



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΕΔΡΑΝΩΝ  
ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ  
ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ**

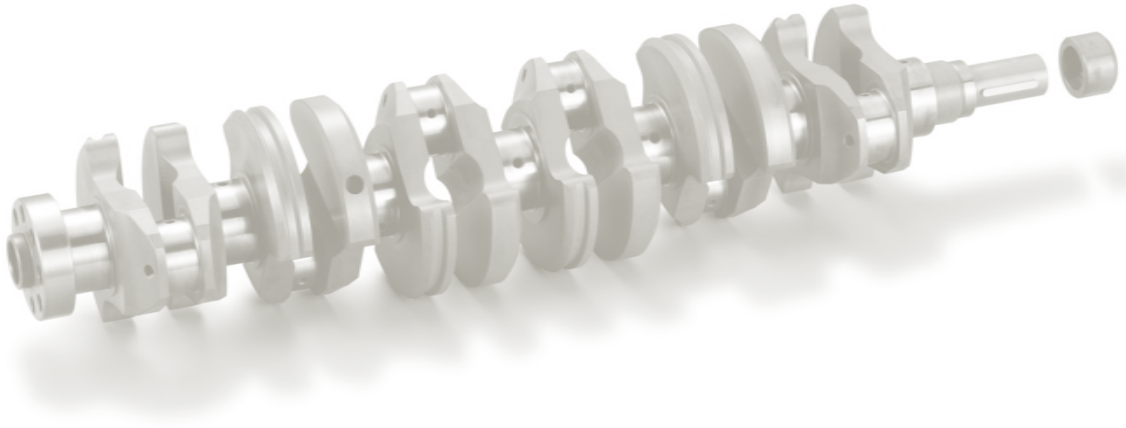


**Παναγούλιας - Παπακώστας Αλέξανδρος**

(Α.Μ. 02106014)

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Γιακουμής - Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ**

**Αθήνα, Ιούλιος 2011**



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο βήμα των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του επίκ. Καθηγητή κ. Ευάγγελου Γιακουμή, τον οποίο και ευχαριστώ ιδιαίτερα τόσο για την ανάθεση του θέματος όσο και για την επιμελή του καθοδήγηση κατά την εκπόνησή του. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κ. Ρακόπουλο και τον Καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα, τους συνδιδάσκοντες τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, οι οποίοι συνέβαλαν κι αυτοί στην ανάπτυξη του ενδιαφέροντός μου για τον συγκεκριμένο μηχανολογικό τομέα. Με την ευκαιρία αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, που συνέθεσαν το μεγαλύτερο μέρος της φοιτητικής μου ζωής και, τέλος, τους γονείς μου, Ηλία και Μάρθα, που με την ηθική και υλική τους υποστήριξη, αλλά και τις συμβουλές τους, βοήθησαν να ολοκληρωθεί η προπτυχιακή μου πορεία. Στη γραμμή του τερματισμού, το τελικό αυτό βήμα της προπτυχιακής μου πορείας, αφιερώνεται στους «συνοδηγούς» μου, Μιχάλη και Χάρη.

# Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή.....	1
Πίνακας συμβόλων.....	2
<b>1. Στοιχεία δυναμικής του κινηματικού μηχανισμού</b>	
1.1. Η μετατόπιση του εμβόλου.....	4
1.2. Η ταχύτητα του εμβόλου.....	5
1.3. Η επιτάχυνση του εμβόλου.....	6
1.4. Η αναγωγή του διωστήρα σε δύο μάζες.....	7
<b>2. Δυνάμεις του κινηματικού μηχανισμού</b>	
2.1. Δυνάμεις από αέρια.....	9
2.2. Μαζικές δυνάμεις.....	12
2.2.1. Παλινδρομικές μαζικές δυνάμεις.....	12
2.2.2. Περιστρεφόμενες μαζικές δυνάμεις.....	13
<b>3. Δυνάμεις στα έδρανα</b>	
3.1. Γενικά.....	15
3.2. Έδρανο της άνω κεφαλής του διωστήρα.....	16
3.3. Έδρανο της κάτω κεφαλής του διωστήρα.....	19
3.4. Κομβίο του στροφάλου.....	20
3.4.1. Δρώσες δυνάμεις από έναν κύλινδρο.....	20
3.4.2. Δρώσες δυνάμεις από δύο κυλίνδρους.....	21
3.5. Κομβίο βάσης.....	21
3.5.1. Δρώσες δυνάμεις από έναν κύλινδρο.....	22
3.5.2. Δρώσες δυνάμεις από δύο κυλίνδρους.....	23
3.6. Έδρανο βάσης.....	23
3.6.1. Δρώσες δυνάμεις από έναν κύλινδρο.....	23
3.6.2. Δρώσες δυνάμεις από δύο κυλίνδρους.....	24
3.7. Πολυκύλινδρος κινητήρας.....	25
3.8. Κινητήρας τύπου «W».....	26
<b>4. Μόνιμη λειτουργία</b>	
4.1. Γενικά.....	29

4.2. Κινητήρας σειράς.....	30
4.3. Κινητήρες τύπου V και W.....	37
4.4. Παρουσίαση συγκριτικών διαγραμμάτων.....	42
4.4.1. Διαφορετικές διατάξεις κυλίνδρων.....	42
4.4.2. Καταπόνηση εδράνων βάσης κινητήρων διάφορων διατάξεων.....	45
4.5. Παραμετρική ανάλυση.....	53
4.5.1. Κινητήρας σειράς.....	53
4.5.2. Κινητήρας $V90^\circ$ .....	59
<b>5. Μεταβατική λειτουργία</b>	
5.1. Γενικά.....	63
5.2. Ανάλυση στην ονομαστική μεταβολή φορτίου.....	65
5.2.1. Εξακύλινδρος κινητήρας εν σειρά.....	66
5.2.2. Εξακύλινδρος κινητήρας $V60^\circ$ .....	72
5.3. Παραμετρική ανάλυση.....	76
5.3.1. Εξακύλινδρος κινητήρας εν σειρά.....	77
5.3.2. Εξακύλινδρος κινητήρας $V60^\circ$ .....	82
<b>Παράρτημα.....</b>	<b>86</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>106</b>

# Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο θέμα τη μελέτη της καταπόνησης των εδράνων κινητήρα diesel διαφόρων διατάξεων, σειράς «V», ή και «W», κατά τη μόνιμη και τη μεταβατική λειτουργία. Κατά την εκπόνηση του θέματος, αναπτύχθηκε κώδικας σε προγραμματιστικό περιβάλλον Fortran<sup>®</sup>, ο οποίος, για δεδομένο κινητήρα, υπολογίζει τη ροή των δυνάμεων από το έμβολο ως και το κατώτερο έδρανο βάσης.

Στα τρία πρώτα κεφάλαια γίνεται αναφορά στη βασική θεωρία που είναι απαραίτητη για την κατανόηση των επιμέρους εννοιών. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η δυναμική του κινηματικού μηχανισμού, υπολογίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν και δίνονται οι αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό των δυνάμεων από το ανώτερο ως το κατώτερο σημείο της διάταξης (από το έμβολο ως και το έδρανο βάσης).

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα του κώδικα όσον αφορά τη μόνιμη λειτουργία του κινητήρα (steady state operation). Περιλαμβάνονται διαγράμματα, γραμμικά και πολικά, για διάφορες διατάξεις του κινητήρα, καθώς και συγκριτικά διαγράμματα για μελέτη των μεταβολών αντίστοιχων μεγεθών με μεταβολή της περιεχόμενης γωνίας του «V». Τέλος, δίνονται και επεξηγούνται διαγράμματα παραμετρικής ανάλυσης, της μεταβολής δηλαδή των δυνάμεων με μεταβολή δομικών ή λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναλύεται η μεταβατική λειτουργία του κινητήρα diesel. Παρατίθενται και αναλύονται διαγράμματα για τις δυνάμεις που ασκούνται σε όλα τα έδρανα του εξακύλινδρου κινητήρα, σειράς και V60°, καθώς και ξεχωριστά σε όλα τα έδρανα βάσης του. Το τελευταίο μέρος αφορά την παραμετρική ανάλυση της μεταβατικής λειτουργίας των δύο παραπάνω τύπων κινητήρα, όπου δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής της μέγιστης φόρτισης των εδράνων ανά κύκλο λειτουργίας, καθώς αλλάζει ο τρόπος επιβολής του νέου φορτίου στον κινητήρα.

## Πίνακας Συμβόλων

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
$x$	Μετατόπιση εμβόλου	$m$
$c$	Ταχύτητα εμβόλου	$m/s$
$b$	Επιτάχυνση εμβόλου	$m/s^2$
$r$	Ακτίνα στροφάλου	$m$
$s$	Διαδρομή εμβόλου	$m$
$l$	Μήκος διωστήρα	$m$
$\varphi$	Γωνία στροφάλου	$^\circ$
$\beta$	Γωνία διωστήρα	$^\circ$
$\gamma$	Γωνία διωστήρα «δεξιά» κυλίνδρου (διάταξης V)	$^\circ$
$\delta$	Γωνία αξόνων κυλίνδρων κινητήρα διάταξης V	$^\circ$
$\lambda$	Λόγος ακτίνας στροφάλου προς μήκους διωστήρα	αδιάστατο
$\omega$	Γωνιακή ταχύτητα στροφαλοφόρου ατράκτου	$rad/s$
$n$	Συχνότητα περιστροφής στροφαλοφόρου ατράκτου	$rpm$
$V$	Όγκος (εκάστοτε)	$m^3$
$V_c$	Επιζήμιος όγκος κυλίνδρου	$m^3$
$F$	Εμβαδόν διατομής εμβόλου/κυλίνδρου	$m^2$
$D$	Διάμετρος εμβόλου	$m$
$m_\varepsilon$	Μάζα εμβόλου	$kg$
$m_r$	Περιστρεφόμενη μάζα	$kg$
$m_l$	Παλινδρομούσα μάζα	$kg$
$m_{\delta r}$	Περιστρεφόμενη μάζα διωστήρα	$kg$
$m_{\delta l}$	Παλινδρομούσα μάζα διωστήρα	$kg$
$m_\delta$	Μάζα διωστήρα	$kg$
$m_\sigma$	Μάζα στροφάλου	$kg$
$\Theta_\delta$	Ροπή αδρανείας διωστήρα	$kg \cdot m^2$
$r_0$	Απόσταση του κέντρου βάρους στροφάλου από τον άξονα περιστροφής	$m$
$P_g$	Δύναμη εξ' αερίων στον κύλινδρο	$N$
$\rho_g$	Πίεση εξ' αερίων στον κύλινδρο	$bar$
$S$	Δύναμη διωστήρα	$N$
$N$	Δύναμη παρειάς κυλίνδρου	$N$
$T$	Στρεπτική δύναμη στροφάλου	$N$
$R$	Ακτινική δύναμη στροφάλου	$N$
$D_{0i}$	Δυνάμεις στο έδρανο της άνω κεφαλής διωστήρα	$N$
$D_{1i}$	Δυνάμεις στο έδρανο της κάτω κεφαλής διωστήρα	$N$
$D_{2i}$	Δυνάμεις στο κομβίο στροφάλου (ένας κύλινδρος)	$N$

$D_{3i}$	Δυνάμεις στο κομβίο στροφάλου (δύο κύλινδροι)	$N$
$D_{4i}$	Δυνάμεις στο κομβίο βάσης (ένας κύλινδρος)	$N$
$D_{5i}$	Δυνάμεις στο κομβίο βάσης (δύο κύλινδροι)	$N$
$D_{6i}$	Δυνάμεις στο έδρανο βάσης (ένας κύλινδρος)	$N$
$D_{7i}$	Δυνάμεις στο έδρανο βάσης (δύο κύλινδροι)	$N$
$z$	Αριθμός κυλίνδρων	-
$\Delta\varphi_\alpha$	Γωνία ανάφλεξης	°

Αρκτικόλεξα	Επεξήγηση
KB	Κέντρο βάρους
PSZ	Μερικώς σταθεροποιημένη ζirkόνια Partially stabilized zirconia ( $ZrO_2$ -MgO)
SN	Νιτρίδιο πυριτίου-Silicon nitride ( $Si_3Ni_4$ )
ANΣ	Άνω νεκρό σημείο
πANΣ	Πριν το άνω νεκρό σημείο
KNΣ	Κάτω νεκρό σημείο
MEK	Μηχανή εσωτερικής καύσης
4-X	Τετράχρονος κινητήρας



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

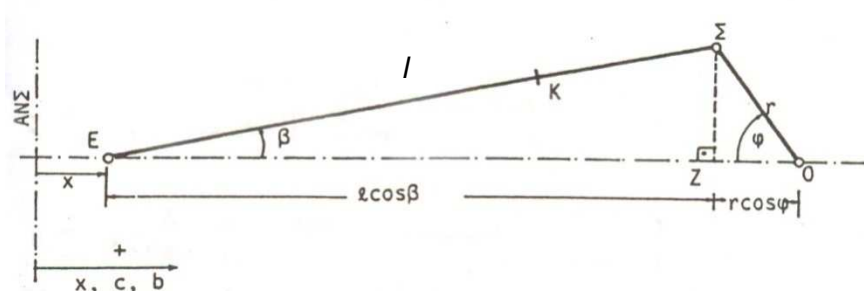
## ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

### 1.1 Η μετατόπιση του εμβόλου

Για την τυχούσα θέση του στροφάλου, που καθορίζεται από τη σχετική γωνία στροφάλου  $\varphi$ , η μετατόπιση του εμβόλου  $x$  από το ΑΝΣ δίνεται από τη σχέση:

$$x = r + l - l \cdot \cos \beta - r \cdot \cos \varphi \quad (1.1)$$

όπου  $\beta$  είναι η γωνία του διωστήρα,  $r$  η ακτίνα του στροφάλου και  $l$  το μήκος του διωστήρα.



Σχήμα 1.1 – Στοιχεία κινηματικού μηχανισμού

Παρατηρώντας τα ορθογώνια τρίγωνα ΕΣΖ και ΟΣΖ του Σχήματος 1.1, λαμβάνουμε την ακόλουθη σχέση:

$$(\Sigma Z) = l \cdot \sin \beta = r \cdot \sin \varphi \quad (1.2)$$

οπότε θέτοντας  $\lambda = \frac{r}{l}$  και εκφράζοντας το  $\cos \beta$  συναρτήσει του  $\sin \beta$ , παίρνουμε

$$\sin \beta = \lambda \cdot \sin \varphi \quad \text{και} \quad \cos \beta = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} \quad (1.3)$$

Στην παραπάνω σχέση, το μέγεθος  $\lambda = \frac{r}{l}$  αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της δυναμικής του κινηματικού μηχανισμού των εμβολοφόρων κινητήρων και οι συνήθεις τιμές του είναι μεταξύ  $\frac{1}{5}$  και  $\frac{1}{3}$ . Τελικά, η ακριβής σχέση που δίνει τη μετατόπιση του εμβόλου είναι

$$x = r(1 - \cos \varphi) + l \left( 1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} \right) \quad (1.4)$$

η οποία, όπως αναμενόταν, παριστάνει περιοδική συνάρτηση με συχνότητα την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

## 1.2 Η ταχύτητα του εμβόλου

Με παραγωγή ως προς το χρόνο της σχέσης (1.4) που παραθέσαμε πιο πάνω για τη μετατόπιση του εμβόλου, προκύπτει η γραμμική ταχύτητά του:

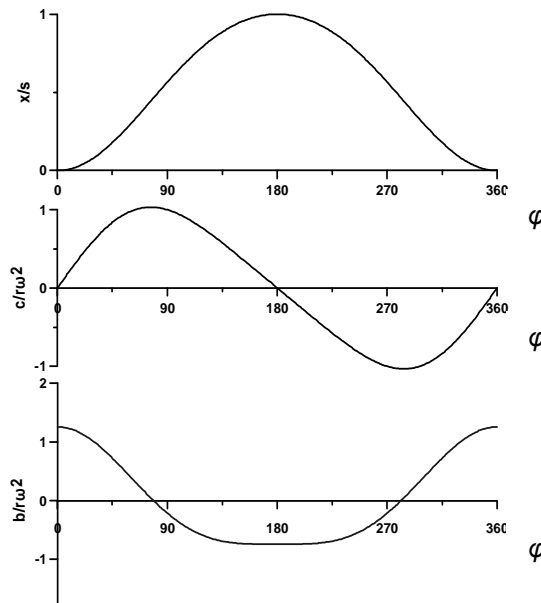
$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.5)$$

Με τη βασική προϋπόθεση ότι το στρόφαλο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα (οι στρεπτικές ταλαντώσεις των μερών του κινητήρα είναι αμελητέες στο παρόν) θα έχουμε

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow c = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \omega \quad (1.6)$$

οπότε η ακριβής τιμή της ταχύτητας, μέσω και της (1.4), θα δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί:

$$c = \omega r \cdot \sin \varphi \left( 1 + \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right) \quad (1.7)$$



Σχήμα 1.2 – Τυπική μορφή ανηγμένης μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης εμβόλου

### 1.3 Η επιτάχυνση του εμβόλου

Με όμοιο τρόπο, όπως παραπάνω, η επιτάχυνση του εμβόλου θα προκύψει με παραγωγή της ταχύτητάς του, που δόθηκε στην αναλυτική σχέση 1.7 παραπάνω:

$$b = \frac{dc}{dt} = \frac{dc}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.8)$$

Με χρήση και πάλι της προϋπόθεσης σταθερής γωνιακής ταχύτητας του στροφάλου, βρίσκουμε την αναλυτική σχέση που δίνει την επιτάχυνση του εμβόλου:

$$b = \omega^2 r \left[ \cos \varphi + \frac{\lambda (\cos 2\varphi + \lambda^2 \sin^4 \varphi)}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \right] \quad (1.9)$$

Ιδιαίτερης σημασίας είναι ο ανηγμένος λόγος  $\frac{b}{r\omega^2}$ , ο οποίος είναι συνάρτηση μόνο των στοιχείων του κινητήρα και της εκάστοτε γωνίας στροφάλου.

## 1.4 Η αναγωγή του διωστήρα σε δύο μάζες

Ο διωστήρας μακροσκοπικά εκτελεί επίπεδη σύνθετη κίνηση, ενώ γνωστή είναι η κίνηση μόνο δύο σημείων του, του Ε και του Σ (βλέπε και Σχήμα 1.1). Το σημείο Ε εκτελεί την ευθύγραμμη κίνηση του εμβόλου, ενώ το Σ διαγράφει κυκλική τροχιά ακτίνας  $r$ .

Ο καθορισμός των δυνάμεων αδρανείας του διωστήρα είναι επίπονος, κάτι που οφείλεται στη σύνθετη κίνηση των σημείων του, εκτός των Σ και Ε, και στο ότι απαιτείται η γνώση της ακριβούς κατανομής της συνολικής μάζας του  $m_\delta$ . Για το λόγο αυτό καταφεύγουμε σε ένα ισοδύναμο – δυναμικά – σύστημα, με δύο μόνο μάζες, τις  $m_{\delta_l}$  και  $m_{\delta_r}$ , συγκεντρωμένες στα σημεία Ε και Σ αντίστοιχα, και συνδεδεμένες μεταξύ τους στερεά με αμφιαρθρωτή ράβδο μεταβιβάζουσα φορτία μόνο κατά τον άξονά της.

Για να είναι το ανωτέρω σύστημα δυναμικά ισοδύναμο προς το διωστήρα, θα πρέπει να αντιδρά όπως ο τελευταίος σε τυχαίο σύστημα εξωτερικών δυνάμεων και ροπών. Θα πρέπει, δηλαδή, να προκύπτει η ίδια επιτάχυνση του κέντρου βάρους και η ίδια γωνιακή επιτάχυνση του στερεού ως προς άξονα διερχόμενο από το κέντρο βάρους του και κάθετο στο επίπεδο της κίνησης. Επομένως, οι αναγκαίες συνθήκες για το ισοδύναμο αυτό σύστημα συνοψίζονται στις εξής:

- η μάζα του να ισούται με τη μάζα του διωστήρα  $m_\delta$
- το κέντρο βάρους του να συμπίπτει με αυτό του διωστήρα Κ
- η ροπή αδράνειάς του ως προς άξονα διερχόμενο από το κέντρο βάρους και κάθετου στο επίπεδο κίνησης να ισούται με την αντίστοιχη ροπή αδρανείας του διωστήρα  $\Theta_\delta$

Οι παραπάνω συνθήκες μπορούν μαθηματικά να γραφτούν ως εξής:

$$m_{\delta_l} + m_{\delta_r} = m_\delta \quad (1.10)$$

$$m_{\delta_l}(\text{ΕΚ}) - m_{\delta_r}(\text{ΣΚ}) = 0 \quad (1.11)$$

$$m_{\delta_l}(\text{ΕΚ})^2 + m_{\delta_r}(\text{ΣΚ})^2 = \Theta_\delta \quad (1.12)$$

Φαίνεται αμέσως ότι οι ζητούμενες τιμές των  $m_{\delta_l}$  και  $m_{\delta_r}$  μπορούν να υπολογιστούν ήδη από τις δύο πρώτες εκ των τριών παραπάνω εξισώσεων. Οι τιμές αυτές, εν γένει, δε θα ικανοποιούν την εξίσωση (1.12), οπότε δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί πλήρης δυναμική ισοδυναμία. Παρ' όλα αυτά, στις τεχνικές εφαρμογές και στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας, ως ισοδύναμο σύστημα λαμβάνεται αυτό που περιγράφεται από τις (1.10) και (1.11). Το σφάλμα που προκύπτει με τον τρόπο αυτό είναι μικρότερο του 1%.

# Κεφάλαιο 2°

---

## ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

### 2.1 Δυνάμεις από αέρια

Η πίεση των αερίων μέσα στον κύλινδρο μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ μεταβάλλεται σε πλατιά όρια κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας. Η ελάχιστη τιμή της είναι περίπου η ατμοσφαιρική ή η πίεση υπερπλήρωσης (στην περίπτωση του υπερπληρωμένου κινητήρα), ενώ η μέγιστη είναι, κατά γενικό κανόνα, 40 έως 70 φορές μεγαλύτερη της πρώτης.

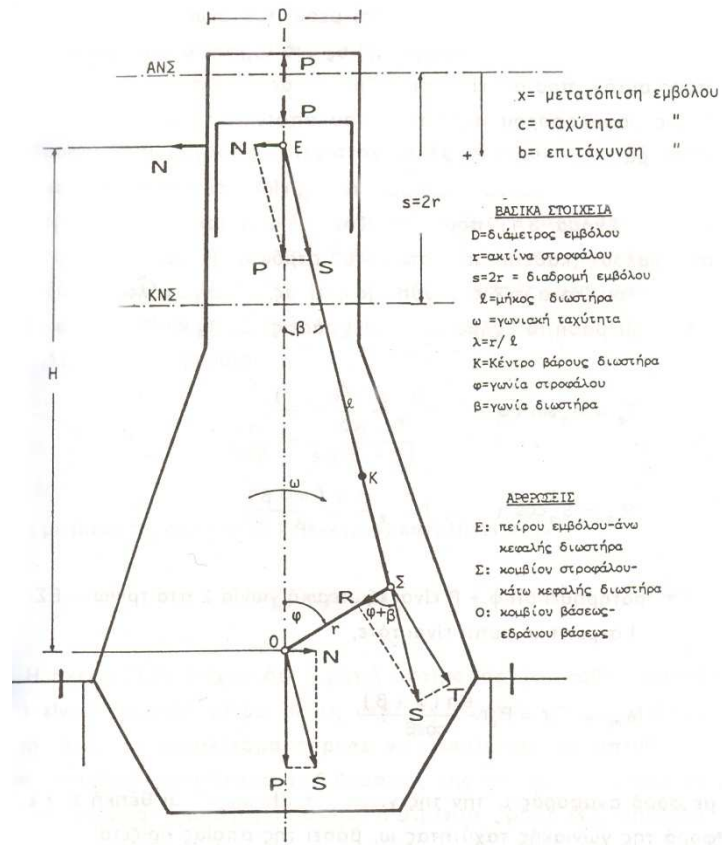
Το δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινητήρα δίνει την τιμή της πίεσης  $p_g$  από αέρια, σε κάθε θέση του εμβόλου  $x$  και επομένως και για κάθε συνολικό όγκο  $V = V_c + Fx$  (όπου  $V_c$  ο επιζήμιος όγκος του κυλίνδρου και  $F = \frac{\pi D^2}{4}$  η επιφάνεια του εμβόλου), ή σε κάθε γωνία στροφάλου  $\varphi$ . Λόγω της πίεσης αυτής, τα αέρια εξασκούν:

- στο έμβολο τη δύναμη  $P_g$  κατά τον άξονα του κυλίνδρου και με φορά πάντοτε από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ
- στο κάλυμμα του κυλίνδρου ίση κατά μέτρο δύναμη  $P_g$  με αντίθετη όμως φορά

Το μέτρο της  $P_g$  κάθε στιγμή δίνεται από τον τύπο

$$P_g = \frac{\pi D^2}{4} \rho_g = F \cdot \rho_g \quad (2.1)$$

όπου σαν  $\rho_g$  λαμβάνεται η μανομετρική πίεση, διότι στην κάτω πλευρά του εμβόλου ασκείται η πίεση της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 2.1 – Δυνάμεις του κινηματικού μηχανισμού

Την  $P_g$  παραλαμβάνει το τοίχωμα του κυλίνδρου μέσω του εμβόλου (δύναμη  $N$  κάθετη στο τοίχωμα) και ο διωστήρας (δύναμη  $S$ ), ο οποίος μπορεί να μεταβιβάζει δύναμη μόνο κατά τον άξονά του (θεωρείται αβαρής αμφιαρθρωτή ράβδος). Έτσι, η επί του εμβόλου δύναμη αναλύεται στις παρακάτω συνιστώσες:

τη δύναμη παρειάς κυλίνδρου:  $N_g = P_g \cdot \tan \beta \quad (2.2)$

και τη δύναμη διωστήρα:  $S_g = \frac{P_g}{\cos \beta} \quad (2.3)$

Η δύναμη  $S_g$  μεταβιβάζεται μέσω του διωστήρα στο κομβίο του στροφάλου. Η αναγωγή της τώρα στο σημείο Ο δίνει μια δύναμη ίση κατά μέτρο με αυτήν, ασκούμενη στο έδρανο βάσης, και μια ροπή επί της στροφαλοφόρου ατράκτου, αποτελούμενη τη στρεπτική ροπή του κινητήρα.

Η  $S_g$  μπορεί να αναλυθεί στο σημείο Σ σε δύο συνιστώσες, τις  $T_g$  και  $R_g$ , που ονομάζονται – αντίστοιχα – στρεπτική δύναμη στροφάλου (πάντα κάθετη στο τελευταίο) και ακτινική δύναμη στροφάλου (κατά την ακτινική διεύθυνση του τελευταίου). Με βάση το Σχήμα 2.1 και την παρατήρηση ότι η γωνία  $\varphi + \beta$  είναι εξωτερική στο τρίγωνο ΕΣΟ, οι εκφράσεις των παραπάνω συνιστωσών είναι οι εξής:

$$T_g = S_g \cdot \sin(\varphi + \beta) = P_g \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (2.4)$$

$$R_g = S_g \cdot \cos(\varphi + \beta) = P_g \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (2.5)$$

Από την ανάλυση που προηγήθηκε, φαίνεται ότι το τελικό αποτέλεσμα της δράσης πίεσης των αερίων, πάνω στο κέλυφος του κινητήρα, είναι η εξάσκηση των εξής δυνάμεων:

- της  $P_g$  απευθείας στο κάλυμμα της μηχανής
- της  $N_g$  στο τοίχωμα του κυλίνδρου
- της  $S_g$  στο έδρανο βάσης του κινητήρα, η οποία μπορεί να αναλυθεί στις συνιστώσες  $N_g$  και  $P_g$ .

Σημειώνεται, τέλος, ότι καθαρά από ενεργειακή θεώρηση, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ισχείς των  $T_g, P_g$  είναι ίσες, μπορούμε να γράψουμε την πολύ χρήσιμη σχέση

$$P_g \cdot c \cdot dt = T_g \cdot r \cdot d\varphi \Rightarrow T_g = P_g \left( \frac{c}{r\omega} \right) \quad (2.6)$$



## 2.2 Μαζικές δυνάμεις

Οι μαζικές δυνάμεις που αναπτύσσονται οφείλονται στις κινούμενες μάζες του κινηματικού μηχανισμού. Οι μάζες αυτές εκτελούν παλινδρομική, περιστροφική και μικτή κίνηση.

Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται οι μάζες του εμβόλου και των στοιχείων που εκτελούν παλινδρομική κίνηση μαζί του, όπως τα ελατήρια στεγανότητας και λίπανσης και ο πίσος του εμβόλου. Το σύνολο των παραπάνω μαζών συμβολίζεται ως  $m_\epsilon$ .

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει η μάζα ενός πλήρους στροφάλου (βραχίονες, κομβίο στροφάλου και βάσης), που κατάλληλα ανηγμένη στην ακτίνα του στροφάλου  $r$  συμβολίζεται με  $m_\sigma$ .

Στην τρίτη κατηγορία ανήκει η συνολική μάζα του διωστήρα  $m_\delta$  η οποία, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε παραπάνω παράγραφο, μπορεί να αντικατασταθεί από σύστημα δύο μαζών, των  $m_{\delta l}$  και  $m_{\delta r}$ , εκ των οποίων η πρώτη μόνο παλινδρομεί και η δεύτερη μόνο περιστρέφεται.

Τελικά, όλος ο κινηματικός μηχανισμός ανάγεται σε δύο διακεκριμένες μάζες, από τις οποίες η μία παλινδρομεί (δείκτης  $l$ ) και η άλλη περιστρέφεται (δείκτης  $r$ ). Αντίστοιχα, ισχύουν οι σχέσεις:

$$m_l = m_\epsilon + m_{\delta l} \quad (2.7)$$

$$m_r = m_\sigma + m_{\delta r} \quad (2.8)$$

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι διακρίνουμε τις μαζικές δυνάμεις οφειλόμενες σε παλινδρομούσες μάζες και τις οφειλόμενες σε περιστρεφόμενες μάζες. Και οι δύο κατηγορίες εξετάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

### 2.2.1 Παλινδρομικές μαζικές δυνάμεις

Η κινούμενη συνολική παλινδρομούσα μάζα  $m_l$  έχει επιτάχυνση  $b$ , η οποία υπολογίζεται σε ανηγμένη μορφή εύκολα από την εξίσωση (1.9). Έτσι, από το έμβολο θα εξασκείται επί του κινηματικού μηχανισμού η δύναμη

$$P_l = -m_l b = -m_l r \omega^2 \left( \frac{b}{r \omega^2} \right) = -m_l r \omega^2 \cdot \left[ \cos \varphi + \frac{\lambda (\cos 2\varphi + \lambda^2 \sin^4 \varphi)}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \right] \quad (2.9)$$

με σταθερό φορέα τον άξονα του κυλίνδρου, αλλά με μεταβαλλόμενη φορά και μέγεθος που εξαρτάται από τη γωνία στροφάλου  $\varphi$ . Δυναμικά, η εξήγηση του παραπάνω φαινομένου γίνεται από το ότι η επιτάχυνση του εμβόλου απαιτεί την εξάσκηση σε αυτό, από τον υπόλοιπο κινηματικό μηχανισμό, μιας δύναμης ίσης με  $-P_l$ . Τότε, από το έμβολο θα ασκείται στον κινηματικό μηχανισμό (νόμος δράσης - αντίδρασης) η ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς δύναμη  $P_l$ . Η τελευταία μεταβιβάζεται ακριβώς όπως και η εξ' αερίων  $P_g$  μέχρι τη βάση και τη θεμελίωση της μηχανής, οπότε και προκύπτει μια αντίστοιχη στρεπτική δύναμη στροφάλου  $T_l$ . Προφανώς λοιπόν όλες οι εξισώσεις (2.1)–(2.5) ισχύουν και για την περίπτωση παλινδρομικών μαζών.

### 2.2.2 Περιστρεφόμενες μαζικές δυνάμεις

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το σύνολο των περιστρεφόμενων μαζών αποτελείται από την περιστρεφόμενη μάζα του διωστήρα  $m_{\delta r}$  (βλέπε σχέση 2.7) και από τη μάζα  $m_r$  ενός πλήρους στροφάλου. Η τελευταία απαιτείται να είναι κατάλληλα ανηγμένη στην ακτίνα του στροφάλου, ώστε να ικανοποιείται συγκεκριμένο κριτήριο.

Η συνολική αυτή μάζα  $m_r$  θεωρείται συγκεντρωμένη στο κομβίο του στροφάλου, στο σημείο Σ. Η πραγματική δύναμη που ασκείται στην  $m_r$  είναι η κεντρομόλος, οπότε η  $m_r$  ασκεί στα έδρανα και το σώμα της μηχανής την αντίστοιχη φυγόκεντρη δύναμη που οφείλεται στην  $m_r$  και έχει μέτρο σταθερό και ίσο με

$$P_r = m_r r \omega^2 \quad (2.10)$$

και φορέα περιστρεφόμενο με το στρόφαλο και διεύθυνση την εκάστοτε διεύθυνση του τελευταίου. Έτσι, η  $P_r$  μεταφέρεται αυτούσια στα έδρανα και το

σώμα της μηχανής και στη συνέχεια και στη θεμελίωση αυτής. Προφανώς αυτή δεν έχει επίδραση στην τιμή της στρεπτικής δύναμης, διότι είναι συνεχώς κάθετη σε αυτήν.

Η αναγωγή της μάζας του στροφάλου στην ακτίνα  $r$ , για τον προσδιορισμό της  $m_\sigma$ , γίνεται με βάση την ισότητα των σχετικών φυγοκεντρικών δυνάμεων. Αν λοιπόν θεωρήσουμε  $m_o$  και  $r_o$  την πραγματική μάζα του στροφάλου και την απόσταση του κέντρου βάρους του από τον άξονα περιστροφής αντίστοιχα, τότε καταλήγουμε στη σχέση

$$m_o r_o \omega^2 = m_\sigma r \omega^2 \Rightarrow m_\sigma = m_o \frac{r_o}{r} \quad (2.11)$$

# Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

---

## ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΑ ΕΔΡΑΝΑ

### 3.1 Γενικά

Για την σωστότερη απεικόνιση των δυνάμεων στα έδρανα, χρησιμοποιούνται τα πολικά διαγράμματα των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά. Στα πολικά διαγράμματα παριστάνονται οι δυνάμεις, ή οι αντίστοιχες πιέσεις, με το πραγματικό τους μέγεθος, υπό ορισμένη κλίμακα, και στην πραγματική θέση τους.

Όσον αφορά τα κινούμενα στοιχεία του μηχανισμού (έδρανα διωστήρα, κομβία στροφάλου και βάσης), είναι βολικότερο να χρησιμοποιήσουμε άξονες αναφοράς που κινούνται με το εκάστοτε στοιχείο. Για τον κινητήρα διάταξης «V», εφόσον έχει γίνει η ανάλυση στα έδρανα μονοκύλινδρου κινητήρα, ο καθορισμός των δυνάμεων που δέχονται τα κομβία στροφάλου και βάσης, καθώς και τα έδρανα βάσης, γίνεται με επαλληλία των δυνάμεων που προέρχονται από κάθε έναν από τους συνεργαζόμενους κυλίνδρους. Αυτό, βέβαια, γίνεται διότι σε τέτοιο κινητήρα, αρθρώνονται δύο διωστήρες σε κάθε στρόφαλο.

Αυτή η γεωμετρία της άρθρωσης των διωστήρων στο κομβίο στροφάλου, καθορίζει τη δύναμη που ασκείται στο τελευταίο. Ανάλογα με τη γεωμετρία της άρθρωσης αυτής, διακρίνονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις:

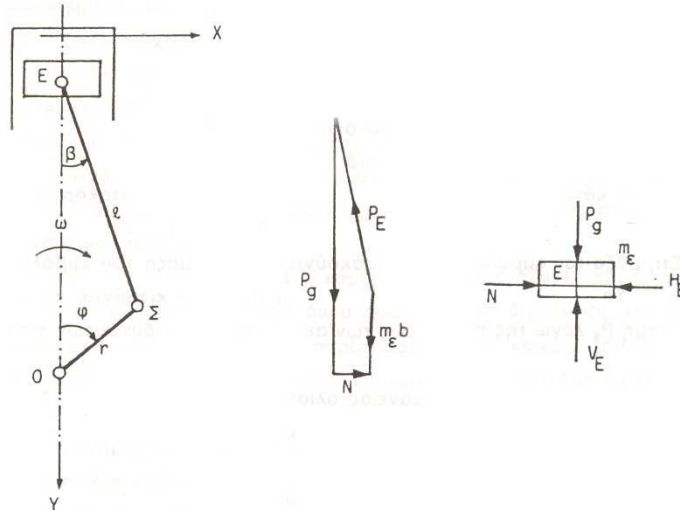
- I. διωστήρες αρθρωμένοι στο κομβίο με τους άξονές τους να κείνται σε κοινό επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή, που θα χρησιμοποιηθεί και στην αριθμητική ανάλυση που ακολουθεί, στο κομβίο του στροφάλου ασκείται η συνισταμένη των δυνάμεων από τους δύο διωστήρες
- II. διωστήρες αρθρωμένοι στο κομβίο με τους άξονές τους να κείνται σε παράλληλα επίπεδα. Όπως και στην παραπάνω περίπτωση, στο κομβίο του στροφάλου ασκείται η συνισταμένη των δυνάμεων από τους δύο διωστήρες αλλά και μια ροπή που οφείλεται στη δράση των δυνάμεων των διωστήρων σε δύο διαφορετικά παράλληλα επίπεδα
- III. ένας κύριος διωστήρας αρθρωμένος κανονικά στο στρόφαλο και ένας δεύτερος αρθρωμένος στον πρώτο, εκκέντρως προς το στρόφαλο. Στην περίπτωση αυτή, η σύνθεση των δυνάμεων που μεταβιβάζουν οι δύο διωστήρες είναι δυνατή, αλλά η σχετική μελέτη είναι δύσκολη λόγω του σύνθετου μηχανισμού

### 3.2 Έδρανο της άνω κεφαλής του διωστήρα

Για το συγκεκριμένο έδρανο χρησιμοποιούμε σταθερό σύστημα αξόνων  $Y, X$  (κατακόρυφος και οριζόντιος άξονας αντίστοιχα) σύμφωνα με το Σχήμα 3.1. Στη θέση αυτή είναι συγκεντρωμένες δύο μάζες, αυτή του εμβόλου  $m_\varepsilon$  και η παλινδρομούσα μάζα του διωστήρα  $m_{\delta l}$ , που κινούνται και οι δύο με επιτάχυνση  $b$  υπό την επίδραση των πιο κάτω δυνάμεων.

Στη μάζα του εμβόλου  $m_\varepsilon$  ασκούνται:

- η δύναμη  $P_g$  λόγω της πίεσης των αερίων στον κύλινδρο
- η αντίδραση  $N$  από την επιφάνεια ολίσθησης του κυλίνδρου
- η δύναμη  $P_E$  από το διωστήρα, μέσω του πύρου, με συνιστώσες τις  $H_E, V_E$



Σχήμα 3.1 – Δυνάμεις στο έμβολο

Κατά τις αρχές της δυναμικής, λαμβάνοντας τις προβολές των δυνάμεων στους άξονες, παίρνουμε:

$$H_E = N \quad (3.1)$$

$$P_g - V_E = m_\epsilon b \quad (3.2)$$

όπου ισχύει  $P_E = \sqrt{H_E^2 + V_E^2}$ . Σημειώνεται ότι θετική τιμή των  $P_g$  και  $b$  υποδηλώνει φορά κατά τον άξονα  $Y$ .

Αντίστοιχα, στη μάζα του διωστήρα  $m_{\delta i}$  ασκούνται οι δυνάμεις (Σχήμα 3.2):

- η  $-P_E$  από το έμβολο, μέσω του πέρου
- η μεταβιβαζόμενη κατά το μήκος του άξονα του διωστήρα  $S$

Για τις δυνάμεις αυτές, εργαζόμενοι ομοίως, εξάγουμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$H_E - S \cdot \sin \beta = 0 \quad (3.3)$$

$$V_E - S \cdot \cos \beta = m_{\delta i} b \quad (3.4)$$

Από τις σχέσεις (3.1),(3.3) προκύπτει η  $H_E = S \cdot \sin \beta = N$ , ενώ αντικαθιστώντας την τιμή της  $V_E$  από τη σχέση (3.2) στη σχέση (3.4) έχουμε

$$P_g - m_\varepsilon b - S \cos \beta = m_{\delta l} b \Rightarrow$$

$$S \cos \beta = P_g - m_\varepsilon b - m_{\delta l} b = P_g - m_l b = P_g + P_l = P \quad (3.5)$$

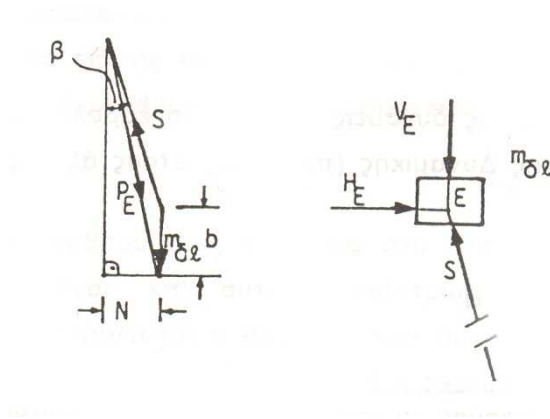
ώστε τελικά προσδιορίζεται η δύναμη, η οποία μεταβιβάζεται από το έδρανο του διωστήρα στον πύρο του εμβόλου, και αντίστροφα, με μέτρο

$$P_E = \sqrt{H_E^2 + V_E^2} = \sqrt{(P \cdot \tan \beta)^2 + (P_g - m_\varepsilon b)^2} \quad (3.6)$$

και συνιστώσες στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση αντίστοιχα, τις

$$H_E = N = (P_g - m_l b) \cdot \tan \beta = P \cdot \tan \beta \quad (3.7)$$

$$V_E = P_g - m_\varepsilon b \quad (3.8)$$



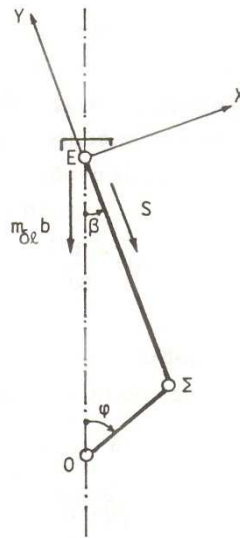
Σχήμα 3.2 – Δυνάμεις στην άνω κεφαλή διωστήρα

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, παραθέτουμε την τιμή των δυνάμεων που ασκούνται στο έδρανο με βάση κινούμενο σύστημα αξόνων, όπως στο παρακάτω Σχήμα 3.3. Ο άξονας Y συμπίπτει τώρα με αυτόν του διωστήρα και κινείται με αυτόν. Οι δυνάμεις που δρουν έχουν μέτρο:

$$D_{0X} = m_{\delta l} b \cos(90^\circ + \beta) = -m_{\delta l} r \omega^2 \left( \frac{b}{r \omega^2} \right) \sin \beta \quad (3.9)$$

$$D_{0Y} = -S + m_{\delta l} b \cos(180^\circ - \beta) = -\frac{P}{\cos \beta} - m_{\delta l} r \omega^2 \left( \frac{b}{r \omega^2} \right) \cos \beta \quad (3.10)$$

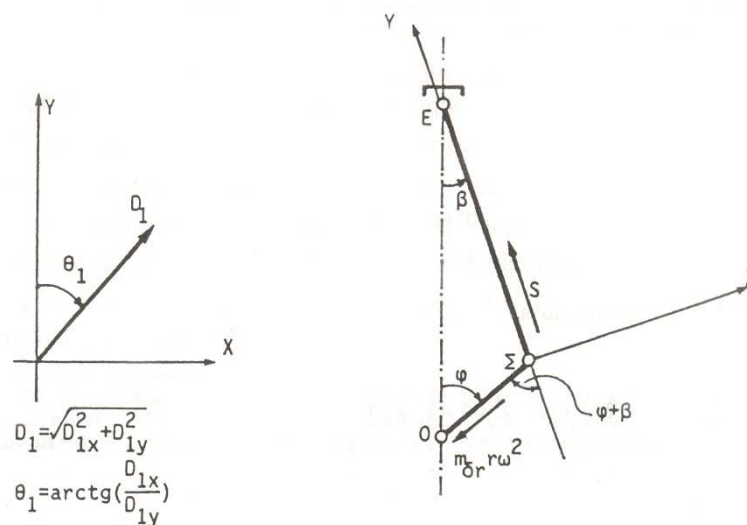
όπου σημειώνεται και πάλι η ισχύς της  $P = P_g + P_l$



Σχήμα 3.3 – Δυνάμεις στο έδρανο της άνω κεφαλής διωστήρα

### 3.3 Έδρανο της κάτω κεφαλής του διωστήρα

Κάνοντας χρήση του τελευταίου συστήματος αξόνων, που κινείται «μαζί» με το διωστήρα και ακολουθώντας παρόμοιο τρόπο ανάλυσης, υπολογίζουμε την αναλυτική έκφραση των δυνάμεων που δρουν στο έδρανο της κάτω κεφαλής του διωστήρα. Σχετικό είναι το παρακάτω Σχήμα 3.4:



Σχήμα 3.4 – Δυνάμεις στο έδρανο της κάτω κεφαλής διωστήρα



$$D_{1X} = m_{\delta r} \cdot r\omega^2 \cos(90^\circ + \varphi + \beta) = -m_{\delta r} \cdot r\omega^2 \left( \frac{c}{r\omega} \right) \cos \beta \quad (3.11)$$

$$D_{1Y} = S + m_{\delta r} \cdot r\omega^2 \cos(180^\circ - \beta - \varphi) = -\frac{P(\varphi)}{\cos \beta} - m_{\delta r} \cdot r\omega^2 \cos(\varphi + \beta) \quad (3.12)$$

όπου υπενθυμίζεται η ισχύς της σχέσης  $\frac{T}{P} = \frac{c}{r\omega} = \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$ , η οποία προκύπτει από τις (2.4),(2.6).

