

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ  
ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ  
ΒΕΝΖΙΝΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

ΓΚΑΡΔΙΑΚΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ  
ΣΥΜΙΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:  
Δρ. ΜΠΟΥΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ 2004

**ΓΚΑΡΔΙΑΚΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ**  
**ΣΥΜΙΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

*ΣΤΟΥΣ ΓΟΝΕΪΣ ΜΑΣ*

## Ευχαριστίες

Η εργασία που κρατάτε στα χέρια σας, δε θα έφθανε ποτέ σε αυτή τη μορφή χωρίς τη βοήθεια κάποιων ανθρώπων, τους οποίους θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε για την πολύτιμη συμβολή τους.

Καταρχήν θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας Κ. Δημήτρη Μπούρη για την υπομονή του, τις συμβουλές του και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της διπλωματικής αυτής.

Ευχαριστούμε ιδιαίτερα τον Κ. Αντώνη Τουρλιδάκη για τη γενικότερη βοήθειά του και κυρίως για τη συμβολή του ώστε να συμμετάσχουμε στο ενημερωτικό σεμινάριο του προγράμματος CFX στη Θεσσαλονίκη.

Τέλος, θέλουμε να ευχαριστήσουμε πολύ τη Μελίνα Πετρίδου και το Νάσο Γραμματικόπουλο για τη βοήθεια, την αμέριστη συμπαράσταση, και τη συνεργασία τους σε όλες τις δυσκολίες και αντιξοότητες που αντιμετωπίσαμε από κοινού όλο αυτό το διάστημα.

Α.Π.Θ. - ΤΜΗΜΑ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ  
Αριθμ. Εισαγ.: 1364  
Ημερομηνία: 9/11/04

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη στιγμή που το αυτοκίνητο αποτέλεσε αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής του ανθρώπου και η προστασία του περιβάλλοντος έγινε στόχος όλων, η βελτίωση της λειτουργίας και της απόδοσης των μηχανών ήταν επιτακτική. Τα περιθώρια εξέλιξης των κινητήρων εσωτερικής καύσης φαίνεται να μην έχουν φθάσει στο όριο τους και αυτό χάρη στην τεράστια συμβολή της ηλεκτρονικής επιστήμης και της επιστήμης των υλικών.

Το σύστημα ψεκασμού του καυσίμου αποτελούσε ανέκαθεν ένα από τα πιο σημαντικά συστήματα του κινητήρα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τα τελευταία χρόνια έγινε ένα μεγάλο βήμα στο συγκεκριμένο τομέα με την εμφάνιση των συστημάτων άμεσου ψεκασμού βενζίνης (GDI). Σε αυτό το σύστημα ο ψεκασμός του καυσίμου γίνεται πλέον απευθείας στο θάλαμο καύσης σε αντίθεση με τα συστήματα έμμεσου ψεκασμού.

Το άκρο του εγχυτήρα –στο σημείο ακριβώς του ψεκασμού- βρίσκεται σε άμεση επαφή με το θάλαμο καύσης όπου αναπτύσσονται εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Στο άκρο αυτό έχουν παρατηρηθεί κάποια υπολείμματα καύσης, τα οποία είναι πιθανόν να προκαλούνται εξαιτίας κάποιας τοπικής αυτανάφλεξης του καυσίμου εσωτερικά του ακροφυσίου. Με τη συνεχή εμφάνιση αυτού του φαινομένου είναι δυνατόν να προκληθεί συσσωμάτωση των υπολειμμάτων με αποτέλεσμα να υπάρχει πρόβλημα στην ομαλή λειτουργία του εγχυτήρα κατά την έγχυση του καυσίμου.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί η κατανομή των θερμοκρασιών του καυσίμου στο εσωτερικό του άκρου εγχύσεως, κατά τη διάρκεια του ψεκασμού, αλλά και του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών ψεκασμών (όπου δεν υπάρχει ροή καυσίμου), ώστε να δούμε αν υπάρχουν κάποια σημεία ή περιοχές στο εσωτερικό αυτό, όπου η θερμοκρασία παίρνει τέτοιες τιμές, που είναι δυνατόν με βάση τις ιδιότητες του καυσίμου, να δημιουργηθεί αυτανάφλεξη (εφόσον υπάρξει ικανή ποσότητα αέρα).

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στο πρόβλημα αυτό, έγινε επίλυση της ροής και της μεταφοράς θερμότητας στο άκρο ενός πρότυπου εγχυτήρα, με τη χρήση προγράμματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Ένα από τα πιο επίτονα σημεία στη διαδικασία επίλυσης ενός ρευστομηχανικού προβλήματος, με τη χρήση υπολογιστικού προγράμματος, είναι η κατασκευή της γεωμετρίας. Στη δική μας περίπτωση επιλέχθηκε αρχικά το υπολογιστικό πρόγραμμα star-cd όπου και ξεκίνησε η προσπάθεια για την κατασκευή της. Η διαδικασία αυτή αποδείχθηκε αρκετά πολύπλοκη και επαλήθευσε τα λεγόμενα όσων έχουν ασχοληθεί με τέτοια προγράμματα.

Το πρόγραμμα το οποίο τελικά χρησιμοποιήθηκε είναι το CFX 5.7.

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΒΕΝΖΙΝΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ .....	3
2.1.	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	3
2.2.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΜΕ ΚΑΡΜΠΥΡΑΤΕΡ .....	4
2.2.1.	Περιγραφή του συστήματος.....	4
2.2.2.	Σχεδίαση και αρχή λειτουργίας του καρμπυρατέρ.....	5
2.3.	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ.....	7
2.3.1.	Ηλεκτρονικά ελεγχόμενο ή ρυθμιζόμενο καρμπυρατέρ .....	7
2.3.2.	Ηλεκτρονικά Συστήματα Ψεκασμού.....	9
2.4.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΡΜΠΥΡΑΤΕΡ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	11
3.	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ	13
3.1.	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	13
3.1.1.	Συνεχής ή Μηχανικός ψεκασμός .....	13
3.1.2.	Διακοπτόμενος ψεκασμός - ταξινομήσεις.....	13
3.2.	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ Η ΤΩΝ ΜΠΕΚ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	15
3.3.	ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΥ ΜΠΕΚ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ .....	16
3.4.	ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΘΕΙ ΤΑ ΜΠΕΚ. ....	17
4.	ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	18
4.1.	ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	18
4.1.1.	Δοχείο Καυσίμου (Ρεζερβουάρ) .....	19
4.1.2.	Ηλεκτρική Αντλία Καυσίμου.....	21
4.1.3.	Φίλτρα καυσίμου.....	23
4.1.4.	Διακλαδωτήρας σωληνώσεων των μπεκ ή μπεκιέρα (για τον πολλαπλό ψεκασμό)...	24
4.1.5.	Ρυθμιστής πίεσης καυσίμου .....	25
4.1.6.	Ηλεκτρομαγνητικά μπεκ ψεκασμού.....	26
4.1.7.	Μπεκ ψυχρής εκκίνησης .....	32

4.2.	ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ - ΜΕΤΡΗΤΗ ΡΟΗΣ (AIR-FLOW METER INTAKE SYSTEM). .....	34
4.2.1.	Μετρητες αναρροφούμενου αέρα .....	34
4.2.2.	Σώμα πεταλούδας.....	39
4.2.3.	Βαλβίδα βοηθητικού αέρα (AAV) ή βαλβίδα ρύθμισης ρελαντί.....	40
4.3.	ΤΟ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	41
4.3.1.	Εγκέφαλος ( ECU ή Electronic Control Unit ).....	41
4.3.2.	Είδη Αισθητήρων Συστήματος Ηλεκτρονικού Ψεκασμού.....	44
5.	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗ.....	48
6.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ.....	51
6.1.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ K-JETRONIC .....	51
6.1.1.	Εισαγωγή αέρα.....	52
6.1.2.	Παροχή καυσίμου.....	53
6.1.3.	Έλεγχος έγχυσης καυσίμου .....	55
6.2.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ KE-JETRONIC .....	61
6.3.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ L -JETRONIC .....	65
6.4.	ΣΥΣΤΗΜΑ LH -JETRONIC.....	68
6.5.	ΣΥΣΤΗΜΑ MONO – JETRONIC .....	69
6.6.	ΣΥΣΤΗΜΑ MOTRONIC.....	74
7.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ BENZΙΝΗΣ (GDI).....	76
7.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	76
7.2.	ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ.....	77
7.3.	Η ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GDI .....	77
7.4.	Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ .....	79
7.5.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	81
7.5.1.	«Πρόγραμμα Φτωχού Μίγματος».....	81
7.5.2.	«Πρόγραμμα Υψηλής Απόδοσης» .....	84
7.6.	ΕΓΧΥΤΗΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	89
7.7.	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ.....	91
7.7.1.	Κινητήρας άμεσου ψεκασμού της Toyota .....	91
7.7.2.	GDI της Mitsubishi .....	93
7.7.3.	Κινητήρας άμεσου ψεκασμού της Nissan.....	94



7.7.4.	Σύστημα DI - MOTRONIC της Bosch .....	95
7.7.5.	Κινητήρες Άμεσου ψεκασμού VW – Audi (FSI).....	97
7.8.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΜΕΣΟΥ - ΕΜΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	101
7.9.	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	103
8.	<b>ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL .....</b>	<b>104</b>
8.1.	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	104
8.2.	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ:.....	105
8.3.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ .....	106
8.3.1.	Αναφορικά.....	106
8.3.2.	Σύστημα αντλίας διανομής περιστρεφόμενου / παλινδρομούντος εμβόλου.....	108
8.3.3.	Σύστημα Unit injector .....	108
8.3.4.	Σύστημα common rail .....	110
8.4.	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ – ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ .....	114
8.5.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ DIESEL-GASOLINE .....	116
8.6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	118
9.	<b>ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ .....</b>	<b>119</b>
9.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	119
9.2.	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	120
9.3.	ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ.....	121
9.4.	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ .....	124
9.5.	ΝΟΜΟΙ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	125
9.6.	ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	138
9.6.1.	Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών .....	139
9.6.2.	Μέθοδος πεπερασμένων όγκων: .....	141
9.6.3.	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων:.....	141
10.	<b>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ CFX.....</b>	<b>142</b>
10.1.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ (CAD).....	142
10.2.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESHING) .....	143
10.3.	ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ (PRE-PROCESSING).....	143
10.4.	ΕΠΙΛΥΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ (SOLVER).....	144

10.5.	ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – (POST- PROCESSING).....	147
11.	ΕΠΙΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΓΧΥΤΗΡΑ GDI.....	148
11.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	148
11.2.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ (GEOMETRY-CAD).....	149
11.2.1.	Περιστροφή δισδιάστατου σχήματος.....	150
11.2.2.	Κατασκευή κυλίνδρων .....	151
11.3.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESHING) .....	154
11.3.1.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ .....	159
11.3.2.	ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ .....	161
11.4.	ΤΕΛΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ .....	161
11.5.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ (PRE-PROCESSING).....	166
11.6.	ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΙΣΩΣΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (SOLVER).....	169
12.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (POST-PROCESSING).....	170
12.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	170
12.2.	ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ (STEADY STATE) .....	170
12.2.1.	Σύγκριση αρχικού και τελικού πλέγματος για την ίδια περίπτωση ροής.....	170
12.2.2.	Ροή με επιβολή σταθερής θερμοκρασίας τοιχωμάτων.....	176
12.3.	ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ (TRANSIENT).....	188
12.3.1.	Χρόνος ψεκασμού.....	188
12.3.2.	Ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών ψεκασμών.....	193
12.3.3.	Χρόνος ψεκασμού μετά από τον ενδιάμεσο χρόνο .....	197
13.	ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ – ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	202
14.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ... .....	204
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	207

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή αποτελείται κυρίως από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, γίνεται η παρουσίαση - σε θεωρητικό επίπεδο - όλων των συστημάτων έγχυσης σε βενζινοκινητήρες, δίνοντας έμφαση στα συστήματα άμεσου ψεκασμού, αλλά και στη σύγκριση των συστημάτων αυτών με τα αντίστοιχα των κινητήρων diesel. Στο δεύτερο μέρος, γίνεται η θεωρητική προσέγγιση της υπολογιστικής μηχανικής των ρευστών και στη συνέχεια η μελέτη, ανάλυση-επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επίλυσης της ροής και της μεταφοράς θερμότητας, σε έναν εγχυτήρα άμεσου ψεκασμού, με τη χρήση υπολογιστικού προγράμματος.

Στο κεφάλαιο δύο γίνεται αναφορά στα συστήματα τροφοδοσίας των βενζινοκινητήρων, από το πρώτο σύστημα με καρμπυρατέρ έως τα ηλεκτρονικά συστήματα έμμεσου ψεκασμού. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση του τρόπου λειτουργίας αυτών των συστημάτων.

Στο επόμενο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά όλων των ηλεκτρονικών συστημάτων έμμεσου ψεκασμού και η ταξινόμησή τους με διάφορους τρόπους, ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μία γενική άποψη για τον τρόπο λειτουργίας αλλά και για τις δυνατότητες των συστημάτων αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται περιεκτικά τα υποσυστήματα από τα οποία αποτελούνται τα συστήματα ηλεκτρονικού ψεκασμού και τα οποία είναι τα συστήματα τροφοδοσίας καυσίμου, εισαγωγής και μέτρησης του αέρα και ηλεκτρονικού ελέγχου του ψεκασμού. Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να καταδειχθεί το πλήθος των συστημάτων που πρέπει να συνεργαστούν ώστε να επιτευχθεί ο ψεκασμός με ακρίβεια και αξιοπιστία για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα.

Το σύστημα της ανάφλεξης περιγράφεται συνοπτικά στο πέμπτο κεφάλαιο. Η ανάλυση του συστήματος αυτού γίνεται για να δείξει την πολύ μεγάλη σημασία της συνεργασίας του με το σύστημα ψεκασμού. Ο σωστός συνδυασμός των δύο αυτών συστημάτων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για αποδοτική καύση.

Στο κεφάλαιο έξι, γίνεται η ανάλυση των σημαντικότερων συστημάτων έμμεσου ψεκασμού που επικράτησαν και χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα σε αυτοκίνητα παραγωγής.

Στο έβδομο κεφάλαιο, γίνεται εισαγωγή και ανάλυση του τρόπου λειτουργίας των συστημάτων άμεσου ψεκασμού βενζίνης (GDI). Επίσης, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα αυτών έναντι των συστημάτων έμμεσου ψεκασμού και δίνεται μία γενική εικόνα για τις δυνατότητες που προσφέρουν τα σύγχρονα αυτά συστήματα.

Οι κινητήρες Diesel στους οποίους εφαρμόστηκαν αρχικά τα συστήματα άμεσου ψεκασμού, αναλύονται στο όγδοο κεφάλαιο. Επιπλέον γίνεται η σύγκριση αυτών με τους κινητήρες άμεσου ψεκασμού βενζίνης.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας ξεκινά στο ένατο κεφάλαιο, με την περιγραφή των βασικών νόμων που διέπουν την υπολογιστική ρευστομηχανική και συγκεκριμένα με την περιγραφή της αριθμητικής μεθοδολογίας που ακολουθεί το λογισμικό CFX το οποίο χρησιμοποιήθηκε.

Στο επόμενο κεφάλαιο (10<sup>ο</sup>), περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται στο πρόγραμμα αυτό, για την προσομοίωση ενός προβλήματος.

Στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή και ανάλυση της διαδικασίας – από το σχεδιασμό της γεωμετρίας και την διακριτοποίηση του χώρου με την κατασκευή πλέγματος έως τον ορισμό των οριακών συνθηκών και των φυσικών παραμέτρων - που ακολουθήθηκε για την επίλυση της ροής και της μεταφοράς θερμότητας σε έναν πρότυπο εγχυτήρα GDI.

Στο κεφάλαιο δώδεκα, γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από το πρόγραμμα και η ανάλυση των φαινομένων που παρατηρούνται για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν (μόνιμη και μη-μόνιμη ροή).

Στο κεφάλαιο δεκατρία, αναπτύσσονται οι παραδοχές που έγιναν για την προσομοίωση του προβλήματος, με σκοπό να γίνει η σύγκριση της προσομοίωσης που έγινε στην εργασία με την πραγματικότητα.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων και οι προτάσεις μας για επέκταση της εργασίας ώστε να καλυφθούν οι πτυχές του προβλήματος οι οποίες δεν εξετάστηκαν.

## 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΒΕΝΖΙΝΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

### 2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Το βασικό σύστημα τροφοδοσίας κάθε βενζινοκινητήρα, που επικράτησε έως τις αρχές της δεκαετίας του '90, ήταν αυτό με το καρμπυρατέρ (σχήμα 2-1) . Το καρμπυρατέρ ή εξαερωτήρας ήταν το εξάρτημα εκείνο που εξαέρωνε τη βενζίνη (από υγρή κατάσταση - σε αέρια κατάσταση) και προετοίμαζε την αναλογία του μίγματος αέρα - καυσίμου. Το καρμπυρατέρ, σε όλες τις παραλλαγές που εμφανίστηκε κατά καιρούς, μέχρι και σήμερα, αποτελεί συμβατικό σύστημα τροφοδοσίας και κατ' επέκταση τα αυτοκίνητα που έχουν καρμπυρατέρ, λέγονται συμβατικά αυτοκίνητα. Τα τελευταία χρόνια, οι κατασκευαστές κινητήρων προσπαθούν να ανταποκριθούν στα ολοένα αυστηρότερα όρια εκπομπής ρύπων των καυσαερίων. Η προσπάθεια τους εστιάζεται στη βελτιστοποίηση των συστημάτων του κινητήρα που επηρεάζουν τους ρύπους.

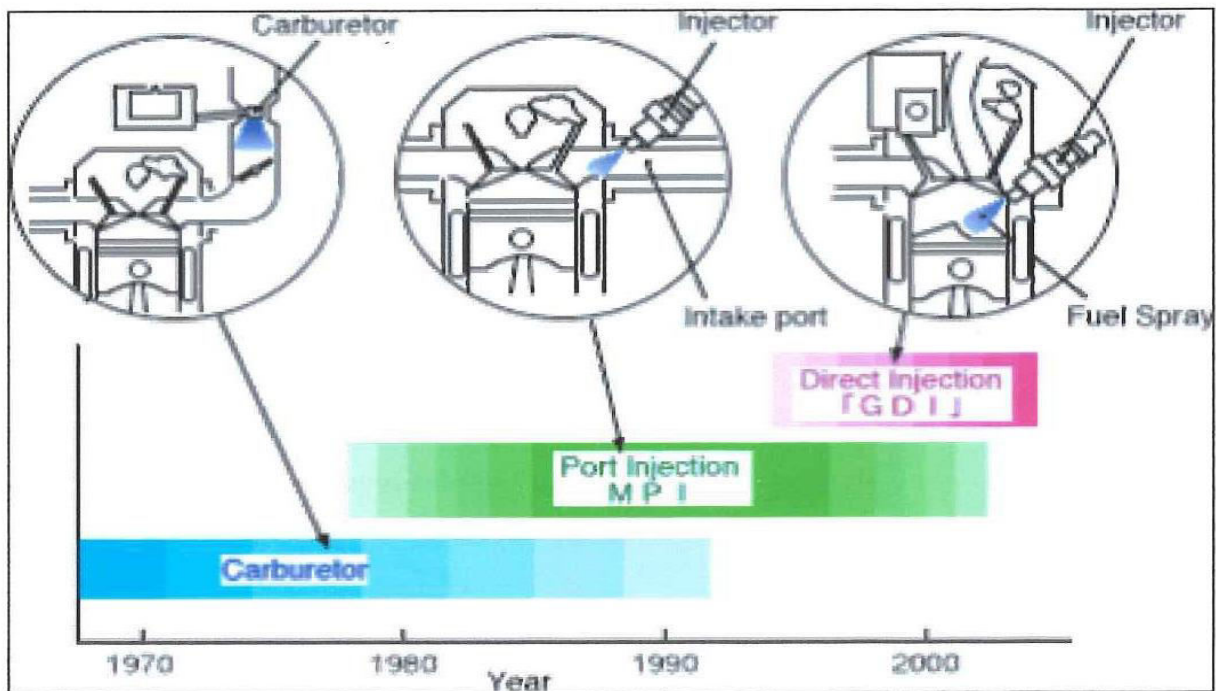


*Σχήμα 2-1 : Από το καρμπυρατέρ, σήμερα στα συστήματα άμεσου ψεκασμού*

Τα συστήματα ψεκασμού ή έγχυσης καυσίμου (injection) αντικατέστησαν τα συστήματα τροφοδοσίας, που είχαν μηχανικά ή ηλεκτρονικά καρμπυρατέρ . Τα συστήματα ψεκασμού έχουν τη δυνατότητα μέτρησης της ποσότητας του καυσίμου, που ψεκάζεται με μεγάλη ακρίβεια λαμβάνοντας υπόψη πολλές παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα, όπως το φορτίο του κινητήρα, τη θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού, τις απαιτήσεις του οδηγού κ.λπ. Όλες αυτές οι παράμετροι λειτουργίας, υπόκεινται σε επεξεργασία από τον εγκέφαλο του συστήματος, με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσαρμογή του μίγματος τροφοδοσίας του

κινητήρα, ανάλογα με τις συνθήκες.

Η τελευταία εξέλιξη στα συστήματα ψεκασμού, μετά από αρκετά χρόνια μελέτης και έρευνας είναι τα συστήματα άμεσου ψεκασμού (σχήμα 2-2). Τα συμπεράσματα από τις πρώτες εφαρμογές αυτών των συστημάτων σε αυτοκίνητα παραγωγής, είναι θετικά και δείχνουν ότι ο στόχος της μείωσης των επιπτώσεων στο περιβάλλον, από τις μηχανές εσωτερικής, καύσης είναι εφικτός.



Σχήμα 2-2 : Η εξέλιξη στα συστήματα ψεκασμού

## 2.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΜΕ ΚΑΡΜΠΥΡΑΤΕΡ

### 2.2.1. Περιγραφή του συστήματος

Αυτό το σύστημα τροφοδοσίας αποτελείται από τη δεξαμενή καυσίμου (ρεζερβουάρ), την αντλία βενζίνης που είναι συνήθως μηχανική (με εξαίρεση στον ψεκασμό που είναι ηλεκτρική) και παίρνει κίνηση από τον εκκεντροφόρο του κινητήρα, το φίλτρο καυσίμου, το καρμπυρατέρ (σχήμα 2-3) και την πολλαπλή εισαγωγής. Η αντλία βενζίνης, η οποία συνδέεται μέσω σωληνώσεων με τη δεξαμενή και το καρμπυρατέρ, μεταφέρει καύσιμο στο σύστημα του

πλωτήρα του καρμπυρατέρ. Η ανάμιξη της βενζίνης με τον αέρα και η εξαέρωση της πραγματοποιείται από το καρμπυρατέρ.

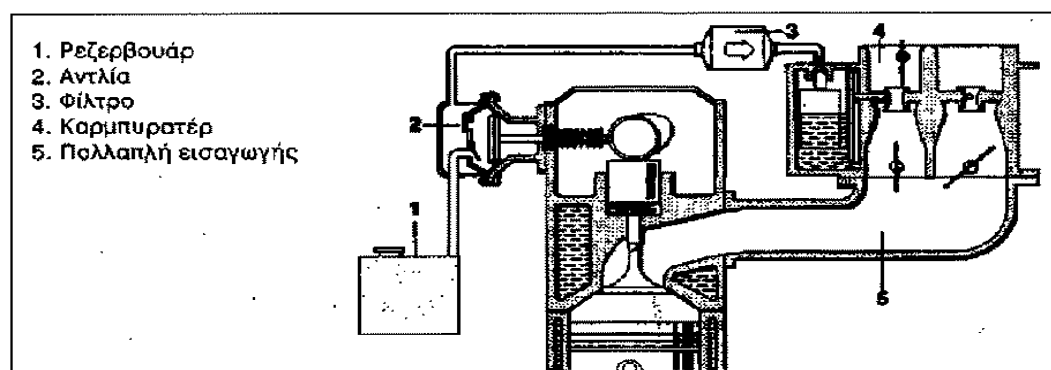
Με το καρμπυρατέρ, επιτυγχάνεται σωστή και σταθερή αναλογία μίγματος αέρα-καυσίμου, σε όλες τις καταστάσεις που αντιμετωπίζει το αυτοκίνητο όταν κινείται. Πιο συγκεκριμένα όμως με το καρμπυρατέρ επιτυγχάνονται ακόμα τα εξής:

α) Αυτόματη ρύθμιση πλούσιου μίγματος στην εκκίνηση ή στην επιτάχυνση του κινητήρα με αναλογία μίγματος αέρα-καυσίμου, π.χ. 13.5 : 1 ή 12 : 1.

β) Αυτόματη ρύθμιση φτώχου μίγματος για περίπτωση επιβράδυνσης του κινητήρα, με αναλογία μίγματος αέρα-καυσίμου, π.χ. 16.5:1.

Τα συστήματα από τα οποία αποτελείται ένα καρμπυρατέρ (ονομάζονται και κυκλώματα), είναι τα εξής:

- Σύστημα του πλωτήρα.
- Σύστημα ρελαντί και χαμηλών στροφών.
- Κύριο μετρητικό σύστημα παροχής βενζίνης.
- Σύστημα επιτάχυνσης (ισχύος), και
- Σύστημα εμπλουτισμού μίγματος (τσοκ) σε ψυχρή εκκίνηση.



Σχήμα 2-3 : Σχηματικό διάγραμμα καρμπυρατέρ

### 2.2.2. Σχεδίαση και αρχή λειτουργίας του καρμπυρατέρ

Ο οδηγός του αυτοκινήτου μέσω ενός συστήματος μοχλών (με ντίζες ή συρματόσχοινο), επενεργεί στην πεταλούδα του γκαζιού και στην αντλία επιτάχυνσης του καρμπυρατέρ. Η πεταλούδα όμως ελέγχει (καθορίζει) την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα. Το καρμπυρατέρ "μετράει" την κατάλληλη ποσότητα καυσίμου, που εξαρτάται όμως από την

εισερχόμενη ποσότητα αέρα.

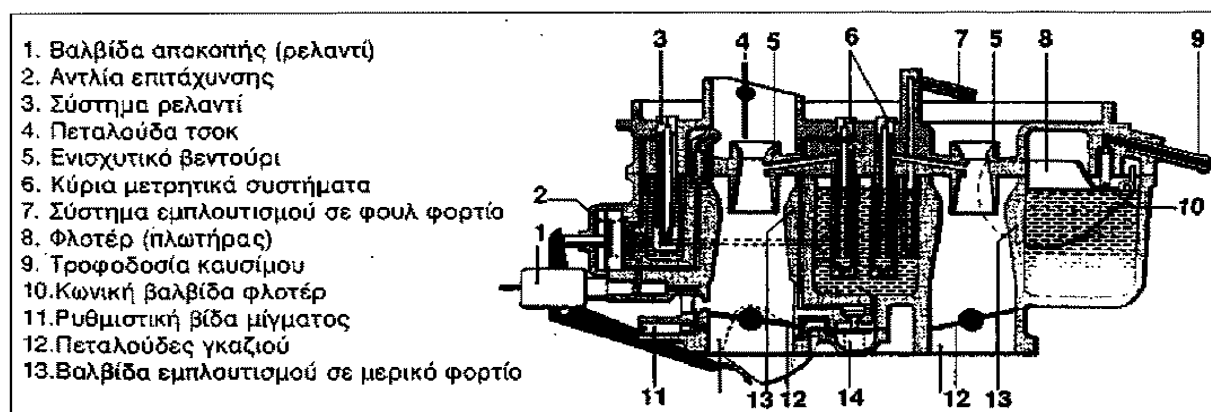
Η απόδοση ισχύος του κινητήρα προσδιορίζεται τελικά από τη θέση της πεταλούδας γκαζιού. Ο πλωτήρας (φλοτέρ), σε συνδυασμό με την κωνική βαλβίδα, ρυθμίζει τη ροή καυσίμου από την αντλία βενζίνης στο καρμπυρατέρ και κρατάει σταθερή τη στάθμη του καυσίμου στο θάλαμο.

Η ποσότητα του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα μετράται στο καρμπυρατέρ από ένα venturi, το οποίο φέρει εκ κατασκευής ένα στένωμα στην είσοδο του.

Στη Μηχανική των ρευστών (ρευστά θεωρούνται τα υγρά και τα αέρια), όταν ένα ρευστό και στην προκειμένη περίπτωση ο αέρας, χρειαστεί να περάσει από ένα στένωμα - venturi - τότε, σύμφωνα με τον νόμο του Bernoulli, στο σημείο του στενώματος αυξάνεται η ταχύτητα του, ενώ πέφτει η πίεση του (δημιουργία υποπίεσης). Με τον τρόπο αυτό εξηγείται η ύπαρξη ατμοσφαιρικής πίεσης (1 atm) στο θάλαμο πριν από το venturi του πλωτήρα, ενώ μετά το venturi η πίεση του αέρα μειώνεται λόγω της στένωσης και γίνεται μικρότερη της ατμοσφαιρικής (π.χ. 0.7 atm). Αυτή η διαφορά πίεσης, μπορεί ν' αυξηθεί με τη χρησιμοποίηση ενός δεύτερου ενισχυτικού venturi που υπάρχει στα περισσότερα καρμπυρατέρ.

Το venturi χρησιμεύει για να παρέχει καύσιμο από το θάλαμο του πλωτήρα προς τα διάφορα ακροφύσια. Στο ενισχυτικό venturi του καρμπυρατέρ καταλήγει το κύριο μετρητικό σύστημα του καρμπυρατέρ, αλλά και μερικά άλλα βοηθητικά συστήματα που καθορίζουν την ποσότητα καυσίμου, ανάλογα με την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα.

Λόγω της υψηλής ταχύτητας του αέρα στο venturi και του ανοίγματος της πεταλούδας γκαζιού, επιτυγχάνεται πολύ καλή αναλογία μίγματος (σχήμα 2-4).



Σχήμα 2-4 : Διάγραμμα λειτουργίας καρμπυρατέρ



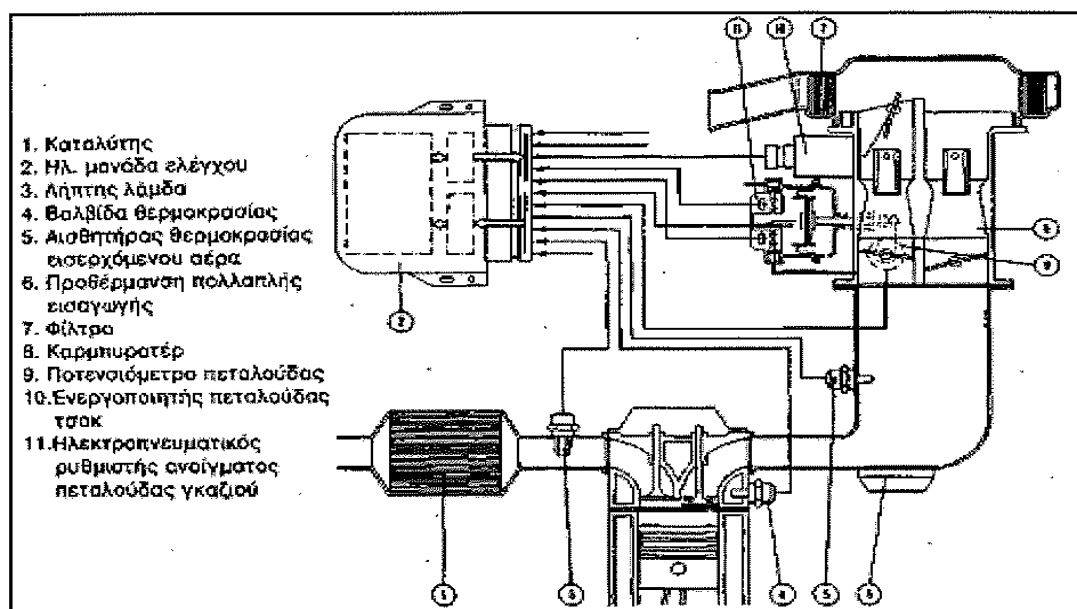
## 2.3. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Τα συστήματα τροφοδοσίας που έχουν αναπτυχθεί είναι τα εξής:

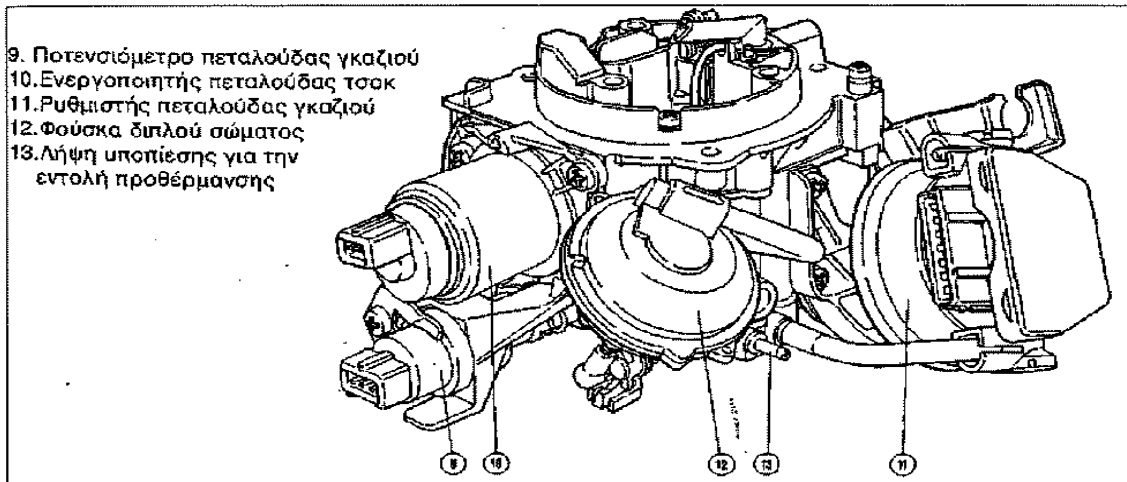
- Ηλεκτρονικά ελεγχόμενο ή ρυθμιζόμενο καρμπυρατέρ
- Ηλεκτρονικά συστήματα ψεκασμού
  - α) Κεντρικός ψεκασμός - Single point injection (SPI)
  - β) Πολλαπλός ψεκασμός - Multi point injection (MPI)

### 2.3.1. Ηλεκτρονικά ελεγχόμενο ή ρυθμιζόμενο καρμπυρατέρ

Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος τροφοδοσίας με ηλεκτρονικό καρμπυρατέρ στηρίζονται στο κυρίως μέρος του καρμπυρατέρ. Το καρμπυρατέρ προετοιμάζει σταθερά το ίδιο μίγμα, για διάφορες τιμές στροφών του κινητήρα και ισχύος, διαμέσου των διαφόρων συστημάτων (ρελαντί, ισχύος, κλπ.). Οι ρυθμίσεις των συστημάτων αυτών, είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να βρίσκονται κοντά στην περιοχή φτωχού ή πλούσιου μίγματος με τον έλεγχο του τσοκ. Ένας ενεργοποιητής (μηχανισμός που ρυθμίζει τη θέση της πεταλούδας του τσοκ) διορθώνει την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα με ανάλογη διόρθωση στο κύριο μετρητικό σύστημα, το οποίο εμπλουτίζει το μίγμα, αν και η πεταλούδα του τσοκ είναι κλειστή. Ο ενεργοποιητής (ρυθμιστής τσοκ-μοτεράκι), ελέγχεται μ' ένα σήμα εξόδου από τον εγκέφαλο (Σχήμα 2-5).



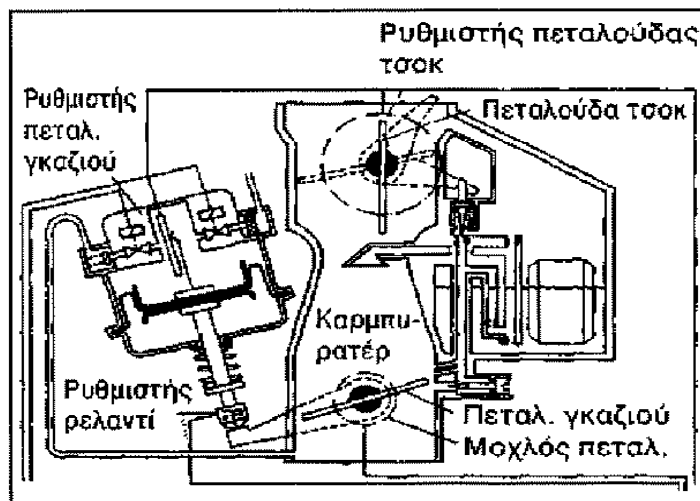
Σχήμα 2-5 : Σχηματικό διάγραμμα του ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενου καρμπυρατέρ Ecotronic



Σχήμα 2-6 : Κόρια εξωτερικά μέρη ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενου καρμπυρατέρ Ecotronic

Ένας άλλος μηχανισμός που επηρεάζει την πεταλούδα γκαζιού, είναι ο ηλεκτροπνευματικός ρυθμιστής. Ο ηλεκτροπνευματικός αυτός ρυθμιστής αποτελείται από ένα διάφραγμα κι ένα έμβολο. Το ένα άκρο του στηρίζεται στο διάφραγμα και το άλλο σ' ένα μπράτσο, πάνω στο καρμπυρατέρ, το οποίο κινεί την πεταλούδα του γκαζιού (σχήμα 2-7).

Η όλη μετακίνηση του διαφράγματος στηρίζεται σε ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, στις οποίες έρχονται από δύο σωληνάκια αντίστοιχα, ατμοσφαιρικός αέρας και υποπίεση από την πολλαπλή εισαγωγής (ή από το καρμπυρατέρ κάτω από την πεταλούδα του γκαζιού) (σχήμα 2-6). Οι δύο αυτές διαφορετικές πιέσεις (ατμοσφαιρική και υποπίεση) καθορίζουν την πίεση λειτουργίας, η οποία εφαρμόζεται στο διάφραγμα. Ένα σήμα φεύγει για την είσοδο του εγκεφάλου, ώστε αυτός να πληροφορείται τη θέση του διαφράγματος, ενώ δύο άλλα σήματα φθάνουν από τον εγκέφαλο στις ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες.



Σχήμα 2-7 : Ρυθμιστής της πεταλούδας τσοκ και γκαζιού

### 2.3.2. Ηλεκτρονικά Συστήματα Ψεκασμού

Τα συστήματα έμμεσου ψεκασμού είναι διαφοροποιημένα κατά πολύ σε σχέση με τα παλαιότερα συστήματα τροφοδοσίας. Τα πρώτα ηλεκτρονικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για να αυξήσουν την ισχύ του κινητήρα. Σήμερα, έχει δοθεί απόλυτη προτεραιότητα στην προστασία του περιβάλλοντος.

Ο ψεκασμός έχει ξεκινήσει να εφαρμόζεται στις αρχές του αιώνα μας, αλλά μόλις το 1951 άρχισε η ευρεία εφαρμογή του από την Bosch, με μηχανικό συνεχή ψεκασμό στην αρχή, ενώ το 1967 αναπτύχθηκε από την ίδια εταιρεία ο ηλεκτρονικός ψεκασμός με το D-Jetronic (το όνομα του το οφείλει στη γερμανική λέξη Druckfuiger = αισθητήρας ή εντολέας πίεσης αέρα). Το σύστημα αυτό που στήριζε την λειτουργία του στις στροφές του κινητήρα και την πίεση (υποπίεση) της πολλαπλής εισαγωγής έχει καταργηθεί εδώ και αρκετά χρόνια.

Παρ' όλα αυτά, το σύστημα έχει επανέλθει στην αγορά με νέους ηλεκτρονικούς, αισθητήρες πίεσης, πολύ πιο μικρούς και φθηνούς. Το μέλλον των αισθητήρων αυτών φαίνεται ν' αποκτά ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού ήδη χρησιμοποιείται και από αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες της Ιαπωνίας. Δύο χρόνια αργότερα, το 1969 εμφανίστηκε το πασίγνωστο L-Jetronic, το οποίο αποτέλεσε τη βάση των ηλεκτρονικών συστημάτων ψεκασμού με μετρητή ροής αέρα. Το σύστημα αυτό και τα υποσυστήματα του θα εξεταστούν παρακάτω.

Με τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σήμερα τα ηλεκτρονικά συστήματα ψεκασμού καταφέρνουν να "υπηρετούν" κοινωνικές τάσεις (μικρότερες εκπομπές καυσαερίων), να παρουσιάζουν τεχνολογικά επιτεύγματα (η ηλεκτρονική ως επιστήμη στην υπηρεσία του ανθρώπου) και φυσικά να ισχυροποιούνται στη διεθνή αγορά, εκτοπίζοντας τα συμβατικά συστήματα τροφοδοσίας (καρμπυρατέρ).

Παρατηρώντας κανείς, διαπιστώνει ότι το καρμπυρατέρ, σαν ιδέα σχεδίασης, διαφέρει εντελώς από τα συστήματα ψεκασμού. Η ανάμιξη (αέρα-καυσίμου) και η εξαέρωση δεν γίνεται όπως στο καρμπυρατέρ (στο venturi με το παρεχόμενο καύσιμο από τους μετρητικούς μηχανισμούς και τα ακροφύσια), αλλά στην πολλαπλή εισαγωγής, εκεί ακριβώς όπου ψεκάζει το μπεκ (για τον πολλαπλό ψεκασμό), δηλαδή μπροστά από την ανοικτή ή κλειστή βαλβίδα εισαγωγής (σχήμα 2-8).

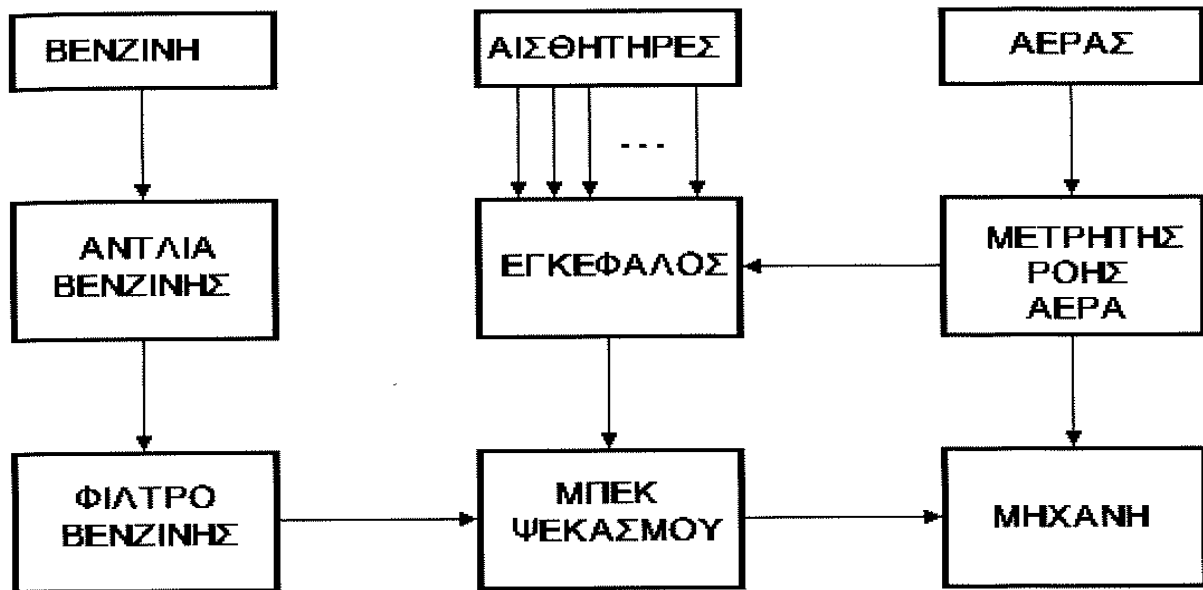
**Πλεονεκτήματα :**

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων ψεκασμού καυσίμου έναντι των συμβατικών συστημάτων τροφοδοσίας είναι:

- Ομοιόμορφο μίγμα αέρα καυσίμου σε κάθε κύλινδρο
- Ακριβής σχέση αέρα-καυσίμου σε κάθε περιοχή στροφών λειτουργίας του κινητήρα
- Συνεχείς διορθώσεις του μίγματος αέρα-καυσίμου
- Αποκοπή του καυσίμου για μειωμένες εκπομπές καυσαερίων, σε διάφορες καταστάσεις του κινητήρα (π.χ., κατά το φρενάρισμα).
- Μειωμένη ειδική κατανάλωση καυσίμου, που έχει σαν αποτέλεσμα την πρόσθετη οικονομία καυσίμου.
- Μεγαλύτερη απόδοση ισχύος του κινητήρα.
- Μεγαλύτερη ροπή στις χαμηλές στροφές λειτουργίας του κινητήρα.
- Άμεση απόκριση της πεταλούδας του γκαζιού, λόγω της μικρότερης διαδρομής που έχει να διανύσει το μίγμα αέρα-καυσίμου.
- Βελτιωμένη ψυχρή εκκίνηση και προθέρμανση του κινητήρα με το μπεκ ψυχρής εκκίνησης.
- Χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων.

**Μειονεκτήματα :**

Το σημαντικότερο ίσως μειονέκτημα, που αντιπαρατίθεται σε όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα, είναι το υψηλότερο κόστος των ηλεκτρονικών συστημάτων ψεκασμού, σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.



Σχήμα 2-8 : Απλοποιημένος χάρτης ροής των λειτουργιών του συστήματος ηλεκτρονικού ψεκασμού

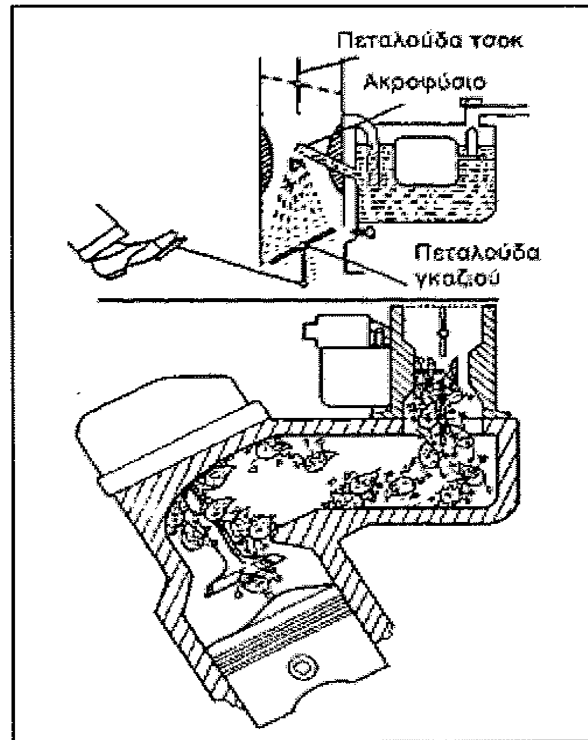
#### 2.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΡΜΠΥΡΑΤΕΡ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Για να γίνει κατανοητή η αρχή λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρονικού ψεκασμού καυσίμου (EFI), γίνεται παρακάτω μία σύγκριση με το συμβατικό σύστημα τροφοδοσίας με καρμπυρατέρ.

##### α) Καρμπυρατέρ

Στο καρμπυρατέρ το καύσιμο αναρροφάται από την υποπίεση που επικρατεί στην πολλαπλή εισαγωγής, συμπαρασύρεται και αναμιγνύεται από το ρεύμα του αέρα εισαγωγής (σχήμα 2-9). Στην περίπτωση όμως αυτή υπάρχει πάντα η πιθανότητα προσκόλλησης ενός μέρους της βενζίνης στα τοιχώματα της πολλαπλής εισαγωγής, απορυθμίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την αναλογία του μίγματος αέρα-καυσίμου. Η ποσότητα του παρεχόμενου καυσίμου καθορίζεται από τη διάμετρο των ζιγκλέρ και από την επικρατούσα υποπίεση που δημιουργείται μέσα στο venturi.

Μερικά πρόσθετα συστήματα, χρησιμοποιούνται για να μπορεί να διορθωθεί η σχέση αέρα-καυσίμου σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.



Σχήμα 2-9 : Τροφοδοσία καυσίμου με καρμπυρατέρ

### β) Ηλεκτρονικός (πολλαπλός) ψεκασμός καυσίμου

Στον ηλεκτρονικό (πολλαπλό) ψεκασμό το καύσιμο ψεκάζεται υπό πίεση πριν ακριβώς την ανοικτή βαλβίδα εισαγωγής, χωρίς να χρειάζεται να διανύσει κάποια διαδρομή. Με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχει πιθανότητα προσκόλλησης μέρους της βενζίνης στα τοιχώματα της πολλαπλής εισαγωγής και ακόμα καθυστέρησης και απορύθμισης της αναλογίας του μίγματος αέρα-καυσίμου.

Η ποσότητα του παρεχόμενου καυσίμου στον κινητήρα ρυθμίζεται από τον χρόνο διάρκεια ανοίγματος των μπεκ. Αυτά ελέγχονται από τον εγκέφαλο, σύμφωνα με τις πληροφορίες που λαμβάνει αυτός από τους διάφορους αισθητήρες (σήματα από τις βαλβίδες για τη θερμοκρασία νερού, τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής, την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα, τις στροφές του κινητήρα, κλπ).

Οι διάφοροι αισθητήρες προσδιορίζουν την οποιαδήποτε αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας του κινητήρα και αποστέλλουν συνεχώς σήματα στον εγκέφαλο. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει ουσιαστικά ένα συνεχή έλεγχο της διάρκειας ανοίγματος των μπεκ, επιτυγχάνοντας την στοιχειομετρική αναλογία του μίγματος αέρα-καυσίμου.

### 3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Παρακάτω γίνεται μία ταξινόμηση των συστημάτων ψεκασμού ανάλογα με:

- A) Τον τρόπο ψεκασμού
- B) Τον αριθμό σημείων (μπεκ ψεκασμού)
- Γ) Την ύπαρξη βοηθητικού μπεκ εκκίνησης .
- Δ). Το σημείο που έχουν τοποθετηθεί τα μπεκ

#### 3.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Μία ταξινόμηση που μπορεί να γίνει, ανάλογα με τον τρόπο που ψεκάζουν τα μπεκ, είναι:

- Συνεχής ή μηχανικός ψεκασμός
- Διακοπτόμενος ψεκασμός

##### 3.1.1. Συνεχής ή Μηχανικός ψεκασμός

Ο συνεχής ψεκασμός είναι ένα σύστημα που λειτουργεί μηχανικά μ' ένα μπεκ ψεκασμού ανά κύλινδρο. Το όνομα του προέρχεται από το γεγονός ότι τα μπεκ που ψεκάζουν μηχανικά είναι ανοικτά συνεχώς κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Η ποσότητα του καυσίμου που ψεκάζεται δεν ελέγχεται με την αυξομείωση του χρόνου ψεκασμού, αλλά από την πίεση (παροχή) καυσίμου στα μπεκ.

##### 3.1.2. Διακοπτόμενος ψεκασμός - ταξινομήσεις

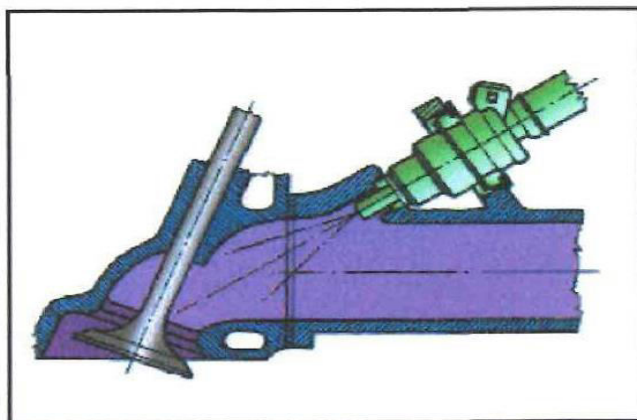
- Ηλεκτρονικά συστήματα ψεκασμού (L,LE,LU,LH-jetronic)
- Συνδυασμένα συστήματα ανάφλεξης και ψεκασμού ( Motronic, Multec - GM).

### 3.1.2.1. Ηλεκτρονικά συστήματα ψεκασμού (L,LE,LU,LH-jetronic)

Το αντιπροσωπευτικότερο σύστημα διακοπτόμενου ψεκασμού είναι το L-Jetronic Το διακοπτόμενο αυτό σύστημα ψεκασμού το όνομά του το οφείλει στα αρχικά της Γερμανικής λέξης Luft = αέρας. Ο υπολογισμός της ποσότητας του καυσίμου που ψεκάζεται γίνεται από την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (HME) με βάση τις πληροφορίες για τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα που μεταβιβάζονται σ' αυτήν από τους αισθητήρες. Η HME συντονίζει με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια όλες τις λειτουργίες του συστήματος, που απαιτούνται για την προετοιμασία του καυσίμου μίγματος. Κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, η αναλογία αέρα - βενζίνης κυμαίνεται στην περιοχή αναλογίας 14,7:1 κατά βάρος. Αυτό το γεγονός εξασφαλίζει τις συνθήκες για την αποδοτική λειτουργία του καταλύτη.

Το ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα ψεκασμού L-Jetronic εξελίχθηκε ώστε να ικανοποιεί τις ολοένα και αυστηρότερες προδιαγραφές για τα όρια ρύπων στα καυσαέρια. Έτσι εμφανίστηκαν διάφορες παραλλαγές του συστήματος αυτού, όπως το LE, που ήταν το σύστημα που κάλυπτε τις προδιαγραφές για τα όρια ρύπων που ίσχυαν στην Ευρώπη και το LU, το οποίο προοριζόταν για χώρες με πιο αυστηρά όρια εκπομπών, όπως η Αμερική.

Στη συνέχεια εμφανίστηκαν πιο εξελιγμένα συστήματα όπως το LE2 και το LE3 που ήταν το πλέον βελτιωμένο. Άλλα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα συστήματα ψεκασμού, όπως το LH διαθέτουν μετρητή μάζας αέρα και τα μπεκ ψεκάζουν ανά ζεύγη, ενώ σε άλλα όπως το LE-Jetronic II τα μπεκ (σχήμα 3-1) ψεκάζουν ταυτόχρονα ανά ζεύγη σε κάθε περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα του κινητήρα το μισό της ποσότητας του καυσίμου που χρειάζεται κάθε κύκλο λειτουργίας. Σε κάθε κινητήρα χρησιμοποιούνται μπεκ διαφορετικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 3-1 : Εγχυτήρας σε ηλεκτρονικό σύστημα έμμεσου ψεκασμού



### 3.1.2.2. Συνδυασμένα συστήματα ανάφλεξης και ψεκασμού

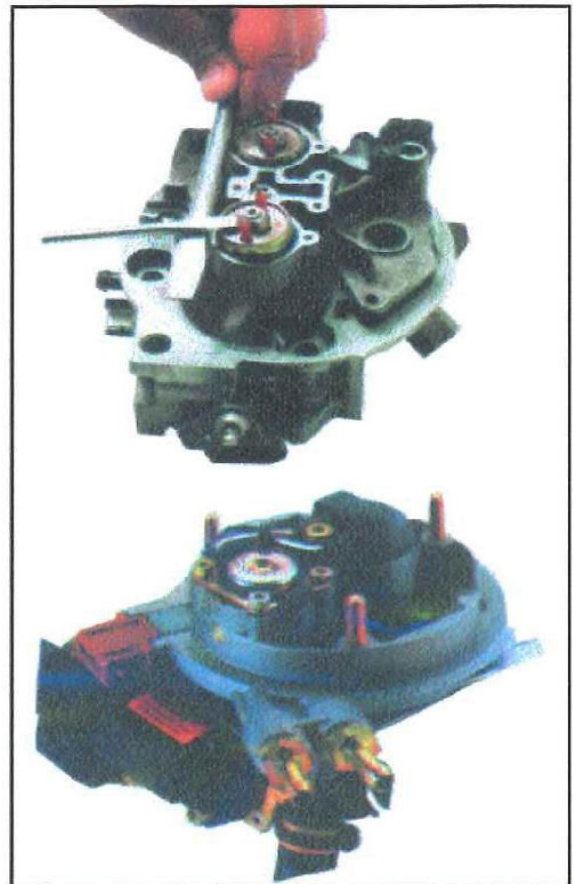
Τα ολοένα και αυστηρότερα όρια εκπομπών ρύπων, είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία συστημάτων ψεκασμού και ανάφλεξης που ελέγχονται από μία κοινή κεντρική μονάδα ελέγχου και χρησιμοποιούν κοινούς αισθητήρες. Τα συστήματα αυτά, τα οποία είναι διακοπτόμενου τύπου ονομάζονται συνδυασμένα συστήματα ψεκασμού και ανάφλεξης και εμφανίζονται τόσο στον πολλαπλό ψεκασμό (Motronic), όσο και στον μονό ή κεντρικό ψεκασμό, όπως είναι το MULTEC της OPEL (General Motors) και το Mono-motronic της Bosch.

## 3.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ Η ΤΩΝ ΜΠΕΚ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Τα συστήματα ψεκασμού ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες

- Κεντρικός ή μονός ψεκασμός ή ψεκασμός ενός σημείου (π.χ. Mono-Jetronic):
- Πολλαπλός ψεκασμός ή ψεκασμός πολλών σημείων (π.χ. K-Jetronic, L-Jetronic, Motronic, κλπ):

Στην πρώτη περίπτωση (σχήμα 3-2), η τροφοδοσία καυσίμου προς όλους τους κυλίνδρους γίνεται από ένα μπεκ που είναι τοποθετημένο ακριβώς επάνω από την πεταλούδα του γκαζιού, όπως ακριβώς συμβαίνει και με το σύστημα τροφοδοσίας με καρμπυρατέρ. Το καύσιμο διοχετεύεται στην πολλαπλή εισαγωγής με διακοπτόμενο ψεκασμό. Διάφορες εμπορικές ονομασίες συστημάτων μονού ψεκασμού είναι τα Mono-Jetronic, Mono-Motronic,

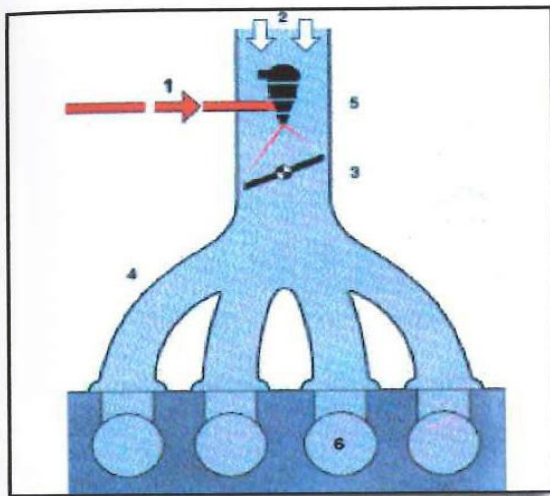


Σχήμα 3-2 : Σύστημα μονού ψεκασμού

TBI (Throttle Body Injection) και SPI (Single Point Injection).

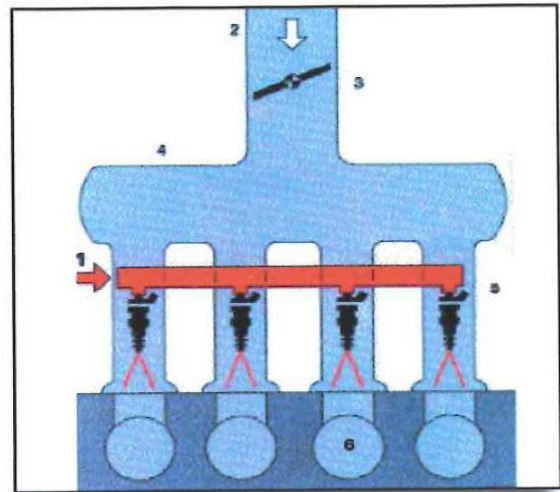
Στους τετρακύλινδρους κινητήρες τοποθετείται σύστημα ψεκασμού με ένα μπεκ (σχήμα 3-3), ενώ στους κινητήρες V6 και V8 τοποθετείται σύστημα μονού ψεκασμού με δύο μπεκ και με δύο πεταλούδες που συνδέονται με κοινό άξονα.

Στη περίπτωση συστημάτων πολλαπλού ψεκασμού (σχήμα 3-4), ένα μπεκ έχει τοποθετηθεί σε κάθε αυλό εισαγωγής πριν από τη βαλβίδα ή τις βαλβίδες εισαγωγής κάθε κυλίνδρου.



Σχήμα 3-3 : Σύστημα μονού ψεκασμού

1. καύσιμο 4.πολλαπλή εισαγωγής 2.αέρας  
5.μπέκ 3.πεταλούδα 6.κινητήρας



Σχήμα 3-4 : Σύστημα πολλαπλού ψεκασμού

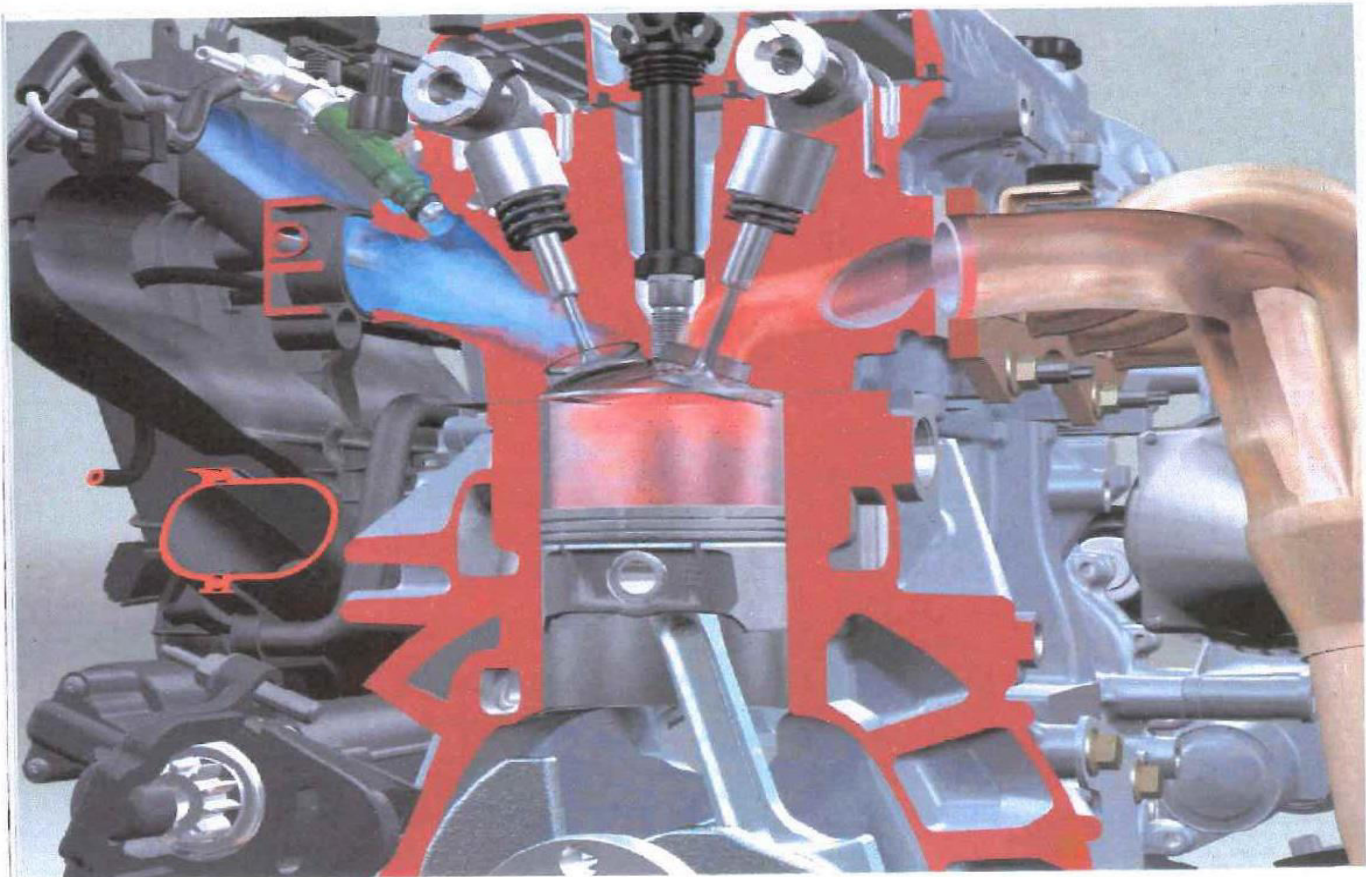
*Σημείωση! Ο κεντρικός ψεκασμός (μονός) λόγω του μικρότερου αριθμού εξαρτημάτων είναι πιο οικονομικός σαν σύστημα.*

### 3.3. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΥ ΜΠΕΚ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ .

Στα συστήματα πολλαπλού ψεκασμού εκτός από τα κύρια μπεκ μπορεί να υπάρχει ένα βοηθητικό μπεκ ψυχρής εκκίνησης (5° μπεκ). Αυτό ισχύει στα συστήματα L-Jetronic, TCCS της Toyota, Digifant της VAG. Αντίστοιχα, στα συστήματα μονού ψεκασμού μπορεί να υπάρχει και δεύτερο βοηθητικό μπεκ ψυχρής εκκίνησης όπως στην περίπτωση του PGM-FI της Honda.

### 3.4. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΘΕΙ ΤΑ ΜΠΕΚ.

Εάν τα μπεκ έχουν τοποθετηθεί στην πολλαπλή εισαγωγής πριν από τη βαλβίδα εισαγωγής, το σύστημα ψεκασμού ονομάζεται έμμεσο (σχήμα 3-5), ενώ εάν τα μπεκ ψεκάζουν το καύσιμο απευθείας μέσα στο θάλαμο καύσης, το σύστημα ονομάζεται άμεσο. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το GDI της Mishubishi.



*Σχήμα 3-5: Λειτουργία του συστήματος έμμεσου ψεκασμού*

## 4. ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Κάθε ηλεκτρονικό σύστημα ψεκασμού αποτελείται από τρία βασικά υποσυστήματα. Σε αυτό το σημείο γίνεται ξεχωριστή αναφορά για το καθένα, αφού η σύνθεση των τριών υποσυστημάτων αλλά και η επίδραση τους, έχει σαν αποτέλεσμα την ηλεκτρονική προετοιμασία και διόρθωση της αναλογίας μίγματος αέρα-καυσίμου στην επιθυμητή στοιχειομετρική περιοχή  $\lambda=1$ .

Τα τρία υποσυστήματα είναι τα εξής:

A. ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (FUEL SUPPLY SYSTEM)

B. ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ - ΜΕΤΡΗΤΗ ΡΟΗΣ (AIR-FLOW METER INTAKE SYSTEM).

Γ. ΤΟ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ - ΕΓΚΕΦΑΛΟΣ ή ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ (ECU ή ELECTRONIC CONTROL UNIT)

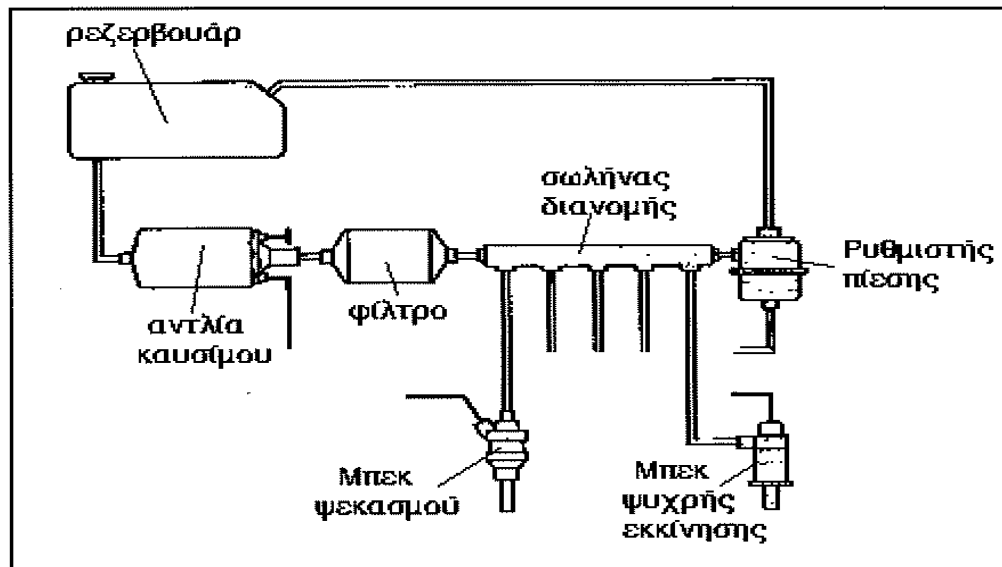
### 4.1. ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Το υποσύστημα τροφοδοσίας καυσίμου (σχήμα 4-1) παρέχει το απαιτούμενο καύσιμο με πίεση (π.χ 2.5 bar) και αποτελείται κυρίως από τα εξής μέρη (σχήμα 4-2):

- Δοχείο καυσίμου (ρεζερβουάρ)
- Ηλεκτρική αντλία καυσίμου
- Φίλτρα καυσίμου
- Διακλαδωτήρας σωληνώσεων των μπεκ (για πολλαπλό ψεκασμό μόνο)
- Ρυθμιστής πίεσης καυσίμου
- Ηλεκτρομαγνητικά μπεκ ψεκασμού (ένα για κεντρικό ψεκασμό ή ένα σε κάθε κύλινδρο για πολλαπλό ψεκασμό)
- Μπεκ ψυχρής εκκίνησης (για πολλαπλό ψεκασμό) - Θερμικός χρονοδιακόπτης



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα ροής του συστήματος τροφοδοσίας



Σχήμα 4-2: Απλοποιημένη απεικόνιση του συστήματος τροφοδοσίας

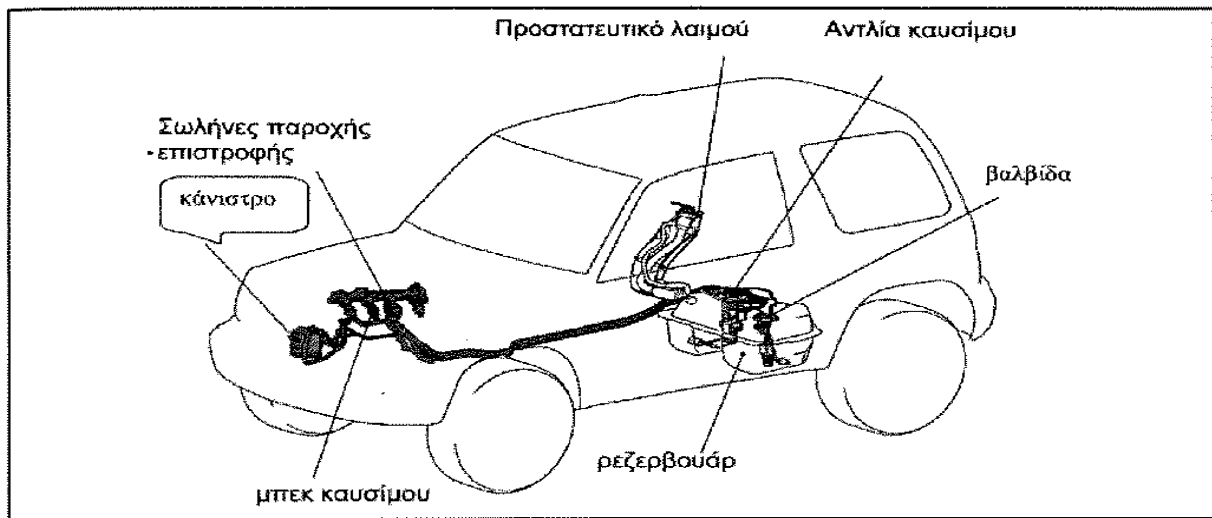
## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΡΙΩΝ ΜΕΡΩΝ

### 4.1.1. Δοχείο Καυσίμου (Ρεζερβουάρ)

Το ρεζερβουάρ είναι ο χώρος αποθήκευσης και επιστροφής της περίσσειας του καυσίμου. Είναι στεγανό και κατασκευασμένο από αντιδιαβρωτικά υλικά και έχει βαλβίδες ασφαλείας για:

- α) την εκτόνωση της υπερβολικής πίεσης,
- β) την αποφυγή της διαρροής καυσίμου από την τάπα γεμίματος σε περίπτωση ανατροπής του αυτοκινήτου και
- γ) την αποφυγή της διαρροής σε περίπτωση ατυχήματος ή σε κίνηση του αυτοκινήτου σε δρόμους με μεγάλες κλίσεις, σε απότομες στροφές και απότομα σταματήματα.

Τα μεγάλα ρεζερβουάρ έχουν διαφράγματα, για να εμποδίζουν την απότομη μετακίνηση του καυσίμου. Σε κάθε ρεζερβουάρ υπάρχει μια βαλβίδα αντεπιστροφής που είναι μια μηχανική βαλβίδα και επιτρέπει τη ροή του καυσίμου από τη δεξαμενή προς την αντλία και όχι αντίστροφα.

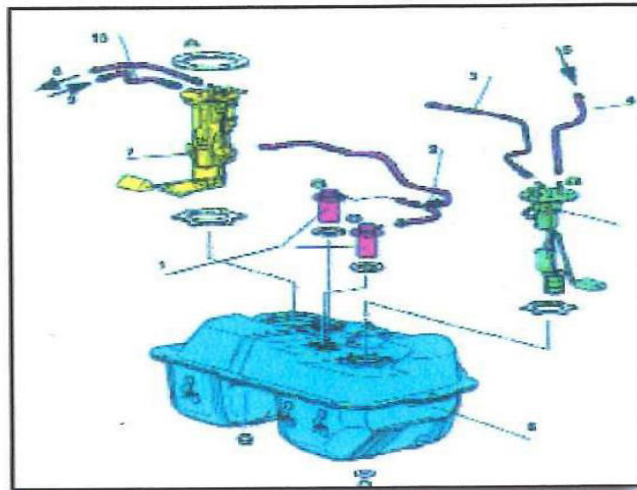


Σχήμα 4-3 : Κύκλωμα τροφοδοσίας βενζίνης

Στο πάνω μέρος του ρεζερβουάρ υπάρχει διάταξη αντεπιστροφής και δεν επιτρέπει τη διαρροή καυσίμου σε περίπτωση ανατροπής (σχήμα 4-4). Οι αναθυμιάσεις του καυσίμου οδηγούνται σε ένα φίλτρο από ενεργό άνθρακα (κάνιστρο), όπου και κατακρατούνται (σχήμα 4-3). Όταν ο κινητήρας λειτουργεί, οδηγούνται στο χώρο καύσης.

Οι σωληνώσεις του καυσίμου χρησιμοποιούνται για την αναρρόφηση, την κατάθλιψη και επιστροφή του καυσίμου. Είναι ανθεκτικές σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες λειτουργίας. Δε διέρχονται από το χώρο των επιβατών και είναι μεταλλικές ή κατασκευάζονται από ανθεκτικά σύνθετα υλικά. Συνδέονται με ταχυσυνδέσμους (ρακόρ) για ευκολία στη συντήρηση και στην επισκευή.

Στο κύκλωμα τροφοδοσίας καυσίμου υπάρχει ένας αποσβεστήρας στον αγωγό επιστροφής, για τον περιορισμό του θορύβου που δημιουργείται από το άνοιγμα και κλείσιμο των μπεκ και του ρυθμιστή της πίεσης. Είναι τύπου μεμβράνης -ελατηρίου και βρίσκεται μεταξύ του ρυθμιστή πίεσης και του ρεζερβουάρ. Κάποια συστήματα διαθέτουν αισθητήρα θερμοκρασίας και πίεσης του καυσίμου (καθώς και ψυγείο καυσίμου).



1. βαλβίδα ρολόβερ (αντεπιστροφής)
2. δίοδος βαλβίδα
3. σωλήνας αναρρόφησης
4. σωλήνας επιστροφής
5. από κινητήρα
6. ρεζερβουάρ
7. αντλία
8. προς κινητήρα
9. από κινητήρα
10. σωλήνωση

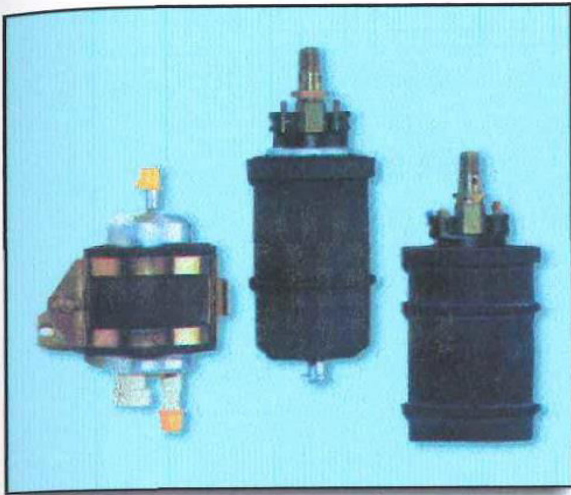
*Σχήμα 4-4: Συνδεσμολογία ρεζερβουάρ*

#### 4.1.2. Ηλεκτρική Αντλία Καυσίμου

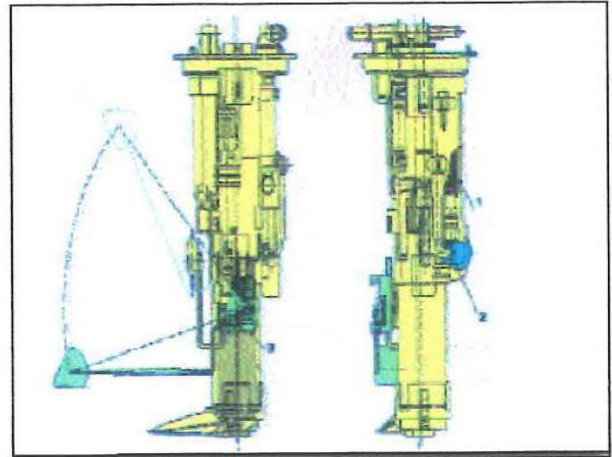
- Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του καυσίμου στο σύστημα,
- παρέχει καύσιμο με πίεση διαμέσου των σωληνώσεων και
- ενεργοποιείται από τον εγκέφαλο μέσω ενός ρελέ.
  
- Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία αντλιών και διακρίνονται :
  - (α) σε αντλίες γραμμής (εν σειρά ).(σχήμα 4-5)και
  - (β) σε αντλίες δεξαμενής. (βυθιζόμενες ή εμβαπτίσεως) (σχήμα 4-6)

Σε ορισμένες περιπτώσεις συνδυάζονται με μηχανική αντλία βενζίνης.

Η αντλία γραμμής τοποθετείται έξω από τη δεξαμενή, πριν από το φίλτρο καυσίμου και επάνω στο σασί του αυτοκινήτου



*Σχήμα 4-5 : Αντλίες γραμμής*



*Σχήμα 4-6 : Εμβαπτιζόμενη αντλία με φλοτέρ*

Σήμερα πιο συνηθισμένες είναι οι βυθιζόμενες αντλίες ή εμβαπτίσεως που έχουν ενσωματωμένο όργανο στάθμης βενζίνης (φλοτέρ). Ένα φίλτρο στην είσοδο της αντλίας εμποδίζει την είσοδο ξένων σωματιδίων.

Ορισμένες εμβαπτιζόμενες αντλίες έχουν δοχείο σταθεροποίησης (σχήμα 4-7) με τη βοήθεια του οποίου αποφεύγονται οι εναλλαγές στην ένδειξη της στάθμης από τις μετακινήσεις του καυσίμου σε στροφές ή αλλαγές της ταχύτητας και εξασφαλίζεται η συνεχής παροχή καυσίμου ακόμα και σε ακραίες συνθήκες οδήγησης.

Ο παραπάνω τύπος αντλίας διαθέτει δύο βαθμίδες (βοηθητική και κύρια) (σχήμα 4-8) και έχει ενδιάμεσο εξαερισμό μέσα σε δοχείο στο οποίο συσσωρεύεται το καύσιμο. Προσφέρει σταθερή παροχή και διαθέτει αισθητήρα στάθμης καυσίμου .

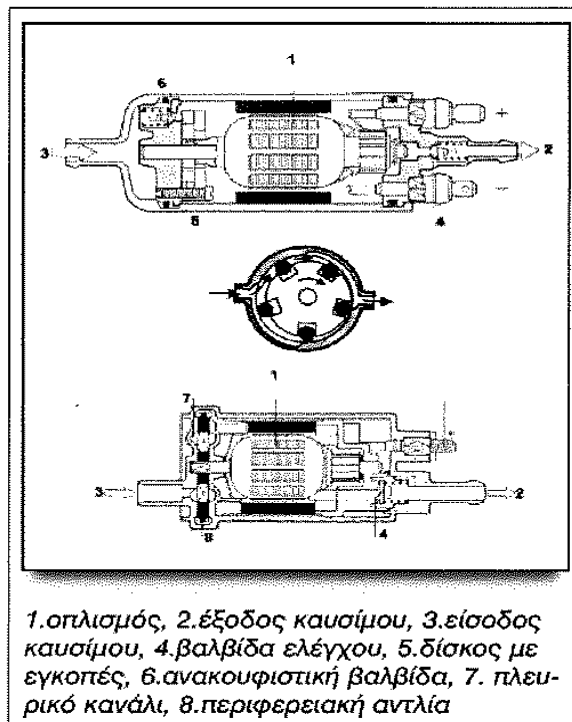
Ο αισθητήρας στάθμης καυσίμου έχει μια μεταβλητή αντίσταση, που δίνει ένδειξη στο αντίστοιχο όργανο του πίνακα ελέγχου του οδηγού.

Οι εμβαπτιζόμενες αντλίες έχουν καλύτερη ψύξη, μικρότερο θόρυβο και τοποθετούνται σε ειδική βάση μέσα στη δεξαμενή. Όσες αντλίες είναι τοποθετημένες έξω από το ρεζερβουάρ, πρέπει να προστατεύονται από χαλίκια και πέτρες στα οποία είναι εκτεθειμένες.



*Σχήμα 4-7 : Εμβαπτιζόμενη αντλία με δοχείο σταθεροποίησης*



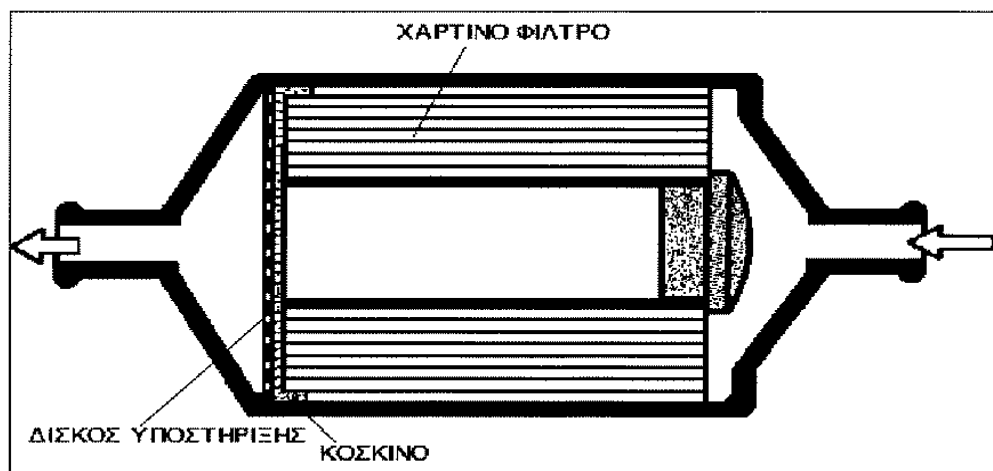


Σχήμα 4-8: Δομή ηλεκτρικής αντλίας. Πάνω: περιστροφική αντλία με δίσκο, Κάτω :Αντλία δύο βαθμίδων

#### 4.1.3. Φίλτρα καυσίμου

Συγκρατούν τα ξένα σώματα που θα έφραζαν τα μπεκ. Κατασκευάζονται από ειδικό χαρτί με πόρους της τάξης μεγέθους 10-15  $\mu\text{m}$  που περιβάλλεται από έναν χνουδωτό διάτρητο κύλινδρο, ο οποίος περικλείεται από ένα μεταλλικό κυλινδρικό διάτρητο δοχείο (σχήμα 4-9).

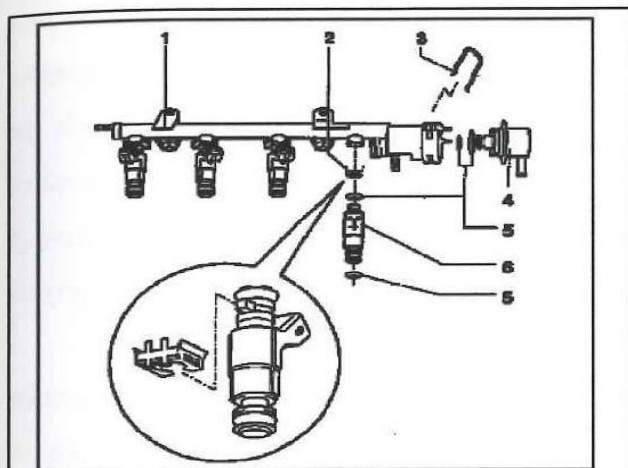
Η θήκη του φίλτρου είναι κυλινδρική, μεταλλική ή και πλαστική/ Έχει έναν αγωγό για την είσοδο και έναν άλλο για την έξοδο. Το φίλτρο είναι τοποθετημένο κάτω από το όχημα , κοντά στο ρεζερβουάρ ή στο χώρο του κινητήρα.



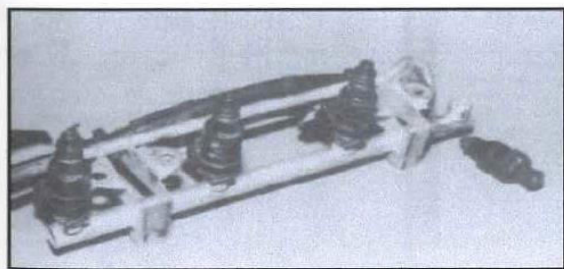
Σχήμα 4-9 : Φίλτρο καυσίμων

#### 4.1.4. Διακλαδωτήρας σωληνώσεων των μπεκ ή μπεκιέρα (για τον πολλαπλό ψεκασμό).

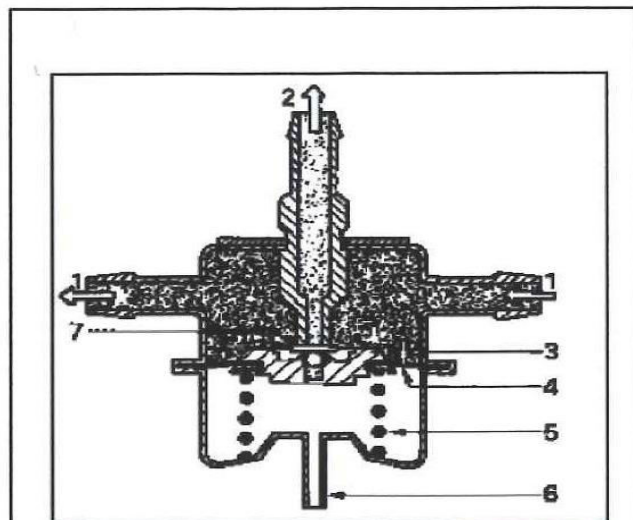
Είναι ο σωλήνας διανομής του καυσίμου, που αποθηκεύει και εξασφαλίζει την ίδια πίεση για κάθε μπεκ. Πάνω του βρίσκονται τα μπεκ (σχήμα 4-10) και ο ρυθμιστής πίεσης του καυσίμου (σχήμα 4-12). Λέγεται και φλογέρα.



1. διακλαδωτήρες
- 2&3. συνδετήρας συγκράτησης
4. ρυθμιστής πίεσης
5. δακτυλίδι σχήματος O
6. μπεκ



Σχήμα 4-10 : Διακλαδωτήρας καυσίμου με μπεκ



1. ροή καυσίμου, 2. γραμμή επιστροφής,
3. στήριξη βαλβίδας, 4. διάφραγμα,
5. ελατήριο πίεσης, 6. σύνδεση με πολλαπλή εισαγωγής, 7. βαλβίδα



Σχήμα 4-11 : Ρυθμιστές πίεσης

#### 4.1.5. Ρυθμιστής πίεσης καυσίμου

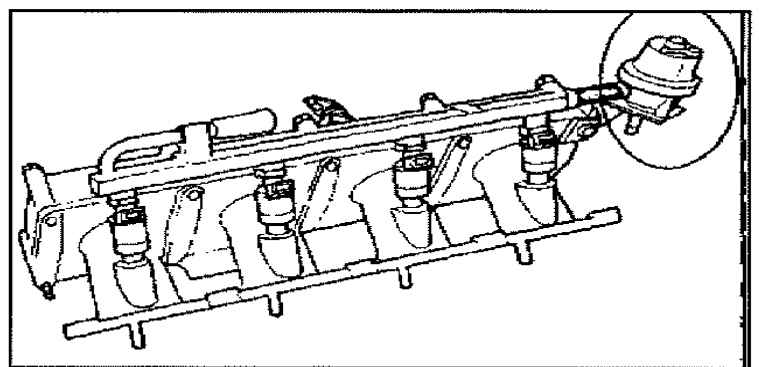
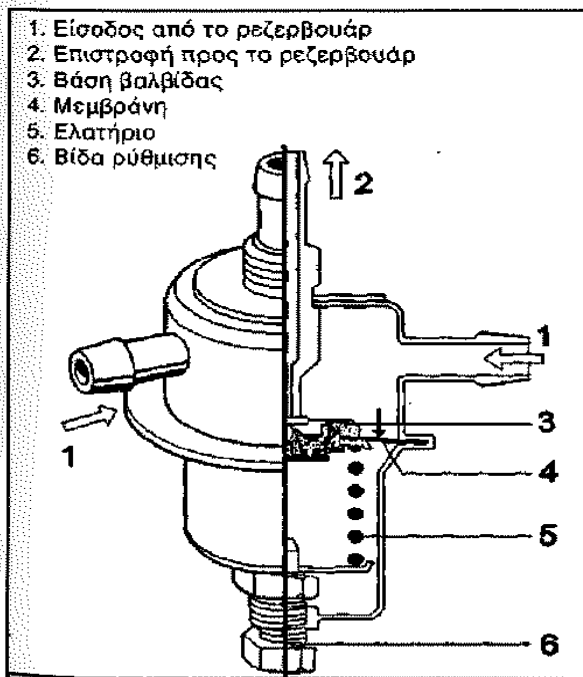
Εξασφαλίζει μια σταθερή διαφορά μεταξύ της πίεσης του καυσίμου και της πίεσης που επικρατεί στην πολλαπλή εισαγωγής.

Μία ελαστική μεμβράνη χωρίζει το ρυθμιστή στον κάτω θάλαμο εισαγωγής καυσίμου και στον πάνω θάλαμο, μέσα στον οποίο ένα προφορτισμένο ελατήριο πιέζει τη μεμβράνη. Μία επίπεδη βαλβίδα, που συνδέεται με τη μεμβράνη μέσω του σώματος της βαλβίδας, πιέζεται από το ελατήριο πάνω στην έδρα της. Όταν η δύναμη που εξασκεί η πίεση του καυσίμου πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης υπερνικήσει την αντίθετη δύναμη του ελατηρίου, τότε ανασηκώνεται η βαλβίδα από την έδρα της και το καύσιμο επιστρέφει μέσω του ανοίγματος στη δεξαμενή (σχήμα 4-13).

Στη μια πλευρά του διαφράγματος επενεργεί η πίεση του καυσίμου και στην άλλη πλευρά η πίεση του ελατηρίου και η υποπίεση της πολλαπλής εισαγωγής. Σ' αυτή την κατάσταση ισορροπίας, η διαφορά πίεσης μεταξύ του πάνω και κάτω θαλάμου είναι π.χ. 100 KPa (σχήμα 4-11).

Όταν η υποπίεση στην πολλαπλή εισαγωγής μεταβληθεί, τότε υπερνικάται η δύναμη του ελατηρίου και ανοίγει η δίοδος προς την επιστροφή του καυσίμου στο ρεζερβουάρ, ώστε να διατηρηθεί σταθερή η διαφορά μεταξύ της πίεσης του καυσίμου και της πολλαπλής εισαγωγής.

Η υποπίεση στην πολλαπλή εισαγωγής του κινητήρα μεταβάλλεται σύμφωνα με το φορτίο του κινητήρα και τη θέση της πεταλούδας γκαζιού.



Σχήμα 4-12: Θέση ρυθμιστή πίεσης πάνω στο διακλαδωτήρα σωληνώσεων των εγχυτήρων

Σχήμα 4-13 : Τομή παλαιότερου ρυθμιστή πίεσης (χωρίς υποπίεση)

#### 4.1.6. Ηλεκτρομαγνητικά μπεκ ψεκασμού

Τα μπεκ ψεκασμού είναι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες που ανοιγοκλείνουν σύμφωνα με τα σήματα που λαμβάνονται από τον εγκέφαλο (σχήμα 4-14).

Τοποθετούνται στην πολλαπλή εισαγωγής ή στην κυλινδροκεφαλή μαζί με μία ελαστική μόνωση, ώστε ν' αποφεύγονται:

α) Η δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών στην άκρη των μπεκ.

β) Η εξάτμιση του καυσίμου, που έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλλίδων.

Τα μπεκ συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα και τροφοδοτούνται από τον διακλαδωτήρα, ώστε να ψεκάζουν με συγκεκριμένη γωνία ψεκασμού πριν την βαλβίδα εισαγωγής. Η διάρκεια του χρόνου ψεκασμού καθορίζεται από τον εγκέφαλο συναρτήσει πολλών παραγόντων, όπως θα εξεταστεί παρακάτω, ενώ ο τρόπος ψεκασμού ποικίλλει.



Σχήμα 4-14 : Είδη εγχυτήρων

##### 4.1.6.1. Ταξινόμηση των μπεκ

Τα μπεκ ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες:

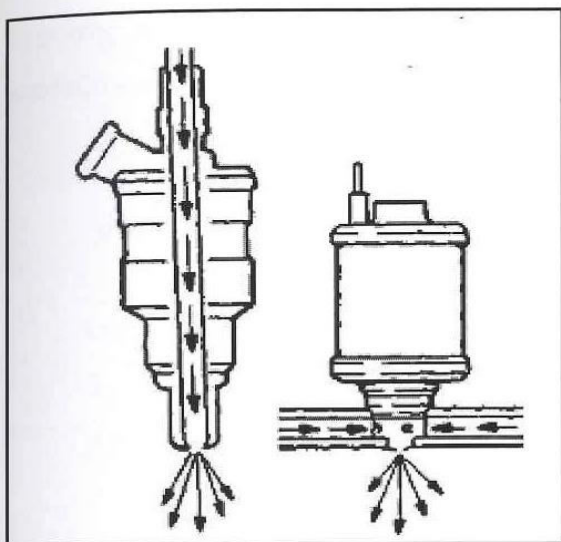
- Ανάλογα με τον τρόπο που παρέχεται σε αυτά το καύσιμο
- Ανάλογα με το σχήμα της βαλβίδας ανοίγματος,
- Ανάλογα με την ωμική τους αντίσταση και τον τρόπο ψεκασμού.

Ανάλογα με τον τρόπο που παρέχεται το καύσιμο υπάρχουν δύο ειδών μπεκ:

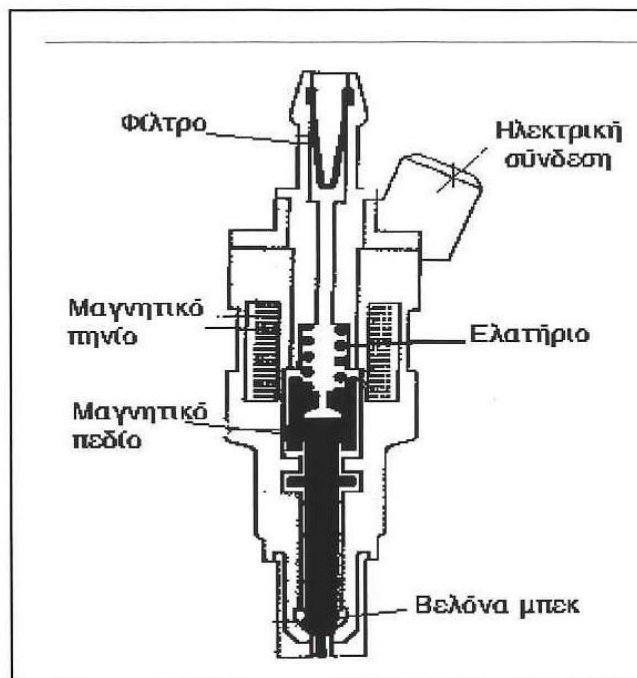
α) Μπεκ κάθετης εισαγωγής, τα οποία τροφοδοτούνται από το επάνω μέρος (δεν χρησιμοποιούνται στον κεντρικό ψεκασμό) (σχήμα 4-16)

β) Μπεκ πλευρικής εισαγωγής, τα οποία τροφοδοτούνται από το πλαϊνό μέρος τους.

