69)$$

Τέλος για το μήκος της ζώνης ανακυκλοφορίας θα χρησιμοποιηθεί η εξής σχέση:

$$L_{RZ} = L_{ig} + \frac{H_L}{4} \quad (2.70)$$

Λόγω της περίπλοκης εξίσωσης της γωνίας του θόλου δεν θα πραγματοποιηθεί επίλυση του συστήματος των εξισώσεων με την μέθοδο Newton-Raphson, αλλά θα γίνει αρχικοποίηση της γωνίας του θόλου ($\theta_{do} = 60^\circ$) και θα ενημερώνεται η τιμή της γωνίας σε κάθε βρόχο (**Σχήμα 2.19**) μέχρι η διαφορά των τιμών $|\theta_{do}^{n+1} - \theta_{do}^n|$ να γίνει μικρότερη από το ε . Το ε π.χ. μπορεί να λάβει την τιμή $\varepsilon = 10^{-4}$. Σε περίπτωση που δεν επιτευχθεί σύγκλιση επιλέγεται σαν τιμή της γωνίας η αρχική.



Σχήμα 2.19: Αλγόριθμος σχεδιασμού θόλου και αναφλεκτήρα

2.8 Εσωτερικές περιοχές μανδύα

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία διαστασιολόγησης του χαρακτηριστικών περιοχών του μανδύα (πρωτεύουσα, δευτερεύουσα ζώνη και ζώνη αραίωσης).

Για τον σχεδιασμό του θαλάμου καύσεως (πρωτεύουσα ζώνη, δευτερεύουσα ζώνη και ζώνη αραίωσης) θα θεωρηθούν σαν δεδομένα τα εξής:

- C_{d90° : Συντελεστής οπών
- S' : Αδιάστατος αριθμός συστροφεία
- $r_{sw,t}$: Ακτίνα κεφαλής συστροφεία

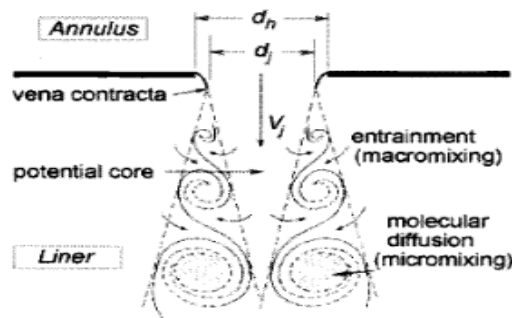
- ΔP_L : Πτώση ολική πίεσης κατά μήκος του μανδύα
- $P_{t_{3.2}}$: Ολική πίεση στην έξοδο του διαχύτη
- P_{t_4} : Ολική πίεση στην είσοδο του στροβίλου
- $\rho_{3.2}$: Πυκνότητα στην έξοδο του διαχύτη

Για την πρωτεύουσα ζώνη, για να υπολογιστεί το μήκος της πρέπει αρχικά να διαστασιολογηθούν οι συστροφείς το οποίο, έχει ήδη πραγματοποιηθεί οπότε από Mattingly [1]:

$$L_{PZ} = 2S' r_{sw,t} \quad (2.71)$$

Εφόσον καθορίστηκε το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των οπών της δευτερεύουσας ζώνης, της ζώνης αραίωσης καθώς και των μηκών της κάθε προαναφερθείσας ζώνης.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία για τον υπολογισμό της διαμέτρου και τον αριθμό των οπών για την ανάμειξη στην δευτερεύουσα ζώνη και στην ζώνη αραίωσης. Το **Σχήμα 2.20** δείχνει την τοπική γεωμετρία και την κατάσταση της ροής στην περιοχή των οπών.



Σχήμα 2.20: Γεωμετρία και συνθήκες ροής στην περιοχή των οπών από [1].

Λαμβάνεται η θεώρηση ότι η ροή είναι ισεντροπική από την δακτυλοειδής διατομή (Annulus) στην συγκλίνουσα δέσμη (vena contracta) οπότε ισχύει η εξίσωση Bernoulli, άρα η ταχύτητα στην συγκλίνουσα δέσμη μπορεί να υπολογιστεί από την διαφορά της στατικής πίεσης των δύο πλευρών της οπής, οπότε:

$$P_A = P_j + \frac{1}{2} \rho_j V_j^2 \quad (2.72)$$

Η πυκνότητα του αέρα στην συγκλίνουσα δέσμη ισούται με αυτήν στην δακτυλοειδής διατομή και για την στατική πίεση στην συγκλίνουσα δέσμη ισχύει ότι ισούται με την στατική πίεση στην εσωτερική περιοχή του μανδύα (Liner), οπότε τελικά:

$$V_j = \sqrt{\frac{2(P_A - P_L)}{\rho_A}} \quad (2.73)$$

Καθώς γίνεται η ανάμειξη όλη η δυναμική πίεση της δέσμης αέρας μετατρέπεται σε θερμότητα εξαιτίας της τριβής και της τύρβης, οπότε ισχύει:

$$\Delta P_t = P_{tA} - P_{tL} = \frac{1}{2} \rho_A V_j^2 = q_j \quad (2.74)$$

Οπότε, αξιοποιώντας την εξίσωση (2.73) & (2.74):

$$V_j = U_r \sqrt{\frac{\Delta P_t}{q_r MB}} \quad (2.75)$$

Και

$$U_r = \sqrt{2\rho_{3.2}(P_{t3.2} - P_{3.2})} \quad (2.76)$$

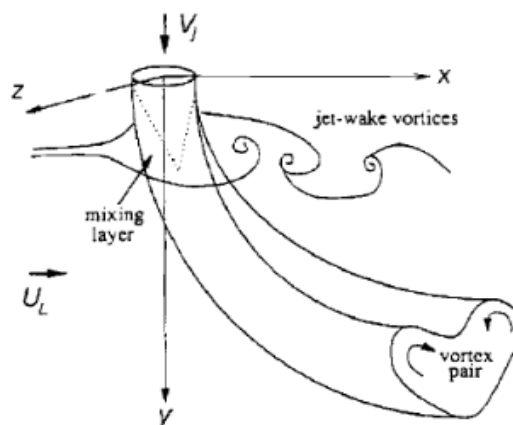
Η σχέση (2.76) ισχύει και για τις σπές που τοποθετούνται στην αρχή της ζώνης αραίωσης. Στην συνέχεια γίνονται υπολογισμοί για την διείδυση αυτών των δεσμών αέρα στον μανδύα. Από τον Lefebvre [3] καθορίζεται ότι το βάθος διείδυσης δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\frac{Y}{d_j} = 0.82J^2 \left(\frac{X}{d_j}\right)^2 \quad (2.77)$$

Όπου:

$$J = \frac{\rho_A V_j^2}{\rho_L U_L^2} \quad (2.78)$$

ρ_L : Η πυκνότητα του καυσαερίου μέσα στον μανδύα (Liner)



Σχήμα 2.21: Δέσμη αέρα που διείδυει από [1]

Όπου για το μέγιστο βάθος διείδυσης:

$$\frac{Y_{max}}{d_j} = 1.15J^{0.5} \quad (2.79)$$

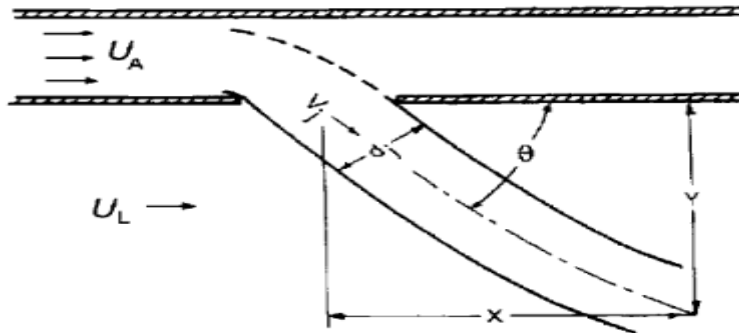
Λόγο του ότι στην πραγματικότητα η δέσμη εισάγεται υπό μια γωνία (θ) **Σχήμα 2.22**.

Ο Lefebvre [3] προτείνει την εξής σχέση:

$$\frac{Y_{max}}{d_j} = 1.15J^{0.5}\sin\theta = 1.15\sqrt{\frac{q_j}{q_L}\left(1 - \frac{q_A}{q_j}\right)} \quad (2.80)$$

Όπου πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με το q_r :

$$\frac{Y_{max}}{d_j} = 1.15J^{0.5}\sin\theta = 1.15\sqrt{\frac{q_j q_r}{q_r q_L}\left(1 - \frac{q_A q_r}{q_r q_j}\right)} \quad (2.81)$$



Σχήμα 2.22: Διείσδυση δέσμης αέρα υπό γωνία θ από [1]

Για τα κλάσματα δυναμικών πιέσεων και τις άλλες άγνωστες μεταβλητές που εμφανίζονται μέσα στους αναλυτικούς τύπους ισχύει:

$$\frac{q_j}{q_r} = \frac{\Delta P_t}{q_r} \quad (2.82)$$

Αυτό το κλάσμα είναι κοινό για την περιοχή δευτερεύουσα ζώνη και την ζώνη αραίωσης.

Για την δευτερεύουσα ζώνη ισχύουν οι τύποι:

$$\frac{q_A}{q_r} = \left(\frac{\mu_{DZ} + \mu_{SZ}}{1 - \alpha_{opt}}\right)^2 \quad (2.83)$$

$$\frac{q_L}{q_r} = \tau_{PZ} \left(\frac{\mu_{PZ}}{\alpha_{opt}}\right)^2 \quad (2.84)$$

$$d_j = \frac{1}{4}H_L \left(\frac{Y_{max}}{d_j}\right)^{-1} \quad (2.85)$$

Για τον αριθμό των σπών στην δευτερεύουσα ζώνη ισχύει:

$$N_{hsz} = \mu_{SZ} \left(\frac{4A_r}{\pi d_j^2}\right) \frac{U_r}{V_j} \quad (2.86)$$

Για την γωνία που εισέρχεται η δέσμη αέρα της δευτερεύουσας ζώνης ισχύει:

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \frac{q_r q_A}{q_j q_r}} \quad (2.87)$$

$$d_h = \frac{d_j}{\sqrt{C_{D90^\circ} \sin\theta}} \quad (2.88)$$

Ενώ για την ζώνη αραίωσης:

$$\frac{q_A}{q_r} = \left(\frac{\mu_{DZ}}{1 - a_{opt}} \right)^2 \quad (2.89)$$

$$\frac{q_L}{q_r} = \tau_{PZ} \left(\frac{\mu_{PZ} + \mu_{SZ}}{a_{opt}} \right)^2 \quad (2.90)$$

$$d_j = \frac{1}{3} H_L \left(\frac{Y_{max}}{d_j} \right)^{-1} \quad (2.91)$$

Για τον αριθμό των σπών στην ζώνη αραίωσης ισχύει:

$$N_{hDZ} = \mu_{DZ} \left(\frac{4A_r}{\pi d_j^2} \right) \frac{U_r}{V_j} \quad (2.92)$$

Για τον αριθμό των σπών στην ζώνη αραίωσης ισχύει:

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \frac{q_r q_A}{q_j q_r}} \quad (2.93)$$

$$d_h = \frac{d_j}{\sqrt{C_{D90^\circ} \sin\theta}} \quad (2.94)$$

Έχοντας υπολογίσει τα προηγούμενα, σειρά έχει το μήκος κάθε ζώνης όπου ισχύει:

$$L_{SZ} = 0.5H_L \quad (2.95)$$

$$L_{DZ} = 1.5 \sim 2H_L \quad (2.96)$$

Και τελικά για όλο τον θάλαμο καύσης ισχύει:

$$L_L = L_{PZ} + L_{SZ} + L_{DZ} \quad (2.97)$$

Παρατηρείται ότι οι σχέσεις υπολογισμού του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης και του μήκους της ζώνης αραίωσης είναι αρκετές απλές οπότε προτείνεται ο εξής αλγόριθμος:

Αρχικά γίνεται η εκτίμηση του μήκους των προαναφερθέντων ζωνών με την χρήση των απλοϊκών σχέσεων. Στην συνέχεια με βάση τα αποτελέσματα υπολογίζεται το Pattern Factor μέσω ημιεμπειρικής σχέσης που προτείνει ο Lefebvre [3]:

$$PF = 1 - e^{\left[-0.05 \frac{L_L \Delta P_L}{H_L q_{ref}}\right]^{-1}} \quad (\text{Δακτυλιοειδής}) \quad (2.98)$$

$$PF = 1 - e^{\left[-0.07 \frac{L_L \Delta P_L}{H_L q_{ref}}\right]^{-1}} \quad (\text{Σωληνο – Δακτυλιοειδής}) \quad (2.99)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το μήκος της ζώνης αραίωσης από Sawyer [11]:

$$L_{DZ} = H_L (3.83 - 11.83 + 13.84 PF^2) \quad (2.100)$$

Για τον υπολογισμό του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης θα αξιοποιηθούν οι απλές σχέσεις που προτείνει η αναφορά [21], προκειμένου να προσδιοριστεί ο λόγος των μηκών των ζωνών, οπότε:

$$L_{SZ} = \frac{1}{3} L_{DZ} \quad (2.101)$$

Τελικά επανυπολογίζεται το ολικό μήκος L_L μέσω της εξίσωσης (2.97) και επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος έως να εμφανιστεί σύγκλιση.

Όπως αναφέρθηκε οι δύο ημιεμπειρικές σχέσεις (2.98 & 2.99) που συνδέουν τα μήκη με τον αριθμό (PF) προκύπτουν από διαφορετικές πηγές, οπότε η συσχέτιση μπορεί να έχει προέλθει από διαφορετικούς θαλάμους καύσεως. Με βάση τα προηγούμενα υπάρχει πιθανότητα τα αποτελέσματα να είναι μη δυνατά $PF < 0.15$. Οπότε σε αυτήν την περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί άλλος αλγόριθμος που παρουσιάζεται παρακάτω.

Πρώτο βήμα η επιλογή τιμής για την μεταβλητή (PF), $0.20 < PF < 30$. Στην συνέχεια ανάλογα της διάταξης του θαλάμου καύσεως, υπολογίζεται το μήκος από τις εξισώσεις (2.23) & (2.24). Γνωρίζοντας το L_L υπολογίζεται το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης από την εξίσωση (2.95). Τέλος, υπολογίζεται το μήκος της ζώνης αραίωσης από την σχέση:

$$L_{DZ} = L_L - L_{PZ} - L_{SZ} \quad (2.102)$$

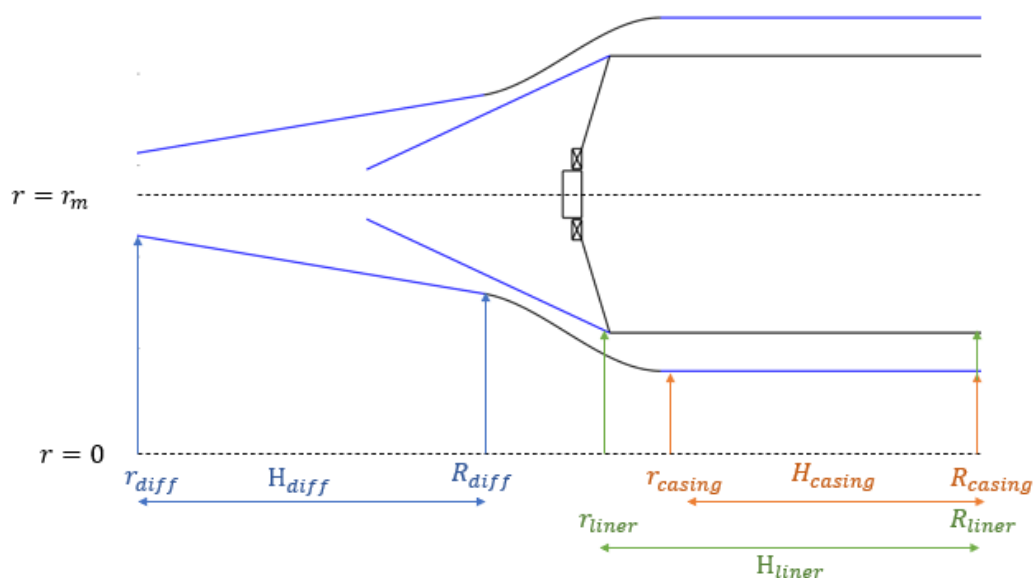
Επιπλέον, επειδή όπως αναφέρθηκε η μεταβλητή $\Delta P_{3-4}/q_{ref}$ δεν είναι γνωστή, αλλά ακόμη και αν είναι γνωστή η διαστασιολόγηση δεν επιφέρει ικανοποιητικά

αποτελέσματα, κρίνεται απαραίτητο για το εμβαδόν αναφοράς να εφαρμοστεί η εξίσωση (2.28) που προτείνει ο Fletcher [19] και για μήκη να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις (2.95, 2.96 και 2.97).

2.9 Εκτίμηση Βάρους

Προκειμένου να επιτευχθεί η εκτίμηση του βάρους του θαλάμου καύσεως κρίνεται απαραίτητο η απλοποίηση της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης (**Σχήμα 2.23**), ώστε να υπολογιστεί ο όγκος του δακτυλίου. Η απλοποίηση γίνεται λόγω μη γνώσης της καμπύλης του μανδύα στην πρωτεύουσα ζώνη, οπότε θεωρείται ότι είναι ευθεία η οποία ευθεία έχει αφηγηρία τον συστροφέα και καταλήγει στην αρχή της δευτερεύουσας ζώνης. Οι άγνωστες μεταβλητές είναι οι εξής:

- t_D : Πάχος τοιχωμάτων διαχύτη
- t_{casing} : Πάχος τοιχωμάτων κελύφους
- t_L : Πάχος τοιχωμάτων μανδύα
- Υλικό τοιχωμάτων διαχύτη (για να είναι γνωστή η πυκνότητα του μετάλλου)
- Υλικό τοιχωμάτων κελύφους
- Υλικό τοιχωμάτων μανδύα



Σχήμα 2.23: : Γεωμετρία τοιχωμάτων θαλάμου καύσεως

Για να προσδιοριστούν τα πάχη των τοιχωμάτων θα χρησιμοποιηθούν εμπειρικά δεδομένα συμπεριλαμβανομένων και μετρήσεων των τοιχωμάτων του κινητήρα J79 που βρίσκεται στο εργαστήριο θερμικών στροβιλομηχανών. Για τα τοιχώματα του διαχύτη και του κελύφους θεωρήθηκε ότι έχουν κατασκευαστεί από χάλυβα, αφού σε αντίθεση με τα τοιχώματα του μανδύα δεν έχουν απαιτήσεις για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Για τα τοιχώματα του μανδύα θα αξιοποιηθεί ο **Πίνακας 2.2**.

Πίνακας 2.2: Υλικά μανδύα θαλάμου καύσεως από [26]

<u>Material</u>	<u>Max. Temperature (K)</u>
Nimonic 75	~ 973 - 1023
Hastelloy X	~ 1023 – 1073
Nimonic C263	~ 1023 – 1123
Haynes 188000	~1173
TD Nickel	~ 1173 – 1323
TBCs	~ +80 – 120
Ceramics	~ 1573 – 1773

Η επιλογή του υλικού των τοιχωμάτων του μανδύα θα πραγματοποιηθεί αξιοποιώντας το ότι στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση του θαλάμου καύσεως, προκειμένου να υπολογιστεί το απαραίτητο ποσοστό αέρα που απαιτείται για την ψύξη επιλέγηκε η τιμή T_m . Επιπλέον υλικά είναι δυνατό να βρεθούν στο Παράρτημα Μ της αναφοράς [1], όπου και δίνονται πληροφορίες για πυκνότητες υλικών και αντοχές σε κόπωση. Οπότε, έχοντας σαν δεδομένο την τιμή T_m και χρησιμοποιώντας τον **Πίνακα 2.2** ή την αναφορά [1] επιλέγεται το κατάλληλο υλικό.

Έχοντας σαν δεδομένα τα πάχη και υλικά του κάθε τμήματος ακολουθεί ο υπολογισμός του συνολικού όγκου των τοιχωμάτων. Η εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του όγκου είναι αυτή του όγκου του κόλουρου κώνου. Η γεωμετρία που θεωρείται είναι αυτή του **Σχήματος 2.23**.

Στο **Σχήμα 2.23** παρουσιάζονται οι περιοχές στις οποίες υπολογίζονται οι μάζες των υλικών, η άνω πλευρά ($r > r_m$) δεν έχει παρουσιαστεί για λόγους ευκρίνειας του σχήματος. Τα (r) , (R) και (H) αντιστοιχούν στην εξίσωση (2.103).

$$V = \frac{1}{3}\pi(R^2 + rR + r^2)H \quad (2.103)$$

$$m = \rho V \quad (2.104)$$

Για να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος των τοιχωμάτων του διαχύτη θεωρείται ότι τα τοιχώματα που βρίσκονται στην περιοχή ($r < r_m$), ορίζουν δύο διαφορετικούς

κόλουργους κώνους, ο ένας με ακτίνα r_{diff} και ο άλλος με ακτίνα $(r_{diff} - t_{diff})$. Οπότε, ο όγκος των τοιχωμάτων δίνεται από την διαφορά του όγκου των κόλουργων κώνων οπότε:

$$V_{diff} = \frac{1}{3}\pi H_{diff} \left[R_{diff}^2 + r_{diff}R_{diff} + r_{diff}^2 - (R_{diff} - t_{diff})^2 - (r_{diff} - t_{diff})(R_{diff} - t_{diff}) - (r_{diff} - t_{diff})^2 \right] \quad (2.105)$$

Εφόσον έχει υπολογιστεί ο όγκος τότε υπολογίζεται η μάζα των τοιχωμάτων μέσω της εξίσωσης (2.105). Παρόμοια μεθοδολογία ακολουθείται και για τις περιοχές. Στην άνω περιοχή ($r > r_m$) θεωρείται ότι ο όγκος των τοιχωμάτων δίνεται από την σχέση: $V = V(r + t) - V(r)$.

2.10 Συζήτηση επί της μεθοδολογίας διαστασιολόγησης

Κρίνεται καίριο να αναφερθούν οι απλοποιήσεις που λήφθηκαν κατά την διάρκεια της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης, αλλά και αντικρουόμενες θεωρήσεις άλλων μεθοδολογιών διαστασιολόγησης.

Αρχικά η βασική απλοποίηση που έλαβε χώρα είναι η θεώρηση ότι το ύψος του μανδύα σε κάθε ζώνη του θαλάμου καύσεως παραμένει σταθερό. Στην πραγματικότητα τα τοιχώματα συγκλίνουν σε κάθε ζώνη, με πιο έντονη σύγκλιση αυτήν στην ζώνη αραίωσης (Παράρτημα Α.). Πιο ειδικά στην πραγματικότητα στην ζώνη αραίωσης ο κάτω δακτύλιος του μανδύα συγκλίνει έως να αποκτήσει την ακτίνα ποδός των πρώτων σταθερών πτερύγων του στροβίλου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η διαστασιολόγηση μας να πραγματοποιεί αύξηση του όγκου του θαλάμου καύσεως στην ζώνη αραίωσης, αποτέλεσμα που σε μετέπειτα μελέτες της θερμοχημείας της καύσης οδηγεί σε μικρά λάθη στον υπολογισμό των εκπομπών ρύπων. Η σύγκλιση των τοιχωμάτων στην ζώνη της αραίωσης είναι απαραίτητη στην περίπτωση που πραγματοποιηθεί και υπολογιστική ρευστομηχανική ανάλυση της ροής.

Οι αντικρουόμενες θεωρήσεις σχετίζονται με την μεθοδολογία διαχωρισμού των ροών. 1^ο η αναφορά [24] του 2017 αναφέρει ότι η μεθοδολογία του Mattingly [1] για των διαχωρισμό των ροών δεν ισχύει για πλούσια μείγματα στην πρωτεύουσα ζώνη ($\varphi_{PZ} > 1$). Αυτό το γεγονός δεν αναφέρεται στον Mattingly [1]. Η αναφορά [24] προτείνει την λύση ενός συστήματος τεσσάρων εξισώσεων για την εύρεση της θερμοκρασίας (T_g). Όμως αξίζει να αναφερθεί ότι στην μεθοδολογία της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης, αφού πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση λαμβάνει χώρα και εύρεση της τιμής (T_g), μέσω βρόχου αξιοποιώντας το λογισμικό Cantera. Οπότε τελικά υπάρχει η δυνατότητα της αρχικοποίησης της τιμής (T_g) μέσω της αναφοράς για πιο γρήγορη σύγκλιση του βρόχου.

2^ο Ο Mellor [2] προτείνει τελείως διαφορετική μεθοδολογία υπολογισμού των κλασμάτων ροής. Αρχικά αναφέρει ότι η παροχή μάζας του συστροφέα πρέπει να

κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 11% και 13.5% ενώ στην παρούσα μεθοδολογία κυμαίνεται μεταξύ 3% έως 12%. Επιπλέον αναφέρει για την ψύξη του θόλου ότι είναι απαραίτητο ο ρυθμός ψύξης να έχει την τιμή $0.5 \text{ Kg s}^{-1} \text{ m}^2 \text{ atm}^{-1}$ δίχως να αναφέρει τον αναλυτικό τύπο του υπολογισμού του ρυθμού ψύξης. Επιπλέον αναφέρει ότι για τον υπολογισμό του αριθμού (φ_{PZ}) επιλέγεται τιμή μεταξύ των ορίων 1.4 και 1.5, το οποίο δεν έχει παρατηρηθεί για κινητήρες που είναι γνωστά τα δεδομένα τους (CFM-56) και έρχεται σε αντίθεση με τον Fletcher [19] που προτείνει την τιμή $\varphi_{PZ} = 1.05$.

2.11 Αριθμητική εφαρμογή

Θα παρουσιαστεί μια λεπτομερής διαστασιολόγηση για ένα θάλαμο καύσης με δεδομένα από τον κινητήρα J79, χρησιμοποιώντας, όπως αναφέρθηκε, την μεθοδολογία που προτείνουν οι Mattingly [1] και Lefebvre [3]. Η επιλογή του J79 έγινε με κριτήριο την ύπαρξη αυτού του κινητήρα στο εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών και την άμεση δυνατότητα μέτρησης των πραγματικών μεγεθών του θαλάμου καύσεως. Οπότε είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την διαστασιολόγηση με τα μετρούμενα.

Η αρχική γεωμετρική διαστασιολόγηση πραγματοποιείται προκειμένου να λάβουμε τα απαραίτητα γεωμετρικά μεγέθη τα οποία είναι καίρια για τα επόμενα βήματα της διαστασιολόγησης. Επιπλέον, τα αποτελέσματα αυτά είναι δυνατόν να συγκριθούν με τα πραγματικά, προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης. Αυτά τα μεγέθη είναι τα μήκη και τα ύψη των ζωνών, ο αριθμός οπών στην δευτερεύουσα και πρωτεύουσα ζώνη, τα ποσοστά του αέρα στην διάφορες ζώνες.

Αντίστοιχα, έγινε παρόμοια σύγκριση των αποτελεσμάτων για τον θάλαμο καύσεως του CFM56. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί και σύγκριση αυτής της μεθοδολογίας σχετικά με τα πραγματικά μήκη τεσσάρων διαφορετικών αεροπορικών κινητήρων.

2.11.1 Κινητήρας J79

Στην συνέχεια παρατίθενται (Πίνακας 2.3) τα δεδομένα εισόδου τα οποία θεωρούνται γνωστά για τον J79.

Πίνακας 2.3: Δεδομένα J79

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
T_{t3}	[K]	662.15
P_{t3}	[Pa]	$12 \cdot 10^5$
\dot{m}_3	[kg/s]	73
T_{t4}	[K]	1279.2
$r_{h3.1}$	[m]	0.312
$r_{t3.1}$	[m]	0.356

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων: Επιλέγηκε η μέθοδος του Lefebvre για το A_{ref} , η μέθοδος του Mattingly για το AL , για το συνολικό μήκος χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.24) και για το μήκος αραίωσης η σχέση (2.102).

Ακολουθούν οι τιμές των μεταβλητών (Πίνακας 2.4) που επιλέγηκαν με βάση εμπειρικά στοιχεία.

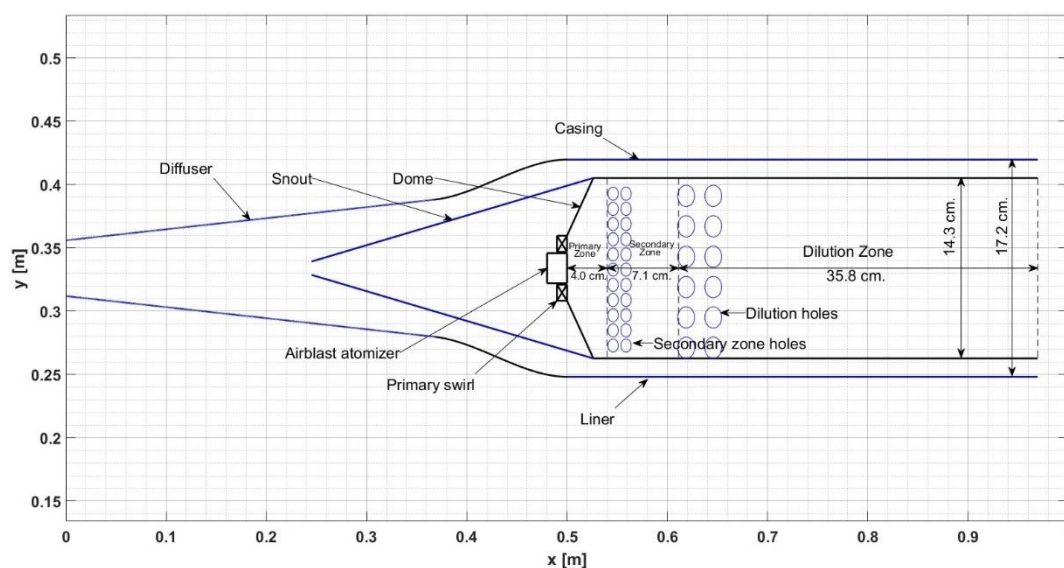
Πίνακας 2.4: Τιμές σχεδιαστικών μεταβλητών

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
M_{32}	[-]	0.1
$\Delta P_{34}/q_{ref}$	[-]	20
$\Delta P_{34}/P_{t3}$	[-]	0.05
τ_{pZ}	[-]	4
ε_{pZ}	[-]	0.76
Cooling Method	[-]	Film
T_m	[K]	1228
θ_{dome}	[°]	60
μ_{sw}	[-]	0.10
K_{sw}	[-]	1.30
β_{sw}	[°]	45
v_t	[mm]	1.0
n_v	[-]	8
r_{at}	[m]	0.0108
C_D	[-]	0.64
PF	[-]	0.20

Ακολουθούν τα αποτελέσματα και η σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης του J79 (Πίνακας 2.5):

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
L_{diff}	[m]	0.368
D_{ref}	[m]	0.172
H_L	[m]	0.143
L_{PZ}	[m]	0.040
L_{SZ}	[m]	0.071
L_{DZ}	[m]	0.358
L_L	[m]	0.470

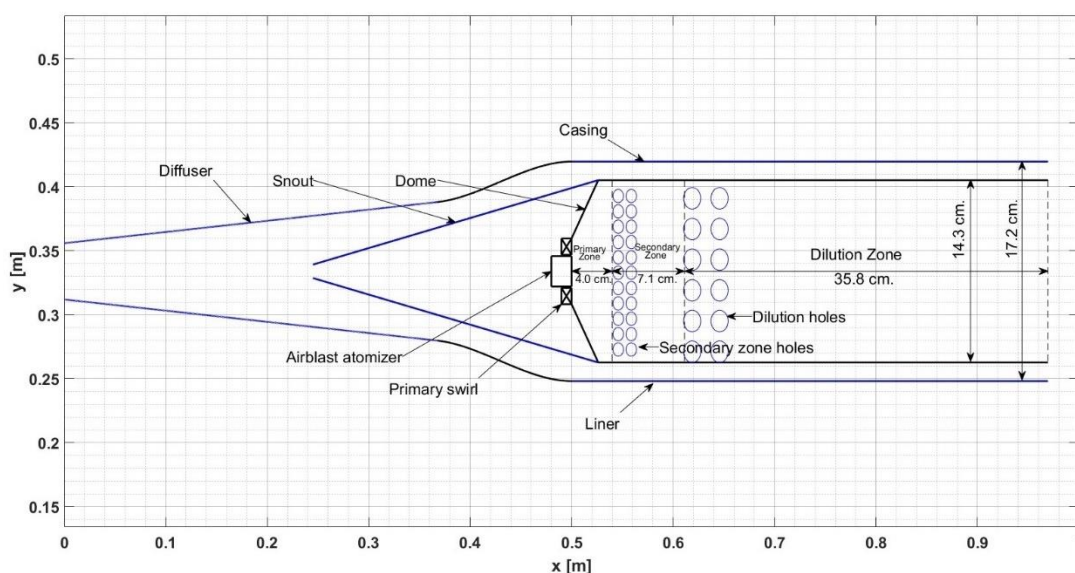
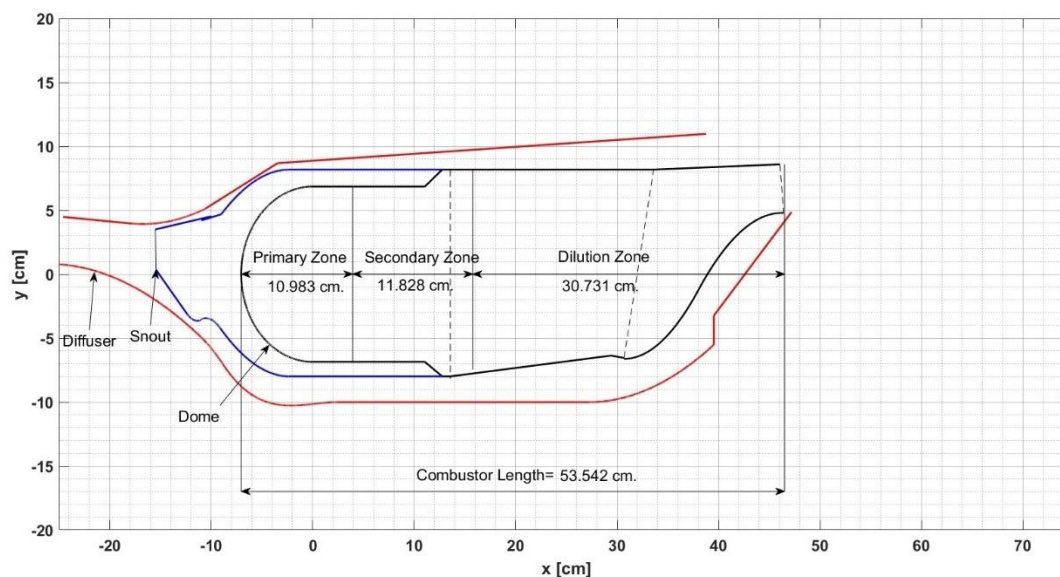


Σχήμα 2.24: Διάταξη θαλάμου καύσεως του J79 που προσδιορίστηκε από την προκαταρκτική διαστασιολόγηση

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι ο θάλαμος καύσης ο J79 είναι σωληνο-δακτυλιοειδής. Αυτή η θεώρηση λήφθηκε υπόψη σύμφωνα με τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.3.

Για τον υπολογισμό του μήκους χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (2.24) που είναι προσαρμοσμένη για θαλάμους καύσεως διάταξης τύπου σωληνο-δακτυλιοειδείς. Ενώ το μήκος της ζώνης αραίωσης υπολογίστηκε από την εξίσωση (2.102).

Στην συνέχεια ακολουθεί το **Σχήμα 2.25** όπου πραγματοποιείται η σύγκριση των διαστάσεων που υπολογίστηκαν με τις διαστάσεις που μετρήθηκαν στον J79.



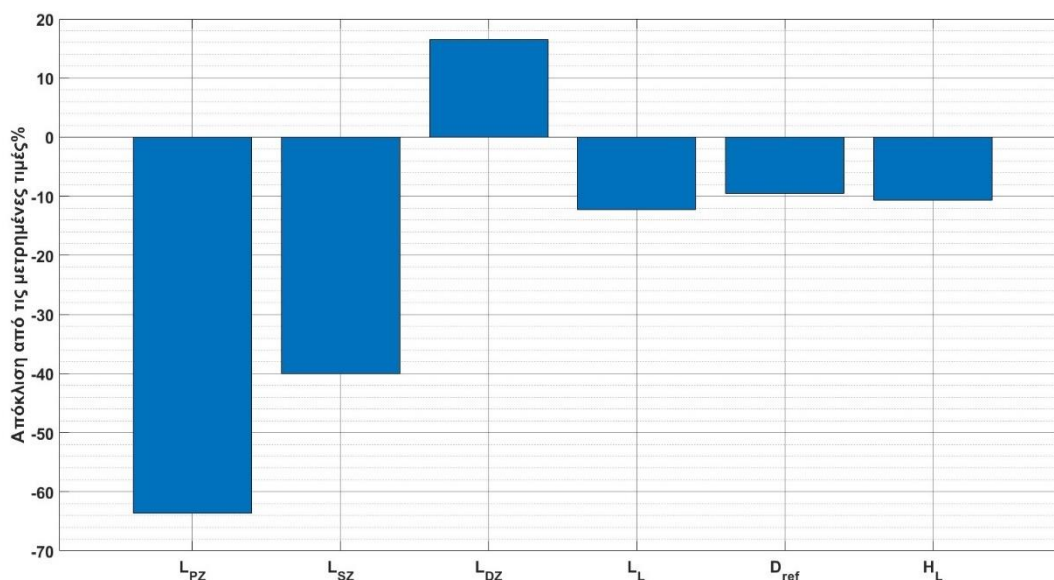
Σχήμα 2.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων προκαταρκτικής διαστασιολόγησης με τις διαστάσεις του J79 που μετρήθηκαν επιτόπου.

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαστάσεις αναφοράς που ήταν διαθέσιμες για μέτρηση. Αυτές ήταν το μήκος μεταξύ των δύο διακεκομμένων γραμμών στο **Σχήμα 2.25** καθώς και το ύψος της ζώνης αραίωσης. Αυτές οι μετρήσεις λήφθηκαν από τον κινητήρα J79 που βρίσκεται στο εργαστήριο θερμικών στροβιλομηχανών. Αφού μετρήθηκαν αυτές οι δύο τιμές και έχοντας διαθέσιμη την αξονική τομή του θαλάμου καύσης (Παράρτημα Α), υπολογίστηκε ένας μέσος αριθμός l_{ref} (cm/px) ώστε να υπολογιστούν και οι υπόλοιπες διαστάσεις. Οι τελικές διαστάσεις περιέχουν μια μικρή ανακρίβεια, για παράδειγμα το μήκος του θαλάμου καύσεως είναι 48.26 cm αντί για 53.542 cm.

Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι ο διαχύτης στον J79 βάση του **Σχήματος 2.25**,

έχει σχεδόν μηδενική γωνία και το ρύγχος ουσιαστικά επιβραδύνει την ταχύτητα οπότε η διαφορά του μήκους στον διαχύτη είναι αναμενόμενη.

Στο επόμενο σχήμα ακολουθεί η ποσοστιαία διαφορά των αποτελεσμάτων:



Σχήμα 2.26: Απόκλιση αποτελεσμάτων προκαταρκτικής διαστασιολόγησης από τα μετρημένα

Αρχικά αξίζει να αναφερθεί ότι η διάμετρος αναφοράς (D_{ref}) που υπολογίστηκε είναι λίγο μικρότερη με την πραγματική, αποτελέσματα που δείχνουν την μικρή ανακρίβεια των τύπων του Lefebvre. Πιο συγκεκριμένα η μεταβλητή $\Delta P_{34}/q_{ref}$ θεωρήθηκε ότι έχει την τιμή 20, χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.3. Παρομοίως το ύψος του μανδύα (H_L) είναι λίγο μικρότερο με το πραγματικό, αλλά ο λόγος του D_{ref}/H_L είναι σχεδόν ίσος με τον πραγματικό, αποτελέσματα που επίσης αποδεικνύει την εγκυρότητα της σχέσης του Mattingly. Αυτά τα δύο αποτελέσματα είναι λογικά αφού οι σχέσεις υπολογισμών αυτών των μεγεθών είναι και για σωληνο-δακτυλοειδείς θαλάμους καύσεως. Συγχρόνως, το μήκος της ζώνης αραίωσης που υπολογίστηκε είναι λίγο μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό των πραγματικών διαστάσεων. Τέλος πιο σημαντικό από όλα είναι ότι έχει πραγματοποιηθεί πολύ καλή εκτίμηση για το μήκος του θαλάμου καύσεως (L_L).

Για τις διαφορές αξίζει να αναφερθεί ότι μια ιδιοτροπία του J79 είναι ότι για την ψύξη των πρώτων βαθμίδων του στροβίλου δεν απομαστεύεται αέρας από την τελευταία βαθμίδα του συμπιεστή, αλλά από ένα ποσοστό που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης και πηγαίνει στον άνω δακτύλιο του θαλάμου καύσεως. Επιπλέον ο σχεδιασμός του συστροφέα είναι εξολοκλήρου για συστροφείς που χρησιμοποιούνται σε δακτυλοειδείς θαλάμους καύσεως. Συγχρόνως αξίζει να αναφερθεί ότι αλλάζοντας τις τιμές των ελεύθερων σχεδιαστικών μεταβλητών (διαλέγοντας την μέγιστη τιμή των ορίων) του συστροφέα, το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης καταλήγει στην τιμή

$L_{PZ} = 8.69 \text{ cm.}$, αποτέλεσμα πολύ κοντά στο πραγματικό. Η επίδραση του συστροφέα στον υπολογισμό του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο της μελέτης ευαισθησίας.

Η άλλη σημαντική διαφορά έχει σχέση με το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης. Μια ιδιοτροπία του θαλάμου καύσεως είναι ότι οι οπές της δευτερεύουσας ζώνης τοποθετούνται το εσωτερικό του θόλου, όπως υποδεικνύει το **Σχήμα 2.25**. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μειωμένη στατική πίεση στην άνω πλευρά των οπών, το οποίο έχει οδηγήσει στην αύξηση του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης προκειμένου να αντισταθμιστεί η μείωση της ποιότητας της ανάμιξης λόγω της μικρότερης στατικής πίεσης. Οπότε εύλογο το αποτέλεσμα, αφότου στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση δεν έχει ληφθεί υπόψη αυτή η ιδιοτροπία.

