



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Εκτίμηση Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών Θαλάμου Καύσης Αεροπορικού Κινητήρα με Χρήση Εμπειρικών Σχέσεων

Διπλωματική Εργασία

Εμμανουήλ Ν. Κονταράτου

Επίβλεψη: **Κ. ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ**

ΑΘΗΝΑ
Φεβρουάριος 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία στόχος είναι να εκτιμηθούν κάποια βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θαλάμου καύσης αεροπορικού κινητήρα. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο, το οποίο υπολογίζει κάποια μεγέθη του θαλάμου με χρήση εμπειρικών σχέσεων.

Αρχικά, στα πρώτα κεφάλαια, παρουσιάζονται βασικά στοιχεία και πληροφορίες για τους θαλάμους καύσης, τα είδη τους και το σκοπό τον οποίο εξυπηρετούν. Στη συνέχεια αναφέρονται οι εμπειρικές σχέσεις και οι μέθοδοι οι οποίες μας βοηθούν να εκτιμήσουμε τη γεωμετρία του θαλάμου. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το αναπτυχθέν μοντέλο καθώς και οι παραδοχές που έγιναν.

Προχωρώντας, δίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για δύο θαλάμους καύσης αεροπορικών κινητήρων, του J79 και του J85. Αν και συγκρινόμενα με τα πραγματικά μεγέθη, έχουν αισθητές αποκλίσεις, φαίνεται πως είναι εφικτή τουλάχιστον η εκτίμηση της τάξης μεγέθους των κύριων διαστάσεων.

Τέλος, έγινε ανάλυση ευαισθησίας για τα μεγέθη που υπολογίζουμε, ως προς κάποιες παραμέτρους που ουσιαστικά καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό και επιπρόσθετα ακολουθήθηκε μια διαδικασία αντίστροφου σχεδιασμού, έτσι ώστε να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων που δίνουν τα επιθυμητά μεγέθη.

ABSTRACT

The primary aim of this diploma thesis is to estimate basic geometric features of combustion chamber of aircraft engine using overall engine performance data (air and fuel mass flow rate, combustor inlet pressure and temperature, combustor exhaust gas temperature). Therefore, a model was developed, using publicly available equations that came up from experiments and former data, in order to calculate the geometry of the chamber.

At the first chapters, generic information about the type, the operation and the purpose that combustors serve, are presented. Moreover, there are all the empirical equations and methods that help us to specify the geometry of the chamber. Also, the way the model works and the assumptions made are demonstrated.

In addition, the obtained results are given for the combustors of two engines, the J79 and the J85. Although there are substantial differences compared with the real sizes, it seems at least that it is possible to estimate approximately the main combustor dimensions.

Furthermore, sensitivity analysis was made so as for us to see the relation among the concerning features and some parameters that largely determine the design. Finally, an optimization procedure was formulated to estimate the values of these parameters from available geometry data that minimize the differences between estimated and actual dimensions.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	v
Abstract.....	vii
Περιεχόμενα.....	ix
1 – Εισαγωγή.....	1
2 – Θάλαμος Καύσης.....	5
2.1 – Σκοπός και Απαιτήσεις.....	5
2.2 – Τυπική Μορφή.....	5
2.3 – Βασικά Μέρη.....	7
2.4 – Ζώνες Θαλάμου Καύσης.....	8
2.4.1 – Πρωτεύουσα Ζώνη.....	8
2.4.2 – Ενδιάμεση Ζώνη.....	9
2.4.3 – Ζώνη Ανάμειξης.....	9
2.5 – Ταξινόμηση Θαλάμων Καύσης.....	10
2.5.1 – Γεωμετρία.....	10
2.5.2 – Αεροδυναμική.....	12
2.5.3 – Εφαρμογή.....	14
2.6 – Βασικά Γεωμετρικά Στοιχεία.....	14
2.6.1 – Μήκος και Βάθος Μανδύα.....	14
2.6.2 – Εγκάρσια Επιφάνεια Διατομής Θαλάμου Καύσης.....	15
2.6.3 – Οπές Μανδύα.....	15
2.6.4 – Διαχύτης.....	15
3 - Εκτίμηση Γεωμετρικών Στοιχείων Θαλάμου Καύσης.....	19
3.1 – Μεγέθη Αναφοράς.....	19
3.2 – Πτώση Πίεσης.....	20
3.3 – Παράμετροι Πτώσης Πίεσης.....	21
3.4 – Μέθοδοι Επιλογής Μεγεθών Αναφοράς.....	22
3.4.1 – Μέθοδος Ταχυτήτων.....	22
3.4.2 – Μέθοδος Απωλειών Πίεσης.....	23
3.5 – Υπολογισμός Βάθους και Μήκους Μανδύα.....	25
3.5.1 – Βάθος.....	25
3.5.2 – Μήκος.....	26
3.6 – Υπολογισμός Οπών Μανδύα.....	27
3.7 – Περιγραφή Αναπτυχθέντος Προγράμματος.....	30
3.7.1 – Δεδομένα Εισόδου.....	31
3.7.2 – Δεδομένα Εξόδου.....	31
3.7.3 – Παραδοχές.....	31
3.7.4 – Λειτουργία του Προγράμματος.....	33
4 - Εφαρμογή σε Αεροπορικούς Κινητήρες.....	35
4.1 – Εκτίμηση Θαλάμου Καύσης Κινητήρα J79.....	35
4.2 – Εκτίμηση Θαλάμου Καύσης Κινητήρα J85.....	38
4.3 – Συμπεράσματα.....	41
5 - Ανάλυση Ευαισθησίας.....	43
5.1 – Ανάλυση Ευαισθησίας για τον J79.....	44
5.1.1 – Μέθοδος Απωλειών πίεσης.....	44
5.1.1.1 – Επίδραση Λόγου Ισοδυναμίας Φ_{pz}	44
5.1.1.2 – Επίδραση Ποσοστού Απωλειών Μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$	46
5.1.1.3 – Επίδραση PF.....	48
5.1.1.4 – Επίδραση Διείσδυσης στο Μανδύα $Y_{max}/Depth$	49

5.1.1.5 – Επίδραση Λόγου Πυκνοτήτων ρ_j/ρ_g	51
5.1.1.6 – Συμπεράσματα.....	52
5.1.2 – Μέθοδος ταχυτήτων.....	53
5.1.2.1 – Επίδραση Λόγου Ισοδυναμίας Φ_{pz}	53
5.1.2.2 – Επίδραση Ποσοστού Απωλειών Μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$	56
5.1.2.3 – Επίδραση PF.....	58
5.1.2.4 – Επίδραση Διείσδυσης στο Μανδύα $Y_{max}/Depth$	59
5.1.2.5 – Επίδραση Λόγου Πυκνοτήτων ρ_j/ρ_g	61
5.1.2.6 – Επίδραση Ταχύτητας Θόλου V_{dome}	63
5.1.2.7 – Επίδραση Ταχύτητας «Περάσματος» $V_{passage}$	65
5.1.2.8 – Συμπεράσματα.....	66
5.2 – Ανάλυση Ευαισθησίας για τον J85.....	68
5.2.1 – Μέθοδος Απωλειών Πίεσης.....	68
5.2.1.1 – Επίδραση Λόγου Ισοδυναμίας Φ_{pz}	68
5.2.1.2 – Επίδραση Ποσοστού Απωλειών Μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$	70
5.2.1.3 – Επίδραση PF.....	72
5.2.1.4 – Επίδραση Διείσδυσης στο Μανδύα $Y_{max}/Depth$	73
5.2.1.5 – Επίδραση Λόγου Πυκνοτήτων ρ_j/ρ_g	75
5.2.1.6 – Συμπεράσματα.....	76
5.2.2 – Μέθοδος Ταχυτήτων.....	77
5.2.2.1 – Επίδραση Λόγου Ισοδυναμίας Φ_{pz}	77
5.2.2.2 – Επίδραση Ποσοστού Απωλειών Μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$	79
5.2.2.3 – Επίδραση PF.....	80
5.2.2.4 – Επίδραση Διείσδυσης στο Μανδύα $Y_{max}/Depth$	81
5.2.2.5 – Επίδραση Λόγου Πυκνοτήτων ρ_j/ρ_g	82
5.2.2.6 – Επίδραση Ταχύτητας Θόλου V_{dome}	84
5.2.2.7 – Επίδραση Ταχύτητας «Περάσματος» $V_{passage}$	86
5.2.2.8 – Συμπεράσματα.....	88
5.3 – Γενικά Συμπεράσματα.....	89
6 - Προσαρμοστική Μέθοδος Εκτίμησης Γεωμετρίας Θαλάμου Καύσης.....	91
6.1 – Βελτιστοποίηση για τον J79.....	93
6.1.1 – Μέθοδος των Απωλειών Πίεσης.....	93
6.1.2 – Μέθοδος των Ταχυτήτων.....	95
6.2 – Βελτιστοποίηση για τον J85.....	96
6.2.1 – Μέθοδος των Απωλειών Πίεσης.....	96
6.2.2 – Μέθοδος των Ταχυτήτων.....	98
6.3 – Συμπεράσματα.....	99
7 – Ανακεφαλαίωση, Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	101
Βιβλιογραφία.....	103
Παράρτημα Ι – Οδηγίες Χρήσης Προγράμματος.....	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως κάθε μηχανολογική κατασκευή έτσι και ο θάλαμος καύσης χρειάζεται προσεκτικό και λεπτομερή σχεδιασμό ώστε να λειτουργεί σωστά και σύμφωνα με τις προδιαγραφές που επιθυμούνται. Αυτό το γεγονός καθιστά απαραίτητο για κάθε μηχανικό που θέλει να ασχοληθεί με αυτό το πεδίο να γνωρίζει κάποια βασικά στοιχεία τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία του σχεδιασμού ενός θαλάμου καύσης.

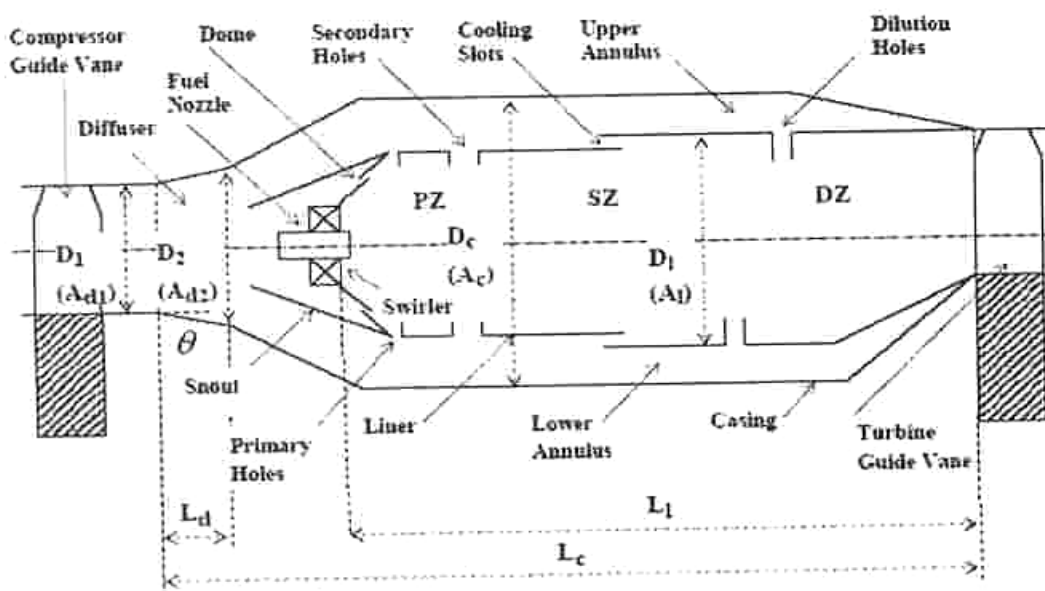
Στις μέρες μας ειδικά, όπου η τεχνολογία των αεροπορικών κινητήρων και των βιομηχανικών αεριοστροβίλων έχει αναπτυχθεί σημαντικά σε όλους τους τομείς, είναι αναγκαίο το να μπορεί να κατασκευάζεται ένας θάλαμος καύσης ο οποίος όχι μόνο θα προσφέρει καλή απόδοση κατά την καύση, αλλά ταυτόχρονα θα μειώνει σε μεγάλο βαθμό τους εκπεμπόμενους ρύπους, το μέγεθος, καθώς και το βάρος της μηχανής.

Παρόλη όμως την εξέλιξη που έχει παρατηρηθεί, αρκετοί θάλαμοι καύσης που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας έχουν αρκετές ομοιότητες με παλαιότερα μοντέλα. Αυτό το γεγονός οφείλεται κατά μείζονα λόγο στο ότι η βασική γεωμετρία του θαλάμου καύσης καθορίζεται κυρίως από την ανάγκη να παραμείνουν μέσα στα όρια που έχουν διαμορφωθεί από άλλες μηχανές, τόσο το μήκος όσο και η μετωπική επιφάνεια. Επιπλέον, από την αναγκαιότητα του διαχύτη να μειώνει όσο το δυνατόν περισσότερο τις απώλειες πίεσης και τέλος από την απαίτηση του φλογομανδύα (liner) να παρέχει σταθερή λειτουργία μέσα σε ένα ευρύ πεδίο λόγου αέρα/καυσίμου. Η διαφορά όμως σε σχέση με το παρελθόν είναι ότι πλέον υπάρχει η δυνατότητα όταν είναι γνωστή μια γεωμετρία να γίνει επίλυση της ροής με κάποιο κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), αντίθετα με παλαιότερα, όπου η δοκιμή της γεωμετρίας που προέκυπτε γινόταν πειραματικά με νερό σε επίπεδα συνήθως ξύλινα μοντέλα [1]. Οπότε, γίνεται αρχικά ένας προκαταρκτικός σχεδιασμός και στη συνέχεια μελετάται με μεγαλύτερη ακρίβεια η απόδοση του θαλάμου προσομοιώνοντας τη λειτουργία του. Εκτός όμως από τα παραπάνω, η γνώση της γεωμετρίας είναι πολύ σημαντική δεδομένου ότι είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις όπου γίνεται έρευνα και ανάπτυξη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, που μπορεί να είναι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, η μελέτη της απόδοσης ή ίσως κάποια ανάλυση ευαισθησίας, η γνώση της γεωμετρίας δίνει τη δυνατότητα να μελετηθούν και να υπολογιστούν δεδομένα που διαφορετικά δεν θα γινόταν.

Οι εργασίες που έχουν γίνει πάνω στο θέμα της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης δεν είναι πολλές. Οι περισσότερες αυτών στηρίζονται σε υπάρχοντα δεδομένα άλλων μηχανών και σε εμπειρικές σχέσεις οι οποίες σε μεγάλο βαθμό προέρχονται από στοιχεία του Arthur H. Lefebvre [2]. Τέτοια είναι και η εργασία του Shakariyants [3] από το πανεπιστήμιο του Delft της Ολλανδίας, η οποία αποτελεί ίσως την πιο σύγχρονη μελέτη και αφορά κυρίως θαλάμους καύσης κινητήρων turbofan δακτυλιοειδούς γεωμετρίας. Επιπλέον, βάσει αυτής της εργασίας, ακολούθησαν και άλλες [4], οι οποίες χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της πρώτης, ασχολήθηκαν με την πρόβλεψη εκπομπής ρύπων και γενικά με τη ρευστοδυναμική μέσα στο θάλαμο.

Έχοντας λοιπόν ως βάση τα εμπειρικά στοιχεία που δίνονται στη βιβλιογραφία, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών θαλάμου καύσης αεροπορικού κινητήρα. Τέτοια γεωμετρικά

χαρακτηριστικά είναι το μήκος (L_1) και το βάθος (D_1) του μανδύα, η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του θαλάμου (A_c) καθώς και το μέγεθος και ο αριθμός των οπών. Κάποια από αυτά εμφανίζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1.1: Γενική μορφή θαλάμου καύσης αεροπορικού κινητήρα [3]

Επιπλέον έγινε προσπάθεια να βρεθούν οι παράμετροι εκείνες που επηρεάζουν περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα. Αυτό έγινε μέσω ανάλυσης ευαισθησίας, η οποία εφαρμόστηκε στους θαλάμους καύσης δύο αεροπορικών κινητήρων, του J79 και του J85. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε μία μέθοδος βελτιστοποίησης, ώστε να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων οι οποίες δίνουν τη γεωμετρία που έχει τα μικρότερα σφάλματα σε σχέση με τον πραγματικό θάλαμο καύσης των κινητήρων.

Για την πραγματοποίηση των παραπάνω αναπτύχθηκε ένας κώδικας σε Fortran 77 ο οποίος παίρνει ως είσοδο στοιχεία της μηχανής και δίνει βασικές πληροφορίες για το μέγεθος και τη μορφή του θαλάμου καύσης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την περάτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής: Αρχικά έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση έτσι ώστε να εντοπιστούν οι εμπειρικές σχέσεις και οι μέθοδοι εκείνες που καθορίζουν το σχεδιασμό. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν και αναπτύχθηκε εφαρμογή η οποία υλοποιεί τις επιλεγμένες μεθόδους. Τέλος εφαρμόστηκε, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για δύο κινητήρες και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πραγματικά.

Όσον αφορά στη δομή του παρόντος κειμένου, αρχικά στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του σκοπού του θαλάμου καύσης, των μερών από τα οποία

αποτελείται, των προδιαγραφών που πρέπει να πληροί καθώς και των διαφόρων τύπων που συναντώνται στις μηχανές. Επιπρόσθετα, γίνεται μια σύντομη αναφορά στους διαχύτες και γενικά στα γεωμετρικά μεγέθη που γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθούν. Τελειώνοντας με το θεωρητικό κομμάτι, στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μέθοδοι και οι σχέσεις με τις οποίες εκτιμώνται τα γεωμετρικά στοιχεία των θαλάμων και περιγράφεται το αναπτυχθέν πρόγραμμα. Προχωρώντας, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας κάποιες τυπικές τιμές για παραμέτρους που δεν καθορίζονται επακριβώς, καθώς και σύγκριση αυτών με τα πραγματικά μεγέθη των θαλάμων. Στο Κεφάλαιο 5 που ακολουθεί παρατίθενται τα διαγράμματα ευαισθησίας για κάποιες παραμέτρους για τους θαλάμους καύσης των δύο κινητήρων. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 αναπτύσσεται μια προσαρμοστική μέθοδος, η οποία μας δίνει τις τιμές των παραμέτρων που έχουν ως αποτέλεσμα τα γεωμετρικά μεγέθη να είναι όσο γίνεται πιο κοντά σε αυτά ενός δεδομένου θαλάμου που επιλέγουμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ

2.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Σκοπός του θαλάμου καύσης είναι να μετατρέψει τη χημική ενέργεια (μείγμα αέρα-καυσίμου) σε θερμική ενέργεια με απώτερο στόχο την ανύψωση της θερμοκρασίας του αέρα που εξέρχεται από το συμπιεστή.

Έτσι, μέσα στο θάλαμο καύσης εισάγεται ο αέρας υψηλής πίεσης, ο οποίος στη συνέχεια αναμειγνύεται με το καύσιμο και μέσω της καύσης που πραγματοποιείται παρέχει ένα μείγμα καυσαερίων που οδηγείται τελικά την είσοδο του στροβίλου.

Η παραπάνω διαδικασία πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του καυσίμου και ταυτόχρονα να μπορούν να τηρούνται κάποιες βασικές προϋποθέσεις όσον αφορά στη λειτουργία της μηχανής.

Συνεπώς ένας σωστά σχεδιασμένος θάλαμος καύσης πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες γενικές απαιτήσεις [1] [2] [5]:

- Υψηλή απόδοση κατά την καύση
- Αξιόπιστη και ομαλή έναυση
- Δυνατότητα επανέναυσης
- Μεγάλο εύρος λειτουργίας (η φλόγα πρέπει να διατηρείται για ένα μεγάλο εύρος μεταβολής της πίεσης, της ταχύτητας και του λόγου αέρα-καυσίμου)
- Χαμηλές απώλειες ολικής πίεσης
- Κατανομή θερμοκρασίας (pattern factor) στην έξοδο του θαλάμου καύσης τέτοια ώστε να διασφαλίζεται τη μέγιστη διάρκεια ζωής των πτερυγίων του στροβίλου
- Χαμηλές εκπομπές αιθάλης, άκαυστων και αέριων ρύπων
- Σχεδιασμός που να ελαχιστοποιεί το κόστος και να διευκολύνει τη συντήρηση της μηχανής
- Μέγεθος και μορφή που να συμβαδίζει με την όλη μηχανή
- Δυνατότητα καύσης διαφόρων καυσίμων

Η δυνατότητα επανέναυσης καθώς και το μεγάλο εύρος λειτουργίας αναφέρονται κυρίως σε αεροπορικούς κινητήρες ενώ η μέγιστη διάρκεια ζωής και η καύση διαφόρων καυσίμων έχει να κάνει βασικά με βιομηχανικούς στροβίλους.

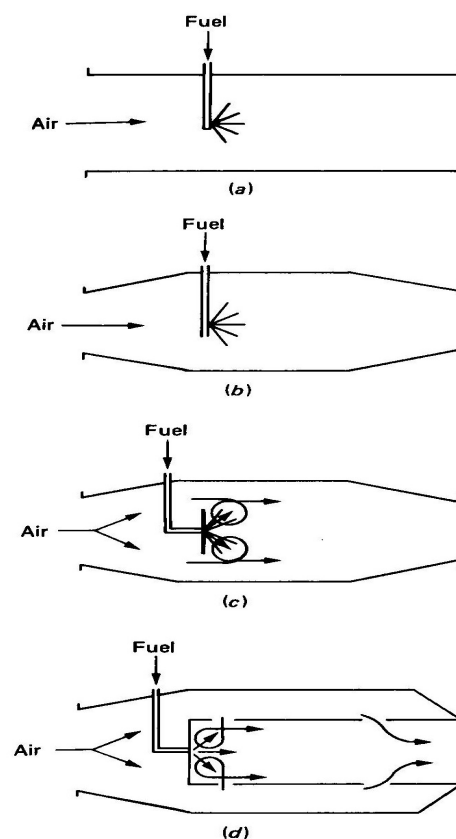
2.2 ΤΥΠΙΚΗ ΜΟΡΦΗ

Αρχικά στο σχήμα 2.1α φαίνεται η απλούστερη μορφή που θα μπορούσε να είχε ο θάλαμος καύσης. Αποτελείται από ευθεία τοιχώματα τα οποία συνδέουν την έξοδο του συμπιεστή με την είσοδο του στροβίλου. Επειδή όμως οι απώλειες πίεσης εξαιτίας της καύσης είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας του αέρα και η ταχύτητα αμέσως μετά το συμπιεστή είναι της τάξεως των 150 m/sec, οι απώλειες αποτελούν ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της συνολικής αύξησης πίεσης που επιτυγχάνεται στο συμπιεστή. Ουσιαστικά αυτή η μορφή θαλάμου καύσης είναι

θεωρητική και δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη. Για να μειωθούν λοιπόν αυτές οι απώλειες πίεσης που αναφέρθηκαν παραπάνω σε ένα αποδεκτό επίπεδο, χρησιμοποιήθηκε στη είσοδο του θαλάμου καύσης ένας διαχύτης ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του αέρα. Η μορφή του θαλάμου με το διαχύτη παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1b

Εκτός όμως από την πτώση πίεσης λόγω της υψηλής ταχύτητας του αέρα, υπήρχαν δύο επιπλέον προβλήματα. Πρώτον, πως θα διατηρηθεί η φλόγα μέσα στο θάλαμο, δεδομένου ότι οι ταχύτητες συνέχιζαν να είναι αρκετά υψηλές και δεύτερον πως θα επιτευχθεί ανάφλεξη όταν ο λόγος αέρα/καυσίμου έπρεπε να είναι περίπου 50 ώστε να παράγεται η επιθυμητή αύξηση της θερμοκρασίας. Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα, αρχικά σχεδιάστηκε ο θάλαμος καύσης του σχήματος 2.1c και στη συνέχεια αυτός του σχήματος 2.1d που αποτελεί μέχρι και σήμερα το βασικό μοντέλο σχεδιασμού. Σε αυτό το θάλαμο καύσης τοποθετήθηκε ένας διάτρητος μανδύας (liner) ο οποίος διατηρεί την καύση δημιουργώντας μια περιοχή ανακυκλοφορίας του αέρα μέσα στην οποία οι ταχύτητες είναι χαμηλές και ο λόγος αέρα/καυσίμου είναι κοντά στο στοιχειομετρικό. Ο αέρας που δεν χρειάζεται για την καύση προστίθεται σταδιακά κατάντι της περιοχής όπου έχουμε τη φλόγα και αναμειγνύομενος με τα καυσαέρια που έχουν πολύ υψηλή θερμοκρασία, μειώνει την τελική τους θερμοκρασία σε επίπεδα που μπορούν να γίνουν αποδεκτά από το στρόβιλο.

Στην πράξη, μεταξύ της ζώνης που πραγματοποιείται η καύση (primary zone) και της ζώνης όπου γίνεται η ανάμειξη (dilution zone) υπάρχει η ενδιάμεση ζώνη (intermediate zone) της οποίας ο ρόλος όπως και των δύο προηγούμενων θα αναπτυχθεί περισσότερο παρακάτω.



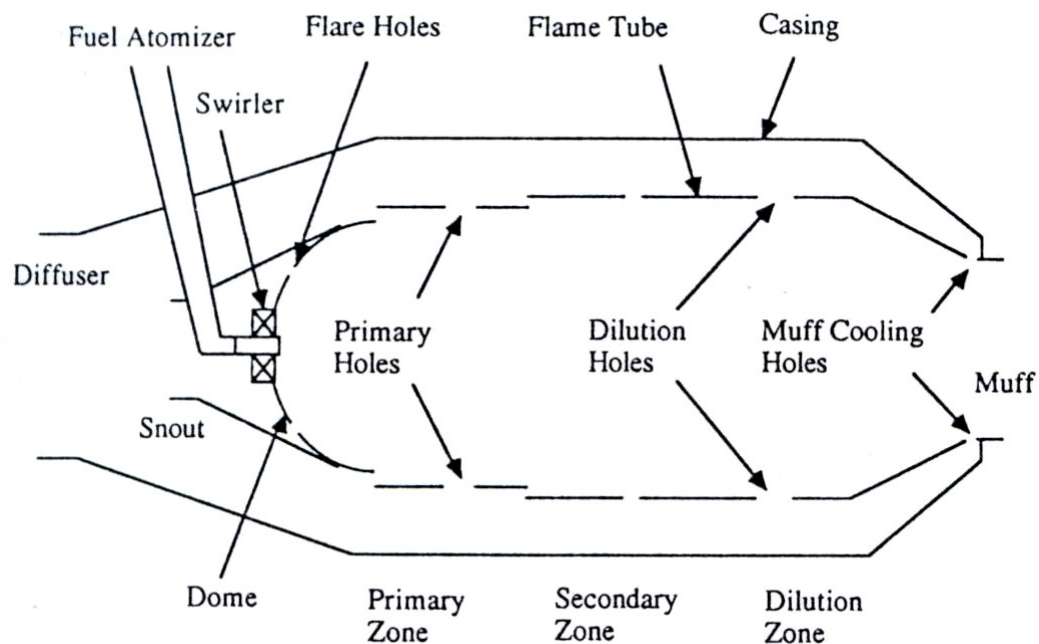
Σχήμα 2. 1:Στάδια εξέλιξης τυπικού θαλάμου καύσης [2]

2.3 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ

Τα βασικά μέρη που συνθέτουν το θάλαμο καύσης είναι:

- Ο διαχύτης (diffuser): Επιβραδύνει τη ροή που έρχεται από το συμπιεστή ώστε να μειωθούν οι απώλειες πίεσης
- Ο διαχωριστής (snout): Διαχωρίζει τη ροή που έρχεται από το διαχύτη σε πρωτεύουσα (αυτή που περνάει στο θόλο) και δευτερεύουσα
- Ο μανδύας (liner): Εκτείνεται από το θόλο μέχρι την είσοδο του ακροφυσίου του στροβίλου και μέσα σε αυτόν διατηρείται η φλόγα
- Ο θόλος (dome): Είναι τοποθετημένος στην αρχή του μανδύα και έχει ως στόχο να δημιουργήσει μια περιοχή κατάλληλη για την καύση
- Η συσκευή ανάφλεξης (ignitor): Η συσκευή αυτή τοποθετείται συνήθως στο θόλο και δίνει τη σπίθα για να πραγματοποιηθεί η εκκίνηση της μηχανής
- Οι εγχυτήρες καυσίμου (fuel injectors): Οι συσκευές που παρέχουν το καύσιμο στην πρωτεύουσα ζώνη

Μια τυπική μορφή του θαλάμου καύσης φαίνεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2. 2: Τυπικός θάλαμος καύσης [1]

2. 4 ΖΩΝΕΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ

2.4. 1 ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΖΩΝΗ

Η λειτουργία της πρωτεύουσας ζώνης είναι η διατήρηση της φλόγας και η παροχή επαρκούς χρόνου, θερμοκρασίας και ανακυκλοφορίας ώστε να επιτευχθεί η τέλεια κατά το δυνατόν καύση του καυσίμου.

Οι πρωτεύουσες ζώνες μπορούν γενικά να διαιρεθούν σε μεγάλης κλίμακας ανακυκλοφορία (large scale recirculation) και σε μικρής κλίμακας ανακυκλοφορία (small scale recirculation). Στην πρώτη επιτυγχάνεται ανακυκλοφορία της ροής χρησιμοποιώντας μικρό αριθμό μεγάλων δεσμών (jets). Με αυτό τον τρόπο η μείξη του καινούργιου μείγματος που εισάγεται στο θάλαμο με τα προϊόντα της καύσης πραγματοποιείται αργά. Αποτέλεσμα είναι η μέγιστη απελευθέρωση θερμότητας να τείνει να είναι χαμηλή. Ωστόσο η διατήρηση της καύσης γίνεται σε ένα μεγάλο εύρος παροχής καυσίμου και υπό χαμηλές πιέσεις. Όσον αφορά στη δεύτερη, η επιθυμητή ροή εξασφαλίζεται από ένα μεγάλο αριθμό μικρών δεσμών. Έτσι για στοιχειομετρικά μείγματα η έντονη ανάμειξη που δημιουργείται οδηγεί σε υψηλή απελευθέρωση θερμότητας. Όμως το εύρος λειτουργίας είναι στενό και η απόδοση σε χαμηλές πιέσεις ανεπαρκής. Συνήθως αυτού του είδους η ζώνη προτιμάται για μείωση των εκπομπών.

Επιπλέον σε ότι έχει να κάνει με τον τρόπο που εισάγεται το καύσιμο στην πρωτεύουσα ζώνη, έχει βρεθεί από πειράματα ότι η μέγιστη απελευθέρωση θερμότητας επιτυγχάνεται όταν γίνεται προανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα και ατμοποίηση του πριν αυτό εισέλθει στη ζώνη [2]. Ταυτόχρονα όμως πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και η πτώση πίεσης κατά την ανάμειξη των καυσαερίων με το νέο μείγμα αέρα-καυσίμου. Όσο πιο μεγάλη είναι η απώλεια πίεσης κατά τη ανάμειξη τόσο πιο μεγάλο πόσο θερμότητας απελευθερώνεται. Από την άλλη μεριά όμως το μειονέκτημα αυτού του τρόπου εισαγωγής του καυσίμου είναι η μείωση του εύρους λειτουργίας για το οποίο είναι δυνατή η καύση.

Επιπρόσθετα, να αναφερθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις, εκτός από τις οπές για την ανάμειξη του αέρα με τα προϊόντα της καύσης, υπάρχουν και οπές στην πρωτεύουσα ζώνη. Αυτό γίνεται διότι τοποθετώντας οπές και εισάγοντας μέρος του αέρα που απαιτείται για την καύση μέσα από αυτές, επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη. Από εμπειρικά στοιχεία [3] γνωρίζουμε ότι το ποσοστό του αέρα που συνήθως εισάγεται μέσα στη ζώνη από τις οπές είναι της τάξης του 1/3 αυτού που απαιτείται. Το υπόλοιπο (2/3) εισάγεται στο θόλο μέσω του διαχωριστή.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται η παροχή του αέρα που περνά μέσα στην πρωτεύουσα ζώνη. Κριτήριο για τον καθορισμό αυτό, είναι ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (Φ_{pz}) που επιθυμείται. Μια τυπική τιμή αυτού του λόγου είναι το 1,1 με μέγιστη περίπου το 1,4. Οι τιμές αυτές έχουν επιλεγεί ώστε να υπάρχει η όσο το δυνατόν μικρότερη δημιουργία αιθάλης [1].

2.4. 2 ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΖΩΝΗ

Η ενδιάμεση ζώνη σε αρκετούς θαλάμους καύσης είναι απαραίτητη διότι επιτελεί δύο βασικές λειτουργίες. Σε χαμηλά ύψη αποτελεί μια περιοχή στην οποία είναι δυνατόν να ανακτηθεί μέρος των απωλειών που έχουν προέλθει λόγω χημικών ασταθειών των προϊόντων της καύσης. Πιο συγκεκριμένα στις υψηλές θερμοκρασίες (2200 - 2400 K) που επικρατούν στην πρωτεύουσα ζώνη μπορεί να επιτυγχάνεται σχεδόν τέλεια καύση, όμως ταυτόχρονα παρατηρείται διαχωρισμός κυρίως του CO₂ σε CO και οξυγόνο. Εισάγοντας μικρές ποσότητες αέρα στην ενδιάμεση ζώνη μέσω των οπών, προτού γίνει η απότομη ψύξη των καυσαερίων στην τελευταία ζώνη, επιτυγχάνεται μικρή πτώση της θερμοκρασίας και καύση του CO.

Σε μεγάλα ύψη όπου η πίεση είναι χαμηλή ο ρυθμός αντίδρασης κατά την καύση είναι αρκετά πιο αργός εξαιτίας της χαμηλής συγκέντρωσης του αέρα και του καυσίμου. Συνεπώς η καύση είναι ατελής και κάτω από αυτές τις συνθήκες η ενδιάμεση ζώνη αποτελεί επέκταση της πρωτεύουσας ζώνης παρέχοντας επιπλέον χρόνο για να γίνει η καύση. Η καύση αυτή πραγματοποιείται σε περιβάλλον όπου ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (Φ_{sz}) είναι κοντά στο 0,8 [1]. Η τιμή αυτή ουσιαστικά καθορίζει την παροχή του αέρα που περνά από τις οπές της ζώνης αυτής και χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς μόνο αν επιλεγθεί μια τέτοια γεωμετρία. Αυτό σημειώνεται διότι πολλοί θάλαμοι καύσης δεν έχουν απαραίτητα δευτερεύουσα ζώνη ή πολλές φορές δεν είναι εύκολα διακριτά τα όρια που τη χωρίζουν από την πρωτεύουσα.

2.4. 3 ΖΩΝΗ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ

Ο ρόλος της ζώνης ανάμειξης είναι η εισαγωγή στο μανδύα αέρα που δεν χρησιμοποιείται για την καύση. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων καθώς και η κατανομή αυτής κατά τέτοιο τρόπο που να είναι αποδεκτή από το στρόβιλο. Η κατανομή της θερμοκρασίας (pattern factor) είναι μείζονος σημασίας για την αντοχή των πτερυγίων του στροβίλου. Σε αυτό το σημείο σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι όσο μεγαλώνει το μήκος και κυρίως ο λόγος μήκους προς ύψος της ζώνης αυτής, τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η κατανομή της θερμοκρασίας στην έξοδο. Η εισαγωγή του αέρα γίνεται με σειρές οπών που είναι επάνω στο μανδύα. Τέλος, από τη γνώση διαφόρων θαλάμων καύσης προκύπτει ότι συνήθως η ποσότητα του αέρα που είναι διαθέσιμη για την ανάμειξη στη ζώνη αυτή είναι μεταξύ 20% - 40% του αέρα που περνά από το θάλαμο καύσης.

Οι ζώνες που περιγράφηκαν εικονίζονται στο σχήμα 2.2 που προαναφέρθηκε στα βασικά μέρη του θαλάμου καύσης.

2.5 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

Οι θάλαμοι καύσης ταξινομούνται βάσει τριών κριτηρίων: Τη γεωμετρία, την αεροδυναμική και την εφαρμογή. Παρακάτω δίνονται τα βασικά στοιχεία διαφόρων θαλάμων και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Επιπρόσθετα πρέπει να τονισθεί ότι στην παρούσα εργασία δεν γίνεται εκτίμηση της γεωμετρίας για οποιοδήποτε είδος θαλάμου. Πιο συγκεκριμένα, η εμπειρική μέθοδος που αναπτύχθηκε εφαρμόζεται σε θαλάμους καύσης αεροπορικών κινητήρων με φλόγα διάχυσης και οποιαδήποτε από τις τρεις πρώτες παρακάτω γεωμετρίες. Στους υπόλοιπους θαλάμους, που είναι νεότερης τεχνολογίας, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της ίδιας μεθόδου διότι δεν υπάρχουν απαραίτητα δεδομένα και εμπειρικές σχέσεις.

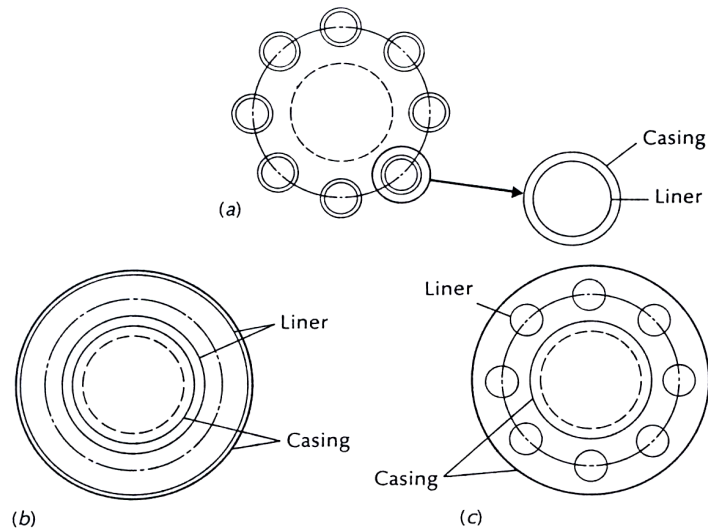
2.5.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Βάσει της γεωμετρίας τους, οι θάλαμοι καύσης χωρίζονται σε σωληνοειδείς (tubular), δακτυλιοειδείς (annular), σωληνοειδείς-δακτυλιοειδείς (tuboannular). (βλ. σχήμα 2.3 a,b,c) και τέλος δακτυλιοειδείς διπλού θόλου (double annular can). (βλ. σχήμα 2.4)

Tubular: Ο σωληνοειδής θάλαμος καύσης αποτελείται από ένα κυλινδρικό μανδύα ο οποίος είναι τοποθετημένος ομόκεντρα μέσα σε ένα κυλινδρικό πλαίσιο (can). Τέτοιοι θάλαμοι καύσης χρησιμοποιούνται περισσότερο στους αρχικούς αεροπορικούς κινητήρες και είχαν συνήθως 7 έως 16 μανδύες. Όμως αυτός ο τύπος είναι συνήθως αρκετά μακρύτερος και βαρύτερος με αποτέλεσμα να μην είναι πλέον σε ευρεία χρήση.

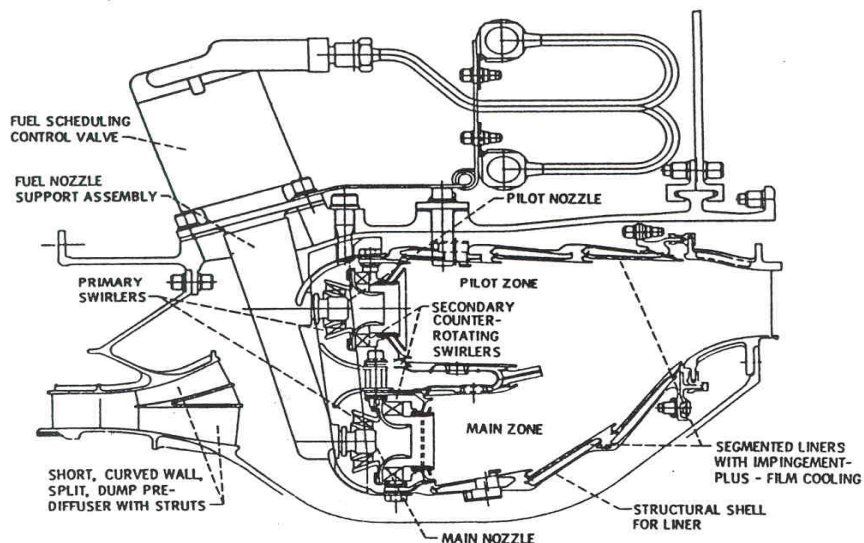
Annular: Σε αυτό το θάλαμο καύσης ο μανδύας είναι ουσιαστικά ένας δακτύλιος τοποθετημένος ομόκεντρα μέσα σε ένα δακτυλιοειδές πλαίσιο. Το πλεονέκτημα αυτού του θαλάμου εν συγκρίσει με τους άλλους δύο (tubular και tuboannular) είναι ότι έχει μικρότερες απώλειες πίεσης, έχει μικρότερη μετωπική επιφάνεια, είναι πιο κοντός και άρα πιο ελαφρύτερος. Παρουσιάζει όμως και κάποια μειονεκτήματα. Τέτοια είναι τα προβλήματα αντοχής του μανδύα, η μεγάλη ευαισθησία σε αλλαγή του προφίλ ταχύτητας στην είσοδο καθώς και το μεγάλο κόστος που απαιτείται για τις δοκιμές σε πλήρες φορτίο.

Tuboannular: Ο θάλαμος αυτός αποτελείται από ένα δακτυλιοειδές πλαίσιο μέσα στο οποίο είναι τοποθετημένοι κυλινδρικοί μανδύες. Είναι δηλαδή μια προσπάθεια να συνδυαστούν οι δύο προηγούμενες μορφές. Το αποτέλεσμα είναι ο συγκεκριμένος θάλαμος καύσης να έχει σχετικά μικρές απώλειες πίεσης, να είναι ελαφρύτερος του σωληνοειδούς, να μην έχει προβλήματα αντοχής αλλά ταυτόχρονα να είναι λιγότερο συμπαγής (compact) από τον δακτυλιοειδή.



Σχήμα 2. 3: Γεωμετρικές μορφές θαλάμων καύσης [1]

Double annular can: Οι θάλαμοι αυτοί αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια με σκοπό να μειώσουν τις εκπομπές NOx. Ο αρχικός λόγος της προσπάθειας αυτής ήταν ότι τα NOx ήταν το μοναδικό είδος εκπομπών στο οποίο δεν είχε σημειωθεί αξιόλογη πρόοδος για τη μείωση του. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτών των θαλάμων καύσης είναι ότι ενσωματώνουν έναν επιπλέον θόλο, δηλαδή υπάρχει ένας επιπλέον εσωτερικός δακτύλιος ακροφυσίων (inner main stage). Στα χαμηλά επίπεδα ισχύος λειτουργεί μόνο η εξωτερική βαθμίδα (outer pilot stage) η οποία είναι σχεδιασμένη με χαμηλές ταχύτητες ροής και μικρή παροχή αέρα, ώστε να παρέχει σταθερή λειτουργία και τέλεια καύση. Στα υψηλά επίπεδα ισχύος και οι δύο βαθμίδες τίθενται σε λειτουργία αλλά το μεγαλύτερο ποσοστό του αέρα και του καυσίμου καίγεται στην εσωτερική βαθμίδα όπου οι ταχύτητες ροής είναι αρκετά υψηλές. Επιπλέον, οι παροχή του αέρα που περνά από τους συστροφείς (swirlers) είναι σχεδόν διπλάσια αυτής ενός συνηθισμένου θαλάμου καύσης με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι χαμηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με το μικρό χρόνο που μένει το μείγμα στο θάλαμο, λόγω των υψηλών ταχυτήτων, συντελούν στη μείωση των εκπομπών NOx.



