

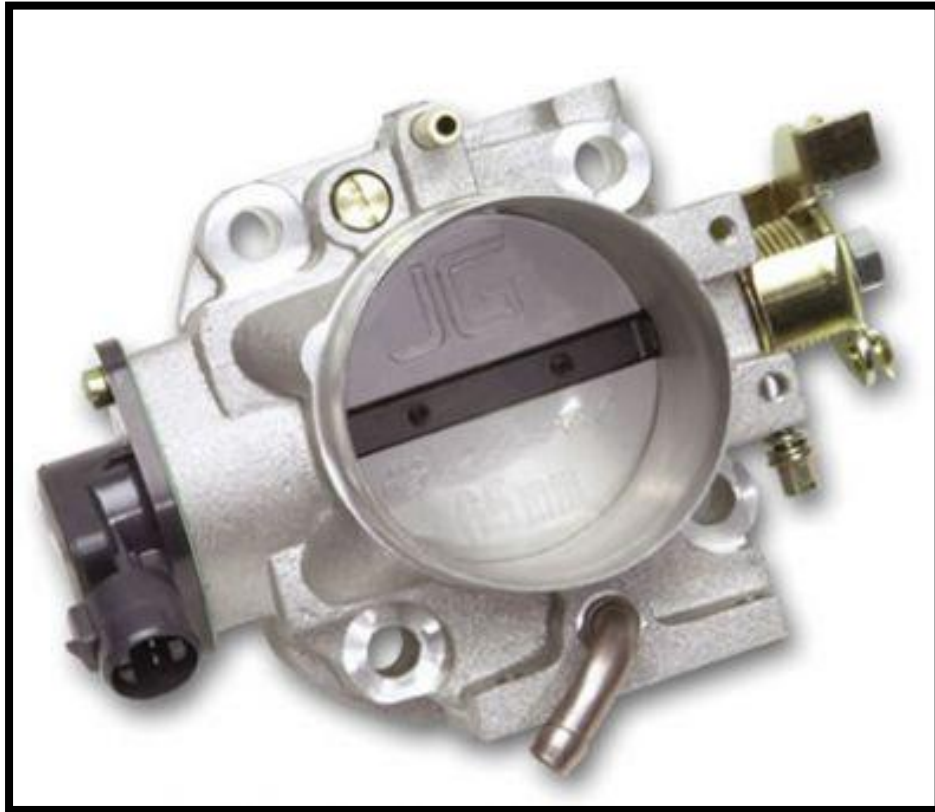


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ:

ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗΣ ΔΙΚΛΕΙΔΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΟΤΤΟ



ΜΠΕΗΣ ΗΛΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε.Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ,
ΕΜΠ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

Πρόλογος

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Γιακουμή για την ανάθεση του θέματος και για τη συνεχή και πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κ. Ρακόπουλο και τον Καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα, οι οποίοι συνδιδάσκουν τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράστασή τους και την πολύτιμη συνεισφορά τους σε κάθε μου βήμα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
A_{ϵ}	Διατομή του εμβόλου	m^2
A_{th}	Ολική κάθετη επιφάνεια διέλευσης του αέρα	m^2
A_v	Στιγμιαία γεωμετρική επιφάνεια του ανοίγματος της βαλβίδας	m^2
C_d	Συντελεστής εκροής	-
$C_{d,th}$	Συντελεστής εκροής εξαρτώμενος της A_{th}	-
c_{ϵ}	Μέση ταχύτητα εμβόλου	m/s
D_{th}	Διάμετρος αγωγού οχετού εισαγωγής	m
\dot{m}	Παροχή μάζας	kg/s
\dot{m}_{crit}	Κρίσιμη παροχή μάζας	kg/s
P_a	Πίεση περιβάλλοντος	N/m^2
P_d	Πίεση κατάντι της “πεταλούδας”	N/m^2
P_{im}	Πίεση εντός της πολλαπλής εισαγωγής	N/m^2
P_u	Πίεση ανάντι της “πεταλούδας”	N/m^2
R	Ειδική σταθερά του αερίου	J/kgK
s	Διαδρομή του εμβόλου	m
T_d	Θερμοκρασία κατάντι της “πεταλούδας”	K
T_u	Θερμοκρασία ανάντι της “πεταλούδας”	K
u_{th}	Ταχύτητα του ρευστού στην θέση της “πεταλούδας”	m/s
α	Γωνία “πεταλούδας”	$^{\circ}$
γ	Εκθέτης ισεντροπικής μεταβολής	-
ζ_{th}	Συντελεστής απωλειών	-
ρ_a	Πυκνότητα του αέρα	kg/m^3

Αρκτικόλεξα	Επεξήγηση
CFI	Κεντρική έγχυση καυσίμου (Center fuel injection - Ford)
DC	Συνεχές ρεύμα (Direct current)
ECU	Μονάδα ελέγχου του κινητήρα (Engine control unit)
EGR	Ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust gas recirculation)
IACV	Βαλβίδα ελέγχου της ελάχιστης παροχής αέρα (Idle air control valve)
ITB's	Αυτόνομα “μπλοκ” “πεταλούδας” (Individual throttle bodies)
NO _x	Οξειδία του αζώτου (nitrogen oxides)
TBI (by General Motors)	Έγχυση καυσίμου επί του “μπλοκ” της “πεταλούδας” (Throttle body injection)
TPS	Αισθητήρας γωνίας ανοίγματος της “πεταλούδας” (Throttle position sensor)
MEK	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (internal combustion engine)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Γενικά θεωρητικά στοιχεία	
1.1. Γενικός ορισμός.....	6
1.2. Μηχανές εσωτερικής καύσης.....	6
1.2.1. Μ.Ε.Κ. με otto κινητήρα.....	6
1.2.2. Μ.Ε.Κ. με diesel κινητήρα.....	13
1.3. Σύστημα ρυθμιστικής δικλείδας.....	15
2. Θεωρητικό υπόβαθρο	
2.1. Ροή και συντελεστές αυτής.....	29
2.2. Ροή του αέρα διαμέσου της ρυθμιστικής δικλείδας.....	33
3. Υπολογιστική διερεύνηση	
3.1. Εισαγωγικό μέρος.....	42
3.2. Διερεύνηση των εξισώσεων υπολογισμού της επιφάνειας ροής της ρυθμιστικής δικλείδας.....	43
3.3. Διερεύνηση των εξισώσεων υπολογισμού της παροχής μάζας αέρα δια μέσω της ρυθμιστικής δικλείδας.....	55
3.4. Διερεύνηση ενός συγκεντρωτικού γραφήματος της παροχής μάζας του αέρα συναρτήσει του λόγου πίεσης του οχετού εισαγωγής με παράμετρο τη γωνία της πεταλούδας και τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.....	59
Βιβλιογραφία.....	67

Κεφάλαιο 1 – Γενικά θεωρητικά στοιχεία

1.1 Γενικός ορισμός

Η ρυθμιστική δικλείδα (throttle) είναι ένας μηχανισμός ελέγχου της ροής ενός υγρού. Η ισχύς ενός κινητήρα otto μπορεί να μειωθεί ή να αυξηθεί μέσω της μείωσης ή όχι στο εισερχόμενο αέριο, με την χρήση μίας ρυθμιστικής δικλείδας. Ο όρος throttle έφτασε να χρησιμοποιείται, παράτυπα και λανθασμένα, σε κάθε μηχανισμό ρύθμισης της ισχύος ή της ταχύτητας ενός κινητήρα. Ότι συνήθως αναφέρεται ως throttle σε αεροναυπηγικά κείμενα ονομάζεται ορθότερα ως thrust lever. Για έναν ατμοκινητήρα, η βαλβίδα ατμού που ελέγχει την ισχύ ή τις στροφές του κινητήρα είναι γνωστή ως regulator. Στα μηχανοκίνητα οχήματα, ο έλεγχος που παρέχεται στον οδηγό του οχήματος για ρύθμιση της ισχύος ονομάζεται “πεντάλ” ρυθμιστικής δικλείδας.

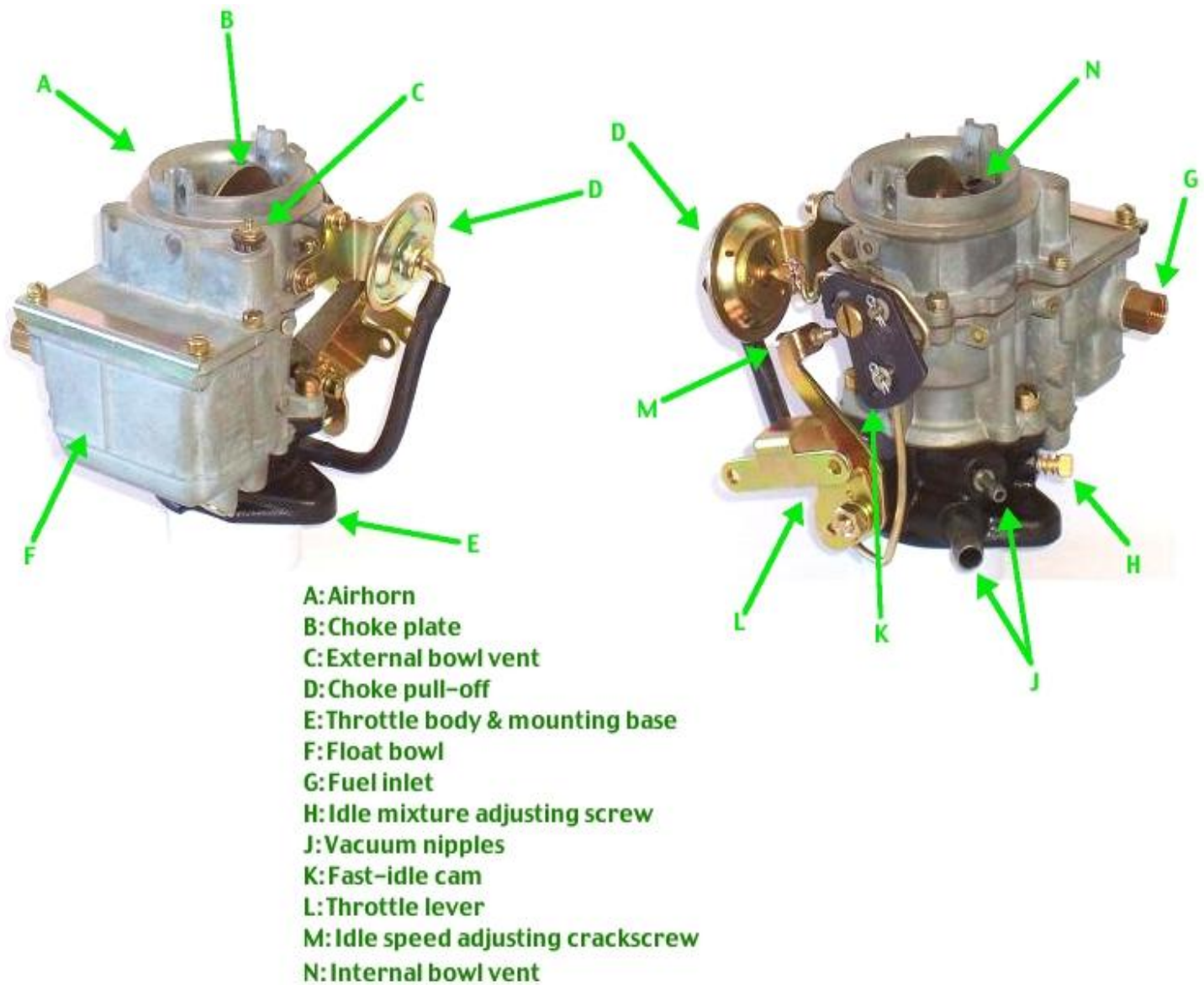
1.2 Μηχανές εσωτερικής καύσης

1.2.1 Μ.Ε.Κ. με κινητήρα otto

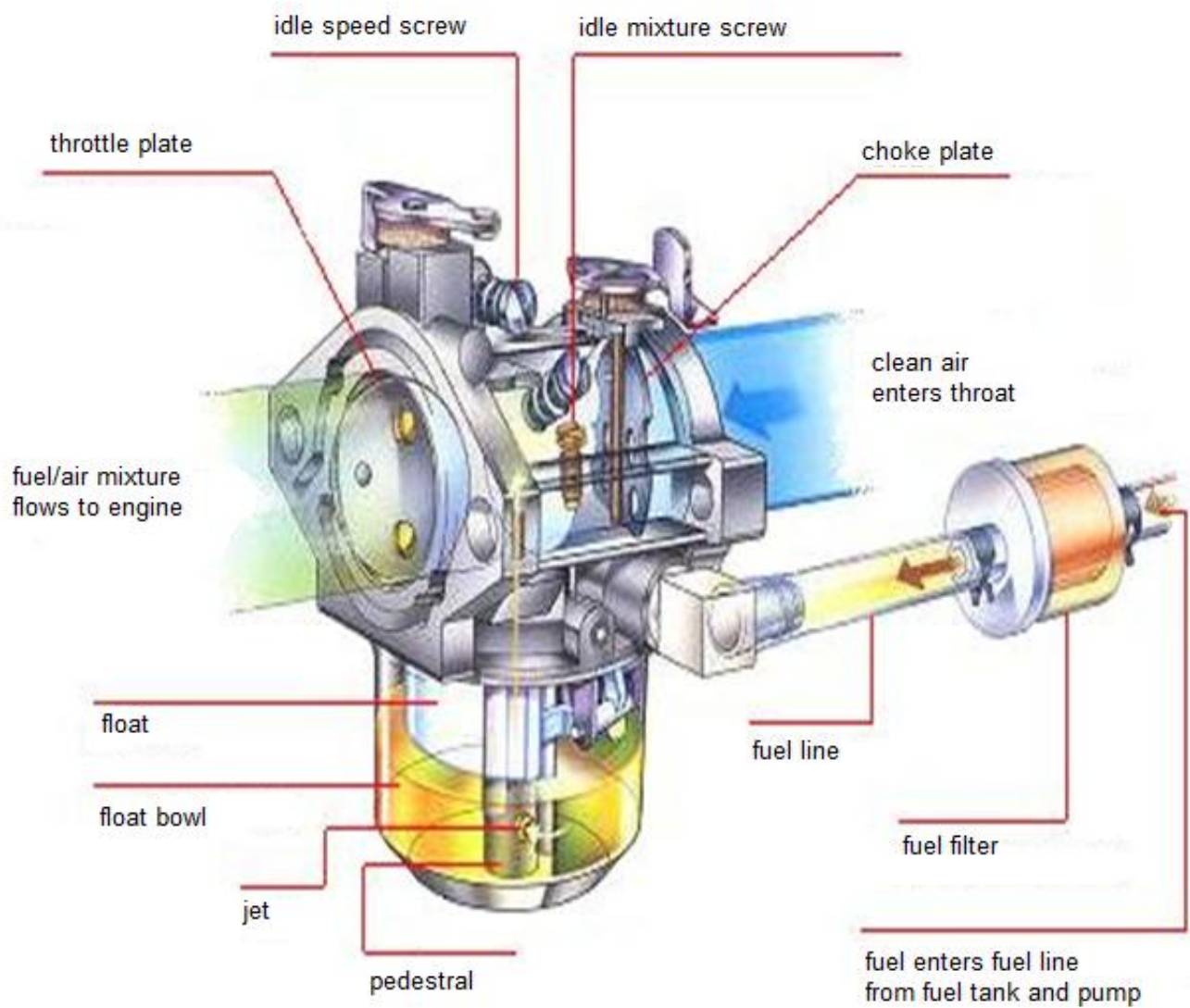
Σε μία otto Μ.Ε.Κ., η ρυθμιστική δικλείδα είναι μία βαλβίδα όπου ρυθμίζει άμεσα την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα, ελέγχοντας εμμέσως και το μείγμα αέρα – καυσίμου (π.χ. βενζίνης) που καίγεται σε κάθε κύκλο, λόγω της διατήρησης από τον εγχυτήρα ή τον εξαεριωτή σταθερού λόγου αέρα – καυσίμου. Αναλυτικότερα, η διατήρηση σταθερού λόγου αέρα – καυσίμου είναι σχετικώς εφικτή με την χρήση του εξαεριωτή, ενώ με την χρήση των πλέον σύγχρονων ηλεκτρονικών εγχυτήρων καυσίμου επιτυγχάνεται η διατήρηση του λόγου με πολύ

μεγάλη ακρίβεια, και αυτό είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την ορθή λειτουργία των καταλυτικών μετατροπέων στα αυτοκίνητα με κινητήρες otto.

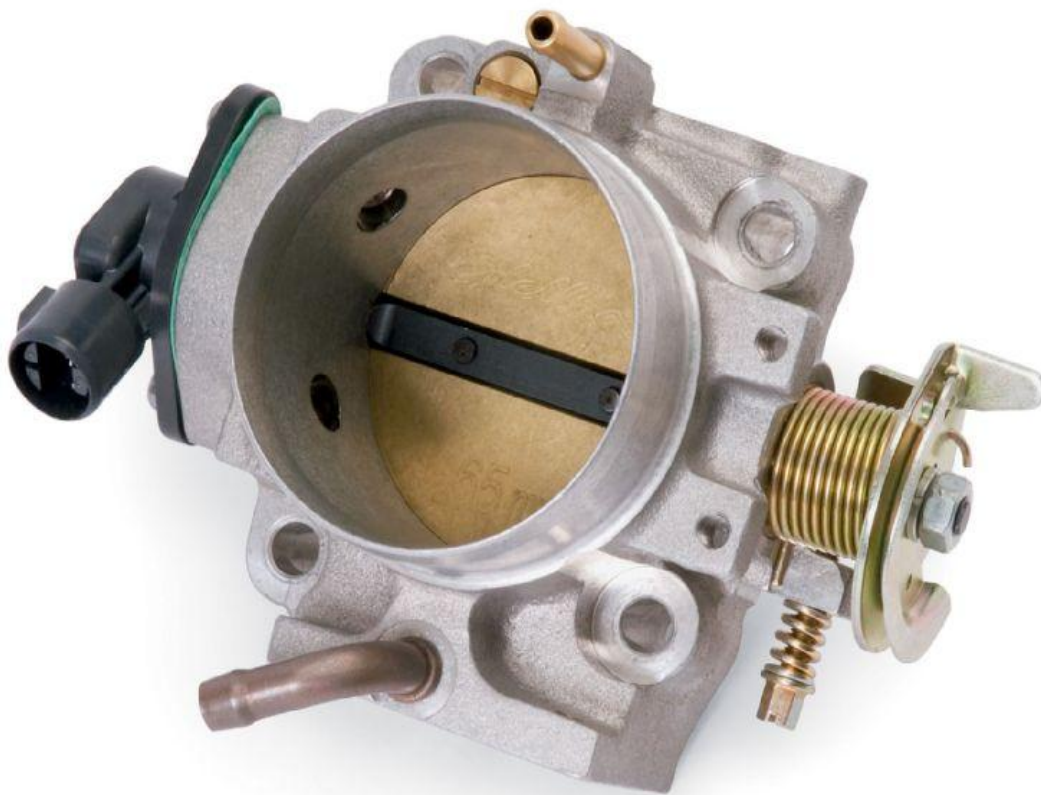
Η ρυθμιστική δικλείδα είναι μία τυπική βαλβίδα “πεταλούδας”. Σε έναν κινητήρα με ηλεκτρονικό ψεκασμό, η ρυθμιστική δικλείδα τοποθετείται στην είσοδο του οχετού εισαγωγής (intake manifold) ή συνήθως βρίσκεται σε ειδικό “μπλοκ” γνωστό με τον όρο throttle body. Σε έναν κινητήρα με εξαεριωτή, βρίσκεται τοποθετημένη μέσα σε αυτό.



Σχήμα 1.1: Τυπική διάταξη εξαεριωτή [7].



Σχήμα 1.2: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας του εξαεριοτή [8].



Σχήμα 1.3: Τυπική διάταξη “μπλοκ” ρυθμιστικής δικλείδας [9].

Όταν η “πεταλούδα” είναι πλήρως ανοικτή, ο οχετός εισαγωγής βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση περιβάλλοντος. Όταν είναι μερικώς ή ολικώς κλειστή, δημιουργείται υποπίεση στον οχετό καθώς η πίεση εισαγωγής πέφτει κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση περιβάλλοντος.

Συνήθως η ρυθμιστική δικλείδα ελέγχεται είτε μέσω ηλεκτρονικής σύνδεσης “πεντάλ” – ηλεκτροκινητήρα ελέγχου ανοίγματος της (drive by wire) είτε μέσω άμεσης μηχανικής σύνδεσης “πεντάλ” – άξονα της “πεταλούδας” μέσω ντίζας.



Σχήμα 1.4: “Μπλοκ” “πεταλούδας” μηχανικής σύνδεσης με το “πεντάλ” [10].



Σχήμα 1.5: “Μπλοκ” “πεταλούδας” ηλεκτρονικής σύνδεσης με το “πεντάλ”. Είναι φανερό η ύπαρξη ηλεκτροκινητήρα και η καλυμμένη διάταξη μειωτήρα για μεταφορά της κίνησης από το μοτέρ στον άξονα της “πεταλούδας” [11].