Χρησιμοποιούνται τόσο σε κεντρικό, όσο και σε πολλαπλό ψεκασμό. Τα χαρακτηριστικά των μπεκ πλευρικής εισαγωγής (σχήμα 4-15) είναι ότι περιβρέχονται με καύσιμο μέχρι την οπή ψεκασμού, με αποτέλεσμα την καλύτερη ψύξη τους.



Σχήμα 4-15: μπεκ κάθετης εισαγωγής καυσίμου (αριστερά) και πλευρικής εισαγωγής (δεξιά)



Σχήμα 4-16 : Τομή εγχυτήρα κάθετης εισαγωγής

Ανάλογα με το σχήμα της βαλβίδας ανοίγματος υπάρχουν τριών ειδών μπεκ ψεκασμού (σχήμα 4-18):

- α) Ο τύπος βελονοειδούς βαλβίδας (βελόνας), που εξασφαλίζει πολύ καλή μετατροπή του καυσίμου σε μικρότατα στα γονίδια.
- β) Ο τύπος οπής με κωνική βαλβίδα, με μία ή περισσότερες οπές (σχήμα 4-17) και
- γ) Ο τύπος πλάκας (επίπεδος) με πολύ μικρές οπές που έχουν διάμετρο μόλις 0.2 mm.

Αυτές οι οπές έχουν σαν αποτέλεσμα την επιμήκυνση της ακτίνας ψεκασμού και τον ομοιόμορφο ψεκασμό. Το μπεκ αυτό είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στις βλαβερές εναποθέσεις από τα χρησιμοποιούμενα καύσιμα κακής ποιότητας.



**Σημείωση!**

Η διάμετρος της κάθε οπής τους ακροφυσίου ( $d_n$ ) είναι συνήθως ανάμεσα στις τιμές 0,14-1mm, με λόγο διαστάσεων (μήκος / διάμετρος) από 2 έως 8. Αυξάνοντας αυτό το λόγο, παράγεται ένας ψεκασμός ο οποίος έχει μικρότερη γωνία και το καύσιμο διανύει μεγαλύτερη απόσταση. Το καύσιμο εγχέεται στο θάλαμο δημιουργώντας νέφος σταγονιδίων. Όσο η γωνία εγχύσεως αυξάνεται τόσο η ταχύτητα του νέφους μειώνεται. Δύο σημαντικές παράμετροι της έγχυσης είναι το μέγεθος της σταγόνας του καυσίμου και το μήκος (S) που διανύει το ψεκαζόμενο νέφος.

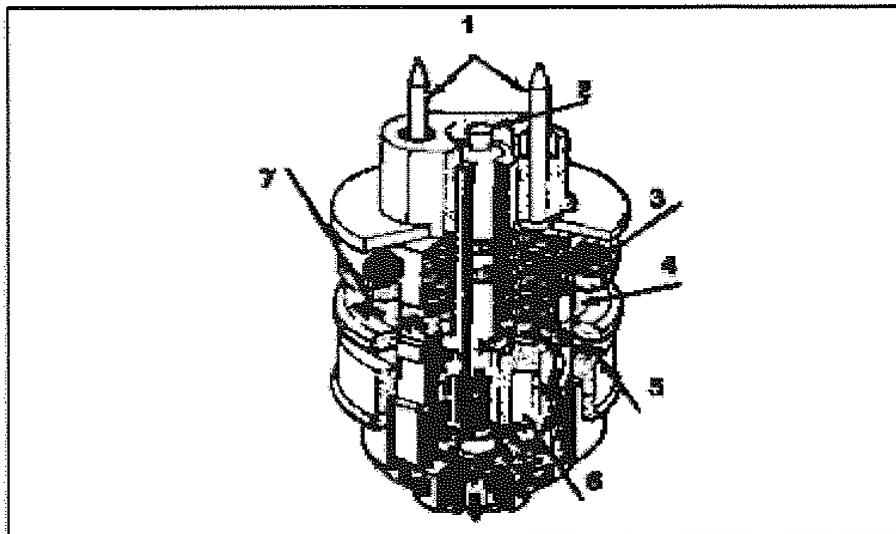
$$S = 3.07 \left( \frac{P}{\rho_g} \right)^{1/4} (td_n)^{1/2} \left( \frac{294}{T_g} \right)^{1/4}$$

όπου

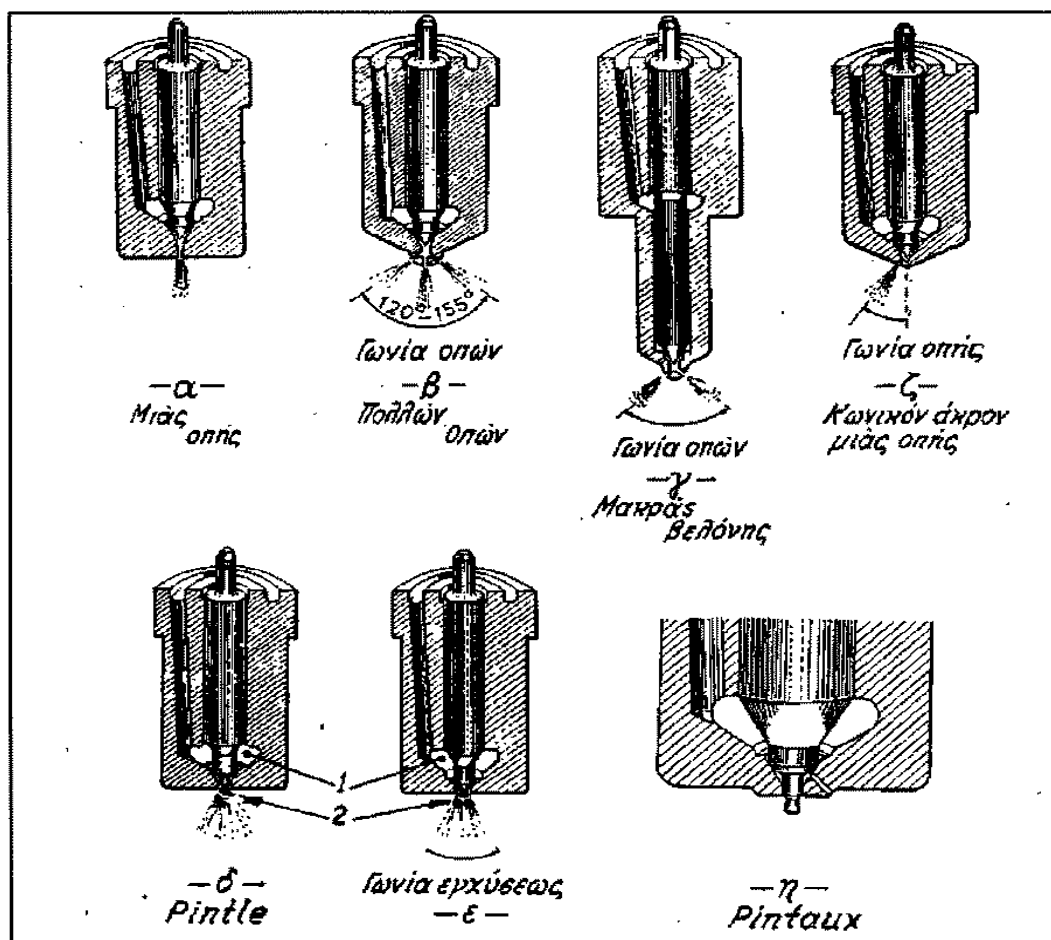
$T_g$  = θερμοκρασία καυσίμου (K)

$\rho_g$  = πυκνότητα του αερίου (σταγονιδίων καυσίμου) ( $\text{kg/m}^3$ )

$t$  = ο χρόνος μετά την εκκίνηση του ψεκασμού



Σχήμα 4-17 : Εγχυτήρας κεντρικού ψεκασμού 6 οπών γωνίας ψεκασμού  $45^\circ$  με σφαιρική έδραση



Σχήμα 4-18 : Διάφοροι τύποι εγχυτήρων ανάλογα με τον τύπο της βαλβίδας ανοίγματος

Ανάλογα με την ωμική τους αντίσταση υπάρχουν δύο τύποι μπεκ ψεκασμού:

α) Τα μπεκ χαμηλής ωμικής αντίστασης (η αντίσταση τους κυμαίνεται από 1.5-2.5  $\Omega$ m ή 3-5  $\Omega$ m περίπου) και

β) Τα μπεκ υψηλής ωμικής αντίστασης (η αντίσταση τους κυμαίνεται από 13.5-17  $\Omega$ m περίπου).

Στα μπεκ χαμηλής ωμικής αντίστασης συνδέεται - σε σειρά - μία επιπρόσθετη αντίσταση (5-8 περίπου  $\Omega$ m), η οποία λειτουργεί σαν περιοριστής της έντασης του ρεύματος. Η αντίσταση αυτή τοποθετείται μεταξύ του διακόπτη του κινητήρα και των μπεκ.

Στα μπεκ υψηλής ωμικής αντίστασης τέτοια αντίσταση δεν χρειάζεται. Τα μπεκ χαμηλής ωμικής αντίστασης δεν επιτρέπεται να τροφοδοτηθούν με απευθείας τάση από την μπαταρία, γιατί αυτά θα κολλήσουν.

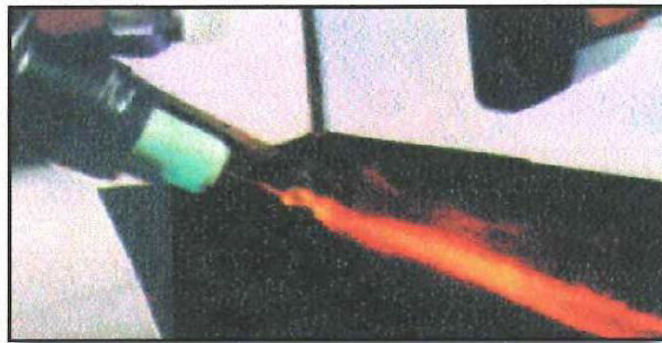
Αντίθετα, η τάση της μπαταρίας μπορεί να εφαρμοστεί στα μπεκ υψηλής ωμικής αντίστασης (π.χ. για τον έλεγχο τους). Κατά τα άλλα οι ηλεκτρικές τους συνδεσμολογίες δεν διαφέρουν.

#### 4.1.6.2. Μέθοδοι (τρόποι) ψεκασμού των μπεκ

Τρεις είναι οι πιο γνωστοί τρόποι ψεκασμού των μπεκ που εφαρμόζονται στα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα συστήματα:

##### A) Ταυτόχρονος (διπλός) ψεκασμός

Στον ταυτόχρονο (διπλό) ψεκασμό ενεργοποιούνται όλα μαζί τα μπεκ του 4χρονου βενζινοκινητήρα και ψεκάζουν μία φορά σε κάθε περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα του κινητήρα ή δύο φορές σ' έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας ( $720^\circ$ ) (γι' αυτό ονομάζεται και διπλός) (Σχήμα 4-19).



Σχήμα 4-19: Εγχυτήρας σε λειτουργία

Συνεπώς, ο ψεκασμός πραγματοποιείται μία φορά μπροστά σε ανοικτή και μία φορά μπροστά σε κλειστή βαλβίδα εισαγωγής.

Η ποσότητα καυσίμου που πρόκειται να ψεκαστεί στον κάθε κύλινδρο υπολογίζεται συνεχώς από τον εγκέφαλο και για κάθε μία φορά περιστροφής του στροφαλοφόρου ψεκάζεται το ήμισυ της υπολογισθείσας ποσότητας.

##### B) Διαδοχικός (μονός - σε σειρά) ψεκασμός ή ανεξάρτητος

Στον διαδοχικό ή μονό - σε σειρά ψεκασμό, το κάθε μπεκ ψεκάζει όλη την απαιτούμενη ποσότητα μία μόνο φορά σε κάθε κύκλο λειτουργίας και μάλιστα πριν ανοίξει η βαλβίδα εισαγωγής (δηλ. στο χρόνο εξαγωγής). Η σειρά με την οποία πραγματοποιείται ο διαδοχικός ψεκασμός είναι ίδια με την σειρά ανάφλεξης του συγκεκριμένου κινητήρα (1-3-4-2). Από την ιδιότητα αυτή προκύπτει και η ονομασία σε σειρά ψεκασμός.

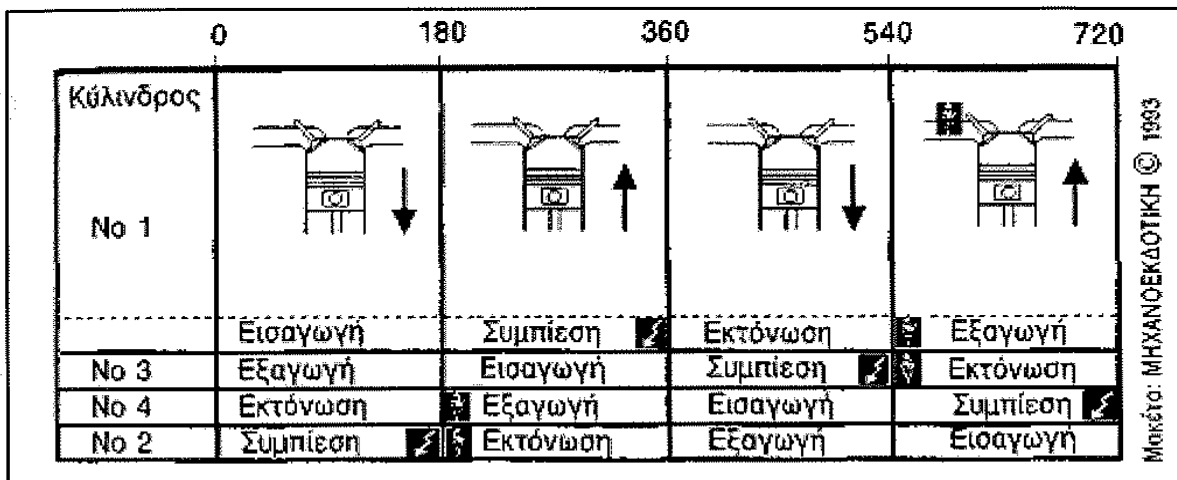


Τα πλεονεκτήματα του διαδοχικού ψεκασμού είναι τα παρακάτω:

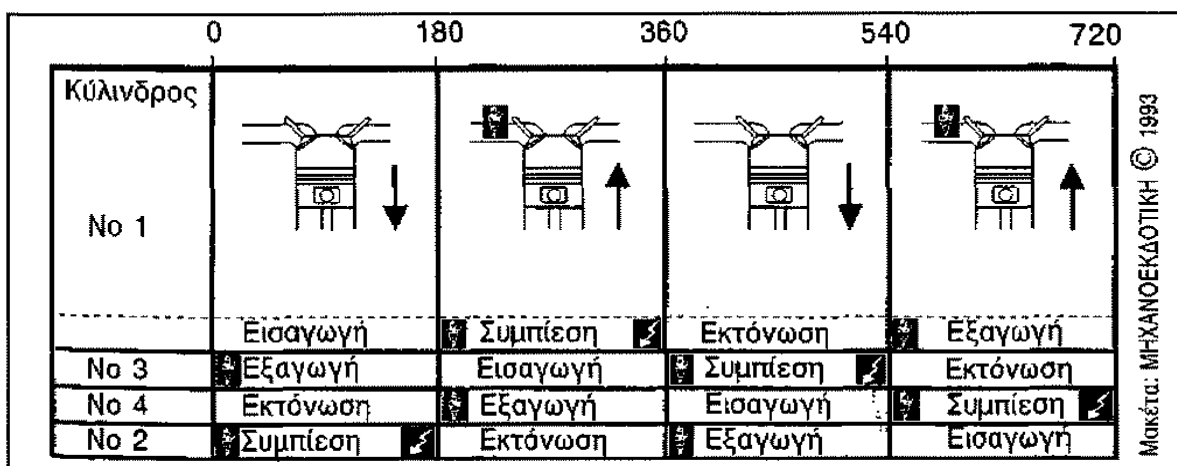
- Πιο ακριβής ποσότητα καυσίμου που ψεκάζεται σε κάθε κύλινδρο.
- Καλύτερη απόκριση στις απότομες αλλαγές.
- Μικρότερες εκπομπές καυσαερίων (η εκπομπή υδρογονανθράκων - HC μειώνεται μέχρι και 30% σε σχέση με τον ταυτόχρονο ψεκασμό).

**Γ) Εναλλασσόμενος (μονός ή διπλός) ψεκασμός ή ψεκασμός σε 2 γκρουπ**

Στον εναλλασσόμενο διπλό ψεκασμό τα μπεκ ενεργοποιούνται και ψεκάζουν σε γκρουπ (ψεκασμός 2 γκρουπ ) μία φορά για κάθε περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα ή δύο φορές σ' ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας (720°).



Σχήμα 4-20: Εναλλασσόμενος μονός ψεκασμός ή ψεκασμός σε 2 γκρουπ : Τα μπεκ ψεκάζουν μια φορά σε ένα πλήρη κύκλο ανά γκρουπ (1-3 και 4-2)



Σχήμα 4-21 : Εναλλασσόμενος διπλός ψεκασμός ή ψεκασμός σε 2 γκρουπ : Τα μπεκ ψεκάζουν δύο φορές σε ένα πλήρη κύκλο ανά γκρουπ (1-4 και 3-2)

Στον εναλλασσόμενο μονό ψεκασμό τα μπεκ ενεργοποιούνται και ψεκάζουν σε γκρουπ μια φορά για κάθε πλήρη κύκλο (δύο περιστροφές του στροφαλοφόρου).

Σ' έναν 4-κύλινδρο κινητήρα μ' εναλλασσόμενο διπλό ψεκασμό (σχήμα 4-21), ψεκάζουν μαζί σαν γκρουπ τα μπεκ 1-4 και 3-2 δύο φορές, μία φορά στον χρόνο της συμπίεσης και μία φορά στον χρόνο της εξαγωγής εναλλάξ.

Σ' έναν 4-κύλινδρο κινητήρα μ' εναλλασσόμενο μονό ψεκασμό (σχήμα 4-20), τα μπεκ 1-3 και 4-2 ψεκάζουν μαζί σαν γκρουπ μία μόνο φορά στο χρόνο της εξαγωγής και στο χρόνο της συμπίεσης αντίστοιχα σε κάθε κύκλο λειτουργίας.

Εναλλασσόμενος μονός ψεκασμός 2 γκρουπ συναντάται και σε 6-κύλινδρους κινητήρες. Για παράδειγμα, σ' έναν 6-κύλινδρο κινητήρα με σειρά 1-5-3-6-2-4 τα 2 γκρουπ ψεκασμού είναι 1-5-3 και 6-2-4. Ακόμα στον προαναφερθέντα κινητήρα συναντάται εναλλασσόμενος μονός ψεκασμός σε 3-γκρουπ, όπου τα γκρουπ μπορεί να είναι 1-5, 3-6 και 2-4.

Τέλος σ' έναν 8-κύλινδρο κινητήρα συναντάται εναλλασσόμενος μονός ψεκασμός σε 4 γκρουπ με σειρά 1-8-4-3-6-5-7-2, όπου τα γκρουπ είναι 1-8, 4-3, 6-5 και 7-2.

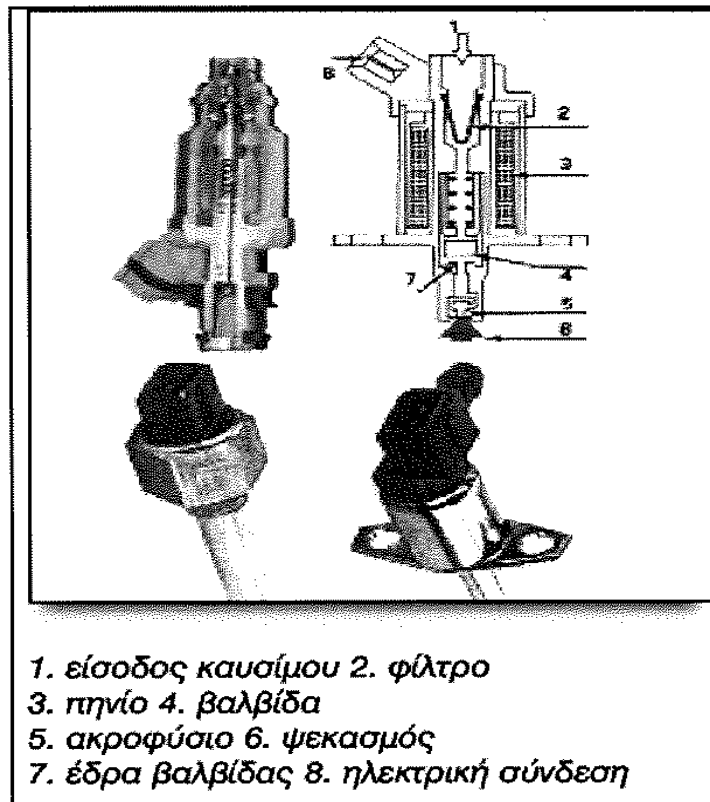
#### Συνδυασμός μεθόδων ψεκασμού

Σε νεότερους εξελιγμένους εγκεφάλους παρατηρείται η τάση να εφαρμόζεται ένας συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων ψεκασμού.

Κατά την εκκίνηση (με τη μίζα) το καύσιμο παρέχεται με την μέθοδο του ταυτόχρονου ψεκασμού, ενώ αμέσως μετά την εκκίνηση (κατά τη λειτουργία) το πρόγραμμα του εγκεφάλου αλλάζει και ο τρόπος ψεκασμού γίνεται διαδοχικός ψεκασμός ή εναλλασσόμενος μονός ψεκασμός.

#### **4.1.7. Μπεκ ψυχρής εκκίνησης**

Στα παλαιότερα συστήματα χρησιμοποιούνταν πέμπτο μπεκ (μπεκ ψυχρής εκκίνησης). Ο σκοπός του μπεκ ψυχρής εκκίνησης (που είναι και αυτό ένα ηλεκτρομαγνητικό μπεκ), είναι να ψεκάσει για ορισμένο χρονικό διάστημα μία πρόσθετη ποσότητα βενζίνης.



Σχήμα 4-22 : Μπεκ ψυχρής εκκίνησης και θερμικός χρονοδιακόπτης

Ο χρόνος ψεκασμού καθορίζεται από ένα θερμικό χρονοδιακόπτη, ανάλογα με την θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα (σχήμα 4-22).

Ο πρόσθετος αυτός ψεκασμός βενζίνης είναι απαραίτητος, γιατί η εξαερωμένη βενζίνη συμπυκνώνεται στα ψυχρά τοιχώματα και έτσι το μίγμα περιέχει λιγότερη βενζίνη απ' ότι όταν ο κινητήρας είναι ζεστός, με αποτέλεσμα να γίνεται μη αναφλέξιμο.

Με αυτόν τον τρόπο όμως επιτυγχάνεται ένας λεπτός ψεκασμός βενζίνης που εμπλουτίζει το μίγμα ακριβώς μετά το πάτημα της πεταλούδας γκαζιού.

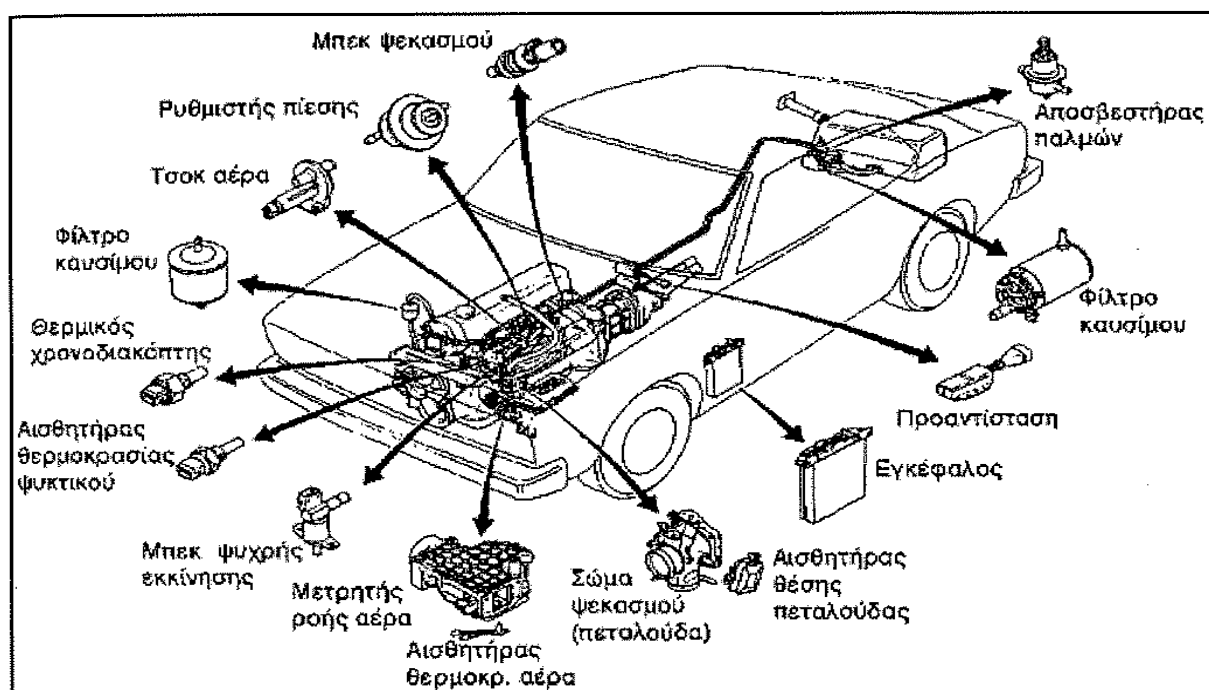
Για την καλύτερη λειτουργία, υπάρχει πηνίο προθέρμανσης για να μην έχουμε υπερβολικό ψεκασμό.

Ανεξάρτητα από το αν θερμανθεί η μηχανή, το κύκλωμα διακόπτεται μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα π. χ. 8-10 δευτερολέπτων. Όταν η μηχανή είναι ζεστή, οι επαφές μένουν μόνιμα ανοιχτές. Ο εμπλουτισμός του μίγματος μειώνεται σταδιακά ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας.

## 4.2. ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ - ΜΕΤΡΗΤΗ ΡΟΗΣ (AIR-FLOW METER INTAKE SYSTEM).

Επιτρέπει την είσοδο και τη μέτρηση της ποσότητας και συχνά της θερμοκρασίας του αναρροφούμενου αέρα που οδηγείται στους θαλάμους καύσης. Το σύστημα εισαγωγής αποτελείται από το φίλτρο, το μετρητή ροής, το μηχανισμό πεταλούδας γκαζιού, τη βαλβίδα πρόσθετου αέρα και την πολλαπλή εισαγωγής (σχήμα 4-23).

Το φίλτρο απαλλάσσει τον αέρα τροφοδοσίας από σωματίδια που θα μπορούσαν να φθείρουν το σύστημα και τους κυλίνδρους.



Σχήμα 4-23: Εξαρτήματα διακοπτόμενου ψεκασμού με μετρητή ροής αέρα

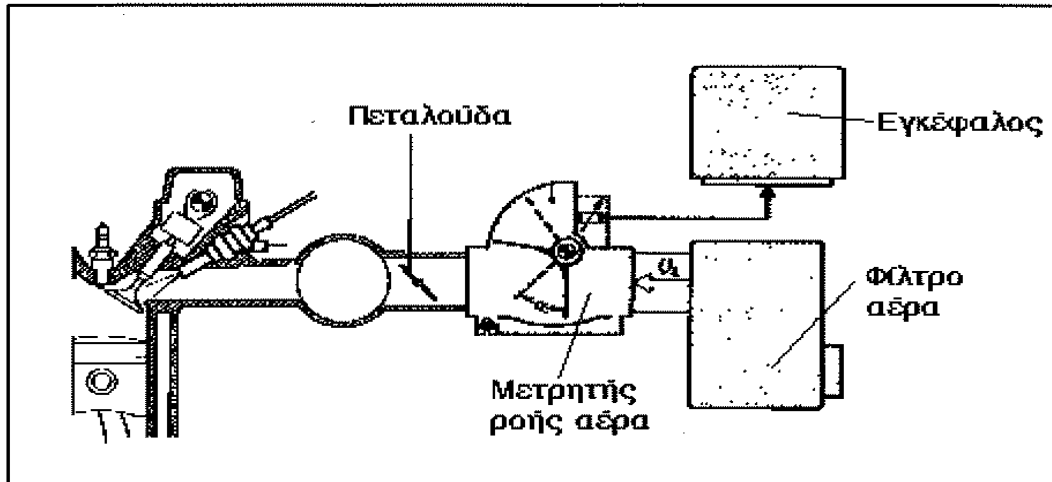
### 4.2.1. Μετρητες αναρροφούμενου αέρα

Η ποσότητα του αέρα τροφοδοσίας είναι ο βασικός παράγοντας υπολογισμού της διάρκειας του ψεκασμού.

Οι μετρητές ή παροχόμετρα μετρούν είτε τη μάζα, είτε τον όγκο του εισερχομένου αέρα.

Οι βασικότεροι τύποι μετρητών είναι :

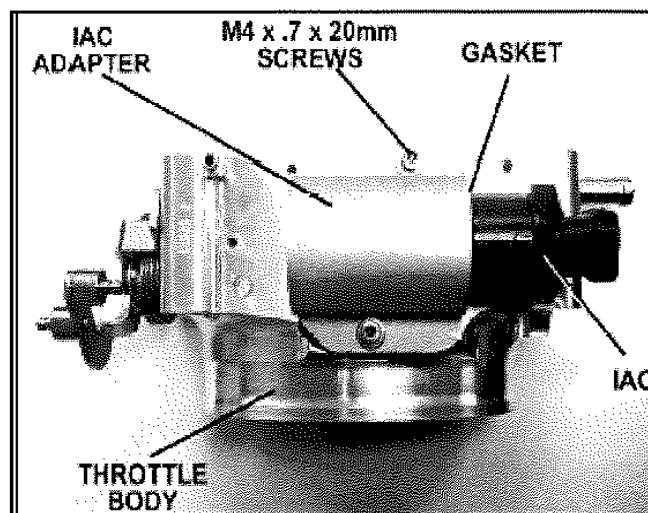
- α. όγκου αέρα με πεταλούδα ή κλαπέτο,
- β. μάζας αέρα με θερμαινόμενο σύρμα ή με θερμαντικό σπείραλ και
- γ. υποπίεσης της πολλαπλής εισαγωγής



Σχήμα 4-24 : Θέση μετρητή ροής αέρα

#### 4.2.1.1. Μετρητής όγκου (AFS)

Χρησιμοποιήθηκε πρώτα στο σύστημα L-Jetronic(σχήμα 4-25) .Είναι τοποθετημένος στο σύστημα εισαγωγής και βρίσκεται πριν από την πεταλούδα του γκαζιού (σχήμα 4-24).



Σχήμα 4-25 : Φωτογραφία ενός μετρητή όγκου αέρα

Ο μηχανισμός του αποτελείται από δύο περιστρεφόμενα πτερύγια (κλαπέτα).

Το κλαπέτο μέτρησης είναι τοποθετημένο στην κατεύθυνση ροής του αέρα και περιστρέφεται ανάλογα με την επίδραση της δύναμης, που ασκεί πάνω του η πίεση του αέρα (σχήμα 4-26).

Σε γωνία 100 μοιρών από αυτό υπάρχει το κλαπέτο αντιστάθμισης. Τα δύο κλαπέτα είναι σφηνωμένα πάνω στον ίδιο άξονα και ισορροπούν κάτω από τη δύναμη ενός σπειροειδούς ελατηρίου επαναφοράς.

Η πίεση του αέρα περιστρέφει το κλαπέτο μέτρησης αντίθετα προς τη δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου. Το πτερύγιο της αντιστάθμισης, αποσβένει τις ταλαντώσεις, που δημιουργούνται από τις εναλλαγές του αναρροφούμενου αέρα.

Ανάμεσα στο πτερύγιο και στο περίβλημα του μετρητή υπάρχει ο χώρος απόσβεσης. Ο χώρος αυτός περιέχει εγκλωβισμένο αέρα που διαφεύγει αργά από το διάκενο που υπάρχει.

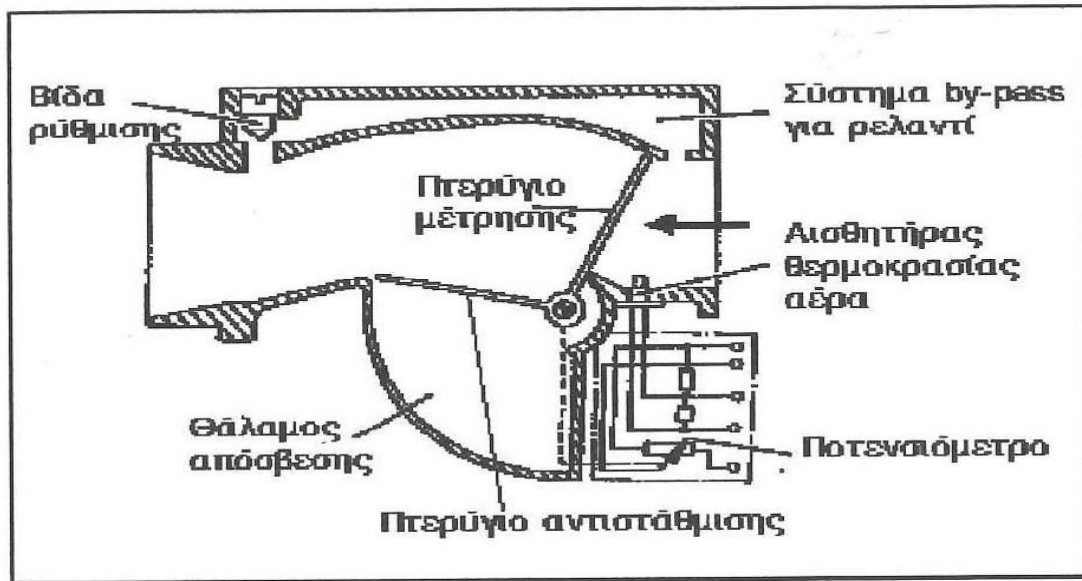
Στον άξονα του πτερυγίου είναι τοποθετημένο ένα ποτενσιόμετρο, που μεταβάλλει ανάλογα με τη θέση του πτερυγίου την τάση.

Στο κάτω μέρος του μετρητή υπάρχει αγωγός από όπου μία μικρή ποσότητα αέρα παρακάμπει το πτερύγιο μέτρησης. Στα παλιότερα μοντέλα υπάρχει βίδα που ρυθμίζει το μίγμα στο ρελαντί. Καθώς βιδώνουμε και ξεβιδώνουμε μικραίνει και μεγαλώνει το στόμιο του περάσματος του αέρα. Κατ' αυτό το τρόπο εμπλουτίζεται ή πτωχαίνει το μίγμα αέρα - βενζίνης.

Μέσα στο χώρο του ποτενσιόμετρου, βρίσκεται σε μερικά μοντέλα ο διακόπτης της αντλίας καυσίμου που διακόπτει τη παροχή βενζίνης σε περίπτωση σύγκρουσης.

Μπροστά από το πτερύγιο μέτρησης ροής του αέρα είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής. Σε άλλους κινητήρες, μπορεί να βρίσκεται στο φίλτρο αέρα ή στην πολλαπλή εισαγωγής.

Κάθε αλλαγή της θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής μεταβάλλει την αντίσταση και αυτό συνεπάγεται μεταβολή της πτώσης τάσης, που προκαλεί ο αισθητήρας. Η τιμή της αντίστασης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Η πτώση της τάσης είναι το σήμα που πληροφορεί η Η.Μ.Ε., για τη διόρθωση που απαιτείται, για τον υπολογισμό της μάζας του εισερχόμενου αέρα.

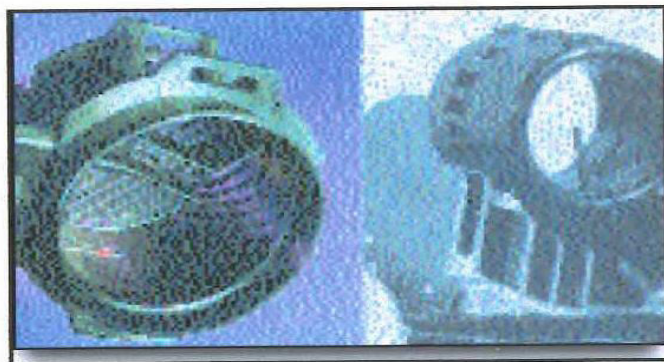


Σχήμα 4-26: Σχηματικό διάγραμμα μετρητή όγκου αέρα

#### 4.2.1.2. Μετρητής μάζας αέρα (MAF) με θερμαινόμενο νήμα.

Καταγράφει τη μάζα του αέρα που εισάγεται στον κινητήρα. Η λειτουργία του μετρητή μάζας αέρα στηρίζεται στη μεταβολή έντασης του ρεύματος, που διαρρέει τη θερμαινόμενη αντίσταση του μετρητή μάζας, έτσι ώστε να αντισταθμίζονται οι μεταβολές που προκαλούνται στη θερμοκρασία της αντίστασης, καθώς ο αέρας που εισέρχεται στους κυλίνδρους ψύχει την αντίσταση. Η πληροφορία που φτάνει στον εγκέφαλο είναι η τάση του ρεύματος που διαρρέει τον αισθητήρα (σχήμα 4-27).

Ο μετρητής μάζας με θερμό σύρμα χρησιμοποιήθηκε αρχικά στο σύστημα LH Jetronic. Είναι μεγαλύτερης ακρίβειας σε σχέση με το μετρητή όγκου, επειδή δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα του αέρα, δεν έχει μηχανικά μέρη και οι διακυμάνσεις της πίεσης λόγω υψομετρικών διαφορών και αλλαγών θερμοκρασίας δεν επηρεάζουν τη μέτρηση. Ένα άλλο πλεονέκτημα του μετρητή αυτού είναι ότι στραγγαλίζει λιγότερο τη ροή του αέρα απ' ό,τι ο μετρητής όγκου.

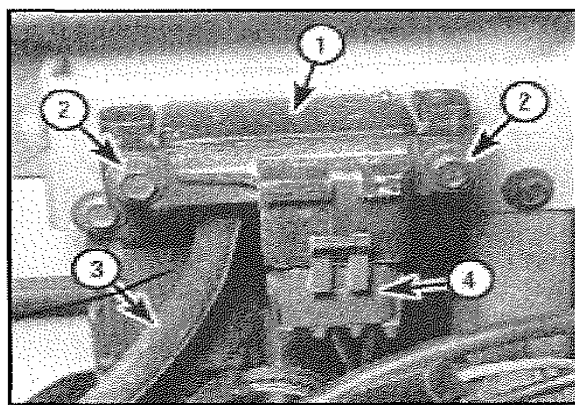


Σχήμα 4-27: Μετρητής μάζας αέρα με θερμαινόμενο νήμα

### 4.2.1.3. Μετρητής απόλυτης πίεσης ή υποπίεσης (MAP)

Μετράει την απόλυτη τιμή της πίεσης μέσα στην πολλαπλή εισαγωγής. Οι αυξομειώσεις της πίεσης προκύπτουν λόγω της μεταβολής του φορτίου του κινητήρα. Στο εσωτερικό του αισθητήρα υπάρχει ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα και ένας στεγανός θάλαμος, όπου επικρατεί μηδενική πίεση.

Ο μετρητής συνδέεται με την πολλαπλή εισαγωγής μέσω σωλήνα (σχήμα 4-28). Η υποπίεση της πολλαπλής εισαγωγής εφαρμόζεται στη μία πλευρά του ηλεκτρονικού κυκλώματος που βρίσκεται τοποθετημένο πάνω σε μία εύκαμπτη πλακέτα. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι αποτυπωμένο σε μεμβράνη σιλικόνης και έχει πιεζοηλεκτρική αντίσταση.



1. αισθητήρας, 2. βίδα,  
3. σωλήνας υποπίεσης, 4. ηλεκτρική σύνδεση

Σχήμα 4-28: Φωτογραφία μετρητή απόλυτης πίεσης

Η περιοχή μέτρησης του αισθητήρα κυμαίνεται από 0,1 bar μέχρι 1,05 bar. Ο κρύσταλλος του αισθητήρα πίεσης είναι από χαλαζία ή τουρμαλίνη. Οι παραμορφώσεις της πλακέτας προκαλούν αυξομειώσεις της τιμής της αντίστασης, που μετατρέπεται σε ένα σήμα ηλεκτρικής τάσης.

Ο μετρητής ενεργοποιείται σε 2 msec, έχει φως με τρεις επαφές και συνδέεται με τον εγκέφαλο από τον οποίο τροφοδοτείται με συνεχή τάση 5V. Το σήμα μεταβάλλεται από 1 έως 4,5 V, ανάλογα με την υποπίεση της πολλαπλής εισαγωγής.

Ο εγκέφαλος χρησιμοποιεί το σήμα του αισθητήρα για να προσδιορίσει το φορτίο του κινητήρα.



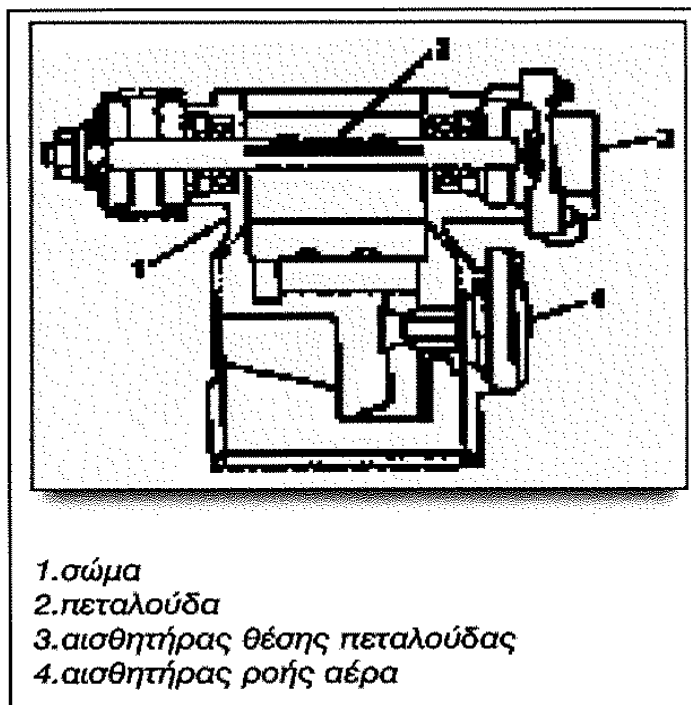
#### 4.2.2. Σώμα πεταλούδας

Το σώμα της πεταλούδας αποτελείται από τον κεντρικό κύλινδρο, το άνοιγμα παράκαμψης (by pass) του αέρα και τα εξής εξαρτήματα (σχήμα 4-29)

-Την πεταλούδα, που είναι συνδεδεμένη με το πεντάλ του γκαζιού και ελέγχει την ποσότητα του αέρα εισαγωγής.

-Τον αισθητήρα θέσης της πεταλούδας, που εντοπίζει το άνοιγμα της πεταλούδας και στέλνει το ανάλογο σήμα στον εγκέφαλο.

-Τη βαλβίδα γρήγορου ρελαντί (τσοκ), που ανοίγει την πεταλούδα όταν ο κινητήρας είναι κρύος.



Σχήμα 4-29 : Σχηματικό διάγραμμα στο σώμα της πεταλούδας

### 4.2.3. Βαλβίδα βοηθητικού αέρα (AAV) ή βαλβίδα ρύθμισης ρελαντί

Κατά την εκκίνηση, η μηχανή πρέπει να αναρροφήσει περισσότερο αέρα και τα μπεκ να ψεκάσουν περισσότερο καύσιμο. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει ο σωλήνας παράκαμψης (by pass) που βρίσκεται κάτω από την πεταλούδα.

Όταν η πεταλούδα είναι κλειστή, περνάει αέρας από τον αγωγό by-pass και εισέρχεται στον κύλινδρο. Πάνω στον αγωγό, έχει τοποθετηθεί η βαλβίδα του βοηθητικού αέρα που έχει φινις και συνδέεται ηλεκτρικά με μοτέρ.

Όταν ο κινητήρας βρίσκεται στο ρελαντί ή όταν είναι κρύος και η πεταλούδα γκαζιού είναι κλειστή, τότε ο εγκέφαλος παρέχει πρόσθετο αέρα μέσω αυτής της βαλβίδας. Επίσης ενεργοποιείται, όταν πέσουν οι στροφές ή λειτουργήσει ο κλιματισμός.

Οι κυριότεροι τύποι βαλβίδων βοηθητικού αέρα είναι οι:

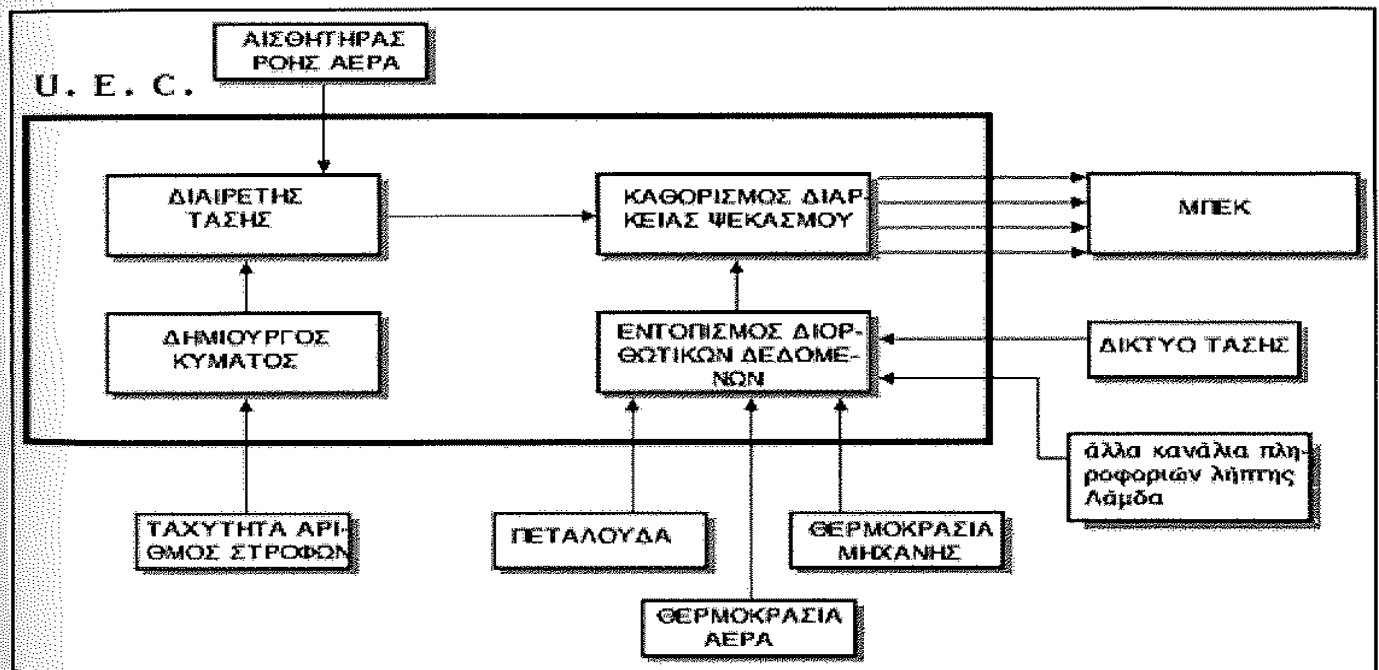
- α. διμεταλλικές,
- β. θερμοστατικές,
- γ. ηλεκτρομαγνητικές,
- δ. περιστροφικές με μοτέρ και
- ε. με βηματικό κινητήρα .

### 4.3. ΤΟ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Το σύστημα ρύθμισης του ψεκασμού αποτελείται από την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου, δηλαδή τον εγκέφαλο, τους αισθητήρες και τα μπεκ.

#### 4.3.1. Εγκέφαλος ( ECU ή Electronic Control Unit )

Οι αισθητήρες μετρούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας του κινητήρα. Ο εγκέφαλος (Ηλεκτρονική Μονάδα Ελέγχου) δέχεται τα σήματα από τους αισθητήρες και τα επεξεργάζεται. Στη συνέχεια παράγει το κατάλληλο σήμα διάρκειας του ψεκασμού, που στέλνει στα μπεκ. Ο εγκέφαλος εκτελεί τους υπολογισμούς και είναι κατασκευασμένος από ολοκληρωμένα κυκλώματα (LC) και τρανζίστορ (σχήμα 4-30).



Σχήμα 4-30 : Διάγραμμα εγκέφαλου.

Η ΗΜΕ αποτελείται από:

- α) το τροφοδοτικό
- β) το σύστημα εισόδου σημάτων
- γ) τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας CPU
- δ) το σύστημα εξόδου σημάτων
- ε) τη μνήμη
- στ) το βοηθητικό πρόγραμμα λειτουργίας και
- ζ) το σύστημα αυτοδιάγνωσης.

Τα ηλεκτρικά σήματα εισόδου που λαμβάνονται από τους αισθητήρες μετατρέπονται σε ψηφιακά και επεξεργάζονται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (ΚΜΕ) και τους μικροεπεξεργαστές. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί εκτελούνται σε συνδυασμό με τις αποθηκευμένες πληροφορίες που υπάρχουν στο σύστημα μνήμης.

Τα σήματα εξόδου μετατρέπονται από ψηφιακά σε αναλογικά και τροφοδοτούν τους ενεργοποιητές.

Ενεργοποιητές εκτός από τα μπεκ είναι ο πολλαπλασιαστής, ο διανομέας αν υπάρχει, τα μπουζί και ο ρυθμιστής των στροφών του ρελαντί. Οι κύριες λειτουργίες του εγκεφάλου, εκτός από τον έλεγχο της βασικής διάρκειας ψεκασμού, είναι η διόρθωση της τάσης και διάφορες άλλες μικροδιορθώσεις που πραγματοποιεί.



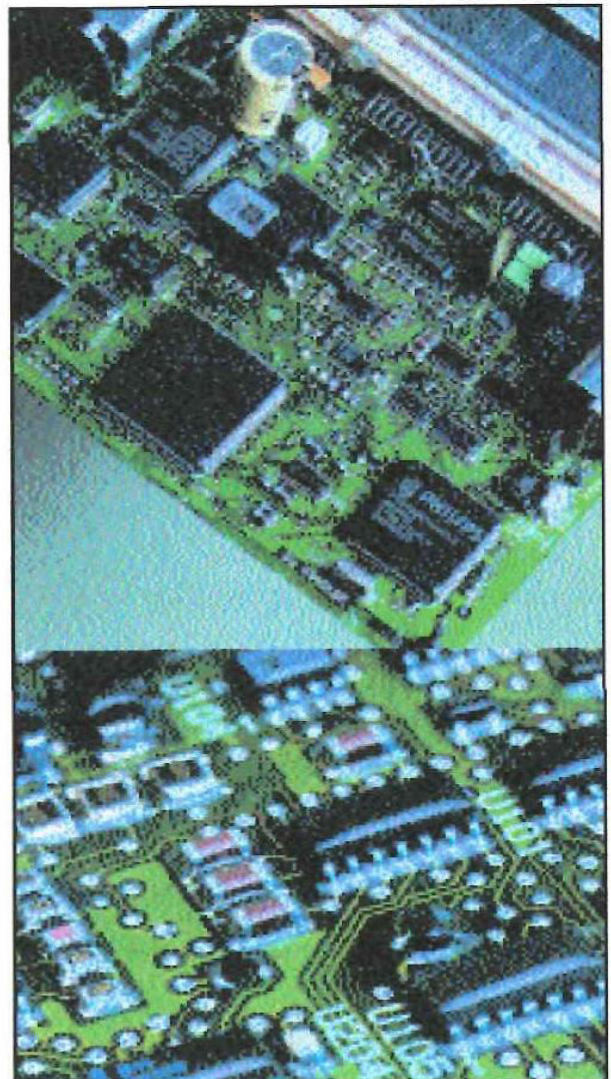
*Σχήμα 4-31 : Εσωτερική όψη ΗΜΕ*

Η μνήμη της HME (ECU) (σχήμα 4-31) είναι ένας μεταφορέας διευθύνσεων, δεδομένων και ελέγχου που συνδέει τη μνήμη με τον μικροεπεξεργαστή. Η μνήμη είναι η RAM, ROM και PROM.

Η RAM αποθηκεύει προσωρινά τα δεδομένα εισόδου και εξόδου, πριν αρχίσει να λειτουργεί το πρόγραμμα ελέγχου. Στη ROM υπάρχουν μόνιμα αποθηκευμένες πληροφορίες και η μνήμη αυτού του είδους επικοινωνεί απευθείας με τον επεξεργαστή. Η PROM περιέχει σε πρόγραμμα όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία λειτουργίας του κινητήρα. Επαναπρογραμματίζεται και βρίσκεται πάνω σε ειδική βάση στην πλακέτα της HME (σχήμα 4-32). Υπάρχει και η μνήμη KAM που είναι παραλλαγή της RAM. Στην KAM ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να διαβάσει και να γράψει νέα δεδομένα λειτουργίας.

Το πρόγραμμα λειτουργίας είναι το σύνολο των οδηγιών που καθοδηγούν την HME πώς να λειτουργήσει. Στο βασικό πρόγραμμα εισόδου και εξόδου των σημάτων BIOS έχει ενσωματωθεί ένα βοηθητικό πρόγραμμα έκτακτης ανάγκης σύμφωνα με το οποίο, όταν ανιχνευθεί η δυσλειτουργία κάποιου κύριου αισθητήρα από τη μνήμη του εγκέφαλου, ο κινητήρας διατηρεί ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας και οδήγησης μέχρι το πλησιέστερο συνεργείο.

Όταν ανιχνευθεί δυσλειτουργία κάποιου αισθητήρα στη μνήμη του εγκέφαλου, τότε ο κινητήρας ελέγχεται από το λογικό σύστημα που έχει ο εγκέφαλος. Είναι η λεγόμενη Fail Safe Function και με αυτή διασφαλίζεται ένα ικανοποιητικό επίπεδο απόδοσης του κινητήρα παρά την ύπαρξη της βλάβης.



Σχήμα 4-32 : Δομή ηλεκτρονικής μονάδας ελέγχου

Τα συστήματα ελέγχου των κινητήρων είναι δύο τύπων: ανοικτά και κλειστά ή αλλιώς ανοικτού και κλειστού βρόχου.

Στα ανοικτά συστήματα, το μίγμα δε μπορεί να διορθωθεί και να πλησιάσει τη στοιχειομετρική αναλογία. Αυτά είναι τα συστήματα συμβατικής τεχνολογίας και γενικά τα συστήματα χωρίς αισθητήρα λ.

Στα κλειστά συστήματα ελέγχου, εκτελείται ανατροφοδότηση του εγκεφάλου με πληροφορίες που αφορούν στη λειτουργία του ώστε να έχουμε διόρθωση του μίγματος. Ο κλειστός κύκλος ρύθμισης επαναλαμβάνεται πάνω από 100 φορές το λεπτό.

Στα σύγχρονα κλειστά συστήματα υπάρχουν δύο αισθητήρες λάμδα. Ο πρώτος αισθητήρας, που είναι τοποθετημένος στην πολλαπλή εξαγωγής πριν από τον καταλύτη, δίνει τη δυνατότητα στον εγκέφαλο να ρυθμίζει συνεχώς το μίγμα.

Ο δεύτερος αισθητήρας λάμδα που είναι τοποθετημένος μετά τον καταλύτη δίνει την δυνατότητα στον εγκέφαλο να ελέγξει την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του καταλύτη.

#### 4.3.2. Είδη Αισθητήρων Συστήματος Ηλεκτρονικού Ψεκασμού

Είναι μικροσυσκευές ή όργανα που τοποθετούνται σε εξαρτήματα, όργανα, συσκευές του κινητήρα ή σε κυκλώματα των συστημάτων του κινητήρα και πραγματοποιούν διάφορες μετρήσεις.

Τα στοιχεία των μετρήσεων τα μετατρέπουν συνήθως σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία διαβιβάζουν σε μικροϋπολογιστές και στην μονάδα.

Οι μικροϋπολογιστές και η μονάδα επεξεργάζονται τα σήματα, τα συγκρίνουν με τα αντίστοιχα του προγράμματος και στέλνουν στους ενεργοποιητές των συστημάτων λειτουργίας του κινητήρα, τις ανάλογες εντολές.

##### **Αισθητήρες ελέγχου ατμοσφαιρικού αέρα πολλαπλής**

Είναι μικροσυσκευές που τοποθετούνται στην είσοδο του εξαερωτήρα ή της πολλαπλής εισαγωγής. Η λειτουργία τους βασίζεται στις κινήσεις του διαφράγματος αέρα.

Ανάλογα με τις γωνίες (θέσεις) του διαφράγματος διαμορφώνονται τα ηλεκτρικά σήματα που στέλνονται στους μικροϋπολογιστές και στην μονάδα.

Οι αισθητήρες αέρα είναι διαφόρων τύπων δομών και αρχών λειτουργίας.

Διακρίνονται σε αισθητήρες μέτρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης και σε αισθητήρες μέτρησης της απόλυτης πίεσης (MAP). Σε πολλούς τύπους χρησιμοποιούνται και αισθητήρες μέτρησης του όγκου του διερχόμενου αέρα.

### Αισθητήρας οξυγόνου ( $\lambda$ ) :

Ανιχνεύει τις ποσότητες του οξυγόνου της ατμόσφαιρας και των καυσαερίων.

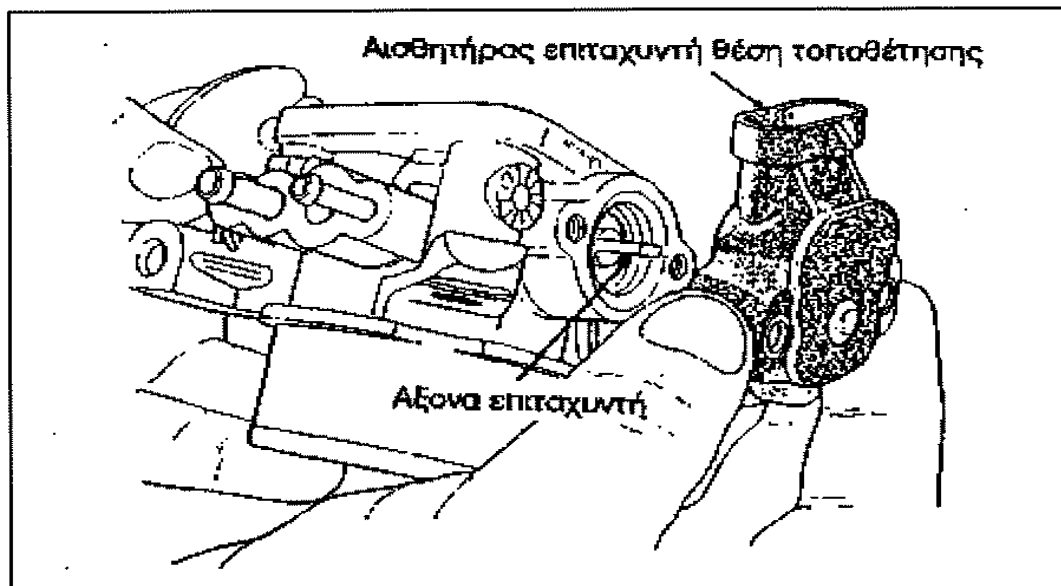
Οι πληροφορίες αυτές διαβιβάζονται στην ηλεκτρονική μονάδα. Οι εντολές που δίδονται αφορούν σχεδόν όλες τις λειτουργίες του κινητήρα, ώστε να διατηρείται σταθερή η αναλογία αέρα και καυσίμου στο 14:7:1.

Ο αισθητήρας τοποθετείται στην πολλαπλή εξαγωγή ή στον καταλυτικό μετατροπέα (καταλύτη).

Υπάρχουν διάφορα είδη αισθητήρων οξυγόνου που διαφέρουν ως προς τις αρχές λειτουργίας τα κυριότερα των οποίων είναι:

- Αισθητήρας οξυγόνου ( $\lambda$ ) τύπου Ζιρκονίου ( $ZrO_2$ )
- Αισθητήρας οξυγόνου ( $\lambda$ ) τύπου Τιτανίου ( $TiOs$ )

### Αισθητήρας θέσης διαφράγματος επιταχυντή



Σχήμα 4-33 : Αισθητήρας ελέγχου θέσεων επιταχυντή εξαεριοτήρα ή πολλαπλή εισαγωγής

Ελέγχει τις εκάστοτε θέσεις του επιταχυντή (πεταλούδα γκαζιού). Οι πληροφορίες αφορούν την ενεργοποίηση των λειτουργιών σχεδόν όλων των συστημάτων. Από την θέση του επιταχυντή εξαρτώνται οι εκάστοτε ποσότητες αέρα. Μεγάλο άνοιγμα αυξάνει την ροή (ποσότητα) του αέρα και αντίστροφα. Ανάλογες λοιπόν θα είναι και οι εντολές της μονάδας προς τους ενεργοποιητές. Ο αισθητήρας τοποθετείται στο άκρο του άξονα του επιταχυντή (σχήμα 4-33). Οι κινήσεις του επιταχυντή, συμπαρασύρουν μία βελόνα που επηρεάζει μία αντίσταση. Οι παραγόμενες ηλεκτρικές τάσεις (σήματα) φθάνουν στην ηλεκτρονική μονάδα. Οι εντολές ενεργοποίησης δίδονται προς τα διάφορα συστήματα, όργανα ή συσκευές.

### **Αισθητήρας θερμοκρασίας εισαγωγής αέρα**

Ελέγχει την θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα στην πολλαπλή εισαγωγή. Από αυτή προσδιορίζεται η πυκνότητα του αέρα. Ο κρύος αέρας είναι πάντα πυκνότερος, οπότε το σήμα θα είναι για αύξηση της ποσότητας ψεκασμού.

### **Αισθητήρας θερμοκρασίας ψυκτικού υγρού**

Βρίσκεται βυθισμένος στο ψυκτικό υγρό της μηχανής κοντά στο θερμοστάτη (σχήμα 4-34). Ο αισθητήρας είναι μια αντίσταση τύπου NIC (αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας). Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η τιμή της ηλεκτρικής του αντίστασης R. Ο αισθητήρας βρίσκεται σε μια μεταλλική υποδοχή και βιδώνεται στο μπλοκ του κινητήρα ή στην κυλινδροκεφαλή.

Ο εγκέφαλος στέλνει ηλεκτρική τάση 5 V (τυπική τιμή) και δέχεται πίσω τη μεταβολή της τάσης. Έτσι υπολογίζει τη θερμοκρασία του κινητήρα και προσαρμόζει την ποσότητα του καυσίμου που ψεκάζεται ιδίως κατά την εκκίνηση.





*Σχήμα 4-34 : Αισθητήρας θερμοκρασίας νερού μηχανής*

Σε θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας του κινητήρα, η αντίσταση του αισθητήρα είναι 300 Ωhm.

Αν υπάρχει βλάβη στον αισθητήρα, ο εγκέφαλος χρησιμοποιεί μια τάση που αναλογεί στη θερμοκρασία των 60° - 80°C. Αν η θερμοκρασία είναι κοντά στους 0°C ως πληροφορία χρησιμοποιείται η θερμοκρασία του αέρα. Ανάλογα με την τιμή του ηλεκτρικού σήματος που λαμβάνει ο εγκέφαλος, δίνεται εντολή για τη ρύθμιση του μίγματος ή του αβάνς, ώστε να μην παρατηρείται κρουστική καύση.

## 5. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΑΝΑΦΛΕΞΗ

Το σύστημα ανάφλεξης δημιουργεί το σπινθήρα για την ανάφλεξη του καυσίμου μίγματος στην κατάλληλη χρονική στιγμή, κάτω από όλες τις συνθήκες λειτουργίας.

Το σύστημα της ανάφλεξης έχει εξελιχθεί και έχει γίνει ηλεκτρονικά ελεγχόμενο. Διατηρεί κάποια βασικά στοιχεία από το προηγούμενο ηλεκτρικό σύστημα με πλατίνες, που χρησιμοποιούσαν τα αυτοκίνητα συμβατικής τεχνολογίας.

Το σύστημα ανάφλεξης αποτελείται από:

α) το συσσωρευτή (μπαταρία) που παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα στο κύκλωμα κατά την εκκίνηση του κινητήρα και μέχρι ο εναλλάκτης του αυτοκινήτου να αποκτήσει τάση ορισμένης τιμής.

β) το μηχανισμό διακοπής του μαγνητικού πηνίου του πολλαπλασιαστή. Στα συμβατικά συστήματα ο διακόπτης είναι οι πλατίνες,

γ) το πρωτεύον πηνίο του πολλαπλασιαστή, που δημιουργεί την επαγωγική τάση στο δευτερεύον πηνίο, και

δ) το έκκεντρο και τις επαφές του μηχανισμού διακοπής του μαγνητικού πεδίου, ώστε να διακόπτεται το κύκλωμα κατά σταθερά και συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

**Το σύστημα ανάφλεξης αποτελείται στην ουσία από δύο κυκλώματα: το πρωτεύον και το δευτερεύον.**

Το πρώτο κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα που προκαλείται από χαμηλή τάση.

Το δεύτερο κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα υψηλής τάσης, της τάξης των 35.000 -40.000 βολτ. Αποτελείται από το δευτερεύον πηνίο του πολλαπλασιαστή, τον διανομέα (αν υπάρχει) που διανέμει το ρεύμα στα μπουζί, τα καλώδια του ρεύματος και τέλος τα ίδια τα μπουζί.

Όταν το κύκλωμα κλείνει, το πρωτεύον πηνίο διαρρέεται από ρεύμα και δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μαγνητικό πεδίο καταρρέει όταν το κύκλωμα διακοπεί και έτσι δημιουργείται στο δευτερεύον πηνίο υψηλή τάση. Η τάση αυτή, που ανάλογα με τον κατασκευαστή του πολλαπλασιαστή μπορεί να φθάσει τα 40000 βολτ, κατευθύνεται διαμέσου του διανομέα στα μπουζί και δημιουργεί σπινθήρα στο διάκενο που υπάρχει μεταξύ των ηλεκτροδίων που έχει το μπουζί.

Ενώ στην αρχή ο έλεγχος του πρωτεύοντος κυκλώματος γινόταν από τις πλατίνες και η

ρύθμιση της προπορείας μηχανικά, τώρα γίνονται όλα ηλεκτρονικά με τη βοήθεια του εγκεφάλου.

Τα παλαιότερα συμβατικά συστήματα ανάφλεξης έχουν πλέον εξελιχθεί σε συστήματα με:

A. Ηλεκτρονική ανάφλεξη με διανομέα, παλμογεννήτρια και μηχανισμό μεταβολής του αβάνς,

B. Ηλεκτρονική ανάφλεξη με μηχανικό διανομέα, αισθητήρες και εγκεφαλο (μικροεπεξεργαστή) και

Γ. Ηλεκτρονική ανάφλεξη χωρίς διανομέα.

### Σύστημα ελέγχου ανάφλεξης

Το σύστημα αυτό ελέγχει ηλεκτρονικά το χρόνο παροχής του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο του πολλαπλασιαστή.

Ο εγκεφαλος αποφασίζει για την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα χρησιμοποιώντας σήματα από τους αισθητήρες. Διαλέγει το κατάλληλο ρεύμα για την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα και κατόπιν στέλνει το σήμα ανάφλεξης στην ηλεκτρονική.

Η ηλεκτρονική ανάφλεξη ανοίγει και κλείνει το ρεύμα στο πρωτεύον του πολλαπλασιαστή μετά από σήμα του εγκεφάλου.

Το σύστημα πραγματοποιεί τους παρακάτω τρεις τύπους ελέγχου:

α). Έλεγχο αβάνς κατά την εκκίνηση του κινητήρα.

β). Έλεγχο αβάνς μετά την εκκίνηση. Το αβάνς καθορίζεται από τη βασική προπορεία που διαφοροποιείται ανάλογα με τις στροφές,

γ) Έλεγχο χρόνου παροχής ρεύματος. Το σύστημα ελέγχει την τάση του πρωτεύοντος για να σταθεροποιηθεί η τάση του δευτερεύοντος του πολλαπλασιαστή.

### **Πλεονεκτήματα ηλεκτρονικών αναφλέξεων έναντι συμβατικής ανάφλεξης**

- Έχουν υψηλή τάση που φθάνει μέχρι τα 55kV σε αντίθεση με τα 20 kV της ανάφλεξης με πλατίνες .
- Στα ηλεκτρονικά συστήματα που έχουν και πλατίνες, η διάρκεια λειτουργίας τους έχει αυξηθεί περίπου στο διπλάσιο.
- Η διάρκεια λειτουργίας των μπουζί έχει αυξηθεί στο διπλάσιο.
- Η τάση του δευτερεύοντος είναι σταθερή σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του

κινητήρα.

- Γίνεται καλή καύση του μίγματος και έχουμε παρατεταμένη λειτουργία του συστήματος χωρίς βλάβες.
- Γίνεται καλύτερος έλεγχος της ανάφλεξης με αποτέλεσμα να έχουμε χαμηλότερη κατανάλωση στη βενζίνη.
- Δεν υπάρχει πρόβλημα κρύας εκκίνησης του κινητήρα γιατί η υψηλή τάση είναι πάνω από 20kV.
- Δε χρειάζεται συχνή ρύθμιση του αβάνς και της γωνίας dwell, γιατί οι πλατίνες έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Ενώ στην περίπτωση που το σύστημα δεν διαθέτει πλατίνες, δεν υπάρχει ανάγκη ρυθμίσεων και συντήρησης.
- Δεν απαιτείται συντήρηση για 50.000 έως 60.000 Km. Το συμβατικό σύστημα με πλατίνες μπορεί να λειτουργήσει χωρίς προβλήματα και συντήρηση για 15000 km περίπου. Η ηλεκτρονική ανάφλεξη με πλατίνες για 30000 Km και η ανάφλεξη χωρίς πλατίνες δηλαδή με γεννήτρια παλμών δε θέλει καθόλου συντήρηση
- Τα ηλεκτρονικά συστήματα έχουν καλώδια υψηλής τάσης με μικρό μήκος και καλή γείωση.
- Στις ηλεκτρονικές αναφλέξεις χωρίς διανομέα έχουμε ακόμα:
  - α) μεγαλύτερης τάσης σπινθήρα
  - β) μείωση ηλεκτρικών παράσιτων
  - γ) ελάχιστη συντήρηση και
  - δ) λιγότερες συνδέσεις καλωδίων.

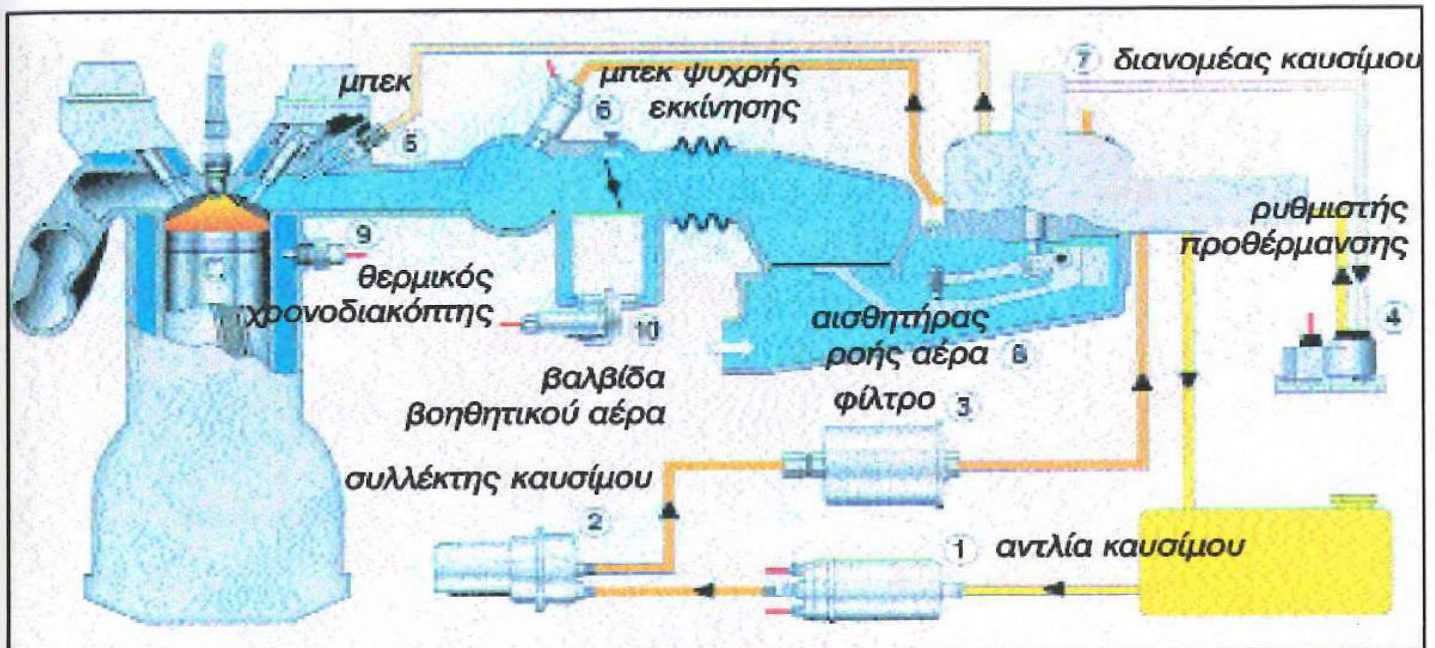
#### **Μειονέκτημα:**

Το μόνο μειονέκτημα των ηλεκτρονικών αναφλέξεων είναι ότι δεν πρέπει να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίας και γι' αυτό πρέπει να τοποθετούνται σε θέσεις καλά αεριζόμενες και μακριά από την πλευρά της πολλαπλής εξαγωγής.

## 6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

### 6.1. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ K-JETRONIC

Ένα κλασικό παράδειγμα μηχανικού ή συνεχούς ψεκασμού είναι το K-Jetronic (σχήμα 6-1), που πιο απλά είναι ένα μηχανικό - υδραυλικό σύστημα πολλαπλού ψεκασμού (με ένα μετρητή ροής αέρα, τύπου δίσκου και διανομέα καυσίμου, που δεν συναντάται στα ηλεκτρονικά συστήματα διακοπόμενου ψεκασμού) και το οποίο με τη βοήθεια μηχανικών μπεκ ψεκάζει συνεχώς καύσιμο (ανοικτό σύστημα ρύθμισης χωρίς λήπτη λάμδα). Το όνομα του συστήματος K-Jetronic προέρχεται από τα αρχικά της Γερμανικής λέξης Kontinuiertlich = συνέχεια. Το K-Jetronic είναι το μοναδικό σύστημα που έχει συσσωρευτή πίεσης.



Σχήμα 6-1 : Σύστημα K-Jetronic

Η λειτουργία του K-Jetronic χωρίζεται στα ακόλουθα λειτουργικά τμήματα (σχήμα 6-2):

α. Εισαγωγή αέρα.

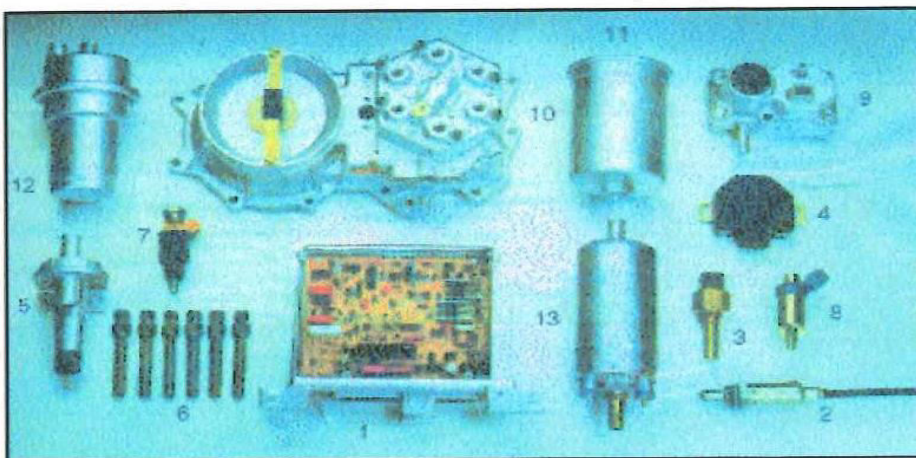
Η ποσότητα του εισαγόμενου στον κινητήρα αέρα ελέγχεται από μια πεταλούδα και μετρείται από ένα μετρητή ροής αέρα με ένα κλαπέτο.

### β. Παροχή καυσίμου.

Το καύσιμο πρέζεται από μια ηλεκτρική αντλία, σε ένα διανομέα καυσίμου, μέσω ενός διατηρητή πίεσης και ενός φίλτρου. Ο διανομέας καυσίμου στέλνει το καύσιμο στα μπεκ.

### γ. Έλεγχος έγχυσης καυσίμου.

Η ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου εξαρτάται από την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα. Η ποσότητα του εισερχόμενου αέρα εξαρτάται από τη θέση της πεταλούδας και μετρείται από ένα μετρητή ροής αέρα που ελέγχει τη λειτουργία του διανομέα καυσίμου. Τα μπεκ εγχύουν συνεχώς καύσιμο ανεξάρτητα από τη θέση (ανοικτή ή κλειστή) των βαλβίδων εισαγωγής. Όταν οι βαλβίδες εισαγωγής είναι κλειστές, το καύσιμο αποθηκεύεται στους σωλήνες εισαγωγής.



1. εγκέφαλος
2. αισθητήρας λ
3. θερμικός χρονοδιακόπτης
4. αισθητήρας πεταλούδας
5. βαλβίδα βοηθητικού αέρα
6. μηχανικά μπεκ
7. μπεκ ψυχρής εκκίνησης
8. χρονική βαλβίδα
9. ρυθμιστής πίεσης
10. παροχόμετρο
11. φίλτρο
12. συλλέκτης βενζίνης
13. αντλία

Σχήμα 6-2 : Εξαρτήματα K-jetronic

#### 6.1.1. Εισαγωγή αέρα

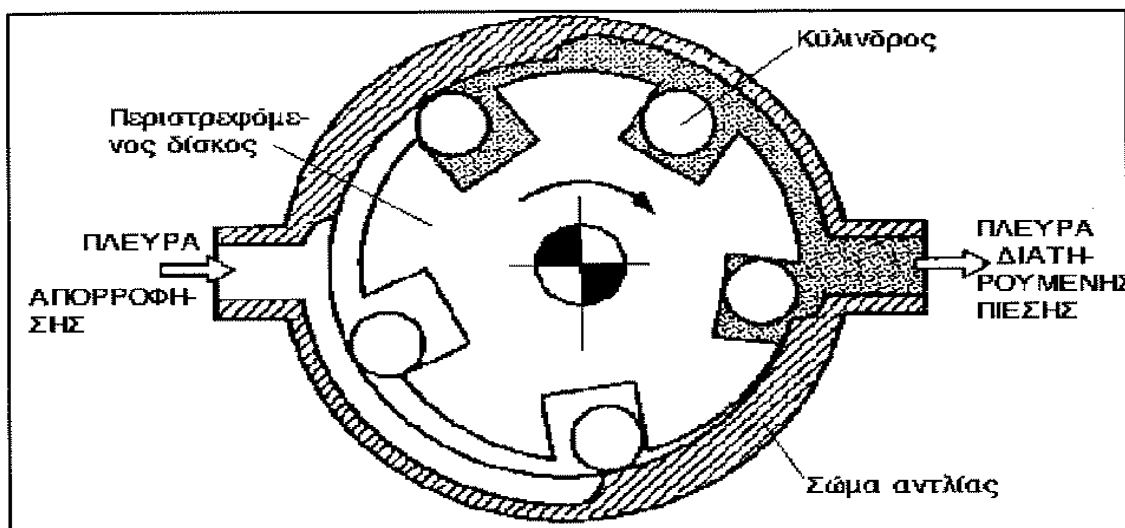
Το τμήμα εισαγωγής αέρα αποτελούν:

- Το φίλτρο αέρα
- Η πεταλούδα αέρα
- Οι σωλήνες εισαγωγής (πολλαπλή εισαγωγής) με τις οποίες ο αέρας οδηγείται στους κυλίνδρους.

### 6.1.2. Παροχή καυσίμου

#### Λειτουργία

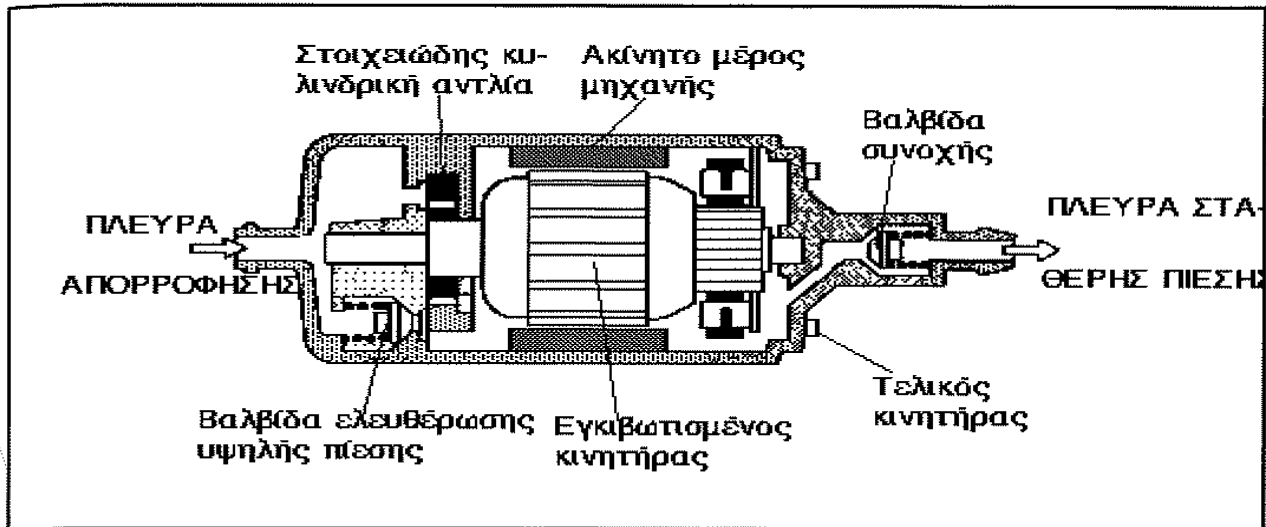
Το καύσιμο αναρροφάται από τη δεξαμενή με την ηλεκτρική αντλία (σχήμα 6-3) και στέλνεται στον διατηρητή πίεσης και στο φίλτρο. Από το φίλτρο, το καύσιμο πηγαίνει στην μονάδα ελέγχου του μίγματος. Εκεί υπάρχει ο ρυθμιστής πίεσης που διατηρεί σταθερή την πίεση για τη λειτουργία των μπεκ. Οι εγχυτήρες ψεκάζουν στους σωλήνες εισαγωγής συνεχώς καύσιμο. Όταν οι βαλβίδες εισαγωγής ανοίγουν, το μίγμα εισέρχεται στο θάλαμο καύσης.



Σχήμα 6-3 : Λειτουργία αντλίας k-jetronic

#### Ηλεκτρική αντλία

Αποτελείται από ένα κέλυφος που εσωτερικά περιέχει ένα ηλεκτροκινητήρα και ένα περιστρεφόμενο δίσκο με περιφερειακές εγχοπές. Σε κάθε εγχοπή υπάρχει ένας κύλινδρος. Όταν ο δίσκος περιστρέφεται, οι κύλινδροι αυτοί λόγω της φυγόκεντρης δύναμης, έρχονται σε επαφή με το εσωτερικό του κελύφους, δημιουργώντας φωλιές που κινούν και συμπιέζουν το καύσιμο προς την έξοδο της αντλίας. Το καύσιμο ρέει συνεχώς γύρω από τον ηλεκτροκινητήρα (σχήμα 6-4). Κίνδυνος ανάφλεξης δεν υπάρχει, επειδή απουσιάζει ο αέρας που θα δημιουργούσε συνθήκες ανάφλεξης ή έκρηξης.



Σχήμα 6-4 : Ηλεκτρική αντλία καυσίμων k-jetronic

### Διατηρητής πίεσης

Έχει προορισμό να διατηρεί την πίεση του καυσίμου σταθερή για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα μετά το σβήσιμο του κινητήρα, εξασφαλίζοντας έτσι την επαναλειτουργία του.

Αποτελείται από το κέλυφος που εσωτερικά χωρίζεται σε δύο θαλάμους από ένα διάφραγμα. Στην μια πλευρά του διαφράγματος υπάρχει ένα ελατήριο, ενώ στην άλλη το καύσιμο. Όταν λειτουργεί η αντλία καυσίμου το καύσιμο πιέζει το διάφραγμα και το ελατήριο υποχωρεί, μέχρι το διάφραγμα να σταματήσει στην υποδοχή που έχει διαμορφωθεί στο κέλυφος. Στη θέση αυτή παραμένει το διάφραγμα όσο λειτουργεί ο κινητήρας και υπάρχει πίεση από την αντλία καυσίμου. Όταν ο κινητήρας σταματήσει το ελατήριο αποσυμπιέζεται. Έτσι το διάφραγμα πιέζει το καύσιμο, διατηρώντας για λίγο την πίεση σταθερή.

### Φίλτρο καυσίμου

Συγκρατεί τα ξένα σώματα και τις ακαθαρσίες που περιέχονται στο καύσιμο. Τοποθετείται μετά τον διατηρητή πίεσης.

### Κύριος ρυθμιστής πίεσης

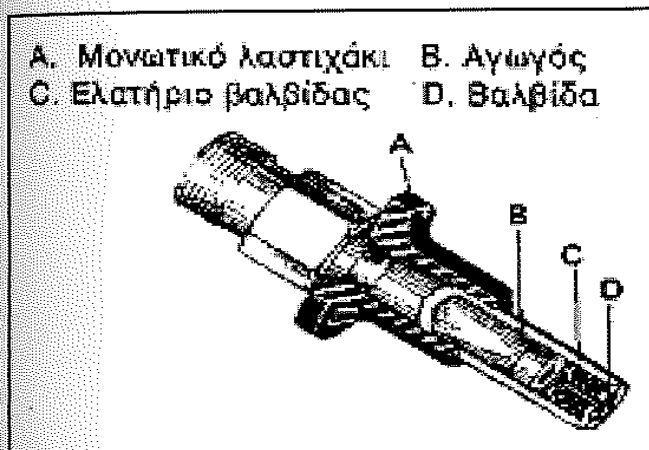
Διατηρεί την πίεση του καυσίμου στις σωληνώσεις τροφοδοσίας σταθερή, περίπου 5 atm, επιστρέφοντας στη δεξαμενή καυσίμου όσο από το καύσιμο περισσεύει. Σημειώνεται ότι η



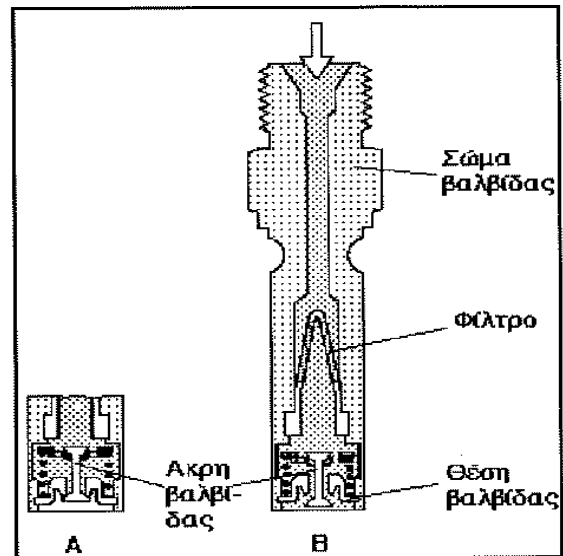
αντλία καυσίμου παρέχει περισσότερο καύσιμο από αυτό που απαιτεί ο κινητήρας. Ο κύριος ρυθμιστής πίεσης τοποθετείται στο κέλυφος του διανομέα. Διαθέτει ένα έμβολο και ένα ελατήριο. Όταν η πίεση του καυσίμου υπερνικήσει τη δύναμη του ελατηρίου το έμβολο υποχωρεί και ανοίγει την έξοδο προς τον αγωγό επιστροφής. Έτσι μειώνεται η πίεση του καυσίμου.

### Μπεκ (εγχυτήρες)

Στα μπεκ φτάνει το καύσιμο με σταθερή πίεση από το διανομέα. Ανοίγουν σε μια ορισμένη πίεση, περίπου 3,3 atm και ψεκάζουν συνεχώς το καύσιμο στους σωλήνες εισαγωγής. Το καύσιμο διασκορπίζεται ομοιόμορφα εξαιτίας της ταλάντωσης της βελόνας της βελονοειδούς βαλβίδας του μπεκ (σχήμα 6-6). Όταν ο κινητήρας σταματήσει η βελονοειδής βαλβίδα κλείνει στεγανά (σχήμα 6-5).



Σχήμα 6-5 : Μηχανικό μπεκ ψεκασμού



Σχήμα 6-6 : Τομή μηχανικού μπεκ

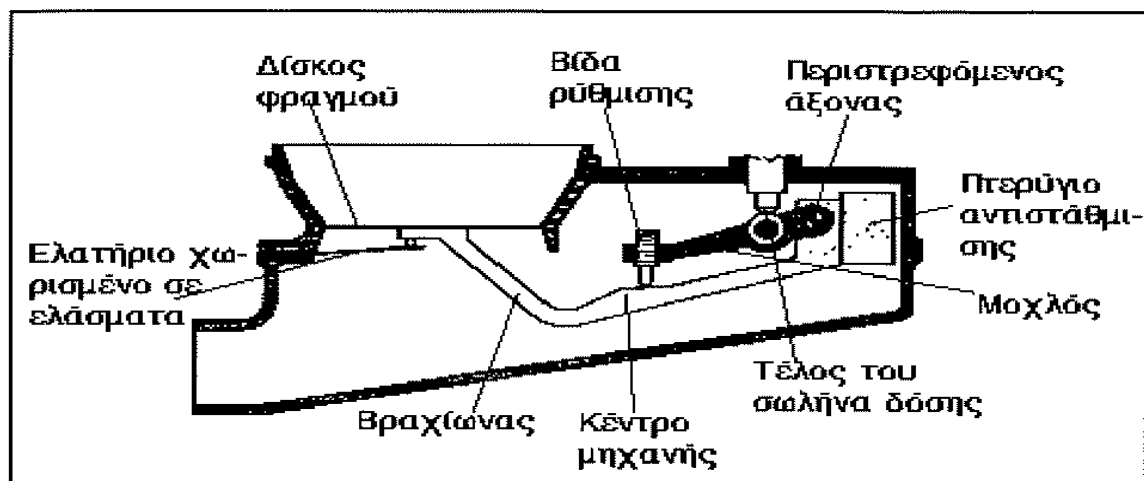
### 6.1.3. Έλεγχος έγχυσης καυσίμου

#### Λειτουργία

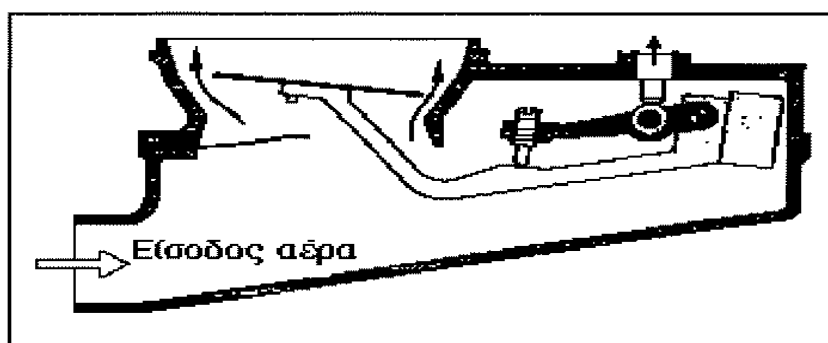
Ο έλεγχος έγχυσης καυσίμου καθορίζει τη σωστή ποσότητα καυσίμου που θα φτάσει στους κυλίνδρους, η οποία εξαρτάται από την ποσότητα αέρα που αναρροφά ο κινητήρας. Ο έλεγχος του εγχυόμενου καυσίμου γίνεται από τον μετρητή ροής αέρα και από τον διανομέα καυσίμου.

### Μετρητής ροής αέρα

Τοποθετείται στη σωλήνα εισαγωγής αέρα. Αποτελείται από ένα κλαπέτο και ένα μηχανισμό με μοχλούς (σχήμα 6-7, 6-8). Όταν ο αέρας περνά, το κλαπέτο κινείται μετακινώντας αντίστοιχα τους μοχλούς και μέσω αυτών, το έμβολο του διανομέα καυσίμου.



Σχήμα 6-7 : Μετρητής ροής αέρα



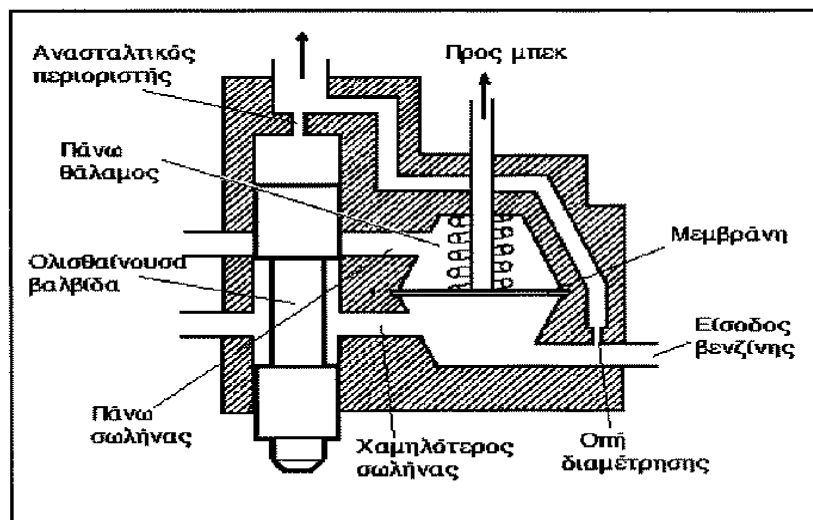
Σχήμα 6-8 : Ο μετρητής ροής σε λειτουργία

### Διανομέας καυσίμου

Καθορίζει την ακριβή ποσότητα καυσίμου που απαιτεί κάθε κύλινδρος, ανάλογα με την αναρροφούμενη ποσότητα αέρα. Διαθέτει ένα έμβολο που κινείται από τον μετρητή ροής αέρα. Ανάλογα με την κίνηση του εμβόλου αποκαλύπτονται οι σχισμές που υπάρχουν στο πλευρό του διανομέα. Έτσι επιτυγχάνεται μερική αποκάλυψη για μειωμένη παροχή και μεγαλύτερη αποκάλυψη για αυξημένη παροχή.

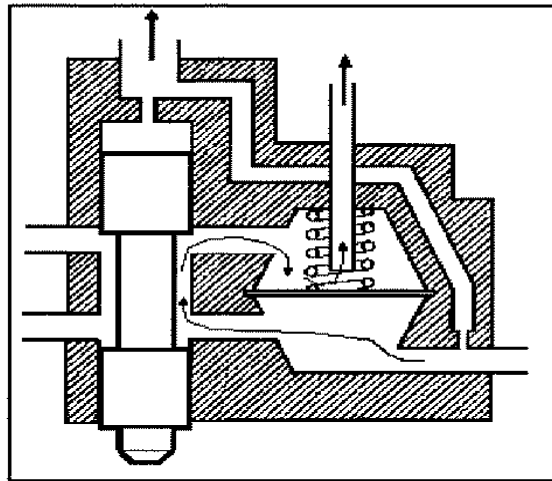
## Βαλβίδες διαφορικής πίεσης

Είναι τοποθετημένες στον διανομέα καυσίμου και έχουν σκοπό να κρατούν την πίεση του καυσίμου που στέλνεται στα μπεκ σταθερή, ανεξάρτητα από την ποσότητα του καυσίμου που διοχετεύεται από τις σχισμές (σχήμα 6-9). Για κάθε σχισμή αντιστοιχεί μια βαλβίδα διαφορικής πίεσης, που διαθέτει ένα διάφραγμα το οποίο τη χωρίζει σε δύο θαλάμους, τον επάνω και τον κάτω. Στον επάνω θάλαμο εισέρχεται το καύσιμο προερχόμενο από την σχισμή. Εκεί πιέζει το διάφραγμα το οποίο υποχωρεί και επιτρέπει την παροχή προς τα μπεκ όταν η πίεση φτάσει σε μία ορισμένη τιμή.