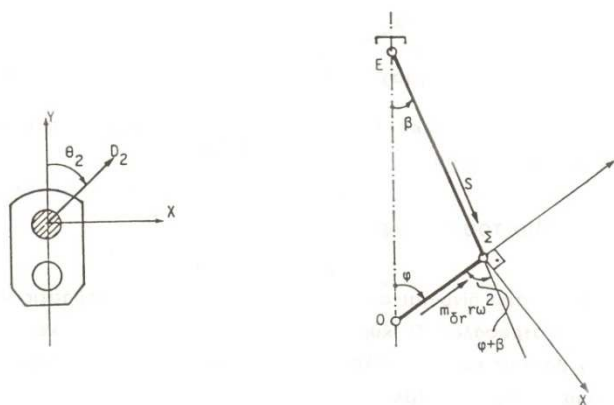
### 3.4 Κομβίο του στρόφαλου

Το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιείται εδώ, βλέπε και Σχήμα 3.5, για την εξαγωγή των αντίστοιχων σχέσεων, κινείται με το στρόφαλο, ενώ ο άξονας Y διέρχεται από τα κέντρα των κομβίων βάσης και στρόφαλου. Στα παρακάτω γίνεται διαχωρισμός για την περίπτωση ενός ή δύο διωστήρων αρθρωμένων στο στρόφαλο (περίπτωση κινητήρα διάταξης σειράς ή V αντίστοιχα):

#### 3.4.1 Δρώσεις δυνάμεις από έναν κύλινδρο

$$D_{2X} = T(\varphi) = \frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \sin(\varphi + \beta) = S \cdot \sin(\varphi + \beta) \quad (3.13)$$

$$D_{2Y} = -\frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \cos(\varphi + \beta) + m_{\delta r} \cdot r\omega^2 = -R + m_{\delta r} \cdot r\omega^2 \quad (3.14)$$



Σχήμα 3.5 – Δύναμη στο κομβίο του στρόφαλου (ένας κύλινδρος)

### 3.4.2 Δρώσες δυνάμεις από δύο κυλίνδρους

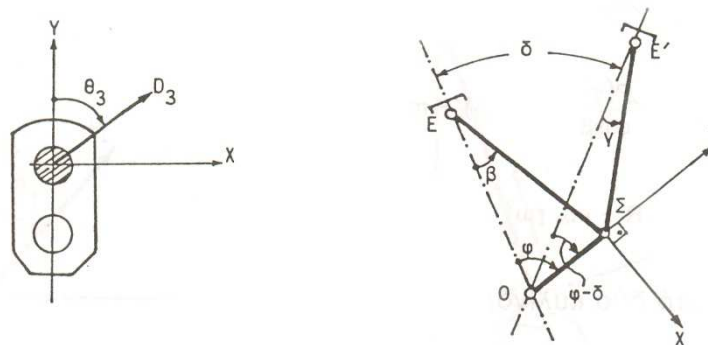
Το σύστημα αξόνων δε μεταβάλλεται από την περίπτωση του ενός κυλίνδρου. Αν ο «αριστερά» κύλινδρος βρίσκεται σε τυχαία χρονική στιγμή σε γωνία στροφάλου  $\varphi$ , ο «δεξιά» κύλινδρος βρίσκεται την ίδια χρονική στιγμή σε γωνία  $\varphi - \delta$ , όπου  $\delta$  η γωνία που σχηματίζουν οι άξονες των δύο κυλίνδρων (η γωνία του V). Αντίστοιχα, όπως συμβολίσαμε με  $\beta$  τη γωνία διωστήρα για τον «αριστερά» κύλινδρο, η αντίστοιχη για τον «δεξιά» θα συμβολίζεται στα παρακάτω με  $\gamma$  και θα προσδιορίζεται από τη σχέση

$$\sin \gamma = \lambda \sin(\varphi - \delta) \quad (3.15)$$

οπότε οι δυνάμεις που θα εξασκούνται τώρα στο κομβίο του στροφάλου θα δίνονται από τις αναλυτικές σχέσεις που ακολουθούν:

$$D_{3x} = T(\varphi) + T(\varphi - \delta) = \frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \sin(\varphi + \beta) + \frac{P(\varphi - \delta)}{\cos \gamma} \sin(\varphi - \delta + \gamma) \quad (3.16)$$

$$D_{3y} = -\frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \cos(\varphi + \beta) - \frac{P(\varphi - \delta)}{\cos \gamma} \cos(\varphi - \delta + \gamma) + 2 \cdot m_{\delta r} r \omega^2 \quad (3.17)$$



Σχήμα 3.6 – Δύναμη στο κομβίο του στροφάλου (δύο κύλινδροι)

### 3.5 Κομβίο βάσης

Όπως ακριβώς και στην προηγούμενη παράγραφο, κάνουμε χρήση συστήματος αξόνων που κινείται με το στρόφαλο, ακολουθεί δηλαδή την

περιστροφή του, και ο κύριος άξονας  $Y$  διέρχεται από τα κέντρα των κομβίων στροφάλου και βάσης. Ακολουθούν οι εκφράσεις για τις δυνάμεις που εξασκούνται στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις του ενός και των δύο κυλίνδρων ανά στρόφαλο.

### 3.5.1 Δρώσεις δυνάμεις από έναν κύλινδρο

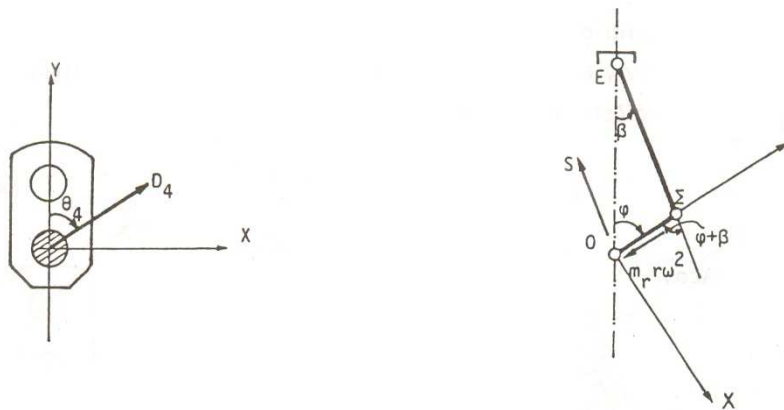
Βασίζουμε την παρακάτω ανάλυση στην υπόθεση ότι η φόρτιση από τον κύλινδρο μοιράζεται εξίσου στα δύο εκατέρωθεν κομβία βάσης του κινητήρα. Για το λόγο αυτό θα έπρεπε να συμπεριλάβουμε τον παράγοντα  $\frac{1}{2}$  στις παρακάτω σχέσεις. Παρ' όλα αυτά, υποθέτουμε, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τον κώδικα που θα παρουσιαστεί σε επόμενο μέρος, ότι το κομβίο βάσης δέχεται δύναμη ίσου μέτρου και από τον γειτονικό κύλινδρο.

Βάσει αυτού, και λαμβάνοντας υπόψη το κάτωθι Σχήμα 3.7, οι αναλυτικές σχέσεις των δυνάμεων γράφονται ως εξής:

$$D_{4x} = \frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \cos(90^\circ + \varphi + \beta) = -\frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \sin(\varphi + \beta) = -T(\varphi) \quad (3.18)$$

$$D_{4y} = \frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \cos(\varphi + \beta) - m_r r \omega^2 = R - m_r r \omega^2 \quad (3.19)$$

όπου για την συνολική περιστρεφόμενη μάζα ισχύει βέβαια η  $m_r = m_{\sigma_r} + m_{\sigma}$ .



Σχήμα 3.7 – Δύναμη στο κομβίο βάσης (ένας κύλινδρος)

### 3.5.2 Δρώσεις δυνάμεις από δύο κυλίνδρους

Ισχύουν τα ίδια που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για τη γωνία στροφάλου στην οποία βρίσκεται ο «δεξιά» κύλινδρος καθώς και για τη γωνία διωστήρα του. Με διατήρηση του ίδιου συστήματος αξόνων, παραθέτουμε τις αντίστοιχες αναλυτικές σχέσεις για τις δυνάμεις που δρουν:

$$D_{5x} = -T(\varphi) - T(\varphi - \delta) \Rightarrow$$
$$D_{5x} = -\frac{P(\varphi)}{\cos\beta} \sin(\varphi + \beta) - \frac{P(\varphi - \delta)}{\cos\gamma} \sin(\varphi - \delta + \gamma) \quad (3.20)$$

$$D_{5y} = P(\varphi - \delta) \frac{\cos(\varphi - \delta + \gamma)}{\cos\gamma} + \frac{P(\varphi)}{\cos\beta} \cos(\varphi + \beta) - (2m_{\delta r} + m_{\sigma}) r\omega^2 \quad (3.21)$$

Παρόλο που για την ορθότερη διατύπωση των παραπάνω, θα έπρεπε η μάζα ενός στροφάλου  $m_{\sigma}$  να μοιραστεί εξίσου στις σχέσεις (3.19),(3.21), το τελικό αποτέλεσμα είναι το ίδιο σε κάθε περίπτωση.

## 3.6 Έδρανο βάσης

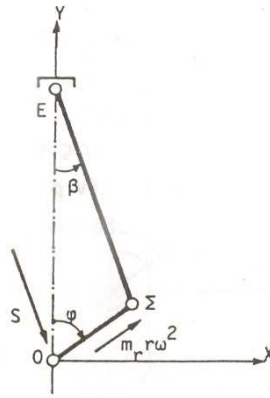
Στην τελευταία αυτή περίπτωση, κάνουμε χρήση σταθερού συστήματος αξόνων, μιας που το ίδιο το έδρανο είναι σταθερό. Ως κύριος άξονας  $Y$ , χρησιμοποιείται αυτή τη φορά ο άξονας του κυλίνδρου. Σχετικό είναι το παρακάτω Σχήμα 3.8.

### 3.6.1 Δρώσεις δυνάμεις από έναν κύλινδρο

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γράφουμε τις αναλυτικές σχέσεις για την περίπτωση του ενός κυλίνδρου (περίπτωση κινητήρα διάταξης σειράς):

$$D_{6x} = \frac{P(\varphi)}{\cos\beta} \cos(90^\circ - \beta) + m_r r\omega^2 \cos(90^\circ - \varphi) \Rightarrow$$
$$D_{6x} = P(\varphi) \cdot \tan\beta + m_r r\omega^2 \sin\varphi \quad (3.22)$$

$$D_{6y} = \frac{P(\varphi)}{\cos\beta} \cos(180^\circ - \beta) + m_r r\omega^2 \cos\varphi = -P(\varphi) + m_r r\omega^2 \cos\varphi \quad (3.23)$$



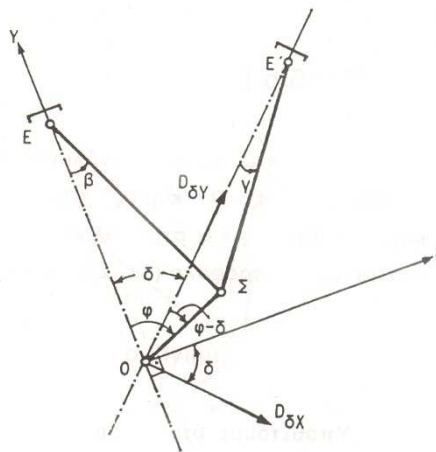
Σχήμα 3.8 – Δύναμη στο έδρανο βάσης (ένας κύλινδρος)

### 3.6.2 Δρώσες δυνάμεις από δύο κυλίνδρους

Αφού έχουν ήδη υπολογιστεί οι συνιστώσες του ενός κυλίνδρου με το σύστημα αξόνων της προηγούμενης περίπτωσης, το διατηρούμε αμετάβλητο και για την παρούσα περίπτωση (κινητήρα διάταξης V). Διατυπώνουμε πρώτα τις συνιστώσες για τον δεύτερο κύλινδρο σε παρόμοιο σύστημα αξόνων, με κύριο άξονα δηλαδή τον άξονα του κυλίνδρου, και στη συνέχεια προβάλλουμε τις συνιστώσες αυτές στο αρχικό αξονικό σύστημα. Εμφανίζονται λοιπόν αρχικά οι συνιστώσες

$$D_{\delta X} = P(\varphi - \delta) \cdot \tan \gamma + m_{\delta r} r \omega^2 \sin(\varphi - \delta) \quad (3.24)$$

$$D_{\delta Y} = -P(\varphi - \delta) + m_{\delta r} r \omega^2 \cos(\varphi - \delta) \quad (3.25)$$



Σχήμα 3.9 – Δύναμη στο έδρανο βάσης (δύο κύλινδροι)

Προβάλλοντας τις παραπάνω στο σύστημα αξόνων του «αριστερά» κυλίνδρου, βλέπε σχετικό Σχήμα 3.9, θα έχουμε την τελική μορφή των σχέσεων για τις δυνάμεις που δέχεται το έδρανο βάσης:

$$D_{7X} = D_{6X} + D_{\delta X} \cos \delta + D_{\delta Y} \underbrace{\cos(90^\circ - \delta)}_{\sin \delta} \quad (3.26)$$

$$D_{7Y} = D_{6Y} + D_{\delta X} \underbrace{\cos(90^\circ + \delta)}_{-\sin \delta} + D_{\delta Y} \cos \delta \quad (3.27)$$

οι οποίες προφανώς συμπληρώνονται με αντικατάσταση των  $D_{6X}, D_{6Y}, D_{\delta X}, D_{\delta Y}$  από τις (3.22)–(3.25). Υπενθυμίζεται ότι  $\gamma$  είναι η γωνία διωστήρα του «δεξιά» κυλίνδρου, όπως και ότι με  $\delta$  συμβολίζεται η γωνία του V, αυτή που σχηματίζουν οι άξονες των δύο κυλίνδρων. Σημειώνεται, τέλος, ότι οι παραπάνω σχέσεις αφορούν τις δυνάμεις που δέχεται το έδρανο βάσης του κινητήρα με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν άλλες εξωτερικές δυνάμεις. Όταν αυτές δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, πρέπει να γίνεται εκτενέστερη μελέτη και να λαμβάνονται υπόψη στις παραπάνω, σύμφωνα πάντα με τις αρχές της μηχανικής. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, οι εξωτερικές δυνάμεις αυτές αμελούνται.

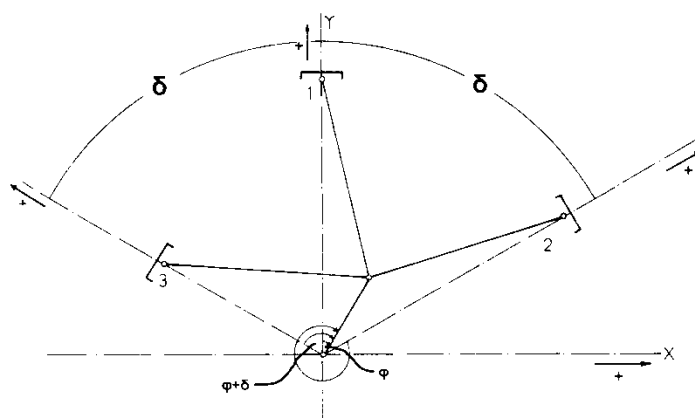
### 3.7 Πολυκύλινδρος κινητήρας

Όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους ισχύουν αυτούσια για τον μονοκύλινδρο κινητήρα. Όσον αφορά τα έδρανα της άνω και κάτω κεφαλής του διωστήρα, τα παραπάνω ισχύουν αμετάβλητα και για πολυκύλινδρο κινητήρα. Παρ' όλα αυτά, για τα έδρανα βάσης του πολυκύλινδρου κινητήρα δεν ακολουθείται η ίδια υπολογιστική πορεία, καθώς η δύναμη που μεταβιβάζεται στο καθένα από αυτά καθορίζεται πλέον από τις σχετικές δυνάμεις όλων των στροφάλων της στροφαλοφόρου ατράκτου. Τέτοιου είδους υπολογισμός απαιτεί, βέβαια, σύνολο παραδοχών και αποδεικνύεται κοπιώδης και χρονοβόρος. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός για κάθε έδρανο βάσης γίνεται με επαλληλία των δυνάμεων που οφείλονται στη δράση των δύο εκατέρωθεν μόνο στροφάλων,

με την καθεμιά από τις δυνάμεις να υπολογίζεται όπως στον μονοκύλινδρο κινητήρα, ή τον αντίστοιχο δικύλινδρο διάταξης V. Η ακρίβεια που προκύπτει με τη μέθοδο αυτή, είναι αρκούντως ικανοποιητική για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης.

### 3.8 Κινητήρας τύπου «W»

Εκτός από τους κινητήρες εν σειρά και τους διάταξης V, ο κώδικας θα εφαρμοστεί και σε μια ειδική διάταξη κινητήρα τύπου W, ή διπλού V, όπου 3 κύλινδροι είναι αρθρωμένοι στο ίδιο στρόφαλο, ενώ η περιεχόμενη γωνία των δύο V είναι ίση και στα δύο ζευγάρια. Όσον αφορά τα έδρανα της άνω και κάτω κεφαλής του διωστήρα, όσα παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 3.2 και 3.3 ισχύουν αυτούσια και εδώ. Θεωρούμε ως κύλινδρο 1 τον κεντρικό κύλινδρο του «W», ως 2 τον «δεξιά» και ως 3 τον «αριστερά». Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να γράψουμε ότι όταν ο κεντρικός κύλινδρος βρίσκεται σε τυχαία χρονική στιγμή σε γωνία στροφάλου  $\varphi$ , ο «δεξιά» κύλινδρος βρίσκεται την ίδια χρονική στιγμή σε γωνία  $\varphi - \delta$ , όπου  $\delta$  η γωνία που σχηματίζουν οι άξονες των δύο κυλίνδρων, και ο «αριστερά» κύλινδρος βρίσκεται σε γωνία  $\varphi + \delta$ . Σχετικό είναι το Σχήμα 3.10 που ακολουθεί. Αντίστοιχα, όπως



Σχήμα 3.10 – Διάταξη κυλίνδρων σε κινητήρα τύπου W

συμβολίσαμε με  $\beta$  τη γωνία διωστήρα για τον 1<sup>ο</sup> κύλινδρο, οι αντίστοιχες για τον «δεξιά» και «αριστερά» θα συμβολίζονται στα παρακάτω με  $\gamma_2, \gamma_3$  και θα προσδιορίζονται από τις γνωστές σχέσεις

$$\sin \gamma_2 = \lambda \sin(\varphi - \delta) \quad (3.28)$$

$$\sin \gamma_3 = \lambda \sin(\varphi + \delta) \quad (3.29)$$

Εργαζόμενοι ομοίως λοιπόν, εξάγουμε τις αντίστοιχες αναλυτικές σχέσεις που δίνουν τις συνιστώσες των δυνάμεων στα κομβία στροφάλου και βάσης και στο έδρανο βάσης, σύμφωνα με τα ήδη αναφερθέντα συστήματα αξόνων:

$$D_{3wX} = T(\varphi) + T(\varphi - \delta) + T(\varphi + \delta) = \frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \sin(\varphi + \beta) + \frac{P(\varphi - \delta)}{\cos \gamma_2} \sin(\varphi - \delta + \gamma_2) + \frac{P(\varphi + \delta)}{\cos \gamma_3} \sin(\varphi + \delta + \gamma_3) \quad (3.30)$$

$$D_{3wY} = -\frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \cos(\varphi + \beta) - \frac{P(\varphi - \delta)}{\cos \gamma_2} \cos(\varphi - \delta + \gamma_2) \dots - \frac{P(\varphi + \delta)}{\cos \gamma_3} \cos(\varphi + \delta + \gamma_3) + 3 \cdot m_{\delta r} r \omega^2 \quad (3.31)$$

$$D_{5wX} = -T(\varphi) - T(\varphi - \delta) - T(\varphi + \delta) \Rightarrow D_{5wX} = -\frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \sin(\varphi + \beta) - \frac{P(\varphi - \delta)}{\cos \gamma_2} \sin(\varphi - \delta + \gamma_2) \dots - \frac{P(\varphi + \delta)}{\cos \gamma_3} \sin(\varphi + \delta + \gamma_3) \quad (3.32)$$

$$D_{5wY} = P(\varphi + \delta) \frac{\cos(\varphi + \delta + \gamma_3)}{\cos \gamma_3} + P(\varphi - \delta) \frac{\cos(\varphi - \delta + \gamma_2)}{\cos \gamma_2} \dots + \frac{P(\varphi)}{\cos \beta} \cos(\varphi + \beta) - (3m_{\delta r} + m_{\sigma}) r \omega^2 \quad (3.33)$$

Για το έδρανο βάσης, παρατίθενται πρώτα οι ενδιάμεσες συνιστώσες, βλέπε την αντίστοιχη Ενότητα 3.6:

$$D_{\delta wX} = P(\varphi - \delta) \cdot \tan \gamma_2 + m_{\delta r} r \omega^2 \sin(\varphi - \delta) \quad (3.34)$$

$$D_{\delta wY} = -P(\varphi - \delta) + m_{\delta r} r \omega^2 \cos(\varphi - \delta) \quad (3.35)$$

$$D_{\alpha wX} = P(\varphi + \delta) \cdot \tan \gamma_3 + m_{\delta r} r \omega^2 \sin(\varphi + \delta) \quad (3.36)$$

$$D_{\alpha wY} = -P(\varphi + \delta) + m_{\delta r} r \omega^2 \cos(\varphi + \delta) \quad (3.37)$$



Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν τις παραπάνω, με βάση το σύστημα αξόνων του οποίου ο κύριος άξονας  $Y$  συμπίπτει με τον άξονα του κεντρικού κυλίνδρου, οι αναλυτικές σχέσεις για τη δύναμη στο έδρανο βάσης είναι:

$$D_{7wX} = D_{6wX} + (D_{\delta wX} + D_{awX}) \cos \delta + (D_{\delta wY} - D_{awY}) \sin \delta \quad (3.38)$$

$$D_{7wY} = D_{6wY} + (D_{awX} - D_{\delta wX}) \sin \delta + (D_{awY} + D_{\delta wY}) \cos \delta \quad (3.39)$$

# Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

---

## ΜΟΝΙΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

### 4.1 Γενικά

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν σε μορφή διαγραμμάτων, τόσο γραμμικών όσο και πολικών, οι δυνάμεις που ασκούνται στα έδρανα της διάταξης ανά μοίρα στροφάλου, όσον αφορά τη μόνιμη λειτουργία του κινητήρα diesel (steady-state operation).

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε, στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας, σε προγραμματιστικό περιβάλλον Fortran<sup>®</sup>, δέχεται ως δεδομένα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως:

- τη διάμετρο, τη μάζα και τη διαδρομή του εμβόλου
- τη σειρά ανάφλεξης
- τη διάταξη (σειράς, τύπου V ή και W) και την περιεχόμενη γωνία
- τη μάζα, το μήκος διωστήρα και την απόσταση του ΚΒ του από την κάτω κεφαλή του
- τη μάζα ενός στροφάλου
- την ταχύτητα περιστροφής (περίπτωση μόνιμης λειτουργίας)

Κατά την εκτέλεση ακολουθείται διαφορετική διαδικασία κατά την επιλογή μόνιμης και κατά την επιλογή της μεταβατικής λειτουργίας (Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>). Όσον αφορά τη μόνιμη λειτουργία, που είναι και το θέμα του παρόντος

κεφαλαίου, ο κώδικας λαμβάνει ως είσοδο το εκάστοτε αρχείο δυναμοδεικτικού διαγράμματος, που έχει προέλθει από προηγούμενη μελέτη κινητήρα diesel του εργαστηρίου ΜΕΚ του Ε.Μ.Π. [5]. Κατά την εκτέλεσή του, παρέχει τα μέτρα των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε έδρανο (από την άνω κεφαλή διωστήρα μέχρι και τη βάση), ανά μοίρα στροφάλου, καθώς και τη γωνία που σχηματίζουν αυτές στο εκάστοτε σύστημα αξόνων - βλέπε 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Επίσης, εμφανίζει τις μέγιστες τιμές των παραπάνω δυνάμεων και τη γωνία στην οποία εμφανίζονται. Τέλος, υπολογίζει τη δύναμη που ασκείται σε κάθε ένα από τα έδρανα βάσης του κινητήρα, αναλόγως φυσικά τη διάταξη των κυλίνδρων του και λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.7 για τον πολυκύλινδρο κινητήρα.

Παρακάτω, θα παρουσιαστούν διαγραμματικά και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα για την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας. Η τελευταία αναφέρεται σε:

- 90% φορτίο
- ταχύτητα περιστροφής 1200rpm
- στατική προπορεία έγχυσης 36° ΠΑΝΣ
- υλικό χυτοσίδηρο στο τοίχωμα του κυλίνδρου

Αρχικά θα εξεταστεί ο κινητήρας σειράς και στη συνέχεια κινητήρες διάταξης V διαφόρων περιεχόμενων γωνιών, καθώς και ένας τύπου W. Στη συνέχεια θα δοθούν συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των παραπάνω τύπων, αλλά και μεταξύ εδράνων βάσης κινητήρων διαφορετικής διάταξης και σειράς ανάφλεξης. Στο τελικό μέρος του κεφαλαίου θα γίνει μια παραμετρική ανάλυση όπου θα παρουσιαστούν οι μεταβολές των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν καθώς τροποποιούνται λειτουργικά και δομικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.

## 4.2 Κινητήρας σειράς

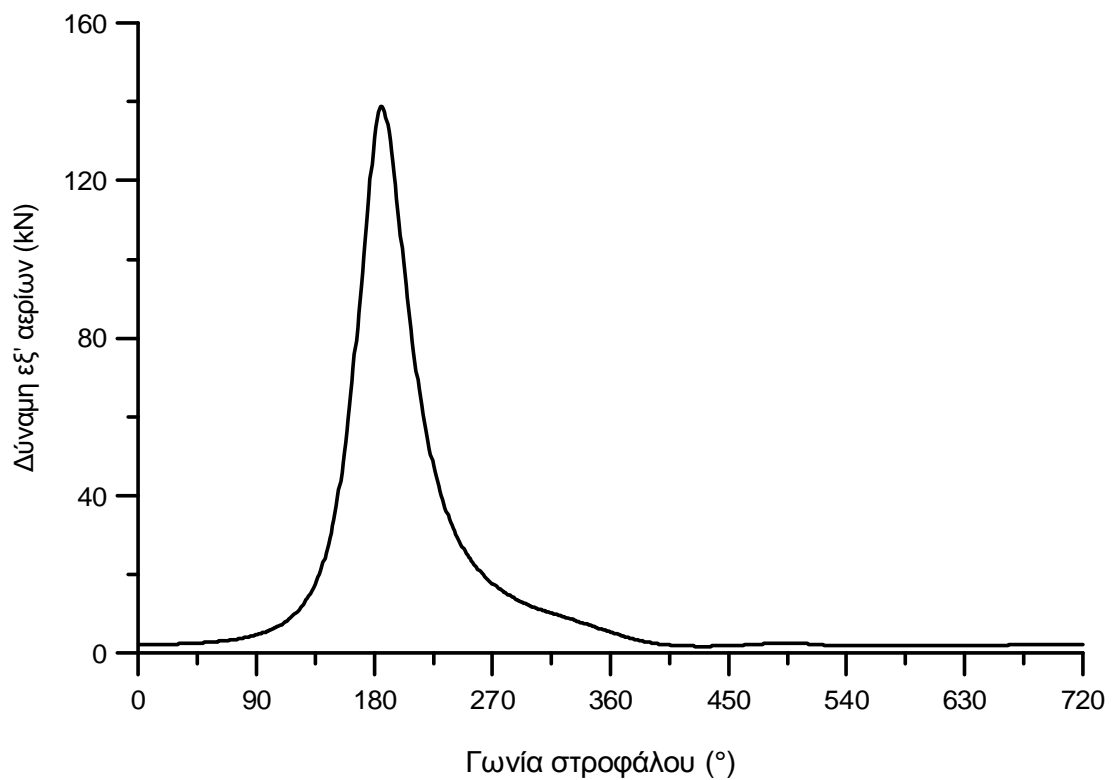
Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα πολικά διαγράμματα για τις δυνάμεις που ασκούνται στα έδρανα του κινητήρα εν σειρά διάταξης, καθώς

και το γραμμικό και πολικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται μαζί όλες οι παραπάνω δυνάμεις.

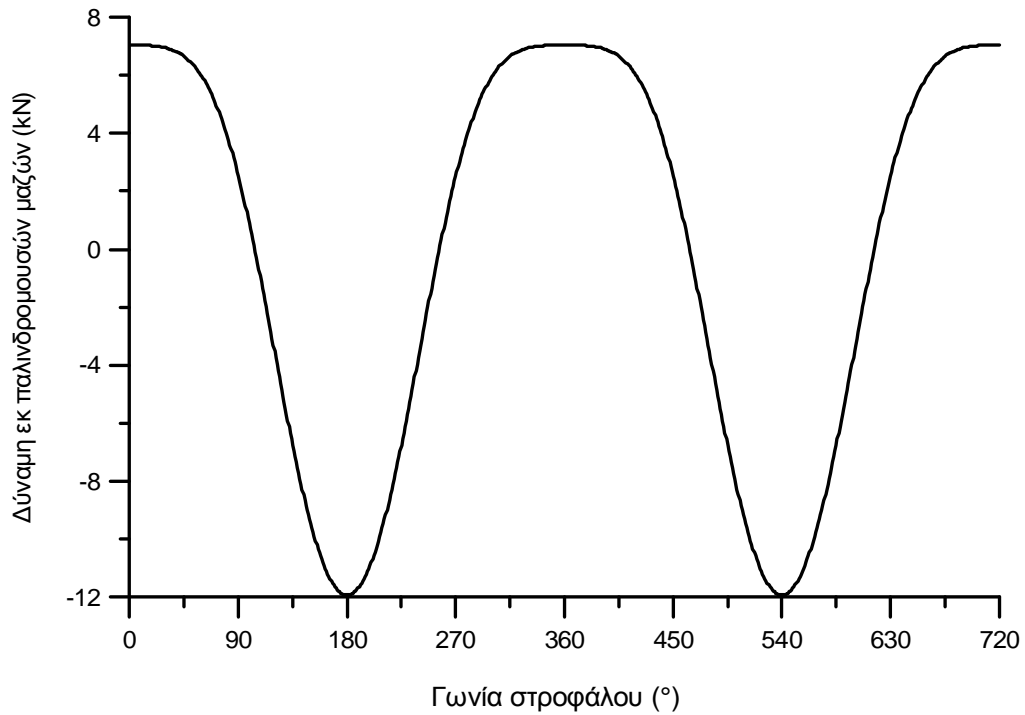


**Σχήμα 4.1** – Σκαρίφημα τυπικού (εξακύλινδρου) κινητήρα σειράς

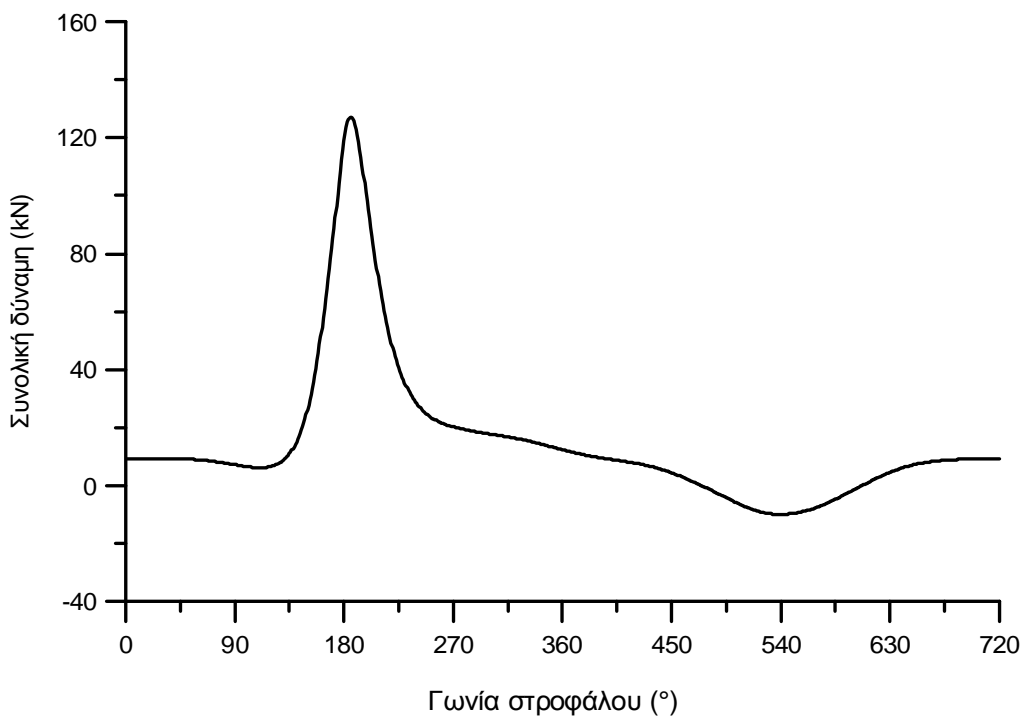
Για διευκόλυνση στην ανάλυση και ερμηνεία των παρακάτω αποτελεσμάτων, δίνονται πρώτα τα αντίστοιχα διαγράμματα πιέσεων εξ' αερίων (δυναμοδεικτικό), παλινδρομικών και συνολικών δυνάμεων (Σχήματα 4.2 - 4.4) για την ονομαστική περίπτωση λειτουργίας που εξετάζουμε. Ως θετική φορά λαμβάνεται αυτή του Σχήματος 2.1 (από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ).



**Σχήμα 4.2** – Διάγραμμα δυνάμεων εξ' αερίων κινηματικού μηχανισμού



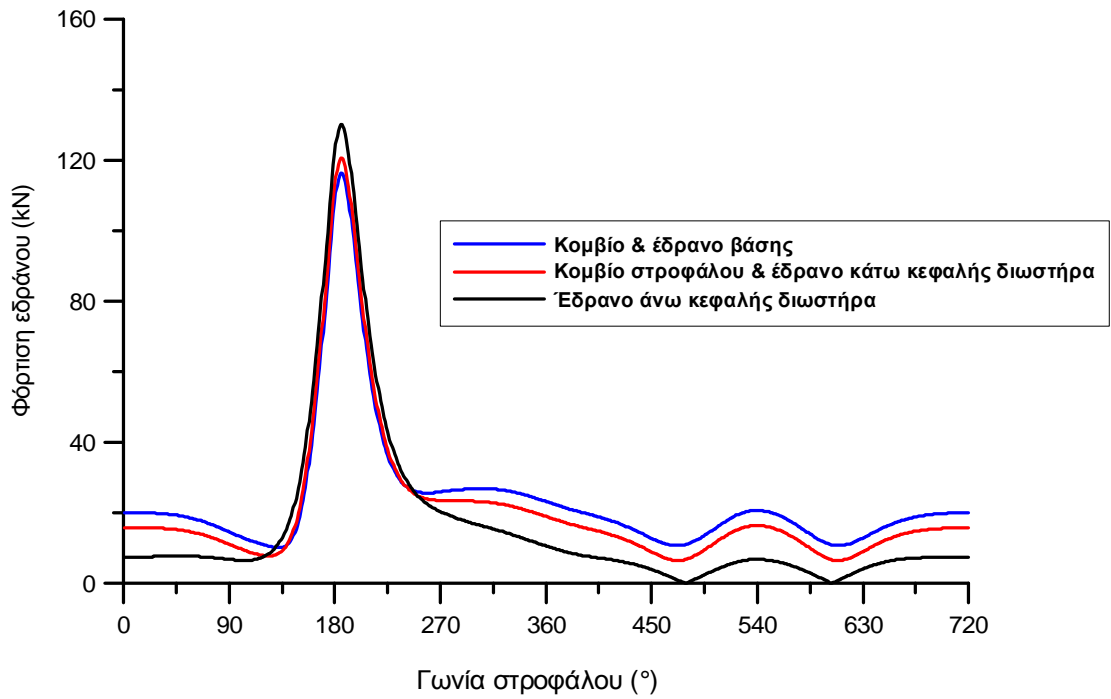
**Σχήμα 4.3** – Διάγραμμα δυνάμεων εκ παλινδρομουσών μαζών κινηματικού μηχανισμού



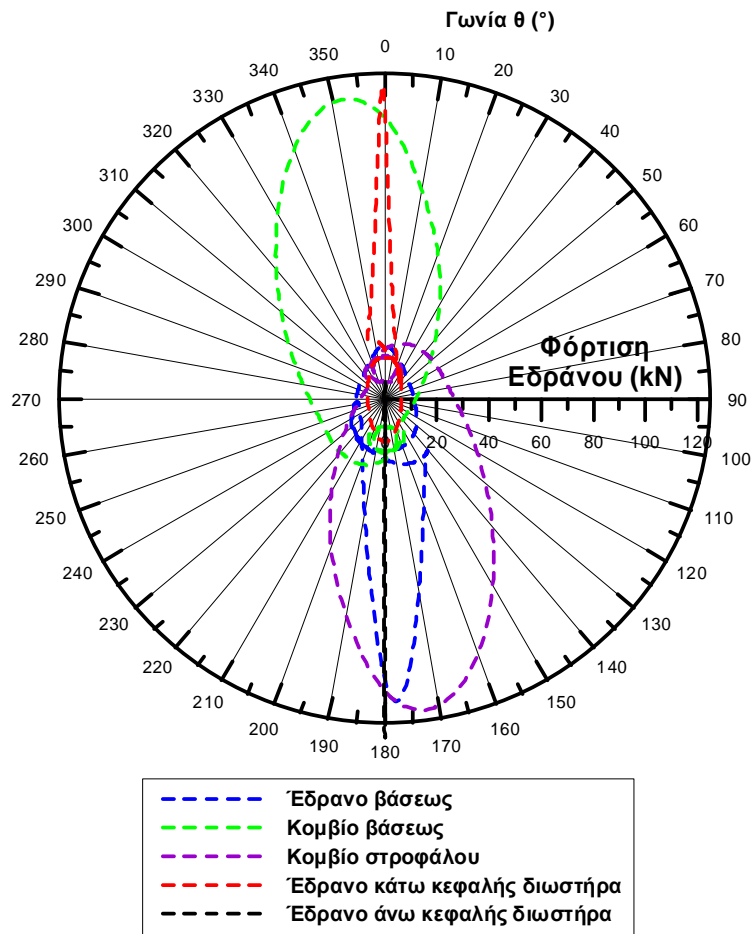
**Σχήμα 4.4** – Διάγραμμα συνολικών δυνάμεων κινηματικού μηχανισμού

Σημαντικό είναι ότι αύξηση του φορτίου συνεπάγεται αύξηση των μέγιστων πιέσεων καύσης, ενώ αύξηση των στροφών του κινητήρα συνεπάγεται αύξηση του μέτρου των δυνάμεων εκ παλινδρομουσών μαζών.

## Κινητήρας εν σειρά

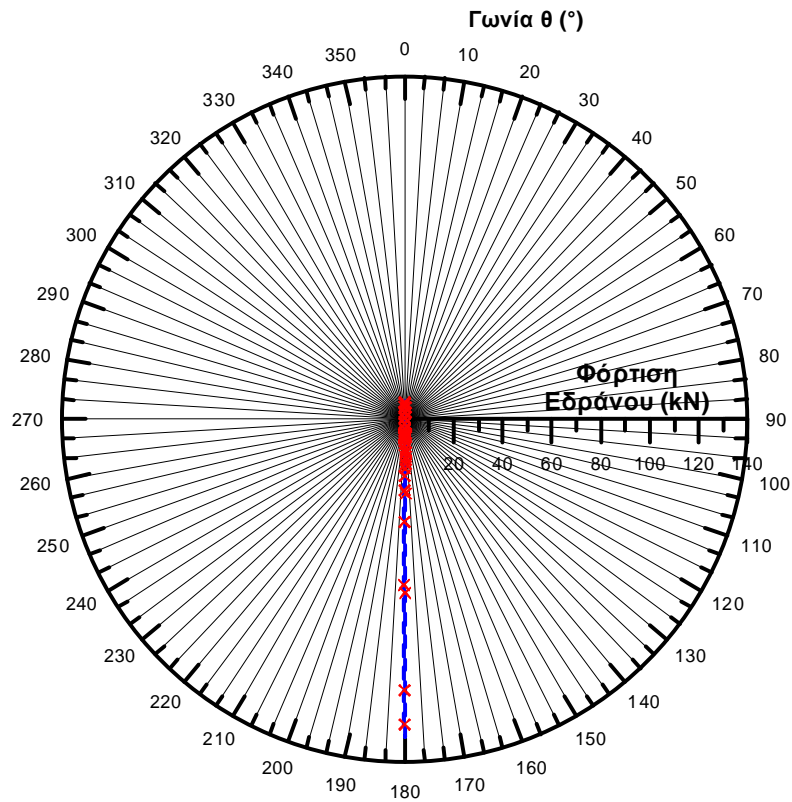


**Σχήμα 4.5α** – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα σειράς



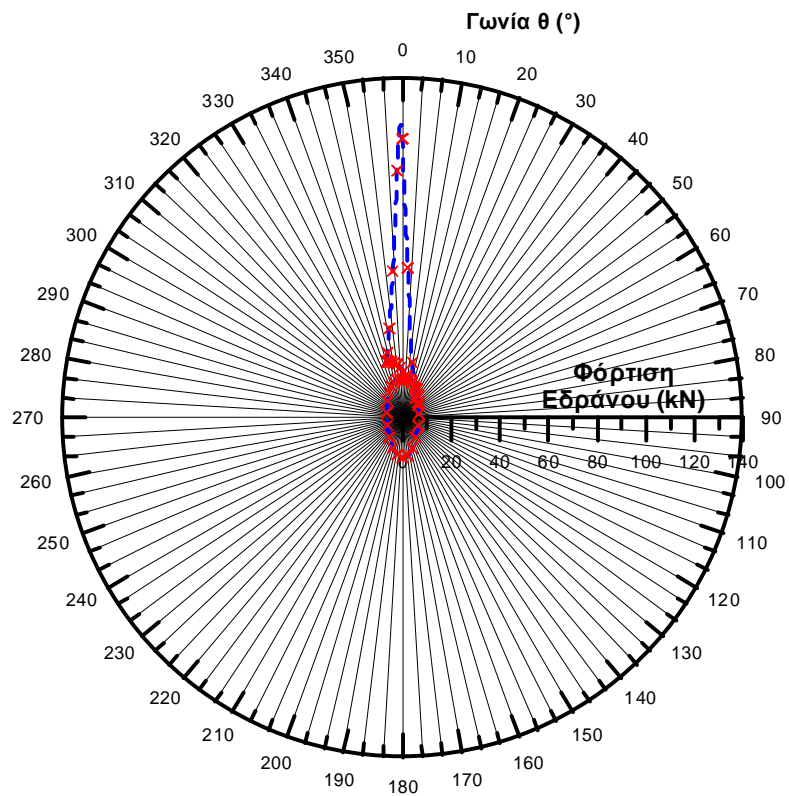
**Σχήμα 4.5β** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα σειράς

**Κινητήρας εν σειρά  
Έδρανο άνω κεφαλής διωστήρα**



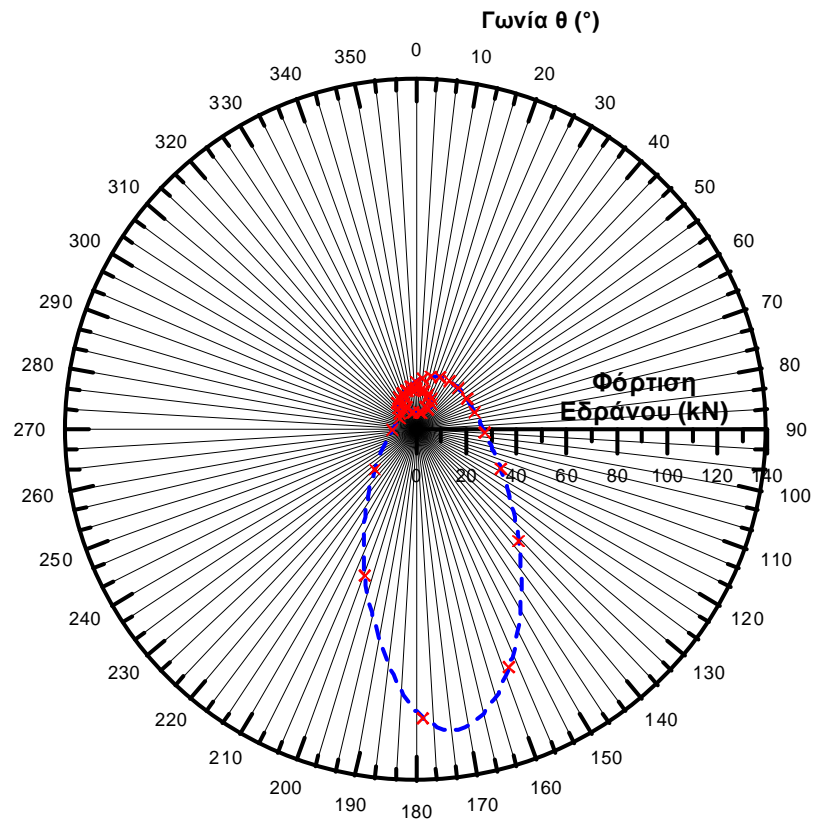
**Σχήμα 4.5γ** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου άνω κεφαλής διωστήρα κινητήρα σειράς

**Έδρανο κάτω κεφαλής διωστήρα**



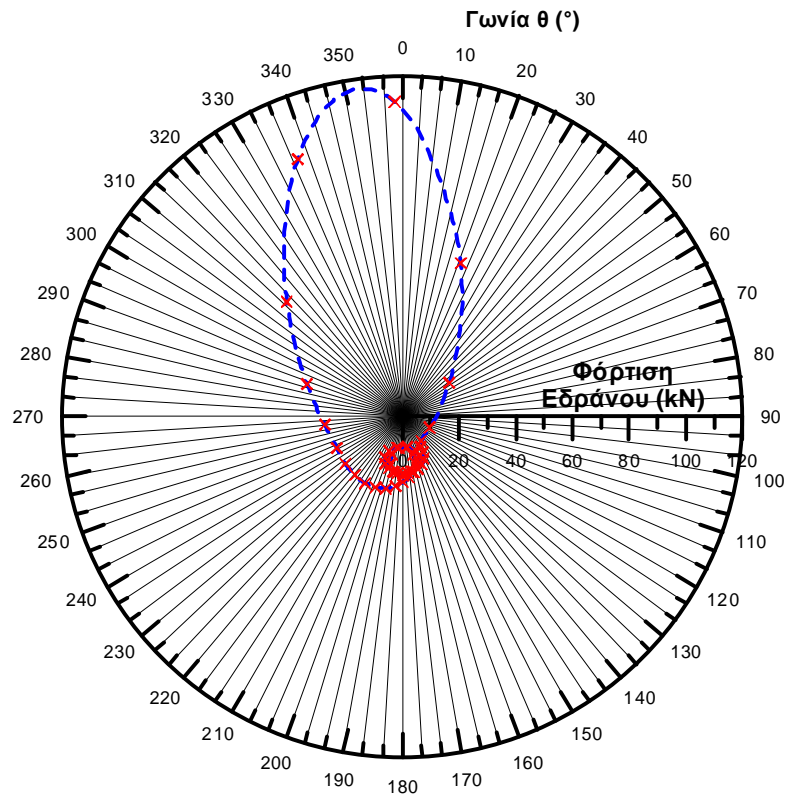
**Σχήμα 4.5δ** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου κάτω κεφαλής διωστήρα κινητήρα σειράς

### Κινητήρας εν σειρά Κομβίο στροφάλου



Σχήμα 4.5ε – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα σειράς

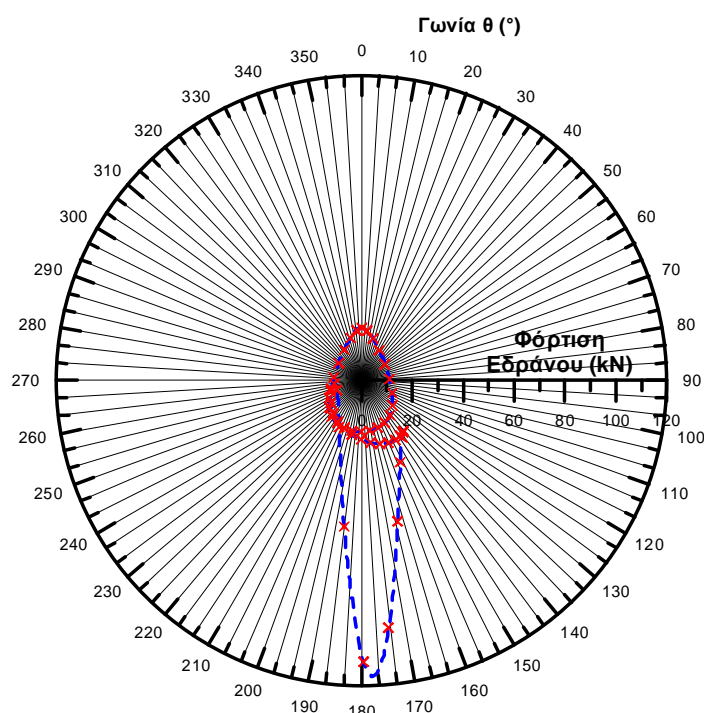
### Κομβίο βάσης



Σχήμα 4.5στ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης κινητήρα σειράς



### Κινητήρας εν σειρά Έδρανο βάσης



Σχήμα 4.5ζ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης κινητήρα σειράς

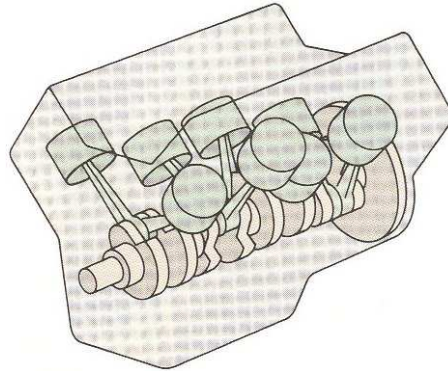
Στο γραμμικό διάγραμμα, Σχήμα 4.5α, παρατηρούμε την εξέλιξη των δυνάμεων στα έδρανα συναρτήσει της γωνίας στροφάλου  $\varphi$ . Η κορυφή και των τριών συναρτήσεων εμφανίζεται στην περιοχή αμέσως μετά το ΑΝΣ, όπου συμβαίνει η σημαντική αύξηση των πιέσεων εξ' αερίων στον κύλινδρο, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το έργο αποτόνωσης και συνεπώς και η παραγόμενη ισχύς και ροπή από τον κινητήρα.