Στα οχήματα με κινητήρα otto και με άμεση μηχανική σύνδεση “πεντάλ” - άξονα της “πεταλούδας” μέσω ντίζας, υπάρχει σταθερή απόκριση του κινητήρα στο πάτημα του “πεντάλ”. Δεδομένο πάτημα του “πεντάλ” οδηγεί σε αντίστοιχα δεδομένο άνοιγμα της “πεταλούδας”. Από εκεί και πέρα φυσικά, αφενός για τα σύγχρονα οχήματα η μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU) μέσω της ανάγνωσης των διάφορων αισθητήρων ρυθμίζει την ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου ώστε η καύση να είναι πάντα στοιχειομετρική, αφετέρου για τα παλαιότερου τύπου οχήματα η ρύθμιση της εγχυόμενης ποσότητας καυσίμου γίνεται μηχανικά εντός του εξαεριοτή (carburetor).

Αντιθέτως στα οχήματα με κινητήρα otto και με ηλεκτρονικό έλεγχο της ρυθμιστικής δικλείδας (drive by wire), δεν υπάρχει σταθερή απόκριση του κινητήρα στο πάτημα του “πεντάλ” καθώς τώρα δεν υπάρχει άμεση σύνδεση του “πεντάλ” με την ρυθμιστική δικλείδα, αλλά παρεμβάλλεται μεταξύ τους η μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU). Έτσι η ρύθμιση της επιθυμητής ισχύος εδώ πραγματοποιείται σε στάδια. Από το πάτημα του “πεντάλ” του οδηγού στέλνεται ένα σήμα στην μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU), η οποία με την σειρά της ελέγχει άμεσα την θέση ανοίγματος της “πεταλούδας”. Αυτό σημαίνει ότι ο οδηγός δεν έχει άμεσο έλεγχο επί της “πεταλούδας”. Η μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU) είναι αυτή που τελικώς ελέγχει την πεταλούδα με σκοπό την επίτευξη συγκεκριμένης επιθυμητής λειτουργίας, όπως π.χ. την μείωση των ρύπων ή την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 1.6: Σειτ “μπλοκ” “πεταλούδας” με ηλεκτρονικό έλεγχο ρύθμισης του ανοίγματός της και κατάλληλη μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU) για τον έλεγχο όλων των σχετικών παραμέτρων, την επικοινωνία με όλους τους αισθητήρες εντός του κινητήρα και των περιφερειακών συστημάτων για την λήψη κατάλληλων αποφάσεων ρύθμισης της γωνίας ανοίγματος της “πεταλούδας” αναλογικά με το σχετικό πάτημα του “πεντάλ” από τον οδηγό του οχήματος και τις υπόλοιπες συνθήκες λειτουργίας όπως στροφές του κινητήρα, φορτίο λειτουργίας, ταχύτητα οχήματος κ.λπ [12].

1.2.2 Μ.Ε.Κ. με κινητήρα diesel

Η ισχύς εξόδου από έναν κινητήρα diesel ελέγχεται ρυθμίζοντας την ποσότητα καυσίμου (πετρελαίου) που εγχύεται στους κυλίνδρους. Επειδή οι κινητήρες αυτοί δεν χρειάζεται να ελέγχουν την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα, στερούνται ρυθμιστικής δικλείδας στην είσοδο του οχετού εισαγωγής. Εξαίρεση σε αυτή την γενική θεώρηση των κινητήρων diesel αποτελούν κινητήρες νέας τεχνολογίας, που υποχρεούνται να τηρούν συγκεκριμένα επίπεδα εκπομπών ρύπων, όπου μια ρυθμιστική δικλείδα χρησιμοποιείται για να δημιουργεί υποπίεση στον οχετό εισαγωγής, επιτρέποντας έτσι την εισροή των καυσαερίων στους κυλίνδρους με σκοπό την μείωση των θερμοκρασιών καύσης και επομένως την ελάττωση των εκπεμπόμενων NO_x.



Σχήμα 1.7: Ο ηλεκτρονικός έλεγχος της πεταλούδας σε κινητήρα diesel όπως π.χ. της Delphi ρυθμίζει την πίεση στον οχετό εισαγωγής σε κινητήρες diesel βοηθώντας να αυξηθεί ο βαθμός ανακλυκλοφορίας των καυσαερίων (exhaust gas recirculation – EGR). Η ρυθμιστική δικλείδα επίσης παρέχει χαμηλή παροχή αέρα για ομαλό σβήσιμο του κινητήρα [13].



Σχήμα 1.8: Σύνθετη ρυθμιστική δικλείδα ηλεκτρονικού ελέγχου της Delphi με αισθητήρα μη – επαφής και ηλεκτροκινητήρα συνεχούς τάσεως (DC) [13].



Σχήμα 1.9: Σύνθετη ρυθμιστική δικλείδα ηλεκτρονικού ελέγχου της Delphi με αισθητήρα μη – επαφής και ηλεκτροκινητήρα ροπής [13].

1.3 “Μπλοκ” ρυθμιστικής δικλείδας (throttle body)

Στους κινητήρες ηλεκτρονικής έγχυσης καυσίμου, το “μπλοκ” της “πεταλούδας” είναι το μέρος εκείνο του συστήματος εισαγωγής αέρα που ελέγχει την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα, σε άμεση ανταπόκριση του πατήματος του “πεντάλ” του “γκαζιού” από τον οδηγό. Το “μπλοκ” της πεταλούδας συνήθως τοποθετείται μεταξύ του φίλτρου αέρα και του οχετού εισαγωγής, και προσαρτάται πάνω του ή κοντά του ο αισθητήρας παροχής αέρα.



Σχήμα 1.10: Σύστημα εισαγωγής αέρα (Pontiac GTO). Ο αέρας αρχικά εισέρχεται και φιλτράρεται από το κωνοειδούς σχήματος φίλτρο στα δεξιά της εικόνας, έπειτα μέσω του ελαστικού κολάρου σιλικόνης μεταφέρεται στην πεταλούδα ηλεκτρονικής ρύθμισης του ανοίγματός της, και τέλος ο εισερχόμενος αέρας διανέμεται μέσω του κοινού οχετού εισαγωγής σε καθέναν από τους 8 κυλίνδρους του V8 GTO κινητήρα [14].

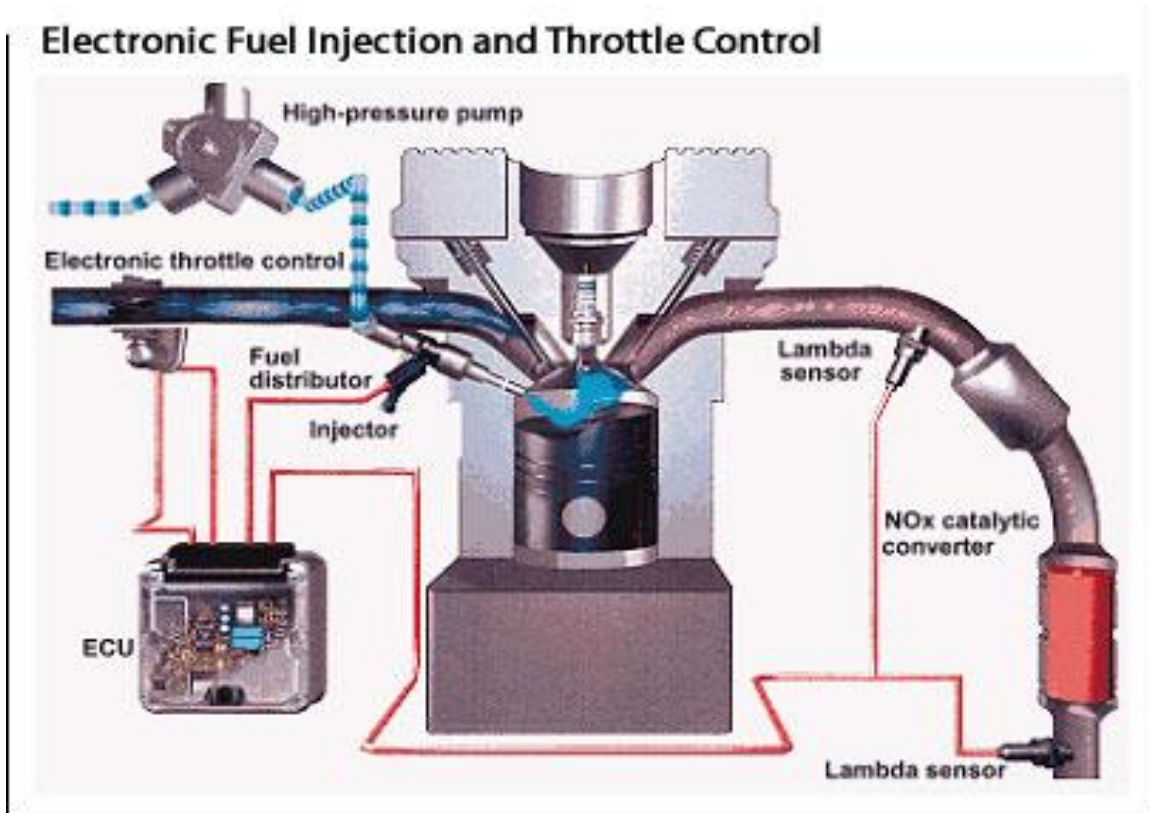
Το μεγαλύτερο εξάρτημα εντός του “μπλοκ” της “πεταλούδας” είναι ο δίσκος της (throttle plate), ο οποίος ρυθμίζει την παροχή του αέρα.



Σχήμα 1.11: Το μεγαλύτερης διάστασης κινούμενο μέρος στο μπλοκ της πεταλούδας είναι ο δίσκος της πεταλούδας. Συγκεκριμένα εδώ έχουν αφαιρεθεί οι βίδες σύνδεσής της με τον άξονά της και ο δίσκος αφαιρείται από το μπλοκ της πεταλούδας [15].

Σε πολλά αυτοκίνητα, η κίνηση του “πεντάλ” στην καμπίνα του οδηγού μεταφέρεται μέσω ντίζας για να ενεργοποιήσει τις κινούμενες διατάξεις στο “μπλοκ” της “πεταλούδας” ώστε τελικά να επιτευχθεί η περιστροφή του δίσκου. Σε αυτοκίνητα με ηλεκτρονική ρύθμιση της “πεταλούδας” (drive by wire), ένα ηλεκτρικό μοτέρ ελέγχει τις κινούμενες διατάξεις στο μπλοκ της πεταλούδας, και το πεντάλ της ρυθμιστικής δικλείδας δεν συνδέεται έτσι κατευθείαν στο μπλοκ αλλά σε έναν

αισθητήρα, ο οποίος στέλνει την σχετική γωνία του πεντάλ στην μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU). Η μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU) είναι αυτή λοιπόν που καθορίζει εδώ το άνοιγμα της πεταλούδας αναλογικά με την σχετική γωνία του πεντάλ και δεδομένα από διάφορους άλλους αισθητήρες του κινητήρα.



Σχήμα 1.12: Σχεδιάγραμμα των αισθητήρων λ προ και μετά του καταλυτικού μετατροπέα, απαραίτητων για την λήψη απόφασης της ECU για την ρύθμιση του ανοίγματος της πεταλούδας και τον ψεκασμό του καυσίμου [16].

Όταν ο οδηγός πατήσει το “πεντάλ”, ο ρυθμιστικός δίσκος περιστρέφεται εντός του “μπλοκ” της “πεταλούδας”, αυξάνοντας το άνοιγμα της βαλβίδας και επιτρέποντας έτσι την εισχώρηση περισσότερου αέρα στον οχετό εισαγωγής. Συνήθως ένας μετρητής παροχής αέρα μετράει αυτήν την αλλαγή και επικοινωνεί με την μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU). Η μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU) έπειτα αυξάνει το ποσό του καυσίμου που στέλνεται στους ηλεκτρονικούς

εγγυτήρες με σκοπό να διατηρήσει τον επιθυμητό λόγο αέρα – καυσίμου. Συχνά ένας αισθητήρας γωνίας πεταλούδας (throttle position sensor – TPS) είναι συνδεδεμένος με τον άξονα του δίσκου της πεταλούδας για να παρέχει στην ECU πληροφορίες σχετικά με το αν η πεταλούδα είναι στην κλειστή θέση, πλήρως ανοικτή ή σε κάποια ενδιάμεση θέση.



Σχήμα 1.13: Στα αριστερά αυτού του “μπλοκ” “πεταλούδας”, μηχανικής σύνδεσης με το “πεντάλ”, παρατηρείται ο αισθητήρας γωνίας “πεταλούδας” [17].

Το “μπλοκ” της “πεταλούδας” μπορεί να περιέχει επίσης βαλβίδες και ρυθμιστικές διατάξεις για τον έλεγχο της ελάχιστης παροχής εισερχόμενου αέρα κατά το πλήρες κλείσιμο της πεταλούδας. Συνήθως υπάρχει μία μικρή βάνα οδηγούμενη από ένα ηλεκτροκινητήρα (ηλεκτροβάννα), η βαλβίδα ελέγχου της ελάχιστης παροχής του αέρα (Idle Air Control Valve - IACV), την οποία

χρησιμοποιεί η μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU) για να ελέγχει την ελάχιστη παροχή εισερχόμενου αέρα στην πλήρως κλειστή θέση της ρυθμιστικής δικλείδας. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη μιας θυρίδας – καναλιού εντός του εσωτερικού τοιχώματος του αγωγού, το οποίο οδηγεί την ελάχιστη αυτή παροχή μέσω της βαλβίδας κατάντι της ρυθμιστικής δικλείδας.



Σχήμα 1.14: Είναι εμφανείς οι διάφορες ρυθμιστικές διατάξεις επίχρυσου χρώματος για τον έλεγχο μεταξύ άλλων και της ελάχιστης παροχής στην ηλεκτρονικού ελέγχου ρυθμιστική δικλείδα [18].



Σχήμα 1.15: Στο επάνω μέρος και στα δεξιά διακρίνεται η βαλβίδα ελέγχου της ελάχιστης παροχής του αέρα (Idle Air Control Valve). Επίσης διακρίνεται και η θυρίδα οδήγησης του αέρα από τον κύριο αγωγό της πεταλούδας σε αυτήν [19].



Σχήμα 1.16: Η βαλβίδα ελέγχου της ελάχιστης παροχής του αέρα (Idle Air Control Valve) έχοντας αυτή αφαιρεθεί από την θέση της στο “μπλοκ” της “πεταλούδας”, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.15 [20].

Τα περισσότερα αυτοκίνητα έχουν ένα μόνο “μπλοκ” “πεταλούδας”. Σε άλλα απαντώνται περισσότερα του ενός, ενωμένα αλυσιδωτά με συνδέσμους για να βελτιώσουν την απόκριση του αυτοκινήτου στο πάτημα του “πεντάλ”, αναφορικά πάντα με τις στροφές λειτουργίας και το φορτίο του κινητήρα αλλά και την ταχύτητα του οχήματος. Σε ακραίες περιπτώσεις, υψηλής απόδοσης αυτοκίνητα όπως η E92 BMW M3, και υψηλής απόδοσης μοτοσυκλέτες όπως η SUZUKI GSXR750 χρησιμοποιούν ξεχωριστό μπλοκ πεταλούδας για κάθε κύλινδρο, τεχνολογία συχνά αναφερόμενη ως αυτόνομα “μπλοκ” “πεταλούδας” (individual throttle bodies ή ITB’s).

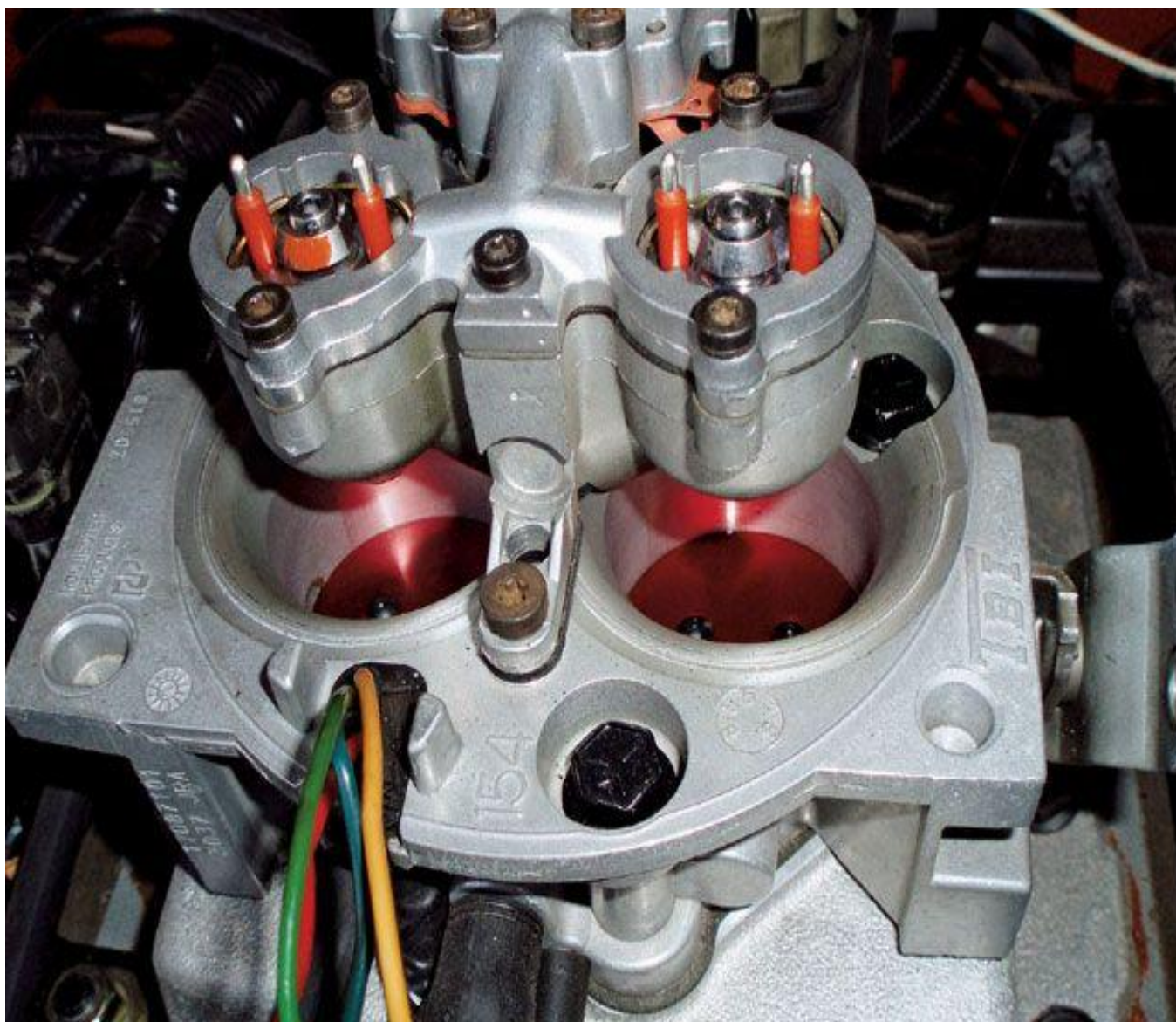


Σχήμα 1.17: Αυτόνομα “μπλοκ” “πεταλούδας” (ITB’s) στον κινητήρα της E28 BMW M3 [21].



Σχήμα 1.18: Αυτόνομα “μπλοκ” “πεταλούδας” (ITB’s) μιας SUZUKI GSXR750cc του τετράχρονου τετρακύλινδρου κινητήρα της [22].

Ο εξαεριωτής ενός κινητήρα otto είναι ο συνδυασμός της ρυθμιστικής δικλείδας και της έγχυσης καυσίμου μαζί. Στους παλαιότερης τεχνολογίας κινητήρες otto, ο εξαεριωτής ήταν η διάταξη του κινητήρα στην οποία γινόταν η ρύθμιση της παροχής του εισερχόμενου αέρα καθώς επίσης και η ταυτόχρονη μηχανική έγχυση του καυσίμου. Στον εξαεριωτή δηλαδή δημιουργείτο το καύσιμο μίγμα και σε ποσότητα αντίστοιχη του πατήματος του “πεντάλ”. Η διευκρίνιση αυτή γίνεται καθώς οι εξαεριωτές χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι και σήμερα σε μεγάλο φάσμα τεχνολογικών εφαρμογών και προϊόντων μικρότερης κυρίως κλίμακας ισχύος όπως αλυσοπρίονα, βενζινοκίνητοι κόφτες του γκαζόν, τηλεκατευθυνόμενος μοντελισμός και άλλα πολλά. Οι εξαεριωτές συνδυάζουν την χρηστικότητα του “μπλοκ” της “πεταλούδας” και του ψεκαστήρα καυσίμου σε μία κατασκευή με σκοπό να ρυθμίσουν την παροχή του αέρα και να αναμείξουν τον εισερχόμενο αυτό αέρα με το καύσιμο. Αυτοκίνητα με ψεκασμό επί του “μπλοκ” του εξαεριωτή (επονομαζόμενα TBI από την General Motors και CFI από την Ford) έχουν τοποθετημένους ψεκαστήρες καυσίμου εντός του “μπλοκ”, επιτρέποντας συνεπώς σε έναν κινητήρα παλαιότερης τεχνολογικά εποχής να μετατρέπει την εξαέρωση του καυσίμου εντός του εξαεριωτή σε ψεκασμό καυσίμου χωρίς σημαντική αλλαγή στο σχεδιασμό του κινητήρα.