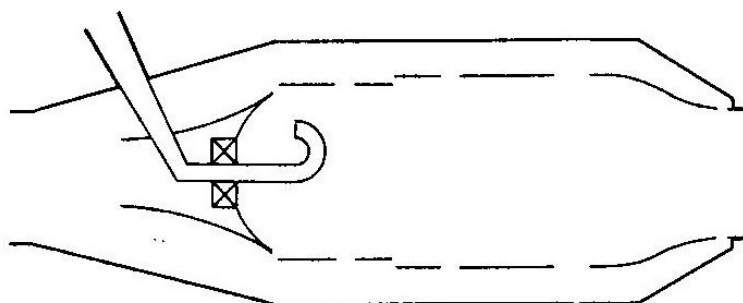
Σχήμα 2. 4: Θάλαμος καύσης διπλού θόλου [6]

2.5. 2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Από αεροδυναμικής άποψης οι θάλαμοι καύσης κατηγοριοποιούνται σε θαλάμους φλόγας διάχυσης (diffusion flame combustors), όπου το καύσιμο εγχύεται απευθείας στην πρωτεύουσα ζώνη. Σε προανάμειξης (premixing combustors), όπου το καύσιμο αναμειγνύεται με ένα μέρος του αέρα πριν την καύση, σε βαθμωτούς θαλάμους (staged combustors) στους οποίους το καύσιμο εισάγεται σταδιακά κατά μήκος του μανδύα με αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών και τέλος υπάρχουν οι καταλυτικοί θάλαμοι (catalytic combustors) οι οποίοι είναι κυρίως προανάμειξης και καίνε συνήθως φτωχά μείγματα.

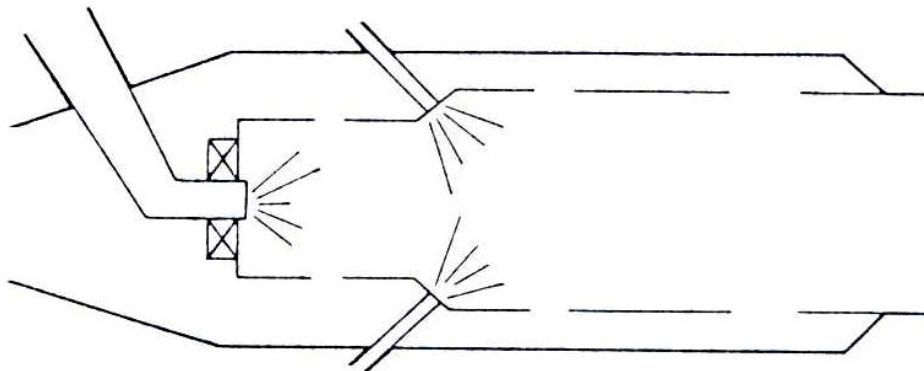
Οι θάλαμοι καύσης με φλόγα διάχυσης είναι ιστορικά η πρώτη επιλογή για τη χρήση σε στροβίλους. Το χαρακτηριστικό που τους διαφοροποιεί από τους άλλους είναι ότι αρχικά το καύσιμο και ο αέρας δεν αναμειγνύονται. Το καύσιμο εγχύεται απευθείας στη ζώνη καύσης, γεγονός που απαιτεί να υπάρχει επαρκής ανάμειξη ώστε να επιτυγχάνεται η καύση που επιθυμείται. Συνήθως, ο λόγος καυσίμου/αέρα στο σημείο σχεδίασης είναι κοντά στο στοιχειομετρικό. Οι θάλαμοι αυτοί παρέχουν πολύ καλή σταθερότητα κατά την καύση, έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας, υψηλούς λόγους turndown (λόγος μέγιστης παροχής καυσίμου προς την ελάχιστη σταθερή παροχή καυσίμου) και μπορούν να λειτουργήσουν σε αρκετά χαμηλές πιέσεις. Αυτοί είναι και οι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα και σήμερα. Ωστόσο, το μειονέκτημα τους είναι οι υψηλές εκπομπές οξειδίων του αζώτου και καπνού. Ένας τέτοιος θάλαμος καύσης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2 που απεικονίζει την τυπική μορφή ενός θαλάμου.

Οι θάλαμοι προανάμειξης είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της προσπάθειας για μείωση των εκπομπών. Η βασική ιδέα είναι, ότι ένα σημαντικό μέρος του αέρα, που εισάγεται στη μηχανή, αναμειγνύεται με το καύσιμο πριν την καύση, έτσι ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για να εξατμιστεί. Σ' αυτούς τους θαλάμους πρέπει να σημειωθεί ότι τα σημεία έγχυσης είναι τοποθετημένα αρκετά ανάντι της φλόγας για να μπορεί να γίνει η προανάμειξη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Παρόλη τη μείωση των εκπομπών που επιτυγχάνεται, η χρήση τους δεν είναι στην πράξη εύκολη, διότι αυξάνεται η μηχανολογική και λειτουργική πολυπλοκότητα και απαιτείται μεταβλητή γεωμετρία.



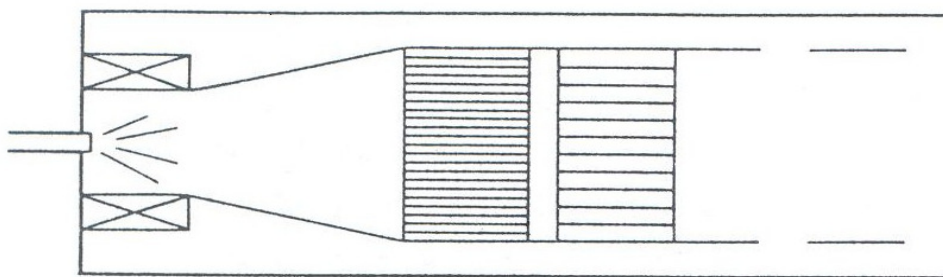
Σχήμα 2. 5: Θάλαμος καύσης προανάμειξης [1]

Οι βαθμωτοί θάλαμοι είναι κυρίως φλόγας διάχυσης αν και έχουν εμφανιστεί και κάποιοι προανάμειξης. Σε αυτούς τους θαλάμους μπορούν να επιτευχθούν μεγάλοι λόγοι turndown (λόγος μέγιστης παροχής καυσίμου προς την ελάχιστη σταθερή παροχή καυσίμου). Συνήθως, η πρώτη βαθμίδα λειτουργεί ως οδηγός, παρέχοντας τη σταθερότητα κατά την καύση. Επιπλέον, οι πρώτες βαθμίδες είναι πιο πλούσιες σε καύσιμο, ενώ όσο προχωράμε κατάντι μειώνεται ο λόγος καυσίμου/αέρα. Αποτέλεσμα είναι η μείωση των εκπομπών. Ταυτόχρονα όμως, διατηρείται η απλότητα της κατασκευής και η μόνη προσαρμογή που απαιτείται είναι η κατανομή της παροχής καυσίμου σε κάθε βαθμίδα.



Σχήμα 2. 6: Βαθμωτός θάλαμος καύσης [1]

Οι καταλυτικοί θάλαμοι καύσης χρησιμοποιούν τον αυξημένο ρυθμό αντίδρασης που προσφέρουν οι καταλύτες, ώστε να μπορέσουν να κάψουν πολύ φτωχά μείγματα καυσίμου. Οι περισσότεροι είναι θάλαμοι προανάμειξης και όσοι λειτουργούν με πλούσια μείγματα καυσίμου συνήθως έχουν και μία δεύτερη διαδοχική βαθμίδα όπου το μείγμα είναι φτωχό. Είτε με τη μία, είτε με την άλλη περίπτωση, οι εκπομπές είναι ελάχιστες, αλλά πάντα πρέπει να ελέγχεται η θερμοκρασία λειτουργίας και συνεπώς ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου για να αποφεύγεται η καταστροφή του καταλύτη. Η ανάγκη μεταβλητής γεωμετρίας και το σχετικά μεγάλο βάρος σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα της κατασκευής εμποδίζουν τη χρήση αυτών των θαλάμων στους αεροπορικούς κινητήρες.



Σχήμα 2. 7: Καταλυτικός θάλαμος καύσης [1]

2.5. 3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Οι θάλαμοι καύσης ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε αεροπορικούς και σε βιομηχανικούς.

Οι πρώτοι είναι συνήθως δακτυλιοειδείς ή δακτυλιοειδείς-σωληνοειδείς. Έχουν μικρό βάρος, μικρή μετωπική επιφάνεια και σχεδιάζονται ώστε να έχουν μεγάλη αξιοπιστία. Η πλειοψηφία αυτών είναι φλόγας διάχυσης, ενώ λόγω του ενδιαφέροντος για μείωση των ρύπων, τελευταία έχουν αναπτυχθεί, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, βαθμωτοί θάλαμοι και θάλαμοι προανάμειξης η χρήση όμως των οποίων δεν είναι ακόμα δυνατή εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν.

Από την άλλη μεριά οι βιομηχανικοί θάλαμοι καύσης δίνουν μεγαλύτερη έμφαση κατά το σχεδιασμό στην επίτευξη μικρών απωλειών, μεγάλης διάρκειας ζωής όπως έχει αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου και δυνατότητα καύσης πολλών καυσίμων. Το μέγεθος δεν αποτελεί κύρια απαίτηση διότι δεν τίθεται θέμα βάρους ή χώρου στον αντίστοιχο βαθμό των αεροπορικών.

2. 6 ΒΑΣΙΚΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η παρούσα ενότητα γράφτηκε με σκοπό να παρουσιάσει αναλυτικότερα τα γεωμετρικά μεγέθη που υπολογίζονται από το αναπτυχθέν εμπειρικό μοντέλο καθώς και να εξηγήσει τη λειτουργία του διαχύτη μέσα στο θάλαμο καύσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μήκος και το βάθος του μανδύα, η εγκάρσια επιφάνεια της διατομής του θαλάμου, καθώς και ο αριθμός και η διατομή των οπών, είναι τα μεγέθη που θα μας απασχολήσουν από εδώ και στο εξής. Στο σχήμα 1.1 που αναφέρθηκε νωρίτερα στην εισαγωγή, μπορεί κανείς να δει τα μεγέθη αυτά για ένα τυπικό θάλαμο καύσης.

Ο λόγος που παρουσιάζονται και οι διαχύτες είναι, ότι παρόλο που δεν αποτελούν μέρος του θαλάμου που προσδιορίζεται από το μοντέλο, είναι ίσως ένα από τα σημαντικότερα μέρη του θαλάμου. Ο σχεδιασμός τους και το είδος τους καθορίζει τις συνθήκες ροής με άμεσο αποτέλεσμα τη συνολική επιρροή στο σχεδιασμό. Συνεπώς κρίθηκε αναγκαίο να δοθούν κάποιες πληροφορίες που έχουν να κάνουν με τον τρόπο που λειτουργούν αλλά και να γίνει μια συνοπτική αναφορά στα είδη που συναντώνται.

2.6. 1 ΜΗΚΟΣ ΚΑΙ ΒΑΘΟΣ ΜΑΝΔΥΑ

Το μήκος και το βάθος του μανδύα είναι δύο πάρα πολύ σημαντικά στοιχεία για τη λειτουργία του θαλάμου καύσης. Έχει αποδειχθεί από πειράματα, αλλά και από δεδομένα παλαιότερων μηχανών, πως όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος του μήκους του μανδύα προς το βάθος, τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η κατανομή της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου. Αυτή η διαπίστωση είναι ιδιαίτερα σπουδαία, δεδομένου ότι η κατανομή αυτή καθορίζει την αντοχή των πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου. Επιπλέον, το βάθος του μανδύα δε μπορεί να είναι

συνήθως μικρότερο από ένα όριο που καθορίζεται από τη δυνατότητα διατήρησης σταθερής καύσης για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Το ιδανικό, όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 3, θα ήταν το μεγάλο βάθος του μανδύα για λόγους απόδοσης της καύσης. Αυτό όμως έρχεται σε αντίθεση με αυτά που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου και επίσης περιορίζεται από την ολική εγκάρσια επιφάνεια του θαλάμου, η οποία περιγράφεται ακολούθως.

2.6. 2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ

Η επιφάνεια αυτή είναι η μέγιστη εγκάρσια επιφάνεια του θαλάμου καύσης και ουσιαστικά καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μετωπική επιφάνεια του κινητήρα. Είναι αναγκαίο η επιφάνεια αυτή να μην είναι πολύ μεγάλη, διότι με αυτό τον τρόπο η οπισθέλκουσα δύναμη στον αεροπορικό κινητήρα αυξάνεται. Επιπρόσθετα δεν επιθυμείται μια πάρα πολύ μικρή επιφάνεια, διότι με αυτό τον τρόπο αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες μέσα στο θάλαμο και αυξάνονται οι απώλειες πίεσης.

2.6. 3 ΟΠΕΣ ΜΑΝΔΥΑ

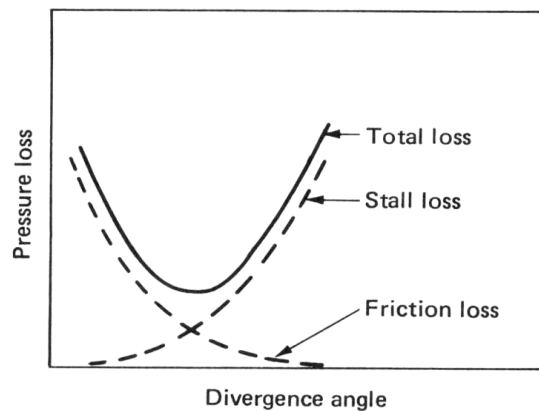
Οι οπές του μανδύα, όπως επιγραμματικά ειπώθηκε στο Κεφάλαιο 2 έχουν ως σκοπό την σταδιακή εισαγωγή του «κρύου» αέρα που δεν παίρνει μέρος στην καύση στο κυρίως ρεύμα των καυσαερίων (οπές ανάμειξης). Βέβαια, εκτός από τις οπές ανάμειξης, σε ορισμένους θαλάμους καύσης υπάρχουν οπές και στις δύο πρώτες ζώνες. Η παρουσία των οπών αυτών προσφέρει αποδοτικότερη καύση η οποία επιτυγχάνεται μέσω πιο αποτελεσματικής ανάμειξης του εργαζόμενου μέσου. Ο προσδιορισμός των οπών και στις τρεις ζώνες είναι θέμα μηχανικής των ρευστών, όμως στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια μέσα από εμπειρικές σχέσεις να υπολογιστούν τόσο ο αριθμός όσο και η διάμετρος τους. Οι σχέσεις και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, όχι μόνο για τις οπές, αλλά και για τα υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία, αναπτύσσονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.

2.6. 4 ΔΙΑΧΥΤΗΣ

Ο διαχύτης όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο έχει ως βασική λειτουργία τη μείωση της ταχύτητας του εξερχόμενου από το συμπιεστή αέρα. Το συνολικό μήκος του διαχύτη καθορίζεται από την γωνία απόκλισης που επιλέγεται καθώς και από το λόγο των διατομών εισόδου-εξόδου. Όσο αυξάνεται η γωνία απόκλισης τόσο μειώνονται οι γραμμικές απώλειες λόγω τριβής αλλά ταυτόχρονα αυξάνονται οι απώλειες που προέρχονται από την αποκόλληση της ροής. Συνεπώς είναι σημαντικό κατά το σχεδιασμό να βρίσκεται η χρυσή τομή που θα έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ροής με τις μικρότερες δυνατές απώλειες ολικής πίεσης.

Έχει βρεθεί γενικά ότι για οποιοδήποτε λόγο διατομών, υπάρχει μια γωνία απόκλισης στην οποία έχουμε ελαχιστοποίηση των απωλειών. Συνήθως αυτή η γωνία κυμαίνεται μεταξύ 7° και 12° [1]. Αυτό δεν ισχύει απαραίτητα για τους αεροπορικούς κινητήρες όπου βασική ιδέα κατά το σχεδιασμό είναι η μείωση του μήκους του διαχύτη χρησιμοποιώντας όσο πιο μεγάλη γωνία είναι δυνατόν. Άρα σε αυτή την περίπτωση

πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ των συνολικών απωλειών στο διαχύτη και του μήκους. Μια ποιοτική απεικόνιση για το πως επιδρά η γωνία απόκλισης στις απώλειες του διαχύτη δίνεται στο σχήμα 2.8 που ακολουθεί.



Σχήμα 2. 8: Επίδραση γωνίας απόκλισης στην πτώση πίεσης [2]

Σε γενικές γραμμές, βάσει της εμπειρίας που υπάρχει στο σχεδιασμό θαλάμων καύσης και διαχυτών, οι απώλειες του διαχύτη αποτελούν συνήθως το 30 - 40 % του συνόλου της πτώσης πίεσης. Συνήθως στον προκαταρκτικό σχεδιασμό, για να υπολογιστούν τα υπόλοιπα μεγέθη του θαλάμου καύσης, επιλέγεται μια τιμή περίπου 40% [1].

Ο διαχύτης πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να πληροί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

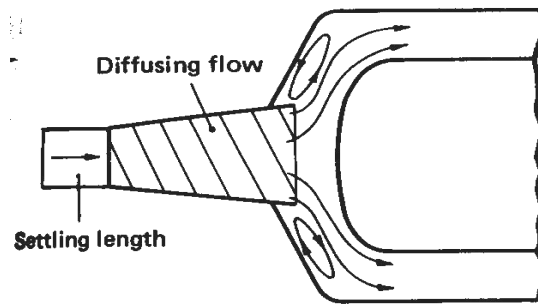
- Χαμηλές απώλειες πίεσης. Γενικά οι απώλειες στο διαχύτη δεν πρέπει να ξεπερνούν το 40% της δυναμικής πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή
- Μικρό μήκος
- Μη αποκόλληση της ροής εκτός από την περιοχή απότομης αύξησης της διατομής στους dump diffusers που αναφέρονται παρακάτω
- Ομοιόμορφη ροή τόσο περιφερειακά όσο και ακτινικά.
- Σταθερότητα ροής σε όλες τις περιοχές λειτουργίας

Επιπλέον, ανάλογα με τον τρόπο που επιβραδύνουν τη ροή, οι διαχύτες μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες.

Η πρώτη αποτελείται από τους συμβατικούς αεροδυναμικούς διαχύτες (aerodynamic or faired) οι οποίοι μειώνουν την ταχύτητα σταδιακά χωρίς να αποκολλάται η ροή. Το βασικό πλεονέκτημα τους είναι οι μικρές απώλειες πίεσης ενώ τα μειονεκτήματά τους είναι ότι έχουν σχετικά μεγάλο μήκος και είναι αρκετά ευαίσθητοι στο προφίλ εισόδου.

Συνεχίζοντας, είναι οι διαχύτες τύπου damp ή αλλιώς απότομης αύξησης της διατομής. Αυτοί αποτελούνται από ένα συμβατικό διαχύτη που μειώνει την αρχική ταχύτητα περίπου κατά 60% και από μια περιοχή όπου παρατηρείται απότομη αύξηση της διατομής (βλ. σχήμα 2.9). Αυτού του είδους η διάταξη βρίσκεται πλέον σε ευρεία χρήση εξαιτίας της εξάλειψης των μειονεκτημάτων των συμβατικών

διαχυτών. Το κύριο όμως πρόβλημα είναι οι μεγάλες απώλειες πίεσης οι οποίες είναι περίπου 50% αυξημένες εν συγκρίσει με την πρώτη κατηγορία.



Σχήμα 2. 9: Dump diffuser [2]

Τέλος, είναι οι διαχύτες τύπου vortex και hybrid. Αυτοί οι διαχύτες αναπτύχθηκαν έτσι ώστε να αντιμετωπίσουν τα όποια προβλήματα των προηγούμενων τύπων. Έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα όμως εξαιτίας κυρίως της πολυπλοκότητας τους δεν χρησιμοποιούνται ευρέως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ

Η αεροδυναμική του θαλάμου καύσης αποτελεί ίσως το σημαντικότερο κομμάτι κατά το σχεδιασμό διότι καθορίζει κατά κύριο λόγο το μέγεθος του θαλάμου, τις απώλειες πίεσης καθώς και τον τρόπο που θα γίνει η καύση. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι ανεξαρτήτου του θαλάμου καύσης, υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία είναι κοινά για όλα τα συστήματα. Ο πρωταρχικός στόχος στο διαχύτη και στο «πέρασμα» είναι να μειωθεί η ταχύτητα της ροής και να κατανεμηθεί ο αέρας σε καθορισμένες ποσότητες μέσα στις ζώνες. Ταυτόχρονα, πρέπει να διατηρούνται σταθερές και ομοιόμορφες συνθήκες ροής έτσι ώστε να μην δημιουργούνται μη επιθυμητές απώλειες ή ανακυκλοφορία της ροής. Μέσα στο μανδύα τώρα, ο κύριος στόχος είναι η επίτευξη μεγάλης κλίμακας ανακυκλοφορία ώστε να σταθεροποιείται η φλόγα, καθώς και να δημιουργείται αποτελεσματική διάχυση των προϊόντων της καύσης. Σε γενικές γραμμές έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της ανάμειξης, η οποία είναι ευεργετική για την καύση, επιτυγχάνεται μόνο με αύξηση του μήκους του μανδύα και με αύξηση των απωλειών πίεσης. Έτσι, ο πρωταρχικός στόχος κατά το σχεδιασμό είναι η επαρκής ανάμειξη μέσα στο θάλαμο καύσης και η ομοιόμορφη ροή προς το στρόβιλο αλλά με όσο το δυνατόν περιορισμό του μήκους και των απωλειών πίεσης. Κλείνοντας, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση των υπαρχόντων γνώσεων που υπάρχουν πάνω σε αυτόν τον τομέα και επιπρόσθετα παρουσιάζονται σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος του θαλάμου και κάποια άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του με την πτώση πίεσης και το pattern factor.

3.1 ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Για να είναι πιο εύκολη η ανάλυση ενός θαλάμου καύσης καθώς και για να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης του με άλλους, έχουν αναπτυχθεί κάποιες παράμετροι ή αλλιώς μεγέθη αναφοράς. Αυτά είναι η ταχύτητα αναφοράς V_{ref} και η δυναμική πίεση αναφοράς q_{ref} .

Η ταχύτητα αναφοράς ορίζεται ως η ταχύτητα που προκύπτει εφαρμόζοντας το νόμο της συνέχειας θεωρώντας ότι δεν υπάρχει ο μανδύας. Δηλαδή υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$V_{ref} = \frac{\dot{m}_3}{\rho_3 \cdot A_{ref}} \quad (\text{εξ.3.1})$$

όπου \dot{m}_3 είναι η παροχή αέρα που περνά από το θάλαμο καύσης, A_{ref} η επιφάνεια της μέγιστης ολικής εγκάρσιας διατομής του θαλάμου και ρ_3 η ολική πυκνότητα του αέρα που εισάγεται.

Η ταχύτητα αυτή δεν περιγράφει κάποια «πραγματική ταχύτητα» σε κάποιο συγκεκριμένο τμήμα του συστήματος αλλά έχει να κάνει με το χρόνο που έχει στη διάθεση του το μείγμα αέρα-καυσίμου για να καεί. Όπως θα δούμε και παρακάτω όσο

μεγαλύτερη είναι αυτή η ταχύτητα τόσο πιο μακρύς πρέπει να γίνει ο θάλαμος καύσης αλλά ταυτόχρονα και με μικρότερη εγκάρσια διατομή.

Η δυναμική πίεση αναφοράς είναι το μέγεθος

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \cdot \rho_3 \cdot V_{ref}^2 \quad (\text{εξ.3. 2})$$

Γενικά γίνεται προσπάθεια η πτώση πίεσης στο μανδύα (ΔP_{liner}) να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη της q_{ref} . Διότι με αυτό τον τρόπο γίνεται σωστή ανάμειξη του αέρα και υπάρχει ομοιογένεια στην κατανομή του αέρα στην έξοδο.

3. 2 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ

Οι συνολικές απώλειες πίεσης μέσα σε ένα θάλαμο καύσης ανάλογα με το σχεδιασμό είναι της τάξεως του 4%-10% περίπου της πίεσης εξόδου από το συμπιεστή. Από αυτές ένα μέρος οφείλεται στις τριβές του αέρα μέσα στο θάλαμο και το υπόλοιπο προκύπτει από την πρόσδοση θερμότητας σε ρεύμα υψηλής ταχύτητας. Έτσι προκύπτει:

$$\Delta P_{3-4} = \Delta P_{cold} + \Delta P_{hot} \quad (\text{εξ.3. 3})$$

Οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών (ΔP_{cold}) αντιπροσωπεύουν το άθροισμα των απωλειών που παίρνουν μέρος στο διαχύτη και στο μανδύα.

$$\Delta P_{cold} = \Delta P_{diff} + \Delta P_{liner} \quad (\text{εξ.3. 4})$$

Οι «θερμές» απώλειες (ΔP_{hot}) είναι ανάλογες του λόγου T_4/T_3 και του τετραγώνου της ταχύτητας του αέρα.

Όπως θα δούμε και παρακάτω, σύμφωνα με το Lefebvre [2], όταν θα αναφέρονται οι ολικές απώλειες πίεσης θα εννοούνται οι «ψυχρές» απώλειες. Αυτό συμβαίνει διότι οι «θερμές» απώλειες είναι πολύ μικρές εξαιτίας των χαμηλών ταχυτήτων μέσα στο θόλο.

Επιπλέον πρέπει να τονισθεί ότι, οι απώλειες πίεσης του μανδύα, δηλαδή το ΔP_{liner} ορίζεται ως ο μέσος όρος των απωλειών που συμβαίνουν από την εισαγωγή του αέρα στο μανδύα, διαμέσου των οπών και την τριβή μεταξύ του μανδύα και των τοιχωμάτων του θαλάμου.

Οι απώλειες αυτές μπορούν να αντικατασταθούν ουσιαστικά από τη σχέση

$\Delta P_{liner} = \frac{1}{2} \cdot \rho_3 \cdot U_j^2$, όπου είναι η πτώση πίεσης της ροής που προκύπτει όταν το ρευστό περνάει μέσα από ένα στόμιο όπου έχει ενεργό διατομή d_{ef} .

Τυπικές τιμές του λόγου $\Delta P_{liner}/\Delta P_{cold}$ είναι από 60 – 70%.

3. 3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Για τη μελέτη ενός θαλάμου καύσης υπάρχουν δύο βασικές αδιάστατες παράμετροι οι οποίες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του. Η μία είναι ο λόγος της συνολικής πτώσης πίεσης προς την πίεση εξόδου του συμπιεστή και η άλλη είναι ο λόγος της συνολικής πτώσης πίεσης προς την δυναμική πίεση αναφοράς.

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3}, \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \quad (\text{εξ.3. 5})$$

Σύμφωνα με τον Lefebvre [2] η σχέση που συνδέει τις δύο παραπάνω παραμέτρους είναι:

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} = \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \cdot \frac{R}{2} \cdot \left(\frac{m_3 \cdot T_3^{0,5}}{A_{ref} \cdot P_3} \right)^2 \quad (\text{εξ.3. 6})$$

Το ΔP_{3-4} αναφέρεται, όπως είχε ειπωθεί και προηγουμένως, μόνο στις απώλειες τριβής και όχι και στις απώλειες λόγω πρόσδοσης θερμότητας.

Η πρώτη παράμετρος αναφέρεται ως ολική πτώση πίεσης, συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό επί % και εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.

Η δεύτερη παράμετρος ονομάζεται παράγοντας πτώσης πίεσης και δείχνει την αντίσταση της ροής που εισάγεται μεταξύ της εξόδου του συμπιεστή και της εισόδου του στροβίλου. Από αεροδυναμικής άποψης θα μπορούσε ίσως να συσχετισθεί με το συντελεστή οπισθέλκουσας. Είναι στοιχείο του θαλάμου καύσης και δεν έχει να κάνει με τη λειτουργία της μηχανής. Μπορεί να εκφραστεί και ως εξής:

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} = \frac{\Delta P_{diff}}{q_{ref}} + \frac{\Delta P_{liner}}{q_{ref}} \quad (\text{εξ.3. 7})$$

Από τα παραπάνω μεγέθη, η ποσότητα που μπορεί να αλλάξει ο σχεδιαστής είναι ουσιαστικά η επιφάνεια αναφοράς A_{ref} . Επιλέγοντας γενικά μεγάλη επιφάνεια, η ταχύτητα V_{ref} μειώνεται και αυτό οδηγεί σε μικρές απώλειες πίεσης. Το αντίθετο ισχύει σε περίπτωση μείωσης του A_{ref} . Συνεπώς, ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής καθώς και με την επιθυμητή πτώση πίεσης πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος θάλαμος καύσης.

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται κάποιες τυπικές τιμές των παραμέτρων για τα τρία είδη θαλάμων καύσης.

Τύπος θ.Κ	$\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3}$	$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}}$
tubular	0,07	37
tuboannular	0,06	28
annular	0,06	20

Πίνακας 3. 1: Τυπικές τιμές των παραμέτρων πίεσης [2]

Από τον πίνακα αυτό είναι προφανές γιατί οι σύγχρονοι θάλαμοι καύσης είναι δακτυλιοειδείς (annular). Διότι για το ίδιο ποσοστό απωλειών έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα αναφοράς και άρα μικρότερη επιφάνεια αναφοράς. Δηλαδή είναι κατάλληλοι ειδικά για χρήση στους αεροπορικούς κινητήρες όπου επιθυμείται μικρή μετωπική επιφάνεια της μηχανής.

3. 4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Για να καθοριστούν τα δύο βασικά μεγέθη αναφοράς καθώς και η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του μανδύα χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι. Η πρώτη λέγεται μέθοδος των ταχυτήτων [1] και η δεύτερη μέθοδος των απωλειών πίεσης [1] [2] [3].

3.4. 1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Από την εξίσωση της συνέχειας γνωρίζουμε ότι αν έχουμε μια διατομή με επιφάνεια

A, τότε η ταχύτητα του ρευστού που περνά μέσα από αυτή ισούται με: $V = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A}$,

όπου ρ η πυκνότητα και m η παροχή του ρευστού.

Από παλαιότερους θαλάμους καύσης είναι γνωστό ότι η ταχύτητα στο θόλο (V_{dome}) κυμαίνεται από 7-12 m/s και η ταχύτητα μεταξύ μανδύα και πλαισίου ($V_{passage}$) από 35-60 m/s. Ενώ σαν μέσες τιμές μπορούν να επιλεγούν το 9 m/s και το 50 m/s αντίστοιχα [1].

Έτσι, έχοντας επιλέξει εμπειρικά την ταχύτητα σε κάθε περιοχή, στη συνέχεια καθορίζουμε την παροχή του εργαζόμενου μέσου στο θόλο και στο «πέρασμα» έχοντας ως κριτήριο το λόγο αέρα-καυσίμου που επιθυμούμε στην πρωτεύουσα ζώνη. Τέλος, εφαρμόζοντας την εξίσωση της συνέχειας για τις δύο περιοχές του θαλάμου και για ρ_3 την ολική πυκνότητα στην εξόδου του συμπιεστή, προκύπτουν δύο επιφάνειες. Οπότε, οι δύο επιφάνειες είναι:

$$A_{dome} = \frac{\dot{m}_{dome}}{\rho_3 \cdot V_{dome}} \quad (\text{εξ.3. 8})$$

$$A_{passage} = \frac{\dot{m}_{passage}}{\rho_3 \cdot V_{passage}} \quad (\text{εξ.3. 9})$$

Η επιφάνεια αναφοράς υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{ref} = A_{dome} + A_{passage} \quad (\text{εξ.3.10})$$

Ενώ η ταχύτητα αναφοράς προκύπτει ίση με:

$$V_{ref} = \frac{\dot{m}_3}{\rho_3 \cdot A_{ref}} \quad (\text{εξ.3.11})$$

3.4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη σχέση που συνδέει της παραμέτρους πίεσης (εξ.3.6) και η οποία αναφέρθηκε προηγουμένως στο ίδιο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα λύνεται η σχέση αυτή ως προς A_{ref} και εκτός από τα μεγέθη εξόδου του συμπιεστή τα οποία είναι γνωστά, οι παράμετροι παίρνουν τις τυπικές τιμές που έχουν προκύψει εμπειρικά από άλλες μηχανές και οι οποίες δίνονται στον πίνακα 3.1.

Άρα η επιφάνεια αναφοράς προκύπτει ίση με:

$$A_{ref} = \left[\frac{R}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m}_3 \cdot T_3^{0.5}}{P_3} \right)^2 \cdot \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \cdot \left(\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} \right)^{-1} \right]^{0.5} \quad (\text{εξ.3.12})$$

Γνωρίζοντας τώρα την επιφάνεια αυτή εύκολα υπολογίζεται και η ταχύτητα αναφοράς ως εξής.

$$V_{ref} = \frac{\dot{m}_3}{\rho_3 \cdot A_{ref}} \quad (\text{εξ.3.13})$$

Αν λύσουμε τη δεύτερη σχέση ως προς A_{ref} και αντικαταστήσουμε στην πρώτη θα έχουμε:

$$\frac{\dot{m}_3}{\rho_3 \cdot V_{ref}} = \left[\frac{R}{2} \cdot \left(\frac{\dot{m}_3 \cdot T_3^{0.5}}{P_3} \right)^2 \cdot \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \cdot \left(\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} \right)^{-1} \right]^{0.5} \quad (\text{εξ.3.14})$$

Επιπρόσθετα, αν αντικατασταθεί η ρ_3 με τον όρο $\frac{P_3}{R \cdot T_3}$ από την καταστατική

εξίσωση θα προκύψει ότι:

$$V_{ref} = \sqrt{2 \cdot \frac{q_{ref}}{P_3} \cdot R \cdot T_3} \quad (\text{εξ.3.15})$$

Το q_{ref}/P_3 υπολογίζεται αν διαιρεθούν κατά μέλη οι δύο παράμετροι πίεσης.

Από τα παραπάνω εξάγεται ότι σε αυτή τη μέθοδο η ταχύτητα αναφοράς δεν εξαρτάται από την παροχή αλλά από το είδος του θαλάμου καύσης και τη θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή.

Για να βρεθεί τώρα η επιφάνεια του θόλου (A_{dome}) με μια πρώτη ματιά θα φαινόταν λογικό να γίνει όσο το δυνατόν πιο μεγάλη διότι έτσι θα επιτυγχάνονταν χαμηλές ταχύτητες μέσα στο μανδύα και συνεπώς η απόδοση της καύσης θα ήταν υψηλότερη και η διατήρηση της φλόγας πιο εύκολη. Όμως κάθε αύξηση του A_{dome} φέρνει μείωση του $A_{passage}$ διότι η μέγιστη επιφάνεια A_{ref} είναι συγκεκριμένη. Αποτέλεσμα αυτού είναι να αναπτύσσονται πολύ μεγάλες ταχύτητες μεταξύ μανδύα και πλαισίου και αυτό επιφέρει πτώση της στατικής πίεσης. Αυτό το φαινόμενο δεν είναι επιθυμητό γιατί με αυτό τον τρόπο μειώνεται η διαθέσιμη πτώση της στατικής πίεσης στις οπές του μανδύα και έτσι δεν γίνεται επαρκής ανάμειξη του αέρα με τα προϊόντα της καύσης.

Εξαιτίας των παραπάνω προτάθηκε ένα κριτήριο ανάμειξης [1] [2] [3] σύμφωνα με το οποίο καλύτερη ανάμειξη επιτυγχάνεται όταν ο λόγος της πτώσης της στατικής πίεσης κατά μήκος του μανδύα προς τη δυναμική πίεση στην πρωτεύουσα ζώνη είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος. Η σχέση που εκφράζει το λόγο αυτό είναι:

$$\frac{\Delta p_L}{q_{pz}} = 1 + \frac{T_3}{T_{pz}} \cdot \frac{k^2}{m_p^2} \cdot \left\{ \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} - \frac{\left(1 - \frac{m_{dome}}{m_3}\right)^2 + \lambda \cdot \left[r^2 \cdot (1-k)^2 - 1\right]}{(1-k)^2} \right\} \quad (\text{εξ.3. 16})$$

όπου

- T_{pz} η ολική θερμοκρασία στην πρωτεύουσα ζώνη
- T_3 η ολική θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή
- m_{dome}/m_3 το ποσοστό του αέρα που περνά στο θόλο
- m_p το ποσοστό του αέρα που περνά στην πρωτεύουσα ζώνη
- $\lambda = \frac{\Delta P_{diff}}{q_3}$, όπου $q_3 = \frac{1}{2} \cdot \rho_3 \cdot V_3^2$ η δυναμική πίεση στην έξοδο του συμπιεστή
- $r = \frac{A_{ref}}{A_3}$. Το A_3 είναι η επιφάνεια της διατομής εισόδου του διαχύτη
- κ ο λόγος A_{dome}/A_{ref}

Παραγωγίζοντας την εξίσωση αυτή ως προς κ και μηδενίζοντας την, βρίσκουμε ότι ο λόγος $\frac{\Delta p_L}{q_{pz}}$ μεγιστοποιείται για μια τιμή του κ που είναι ίση με:

$$\frac{A_{dome}}{A_{ref}} = 1 - \left[\frac{\left(1 - \frac{m_{dome}}{m_3}\right)^2 - \lambda}{\left(\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}}\right) - \lambda \cdot r^2} \right]^{1/3} = k_{opt} \quad (\text{εξ.3.17})$$

Συνεπώς $A_{dome} = k_{opt} \cdot A_{ref}$

3.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΘΟΥΣ ΚΑΙ ΜΗΚΟΥΣ ΜΑΝΔΥΑ

Αναφερόμενοι στο μήκος του μανδύα εννοούμε το μήκος από το σημείο που γίνεται η έγχυση του καυσίμου μέχρι το τέλος του θαλάμου καύσης, ενώ ως βάθος μανδύα ορίζεται για σωληνοειδείς μανδύες η διάμετρος τους και για δακτυλιοειδείς η απόσταση μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού τοιχώματος του.

3.5.1 ΒΑΘΟΣ

Έχοντας χρησιμοποιήσει μία από τις δύο μεθόδους επιλογής των μεγεθών αναφοράς που αναπτύχθηκαν, η εγκάρσια επιφάνεια του θόλου και κατά συνέπεια και του μανδύα είναι η $A_{dome}=A_{liner}$. Για τους θαλάμους που ο μανδύας έχει κυκλική διατομή όπως είναι ο σωληνοειδής και σωληνοειδής-δακτυλιοειδής, το βάθος ή αλλιώς ύψος του μανδύα είναι η διάμετρος του κύκλου. Δηλαδή έχουμε:

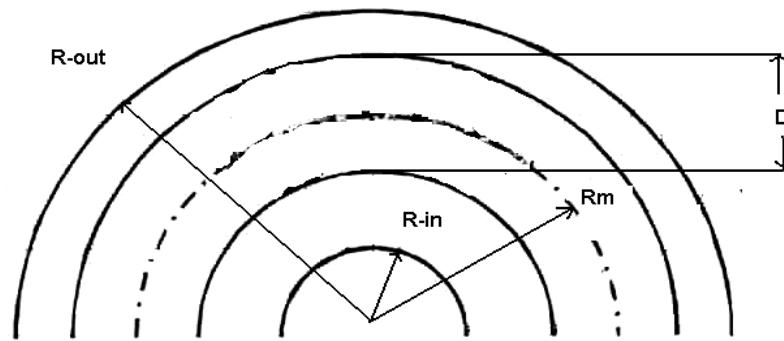
$$A_{dome} = \Pi \cdot R^2 = \Pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Rightarrow D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{dome}}{\Pi}} \quad (\text{εξ.3.18})$$

Για το δακτυλιοειδή, η εύρεση του D εξαρτάται από τη γνώση της εσωτερικής διαμέτρου του πλαισίου του θαλάμου καύσης. Δηλαδή την ακτίνα (R_{in}) από τον άξονα της μηχανής στην οποία είναι τοποθετημένος ο θάλαμος. Ποιο συγκεκριμένα από τη γνώση του A_{ref} και R_{in} υπολογίζεται η R_{out} .

$$R_{out} = \sqrt{\frac{A_{ref}}{\Pi} + R_{in}^2} \quad (\text{εξ.3.19})$$

Στη συνέχεια θεωρούμε μια μέση ακτίνα R_m η οποία δείχνει το μέσο του μανδύα με την παραδοχή ότι ο μανδύας ισαπέχει από το εσωτερικό και από το εξωτερικό όριο του θαλάμου (βλ. σχήμα 3.1). Στην πραγματικότητα ο μανδύας είναι συνήθως λίγο μετατοπισμένος προς τα εξωτερικά διότι από την εσωτερική πλευρά περνάει μεγαλύτερη παροχή για την ψύξη των πτερυγίων του στροβίλου (by pass). Έτσι, το D θα είναι:

$$D = \frac{A_{dome}}{2 \cdot \Pi \cdot r_m} \quad (\text{εξ.3.20})$$



Σχήμα 3. 1: Εγκάρσια τομή δακτυλιοειδή θαλάμου καύσης

3.5. 2 ΜΗΚΟΣ

Για τον ακριβή υπολογισμό του μήκους το ιδανικότερο θα ήταν να γινόταν επίλυση της ροής με κάποιο κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Όμως αυτός ο τρόπος έχει ως απαίτηση τη γνώση της γεωμετρίας κάτι το οποίο δεν είναι δεδομένο στην παρούσα φάση.

Επομένως, για να υπολογιστεί το μήκος πρέπει να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές μέθοδοι οι οποίες δίνουν με επαρκή ακρίβεια το μήκος του μανδύα.

Η πρώτη μέθοδος [3] στηρίζεται στη φόρτιση του μανδύα και το μήκος δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$L = \frac{m_f \cdot LCV}{H \cdot A_{liner} \cdot P_{liner}} \cdot n_c \quad (\text{εξ.3. 21})$$

όπου

- m_f η παροχή καυσίμου
- LCV η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου
- n_c ο βαθμός απόδοσης της καύσης
- $A_{liner}=A_{dome}$ η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του θόλου
- P_{liner} η ολική πίεση στο μανδύα
- Η επιτρεπτή φόρτιση του μανδύα

Η δεύτερη βασίζεται στο λόγο μήκους προς βάθος (L/D) του μανδύα σε συνδυασμό με το pattern factor (pf). Πιο συγκεκριμένα οι δύο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή της θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου

καύσης είναι ο προαναφερθείς γεωμετρικός λόγος και ο λόγος $\frac{\Delta P_{liner}}{q_{ref}}$. Σύμφωνα με

το Lefebvre [2] από ανάλυση πειραματικών δεδομένων έχει βρεθεί ότι

$$pf = \frac{T_{max} - T_4}{T_4 - T_3} = f\left(\frac{L}{D} \cdot \frac{\Delta P_{liner}}{q_{ref}}\right)$$

Η παραπάνω γενική σχέση μετά από τη μελέτη στοιχείων διαφόρων θαλάμων καύσης τροποποιήθηκε στην ακόλουθη.

$$pf = \frac{T_{\max} - T_4}{T_4 - T_3} = 1 - \exp\left(-A \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\Delta P_{\text{liner}}}{q_{\text{ref}}}\right)^{-1} \quad (\text{εξ.3. 22})$$

όπου η παράμετρος A παίρνει την τιμή 0,050 για δακτυλιοειδείς θαλάμους και 0,070 για σωληνοειδείς και σωληνοειδείς-δακτυλιοειδείς.

Λύνοντας ως προς L προκύπτει:

$$L = D \cdot \left(A \cdot \frac{\Delta P_{\text{liner}}}{q_{\text{ref}}} \cdot \ln \frac{1}{1 - pf} \right)^{-1} \quad (\text{εξ.3. 23})$$

Στην παραπάνω εξίσωση, εκτός από το τη δυναμική πίεση αναφοράς q_{ref} , το βάθος D και το λόγο $\Delta P_{\text{liner}}/q_{\text{ref}}$, στα οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως, υπάρχει και άλλη μία παράμετρος η οποία ουσιαστικά «επιβάλλει» το μήκος του μανδύα. Αυτή η παράμετρος είναι το pf. Μια τυπική τιμή που μπορεί να πάρει είναι το 0,25, αλλά θεωρητικά μπορεί να πάρει τιμές από 0,1 έως 0,5.

3. 6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΠΩΝ ΜΑΝΔΥΑ

Όπως έχει αναφερθεί από το πρώτο κεφάλαιο, κατά μήκος του μανδύα υπάρχουν σειρές οπών οι οποίες έχουν ως κύριο σκοπό να εισάγουν τμηματικά τον αέρα μέσα στο μανδύα ώστε να γίνει η ανάμειξη με τα θερμά καυσαέρια.

Η ροή μέσα από μια οπή του μανδύα εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της και τη μορφή της, την πτώση πίεσης που επιτυγχάνεται σε αυτή αλλά επιπλέον σημαντικός παράγοντας είναι η πτώση πίεσης κατά μήκος του μανδύα καθώς και η επίδραση από την γειτνιαζούσα περιοχή.