Η δύναμη στο έδρανο της άνω κεφαλής διωστήρα παίρνει σχεδόν μηδενικές τιμές δύο φορές κατά τη διάρκεια του κύκλου, ενώ οι αντίστοιχες δυνάμεις στα υπόλοιπα έδρανα παρουσιάζουν κι αυτές παρόμοια βύθιση. Αυτό οφείλεται στη μείωση του συνολικού φορτίου  $P = P_g + P_l$  κατά τη φάση εναλλαγής των αερίων, αφού εκεί οι παλινδρομικές μαζικές δυνάμεις αντισταθμίζουν τις πολύ μικρές δυνάμεις εξ' αερίων εξαιτίας αντίθετου προσήμου.

Στα πολικά διαγράμματα (Σχήματα 4.5β-ζ) παρατηρούμε την εκάστοτε διεύθυνση της δύναμης στα έδρανα. Κάποια από αυτά είναι «αντιδιαμετρικά» μεταξύ τους, γεγονός που οφείλεται στο νόμο δράσης - αντίδρασης που εφαρμόζεται κατά τη ροή των δυνάμεων από το έμβολο προς τη βάση.

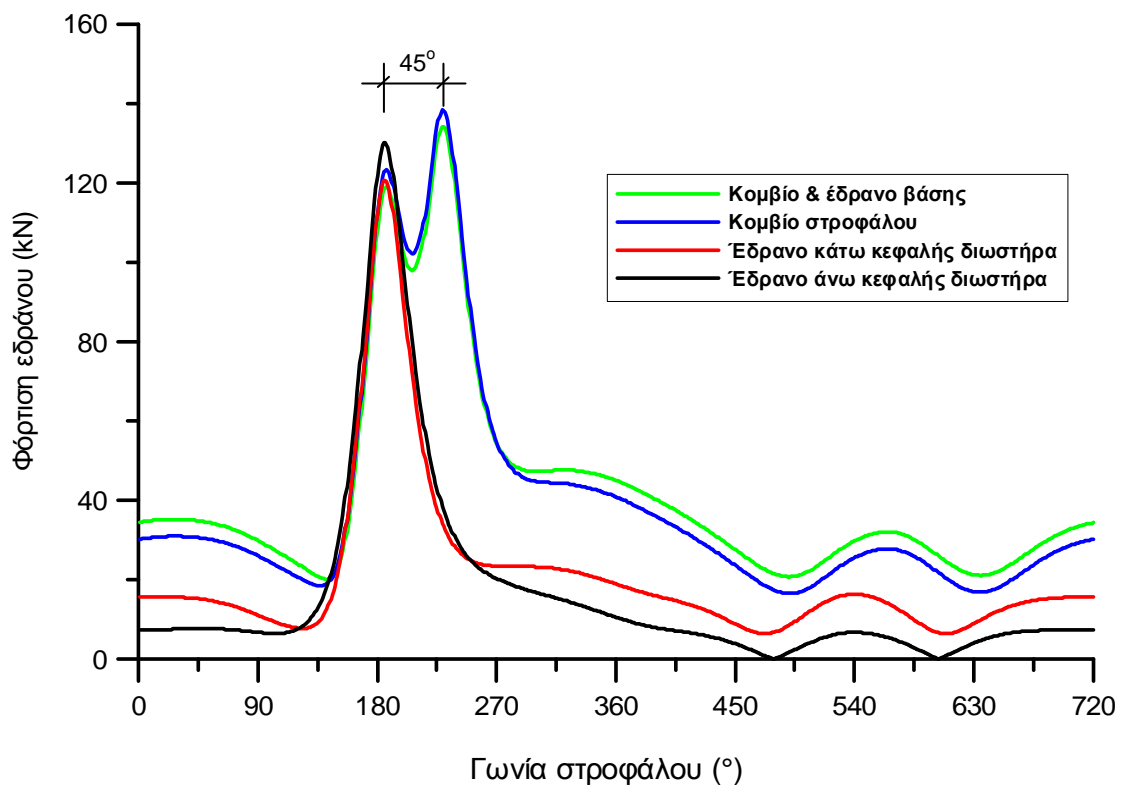
### 4.3 Κινητήρες τύπου V και W

Στην παρούσα ενότητα θα εξεταστούν τα διαγράμματα για τις δυνάμεις που ασκούνται στα έδρανα κινητήρων τύπου V και τύπου W. Συγκεκριμένα η εφαρμογή γίνεται σε κινητήρα τύπου V με περιεχόμενη γωνία των αξόνων των κυλίνδρων ίση με  $45^\circ - 60^\circ - 72^\circ - 90^\circ - 120^\circ - 180^\circ$  και σε κινητήρα τύπου W με περιεχόμενες γωνίες  $45^\circ$ .



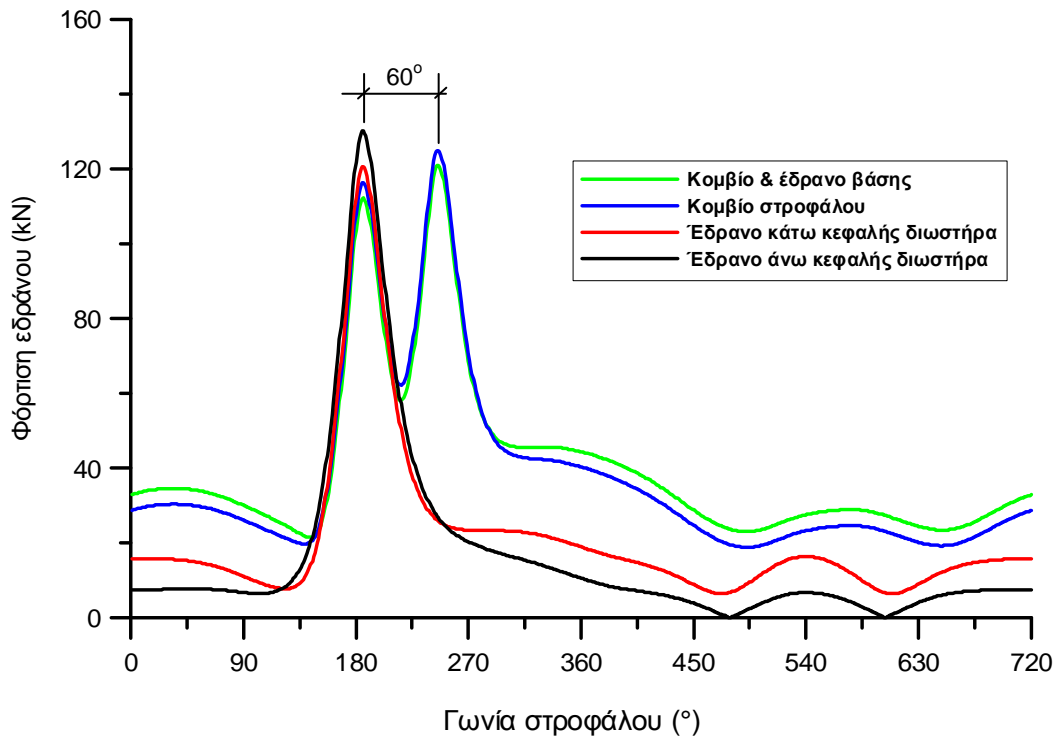
Σχήμα 4.6 – Σκαρίφημα τυπικού (οκτα-κύλινδρου) κινητήρα V

#### Κινητήρας V45°



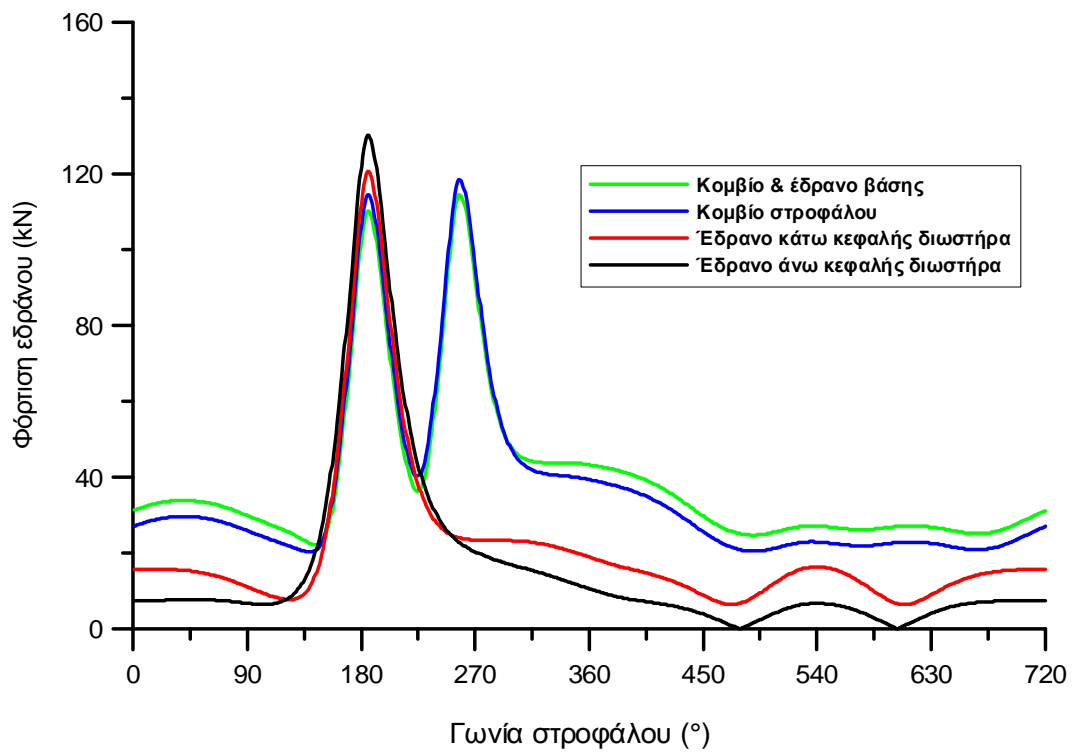
Σχήμα 4.7α – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα V45°

## Κινητήρας V60°



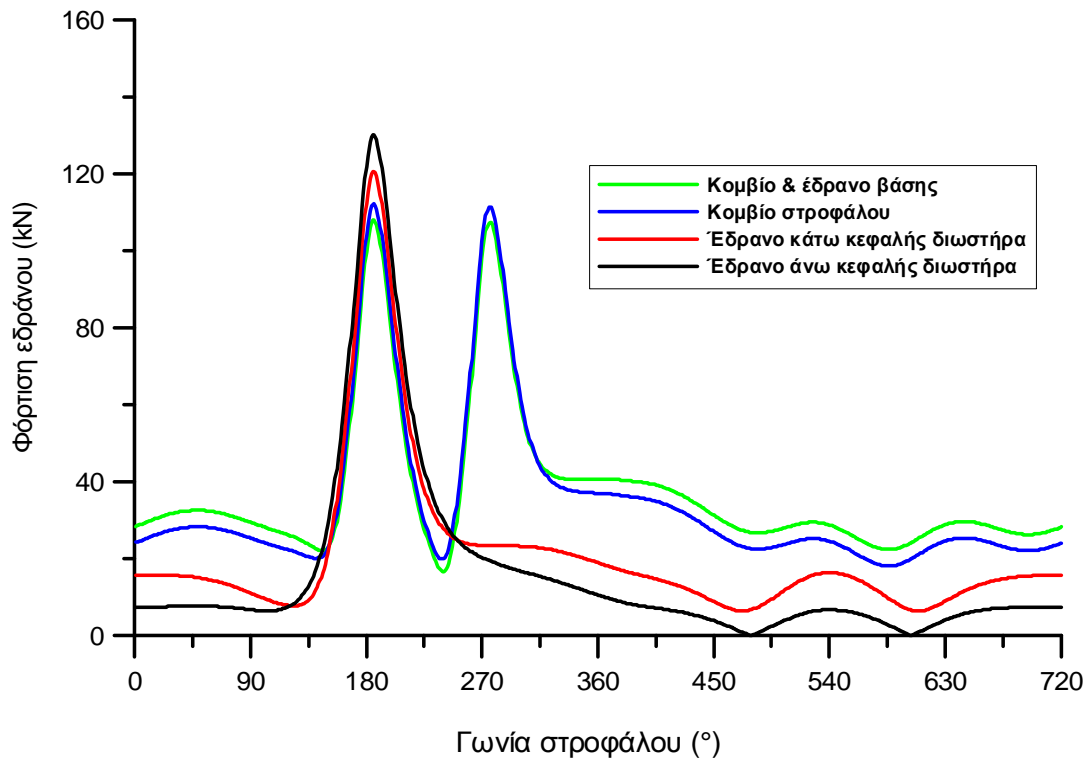
Σχήμα 4.7β – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα V60°

## Κινητήρας V72°



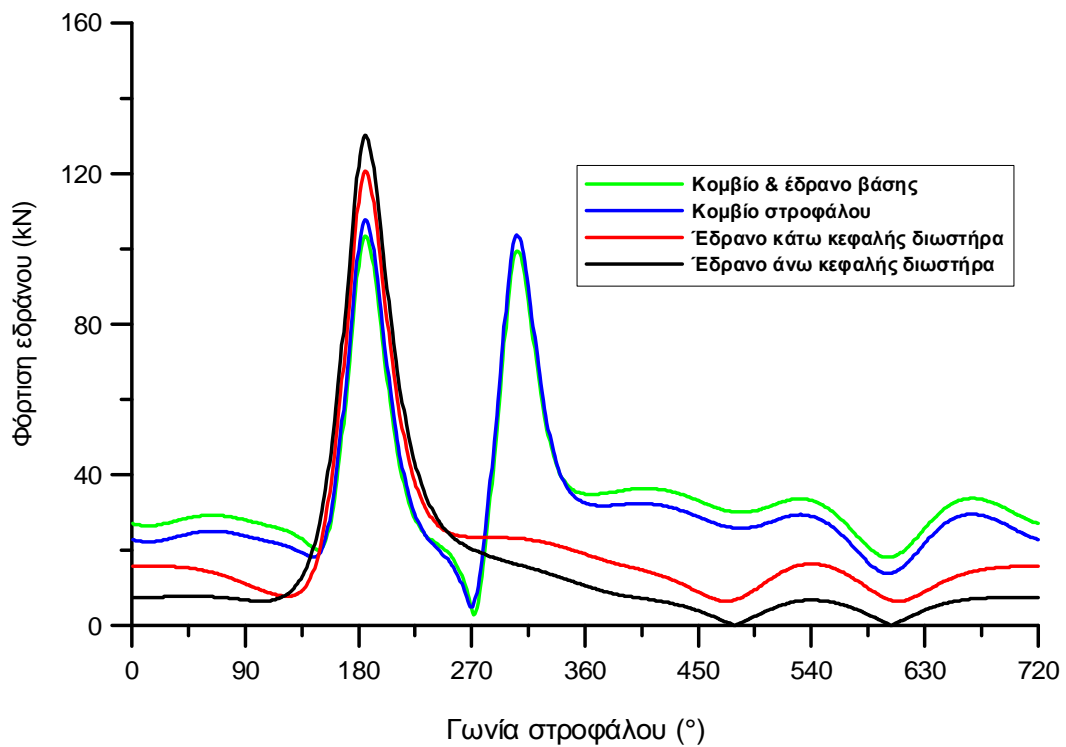
Σχήμα 4.7γ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα V72°

## Κινητήρας V90°



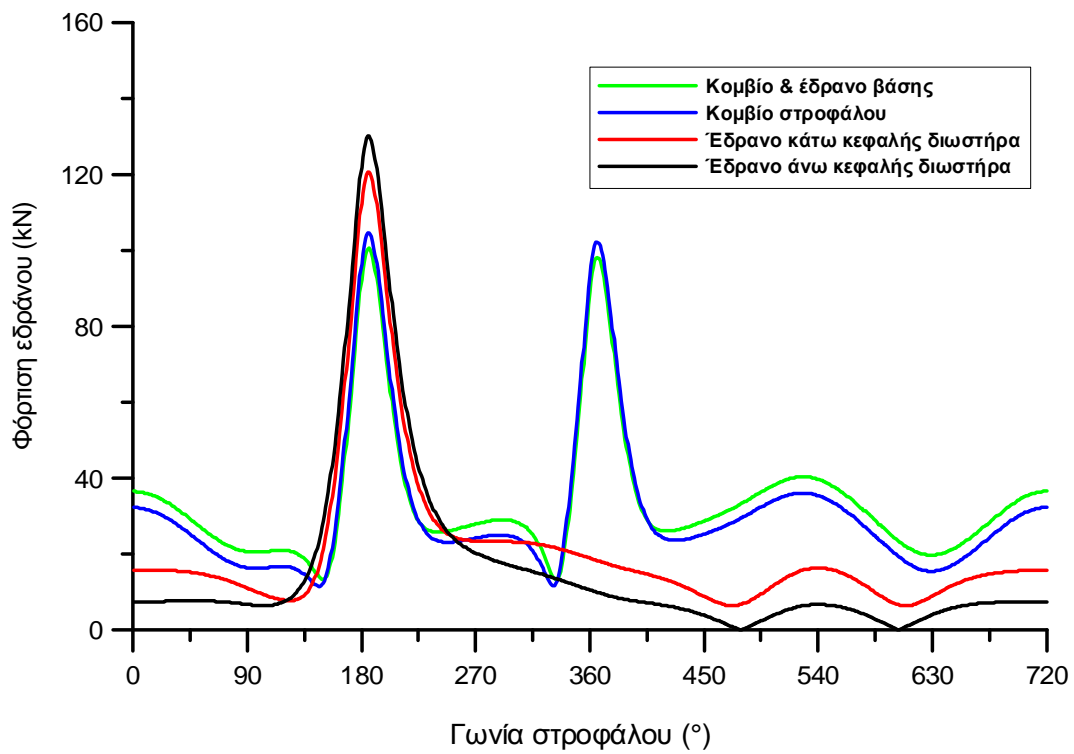
Σχήμα 4.7δ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα V90°

## Κινητήρας V120°



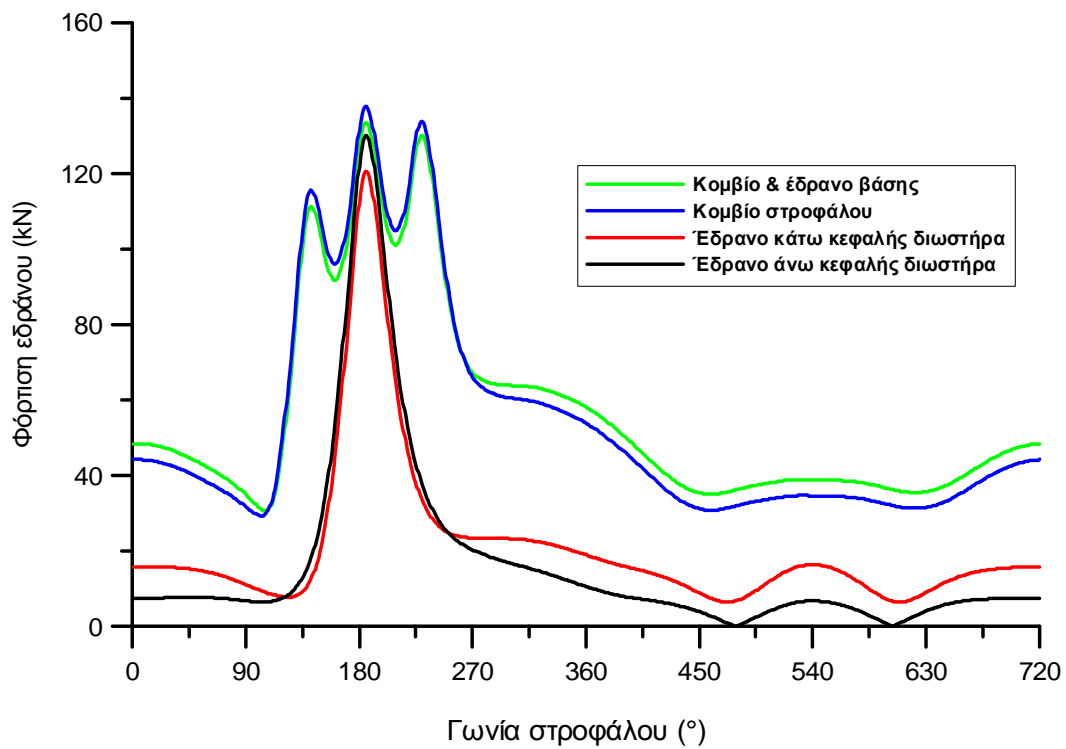
Σχήμα 4.7ε – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα V120°

## Κινητήρας V180°



Σχήμα 4.7στ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα V180°

## Κινητήρας W45°



Σχήμα 4.7ζ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίων & εδράνων κινητήρα W45°

Η γραφική παράσταση των δυνάμεων που ασκούνται στα έδρανα των κεφαλών του διωστήρα είναι ταυτόσημη σε όλα τα διαγράμματα, όπως και αναμενόταν άλλωστε, αφού ο τύπος του κινητήρα επηρεάζει μόνο τα κατώτερα έδρανα και κομβία.

Στους κινητήρες  $V$  οι δυνάμεις που ασκούνται στα κομβία στροφάλου, βάσης και στο έδρανο βάσης, παρουσιάζουν διπλή κορυφή, στις γωνίες στροφάλου στις οποίες παρουσιάζει μέγιστο η πίεση από αέρια στον εκάστοτε κύλινδρο. Χαρακτηριστικό είναι ότι η γωνιακή (οριζόντια) διαφορά των δύο κορυφών, ισούται με τη γωνία  $\delta$  του « $V$ », κάτι που συμφωνεί απόλυτα με τα παραπάνω. Παρατηρούμε ότι για τις δυνάμεις αυτές, αυξανόμενης της γωνίας  $\delta$ , η δεύτερη κορυφή έχει ολοένα και μικρότερη τιμή.

Τέλος, ενδιαφέρουσα είναι και η συμπεριφορά των δυνάμεων στο δεξί κομμάτι των διαγραμμάτων, προς το τέλος του κύκλου. Το μέτρο τους εκεί αυξομειώνεται γύρω από μια χαμηλότερη τιμή και παρουσιάζει μια μορφή ταλάντωσης, η οποία ακολουθεί ουσιαστικά τη διακύμανση των παλινδρομικών δυνάμεων (Σχήμα 4.3). Φανερό είναι ότι αυτή η ταλαντωτική συμπεριφορά μειώνεται σε μεγάλο βαθμό για  $\delta = 72^\circ$ , όπου τα μέτρα διατηρούνται περίπου σταθερά σε τιμές  $25 - 30 kN$ . Περισσότερα συμπεράσματα θα εξαχθούν στην επόμενη ενότητα της έκθεσης αυτής, όπου παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα.

Στο διάγραμμα του κινητήρα τύπου  $W$  (Σχήμα 4.7ζ), οι κορυφές που ξεχωρίζουν είναι αντίστοιχα τρεις, μία για κάθε έναν από τους τρεις κυλίνδρους του στροφάλου που φτάνει στο θερμό<sup>1</sup> ΑΝΣ του. Τα δύο πιο αξιοσημείωτα φαινόμενα στο διάγραμμα αυτό, είναι η διαφορά στην τιμή των τριών κορυφών (των οποίων η οριζόντια διαφορά ισούται βέβαια με  $45^\circ$ ), και ότι τα φορτία που δέχονται τα κομβία στροφάλου και βάσης και το έδρανο βάσης, παραμένουν για το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου σε μεγαλύτερα επίπεδα από ότι στις υπόλοιπες διατάξεις κυλίνδρων.

---

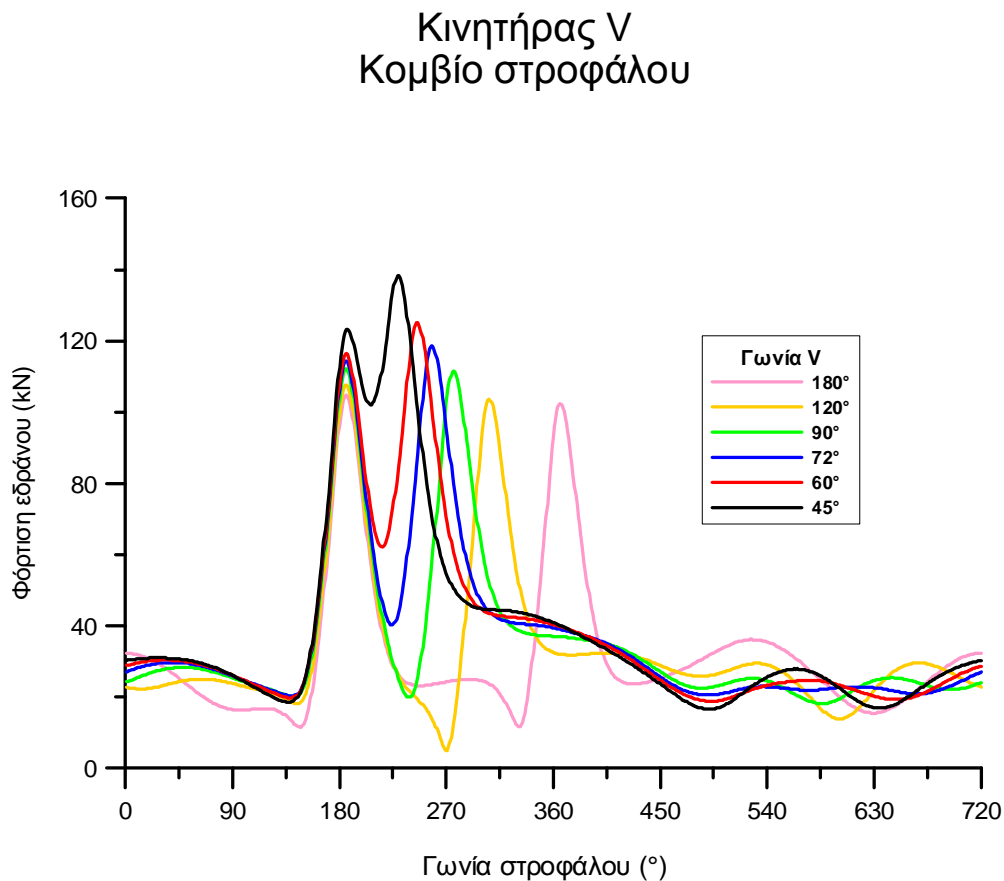
<sup>1</sup> Θερμό ΑΝΣ καλείται η θέση του κυλίνδρου που βρίσκεται στο τέλος της συμπίεσης, δηλαδή εδώ:  $\varphi = 180^\circ$

## 4.4 Παρουσίαση συγκριτικών διαγραμμάτων

Στο πρώτο μέρος της ενότητας αυτής, θα παρατεθούν συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των κινητήρων διάταξης V, για κάθε ένα από τα έδρανα και κομβία, ώστε να αποτυπωθούν πιο αποτελεσματικά οι διαφορές που προκύπτουν με μεταβολή της περιεχόμενης γωνίας των κυλίνδρων. Στο δεύτερο μέρος της ενότητας θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα για τις δυνάμεις των εδράνων βάσης ξεχωριστά, για τέσσερις διαφορετικούς πολυκύλινδρους κινητήρες με δεδομένη σειρά ανάφλεξης.

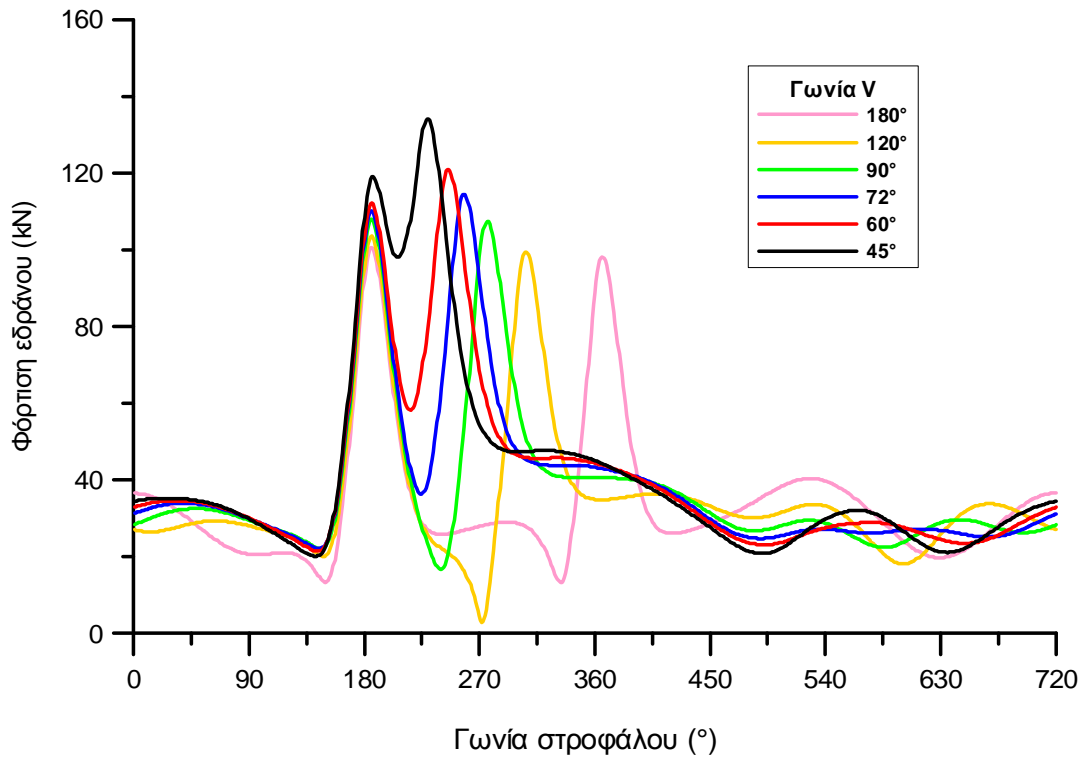
### 4.4.1 Διαφορετικές διατάξεις κυλίνδρων

Οι συγκρίσεις που θα παρουσιαστούν πιο κάτω αφορούν το τμήμα της διάταξης του κινητήρα V που διαφοροποιείται δυναμικά από τον μονοκύλινδρο, δηλαδή το έδρανο και το κομβίο βάσης, καθώς και το κομβίο στροφάλου. Επειδή, λόγω δράσης - αντίδρασης, οι δυνάμεις που ασκούνται στο κομβίο και το έδρανο βάσης είναι κατά μέτρο ίσες, θα απεικονιστούν σε κοινό γραμμικό, αλλά ξεχωριστό πολικό διάγραμμα.

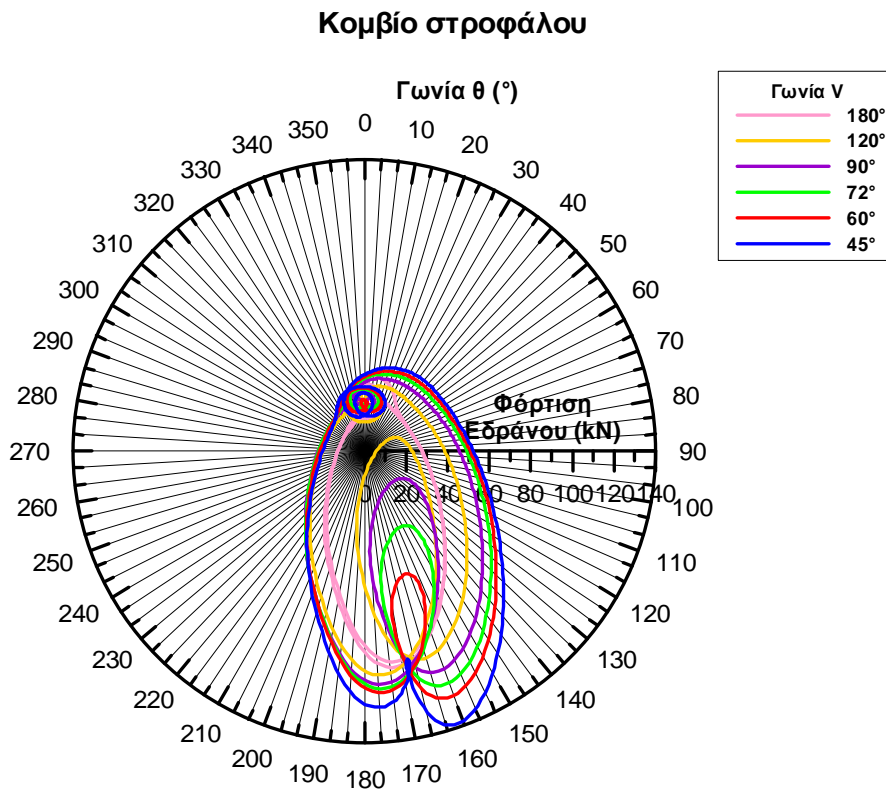


Σχήμα 4.8α – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου για διάφορους κινητήρες V

## Κινητήρας V Κομβίο & έδρανο βάσεως



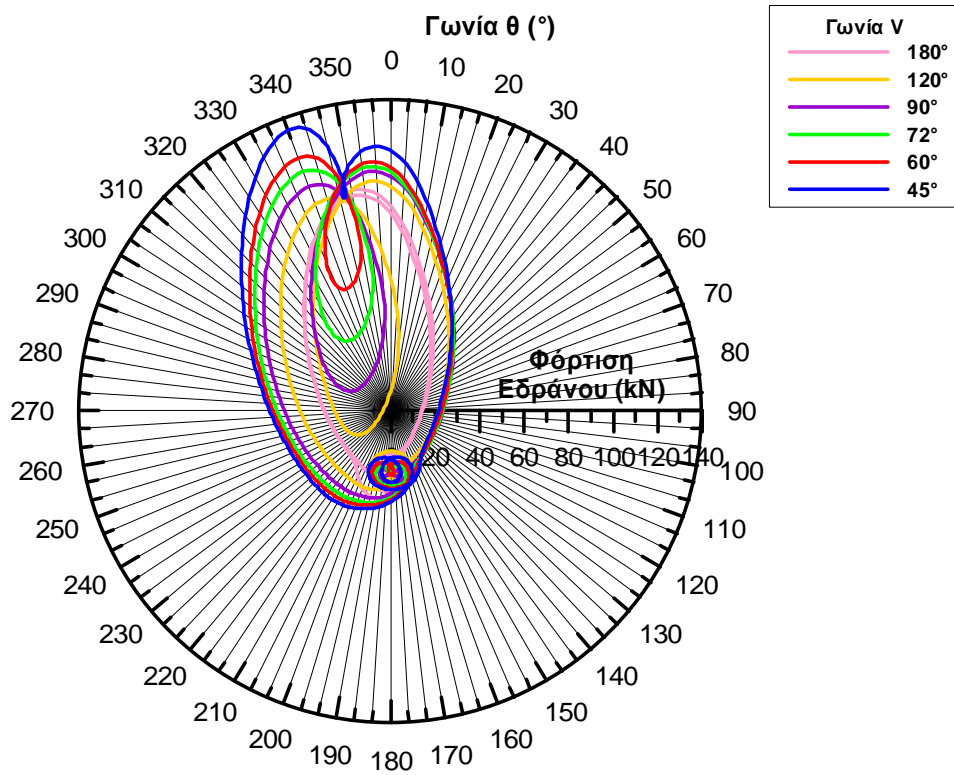
Σχήμα 4.8β – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης για διάφορους κινητήρες V



Σχήμα 4.8γ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου για διάφορους κινητήρες V

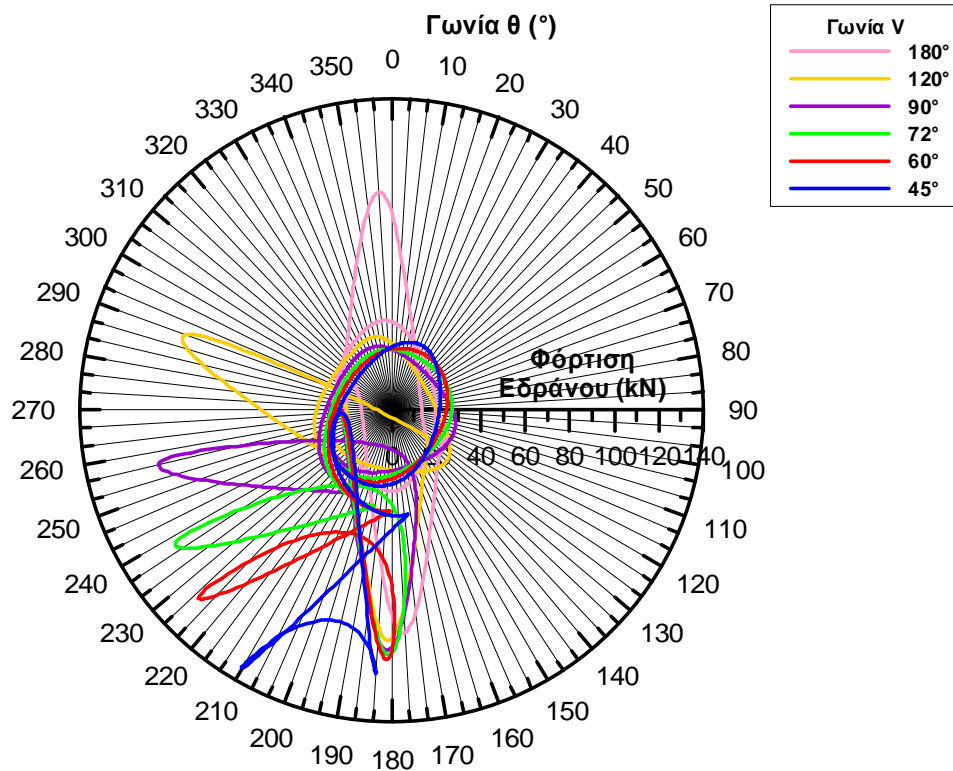


### Κινητήρας V Κομβίο βάσεως



Σχήμα 4.8δ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης για διάφορους κινητήρες V

### Έδρανο βάσεως



Σχήμα 4.8ε – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης για διάφορους κινητήρες V

Από τα γραμμικά διαγράμματα 4.8α-β, είναι εμφανής ή μείωση της δεύτερης «κορυφής» των δυνάμεων αυξανόμενης της γωνίας  $\delta$ . Καθώς η τελευταία αυξάνεται, αυξάνει ισόποσα και η οριζόντια διαφορά των δύο κορυφών, ενώ μειώνεται και η τιμή τους, αισθητά της πρώτης (θερμό ΑΝΣ του πρώτου κυλίνδρου που αρθρώνεται στο στρόφαλο) και σημαντικά της δεύτερης (θερμό ΑΝΣ του δεύτερου κυλίνδρου που αρθρώνεται στο στρόφαλο). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι για μεγάλες γωνίες  $\delta$ , όταν ο δεύτερος κύλινδρος είναι στο θερμό ΑΝΣ του, έχει παρέλθει σημαντικό χρονικό διάστημα από την ανάφλεξη στον πρώτο κύλινδρο. Το αποτέλεσμα είναι η πίεση εξ' αερίων στον τελευταίο να έχει μειωθεί σημαντικά τη στιγμή που γίνεται η ανάφλεξη στον δεύτερο κύλινδρο, άρα και το φορτίο  $P_g$  είναι σημαντικά μειωμένο. Η μείωση αυτή φαίνεται καθαρά και από τη «συρρίκνωση» που παρουσιάζουν τα πολικά διαγράμματα με αύξηση της  $\delta$ . Εκτός από τα παραπάνω, είναι εμφανής και η μείωση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς των δυνάμεων στο τελευταίο κομμάτι του τετράχρονου κύκλου, καθώς η τιμή της  $\delta$  τείνει στις  $72^\circ$ .

Ένα στοιχείο που αξίζει να σημειωθεί ακόμα είναι ο αντιδιαμετρικός χαρακτήρας που παρουσιάζει το πολικό διάγραμμα για το κομβίο στροφάλου σε σχέση με αυτό του κομβίου βάσης (Σχήματα 4.5γ-δ). Τέλος, στο πολικό διάγραμμα για το έδρανο βάσης, παρατηρούμε ότι οι διευθύνσεις των δυνάμεων στις θέσεις που παίρνουν τις δύο μεγαλύτερες τιμές τους, διαφέρουν κατά γωνία που αυξάνεται αυξανόμενης της  $\delta$ .

#### **4.4.2 Καταπόνηση εδράνων βάσης κινητήρων διαφόρων διατάξεων**

Στην παρούσα ενότητα θα εξεταστούν τα διαγράμματα καταπόνησης των εδράνων βάσης τεσσάρων κινητήρων διαφορετικής διάταξης και σειράς ανάφλεξης. Είναι όμως σκόπιμο να γίνει πρώτα μια αναφορά στο πλήθος των εδράνων βάσης και στη λειτουργία που εξυπηρετούν.

Τα έδρανα βάσης είναι αυτά στα οποία στηρίζεται η στροφαλοφόρος άτρακτος του κινητήρα. Σε αυτά εδράζονται τα κομβία βάσης της ατράκτου. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχετικό Σχήμα 4.9, τα κομβία βάσης

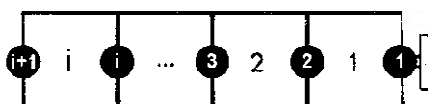
παρεμβάλλονται μεταξύ γειτονικών κομβίων στροφάλου. Όπως έχει γίνει ήδη ξεκάθαρο από τα πρώτα κεφάλαια, στο κάθε στρόφαλο αντιστοιχεί ένας διωστήρας, εφόσον αναφερόμαστε σε εν σειρά κινητήρα, ή δύο διωστήρες, εφόσον αναφερόμαστε σε διάταξης V.



Σχήμα 4.9 – Κομβία βάσης ● και κομβίο στροφάλου ●

Είναι φανερό, λοιπόν, ότι το πλήθος των εδράνων βάσης του κινητήρα είναι ίσο με τον αριθμό των κομβίων στροφάλου αυξημένο κατά ένα. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν διαγραμματικά τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα για τετρακύλινδρο εν σειρά και οκτακύλινδρο  $V90^\circ$  κινητήρα, σειράς «ανάφλεξης στροφάλων»<sup>2</sup> 1 – 3 – 4 – 2, και εξακύλινδρο εν σειρά και δωδεκακύλινδρο  $V60^\circ$ , σειράς «ανάφλεξης στροφάλων» 1 – 5 – 3 – 6 – 2 – 4. Σύμφωνα με τα αναφερθέντα παραπάνω, οι δύο πρώτοι κινητήρες διαθέτουν πέντε (5) έδρανα βάσης, ενώ οι δύο τελευταίοι διαθέτουν επτά (7).

Λαμβάνοντας υπόψην όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.7 του παρόντος, ότι η δύναμη που ασκείται σε κάθε έδρανο υπολογίζεται ως επαλληλία των δυνάμεων των γειτονικών μόνο στροφάλων, το παρακάτω Σχήμα 4.10 βοηθά στην κατανόηση της αρίθμησης των εδράνων, ξεκινώντας από τον 1<sup>ο</sup> κύλινδρο πλησίον του συνδέσμου ισχύος.

