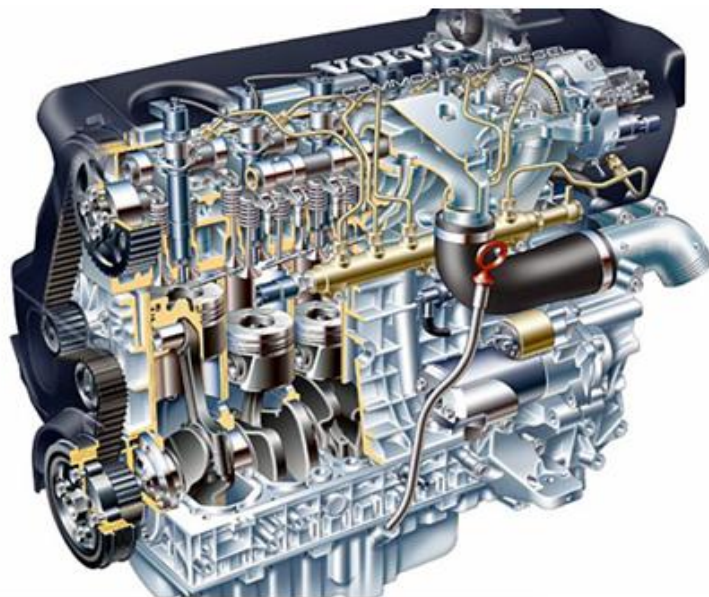




**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών**  
**Τομέας Θερμότητας**

**Διπλωματική Εργασία**

**Ανάλυση Εναλλακτικών Κινηματικών Μηχανισμών Εμβόλου –  
Διωστήρα –Στροφάλου (εκκεντρότητα πείρου εμβόλου και κομβίου  
βάσης)**



**Βελισσάριος . Λ . Αργύρης**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Ε . Γ . Γιακουμής, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ , ΙΟΥΛΙΟΣ 2011**

## Πρόλογος

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επικ. Καθηγητή κύριο Ευάγγελο Γιακουμή για την ανάθεση του θέματος και για την συνεχή και πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης αυτής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το καθηγητή κύριο Κ. Ρακόπουλο και τον καθηγητή κύριο Δ. Χουντάλα, οι οποίοι συνδιδάσκουν τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Η διδασκαλία τους μου κίνησε το ενδιαφέρον για την παραιτέρω ενασχόληση μου με την μελέτη των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης.*

## ΣΥΜΒΟΛΑ

$\varphi$	: Γωνία Στροφάλου, μετρούμενη από ΑΝΣ, (μοίρες)
$\varphi_0$	: Αρχική Γωνία Στροφάλου, μετρούμενη από ΑΝΣ, (μοίρες)
$\theta$	: Τελική Γωνία Στροφάλου, μετρούμενη από ΑΝΣ, (μοίρες)
$\beta$	: Γωνία Διωστήρα, (μοίρες)
$\beta_0$	: Αρχική Γωνία Διωστήρα, (μοίρες)
$\beta_{\tau\epsilon\lambda}$	: Τελική Γωνία Διωστήρα, (μοίρες)
$\omega$	: Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής, (rad/sec)
$N$	: Στροφές Μηχανής, (rpm)
$\lambda$	: Σταθερά
$\delta$	: Εκκεντρότητα (ανηγμένη στην ακτίνα στροφάλου)
$off$	: Εκκεντρότητα, (m)
$r$	: Ακτίνα Στροφάλου, (m)
$L$	: Μήκος Διωστήρα, (m)
$x$	: Μετατόπιση Εμβόλου από το ΑΝΣ (m)
$c$	: Ταχύτητα Εμβόλου, (m/sec)
$b$	: Επιτάχυνση Εμβόλου, (m/sec <sup>2</sup> )
$m_{\delta l}$	: Παλινδρομούσα μάζα διωστήρα, (kgr)
$m_{\delta r}$	: Περιστρεφόμενη μάζα Διωστήρα, (kgr)
$m_{\delta}$	: Μάζα Διωστήρα, (kgr)
$m_{\epsilon}$	: Μάζα Εμβόλου, (kgr)
$m_r$	: Περιστρεφόμενη μάζα Διωστήρα, (kgr)
$\theta$	: Ροπή Αδρανείας, (Kgr m <sup>2</sup> )
$\theta_{\delta}$	: Ροπή Αδρανείας Διωστήρα (Kgr m <sup>2</sup> )
$F$	: Διατομή Εμβόλου, (m <sup>2</sup> )
$p_g$	: Πίεση Εξ' Αερίων, (bar)
$P_g$	: Δύναμη Εξ' Αερίων, (N)
$N_g$	: Δύναμη Παρειάς / Πλευρική Δύναμη Κυλίνδρου Εξ' Αερίων, (N)
$S_g$	: Δύναμη Διωστήρα, (N)
$T_g$	: Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου Εξ' Αερίων, (N)
$R_g$	: Ακτινική Δύναμη Εξ' Αερίων, (N)
$M_{\sigma g}$	: Στρεπτική Ροπή Εξ' Αερίων, (Nm)
$P_l$	: Δύναμη λόγω Μαζικών Δυνάμεων, (N)
$N_l$	: Παλινδρομική Δύναμη Παρειάς Κυλίνδρου, (N)
$S_l$	: Παλινδρομική Δύναμη Διωστήρα, (N)
$T_l$	: Παλινδρομική Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου, (N)
$R_l$	: Παλινδρομική Ακτινική Δύναμη Στροφάλου, (N)
$M_{\sigma l}$	: Στρεπτική Ροπή λόγω Παλινδρομικών δυνάμεων, (Nm)
$P_r$	: Περιστρεφόμενη Μαζική Δύναμη, (N)

$P_{tot}$	: Ολική Δύναμη, (N)
$N_{tot}$	: Ολική Δύναμη Παρειάς, (N)
$S_{tot}$	: Ολική Δύναμη Διωστήρα, (N)
$T_{tot}$	: Ολική Στρεπτική Δύναμη, (N)
$R_{tot}$	: Ολική Ακτινική Δύναμη, (N)
$M_{tot}$	: Ολική Ροπή, (Nm)
$M_{ag}$	: Ροπή Ανατροπής, (Nm)

# Πίνακας Περιεχομένων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΚΑΤΑΤΑΞΗ – ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΕΚ – ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ

1.1	Κατάταξη και σύντομη ανάπτυξη λειτουργίας.....	1
1.2	Γενική κατάταξη ΜΕΚ.....	3

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

2.1	Οι παράγοντες που οδήγησαν στην μελέτη και εφαρμογή της εκκεντρότητας πείρου εμβόλου και κομβίου βάσης στις μηχανές	5
2.1.1	Πως επιδρά η εκκεντρότητα (offset) στις απώλειες τριβής στη μηχανή και στη κατανάλωση καυσίμου.....	6
2.1.2	Πως επιδρά η εκκεντρότητα (offset) στη μηχανική απόδοση , στο θόρυβο και στις δονήσεις της μηχανής .....	7

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑ ΠΕΙΡΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ

3.1	Κινηματική ανάλυση εκκεντρότητας πείρου εμβόλου. (PISTON PIN OFFSET).....	9
3.2	Η Ταχύτητα του εμβόλου $c$ .....	19
3.3	Η επιτάχυνση του εμβόλου $b$ .....	19

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΔΥΝΑΜΕΙΣ

4.1	Μαζικές Δυνάμεις.....	20
4.2	Δυνάμεις κινηματικού μηχανισμού.....	24
4.2.1	Δυνάμεις από Αέρια.....	24
4.2.2	Παλινδρομικές Μαζικές Δυνάμεις.....	30
4.2.3	Περιστροφικές Μαζικές Δυνάμεις.....	32

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑ ΚΟΜΒΙΟΥ ΒΑΣΗΣ

5.1	Κινηματική Ανάλυση εκκεντρότητας κομβίου βάσης.....	33
5.2	Υπολογισμός Ταχύτητας $c$ .....	38
5.3	Υπολογισμός Επιτάχυνσης $b$ .....	38

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ ΚΟΜΒΙΟΥ ΣΤΡΟΦΑΛΟΥ

6.1	Μαζικές δυνάμεις .....	40
6.2	Δυνάμεις Κινηματικού Μηχανισμού.....	41
6.2.1	Δυνάμεις από Αέρια.....	41
6.2.2	Παλινδρομικές Μαζικές Δυνάμεις.....	42

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΤΕΛΑΣΜΑΤΑ

7.1	Διαγράμματα για Εκκεντρότητα πείρου - εμβόλου.....	45
7.1.1	Εφαρμογή εκκενρότητας για $off=0mm$ , $off=3mm$ , $off=10mm$ .....	45
7.1.2	Εκκενρότητα Πείρου Εμβόλου – Παραμετρική Ανάλυση.Επίδραση ταχύτητας περιστροφής .....	62
	Χωρίς Εκκενρότητα $Offset = 0$ .....	61
	Με Εκκενρότητα $3mm$ ( $Offset=3mm$ ).....	76
	Με Εκκενρότητα $10mm$ ( $Offset = 10mm$ ).....	91
7.1.3	Εκκενρότητα Πείρου Εμβόλου.Ανάλυση επίδρασης μεγέθους μαζών κινηματικού μηχανισμού.....	107
7.1.4	Εκκενρότητα Πείρου Εμβόλου –Παραμετρική Ανάλυση.Επίδραση μεγέθους μαζών κινηματικού μηχανισμού.....	123
	Για εκκενρότητα $Offset = 10mm$ .....	123
7.2	Διαγράμματα Εκκενρότητας Στροφάλου (Crank Pin Offset).....	138
7.2.1	Για εκκενρότητα $0mm$ , $3mm$ , $10mm$ .....	138
	Διαγράμματα Εκκενρότητας $0$ , $15$ , $60mm$ .....	154
7.2.2	Διαγράμματα Εφαρμογής Εκκενρότητας Στροφάλου – Παραμετρική Ανάλυση. Επίδραση ταχύτητας περιστροφής.....	169
	Για εκκενρότητα $offset= 10mm$ .....	169
7.2.3	Εκκενρότητα κομβίου στροφάλου.Ανάλυση επίδρασης μεγέθους μαζών κινηματικού μηχανισμού.....	184
7.3	Συμπεράσματα.....	215
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	217

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΚΑΤΑΤΑΞΗ – ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΕΚ – ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ

### 1.1 Κατάταξη και σύντομη ανάπτυξη λειτουργίας

**Ιστορική Εξέλιξη.** Για να εξαλειφθούν οι απώλειες των μηχανών εξωτερικής καύσης δηλαδή των ατμομηχανών αναπτύχθηκαν οι μηχανές Εσωτερικής Καύσης , όπου η καύση του καυσίμου γίνεται μέσα στον κύλινδρο , με συνέπεια την αύξηση της απόδοσης. Οι διάφορες κύριες προσπάθειες και η εξέλιξη δίνεται παρακάτω.

**1794 Street.** Αποτελεί την πρώτη σκέψη και προσπάθεια. Το καύσιμο ερχόταν με στάθμη σε κλίβανο εξωτερικά θερμαινόμενο , όπου καιγόταν με αέρα από αεραντλία. Η προέκταση του εμβόλου λειτουργούσε σαν αντλία νερού.

**1838 Barnett.** Πρότεινε τη συμπίεση του αέρα πριν από τη καύση.

**1862 Beau de Rochas.** Έθεσε τις βασικές αρχές των 4 φάσεων , όπως σήμερα , δηλ. τις βάσεις της οικονομικής λειτουργίας της μηχανής.

**1860-80 Langen.** Προσπάθειες κατασκευής μηχανής ελεύθερου εμβόλου.

**1838 Barnett και κυρίως 1862 Clerk.** Πρότειναν την κατασκευή δίχρονης μηχανής.

**1876 Otto.** Εμφάνιση πρώτης βενζινομηχανής , κύκλου λειτουργίας σταθερού όγκου, που ονομάστηκε Otto προς τιμή του εφευρέτη.

**1829-97 R. Diesel.** Κατασκεύασε την πρώτη πετρελαιομηχανή που λειτουργούσε με συμπίεση αέρα και έγχυση πετρελαίου με εμφύσηση, βαθμού απόδοσης  $\eta_e = 26,2\%$ ,  $L = 400\text{mm}$ ,  $D = 250\text{mm}$ ,  $P = 13.3 \text{ kW (17.8hp)}$ ,  $N = 154 \text{ rev/min}$ .

**1905 A. Buchi.** Πρόταση χρησιμοποίησης των καυσαερίων σε στροβιλοσυμπιεστή.

**1912.** Πρώτο Ωκεανοπόρο πλοίο Selandia με μηχανές B & W

**1924.** Κατασκευή από την Burmeister & Wain της πρώτης τετράχρονης, διπλής ενεργείας, μηχανής.

**1928 Μηχανική Έγχυση** και κατασκευή πρώτης υπερπληρούμενης τετράχρονης μηχανής από την MAN.

**1930** και μετά, οι εξελίξεις ήταν γρήγορες τόσο στο θερμικό, όσο και στο μεταλλουργικό τομέα.

**1957.** Κατασκευάστηκε ο περιστροφικός κινητήρας F. Wankel σε συνεργασία με τον οίκο NSU.

**Στις σύγχρονες κατασκευές η προσπάθεια επικεντρώνεται :**

1. Στην ελάττωση του βάρους ανά ίππο , ώστε οι μηχανές να πιάνουν λιγότερο χώρο. Αυτό σημαίνει και μικρότερο κόστος μηχανής.
2. Αύξηση της ιπποδύναμης ανά κύλινδρο, με παράλληλη μεταλλουργική βελτίωση , ώστε να ανταποκρίνονται στις μεγάλες καταπονήσεις λόγω πιέσεων και θερμοκρασιών.
3. Βελτίωση στην κατανάλωση ανά ίππο και ώρα , που σημαίνει αύξηση της απόδοσης της μηχανής με :
  - A. Βελτιωμένα συστήματα σάρωσης , υπερπλήρωσης
  - B. Βελτιωμένα συστήματα έγχυσης
  - Γ. Με χρήση πολύ βαρέος πετρελαίου φθηνής προμήθειας
  - Δ. Με χρήση μηχανών Super Long Stroke δηλαδή μηχανές όπου η διαδρομή του εμβόλου είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο του.
  - Ε. Με μεγάλη εκμετάλλευση των απωλειών θερμότητας (αερίων και νερού ψύξης)
  - Ζ. Λειτουργία μηχανών σε χαμηλά φορτία για την πρόωση
  - Η. Πειραματισμό για λειτουργία μηχανών με νέας μορφής καύσιμα(π.χ βιοκαύσιμα) οικονομικότερα και φιλικότερα προς το περιβάλλον.



**1.2 Γενική κατάταξη ΜΕΚ.** Είναι η παρακάτω ανάλογα με :

**Τον θερμικό κύκλο.** 1) Μηχανές σταθερού όγκου (Otto-βενζινομηχανές)

2) Σταθερής πίεσης ( R. Diesel)

3) Μικτού Κύκλου (ταχύστροφες και υπερπληρούμενες πετρελαιομηχανές).

**Την πλήρωση με αέρα** α) Φυσικής αναπνοής

β) Υπερπληρούμενες με αντλία αέρα ή με στροβιλοφουσητήρα.

**Τους χρόνους** 1) Δίχρονες 2) Τετράχρονες

**Την Διάταξη των εμβόλων** 1) Χωρίς Ζύγωμα (trunk piston )

2) Με Ζύγωμα (crosshead)

**Την Ισχύ** 1) Απλής, Διπλής ενέργειας 2) Μικρής, μέσης , μεγάλης ισχύος

**Τις Στροφές ή τη μέση ταχύτητα του εμβόλου**

1. Σταθερών ή μεταβλητών στροφών

2. α) Αργόστροφες προωστήριες 70-250στρ/λ  $\bar{c}_e=5,5$  m/sec (μέση ταχ εμβόλου)

β) Μεσόστροφες 300-900 « « = 6-9 m/sec

γ) ταχ/φες πετρ/νες 1000-4200 « « = 9-14 «

δ) « αυτοκινήτων 3500-5000 « « = 10,5-13,5 «

ε) « « αγώνων 5000-7000 και άνω « = 10-14,5 «

**Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο.** Οι μηχανές είναι:

A) Βαρέων πετρελαίων

B) Ελαφρών καυσίμων (πετρέλαιο ντίζελ) - αεριοθούμενων (jet fuel) - βενζίνη

Γ) Αεριομηχανές φυσικών ή τεχνικών αερίων

Δ) Πολλαπλών καυσίμων (Multi fuels)

Ε) Μικτού Καυσίμου (5 % πετρέλαιο , 95% αέριο)

Ο τρόπος χρησιμοποίησης καυσίμου είναι

1) Μηχανική έγχυση

2) Η Εξαέρωση (carburation)

**Τα μέσα βελτίωσης της καύσης.** Με ή χωρίς στροβιλισμό. Μεγάλης ή μικρής περιόδου αέρος.

**Την Ψύξη.** Αερόψυκτες ή υδρόψυκτες

**Την Διάταξη Κυλίνδρων.** Είναι :

1)Κατακόρυφη διάταξη 2) Διάταξη V 3) Διάταξη W 4) Διάταξη H 5)Αντιθέτων Κυλίνδρων 6) Αστεροειδείς (ενός αστέρα ή πολλών αστέρων) 7) Αντιθέτων εμβόλων 9) Περιστρεφόμενου εμβόλου (Wankel)

**Την Χρήση.** 1) Μηχανές ξηράς, 2) Προωστήριες θαλάσσης, 3) Αεροπορικοί κινητήρες

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

## **2.1 Οι παράγοντες που οδήγησαν στην μελέτη και εφαρμογή της εκκεντρότητας πείρου – εμβόλου και κομβίου βάσης στις μηχανές**

### **(Piston pin Offset , Crank Offset)**

Λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, έχουν θεσπιστεί αυστηροί κανονισμοί από την Ευρώπη και την Αμερική για την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και έχουν οδηγήσει την βιομηχανία και την ναυτιλία στην αναζήτηση εναλλακτικών μεθόδων μειωσής τους, με την κατανάλωση καυσίμου χαμηλής περιεκτικότητας θείου. Επίσης η αύξηση του κόστους του καυσίμου έχει αυξήσει τη ζήτηση στην αγορά για οχήματα χαμηλής κατανάλωσης

Έτσι, η σχέση απόδοσης μηχανής - κατανάλωσης καυσίμου έχει γίνει ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τους κατασκευαστές.

Μεταξύ των προσπαθειών για τη βελτίωση κατανάλωσης – οικονομίας καυσίμου στα οχήματα, αρκετές έρευνες έχουν διενεργηθεί στην ανάπτυξη – δημιουργία μιας υψηλής απόδοσης και χαμηλής κατανάλωσης μηχανής.

Σήμερα πλέον υπάρχει ενδιαφέρον, όχι μόνο για τις επιδόσεις της μηχανής αλλά επίσης και για την μείωση των εκπομπών σαν ένα αποτέλεσμα της καλύτερης και αποδοτικότερης κατανάλωσης καυσίμου, χρησιμοποιώντας συστήματα άμεσης έγχυσης βενζίνης (GDI), μεταβλητής ρύθμισης βαλβίδων (VVT) , μεταβλητής διαδρομής βαλβίδων (VVL) και άλλες τεχνολογίες .

### **2.1.1 Πως επιδρά η εκκεντρότητα (offset) στις απώλειες τριβής στη μηχανή και στη κατανάλωση καυσίμου.**

Γενικά, η μείωση των απωλειών τριβής θα βελτιώνει σημαντικά, αρχικά τον μηχανικό βαθμό απόδοσης και στη συνέχεια τον ολικό βαθμό απόδοσης άρα και την κατανάλωση καυσίμου της μηχανής. Παράλληλα θα μειώνονταν οι εκπομπές CO<sub>2</sub> αλλά και όλων των βλαβερών ρύπων.

Οι μηχανικές απώλειες εντοπίζονται στο σώμα του εμβόλου (ελατήρια,ποδιά), στα έδρανα της στροφαλοφόρου ατράκτου, στον εκκεντροφόρο άξονα καθώς και στις βοηθητικές συσκευές. Όπως έχει αποδειχθεί στο συγκρότημα του εμβόλου οι απώλειες λόγω τριβών κυμαίνονται σε ποσοστό 40 – 65% από τις οποίες το 40 – 50% εμφανίζονται στο σώμα του εμβόλου. Επίσης η τριβή είναι και η αιτία για την μείωση περίπου του 5% της ολικής ισχύς της μηχανής. Είναι αξιοσημείωτο ότι πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μια μείωση της μηχανικής τριβής κατά 10% θα βελτιώνει την οικονομία καυσίμου κατά 1 – 1,5% όταν η λειτουργία της μηχανής πραγματοποιείται σε χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ερευνητές να ασχοληθούν με την μελέτη και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, μία από τις οποίες είναι και η εφαρμογή εκκεντρότητας κομβίου στροφάλου (crank offset) ή πείρου εμβόλου (piston pin offset). Ωστόσο ελάχιστες μελέτες έχουν εστιάσει στην ανάπτυξη αυτής της νέας τεχνολογίας και τα αποτελέσματα από την επίδραση που έχει στην λειτουργία της μηχανής δεν έχουν μελετηθεί πλήρως. Αξιοσημείωτο βέβαια είναι ότι από τις ελάχιστες αυτές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, έχει αποδειχθεί ότι η οικονομία καυσίμου είναι βελτιωμένη κατά 3% με λειτουργία της μηχανής σε χαμηλή ταχύτητα και χαμηλό φορτίο.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επίτευξη του βέλτιστου μεγέθους εκκεντρότητας εξαρτάται πάντα από τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.

### **2.1.2 Πως επιδρά η εκκεντρότητα (offset) στη μηχανική απόδοση , στο θόρυβο και στις δονήσεις της μηχανής.**

Ένας ακόμη λόγος χρήσης εκκεντροτήτων είναι ότι με εφαρμογή μιας εκκεντρότητας στροφάλου ή πείρου εμβόλου μπορούμε να επιτύχουμε χαμηλό επίπεδο θορύβου και χαμηλή διέγερση δονήσεων.

Ο κύριος λόγος για την εμπορική επιτυχία μιας μηχανής Diesel είναι η συνολική ανώτερη απόδοση της σε σύγκριση με μια βενζινομηχανή. Ωστόσο σε αντίθεση με την βενζινομηχανή , η πετρελαιομηχανή λειτουργεί σε υψηλότερες /ακραίες τιμές πιέσεων ( peak pressure), σε υψηλότερους ρυθμούς αύξησης πίεσης και με μεγαλύτερες πλευρικές δυνάμεις, που έχει σαν αποτέλεσμα την θορυβότερη λειτουργία. Υπάρχουν δύο τύποι προέλευσης θορύβου σε μια πετρελαιομηχανή, ο θόρυβος που προκαλείται από την καύση και ο μηχανικός θόρυβος.

Ο θόρυβος που παράγεται από την καύση είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της ταχέως αύξησης της πίεσης στο θάλαμο καύσης.

Ο μηχανικός θόρυβος οφείλεται στην κρούση (“ σκαμπίλισμα”) του εμβόλου στο τοίχωμα αμέσως μετά το ΑΝΣ και το ΚΝΣ ( piston slap impact) , από τον κρότο των γραναζιών χρονισμού (timing gear), από τους κρότους των κουζινέτων (bearing impacts), από το σύστημα λειτουργίας εγχύσης πετρελαίου, το σύστημα των βαλβίδων και από κρότους διαφόρων άλλων εξαρτημάτων. Μεταξύ αυτών των πηγών προέλευσης , ο θόρυβος και η δόνηση (vibration) εξαιτίας του κτύπου του εμβόλου στο παράπλευρο τοίχωμα είναι ο πιο σημαντικός.

Η αντιμετώπιση του θορύβου καύσης γίνεται με την κατάλληλη τροποποίηση του αρχικού τμήματος της διεργασίας της καύσης (καθυστέρηση ανάφλεξης) έτσι ώστε να μειωθεί η απότομη αύξηση της πίεσης του αερίου (π.χ καύσιμα με υψηλότερο αριθμό κετανίου,καθυστέρηση της έναρξης έγχυσης, κ.ο.κ.)

Στο μηχανικό θόρυβο η διέγερση από την ολίσθηση του εμβόλου είναι η πιο σημαντική αιτία/πηγή προέλευσης μηχανικού θορύβου και δόνησης στην πετρελαιομηχανή και προκαλείται όποτε η πλευρική δύναμη του εμβόλου αλλάζει μέγεθος και διεύθυνση (πέριξ των νεκρών σημείων).

Σαν αποτέλεσμα της αλλαγής διεύθυνσης, οι δυνάμεις στο διωστήρα αλλάζουν σε μέγεθος και διεύθυνση λόγω της συμπίεσης και αντίστροφα , ενώ στο ΑΝΣ και στο ΚΝΣ η συνιστώσα στο διωστήρα είναι κάθετη στο άξονα αυτού.

