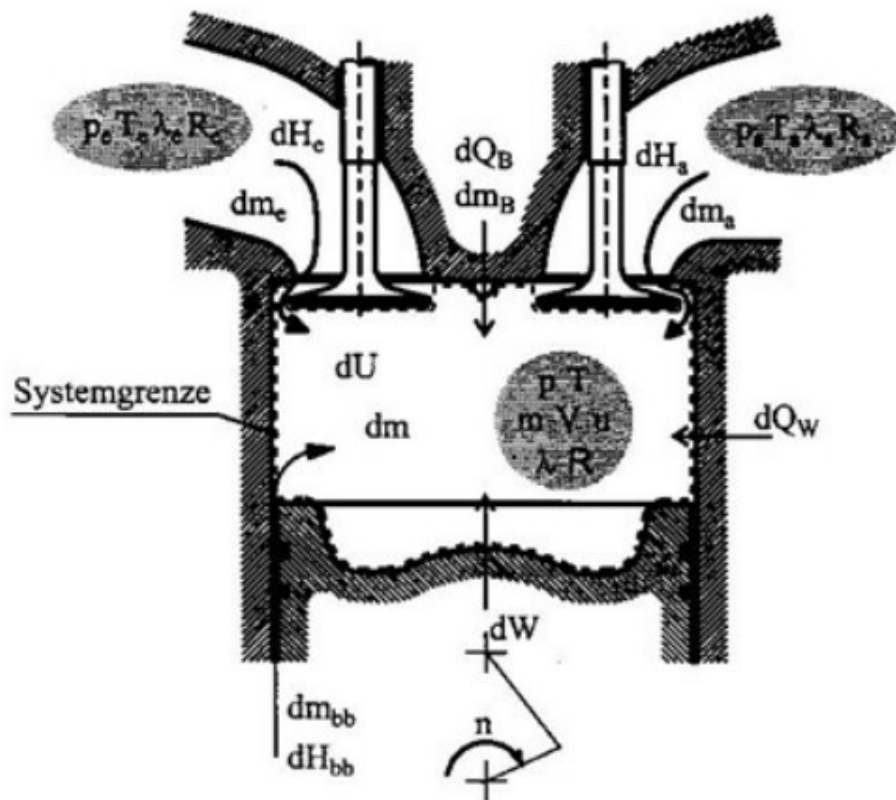


## Μηχανές Εσωτερικής Καύσης II

### Μοντέλο Πλήρωσης-Εκκένωσης Κυλίνδρου μίας Ζώνης



Κυριακόπουλος Αντώνιος-Ιωακείμ

6337

[antokyri@meng.auth.gr](mailto:antokyri@meng.auth.gr)

11/4/23

## Περιεχόμενα

● Εισαγωγή.....	1
● Μαθηματικό Μοντέλο.....	2
● Αλγόριθμος.....	8
● Σημείο Λειτουργίας.....	12
● Πεδίο Ειδικής Κατανάλωσης.....	17
● Βελτίωση Ειδικής Κατανάλωσης.....	18
● Βιβλιογραφία.....	24

## Εισαγωγή

Η πειραματική διερεύνηση και βελτιστοποίηση ενός εμβολοφόρου κινητήρα είναι πολύ δαπανηρή διαδικασία. Έτσι, τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί λογισμικά προσομοίωσης που βοηθούν ιδιαίτερα σε αυτές τις εργασίες, χωρίς το κόστος πειράματος. Ένα τέτοιου είδους πρόγραμμα κατασκευάστηκε για να διερευνηθεί ένας συγκεκριμένος κινητήρας. Το πρόγραμμα και η διερεύνηση, περιγράφονται στην παρούσα αναφορά.

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα φαίνονται παρακάτω:

<b>Κινητήρας Otto, άμεσης έγχυσης επιβατικού οχήματος</b>					
<b>1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά θαλάμου καύσης</b>					
Διάμετρος εμβόλου	[m]	0.085	Λόγος επιφανειών κυλινδροκεφαλής - εμβόλου	[-]	1.15
Μήκος διωστήρα	[m]	0.145	Απόσταση μεταξύ επιφάνειας του εμβόλου και του δακτυλίου συμπίεσης [h]	[m]	0.01
Ακτίνα στροφάλου	[m]	0.045			
Σχέση συμπίεσης	[-]	11			
<b>2. Οριακές συνθήκες</b>					
			Θερμοκρασία περιβάλλοντος	[K]	300
Πίεση εξαγωγής	[Pa]	$10^5$	Θερμοκρασία τοιχωμάτων	[K]	400
<b>3. Παράμετροι καύσης</b>					
Παράμετρος μορφής	[-]	2.3	Λόγος στροβιλισμού εισαγωγής	[-]	2
Διάρκεια καύσης	[°]	58	Σημείο αναφοράς N [rpm] - bmer [bar]	2000 [rpm]	3 [bar]
Γωνία έναυσης	[°]	-20	Λόγος αέρα (λ)	[-]	1.0
<b>4. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά βαλβίδων</b>					
Διάμετρος εισαγωγής	[m]	0.035	Βύθισμα	[m]	0.01
Διάμετρος εξαγωγής	[m]	0.03	Αριθμός βαλβίδων	[-]	4
<b>5. Χρονισμός βαλβίδων</b>					
Άνοιγμα εισαγωγής	[°]	332	Άνοιγμα εξαγωγής	[°]	84
Κλείσιμο εισαγωγής	[°]	604	Κλείσιμο εξαγωγής	[°]	348

## Μαθηματικό Μοντέλο

Για την προσομοίωση του κυλίνδρου αξιοποιούνται τα παρακάτω μοντέλα:

- ◆ Ισοζύγιο Ενέργειας
- ◆ Μοντέλο Μετάδοσης Θερμότητας του Woschni
- ◆ Μοντέλο ροής μέσο βαλβίδων
- ◆ Μοντέλο όγκου κυλίνδρου
- ◆ Μοντέλο Καύσης Vibe
- ◆ Συνάρτηση του Justi
- ◆ Συναρτήσεις Παραμέτρων Καύσης του Csallner
- ◆ Τριώνυμο εκτίμησης fmer

### Ισοζύγιο Ενέργειας:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\left[ -\frac{RT}{V} \frac{dV}{dt} + \left( \frac{dQ_W}{dt} + \frac{dQ_B}{dt} + \sum \frac{dm_i}{dt} h_i - u \frac{dm}{dt} \right) \frac{1}{m} - \frac{\partial u}{\partial F} \frac{dF}{dt} \right]}{\frac{\partial u}{\partial T}}$$

### Μοντέλο Μετάδοσης Θερμότητας:

$$\frac{dQ_W}{dt} = \sum_i a_i A_i (T_{W,i} - T_{GAS}), \text{ με } i=1,2,3$$

1. Έμβολο
2. Κυλινδροκεφαλή
3. Χιτώνιο

$$a = 127,93 b^{-0.2} P^{0.8} \nu^{0.8} T^{-0.53} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad \text{όπου ,}$$

- P η πίεση [bar]
- b η διάμετρος του εμβόλου [m]
- T η θερμοκρασία του αέριου μίγματος [Kelvin]

$$v = C_1 c_m + C_2 \frac{V_h T_1}{P_1 V_1} (P - P_0)$$

$$C_1 = \begin{cases} 6,18 + 0,417 \frac{c_u}{c_m} : \text{Εναλλαγή μίγματος} \\ 2,28 + 0,308 \frac{c_u}{c_m} : \text{Συμπίεση / Εκτόνωση} \end{cases}$$

$$C_2 = 0,00324 \text{ [m/sK]}$$

Με τις τιμές  $T_1$ ,  $P_1$ ,  $V_1$  να αναφέρονται στην έναρξη της συμπίεσης, ενώ η  $P_0$  να είναι η πίεση αν δεν γινόταν καύση. Έτσι ο δεύτερος όρος παραμένει μηδενικός σε όλο το κύκλο εκτός της φάσης της καύσης.

Μοντέλο Ροής Μέσο Βαλβίδων:

$$\text{lift} = \begin{cases} 0.5 * \text{Lift}_{\max} * (1 - \cos(2 * \pi * (\theta - VO) / (VC - VO))) \\ \text{για } VO \leq \theta \leq VC \\ 0 \end{cases}$$

VC = valve closing crank angle

VO = valve opening crank angle

$$A = \begin{cases} \pi d l & l < 0.25 d \\ 0.25 \pi d^2 & l \geq 0.25 d \end{cases}$$

Για τη ροή μάζας:

$$\dot{m} = C_f \cdot \dot{m}_{theo}$$

$$\dot{m}_{theo.} = A_1 \sqrt{P_0 \rho_0} \Psi$$

$$\Psi = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left( \pi^{\frac{2}{\kappa}} - \pi^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)}$$

$$\pi = \frac{P_1}{P_0}$$

Αν ο λόγος π πέσει κάτω από μια κρίσιμη τιμή εμφανίζεται ηχητική ροή στη βαλβίδα και η ροή στραγγαλίζεται. Τότε θα έχουμε:

$$m_{cr} = \rho_0 \cdot C_f \cdot A \cdot c_0 \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma+1/2 \cdot (\gamma-1)}$$

$$c_0 = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_0}$$

Μοντέλο Όγκου Κυλίνδρου:

$$V(\phi) = V_C + A_{CYL} \cdot s(\phi)$$

$$A_{CYL} = \frac{\pi}{4} \cdot b^2$$

$$s(\phi) = r + l - \sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2(\phi)} - r \cdot \cos(\phi)$$

$$\frac{ds}{d\phi} = r \cdot \left[ \sin(\phi) + \frac{\lambda_s}{2} \cdot \frac{\sin(2\phi)}{\sqrt{1 - \lambda_s^2 \cdot \sin^2(\phi)}} \right], \quad \text{όπου } \lambda_s = r/l$$

$$\frac{dV}{d\phi} = A_{CYL} \cdot \frac{ds}{d\phi} \quad \text{και} \quad \frac{dV}{dt} = \omega \cdot \frac{dV}{d\phi}$$

### Μοντέλο Καύσης Vibe:

$$Q_B(\phi) = m_B H_u \left( 1 - e^{-a \left( \frac{\phi - \phi_{BB}}{\Delta \phi_{BD}} \right)^{m+1}} \right)$$

$$\frac{dQ_B}{d\phi} = m_B H_u \frac{a(m+1)}{\Delta \phi_{BD}} \left( \frac{\phi - \phi_{BB}}{\Delta \phi_{BD}} \right)^m e^{-a \left( \frac{\phi - \phi_{BB}}{\Delta \phi_{BD}} \right)^{m+1}}$$