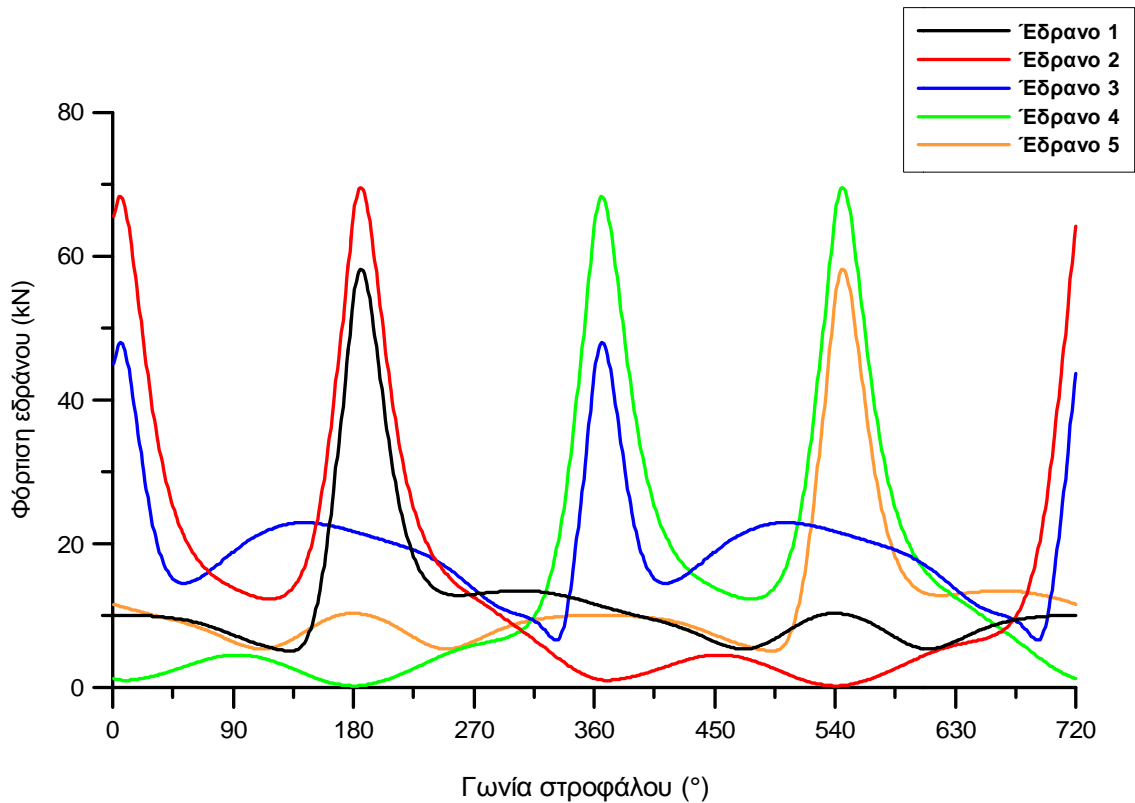


Σχήμα 4.10 – Αρίθμηση κυλίνδρων και εδράνων βάσης πολυκύλινδρου κινητήρα

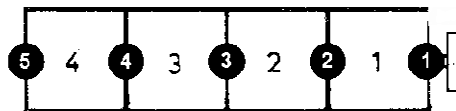
<sup>2</sup> Θεωρούμε δεδομένο ότι κύλινδροι αρθρωμένοι στο ίδιο στρόφαλο (διάταξη V) φτάνουν διαδοχικά στο θερμό ANΣ τους. Παραδείγματος χάριν, στον οκτακύλινδρο  $V90^\circ$  η σειρά ανάφλεξης θα είναι 1-5-3-7-4-8-2-6

## 4κύλινδρος κινητήρας εν σειρά διάταξης

Σ.Α.: 1-3-4-2



Σχήμα 4.11α – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνων βάσης τετρακύλινδρου εν σειρά κινητήρα



Από το παραπάνω Σχήμα 4.11α εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα, που είναι κοινά και για τους κινητήρες διαφορετικής διάταξης που θα εξεταστούν στην συνέχεια. Αρχικά, έδρανα συμμετρικά ως προς το μέσο του κινητήρα (στην προκειμένη περίπτωση το έδρανο 3), έχουν ταυτόσημη συμπεριφορά, αλλά μετατοπισμένη κατά συγκεκριμένη γωνία, που εξαρτάται από τη σειρά ανάφλεξης. Έτσι, εφόσον στην παρούσα περίπτωση η

γωνία ανάφλεξης είναι  $\Delta\varphi_\alpha = \frac{720^\circ}{z=4} = 180^\circ$ , η γραφική παράσταση του μέτρου

της δύναμης που δέχεται το έδρανο 1 είναι ταυτόσημη με αυτήν του εδράνου 5, και προπορεύεται κατά  $2 \cdot \Delta\varphi_\alpha = 360^\circ$ , όσο δηλαδή απέχει γωνιακά η ανάφλεξη του 1<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> κυλίνδρου. Αντίστοιχα, η γραφική παράσταση για

το 2<sup>ο</sup> και το 4<sup>ο</sup> έδρανο είναι ίδιες και διαφέρουν επίσης κατά  $2 \cdot \Delta\varphi_\alpha$ , όσο οι αναφλέξεις του ζεύγους κυλίνδρων 2-1 με το ζεύγος 3-4.

Είναι προφανές, όπως έχει σημειωθεί και σε προηγούμενες ενότητες, ότι οι γραφικές παραστάσεις των δυνάμεων παρουσιάζουν – κατά τη διάρκεια του τετράχρονου κύκλου - μέγιστα, στις θέσεις που οι εκατέρωθεν κύλινδροι βρίσκονται αμέσως μετά το θερμό ΑΝΣ τους. Ακριβώς για αυτό, οι δυνάμεις των ακραίων εδράνων της ατράκτου (εδώ τα 1 και 5) εμφανίζουν μόνο ένα μέγιστο, ενώ οι δυνάμεις που ασκούνται στα υπόλοιπα, εμφανίζουν αντίστοιχα δύο μέγιστα. Παρ' όλα αυτά, οι κορυφές των δυνάμεων των εδράνων 2 και 4, είναι μεγαλύτερου μέτρου, αφού συνεισφέρουν οι πιέσεις εξ' αερίων και των δύο κυλίνδρων του ζεύγους. Αντίθετα, οι δυνάμεις που δέχονται τα ακραία έδρανα βάσης παρουσιάζουν ελάχιστο σε τιμή  $\sim 5kN$ , ενώ οι δυνάμεις του 2<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> εδράνου εμφανίζουν σχεδόν μηδενικές τιμές κατά τη διάρκεια του τετράχρονου κύκλου ( $\varphi_1 = 180^\circ, 540^\circ$ ). Αυτό συμβαίνει λόγω «αλληλοαναίρεσης» της δύναμης που ασκείται εξαιτίας του πρώτου κυλίνδρου από τον δεύτερο κύλινδρο, που λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της συνισταμένης δύναμης που ασκείται στο έδρανο.

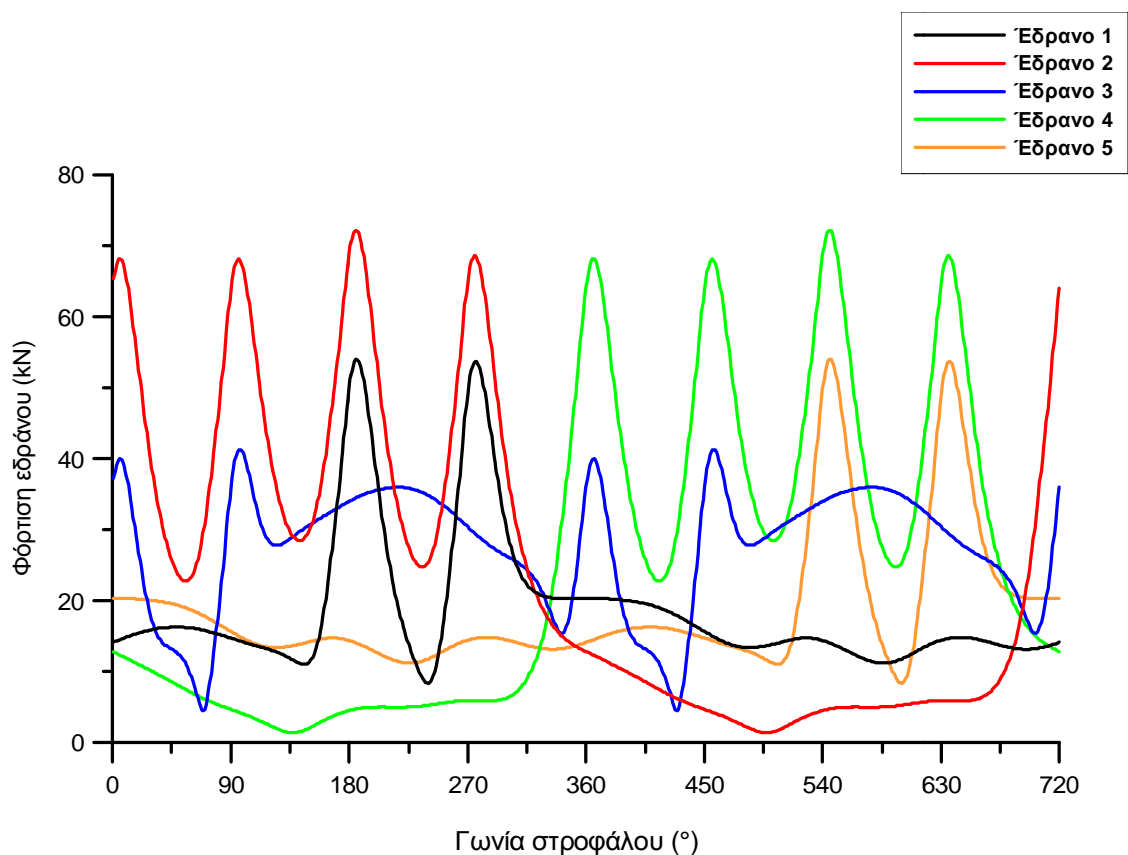
Π.χ., το 2<sup>ο</sup> έδρανο δέχεται τις δυνάμεις από τον 1<sup>ο</sup> και τον 2<sup>ο</sup> κύλινδρο. Για  $\varphi_1 = 540^\circ$  ο κύλινδρος 1 βρίσκεται στο ψυχρό ΑΝΣ του, ενώ ο κύλινδρος 2 στο ΚΝΣ του κατά την έναρξη της συμπίεσης. Στις θέσεις αυτές, οι οριζόντιες (κατά  $x$ ) συνιστώσες των δυνάμεων είναι μηδενικές, ενώ οι κάθετες συνιστώσες είναι αντίθετες και σχεδόν ίδιου μέτρου. Η συνισταμένη δύναμη λοιπόν στο έδρανο είναι σχεδόν μηδενική.

Τέλος, είναι άξιο προσοχής το γεγονός ότι η δύναμη που ασκείται στο κεντρικό έδρανο, στην περίπτωση μας το 3<sup>ο</sup>, εμφανίζει τη χαμηλότερη κορυφή, αλλά διατηρεί μεγαλύτερες – συγκριτικά - τιμές για το υπόλοιπο τμήμα του κύκλου. Παραδείγματος χάριν, για  $\varphi_1 = 180^\circ$ , έχουμε  $\varphi_3 = 720^\circ$  και  $\varphi_2 = 360^\circ$ , δηλαδή οι κύλινδροι 2 και 3 βρίσκονται στην αρχή της εξαγωγής και συμπίεσης αντίστοιχα. Στις φάσεις αυτές, η πίεση εξ' αερίων στον κύλινδρο είναι πολύ μικρότερη της μέγιστης, με τις δυνάμεις από παλινδρομούσες μάζες να παίζουν σημαντικό ρόλο. Στις θέσεις αυτές, οι

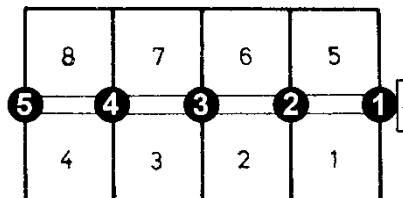
οριζόντιες συνιστώσες των δυνάμεων που δέχεται το έδρανο βάσης είναι μηδενικές, ενώ και οι δύο κάθετες συνιστώσες είναι προς τα αρνητικά του άξονα  $Y$ , συνεισφέροντας και διατηρώντας σε υψηλά επίπεδα το μέτρο της εξασκούμενης δύναμης, ακόμα και σε γωνίες στροφάλου που απέχουν από το θερμό ΑΝΣ των εκατέρωθεν κυλίνδρων.

## 8κύλινδρος κινητήρας V90°

Σ.Α.: 1-5-3-7-4-8-2-6



Σχήμα 4.11β – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνων βάσης οκτακύλινδρου V90° κινητήρα



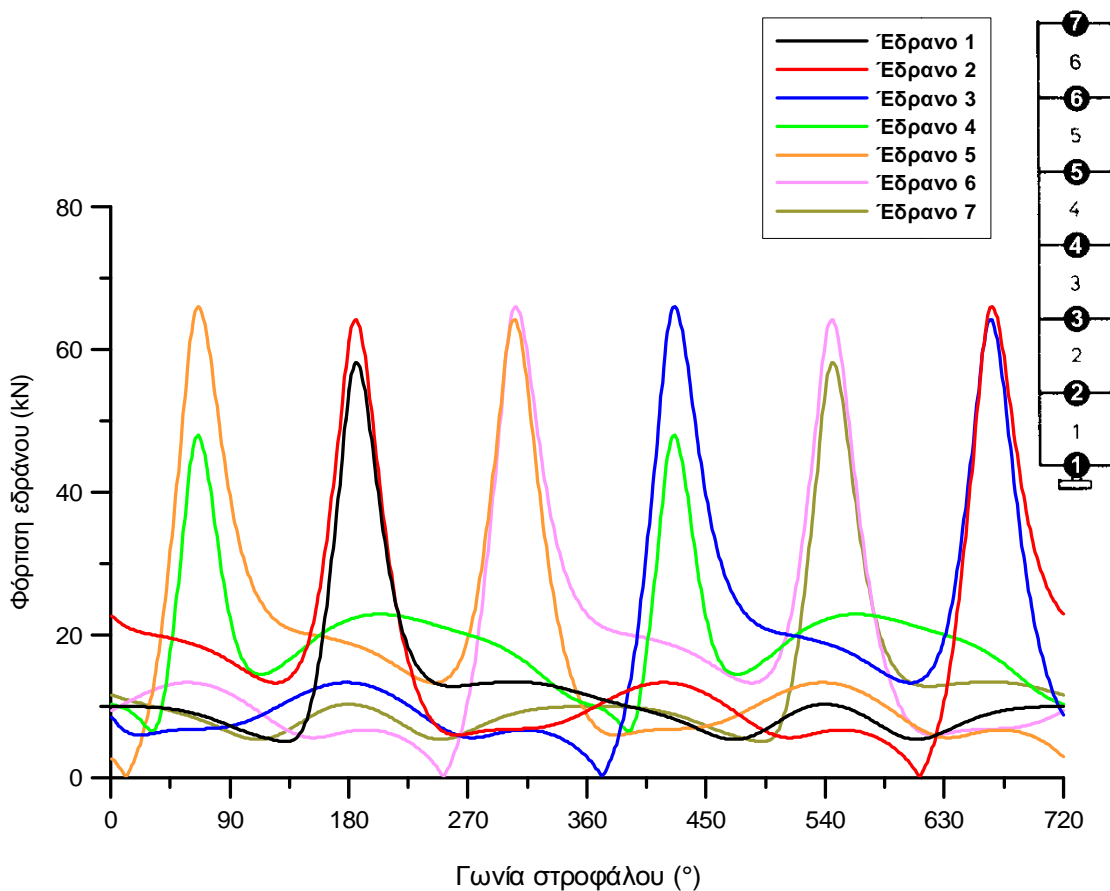
Εφαρμόζοντας αντίστοιχους συλλογισμούς με αυτούς που αναπτύχθηκαν παραπάνω, μπορούμε να εξάγουμε τα αντίστοιχα συμπεράσματα για τον οκτα-κύλινδρο κινητήρα V90°. Χαρακτηριστικό είναι

ότι στον κινητήρα αυτόν τυχαίνει να έχουμε ισοδιαστήματα ανάφλεξης για όλους τους κυλίνδρους, αφού η απόσταση «ανάφλεξης μεταξύ στροφάλων» είναι ίση με  $\Delta\varphi_\alpha = \frac{720^\circ}{\frac{z}{2}} = 180^\circ$  και η γωνία του V ίση με  $90^\circ$ . Παρατηρούμε

ότι τα ακραία έδρανα 1 και 5 παρουσιάζουν δύο κορυφές στη φόρτισή τους, ενώ τα υπόλοιπα τέσσερις, όσοι δηλαδή είναι και οι εκατέρωθεν κύλινδροι του εκάστοτε εδράνου βάσης. Ακόμα, η δύναμη που δέχεται το 1<sup>ο</sup> έδρανο είναι η ίδια που δέχεται το 5<sup>ο</sup> έδρανο με διαφορά φάσης τη γωνιακή διαφορά των κυλίνδρων 1 και 4, δηλαδή  $2 \cdot \Delta\varphi_\alpha = 360^\circ$ , ενώ αυτή του 2<sup>ου</sup> εδράνου συμπίπτει με αυτήν του 4<sup>ου</sup>, με ίση διαφορά φάσης. Τέλος, το μεσαίο έδρανο, δέχεται δύναμη μικρότερου μέτρου αλλά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από τα υπόλοιπα, κάτι που οφείλεται σε φαινόμενο που εξηγήθηκε στην προηγούμενη περίπτωση κινητήρα.

## 6κύλινδρος κινητήρας εν σειρά διάταξης

Σ.Α.: 1-5-3-6-2-4



Σχήμα 4.11γ – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνων βάσης εξακύλινδρου εν σειρά κινητήρα

Ο εξακύνδρος κινητήρας εν σειρά διάταξης διαθέτει επτά έδρανα βάσης, ενώ η γωνία ανάφλεξης ισούται με  $\Delta\varphi_\alpha = \frac{720^\circ}{z=6} = 120^\circ$ . Παρά το διαφορετικό πλήθος κυλίνδρων και εδράνων σε σχέση με τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, τα συμπεράσματα που εξαγονται είναι παρόμοιας λογικής και παρατίθενται στη συνέχεια (Σχήμα 4.11γ)

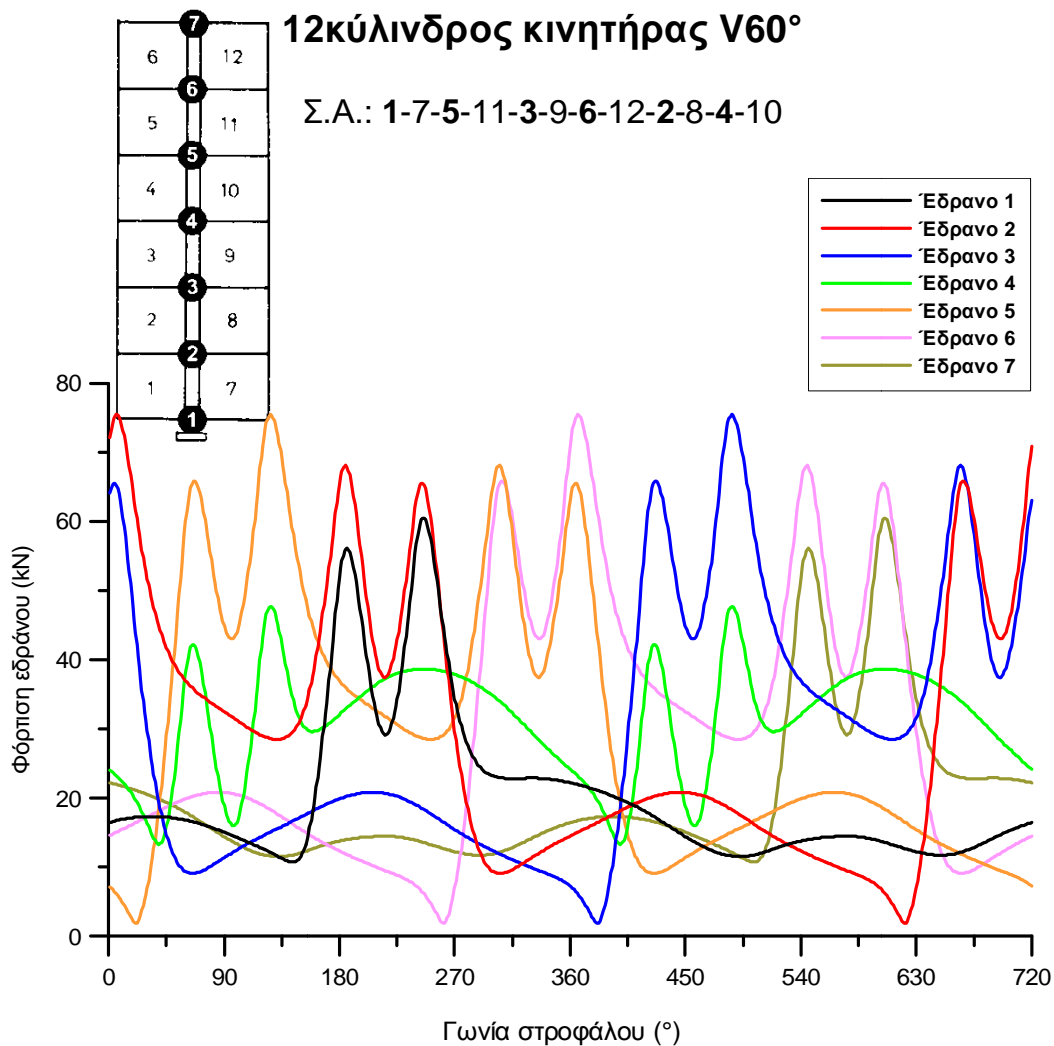
Τα «εσωτερικά» έδρανα εκτός του κεντρικού, δηλαδή το 2<sup>ο</sup>, το 3<sup>ο</sup>, το 5<sup>ο</sup> και το 6<sup>ο</sup>, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες, αλλά και τις μικρότερες τιμές φόρτισης κατά τη διάρκεια του κύκλου. Κάθε μία από τις δυνάμεις που ασκείται στα έδρανα αυτά, παρουσιάζει δύο μέγιστα και ένα ελάχιστο, κοντά στη μηδενική τιμή. Η οριζόντια διαφορά των κορυφών ισούται με την απόσταση ανάφλεξης των δύο κυλίνδρων εκατέρωθεν του εκάστοτε εδράνου. Για παράδειγμα, οι κορυφές της δύναμης που καταπονεί το 3<sup>ο</sup> έδρανο απέχουν  $2\Delta\varphi_\alpha = 240^\circ$ , όσο απέχουν δηλαδή οι αναφλέξεις των κυλίνδρων 3 και 2 σε γωνία στροφάλου. Το ελάχιστο, οφείλεται και πάλι στην αλληλοαναιρέση των συνιστωσών των δυνάμεων στους άξονες X,Y, αφού η δύναμη που προκαλείται από τον πρώτο κύλινδρο του ζεύγους, αναιρεί σχεδόν εξ' ολοκλήρου αυτήν που προκαλείται από τον δεύτερο κύλινδρο.

Επίσης, τα ζεύγη που είναι συμμετρικά ως προς το κεντρικό 4<sup>ο</sup> έδρανο, έχουν μόνο διαφορά φάσης, και όχι διαφορά τιμών, που προκύπτει από τη δεδομένη σειρά ανάφλεξης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η δύναμη που ασκείται στα έδρανα 2 και 6, είναι η ίδια, με διαφορά φάσης 360<sup>ο</sup>, όσο δηλαδή καθυστερεί η ανάφλεξη των κυλίνδρων 5-6 σε σχέση με τους 2-1.

Τα ακραία έδρανα 1 και 7, παρουσιάζουν κορυφή μικρότερου μέτρου, αφού η δύναμη που τους ασκείται προέρχεται από τη δράση ενός μόνο κυλίνδρου, του 1<sup>ου</sup> και του 6<sup>ου</sup> αντίστοιχα, αλλά διατηρούν ένα μέσο επίπεδο της τάξης των 10kN στο υπόλοιπο κομμάτι του κύκλου.

Το κεντρικό 4<sup>ο</sup> έδρανο, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, εμφανίζει μικρότερη – συγκριτικά – μέγιστη καταπόνηση, αλλά μεγαλύτερη μέση τιμή, αφού καταπονείται περισσότερο στα ενδιάμεσα τμήματα του τετράχρονου κύκλου του κινητήρα.





**Σχήμα 4.11δ** – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνων βάσης δωδεκακύλινδρου V60° κινητήρα

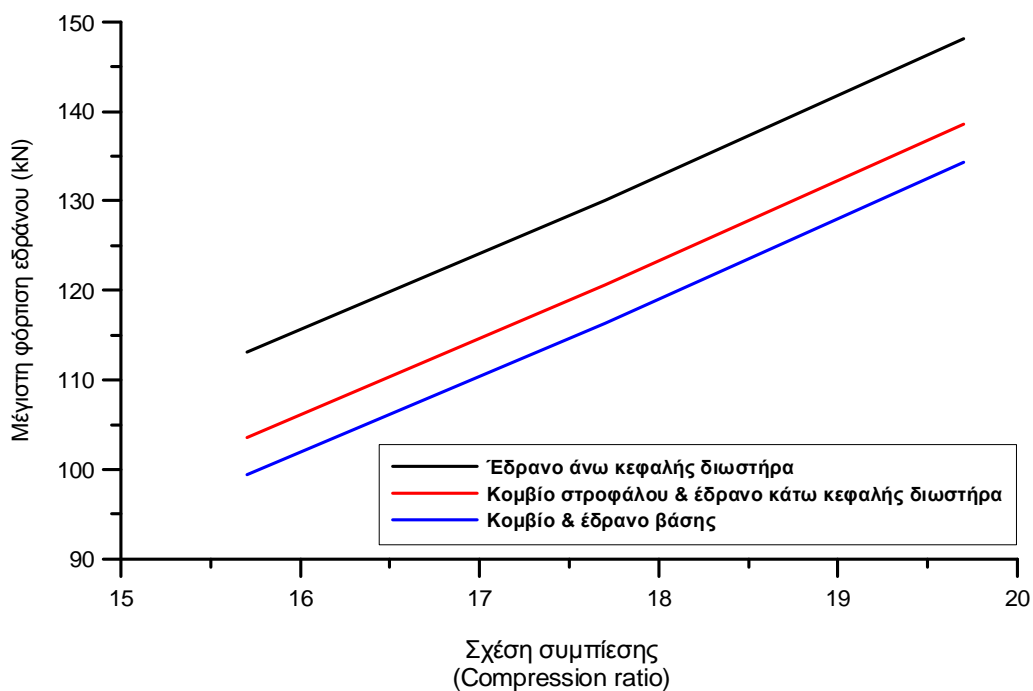
Το τελευταίο από τα διαγράμματα (Σχήμα 4.11δ) αφορά τον δωδεκακύλινδρο κινητήρα V60°, που διαθέτει τον ίδιο αριθμό στροφάλων με τον εξακύλινδρο εν σειρά διάταξης που παρουσιάστηκε αμέσως παραπάνω. Έχει, επίσης, ισοδιαστήματα ανάφλεξης για όλους τους κυλίνδρους του, όπως και ο αντίστοιχος οκτακύλινδρος V90°. Η συλλογιστική πορεία για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι η ίδια που ακολουθήθηκε και στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω του μεγαλύτερου πλήθους κυλίνδρων, τα φορτία των εδράνων παρουσιάζονται πιο αυξημένα, συγκριτικά με τις άλλες διατάξεις, με τις μεγαλύτερες κορυφές να υποδηλώνουν δυνάμεις της τάξης των 75kN. Παρομοίως, το κεντρικό (4°) έδρανο φορτίζεται κατά το σύνολο του κύκλου με δύναμη μέτρου περισσότερων από 10kN, αντίθετα με τα υπόλοιπα έδρανα.

## 4.5 Παραμετρική ανάλυση

Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, θα πραγματοποιηθεί μια παραμετρική ανάλυση κατά τη μόνιμη λειτουργία του κινητήρα diesel. Εξετάζουμε με μορφή διαγραμμάτων τη μεταβολή στη μέγιστη φόρτιση του κάθε εδράνου του κινητήρα καθώς μεταβάλλονται δομικά, αλλά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του. Στην πράξη, αντικαθιστούμε το ονομαστικό αρχείο εισόδου του κώδικα με το εκάστοτε δυναμοδεικτικό διάγραμμα που έχει προέλθει από δεδομένα σε κινητήρα του εργαστηρίου MEK του Ε.Μ.Π. [5]. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούμε στην ανάλυση είναι:

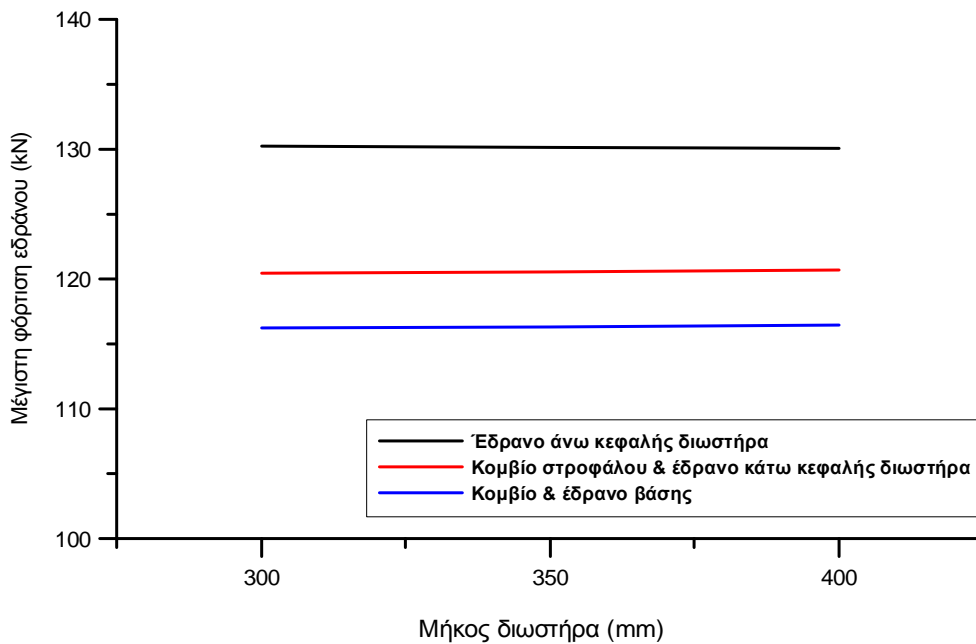
- η σχέση συμπίεσης (compression ratio)
- το μήκος του διωστήρα
- η επιφάνεια του στροβίλου του συστήματος υπερπλήρωσης
- η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα
- η στατική προπορεία έγχυσης (static injection timing)
- το μονωτικό υλικό του κυλίνδρου
- το ποσοστό του φορτίου υπό το οποίο λειτουργεί ο κινητήρας

### 4.5.1 Κινητήρας σειράς

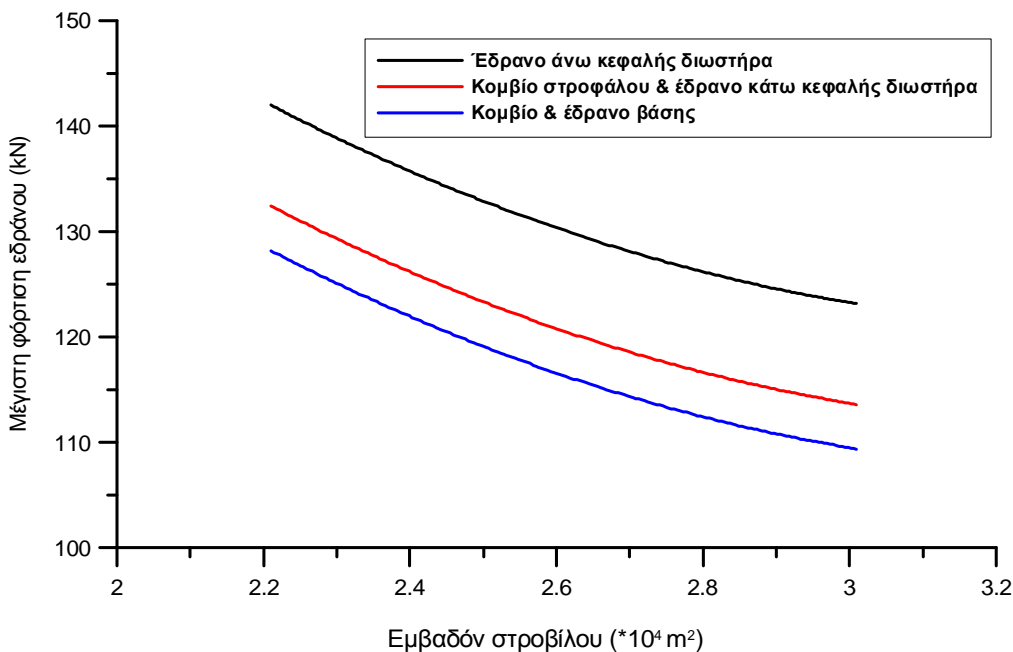


**Σχήμα 4.12** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα σειράς από τη σχέση συμπίεσης

Με αύξηση της σχέσης συμπίεσης, αυξάνεται η θερμοκρασία και η πίεση στον κύλινδρο κατά το τέλος της φάσης συμπίεσης, άρα και οι φορτίσεις στα έδρανα, αφού για το φορτίο εξ' αερίων έχουμε  $P_g = Fp_g$ . Το ότι ο τρόπος μεταβολής της μέγιστης φόρτισης έχει παρόμοιο χαρακτήρα σε όλα τα έδρανα, μπορεί να εξηγηθεί από τις αναλυτικές σχέσεις των δυνάμεων αυτών που παρατέθηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο του παρόντος.



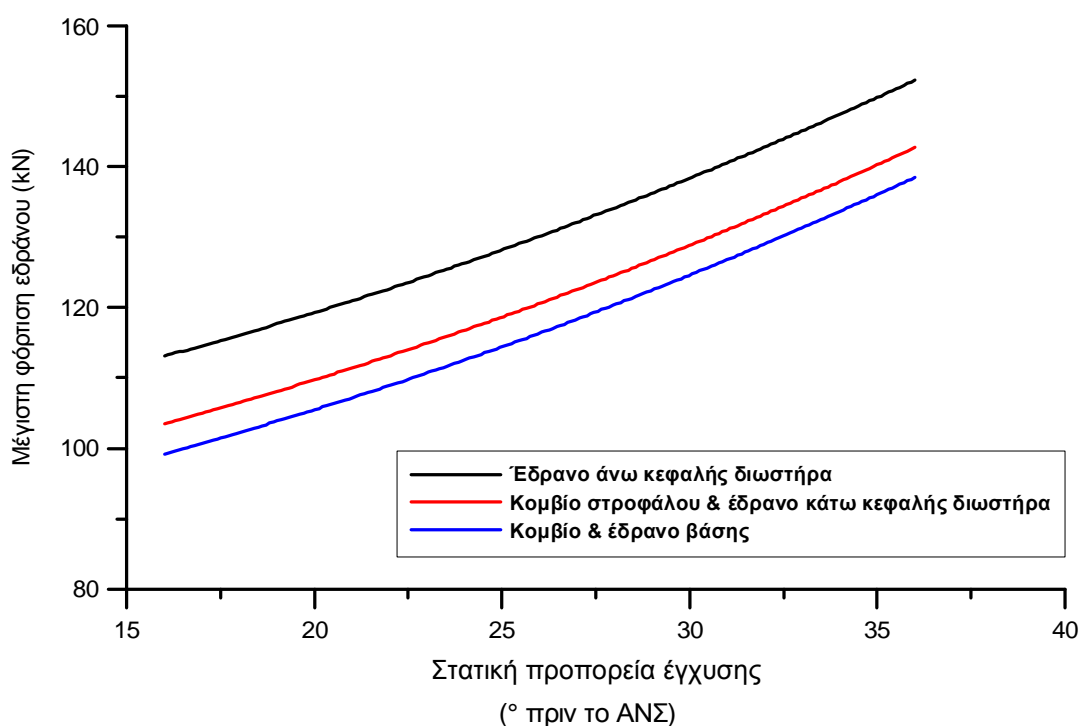
**Σχήμα 4.13** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα σειράς από το μήκος του διωστήρα



**Σχήμα 4.14** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα σειράς από το εμβαδόν του στροβίλου υπερπλήρωσης

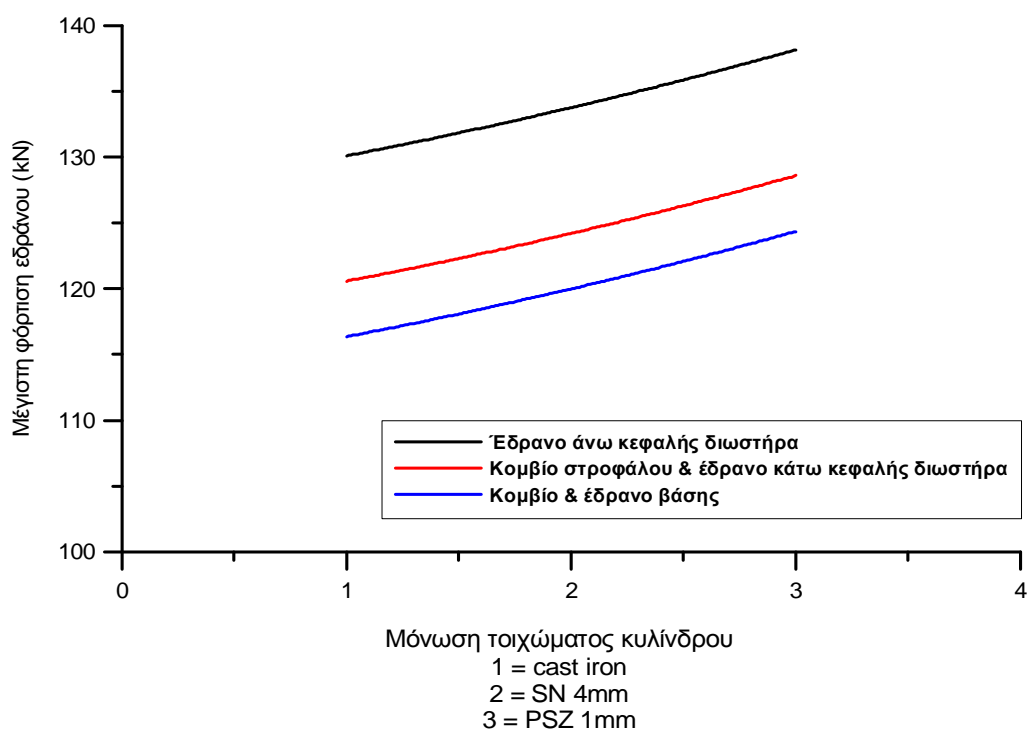
Είναι εμφανές ότι το μήκος του διωστήρα, άρα και ο λόγος  $\lambda = \frac{r}{l}$ , δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις μέγιστες φορτίσεις που δέχονται τα έδρανα του κινητήρα. Παρ' όλο που η μεταβολή του σημαίνει μεταβολή των μαζών  $m_{\delta l}$  και  $m_{\delta r}$ , αλλά και των πηλίκων  $\frac{b}{r\omega^2}$  και  $\frac{c}{r\omega}$ , το παραπάνω Σχήμα 4.13 αποδεικνύει ότι η συνεισφορά της μεταβολής αυτής δεν είναι ικανή να επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση στην καταπόνηση των εδράνων.

Αντίθετα, η επιφάνεια του στροβίλου του συστήματος υπερπλήρωσης, φαίνεται ότι έχει σημαντικό ρόλο στην εν λόγω καταπόνηση. Παρατηρούμε ότι με αύξηση της τελευταίας, έχουμε σημαντική μείωση της καταπόνησης αυτής. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της επιφάνειας, μειώνει την πίεση αντίθλιψης στο στρόβιλο, κάτι που οδηγεί σε μειωμένο παραγόμενο έργο από αυτόν. Συνεπώς, μειώνεται και το προσδιδόμενο στο συμπιεστή έργο, η ταχύτητα περιστροφής του και, τελικά, η πίεση υπερπλήρωσης, άρα και το σύνολο των πιέσεων εντός του κυλίνδρου. Ενδεικτικά, με αύξηση 13% στην επιφάνεια, έχουμε μείωση ~7% στη μέγιστη φόρτιση του εδράνου της άνω κεφαλής διωστήρα.



**Σχήμα 4.15** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα σειράς από τη στατική προπορεία έγχυσης

Η αύξηση της στατικής προπορείας έγχυσης εμφανίζεται να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην καταπόνηση των μερών του κινητήρα, όπως είναι εμφανές από το ανωτέρω διάγραμμα. Όσο νωρίτερα γίνεται η έγχυση, τόσο μικρότερο ποσοστό της φάσης συμπίεσης έχει ολοκληρωθεί στον κύλινδρο. Για μεγάλη προπορεία, λοιπόν, η συμπίεση ολοκληρώνεται αρκετές μοίρες στροφάλου μετά την έγχυση, προφανώς όταν το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ του. Η αυξημένη πίεση και θερμοκρασία, λόγω της έγχυσης, αυξάνεται περαιτέρω λόγω του τελευταίου τμήματος της συμπίεσης, με αποτέλεσμα τη γενικότερη ανύψωση των πιέσεων στον κύλινδρο, που συνεπάγεται δυσμενέστερες καταπονήσεις για τα έδρανα.

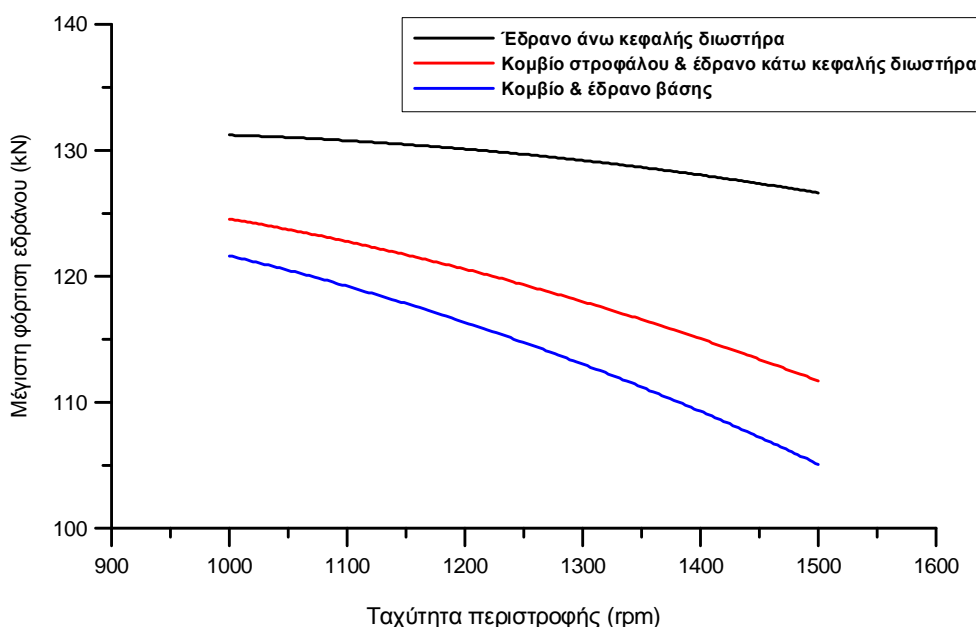


**Σχήμα 4.16** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα σειράς από το μονωτικό υλικό κυλίνδρου

Στο ανωτέρω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξάρτηση των μέγιστων φορτίσεων από το μονωτικό υλικό του κυλίνδρου. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι:

- ο χυτοσίδηρος (η απουσία μονωτικού υλικού στο τοίχωμα)
- η μόνωση νιτριδίου του πυριτίου (SN) πάχους 4mm
- η μόνωση συγκεκριμένου τύπου ζιρκόνιας (PSZ) πάχους 1mm

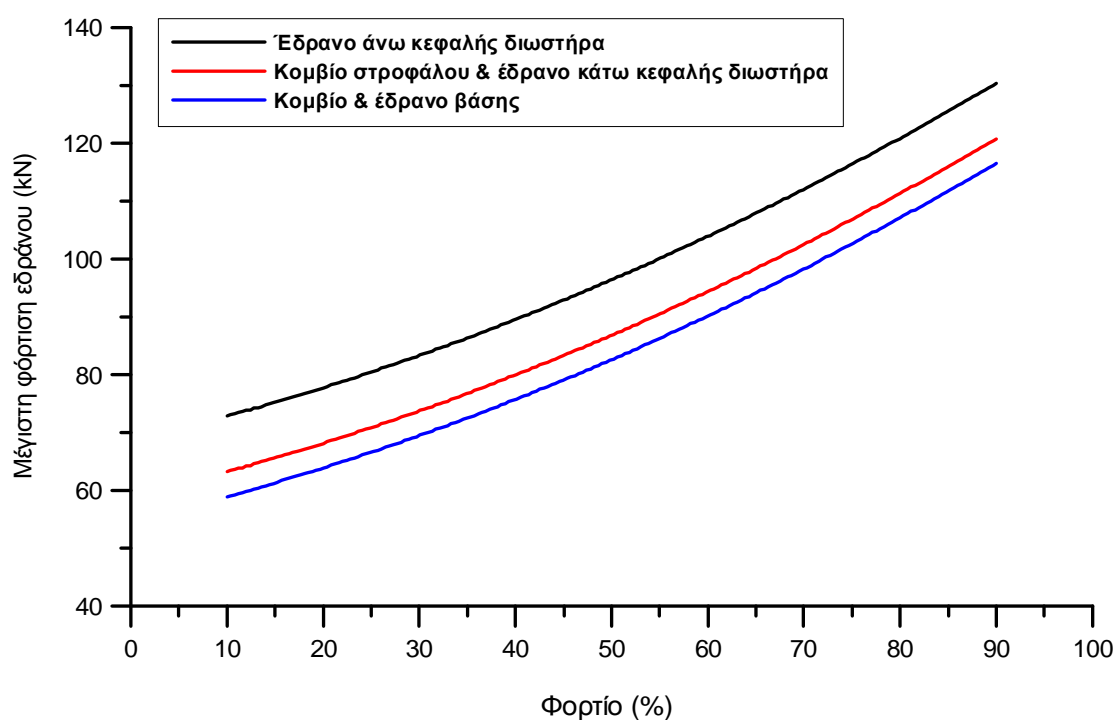
Η τελευταία είναι και αυτή με την ισχυρότερη μονωτική δράση, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες θερμότητας προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου, άρα αυξάνοντας το προσδιδόμενο στο εργαζόμενο μέσο έργο και, συνεπώς, και τις πιέσεις εντός του κυλίνδρου. Αναλογικά, με την ύπαρξη μεγαλύτερων πιέσεων στον κύλινδρο, αυξάνονται και οι μέγιστες φορτίσεις των εδράνων της διάταξης. Είναι βέβαια κατανοητό, ότι παρ' όλο που στη συγκεκριμένη περίπτωση καταδεικνύεται ένα μειονέκτημα της χρήσης μονωτικού υλικού, αυτή έχει γενικά θετικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια του κύκλου, όπως μειωμένες απώλειες, άρα αυξημένη ισχύ στη στροφαλοφόρο άτρακτο.



**Σχήμα 4.17** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα σειράς από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα

Από το παραπάνω Σχήμα 4.17 εξάγουμε δύο κύρια συμπεράσματα. Αρχικά, είναι εμφανής η μείωση των μέγιστων φορτίσεων με αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα. Επιπλέον, εμφανίζεται διαφορετική συμπεριφορά από έδρανο σε έδρανο με την ταχύτητα περιστροφής να έχει πιο θετική επίδραση στις καταπονήσεις όσο απομακρυνόμαστε από το θάλαμο καύσης. Όπως είδαμε στα πρώτα κεφάλαια της θεωρίας, οι αναλυτικές σχέσεις των δυνάμεων είναι της μορφής  $D = f\left(\frac{b}{r\omega^2}, \frac{c}{r\omega}, \omega\right)$  όπου τα δύο πρώτα κλάσματα είναι συνάρτηση μόνο της γωνίας στροφάλου  $\varphi$  και του λόγου  $\lambda$ . Επομένως,

οι δυνάμεις που δέχονται τα έδρανα εξαρτώνται από τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα  $\omega = \frac{\pi n}{30}$ , λόγω της εξάρτησης των δυνάμεων από παλινδρομούσες και περιστρεφόμενες μάζες. Ανατρέχοντας στις αναλυτικές σχέσεις των πρώτων κεφαλαίων, παρατηρούμε ότι στα κατώτερα έδρανα και κομβία, η αύξηση της  $\omega$  προκαλεί μεγαλύτερη μείωση των συνιστωσών, άρα και της συνισταμένης δύναμης. Αυτό γίνεται λόγω του ότι ο βαθμός εξάρτησης των φορτίσεων από την ταχύτητα περιστροφής καθορίζεται από τον παράγοντα που πολλαπλασιάζει τον όρο  $r\omega^2$ . Ο παράγοντας αυτός είναι η εκάστοτε μάζα που εισέρχεται στην εξίσωση, όπως η μάζα  $m_r$  ή η μάζα  $m_{\delta r}$ .