Από μελέτες έχει αποδειχθεί ότι όταν η εκκεντρότητα πείρου εμβόλου (piston pin offset) κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών ανάλογα με τα κινηματικά χαρακτηριστικά της μηχανής, η απώλεια της κινητικής ενέργειας είναι ελάχιστη, ενώ για εκκεντρότητα πείρου εμβόλου μεγαλύτερη από την ανώτερη τιμή του εύρους, η

απώλεια της κινητικής ενέργειας είναι υψηλή και στην περίπτωση αυτή η περιοχή ονομάζεται **περιοχή αδρανείας για την εκκεντρότητα του πείρου εμβόλου**.

Γενικά έχει βρεθεί ότι η απώλεια της κινητικής ενέργειας μειώνεται όταν :

α) Η εκκεντρότητα του στροφάλου (crank offset) τοποθετηθεί στη πλευρά ώθησης (thrust side)

β) Η εκκεντρότητα πείρου εμβόλου (piston pin offset) τοποθετηθεί επίσης στην πλευρά ώθησης.

γ) Η εκκεντρότητα του κέντρου βάρους (center of gravity offset) είναι αδρανής στην απώλεια της Κινητικής Ενέργειας.

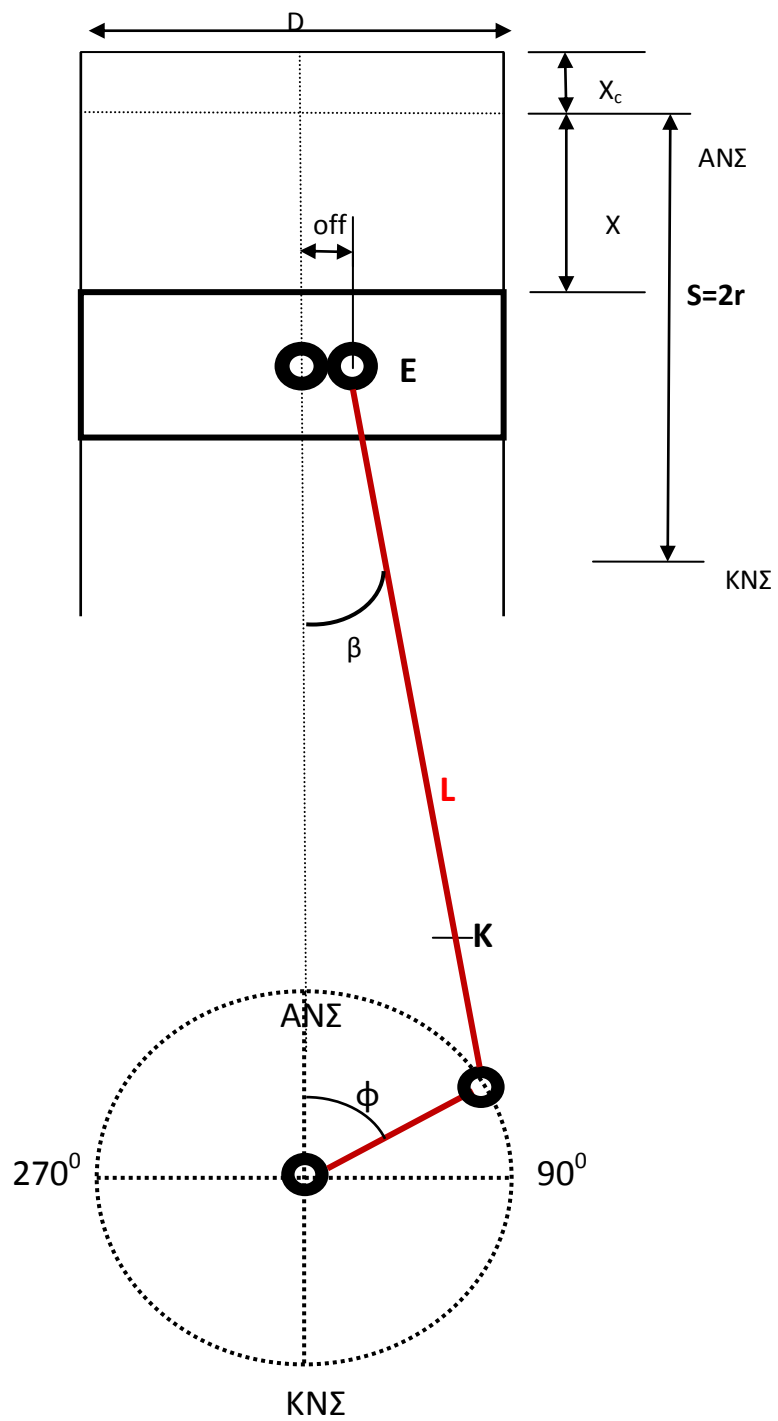
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## Εκκεντρότητα πείρου εμβόλου

### **3.Κινηματική ανάλυση εκκεντρότητας πείρου εμβόλου (PISTON PIN OFFSET)**

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η κινηματική ανάλυση ενός μηχανισμού με εφαρμογή εκκεντρότητας πείρου εμβόλου, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 και στο οποίο η εκκεντρότητα αποτυπώνεται γραφικά με την μετατόπιση της θέσης του πείρου εμβόλου.

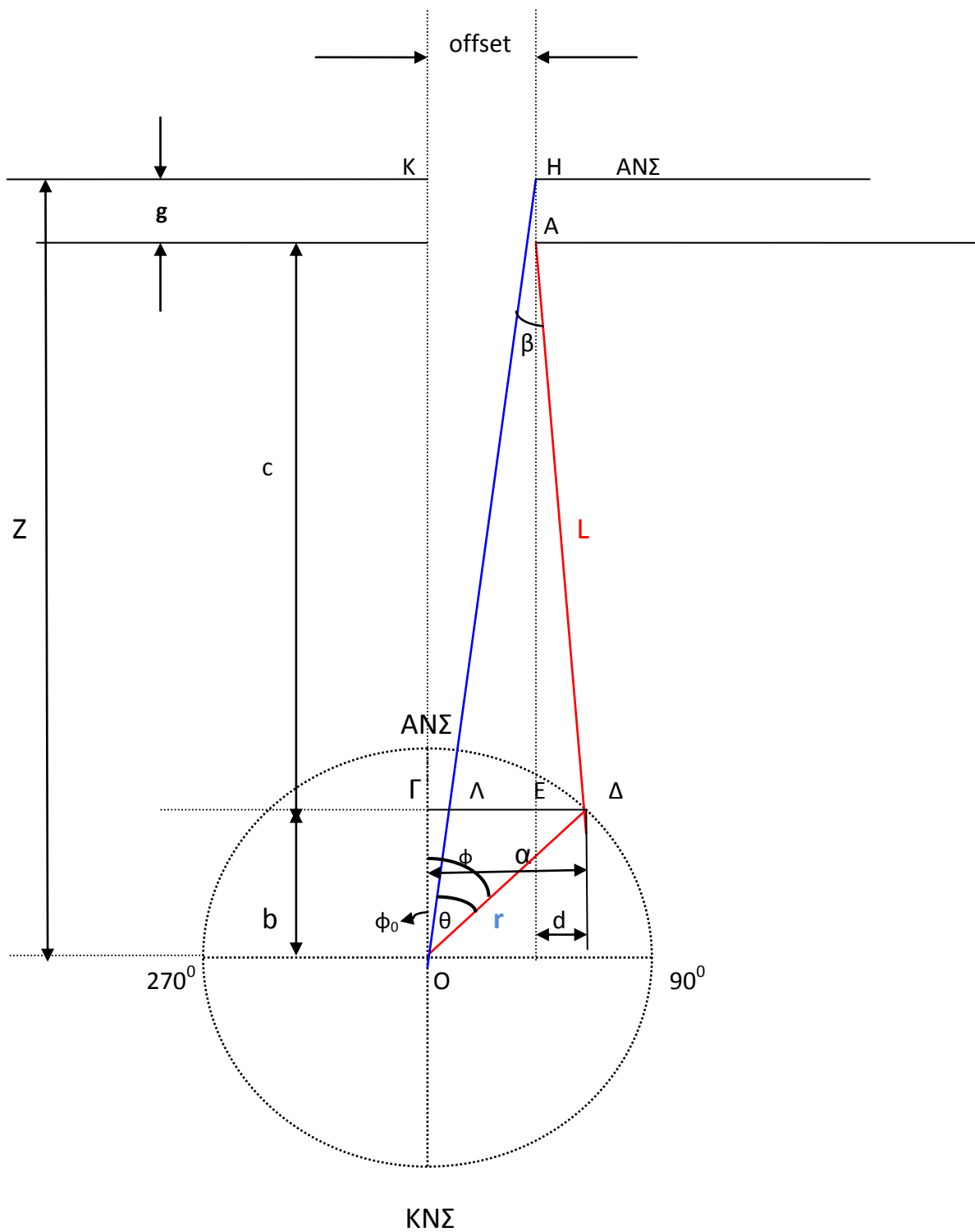
Επίσης στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η γεωμετρική απεικόνιση του μηχανισμού, βάση της οποίας γίνεται η εκτενής κινηματική ανάλυση.



Σχήμα 3.1 Απεικόνιση εφαρμογής εκκεντρότητας



# PISTON PIN OFFSET



**ΣΧΗΜΑ 3.2 Γεωμετρική απεικόνιση εκκεντρότητας**

Από το ορθογώνιο τρίγωνο ΟΔΓ του Σχήματος 3.2 έχουμε ότι :

$$b = r \cos \varphi \quad (3.1)$$

$$a = r \sin \varphi \quad (3.2)$$

όπου  $r$  : η ακτίνα στροφάλου

$\varphi$  : η γωνία στροφάλου.

Επίσης από το ορθογώνιο τρίγωνο ΕΑΔ θα έχουμε :

$$ΑΔ^2 = ΔΕ^2 + ΕΑ^2 \rightarrow$$

$$L^2 = c^2 + d^2 \rightarrow c = \sqrt{L^2 + d^2} \quad (3.3)$$

όπου  $L$  είναι το μήκος του διωστήρα.

Από το Σχήμα 3.2 η απόσταση  $d$  θα δίνεται από τη σχέση

$$d = a - off \quad (3.4)$$

Όπου  $off$  : εκκεντρότητα πείρου εμβόλου

και αντικαθιστώντας την σχέση 3. 2 στην σχέση 3. 4 τότε θα προκύψει ότι :

$$d = r \sin \varphi - off \quad (3.5)$$

Την παραπάνω σχέση αν την αντικαταστήσουμε στην σχέση 3.3 θα έχουμε την απόσταση  $c$  :

$$c = \sqrt{L^2 - (r \sin \varphi - off)^2} \quad (3.6)$$

Όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ, το στρόφαλο και ο διωστήρας είναι σε ευθυγραμμία. Έτσι στο Σχήμα 3.1 το ολικό ύψος θα συμβολίζεται με  $Z$  και θα είναι ίσο με :

$$Z = c + b + g$$

όπου  $g$  είναι η μετατόπιση του εμβόλου από το ΑΝΣ και μπορεί να υπολογιστεί από το ορθογώνιο τρίγωνο ΟΗΚ :

$$ΟΗ^2 = ΟΚ^2 + ΗΚ^2 \rightarrow$$

$$(L + r)^2 = Z^2 + off^2 \rightarrow Z^2 = (L + r)^2 - off^2 \rightarrow$$

$$Z = \sqrt{(L + r)^2 - off^2}$$

Αλλά λόγω της παραπάνω σχέσης η μετατόπιση  $g$  θα είναι

$$g = z - c - b \rightarrow$$

$$g = \sqrt{(L+r)^2 - off^2} - c - b$$

και λόγω των σχέσεων 3.6 και 3.1 θα έχουμε :

$$g = \sqrt{(L+r)^2 - off^2} - \sqrt{L^2 - (r \sin \varphi - off)^2} - r \cos \varphi \quad (3.7)$$

Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με την ακτίνα του στροφάλου  $r$  και θέτοντας όπου  $\frac{r}{L} = \lambda$  και  $\frac{off}{r} = \delta$  τότε η μετατόπιση εμβόλου θα μετασχηματιστεί ως εξής :

$$X = \frac{g}{r} = \sqrt{\left(\frac{L}{r} + \frac{r}{r}\right)^2 - \left(\frac{off}{r}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{L}{r}\right)^2 - \left(\sin \varphi - \frac{off}{r}\right)^2} - \frac{r}{r} \cos \varphi$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} + 1\right)^2 - \delta^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - (\sin \varphi - \delta)^2} - \cos \varphi$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} + 1\right)^2 - \delta^2} - \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda(\sin \varphi - \delta)^2} - \cos \varphi \quad (3.8)$$

Όταν το έμβολο είναι στο ΑΝΣ, λόγω της εκκεντρότητας του, σχηματίζεται μία (μικρή) γωνία  $\phi_0$  με τον κάθετο άξονα. Άρα η πραγματική γωνία στροφάλου θα είναι  $\theta = \phi - \phi_0$ . Οπότε οι παραπάνω σχέσεις μετατρέπονται σε :

$$c = AH = r \cos(\varphi - \varphi_0) = r \cos \theta$$

$$b = OL = r \sin(\varphi - \varphi_0) = r \sin \theta$$

Μια άλλη έκφραση της μετατόπισης του εμβόλου παρουσιάζεται παρακάτω λαμβάνοντας υπ' όψιν μια διαφορετική έκφραση της απόστασης  $C$ .

Γνωρίζοντας ότι

$$c = L \cos \beta \quad (3.9)$$

Και αντικαθιστώντας στη σχέση 7 έχουμε

$$g = \sqrt{(L+r)^2 - off^2} - L \cos \beta - r \cos \theta \rightarrow$$

$$g = \sqrt{(L+r)^2 - off^2} - (L \cos \beta + r \cos \theta) \quad (3.10)$$

Διαιρώντας με την ακτίνα στροφάλου  $r$  όπως προηγήθηκε στην παραπάνω ανάλυση και θέτοντας και πάλι όπου  $\frac{r}{L} = \lambda$  και  $\frac{off}{r} = \delta$  θα έχουμε

$$X = \frac{g}{r} = \sqrt{\left(\frac{L}{r} + \frac{r}{r}\right)^2 - \left(\frac{off}{r}\right)^2} - \left(\frac{L}{r} \cos \beta + \frac{r}{r} \cos \theta\right) \rightarrow$$

$$X = \frac{g}{r} = \sqrt{\left(\frac{L}{r} + \frac{r}{r}\right)^2 - \left(\frac{off}{r}\right)^2} - \frac{1}{\lambda} \cos \beta - \cos \theta \quad (3.11)$$

Εκφράζοντας το  $\cos \beta$  συναρτήσει του  $\sin \theta$  έχουμε :

$$L \sin \beta - off = r \sin \theta \rightarrow$$

$$\sin \beta = \lambda \sin \theta + \frac{off}{L}$$

Γνωρίζοντας ότι  $\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1$  τότε προκύπτει

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \left(\lambda \sin \theta + \frac{off}{L}\right)^2} \quad (3.12)$$

και αντικαθιστώντας την σχ. 3.12 στην σχ. 3.7 προκύπτει

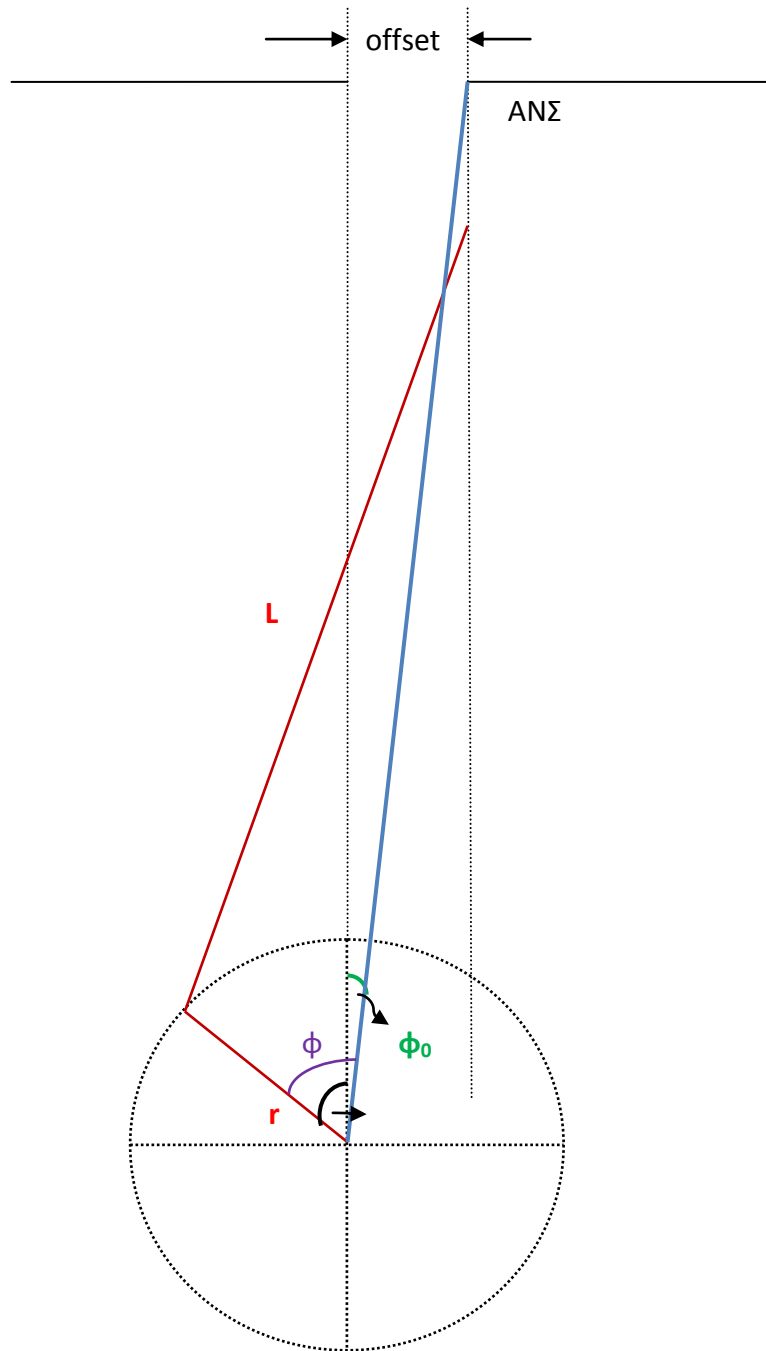
$$g = \sqrt{(L+r)^2 - off^2} - \sqrt{1 - \left(\lambda \sin \theta + \frac{off}{L}\right)^2} - \cos \theta$$

Οπότε η μετατόπιση  $X$  θα είναι :

$$X = \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} + 1\right)^2 - \delta^2} - \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\lambda \sin \theta + \frac{off}{L}\right)^2} - \cos \theta \quad (3.13)$$

**(Υπενθύμιση ότι ισχύει  $\theta = \phi - \phi_0$ )**

Παρακάτω με την βοήθεια του Σχήματος 3.3 θα υπολογίσουμε την γωνία  $\phi_0$  και την γωνία διωστήρα  $\beta$



Σχήμα 3.3 Εκκεντρότητα – Πείρου Εμβόλου

Από το Σχήμα 3.3 προκύπτει ότι

$$L\sin\beta = r\sin(\varphi - \varphi_0) + off \rightarrow$$

$$\sin\beta = \frac{\sin(\varphi - \varphi_0) + off}{L} \quad (3.14)$$

Και έχοντας θέσει στην αρχή της ανάλυσης  $\theta = \varphi - \varphi_0$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{r\sin\theta + off}{L}\right) \quad (3.15)$$

Μια άλλη έκφραση της γωνίας διωστήρα  $\beta$  δίνεται παρακάτω

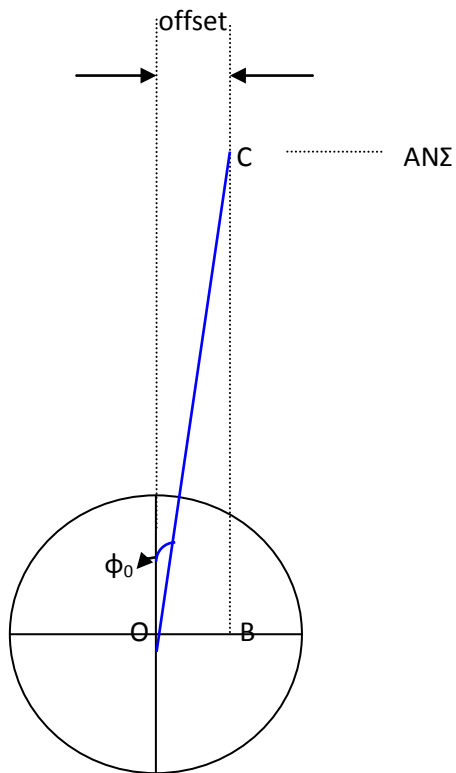
$$L\sin\beta = r\sin\varphi - off \rightarrow$$

$$\sin\beta = \frac{\sin\varphi - off}{L} \quad (3.16)$$

όπου  $\varphi$  η αρχική γωνία τροφάλου από τον κάθετο άξονα, στην οποία εμπεριέχεται η εκκεντρότητα (offset) και άρα η γωνία  $\varphi_0$ , δηλ  $\varphi = \theta + \varphi_0$ . Επομένως η  $\beta$  θα ισούται με

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{r\sin\varphi - off}{L}\right) \quad (3.17)$$

Το έμβολο κατά την κίνησή του έρχεται σε ακινησία ακριβώς στη γωνία τροφάλου όπου το στρόφαλο και ο διωστήρας είναι σε ευθεία (δηλ στο ΑΝΣ και στο ΚΝΣ) και συνεχίζει να κινείται σε όλες τις άλλες γωνίες τροφάλου. Όταν πλησιάζει στο ΑΝΣ και ΚΝΣ κινείται πολύ αργά όπου οι γωνίες τροφάλου είναι κοντά με τις γωνίες των σημείων αυτών. Παρακάτω μπορούμε να εξετάσουμε ποια θα είναι η τιμή της γωνίας τροφάλου στα δύο αυτά σημεία με τη βοήθεια των παρακάτω Σχημάτων (3.4) και (3.5)



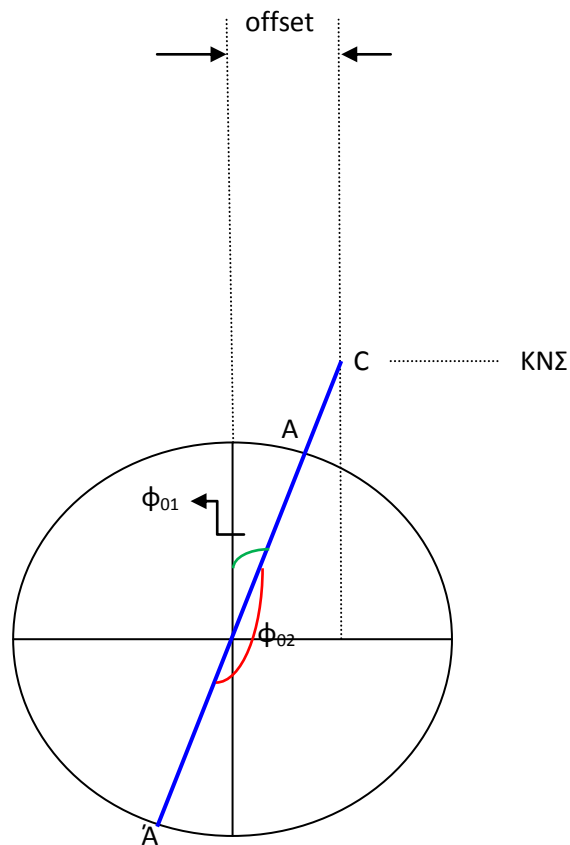
**Σχήμα 3.4 Έμβολο Στο ΑΝΣ**

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η γωνία στροφάλου  $\phi_0$  όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ όπου υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sin\varphi_0 = \frac{off}{L} \rightarrow$$

$$\varphi_0 = \sin^{-1}\left(\frac{off}{r + L}\right) \quad (3.18)$$

Όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΚΝΣ η γωνία στροφάλου θα υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.5 Έμβολο Στο ΚΝΣ

$$\sin \varphi_{0_2} = \frac{off}{L - r} \rightarrow \varphi_{0_2} = \arcsin\left(\frac{off}{L - r}\right) \quad (3.19)$$

$$\phi_{0_2} = \phi_{0_1} + 180$$

Και τέλος η γωνία στροφάλου  $\theta = \phi - \phi_0$  θα είναι

$$\begin{aligned} L \sin \beta &= r \sin(\varphi - \varphi_0) + off \rightarrow \\ \sin(\varphi - \varphi_0) &= \frac{L \sin \beta - off}{L} \rightarrow \\ \theta = (\varphi - \varphi_0) &= \sin^{-1}\left(\frac{L \sin \beta - off}{L}\right) \end{aligned} \quad (3.20)$$



### 3.2 Η Ταχύτητα του εμβόλου c

Η ταχύτητα του εμβόλου c προκύπτει με παραγωγή ως προς τον χρόνο της διαδρομής του εμβόλου

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

Με την προϋπόθεση ότι το στρόφαλο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ ,  $c = \omega \left( \frac{dx}{d\varphi} \right)$

Έτσι η ακριβής τιμή της ταχύτητας που προκύπτει από την εξίσωση 3.13 είναι

$$c = \frac{c_1}{r} = \omega \left[ \frac{(\lambda \sin\theta + \frac{off}{L}) \cos\theta}{\sqrt{1 - (\lambda \sin\theta + \frac{off}{L})^2}} + \sin\theta \right] \quad (3.21)$$

$\omega = \frac{2\pi N}{60}$ , και N είναι η ταχύτητα σε RPM.