### Συνάρτηση του Justi:

$$u(T, \lambda) = 144.5 \left[ \begin{aligned} &1356.8 + \left( 489.6 + \frac{46.4}{\lambda^{0.93}} \right) (T - T_{bez}) \cdot 10^{-2} \\ &+ \left( 7.768 + \frac{3.36}{\lambda^{0.8}} \right) (T - T_{bez})^2 \cdot 10^{-4} \\ &- \left( 0.00975 + \frac{0.0485}{\lambda^{0.75}} \right) (T - T_{bez})^3 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \right] \left[ \frac{J}{kg} \right]$$

$$\frac{\partial u}{\partial T} = 144.5 \left[ \begin{aligned} &\left( 489.6 + \frac{46.4}{\lambda^{0.93}} \right) \cdot 10^{-2} \\ &+ 2 \cdot \left( 7.768 + \frac{3.36}{\lambda^{0.8}} \right) (T - T_{bez}) \cdot 10^{-4} \\ &- 3 \cdot \left( 0.00975 + \frac{0.0485}{\lambda^{0.75}} \right) (T - T_{bez}) \cdot 10^{-6} \end{aligned} \right] \left[ \frac{J}{kgK} \right]$$

$$\frac{\partial u}{\partial F} = 144.5 \left[ \begin{aligned} &0.93 \cdot \left( \frac{46.4}{F^{0.07}} \right) (T - T_{bez}) \cdot 10^{-2} \\ &+ 0.8 \cdot \left( \frac{3.36}{F^{0.2}} \right) (T - T_{bez})^2 \cdot 10^{-4} \\ &- 0.75 \cdot \left( \frac{0.0485}{F^{0.25}} \right) (T - T_{bez})^3 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \right] \left[ \frac{J}{kg} \right]$$

## Συναρτήσεις Παραμέτρων Καύσης Csallner:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_A g_{ZZP} g_n g_{x_{RG}} g_{wi}$$

$$m = m_A h_{ZZP} h_n h_{x_{RG}} h_{wi}$$

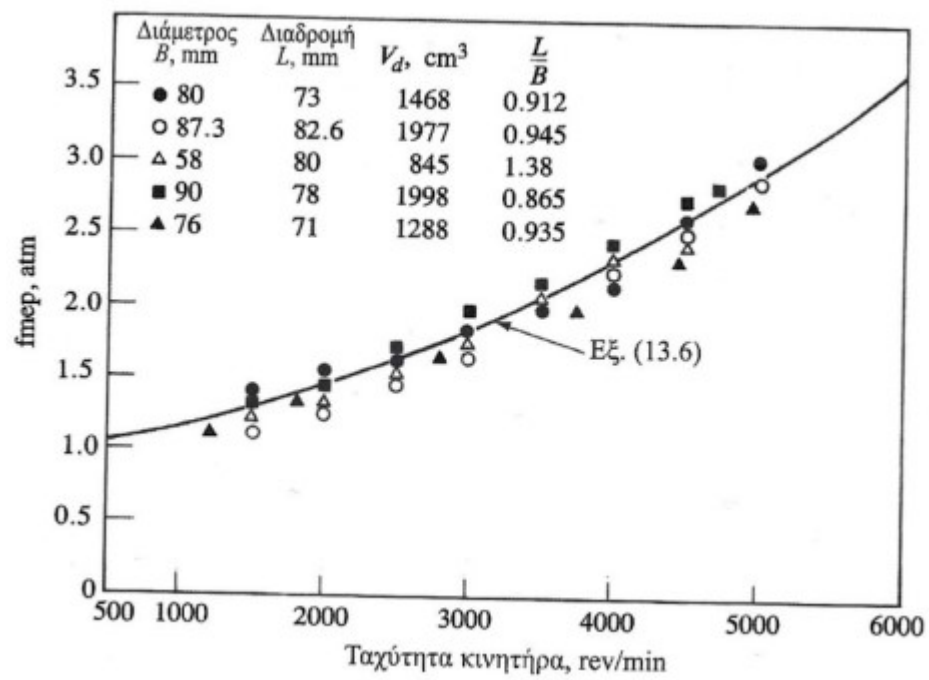
Brenndauer	Formparameter
$g_{ZZP} = \frac{a + b\varphi_{ZZP}^{-0.5}}{a + b\varphi_{ZZP,A}^{-0.5}}$	$h_{ZZP} = \frac{a + b\varphi_{ZZP}^{-2}}{a + b\varphi_{ZZP,A}^{-2}}$
$g_{x_{RG}} = \frac{a + b x_{RG}}{a + b x_{RG,A}}$	$h_{x_{RG}} = \frac{a + b x_{RG}^2}{a + b x_{RG,A}^2}$
$g_n = \frac{a + b n^{-0.5}}{a + b n_A^{-0.5}}$	$h_n = \frac{a + b n^{1.5}}{a + b n_A^{1.5}}$
$g_{wi} = \frac{a + b wi}{a + b wi_A}$	$h_{wi} = \frac{a + b \ln(wi)}{a + b \ln(wi_A)}$

## Τιμές Παραμέτρων:

Brenndauer	gedrosselt	a	0,596	0,429	1,355	1,115
		b	2,480	0,031	-18,49	-0,346
	ungedrosselt	a	0,477	0,690	1,701	1,295
		b	3,200	0,017	-34,50	-0,699
Formparameter	gedrosselt	a	0,964	1,076	1,046	1,007
		b	75,56	$-2,534 \cdot 10^{-4}$	$-4,075 \cdot 10^{-7}$	0,004
	ungedrosselt	a	1,000	1,061	1,016	1,053
		b	19,36	$-1,656 \cdot 10^{-4}$	$-1,206 \cdot 10^{-7}$	0,065



### Τριώνυμο Εκτίμησης $f_{mep}$ :



$$f_{mep} = 6.1419 \cdot 10^{-8} N^2 + 1.0862 \cdot 10^{-4} N + 0.77735 \quad [\text{bar}]$$

# Αλγόριθμος

## Κύκλος

Ο κύκλος χωρίζεται σε 7 διαφορετικές φάσεις:

1. Καύση
2. Εκτόνωση
3. Εκκένωση
4. Επικάλυψη Βαλβιδών
5. Πλήρωση
6. Συμπίεση
7. Έγχυση

Για κάθε φάση υπολογίζεται η κλίση θερμοκρασίας ανάλογα με τους κατάλληλους όρους. Συγκεκριμένα, για κάθε φάση:

### Καύση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\frac{RT}{V} \frac{dV}{dt} + \left( \frac{dQ_W}{dt} + \frac{dQ_B}{dt} \right) \frac{1}{m}}{\frac{du}{dT}}$$

### Εκτόνωση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\frac{RT}{V} \frac{dV}{dt} + \frac{dQ_W}{dt} \frac{1}{m}}{\frac{du}{dT}}$$

### Εκκένωση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\frac{RT}{V} \frac{dV}{dt} + \left( \frac{dQ_W}{dt} + \frac{dm_{exh}}{dt} h_{exh} - u \frac{dm}{dt} \right) \frac{1}{m}}{\frac{du}{dT}}$$

Επικάλυψη Βαλβίδων:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\frac{RT}{V} \frac{dV}{dt} + \left( \frac{dQ_w}{dt} + \frac{dm_{int}}{dt} h_{int} + \frac{dm_{exh}}{dt} h_{exh} - u \frac{dm}{dt} \right) \frac{1}{m} - \frac{du}{dF} \frac{dF}{dt}}{\frac{du}{dT}}$$

Πλήρωση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\frac{RT}{V} \frac{dV}{dt} + \left( \frac{dQ_w}{dt} + \frac{dm_{int}}{dt} h_{int} - u \frac{dm}{dt} \right) \frac{1}{m} - \frac{du}{dF} \frac{dF}{dt}}{\frac{du}{dT}}$$

Συμπίεση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\frac{RT}{V} \frac{dV}{dt} + \frac{dQ_w}{dt} \frac{1}{m}}{\frac{du}{dT}}$$

Έγχυση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\left[ -\frac{RT}{V} \frac{dV}{dt} + \left( \frac{dQ_w}{dt} - u \frac{dm}{dt} \right) \frac{1}{m} - \frac{du}{dF} \frac{dF}{dt} \right]}{\frac{du}{dT}}$$

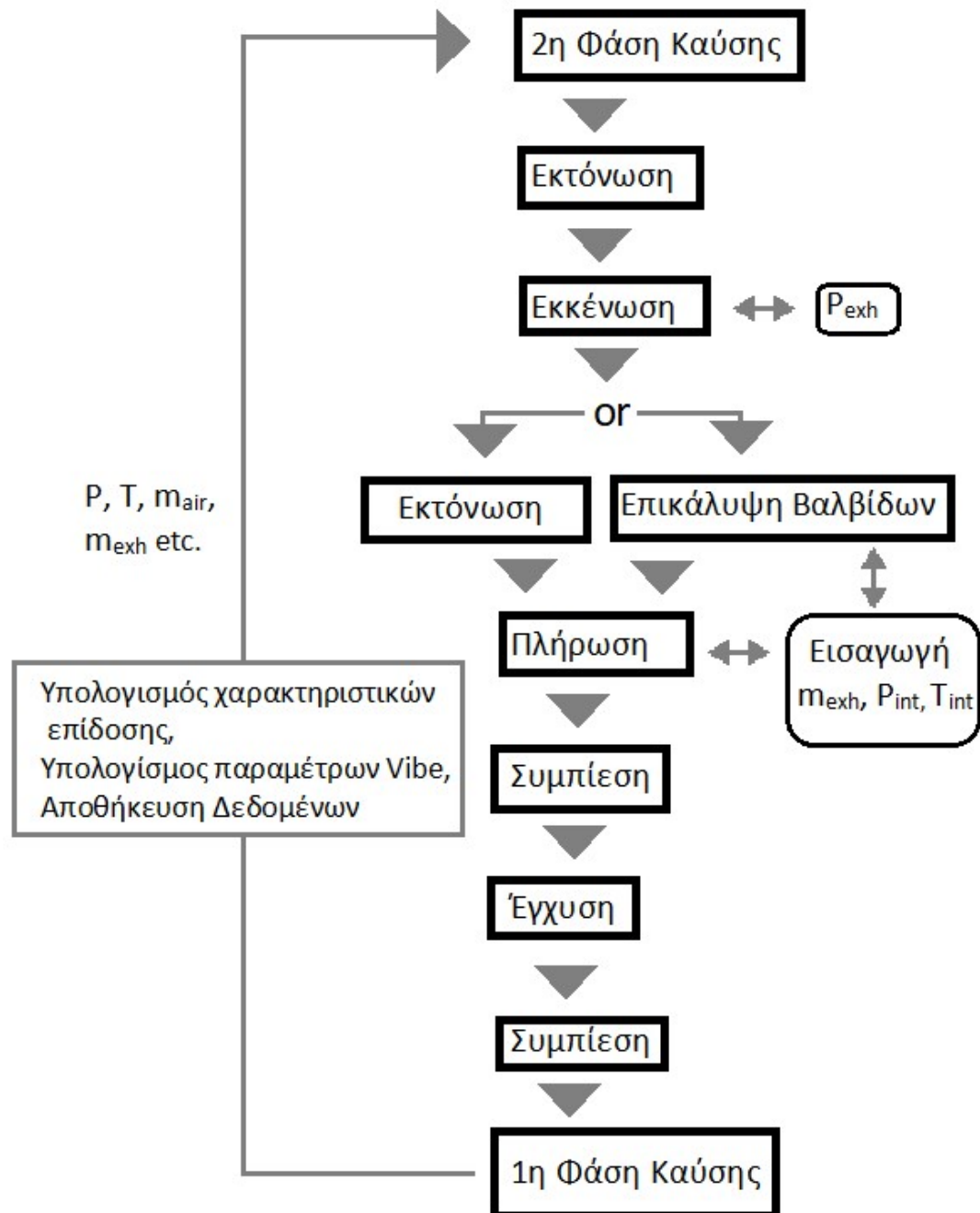
Η θερμότητα και η μάζα υπολογίζονται με απλοποιημένο ανάπτυγμα Taylor:

$$T_{\phi+\Delta\phi} = T_{\phi} + \frac{dT}{dt} \frac{\Delta\phi}{\omega}$$

$$m_{\phi+\Delta\phi} = m_{\phi} + \frac{dm}{dt} \frac{\Delta\phi}{\omega}$$

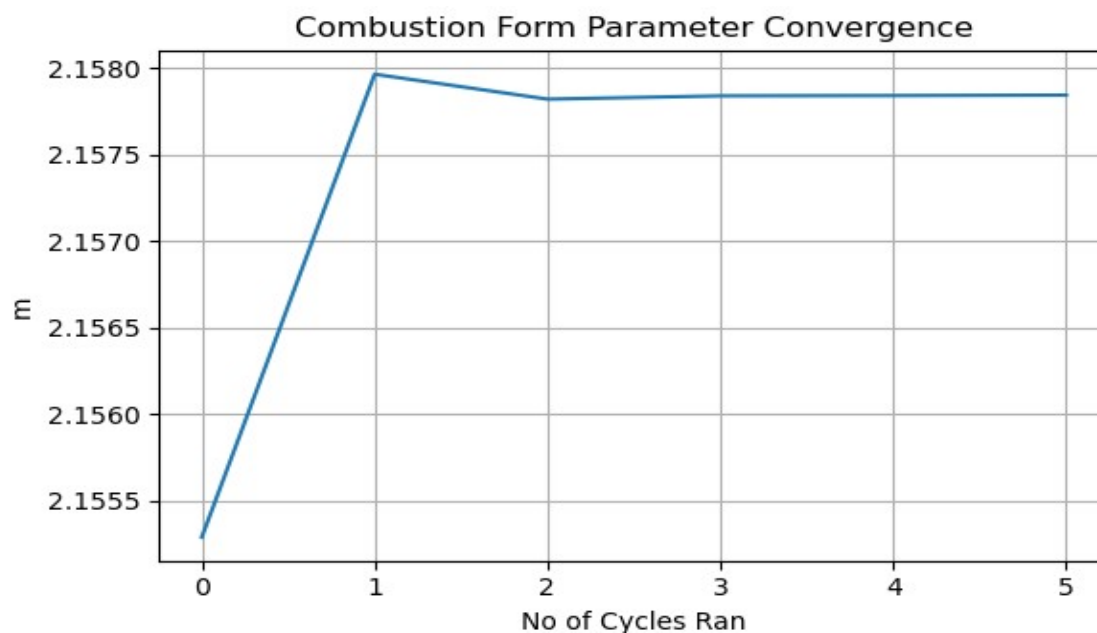
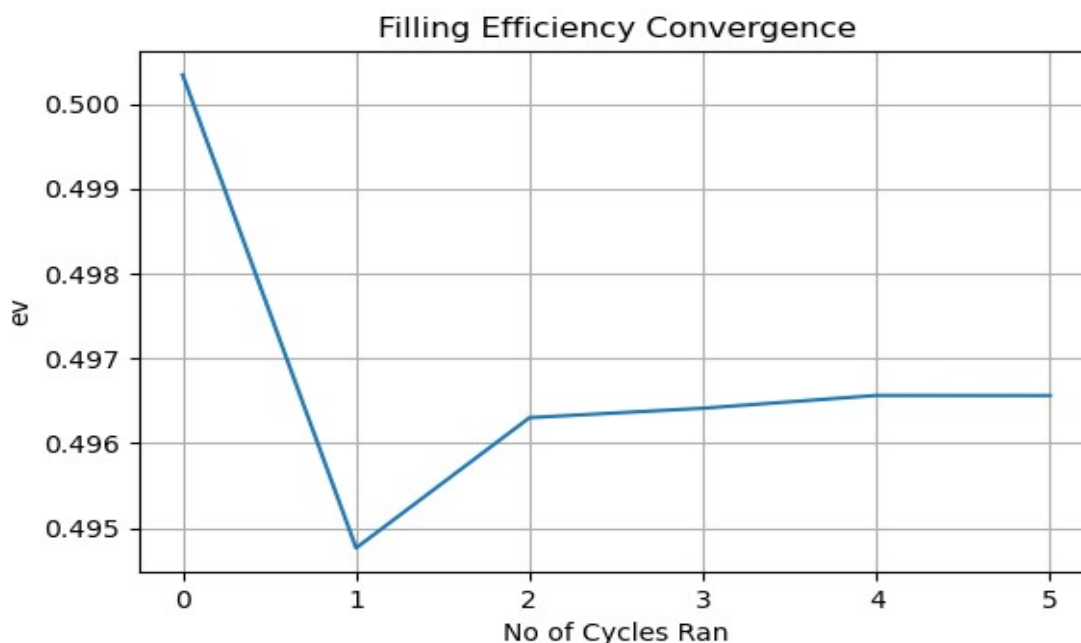
Στο τέλος κάθε κύκλου υπολογίζονται νέες παράμετροι καύσης Vibe.

Το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου φαίνεται παρακάτω:



### Μόνιμη λειτουργία

Αφού εισαχθούν οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες, η προσομοίωση αφήνεται να τρέξει για μερικούς κύκλους με τον κάθε ένα να “ταϊζει” τις τελικές συνθήκες που υπολογίζει στον επόμενο κύκλο. Αφού ο κινητήρας τρέξει για μερικούς κύκλους, συγκλίνει στο σημείο μόνιμης λειτουργίας του, από όπου και παίρνονται τα μεγέθη επίδοσης του. Η σύγκλιση ενός τέτοιου μεγέθους, του βαθμού πλήρωσης παρουσιάζεται παρακάτω. Επίσης παρουσιάζεται και η σύγκλιση της παραμέτρου μορφής καύσης. (Σημείο λειτουργίας:  $b_{\text{mep}} = 3.845 \text{ bar}$ ,  $N = 3000 \text{ rpm}$ )



## Σημείο Λειτουργίας

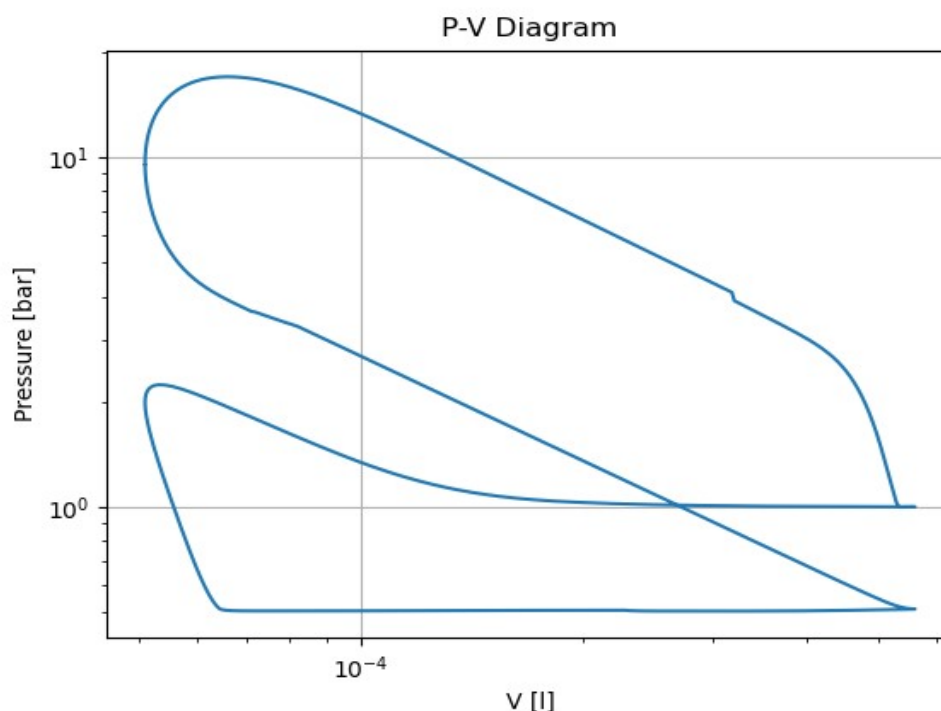
( $b_{mep} = 2.9 \text{ bar}$ ,  $N = 2600 \text{ rpm}$ )