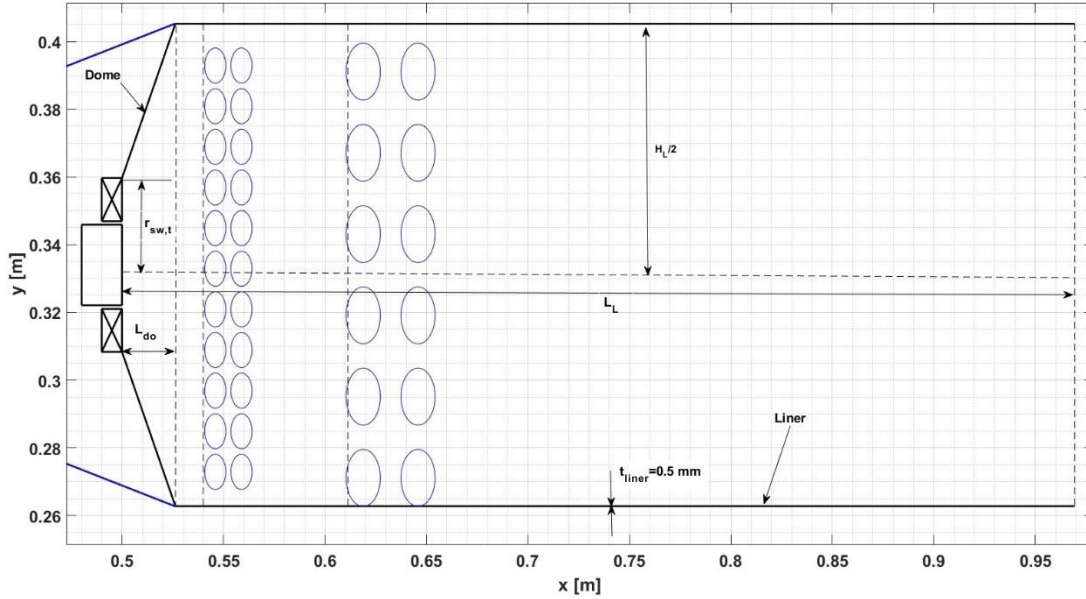
Γενικά, αποδεικνύεται η φερεγγυότητα των εμπειρικών σχέσεων που χρησιμοποιήθηκαν, διότι παρά τις ιδιοτροπίες του θαλάμου καύσεως, τα αποτελέσματα των γενικών διαστάσεων είναι κοντά στα πραγματικά. Επομένως αποτελούν μια ικανή αρχικοποίηση των διαστάσεων ενός θαλάμου καύσεως.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η αυθαίρετη επιλογή του αριθμού (PF) και του αριθμού $\Delta P_{34}/q_{ref}$ έχει σημαντικές επιδράσεις στην διαστασιολόγηση. Αρχικά αφού παρατηρήθηκε μικρότερο ύψος μανδύα και δακτυλίου, για να πραγματοποιηθεί ακριβή διαστασιολόγηση, πρέπει να αυξηθεί σε λογικά πλαίσια η τιμή της μεταβλητής $\Delta P_{34}/q_{ref}$. Αυτή η αύξηση είναι ικανή να οδηγήσει σε ακρίβεια χιλιοστού. Επιπλέον αυτή η αύξηση θα οδηγήσει σε μείωση του μήκους (Εξίσωση 2.24), όμως με παράλληλη μείωση του αριθμού (PF) σε λογικά πλαίσια το μήκος αυξάνεται. Οπότε, υπόψη τα προηγούμενα είναι δυνατόν να ευρεθεί ένας συνδυασμός των δύο αυτών μεταβλητών που καταλήγουν σε μια διαστασιολόγηση τέλει ακρίβειας. Όλα τα προηγούμενα αποδεικνύουν την φερεγγυότητα ενός τέτοιου αλγορίθμου.

Για τον υπολογισμό του βάρους του θαλάμου καύσεως, θα χρησιμοποιηθεί το **Σχήμα 2.27**. Σε αυτό το σχήμα παρουσιάζονται οι απαραίτητες γεωμετρικές διαστάσεις για τον υπολογισμό του συνολικού βάρους. Επιπλέον, ο θάλαμος καύσεως του J79 αποτελείται από 10 όμοιους σωλήνες που στον καθένα ισο-μοιράζεται ο αέρας για την καύση. Οπότε στους υπολογισμούς το συνολικό βάρος θα είναι:

$$W_{burner} = n_{cans} W_{tube} \quad (2.106)$$

όπου W_{tube} το βάρος που θα υπολογιστεί.



Σχήμα 2.27: Γεωμετρικές διαστάσεις για τον υπολογισμό του βάρους

Αρχικά το πάχος του μανδύα θεωρήθηκε $t_{liner} = 0.5 \text{ mm}$ από Mellor [2] και θεωρείται ότι το πάχος του θόλου ισούται με αυτό του μανδύα. Στην συνέχεια χωρίζεται ο θάλαμος καύσης σε δύο περιοχές, σε αυτήν με το μήκος L_{do} και σε αυτήν με το μήκος $(L_L - L_{do})$. Επομένως υπολογίζονται οι όγκοι μετάλλου σε αυτές τις δύο περιοχές, με βάση το Κεφάλαιο 2.9. Για την περιοχή του θόλου:

$$V_{do} = \frac{1}{3}\pi L_{do} \left[\left(\frac{H_L}{2} \right)^2 + \frac{r_{sw,t} H_L}{2} + r_{sw,t}^2 - \left(\frac{H_L}{2} - t_{liner} \right)^2 - (r_{sw,t} - t_{liner}) \left(\frac{H_L}{2} - t_{liner} \right) - (r_{sw,t} - t_{liner})^2 \right] \quad (2.107)$$

Για την άλλη περιοχή ο συνολικό όγκος είναι:

$$V_{liner} = \pi(L_{do} - L_L) \left(\frac{H_L}{2} \right)^2 \quad (2.108)$$

Ο τελικός όγκος ενός σωλήνα είναι:

$$V_{tube} = V_{liner} + V_{do} \quad (2.109)$$

Το επόμενο βήμα για τον υπολογισμό του βάρους είναι η επιλογή υλικού, δηλαδή η επιλογή της πυκνότητας του μετάλλου. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από την αναφορά [1] για τα υλικά του μανδύα, επιλέγεται το υλικό Nimonic 105 με θερμοκρασιακή αντοχή 1228 K και πυκνότητα $\rho = 15.5 \text{ slug/ft}^3$, μιας και αυτή θερμοκρασιακή αντοχή επιλέγηκε στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση του J79. Οπότε υπολογίζεται το συνολικό βάρος, $W_{burner} = 14.3 \text{ Kg}$.

2.11.2 Κινητήρας CFM56

Στην συνέχεια ακολουθεί η διαστασιολόγηση του CFM56 αξιοποιώντας στοιχεία που προέκυψαν από το PROOSIS καθώς και δεδομένων από τον Rezvani [5]. Ο σχεδιασμός έγινε για το σημείο λειτουργίας της απογείωσης, αλλά θα παρουσιαστεί και η διαστασιολόγηση για την περίπτωση της πλεύσης.

Πίνακας 2.6: Δεδομένα για CFM-56

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
$\Delta P_L/q_{ref}$	[-]	35
$\Delta P_{3-4}/P_3$	[-]	0.05
φ_{PZ}	[-]	1.05
φ_{SZ}	[-]	0.8
$r_{h3.1}$	[m]	0.2671
$r_{t3.1}$	[m]	0.2866
$M_{3.2}$	[-]	0.075
AR_{sweet}	[-]	1.5
T_m	[K]	1460
β_{sw}	[°]	60
Cooling Method	[-]	Film
K_{sw}	[-]	1.3
C_D	[-]	0.6
v_t	[mm]	1.0
n_v	[-]	8
PF	[-]	0.20

Στην συνέχεια ακολουθούν τα επιπρόσθετα δεδομένα για τον CFM56 από την μοντελοποίηση του στο PROOSIS. Ο Πίνακας 2.7 περιέχει τα δεδομένα κατά την απογείωση, ενώ ο Πίνακας 2.8 περιέχει τα δεδομένα κατά την πλεύση.

Πίνακας 2.7: Δεδομένα CFM56 κατά την απογείωση

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
T_{t3}	[K]	836.68
P_{t3}	[Pa]	$29.13 \cdot 10^5$
\dot{m}_3	[kg/s]	47.21
T_{t4}	[K]	1750
\dot{m}_f	[kg/s]	1.3162

Πίνακας 2.8: Δεδομένα CFM56 κατά την πλεύση

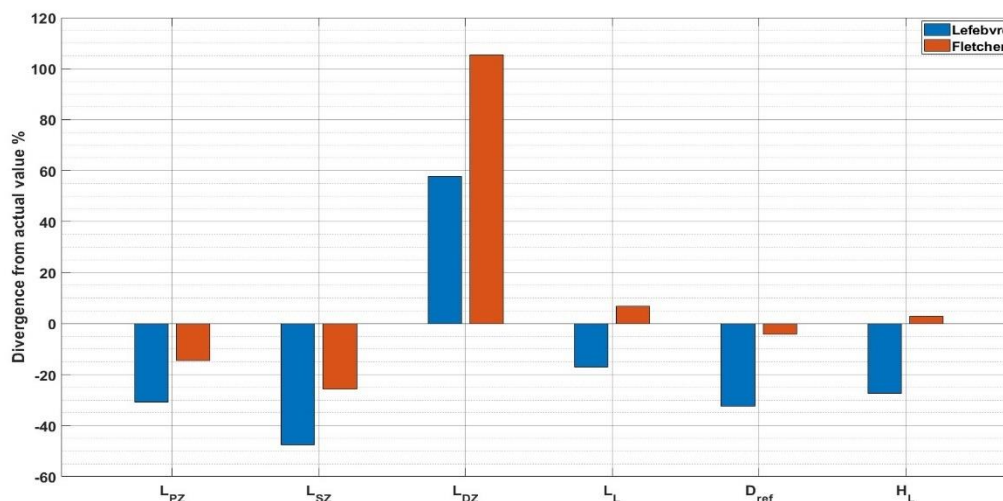
Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή
T_{t3}	[K]	686.86
P_{t3}	[Pa]	$9.67 \cdot 10^5$
\dot{m}_3	[kg/s]	17.35
T_{t4}	[K]	1455
\dot{m}_f	[kg/s]	0.3844

Για την διαστασιολόγηση του εμβადού αναφοράς αξιοποιήθηκε ο τύπος του Lefebvre [3] και του Fletcher [19] και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τα πραγματικά. Οπότε ακολουθεί ο Πίνακας 2.9 και το Σχήμα 2.27 με τα αποτελέσματα:

Πίνακας 2.9: Αποτελέσματα μεθόδων για τον CFM56

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Lefebvre	Fletcher	Πραγματικό
D_{ref}	[cm]	8.51	12.06	12.60
H_L	[cm]	6.26	8.87	8.61
L_{pZ}	[cm]	3.74	4.64	5.31*
L_{sZ}	[cm]	3.13	4.43	5.97*
L_{DZ}	[cm]	10.16	13.30	6.48*
L_L	[cm]	17.02	22.38	20.85

*Ο λόγος του μήκους του θαλάμου καύσεως και το ύψος συμβαδίζουν με το Σχήμα 2.7, οι διαστάσεις της κάθε ζώνης είναι λάθος, γιατί αρχικά δεν δίνουν άθροισμα το ολικό μήκος του θαλάμου καύσης, οπότε πρέπει η αναφορά [5], να έκανε κάποιο λάθος στην μέτρηση των διαστάσεων, το λάθος πρέπει να είναι στο μήκος της ζώνης αραίωσης, λόγω των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.28: Σύγκριση αποτελεσμάτων για CFM-56

Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα ειπώθηκαν προηγουμένως, είναι ευκρινές ότι η ακριβέστερη διαστασιολόγηση είναι αυτή του Fletcher, με σχετικά μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις του μήκους του θαλάμου καύσεως, το ύψος αναφοράς και το ύψος του μανδύα. Επιπλέον ο λόγος μήκους του θαλάμου καύσεως με την μέθοδο του Fletcher προκύπτει $\frac{L_L}{H_L} = 2.51$, ενώ με βάση το Σχήμα 2.7 για τον CFM56 ο λόγος είναι 2.4. Οι διαφορές στα μήκη της κάθε ζώνης είναι αναμενόμενες λόγω του λάθους που αναφέρθηκε. Επίσης η διαστασιολόγηση του εμβადού αναφοράς σύμφωνα με τον

Lefebvre ακόμη και με τον αντίστροφο σχεδιασμό που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3 επιφέρει μεγάλες αποκλίσεις. Οι διαφορές στα μήκη των άλλων ζωνών είναι αναμενόμενες λόγω της χρήσης των ημιεμπειρικών σχέσεων.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα για την περίπτωση της πλεύσης και η σύγκρισή τους με τα πραγματικά και αυτά της απογείωσης. Επιλέγηκε να γίνει ανάλυση και στην πλεύση, προκειμένου να διαπιστωθεί η επήρεια που έχει το σημείο σχεδιασμού στην διαστασιολόγηση ενός θαλάμου καύσεως. Η διαστασιολόγηση έγινε με τον τύπο του Fletcher.

Πίνακας 2.10: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης κατά την πλεύση Fletcher

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης	Πλεύση	Απογείωση	Πραγματικό
D_{ref}	[cm]	9.83	12.06	12.60
H_L	[cm]	6.66	8.87	8.61
L_{pZ}	[cm]	4.10	4.54	5.31
L_{SZ}	[cm]	3.33	4.43	5.97
L_{DZ}	[cm]	10.00	13.30	6.48
L_L	[cm]	17.43	22.28	20.85

Προκύπτει ότι οι διαφορές είναι μικρές αλλά αξιοσημείωτες. Από τον **Πίνακα 2.10** είναι ευκρινές ότι η διαστασιολόγηση για σημείο σχεδιασμού την πλεύση, επιφέρει μικρότερες διαστάσεις. Παρόλα αυτά το υπολογισμένο μήκος του θαλάμου καύσεως είναι πιο κοντά στο πραγματικό για την περίπτωση της απογείωσης, παρομοίως και για το ύψος του μανδύα και το ύψος του δακτυλίου.

2.11.3 Κινητήρες F100, JT9D & TF41

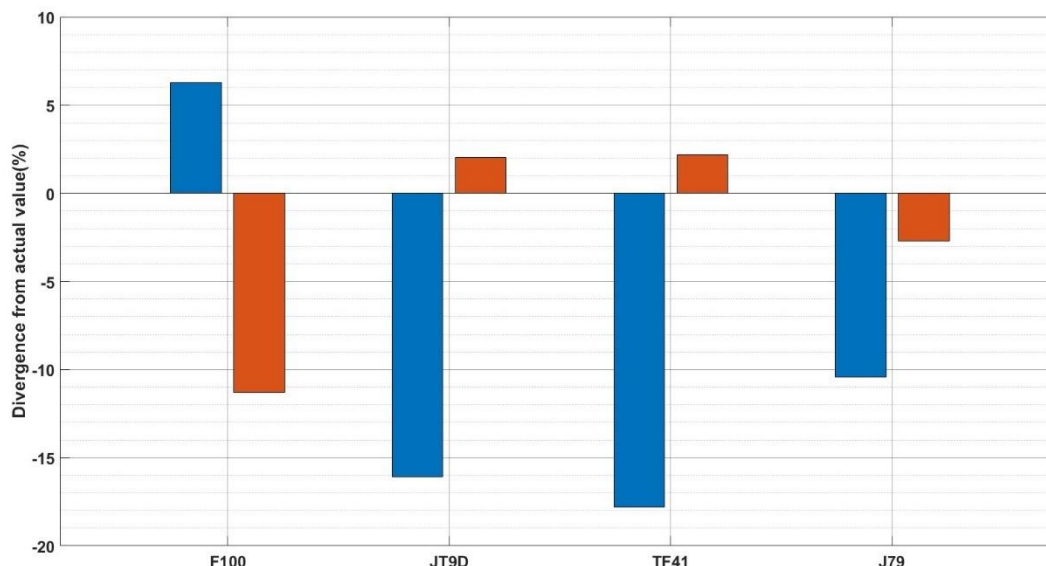
Έχοντας τα δεδομένα του **Πίνακα 2.11**, αξιοποιώντας τις πληροφορίες από την αναφορά [9] (μεσημβρινές τομές των κινητήρων) και γνωρίζοντας μια διάσταση, προσδιορίστηκε η ακτίνα ποδός και κεφαλής στην είσοδο του διαχύτη. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η προσεγγιστική εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για να προσδιοριστεί η θερμοκρασία (T_{t3}), όπου:

$$T_{t3} = \left(1 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_3}\right) T_{t4} \frac{C_{pt}}{C_{pc}} - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_3} H_u \frac{1}{C_{pc}} \quad (2.110)$$

Πίνακας 2.11: Δεδομένα από [7] για θαλάμους καύσεως

Engine Type	TF39 Annular	TF41 Cannular	J79 Cannular	JT9D Annular	F100 Annular	T63 Can
Mass flow						
Air (lb/sec)	178	135	162	242	135	3.3
Fuel (lb/hr)	12,850	9965	8350	16,100	10,580	235
Size						
Length (in)	20.7	16.6	19.0	17.3	18.5	9.5
Diameter (in)	33.3	5.3/24.1*	6.5/32.0*	38.0	25.0	5.4
P_{t3} (psia)	382	314	198	316	366	92
$T_{t4\max}$ (°R)	2915	2620	2160	2865	3025	1840

Ακολουθεί το **Σχήμα 2.29** εφαρμόζοντας την διαστασιολόγηση κατά Lefebvre και Fletcher και παρουσιάζοντας τις αποκλίσεις από το πραγματικό μήκος L_L .



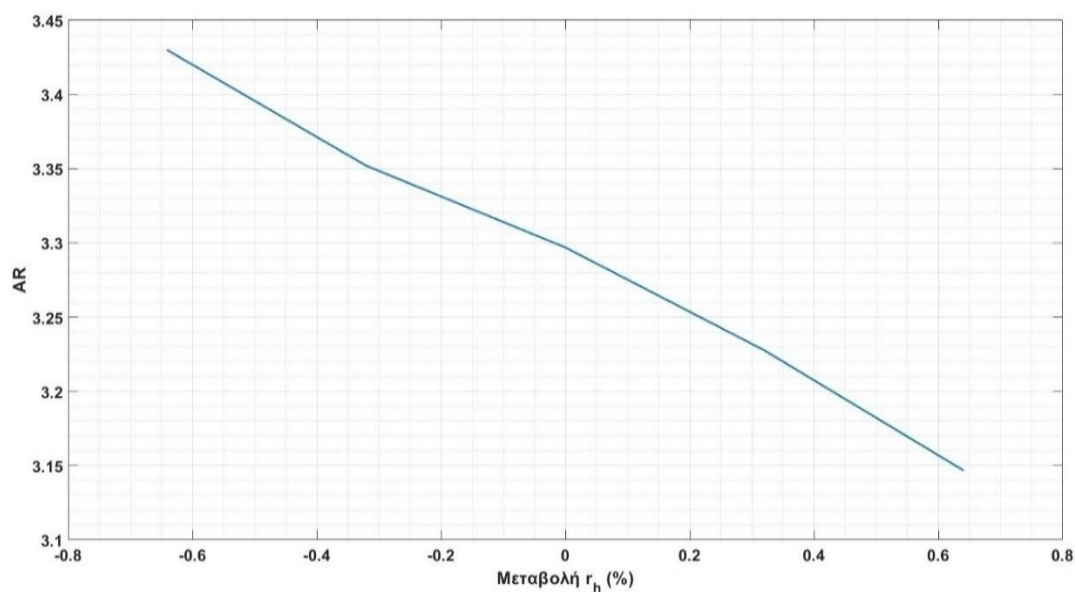
Σχήμα 2.29: Αποκλίσεις μήκους θαλάμου καύσεως υπολογισμένο με δύο μεθόδους

Παρατηρούνται και μεγάλες και μικρές αποκλίσεις του μήκους και με τις δύο μεθόδους, από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μεθοδολογία με τις σχέσεις του Lefebvre αποδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια, αποτέλεσμα αντίθετο με αυτό του CFM56. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αντίστροφος σχεδιασμός για τον υπολογισμό της μεταβλητής $\Delta p_{3-4}/q_{ref}$ απέδωσε σημαντικά αποτελέσματα έχοντας μικρές διαφορές από την αναμενόμενη τιμή αλλά τιμές ικανές να αποδώσουν στον σχεδιασμό μεγαλύτερη ακρίβεια.

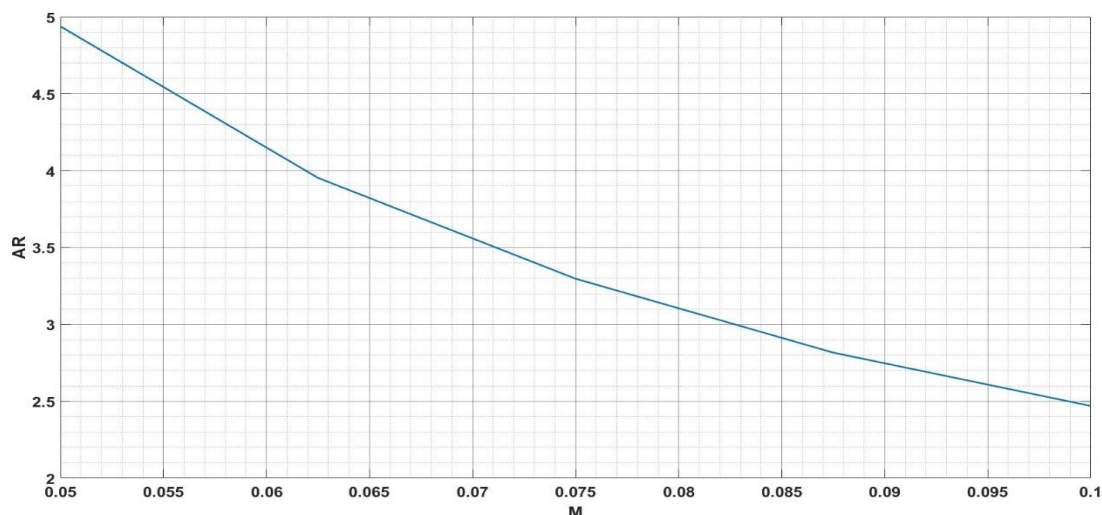
2.12 Μελέτη ευαισθησίας

Κατά την διαδικασία της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης προέκυψε ότι υπάρχει πληθώρα μεταβλητών που επιλέγονται με βάση εμπειρικά στοιχεία (**Πίνακας 2.4**). Σε αυτό το κεφάλαιο επιπλέον ορίστηκαν και τα όρια που κυμαίνονται οι τιμές που λαμβάνουν αυτές οι μεταβλητές. Προκύπτει ότι για μεταβλητές όπως το β_{sw} , \dot{m}_{sw} τα όρια μεταβολής κυμαίνονται μέχρι και 150%. Τέτοια κύμανση στην μεταβλητή απαιτεί μελέτη εξάρτησης προκειμένου να υπολογιστεί πόσο επηρεάζει η αυθαιρεσία της επιλογής της τιμής τα αποτελέσματα.

Επιπλέον, σχετικά με την επιλογή των μεταβλητών αυτών στον διαχύτη, ένα πρόβλημα που διαπιστώθηκε στην μελέτη της διαστασιολόγησης είναι ότι οι τιμές των διαστάσεων του διαχύτη που προκύπτουν μέσω της μεσημβρινής τομής, αν αλλαχθούν ελάχιστα οδηγούν σε μεγάλες διαφορές στην γεωμετρία του διαχύτη, το οποίο έχει σαν αποτελέσματα την λάθος διαστασιολόγηση (**Σχήμα 2.30**). Δηλαδή ακόμη και μικρή μεταβολή στις ακτίνες της τάξης του 1 mm. μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά το AR. Επίσης, η μοντελοποίηση του διαχύτη είναι πολύ ευαίσθητη ως προς τον Mach εξόδου, όπου πάλι, οι μικρές μεταβολές προκαλούν πιο μεγάλες γεωμετρικές μεταβολές (**Σχήμα 2.31**).

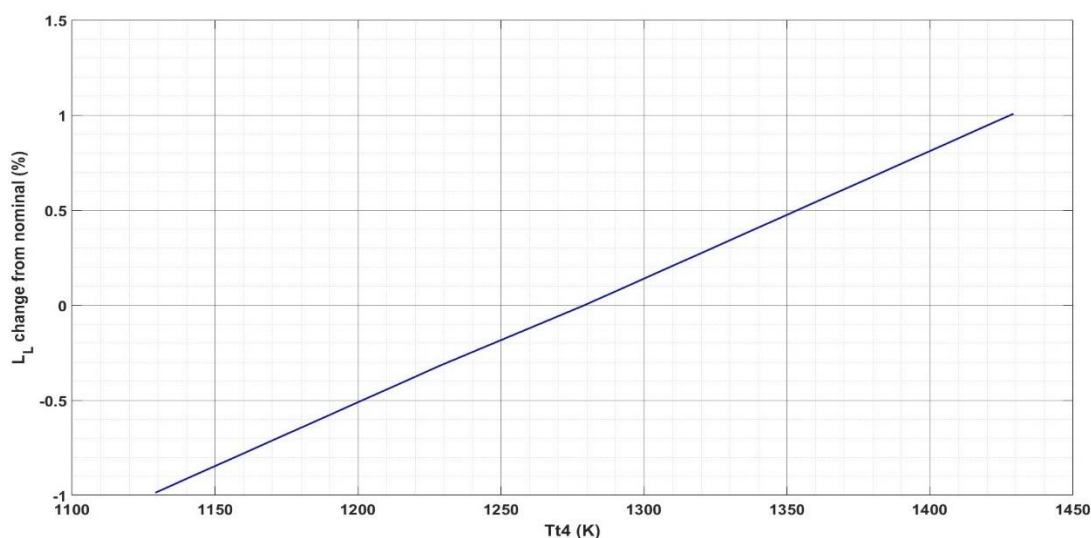


Σχήμα 2.30: Μεταβολή λόγου AR ως προς την ποσοστιαία μεταβολή του r_h



Σχήμα 2.31: Μεταβολή λόγου AR ως προς την μεταβολή του M_{32}

Αφού πραγματοποιήθηκε η μελέτη της εξάρτησης στον διαχύτη ακολουθεί η μελέτη της εξάρτησης των αυθαίρετων μεταβλητών του θαλάμου καύσης προς το μήκος του θαλάμου καύσεως. Οπότε, ακολουθεί η παραμετρική ανάλυση της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης για τον κινητήρα J79 με μεταβλητή την θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσεως (T_{t4}). Η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιείται προκειμένου να διαπιστωθεί πόσο μεγάλη είναι μεταβολή του απαραίτητου του μήκους του θαλάμου καύσης με την μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο. Αυτού του είδους η παραμετρική ανάλυση είναι απαραίτητη γιατί κατά την διάρκεια πτήσης ενός αεροσκάφους η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων στον θάλαμο καύσης μεταβάλλεται και είναι μεγαλύτερη στην απογείωση σε σχέση με την πλεύση. Οπότε είναι απαραίτητο εάν, η διαστασιολόγηση πραγματοποιηθεί σε σημείο σχεδιασμού την πλεύση να ελεγχθεί εάν το μήκος είναι επαρκές για την καύση. Επιπλέον, με το πέρασμα του χρόνου τα υλικά φθείρονται, με συνέπεια την μείωση των αποδόσεων και την μεταβολή των χαρακτηριστικών μεγεθών της ροής, οπότε σημειώνεται και μια μικρή αλλά σημαντική αλλαγή στην θερμοκρασία εξόδου του θαλάμου καύσεως (T_{t4}).



Σχήμα 2.32: Μεταβολή μήκους θαλάμου καύσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

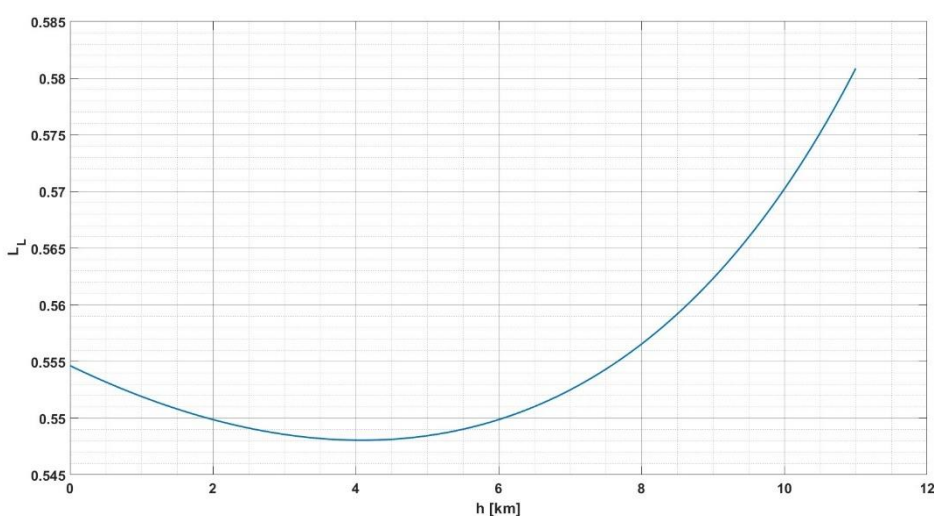
Για μια διαφορά 300 βαθμών C^ο παρατηρείται η αύξηση κατά 1.0 cm. του μήκους του θαλάμου καύσεως μια αύξηση που ήταν αναμενόμενη και είναι σημαντικό ότι για ένα σχετικά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών εισόδου στον στρόβιλο, το μήκος μεταβάλλεται λίγο.

Η μόνη μεταβλητή που επανυπολογίστηκε, ήταν η παροχή καυσίμου μέσω της προσεγγιστικής εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας:

$$\dot{m}_f = \frac{C_{pt}T_{t4}\dot{m}_3}{H_u - C_{pt}T_{t4}} - \frac{C_{pc}T_{t3}\dot{m}_3}{H_u - C_{pt}T_{t4}} \quad (2.111)$$

Για την επόμενη μελέτη εξάρτησης θεωρήθηκε $M_0 = 0.5$, και ταχύτητα εξόδου συμπιεστή ίση με αυτήν της εισόδου, οπότε υπολογίστηκε ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης ($\eta_{pc} = 85.34\%$), χρησιμοποιώντας τις τιμές ολικής πίεσης και θερμοκρασίας στο σημείο σχεδιασμού, θεωρώντας ατμοσφαιρικές συνθήκες κανονικής μέρας και έναν ισεντροπικό βαθμό απόδοσης ακροφυσίου εισόδου από [7]. Για την παραμετρική μελέτη θεωρήθηκε σταθερή θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο και γνωρίζοντας ολικά μεγέθη πιέσεων και θερμοκρασιών στην είσοδο του αγωγού εισόδου, υποτέθηκε μια πτώση της ολικής πίεσης στον αγωγό εισόδου αξιοποιώντας δεδομένα από [7] (το έτος κατασκευής του κινητήρα), θεωρήθηκε ίδιος λόγος αύξησης πίεσης στον συμπιεστή και από τον υπολογισμένο πολυτροπικό βαθμό απόδοσης υπολογίστηκε η ολική θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή (T_{t3}). Επιπλέον θεωρήθηκε ότι η ταχύτητα παραμένει σταθερή από τον αγωγό εισόδου μέχρι την είσοδο στον θάλαμο καύσης, προκειμένου να υπολογιστεί η παροχή μάζας.

Οπότε είναι διαθέσιμα όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τους υπολογισμούς. Η παραμετρική αυτή μελέτη πραγματοποιήθηκε για τους προαναφερόμενους λόγους.

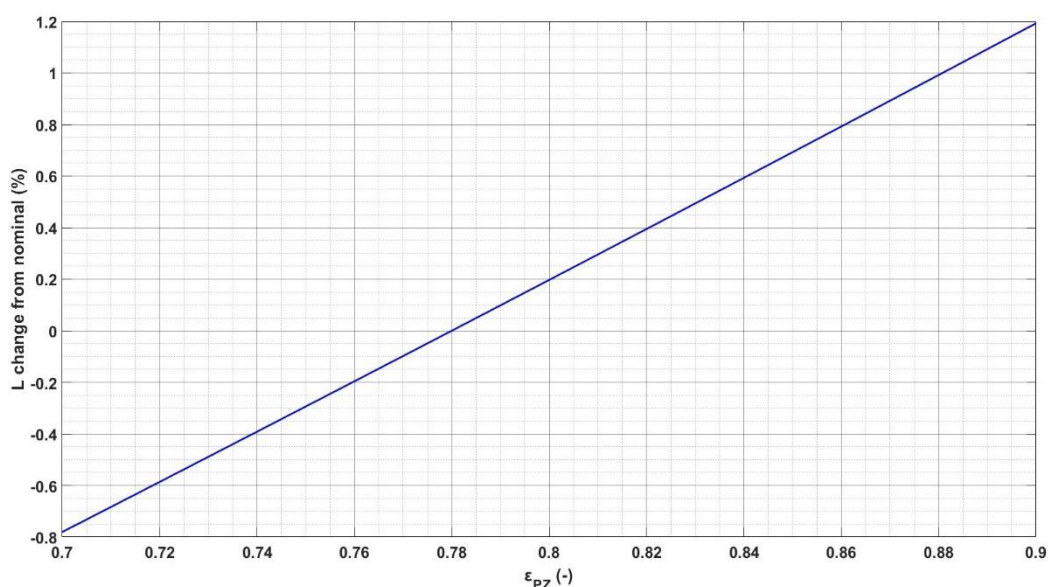


Σχήμα 2.33: Μεταβολή μήκους του θαλάμου καύσης συναρτήσει του ύψους πτήσης

Για ένα υψόμετρο μέχρι τα 11 χιλιόμετρα παρατηρείται αρχικά μια μείωση του μήκους του θαλάμου καύσης και μετά μια αύξηση. Τα μήκη προφανώς είναι

μεγαλύτερα διότι θεωρήθηκε $M_0 = 0.5$, αποτέλεσμα που αυξάνει τα ολικά μεγέθη πιέσεων και θερμοκρασιών στον κινητήρα. Επιπλέον η θεώρηση ότι η ταχύτητα κατά μήκος του συμπιεστή παραμένει σταθερή, έχει σαν αποτέλεσμα το εμβαδό αναφοράς να έχει την ίδια τιμή.

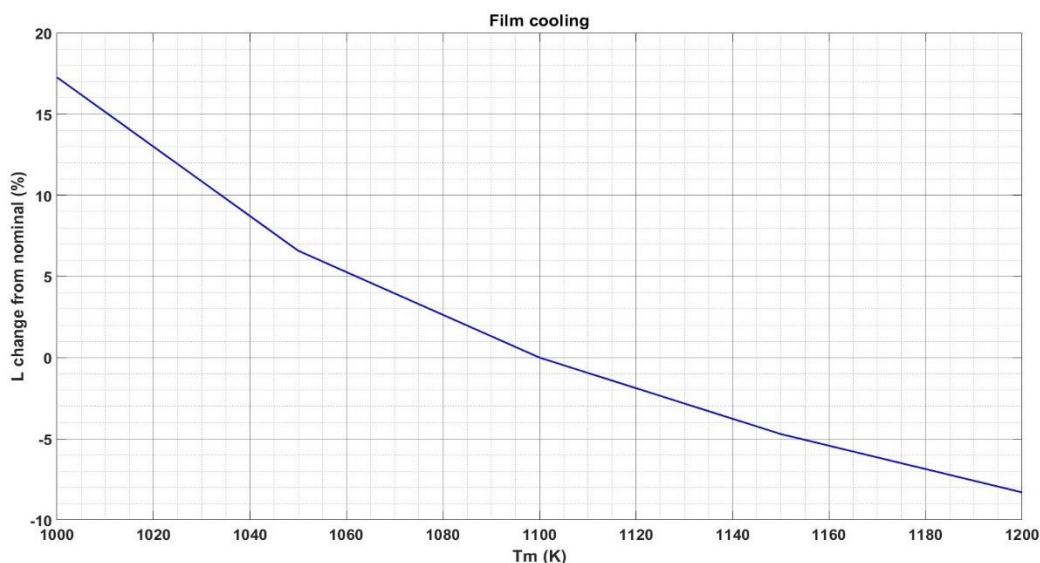
Μια άλλη μεταβλητή που επιλέγεται μέσω γνωστών δεδομένων είναι η ε_{PZ} , που όπως αναφέρθηκε επιλέγονται τιμές μεγαλύτερες του 0.7 ώστε να μην εμφανιστεί σβήσιμο της φλόγας. Οπότε ακολουθεί η εξάρτηση του μήκους από αυτήν την μεταβλητή.



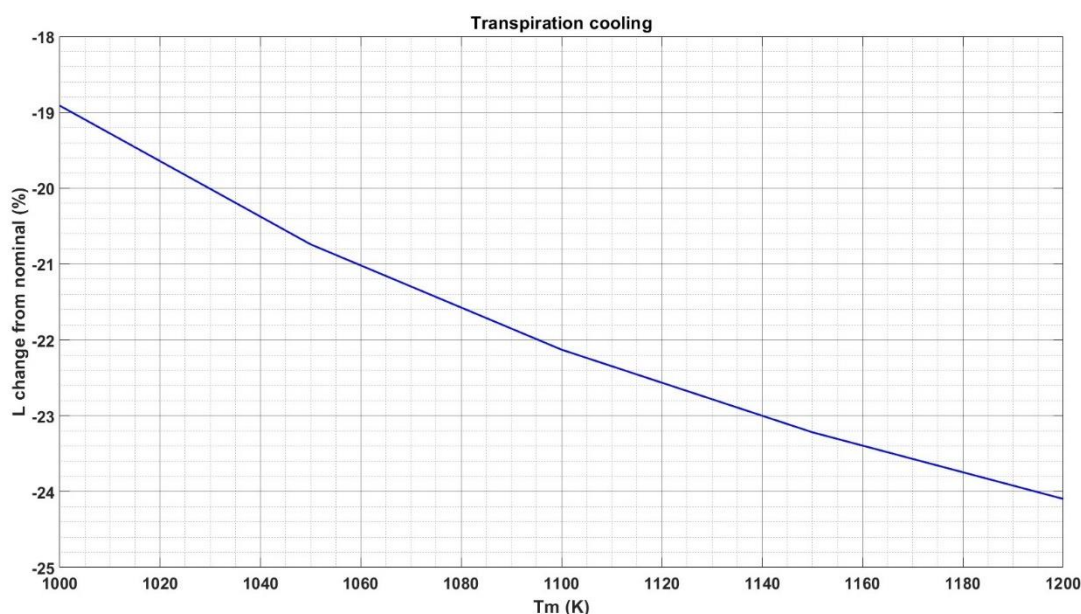
Σχήμα 2.34: Μεταβολή του μήκους του θαλάμου καύσης ως προς την μεταβολή του ε_{PZ}

Παρατηρείται γραμμική εξάρτηση σχεδόν του ίδιου βαθμού με αυτής της μεταβλητής (ε_{PZ}). Αν ληφθεί υπόψη ότι το ε_{PZ} δεν λαμβάνει συνήθως τιμές μεγαλύτερες του 0.9 η εξάρτηση είναι αρκετά μικρή, της τάξης περίπου του 2% του μήκους.

Ακολουθούν οι μελέτες εξάρτησης της θερμοκρασίας αντοχής του μετάλλου του μανδύα και της μεθόδου ψύξης προς το μήκος του θαλάμου καύσης.



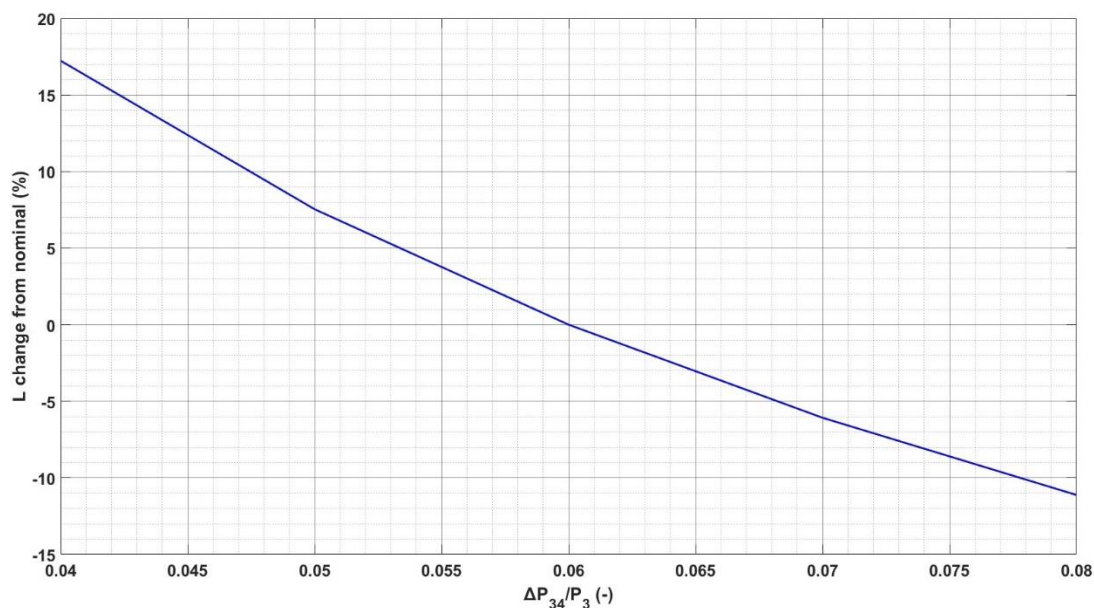
Σχήμα 2.35: Μεταβολή του μήκους του θαλάμου καύσης ως προς την μεταβολή του T_m για μεμβρανική ψύξη



Σχήμα 2.36: Μεταβολή του μήκους του θαλάμου καύσης ως προς την μεταβολή του T_m για ψύξη μέσω διαπνοής

Όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση της θερμοκρασιακής αντοχής του μετάλλου του μανδύα, προκαλεί μείωση του μήκους του θαλάμου καύσεως διότι απαιτείται λιγότερος αέρας για ψύξη άρα υπάρχει περισσότερος αέρας διαθέσιμος για αραίωση. Επιπλέον η ψύξη μέσω διαπνοής από τις εξισώσεις (2.29 & 2.30) απαιτεί λιγότερο αέρα περίπου 70% λιγότερο όποτε το μήκος καταλήγει να είναι αρκετά μικρότερο από αυτό του αναμενόμενου, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εξάρτηση είναι παραβολική.

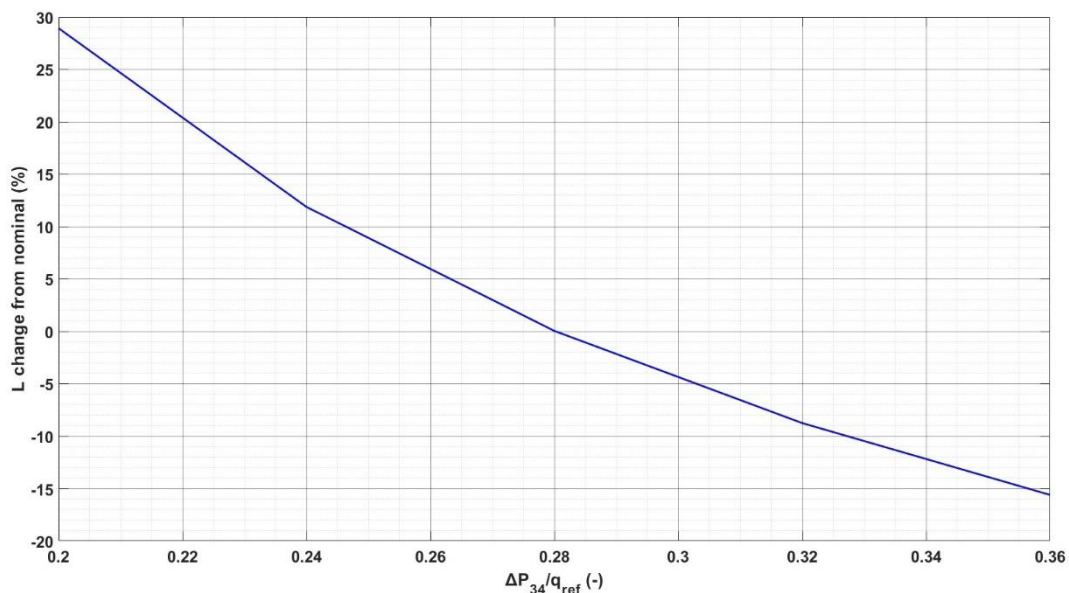
Ακολουθεί η μελέτη εξάρτησης ως προς την εκτιμώμενη πτώση πίεσης.



Σχήμα 2.37: Μεταβολή του μήκους του θαλάμου καύσης ως προς την μεταβολή του ΔP_{34}

Είναι ξεκάθαρη σε μεγάλο βαθμό η εξάρτηση του μήκους από την ολική πτώση πίεσης στον θάλαμο καύσης. Σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη διαφορά είναι περίπου 40 %.