### 3.3 Η επιτάχυνση του εμβόλου

Η επιτάχυνση του εμβόλου b προκύπτει ομοίως με παραγωγή ως προς το χρόνο της ταχύτητας του εμβόλου,

$$b = \frac{dc}{dt} = \frac{dc}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

πάλι με την προϋπόθεση της  $\frac{d\varphi}{dt} = \omega = \text{σταθ.}$ , βρίσκεται η ακριβής τιμή της επιταχύνσεως που προκύπτει από την εξίσωση 3.15

$$b = \omega^2 r \left[ \frac{\lambda \cos^2\theta + \sin\theta (\lambda \sin\theta + \frac{off}{L}) ((\lambda \sin\theta + \frac{off}{L})^2 - 1)}{[1 - (\lambda \sin\theta + \frac{off}{L})^2]^{3/2}} + \cos\theta \right] \quad (3.22)$$

όπου  $\omega = \frac{2\pi N}{60}$  και N είναι η ταχύτητα σε RPM.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## ΔΥΝΑΜΕΙΣ

### 4.1 Μαζικές Δυνάμεις

Οι αναπτυσσόμενες μαζικές δυνάμεις προκαλούνται από τις κινούμενες μάζες του κινηματικού μηχανισμού. Οι μάζες αυτές εκτελούν παλινδρομική , περιστροφική και μικτή κίνηση.

Στις παλινδρομικές μάζες ανήκουν οι μάζες του εμβόλου και των στοιχείων που παλινδρομούν μαζί του(ελατήρια στεγανότητας και λίπανσης , πείρος του εμβόλου, ζύγωμα βάκτρο κ.λ.π.). Το σύνολο των μαζών αυτών συμβολίζεται με  $m_e$

Στις περιστροφικές μάζες ανήκει η μάζα ενός πλήρους στροφάλου (βραχίονες, κομβίο στροφάλου και βάσεως) κατάλληλα ανηγμένη στην ακτίνα του στροφάλου  $r$ , και συμβολίζεται με  $m_\sigma$

Στη τρίτη κατηγορία (μικτή κίνηση) ανήκει η συνολική μάζα του διωστήρα  $m_\delta$ . Οπότε ο διωστήρας μπορεί να αντικατασταθεί από ένα σύστημα 2 μαζών  $m_{\delta l}$  και  $m_{\delta r}$ . Έτσι ώστε να ισχύει

$$m_{\delta l} + m_{\delta r} = m_\delta \quad (4.1)$$

$$m_{\delta l} (EK) = m_{\delta r} (\Sigma K)$$

όπου K το μεταξύ των σημείων E και Σ κέντρο βάρους του διωστήρα (Σχήμα 4.1).

Έτσι όλος ο κινηματικός μηχανισμός ανάγεται σε δύο διακεκριμένες μάζες από τις οποίες η μία είναι

- η μάζα που παλινδρομεί  $m_l = m_e + m_{\delta l}$
- η μάζα που περιστρέφεται  $m_r = m_\sigma + m_{\delta r}$

Όπως αναφέραμε παραπάνω, την συνολική μάζα του διωστήρα την χωρίσαμε στην μάζα που παλινδρομεί  $m_{\delta l}$  και τη μάζα που περιστρέφεται  $m_{\delta r}$ . Για να είναι το σύστημα των 2 αυτών μαζών δυναμικά ισοδύναμο προς το διωστήρα, θα πρέπει να αντιδρά σε σύστημα εξωτερικών δυνάμεων και ροπών ακριβώς όπως και ο διωστήρας, δηλαδή πρέπει να προκύπτει η ίδια επιτάχυνση του σώματος ως προς άξονα διερχόμενο από το Κ.Β και καθέτου στο επίπεδο της κίνησης.

Έτσι, οι αναγκαίες συνθήκες για το ισοδύναμο σύστημα είναι :

- α) Η μάζα του να ισούται προς τη μάζα του διωστήρα
- β) Το κέντρο βάρους του να συμπίπτει με το κέντρο βάρους του διωστήρα Κ
- γ) Η ροπή αδρανείας του ως προς άξονα διερχόμενο από το Κ.Β και καθέτου στο επίπεδο της κίνησης να ισούται προς την αντίστοιχη ροπή αδρανείας του διωστήρα  $\theta_\delta$

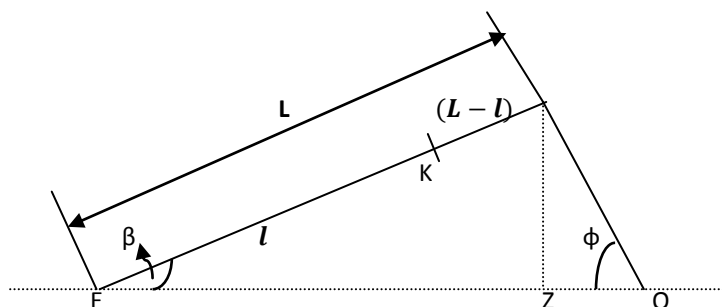
Η γενική σχέση που δίνει τη ροπή αδρανείας είναι :

$$\theta = \sum_{i=1}^{i=n} m_i \cdot r_i^2$$

Και στην περίπτωση που έχουμε συνεχή κατανομή μάζας η παραπάνω σχέση γίνεται

$$\theta = \int r^2 dm$$

Αναλύοντας το σύστημα του διωστήρα έχουμε βάσει του Σχήματος 4.1 :



**ΣΧΗΜΑ 4.1 Σύστημα του Διωστήρα**

$$m_{\delta} K_{\delta}^2 = m_{\delta l} l + m_{\delta r} (L - l) \quad (4.2)$$

όπου  $K_{\delta}$  είναι η απόσταση Κ.Β των 2 μαζών.

$$m_{\delta} = m_{\delta l} + m_{\delta r} \quad (4.3)$$

$$m_{\delta r} (L - l) - m_{\delta l} l = 0 \quad (4.4)$$

Πολλαπλασιάζοντας την σχέση 4.3 με το  $l$  έχουμε :

$$m_{\delta} l = m_{\delta l} l + m_{\delta r} l \quad (4.5)$$

προσθέτοντας σχέση.4.4 και σχέση.4.5 έχουμε :

$$\begin{aligned} m_{\delta r} l &= m_{\delta} L \\ m_{\delta r} &= \frac{m_{\delta} l}{L} \end{aligned} \quad (4.6)$$

με αντικατάσταση της 4.6 στην 4.4 δίνει :

$$m_{\delta l} = \frac{(L-l)m_{\delta}}{l} \quad (4.7)$$

και από τις σχέσεις 4.4 και 4.2 προκύπτει :

$$m_{\delta} K_{\delta}^2 = m_{\delta l} l^2 + m_{\delta r} \frac{l}{(L-l)} (L-l)^2 \rightarrow$$

$$m_{\delta l} = \frac{m_{\delta} k_{\delta}^2}{l \cdot L} \quad (4.8)$$

Τέλος εξισώνοντας την 4.7 με την 4.8 έχουμε

$$\frac{(L-l)m_{\delta}}{l} = \frac{m_{\delta} k_{\delta}^2}{l \cdot L} \rightarrow$$

$$k_{\delta}^2 = l (L - l) \quad (4.9)$$

Η ροπή αδρανείας του πραγματικού διωστήρα είναι  $m_{\delta} K_{\delta\pi}^2$  όπου  $K_{\delta\pi}$  είναι η απόσταση κ.β από την κάτω κεφαλή του πραγματικού διωστήρα.

Η ροπή αδρανείας του ισοδύναμου (ανηγμένου) διωστήρα είναι  $m_{\delta} K_{\delta}^2$

Άρα η διαφορά είναι  $\theta_{\delta} = m_{\delta} (K_{\delta}^2 - K_{\delta\pi}^2)$

Επειδή η κίνηση του διωστήρα είναι μικτή (παλινδρομική και περιστροφική), για να είναι το σύστημα των 2 μαζών (ανηγμένες μάζες) δυναμικά ισοδύναμο με τον πραγματικό διωστήρα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια διορθωτική στρεπτική ροπή για την κάτω κεφαλή του διωστήρα η οποία δέχεται στρεπτική ροπή λόγω της  $m_{\delta r}$ .

Άρα θα έχουμε :

$$M_{\delta\Sigma P} = \theta_{\delta} \cdot d^2\beta / dt^2 \quad (4.10)$$

Όπου  $\theta_{\delta} = m_{\delta} (K_{\delta}^2 - K_{\delta\pi}^2)$

και  $M_{\delta\Sigma P}$  : η διορθωτική στρεπτική ροπή για την κάτω κεφαλή διωστήρα.

Από το Σχήμα 3.1 έχουμε ότι

$$L \sin\beta = r \sin\varphi - off \quad (4.11)$$

Όπου, όπως έχουμε αναφέρει το *off* συμβολίζει την εκκεντρότητα μεταξύ του κέντρου του κομβίου του στροφαλοφόρου και του κέντρου του πείρου του εμβόλου.

Η τιμή της εκκεντρότητας (*offset*) είναι ανεξάρτητη από την οριζόντια απόσταση του εμβόλου αν και αυτό δεν είναι ακριβώς αληθές και αιτιολογείται ότι σε αυτή την περίπτωση η απόσταση μεταξύ εμβόλου και κυλίνδρου, όπου παρουσιάζεται ένα κενό είναι αμελητέο για τον υπολογισμό της γωνίας  $\beta$ .

Από την σχέση 4.11 έχουμε ότι

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{r \sin\varphi - off}{L}\right) \quad (4.12)$$

Διαφορίζοντας την παραπάνω σχέση 4.12 ως προς το χρόνο έχουμε

$$\dot{\beta} = \frac{d\beta}{dt} = \frac{\omega r \cos\beta}{L \cos\varphi} \quad (4.13)$$

Και διαφορίζοντας ξανά ως προς χρόνο και θεωρώντας  $d^2\phi / dt^2 = 0$  παίρνουμε ότι

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} = \frac{-rL \sin\varphi \cos\beta \omega^2 + rL\omega \cos\varphi \sin\beta \dot{\beta}}{(l \cos\beta)^2} \quad (4.14)$$

από την σχέση 4.13 έχουμε

$$\cos\varphi = \frac{(r \cos\beta)\omega}{L\dot{\beta}}$$

Και αντικαθιστώντας στην 4.14 έχουμε την γωνιακή επιτάχυνση

$$\begin{aligned} \frac{d^2\beta}{dt^2} &= \frac{-rL \sin\varphi \cos\beta \omega^2 + rL\omega \cos\varphi \sin\beta \dot{\beta}}{(l \cos\beta)^2} = \\ &= \frac{\sin\beta \dot{\beta} - r \sin\frac{\varphi}{l} \omega^2}{\cos\beta} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Όπου η γωνιακή ταχύτητα στροφάλου  $\omega = \frac{2\pi N}{60}$ , και N είναι η ταχύτητα σε RPM .

## 4.2 Δυνάμεις κινηματικού μηχανισμού

### 4.2.1 Δυνάμεις από Αέρια.

Η πίεση των παραγόμενων αερίων μέσα στον κύλινδρο είναι περίπου η ατμοσφαιρική ή η πίεση υπερπλήρωσης (σε υπερπληρωμένο κινητήρα) ενώ η μέγιστη είναι περίπου 40 με 70 φορές μεγαλύτερη της πρώτης.

Η πίεση των αερίων  $p_g$  λαμβάνεται από το δυναμοδεικτικό διάγραμμα σε κάθε θέση του εμβόλου X (διάγραμμα  $p_g - x$ ), και επομένως και για κάθε συνολικό όγκο  $V = V_c + F_x$  όπου  $V_c$  είναι ο επιζήμιος όγκος και  $F = \frac{\pi D^2}{4}$  η επιφάνεια του εμβόλου ή σε κάθε γωνία στροφάλου  $\phi$  ( διάγραμμα  $p-\phi$  ή  $p-t$  εφόσον  $\phi = \omega t$  για  $\omega = \text{const}$ ).

Έτσι τα αέρια λόγω της πίεσης τους  $p_g$  εξασκούν δυνάμεις στο έμβολο και στη κυλινδροκεφαλή άρα θα έχουμε ότι :

Η  $p_g$  εξασκεί

- Δύναμη  $P_g$  στο έμβολο κατά τον άξονα του κυλίνδρου με φορά πάντα από το ΑΝΣ προς το ΚΝΣ
- Στο κάλυμμα του κυλίνδρου ίση κατά μέτρο  $P_g$  με αντίθετη όμως φορά  $-P_g$ .

Το μέτρο της  $P_g$  δίνεται από την σχέση :

$$P_g = \text{πίεση} \times \text{επιφάνεια} = p_g \times F = \frac{\pi D^2}{4} \times p_g \quad (4.16)$$

Σαν πίεση  $p_g$  λαμβάνεται η μανομετρική , διότι στη κάτω πλευρά του εμβόλου εξασκείται η πίεση της ατμόσφαιρας (ατμοσφαιρική).

Την δύναμη  $P_g$  παραλαμβάνει το τοίχωμα του κυλίνδρου μέσω του εμβόλου (δύναμη  $N$  κάθετη στο τοίχωμα) και ο διωστήρας (δύναμη  $S$ ) ο οποίος μεταβιβάζει δύναμη μόνο κατά τον άξονα του.

Έτσι η δύναμη  $P_g$  του εμβόλου αναλύεται στις ακόλουθες 2 συνιστώσες :

- Δύναμη παρειάς κυλίνδρου  $N_g$

$$N_g = P_g \tan \beta \quad (4.17)$$

Λόγω ύπαρξης εκκεντρότητας η γωνία  $\beta$  έχει βρεθεί από τη σχέση 4.12 και άρα η δύναμη παρειάς δίνεται από

$$N_g = P_g \tan(\sin^{-1}(\frac{r \sin \phi - off}{l})) \quad (4.18)$$

ή εναλλακτικά

$$N_g = P_g \tan(\sin^{-1}(\frac{r \sin \theta + off}{l})) \quad (4.19)$$

- Δύναμη Διωστήρα  $S_g$

$$S_g = \frac{P_g}{\cos \beta} \quad (4.20)$$

Παρομοίως έχουμε με αντικατάσταση της  $\beta$

$$S_g = \frac{P_g}{\cos(\sin^{-1}(\frac{r \sin \varphi - off}{l}))} \quad (4.21)$$

ή εναλλακτικά

$$S_g = \frac{P_g}{\cos(\sin^{-1}(\frac{r \sin \theta + off}{l}))} \quad (4.22)$$

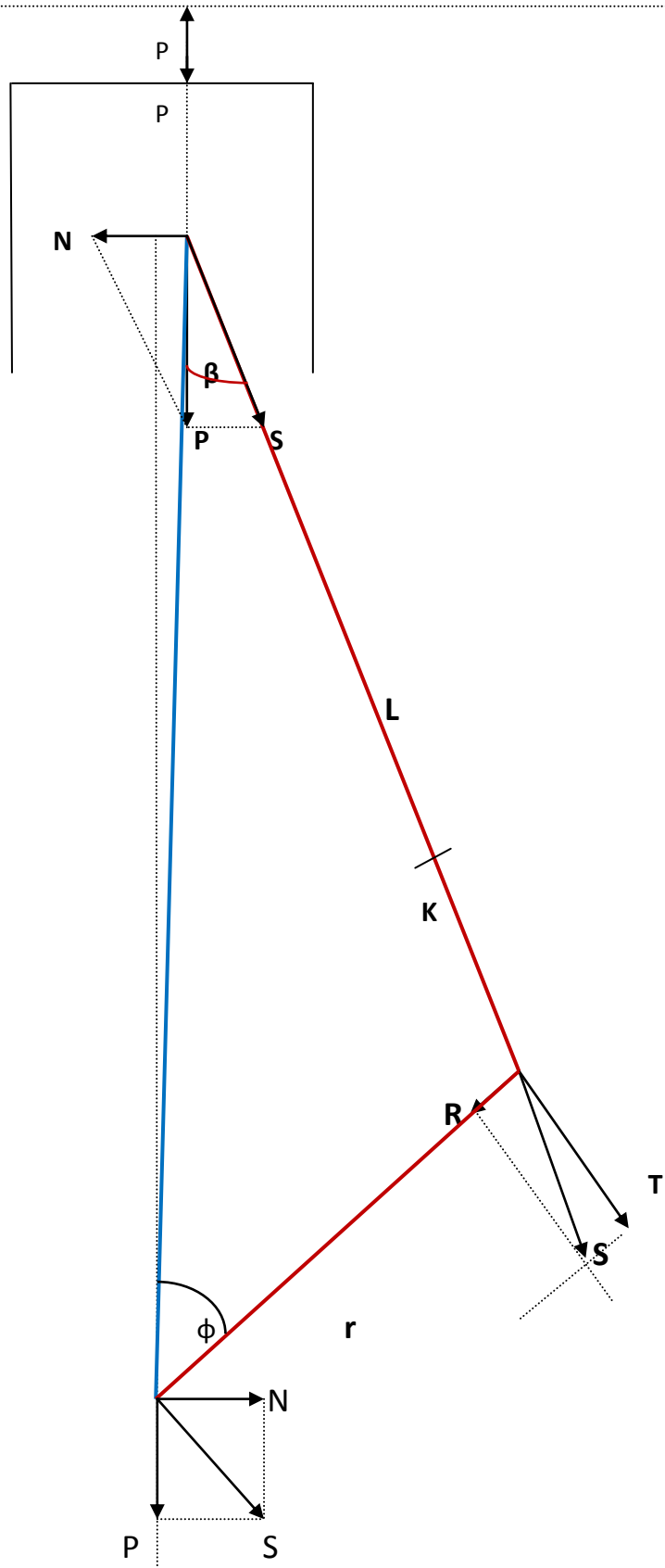
Στις μηχανές μεγάλων διαστάσεων, η δύναμη  $P_g$  μεταβιβάζεται στο κομβίο του στροφάλου μέσω του ζυγώματος και του βάρου. Άρα το ζύγωμα εξασκεί τη δύναμη  $N_g$  στο σώμα του κινητήρα δια μέσου της ευθυντηρίας του.

Η δύναμη  $S_g$  που μεταβιβάζεται μέσω του διωστήρα στο κομβίο του στροφάλου μπορεί να αναλυθεί στις δυνάμεις που ασκούνται στο έδρανο βάσης και σε αυτές που ασκούνται στο κομβίο στροφάλου.

Άρα η αναγωγή της  $S_g$  στο σημείο  $O$  όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.2 δίνει μια δύναμη ίση προς αυτήν που ασκείται στο έδρανο βάσης καθώς και μία ροπή επί της στροφαλοφόρου ατράκτου που αποτελεί την στρεπτική ροπή του κινητήρα .

Επίσης η αναγωγή της  $S_g$  στο σημείο  $\Sigma$  στο κομβίο του στροφάλου και η ανάλυση της σε αυτό δίνει δύο συνιστώσες , τη στρεπτική δύναμη στροφάλου  $T_g$  (κάθετη πάντοτε στο στροφάλο) και την ακτινική δύναμη στροφάλου  $R_g$  ( κατά τη διεύθυνση της ακτίνας του στροφάλου)





Σχήμα 4.2 Δυνάμεις κινηματικού μηχανισμού

Άρα οι εκφράσεις των παραπάνω δυνάμεων είναι :

- Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου

$$T_g = S_g \sin(\theta + \beta) = P_g \frac{\sin(\theta + \beta)}{\cos\beta} \quad (4.23)$$

- Ακτινική Δύναμη Στροφάλου

$$R_g = S_g \cos(\theta + \beta) = P_g \frac{\cos(\theta + \beta)}{\cos\beta} \quad (4.24)$$

Όπου  $\beta$  η γωνία διωστήρα με μέτρο

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{r\sin\theta + off}{L}\right)$$

- Στρεπτική ροπή

$$M_{\sigma g} = T_g r = P_g r \frac{\sin(\theta + \beta)}{\cos\beta} \quad (4.25)$$

με φορά αυτή της γωνίας στροφάλου  $\phi$ .

Επίσης, η ροπή  $M_{\sigma g}$  είναι θετική εάν έχει τη φορά της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$ , βάσει της οποίας ορίζεται η φορά της  $\phi$ .

Το αποτέλεσμα της δράσης της πίεσης των αερίων επάνω στο κέλυφος της μηχανής είναι η εξάσκηση των εξής δυνάμεων.

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

Προφανώς οι δυνάμεις αυτές αναγόμενες σε τυχόν σημείο δίνουν δύναμη μηδενική αλλά όμως ροπή διάφορη του μηδενός που καλείται ροπή ανατροπής  $M_{\alpha g}$ . Αυτή τείνει να ανατρέψει τη μηχανή, και αποτελεί τη μόνη δράση της πίεσης των αερίων στο κέλυφος μεταβιβαζόμενη και στη θεμελίωση.

Το μέτρο της ροπής ανατροπής βρίσκεται από τον νόμο ημιτόνων

$$\frac{r}{\sin\beta} = \frac{H}{\sin(\varphi + \beta)} \quad (4.26)$$

Όπου  $H$  το ύψος από το κέντρο του πείρου στο κέντρο του κομβίου βάσεως,

$$\text{Άρα } M_{\alpha g} = N_g H = -M_{\sigma g}$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η ροπή ανατροπής είναι ίση κατά μέτρο με τη στρεπτική ροπή, με φορά όμως αντίθετη. Η ύπαρξη αυτής απαιτεί την πάκτωση της μηχανής με κοχλίες αγκύρωσης υπολογιζόμενους με βάση την τιμή της.

Από καθαρά ενεργειακής θεώρησης, λαμβάνεται υπόψη ότι η ισχύς της δύναμης εξ'αερίων  $P_g$  είναι ίση με την ισχύ της Στρεπτικής Δύναμης  $T_g$  δηλαδή ότι ισχύει  $P_g c dt = T_g r d\phi$  οπότε καταλήγουμε στη σχέση

$$T_g = P_g \left( \frac{c}{r\omega} \right) \quad (4.27)$$

Όπου  $\frac{c}{r\omega}$  είναι η ανηγμένη ταχύτητα εμβόλου όπου

$r$  : η ακτίνα στροφάλου

$\omega$  : η γωνιακή ταχύτητα στροφάλου

$c$  : η ταχύτητα εμβόλου.

Το μέτρο της ταχύτητας εμβόλου  $c$  λόγω εκκεντρότητας υπολογίζεται από τον τύπο

$$c = \frac{c_1}{r} = \omega \left[ \frac{(\lambda \sin\theta + \delta) \cos\theta}{\sqrt{1 - (\lambda \sin\theta + \delta)^2}} + \sin\theta \right] \quad (4.28)$$

και η ανηγμένη ταχύτητα θα είναι

$$c = \frac{c_1}{r\omega} = \left[ \frac{(\lambda \sin\theta + \delta) \cos\theta}{\sqrt{1 - (\lambda \sin\theta + \delta)^2}} + \sin\theta \right] \quad (4.29)$$

έτσι ο λόγος  $(c_1/r\omega)$  μπορεί να είναι γνωστός για κάθε θέση του εμβόλου και με δεδομένο το δυναμοδεικτικό διάγραμμα (άρα είναι γνωστή και η  $P_g$ ) μπορεί να υπολογιστεί η στρεπτική ροπή  $T_g$  με τον παραπάνω τύπο.

Όταν οι δυνάμεις ανάγονται στη μονάδα επιφανείας του εμβόλου, τότε προκύπτουν οι αντίστοιχες πιέσεις δηλ τα μεγέθη  $p_{Ng}$ ,  $p_{Sg}$ ,  $p_{Tg}$ ,  $p_{Rg}$ .

Αντίστοιχα οι ροπές  $M_{\sigma g}$  και  $M_{\alpha g}$  ανάγονται στη μονάδα όγκου εμβολισμού ( $V_h = F_s = 2r$ ) οπότε προκύπτουν τα μεγέθη  $\mu_{\sigma g}$ ,  $\mu_{\alpha g}$

- $p_{Ng} = p_g \tan \beta$
- $p_{Sg} = \frac{p_g}{\cos \beta}$
- $p_{Tg} = p_g \frac{\sin(\theta + \beta)}{\cos \beta}$
- $p_{Rg} = p_g \frac{\cos(\theta + \beta)}{\cos \beta}$
- $\mu_{\sigma g} = p_{Tg} / 2$
- $\mu_{\alpha g} = -\mu_{\sigma g}$

#### 4.2.2 Παλινδρομικές Μαζικές Δυνάμεις.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι παλινδρομούσες μάζες έχουν επιτάχυνση  $b$  που σε ανηγμένη μορφή υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση,

$$b = \omega^2 r \left[ \frac{\lambda \cos^2 \theta + \sin \theta (\lambda \sin \theta + \delta) ((\lambda \sin \theta + \delta)^2 - 1)}{[1 - (\lambda \sin \theta + \delta)^2]^{3/2}} + \cos \theta \right] \quad (4.30)$$

με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε την ανηγμένη επιτάχυνση του εμβόλου ( $b / r\omega^2$ ) για κάθε γωνία  $\phi$ .