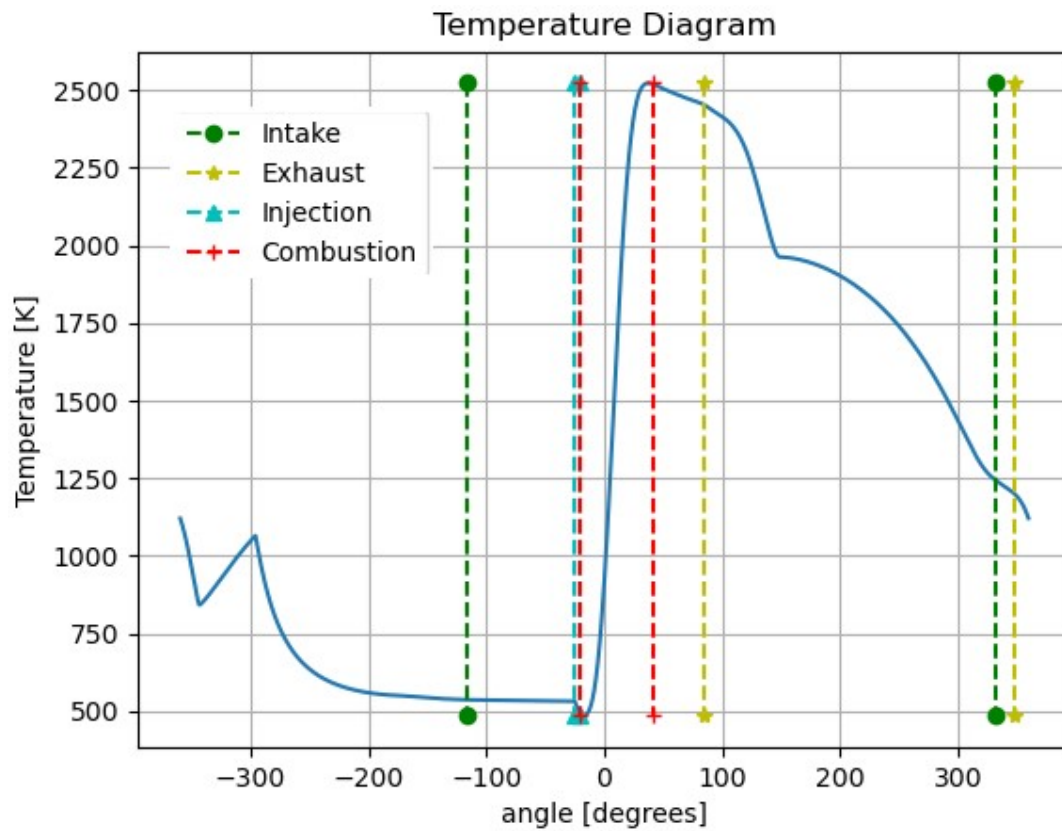
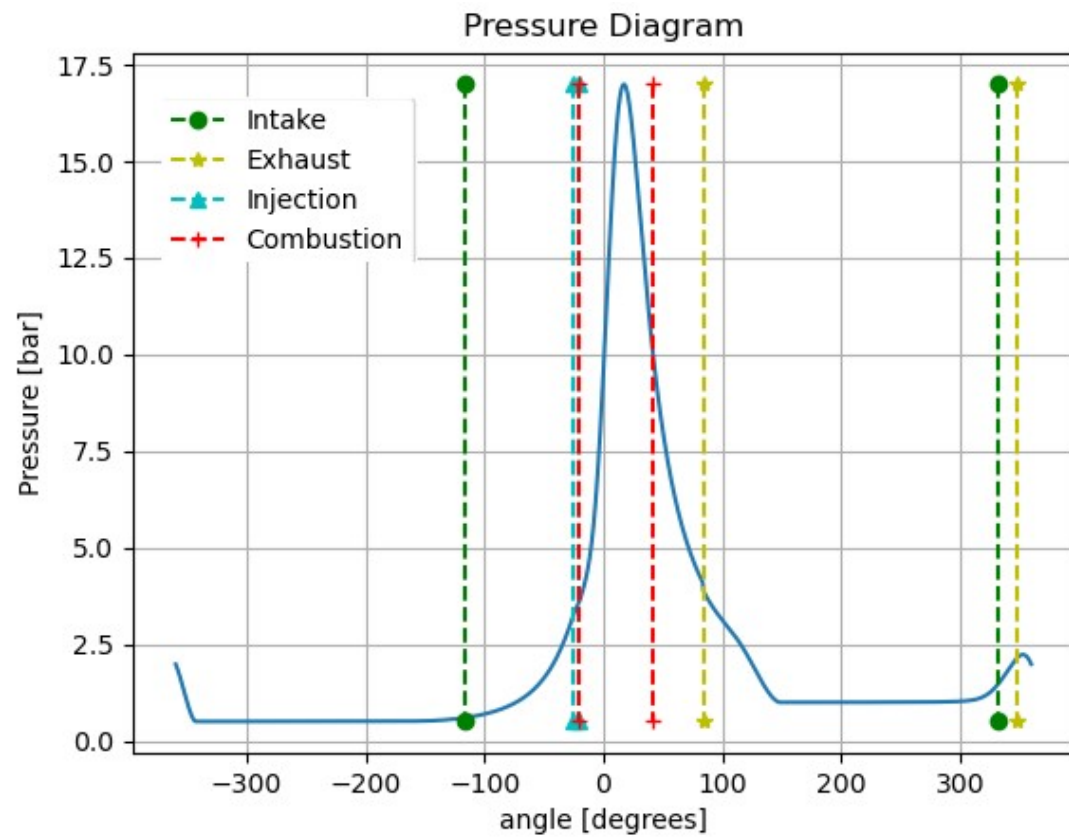
Για να γίνει εύρεση του σημείου λειτουργίας που ενδιαφέρει, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος διχοτόμησης (βάση του θεωρήματος Bolzano). Χρησιμοποιείται ένα διάστημα τιμών πιέσεων εισαγωγής το οποίο όλο και μικραίνει μέχρι να φτάσει η  $b_{mep}$  ικανοποιητικά κοντά στο σημείο ενδιαφέροντος. Έτσι βρίσκεται πίεση εισαγωγής:  $0.51 \text{ bar}$

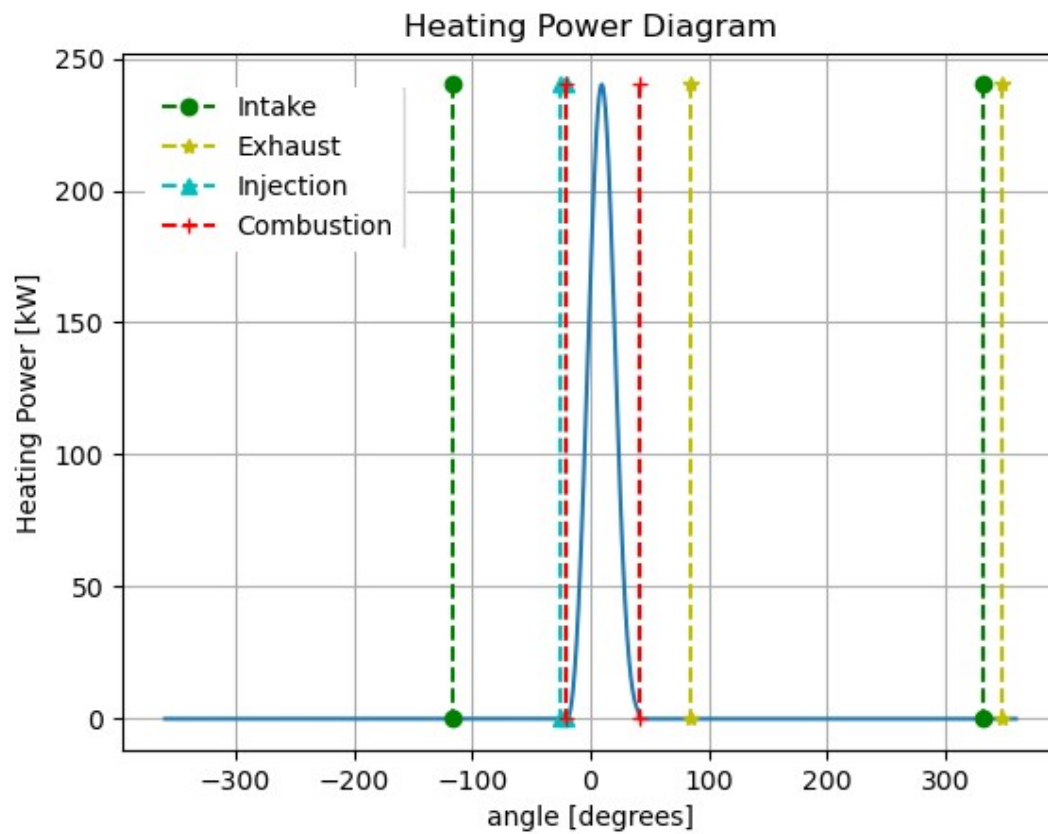
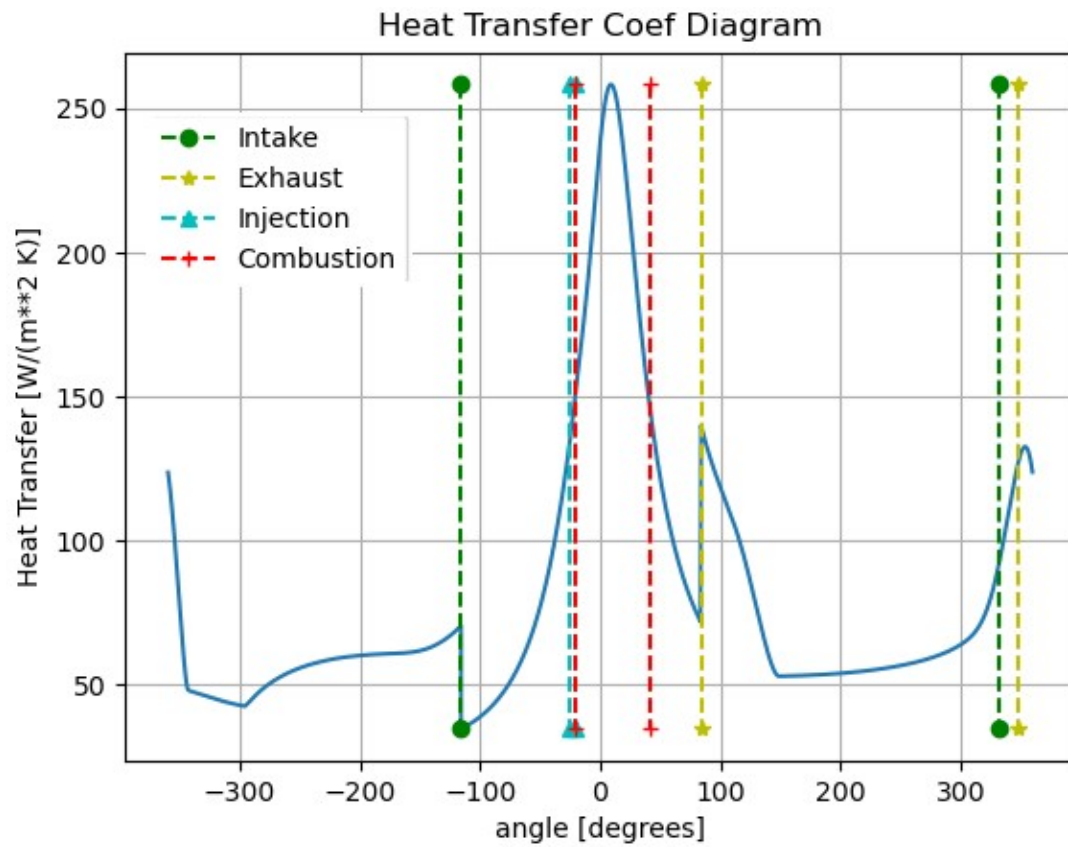
### Χαρακτηριστικά επίδοσης:

- $b_{mep} = 2.8989 \text{ bar}$
- $i_{mep_{net}} = 3.7918 \text{ bar}$
- $i_{mep_{gross}} = 4.3738 \text{ bar}$
- $p_{mep} = 0.5819 \text{ bar}$
- $f_{mep} = 1.4749 \text{ bar}$
- $P_{int} = 0.5103 \text{ bar}$
- $e_v = 0.4626$
- $f = 0.2071$
- $\eta_i = 0.4684$
- $\eta_b = 0.3581$
- $T_b = 11.78 \text{ Nm}$
- $W_b = 3.207 \text{ kW}$
- $bsfc = 231.62 \text{ g/kWh}$