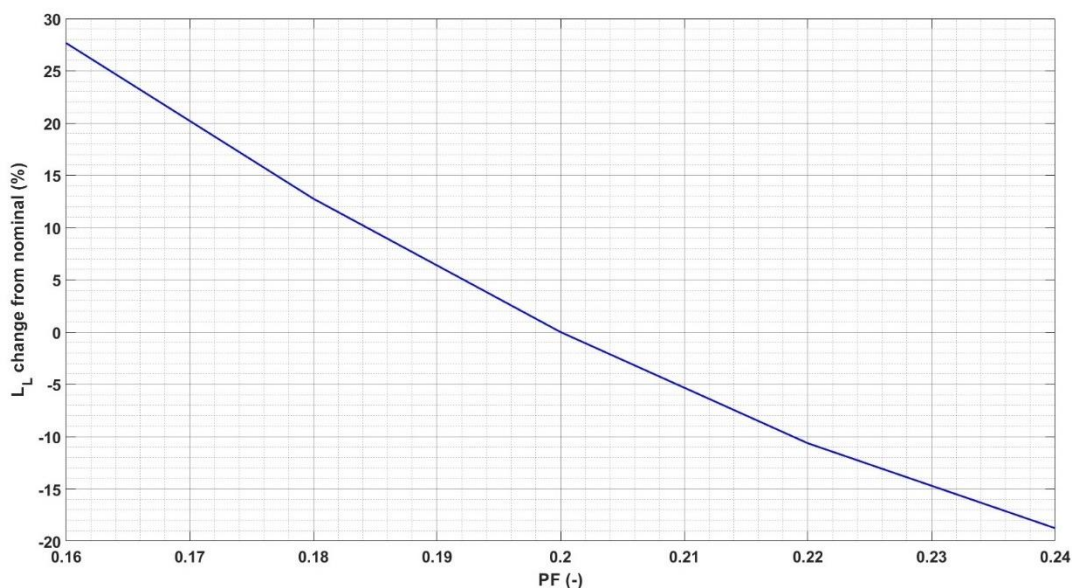
Ακολουθεί η μελέτη εξάρτησης του μήκους του θαλάμου καύσεως ως προς τον συντελεστή $\Delta P_{34}/q_{ref}$.



Σχήμα 2.38: Μεταβολή του μήκους του θαλάμου καύσης ως προς την μεταβολή του C_D

Όπως είναι αναμενόμενο η εξάρτηση είναι αρκετά μεγάλη με μέγιστη μεταβολή κατά 45 %.

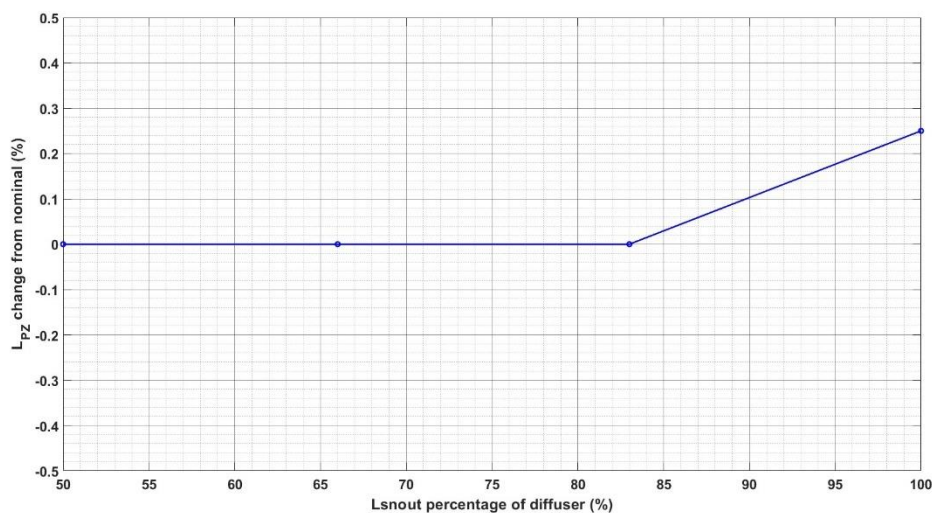
Ακολουθεί η μελέτη εξάρτησης του μήκους του θαλάμου καύσεως ως προς την μεταβλητή (PF).



Σχήμα 2.39: Μεταβολή του θαλάμου καύσεως ως προς την μεταβολή του PF.

Η εξάρτηση του μήκους του θαλάμου καύσης ως προς την μεταβλητή PF είναι σημαντική. Το μέγεθος της εξάρτησης είναι παρόμοιο με αυτό της μεταβλητής $\Delta P_{34}/q_{ref}$. Η μείωση του μήκους είναι αναμενόμενη διότι, μεγαλύτερος αριθμός PF συνεπάγεται μικρότερο μήκος ζώνης αραίωσης.

Ακολουθεί η μελέτη εξάρτησης του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης ως προς την μεταβλητή L_{snout} , η οποία είναι το μήκος τοποθέτησης του ρύγχους μέσα στον διαχύτη.

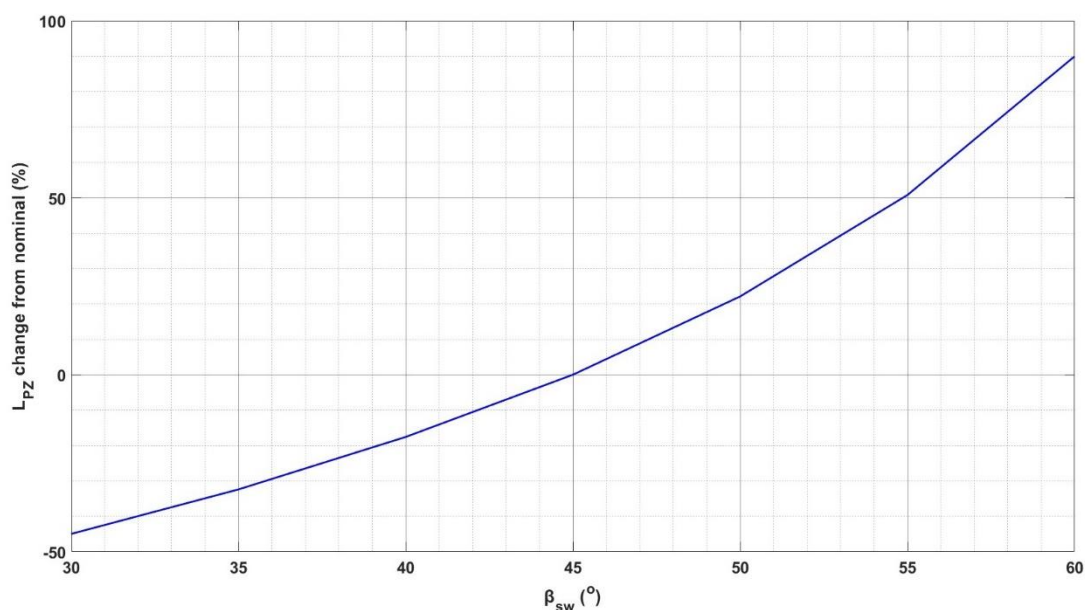


Σχήμα 2.40: Μεταβολή του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης ως προς την μεταβολή του L_{snout}

Η εξάρτηση του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης είναι σχεδόν μηδενικό με μια μεταβολή σχεδόν 0.25 %, η οποία είναι περίπου 0.1 mm.

Ακολουθεί η μελέτη εξάρτησης του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης του θαλάμου καύσεως ως προς την μεταβλητή β_{sw} . Η μεταβολή αυτή προτείνεται βάσει

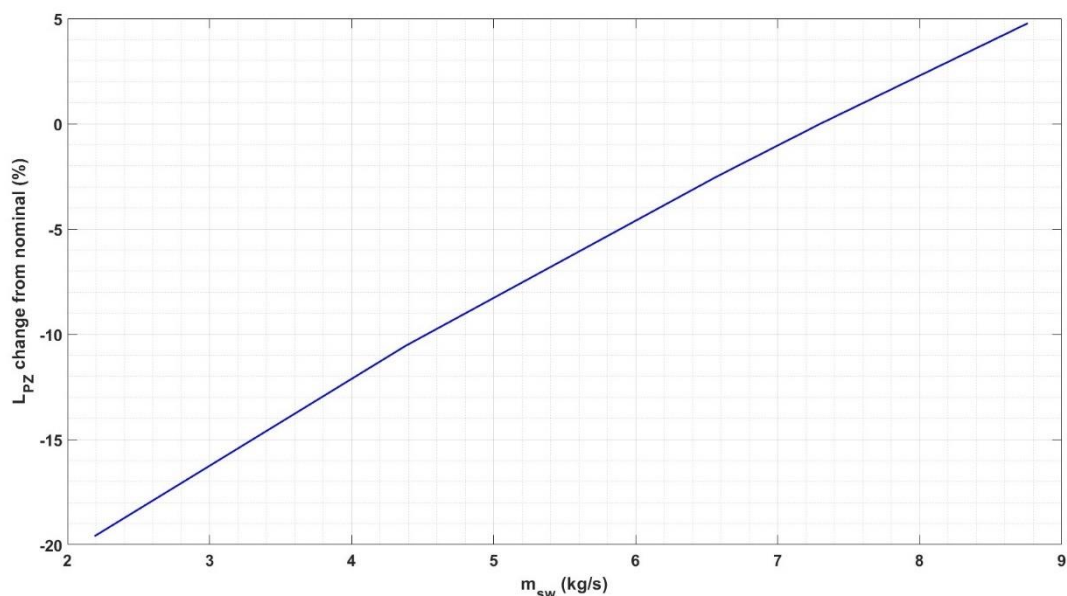
εμπειρικών στοιχείων. Η μεταβολή είναι ως προς το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης



Σχήμα 2.41: Μεταβολή του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης ως προς την μεταβολή του β_{sw}

Σε αυτήν την περίπτωση η εξάρτηση είναι σημαντική με μέγιστη διαφορά κατά 150%.

Τέλος, ακολουθεί η μελέτη εξάρτησης του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης του θαλάμου καύσεως ως προς την μεταβλητή \dot{m}_{sw} . Η μεταβολή αυτή προτείνεται βάσει εμπειρικών στοιχείων. Η μεταβολή είναι ως προς το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης.



Σχήμα 2.42: Μεταβολή του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης ως προς την μεταβολή του m_{sw}

Σε αυτήν την περίπτωση η εξάρτηση είναι γραμμική και σημαντική με μέγιστη διαφορά κατά 25%.

Συνολικά, από την μελέτη ευαισθησίας παρατηρείται ότι είναι καίριο να γίνει σωστή επιλογή των μεταβλητών πιθανώς μέσω σύγκρισης με παρόμοιας γενιάς κινητήρων.

2.13 Συμπεράσματα

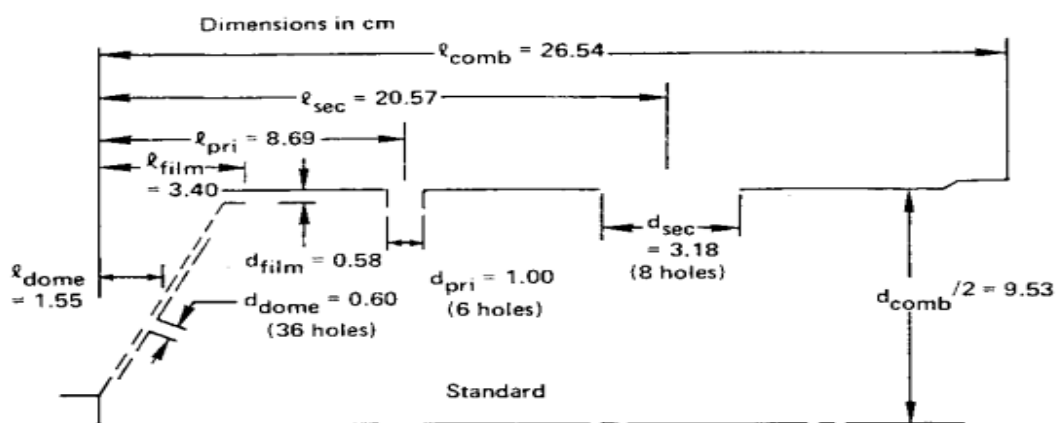
Τα συμπεράσματα που απορρέουν από την διαδικασία της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης, τις αριθμητικές εφαρμογές και την μελέτη ευαισθησίας ως προς τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται, μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- 1) Στις περιπτώσεις εφαρμογής που εξετάστηκαν τα μεγέθη που προσδιορίζονται με βάση την διαδικασία που ακολουθήθηκε προσεγγίζουν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό τα μεγέθη των θαλάμων καύσεως που έχουν κατασκευαστεί και λειτουργήσει στις αντίστοιχες μηχανές. Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω του ότι οι εξισώσεις που λύνονται είναι αλγεβρικές και απλοποιείται το πρόβλημα του σχεδιασμού σε τεράστιο βαθμό σε σχέση με αυτό που απαιτεί υπολογιστικές μεθόδους. Οι διαφορές, αν και μεγάλες, είναι ικανές να ορίσουν μια αρχικοποίηση για μετέπειτα βελτιστοποίηση μέσω υπολογιστικών μεθόδων.
- 2) Παρατηρήθηκε και από την μελέτη ευαισθησίας ότι η επιλογή των τιμών των αυθαίρετων μεταβλητών επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα. Η πραγματικότητα είναι ότι ένας σχεδιαστής θαλάμων καύσεως με βάση κινητήρες παρόμοιας γενιάς θα έχει πιο ακριβείς τιμές μεταβλητών, οπότε αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να μειωθούν σε σημαντικό βαθμό και να οδηγήσουν σε μια αρχικοποίηση που θα μειώσει σε μεγάλο βαθμό τον κύκλο της βελτιστοποίησης.
- 3) Επιπλέον από την μελέτη ευαισθησίας προέκυψε ότι εάν επιλεγεί ο αλγόριθμος σχεδιασμού του Lefebvre [3] τα αποτελέσματα διαφέρουν αρκετά ανάλογα της επιλογής της μεταβλητής ($\Delta P_{34}/q_{ref}$). Συγχρόνως παρουσιάστηκε μεγάλη απόκλιση των θεωρητικών τιμών που λαμβάνει αυτή η μεταβλητή, ακόμη και εάν υπολογιστεί μέσω της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.3. Οπότε εάν επιλεγεί αυτή η μέθοδος ο σχεδιαστής είναι απαραίτητο να είναι αρκετά προσεκτικός ως προς ποια τιμή θα επιλέξει. Παρομοίως παρατηρείται και σχετικά μεγάλη εξάρτηση ως προς την μεταβλητή ($\Delta P_{34}/P_3$), η διαφορά είναι ότι η τιμή αυτή είναι γνωστή και όχι τόσο αυθαίρετη όσο η μεταβλητή ($\Delta P_{34}/q_{ref}$).
- 4) Τέλος από το Κεφάλαιο της αριθμητικής εφαρμογής παρατηρήθηκε, όπως ήταν και αναμενόμενο ότι αν το σημείο σχεδιασμού του θαλάμου καύσεως είναι η απογείωση τότε οι διαστάσεις είναι μεγαλύτερες. Οπότε στην περίπτωση που ο θάλαμος καύσεως έχει σχεδιαστεί στην πλευση, τότε κατά την διάρκεια της απογείωσης το μήκος του θαλάμου καύσεως δεν θα είναι επαρκές για την απαραίτητη ανάμιξη. Το οποίο θα προκαλέσει αυξημένες θερμοκρασίες στην είσοδο του στροβίλου, χαμηλής ποιότητας παράγοντα μορφής (PF) και παράγοντα κατανομής θερμοκρασίας (P_f). Τα προαναφερόμενα θα μειώσουν τους κύκλους λειτουργίας του θαλάμου καύσεως, οπότε τελικά είναι δόκιμο ο θάλαμος καύσεως να σχεδιάζεται στο πιο απαιτητικό σημείο λειτουργίας.

3. Σχεδιασμός Θαλάμων Καύσεως Χαμηλών Ρύπων

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή το πιο μείζων θέμα της αεροπορικής βιομηχανίας είναι η μείωση εκπομπών ρύπων. Όμως, η προκαταρκτική διαστασιολόγηση του 2^{ου} Κεφαλαίου δεν εμβαθύνει στο θέμα των ρύπων, οπότε κρίθηκε απαραίτητο ο εντοπισμός αλγορίθμου που αξιοποιεί τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης και μέσω ημιεμπειρικών σχέσεων, να επανυπολογίζονται οι γεωμετρικές διαστάσεις των μεταβλητών που επηρεάζουν τις εκπομπές ρύπων. Σύμφωνα με την αναφορά [10] στην οποία βασίστηκε και ο αλγόριθμος οι μεταβλητές αυτές είναι τα μήκη της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ζώνης, ο αριθμός και η διάμετρος των οπών που τοποθετούνται στο τέλος της κάθε προαναφερόμενης ζώνης. Σε αυτό το Κεφάλαιο θα αξιοποιηθούν ημιεμπειρικές σχέσεις, μέσω τον οποίων επανυπολογίζονται οι γεωμετρικές που αναφέρθηκαν, με στόχο την μείωση των ρύπων σε επισημασμένη τιμή.

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η ονομασία των μεταβλητών σε αυτό το Κεφάλαιο είναι διαφορετική σε σχέση με το 2^ο Κεφάλαιο. Οι διαφορές αυτές θα αποσαφηνιστούν με βάση το **Σχήμα 3.1** που ακολουθεί.



Σχήμα 3.1: Ονομασία γεωμετρικών στοιχείων αλγορίθμου χαμηλών ρύπων

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι αποστάσεις μετριοούνται από την κορυφή του ψεκαστήρα καυσίμου.

1^{ον} Η μεταβλητή l_{dome} είναι η απόσταση στην οποία τοποθετούνται οι οπές που χρησιμοποιούνται για την ψύξη του θόλου, για τον υπολογισμό αυτής της μεταβλητής δεν έχει εντοπιστεί μεθοδολογία. Όμως, δεν χρησιμοποιείται αυτό το μέγεθος στον αλγόριθμο.

2^{ον} Οι μεταβλητές d_{dome} και n_{dome} είναι αντίστοιχα η διάμετρος και ο αριθμός των οπών του θόλου. Η δύο αυτές μεταβλητές δεν χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο, αλλά χρησιμοποιείται το εμβαδό των οπών, το οποίο είναι δυνατόν να υπολογιστεί από την εξής σχέση:

$$A_{dome} = \frac{\dot{m}_{dome}}{Cd\sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (3.1)$$

Από το Κεφάλαιο 2 είναι γνωστό ότι η παροχή \dot{m}_{dome} κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10 – 15%. Η τιμή της μεταβλητής Cd προτείνεται από [27] να λαμβάνει την τιμή 0.8 για αρχικούς υπολογισμούς. Η μεταβλητή ΔP θεωρείται ότι ισούται με το 70% τις συνολικής πτώσης πίεσης στον θάλαμο καύσης. Η μεταβλητή ρ είναι η πυκνότητα του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή.

3^{ον} Η μεταβλητή l_{film} είναι το μήκος που τοποθετούνται οι σχισμές για την ψύξη του του μανδύα, δεν έχει εντοπιστεί μεθοδολογία υπολογισμού της, παρόλα αυτά η μεταβλητή αυτή επηρεάζει τα αποτελέσματα και η τιμή της μπορεί να προξενήσει επαναλήψεις στον αλγόριθμο.

4^{ον} Οι μεταβλητές l_{pri} , d_{pri} και n_{pri} είναι η απόσταση, η διάμετρος και ο αριθμός των οπών που τοποθετούνται στο τέλος της πρωτεύουσας ζώνης.

5^{ον} Οι μεταβλητές l_{sec} , d_{sec} και n_{sec} είναι η απόσταση, η διάμετρος και ο αριθμός των οπών που τοποθετούνται στο τέλος της δευτερεύουσας ζώνης.

3.1 Αλγόριθμος σχεδιασμού

Το επόμενο βήμα αυτής της προκαταρκτικής μελέτης είναι ο σχεδιασμός ενός θαλάμου καύσεως με σκοπό την μείωση των εκπομπών ρύπων (NO_x , CO). Αυτός ο προκαταρκτικός σχεδιασμός όπως αναφέρθηκε θα βασιστεί στην αναφορά [10]. Σε αυτόν τον σχεδιασμό θα αξιοποιηθούν μερικά δεδομένα που προέκυψαν από το προηγούμενο βήμα χρησιμοποιώντας μαζί και ημιεμπειρικές σχέσεις για τις εκπομπές ρύπων. Οι κύριες σχεδιαστικές μεταβλητές είναι ουσιαστικά τα μήκη της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας ζώνης, ο αριθμός και η διάμετρος των οπών στην κάθε ζώνη. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί και σχεδιασμός του διασκορπιστή (SMD στο ξεκίνημα και στο ρελαντί), για να επιτευχθεί κατάλληλος βαθμός απόδοσης της καύσης.

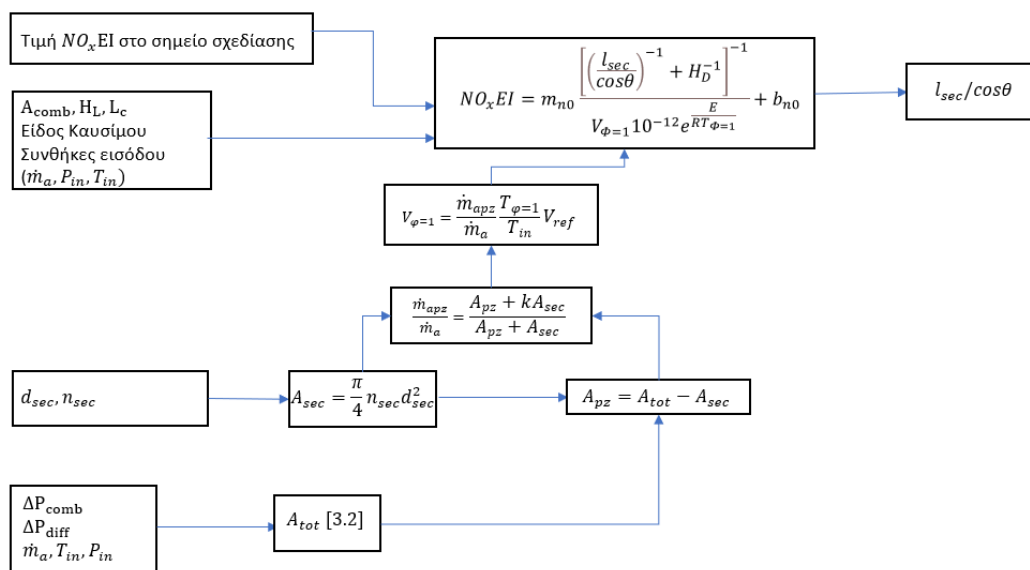
3.1.1 Δευτερεύουσα ζώνη

Το πρώτο βήμα αυτής του σχεδιασμού είναι ο υπολογισμός του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης. Η αφετηρία του σχεδιασμού είναι η δευτερεύουσα ζώνη, διότι τα αποτελέσματα αυτού του αλγορίθμου αξιοποιούνται από τον αλγόριθμο υπολογισμού της πρωτεύουσας ζώνης. Ο υπολογισμός των στοιχείων της δευτερεύουσας ζώνη πραγματοποιείται με σκοπό την μείωση των ρύπων NO_x . Στο **Σχήμα 3.2** παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου.



Σχήμα 3.2: Δεδομένα εισόδου και εξόδου για τον σχεδιασμό της δευτερεύουσας ζώνης

Στην συνέχεια ακολουθεί ο αλγόριθμος υπολογισμού των δεδομένων εξόδου. Σε αυτόν τον αλγόριθμο επιλέγεται αρχικά η τιμή στόχος των ρύπων NO_x στο σημείο λειτουργίας της μέγιστης ισχύς, με σκοπό να προσδιοριστούν οι τιμές των μεταβλητών της δευτερεύουσας ζώνης. Ο αλγόριθμος είναι ο εξής:



Σχήμα 3.3: Αλγόριθμος σχεδιασμού δευτερεύουσας ζώνης

Η αφετηρία του αλγορίθμου είναι η επιλογή της τιμής των μεταβλητών d_{sec} και n_{sec} . Στην δημοσίευση [10] η επιλογή γίνεται σχεδόν αυθαίρετα, ο τρόπος επιλογής δεν δικαιολογείται, αλλά με βάση την σύγκριση των τιμών που επιλέγηκαν προτείνεται η επιλογή να είναι τέτοια η οποία δίνει συνολικό εμβαδό οπών λίγο μικρότερο (κατά 10-15%) από το εμβαδό των οπών που προέκυψε από την προκαταρκτική διαστασιολόγηση ή από το εμβαδό που είναι γνωστό σε έναν δεδομένο θάλαμο καύσης. Το εμβαδό των οπών δίνεται από την σχέση:

$$A_{sec} = \frac{n_{sec}\pi d_{sec}^2}{4} \quad (3.2)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η τιμή του συνολικού εμβαδού των οπών στον θάλαμο καύσης A_{tot} μέσω της σχέσης:

$$A_{tot} = \dot{m}_a \left[\frac{RT_{in}}{2P_{in}(\Delta P_{comb} - \Delta P_{diff})} \right]^{0.5} \quad (3.3) \text{ από [10]}$$

Μέσω του υπολογισμού των δύο προηγούμενων εμβαδόν υπολογίζεται το εμβαδό των οπών της πρωτεύουσας ζώνης συμπεριλαμβανομένου και των οπών του θόλου οπότε:

$$A_{pz} = A_{tot} - A_{sec} \quad (3.4)$$

Αφού έχει προσδιοριστεί το εμβαδό των οπών της πρωτεύουσας ζώνης το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του κλάσματος μάζας αέρα που εισέρχεται στην πρωτεύουσα ζώνη.

$$\frac{\dot{m}_{apz}}{\dot{m}_a} = \frac{A_{pz} + kA_{sec}}{A_{pz} + A_{sec}} \quad (3.5)$$

Η μεταβλητή k υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$k = 0.5 \left(\frac{T_{in}}{T_{\varphi=1}} \right)^{0.5} \cos\beta_0 \quad (3.6)$$

Η γωνία β_0 είναι η γωνία εισαγωγής του αέρα μετρημένη κάθετα από την μέση γραμμή του θαλάμου καύσης. Η μεταβλητή $T_{\varphi=1}$ είναι η αδιαβατική στοιχειομετρική θερμοκρασία φλόγας, και υπολογίζεται γνωρίζοντας την θερμοκρασία εισόδου, το είδος καύσιμου και την παροχή καυσίμου.

Η επόμενη μεταβλητή που πρέπει να υπολογιστεί είναι η ταχύτητα της στοιχειομετρικής ζώνης φλόγας ($V_{\varphi=1}$). Η οποία υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$V_{\varphi=1} = \frac{\dot{m}_{apz}}{\dot{m}_a} \frac{T_{\varphi=1}}{T_{in}} V_{ref} \quad (3.7)$$

Η μεταβλητή V_{ref} υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_{ref} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_3 A_{ref}} \quad (3.8)$$

Η μεταβλητή A_{ref} είναι το εμβαδό του μανδύα του θαλάμου καύσεως.

Εφόσον έχουν υπολογιστεί όλα τα προηγούμενα σειρά έχει να υπολογιστεί ο λόγος $(l_{sec}/\cos\theta)$ μέσω της εξίσωσης:

$$NO_x EI = m_{n0} \left[\frac{\left[\left(\frac{l_{sec}}{\cos\theta} \right)^{-1} + H_L^{-1} \right]^{-1}}{\frac{V_{\phi=1}}{10^{-12} e^{\frac{E}{RT_{\phi=1}}}}} \right] + b_{n0} \quad (3.9)$$

Οι τιμές m_{n0} και b_{n0} προκύπτουν από την γραμμική συσχέτιση των $NO_x EI$ (gram NO as $NO_2/kg fuel$) για μια ομάδα κινητήρων, όπου ο όρος m_{n0} είναι η κλίση και ο όρος b_{n0} είναι η τεταγμένη της ευθείας όταν τέμνεται με τον άξονα Oy . Στην περίπτωση της δημοσίευσης η συσχέτιση έγινε για τους αεροπορικούς κινητήρες T-63, GT-309 και JT9D και λήφθηκαν οι τιμές $m_{n0} = 4.5$ και $b_{n0} = 0.0$. Η μεταβλητή E , είναι η ενέργεια ενεργοποίησης και λαμβάνει τιμές $E = 135 \left(\frac{kcal}{gmole} \right)$.

Η γωνία θ είναι η γωνία των συστροφών, στο Κεφάλαιο 2 έχει την ονομασία β_{sw} , και λαμβάνει τιμές:

$$30^\circ < \theta < 60^\circ \quad (3.10)$$

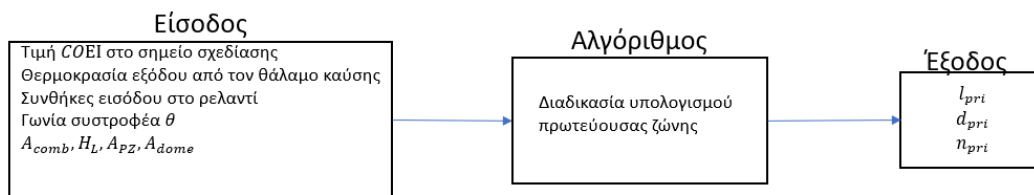
Οπότε χρησιμοποιώντας την τιμή θ που επιλέγηκε στον προκαταρκτικό σχεδιασμό ή αυτήν που είναι γνωστή για δεδομένο κινητήρα υπολογίζεται το μήκος l_{sec} .

Στην συνέχεια συγκρίνεται το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης με το συνολικό μήκος του θαλάμου καύσεως στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερο, επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος αυξάνοντας τον αριθμό των οπών και/ή την διάμετρο των οπών μέχρι η τιμή του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης να λάβει ικανοποιητική τιμή.

3.1.2 Πρωτεύουσα ζώνη

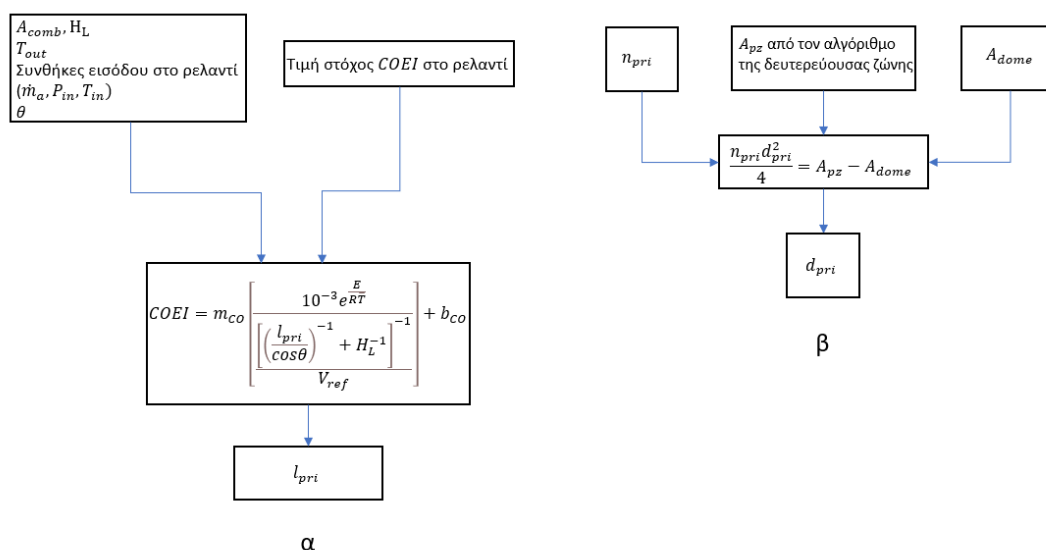
Το επόμενο βήμα είναι ο σχεδιασμός της πρωτεύουσας ζώνης. Παρομοίως θα υπολογιστούν οι τιμές $(l_{pri}, d_{pri}, n_{pri})$. Αυτός ο σχεδιασμός εφαρμόζεται σε συνθήκες ρελαντί (idle) με στόχο την μείωση των ρύπων CO ($COEI$). Τα στοιχεία λειτουργίας στο ρελαντί είναι γνωστά είτε από μοντελοποίηση του αεροπορικού κινητήρα στο PROOSIS, είτε από στοιχεία του κατασκευαστή. Στο **Σχήμα 3.4**

παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου του αλγορίθμου.



Σχήμα 3.4: Δεδομένα εισόδου και εξόδου για τον σχεδιασμό της πρωτεύουσας ζώνης

Ο αλγόριθμος σχεδιασμού της πρωτεύουσας ζώνη δέχεται σαν δεδομένα αυτά του Σχήματος 3.4 και εφαρμόζοντας τις κατάλληλες σχέσεις υπολογίζει το μήκος της πρωτεύουσας (l_{pri}), τον αριθμό των οπών της πρωτεύουσας ζώνη (n_{pri}) και της διαμέτρου των οπών της πρωτεύουσας ζώνης (d_{pri}). Ο αλγόριθμος σχεδιασμού είναι ο εξής:



Σχήμα 3.5: Αλγόριθμος πρωτεύουσας ζώνης

Για τον αλγόριθμο το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης (l_{pri}), ο οποίος πραγματοποιείται μέσω του λογικού διαγράμματος (α). Η εξίσωση που θα αξιοποιηθεί είναι η εξής:

$$COEI = m_{CO} \left[\frac{10^{-3} e^{\frac{E}{R\bar{T}}}}{\left[\left(\frac{l_{pri}}{\cos\theta} \right)^{-1} + H_L^{-1} \right]^{-1} V_{ref}} \right] + b_{CO} \quad (3.11)$$

Η τιμή της μεταβλητής \bar{T} δίνεται από την σχέση:

$$\bar{T} = 0.5(T_{in} + T_{out}) \quad (3.12)$$

Ουσιαστικά είναι η αριθμητική μέση θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης.

Η μεταβλητή V_{ref} έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3.1.1 πως υπολογίζεται. Επιπλέον σε αυτήν την περίπτωση η ενεργεία ενεργοποίησης λαμβάνει την τιμή $E = 10.76 \left(\frac{kcal}{gmole} \right)$. Οι τιμές των m_{CO} και b_{CO} από την αναφορά [10] λαμβάνουν τις τιμές $m_{no} = 35$ και $b_{CO} = 0.0$ για την ίδια ομάδα κινητήρων που αναφέρθηκε στον αλγόριθμο της δευτερεύουσας ζώνης.

Από τον σχεδιασμό της δευτερεύουσας ζώνης έχει ήδη επιλεγεί η τιμή θ οπότε λύνεται η εξίσωση (3.11) προς το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης (l_{pri}). Στην συνέχεια συγκρίνεται η τιμή του l_{pri} με την τιμή l_{sec} για να ελεγχθεί πρώτον εάν το l_{pri} είναι μικρότερο του l_{sec} και δεύτερον εάν η απόσταση μεταξύ της δέσμης αέρα των οπών της πρωτεύουσας περιοχής με την δέσμη αέρα των οπών της δευτερεύουσας ζώνης είναι ικανοποιητική με βάση άλλους σχεδιασμούς θαλάμων καύσεως. Στην περίπτωση όπου η τιμή του μήκους δεν είναι ικανοποιητική επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος του σχεδιασμού της δευτερεύουσας ζώνης, αλλάζοντας τις τιμές της διαμέτρου αλλά και του αριθμού οπών μέχρι να ληφθεί τιμή μήκους πρωτεύουσας ζώνης που να ικανοποιεί τους περιορισμούς.

Μέσω του αλγορίθμου (β) του **Σχήματος 3.5** υπολογίζεται ο αριθμός και η διάμετρος των οπών της πρωτεύουσας ζώνης θα χρησιμοποιηθεί η εξής εξίσωση:

$$n_{pri} \left(\frac{\pi}{4} \right) d_{pri}^2 = A_{pz} - A_{dome} \quad (3.13)$$

Το A_{pz} έχει υπολογιστεί από τον αλγόριθμο της δευτερεύουσας ζώνης, το A_{dome} μπορεί να προσδιοριστεί είτε πραγματοποιώντας ανάλυση μέσω μεταφοράς θερμότητας, είτε μέσω σύγκρισης από προηγούμενους σχεδιασμούς θαλάμων καύσεως. Η εξίσωση (3.13) επιτρέπει να επιλεγεί έναν λογικό και προκαταρκτικό αριθμό και διάμετρο οπών. Στην περίπτωση όπου $A_{pz} - A_{dome} < 0$ είναι απαραίτητο να μειωθεί ο αριθμός ή/και η διάμετρος των οπών της δευτερεύουσας ζώνης και να επανυπολογιστεί το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης.

3.1.3 Διασκορπιστής

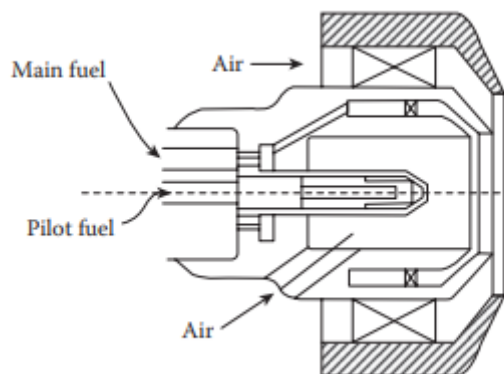
Επόμενο στάδιο του σχεδιασμού είναι όπως αναφέρθηκε ο σχεδιασμός του διασκορπιστή. Ο σχεδιασμός του θα πραγματοποιηθεί μέσω υπολογισμού του αριθμού Sauter mean diameter (SMD), και επακολούθως γνωρίζοντας τον αριθμό SMD και την παροχή καυσίμου σχεδιάζεται ο διασκορπιστής. Ο σχεδιασμός λαμβάνει χώρα όταν η μηχανή λειτουργεί στο ρελαντί, επιτυγχάνοντας μια συγκεκριμένη τιμή-στόχο του βαθμού απόδοσης της καύσης. Αυτή η τιμή στόχος στην αναφορά [10] είναι τουλάχιστον 99%.

Η τιμή (*SMD*) είναι η εξής:

$$SMD = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (3.14)$$

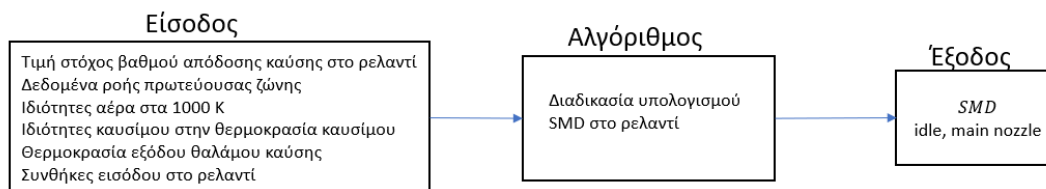
Όπου n_i είναι ο αριθμός των σταγόνων που έχουν διάμετρο d_i .

Ο διασκορπιστής έχει δύο εγχυτήρες τον οδηγό και τον κεντρικό **Σχήμα 3.6**.



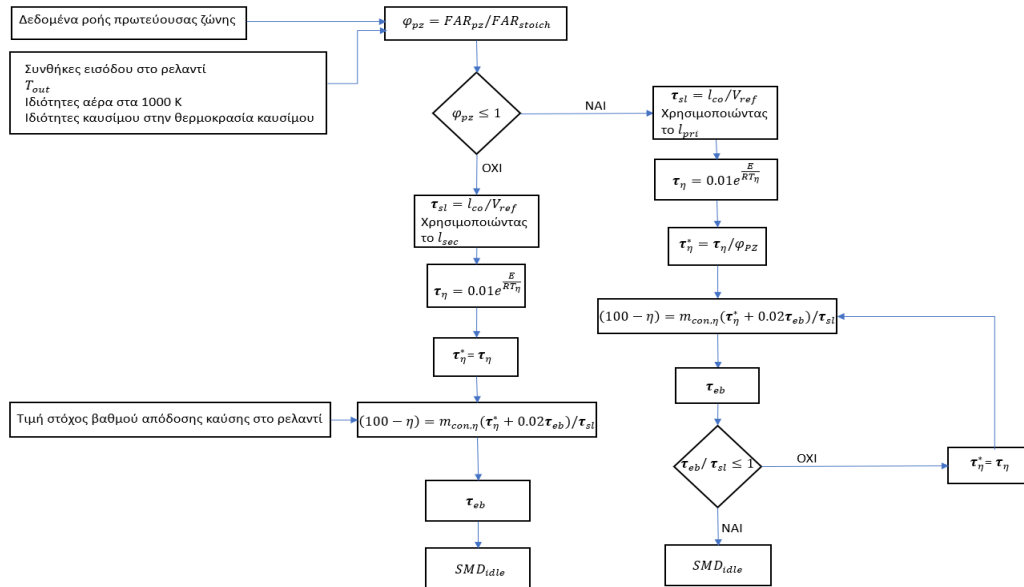
Σχήμα 3.6: Μορφή διασκορπιστή από [3]

Στο **Σχήμα 3.7** παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου για τον υπολογισμό του *SMD* στο ρελαντί.



Σχήμα 3.7: Δεδομένα εισόδου και εξόδου για τον υπολογισμό του *SMD* στο ρελαντί

Ο αλγόριθμος υπολογισμού του *SMD* στο ρελαντί δέχεται σαν δεδομένα εισόδου αυτά του **Σχήματος 3.7**, και υπολογίζει μέσω των κατάλληλων σχέσεων την τιμή *SMD*. Ακολουθεί ο αλγόριθμος υπολογισμός του *SMD*:



Σχήμα 3.8: Αλγόριθμος υπολογισμούς του SMD για κατάσταση ρελαντί

Για τον αλγόριθμο αυτόν το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός της τιμής φ_{pz} η οποία είναι ήδη γνωστή από το Κεφάλαιο 2.2 (Εξίσωση 2.7). Ο αλγόριθμος χωρίζεται σε δύο κομμάτια ανάλογα την τιμή του φ_{pz} . Για την περίπτωση όπου $\varphi_{pz} > 1$:

Ξεκινάει με τον υπολογισμό της μεταβλητής τ_{sl} όπου:

$$\tau_{sl} = (l_{sec} + H_L^{-1})^{-1} \quad (3.15)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η μεταβλητή τ_{η} :

$$\tau_{\eta} = 0.01 e^{\frac{E}{RT_{\eta}}} \quad (3.16)$$

Όπου η μεταβλητή T_{η} υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{\eta} = (0.9T_{in} + 0.1T_{out}) \quad (3.17)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η μεταβλητή τ_{η}^* :

$$\tau_{\eta}^* = \tau_{\eta} \quad (3.18)$$

Γνωρίζοντας τα τ_{sl} , τ_{η} και τ_{η}^* είναι δυνατό να υπολογιστεί το τ_{eb} , όπου προκύπτει επιλύοντας της εξίσωση:

$$(100 - \eta_{idle}) = m_{con,\eta} (\tau_{\eta}^* + 0.02\tau_{eb}) / \tau_{sl} \quad (3.19)$$

Για τον σχεδιασμό αυτού του ψεκαστήρα στην αναφορά [10] αναφέρεται ότι έχει γίνει συσχέτιση της μεταβλητής $m_{con,\eta}$ για τους θαλάμους καύσεως των αεροσκαφών (F101, TF-41, T-63 και AGT-1500) και προτείνεται τιμή $m_{con,\eta} = 3.38$.

Και τελικά υπολογίζεται η τιμή του SMD από την εξίσωση:

$$\tau_{eb} = SMD^2 / \beta \quad (3.20)$$

Για την περίπτωση όπου $\varphi_{pz} > 1$ οι σχέσεις είναι οι εξής:

$$\tau_{sl} = (l_{pri} + H_L^{-1})^{-1} \quad (3.21)$$

τ_η από (3.16)

$$\tau_\eta = \tau_\eta^* / \varphi_{pz} \quad (3.22)$$

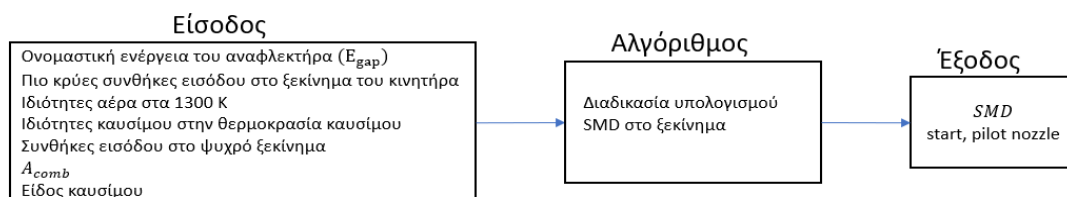
τ_{eb} από (3.19)

Αφότου υπολογιστεί το τ_{eb} πρέπει να γίνει ένας έλεγχος της τιμής του. Στην περίπτωση όπου $\tau_{eb}/\tau_{sl} > 1$ θεωρείται ότι για το τ_η^* ισχύει η εξίσωση (3.14) με αυτήν την ανανεωμένη τιμή επανυπολογίζεται το τ_{eb} . Όταν $\tau_{eb}/\tau_{sl} \leq 1$ δεν εφαρμόζεται καμία επιπλέον σχέση. Τελικά και για τις δύο περιπτώσεις του φ_{pz} αφότου είναι γνωστό το τ_{eb} υπολογίζεται το SMD από την επόμενη σχέση.