Έτσι από το έμβολο θα εξασκείται επί του κινηματικού μηχανισμού η δύναμη

$$P_l = -m_l b = -m_l r \omega^2 \frac{b}{r \omega^2} \quad (4.31)$$

με σταθερό φορέα (άξονα του κυλίνδρου) μεταβαλλόμενης όμως φοράς και μεγέθους συναρτήσει της γωνίας  $\phi$ . Η επιτάχυνση  $b$  του εμβόλου απαιτεί την εξάσκηση επ' αυτού, από τον υπόλοιπο κινηματικό μηχανισμό μίας δύναμης ίσης προς  $P_l = -P_l = -m_l b$ .

Η  $P_l$  που ασκείται από την  $m_l$  μεταβιβάζεται όπως και η  $P_g$  μέχρι της βάσεως και της θεμελίωσης της μηχανής που έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται στρεπτική δύναμη στροφάλου  $T_l$ , Στρεπτική Ροπή  $M_{σl} = T_l r$  και Ροπή Ανατροπής  $M_{αl} = -M_{σl}$ .

Επίσης, η παλινδρομούσα δύναμη του εμβόλου  $P_l$  αναλύεται στις ακόλουθες δύο συνιστώσες.

- Δύναμη Παρειάς.

$$N_l = P_l \tan \beta \quad (4.32)$$

- Δύναμη Διωστήρα

$$S_l = \frac{P_l}{\cos \beta} \quad (4.33)$$

Και με ανάλυση της  $S_l$  στο έδρανο βάσεως της μηχανής και στο κομβίο του στροφάλου όπως έγινε και στην προηγούμενη ενότητα θα μας δώσει τις παρακάτω σχέσεις.

- Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου

$$T_l = S_l \sin(\theta + \beta) = P_l \frac{\sin(\theta + \beta)}{\cos \beta} \quad (4.34)$$

- Ακτινική Δύναμη Στροφάλου

$$R_l = S_l \cos(\theta + \beta) = P_l \frac{\cos(\theta + \beta)}{\cos \beta} \quad (4.35)$$

- Στρεπτική Ροπή

$$M_{\sigma g} = T_l r = P_l r \frac{\sin(\theta + \beta)}{\cos \beta} \quad (4.36)$$

Και από ενεργειακής θεώρησης  $T_l = P_l \frac{c}{r\omega}$

Βέβαια θα πρέπει να επισημανθεί ότι στη βάση θεμελίωσης της μηχανής μεταβιβάζεται εκτός της ροπής ανατροπής  $M_{αl}$  και η δύναμη  $P_l$ . Αυτό μπορεί εύκολα να εξηγηθεί ότι η  $P_g$  εξασκείται στο κάλυμμα άρα η  $P_l$  θα εξασκείται στη βάση της μηχανής αφού δεν έρχεται σε επαφή με το κάλυμμα του κυλίνδρου.

### 4.2.3. Περιστροφικές Μαζικές Δυνάμεις.

Όπως αναφέραμε στην αρχή της ενότητας οι περιστροφικές μαζικές δυνάμεις αποτελούνται από την μάζα του διωστήρα  $m_{\delta r}$  και τη μάζα ενός πλήρους στροφάλου  $m_{\sigma}$  ανηγμένη στην ακτίνα του στροφάλου.

Η συνολική αυτή μάζα ( $m_r = m_{\sigma} + m_{\delta r}$ ) θεωρείται συγκεντρωμένη στο κομβίο του στροφάλου στην οποία ασκείται η κεντρομόλος δύναμη, και οπότε η μάζα  $m_r$  ασκεί στα έδρανα και το σώμα της μηχανής την αντίστοιχη φυγόκεντρο δύναμη που έχει μέτρο σταθερό και ίσο με

$$P_r = m_r r \omega^2$$

και φορέα περιστρεφόμενο με το στρόφαλο και διεύθυνση την εκάστοτε διεύθυνση αυτού.

Έτσι η  $P_r$  μεταφέρεται ακέραιη στα έδρανα και το σώμα της μηχανής και στη θεμελίωση της αλλά δεν έχει καμία επίδραση στην στρεπτική ροπή 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 δυνάμεων (φυγόκεντρικών). Έτσι, αν  $m_o$ ,  $r_o$  είναι αντίστοιχα η πραγματική μάζα του στροφάλου και η απόσταση του κέντρου βάρους του από τον άξονα περιστροφής, τότε

$$P_{\sigma r} = m_o r_o \omega^2 = m_{\sigma} r \omega^2$$

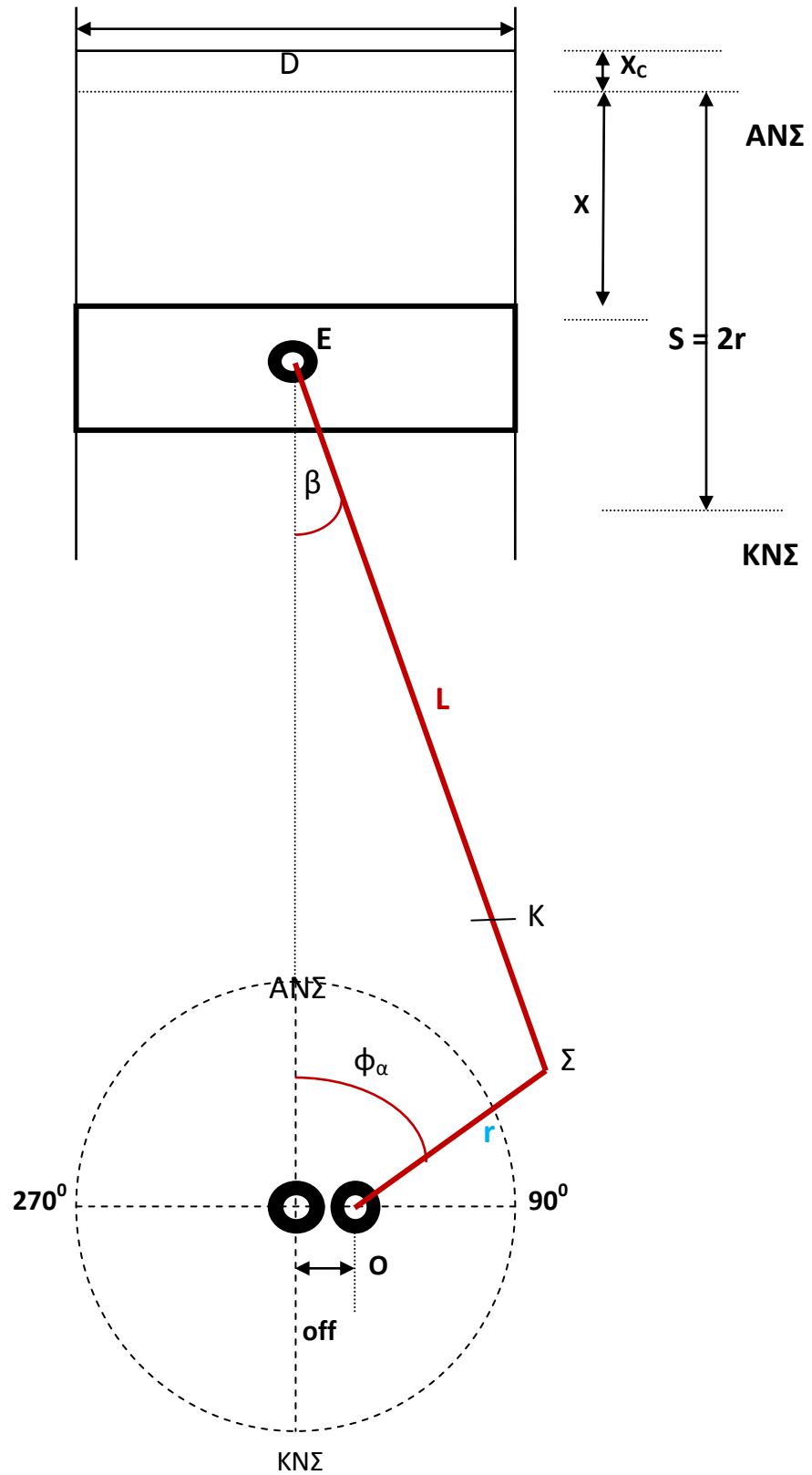
Άρα προκύπτει  $m_{\sigma} = \frac{m_o r_o}{r}$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

## Εκκεντρότητα Κομβίου Βάσης

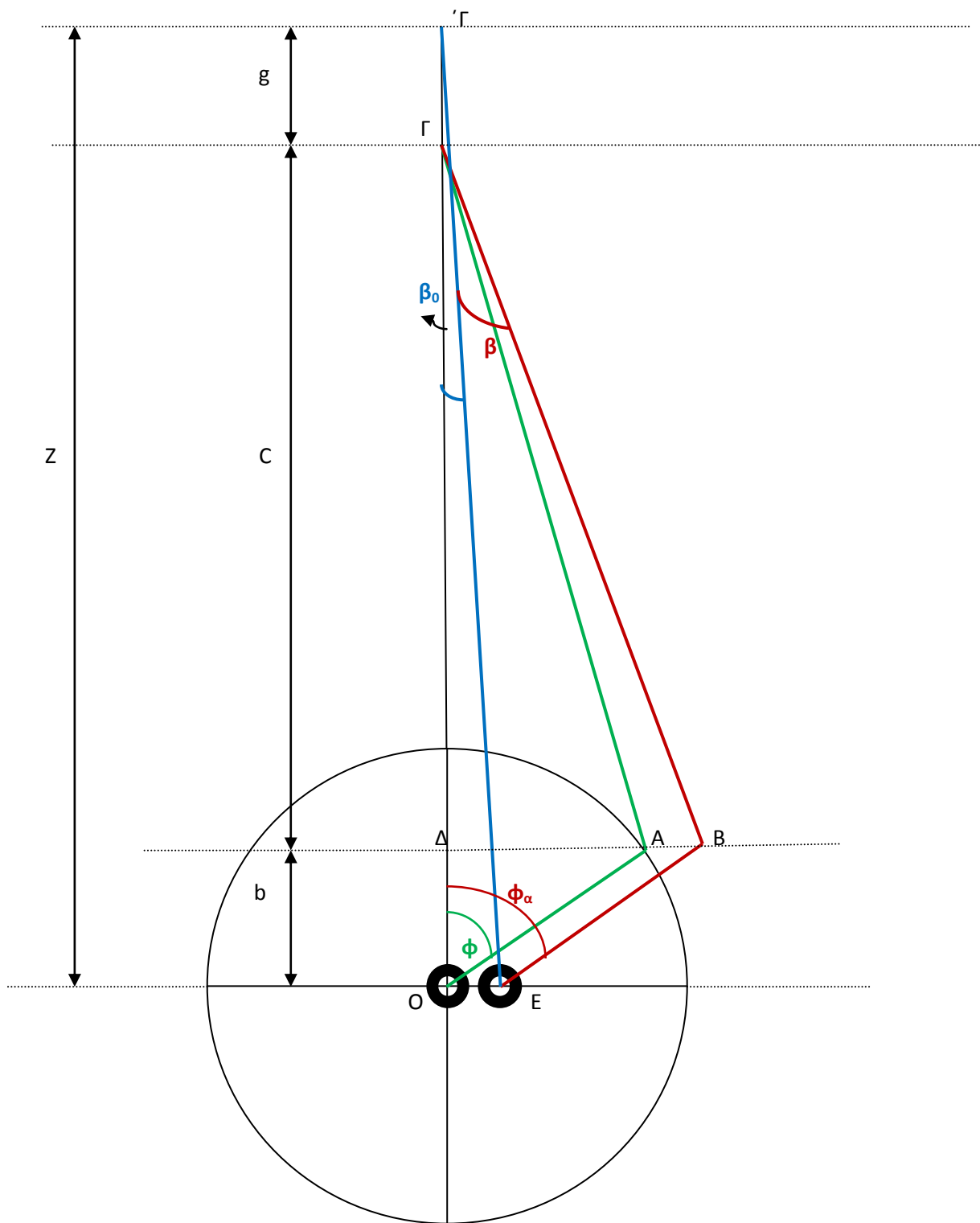
### 5.1 Κινηματική Ανάλυση εκκεντρότητας κομβίου βάσης

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από τα παρακάτω σχήματα, η εκκεντρότητα στροφάλου (crank offset) είναι ανάλογη της εκκεντρότητας πείρου εμβόλου (piston pin offset) σε αναφορά ίδιας γεωμετρίας μηχανισμού. Αυτό σημαίνει ότι η κινηματική ανάλυση θα είναι ίδια και για τις δύο περιπτώσεις. Έτσι στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί αποτυπώνεται γραφικά η εκκεντρότητα κομβίου βάσης με την μετατόπιση του κέντρου του κομβίου, ενώ στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η γεωμετρική απεικόνιση του μηχανισμού, βάση της οποίας γίνεται η ανάλυση.



Σχήμα 5.1 Απεικόνιση Εφαρμογής Εκκεντρότητας





Σχήμα 5.2 Γεωμετρική Απεικόνιση Εκκεντρότητας

Έτσι από το Σχήμα 5.2 λόγω της εκκεντρότητας (offset) θα έχουμε

$$L \sin \beta = r \sin \varphi + off$$

ή

$$r \sin \varphi_{\alpha} = r \sin \varphi + off$$

όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ το στρόφαλο και ο διωστήρας είναι σε ευθυγραμμία, οπότε το ολικό ύψος του κυλίνδρου είναι Z όπου

$$Z = c + b + g \quad (5.1)$$

Από το ορθογώνιο τρίγωνο ΟΓ'Ε έχουμε

$$EG'^2 = OG'^2 + OE^2 \rightarrow$$

$$(r + L)^2 = Z^2 + off^2 \rightarrow$$

$$Z = \sqrt{(r + L)^2 - off^2} \quad (5.2)$$

Επίσης από το ορθογώνιο τρίγωνο ΟΑΔ έχουμε ότι :

$$b = r \cos \varphi \quad (5.3)$$

επίσης από το ορθογώνιο τρίγωνο ΓΔΒ

$$BG^2 = GD^2 + BD^2 \rightarrow$$

$$GD^2 = BG^2 - BD^2$$

όπου  $BD = AD + AB$

$$BD = r \sin \varphi + off$$

Άρα  $GD^2 = L^2 - (r \sin \varphi + off)^2 \rightarrow$

$$c^2 = L^2 - (r \sin \varphi + off)^2 \rightarrow$$

$$c = \sqrt{L^2 - (r \sin \varphi + off)^2} \quad (5.4)$$

Και αντικαθιστώντας στην σχέση 5.1 θα έχουμε

$$Z = c + b + g \rightarrow$$

$$\sqrt{(r+L)^2 - off^2} = g + \sqrt{L^2 - (r\sin\varphi + \delta)^2} + r\cos\varphi \rightarrow$$

$$g = \sqrt{(r+L)^2 - off^2} - \sqrt{L^2 - (r\sin\varphi + \delta)^2} - r\cos\varphi$$

Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με την ακτίνα του στροφάλου  $r$  και θέτοντας όπου

$\frac{r}{l} = \lambda$  και  $\frac{off}{r} = \delta$  τότε η μετατόπιση εμβόλου θα μετασχηματιστεί ως εξής

$$X = \frac{g}{r} = \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} + 1\right)^2 - \delta^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - (\sin\varphi + \delta)^2} - \cos\varphi \quad (5.5)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ λόγω της εκκεντρότητας του σχηματίζεται μία μικρή γωνία διωστήρα  $\beta_0$  που θα υπολογίζεται από την σχέση :

$$\sin\beta_0 = \frac{off}{(l+r)}$$

$$\beta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{off}{(l+r)}\right) \quad (5.6)$$

Επομένως η τιμή της γωνίας του διωστήρα  $\beta$  θα είναι  $\beta = \beta_1 - \beta_0$

όπου 
$$\beta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{(r\sin\varphi + off)}{l}\right) \quad (5.7)$$

και άρα 
$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{r\sin\varphi + off}{l}\right) - \beta_0 \quad (5.8)$$

## 5.2 Υπολογισμός Ταχύτητας c

Η ταχύτητα του εμβόλου c προκύπτει με παραγωγή ως προς τον χρόνο της διαδρομής του εμβόλου

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (5.9)$$

Με την προϋπόθεση ότι το στρόφαλο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ ,  $c = \omega \left( \frac{dx}{d\varphi} \right)$

Έτσι η ακριβής τιμή της ταχύτητας που προκύπτει είναι :

$$c = \frac{c_1}{r} = \omega \left[ \sin \varphi + \frac{(\sin \varphi + \delta) \cos \varphi}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - (\sin \varphi + \delta)^2}} \right] \quad (5.10)$$

και η ανηγμένη ταχύτητα είναι

$$c = \frac{c_1}{r\omega} = \left[ \sin \varphi + \frac{(\sin \varphi + \delta) \cos \varphi}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - (\sin \varphi + \delta)^2}} \right] \quad (5.11)$$

## 5.3 Υπολογισμός επιτάχυνσης b

Η επιτάχυνση του εμβόλου b προκύπτει ομοίως με παραγωγή ως προς το χρόνο της ταχύτητας του εμβόλου

$$b = \frac{dc}{dt} = \frac{dc}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (5.12)$$

πάλι με την προϋπόθεση της  $\frac{d\varphi}{dt} = \omega = \text{σταθ.}$ , βρίσκεται η ακριβής τιμή της επιτάχυνσης που προκύπτει :

$$b = \frac{b}{r} = \omega^2 \left[ \frac{\cos \varphi + (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi - \delta \sin \varphi) \left( \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 - (\sin \varphi + \delta)^2 \right) + \cos^2 \varphi (\sin \varphi + \delta)^2}{2 \left( \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 - (\sin \varphi + \delta)^2 \right)^{3/2}} \right] \quad (5.13)$$

και η ανηγμένη επιτάχυνση είναι :

$$b = \frac{b}{r \omega^2} \left[ + \frac{\cos \varphi + (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi - \delta \sin \varphi) \left( \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 - (\sin \varphi + \delta)^2 \right) + \cos^2 \varphi (\sin \varphi + \delta)^2}{2 \left( \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 - (\sin \varphi + \delta)^2 \right)^{3/2}} \right] \quad (5.14)$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

## Δυνάμεις λόγω εκκεντρότητας κομβίου στροφάλου

Η εκτενής ανάλυση των δυνάμεων του κινηματικού μηχανισμού έχει προηγηθεί στην προηγούμενη περίπτωση εκκεντρότητας (Piston Pin Offset). Παρακάτω παρατίθενται οι εξισώσεις των σχετικών δυνάμεων και οι οποίες διαφέρουν για την εξεταζόμενη περίπτωση της εκκεντρότητας κομβίου - στροφάλου.

### 6.1 Μαζικές δυνάμεις

Στον κύλινδρο αναπτύσσονται μαζικές δυνάμεις από τα κινούμενα εξαρτήματα τα οποία βρίσκονται μέσα σε αυτόν. Η ανάλυση των δυνάμεων αυτών είναι παρόμοια

με την περίπτωση εφαρμογής εκκεντρότητας πείρου – εμβόλου η οποία έχει προηγηθεί στην ενότητα 4.1.

## 6.2 Δυνάμεις Κινηματικού Μηχανισμού.

### 6.2.1 Δυνάμεις από Αέρια.

- Δύναμη παρειάς κυλίνδρου  $N_g$

$$N_g = P_g \tan \beta \quad (6.1)$$

$$N_g = P_g \tan(\sin^{-1}(\frac{r \sin \varphi + off}{l}) - \beta_0) \quad (6.2)$$

- Δύναμη Διωστήρα  $S_g$

$$S_g = \frac{P_g}{\cos \beta} \quad (6.3)$$

$$S_g = \frac{P_g}{\cos(\sin^{-1}(\frac{r \sin \varphi + off}{l}) - \beta_0)} \quad (6.4)$$

- Στρεπτική Δύναμη Στροφάλου

$$T_g = S_g \sin(\varphi + \beta) = P_g \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (6.5)$$

- Ακτινική Δύναμη Στροφάλου

$$R_g = S_g \cos(\varphi + \beta) = P_g \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (6.6)$$

όπου  $\beta$  η γωνία διωστήρα με μέτρο

$$\beta = \sin^{-1}(\frac{r \sin \varphi + off}{l}) - \beta_0$$

- Στρεπτική ροπή

$$M_{\sigma g} = T_g r = P_g r \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (6.7)$$

με φορά αυτή της γωνίας στροφάλου  $\varphi$

- Ροπή Ανατροπής

$$M_{\alpha g} = N_g H = -M_{\sigma g} \quad (6.8)$$

Αντίστοιχα οι Ροπές  $M_{\sigma g}$  και  $M_{\alpha g}$  ανάγονται στη μονάδα όγκου εμβολισμού ( $V_h = F_s = 2r$ ) οπότε προκύπτουν τα μεγέθη  $\mu_{\sigma g}$ ,  $\mu_{\alpha g}$

### 6.2.2 Παλινδρομικές Μαζικές Δυνάμεις.

Όπως είναι γνωστό οι παλινδρομούσες μάζες έχουν επιτάχυνση  $b$  που σε ανηγμένη μορφή υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$b = \frac{b}{r} \omega^2 \left[ \cos\varphi + \frac{(\cos^2\varphi - \sin^2\varphi - \delta \sin\varphi) \left( \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - (\sin\varphi + \delta)^2 \right) + \cos^2\varphi (\sin\varphi + \delta)^2}{2 \left( \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - (\sin\varphi + \delta)^2 \right)^{3/2}} \right] \quad (6.9)$$

με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε την ανηγμένη επιτάχυνση του εμβόλου ( $b / r\omega^2$ ) για κάθε γωνία  $\varphi$ .

Οι δυνάμεις που ασκούνται από το έμβολο είναι ίδιες με εκείνες που ασκούνται στη περίπτωση εκκεντρότητας πείρου εμβόλου και οι οποίες έχουν αναλυθεί εκτενώς στην ενότητα 4.2.2



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα Η/Υ σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran για τον υπολογισμό των κινηματικών μεγεθών και των δυνάμεων του μηχανισμού εμβόλου – διωστήρα – στροφάλου στην περίπτωση ύπαρξης εκκεντρότητας πείρου – εμβόλου και εκκεντρότητας κομβίου – στροφάλου.

Επιπλέον έγινε και μια παραμετρική ανάλυση επίδρασης της ταχύτητας περιστροφής και του μεγέθους των μαζών του κινηματικού μηχανισμού. Όλα τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν παρατίθενται παρακάτω.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής η οποία χρησιμοποιείται ως μοντέλο για την διεξαγωγή των συμπερασμάτων είναι ως ακολούθως:

- Διάμετρος Εμβόλου  $D = 140\text{mm}$
- Διαδρομή Εμβόλου  $S = 180\text{mm}$
- Μήκος Διωστήρα  $L = 350\text{mm}$
- Μάζα Εμβόλου  $m_{\text{εμβ}} = 4,97\text{ kgr}$
- Μάζα Διωστήρα  $m_{\text{δωσ}} = 6,33\text{ kgr}$
- Μάζα Στροφάλου  $m_{\text{στρ}} = 5\text{ kgr}$
- Απόσταση κ.β από τη κάτω κεφαλή =  $94\text{mm}$
- Ονομαστική Ταχύτητα Περιστροφής  $N=1200\text{rpm}$

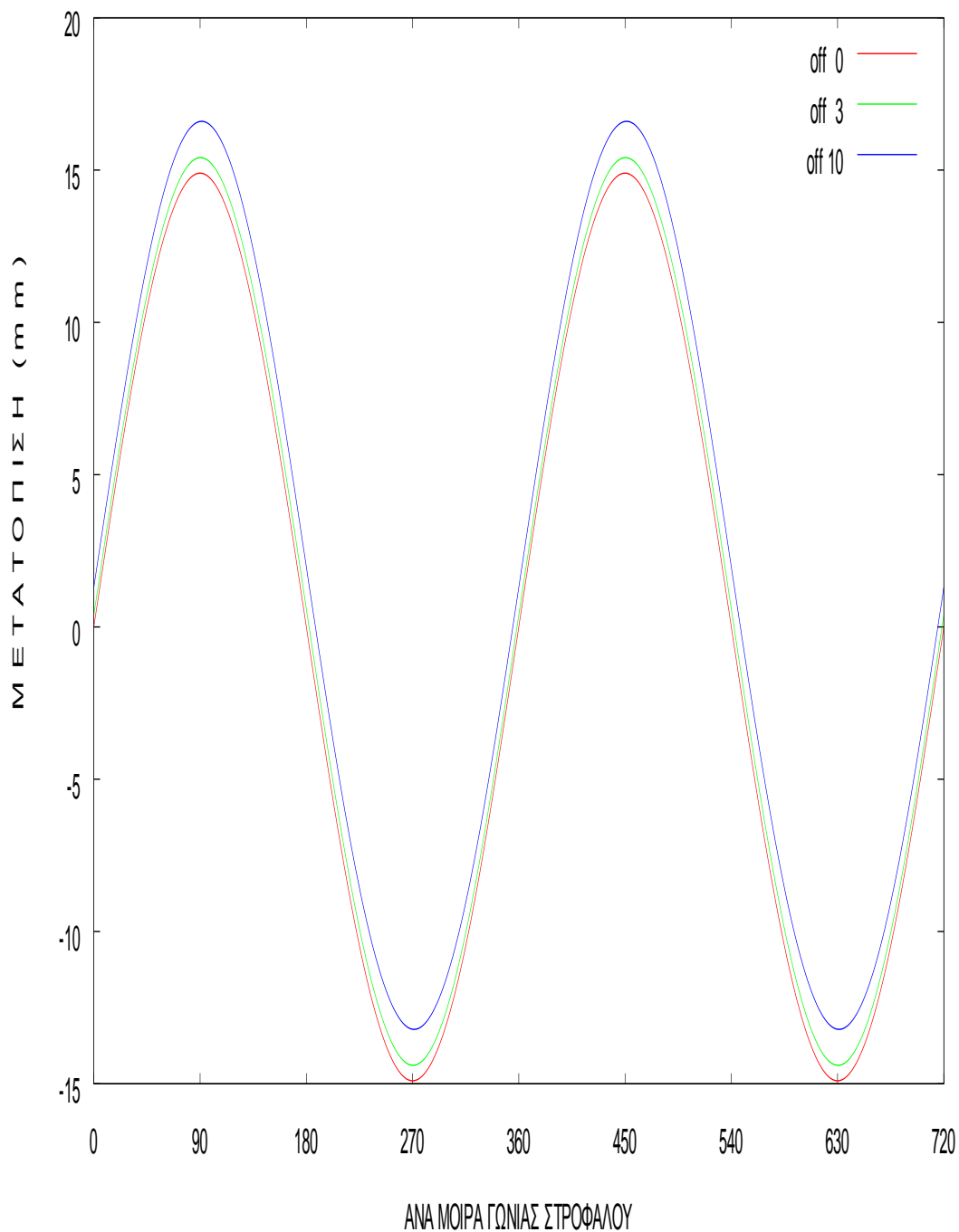
Οι δύο περιπτώσεις (εκκεντρότητα πείρου – εμβόλου και κομβίου στροφάλου) μελετήθηκαν για τιμές μεγέθους εκκεντρότητας  $0\text{mm} - 3\text{mm} - 10\text{mm}$  δηλαδή σε ποσοστό  $0\% - 2.1\% - 7.1\%$  επί της διαμέτρου του εμβόλου, όπως και σε κάποιες περιπτώσεις για τιμές  $0\text{mm} - 15\text{mm} - 60\text{mm}$  δηλαδή σε ποσοστό  $0\% - 11\% - 43\%$  επίσης επί της διαμέτρου του εμβόλου, όπου ήταν απαραίτητο για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων και των οποίων τα διαγράμματα παρατίθενται στην ενότητα 7.2.1 σελίδα 153.