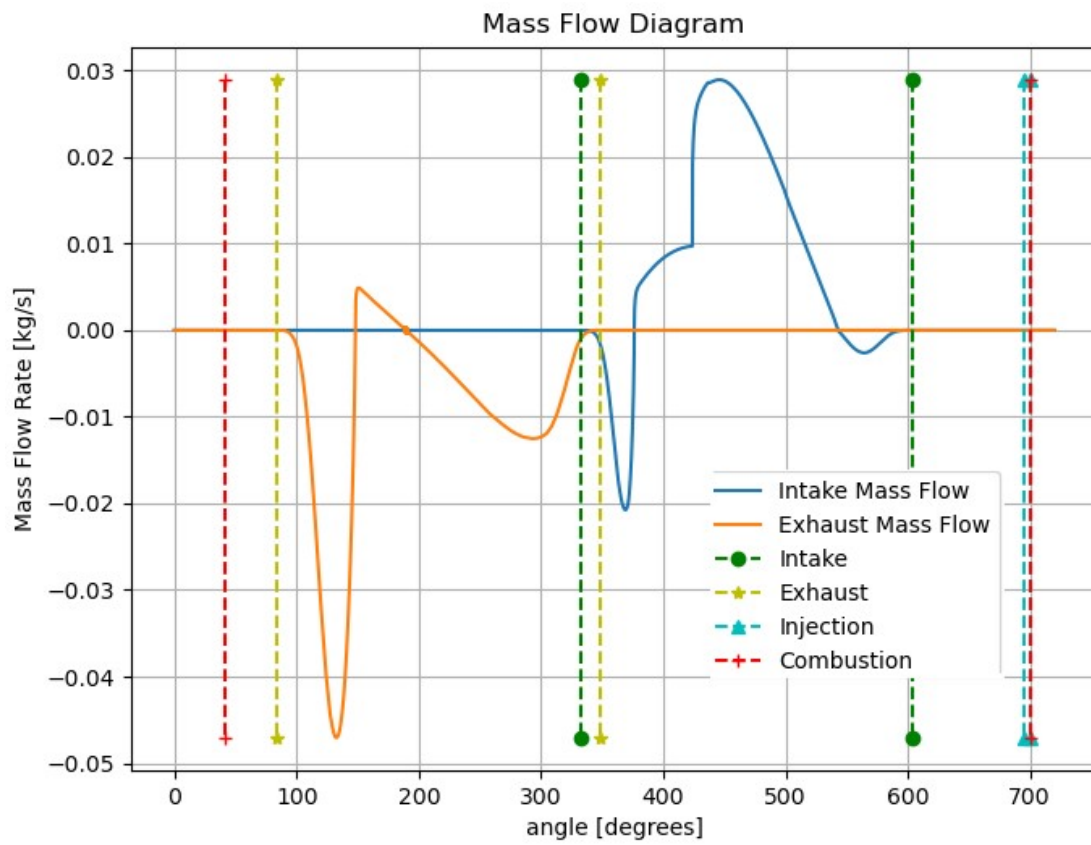
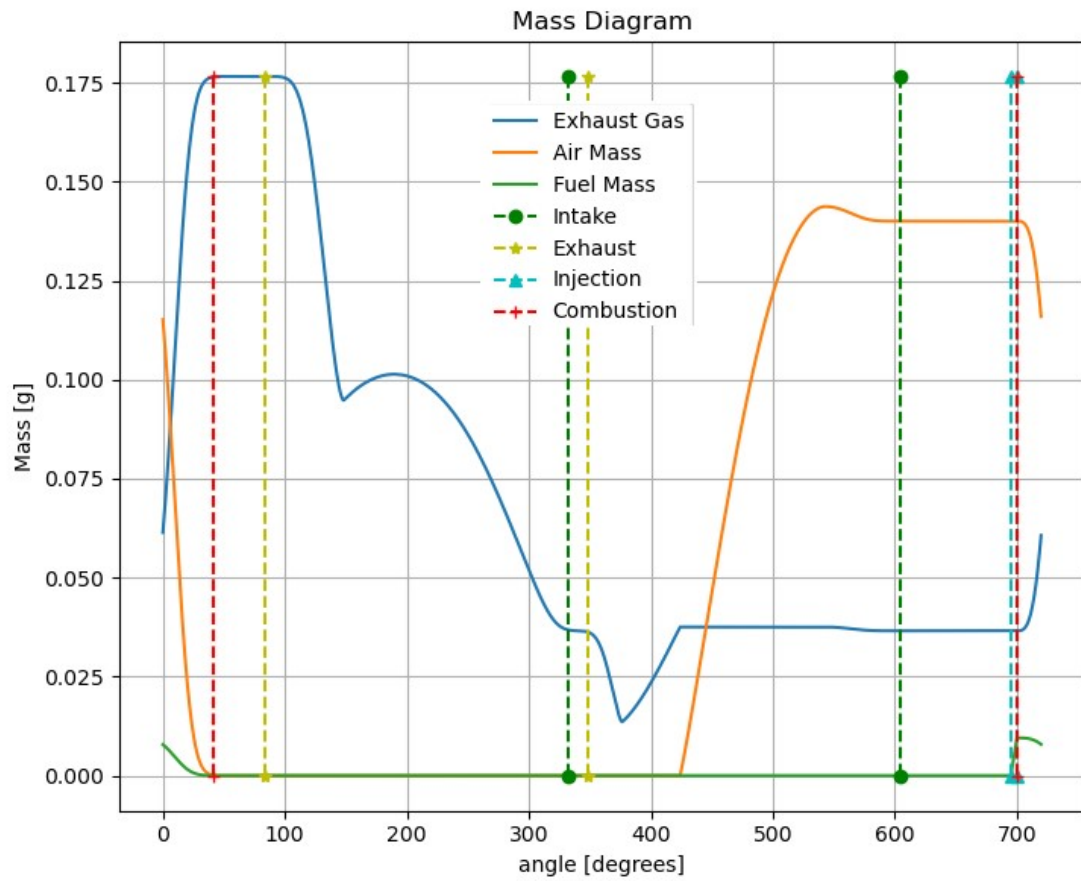
### Διαγράμματα:



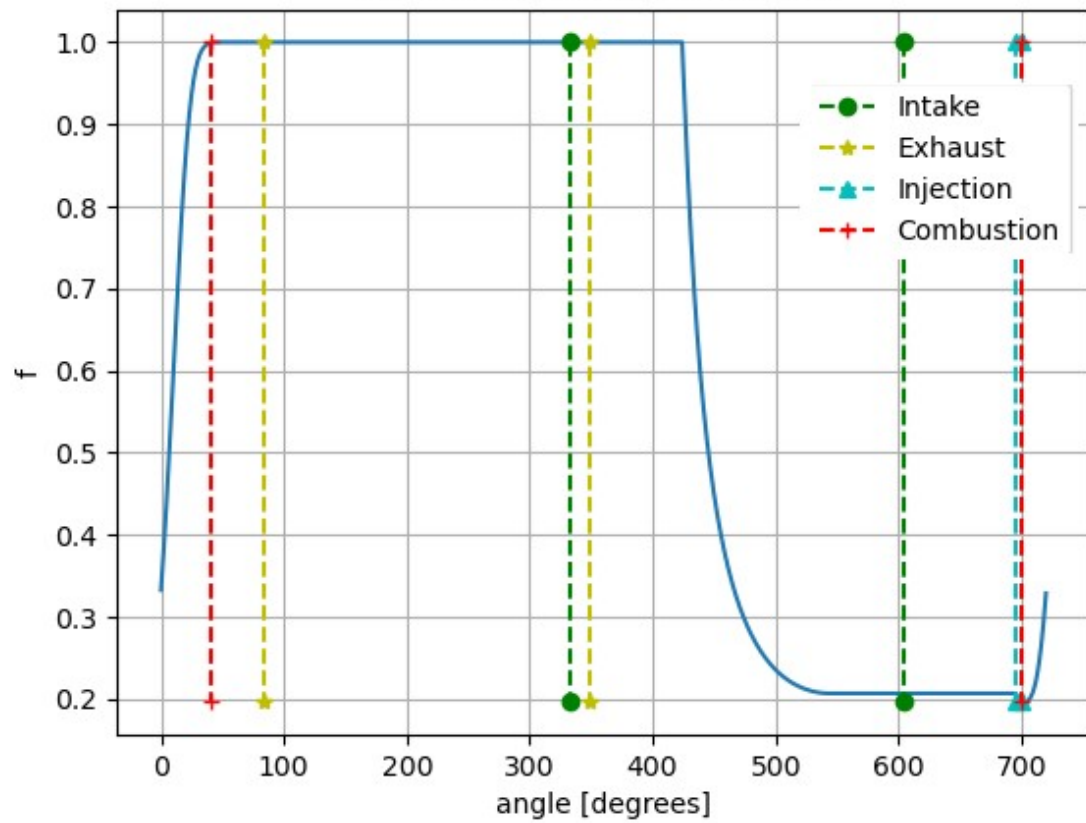




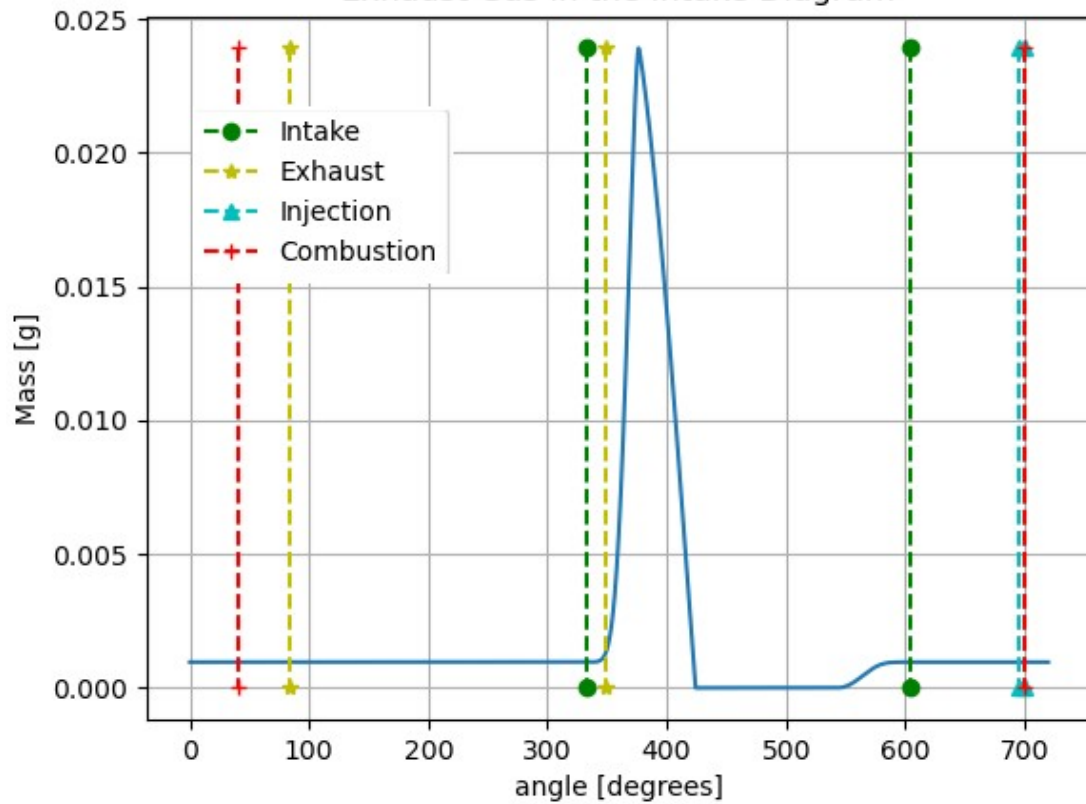




Burnt Mass Fraction Diagram

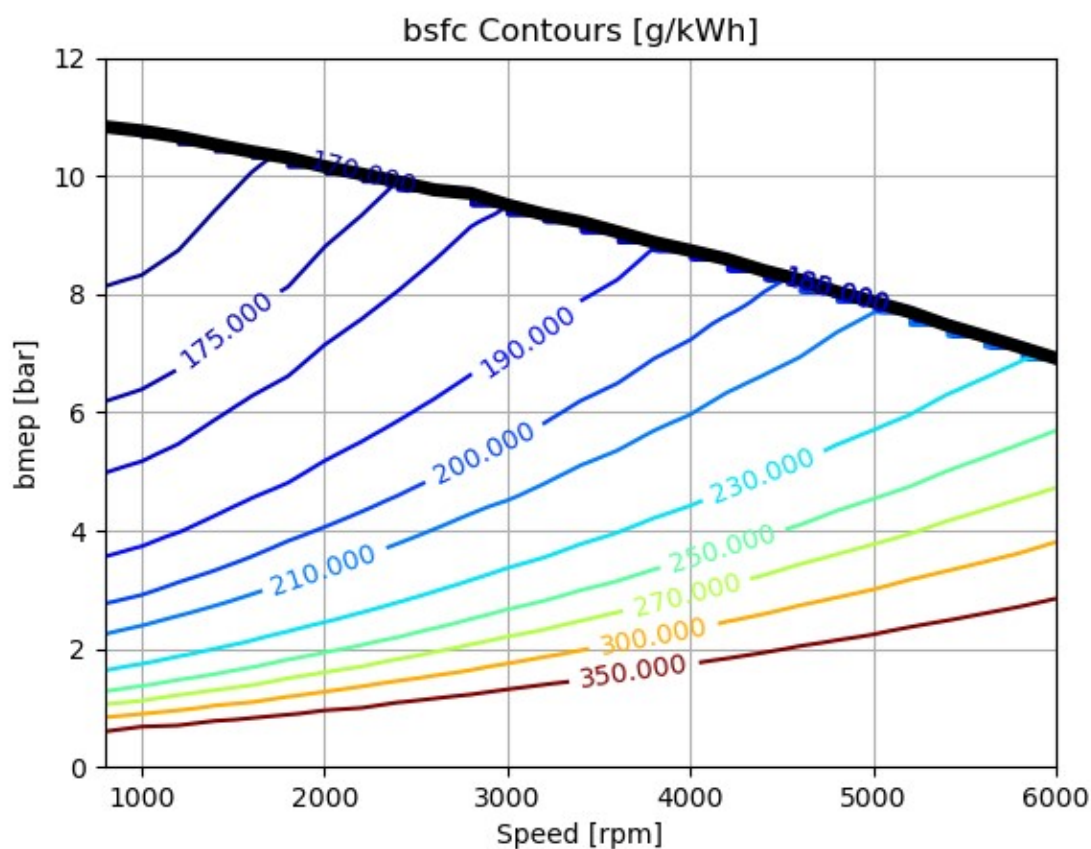
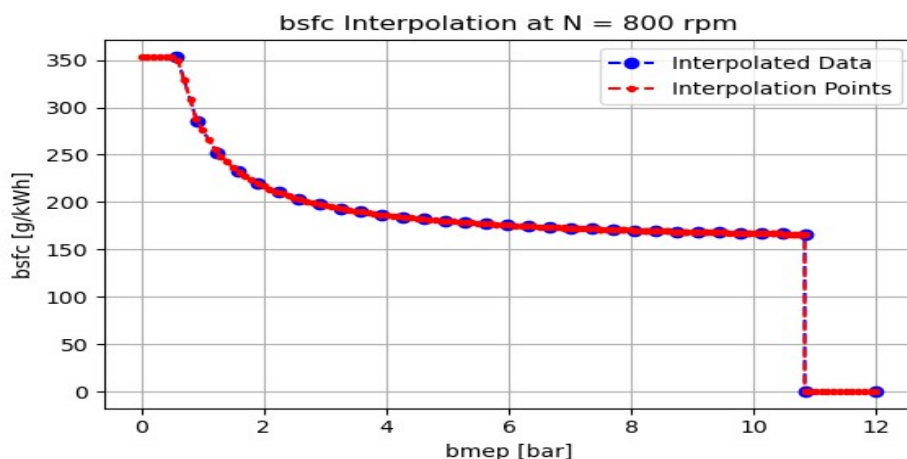


Exhaust Gas in the Intake Diagram



## Πεδίο Ειδικής Κατανάλωσης

Το υπολογιστικό κόστος για τον υπολογισμό συγκεκριμένων σημείων λειτουργίας είναι μεγάλο. Έτσι, το πεδίο ειδικής κατανάλωσης υπολογίζεται με άλλη μέθοδο. Συγκεκριμένα, για σταθερές στροφές υπολογίζονται οι  $b_{mep}$  και οι  $bsfc$ , για διάφορες πιέσεις εισαγωγής. Έπειτα γίνεται παρεμβολή των τιμών της  $bsfc$  σε επιλεγμένα grid points  $[N, b_{mep}]$ . Τέλος, τραβούνται οι ισοϋψείς.



## Βελτίωση Ειδικής Κατανάλωσης

(bmep = 2.9 bar, N = 2600 rpm)

Καθώς ο κύλινδρος λειτουργεί σε ιδιαίτερα χαμηλότερο φορτίο από το μέγιστο του, η πρώτη ιδέα είναι να “κοντίνουμε” το πεδίο ειδικής κατανάλωσης. Αυτό μπορεί να γίνει με μεταβολή στο χρονισμό των βαλβίδων. Συγκεκριμένα, με σύμβουλο το δυναμοδεικτικό αλλάζουμε το χρονισμό των βαλβίδων εξαγωγής, έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερος ο χρόνος εκτόνωσης. Έπειτα, ορίζουμε την πίεση εισαγωγής ίση με 1 bar ώστε να μην υπάρχει στραγγαλισμός. Η μείωση του φορτίου που επιζητείται γίνεται με αλλαγή χρονισμού βαλβίδων εισαγωγής ώστε ο κύκλος να ομοιάζει κύκλο Miller. Αφού βρεθεί μια κατάλληλη γωνία, τότε ρυθμίζεται λίγο η πίεση εισαγωγής με χρήση του αλγορίθμου διχοτόμησης, για να επιτευχθεί το ακριβές σημείο λειτουργίας. Επιπρόσθετα μετακινούμε το σημείο έγχυσης νωρίτερα, σε μια προσπάθεια να ρίξουμε την πίεση κατά την συμπίεση. Έτσι ο χρονισμός βαλβίδων γίνεται:

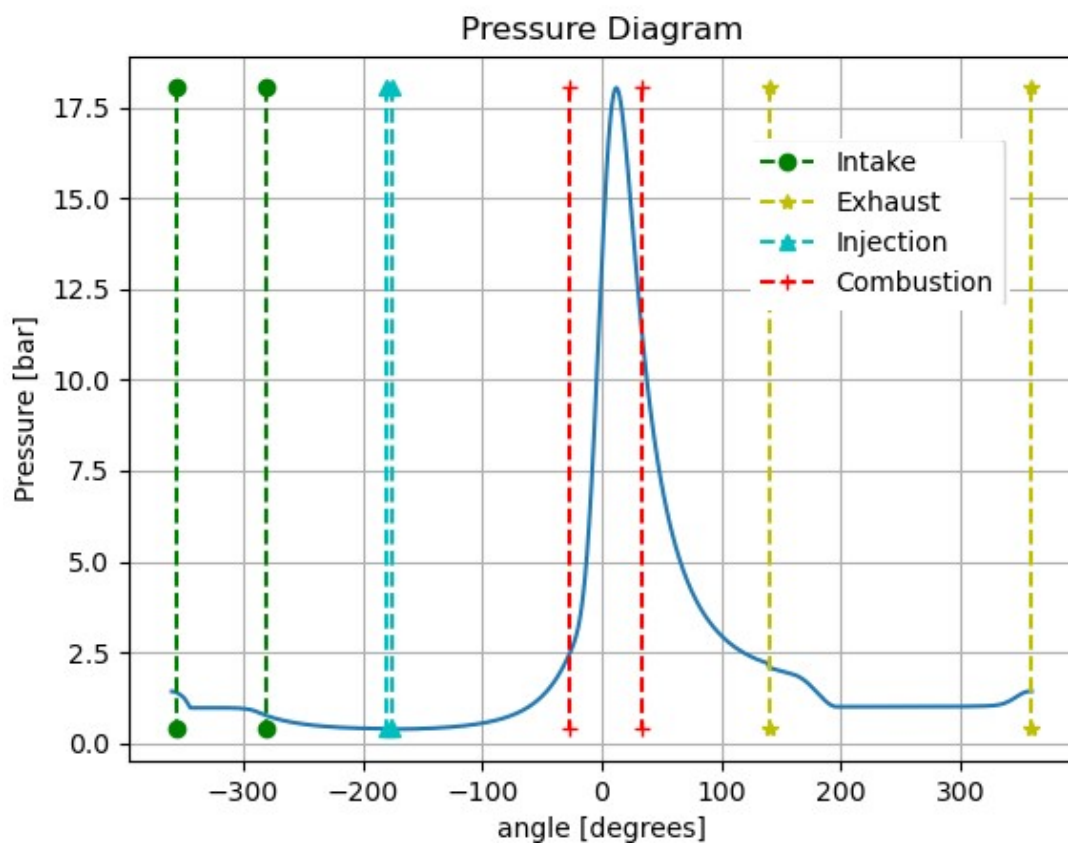
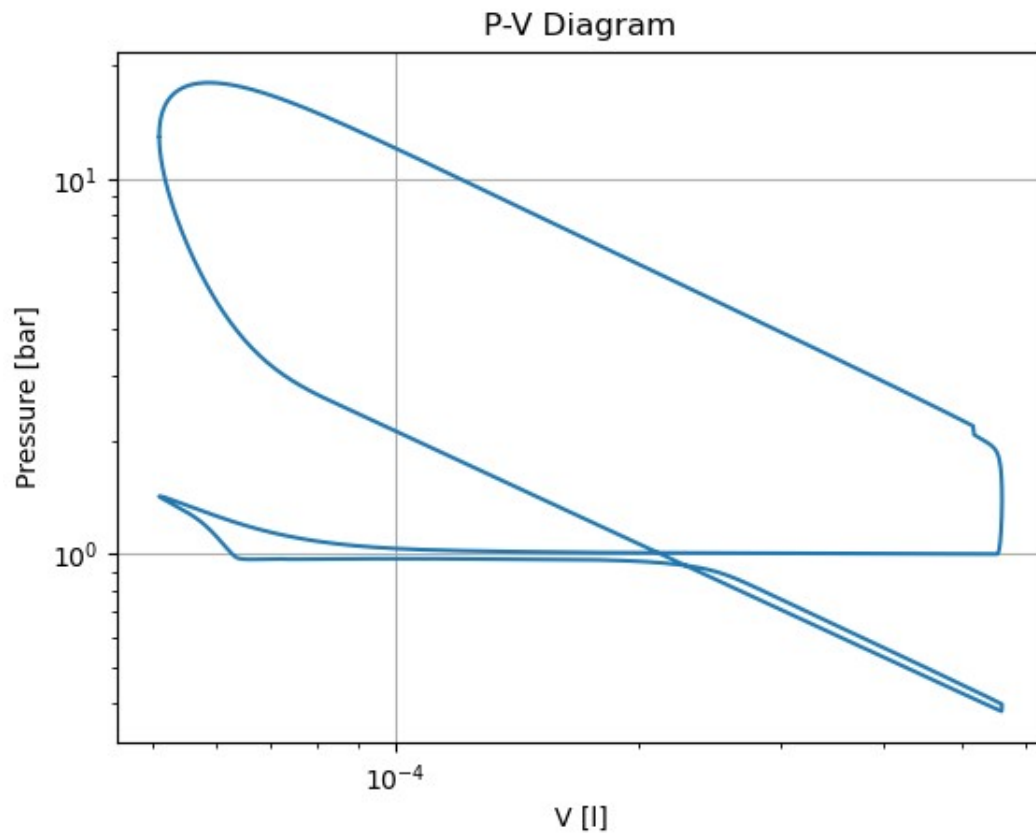
Άνοιγμα εισαγωγής	365	Άνοιγμα εξαγωγής	140
Κλείσιμο εισαγωγής	439	Κλείσιμο εξαγωγής	360