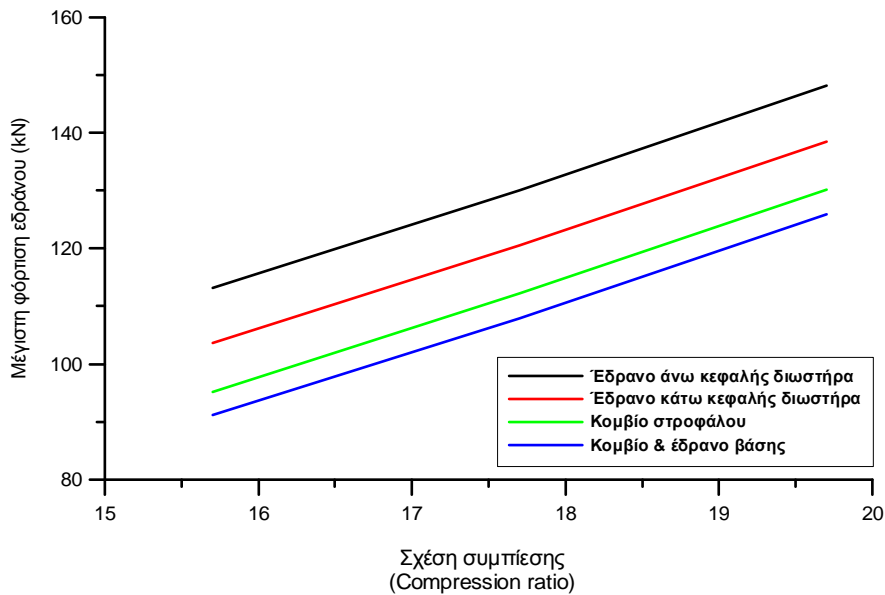


**Σχήμα 4.18** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα σειράς από το ποσοστό του φορτίου με το οποίο επιβαρύνει η πέδη τον κινητήρα

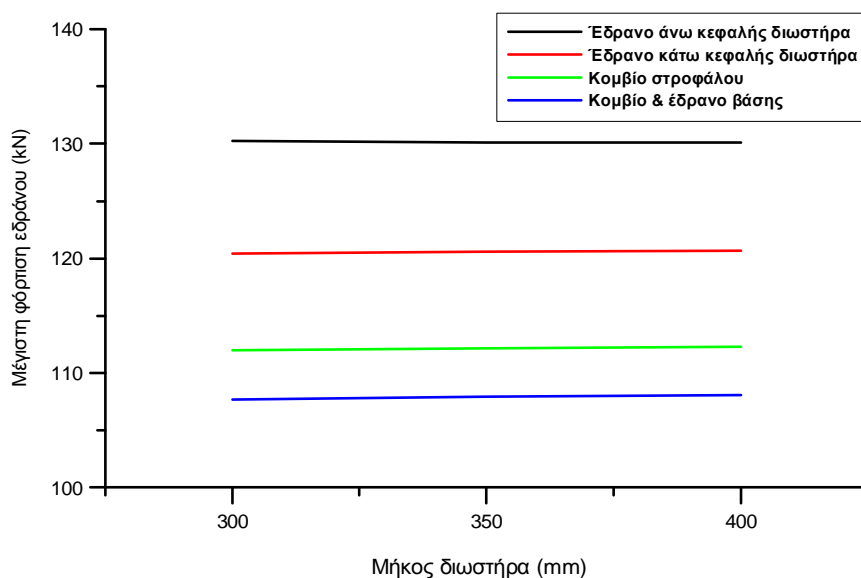
Το τελευταίο από τα διαγράμματα της παραμετρικής ανάλυσης (Σχήμα 4.18), αφορά το ποσοστό του φορτίου που επιβαρύνει τον κινητήρα μέσω της πέδης. Με αύξηση του φορτίου στο σύνδεσμο πέδης - κινητήρα απαιτείται και αυξημένη κατανάλωση καυσίμου για να επιτευχθεί η αναγκαία για την ισορροπία του συστήματος ροπή. Το πλουσιότερο μίγμα (μείωση  $\lambda_a$ ) οδηγεί σε μεγαλύτερες πιέσεις κατά την έναυση στον κύλινδρο, σε μεγαλύτερες δυνάμεις άρα και αυξημένες (μέγιστες) φορτίσεις των εδράνων.

#### 4.5.2 Κινητήρας V90°

Ακολουθώντας αντίστοιχη συλλογιστική πορεία με την προηγούμενη παράγραφο, θα παρουσιαστούν εδώ τα αντίστοιχα διαγράμματα για την παραμετρική ανάλυση του κινητήρα διάταξης V με περιεχόμενη γωνία αξόνων των κυλίνδρων ίση με 90°. Τα συμπεράσματα που εξαγονται είναι αντίστοιχα με τον κινητήρα σειράς.



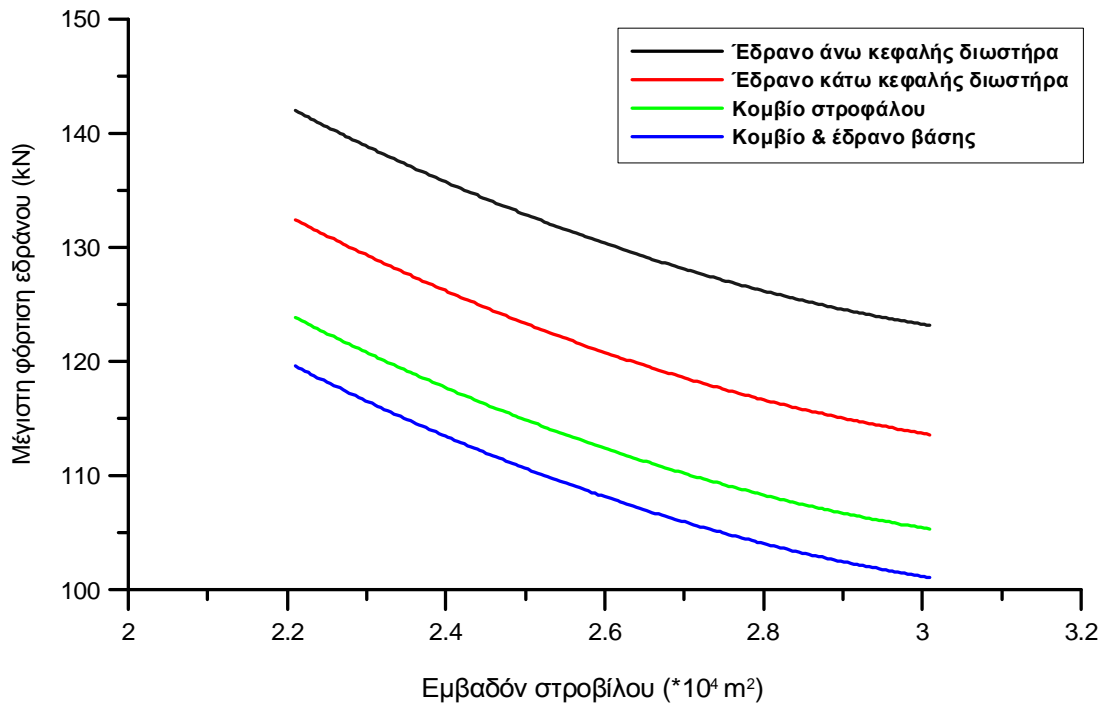
**Σχήμα 4.19** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα V90° από τη σχέση συμπίεσης



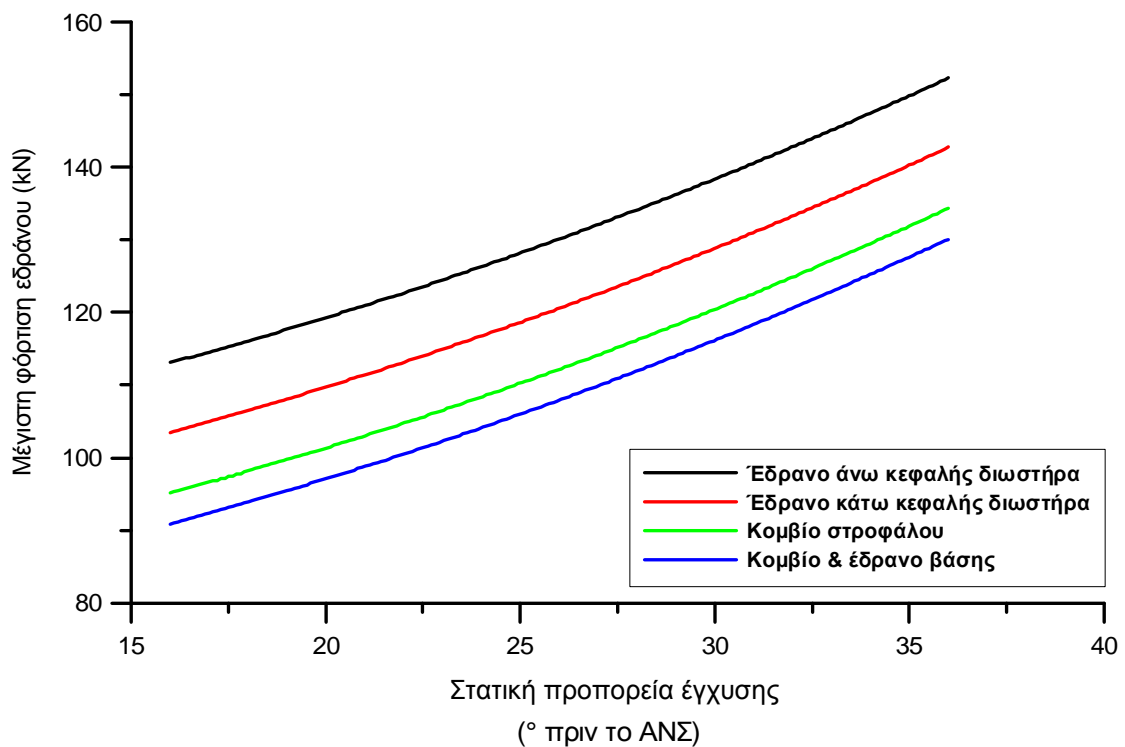
**Σχήμα 4.20** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα V90° από το μήκος του διωστήρα



## Κινητήρας V90°

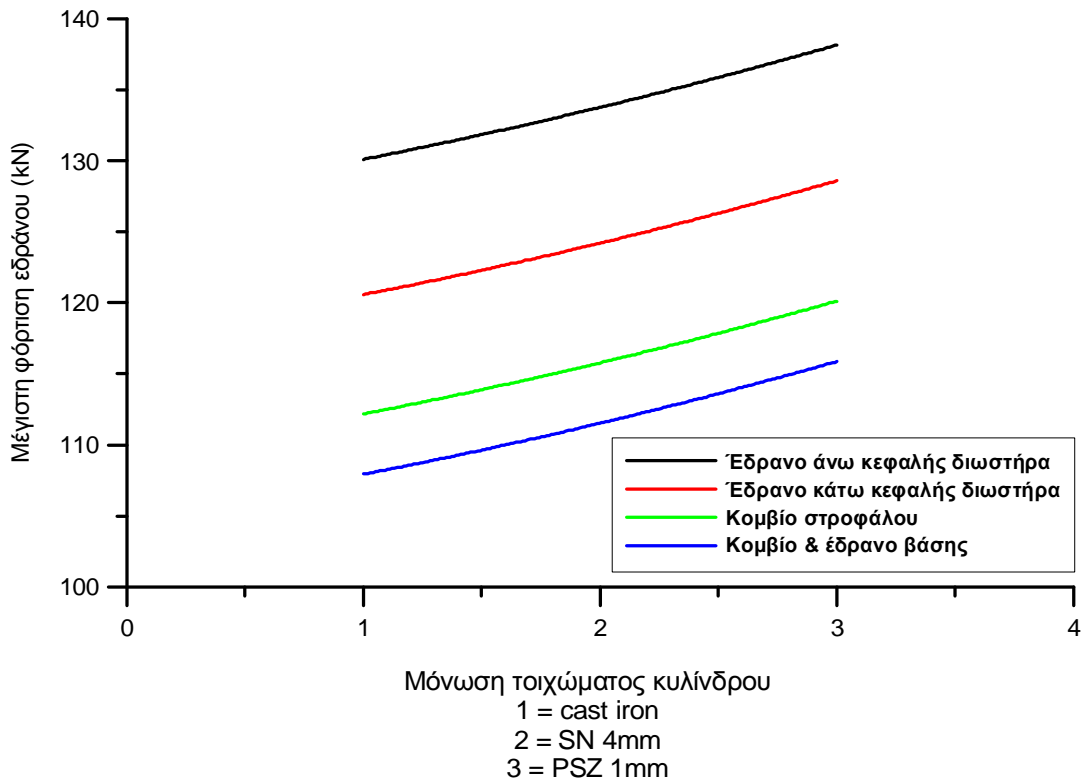


**Σχήμα 4.21** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα V90° από το εμβαδόν του στροβίλου υπερπλήρωσης

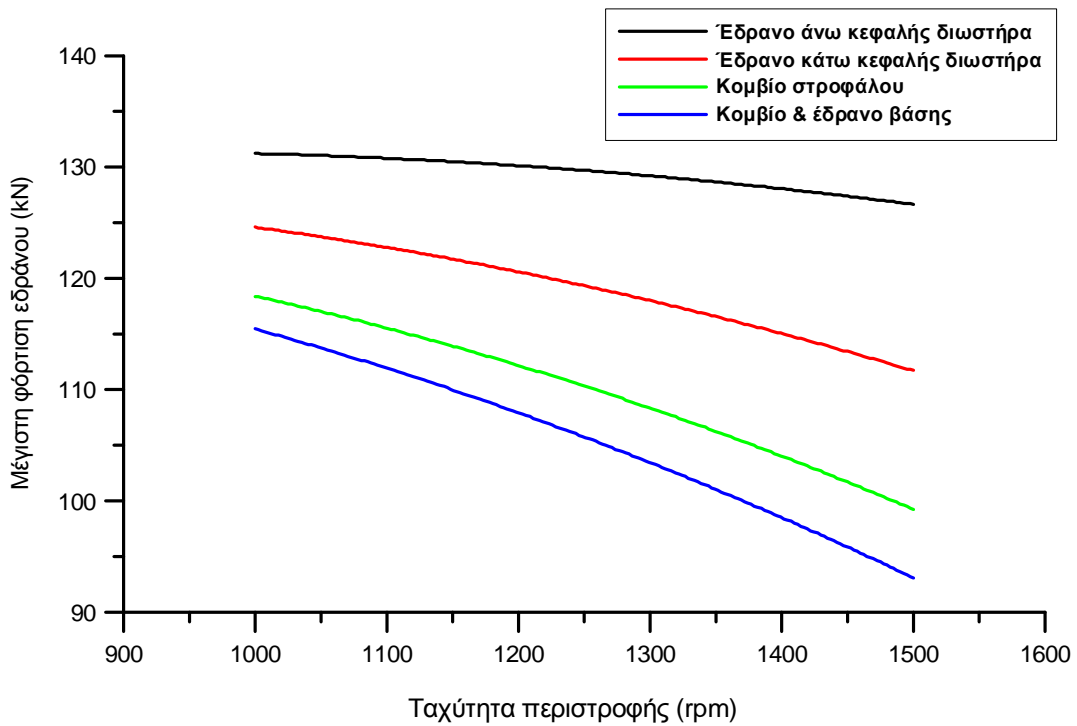


**Σχήμα 4.22** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα V90° από τη στατική προπορεία έγχυσης

### Κινητήρας V90°

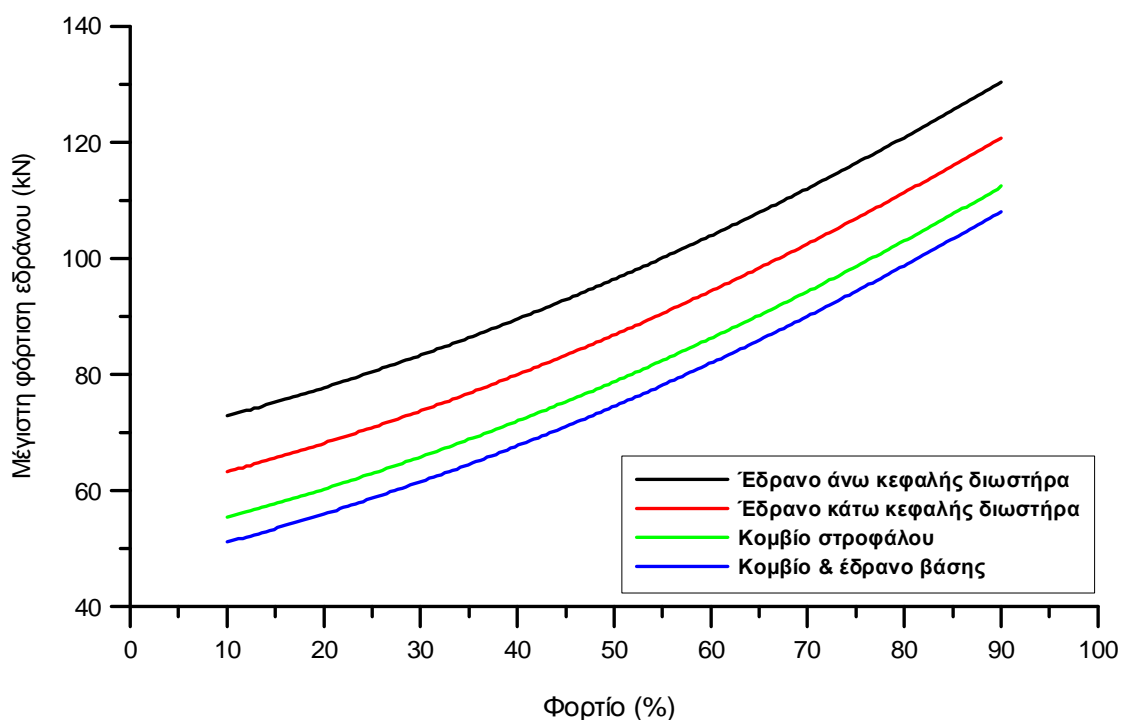


**Σχήμα 4.23** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα V90° από το μονωτικό υλικό κυλίνδρου



**Σχήμα 4.24** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα V90° από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα

## Κινητήρας V90°



**Σχήμα 4.25** – Διάγραμμα εξάρτησης μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης κινητήρα V90° από το ποσοστό του φορτίου με το οποίο επιβαρύνει η πέδη τον κινητήρα

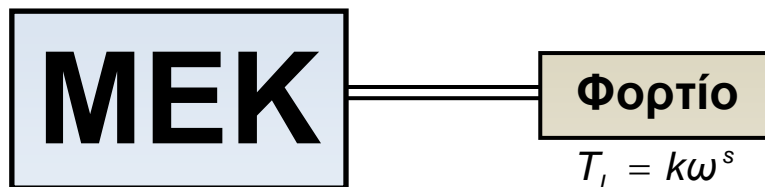
Όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, στα διαγράμματα του κινητήρα V έχουμε διαφορετική γραφική παράσταση για το έδρανο της κάτω κεφαλής διωστήρα και το κομβίο στροφάλου, αφού αυτές οι δύο δυνάμεις δεν είναι ξανά ίσες κατά μέτρο, λόγω του δεύτερου ζεύγους κυλίνδρου - διωστήρα που είναι αρθρωμένο στο ίδιο στρόφαλο. Παρ' όλα αυτά, η επίδραση των παραμέτρων είναι της ίδιας μορφής με την περίπτωση του κινητήρα σειράς που εξετάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

# Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

## ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

### 5.1 Γενικά

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν και πάλι σε μορφή διαγραμμάτων, τόσο γραμμικών όσο και πολικών, οι δυνάμεις που ασκούνται στα έδρανα της διάταξης ανά μοίρα στροφάλου, όσον αφορά τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα diesel.



Σχήμα 5.1 – Σκαρίφημα μεθόδου επιβολής φορτίου στον κινητήρα

Στην προκειμένη περίπτωση, όπως φαίνεται και στο σχετικό Σχήμα 5.1, το φορτίο επιβάλλεται στον κινητήρα μέσω μιας πέδης. Μπορούμε έτσι να μεταβάλλουμε το εύρος του επιβαλλόμενου φορτίου, το χρονικό διάστημα  $\Delta t$  στο οποίο γίνεται αυτή η μεταβολή και τον τύπο του συνδεδεμένου φορτίου (μέσω του εκθέτη  $s$  στην έκφραση της ροπής της πέδης  $T_L = k\omega^s$ ). Διακρίνουμε τις περιπτώσεις:

- $s = 2$ : υδραυλική πέδη / έλικα / αεροδυναμική αντίσταση οχήματος

- $s = 1$ : ηλεκτρική πέδη / γεννήτρια
- $s = 0$ : σταθερός όρος αντίστασης κίνησης οχήματος

Ο κώδικας, για τη φάση αυτή της λειτουργίας, δέχεται ως δεδομένα και πάλι τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως τη διάμετρο και τη διαδρομή εμβόλου, τη σειρά ανάφλεξης, τη διάταξη (σειράς, τύπου V ή και W), το μήκος διωστήρα κ.α. Με σαφή διαφοροποίηση από την περίπτωση της μόνιμης λειτουργίας, ο κώδικας λαμβάνει τώρα ως είσοδο σύνολο δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων, καθένα από τα οποία αφορά έναν τετράχρονο κύκλο λειτουργίας, και ένα επιπλέον αρχείο με τις μέσες ταχύτητες περιστροφής που μετρήθηκαν ανά κύκλο λειτουργίας. Τα αρχεία αυτά έχουν προέλθει από παρελθοντικά δεδομένα σε κινητήρα diesel του εργαστηρίου ΜΕΚ του Ε.Μ.Π. [5]. Κατά την εκτέλεση, παρέχονται οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε έδρανο (από την άνω κεφαλή διωστήρα μέχρι και τη βάση), ανά κύκλο λειτουργίας, καθώς και η γωνία που σχηματίζουν αυτές στο εκάστοτε σύστημα αξόνων - βλέπε 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Επίσης, ο κώδικας υπολογίζει τη μέγιστη δύναμη που ασκείται σε κάθε ένα από τα έδρανα βάσης του κινητήρα σε κάθε κύκλο λειτουργίας, αναλόγως φυσικά με τη διάταξη των κυλίνδρων του και λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.7 για τον πολυκύλινδρο κινητήρα.

Παρακάτω, θα παρουσιαστούν διαγραμματικά και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα για το ονομαστικό φορτίο. Το τελευταίο αναφέρεται σε μεταβολή του φορτίου του κινητήρα από το 5% στο 70% σε διάρκεια  $\Delta t = 1,3s$  για τύπο φορτίου  $s = 2$ , χωρίς μόνωση του κυλίνδρου. Συνολικά, θα εξεταστεί ο εξακύλινδρος κινητήρας σειράς και στη συνέχεια ο εξακύλινδρος κινητήρας V60°. Αρχικά θα εξετάσουμε το διάγραμμα των μέγιστων φορτίσεων στα έδρανα των παραπάνω τύπων κινητήρα σε αντιπαράθεση με τη μεταβολή της ταχύτητας και της μέγιστης πίεσης εξ' αερίων στον κύλινδρο. Στη συνέχεια θα δοθούν διαγράμματα μεταξύ των παραπάνω τύπων, αλλά και μεταξύ εδράνων βάσης κινητήρων διαφορετικής διάταξης και σειράς ανάφλεξης. Στο τελικό μέρος του κεφαλαίου, όπως και στο προηγούμενο, θα γίνει μια παραμετρική ανάλυση, όπου θα παρουσιαστούν οι μεταβολές των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν καθώς

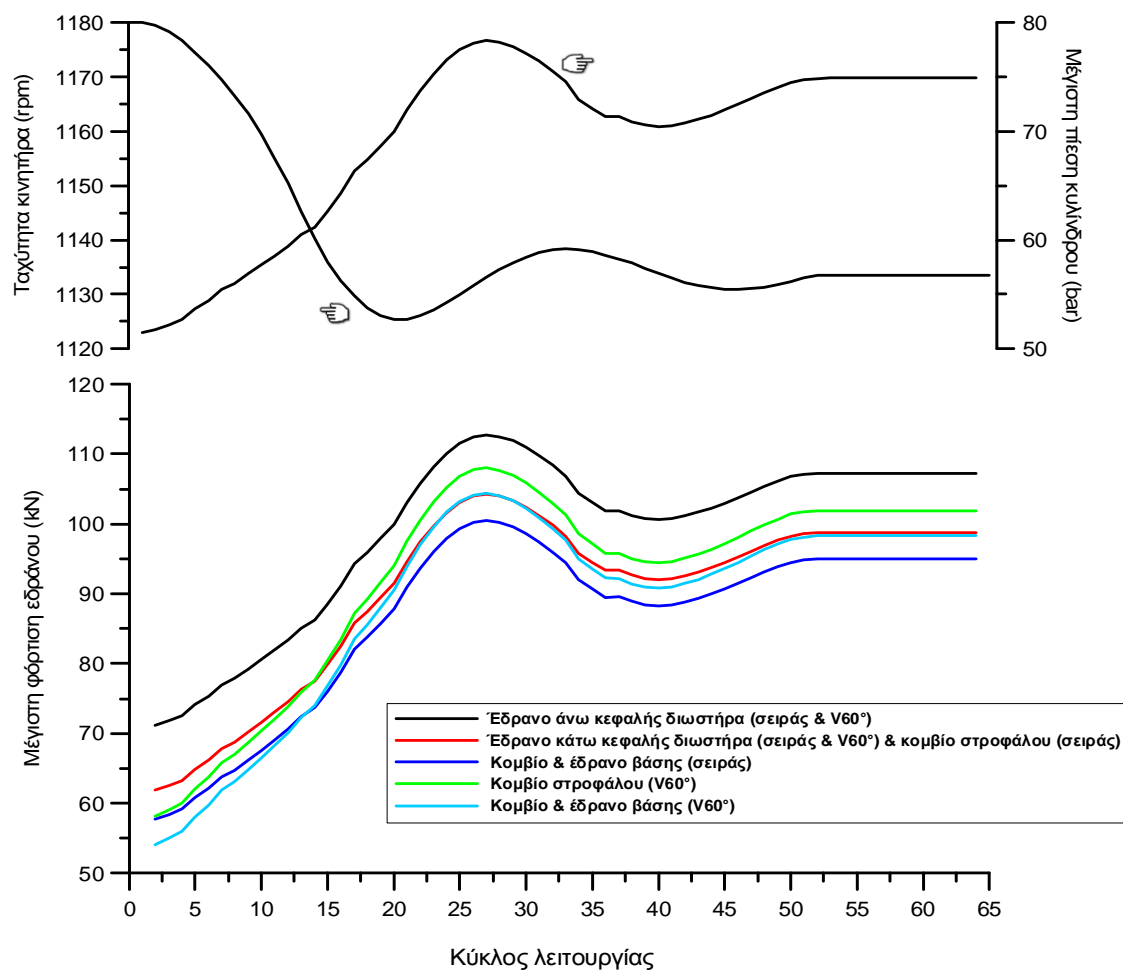
μεταβάλλονται λειτουργικά και δομικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, αλλά και οι τρόποι με τους οποίους επιβάλλεται το νέο φορτίο σε αυτόν.

## 5.2 Ανάλυση στην ονομαστική μεταβολή φορτίου

Πριν εξετάσουμε κάθε έναν από τους δύο εξακύλινδρους ξεχωριστά, θα παραθέσουμε το διάγραμμα μεταβολής των μέγιστων φορτίσεων των εδράνων τους συναρτήσει του κύκλου λειτουργίας. Αυτό δίνεται παρακάτω μαζί με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και της μέγιστης πίεσης εξ' αερίων στον κύλινδρο. Στη συνέχεια εστιάζουμε στα σημαντικότερα συμπεράσματα.

### 6κύλινδρος εν σειρά και V60°

Σ.Α. 1-5-3-6-2-4 & 1-4-3-6-2-5



Σχήμα 5.2 – Διάγραμμα μεταβολής ταχύτητας, μέγιστης πίεσης εξ' αερίων και μέγιστων καταπονήσεων κομβίων και εδράνων κινητήρα σειράς και V60°

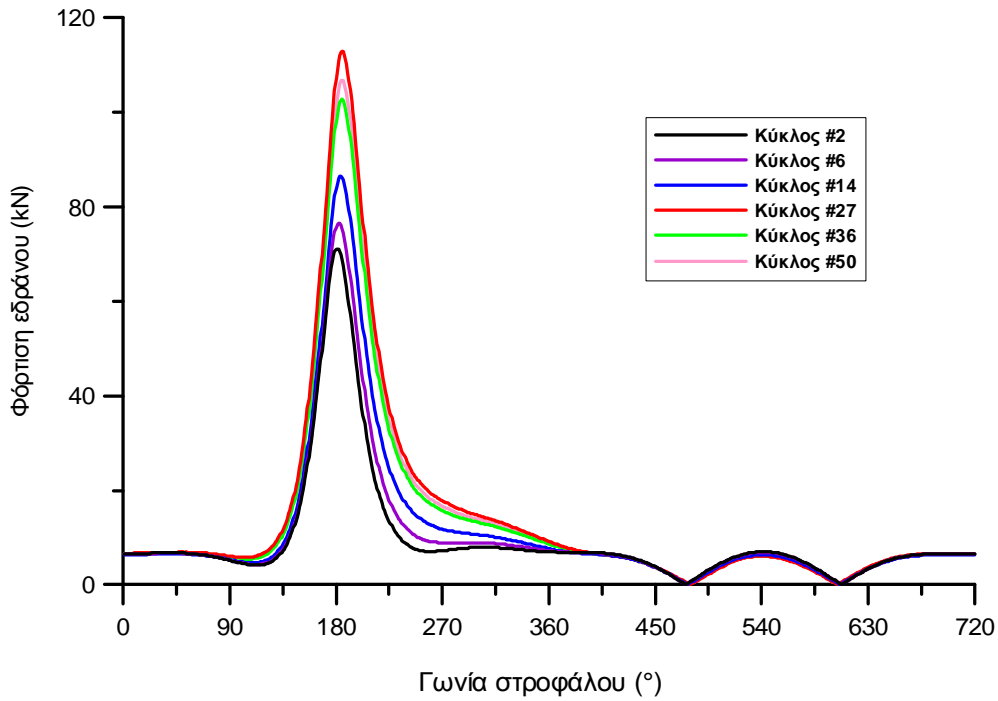
Καταρχάς απαιτείται προσοχή στο γεγονός ότι δυνάμεις που στον κινητήρα σειράς είναι κατά μέτρο ίσες, όπως αυτές που ασκούνται στο κομβίο στροφάλου και την άνω κεφαλή διωστήρα, διαχωρίζονται στον V κινητήρα, όπως έχουμε δει στα προηγούμενα κεφάλαια. Παρομοίως, οι δυνάμεις που καταπονούν τα κομβία και τα έδρανα βάσης του κινητήρα σειράς, είναι διαφορετικού μέτρου από τις αντίστοιχες για τον κινητήρα V.

Η σημαντικότερη παρατήρηση από το διάγραμμα (Σχήμα 5.2) είναι ότι οι γραφικές παραστάσεις των μέγιστων φορτίσεων έχουν ταυτόσημη συμπεριφορά με αυτήν της μέγιστης πίεσης στον κύλινδρο. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού η πιο σημαντική συνιστώσα που καθορίζει τα μέγιστα των φορτίσεων είναι η δύναμη εξ' αερίων στο θάλαμο κάυσης. Το τελευταίο έγινε ξεκάθαρο στις προηγούμενες ενότητες, όπου είδαμε ότι οι φορτίσεις αυξάνονται περί το θερμό ΑΝΣ του κάθε κυλίνδρου. Αντίστοιχα εδώ, με την έναρξη της μεταβολής του φορτίου, απαιτείται αυξημένη παροχή καυσίμου, ώστε να μπορεί ο κινητήρας να ανταπεξέλθει στη νέα τιμή αντίστασης. Αρχικά η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται λόγω της απότομης μεταβολής και επειδή το καύσιμο δεν επαρκεί ακόμα για επίτευξη ισορροπίας και μόνιμης λειτουργίας. Στη συνέχεια, το σύστημα καυσίμου ανταποκρίνεται επιτυχώς, η πίεση εξ' αερίων στον κύλινδρο αυξάνεται λόγω της αυξημένης παροχής καυσίμου και, αναλογικά, οι μέγιστες φορτίσεις παίρνουν τις μεγαλύτερες τιμές. Στη συνέχεια, παρατηρείται μια σχετική μείωση της μέγιστης πίεσης στον κύλινδρο, με αντίστοιχη αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας, ώσπου τελικά και οι δύο φτάνουν στη νέα κατάσταση ισορροπίας για το φορτίο 70%, στην οποία ισχύει  $p_{\max} \cong 75\text{bar}$  και  $n \cong 1130\text{rpm}$ . Αντίστοιχα, και οι μέγιστες τιμές των φορτίσεων των εδράνων σταθεροποιούνται σε συγκεκριμένες τιμές.

### 5.2.1 Εξακύλινδρος κινητήρας εν σειρά

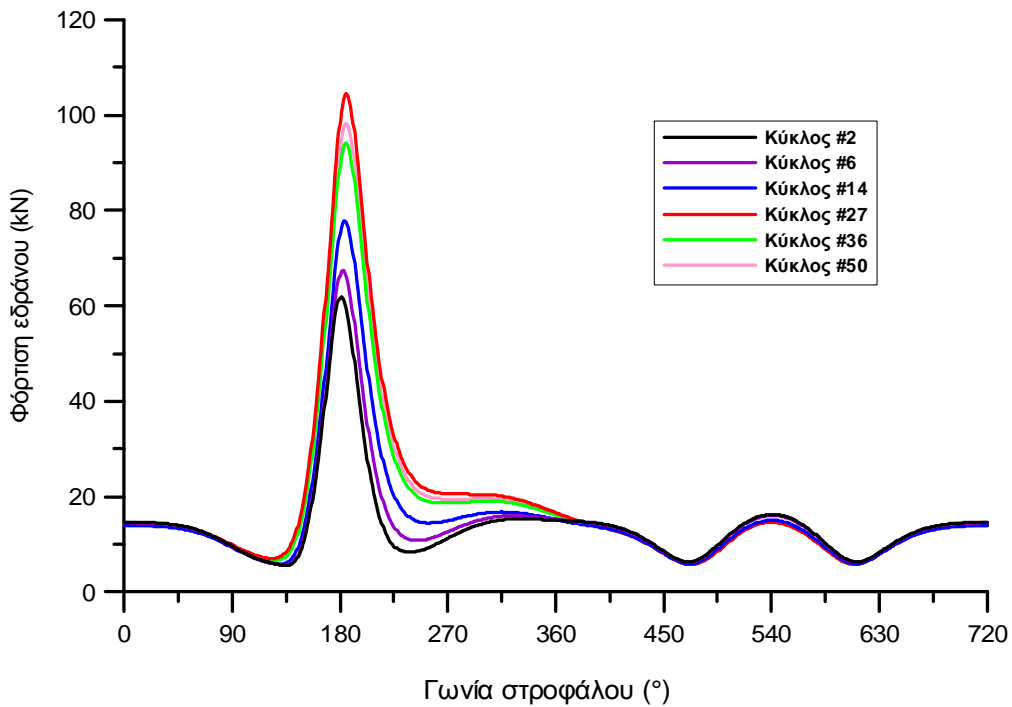
Στην παράγραφο αυτή εξετάζουμε τον εξακύλινδρο κινητήρα διάταξης σειράς και σειράς ανάφλεξης 1-5-3-6-2-4. Θα παρετεθούν αρχικά τα διαγράμματα αντιπροσωπευτικών κύκλων λειτουργίας για κάθε ένα από τα έδρανά του. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε ένα από τα επτά έδρανα βάσης του. Με τη βοήθεια των παραπάνω, θα γίνει πιο εμφανής η αύξηση των φορτίων κατά τη μεταβολή του φορτίου.

### Θκύλινδρος κινητήρας σειράς έδρανο άνω κεφαλής διωστήρα



Σχήμα 5.3α – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνου άνω κεφαλής διωστήρα κινητήρα σειράς για διάφορους κύκλους λειτουργίας

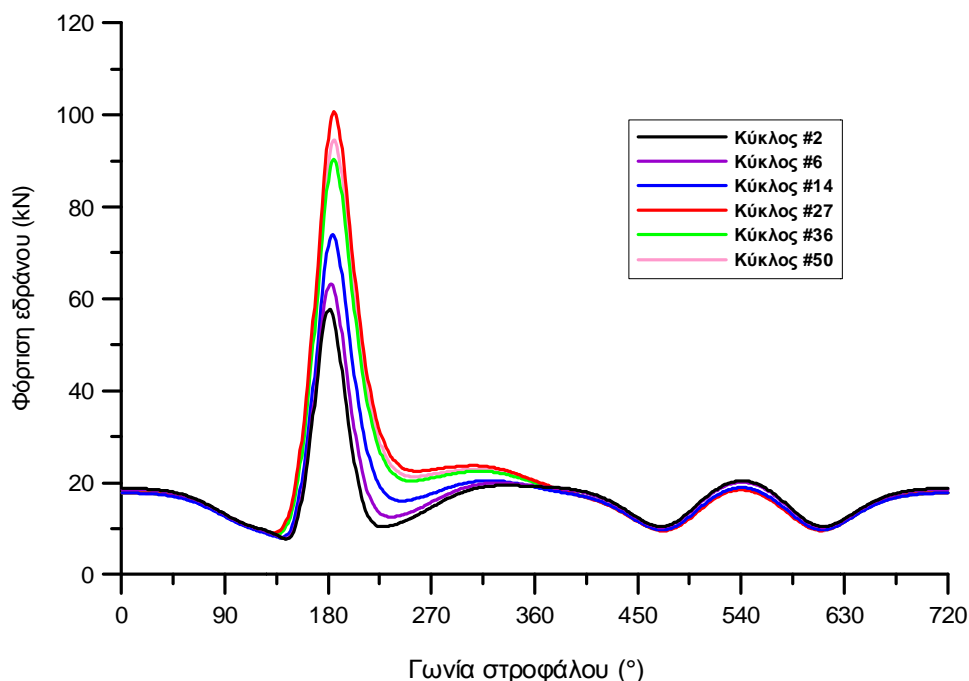
### Έδρανο κάτω κεφαλής διωστήρα & κομβίο στροφάλου



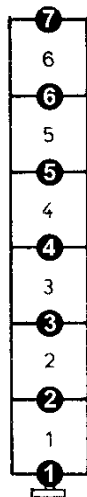
Σχήμα 5.3β – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνου κάτω κεφαλής διωστήρα και κομβίου στροφάλου κινητήρα σειράς για διάφορους κύκλους λειτουργίας



## 6κύλινδρος κινητήρας σειράς κομβίο & έδρανο βάσης



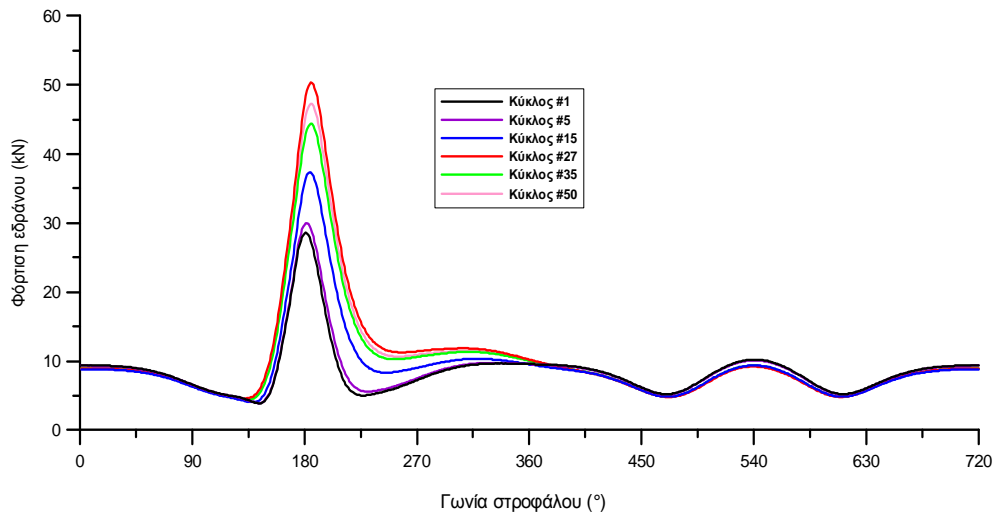
**Σχήμα 5.3γ** – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης κινητήρα σειράς για διάφορους κύκλους λειτουργίας



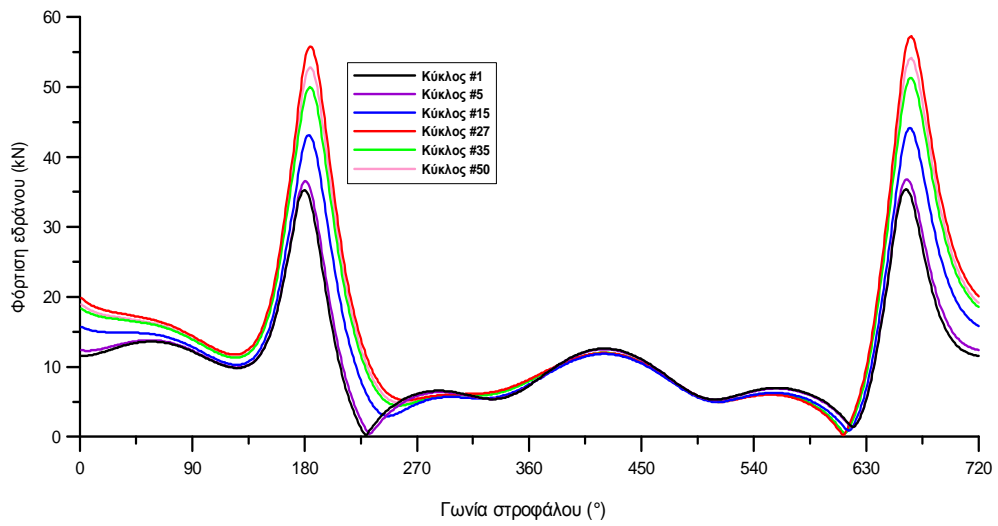
Στην παραπάνω διαγραμματική παρουσίαση συγκεκριμένων κύκλων λειτουργίας, γίνεται κατανοητός ο τρόπος αύξησης των φορτίσεων ανά έδρανο. Έχουν επιλεγεί αντιπροσωπευτικοί κύκλοι λειτουργίας, με τον 27<sup>ο</sup> κύκλο να είναι αυτός στον οποίον έχουμε τη μέγιστη πίεση εξ' αερίων στον κύλινδρο κατά τη μεταβολή του φορτίου από το 5% στο 70% της μέγιστης τιμής. Παρατηρούμε ότι η διαφοροποίηση είναι μεγαλύτερη περί το ΑΝΣ του κυλίνδρου και μέχρι το τέλος της αποτόνωσης, δηλαδή για  $\varphi = 360^\circ$ . Στο υπόλοιπο κομμάτι του τετράχρονου κύκλου, τα έδρανα καταπονούνται από

δύναμη που δε μεταβάλλεται σημαντικά από κύκλο σε κύκλο. Άξιο σημείωσης είναι και το γεγονός ότι στον 50<sup>ο</sup> κύκλο οι δυνάμεις είναι εν γένει μεγαλύτερες από ότι στον 36<sup>ο</sup>. Αυτό οφείλεται στην παροδική μείωση της παροχής καυσίμου μέχρι την ισορροπία – βλέπε Ενότητα 5.2. Στη συνέχεια θα εξεταστούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα επτά έδρανα βάσης του κινητήρα, όπως αυτά φαίνονται στο σχετικό σκαρίφημα πιο πάνω.