Σχήμα 1.19: Χαρακτηριστικό παράδειγμα έγχυσης επί του εξαεριωτή τεχνολογίας TBI της General Motors [23].

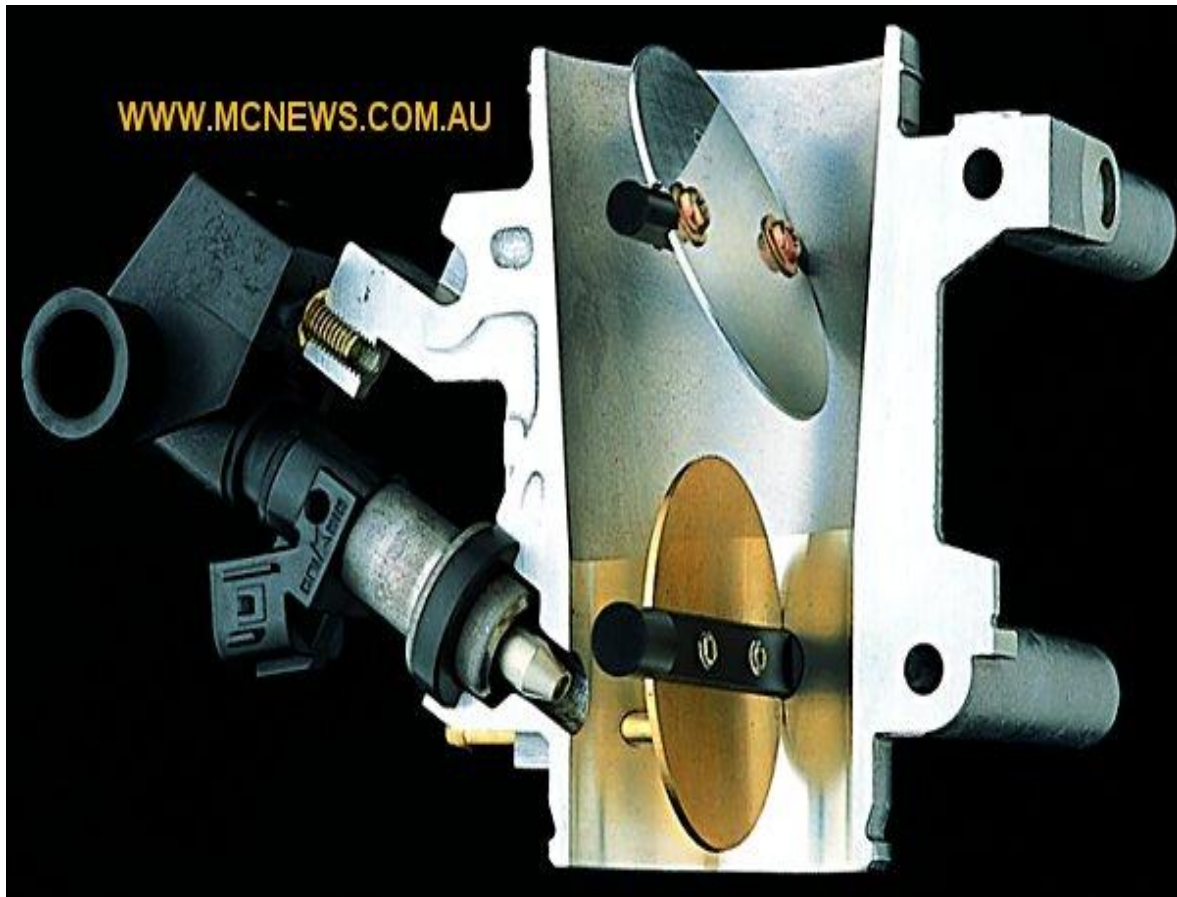


Σχήμα 1.20: Η αντίστοιχη τεχνολογία από την Ford γνωστή ως CFI. Διακρίνονται οι δύο εγχυτήρες προσαρτημένοι επί του μπλοκ του εξαεριοτή [24].

Αναφορικά με τις εξελίξεις και τα τεχνολογικά επιτεύγματα σχεδιασμού και προόδου της αυτοκίνησης και των μοτοσυκλετών, υπάρχουν πολυποίκιλες διαφοροποιήσεις στο μπλοκ της πεταλούδας και του εξαεριοτή, με στόχο διάφορους πολύ συγκεκριμένους κάθε φορά σκοπούς, όπως επίτευξη πολύ υψηλών αποδόσεων, άμεση απόκριση του κινητήρα στο πάτημα του “πεντάλ” για χαμηλές στροφές και φορτία, κλπ. Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε τα επόμενα χαρακτηριστικά Σχήματα 1.21 και 1.22.



Σχήμα 1.21: Διπλοί δίσκοι πεταλούδας ή και μονός δίσκος πεταλούδας μεγάλων διαστάσεων, για περιπτώσεις κινητήρων υψηλού κυβισμού και επιδόσεων όπως η cobra mustang, της οποίας οι δίσκοι της “πεταλούδας” (throttle plates) απεικονίζονται εδώ [25].



Σχήμα 1.22: “Μπλοκ” “πεταλούδας” σε τομή από μια μηχανή SUZUKI GSXR1000. Είναι χαρακτηριστικοί οι διπλοί δίσκοι “πεταλούδας” και η ύπαρξη επιπλέον εγχυτήρα καυσίμου επί του “μπλοκ” της “πεταλούδας”, τεχνολογίες οι οποίες εφαρμόζονται για διάφορους σκοπούς, όπως πολύ υψηλές επιδόσεις, άμεσες αποκρίσεις στο άνοιγμα του γκαζιού, ομαλό προφίλ στην ροή του εισερχόμενου αέρα, ομοιογένεια στις συνθήκες εισόδου επί του κάθε κυλίνδρου κλπ [26].

Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Ροή και συντελεστές αυτής

Η ροή μάζας διαμέσου της βαλβίδας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί βάσει της ροής συμπιεστού αερίου μέσω συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου. Θεωρούμε ότι έχουμε μονοδιάστατη ισεντροπική ροή συμπιεστού τέλει αερίου που διέρχεται διαμέσου ενεργού επιφάνειας ροής, $c_d A_v$, όπου c_d είναι ο συντελεστής εκροής (ο οποίος εξαρτάται από την τριβή και το είδος της ροής, την αποκόλληση της ροής και τις δευτερεύουσες ροές) και A_v είναι η στιγμιαία γεωμετρική επιφάνεια του ανοίγματος της βαλβίδας. Η ροή μάζας συνδέεται με τη στατική πίεση και τη στατική θερμοκρασία που ισχύουν ανάντι (δείκτης u) και τη στατική πίεση που ισχύει κατόντι (δείκτης d) του ακροφυσίου (δηλ. της στένωσης της ροής, δηλ. εδώ της βαλβίδας). Η παροχή μάζας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$\dot{m} = \frac{c_d A_v p_u}{\sqrt{RT_u}} \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (2.1)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει όταν η ροή είναι υποηχητική, όταν δηλαδή

$$p_d / p_u \geq [2 / (\gamma + 1)]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2.2)$$

Όταν η ροή είναι υπερκριτική (choked), δηλαδή έχουμε ηχητική κατάσταση στη στενότερη διατομή του ανοίγματος, δηλ. όταν ισχύει

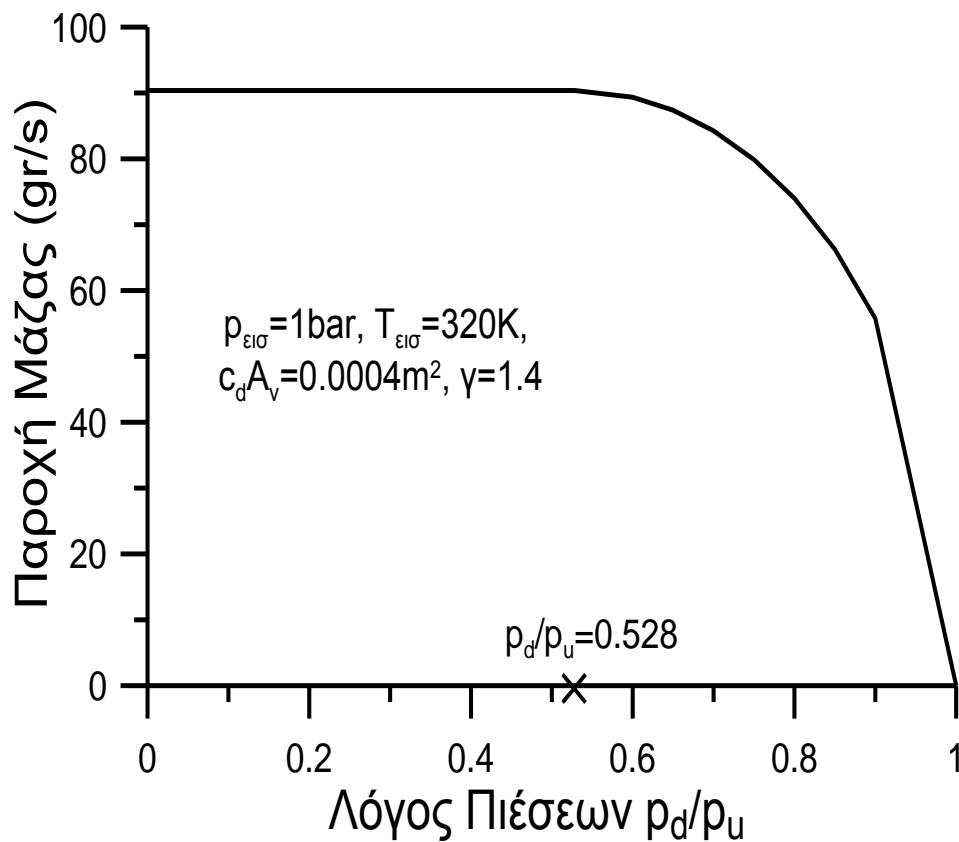
$$p_d / p_u \leq [2 / (\gamma + 1)]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2.3)$$

σε αυτήν την περίπτωση¹ η παροχή μάζας υπολογίζεται από τη σχέση

$$\dot{m}_{\text{crit}} = \frac{c_d A_V p_u}{\sqrt{RT_u}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2.4)$$

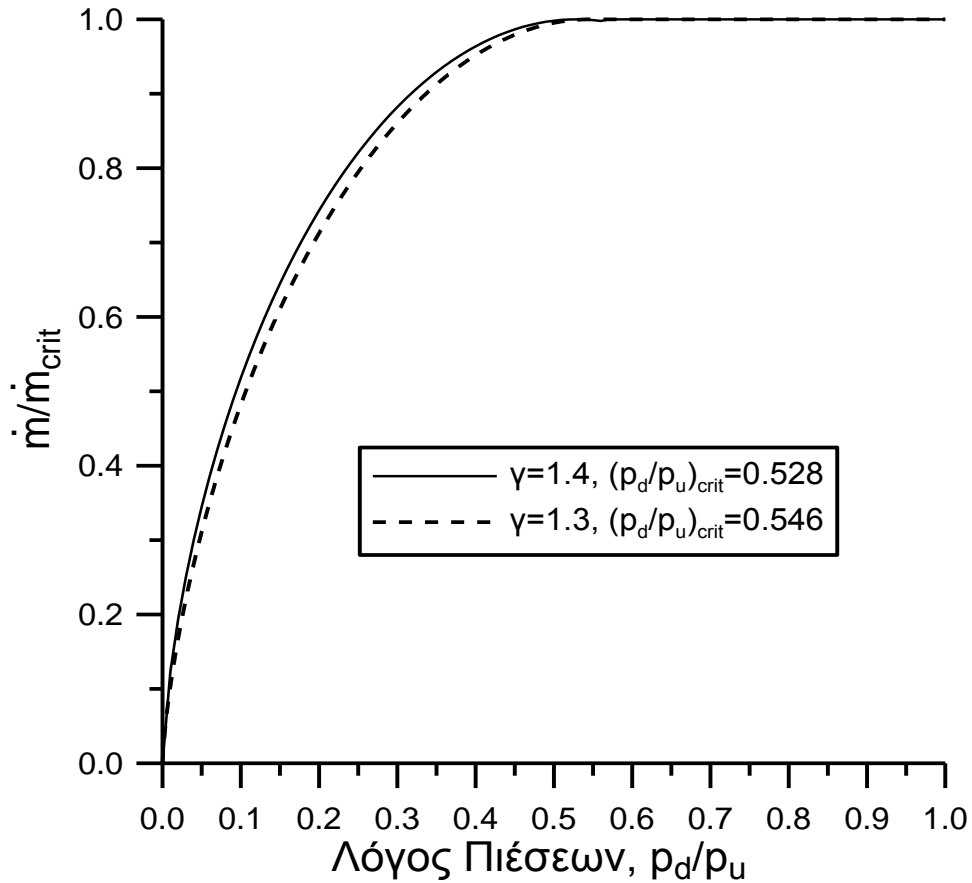
Για τη ροή εισαγωγής, p_u είναι η πίεση εισαγωγής και p_d η πίεση του κυλίνδρου.

Για τις συνθήκες εξαγωγής τα μεγέθη είναι αντίστροφα, δηλαδή p_u είναι η πίεση του κυλίνδρου και p_d η πίεση στον οχετό εξαγωγής.



Σχήμα 2.1α: Παροχή μάζας διαμέσου της βαλβίδας εισαγωγής συναρτήσει του λόγου πιέσεων ανάντι ($p_u = p_{\text{εισ}}$) και κατόντι ($p_d = p_{\text{κυλ}}$).

¹ Αυτό συμβαίνει, όταν $p_d/p_u = 0,528$ για $\gamma = 1,4$ ή $p_d/p_u = 0,546$ για $\gamma = 1,3$.



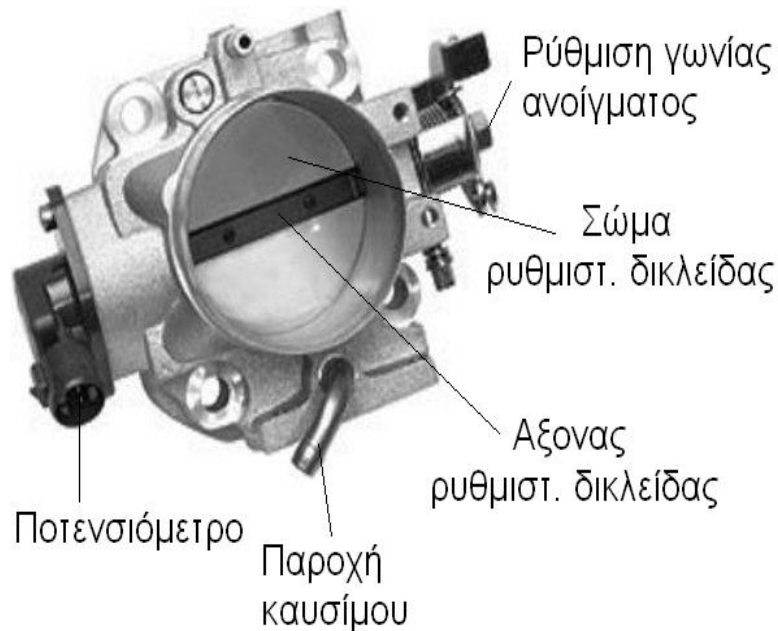
Σχήμα 2.1β: Λόγος στιγμιαίας προς κρίσιμη παροχή μάζας αέρα συναρτήσει του λόγου πιέσεων ρ_d/ρ_u .

Στο Σχήμα 2.1α απεικονίζεται η παροχή μάζας συναρτήσει του λόγου πιέσεων ρ_d/ρ_u βάσει των σχέσεων (2.1)-(2.4)², ενώ στο Σχήμα 2.1β απεικονίζεται γραφικά ο λόγος της στιγμιαίας προς την κρίσιμη τιμή παροχής μάζας, \dot{m}/\dot{m}_{crit} , συναρτήσει του λόγου πιέσεων ρ_d/ρ_u για δύο τυπικές τιμές του εκθέτη γ , δηλαδή 1,3 και 1,4.

² Παρατηρούμε ότι για ρ_d/ρ_u μικρότερο της κρίσιμης τιμής η παροχή μάζας είναι ανεξάρτητη της ρ_d και άρα σταθερή αφού, εν προκειμένω, αναφερόμαστε σε σταθερό $\rho_u=p_{εισ}$.

2.2 Ροή του αέρα διαμέσου της ρυθμιστικής δικλείδας

Η ρυθμιστική ή στραγγαλιστική δικλείδα ή «πεταλούδα», Σχήμα 2.2, αποτελεί σημαντικό υποσύστημα σε κινητήρες otto (spark ignition engines)³ ενώ σε κινητήρες diesel αυτή δεν υφίσταται. Μέσω αυτής καθορίζεται η μάζα του αέρα που θα αναρροφηθεί στον επόμενο κύκλο λειτουργίας και επομένως και η μάζα του καυσίμου που θα καεί. Άρα αυτή καθορίζει τη ρύθμιση του μίγματος, η οποία, έτσι, χαρακτηρίζεται ως ποσοτική, με δεδομένο ότι η ποιότητα του μίγματος εκφραζόμενη μέσω του λόγου ισοδυναμίας αέρα, λ_a , παραμένει περίπου σταθερή και ίση με τη στοιχειομετρική σε σύγχρονους βενζινοκινητήρες εφοδιασμένους με τριοδικό καταλύτη στην εξαγωγή. Επίσης, ανάλογα με το σχετικό της άνοιγμα, καθοριζόμενο από τη γωνία ανοίγματός της, επιτρέπει λιγότερη ή περισσότερη μάζα αέρα να διέλθει καθορίζοντας παράλληλα και την πίεση του αναρροφούμενου αέρα ή μίγματος.



Σχήμα 2.2: Σύστημα ρυθμιστικής δικλείδας σύγχρονου βενζινοκινητήρα.

³ Με πιθανή εξαίρεση στους βενζινοκινητήρες άμεσης έγχυσης, στρωματικής γόμωσης.

Όπως είδαμε στην Παράγραφο 2.1, η πτώση πίεσης που παρατηρείται κατά μήκος της ροής είναι μεταξύ άλλων και συνάρτηση της κάθετης επιφάνειας από όπου διέρχεται το αέριο. Για τη ροή μέσω της πεταλούδας θα έχουμε

$$p_{\alpha} - p_{im} = \Delta p_{th} = \zeta_{th} \rho_{\alpha} u_{th}^2 = \rho_{\alpha} \bar{c}_{\varepsilon}^2 \zeta_{th} \left(\frac{A_{\varepsilon}}{A_{th}} \right)^2 = p_u - p_d \quad (2.5)$$

με p_{α} την πίεση περιβάλλοντος (ανάντι) και p_{im} την πίεση που επικρατεί εντός της πολλαπλής εισαγωγής (κατάντι).