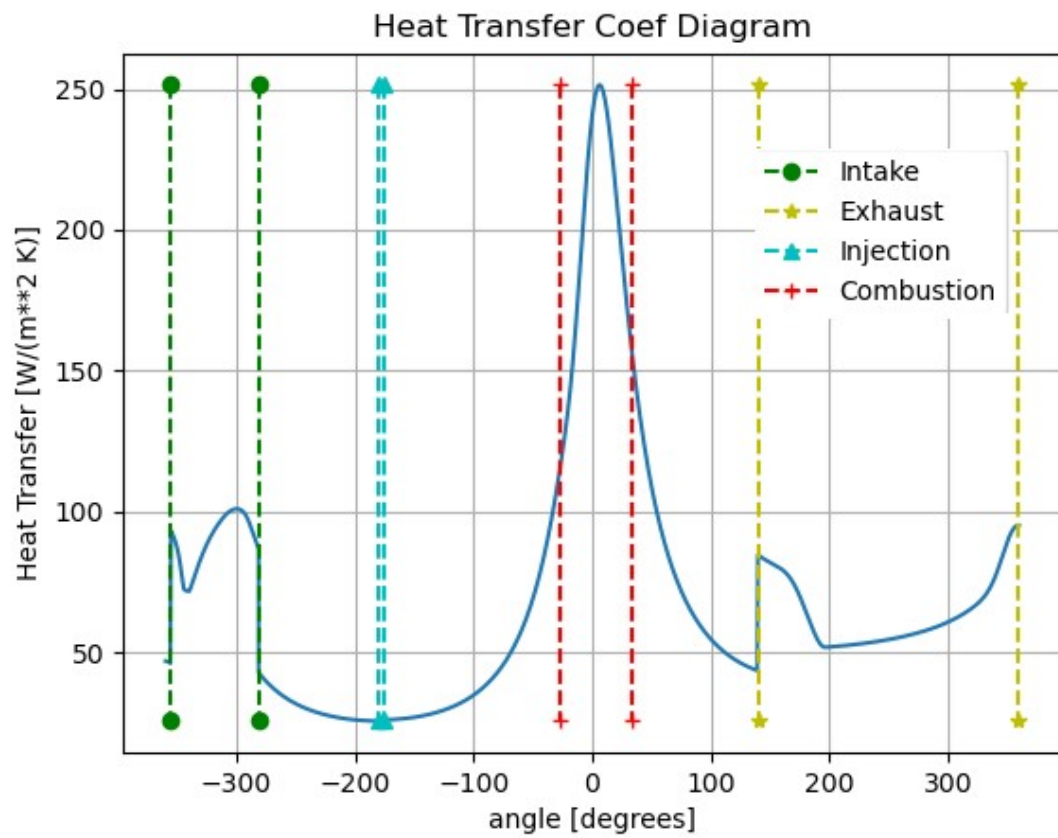
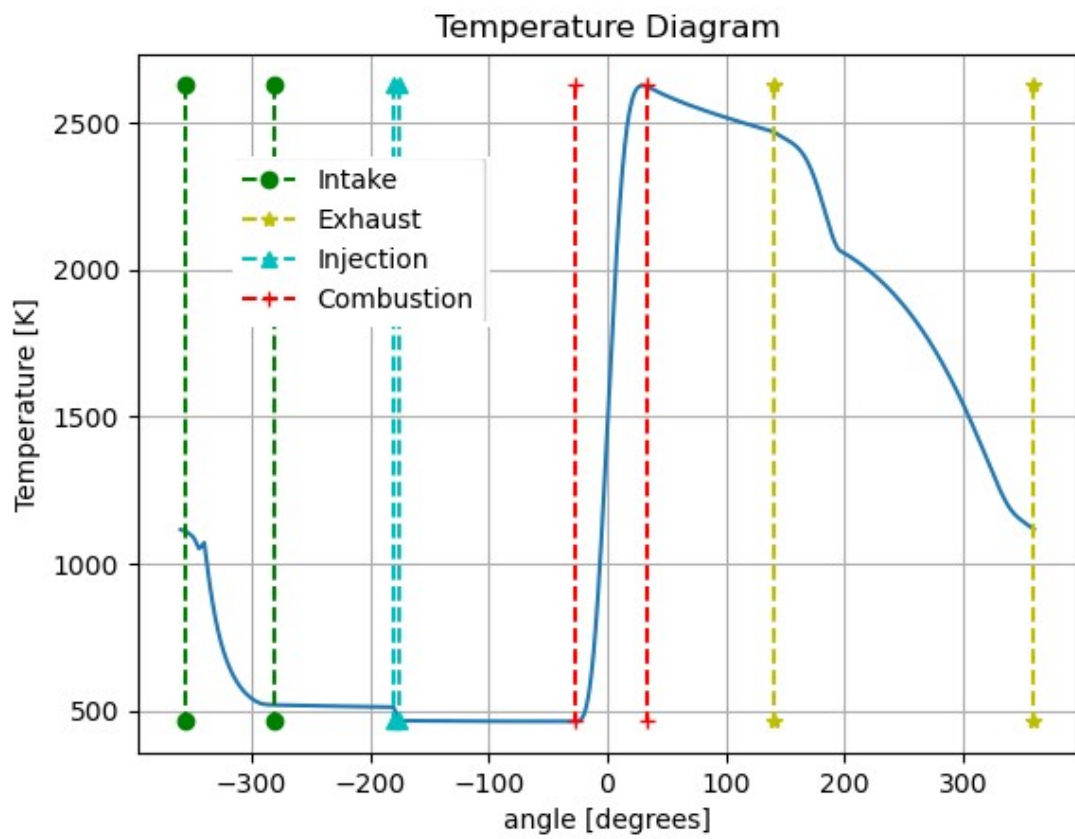
Και έχουμε,

### Χαρακτηριστικά επίδοσης:

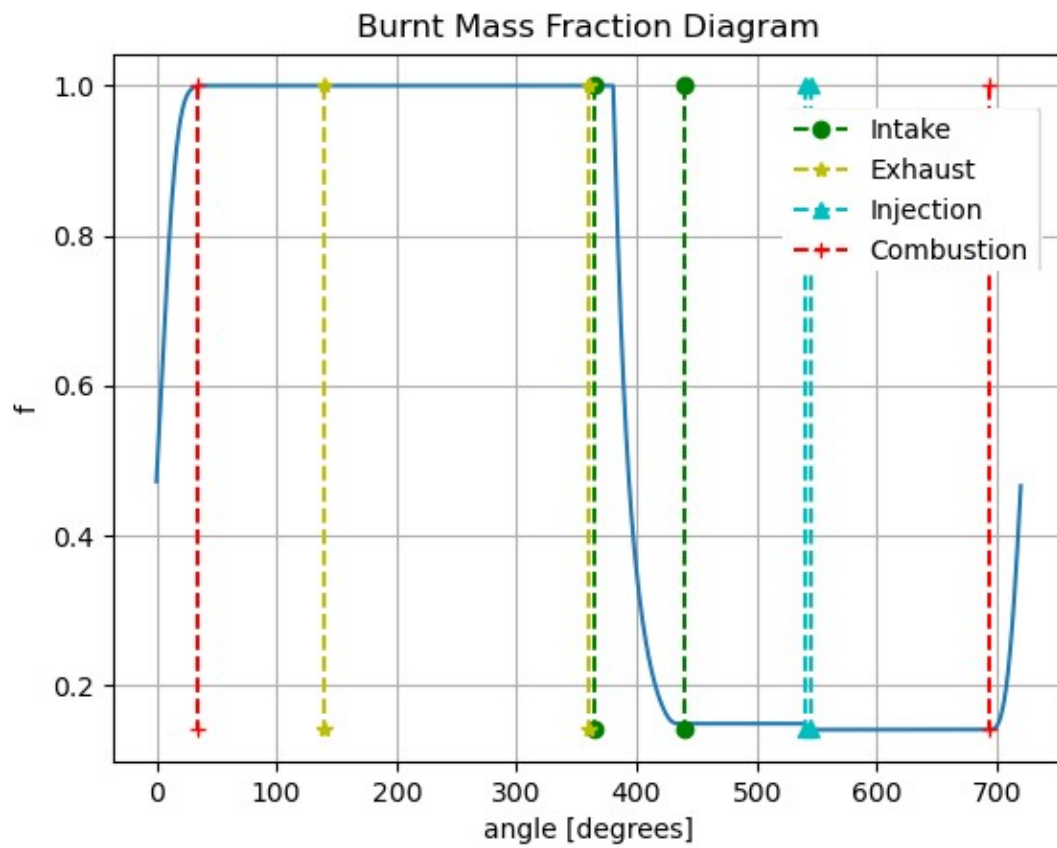
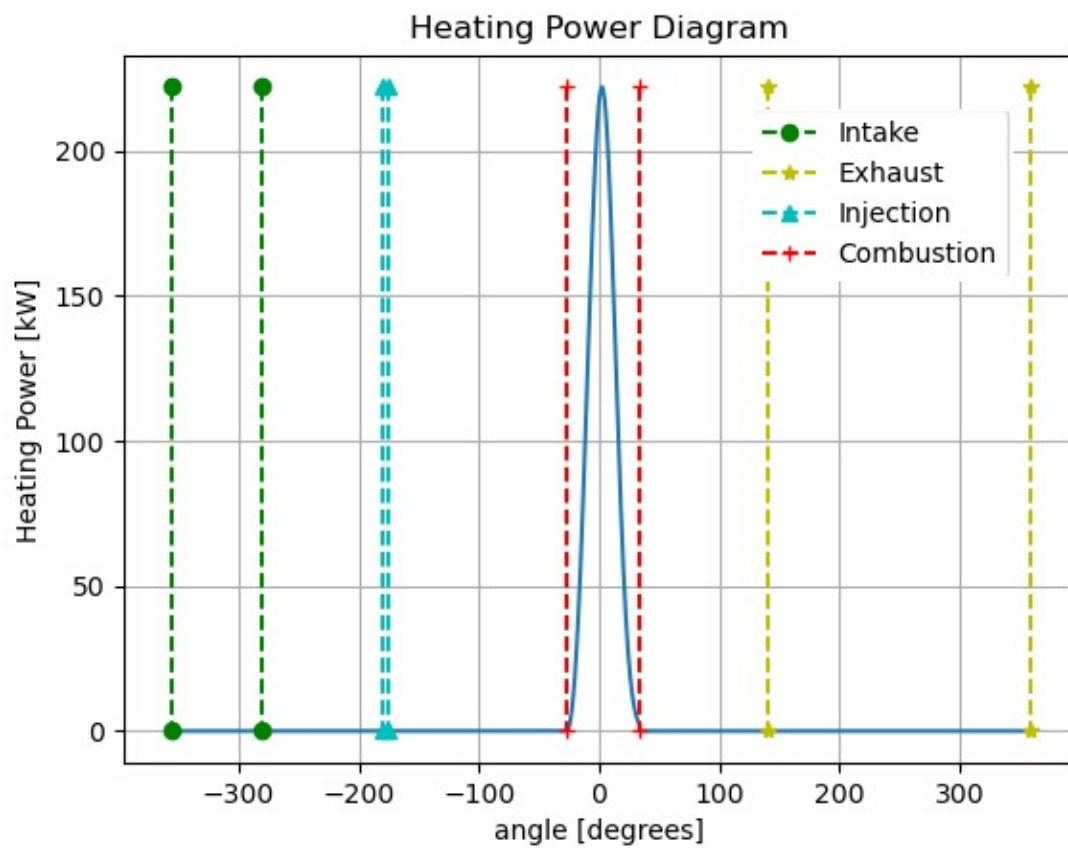
- **bmep = 2.9000 bar**
- **imep<sub>net</sub> = 4.092 bar**
- **imep<sub>gross</sub> = 4.3749 bar**
- **pmep = 0.2827 bar**
- **fmep = 1.4749 bar**
- **P<sub>int</sub> = 0.9782 bar**
- **e<sub>v</sub> = 0.2230**
- **f = 0.1492**
- **η<sub>i</sub> = 0.547**
- **η<sub>b</sub> = 0.3876**
- **T<sub>b</sub> = 11.78 Nm**
- **W<sub>b</sub> = 3.208 kW**
- **bsfc = 213.61 g/kWh**