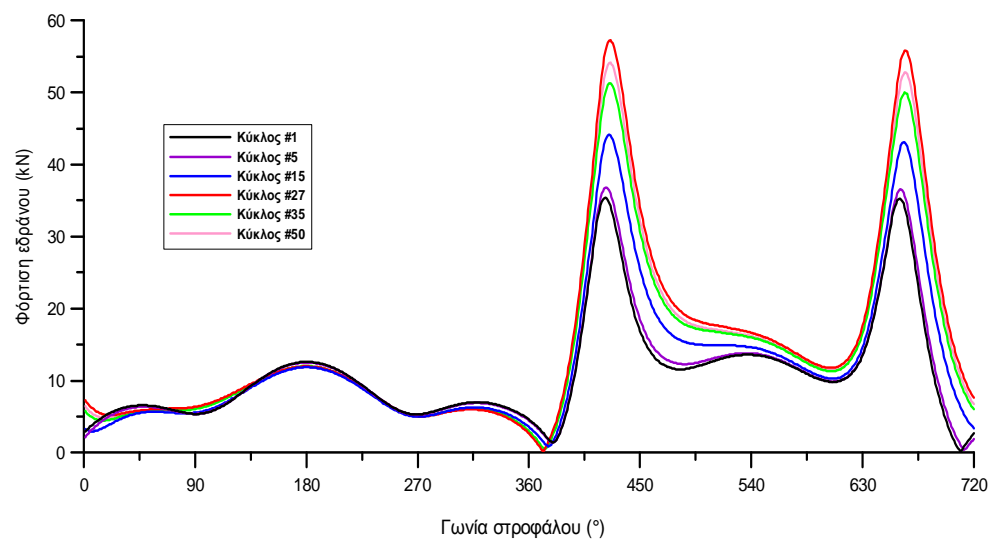
### 1ο έδρανο βάσης



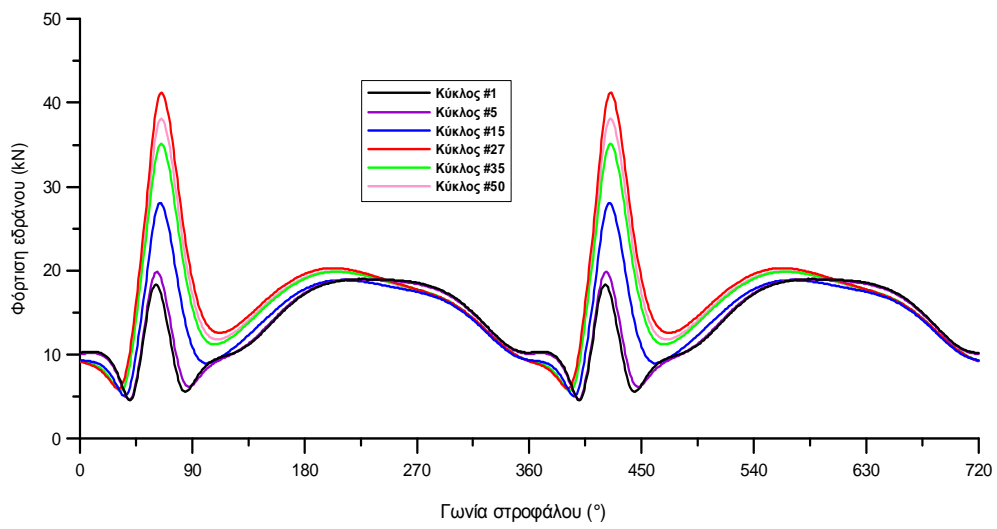
### 2ο έδρανο βάσης



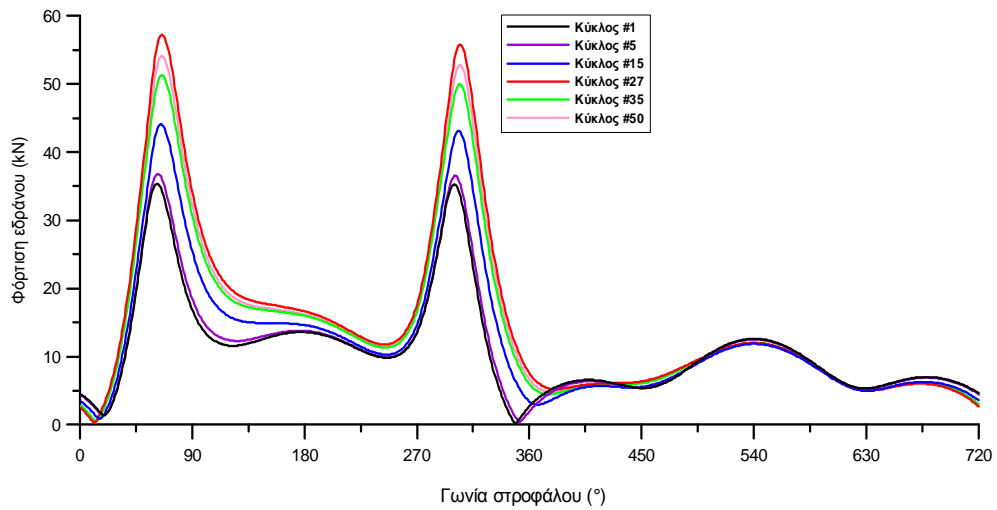
### 3ο έδρανο βάσης



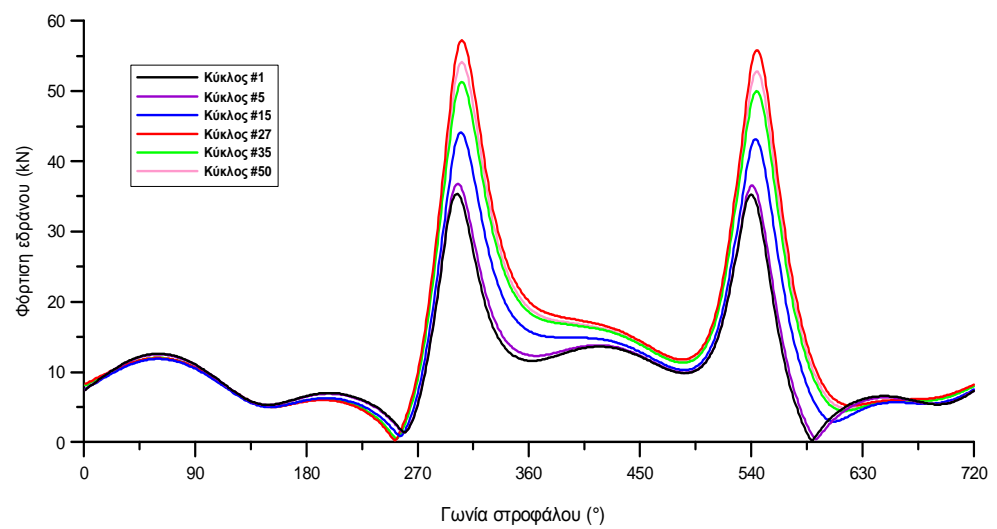
### 4ο έδρανο βάσης



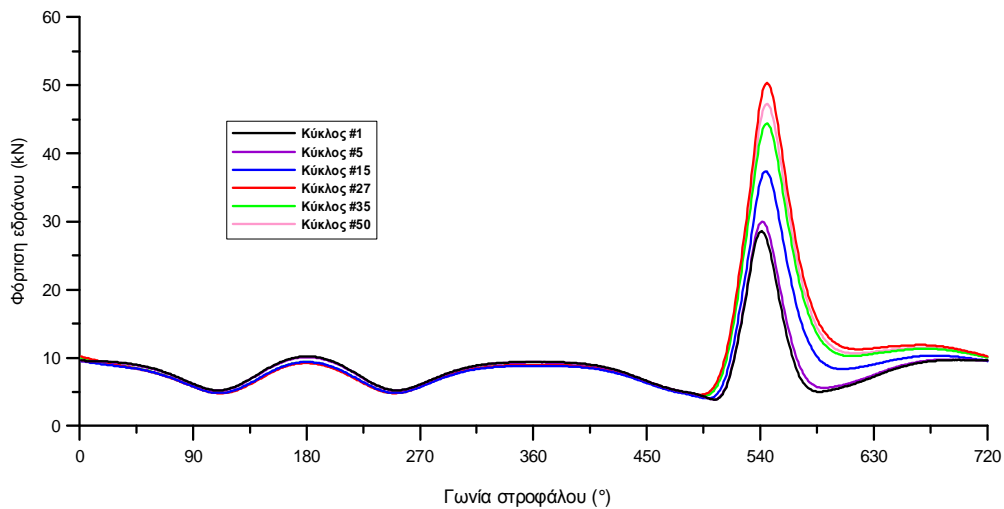
### 5ο έδρανο βάσης



### 6ο έδρανο βάσης



### 7ο έδρανο βάσης



**Σχήματα 5.4α-5.4ζ** – Διαγράμματα καταπόνησης εδράνων βάσης εξακύλινδρου κινητήρα σειράς και σειράς ανάφλεξης 1-5-3-6-2-4

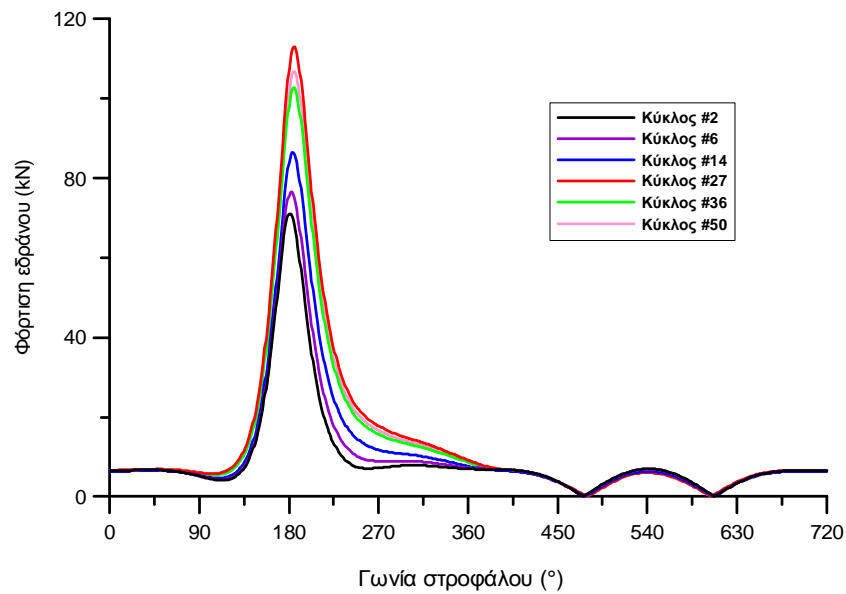
Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μέλετη των διαγραμμάτων των φορτίσεων που καταπονούν τα έδρανα βάσης είναι κοινά με αυτά που σημειώθηκαν στην υποενότητα 4.4.2. Τα ακραία έδρανα 1 και 7 παρουσιάζουν μία κορυφή σε κάθε κύκλο, ενώ τα «εσωτερικά» έδρανα 2 έως και 6 παρουσιάζουν δύο κορυφές. Η οριζόντια διαφορά των κορυφών αυτών, μετρημένη σε γωνία στροφάλου, καθορίζεται από τη σειρά ανάφλεξης. Για παράδειγμα, στο 3<sup>ο</sup> έδρανο βάσης, οι δύο κορυφές απέχουν  $\Delta\varphi = 2\Delta\varphi_{\alpha} = 240^{\circ}$ , όσο δηλαδή απέχουν οι αναφλέξεις στον 2<sup>ο</sup> και τον 3<sup>ο</sup> κύλινδρο. Αντίστοιχα, έδρανα που είναι συμμετρικά ως προς το κεντρικό 4<sup>ο</sup> έδρανο καταπονούνται ταυτόσημα, αλλά με διαφορά φάσης που καθορίζεται από τη δεδομένη σειρά ανάφλεξης. Τέλος, όπως αναφέραμε και στην αντίστοιχη ενότητα, το κεντρικό 4<sup>ο</sup> έδρανο καταπονείται με μεγαλύτερες δυνάμεις κατά το μεγαλύτερο τμήμα του κύκλου.

Όσον αφορά τη διαφοροποίηση από κύκλο σε κύκλο, είναι εμφανές ότι οι κυριότερες διαφορές εμφανίζονται ξανά περί το θερμό ΑΝΣ των κυλίνδρων που «συμμετέχουν» στην καταπόνηση του εκάστοτε εδράνου. Στις περιπτώσεις που οι αναφλέξεις των κυλίνδρων που συνεργάζονται στο ίδιο στρόφαλο, απέχουν λιγότερες μοίρες στροφάλου, οι διαφοροποιήσεις είναι εμφανείς και στο μικρότερο τμήμα του κύκλου, ανάμεσα στις δύο αυτές αναφλέξεις.

## 5.2.2 Εξακύλινδρος κινητήρας V60°

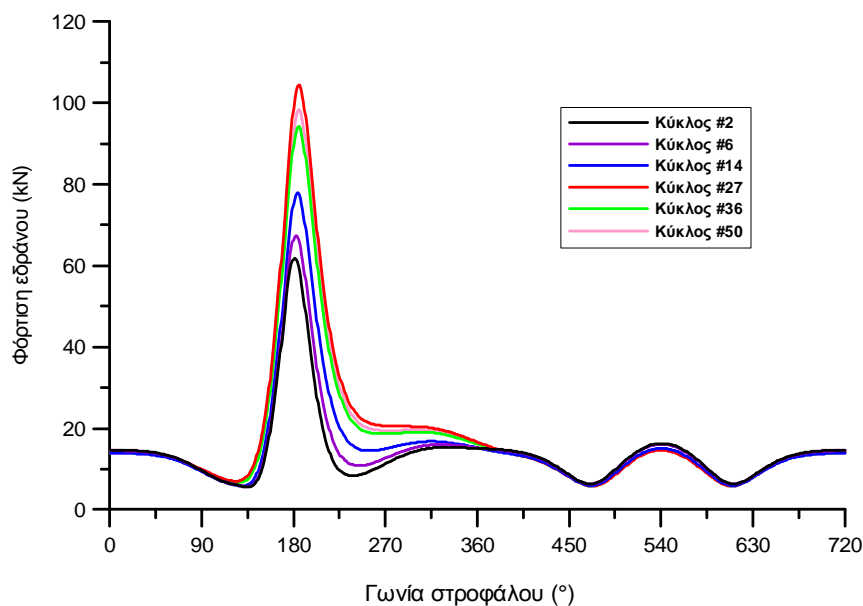
Αντίστοιχα με τον κινητήρα σειράς, στην παράγραφο αυτή παραθέτουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον εξακύλινδρο κινητήρα διάταξης V με περιεχόμενη γωνία των αξόνων των κυλίνδρων ίση με 60°.

Έδρανο άνω κεφαλής διωστήρα



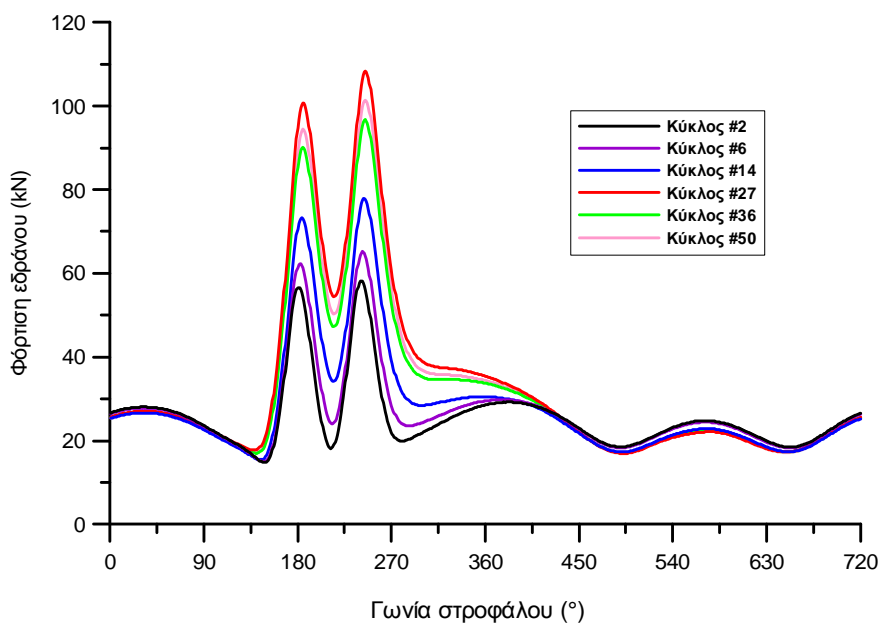
**Σχήμα 5.5α** – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνου άνω κεφαλής διωστήρα κινητήρα V60° για διάφορους κύκλους λειτουργίας

Έδρανο κάτω κεφαλής διωστήρα



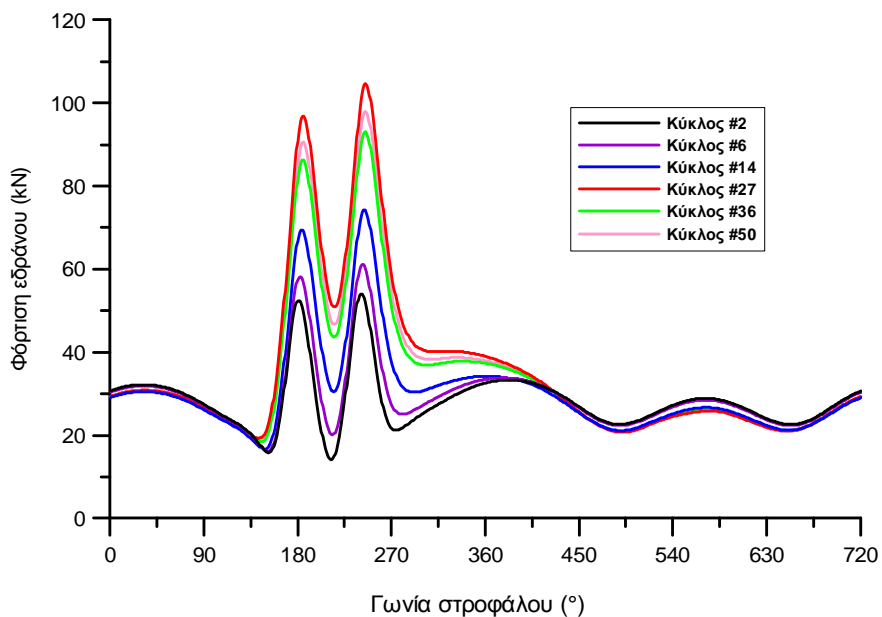
**Σχήμα 5.5β** – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνου κάτω κεφαλής διωστήρα κινητήρα V60° για διάφορους κύκλους λειτουργίας

### 6κύλινδρος κινητήρας V60° κομβίο στροφάλου



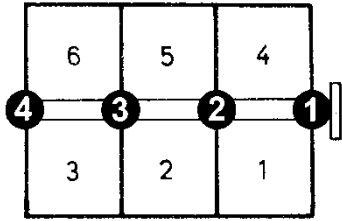
**Σχήμα 5.5γ** – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V60° για διάφορους κύκλους λειτουργίας

### Έδρανο & κομβίο βάσης



**Σχήμα 5.5δ** – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνου & κομβίου βάσης κινητήρα V60° για διάφορους κύκλους λειτουργίας

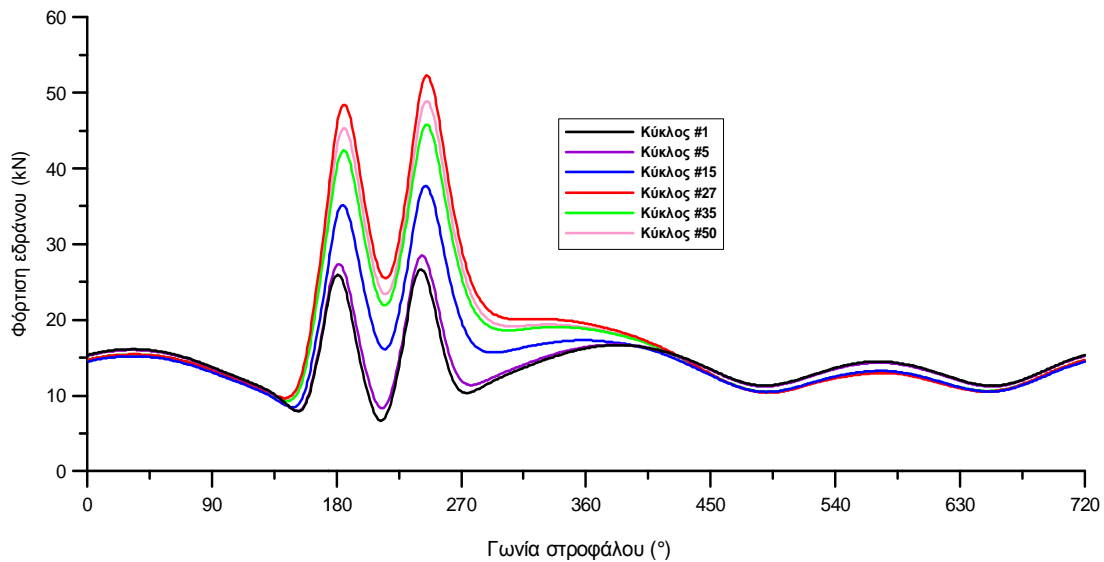
Η μορφή των διαγραμμάτων είναι αντίστοιχη με αυτή των προηγούμενων, με τη διαφορά ότι τώρα στα κομβία στροφάλου και βάσης και στο έδρανο βάσης εμφανίζονται δύο κορυφές, λόγω του ζεύγους κυλίνδρων



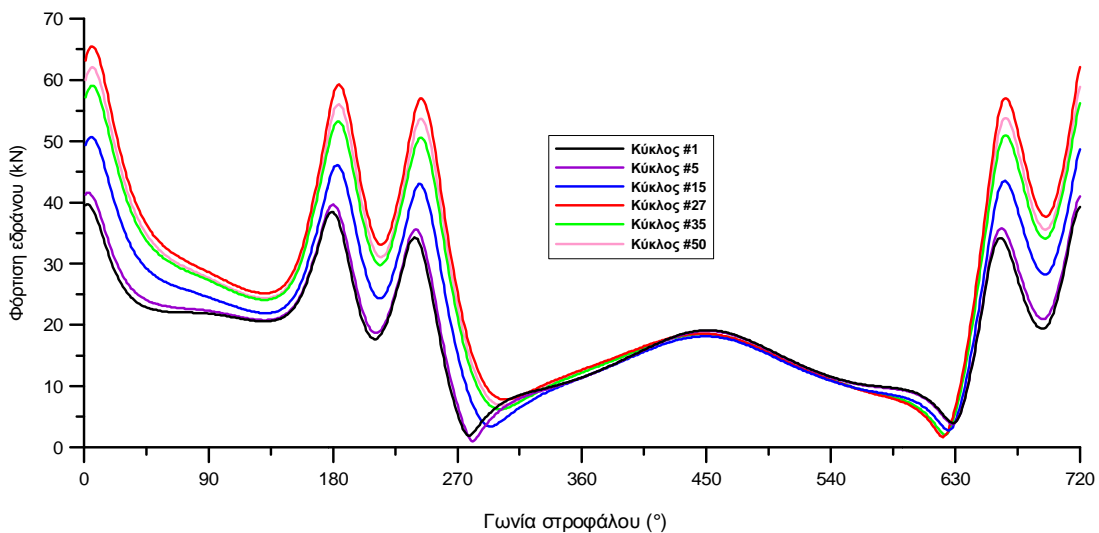
που είναι αρθρωμένο στο στρόφαλο. Συμπεράσματα όσον αφορά τη διαφοροποίηση ανάμεσα στη γραφική παράσταση των διαφόρων κύκλων λειτουργίας, είναι κοινά με τις παραπάνω περιπτώσεις. Τα ίδια ισχύουν και για τα

διαγράμματα των καταπονήσεων των εδράνων βάσης του κινητήρα που ακολουθούν. Στο διπλανό σκαρίφημα γίνεται εμφανής η αρίθμηση των εδράνων βάσης και των κυλίνδρων. Η σειρά ανάφλεξης είναι 1 - 4 - 3 - 6 - 2 - 5 με τους κυλίνδρους, δηλαδή, του ίδιου στροφάλου να φτάνουν διαδοχικά στο θερμό τους ΑΝΣ.

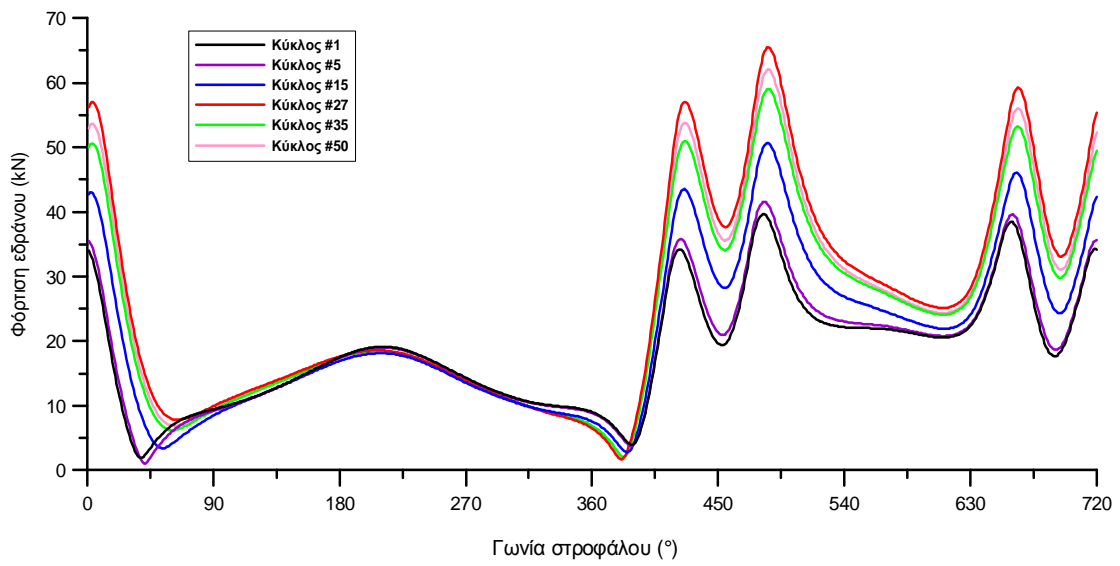
1ο έδρανο βάσης



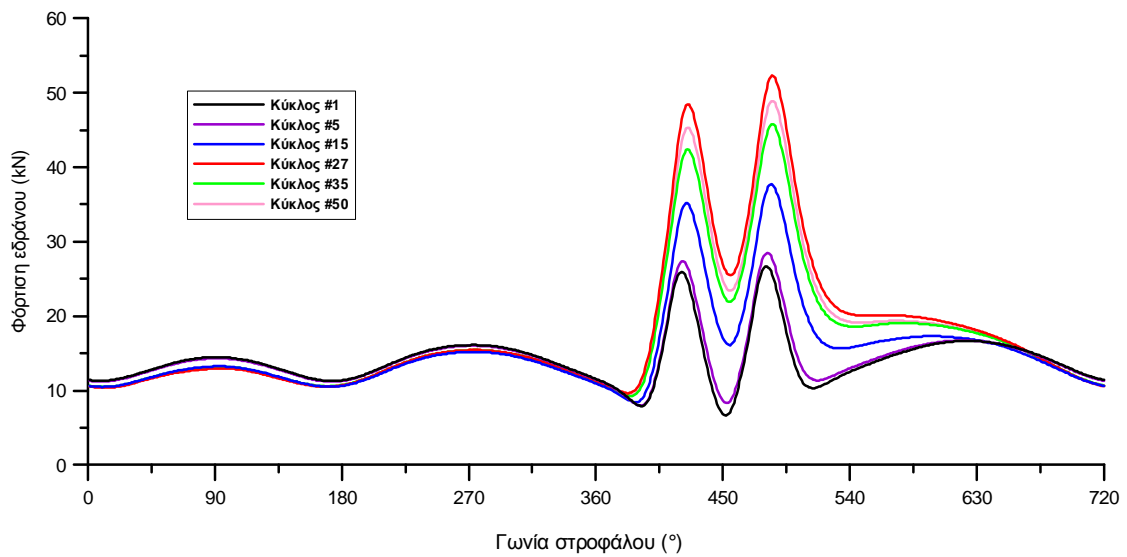
2ο έδρανο βάσης



### 3ο έδρανο βάσης



### 4ο έδρανο βάσης



**Σχήματα 5.6α-5.6δ** – Διαγράμματα καταπόνησης εδράνων βάσης εξακύλινδρου κινητήρα V60° και σειράς ανάφλεξης 1-4-3-6-2-5

Ακολουθώντας αντίστοιχους συλλογισμούς με τις παραπάνω ενότητες, στις οποίες αναλύθηκαν διεξοδικά τα περί εδράνων βάσης, εστιάζουμε και εδώ στα αντίστοιχα σημεία. Χαρακτηριστικό του κινητήρα είναι η ανομοιομορφία ανάφλεξης των κυλίνδρων, αφού η γωνία ανάφλεξης μεταξύ



των στροφάλων είναι  $\Delta\varphi_\alpha = \frac{720^\circ}{6/2} = 240^\circ$ , ενώ η γωνία του «V» είναι  $60^\circ$ .

Έτσι, η διαφορά σε γωνία στροφάλου μεταξύ των θερμών ΑΝΣ των κυλίνδρων είναι  $\frac{1}{60^\circ} - \frac{4}{180^\circ} - \frac{3}{60^\circ} - \frac{6}{180^\circ} - \frac{2}{60^\circ} - \frac{5}{180^\circ} - \frac{1}{180^\circ}$ . Συνεπώς, τα γραφήματα για το  $1^\circ$  και το  $4^\circ$  έδρανο είναι ταυτόσημα με μόνη διαφορά τη γωνιακή διαφορά φάσης στην ανάφλεξη του ζεύγους κυλίνδρων 1-4 και των 3-6, δηλαδή  $\Delta\varphi = 240^\circ$ . Αντίστοιχη διαφορά φάσης έχουν και οι γραφικές παραστάσεις για το  $2^\circ$  και το  $3^\circ$  έδρανο βάσης. Τέλος, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι διαφορές μεταξύ των κύκλων μεγιστοποιούνται για γωνίες στροφάλου κοντά στα σημεία ανάφλεξης των κυλίνδρων. Στο υπόλοιπο τμήμα του κύκλου έχουμε σχεδόν πλήρη ταύτιση, όπως για παράδειγμα στο γράφημα του  $2^{\text{ου}}$  εδράνου βάσης για  $\varphi = 270^\circ - 630^\circ$ .

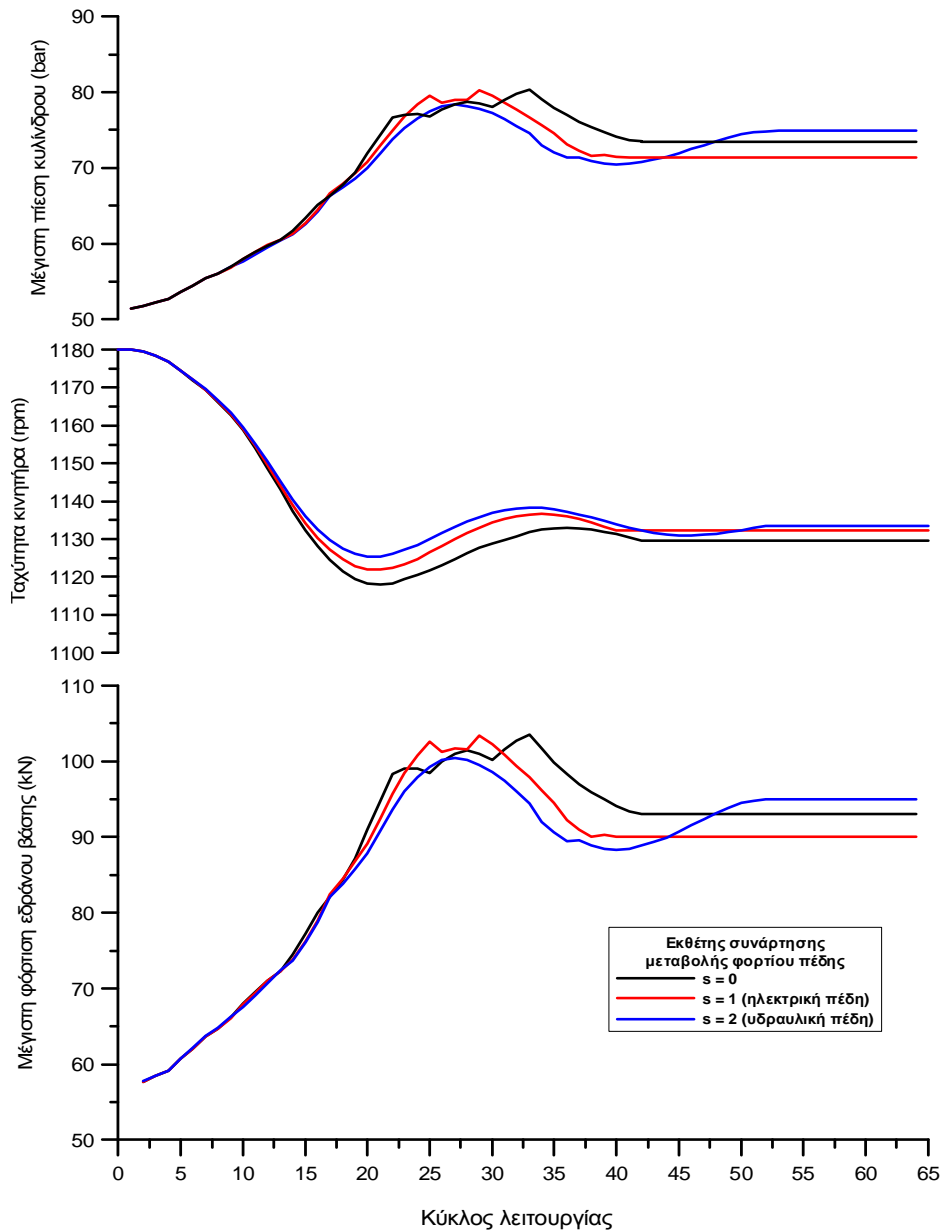
### 5.3 Παραμετρική ανάλυση

Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, θα πραγματοποιηθεί η παραμετρική ανάλυση κατά τη μεταβατική λειτουργία του κινητήρα diesel. Εξετάζουμε με μορφή διαγραμμάτων τη μεταβολή στη μέγιστη φόρτιση του κάθε εδράνου βάσης του κινητήρα συναρτήσει του κύκλου λειτουργίας, καθώς μεταβάλλονται δομικά, αλλά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του ίδιου ή του τρόπου μέσω του οποίου του επιβάλλεται το φορτίο (πέδη). Στην πράξη, αντικαθιστούμε το σύνολο των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων εισόδου του κώδικα με το εκάστοτε σύνολο που αφορά την μεταβολή της παραμέτρου και έχει προέλθει από δεδομένα σε κινητήρα diesel του εργαστηρίου ΜΕΚ του Ε.Μ.Π. [5]. Οι πέντε παράμετροι που λαμβάνουμε υπόψη στην ανάλυση είναι οι παρακάτω:

- ο τύπος του φορτίου (εκθέτης  $s$ )
- το χρονικό διάστημα της μεταβολής του φορτίου ( $\Delta t$ )
- τη ροπή αδρανείας του υπερπληρωτή
- το μονωτικό υλικό του κυλίνδρου
- το εύρος της μεταβολής του φορτίου του κινητήρα

### 5.3.1 Εξακύλινδρος κινητήρας εν σειρά

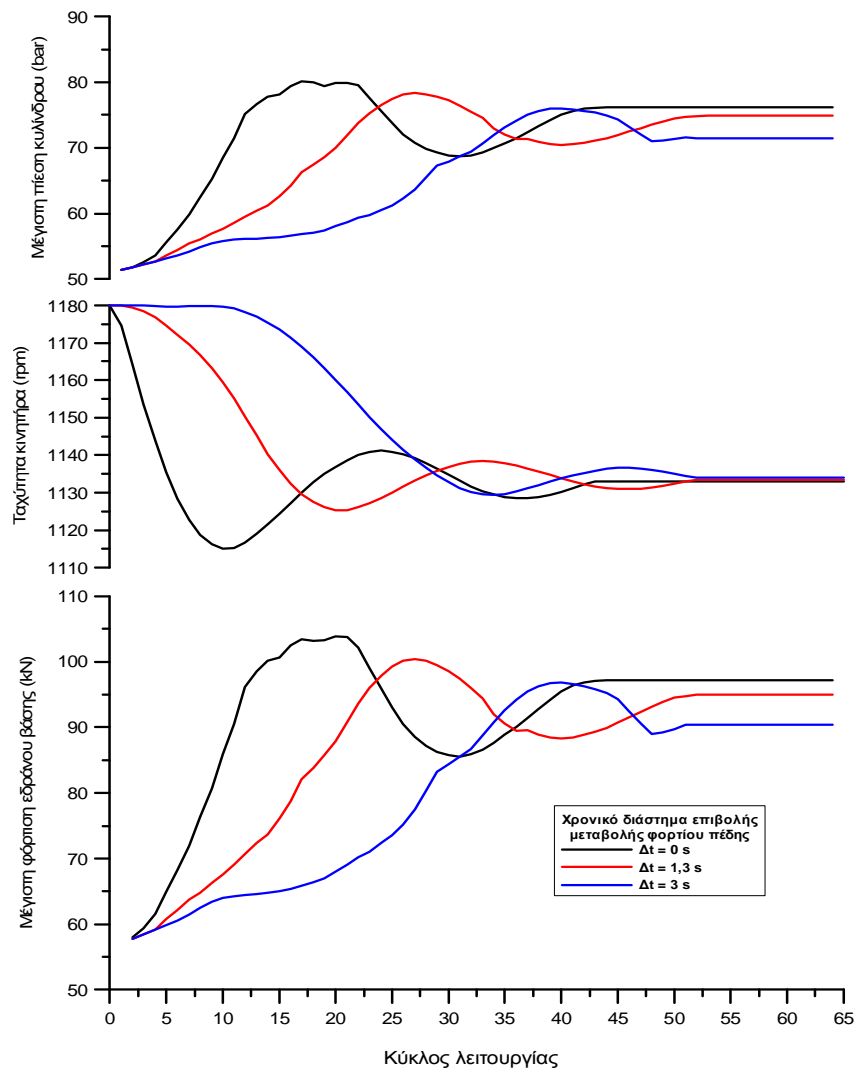
Με τις γραφικές παραστάσεις των μέγιστων φορτίσεων των εδράνων βάσης, θα αντιπαρατίθεται η μεταβολή στη μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου και στην περιστροφική ταχύτητα του κινητήρα.



**Σχήμα 5.7** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα σειράς από τον τύπο του φορτίου

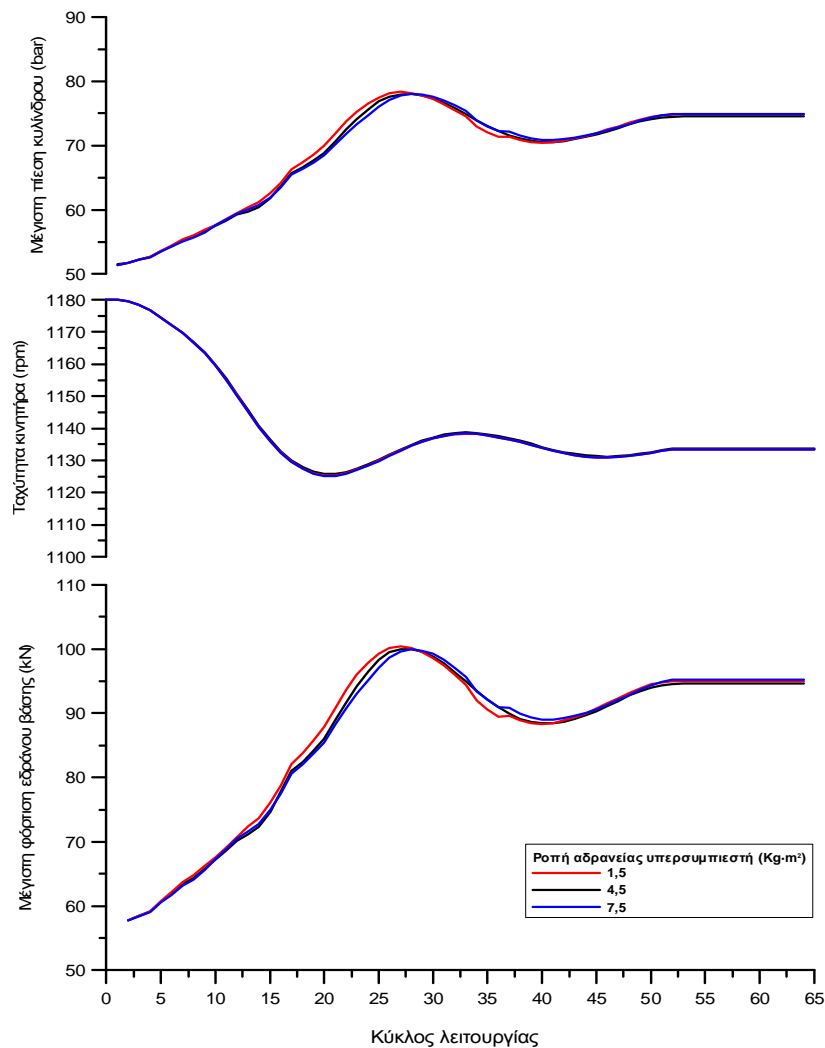
Όσον αφορά τον εκθέτη της συνάρτησης επιβολής του φορτίου  $T_L = k\omega^s$ , εξετάζουμε τη συμπεριφορά του κινητήρα για τρεις διαφορετικές

τιμές του: 0, 1 και 2. Παρατηρούμε ότι για μικρότερη τιμή του εκθέτη έχουμε μεγαλύτερη πίεση εξ' αερίων στον κύλινδρο και μεγαλύτερη – προσωρινή – επιβράδυνση του κινητήρα. Συνεπώς και τα έδρανα καταπονούνται περισσότερο μέχρι να επιτευχθεί η τελική κατάσταση ισορροπίας στη νέα τιμή του φορτίου, αφού απαιτείται έγχυση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση του εκθέτη λαμβάνεται σε μεγαλύτερο βαθμό υπόψη η περιστροφική ταχύτητα του κινητήρα στον τρόπο που η πέδη επιβαρύνει τον τελευταίο. Για  $s=0$ , έχουμε  $T_L = const$ , δηλαδή η συνάρτηση της στρεπτικής δύναμης που επιβάλλει η πέδη δε λαμβάνει υπόψη τα εκάστοτε λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως οι στροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου.



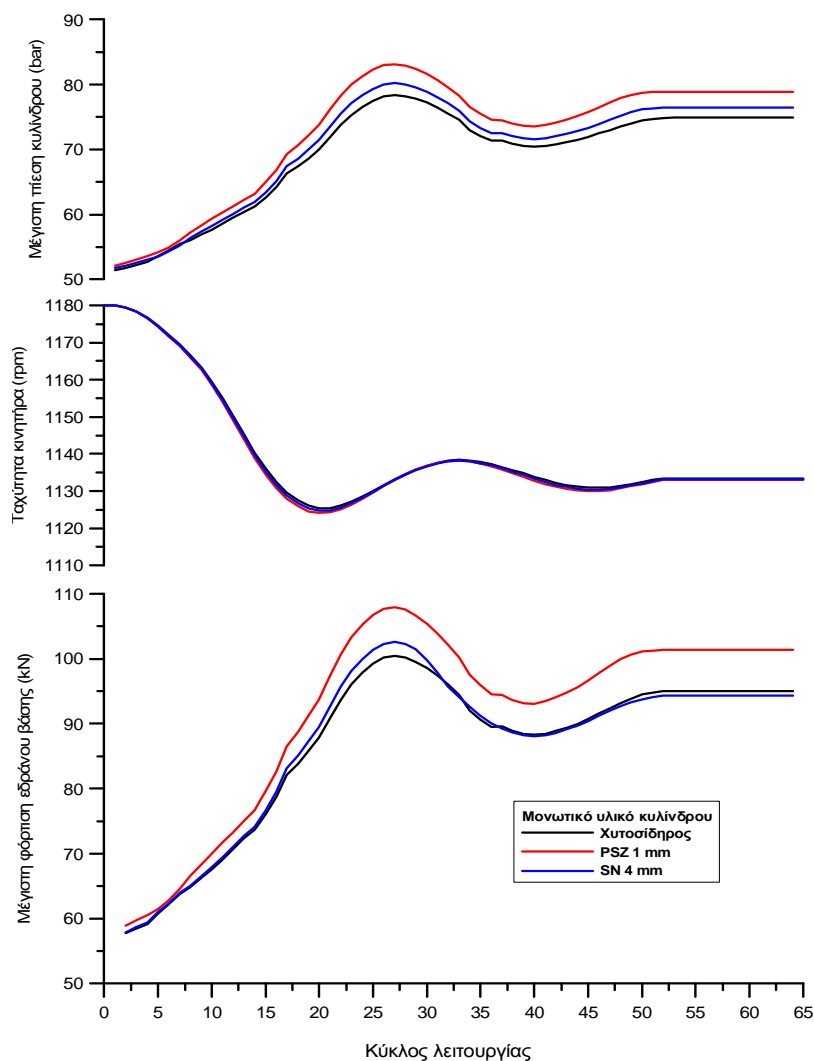
**Σχήμα 5.8** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα σειράς από το χρονικό διάστημα επιβολής του νέου φορτίου στον κινητήρα

Το χρονικό διάστημα που διαρκεί η μεταβολή του φορτίου στον κινητήρα diesel παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο. Όσο μικρότερο είναι αυτό, τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της παροχής καυσίμου για να ανταπεξέλθει ο κινητήρας γρηγορότερα στη νέα απότομη επιβάρυνση. Δυσμενέστερη από τις περιπτώσεις είναι η ακαριαία μεταβολή φορτίου ( $\Delta t = 0$ ) για την οποία έχουμε τη μεγαλύτερη αύξηση των πιέσεων εντός του κυλίνδρου, τη μεγαλύτερη μείωση των στροφών και τη μεγαλύτερη καταπόνηση των εδράνων. Η περίπτωση  $\Delta t = 1s$  είναι μια ενδιάμεση κατάσταση, ενώ για διάστημα ίσο με  $\Delta t = 3s$  η δυναμική καταπόνηση των εδράνων είναι ηπιότερη λόγω σταδιακής αύξησης του φορτίου. Παρατηρείται πολύ μικρή υπερακόντιση στην μέγιστη πίεση εξ' αερίων στον κύλινδρο, ενώ η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται ελαφρώς κάτω από την τιμή που λαμβάνει στην ισορροπία.



**Σχήμα 5.9** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα σειράς από τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή

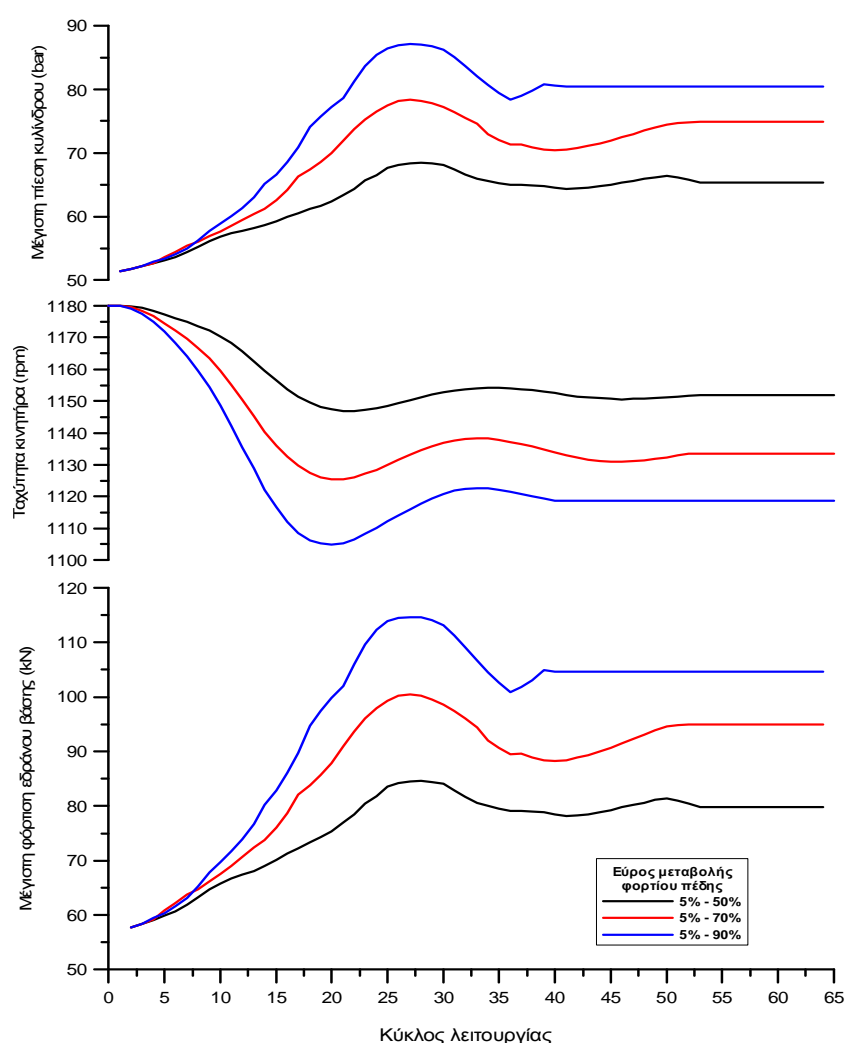
Η ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή του κινητήρα έχει αμελητέο ρόλο στην καταπόνηση των εδράνων, όπως είναι φανερό από το ανωτέρω Σχήμα 5.9. Για τις τρεις διαφορετικές τιμές της ροπής αδράνειας που εξετάστηκαν, οι διαφορές στην ταχύτητα περιστροφής, την μέγιστη πίεση στον κύλινδρο και τις μέγιστες φορτίσεις εδράνων βάσης είναι αμελητέες.



**Σχήμα 5.10** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα σειράς από το μονωτικό υλικό κυλίνδρου

Έχοντας τώρα ως παράμετρο το μονωτικό υλικό του κυλίνδρου, εξετάζονται οι τρεις περιπτώσεις υλικού που εξετάστηκαν και στην παραμετρική ανάλυση της μόνιμης λειτουργίας: η απουσία μονωτικού υλικού (η παρουσία μόνο του χυτοσιδήρου του κυλίνδρου), η μόνωση νιτριδίου του

πυριτίου (SN) πάχους 4mm και η μόνωση συγκεκριμένου τύπου ζιρκόνιας (PSZ) πάχους 1mm. Παρ' όλο που παρατηρούμε αμελητέες διαφορές στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, οι διαφορές στην πίεση εξ' αερίων στον κύλινδρο είναι εμφανείς. Η ζιρκόνια παρουσιάζει ξανά την ισχυρότερη μονωτική δράση, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες θερμότητας. Λόγω της ύπαρξης μεγαλύτερων πιέσεων στον κύλινδρο, έχουμε και αύξηση στις μέγιστες φορτίσεις των εδράνων βάσης. Η παρουσία νιτριδίου του πυριτίου, σε μεγαλύτερο μάλιστα πάχος από τη μόνωση της ζιρκόνιας, αποτελεί μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ χυτοσιδήρου και ζιρκόνιας.