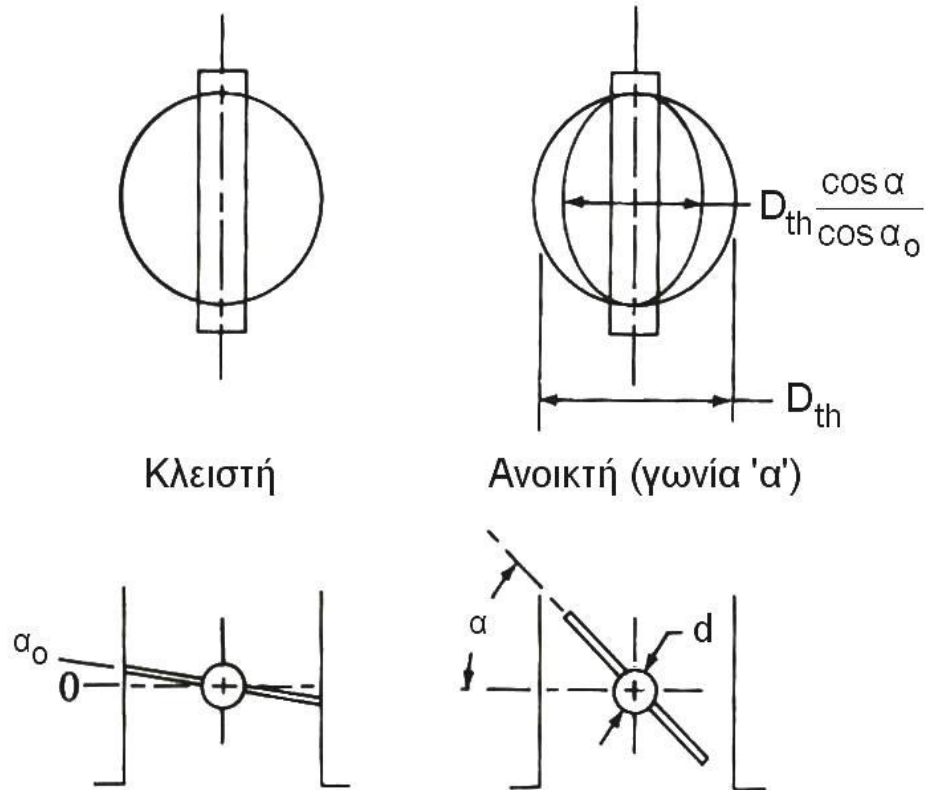
Όταν η ρυθμιστική δικλείδα δεν είναι πλήρως ανοικτή, η διατομή διέλευσης του αερίου από αυτήν είναι από τις μικρότερες που συναντάει το αέριο κατά τη ροή του μέχρι την είσοδό του στον κύλινδρο, με συνεπακόλουθο τη μεγάλη πτώση πίεσης⁴. Συνολικά, η συμμετοχή της ρυθμιστικής δικλείδας στη συνολική πτώση πίεσης εισαγωγής είναι ιδιαίτερα σημαντική, και σε περιπτώσεις οχημάτων μπορεί να φθάσει και το 90% της συνολικής. Ο λόγος μέγιστης προς ελάχιστη επιφάνεια διέλευσης αερίου στη ρυθμιστική δικλείδα είναι ιδιαίτερα μεγάλος, με μία τυπική τιμή του κοντά στο 100. Η ρυθμιστική δικλείδα χαρακτηρίζεται ως μερικώς ανοικτή, όταν η γωνία της είναι 20–45°. Τότε η ροή μπορεί να θεωρηθεί με καλή προσέγγιση δισδιάστατη. Για μεγαλύτερη γωνία ανοίγματος δεν επηρεάζεται πολύ το πεδίο ροής, αφού ουσιαστικά η ρυθμιστική δικλείδα συμπεριφέρεται σαν πλήρως ανοικτή, ενώ για μικρότερες γωνίες δεν υπάρχει καθόλου ροή αερίου. Σημειωτέον, ότι η ρυθμιστική δικλείδα θεωρείται ότι κλείνει εντελώς για γωνία συνήθως 5, 10, ή 15° (Σχήμα 2.2 αριστερά). Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ρυθμιστικής δικλείδας φαίνονται στο Σχήμα 2.2. Μία τέτοιου τύπου «πεταλούδα» πάντως δημιουργεί, εν γένει, τρισδιάστατο πεδίο ροής.

Το αέριο, κατ' αρχήν, επιταχύνεται καθώς διέρχεται από τον εξαεριωτή (καρμπυρατέρ)⁵, ενώ αποκολλάται στις γωνίες του αγωγού εισόδου. Στη συνέχεια, διαχωρίζεται στις δύο πλευρές της ρυθμιστικής δικλείδας. Η ροή μετά τη ρυθμιστική

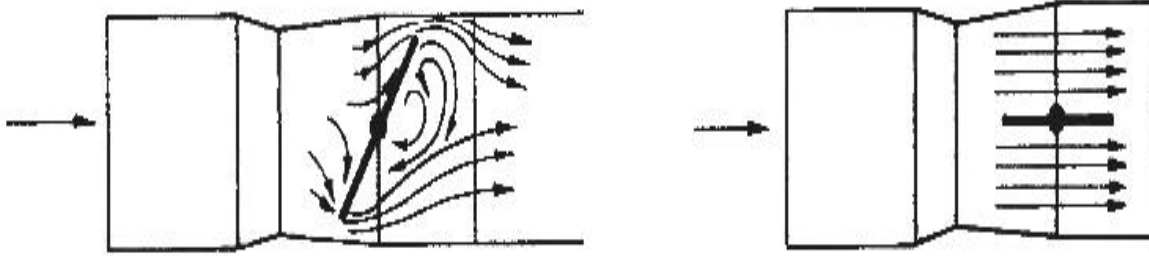
⁴ Μπορεί να φθάσει ακόμα και τα 0,5 bar.

⁵ Εδώ και αρκετά χρόνια, σε όλους του κινητήρες οχημάτων, οι εξαεριωτές έχουν αντικατασταθεί από συστήματα ηλεκτρονικά ελεγχόμενης έγχυσης, συνήθως πολλαπλού σημείου, δηλ. με έγχυση βενζίνης λίγο πριν τη βαλβίδα εισαγωγής κάθε κυλίνδρου. Αντιθέτως, ο εξαεριωτής συνεχίζει να υφίσταται σε κινητήρες otto πωχού μίγματος, μεγαλύτερων διαστάσεων, συνήθως βιομηχανικής εφαρμογής.

δικλείδα αποτελείται από δύο δίνες που περιστρέφονται με αντίθετη φορά. Τα ρεύματα αέρα στις δίνες αυτές πλησιάζουν την ηχητική κατάσταση κατά το μερικό άνοιγμα της πεταλούδας. Δεν υπάρχει ουσιαστικά ανάμιξη των δύο ρευμάτων, και γι' αυτόν το λόγο υπάρχει περίπτωση να παρατηρηθεί στο μίγμα ανομοιομορφία στην κατανομή των ατμών καυσίμου και αέρα μετά τη ρυθμιστική δικλείδα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ροής φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Γεωμετρία ρυθμιστικής δικλείδας (d: διάμετρος άξονα πεταλούδας, D_{th}: διάμετρος αγωγού πεταλούδας, α: γωνία ανοίγματος, α₀: γωνία κλεισίματος ρυθμιστικής δικλείδας >0°).



Σχήμα 2.4 Πεδίο ροής πριν και μετά τη ρυθμιστική δικλείδα για μερικό (αριστερά) και πλήρες (δεξιά) άνοιγμά της.

Εξετάζοντας τη ροή του αερίου διαμέσου της ρυθμιστικής δικλείδας, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα παρακάτω:

Ο άξονας της ρυθμιστικής δικλείδας επηρεάζει την επιφάνεια διέλευσης και επομένως και τη ροή, όντας σημαντικής (και πάντως μη-αμελητέας) διάστασης.

Ο συντελεστής εκροής της ρυθμιστικής δικλείδας παίρνει μικρότερες τιμές από αυτόν ενός συγκλίνοντος- αποκλίνοντος ακροφυσίου και εξαρτάται από τη γωνία ανοίγματος, το λόγο πίεσης και τον τοπικό αριθμό Reynolds.

Υπάρχει μία μικρή διαρροή αερίου ακόμα και όταν η ρυθμιστική δικλείδα είναι πλήρως κλειστή. Αυτή οφείλεται σε κατασκευαστικές ανοχές και μπορεί να πάρει σημαντικές τιμές για μικρά ανοίγματα.

Η πτώση πίεσης στη ρυθμιστική δικλείδα υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, οι οποίες δεν είναι σταθερές ακόμα και για σταθερές στροφές και φορτίο, είναι μικρότερη από αυτήν της πλήρως μόνιμης ροής.

Το βασικό μέγεθος για την εύρεση της πτώσης πίεσης διαμέσου της στραγγαλιστικής δικλείδας είναι η επιφάνεια ροής του αερίου.

Η ολική κάθετη επιφάνεια διέλευσης του αέρα είναι

$$A_{th} = \frac{\pi D_{th}^2}{4} - \frac{D_{th}^2}{2} \sin^{-1} \left(\frac{d}{D_{th}} \right) - \frac{d}{2} \sqrt{D_{th}^2 - d^2} - \frac{\pi D_{th}^2}{4} \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} + \frac{D_{th}^2}{2} \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \sin^{-1} \left(\frac{d}{D_{th}} \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right) + \frac{d}{2} \sqrt{D_{th}^2 - \frac{\cos^2 \alpha_0}{\cos^2 \alpha} d^2} \quad (2.6a)$$

Αν αδιαστατοποιήσουμε τη σχέση (2.5) με τη διατομή του αγωγού της ρυθμιστικής δικλείδας, θα πάρουμε την τελική έκφραση της επιφάνειας A_{th}

$$\frac{A_{th}}{\pi D_{th}^2 / 4} = \frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \right) + \frac{2}{\pi} \left[\frac{\beta}{\cos \alpha} \sqrt{(\cos^2 \alpha - \beta^2 \cos^2 \alpha_0)} + \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \sin^{-1} \left(\frac{\beta \cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right) - \beta \sqrt{(1 - \beta^2)} - \sin^{-1} \beta \right] \quad (2.6\beta)$$

όπου $\beta = d/D_{th}$ είναι ο λόγος της διαμέτρου του άξονα της ρυθμιστικής δικλείδας προς τη διάμετρο του αγωγού της ρυθμιστική δικλείδας.

Η A_{th} παίρνει τη μέγιστη τιμή της ($\approx \pi D_{th}^2 / 4 - d D_{th}$), δηλαδή η ρυθμιστική δικλείδα είναι πλήρως ανοικτή, όταν μηδενίζεται η ποσότητα εντός της πρώτης ρίζας στο δεύτερο όρο του δεξιού μέλους της εξίσωσης (2.6). Τότε ισχύει η σχέση:

$$\cos^2 \alpha = \beta^2 \cos^2 \alpha_0 \Rightarrow \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} = \beta \Rightarrow \alpha = \cos^{-1}(\beta \cos \alpha_0) \quad (2.7)$$

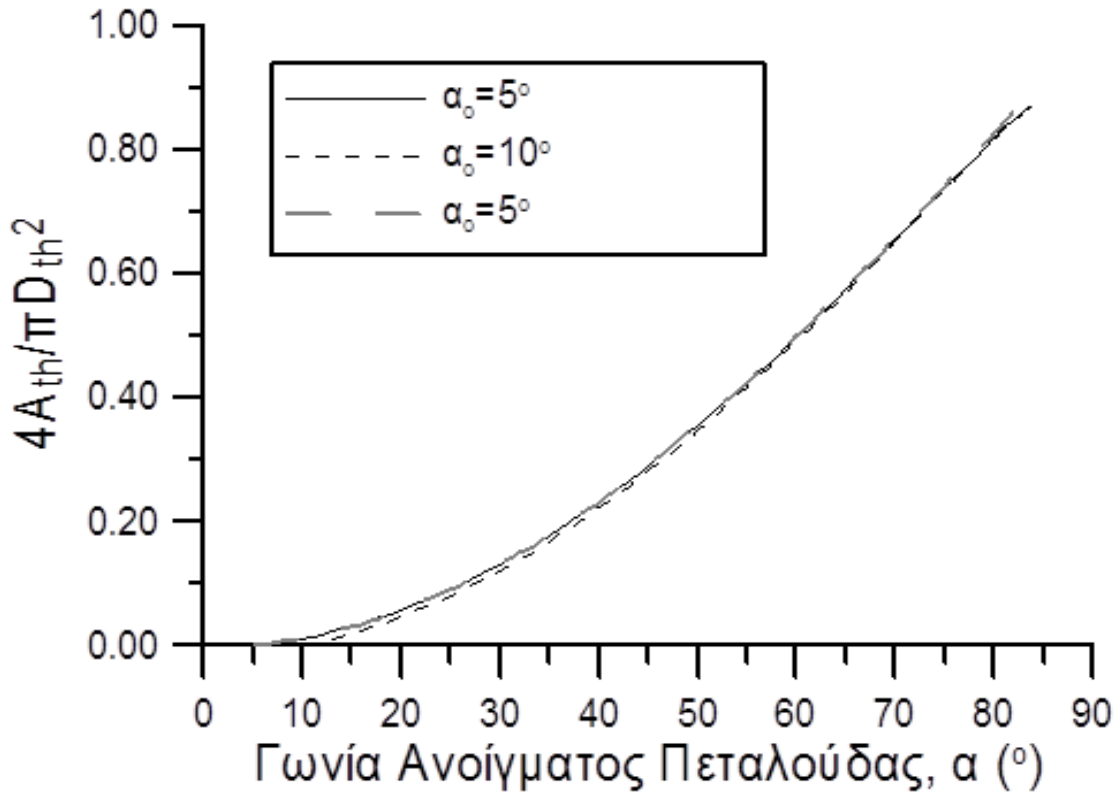
Αν αμελήσουμε τη διάμετρο του άξονα της ρυθμιστικής δικλείδας, δηλαδή θεωρήσουμε ότι $d \approx 0$, η σχέση (2.6) θα γίνει

$$\frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = 1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \quad (2.8)$$

Στο Σχήμα 2.5 δίνεται γραφική παράσταση του ποσοστού της ελεύθερης επιφάνειας της ρυθμιστικής δικλείδας, εξίσωση (2.6), για $\beta=0,1$ και για γωνίες

κλεισίματος $\alpha_0=5^\circ$ και 10° . Βλέπουμε ότι η επιφάνεια διαφοροποιείται ελάχιστα με το α_0 , στοιχείο που είναι επιθυμητό.

Επίσης, όπως αναμενόταν, δεν υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα σε γωνία ανοίγματος πεταλούδας και επιφάνεια ροής. Η προσεγγιστική σχέση (2.8) δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά στα ακριβή της σχέσης (4.2). Ακόμα, για διαφορετικές τιμές του λόγου β δεν παρατηρείται ουσιαστική διαφοροποίηση.



Σχήμα 2.5 Ποσοστό ελεύθερης επιφάνειας ρυθμιστικής δικλείδας για $\beta=d/D_{th}=0,1$ (σχέση (2.6)).

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της επιφάνειας ροής διαμέσου της ρυθμιστικής δικλείδας, που έχει πιο απλή μορφή, είναι ο παρακάτω

$$\frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = 1 - \cos(c_0 \alpha + c_1) + \frac{4A_o}{\pi D_{th}^2} \quad (2.9)$$

όπου οι παράμετροι c_0 και c_1 δείχνουν την απόκλιση της πραγματικής γωνίας ανοίγματος α , λόγω κατασκευαστικών ανοχών, και η A_0 είναι η επιφάνεια διαρροής όταν η ρυθμιστική δικλείδα είναι πλήρως κλειστή.

Υπάρχουν ακόμα απλούστερες εξισώσεις για τον υπολογισμό αυτής της επιφάνειας, οι οποίες έχουν μία απόκλιση περίπου 2% από την πραγματική τιμή. Αυτές μπορεί να είναι πολυωνυμικές δεύτερης τάξης ως προς α

$$\frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = c_0 + c_1 \alpha + c_2 \alpha^2 \quad (2.10)$$

ή ως προς $\cos \alpha$

$$\frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = c_0 + c_1 \cos \alpha + c_2 \cos^2 \alpha \quad (2.11)$$

με τους οι συντελεστές c_i ($i=0-2$) να ορίζονται όπως στη σχέση (2.9).

Μία αριθμητική εφαρμογή της (2.11) είναι π.χ. η εξής

$$\frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = (0.23\alpha^2 - 2.275\alpha - 0.2215) \times 10^{-4} \frac{1}{c_{d,th} D_{th}^2} \quad (2.12)$$

Από αυτήν τη σχέση υπολογίζουμε ουσιαστικά την ενεργό επιφάνεια της ρυθμιστική δικλείδας. Η γωνία α σε αυτήν την περίπτωση δίνεται σε μοίρες.

Η παροχή μάζας του αέρα διαμέσου της ρυθμιστικής δικλείδας μπορεί να υπολογιστεί από σχέσεις για ισεντροπική ροή συμπιεστού αερίου μέσω συγκλίνοντος-αποκλίνοντος ακροφυσίου, όπως είδαμε και στην Παράγραφο 2.1:

$$\dot{m}_{th} = \frac{c_{d,th} A_{th} p_u}{\sqrt{RT_u}} \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (2.13)$$

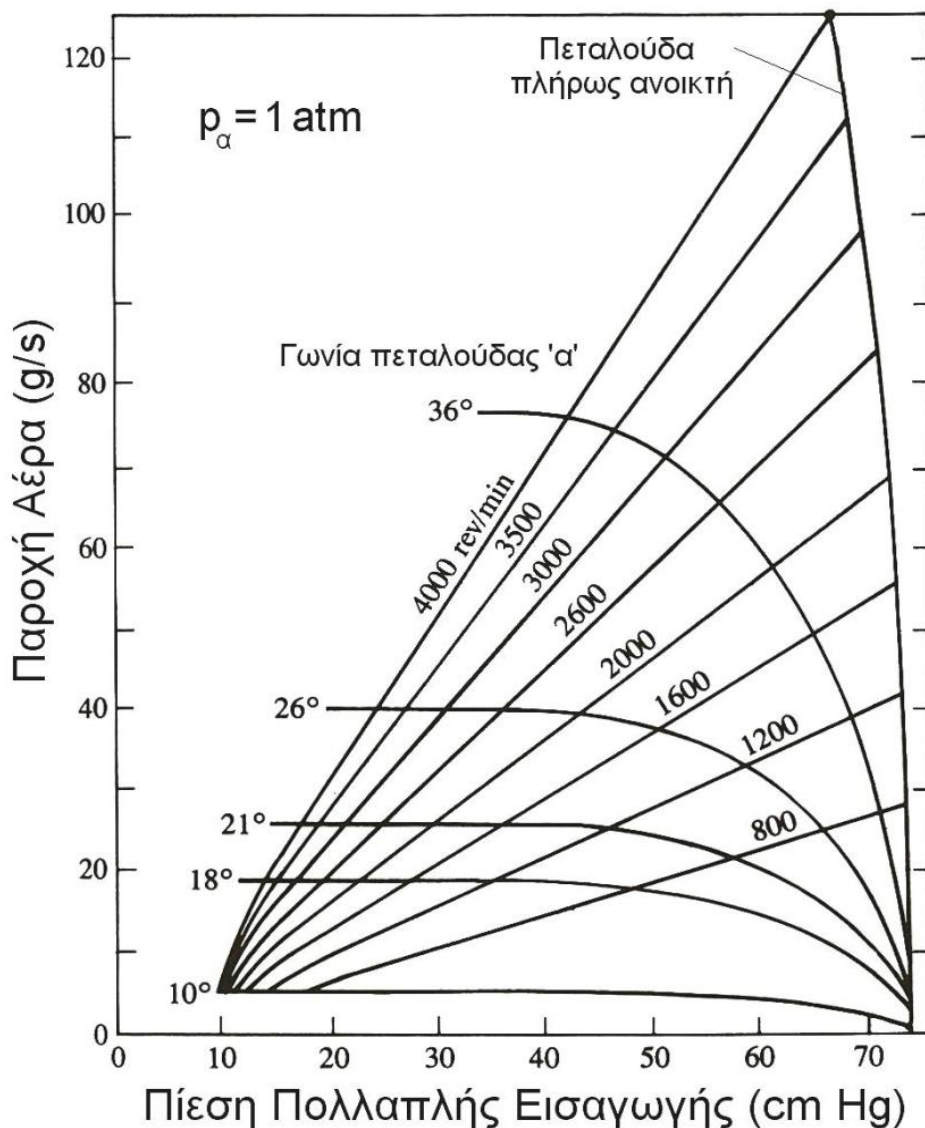
όπου p_u , T_u είναι η πίεση και θερμοκρασία ανάντι της πεταλούδας ($\approx p_\alpha, T_\alpha$), p_d η πίεση κατάντι (=πίεση πολλαπλής εισαγωγής, p_{im} , βλ. Παράγραφο 2.1) και $c_{d,th}$ ο

συντελεστής εκροής που εξαρτάται από την επιφάνεια A_{th} και πρέπει να υπολογιστεί πειραματικά. Όταν η ροή γίνει διηχητική, ισχύει

$$p_d / p_u = [2 / (\gamma + 1)]^{\gamma / (\gamma - 1)} \quad (2.14)$$

Τότε, η παροχή μάζας διαμέσου της στραγγαλιστικής δικλείδας είναι ανεξάρτητη της πίεσης της πολλαπλής εισαγωγής και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\dot{m}_{th,crit} = \frac{c_{d,th} A_{th} p_u}{\sqrt{RT_u}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (2.15)$$



Σχήμα 2.6 Επίδραση της πίεσης της πολλαπλής εισαγωγής στην παροχή αέρα διαμέσου στραγγαλιστικής δικλείδας για διάφορες γωνίες ανοίγματός της και ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα (rpm) (8-κύλινδρος κινητήρας, $V_H = 4,7$ L). Υπενθυμίζεται ότι $76 \text{ cm Hg} \equiv 1 \text{ atm}$.

Η σχέση της παροχής μάζας, \dot{m}_{th} , με τη γωνία α , την πίεση εισόδου στον οχετό p_u και τις στροφές n , δίνεται στο Σχήμα 2.6. Εδώ βλέπουμε ότι όταν η πίεση στον οχετό εισαγωγής, p_{im} , είναι μικρότερη από μία κρίσιμη τιμή ($= 0,528p_\alpha = 40,1 \text{ cmHg}$), η παροχή μάζας για δεδομένη γωνία, α , είναι ανεξάρτητη της πίεσης και

των στροφών (δηλ. οι καμπύλες ανοίγματος 'α' είναι ευθείες, βλ. και Σχήμα 2.1α) διότι η ροή τότε έχει γίνει διηχητική.