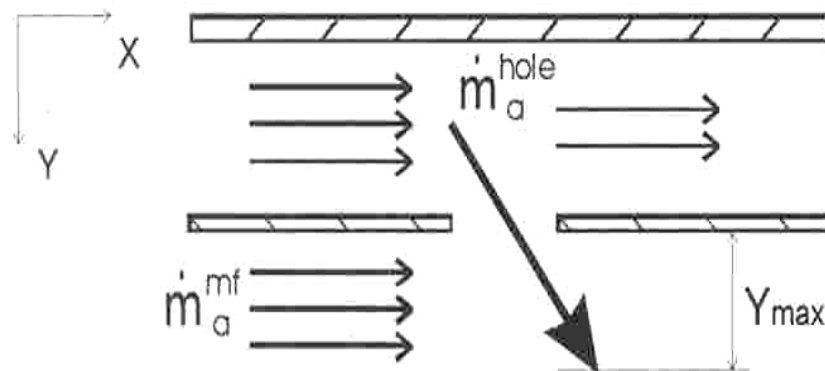
Από το Lefebvre [2] η βασική εξίσωση η οποία δίνει την παροχή του αέρα μέσα από μία οπή είναι:

$$m_h = C_D \cdot A_h \cdot \left[2 \cdot \rho_3 \cdot (P_1 - P_j) \right]^{0,5} \quad (\text{εξ.3. 24})$$

όπου

- P_1 = η ολική πίεση ανάντι της οπής
- P_j = η στατική πίεση κατάντι της οπής
- C_D = συντελεστής αποφόρτισης οπής (discharge coefficient) ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω
- A_h = η επιφάνεια της οπής

Σχηματικά, η ροή στην οπή μπορεί να παρασταθεί στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3. 2: Ροή μέσα από οπή του μανδύα

Αρχικά, ανάντι της οπής η ροή μεταξύ του τοιχώματος του μανδύα («πέραςμα») και του πλαισίου του θαλάμου καύσης έρχεται παράλληλα με το μανδύα. Πλησιάζοντας όμως στην οπή η ροή επηρεάζεται από την χαμηλότερη πίεση που επικρατεί μέσα στο μανδύα με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ρεύμα αέρα (δέσμη) μέσα από την οπή το οποίο ξεκινά κοντά από το τοίχωμα και καταλήγει σε ένα βάθος Y_{max} (διείσδυση).

Το μέγεθος Y_{max} αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα για την επίτευξη της απαραίτητης κατανομής αέρα στην έξοδο του θαλάμου και για αυτό το λόγο η δημιουργία επαρκούς διείσδυσης της δέσμης στο κυρίως ρεύμα του μανδύα είναι μείζονος σημασίας. Το Y_{max} πρέπει να είναι μικρότερο του $0,5 \cdot D$ για τη δευτερεύουσα ζώνη, όπως επίσης και για τη ζώνη ανάμειξης, ενώ για την πρωτεύουσα ζώνη δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία που να αναφέρουν κάτι διαφορετικό σε σχέση με τις άλλες δύο ζώνες. Το μόνο επιβεβαιωμένο στοιχείο είναι ότι το Y_{max} μπορεί να πάρει τιμές ίσες ή μεγαλύτερες του $0,5 \cdot D$ στην περίπτωση που επιθυμείται ανάμειξη στην πρωτεύουσα ζώνη με δέσμες, οι οποίες τοποθετούνται απέναντι (opposing jet mixing).

Όταν υπάρχουν πολλές οπές σε μια εγκάρσια σειρά γύρω από το μανδύα τότε έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η διείσδυση σύμφωνα με το Lefebvre [2] δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$Y_{max} = 1,25 \cdot d_{ef} \cdot J^{0.5} \frac{m_a^{mf}}{m_a^{mf} + m_a^{hole}} \quad (\text{εξ.3. 25})$$

όπου

- d_{ef} = η διάμετρος της ενεργούς διατομής της οπής
- $J = \frac{\rho_J \cdot U_J^2}{\rho_{mf} \cdot U_{mf}^2}$ (εξ.3. 26)

ρ_J και ρ_{mf} η πυκνότητα της δέσμης και του κυρίως ρεύματος αντίστοιχα, U_{mf} η ταχύτητα του κυρίως ρεύματος και U_J η ταχύτητα της δέσμης η οποία εξαρτάται από το ΔP_{liner} ως εξής

$$U_J = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{liner}}{\rho_3}} \quad (\text{εξ.3. 27})$$

- m_a^{mf} και m_a^{hole} η παροχή του κυρίως ρεύματος και η παροχή διαμέσου του συνόλου των οπών στη σειρά αντίστοιχα

Ο λόγος των πυκνοτήτων της δέσμης προς αυτή του κυρίως ρεύματος δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια. Από εμπειρικά στοιχεία και πειράματα έχει βρεθεί ότι είναι περίπου ίσος ή και λίγο μικρότερος της μονάδας και μπορεί να μεταβάλλεται μέχρι την τιμή 2,5 με 3.

Όσον αφορά τώρα την παροχή του αέρα που περνάει από το σύνολο των οπών που βρίσκονται στην ίδια εγκάρσια σειρά, αυτή υπολογίζεται από:

$$m_a^{hole} = \frac{\pi}{4} \cdot n_h \cdot d_{ef}^2 \cdot (2 \cdot \Delta P_l \cdot \rho_3)^{0,5} \quad (\text{εξ.3. 28})$$

όπου n_h ο αριθμός των οπών σε μία σειρά.

Κλείνοντας, ο συντελεστής C_D ο οποίος είχε χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενη σχέση είναι αυτός που καθορίζει την πραγματική διατομή της οπής βάσει της ενεργούς διατομής που απαιτείται. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας βρει τη διάμετρο d_{ef} συναρτήσει της διεύθυνσης, στη συνέχεια υπολογίζεται η πραγματική d_h ως εξής:

$$d_h = \frac{d_{ef}}{C_D^{0.5}} \quad (\text{εξ.3. 29})$$

Ο συντελεστής υπολογίζεται με αρκετά μεγάλη ακρίβεια από τις δύο ακόλουθες σχέσεις του Lefebvre [2]. Η πρώτη είναι για επίπεδες οπές (plain holes) και η δεύτερη για οπές οι οποίες «βυθίζονται» (plunged holes).

$$C_D = \frac{1.25 \cdot (K - 1)}{[4 \cdot K^2 - K \cdot (2 - a)^2]^{0.5}} \quad (\text{εξ.3. 30})$$

$$C_D = \frac{1.65 \cdot (K - 1)}{[4 \cdot K^2 - K \cdot (2 - a)^2]^{0.5}} \quad (\text{εξ.3. 31})$$

Ως K ορίζεται ο λόγος της δυναμικής πίεσης της δέσμης προς τη δυναμική πίεση της ροής στο «πέρασμα», δηλαδή

$$K = \frac{q_{jet}}{q_{passage}} \quad (\text{εξ.3. 32})$$

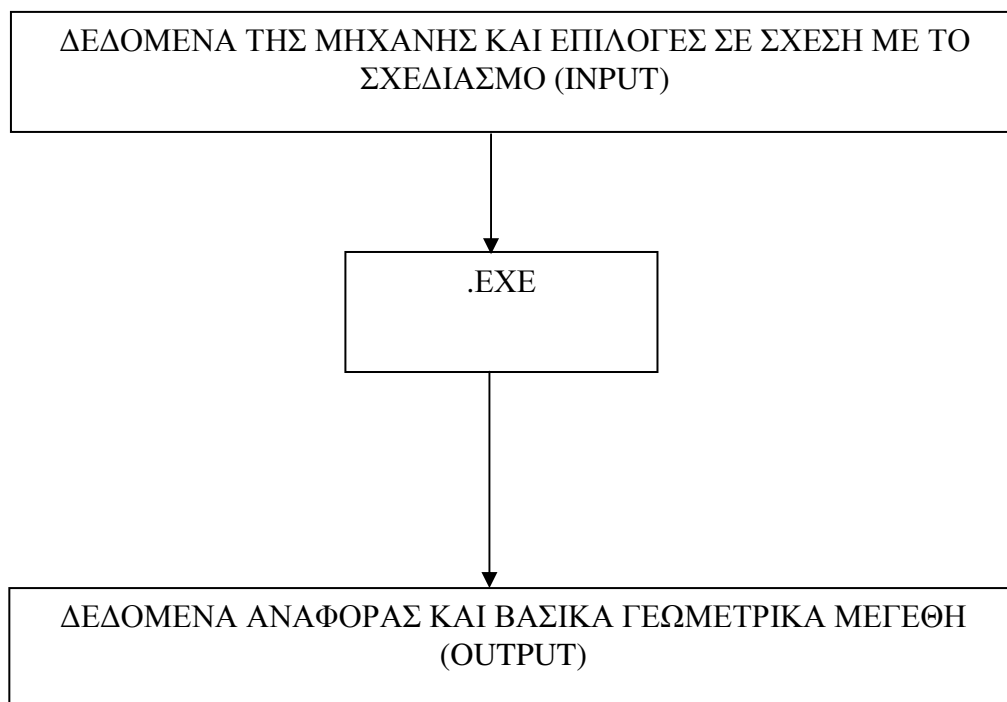
ενώ η παράμετρος a είναι ο λόγος της παροχής που περνά από της οπές μιας σειράς προς την παροχή του περάσματος, δηλαδή

$$a = \frac{m_a^{hole}}{m_{passage}} \quad (\text{εξ.3. 33})$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όσο προχωράμε κατάντι αυξάνει το K και άρα και ο C_D . Επομένως στις τελευταίες σειρές οπών μπορεί να περάσει η ίδια παροχή αέρα με μικρότερες οπές με την προϋπόθεση βέβαια ότι απαιτείται η ίδια ενεργός διάμετρος. Εναλλακτικά όσο προχωράμε κατάντι η παροχή διαμέσου των ίδιων γεωμετρικά οπών μεγαλώνει.

3. 7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΑΠΤΥΧΘΕΝΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Για την εύρεση των βασικών διαστάσεων που έχουν ήδη αναφερθεί, καθώς και για την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε Fortran77. Ο κώδικας σχεδιάστηκε έτσι ώστε δίνοντας του κάποια βασικά δεδομένα εισόδου που αφορούν γενικά τη μηχανή και ειδικότερα το θάλαμο καύσης να δίνει σαν έξοδο τις διαστάσεις και τις οπές του μανδύα καθώς και την επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του θαλάμου. Βάσει λοιπόν των παραμέτρων πίεσης, των μεθόδων επιλογής των μεγεθών αναφοράς καθώς και των σχέσεων για τον υπολογισμό των υπολοίπων μεγεθών, γράφτηκε ο κώδικας του οποίου μια απλοϊκή μορφή για το πως λειτουργεί δίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3. 3: Απλή σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του κώδικα

Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου του κώδικα παρουσιάζονται ακολούθως.

3.7.1 ΔΕΛΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

- Τύπος του θαλάμου καύσης (σωληνοειδής, δακτυλιοειδής ή σωληνοειδής-δακτυλιοειδής)
- Αριθμός κυλίνδρων (cans)
- Μέθοδος υπολογισμού μεγεθών αναφοράς (μέθοδος ταχυτήτων ή μέθοδος απωλειών πίεσης)
- Παροχή του αέρα στο θάλαμο καύσης
- Παροχή του καυσίμου
- Ολική και στατική θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή (Tt3 και Ts3 αντίστοιχα)
- Ολική πίεση εξόδου του συμπιεστή (Pt3)
- Επιφάνεια της διατομής εισόδου του διαχύτη
- Αριθμός των σειρών οπών που επιθυμούμε σε κάθε ζώνη
- Εσωτερική ακτίνα θαλάμου καύσης (μόνο για τους δακτυλιοειδείς θαλάμους καύσης)

Όλα τα δεδομένα εισόδου (αεροδυναμικά και θερμοδυναμικά) του κώδικα προέρχονται από τα αντίστοιχα μοντέλα των κινητήρων τα οποία υπάρχουν στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών και αναφέρονται στο σημείο σχεδίασης της μηχανής. Επιπλέον, κάποια γεωμετρικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν σαν είσοδος προέρχονται από σχέδια των κινητήρων που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία [7].

3.7.2 ΔΕΛΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ

- Ταχύτητα αναφοράς V_{ref}
- Επιφάνεια αναφοράς A_{ref}
- Λόγος A_{dome}/A_{ref}
- Βάθος (D_{liner}) και μήκος (L_{liner}) του μανδύα
- Αριθμός οπών (n_h) σε κάθε εγκάρσια σειρά και διατομή αυτών (d_h)

3.7.3 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχουν κάποια στοιχεία που αφορούν το σχεδιασμό τα οποία δεν έχουν μία συγκεκριμένη τιμή από την αρχή, αλλά συνήθως κινούνται μέσα σε ένα διάστημα. Η τιμή που παίρνουν έχει να κάνει κυρίως με το πως γίνεται η καύση μέσα στο θάλαμο, τι θάλαμος είναι, τι διαχύτης έχει επιλεγεί, τι οπές και πολλές άλλες επιλογές που αφορούν το σχεδιασμό συνολικά. Τα στοιχεία αυτά από εδώ και στο εξής θα τα ονομάζουμε παραμέτρους σχεδιασμού του θαλάμου καύσης.

Οι παράμετροι είναι: Ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη (Φ_{pz}), η πτώση πίεσης στο μανδύα ως ποσοστό των συνολικών απωλειών πίεσης ($\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$), η κατανομή της θερμοκρασίας στην εξόδου του θαλάμου καύσης (pattern factor), η διεϊσδυση στο μανδύα ($Y_{max}/depth$) και ο λόγος πυκνοτήτων δέσμης-ρεύματος (ρ_j/ρ_g). Τέλος, εκτός από τις παραπάνω, στη μέθοδο των ταχυτήτων είναι ακόμα οι ταχύτητες θόλου και «περάσματος» (V_{dome} , $V_{passage}$).

Βάσει της βιβλιογραφίας, στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, επιλέχθηκαν τυπικές τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους οι οποίες προέρχονται από τις μέσες τιμές σε υπάρχουσες μηχανές. Οι τιμές αυτές δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Παράμετρος Σχεδιασμού	Τυπική Τιμή Παραμέτρου Σχεδιασμού
Φ_{pz}	1,1
$\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$	0,6
$Y_{max}/depth$	0,4
ρ_i/ρ_g	2
PF	0,25

Πίνακας 3. 2 Τυπικές τιμές παραμέτρων σχεδιασμού

Εκτός από τις παραπάνω, έγιναν ακόμα κάποιες παραδοχές διότι στους περισσότερους θαλάμους καύσης υπάρχει παρόμοιος σχεδιασμός και επιπλέον δεν υπάρχουν στοιχεία για το πώς θα μπορούσε να είναι διαφορετικά. Έτσι επιλέχθηκαν τα παρακάτω:

- Για τον υπολογισμό του στοιχειομετρικού λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα, χρησιμοποιούμε ως καύσιμο την τυπική μορφή της κηροζίνης $C_{12}H_{24}$ το οποίο δίνει $(m_{air}/m_{fuel})_s = 14,8$
- Θεωρούμε ότι ο μανδύας έχει σε όλο το μήκος διατομή ίδια με εκείνη του θόλου ,επιπλέον σταθερή διατομή και ίση με A_{ref} έχει και όλος ο θάλαμος
- Από τις οπές της ζώνης ανάμειξης περνάει ο αέρας που απομένει, δηλαδή αυτός που δεν ανήκει στο πρωτεύον ρεύμα και ταυτόχρονα δεν εισάγεται από της οπές της πρώτης ή της δεύτερης ζώνης
- Η παροχή που περνά από ένα σύνολο οπών σε μία ζώνη επιμερίζεται εξίσου σε κάθε εγκάρσια σειρά.
- Επιλέχθηκαν επίπεδες οπές (plain holes) για τον υπολογισμό του C_D (βλ. εξ.3.28)
- Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι στους υπολογισμούς μέσα στο θάλαμο καύσης, δεν λαμβάνονται υπόψη οι παροχές του αέρα που έχουν να κάνουν με την ψύξη του θαλάμου και οι οποίες επηρεάζουν κυρίως τις οπές τις ζώνης διάχυσης.

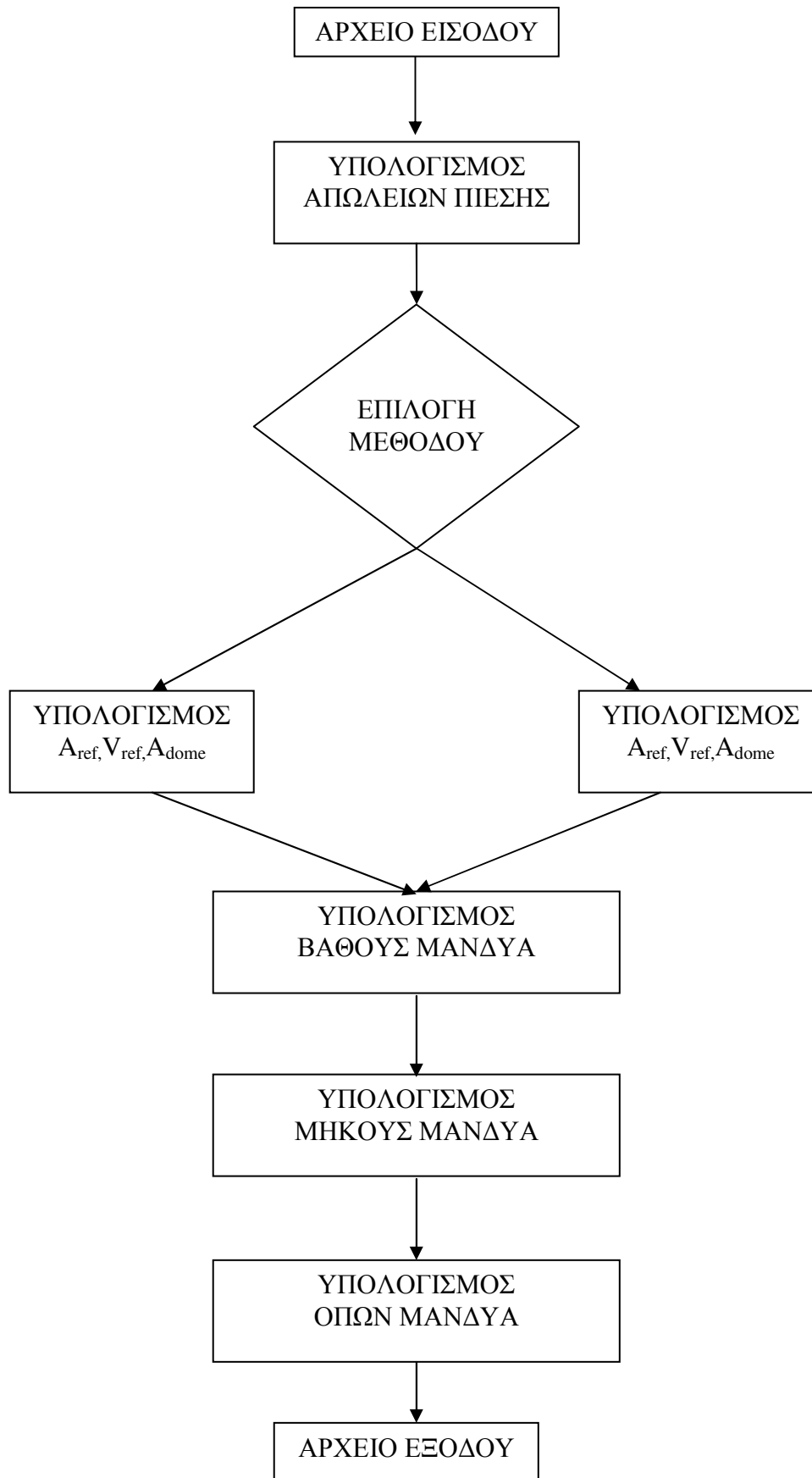
Σίγουρα οι παραδοχές αυτές, όπως και οι αρχικές δεν μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι πλήρως σωστές και ακριβείς, αλλά αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο στο Κεφάλαιο 5 γίνεται εκτενής ανάλυση ευαισθησίας για να διαπιστωθεί ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η κάθε μία στο σχεδιασμό.

3.7. 4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Για να γίνει πιο κατανοητό το πώς λειτουργεί ο κώδικας, παρακάτω αναπτύσσεται περιληπτικά ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζει τα δεδομένα που δίνει σαν έξοδο.

Αρχικά από την ολική πίεση εξόδου του συμπιεστή, ανάλογα με το τι τύπος θαλάμου καύσης είναι, υπολογίζονται από εμπειρικές σχέσεις οι ολικές απώλειες πίεσης. Τις απώλειες αυτές στη συνέχεια τις κατανέμει σε απώλειες του διαχύτη και απώλειες στο μανδύα σύμφωνα με την εξ.1.2 και την τιμή του ποσοστού που έχει επιλεγεί για τις απώλειες στο διαχύτη. Προχωρώντας, ανάλογα με τη μέθοδο που έχει επιλεγεί (ταχύτητας ή απωλειών πίεσης κεφ. 3) βρίσκονται τα μεγέθη αναφοράς, η μέγιστη εγκάρσια διατομή του θαλάμου καύσης και το ποσοστό αυτής που καλύπτει ο μανδύα. Βάσει λοιπόν των παραπάνω, από την εξ.3.16 ή την εξ.3.18 ανάλογα το θάλαμο, υπολογίζεται το βάθος και στη συνέχεια από την εξ.3.21 το μήκος του μανδύα. Τέλος από τη θεωρία των οπών και συγκεκριμένα από την εξ.3.23 έως την εξ.3.31 υπολογίζονται οι οπές.

Σχηματικά τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3. 4: Σύντομο λογικό διάγραμμα του προγράμματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των θαλάμων καύσης δύο αεροπορικών κινητήρων. Τα αποτελέσματα αυτά προήλθαν από τη χρήση των παραδοχών που έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης, οι υπολογισμοί έχουν γίνει με βάση τις τυπικές τιμές των παραμέτρων που καθορίζουν το σχεδιασμό και οι οποίες προέρχονται κυρίως από τη βιβλιογραφία. Επιπλέον να τονιστεί ότι τα πραγματικά στοιχεία των κινητήρων που παρουσιάζονται είναι υπολογισμένα κατά προσέγγιση και δεν αποτελούν τα επίσημα στοιχεία της κατασκευάστριας εταιρίας. Συνεπώς, ανεξάρτητα από τα πιθανά σφάλματα της εφαρμογής, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αποκλίσεων εξαιτίας αυτού του παράγοντα.

4.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ J79

Από τα σχέδια του κινητήρα καθώς και από οπτικό έλεγχο που έγινε στο εργαστήριο, βρέθηκε ότι ο θάλαμος καύσης του είναι σωληνοειδής-δακτυλιοειδής και αποτελείται από δέκα μανδύες. Κάθε ένας από αυτούς έχει έξι σειρές οπών οι οποίες είναι όλες στη ζώνη διάχυσης. Βάσει του υπολογιστικού μοντέλου του κινητήρα του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών, προέκυψε ότι η συνολική παροχή αέρα που περνά στο θάλαμο είναι 66.51 kg air/sec , η παροχή του καυσίμου είναι 1.23 kg fuel/sec , η ολική θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή καθώς και η ολική πίεση στην ίδια θέση είναι $T_t = 662.5 \text{ K}$ και $P_t = 1201902.96 \text{ Pa}$ αντίστοιχα, τέλος η επιφάνεια διατομής της εισόδου του διαχύτη είναι 0.11 m^2 . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις δύο μεθόδους υπολογισμού των μεγεθών αναφοράς, καθώς και τα πραγματικά στοιχεία, εμφανίζονται ακολούθως.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ
L(mm)	380	430
D(mm)	194	162
Vref(m/s)	23.4	-
Aref(m ²)	0.045740	0.046908
Adome(m ²)	0.029643	0.020602
Adome/Aref	0.648	0.439
L/D	1.95	2.65
Αριθμός οπών στη σειρά 1	57	6
Αριθμός οπών στη σειρά 2	32	6
Αριθμός οπών στη σειρά 3	20	6
Αριθμός οπών στη σειρά 4	14	6
Αριθμός οπών στη σειρά 5	10	6
Αριθμός οπών στη σειρά 6	8	6
Διάμετρος οπών στη σειρά 1(mm)	6.7	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 2(mm)	8.8	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 3(mm)	10.9	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 4(mm)	12.9	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 5(mm)	15	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 6(mm)	17	16.8

Πίνακας 4. 1: Αποτελέσματα μεθόδου ταχυτήτων για τον J79

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ
L(mm)	570	430
D(mm)	197	162
Vref(m/s)	29	-
Aref(m ²)	0.037540	0.046908
Adome(m ²)	0.030350	0.020602
Adome/Aref	0.808	0.439
L/D	2.90	2.65
Αριθμός οπών στη σειρά 1	58	6
Αριθμός οπών στη σειρά 2	33	6
Αριθμός οπών στη σειρά 3	21	6
Αριθμός οπών στη σειρά 4	15	6
Αριθμός οπών στη σειρά 5	11	6
Αριθμός οπών στη σειρά 6	8	6
Διάμετρος οπών στη σειρά 1(mm)	10	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 2(mm)	11.5	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 3(mm)	12.4	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 4(mm)	13.7	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 5(mm)	15.3	16.8
Διάμετρος οπών στη σειρά 6(mm)	17	16.8

Πίνακας 4. 2: Αποτελέσματα μεθόδου απωλειών πίεσης για τον J79

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή που αναπτύχθηκε, βλέπουμε κατ' αρχήν ότι η τάξη μεγέθους είναι ίδια με αυτή των πραγματικών μεγεθών. Επιπρόσθετα φαίνεται ότι, αν και σε πολλά σημεία στη μέθοδο των ταχυτήτων υπάρχουν αρκετά μεγάλες διαφορές, η μέθοδος αυτή δείχνει να λειτουργεί καλύτερα από αυτή των απωλειών πίεσης. Αυτό είναι κατά μία έννοια λογικό, διότι σύμφωνα με το Mellor [1], οι ταχύτητες που προκύπτουν στη μέθοδο απωλειών πίεσης είναι συνήθως πολύ υψηλές. Για αυτό το λόγο, φαίνεται να χάνει έδαφος η χρήση της σε σχέση με τη μέθοδο των ταχυτήτων, ειδικά στους σύγχρονους αεροπορικούς κινητήρες όπου επιθυμούνται χαμηλές ταχύτητες μέσα στο θάλαμο καύσης.

Επιπλέον, από τα αποτελέσματα είναι εμφανές αυτό που είχε επιβεβαιωθεί και από τη βιβλιογραφία, ότι δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα αναφοράς, τόσο πιο μικρή είναι και η μέγιστη επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του θαλάμου. Από την άλλη βέβαια, οι δύο μέθοδοι συμφωνούν όσον αφορά στο βάθος του μανδύα και στις οπές, ενώ σημαντικές διαφορές παρουσιάζουν στο μήκος του μανδύα, τόσο μεταξύ τους, όσο και εν συγκρίσει με τον πραγματικό θάλαμο. Τέλος, καμία από τις δύο μεθόδους δεν δείχνει να προσεγγίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα πραγματικά μεγέθη με εξαίρεση ίσως την επιφάνεια αναφοράς A_{ref} για τη μέθοδο των ταχυτήτων και το λόγο L/D για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης.

Όσον αφορά στις οπές, οι αποκλίσεις είναι μεγάλες σε σχέση με τα πραγματικά στοιχεία του θαλάμου καύσης, αλλά τα μεγέθη που προέκυψαν είναι σχεδόν ταυτόσημα και για τις δύο μεθόδους. Αυτό είναι λογικό, διότι η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των οπών είναι ίδια και για τις δύο μεθόδους. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι αλλάζουν κάποια αεροδυναμικά στοιχεία μέσα στο θάλαμο, με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται λίγο και οι οπές.

Πιο συγκεκριμένα τώρα, η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των ταχυτήτων με αυτά του πραγματικού θαλάμου καύσης ακολουθεί στον πίνακα 4.3.

	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ	ΔΙΑΦΟΡΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ(%)
$A_{ref}(m^2)$	0.046908	0.045740	-2.5
L(mm)	430	380	-11.6
D(mm)	162	194	+19.8
A_{dome}/A_{ref}	0.439	0.648	+47.6
L/D	2.65	1.95	-26.4

Πίνακας 4. 3: Σύγκριση αποτελεσμάτων του J79 για τη μέθοδο των ταχυτήτων

Από τα παραπάνω στοιχεία του πίνακα γίνεται σαφές ότι, όσον αφορά την εγκάρσια διατομή του θαλάμου καύσης, τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Αντίστοιχα ικανοποιητικά είναι και τα αποτελέσματα των οπών στην πέμπτη και έκτη σειρά, τα οποία δείχνουν να είναι αρκετά κοντά στις πραγματικές τιμές. Σε αντίθεση όμως με τα προαναφερθέντα, τα υπόλοιπα μεγέθη παρουσιάζουν μεγάλες γενικά αποκλίσεις οι οποίες οφείλονται κατά κύριο λόγο στις παραδοχές που έχουν γίνει για πολλά δεδομένα που είναι απαραίτητα κατά το σχεδιασμό και τα οποία όμως δεν είναι γνωστά. Τέτοια είναι οι απώλειες πίεσης στο

μανδύα, ο pf καθώς και άλλες παράμετροι που αναφέρονται στα προηγούμενα κεφάλαια.

Ανάλογα με την προηγούμενη παράγραφο, στο πίνακα 4.4 είναι η σύγκριση για την μέθοδο των απωλειών πίεσης.

	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ	ΔΙΑΦΟΡΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ(%)
Aref(m²)	0.046908	0.037540	-20
L(mm)	430	570	+32.6
D(mm)	162	197	+21.6
Adome/Aref	0.439	0.808	+84
L/D	2.65	2.90	+9.4

Πίνακας 4. 4: Σύγκριση αποτελεσμάτων του J79 για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

Βλέποντας τον πίνακα σύγκρισης της μεθόδου αυτής παρατηρείται ότι, όπως είχε αναφερθεί και στα γενικά σχόλια, η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο αποτελεσματική σε σχέση με αυτή των ταχυτήτων, τουλάχιστον για αυτόν τον κινητήρα που μελετάμε. Ακόμα, ενώ έχει σε γενικές γραμμές σημαντικές αποκλίσεις από τα πραγματικά δεδομένα, προσεγγίζει με καλή ακρίβεια το λόγο μήκους προς βάθος του μανδύα καθώς και τις οπές στην πέμπτη και έκτη σειρά. Τελειώνοντας, οι αποκλίσεις είναι λογικό να υπάρχουν, από τη στιγμή που όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο πολλά από τα δεδομένα εισόδου έχουν πάρει κάποιες τυπικές τιμές.

4. 2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ J85

Ο J85 είναι ένας αεροπορικός κινητήρας ο οποίος έχει ένα δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης. Βάσει του υπολογιστικού μοντέλου του κινητήρα του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών, προέκυψε ότι η συνολική παροχή αέρα που περνά στο θάλαμο είναι 17.99 kg air/sec, η παροχή του καυσίμου είναι 0.348 kg fuel/sec, η ολική θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή καθώς και η ολική πίεση στην ίδια θέση είναι $T_t = 540.2K$ και $P_t = 675284.78Pa$ αντίστοιχα, τέλος η επιφάνεια διατομής της εισόδου του διαχύτη είναι $0.0377 m^2$. Ο θάλαμος αυτός, από σχέδιο του κινητήρα, φαίνεται να έχει επάνω στο μανδύα έξι σειρές οπών, οι οποίες δεν ανήκουν μόνο στη ζώνη διάχυσης, αλλά ίσως και στις άλλες δύο. Από εκτίμηση που έγινε, χωρίς να γνωρίζουμε τον ακριβή σχεδιασμό, θεωρήθηκε ότι υπάρχουν δύο σειρές οπών ανά ζώνη. Οι δύο πρώτες σειρές ανήκουν στην πρωτεύουσα ζώνη, η τρίτη και η τέταρτη στη δευτερεύουσα, ενώ οι δύο τελευταίες σειρές είναι στη ζώνη διάχυσης. Απαραίτητο είναι να γνωρίζει κανείς εδώ, ότι η ύπαρξη ή μη οπών στην πρωτεύουσα ζώνη είναι μείζονος σημασίας, διότι καθορίζει, όπως έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, την παροχή μέσα στο θόλο και άρα τη διαστασιολόγηση του. Βάσει λοιπόν των παραπάνω, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων καθώς και τα πραγματικά μεγέθη εμφανίζονται στους παρακάτω πίνακες.

ΜΕΓΕΘΗ	ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ
L(mm)	346	180
D(mm)	73	60
Vref(m/s)	28.1	-
Aref(m ²)	0.151697	0.135717
Adome(m ²)	0.0812	0.075459
Adome/Aref	0.535	0.556
L/D	4.76	3
Αριθμός οπών στη σειρά 1	594	100
Αριθμός οπών στη σειρά 2	409	100
Αριθμός οπών στη σειρά 3	320	100
Αριθμός οπών στη σειρά 4	239	100
Αριθμός οπών στη σειρά 5	436	100
Αριθμός οπών στη σειρά 6	201	100
Διάμετρος οπών στη σειρά 1(mm)	2.6	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 2(mm)	3.1	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 3(mm)	3.7	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 4(mm)	4.2	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 5(mm)	8.1	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 6(mm)	11.5	12

Πίνακας 4. 5: Αποτελέσματα μεθόδου ταχυτήτων για τον J85

ΜΕΓΕΘΗ	ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ
L(mm)	524	180
D(mm)	93	60
Vref(m/s)	30.5	-
Aref(m ²)	0.139525	0.135717
Adome(m ²)	0.101844	0.075459
Adome/Aref	0.730	0.556
L/D	5.62	3
Αριθμός οπών στη σειρά 1	567	100
Αριθμός οπών στη σειρά 2	391	100
Αριθμός οπών στη σειρά 3	306	100
Αριθμός οπών στη σειρά 4	228	100
Αριθμός οπών στη σειρά 5	417	100
Αριθμός οπών στη σειρά 6	192	100
Διάμετρος οπών στη σειρά 1(mm)	3.7	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 2(mm)	4.1	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 3(mm)	4.6	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 4(mm)	5.1	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 5(mm)	9.9	12
Διάμετρος οπών στη σειρά 6(mm)	12.3	12

Πίνακας 4. 6: Αποτελέσματα μεθόδου απωλειών πίεσης για τον J85

Μελετώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν και συγκρίνοντας τα με τα πραγματικά μεγέθη του θαλάμου καύσης καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι καμία από τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν δεν υπολογίζει με ακρίβεια τις σωστές διαστάσεις. Αυτά που δίνουν με σχετικά καλή προσέγγιση είναι η επιφάνεια αναφοράς A_{ref} καθώς και η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του μανδύα, δηλαδή το $Adome$. Το βάθος του μανδύα καθώς και το λόγο $Adome/A_{ref}$ η μέθοδος των ταχυτήτων δείχνει να τα βρίσκει ικανοποιητικά, ενώ αντίθετα, η μέθοδος των απωλειών πίεσης εμφανίζει και πάλι περισσότερες αδυναμίες και αποκλίνει σημαντικά σε όλα τα μεγέθη. Όσον αφορά τις οπές, αυτές προκύπτουν αρκετά μικρότερες των πραγματικών, Εκτός από την τελευταία σειρά, όπου προσεγγίζεται σχεδόν ακριβώς και στις δύο μεθόδους το πραγματικό μέγεθος. Τέλος, ο αριθμός των οπών εμφανίζεται πολύ μεγάλος σε μερικές σειρές και έχει αρκετά μεγάλες αποκλίσεις από τα πραγματικά στοιχεία.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σχολιαστεί ότι, σε αντίθεση με τον προηγούμενο θάλαμο καύσης του J79, κινούμενοι κατάντι της φλόγας, ο αριθμός των οπών δεν μειώνεται συνεχώς, αλλά σε κάθε ζώνη ανεξάρτητα. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι σε κάθε ζώνη η παροχή που περνά διαμέσου των οπών εξαρτάται από τους λόγους ισοδυναμίας αέρα καυσίμου στις δύο πρώτες ζώνες. Οπότε, σε κάθε ζώνη παρατηρείται το φαινόμενο της μείωσης του αριθμού των οπών, ενώ σε όλο το μανδύα όχι.

Κλείνοντας, και προτού παρουσιαστούν οι πίνακες σύγκρισης των μεθόδων με τα πραγματικά μεγέθη, πρέπει να ειπωθεί ότι η τάση των οπών να μεγαλώνουν σε αριθμό και να μικραίνουν σε διάμετρο όσο προχωράμε προς το στρόβιλο είναι απολύτως φυσιολογική από άποψη φυσικής. Αυτό συμβαίνει διότι, εφόσον στην ίδια ζώνη η κάθε σειρά οπών έχει την ίδια παροχή, όσο λιγότερες οπές χρησιμοποιούνται για να περάσει ο αέρας, τόσο πιο μεγάλες θα πρέπει να είναι (αυξάνει η ενεργός διατομή d_{ef}), δεδομένου βέβαια ότι επιθυμείται η ίδια διείσδυση της δέσμης μέσα στο κυρίως ρεύμα. Τα παραπάνω μπορεί κανείς να τα κατανοήσει καλύτερα αν μελετήσει από την εξ. 3.25 μέχρι και την εξ. 3.29. Βέβαια τα παραπάνω δεν συμφωνούν απαραίτητα με τα στοιχεία του συγκεκριμένου θαλάμου, απλά τονίζεται ότι από άποψη φυσικής είναι σωστό το αποτέλεσμα που προκύπτει.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πραγματικά μεγέθη δίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ	ΔΙΑΦΟΡΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ(%)
$A_{ref}(m^2)$	0.135717	0.151697	+11.8
L(mm)	180	346	+92.2
D(mm)	60	73	+21.7
$Adome/A_{ref}$	0.556	0.535	-3.8
L/D	3	4.76	+58.7

Πίνακας 4. 7: Σύγκριση αποτελεσμάτων του J85 για τη μέθοδο των ταχυτήτων

Συγκρίνοντας και αριθμητικά αυτά που σχολιάστηκαν προηγουμένως, συμπεραίνουμε ότι σε γενικές γραμμές υπάρχει μια υπερδιαστασιολόγηση του

θαλάμου καύσης και το μοναδικό στοιχείο που υπολογίζεται επαρκώς είναι ο λόγος A_{dome}/A_{ref} . Οι διαφορές αυτές προέρχονται από το ότι πιθανώς οι ταχύτητες μέσα στο θάλαμο του συγκεκριμένου κινητήρα είναι πιο υψηλές στο θόλο σε σχέση με αυτές που επιλέγηκαν και επιπλέον οι απώλειες πίεσης στον μανδύα (60% των ολικών απωλειών) δεν είναι κοντά στις πραγματικές. Ακόμα, παράγοντες σχεδιασμού που αναφέρθηκαν και στον J79, όπως και οι απώλειες πίεσης, δεν είναι γνωστοί με αποτέλεσμα να είναι επισφαλής η έκδοση συμπερασμάτων για τα ακριβή αίτια των αποκλίσεων.

Ανάλογα, ο πίνακας για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης είναι:

	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ	ΔΙΑΦΟΡΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ(%)
$A_{ref}(m^2)$	0.135717	0.139525	+2.8
$L(mm)$	180	524	+191.1
$D(mm)$	60	93	+55
A_{dome}/A_{ref}	0.556	0.730	+31.3
L/D	3	5.62	+87.3

Πίνακας 4. 8: Σύγκριση αποτελεσμάτων του J85 για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

Όπως και στην άλλη μέθοδο, έτσι και εδώ οι διαφορές είναι μεγάλες και αν εξαιρέσουμε την επιφάνεια αναφοράς A_{ref} που προσεγγίζεται ικανοποιητικά, όλες οι άλλες διαστάσεις δεν βρίσκονται κοντά στις πραγματικές. Επίσης, επειδή εδώ το V_{ref} είναι λογικά σωστό, δεδομένου ότι το A_{ref} είναι σωστό, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα πως η αιτία των αποκλίσεων είναι μάλλον οι απώλειες στο μανδύα ή ακόμα και το pattern factor (pf). Αυτό είναι κατανοητό από το γεγονός ότι από τη θεωρία των προηγούμενων κεφαλαίων οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο το σχεδιασμό είναι το pf, οι απώλειες ΔP_{liner} , τα μεγέθη αναφοράς καθώς και οι επιλογές που έχουν να κάνουν με τη ζώνη καύσης.

4. 3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω στοιχεία και τη σύγκριση που έγινε, καθίσταται σαφές πως χωρίς την επαρκή γνώση βασικών τιμών των παραμέτρων που επιδρούν σημαντικά στο σχεδιασμό, είναι παράτολμη η χρήση των εμπειρικών μεθόδων για τον τελικό σχεδιασμό. Επιπλέον γίνεται καθαρή η ανάγκη να βρεθούν από το σύνολο των παραμέτρων, εκείνες οι οποίες έχουν καθοριστικότερο ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα. Άρα κρίνεται αναγκαίο να γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας, η οποία θα δώσει σε μεγάλο βαθμό απαντήσεις για το ποιες παράμετροι θα πρέπει να προσεχθούν περισσότερο κατά την επιλογή των τιμών τους, καθώς και για το ποια μεγέθη του θαλάμου επηρεάζει η καθεμία από αυτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου κατέδειξαν την αναγκαιότητα να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας, έτσι ώστε να βρεθούν ποιες παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό είναι σημαντικότερες. Έτσι, σε αυτό το κεφάλαιο έγινε η ανάλυση για τους δύο κινητήρες που έχουμε επιλέξει. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να μελετηθούν δεν είναι το σύνολο των παραμέτρων που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα, αλλά μόνο αυτές που όπως έχει ειπωθεί, κινούνται μέσα σε ένα εύρος τιμών. Ο λόγος είναι ότι κάποιες από αυτές είναι γνωστό ότι δεν παρουσιάζουν αξιολογες μεταβολές από θάλαμο σε θάλαμο και επιπλέον δεν επηρεάζουν το σύνολο του σχεδιασμού.

Οι παράμετροι με τις οποίες θα ασχοληθούμε και οι οποίες έχουν ειπωθεί ξανά στην ενότητα 3.7.3 είναι: Ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη (Φ_{pz}), η πτώση πίεσης στο μανδύα ως ποσοστό των συνολικών απωλειών πίεσης ($\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$), η κατανομή της θερμοκρασίας στην εξόδου του θαλάμου καύσης (pattern factor), η διείσδυση στο μανδύα ($Y_{max}/depth$) και ο λόγος πυκνοτήτων δέσμης-ρεύματος (ρ_j/ρ_g). Τέλος, εκτός από τις παραπάνω, στη μέθοδο των ταχυτήτων είναι ακόμα οι ταχύτητες θόλου και «περάσματος» (V_{dome} , $V_{passage}$).

Συνεπώς, για τις δύο μεθόδους, καθώς και για τις παραμέτρους που είπαμε, σχεδιάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα. Αυτά τα διαγράμματα, ως άξονα y έχουν την ποσοστιαία μεταβολή του μεγέθους που μετράμε σε σχέση με το αποτέλεσμα που είχε το μέγεθος αυτό για την τυπική τιμή της παραμέτρου που είχε επιλεγεί, ενώ στον άξονα x είναι η τιμή της παραμέτρου. Παρακάτω, στα διαγράμματα η ποσοστιαία μεταβολή θα αναφέρεται ως Y.

Για να γίνει κατανοητό το πώς έγινε η ανάλυση ευαισθησίας, πρέπει να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο προέκυψαν τα διαγράμματα που ακολουθούν. Έτσι, για κάθε παράμετρο που μελετάται, μεταβάλλεται η τιμή της από το κατώτατο όριο που έχει τεθεί μέχρι το ανώτατο, ενώ την ίδια στιγμή οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παραμένουν σταθερές και ίσες με τις τυπικές τους τιμές που έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3 (Πίνακας 3.2). Συνεπώς, για κάθε διαφορετική τιμή της παραμέτρου, έχουμε διαφορετική είσοδο στο πρόγραμμα και άρα διαφορετική έξοδο. Οι τιμές των μεγεθών που υπολογίζουμε καταγράφονται και στη συνέχεια σχεδιάζονται οι καμπύλες.