SMD από (3.20)

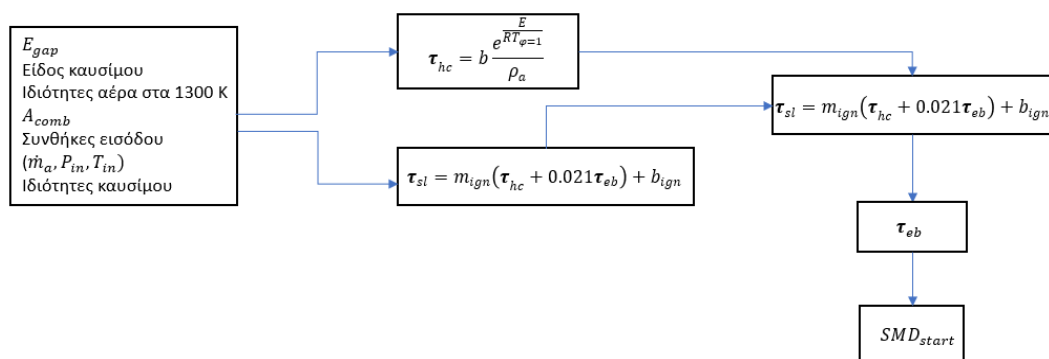
Επομένως, γνωρίζοντας την τιμή του SMD, την παροχή καυσίμου και θεωρώντας ότι ο διασκορπιστής λειτουργεί με τον κεντρικό εγχυτήρα, μπορεί πλέον να επιλεγεί ένας διασκορπιστής που καλύπτει αυτά τα δεδομένα.

Το επόμενο στάδιο είναι ο υπολογισμός της τιμής του SMD για τον οδηγό εγχυτήρα. Χρησιμοποιείται το κριτήριο cold start ignition (είτε στο έδαφος είτε στον αέρα). Στο **Σχήμα 3.9** παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου



Σχήμα 3.9: Δεδομένα εισόδου και εξόδου για τον σχεδιασμό του ψεκαστήρα στην ψυχρή εκκίνηση

Ο αλγόριθμος υπολογισμού του SMD στο ρελαντί δέχεται σαν δεδομένα εισόδου αυτά του **Σχήματος 3.9**, και υπολογίζει μέσω των κατάλληλων σχέσεων την τιμή SMD. Ακολουθεί ο αλγόριθμος υπολογισμού του SMD:



Σχήμα 3.10: Αλγόριθμος υπολογισμού του SMD για κατάσταση ψυχρής εκκίνησης

Στον αλγόριθμο αυτόν το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός του τ_{sl} με την χρήση της εξίσωσης:

$$\tau_{sl} = \frac{d_q}{V_{ref}} \quad (3.21)$$

Όπου:

$$d_q = \left[\frac{E_{gap}}{\frac{\pi}{6} \rho_a C_{pa} (T_{\varphi=1} - T_{in})} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.22)$$

Οι ιδιότητες του αέρα, όπως αναφέρθηκε, υπολογίζονται στους 1300 K. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο όρος τ_{hc} , όπου:

$$\tau_{hc} = b \frac{e^{\frac{E}{RT_{\varphi=1}}}}{\rho_a} \quad (3.23)$$

Από την αναφορά [10] ισχύει: $b = 10^{-5} \text{ Kg ms/m}^3$, $E = 26.1 \text{ kcal/g mole}$. Στην συνέχεια υπολογίζεται το τ_{eb} μέσω της εξίσωσης:

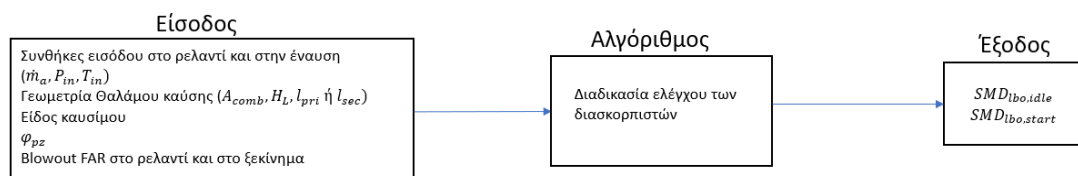
$$\tau_{sl} = m_{ign}(\tau_{hc} + 0.021\tau_{eb}) + b_{ign} \quad (3.24)$$

Για τον σχεδιασμό αυτού του ψεκαστήρα στην αναφορά [10] αναφέρεται ότι έχει γίνει συσχέτιση των μεταβλητών m_{ign} & b_{ign} για τους θαλάμους καύσεως των αεροσκαφών (F101, T-63 και AGT-1500) και προτείνεται τιμή $m_{ign} = 3.38$, $b_{ign} = 0.135$.

Αξιοποιώντας την εξίσωση (3.20) υπολογίζεται και το SMD . Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί διασκορπιστής Πίεσης-Συστροφής και η τιμή του SMD απαιτεί υψηλή πίεση τροφοδοσίας, τότε είναι αναγκαίο να επιλεγεί ένας αναφλεκτήρας με μεγαλύτερη τιμή E_{gap} και να επαναληφθεί ο αλγόριθμος.

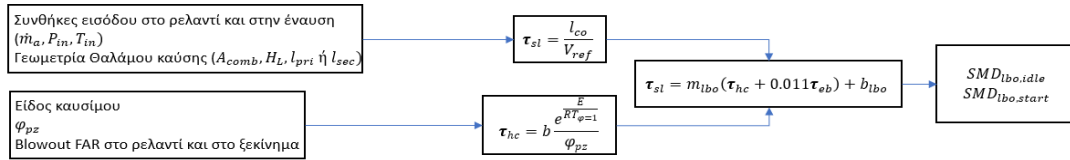
Το επόμενο και τελευταίο στάδιο του σχεδιασμού είναι ο έλεγχος αν οι δυο προηγούμενοι διασκορπιστές που σχεδιάστηκαν είναι ικανοί για την διατήρηση της ευστάθειας της φλόγας, δηλαδή να μην εμφανιστεί σβήσιμο της φλόγας (blow-out). Στην αναφορά [10] αναφέρεται ότι το σβήσιμο της φλόγας πρέπει να εμφανίζεται για FAR μικρότερο του 50% του FAR στο ρελαντί.

Στο **Σχήμα 3.11** παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου του αλγορίθμου του ελέγχου.



Σχήμα 3.11: Δεδομένα εισόδου και εξόδου για τον αλγόριθμο ελέγχου του διασκορπιστή

Ο αλγόριθμος ελέγχου δέχεται σαν δεδομένα εισόδου αυτά του **Σχήματος 3.11**, και υπολογίζει μέσω των κατάλληλων σχέσεων τις τιμές των SMD. Ακολουθεί ο αλγόριθμος ελέγχου:



Σχήμα 3.12: Αλγόριθμος αλγόριθμο ελέγχου του διασκορπιστή

Για τον αλγόριθμο η αρχή είναι ο υπολογισμός του τ_{sl} :

$$\tau_{sl} = \frac{l_{co}}{V_{ref}} \quad (3.25)$$

Όπου η μεταβλητή l_{co} λαμβάνει την τιμή l_{pri} ή l_{sec} και θα πραγματοποιηθεί έλεγχος για το ποια τιμή θα ληφθεί. Αρχικά θεωρείται ότι $l_{co} = l_{pri}$ και υπολογίζεται το τ_{sl} . Στην συνέχεια το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του τ_{hc} μέσω της εξίσωσης:

$$\tau_{hc} = b \frac{e^{\frac{E}{RT_{\phi=1}}}}{\varphi_{pz}} \quad (3.26)$$

Όπου $b = 10^{-4} \text{ kg ms/m}^3$ και $E = 21 \text{ kcal/g mole}$. Στην συνέχεια υπολογίζεται το τ_{eb} μέσω της εξίσωσης:

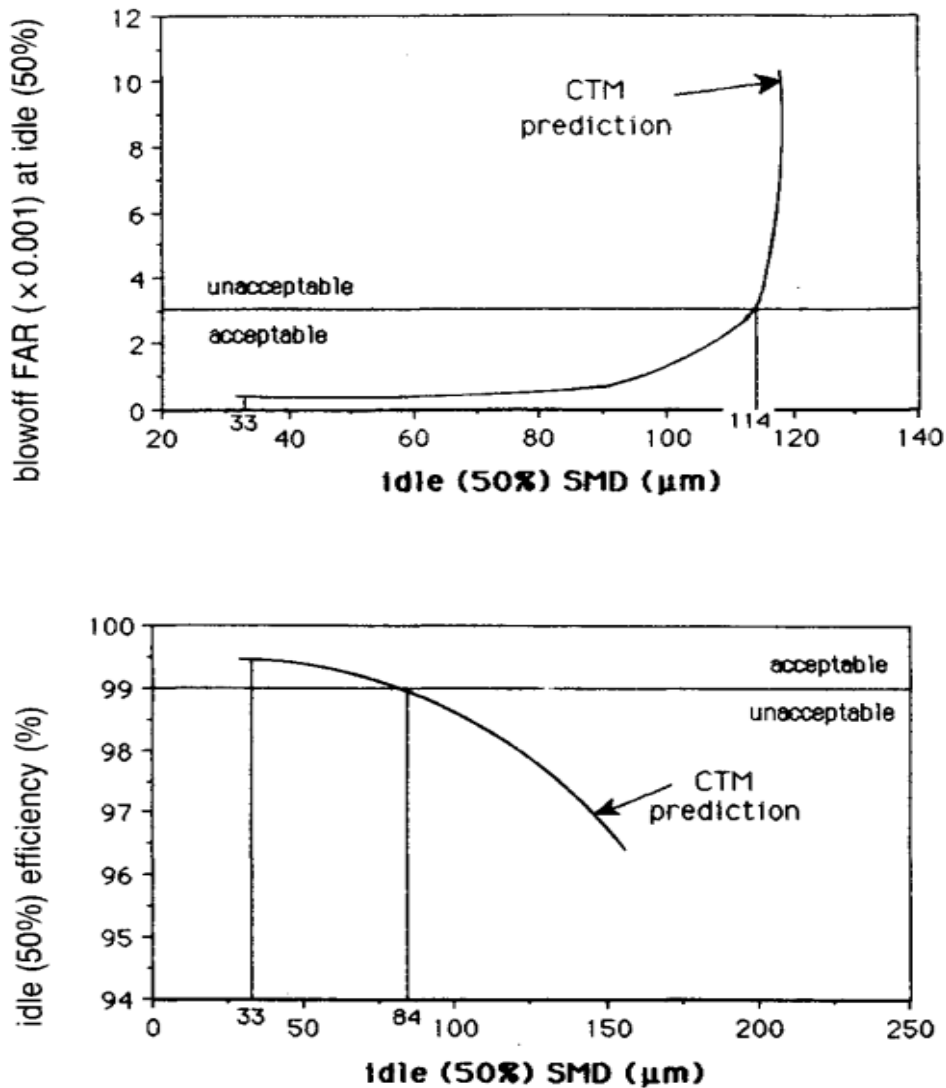
$$\tau_{sl} = m_{ibo}(\tau_{hc} + 0.011\tau_{eb}) + b_{ibo} \quad (3.27)$$

Για τον έλεγχο στην αναφορά [10] αναφέρεται ότι έχει γίνει συσχέτιση των μεταβλητών m_{ibo} & b_{ibo} για τους θαλάμους καύσεως των αεροσκαφών (J85, T-63 και AGT-1500) και προτείνεται τιμή $m_{ibo} = 1.36$, $b_{ibo} = 0.36$.

Υπολογίζοντας το τ_{eb} γίνεται έλεγχος εάν $\tau_{eb}/\tau_{sl} < 50$. Εάν είναι αληθής αυτή η ανισότητα, τότε η επιλογή ότι $l_{co} = l_{pri}$ είναι σωστή. Αλλιώς, χρησιμοποιείται η σχέση $l_{co} = l_{sec}$ για να προσδιοριστεί η τιμή του τ_{eb} .

Τέλος, αφού ληφθούν οι τιμές των SMD_{ibo} , σχεδιάζονται οι καμπύλες SMD συναρτήσεως της παροχής καυσίμου και του βαθμού απόδοσης στο ρελαντί, για την περίπτωση εκκίνησης και ρελαντί, με σκοπό να βρεθεί και στις δυο περιπτώσεις η τιμή $SMD_{blowout}$. Στην περίπτωση όπου $SMD_{blowout} < SMD_{ibo}$ ο σχεδιασμός είναι αποδεκτός. Στην περίπτωση που δεν ισχύει η ισότητα, τότε θα υπάρξει σβήσιμο της φλόγας και είναι αναγκαίο η μείωση της διαμέτρου ή/και των αριθμό των οπών της πρωτεύουσας ζώνης ώστε να αυξηθεί το φ_{pz} , το οποίο οδηγεί και σε αύξηση του SMD_{ibo} .

Με βάση την αναφορά [10] οι καμπύλες έχουν την εξής μορφή:



Σχήμα 3.13: Καμπύλες για τον έλεγχο του διασκορπιστή από [10]

Η συνάρτηση προς τον βαθμό απόδοσης είναι δυνατόν να σχεδιαστεί μέσω της εξίσωσης (3.20). Για την συνάρτηση προς τον λόγο FAR είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μια σχέση της μορφής:

$$SMD = 2.25\sigma_L^{0.25}\mu_L^{0.25}\dot{m}_L^{0.25}\Delta P_L^{0.25}\rho_A^{0.25} \quad (3.28) \text{ από [3]}$$

Όπου:

- σ_L : Επιφανειακή τάση του καυσίμου (N/m)
- μ_L : Δυναμική συνεκτικότητα του καυσίμου ($Poise, Pa \cdot s$)
- \dot{m}_L : Παροχή καυσίμου (Kg/s)
- ΔP_L : Πτώση ολικής πίεσης του καυσίμου κατά μήκος του διασκορπιστή (Pa)
- ρ_A : Πυκνότητα του αέρα (Kg/m^3)

Ο λόγος FAR συνδέεται με την παροχή καύσιμου έμμεσα από την σχέση:

$$FAR = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_a} \quad (3.29)$$

Ενώ η πτώση πίεσης ΔP_L υπολογίζεται με βάση την μεταβλητή του ψεκαστήρα FN (Injector Flow Number), η οποία τιμή είναι μοναδική και σταθερή για τον κάθε ψεκαστήρα, οπότε:

$$FN = \frac{\dot{m}_L}{\sqrt{\Delta P_L \rho_L}} \quad (3.30)$$

Και επιπλέον

$$FN = 0.389 d_o^{1.25} A_p^{0.5} D_s^{-1.25} \quad (3.31) \text{ από [3]}$$

Όπου:

- ρ_L : Πυκνότητα του καυσίμου (Kg/m^3)
- d_o : discharge orifice diameter (m)
- A_p : Total inlet ports area (m^2)
- D_s : Διάμετρος του συστροφέα (m)

Επιπλέον από [3];

$$2\psi = 6 \left(\frac{D_s d_o}{A_p} \right)^{0.15} \left(\frac{\Delta P_L d_o^2 P_L}{\mu_L^2} \right)^{0.11} \quad (3.32)$$

Όπου:

- 2ψ : Η γωνία το κώνου που σχηματίζει το καύσιμο στην εισαγωγή του
- P_L : Η πίεση του καυσίμου

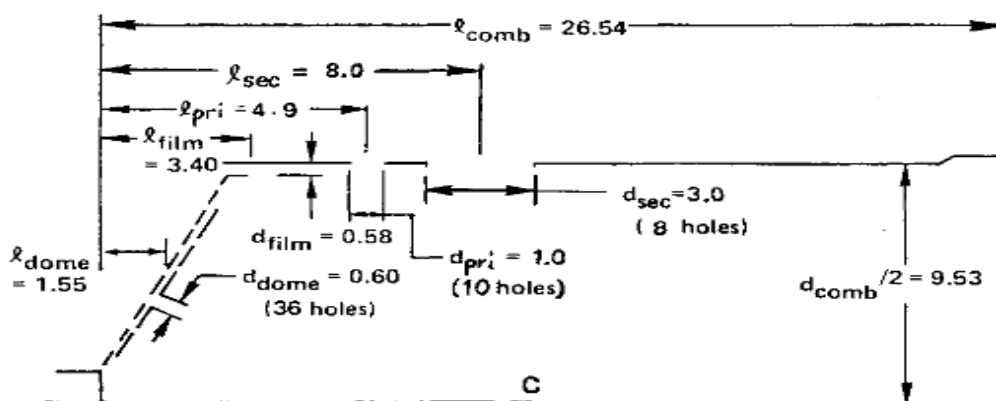
Η μεταβλητή 2ψ είναι δυνατόν να εκτιμηθεί από τον τύπο:

$$\tan\psi = 0.13 \left(1 + \frac{\rho_A}{\rho_L} \right) \quad (3.33)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις του SMD και του FN είναι για διασκορπιστή πίεσης-συστροφής.

3.2 Αριθμητική Εφαρμογή

Προκείμενου να πραγματοποιηθεί η επαλήθευση του κώδικα για την διαδικασία θα πραγματοποιηθεί μια αριθμητική εφαρμογή με βάση τα αποτελέσματα της αναφοράς [10]. Το επόμενο σχήμα, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της χρήσης αυτού του αλγορίθμου από την αναφορά [10] για τον θάλαμο καύσεως του κινητήρα GT-309.



Σχήμα 3.14: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου προκαταρκτικού σχεδιασμού θαλάμου καύσεων από [10]

Για να υλοποιηθεί αυτός ο αλγόριθμος, όλα τα απαραίτητα δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα στην αναφορά [10], οπότε ύστερα από έρευνα εντοπίστηκαν αυτά τα δεδομένα στην αναφορά [28]. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε κάποια κοινά δεδομένα που είχαν και οι δύο αναφορές εντοπίστηκαν μικρές διαφορές (π.χ. Παροχή μάζας). Συγχρόνως, μια σημαντική πληροφορία που λείπει είναι η γωνία θ του συστροφέα, οπότε έγιναν και οι κατάλληλες θεωρήσεις για τον υπολογισμό της με βάση το Κεφάλαιο 2. Επιπλέον στα διαθέσιμα δεδομένα δεν διευκρινίζεται αν οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις είναι στατικές ή ολικές, με βάση όμως τους τύπους που χρησιμοποιεί η δημοσίευση του Mellor [29] θεωρούνται στατικές.

Σχετικά με τον προσδιορισμό του θ , είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με αντίστροφο σχεδιασμό δηλαδή χρησιμοποιώντας το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης σαν δεδομένο, οπότε η γωνία θ προκύπτει, $\theta = 52.1265^\circ$ μέσα στα όρια τα οποία έχουν τεθεί στο Κεφάλαιο 2. Εφόσον επιλεγεί αυτή η τιμή το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης θα είναι το ίδιο. Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα θεωρώντας $\theta = 50^\circ$.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμου χαμηλών ρύπων

	l_{sec} (cm)	l_{pri} (cm)
Από Σχήμα 3.14	8.0	3.6*
Κώδικας	8.37	4.19

* Στο Σχήμα 3.14 το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης ισούται με $l_{pri} = 4.9$ cm, όμως με βάση την δημοσίευση [10] στην 8^η σελίδα και 2^η παράγραφο αναφέρεται ότι το αρχικό μήκος υπολογισμένο από τον αλγόριθμο είναι 3.6 (cm). Αλλά επιλέγηκε να

είναι 4.6 (cm) λόγω του film.

3.3 Αποτελέσματα για δεδομένα του κινητήρα CFM-56

Ο προαναφερθείς αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για την τροποποίηση του θαλάμου καύσεως του CFM-56. Επιλέγηκε αυτός ο κινητήρας διότι η αναφορά [5] παρέχει δεδομένα για τις συνθήκες εισόδου στο ρελαντί αλλά, και για τις εκπομπές καυσαερίων που είναι απαραίτητες για τον υλοποίηση του αλγόριθμου. Δεν επιλέχθηκε ο J79 διότι δεν υπήρχαν αυτά τα δεδομένα. Για την κατάσταση 100% που απαιτείται για τον αλγόριθμο των NO_x , θεωρήθηκε η κατάσταση Take-off που είναι η πιο <<δυσμενής>> από αυτές που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.

Πίνακας 3.2: Δεδομένα για ρύπους CFM-56 από [5]

	EI NO_x	EI CO
Take-off	30.9	0.2
Idle	4.8	17.7

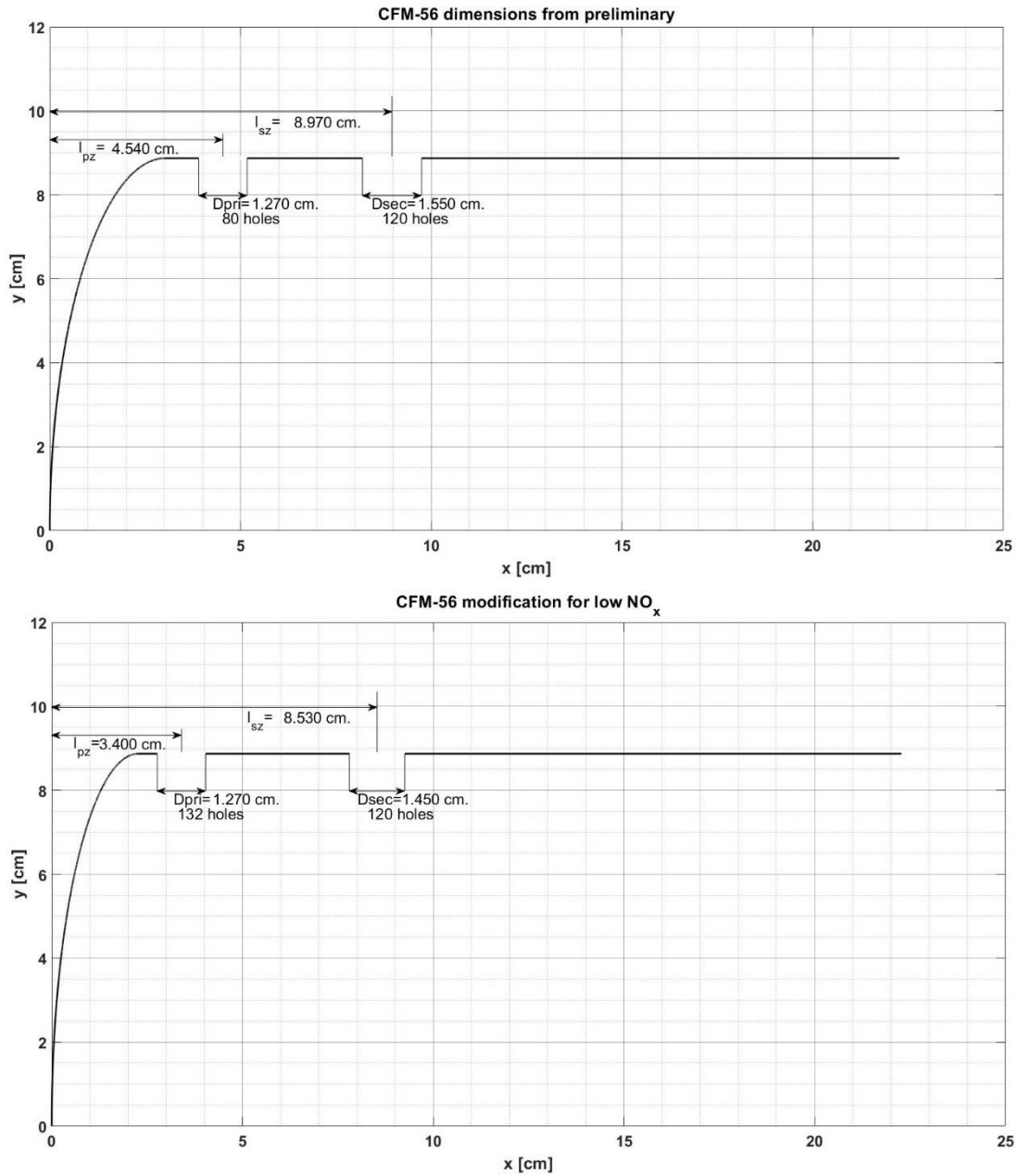
Για την μείωση των ρύπων θεωρήθηκε μια μεταβολή κατά -15% για τα NO_x και κατά -0% για το CO. Η επιλογή για τις μειώσεις των CO πραγματοποιήθηκε με βάση την αριθμητική εφαρμογή που προηγήθηκε, Οπότε:

Πίνακας 3.3: Δεδομένα για αλγόριθμο χαμηλών ρύπων για CFM-56

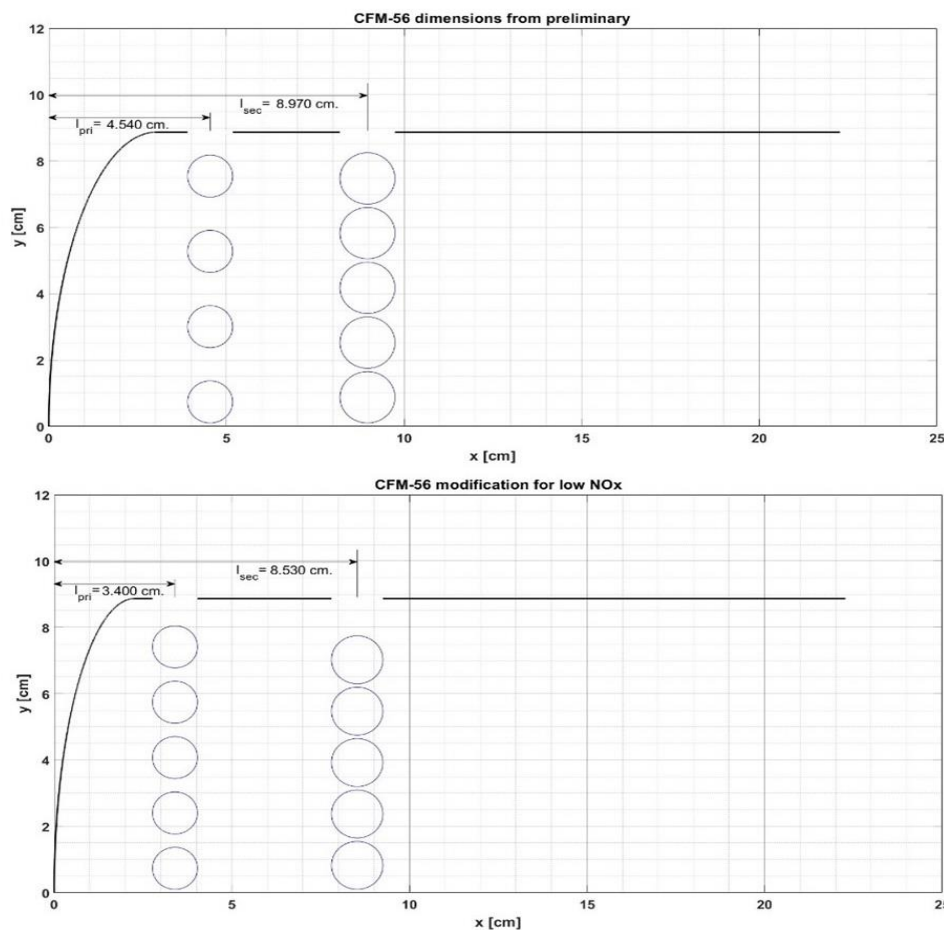
	EI NO_x	EI CO
Take-off	26.5	-
Idle	-	17.7

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα αλγορίθμου χαμηλών ρύπων

	Αρχικές Τιμές (cm)	Αποτελέσματα αλγορίθμου (cm)
l_{pri}	4.54	3.4
l_{sec}	8.97	8.53



Σχήμα 3.15: Υπάρχουσα γεωμετρία και μετατροπή της για μείωση NO_x



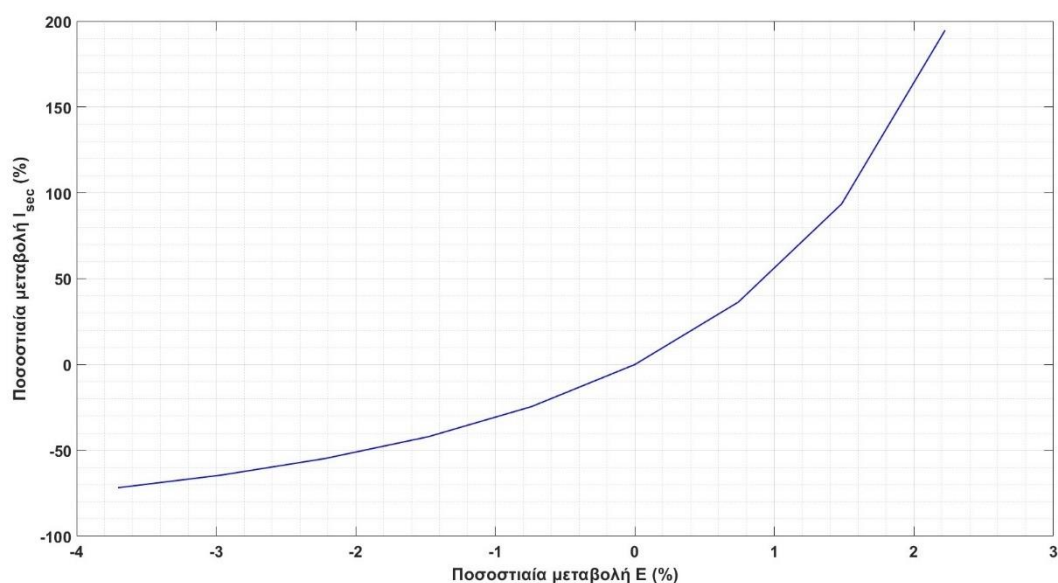
Σχήμα 3.16: Γεωμετρική αναπαράσταση μεταβολής γεωμετρίας των οπών.

Επιπλέον έγινε ένας υπολογισμός επιπλέον για μείωση των NO_x κατά 30%. Από την υλοποίηση του αλγορίθμου προέκυψε ένα μήκος δευτερεύουσας ζώνης $l_{SZ} = 5.245 \text{ cm}$, όπως ήταν αναμενόμενο μειώθηκε περαιτέρω το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης, όμως μεγάλες μειώσεις σε αυτό το μήκος οδηγούν σε μικρό διαθέσιμο όγκο για την καύση των άκαυστων, το οποίο θα οδηγήσει σε αύξηση των ρύπων.

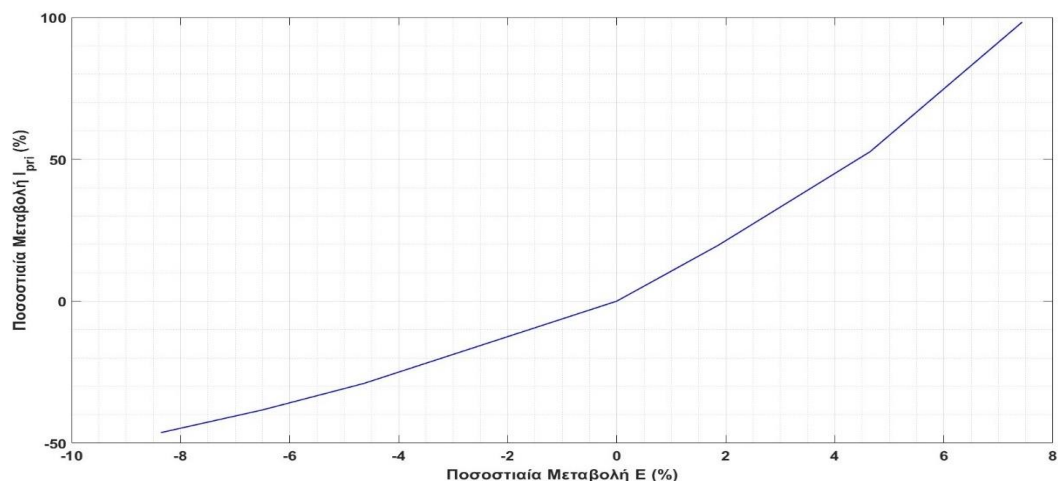
Όπως είναι αναμενόμενο υπάρχει συσχέτιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου σε σχέση με τα αποτελέσματα στην αναφορά [10], όπου εκεί παρουσιάζεται ο αλγόριθμος. Επιπλέον από μετέπειτα υπολογισμούς της παροχής αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη παρατηρείται αύξησή της, όπου σύμφωνα με τα αποτελέσματα του επόμενου κεφαλαίου αυτή η αύξηση οδηγεί και σε μείωση των ρύπων. Για τον υπολογισμό των οπών ακολουθήθηκε η διαδικασία της αναφοράς [10] όπου όταν αλλάζει το συνολικό εμβαδό των οπών η μεταβολή συνεπάγεται μεταβολή του αριθμού των οπών και όχι της διαμέτρου. Στην δευτερεύουσα ζώνη σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει περισσότερος όγκος για να αντιδράσουν τα άκαυστα το οποίο οδηγεί σε μείωση των ρύπων CO . Παρομοίως η αύξηση της παροχής αέρα της πρωτεύουσας ζώνης μειώνει την θερμοκρασία στην έξοδο της πρωτεύουσας ζώνης (απλή θερμοδυναμική) το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των ρύπων NO_x .

3.4 Μελέτη ευαισθησίας του αλγόριθμου

Στην συνέχεια προκειμένου να ερευνηθεί η ευαισθησία του αλγορίθμου για τον σχεδιασμό του θαλάμου καύσεως, πραγματοποιήθηκαν δύο παραμετρικές μελέτες. Μια για τον αλγόριθμο υπολογισμού του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης και μια για το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης, συναρτήσει της μεταβλητής E . Οι παραμετρικές μελέτες πραγματοποιήθηκαν για τον αεροπορικό κινητήρα GT-309, όπου είχε πραγματοποιηθεί διαστασιολόγηση με αυτόν τον αλγόριθμο στην αναφορά [10].



Σχήμα 3.17: Μεταβολή του μήκους δευτερεύουσας ζώνης αλλάζοντας την ενέργεια ενεργοποίησης



Σχήμα 3.18: Μεταβολή του μήκους πρωτεύουσας ζώνης αλλάζοντας την ενέργεια ενεργοποίησης

Παρατηρούνται τεράστιες μεταβολές για ένα αβέβαιο μέγεθος, δεδομένο το οποίο είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη και να δοθεί η απαραίτητη προσοχή όταν επιλέγεται αυτή η τιμή.

3.5 Συμπεράσματα αλγόριθμου χαμηλών ρύπων

Η υλοποίηση αυτού του αλγορίθμου επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα.

Αρχικά για πλεονεκτήματα, προκύπτει ότι στην αρχική προκαταρκτική διαστασιολόγηση (2^ο Κεφάλαιο) δεν λήφθηκαν υπόψη καθόλου οι εκπομπές ρύπων, η διαστασιολόγηση επικεντρώθηκε κυρίως στο να είναι λειτουργικός ο θάλαμος καύσεως και όχι στις εκπομπές ρύπων, οι οποίες εκπομπές στον σύγχρονο σχεδιασμό θαλάμου καύσεως ίσως και να αποτελούν την πιο σημαντική σχεδιαστική μεταβλητή.

Επιπλέον και εξίσου σημαντικό είναι ότι τα αποτελέσματα αυτού του αλγορίθμου είναι ικανά και αναγκαία να δώσουν μια κατάλληλη ρύθμιση των τιμών των μεταβλητών που επανυπολογίζονται, προκειμένου να επιτευχθεί μια διαστασιολόγηση που τηρεί να τις προϋποθέσεις για τις εκπομπές ρύπων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο αλγόριθμος αυτός έχει αναφερθεί και στην αναφορά [18], όπου ο συγγραφέας αναφέρει ότι αυτός ο αλγόριθμος είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί για ένα μια βελτίωση της ακρίβειας της αρχικής προκαταρκτικής διαστασιολόγησης.

Οι αναφορές [22] και [23] είναι μετέπειτα δημοσιεύσεις (1996) του Mellor και συνεργατών του, όπου στην αναφορά [22] προβλέπεται το σφάλμα σε g/Kg NO_x /Καύσιμο που προκαλείται από την επιλογή των τιμών των αυθαίρετων μεταβλητών (m_{no}, b_{no}) που υπολογίστηκαν από συσχετίσεις κινητήρων. Στην αναφορά [23] παρουσιάζονται και παραλλαγές αυτού του αλγορίθμου, προκειμένου να υπολογιστούν οι εκπομπές ρύπων. Όλα τα προηγούμενα αναδεικνύουν την χρησιμότητα μια τέτοιας μεθοδολογίας.

Το μειονέκτημα είναι ότι αρκετές από τις μεταβλητές προκύπτουν από εμπειρικά δεδομένα για 3-4 συγκεκριμένους κινητήρες, οπότε, στην περίπτωση που ο αλγόριθμος υλοποιηθεί για άλλον κινητήρα διαφορετικής γενιάς, είναι απαραίτητο να υπολογιστούν οι μεταβλητές αυτές μέσω συσχέτισης.

4. Μοντελοποίηση της Καύσης

4.1 Λογισμικό Cantera

Σαν πρόγραμμα μοντελοποίησης της καύσης επιλέγηκε το λογισμικό Cantera [14]. Το Cantera είναι πρόγραμμα ανοικτού κώδικα που αναπτύχθηκε από τον Καθηγητή Dave Goodwin του Πανεπιστημίου Caltech. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για ανάλυση και προσομοίωση χημικής κινητικής, θερμοδυναμικής, και φαινομένων μεταφοράς. Διαθέτει αρκετές βιβλιοθήκες και εργαλεία, προκειμένου να επιτευχθεί η σωστή μοντελοποίηση των προαναφερθέντων προσομοιώσεων για εφαρμογές στην καύση, χημική μηχανική και στην χημεία της ατμόσφαιρας.

Το Cantera χρησιμοποιεί τις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, τις εξισώσεις των χημικών αντιδράσεων και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες. Το λογισμικό αυτό επιτρέπει στον χρήστη να ορίζει περίπλοκα χημικά συστήματα, αποσαφηνίζοντας τις χημικές ενώσεων και μορίων που αντιδρούν, την χημική αντίδραση αυτού του συστήματος, καθώς και τις σχετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες.

Έτσι μοντελοποιώντας την καύση καθίσταται δυνατός ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης, ως προς τους σχεδιαστικούς στόχους που έχουν τεθεί. Με τον όρο έλεγχο εννοείται εάν οι στόχοι που τέθηκαν στην διαστασιολόγηση επιτευχθήκαν, και αν με πόσο ακρίβεια.

4.2 Μοντελοποίηση καύσης μέσω Cantera

Το επόμενο στάδιο της εργασίας αποτελείται από την αξιοποίηση του αντικειμενοστραφούς περιβάλλοντος μοντελοποίησης και προσομοίωσης Cantera. Ο πηγαίος κώδικας αυτού του λογισμικού αναπτύχθηκε από τον υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ Σέργιο Βιλλέτ σε C++ και χρησιμοποιήθηκε σαν εκτελέσιμο, προκειμένου να πραγματοποιηθούν υπολογισμοί για τον θάλαμο καύσης.

Στην παρούσα εργασία για την μοντελοποίηση της καύσης θεωρείτε ότι η καύση

πραγματοποιείται με αντιδρώντα υδρογονάνθρακες (κηροζίνη) και αέρας (οξυγόνο και άζωτο). Κατά την καύση του υδρογονάνθρακα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών σπάνε οι αλυσίδες του και δημιουργούνται νέες οργανικές χημικές ενώσεις οι οποίες ξανά αντιδρούνε. Η καύση θα πραγματοποιηθεί όταν η αναλογία προϊόντων και αντιδρώντων είναι τέτοια ώστε να υπάρχει χημική ισορροπία. Αυτή η μοντελοποίηση της καύσης χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων της μορφής:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + U \frac{\partial n_i}{\partial x} = f_i(n_k, T) \quad i, k = 1, NS \quad (4.1)$$

Ένα απλό μοντέλο-μηχανισμός της πυρόλυσης αεροπορικού καυσίμου ($C_{12}H_{23}$), παρατίθεται στον **Πίνακα 4.1**. Σε αυτό το μοντέλο η καύση αποτελείται από 30 βήματα και αυτός ο μηχανισμός αναπτύχθηκε από τον Reiner Kollrack το 1976 από [1].

Πίνακας 4.1: Μηχανισμός πυρόλυσης δύο βημάτων του Kollrack

A	B	C	D	E	F	B	N	T_{act}
$C_{12}H_{23}$	O_2	—	$5C_2H_4$	C_2H_3	O_2	4.48	1.5	7900
$C_{12}H_{23}$	OH	—	$6C_2H_4$	O	—	7.3	1.0	4500
C_2H_4	H	—	C_2H_3	H_2	—	10.48	0.0	9500
H	H	M	H_2	—	M	12.30	-1.0	0.0
O	O	M	O_2	—	M	11.0	-1.0	0.0
H	OH	M	H_2O	—	M	13.85	-1.0	0.0
H	O_2	—	OH	O	—	11.35	0.0	8400
O	H_2	—	OH	H	—	10.24	0.0	4730
CO	OH	—	CO_2	H	—	-14.75	7.0	-7000
H	H_2O	—	OH	H_2	—	10.92	0.0	10050
CH_3	O_2	—	CH_2O	OH	—	9.0	0.0	4000
HO_2	—	M	H	O_2	M	12.32	0.0	23000
HO_2	H	—	OH	OH	—	9.89	0.0	950
CH_2O	OH	—	H_2O	HCO	—	10.90	0.0	2120
O	H_2O	—	OH	OH	—	10.76	0.0	9000
N_2	O	—	NO	N	—	9.00	0.0	25000
N	O_2	—	NO	O	—	5.00	1.0	2000
N	OH	—	NO	H	—	9.00	0.0	0.0
HCO	O_2	—	HO_2	CO	—	10.48	0.0	7000
HCO	OH	—	H_2O	CO	—	10.30	0.0	0.0
C_2H_4	OH	—	C_2H_3	H_2O	—	9.78	0.0	1750
CH_2O	HO_2	—	HCO	OH	OH	9.0	0.0	4500
C_2H_2	HO_2	—	HCO	CH_2O	—	9.30	0.0	5500
C_2H_3	O_2	—	C_2H_2	HO_2	—	9.23	0.0	5000
NO	HO_2	—	NO $_2$	OH	—	3.00	1.0	0.0
C_2H_4	O	—	CH_3	HCO	—	9.93	0.0	1500
C_2H_4	HO_2	—	CH_3	HCO	OH	9.90	0.0	5000
H_2	CH_3	—	CH_4	H	—	7.0	-1.5	7140
C_2H_2	OH	—	CH_3	CO	—	8.2	0.0	2500
CH_3	O	—	CH_2O	H	—	11.11	0.0	1000

$A + B + C \rightarrow D + E + F, k = 10^B T^N \exp(-T_{act}/T);$ (SI units: kmol, m³, K, s)

Στο λογισμικό Cantera ο μηχανισμός της καύσης είναι της J. Luche [12] και είναι πιο περίπλοκος από αυτόν που παρουσιάστηκε. Πιο συγκεκριμένα ο μηχανισμός του Cantera συνυπολογίζει 91 πιθανές χημικές ενώσεις και 991 πιθανές μεταξύ τους αντιδράσεις.