Σχήμα 6-9 Η λειτουργία του διανομέα στον ρυθμιστή μίγματος

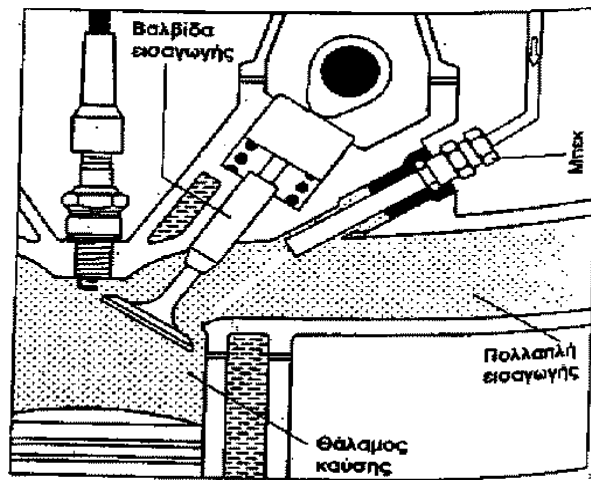
Στο σχήμα 6-10 μπορούμε να δούμε ότι το διάφραγμα έχει σπρώξει τη βαλβίδα ανοίγοντας τη δίοδο για τη βενζίνη, ώστε να μπορεί να ρέει δια μέσου του πάνω σωλήνα μέσα στον πάνω κύλινδρο. Χάρη στην πίεσή του μπορεί και μπαίνει στα μπεκ και όταν η πίεσή του ισοδυναμεί μ' αυτή των ελατηρίων ή είναι μεγαλύτερη από την πίεση στον χαμηλότερο θάλαμο, η μεμβράνη πέφτει προς τα πίσω και αφήνει ελεύθερη την οδό για τα καύσιμα στον πάνω θάλαμο. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι τα καύσιμα περνούν στα μπεκ σε όλες τις φάσεις, όσο η πίεση είναι μεγαλύτερη από αυτή στα μπεκ.



Σχήμα 6-10 : Η βαλβίδα διαφορικής πίεσης, δουλεύοντας με πλήρες φορτίο

### Δημιουργία μίγματος

Το μίγμα δημιουργείται στους σωλήνες εισαγωγής (πολλαπλή εισαγωγής), πίσω από τις βαλβίδες εισαγωγής. Τα μπεκ ψεκάζουν συνεχώς το καύσιμο, που όταν οι βαλβίδες εισαγωγής είναι κλειστές παραμένει στους σωλήνες εισαγωγής (σχήμα 6-11). Όταν οι βαλβίδες εισαγωγής ανοίξουν τότε στους κυλίνδρους αναρροφάται αέρας που παρασύρει και το καύσιμο δημιουργώντας το μίγμα .



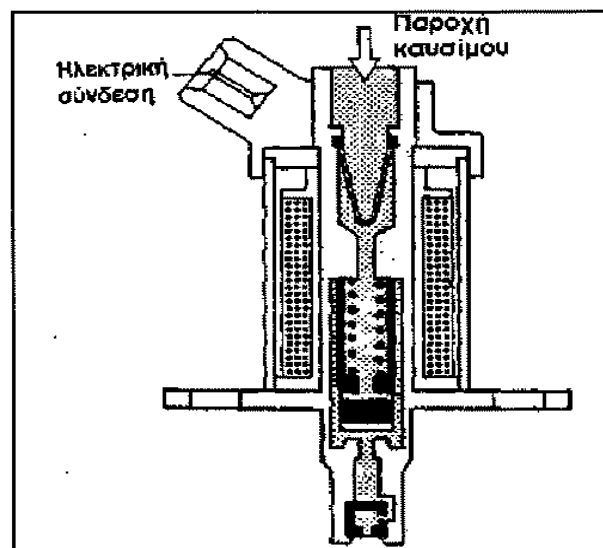
Σχήμα 6-11 : Δημιουργία μίγματος

## Προσαρμογή μίγματος στις συνθήκες λειτουργίας

Στις διάφορες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα απαιτείται σχετική προσαρμογή της αναλογίας του καυσίμου μίγματος που επιτυγχάνεται ως εξής:

### Ψυχρή εκκίνηση

Κατά την ψυχρή εκκίνηση υπάρχει ένα μπεκ ψυχρής εκκίνησης (Σχήμα 6-12) που ψεκάζει πρόσθετη ποσότητα καυσίμου στους σωλήνες εισαγωγής. Το χρονικό διάστημα παροχής προσθέτου καυσίμου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του κινητήρα και ρυθμίζεται από ένα θερμοδιακόπτη που τοποθετείται στο κύκλωμα ψύξης.



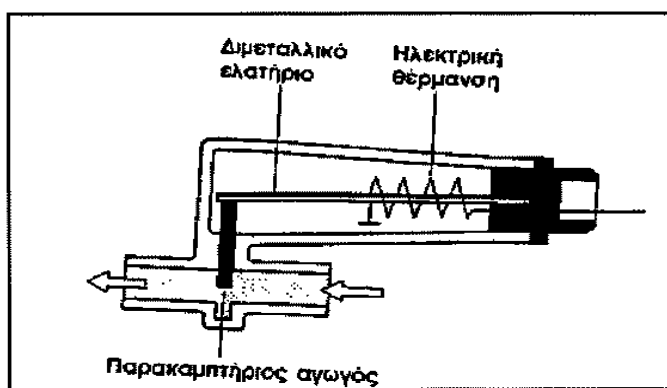
Σχήμα 6-12 : Μπεκ ψυχρής εκκίνησης K-Jetronic

### Περίοδος θέρμανσης του κινητήρα

Μετά την ψυχρή εκκίνηση ο κινητήρας αρχίζει να θερμαίνεται. Μέχρι να φτάσει στη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας απαιτείται η παροχή πλουσιότερου μίγματος. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα ρυθμιστή θέρμανσης που η λειτουργία του εξαρτάται από τη θερμοκρασία του κινητήρα. Ο ρυθμιστής αυτός μειώνει την πίεση ελέγχου στο έμβολο του διανομέα. Έτσι οι σχισμές ανοίγουν περισσότερο με αποτέλεσμα την αυξημένη παροχή

καυσίμου. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του κινητήρα, τόσο ο ρυθμιστής θέρμανσης μειώνει σταδιακά την αυξημένη παροχή, αυξάνοντας την πίεση ελέγχου.

Κατά την περίοδο θέρμανσης του κινητήρα απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα αέρα ώστε να δημιουργηθεί αυξημένη ποσότητα μίγματος. Αυτό επιτυγχάνεται με το μηχανισμό συμπληρωματικού αέρα (σχήμα 6-13). Ο συμπληρωματικός αέρας περνά από ένα παρακαμπτήριο αγωγό που βρίσκεται στο σημείο της πεταλούδας του αέρα. Η συμπληρωματική παροχή αέρα γίνεται αισθητή από το μετρητή ροής του αέρα, που με τη σειρά του ενεργοποιεί το έμβολο του διανομέα καυσίμου, ώστε να στείλει μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου για να δημιουργηθεί η επιθυμητή αυξημένη ποσότητα μίγματος.

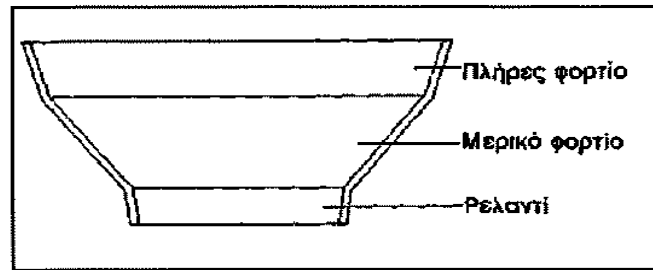


Σχήμα 6-13 : Μηχανισμός συμπληρωματικού αέρα

### Μεταβολή φορτίου

Η προσαρμογή του μίγματος κατά τη μεταβολή του φορτίου (ρελαντί-μερικό φορτίο-πλήρες φορτίο) επιτυγχάνεται με το άνοιγμα της πεταλούδας του αέρα που έχει αποτέλεσμα το άνοιγμα του κλαπέτου του μετρητή ροής του αέρα.

Το κλαπέτο ανοίγει σε ένα κανάλι που έχει σχήμα κώνου (Σχήμα 6-14). Έτσι ανάλογα με την θέση του κλαπέτου, λόγω του κωνικού σχήματος του καναλιού, παρέχεται η απαιτούμενη ποσότητα του αέρα, ενώ παράλληλα ο μηχανισμός μοχλών του κλαπέτου επιδρά στον διανομέα που στέλνει ανάλογο καύσιμο.



Σχήμα 6-14 : Κωνικό κανάλι εισαγωγής αέρα K-Jetroni

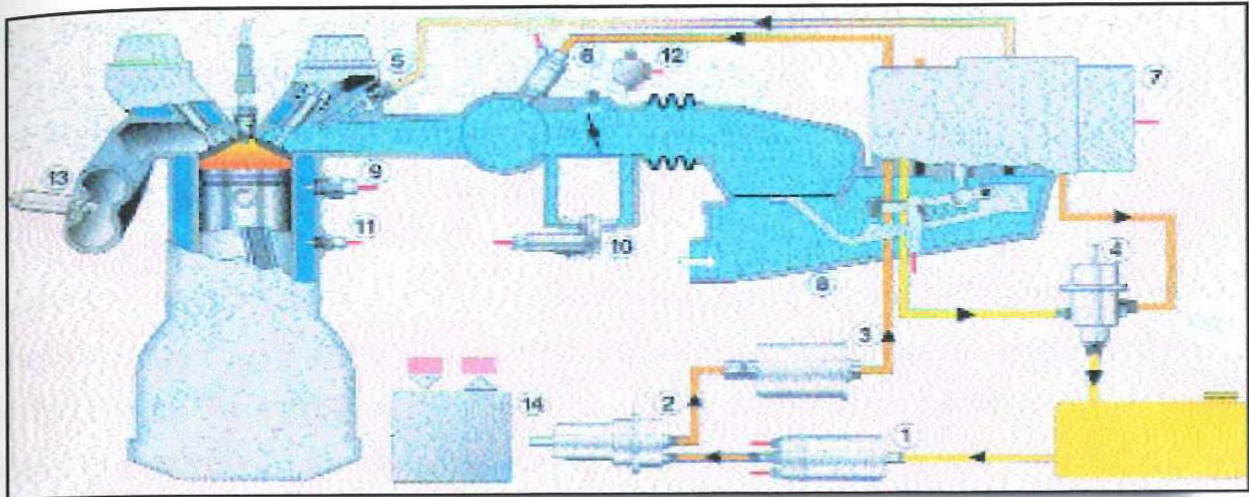
### Επιτάχυνση

Κατά την απότομη πίεση του πεντάλ του γκαζιού ανοίγει απότομα η πεταλούδα του αέρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το απότομο άνοιγμα του κλαπέτου του μετρητή ροής αέρα σε ποσοστό μεγαλύτερο από το απαιτούμενο. Η κίνηση του κλαπέτου μεταφέρεται στο διανομέα που στέλνει αυξημένη ποσότητα καυσίμου για να καλύψει τις ανάγκες της επιτάχυνσης.

## 6.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ KE-JETRONIC

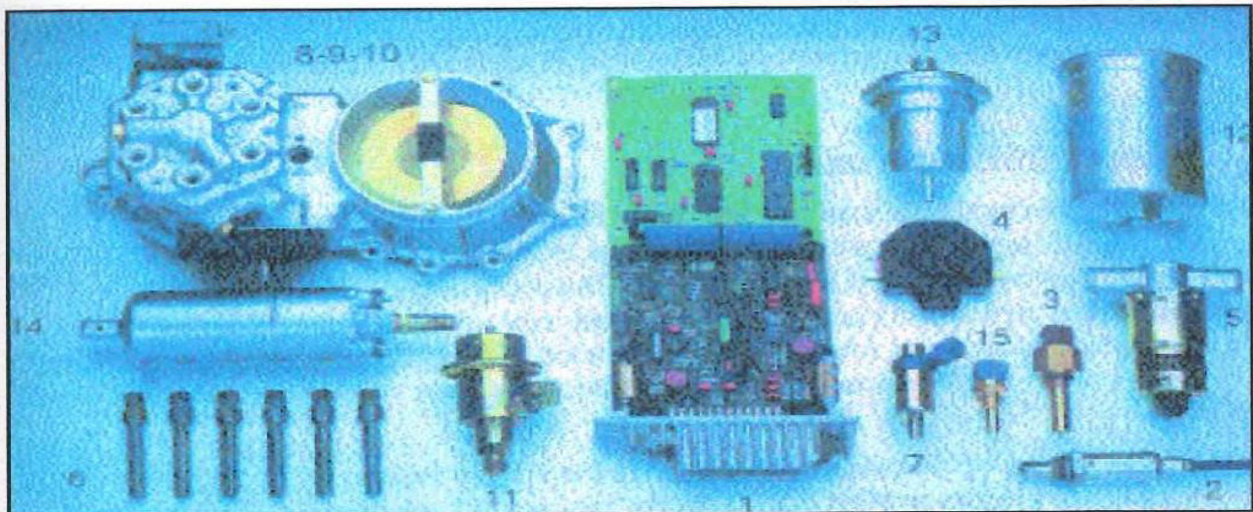
Παραλλαγές του βασικού συστήματος είναι τα KE-Jetronic και KE3-Jetronic. Τα συστήματα αυτά αποτελούν εξέλιξη των μηχανικών συστημάτων ψεκασμού. Ορισμένες από τις επιμέρους λειτουργίες τους ελέγχονται μηχανικά, ενώ ορισμένες άλλες ελέγχονται ηλεκτρονικά, από την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου.

Ειδικότερα, το KE-Jetronic κυκλοφόρησε σε δύο εκδόσεις, σαν κλειστό και σαν ανοικτό σύστημα ρύθμισης, δηλαδή με και χωρίς λήπτη λάμδα αντίστοιχα. Λειτουργεί όπως και το K-Jetronic και συμπληρώνεται με ηλεκτρονική συσκευή ελέγχου, ηλεκτροϋδραυλικό επενεργητή πίεσης, διακόπτη πεταλούδας γκαζιού, ποτενσιόμετρο μέσα στο μετρητή του αέρα και τέλος αισθητήρες για την εξακρίβωση της θερμοκρασίας του κινητήρα, την πίεση του αέρα και το σχηματισμό του μίγματος (σχήμα 6-15, 6-16). Έχει γρήγορη προσαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίες του κινητήρα.



- |                          |                                      |
|--------------------------|--------------------------------------|
| 1. αντλία καυσίμου       | 8. αισθητήρας ροής αέρα              |
| 2. συλλέκτης καυσίμου    | 9. θερμικός χρονοδιακόπτης           |
| 3. φίλτρο                | 10. βαλβίδα βοηθητικού αέρα          |
| 4. ρυθμιστής πίεσης      | 11. αισθητήρας θερμοκρασίας ψυκτικού |
| 5. μπεκ                  | 12. διακόπτης πεταλούδας             |
| 6. μπεκ ψυχρής εκκίνησης | 13. αισθητήρας λάμδα                 |
| 7. διανομέας καυσίμου    | 14. εγκέφαλος                        |

Σχήμα 6-15 : Σύστημα KE-Jetronic



- |                            |                                |                               |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. εγκέφαλος               | 6. μηχανικά μπεκ               | 11. ρυθμιστής πίεσης          |
| 2. αισθητήρας λ            | 7. μπεκ ψυχρής εκκίνησης       | 12. φίλτρο                    |
| 3. θερμικός χρονοδιακόπτης | 8. διανομέας καυσίμου          | 13. συλλέκτης βενζίνης        |
| 4. αισθητήρας πεταλούδας   | 9. ηλεκτροϋδραυλικός ρυθμιστής | 14. αντλία                    |
| 5. βαλβίδα βοηθητικού αέρα | 10. μετρητής παροχής           | 15. αισθητήρας ψυκτικού υγρού |

Σχήμα 6-16 : Εξαρτήματα KE-Jetronic



Από κατασκευαστικής άποψης το σύστημα ΚΕ αποτελείται από τρία υποσυστήματα:

- α) τροφοδοσίας καυσίμου
- β) μέτρησης αναρροφούμενου αέρα και
- γ) ηλεκτρονικό έλεγχο του μίγματος.

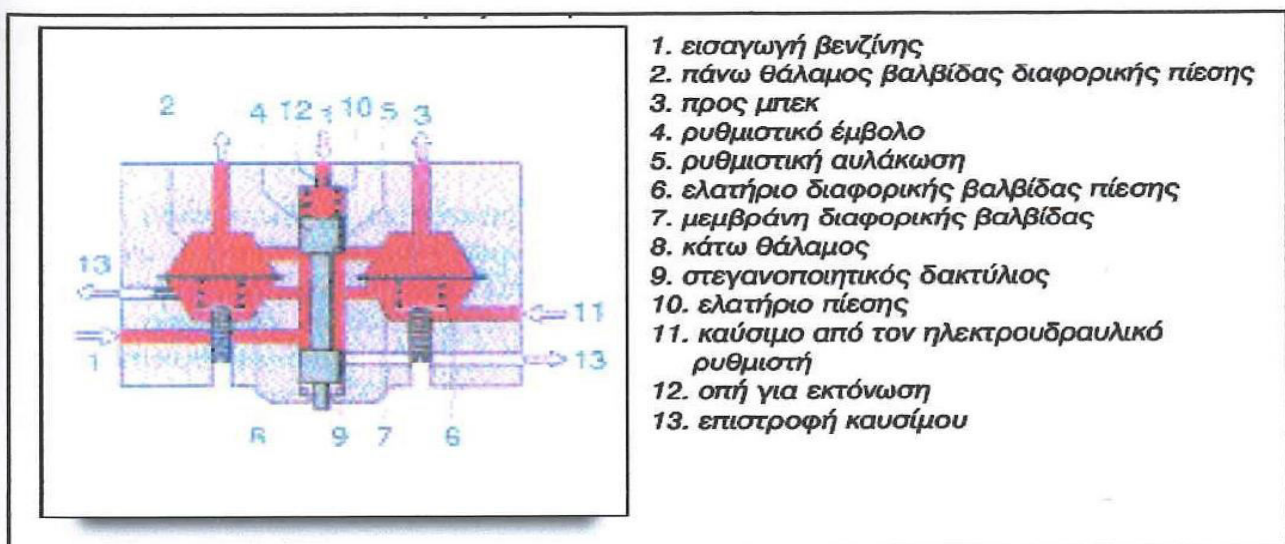
Η αντλία τροφοδοτεί το κύκλωμα με καύσιμο που διέρχεται από το συλλέκτη, το φίλτρο, το ρυθμιστή πίεσης και τα μπεκ. Ο ρυθμιστής πίεσης του ΚΕ διαφέρει από του Κ, γιατί ο ένας από τους θαλάμους του συνδέεται με την πολλαπλή εισαγωγής έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη το φορτίο του κινητήρα. Ο ρυθμιστής εξασφαλίζει σταθερή πίεση από το συλλέκτη μέχρι το διανομέα.

Ο διανομέας καυσίμου (σχήμα 6-17) είναι ίδιος με αυτόν του συστήματος Κ και έχει ενσωματωμένο ηλεκτρομαγνητικό -υδραυλικό ρυθμιστή που μεταβάλλει την πίεση στους κάτω θαλάμους των διαφορικών βαλβίδων πίεσης, ανάλογα με το ρεύμα που δέχεται από τον εγκέφαλο.

Η ρυθμιστική πίεση (σερβοπίεση) στο πάνω μέρος του εμβόλου προέρχεται από την πίεση του συστήματος και ενισχύεται από τη δράση του ελατηρίου που υπάρχει στο διανομέα καυσίμου. Στο κάτω μέρος της έδρας του εμβόλου υπάρχει στεγανοποιητικός δακτύλιος για τυχόν διαρροές. Ο δακτύλιος ρυθμίζεται από μία βίδα.

Οι βαλβίδες διαφοράς πίεσης έχουν επίπεδες έδρες και χωρίζονται οι πάνω θάλαμοι από τους κάτω με μία μεταλλική μεμβράνη.

Οι κάτω θάλαμοι επικοινωνούν μεταξύ τους και έχουν διαφορά πίεσης 0,2 bar από τους επάνω.



1. εισαγωγή βενζίνης
2. πάνω θάλαμος βαλβίδας διαφορικής πίεσης
3. προς μπεκ
4. ρυθμιστικό έμβολο
5. ρυθμιστική αυλάκωση
6. ελατήριο διαφορικής βαλβίδας πίεσης
7. μεμβράνη διαφορικής βαλβίδας
8. κάτω θάλαμος
9. στεγανοποιητικός δακτύλιος
10. ελατήριο πίεσης
11. καύσιμο από τον ηλεκτρουδραυλικό ρυθμιστή
12. οπή για εκτόνωση
13. επιστροφή καυσίμου

Σχήμα 6-17 : Διανομέας καυσίμου

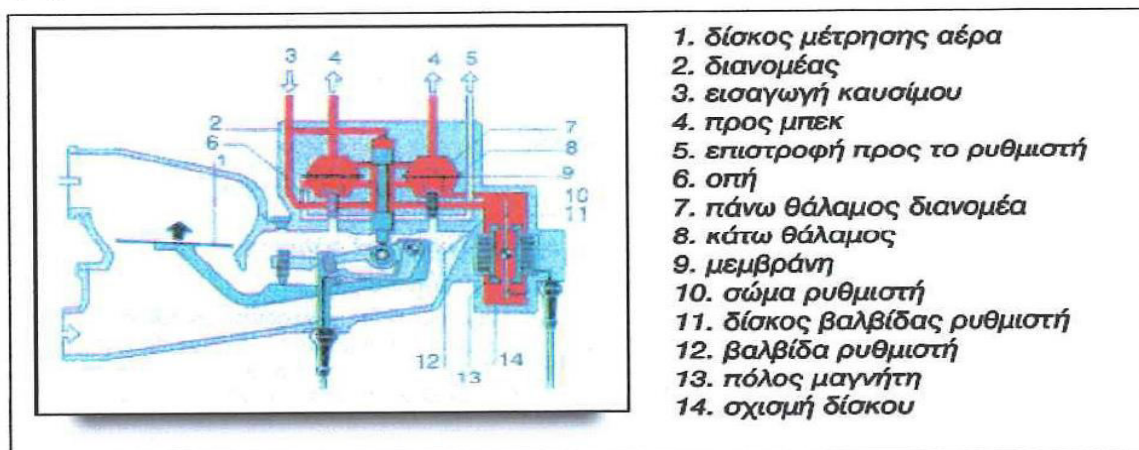
Στο πλαϊνό του διανομέα υπάρχει ο ηλεκτρομαγνητικός - υδραυλικός ρυθμιστής (σχήμα 6-18). Αυτός ο ρυθμιστής μεταβάλλει την πτώση πίεσης στις θυρίδες που μετρούν την ποσότητα του καυσίμου που θα ψεкаσθεί. Παίρνει σήμα από τον εγκέφαλο και σε συνδυασμό με τις υδραυλικές δυνάμεις, που αναπτύσσονται από το καύσιμο μέσα στο διανομέα, ρυθμίζεται το άνοιγμα μιας βαλβίδας μέσω της οποίας μεταφέρεται πίεση στους κάτω θαλάμους.

Η πίεση του καυσίμου, η δύναμη του ελατηρίου και το μαγνητικό πεδίο δημιουργούν μία ισορροπία στη βαλβίδα. Ανάλογα με το ρεύμα που τροφοδοτεί το πηνίο δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο που όσο πιο ισχυρό είναι τόσο περιορίζει το άνοιγμα της βαλβίδας που έχει ο ρυθμιστής. Με μικρό άνοιγμα της βαλβίδας έχουμε μικρή πίεση στο κάτω θάλαμο και λόγω της σταθερής διαφοράς πύεσεως έχουμε μικρότερη πίεση στο κάτω θάλαμο που συνεπάγεται την πτώση της πίεσης στις θυρίδες. Ως αποτέλεσμα, τροφοδοτείται περισσότερη ποσότητα καυσίμου στους πάνω θαλάμους του διανομέα και επομένως γίνεται αύξηση της ποσότητας του ψεкаσμού.

Η φάση της ψυχρής εκκίνησης είναι όμοια με του συστήματος K Jetronic. Ο εγκέφαλος οδηγεί τον ηλεκτρο-μαγνητικό-υδραυλικό ρυθμιστή να πραγματοποιήσει τον επιπλέον εμπλουτισμό του μίγματος μέχρι το ζέσταμα του κινητήρα. Όσο ζεσταίνεται ο κινητήρας, τόσο μειώνεται σταδιακά ο εμπλουτισμός.

Το ρεύμα που τροφοδοτεί το ρυθμιστή είναι ανάλογο της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού του κινητήρα.

Κατά την προθέρμανση του κινητήρα υπάρχει ηλεκτρομαγνητική περιστροφική βαλβίδα που τροφοδοτεί με πρόσθετο αέρα τον κινητήρα. Ο ρυθμιστής του συμπληρωματικού αέρα αναλαμβάνει τη σταθεροποίηση των στροφών στο ρελαντί και όταν ο κινητήρας λειτουργεί κάτω από φορτίο.



1. δίσκος μέτρησης αέρα
2. διανομέας
3. εισαγωγή καυσίμου
4. προς μπεκ
5. επιστροφή προς το ρυθμιστή
6. οπή
7. πάνω θάλαμος διανομέα
8. κάτω θάλαμος
9. μεμβράνη
10. σώμα ρυθμιστή
11. δίσκος βαλβίδας ρυθμιστή
12. βαλβίδα ρυθμιστή
13. πόλος μαγνήτη
14. σχισμή δίσκου

Σχήμα 6-18 : Διανομέας με ηλεκτροϋδραυλικό ρυθμιστή

Όταν ανοίξει η πεταλούδα του γκαζιού οδηγείται αέρας μέσω του μετρητή του αέρα στους κυλίνδρους. Το ποτενσιόμετρο του μετρητή δίνει πληροφορία στον εγκέφαλο για το φορτίο, ο διακόπτης της πεταλούδας πληροφορεί για το μερικό φορτίο και ο αισθητήρας λ για το εάν το μίγμα είναι πλούσιο ή φτωχό.

Όταν ο διακόπτης δώσει σήμα για το πλήρες φορτίο διοχετεύεται στον ηλεκτρομαγνητικό - υδραυλικό ρυθμιστή το ανάλογο ρεύμα.

Ο εγκέφαλος διακόπτει τη λειτουργία των μπεκ στην περίπτωση που οι στροφές ανά λεπτό ξεπεράσουν το όριο που προβλέπει ο κατασκευαστής.

Σε μερικά συστήματα ΚΕ υπάρχει αισθητήρας της βαρομετρικής πίεσης του αέρα του περιβάλλοντος για την τελική ρύθμιση της ποσότητας του ψεκασμού.

### 6.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ L -JETRONIC

Είναι ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα διακοπτόμενου ψεκασμού πολλαπλών σημείων. Η ποσότητα του εισερχόμενου αέρα μετριέται από ένα μετρητή ροής αέρα και, αφού η λειτουργία του κινητήρα παρακολουθείται από διάφορους αισθητήρες, υπολογίζεται ο χρόνος ανοίγματος των ηλεκτρομαγνητικών μπεκ. Οι στροφές διαμορφώνονται ανάλογα με το φορτίο που ελέγχεται από τη γωνία της πεταλούδας γκαζιού.

Για τη λειτουργία του συστήματος μετριούνται οι στροφές του κινητήρα και υπολογίζεται η ποσότητα του εισερχόμενου αέρα. Επίσης συλλέγονται και χρησιμοποιούνται πληροφορίες όπως:

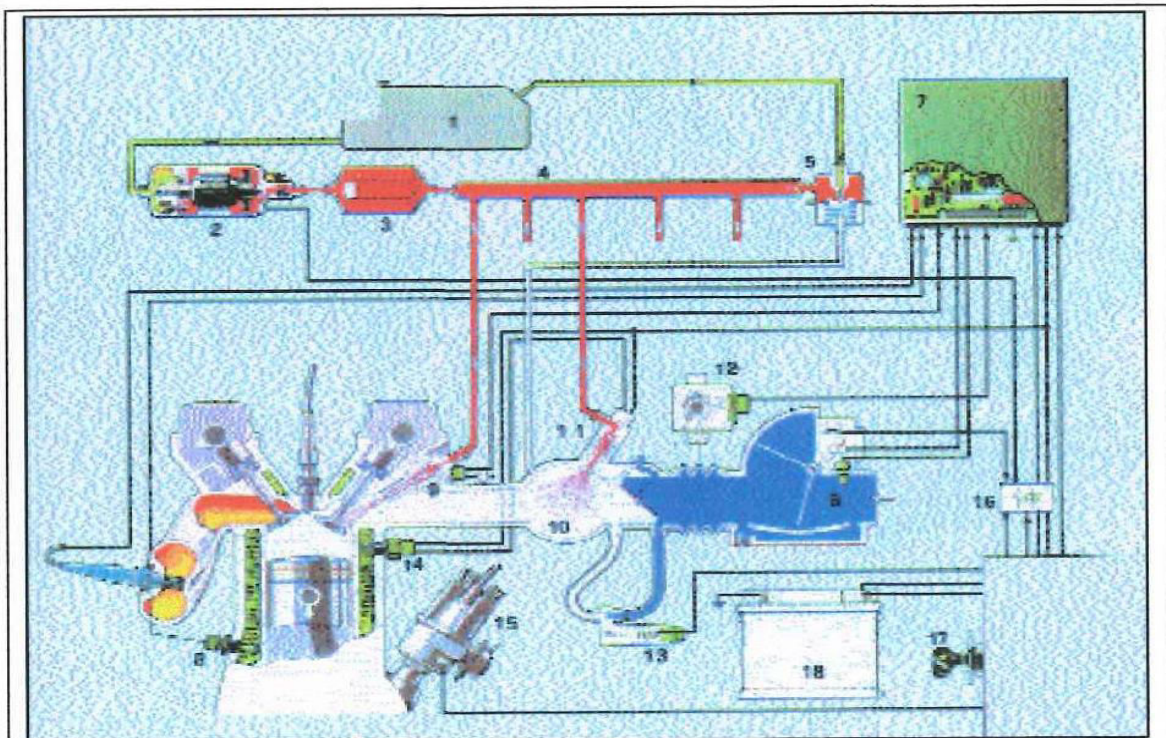
- η θερμοκρασία κινητήρα
- η θερμοκρασία αναρροφούμενου αέρα
- η περιοχή φορτίου
- η μεταβατική λειτουργία κατά την επιτάχυνση
- ο περιορισμός μέγιστων στροφών και
- η σύνθεση καυσαερίων μέσω του αισθητήρα λ.

Ο εγκέφαλος συλλέγει αυτές τις πληροφορίες για την κατάσταση λειτουργίας της μηχανής και τις συνθήκες περιβάλλοντος με τη βοήθεια αισθητήρων.

Το σύστημα εισαγωγής και μέτρησης του αέρα αποτελείται από (σχήμα 6-19):

1. το φίλτρο
2. το μετρητή ροής
3. το μηχανισμό πεταλούδας γκαζιού
4. τη βαλβίδα πρόσθετου αέρα και
5. την πολλαπλή εισαγωγής.

Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τις πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα του αέρα, τη θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού, τη θερμοκρασία του αέρα, τη θέση πεταλούδας γκαζιού, τη διαδικασία εκκίνησης, τις στροφές του κινητήρα και τη χρονική στιγμή ψεκασμού. Από αυτά καθορίζεται η διάρκεια ψεκασμού και, κατά συνέπεια, η ποσότητα που ψεκάζεται.

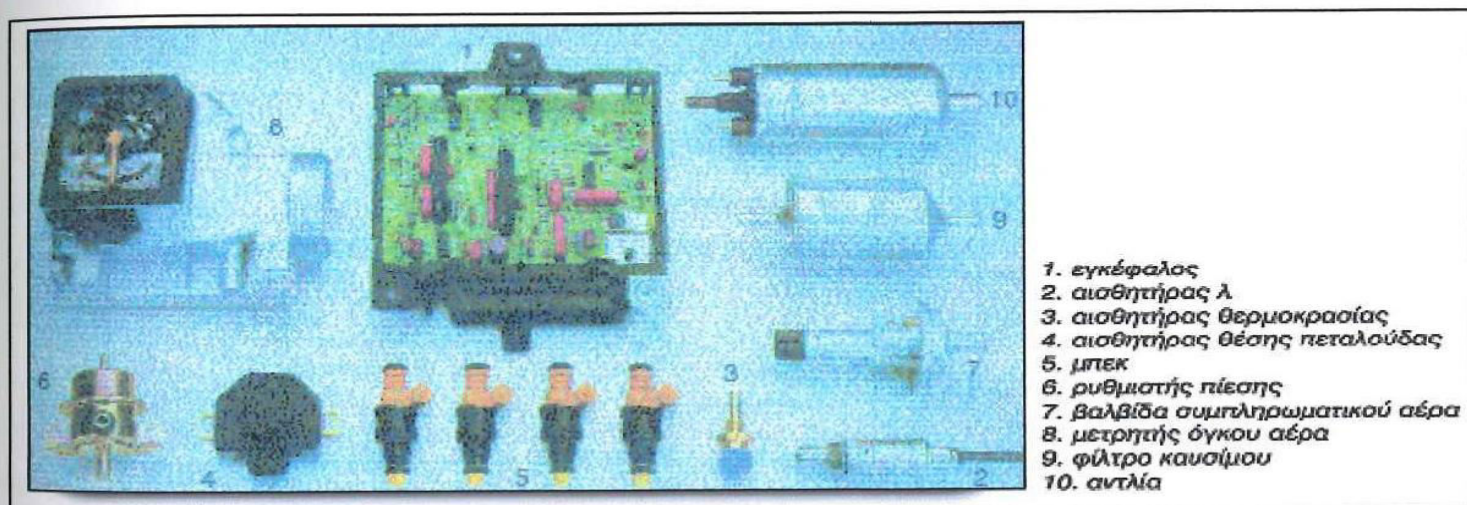


- |                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1. ρεζερβουάρ                     | 10. πολλαπλή εισαγωγής              |
| 2. αντλία καυσίμου                | 11. μπεκ ψυχρής εκκίνησης           |
| 3. φίλτρο                         | 12. αισθητήρας διακόπτη πεταλούδας  |
| 4. σωλήνας διανομής καυσίμου      | 13. βαλβίδα βοηθητικού αέρα         |
| 5. ρυθμιστής πίεσης               | 14. θερμικός χρονοδιακόπτης         |
| 6. μετρητής ροής αέρα με πτερύγιο | 15. διανομέας                       |
| 7. εγκέφαλος                      | 16. ρελέ                            |
| 8. αισθητήρας θερμοκρασίας        | 17. διακόπτης ανάφλεξης - εκκίνησης |
| 9. μπεκ                           | 18. μπαταρία                        |

Σχήμα 6-19 : L-jetronic

Στο σύστημα καυσίμου των πρώτων μοντέλων με L-JETRONIC (σχήμα 6-20) υπάρχει εξωτερική αντλία καυσίμου. Το φίλτρο τοποθετείται ή στο χώρο του κινητήρα ή στο πίσω τμήμα κοντά στην αντλία.

Τα μπεκ είχαν χαμηλή ωμική αντίσταση και μια προαντίσταση για την καλύτερη προστασία τους. Στους τετρακύλινδρους κινητήρες υπάρχουν τέσσερα μπεκ, ένα για κάθε κύλινδρο, για καλύτερη διανομή του καυσίμου με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα μπεκ παίρνουν εντολή από τον εγκέφαλο για τη διάρκεια του ανοίγματος τους, έτσι ώστε η ποσότητα της βενζίνης που ψεκάζεται να είναι καθορισμένη. Ο χρόνος ψεκασμού του μπεκ ψυχρής εκκίνησης καθορίζεται από το θερμικό χρονοδιακόπτη. Η θερμοκρασία ενεργοποίησης και ο χρόνος ψεκασμού αναγράφονται στο σώμα του θερμικού χρονοδιακόπτη π.χ. 35° C/ 8 sec. Ο σχεδιασμός του συστήματος δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες ώστε να αποφεύγονται τα φαινόμενα συμπύκνωσης της βενζίνης στα τοιχώματα της πολλαπλής εισαγωγής. Στο ένα άκρο του διακλαδωτήρα υπάρχει ο ρυθμιστής πίεσης.



Σχήμα 6-20 : Εξαρτήματα L-jetronic

Το L3 Jetronic χρησιμοποιεί μετρητή αέρα καλύτερης τεχνολογίας σε σχέση με τα παλαιότερα μοντέλα. Ο μετρητής δε διαθέτει διακόπτη για τον έλεγχο της αντλίας βενζίνης και ο αισθητήρας θερμοκρασίας δε βρίσκεται πλέον πάνω στο φίς.

Τα μπεκ του συστήματος είναι μεγαλύτερης αντίστασης και ο εγκέφαλος είναι πιο εξελιγμένος απ' ό,τι στο σύστημα L2 που ανήκει στη δεύτερη τεχνολογική γενιά.

## 6.4. ΣΥΣΤΗΜΑ LH -JETRONIC

Λειτουργεί όπως και το προηγούμενο αλλά έχει μεγαλύτερης ακρίβειας μετρητή της μάζας του αέρα. Η μέτρηση του αέρα είναι ανεξάρτητη από την πίεση και από τη θερμοκρασία που επικρατεί στην πολλαπλή εισαγωγής.

Το σώμα της πεταλούδας αποτελείται από την πεταλούδα γκαζιού, το by-pass και τον αισθητήρα θέσης πεταλούδας που ανιχνεύει τη γωνία του ανοίγματος της.

Η βασική διάρκεια του ψεκασμού υπολογίζεται:

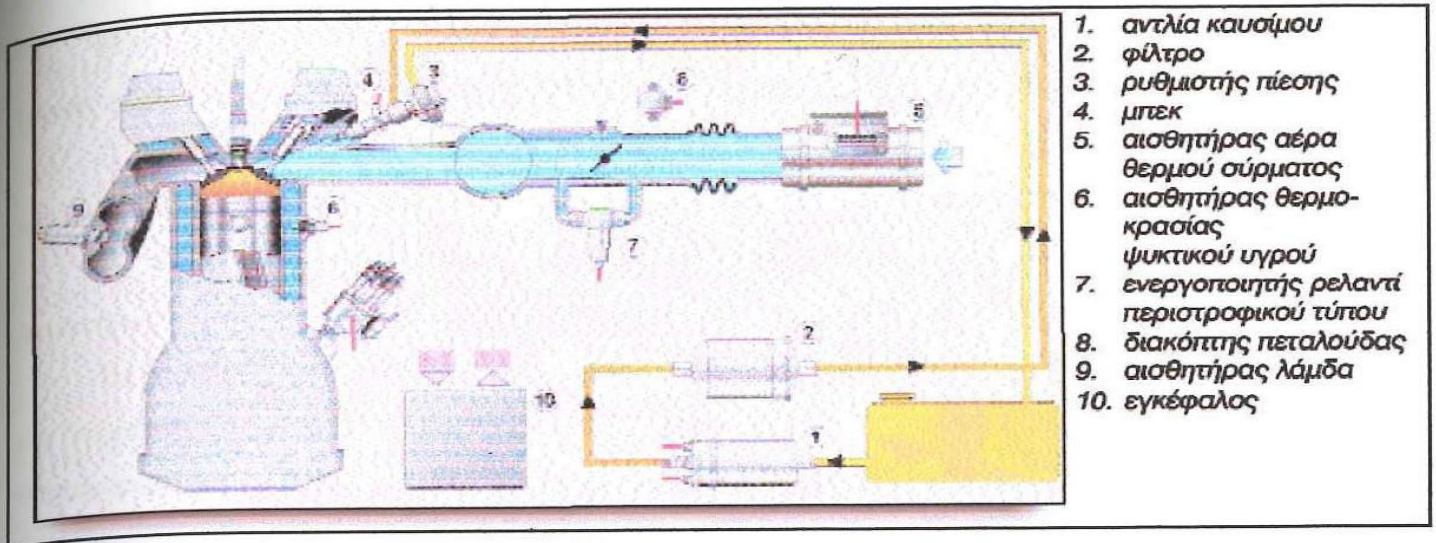
- α) από το σήμα μέτρησης του φορτίου του κινητήρα (υποπίεση πολλαπλής και μέτρηση μάζας αέρα) και
- β) από το σήμα των στροφών του κινητήρα

Η βέλτιστη διάρκεια ψεκασμού προϋποθέτει διορθώσεις των σημάτων που λαμβάνονται από διάφορους αισθητήρες. Γι' αυτό το λόγο, ο εγκέφαλος επιλέγει από τη μνήμη του μία βασική διάρκεια ψεκασμού που είναι κατάλληλη για τη θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού του κινητήρα. Στη συνέχεια, ο εγκέφαλος προσθέτει μία διόρθωση που προέρχεται από τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής και από τη τάση της μπαταρίας, για να υπολογίσει την πραγματική διάρκεια του ψεκασμού. Στην περίπτωση που το σύστημα διαθέτει μπεκ ψυχρής εκκίνησης, ο ψεκασμός του βελτιώνει την ικανότητα εκκίνησης.

Αμέσως μετά την εκκίνηση ψεκάζεται μια επιπλέον ποσότητα για 30 sec ώστε να σταθεροποιηθεί η λειτουργία. Όταν ο εγκέφαλος ανιχνεύει επιβράδυνση, μειώνει την ποσότητα ψεκασμού. Στην κατάσταση πλήρους φορτίου η ποσότητα καυσίμου που ψεκάζεται αυξάνεται σύμφωνα με το φορτίο. Το πλήρες φορτίο ανιχνεύεται από τη μέτρηση του αέρα και τη γωνία ανοίγματος της πεταλούδας. Όταν ανιχνευθεί υπέρβαση του ορίου στροφών διακόπτεται ο ψεκασμός. Τα σήματα από τον αισθητήρα λ διορθώνουν τη διάρκεια που ψεκάζουν τα μπεκ έτσι ώστε να υπάρχει στοιχειομετρική σχέση αέρα - καυσίμου.

Στο LH -Jetronic (σχήμα 6-21) τα μπεκ ψεκάζουν ανά ζεύγη, ενώ στο LH-II ψεκάζουν όλα τα μπεκ μαζί σε κάθε στροφή της μηχανής τη μισή ποσότητα καυσίμου που απαιτείται. Τα μπεκ είναι διαφορετικά σε κάθε σύστημα.

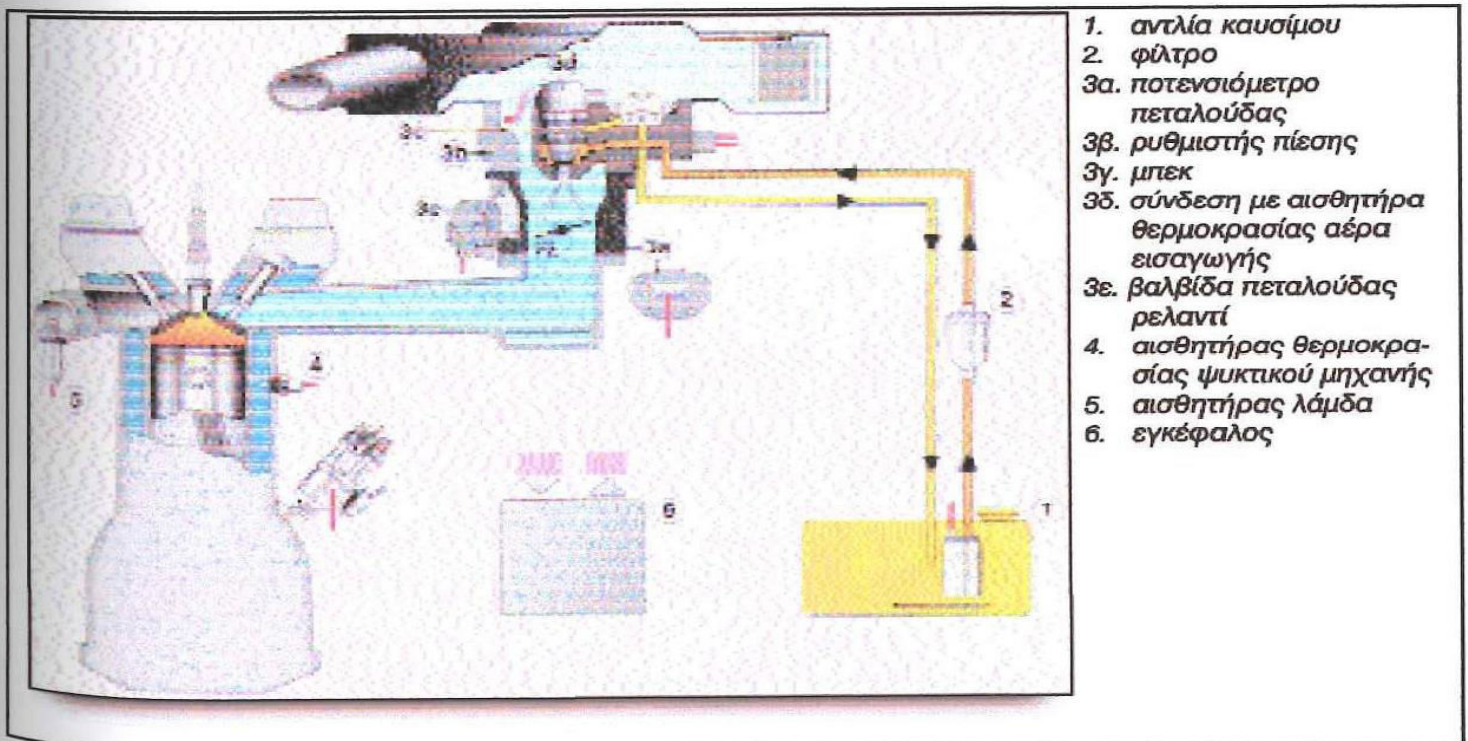
Ο διακόπτης πεταλούδας γκαζιού στο LH έχει δύο μικροδιακόπτες. Ο ένας ενεργοποιείται στο ρελαντί και ο δεύτερος στα 2/3 της διαδρομής. Στο LH II υπάρχει διακόπτης που πληροφορεί για το κενό στην εισαγωγή. Σε όλα τα μοντέλα LH -Jetronic υπάρχει έλεγχος στροφών του ρελαντί.



Σχήμα 6-21 : Συνδεσμολογία LH-Jetronic

## 6.5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΟ – JETRONIC

Είναι ένα σύστημα ψεκασμού μονού σημείου (σχήμα 6-22) ή όπως διαφορετικά ονομάζεται κεντρικού ψεκασμού. Ο ψεκασμός είναι διακοπτόμενος και γίνεται πάνω στην πεταλούδα. Η διανομή του καυσίμου γίνεται μέσω της πολλαπλής εισαγωγής.



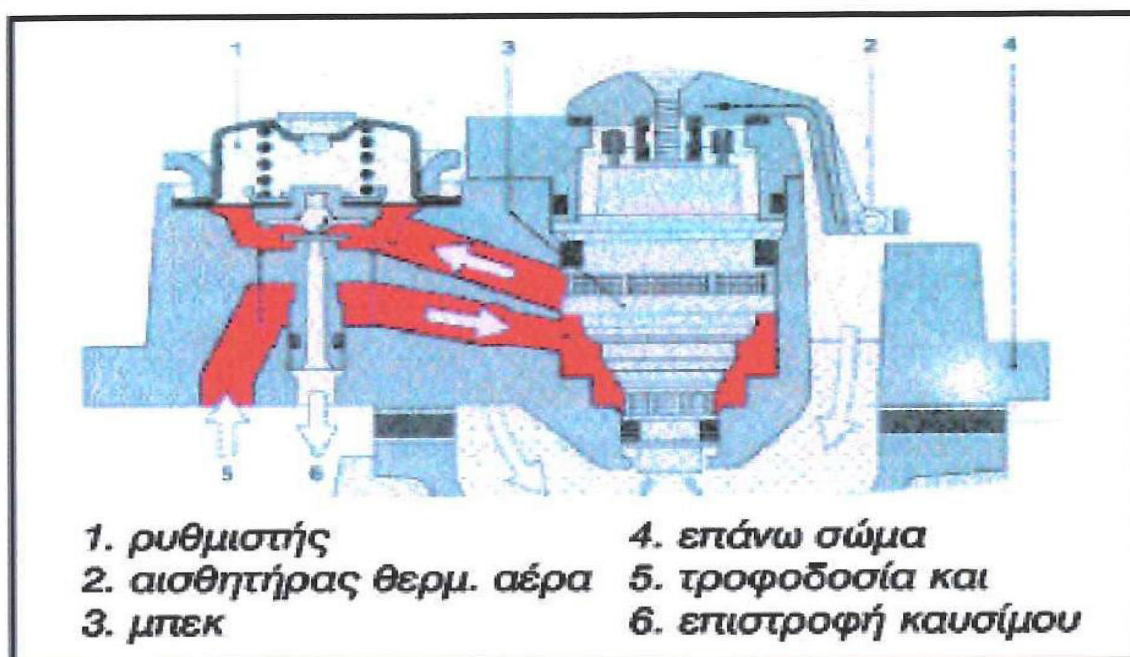
Σχήμα 6-22 : Συνδεσμολογία Mono-Jetronic

Η συσκευή του ψεκασμού αποτελείται από δύο μέρη: το πάνω και το κάτω. Το πάνω μέρος περιλαμβάνει το μπεκ, το ρυθμιστή πίεσης και τα κανάλια καυσίμου (σχήμα 6-24).

Ο ρυθμιστής πίεσης διατηρεί σταθερή τη διαφορά πίεσης μεταξύ της πίεσης του καυσίμου και της πίεσης της πολλαπλής εισαγωγής (σχήμα 6-23).

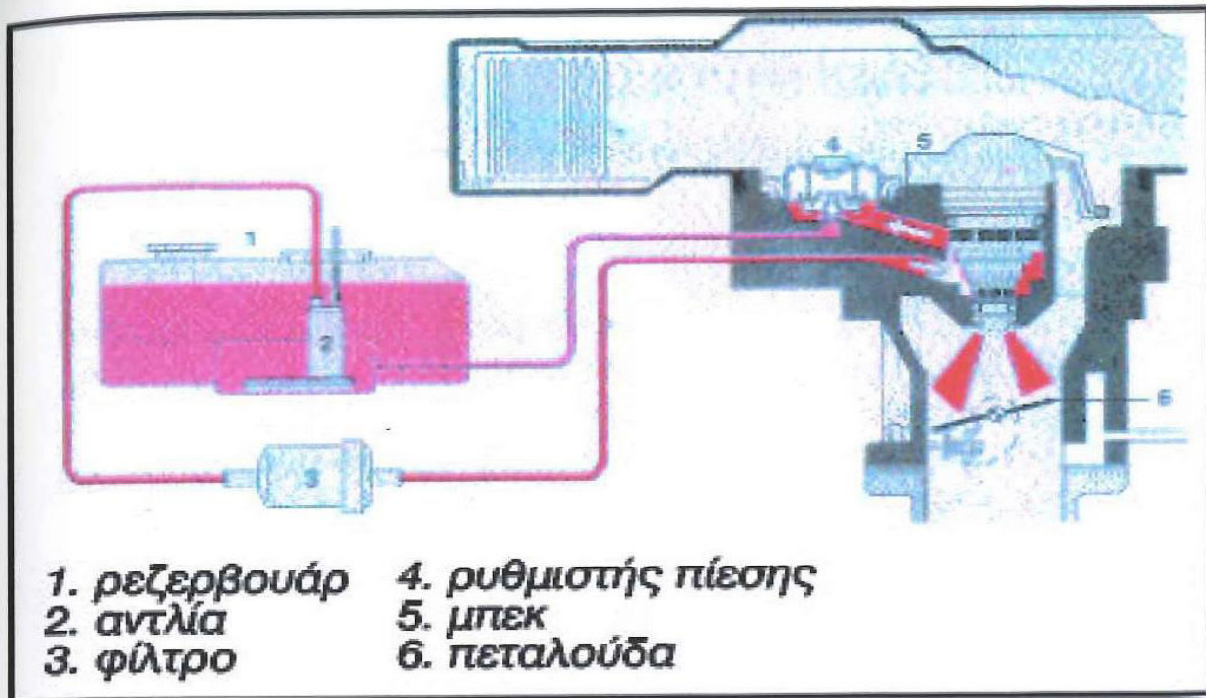
Η πίεση του συστήματος πρέπει να διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από την ατμοσφαιρική πίεση και την παροχή της αντλίας.

Το μπεκ (σχήμα 6-25) ψεκάζει με κωνική δέσμη (βεντάλια) πάνω στη πεταλούδα. Για να μη σχηματίζονται φυσαλίδες λόγω της χαμηλής πίεσης του καυσίμου και της υψηλής θερμοκρασίας, το μπεκ περιβρέχεται συνεχώς με νέες ποσότητες βενζίνης.



Σχήμα 6-23: Μπεκ μονού ψεκασμού με το ρυθμιστή πίεσης





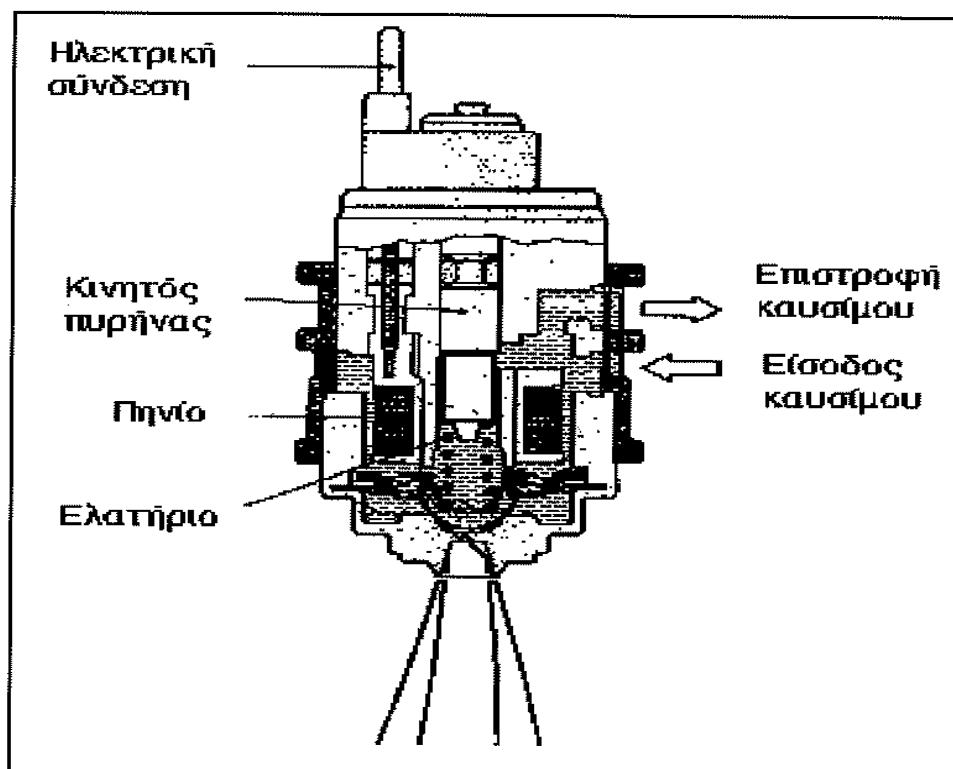
Σχήμα 6-24: Κύκλωμα παροχής καυσίμου

Η παροχή γίνεται από το κάτω μέρος και η επιστροφή της ποσότητας που περισσεύει γίνεται από το πάνω μέρος του μπεκ. Το πάνω κανάλι συνδέεται με τον κάτω θάλαμο του ρυθμιστή πίεσης από τον οποίο επιστρέφει το πλεόνασμα στο ρεζερβουάρ.

Η επιστροφή διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα. Το ένα ρεύμα διαρρέει και το δεύτερο περιβρέχει το μπεκ.

Με την ελεγχόμενη ψύξη του μπεκ πετυχαίνουμε καλή λειτουργία και κατά την ψυχρή εκκίνηση του κινητήρα.

Στο καπάκι του πάνω μέρους βρίσκεται τοποθετημένος ο αισθητήρας θερμοκρασίας του αέρα.



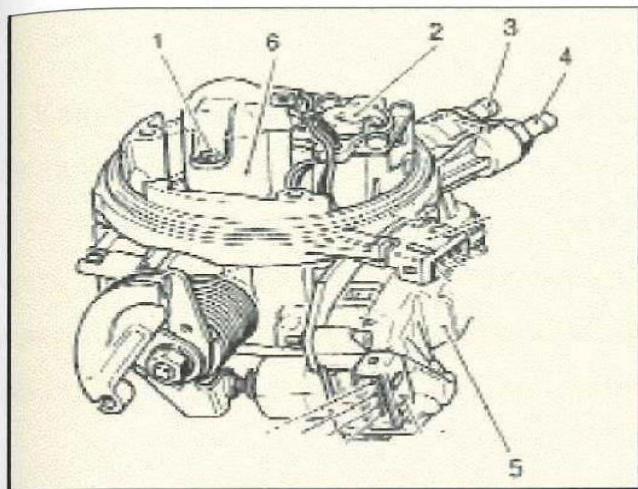
Σχήμα 6-25 : Μπεκ ψεκασμού

Το κάτω μέρος της συσκευής ψεκασμού περιλαμβάνει την πεταλούδα με το ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση της γωνίας του ανοίγματος της πεταλούδας. Στη βάση που είναι τοποθετημένη στο κάτω μέρος, βρίσκεται ο ρυθμιστής της πεταλούδας για τη ρύθμιση των στροφών κατά το ρελαντί. Ο άξονας της πεταλούδας του γκαζιού συνδέεται με ένα ποτενσιόμετρο που τροφοδοτείται με τάση 5V και έχει δύο ζευγάρια αντιστάσεων που καλύπτουν όλο το φάσμα λειτουργίας στροφών του κινητήρα.

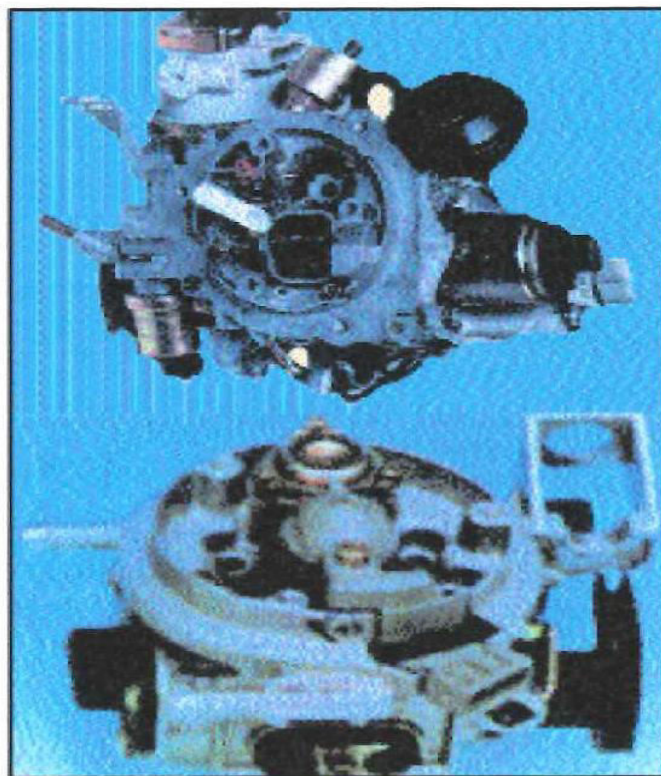
Σε κάθε γωνία της πεταλούδας αντιστοιχεί και μία ηλεκτρική τάση που ανάλογα με την τιμή της κατατάσσεται ή στο πλήρες φορτίο ή στην ενδιάμεση λειτουργία ή στο ρελαντί.

Εν συνεχεία η τάση μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα και είναι μία από τις παραμέτρους ρύθμισης του χρόνου διαρκείας ψεκασμού της βενζίνης. Στο ρελαντί η πεταλούδα κλείνει και υπάρχει ένας μικροδιακόπτης που κλείνει την επαφή.

Η ποσότητα του αέρα που χρειάζεται για τη δημιουργία του μίγματος ονομάζεται αέρας πλήρωσης. Όταν είναι γνωστή αυτή η ποσότητα, τότε υπολογίζεται και η αντίστοιχη ποσότητα βενζίνης με ρύθμιση του χρόνου ψεκασμού.



1. αισθητήρας θερμοκρασίας αέρα
2. ρυθμιστής πίεσης
3. επιστροφή καυσίμου
4. τροφοδοσία
5. βηματικός κινητήρας
6. μπεκ ψεκασμού



*Σχήμα 6-26 : Σχηματικό διάγραμμα και φωτογραφία του σώματος και του μπεκ μονού ψεκασμού*

Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τα σήματα από τους αισθητήρες και ελέγχει το μπεκ στέλλοντας ηλεκτρικούς παλμούς συγκεκριμένης διάρκειας. Συγκεκριμένα, δέχεται πληροφορίες από τον αισθητήρα θερμοκρασίας ψυκτικού του κινητήρα, τον αισθητήρα θερμοκρασίας του αναρροφούμενου αέρα, το διακόπτη της πεταλούδας γκαζιού, τον αισθητήρα λάμδα, το διανομέα για τον αριθμό των στροφών του κινητήρα και από την τάση της μπαταρίας.

Αφού γίνει η επεξεργασία αυτών των πληροφοριών ο εγκέφαλος δίνει σήματα στα μπεκ (σχήμα 6-26) , στη βαλβίδα αναθυμιάσεων και στο βηματικό κινητήρα της πεταλούδας του γκαζιού.

Στο σύστημα αυτό για να προσαρμόζεται η σχέση αέρα - καυσίμου σε κάθε σημείο λειτουργίας του κινητήρα, υπάρχει αποθηκευμένο στη μνήμη το χαρακτηριστικό πεδίο τιμών λειτουργίας του λάμδα.

Ο καθορισμός του αέρα πλήρωσης πετυχαίνεται έμμεσα με τη βοήθεια δύο μεγεθών :

- α. της γωνίας της πεταλούδας και
- β. του αριθμού στροφών του κινητήρα.

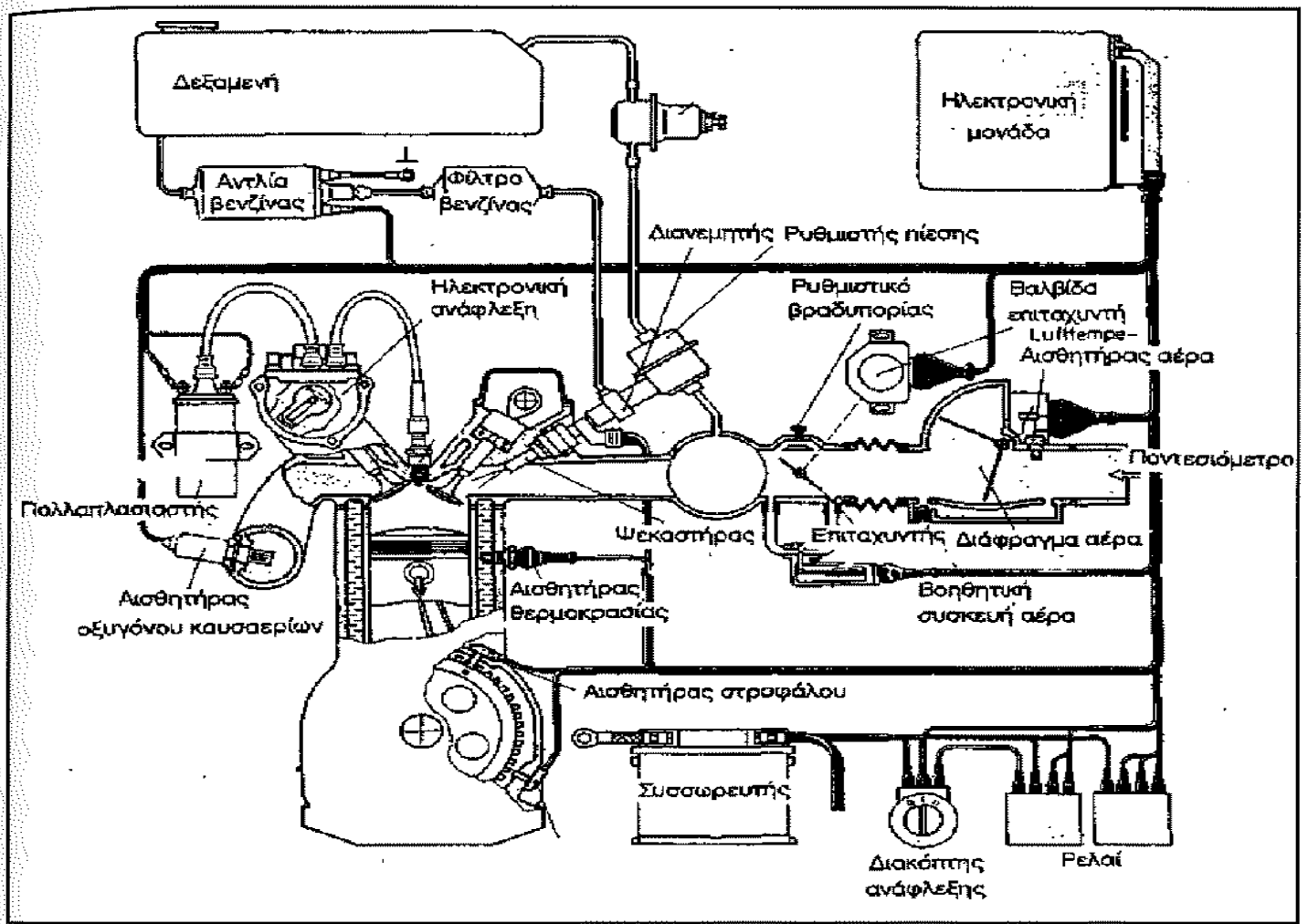
Υπάρχουν δηλαδή αποτυπωμένα στη μνήμη: η διάρκεια ψεκασμού σε συνάρτηση με τη γωνία πεταλούδας και τον αριθμό στροφών λειτουργίας του κινητήρα.

Ο εγκέφαλος ανάλογα με τα σήματα που λαμβάνει υπολογίζει το χρόνο ψεκασμού. Κατόπιν κάνει διορθώσεις εάν απαιτούνται σε κάποιες περιπτώσεις κατά τον εμπλουτισμό, στην περίπτωση δημιουργίας φτωχού μίγματος, εάν έχει ξεπεραστεί το ανώτατο όριο στροφών και τέλος αν υπάρχει βλάβη σε κάποιο αισθητήρα.

## 6.6. ΣΥΣΤΗΜΑ MOTRONIC

Το Motronic είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα έγχυσης που ελέγχει όχι μόνο την τροφοδοσία του κινητήρα αλλά και την ανάφλεξη (σχήμα 6-27). Στην ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου του Motronic υπάρχουν αποθηκευμένα δεδομένα για την λειτουργία του κινητήρα όπως η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου, η στιγμή που θα πραγματοποιηθεί ο σπινθήρας στα μπουζί κ.λπ. Κατά την λειτουργία τα δεδομένα αυτά συνδυάζονται με πληροφορίες, όπως η ταχύτητα του κινητήρα, η θέση του στροφαλοφόρου άξονα, η θερμοκρασία (κινητήρα και περιβάλλοντος) κ.λπ., που προέρχονται από διάφορους αισθητήρες. Έτσι η ηλεκτρονική μονάδα ελέγχει την παροχή του καυσίμου και την στιγμή που θα παρουσιαστεί ο σπινθήρας, με τρόπο ώστε να ανταποκρίνονται ακριβώς στις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα

Η βασική λειτουργία του Motronic είναι παρόμοια με αυτή του L - Jetronic εκτός από τον έλεγχο της ανάφλεξης.



Σχήμα 6-27 : Τοπική διάταξη οργάνων και συσκευών ηλεκτρονικού συστήματος ψεκασμού motronic

## 7. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΒΕΝΖΙΝΗΣ (GDI)

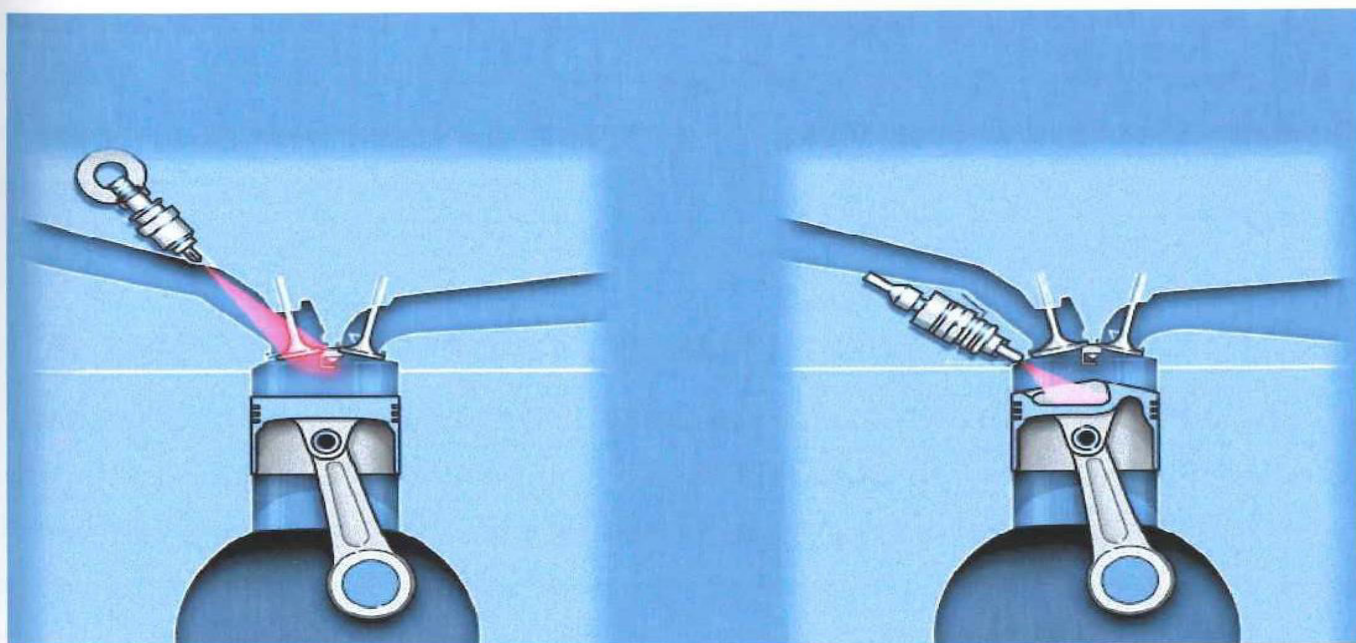
### 7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η προσπάθεια για την προστασία του περιβάλλοντος, την καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την εξοικονόμηση ενέργειας έχουν ως αποτέλεσμα την επιβολή αυστηρότερων ορίων για τους εκπεμπόμενους ρύπους και τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων.

Η διεθνής αυτοκινητοβιομηχανία συμβάλλει αποφασιστικά στην προσπάθεια αυτή και έχει κάνει σημαντικά βήματα προόδου στον περιορισμό των άμεσα επιβλαβών, για την υγεία, ρύπων που εκπέμπουν τα αυτοκίνητα, κάτω από την πίεση των ολοένα αυστηρότερων κυβερνητικών περιορισμών.

Το πρόβλημα ξεκινά από το διοξείδιο του άνθρακα και ο περιορισμός αυτού ακριβώς είναι ο στόχος κάθε γνωστής, μέχρι σήμερα, αντιρρυπαντικής τεχνολογίας.

Μερικές από τις τεχνολογίες οι οποίες αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια είναι τα εναλλακτικά καύσιμα, τα υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα, καθώς και η τεχνολογία των ενεργειακών κυψελών (fuel cells). Όμως αυτές δεν έχουν καταφέρει έως και σήμερα να σταματήσουν την εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις των τελευταίων είναι το σύστημα άμεσου ψεκασμού καυσίμου (gasoline direct injection) (Σχήμα 7-1).



Σχήμα 7-1: Αριστερά: σύστημα έμμεσου ψεκασμού, Δεξιά: σύστημα άμεσου ψεκασμού

## 7.2. ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ

Ο καλύτερος τρόπος για την επίτευξη του τελικού στόχου της μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, είναι η μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι το προϊόν τέλειας καύσης και η εκπεμπόμενη ποσότητά του είναι ευθέως ανάλογη με το καύσιμο που καίγεται. Με την αύξηση της θερμοδυναμικής απόδοσης καταφέρνουμε να παράγουμε το ίδιο αποτέλεσμα καταναλώνοντας λιγότερο καύσιμο. Έτσι έχουμε αυτόματα μείωση και το εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα.

Αυτό είναι γνωστό, εδώ και μερικές δεκαετίες, με τους κινητήρες diesel, στους οποίους ο ψεκασμός ανέκαθεν ήταν άμεσος (ακόμα και με προθάλαμο καύσης, το καύσιμο ψεκάζεται απευθείας στον κύλινδρο). Ο λόγος για τον οποίο δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή του άμεσου ψεκασμού στους βενζινοκινητήρες έχει να κάνει με το πόσο εύκολα αναφλέγεται το κάθε καύσιμο.

Το πετρέλαιο κίνησης αναφλέγεται αμέσως μόλις η θερμοκρασία ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο, ανεξάρτητα από την αναλογία αέρα-καυσίμου. Γι' αυτό και η τεχνολογία diesel προχώρησε πολύ πριν η μικροηλεκτρονική επιτρέψει τον ακριβή έλεγχο του μίγματος. Αντίθετα, η αυτανάφλεξη της βενζίνης είναι σχεδόν αδύνατη. Χρειάζεται ηλεκτρικός σπινθήρας από μπουζί στη σωστή χρονική στιγμή, αλλά και στοιχειομετρική αναλογία αέρα καυσίμου και μεγάλη ακρίβεια στο χρόνο και στη θέση σχηματισμού του μίγματος, ώστε, σε συνδυασμό με το σπινθήρα, να έχουμε μια καλή έκρηξη και μια ομοιόμορφη καύση. Χρειάστηκε πρώτα η πλήρης κατανόηση των φυσικών παραμέτρων της καύσης του μίγματος και η εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής για τον ακριβέστερο έλεγχο αυτών των παραμέτρων, ώστε να επιτευχθεί το αυτονόητο: ένας κινητήρας με τη θερμοδυναμική απόδοση ενός diesel και τις επιδόσεις ενός βενζινοκινητήρα.

## 7.3. Η ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ GDI

Από πολλές απόψεις, η τεχνολογία GDI αντιπροσωπεύει ένα περαιτέρω βήμα στη φυσική εξέλιξη των συστημάτων τροφοδοσίας της βενζινομηχανής, τα οποία θεωρούνται από τα πιο αποδοτικά μηχανικά συστήματα, που εξοπλίζουν τα σημερινά αυτοκίνητα. Μέσα από κάθε βήμα αυτής της εξέλιξης, από το μηχανικό καρμπυρατέρ, στον ρυθμιζόμενο εγχυτήρα καυσίμου, μέσω του πολλαπλού ψεκασμού και τελικά διαδοχικού ψεκασμού καυσίμου πολλαπλών σημείων, προκύπτουν βελτιώσεις στην έγχυση καυσίμου και την ηλεκτρονική

τεχνολογία ελέγχου για να επιτύχει οφέλη στον έλεγχο των μηχανών εσωτερικής καύσεως. Οι περαιτέρω πρόοδοι σε αυτές τις τεχνολογίες, καθώς επίσης και η αδιάκοπη πρόοδος στην εξέλιξη των χώρων καύσης και στο σχεδιασμό των βαλβίδων εισαγωγής και η δυναμική της ροής στους χώρους καύσης, έχουν επιτρέψει την παραγωγή των μηχανών GDI για τα αυτοκίνητα (σχήμα 7-2).



*Σχήμα 7-2 : Φωτογραφία με διάταξη στο χώρο του εμβόλου, των βαλβίδων , του εγχυτήρα και του σπινθηριστή*

Πρωτοπόρος σε αυτή την τεχνολογία είναι η Mitsubishi, που έκανε τις πρώτες ανακοινώσεις πριν από τρία χρόνια, και από τότε έχει χρησιμοποιήσει βενζινοκινητήρες άμεσου ψεκασμού σε πολλά, μαζικά παραγόμενα μοντέλα της. Από τότε όλο και περισσότεροι κατασκευαστές ανά τον κόσμο εκδηλώνουν ενδιαφέρον για την τεχνολογία αυτή.

Κοινή πεποίθηση αυτών είναι ότι οι κινητήρες άμεσου ψεκασμού πλεονεκτούν έναντι όχι μόνο των συμβατικών κινητήρων, αλλά και άλλων νέων και πιο εξωτικών τεχνολογιών. Ο λόγος είναι ότι, σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες, εκπέμπουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα κατά τη λειτουργία τους.

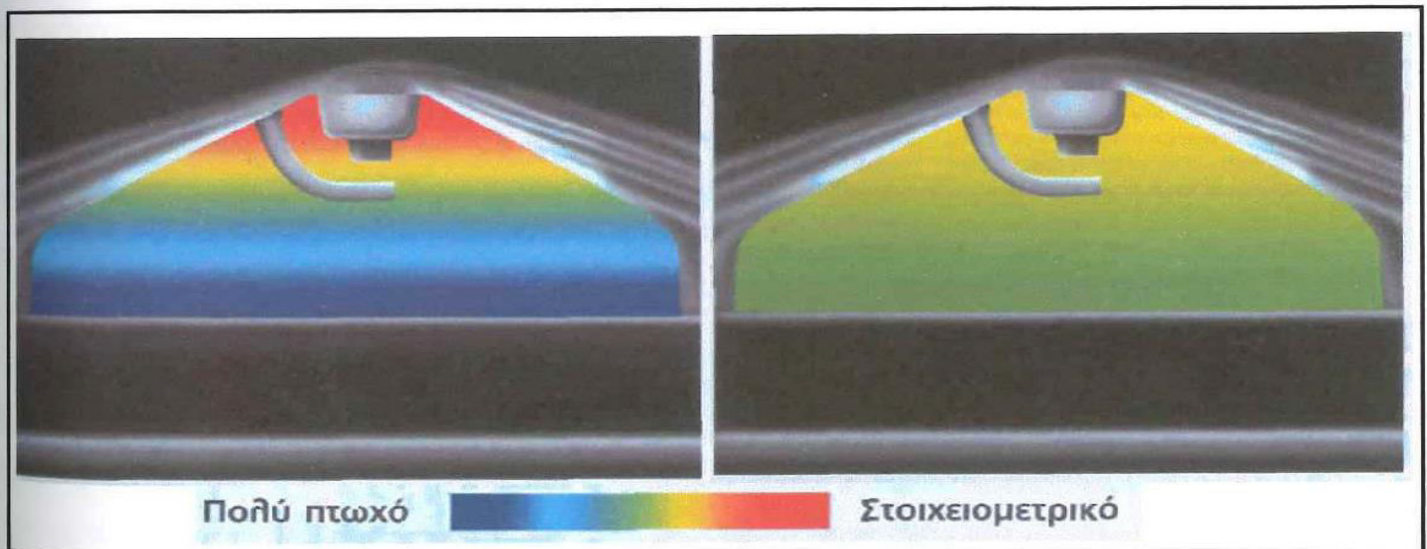
Κατά τα άλλα, οι μέθοδοι παραγωγής και ανακύκλωσης είναι ακριβώς οι ίδιες με τις μέχρι σήμερα γνωστές, οπότε, από αυτή την άποψη, δεν υπάρχει διαφοροποίηση. Σε σύγκριση με τις άλλες νέες τεχνολογίες που εξελίσσονται αυτό τον καιρό, οι κινητήρες άμεσου ψεκασμού εκπέμπουν περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα κατά τη λειτουργία τους. Οι νέες



τεχνολογίες, όμως, επιβαρύνουν πολύ περισσότερο το περιβάλλον κατά τη φάση παραγωγής και ανακύκλωσής τους, στο τέλος της ζωής τους. Έτσι, συνολικά, επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον από τους κινητήρες άμεσου ψεκασμού.

#### 7.4. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα της έναυσης ενός «πλήρως ομοιογενοποιημένου» - αλλά αρκετά φτωχού - μίγματος καυσίμου-αέρα, μέσα σε μία μηχανή (δηλαδή, μίγμα όπου η τιμή του λόγου A/K είναι όχι μόνο υψηλή αλλά και παντού η ίδια, μέσα στον κύλινδρο) ήταν πάντα ένα πεδίο ιδιαίτερης μελέτης και έρευνας. Αυτή ακριβώς η δυσκολία έναυσης είναι και ο λόγος που, για την καύση αρκετά φτωχών μιγμάτων, καταφεύγουμε, στη λεγόμενη «στρωματοποίηση» του μίγματος. Με τον τρόπο αυτό, ενώ το μίγμα καυσίμου-αέρα είναι «συνολικά φτωχό», μέσα στον κύλινδρο, εντούτοις παρουσιάζει μία αυξημένη περιεκτικότητα σε βενζίνη όσο πλησιάζουμε προς το μπουζί - όπου και γίνεται «περίπου στοιχειομετρικό», στην περιοχή γύρω από τα ηλεκτρόδια του. Αντίστοιχα, η περιεκτικότητα σε βενζίνη γίνεται, σταδιακά, ολοένα και μικρότερη, όσο απομακρυνόμαστε από αυτό (Σχήμα 7-3).



**Σχήμα 7-3 :** Σύγκριση της κατάστασης του μίγματος σ' ένα θάλαμο με στρωματοποιημένη κατανομή (αριστερά) και ομοιογενή(δεξιά). Στην πρώτη περίπτωση το μίγμα γίνεται ολοένα και πιο φτωχό όσο απομακρυνόμαστε απ' το μπουζί. Και παραμένει στοιχειομετρικό στην περιοχή του μπουζί, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η έναυση των μορίων της βενζίνης μετά την εμφάνιση του σπινθήρα.

Η επίτευξη αυτής της επιδεκτικής διαστρωμάτωσης του μίγματος, μέσα στο θάλαμο καύσης, έχει πολύ μεγάλη σημασία καθώς, μόνο με αυτή τη πρακτική, είναι δυνατόν να πετύχουμε έναυση του μίγματος με το σπινθήρα του μπουζί. Στη συνέχεια, αυτή η αρχική έναυση είναι που θα οδηγήσει στη σταδιακή αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας μέσα στον κύλινδρο, άρα και τη δημιουργία των συνθηκών εκείνων που θα προκαλέσουν την καύση και του πολύ φτωχού μίγματος που βρίσκεται μακρύτερα από το μπουζί. Πράγμα που θα συμβεί όταν το μέτωπο της φλόγας φτάσει τελικά σε εκείνα τα απομακρυσμένα (ως προς το μπουζί) σημεία του κυλίνδρου.

Σε γενικές γραμμές, η τεχνική της επίτευξης της επιθυμητής στρωματοποίησης του μίγματος βασίζεται στον κατάλληλο σχεδιασμό του πεδίου ροής έτσι ώστε να υπάρχουν μακροστρόβιλοι ροής μέσα στον κύλινδρο (δηλαδή στρόβιλοι παραπλήσιοι, σε μέγεθος, με τη διάμετρο του κυλίνδρου).

Στην περίπτωση του έμμεσου ψεκασμού όταν το καύσιμο ψεκαστεί στον αυλό ή την πολλαπλή εισαγωγής (κατά το χρόνο της εισαγωγής, όταν οι βαλβίδες εισαγωγής είναι ανοικτές), η βενζίνη δε θα πρέπει να βρίσκεται σε τέτοια κατάσταση ώστε να μπορεί να εξατμιστεί μέσα στον αυλό ή την πολλαπλή εισαγωγής, αλλά οι σταγόνες της να προλάβουν να περάσουν στον κύλινδρο γρήγορα και χωρίς αλλαγή των αρχικών τους συνθηκών, μέσα από τις ανοικτές βαλβίδες εισαγωγής.

Στη συνέχεια, καθώς θα έχουν μεταφερθεί από τη ροή του αέρα της εισαγωγής στο εσωτερικό του κυλίνδρου, οι σταγόνες θα πρέπει να παρασυρθούν από τους μακροστρόβιλους της ροής και τότε, μόνο, να εξατμιστούν. Έτσι, θα μπορέσουν να αναμιχθούν με τον αέρα με τον «κατάλληλο» εκείνο τρόπο ώστε τελικά να επιτευχθεί η ζητούμενη στρωματοποίηση του μίγματος.

Στην πράξη αυτό γίνεται εφικτό με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με τη χρήση μεταβλητού χρονισμού και βύθισματος των βαλβίδων - ένα σύστημα που εξελίχθηκε και πρωτοεμφανίστηκε από τη Honda (με τον κινητήρα VTEC). Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιήσουμε μεγάλο βύθισμα στη μία βαλβίδα εισαγωγής και πολύ μικρότερο στην άλλη, μπορούμε να δημιουργήσουμε, κατ' αρχήν, τον κατάλληλο στροβιλισμό του μίγματος κατά τη διάρκεια της εισαγωγής. Ο δεύτερος είναι να διατηρήσουμε αυτό το στροβιλισμό μέσα στον κύλινδρο μέχρι και την έναυση, στο τέλος του χρόνου συμπίεσης. Με αυτή την πρακτική, οι μηχανές βενζίνης που διαθέτουν έμμεσο ψεκασμό, μπορούν να κάψουν μίγματα με λόγο αέρα-καυσίμου της τάξης του 25:1, το πολύ.

Πριν όμως από μερικά χρόνια, εμφανίστηκαν τα πρώτα «εμπορικά» συστήματα άμεσου ψεκασμού της βενζίνης στα οποία η στρωματοποίηση επιτυγχάνεται με ψεκασμό του καυσίμου

κατευθείαν μέσα στον κύλινδρο. Χάρη σε αυτή την τεχνολογία, επιτυγχάνεται ένας πολύ πιο ακριβής έλεγχος της στρωματοποίησης, με αποτέλεσμα οι κινητήρες άμεσου ψεκασμού βενζίνης να μπορούν να αναφλέξουν και να κάψουν μίγματα με συνολικό λόγο αέρα-καυσίμου, μέσα στον κύλινδρο, της τάξης του 40:1. (Σχήμα 7-4) τη στιγμή που το στοιχειομετρικό είναι 14,7:1



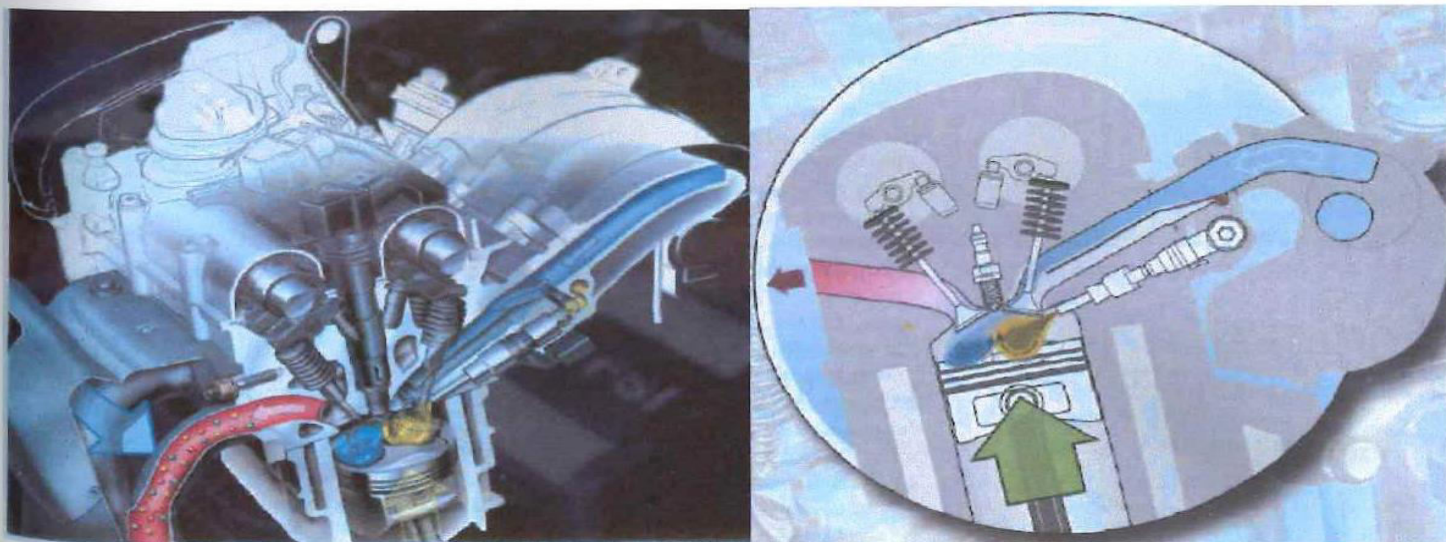
Σχήμα 7-4: Στιγμιότυπο από την καύση πολύ πτωχού μίγματος (40:1), μέσα στον κύλινδρο βενζινοκινητήρα άμεσου ψεκασμού

## 7.5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο κινητήρας άμεσου ψεκασμού βενζίνης μπορεί να λειτουργεί με δύο διαφορετικά προγράμματα ψεκασμού, ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης.

### 7.5.1. «Πρόγραμμα Φτωχού Μίγματος».

Είναι το πρώτο πρόγραμμα που χρησιμοποιείται στο ρελαντί κάτω από κανονικές συνθήκες οδήγησης, με σταθερή ταχύτητα και χωρίς ξαφνικές επιταχύνσεις. Ουσιαστικά αυτό που προσπαθούμε να πετύχουμε στη συγκεκριμένη κατάσταση είναι η τεχνική του στρωματοποιημένου μίγματος.



Σχήμα 7-5 : Η διαμόρφωση των ανών εισαγωγής και εξαγωγής στο χώρο, σε σύστημα άμεσου ψεκασμού

Το καύσιμο ψεκάζεται σε μικρή ποσότητα μέσα στον κύλινδρο, στα τελευταία στάδια του χρόνου συμπίεσης πριν την ανάφλεξη.

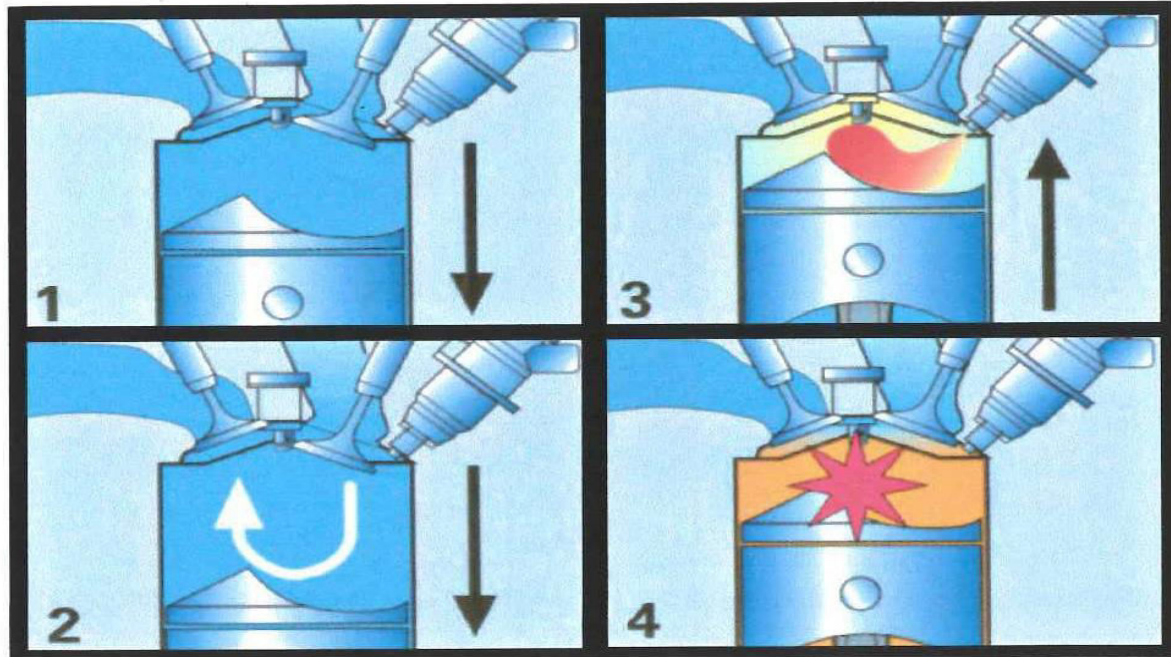
Ειδικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για τον καλύτερο σχηματισμό του μίγματος. Η κεφαλή του εμβόλου έχει καμπύλη διαμόρφωση (σχήμα 7-6), που προκαλεί το στροβιλισμό του μίγματος γύρω από άξονα κάθετο στον άξονα του κυλίνδρου. Οι διπλοί αυλοί εισαγωγής έχουν υποστεί ιδιαίτερη διαμόρφωση και είναι σχεδόν κατακόρυφοι και ευθύγραμμοι ενισχύοντας το ρεύμα του αέρα εισαγωγής (σχήμα 7-5).



*Σχήμα 7-6 : Τομή της κυλινδροκεφαλής ενός κινητήρα άμεσου ψεκασμού(φαίνεται καθαρά η ειδική διαμόρφωση της κεφαλής του εμβόλου, η θέση του σπινθηριστή αλλά και τον εγχυτήρα)*

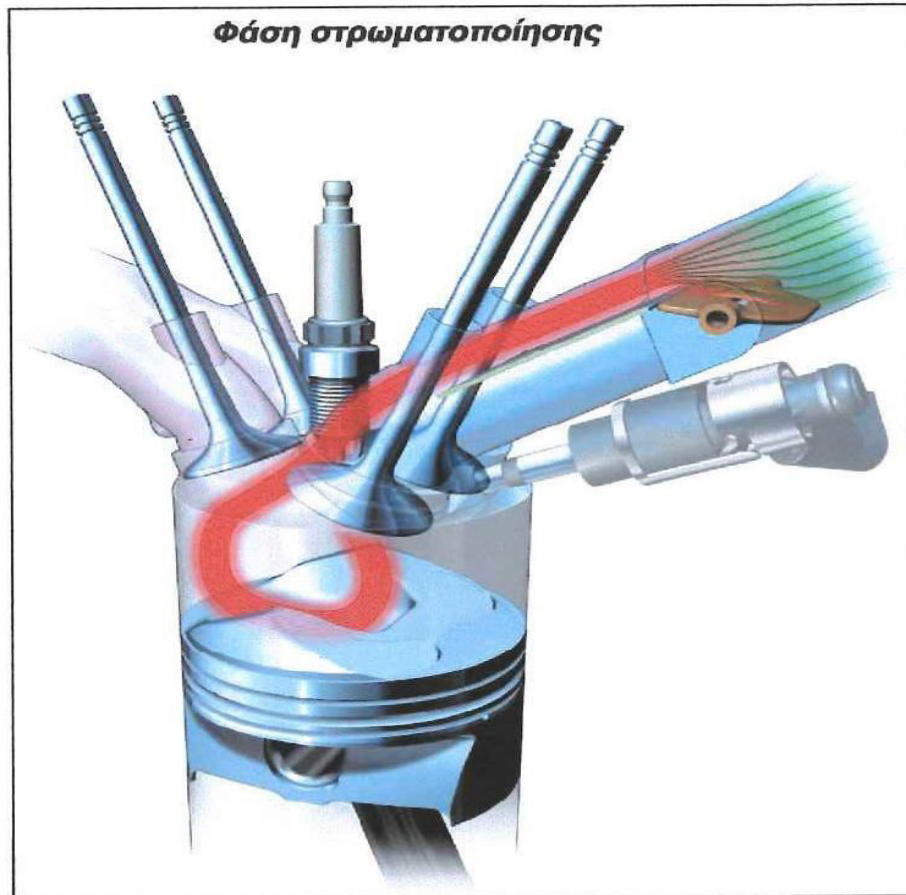
Ο ένας από αυτούς περιλαμβάνει μια πεταλούδα η οποία κλείνει στα χαμηλά φορτία, με αποτέλεσμα όλος ο απαραίτητος αέρας να περνάει από το δεύτερο αυλό και να στροβιλίζεται έντονα, επιτυγχάνοντας την καλύτερη ανάμιξη του μίγματος. Στα υψηλά φορτία τώρα, η πεταλούδα ανοίγει και η αναρρόφηση γίνεται και από τους δύο αυλούς, ώστε να αυξάνεται σημαντικά η ποσότητα του αέρα που εισάγεται στους κυλίνδρους. Το καύσιμο ψεκάζεται από

ειδικά μπεκ υψηλής πίεσης και στροβιλισμού, μέσα στον κύλινδρο, και σε μεγάλη απόσταση από το σπινθηριστή. Στη συνέχεια, αναμιγνύεται με τον αέρα που στροβιλίζεται με τον τρόπο που είπαμε προηγουμένως, χάρη στην ειδική διαμόρφωση της κεφαλής του εμβόλου. Με όλα αυτά γίνεται δυνατή η λειτουργία του κινητήρα με πολύ φτωχό μίγμα επιτυγχάνοντας θερμοδυναμική απόδοση στα επίπεδα υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα diesel.