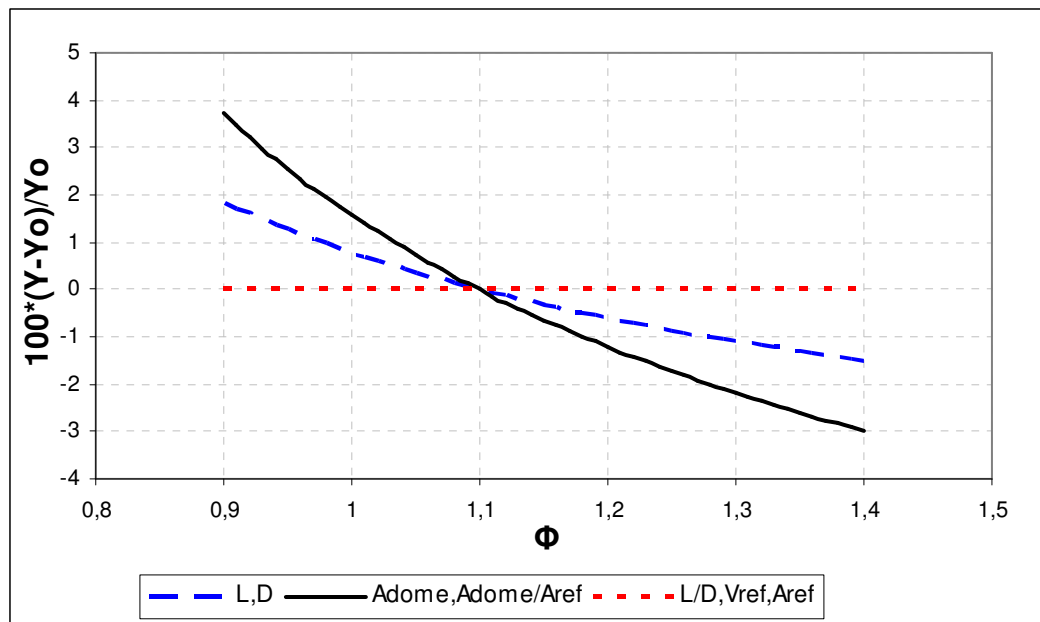
Όλες οι μεταβολές των μεγεθών, για κάθε παράμετρο, απεικονίζονται σε τρία διαγράμματα. Στο πρώτο είναι τα μεγέθη αναφοράς, το μήκος L, το βάθος D, ο λόγος L/D και ο λόγος A_{dome}/A_{ref} (παρακάτω θα αναφέρονται ως βασικά μεγέθη). Στο δεύτερο είναι ο αριθμοί των οπών σε κάθε σειρά (θα συμβολίζονται με nh), και στο τρίτο είναι οι διαμέτροι των οπών σε κάθε σειρά (θα συμβολίζονται με dh). Εξαίρεση αποτελεί το pattern factor, όπου σε αυτό, έχουμε μόνο τη μεταβολή του μήκους και του λόγου L/D, διότι όλα τα άλλα μένουν σταθερά και για λόγους συντομίας και απλότητας δεν παρατίθενται.

5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ J79

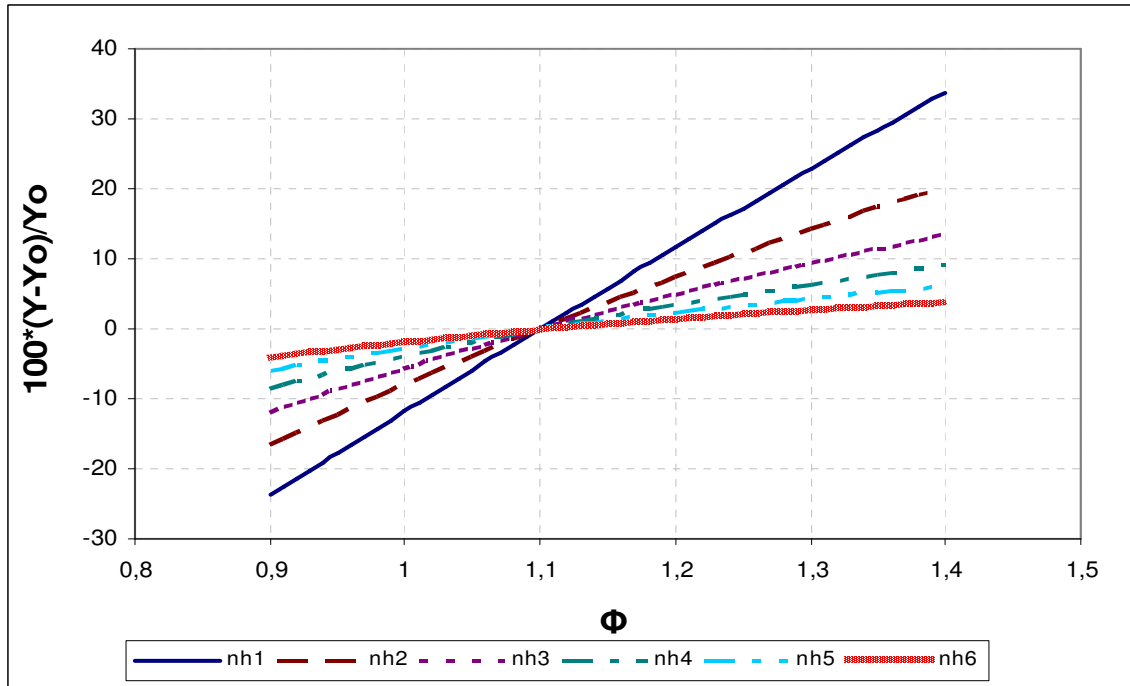
Τα διαγράμματα που προέκυψαν για τον J79 βάσει της μεθόδου των ταχυτήτων και αυτής των απωλειών πίεσης είναι:

5.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ

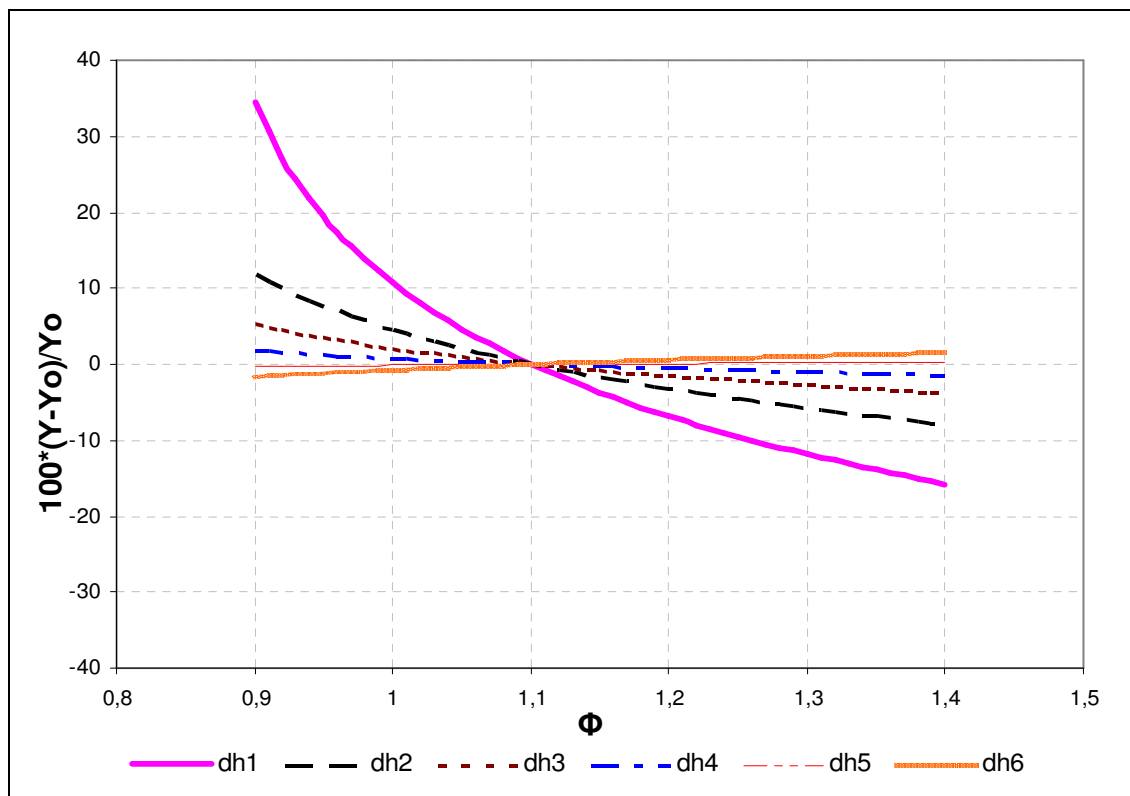
5.1.1.1 Επίδραση Λόγου Ισοδυναμίας Φρζ



Διάγραμμα 5. 1 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος



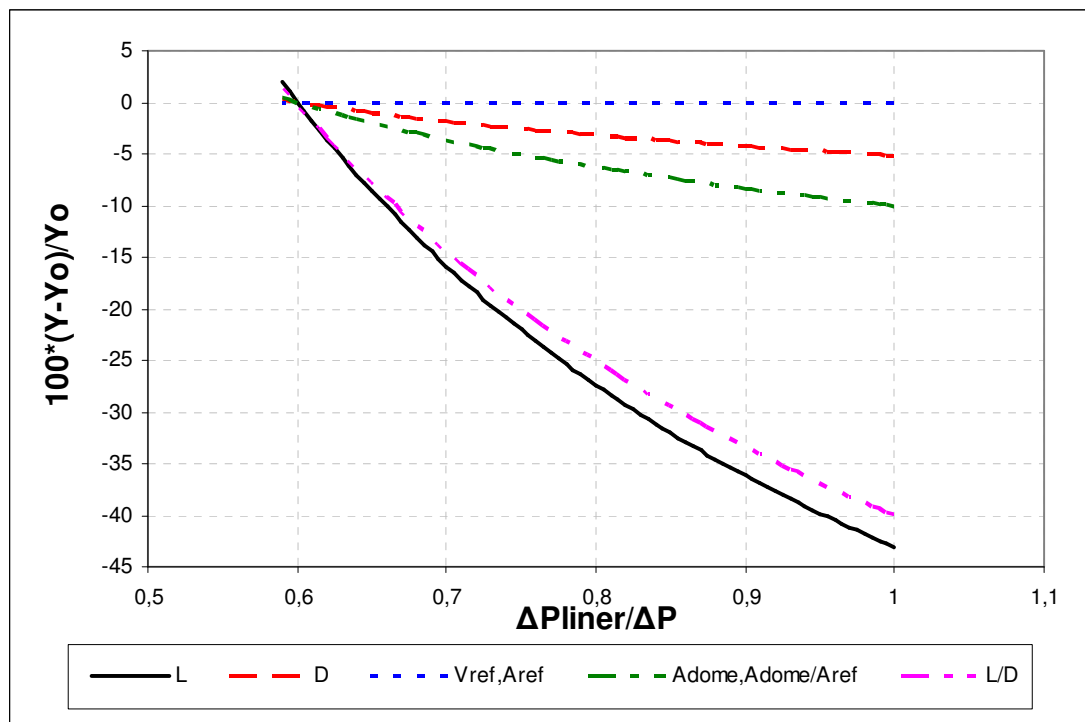
Διάγραμμα 5. 2 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



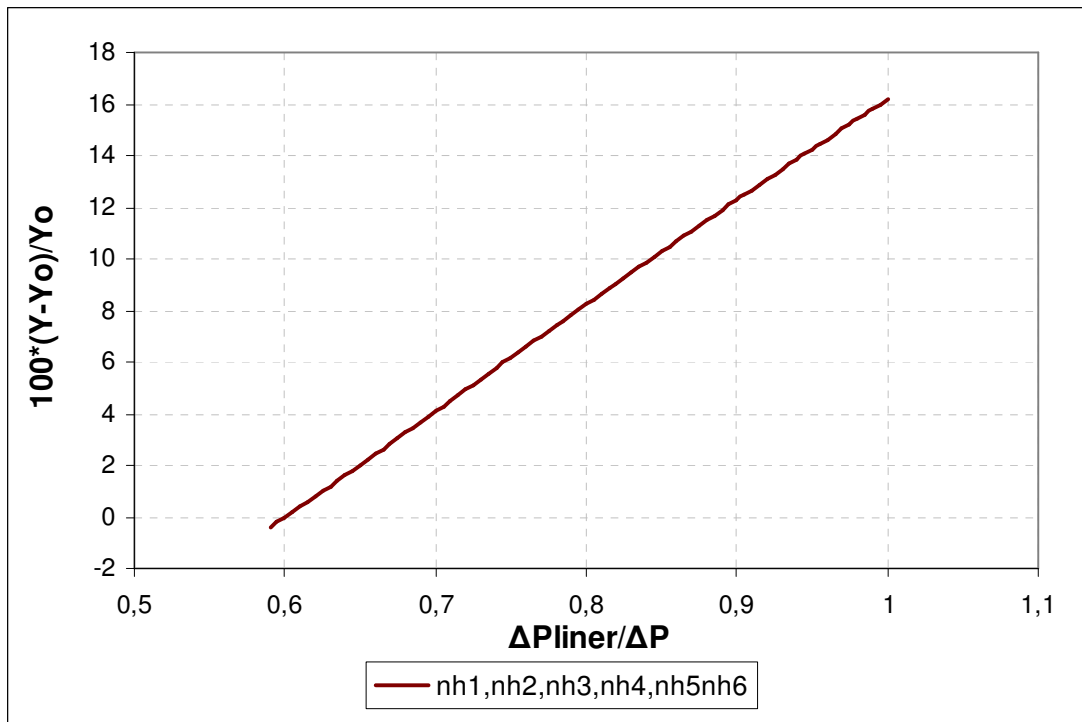
Διάγραμμα 5. 3 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Η παράμετρος Φ της πρωτεύουσας ζώνης δείχνει να είναι πολύ σημαντική όσον αφορά το σχεδιασμό. Διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό τη διάμετρο και τον αριθμό των οπών και η επιρροή αυτή δείχνει να μειώνεται κατάντι της φλόγας. Δηλαδή η πρώτες σειρές οπών επηρεάζονται περισσότερο. Επιπλέον, το μήκος και το βάθος έχουν μια μέγιστη μεταβολή της τάξης του 1-2% ενώ τα μεγέθη αναφοράς παραμένουν σταθερά. Τέλος, παρατηρείται ότι η ποσοστιαία μεταβολή του αριθμού των οπών ανά εγκάρσια σειρά έχει γραμμική σχέση με το λόγο ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη.

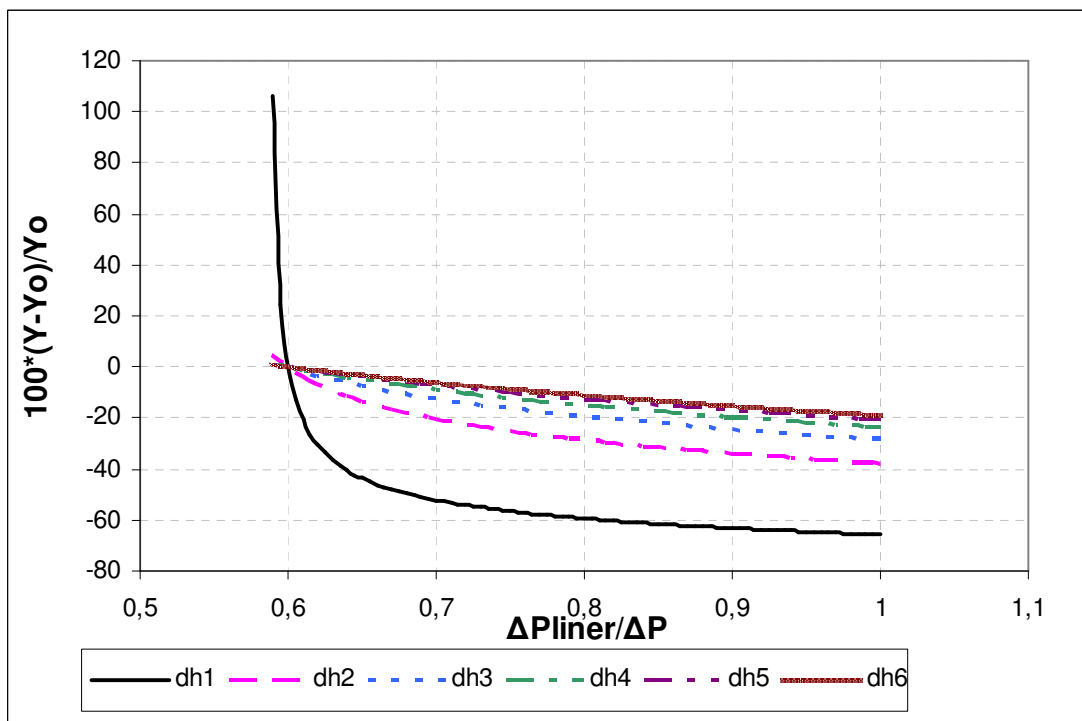
5.1.1. 2 Επίδραση Ποσοστού Απωλειών Μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$



Διάγραμμα 5. 4 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{liner}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



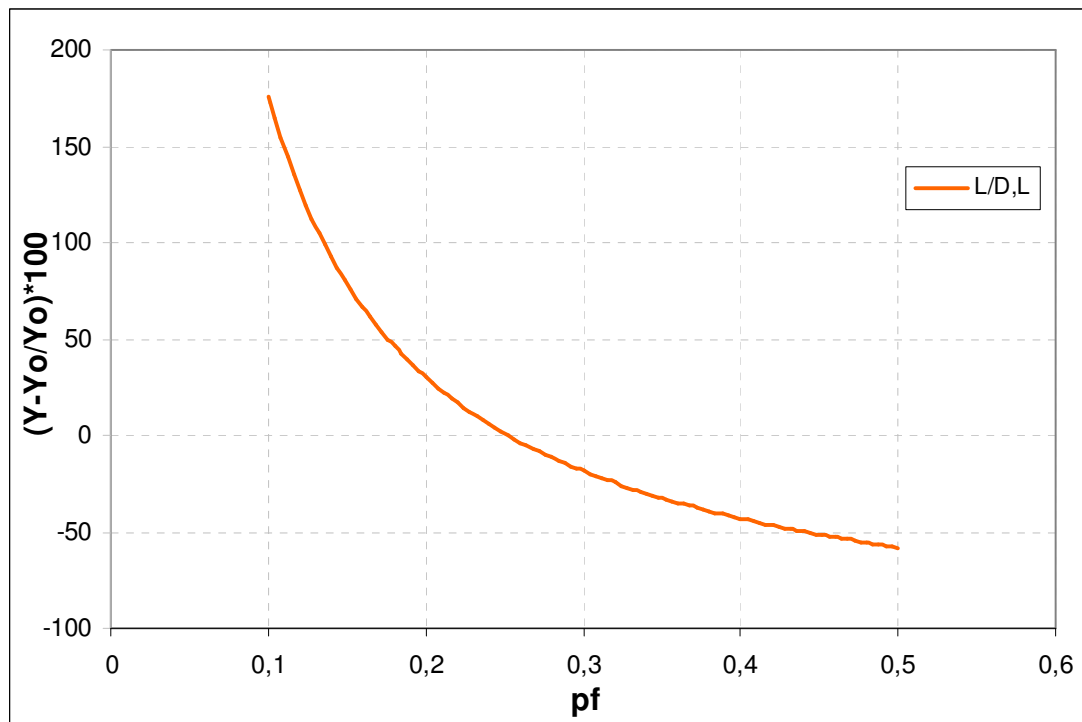
Διάγραμμα 5. 5 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{liner}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 6 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{liner}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Η μεταβολή του ποσοστού της πτώσης πίεσης στο μανδύα, όπως και το Φ , επιδρά περισσότερο στις πρώτες οπές όσον αφορά τη διάμετρο, ενώ σε ότι έχει να κάνει με τον αριθμό των οπών, η μεταβολή είναι ίδια για όλες τις σειρές και μάλιστα η σχέση που συνδέει τις μεταβολές είναι γραμμική. Ακόμα, οι διαστάσεις του θαλάμου καύσης και ειδικά το μήκος του μανδύα, έχουν αξιοσημείωτη μεταβολή. Τέλος, τα μεγέθη αναφοράς δεν αλλάζουν.

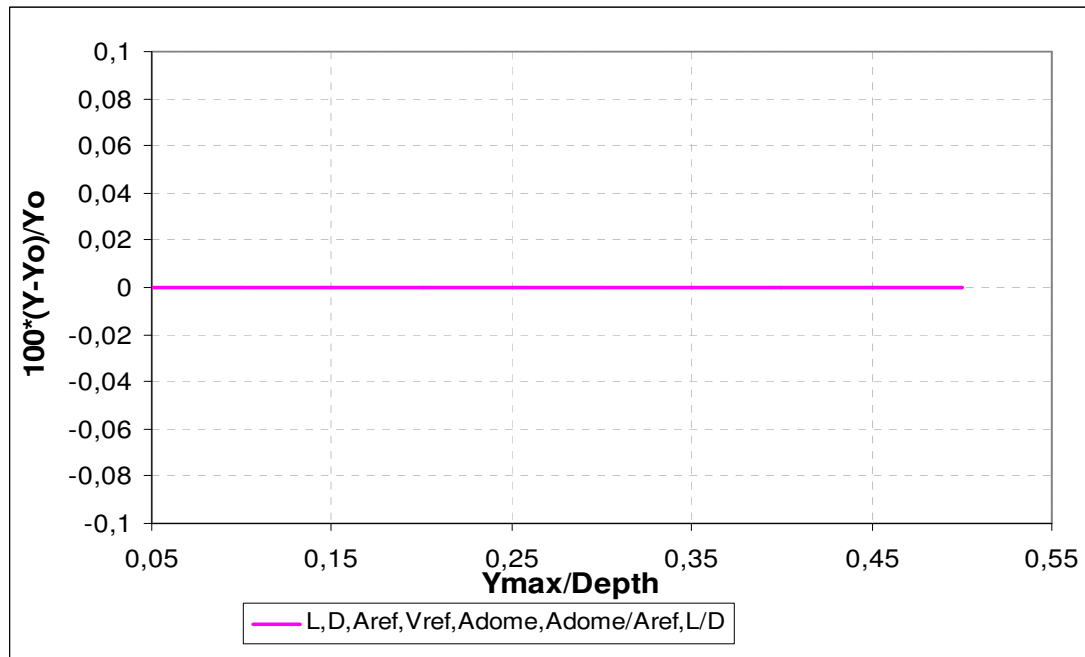
5.1.1. 3 Επίδραση PF (pattern factor)



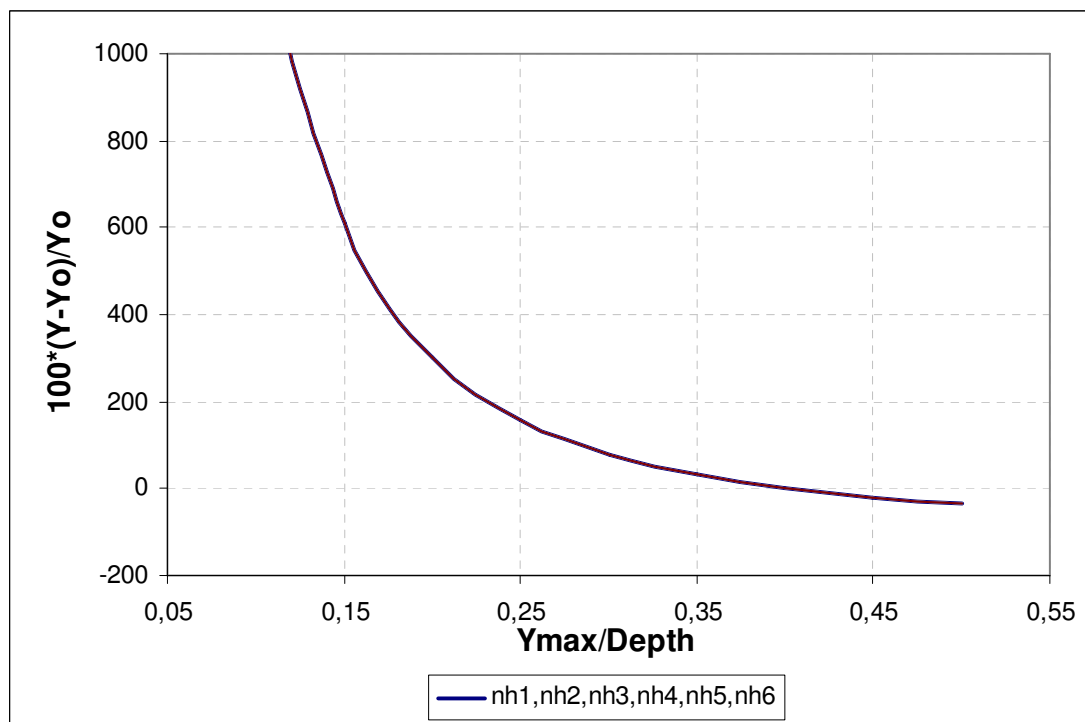
Διάγραμμα 5. 7 Επίδραση της παραμέτρου pf στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, το pf έχει επίδραση μόνο στο μήκος L και μάλιστα αρκετά μεγάλη. Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το pf, τόσο μειώνεται το απαιτούμενο μήκος του μανδύα, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία [2].

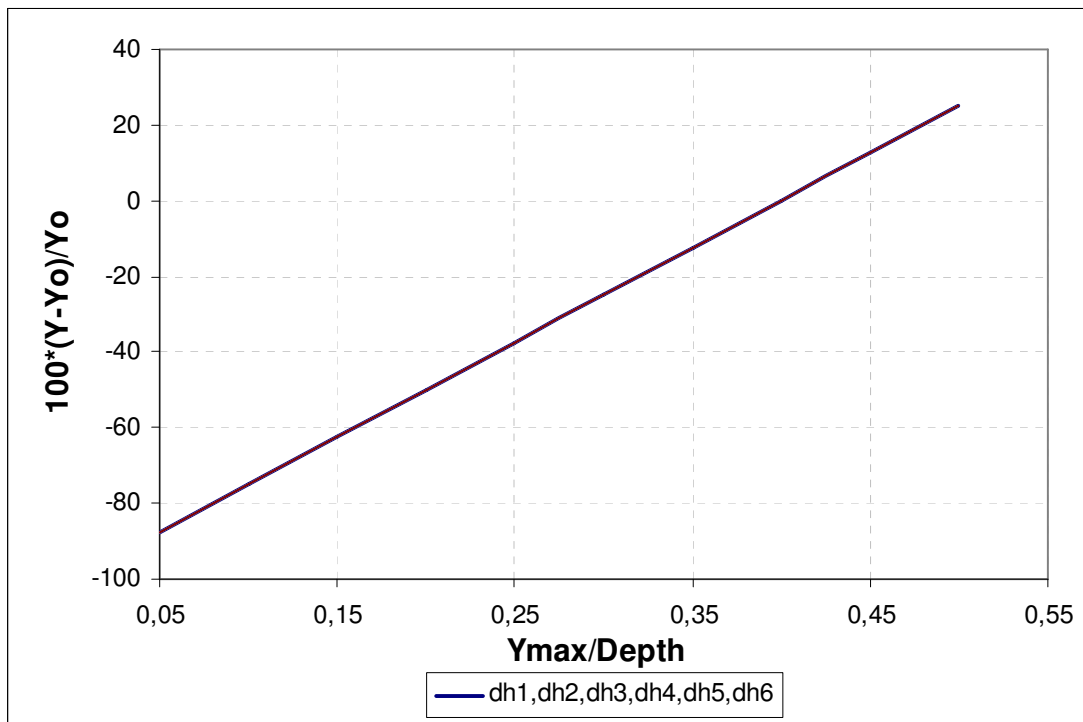
5.1.1. 4 Επίδραση Διείσδυσης Στο Μανδύα $Y_{max}/Depth$



Διάγραμμα 5. 8 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος



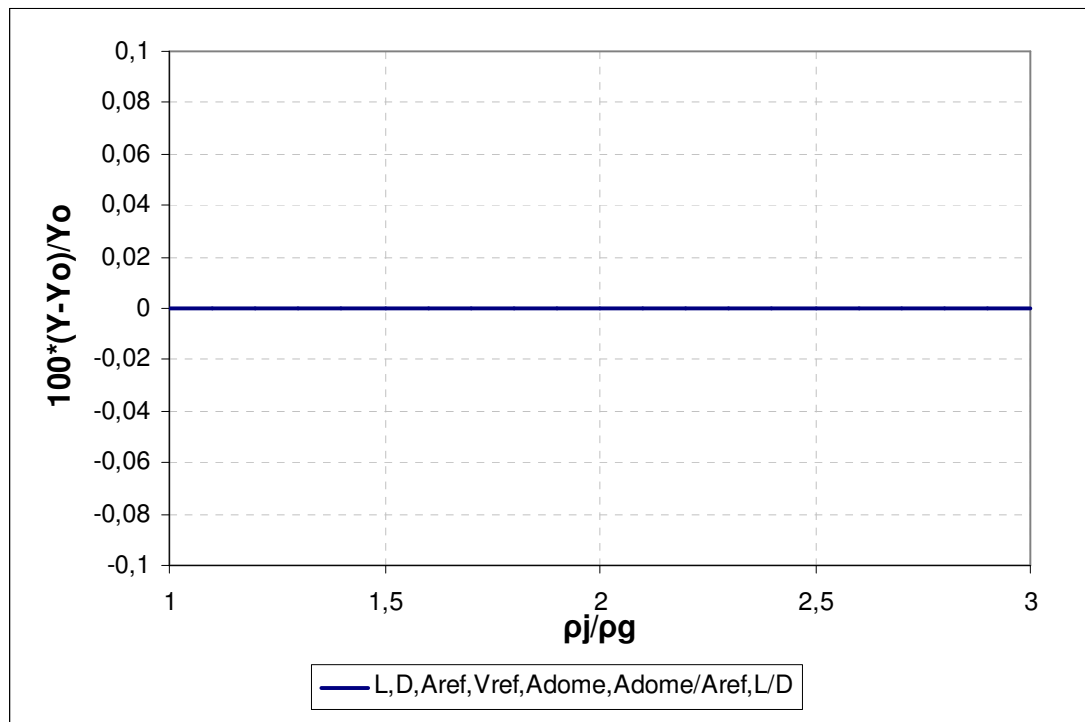
Διάγραμμα 5. 9 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος



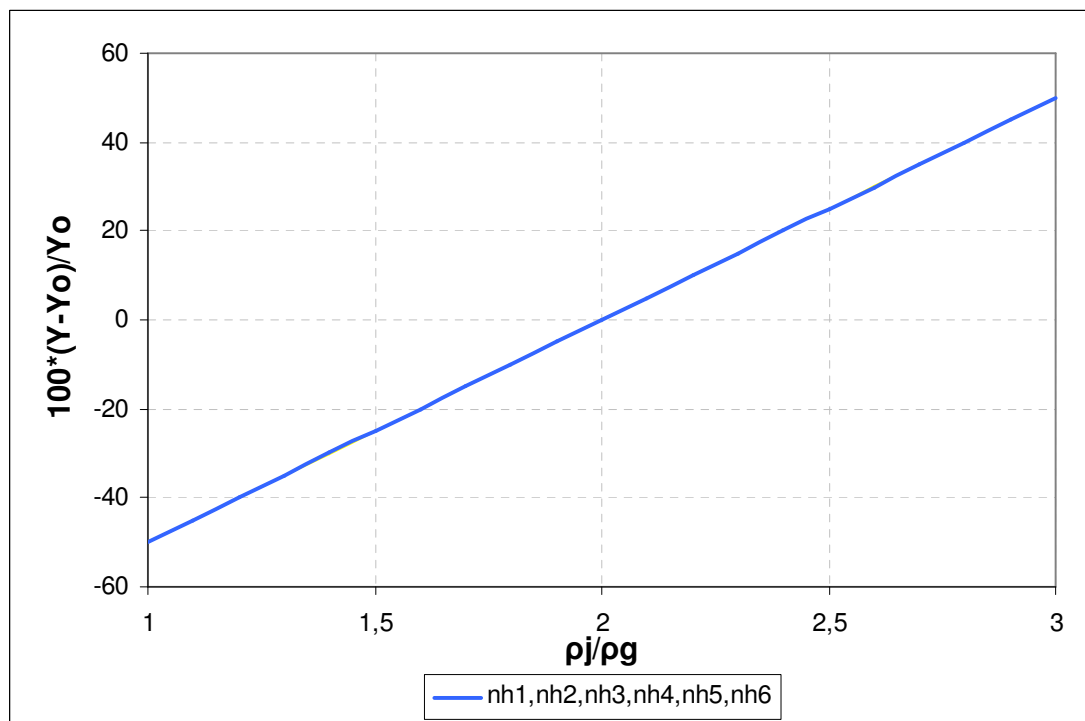
Διάγραμμα 5. 10 Επίδραση της παραμέτρου Y_{\max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Η μεταβολή της διείσδυσης μέσα στο ρεύμα του μανδύα δεν έχει καμία επίδραση στο μέγεθος του θαλάμου καύσης ή του μανδύα. Η αλλαγή που προκαλεί είναι μόνο στον αριθμό των οπών καθώς και στη διάμετρο τους. Όμως, η αλλαγή αυτή είναι ίδια σε κάθε σειρά. Το γεγονός ότι η μεταβολή αυτής της παραμέτρου αφορά μόνο τις οπές μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό από τις εξισώσεις του κεφαλαίου 3. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η σχέση που συνδέει την ποσοστιαία μεταβολή της διαμέτρου των οπών με τη διείσδυση είναι γραμμική.

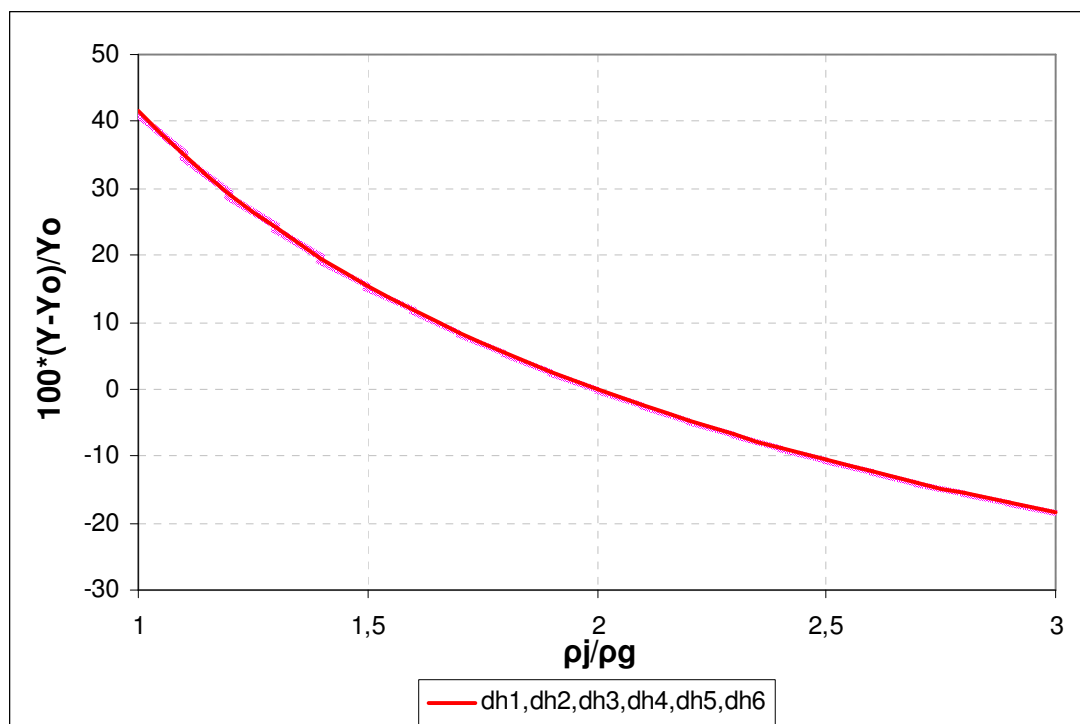
5.1.1. 5 Επίδραση Λόγου Πυκνοτήτων ρ_j/ρ_g



Διάγραμμα 5. 11 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 12 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 13 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

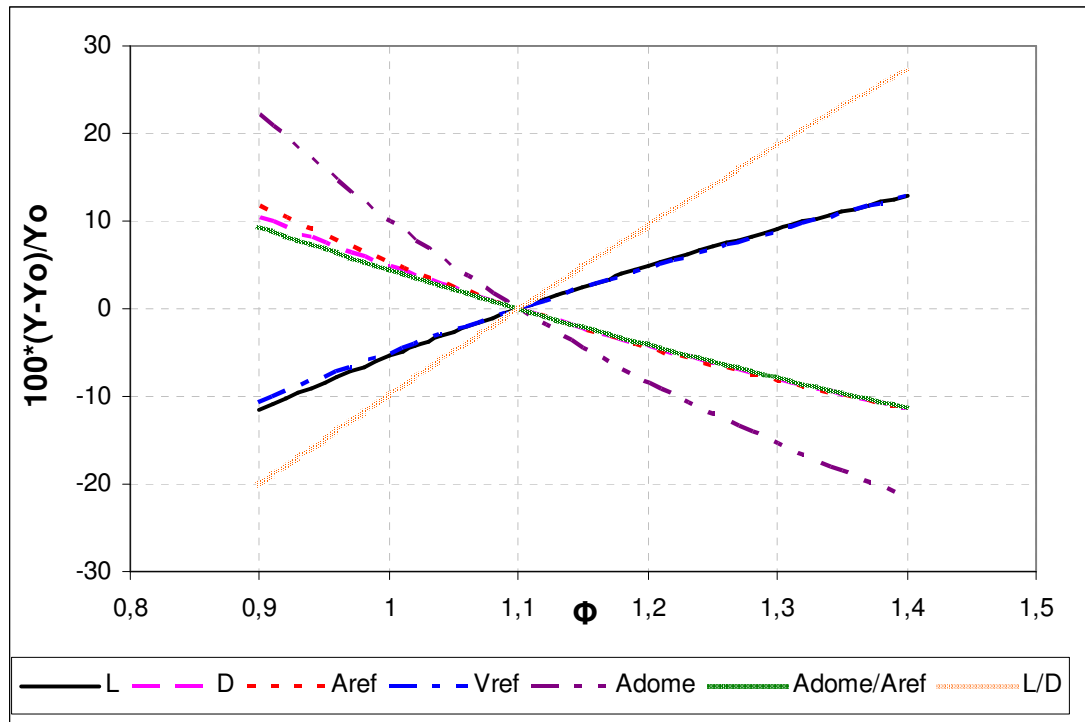
Ανάλογα με την προηγούμενη παράγραφο, εκτός από τις εξισώσεις του κεφαλαίου 3, με τα παραπάνω διαγράμματα επιβεβαιώνεται ότι ο λόγος των πυκνοτήτων δέσμης-κυρίως ρεύματος επιδρά μόνο στις οπές και ανεξάρτητα από τη σειρά στην οποία βρίσκονται. Επιπρόσθετα, φαίνεται ότι η επιρροή που έχει στο τελικό αποτέλεσμα είναι λίγο μικρότερη σε σχέση με τη διείδυση και ότι η επίδραση είναι αντίθετη. Δηλαδή αυξανόμενης της παραμέτρου, οι οπές αυξάνονται και η διάμετρος μικραίνει.

5.1.1. 6 Συμπεράσματα

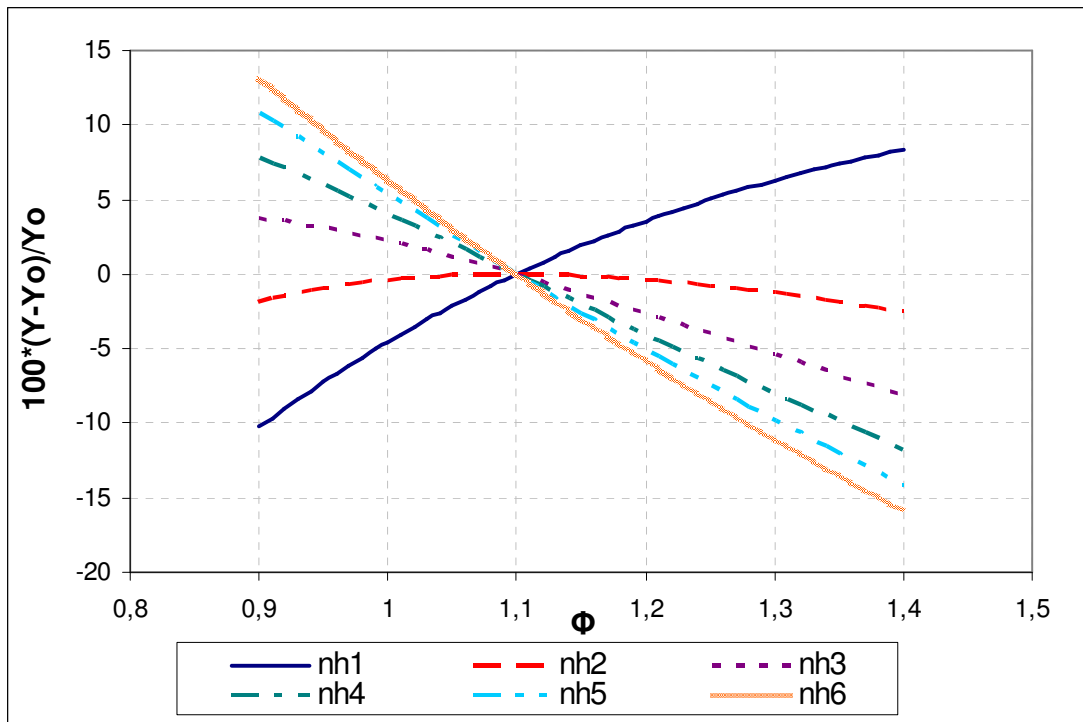
Βάσει όλων των παραπάνω διαγραμμάτων και παρατηρήσεων, στη μέθοδο των απωλειών πίεσης για τον J79 γίνεται σαφές πως ο λόγος ισοδυναμίας Φ_{pz} επηρεάζει σε μικρό βαθμό τα κύρια γεωμετρικά μεγέθη όπως το μήκος και το βάθος του μανδύα, όμως έχει σημαντική επίδραση στις οπές. Από την άλλη, οι απώλειες πίεσης στο μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P$ δείχνουν να επιδρούν κυρίως στο μήκος του μανδύα. Η επίδραση στο βάθος είναι μεγαλύτερη αυτής του Φ_{pz} , ενώ στις οπές φαίνεται πως η πτώση πίεσης στο μανδύα αν και έχει διαφορετική μορφή, δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, ιδιαίτερα για τις πρώτες σειρές. Προχωρώντας, όπως έχει ήδη ειπωθεί, το pf δρα μόνο στο μήκος και η επίδραση του δείχνει να είναι η πιο άξια προσοχής εν συγκρίσει με τις δύο προαναφερθείσες παραμέτρους. Στη συνέχεια, η διείδυση στο μανδύα διαφοροποιεί σε πολύ μεγάλο βαθμό τις οπές, τις οποίες επηρεάζει το ίδιο ανεξάρτητα της σειράς στην οποία βρίσκονται, ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη του θαλάμου καύσης παραμένουν αμετάβλητα. Το ίδιο συμβαίνει και με το λόγο των πυκνοτήτων σε μικρότερο όμως βαθμό.