Στην μοντελοποίηση της καύσης του θαλάμου καύσης θα θεωρηθούν σαν περιοχές μελέτης η πρωτεύουσα ζώνη, δευτερεύουσα ζώνη και ζώνη αραιώσης ώστε να

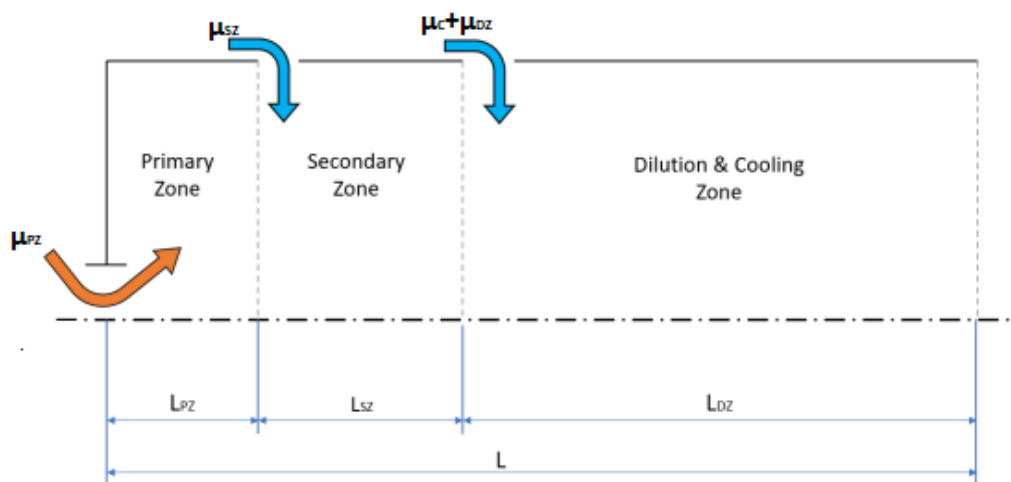
χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά τα δεδομένα που προέκυψαν από την προκαταρκτική διαστασιολόγηση.

Για την προσομοίωση της χημικής καύσεως θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος δικτύου αντιδραστήρων (Chemical Reactors Networks - CRN).

Για την γεωμετρία του θαλάμου καύσεως θεωρείται ότι ο θάλαμος καύσης που αποτελείται από τις προαναφερθείσες ζώνες, είναι κυλινδρικός και αξονοσυμμετρικός σε κάθε ζώνη, το εμβαδόν και τα μήκη του θαλάμου καύσεως θεωρούνται ότι έχουν τις ίδιες τιμές με αυτές της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης. Οι παραδοχές που πραγματοποιούνται και διαφέρουν από αυτές της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης είναι οι εξής:

- i. Ο αέρας στην δευτερεύουσα ζώνη και στην ζώνη αραίωσης εισέρχεται μαζικά και όχι μέσω οπών.
- ii. Η ψύξη συνυπολογίζεται στην ζώνη αραίωσης και όχι ότι μοιράζεται σε οπές στην πρωτεύουσα, δευτερεύουσα ζώνη και ζώνη αραίωσης. Επιπλέον δεν λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα ψύξης των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσεως.
- iii. Επιπλέον, θεωρείται ότι ο συντελεστής ε_{PZ} είναι μονάδα, δηλαδή θεωρείται ότι το καύσιμο καίγεται πλήρως στην πρωτεύουσα ζώνη.

Στο **Σχήμα 4.1** ακολουθεί η σχηματική απεικόνιση της μοντελοποίησης της ροής στον θάλαμο καύσης.



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της μοντελοποίησης της ροής

Προκειμένου αυτή η μοντελοποίηση να λάβει χώρα στο περιβάλλον του Cantera χρειάστηκε να αξιοποιηθεί ένα σύνολο αντικειμένων του Cantera τα οποία είναι:

- i. Reservoir: Είναι ένα δοχείο μεγάλου όγκου στο οποίο εισέρχεται ή εξέρχεται η παροχή μάζας του μέσου, δίχως μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας.
- ii. Reactor: Είναι ο χώρος πεπερασμένου όγκου, μέσα στον οποίο πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις και τα φαινόμενα μεταφοράς.

- iii. MassflowController: Είναι αντικείμενο που καθορίζει την παροχή μάζας από το αντικείμενο που βρίσκεται ανάντι του αντικειμένου που βρίσκεται κατάντι του.
- iv. Valve: Αντικείμενο που χρησιμοποιείται ενδιάμεσου δύο συνιστωσών, προκειμένου να ρυθμίζει τη πίεση μεταξύ τους, καθορίζοντας την παροχή και την μάζας διαφυγής.

Στο μοντέλο καύσης που αναφέρθηκε θα χρησιμοποιηθεί ένα δίκτυο PSR αντιδραστήρων πραγματικών αερίων για την προσομοίωση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε κάθε ζώνη. Αυτό το δίκτυο θεωρεί έναν πεπερασμένο όγκο, όπου μέσα σε αυτόν όλα τα χημικά συστατικά είναι τέλεια αναμεμιγμένα και έτοιμα να αντιδράσουν. Είναι μηδενικής τάξης μοντελοποίηση, μη μόνιμη θερμοδυναμική μοντελοποίηση και διέπτετε από τις εξισώσεις διατήρησης μάζας, διατήρησης χημικού στοιχείου και διατήρησης εσωτερικής ενεργείας, όπου αντίστοιχα είναι οι παρακάτω εξισώσεις:

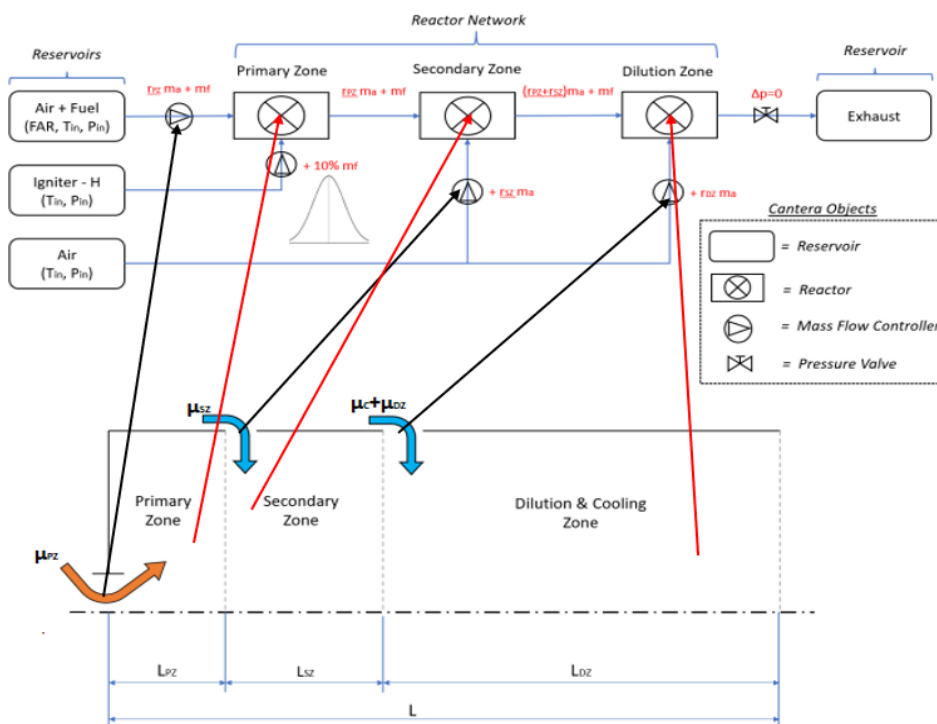
$$\frac{dm}{dt} = \sum_{in} \dot{m}_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} + \dot{m}_{wall} \quad (4.2)$$

$$\frac{d(m \cdot Y_k)}{dt} = \sum_{in} \dot{m}_{in} Y_k^{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} Y_k^{out} + \dot{m}_{k,gen} \quad (4.3)$$

$$\frac{dU}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \dot{Q} + \sum_{in} \dot{m}_{in} h_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} h_{out} \quad (4.4)$$

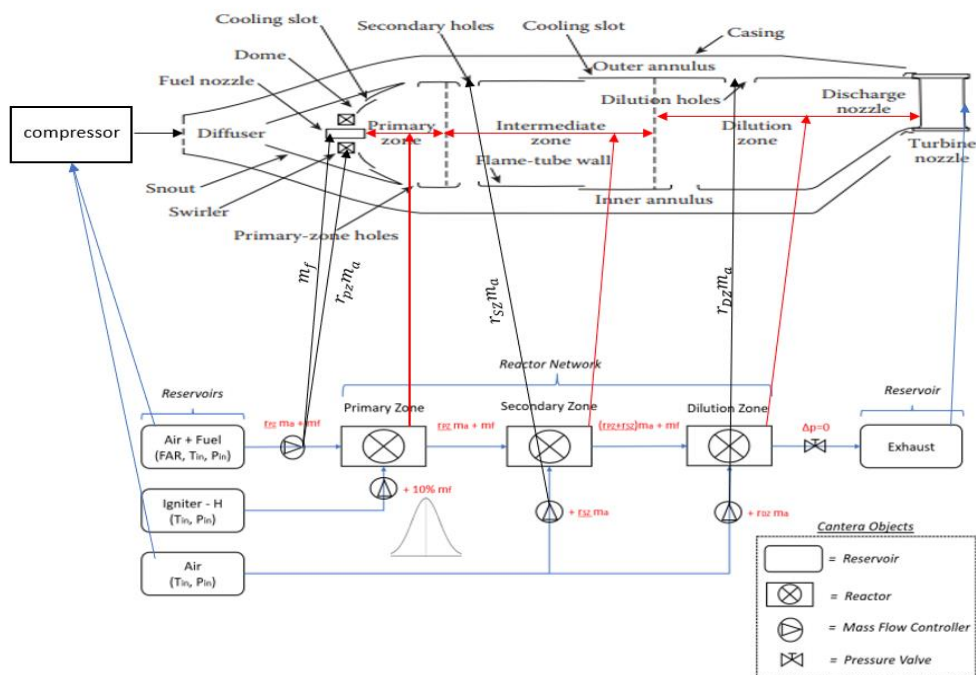
Στην θεώρηση αυτή, επιπλέον, θεωρείται αδιαβατική μεταβολή ως προς τα τοιχώματα, οπότε $\dot{m}_{wall} = 0$ & $\dot{Q} = 0$.

Ακολουθεί το λογικό διάγραμμα συνυπολογίζοντας όσα αναφέρθηκαν για την μοντελοποίηση της καύσης στον θάλαμο καύσης, αξιοποιώντας το λογισμικό Cantera.



Σχήμα 4.2: Λογικό διάγραμμα μοντελοποίησης καύσης θαλάμου καύσης

Στο Σχήμα 4.2 με τα μαύρα βέλη απεικονίζονται οι διάφορες παροχές ενώ με τα κόκκινα βέλη οι δεξαμενές που γίνονται οι αντιδράσεις.



Σχήμα 4.3: Συσχέτιση λογικού διαγράμματος με τον θάλαμο καύσης

Με βάση το Σχήμα 4.3 η δεξαμενή μεγάλου όγκου (Reservoir) που τροφοδοτεί με αέρα συγκεκριμένων ιδιοτήτων και παροχής το σύστημα θεωρείται πως είναι η

έξοδος του συμπιεστή. Τα μαύρα βέλη συμβολίζουν ποιες παροχές του λογικού διαγράμματος (Mass flow controller) είναι αντίστοιχες με τις παροχές του θαλάμου καύσεως. Τα κόκκινα βέλη συσχετίζουν τις ζώνες του θαλάμου καύσεως με χώρους πεπερασμένου όγκου (Reactors), όπου πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις και τα φαινόμενα μεταφοράς.

Το καύσιμο στην μοντελοποίηση θα θεωρηθεί το αεροπορικό καύσιμο JP-5 με την εξής σύσταση:

Πίνακας 4.2: Σύσταση καυσίμου στην μοντελοποίηση

Κατηγορία	Όνομα	Χημικός Τύπος	Ποσοστό κ.ο. %
Παραφίνη	n-δεκάνιο	n- C ₁₀ H ₂₂	53
Ναφθαλίνη	Κύκλο-εννάνιο	cy-C ₉ H ₁₈	31
Αρωματική ένωση	Τολουένιο	C ₇ H ₈	16

Αυτή η μοντελοποίηση αξιοποιείται με μορφή εκτελέσιμου αρχείου (.exe) και δέχεται σαν παραμέτρους εισόδου τις εξής μεταβλητές

Πίνακας 4.3: Δεδομένα εισόδου για το εκτελέσιμο

Είσοδος	Ονομασία	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
$P_{t3.2}$	ptin	Bar	Ολική Πίεση
$T_{t3.2}$	Ttin	Kelvin	Ολική Θερμοκρασία
$\dot{m}_{3.2}$	mair	kg/s	Παροχή μάζας
FAR	FAR	-	Λόγο FAR
Hu	lowHeatValue	MJ/Kg	Θερμογόνος δύναμη
A_L	Aref	m^2	Εμβαδό μανδύα
L_L	length	m	Μήκος θαλάμου καύσεως
t_{total}	timeFinal	s	Χρόνος αλγορίθμου
Αριθμός βημάτων	timeSteps	-	-
μ_{PZ}	airRatioPri	-	Κλάσμα μάζας πρωτεύουσας ζώνης
μ_{SZ}	airRatioSec	-	Κλάσμα μάζας δευτερεύουσας ζώνης
μ_{DZ}	airRatioDil	-	Κλάσμα μάζας ζώνης αραίωσης
L_{PZ}/L_L	lengthRatioPri	-	Κλάσμα μήκους πρωτεύουσας ζώνης
L_{SZ}/L_L	lengthRatioSec	-	Κλάσμα μήκους δευτερεύουσας ζώνης
L_{DZ}/L_L	lengthRatioDil	-	Κλάσμα μήκους ζώνης αραίωσης
Ονομασία μηχανισμού αντίδρασης	-	-	Τίτλος αρχείου
Σύσταση καυσίμου	-	-	Ποιοτική & ποσοτική
Χρήση ευναστήρα	useIgniter	Boolean	-
Παραγωγή & χρήση πινάκων ενθαλπίας	genCharts		-

Στην έξοδο, σαν αποτελέσματα λαμβάνονται οι θερμοδυναμικές συνθήκες εξόδου σε κάθε ζώνη, την σύσταση των καυσαερίων σε *mole/mole* και δύο βαθμοί αποδόσεων, όπου ο πρώτος βαθμός απόδοσης είναι ο θερμοδυναμικός:

$$\eta_b = \frac{\Delta h_{t4} - \Delta h_{t3} + FAR(\Delta h_{t4} - \Delta h_{ft})}{FAR \cdot LHV} \quad (4.5)$$

Όπου $\Delta h_{ti} = h(T_i, FAR) - h(T_{ref} = 15^\circ C, FAR)$. Είτε υπολογίζεται μέσω πολυωνύμων θεωρώντας $\Delta h_{ft} = 0$.

Ο άλλος βαθμός απόδοσης βασίζεται στην ποσότητα άκαυστου *CO* και άκαυστων υδρογονανθράκων *UHC*.

$$\eta_b = \frac{LHV - Q_{CO} - Q_{UHC}}{LHV} \quad (4.6)$$

Όπου $Q_{CO} = N_{CO}^{GAS} \cdot 282965 \text{ kJ/kg}_{fuel}$ και $Q_{UHC} = N_{UHC}^{GAS} \cdot 802396 \text{ kJ/kg}_{fuel}$ είναι οι εκλυόμενες θερμότητες κατά την καύση των εκάστοτε ατελών προϊόντων καύσης, N_i^{GAS} η αναλογία γραμμομορίων *i* – προϊόντων και μάζας καυσίμου κατά την λειτουργία του θαλάμου καύσεως σε [*kmol/kg_{fuel}*].

Η διαδικασία υπολογισμού των N_i^{GAS} πάρθηκε από την αναφορά [13] και παρουσιάζεται εν συνεχεία.

Αρχικά υπολογίζεται η στοιχειομετρική αναλογία γραμμομορίων *O₂*, *CO₂* & *H₂O*:

$$NO_2^{st} = \frac{a + b/4}{MW_{fuel}}, \quad N_{CO_2}^{st} = \frac{a}{MW_{fuel}}, \quad N_{H_2O}^{st} = \frac{b/2}{MW_{fuel}} \quad (4.7)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η στοιχειομετρική αναλογία γραμμομορίων *N₂*, *Ar* και μάζας καυσίμου από το τυπικό ποσοστό τους στον αέρα:

$$N_{air}^{st} = N_{O_2}^{st}/0.20946, \quad N_{N_2}^{st} = 0.7804N_{air}^{st}, \quad N_{Ar}^{st} = 0.00934N_{air}^{st} \quad (4.8)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η αναλογία γραμμομορίων καυσαερίου και μάζας καυσίμου για στοιχειομετρική τέλεια καύση:

$$N_{gas}^{st} = N_{CO_2}^{st} + N_{H_2O}^{st} + N_{N_2}^{st} + N_{Ar}^{st} \quad (4.9)$$

Στην συνέχεια γνωρίζοντας τον λόγο αέρα καύσης $\lambda = 1/\varphi$ προκύπτει η πραγματική αναλογία γραμμομορίων καυσαερίων και μάζας καυσίμου ως:

$$N_{gas} = N_{air}^{st} + (\lambda - 1)N_{gas}^{st} \quad (4.10)$$

Τελικά, οι λόγοι N_{CO}^{GAS} και N_{UHC}^{GAS} προκύπτουν από τις εξισώσεις:

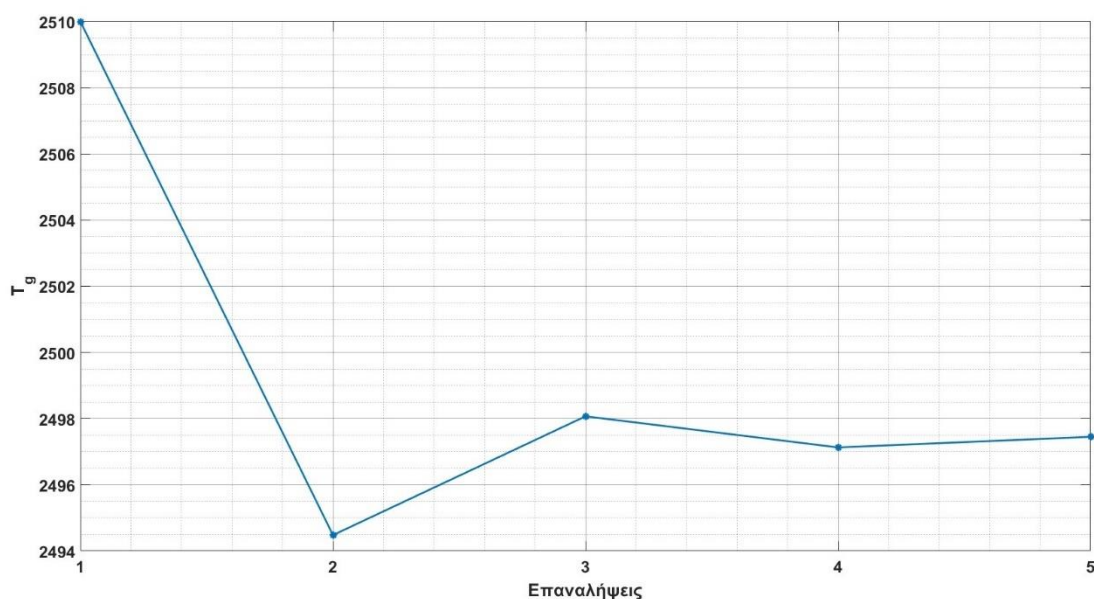
$$X_i = \frac{mol_i}{\sum_{products} mol} \quad (4.11)$$

$$N_{CO}^{gas} = X_{CO}N_{gas}, \quad N_{UHC}^{gas} = X_{UHC}N_{gas} \quad (4.12)$$

4.3 Αποτελέσματα μοντελοποίησης καύσης

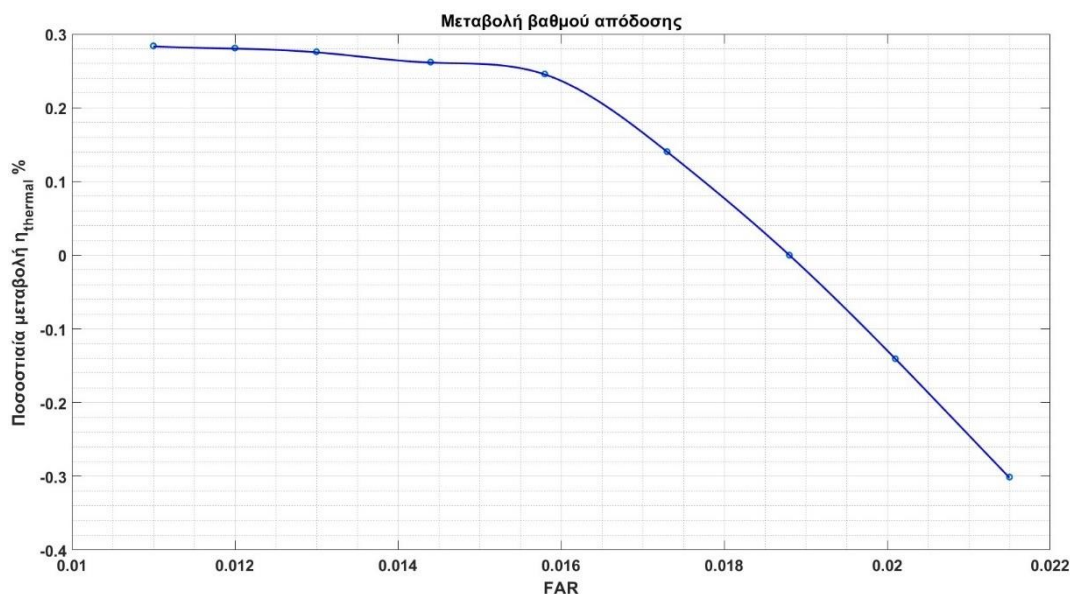
Εφόσον εδραιώθηκε η μοντελοποίηση αλλά και τα δεδομένα εισόδου και εξόδου, το επόμενο βήμα είναι η αποτίμηση της εγκυρότητας της μοντελοποίησης μέσω πραγματοποίησης παραμετρικών μελετών ως προς τις μεταβολές των κύριων μεταβλητών σχεδιασμού. Όπως αναφέρθηκε από τον σχεδιασμό του Κεφάλαιου 2, είναι γνωστά τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται στο εκτελέσιμο αρχείο, οπότε μια αρχική μεταβολή μεταβλητής είναι αυτή του λόγου FAR. Η μελέτη προς αυτήν την μεταβλητή είναι καίρια, διότι αν εξαιρέσουμε την μεταβολή του εμβαδού του ακροφυσίου, ο κύριος έλεγχος του σημείου λειτουργίας της αεροπορικής μηχανής γίνεται μέσω της παροχής καυσίμου, δηλαδή του FAR. Πραγματοποιώντας αυτήν την παραμετρική μελέτη για ένα συγκεκριμένο εύρος FAR, καθιστάτε δυνατή η έρευνα της συμπεριφοράς του θαλάμου καύσεως στο εύρος λειτουργίας του (Idle, Take-off, Cruising), το οποίο είναι απαραίτητο, διότι είναι αναγκαίο ο θάλαμος καύσης να ανταποκρίνεται άριστα και σε συνθήκες που δεν συνάδουν με το σημείο λειτουργίας.

Όπως έχει αναφερθεί στο 2^ο Κεφάλαιο, μια αυθαίρετη μεταβλητή στον σχεδιασμό είναι η θερμοκρασία T_g , για την οποία γίνεται υπόθεση μέσω σύγκρισης κινητήρων παρόμοιας γενιάς. Στο Παράρτημα Β, στο Κεφάλαιο 8.2, από το αρχείο εξόδου προκύπτει η μεταβλητή T_{PZ} η οποία στον προκαταρκτικό σχεδιασμό είναι η T_g . Δεδομένου ότι η μεταβλητή αυτή επιλέγεται με βάση εμπειρικά στοιχεία, μέσω του Cantera προκύπτει η δυνατότητα να υπολογιστεί αναλυτικά μέσω βρόχου επικοινωνίας προκαταρκτικής διαστασιολόγησης και Cantera. Οπότε επαναληπτικά, ανανεώνοντας σε κάθε επανάληψη την τιμή T_g , ο βρόχος καταλήγει σε σύγκλιση της T_g . Φυσικά, κατά την διάρκεια της σύγκλισης εφόσον η αρχική θεώρηση δεν απέχει αρκετά από την πραγματική τα μήκη επηρεάζονται ελάχιστα. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το **Σχήμα 4.4** που δείχνει την σύγκλιση.



Σχήμα 4.4: Σύγκλιση βρόχου T_g

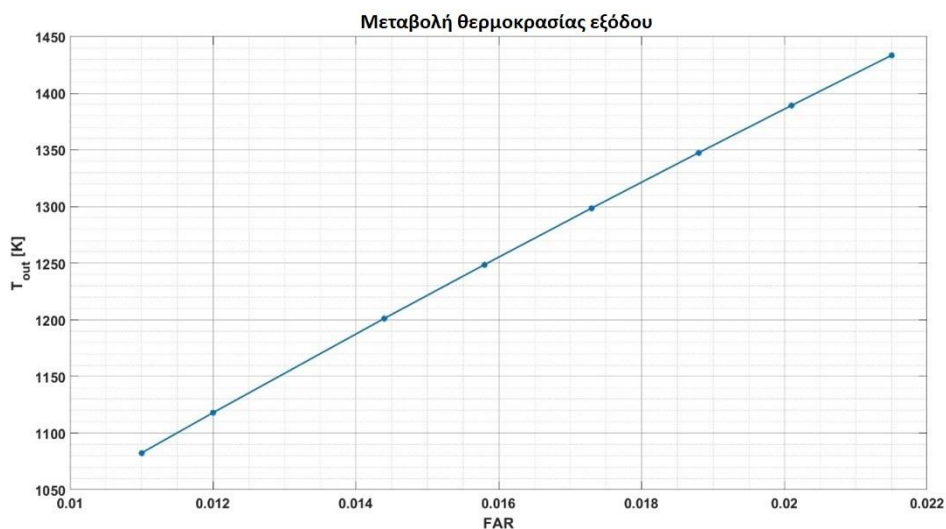
Στην συνέχεια ακολουθούν τα σχήματα με τις μεταβολές του θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης, συστάσεων καυσαερίων, και θερμοκρασίας εξόδου.



Σχήμα 4.5: Μεταβολή βαθμού απόδοσης μεταβάλλοντας το FAR

Παρατηρείται μικρή μεταβολή του βαθμού απόδοσης για ένα μεγάλο εύρος FAR, αποτέλεσμα επιθυμητό. Η μείωση του βαθμού απόδοσης είναι αναμενόμενη. Συγχρόνως, ο ρυθμός μείωσης του βαθμού απόδοσης είναι φθίνων.

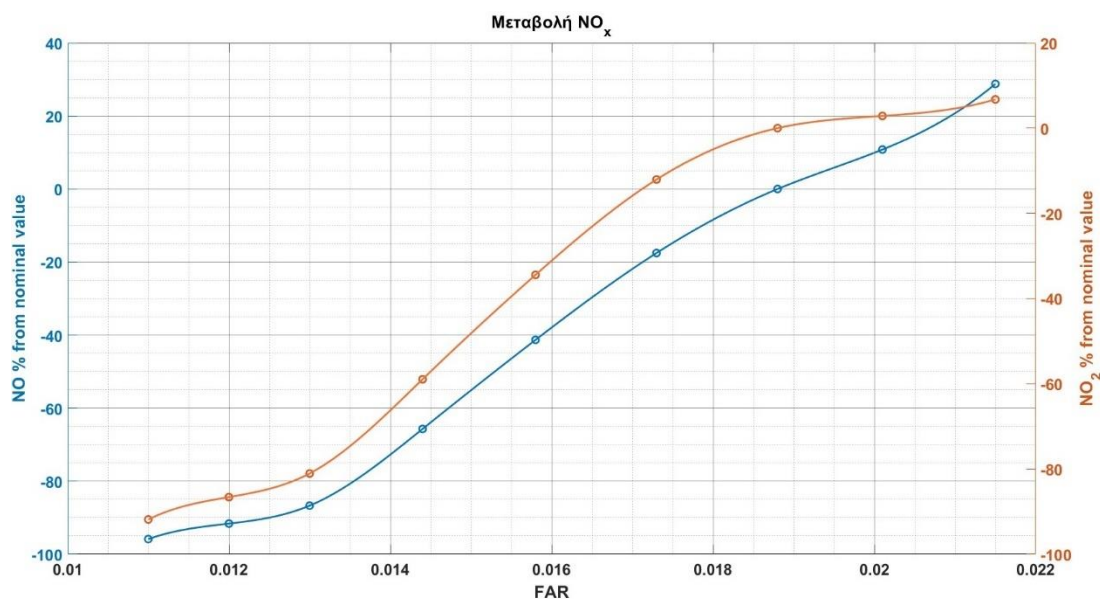
Ακολουθεί το διάγραμμα της μεταβολής θερμοκρασίας εξόδου του θαλάμου καύσεως με την μεταβολή του FAR.



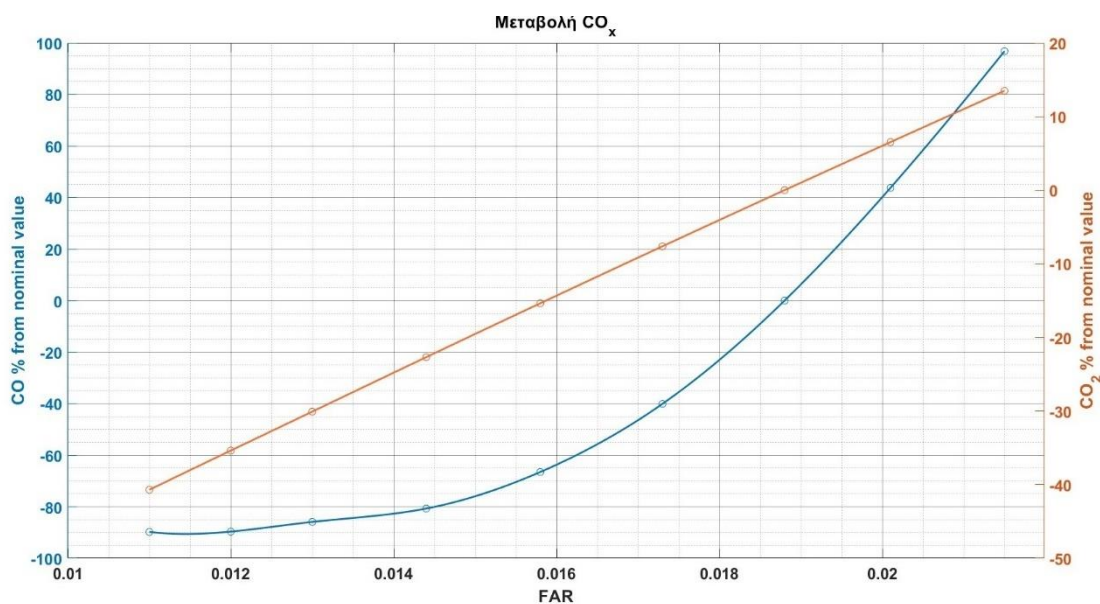
Σχήμα 4.6: Μεταβολή θερμοκρασίας εξόδου μεταβάλλοντας το FAR.

Εδώ παρατηρείται μια αυξητική γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου, αποτελέσματα αναμενόμενα λόγω της σχεδόν γραμμικότητας της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας. Η αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου με την αύξηση του FAR είναι προφανώς αναμενόμενη, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της καύσης.

Στην συνέχεια ακολουθούν οι ποσοστιαίες μεταβολές των ρύπων του θαλάμου καύσεως, μεταβάλλοντας το FAR. Τέτοιου είδους διερεύνηση είναι σημαντική διότι π.χ. στα αεροδρόμια μπορεί να γίνει έλεγχος κατά πόσο αυξάνονται ανεπιθύμητα καυσαέρια κατά την διάρκεια της απογείωσης.

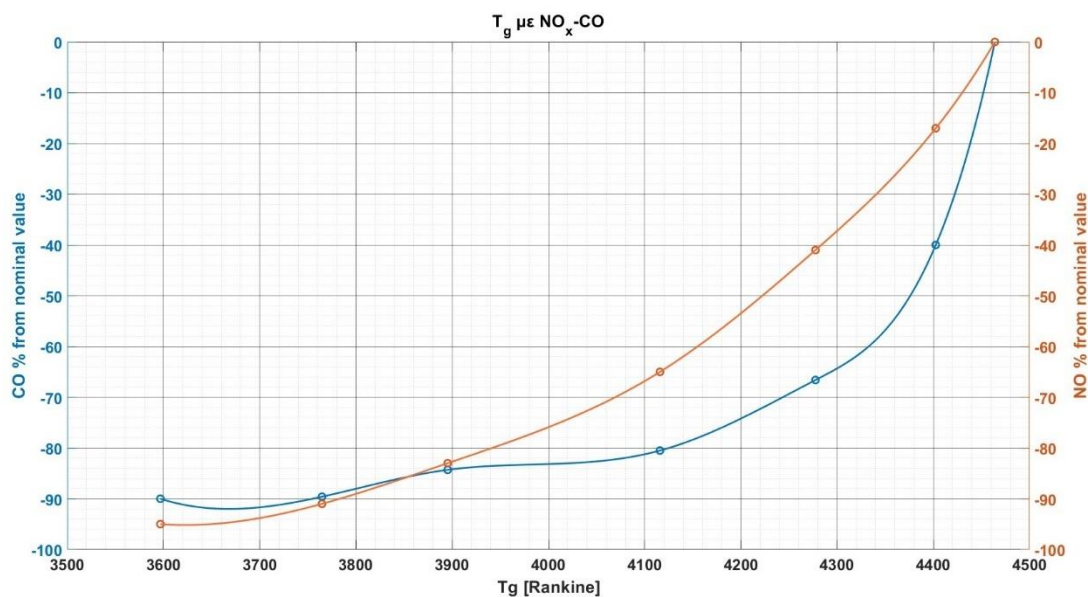


Σχήμα 4.7: Ποσοστιαία μεταβολή NO_x συναρτήσει του FAR

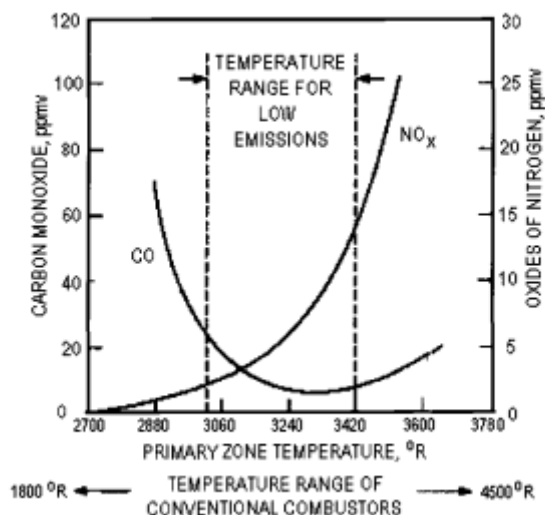


Σχήμα 4.8: Ποσοστιαία μεταβολή CO₂ και CO συναρτήσει του FAR

Για να κριθούν τα αποτελέσματα βάση θα αποτελέσει το **Σχήμα 4.10** από την αναφορά [1]. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι η αύξηση του FAR οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας της πρωτεύουσας ζώνης, διότι αντιδρά περισσότερη ποσότητα καυσίμου. Επιπλέον θα παρουσιαστεί και η εξάρτηση των εκπομπών ρύπων με την θερμοκρασία της πρωτεύουσας ζώνης, προκειμένου να παραχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.9: Ποσοστιαία μεταβολή ρύπων συναρτήσει της θερμοκρασία της πρωτεύουσας ζώνης



Σχήμα 4.10: Εκπομπές καυσαερίων συναρτήσει της θερμοκρασία πρωτεύουσας ζώνης από [1]

Η ακριβής αναπαράσταση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί διότι ο θάλαμος καύσεως έχει κυρίως αρκετά υψηλές θερμοκρασίες όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.9**. Παρόλα αυτά παρατηρείται σωστή αναπαράσταση διότι η θερμοκρασία T_g ξεκινά από τους 3600 Rankine και με βάση το **Σχήμα 4.10**, οι εκπομπές ρύπων CO και NO αυξάνονται.

Στο **Σχήμα 4.10** είναι εμφανές ότι η αύξηση του FAR (αύξηση της θερμοκρασίας πρωτεύουσας ζώνης) προκαλεί αύξηση των ρύπων του CO μετά ένα κατώφλι της θερμοκρασίας ($T_g = 3300$ Rankine) στην πρωτεύουσα ζώνη. Με βάση το **Σχήμα 4.9**, το κατώφλι έχει ήδη ξεπεραστεί οπότε είναι αναμενόμενη η αύξηση των CO. Τα αποτελέσματα για τους ρύπους NO και NO₂ είναι και αυτά αναμενόμενα, γιατί είναι γνωστό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί τον σχηματισμό NO_x με βάση το **Σχήμα 4.10** και την βιβλιογραφία.

Στην συνέχεια ακολουθεί ο **Πίνακας 4.4** ο οποίος περιέχει τις τιμές των ppmv CO και

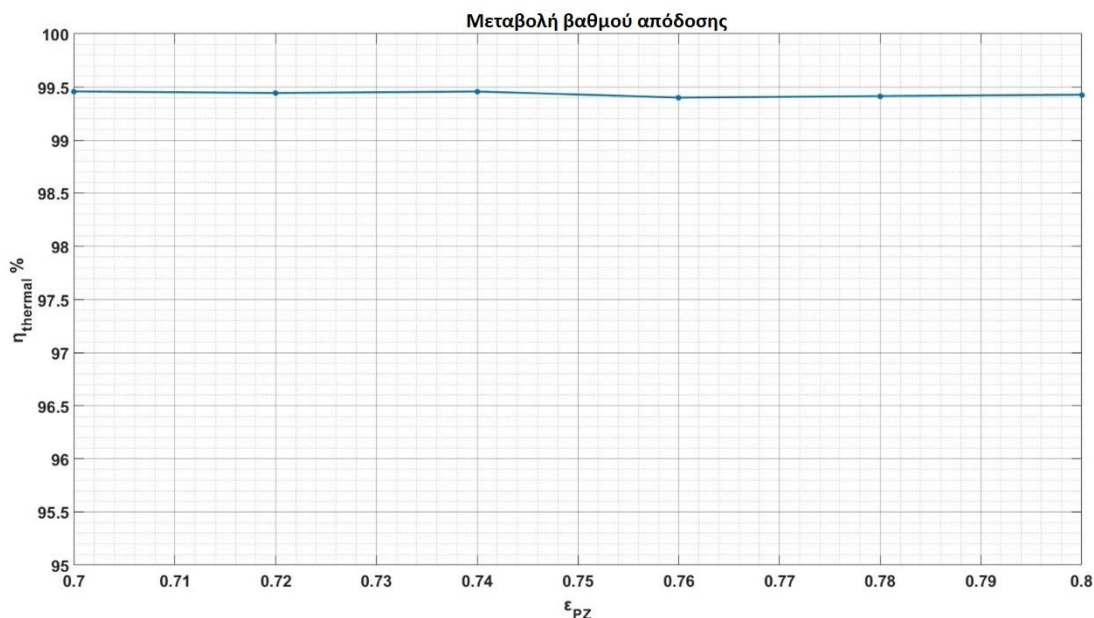
NO_x για την θερμοκρασία $T_g = 3600 Rankine$, ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με βάση το **Σχήμα 4.10**.

Πίνακας 4.4: Σύγκριση ppmv ρύπων για $T_g = 3600 Rankine$

	Σχήμα 4.9	Cantera
ppmv NO_x	26	31.57
ppmv CO	17	23.24

Παρατηρείται μια διαφορά σχετικά μικρή η οποία είναι και αναμενόμενη, λόγω το ότι διάγραμμα αυτό δεν αποτελεί βάση για όλους τους θαλάμους καύσης, αλλά έχει προκύψει από συσχετίσεις δεδομένων για μια ομάδα θαλάμων καύσεως.

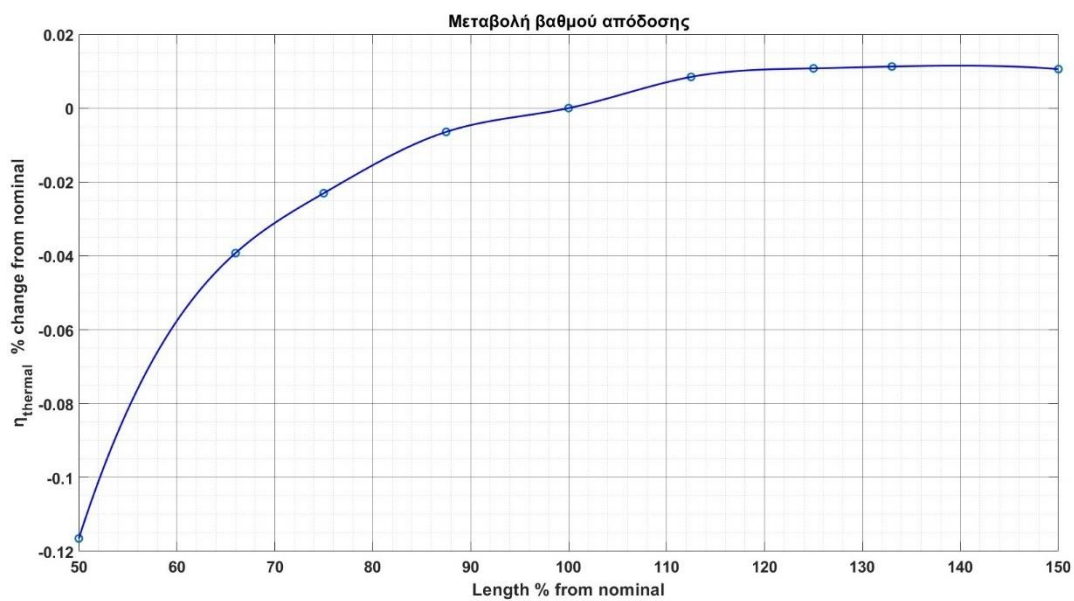
Η επόμενη μελέτη ευαισθησίας έλαβε χώρα για μεταβολή της μεταβλητής ϵ_{PZ} , για την οποία έγινε υπόθεση με βάση τον Mattingly [1]. Οπότε:



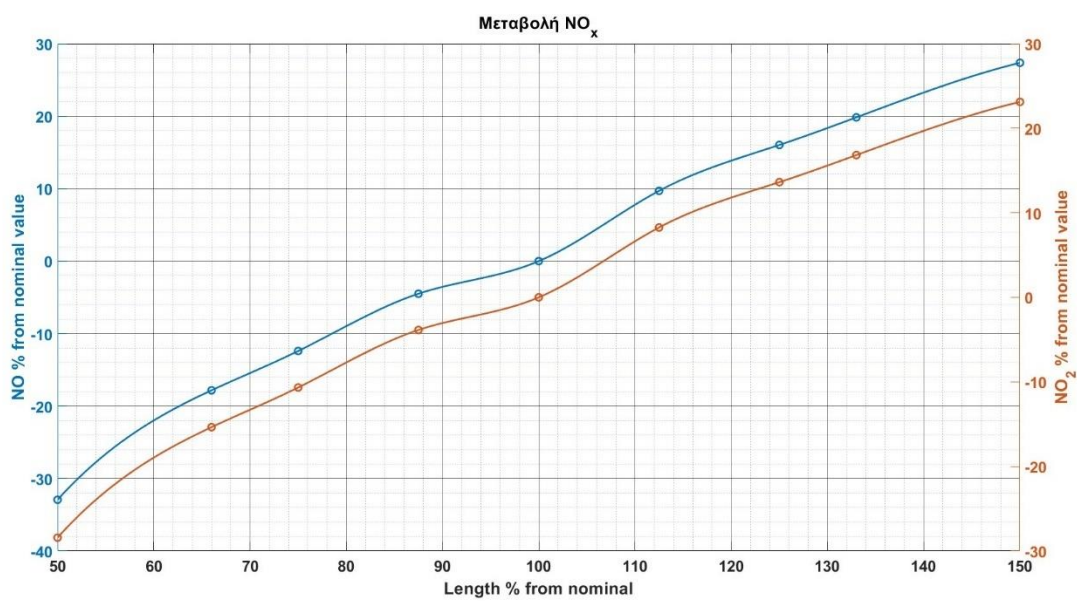
Σχήμα 4.11: Μεταβολή βαθμού απόδοσης καύσεως συναρτήσει του ϵ_{PZ}

Παρόμοια αποτελέσματα και για τις εκπομπές ρύπων, δηλαδή δεν παρατηρείτε σχεδόν καθόλου εξάρτηση των αποτελεσμάτων από την επιλογή της τιμής ϵ_{PZ} .