Κάθε καμπύλη σταθερού ανοίγματος πεταλούδας αντιστοιχεί σε ένα διάγραμμα του Σχήματος 2.1α. Παρατηρούμε ότι όσο είναι μικρότερο το άνοιγμα 'α' της γωνίας τόσο πιο πλατιά είναι η καμπύλη παροχής αέρα (εξάλλου, η καμπύλη για πλήρες άνοιγμα είναι σχεδόν κάθετη), αφού σύμφωνα με την (2.5) έχουμε μεγαλύτερη πτώση πίεσης κατά μήκος της πεταλούδας⁶ και άρα μεγάλη διαφορά $p_u - p_d$ ή χαμηλότερες τιμές p_d , δηλαδή p_{im} .

⁶ Και μάλιστα με ισχυρή εξάρτηση από την ταχύτητα περιστροφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 και υποδηλώνει η (2.5).

Κεφάλαιο 3 – Υπολογιστική διερεύνηση

3.1. Εισαγωγικό μέρος

Στο τμήμα αυτό της διπλωματικής εργασίας θα διερευνήσουμε τους μαθηματικούς τύπους που ανακύπτουν από το 2^ο Κεφάλαιο της εργασίας, το θεωρητικό δηλαδή μέρος της. Θα αναφέρουμε όλους τους σχετικούς τύπους υπολογισμού των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν γύρω από την πτώση πίεσης της στραγγαλιστικής δικλείδας, τύπους που έχουν να κάνουν κυρίως με τον υπολογισμό της επιφάνειας ροής διαμέσου της ρυθμιστικής δικλείδας και τύπους υπολογισμού της παροχής μάζας του εισερχόμενου αέρα σε αυτήν. Θα υπολογίσουμε τα αποτελέσματα των τύπων αυτών για τις διάφορες παραμέτρους τους, όπως οι μοίρες γωνίας ανοίγματος της πεταλούδας και οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα. Στην συνέχεια θα αποδώσουμε τα αποτελέσματα αυτά με την μορφή γραφημάτων για εποπτικότερη μελέτη αλλά και για το συσχετισμό τους, καθώς επίσης και για σύγκριση με αυτά του θεωρητικού μέρους. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι για την επεξεργασία των σχετικών τύπων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται χρήση γλώσσας προγραμματισμού σε προσωπικό Η/Υ. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι η Visual Fortran 6.5.

Στην Παράγραφο 3.2 γίνεται η διερεύνηση των εξισώσεων σχετικά με την επιφάνεια της ροής, πραγματικής και ανηγμένης, της ρυθμιστικής δικλείδας. Στην Παράγραφο 3.3 γίνεται διερεύνηση των εξισώσεων σχετικά με την παροχή μάζας του αέρα, υποηχητική ή διηχητική, της ρυθμιστικής δικλείδας. Τέλος στην Παράγραφο 3.4. γίνεται η διερεύνηση ενός συγκεντρωτικού τύπου υπολογισμού της παροχής μάζας του αέρα συναρτήσει της πίεσης του οχετού εισαγωγής

παραμετρικά με την αρχική γωνία της πεταλούδας και των στροφών λειτουργίας του κινητήρα.

3.2. Διερεύνηση των εξισώσεων υπολογισμού της επιφάνειας ροής της ρυθμιστικής δικλείδας.

Ανατρέχοντας στο θεωρητικό τμήμα της διπλωματικής εργασίας, βρίσκουμε συγκεντρωτικά τρεις τύπους υπολογισμού της ανηγμένης επιφάνειας ροής δια μέσω της ρυθμιστικής δικλείδας.

Έναν ακριβή τύπο υπολογισμού της ανηγμένης επιφάνειας, έναν δηλαδή πολύπλοκο τύπο που λαμβάνει υπόψιν πολλά μεγέθη και με σύνθετο τρόπο εξάρτησής τους, και που έχει προκύψει από την πλήρη μελέτη του φαινομένου ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μεγέθη του. Ο τύπος είναι:

$$\frac{A_{th}}{\pi D_{th}^2 / 4} = \frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_o} \right) + \frac{2}{\pi} \left[\frac{\beta}{\cos \alpha} \sqrt{(\cos^2 \alpha - \beta^2 \cos^2 \alpha_o)} + \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_o} \sin^{-1} \left(\frac{\beta \cos \alpha_o}{\cos \alpha} \right) - \beta \sqrt{1 - \beta^2} - \sin^{-1} \beta \right] \quad (3.1)$$

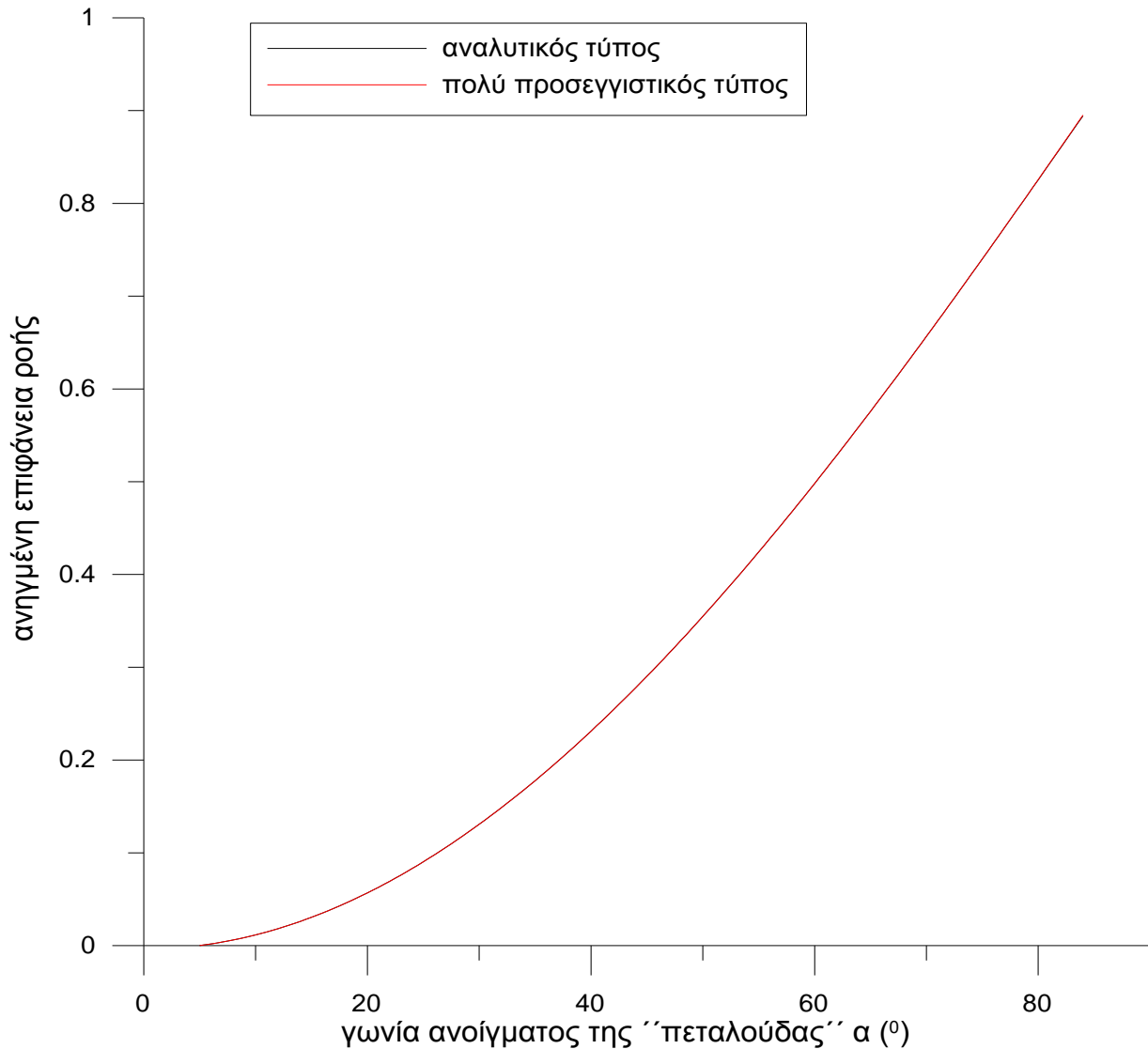
Έναν προσεγγιστικό τύπο απλούστερων παραστάσεων και μεγεθών, περισσότερο πειραματική – υπολογιστική προσπάθεια απόδοσης του μεγέθους της ανηγμένης επιφάνειας με έναν πιο εύκολο και άμεσο τύπο. Ο τύπος είναι:

$$\frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = c_o + c_1 \alpha + c_2 \alpha^2 \quad (3.2)$$

Τέλος έναν πολύ προσεγγιστικό τύπο, ακόμα απλούστερης δομής και λιγότερων εμπλεκόμενων μεγεθών, πρακτικά δημιουργήμα απλοποίησης του αναλυτικού τύπου (3.1) βάσει παραδοχών, όπως φάνηκε και από το δεύτερο Κεφάλαιο. Ο τύπος είναι:

$$\frac{4A_{th}}{\pi D_{th}^2} = 1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \quad (3.3)$$

“Τρέχοντας” τους δύο αυτούς τύπους (τον αναλυτικό και τον πολύ προσεγγιστικό δηλαδή) στον υπολογιστικό κώδικα και τοποθετώντας τα αποτελέσματα σε ένα διάγραμμα, βλέπουμε ότι και οι δύο συμπίπτουν απολύτως:



Σχήμα 3.1: Αναλυτικός και πολύ προσεγγιστικός τύπος υπολογισμού της ανηγμένης επιφάνειας ροής της στραγγαλιστικής δικλείδας.

Ο αναλυτικός τύπος είναι σχεδιασμένος με την μαύρη γραμμή, ενώ ο πολύ προσεγγιστικός με την κόκκινη. Όπως παρατηρούμε, οι δύο γραφικές παραστάσεις πρακτικά συμπίπτουν, για όλο το εύρος των μοιρών ανοίγματος της “πεταλούδας”.

Αξίζει να σημειωθεί πως το εύρος των μοιρών ανοίγματος της “πεταλούδας” διαμορφώνεται στον άξονα των X από 5° έως 84° . Αυτό συμβαίνει διότι πρακτικά λόγω γεωμετρικών περιορισμών κατασκευής της ρυθμιστικής δικλείδας, πλήρως κλειστή “πεταλούδα” απαντάται περί των 5° , ενώ το πλήρες άνοιγμά της βρίσκεται περί των 84° . Αναλογικά τώρα, στον άξονα των Y βρίσκουμε τιμές ανηγμένης επιφάνειας εύρους $0 - 90\%$. Αυτό συμβαίνει διότι ενώ στην πλήρως κλειστή θέση, δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια ροής οπότε και συναντάμε το 0% , στην πλήρως ανοικτή θέση η ελεύθερη δημιουργούμενη επιφάνεια είναι μικρότερη της ολικής επιφάνειας του αγωγού της “πεταλούδας” οπότε και συναντάμε ένα κλάσμα μεγέθους περί το 90% όπως ακριβώς στο διάγραμμά μας. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης του άξονα περιστροφής του δίσκου της “πεταλούδας” ο οποίος καταλαμβάνει μόνιμα ένα μέρος της συνολικής επιφάνειας επί του εσωτερικού του αγωγού της ρυθμιστικής δικλείδας.

Έχουμε λοιπόν την ανάγκη εύρεσης ενός προσεγγιστικού τύπου υπολογισμού της ανηγμένης επιφάνειας ροής, μιας ενδιάμεσης δηλαδή πολυπλοκότητας εξαρτησιακών σχέσεων των μεγεθών, ενός τύπου αρκετά κοντά στο αναλυτικό μοντέλο. Και αυτό στο πλαίσιο διερεύνησης για αντικατάσταση του προσεγγιστικού (υπολογιστικής φύσεως) τύπου, ο οποίος απαιτεί και τον ορισμό των τριών σταθερών c_0 , c_1 και c_2 . Παρακάτω περιγράφουμε αυτήν ακριβώς την διαδικασία που θα ακολουθήσουμε για την δημιουργία αυτού του προσεγγιστικού μοντέλου.

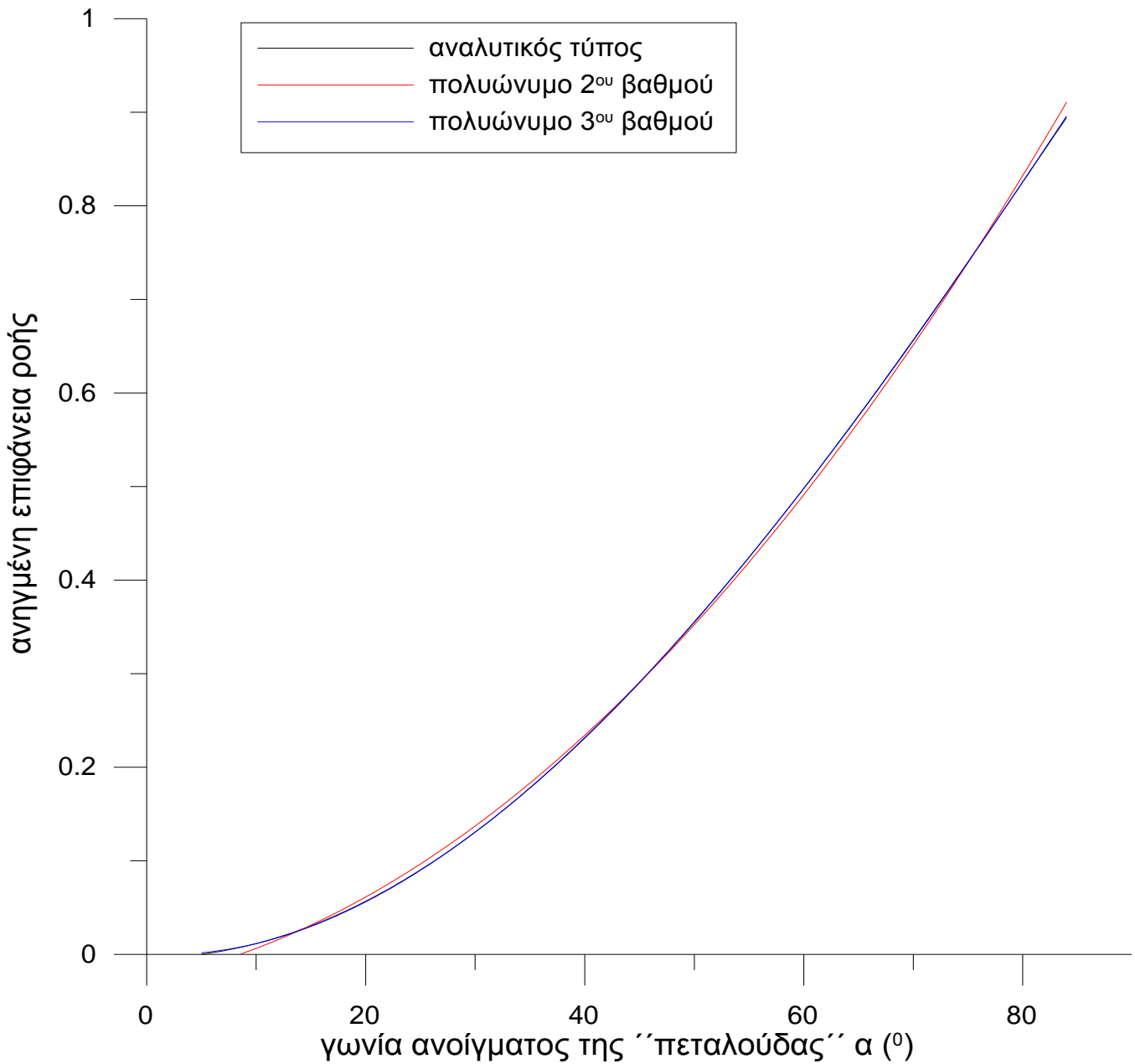
Επί του γραφήματος του πλήρη τύπου ανηγμένης επιφάνειας ροής, βρίσκουμε τις πολυωνυμικές προσεγγίσεις $2^{ου}$ και $3^{ου}$ βαθμού αντίστοιχα. Το πολυώνυμο $2^{ου}$ βαθμού είναι:

$$y = -0.02732258282 + 0.002330598016 \cdot x + 0.0001052106274 \cdot x^2 \quad (3.4)$$

Αντιστοίχως το πολυώνυμο $3^{ου}$ βαθμού είναι:

$$y=0.0007750609898-0.0007232550257 \cdot x+0.0001868660875 \cdot x^2 -6.116513864 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 \quad (3.5)$$

Έτσι λοιπόν δημιουργούμε ένα καινούργιο γράφημα για σύγκριση του αναλυτικού τύπου με την πολυωνυμική προσέγγιση 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού αντίστοιχα:



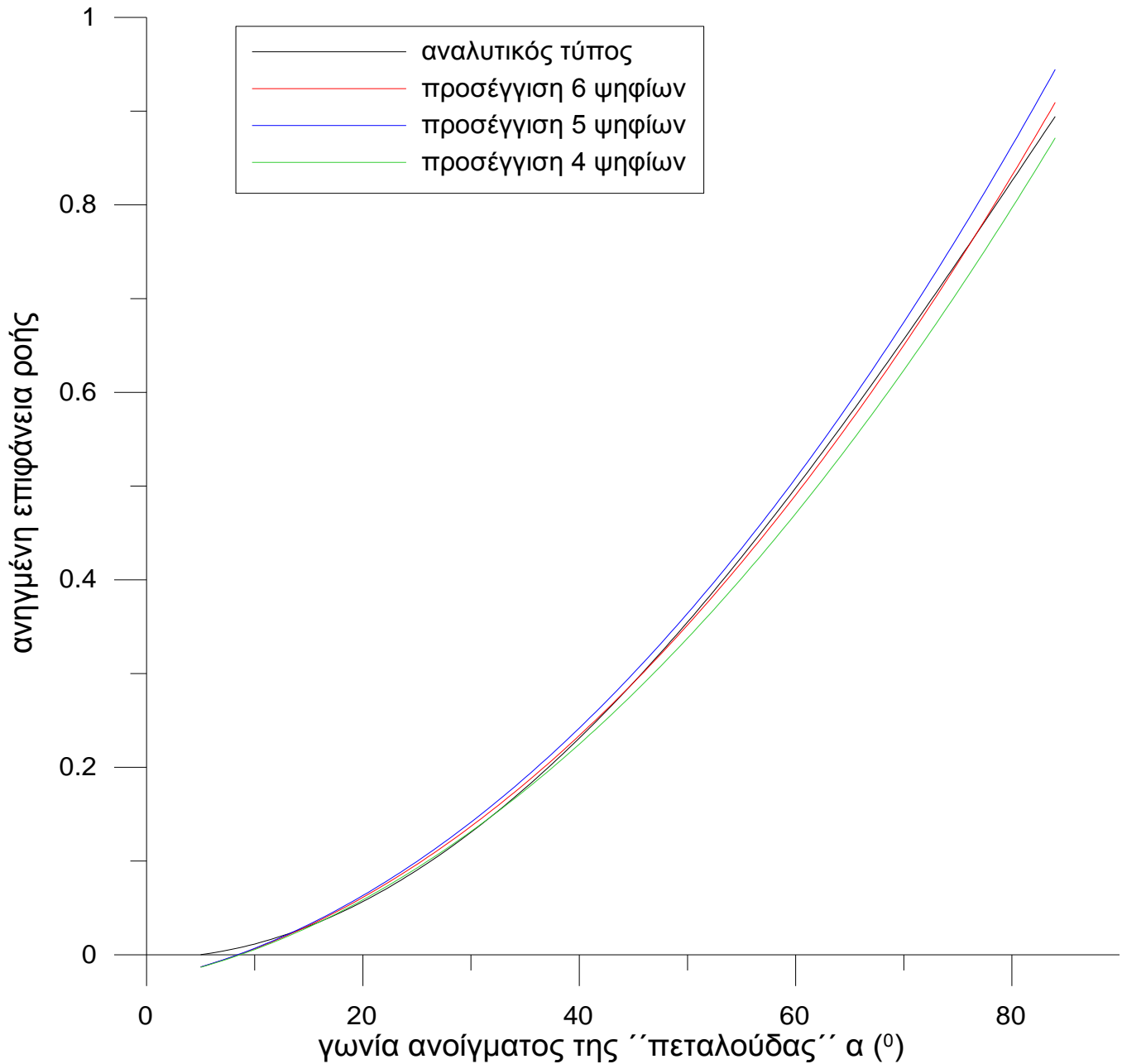
Σχήμα 3.2: Σύγκριση αναλυτικού τύπου με τις πολυωνυμικές προσεγγίσεις 2^{ου} και 3^{ου} βαθμού αντίστοιχα.