5.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

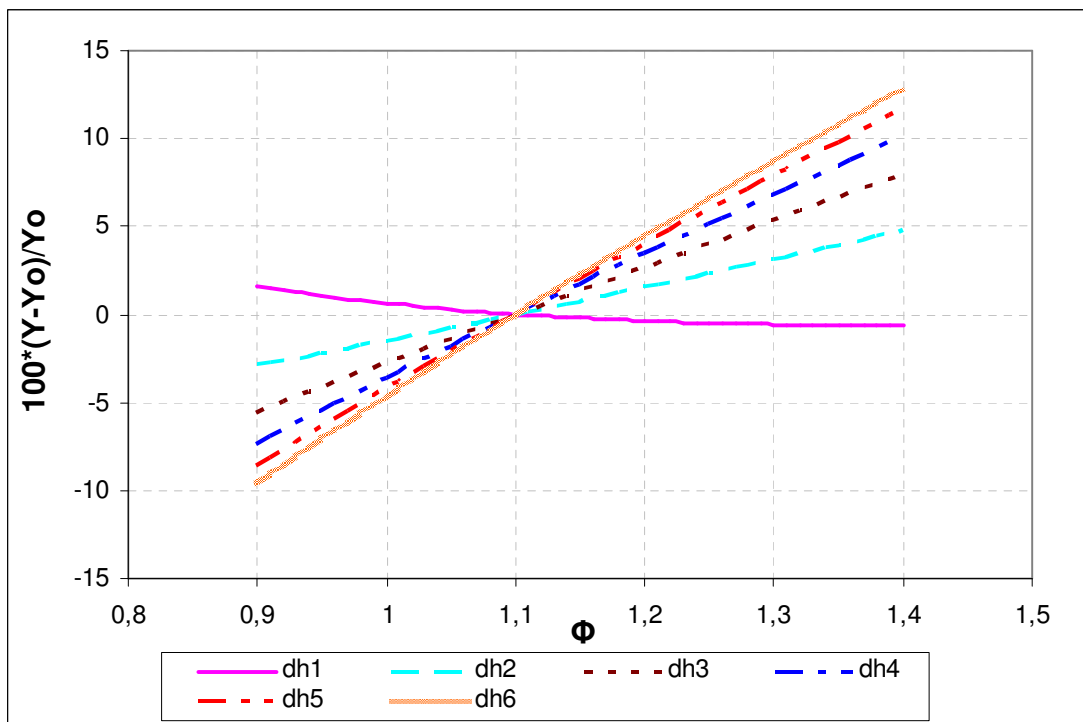
5.1.2.1 Επίδραση Λόγου Ισοδυναμίας Φρζ



Διάγραμμα 5. 14 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος



Διάγραμμα 5. 15 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



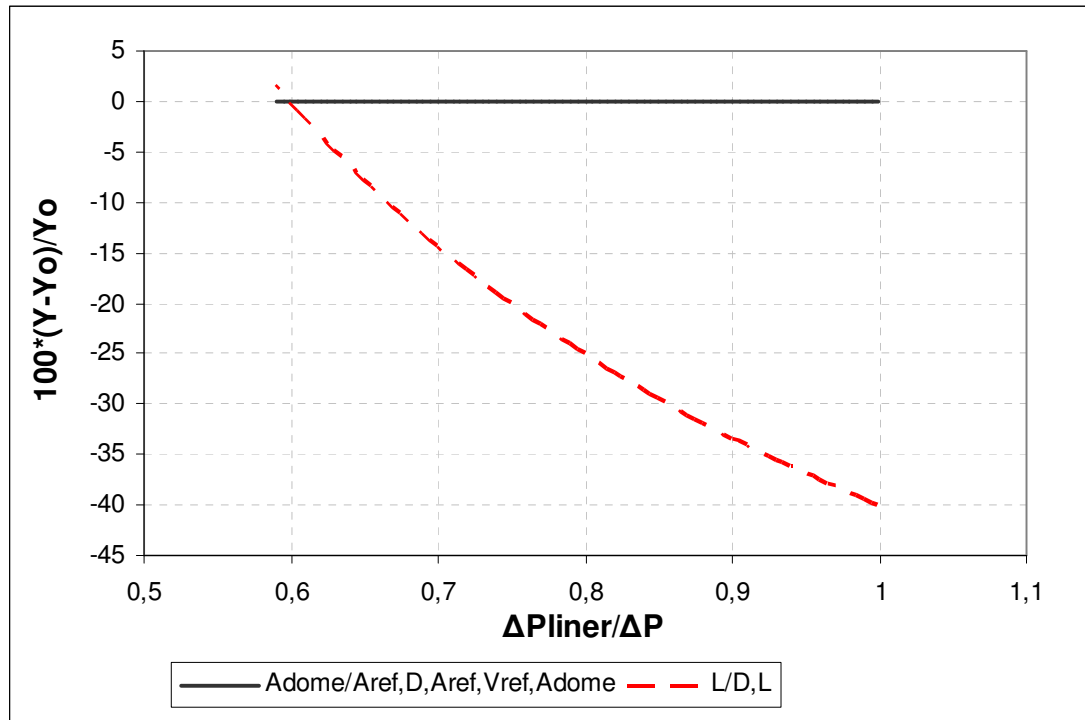
Διάγραμμα 5. 16 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Στη μέθοδο των ταχυτήτων η μεταβολή του Φ εν συγκρίσει με τη μέθοδο των απωλειών πίεσης, επηρεάζει αρκετά περισσότερο τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη. Το μήκος και το βάθος του μανδύα, ανάλογα με το Φ , μεταβάλλονται μέχρι και 10% περίπου. Τη μεγαλύτερη μεταβολή δείχνει να έχει ο λόγος L/D και η επιφάνεια του

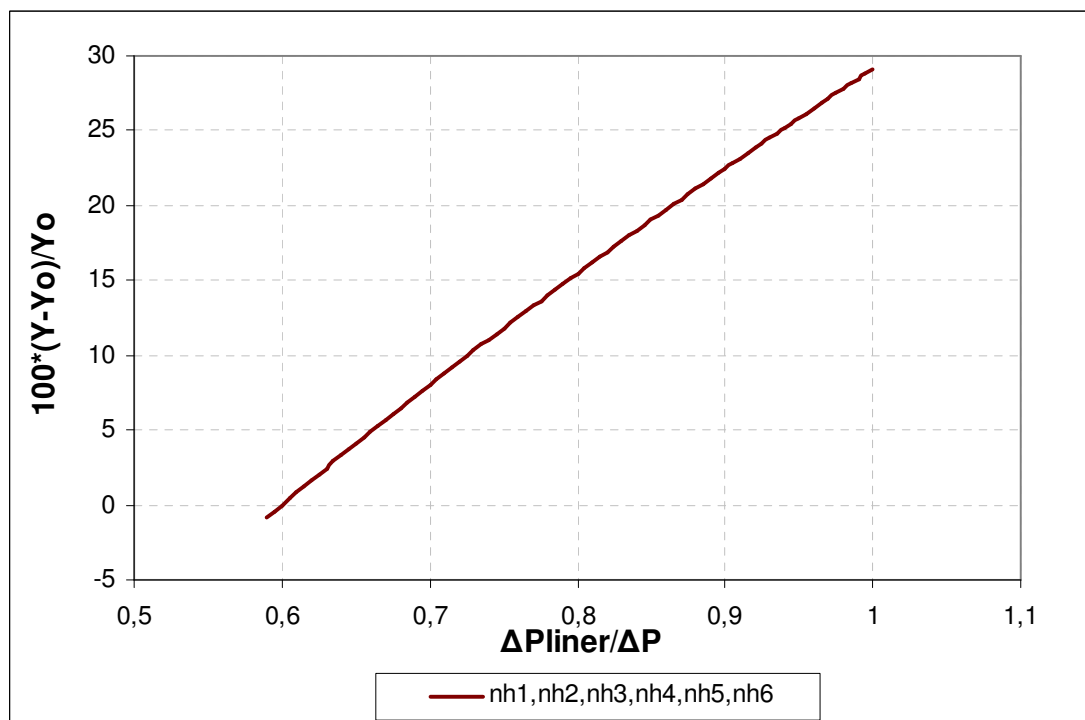
μανδύα, ενώ ακολουθούν τα μεγέθη αναφοράς με μέγιστη επίδραση η οποία αγγίζει το 13%.

Όσον αφορά τις οπές, ο αριθμός τους ανά σειρά μεταβάλλεται σημαντικά στις ακραίες σειρές, ενώ στις μεσαίες σειρές οι μεταβολές τείνουν να είναι μικρότερες, μέχρι και τη δεύτερη σειρά, όπου η μέγιστη διακύμανση στην ακραία τιμή του Φ είναι της τάξης του 2%. Η διάμετρος από την άλλη μεριά εμφανίζει μεγάλες μεταβολές στις τελευταίες σειρές οπών, ενώ όσο κινούμαστε ανάντι, η μεταβολή στην πρώτη σειρά είναι σχεδόν μηδενική.

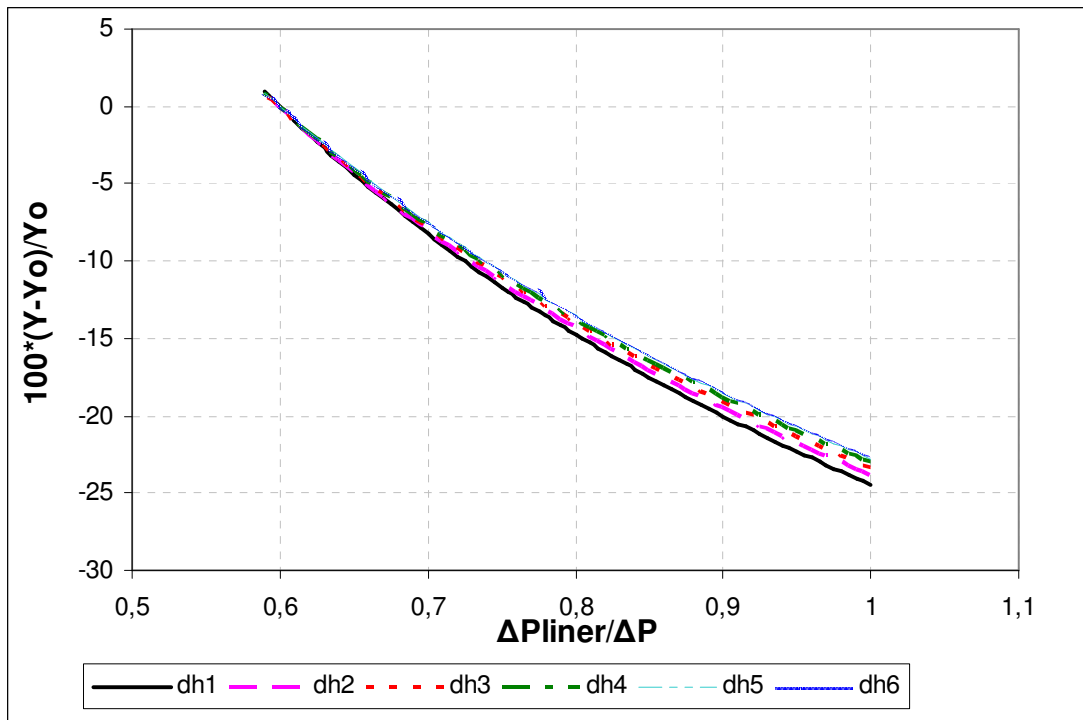
5.1.2. 2 Επίδραση Ποσοστού Απωλειών Μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$



Διάγραμμα 5. 17 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{liner}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 18 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{liner}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

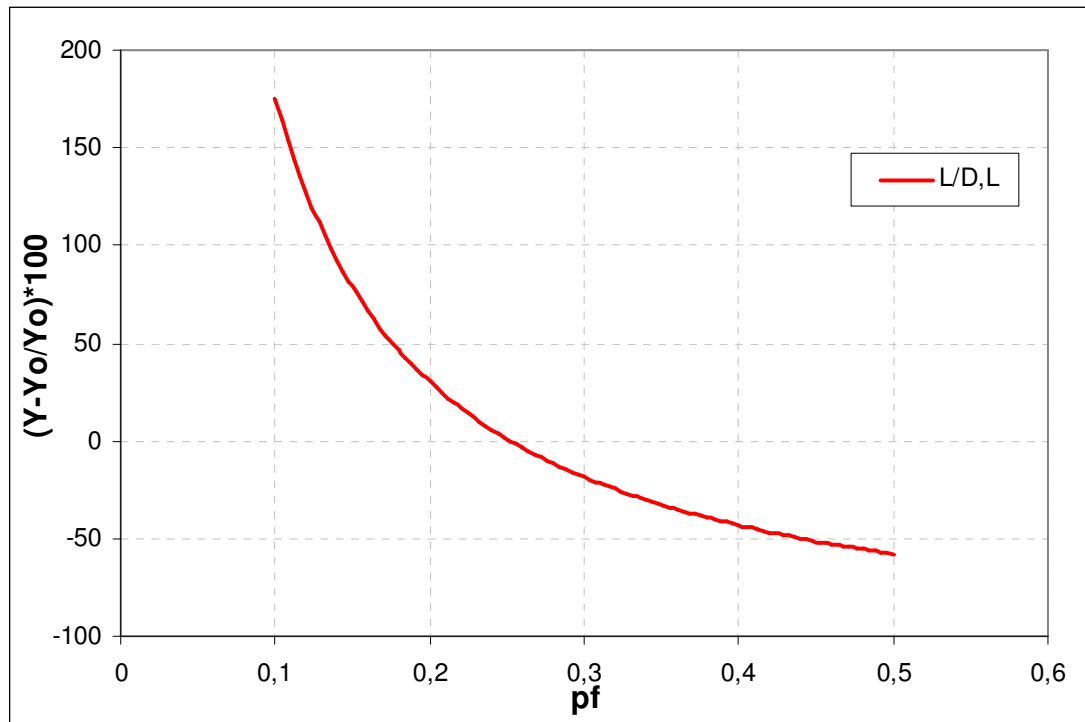


Διάγραμμα 5. 19 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{\text{liner}}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Η μεταβολή της παραμέτρου αυτής δεν μεταβάλλει καθόλου τα μεγέθη αναφοράς και το βάθος του μανδύα, όμως έχει μεγάλη επίδραση στο μήκος L και στο λόγο L/D όπως συνέβαινε και στην άλλη μέθοδο.

Ο αριθμός των οπών ανά σειρά μεταβάλλεται το ίδιο για κάθε σειρά, άλλα η μεταβολή αυτή είναι λίγο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μεταβολή της μεθόδου των απωλειών πίεσης. Τέλος, η διάμετρος επηρεάζεται περισσότερο στην πρώτη σειρά, αν και η επίδραση δεν παρουσιάζει σπουδαίες διαφορές από σειρά σε σειρά.

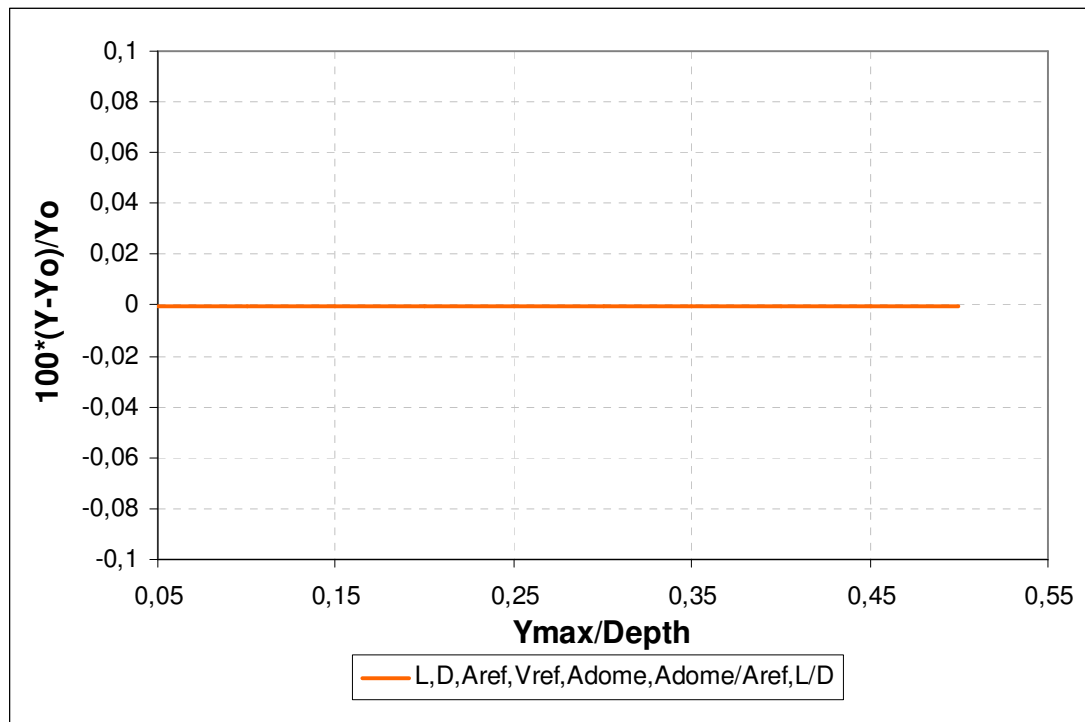
5.1.2. 3 Επίδραση PF (pattern factor)



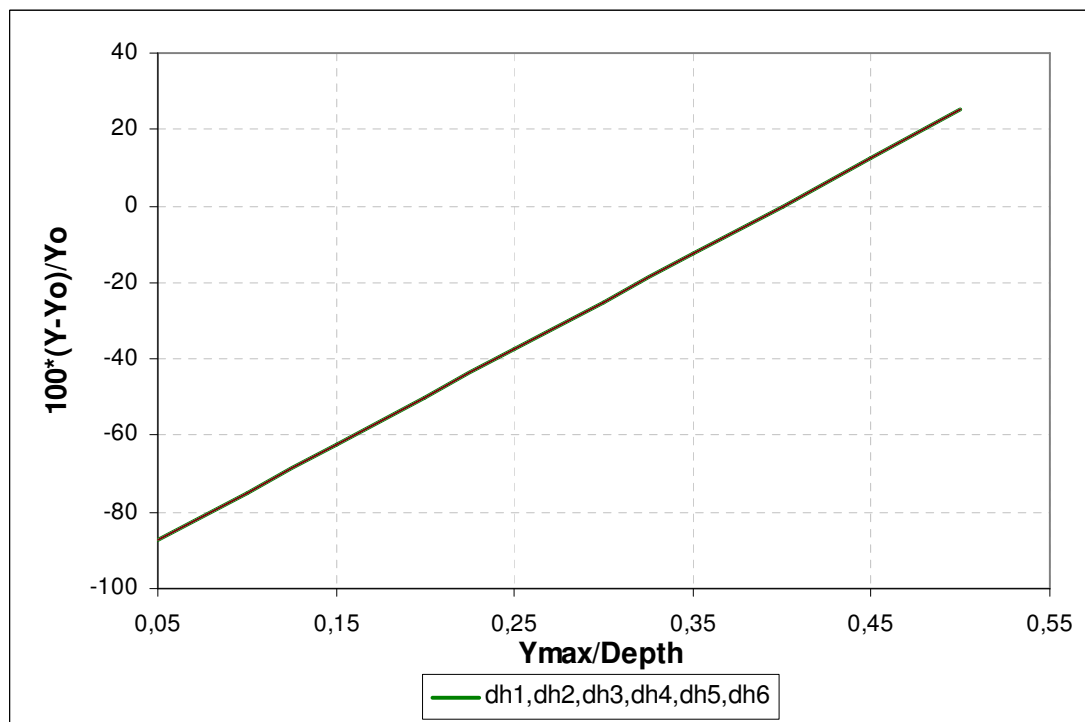
Διάγραμμα 5. 20 Επίδραση της παραμέτρου pf στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος

Η μεταβολή του pf αλλάζει μόνο το μήκος L και το λόγο L/D όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη μέθοδο. Επιπλέον γίνεται σαφές από το διάγραμμα ότι, ανεξάρτητα της μεθόδου, η μεταβολή είναι ακριβώς η ίδια μιας και χρησιμοποιείται η ίδια εξίσωση υπολογισμού.

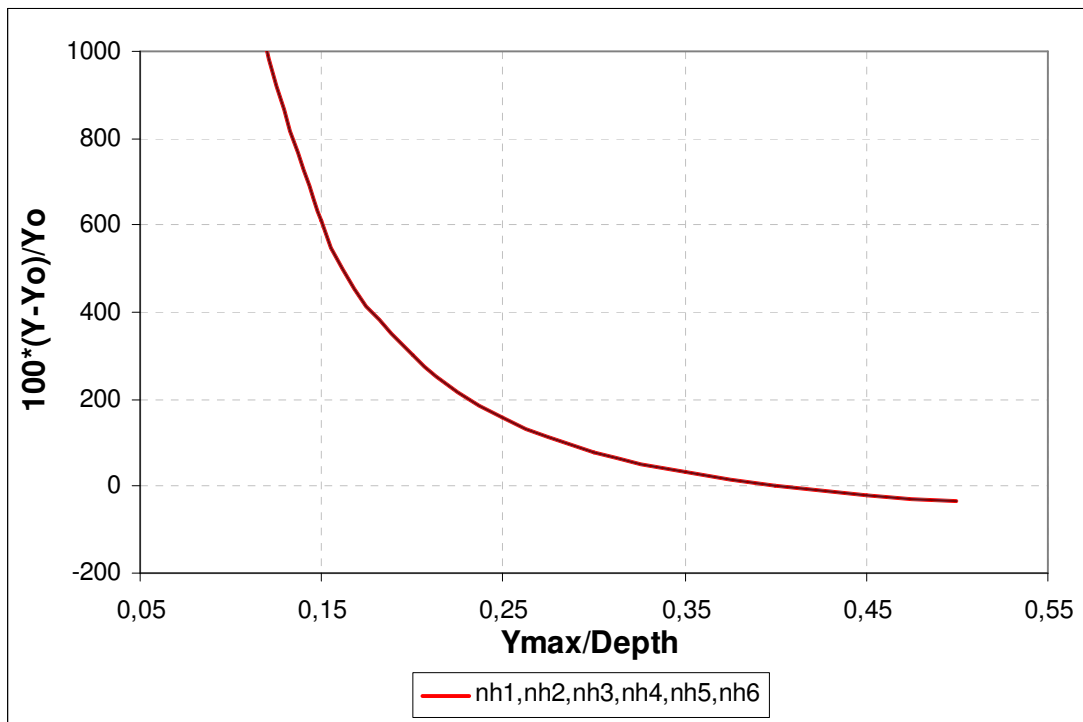
5.1.2. 4 Επίδραση Διείσδυσης Στο Μανδύα $Y_{max}/Depth$



Διάγραμμα 5. 21 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



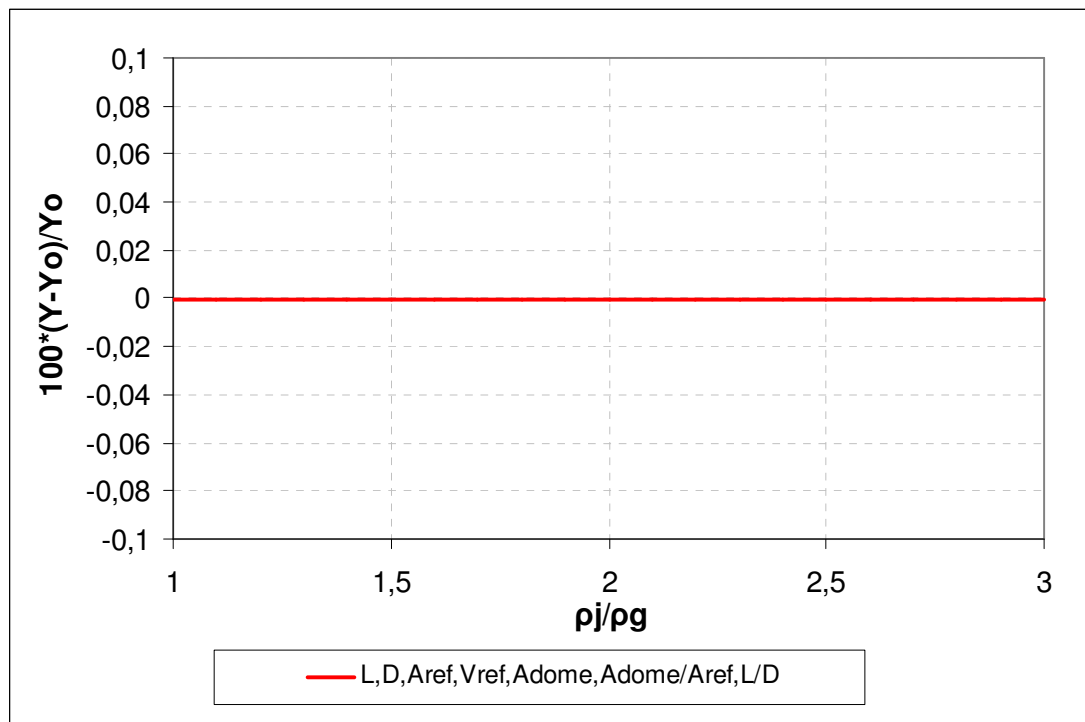
Διάγραμμα 5. 22 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



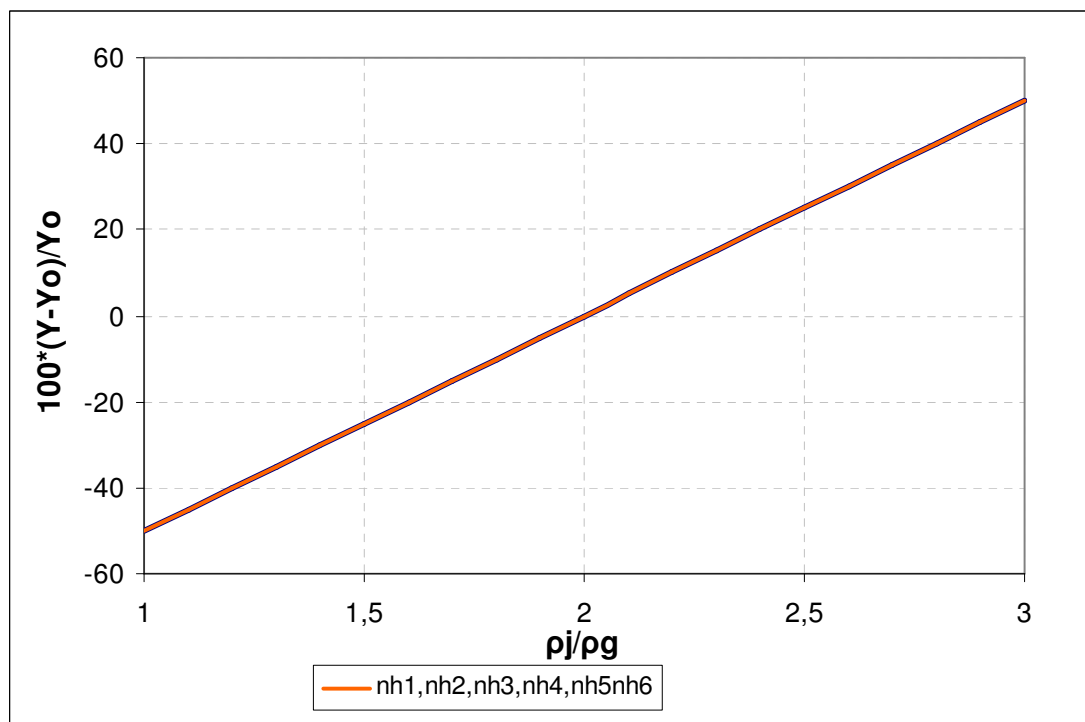
Διάγραμμα 5. 23 Επίδραση της παραμέτρου Y_{\max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Η επίδραση του Y_{\max}/Depth στο σχεδιασμό έχει να κάνει μόνο με τις σπές και αν συγκρίνει κανείς τα διαγράμματα με τα αντίστοιχα της μεθόδου των απωλειών πίεσης θα διαπιστώσει ότι η μεταβολές είναι ακριβώς οι ίδιες. Αυτό είναι λογικό, μιας και η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται όπως και το pf μόνο σε μια εξίσωση υπολογισμού, η οποία είναι ανεξάρτητη της μεθόδου που επιλέγεται.

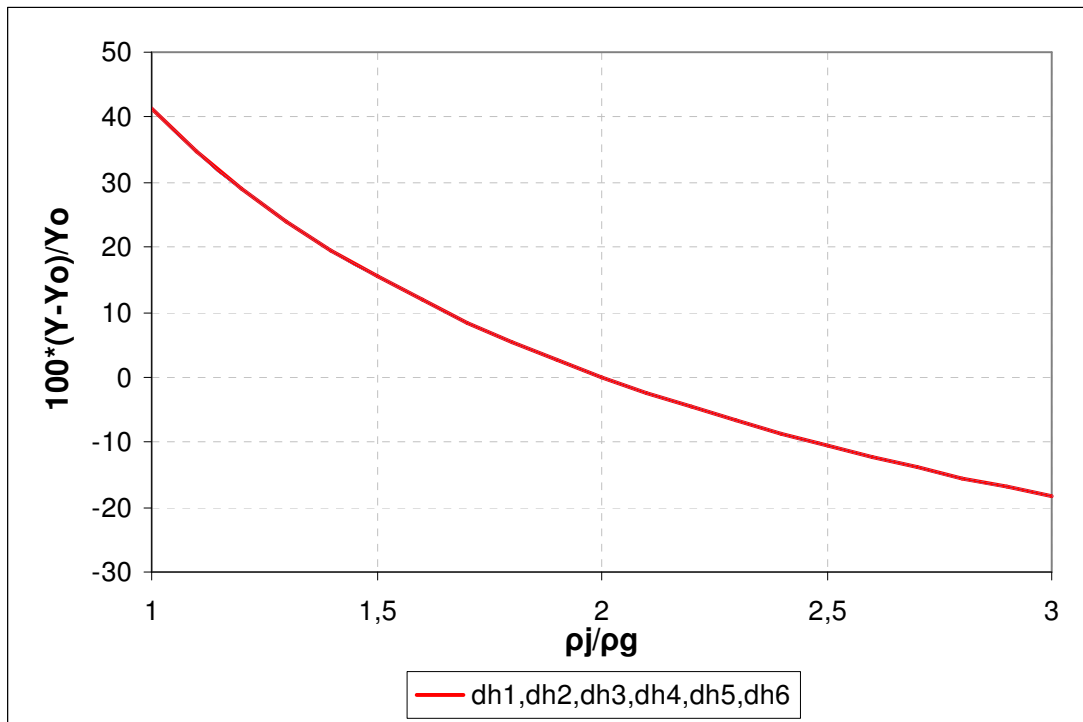
5.1.2. 5 Επίδραση Λόγου Πυκνοτήτων ρ_j/ρ_g



Διάγραμμα 5. 24 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



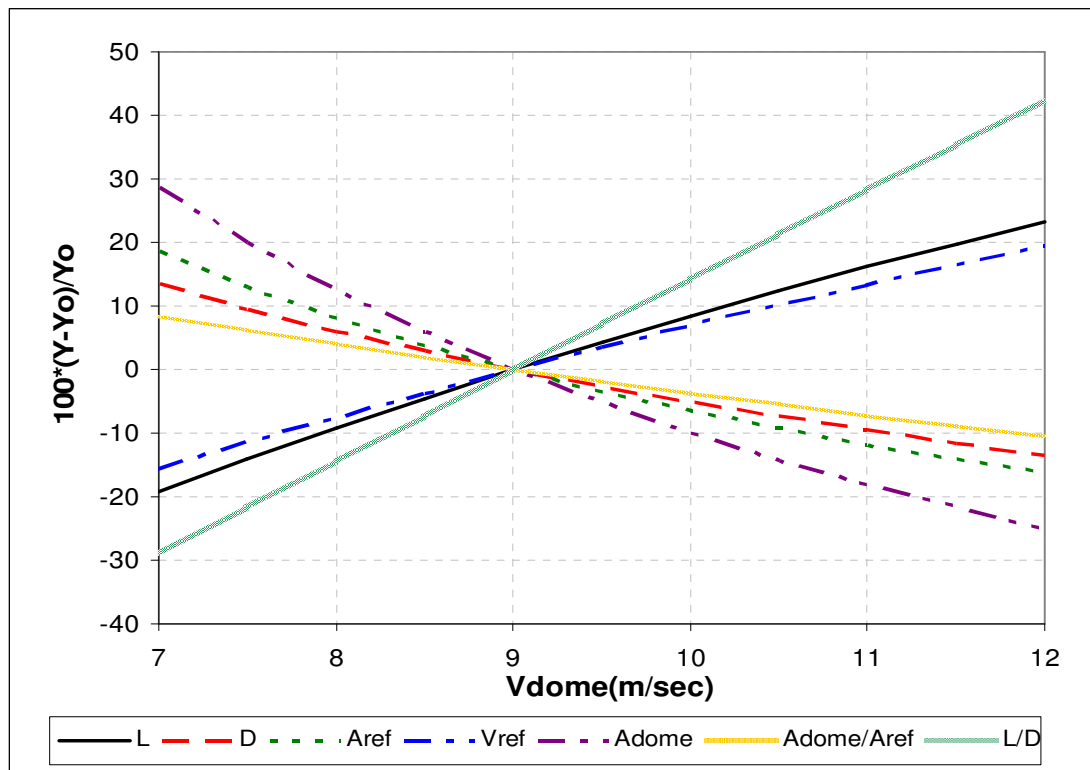
Διάγραμμα 5. 25 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



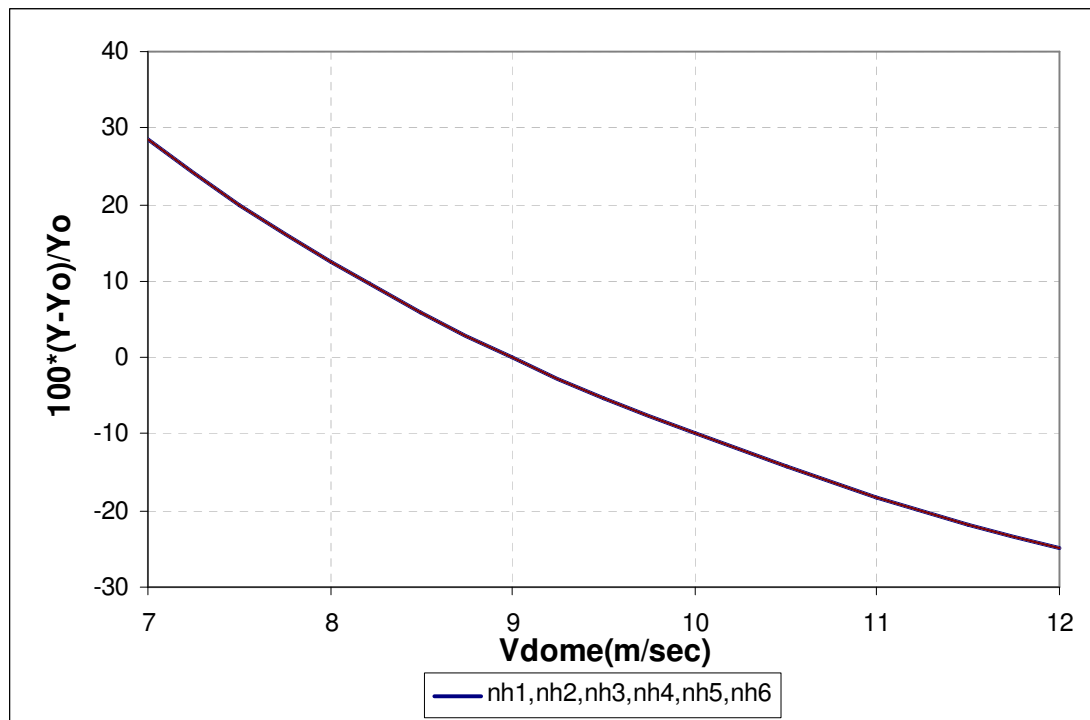
Διάγραμμα 5. 26 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j / ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Για τη μεταβολή του λόγου των πυκνοτήτων ισχύει, όπως και για την προηγούμενη παράμετρο, ότι η επίδραση στα μεγέθη είναι ανεξάρτητη της μεθόδου και επηρεάζει μόνο τον αριθμό και την διάμετρο των σπών, εξίσου για κάθε σειρά.

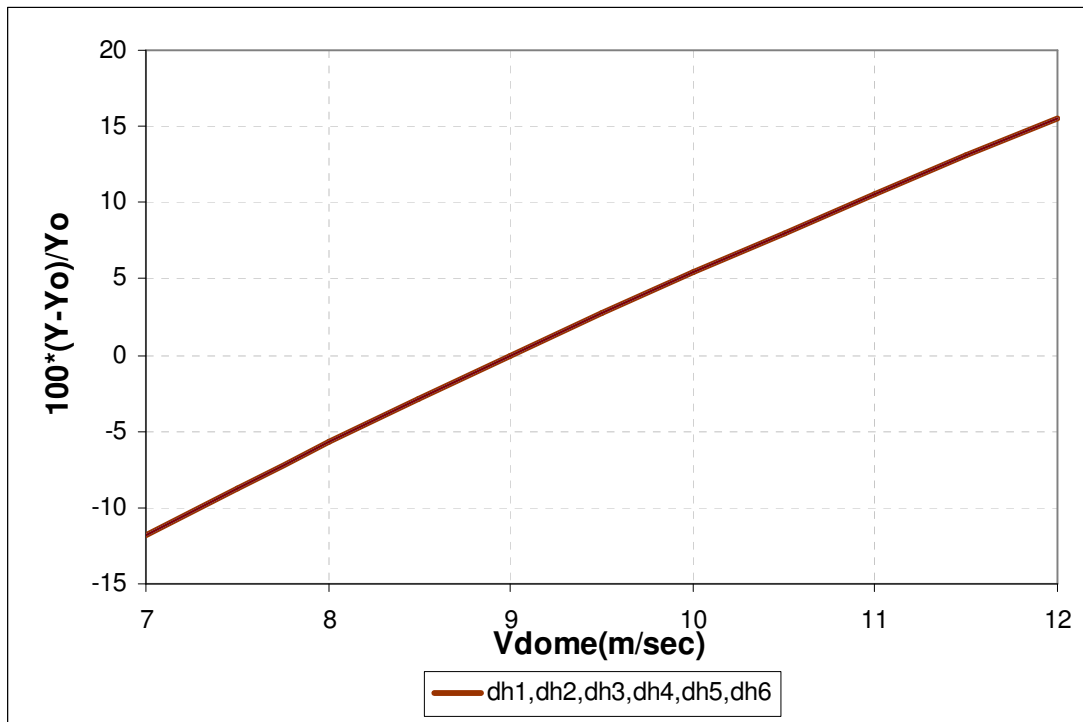
5.1.2. 6 Επίδραση Ταχύτητας Θόλου V_{dome}



Διάγραμμα 5. 27 Επίδραση της παραμέτρου V_{dome} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 28 Επίδραση της παραμέτρου V_{dome} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

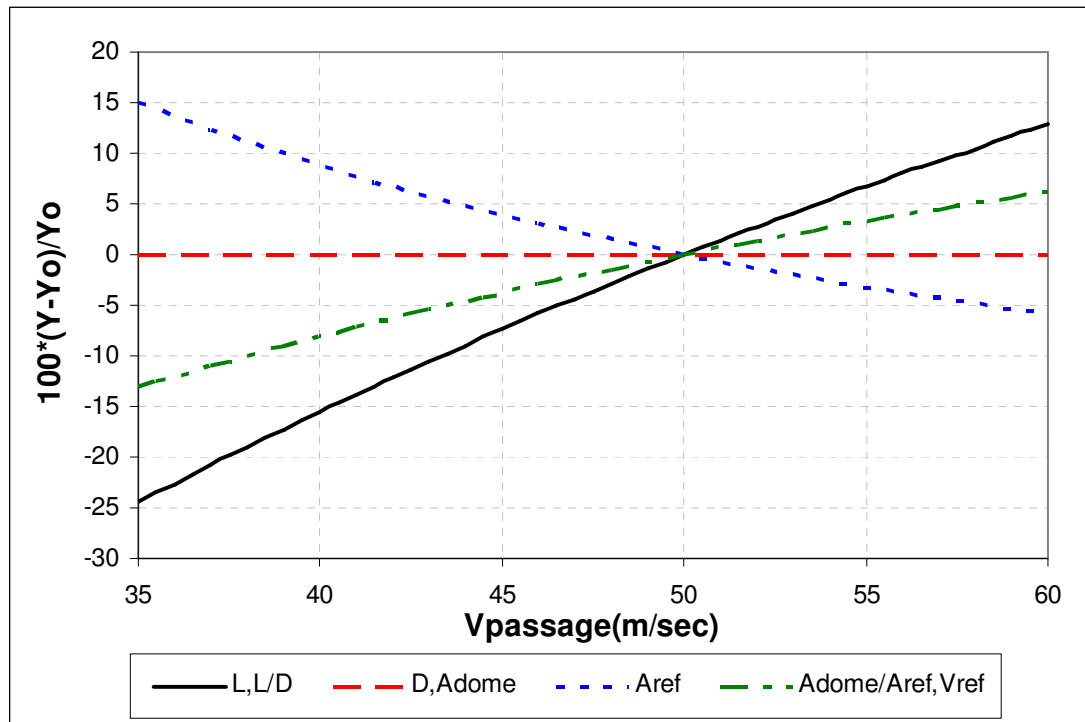


Διάγραμμα 5. 29 Επίδραση της παραμέτρου V_{dome} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

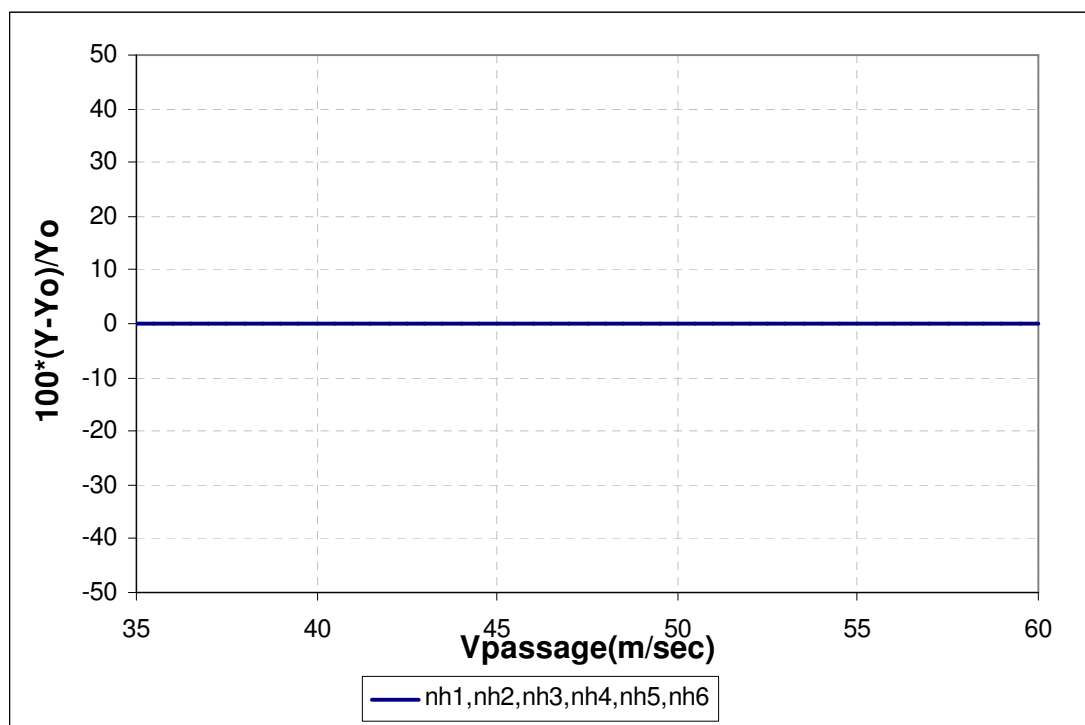
Η επιλογή της τιμής της ταχύτητας μέσα στο θόλο φαίνεται να είναι πολύ σημαντική για όλο το σχεδιασμό, στην περίπτωση χρήσης της μεθόδου των ταχυτήτων. Όλα τα μεγέθη μεταβάλλονται σημαντικά, αλλά ο λόγος L/D , η επιφάνεια αναφοράς A_{ref} και το μήκος L φαίνεται να έχουν τη μεγαλύτερη μεταβολή.

Σε ότι έχει να κάνει με τις οπές, ο αριθμός τους, όπως και η διάμετρος τους παρουσιάζει αξιόλογη μεταβολή, η οποία όμως είναι ίδια για όλες τις εγκάρσιες σειρές οπών.

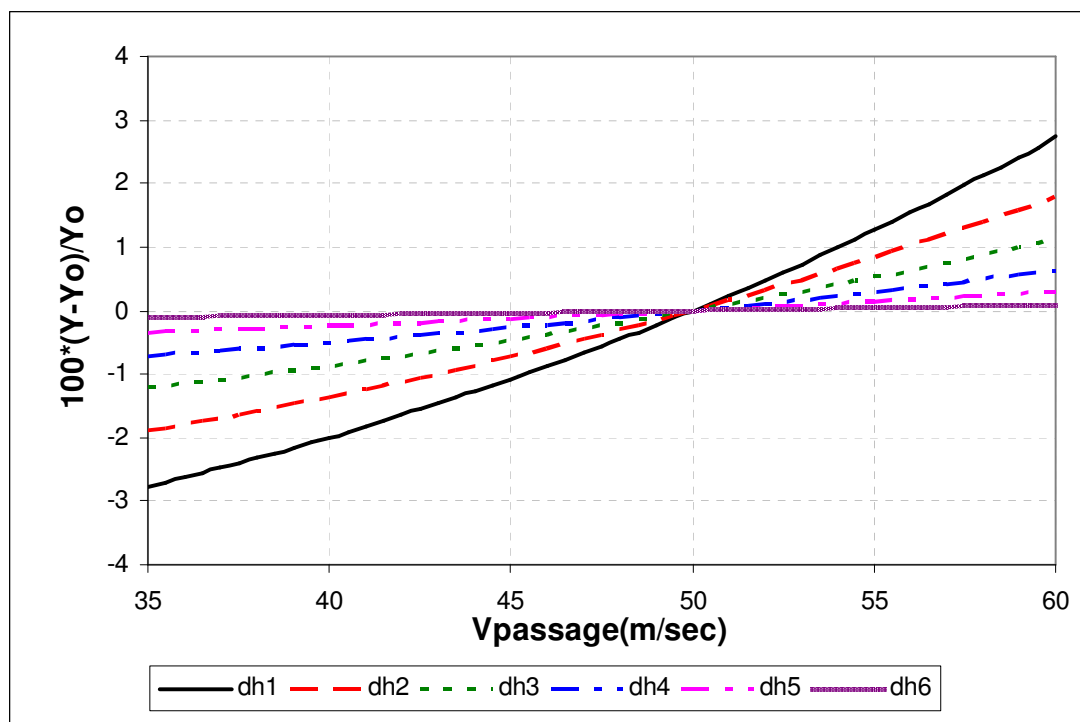
5.1.2. 7 Επίδραση Ταχύτητας «Περάσματος» V_{passage}



Διάγραμμα 5. 30 Επίδραση της παραμέτρου V_{passage} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 31 Επίδραση της παραμέτρου V_{passage} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 32 Επίδραση της παραμέτρου V_{passage} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Η ταχύτητα στο πέρασμα είναι και αυτή πολύ σημαντική, κυρίως για τα αρχικά μεγέθη αναφοράς και το ολικό μέγεθος του θαλάμου. Όμως, η επίδραση της είναι μικρότερη αυτής του θόλου.