Σχήμα 7-7 : Το καύσιμο ψεκάζεται σε μικρή ποσότητα , στα τελευταία στάδια του χρόνου συμπίεσης

Επιλέγοντας την οικονομική λειτουργία η στοιχειομετρική αναλογία αέρα-βενζίνης είναι 40:1 . Ανάλογα με το αν απαιτείται οικονομία ή υψηλή απόδοση, αλλάζει ο χρονισμός του ψεκασμού. Η βενζίνη ψεκάζεται καθυστερημένα στο θάλαμο καύσης κατά τη φάση της συμπίεσης και σχηματίζεται ένα στρωματοποιημένο μίγμα που οδηγείται απευθείας στο σπινθηριστή (Σχήμα 7-7 , 7-8).

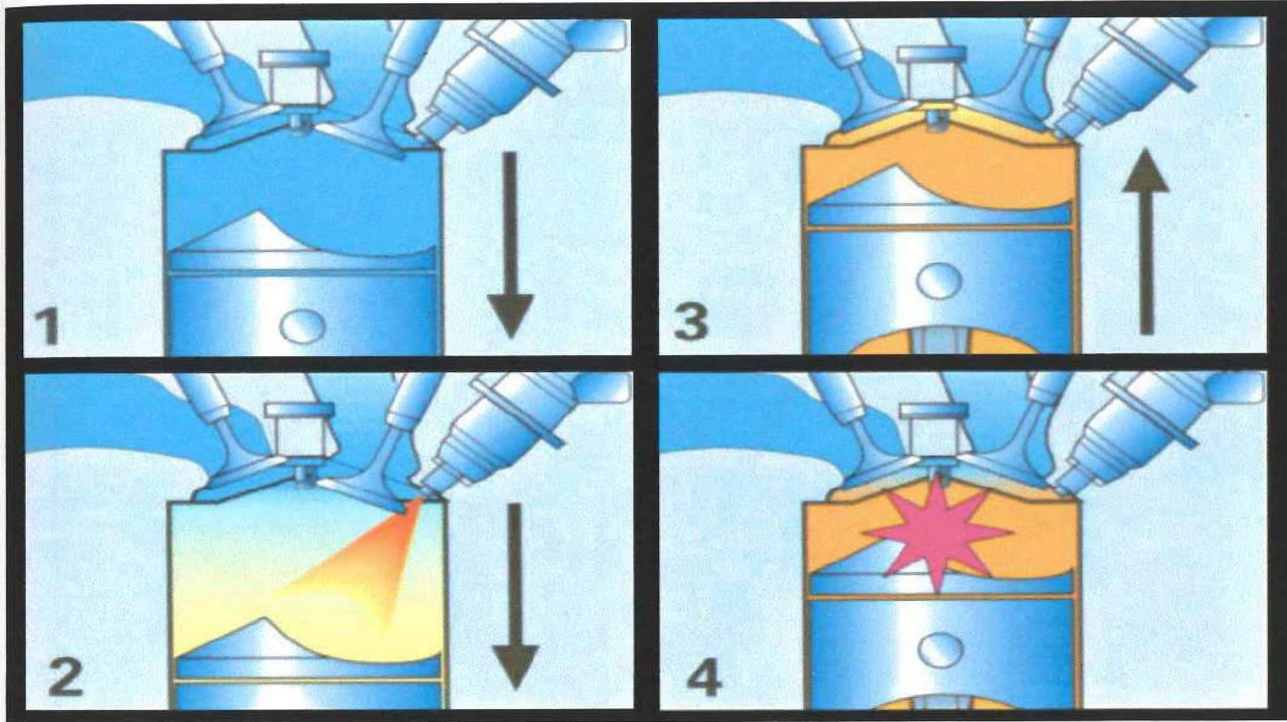


*Σχήμα 7-8 : Σε λειτουργία υπό μικρά φορτία (φάση στρωματοποίησης), η πεταλούδα "στραγγαλίζει" την παροχή του αέρα, κατευθύνοντας το πλουσιότερο μίγμα κάτω από το σπινθιριστή...*

### 7.5.2. «Πρόγραμμα Υψηλής Απόδοσης»

Είναι το πρόγραμμα λειτουργίας του κινητήρα άμεσου ψεκασμού το οποίο χρησιμοποιείται κατά την επιτάχυνση και σε συνθήκες πλήρους φορτίου (π.χ. οδήγηση σε ανηφόρα με φορτωμένο αυτοκίνητο ή με τέρμα γκάζι και ταχύτητα που πλησιάζει την τελική). Σε αυτό το πρόγραμμα, το καύσιμο ψεκάζεται όταν το έμβολο κινείται ακόμα προς τα κάτω, κατά το χρόνο εισαγωγής (Σχήμα 7-9). Έτσι, σχηματίζεται ένα ομοιογενές στοιχειομετρικό ή και πλούσιο μίγμα, όπως και στους συμβατικούς κινητήρες — μόνο που εδώ η απόδοση είναι καλύτερη, χάρη στα ειδικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα άμεσου ψεκασμού που αναφέραμε παραπάνω, αλλά και για τους λόγους που εξηγούνται στη συνέχεια. Το καύσιμο ψεκάζεται απευθείας μέσα στον κύλινδρο κατά το χρόνο εισαγωγής και εξατμίζεται ψύχοντας έτσι, τον εισερχόμενο αέρα (Σχήμα 7-10). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συστολή του εισερχόμενου αέρα και τη δημιουργία χώρου για να εισέλθει και άλλος αέρας στον κύλινδρο. Έχουμε, δηλαδή, καλύτερη πλήρωση του κυλίνδρου με αέρα. Η ψύξη του αέρα εισαγωγής

περιορίζει, επίσης, το φαινόμενο της προανάφλεξης, που επίσης μειώνει την απόδοση των συμβατικών κινητήρων, στους οποίους το φαινόμενο είναι έντονο κατά την επιτάχυνση, κυρίως λόγω της συγκέντρωσης υγρού καυσίμου στα τοιχώματα των θυρίδων εισαγωγής. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβεί στον κινητήρα άμεσου ψεκασμού, αφού το καύσιμο ψεκάζεται απευθείας μέσα στον κύλινδρο, ενώ η ψύξη του αέρα εισαγωγής μειώνει, όπως εξηγήσαμε πριν, ακόμα περισσότερο τον κίνδυνο προανάφλεξης.



*Σχήμα 7-9 : υπό υψηλά φορτία ο ψεκασμός γίνεται νωρίτερα .  
κατά τη φάση της εισαγωγής με αναλογία 12:1*

Τέλος, ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που αυξάνουν την απόδοση σε συνθήκες πλήρους φορτίου είναι ο ψεκασμός σε δύο στάδια. Μόνο το 25% του καυσίμου ψεκάζεται κατά το χρόνο εισαγωγής, ενώ το υπόλοιπο ψεκάζεται στα τελευταία στάδια του χρόνου συμπίεσης, όπως συμβαίνει και στο «Πρόγραμμα Φτωχού Μίγματος». Έτσι, το μίγμα στην αρχή της συμπίεσης είναι πολύ φτωχό και στο τέλος είναι πλούσιο. Η προανάφλεξη εμφανίζεται συνήθως με στοιχειομετρικό μίγμα. Επιπλέον, ο ψεκασμός σε δύο στάδια μειώνει την εκπομπή άκαυστων υδρογονανθράκων. Στο τελευταίο στάδιο της συμπίεσης, ο θάλαμος καύσης είναι χωρισμένος σε δύο μέρη, λόγω της ειδικής διαμόρφωσης της κεφαλής του εμβόλου. Στη μια πλευρά βρίσκεται το πολύ φτωχό μίγμα, που σχηματίστηκε κατά το χρόνο εισαγωγής, και στην άλλη το πλούσιο μίγμα, που σχηματίζεται στο τελευταίο στάδιο της συμπίεσης. Το φτωχό μίγμα δεν μπορεί να αναφλεγεί, ενώ το πλούσιο δεν μπορεί να καεί

πλήρως, λόγω έλλειψης αέρα. Όμως, λόγω της εξέλιξης της καύσης στην πλευρά του πλούσιου μίγματος, το άκαυστο καύσιμο εκτοπίζεται προς την πλευρά του φτωχού, το οποίο έτσι εμπλουτίζεται και αναφλέγεται και αυτό. Το αποτέλεσμα είναι η πλήρης καύση του μίγματος. Η εξάλειψη της προανάφλεξης, για όλους τους λόγους που εξηγήσαμε, επιτρέπει την αύξηση της συμπίεσης μέχρι και 12.5:1, που, σε συνδυασμό με την πλήρη καύση του μίγματος, αποτελούν παράγοντες σημαντικής αύξησης της απόδοσης του κινητήρα και σε συνθήκες υψηλών απαιτήσεων.



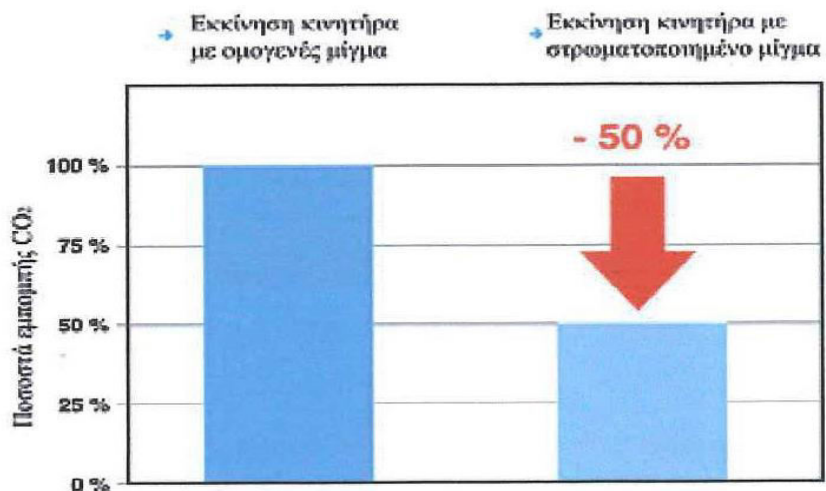
**Σχήμα 7-10 : στις υψηλές στροφές (φάση ομογενοποίησης), η κλίση της πεταλούδας επιτρέπει την πλήρη παροχή του αέρα, λίγο πριν από τη συμπίεση**



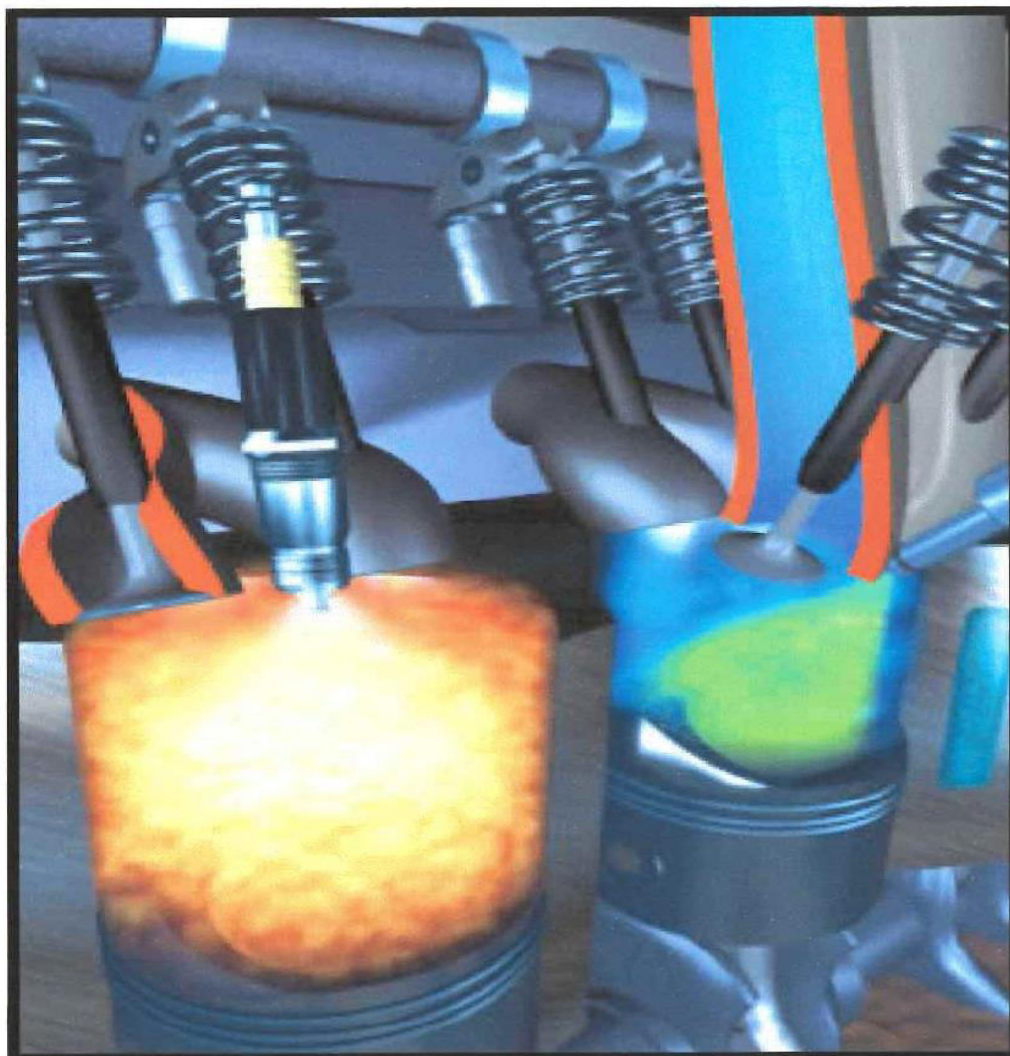
Το τελικό αποτέλεσμα των δύο προγραμμάτων λειτουργίας είναι μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, που ξεκινάει από 20% και φτάνει το 33%, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Και, βέβαια, αυτό μεταφράζεται σε αντίστοιχα ποσοστά μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ).

Εκτός από τη μείωση της κατανάλωσης και των εκπομπών του  $\text{CO}_2$ , η τεχνολογία άμεσου ψεκασμού επιτρέπει την παραπέρα μείωση και των υπόλοιπων ρύπων. Οι υδρογονάνθρακες μειώνονται χάρη στη γρηγορότερη προθέρμανση του καταλύτη μετά την εκκίνηση. Μετά από αυτήν, ο κινητήρας λειτουργεί στο ρελαντί με το Πρόγραμμα Φτωχού Μίγματος. Το καύσιμο ψεκάζεται λίγο πριν από το ΑΝΣ στο χρόνο συμπίεσης και αμέσως μετά ακολουθούν η έκρηξη και η εκτόνωση.

Στα πρώτα λεπτά της λειτουργίας στο ρελαντί, τα μπεκ ψεκάζουν, για δεύτερη φορά, καύσιμο στη διάρκεια του χρόνου εκτόνωσης (Σχήμα 7-12). Έτσι, το μίγμα καίγεται για δεύτερη φορά και η θερμοκρασία των καυσαερίων τετραπλασιάζεται μειώνοντας στο μισό το χρόνο προθέρμανσης του καταλύτη και, κατά συνέπεια, την εκπομπή υδρογονανθράκων μετά την εκκίνηση (Σχήμα 7-11). Κάτι τέτοιο δεν θα ήταν δυνατό σε ένα συμβατικό κινητήρα, αφού ψεκασμός σε χρόνο συμπίεσης και εκτόνωσης, δηλαδή με κλειστές τις βαλβίδες, δεν μπορεί να γίνει.



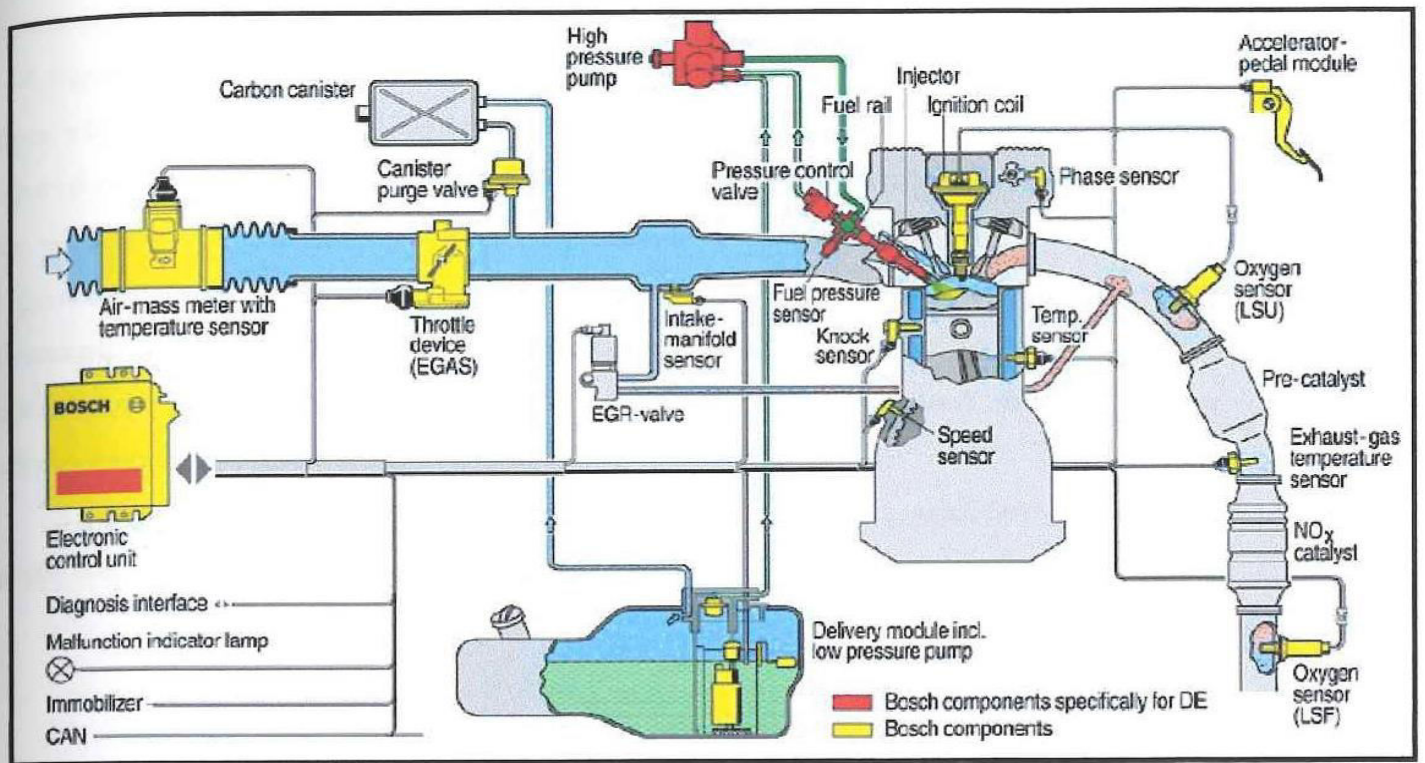
**Σχήμα 7-11:** Κατά την εκκίνηση του κινητήρα με στρωματοποιημένο μίγμα έχουμε μείωση των εκπομπών  $\text{CO}_2$  κατά 50%



Σχήμα 7-12: Ο εγχυτήρας ψεκάζει για δεύτερη φορά κατά τη φάση της εκτόνωσης

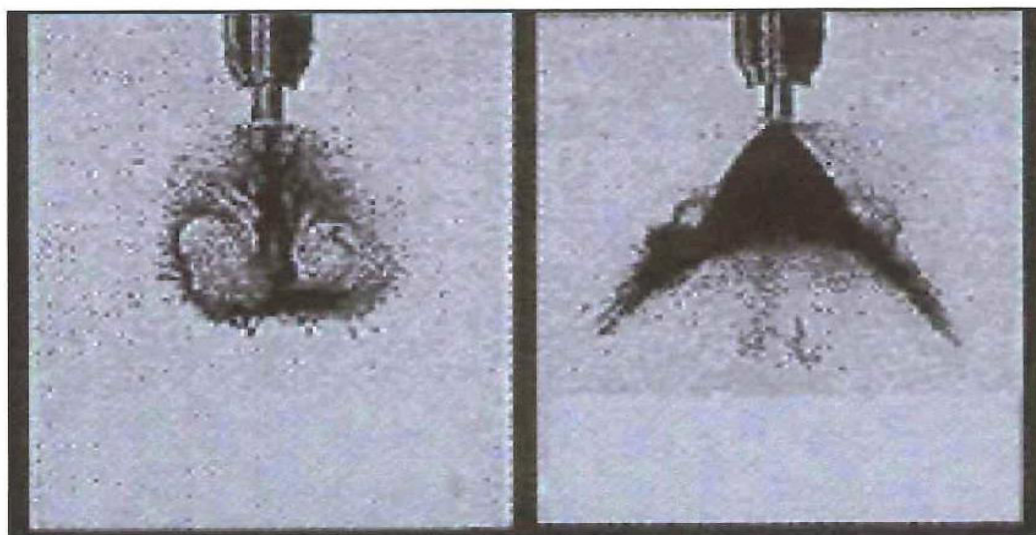
Επίσης, με τον άμεσο ψεκασμό μπορεί να επιτευχθεί και μείωση της εκπομπής των οξειδίων του αζώτου, του κύριου υπευθύνου για το νέφος. Ο τρόπος μείωσης των οξειδίων του αζώτου είναι η επανακυκλοφορία των καυσαερίων, (EGR: Electronic Gas Recirculation). η επανεισαγωγή τους, δηλαδή, στο θάλαμο καύσης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη γενιά συστημάτων ηλεκτρονικού ελέγχου κινητήρων βενζίνης, για να εγκαταλειφθεί, στη συνέχεια, λόγω της εξέλιξης των προγραμμάτων ελέγχου και της τεχνολογίας των καταλυτών. Ο λόγος αυτής της εγκατάλειψης ήταν ότι η επανακυκλοφορία των καυσαερίων εμπόδιζε την καύση και μείωνε την απόδοση. Με την τεχνολογία του άμεσου ψεκασμού (σχήμα 7-13), η πυκνότητα του μίγματος στο θάλαμο καύσης είναι τέτοια, που επιτρέπει την επανακυκλοφορία των καυσαερίων, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του κινητήρα, με αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου, σε ποσοστό μέχρι και 70%, σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες. Σε αυτό το εντυπωσιακό ποσοστό συμβάλλει και μια

νέα γενιά καταλυτών, ειδικά σχεδιασμένα για τις αυξημένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου που συνεπάγεται η χρήση φτωχού μίγματος.



Σχήμα 7-13 : Σχηματικό διάγραμμα ολόκληρου του συστήματος άμεσου ψεκασμού βενζίνης με πίεση έγχυσης που φθάνει τα 120 bar

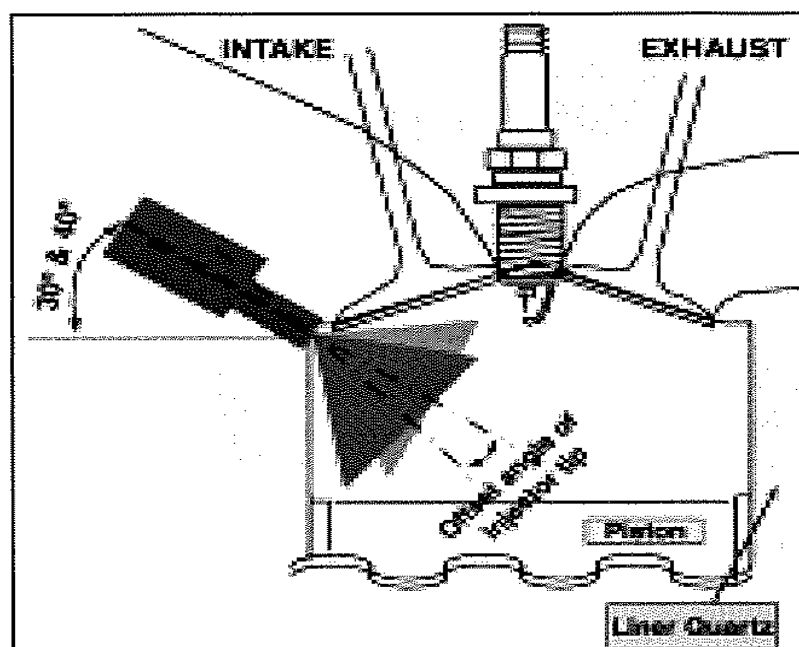
### 7.6. ΕΓΧΥΤΗΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ



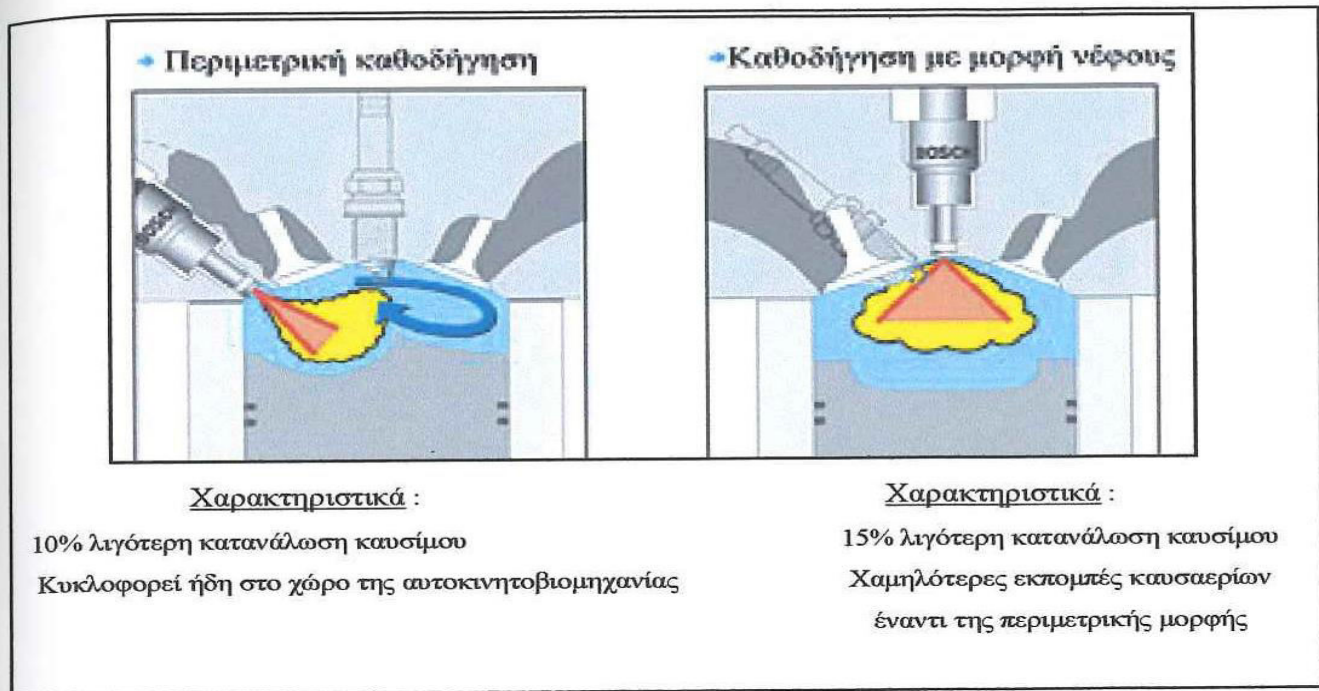
Σχήμα 7-14 : Διαφορετικοί τρόποι ψεκασμού του καυσίμου

Οι κινητήρες άμεσου ψεκασμού έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν το σχήμα του spray τους, ανάλογα με το αν λειτουργούν με φτωχό, στρωματοποιημένο μίγμα ή με ομοιογενές, στοιχειομετρικό. Στην πρώτη περίπτωση, η δέσμη του spray είναι «στενή» (σχήμα 7-14 αριστερά), έτσι ώστε το καύσιμο να παραμένει συγκεντρωμένο στον ελάχιστο δυνατό χώρο, γύρω από το μπουζί. Όταν όμως οι ανάγκες για απόδοση αυξάνουν, το spray αποκτά ένα ανοικτό σχήμα «ομπρέλας» (σχήμα 7-14 δεξιά) ώστε το καύσιμο να διασπαρθεί, ισομερώς σε όλο το χώρο του κυλίνδρου. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που γίνεται καθοδήγηση του μίγματος με μορφή νέφους, με τον εγχυτήρα να είναι τοποθετημένος κατακόρυφα και με συγκεκριμένη διαμόρφωση του εμβόλου. Στην περίπτωση που έχουμε περιμετρική καθοδήγηση, ο εγχυτήρας είναι συνήθως τοποθετημένος υπό γωνία (σχήμα 7-15) και το έμβολο έχει διαφορετική διαμόρφωση (σχήμα 7-16).

Σε αντίθεση με τα συμβατικά μπεκ, τα συγκεκριμένα ψεκάζουν το καύσιμο με ιδιαίτερα υψηλή πίεση, η οποία παίρνει τιμές από 80 έως 120 bar.



Σχήμα 7-15: Γωνία τοποθέτησης του εγχυτήρα και γωνία της δέσμης εγχεόμενου καυσίμου



*Σχήμα 7-16 : Διαφορετικές θέσεις του εγχυτήρα και του τρόπου ψεκασμού ανάλογα με την καθοδήγηση*

## 7.7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

### 7.7.1. Κινητήρας άμεσου ψεκασμού της Toyota

Ο κινητήρας της Toyota με την κωδική ονομασία D4 περιλαμβάνει σύστημα μεταβλητού χρονισμού των βαλβίδων εισαγωγής, στοιχείο που βελτιώνει την απόδοση του κινητήρα σε όλο το φασμά των στροφών λειτουργίας του.. Το πρόβλημα των υψηλών επιπέδων εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx) αντιμετωπίστηκε με δύο τρόπους : Καταρχήν, σχεδιάστηκε καλύτερα ο μηχανισμός ανακύκλωσης των καυσαερίων, EGR, ώστε να μειωθούν οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μέσα στον κύλινδρο κατά την καύση και, συνακόλουθα, η δημιουργία των οξειδίων του αζώτου. Έτσι, στον D4, το 40% των καυσαερίων ανακυκλώνεται και καταλήγει εκ νέου στον κύλινδρο.



*Σχήμα 7-17 : Ηλεκτρονικό σύστημα άμεσου ψεκασμού βενζίνης*

Η λύση όμως της ανακύκλωσης των καυσαερίων δεν μπορούσε από μόνη της να εξαλείψει το πρόβλημα, γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε παράλληλα και ειδικός καταλύτης κατακράτησης των NO<sub>x</sub>. Ο καταλύτης αυτός κατακρατεί και καίει τα οξείδια του αζώτου, παρουσιάζει όμως ευαισθησία στο θείο που περιέχει η βενζίνη, το οποίο μειώνει τον ωφέλιμο χρόνο ζωής του. Ο συνδυασμός πάντως του μηχανισμού ανακύκλωσης των καυσαερίων με τον καταλύτη κατακράτησης οξειδίων έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική μείωση τους κατά 95% και την κάλυψη των πιο αυστηρών περιορισμών εκπομπής καυσαερίων που ισχύουν στην Ιαπωνία. Αξίζει στο σημείο αυτό να προσθέσουμε πως η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε αυτοκίνητα παραγωγής της Toyota έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης κατά 30% (5,7 λίτρα/100 χλμ.), στοιχείο που συνοδεύεται με ταυτόχρονη βελτίωση των επιδόσεων κατά 10%.

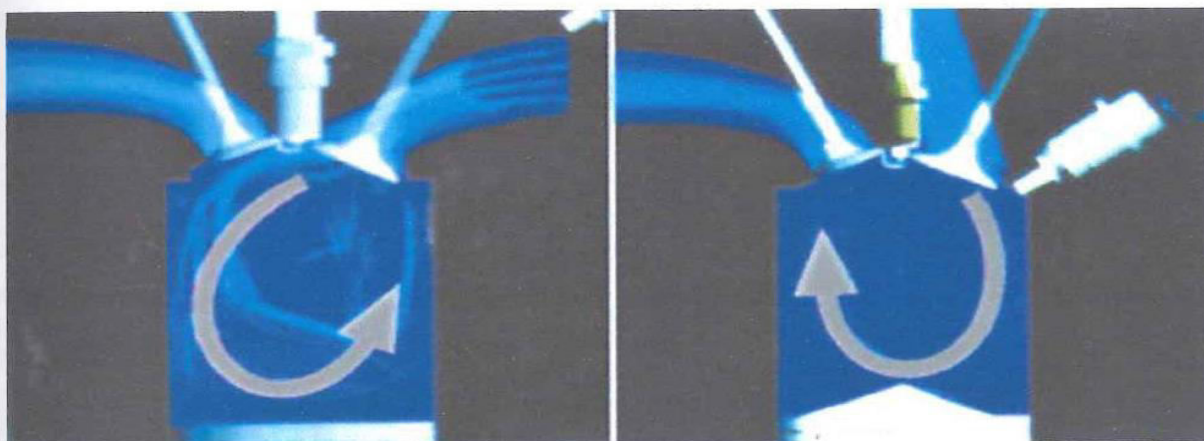
Ιδιαίτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και ο νέος 2λιτρος κινητήρας άμεσου ψεκασμού της εταιρείας. Κι αυτό γιατί η πίεση ψεκασμού του καυσίμου κυμαίνεται από 80 έως και 129 bar , τιμές που είναι οι υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες που χρησιμοποιεί σήμερα οποιοσδήποτε άλλος κατασκευαστής.

Παράλληλα, εκτός από την υψηλή αυτή πίεση, στην προσπάθεια ο κινητήρας να εναρμονιστεί με τις προδιαγραφές ρύπων Euro IV χρησιμοποιήθηκε ένας νέος τύπος αισθητήρα για την καταμέτρηση της ροής του αέρα, ο οποίος ανιχνεύει με ακρίβεια τον όγκο του, επιτρέποντας στην κεντρική μονάδα ελέγχου του κινητήρα να ελέγχει καλύτερα την αναλογία μίγματος αέρα-βενζίνης. Για να επιτευχθούν όλα αυτά, κρίθηκε αναγκαία η

επανασχεδίαση του ηλεκτρονικού συστήματος ψεκασμού, το οποίο είναι σε θέση τώρα να ελέγχει ταυτόχρονα τον όγκο του μίγματος και τη στιγμή του ψεκασμού (Σχήμα 7-17).

### 7.7.2. GDI της Mitsubishi

Μία από τις πρώτες χρονικά εταιρείες που εφοδίασαν με κινητήρες άμεσου ψεκασμού αυτοκίνητο παραγωγής, στα μοντέλα Galant στην Ιαπωνία και Carisma στην ευρωπαϊκή αγορά, ήταν η Mitsubishi. Με χωρητικότητα 1,8 λίτρα, ο GDI κινητήρας απέδιδε ισχύ 150 ίππων και ροπή 18,2 χλγμ. Σε σχέση με τον αντίστοιχο συμβατικό βενζινοκινητήρα της εποχής παρουσίαζε κατά 35% χαμηλότερη κατανάλωση, προσδίδοντας στο αυτοκίνητο και 5% χαμηλότερο χρόνο για την επιτάχυνση από τα 0 έως τα 100 χλμ./ώρα. Η κατανάλωση καυσίμου ήταν χαμηλή ακόμα και σε σύγκριση με τον κλασικό 2λιτρο, υπερτροφοδοτούμενο 4κύλινδρο Diesel, ο οποίος καταργήθηκε στη συνέχεια. Η επίτευξη του στόχου – όπως ισχύει και για τα περισσότερα GDI συστήματα - απαιτήσε σημαντικές διαφοροποιήσεις σε βασικά σημεία του κινητήρα, με πρώτο τους ευθείς αυλούς εισαγωγής, οι οποίοι επιτρέπουν καλύτερο έλεγχο του αέρα κατά την εισαγωγή του (Σχήμα 7-18).



**Σχήμα 7-18:** Στον κινητήρα GDI της Mitsubishi, ο αυλός εισαγωγής τοποθετήθηκε σχεδόν κάθετα ως προς τον κύλινδρο, προκειμένου να επιτευχθεί ο κατακόρυφος, δεξιόστροφος στρόβιλος του αριστερού σχήματος. Αν ο στρόβιλος ήταν αριστερόστροφος, όπως δεξιά, η βενζίνη, μετά τον ψεκασμό της, θα κατέληγε στο μπουζί, βραχυκυκλώνοντάς το.

Ο θάλαμος καύσης είναι πλέον σκαμμένος πάνω στην επιφάνεια του εμβόλου με τέτοιο τρόπο, ώστε να κατευθύνει τη φλόγα προς τις πλευρές των κυλίνδρων, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η πλήρης καύση του καυσίμου. Όσον αφορά την τροφοδοσία του καυσίμου, εδώ έχουμε μια ιδιαίτερα ισχυρή αντλία βενζίνης και τα ειδικά διαμορφωμένα μπεκ, τα οποία φροντίζουν για τη διασπορά του καυσίμου και την ατμοποίησή του. Η πίεση του καυσίμου στα

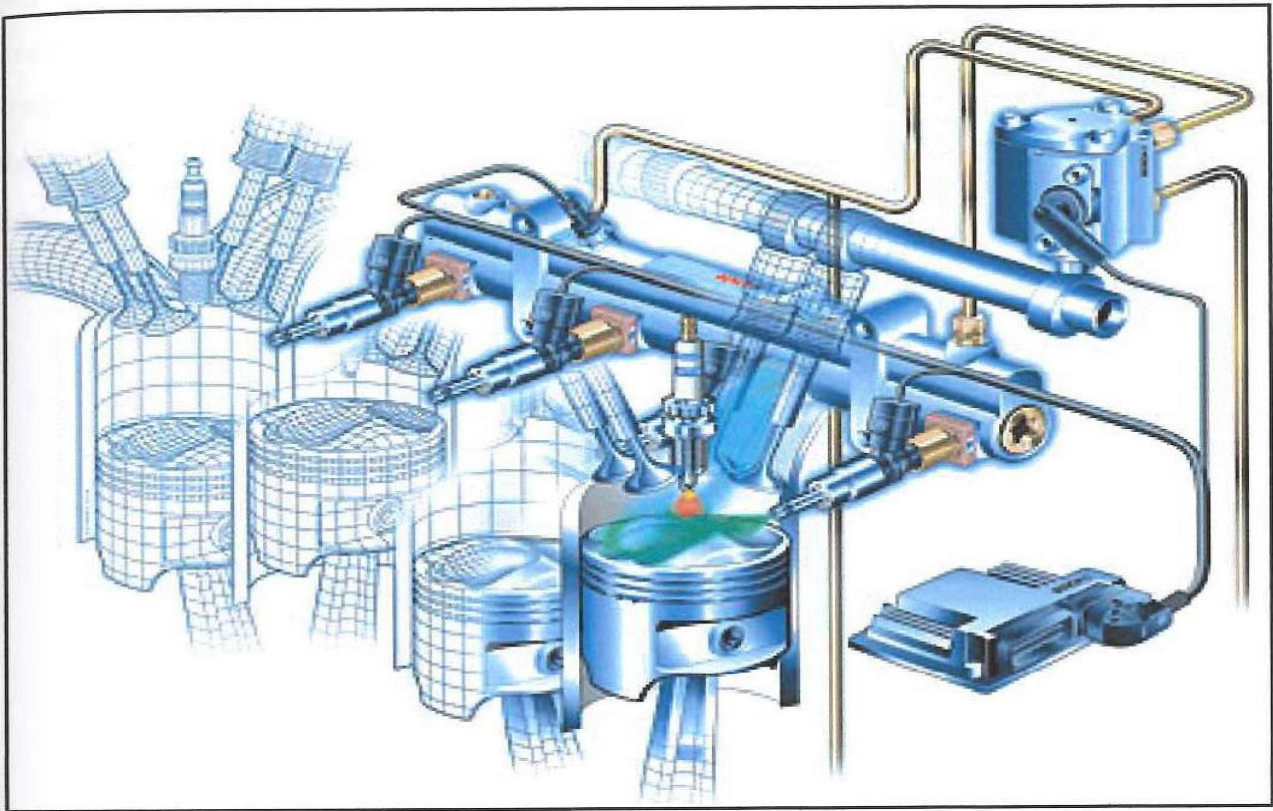
μπεκ φτάνει τα 50 bar (γύρω στις 15 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι στα συμβατικά μπεκ ψεκασμού), με αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ καλή μόνωση κάτω από το πλαστικό καπάκι που καλύπτει τον κινητήρα. Χαρακτηριστικό του κινητήρα είναι και η υψηλή συμπίεση του, που φτάνει το 12:1, απαιτώντας τη χρήση βενζίνης υψηλών οκτανίων, προσδίδοντας έτσι και την υψηλή ροπή του κινητήρα. Όσον αφορά τα εκπεμπόμενα οξείδια του αζώτου, ο κινητήρας χρησιμοποιεί έναν καταλύτη επιλεκτικής οξείδωσης με τον οποίο, σύμφωνα με την εταιρεία, η μείωση των ρύπων αυτών φτάνει το 97%. Η Mitsubishi δεν περιορίσε τη χρήση του άμεσου ψεκασμού στο μικρό κινητήρα των 1,8 λίτρων, αλλά δημιούργησε στη συνέχεια μια ολόκληρη οικογένεια κινητήρων με χωρητικότητα 2,4 λίτρων, ένα V6 3.5 λίτρων και ένα V8 ή,5 λίτρων. Μακροπρόθεσμα, σύμφωνα πάντα με τα πλάνα της ίδιας, μέχρι το 2010 όλοι οι βενζινοκινητήρες της γκάμας της θα είναι άμεσου ψεκασμού.

### 7.7.3. Κινητήρας άμεσου ψεκασμού της Nissan

Η Nissan είναι η τελευταία ιαπωνική εταιρεία που παρουσίασε (πρόσφατα) τη δική της πρόταση στο θέμα με έναν εξακύλινδρο, σε διάταξη V, κινητήρα με χωρητικότητα 2.987 κ.εκ. Έχοντας σχεδιάσει ένα διαφορετικό και πιο ρηχό θάλαμο καύσης σε σχέση με αυτούς της Toyota και της Mitsubishi, οι μηχανικοί της εταιρείας τοποθέτησαν το μπεκ απέναντι από τις βαλβίδες εισαγωγής διαφοροποιώντας σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο δημιουργείται το φίλμ του καυσίμου. Το αποτέλεσμα της επιλογής τους αυτής ήταν η δημιουργία ενός πιο ομοιογενούς μίγματος γύρω από το μπουζί και η πιο σταθερή διάδοση της φλόγας προς τις πλευρές του κυλίνδρου. Ο σχεδιασμός των αυλών πάντως βασίστηκε στην εμπειρία του αγωνιστικού κινητήρα R390GTI . Ο κινητήρας τελικά επιτυγχάνει μέση κατανάλωση 11,2 λίτρα/100χλμ., τιμή κατά 20% χαμηλότερη σε σχέση με αυτή που έχει το ίδιο μοντέλο όταν χρησιμοποιεί το συμβατικό κινητήρα.



#### 7.7.4. Σύστημα DI - MOTRONIC της Bosch



*Σχήμα 7-19 : Σύστημα DI-Motronic της Bosch*

Από την πλευρά της ευρωπαϊκής βιομηχανίας η Bosch έχει να παρουσιάσει ένα ανάλογο σύστημα άμεσου ψεκασμού, το οποίο προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί στα αυτοκίνητα της επόμενης δεκαετίας (σχήμα 7-19). Στόχος είναι η μείωση του μέσου επιπέδου εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, που συνδέονται άμεσα με την κατανάλωση καυσίμου σε 140g/km για τα νέα αυτοκίνητα μέχρι το 2008. Ακόμα όμως δεν υπάρχει πρακτική λύση για τη μείωση των οξειδίων του αζώτου. Με την τεχνολογία που χρησιμοποιεί έχει καταφέρει να μειώσει την κατανάλωση σε ποσοστό 10%, σε σύγκριση με τα συστήματα έμμεσου ψεκασμού καυσίμου.

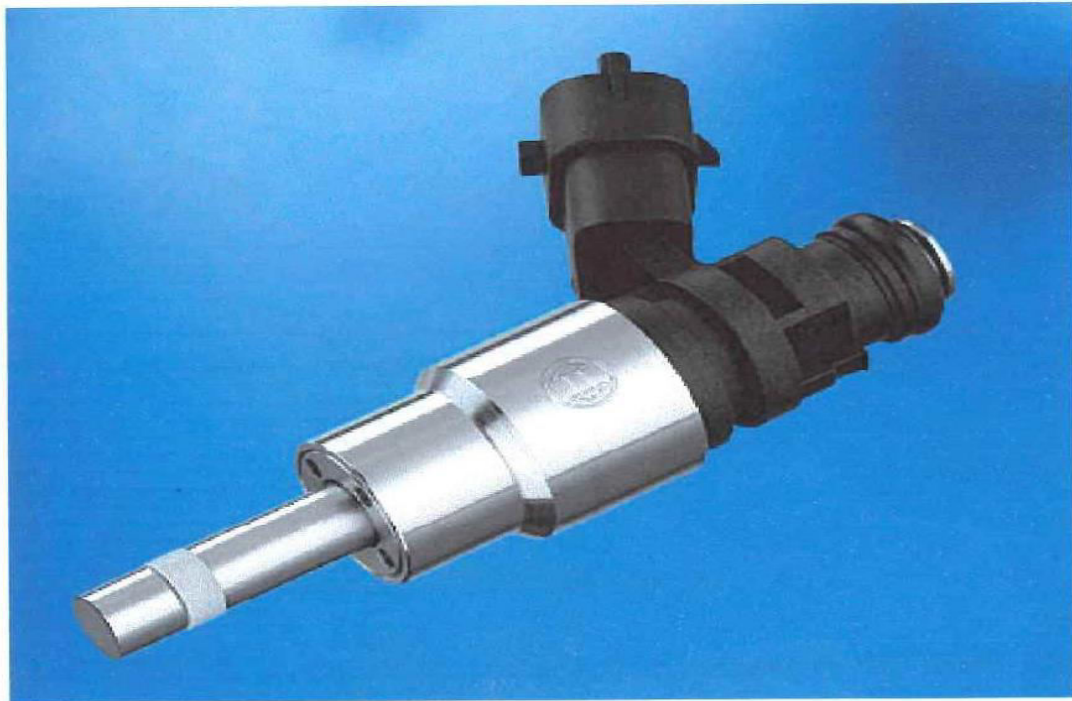
Το σύστημα περιλαμβάνει μια αντλία υψηλής πίεσης και τα ανάλογα ηλεκτρομαγνητικά ακροφύσια τα οποία ψεκάζουν το καύσιμο με πίεση που φτάνει τα 120 bar. Η κεντρική μονάδα Motronic ME7 φροντίζει για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος με τη συμβολή των περιφερειακών αισθητήρων.

Επίσης αυτήν την περίοδο αναπτύσσονται δυο διαφορετικοί τύποι βαλβίδων έγχυσης για την άμεση διαδικασία καύσης, μαγνητικά ενεργοποιούμενες βαλβίδες με μπεκ πολλαπλού

ψεκασμού και βαλβίδες με πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές.

Στις βαλβίδες έγχυσης με πολλαπλά μπεκ ψεκασμού, το καύσιμο ψεκάζεται μέσω του διάτρητου δίσκου σε 6 ή 10 σημεία στην άκρη της βαλβίδας (σχήμα 7-20).

Με το διαφορετικό καθορισμό της θέσης αυτών των τρυπών, η γεωμετρία του ρεύματος του καυσίμου μπορεί να προσαρμοστεί σε όλους τους τύπους και μορφές κυλίνδρων. Αφ' ενός αυτό είναι ένας σημαντικός και καθοριστικός παράγοντας για μια σταθερή διαδικασία καύσης, αφ' ετέρου σημαίνει ότι η βαλβίδα έγχυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους κινητήρων και να διευκολύνει την ανάπτυξη μελλοντικών τεχνικών καύσης.



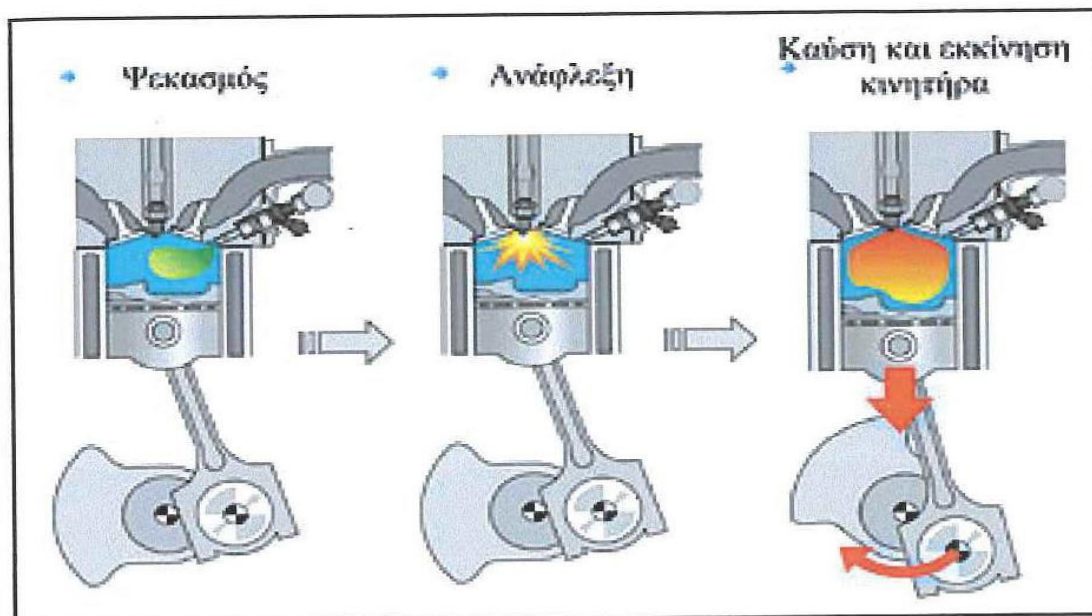
Σχήμα 7-20 : φωτογραφία εγχυτήρα πολλών οπών

Ο συνδυασμός του πολλαπλού ψεκασμού και του μαγνητικού ενεργοποιητή καθιστά δυνατή τη δημιουργία βαλβίδων έγχυσης με πολύ χαμηλό κόστος.

Από την άλλη οι βαλβίδες έγχυσης με πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή ταιριάζουν ιδιαίτερα στις απαιτήσεις της καθοδηγούμενης διαδικασίας καύσης. Κι αυτό γιατί μπορούν να πραγματοποιήσουν τη διαδικασία έγχυσης στο μισό χρόνο, σε σύγκριση με τις βαλβίδες με μαγνητικό ενεργοποιητή.

Στο συγκεκριμένο σύστημα ψεκασμού μελετάται η προσθήκη μιας οικονομικά αποδοτικής λειτουργίας "start - stop", έτσι ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν λιγότερη κατανάλωση καυσίμου σε καταστάσεις κίνησης μέσα σε πόλη. Ουσιαστικά σβήνει τον

κινητήρα όταν το αυτοκίνητο ακινητοποιηθεί πλήρως και λειτουργεί ξανά χωρίς τη χρήση εκκινητή. Η λειτουργία αυτή θα επιτυγχάνει εξοικονόμηση καυσίμου έως 5% (Σχήμα 7-21).



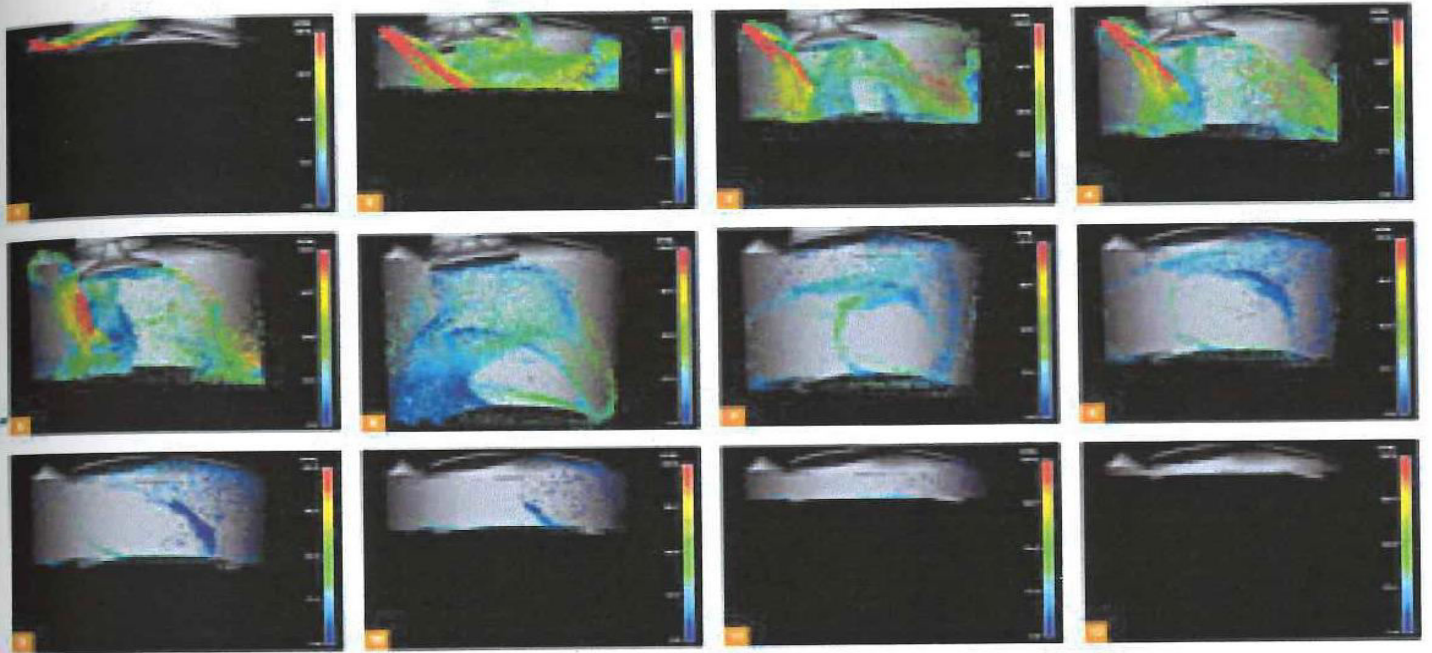
Σχήμα 7-21: Με τη χρήση της τεχνολογίας DI - Motronic η εκκίνηση του κινητήρα γίνεται πιο σύντομα και πιο αποτελεσματικά

#### 7.7.5. Κινητήρες Άμεσου ψεκασμού VW – Audi (FSI)

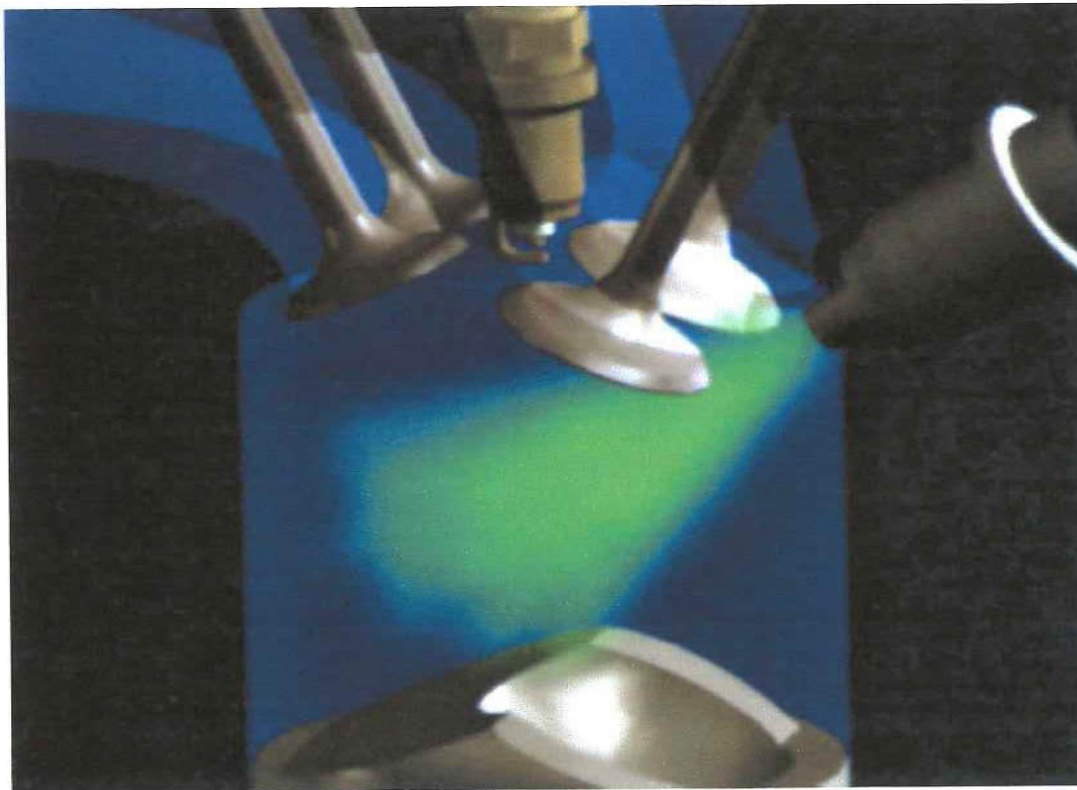
Ο πρώτος κινητήρας στον οποίο η εταιρεία ενσωμάτωσε αυτήν την τεχνολογία παρουσιάστηκε με το πρωτότυπο (concept car) A12. Το 3κύλινδρο σύνολο του συγκεκριμένου μοντέλου έχει χωρητικότητα 1.196 κ.εκ., διαθέτει πέντε βαλβίδες ανά κύλινδρο (τρεις εισαγωγής και δύο εξαγωγής) και αποδίδει 76 ίππους, ενώ η κατανάλωση του είναι κατά 15-20% χαμηλότερη από αυτή ενός αντίστοιχου συμβατικού κινητήρα. Οι βαλβίδες είναι τοποθετημένες με μικρή περιεχόμενη γωνία, και ο θάλαμος καύσης είναι επίπεδος. Όσον αφορά τα εκπεμπόμενα καυσαέρια, αυτά είναι σαφώς χαμηλότερα με τη χρήση εξελιγμένων καταλυτών, ενώ, ειδικά για τα οξείδια του αζώτου, χρησιμοποιείται ένας επιπλέον καταλύτης DeNOx.

Ο δεύτερος κινητήρας ονομάστηκε FSI (Fuel Stratified Injection). Είναι ένα-αντιπροσωπευτικό δείγμα της τεχνολογίας GDI και ήδη ενσωματώνεται στα περισσότερα νέα μοντέλα της εταιρείας.

Το μπεκ είναι τοποθετημένο σχεδόν στο πλάι της κυλινδροκεφαλής και ψεκάζει το καύσιμο κατά διαστήματα που διαρκούν λιγότερο από χιλιοστά του δευτερολέπτου (msec), υπό πίεση άνω των 110bar (σχήμα 7-22).



**Σχήμα 7-22 :** Στην παραπάνω σειρά φωτογραφιών φαίνονται τα στάδια ενός κύκλου έκχυσης καυσίμου με πίεση 110 bar στο θάλαμο καύσης ενός κινητήρα FSI που δουλεύει στις 6.000 σ.α.λ. Η όλη διαδικασία λαμβάνει μέρος σε 0.01 sec. Τα διαφορετικά χρώματα δείχνουν τις διαφορετικές ταχύτητες των σωματιδίων του καυσίμου (κόκκινο=130 m/s., πράσινο=60 m/s. και μπλε=5 m/s.).



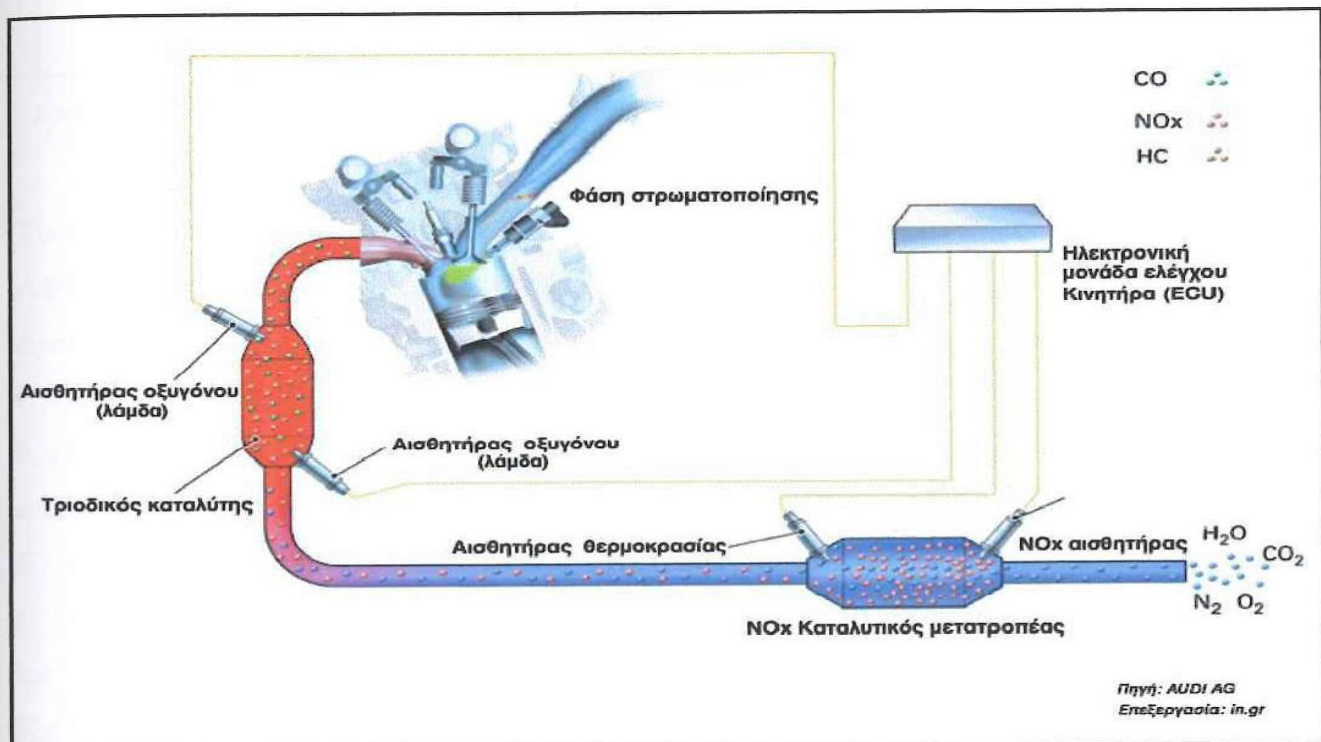
*Σχήμα 7-23 : Σε συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα υπό υψηλά φορτία, έχουμε ψεκασμό κατά τη φάση της εισαγωγής της δραστικής μίξης*



*Σχήμα 7-24 : Σε μικρά φορτία το καύσιμο ψεκάζεται στο τέλος του χρόνου συμπίεσης, όπως σε όλους τους κινητήρες άμεσου ψεκασμού*

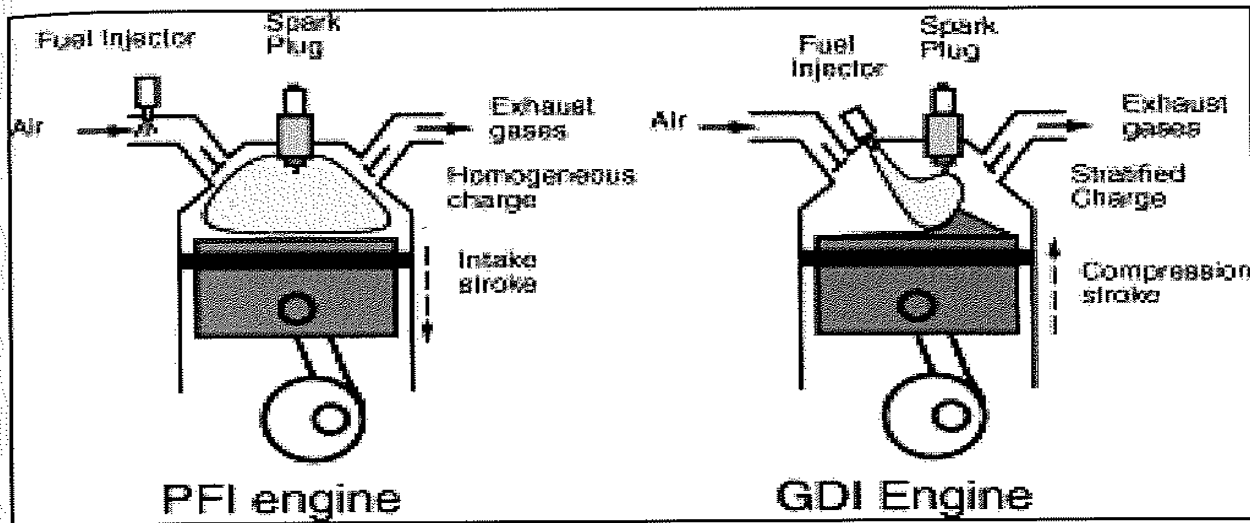
Η διαμορφωμένη κοιλότητα στην επιφάνεια του εμβόλου επιτρέπει την επίτευξη υψηλής σχέσης συμπίεσης. (11.5:1). Ο κινητήρας λειτουργεί κι αυτός, με τα δύο προγράμματα λειτουργίας στρωματοποιημένου (σχήμα 7-23) και ομοιογενούς μίγματος (σχήμα 7-24), όπως περιγράφηκε για όλους τους κινητήρες άμεσου ψεκασμού..

Όσον αφορά το σύστημα επανακυκλοφορίας των καυσαερίων EGR μια ηλεκτρονικά ελεγχόμενη βαλβίδα ρυθμίζει το ποσοστό της επανακυκλοφορίας τους. Η βαλβίδα αυτή στην περίπτωση του FSI διοχετεύει περισσότερο από το 30% των καυσαερίων πίσω στο θάλαμο καύσης. Δύο καταλύτες ελέγχουν την ποιότητα των καυσαερίων, ένας τριοδικός μετά την πολλαπλή εξαγωγής και ένας καταλυτικός μετατροπέας NOx πριν από το σιγαστήρα της εξάτμισης (σιλανσιέ) (σχήμα 7-25).



Σχήμα 7-25 : Διάγραμμα ελέγχου εκπομπής ρύπων σε κινητήρα FSI

## 7.8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΜΕΣΟΥ - ΕΜΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ



Σχήμα 7-26 : Αριστερά : κινητήρας έμμεσου ψεκασμού, Δεξιά : κινητήρας άμεσου ψεκασμού

- Το καύσιμο εγχέεται απευθείας στο θάλαμο καύσης (σχήμα 7-26)
- Αύξηση της συμπίεσης του κινητήρα έως 12.5:1.
- Διαφορές στη γεωμετρία του θαλάμου καύσης. Ειδική διαμόρφωση "οδηγών - τοιχωμάτων" στην εσωτερική του επιφάνεια
- Καλύτερος στροβιλισμός του εισερχόμενου αέρα εξαιτίας του ευθύγραμμου, κατακόρυφου αυλού εισαγωγής
- Ελεγχόμενη διάχυση της βενζίνης με μεγάλη ακρίβεια.
- Η γωνία ψεκασμού είναι η ίδια με την κατεύθυνση της ροής του αέρα εισαγωγής για καλύτερη ανάμειξη
- Καλύτερη ανάμειξη του αέρα με τη βενζίνη με αποτέλεσμα να έχουμε αποδοτικότερη καύση
- Καλύτερη και αμεσότερη απόκριση στην επιτάχυνση και επιβράδυνση του κινητήρα.
- Καλύτερη απόδοση και με πιο δυναμικά χαρακτηριστικά κατά την εκκίνηση τις κρύες μέρες του χειμώνα.
- Οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν με πολύ φτωχό μίγμα, που κατά περίπτωση μπορεί να φθάνει το 40:1 κατά βάρος δηλαδή 40 μέρη αέρα προς 1 μέρος βενζίνης

- Ειδική καμπύλη διαμόρφωση της κεφαλής του εμβόλου που προκαλεί το στροβιλισμό του μίγματος σε διεύθυνση κάθετη στον άξονα του κυλίνδρου(σχήμα 7-27)



*Σχήμα 7-27 : τρία έμβολα με ειδική διαμόρφωση εμβόλου*

- Μειωμένη κατανάλωση σε σχέση με τα συστήματα έμμεσου ψεκασμού περίπου κατά 15% ενώ μπορεί να φθάσει και σε υψηλότερα ποσοστά.
- Μειωμένη εκπομπή ρύπων η οποία μπορεί να φθάσει το 25 %.
- Χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στο σύνολο του κύκλου ζωής ενός αυτοκινήτου



## 7.9. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

Παρά το γεγονός ότι η τεχνογνωσία στο θέμα των κινητήρων άμεσου ψεκασμού έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, οι τελευταίοι είναι δύσκολο να βρουν ευρύ πεδίο εφαρμογής, αν δεν ξεπεραστούν προηγουμένως ορισμένα σημαντικά εμπόδια.

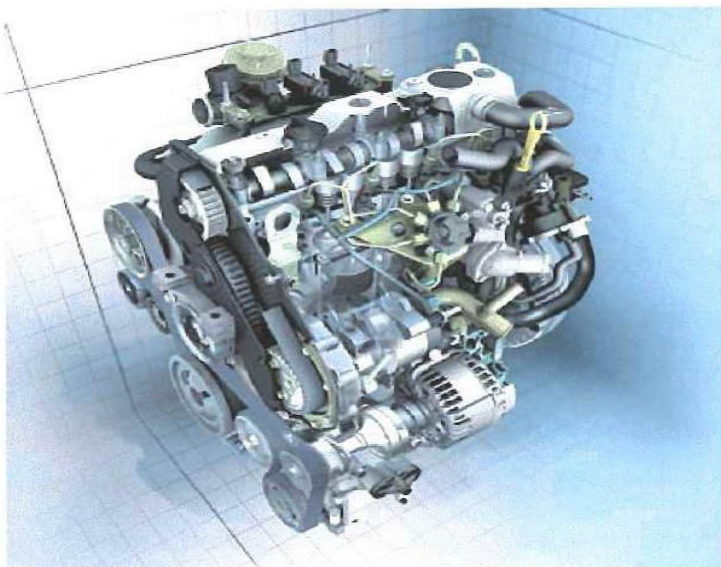
Το κυριότερο εμπόδιο είναι αυτό της επεξεργασίας των οξειδίων του αζώτου, τομέας στον οποίο οι καταλύτες κατακράτησης των ρύπων αυτών είναι η μόνη λύση. Επίσης εξακολουθούν να παρουσιάζουν κάποια προβλήματα εκπομπής άκαυστων υδρογονανθράκων, που οφείλονται στη ανικανότητα καύσης του πολύ φτωχού εκείνου μίγματος που βρίσκεται πολύ μακριά από το μπουζί. Παρουσιάζουν όμως, παραδόξως, και πρόβλημα εκπομπής σωματιδίων άνθρακα - και μάλιστα ικανών σε ποσότητα, όταν αρχίσει η «παραγωγή» τους. Τα σωματίδια αυτά έχουν σημαντικά μικρότερο μέγεθος από τα αντίστοιχα που εκπέμπουν οι μηχανές πετρελαίου, αλλά είναι εξίσου επικίνδυνα - αν όχι περισσότερο, λόγω του πολύ μικρότερου μεγέθους τους - για τη δημόσια υγεία. Προέρχονται από τη καύση μίγματος, το οποίο μπορεί να είναι πλούσιο, τοπικά, γύρω από το μπουζί ή μίγματος που εμπεριέχει μικροσταγόνες καυσίμου στις οποίες δεν δόθηκε επαρκής χρόνος ώστε να εξατμιστούν, μέχρι τη στιγμή της έναυσης.

Στα μείον τους ακόμα συγκαταλέγεται τόσο η λειτουργικότητα όσο και η μακροζωία τους, οι οποίες επηρεάζονται αρνητικά από το θείο που περιέχεται στα καύσιμα. Σήμερα, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο είναι τα 30 ppm, κάτι όμως που δυσκολεύονται να επιτύχουν οι εταιρείες πετρελαιοειδών. Επιπλέον, υπάρχουν σοβαρά ερωτήματα για την αξιοπιστία και τη μακροβιότητα των συστημάτων τροφοδοσίας, τα οποία χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα και μεγάλες απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος στα μπεκ και στην αντλία. Τέλος, η αυξημένη ισχύς που αποδίδουν ενδεχομένως θα επιφέρει και μεγαλύτερη φθορά στους κινητήρες, κάτι όμως που ακόμα δεν μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια.

## 8. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL

### 8.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Αρχικά η τεχνολογία του diesel είχε εφαρμογή σε μεγάλες-σταθερές μηχανές και σε μηχανές πλοίων, όπου το καύσιμο ψεκαζόταν στον θάλαμο καύσης από ξεχωριστούς συμπιεστές: ένα σύστημα ακριβό και λιγότερο αποδοτικό. Αργότερα, στις αρχές του 1900 εφευρέθηκε η έγχυση του καυσίμου σε προθάλαμο καύσης, αυξάνοντας την δυναμική της τεχνολογίας diesel. Πριν από 75 χρόνια, στα τέλη του 1927, η Bosch ξεκίνησε την πρώτη μαζική παραγωγή αντλιών ψεκασμού diesel. Έτσι οι κατασκευαστές είχαν στη διάθεσή τους ένα σύστημα ψεκασμού που επέτρεπε την οικονομική παραγωγή μικρών κινητήρων diesel για φορτηγά, λεωφορεία και αργότερα και για επιβατικά οχήματα. Μετά από αρκετά χρόνια, το 1962 παρουσιάστηκε η πρώτη περιστροφική αντλία ψεκασμού.



Σχήμα 8-1 : φωτογραφία σύγχρονου πετρελαιοκινητήρα

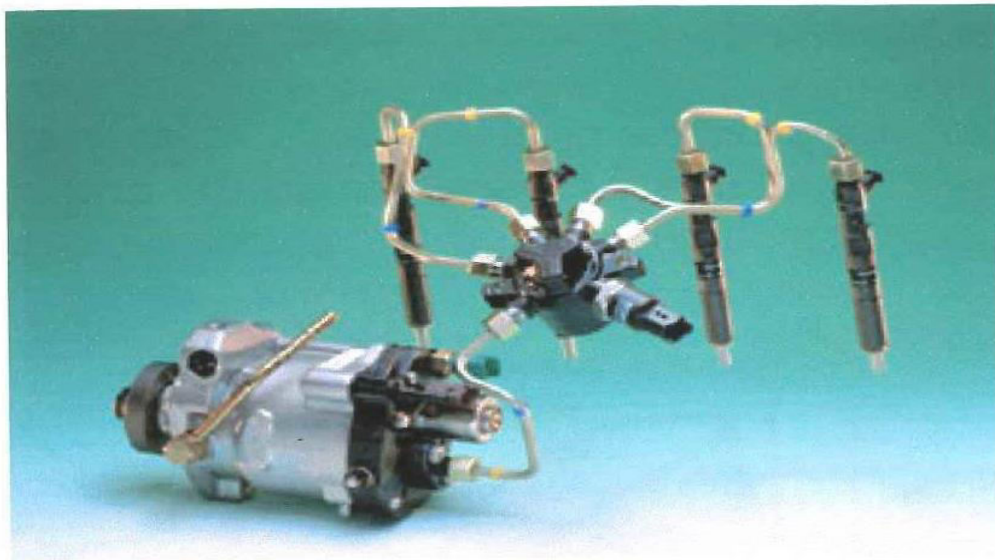
Με τη βοήθεια της τεχνολογίας των υλικών, της μηχανικής και κυρίως της ηλεκτρονικής τα τελευταία 20 χρόνια οι εξελίξεις ήταν ραγδαίες. Έτσι το 1986 εμφανίστηκε το πρώτο ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα ψεκασμού diesel EDC (Electronic Diesel Control). Μια χρονιά σταθμός στα συστήματα ψεκασμού ήταν το 1989 όπου τοποθετήθηκε το πρώτο σύστημα άμεσου ψεκασμού με ηλεκτρονικά ελεγχόμενη αντλία σε επιβατικό αυτοκίνητο παραγωγής. Το 1994 ακολούθησε η έναρξη της παραγωγής της μονάδας αντλίας-μπεκ UIS (Unit Injector System) για φορτηγά και το 1998 για επιβατικά. Η τελευταία σημαντική εξέλιξη ήταν το 1996 με το λανσάρισμα της πρώτης γενιάς συστημάτων Common Rail. Τα σημερινά αυτοκίνητα παραγωγής (σχήμα 8-1) εξοπλίζονται με εξελιγμένα συστήματα τρίτης γενιάς και σύντομα αναμένονται στην παραγωγή τα τέταρτης γενιάς.

## 8.2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο πετρελαιοκινητήρας (κινητήρας DIESEL) είναι ένας παλινδρομικός κινητήρας εσωτερικής καύσης, στον οποίο το καύσιμο μείγμα σχηματίζεται μέσα στο θάλαμο καύσης. Η διαδικασία σχηματισμού του καυσίμου μείγματος είναι διαφορετική από αυτήν των βενζινοκινητήρων. Το καύσιμο μείγμα δεν σχηματίζεται έξω από τους θαλάμους καύσης, πριν από τις βαλβίδες εισαγωγής, αλλά η ανάμειξη του αέρα και του καυσίμου γίνεται μέσα στους κυλίνδρους, λίγο πριν το έμβολο φτάσει στο άνω νεκρό σημείο. Τους κινητήρες diesel οι οποίοι χρησιμοποιούν σύστημα ψεκασμού με προθάλαμο καύσης τους αναφέρουμε ως έμμεσου ψεκασμού και αυτούς χωρίς προθάλαμο οι οποίοι είναι πιο σύγχρονης τεχνολογίας, ως άμεσου ψεκασμού.

Η λειτουργία των κινητήρων diesel στηρίζεται στη συμπίεση του αέρα μέσα στον κύλινδρο, πριν από τον ψεκασμό του καυσίμου το οποίο ψεκάζεται στο θάλαμο καύσης, υπό τη μορφή πολύ μικρών σταγονιδίων, που πρέπει να έχουν διάμετρο της τάξης των 5-40  $\mu\text{m}$ . Σταγονίδια μεγαλύτερου μεγέθους επιμηκύνουν τη διαδικασία της καύσης και προκαλούν το σχηματισμό αιθάλης. Η συμπίεση του αέρα είναι τόσο, που από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται, μόλις ψεκαστεί το καύσιμο μέσα στον κύλινδρο, αναφλέγεται χωρίς σπινθήρα. Λόγω των μεγάλων πιέσεων που απαιτούνται για ανάπτυξη των αναγκαίων (για την αυτανάφλεξη του καυσίμου) θερμοκρασιών, αντίστοιχα μεγάλη πρέπει να είναι και η πίεση ψεκασμού του καυσίμου, για να μπορέσει όχι μόνο να εισέλθει, αλλά και να στροβιλιστεί μέσα στο θάλαμο καύσης. Έτσι, το τεχνολογικό ενδιαφέρον των κινητήρων diesel εστιάζεται στο σύστημα ψεκασμού τους.

Η ποσότητα του καυσίμου που ψεκάζεται από την αντλία, ρυθμίζεται με το πάτημα του πεντάλ του γκαζιού και καθορίζει την ισχύ που ο οδηγός ζητά από τον κινητήρα. Η έναρξη της καύσης καθορίζεται επίσης από την αντλία ψεκασμού και αντιστοιχεί στην ανάφλεξη μέσω των μπουζί (σπινθηριστών) των βενζινοκίνητων κινητήρων. Όμοια όπως και στους βενζινοκινητήρες ή ρύθμιση της προπορείας (δηλαδή η χρονική στιγμή της ανάφλεξης) πρέπει να γίνεται με μεγάλη ακρίβεια. Στους πετρελαιοκινητήρες καθορίζεται από την αντλία ψεκασμού πετρελαίου (σχήμα 8-2).



*Σχήμα 8-2 : φωτογραφία με την αντλία ψεκασμού υψηλής πίεσης και με τους εγχυτήρες*

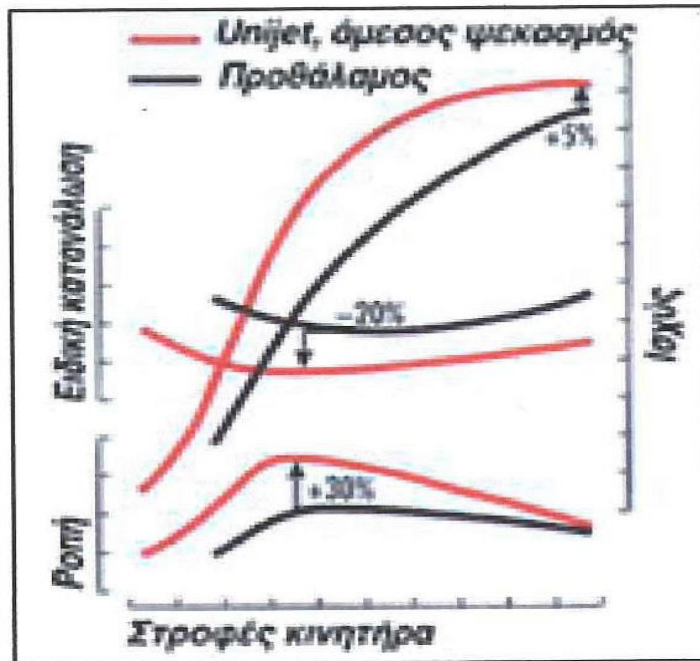
### 8.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΨΕΚΑΣΜΟΥ

#### 8.3.1. Αναφορικά

Στους πρώτους diesel, το καύσιμο ψεκαζόταν στους κυλίνδρους όχι αυτούσιο, αλλά αναμεμειγμένο με συμπιεσμένο αέρα. Στις αρχές της δεκαετίας του '20 οι diesel απέκτησαν νέο σύστημα «υγρής» τροφοδοσίας. Το καύσιμο ψεκαζόταν σε υγρή κατάσταση, αλλά η πίεση του ψεκασμού ήταν μικρή και δεν επέτρεπε τον άμεσο ψεκασμό.

Οι κινητήρες με προθάλαμο ήταν οι πρώτοι που αναπτύχθηκαν και επικράτησαν στο χώρο των επιβατικών αυτοκινήτων για πολλά χρόνια. Ενώ ακόμα και σήμερα μεγάλος αριθμός πετρελαιοκίνητων αυτοκινήτων διαθέτει κινητήρα με προθάλαμο. Ο λόγος της επικράτησης του έμμεσου ψεκασμού πρέπει να αναζητηθεί στην καλύτερη προετοιμασία του μείγματος, που είναι απαραίτητη για την καλή απόδοση στις ψηλές στροφές, παρά τη σχετικά χαμηλή πίεση ψεκασμού. Ωστόσο, αν και πιο αποδοτικοί από τους βενζινοκινητήρες, οι κινητήρες με προθάλαμο δεν μπορούν να πετύχουν τόσο υψηλό βαθμό απόδοσης, όσο οι κινητήρες άμεσου ψεκασμού (σχήμα 8-3), λόγω των απωλειών ροής από τον προθάλαμο στον κυρίως θάλαμο καύσης και των συγκριτικά αυξημένων θερμικών απωλειών.

Τα προβλήματα αυτά δεν υπάρχουν στον άμεσο ψεκασμό, με τη βοήθεια του οποίου μειώνεται η κατανάλωση σε ποσοστό 15-20%, σε σχέση με τον έμμεσο. Εφ' όσον το καύσιμο ψεκάζεται με υψηλή πίεση στους κυλίνδρους, μπορεί να επιτευχθεί καλή ανάμειξή του με τον αέρα. Αυτό έγινε πραγματοποιήσιμο μετά το 1950, οπότε, οι diesel άμεσου ψεκασμού άρχισαν να αντικαθιστούν τους έμμεσου ψεκασμού, στα φορτηγά και στα βαριά οχήματα.



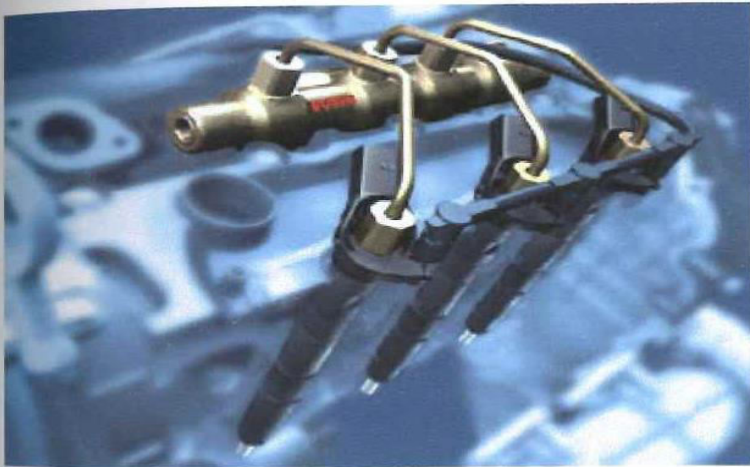
Σημά 8-3 : Συγκριτικό διάγραμμα ισχύος, ροπής και ειδικής κατανάλωσης κινητήρων Diesel με προθάλαμο και με σύστημα άμεσου ψεκασμού

Τα συστήματα ψεκασμού που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι :

- το σύστημα ψεκασμού με αντλία διανομής περιστρεφόμενου / παλινδρομούντος εμβόλου (που είναι και το παλιότερο)
- το σύστημα unit injector (ανεξάρτητη μονάδα αντλίας-ακροφυσίου)
- το σύστημα άμεσου ψεκασμού common rail (κοινή γραμμή τροφοδοσίας) .

### 8.3.2. Σύστημα αντλίας διανομής περιστρεφόμενου / παλινδρομούντος εμβόλου

Το έμβολο της αντλίας διανομής έχει τη μορφή πολυέδρου σωλήνα με μια μικρή οπή σε κάποιο σημείο του. Με τη βοήθεια ενός ειδικού μηχανισμού, το έμβολο παλινδρομεί και ταυτόχρονα περιστρέφεται μέσα σε ένα χιτώνιο. Το χιτώνιο αυτό σε κάποιο σημείο κατά μήκος έχει τόσες ισοκαταναμημένες οπές στην περίμετρο του όσοι είναι οι κύλινδροι του κινητήρα (τέσσερις ή έξι, γιατί αυτή η τεχνολογία δεν μπορεί να λειτουργήσει με περισσότερους κύλινδρους). Από καθεμία από αυτές τις οπές ξεκινάει ένας σωλήνας που καταλήγει στο μπεκ ψεκασμού ενός κυλίνδρου. Κατά την παλινδρόμηση, το καύσιμο συμπιέζεται στην εσωτερική κοιλότητα του εμβόλου, ενώ με την περιστροφή, η μία και μοναδική οπή στο πλάι του εμβόλου ευθυγραμμίζεται με τη σειρά με καθεμία από τις οπές του χιτωνίου. Έτσι, το υπό πίεση καύσιμο που υπάρχει στο εσωτερικό του εμβόλου εκτονώνεται προς το κάθε μπεκ, που λειτουργεί μηχανικά με την πίεση του καυσίμου.



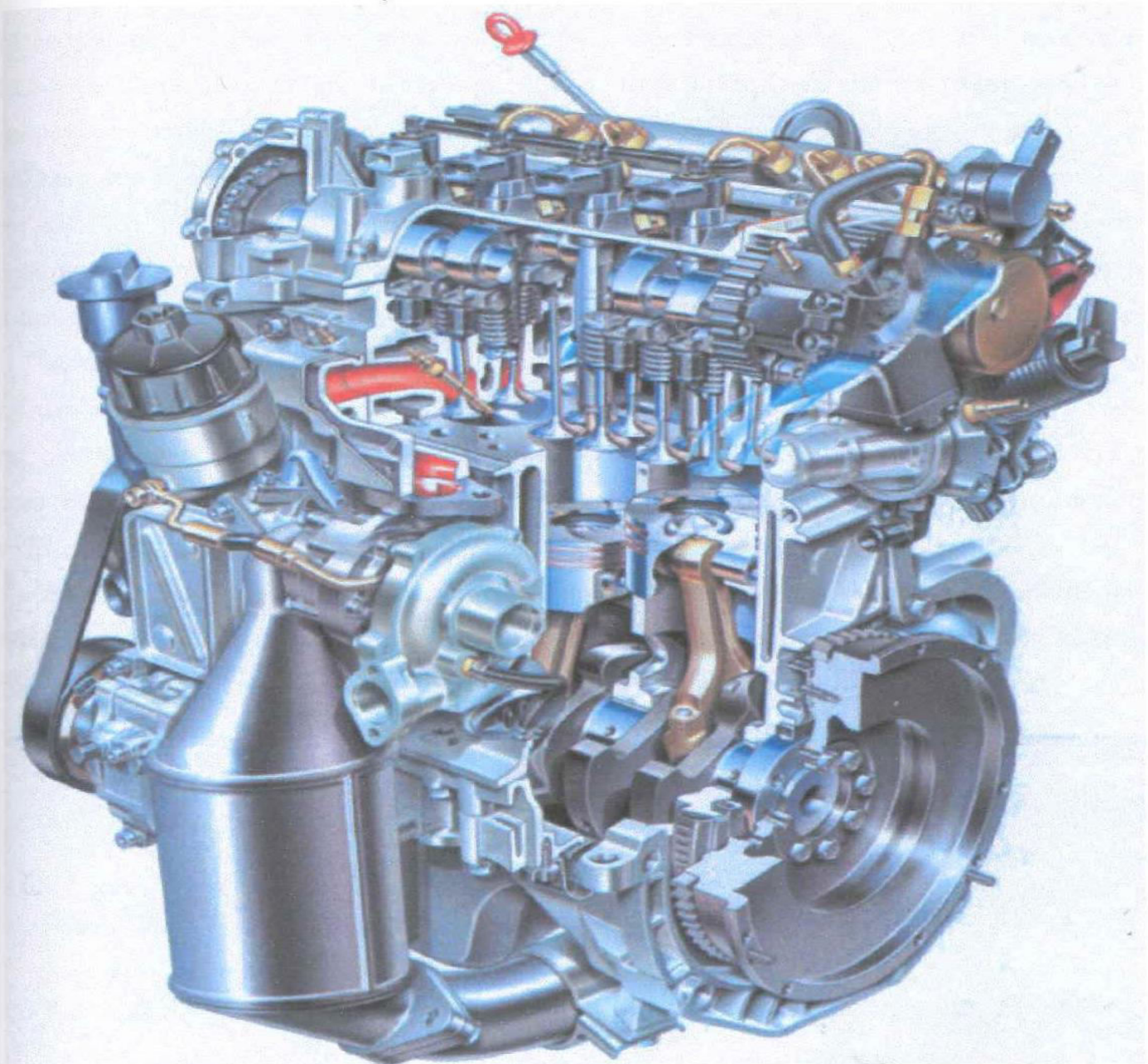
*Σχήμα 8-4 : Σύστημα ψεκασμού με ανεξάρτητες μονάδες αντλίας- ακροφυσίου*

Η αντλία λοιπόν, εκτός από την αύξηση της πίεσης (σε τιμές, που ξεκινούν από τα 300 και φτάνουν στα 550 bar ανάλογα με την εφαρμογή), κάνει και τη δουλειά του διανομέα (ντιστριμπιτέρ) ενός κινητήρα βενζίνης, και γι' αυτό παίρνει κίνηση από τον εκκεντροφόρο και είναι συγχρονισμένη με αυτόν.

### 8.3.3. Σύστημα Unit injector

Μια ενδιαφέρουσα και πιο σύγχρονη παραλλαγή του παραπάνω είναι αυτή της ανεξάρτητης μονάδας αντλίας-ακροφυσίου (σχήμα 8-4). Η απαιτούμενη πίεση δε διοχετεύεται μέσω μιας κοινής αντλίας ή γραμμής παροχής στους κυλίνδρους, αλλά δημιουργείται στο ακροφύσιο ψεκασμού κάθε κυλίνδρου ξεχωριστά, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πίεσης μέχρι και 2.050 bar, η οποία βελτιώνει την καύση και προσφέρει σημαντική βελτίωση ροπής και ιπποδύναμης, καθώς και καλύτερη ποιότητα καυσαερίων.

Κατασκευαστικά, το σύστημα αποτελείται από ανεξάρτητες μονάδες ψεκασμού, προσαρμοσμένες στην κυλινδροκεφαλή, οι οποίες περιλαμβάνουν από ένα ακροφύσιο ψεκασμού και μια αντλία καυσίμου για κάθε κύλινδρο. Ένα μικρό, μηχανικά κινούμενο έμβολο (μέσω ενός επιπλέον έκκεντρου στον εκκεντροφόρο των βαλβίδων) φροντίζει για την ανάπτυξη της απαιτούμενης πίεσης. Το καύσιμο προωθείται στη μονάδα αντλίας-ακροφυσίου από μια αντλία υποπίεσης, η οποία βρίσκεται στην κυλινδροκεφαλή, έτσι ώστε να περιοριστεί η απόσταση που είναι αναγκασμένο να διανύσει το καύσιμο (σχήμα 8-5).



*Σχήμα 8-5: Εφαρμογή συστήματος Unit Injector σε σύγχρονο πετρελαιοκινητήρα*

### 8.3.4. Σύστημα common rail

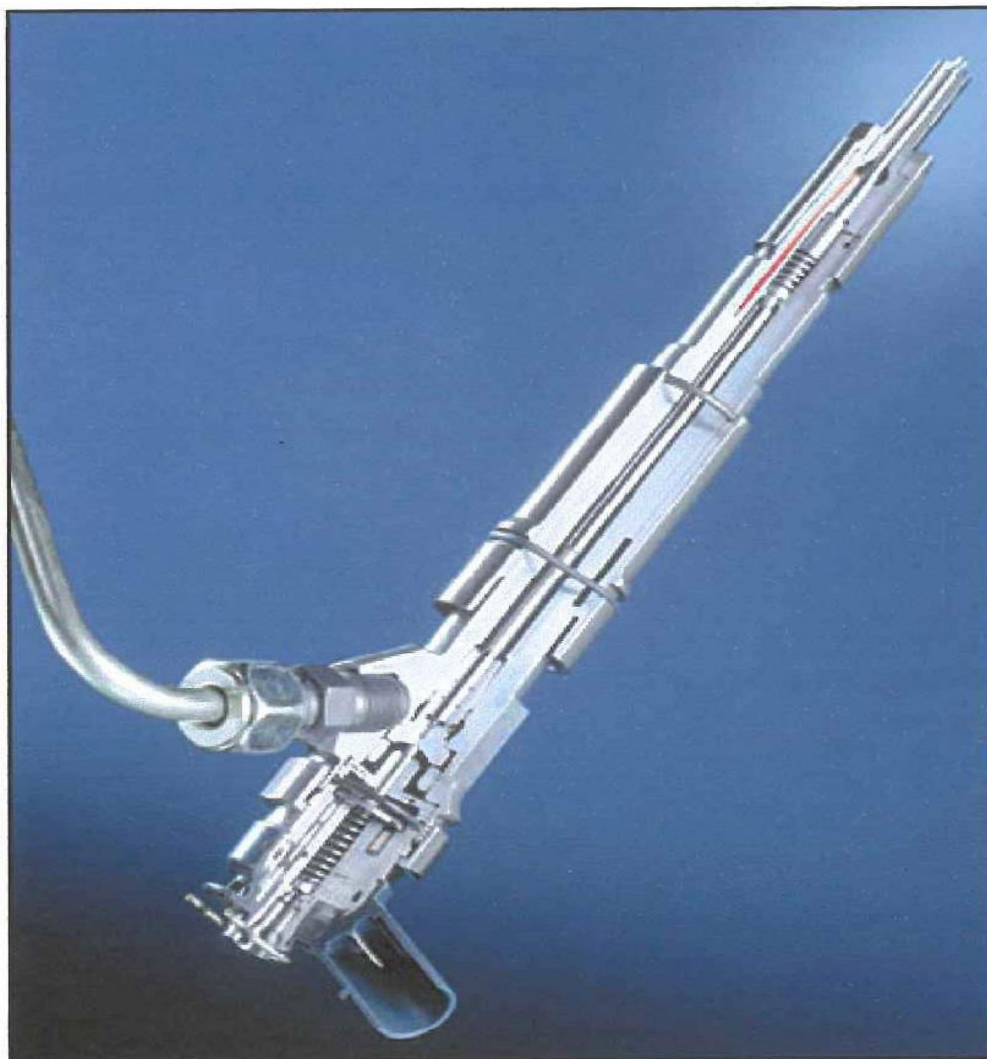
Το common rail είναι το πλέον σύγχρονο και εξελιγμένο σύστημα ψεκασμού για κινητήρες diesel. Η βασικότερη καινοτομία την οποία εισάγει είναι ότι το υπό πίεση καύσιμο που παρέχεται από την αντλία είναι διαχωρισμένο από εκείνο που ψεκάζεται στον κύλινδρο.