Ο αναλυτικός τύπος παριστάνεται με μαύρο χρώμα, το πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού με κόκκινο και το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού με μπλε. Παρατηρούμε πως η προσέγγιση μέσω του πολυωνύμου 3^{ου} βαθμού ταυτίζεται πλήρως με τον αναλυτικό τύπο και η προσέγγιση μέσω του πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού ταυτίζεται σε όλο σχεδόν το εύρος ανοίγματος της “πεταλούδας” αποκλίνοντας λίγο μόνο επί των ορίων αυτού, κάτι το αναμενόμενο μαθηματικώς εφόσον μεγαλύτερου βαθμού πολυώνυμο μπορεί να προσαρμοσθεί καλύτερα σε περισσότερες αλλαγές κλίσης.

Για λόγους περαιτέρω απλοποίησης των δύο πολυωνυμικών εκφράσεων που βρέθηκαν μέσω της προσαρμογής (fitting) στον πλήρη τύπο, δημιουργούμε δύο νέα διαγράμματα για καθένα από τα δύο πολυώνυμα. Σε καθένα από αυτά τα διαγράμματα παραθέτουμε πάλι τον αναλυτικό τύπο, αλλά με τρεις προσεγγίσεις τώρα του αντίστοιχου πολυωνύμου. Λέγοντας προσεγγίσεις τώρα, εννοούμε την πολυωνυμική αυτή μορφή κάθε φορά με λιγότερα σημαντικά ψηφία επί των πολυωνυμικών όρων του καθενός από αυτά.

Προκειμένου για την πολυωνυμική έκφραση 2^{ου} βαθμού εξετάζουμε τις περιπτώσεις στρογγυλοποίησης στα 6, 5 και 4 αντίστοιχα σημαντικά ψηφία. Αντίστοιχα για την πολυωνυμική έκφραση 3^{ου} βαθμού εξετάζουμε στρογγυλοποίηση επί του 8^{ου}, 7^{ου} και 6^{ου} αντίστοιχα σημαντικού ψηφίου. Αυτή η διαφοροποίηση της διερεύνησης σε διαφορετικό πλήθος σημαντικών ψηφίων είναι λογική, δεδομένου ότι η πολυωνυμική έκφραση 3^{ου} βαθμού έχει εξαρχής πολυωνυμικούς όρους με περισσότερα σημαντικά ψηφία από την αντίστοιχη πολυωνυμική έκφραση 2^{ου} βαθμού.

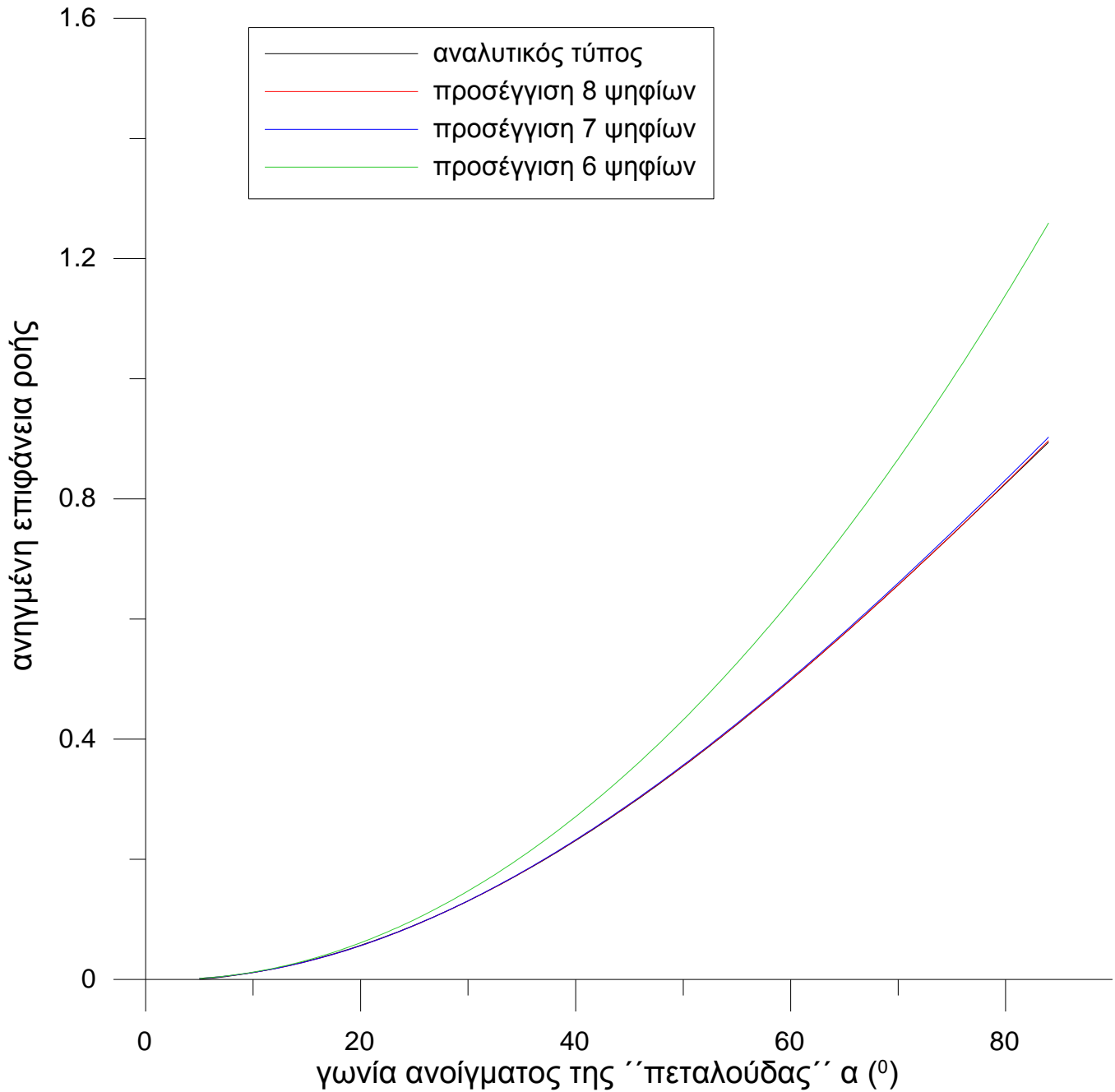
Έτσι λοιπόν έχουμε τα αντίστοιχα δύο διαγράμματα διερεύνησης της ακρίβειας στρογγυλοποίησης των δύο πολυωνυμικών αυτών προσεγγίσεων του αναλυτικού τύπου (Εξίσωση 3.1):



Σχήμα 3.3: Προσέγγιση της πολυωνυμικής έκφρασης 2^{ου} βαθμού με 6,5 και 4 σημαντικά ψηφία αντίστοιχα.

Η προσέγγιση με τα 6 σημαντικά ψηφία σημειώνεται με κόκκινο χρώμα. Η προσέγγιση με 5 σημαντικά ψηφία σημειώνεται με μπλε χρώμα ενώ η προσέγγιση με 4 σημαντικά ψηφία με πράσινο. Ο αναλυτικός τύπος σημειώνεται με μαύρο

χρώμα. Όπως φαίνεται καθαρά και στο γράφημα, η κοντινότερη προσέγγιση στον πλήρη τύπο είναι αυτή των 6 σημαντικών ψηφίων.



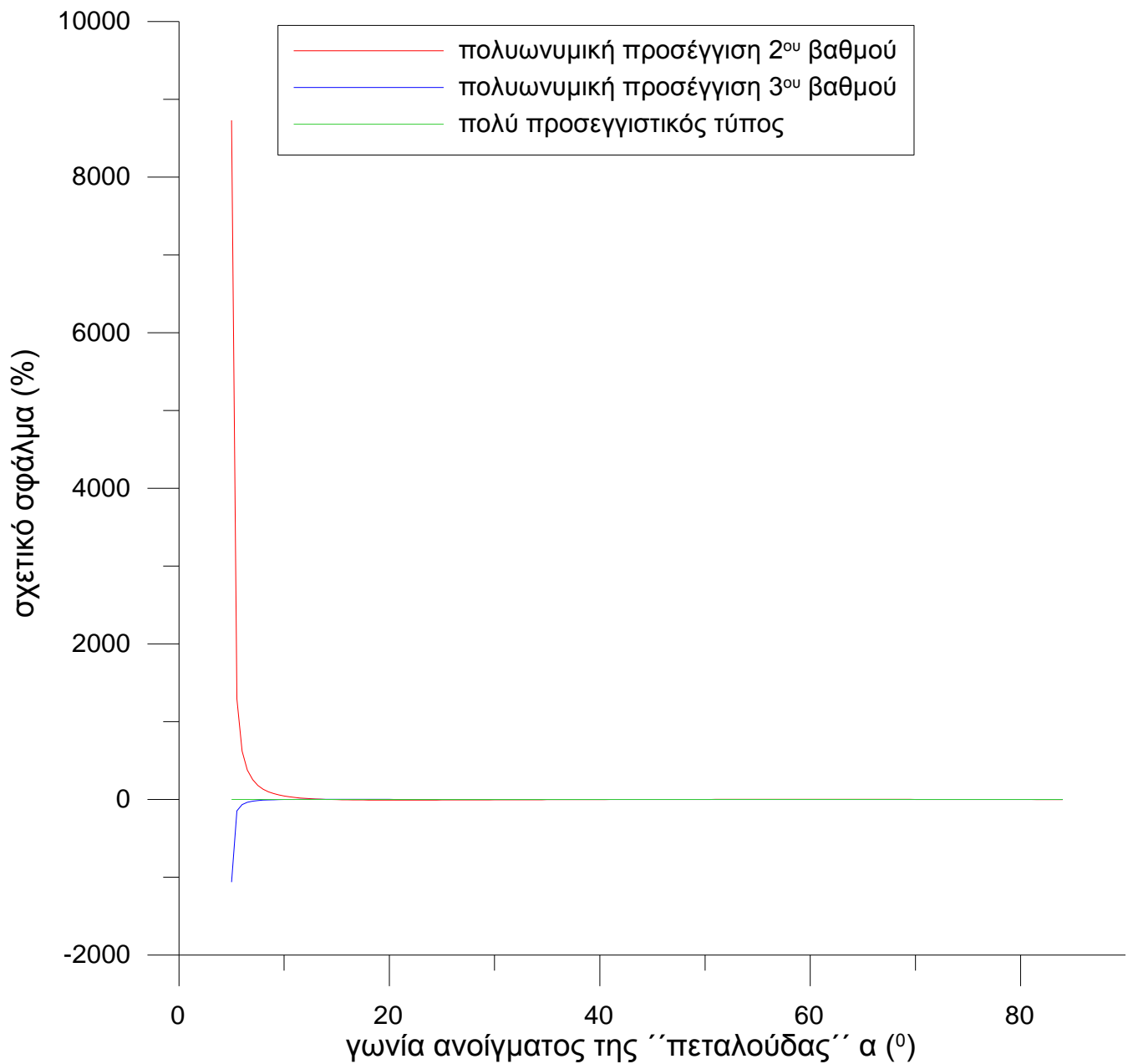
Σχήμα 3.4: Προσέγγιση της πολυωνυμικής έκφρασης 3^{ου} βαθμού με 8,7 και 6 σημαντικά ψηφία αντίστοιχα.

Η προσέγγιση με τα 8 σημαντικά ψηφία σημειώνεται με κόκκινο χρώμα. Η προσέγγιση με 7 σημαντικά ψηφία σημειώνεται με μπλε χρώμα ενώ η προσέγγιση με 6 σημαντικά ψηφία με πράσινο. Ο αναλυτικός τύπος σημειώνεται και εδώ με μαύρο χρώμα. Όπως φαίνεται καθαρά και στο γράφημα, η κοντινότερη προσέγγιση στον πλήρη τύπο είναι αυτή των 8 και 7 αντίστοιχα σημαντικών ψηφίων, ενώ η προσέγγιση με τα 6 σημαντικά ψηφία αποκλίνει υπερβολικά. Έτσι λοιπόν επιλέγουμε την προσέγγιση των 7 σημαντικών ψηφίων ως τον ελάχιστο αποδεκτό αριθμό μη σημαντικής απόκλισης από τον αναλυτικό τύπο.

Στην συνέχεια για λόγους πληρότητας, υπολογίζουμε τα σχετικά σφάλματα της πολυωνυμικής προσέγγισης 2^{ου} βαθμού, της πολυωνυμικής προσέγγισης 3^{ου} βαθμού καθώς και του πολύ προσεγγιστικού τύπου σχετικά με τον αναλυτικό τύπο. Το σχετικό αυτό σφάλμα κάθε φορά υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$\text{σχετικό σφάλμα} = \frac{\text{αναλυτικός τύπος} - \text{προσεγγιστικός τύπος}}{\text{αναλυτικός τύπος}} (\%) \quad (3.6)$$

Το γράφημα που προκύπτει λοιπόν βάσει αυτού του τύπου είναι το παρακάτω:



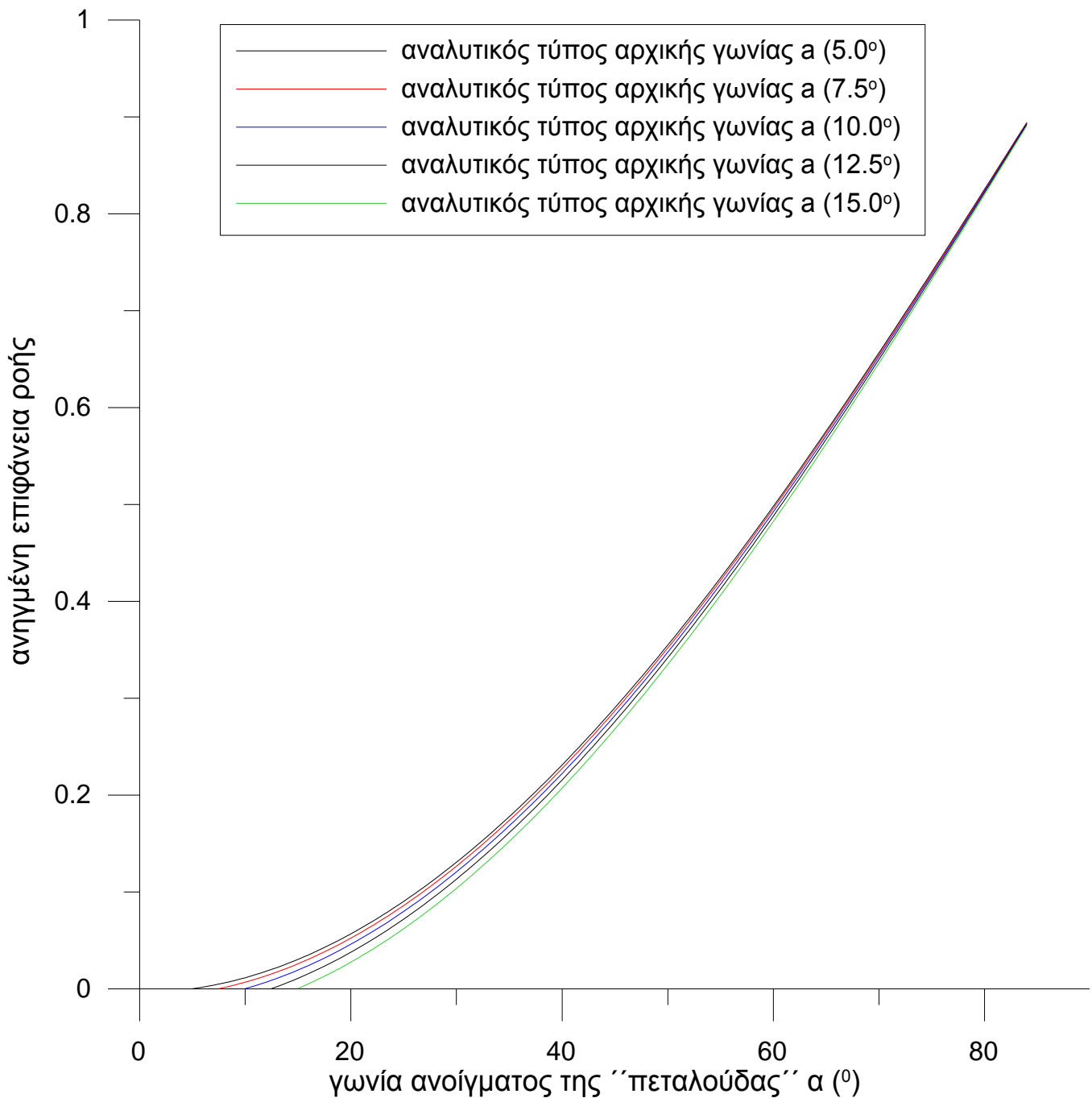
Σχήμα 3.5 Σχετικά σφάλματα των προσεγγιστικών τύπων αναφορικά με τον πλήρη τύπο.

Το σχετικό σφάλμα της πολυωνυμικής προσέγγισης 2^{ου} βαθμού σημειώνεται με κόκκινο χρώμα. Το σχετικό σφάλμα της πολυωνυμικής προσέγγισης 3^{ου} βαθμού

σημειώνεται με μπλε χρώμα, και το σχετικό σφάλμα του πολύ προσεγγιστικού τύπου σημειώνεται με πράσινο χρώμα.

Βλέπουμε λοιπόν ότι ενώ ο πολύ προσεγγιστικός τύπος δίνει μηδενικό σχετικό σφάλμα για όλο το εύρος των μοιρών ανοίγματος της πεταλούδας, οι δύο πολυωνυμικές προσεγγίσεις δίνουν σχετικά σφάλματα σημαντικού μεγέθους, σε μικρό βέβαια εύρος μοιρών ανοίγματος της πεταλούδας, γύρω από την πλήρως κλειστή θέση της. Συγκεκριμένα η πολυωνυμική προσέγγιση 2^{ου} βαθμού δίνει σχετικό σφάλμα πολύ μεγάλου μεγέθους για το εύρος μοιρών 5° – 13°, ενώ η πολυωνυμική προσέγγιση 3^{ου} βαθμού δίνει σχετικό σφάλμα εμφανώς μικρότερου μεγέθους για το εύρος γωνιών 5° – 8°. Φαίνεται δηλαδή καθαρά η σαφώς ταχύτερη σύγκλιση της πολυωνυμικής προσέγγισης 3^{ου} βαθμού στα αποτελέσματα του αναλυτικού τύπου, και σε επίπεδο μεγέθους των σχετικών σφαλμάτων αλλά και σε επίπεδο μικρότερου εύρους μοιρών ανοίγματος της “πεταλούδας” αρχής γενομένης της πλήρως κλειστής θέσεως. Γεγονός λογικό και αναμενόμενο αφού η πολυωνυμική αυτή προσέγγιση 3^{ου} βαθμού προσεγγίζει με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια την καμπύλη δεδομένων του αναλυτικού τύπου από τον οποίο και προήλθε. Και οι δύο ωστόσο πολυωνυμικές προσεγγίσεις δείχνουν μια συνεχή σταδιακή πτώση των σχετικών σφαλμάτων τους μέχρι του σημείου όπου πρακτικά συμπίπτουν με τον αναλυτικό τύπο με περαιτέρω σχετικό σφάλμα αναμενόμενα μηδενικό.

Στην συνέχεια διερευνούμε τα αποτελέσματα του αναλυτικού τύπου της ανηγμένης επιφάνειας ροής μόνο, με παράμετρο την αρχική γωνία ανοίγματος της “πεταλούδας”. Αποτυπώνουμε δηλαδή τα αποτελέσματα του αναλυτικού τύπου για ολόκληρο πάντα το εύρος μοιρών ανοίγματος της “πεταλούδας” αλλά για διαφορετική αρχική γωνία ανοίγματος κάθε φορά. Το εύρος μοιρών αρχικής θέσης ανοίγματος της πεταλούδας κυμαίνεται από τις 5° έως τις 15°. Έτσι παίρνουμε το επόμενο γράφημα.