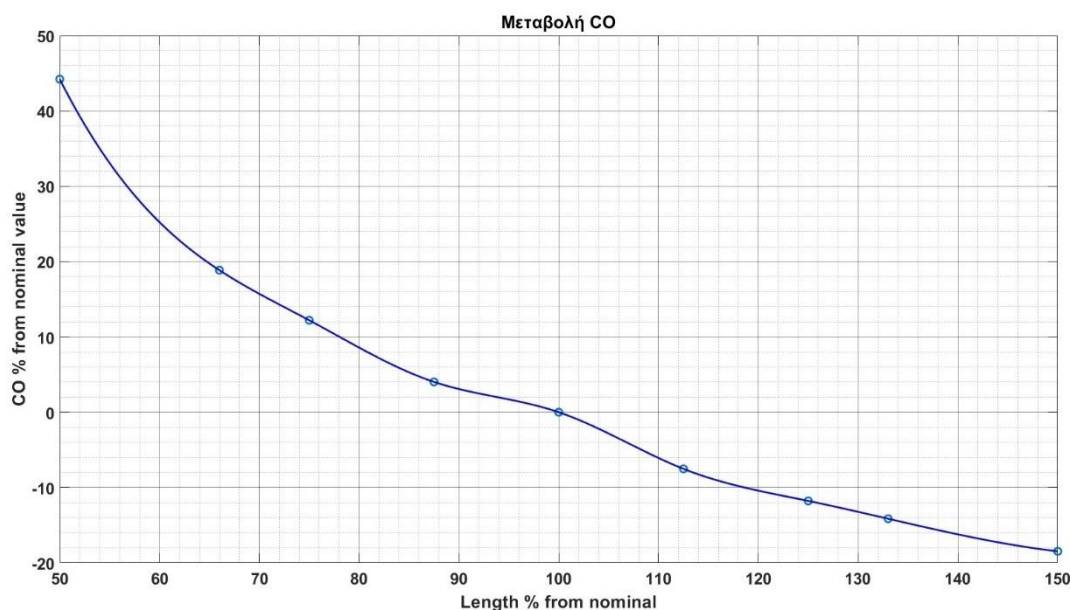
Η επόμενη μελέτη ευαισθησίας έλαβε χώρα για μεταβολή του μήκους του θαλάμου καύσεως διατηρώντας τον FAR, τα ποσοστά των μηκών των ζωνών και τα ποσοστά παροχής μάζας σε κάθε ζώνη στο σημείο λειτουργίας.



Σχήμα 4.12: Ποσοστιαία μεταβολή βαθμού απόδοσης με την μεταβολή του μήκους



Σχήμα 4.13 Ποσοστιαία μεταβολή NO με την μεταβολή του μήκους

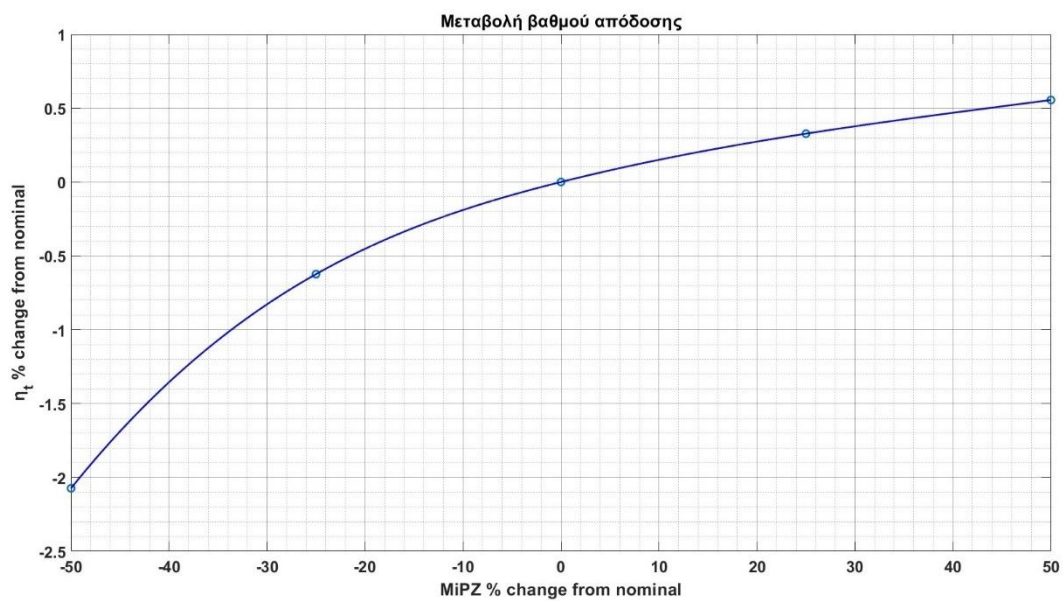


Σχήμα 4.14: Ποσοστιαία μεταβολή CO με την μεταβολή του μήκους

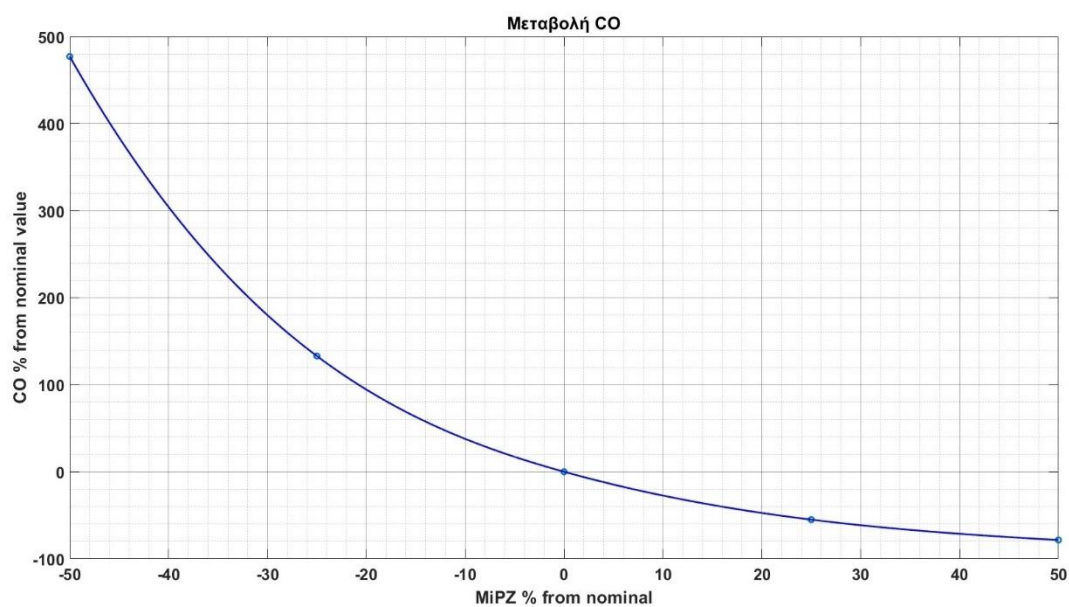
Σε αυτήν την περίπτωση είναι εύλογο η αύξηση του μήκους του θαλάμου καύσεως να οδηγεί σε αύξηση του βαθμού απόδοσης. Αυτό διότι υπάρχει περισσότερος όγκος στον οποίο αντιδρά το καύσιμο, οπότε καίγεται το μεγαλύτερο ποσοστό του. Επιπλέον, υπάρχει η συμφωνία της αύξησης του βαθμού απόδοσης με την μείωση των εκπομπών CO. Αυτό διότι υπάρχει περισσότερος χώρος, ώστε να αντιδράσει πλήρως το καύσιμο και να μην έχει σαν προϊόντα άκαυστα. Είναι γνωστό εξάλλου ότι λιγότερα άκαυστα συνεπάγεται μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης, εξίσωση (4.6).

Επόμενο στάδιο της παραμετρικής μας μελέτης είναι η αλλαγή της παροχής σε κάθε χαρακτηριστική ζώνη στον θάλαμο καύσης. Η αλλαγή αυτή θα προστεθεί ή θα αφαιρεθεί, ανάλογα την περίπτωση, ισόποσα από τις άλλες δυο ζώνες, διατηρώντας όλα τα μεγέθη σταθερά. Ουσιαστικά, αυτή η μεταβολή της παροχής πραγματοποιείται μεταβάλλοντας τον αριθμό ή/και την διάμετρο των οπών σε κάθε ζώνη. Κρίνεται σκόπιμη μια τέτοια μελέτη προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης, δηλαδή θα συγκριθούν με άλλες πιθανές καταστάσεις (διαφορετικές παροχές) και θα γίνει σύγκριση των ωφελειών.

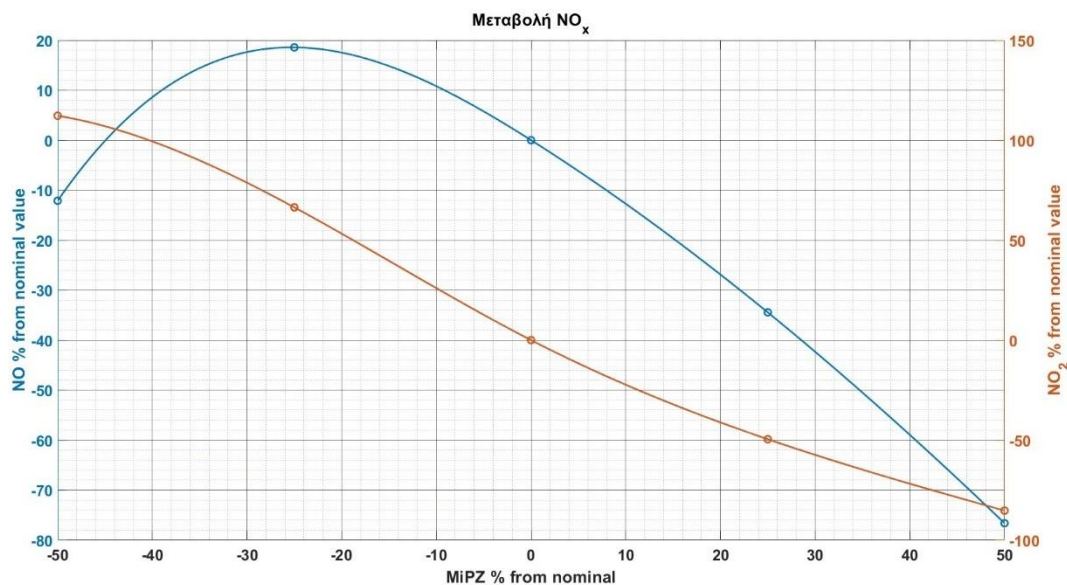
Η 1^η μελέτη ευαισθησίας αυτού του είδους πραγματοποιήθηκε για την πρωτεύουσα ζώνη, οπότε παρατίθενται τα αποτελέσματα:



Σχήμα 4.15: Ποσοστιαία μεταβολή βαθμού απόδοσης θαλάμου καύσης συναρτήσει ποσοστιαίας μεταβολής παροχής πρωτεύουσας ζώνης



Σχήμα 4.16: Ποσοστιαία μεταβολή CO συναρτήσει ποσοστιαίας μεταβολής παροχής πρωτεύουσας ζώνης

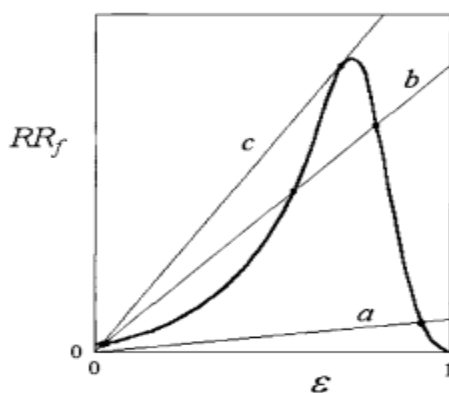


Σχήμα 4.17: Ποσοστιαία μεταβολή NO_x συναρτήσει ποσοστιαίας μεταβολής παροχής πρωτεύουσας ζώνης

Σε αυτήν την μελέτη ευαισθησίας είναι αρκετά ενδιαφέρον ότι η αύξηση της παροχής στην πρωτεύουσα ζώνη έχει ως αποτελέσματα μόνο θετικά (αύξηση βαθμού απόδοσης και μείωση εκπομπών). Αυτό το αποτέλεσμα είναι αξιοσημείωτο, διότι σε καμία από τις άλλες δυο παραμετρικές δεν παρατηρήθηκαν τόσο θετικά αποτελέσματα. Αξίζει να αναφερθούν δυο αντεπιχειρήματα σχετικά με αυτά τα αποτελέσματα:

1^{ον} Η αύξηση της παροχής στην πρωτεύουσα ζώνη αναγκαστικά οδηγεί σε μείωση της παροχής αέρα για την ψύξη, το οποίο είναι από τις πιο απαραίτητες εσωτερικές παροχές αέρα του θαλάμου καύσεως. Οπότε, μειώνοντας συνεχώς το ποσοστό για τον αέρα ψύξης είναι σίγουρο ότι τα μέταλλα του μανδύα δεν θα ανταπεξέλθουν στην αυξημένη θερμοκρασία και θα υπάρξει καταστροφή του θαλάμου καύσεως.

2^{ον} Θα βασιστούμε στο **Σχήμα 4.18** από την αναφορά [1].

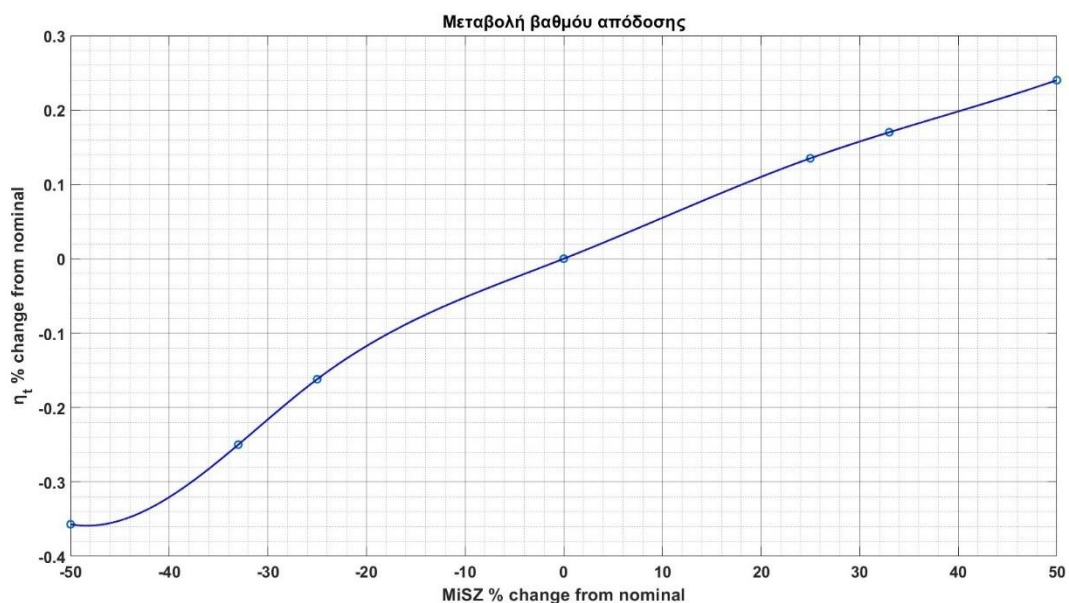


Σχήμα 4.18: Μεταβολή RR_f συναρτήσει ε από [1]

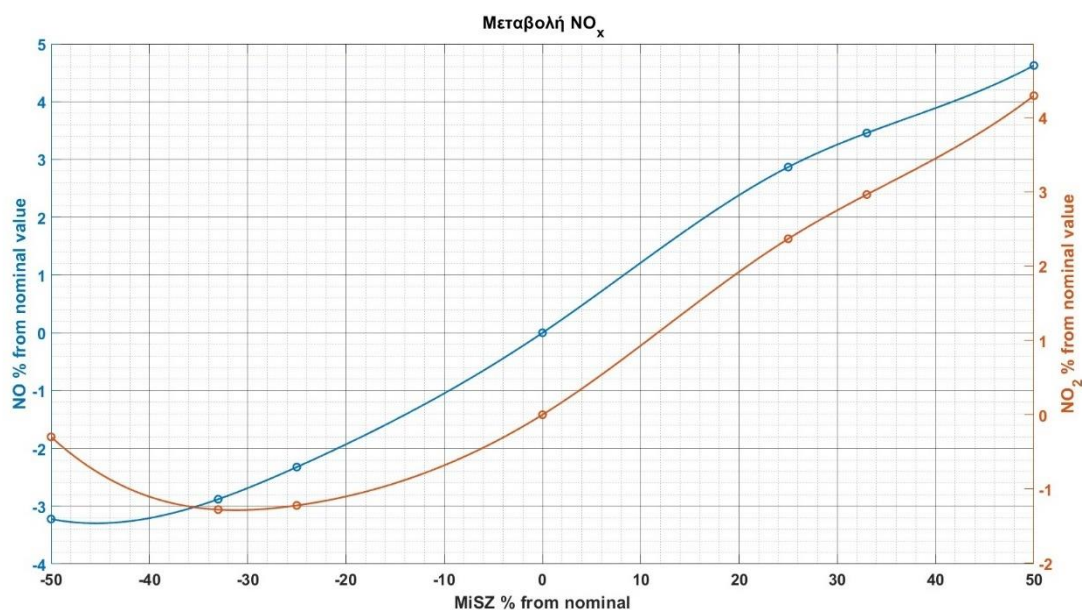
Στο Σχήμα 4.18 το ε είναι το ε_{PZ} και με την βοήθεια των εξισώσεων (2.18), (2.19) και (2.20), παρατηρείται ότι αύξηση της παροχής μάζας στην πρωτεύουσα ζώνη οδηγεί

σε αύξηση του ε_{PZ} και με βάση το **Σχήμα 4.18** αυτό θα οδηγήσει σε αστάθεια της καύσης. Αυτό, διότι σύμφωνα με την αναφορά [1] η καύση είναι ευσταθής μόνο όταν το ε βρίσκεται μεταξύ των καμπυλών b και c . Όμως αυξάνοντας την παροχή μάζας στην πρωτεύουσα ζώνη οδηγούμαστε σε αστάθεια και σβήσιμο της φλόγας, οπότε υπάρχει περιορισμός στις αλλαγές των παροχών αρκετά με βάση αυτά τα κριτήρια.

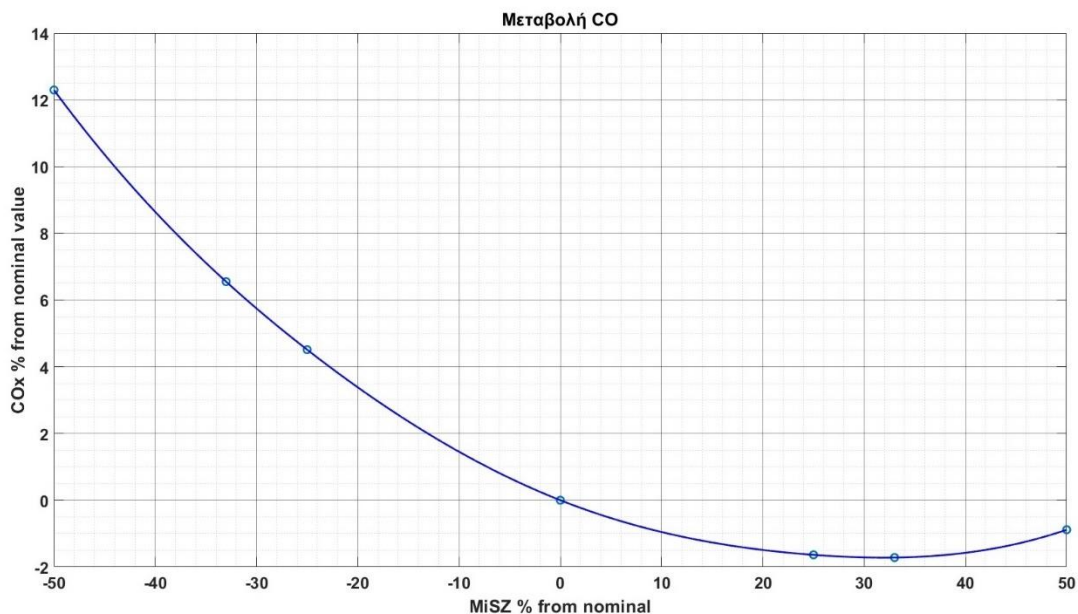
Στην συνέχεια ακολουθεί παρόμοια μελέτη ευαισθησίας για την ποσοστιαία μεταβολή της παροχής στην δευτερεύουσα ζώνη.



Σχήμα 4.19: Ποσοστιαία μεταβολή βαθμού απόδοσης θαλάμου καύσης συναρτήσει ποσοστιαίας μεταβολής παροχής δευτερεύουσας ζώνης



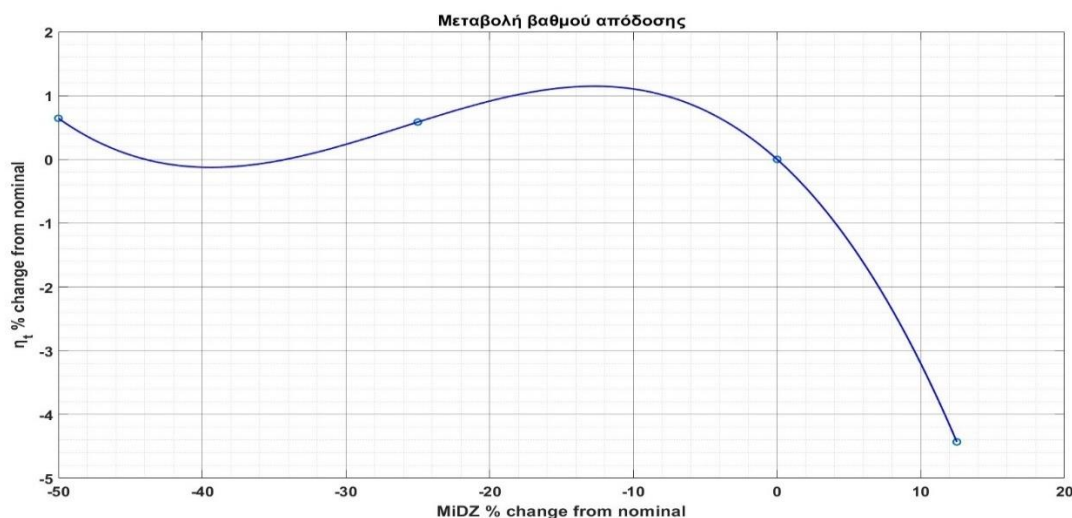
Σχήμα 4.20: Ποσοστιαία μεταβολή NOx συναρτήσει ποσοστιαίας μεταβολής παροχής δευτερεύουσας ζώνης



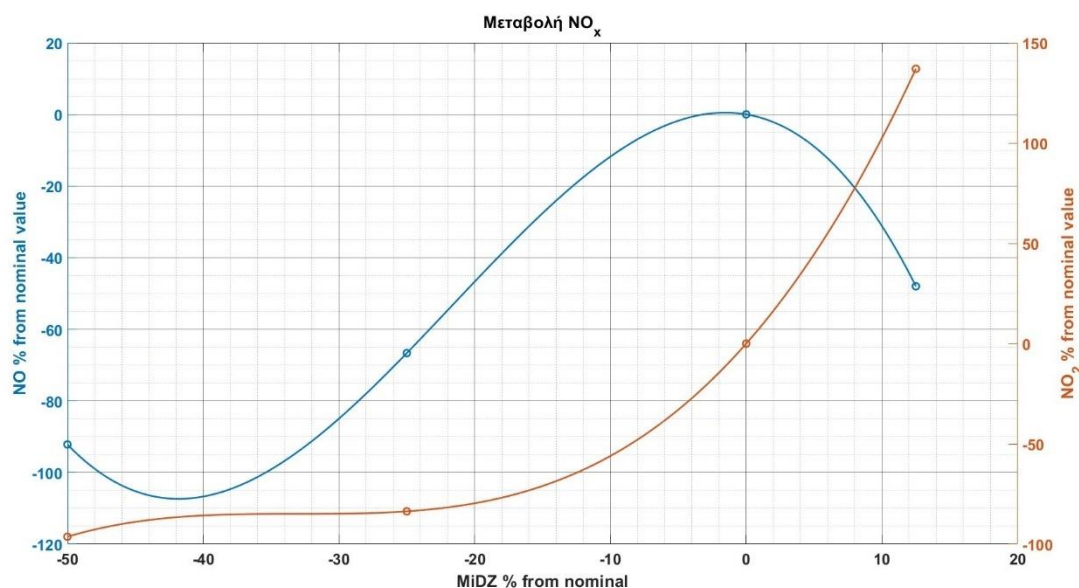
Σχήμα 4.21: Ποσοστιαία μεταβολή CO συναρτήσεως ποσοστιαίας μεταβολής παροχής ζώνης αραίωσης

Σε αυτήν την μελέτη εξάρτησης τα αποτελέσματα αυτά είναι ενδιαφέροντα διότι η μείωση της παροχής στην δευτερεύουσα ζώνη παρότι αυξάνει την παροχή στην πρωτεύουσα ζώνη, δεν προκαλεί μείωση των εκπομπών NOx, προκαλεί όμως την αύξηση του βαθμού απόδοσης και μείωση των εκπομπών ρύπων CO, οι δύο αυτές αυξήσεις είναι άρρηκτα συνδεδεμένες. Η μείωση των ρύπων CO με την αύξηση της παροχής της δευτερεύουσας ζώνης είναι λογική διότι διευκολύνεται η καύση των άκαυστων, οπότε μειώνονται οι ρύποι. Οι μικρές μεταβολές στα αποτελέσματα μπορεί να οφείλονται στο ότι σημείο λειτουργίας η παροχή στην δευτερεύουσα ζώνη είναι πολύ μικρή περίπου το 8% οπότε μείωση της παροχής αυτής δεν προκαλεί μεγάλες αυξήσεις της παροχής στην πρωτεύουσα ζώνη.

Η τελευταία μελέτη ευαισθησίας των παροχών πραγματοποιήθηκε για την παροχή στην ζώνη αραίωσης, όπου και ακολουθούν τα αποτελέσματα:



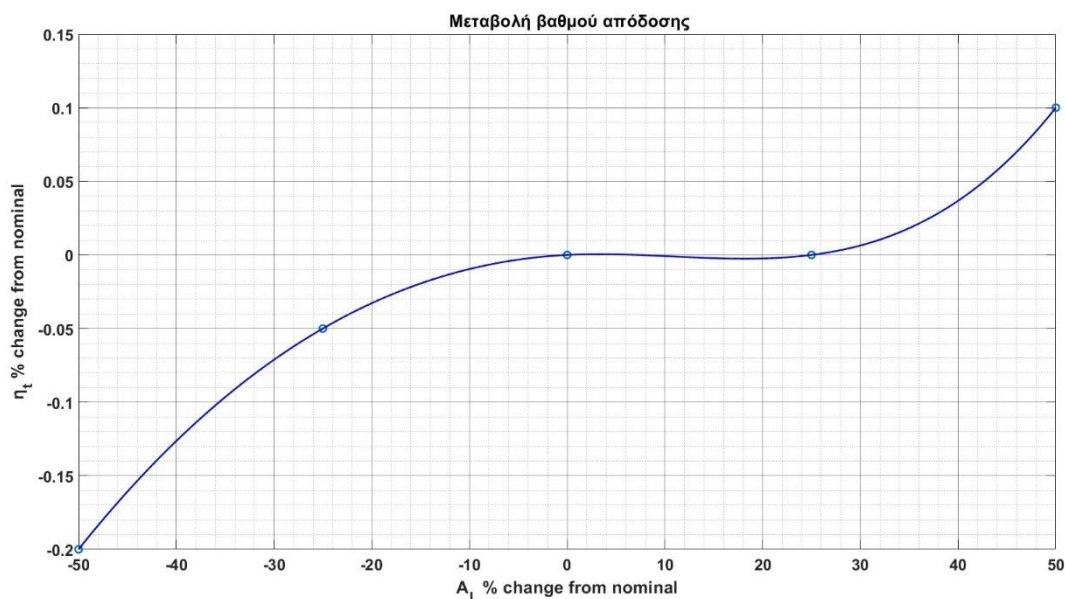
Σχήμα 4.22: Ποσοστιαία μεταβολή βαθμού απόδοσης θαλάμου καύσης συναρτήσεως ποσοστιαίας μεταβολής παροχής ζώνης αραίωσης



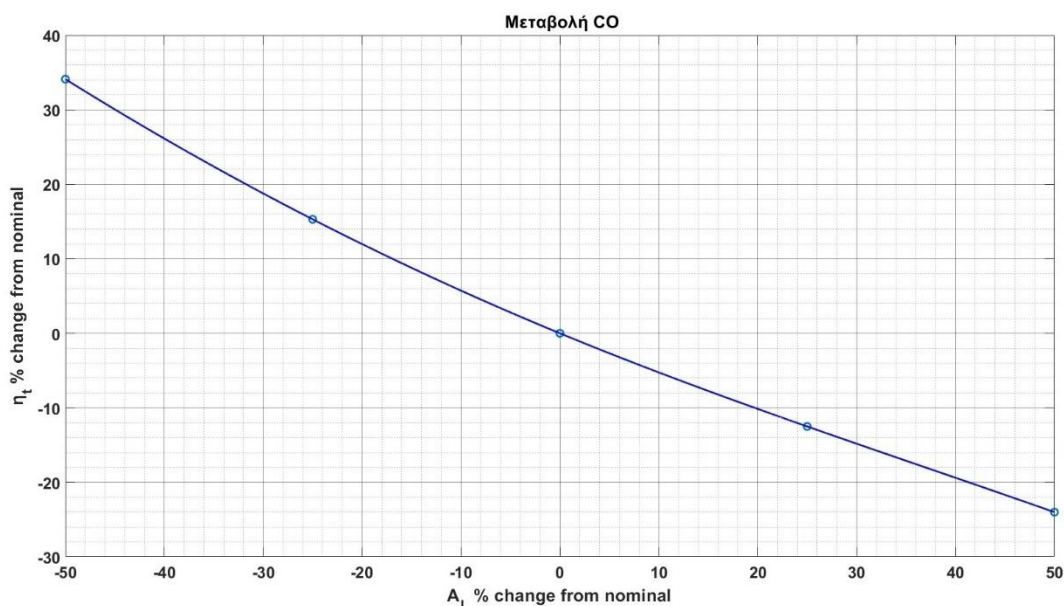
Σχήμα 4.23: Ποσοστιαία μεταβολή NO συναρτήσει ποσοστιαίας μεταβολής παροχής ζώνη αραιώσης

Σε αυτήν την μελέτη ευαισθησίας είναι εμφανές ότι αύξηση της παροχής αέρα στην ζώνη αραιώσης προκαλεί μείωση της απόδοσης και αύξηση των εκπομπών ρύπων. Σε αυτήν την περίπτωση τα αποτελέσματα είναι λογικά επειδή το ποσοστό του αέρα στην ζώνη αραιώσης συνυπολογίζοντας και τον αέρα ψύξης, έχει ποσοστό μεγαλύτερο του 50%, δεδομένο που προκαλεί σημαντική μείωση της παροχής μάζας στην πρωτεύουσα ζώνη και επακολούθως μείωση των αποδόσεων.

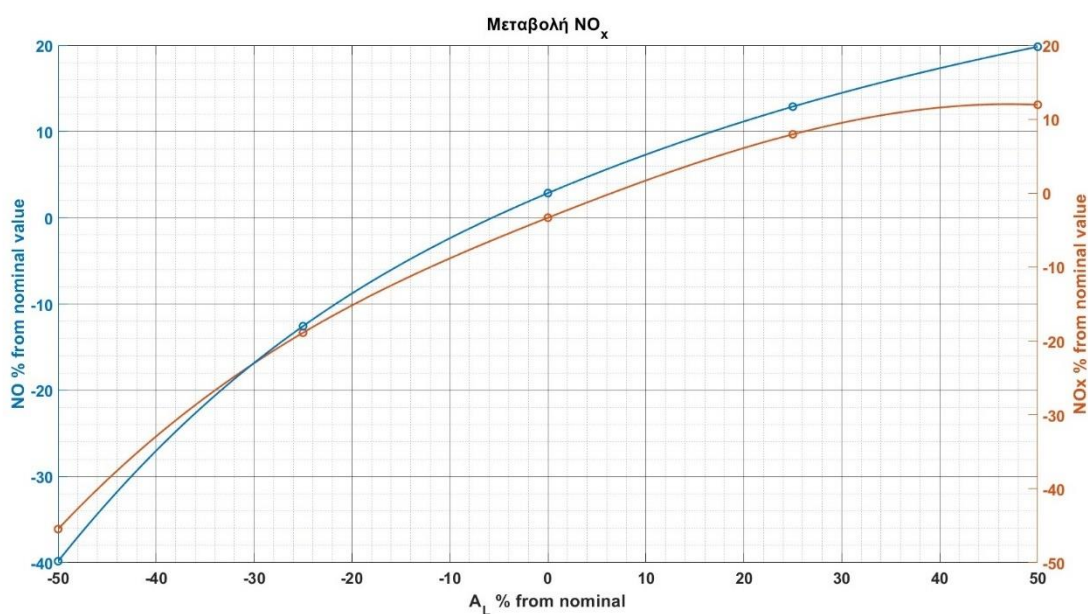
Η επόμενη μεταβλητή σχεδιασμού είναι η τιμή A_L η οποία στο Cantera είναι η A_{ref} . Πραγματοποιήθηκε μελέτη ευαισθησίας για την μεταβολή αυτής της μεταβλητή σε όρια $\pm 50\%$ οπότε:



Σχήμα 4.24: Μεταβολή η_{th} συναρτήσει του A_L



Σχήμα 4.25 : Ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών CO συναρτήσει του A_L

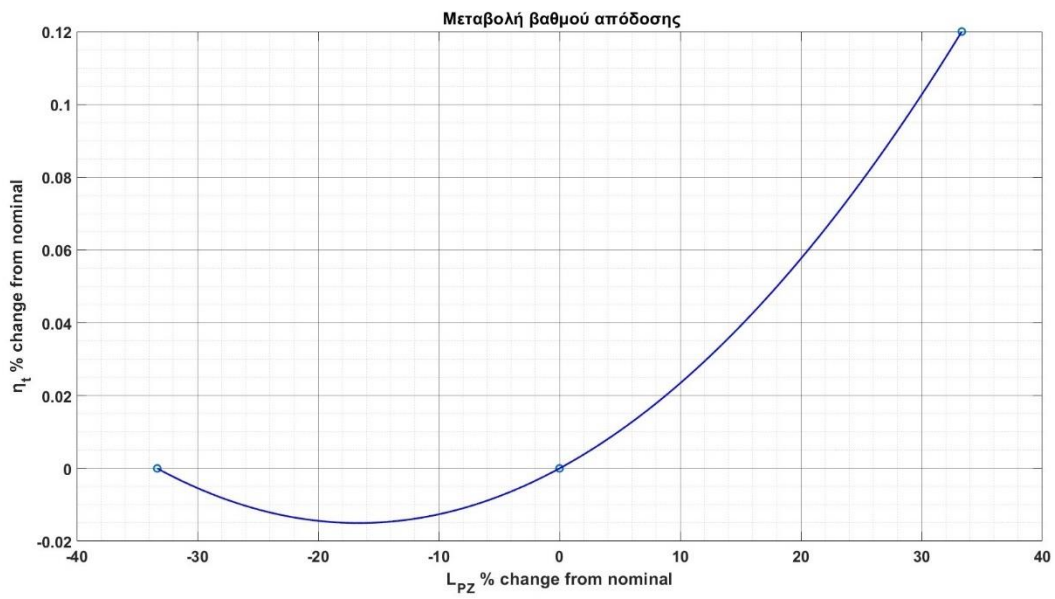


Σχήμα 4.26 : Ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών NOx του A_L

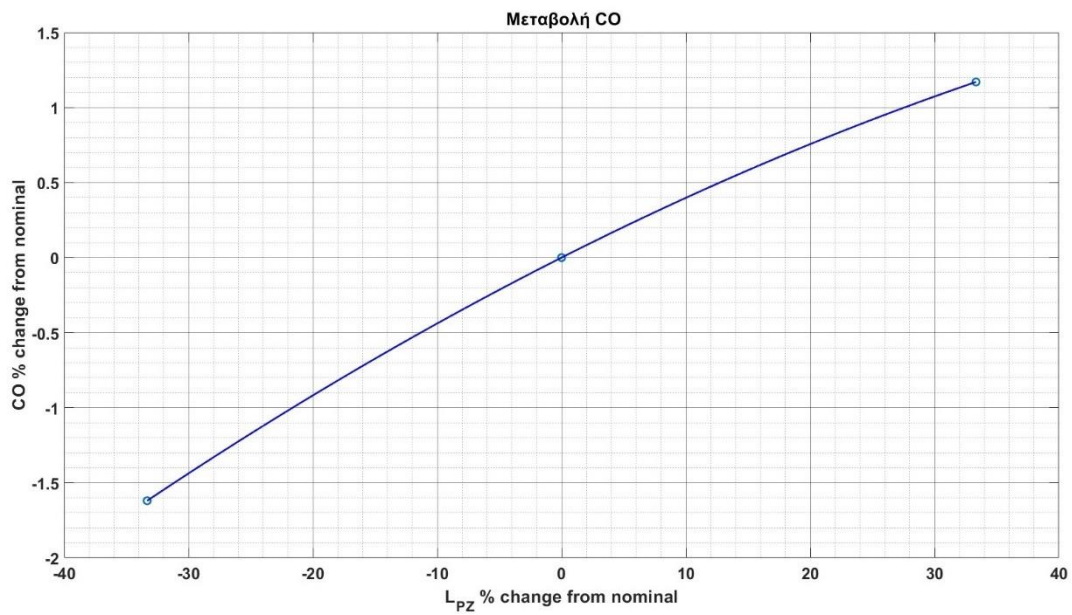
Παρατηρείται μικρή αύξηση του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της αύξησης του εμβαδού του μανδύα. Επιπλέον, η αύξηση του εμβαδού του μανδύα συνεπάγεται αύξηση του όγκου της δευτερεύουσας ζώνης, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα περισσότερο όγκο για την καύση του CO και άρα μείωση των ρύπων του. Επιπλέον, λόγω της αύξησης του όγκου υπάρχει και μεγαλύτερη θερμοκρασία στην έξοδο της πρωτεύουσας ζώνης, διότι καίγεται περισσότερο καύσιμο άρα και αύξηση των NO_x, η οποία αύξηση παρατηρείται.

Η επόμενη μεταβλητή σχεδιασμού είναι το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης (L_{PZ}), η οποία στο Cantera εισάγεται ως το ποσοστό του συνολικού μήκους. Πραγματοποιήθηκε μελέτη ευαισθησίας για την μεταβολή αυτής της μεταβλητής σε

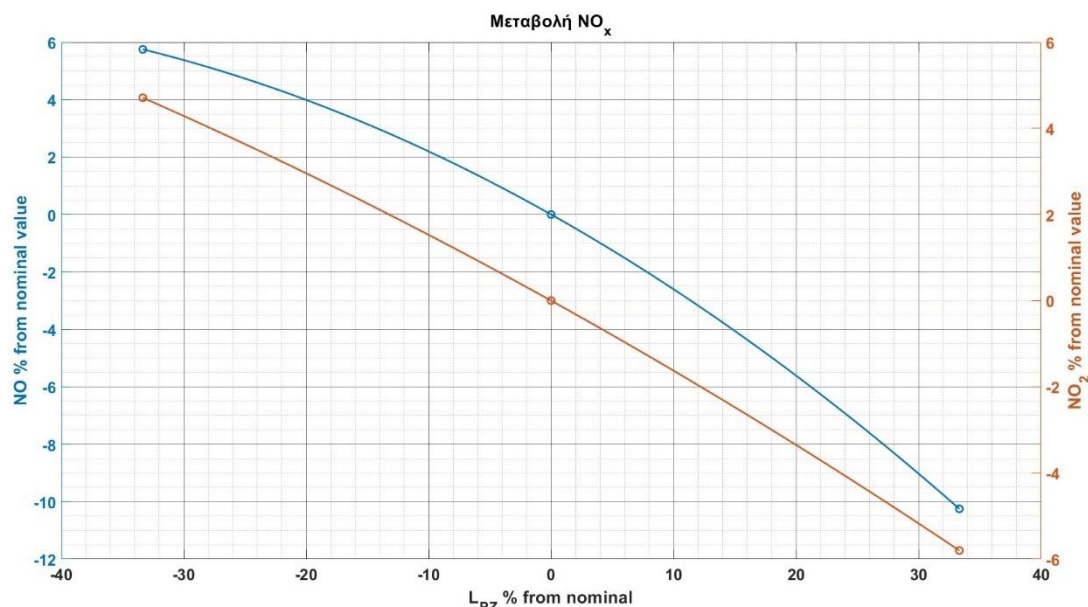
όρια $\pm 33\%$, οπότε:



Σχήμα 4.27: Ποσοστιαία μεταβολή η_{tH} συναρτήσει του L_{PZ}



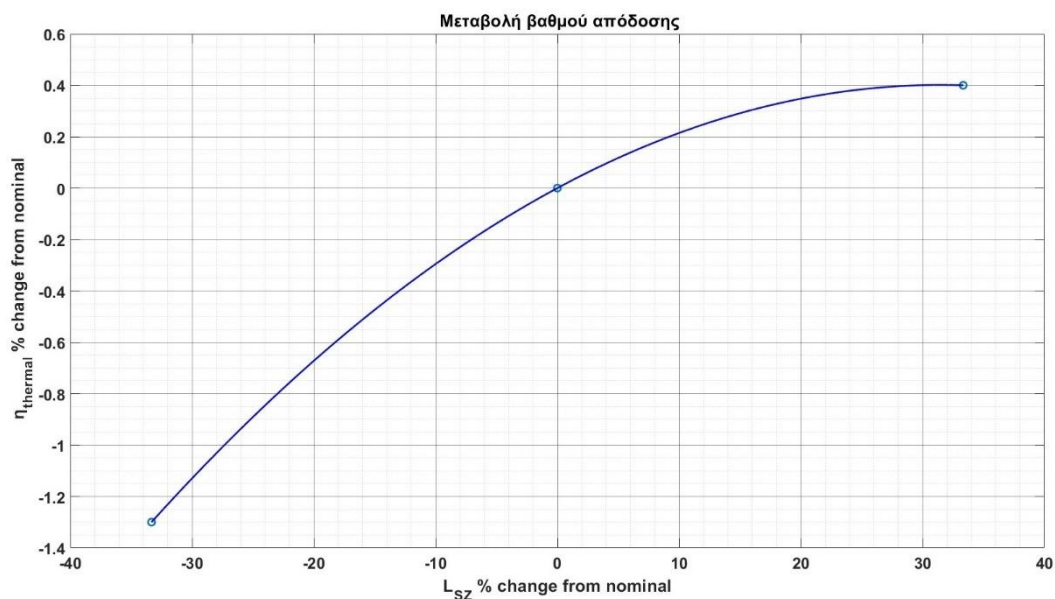
Σχήμα 4.28: Ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών CO συναρτήσει του L_{PZ}



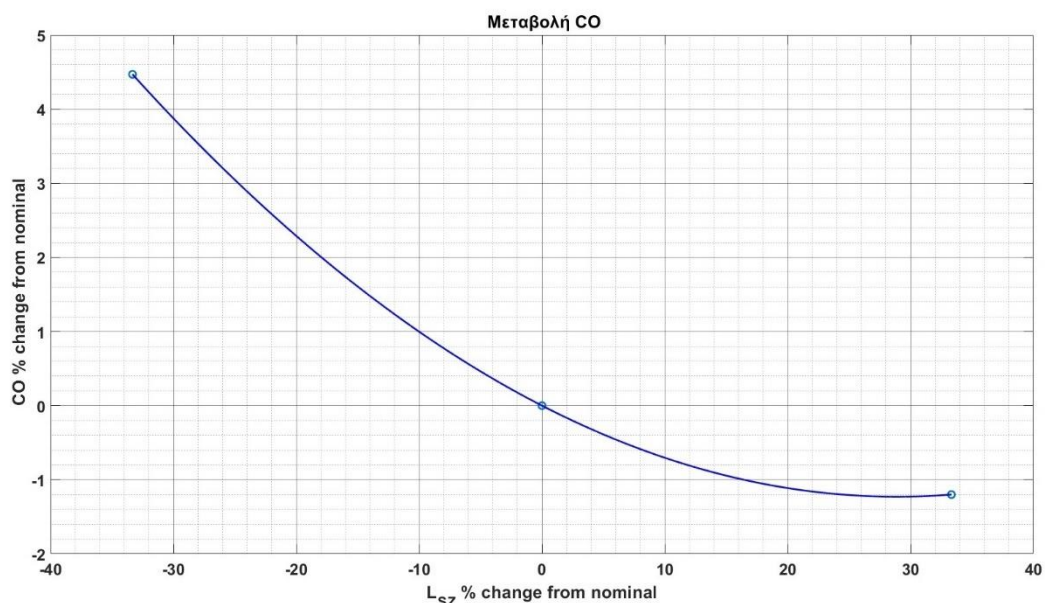
Σχήμα 4.29: Ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών NOx συναρτήσει του L_{pZ}

Παρομοίως με την προηγούμενη μελέτη εξάρτησης, η μεταβολή του βαθμού απόδοσης είναι ελάχιστη. Επιπλέον, η αύξηση του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης συνεπάγεται αύξηση του όγκου της πρωτεύουσας ζώνης που οδηγεί σε μείωση των ρύπων CO. Παρόλα αυτά, μειώνεται και το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ζώνης όπου καίγονται τα άκαυστα. Τελικά υπερισχύει ελάχιστα η επίδραση στην δευτερεύουσα ζώνη, όπως φαίνεται από τα σχήματα.