Η πίεση η οποία παράγεται από την αντλία μεταβιβάζεται και αποθηκεύεται στο συλλέκτη καυσίμου (common rail). Η λειτουργία της αντλίας περιορίζεται στο να κρατά το συλλέκτη συνεχώς υπό πλήρη πίεση –ανεξάρτητη από τις στροφές του κινητήρα -και όχι στο να παρέχει καύσιμο άμεσα στους κυλίνδρους . Η αντλία είναι κατασκευασμένη από κράματα μετάλλων που έχουν υποστεί ειδικές κατεργασίες, έτσι ώστε να μη φθείρονται τα τριβόμενα μέρη της. Οι κατασκευαστικές της ανοχές είναι πολύ μικρές για να επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες υψηλές πιέσεις χωρίς διαρροές Αξίζει να επισημανθεί ότι είναι ένα εξάρτημα ακριβότερο και από τον ίδιο τον κινητήρα.

Μετά τη δημιουργία της απαιτούμενης πίεσης λειτουργίας, το καύσιμο εισέρχεται στα μπεκ του συστήματος και από κει ψεκάζεται η κατάλληλη ποσότητα αυτού με μορφή νέφους μέσα στο θάλαμο καύσης. Γι' αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία η διατομή και η επιφάνεια του ακροφυσίου, από όπου βγαίνει το καύσιμο, η οποία καθορίζει το εύρος του ψεκασμού καθώς και την ποσότητα που θα βγει κάθε φορά.

Έτσι, τα μπεκ έχουν εξελιχθεί και διαθέτουν όχι μία, αλλά πολλές οπές και ψεκάζουν το καύσιμο προς πολλές κατευθύνσεις (4-6) μέσα στο θάλαμο καύσης, με στόχο τον καλύτερο στροβιλισμό και τη δημιουργία πιο ομοιογενούς μείγματος (σχήμα 8-6).

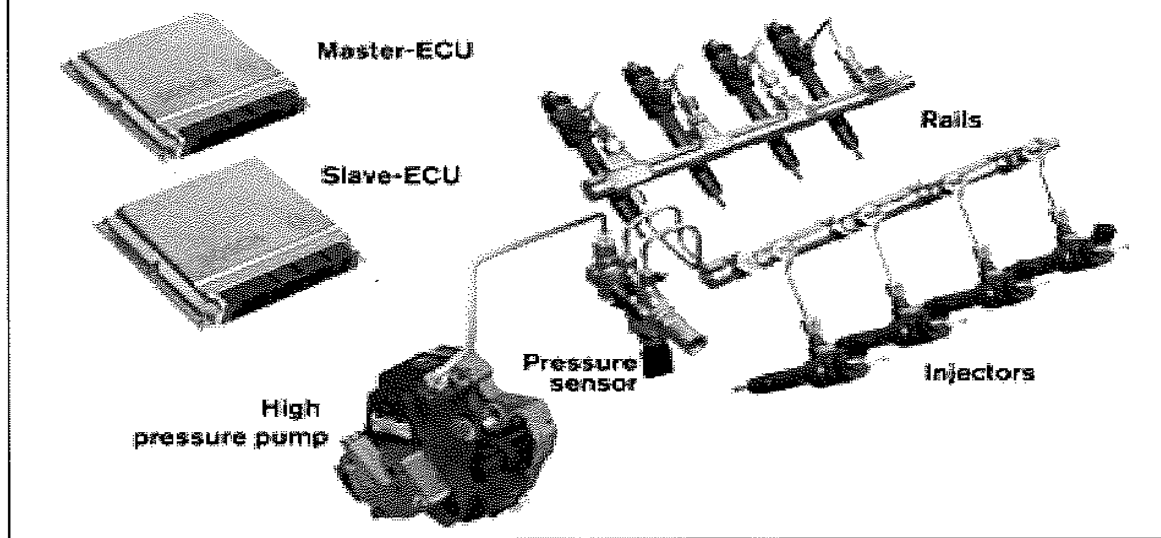




*Σχήμα 8-6 : Τομή εγχυτήρα πολλών οπών συστήματος άμεσου ψεκασμού*

Πέρα από το μηχανικό αυτό σύνολο του συστήματος ψεκασμού, καθοριστικό ρόλο παίζει και η ηλεκτρονική μονάδα που ελέγχει αυτό το σύστημα, το Electronic Diesel Control EDC, η οποία λαμβάνει πληροφορίες από ένα σύνολο αισθητήρων και ρυθμίζει πολλές παραμέτρους κατά την έγχυση, όπως είναι η ταχύτητα και η διάρκεια του χρόνου ψεκασμού του καυσίμου. Οι σύγχρονες κεντρικές μονάδες ελέγχου της λειτουργίας των κινητήρων έχουν αυξήσει την απόδοσή τους 40 φορές (επεξεργάζονται 6000 παραμέτρους αντί 500) και οι επεξεργαστές 8 bit έχουν αντικατασταθεί από αυτούς των 32 bit. Η απόδοση αυτή αντιστοιχεί σε έναν επεξεργαστή Pentium II κάτω από το μπροστινό καπό. Στη συνέχεια, στέλνει τα κατάλληλα σήματα στην ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα ελέγχου του κάθε μπεκ.

### Common Rail System for 8-Cylinder Passenger Car Diesel Engines

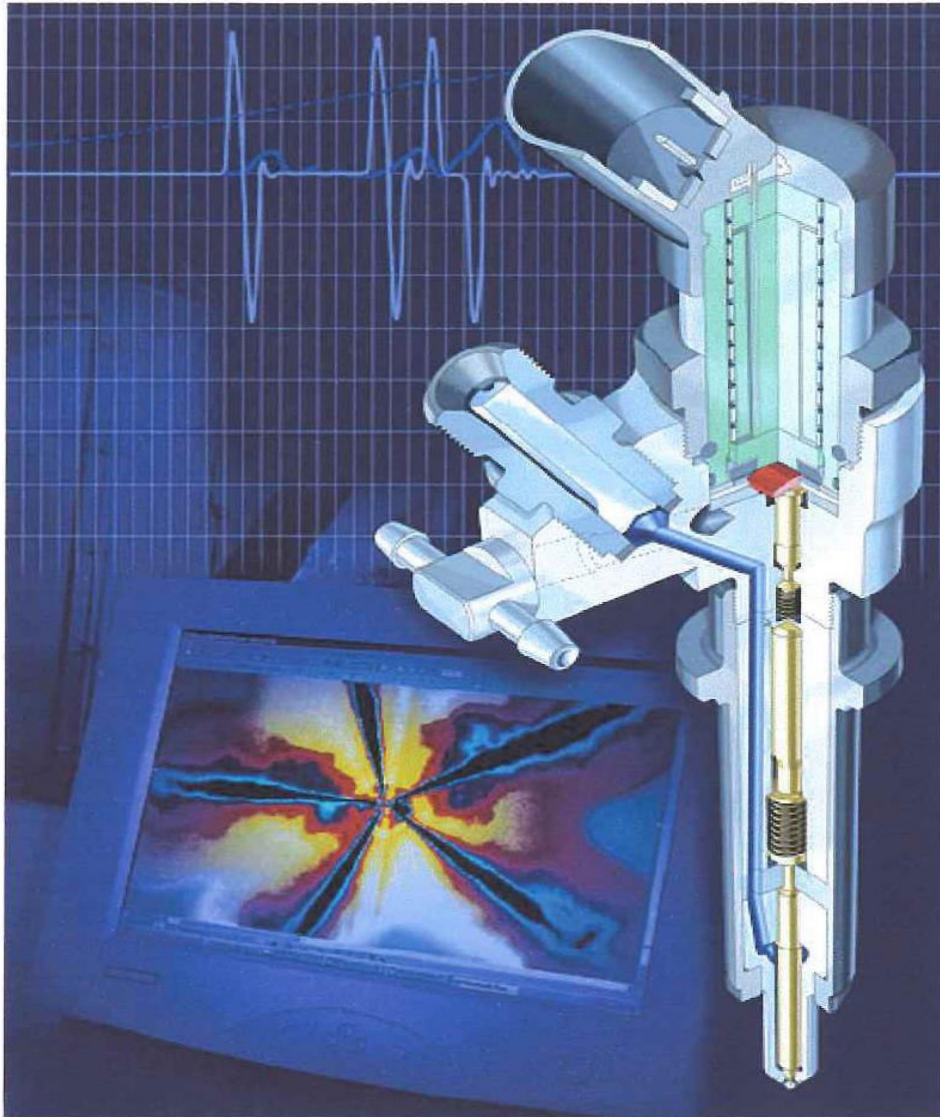


Σχήμα 8-7 :Σύστημα άμεσου ψεκασμού Common Rail

Τα συστήματα common rail (σχήμα 8-7) πρώτης γενιάς παρουσιάστηκαν σε επιβατικά αυτοκίνητα το 1996 και λειτουργούσαν με πίεση 1.350 bar! Στα common rail δεύτερης γενιάς η πίεση αυξήθηκε ακόμα περισσότερο, για να φτάσει στα 1.600-1.800 bar.

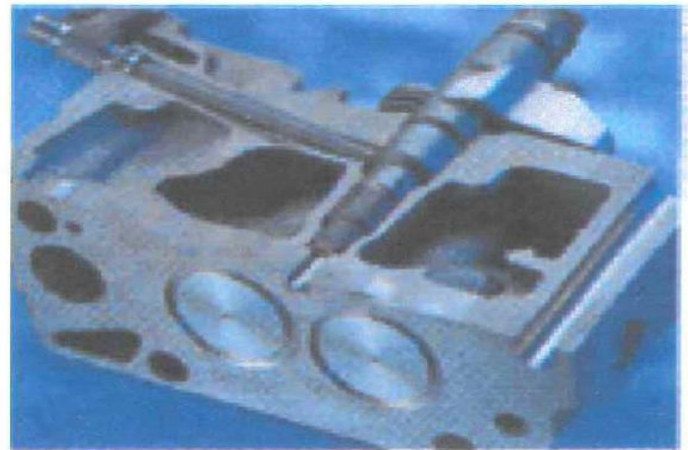
Στο τρίτης γενιάς σύστημα common rail της γερμανικής Bosch γίνεται εκμετάλλευση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, της πρόκλησης δηλαδή πόλωσης μέσω πίεσης σε ειδικά μονωτικά υλικά, στα μπεκ καυσίμου. Σύμφωνα με την ίδια την εταιρεία κατασκευής, για πρώτη φορά έχει γίνει πλήρης εκμετάλλευση των πιεζοηλεκτρικών εγχυτήρων (σχήμα 8-8), οι οποίοι καταφέρνουν αμεσότερο και ακριβέστερο έλεγχο της ποσότητας του ψεκαζόμενου καυσίμου.

Τέλος, προσφέρει μειωμένη κατανάλωση κατά 3%, αυξημένη απόδοση του κινητήρα πάνω από 5% ενώ ο θόρυβος έχει μειωθεί κατά 3dB (τιμή ιδιαίτερα μεγάλη αφού η κλίμακα των ντεσιμπέλ είναι λογαριθμική). Τα πρώτα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής με κινητήρες που ενσωματώνουν την τρίτη γενιά της τεχνολογίας common rail άρχισαν να πωλούνται στην αγορά μετά το καλοκαίρι του 2004.



*Σχήμα 8-8 : τομή εγχυτήρα σε πιεζοηλεκτρικό σύστημα άμεσου ψεκασμού*

Η τάση του μέλλοντος είναι ο ολοένα και μεγαλύτερος περιορισμός των ρύπων, με συνεχή εξέλιξη των συστημάτων common rail (σχήμα 8-9). (Οι δυνατότητες της αντλίας διανομής υψηλής πίεσης επαρκούν μόνο για να επιτευχθούν τα όρια EURO III. Έτσι, στο μέλλον, η τεχνολογία αυτή θα εγκαταλειφθεί.) Σειρά έχει τώρα η ανάπτυξη τεχνολογιών για την καλύτερη διαχείριση της τεράστιας -πλέον- πίεσης λειτουργίας των συστημάτων common rail.



*Σχήμα 8-9 : :τομή κυλινδροκεφαλής όπου διακρίνονται οι βαλβίδες και η θέση του εγχυτήρα συστήματος Common rail*

Οι νέες γενιές common rail θα βασίζονται σε μπεκ με μεταβαλλόμενο ακροφύσιο και υδραυλικό μηχανισμό που θα αυξάνει την πίεση. Προβλέπεται ότι μέχρι το 2007 θα διατίθεται στην αγορά ένα επαναστατικό σύστημα τεχνολογίας common rail που θα περιλαμβάνει μια δεύτερη συστοιχία μπεκ, με μεγαλύτερη διατομή ανοίγματος, που θα ψεκάζουν μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Η πίεση του συστήματος θα αγγίζει τα 1.800bar ενώ ο θόρυβος θα είναι μειωμένος σε ποσοστό 70%.

Επίσης, η Bosch μελετά ένα ακόμα σύστημα ψεκασμού common rail το οποίο αναμένεται στην παραγωγή το 2008 και στο οποίο η αντλία διοχετεύει το καύσιμο υπό σχετικά χαμηλή πίεση, γύρω στα 1.350bar. Το καύσιμο φτάνει στα μπεκ τα οποία θα διαθέτουν υδραυλικό μηχανισμό που θα ανεβάζει την πίεση ψεκασμού στα 2.200bar(!)

#### 8.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ – ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Οι υψηλές τιμές πίεσης οδήγησαν σε καλύτερη σταγονοποίηση και ομαλότερη καύση του πετρελαίου, με, γενικά, μικρότερες εκπομπές αερίων ρύπων και εξαιρετικά περιορισμένες εκπομπές σωματιδίων άνθρακα. Αυτό όμως επέφερε και προβλήματα όπως είναι η αύξηση της περιεκτικότητας των οξειδίων του αζώτου (NOx) στα εκπεμπόμενα καυσαέρια αλλά και η αύξηση των επιπέδων του θορύβου.

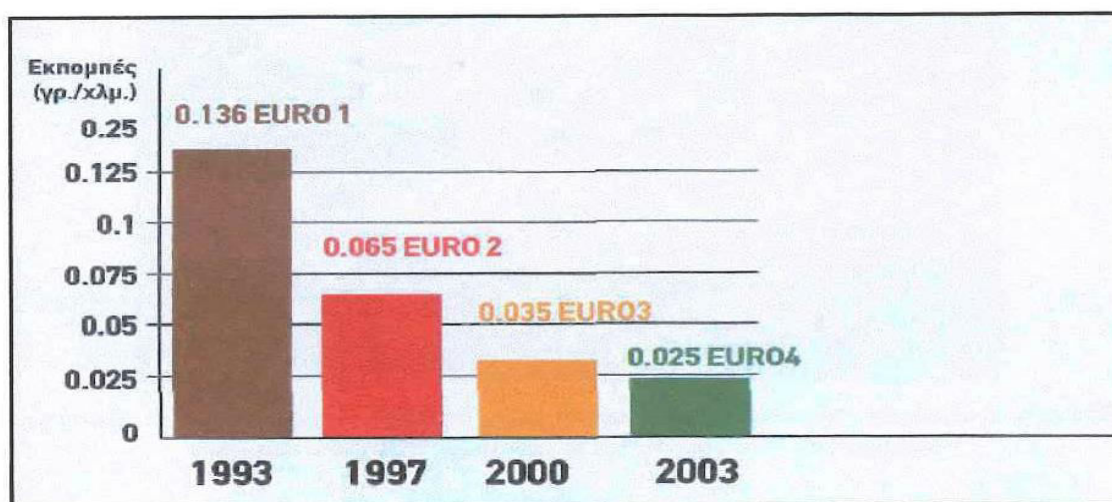
Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη λύση του «πιλοτικού ψεκασμού» ή προ-ψεκασμού.

Πριν από τον κανονικό ψεκασμό τα μπεκ ανοίγουν στιγμιαία και ψεκάζουν μια πολύ μικρή ποσότητα καυσίμου η οποία αναφλέγεται αμέσως, προθερμαίνοντας το θάλαμο καύσης. Η διάρκεια του προψεκασμού είναι γύρω στα 200 μsec και η ποσότητα του καυσίμου που εισάγεται είναι της τάξης των 2 ml. Έτσι στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια του κανονικού ψεκασμού, το πετρέλαιο αναφλέγεται πιο εύκολα, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, παράγοντας που συμβάλει αποφασιστικά στη δημιουργία των οξειδίων του αζώτου. Παράλληλα δεν παρουσιάζονται απότομες μεταβολές πίεσης, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο θόρυβος που δημιουργείται από την αυτανάφλεξη του καυσίμου μίγματος. Έτσι οι πετρελαιοκινητήρες που λειτουργούν με το σύστημα «common rail» από πλευράς θορύβου βρίσκονται ουσιαστικά στα ίδια επίπεδα με αυτούς με προθάλαμο καύσης.

Από την άλλη μεριά εξελίσσονται κι άλλα νέα συστήματα περιορισμού της εκπομπής ρύπων (π.χ. παγίδες αιθάλης) που θα κάνουν τους diesel ακόμα πιο «καθαρούς».

Οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου και των στερεών σωματιδίων έχουν μειωθεί την τελευταία δεκαετία κατά 85% (σχήμα 8-10). Έτσι πλέον καλύπτουν τις προδιαγραφές Euro III, της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Για τον περιορισμό τους χρησιμοποιούνται –πέρα από τη λύση του προψεκασμού– διάφορες μέθοδοι, όπως η ανακύκλωση των καυσαερίων και η τοποθέτηση οξειδωτικού καταλύτη. Εξαιτίας των εξαιρετικά αυστηρών προδιαγραφών Euro IV, η οποία θα ισχύει από τον Ιανουάριο του 2005, το τελευταίο διάστημα έχουν κάνει την εμφάνισή τους παγίδες αιθάλης και νέοι καταλύτες (DeNOx) για τον περαιτέρω περιορισμό των οξειδίων του αζώτου.

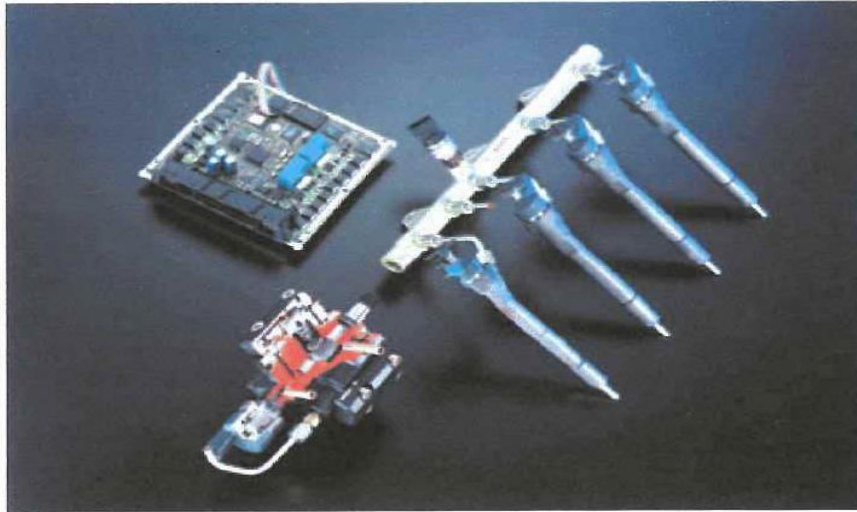


Σχήμα 8-10 : Αλλαγές στα επίπεδα εκπομπών κινητήρων diesel 1993-2003

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η κατανάλωση καυσίμου είναι ανάλογη της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) - και το αντίστροφο. Έτσι, ενώ τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), τα σωματίδια καπνού, οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) μπορούν να περιοριστούν με καταλύτη (ή κάποιας μορφής καύση φτωχού μίγματος), το CO<sub>2</sub> μπορεί να περιοριστεί μόνο με τη χρήση λιγότερου καυσίμου, δηλαδή με την καύση όσο το δυνατόν φτωχότερων μιγμάτων. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που αναζητούνται συνεχώς τρόποι για τη μείωση της κατανάλωσης.

## 8.5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΜΕΣΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ DIESEL-GASOLINE

Αυτό που θα πρέπει να παρατηρήσουμε είναι ότι με την εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων οι κινητήρες βενζίνης και πετρελαίου παρουσιάζουν όλο και περισσότερες ομοιότητες στο τμήμα της τροφοδοσίας.



*Σχήμα 8-11 : Φωτογραφία όπου διακρίνονται ο ηλεκτρονικός εγκέφαλος, η αντλία υψηλής πίεσης σε τομή και οι εγχυτήρες του συστήματος*

- Η επίτευξη μεγαλύτερης οικονομίας και στις δύο περιπτώσεις προέρχεται από το γεγονός ότι οι κινητήρες λειτουργούν σε ελεγχόμενες συνθήκες φτωχού μίγματος (ακόμα και οι diesel), γεγονός όμως που ευνοεί τη δημιουργία των οξειδίων του αζώτου (σχήμα 8-12). Ακόμα κι αν το πρόβλημα λυθεί με την εφαρμογή καταλυτών κατακράτησης, θα πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος για να εξασφαλιστεί η μακροζωία τους.
- Στα καυσαέρια των βενζινοκινητήρων περιέχονται κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρογονάνθρακες (H/C), οξείδια του αζώτου (NOx), μαζί με περαιτέρω στοιχεία όπως αιθάλη και διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>).

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του diesel τα καυσαέρια αποτελούνται από οξείδια του αζώτου (κυρίως), αιθάλη, υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου κ.λπ.

Τεχνολογία κινητήρα Τεχνικά χαρακτηριστικά Θόρυβος- Ρύποι- Κατανάλωση	BENZINΗΣ ΑΜ. ΨΕΚΑΣΜΟΥ	BENZINΗΣ ΠΟΛ. ΣΗΜΕΙΩΝ	NTΙΖΕΑ COMMON RAIL	
Κυβικά εκατοστά	1.798	1.999	1.998	
Μέγιστη ισχύς (ίπποι/σ.α.λ.)	130/6.000	145/6.000	130/3.500	
Μέγιστη ροπή (κγμ./σ.α.λ.)	17,8/4.250	19,4/4.500	33,6/1.800	
Θόρυβος σε στάση dB(A)	82	81	75	
Θόρυβος εν κινήσει dB(A)	70	72	71	* Πρέπει να επισημάνουμε ότι στους πετρελαιοκινητήρες, οι εκπομπές HC προκύπτουν έμμεσα. Μετά από πρώτα τα έθροισμα των HC και NOx και βόνο των NOx και γίνεται η προαιρετική.
CO (γρ./κλμ.)	0,166	0,51	0,101	
HC (γρ./κλμ.)	0,07	0,08	0,021*	
NOx (γρ./κλμ.)	0,043	0,064	0,225	
HC + NOx (γρ./κλμ.)	-	-	0,246	
Σωματίδια (γρ./κλμ.)	-	-	0,021	
CO <sub>2</sub> Αστικός (γρ./κλμ.)	238	276	215	
CO <sub>2</sub> Υπεραστικός (γρ./κλμ.)	137	139	127	
CO <sub>2</sub> Συνδυασμένος (γρ./κλμ.)	173	189	159	
Κατανάλωση πόλης (λίτρα/100 κλμ.)	9,9	11,5	8,1	
Κατανάλωση εκτός πόλης (λίτρα/100 κλμ.)	5,7	5,8	4,8	
Κατανάλωση — μέσος όρος (λίτρα/100 κλμ.)	7,2	7,9	6	

Σχήμα 8-12 : Σύγκριση κινητήρων βενζίνης άμεσου και έμμεσου ψεκασμού με κινητήρες Diesel Common Rail με τιμές εκπομπών ρύπων και κατανάλωσης καυσίμου.

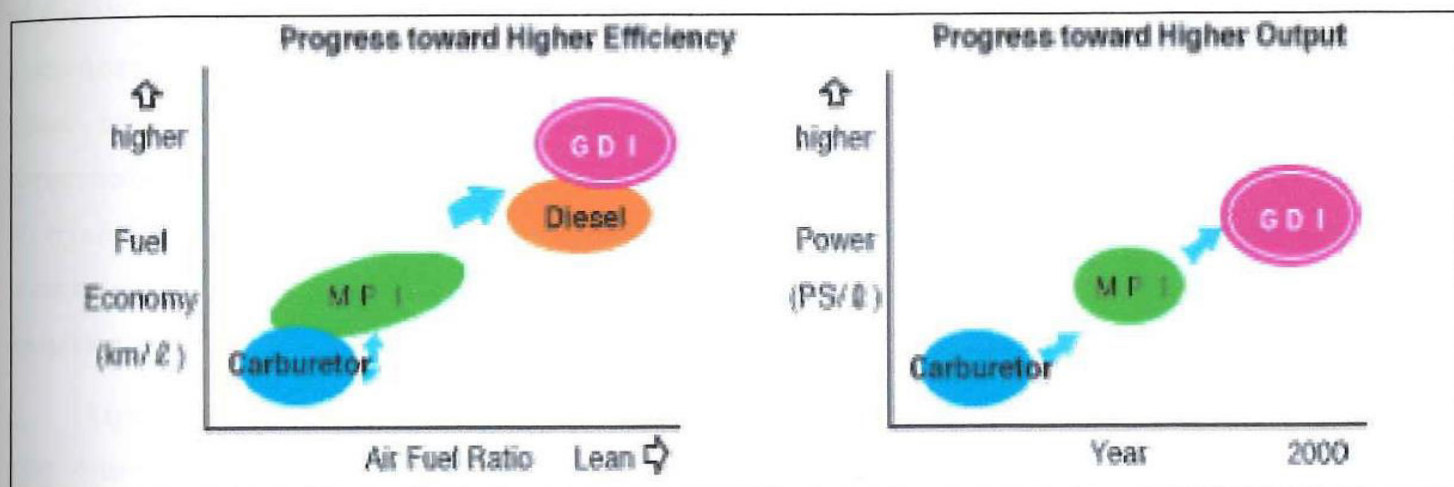
- Ο ψεκασμός του καυσίμου στους πετρελαιοκινητήρες φθάνει τα 2000 bar ενώ στους κινητήρες GDI δεν ξεπερνά τα 130 bar
- Στους κινητήρες πετρελαίου σε αντίθεση με τους βενζινοκινητήρες δεν υπάρχει η έννοια της στρωματοποίησης του μίγματος λόγω της διαφοράς τους στον τρόπο ανάφλεξης.
- Η αντλία υψηλής πίεσης των πετρελαιοκινητήρων (σχήμα 8-11) είναι αυτολιπαινόμενη, δηλαδή η λίπανση της εξασφαλίζεται από το ίδιο το καύσιμο. Οι λιπαντικές ιδιότητες του καυσίμου, λοιπόν, είναι κρίσιμες για τη διάρκεια ζωής της πολύτιμης αντλίας. Καύσιμο νοθευμένο με ναυτικό πετρέλαιο, πετρέλαιο θέρμανσης ή νερό προκαλεί ακαριαία φθορά της αντλίας. Σε αντίθεση η αντλία τροφοδοσίας των βενζινοκινητήρων παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες ανοχές στην κακή ποιότητα καυσίμου.
- Ο έλεγχος του φορτίου του πετρελαιοκινητήρα επιτυγχάνεται μόνο με την αύξηση ή την μείωση της ποσότητας του καυσίμου που ψεκάζεται. Όμοια, ο έλεγχος του φορτίου των κινητήρων GDI γίνεται μέσω του όγκου του καυσίμου που ψεκάζεται στον κύλινδρο και δεν απαιτεί κανένα στραγγαλισμό του αέρα, με συνέπεια τις σημαντικές βελτιώσεις του θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης μέσω της καύσης περίσσειου αέρα και την αποβολή των απωλειών στραγγαλισμού.

## 8.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία του άμεσου ψεκασμού δείχνει ότι τα περιθώρια εξέλιξης των κινητήρων εσωτερικής καύσης δεν έχουν ακόμα εξαντληθεί. Παρά τις αλληπάλληλες αναπροσαρμογές των ορίων των ρύπων από τις ολοένα και αυστηρότερες νομοθεσίες, σε όλα τα μήκη και πλάτη της γης, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης καταφέρνουν να προσαρμόζονται να εξελίσσονται και να βελτιώνονται συνεχώς, παραμένοντας ανταγωνιστικοί.

Τους κινητήρες Diesel, οι οποίοι είναι πρωτοπόροι στη χρήση συστημάτων άμεσου ψεκασμού, ακολούθησαν οι κινητήρες Otto υιοθετώντας παρόμοια τεχνολογία και λαμβάνοντας τα ίδια οφέλη.

Όπως διαφαίνεται πλέον, με βάση όλα τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει ο άμεσος ψεκασμός καυσίμου (σχήμα 8-13), αναμένεται να επικρατήσει τα επόμενα χρόνια και στους δύο τύπους Μ.Ε.Κ.



Σχήμα 8-13 : Διαγράμματα που δείχνουν τη μείωση της κατανάλωσης (αριστερά) και την αύξηση της ισχύος (δεξιά) με την εξέλιξη των συστημάτων ψεκασμού



## 9. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

### 9.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια βρίσκει εφαρμογή σε όλο και περισσότερους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η μηχανική των ρευστών ήταν από τα πρώτα επιστημονικά πεδία που χρησιμοποίησε τον υπολογιστή ο οποίος αποτέλεσε αναπόσπαστο εργαλείο, για την επίλυση των πρακτικών προβλημάτων της.

Εκμεταλλευόμενοι λοιπόν τις δυνατότητες των υπολογιστικών συστημάτων, μπορούμε πλέον να σχεδιάσουμε, να εξελίξουμε αλλά και να ελέγξουμε τις μηχανικές κατασκευές πριν ξεκινήσει η παραγωγή τους. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σημαντικά το κόστος και ο χρόνος όλων των παραπάνω διαδικασιών. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα σε σχεδιαστές και μηχανικούς να επιλέξουν μεταξύ διαφόρων λύσεων, είτε ως προς την κατασκευή, είτε ως προς το σχεδιασμό, χωρίς να περιορίζονται αναγκαστικά από το κόστος που θα απαιτούσε η τυχόν κατασκευή και δοκιμή, για παράδειγμα, ενός νέου τύπου οχήματος, έστω και σε μικρή κλίμακα.

Πριν την εμφάνιση των λογισμικών προγραμμάτων της υπολογιστικής ρευστομηχανικής είχε διαπιστωθεί ότι ήταν αδύνατο να επιλυθούν μαθηματικά οι εξισώσεις Navier- Stokes (εξισώσεις που εκφράζουν μαθηματικά τα πεδία της ρευστομηχανικής). Η βασική μεθοδολογία επίλυσης των εξισώσεων της ρευστομηχανικής με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι η μεθοδολογία των πεπερασμένων διαφορών, που θα αναλυθεί παρακάτω.

Η επίλυση της δυναμικής ροής αποτελεί σήμερα το βασικό μέσο αντιμετώπισης των πρακτικών εφαρμογών, λόγω της απλότητας που παρουσιάζει, τόσο στην επίλυση, όσο και στον καθορισμό της γεωμετρίας των εξεταζόμενων μηχανισμών.

Ο συνδυασμός της υπολογιστικής ρευστομηχανικής και των ισχυρών Η/Υ αποτελεί πλέον ένα πολύ χρήσιμο και ισχυρό μέσο για τον αρχικό σχεδιασμό μιας νέας κατασκευής γεγονός που περιορίζει σημαντικά το χρόνο και το κόστος της εξέλιξης.

Θέλοντας να κάνουμε μια πιο ακριβή προσέγγιση στον όρο υπολογιστική ρευστομηχανική θα λέγαμε ότι είναι η μέθοδος ανάλυσης και επίλυσης συστημάτων ροής που μπορεί να περιέχουν και φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας σε συνδυασμό και με χημικές αντιδράσεις. Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται και των νόμων πάνω στους οποίους στηρίζεται η επίλυση ενός ροϊκού πεδίου με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

## 9.2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Ο βασικός σκοπός της αριθμητικής ανάλυσης είναι να βρίσκει εύχρηστες μεθόδους για την λύση προβλημάτων που μπορεί να εκφραστούν με μαθηματικές εξισώσεις.

Αναλυτικές λύσεις των προβλημάτων, όταν υπάρχουν, μπορεί μεν να είναι ακριβείς αλλά να μη βρίσκονται σε εύχρηστη μορφή, από την άποψη να μην είναι δυνατή η απ' ευθείας αριθμητική επεξεργασία. Στην περίπτωση αυτή ο αναλυτής πρέπει να επιχειρήσει να δημιουργήσει μια μέθοδο για την παραπέρα αριθμητική επεξεργασία της λύσης ή μπορεί να προτιμήσει να βασίσει την ανάλυσή του στην απαρχής μόρφωση και αριθμητική λύση του προβλήματος.

Γενικά ο αναλυτής δεν ενδιαφέρεται για το αυστηρό μαθηματικό πρόβλημα αλλά κυρίως επιχειρεί να μορφώσει μια μεθοδολογία που θα δώσει τη λύση στο πρόβλημα με μια προσέγγιση που θα διαφέρει από την ακριβή λύση λιγότερο από μια ορισμένη ανοχή. Όταν πάλι η πληροφορία που του παρέχεται δεν είναι ακριβής επιχειρεί να αποκτήσει ένα μέτρο της αβεβαιότητας της λύσης που προκύπτει από την ανακρίβεια της πληροφορίας, αβεβαιότητα όμως που να είναι συγκρίσιμη με την ανακρίβεια της πληροφορίας.

Ένα από τα πιο γρήγορα εξελισσόμενα πεδία αριθμητικής ανάλυσης είναι εκείνο που ασχολείται με την προσεγγιστική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Συνεχώς νέοι αλγόριθμοι αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων προτείνονται και εφαρμόζονται με κριτήρια αξιολόγησής τους, την ευστάθεια, την ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος, την απαιτούμενη χωρητικότητα μνήμης του υπολογιστή και φυσικά την ακρίβεια της λύσης.

### 9.3. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Ένα βασικό ερώτημα που πρέπει να απασχολεί κάθε αναλυτή- προγραμματιστή είναι η ακρίβεια των αριθμητικών πράξεων που ο Η/Υ εκτελεί, η μετάδοση του σφάλματος από αριθμητική πράξη στην επόμενη κατά τη διάρκεια επίλυσης του προβλήματος και το σφάλμα που περιέχεται στο τελικό αποτέλεσμα των υπολογισμών. Στην συνέχεια παρουσιάζονται διάφορα είδη αριθμητικών σφαλμάτων τα οποία αποτελούν ένα από τα βασικά αντικείμενα της αριθμητικής ανάλυσης.

Είναι φανερό ότι ο υπολογιστής πάντοτε θα δώσει ένα τελικό αποτέλεσμα, μερικές φορές όμως το σφάλμα που περιέχεται σ' αυτό το αποτέλεσμα είναι τόσο σημαντικό ώστε να κάνει το αποτέλεσμα αναξιόπιστο και χωρίς πρακτική αξία.

Διακρίνονται δυο τιμές μιας ποσότητας  $x$ , η ακριβής τιμή  $x$  και η υπολογισμένη αλλά προσεγγιστική τιμή  $\bar{x}$ . Η διαφορά

$$\sigma_x = x - \bar{x}$$

καλείται απόλυτο σφάλμα, και ο λόγος

$$\frac{\sigma_x}{x} = \frac{x - \bar{x}}{x} = 1 - \frac{\bar{x}}{x}$$

καλείται σχετικό σφάλμα.

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει ότι, κατά κανόνα για μεγάλους αριθμούς, το απόλυτο σφάλμα  $\sigma_x$  είναι μεγάλος αριθμός, το δε σχετικό σφάλμα μικρός. Για πολύ μικρούς αριθμούς ισχύει το αντίστροφο. Για αριθμούς της τάξης της μονάδας τα δύο σφάλματα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Από τα προηγούμενα γίνεται φανερή η ιδιαίτερη σημασία του καθορισμού της ακρίβειας προσέγγισης στην πραγματική τιμή του αριθμού. Αν ο αριθμός βρίσκεται κοντά στη μονάδα, η ακρίβεια προσέγγισης μπορεί να οριστεί είτε με το απόλυτο είτε με το σχετικό σφάλμα. Για μεγάλους αριθμούς, το σχετικό σφάλμα αποτελεί καλύτερο οδηγό προσέγγισης στην πραγματική τιμή του αριθμού, ενώ για πολύ μικρούς αριθμούς, σημασία έχει το απόλυτο σφάλμα. Στην περίπτωση όμως αυτή, ο αριθμός των ψηφίων της διακριτής εκπροσώπησης του αριθμού στον υπολογιστή έχει ιδιαίτερη βαρύτητα.

Στην συνέχεια αναφέρονται οι διάφορες πηγές σφαλμάτων που οδηγούν στην διαφοροποίηση της τιμής υπολογισμού από την ακριβή τιμή.

### ➤ Προσέγγιση αριθμών

Πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των αριθμών που είναι ακριβείς και εκείνων που είναι προσεγγιστικοί. Ακριβείς αριθμοί είναι εκείνοι που αντιπροσωπεύονται με ένα σύμβολο, π.χ. όλοι οι ακέραιοι, όλα τα κλάσματα που εκφράζονται ως πηλίκο ακεραίων καθώς και οι αριθμοί  $\pi$ ,  $e$ .

Όλοι οι προηγούμενοι αριθμοί εκφράζονται επακριβώς με ένα σύμβολο, ορισμένοι απ' αυτούς δεν εκφράζονται με πεπερασμένο αριθμό ψηφίων και έτσι θεωρούνται ακριβείς για τον υπολογιστή. Ένας αριθμός παρίσταται στον υπολογιστή με περιορισμένο αριθμό ψηφίων και κατ' αυτό τον τρόπο εισάγεται ένα αριθμητικό σφάλμα για αριθμούς που έχουν άπειρο ή πολύ μεγάλο αριθμό ψηφίων, όπως π.χ. ο αριθμός  $1/3$  ισούται με  $0,333\dots$ . Δηλαδή παρίσταται ακριβώς μόνο με άπειρο αριθμό ψηφίων. Συνεπώς η παράσταση του αριθμού  $1/3$  με τον αριθμό  $0,333333$  εισάγει σφάλμα στους μετέπειτα υπολογισμούς. Επίσης ορισμένες κλασματικές παραστάσεις, οι οποίες έχουν πεπερασμένη παράσταση σ' ένα σύστημα αρίθμησης, ως ο αριθμός  $1/10$  που έχει την παράσταση  $0,1$  στο δεκαδικό σύστημα, δεν έχει πεπερασμένη παράσταση στο δυαδικό σύστημα, διότι εκφράζεται ως  $0,000110011001100\dots$ . Αυτό έχει ως συνέπεια το άθροισμα 10 αριθμών που ο καθένας τους αποτελεί δυαδική προσέγγιση του δεκαδικού αριθμού  $0,1$  να μην είναι ακριβώς ίσο με τη μονάδα.

### ➤ Σφάλματα από στρογγυλοποίηση

Η παράσταση στον υπολογιστή αριθμών με περιορισμένο αριθμό ψηφίων δημιουργεί σφάλματα στην εκτέλεση αριθμητικών πράξεων, ακόμη και στην περίπτωση που οι αριθμοί είναι ακριβείς.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι στρογγυλοποίησης, είτε αγνοώντας όσα ψηφία του αριθμού δεν μπορούν να παρασταθούν από μια θέση στη μνήμη του υπολογιστή είτε με συμμετρική στρογγυλοποίησης, δηλαδή στον υποθετικό υπολογιστή των 4 ψηφίων, ο αριθμός  $16,436$ , μπορεί να εκφρασθεί ως  $16,43$  ή ως  $16,44$ . Στην πρώτη μέθοδο το σχετικό σφάλμα είναι

$$\frac{\sigma_x}{x} = 10^{-t+1}$$

$$\frac{\sigma_x}{x} = \frac{1}{2} 10^{-t+1}$$

όπου  $t$  ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων που ο αριθμός παρίσταται στον υπολογιστή. Συνήθως οι Η/Υ αποθηκεύουν τους αριθμούς σε δυαδική μορφή χρησιμοποιώντας 32 δυαδικά ψηφία (bits) ή 4 bytes (1 byte=8bits). Το σφάλμα στρογγυλοποίησης στον 32 bit υπολογιστή είναι  $3 \cdot 10^{-8}$ .

### ➤ Σφάλματα αρχικών ή οριακών τιμών

Αυτά είναι σφάλματα στις τιμές των δεδομένων που εισάγονται στον υπολογιστή και που προέρχονται από αβεβαιότητα της φυσικής κατάστασης των πραγμάτων (π.χ. θερμοκρασία). Μία φυσική μέτρηση, όπως η απόσταση ή η ταχύτητα δεν μπορεί να είναι γνωστή παρά μόνο με προσέγγιση, ανάλογα με τι πειραματικό σφάλμα. Η αβεβαιότητα λοιπόν στα δεδομένα εισόδου μεταφέρεται και στη λύση του προβλήματος και στο τέλος η αβεβαιότητα αυτή γίνεται μεγαλύτερη της αρχικής με προσθήκη σφαλμάτων από άλλες πηγές.

### ➤ Σφάλματα αποκοπής

Τα σφάλματα αυτά προέρχονται από την προσέγγιση μιας συνάρτησης από λίγους μόνον όρους του αναπτύγματος της σε σειρά Taylor. Έστω η συνάρτηση  $f(x)$  με  $(n+1)$  συνεχείς παραγώγους στο διάστημα  $(a,b)$ . Τότε μπορεί να παρασταθεί με σειρά Taylor της μορφής

$$f(x) = f(a) + \frac{(x-a)}{1!} f'(a) + \frac{(x-a)^2}{2!} f''(a) + \dots + \frac{(x-a)^n}{n!} f^{(n)}(a) + \frac{(\xi-a)^{n+1}}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi)$$

όπου  $a < \xi < b$

Αν η  $f(x)$  προσεγγισθεί από το άθροισμα των πρώτων  $(n+1)$  όρων τότε γίνεται ένα σφάλμα προσέγγισης στην  $f(x)$  από την αποκοπή των υπολοίπων όρων της σειράς, το δε σφάλμα αντιπροσωπεύεται από τον τελευταίο όρο που καλείται υπόλοιπο.

Η συνάρτηση  $e^{-x}$  παρίσταται ως

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} + Y\pi(\xi)$$

όπου το σφάλμα από την αποκοπή των υπολοίπων όρων είναι

$$|Y\pi(\xi)| = \frac{1}{24} e^{-\xi} \xi^4 \quad \text{όπου } 0 < \xi < \chi$$

και επειδή  $\xi > 0$

$$|Y\pi(\xi)| < \frac{1}{24} \xi^4$$

Είναι φανερό ότι από το ανάπτυγμα της  $f(x)$  διατηρούνται τόσοι όροι όσους επιτρέπει η ακρίβεια με την οποία εκτελούνται οι πράξεις στον ψηφιακό υπολογιστή δηλαδή με όσα σημαντικά ψηφία παρίστανται οι αριθμοί στον υπολογιστή.

Τα πρώτα σφάλματα εξαρτώνται από το μηχανικό μέρος του υπολογιστή (αντιπροσώπευση αριθμού με 8 ή 16 ή 32 bits), ενώ το σφάλμα αποκοπής εξαρτάται από το λογισμικό του αναλυτή και είναι ανεξάρτητο του μηχανικού μέρους. Η ελαχιστοποίηση του σφάλματος αποκοπής πρέπει να αποτελεί έναν από τους στόχους του αναλυτή-προγραμματιστή, διότι το σφάλμα αυτό θα υπάρχει ακόμα και σε ιδανικό υπολογιστή στον οποίο η αντιπροσώπευση του αριθμού γίνεται με άπειρο αριθμό «δυναδικών» ψηφίων.

#### 9.4. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Σημαντική φροντίδα πρέπει να λαμβάνεται στην αριθμητική ανάλυση ώστε ένα σφάλμα σ' ένα σημείο της διαδικασίας εκτέλεσης υπολογισμών να μη μεταφέρεται στις επόμενες πράξεις αυξανόμενο, π.χ. η αφαίρεση δύο σχεδόν ίσων αριθμών είναι μία ακραία περίπτωση διότι ακόμα και αν οι δύο αριθμοί έχουν μικρό σφάλμα, το σχετικό σφάλμα της διαφοράς μπορεί να γίνει μεγάλο, κι αυτό μπορεί να μεταδοθεί στις παραπέρα αριθμητικές πράξεις. Συνοπτικά αναφέρονται στη συνέχεια τρόποι μετάδοσης σφάλματος στις διάφορες αριθμητικές πράξεις.

##### Απόλυτο σφάλμα

$$\sigma_{x+y} = \sigma_x + \sigma_y$$

$$\sigma_{x-y} = \sigma_x - \sigma_y$$

##### Σχετικό σφάλμα

$$\frac{\sigma_{x+y}}{x+y} = \frac{x}{x+y} \frac{\sigma_x}{x} + \frac{y}{x+y} \frac{\sigma_y}{y}$$

$$\frac{\sigma_{x-y}}{x-y} = \frac{x}{x-y} \frac{\sigma_x}{x} + \frac{y}{x-y} \frac{\sigma_y}{y}$$

$$\sigma_{xy} = x \sigma_y + y \sigma_x$$

$$\frac{\sigma_{xy}}{xy} = \frac{\sigma_x}{x} + \frac{\sigma_y}{y}$$

$$\sigma_{x/y} = \frac{\sigma_x}{y} - \frac{x\sigma_y}{y^2}$$

$$\frac{\sigma_{x/y}}{x/y} = \frac{\sigma_x}{x} - \frac{\sigma_y}{y}$$

Είναι φανερό ότι τα σφάλματα που οφείλονται στην στρογγυλοποίηση επαυξάνονται κατά την διαδικασία εκτέλεσης πράξεων, διότι αυτά που εμπεριέχονται στους δύο αριθμούς (από εκτέλεση προηγούμενης πράξης) σταθμιστικά προστίθενται και μεταφέρονται στην επόμενη αριθμητική πράξη. Στην χειρότερη περίπτωση, όταν το σφάλμα επαυξάνεται αθροιστικά προς την ίδια κατεύθυνση, μετά από  $N$  αριθμητικούς υπολογισμούς που ο κάθε έχει σφάλμα  $\varepsilon$ , το συνολικό σφάλμα γίνεται  $N\varepsilon$ . Συνήθως όμως τα σφάλματα μεταφέρονται με τυχαίες διαδικασίες, οπότε το συνολικό σφάλμα γίνεται μόνο  $\sqrt{N\varepsilon}$ .

## 9.5. ΝΟΜΟΙ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

### Η εξίσωση διατήρησης της μάζας

Για ένα ροϊκό στοιχείο η εξίσωση διατήρησης της μάζας εκφράζεται από την πρόταση:

*Η ροή μάζας διαμέσου ενός ροϊκού στοιχείου παραμένει σταθερή*

Μαθηματικά αυτό εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0$$

η οποία είναι γραμμένη σε συμπαγή μορφή και αφορά περιπτώσεις μη-μόνιμης, τρισδιάστατης συμπιεστής ροής και αναπτύσσεται στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Η εξίσωση συνέχειας αποτελεί μια από τις θεμελιώδεις εξισώσεις περιγραφής ενός ροϊκού προβλήματος και η χρήση της είναι επιβεβλημένη σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές που συναντά κανείς.

### Η εξίσωση διατήρησης της ορμής

Ο 2<sup>ος</sup> Νόμος του Νεύτωνα όταν εφαρμόζεται για κίνηση ρευστών, αναφέρεται στη μεταβολή της ορμής του ρευστού και τη συσχετίζει με το αλγεβρικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό.

*Ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ενός ροϊκού στοιχείου ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό*

Μαθηματικά, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής για ένα ροϊκό στοιχείο δίνεται από τις ολικές παραγωγίσεις των τριών συνιστωσών των ταχυτήτων,  $\rho \frac{Du}{Dt}$ ,  $\rho \frac{Dv}{Dt}$ ,  $\rho \frac{Dw}{Dt}$ . Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα ροϊκό στοιχείο είναι οι δυνάμεις λόγω πίεσης και ιξώδους καθώς και οι τυχόν εξωτερικές δυνάμεις εξαιτίας της βαρύτητας, της φυγοκέντρου, της επιτάχυνσης Coriolis και άλλα. Κατά τη μαθηματική μοντελοποίηση αυτών των δυνάμεων, συνήθως οι δυνάμεις πίεσεως και ιξώδους διαχωρίζονται από τις υπόλοιπες και ενσωματώνονται με τις μεταβολές τους στη γενική εξίσωση μεταφοράς της ορμής, ενώ οι υπόλοιπες αποτελούν ένα ξεχωριστό όρο πηγής που αναφέρεται σε όλο το ροϊκό στοιχείο. Αυτό συμβαίνει διότι οι πρώτες αφορούν και υπολογίζονται συνήθως στις επιφάνειες ενός στοιχειώδους τμήματος της ροής, ενώ οι άλλες σε όλο το ροϊκό στοιχείο. Η μαθηματική έκφραση του 2<sup>ου</sup> Νόμου του Νεύτωνα για ρευστά δίνεται από τη σχέση:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + s_x$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + s_y$$



$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + s_z$$

Όπως μπορεί να δει κανείς, οι εξισώσεις είναι εκφρασμένες για τις τρεις διευθύνσεις του χώρου προκειμένου να εκφραστεί η μεταβολή της ορμής για κάθε διεύθυνση. Επίσης έχουν δοθεί οι εκφράσεις για τις μεταβολές των δυνάμεων επιφανείας (που είναι η πίεση αλλά και οι τάσεις που ασκούνται πάνω στις επιφάνειες του ροϊκού στοιχείου) ενώ οι υπόλοιπες δυνάμεις έχουν ενσωματωθεί σε έναν όρο πηγής  $S$  για κάθε μία από τις διευθύνσεις. Στην εξίσωση αυτή όμως δεν έχουν δοθεί οι ακριβείς εκφράσεις για τον υπολογισμό των τάσεων.

Οι εξισώσεις μεταφοράς της ορμής είναι ό,τι πιο γενικό υπάρχει για να περιγραφεί η κίνηση ενός ρευστού. Όμως αν σε κάθε περίπτωση ροής κάνουμε συγκεκριμένες παραδοχές, δημιουργούμε ένα πιο απλό πρόβλημα. Έτσι, θα δούμε παρακάτω, για ασυμπίεστη ιδανική ροή ότι οι εξισώσεις παίρνουν τη γενική μορφή των εξισώσεων του Euler.

### Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας σε ένα ροϊκό στοιχείο εκφράζεται από την παρακάτω πρόταση:

*Ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας ενός ροϊκού στοιχείου ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της θερμικής του ενέργειας + το καθαρό έργο που αποδίδεται ή προσδίδεται στο ρευστό.*

### Η μαθηματική έκφραση αυτής της πρότασης είναι:

$$\rho \frac{DI}{Dt} = -p \operatorname{div}(U) + \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + s_i$$

Σε αυτή την εξίσωση,  $I$  είναι η εσωτερική ενέργεια του ροϊκού στοιχείου και  $k$  ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας. Το  $S$  αποτελεί το αλγεβρικό άθροισμα των έργων που ασκούνται προς ή από το ροϊκό πεδίο.

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας του ρευστού δίνεται σε πολλές μορφές ανάλογα με το είδος της ροής και τις θερμοδυναμικές παραδοχές που κάνουμε για αυτή. Μια κλασική έκφραση είναι αυτή της διατήρησης της ενθαλπίας του ρευστού, που χρησιμοποιείται κυρίως

για τις συμπιεστές ροές. Τέλος, στην εξίσωση αυτή παρατηρεί κανείς και την εισαγωγή της θερμοκρασίας  $T$  του ρευστού. Προκειμένου να είναι εφικτή μια σύνδεση αυτής με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του ρευστού, χρησιμοποιείται η καταστατική εξίσωση που αποτελεί μια συνάρτηση της πίεσης με πεδίο ορισμού την πυκνότητα και τη θερμοκρασία  $P=P(\rho, T)$ .

Για την περίπτωση ιδανικών αερίων, η εξίσωση που δίνεται είναι:

$$P=\rho RT$$

### Οι εξισώσεις Navier- Stokes

Οι εξισώσεις Navier- Stokes εκφράζουν μαθηματικά τα πεδία ροής ρευστών. Πρόκειται για δεύτερης τάξης, μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες εκφράζουν ουσιαστικά τον ισολογισμό των αδρανειακών δυνάμεων, των δυνάμεων πίεσης και των εσωτερικών δυνάμεων τριβής μέσα σε ένα κινούμενο ρευστό. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν τη διαφορική διατύπωση του θεωρήματος της ορμής του Newton όπως είναι γνωστό από την κλασική μηχανική

$$F = \frac{\partial(mu)}{\partial t}$$

και το οποίο συνδέει την κινηματική με τη δυναμική κατάσταση του ρευστού.

Η επίλυση των εξισώσεων αυτών γίνεται συνήθως, αφού γίνουν κάποιες παραδοχές. Αυτό όμως έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Στην εξίσωση διατήρησης της ορμής εμφανίζεται ως άγνωστοι οι εμφανιζόμενες τάσεις, που αποτελούν και μέρος των επιφανειακών δυνάμεων σε ένα ροϊκό στοιχείο. Η μορφή αυτών των τάσεων είναι ανάλογη με κάποια μοντέλα που εισάγονται και σχετίζονται άμεσα με το ιξώδες της ροής. Στα περισσότερα είδη ρευστών οι τάσεις εξαιτίας του ιξώδους εκφράζονται σαν συναρτήσεις της τοπικής παραμόρφωσης του ρευστού. Στην περίπτωση των τριών διαστάσεων η παραμόρφωση αυτή αναλύεται σε μια γραμμική παραμόρφωση και σε μια παραμόρφωση επί του συνόλου του όγκου του ροϊκού πεδίου.

## Τυρβώδης ροή

Παρακάτω γίνεται μια ανάπτυξη της έννοιας της τύρβης. Αναπτύσσονται οι εξισώσεις Navier- Stokes για τυρβώδεις ροές και αναφέρονται μερικά κλασσικά μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές εφαρμογές μέσα από τα υπολογιστικά εργαλεία.

### Η έννοια της τύρβης

Έως τώρα δεν εξετάστηκε καθόλου η έννοια της τύρβης αλλά μόνο οι περιπτώσεις στρωτών ροών. Είναι γνωστό από τη μηχανική ρευστών ότι στη φύση η πλειοψηφία των ροών χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης. Η έννοια της τύρβης μπορεί σε πρώτο στάδιο να οριστεί μέσα από μια διακύμανση της τοπικής ταχύτητας του ρευστού που παρατηρείται για συγκεκριμένο σημείο σε ένα ροϊκό πεδίο. Ο ορισμός αυτός μπορεί να παραπέμψει κάποιον στη μη-μόνιμη ροή δεδομένου ότι οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις είναι σαφώς συναρτήσεις του χρόνου.

Κατά την εξέλιξη της μετρητικής τεχνολογίας, από το 1920 και μετά, εμφανίστηκαν όργανα μέτρησης ταχύτητας, τα οποία είχαν υψηλή ακρίβεια και ήταν σε θέση να μετρήσουν με πολύ καλή απόκριση τις ελάχιστες διακυμάνσεις της ροής. Παράλληλα, οι μέθοδοι οπτικοποίησης της ροής γινόντουσαν ολοένα και πιο αποδοτικές. Τα δύο αυτά συνέκλιναν στην παρατήρηση ότι τελικά μια ροή μπορεί να δώσει ένα εύρος τιμών ταχυτήτων γύρω από μία μέση τιμή.

Κατά τη στρωτή ροή, η μετρούμενη ταχύτητα είναι μία ευθεία γραμμή χωρίς καμία διαταραχή. Στη φάση της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη παρατηρούνται κάποιες τυχαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας αλλά στο μεγαλύτερο εύρος η μετρούμενη ταχύτητα είναι ευθεία γραμμή. Στην τρίτη περίπτωση μετρώνται ισχυρές διαταραχές με κάποιο εύρος και παράλληλα μπορεί να εξαχθεί μία μέση τιμή γύρω από την οποία κινούνται αυτές οι διαταραχές. Η ροή όντως φαίνεται ότι είναι μη-μόνιμη. Αλλά αυτό ισχύει για μια πολύ μικρή χρονική κλίμακα, η οποία σε κάθε περίπτωση είναι τόσο μικρή ώστε στη μακροκλίμακα της ροής που μπορεί να ενδιαφέρει τον μηχανικό, να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Τελικά η τυρβώδης ροή, σε πραγματική κλίμακα χρόνου, μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μόνιμη ροή. Το ουσιαστικό χαρακτηριστικό της είναι ότι έχει τέτοια υφή ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η στατιστική προκειμένου να εξαχθούν μεγέθη όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, το εύρος, η συσχέτιση κ.α.

## Τα χαρακτηριστικά της τύρβης

Ένας πρώτος ορισμός της τύρβης δόθηκε από τον Reynolds και αναφέρθηκε από τον Von Karman το 1937:

*Τύρβη είναι η ακανόνιστη κίνηση που εν γένει εμφανίζεται στα ρευστά όταν ροή αυτών διέρχεται κοντά σε στερεές επιφάνειες ή ακόμα όταν γειτονικά ρεύματα του ίδιου ρευστού αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.*

Εδώ υπήρξε μία πρώτη ένδειξη της διαταραχής που εισάγει μία στερεή επιφάνεια μέσω του οριακού στρώματος που αποτελεί άμεση απόρροια του ιξώδους. Σαφώς και δε σημαίνει αυτό ότι πάντα τα οριακά στρώματα είναι τυρβώδη. Υπάρχει όμως μία περίπτωση το στρωτό οριακό στρώμα για κάποιο λόγο (π.χ. αποκόλληση ή φυσική αστάθεια) να γίνει τυρβώδες και στη συνέχεια η διαταραχή αυτή να διαδοθεί σε όλο το ροϊκό πεδίο με αποτέλεσμα την πλήρη τυρβώδη ροή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η τύρβη είναι άμεσα συνυφασμένη με τον αριθμό Reynolds. Είναι βαθιά αποτυπωμένη σε όλους η χαρακτηριστική τιμή του 2300 για σωλήνες που αποτελεί και μια ένδειξη της μεταπήδησης σε τυρβώδη ροή. Για τον αριθμό Reynolds θα πρέπει να αναφερθούν τα εξής: α) ο αριθμός αυτός ισχύει αποκλειστικά και μόνο για σωλήνες, δεν είναι αυστηρά καθορισμένος και σίγουρα επιδέχεται κάποιες αποκλίσεις. Παράλληλα είναι ορισμένος βάσει της υδραυλικής διαμέτρου του σωλήνα. Έτσι για άλλου είδους ροή (π.χ. για ροή πάνω από επίπεδη πλάκα) έχουμε άλλο αριθμό Re. β) είναι δυνατόν ροές με μεγάλο αριθμό Re να είναι στρωτές γιατί κατέστη δυνατόν να αποφευχθεί οποιαδήποτε διαταραχή. Αντίθετα, μπορεί να υπάρξουν ροές που αντιστοιχούν σε χαμηλό αριθμό Re και να είναι τυρβώδες.

Ο Hinze το 1975 έδωσε έναν πιο ολοκληρωμένο ορισμό για την τύρβη:

*Η τυρβώδης ροή είναι μία «ανώμαλη» κατάσταση κίνησης, όπου οι διάφορες παράμετροι της ροής έχουν μία τυχαία μεταβολή σε σχέση με το χρόνο αλλά και με τον χώρο, τέτοιες που είναι δυνατή η εξαγωγή μέσων τιμών μέσω στατιστικής.*

Ο βασικός λόγος για τον οποίο υπάρχει αυτή η ακανόνιστη κίνηση είναι η ύπαρξη μικρών δομών δινών. Αυτές είναι υπαίτιες για την μεταφορά των διαταραχών από το ένα στρώμα του ρευστού στο άλλο και για τη μεταφορά κινητικής ενέργειας μέσω της περιστροφής

τους. Παράλληλα, λόγω της ακανόνιστης κίνησης αλλά και της περιστροφής, η αλληλεπίδραση μεταξύ τους εισάγει τάσεις, τις λεγόμενες τυρβώδεις τάσεις, οι οποίες συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερες από τις τάσεις της στρωτής ροής. Το μέγεθος αυτών των δινών ποικίλει. Κατά αυτόν τον τρόπο ορίζονται πολλές κλίμακες τύρβης, η κάθε μία εκ των οποίων έχει μία μέση διάσταση και συνεισφέρει στο φάσμα της ενέργειας της τύρβης.

### **Αστάθεια και μη- γραμμικότητα**

Η τυρβώδης ροή αναπτύσσεται ως μία αστάθεια της στρωτής ροής. Παράλληλα, οι εξισώσεις που περιγράφουν την τυρβώδη ροή εισάγουν μη- γραμμικούς όρους, οι οποίοι καθιστούν εξαιρετικά δύσκολη την επίλυσή τους. Ιδιαίτερες τεχνικές απαιτούνται για την επίλυση απλών ροών.

### **Υπαρξη δινών**

Η τύρβη είναι αποκλειστικά συνδεδεμένη με τρισδιάστατες ροές. Οι δίνες που αποτελούν τα βασικά κομμάτια του μηχανισμού εξέλιξής της διαδίδονται με έναν μηχανισμό επιμήκυνσής τους κατά τη διεύθυνση κάθετα της περιστροφής τους. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωση της τύρβης με δισδιάστατη θεώρηση απέχει αρκετά από την πραγματικότητα, με αποτέλεσμα οι λύσεις που δίνουν οι μοντελοποιήσεις της ροής να κρίνονται απλά ικανοποιητικές για βιομηχανικές εφαρμογές μηχανικού. Σε επίπεδο έρευνας χρήζουν περισσότερης ακρίβειας.

### **Υπαρξη στατιστικών στοιχείων**

Όπως αναφέρθηκε, η τύρβη για να μοντελοποιηθεί σωστά απαιτείται μία ρεαλιστική θεώρηση της χρονικής της μικροκλίμακας, η οποία ουσιαστικά είναι και ο μοναδικός τρόπος να αποτυπωθεί σωστά σαν πρόβλημα. Λόγω όμως της μέχρι πρότινος αδυναμίας των υπολογιστών να έχουν υψηλότερες ταχύτητες επεξεργασίας υπολογισμών, οι εξισώσεις περιγραφής της τύρβης γίνεται με βάση τη στατιστική και με τη χρήση συγκεκριμένων μοντέλων τύρβης, τα οποία και πάλι δίνουν απλά μια ικανοποιητική λύση.

## Στατιστική επεξεργασία κατά Reynolds

Στην προσπάθεια να γίνει η μεταπήδηση από τις στιγμιαίες τιμές των παραμέτρων της ροής στις μέσες τιμές, μια ιδιαίτερη τεχνική «μέσης τιμής» στην παράμετρο του χρόνου μπορεί να εφαρμοστεί. Έτσι για ασυμπίεστη ροή μπορούν να γραφτούν οι ταχύτητες και οι πιέσεις σαν ένα άθροισμα μίας μέσης τιμής και μιας διακύμανσης:

$$\vec{u}(x, y, z, t) = \overline{\vec{u}}(x, y, z, t) + \vec{u}'(x, y, z, t)$$

$$p(x, y, z, t) = \overline{p}(x, y, z, t) + p'(x, y, z, t)$$

όπου οι μπάρες δηλώνουν μέση τιμή και οι τόνοι διακυμάνσεις. Η τιμή της στιγμιαίας ταχύτητας δίδεται από τη σχέση:

$$\overline{\vec{u}}(x, y, z) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{u}(x, y, z, t) dt$$

Από τη Στατιστική είναι επίσης γνωστό ότι:

$$\overline{\vec{u}(x, y, z)} = \overline{\vec{u}}(x, y, z)$$

$$\overline{\frac{\partial p}{\partial x}} = \frac{\partial \overline{p}}{\partial x}, \quad \overline{\frac{\partial \vec{u}}{\partial x}} = \frac{\partial \overline{\vec{u}}}{\partial x}$$

Επίσης για οποιαδήποτε ποσότητα  $\phi$  και  $\psi$  ισχύει:

$$\overline{c_1 \phi + c_2 \psi} = c_1 \overline{\phi} + c_2 \overline{\psi}$$

και τέλος:

$$\overline{\phi \psi} = \overline{(\overline{\phi} + \phi')(\overline{\psi} + \psi')} = \overline{\overline{\phi} \overline{\psi} + \overline{\phi} \psi' + \overline{\psi} \phi' + \phi' \psi'} = \overline{\overline{\phi} \overline{\psi}} + \overline{\phi' \psi'}$$

Το επόμενο βήμα είναι η αντικατάσταση των ορισμένων στιγμιαίων μεγεθών στις εξισώσεις Navier Stokes, όπως έχουν δοθεί μέχρι τώρα και η εφαρμογή των προηγούμενων σχέσεων της στατιστικής. Η τελική μορφή των εξισώσεων Navier Stokes είναι για τις τρεις συνιστώσες:

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + f_x + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \left( -\frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right)$$

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + f_y + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) + \left( -\frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \right)$$

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + f_z + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) + \left( -\frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{w}'w'}{\partial z} \right)$$

Η ουσιαστική διαφορά πλέον από τις εξισώσεις για στρωτή ροή είναι η εμφάνιση των μέσων τιμών των συσχετίσεων των στιγμιαίων διακυμάνσεων των ταχυτήτων. Οι όροι αυτοί στην ουσία αποτελούν την μεταβλητότητα από τη μέση τιμή και ονομάζονται και τάσεις Reynolds διότι στην ουσία απορροφούν ή παράγουν ενέργεια από τη ροή ομοιάζοντας με τις κλασσικές τάσεις εξαιτίας του ιξώδους (εκφρασμένο εδώ σαν κινηματικό ιξώδες αφού η πυκνότητα ενσωματώθηκε στο δεξί σκέλος της εξίσωσης).

Αν εξετάσει κανείς τις προηγούμενες εξισώσεις υπό το πρίσμα μοντελοποίησης θα παρατηρήσει ότι υπάρχει ένα πρόβλημα όσον αφορά την εύρεση των τιμών των τάσεων Reynolds. Και αυτό γιατί παρόλο που έγινε αναγωγή στις μέσες τιμές της ροής, εξακολουθεί να υπάρχει η χροιά των στιγμιαίων συσχετίσεων υπό το πρίσμα της μεταβλητότητας που εισάγουν οι τάσεις Reynolds. Το πρόβλημα αυτό επιχειρήθηκε να επιλυθεί με τη χρήση των μοντέλων τύρβης.

### Η μοντελοποίηση της τύρβης.

Εάν κάποιος έθετε το πρόβλημα της επίλυσης των εξισώσεων Navier- Stokes σε έναν μαθηματικό, τότε με την στεγνή λογική των μαθηματικών θα προσπαθούσε να κάνει μία απευθείας επίλυση με τη χρήση κάποιας τεχνικής διακριτοποιώντας αυτές στην χρονική μικροκλίμακα της τύρβης, τάξης nsec ένεκα πάντα της ύπαρξης των τάσεων Reynolds. Ή με μία ακόμη πιο στεγνή αντίληψη θα προσπαθούσε να επιλύσει τις εξισώσεις ξεκινώντας από την

πρωταρχική εξίσωση:

$$\begin{aligned}\bar{u}(x, y, z, t) &= \bar{u}(x, y, z, t) + u'(x, y, z, t) \\ p(x, y, z, t) &= \bar{p}(x, y, z, t) + p'(x, y, z, t)\end{aligned}$$

και επαναδιατυπώνοντας το ΘMR (Θεώρημα Μεταφοράς Reynolds) με τη χρήση αυτής. Η απευθείας αυτή επίλυση- προσομοίωση γίνεται (DNS- Direct Numerical Simulation) αλλά απαιτεί υπολογιστές τερατώδους ισχύος και ροές προς επίλυση αρκετά κλασσικές και πολύ απλής γεωμετρίας.

Ο μηχανικός στα προβλήματα που αντιμετωπίζει λαμβάνει πάντοτε το χρόνο επίλυσης και το κόστος επίλυσης. Προτιμά να έχει μία ικανοποιητική λύση με κάποιες καλές παραδοχές σε ένα δύσκολο πρόβλημα σε μικρό χρόνο που ουσιαστικά θα αυξήσει την παραγωγικότητά του, παρά μία τέλεια λύση σε κυριολεκτικά ουτοπικό χρόνο για ένα πρόβλημα που μόνο σε συνθήκες εργαστηρίου μπορεί να υπάρξει. Για αυτόν τον λόγο εμφανίστηκαν τα μοντέλα τύρβης τα οποία και κατέστησαν την προσομοίωση ένα ρεαλιστικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού.

### Τα γραμμικά μοντέλα τύρβης.

Ο σκοπός να μοντελοποιηθούν οι τάσεις Reynolds οδήγησε σε μία πληθώρα μοντέλων που εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Το κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιεί μία, δύο ή και παραπάνω εξισώσεις οι οποίες σε συνδυασμό με τις τυρβώδεις Navier- Stokes δίδουν ικανοποιητικές λύσεις.

Μία κατηγορία μοντέλων είναι αυτή που θεμελιώνεται από την υπόθεση του Boussinesq η οποία δίδει μία εξίσωση για την προσομοίωση των τάσεων Reynolds υπό την χροιά των κλασσικών τάσεων που εμφανίζονται στη στρωτή ροή. Σε αυτή την εξίσωση ισχύει:

$$\tau_{ij} = -u_i' u_j' = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij}$$

όπου  $\nu_t$  είναι το λεγόμενο ιξώδες της τύρβης (δεν μετράται γιατί δεν είναι φυσικό μέγεθος αλλά υπολογιστικό) και  $\kappa$  είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης η οποία θα ορισθεί παρακάτω.



Ουσιαστικά μεταβαίνει κανείς από τις μέσες τιμές των στιγμιαίων συσχετίσεων στις μέσες τιμές της ροής. Από τη σχέση αυτή φαίνεται επιπροσθέτως ότι απαιτείται μία σχέση για τον υπολογισμό του ιξώδους της τύρβης και της κινητικής ενέργειας της τύρβης.

Πριν δοθούν οι ορισμοί των δύο τελευταίων παραμέτρων της ροής, πρέπει να σημειωθεί ότι η υπόθεση αυτή είναι πραγματικό εργαλείο στην προσομοίωση της τύρβης αλλά έχει ένα βασικό μειονέκτημα: στηρίζεται στην αρχή του ισότροπου ιξώδους της τύρβης κάτι που δεν ισχύει στην πραγματικότητα διότι αυτό προδιαγράφεται άμεσα από τους ρυθμούς παραμόρφωσης της ροής στις τρεις κατευθύνσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο χάνεται και η έντονη τρισδιάστατη υφή της τύρβης και οι λύσεις που δίδονται κρίνονται οριακά ικανοποιητικές. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, διάφοροι ερευνητές δώσανε διάφορες μορφές στις εξισώσεις συγκεκριμένες ροές οι οποίες καθιστούσαν για το λόγο αυτό τα μοντέλα να έχουν έλλειψη «παγκοσμιότητας» εφαρμογών.

Επιστρέφοντας πάλι στους ορισμούς των μεγεθών των μοντέλων τύρβης, η κινητική ενέργεια της τύρβης ορίζεται σαν:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

είναι ένα μέγεθος που μπορεί να μετρηθεί αλλά και να υπολογιστεί. Δεδομένου ότι αποτελεί ιδιότητα της ροής, μπορεί να καταστρωθεί για αυτό μία εξίσωση μεταφοράς κατά τα πρότυπα της Navier- Stokes και υπό το πρίσμα της ενέργειας που καταστρέφεται αλλά και παράγεται.

Το ιξώδες της τύρβης σε έναν πρωτογενή τύπο δίδεται από τη σχέση:

$$\nu_1 = 0.09 \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Το  $\varepsilon$  είναι ο αριθμός διασποράς της τύρβης και συνήθως τίθεται ανάλογο του πηλίκου  $k^{3/2}/l$  όπου  $l$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος κλίμακας της τύρβης. Και για το  $\varepsilon$  υπάρχει μία εξίσωση μεταφοράς.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την μεταφορά της κινητικής ενέργειας της τύρβης και του ρυθμού διασποράς της είναι:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \nu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \nu_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

Όπου  $C_{\varepsilon 1}=1,44$   $C_{\varepsilon 2}=1,92$   $\sigma_k=1,0$   $\sigma_\varepsilon=1,3$

Οι σταθερές αυτές υπολογίστηκαν για συγκεκριμένες ροές και επιδέχονται πληθώρα αλλαγών για διάφορες ροές που εφαρμόζονται αυτές οι εξισώσεις. Για το λόγο αυτό εξηγείται και η πληθώρα των μοντέλων τύρβης. Εναπόκειται στην εμπειρία του μηχανικού για την επιλογή του μοντέλου που θα είναι ανάλογα με το είδος της ροής που θα πρέπει να επιλύσει.

Στην εξίσωση μεταφοράς του  $k$  το αριστερό σκέλος είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τις εξισώσεις ορμής, με τη διαφορά ότι η μεταβαλλόμενη ποσότητα είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης. Στο δεξί σκέλος διαφαίνεται η διασπορά της με το  $\varepsilon$ , η διάχυσή της με τον τελευταίο όρο όπου σε αυτόν τον μηχανισμό συμμετέχει και το φυσικό ιξώδες της ροής μαζί με ιξώδες

της τύρβης. Τέλος, ο όρος  $\bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  αποτελεί την λεγόμενη παραγωγή της τύρβης, που αποτελεί στην ουσία τη συσχέτιση των τάσεων Reynolds με τις κλίσεις της ταχύτητας. Όπου εμφανίζεται κλίση ταχύτητας (οριακά στρώματα, ροές που υπόκεινται σε κλίση ταχύτητας κλπ) εμφανίζεται και παραγωγή κινητικής ενέργειας της τύρβης. Ο όρος παραγωγής πολλές φορές εμφανίζεται στην βιβλιογραφία και ως  $P_k$ .

Αντίστοιχα για το ρυθμό διασποράς της τύρβης έχουμε την παραγωγή διασποράς (πάντα για το δεξί σκέλος), την διασπορά της διασποράς και την διάχυση της διασποράς λόγω φυσικού και τυρβώδους ιξώδους.

Το μοντέλο που αναφέρθηκε αποτελεί το γνωστό ως  $k-\varepsilon$  και είναι το πιο διαδεδομένο σε βιομηχανικές εφαρμογές. Κάθε εμπορικό πακέτο λογισμικού που σέβεται τον εαυτό του περιέχει πάντα και αυτό το μοντέλο, όχι τόσο για τα ικανοποιητικά σχετικά αποτελέσματα που δίδει όσο για την ευστάθειά του σε μία επαναληπτική διαδικασία επίλυσης. Υπάρχουν φυσικά

και άλλα μοντέλα, τα οποία διαφοροποιούνται κυρίως ως την χρήση μίας άλλης μεταβλητής αντί του  $\varepsilon$  όπως είναι το  $\omega$  που είναι ο ειδικός ρυθμός διασποράς.

Τα εναλλακτικά μοντέλα, εκτός από την καλύτερη συμπεριφορά σε κάποια είδη ροών έχουν κάποιες φορές έναν πιο εύχρηστο τρόπο εισαγωγής οριακών συνθηκών για τις τιμές των τωρβωδών παραμέτρων σε περιοχές τοιχωμάτων.

### Τα μη γραμμικά μοντέλα τύρβης

Στην προσπάθειά τους οι μοντελιστές να υπερπηδήσουν τον σκόπελο της αρχής του Boussinesq υπό το πρίσμα της ανισοτροπίας της τύρβης, επικεντρώθηκαν σε μια ανάπτυξη της σχέσης του Boussinesq με επιπλέον όρους προκειμένου να ενσωματωθούν οι τανυστές παραμόρφωσης γωνιακής παραμόρφωσης και παραμόρφωσης όγκου. Η λογική ήταν ότι εφόσον υπάρχουν διαφορετικές παραμορφώσεις σε διαφορετικές κατευθύνσεις της ροής, οι τάσεις Reynolds πρέπει να αισθάνονται αυτές τις παραμορφώσεις. Έτσι, την τελευταία δεκαετία γίνεται μια ευρεία χρήση της παρακάτω έκφρασης των τάσεων Reynolds:

$$\frac{\overline{u'_i u'_j}}{k} = \frac{2}{3} \delta_{ij} - \frac{\nu_t}{k} S_{ij} + c_1 \frac{\nu_t}{\varepsilon} (S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} S_{kl} S_{kl}) + c_2 \frac{\nu_t}{\varepsilon} (\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki}) + c_3 \frac{\nu_t}{\varepsilon} (\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl}) + c_4 \frac{\nu_t k}{\varepsilon^2} (S_{ki} \Omega_{lj} + S_{kj} \Omega_{li}) S_{kl} + c_5 \frac{\nu_t k}{\varepsilon^2} (S_{kl} S_{kl} - \Omega_{kl} \Omega_{kl}) S_{ij}$$

με  $C_1 = -0,1$ ,  $C_2 = 0,1$ ,  $C_3 = 0,26$ ,  $C_4 = -10 C_\mu^2$ ,  $C_5 = -5 C_\mu^2$ ,  $C_\mu = 0,09$

Και οι υπόλοιποι τανυστές ορισμένοι κατά τα γνωστά. Η έκφραση των τάσεων Reynolds για κάθε επίπεδο εξάγεται με την αποπομπή του  $K$  στο δεξί μέλος της εξίσωσης και την αντικατάσταση των δεικτών  $i, j$  στις κατευθύνσεις που απαιτείται.

Τα μοντέλα αυτά ουσιαστικά διαφοροποιούνται ως προς την έκφραση των τάσεων Reynolds ενώ κρατούν ίδιες τις εξισώσεις μεταφοράς του  $K$  και του  $\varepsilon$ . δίδουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα αλλά το κόστος σε χρόνο υπολογισμών και σε μεγάλες αστάθειες είναι πολλές φορές τεράστιο.

Πέρα από τις απλές αναφορές που έγιναν στα συγκεκριμένα μοντέλα τύρβης υπάρχουν και άλλα μοντέλα τα οποία δεν στηρίζονται στην υπόθεση του ιξώδους της τύρβης. Αυτά επιλύουν απευθείας τις τάσεις Reynolds με την χρήση 9 εξισώσεων (για τρεις διαστάσεις) μεταφοράς των τάσεων.

## 9.6. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή ενός ρευστού είναι διαφορετικές εξισώσεις στις οποίες εμφανίζονται μικτών παραγωγίσεων. Για συγκεκριμένες συνθήκες- σχετικά απλές- τα μαθηματικά μπορούν να δώσουν λύσεις αλλά σε δυσκολότερες περιπτώσεις οι διαδικασίες επίλυσης είναι πολύπλοκες και αρκετές φορές ανέφικτες.

Σε τέτοιες περιπτώσεις η χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής δίνει λύσεις οι οποίες όμως δεν είναι ακριβείς αλλά προσεγγιστικές. Οι προσεγγιστικές αυτές λύσεις χρησιμοποιούν τη μέθοδο της διακριτοποίησης. Σύμφωνα με αυτή το διαφορικό και κατ' επέκταση η παράγωγος μιας συνάρτησης προσεγγίζεται με μικρές διαφορές. Όσο αυτές οι διαφορές τείνουν στο ελάχιστο τόσο και η προσέγγιση μιας εκφράσεως παραγώγου γίνεται πιο ακριβής.

Οι προσεγγιστικές λύσεις για ένα πρόβλημα δίνουν τιμές των μεγεθών που επιλύονται πάνω σε διακριτά σημεία του πεδίου ροής του ρευστού. Τα διακριτά σημεία ονομάζονται κόμβοι ενός πλέγματος και δημιουργούνται με συγκεκριμένο τρόπο επάνω στο πεδίο ροής. Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των σημείων είναι η δεδομένη μεταξύ τους απόσταση για κάθε κατεύθυνση στο χώρο.

Τα βασικά στοιχεία που διακρίνονται γενικά σε ένα πλέγμα είναι:

α) υπάρχει ένας συγκεκριμένος τρόπος αρίθμησης των κόμβων που συνθέτουν το πλέγμα. Στη γενική περίπτωση χρησιμοποιούνται οι δείκτες  $i, j$  εφόσον έχουμε δύο διαστάσεις. Για ένα τυχαίο σημείο, έστω  $P$  ορίζονται το ζεύγος  $i, j$ . Γύρω από αυτό υπάρχουν τα γειτονικά σημεία του, τα οποία βάσει αυτού θα έχουν τις αριθμήσεις όπως φαίνονται στο σχήμα 1.

β) δύο γειτονικά σημεία θα έχουν απόσταση έστω  $\Delta x$  κατά τη  $x$ - διεύθυνση και  $\Delta y$  κατά την  $y$ - διεύθυνση. Στη γενική περίπτωση αυτές είναι διαφορετικές σε κάθε περιοχή και για κάθε διεύθυνση. Στην ειδική περίπτωση τα  $\Delta x$  μπορούν να θεωρηθούν ίσα μεταξύ τους και τα  $\Delta y$  επίσης ίσα μεταξύ τους. Σε πιο ειδική περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ότι όλες οι αποστάσεις είναι ίσες μεταξύ τους.

γ) σε κάθε σημείο υπάρχει και η προς εύρεση τιμή του πεδίου ροής. Επίσης για κάθε πλέγμα υπάρχει και η χωρική πληροφορία, δηλαδή ποιες είναι οι συντεταγμένες του στο χώρο, οπότε εύκολα συνάγεται ότι χρήζουν τα ζεύγη  $x(i, j)$  και  $y(i, j)$  για δύο διαστάσεις.

Στην πράξη, τα πλέγματα που προσομοιώνουν ένα πεδίο ροής για δύσκολα υπολογιστικά ρευστομηχανικά προβλήματα δεν είναι τόσο απλά. Προκειμένου να αποδοθούν πολύπλοκοι χώροι ροής τα πλέγματα διαμορφώνονται σε ιδιαίτερα σχήματα στα οποία δεν είναι δυνατόν να αποτελούνται ούτε από γραμμές που είναι κάθετες μεταξύ τους αλλά ούτε και από κόμβους που ισαπέχουν.

Αφού δημιουργηθούν οι κόμβοι του πλέγματος (σε πολύπλοκο ή μη πρόβλημα πεδίου ροής) το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της τεχνικής με την οποία θα επιλυθεί το πρόβλημα. Για επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων υπάρχουν τρεις βασικές μεθοδολογίες:

- Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών
- Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

### 9.6.1. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι η βασική μέθοδος της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Στόχος αυτής της μεθόδου είναι η αντικατάσταση των μαθηματικών εκφράσεων των μερικών παραγωγίσεων μιας συνάρτησης με τις πεπερασμένες διαφορές.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην τεχνική του αναπτύγματος του Taylor. Σύμφωνα με αυτή τη τιμή μιας συνάρτησης σε κάποιο σημείο μπορεί να υπολογιστεί σε σχέση με ένα γειτονικό, γνωστής τιμής σημείο σύμφωνα με τη σχέση:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \dots + \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \frac{(\Delta x)^n}{n!} + \dots$$

Έτσι αφού είναι γνωστή η τιμή της συνάρτησης  $f(x)$  και υπολογίζεται η τιμή της στην απόσταση  $x + \Delta x$  βάσει των τιμών των παραγωγίσεων πρώτης, δεύτερης και ανώτερης τάξης. Με την ίδια λογική αλλά διαφορετικό συμβολισμό μπορεί να υπολογιστεί η τιμή π.χ. της ταχύτητας  $u$  ενός ρευστού σε μια επόμενη θέση από τον αρχικό κόμβο σε απόσταση  $\Delta x$ .

$$u_{i+1,j} = u_{i,j} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \Delta x + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots$$

Η εξίσωση αυτή δίνει την ακριβή της τιμή  $u_{i+1,j}$  όταν αποτελείται από μια σειρά άπειρους όρους και το  $\Delta x$  τείνει στο μηδέν.

Η εξίσωση του αναπτύγματος Taylor μπορεί να επιλυθεί ως προς την παράγωγο πρώτης τάξης που εμφανίζεται στο δεξί μέλος.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \underbrace{\frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x}}_{\text{Έκφραση πεπερασμένων διαφορών}} - \underbrace{\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{\Delta x}{2} - \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{6} + \dots}_{\text{Σφάλμα αποκοπής}}$$

Έτσι κατέστη η έκφραση μιας παραγωγίσεως με τη μορφή μιας διακριτοποιημένης σχέσης από τιμές των ταχυτήτων σε δυο γειτονικούς κόμβους του πλέγματος. Συνηθίζεται να λέγεται ότι αυτή η έκφραση των πεπερασμένων διαφορών είναι ακρίβειας πρώτης τάξης. Η αποδεκτή παράσταση πεπερασμένων διαφορών όταν απαλείφονται οι επιπλέον όροι είναι η εξής:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

Η ονομασία αυτής της έκφρασης πεπερασμένων διαφορών είναι πεπερασμένη διαφορά πρώτης τάξης ακρίβειας στην κατάντη διεύθυνση. Ονομάζεται στην κατάντη διεύθυνση διότι προκειμένου να υπολογιστεί η παράγωγος στον κόμβο  $i, j$  παίρνουμε τιμές από έναν κατάντη κόμβο.

Η αντίστοιχη ανάντη έκφραση δίδεται ως:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

Συμπερασματικά, για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών μπορούμε να πούμε:

Με τη χρήση του αναπτύγματος Taylor μπορούν να δοθούν οι εκφράσεις των πεπερασμένων διαφορών για τις παραγωγίσεις πρώτης τάξης. Έτσι μπορεί να έχει κανείς εκφράσεις ανάντη, κατάντη και κεντρώες. Ανάλογα με το σχήμα που επιλέγουμε εισάγουμε και ένα σφάλμα αποκοπής των υπολοίπων όρων Taylor. Το μικρότερο σφάλμα για έκφραση

πεπερασμένων διαφορών της πρώτης παραγώγου έχει η κεντρικά έκφραση.

### 9.6.2. Μέθοδος πεπερασμένων όγκων:

Ολοκληρώνονται προσεγγιστικά οι εξισώσεις που διέπουν την εξέλιξη της ροής για ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου που διαμορφώνεται γύρω από κάθε κόμβο. Ο όγκος ελέγχου έχει συγκεκριμένες διαστάσεις και στα όρια αυτού εκφράζονται όλοι οι όροι που εμφανίζονται στη ολοκληρωμένη εξίσωση. Η μέθοδος περιγράφει τους συγκεκριμένους όρους της εξίσωσης σαν όρους συναγωγής, διάχυσης, πηγής και τους διαχειρίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καταλήγει σε συστήματα εξισώσεων προς επίλυση. Οι όροι του συστήματος αναφέρονται για κάθε όγκο ελέγχου και για κάθε είδος διακριτοποιημένου όρου που εμφανίζεται στην ολοκληρωμένη εξίσωση. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων γίνεται με μια επαναληπτική μέθοδο. Το βασικό ισοζύγιο για μια ποσότητα  $\phi$  που γίνεται σε έναν όγκο ελέγχου περιγράφεται ως εξής:

$$\text{Μεταβολή της } \phi \text{ στον όγκο ελέγχου} = \text{Ροή της } \phi \text{ λόγω συναγωγής} + \text{Ροή της } \phi \text{ λόγω διάχυσης} + \text{παραγωγής της } \phi$$

### 9.6.3. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων:

Χρησιμοποιεί κάποιες ειδικές συναρτήσεις προσέγγισης για να περιγράψει τις μεταβολές και τις τιμές των άγνωστων προς επίλυση μεταβλητών της  $\phi$ .

Ανακεφαλαιώνοντας τα περί υπολογιστικής ρευστομηχανικής, πρέπει να αναφερθεί ότι το είδος της προσέγγισης μιας παραγωγίσιμης που θα επιλεγθεί, αποτελεί σοβαρή πρόκληση ικανή να επηρεάσει το χρόνο και την ποιότητα της λύσης του ροϊκού πεδίου. Ουσιαστικά μεγάλο μέρος της έρευνας στην περιοχή αυτή επικεντρώνεται στο πρόβλημα αυτό, δεδομένου ότι ακόμη και η χρήση μιας υψηλότερης τάξης ακρίβειας παραγωγίσιμης μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε αστάθεια της διαδικασίας προσομοίωσης του προβλήματος.

## 10. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ CFX

### Εισαγωγικά

Ο σύγχρονος τρόπος επίλυσης προβλημάτων ρευστομηχανικής κινείται στο πλαίσιο της προσομοίωσής τους σε Η/Υ. Με τη λέξη κώδικας εννοούμε συνήθως το πρόγραμμα σε Η/Υ που επεξεργάζεται τη ροή που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Οι κώδικες που επεξεργάζονται προβλήματα ρευστομηχανικής είναι βασισμένοι πάνω σε αλγορίθμους ευρείας έκτασης και σε γνωστές γλώσσες προγραμματισμού όπως Fortran, C κτλ.

Η προσέγγιση και επίλυση ενός προβλήματος ρευστομηχανικής είναι ενιαία σε κάθε περίπτωση και ακολουθεί καθορισμένα βήματα. Συγκεκριμένα το CFX παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την κατασκευή της γεωμετρίας (ANSYS Design Modeler) και του πλέγματος (ICEM CFD), για τον ορισμό των οριακών συνθηκών και της φυσικής του προβλήματος (CFX-Pre) καθώς επίσης και για την επίλυση των εξισώσεων ροής (CFX-Solver) και της ανάλυσης των αποτελεσμάτων (CFX-Post).

### 10.1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ (CAD)

Ο ANSYS DesignModeler είναι ένα ολοκληρωμένο σχεδιαστικό πακέτο το οποίο δίνει τη δυνατότητα για τη δημιουργία 3D (τρισεδιάστατων) γεωμετριών.

Ο ακριβής καθορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου προς εξέταση είναι ένα πολύ σημαντικό αλλά και επίπονο στάδιο. Είναι σαφές ότι η προσέγγιση της πραγματικής γεωμετρίας του μοντέλου είναι ιδιαίτερα δύσκολη, απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις σχεδιασμού σε υπολογιστικό περιβάλλον και το τελικό αποτέλεσμα καθορίζεται σημαντικά από την υπομονή που επιδεικνύει ο χειριστής και το βαθμό τελειότητας τον οποίο επιζητά.

Η φιλοσοφία σχεδιασμού της τρισεδιάστατης γεωμετρίας βασίζεται στην δημιουργία δισεδιάστατων σχημάτων από τα οποία, με τη βοήθεια των κατάλληλων εργαλείων όπως περιστροφή γύρω από έναν άξονα ή προέκταση μίας επιφάνειας στο χώρο, προκύπτει το τελικό μας μοντέλο (3D) που θα αποτελέσει το χώρο για την επίλυση του ρευστομηχανικού προβλήματος.

Ο τύπος αρχείου που δημιουργείται είναι \*.agdb



## 10.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESHING)

Στη συνέχεια δημιουργείται το πλέγμα προσομοίωσης της ροής, το οποίο δεν είναι κάτι διαφορετικό από όγκους ελέγχου που πραγματοποιούν διακριτοποίηση στο χώρο. Για το σκοπό αυτό γίνεται εισαγωγή της γεωμετρίας (που κατασκευάστηκε στον DesignModeler) στον ICEM CFD. Υπάρχει η δυνατότητα να εισάγουμε μία γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε σε κάποιο άλλο CAD πακέτο. Συνήθως η γεωμετρία που κατασκευάστηκε σε άλλο πακέτο, έχει τη μορφή κάποιου IGES αρχείου.

Το βασικό βήμα για την κατασκευή του πλέγματος είναι η επιλογή της μορφής του (τετράεδρα ή εξάεδρα). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι διαφορετική για τις δύο μορφές πλέγματος. Η κατασκευή των εξαέδρων είναι μια πιο πολύπλοκη διαδικασία συγκριτικά με αυτήν των τετραέδρων. Η επιλογή της μορφής των στοιχείων και της πυκνότητας του πλέγματος γίνεται τελικά με βάση τις ιδιαιτερότητες και απαιτήσεις του κάθε ρευστομηχανικού προβλήματος.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία, βελτίωση του πλέγματος και της ίδιας της γεωμετρίας με τη χρήση των κατάλληλων εργαλείων.

Στο τέλος αποθηκεύουμε αρχείο τύπου \*.msh

## 10.3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ (PRE-PROCESSING)

Επόμενο βήμα είναι η επιλογή των φυσικών και χημικών δεδομένων που απαιτούν μοντελοποίηση καθώς και ο καθορισμός των φυσικών χαρακτηριστικών της ροής. Τέλος, καθορίζεται το είδος των ορίων του προβλήματος (τοιχώματα, είσοδος και έξοδος ρευστού). Αυτό πραγματοποιείται στον CFX-Pre processor, όπου εισάγεται το αρχείο του πλέγματος \*.msh και δημιουργείται το αρχείο προσομοίωσης (simulation file) .

Συγκεκριμένα:

- Επιλέγουμε τις περιοχές εισόδου και εξόδου του ρευστού , εισάγοντας για την κάθε μία τις συνθήκες (π.χ. πίεση, θερμοκρασία , ταχύτητα ) που υπάρχουν στα δεδομένα του προβλήματος .
- Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής πλήθους ρευστών καθώς και η δημιουργία οποιουδήποτε άλλου, ακόμα και μείγματος με συγκεκριμένη σύσταση εισάγοντας όλες τις φυσικές του ιδιότητες.

- Μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε μόνιμη ή μη μόνιμη ροή.
- Επίσης μας δίνεται η δυνατότητα να εισάγουμε εξισώσεις με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές των χαρακτηριστικών της ροής.
- Τέλος, καθορίζουμε το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων για την επίλυση του προβλήματος και όλες τις παραμέτρους της ροής.

Τελικά δημιουργείται ένα αρχείο τύπου \*.def.

#### 10.4. ΕΠΙΛΥΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ (SOLVER)

Στον CFX-Solver εισάγεται το αρχείο \*.def ώστε να είναι δυνατή η επίλυση των εξισώσεων της ροής.

Το CFX χρησιμοποιεί τη μέθοδο multigrid για την προσομοίωση των προβλημάτων . Οι δυνατότητες του cfx - solver είναι:

- Ανεξάρτητα από το λόγο διάστασης πλέγματος επιτυγχάνει μεγάλη σύγκλιση ακόμη και αν απαιτείται μεγάλος καθορισμός για το οριακό στρώμα,
- Προσομοιώνει την πραγματική φυσική του προβλήματος,
- Μπορεί να λειτουργήσει εύκολα σε συνεχή και παράλληλη επίλυση.

Κατά την παράλληλη επίλυση, το CFX-5 συνδυάζει τη μνήμη και τις πηγές των πολλαπλών επεξεργαστών για να μειώσει το χρόνο υπολογισμού ώστε να είναι δυνατή η επίλυση πολύπλοκων προσομοιώσεων.

- Ο solver μας δίνει αποτελέσματα για τη ροή στο σύνολό της, για τις δυνάμεις δημιουργούνται , για τα ισοζύγια, για τα σημεία που πιθανά να έχουν επιλεχτεί από τον χρήστη (monitor points).
- Επίσης μας δείχνει με διαγράμματα –κατά τη διάρκεια της επίλυσης-τη σύγκλιση των υπολογισμών στο επίπεδο σφάλματος που έχει οριστεί. Όταν είναι απαραίτητο, οι παράμετροι όπως οι οριακές συνθήκες, το χρονικό βήμα (time step) και τα κριτήρια σύγκλισης μπορούν έπειτα να τροποποιηθούν χωρίς να γίνει παύση του solver προκειμένου να επιταχυνθεί η σύγκλιση.