Επίσης η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής κατά την παραμετρική ανάλυση μελετήθηκε και υπολογίσθηκε για μέγεθος στροφών μηχανής με τιμές  $1000\text{rpm} - 1200\text{rpm} - 1500\text{rpm}$

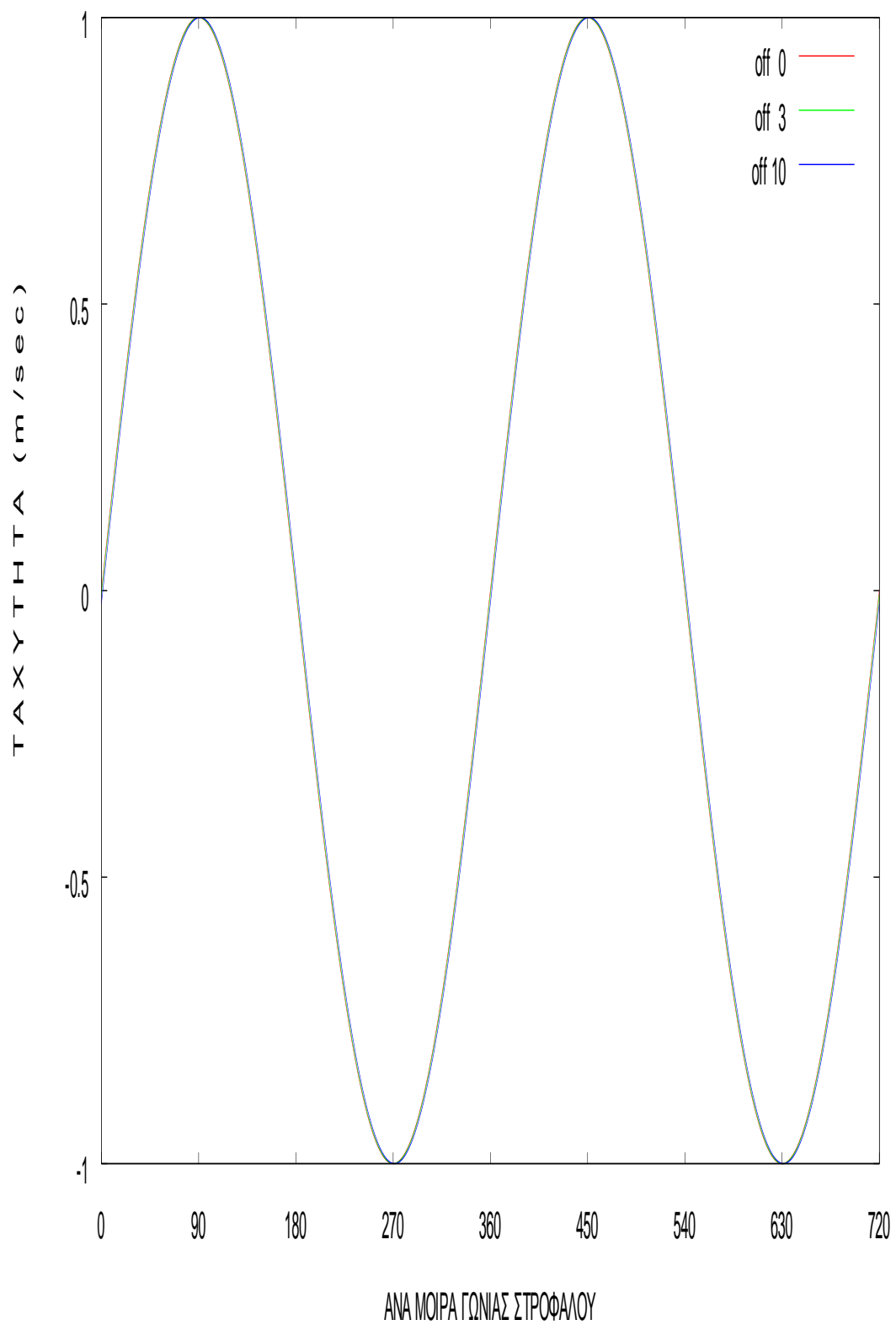
Τέλος σε όλες τις παραπάνω εξεταζόμενες περιπτώσεις και για τα δύο είδη εκκεντροτήτων πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με μεταβολή στο μέγεθος των μαζών του κινηματικού μηχανισμού ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση που έχει η μεταβολή του μεγέθους των μαζών στην κινηματική του μηχανισμού.

## 7.1. Διαγράμματα για εκκενρότητα πείρου εμβόλου.

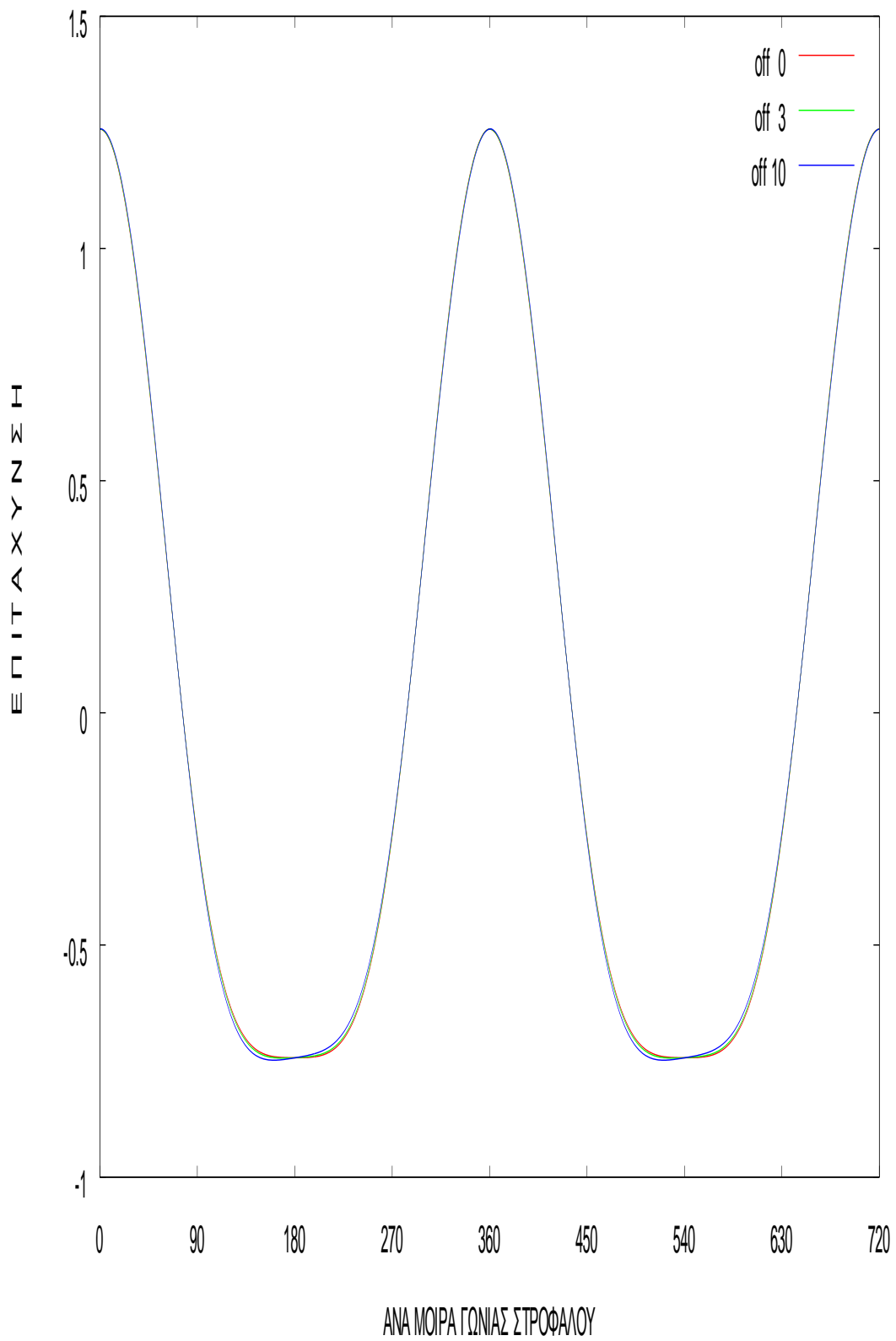
### 7.1.1 Εφαρμογή εκκενρότητας για off=0mm, off=3mm ,off=10mm



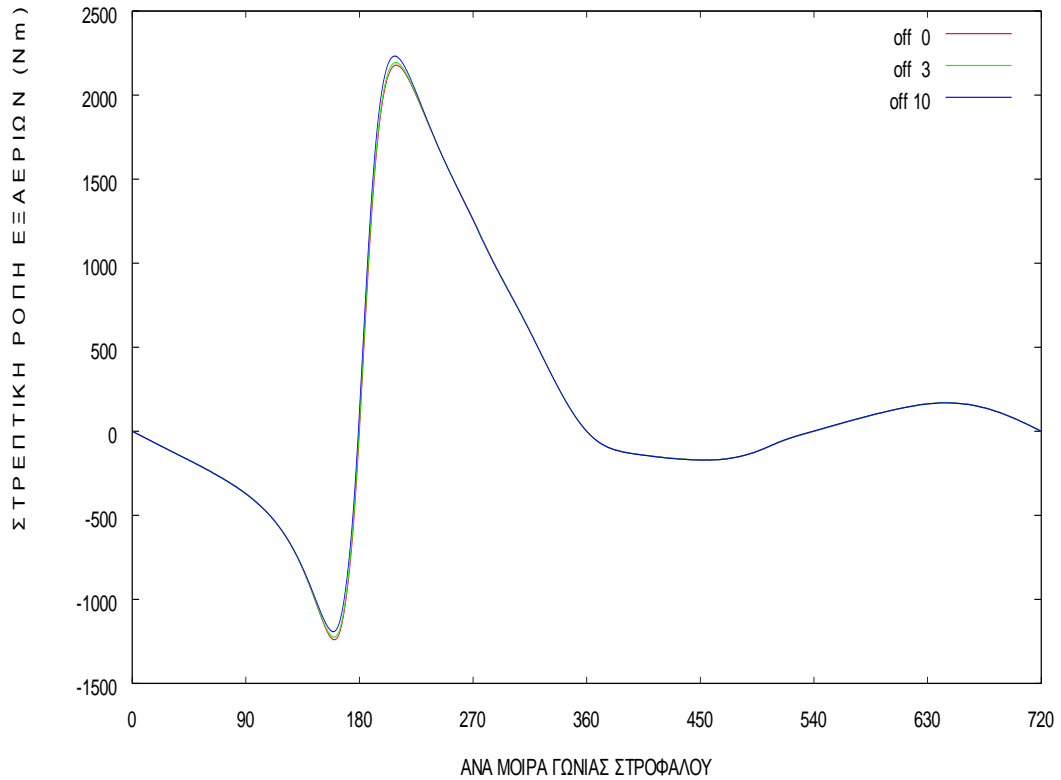
Σχ.7.1 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



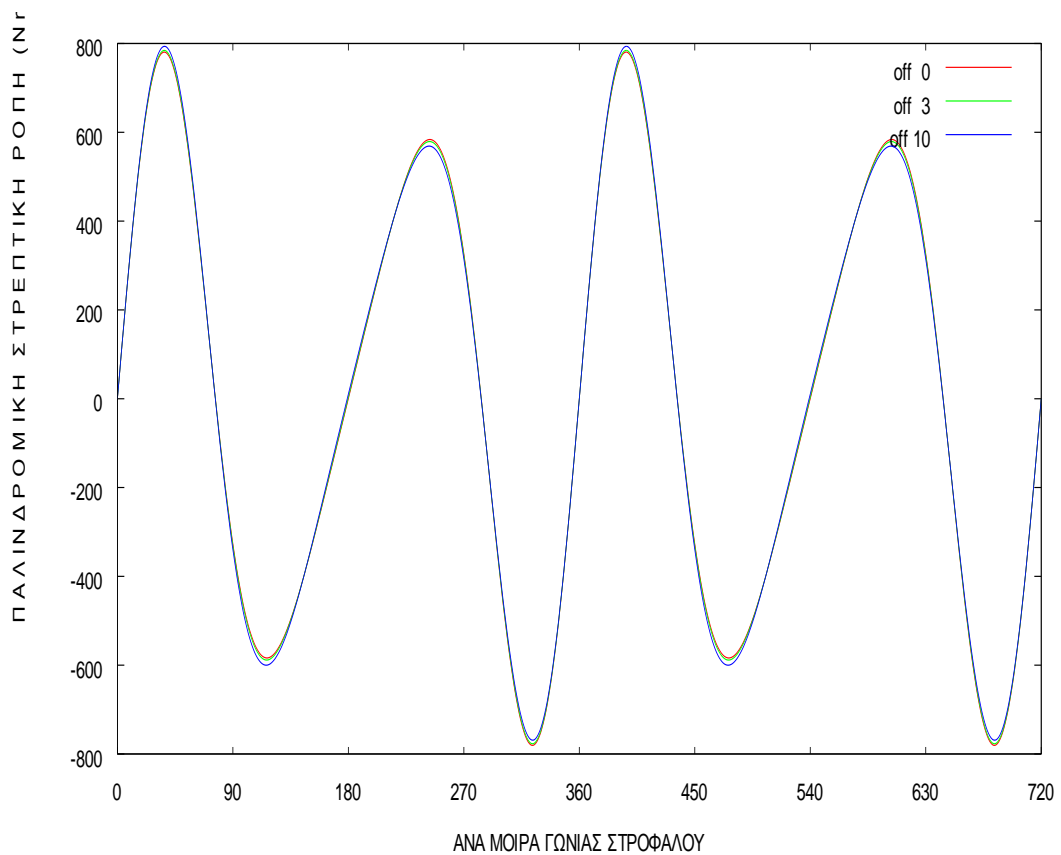
**Σχ.7.2 Επιτάχυνση σε ( m/s<sup>2</sup> ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



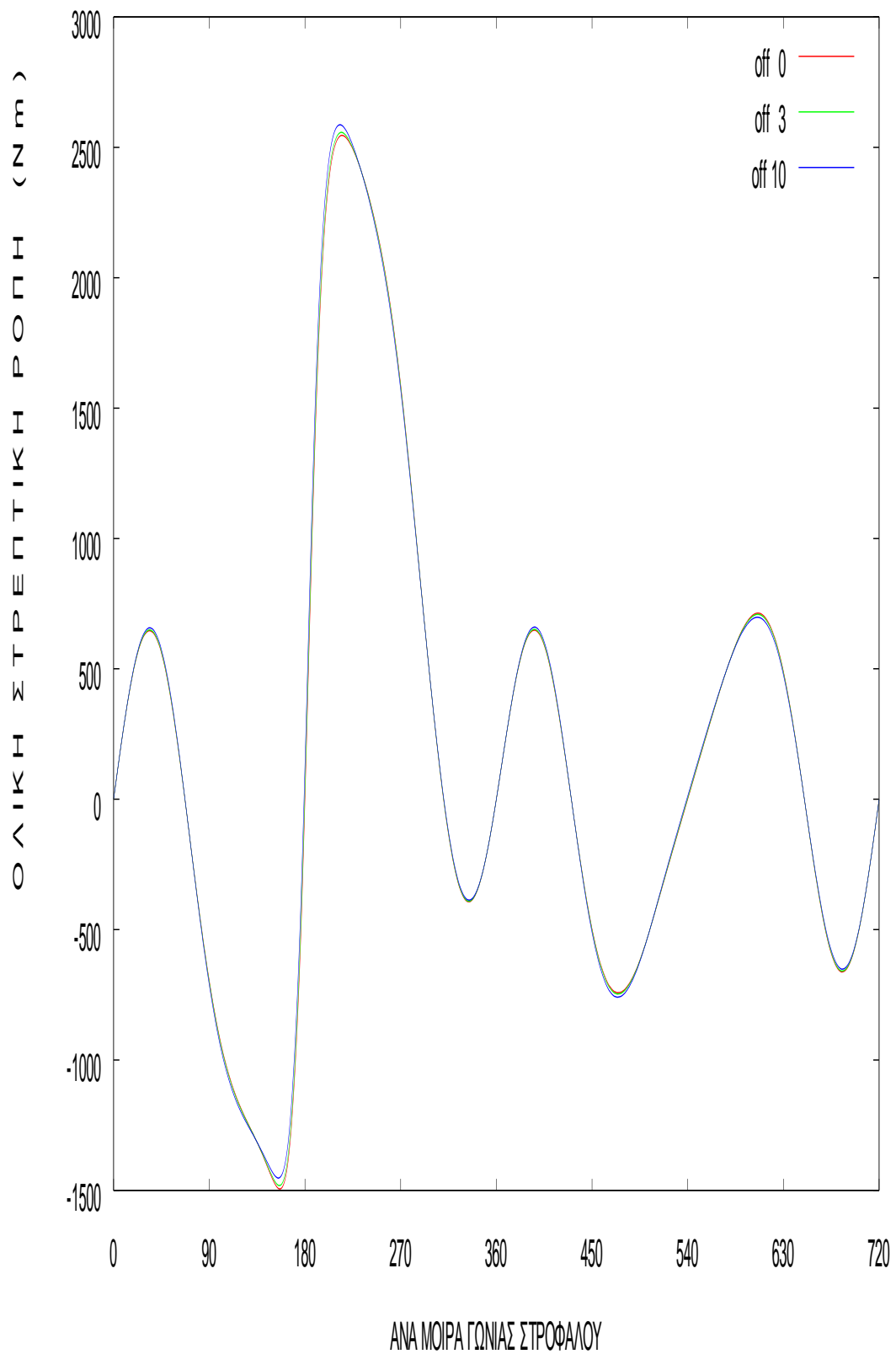
**Σχ.7.3 Ταχύτητα σε ( m/s) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



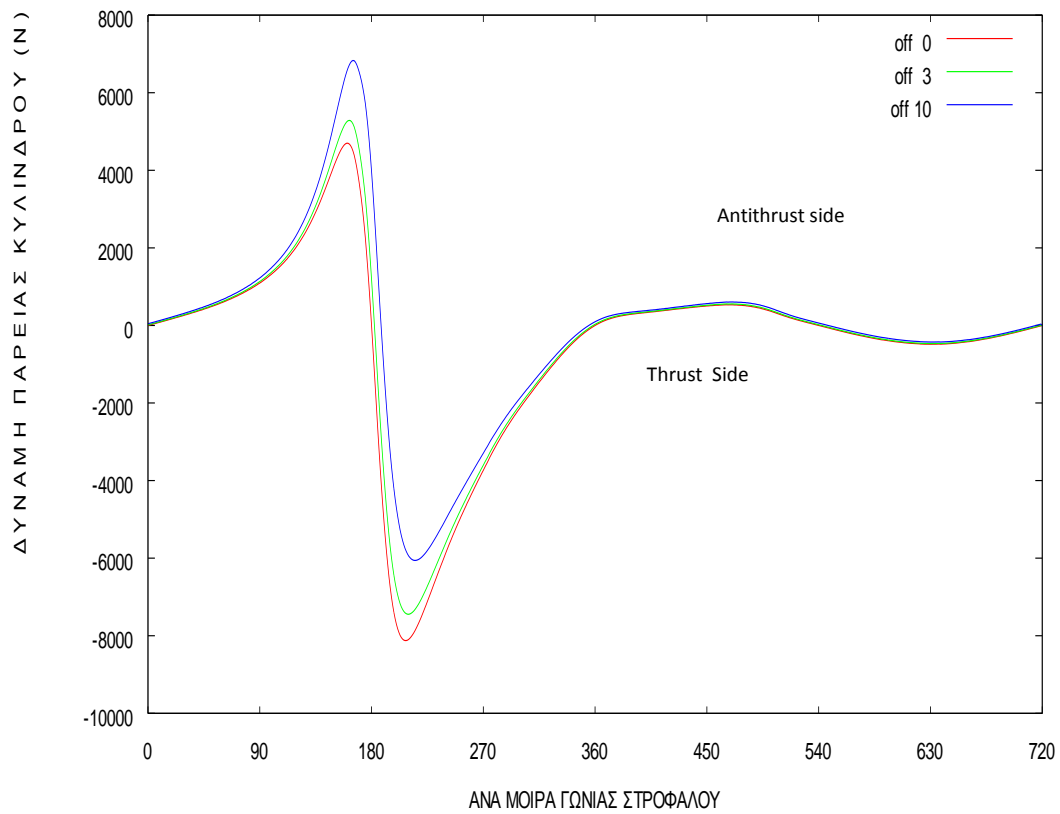
**Σχ. 7.4. Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



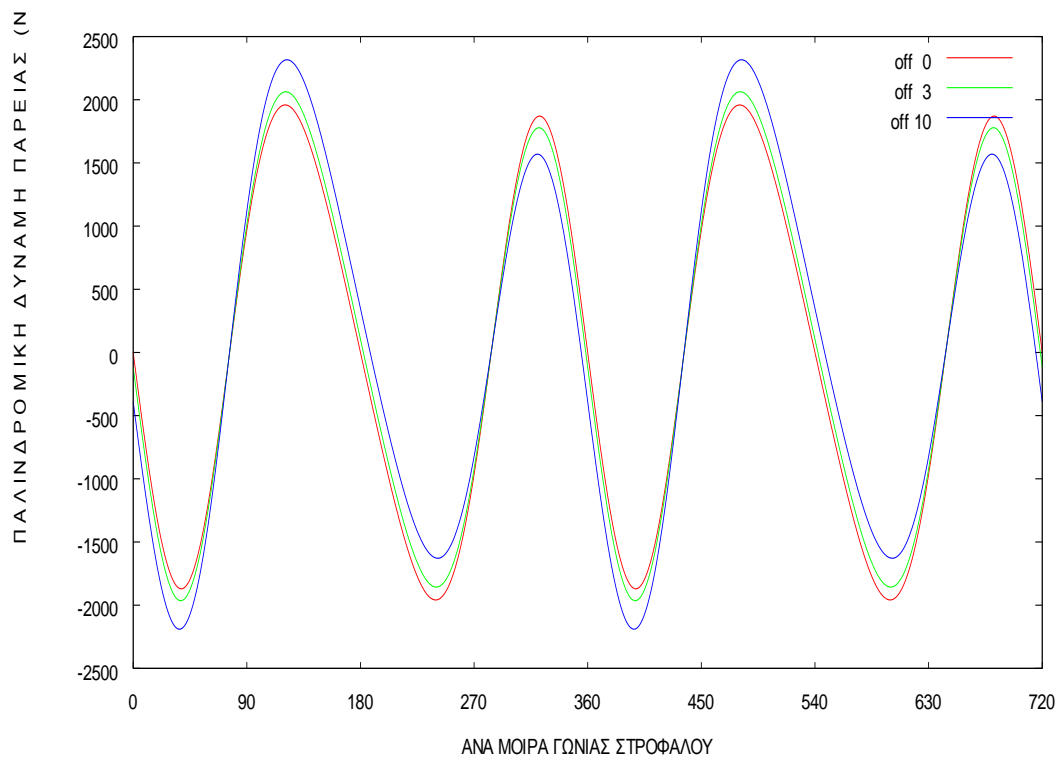
**Σχ.7.5 Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ. 7.6 Συνολική στρεπτική ροπή σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στρόφαλου**