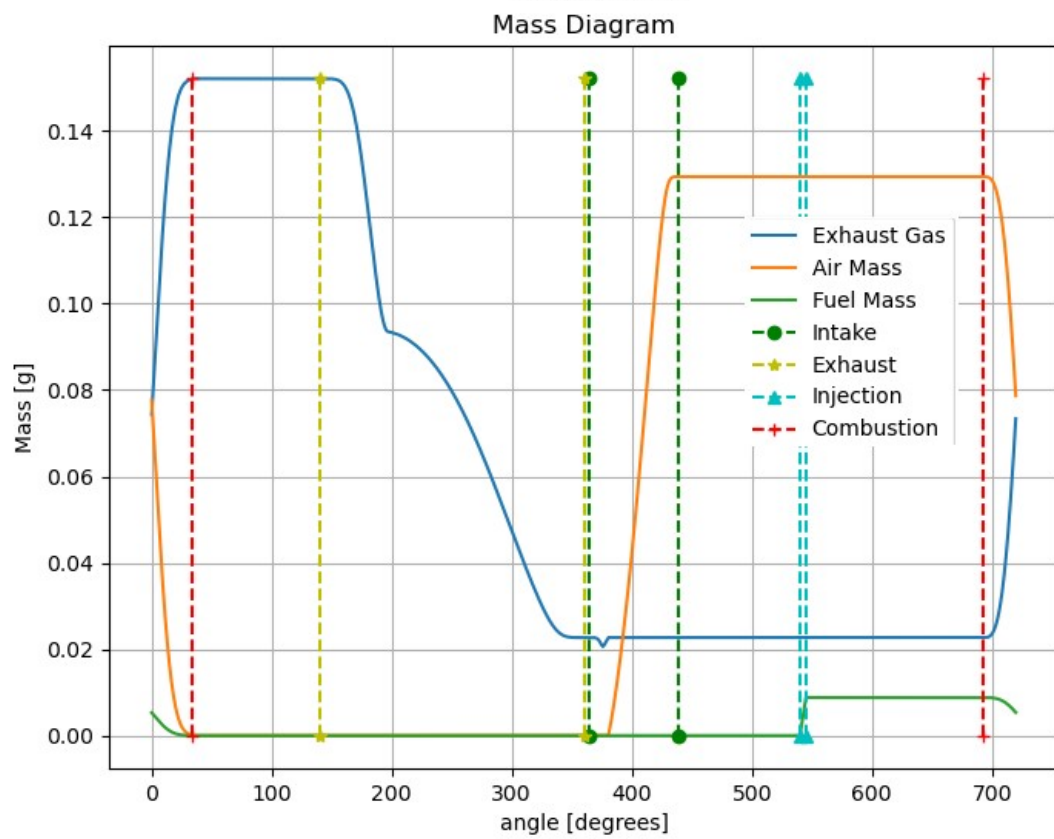
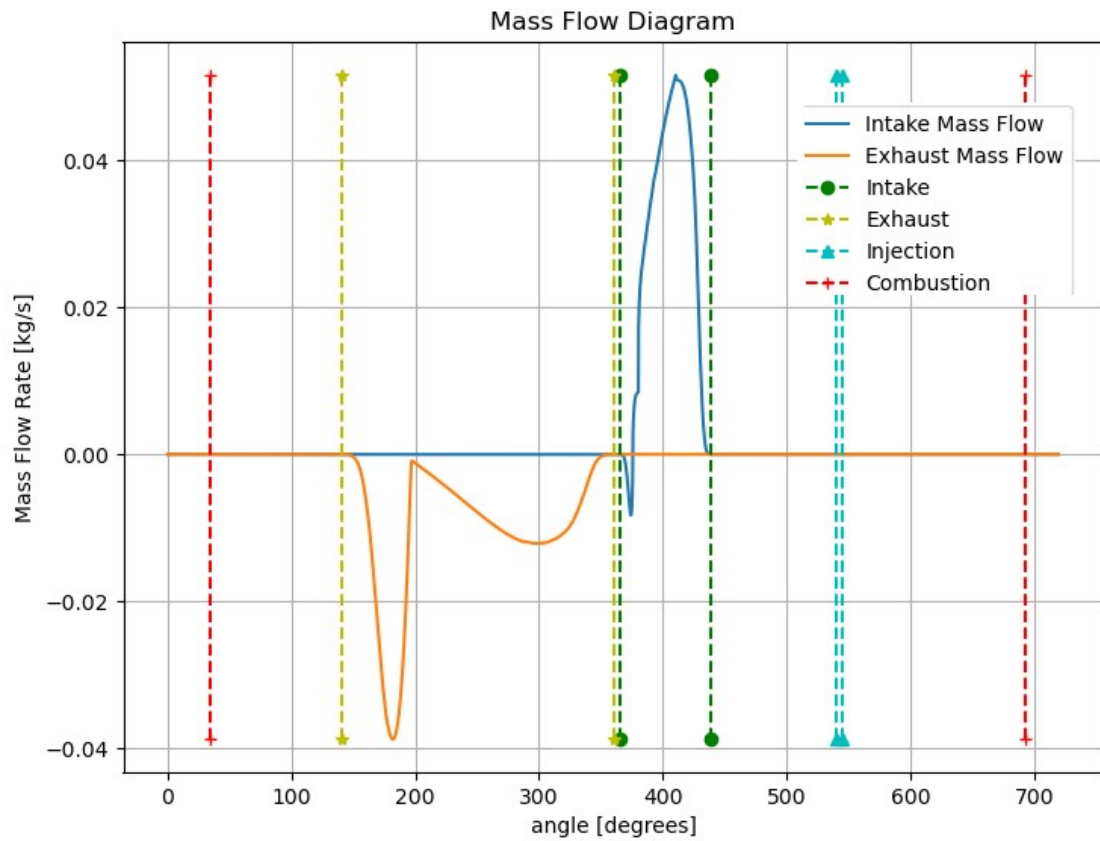
## Διαγράμματα:



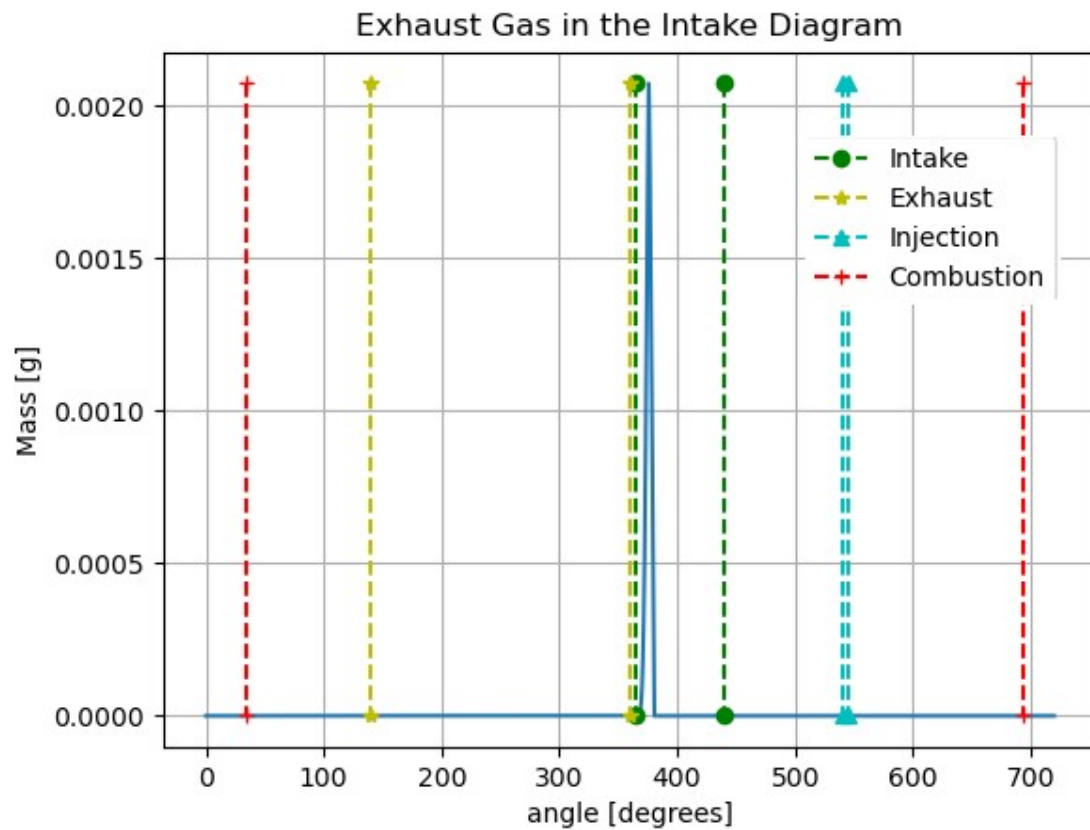












### Σχόλια:

Παρά την καλή βελτίωση του  $\eta_i$  και τη μείωση του  $p_{\text{med}}$ , η ειδική κατανάλωση μειώθηκε κατά ένα ταπεινό 18 g/kWh. Αυτό πιθανόν οφείλεται στις ιδιαίτερα υψηλές  $f_{\text{med}}$ , οι οποίες εκτιμήθηκαν με βάση παλαιότερους κινητήρες.

## **Βιβλιογραφία**

Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, C. Ferguson, A. Kirkpatrick  
Σημειώσεις Μαθήματος ΜΕΚ ΙΙ, Γ.Χ. Κολτσάκης  
Βασικές Αρχές Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, J.B. Heywood  
Οδηγίες Εκπόνησης Εργασίας