Στο CFX-5 υπάρχουν εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την τελειοποίηση του μοντέλου κατά τον σχεδιασμό, τη ταχύτερη ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων και την ευκολότερη σύγκλιση. Μερικά από αυτά τα εργαλεία είναι:

- Η Command Language (CCL) είναι η εσωτερική γλώσσα επικοινωνίας και εντολής που διευκρινίζει τις παραμέτρους, όπως την ταχύτητα εισροής ή τις παραμέτρους επίλυσης και επιτρέπει την πρόσβαση στα προηγμένα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, η Command Language του CFX επιτρέπει τον έλεγχο της σύνθεσης των παραμέτρων που εμείς ορίζουμε.
- Η γλώσσα CFX (CEL) είναι μια γλώσσα που επιτρέπει στους χρήστες να ενισχύσουν τις προσομοιώσεις χωρίς προσφυγή στις εξωτερικές γλώσσες FORTRAN. Οι κανόνες σύνταξης για τα CEL ακολουθούν τη συμβατική αριθμητική ανάλυση και έχουν πρόσβαση στις εσωτερικές μεταβλητές επίλυσης. Οι χρήστες μπορούν περαιτέρω να επεκτείνουν τη γλώσσα CEL και να την εισάγουν σε άλλο λογισμικό.
- Free Surface : Χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση κατά Euler, το CFX-5 παρέχει μια τεχνολογία που είναι περισσότερο ακριβής και γρηγορότερη στη διαμόρφωση της ροής στις ελεύθερες επιφάνειες.
- Lagrangian Particle Tracking : Ακολουθεί πρότυπο μορίων και επιτρέπει την επίλυση μιας ή περισσότερων φάσεων μορίων μέσα σε μια συνεχή ροή. Οι φάσεις μπορούν να συνδεθούν μέσω της διπλής κατεύθυνσης ορμής, της ενέργειας και της μεταφοράς της μάζας. Υπάρχουν επιλογές που καθορίζουν το μέγεθος των μορίων, τη θέση εγχύσεως και τον καθορισμό των ορίων έτσι ώστε η προσομοίωση να ταιριάζει με τους πραγματικούς όρους.
- Ένα γενικό πλαίσιο για τη μεταφορά της μάζας σε ενδιάμεση φάση παρέχεται στο CFX-5 μαζί με τα πρότυπα για τη δημιουργία κοιλότητας, τη συμπύκνωση, την εξάτμιση και το σημείο βρασμού.
- Το CFX-5 παρέχει την τεχνολογία για την επίλυση της ροής των ρευστών στις τρισδιάστατες περιοχές συμπεριλαμβανομένης του υπολογισμού της μεταφοράς θερμότητας. Οι υπολογισμοί συνδέονται με τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των ρευστών.
- Τα πρότυπα ακτινοβολίας καλύπτουν μια ευρεία κατηγορία προβλημάτων μεταφοράς της θερμότητας συμπεριλαμβανομένης της μη-θερμικής παράλληλης ακτινοβολίας (ηλιακή θέρμανση).

- Το λογισμικό του CFX έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση περιστρεφόμενων μηχανών για σχεδόν 20 έτη. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί για ποικίλες εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων των αντλιών, των συμπιεστών, των ανεμιστήρων, των στροβίλων, των στροφείων, του στάτη και του πτερυγίου του κινητήρα. Όλα τα αναμενόμενα εργαλεία και τα παραδείγματα που απαιτούνται στη βιομηχανία περιστρεφόμενων μηχανημάτων παρέχονται.
- Το CFX-5 προσφέρει μια επιλογή από 16 διαφορετικά πρότυπα τυρβώδους ροής, συμπεριλαμβανομένου του τυποποιημένου K-E μοντέλου. Εντούτοις, το ευρέως διαδεδομένο πρότυπο SST τυρβώδους ροής προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για το τυρβώδες οριακό στρώμα και τις προβλέψεις της μετάδοσης θερμότητας. Το SST πρότυπο προσφέρει υψηλότερη ακρίβεια, ειδικά για ασταθής ροές, και δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για ένα ευρύ φάσμα ροών ακόμα και στην περίπτωση που θέλουμε να εξετάσουμε τη ροή κοντά στα τοιχώματα.
- Ο CFX-5 επιλύει όλα τα είδη ως ενιαίο σύστημα συγκλίνοντας ικανοποιητικά γρήγορα, ειδικά για τους σύνθετους μηχανισμούς αντίδρασης. Τα φαινόμενα ανάφλεξης και εξάλειψης της φλόγας συμπεριλαμβάνονται μέσω των χημικών χρονοδιαγραμμάτων και της θερμοκρασίας. Οι μηχανισμοί και οι ιδιότητες που θέλουμε να εφαρμόσουμε μπορούν να επιλεχθούν εύκολα από μια παρεχόμενη βιβλιοθήκη με επιλεγμένες τιμές.
- Οι ιδιότητες κάθε ρευστού εμπεριέχονται στο CFX-5 και υποστηρίζονται από τα γενικά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά για οποιοδήποτε κορεσμένο ρευστό συμπεριλαμβανομένου και των υγροποιημένων ατμών. Τα γενικά χαρακτηριστικά και όλες οι θερμοδυναμικές σχέσεις δίνονται από πίνακες που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο πρόγραμμα.
- Όταν προσομοιώνουμε ροή ρευστού τροποποιώντας τη γεωμετρία, παραδείγματος χάριν σε συσκευές όπως οι συμπιεστές, οι αντλίες, οι βαλβίδες καρδιάς και οι μηχανές εσωτερικής καύσεως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μεταβαλλόμενα πλέγματα. Τα πλέγματα που είναι διαθέσιμα είναι η μετακίνηση επιφανειών με αυτόματα πλέγματα και η τρισδιάστατη μετακίνηση πλέγματος. Αυτές οι περιπτώσεις καλύπτουν σχεδόν κάθε ανάγκη μετακίνησης πλέγματος.
- Fluid Structure Interaction\*: Σε περιπτώσεις όπου η επίδραση ενός ρευστού γύρω από το στερεό είναι σημαντική, μπορεί να εφαρμοστεί μια προσομοίωση (FSI). Για τις πιο σύνθετες περιπτώσεις FSI, όπως οι μεγάλης κλίμακας στερεές παραμορφώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το CFX-5 και να γίνει η ανάλυση στο ANSYS.

## 10.5. ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – (POST- PROCESSING)

Επεξεργασία αποτελεσμάτων (CFX-Post):

Σε αυτό το τελικό στάδιο ο μηχανικός- ερευνητής θα πρέπει από την ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων της επίλυσης του κώδικα να οδηγηθεί σε ασφαλή συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά της ροής τις ιδιαιτερότητες του υπό εξέταση φαινομένου κτλ

Ο CFX-Post χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έχουν εξαχθεί από τον Solver. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται στον CFX-Post, ο οποίος διαβάζει το αρχείο της μορφής \*.res.

Οι δυνατότητες του προγράμματος είναι οι εξής:

- Μπορούν να παραχθούν διανύσματα ταχυτήτων, ροϊκές γραμμές κάθε μορφής, ισοεπιφάνειες, ισούψεις επιφάνειες (contours) , πλάνα θερμοκρασιών, πιέσεων, συγκεντρώσεων κλπ.
- Μπορούμε να εξάγουμε τα αποτελέσματα και να τα επεξεργαστούμε σε άλλο λογισμικό, όπως π.χ. στο excel.
- Μπορούμε να εξετάσουμε μεμονωμένα σημεία (monitor points) στο χώρο υπολογίζοντας τις παραμέτρους που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.
- Τέλος, μια σημαντική δυνατότητα του post είναι η δημιουργία αρχείου εικόνας (animation) \*.mpreg, το οποίο μας επιτρέπει να δούμε την εξέλιξη του φαινομένου στη διάρκεια του χρόνου.

## 11. ΕΠΙΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΓΧΥΤΗΡΑ GDI

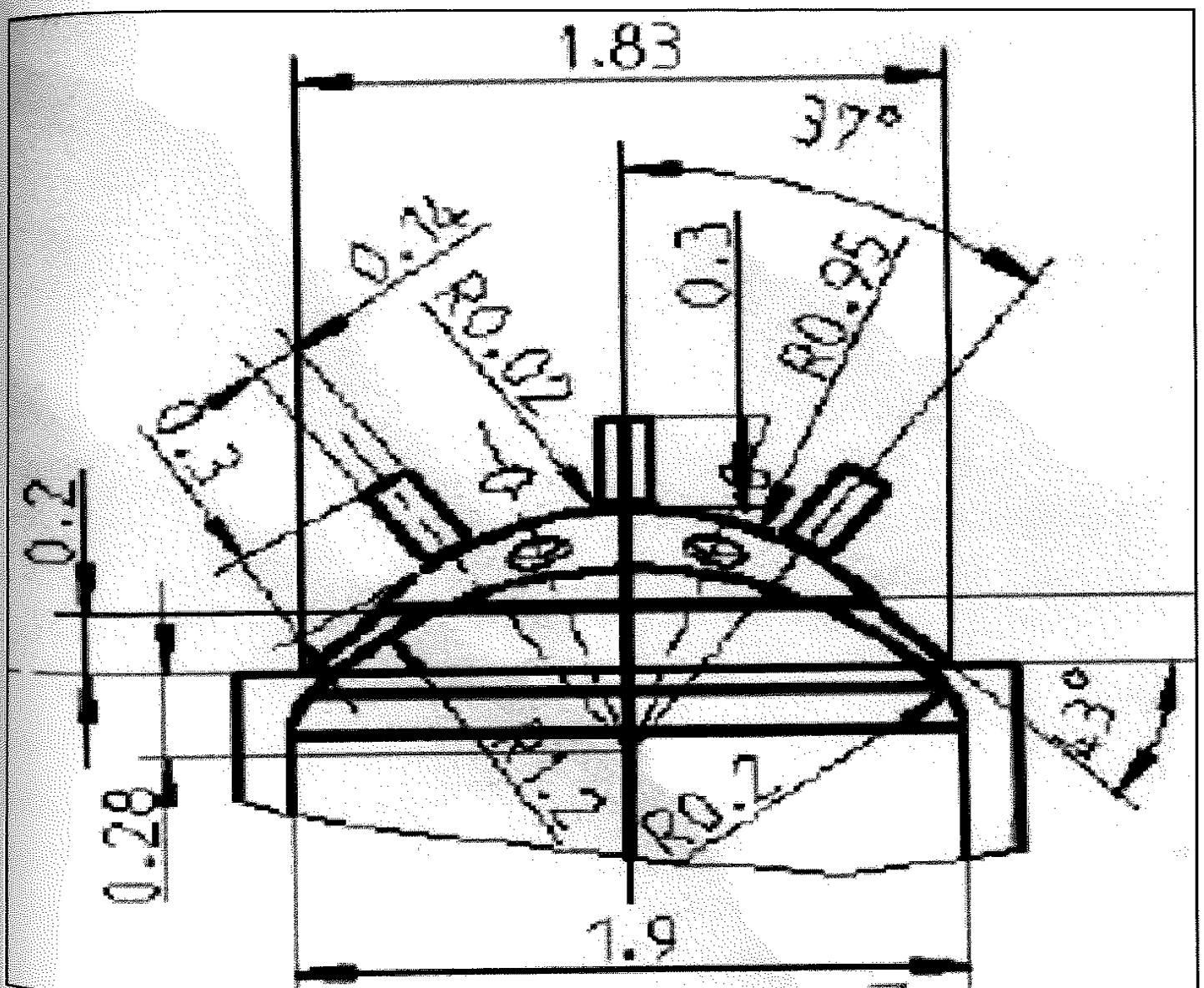
### 11.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Όπως έχει γίνει κατανοητό από την ανάλυση των συστημάτων ψεκασμού, ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα για την έγχυση του καυσίμου είναι ο εγχυτήρας. Στην εργασία αυτή η γεωμετρία του προβλήματος αντιστοιχεί ακριβώς στο άκρο εξόδου ενός πειραματικού πρότυπου εγχυτήρα ο οποίος εξελίσσεται από μεγάλη αυτοκινητοβιομηχανία για σύστημα άμεσου ψεκασμού βενζίνης. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα θεωρούμε ότι ο εγχυτήρας διαρρέεται από καύσιμο κανονικό οκτάνιο  $n\text{-C}_8\text{H}_{18}$ . Για την επίλυση της ροής και του όλου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics) CFX. Παρακάτω περιγράφεται όλη η διαδικασία μέχρι τη λήψη των τελικών αποτελεσμάτων. Ξεκινώντας από την κατασκευή της γεωμετρίας και του πλέγματος, συνεχίζουμε στην εισαγωγή όλων των φυσικών παραμέτρων, και τελικά φθάνουμε στην επίλυση της ροής και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

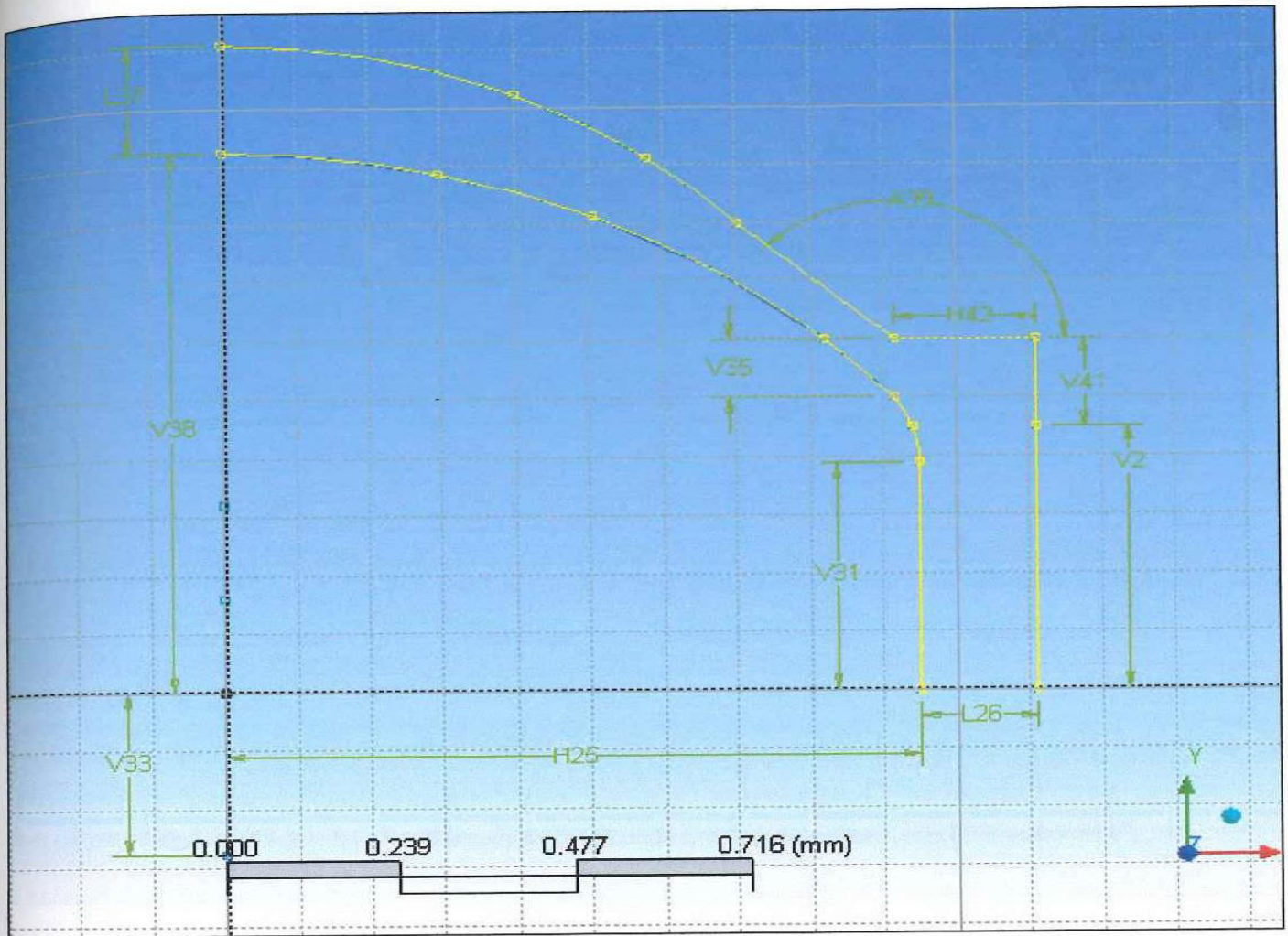
## 11.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ (GEOMETRY-CAD)

Για τη δημιουργία της τρισδιάστατης γεωμετρίας βασιστήκαμε στο σκαρίφημα (πλήρης τομή του τελικού όγκου στο επίπεδο), όπου εκεί δίνονται κάποιες βασικές διαστάσεις. (σχήμα 11-1). Με βάση λοιπόν αυτές τις δεδομένες διαστάσεις υπολογίστηκαν και όλες αυτές οι οποίες ήταν απαραίτητες για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε την τελική γεωμετρία.

Αρχικά σχεδιάστηκε στο επίπεδο μία ημιτομή της γεωμετρίας (σχήμα 11-2) έτσι όπως αυτή παρουσιάστηκε και στο σκαρίφημα χωρίς τους κυλίνδρους εξόδου του ρευστού.



Σχήμα 11-1 : Σκαρίφημα γεωμετρίας

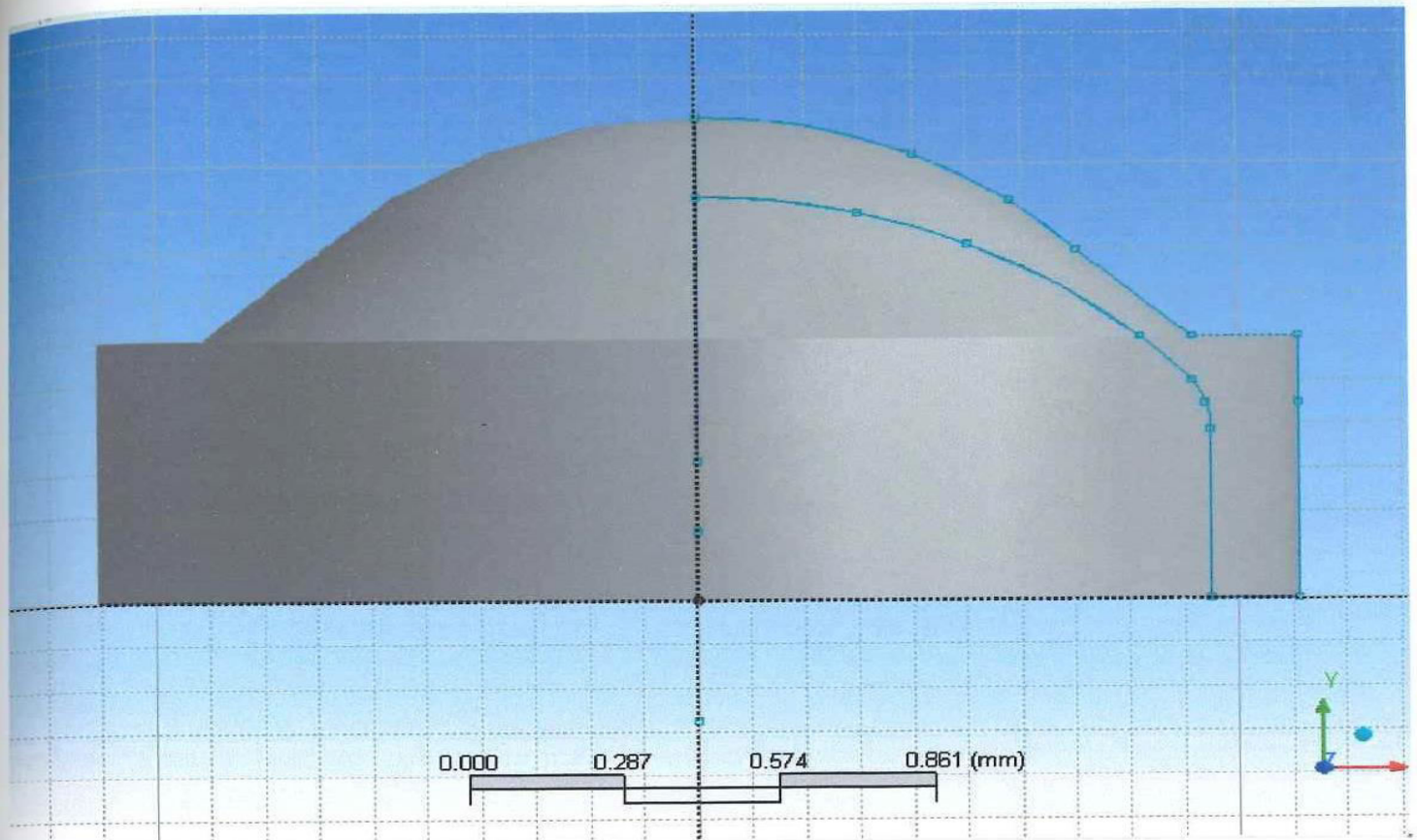


Σχήμα 11-2 : Σχέδιο στις δύο διαστάσεις (Επίπεδο XY)

### 11.2.1. Περιστροφή δισδιάστατου σχήματος

Η τελική τρισδιάστατη γεωμετρία (σχήμα 11-3) προέκυψε μετά από την περιστροφή του παραπάνω σχήματος γύρω από τον άξονα Y κατά  $360^{\circ}$ .

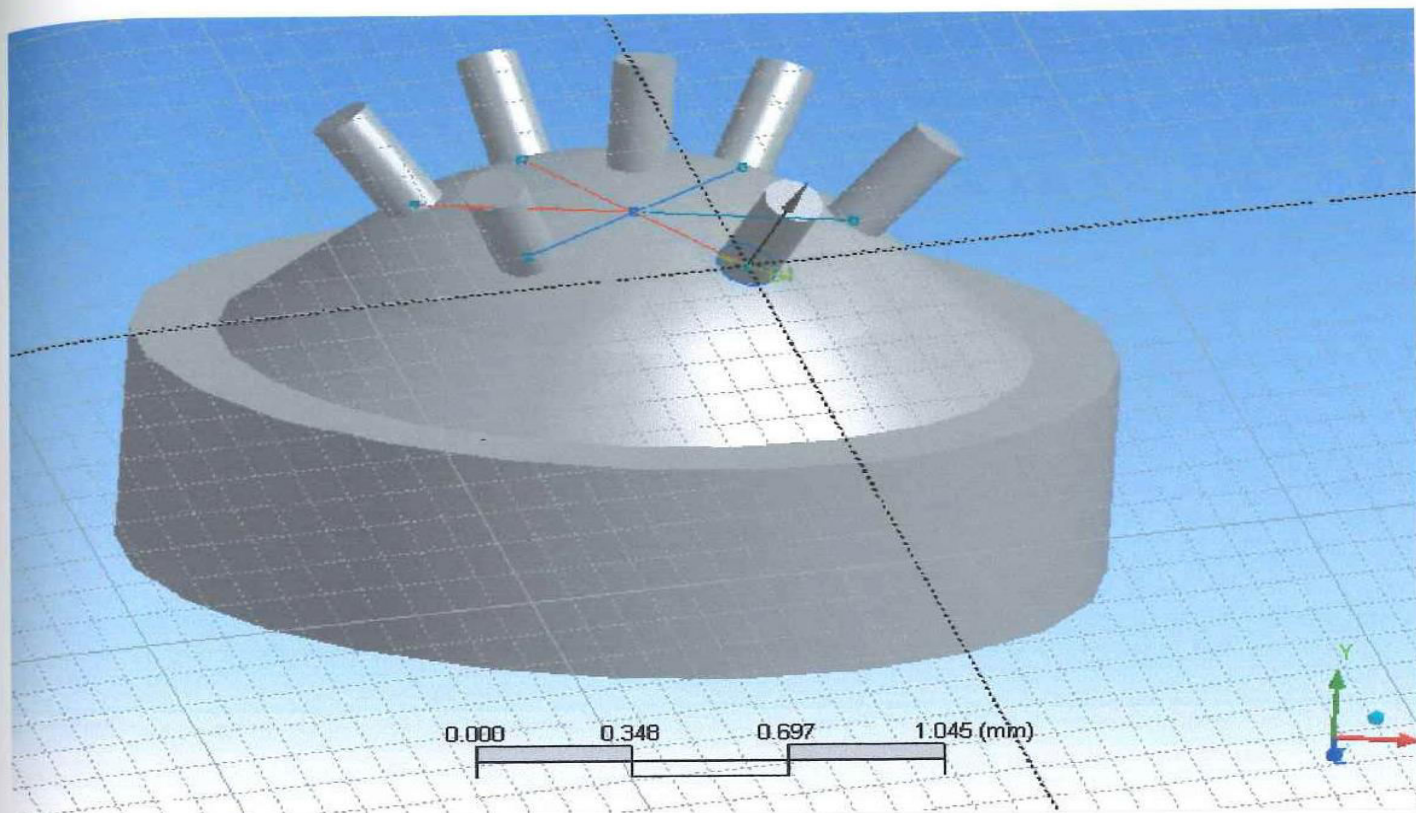




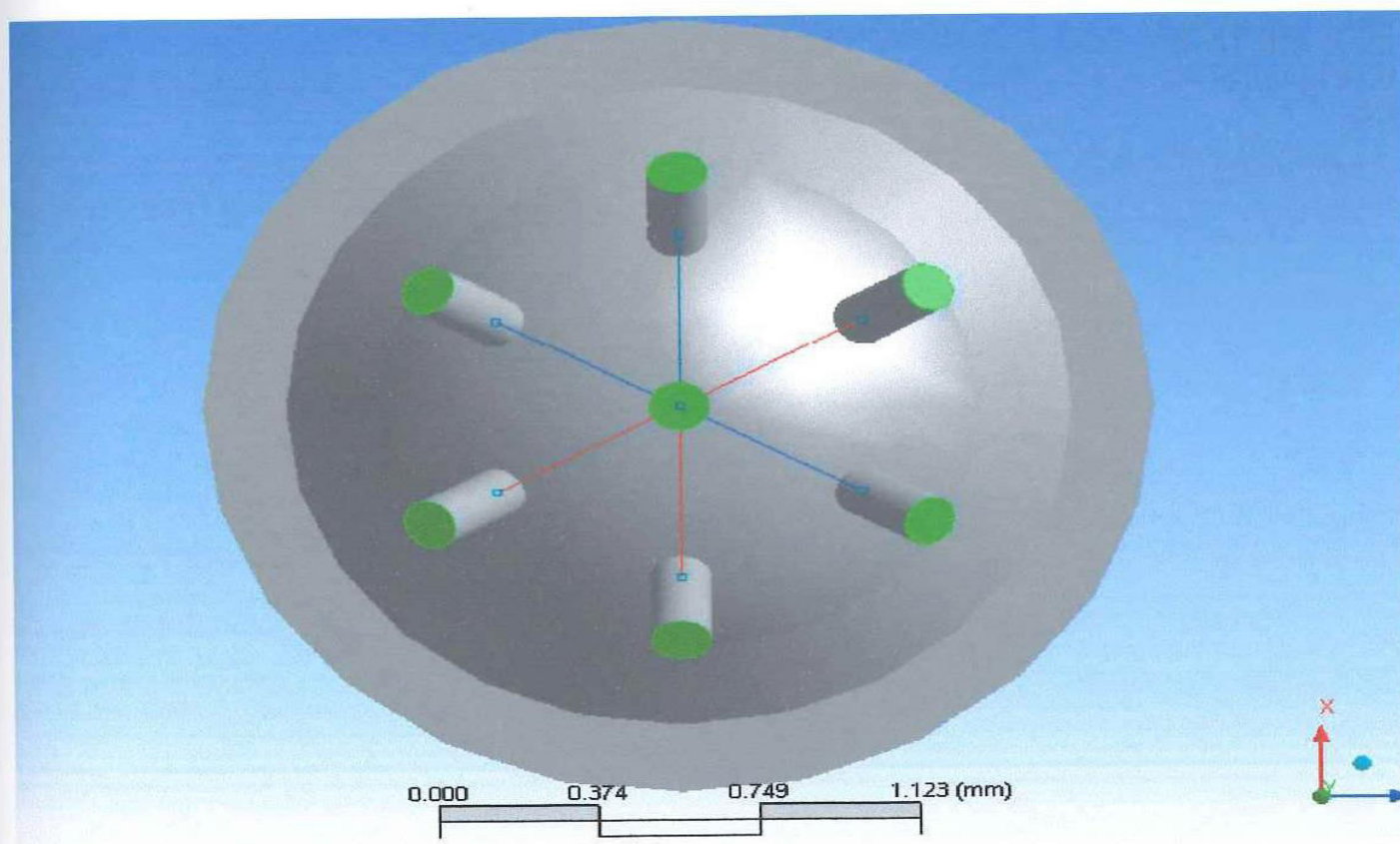
*Σχήμα 11-3 : Το αποτέλεσμα της περιστροφής του αρχικού σχεδίου κατά  $360^\circ$ .*

### 11.2.2. Κατασκευή κυλίνδρων

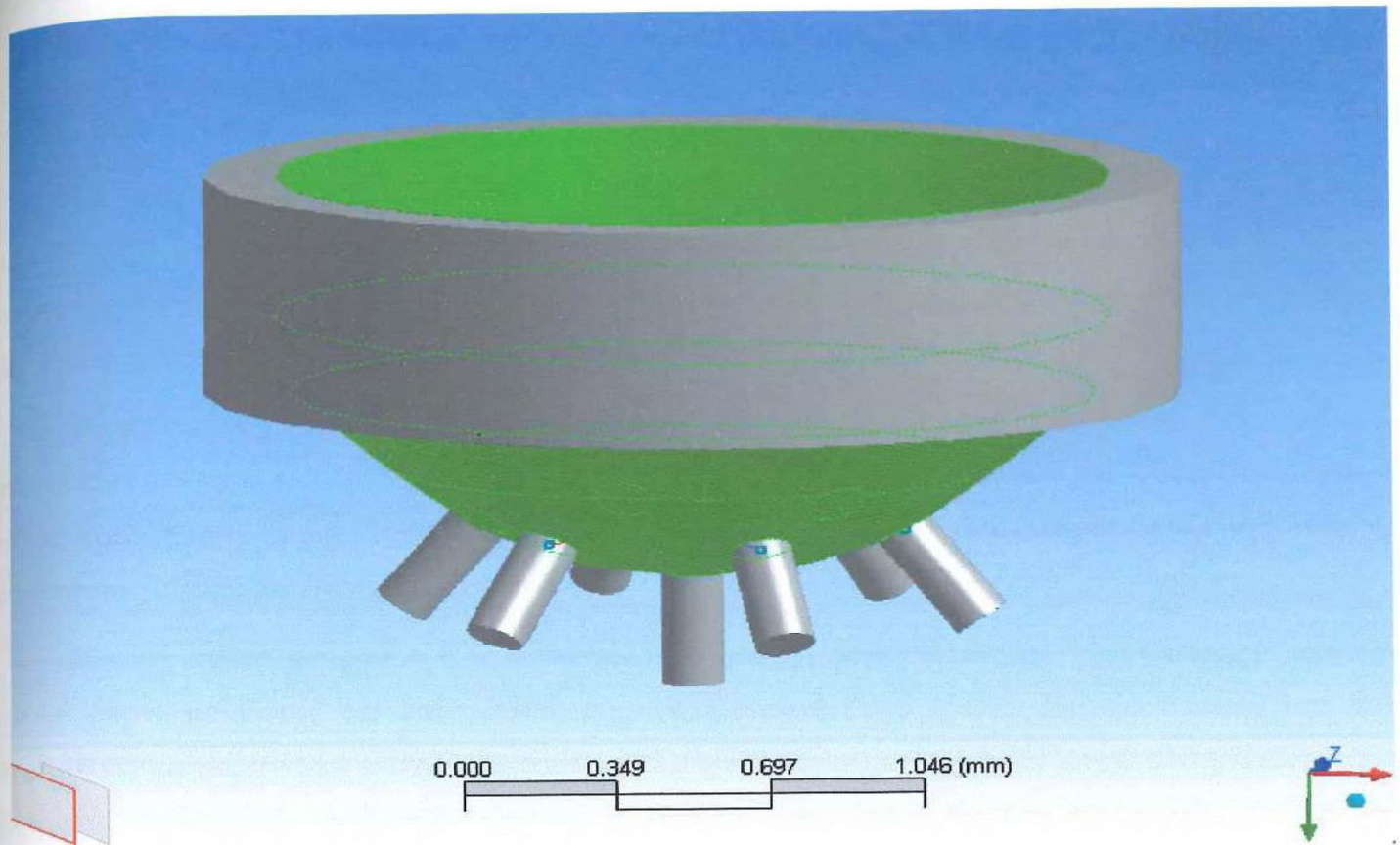
Όπως φαίνεται παραπάνω, στην κατασκευή του αρχικού σώματος δεν συμπεριελήφθησαν οι 7 κύλινδροι (6 πλάγιοι και ένας κεντρικός) απ' όπου τελικά εξέρχεται το ρευστό. Ο λόγος για τον οποίο ακολουθήθηκε η παραπάνω μεθοδολογία, είναι ότι για να σχεδιαστούν αυτοί, έπρεπε να οριστούν νέα συστήματα αναφοράς (σχήμα 11-4), με βάση την καμπύλη επιφάνεια που προέκυψε από την περιστροφή του αρχικού σχεδίου στο χώρο. Με τη βοήθεια αυτών των τοπικών συστημάτων επιτεύχθηκε και η δημιουργία όλων των κυλίνδρων. Έτσι ολοκληρώθηκε η διαδικασία της κατασκευής της γεωμετρίας του προβλήματος (Σχήμα 11-5, 11-6).



*Σχήμα 11-4 : Δημιουργία των κυλίνδρων με τη βοήθεια των τοπικών συστημάτων αναφοράς*



*Σχήμα 11-5 : Κάτοψη του τελικού σώματος*



*Σχήμα 11-6 : Το τελικό σώμα σε πλάγια όψη*

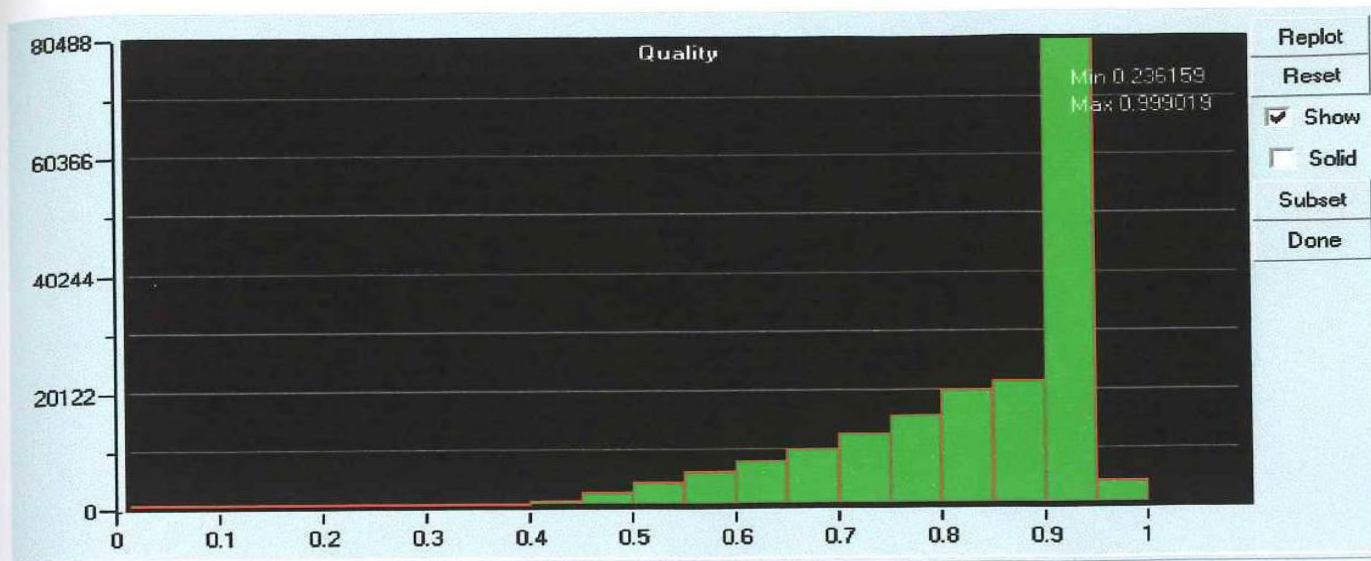
### 11.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (MESHING)

Το πρώτο βήμα που απαιτείται, για τη σωστή επεξεργασία του πλέγματος που θα δημιουργηθεί, για τον ορισμό των φυσικών παραμέτρων και των οριακών συνθηκών, είναι ο διαχωρισμός και ο καθορισμός του ονόματος των επιφανειών της εισόδου, εξόδου του ρευστού και όλων των υπολοίπων επιφανειών της γεωμετρίας.

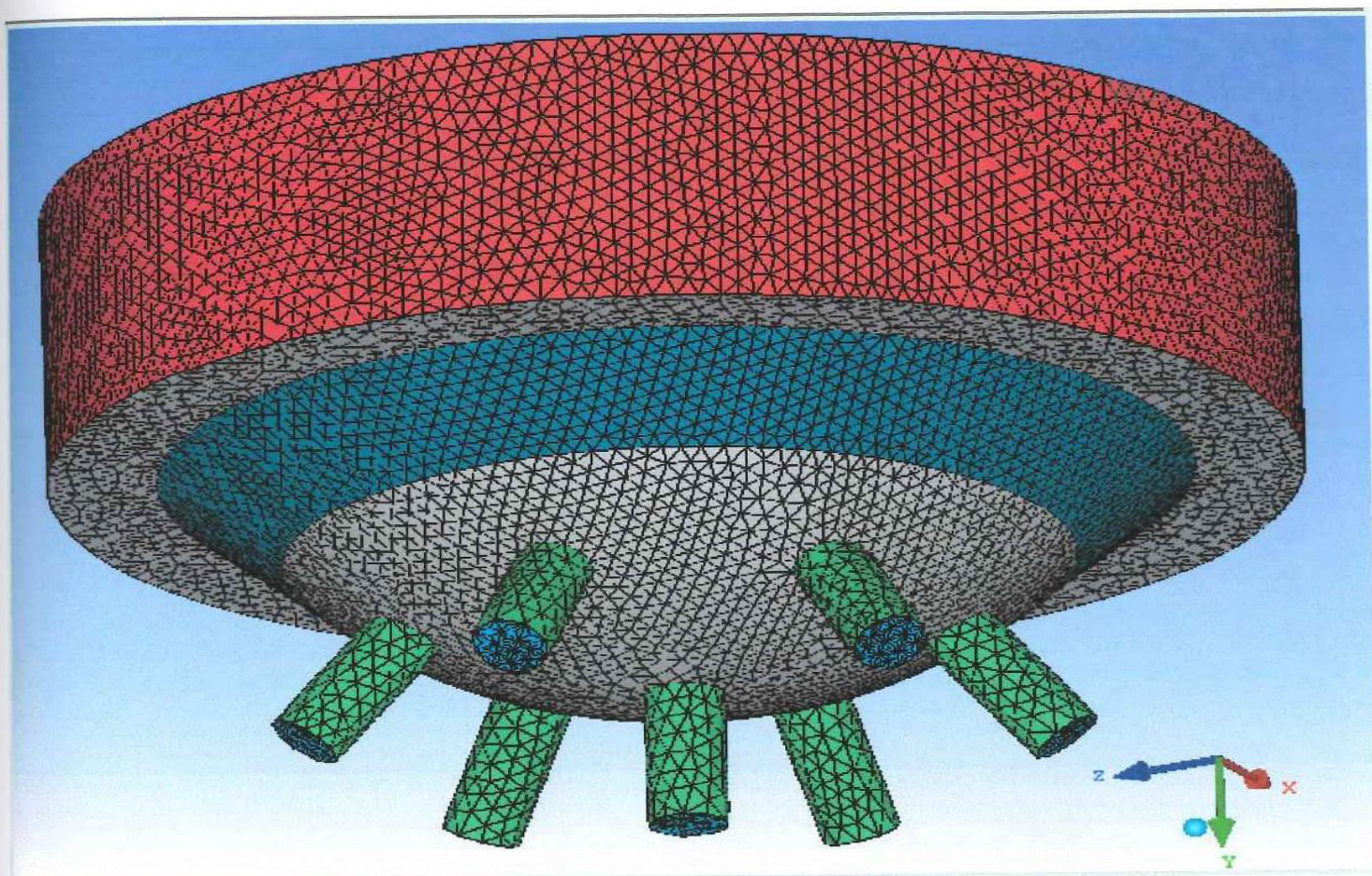
Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του πλέγματος εσωτερικά του όγκου στον οποίο θα επιλυθεί η ροή του ρευστού μας. Από τους δύο τρόπους κατασκευής του πλέγματος επιλέχθηκε αυτός των τετραέδρων. Αυτή η μορφή πλέγματος θεωρήθηκε ότι μπορούσε να καλύψει τις απαιτήσεις αυτού του προβλήματος.

Στη συνέχεια αυτό που μας απασχόλησε ήταν η πυκνότητα του πλέγματος. Η επιλογή αυτής έγινε με βάση τις διαστάσεις της γεωμετρίας (της τάξης του χιλιοστού) και των υπολοίπων μεγεθών (π.χ μεταβολή πίεσης). Πιο συγκεκριμένα η πυκνότητα αυτή καθορίζεται δίνοντας το μέγιστο όγκο που μπορεί να έχει το κάθε στοιχείο του πλέγματος. Μετά από αρκετούς πειραματισμούς και ελέγχοντας την ποιότητα του πλέγματος που κατασκευαζόταν κάθε φορά, η τιμή αυτού του μεγέθους ορίστηκε στο 17% του όγκου της γεωμετρίας. Με αυτή την τιμή κατασκευάστηκαν 164.341 τετράεδρα και δημιουργήθηκαν συνολικά 33.957 κόμβοι (σχήμα 11-8).

Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της ποιότητας του πλέγματος ο οποίος γίνεται με τη βοήθεια ενός ιστογράμματος. Στον άξονα X φαίνεται το ποσοστό της ποιότητας του πλέγματος με την τιμή 1 να αντιστοιχεί στην τέλεια ποιότητα, ενώ στον άξονα Y φαίνεται το πλήθος των στοιχείων. Με τον όρο ποιότητα αναφερόμαστε στο πόσο καλά έχει οριστεί η γεωμετρία από το πλέγμα. Από το ιστόγραμμα αυτό (σχήμα 11-7) παρατηρούμε ότι 80.554 στοιχεία από τα 164.341 του πλέγματος έχουν 95% ποιότητα Αυτό σημαίνει ότι η γεωμετρία μας έχει οριστεί ικανοποιητικά από το πλέγμα.

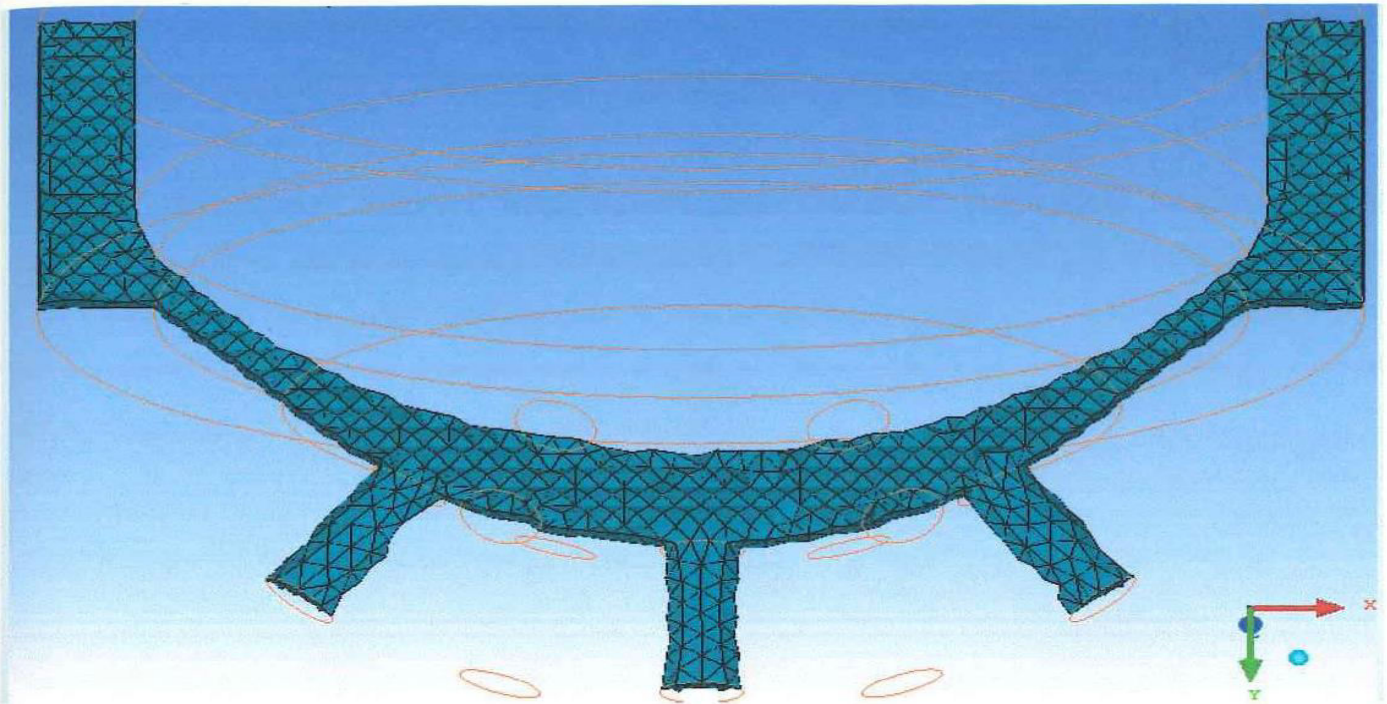


Σχήμα 11-7 : Ιστόγραμμα ποιότητας πλέγματος



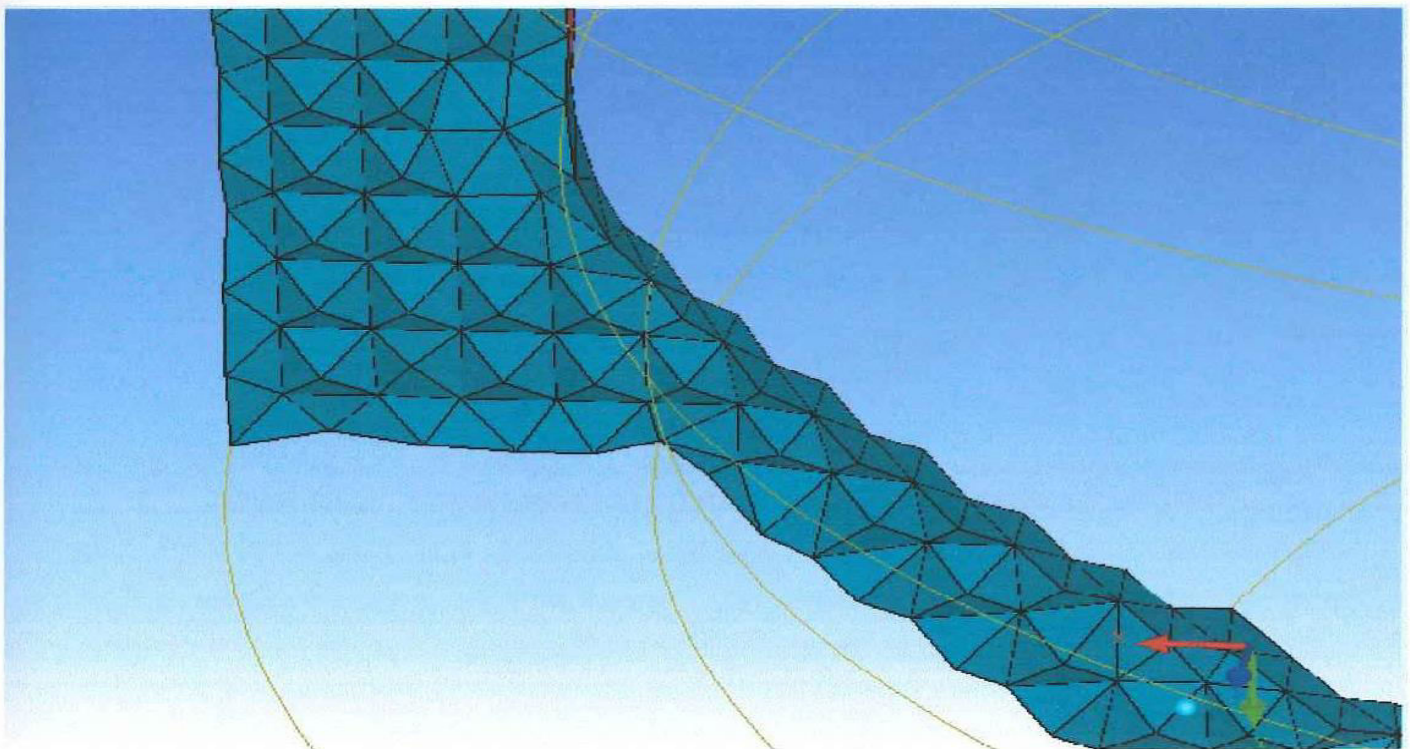
Σχήμα 11-8 : Η τελική διαμόρφωση του πλέγματος στις εξωτερικές επιφάνειες

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται μία πλήρης τομή στο επίπεδο XY στην οποία φαίνονται τα τετράεδρα που έχουν κατασκευαστεί (σχήμα 11-9).



**Σχήμα 11-9 :** Πλήρης τομή όπου φαίνεται η διαμόρφωση των τετραέδρων εσωτερικά του όγκου

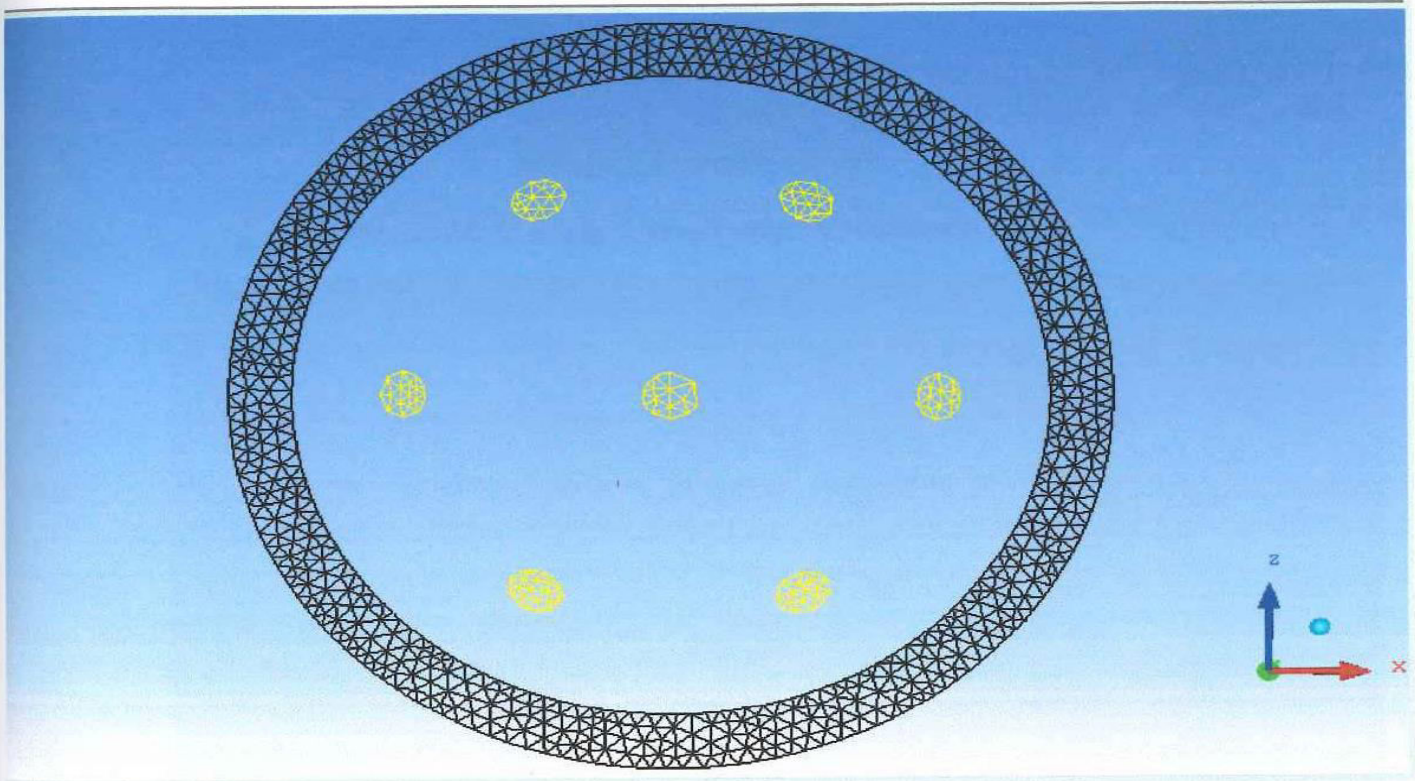
Παρακάτω βλέπουμε μία μεγέθυνση στην περιοχή του στενώματος της γεωμετρίας όπου φαίνεται καλύτερα η πυκνότητα του πλέγματος (σχήμα 11-10). Η περιοχή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι εκεί αναμένουμε τις πρώτες αξιοσημείωτες μεταβολές της πίεσης, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας στη ροή του ρευστού.



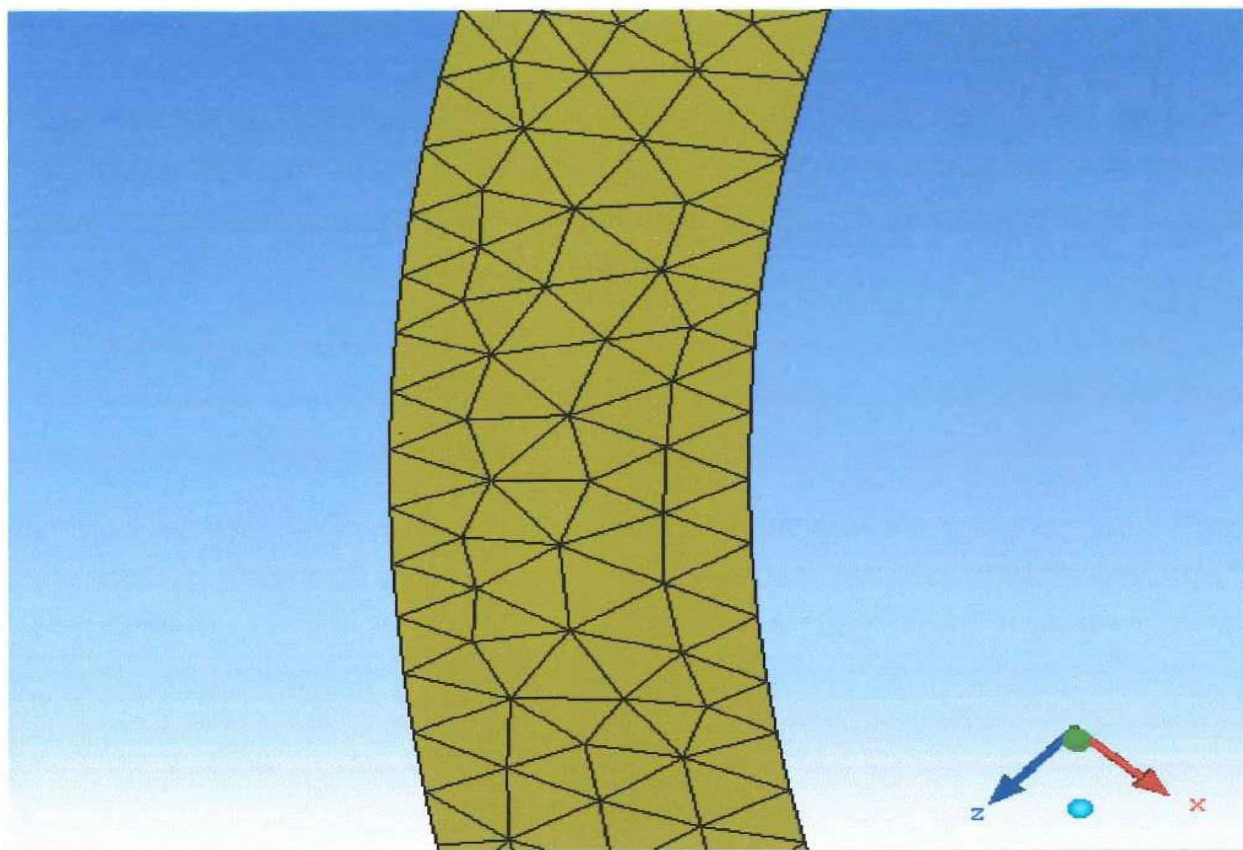
**Σχήμα 11-10 :** Τομή της περιοχής του στενώματος σε μεγέθυνση

Έχοντας διαχωρίσει τις επιφάνειες εισόδου , εξόδου αλλά και όλες τις υπόλοιπες επιφάνειες του σώματος, μπορούμε να εμφανίσουμε και να επεξεργαστούμε κάθε μία απ' αυτές .

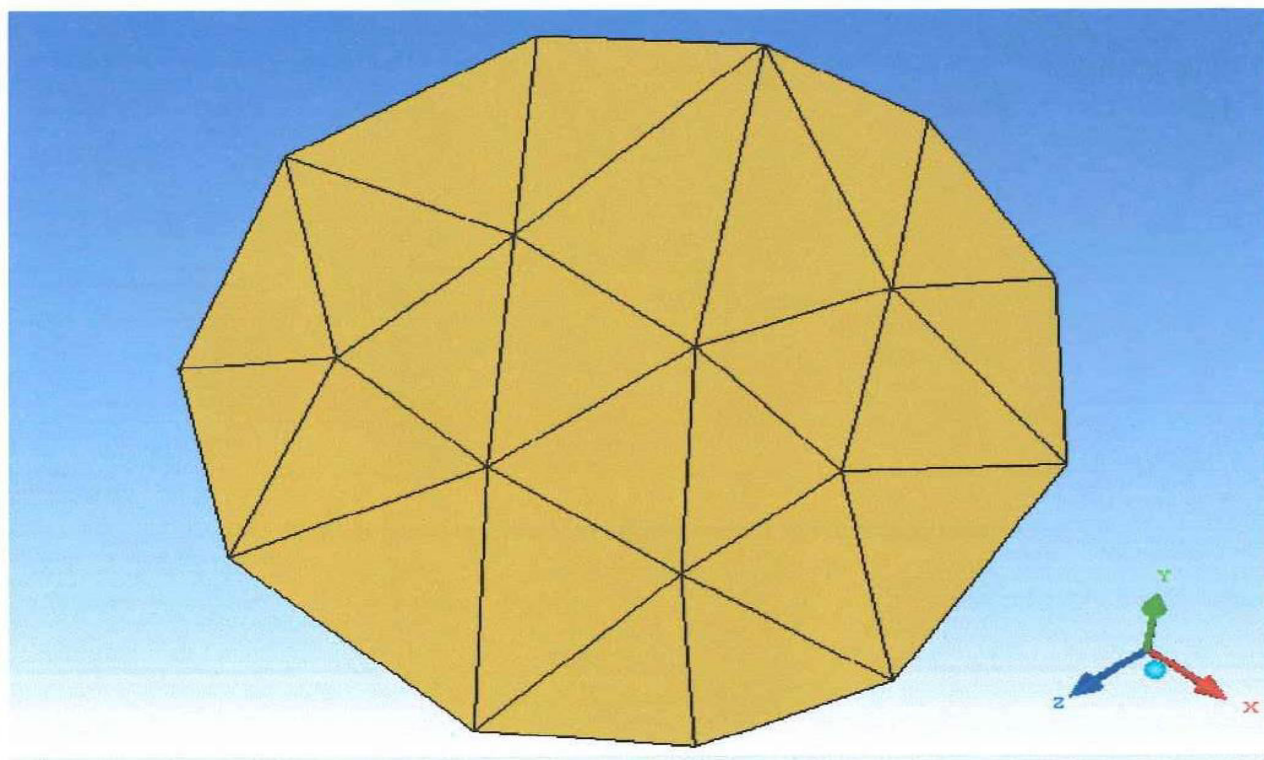
Οι επιφάνειες εισόδου και εξόδου του ρευστού είναι δύο περιοχές υψηλού ενδιαφέροντος γι' αυτό το λόγο επιλέγουμε να τις παρουσιάσουμε και τις δύο μαζί (σχήμα 11-11) αλλά και σε μεγέθυνση ξεχωριστά την κάθε μία (σχήμα 11-12, 11-13) . Αυτό γίνεται για να φανεί καλύτερα το μέγεθος των στοιχείων και να αποφασιστεί αν η διαμόρφωση αυτή είναι επαρκής για τις ανάγκες του προβλήματος.



*Σχήμα 11-11 : Επιφάνειες εισόδου(μαύρη) και εξόδου(κίτρινη) του ρευστού*



*Σχήμα 11-12 : Τμήμα επιφάνειας εισόδου του ρευστού*



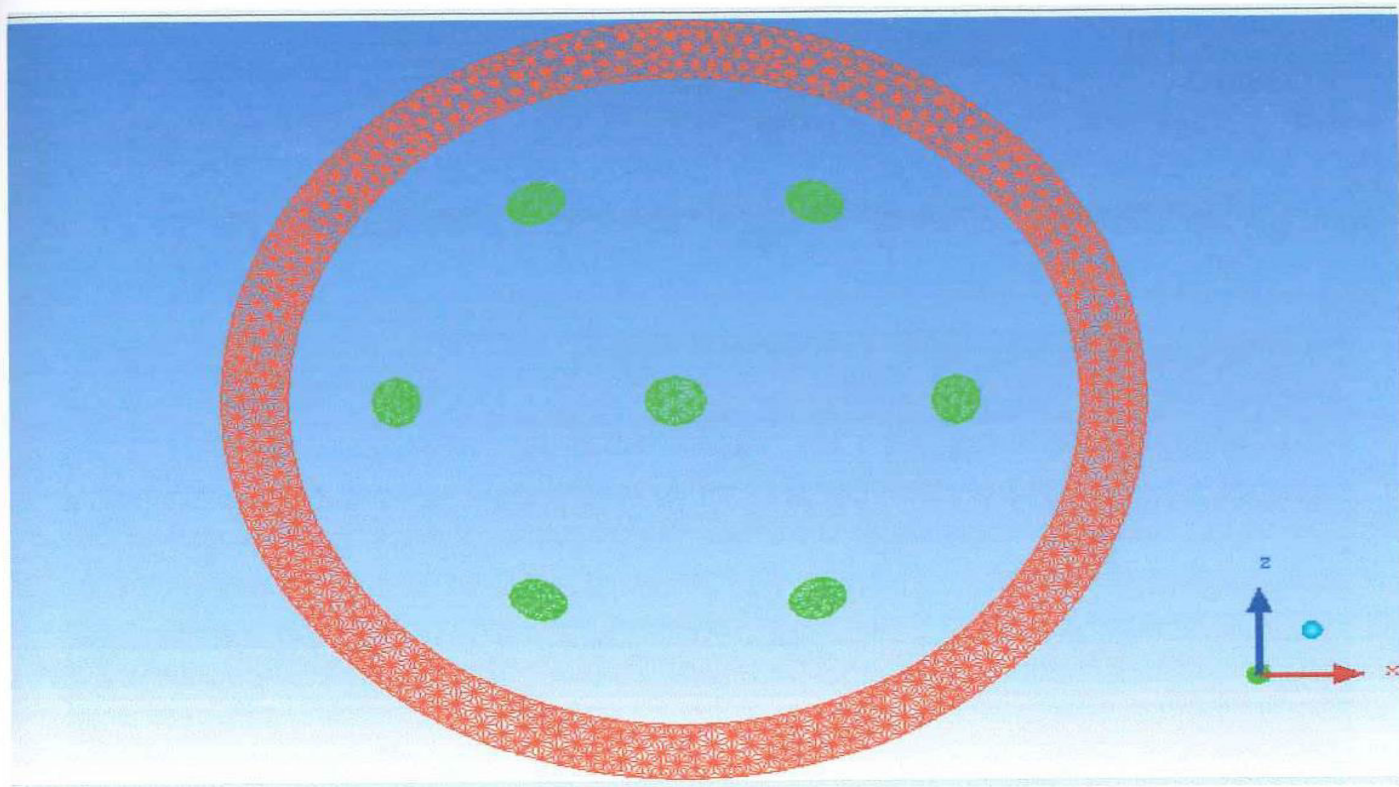
*Σχήμα 11-13 : Μία από τις συνολικά επτά επιφάνειες εξόδου του ρευστού*



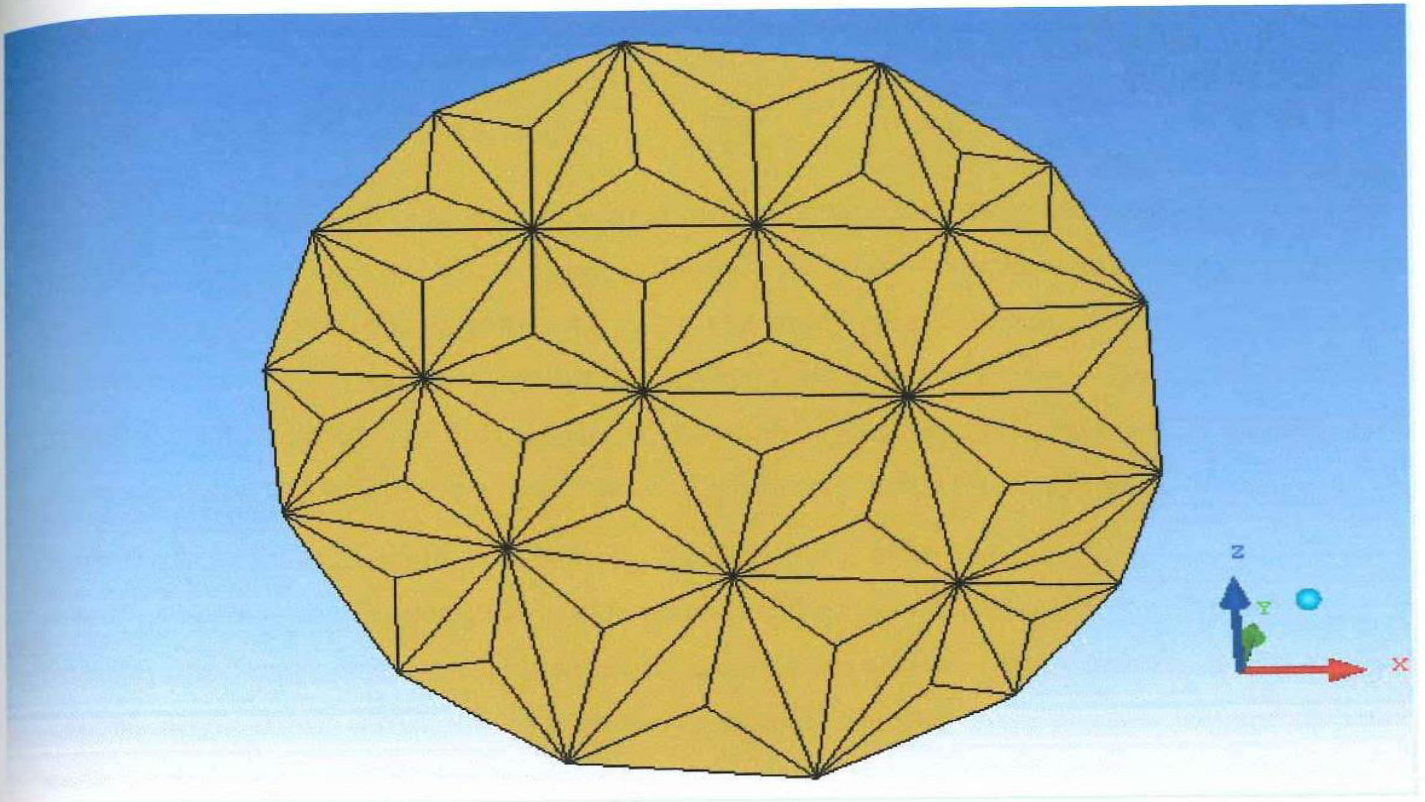
### 11.3.1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ

Στη συνέχεια έγινε επεξεργασία του αρχικού αυτού πλέγματος στις επιφάνειες εισόδου και εξόδου του ρευστού με τον τριπλασιασμό των στοιχείων που είχαμε αρχικά. Αυτό έγινε για να πετύχουμε μια πιο πυκνή διαμόρφωση η οποία θα καλύψει τις ανάγκες για έλεγχο της εισόδου και εξόδου του ρευστού.

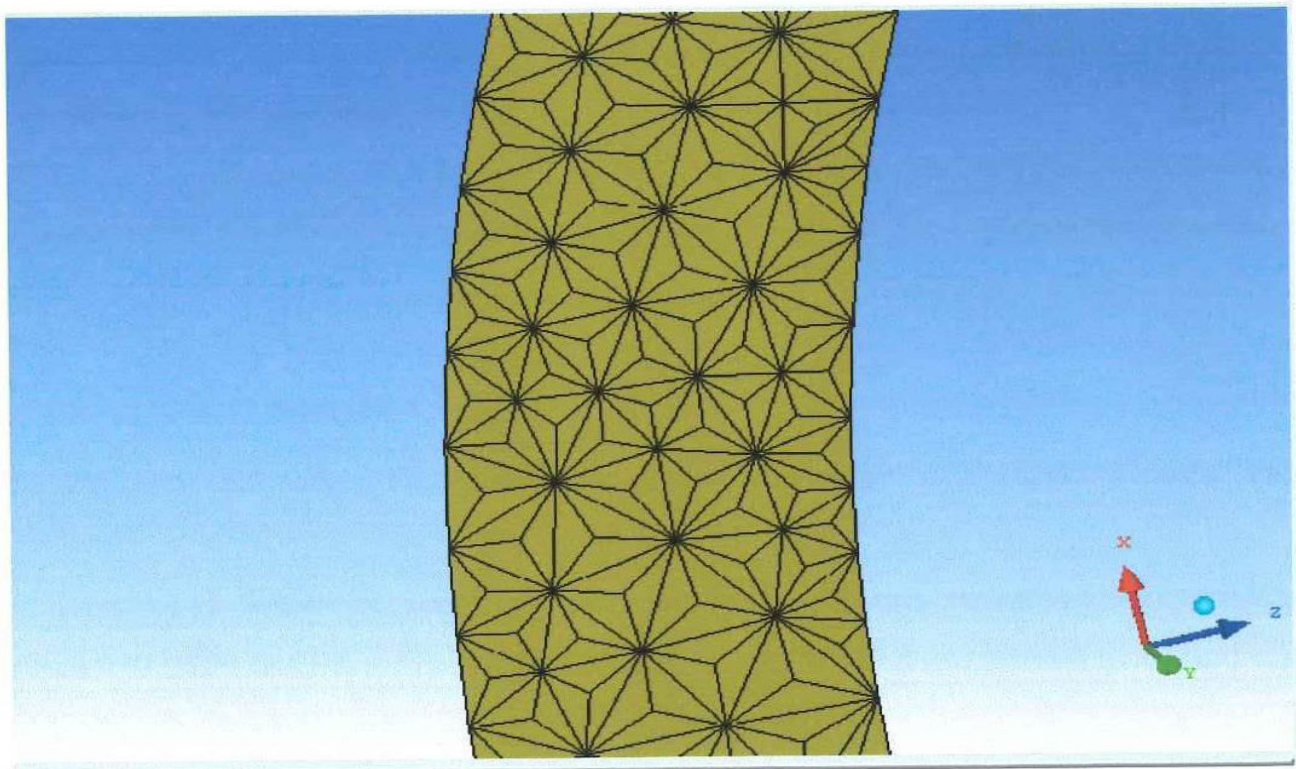
Τα επόμενα τρία σχήματα (11-14,11-15,11-16) προκύπτουν μετά την επεξεργασία και είναι τα αντίστοιχα των τριών προηγούμενων σχημάτων . Η βελτίωση στη διαμόρφωση είναι εμφανής με μια απλή σύγκριση.



*Σχήμα 11-14 : Επιφάνειες εισόδου και εξόδου μετά την επεξεργασία τους*



*Σχήμα 11-15 : Επιφάνεια εξόδου μετά τον τριπλασιασμό των στοιχείων της*



*Σχήμα 11-16: Τμήμα της επιφάνειας εισόδου μετά τον τριπλασιασμό των στοιχείων*

### 11.3.2. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Η κατασκευή πλέγματος με μεγαλύτερο πλήθος στοιχείων σε ολόκληρο τον όγκο δεν ενδείκνυται για τους παρακάτω λόγους. Αφενός μεν διότι ο διπλασιασμός των στοιχείων δεν θα βελτιώσει τους υπολογισμούς στις περιοχές χαμηλού ενδιαφέροντος, καθώς η πυκνότητα του πλέγματος είναι πολύ καλή για τη μελέτη των περιοχών όπου παρουσιάζονται μικρές μεταβολές και αφετέρου διότι αυτή η συνολική βελτίωση επιφέρει πολύ μεγάλο αριθμό στοιχείων και το υπολογιστικό πρόγραμμα αδυνατεί να τα δημιουργήσει.

Έτσι στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας έγινε προσπάθεια για βελτίωση της πυκνότητας του επεξεργασμένου πλέγματος στις περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος, εκεί δηλαδή όπου παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μεταβολές στα χαρακτηριστικά της ροής. Στις περιοχές αυτές απαιτούνται περισσότεροι υπολογισμοί ώστε οι τιμές των μεταβολών να καθοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια.

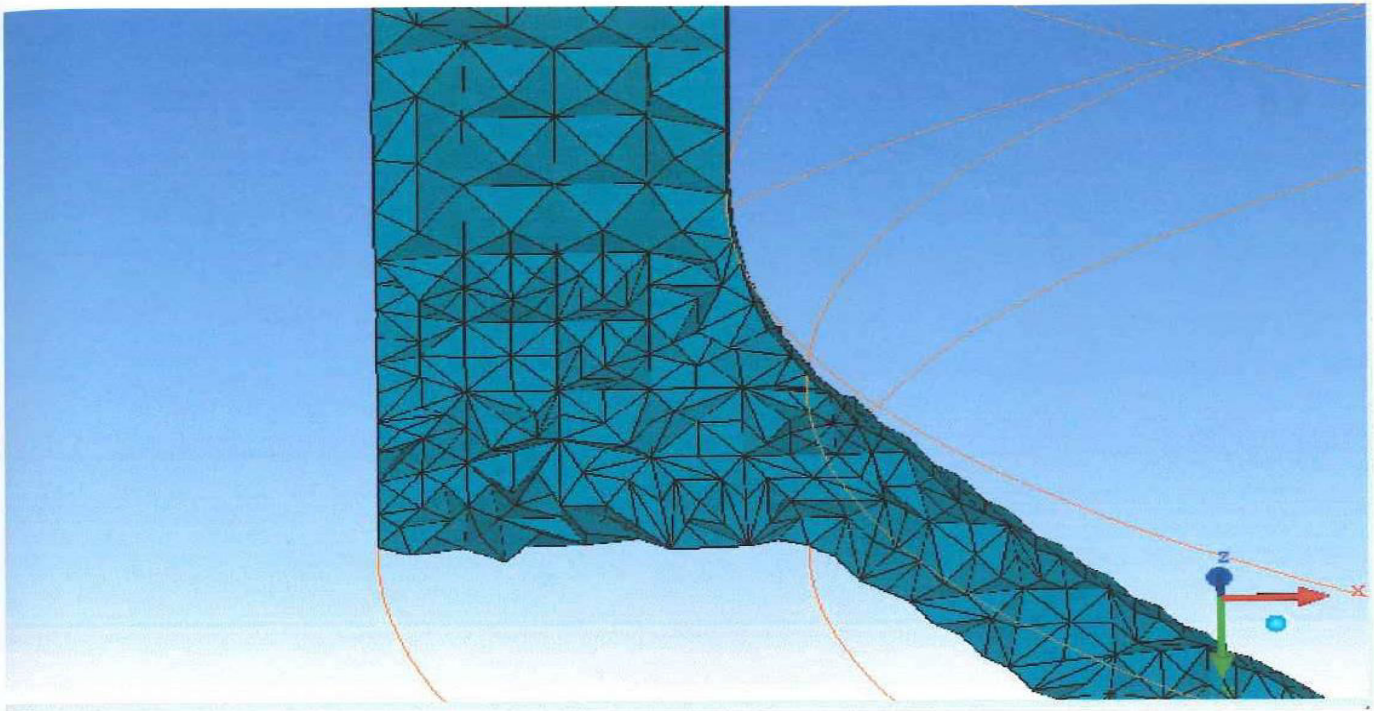
Με βάση την αρχή της επίλυσης ροών στην υπολογιστική ρευστομηχανική (επίλυση όλων των εξισώσεων για κάθε στοιχείο) οι περισσότεροι υπολογισμοί, επιτυγχάνονται με πύκνωση του πλέγματος στα επιμέρους αυτά σημεία. Η αύξηση των στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της μεταβολής ανά όγκο η οποία συνεπάγεται την μεγιστοποίηση της ακρίβειας.

Οι περιοχές τελικά που θα μας απασχολήσουν είναι η περιοχή στο πρώτο στένωμα που συναντά η ροή όπως έχει προαναφερθεί και η περιοχή της εισόδου του ρευστού στους κυλίνδρους εξόδου.

### 11.4. ΤΕΛΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

Μετά τη βελτίωση της πυκνότητας του πλέγματος στις συγκεκριμένες περιοχές προέκυψαν 503.995 τετράεδρα και 99.743 κόμβοι.

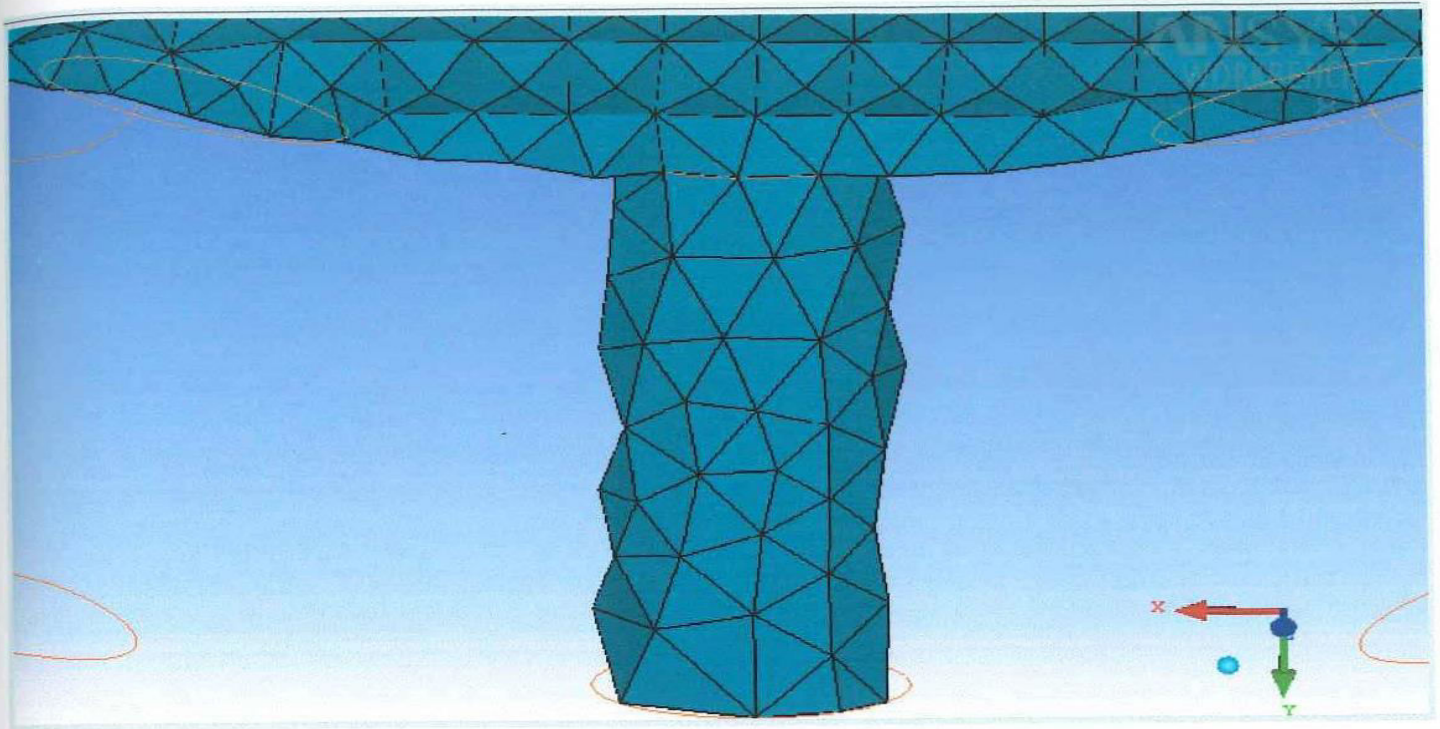
Στην αρχή έγινε διπλασιασμός των στοιχείων του αρχικού πλέγματος στην πρώτη περιοχή στο στένωμα της ροής. Στο σχήμα (11-17) φαίνεται η μεγέθυνση σε πλήρη τομή της πύκνωσης του πλέγματος που επιτελέστηκε σε αυτή την πρώτη περιοχή ενδιαφέροντος.



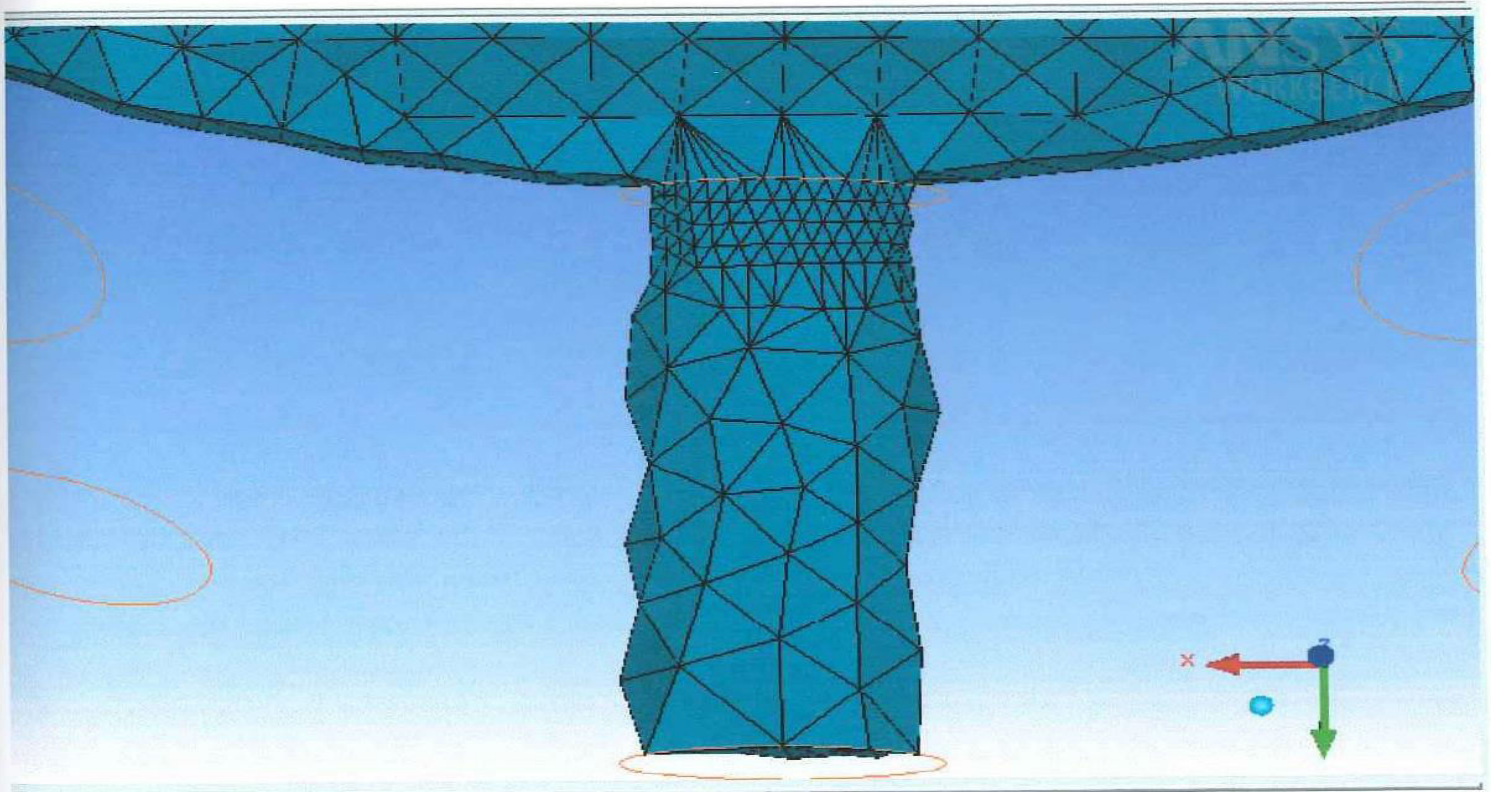
*Σχήμα 11-17: Διπλασιασμός των στοιχείων του πλέγματος στην περιοχή του στενώματος*

Στη συνέχεια έγινε προσπάθεια για αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος και στις περιοχές εισόδου του ρευστού στους κυλίνδρους. Αυτό όμως δεν κατέστη δυνατό, διότι το πρόγραμμα λόγω της πολύ μεγάλης αύξησης των στοιχείων και της περιορισμένης δυνατότητας του υπολογιστή, δεν μπορούσε να δημιουργήσει το πυκνότερο πλέγμα σε αυτά τα σημεία. Έτσι λοιπόν περιοριστήκαμε σε μια διαδικασία βελτίωσης και πύκνωσης των στοιχείων μόνο κοντά σε αυτές τις επιφάνειες εξωτερικά, στην καμπύλη (σφαίρα) αλλά και στους κυλίνδρους. Τελικά με αυτή την επεξεργασία έγινε και κάποια μικρή βελτίωση στα κελιά εσωτερικά των επιφανειών.

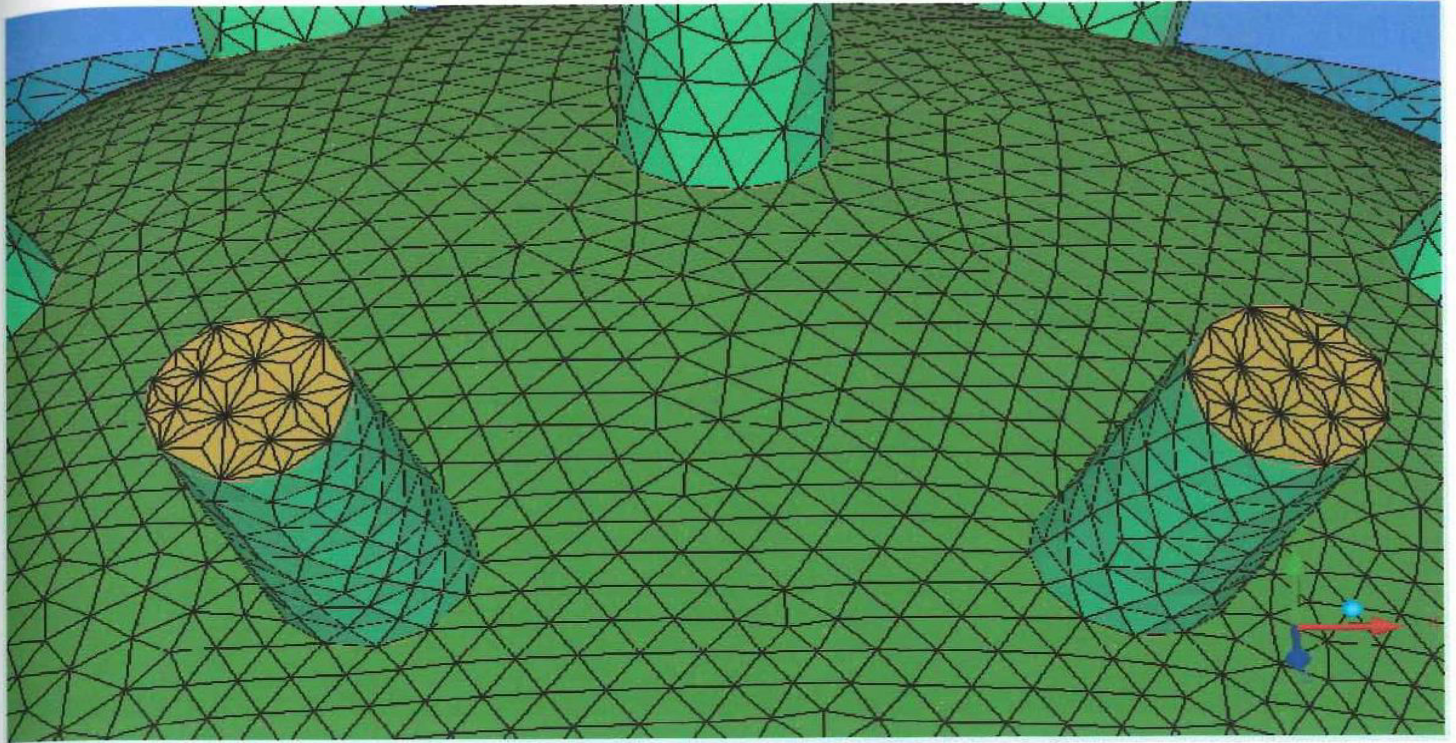
Στα σχήματα (11-18,11-19) φαίνεται ακριβώς, σε τομή, η σημαντική διαφορά πριν και μετά τη βελτίωση που επιτεύχθηκε στο πλέγμα εσωτερικά της περιοχής αυτής. Ενώ στα σχήματα (11-20, 11-21) φαίνεται καλύτερα η διαφορά στην πύκνωση που εμφανίζεται στην ένωση της επιφάνειας της σφαίρας με τις επιφάνειες των κυλίνδρων.



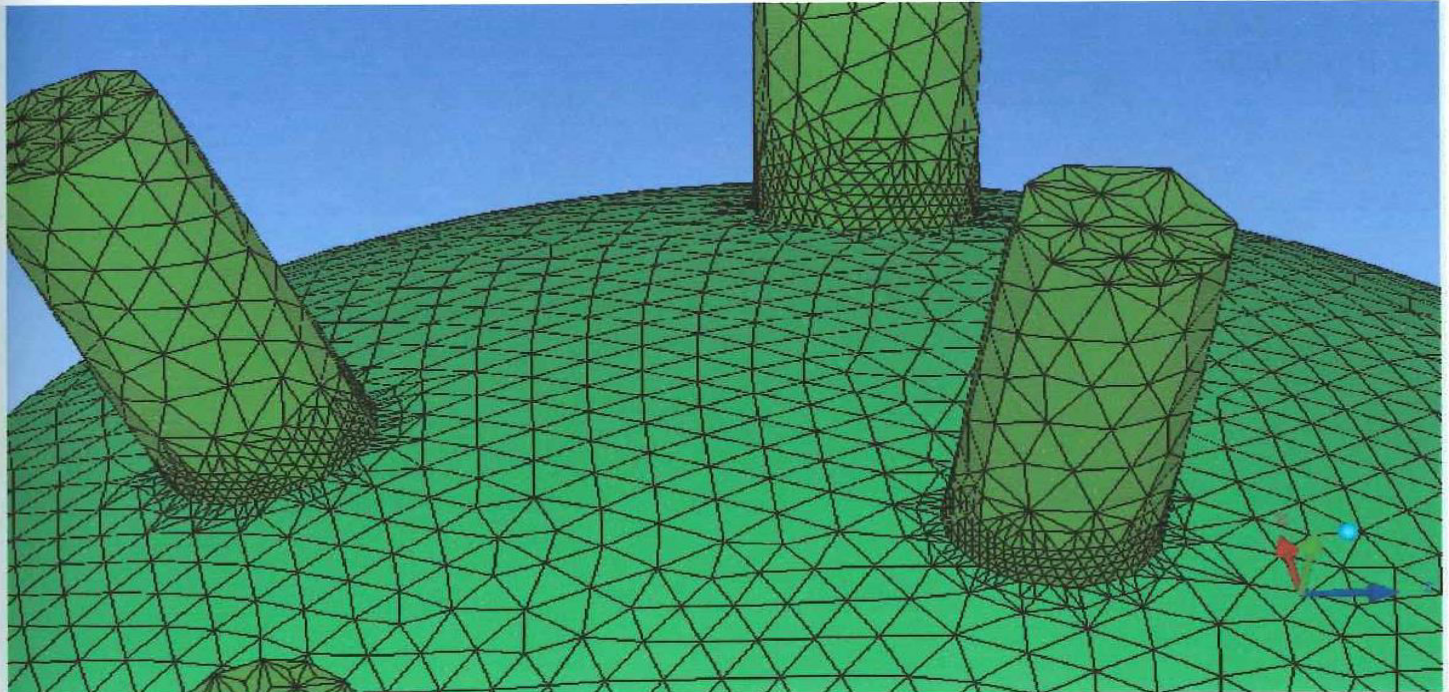
Σχήμα 11-18 : Η τομή της δεύτερης περιοχής ενδιαφέροντος σε μεγέθυνση πριν τη βελτίωση



Σχήμα 11-19 : Η τομή της δεύτερης περιοχής ενδιαφέροντος σε μεγέθυνση μετά τη βελτίωση

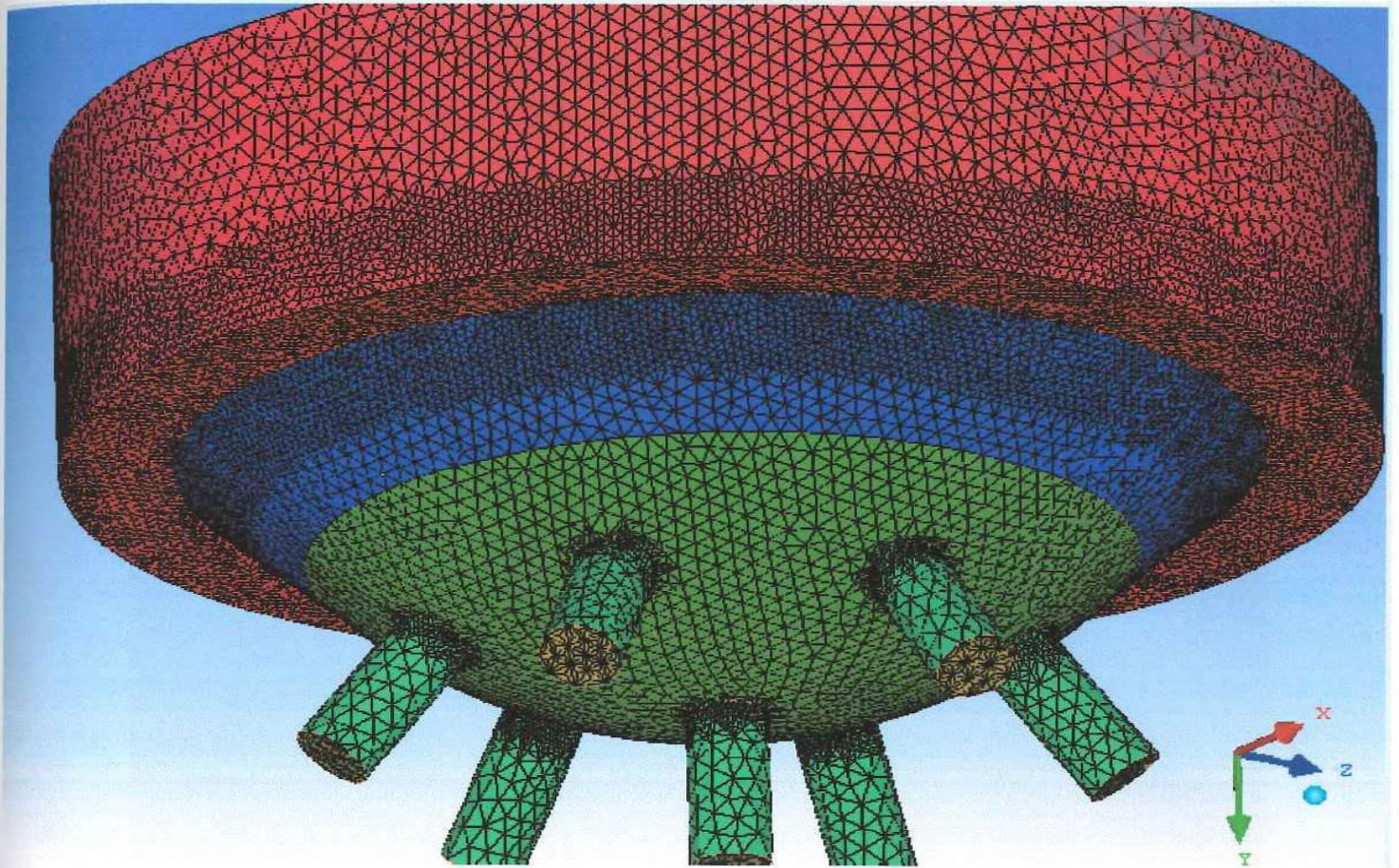


*Σχήμα 11-20 : Το πλέγμα στις επιφάνειες των κυλίνδρων και της σφαίρας πριν την πόκνωση*



*Σχήμα 11-21 : Το πλέγμα στις επιφάνειες των κυλίνδρων και της σφαίρας μετά την πόκνωση*

Μετά από τη διαδικασία της επεξεργασίας και της βελτίωσης του πλέγματος σε όσα σημεία κρίθηκε απαραίτητο προέκυψε η τελική κατάσταση του πλέγματος (σχήμα 11-22) . Με βάση αυτό το πλέγμα θα γίνει η επίλυση της ροής για όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις που θα μας απασχολήσουν.