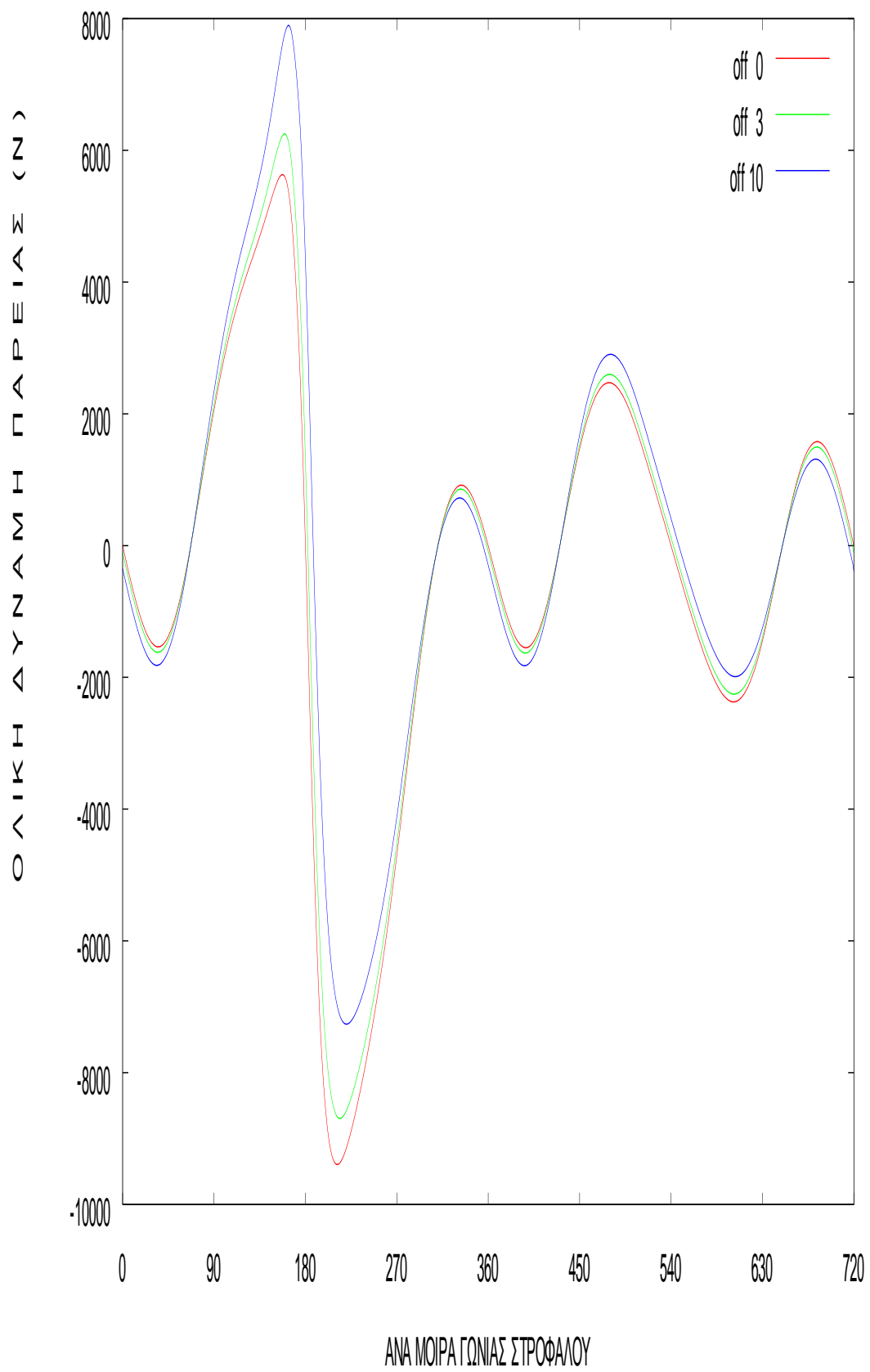


**Σχ.7.7 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

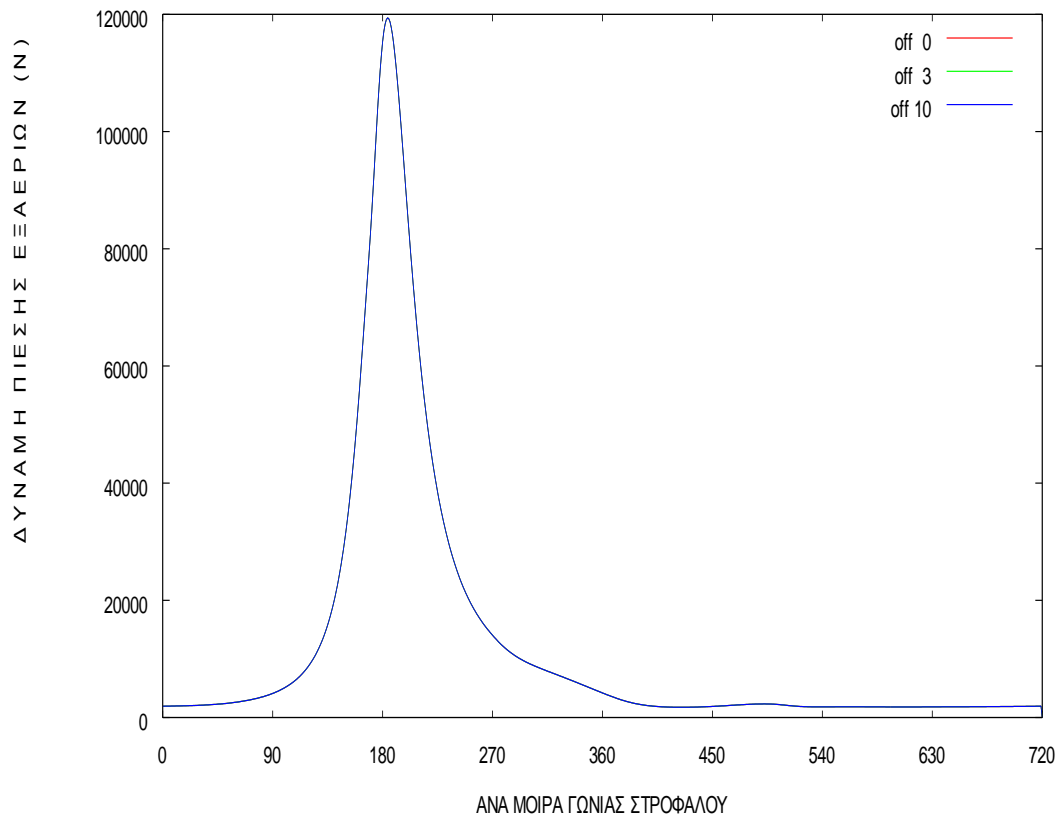


**Σχ.7.8 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

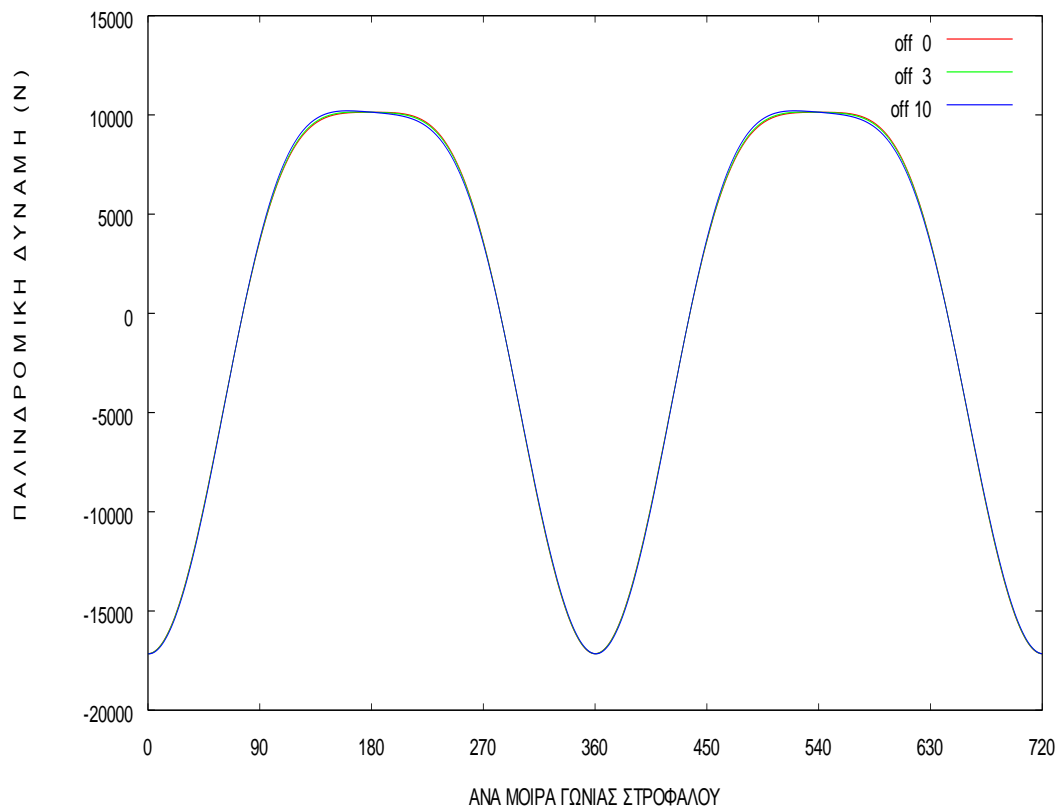




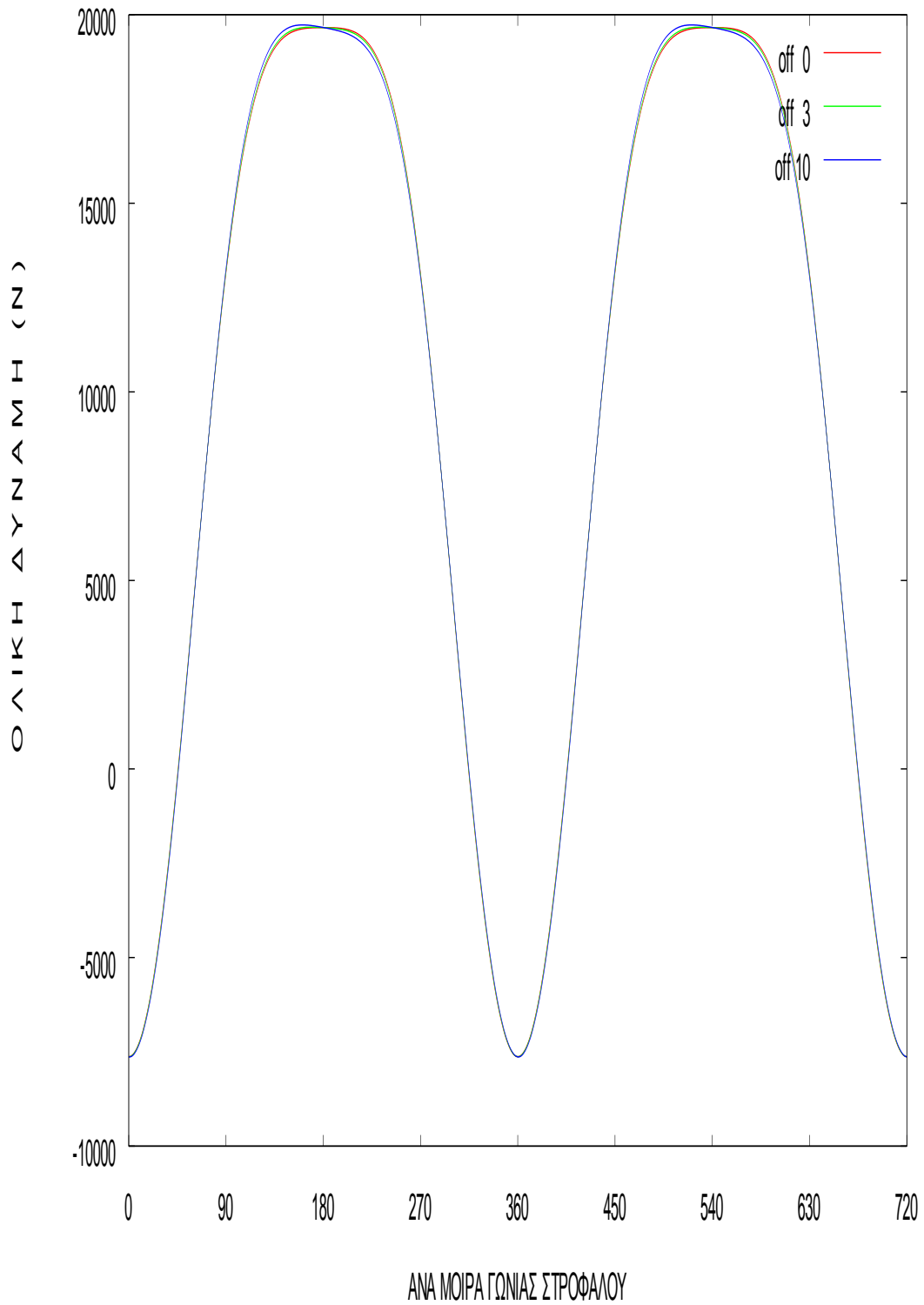
Σχ.7.9 Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



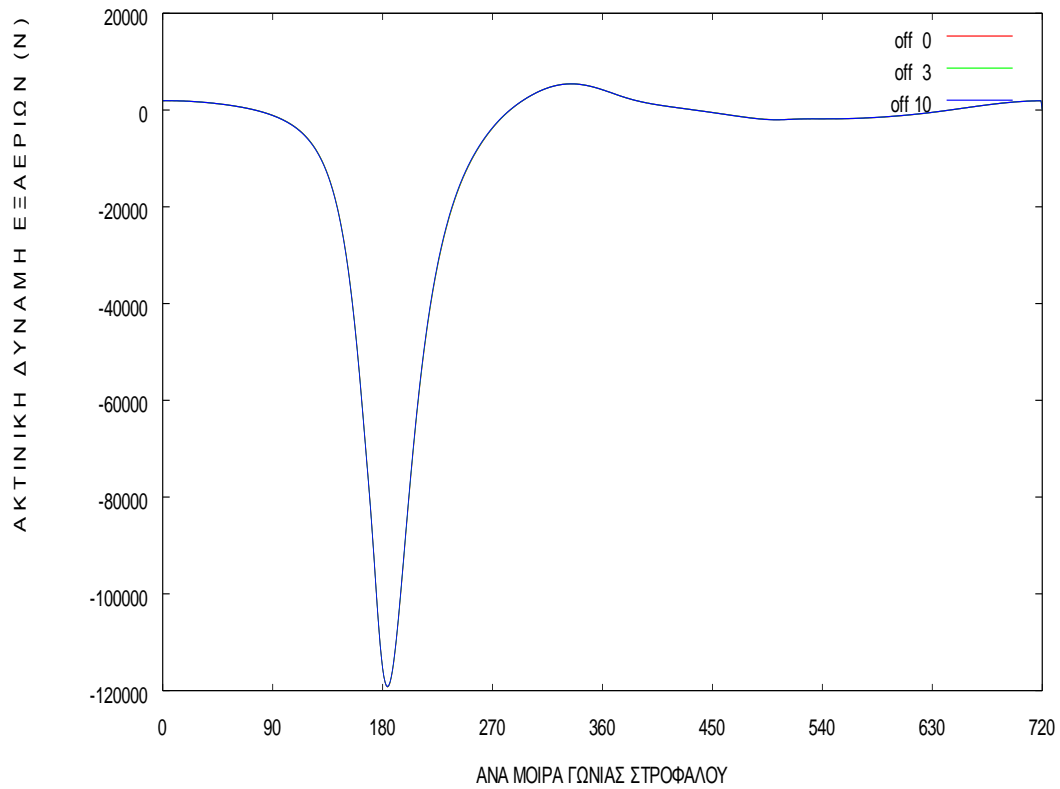
**Σχ.7.10 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



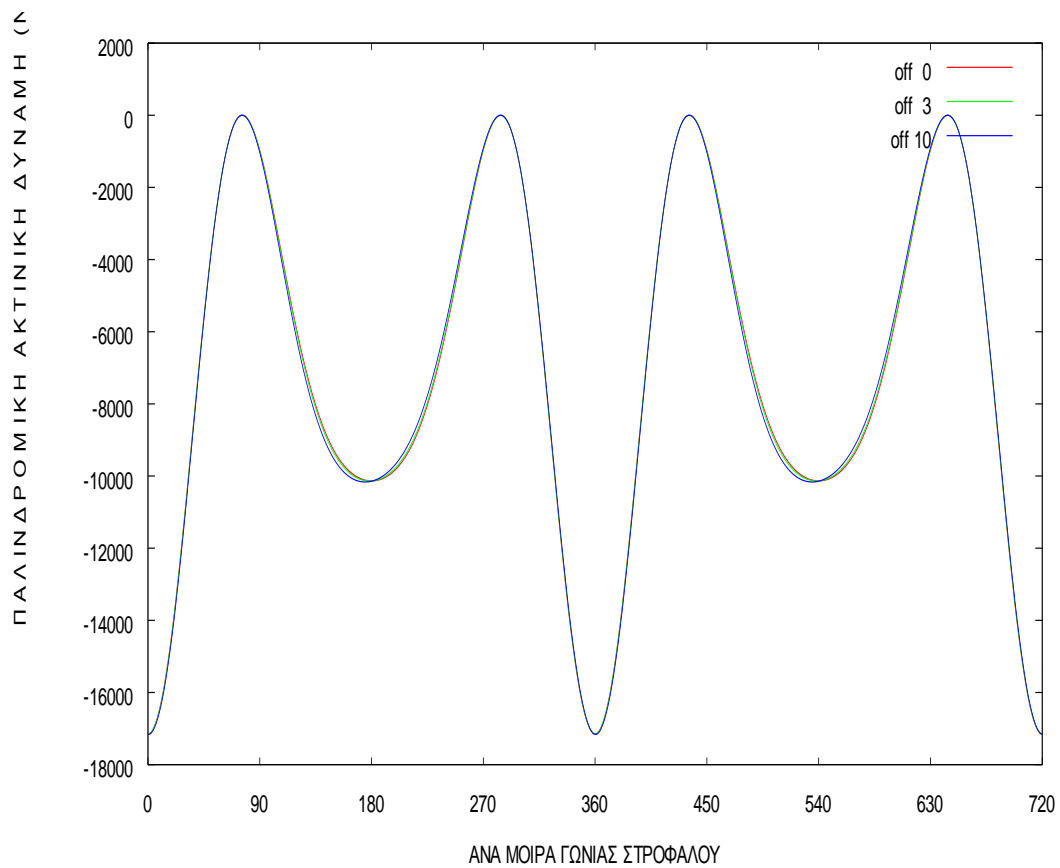
**Σχ.7.11 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



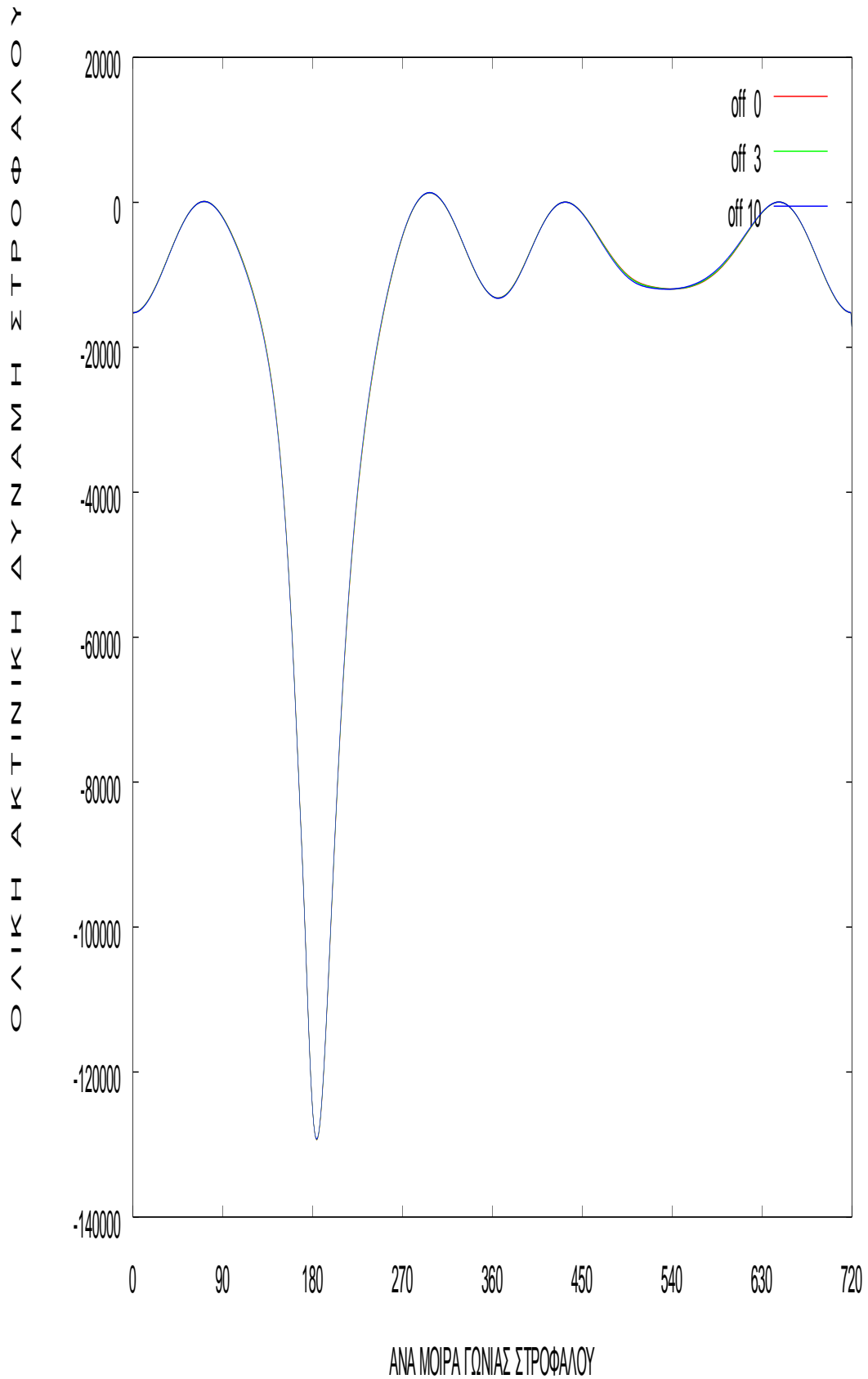
**Σχ.7.12 Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα στροφάλου**



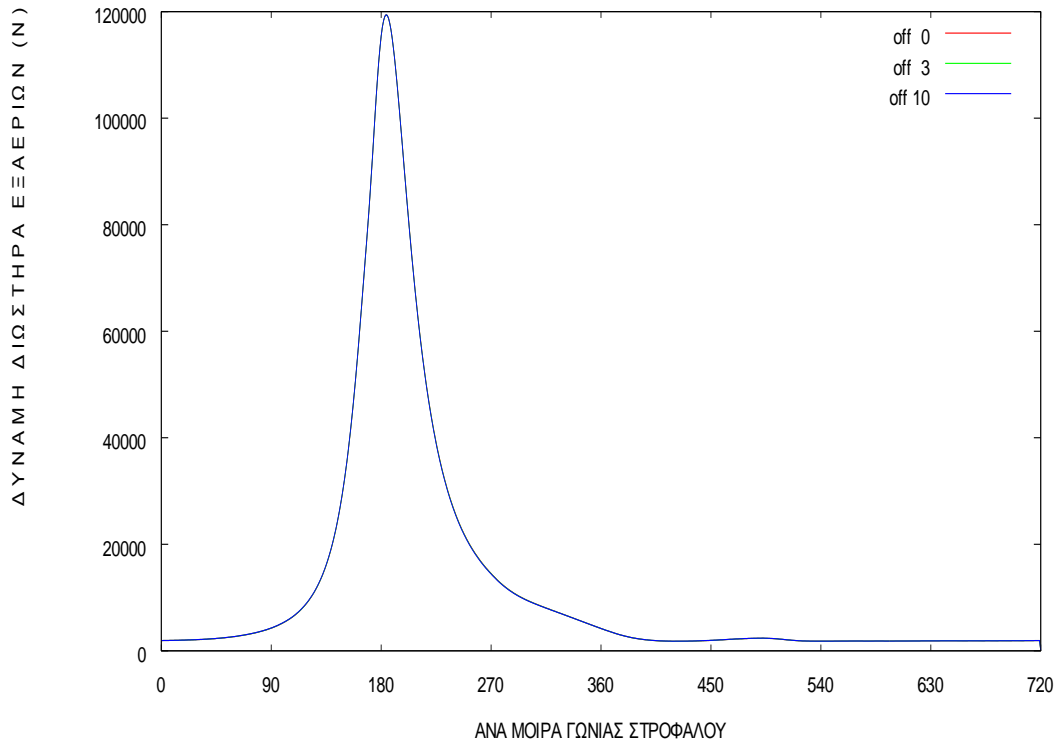
**Σχ.7.13** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