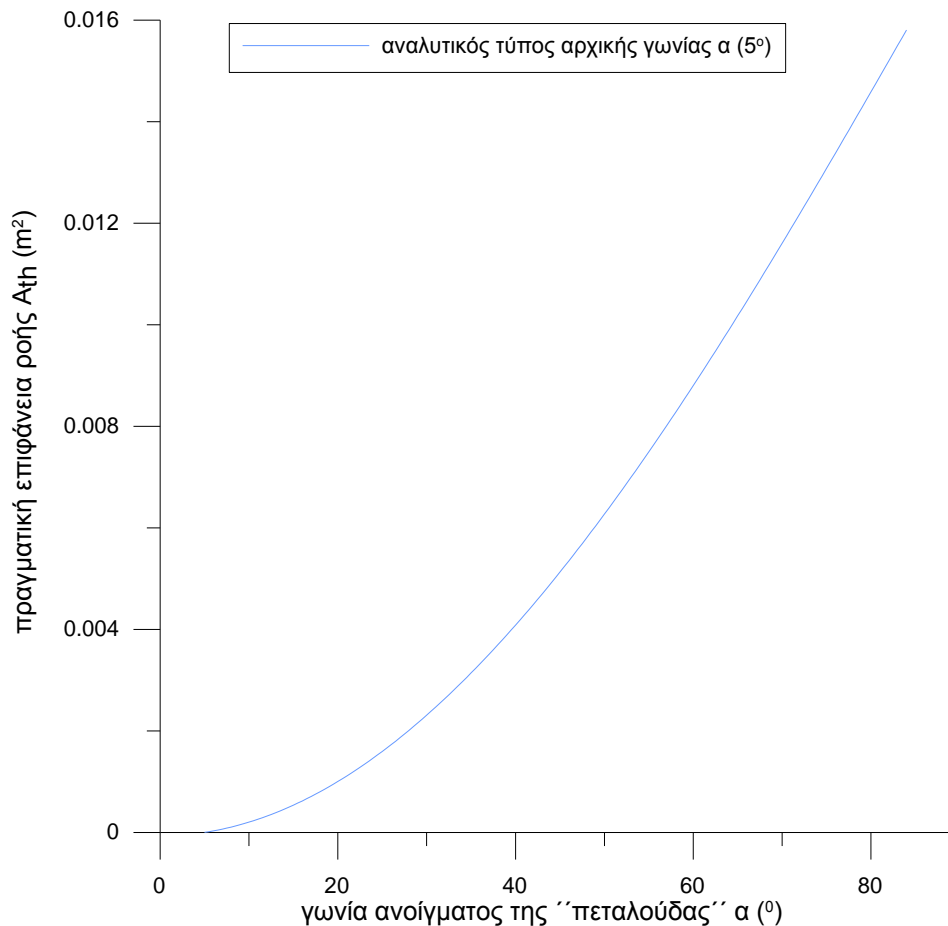


Σχήμα 3.6: Αναλυτικός τύπος ανηγμένης επιφάνειας συναρτήσει των μοιρών ανοίγματος της "πεταλούδας" με παράμετρο τις αρχικές μοίρες ανοίγματός της.

Βλέπουμε ότι ο αναλυτικός τύπος της ανηγμένης επιφάνειας ροής συγκλίνει πάντα στο ίδιο μέγεθος, ανεξαρτήτως της μικρής αυτής διαφοροποίησης του

αρχικού ανοίγματος της “πεταλούδας”, και αυτό γιατί η διαφοροποίηση αυτή στην αρχική γωνία κατά τόσο μικρό εύρος αποτελεί μικρό μόνο κλάσμα επί της ολικής μεταβολής στην τιμή της πλήρως ελεύθερης επιφάνειας που αποτελεί και τον παρονομαστή της αναγωγής. Αυτό που προφανώς και αλλάζει είναι το σημείο εκκίνησης ανοίγματος της “πεταλούδας”, με τις τιμές της ανηγμένης επιφάνειας να συγκλίνουν γρήγορα σε αυτό το κοινό μέγεθος της πλήρως ανοικτής θέσης.

Τέλος, παραθέτουμε το γράφημα του αναλυτικού τύπου για την πραγματική επιφάνεια ροής και όχι την ανηγμένη όπως έως τώρα, πάντα βάσει της Εξίσωσης 3.1. Αυτός ο υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί για αρχική γωνία ανοίγματος της “πεταλούδας” πάλι 5° . Έχουμε:



3.7 Πραγματική επιφάνεια ροής δια μέσω της ρυθμιστικής δικλείδας για αρχική γωνία ανοίγματος της πεταλούδας 5° .

Το εύρος των τιμών του άξονα X είναι και πάλι $5^\circ - 84^\circ$, όπως και στην αρχική σύγκριση του αναλυτικού τύπου με τον πολύ προσεγγιστικό (Σχήμα 3.1) τότε βέβαια για την ανηγμένη επιφάνεια ροής. Το εύρος τώρα του άξονα Y μετατρέπεται βάση των αντίστοιχων τιμών του άξονα Y του αναλυτικού τύπου ανηγμένης επιφάνειας πολλαπλασιασμένο επί τον παράγοντα:

$$\frac{\pi D t h^2}{4}$$

Αυτό είναι κάτι που διαφαίνεται ανατρέχοντας στον αναλυτικό τύπο ανηγμένης επιφάνειας όπως αυτός δίνεται στην αρχή της παραγράφου (Εξίσωση 3.1), καθώς ο παράγοντας αυτός αποτελεί το μέγεθος αδιαστατοποίησης της επιφάνειας από πραγματική σε ανηγμένη.

3.3. Διερεύνηση των εξισώσεων υπολογισμού της παροχής μάζας αέρα δια μέσω της ρυθμιστικής δικλείδας.

Επιστρέφοντας στο θεωρητικό τμήμα της διπλωματικής εργασίας (Κεφάλαιο 2), βρίσκουμε δύο τύπους υπολογισμού της παροχής μάζας του αέρα δια μέσω της ρυθμιστικής δικλείδας.

Για την περίπτωση υποηχητικής ροής, κριτήριο της οποίας είναι το:

$$p_d / p_u \geq [2 / (\gamma + 1)]^{\gamma / (\gamma - 1)} \quad (3.7)$$

δηλαδή ο λόγος πίεσης ανάντι και κατάντι της πεταλούδας να είναι μεγαλύτερος του παραπάνω λόγου, τότε ο τύπος παροχής μάζας του αέρα είναι:

$$\dot{m} = \frac{c_d A_v p_u}{\sqrt{R T_u}} \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (3.8)$$

Για την περίπτωση διηχητικής ροής, κριτήριο της οποίας είναι το:

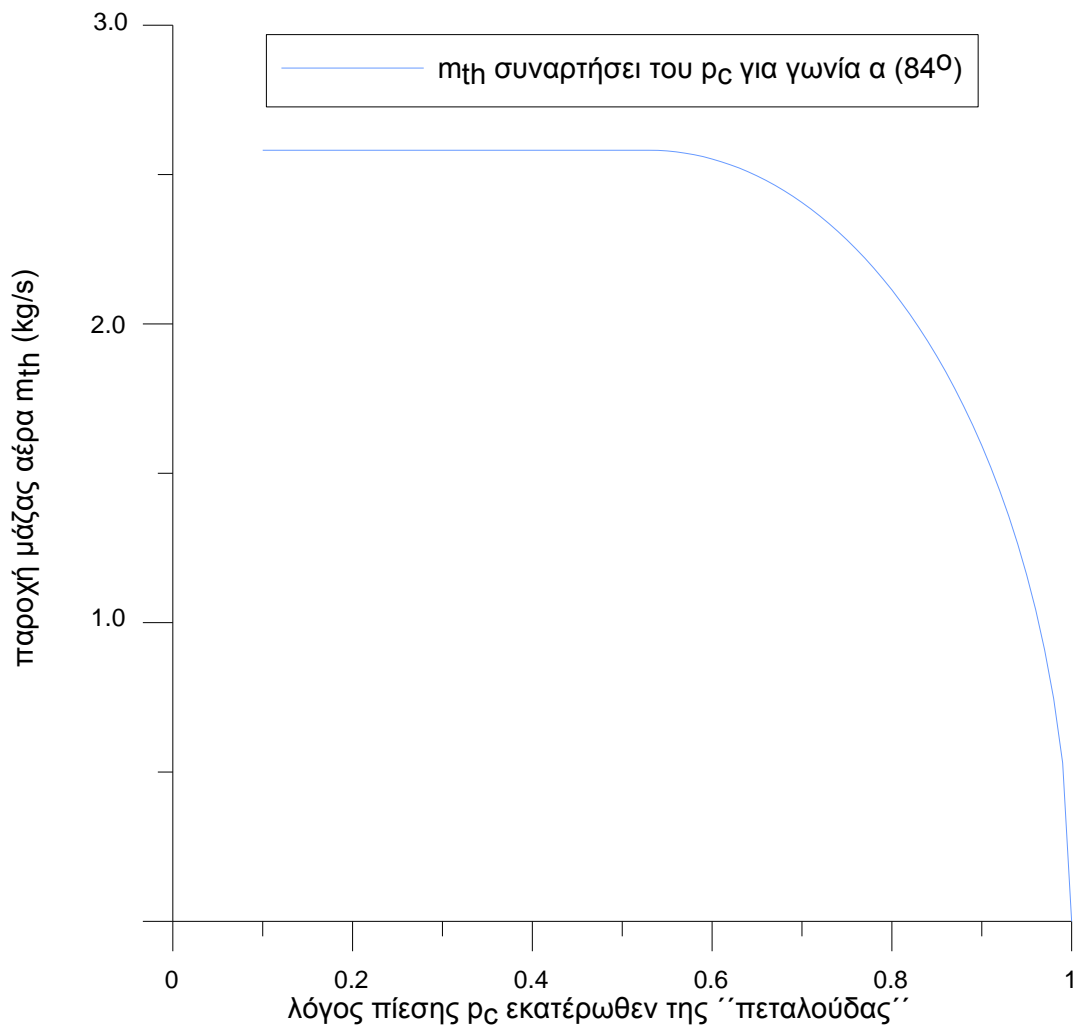
$$p_d / p_u \leq [2 / (\gamma + 1)]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3.9)$$

δηλαδή ο λόγος πίεσης ανάντι και κατόντι της “πεταλούδας” να είναι μικρότερος του παραπάνω λόγου, τότε ο τύπος παροχής μάζας του αέρα είναι ανεξάρτητος πλέον της περαιτέρω πτώσης πίεσης διατηρώντας σταθερή τιμή $\dot{m}=\dot{m}_{crit}$ ίση με:

$$\dot{m}_{crit} = \frac{c_d A_v p_u}{\sqrt{RT_u}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3.10)$$

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε πως για τον σκοπό επεξεργασίας των εξισώσεων αυτών, λαμβάνουμε πίεση ανάντι της “πεταλούδας” $p_u=1\text{bar}$ και $\gamma=1,4$ όπως αυτά προκύπτουν από το Σχήμα 2.1.α του 2^{ου} Κεφαλαίου. Επίσης λαμβάνουμε θερμοκρασία ανάντι της “πεταλούδας” $T_u=300\text{K}$, συντελεστή εκροής $C_d=0,7$, καθώς επίσης και $R=287,1 \text{ kJ/kg K}$. Ως A_v τέλος λαμβάνουμε την μέγιστη τιμή που μας δίνει η Εξίσωση 3.1 για την πραγματική επιφάνεια ροής της “πεταλούδας”, ίση με $A_v=0,01580\text{m}^2$.

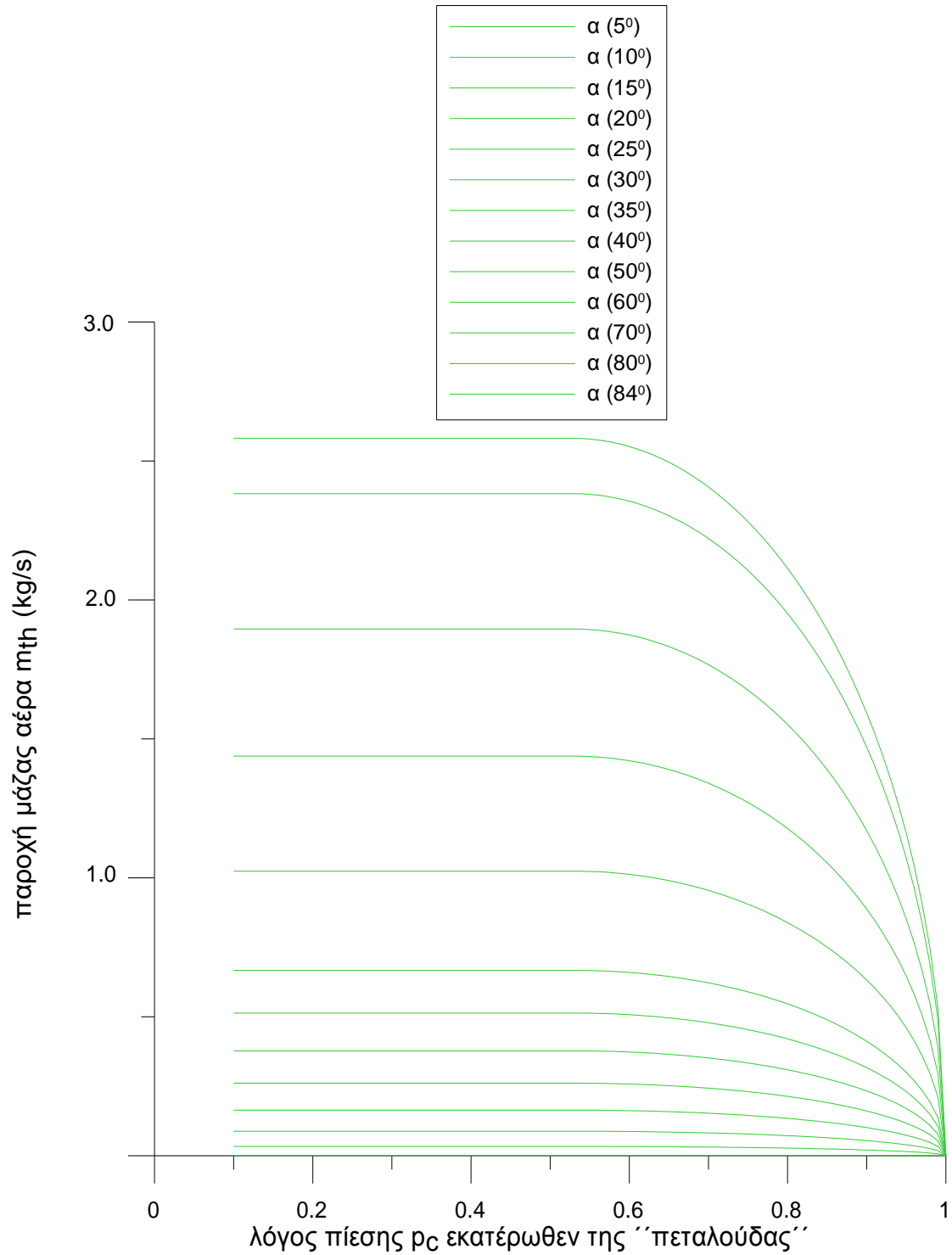
Έτσι λοιπόν υπολογίζουμε με χρήση του σχετικού κώδικα τις τιμές της παροχής μάζας αέρα για όλο το εύρος τιμών του λόγου πίεσης, δηλαδή 0 – 1. Σημαντικό επίσης να τονισθεί είναι και το κριτήριο “παγώματος” της ροής από υποηχητική σε υπερκριτική λόγω δημιουργίας ηχητικού λαιμού, το οποίο ισούται με $p_d/p_u=0,528$ για $\gamma=1,4$.



Σχήμα 3.8: Παροχή μάζας αέρα διαμέσου της βαλβίδας εισαγωγής συναρτήσεως του λόγου πιέσεων ανάντι (p_u) και κατόντι (p_d) για γωνία 84° .

Παρατηρούμε πράγματι πως μετά την τιμή $p_d/p_u=0,528$, η ροή “παγώνει”, σταθεροποιείται δηλαδή στην κρίσιμη τιμή της.

Στην συνέχεια υπολογίζουμε και πάλι την παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα συναρτήσεως του λόγου πίεσης p_c , με παράμετρο όμως τώρα την αρχική γωνία “πεταλούδας”. Για διαφορετική αρχική γωνία πεταλούδας υπολογίζουμε από τον αναλυτικό τύπο της επιφάνειας ροής την πραγματική επιφάνεια ροής και έτσι έχουμε μια διαφορετική γραφική παράσταση της παροχής μάζας του αέρα συναρτήσεως του λόγου πίεσης p_c . Έτσι προκύπτει το παρακάτω γράφημα:



Σχήμα 3.9: Παροχή μάζας αέρα διαμέσου της βαλβίδας εισαγωγής συναρτήσει του λόγου πιέσεων ανάντι (p_u) και κατόντι (p_d) με παράμετρο την αρχική γωνία της “πεταλούδας”.

Ξεκινώντας από την πρώτη γραφική παράσταση όπου ταυτίζεται με τον άξονα της Χ συνιστώσας, και προχωρώντας προς τα επάνω μέχρι να συναντήσουμε την υψηλότερη καμπύλη, ταυτόσημη με αυτή του Σχήματος 3.8 καθώς και τα δύο αναφέρονται στην ίδια γωνία ανοίγματος της πεταλούδας (84°), έχουμε τον εξής βηματισμό δειγματοληψίας της παραμέτρου γωνίας της πεταλούδας:

[$5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 84^\circ$]

Αν παρατηρήσουμε τις πέντε υψηλότερες καμπύλες του Σχήματος 3.9 προσεκτικά θα δούμε πως η ροή σταθεροποιείται πάντα στον ίδιο λόγο πίεσης ίσο με 0,528, καθώς το κριτήριο παγώματος της ροής είναι ανεξάρτητο της γωνίας της “πεταλούδας” και εξαρτάται μόνο από τον συντελεστή ισεντροπικής μεταβολής. Αυτό όμως δεν συνεχίζει να είναι ευδιάκριτο στις χαμηλότερες καμπύλες του γραφήματος μέχρι και την οριακή κατάσταση της πρώτης καμπύλης όπου αυτή ταυτίζεται με τον άξονα της Χ συνιστώσας, δίνοντας έτσι την λανθασμένη εντύπωση ότι η τιμή του λόγου πίεσης για τον οποίο σταθεροποιείται η ροή αλλάζει, μέχρι όπου και μηδενίζεται τελείως η παροχή μάζας για κάθε λόγο πίεσης στην οριακή κατάσταση της πρώτης καμπύλης. Αυτό συμβαίνει διότι το γράφημα δεν μπορεί να αποδώσει με την υπάρχουσα βαθμονόμηση του άξονα Υ την ακρίβεια των μικρών αυτών αλλαγών στις τιμές της παροχής συναρτήσει πάντα του λόγου πίεσης, σε επίπεδο γραφικής απεικόνισης. Η πληροφορία αυτή δηλαδή χάνεται στην γραφική απεικόνιση τόσο μικρών αλλαγών στις τιμές της παροχής.

3.4. Διερεύνηση ενός συγκεντρωτικού γραφήματος της παροχής μάζας του αέρα συναρτήσει του λόγου πίεσης του οχετού εισαγωγής με παράμετρο τη γωνία της πεταλούδας και τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

Σκοπός μας εδώ είναι η δημιουργία ενός σύνθετου διαγράμματος της παροχής μάζας αέρα συναρτήσει του λόγου πίεσης στον οχετό εισαγωγής παραμετρικά της γωνίας “πεταλούδας” και των στροφών λειτουργίας του κινητήρα. Το διάγραμμα

αυτό προκύπτει από την σύνθεση δύο ξεχωριστών διαγραμμάτων. Το ένα ήδη έχει παρουσιαστεί στην προηγούμενη παράγραφο, αυτό δηλαδή με παράμετρο τη γωνία της “πεταλούδας” (Σχήμα 3.9). Το δεύτερο διάγραμμα θα το δημιουργήσουμε βάσει ενός διαφορετικού τύπου υπολογισμού της παροχής μάζας αέρα συναρτήσεως του λόγου πίεσης, παραμετρικά με τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα. Ο τύπος που δίνει αυτήν την εξάρτηση είναι ο εξής:

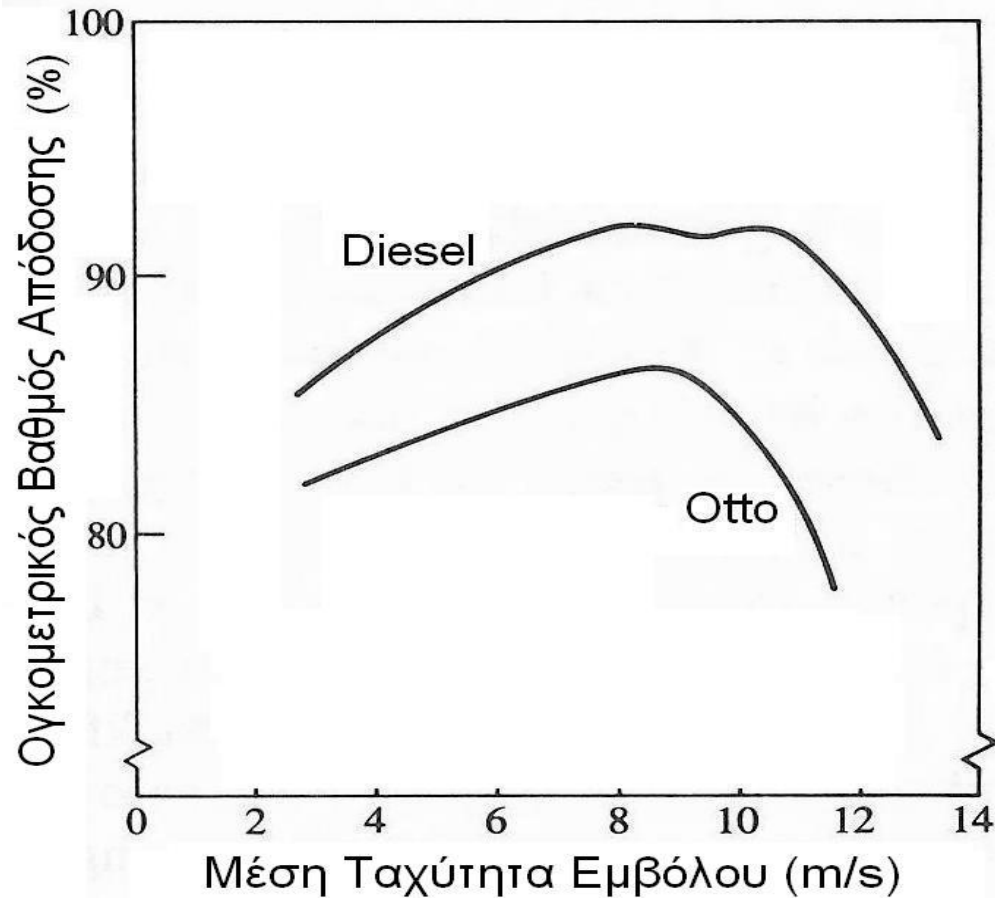
$$\dot{m}_{th} = \frac{p_d * \eta_{vol} * V_h * n}{R * T_d * 30K} \quad (3.11)$$

όπου ο όγκος εμβολισμού είναι $V_h=400\text{cm}^3$, η θερμοκρασία κατόπιν της “πεταλούδας” είναι $T_d=300\text{K}$, το $K=4$ επειδή μελετάμε τετράχρονο κινητήρα, η ειδική σταθερά του αερίου είναι $R=287.1 \text{ kJ/kg K}$ και τέλος θεωρούμε την διαδρομή του εμβόλου $s=0,080\text{m}$.