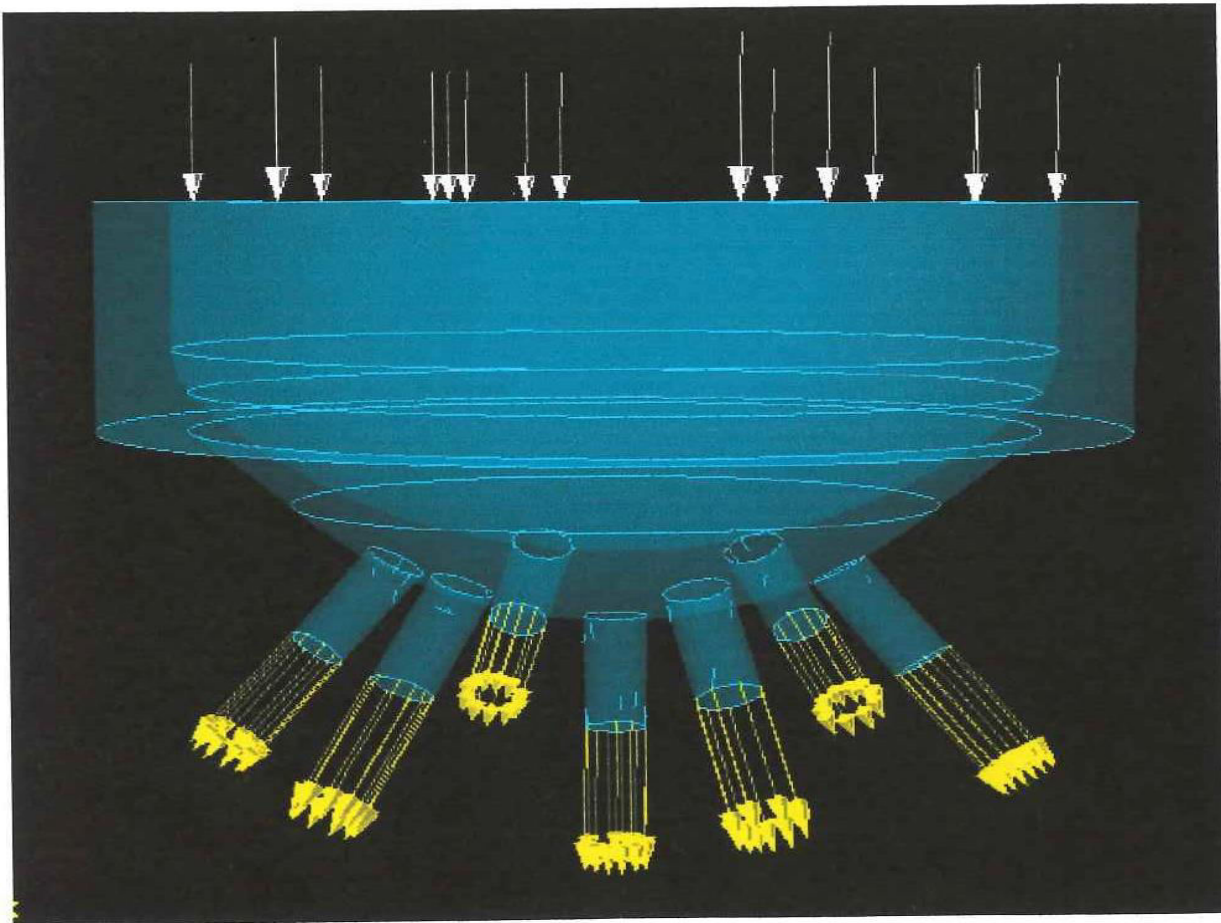


*Σχήμα 11-22 : Γενική όψη του σώματος με το τελικό πλέγμα.*

## 11.5. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ (PRE-PROCESSING)

Ο ορισμός του ρευστομηχανικού προβλήματος γίνεται σ' αυτό το στάδιο με την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων. Τα στοιχεία αυτά καθορίζουν τη φύση του προβλήματος και καθένα απ' αυτά έχει ιδιαίτερη σημασία για την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας.

Το πρώτο βασικό βήμα είναι η επιλογή των οριακών συνθηκών. Έτσι ορίζουμε τις επιφάνειες εισόδου και εξόδου του ρευστού (σχήμα 11-23). Όλες οι υπόλοιπες επιφάνειες αποτελούν τα τοιχώματα, δηλαδή τα όρια μέσα στα οποία θα υπάρχει το ρευστό.



Σχήμα 11-23 : Τα διανόσματα δείχνουν την κατεύθυνση της ροής



Ο καθορισμός του ρευστού και όλων των ιδιοτήτων του γίνεται σε αυτό το σημείο. Στη δική μας περίπτωση, το ρευστό είναι το καύσιμο κανονικό οκτάνιο  $n\text{-C}_8\text{H}_{18}$ . Η βάση δεδομένων του προγράμματος δεν συμπεριλάμβανε αυτή την ουσία και έτσι ο ορισμός του καυσίμου έγινε με την καταχώρηση όλων των φυσικών ιδιοτήτων του (σχήμα 11-24).

Θερμοδυναμική κατάσταση	Υγρό
Μοριακό βάρος	114,232 kg/kmol
Πυκνότητα	696,13 kg/m <sup>3</sup>
Ειδική θερμοχωρητικότητα	2215.53 J/kg • k
Ειδική ενθαλπία αναφοράς	-1.825 • 10 <sup>6</sup> J/kg
Ιξώδες	0.0005163 kg/m • sec
Θερμική αγωγιμότητα	0,12518 W/m • k
Πίεση εξάτμισης (στους 20 °C)	1,33 kPa
Σημείο αυτανάφλεξης	220 °C
Σημείο βρασμού	126 °C
Σημείο τήξης	-56,8 °C
Flash point (σημείο ικανό για καύση)	13 °C

*Σχήμα 11-24 : Πίνακας ιδιοτήτων του οκτανίου  $n\text{-C}_8\text{H}_{18}$  [ $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_6\text{-CH}_3$ ] θερμοκρασία αναφοράς 298 K και πίεση αναφοράς 1atm*

Οι φυσικές παράμετροι τις οποίες ορίσαμε σε κάθε περίπτωση ροής ήταν οι παρακάτω.

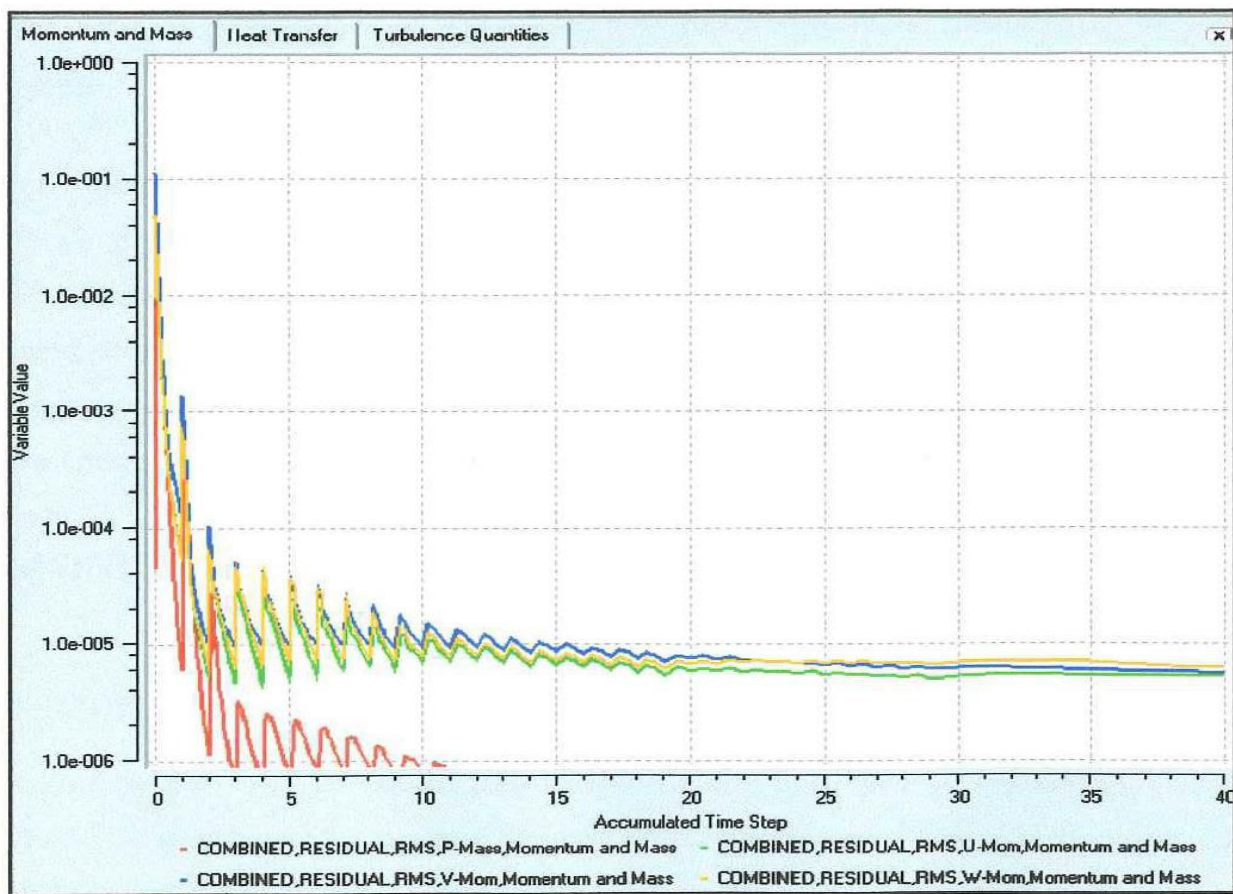
- Πίεση εισόδου και εξόδου του καυσίμου
- Θερμοκρασία εισόδου του καυσίμου
- Θερμοκρασία τοιχωμάτων
- Είδος ροής (μόνιμη ή μη μόνιμη)
- Χρόνος προσομοίωσης (για μη μόνιμη ροή)
- Επίπεδο σύγκλισης των υπολογισμών (σφάλμα)
- Χρονικά βήματα (time step) για τη μη μόνιμη ροή

Στην ανάλυση της κάθε περίπτωσης ξεχωριστά αναφέρεται η επεξεργασία των τιμών όλων των παραμέτρων.

## 11.6. ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (SOLVER)

Έχοντας καταχωρήσει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους στον υπολογιστή, είμαστε πλέον σε θέση να επιλύσουμε το πεδίο ροής. Έτσι ξεκινάει η επαναληπτική διαδικασία των υπολογισμών όπου αρχίζοντας από κάποιες αρχικές τιμές που προδιαγράφουν ένα πεδίο ροής το πρόγραμμα προχωρά στην επίλυσή ή όπως λέγεται στη σύγκλιση του προβλήματος, έχοντας σαν κριτήριο έναν πολύ μικρό αριθμό, το σφάλμα. (Στη δική μας περίπτωση έχει οριστεί στο  $10^{-5}$ ) Όταν οι τιμές των χαρακτηριστικών της ροής γίνουν πιο μικρές από το σφάλμα, τότε θεωρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει ή ότι το πεδίο ροής που υπολογίζει ο κώδικας είναι αυτό που θέλουμε να προσομοιώσουμε.

Το CFX κατά τη διάρκεια των υπολογισμών αναπαριστά γραφικά (σχήμα 11-25) το επίπεδο σφάλματος που υπάρχει για κάθε μέγεθος που υπολογίζει σε συνάρτηση με το χρόνο



Σχήμα 11-25 : Γραφική αναπαράσταση της σύγκλισης των υπολογισμών στην τιμή σφάλματος

## 12. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (POST-PROCESSING)

### 12.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται και αναλύονται όλες οι περιπτώσεις ροών που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της γραφικής αναπαράστασης όλων των αποτελεσμάτων των εξισώσεων που έχουν επιλυθεί για την κάθε περίπτωση. Στο δικό μας πρόβλημα, για την εξαγωγή των συμπερασμάτων, μας απασχόλησαν κυρίως οι μεταβολές της πίεσης, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ρευστού.

Αρχικά, για το πρόβλημά μας θεωρήσαμε μόνιμη ροή. Δηλαδή ροή της οποίας τα χαρακτηριστικά δε μεταβάλλονται με το χρόνο. Αργότερα, για την προσομοίωση της λειτουργίας του μηχανισμού του εγχυτήρα που μελετάται ήταν απαραίτητη η χρήση μη μόνιμης ροής, Δηλαδή ροής της οποίας η μέση τιμή των χαρακτηριστικών μεταβάλλεται με το χρόνο.

Με τη μόνιμη ροή μας δόθηκε η δυνατότητα να γνωρίζουμε ποια είναι η συμπεριφορά του ρευστού σε μία σταθερή κατάσταση. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο, ώστε αργότερα να μπορούμε να τη συγκρίνουμε με τις περιπτώσεις μη μόνιμης ροής και να δούμε αν φθάνουμε σε ροή η οποία αποκτά χαρακτηριστικά μόνιμης κατάστασης. Τέλος με την επιβολή μη μόνιμης ροής μπορέσαμε να ορίσουμε όλα τα ακριβή χρονικά διαστήματα των μεταβατικών καταστάσεων που εμφανίζονται.

### 12.2. ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ (STEADY STATE)

#### 12.2.1. Σύγκριση αρχικού και τελικού πλέγματος για την ίδια περίπτωση ροής

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την ίδια περίπτωση μόνιμης ροής με τη χρήση του αρχικού και του τελικού πλέγματος. Αυτή η σύγκριση έγινε για να καταδείξει τις διαφορές στις μεταβολές των μεγεθών στα σημεία εκείνα όπου έχουμε παρέμβει με βελτίωση του πλέγματος.

Σε αυτή την περίπτωση εφαρμόστηκε πίεση στην είσοδο του ρευστού 250 bar και στην έξοδο 30 bar. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις ροής του καυσίμου που θα εξεταστούν παρακάτω εφαρμόζεται η ίδια διαφορά πίεσης (250-30) bar από την είσοδο έως την

έξοδο. Επίσης θεωρήθηκε ότι το κανονικό οκτάνιο έχει θερμοκρασία εισόδου 300 K , ενώ την ίδια θερμοκρασία εφαρμόσαμε και για τα τοιχώματα τα οποία ορίστηκαν ως αδιαβατικά. Μετά την καταχώρηση όλων των οριακών αυτών συνθηκών, ακολουθεί ο ορισμός και άλλων σημαντικών παραμέτρων. Κάποιες από τις πιο σημαντικές ,είναι οι εξισώσεις με τις οποίες το πρόγραμμα υπολογίζει όλες τις απαραίτητες τιμές των μεταβλητών, το μοντέλο της τύρβης (έγινε επιλογή τυρβώδους ροής), και το επίπεδο του σφάλματος των υπολογισμών(όπως έχει αναφερθεί ορίστηκε στο  $10^{-5}$ ).

Μετά το πέρας των υπολογισμών και αφού επιτεύχθηκε η σύγκλιση των ταχυτήτων  $u, v, w$  , της θερμικής ενέργειας και της τύρβης στα επιθυμητά επίπεδα σφάλματος είμαστε σε θέση να αναπαραστήσουμε γραφικά τα αποτελέσματα στον μετεπεξεργαστή (post-processor) και να φανερώσουμε όλες τις διαφορές μεταξύ των δύο πλεγμάτων έτσι ώστε να γίνει κατανοητός ο λόγος για τον οποίο επεξεργαστήκαμε τις περιοχές με τις μεγαλύτερες μεταβολές στις τιμές που μας απασχολούν και ο λόγος τελικά που επιλέξαμε το βελτιωμένο πλέγμα ως βάση για τις μετέπειτα περιπτώσεις ροών.

Εάν εστιάσουμε αρχικά στην πρώτη περιοχή (σχήμα 12-1,12-2) όπου και επιτεύχθηκε ο διπλασιασμός των κελιών, λίγο πριν το πρώτο στένωμα που συναντά η ροή όπως εισέρχεται από την είσοδο και παρατηρήσουμε την μεταβολή της πίεσης σε ένα επίπεδο σε πλήρη τομή (plane) , θα δούμε ότι για τα δύο διαφορετικά πλέγματα και για την ίδια μεταβολή της πίεσης σε μία κλίμακα από 249.5 έως 250.5 bar λαμβάνουμε δύο διαφοροποιημένα σχήματα. Η πολύ πιο ομαλή μεταβολή των χρωμάτων στο πυκνό πλέγμα φανερώνει την πολύ πιο ομαλή επίσης μεταβολή της πίεσης σε αυτήν την περιοχή που είναι αποτέλεσμα των περισσότερων υπολογισμών, που έγιναν στην περίπτωση του βελτιωμένου πλέγματος , ανά μονάδα όγκου.

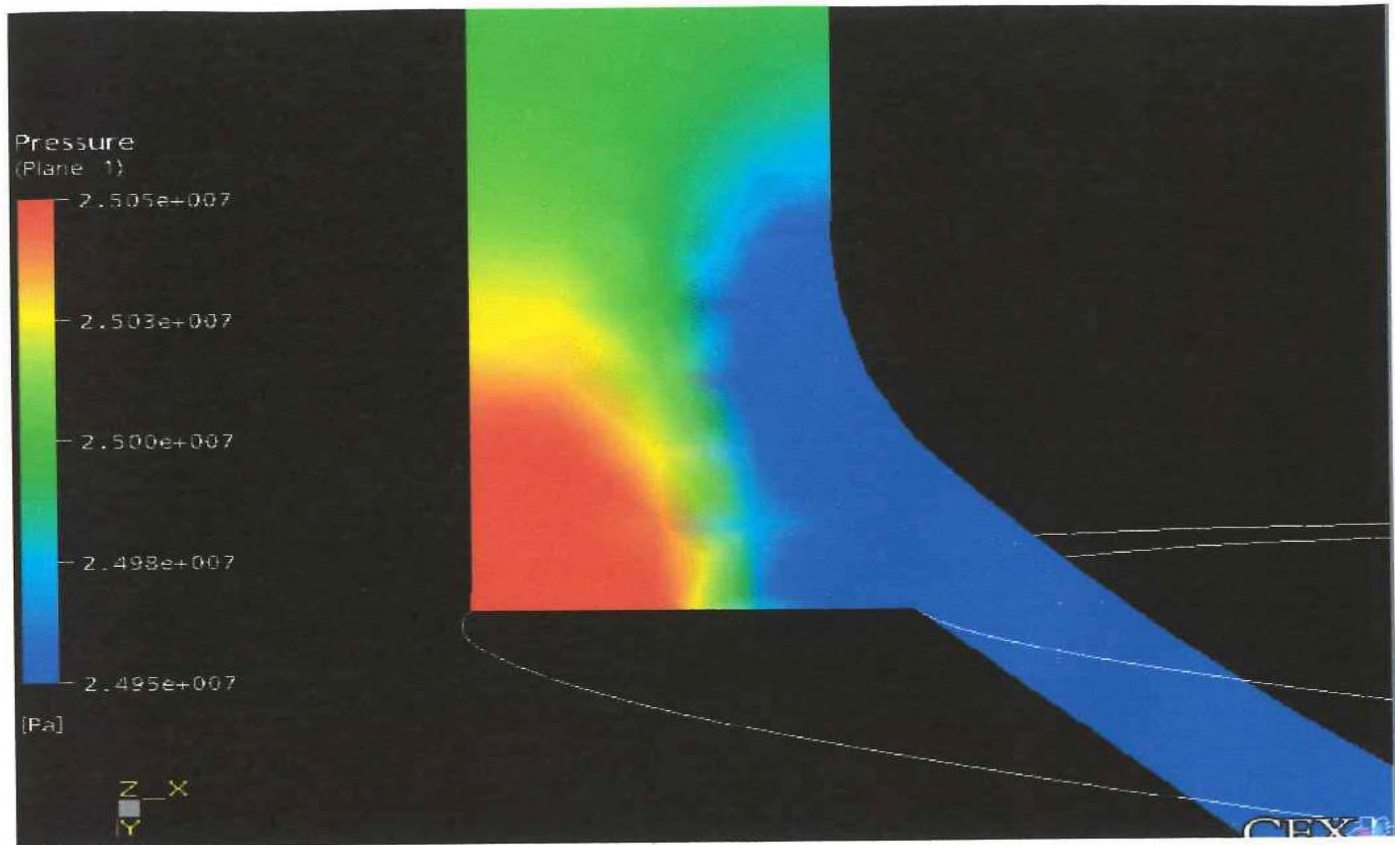
Στη συνέχεια εάν επικεντρωθούμε στην ίδια περιοχή ακριβώς στο ξεκίνημα του στενώματος (σχήμα 12-3, 12-4) θα παρατηρήσουμε δύο αντίστοιχα ενδιαφέροντα σχήματα πάλι σε "plane" όψη. Για αρκετά μεγαλύτερη τώρα μεταβολή της πίεσης από 235 έως και 250 bar προκύπτει μια σημαντική εμφανέστατη διαφορά στα δύο σχήματα. Έτσι λόγω της πολύ πιο αξιόπιστης περιγραφής της γεωμετρίας από το πιο πυκνό πλέγμα, αναπαρίσταται καλύτερα η πρώτη πιο σημαντική πτώση πίεσης στη ροή του ρευστού από 250 bar - η οποία είναι και η πίεση εισόδου - σε 235 bar, στην περιοχή εκείνη τοπικά , στην μία πλευρά της αμβλείας γωνίας που φαίνεται στο σχήμα. Λόγω της ακμής αυτής λοιπόν, έχουμε αποκόλληση του οριακού στρώματος της ροής στην περιοχή εκείνη και έτσι παρατηρούμε τη μεταβολή αυτή που σύμφωνα και με τη μηχανική των ρευστών εξηγείται πολύ καλύτερα γραφικά στην περίπτωση του πυκνότερου πλέγματος.

Η τελευταία περιοχή στην οποία και θα εστιάσουμε την προσοχή μας είναι αυτή της

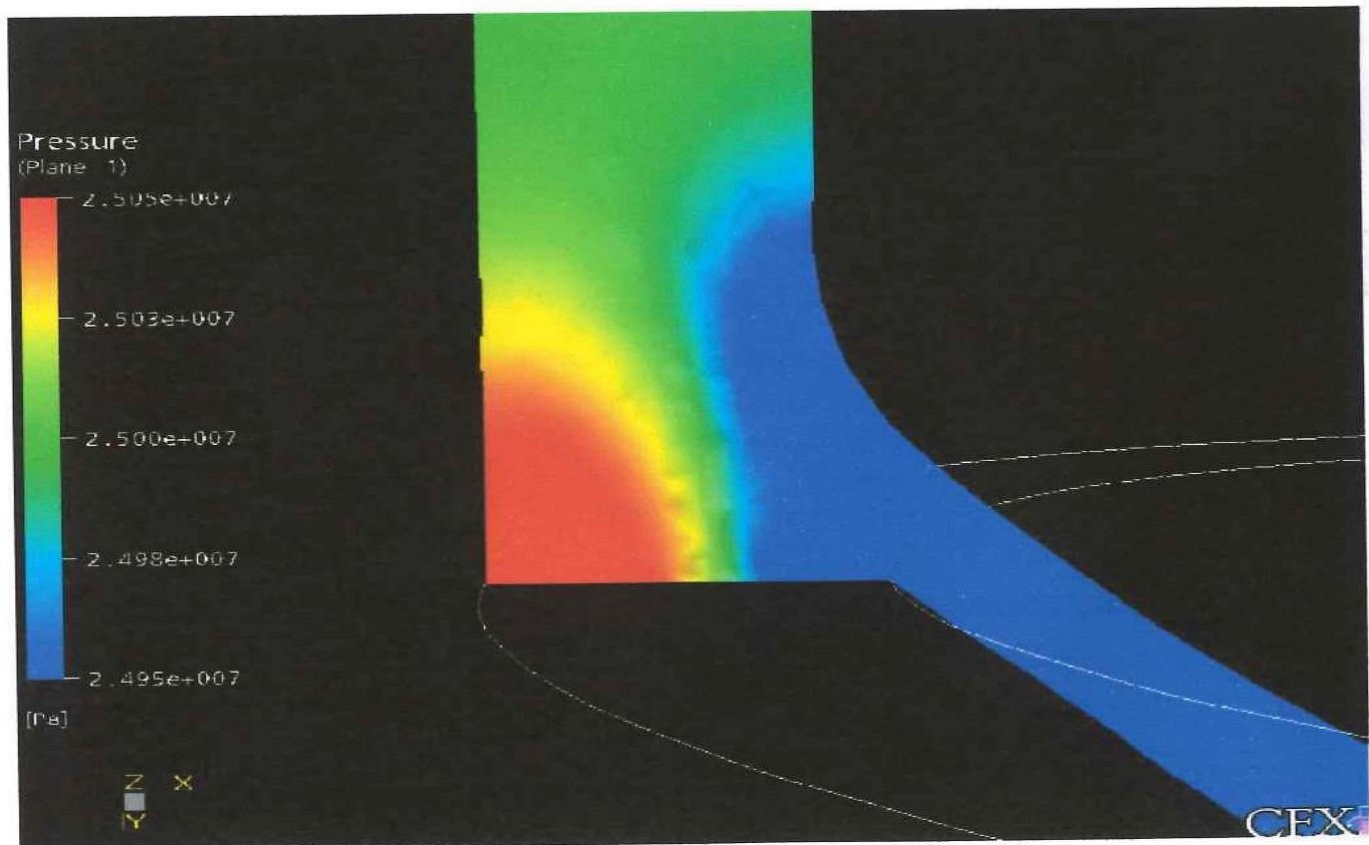
εισόδου του ρευστού στους κυλίνδρους εξόδου (σχήμα 12-5,12-6) . Σε αυτό το σημείο, όπως έχει αναλυθεί , έχει γίνει επιφανειακή κυρίως επεξεργασία και έτσι οι διαφορές στις μεταβολές των μεγεθών δεν είναι τόσο εμφανείς εσωτερικά στο πλέγμα , όσο στην περιοχή που αναλύθηκε πριν γύρω από το στένωμα. Παρόλα αυτά όμως και σε αυτή την περίπτωση , υπάρχουν διαφορές που επισημαίνονται για μία ακόμη φορά, με τη μεταβολή της θερμοκρασίας τώρα, από 298.3 έως 303.3 K πάνω σε μια πλήρη τομή όπως δείξαμε και στα προηγούμενα σχήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο σημείο εισόδου της ροής στους κυλίνδρους παρουσιάζεται μια μικρή πτώση της θερμοκρασίας εισόδου τοπικά , της τάξεως των 3<sup>0</sup>C. Μπορεί εύκολα να παρατηρήσει κανείς εδώ ότι στο πυκνότερο πλέγμα , κοντά στις επιφάνειες όμως κυρίως , έχουμε μια καλύτερη αναπαράσταση της ροής μας.

Αξίζει να τονιστεί ότι παρατηρήθηκαν διαφορές στις ελάχιστες και μέγιστες τιμές των μεγεθών που εξετάζουμε. Η θερμοκρασία για το αρχικό πλέγμα κυμαίνεται από 297,4 έως 315,5 K ενώ για το πυκνότερο από 297 έως 316,6 K. Η πίεση για το αραιό πλέγμα παίρνει τιμές από -89,29 έως 250,77 bar ενώ για το βελτιωμένο από -113,5 έως 250,7 bar. Τέλος η ταχύτητα παρουσιάζει μεγάλη διαφορά με τις τιμές να κυμαίνονται από 0,645 έως 252,2 m/s για το πρώτο πλέγμα ενώ για το πυκνότερο από 0,268 έως 246,5 m/s.

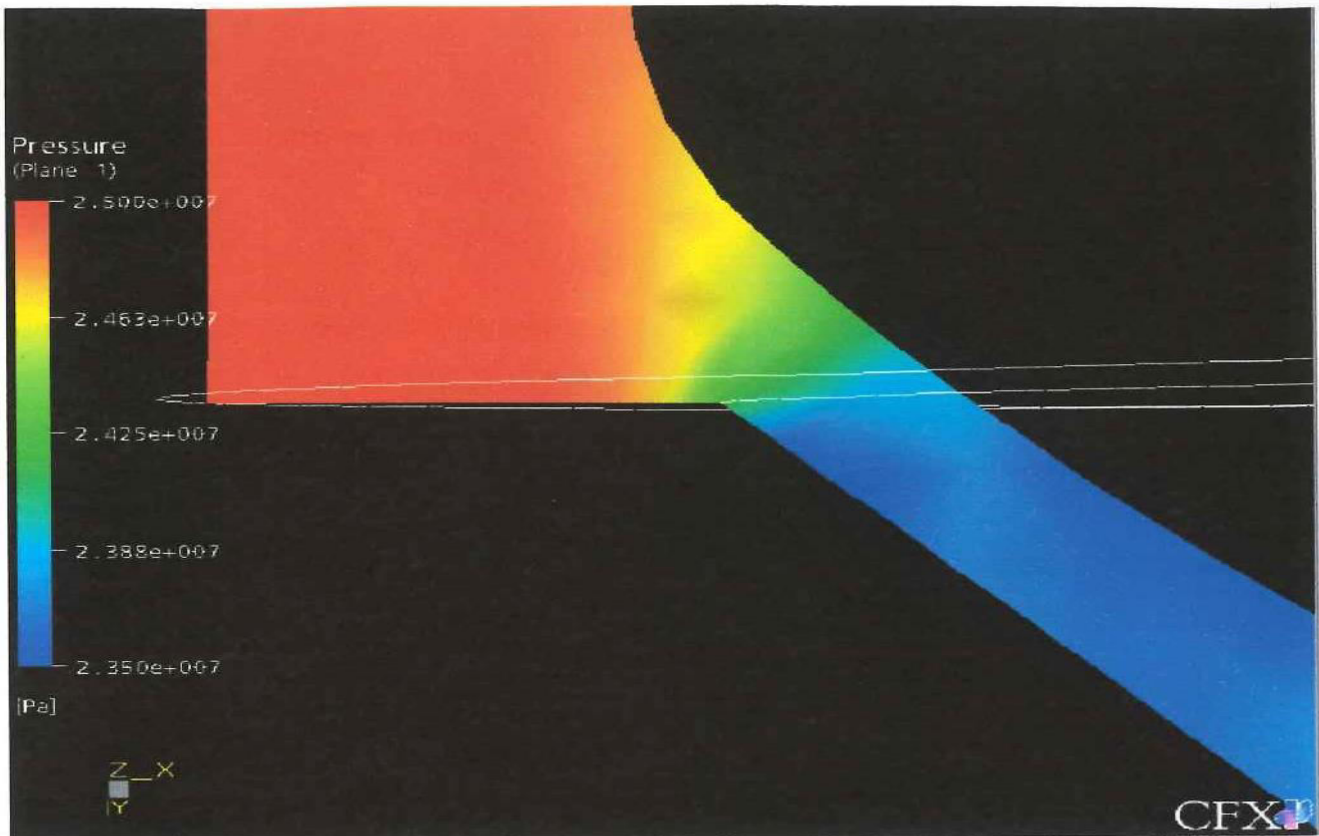
Τέλος, αναφέρεται ότι οι μεταβολές στις τιμές των μεγεθών που λαμβάνουμε με το πυκνότερο πλέγμα βρίσκονται πιο κοντά στην πραγματικότητα. Και αυτό, γιατί γνωρίζουμε ότι έχουμε πιο ακριβείς υπολογισμούς στα σημεία των απότομων μεταβολών λόγω της πύκνωσης του πλέγματος και όχι γιατί έχουμε την αίσθηση των πραγματικών τιμών(π.χ. από κάποιο πείραμα ή πρακτική εφαρμογή).



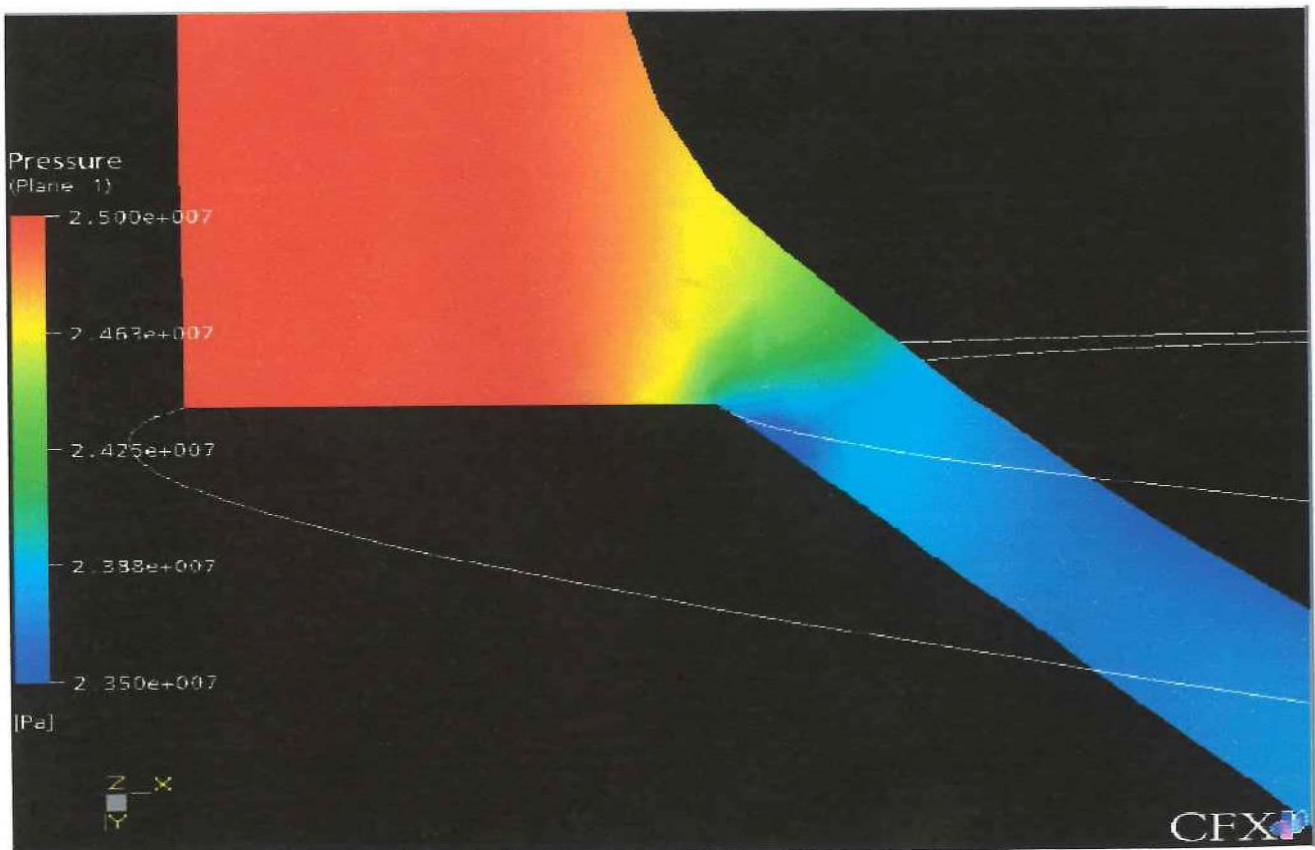
*Σχήμα 12-1 : Κατανομή της πίεσης πριν το στένωμα (αρχικό πλέγμα)*



*Σχήμα 12-2 : Κατανομή της πίεσης πριν το στένωμα (βελτιωμένο πλέγμα)*

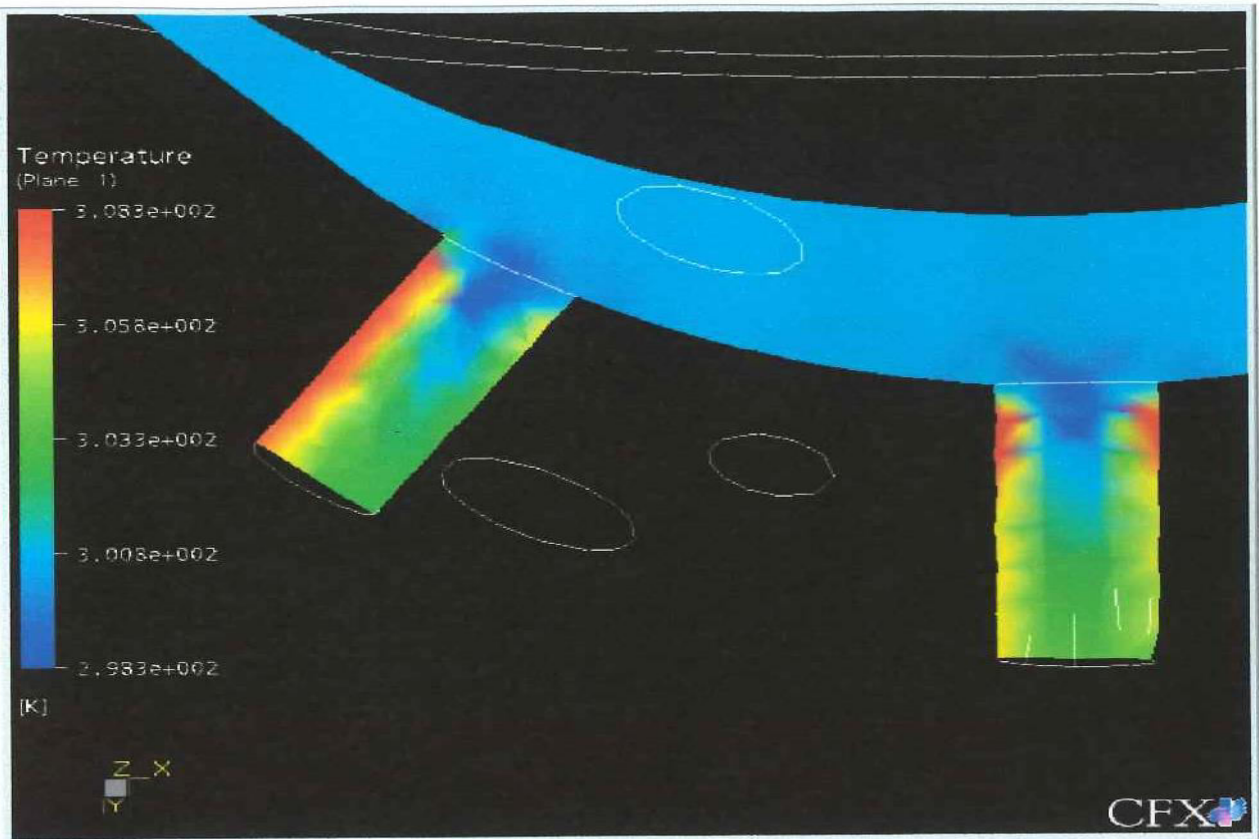


*Σχήμα 12-3: Κατανομή της πίεσης στο στένωμα (αρχικό πλέγμα)*

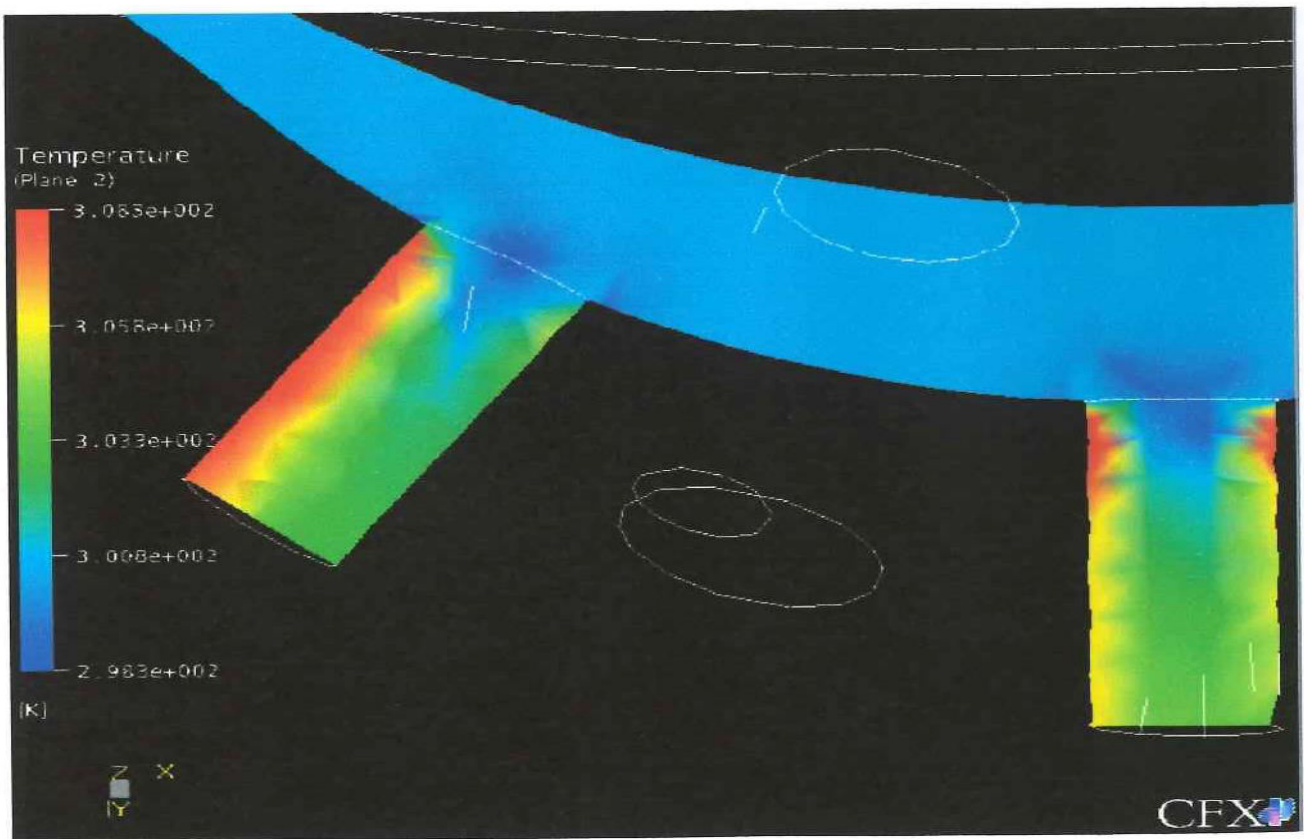


*Σχήμα 12-4 : Κατανομή της πίεσης στο στένωμα (βελτιωμένο πλέγμα)*





**Σχήμα 12-5 :** Κατανομή θερμοκρασίας σε πλαινό και κεντρικό κύλινδρο αρχικό πλέγμα)



**Σχήμα 12-6 :** Κατανομή θερμοκρασίας σε πλαινό και κεντρικό κύλινδρο (βελτιωμένο πλέγμα)

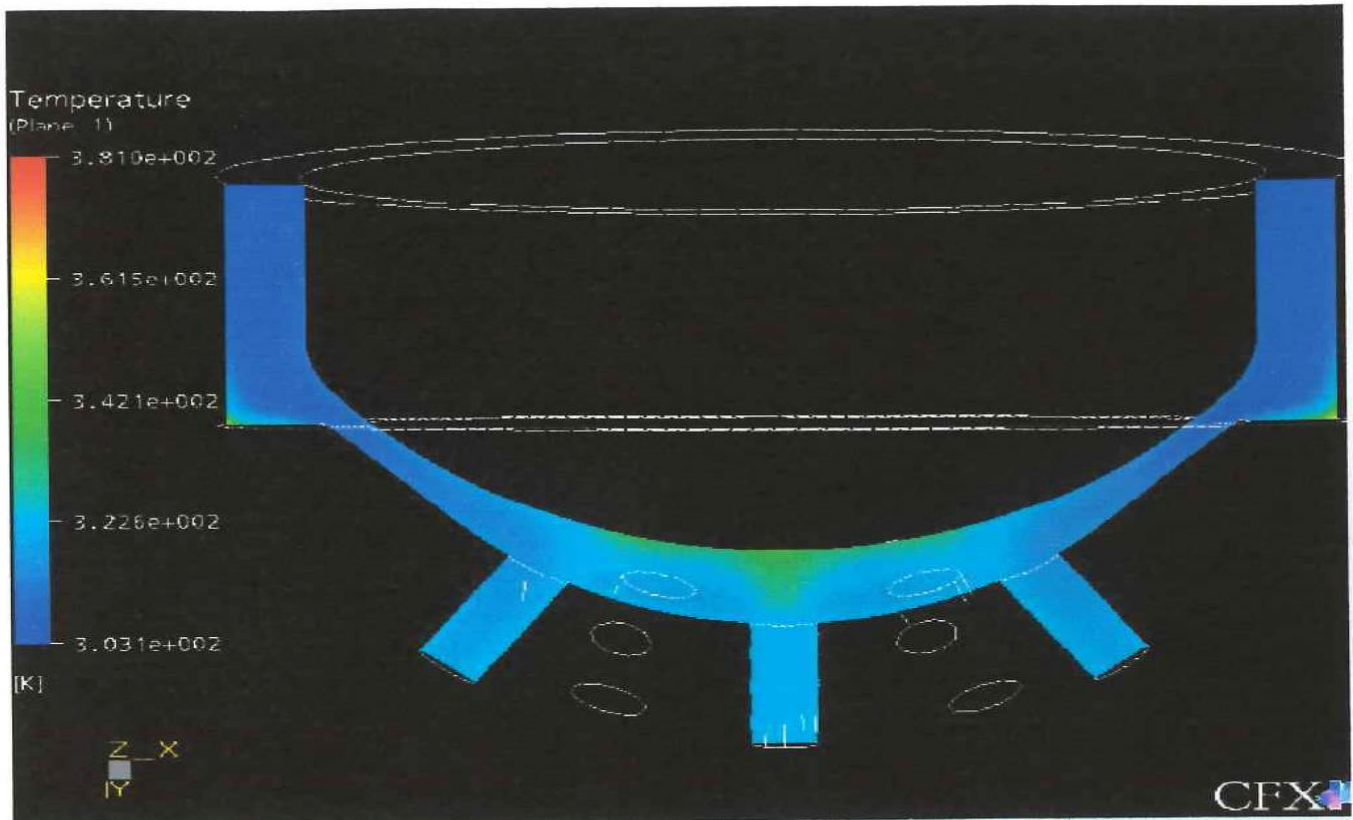
### 12.2.2. Ροή με επιβολή σταθερής θερμοκρασίας τοιχωμάτων

#### Εισαγωγικά

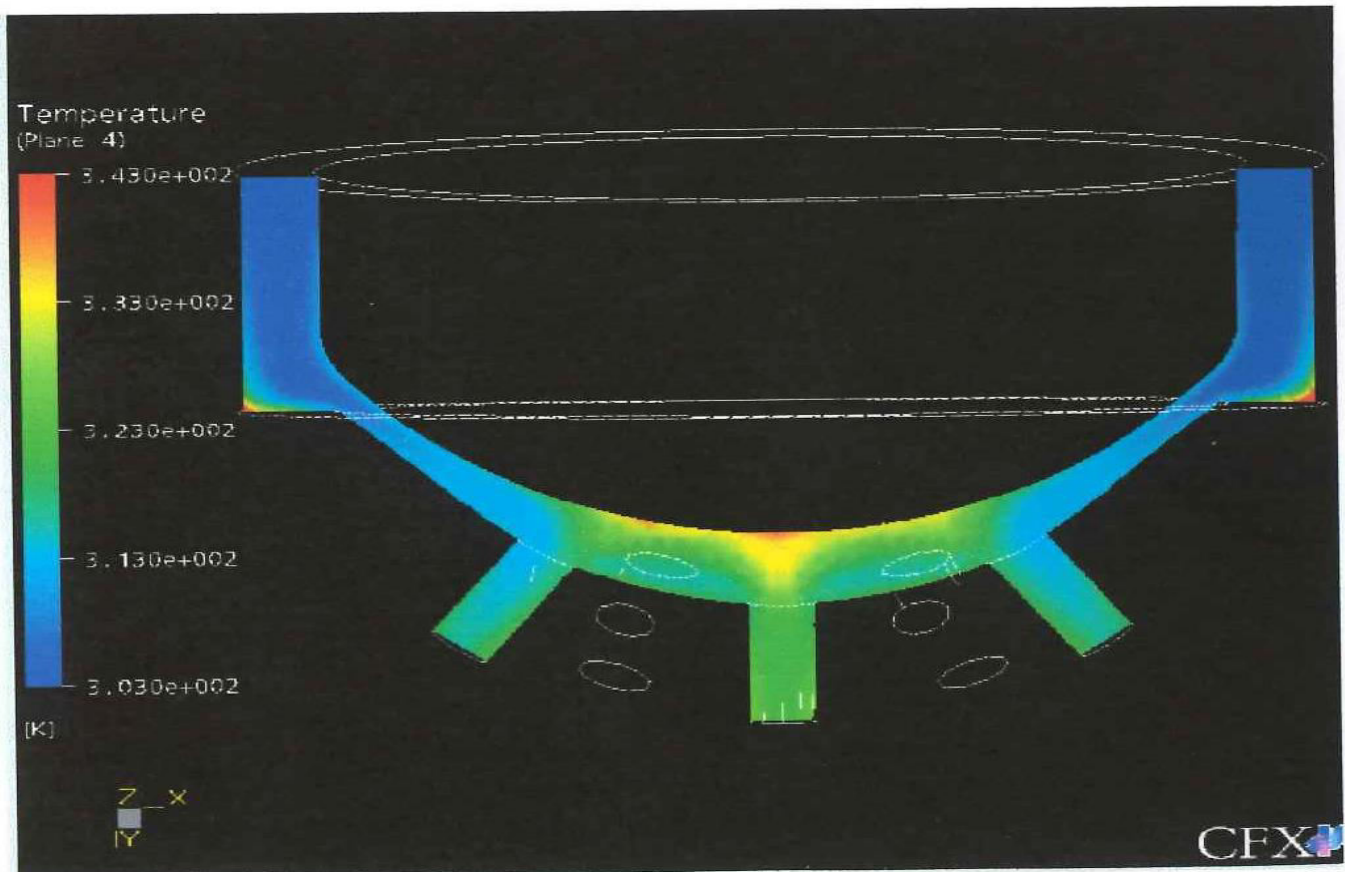
Μετά την παραπάνω σύγκριση έχει γίνει κατανοητή η τελική επιλογή του βελτιωμένου πλέγματος για όλες τις παρακάτω περιπτώσεις που θα εξεταστούν.

Σε όλες τις περιπτώσεις οι οποίες προσομοιώνουν τη φάση του ψεκασμού επιβάλλεται η ίδια διαφορά πίεσης (250-30 bar), ;όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Από αυτή την περίπτωση και για όλες τις επόμενες θεωρούμε αδιαβατικά τοιχώματα με σταθερή θερμοκρασία 873K και θερμοκρασία εισόδου του ρευστού 303K. Με αυτή την επιβολή της θερμοκρασίας σκοπός είναι να δείξουμε πως επηρεάζεται η θερμοκρασία του καυσίμου κατά τη ροή του μέσα από το πλέγμα.

Το πρώτο και σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει συγκριτικά με την περίπτωση που είχαμε θερμοκρασία 300 K στα τοιχώματα, είναι ότι η θερμοκρασία του ρευστού αυξάνεται σημαντικά. Συγκεκριμένα, παίρνει μια μέγιστη τιμή σε κάποια ελάχιστα σημεία μέσα στο σώμα της τάξεως των 381 K δηλαδή αύξηση περίπου 78 K.(σχήμα 12-7) Παρατηρούμε δηλαδή ότι εξαιτίας της μετάδοσης της θερμότητας από τα τοιχώματα στο ρευστό, σε σχέση με την πρώτη περίπτωση, έχουμε μία διαφορά στην αύξηση της θερμοκρασίας (στις πραγματικές μέγιστες τιμές) της τάξης των 64 βαθμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων η μέγιστη θερμοκρασία που φαίνεται να παίρνει το ρευστό τοπικά είναι 345 K (σχήμα 12-8) και όχι τη μέγιστη τιμή την οποία λαμβάνει σε κάποια σημεία, πιθανότατα σε κάποια ακμή.



*Σχήμα 12-7 : Κατανομή της θερμοκρασίας σε πλήρη τομή*

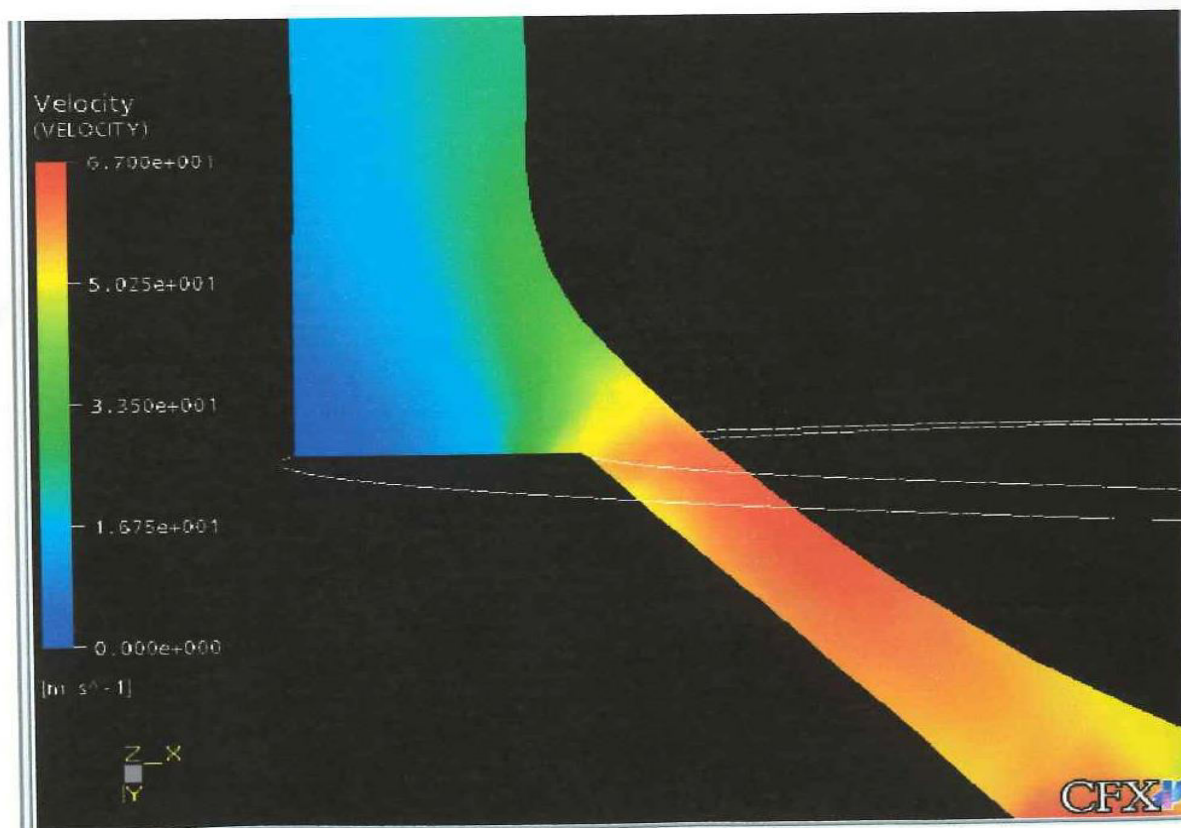


*Σχήμα 12-8 : Κατανομή της θερμοκρασίας σε μικρότερη κλίμακα*

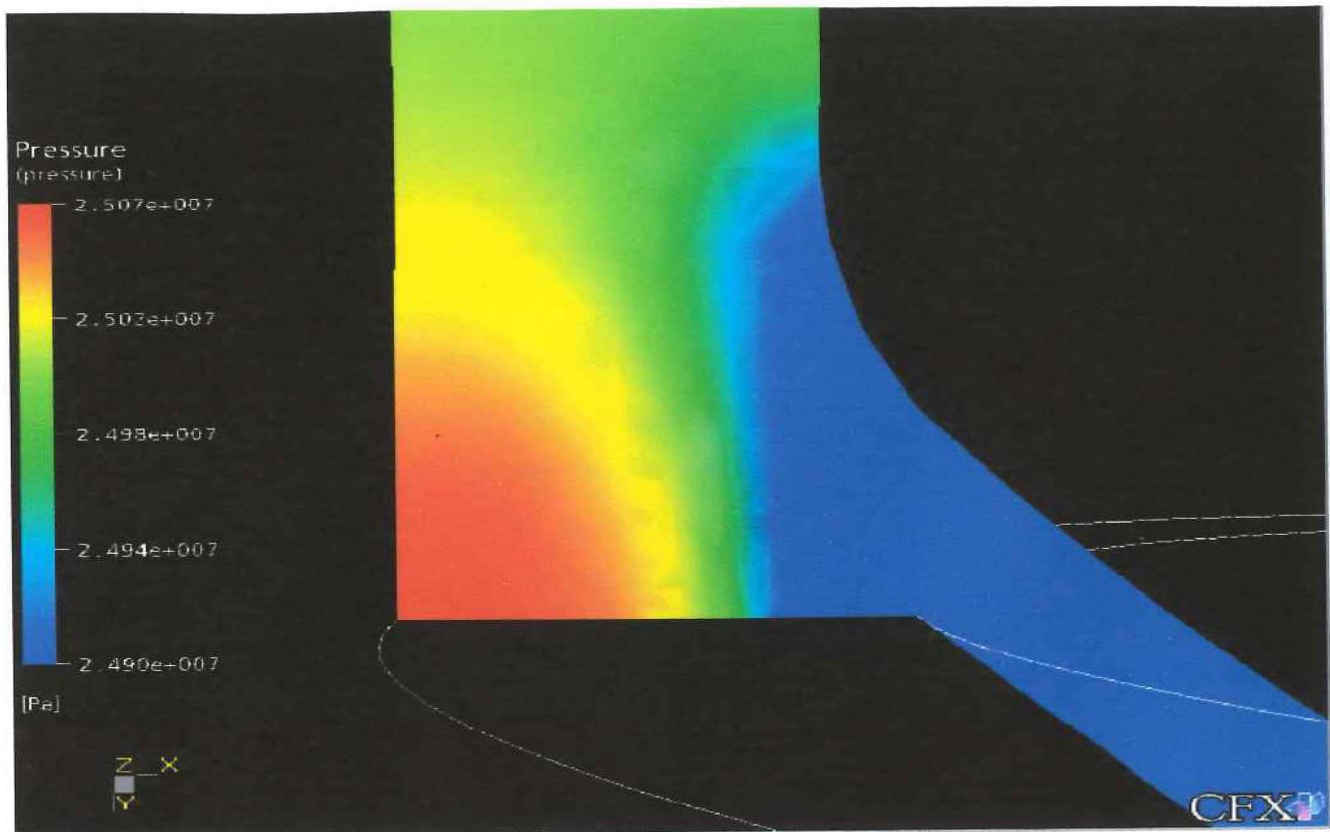
### Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Η πρώτη αξιόλογη σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας μετά την είσοδο του ρευστού, παρατηρείται στην περιοχή γύρω από την ακμή που υπάρχει ακριβώς πριν το στένωμα. Η μέγιστη θερμοκρασία στην περιοχή αυτή βρίσκεται ακριβώς στο σημείο της ακμής και όσο απομακρυνόμαστε απ' αυτήν και τα γύρω τοιχώματα το ρευστό διατηρεί την αρχική του θερμοκρασία.

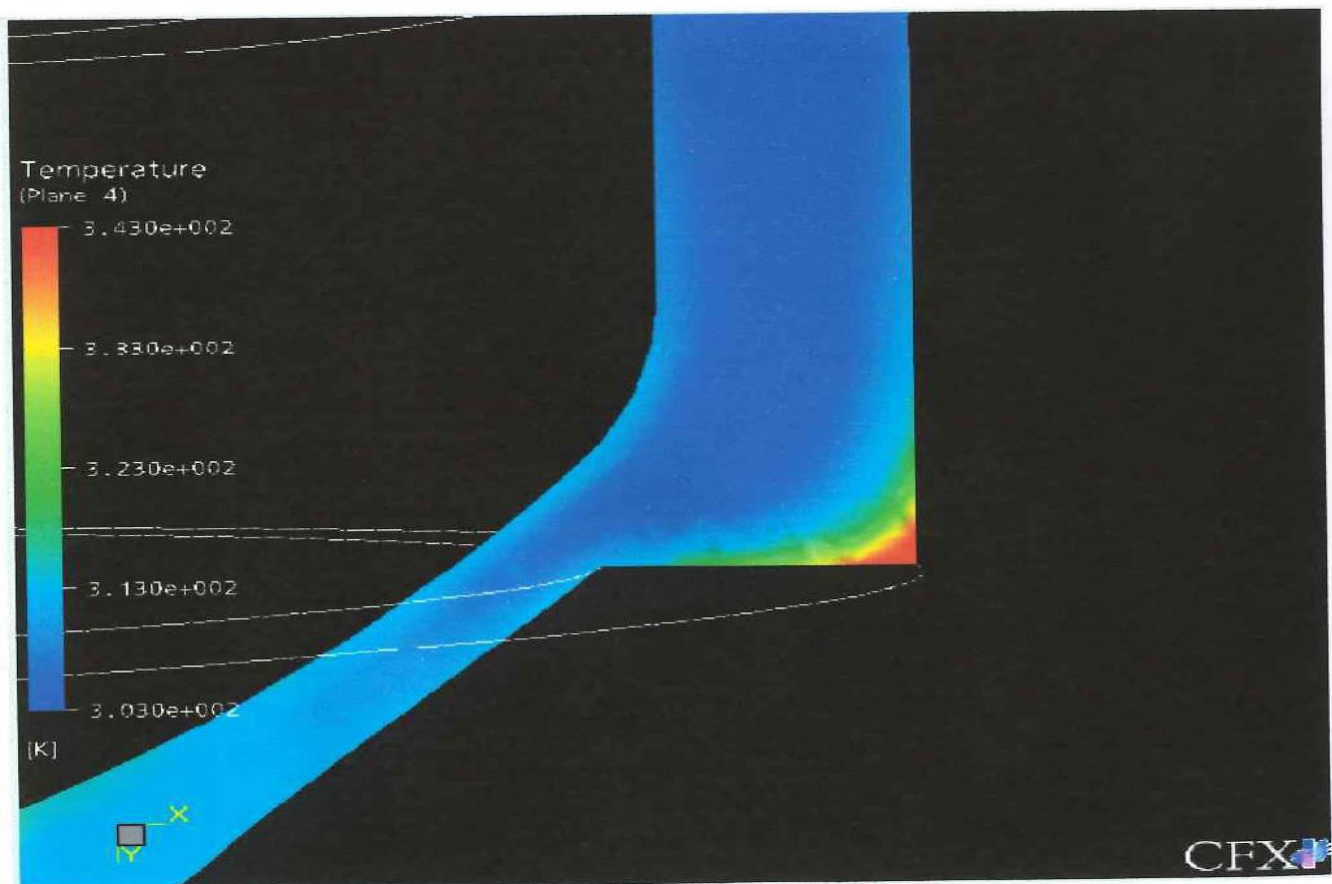
Αυτό που μπορεί εύκολα να παρατηρήσει κανείς είναι ότι στην περιοχή αυτή η ταχύτητα του ρευστού παίρνει πολύ χαμηλές τιμές (0,268 m/s) (σχήμα 12-9). Έτσι αντίστοιχα η πίεση παίρνει τη μέγιστη τιμή της (250,7 bar) ελάχιστα πάνω από την πίεση εισόδου του ρευστού (σχήμα 12-10). Αυτό συμβαίνει διότι το μεγαλύτερο μέρος των ροϊκών γραμμών περνά έξω από αυτήν την περιοχή και ακολουθεί εφαπτομενικά την καμπύλη του εσωτερικού τοιχώματος. Έτσι με την απουσία των ροϊκών γραμμών είναι πολύ πιθανή κάποια ανακυκλοφορία της ελάχιστης ποσότητας του ρευστού που βρίσκεται εκεί. Εξαιτίας λοιπόν αυτής της ανακυκλοφορίας και του εγκλωβισμού αυτής της ελάχιστης ποσότητας ρευστού πολύ κοντά στα τοιχώματα παρουσιάζεται αυτή η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας (σχήμα 12-11).



Σχήμα 12-9 : Κατανομή ταχύτητας εστιάζοντας στις πολύ χαμηλές ταχύτητες της ακμής



*Σχήμα 12-10: Εμφάνιση αυξημένης πίεσης στην περιοχή της ακμής*

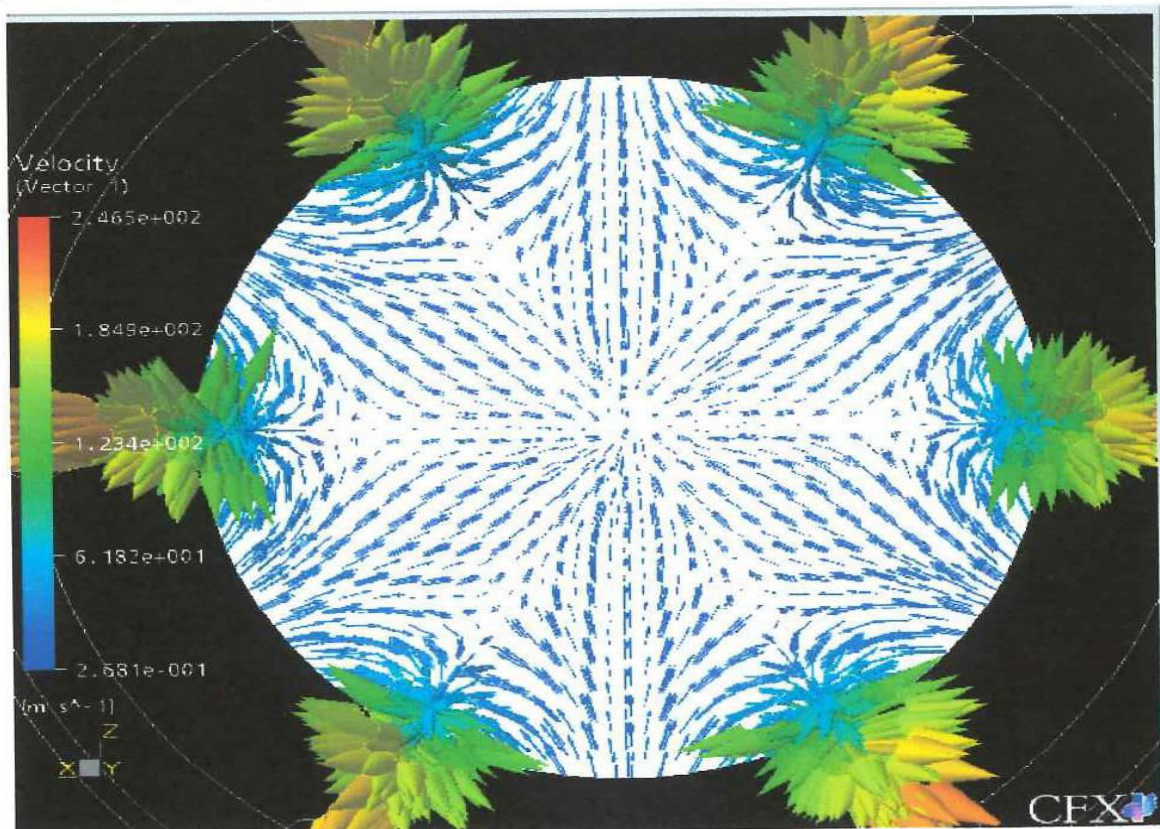


*Σχήμα 12-11: Μεγέθυνση της περιοχής της ακμής με τη μεταβολή της θερμοκρασίας*

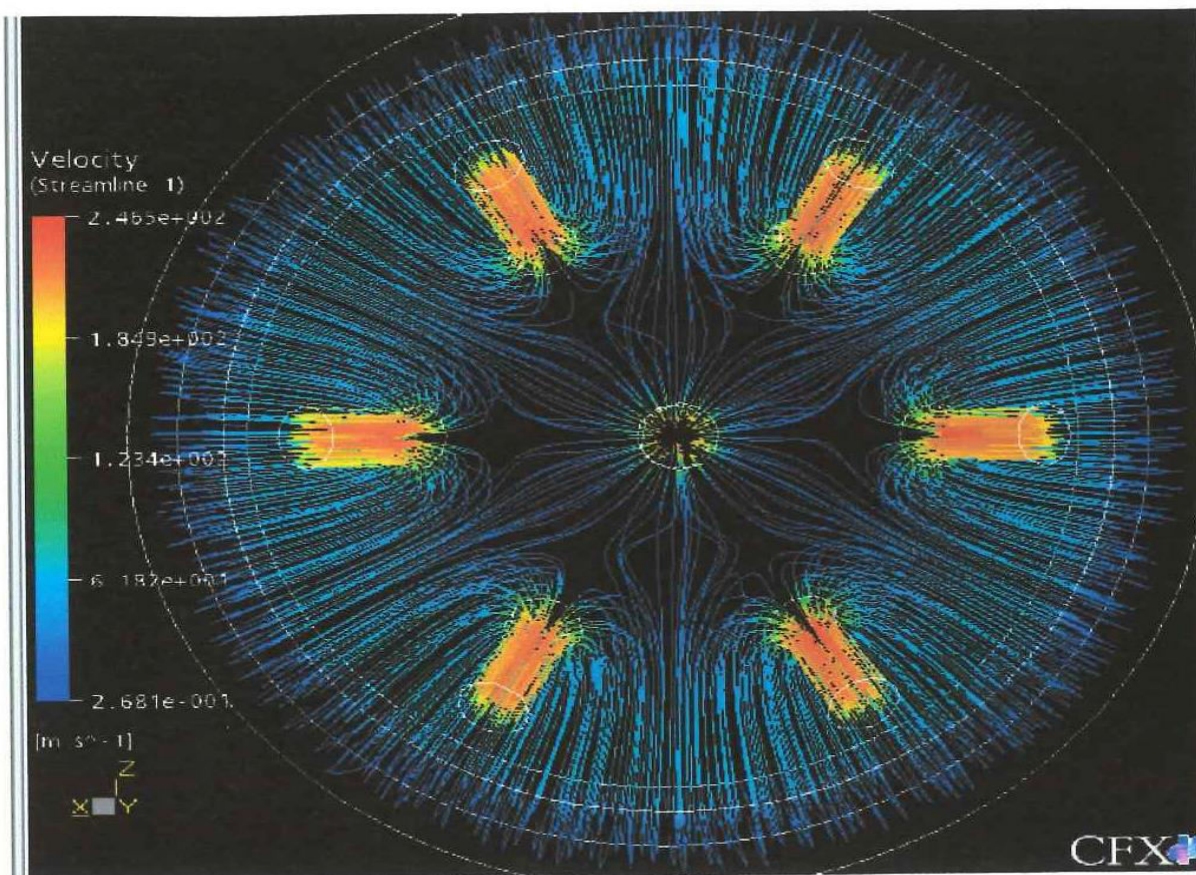
Η επόμενη περιοχή ενδιαφέροντος βρίσκεται στο στένωμα όπου εκεί παρατηρείται η πρώτη σημαντική αύξηση της ταχύτητας (σχήμα 12-9) άρα και η πρώτη μείωση της πίεσης. Αυτές οι μεταβολές είναι αναμενόμενες και εξηγούνται από τη μείωση της διατομής. Πέρα από τη συνολική πτώση πίεσης από το στένωμα και μετά, παρατηρείται όπως έχει ήδη αναφερθεί στη σύγκριση των δύο πλεγμάτων μια περαιτέρω πτώση τοπικά λόγω της αποκόλλησης του οριακού στρώματος (σχήμα 12-4).

Ως συνέπεια της αύξησης της ταχύτητας αλλά και της μείωσης της διατομής, τα δύο σχεδόν παράλληλα τοιχώματα με 873 K επηρεάζουν περισσότερο πλέον τη θερμοκρασία του ρευστού καθώς αυξάνεται και ο συντελεστής συναγωγής. Η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται κοντά στα τοιχώματα (σχήμα 12-11).

Σ' αυτό το σημείο θα εξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίο φθάνουν οι ροϊκές γραμμές στο κεντρικό άνοιγμα έτσι ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η ροή του ρευστού στο σύνολό του για να μπορέσουμε να αναλύσουμε τις περιοχές ενδιαφέροντος που προκύπτουν με βάση την όλη αυτή ροή. Οι ροϊκές γραμμές που φθάνουν τελικά σε αυτό το άνοιγμα προέρχονται από όλες τις κατευθύνσεις (12-12) - έτσι εξηγείται και η συμμετρία που παρουσιάζεται κατά την είσοδο του ρευστού - και συγκεκριμένα αντιπροσωπεύουν τη ροή εκείνη που δεν απορροφάται από τους πλαϊνούς κυλίνδρους και φθάνει καθυστερημένα στο κεντρικό άνοιγμα (σχήμα 2-13).

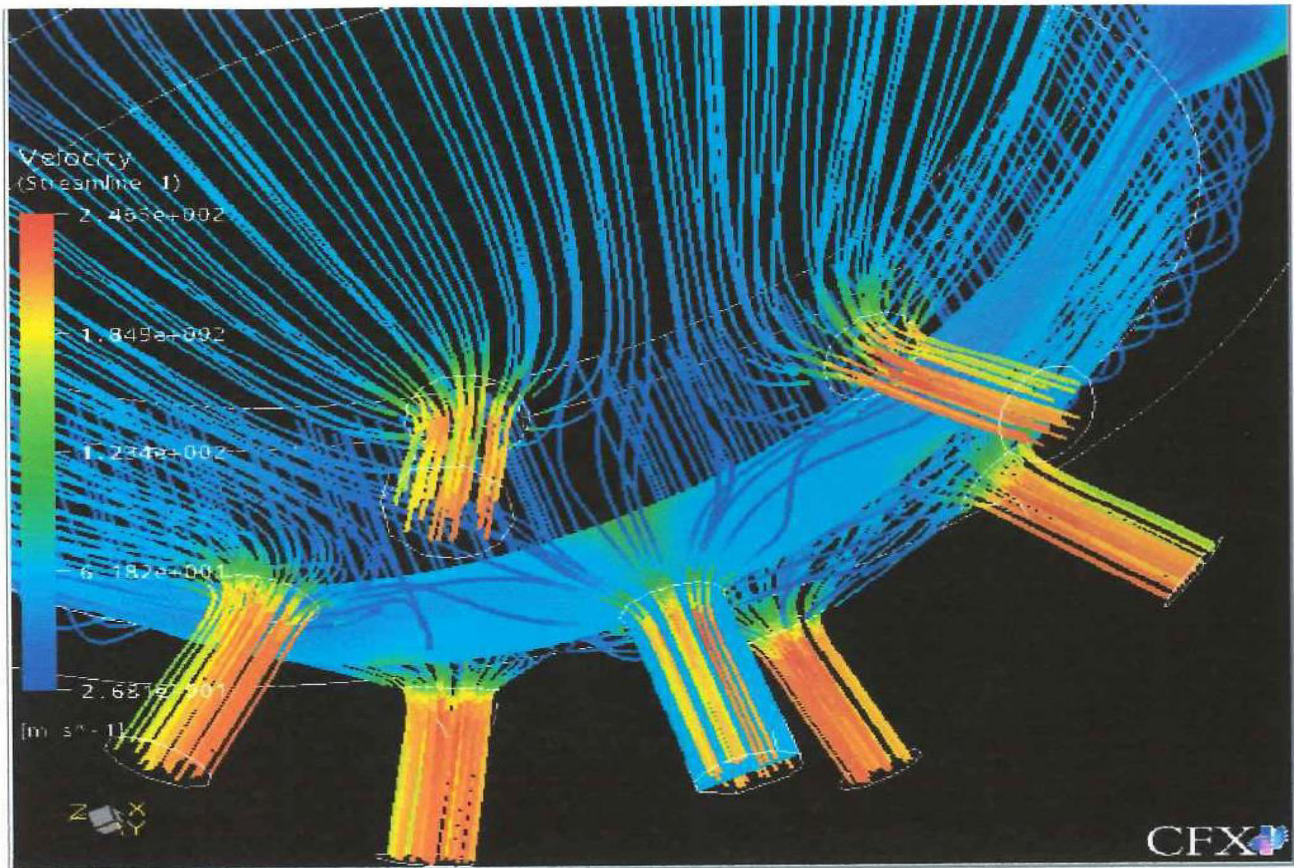


**Σχήμα 12-12 :**Κάτοψη επιφάνειας με διανύσματα ταχύτητας, όπου φαίνεται η είσοδος του καυσίμου στα ανοίγματα

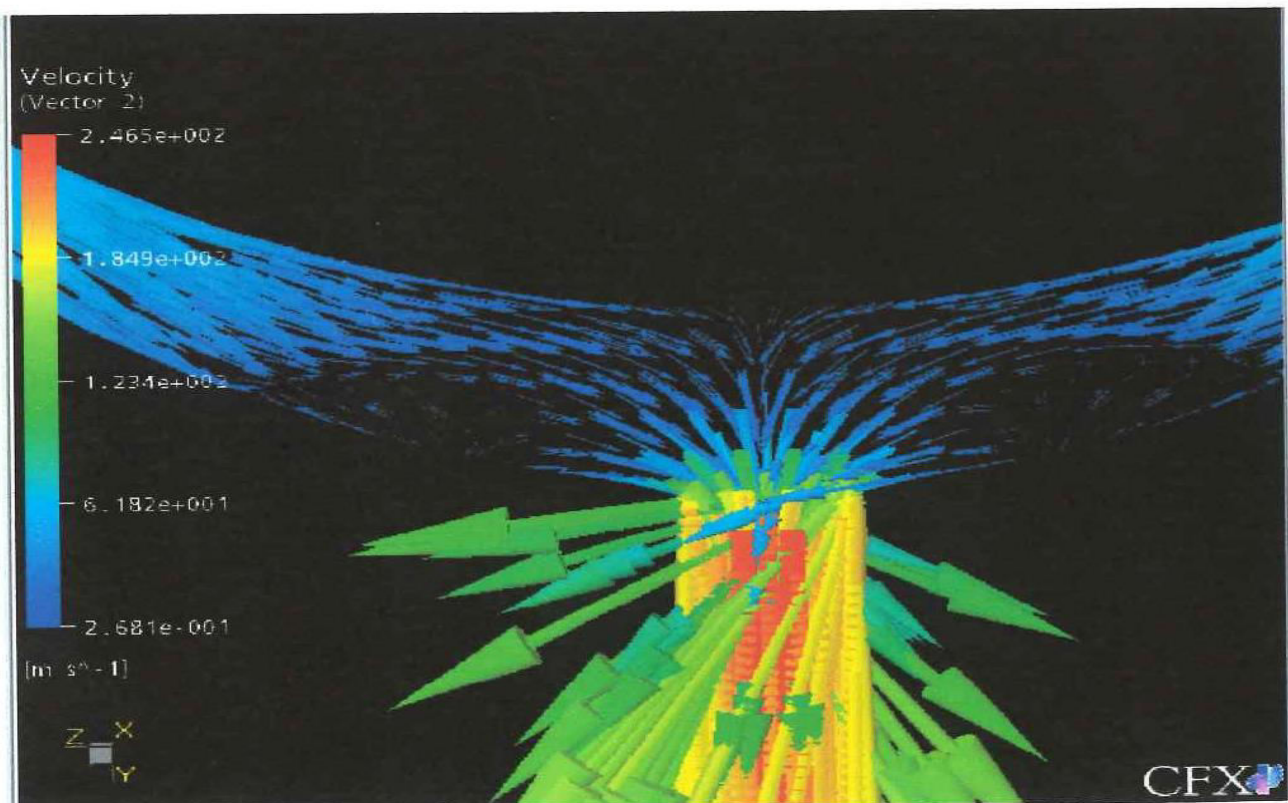


**Σχήμα 12-13:** Κάτοψη που απεικονίζει τις ροϊκές γραμμές κατά την είσοδό τους στους κυλίνδρους εξόδου

Αν παρατηρήσουμε τις ροϊκές γραμμές πάνω σε μία πλήρη τομή όπου εμφανίζεται μόνο το κεντρικό άνοιγμα, θα δούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος τους ακολουθεί μία τέτοια πορεία, από την οποία συμπεραίνουμε την τάση τους να ακολουθήσουν τις υπόλοιπες ροϊκές γραμμές που εισέρχονται στα πλαϊνά ανοίγματα, όμως τελικά καταλήγουν στο κεντρικό, διαγράφοντας μία ενδιαφέρουσα καμπύλη τροχιά (σχήμα 12-14, 12-18). Από τη στιγμή που οι ροϊκές γραμμές περνάνε πολύ κοντά από τους πλαϊνούς κυλίνδρους, η ροή του ρευστού ακολουθεί μία καμπύλη τροχιά σχεδόν εφαπτομενικά με την εσωτερική κοιλότητα και στη συνέχεια εισέρχεται στον κεντρικό κύλινδρο. Ακριβώς κάτω από την καμπύλη, προκύπτει μία περιοχή στην οποία παρατηρούμε πολύ χαμηλές ταχύτητες και έντονη ανακυκλοφορία της ροής (σχήμα 12-15) με συνέπεια την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας (σχήμα 12-16, 12-18).

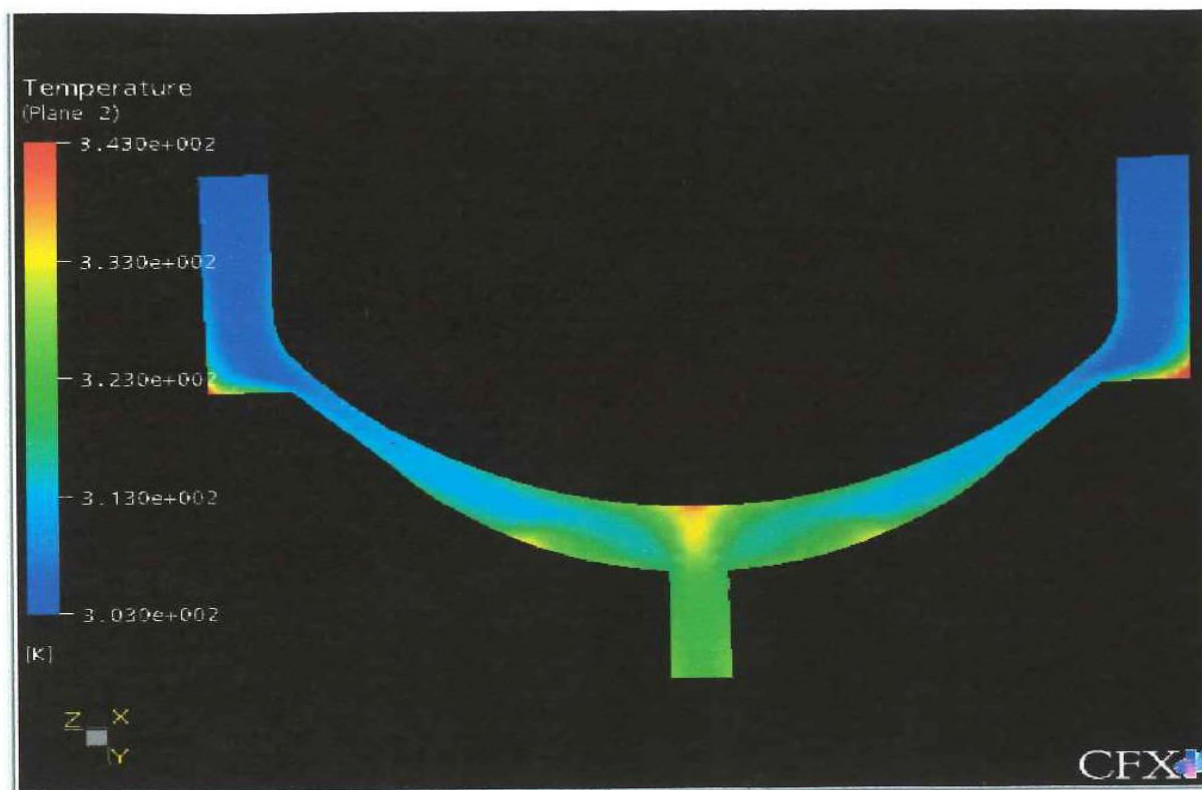


**Σχήμα 12-14:** Διακρίνεται η καμπύλη τροχιά των ροϊκών γραμμών με τη βοήθεια τομής



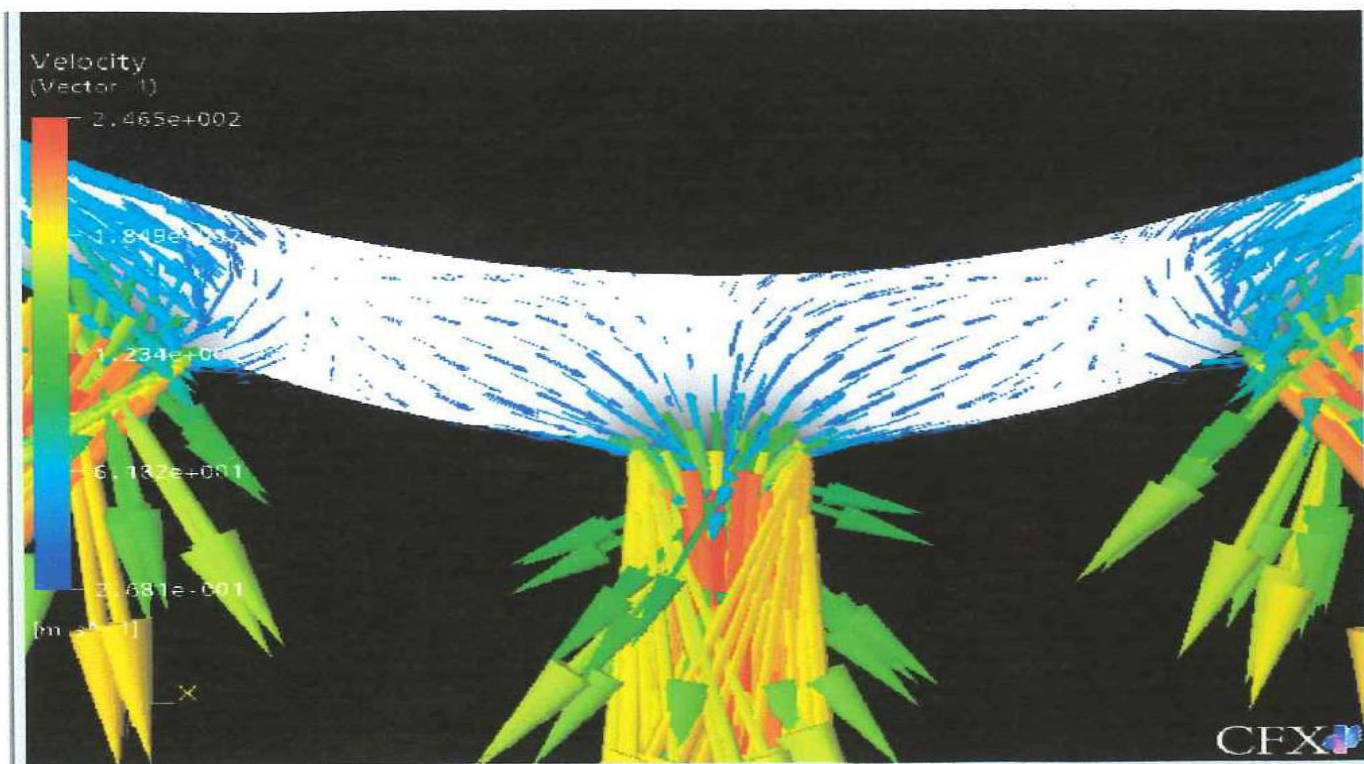
**Σχήμα 12-15:** Παρατηρείται η καμπύλη τροχιά της ροής και η ανακυκλοφορία που σχηματίζεται κάτω από αυτήν



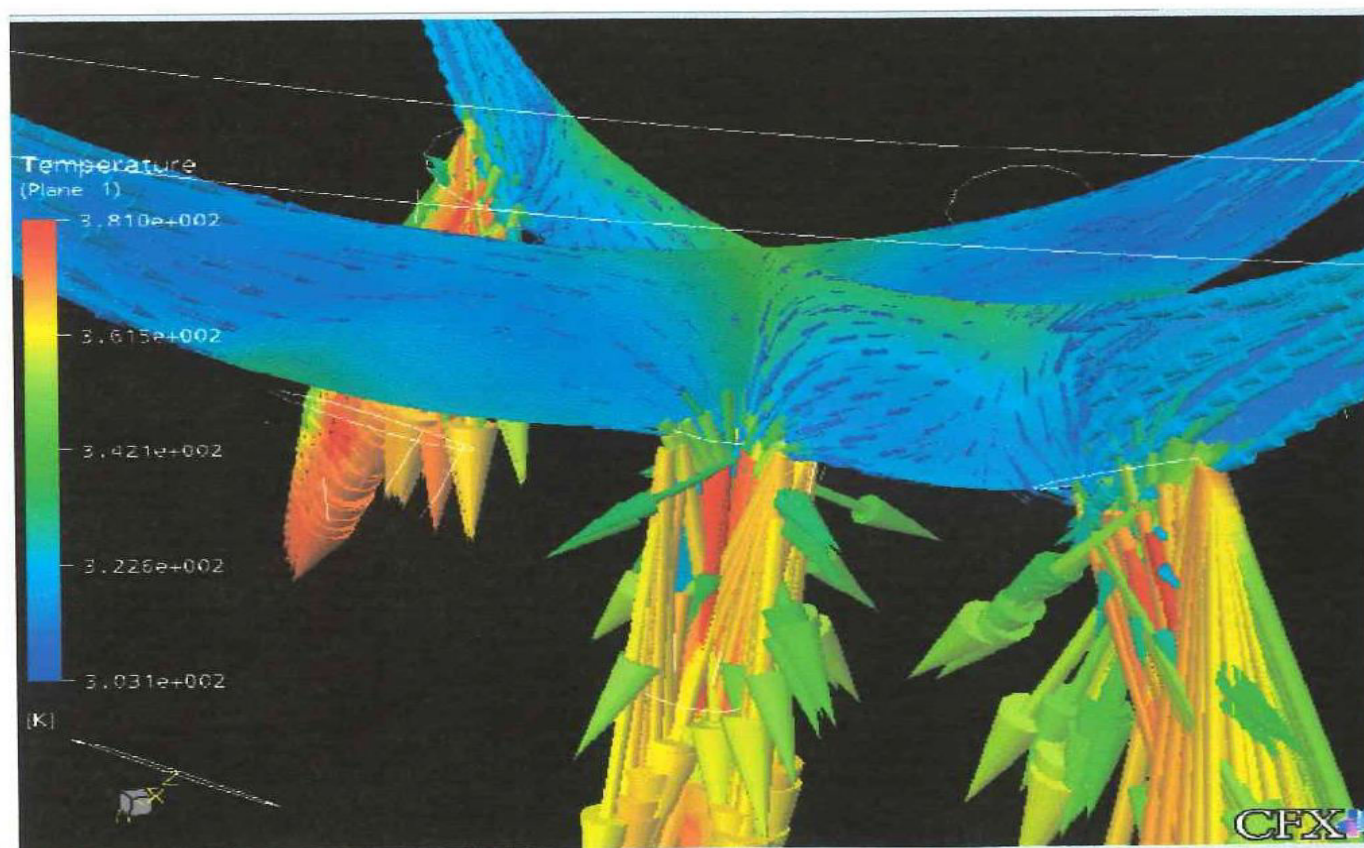


**Σχήμα 12-16:** Περιοχή αυξημένης θερμοκρασίας απέναντι από τον κεντρικό κύλινδρο και οι περιοχές με ανακυκλοφορία δίπλα απ' αυτόν.

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να συνυπολογίσουμε μία ελάχιστη ποσότητα καυσίμου που διαφεύγει λίγο πριν την είσοδό του στα πλαϊνά ανοίγματα η οποία καταλήγει κι αυτή στον κεντρικό κύλινδρο. Αυτό μπορεί να φανεί αν παρατηρήσουμε την πλήρη τομή όπου διακρίνονται και τα πλαϊνά ανοίγματα. (σχήμα 12-17, 12-18) Στην περιοχή της εσωτερικής κοιλότητας παρατηρούμε μία αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά, στο σημείο εκείνο κάτω από το οποίο έχει διαφύγει αυτή η ελάχιστη ποσότητα ρευστού. Η εξήγηση αυτής της αύξησης στηρίζεται στη δημιουργία κάποιας ανακυκλοφορίας της ελάχιστης ροής (σχήμα 12-18).