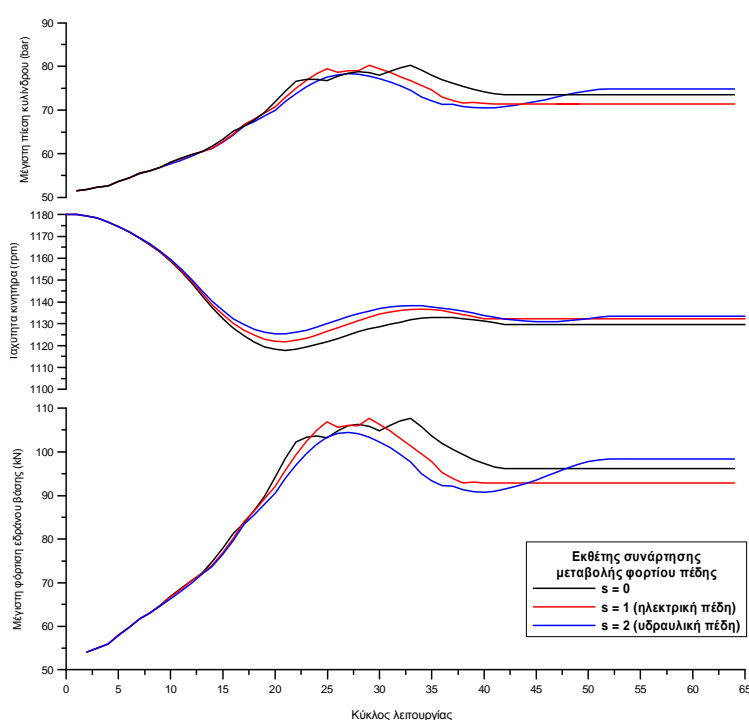
**Σχήμα 5.11** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα σειράς από το εύρος μεταβολής του φορτίου στον κινητήρα

Η τελευταία περίπτωση που εξετάζεται αφορά το εύρος της μεταβολής του φορτίου που δέχεται ο κινητήρας diesel μέσω της πέδης. Σε όλες τις περιπτώσεις, το αρχικό φορτίο είναι στο 5% της μέγιστης τιμής που μπορεί

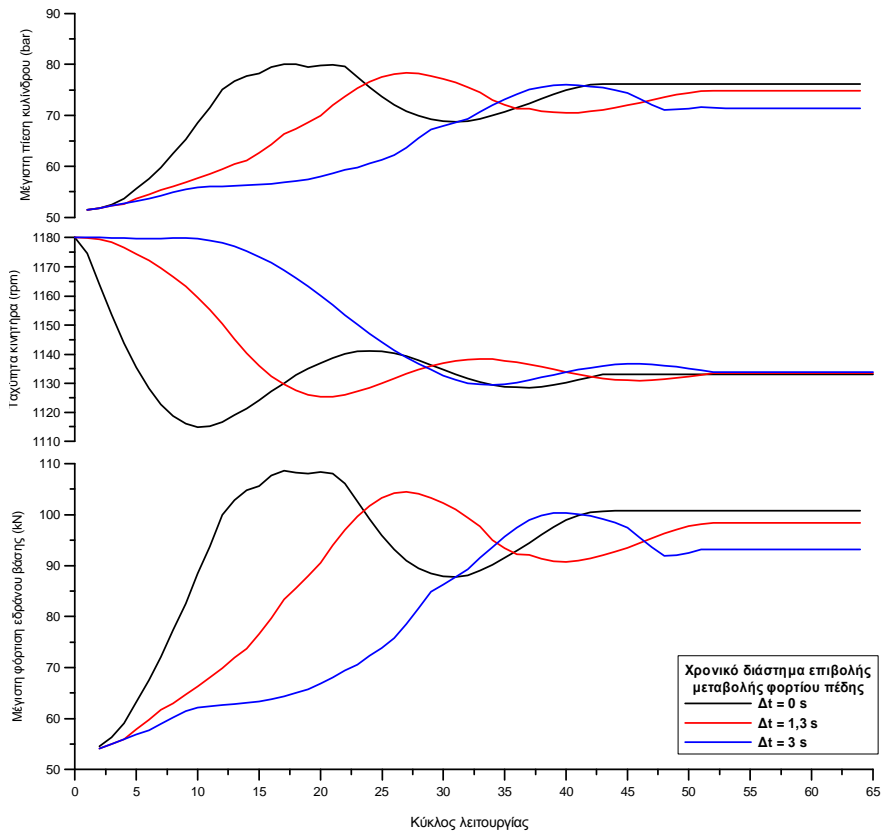
να επιτευχθεί. Η τελική τιμή του φορτίου μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών 50%, 70% και 90%. Μεγαλύτερο τελικό φορτίο συνεπάγεται μεγαλύτερη απαιτούμενη ροπή. Η τελευταία όμως είναι ανάλογη της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης. Στο γεγονός αυτό οφείλεται λοιπόν η αύξηση της μέγιστης πίεσης στον κύλινδρο με αύξηση του εύρους μεταβολής του φορτίου. Η παροχή καυσίμου αυξάνεται, ώστε να επιτευχθεί η νέα απαιτούμενη ροπή και ο κινητήρας να ανταπεξέλθει στη νέα επιβάρυνση που δέχεται μέσω της πέδης. Οδηγούμαστε έτσι σε μεγαλύτερες πιέσεις στον κύλινδρο και δυσμενέστερη καταπόνηση των εδράνων βάσης της διάταξης. Ταυτόχρονα, η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται και σταθεροποιείται σε μικρότερη τιμή όταν η τελική τιμή του φορτίου είναι αυξημένη.

### 5.3.2 Εξακύλινδρος κινητήρας V60°

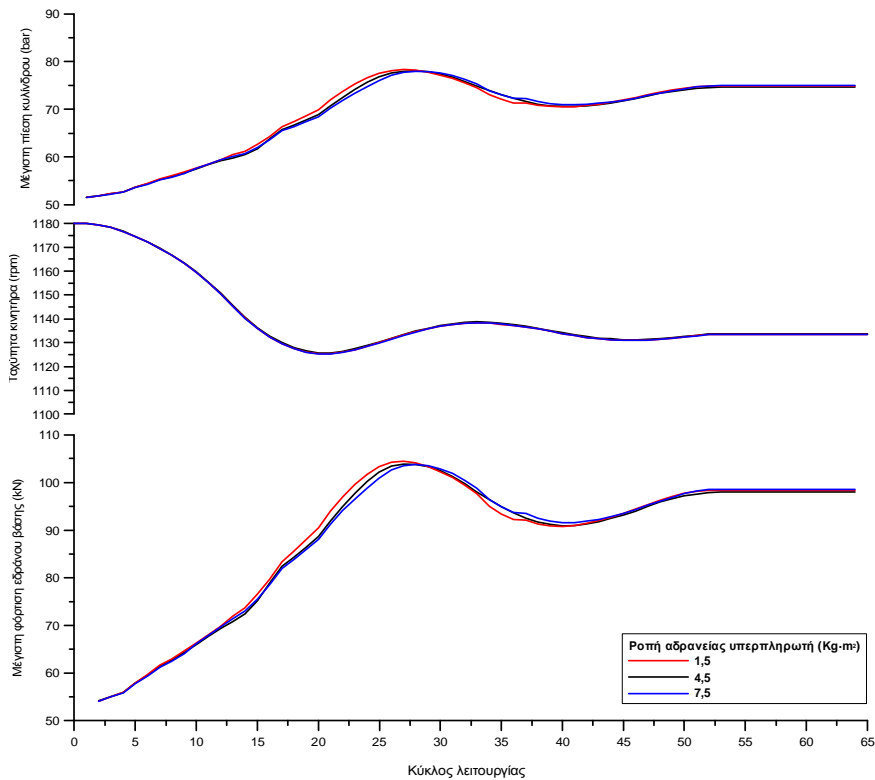
Ακολουθώντας αντίστοιχη συλλογιστική πορεία με την προηγούμενη παράγραφο, θα παρουσιαστούν εδώ τα αντίστοιχα διαγράμματα για την παραμετρική ανάλυση του εξακύλινδρου κινητήρα διάταξης V60°. Τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι αντίστοιχα με τον κινητήρα σειράς, γι' αυτό μπορούμε να ανατρέξουμε στο εκάστοτε αντίστοιχο διάγραμμα της Ενότητας 5.3.1.



**Σχήμα 5.12** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα V60° από τον τύπο του φορτίου

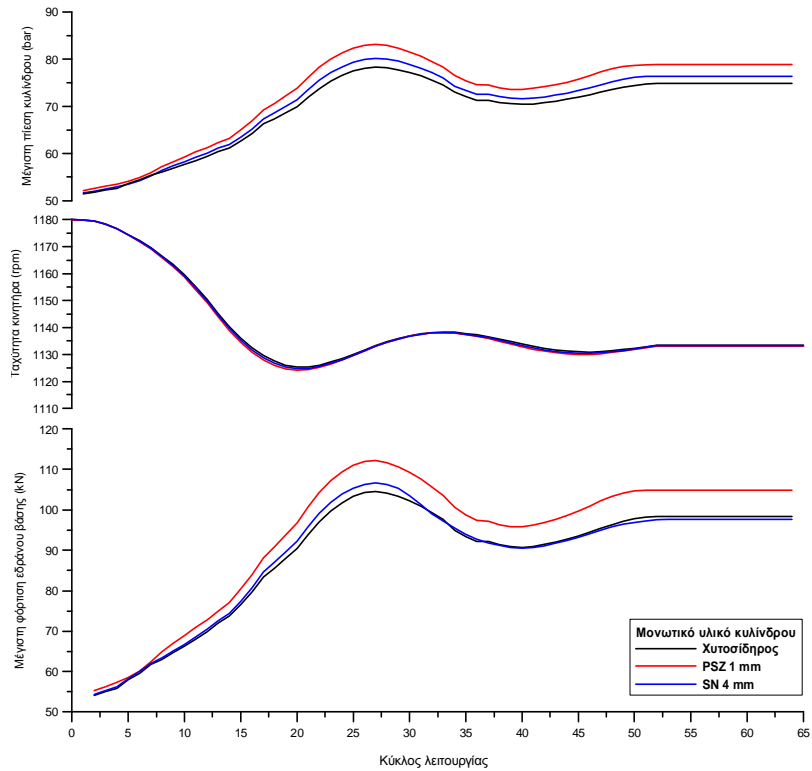


**Σχήμα 5.13** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα V60° από το χρονικό διάστημα επιβολής του νέου φορτίου στον κινητήρα

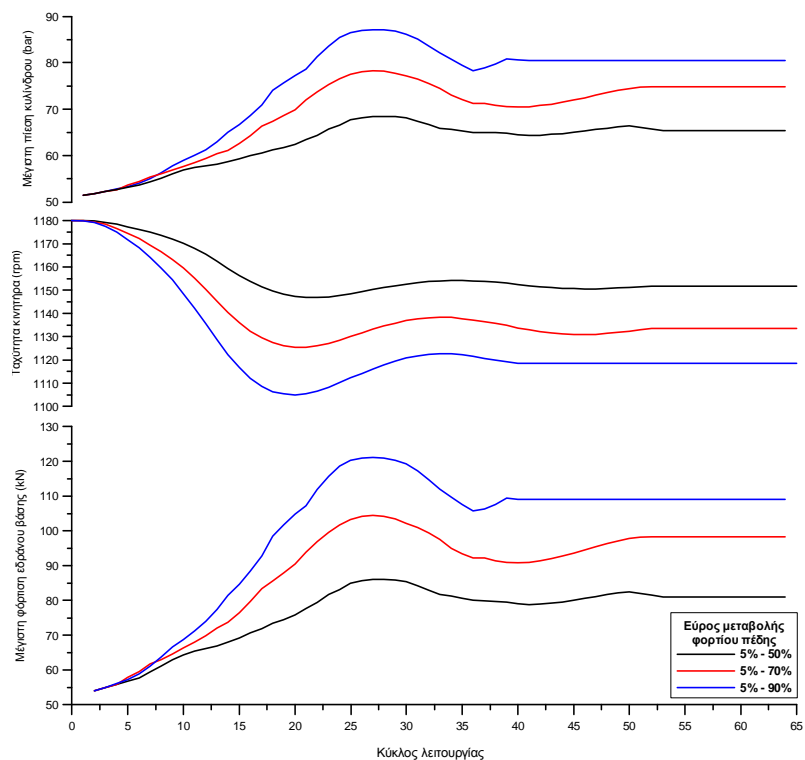


**Σχήμα 5.14** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα V60° από τη ροπή αδράνειας του υπερπληρωτή





**Σχήμα 5.15** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα  $V60^\circ$  από το μονωτικό υλικό κυλίνδρου



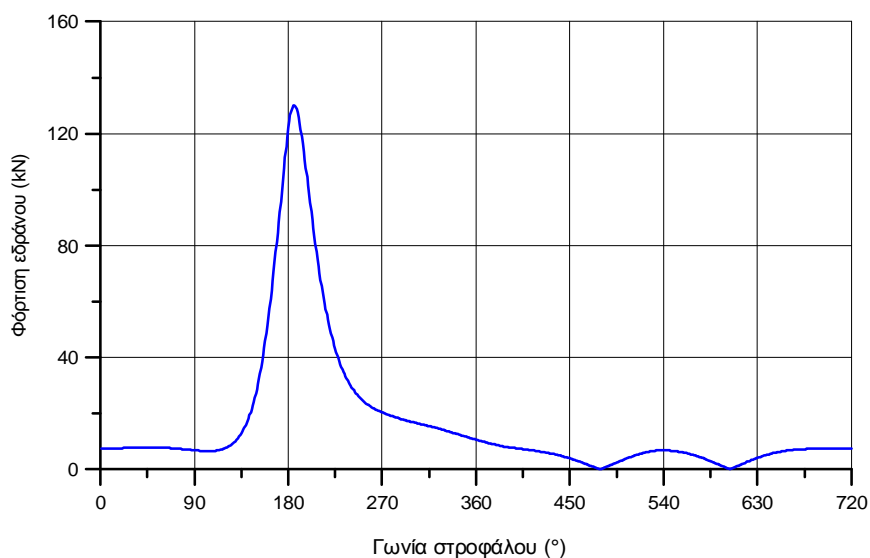
**Σχήμα 5.16** – Διάγραμμα εξάρτησης μεταβολής μέγιστων καταπονήσεων εδράνου βάσης, ταχύτητας περιστροφής και μέγιστης πίεσης κυλίνδρου εξακύλινδρου κινητήρα σειράς από το εύρος μεταβολής του φορτίου στον κινητήρα

Η επίδραση των παραμέτρων είναι της ίδιας μορφής με την περίπτωση του κινητήρα σειράς που εξετάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οι διαφορές εστιάζονται στις τιμές μέγιστων φορτίσεων των εδράνων βάσης, που είναι εν γένει μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του κινητήρα σειράς. Αυτό οφείλεται, βέβαια, στην άρθρωση δύο ζευγών κυλίνδρου - διωστήρα σε κοινό στρόφαλο, κάτι που έχει αναλυθεί πιο διεξοδικά σε προηγούμενο Κεφάλαιο.

## Παράρτημα

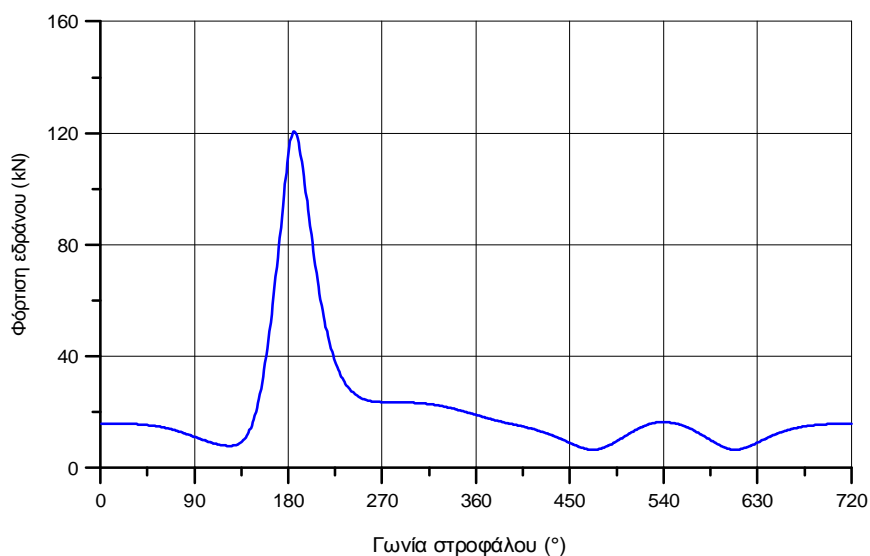
Για λόγους πληρότητας παρατίθενται τα μεμονωμένα πολικά και γραμμικά διαγράμματα καταπόνησης των εδράνων για τους κινητήρες V και τον κινητήρα W που εξετάστηκαν στις Ενότητες 4.3 και 4.4.

### Κινητήρας V Έδρανο άνω κεφαλής διωστήρα



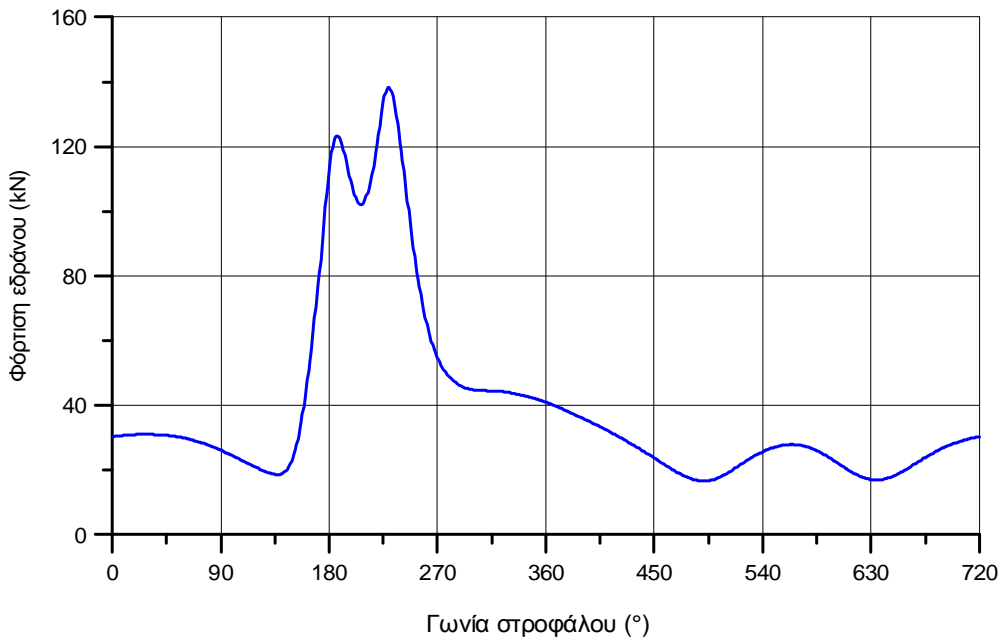
Σχήμα ΠΑ1α – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνου άνω κεφαλής διωστήρα κινητήρα V

### Έδρανο κάτω κεφαλής διωστήρα



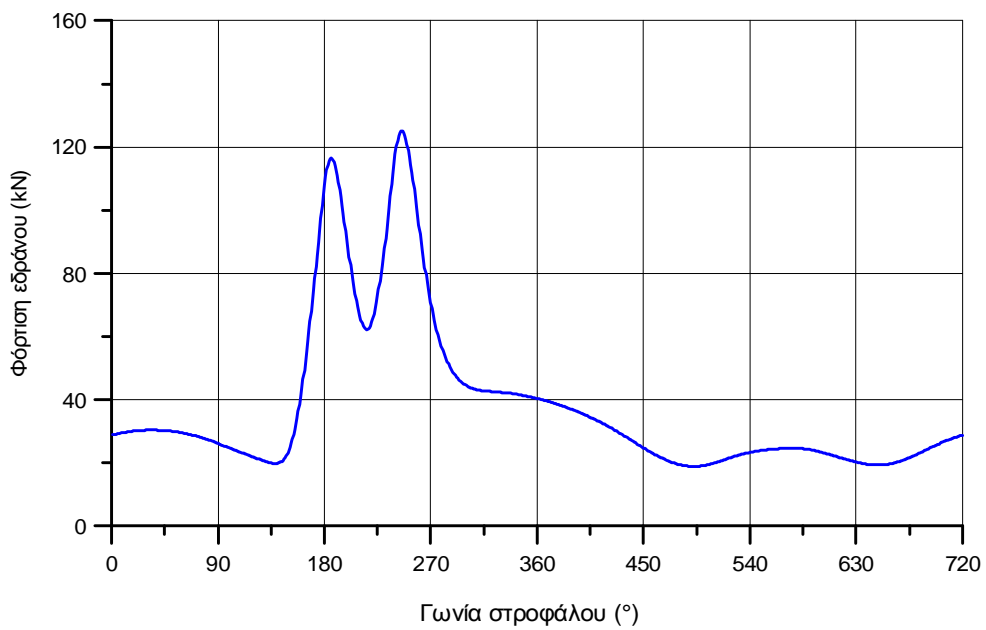
Σχήμα ΠΑ1β – Διάγραμμα καταπόνησης εδράνου κάτω κεφαλής διωστήρα κινητήρα V

### Κινητήρας V45° Κομβίο στροφάλου



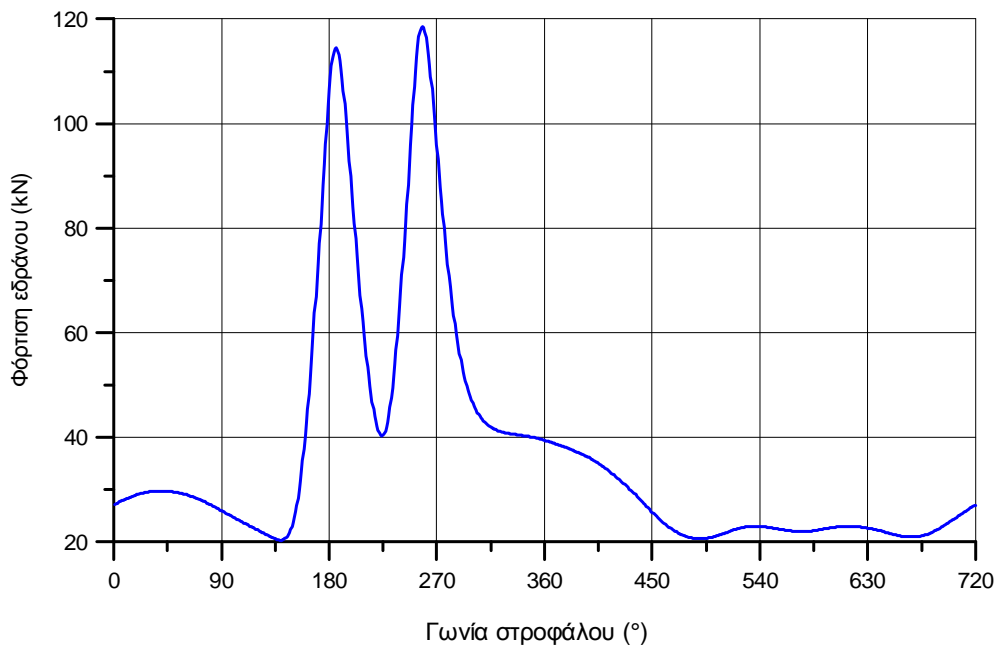
**Σχήμα ΠΑ2α** – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V45°

### Κινητήρας V60° Κομβίο στροφάλου



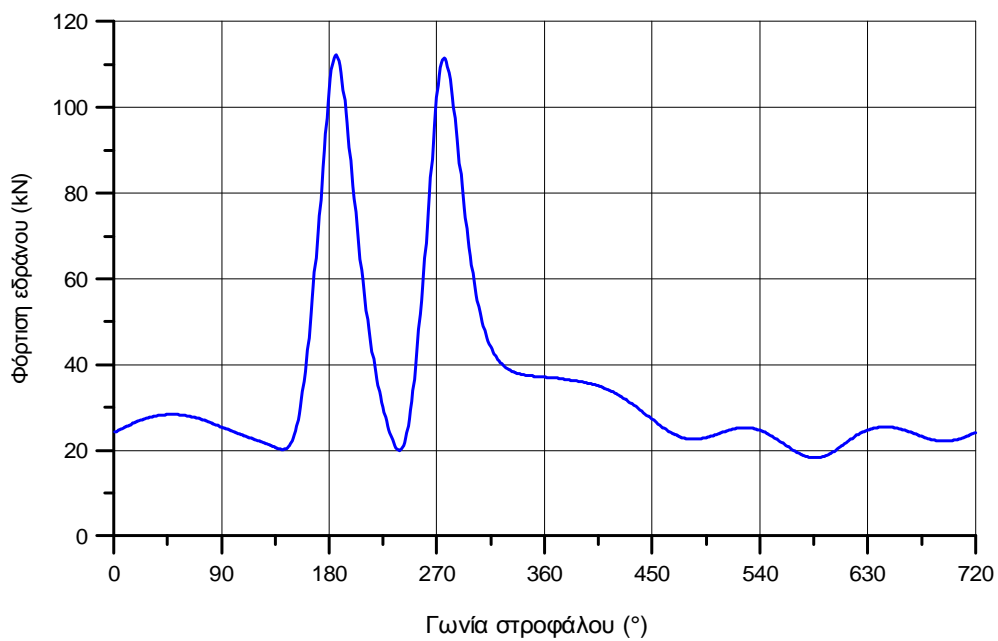
**Σχήμα ΠΑ2β** – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V60°

### Κινητήρας V72° Κομβίο στροφάλου



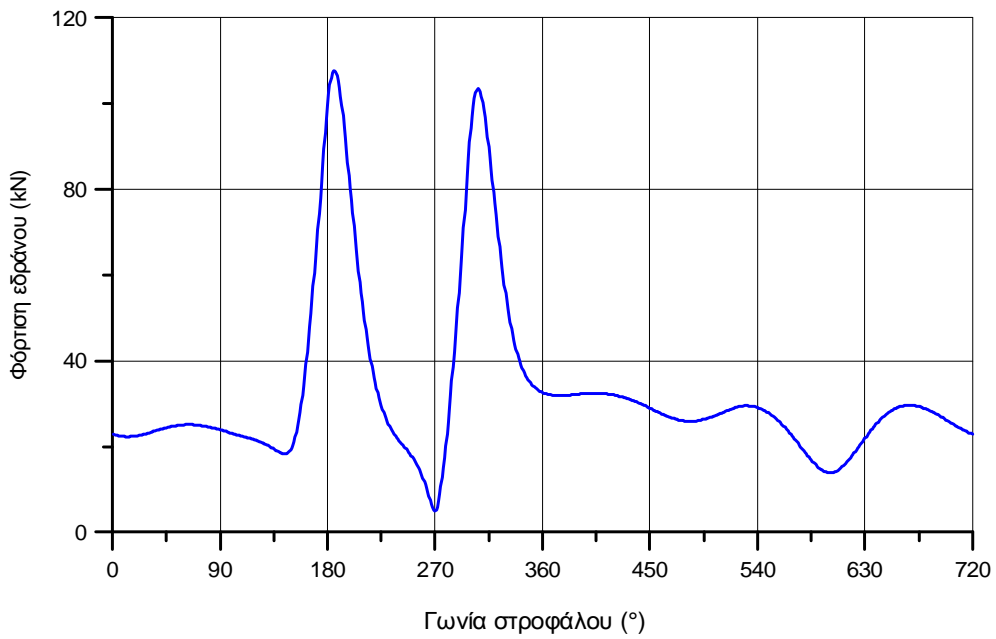
Σχήμα ΠΑ2γ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V72°

### Κινητήρας V90° Κομβίο στροφάλου



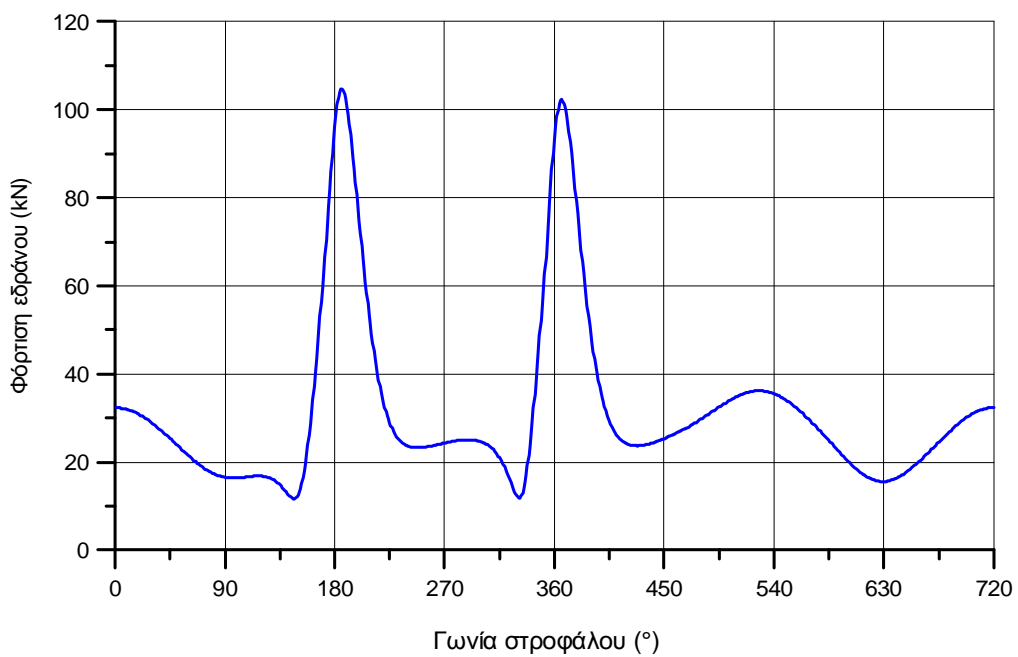
Σχήμα ΠΑ2δ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V90°

### Κινητήρας V120° Κομβίο στροφάλου



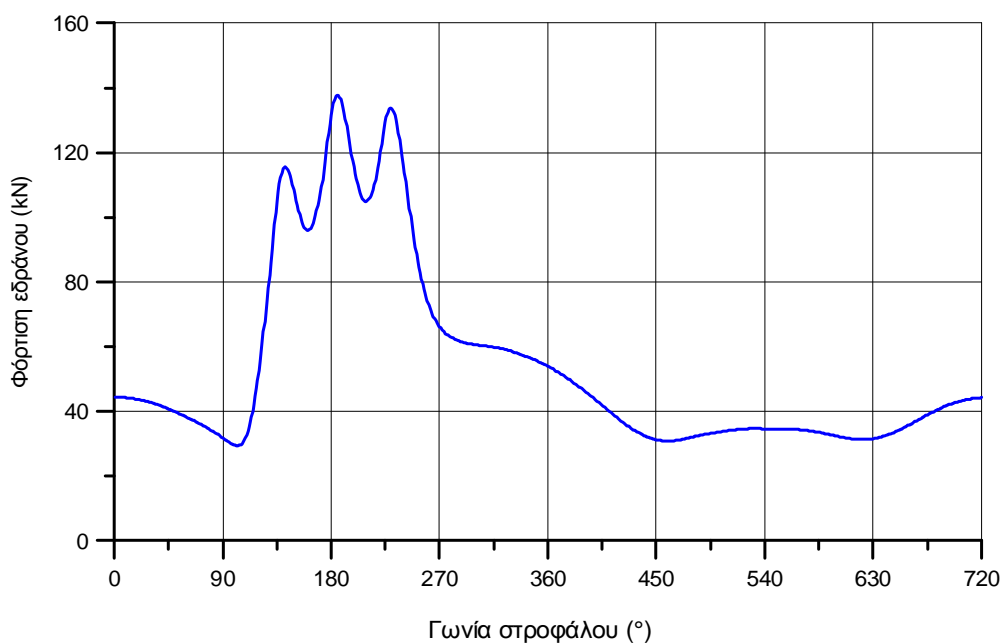
Σχήμα ΠΑ2ε – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V120°

### Κινητήρας V180° Κομβίο στροφάλου



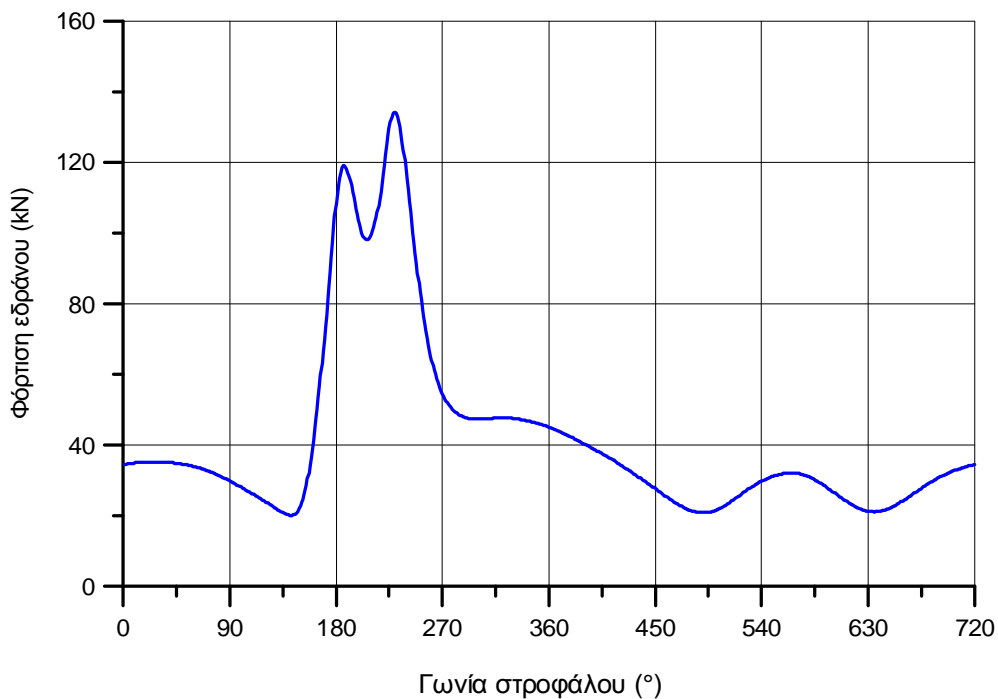
Σχήμα ΠΑ2στ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V180°

### Κινητήρας W45° Κομβίο στροφάλου



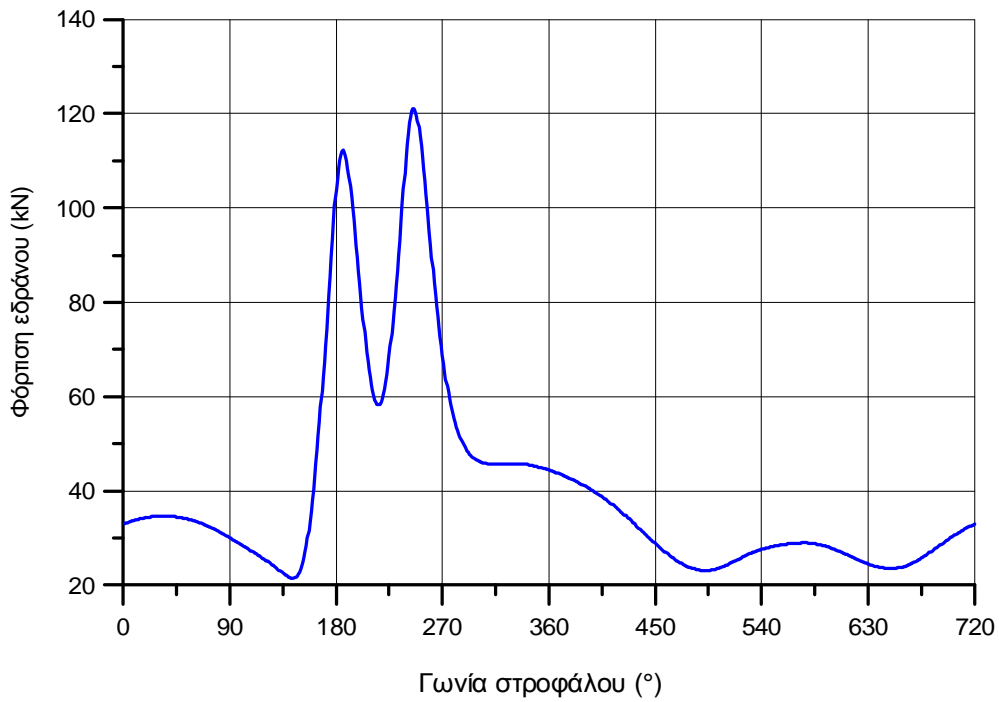
Σχήμα ΠΑ2ζ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα W45°

### Κινητήρας V45° Κομβίο & έδρανο βάσεως



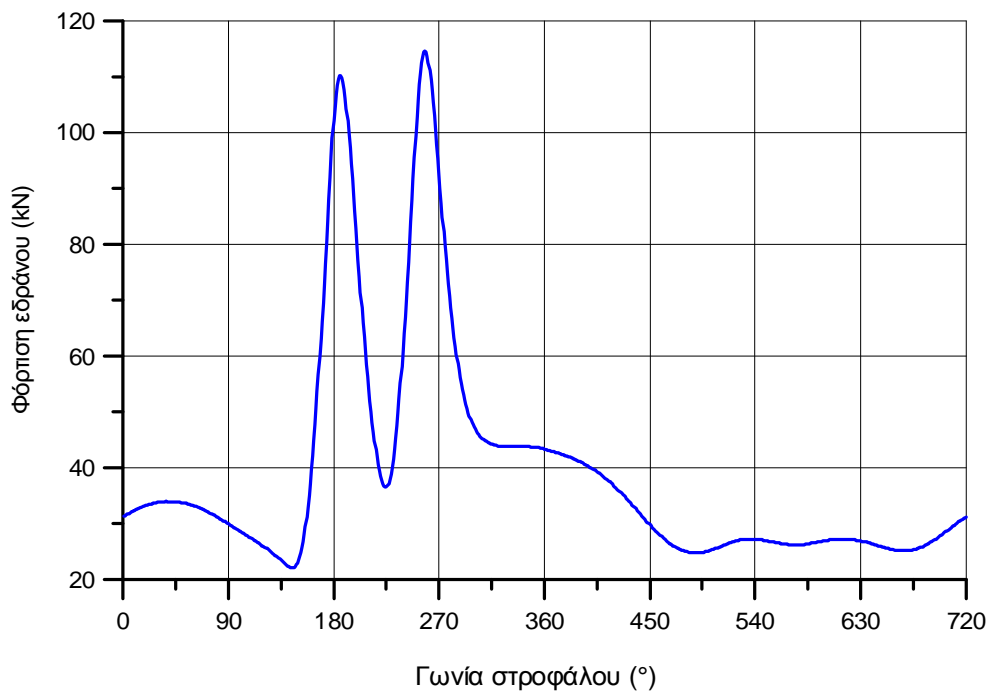
Σχήμα ΠΑ3α – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης κινητήρα V45°

## Κινητήρας V60° Κομβίο & έδρανο βάσεως



Σχήμα ΠΑ3β – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης κινητήρα V60°

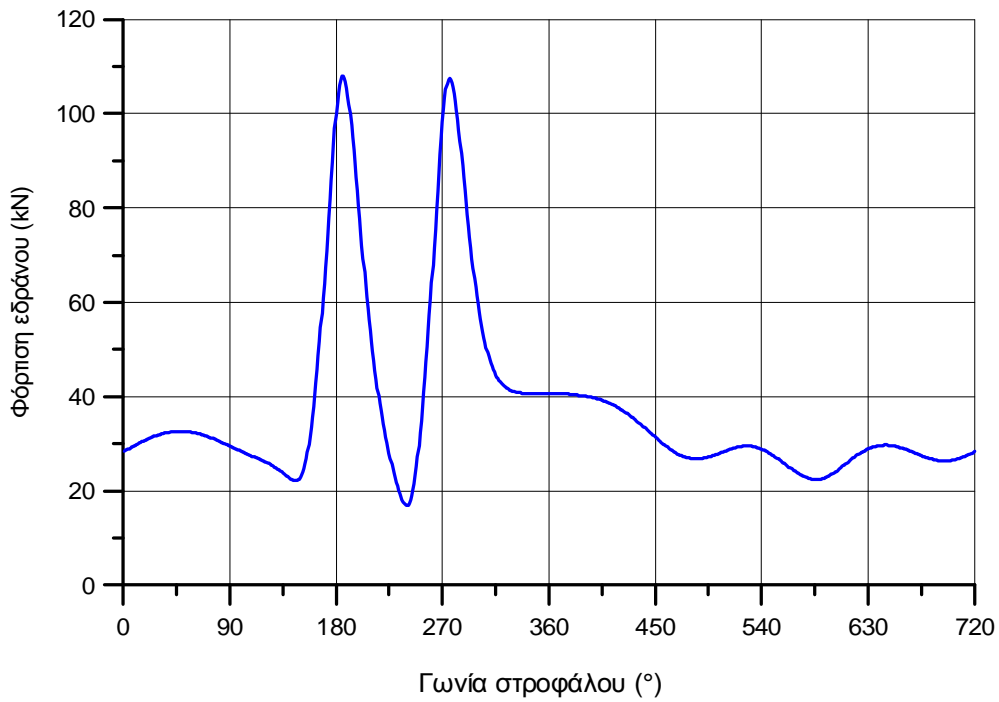
## Κινητήρας V72° Κομβίο & έδρανο βάσεως



Σχήμα ΠΑ3γ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης κινητήρα V72°

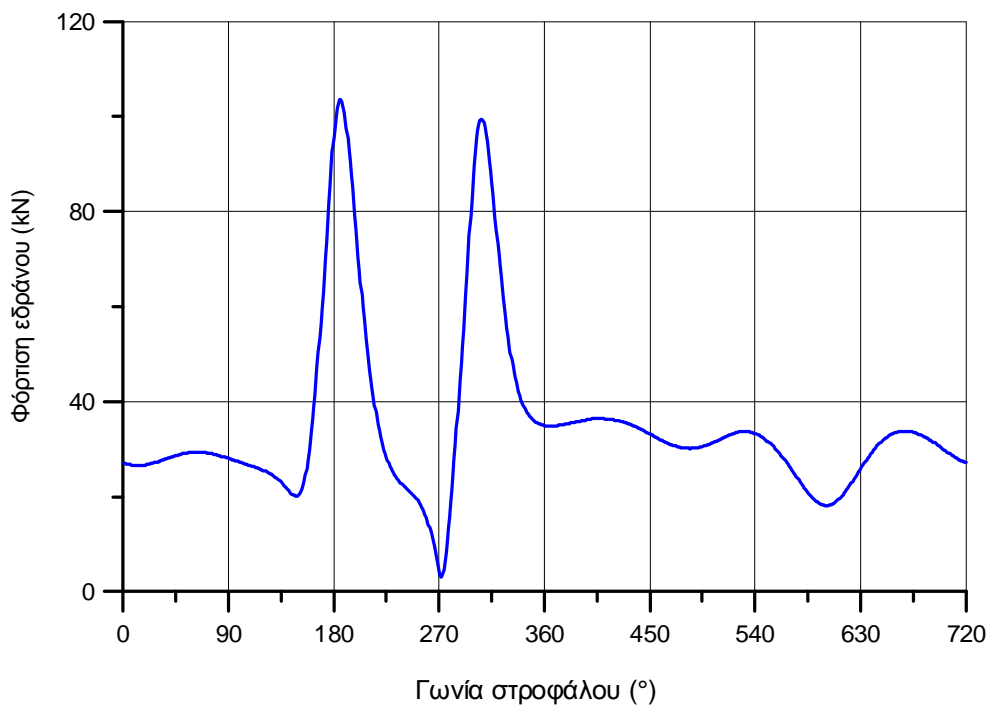


### Κινητήρας V90° Κομβίο & έδρανο βάσεως



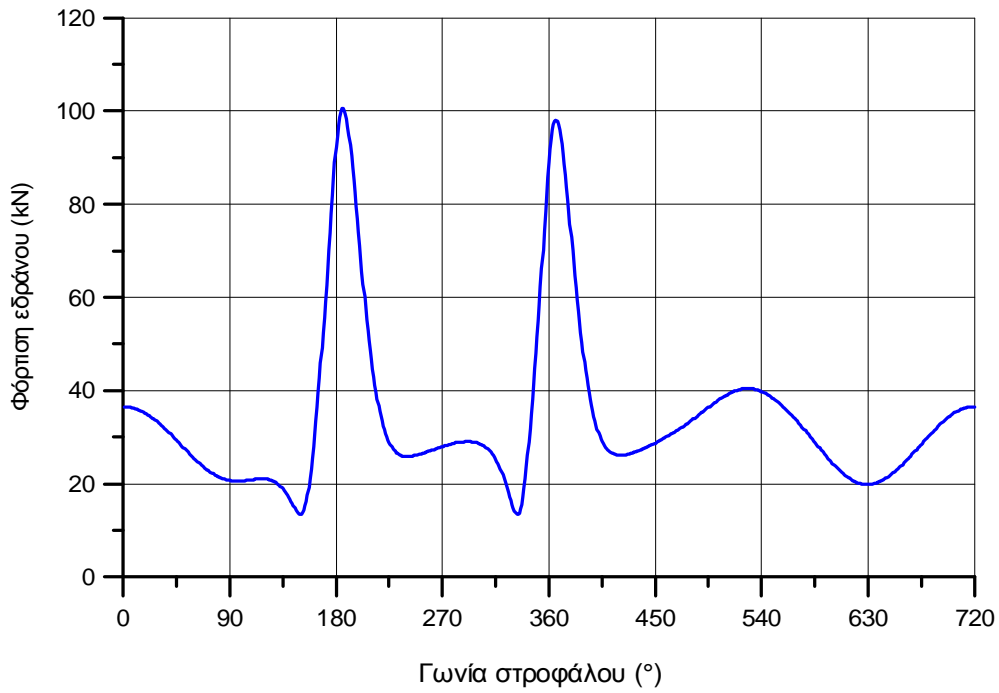
Σχήμα ΠΑ3δ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης κινητήρα V90°

### Κινητήρας V120° Κομβίο & έδρανο βάσεως



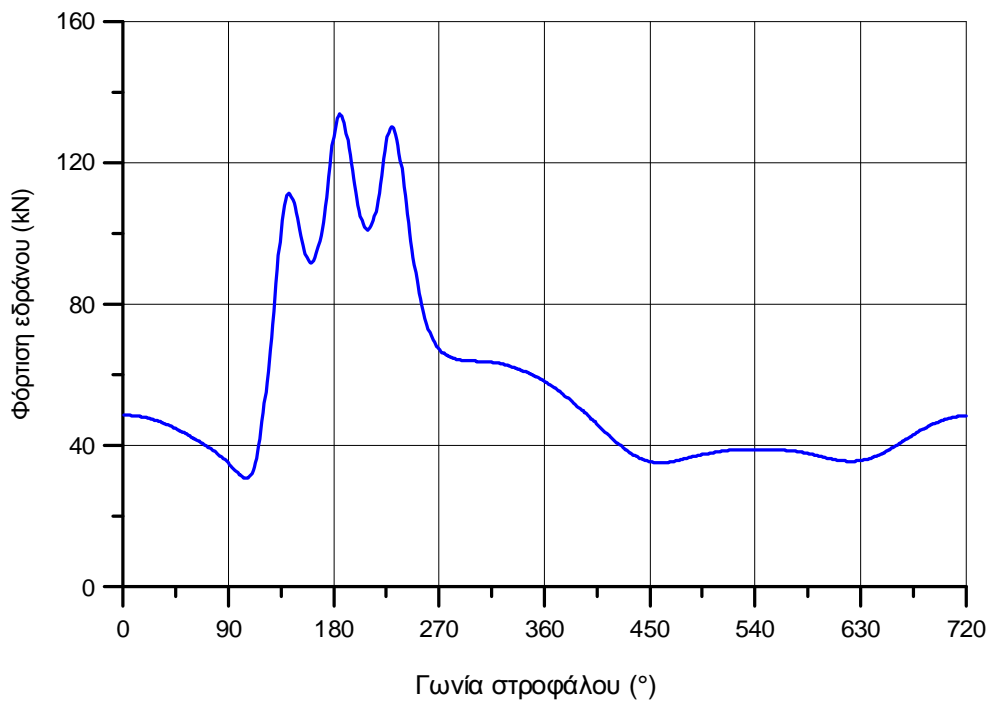
Σχήμα ΠΑ3ε – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης κινητήρα V120°