Το p_d τώρα είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή, το n είναι η παράμετρος των στροφών λειτουργίας του κινητήρα και ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης η_{vol} εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα του εμβόλου c_ϵ . Την μέση αυτή τώρα ταχύτητα του εμβόλου την υπολογίζουμε βάσει του τύπου:

$$c_\epsilon = \frac{(s*n)}{30} \quad (3.12)$$

ενώ το η_{vol} το παίρνουμε συναρτήσεως του c_ϵ όπως ήδη αναφέραμε, από το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα υπολογισμού του η_{vol} συναρτήσει του c_ϵ για κινητήρες otto και diesel.

Εδώ αναφέρουμε πως για να έχουμε ακρίβεια στα αποτελέσματά μας και συνέπεια με το διάγραμμα αυτό, δεν στηριζόμαστε κάθε φορά στον οπτικό υπολογισμό του η_{vol} συναρτήσει του c_ϵ επί του διαγράμματος αυτού. Αντιθέτως, σκοπός μας είναι η εξαγωγή μίας αναλυτικής σχέσης ακριβείας βάσει του γραφήματος, όπου θα μας δίνει άμεσα και με μεγάλη πιστότητα το ζητούμενο αυτό μέγεθος. Για να το πετύχουμε αυτό γίνεται ψηφιοποίηση της καμπύλης του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της μέσης ταχύτητας του εμβόλου.

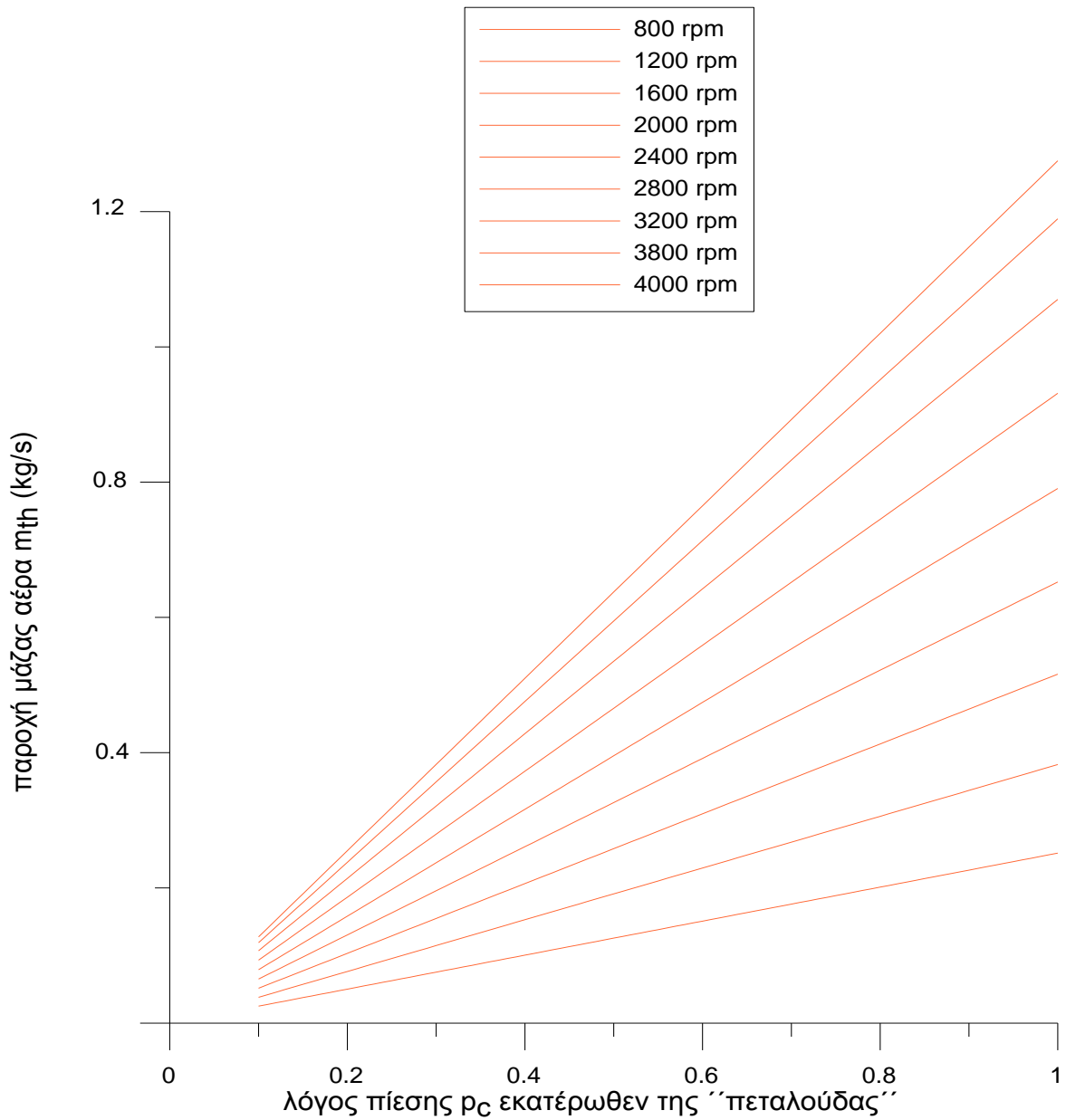
Επομένως ο μαθηματικός τύπος που αποδίδει αυτή την ψηφιοποιημένη καμπύλη, εξάγεται από προσαρμογή (fitting) πολυωνύμου 9^{ου} βαθμού. Επομένως λαμβάνουμε τον παρακάτω πολυωνυμικό τύπο:

$$y = 136.6965872 - 108.5869734x + 88.5676758 * x^2 - 40.01006814 * x^3 + 11.15637286 * x^4 - 1.994136129 * x^5 + 0.2287068624 * x^6 - 0.01624573924 * x^7 + 0.0006493588562 * x^8 - 1.114859317 * 10^{-5} * x^9 \quad (3.13)$$

Έχουμε λοιπόν την εξής διαδικασία υπολογισμού του \dot{m}_{th} συναρτήσεως του λόγου πίεσης παραμετρικά με τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

- Αρχικά θέτουμε τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα, στις οποίες επιθυμούμε να κάνουμε την διερεύνηση της εξάρτησης $\dot{m}_{th} - p_c$.
- Στην συνέχεια, βάσει των στροφών αυτών υπολογίζουμε την μέση ταχύτητα του εμβόλου c_e από την Σχέση 3.12 όπως προαναφέραμε.
- Έπειτα, υπολογίζουμε βάσει του πολυωνυμικού τύπου 9^{ου} βαθμού (Σχέση 3.13) το η_{vol} .
- Έχοντας και τα υπόλοιπα σταθερά δεδομένα του γενικού τύπου όπως αυτά δόθηκαν στην αρχή αυτής της παραγράφου, μπορούμε πλέον να χαράξουμε το διάγραμμα παροχής μάζας – λόγου πίεσης δεδομένων στροφών λειτουργίας.

Επαναλαμβάνοντας διαδοχικά αυτήν την διαδικασία λαμβάνουμε το εξής παραμετρικό διάγραμμα:

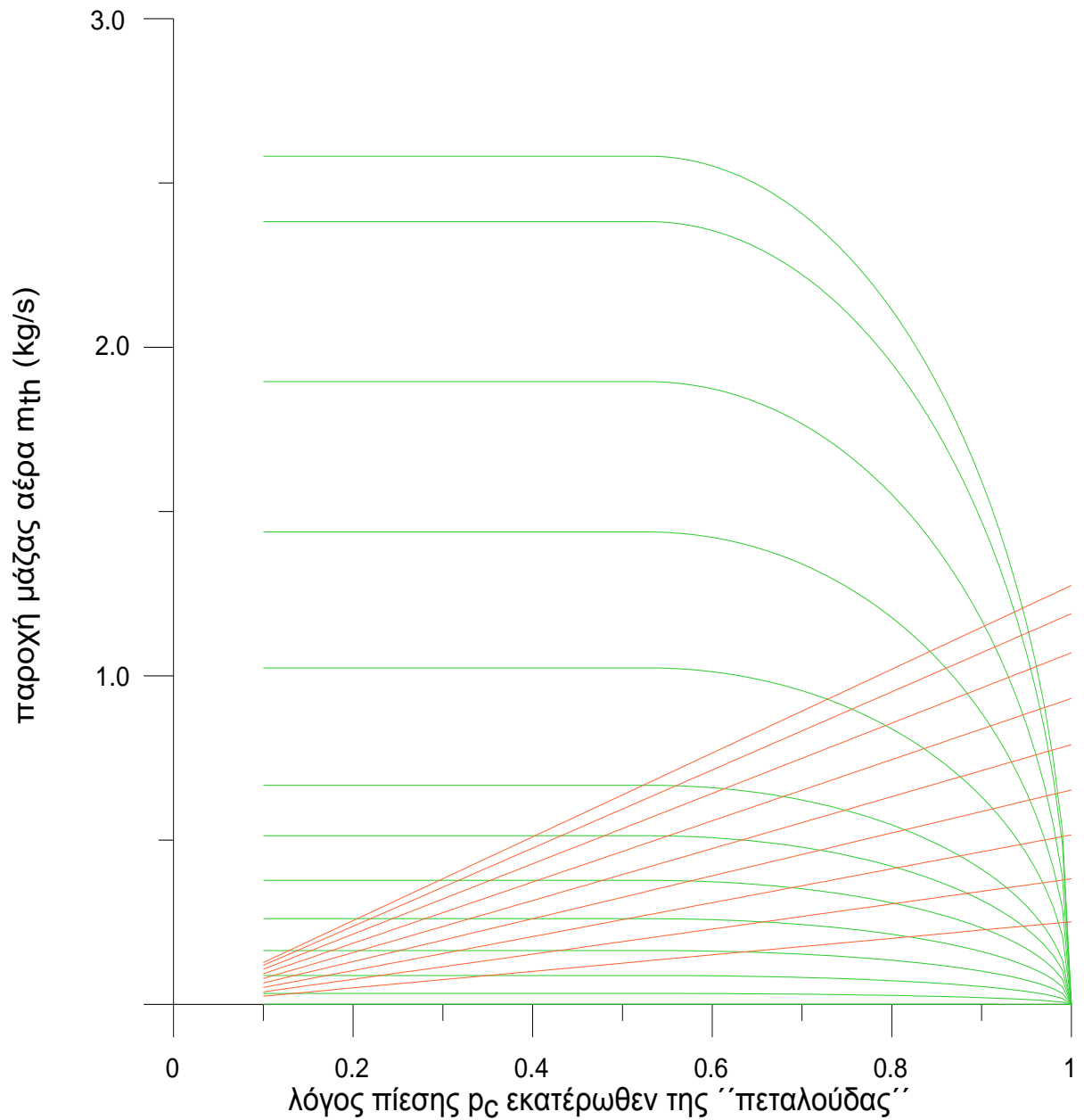


Σχήμα 3.11: Παροχή μάζας αέρα διαμέσου της βαλβίδας εισαγωγής συναρτήσει του λόγου πιέσεων ανάντι (p_u) και κατόντι (p_d) με παράμετρο τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

Αναφέρουμε εδώ ότι ξεκινώντας από το χαμηλότερο διάγραμμα και καταλήγοντας στο υψηλότερο, ο βηματισμός της δειγματοληψίας περιλαμβάνει τις εξής στροφές λειτουργίας του κινητήρα:

[800rpm, 1200rpm, 1600rpm, 2000rpm, 2400rpm, 2800rpm, 3200rpm, 3600rpm, 4000rpm]

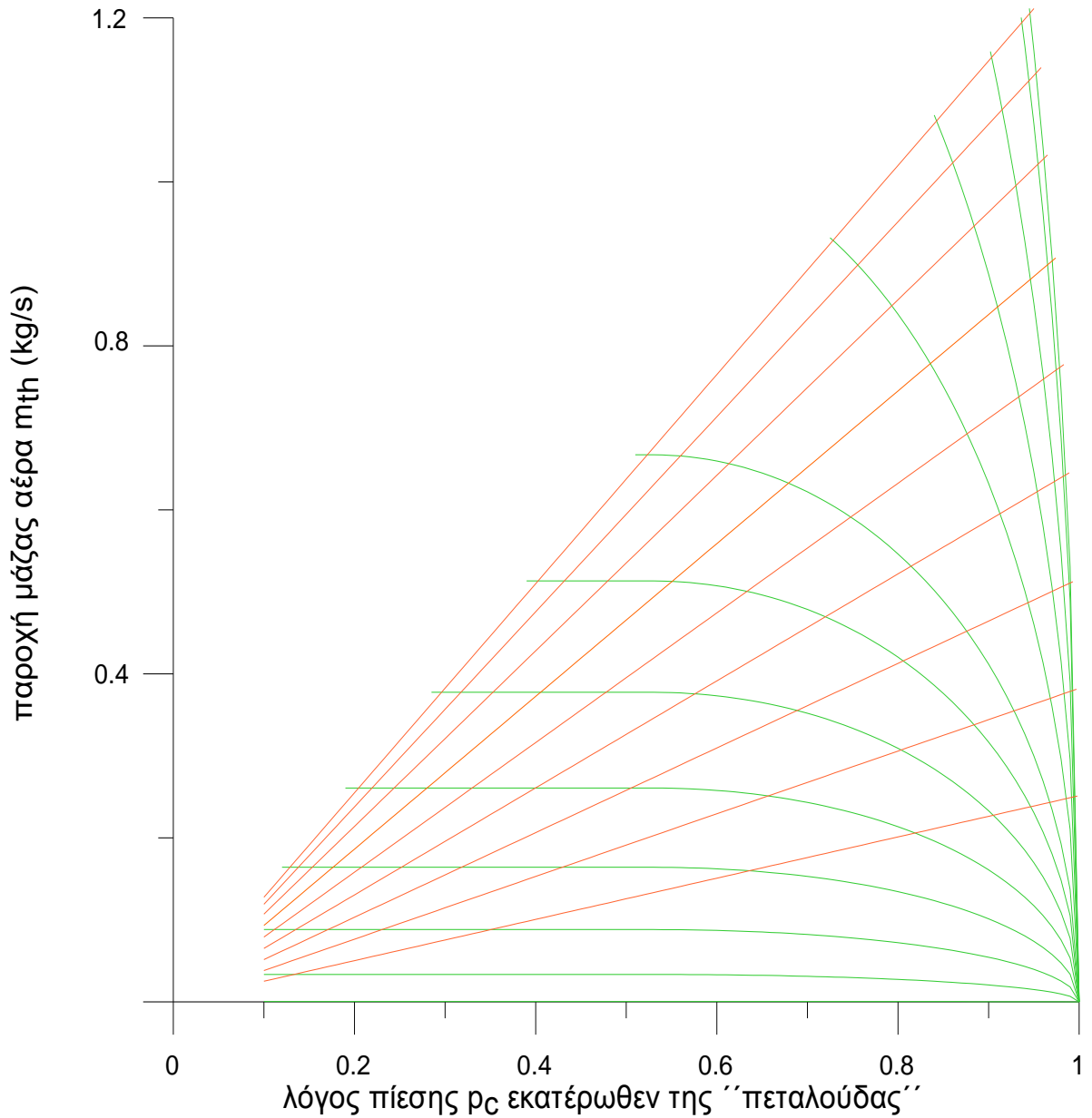
Καταφέραμε λοιπόν να δημιουργήσουμε τα δύο παραμετρικά διαγράμματα, όπως ακριβώς περιγράψαμε στην αρχή της παραγράφου. Έχουμε δηλαδή αφενός το διάγραμμα συνάρτησης $\dot{m}_{th} - p_c$ παραμετρικά της γωνίας “πεταλούδας” (Σχήμα 3.9) και αφετέρου το διάγραμμα συνάρτησης $\dot{m}_{th} - p_c$ παραμετρικά των στροφών λειτουργίας του κινητήρα (Σχήμα 3.11). Συνδυασμός επομένως αυτών των δύο διαγραμμάτων μας δίνει και το ζητούμενο πολύ-παραμετρικό τελικό διάγραμμα, όπως φαίνεται και παρακάτω:



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα $\dot{m}_{th} - p_c$ παραμετρικά με την γωνία “πεταλούδας” και τις στροφές του κινητήρα.

Τέλος, θα πρέπει να τροποποιήσουμε κατάλληλα το συνδυαστικό αυτό διάγραμμα κατά τρόπο ώστε οι καμπύλες που εκφράζουν την παράμετρο των στροφών, να τερματίζονται στην υψηλότερη καμπύλη εκφράσεως του μεγαλύτερος ανοίγματος γωνίας της πεταλούδας, ίσο με 84° , το οποίο και αποτελεί φυσικό άνω

όριο της λειτουργίας της ρυθμιστικής μας δικλείδας, όριο που επιβάλλεται από γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του “μπλοκ” της “πεταλούδας”. Έτσι λοιπόν λαμβάνουμε τελικώς το επόμενο γράφημα:



Σχήμα 3.13: Τροποποιημένο διάγραμμα $\dot{m}_{th} - \rho_c$ παραμετρικά με την γωνία πεταλούδας και τις στροφές του κινητήρα.

Βιβλιογραφία

- 1) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2006) «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις ΕΜΠ.
- 3) Κ. Δ. Ρακόπουλος (2000), «Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης ΙΙ. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 4) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998) «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- 5) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009) «Diesel engine transient operation», Springer, London.
- 6) <http://en.wikipedia.org/wiki/Throttle>
- 7) <http://en.wikipedia.org/wiki/Carburator>
- 8) <http://peswiki.com/index.php/PowerPedia:Carburetor>
- 9) http://www.importtuner.com/tech/impp_1012_carb_legal_buyers_guide/photo_13.html
- 10) <http://www.gasgoo.com/showroom/cnkeruidi/auto-products/1038768.html>

- 11) http://www.mines-wave.com/E_09/CATALOG/E_THROTTLE_E.html
- 12) http://www.mines-wave.com/E_09/CATALOG/R35_GT-R/R35_HF_Throttle_c1000.jpg
- 13) <http://delphi.com/manufacturers/cv/powertrain/engine-controls-and-exhaust-flow-management/diesel-electronic-throttle-controls/>
- 14) <http://www.coldairinductions.com/pontiac-gto-cold-air-intake-powder-coated-black>
- 15) <http://www.fiero.nl/forum/Forum3/HTML/000116-5.html>
- 16) <http://www.anubizcarbturne.com/lc/what-is-a-carb-efi/>
- 17) <http://www.superhonda.com/forum/f49/thanks-klungemonger-98civcek-im-256508/>
- 18) <http://rb-kwin.bosch.com/en/powerconsumptionemissions/gasolinesystems/manifoldinjection/egas/index.html>
- 19) <http://blog.hemmings.com/index.php/2008/01/21/hmx-alphabet-soup-dyslexia-strikes-again/>
- 20) <http://www.edsgarageblog.com/2012/02/how-to-test-iac-valve.html>
- 21) http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bmw_e92_m3_engine3.jpg

- 22) http://www.suzukimotorcycles.com.au/images/upload/working/80075608_G_SXR750_K8_ThrottleBody.jpg
- 23) http://www.4wdandsportutility.com/tech/0810_4wd_gm_small_block_engine_swap/photo_10.html
- 24) <http://www.supermotors.net/clubs/media/registry/media/219393>
- 25) http://www.mustang50magazine.com/techarticles/m5lp_0807_mustang_cobra_mammoth_blower_kit/photo_06.html
- 26) <http://www.mcnews.com.au/NewBikeCatalogue/2001/Suzuki/suzukigsxr1000page2.htm>