Επιπρόσθετα, η τιμή της ταχύτητας αυτής έχει μηδενική επίδραση, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, στον αριθμό των οπών ανά σειρά, ενώ η μέγιστη επίδραση στη διάμετρο των οπών είναι της τάξης του 3% για την πρώτη σειρά και τείνει μειούμενη στις επόμενες.

5.1.2.8 Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας τα συμπεράσματα που προέκυψαν για τη μέθοδο των ταχυτήτων στον J79 έχουμε τα εξής. Αρχικά, ο λόγος ισοδυναμίας Φ_{pz} δείχνει να επιδρά στο σύνολο των μεγεθών του θαλάμου καύσης, σε αντίθεση με τη μέθοδο των απωλειών πίεσης. Επιπλέον η επίδραση αυτή είναι αρκετά πιο σημαντική και εμφανίζεται περισσότερο στο λόγο L/D καθώς και στην επιφάνεια του θόλου Adome. Οι οπές έχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις και παρόλο που η μορφή είναι και εδώ σχεδόν γραμμική, φαίνεται πως σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν επηρεάζονται περισσότερο οι πρώτες σειρές οπών, αλλά οι ακραίες. Σε ότι αφορά τις απώλειες πίεσης στο μανδύα, είναι εμφανές πως τα βασικά μεγέθη του θαλάμου παραμένουν ως έχουν, το μόνο μέγεθος που διαφοροποιείται είναι το μήκος του μανδύα L , το οποίο παρουσιάζει ακριβώς την ίδια μεταβολή με την άλλη μέθοδο υπολογισμού. Οι οπές έχουν σχεδόν ίδια μεταβολή, αν και δεν παρουσιάζονται οι μεγάλες αποκλίσεις στην πρώτη σειρά οπών που είδαμε προηγουμένως (μέθοδος απωλειών πίεσης). Για τις επόμενες τρεις παραμέτρους,

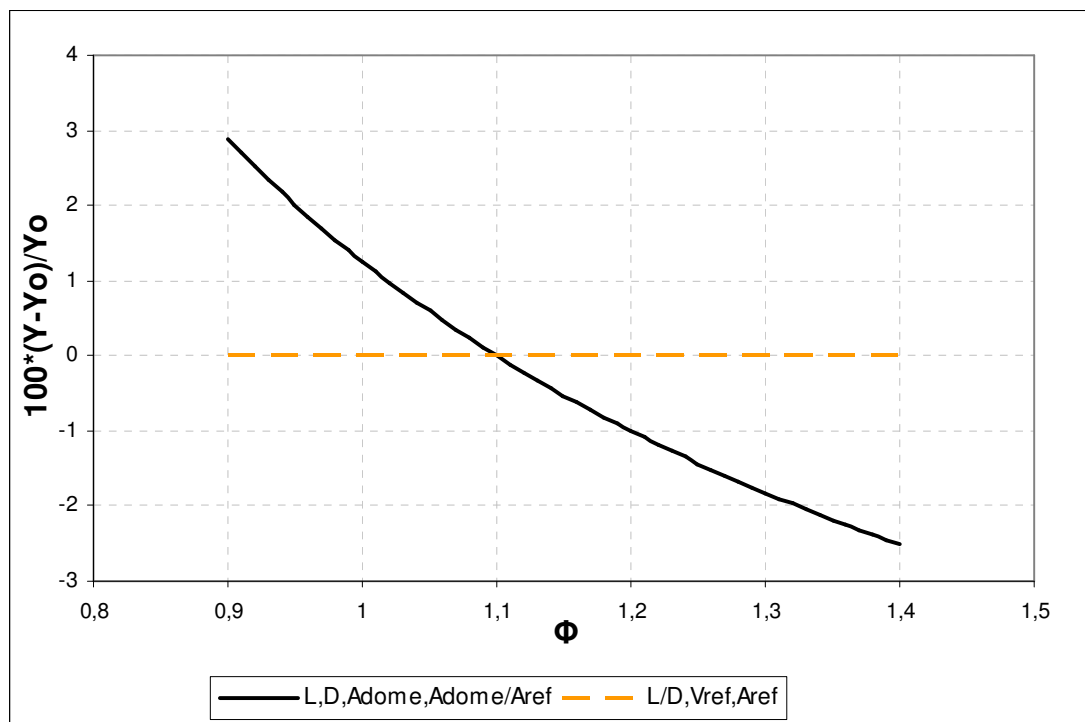
δηλαδή τη διεύθυνση στο μανδύα, το λόγο πυκνοτήτων και το pf ισχύουν ακριβώς τα ίδια που ειπώθηκαν στην πρώτη μέθοδο και συνεπώς είναι ανεξάρτητα της μεθόδου που χρησιμοποιούμε. Επιπρόσθετα, η ταχύτητα του θόλου έχει σημαντική επίδραση στα μεγέθη του θαλάμου. Από τα διαγράμματα που προέκυψαν φαίνεται πως η μορφή των μεταβολών είναι σχεδόν ίδια με αυτή της επίδρασης του Φ_{pz} για τα βασικά μεγέθη, με τη διαφορά να έγκειται στο γεγονός ότι εδώ οι μεταβολές είναι λίγο μεγαλύτερες. Οι οπές παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά τόσο στη διάμετρο όσο και στον αριθμό και η μεταβολή τους είναι ίδια ανεξάρτητα της σειράς. Τέλος, η ταχύτητα «περάσματος» επιδρά κυρίως στο μήκος και στην ολική επιφάνεια του θαλάμου καύσης, ο αριθμός των οπών παραμένει ως έχει, ενώ η διάμετρος των οπών έχει μια μικρή μεταβολή στην πρώτη σειρά της τάξεως του 3%, η οποία τείνει μειούμενη στις επόμενες σειρές.

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ J85

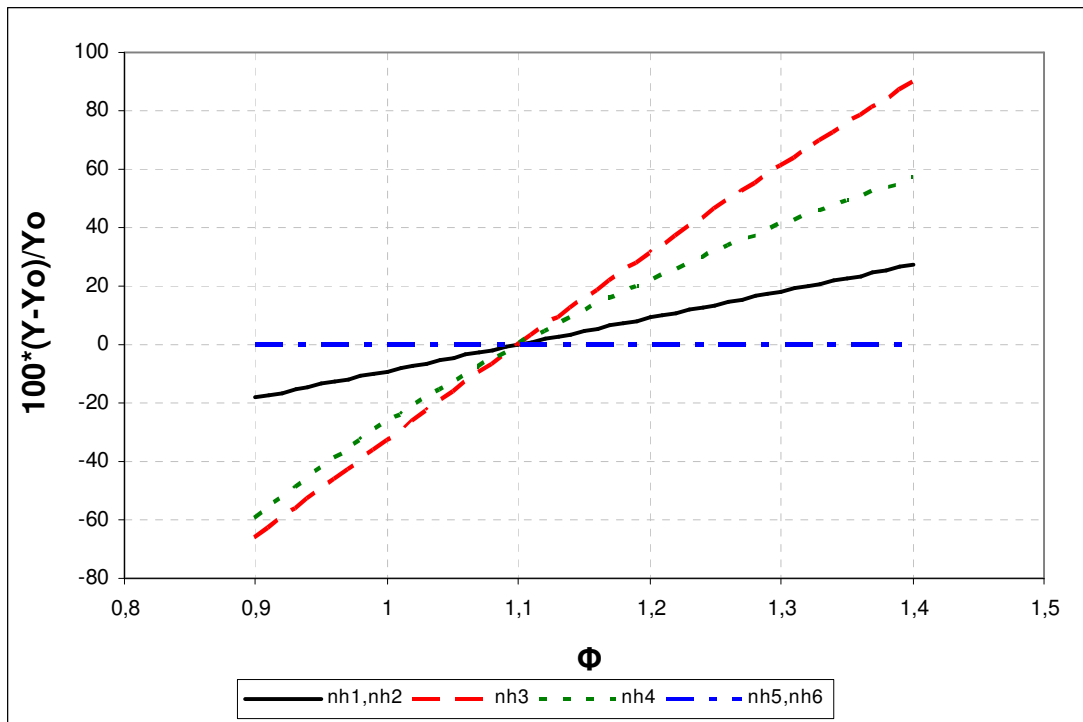
Αντίστοιχα με τον προηγούμενο κινητήρα, σε αυτή την ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ανάλυσης ευαισθησίας που προέκυψαν για τον θάλαμο καύσης του J85.

5.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ

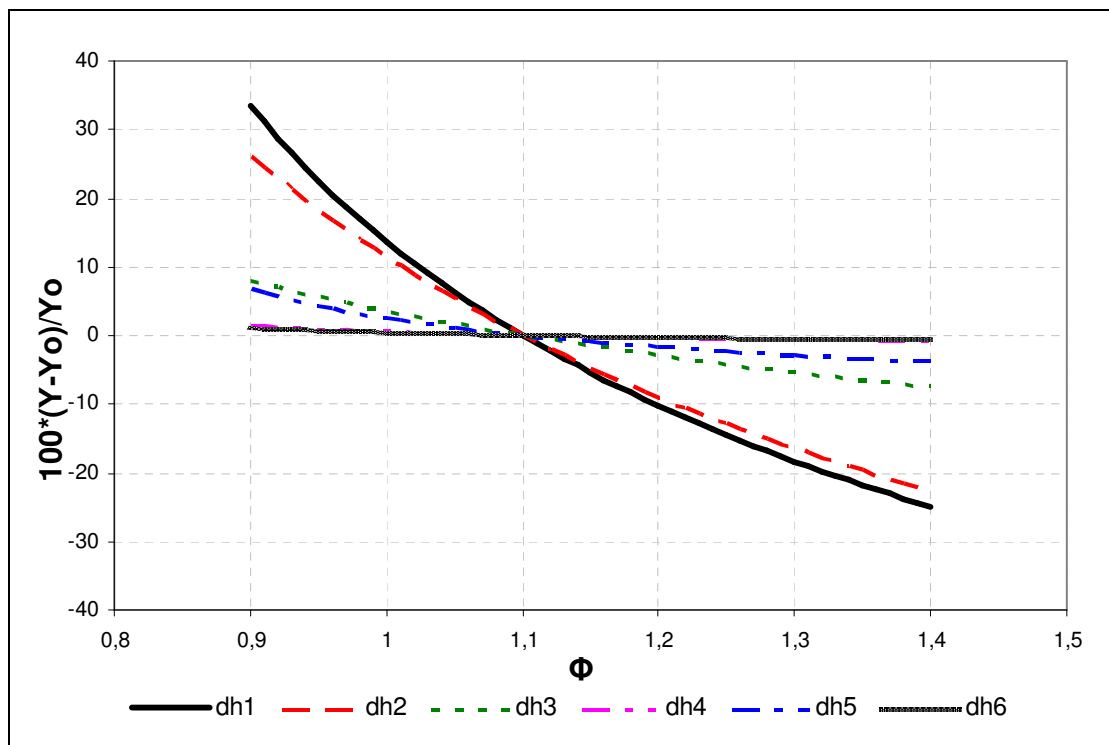
5.2.1.1 Επίδραση Λόγου Ισοδυναμίας Φ_{PZ}



Διάγραμμα 5. 33 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



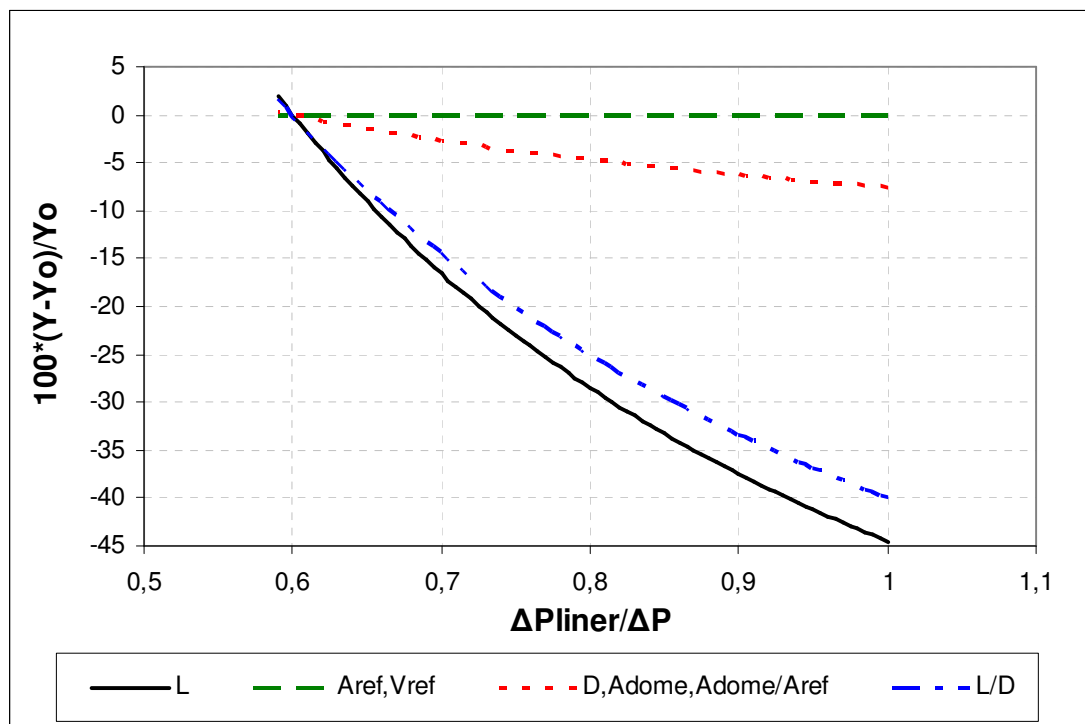
Διάγραμμα 5. 34 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος



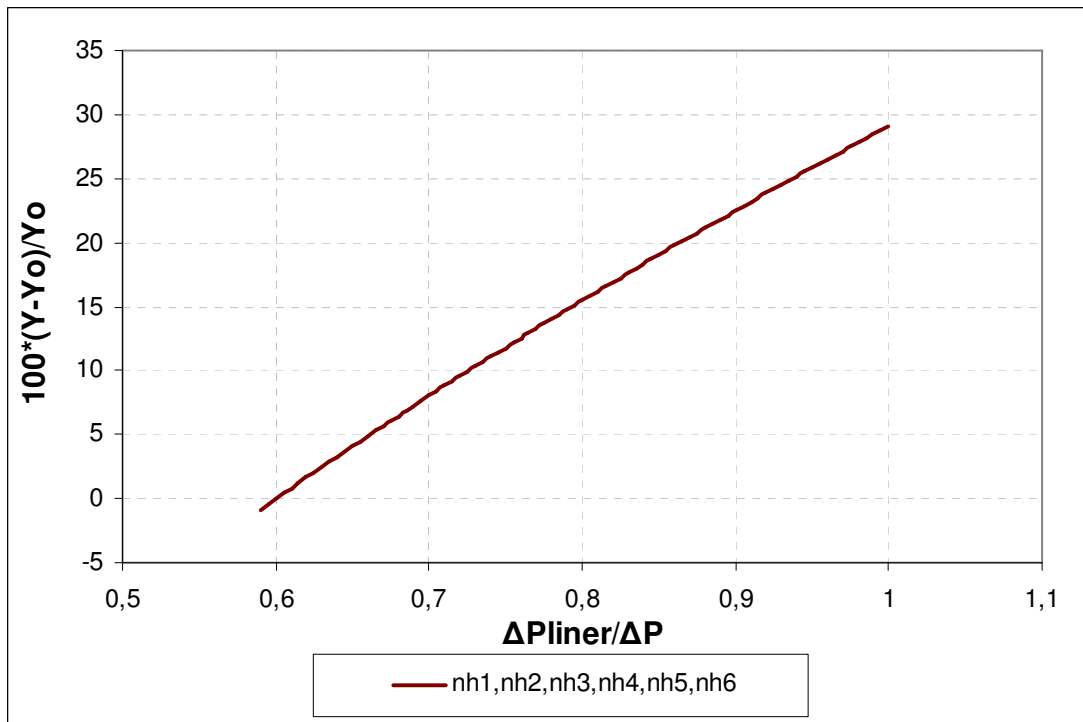
Διάγραμμα 5. 35 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος

Η μεταβολή της παραμέτρου Φ με τη μέθοδο των απωλειών πίεσης, έχει την ίδια επίδραση στα μεγέθη που υπολογίζουμε, με τον άλλο κινητήρα. Σίγουρα υπάρχουν κάποιες μικρές διαφορές οι οποίες οφείλονται κυρίως στο ότι έχουμε ένα διαφορετικό τύπο θαλάμου καύσης, αλλά η μορφή των καμπύλων προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ίδια. Ωστόσο υπάρχουν ορισμένες διαφορές, οι οποίες οφείλονται στο ότι στον κινητήρα αυτό έχουμε οπές στην πρωτεύουσα και στη δευτερεύουσα ζώνη. Αυτές οι διαφορές παρατηρούνται κυρίως στα δύο τελευταία διαγράμματα, όπου η επίδραση στις οπές δεν έχει μια «λογική» σειρά, όπως αντίστοιχα συμβαίνει στον J79. Το γεγονός αυτό αιτιολογείται από το ότι καθώς αυξάνεται το Φ , η παροχή αέρα που περνά από τις δευτερεύουσες οπές αυξάνει, ενώ αντίθετα στις πρωτεύουσες μειώνεται και στις διάχυσης παραμένει σταθερή.

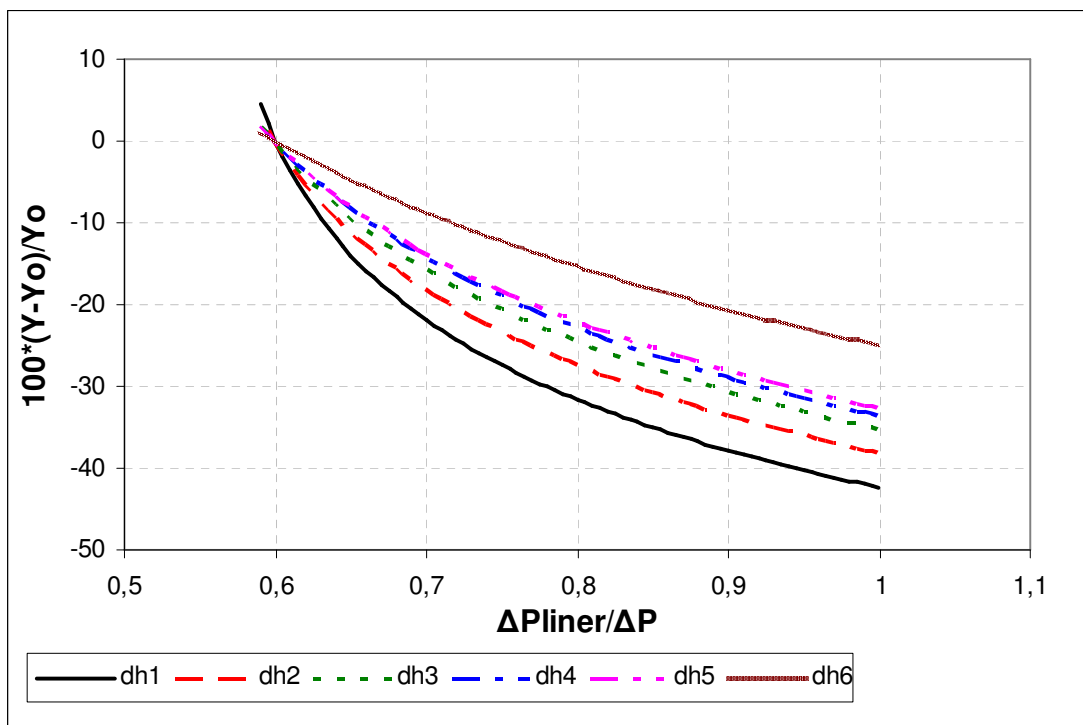
5.2.1. 2 Επίδραση Ποσοστού Απωλειών Μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$



Διάγραμμα 5. 36 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{liner}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



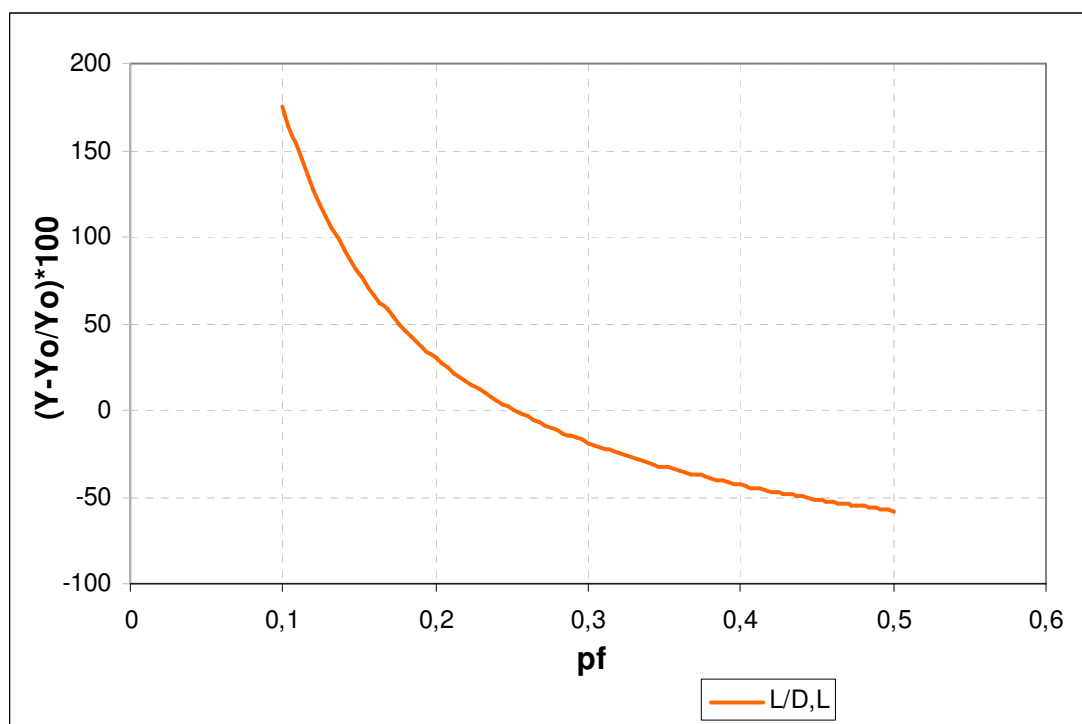
Διάγραμμα 5. 37 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{\text{liner}} / \Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 38 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{\text{liner}} / \Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, εύκολα κανείς καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, οι καμπύλες που απεικονίζουν τις ποσοστιαίες μεταβολές των μεγεθών που μελετώνται, έχουν την ίδια μορφή με αυτές του προηγούμενου κινητήρα που μελετήθηκε. Επιπλέον, σε αντίθεση με την προηγούμενη παράμετρο, φαίνεται πως η επίδραση της μεταβολής της πτώσης πίεσης στο μανδύα επηρεάζει τη διάμετρο των σειρών των οπών αυξανόμενα από τη ζώνη ανάμειξης προς την πρωτεύουσα ζώνη. Ακόμα, ο αριθμός των οπών μεταβάλλεται το ίδιο για όλες τις σειρές και μάλιστα η σχέση είναι γραμμική. Τέλος, φαίνεται ότι το μήκος L και ο λόγος L/D έχουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με την αρχική τυπική τιμή της παραμέτρου.

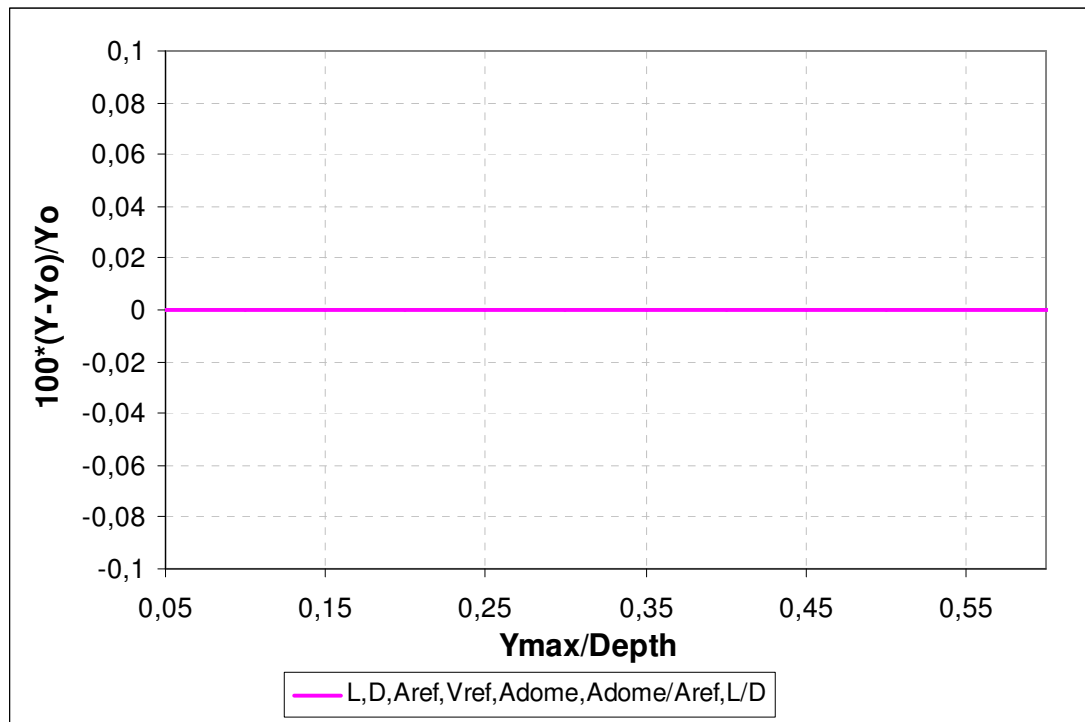
5.2.1. 3 Επίδραση PF (pattern factor)



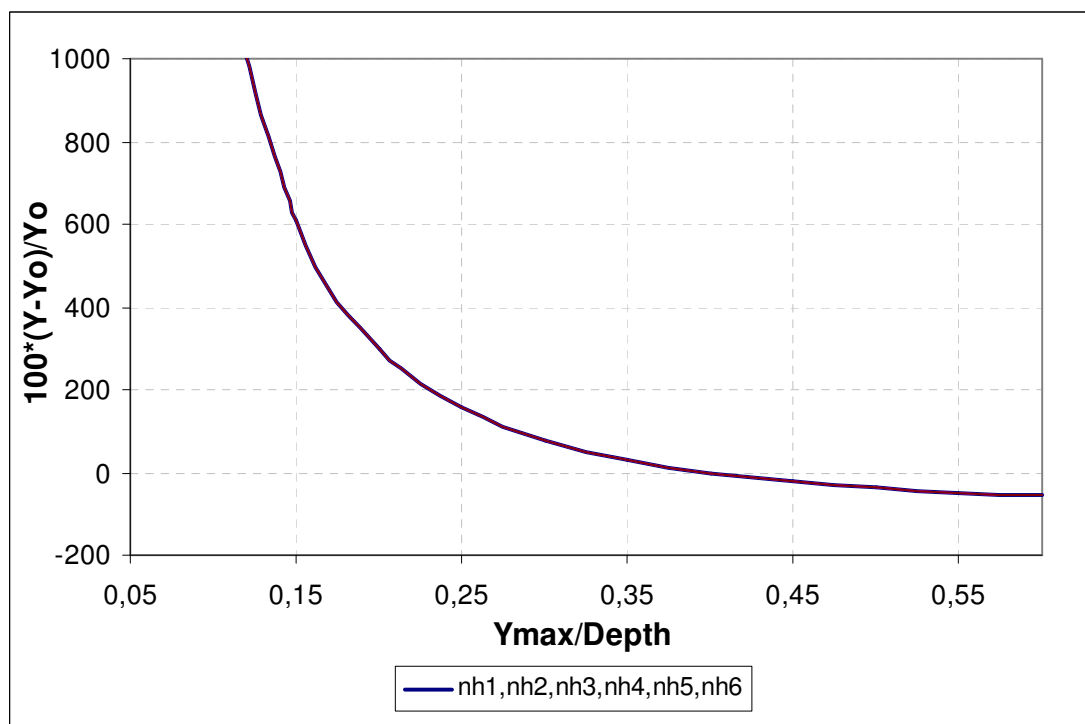
Διάγραμμα 5. 39 Επίδραση της παραμέτρου pf στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος

Για τη μεταβολή του PF ισχύει ότι ακριβώς και για τον προηγούμενο κινητήρα. Δηλαδή, είναι καθαρό ότι ανεξάρτητα του θαλάμου καύσης και των οπών στις διάφορες ζώνες, το PF έχει την ίδια επίδραση στο σχεδιασμό.

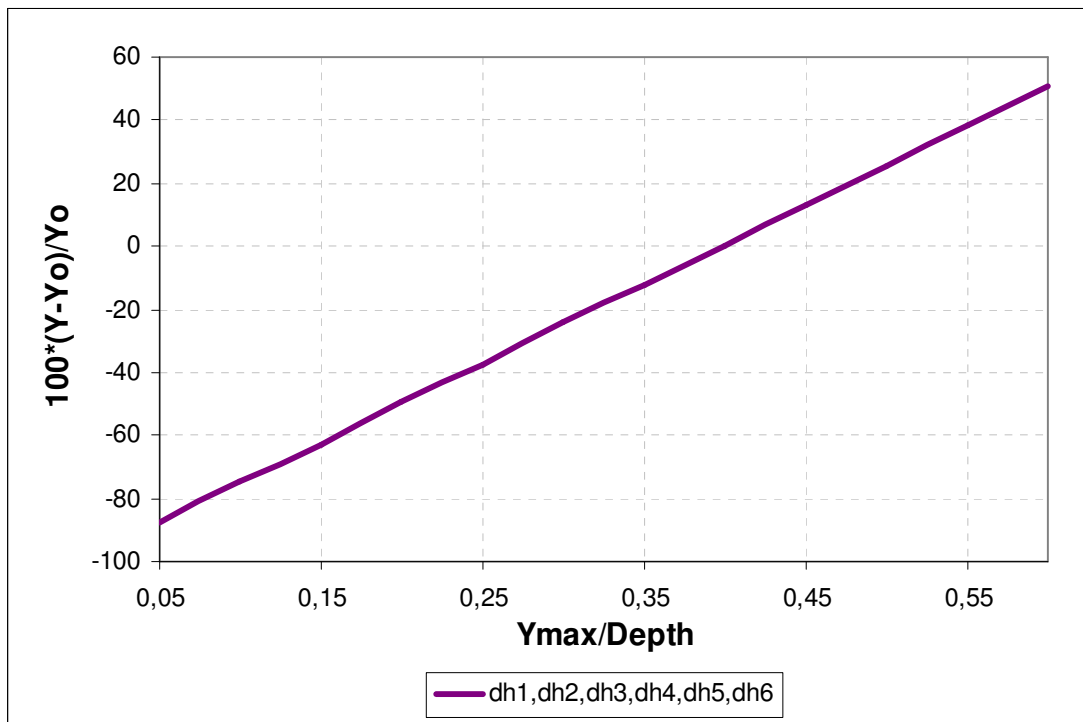
5.2.1. 4 Επίδραση Διείσδυσης Στο Μανδύα $Y_{max}/Depth$



Διάγραμμα 5. 40 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



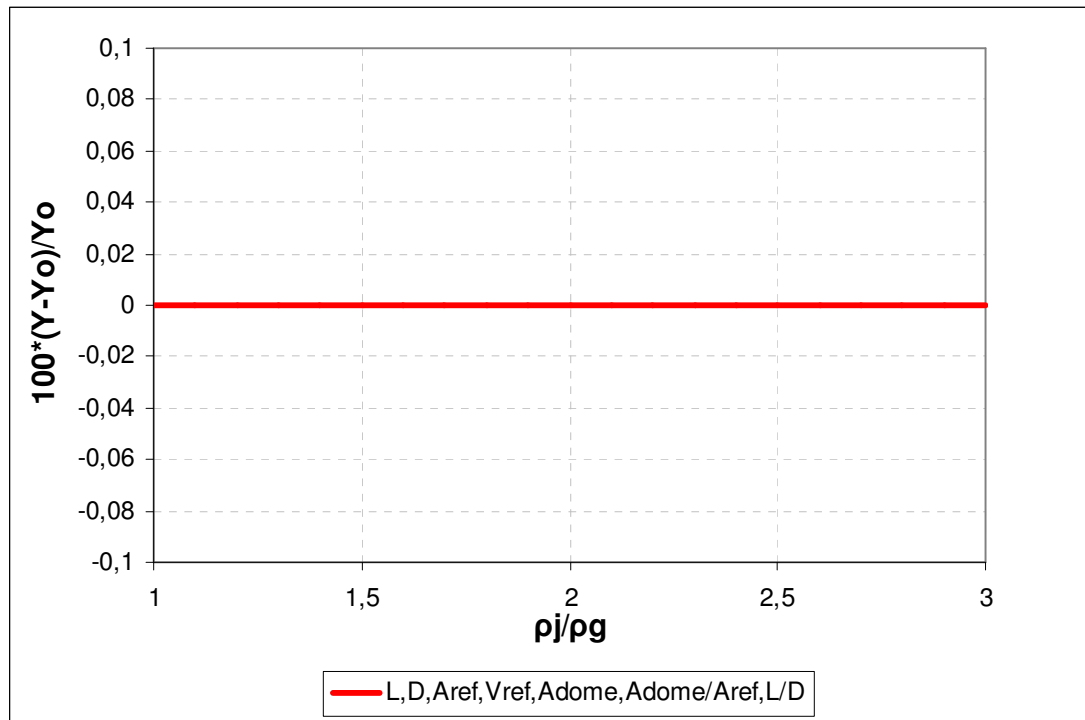
Διάγραμμα 5. 41 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



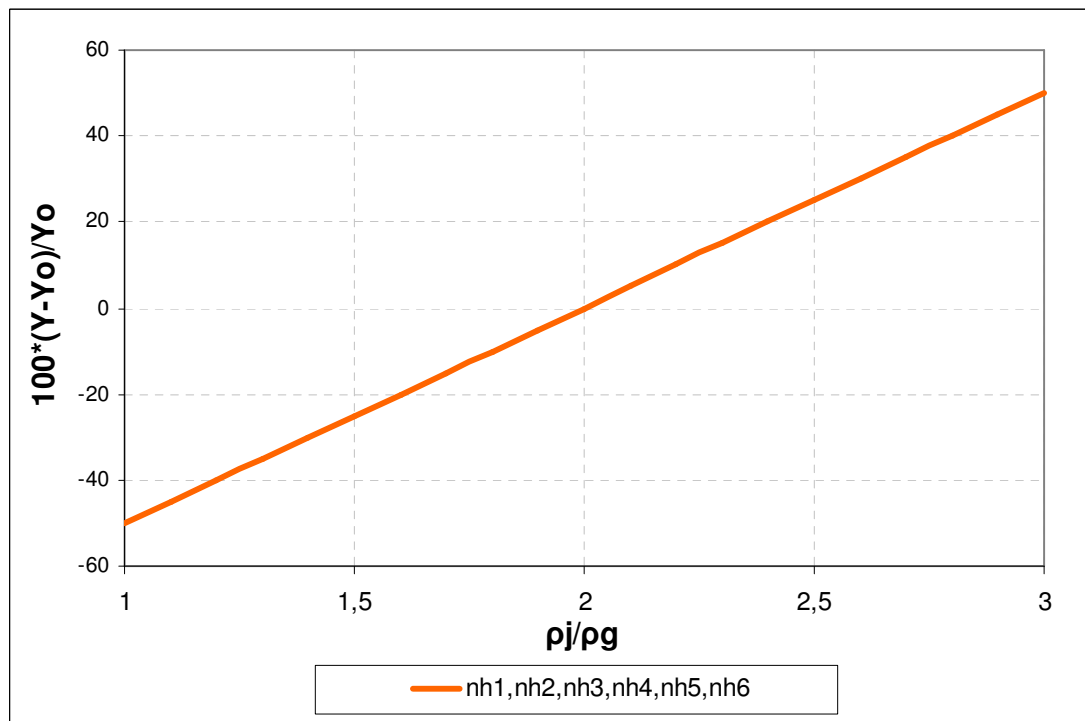
Διάγραμμα 5. 42 Επίδραση της παραμέτρου Y_{\max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Η διεύθυνση όπως απεικονίζεται και παραπάνω δεν έχει καμία επίδραση στα μεγέθη αναφοράς του θαλάμου ή σε βασικά γεωμετρικά μεγέθη του μανδύα. Η επίδραση της, όπως είδαμε και στον J79, έχει να κάνει μόνο με τις οπές. Επιπρόσθετα, αν συγκρίνει κανείς τα διαγράμματα των δύο κινητήρων και για τις δύο μεθόδους, θα διαπιστώσει πως είναι ακριβώς τα ίδια. Συνεπώς, το $Y_{\max}/Depth$ μπορεί να μελετηθεί το ίδιο, ανεξάρτητα του θαλάμου καύσης που έχουμε ή της μεθόδου που χρησιμοποιούμε.

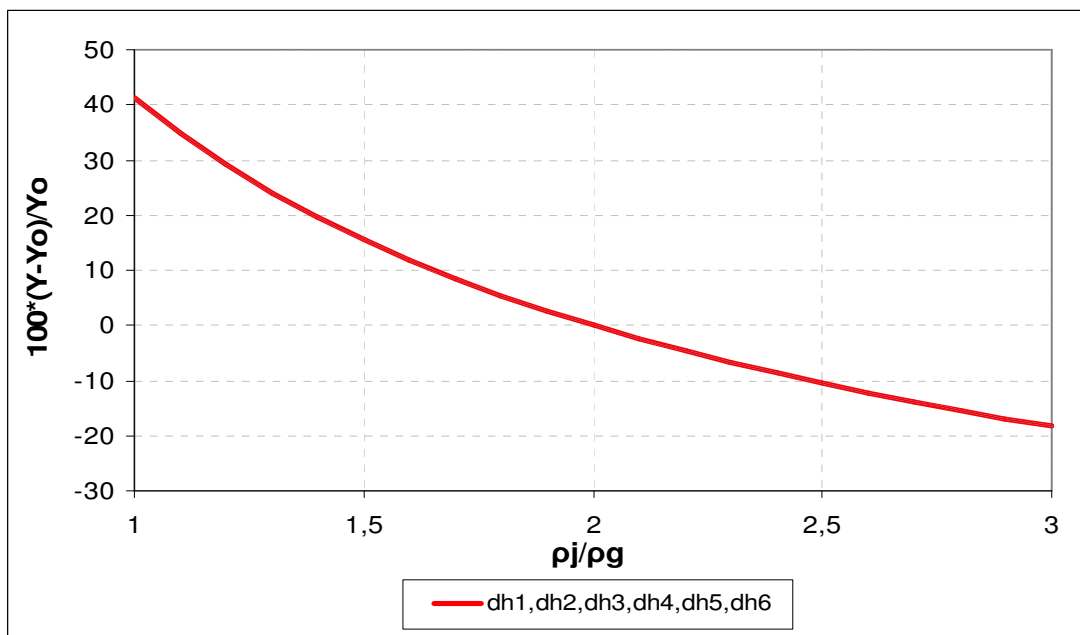
5.2.1. 5 Επίδραση Λόγου Πυκνοτήτων ρ_j/ρ_g



Διάγραμμα 5. 43 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 44 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 45 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

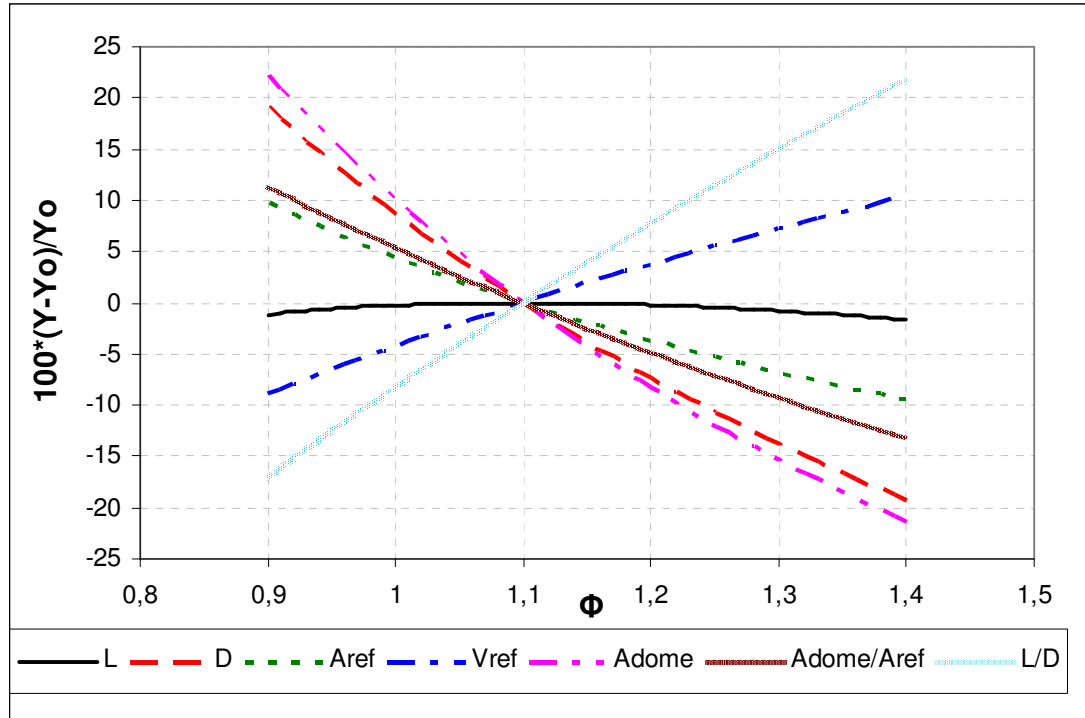
Για την παράμετρο ρ_j/ρ_g ισχύει ότι ακριβώς ειπώθηκε και για τη διείσδυση. Δηλαδή οι μεταβολές που προκαλεί είναι ίδιες για οποιοδήποτε τύπο θαλάμου καύσης έχουμε, καθώς και για οποιαδήποτε μέθοδο υπολογισμού των μεγεθών αναφοράς. Επίδρα μόνο στις οπές και μάλιστα το ίδιο έντονα για κάθε εγκάρσια σειρά.