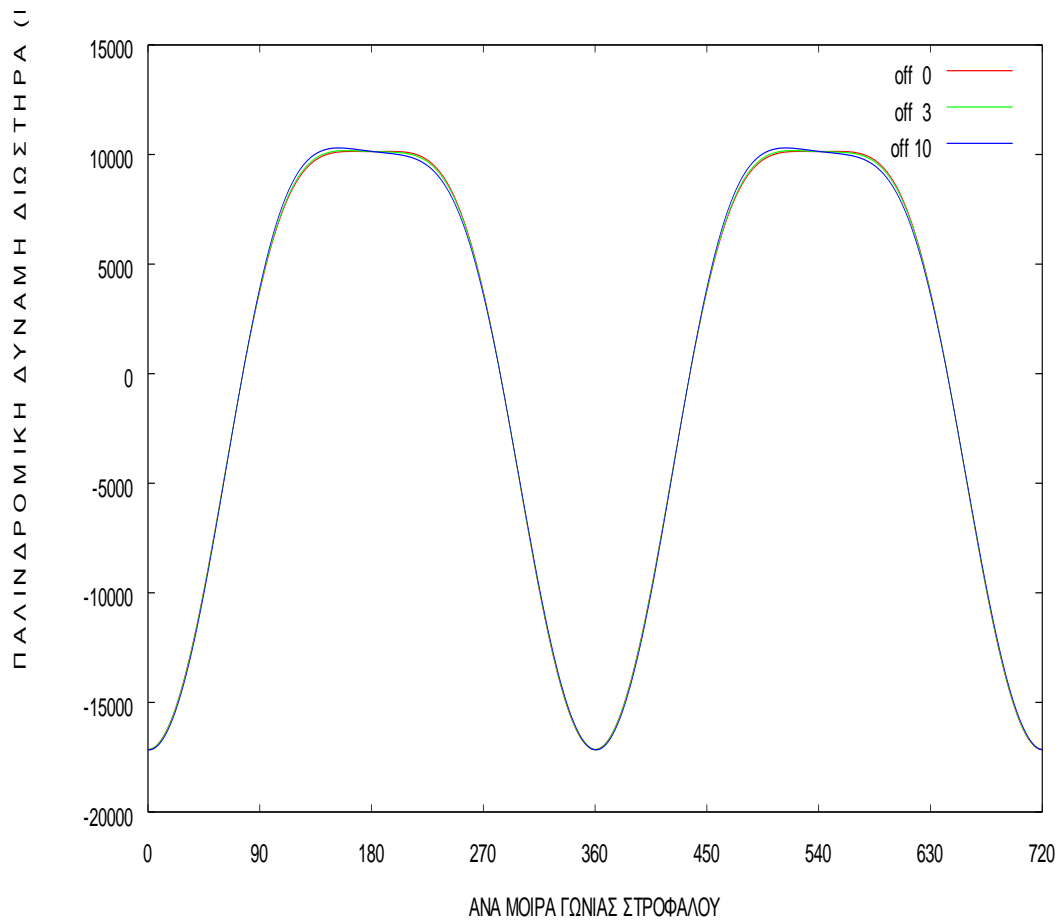
**Σχ.7.14** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



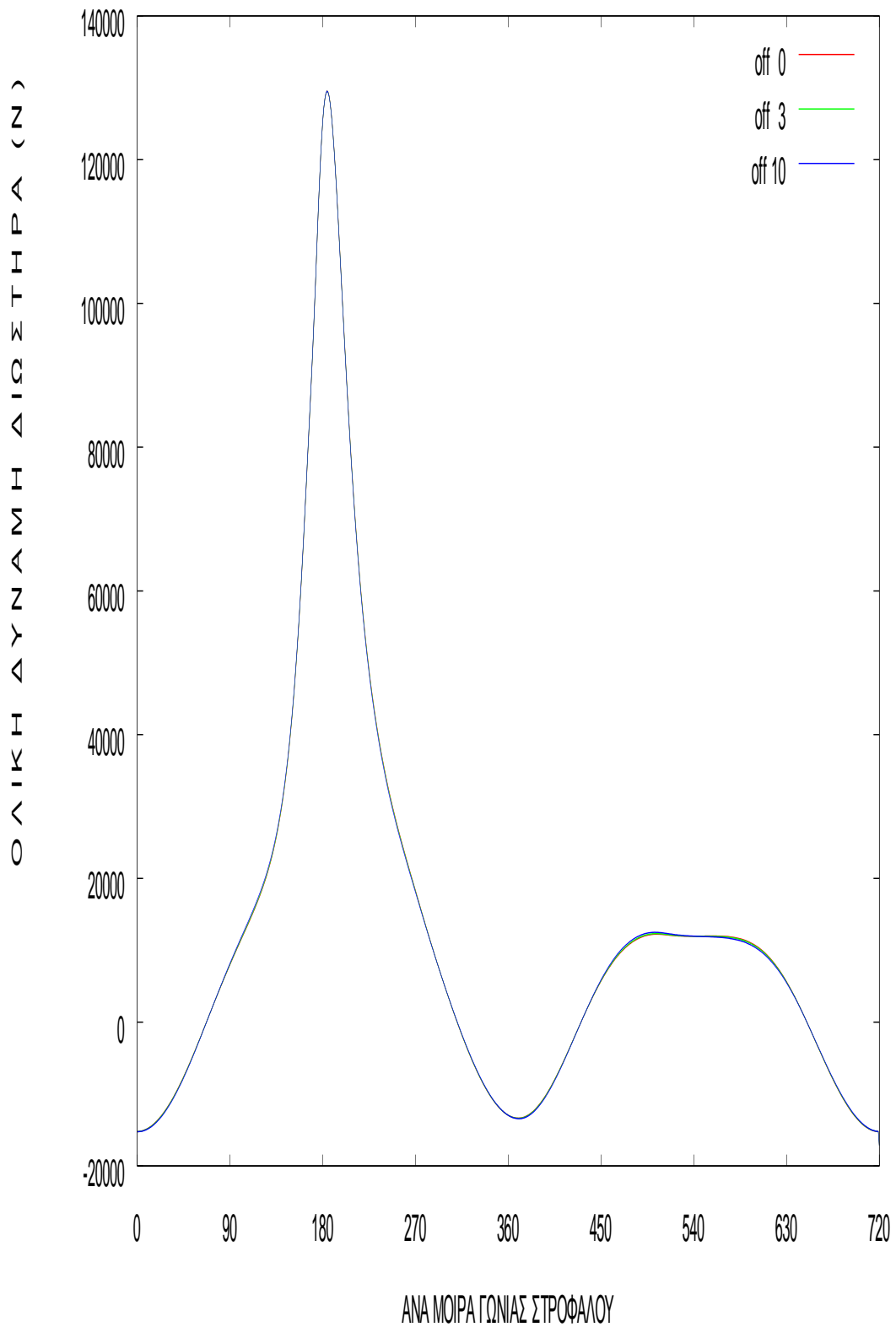
**Σχ.7.15** Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



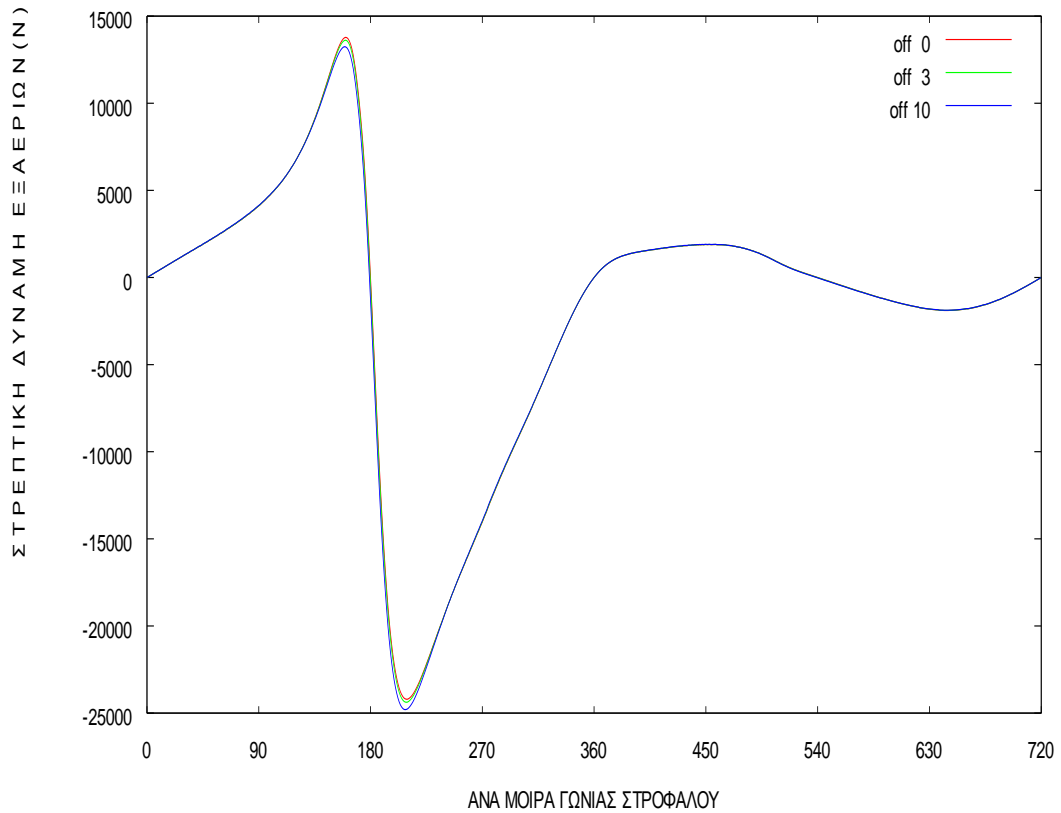
**Σχ.7.16 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



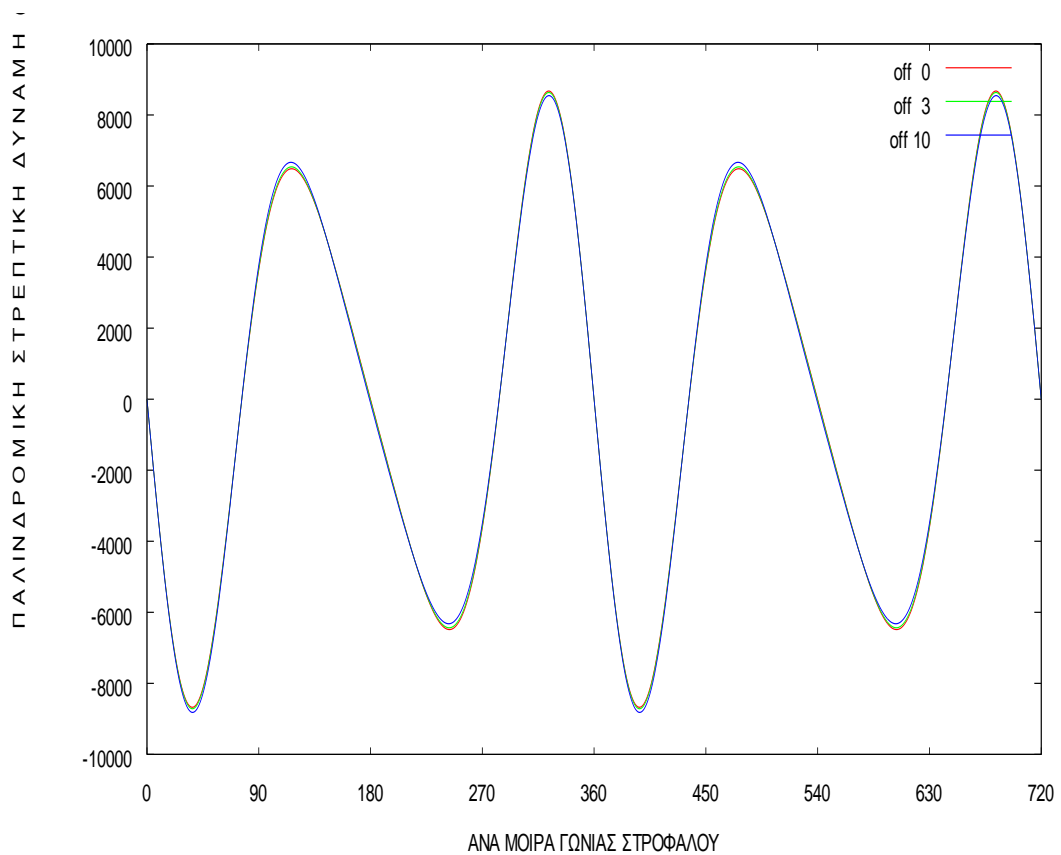
**Σχ.7.17 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.18** Ολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

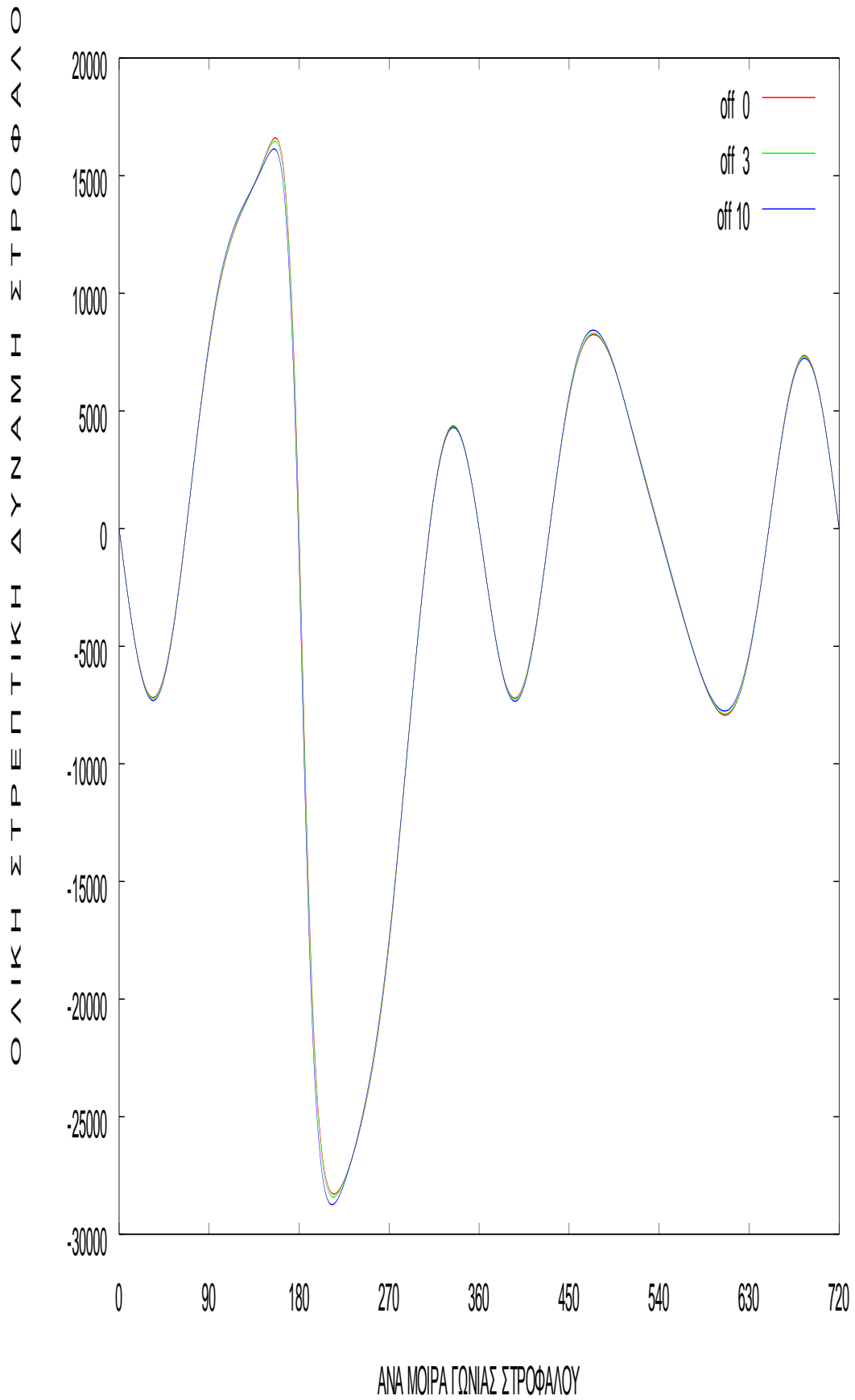


**Σχ.7.19 Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.20 Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**





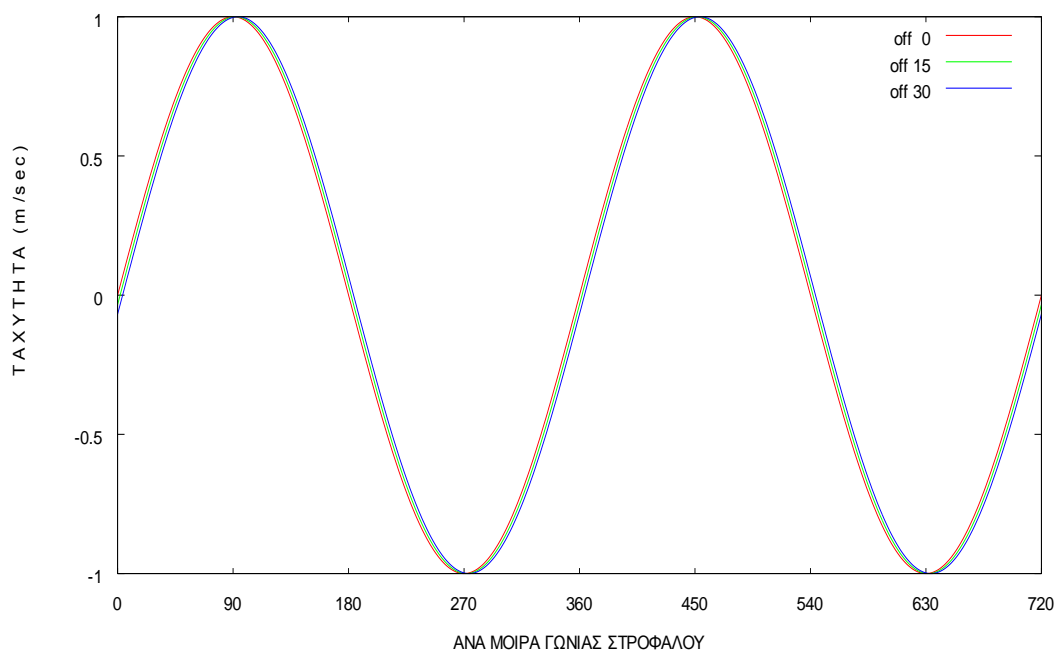
**Σχ.7.21** Ολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται σαφές ότι όταν εφαρμόζεται μία εκκεντρότητα πείρου εμβόλου παρατηρείται μία διαφορά κάθετης μετατόπισης του εμβόλου, όταν αυτό βρίσκεται στο ΑΝΣ και η οποία αυξάνει όσο αυξάνεται το μέγεθος της εφαρμοζόμενης αυτής εκκεντρότητας.

Επίσης αξιοσημείωτη διαφορά παρουσιάζεται και στην πλευρική δύναμη εξ αερίων  $N_g$  όσο και στην πλευρική δύναμη  $N_l$ . Από το παραπάνω διάγραμμα(Σχήμα 7.9) της συνολικής πλευρικής δύναμης  $N_{tot}$  παρατηρείται ότι η δύναμη αυτή γύρω από το ΑΝΣ είναι υψηλότερη από κάθε άλλη θέση γωνίας στροφάλου εξαιτίας της καύσης και των δυνάμεων αδρανείας.

Η  $N_{tot}$  αυξάνει στην κατεύθυνση ώσης του εμβόλου δηλαδή προς το ΑΝΣ μέχρι και τη φάση καύσης, ενώ μετά μειώνεται. Μάλιστα η μείωση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο αυξάνεται το μέγεθος της εκκεντρότητας, ενώ η πλευρική δύναμη στην κατεύθυνση ώσης του εμβόλου ελαττώνεται σε ένα βαθμό, που αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους της εκκεντρότητας.

Το διάγραμμα που ακολουθεί είναι για μεγέθη εκκεντρότητας 0, 15 ,30 και παρατίθεται για την καλύτερη απεικόνιση της μεταβολής της ταχύτητας ολίσθησης καθώς και για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω επισημάνσεων.

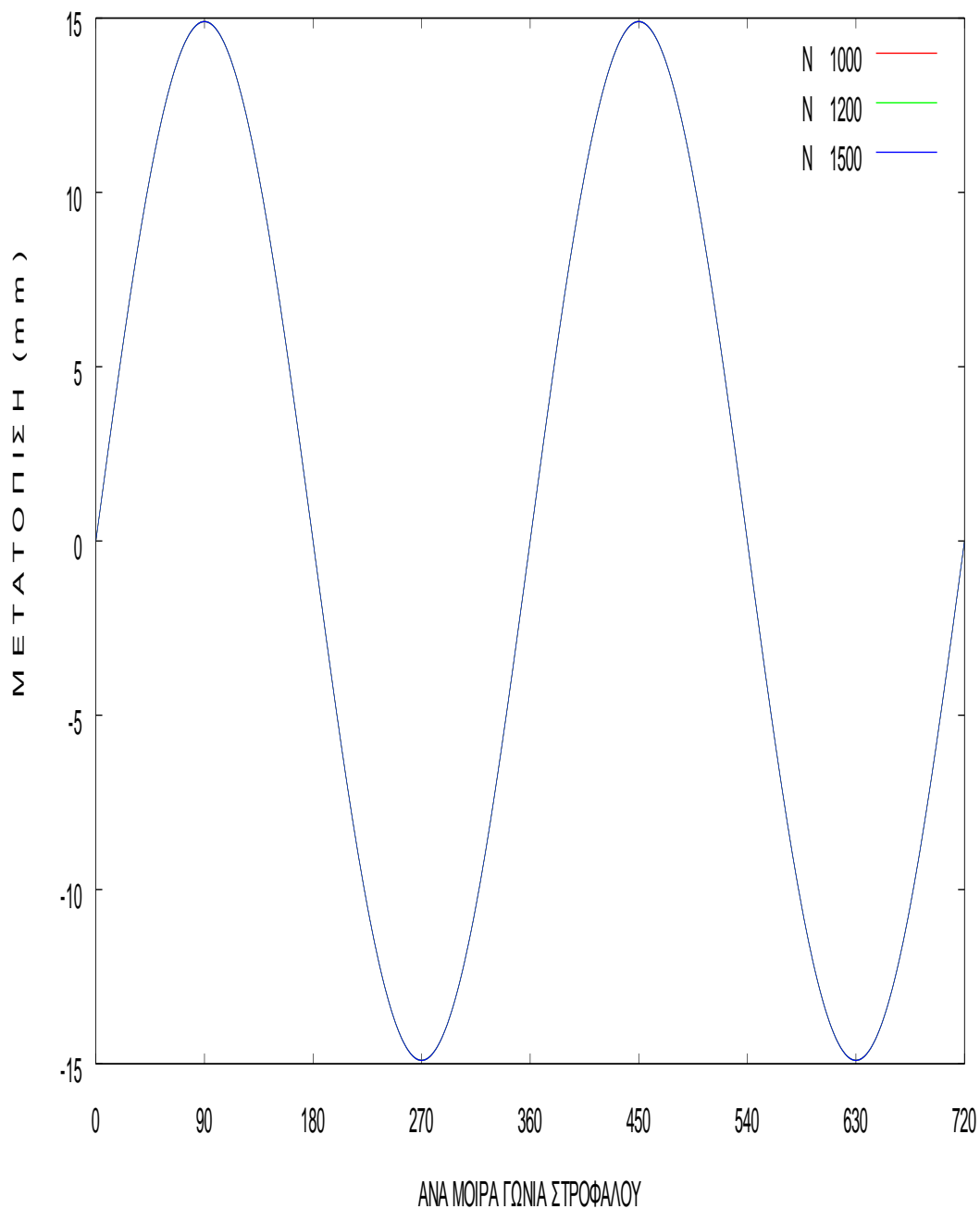


**Σχ. 7.22 Ταχύτητα σε ( m/s) /ανά μοίρα στροφάλου**

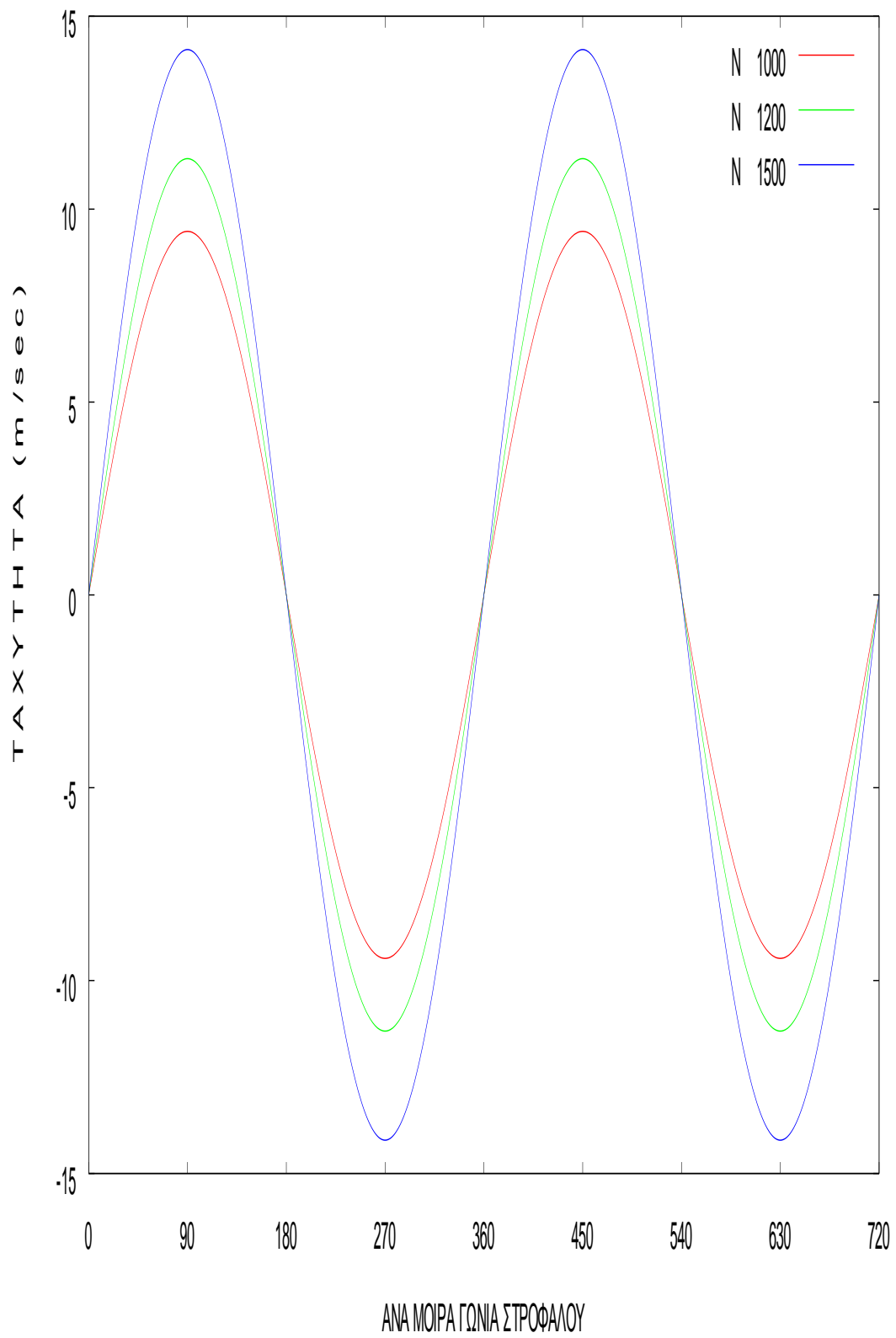
Αντιθέτως για ένα εύρος τιμών γωνίας στροφάλου  $90^0 - 270^0$  αυξάνεται η ταχύτητα ολίσθησης αυξάνοντας και την τριβή