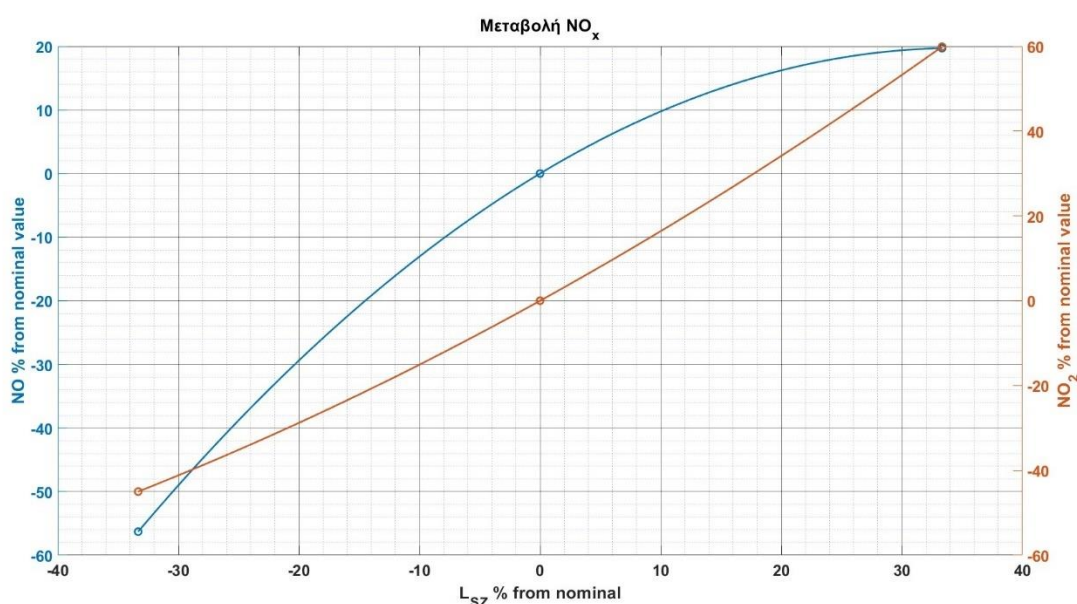
Η επόμενη μεταβλητή σχεδιασμού είναι το μήκος της δευτερεύουσας ζώνης (L_{SZ}) η οποία στο Cantera εισάγεται ως το ποσοστό του συνολικού μήκους. Πραγματοποιήθηκε μελέτη ευαισθησίας για την μεταβολή αυτής της μεταβλητής σε όρια $\pm 33\%$, οπότε:



Σχήμα 4.30: Ποσοστιαία μεταβολή η_{th} συναρτήσει του L_{SZ}



Σχήμα 4.31: Ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών CO συναρτήσει του L_{SZ}

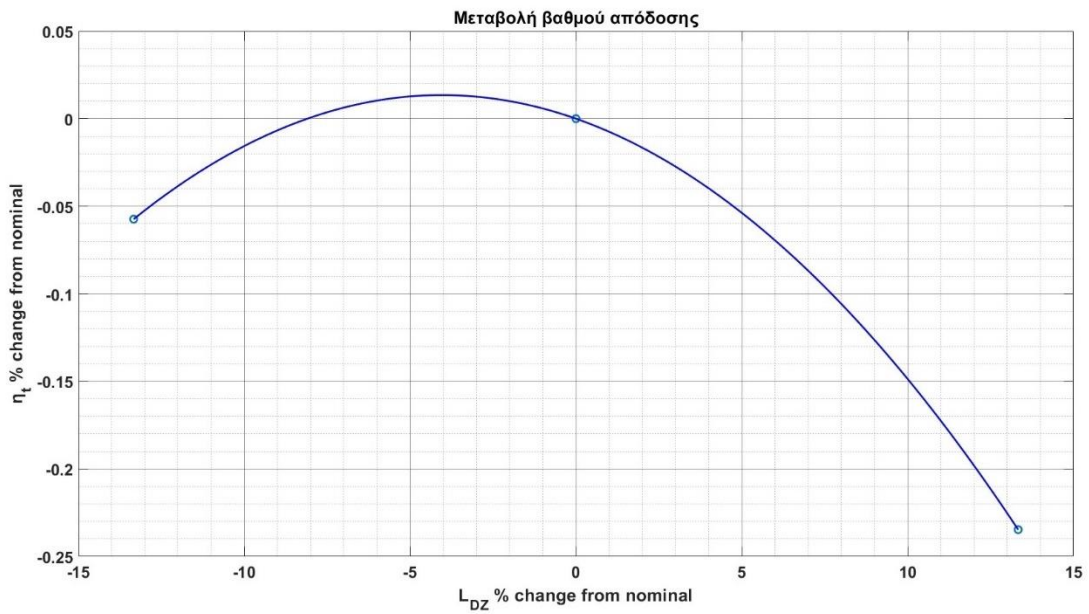


Σχήμα 4.32: Ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών NO συναρτήσει του L_{SZ}

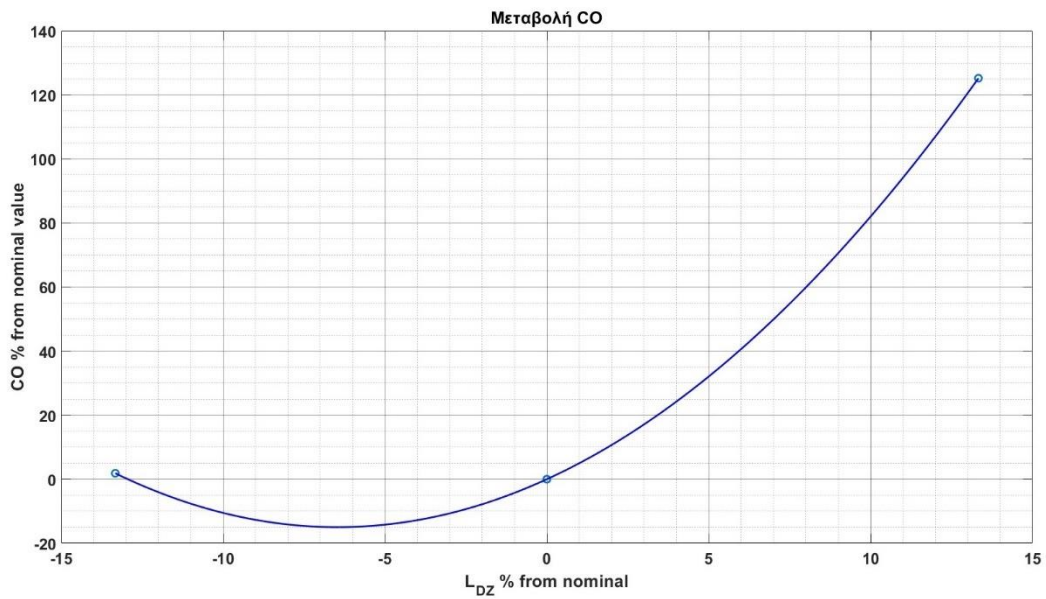
Η αύξηση του βαθμού απόδοσης είναι εύλογη, διότι μειώνονται οι ρύποι CO. Επιπλέον, η αύξηση του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης υπερισχύει ελάχιστα από την μείωση του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης όπως αναφέρθηκε, οπότε εύλογη και η μείωση των ρύπων CO. Επιπλέον, η αύξηση του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης, όπως αναφέρθηκε μειώνει το μήκος της πρωτεύουσας ζώνης και τα αποτελέσματα σχετικά με τους ρύπους NO_x συμφωνούν με τα αποτελέσματα της μελέτης ευαισθησίας ως προς το L_{PZ} .

Η επόμενη μεταβλητή σχεδιασμού είναι το μήκος της ζώνης αραίωσης (L_{DZ}), η οποία στο Cantera εισάγεται ως το ποσοστό του συνολικού μήκους. Πραγματοποιήθηκε

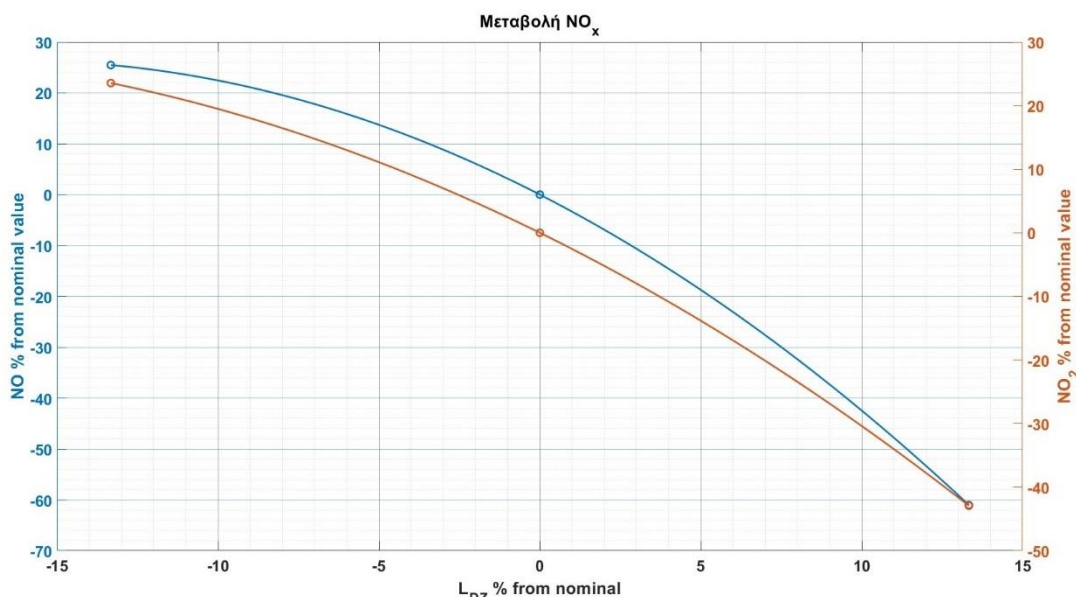
μελέτη ευσθησίας για την μεταβολή αυτής της μεταβλητής σε όρια από -13.33% μέχρι $+13.33\%$ οπότε:



Σχήμα 4.33: Ποσοστιαία μεταβολή η_{th} συναρτήσει του L_{DZ}



Σχήμα 4.34: Ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών CO συναρτήσει του L_{DZ}



Σχήμα 4.35: Ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών NO συναρτήσει του L_{DZ}

Αξίζει να αναφερθεί ότι το μήκος της ζώνης αραίωσης είναι το μεγαλύτερο με διαφορά και αποτελεί περίπου το 74% του συνολικού μήκους, οπότε μικρές μεταβολές σε αυτό το μήκος επιφέρουν σχετικά μεγάλες μεταβολές στα μήκη των άλλων δυο ζωνών. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι ότι παρότι ως αποτέλεσμα της μείωσης των μηκών των άλλων δύο ζωνών μειώνεται και ο όγκος, αυτό δεν συνεπάγεται και αύξηση των ρύπων, αλλά μειώνονται σημαντικά οι ρύποι των NO_x . Παρόλα αυτά, ο βαθμός απόδοσης είναι σημαντικά μικρότερος, αποτέλεσμα που καθιστά τον θάλαμο καύσης μη βιώσιμο. Η μεταβολή του βαθμού απόδοσης είναι σε συμφωνία και με την μεταβολή των NO_x .

4.4 Σύγκριση Cantera με Αλγόριθμο χαμηλών ρύπων.

Εφόσον έχει εδραιωθεί το πόσο επηρεάζει η κάθε μεταβλητή τις εκπομπές ρύπων σειρά έχει να υπολογιστεί η φερεγγυότητα του αλγορίθμου Low NOx που παρουσιάστηκε στο 3^ο Κεφάλαιο οπότε, αξιοποιώντας τα δεδομένα που προέκυψαν από την διαστασιολόγηση του 3^{ου} Κεφαλαίου υπολογίστηκαν οι ποσοστιαίες μεταβολές των ρύπων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατάσταση Take-off:

Πίνακας 4.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων διαστασιολόγησης Low NOx με Cantera

	Αλγόριθμος χαμηλών εκπομπών	Αποτελέσματα Cantera
$NO_{x,difference}$ %	-15 %	-1.96 %
$CO_{x,difference}$ %	-0%	+0.025 %

Η επίδραση είναι αισθητή, αρχικά η διαστασιολόγηση πραγματοποιήθηκε για $\Delta NO_x = -15 \%$. Η διαφορά του CO είναι σχεδόν ίδια. Αξίζει να αναφερθεί ότι

μερικές σταθερές που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο προκύπτουν από συσχετίσεις άλλων κινητήρων εκτός του CFM56, είναι εύλογο αποτέλεσμα να υφίσταται τέτοια ανακρίβεια. Το θετικό όμως είναι ότι επιτεύχθηκε μείωση των εκπομπών ρύπων, το οποίο αναδεικνύει την χρησιμότητα του αλγόριθμο χαμηλών NOx.

Επιπλέον οι μείωση των ρύπων είναι λογική διότι: 1^ο αύξηση της παροχής μάζας μειώνει και τα NOx (**Σχήμα 4.17**) και μείωση της παροχής της δευτερεύουσας ζώνης μειώνει τα NOx (**Σχήμα 4.20**). 2^ο η μείωση του μήκους της δευτερεύουσας μειώνει τα NOx (**Σχήμα 4.32**) ενώ μείωση του μήκους της πρωτεύουσας ζώνης αυξάνει τα NOx (**Σχήμα 4.29**), παρόλα αυτά η επίδραση της μείωσης του μήκους της δευτερεύουσας ζώνης είναι αρκετά πιο σημαντική, περίπου μισής τάξης μεγαλύτερη.

Μέσω της χρήσης του Cantera είναι δυνατόν να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον αλγόριθμο χαμηλών ρύπων. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των εκπομπών ρύπων όπως στον **Πίνακα 4.5** που προηγείται.

4.5 Συμπεράσματα θερμοχημικής μοντελοποίησης

Είναι ξεκάθαρη η χρησιμότητα της ενσωμάτωσης θερμοχημικού μοντέλου καύσης στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση. Αρχικά, ένα από τα οφέλη που απορρέουν από την ενσωμάτωση αυτή είναι η πιο ακριβής διαστασιολόγηση του θαλάμου καύσεως, υπολογίζοντας αναλυτικά την μεταβλητή (T_g) που υποτέθηκε στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση. Αυτή η πιο ακριβής διαστασιολόγηση επιφέρει μικρές αλλά σημαντικές αλλαγές στον σχεδιασμό. Επιπλέον, υπολογίζεται αναλυτικά ο βαθμός απόδοσης που, παρομοίως, αυτό ήταν μια υπόθεση που είχε πραγματοποιηθεί στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση.

Είναι δυνατό μέσω του υπολογισμού του βαθμού απόδοσης της καύσεως, να πραγματοποιηθεί μια μετέπειτα διαστασιολόγηση του θαλάμου καύσεως. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω επανυπολογισμού του $Aref$ με τον χημικό τρόπο εφόσον έχει υπολογιστεί αναλυτικά ο βαθμός απόδοσης και ανάλογα με τα αποτελέσματα να πραγματοποιηθούν και οι ανάλογες πράξεις σχετικά με την διαστασιολόγηση του εμβადού αναφοράς. Επομένως είναι σαφές ότι η μοντελοποίηση της καύσης αυξάνει την ακρίβεια με πολύ μικρό υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον είναι ευκρινές ότι η μελέτη της επίδρασης για την αλλαγή της δεδομένης γεωμετρίας επιφέρει καίρια αποτελέσματα. Αυτό διότι, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η πιο σημαντική σχεδιαστική μεταβλητή ενός θαλάμου καύσεως είναι οι εκπομπές ρύπων. Πραγματοποιώντας αυτήν την μελέτη είναι δυνατό να εντοπιστεί σε ποιες μεταβλητές σχεδιασμού πρέπει να εστιαστεί ο προκαταρκτικός σχεδιασμός, προκειμένου να επιτευχθούν οι σχεδιαστικοί στόχοι.

Τέλος ο σχεδιασμός ενός θαλάμου καύσης με ενσωμάτωση του Cantera αντί για τον

Low NOx είναι αρκετά πιο πλεονεκτικός. Αυτό διότι το Cantera δεν εξαρτάται από μεταβλητές που προκύπτουν από συσχετίσεις δεδομένων για κινητήρες, ούτε εξαρτάται από αυθαίρετες σταθερές που έχουν μεγάλη επίδραση στα αποτελέσματα (*E*). Επιπλέον το Cantera επιτρέπει έλεγχο της επιρροής όλων των μεταβλητών, κάτι που δεν ισχύει για τον αλγόριθμο Low NOx, οπότε προσφέρει μεγαλύτερη σχεδιαστική ελευθερία, το οποίο είναι ίσως και το πιο καίριο πλεονέκτημα. Παρόλα αυτά στην περίπτωση που δεν υπάρχει η διαθεσιμότητα ενός προγράμματος μοντελοποίησης της καύσης ο αλγόριθμος Low NOx είναι χρήσιμος.

5. Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στο 2^ο Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η προκαταρκτική διαστασιολόγηση αξιοποιώντας ημιεμπειρικές σχέσεις από τις βιβλιογραφικές αναφορές [1], [2] [3], [11] και [19]. Στην διαστασιολόγηση αξιοποιήθηκαν δεδομένα και σχέσεις από όλες τις προηγούμενες βιβλιογραφικές αναφορές και συνδυάστηκαν ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση. Συγχρόνως προσφέρεται η ελευθερία στον σχεδιαστή να επιλέξει για το επιμέρους τμήμα του θαλάμου καύσης και ποια μέθοδο θα χρησιμοποιήσει. Για τους θαλάμους καύσεως που υπήρχαν αρκετά διαθέσιμα δεδομένα (CFM56 και J79), επιτεύχθηκαν αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας για τις βασικές διαστάσεις (Μήκος θαλάμου καύσεως, ύψος μανδύα και διάμετρος αναφοράς), το οποίο αναδεικνύει την αποτελεσματικότητα της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο ένας αλγόριθμος μείωσης των εκπομπών ρύπων που προτείνεται από την βιβλιογραφική αναφορά [10]. Αυτός ο αλγόριθμος αξιοποιεί ορισμένα δεδομένα που προκύπτουν από το 2^ο Κεφάλαιο και συγχρόνως χρησιμοποιεί ημιεμπειρικές σχέσεις ώστε να προσδιοριστεί ποιες γεωμετρικές αλλαγές στον θάλαμο καύσης προσδίδουν μείωση των εκπομπών ρύπων. Επομένως είναι δυνατόν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για το ποια κατεύθυνση σχεδιασμού είναι αναγκαίο να ακολουθήσει ο σχεδιαστής του θαλάμου καύσεων, προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα για τις εκπομπές ρύπων.

Στο 4^ο Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση της καύσης μέσω του προγράμματος Cantera. Η μοντελοποίηση αυτή προσφέρει την πιστοποίηση των σχεδιαστικών στόχων που τέθηκαν στην προκαταρκτική διαστασιολόγηση, καθώς προσφέρει και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον αλγόριθμο χαμηλών ρύπων. Επιπλέον πραγματοποιείται και ανάλυση λειτουργίας στον θάλαμο καύσης, υπολογίζοντας αναλυτικά τις μεταβολές των εκπομπών ρύπων, βαθμού απόδοσης και θερμοκρασιών, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες στον σχεδιαστή. Μέσω της μοντελοποίησης της καύσης, πραγματοποιήθηκε και μελέτη της επίδρασης των αλλαγών διάφορων σχεδιαστικών μεταβλητών, παραδείγματος

χάρη της αλλαγής του αριθμού και της διαμέτρου των οπών στην πρωτεύουσα ζώνη, οι οποίες αλλαγές επηρεάζουν τις παροχές αέρα σε κάθε ζώνη. Για τις διάφορες αυτές αλλαγές έγινε και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων μέσω βιβλιογραφίας.

Για τα συμπεράσματα, θα αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα που θα παρθούν από το σχεδιασμό αξιοποιώντας όλα τα προηγούμενα Κεφάλαια είναι ικανά να αποτελέσουν μια αφετηρία σχεδιασμού για τις πιο ακριβείς και λεπτομερείς υπολογιστικές μεθόδους σχεδιασμού. Κάλιστα οι διαστάσεις που θα προκύψουν από τον προκαταρκτικό σχεδιασμό είναι ικανές να αποτελέσουν την αρχικοποίηση ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Με βάση όσα ειπώθηκαν είναι ευκρινής η θετική επίδραση ως προς τον χρόνο σχεδιασμού ενός θαλάμου καύσεως που έχει ένας τέτοιος αλγόριθμος σχεδιασμού.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Mattingly, J.D. (2002) *Aircraft Engine Design*. 2nd ed. Reston: AIAA.
- [2] Mellor, A.M. (1990) *Design of Modern Turbine Combustor*. London: Academic Press.
- [3] Lefebvre, A.H. (2010) *Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions*. 3rd ed. NY: CRC Press.
- [4] Naegeli, D. W., and Moses, C. A. (1980) "Effect of Fuel Molecular Structure on Soot Formation in Gas Turbine Engines," ASME Paper 80-GT-62, Gas Turbine Conference, New Orleans, LA.
- [5] Rezvani, R. (2010) *A Conceptual Methodology for the Prediction of Engine Emissions*, PhD thesis, Georgia Institute of Technology.
- [6] Zoheir Saboohi, Fathollah Ommi, A. Fahkratabatabaei (2016) *Development of an Augmented Conceptual Design Tool for Aircraft Gas Turbine Combustor*. Int. Jnl. of Multiphysics, vol. 10, pp. 53-74.
- [7] Mattingly, J.D. (2006) *Elements of Propulsion, Gas Turbine and Rockets*. Reston: AIAA.
- [8] Mohammad B. S., Jeng S. M. (2009) *Design procedures and a Developed Computer Code for Preliminary Single Annular Combustor Design*, AIAA 2009-5208, 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.
- [9] Mathioudakis Konstantinos, *Introduction to Jet Propulsion*, lecture notes, National Technical University of Athens, delivered on 2022.
- [10] A. M. Mellor, K. J. Fritsky (1990) *Turbine Combustor Preliminary Design Approach*, J. PROPULSION, Vol. 6, No. 3.
- [11] Sawyer, J.W., *Gas Turbine Engineering Handbook: Theory & Design*, 3rd ed. Gas Turbine Publications, Norwalk, 1985
- [12] J. Luche: *Obtentio de mod`eles cin`etiques r`eduits de combustion Application `a un m`ecanisme du k`eros`ene*. PhD thesis, UNIVERSITE D'ORLEANS, 2003.
- [13] Κ. Μαθιουδάκης: *Λειτουργία Αεροπορικών Κινητήρων: επιδόσεις, εκπομπές καυσαερίων και ήχου*. Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2007.

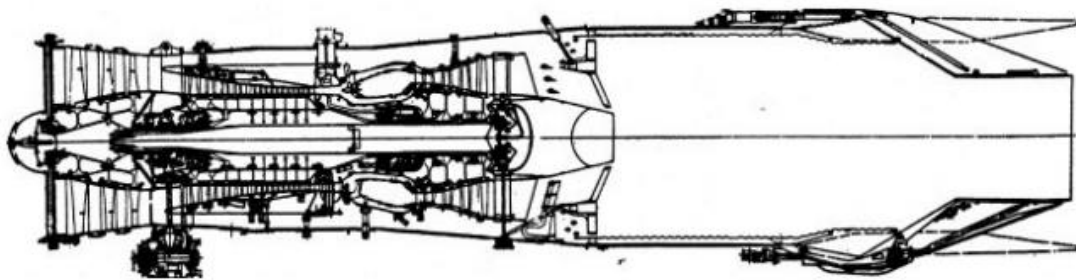
- [14] Cantera Co: Cantera documentation. <https://cantera.org/documentation/index.html/>
- [15] Khandelwal, B., Lili, D., & Sethi, V. (2014). *Design and study on performance of axial swirler for annular combustor by changing different design parameters*. Journal of the Energy Institute, 87(4), 372–382
- [16] Lilley, D. G. (1997), *Swirl flows in combustion: a review*, AIAA J.15, 1063
- [17] NASA: <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>
- [18] Khandelwal, Bhupendra, (2012) *Development of gas turbine combustor preliminary design methodologies and preliminary assessments of advanced low emission combustor concepts*, PhD Thesis, Cranfield University
- [19] Walsh, P.P. and Fletcher, P., (2004) *Gas Turbine Performance*. 2nd edn., John Wiley & Sons, Oxford.
- [20] Luca Fuligno, Diego Micheli, and Carlo Poloni, (2006) *An Integrated Design Approach for Micro Gas Turbine Combustors: Preliminary 0-D And Simplified CFD Based Optimization*, (Dipartimento di Ingegneria Meccanica Università degli Studi di Trieste Trieste 34100 Italy), Proceedings of GT2006 ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air May 8-11, Barcelona, Spain
- [21] Vishal Sethi, *Introduction to design considerations and sizing methodologies, Gas Turbine Combustion Short Course*, Cranfield University
- [22] D. M. Newburry, A. M. Mellor (1996) *Semiempirical correlations of No_x Emissions from utility combustion Turbines with Inert Injection*, J. PROPULSION Vol. 12, No. 3
- [23] C. S. Connors, J. C. Barnes, and A. M. Mellor (1996) *Semi empirical prediction and correlations of CO emissions from utility combustors*, J. PROPULSION Vol. 12, No. 5
- [24] Li, J., Sun, X., Liu, Y.X., & Sethi, V. (2017) *Preliminary aerodynamic design methodology for aero engine lean direct injection combustors*. *The Aeronautical Journal*, 121, 1087 - 1108.
- [25] <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-study-confirms-biofuels-reduce-jet-engine-pollution>
- [26] Vishal Sethi, *Combustor Heat transfer and cooling, Gas Turbine Combustion Short Course*, Cranfield University

[27] Khandelwal, B., Karakurt, A., Sethi, V., Singh, R., & Quan, Z. (2013) *Preliminary design and performance analysis of a low emission aero-derived gas turbine combustor*, The Aeronautical Journal, 117(1198), 1249–1271.

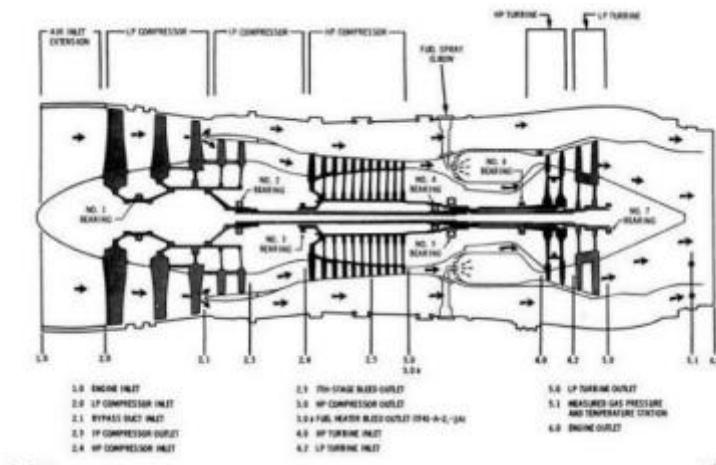
[28] A. M. Mellor (1977) *Characteristics Time Emissions Correlations and Sample Optimization: GT-309 Gas Turbine Combustor*, J. PROPULSION, Vol. 1, No. 4.

[29] Mellor, A. M., & Washam, R. M. (1979) *Characteristic Time Correlations of Pollutant Emissions from an Annular Gas Turbine Combustor*, Journal of Energy, 3(4), 250–253

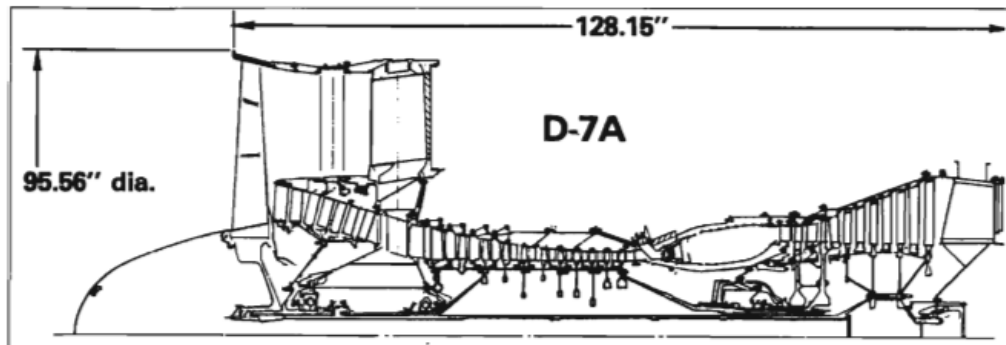
7. Παράρτημα Α. Αξονικές τομές αεροπορικών κινητήρων



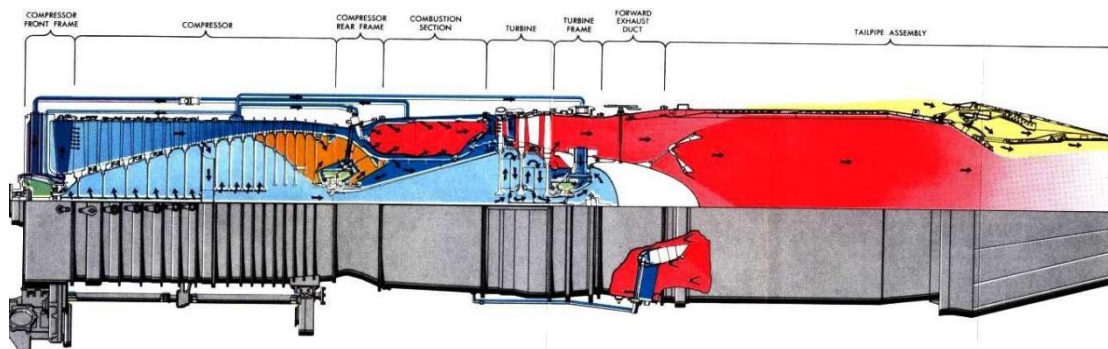
Σχήμα 7.1: Αξονική τομή F100



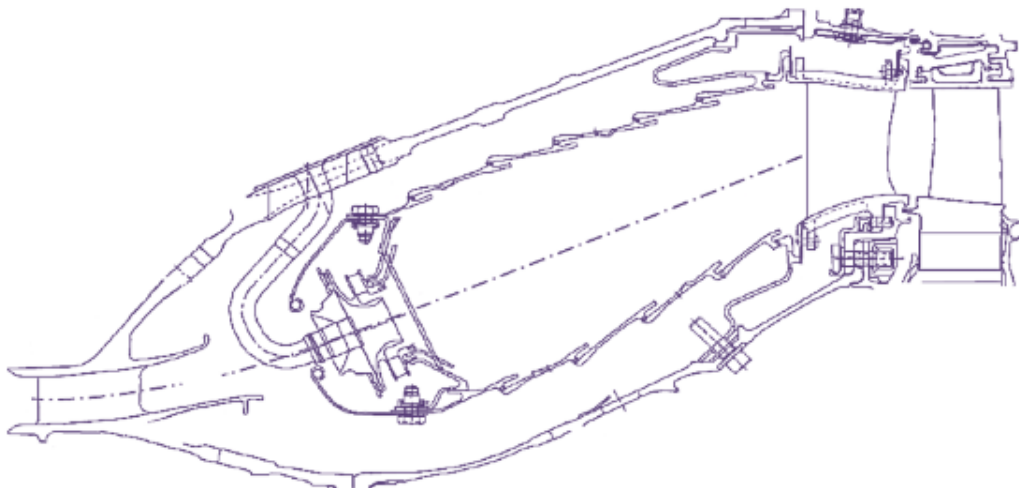
Σχήμα 7.2: Αξονική τομή TF41



Σχήμα 7.3: Αξονική τομή JT9D



Σχήμα 7.4: Αξονική τομή J79



Σχήμα 7.5: Αξονική τομή CFM-56

8. Παράρτημα Β. Προγραμματιστικός κώδικας

Σε αυτό το παράρτημα θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία προγραμματισμού της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης μέσω του προγραμματισμού περιβάλλοντος Matlab. Συγχρόνως θα παρουσιαστεί και ένα τμήμα του κώδικα και θα παρουσιαστεί ο κώδικας του 3^{ου} Κεφαλαίου. Επακολούθως, θα παρουσιαστεί και ο τρόπος χρήσης του Cantera.

8.1 Κώδικας Matlab

8.1.1 Κώδικας 2^{ου} Κεφαλαίου

Ο προγραμματισμός της προκαταρκτικής διαστασιολόγησης πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Matlab στην έκδοση R2022b. Ο χρόνος υλοποίησης του αλγορίθμου της διαστασιολόγησης είναι 1.485 δευτερόλεπτα σε επεξεργαστή AMD Ryzen 5 4600G, 3.7 GHz και 8.00 GB RAM. Ακολουθεί ο **Πίνακας 7.1**, όπου διακρίνονται οι ξεχωριστές συναρτήσεις για την προκαταρκτική διαστασιολόγηση του θαλάμου καύσεως.

Πίνακας 8.1: Συναρτήσεις από τα οποία αποτελείτε ο κώδικας

Ονομασία Κώδικα	Χρήση
Diffuser.m	Διαστασιολόγηση διαχύτη
FlowPartition.m	Υπολογισμός κλασμάτων ροής
Areas.m	Υπολογισμός D_{ref}, H_L
Snout.m	Διαστασιολόγηση ρύγχους
Swirler.m	Διαστασιολόγηση συστροφών
Dome.m	Διαστασιολόγηση θόλου
Zones.m	Διαστασιολόγηση θαλάμου καύσεως
Weight.m	Υπολογισμός βάρους

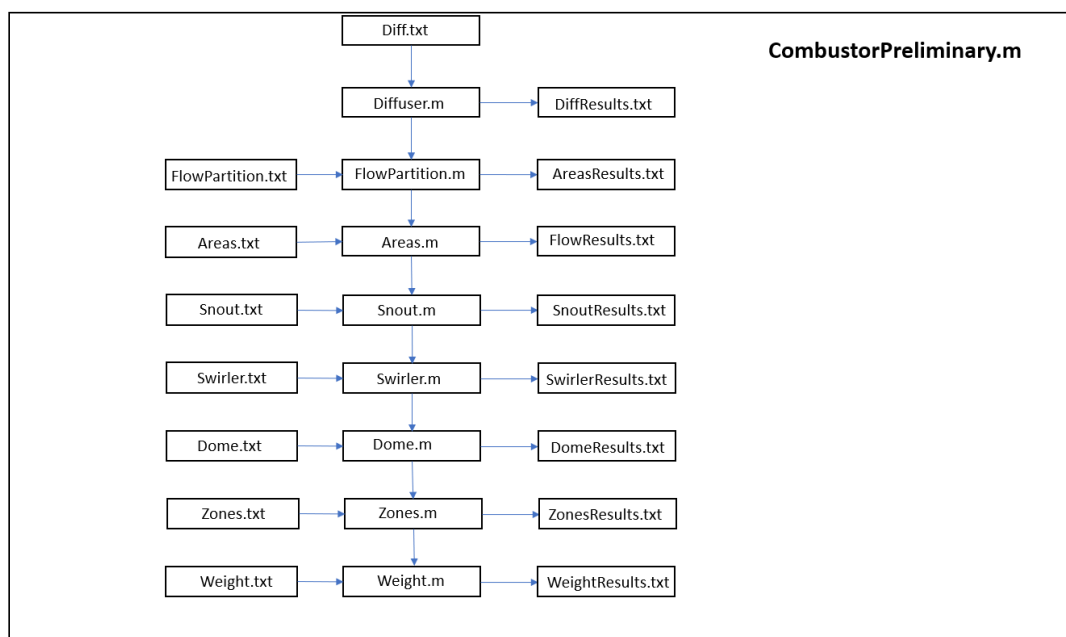
Πίνακας 8.2: Αρχεία εισόδου από τα οποία αποτελείτε ο κώδικας

Όνομασία Κώδικα	Χρήση
Diffuser.txt	Δεδομένα για το Diffuser.m
FlowPartition.txt	Δεδομένα για το FlowPartition.m
Areas.txt	Δεδομένα για το Areas.m
Snout.txt	Δεδομένα για το Snout.m
Swirler.txt	Δεδομένα για το Swirler.m
Dome.txt	Δεδομένα για το Dome.m
Zones.txt	Δεδομένα για το Zones.m
Weight.txt	Δεδομένα για το Weight.m

Πίνακας 8.3: Αρχεία εξόδου τα οποία παράγει ο κώδικας

Όνομασία Κώδικα	Περιεχόμενο
DiffResults.txt	Αποτελέσματα διαστασιολόγησης διαχύτη
FlowResults.txt	Αποτελέσματα FlowPartition.m
AreasResults.txt	Αποτελέσματα A_{ref}, H_L
SnoutResults.txt	Αποτελέσματα διαστασιολόγησης ρύγχους
SwirlerResults.txt	Αποτελέσματα διαστασιολόγησης συστροφών
DomeResults.txt	Αποτελέσματα διαστασιολόγησης θόλου
ZonesResults.txt	Αποτελέσματα διαστασιολόγησης θαλάμου κάυσης
WeightResults.txt	Συνολικό Βάρος

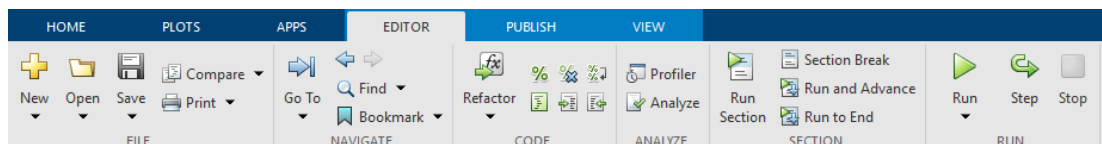
Το λογικό διάγραμμα το προηγούμενων είναι το εξής:



Σχήμα 8.1: Λογικό διάγραμμα εκτέλεσης κώδικα

Ο κώδικας δέχεται αρχεία εισόδου με δεδομένα γνωστά και εκτελεί με την σειρά του **Πίνακα 8.1** τις συναρτήσεις προκειμένου να διαστασιολογήσει τον θάλαμο καύσης, όπως φαίνεται από το **Σχήμα 8.1**.

Για την εκτέλεση του προγράμματος είναι απαραίτητο όλα τα αρχεία εισόδου και εξόδου να βρίσκονται στον ίδιο φάκελο που βρίσκεται και το βασικό πρόγραμμα **CombustorPreliminary.m**. Στην συνέχεια ανοίγεται με το Matlab το αρχείο **CombustorPreliminary.m**, πατιέται η καρτέλα Editor και μετά το Run για να τρέξει το πρόγραμμα.



Σχήμα 8.2: Διαδικασία εκτέλεσης προγράμματος

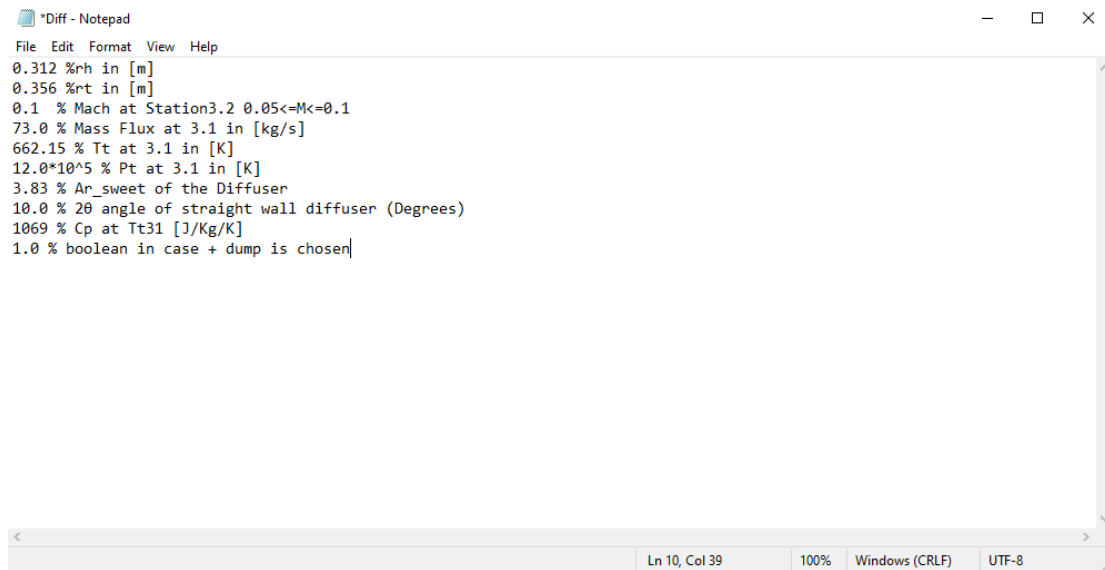
Παρακάτω, ένα δείγμα του κώδικα, πιο συγκεκριμένα παρατίθεται ο κώδικας μαζί με επεξηγήσεις για τον σχεδιασμό του διαχύτη.