5.2.1. 6 Συμπεράσματα

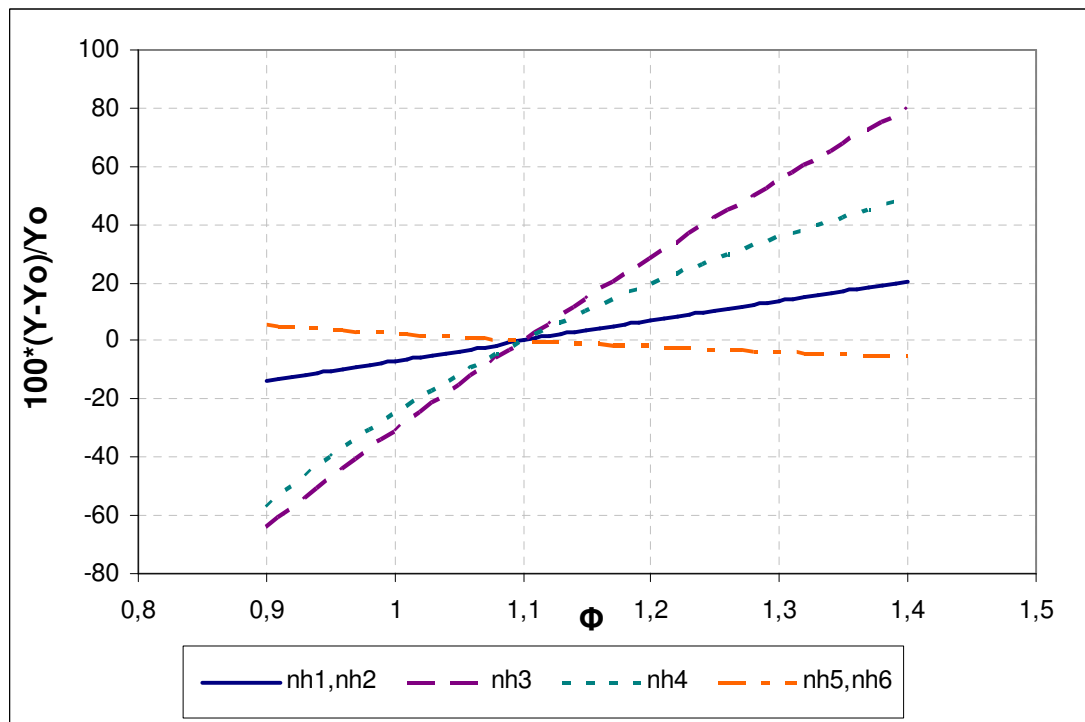
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Κατ'αρχήν η επίδραση που έχει ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη Φ_{pz} είναι σχεδόν ίδια με τον προηγούμενο κινητήρα. Τα βασικά μεγέθη έχουν παρόμοιες μεταβολές με τη διαφορά ότι επειδή έχουμε διαφορετικό τύπο θαλάμου καύσης κάποια στοιχεία όπως το βάθος D και η επιφάνεια του θόλου $Adome$ παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις. Οι καμπύλες των οπών από την άλλη έχουν την ίδια μορφή, αλλά επειδή σε αυτό το θάλαμο έχουμε οπές και στις δύο πρώτες ζώνες η επίδραση δεν ακολουθεί μια σειρά αλλά έχει να κάνει με την παροχή του εργαζόμενου μέσου που περνά σε κάθε ζώνη, όπως αναπτύχθηκε λεπτομερώς στο σχολιασμό των διαγραμμάτων αυτών. Η πτώση πίεσης στο μανδύα έχει ακριβώς την ίδια επίδραση στα βασικά μεγέθη με τον J79 με μια διαφοροποίηση στο βάθος D λόγω της διαφορετικότητας του θαλάμου καύσης. Σε ότι αφορά τις οπές φαίνεται πως η πτώση πίεσης στο μανδύα αν και έχει διαφορετική μορφή από αυτή της Φ_{pz} , δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, ιδιαίτερα για τις πρώτες σειρές, ενώ παρόλη την ύπαρξη τριών ζωνών στο μανδύα εδώ είναι φανερό πως οι πρώτες σειρές επηρεάζονται περισσότερο. Τέλος, οι υπόλοιπες τρεις παράμετροι δεν παρουσιάζουν κάτι διαφορετικό σε σχέση με τον J79, συνεπώς και εδώ ισχύει ότι το pf δρα μόνο στο μήκος του μανδύα και η διείσδυση με το λόγο πυκνοτήτων μόνο στις οπές. Επιπλέον γίνεται κατανοητό ότι η επίδραση αυτή είναι ίδια και για τους δύο τύπους θαλάμου καύσης και άρα είναι ανεξάρτητη αυτού αλλά και ανεξάρτητη της μεθόδου που χρησιμοποιούμε, όπως αποδείχτηκε από την ανάλυση του προηγούμενου κινητήρα.

5.2. 2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

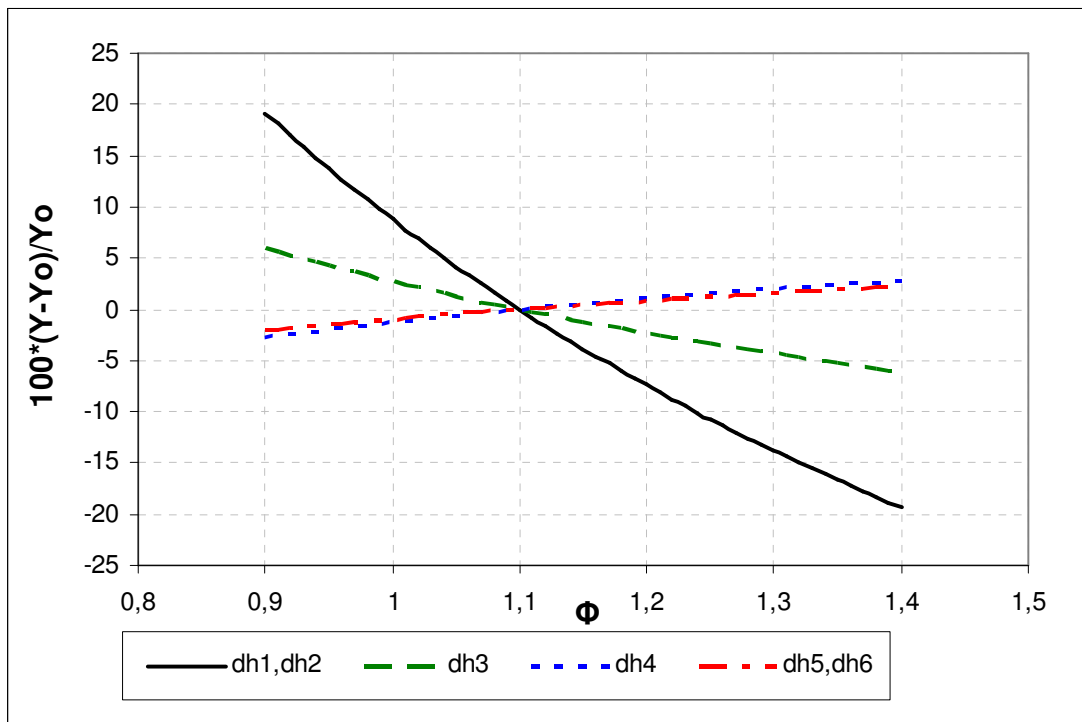
5.2.2. 1 Επίδραση Λόγου Ισοδυναμίας Φ_{PZ}



Διάγραμμα 5. 46 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος



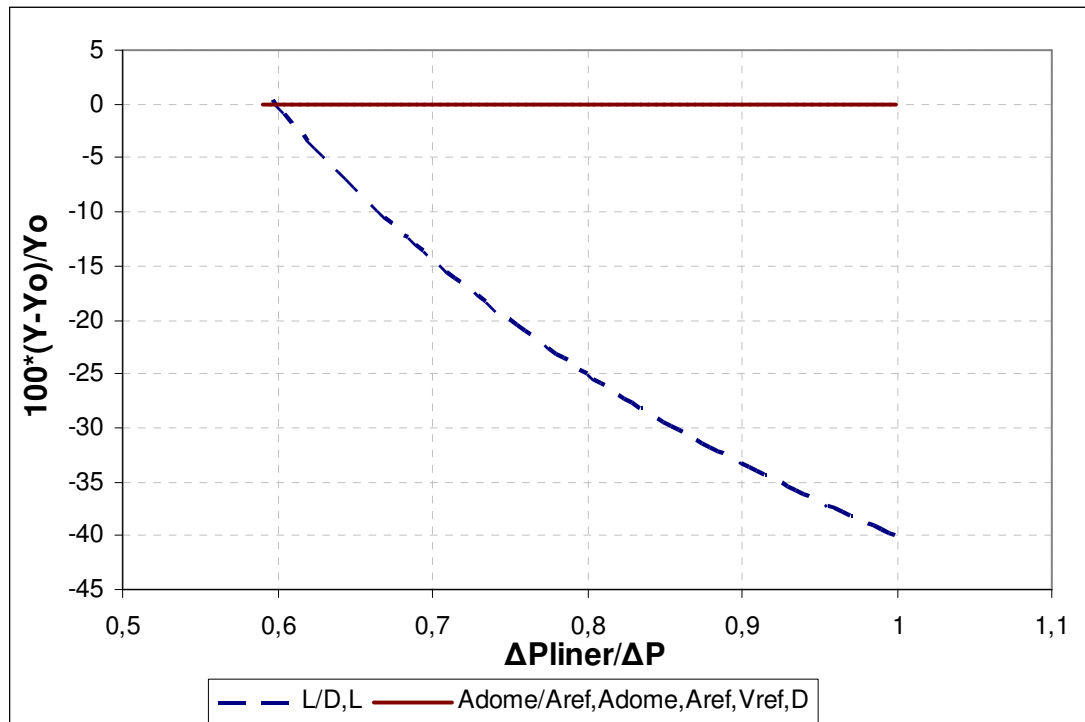
Διάγραμμα 5. 47 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος



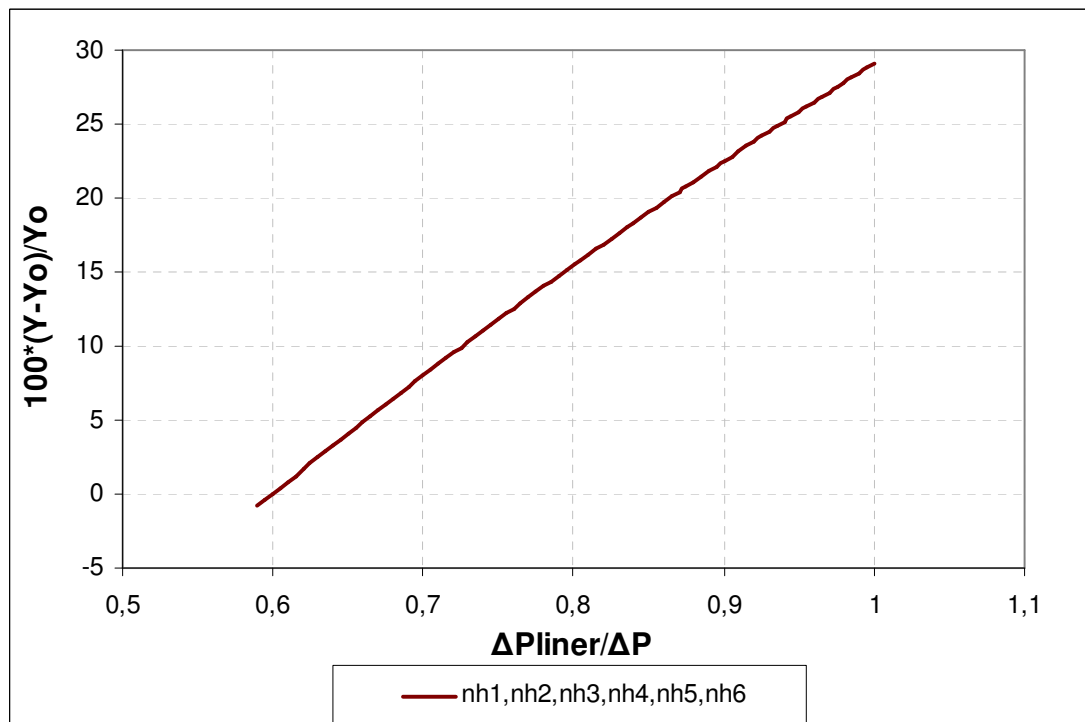
Διάγραμμα 5. 48 Επίδραση της παραμέτρου Φ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Από τα παραπάνω τρία διαγράμματα παρατηρούμε ότι σε όλες τις καμπύλες, οι σχέσεις που συνδέουν τις ποσοστιαίες μεταβολές των μεγεθών με την παράμετρο Φ είναι γραμμικές. Πιο συγκεκριμένα οι οπές παρουσιάζουν αξιόλογες μεταβολές, τόσο σε αριθμό όσο και σε διάμετρο. Όμως, οι μεταβολές αυτές δεν έχουν κάποια συγκεκριμένη διαβάθμιση από σειρά σε σειρά, όπως συμβαίνει στον J79 όπου υπάρχουν οπές μόνο σε μια ζώνη. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι τα μεγέθη που υπολογίζουμε είναι αρκετά πιο ευαίσθητα σε αυτή την παράμετρο για τη μέθοδο των ταχυτήτων, κάτι που είχε παρατηρηθεί και στον πρώτο κινητήρα.

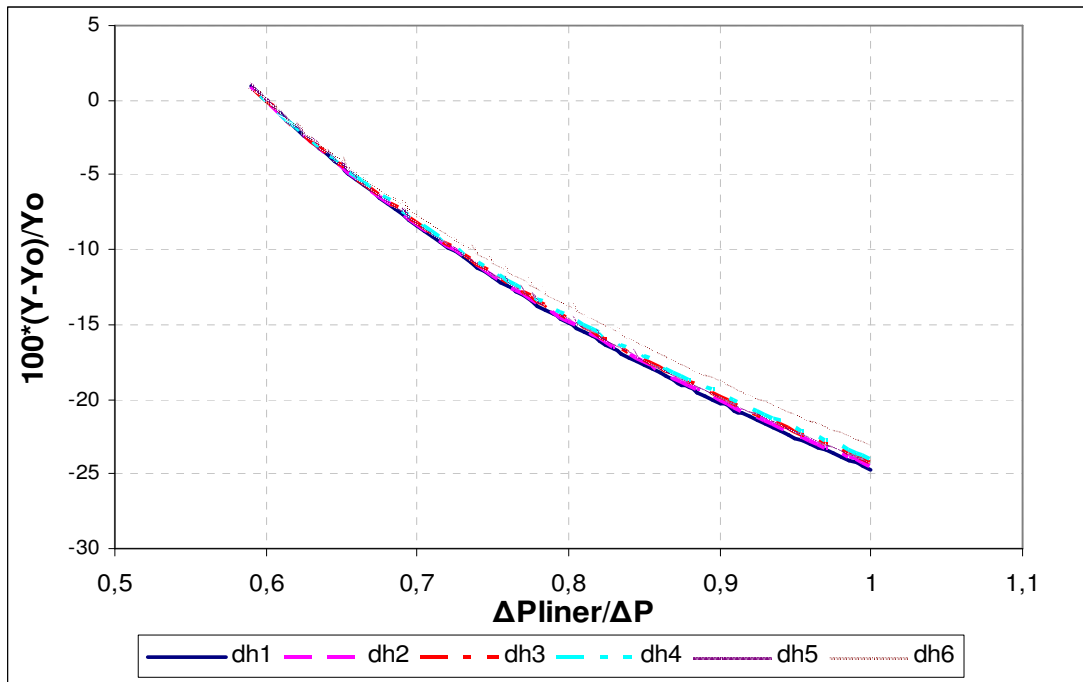
5.2.2. 2 Επίδραση Ποσοστού Απωλειών Μανδύα $\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$



Διάγραμμα 5. 49 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{liner}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



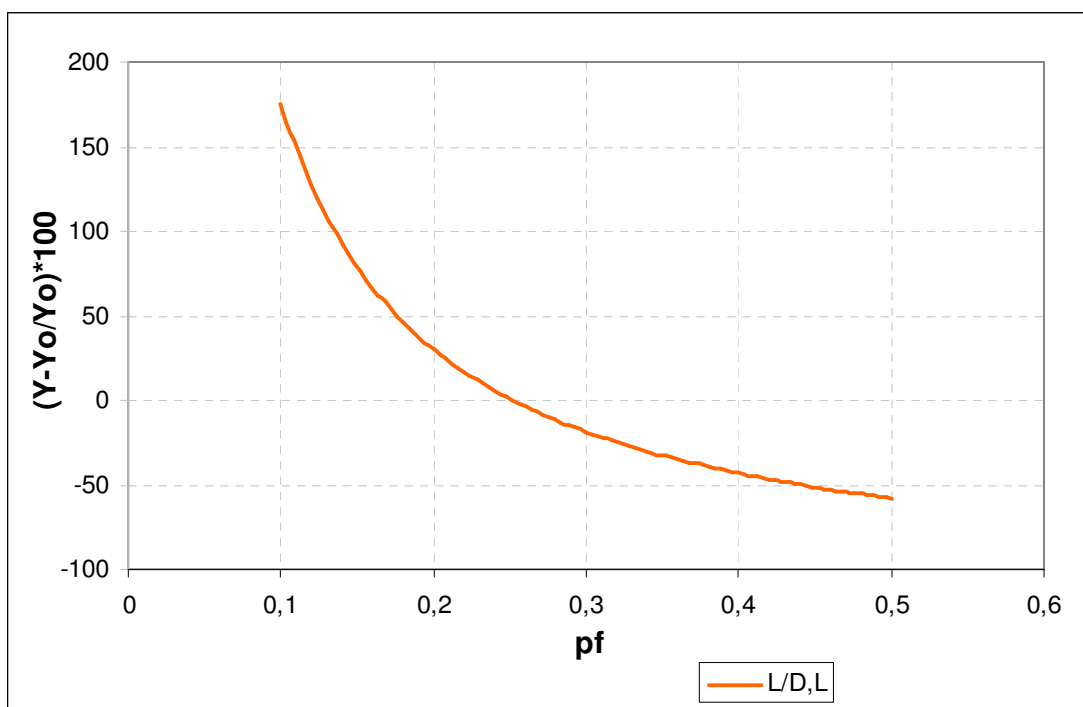
Διάγραμμα 5. 50 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{liner}/\Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 51 Επίδραση της παραμέτρου $\Delta P_{\text{liner}} / \Delta P$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

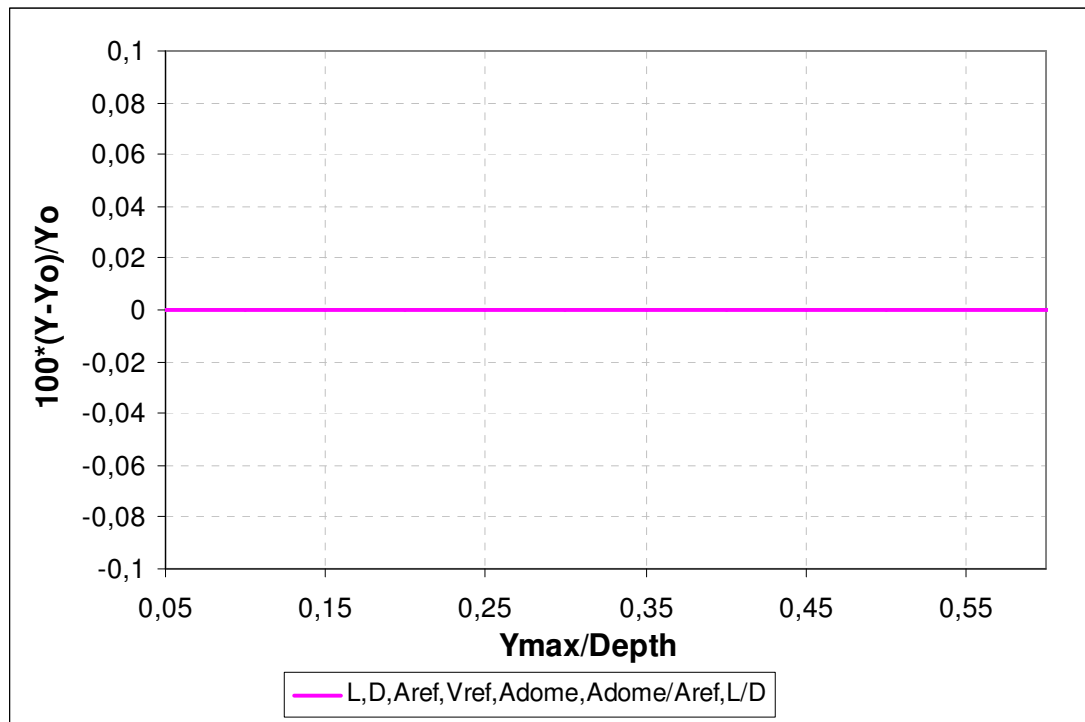
Οι μεταβολές που προκαλούνται στα μεγέθη, αλλάζοντας την τιμή της παραμέτρου $\Delta P_{\text{liner}} / \Delta P$ είναι ακριβώς οι ίδιες με την αντίστοιχη μέθοδο στον κινητήρα J79.

5.2.2. 3 Επίδραση PF (pattern factor)

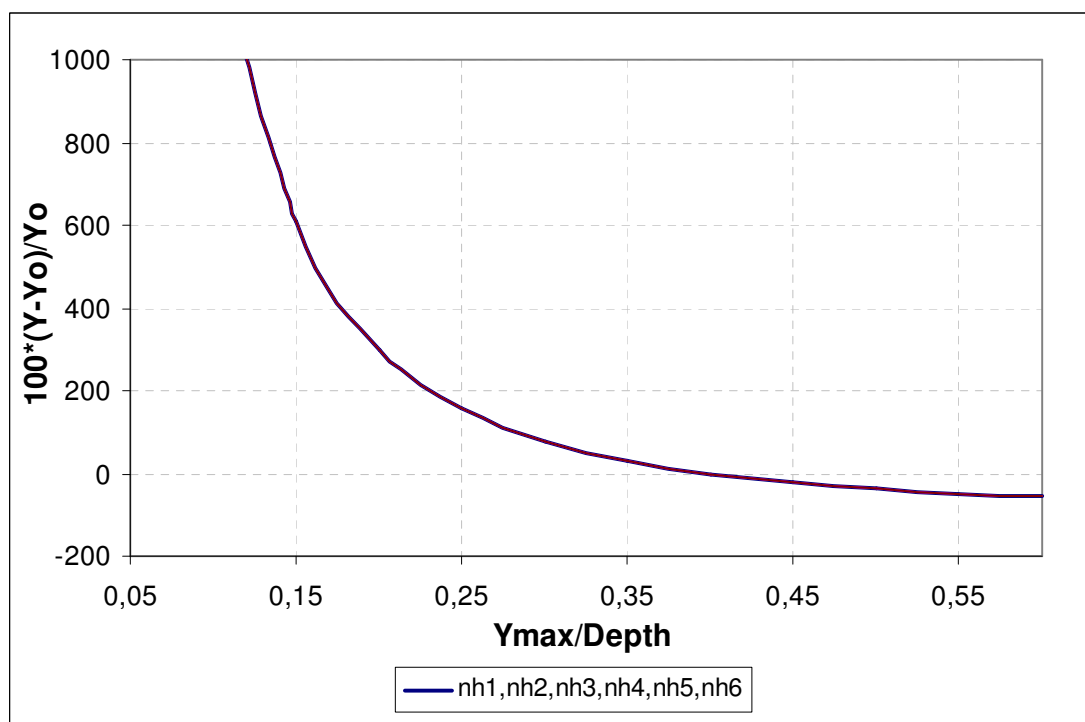


Διάγραμμα 5. 52 Επίδραση της παραμέτρου pf στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

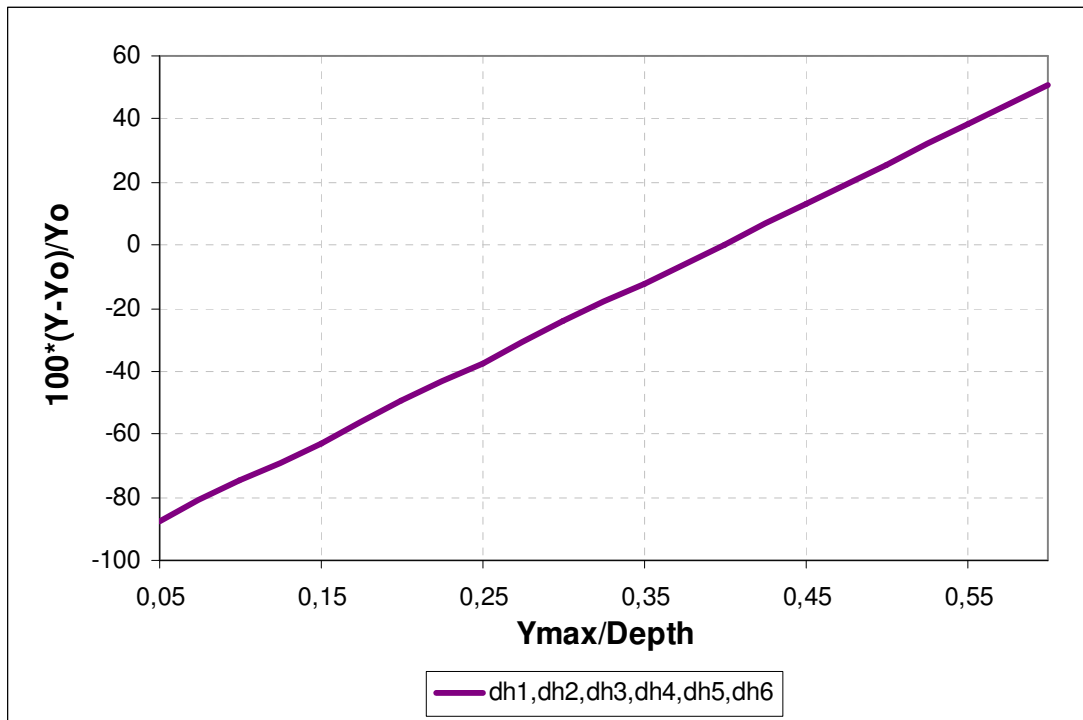
5.2.2. 4 Επίδραση Διείσδυσης Στο Μανδύα $Y_{max}/Depth$



Διάγραμμα 5. 53 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

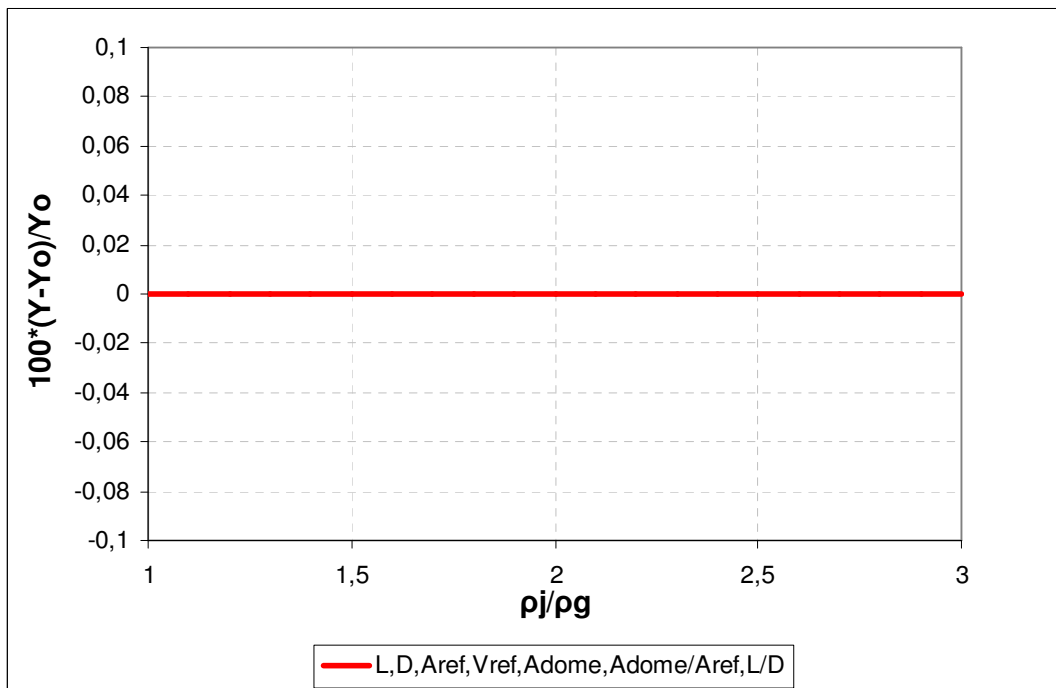


Διάγραμμα 5. 54 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

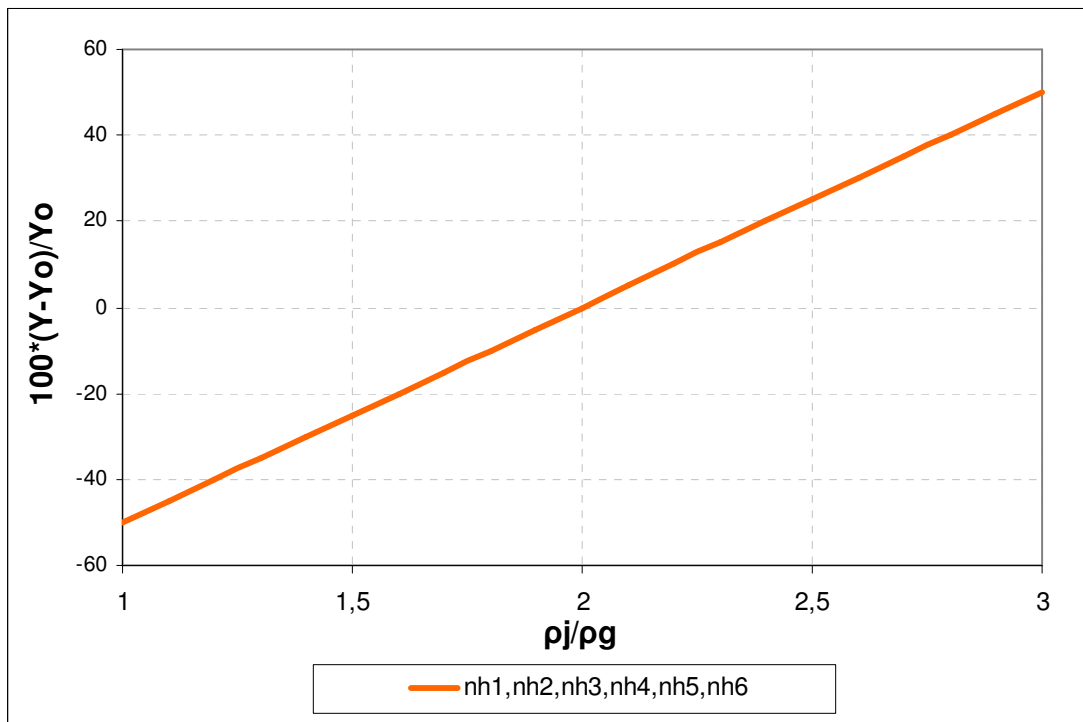


Διάγραμμα 5. 55 Επίδραση της παραμέτρου Y_{max}/D στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

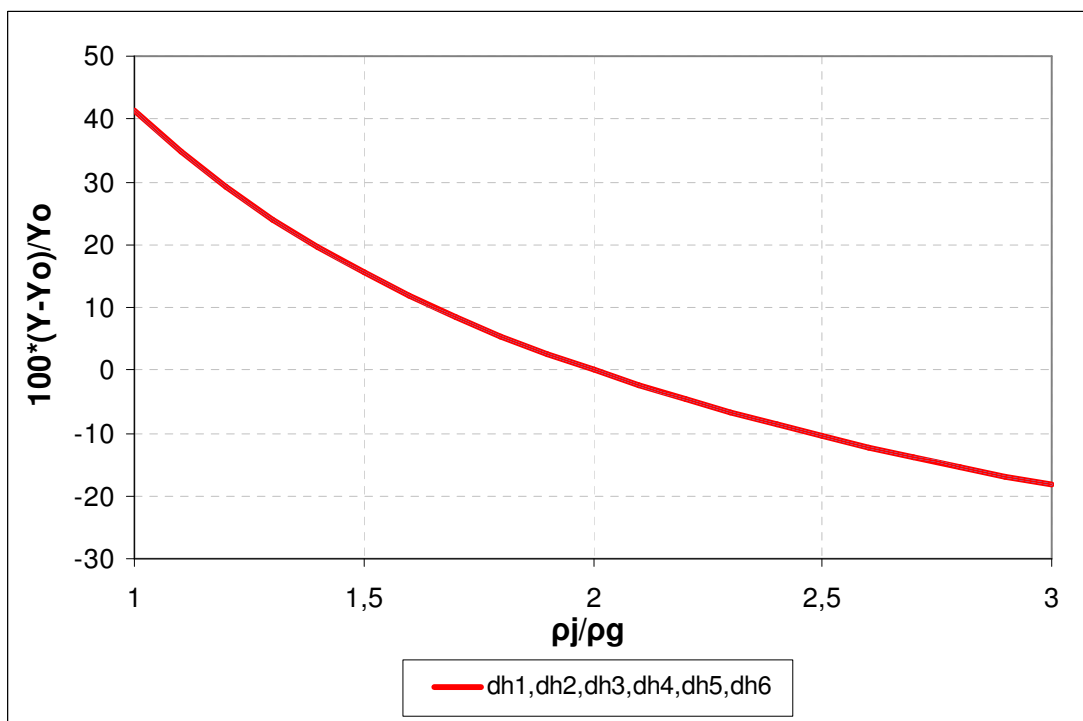
5.2.2. 5 Επίδραση Λόγου Πυκνοτήτων ρ_l/ρ_g



Διάγραμμα 5. 56 Επίδραση της παραμέτρου ρ_l/ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



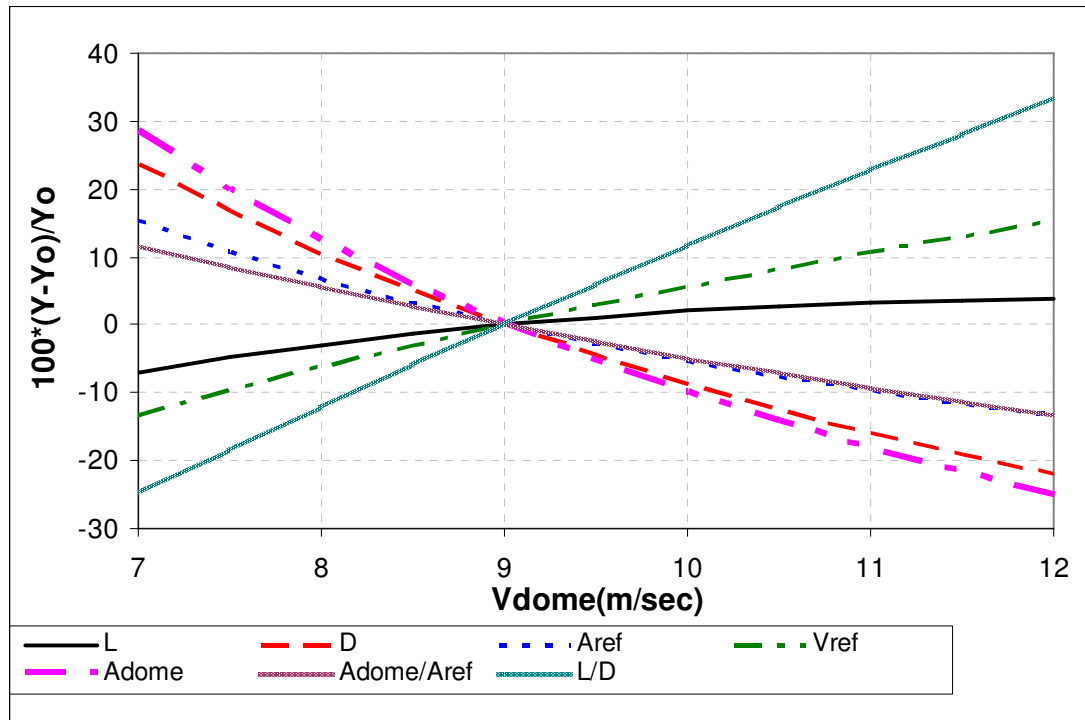
Διάγραμμα 5. 57 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j / ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος



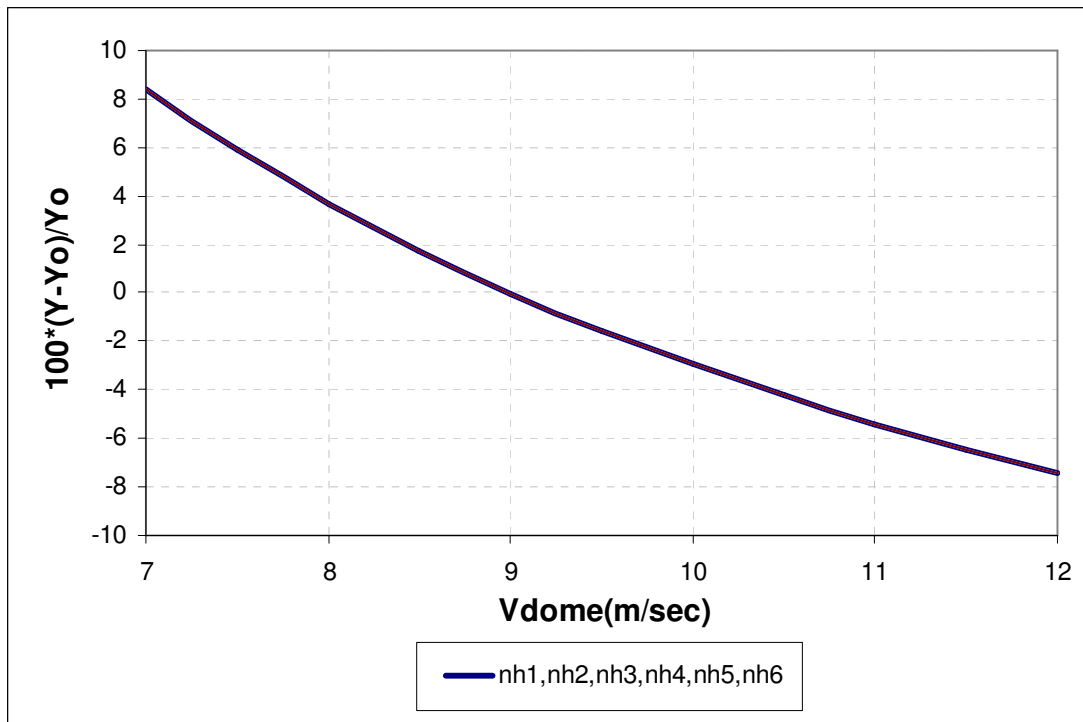
Διάγραμμα 5. 58 Επίδραση της παραμέτρου ρ_j / ρ_g στο Y για τα μεγέθη του υπομήματος

Για τις τρεις τελευταίες παραμέτρους που μελετήθηκαν, δηλαδή για το ρ_f , τη διείσδυση $Y_{\max}/Depth$ και το λόγο των πυκνοτήτων δέσμης-κυρίως ρεύματος, ισχύει ότι είχε ειπωθεί και στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου.

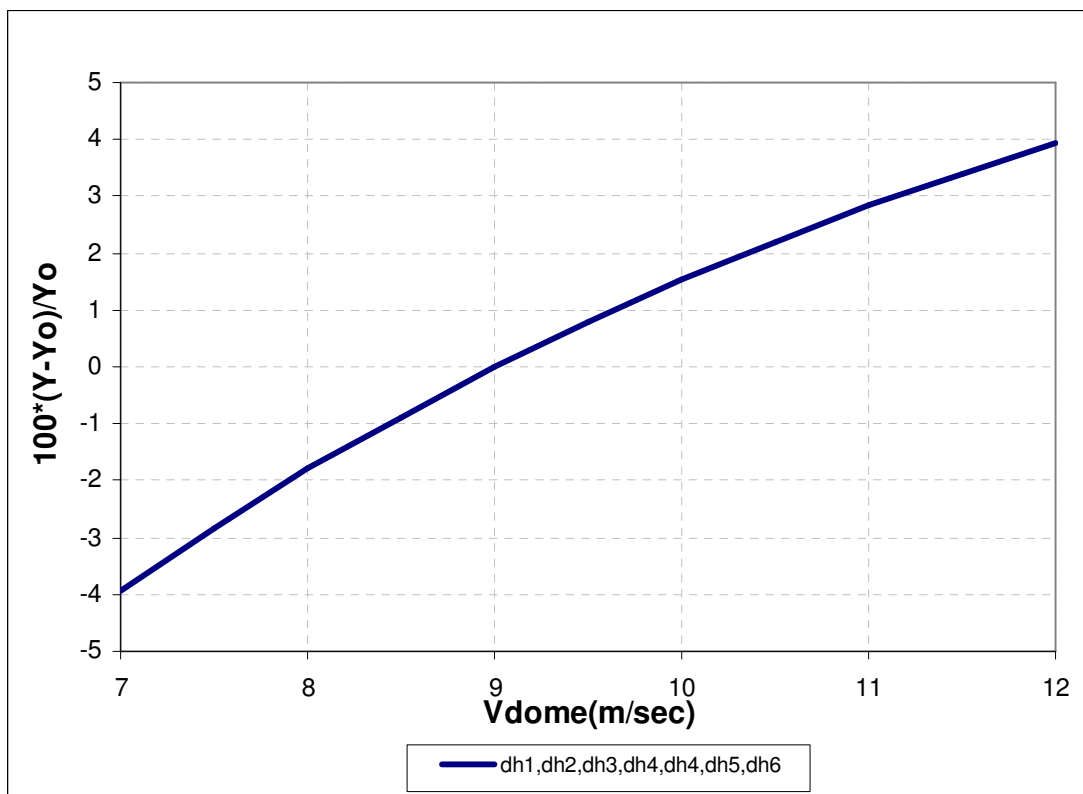
5.2.2. 6 Επίδραση Ταχύτητας Θόλου V_{dome}



Διάγραμμα 5. 59 Επίδραση της παραμέτρου V_{dome} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



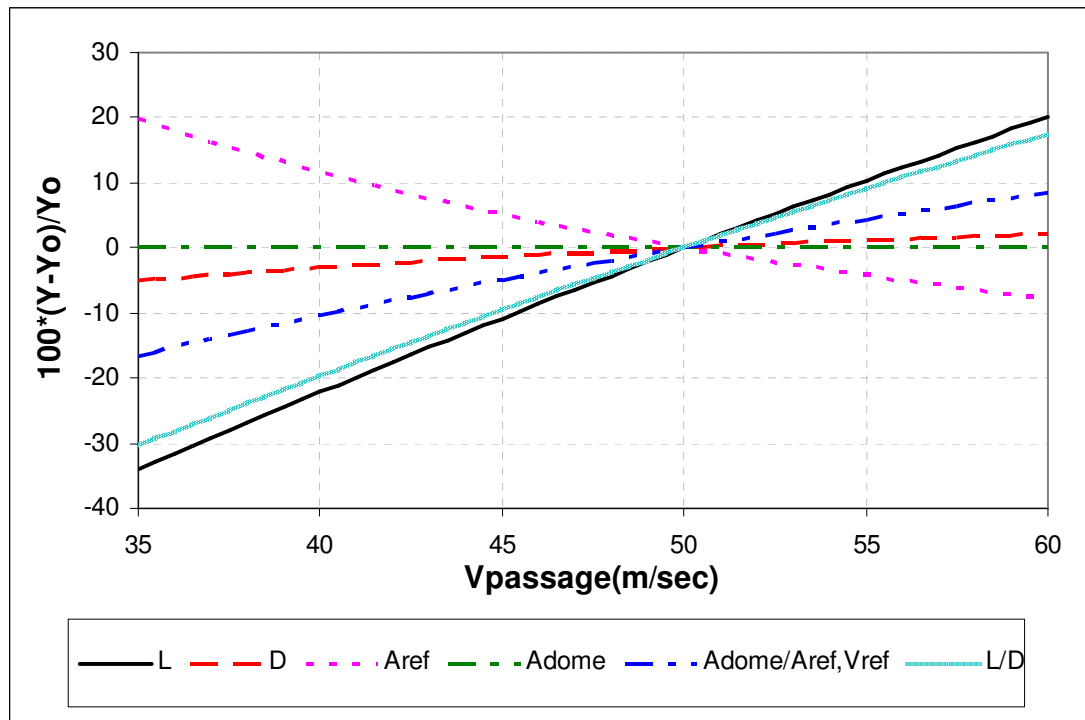
Διάγραμμα 5. 60 Επίδραση της παραμέτρου V_{dome} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



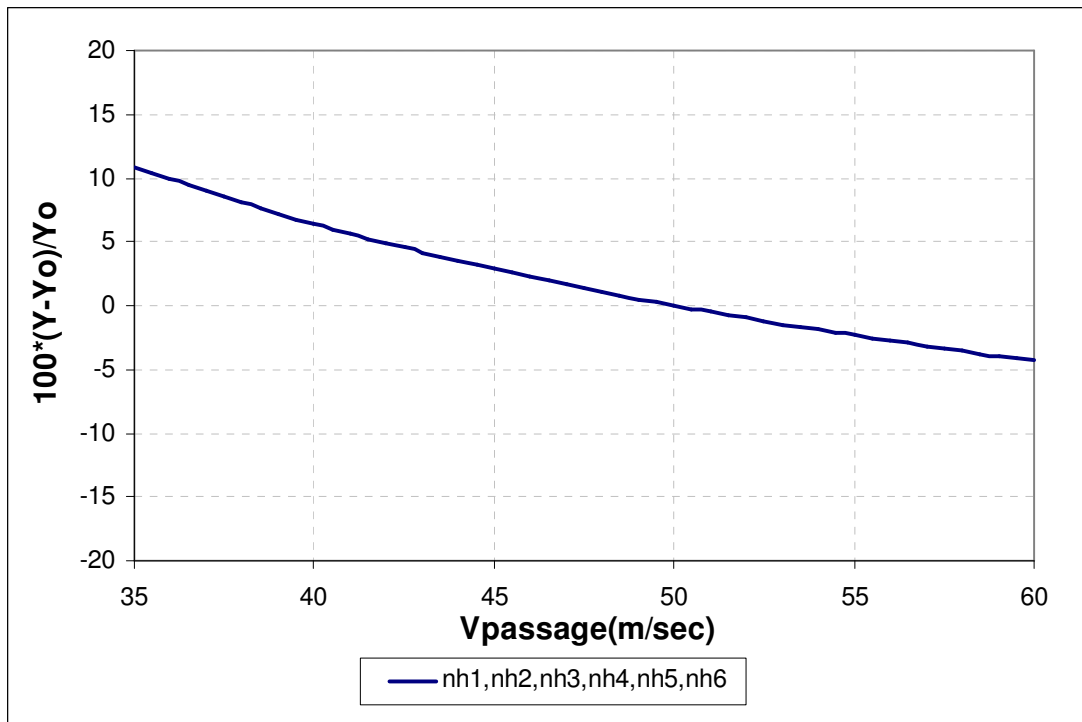
Διάγραμμα 5. 61 Επίδραση της παραμέτρου V_{dome} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Για την ταχύτητα στο θόλο, από τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις μεταβολές των διαφόρων μεγεθών, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Κατ' αρχήν τα ποσοστά των μεταβολών για τα μεγέθη αναφοράς και τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη του μανδύα είναι σχεδόν ίδια με αυτά του J79. Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των δύο θαλάμων καύσης είναι ότι στον J85 η επίδραση της ταχύτητας του θόλου είναι πολύ μικρότερη, τόσο στον αριθμό των οπών, όσο και στη διάμετρο τους.