### Κινητήρας V180° Κομβίο & έδρανο βάσεως



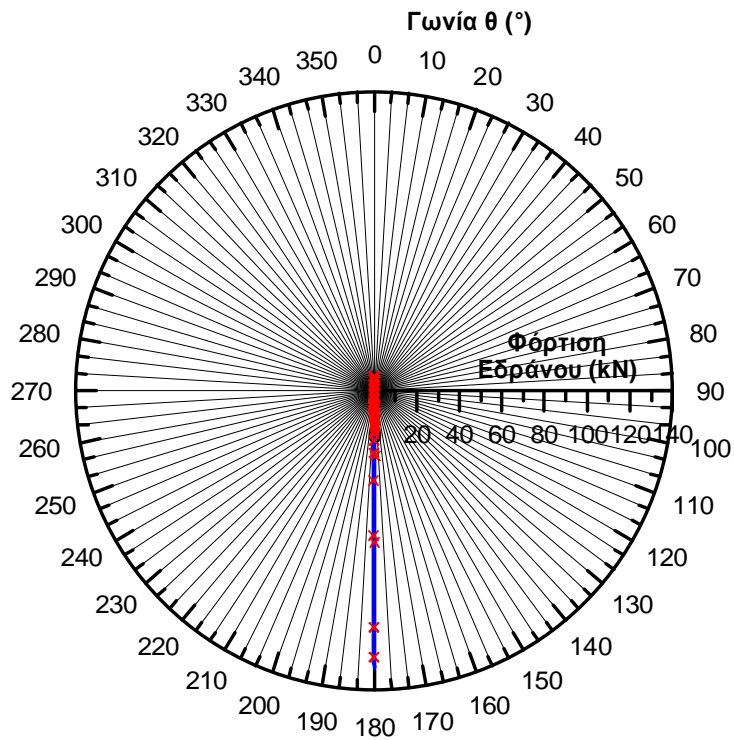
Σχήμα ΠΑ3στ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης κινητήρα V180°

### Κινητήρας W45° Κομβίο & έδρανο βάσεως



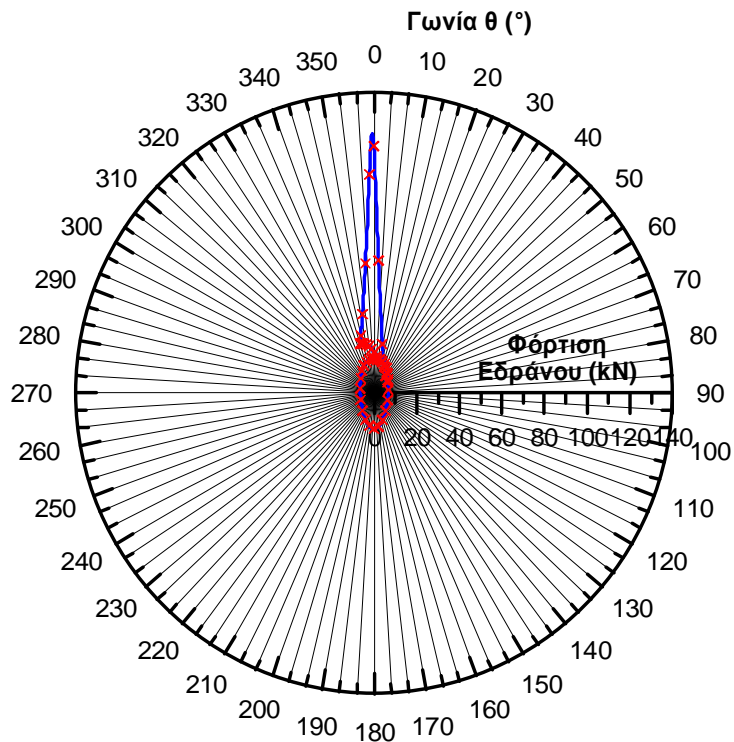
Σχήμα ΠΑ3ζ – Διάγραμμα καταπόνησης κομβίου & εδράνου βάσης κινητήρα W45°

**Κινητήρας V  
Έδρανο άνω κεφαλής διωστήρα**



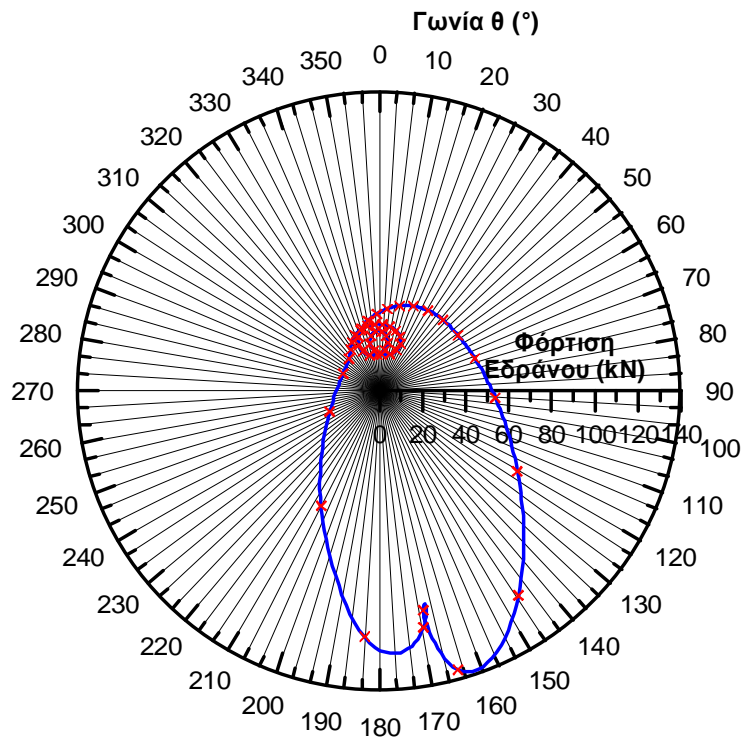
**Σχήμα ΠΑ4α** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου άνω κεφαλής διωστήρα κινητήρα V

**Έδρανο κάτω κεφαλής διωστήρα**



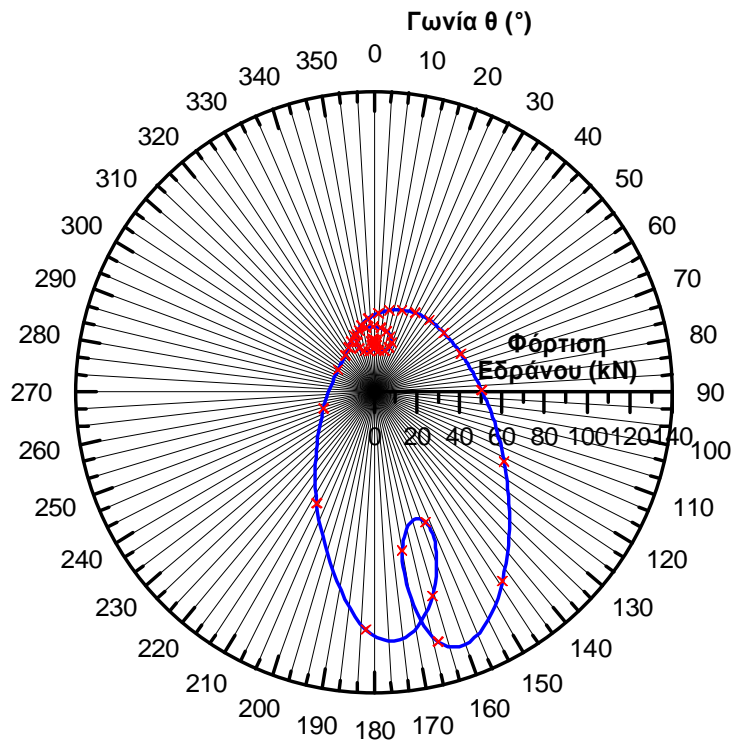
**Σχήμα ΠΑ4β** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου κάτω κεφαλής διωστήρα κινητήρα V

**Κινητήρας V45°  
Κομβίο στροφάλου**



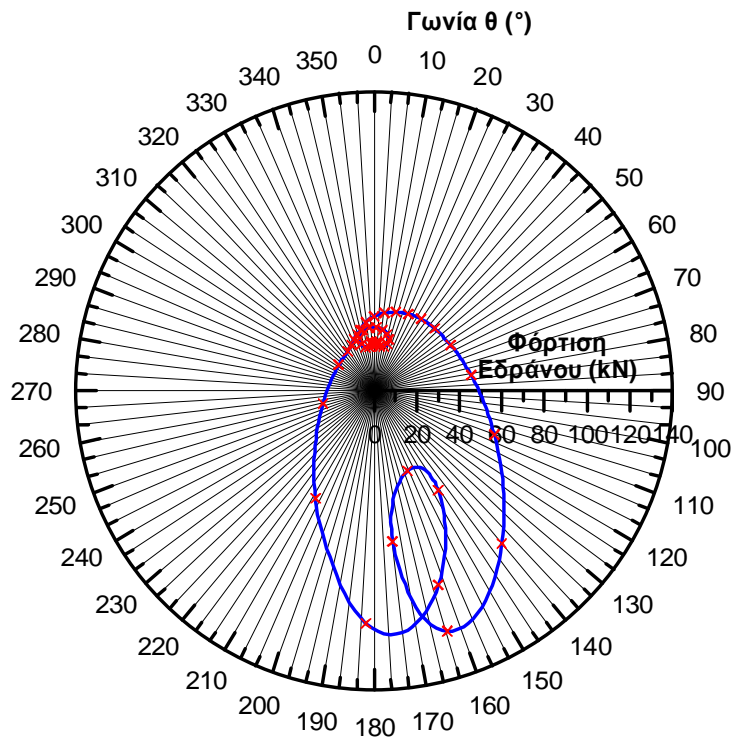
**Σχήμα ΠΑ5α** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V45°

**Κινητήρας V60°  
Κομβίο στροφάλου**



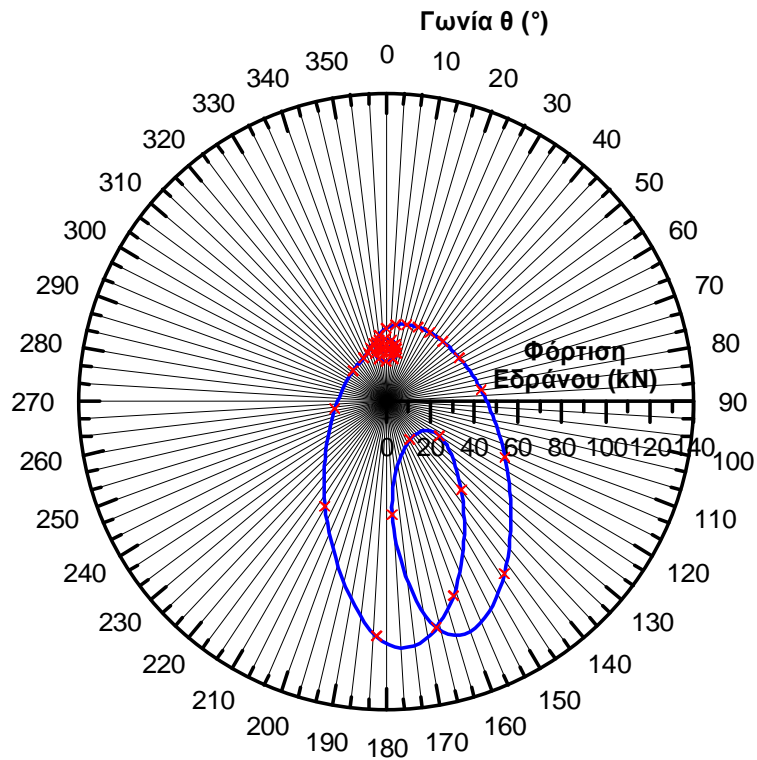
**Σχήμα ΠΑ5β** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V60°

**Κινητήρας V72°  
Κομβίο στροφάλου**



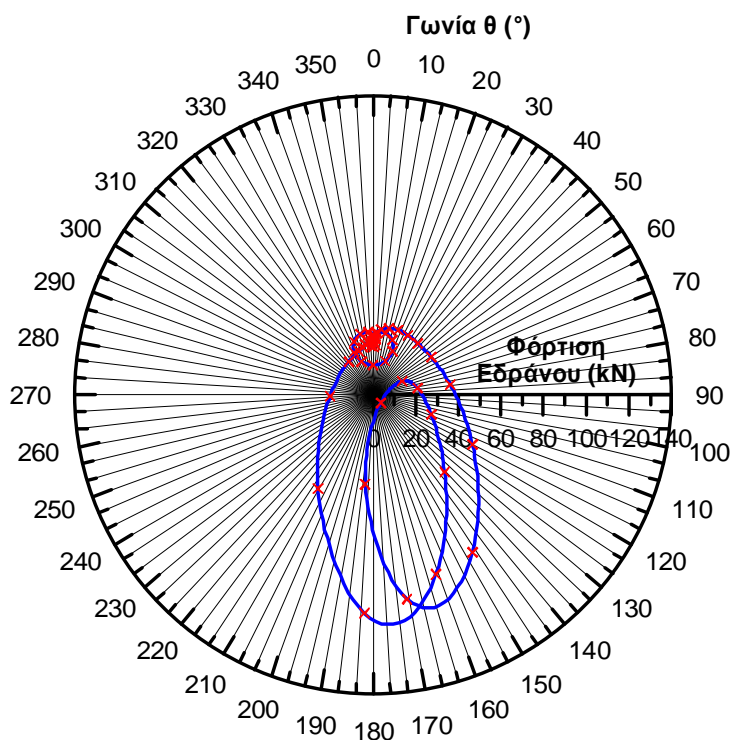
Σχήμα ΠΑ5γ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V72°

**Κινητήρας V90°  
Κομβίο στροφάλου**



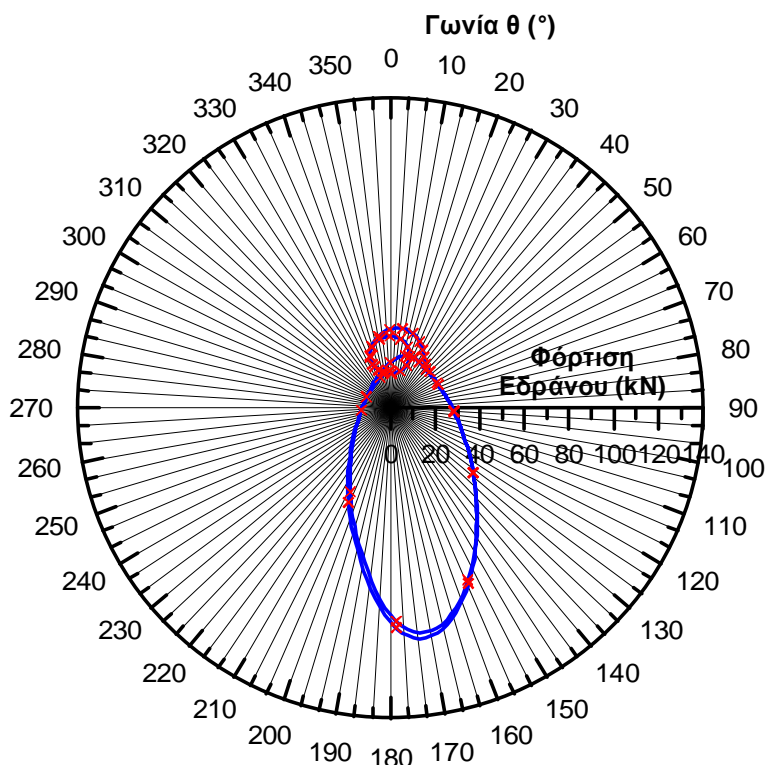
Σχήμα ΠΑ5δ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V90°

### Κινητήρας V120° Κομβίο στροφάλου



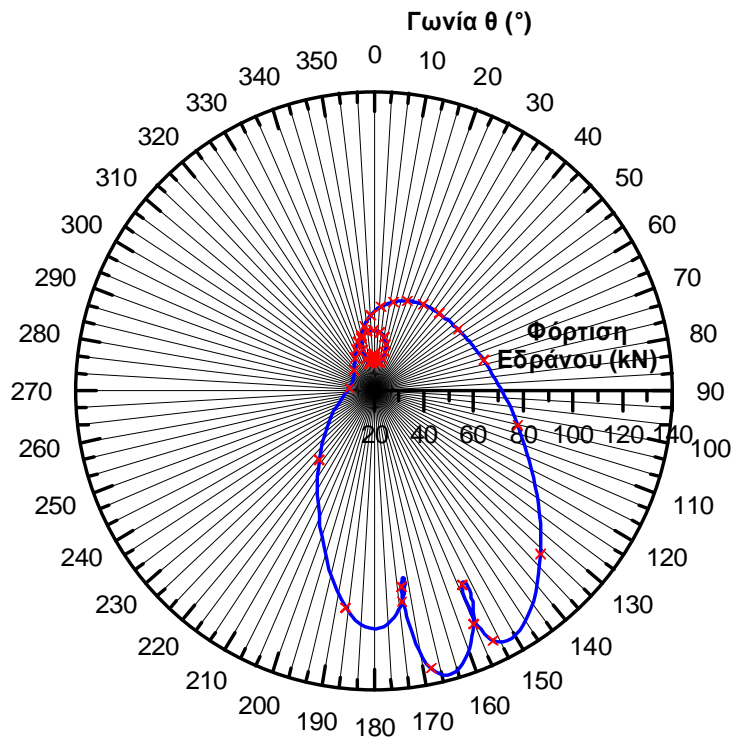
Σχήμα ΠΑ5ε – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V120°

### Κινητήρας V180° Κομβίο στροφάλου



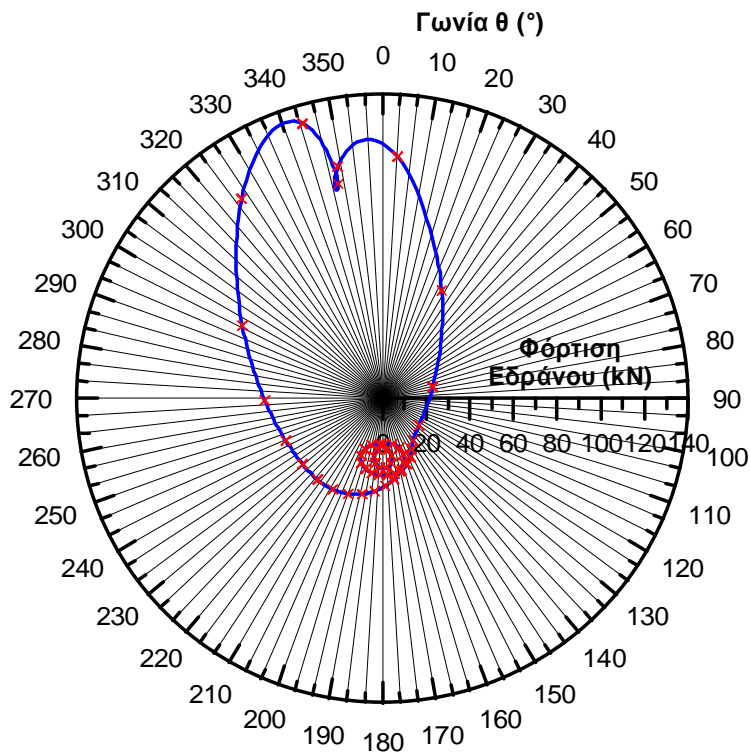
Σχήμα ΠΑ5στ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα V180°

**Κινητήρας W45°  
Κομβίο στροφάλου**



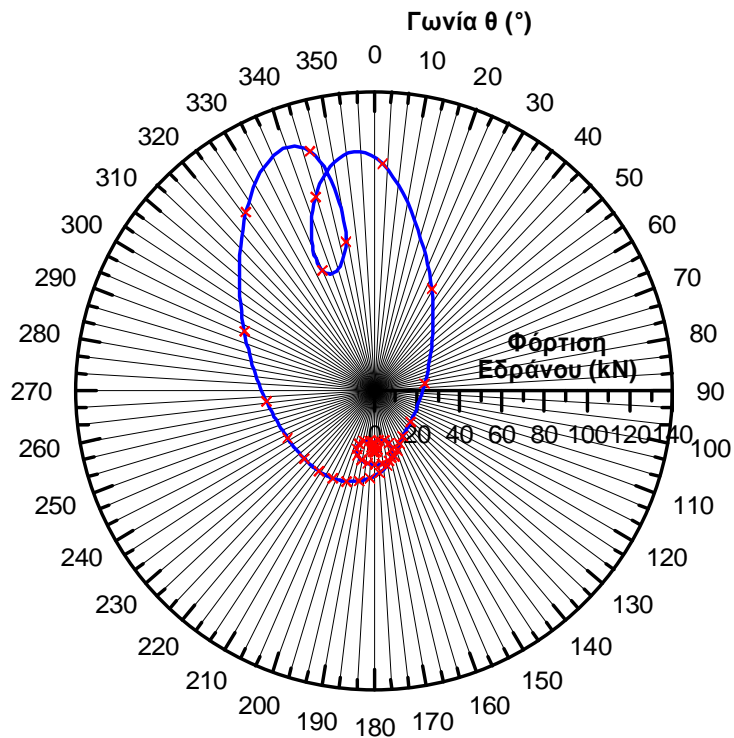
**Σχήμα ΠΑ5ζ** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου στροφάλου κινητήρα W45°

**Κινητήρας V45°  
Κομβίο βάσεως**



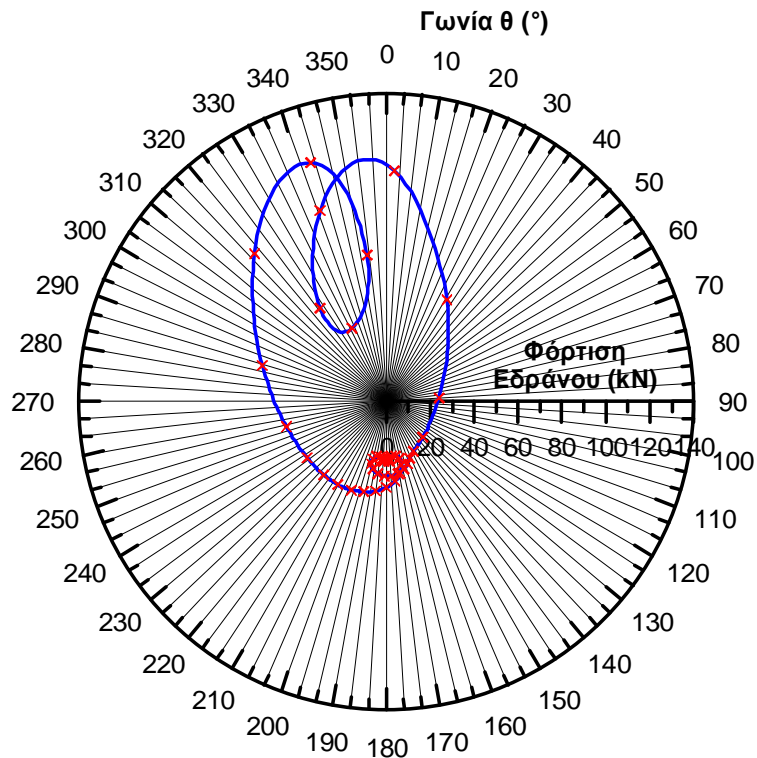
**Σχήμα ΠΑ6α** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης κινητήρα V45°

### Κινητήρας V60° Κομβίο βάσεως



Σχήμα ΠΑ6β – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης κινητήρα V60°

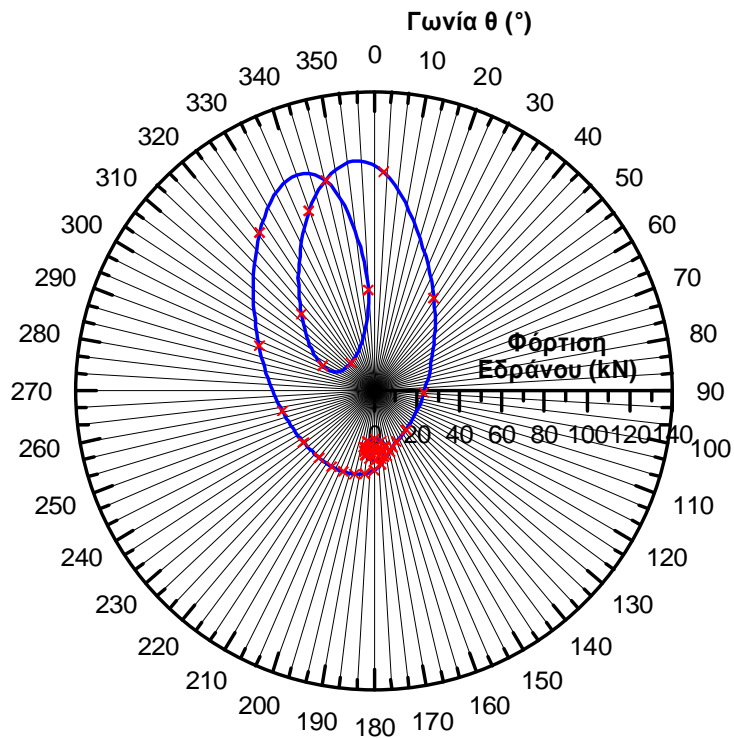
### Κινητήρας V72° Κομβίο βάσεως



Σχήμα ΠΑ6γ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης κινητήρα V72°

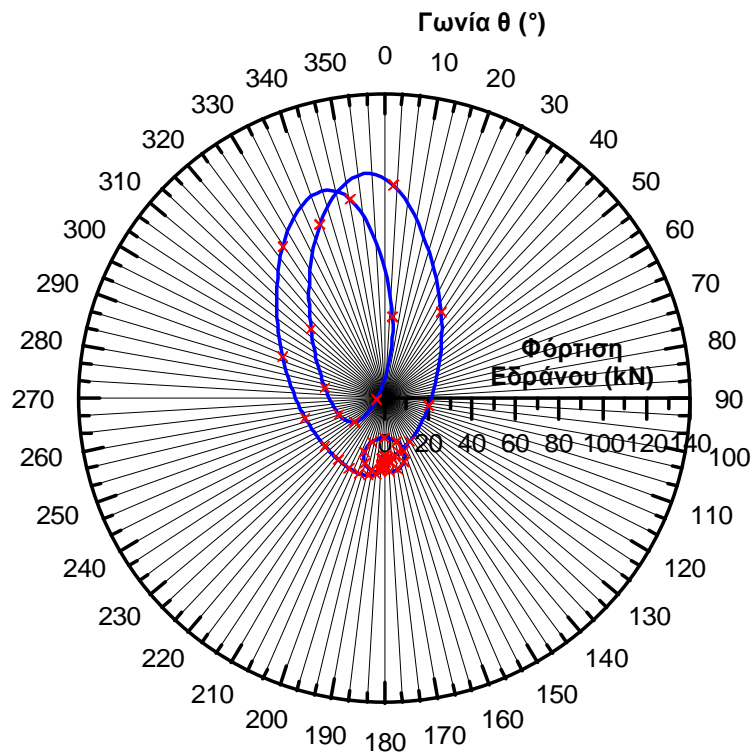


**Κινητήρας V90°  
Κομβίο βάσεως**



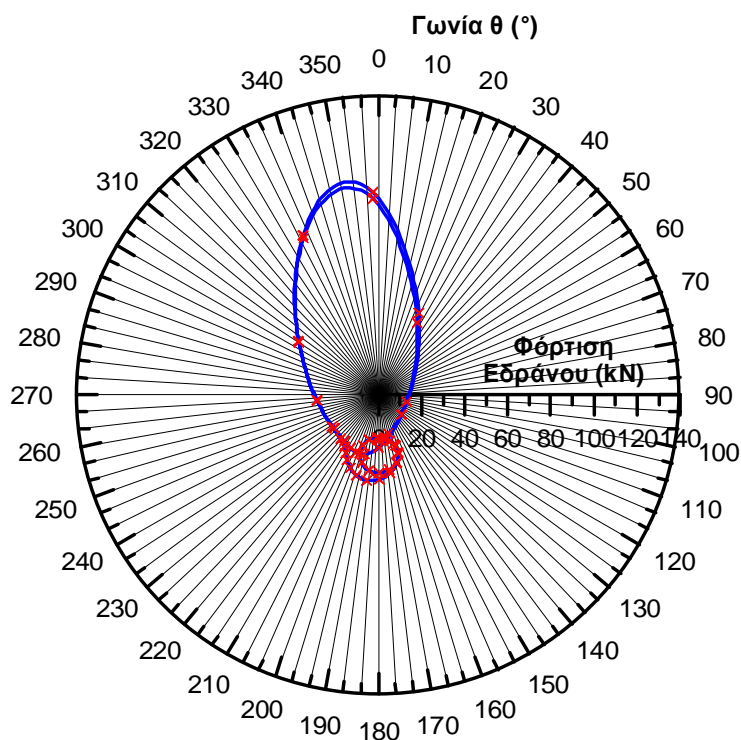
**Σχήμα ΠΑ6δ** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης κινητήρα V90°

**Κινητήρας V120°  
Κομβίο βάσεως**



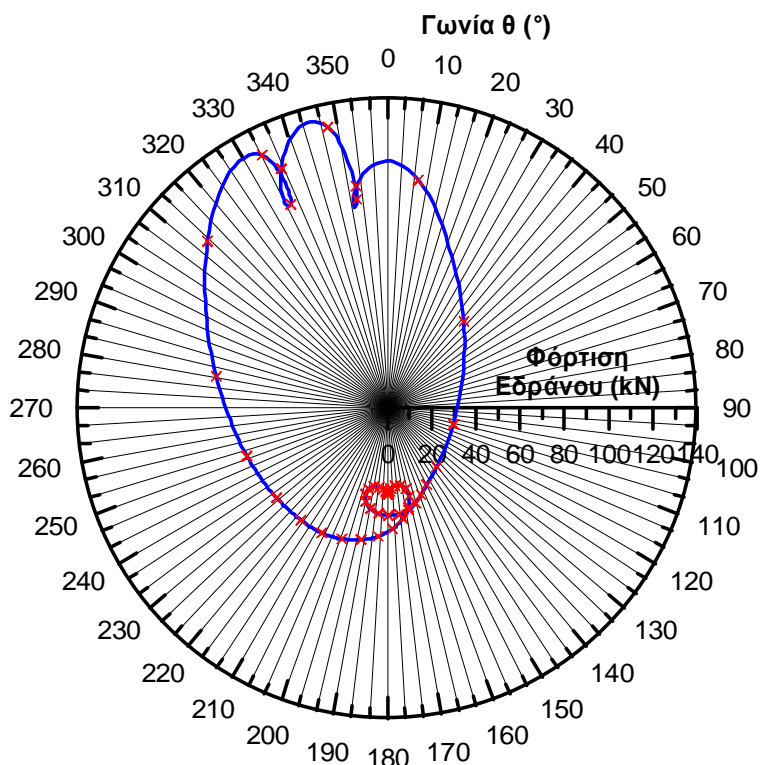
**Σχήμα ΠΑ6ε** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης κινητήρα V120°

### Κινητήρας V180° Κομβίο βάσεως



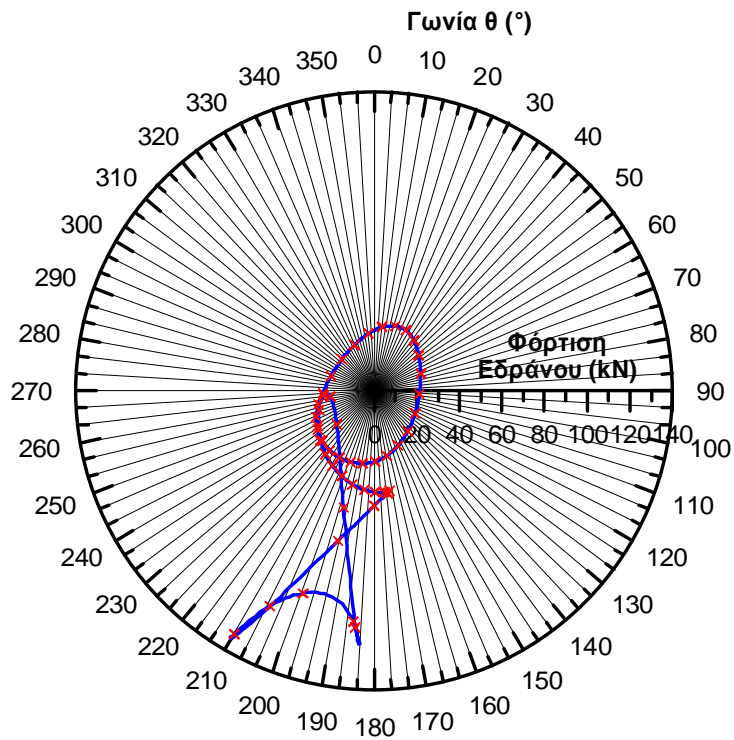
Σχήμα ΠΑ6στ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης κινητήρα V180°

### Κινητήρας W45° Κομβίο βάσεως



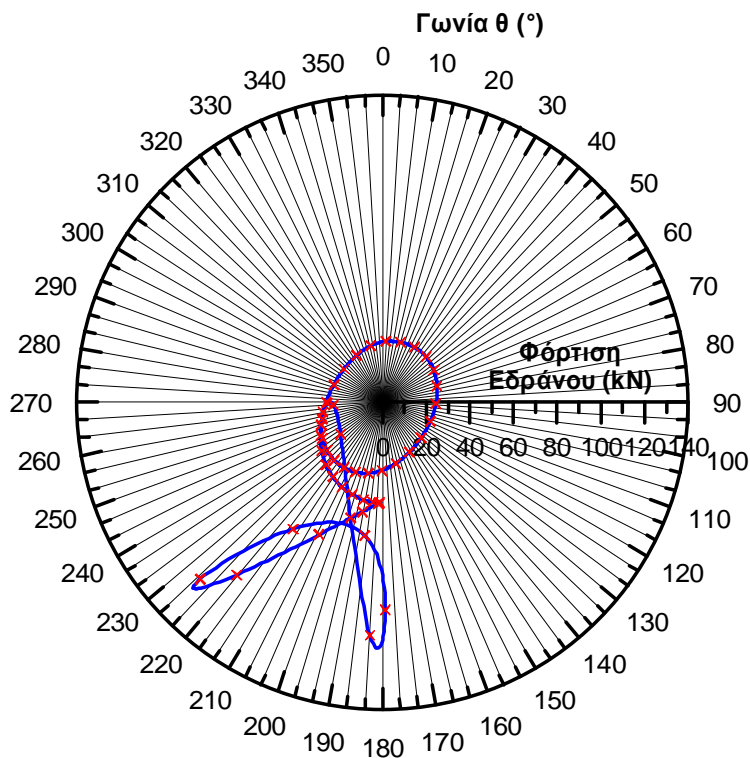
Σχήμα ΠΑ6ζ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης κομβίου βάσης κινητήρα W45°

**Κινητήρας V45°  
Έδρανο βάσεως**



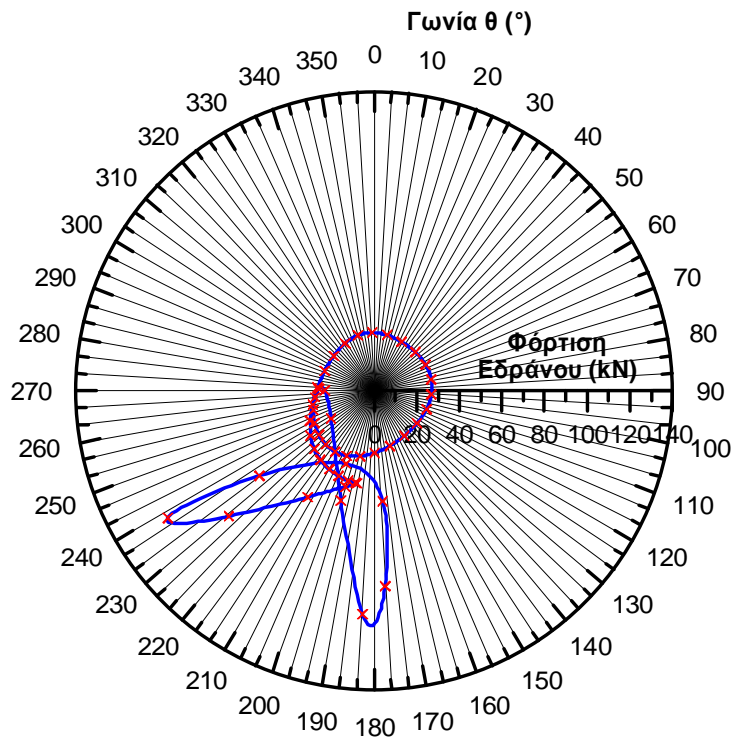
**Σχήμα ΠΑ7α** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης κινητήρα V45°

**Κινητήρας V60°  
Έδρανο βάσεως**



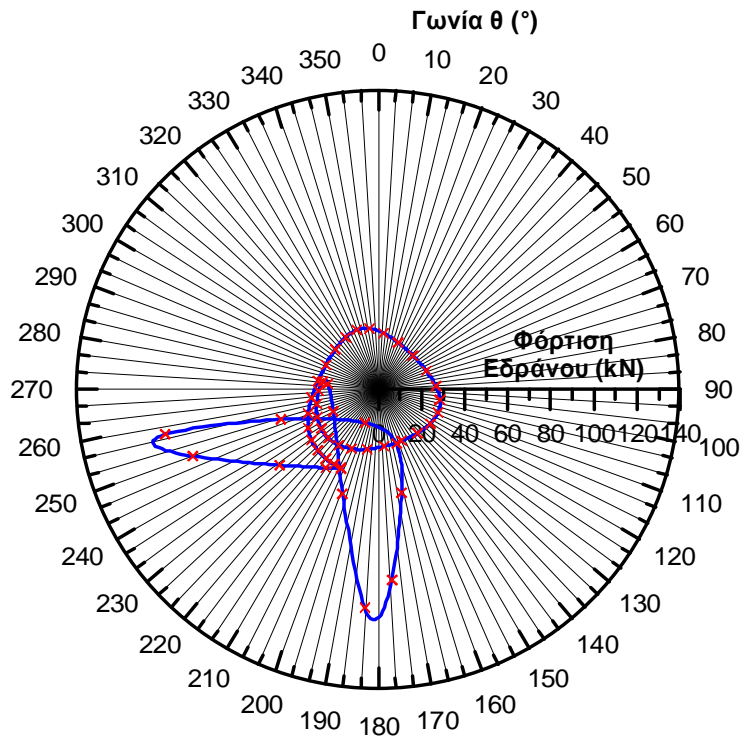
**Σχήμα ΠΑ7β** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης κινητήρα V60°

**Κινητήρας V72°  
Έδρανο βάσεως**



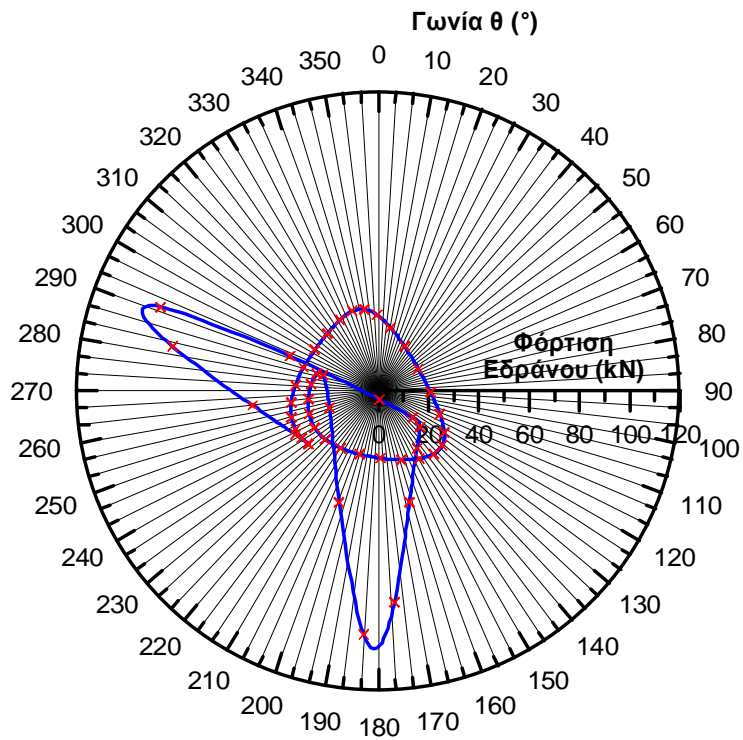
**Σχήμα ΠΑ7γ** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης κινητήρα V72°

**Κινητήρας V90°  
Έδρανο βάσεως**



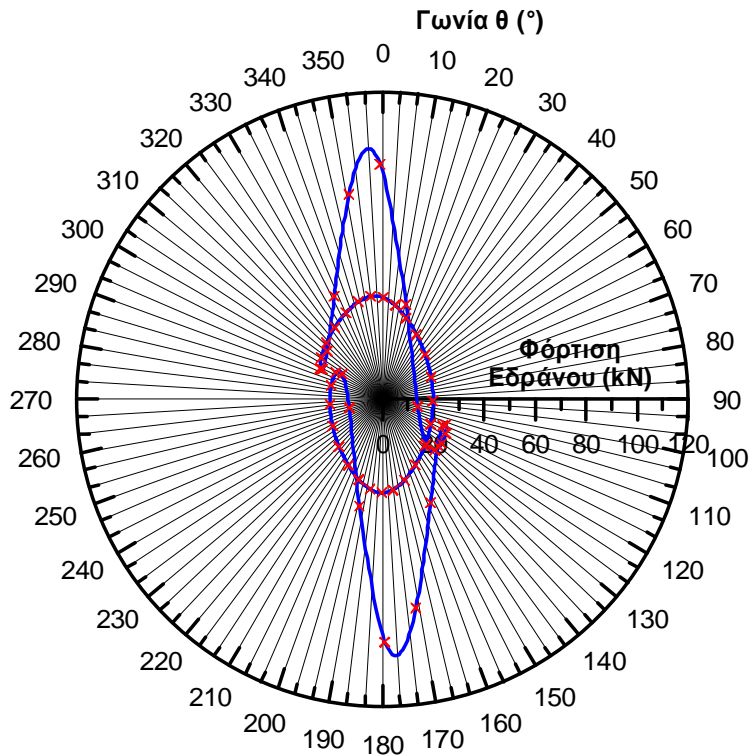
**Σχήμα ΠΑ7δ** – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης κινητήρα V90°

**Κινητήρας V120°  
Έδρανο βάσεως**



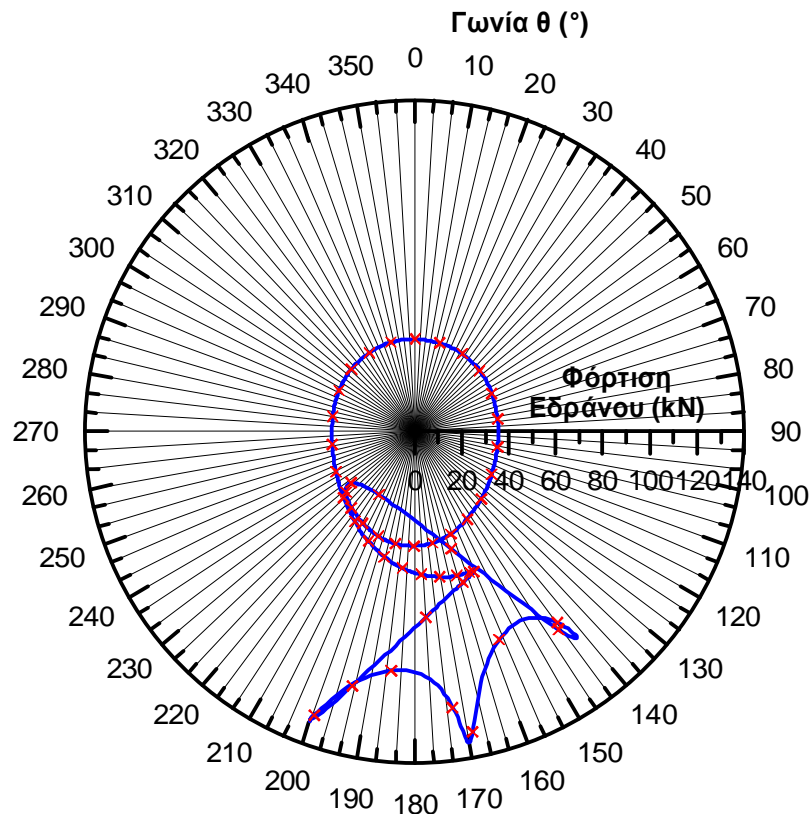
Σχήμα ΠΑ7ε – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης κινητήρα V120°

**Κινητήρας V180°  
Έδρανο βάσεως**



Σχήμα ΠΑ7στ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης κινητήρα V180°

## Κινητήρας W45° Έδρανο βάσεως



Σχήμα ΠΑ7ζ – Πολικό διάγραμμα καταπόνησης εδράνου βάσης κινητήρα W45°

Παραθέσαμε τα γραμμικά και πολικά διαγράμματα των κινητήρων διάταξης V και W, κατά σειρά εδράνου. Για την άνω και κάτω κεφαλή διωστήρα, τα διαγράμματα είναι προφανώς κοινά για όλους τους τύπους. Αναλυτικά συμπεράσματα σχετικά με τη μορφή που παρουσιάζουν τα παραπάνω, έχουν δοθεί στις προηγούμενες ενότητες σχετικά με τα συγκριτικά διαγράμματα κινητήρων.

Επιπλέον, γίνονται πιο εμφανείς οι διαφορές του κινητήρα W45° σε σχέση με τους κινητήρες V, με πρωταρχική διαφορά ότι τα διαγράμματά του παρουσιάζουν τρεις κορυφές, λόγω του επιπλέον κυλίνδρου που αρθρώνεται στο στρόφαλο. Οι τελευταίες φαίνονται καθαρά τόσο στα γραμμικά διαγράμματα του κινητήρα (Σχήματα ΠΑ2ζ και ΠΑ3ζ) όσο και στα πολικά (Σχήματα ΠΑ5ζ, ΠΑ6ζ, ΠΑ7ζ), στο τελευταίο μέρος του παραρτήματος.

## Βιβλιογραφία

- 1) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1988), «**Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική**», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Κ. Δ. Ρακόπουλος (2000), «**Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία**», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 3) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1994) «**Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης**», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 4) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009) «**Diesel engine transient operation**», Springer, London.
- 5) Ε. Γ. Γιακουμής (1997) «**Μεταβατική κατάσταση λειτουργίας κινητήρων diesel**», Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.