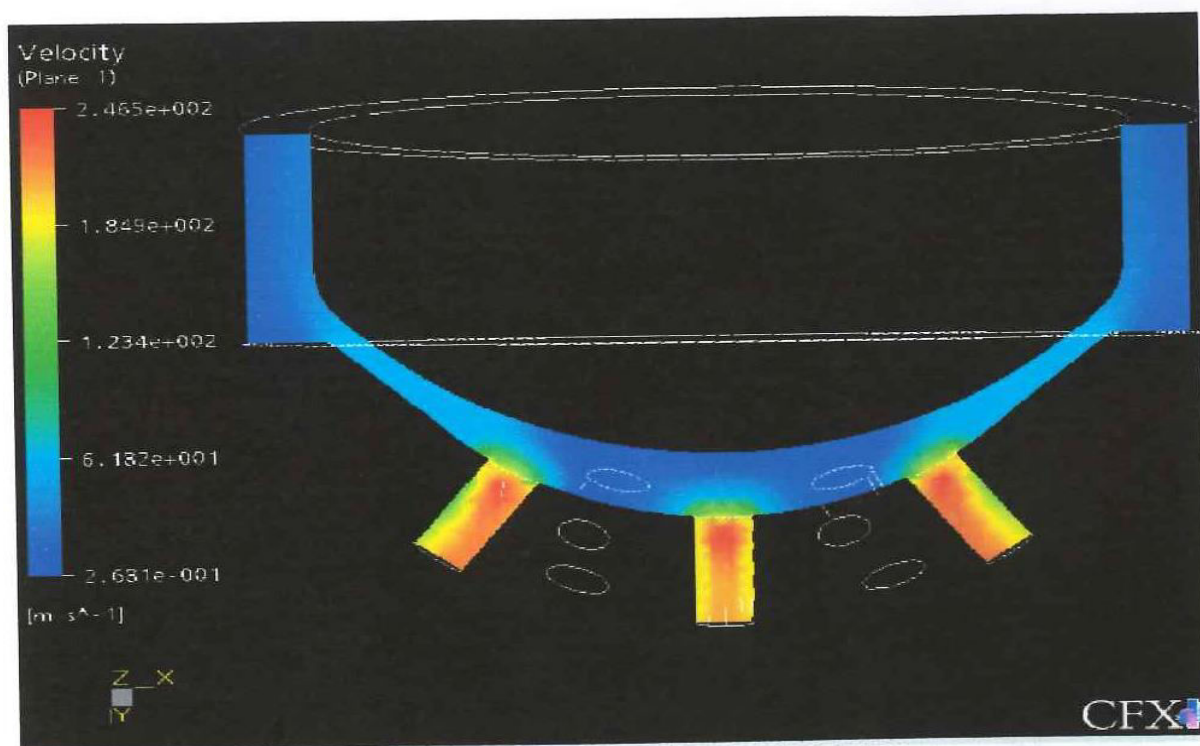


**Σχήμα 12-17 :** Μεγέθυνση της τομής όπου φαίνονται τα διανύσματα της ταχύτητας της ελάχιστης ποσότητας καυσίμου που διαφεύγει από τα πλαϊνά



**Σχήμα 12-18 :** Δύο πλήρεις κάθετες τομές με τα διανυσμάτα των ταχυτήτων και με πλάνα της κατανομής της θερμοκρασίας.

Μία πολύ σημαντική περιοχή, όπου παρατηρούνται οι μέγιστες θερμοκρασίες που παίρνει το ρευστό, βρίσκεται απέναντι από τον κεντρικό κύλινδρο, κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα (12-16, 12-18). Εκεί παρατηρούνται τοπικά ελάχιστες ταχύτητες και έτσι η εγκλωβισμένη αυτή ποσότητα του καυσίμου με ανακυκλοφορία λαμβάνει θερμοκρασία από το τοίχωμα. Γύρω από αυτή την περιοχή συναντώνται οι ροϊκές γραμμές από όλες τις κατευθύνσεις για να καταλήξουν στην κεντρική οπή. Ανάμεσα στις δύο τελευταίες περιοχές υπάρχει και κάποιο επιφανειακό στρώμα στο εσωτερικό τοίχωμα όπου έχουμε αυξημένη θερμοκρασία (σχήμα 12-8). Κάτω από αυτό το στρώμα περνάει το σύνολο των ροϊκών γραμμών. (σχήμα 12-18)



Σχήμα 12-19: Γενικό πλάνο κατανομής της ταχύτητας

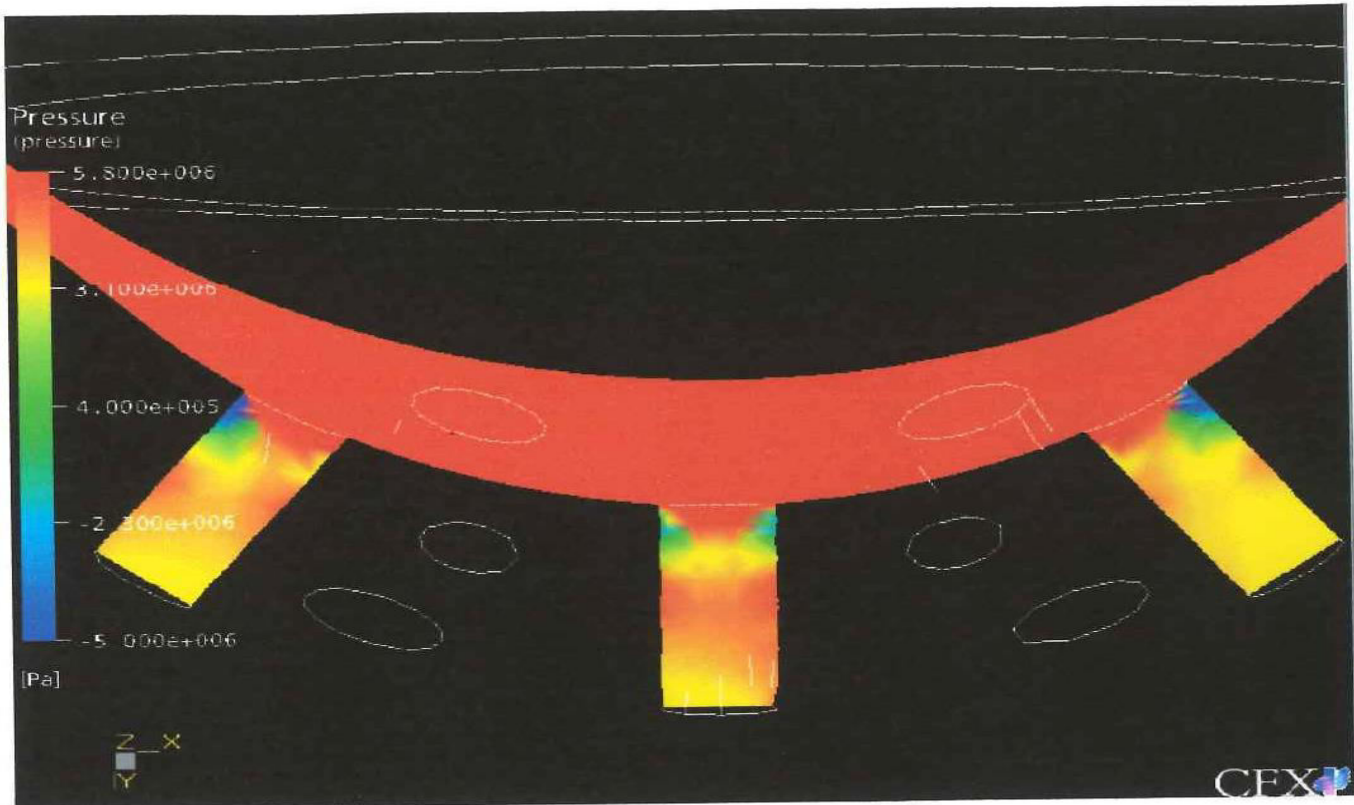
Σε αυτό το σημείο θα αναλύσουμε την κατάσταση που επικρατεί μετά την είσοδο του καυσίμου στα ανοίγματα. Αφού λοιπόν η ροή περάσει από το στένωμα αποκτά μία ταχύτητα της τάξης των 60 m/s (σχήμα 12-19) και εισχωρεί αρχικά στους πλαϊνούς κυλίνδρους εξόδου. Αυτή η περιοχή εισόδου στους 6 κυλίνδρους έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Κατά την είσοδο του ρευστού σε αυτή την περιοχή παρατηρείται πολύ μεγάλη άνοδος της ταχύτητας που αποκτά και τη μέγιστη τιμή της λίγο μετά την είσοδο. Η πολύ μεγάλη αυτή διαφορά της ταχύτητας εξηγείται από την προσπάθεια μεγάλης παροχής του καυσίμου να εισέλθει σε κάθε έναν από τους κυλίνδρους.

Λόγω της απότομης μεταβολής των διανυσμάτων της ταχύτητας που προκαλείται από την αλλαγή κατεύθυνσης της ροής κατά την είσοδο στα ανοίγματα, παρατηρείται αποκόλληση του οριακού στρώματος στην πλευρά εκείνη που φθάνει πρώτα το καύσιμο. Το φαινόμενο αυτό έχει ως συνέπεια τη δημιουργία έντονης υποπίεσης, που φθάνει έως και τα 113 bar, στη μία αυτή πλευρά του κυλίνδρου ακριβώς μετά την είσοδο (σχήμα 12-20).

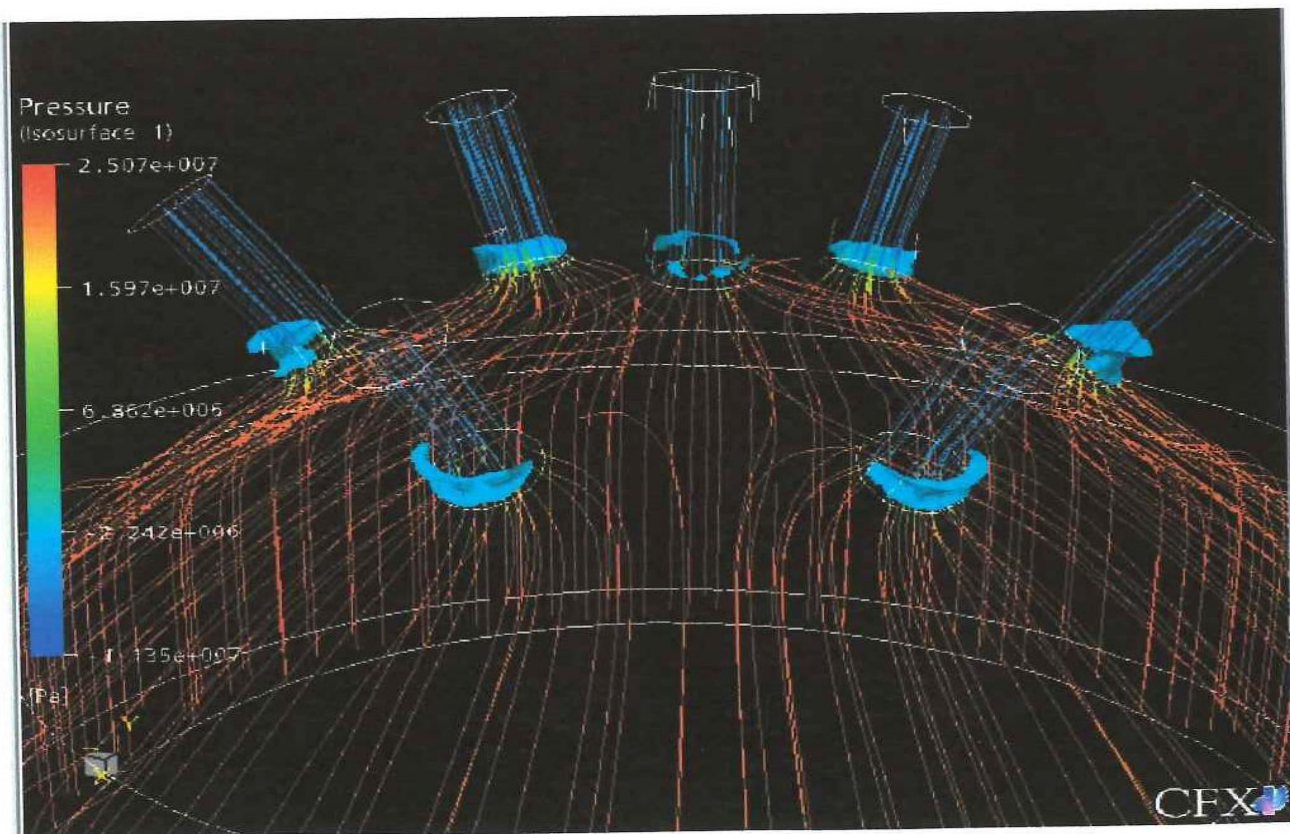
Όσον αφορά την κατανομή της θερμοκρασίας στους πλαϊνούς κυλίνδρους, αυτό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η συμβολή των ροϊκών γραμμών - οι οποίες έχουν περάσει δίπλα από την περιοχή αυξημένης θερμοκρασίας, που αναλύθηκε πιο πριν, και έχει αυξηθεί η θερμοκρασία τους - στην επιφανειακή αύξηση της θερμοκρασίας κατά μήκος του κυλίνδρου, στην πλευρά εκείνη όπου υπάρχει έντονη συγκέντρωση ροϊκών γραμμών.

Αξίζει τέλος να εστιάσουμε ξεχωριστά από τους υπόλοιπους κυλίνδρους, στον κεντρικό διότι παρατηρούνται διαφορές μεταξύ τους. Λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζεται στη ροή κατά την είσοδό της στο κεντρικό άνοιγμα έχουμε αποκόλληση της ροής στην αρχή όλης της κυλινδρικής επιφάνειας κατά την είσοδο και έτσι παρατηρείται αντίστοιχα, όπως και στα πλαϊνά ανοίγματα υποπίεση στην περιοχή αυτή. Σε αυτή την περίπτωση όμως η πίεση δεν φθάνει σε τόσο χαμηλές τιμές όπως είδαμε στα πλαϊνά ανοίγματα, αλλά κυμαίνεται πλέον κοντά στα -40 bar (σχήμα 12-21). Αυτό είναι λογικό και πάλι λόγω της συμμετρίας που ερμηνεύεται ως πιο ομοιόμορφη κατανομή των ροϊκών γραμμών κατά την είσοδο, ιδίως λόγω της καμπύλης που δημιουργείται η οποία αναγκάζει το ρευστό να εισέλθει με μικρότερη γωνία - δηλαδή λιγότερο απότομα - στον κύλινδρο.

Τέλος, σημαντική διαφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους κυλίνδρους παρουσιάζεται στην κατανομή της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία παίρνει σε όλο το σώμα του κυλίνδρου μεγαλύτερες τιμές και αυτό διότι οι ροϊκές γραμμές που εισέρχονται έχουν επηρεαστεί σε μεγαλύτερο βαθμό από τη θερμή περιοχή απέναντι από τον κύλινδρο. Αξίζει εδώ να τονιστεί ότι η θερμοκρασία που έχει το ρευστό σε όλο τον όγκο του κεντρικού κυλίνδρου (325 K) εμφανίζεται μόνο ως μέγιστη θερμοκρασία, οριακά κοντά, σε μία από τις επιφάνειες των πλαϊνών κυλίνδρων.



**Σχήμα 12-20:** Στο σχήμα αυτό, παρατηρείται η έντονη υποπίεση που δημιουργείται τοπικά στην είσοδο των κολώνδρων



**Σχήμα 12-21 :** Ισοβαρές επιφάνειες των -22 bar όπου φαίνεται η μεγαλύτερη υποπίεση στην αρχή των πλαιών κολώνδρων σε σχέση με τον κεντρικό.

### 12.3. ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ (TRANSIENT)

Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της μόνιμης ροής θα αναλύσουμε τις μεταβατικές καταστάσεις και όλα τα αποτελέσματα που λήφθηκαν μετά την επιβολή μη μόνιμης ροής. Οι χρόνοι οι οποίοι μελετήθηκαν, αντιπροσωπεύουν τους χρόνους ψεκασμού αλλά και του ενδιάμεσου χρονικού διαστήματος ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς ψεκασμούς όπως αναλύθηκε καλύτερα στο κεφάλαιο με τις παραδοχές του προβλήματος.

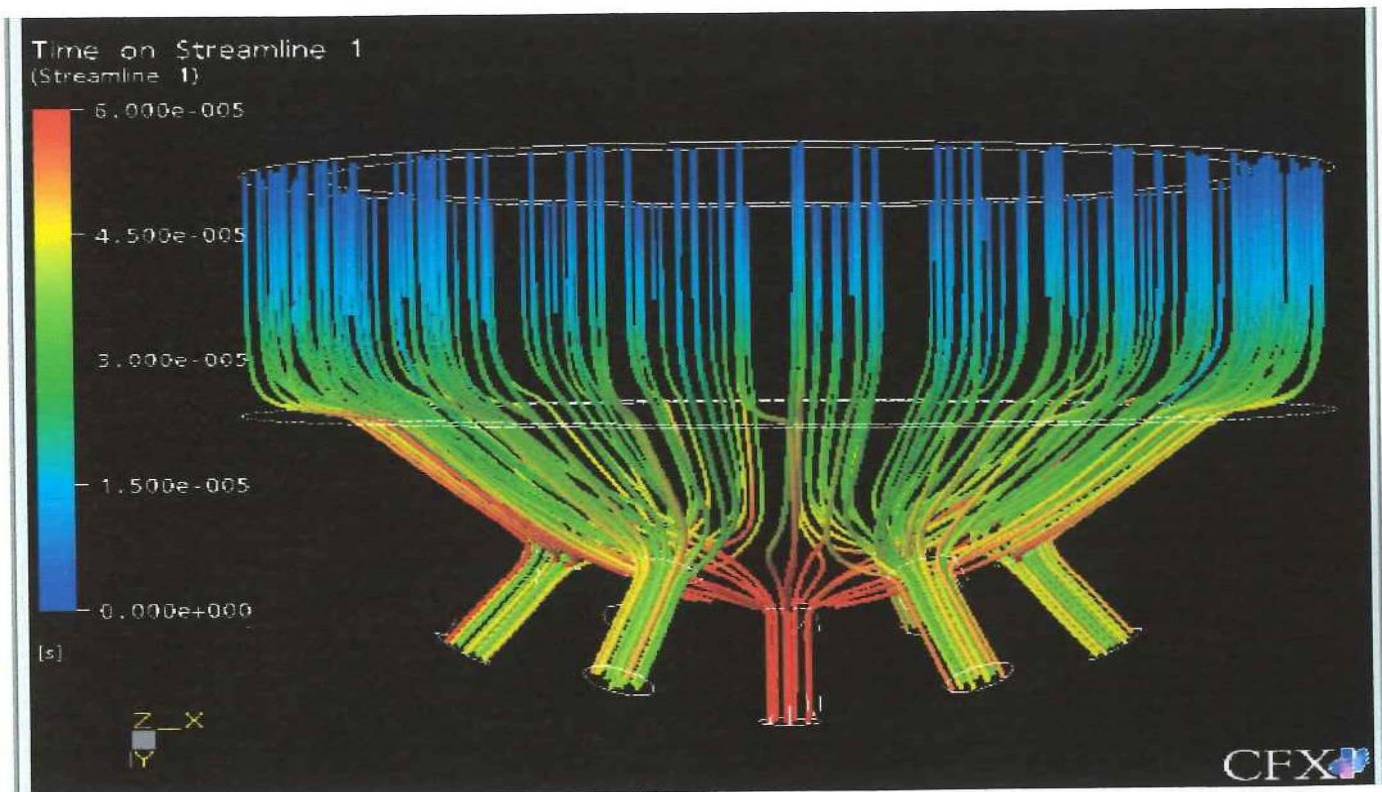
#### 12.3.1. Χρόνος ψεκασμού

Αρχικά μελετήθηκε ο χρόνος ψεκασμού (1msec) με αρχική θερμοκρασία ρευστού 303K. Αυτό συνέβη για να δούμε την κατανομή της θερμοκρασίας του καυσίμου κατά τη διάρκεια ενός ψεκασμού.

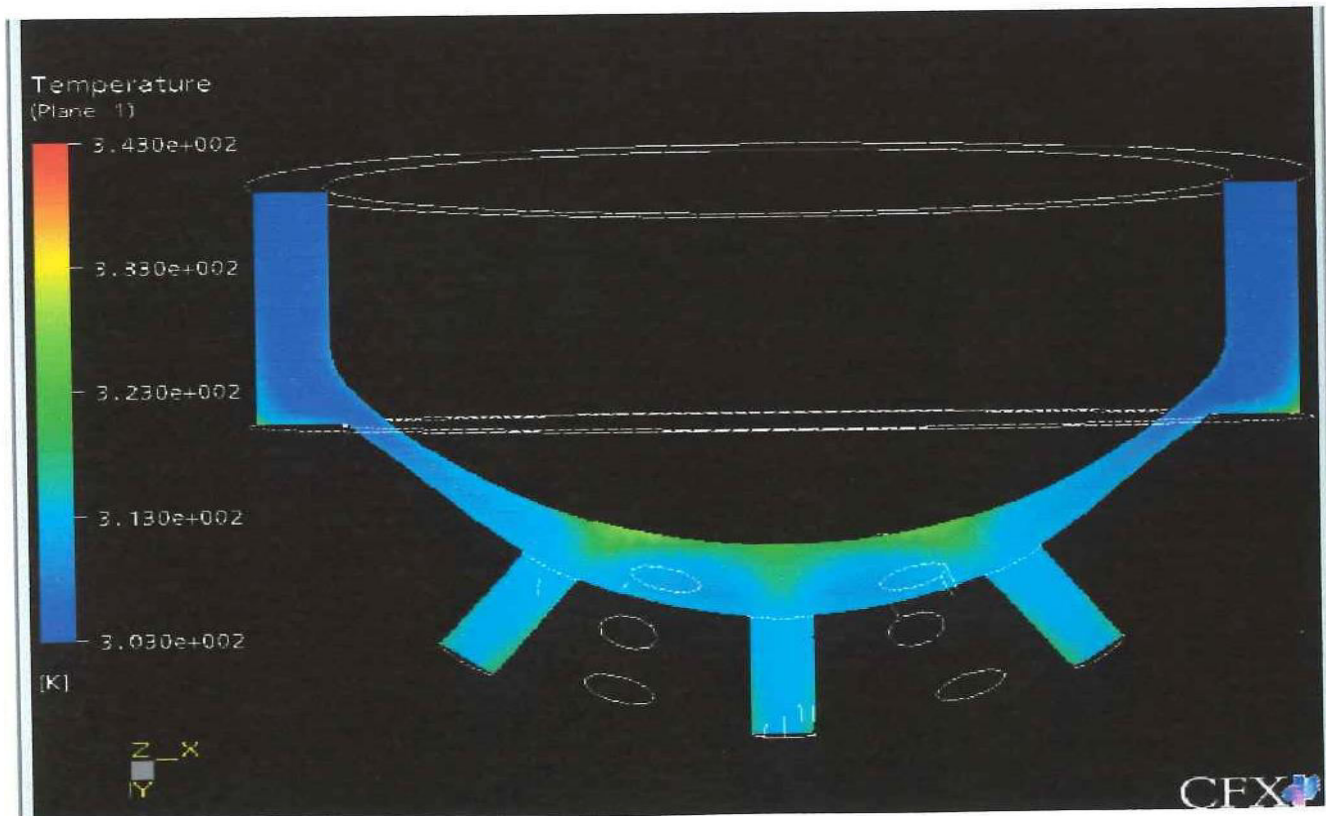
Η πρώτη πληροφορία που λαμβάνουμε και η οποία αξίζει να αναφερθεί είναι ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσει το ρευστό ολόκληρο το σώμα. Δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί από την είσοδο μέχρι την έξοδο ενός μορίου του καυσίμου. Αυτός ο χρόνος είναι  $9,78694 \cdot 10^{-5}$  sec, περίπου δηλαδή 0,1 msec. Το αξιοσημείωτο εδώ, είναι η διαφορά στο χρόνο που χρειάζεται το ρευστό μέχρι να φθάσει στο κεντρικό άνοιγμα σε σχέση με τα πλαϊνά (σχήμα 12-22). Η τιμή της διαφοράς αυτή είναι περίπου  $4 \cdot 10^{-5}$  sec.

Το πιο ενδιαφέρον συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι μέσα στο χρόνο του ψεκασμού το ρευστό προλαβαίνει να αποκτήσει χαρακτηριστικά μόνιμης ροής (όπως ακριβώς στην περίπτωση μόνιμης ροής που εξετάστηκε προηγούμενα). Πιο συγκεκριμένα αυτή η μετάβαση γίνεται πολύ νωρίς, μέσα σε χρονικό διάστημα περίπου  $1,5 \cdot 10^{-4}$  sec. Ουσιαστικά, μέσα σε αυτό το διάστημα το καύσιμο έχει ανανεωθεί πλήρως μία φορά .

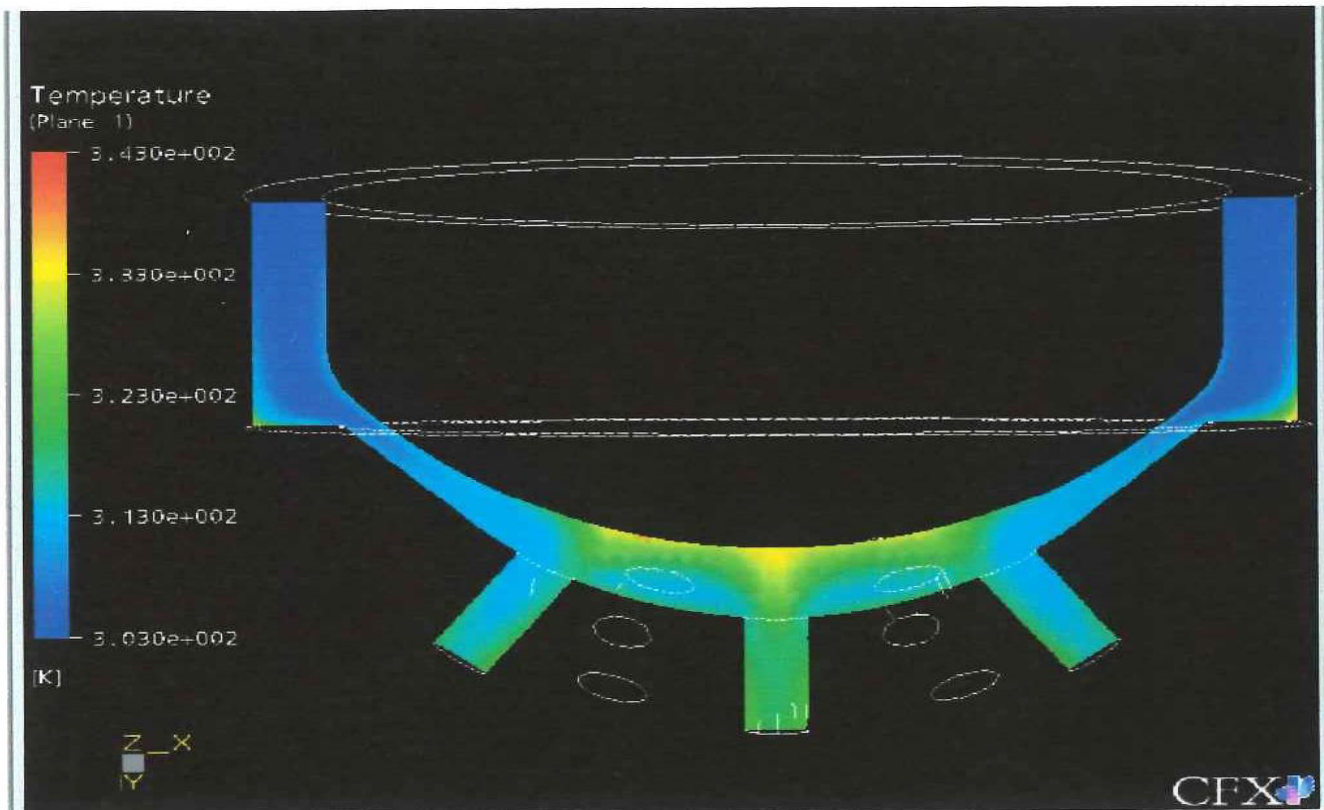
Ο χρόνος ψεκασμού μελετήθηκε για 20 ενδιάμεσα χρονικά βήματα. Από αυτό παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία αποκτά τις τιμές της μόνιμης κατάστασης αυξανόμενη σταδιακά έως ότου φθάσουμε το χρόνο σταθεροποίησης που αναφέρθηκε. Τα χρονικά βήματα (time step) που επιλέχθηκαν για να φανεί αυτή η μεταβολή της κατανομής της θερμοκρασίας είναι τα  $5 \cdot 10^{-5}$  sec (σχήμα 12-23) ,  $10^{-4}$  sec (σχήμα 12-24) και  $1,5 \cdot 10^{-4}$  sec(σχήμα 12-25).



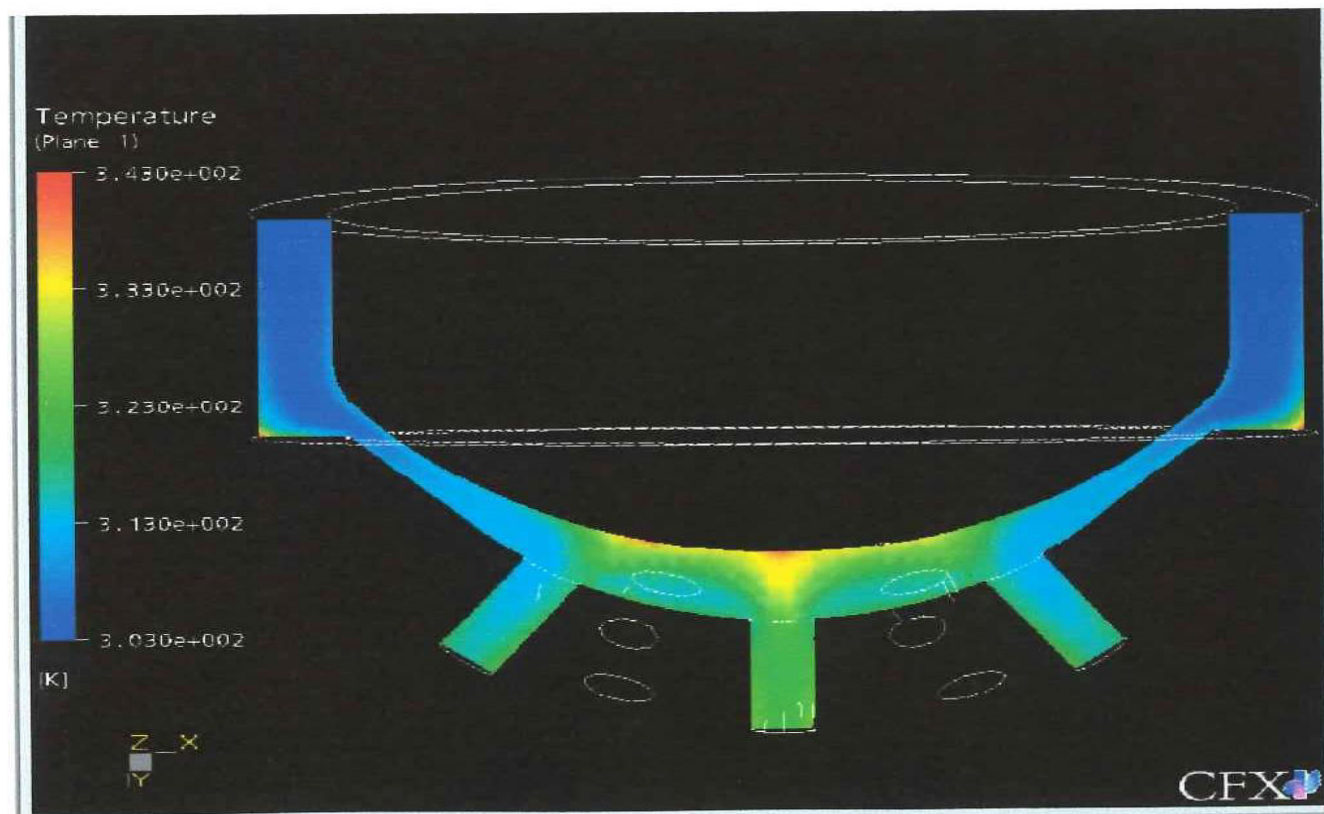
*Σχήμα 12-22 : Παρατηρείται η καθυστερημένη είσοδος του ρευστού στον κεντρικό κύλινδρο στα  $6 \cdot 10^{-5}$  sec.*



*Σχήμα 12-23: Η κατανομή της θερμοκρασίας μέχρι το χρόνο  $5 \cdot 10^{-5}$*



*Σχήμα 12-24 : Μετά από χρόνο  $10^{-4}$  η κατανομή της θερμοκρασίας δεν έχει ακόμα σταθεροποιηθεί*



*Σχήμα 12-25: Μετά από  $1,5 \cdot 10^{-4}$  sec η μεταβολή στην κατανομή της θερμοκρασίας έχει σταθεροποιηθεί*



### Υπολογισμός Παροχής στην Είσοδο και την Έξοδο

Σε αυτό το σημείο θα υπολογιστεί η παροχή του καύσιμου στην έξοδο και την είσοδο με βάση τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από το πρόγραμμα στο τέλος του χρόνου ψεκασμού.

Γνωρίζοντας το εμβαδόν κάθε στοιχείου και την ταχύτητα του ρευστού σε καθένα από αυτά, στην είσοδο και την έξοδο, ήταν δυνατός ο υπολογισμός της παροχής ξεχωριστά για κάθε στοιχείο και συνολικά στην είσοδο και την έξοδο.

Ο υπολογισμός της παροχής ξεχωριστά για κάθε στοιχείο και συνολικά στην είσοδο και την έξοδο, ήταν δυνατός, γνωρίζοντας το εμβαδόν κάθε στοιχείου και την ταχύτητα του ρευστού σε καθένα από αυτά.

Για την είσοδο και την έξοδο ισχύει η σχέση  $\dot{m} = \rho_1 \sum A_{i1} u_{i1} = \rho_2 \sum A_{i2} u_{i2}$  για την παροχή. Όπου,  $A_{i1}$  η επιφάνεια κάθε στοιχείου στην είσοδο που είναι κάθετη στην ταχύτητα  $u_{i1}$  που έχει το ίδιο στοιχείο και όπου  $A_{i2}$ ,  $u_{i2}$  αντίστοιχα για την έξοδο.

Στο πρόβλημά μας έχει θεωρηθεί σταθερή η πυκνότητα του καυσίμου άρα ισχύει

$$\sum A_{i1} u_{i1} = \sum A_{i2} u_{i2}.$$

Οι τιμές που προκύπτουν για την παροχή εισόδου και εξόδου είναι  $20.261 \text{ ml/sec}$  και  $20.185 \text{ ml/sec}$  αντίστοιχα.

Αυτή η απόκλιση που παρατηρείται στις παραπάνω τιμές ( $0.076 \text{ ml/sec}$ ) οφείλεται στο γεγονός ότι, στην περίπτωση μας η τιμή της ταχύτητας εξόδου που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο (και λαμβάνεται από το πρόγραμμα) εκφράζει το μέτρο της ταχύτητας του διανυσματικού αθροίσματος των ταχυτήτων στους τρεις άξονες και όχι το μέτρο της κάθετης, στην επιφάνεια, ταχύτητας της σχέσης. Η τιμή της απόκλισης των παροχών (της τάξεως του 0,3 %) εξηγείται διότι η ροή στην έξοδο εξέρχεται κι αυτή σχεδόν κάθετα στην επιφάνεια.

Στη συνέχεια έγινε μια σύγκριση της ροής μάζας που εξέρχεται από τον κεντρικό κύλινδρο και αυτής που εξέρχεται από τα πλαϊνά. Για το κεντρικό άνοιγμα προκύπτει μετά από παρόμοιους υπολογισμούς παροχή  $2.893 \text{ ml/sec}$ , ενώ για τα πλαϊνά – παίρνοντας το μέσο όρο των 6 παροχών – προκύπτει  $2.886 \text{ ml/sec}$ , με σημαντικές όμως αποκλίσεις από κύλινδρο σε κύλινδρο. Για παράδειγμα, η παροχή που βρέθηκε παίρνοντας τυχαία έναν πλαϊνό κύλινδρο είχε την τιμή  $2,93 \text{ ml/sec}$ . Η απόκλιση των τιμών παροχής μεταξύ των πλαϊνών κυλίνδρων οφείλεται στο ότι ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος στις επιφάνειες εξόδου δεν είναι ακριβώς ο ίδιος.

Με βάση όμως το μέσο όρο των παροχών εξόδου , συμπεραίνουμε ότι από κάθε άνοιγμα φεύγει η ίδια περίπου ποσότητα καυσίμου ανά sec σε σχέση με αυτή που μπαίνει στην είσοδο ,με τις αποκλίσεις να οφείλονται στα σφάλματα των υπολογισμών του προγράμματος .

Για τον υπολογισμό του συντελεστή των απωλειών χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση :

$$\dot{m}_f = C_d A_n \sqrt{2\rho_f \Delta p}$$

$m_f$  = παροχή καυσίμου

$C_d$  = συντελεστής απωλειών

$A_n$  = επιφάνεια παροχής καυσίμου ανά οπή (n ο αριθμός των οπών)

$\rho_f$  = πυκνότητα καυσίμου

$\Delta p$  = η πτώση πίεσης

n = αριθμός των οπών του ακροφυσίου

Με συνολική επιφάνεια εξόδου  $10^{-7}$  m , παροχή εξόδου  $20.185$  m<sup>3</sup> /sec

$\rho = 696,13$  kg/m<sup>3</sup> και πτώση πίεσης  $\Delta P = 220$  bar

Ο συντελεστής απωλειών προκύπτει:  $C_d = 0.36$

Η τιμή αυτή αποδείχθηκε λογική συγκρινόμενη με την τιμή που αναφέρεται στο βιβλίο του Richard Stones “Introduction to internal combustion engines” στο κεφάλαιο “compression ignition engines”.

### 12.3.2. Ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών ψεκασμών

Στην περίπτωση αυτή έγινε προσπάθεια για προσομοίωση της κατάστασης στην οποία δεν έχουμε ροή καυσίμου, η οποία αντιστοιχεί στην χρονική περίοδο μεταξύ δύο διαδοχικών ψεκασμών. Το ζητούμενο είναι να δούμε πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία του ρευστού ,από την αρχική τιμή των 303 K, για χρονικό διάστημα 165,5 msec με την επιβολή των 873 K στα τοιχώματα. Για να επιτευχθεί αυτή η προσομοίωση, θέσαμε στις θέσεις εισόδου και εξόδου τοιχώματα. Η θερμοκρασία στο τοίχωμα εξόδου ορίστηκε στους 873 K ενώ το τοίχωμα εισόδου θεωρήθηκε αδιαβατικό. Η διαφορά με τις περιπτώσεις που έχουμε ροή είναι ότι σε αυτήν την περίπτωση θεωρήσαμε στρωτή ροή, σε σύγκριση με τη τυρβώδη ροή που ορίζαμε προηγούμενα.

Για να εξεταστούν οι τιμές της θερμοκρασίας που αποκτά το ρευστό, το συνολικό χρονικό διάστημα χωρίστηκε σε 17 μέρη (time step) όπου στο καθένα από αυτά μπορούσαμε να δούμε την κατάσταση της θερμοκρασίας του ρευστού μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή.

Από αυτά τα time step επιλέξαμε να παρουσιάσουμε τις χρονικές στιγμές έως τα 20, 30,50 και 165.5 msec ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος και ο ρυθμός με τον οποίο καταλήγουμε στην τελική κατάσταση της θερμοκρασίας του καυσίμου.

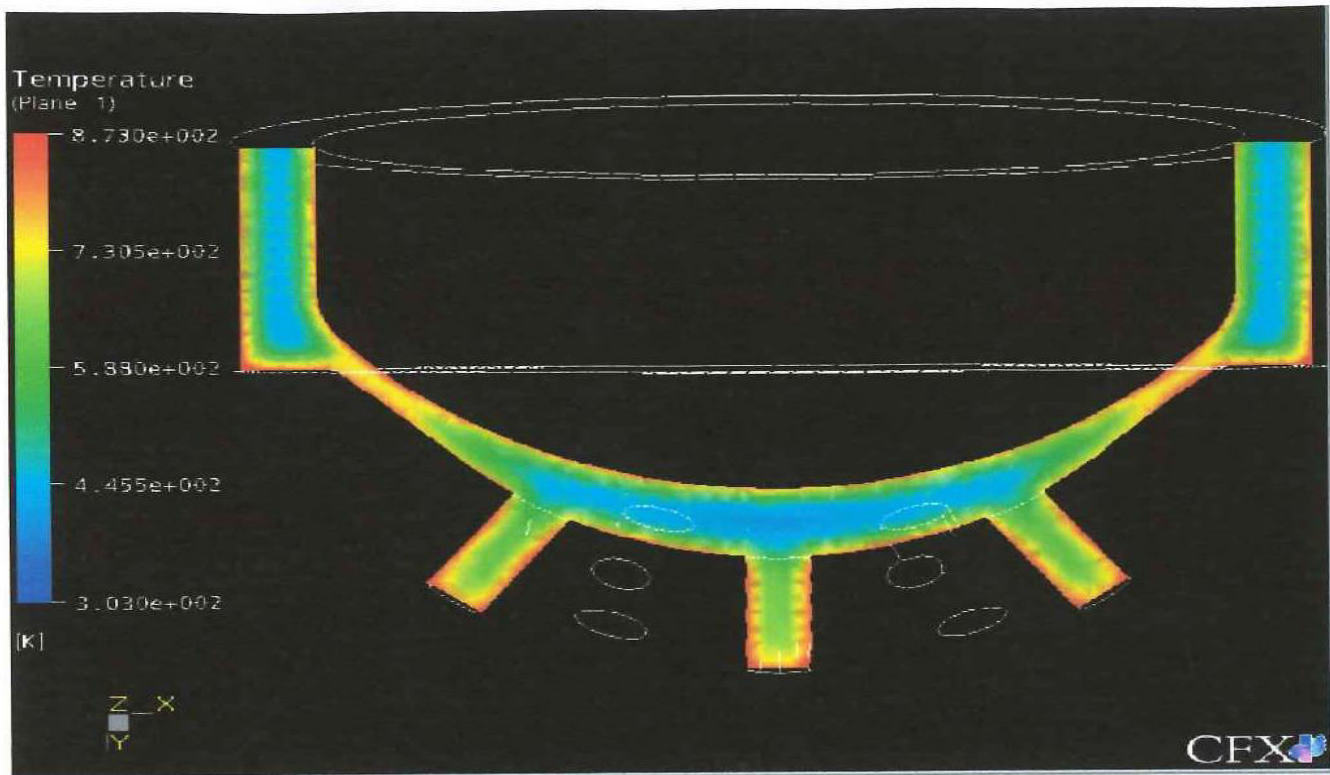
Στο τέλος των 20 msec παρατηρούμε ότι το ρευστό έχει λάβει ήδη μεγάλη θερμότητα από τα τοιχώματα που σε σημεία κοντά σε επιφάνειες και ακμές αποκτά τη μέγιστη τιμή των 873 K. Αυτό που επίσης παρατηρείται είναι η μεγάλη θερμοκρασία στην περιοχή του στενώματος που συμβαίνει εξαιτίας της πολύ μικρής απόστασης μεταξύ των τοιχωμάτων(σχήμα 12-26).

Μετά από 10 msec το φαινόμενο συνεχίζει να εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο και μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι έχει ξεκινήσει να αυξάνεται έντονα η θερμοκρασία του ρευστού εσωτερικά των κυλίνδρων (σχήμα 12-27). Αυτό επίσης φαίνεται λογικό εξαιτίας της μικρής διατομής όπως και στην περίπτωση του στενώματος με την ακόμα πιο μικρή διατομή..

Στα 50 msec πλέον το ρευστό έχει ήδη πάρει τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων στις δύο αυτές περιοχές. Επίσης η ελάχιστη θερμοκρασία κυμαίνεται στους 600 K (σχήμα 12-28).

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο συνεχίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας (σχήμα 12-29, 12-30) για να φθάσουμε στην τελική κατάσταση όπου συνολικά το ρευστό έχει αποκτήσει θερμοκρασίες από 850 έως και 873 K. Στην τελική κατάσταση φαίνεται ότι υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες περιοχές (από την είσοδο μέχρι το στένωμα και κάτω από τον κεντρικό κύλινδρο) όπου το ρευστό δεν έχει ακόμα πάρει τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων, βρίσκεται

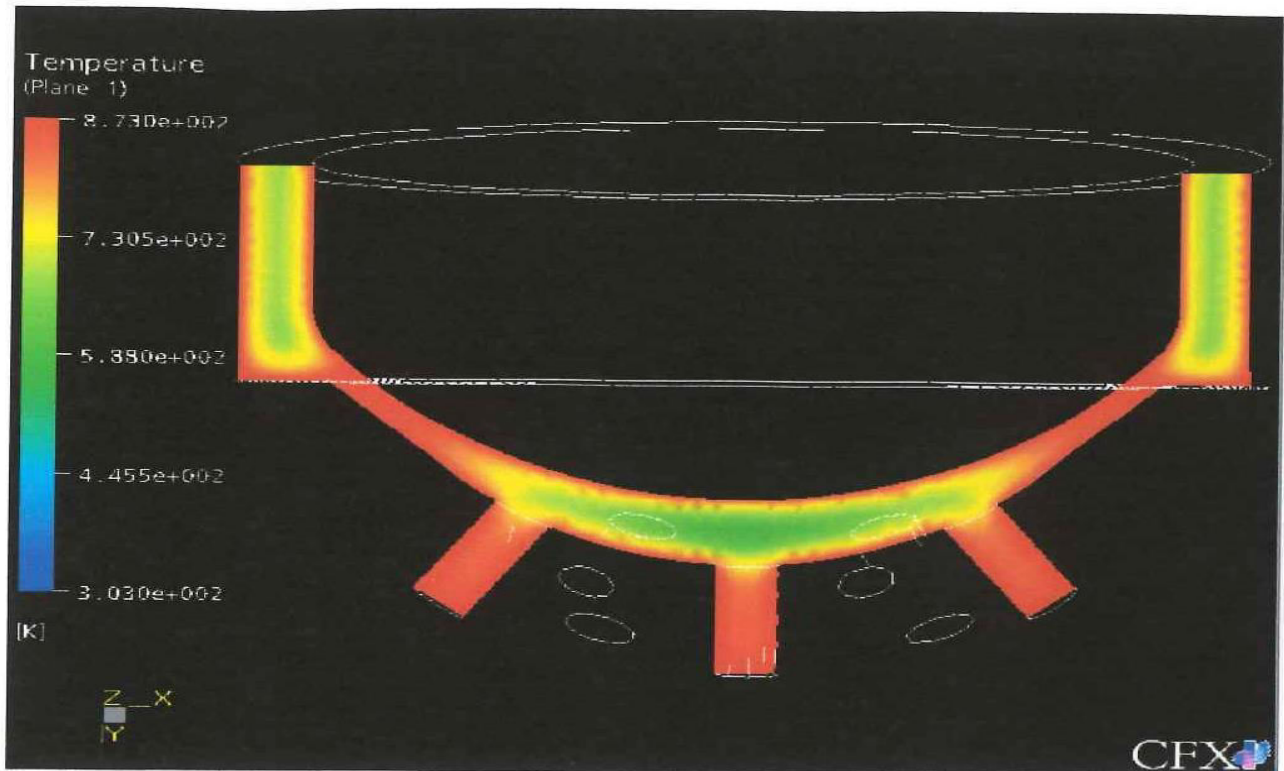
ως σε πολύ υψηλά επίπεδα (σχήμα 12-31).



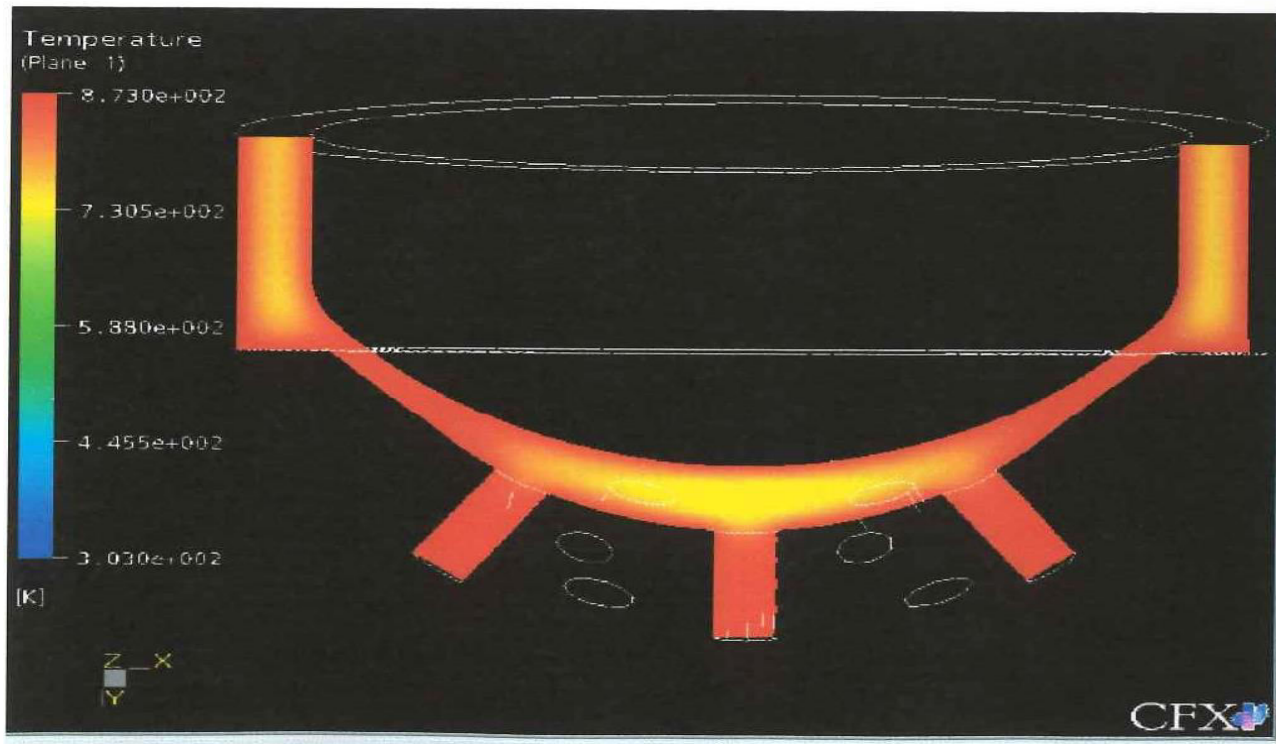
*Σχήμα 12-26: Κατανομή θερμοκρασίας στα 20 msec*



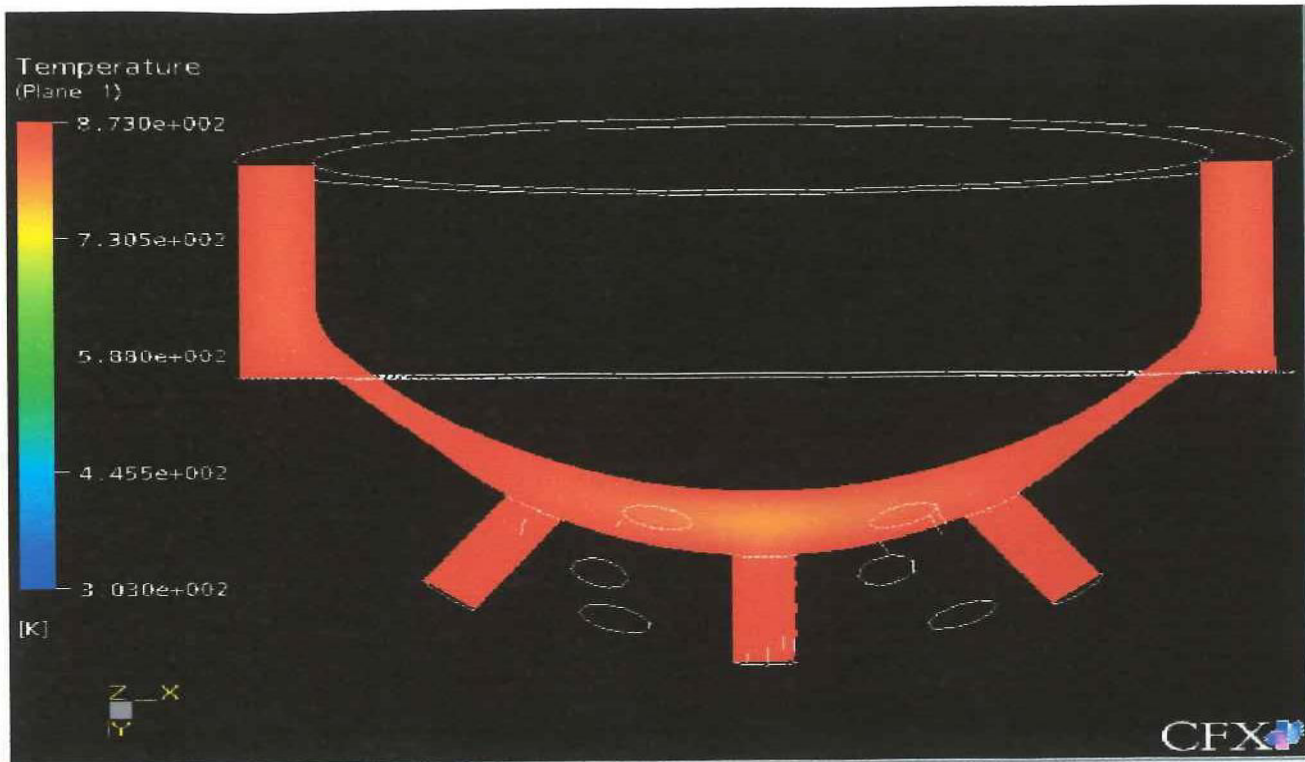
*Σχήμα 12-27: Κατανομή θερμοκρασίας στα 30 msec*



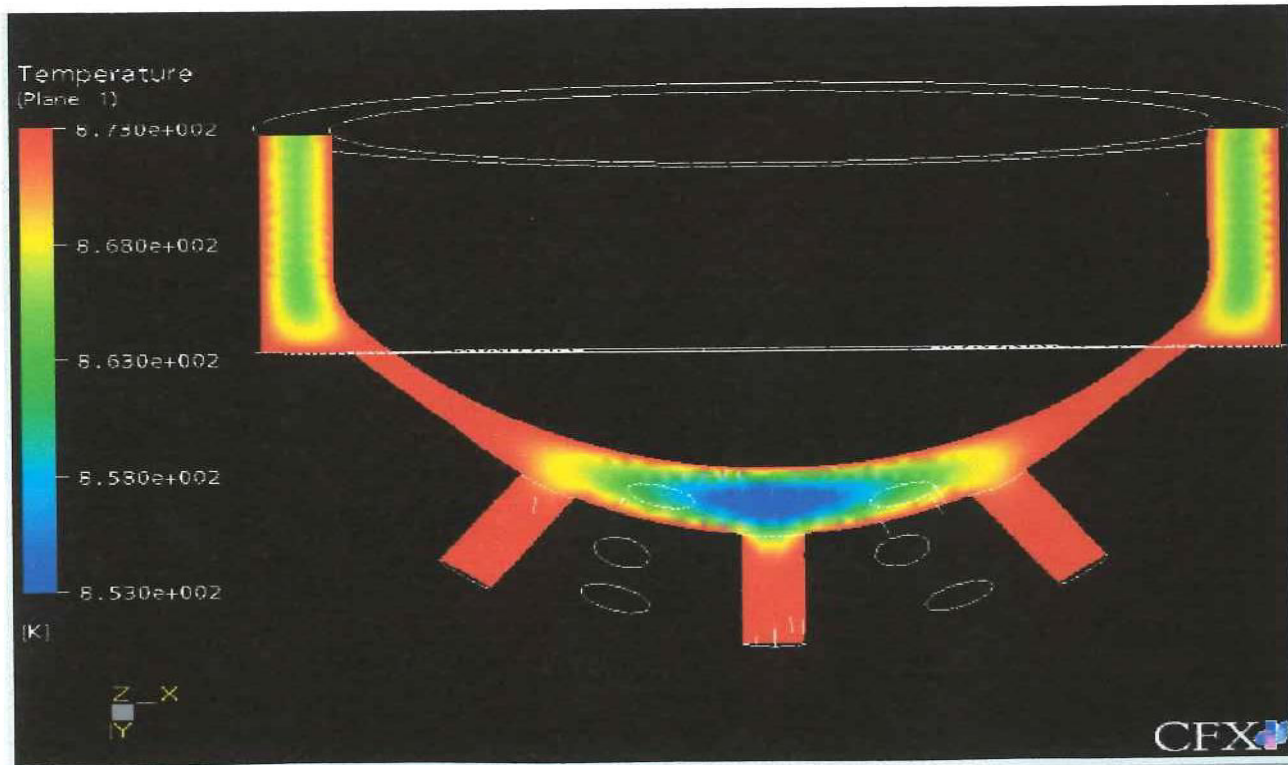
*Σχήμα 12-28: Κατανομή θερμοκρασίας στα 50 msec*



*Σχήμα 12-29: Κατανομή θερμοκρασίας στα 80 msec*



*Σχήμα 12-30: Κατανομή θερμοκρασίας στα 120 msec*



*Σχήμα 12-31 : Στα 165.5 msec με τη χρήση μικρότερης κλίμακας, φαίνονται οι ελάχιστες θερμοκρασίες που παρατηρούνται στο εσωτερικό.*

### 12.3.3. Χρόνος ψεκασμού μετά από τον ενδιάμεσο χρόνο

Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε προσομοιώνει πολύ καλύτερα την πραγματικότητα για το χρονικό διάστημα ενός ψεκασμού. Θεωρούμε την αρχική θερμοκρασία του ρευστού σε όλο το σώμα 873 K. Αυτό στηρίζεται στο ότι μετά από το χρονικό διάστημα που δεν υπάρχει ψεκασμός (165,5 msec) το ρευστό αποκτά στο μεγαλύτερο μέρος του αυτή τη θερμοκρασία, όπως φάνηκε μετά τη μελέτη αυτού του ενδιάμεσου χρόνου. Έτσι, θεωρήσαμε ότι η μέση θερμοκρασία που έχει το ρευστό στο τέλος των 165,5 msec είναι και αυτή η μέγιστη θερμοκρασία

Το ρευστό που εισέρχεται με την εκκίνηση του ψεκασμού έχει θερμοκρασία 303 K. Το βασικό ζητούμενο λοιπόν σε αυτή την περίπτωση είναι να φανεί η μεταβολή στη θερμοκρασία του καυσίμου έως ότου ψεκαστεί αυτή η πρώτη ποσότητα που βρισκόταν εγκλωβισμένη στο σώμα στον ενδιάμεσο χρόνο. Στη συνέχεια θέλουμε να δούμε το χρόνο που απαιτείται μέχρι να σταθεροποιηθεί η κατανομή της θερμοκρασίας αποκτώντας τα χαρακτηριστικά της περίπτωσης που εξετάστηκε προηγούμενα, δηλαδή με αρχική θερμοκρασία του ρευστού μέσα στον όγκο 303K και είσοδο νέου στην ίδια θερμοκρασία. Αυτός είναι και ο χρόνος που χρειάζεται για να αποκτήσει το καύσιμο χαρακτηριστικά μόνιμης ροής έτσι όπως αναλύθηκαν προηγούμενα.

Για το σκοπό αυτό, αρχικά μελετήθηκε ο συνολικός χρόνος του 1 msec με 20 ενδιάμεσα χρονικά βήματα . Από αυτή τη μελέτη φάνηκε ότι η αρχική θερμοκρασία των 873K του ρευστού είχε επιρροή για χρόνο μικρότερο από  $2,5 \cdot 10^{-4}$  sec. Μετά από αυτόν το χρόνο η κατάσταση παρέμενε σταθερή.

Για να φανεί η ακριβής μείωση της θερμοκρασίας από τους 873 K μέχρι τη στιγμή της σταθεροποίησης, μελετήθηκε το χρονικό διάστημα  $3 \cdot 10^{-4}$  sec με 15 ενδιάμεσα χρονικά βήματα, δηλαδή πήραμε γραφικά αποτελέσματα ανά  $2 \cdot 10^{-5}$  sec.

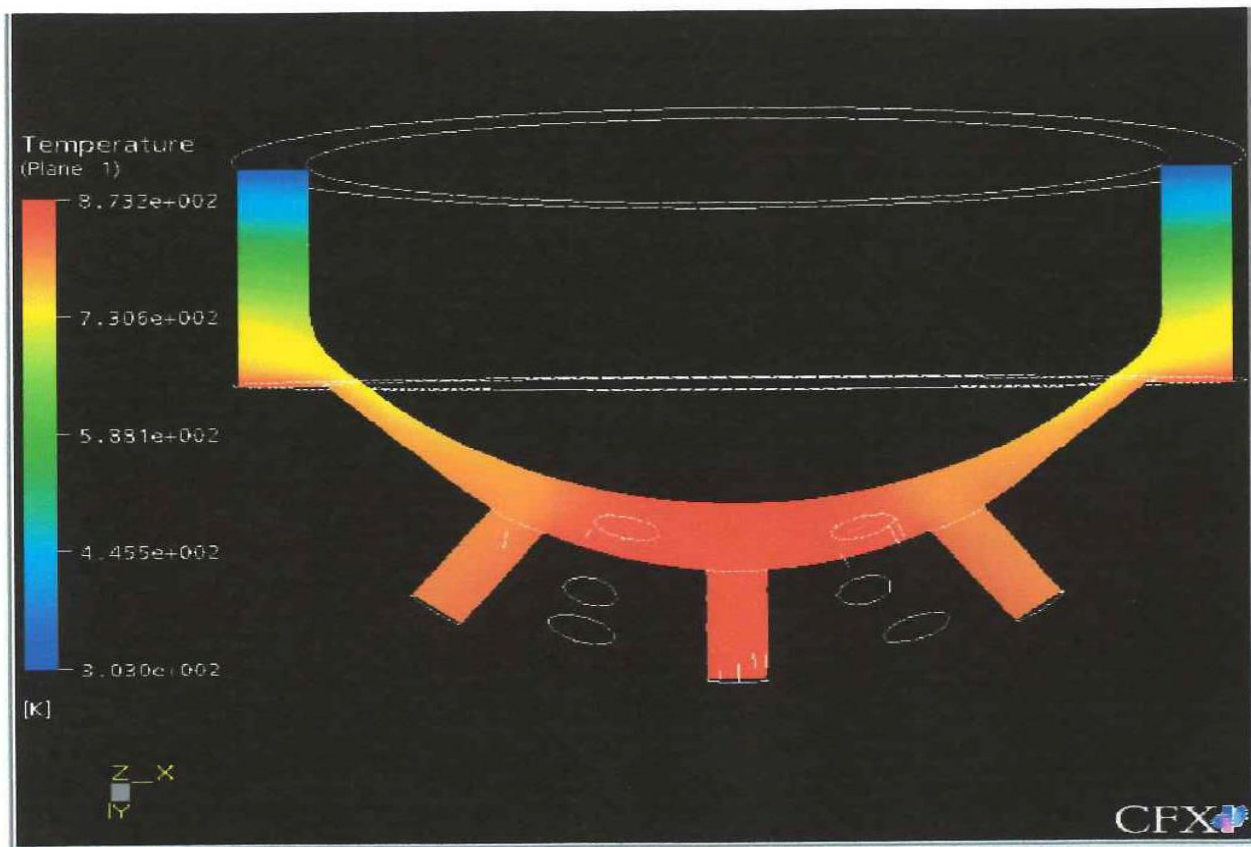
Στο τέλος του πρώτου χρονικού βήματος παρατηρούμε, τον τρόπο με τον οποίο το νέο καύσιμο επηρεάζει τη σταθερή θερμοκρασία των 873 K του αρχικού καυσίμου, καθώς αναμιγνύεται με αυτό. Είναι φανερό ότι κάποιο μέρος του νέου καυσίμου αντικαθιστά το αρχικό καθώς κάποια ποσότητα έχει ήδη ψεκαστεί. (σχήμα 12-32).

Μελετώντας τα επόμενα χρονικά βήματα (σχήμα 12-33, 2-34 ,12-35)., επιβεβαιώνεται ότι το νέο καύσιμο επηρεάζει πιο γρήγορα τη θερμοκρασία στα πλαϊνά ανοίγματα σε αντίθεση

με το κεντρικό. Αυτό συμβαίνει, όπως έχει εξηγηθεί, διότι οι περισσότερες ροϊκές γραμμές φθάνουν γρηγορότερα στους πλαϊνούς κυλίνδρους.

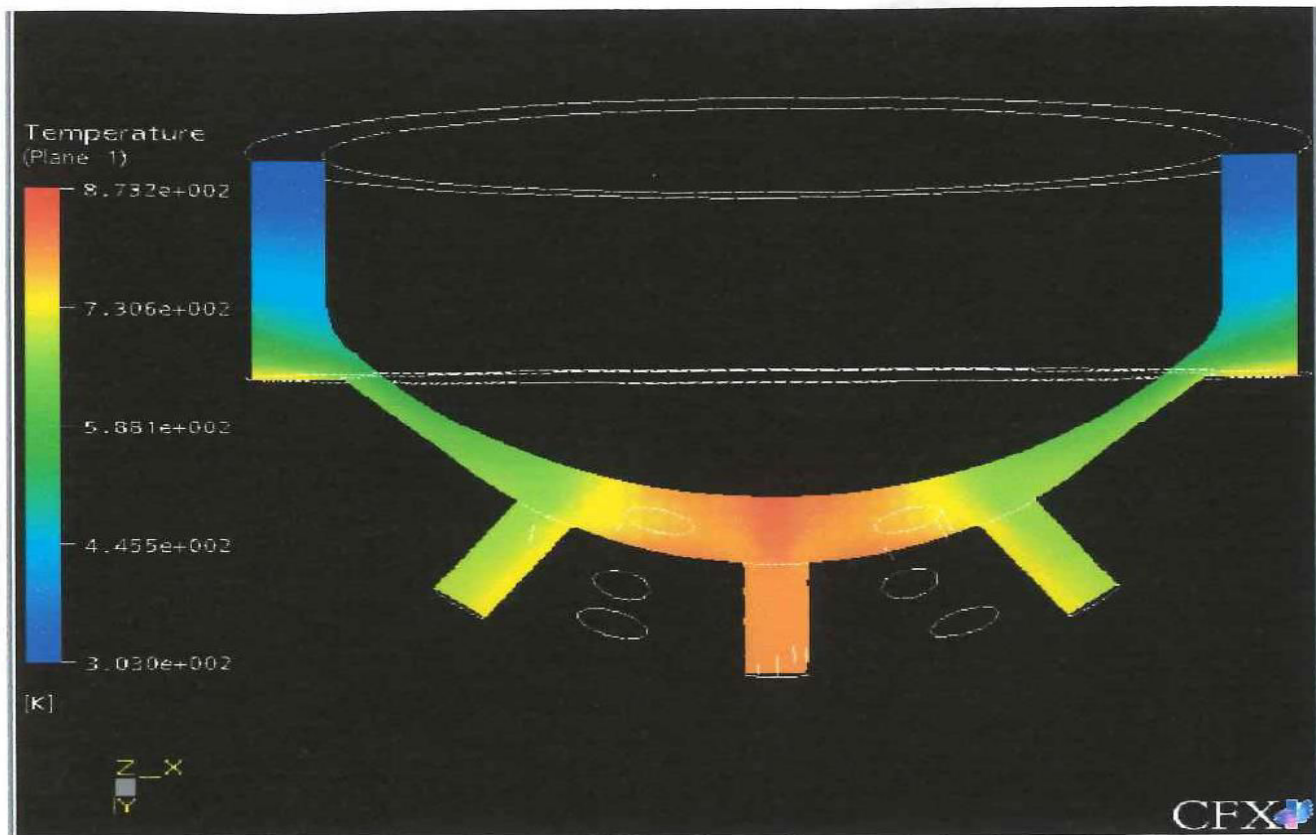
Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι απαιτούνται πάνω από δύο πλήρεις ανανεώσεις καυσίμου ώστε να εξομαλυνθεί τελείως η κατανομή της αρχικής θερμοκρασίας, φθάνοντας μετά από  $2,4 \cdot 10^{-4}$  sec σε κατάσταση με χαρακτηριστικά μόνιμης ροής (σχήμα 12-8).

Για να γίνει πιο ευδιάκριτη η ομαλοποίηση της κατανομής της θερμοκρασίας επιλέχθηκαν κλίμακες μικρότερου εύρους (303-381 K) (σχήμα 12-36, σχήμα 12-37).

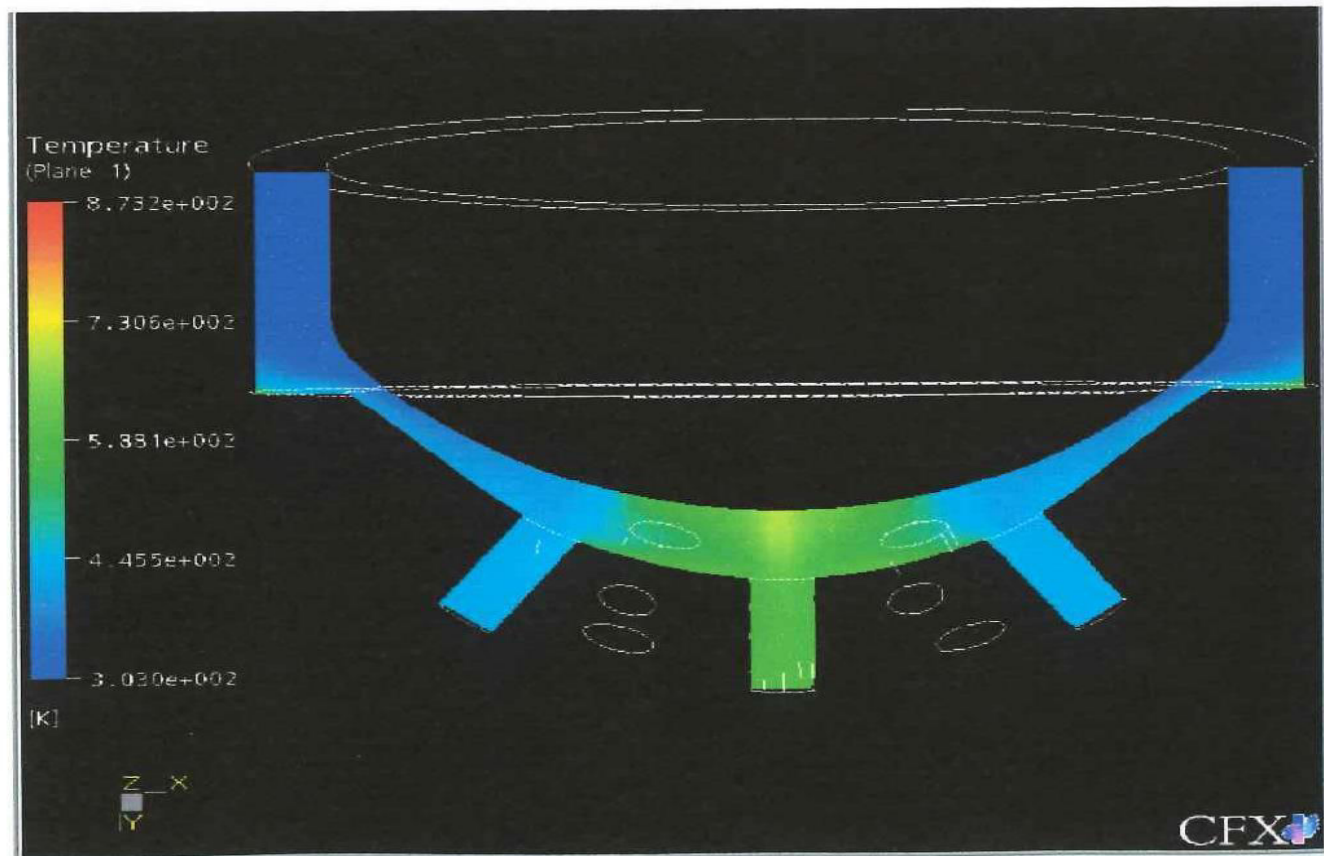


*Σχήμα 12-32 :Κατανομή της θερμοκρασίας μετά από  $2 \cdot 10^{-5}$  sec*

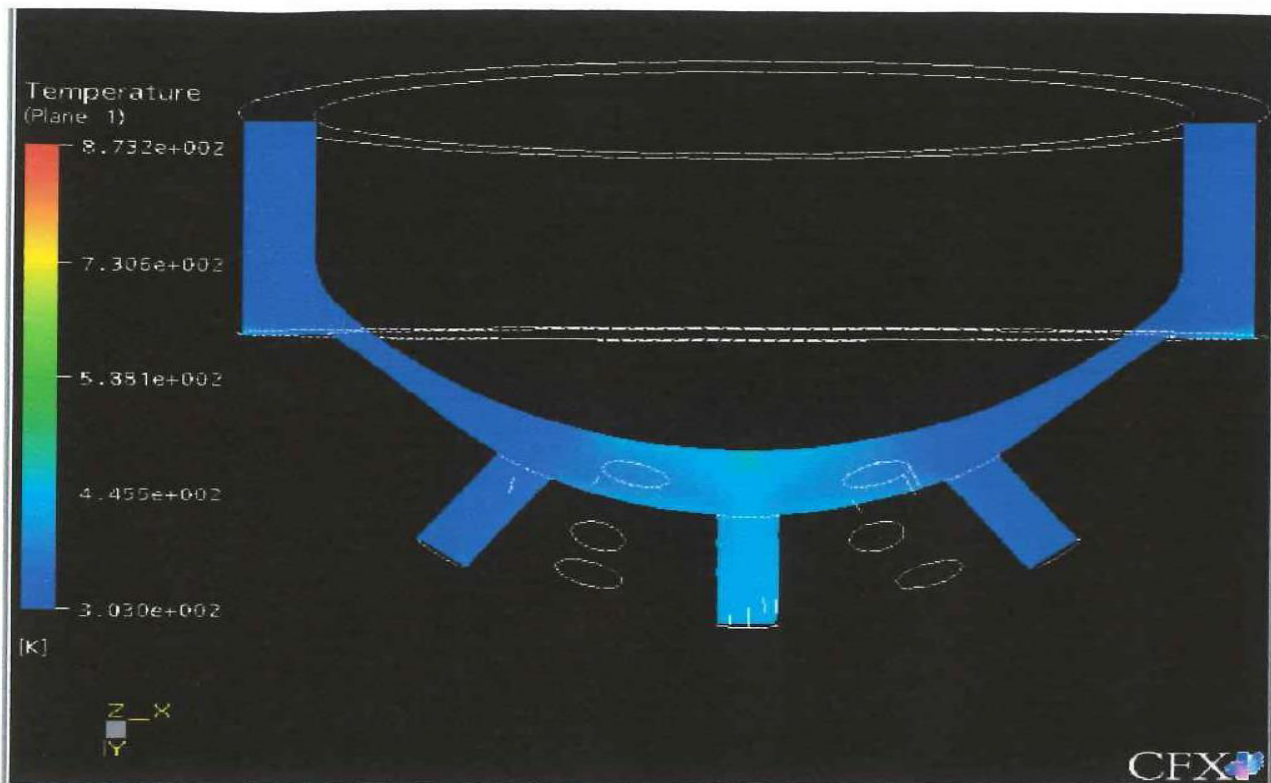




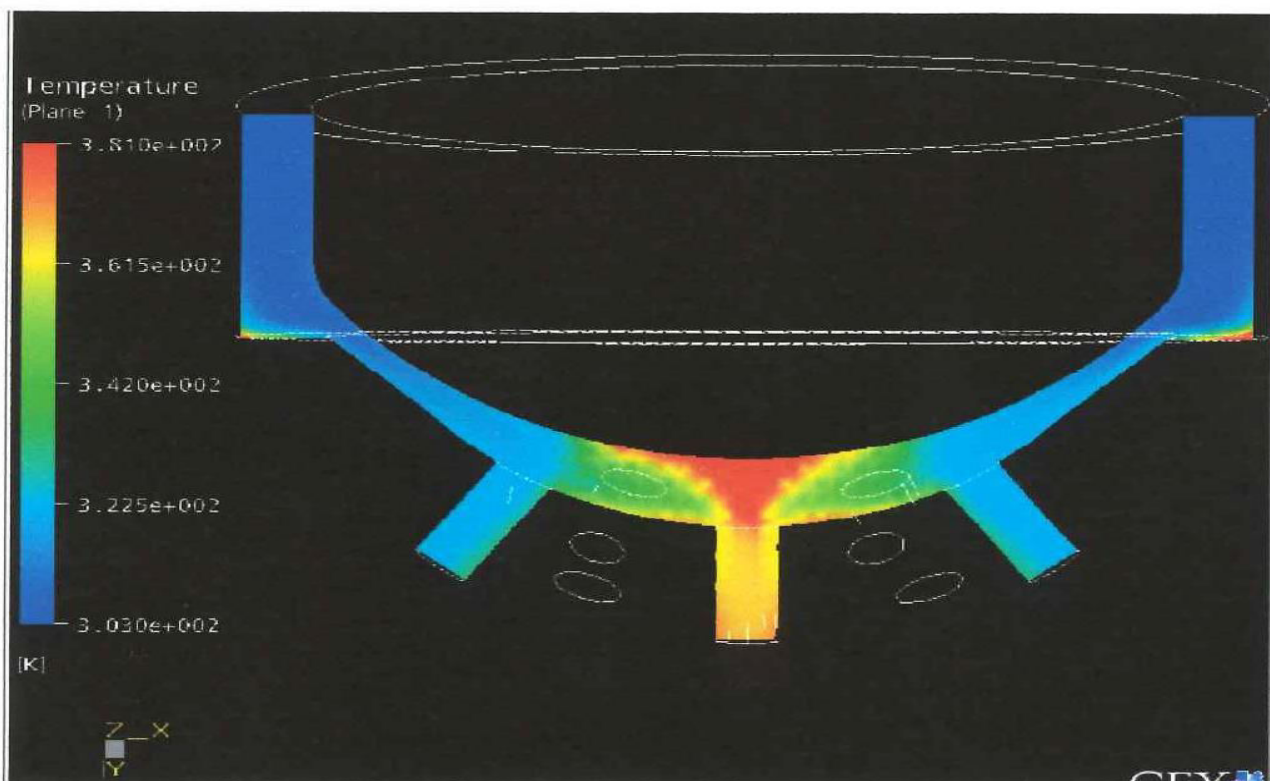
*Σχήμα 12-33: Κατανομή της θερμοκρασίας μετά από  $4 \cdot 10^{-5}$  sec*



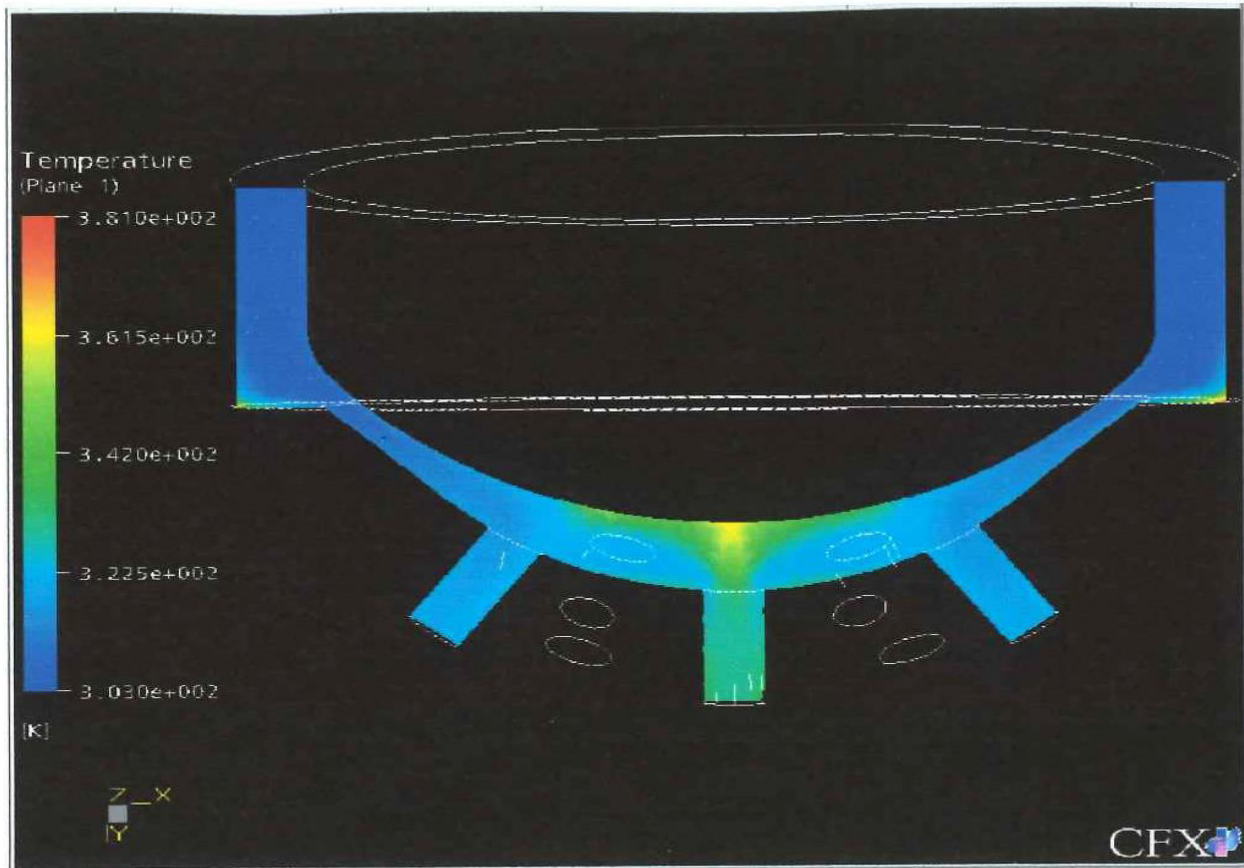
*Σχήμα 12-34: Κατανομή της θερμοκρασίας μετά από  $8 \cdot 10^{-5}$  sec*



*Σχήμα 12-35: Κατανομή της θερμοκρασίας μετά από  $1,2 \cdot 10^{-4}$  sec*



*Σχήμα 12-36 : Κατανομή της θερμοκρασίας σε μικρότερη κλίμακα μετά από  $1,4 \cdot 10^{-4}$  sec*



*Σχήμα 12-37: Κατανομή της θερμοκρασίας σε μικρότερη κλίμακα στο  $1,8 \cdot 10^{-4}$  sec.*

### 13. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ – ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Εξαιτίας της αυξημένης πολυπλοκότητας των πραγματικών συνθηκών του προβλήματος, για την προσομοίωση του, χρησιμοποιήσαμε τις παρακάτω παραδοχές:

- Αρχικά θεωρήσαμε ότι η ροή στο εσωτερικό του εγχυτήρα δεν επηρεάζεται από καμία εξωτερική θερμοκρασία (αδιαβατικά τοιχώματα με θερμοκρασία περιβάλλοντος) ενώ μετά θεωρήσαμε ότι τα τοιχώματα έχουν σταθερή θερμοκρασία 873K . Στην πραγματικότητα η θερμοκρασία των τοιχωμάτων δεν είναι σταθερή σε όλο το σώμα. Το κάτω μέρος των εξωτερικών τοιχωμάτων (καμπύλη διαμόρφωση με τους κυλίνδρους εξόδου) βρίσκεται μέσα στο θάλαμο καύσης. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό αυτών των τοιχωμάτων μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Οι τιμές της θερμοκρασίας και ο ρυθμός της μεταβολής εξαρτώνται από τις συνθήκες που επικρατούν κάθε φορά στο θάλαμο καύσης.
- Στη συγκεκριμένη προσομοίωση θεωρήσαμε ότι τα τοιχώματα στη γεωμετρία έχουν κάποιο αμελητέο- ελάχιστο πάχος. Ο σκοπός για τον οποίο κάναμε αυτή η θεώρηση είναι διότι δε γνωρίζαμε ποιες είναι ακριβώς οι συνθήκες γύρω από τη γεωμετρία μας. Ακριβώς επειδή έξω από τη γεωμετρία μας οι συνθήκες μεταβάλλονται και δεν ήταν γνωστές σε αυτή την εργασία, γι αυτό δεν μπορούσαμε να ορίσουμε κάποιο συγκεκριμένο πάχος και να επιβάλλουμε σε αυτό κάποια σταθερή τιμή θερμοκρασίας. Η θεώρηση βέβαια αυτή, του αμελητέου πάχους είναι ικανή να θέσει τα όρια της γεωμετρίας που μας ήταν απαραίτητα για την επίλυση της ροής.
- Στην πραγματικότητα η διακοπή και η έναρξη του ψεκασμού προκαλείται από τη μεταβολή του στενώματος (lift) από 0mm σε 0.1 mm . Συγκεκριμένα κατά τον ψεκασμό το άνοιγμα από το οποίο εισχωρεί το καύσιμο (στένωμα) έχει τη μέγιστη τιμή του 0,1mm, ακριβώς όπως φαίνεται στη γεωμετρία μας. Κατά τον ενδιάμεσο χρόνο η διαδικασία λήξης του ψεκασμού προκαλείται από τη σταδιακή κίνηση των εσωτερικών τοιχωμάτων της γεωμετρίας μέχρι να κλείσει το άνοιγμα. Έτσι, το καύσιμο εγκλωβίζεται στο χώρο από την είσοδο έως το σημείο που κλείνει όπως περιγράφηκε πριν. Το υπόλοιπο καύσιμο μετά το κλείσιμο δεν γνωρίζουμε με ακρίβεια αν έχει εξέλθει όλο στο θάλαμο καύσης ή έχει παραμείνει κάποια ελάχιστη ποσότητα στην κοιλότητα και τους κυλίνδρους εξόδου. Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε λοιπόν ότι στην αρχή της φάσης του ψεκασμού δεν υπάρχει καύσιμο σε ολόκληρη τη γεωμετρία παρά μόνο στο χώρο πριν το στένωμα.

➤ Η μετάβαση από τη φάση ψεκασμού στη φάση ηρεμίας και αντίστροφα θεωρήθηκε ακαριαία. Στην πραγματικότητα όμως, όπως έχει γίνει κατανοητό, η διαδικασία της εκκίνησης και της λήξης του ψεκασμού απαιτούν κάποιο ελάχιστο χρόνο. Η θεώρηση αυτή μας επέτρεψε να ορίσουμε τοίχωμα στις επιφάνειες εισόδου και εξόδου και στρωτή ροή του καυσίμου εσωτερικά (προσομοιώνοντας έτσι την ηρεμία), για τη μελέτη του ενδιάμεσου χρόνου. Συγκεκριμένα το τοίχωμα στην επιφάνεια εισόδου θεωρήθηκε αδιαβατικό ενώ στην έξοδο με σταθερή θερμοκρασία 873 K. Αυτές οι θεωρήσεις έγιναν με βάση τις συνθήκες που επικρατούν στις γειτονικές περιοχές των τοιχωμάτων.

➤ Θεωρήθηκε ότι το οκτάνιο διατηρεί τις φυσικές ιδιότητές του, σταθερές με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Στην πραγματικότητα η πυκνότητα και το ιξώδες μεταβάλλονται και συγκεκριμένα μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για αυτό το λόγο, ενώ οι μεταβολές πίεσης και ταχύτητας επηρεάζουν τη θερμοκρασία του ρευστού, η οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει την πίεση και την ταχύτητά του.

➤ Η επιτάχυνση ή η επιβράδυνση της ροής απαιτεί την παρουσία μίας εξωτερικής δύναμης υπό τη μορφή διαφοράς πίεσης. Έτσι η διαφορά πίεσης η οποία προκαλεί, στο πρόβλημά μας, την κίνηση του καυσίμου ορίστηκε στα 220 bar (θεωρήσαμε 250 bar στην είσοδο - 30 bar στην έξοδο).

#### ➤ Υπολογισμός διάρκειας του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών ψεκασμών

Ο υπολογισμός αυτού του « νεκρού χρόνου » έγινε για την λειτουργία του κινητήρα στις 840 rpm δηλαδή σε κατάσταση ηρεμίας (ρελαντί), θεωρώντας ότι έχει αποκτήσει τη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας. Θεωρήσαμε ότι σε αυτή τη λειτουργία έχουμε 1 ψεκασμό στους 4 χρόνους που διαρκεί ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα. Η θεώρηση αυτή είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα διότι για τις συγκεκριμένες στροφές λειτουργίας, ο κινητήρας άμεσου ψεκασμού λειτουργεί με όσο το δυνατόν φτωχότερο μίγμα. Όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο των συστημάτων άμεσου ψεκασμού για την καλύτερη καύση αυτού του μίγματος, στόχος μας είναι η στρωματοποίησή του. Για να το πετύχουμε αυτό η έγχυση του καυσίμου γίνεται μία φορά προς το τέλος του χρόνου της συμπίεσης.

Όπως γνωρίζουμε για έναν κύκλο λειτουργίας ο στροφαλοφόρος άξονας χρειάζεται δύο πλήρεις περιστροφές. Με βάση όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι έχουμε 7 ψεκασμούς / sec. Η διάρκεια ψεκασμού του εγχυτήρα που μελετάται είναι 1 msec. Έτσι προκύπτει ότι ο ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών ψεκασμών είναι 165,5 msec.

## 14. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Μετά το πέρας της διπλωματικής εργασίας, θα θέλαμε αρχικά να τονίσουμε ότι σήμερα τα προγράμματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής έχουν φθάσει στο σημείο να μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα ακόμα κι από χρήστες χωρίς προηγούμενη εμπειρία πάνω στο θέμα. Το πρόγραμμα CFX επιβεβαίωσε αυτό ακριβώς, αποτελώντας ένα πολύ εύχρηστο εργαλείο για μας, αφού η εκμάθηση των βασικών λειτουργιών του έγινε σε μικρό χρονικό διάστημα και χωρίς καμία προηγούμενη ενασχόληση, πριν από αυτή την εργασία, με τέτοιου είδους προγράμματα .

Μετά από την ανάλυση των αποτελεσμάτων όλων των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, προκύπτουν κάποια σημαντικά συμπεράσματα.

- Ένα από τα σημεία στα οποία αξίζει να σταθούμε και τα οποία προξένησαν μεγάλη εντύπωση, είναι οι πολύ μεγάλες τιμές υποπίεσης στα σημεία αποκόλλησης του οριακού στρώματος κατά την είσοδο της ροής στους κυλίνδρους. Λόγω αυτής της πολύ μεγάλης αρνητικής πίεσης (της τάξεως των -100 bar) που εμφανίζεται ειδικά στους πλαϊνούς κυλίνδρους στην περιοχή εκείνη, με βάση τις ιδιότητες του κανονικού οκτανίου είναι πολύ πιθανή η εξάτμισή του τοπικά . Λόγω αυτής της κατάστασης είναι πιθανή η δημιουργία φυσαλίδων, οι οποίες μπορεί στη συνέχεια να προκαλέσουν σπηλαίωση δημιουργώντας σοβαρές φθορές στο υλικό των τοιχωμάτων.
- Εξαιτίας του πολύ μικρού πραγματικού μεγέθους της γεωμετρίας του προβλήματος επιτυγχάνονται εξαιρετικά μεγάλες μεταβολές των χαρακτηριστικών του ρευστού σε όλες τις περιπτώσεις, παρόλο που οι χρόνοι οι οποίοι εξετάστηκαν είναι της τάξεως των msec.

Θεωρώντας ως πραγματικές τιμές των χαρακτηριστικών του καυσίμου, αυτές που υπολογίστηκαν στην εργασία και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ο τρόπος της λειτουργίας του ψεκασμού είναι ο πραγματικός μπορούμε να επισημάνουμε τα εξής :

Συγκεκριμένα για τη θερμοκρασία, που μας απασχολεί ιδιαίτερα σε αυτό το πρόβλημα, μπορεί να σχολιαστεί ότι για την περίπτωση του χρόνου των 165,5 msec το ρευστό παίρνει σχεδόν την ίδια θερμοκρασία των τοιχωμάτων, πριν την ολοκλήρωση αυτού του διαστήματος. Από αυτό, συμπεραίνουμε ότι κατά τη στιγμή της έναρξης του επόμενου ψεκασμού, λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας που έχει αποκτήσει το καύσιμο και λόγω κάποιας ελάχιστης ποσότητας αέρα η οποία έχει εισχωρήσει από το θάλαμο καύσης, υπάρχει η πιθανότητα να γίνει κάποια τοπική αυτανάφλεξη του καυσίμου, στο σημείο εξόδου του ακροφυσίου.

Αν εξετάσουμε την περίπτωση της στιγμής που σταματάει ο ψεκασμός κατά την πραγματική λειτουργία της έγχυσης μπορεί να εξαχθούν επίσης κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Κατά τη διακοπή του ψεκασμού το καύσιμο το οποίο δεν εγκλωβίζεται από τα τοιχώματα φεύγει προς το θάλαμο καύσης. Υπάρχει περίπτωση όμως κάποια ελάχιστη ποσότητα να παραμείνει στο χώρο της κοιλότητας. Αυτή η ποσότητα θα έχει την ικανή θερμοκρασία να αυτανάφλεγει σε περίπτωση που έρθει σε επαφή με κάποια ελάχιστη ποσότητα αέρα που θα βρεθεί στο χώρο αυτό προερχόμενος από το θάλαμο καύσης.

Τα αποτελέσματα της αυτανάφλεξης του καυσίμου μπορεί να είναι κάποια υπολείμματα καύσης μέσα στο σώμα και πιθανότατα στις περιοχές αυξημένης θερμοκρασίας. Αν τα παραπάνω φαινόμενα είναι επαναλαμβανόμενα τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οφείλονται κατά ένα μέρος για τα μόνιμα υπολείμματα καύσης (καρβούνιασμα) τα οποία έχουν εντοπιστεί σε αυτά τα σημεία των εγχυτήρων GDI.

### Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Σε αυτό το σημείο παραθέτουμε τις προτάσεις μας για την επέκταση – βελτίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Καταρχήν θα προτείνουμε τη βελτίωση της διακριτοποίησης του χώρου (πυκνότερο πλέγμα) στην περιοχή όπου παρατηρήθηκαν και οι μεγαλύτερες μεταβολές, η οποία βρίσκεται γύρω από την είσοδο του καυσίμου στους κυλίνδρους εξόδου. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί κανείς να λάβει πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα . Για παράδειγμα, η απόκλιση που παρατηρείται στις τιμές των παροχών μεταξύ των επιφανειών εξόδου θα μπορέσει έτσι να μειωθεί.

Η μελέτη του προβλήματος με όσο το δυνατόν λιγότερες παραδοχές θα οδηγήσει σε πιο ρεαλιστική προσομοίωση του όλου προβλήματος.

Μία πρόταση για την περαιτέρω ανάπτυξη του προβλήματος είναι η θεώρηση μίας γραμμικής εξίσωσης  $P = P_0 + \left(\frac{P_1 - P_0}{t_{total}}\right)dt$  με  $P_1=250$  bar και  $P_0=30$  bar και με περιορισμό  $P_{out} = \min(P, P_1)$  για τη μετάβαση από τη φάση της έγχυσης στη φάση ηρεμίας. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση στην έξοδο θα μεταβαλλόταν γραμμικά από 30 bar σε 250 bar για χρόνο  $t_{total}$  ms και όχι ακαριαία όπως συνέβη στη δική μας περίπτωση.

Μία ακόμα πρόταση η οποία θα αντιπροσώπευε καλύτερα την πραγματικότητα ,θα ήταν οι καταστάσεις ψεκασμού και ενδιάμεσου χρόνου να προσομοιωθούν με την κίνηση της γεωμετρίας. Με αυτήν είναι δυνατή ουσιαστικά η μεταβολή της διαφοράς πίεσης μέσα σε κάποιο χρόνο και όχι ακαριαία. Επίσης ο εγκλωβισμός του καυσίμου δε θα γινόταν σε όλο το σώμα όπως θεωρήθηκε , αλλά σε μικρότερο χώρο όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα.

Τέλος η επιβολή χρονικά μεταβαλλόμενων θερμοκρασιών στα εξωτερικά τοιχώματα που έρχονται σε επαφή με το θάλαμο καύσης και η επιβολή διαφορετικών θερμοκρασιών στα υπόλοιπα τοιχώματα, θα έδινε την δυνατότητα για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων.



**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**Βιβλία

1. Ι. Δρόσος – Ε. Χατζηδάκης « Μηχανολογία αυτοκινήτου », Εκδόσεις Φοίβος
2. Καραμπίλας Πέτρος « Injection – Καταλύτες & αναλυτές καυσαερίων », Αθήνα Μηχανεκδοτική 1994
3. Βουσουράς Ευθ. Α, « Μηχανές Εσωτερικής Κάυσης » , Αθήνα
4. Ρετζέπης Πασχάλης Αθ.. « Τεχνολογία Αυτοκινήτου », Εκδόσεις Ίων, 1993
5. Καραπάνος Χ. – Κοτσιλιέρης Αν. – Κουντουράς Λ. « Μηχανές Εσωτερικής Καύσης 2», 1<sup>ο</sup> τεύχος, Παιδαγωγικό Ινστιτούτο Αθήνα 2001
6. Κωνσταντίνος Δ. Ρακόπουλος , «Αρχές εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.», Αθήνα Γρηγ. Φούντας
7. John L. Lumley « Engines », Cambridge University press, 1999
8. Richard Stone « Introduction to Internal combustion engines », 3<sup>rd</sup> edition, Hampshire: Macmillan, 1999
9. Γ. Μπεργελές «Υπολογιστική ρευστομηχανική», Εκδόσεις Συμεών, 1<sup>η</sup> έκδοση 1993, Ανατύπωση 2000
10. Απόστολος Κ.Γούλας, «Μηχανική ρευστών» , Εκδόσεις Γιαχούδη Γιαπούλη Ο.Ε., Θεσσαλονίκη 1986
11. Manual CFX 5.7

Άρθρα

12. Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada “Cost and benefits of the gasoline direct injection engine”
13. Bosch – “Automotive handbook Germany”
14. Duane Bong – “gasoline direct injection” { [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) }
15. Tatsushi Nakashima, Masatoshi Basaki, Kimitaka Saito and Shigeo Furuno- “New concept of a direct injection SI gasoline engine: a study of stratified charge combustion characteristics by radical luminescence measurement” { [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) }

16. Magnus Gäfvert, Karl-Erik Arzén, Lars Malcolm Pedersen and Bo Bernhardsson – “Control of GDI engines using torque feedback exemplified by simulations” { [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) }

### Περιοδικά

17. R&D {τεύχος 06 (Φεβρουάριος 2004)} και {τεύχος 08 (Αύγουστος 2004)}
18. 4τροχοί { ένθετο Αυτοκίνητο και περιβάλλον Δεκέμβριος 2003 }  
{ τεύχος 403 (Απρίλιος 2004) }
19. Eno { τεύχος 15 (Ιανουάριος 2004) }
20. Car {ένθετο Εγκυκλοπαιδικό τεχνικό λεξικό αυτοκινήτου 'B έκδοση }

### Ιστοσελίδες

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

[www.in.gr/auto/cartechnology](http://www.in.gr/auto/cartechnology)

[www.sae.com](http://www.sae.com)

[www.ams.gr](http://www.ams.gr)

[www.autotriti.gr](http://www.autotriti.gr)

[www.vw.com](http://www.vw.com)

[library.techlink.gr](http://library.techlink.gr)

[www.visionengineer.com](http://www.visionengineer.com)

[www.engineersedge.com](http://www.engineersedge.com)

[www.mitsubishi-motors.co.jp/inter/technology/GDI](http://www.mitsubishi-motors.co.jp/inter/technology/GDI)

[www.4troxoi.gr](http://www.4troxoi.gr)