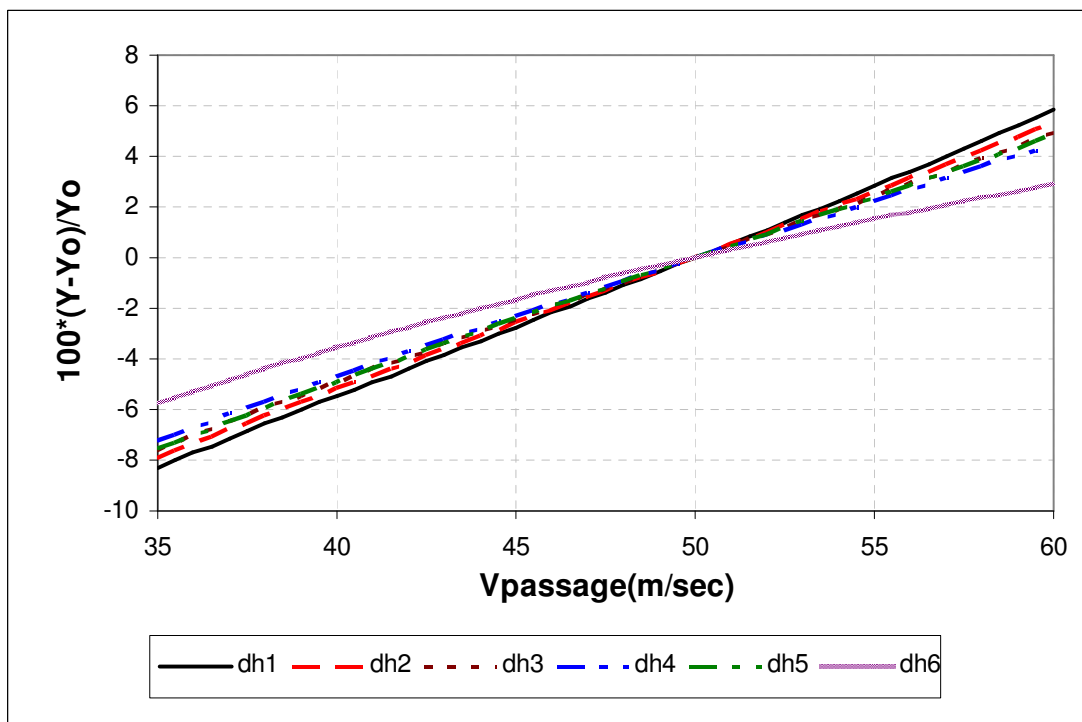
5.2.2. 7 Επίδραση Ταχύτητας «Περάσματος» $V_{passage}$



Διάγραμμα 5. 62 Επίδραση της παραμέτρου $V_{passage}$ στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 63 Επίδραση της παραμέτρου V_{passage} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος



Διάγραμμα 5. 64 Επίδραση της παραμέτρου V_{passage} στο Y για τα μεγέθη του υπομνήματος

Όσον αφορά τέλος την ταχύτητα στο «πέραςμα», εύκολα παρατηρεί κανείς ότι η επίδραση που έχει η μεταβολή της ταχύτητας αυτής στα μεγέθη είναι αρκετά σημαντική στο μανδύα και τα μεγέθη αναφοράς, ενώ μικρότερη έως και αμελητέα στις οπές. Επιπλέον είναι εμφανές ότι σε αυτό το θάλαμο καύσης η ευαισθησία είναι πιο έντονη εν συγκρίσει με τον άλλο θάλαμο, δεδομένου ότι αλλάζει όλη η γεωμετρία και όχι κάποια μεγέθη όπως συμβαίνει στο σωληνοειδή-δακτυλιοειδή του J79. Επιπλέον, μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο κινητήρων είναι ότι σε αυτόν μεταβάλλεται και ο αριθμός των οπών. Αυτό συμβαίνει, διότι από τα διαγράμματα φαίνεται πως αλλάζει και το βάθος D , γεγονός που επιδρά και στη διείδυση όπως ξέρουμε από το Κεφάλαιο 3.

5.2.2. 8 Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα για τον J85 και για τη μέθοδο των ταχυτήτων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Οι μεταβολές των βασικών μεγεθών για την παράμετρο Φ_{pz} είναι αρκετά σημαντικές. Ιδιαίτερα το βάθος D και ο λόγος L/D παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις τιμές που είχαν για την τυπική τιμή της παραμέτρου. Επιπλέον οι καμπύλες αυτές είναι σχεδόν ίδιες με τις αντίστοιχες του άλλου κινητήρα. Για την ίδια παράμετρο τώρα, οι οπές φαίνεται να έχουν τη μεταβολή που περιγράφηκε και στη μέθοδο των απωλειών πίεσης με σχεδόν ταυτόσημες καμπύλες. Στη συνέχεια, η πτώση πίεσης στο μανδύα επιδρά μόνο στο μήκος L και στο λόγο L/D , ενώ στις οπές, σε ότι αφορά τον αριθμό τους, η επίδραση είναι γραμμική και ίδια για κάθε σειρά. Σε ότι έχει να κάνει με τη διάμετρο των οπών, μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά πως όλες οι σειρές επηρεάζονται το ίδιο με μια μικρή μείωση καθώς προχωράμε κατάντι. Με άλλα λόγια για την παράμετρο αυτή ισχύουν τα ίδια με αυτά του κινητήρα J79. Το pf , η διείδυση στο μανδύα και ο λόγος των πυκνοτήτων έχουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με τον προηγούμενο κινητήρα και την άλλη μέθοδο και συνεπώς δεν υπάρχει λόγος να αναλυθούν εκ νέου. Η ταχύτητα στο θόλο δείχνει να επιδρά το ίδιο με τον άλλο θάλαμο καύσης του J79 με τη διαφορά ότι οι ποσοστιαίες μεταβολές στον J85 παρόλο που έχουν την ίδια μορφή, φαίνεται πως είναι μικρότερες. Τελειώνοντας, η ταχύτητα στο «πέραςμα» επιδρά σε όλα τα βασικά μεγέθη εκτός του $Adome$, με τη μέγιστη επίδραση να εμφανίζεται στο L , L/D και $Aref$. Ο αριθμός των οπών αλλάζει αλλά όχι σε πολύ μεγάλο βαθμό, σε αντίθεση με τον J79 όπου παραμένει αμετάβλητος, ενώ η διάμετρος των οπών παρουσιάζει μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες είναι μεγαλύτερες όσο κινούμαστε ανάντι.

5. 3 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικεύοντας τα συμπεράσματα που προέκυψαν για κάθε μέθοδο και για κάθε θάλαμο καύσης των δύο κινητήρων, μπορούμε να πούμε σε γενικές γραμμές ότι ανεξάρτητα του τύπου του θαλάμου καύσης, η επίδραση που έχει η μεταβολή μιας παραμέτρου στα υπολογιζόμενα μεγέθη για μία συγκεκριμένη μέθοδο (μέθοδος απωλειών πίεσης ή μέθοδος ταχυτήτων) είναι ουσιαστικά ίδια. Η μόνη αξιολογική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι επειδή ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται το βάθος D είναι διαφορετικός, αυτό προκαλεί λίγο διαφορετικές μεταβολές σε κάθε θάλαμο. Επιπλέον, κάποια γεωμετρικά στοιχεία, όπως για παράδειγμα το μήκος του μανδύα, μπορεί να παρουσιάζουν κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς τις μέγιστες μεταβολές, διότι οι εξισώσεις τροποποιούνται αναλόγως, όμως η μορφή των καμπυλών παραμένει ίδια. Σε ότι αφορά τις δύο μεθόδους υπολογισμού, φαίνεται από την ανάλυση ευαισθησίας ότι για την παράμετρο Φ_{pz} στη μέθοδο ταχυτήτων επηρεάζεται το σύνολο των γεωμετρικών στοιχείων του θαλάμου, σε αντίθεση με τη μέθοδο απωλειών πίεσης όπου οι μεταβολές παρατηρούνται μόνο σε ορισμένα μεγέθη (L, D και A_{dome}). Από την άλλη, οι οπές και στις δύο μεθόδους παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά με αρκετά μεγάλες μεταβολές. Συνεχίζοντας, η πτώση πίεσης $\Delta P_{liner}/\Delta P_c$, επιδρά στα βασικά μεγέθη, αναφορικά με τη μέθοδο απωλειών στο μήκος και στο βάθος του μανδύα (L και D), ενώ αναφορικά με τη μέθοδο των ταχυτήτων μόνο στο μήκος (L). Οι οπές, ανεξάρτητα της χρησιμοποιούμενης μεθόδου, εμφανίζουν σημαντικές μεταβολές. Ο αριθμός των οπών μεταβάλλεται περίπου το ίδιο για κάθε σειρά, παρουσιάζοντας γραμμική συμπεριφορά και η διάμετρος έχει αξιολογικές μεταβολές οι οποίες τείνουν μειούμενες καθώς προχωράμε κατάντι. Επιπρόσθετα, σε ότι έχει να κάνει με το rf , αυτό επηρεάζει μόνο το μήκος, όπως έχει προαναφερθεί και η επίδραση είναι αρκετά υψηλή και ίδια για κάθε μέθοδο. Η διεσδυσή στο μανδύα $Y_{max}/Depth$ επηρεάζει μόνο τις οπές και πιο συγκεκριμένα επιδρά σημαντικά στον αριθμό τους και λιγότερο στη διάμετρο, η οποία μεταβολή της τελευταίας (της διαμέτρου) είναι γραμμική. Ο λόγος των πυκνοτήτων ρ_j/ρ_g , όπως και η προηγούμενη παράμετρος προκαλεί μεταβολές μόνο στις οπές. Οι μεταβολές αυτές είναι αξιοσημείωτες και είναι σχεδόν γραμμικές και ανεξάρτητες της σειράς των οπών. Τελειώνοντας, οι παράμετροι που απομένουν είναι οι ταχύτητες που επιλέγονται για τη μέθοδο των ταχυτήτων. Η επιλογή των ταχυτήτων αυτών διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο, διότι μεταβάλλει σημαντικά το σύνολο των γεωμετρικών μεγεθών. Σε ότι έχει να κάνει με τις οπές, για την ταχύτητα του θόλου η επίδραση είναι ίδια για κάθε σειρά και γραμμική, τόσο στη διάμετρο όσο και στον αριθμό. Για την ταχύτητα του «περάσματος» η επίδραση στον αριθμό των οπών είναι γραμμική και ίδια σε κάθε σειρά, ενώ στη διάμετρο η επίδραση μειώνεται στις σειρές καθώς κινούμαστε κατάντι.

Ακολούθως, παρουσιάζονται τέσσερις πίνακες, ένας για κάθε περίπτωση και θάλαμο καύσης, στους οποίους μπορεί κανείς εύκολα να δει πια μεγέθη επηρεάζονται. Δεν δείχνει το βαθμό της επίδρασης ή τον τρόπο, απλά εμφανίζεται (+) αν επιδρά σε αυτό το μέγεθος η παράμετρος και (-) αν όχι.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί ότι αν προσέξει κάποιος τους ακόλουθους πίνακες θα διαπιστώσει ότι και στους δύο θαλάμους καύσης, στη μέθοδο των απωλειών πίεσης τα μεγέθη αναφοράς δε μεταβάλλονται. Το γεγονός αυτό έγκειται στο ότι στη μέθοδο αυτή, για συγκεκριμένο θάλαμο, η ταχύτητα αναφοράς V_{ref} εξαρτάται όπως φαίνεται και από την εξ.3.15 μόνο από τη θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή T_3 .

	L	D	V_{ref}	A_{ref}	A_{dome}	A_{dome}/A_{ref}	L/D	n_h	d_h
Φ_{pz}	+	+	-	-	+	+	-	+	+
ΔP_{liner}/ΔP_c	+	+	-	-	+	+	+	+	+
pf	+	-	-	-	-	-	+	-	-
Y_{max}/D	-	-	-	-	-	-	-	+	+
ρ_i/ρ_g	-	-	-	-	-	-	-	+	+

Πίνακας 5. 1 Μεγέθη στα οποία επιδρά η κάθε παράμετρος για τον J79 – μέθοδος απωλειών πίεσης

	L	D	V_{ref}	A_{ref}	A_{dome}	A_{dome}/A_{ref}	L/D	n_h	d_h
Φ_{pz}	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ΔP_{liner}/ΔP_c	+	-	-	-	-	-	+	+	+
pf	+	-	-	-	-	-	+	-	-
Y_{max}/D	-	-	-	-	-	-	-	+	+
ρ_i/ρ_g	-	-	-	-	-	-	-	+	+
V_{dome}	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V_{passage}	+	-	+	+	-	+	+	-	+

Πίνακας 5. 2 Μεγέθη στα οποία επιδρά η κάθε παράμετρος για τον J79 – μέθοδος ταχυτήτων

	L	D	V_{ref}	A_{ref}	A_{dome}	A_{dome}/A_{ref}	L/D	n_h	d_h
Φ_{pz}	+	+	-	-	+	+	-	+	+
ΔP_{liner}/ΔP_c	+	+	-	-	+	+	+	+	+
pf	+	-	-	-	-	-	+	-	-
Y_{max}/D	-	-	-	-	-	-	-	+	+
ρ_i/ρ_g	-	-	-	-	-	-	-	+	+

Πίνακας 5. 3 Μεγέθη στα οποία επιδρά η κάθε παράμετρος για τον J85 – μέθοδος απωλειών πίεσης

	L	D	V_{ref}	A_{ref}	A_{dome}	A_{dome}/A_{ref}	L/D	n_h	d_h
Φ_{pz}	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ΔP_{liner}/ΔP_c	+	-	-	-	-	-	+	+	+
pf	+	-	-	-	-	-	+	-	-
Y_{max}/D	-	-	-	-	-	-	-	+	+
ρ_i/ρ_g	-	-	-	-	-	-	-	+	+
V_{dome}	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V_{passage}	+	+	+	+	-	+	+	+	+

Πίνακας 5. 4 Μεγέθη στα οποία επιδρά η κάθε παράμετρος για τον J85 – μέθοδος ταχυτήτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ

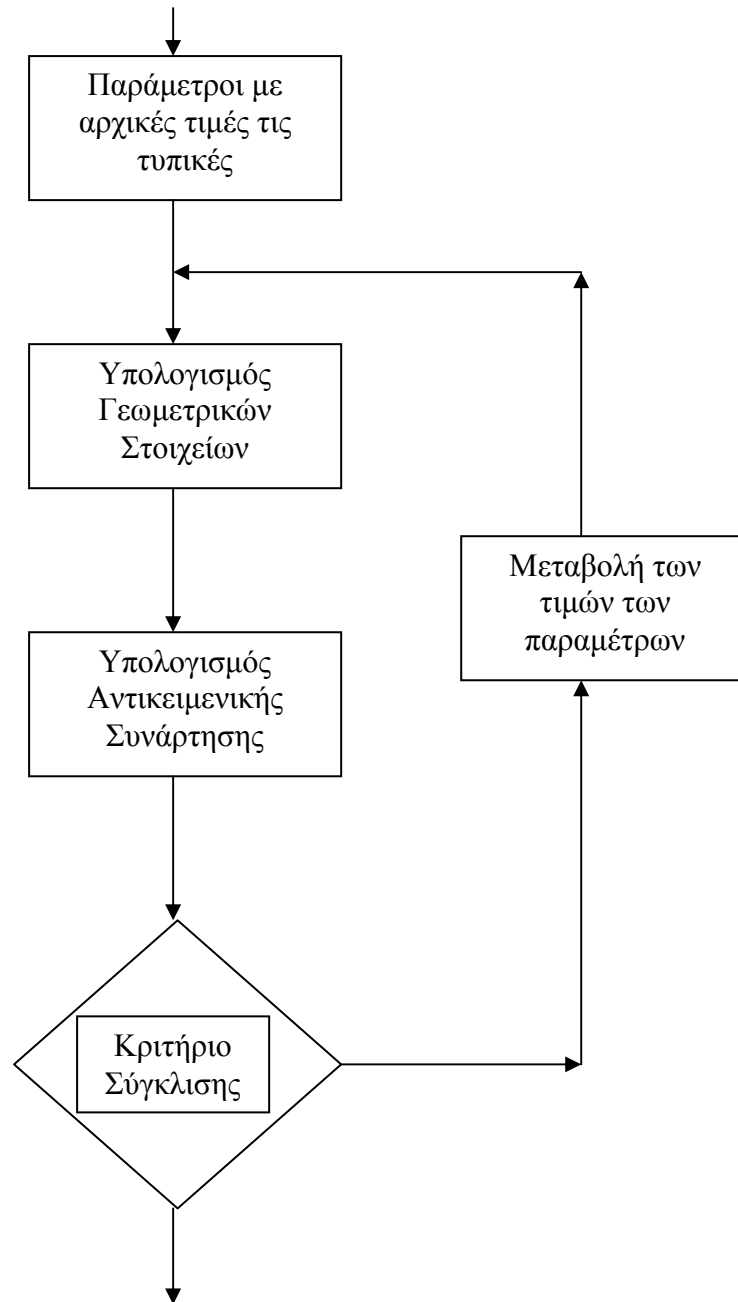
Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας μεθόδου εκτίμησης γεωμετρικών στοιχείων που θα χρησιμοποιεί διαθέσιμα δεδομένα σε συνδυασμό με εμπειρικές σχέσεις. Αφού αναπτύχθηκε το μοντέλο που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και έγινε η ανάλυση ευαισθησίας για να δούμε την επίδραση της κάθε παραμέτρου στο σχεδιασμό, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια να βρεθούν οι τιμές που πρέπει να έχουν οι παράμετροι, ώστε η γεωμετρία του θαλάμου καύσης που θα προκύψει, να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματική. Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα που θέλαμε να επιλύσουμε με την παρούσα προσαρμοστική εφαρμογή, είναι ότι δεν γνωρίζαμε ποιο είναι το σεντ των τιμών των παραμέτρων που θα μας δώσει ένα δεδομένο θάλαμο. Η επίλυση έγινε με τη βοήθεια της μεθόδου Simplex, η οποία βελτιστοποιεί μια αντικειμενική συνάρτηση. Ως τέτοια συνάρτηση επιλέχθηκε το ακόλουθο άθροισμα, όπου y_i είναι το αποτέλεσμα που δίνει το μοντέλο για ένα συγκεκριμένο μέγεθος (πχ το μήκος L), z_i είναι η επιθυμητή τιμή του μεγέθους αυτού και n είναι το πλήθος των υπολογιζόμενων μεγεθών.

$$Func = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(y_i - z_i)}{z_i} \right]^2$$

Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, η Simplex ή αλλιώς μέθοδος του πολυτόπου, δέχεται αρχικές τιμές για τις παραμέτρους. Στη συνέχεια, μεταβάλλει αυτές τις τιμές και υπολογίζονται εκ νέου τα μεγέθη και συνεπώς η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό επαναλαμβάνεται έως ότου η συνάρτηση σταματήσει να μειώνεται και συγκλίνει, οπότε και σταματά η διαδικασία. Οι τιμές που έχουν οι παράμετροι στο τέλος, είναι και οι τιμές που πιθανότατα θα δώσουν και την καλύτερη γεωμετρία.

Τα μεγέθη που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε είναι, κατ' αρχήν το μήκος L και το βάθος D του μανδύα, η επιφάνεια αναφοράς A_{ref} , όπου ουσιαστικά όπως ξέρουμε είναι η μέγιστη εγκάρσια διατομή του θαλάμου και τέλος είναι ο αριθμός και η διάμετρος των οπών του μανδύα.

Πιο συγκεκριμένα, για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η προσαρμοστική μέθοδος, ακολουθεί ένα απλό λογικό διάγραμμα του κώδικα.



Σχήμα 6.1: Απλό λογικό διάγραμμα προσαρμοστικής μεθόδου

6.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ J79

Τα πραγματικά στοιχεία για το θάλαμο καύσης αυτού του κινητήρα είναι γνωστά από το Κεφάλαιο 4. Το μήκος L είναι ίσο με 430 mm, το βάθος D είναι 162 mm, η επιφάνεια A_{ref} είναι 0.046908 m². Οι οπές είναι 6 ανά σειρά και έχουν όλες διάμετρο 16.8 mm και στις 6 σειρές.

6.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ

Για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης, εφαρμόζοντας τη μέθοδο simplex με αρχικές τιμές των παραμέτρων τις τυπικές, η συνάρτηση κόστους συνέκλινε σε μία τιμή. Η τιμή αυτή για τα 15 υπολογιζόμενα μεγέθη είναι $Func = 37,126$. Οι τιμές των παραμέτρων για αυτή τη λύση που πήραμε, καθώς και οι τιμές των μεγεθών και οι αποκλίσεις τους από τα πραγματικά μεγέθη, εμφανίζονται στους δύο ακόλουθους πίνακες.

Φ	$\Delta P_{liner}/\Delta P$	PF	Y_{max}/D	d_j/d_g
1	0.65	0.26	0.499	2.2

Πίνακας 6. 1 Τιμές των παραμέτρων στη βέλτιστη λύση για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ(%)
L(mm)	508	18.14
D(mm)	196	20.99
$A_{ref}(m^2)$	0.037541	-19.97
dh(1)(mm)	11.5	-31.55
dh(2)(mm)	12.4	-26.19
dh(3)(mm)	13.9	-17.26
dh(4)(mm)	15.6	-7.14
dh(5)(mm)	17.5	4.17
dh(6)(mm)	19.5	16.07
nh(1)	37	516.67
nh(2)	22	266.67
nh(3)	14	133.33
nh(4)	10	66.67
nh(5)	7	16.67
nh(6)	6	0

Πίνακας 6. 2 Τιμές των μεγεθών στη βέλτιστη λύση και απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

Επιπλέον, για λόγους πληρότητας και για να γίνει κατανοητό το μέγεθος της διαφοράς των γεωμετρικών μεγεθών πριν και μετά τη βελτιστοποίηση, παρατίθεται ένας ακόμα πίνακας, ο οποίος δίνει τις τιμές των μεγεθών που είχαμε υπολογίσει και στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιώντας τότε τις τυπικές τιμές των παραμέτρων. Ανάλογοι είναι και οι πίνακες και για την άλλη μέθοδο που ακολουθεί, αλλά και για τον δεύτερο θάλαμο καύσης του κινητήρα J85.

ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΤΥΠΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ(%)
L(mm)	570	32.56
D(mm)	197	21.60
Aref(m ²)	0.037540	-19.97
dh(1)(mm)	10	-40.48
dh(2)(mm)	11.5	-31.55
dh(3)(mm)	12.4	-26.19
dh(4)(mm)	13.7	-18.45
dh(5)(mm)	15.3	-8.93
dh(6)(mm)	17	1.19
nh(1)	58	866.67
nh(2)	33	450
nh(3)	21	250
nh(4)	15	150
nh(5)	11	83.33
nh(6)	8	33.33

Πίνακας 6. 3 Τιμές των μεγεθών για τις τυπικές τιμές των παραμέτρων και απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

6.1. 2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Ανάλογα και για αυτή τη μέθοδο, η τιμή της συνάρτησης κόστους πήρε την τιμή $Func = 10,452$. Οι τιμές των παραμέτρων και τα μεγέθη που προέκυψαν παρουσιάζονται στους δύο παρακάτω πίνακες.

Vdome(m/s)	Vpassage(m/s)	Φ	$\Delta P_{liner}/\Delta P$	PF	Ymax/D	dj/dg
12	50	0.90	0.70	0.25	0.499	1.7

Πίνακας 6. 4 Τιμές των παραμέτρων στη βέλτιστη λύση για τη μέθοδο των ταχυτήτων

ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ(%)
L(mm)	356	-17.21
D(mm)	186	14.81
Aref(m ²)	0.04209	-10.27
dh(1)(mm)	9.8	-41.67
dh(2)(mm)	12.3	-26.79
dh(3)(mm)	14.8	-11.90
dh(4)(mm)	17.3	2.98
dh(5)(mm)	19.8	17.86
dh(6)(mm)	22.3	32.74
nh(1)	23	283.33
nh(2)	14	133.33
nh(3)	9	50
nh(4)	7	16.67
nh(5)	5	-16.67
nh(6)	4	-33.33

Πίνακας 6. 5 Τιμές των μεγεθών στη βέλτιστη λύση και απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη για τη μέθοδο των ταχυτήτων

ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΤΥΠΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ(%)
L(mm)	380	-11.63
D(mm)	194	19.75
Aref(m ²)	0.045740	-2.49
dh(1)(mm)	6.7	-60.12
dh(2)(mm)	8.8	-47.62
dh(3)(mm)	10.9	-35.12
dh(4)(mm)	12.9	-23.21
dh(5)(mm)	15	-10.71
dh(6)(mm)	17	1.19
nh(1)	57	850
nh(2)	32	433.33
nh(3)	20	233.33
nh(4)	14	133.33
nh(5)	10	66.67
nh(6)	8	33.33

Πίνακας 6. 6 Τιμές των μεγεθών για τις τυπικές τιμές των παραμέτρων και απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη για τη μέθοδο των ταχυτήτων

6. 2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ J85

Τα πραγματικά στοιχεία για το θάλαμο καύσης αυτού του κινητήρα είναι γνωστά από το Κεφάλαιο 4. Το μήκος L είναι ίσο με 180 mm, το βάθος D είναι 60 mm και η επιφάνεια Aref είναι 0.135717 m². Οι οπές τέλος, έχουν διάμετρο περίπου 12 mm και σε αριθμό είναι προσεγγιστικά 100 ανά σειρά.

6.2. 1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκαν όπως και στον J79 σαν αρχικές τιμές της simplex οι τυπικές τιμές των παραμέτρων και μετά τη σύγκλιση της συνάρτησης στόχου η οποία πήρε την τιμή Func =26,491 πήραμε τα ακόλουθα αποτελέσματα για τις παραμέτρους και τα μεγέθη του θαλάμου καύσης.

Φ	ΔPliner/ΔP	PF	Ymax/D pz	Ymax/D sz	Ymax/D dz	dj/dg
0.90	0.65	0.26	0.49	0.39	0.48	2.1

Πίνακας 6. 7 Τιμές των παραμέτρων στη βέλτιστη λύση για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ(%)
L(mm)	462	156.67
D(mm)	94	56.67
Aref(m ²)	0.139525	2.81
dh(1)(mm)	4.4	-63.33
dh(2)(mm)	4.9	-59.17
dh(3)(mm)	3.8	-68.33
dh(4)(mm)	4	-66.67
dh(5)(mm)	9.9	-17.5
dh(6)(mm)	12.3	2.5
nh(1)	403	303
nh(2)	278	178
nh(3)	149	49
nh(4)	133	33
nh(5)	394	294
nh(6)	182	82

Πίνακας 6. 8 Τιμές των μεγεθών στη βέλτιστη λύση και απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΤΥΠΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ(%)
L(mm)	524	191.11
D(mm)	93	55
Aref(m ²)	0.139525	2.81
dh(1)(mm)	3.7	-69.17
dh(2)(mm)	4.1	-65.83
dh(3)(mm)	4.6	-61.67
dh(4)(mm)	5.1	-57.5
dh(5)(mm)	9.9	-17.5
dh(6)(mm)	12.3	2.5
nh(1)	567	467
nh(2)	391	291
nh(3)	306	206
nh(4)	228	128
nh(5)	417	317
nh(6)	192	92

Πίνακας 6. 9 Τιμές των μεγεθών για τις τυπικές τιμές των παραμέτρων και απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

6.2. 2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, έτσι και εδώ βρίσκουμε την τιμή της συνάρτησης κόστους. Η τιμή αυτή είναι $Func = 4,589$. Οι τιμές των παραμέτρων, καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις τιμές αυτές βρίσκονται στους επόμενους πίνακες.

Vdome(m/s)	Vpassage(m/s)	Φ	$\Delta P_{liner}/\Delta P$	PF	Y_{max}/D_{pz}	Y_{max}/D_{sz}	Y_{max}/D_{dz}	dj/dg
10	46,4	0,90	0,68	0,25	0,49	0,39	0,49	1

Πίνακας 6. 10 Τιμές των παραμέτρων στη βέλτιστη λύση για τη μέθοδο των ταχυτήτων

ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ(%)
L(mm)	288	60
D(mm)	78	30
Aref(m ²)	0,161162	18,74857
dh(1)(mm)	4,6	-61,66667
dh(2)(mm)	5,5	-54,16667
dh(3)(mm)	4,3	-64,16667
dh(4)(mm)	4,5	-62,5
dh(5)(mm)	11,7	-2,5
dh(6)(mm)	16,7	39,16667
nh(1)	214	114
nh(2)	148	48
nh(3)	90	-10
nh(4)	80	-20
nh(5)	194	94
nh(6)	89	-11

Πίνακας 6. 11 Τιμές των μεγεθών στη βέλτιστη λύση και απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη για τη μέθοδο των ταχυτήτων

ΜΕΓΕΘΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΤΥΠΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ(%)
L(mm)	346	92.22
D(mm)	73	21.67
Aref(m ²)	0.151697	11.77
dh(1)(mm)	2.6	-78.33
dh(2)(mm)	3.1	-74.17
dh(3)(mm)	3.7	-69.17
dh(4)(mm)	4.2	-65
dh(5)(mm)	8.1	-32.5
dh(6)(mm)	11.5	-4.17
nh(1)	594	494
nh(2)	409	309
nh(3)	320	220
nh(4)	239	139
nh(5)	436	336
nh(6)	201	101

Πίνακας 6. 12 Τιμές των μεγεθών για τις τυπικές τιμές των παραμέτρων και απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη για τη μέθοδο των απωλειών πίεσης

6. 3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε γίνεται σαφές ότι, η μέθοδος των ταχυτήτων δείχνει να μπορεί να πετύχει καλύτερες τιμές για τα μεγέθη του θαλάμου καύσης που υπολογίζουμε. Αυτό το γεγονός οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι στη μέθοδο αυτή οι ανεξάρτητες μεταβλητές ή αλλιώς οι παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα είναι περισσότερες εν συγκρίσει με τη μέθοδο των απωλειών πίεσης. Επιπλέον, πρέπει να τονισθεί ότι το ίδιο συμβαίνει και στο δακτυλιοειδή θάλαμο του J85 σε σύγκριση με αυτόν του J79, διότι υπάρχουν και στις δύο χρησιμοποιούμενες μεθόδους δύο επιπλέον παράμετροι που μεταβάλλονται, οι οποίες είναι η διείδυση στην πρώτη και στη δεύτερη ζώνη. Τέλος βλέπουμε ότι παρόλη τη βελτιστοποίηση που έγινε, συνεχίζουν να υπάρχουν αποκλίσεις από τα πραγματικά μεγέθη, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Πρώτον, στο μοντέλο που κατασκευάστηκε, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 3, δεν έχουμε λάβει υπ' όψιν μας την παροχή του αέρα που χρησιμοποιείται για την ψύξη του μανδύα, οπότε οι υπολογισμοί δεν θα μπορούσε να είναι απόλυτα ακριβείς. Δεύτερον, επειδή οι παράμετροι που μελετήθηκαν έχουν περιορισμό ως προς το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρουν, εγκλωβίζονται μέσα σε αυτό, ενώ πιθανότατα αν μπορούσαν να πάρουν μια διαφορετική τιμή να προσεγγίζονταν καλύτερα τα πραγματικά μεγέθη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Ανακεφαλαιώνοντας, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εκτίμηση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών θαλάμου καύσης αεροπορικού κινητήρα. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι, το μήκος και το βάθος του μανδύα, η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του θαλάμου καθώς και το μέγεθος και ο αριθμός των οπών. Δεχόμενοι κάποιες παραδοχές, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο το οποίο με εμπειρικές σχέσεις και επιλογές που αφορούν το είδος του θαλάμου, εκτελεί μια διαδικασία που δίνει τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά για το θάλαμο.

Πιο συγκεκριμένα τώρα, το εμπειρικό μοντέλο εφαρμόστηκε για τις τυπικές τιμές των παραμέτρων, που αναπτύχθηκαν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3, για τους θαλάμους καύσης δύο αεροπορικών κινητήρων, του J79 και του J85. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους κινητήρες, συγκρινόμενα με τα πραγματικά μεγέθη του θαλάμου είχαν αισθητές αποκλίσεις. Το πρώτο συμπέρασμα όμως που εξήχθη και από τους δύο κινητήρες είναι ότι η μέθοδος των ταχυτήτων δίνει σε γενικές γραμμές καλύτερα αποτελέσματα εν συγκρίσει με τη μέθοδο των απωλειών πίεσης. Το γεγονός αυτό είναι κατά κάποιο τρόπο αναμενόμενο, δεδομένου ότι από τη βιβλιογραφία [1] γνωρίζουμε πως η τελευταία μέθοδος δίνει συνήθως υψηλές ταχύτητες αναφοράς και καλό είναι να χρησιμοποιείται όταν ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος. Επιπλέον, ανεξάρτητα από την ακρίβεια της προσέγγισης των πραγματικών μεγεθών, είναι δεδομένο πως με το εμπειρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, είναι δυνατή η εύρεση της τάξης μεγέθους των βασικών διαστάσεων του θαλάμου. Οπότε μπορεί να φανεί χρήσιμο κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό. Από την ίδια διαδικασία κατέστη επίσης σαφής η ανάγκη να μελετηθούν ως προς την ευαισθησία οι παράμετροι που καθορίζουν το σχεδιασμό. Η ανάγκη αυτή προέκυψε από την έλλειψη στοιχείων για το πως οι παράμετροι επηρεάζουν το σχεδιασμό ανάλογα με την τιμή που παίρνουν.

Από την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε προέκυψε για κάθε παράμετρο το μέγεθος της επίδρασής της στα αποτελέσματα καθώς και ποια μεγέθη επηρεάζει. Συγκεκριμένα, δύο παράμετροι, η διείσδυση Y_{max}/D και ο λόγος πυκνοτήτων ρ/ρ_g επιδρούν μόνο στο σχεδιασμό των οπών, μία, το rf επιδρά μόνο στο μήκος του μανδύα και όλες οι υπόλοιπες επηρεάζουν το σύνολο του θαλάμου καύσης (σχόλια διαγραμμάτων κεφ.5). Επιπρόσθετα συμπεραίνεται ότι καμία από τις παραμέτρους που μελετήθηκαν δεν μπορεί να αγνοηθεί ως προς την τιμή που παίρνει, διότι για διαφορετικές τιμές, οι μεταβολές των μεγεθών που υπολογίζονται είναι σημαντικές.

Στη συνέχεια, από τη βελτιστοποίηση που έγινε (κεφ.6), βρέθηκε ένα σύνολο τιμών για τις παραμέτρους, το οποίο δίνει μια γεωμετρία κοντά στην πραγματική του θαλάμου. Οι τιμές αυτές μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι κοντά σε αυτές που ισχύουν στον πραγματικό θάλαμο καύσης, χωρίς αυτό όμως να μπορεί να υποστηριχθεί με βεβαιότητα.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, θα μπορούσε σε μελλοντική εργασία να αναπτυχθεί ένα λεπτομερέστερο εμπειρικό μοντέλο, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη του δεδομένα τα οποία αγνοήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τέτοια δεδομένα θα μπορούσε να είναι η ψύξη του θόλου και του μανδύα καθώς και η μείωση της εγκάρσιας διατομής του θαλάμου καθώς προχωράμε κατάντι της φλόγας. Επίσης θα μπορούσε ο θάλαμος να χωριστεί σε ζώνες και να μελετηθεί αναλυτικότερα η πτώση πίεσης και οι θερμοκρασίες που προκύπτουν μέσα σε αυτόν. Συνεπώς, περαιτέρω διερεύνηση της παρούσας μεθόδου, καθώς και γενικότερα των εμπειρικών στοιχείων, κρίνεται απαραίτητη, έτσι ώστε να βρεθούν ακριβέστερα μοντέλα εκτίμησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των θαλάμων καύσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mellor, A. M., 1990, Design of Modern Turbine Combustors, Academic Press
- [2] Lefebvre, A. H., 1983, Gas Turbine Combustion, Hemisphere Publishing Corporation
- [3] Shakariyants, S. A., van Buijtenen, J. P., Visser, W. P. J., 2004, “Generic Geometry Definition of The Aircraft Engine Combustion Chamber”, GT2004-53522, ASME Turbo Expo 2004, Vienna
- [4] Shakariyants, S. A., van Buijtenen, J. P., Visser, W. P. J., Tarasov, A., 2005, “A Generic Approach to Aero-Engine Exhaust Emission Simulation”, ISABE-2005-1232, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc
- [5] Κ.Μαθιουδάκη, 2007, “Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων”, ΕΜΠ
- [6] <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~propulsi/propulsion/images/jets/basics/combust.jpg>
- [7] Jane's, 2004, Aero-Engines, Bill Gunston OBE, FRAeS

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το αναπτυχθέν πρόγραμμα (chamber_teliko.exe) διαβάζει ένα αρχείο εισόδου (engdata.txt) και δίνει ως έξοδο ένα αρχείο με τα αποτελέσματα (results.txt).

Στο αρχείο εισόδου, από αριστερά προς τα δεξιά δίνουμε τα ακόλουθα δεδομένα.:

- Παροχή αέρα σε kg/sec (m_{air})
- Παροχή καυσίμου σε kg/sec (m_{fuel})
- Ολική πίεση εξόδου του συμπιεστή σε Pa (P_3)
- Ολική θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή σε K (T_3)
- Στατική θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή σε K (T_{s3})
- Επιφάνεια εξόδου συμπιεστή σε m^2 (ad_1)
- Επιθυμητό pattern factor (pf)
- Εσωτερική ακτίνα θαλάμου καύσης σε m (r_{ic})
- Ταχύτητα θόλου για τη μέθοδο των ταχυτήτων σε m/sec (V_{dome})
- Ταχύτητα «περάσματος» για τη μέθοδο των ταχυτήτων σε m/sec ($V_{passage}$)
- Λόγος πυκνοτήτων δέσμης-κυρίως ρεύματος (d_j/d_g)
- Διείσδυση στο μανδύα για την πρωτεύουσα ζώνη ($Y_{max}/Depth$)
- Διείσδυση στο μανδύα για τη δευτερεύουσα ζώνη ($Y_{max}/Depth$)
- Διείσδυση στο μανδύα για τη ζώνη ανάμειξης ($Y_{max}/Depth$)
- Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη (Φ_{pz})
- Λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα στην δευτερεύουσα ζώνη (Φ_{sz})
- Ποσοστό απωλειών πίεσης στο μανδύα ($\Delta P_{liner}/\Delta P_{3-4}$)
- Αριθμός σειρών οπών στην πρωτεύουσα ζώνη
- Αριθμός σειρών οπών στη δευτερεύουσα ζώνη
- Αριθμός σειρών οπών στη ζώνη ανάμειξης
- Επιλογή τύπου θαλάμου (1 για δακτυλιοειδή θάλαμο, 2 για σωληνοειδή θάλαμο και 3 για δακτυλιοειδή-σωληνοειδή θάλαμο)
- Επιλογή αριθμού cans (στην περίπτωση του δακτυλιοειδούς θαλάμου πρέπει να μπει 1)
- Επιλογή μεθόδου (1 για τη μέθοδο ταχυτήτων και 2 για τη μέθοδο απωλειών πίεσης)

Στο αρχείο εξόδου, από αριστερά προς τα δεξιά, το πρόγραμμα δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Μήκος μανδύα σε m (L)
- Βάθος μανδύα σε m (D)
- Ταχύτητα αναφοράς σε m/sec (V_{ref})
- Επιφάνεια αναφοράς σε m^2 (A_{ref})
- Επιφάνεια θόλου σε m^2 (A_{dome})
- Λόγος επιφάνειας θόλου προς την επιφάνεια αναφοράς (A_{dome}/A_{ref})
- Λόγος μήκους προς βάθος του μανδύα (L/D)

- Αριθμός οπών πρώτης σειράς
- Διάμετρος οπών πρώτης σειράς σε m
- Αριθμός οπών δεύτερης σειράς
- Διάμετρος οπών δεύτερης σειράς σε m
- .
- .
- .
- .
- Αριθμός οπών τελευταίας σειράς
- Διάμετρος οπών τελευταίας σειράς σε m

ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Στην προσαρμοστική μέθοδο ο κώδικας (DetTrck.exe) διαβάζει ως είσοδο τρία αρχεία. Το πρώτο έχει να κάνει με επιλογές της μεθόδου Simplex (optim.txt), το δεύτερο είναι το αρχείο με τα δεδομένα της μηχανής και είναι ίδιο με αυτό που περιγράφηκε στο εμπειρικό μοντέλο προηγουμένως (engdata.txt), το τρίτο έχει τα γεωμετρικά στοιχεία για το δεδομένο ή αλλιώς πραγματικό θάλαμο που επιθυμούμε (givendata.txt). Ως έξοδο δίνει ένα αρχείο (times parametrwn.txt), στο οποίο όταν συγκλίνει η μέθοδος, καταγράφονται οι τιμές των παραμέτρων ή αλλιώς των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Στο optim.txt, από αριστερά προς τα δεξιά έχουμε:

- Αριθμός ανεξάρτητων μεταβλητών, δηλαδή είναι το πλήθος των παραμέτρων που μεταβάλλονται (ακέραιος)
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων μέχρι να συγκλίνει η διαδικασία (ακέραιος)
- Ανοχή σύγκλισης – convergence tolerance (πραγματικός)
- Επιθυμητή ακρίβεια των ανεξάρτητων μεταβλητών (πραγματικός)

Στο givendata.txt, από αριστερά προς τα δεξιά έχουμε:

- Πραγματικό βάθος μανδύα σε m (D)
- Πραγματικό μήκος μανδύα σε m (L)
- Πραγματική επιφάνεια αναφοράς σε m^2 (Aref)
- Πραγματική διάμετρος των οπών σε m
- Πραγματικός αριθμός οπών σε κάθε σειρά

Στο engdata.txt ισχύουν όπως ειπώθηκε και παραπάνω αυτά που περιγράφηκαν στο εμπειρικό μοντέλο.

Στο times parametrwn.txt, από αριστερά προς τα δεξιά έχουμε:

Για τη μέθοδο απωλειών πίεσης:

- $\Delta P_{\text{liner}}/\Delta P_{3-4}$
- Φ_{pz}
- PF
- $Y_{\text{max}}/\text{Depth}$
- dj/dg

Για τη μέθοδο ταχυτήτων:

- $\Delta P_{\text{liner}}/\Delta P_{3-4}$
- Φ_{pz}
- PF
- V_{dome}
- V_{passage}
- $Y_{\text{max}}/\text{Depth}$
- dj/dg