Αρχικά διαβάζεται από τον κώδικα το αρχείο εισόδου Diff.txt, το οποίο περιέχει τα εξής δεδομένα:

Πίνακας 8.2: Δεδομένα εισόδου για την διαστασιολόγηση του θαλάμου καύσεως

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης	Επεξήγηση
$r_{h3.1}$	[m]	Ακτίνα ποδός στην είσοδο του διαχύτη
$r_{t3.1}$	[m]	Ακτίνα κεφαλής στην είσοδο του διαχύτη
$M_{3.2}^a$	[-]	Αριθμός Mach στην έξοδο του διαχύτη
$\dot{m}_{3.1}$	[kg/s]	Παροχή αέρα στην είσοδο του διαχύτη
$T_{t3.1}$	[K]	Ολική θερμοκρασία στην είσοδο του διαχύτη
$P_{t3.1}$	[Pa]	Ολική θερμοκρασία στην είσοδο του διαχύτη
AR_{sweet}	[-]	Μέγιστος επιτρεπτός λόγος επιφανειών διαχύτη ευθείων πλακών
2θ	[°]	Γωνία τοποθέτησης πλακών διαχύτη
C_p	[J/KgK]	Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα στην είσοδο του διαχύτη
$Dump$	[Boolean]	Χρήση dump τον διαχύτη σε περίπτωση όπου $AR < AR_{sweet}$

^a Για τον $M_{3.2}$ από [2] συνιστώνται τιμές $0.05 < M_{3.2} < 0.1$



```
*Diff - Notepad
File Edit Format View Help
0.312 %rh in [m]
0.356 %rt in [m]
0.1 % Mach at Station3.2 0.05<=M<=0.1
73.0 % Mass Flux at 3.1 in [kg/s]
662.15 % Tt at 3.1 in [K]
12.0*10^5 % Pt at 3.1 in [K]
3.83 % Ar_sweet of the Diffuser
10.0 % 2θ angle of straight wall diffuser (Degrees)
1069 % Cp at Tt31 [J/Kg/K]
1.0 % boolean in case + dump is chosen
```

Σχήμα 8.3: Μορφή αρχείου εισόδου

Όλα τα άλλα αρχεία εισόδου ακολουθούν την ίδια μορφή

Ακολουθεί ο κώδικας με τα πράσινα γράμματα να είναι οι επεξηγήσεις:

Ο κώδικας που ακολουθεί

```
%This segment of the code calculates the dimensions of the diffuser
and the Pressure at the exit of diffuser. For the necessary data, it
reads the file named Diff.txt, which file includes all the necessary
information that has been aforementioned.
```

```
clc
clear all
%Diffuser
%Station 3.1 (Compressor Exit-Diffuser Inlet)
DiffData= load('Diff.txt')
rh=DiffData(1); % Hub Radius at 3.1 [m]
rt=DiffData(2); % Tip Radius at 3.1 [m]
M32=DiffData(3); % Mach at 3.2
MassFlux=DiffData(4);% Air mass flow at 3.1 [kg/s]
Tt31=DiffData(5); % Total Temperature at 3. [K]
Pt31=DiffData(6); % Total Pressure at 3.1 [Pa]
ARsweet=DiffData(7); % Sweet Spot for diffuser straight walled [-]
TwoTheta=DiffData(8); % Angle of plates in diffuser
Cpc=DiffData(9); % Cp of Air at Tt31 [J/Kg/K]
Dump=DiffData(10); % In case dump is selected

rm=(rh+rt)/2 % Mean radius at diffuser inlet [m]
R=287.05; % Gas Constant
gamma=(1/(1-R/Cpc)); %  $\gamma=Cp/Cv$ 
```

Ακολουθεί ο κώδικας-συνάρτηση για τον σχεδιασμό του διαχύτη, η διευκρίνηση για τον κώδικα βρίσκεται με τα πράσινα γράμματα κάτω από τον ορισμό της Function:

```
function Diffexit=Diffuser(rt,rh,rm,M32,MassFlux,Tt31,Pt31,TwoTheta,ARsweet,Cpc,Dump,gamma,R)
%This function receives dimensions and the flow properties of the diffuser
%including a Boolean variable. The design is based on Mattingly [2] in order to calculate the
dimensions of the diffuser, also the function calculates the type of the diffuser (straight
wall/straight walled + dump), end in the end it calculates the geometry and the flow
properties at exit of the diffuser, including the loses of the total pressure

A31=pi*(rt^2-rh^2); % Area at 3.1 [m^2]
H1=rt-rh; % height at the inlet of diffuser [m]
h_str_wall=1.1138-0.017701*TwoTheta+1.99925*10^(-4)*TwoTheta^2-9.3068*10^(-
7)*(TwoTheta)^3+1.5722*10^(-9)*(TwoTheta)^4; % Equation to calculate efficiency of diffuser

syms M31
eqn1=MassFlux-A31*Pt31/sqrt(Tt31)*sqrt(gamma/R)*M31*(1+(gamma-1)/2*M31^2)^(-
(gamma+1)/2*(gamma-1))=0; %equation to Find M31 from flow function
M31=vpasolve(eqn1); % Solving the non linear equation to calculate M31
M31=double(M31) % from symbolic to double
T31=Tt31/(1+1/2/Cpc*gamma*R*M31^2); % Temperature at 3.1 [K]
U31=M31*sqrt(gamma*T31*R); % Total speed at 3.1 [m/s]
P31=Pt31*(T31/Tt31)^(gamma/(gamma-1)); % Pressure at 3.1 [Pa]
dens31=P31/R/T31 % density of air at 3.1 [Kg/m^3]
Pdyn31=Pt31-P31; % Dynamic Pressure at 3.1 [Pa]
Tt32=Tt31; % Temperature at 3.2 [K]
MassFlux32=0; % Initialization of mass flux to the exit of the diffuser [Kg/s]
Cpide=0.50:0.001:0.99; % Cpideal values to check [-]
index=1:length(Cpide);
error=zeros(1,length(Cpide)); % Dimensioning the error vector

for i=1:length(index)
Cpideal=Cpide(i); % Choosing Cpideal
Cp=Cpideal*h_str_wall; % Calculating Cp
DPst=Cp*Pdyn31; % Calculate DPst
P32=P31+DPst; % Calculate P32
Pt32=P32*(1+(gamma-1)/2*M32^2)^(gamma/(gamma-1)); % Calculate Pt32
A32=A31*sqrt(1/(1-Cpideal)); % Calculate A32
MassFlux32=A32*Pt32/sqrt(Tt32)*sqrt(gamma/R)*M32*(1+(gamma-1)/2*M32^2)^(-
(gamma+1)/2*(gamma-
1)); % Calculate Mass flow at 32
error(i)=MassFlux-MassFlux32; % Calculating the difference between the two equal mass flow
end

Indexofmin=index(abs(error)==min(abs(error)));% Find minimum error
Cpideal=Cpide(Indexofmin); % finding Cpideal at which value the minimum error occurs
Cp=Cpideal*h_str_wall % finding Cp
DPst=Cp*Pdyn31; % Change of Static Pressure [Pa]
P32=P31+DPst; % Static Pressure at 3.2 [Pa]
Pt32=P32*(1+(gamma-1)/2*M32^2)^(gamma/(gamma-1)); % Total Pressure at 3.2 [Pa]
A32=A31*sqrt(1/(1-Cpideal)); % Calculate A32
AR=A32/A31 % Fraction of Area 3.2 and 3.1 [-]
if AR<ARsweet
T32=Tt32*(P32/Pt32)^((gamma-1)/(gamma)); % Temperature at 3.2 [K]
U32=M32*sqrt(gamma*R*T32); % Speed at 3.2 [m/s]
dens32=P32/R/T32 % Density at 3.2 [Kg/m^3]

%Diffuser geometry
A32=A31*sqrt(1/(1-Cpideal)); % Area at 3.2 [m^2]
HR=A32/2/pi/rm; % Height at the outlet of diffuser [m]
Ldiff=(HR-H1)/(2*tan(TwoTheta/2*pi/180)); % Length of diffuser [m]
end

if Dump==1 % in case we choose +dump
AM31opt=h_str_wall*AR*A31; % Optimum area of AM for maximum efficiency
hdopt=(1-2*h_str_wall+(h_str_wall*AR)^2)/(h_str_wall*(AR^2-1)); % maximum efficiency
Cp=Cpideal*hdopt; % Cp [J/KgK]
```

```

A32=AR*A31; % Aera of diffuser at 3.2 [m^2]
DPst=Cp*Pdyn31; % Change of Static Pressure [Pa]
P32=P31+DPst; % Static Pressure at 3.2 [Pa]
Pt32=P32*(1+(gamma-1)/2*M32^2)^(gamma/(gamma-1)); % Total Pressure at 3.2 [Pa]
T32=Tt32*(P32/Pt32)^((gamma-1)/(gamma)); % Temperature at 3.2 [K]
U32=M32*sqrt(gamma*R*T32); % Speed at 3.2 [m/s]
dens32=P32/R/T32 % Density at 3.2 [Kg/m^3]

%Diffuser geometry
AM=AM31opt; % Optimum area of AM for maximum efficiency
A32=A31*sqrt(1/(1-Cpideal)); % Aera at 3.2 [m^2]
HM=AM*A31/2/pi/rm; % Height of diffuser at the end of the flat wall diffuser [m]
HR=A32/2/pi/rm ; % Height at the outlet of the dump diffuser [m]
Lflat=(HM-H1)/(2*tan(TwoTheta/2*pi/180)); % Length of flat wall diffuser [m]
Ldump=HR-HM; % Length of diffuser Diffuser [m]
Ldiff=Lflat+Ldump; % Length of the Diffuser [m]
end

if AR>ARsweet % In case we need +dump diffuser

    AM=ARSweet; % AM is the ratio of the straight walled diffuser
    for n=1:length(Cpideal)
        Cpideal=Cpideal(n); % Choosing Cpideal
        A32=A31*sqrt(1/(1-Cpideal)); % Calculate A32
        AR=A32/A31; % Calculate AR
        hd=(h_str_wall*(AR)*(1-AM)+2*(AM*AR-1))/(AR^2-1); % Calculate hd
        Cp=hd*Cpideal; % Calculate Cp
        DPst=Cp*Pdyn31; % Calculate Dpst
        P32=P31+DPst; % Calculate P32
        Pt32=P32*(1+(gamma-1)/2*M32^2)^(gamma/(gamma-1)); % Calculate Pt32
        MassFlux32=vpa(A32*Pt32/sqrt(Tt32)*sqrt(gamma/R)*M32*(1+(gamma-1)/2*M32^2)^(-
(gamma+1)/2*(gamma-1))); % Calculate Mass flow at 32
        error(n)=MassFlux-MassFlux32; % Calculating the difference between the two equal mass flow
    end

    Indexofmin=index(abs(error)==min(abs(error))); % Find minimum error
    Cpideal=Cpideal(Indexofmin) % Cpideal at minimum error
    A32=A31*sqrt(1/(1-Cpideal)); % Aera at 3.2
    AR=A32/A31; % Fraction of Areas of the diffusers
    hd=(h_str_wall*(AR)*(1-AM)+2*(AM*AR-1))/(AR^2-1) % effience of diffuser
    Cp=Cpideal*hd; % Cp of diffuser
    DPst=Cp*Pdyn31; % Change of Static Pressure [Pa]
    P32=P31+DPst; % Static Pressure at 3.2 [Pa]
    Pt32=P32*(1+(gamma-1)/2*M32^2)^(gamma/(gamma-1)); % Total Pressure at 3.2 [Pa]
    T32=Tt32*(P32/Pt32)^((gamma-1)/(gamma)); % Temperature at 3.2 [K]
    U32=M32*sqrt(gamma*R*T32); % Speed at 3.2 [m^2/s]
    dens32=P32/R/T32 % Density at 3.2 [Kg/m^3]

    %Diffuser geometry
    A32=A31*sqrt(1/(1-Cpideal)); % Aera at 3.2 [m^2]
    HM=AM*A31/2/pi/rm; % Height of diffuser at the end of the flat wall diffuser [m]
    HR=A32/2/pi/rm ; % Height at the outlet of the dump diffuser [m]
    Lflat=(HM-H1)/(2*tan(TwoTheta/2*pi/180)); % Length of flat wall diffuser [m]
    Ldump=HR-HM ; % Length of diffuser Diffuser [m]
    Ldiff=Lflat+Ldump; % Length of the Diffuser [m]
end

%values of the function we want for the next step of the preliminary design
Diffexit=HR;
Diffexit(2)=Ldiff;
Diffexit(3)=Pt32;
Diffexit(4)=P32;
Diffexit(5)=dens32
Diffexit(6)=A31
% Results written on a file.
fileID=fopen('Diffresults.txt','w')
fprintf(fileID,'          Results of the Diffuser\n')
fprintf(fileID,'%f !Length of the diffuser [m] \n',Ldiff)
fprintf(fileID,'%f !Total Pressure at the exit of the combustor [Atm] \n',Pt32/10^5)
fprintf(fileID,'%f !Height at the exit of the diffuser [m] \n',HR)
end

```


8.1.2 Κώδικας 3^{ου} Κεφαλαίου

Ο κώδικας του 3^{ου} Κεφαλαίου είναι αυτός για τους χαμηλούς ρύπους. Παρομοίως χρησιμοποιήθηκε Matlab. Σαν είσοδο δέχεται δύο αρχεία τα:

Πίνακας 8.3: Ονομασία αρχείων εισόδου αλγόριθμου χαμηλών ρύπων

Ονομασία	Σκοπός
lsecdata.txt	Δεδομένα για την δευτερεύουσα ζώνη
lpridata.txt	Δεδομένα για την πρωτεύουσα ζώνη

Σαν έξοδο παράγονται τα εξής αρχεία:

Πίνακας 8.4: Ονομασία αρχείων εξόδου αλγόριθμου χαμηλών ρύπων

Ονομασία	Σκοπός
lsecResults.txt	Αποτελέσματα για την δευτερεύουσα ζώνη
lpriResults.txt	Αποτελέσματα για την πρωτεύουσα ζώνη

Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας:

```
% Preliminary design for low emissions from Mellor

clc
clear
%Secondary Zone Algorithm
% This part of the code calculates the length of the secondary zone
% also it calculates the diameter and number of the secondary zone holes
% This algorithm is based upon the paper <<Turbine Combustor Preliminary
% Design Approach>> from A. M. Mellor* and K. J. Fritskyt>
lsecData= load('lsecdata.txt') ;
NoxEi=lsecData(1); %Nox Emission Design Point in g/Kg
Delta=lsecData(2); %liner diameter or annulus height in [cm]
Acomb=pi/4*Delta^2 ; % combustor cross-sectional area [cm^2]
lcomb=lsecData(3) ; %length of combustor [cm]
ma=lsecData(4); %Inlet mass flow at design point [Kg/s]
Pin=lsecData(5); %Inlet pressure at design point [Pa]
Tin=lsecData(6) ; %Inlet temperature at design point [K]
Apri=lsecData(7); % Total Area of primary holes [cm^2]
Asec=lsecData(8);% Total Area of secondary holes [cm^2]
nsec=lsecData(9); %Number of secondary holes [-]
dsec=sqrt(Asec*4/pi/nsec) ;%Diameter of secondary holes [cm]
mno=lsecData(10); %constant
bno=lsecData(11); %constant
E=lsecData(12)/1000*4184; %activation Energy [Kj/cal/K]
T_f1=lsecData(13) ; %adiabatic stoichiometric flame temperature [k]
MethodologyforVf=lsecData(14);
if MethodologyforVf==1
ma_PZ=lsecData(15); % fraction of mass airflow in primary zone [-]
else
beta0=lsecData(16)*pi/180 ; %angle of air injection measured perpendicular to combustor
centerline
k=0.5*(Tin/T_f1)^0.5*cos(beta0); % fraction of secondary holes
ma_PZ=(Apz+k*Asec)/(Apz+Asec); % fraction of massairflow in primary zone
end
V_f1=ma_PZ*ma*287*T_f1/(pi/4)/Pin/Delta^2*1000;%ma_PZ/ma*T_f1/Tin*Vref % Variable for
designing
theta=lsecData(17)*pi/180;
syms lsec
```

```

eqn=NoxEi== mno*((lsec/cos(theta))^-1+DeltaD^(-1))^(-1)/V_f1/(10^(-
15)*exp(135000*4.184/8.134/T_f1))+bno;% Equation to calculate lsec/costh
lsec=double(solve(eqn,lsec)); % length of secondary zone in [cm]

fileID=fopen('lsecResults.txt','w');
fprintf(fileID,'          Results of the Secondary zone\n');
fprintf(fileID,'%f !Lenght of the secondary zone [cm] \n',lsec);
fprintf(fileID,'%f !Diameter of holes in secondary zone [cm] \n',dsec);
fprintf(fileID,'%f !Number of holes in secondary zone [-] \n',nsec);

%Primary Zone Algorithm
% This part of the code calculates the length of the primary zone
% also it calculates the diameter and number of the primary zone holes
lpriData=load('lpriData.txt');

COEI =lpriData(1); % CO goals at idle [g/Kg]
ma=lpriData(2); %Inlet mass flow at design point [Kg/s]
Pin=lpriData(3); %Inlet pressure at design point [Pa]
Tin=lpriData(4); %Inlet temperature at design point [K]
Tout=lpriData(5); %Temperature at the exit of the combustor
E=lpriData(6); % variable
Vref=287*ma*Tin/Pin/(Acomb*10^(-4))/10; % Reference speed [cm/s]
mco=lpriData(7); %constant
bco=lpriData(8); %constant
Tmean=(Tout+Tin)/2 ;%mean temperature
syms lpri
R=8.134;
eqn=COEI==mco*(10^(-3)*exp(E/R/Tmean))/((lpri/cos(theta))^-1+DeltaD^(-1))^(-1)*Vref+bco; %to
calculate lpri
lpri=double(solve(eqn,lpri)); % length of primary zone in [cm]

Adome=lpriData(9); % Area of dome holes
dpri=lpriData(10); % diameter of primary holes
npri=(Apri-Adome)/(pi/4*dpri^2); % number of primary holes

fileID=fopen('lpriResults.txt','w');
fprintf(fileID,'          Results of the Primary zone\n');
fprintf(fileID,'%f !Lenght of the primary zone [cm] \n',lpri);
fprintf(fileID,'%f !Diameter of holes in primary zone [cm] \n',dpri);
fprintf(fileID,'%f !Number of holes in primary zone [-] \n',npri);
    
```

8.2 Αλληλεπίδραση με Cantera

Για το Cantera: Αρχικά τα αποτελέσματα που λαμβάνονται ή τα δεδομένα εισάγονται το αρχείο εισόδου του Cantera (dfile) (Κεφάλαιο 4). Στη συνέχεια ανοίγουμε την εφαρμογή Windows PowerShell. Μετέπειτα με την χρήση της εντολής *cd* κατευθυνόμαστε στον φάκελο που βρίσκεται το εκτελέσιμο (.exe) του Cantera. Στην συνέχεια με την εντολή *./burner.exe* τρέχουμε τον κώδικα. Στην συνέχεια στο παράθυρο του PowerShell εμφανίζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης.

Όταν το Cantera μοντελοποίηση την καύση από τα αποτελέσματα επιλέγουμε την θερμοκρασία T_{PZ} και την ανανεώνουμε στο αντίστοιχο αρχείο εισόδου του κώδικα. Αυτή μέθοδος επαναλαμβάνεται μέχρι την σύγκλιση του T_{PZ} . Ο χρόνος υλοποίησης της κάθε μοντελοποίησης της καύσης είναι 20 με 30 δευτερόλεπτα σε επεξεργαστή Intel i5-10400, 2.90 GHz και 16.0 GB RAM.

Η είσοδος είναι το αρχείο με το όνομα dfile και έχει την εξής μορφή:

```

*dfile - Notepad
File Edit Format View Help
// keroZones thermochemical burner model input data file
//
lowHeatValue      -42.8;
Aref              0.1503;
length           0.2217;
timeSteps        18000;
timeFinal        0.5;

ptin             29.05;
Ttin            836.68;
mair            47.21;
FAR            0.0279;

airRatioPri      0.41;
airRatioSec      0.11;
airRatioDil      0.48;

lengthRatioPri   0.245147;
lengthRatioSec   0.2986;
lengthRatioDil   0.440932;

useIgniter       1;
genCharts        0;
    
```

Σχήμα 8.4: Αρχείο εισόδου για το Cantera

Στον Πίνακα 4.3 επεξηγείτε η ονομασία της κάθε μεταβλητής.

Η έξοδος του Cantera είναι αυτή του επόμενου σχήματος.

```

> Time = 0.5 [s]
> FARst = 0.0681476
> FAR = 0.0188
> LHV = 4.44063e+07 [J/kg]
> nbThermo = 0.993452
> nbCO = 0.994156
> rhoIn = 6.6545 [kg/m^3]
> rhoOut = 1.34826 [kg/m^3]
PRIMARY ZONE:
> Tpri = 2488.59 [K]
> Ppri = 10.0371 [bar]
> mpri = 19.0603 [kg/s]
> phiPri = 1.13855
SECONDARY ZONE:
> Tsec = 2441.73 [K]
> Psec = 10.6415 [bar]
> msec = 24.0462 [kg/s]
> phiSec = 0.88819
DILUTION ZONE:
> Tdil = 1345.39 [K]
> Pdil = 11.9807 [bar]
> mdil = 74.3724 [kg/s]
> phiDil = 0.275872
-----
Emissions at steady:
xFuel,      xO2,      xCO2,      xH2O,      xCO,      xOH,      xH,      xC2H6,      xNO2,      xNO,      xN2
2.04988e-20, 0.150024, 0.0372762, 0.0388784, 0.000472211, 3.64504e-05, 5.63784e-08, 9.48919e-17, 7.30412e-05, 0.000561324, 0.772662,
Ignition time = 0.497 seconds
    
```

Σχήμα 8.5: Έξοδος Cantera

Στον επόμενο πίνακα ακολουθούν και οι επεξηγήσεις για την έξοδο του Cantera

Πίνακας 8.5: Ονομασία και περιγραφή μεταβλητών εξόδου του Cantera

Ονομασία	Περιγραφή
FAR_{st}	Στοιχειομετρικό FAR
FAR	FAR
LHV	Κατώτατη θερμογόνος δύναμη
$nbThermo$	Θερμικός βαθμός απόδοσης
$hbCO$	Βαθμός απόδοσης CO
$rhoIn$	Πυκνότητα εισόδου στον θάλαμο καύσης
$rhoOut$	Πυκνότητα εξόδου στον θάλαμο καύσης
$Tpri$	Θερμοκρασία εξόδου της πρωτεύουσας ζώνης
$Ppri$	Πίεση εξόδου της πρωτεύουσας ζώνης
$mPri$	Παροχή μάζας στην έξοδο της πρωτεύουσας ζώνης
$phiPri$	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη
$Tsec$	Θερμοκρασία εξόδου της δευτερεύουσας ζώνης
$Psec$	Πίεση εξόδου της δευτερεύουσας ζώνης
$mSec$	Παροχή μάζας στην έξοδο της δευτερεύουσας ζώνης
$phiSec$	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου αέρα στην δευτερεύουσα ζώνη
$Tdil$	Θερμοκρασία εξόδου της ζώνης
$Pdil$	Πίεση εξόδου της ζώνης αραιώσης
$mDil$	Παροχή μάζας στην έξοδο της ζώνης αραιώσης
$phiDil$	Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου αέρα στην ζώνη αραιώσης
$xEmission$	Mol καυσαερίων ανά mol αέρα

9. Παράρτημα Γ. Αρχεία εισόδου και εξόδου για τις περιπτώσεις εφαρμογής που παρουσιάστηκαν στην εργασία

Σε αυτό το παράρτημα θα παρουσιαστούν τα αρχεία εισόδου και αρχεία εξόδου για τις εφαρμογές που παρουσιάστηκαν. Ο παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί με την σειρά που έχουν οι εφαρμογές στην εργασία.

9.1 Αρχεία για J79 (2.11.1)

9.1.1 Αρχεία εισόδου

Ακολουθούν τα αρχεία εισόδου

```
*Diff - Notepad
File Edit Format View Help
0.312 %rh in [m]
0.356 %rt in [m]
0.1 % Mach at Station3.2 0.05<=M<=0.1
73.0 % Mass Flux at 3.1 in [kg/s]
662.15 % Tt at 3.1 in [K]
12.0 % Pt at 3.1 in [Atm]
3.83 % Ar_sweet of the Diffuser
10.0 % 2θ angle of straight wall diffuser (Degrees)
1069 % Cp at Tt31 [J/Kg/K]
0.0 % boolean in case + dump is chosen (1 if dump is chosen)
```

Σχήμα 9.1: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του διαχύτη

```
*FlowPartition - Notepad
File Edit Format View Help
1.3711 % mf fuel mass flow [Kg/s]
0 % Boolean (0 if we know Tt4, 1 if we want to calculate it from mf with the approximative equation)
1279.15 % Tt4 combustor exit tperature [K]
0.0685 % Stoichiometric ratio of the fuel [-]
4 % Ratio of Tg/Tt31 [-]
0.78 % epz []
6 % 6 for film cooling, 20 for effusion or transpiration cooling
1228 % Tm temperature the the liner temperature can withstand [K]
1157 % Cpt of fuel in [J/Kg/Kj]
42.8% Hu of fuel in [kJ/Kg]
```

Σχήμα 9.2: Αρχείο εισόδου για τον διαχωρισμό των ροών

```

Areas - Notepad
File Edit Format View Help
20 % ΔPL/qref from Lefebvre [-]
0.05 % Total Pressure loss ΔP34/P3 [%]
0 % Boolean for Aref (0 for Lefebvre, 1 for Fletcher)
1 % Boolean for AL (0 for lefebvre, 1 for Mattingly)
0.45 % λ constant from Lefebvre 0.15 for aerodynamic clean diffuser, 0.45 for dump
0.1 % Mach number at the annular Fletcher recommends the value of 0.1
    
```

Σχήμα 9.3: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό των εμβαδών και των υψών

```

*Snout - Notepad
File Edit Format View Help
0.66666 % Lenght of the diffuser in which the snout starts
1 % Discharge coefficient 1 for uniform flow
    
```

Σχήμα 9.4: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του ρύγχος

```

*Swirler - Notepad
File Edit Format View Help
45 % βsw swirler vanes angle in [^o] its recommended value its between 30 and 60
1.3 % Ksw coefficient of swirler 1.15 for curved 1.3 for straight
0.11 % Fraction of total flow entering the swirler, usual values are between 3 % and 12 %
0.06666 % Ratio of atomizer radius to reference diameter, value varie between 5% and 7.5 %
1 % vane thickness in [mm], values varie between 0.7mm to 1.5mm
12 % number of vanes, values between
    
```

Σχήμα 9.5: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του συστροφέα

```

*Dome - Notepad
File Edit Format View Help
60 % angle of dome its recommended value is 60 degrees
    
```

Σχήμα 9.6: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του θόλου

```

Zones - Notepad
File Edit Format View Help
0.5 % ratio of Secondary zones length to Liner height
1.5 % Ratio of dilution zone length to Liner height, usually 1.5<LSZ/HL<2
0.60 % Discharge coefficient of holes
1 % 1 for Tubullar, 2 for tubuannular, 3 for annular
10 % number of cans in case of tubuannular and Tubullar
0.20 % Profile factor number
1 % This is for the methodology, (1 uses lefebvre aproximation for the total length, 2 uses only the ratios, 3 uses the loop from sawyer for LDZ
    
```

Σχήμα 9.7: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό των μηκών των ζωνών

9.1.2 Αρχεία εξόδου

Ακολουθούν τα αρχεία εξόδου.

```

*Diffresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of the Diffuser
0.367593 !Length of the diffuser [m]
11.983284 !Total Pressure at the exit of the combustor [Atm]
0.108321 !Height at the exit of the diffuser [m]
    
```

Σχήμα 9.8: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του διαχύτη

```

*Flowresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of flow partition
0.242271 !Primary zone fraction of mass flow [-]
0.068333 !Secondary zone fraction of mass flow [-]
0.270969 !Dilution zone fraction of mass flow [-]
0.418427 !Cooling fraction of mass flow [-]
    
```

Σχήμα 9.9: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα του διαχωρισμού της ροής

```

*Areasresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Areas and heights
0.375071 !Reference Area [m^2]
0.178726 !Reference Diameter [m]
0.258992 !Liner Area [-]
0.123413 !Liner Height [-]
    
```

Σχήμα 9.10: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα γεωμετρικά αποτελέσματα του δακτυλίου και του μανδύα

```

*Snoutresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Snout
0.022086 !Area of the Snout
0.514290 !Dimensioless pressure losses (DPsn/qref)
    
```

Σχήμα 9.11: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του ρύγχος

```

*Swirlerresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Swirler
0.778726 !Swirl Number
0.025675 !Tip radius of the swirler [m]
    
```

Σχήμα 9.12: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του συστροφέα

```

* Zonesresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Zones
0.039988 !Primary zone length [m]
0.071311 !Secondary zone length [m]
0.358236 !Dilution zone length [m]
0.469534 !Total length of the combustor [m]
0.142622 !Liner Height [m] in case the engine was tubullar or tubuannular
0.171633 !Reference Diameter [m] in case the engine was tubullar or tubuannular
    
```

Σχήμα 9.13: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των εσωτερικών περιοχών του μανδύα

9.2 Αρχεία για τον κινητήρα CFM56 (2.11.2)

9.2.1 Αρχεία εισόδου για την μέθοδο του Lefebvre κατά την απογείωση

Ακολουθούν τα αρχεία εισόδου για την μέθοδο του Lefebvre, για σημείο σχεδιασμού την απογείωση.

```
*Diff - Notepad
File Edit Format View Help
0.2671 %rh in [m]
0.2886 %rt in [m]
0.075 % Mach at Station3.2 0.05<=M<=0.1
47.21 % Mass Flux at 3.1 in [kg/s]
836.68 % Tt at 3.1 in [K]
29.13 % Pt at 3.1 in [Atm]
1.5 % Ar_sweet of the Diffuser
10.0 % 2θ angle of straight wall diffuser (Degrees)
1116 % Cp at Tt31 [J/Kg/K]
0.0 % boolean in case + dump is chosen (1 if dump is chosen)
```

Σχήμα 9.14: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του διαχύτη

```
*FlowPartition - Notepad
File Edit Format View Help
1.3162 % mf fuel mass flow [Kg/s]
0 % Boolean (0 if we know Tt4, 1 if we want to calculate it from mf with the approximative equation)
1750 % Tt4 combustor exit tperature [K]
0.0685 % Stoichiometric ratio of the fuel [-]
3.2 % Ratio of Tg/Tt31 [-]
0.78 % epz []
6 % 6 for film cooling, 2θ for effusion or transpiration cooling
1460 % Tm temperature the the liner temperature can withstand [K]
1157 % Cpt of fuel in [J/Kg/Kj]
42.8% Hu of fuel in [kJ/Kg]
```

Σχήμα 9.15: Αρχείο εισόδου για τον διαχωρισμό των ροών

```
*Areas - Notepad
File Edit Format View Help
35 % ΔPL/qref from Lefebvre [-]
0.05 % Total Pressure loss ΔP34/P3 [%]
0 % Boolean for Aref (0 for Lefebvre, 1 for Fletcher)
1 % Boolean for AL (0 for lefebvre, 1 for Mattingly)
0.45 % λ constant from Lefebvre 0.15 for aerodynamic clean diffuser, 0.45 for dump
0.1 % Mach number at the annular Fletcher recommends the value of 0.1
```

Σχήμα 9.16: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό των εμβαδών και των υψών

```
*Snout - Notepad
File Edit Format View Help
0.66666 % Lenght of the4 diffuser in which the snout starts
1 % Discharge coefficient 1 for uniform flow
```

Σχήμα 9.17: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του ρύγχος

*Swirler - Notepad

File Edit Format View Help

60 % βsw swirler vanes angle in [$^{\circ}$] its recommended value its between 30 and 60
 1.3 % Ksw coefficient of swirler 1.15 for curved 1.3 for straight
 0.12 % Fraction of total flow entering the swirler, usual values are between 3 % and 12 %
 0.0666 % Ratio of atomizer radius to reference diameter, value varie between 5% and 7.5 %
 1.2 % vane thickness in [mm], values varie between 0.7mm to 1.5mm
 12 % number of vanes, values between

Σχήμα 9.18: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του συστροφέα

*Dome - Notepad

File Edit Format View Help

60 % angle of dome its recommended value is 60 degrees

Σχήμα 9.19: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του θόλου

Zones - Notepad

File Edit Format View Help

0.5 % ratio of Secondary zones length to Liner height
 1.5 % Ratio of dilution zone length to Liner height, usually $1.5 \times LSZ / HL \times 2$
 0.60 % Discharge coefficient of holes
 3 % 1 for Tubullar, 2 for tubuannular, 3 for annular
 10 % number of cans in case of tubuannular and Tubullar
 0.20 % Profile factor number
 1 % This is for the methodology, (1 uses lefebvre aproximation for the total length, 2 uses only the ratios, 3 uses the loop from sawyer for LDZ

Σχήμα 9.20: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό των μηκών των ζωνών

9.2.2 Αρχεία εξόδου για την μέθοδο του Lefebvre κατά την απογείωση

*Diffresults - Notepad

File Edit Format View Help

Results of the Diffuser

0.081641 !Length of the diffuser [m]
 29.044432 !Total Pressure at the exit of the combustor [Atm]
 0.052455 !Height at the exit of the diffuser [m]

Σχήμα 9.21: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του διαχύτη

*Flowresults - Notepad

File Edit Format View Help

Results of flow partition

0.387022 !Primary zone fraction of mass flow [-]
 0.109160 !Secondary zone fraction of mass flow [-]
 0.178310 !Dilution zone fraction of mass flow [-]
 0.325509 !Cooling fraction of mass flow [-]

Σχήμα 9.22: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα του διαχωρισμού της ροής

```

*Areasresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Areas and heights
0.148589 !Reference Area [m^2]
0.085113 !Reference Diameter [m]
0.109280 !Liner Area [-]
0.062597 !Liner Height [-]
    
```

Σχήμα 9.23: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα γεωμετρικά αποτελέσματα του δακτυλίου και του μανδύα

```

*Snoutresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Snout
0.010481 !Area of the Snout
0.685876 !Dimensionless pressure losses (DPsn/qref)
    
```

Σχήμα 9.24: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του ρύγχος

```

*Swirlerresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Swirler
1.342944 !Swirl Number
0.013920 !Tip radius of the swirler [m]
    
```

Σχήμα 9.25: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του συστροφέα

```

* Zonesresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Zones
0.037388 !Primary zone length [m]
0.031298 !Secondary zone length [m]
0.101556 !Dilution zone length [m]
0.170243 !Total length of the combustor [m]
    
```

Σχήμα 9.26: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των εσωτερικών περιοχών του μανδύα

9.2.3 Αρχεία εισόδου για την μέθοδο του Fletcher κατά την απογείωση

```

*Diff - Notepad
File Edit Format View Help
0.2671 %rh in [m]
0.2886 %rt in [m]
0.075 % Mach at Station3.2 0.05<=M<=0.1
47.21 % Mass Flux at 3.1 in [kg/s]
836.68 % Tt at 3.1 in [K]
29.13 % Pt at 3.1 in [Atm]
1.5 % Ar_sweet of the Diffuser
10.0 % 2θ angle of straight wall diffuser (Degrees)
1116 % Cp at Tt31 [J/Kg/K]
0.0 % boolean in case + dump is chosen (1 if dump is chosen)
    
```

Σχήμα 9.27: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του διαχύτη

*FlowPartition - Notepad

```
File Edit Format View Help
1.3162 % mf fuel mass flow [Kg/s]
0 % Boolean (0 if we know Tt4, 1 if we want to calculate it from mf with the approximative equation)
1750 % Tt4 combustor exit ttemperature [K]
0.0685 % Stoichiometric ratio of the fuel [-]
3.2 % Ratio of Tg/Tt31 [-]
0.78 % epz []
6 % 6 for film cooling, 20 for effusion or transpiration cooling
1460 % Tm temperature the the liner temperature can withstand [K]
1157 % Cpt of fuel in [J/Kg/Kj]
42.8% Hu of fuel in [kJ/Kg]
```

Σχήμα 9.28: Αρχείο εισόδου για τον διαχωρισμό των ροών

Areas - Notepad

```
File Edit Format View Help
35 % ΔPL/qref from Lefebvre [-]
0.05 % Total Pressure loss ΔP34/P3 [%]
1 % Boolean for Aref (0 for Lefebvre, 1 for Fletcher)
1 % Boolean for AL (0 for lefebvre, 1 for Mattingly)
0.45 % λ constant from Lefebvre 0.15 for aerodynamic clean diffuser, 0.45 for dump
0.1 % Mach number at the annular Fletcher recommends the value of 0.1
```

Σχήμα 9.29: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό των εμβαδών και των υψών

*Snout - Notepad

```
File Edit Format View Help
0.66666 % Lenght of the4 diffuser in which the snout starts
1 % Discharge coefficient 1 for uniform flow
```

Σχήμα 9.30: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του ρύγχος

*Swirler - Notepad

```
File Edit Format View Help
60 % βsw swirler vanes angle in [°] its recommended value its between 30 and 60
1.3 % Ksw coefficient of swirler 1.15 for curved 1.3 for straight
0.12 % Fraction of total flow entering the swirler, usual values are between 3 % and 12 %
0.0666 % Ratio of atomizer radius to reference diameter, value varie between 5% and 7.5 %
1.2 % vane thickness in [mm], values varie between 0.7mm to 1.5mm
12 % number of vanes, values between
```

Σχήμα 9.31: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του συστροφέα

*Dome - Notepad

```
File Edit Format View Help
60 % angle of dome its recommended value is 60 degrees
```

Σχήμα 9.32: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του θόλου

*Zones - Notepad

```
File Edit Format View Help
0.5 % ratio of Secondary zones length to Liner height
1.5 % Ratio of dilution zone length to Liner height, usually 1.5<LSZ/HL<2
0.60 % Discharge coefficient of holes
3 % 1 for Tubullar, 2 for tubuannular, 3 for annular
10 % number of cans in case of tubuannular and Tubullar
0.20 % Profile factor number
2 % This is for the methodology, (1 uses lefebvre aproximation for the total length, 2 uses only the ratios, 3 uses the loop from sawyer for LDZ)
```

Σχήμα 9.33: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό των μηκών των ζωνών

9.2.2 Αρχεία εξόδου για την μέθοδο του Fletcher κατά την απογείωση

```
*Diffresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of the Diffuser
0.081641 !Length of the diffuser [m]
29.044432 !Total Pressure at the exit of the combustor [Atm]
0.052455 !Height at the exit of the diffuser [m]
```

Σχήμα 9.34: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του διαχύτη

```
*Flowresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of flow partition
0.387022 !Primary zone fraction of mass flow [-]
0.109160 !Secondary zone fraction of mass flow [-]
0.178310 !Dilution zone fraction of mass flow [-]
0.325509 !Cooling fraction of mass flow [-]
```

Σχήμα 9.35: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα του διαχωρισμού της ροής

```
*Areasresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Areas and heights
0.210526 !Reference Area [m^2]
0.120591 !Reference Diameter [m]
0.154833 !Liner Area [-]
0.088690 !Liner Height [-]
```


Σχήμα 9.36: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα γεωμετρικά αποτελέσματα του δακτυλίου και του μανδύα

```
*Snoutresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Snout
0.010481 !Area of the Snout
0.685876 !Dimensionless pressure losses (DPsn/qref)
```

Σχήμα 9.37: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του ρύγχος

```
*Swirlerresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Swirler
1.379399 !Swirl Number
0.016814 !Tip radius of the swirler [m]
```

Σχήμα 9.38: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του συστροφέα


 * Zonesresults - Notepad

File Edit Format View Help

```
Results of Zones
0.046387 !Primary zone length [m]
0.044345 !Secondary zone length [m]
0.133034 !Dilution zone length [m]
0.223766 !Total length of the combustor [m]
```

Σχήμα 9.39 Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των εσωτερικών περιοχών του μανδύα


9.2.3 Αρχεία εισόδου για την μέθοδο του Fletcher κατά την πλεύση

 *Diff - Notepad

File Edit Format View Help

```
0.2671 %rh in [m]
0.2886 %rt in [m]
0.075 % Mach at Station3.2 0.05<=M<=0.1
17.35 % Mass Flux at 3.1 in [kg/s]
686.86 % Tt at 3.1 in [K]
9.67 % Pt at 3.1 in [Atm]
1.5 % Ar_sweet of the Diffuser
10.0 % 2θ angle of straight wall diffuser (Degrees)
1084 % Cp at Tt31 [J/Kg/K]
0.0 % boolean in case + dump is chosen (1 if dump is chosen)
```


Σχήμα 9.40: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του διαχύτη

 *FlowPartition - Notepad

File Edit Format View Help

```
0.3844 % mf fuel mass flow [Kg/s]
0 % Boolean (0 if we know Tt4, 1 if we want to calculate it from mf with the approximative equation)
1455 % Tt4 combustor exit tmeperature [K]
0.0685 % Stoichiometric ratio of the fuel [-]
3.2 % Ratio of Tg/Tt31 [-]
0.78 % epz []
6 % 6 for film cooling, 20 for effusion or transpiration cooling
1460 % Tm temperature the the liner temperature can withstand [K]
1157 % Cpt of fuel in [J/Kg/Kj]
42.8% Hu of fuel in [kJ/Kg]
```


Σχήμα 9.41: Αρχείο εισόδου για τον διαχωρισμό των ροών

 Areas - Notepad

File Edit Format View Help

```
35 % ΔPL/qref from Lefebvre [-]
0.05 % Total Pressure loss ΔP34/P3 [%]
1 % Boolean for Aref (0 for Lefebvre, 1 for Fletcher)
1 % Boolean for AL (0 for lefebvre, 1 for Mattingly)
0.45 % λ constant from Lefebvre 0.15 for aerodynamic clean diffuser, 0.45 for dump
0.1 % Mach number at the annular Fletcher recommends the value of 0.1
```


Σχήμα 9.42: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα γεωμετρικά αποτελέσματα του δακτυλίου και του μανδύα

 *Snout - Notepad

File Edit Format View Help

```
0.66666 % Length of the diffuser in which the snout starts
1 % Discharge coefficient 1 for uniform flow
```


Σχήμα 9.43: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του ρύγχος

 *Swirler - Notepad

File Edit Format View Help

```
60 % βsw swirler vanes angle in [°] its recommended value its between 30 and 60
1.3 % Ksw coefficient of swirler 1.15 for curved 1.3 for straight
0.12 % Fraction of total flow entering the swirler, usual values are between 3 % and 12 %
0.0666 % Ratio of atomizer radius to reference diameter, value varies between 5% and 7.5 %
1.2 % vane thickness in [mm], values vary between 0.7mm to 1.5mm
12 % number of vanes, values between
```

Σχήμα 9.44: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του συστροφέα

 *Dome - Notepad

File Edit Format View Help

```
60 % angle of dome its recommended value is 60 degrees
```

Σχήμα 9.45: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό του θόλου

 *Zones - Notepad

File Edit Format View Help

```
0.5 % ratio of Secondary zones length to Liner height
1.5 % Ratio of dilution zone length to Liner height, usually 1.5<LSZ/HL<2
0.60 % Discharge coefficient of holes
3 % 1 for Tubular, 2 for tubuannular, 3 for annular
10 % number of cans in case of tubuannular and Tubular
0.20 % Profile factor number
2 % This is for the methodology, (1 uses lefebvre approximation for the total length, 2 uses only the ratios, 3 uses the loop from sawyer for LDZ)
```

Σχήμα 9.46: Αρχείο εισόδου για τον υπολογισμό των μηκών των ζωνών

9.2.3 Αρχεία εξόδου για την μέθοδο του Fletcher κατά την πλεύση

```

*Diffresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of the Diffuser
0.081486 !Length of the diffuser [m]
9.641788 !Total Pressure at the exit of the combustor [Atm]
0.052299 !Height at the exit of the diffuser [m]
    
```

Σχήμα 9.47: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του διαχύτη

```

*Flowresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of flow partition
0.396501 !Primary zone fraction of mass flow [-]
0.111834 !Secondary zone fraction of mass flow [-]
0.332584 !Dilution zone fraction of mass flow [-]
0.159081 !Cooling fraction of mass flow [-]
    
```

Σχήμα 9.48: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα του διαχωρισμού της ροής

```

*Areasresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Areas and heights
0.171603 !Reference Area [m^2]
0.098296 !Reference Diameter [m]
0.116351 !Liner Area [-]
0.066647 !Liner Height [-]
    
```

Σχήμα 9.49: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα γεωμετρικά αποτελέσματα του δακτυλίου και του μανδύα

```

*Snoutresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Snout
0.010731 !Area of the Snout
0.792573 !Dimensionless pressure losses (DPsn/qref)
    
```

Σχήμα 9.50: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του ρύγχος

```
*Swirlerresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Swirler
1.355262 !Swirl Number
0.015113 !Tip radius of the swirler [m]
```

Σχήμα 9.51: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από την διαστασιολόγηση του συστροφέα

```
* Zonesresults - Notepad
File Edit Format View Help
Results of Zones
0.040965 !Primary zone length [m]
0.033323 !Secondary zone length [m]
0.099970 !Dilution zone length [m]
0.174258 !Total length of the combustor [m]
```

Σχήμα 9.52: Αρχείο εξόδου που περιέχει τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των εσωτερικών περιοχών του μανδύα