### 7.1.2 Εκκεντρότητα Πείρου Εμβόλου – Παραμετρική Ανάλυση. Επίδραση ταχύτητας περιστροφής N (1000, 1200, 1500 rpm)

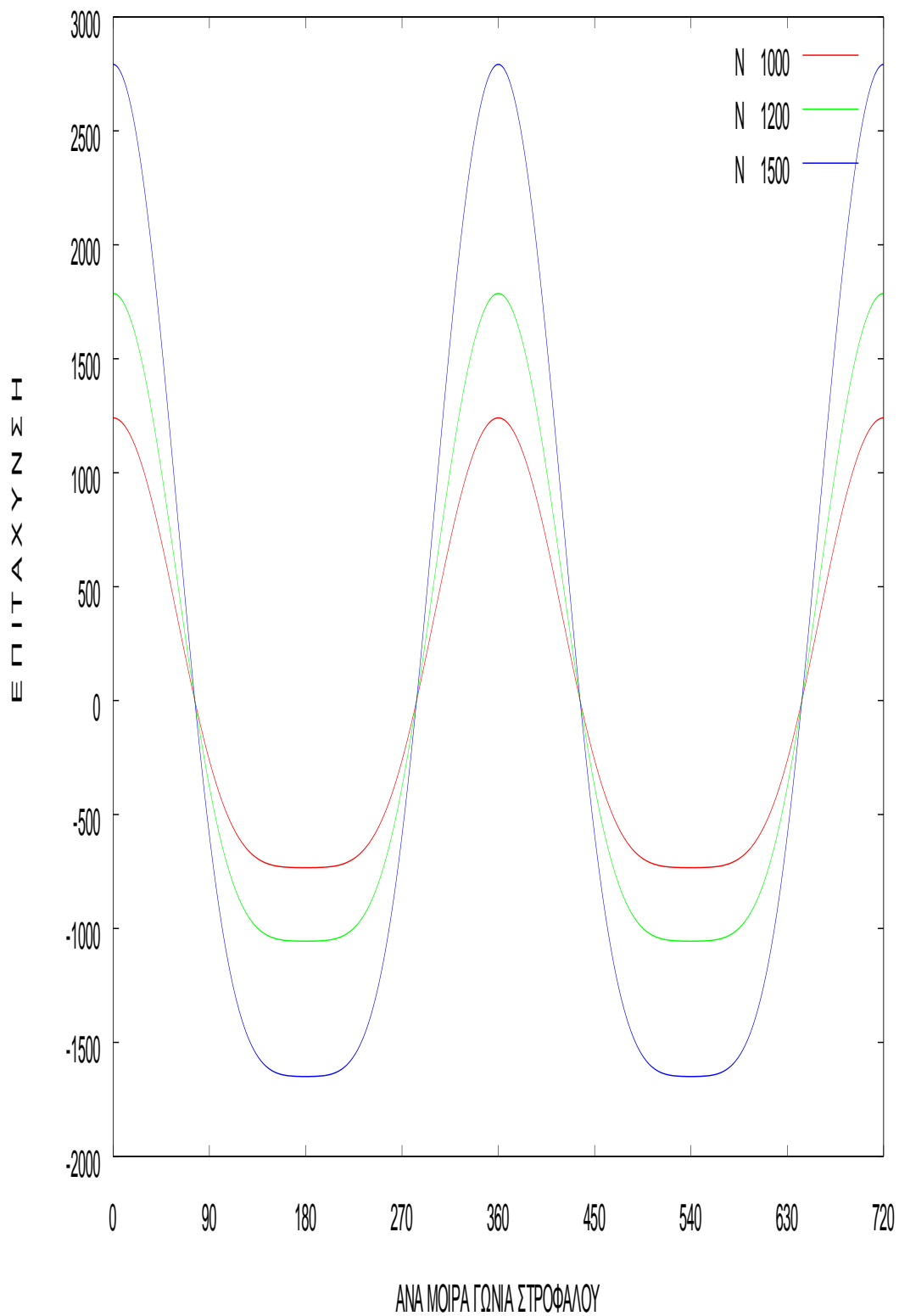
Χωρίς Εκκεντρότητα Offset =0



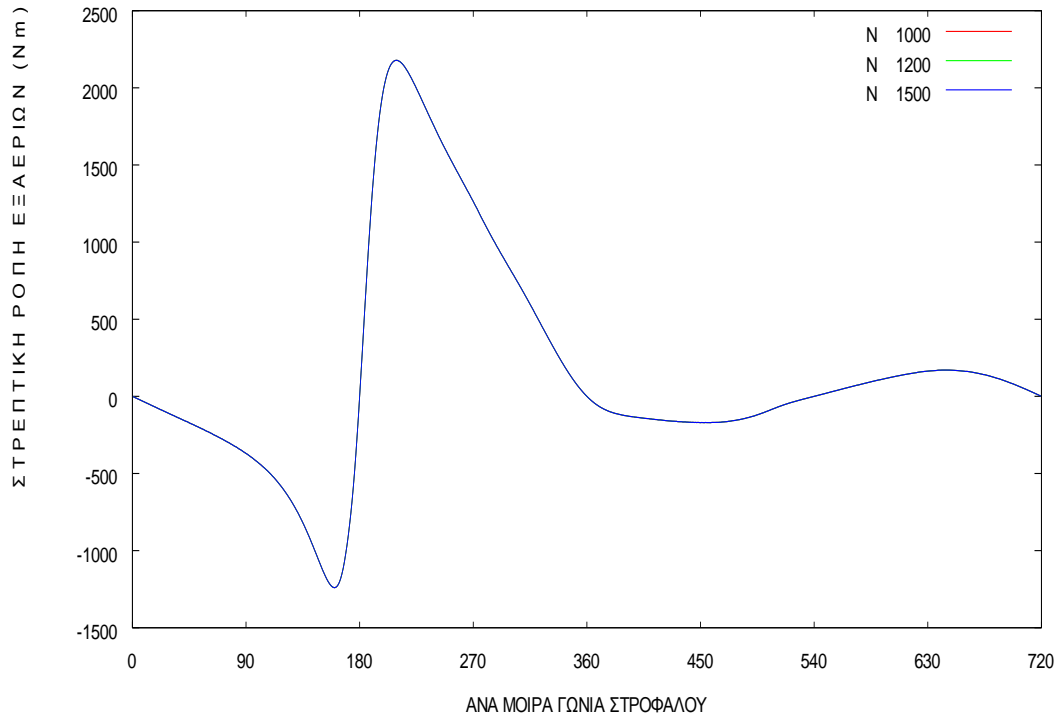
Σχ.7.23 Μετατόπιση σε ( mm ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



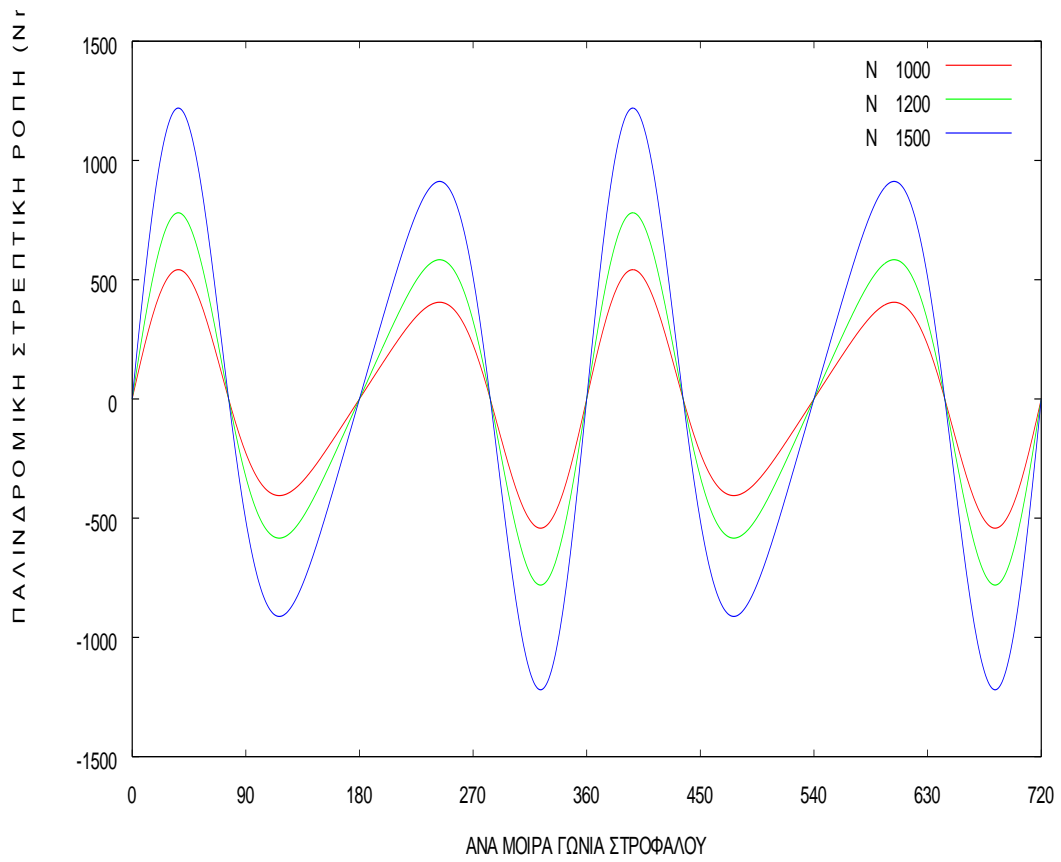
Σχ.7.24 Ταχύτητα σε ( m/s ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



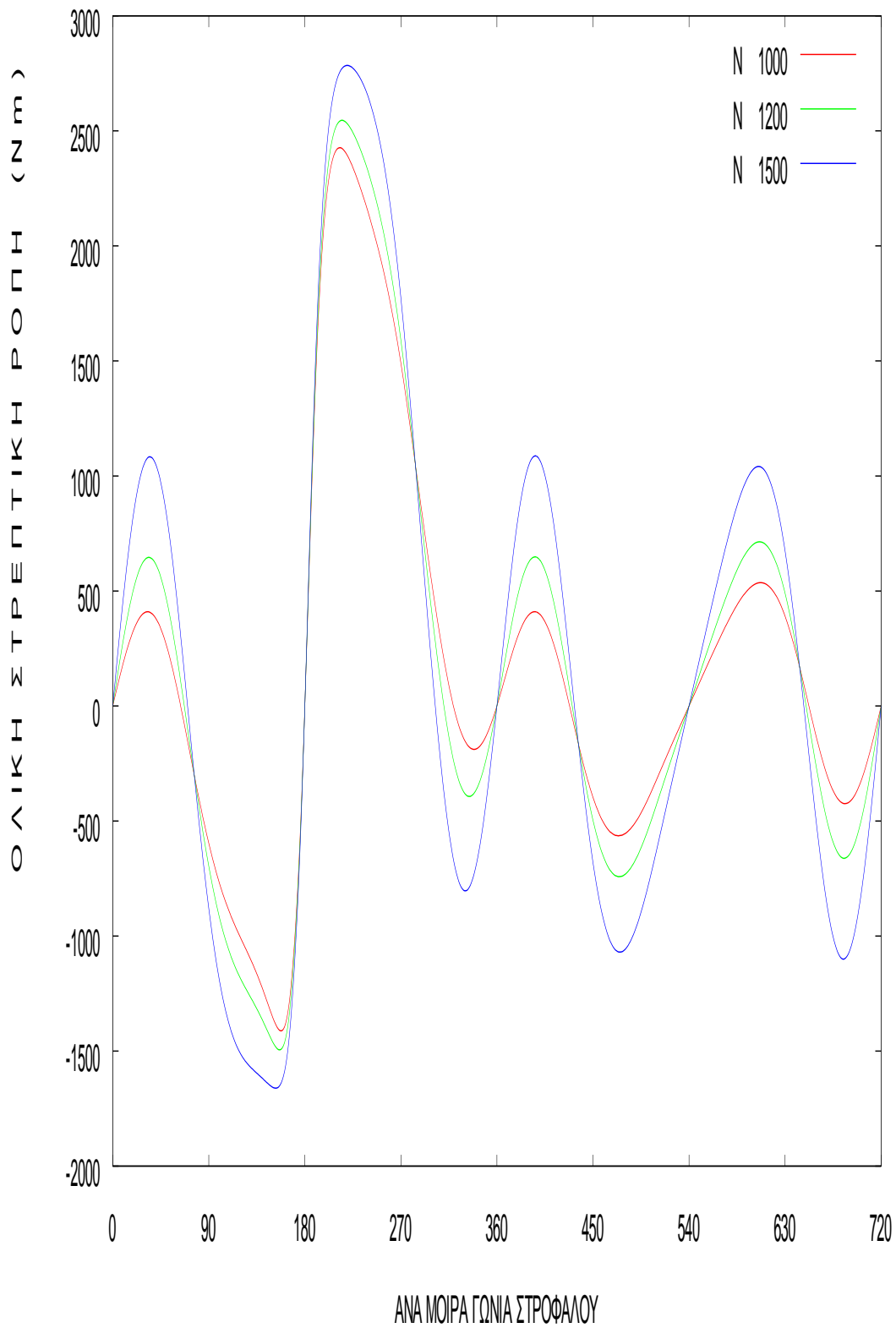
**Σχ.7.25** Επιτάχυνση σε (  $m/s^2$  ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



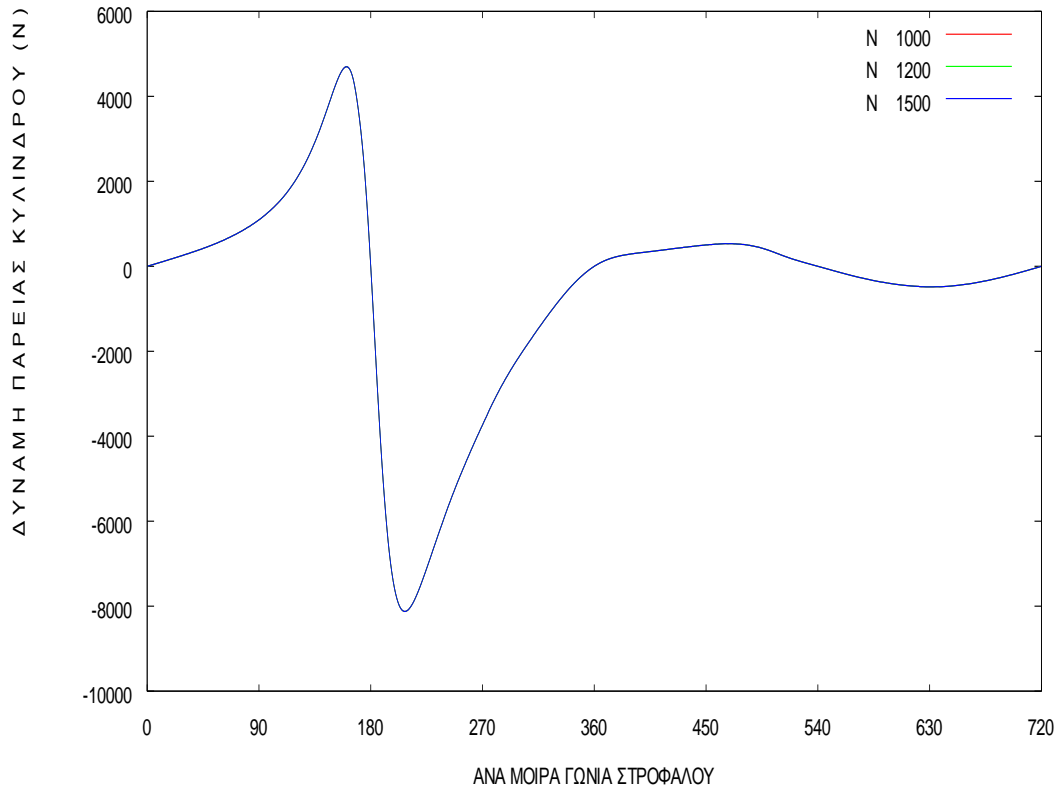
**Σχ.7.26** Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



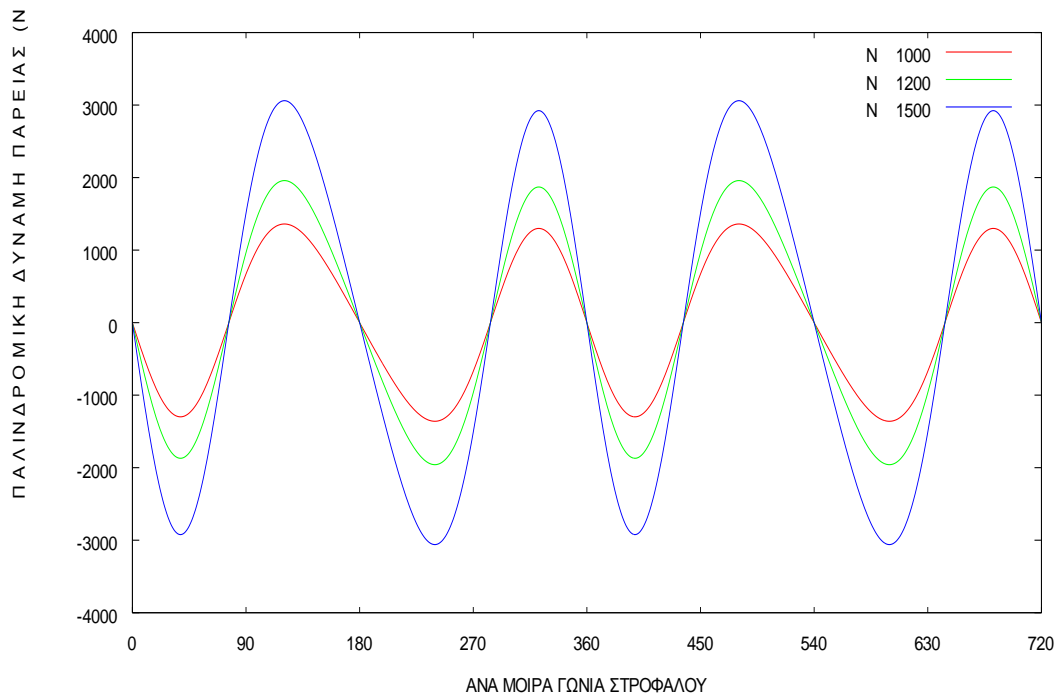
**Σχ.7.27** Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



Σχ. 7.28 Ολική Στρεπτική Ροπή σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

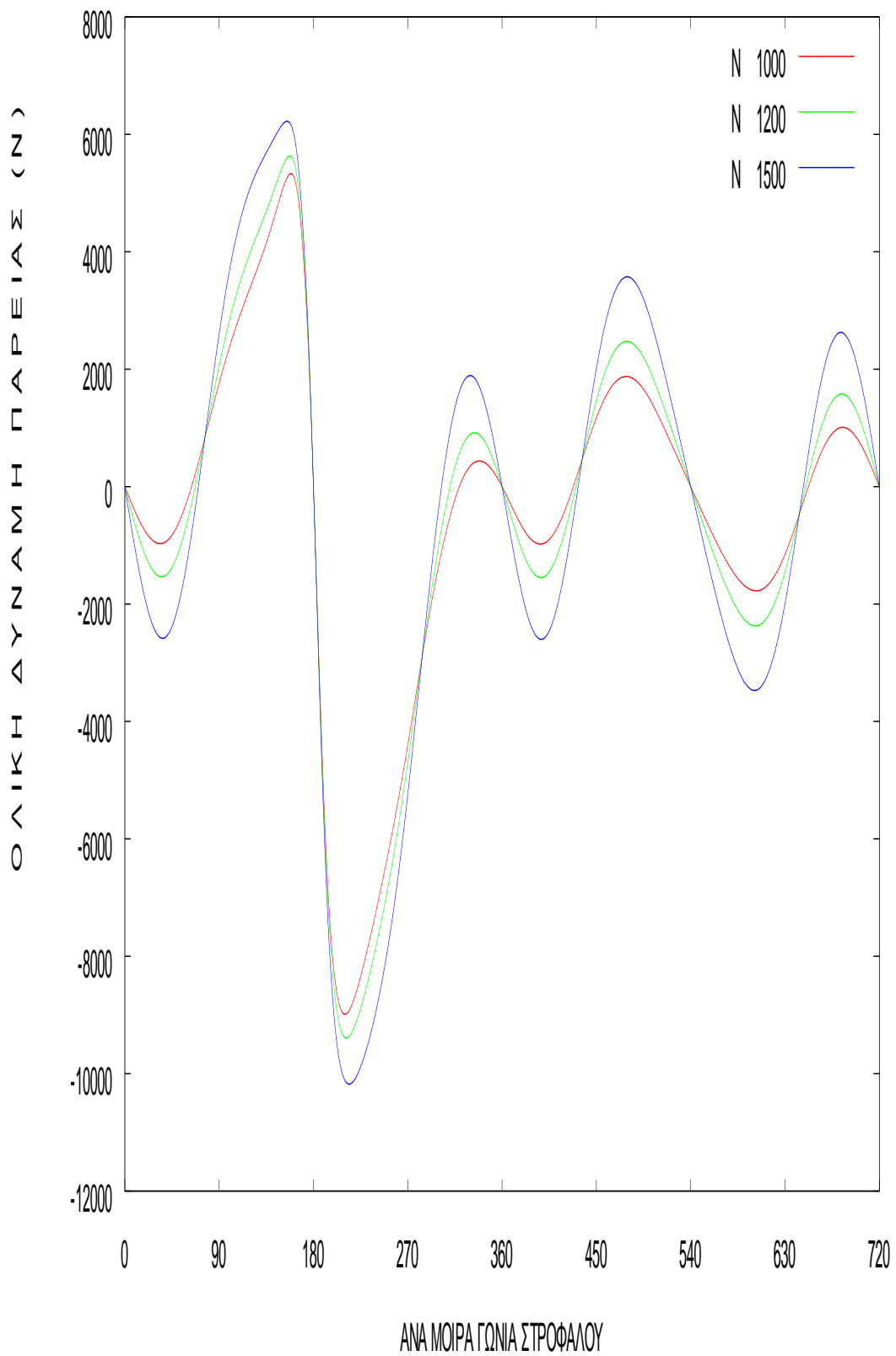


**Σχ. 7.29 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

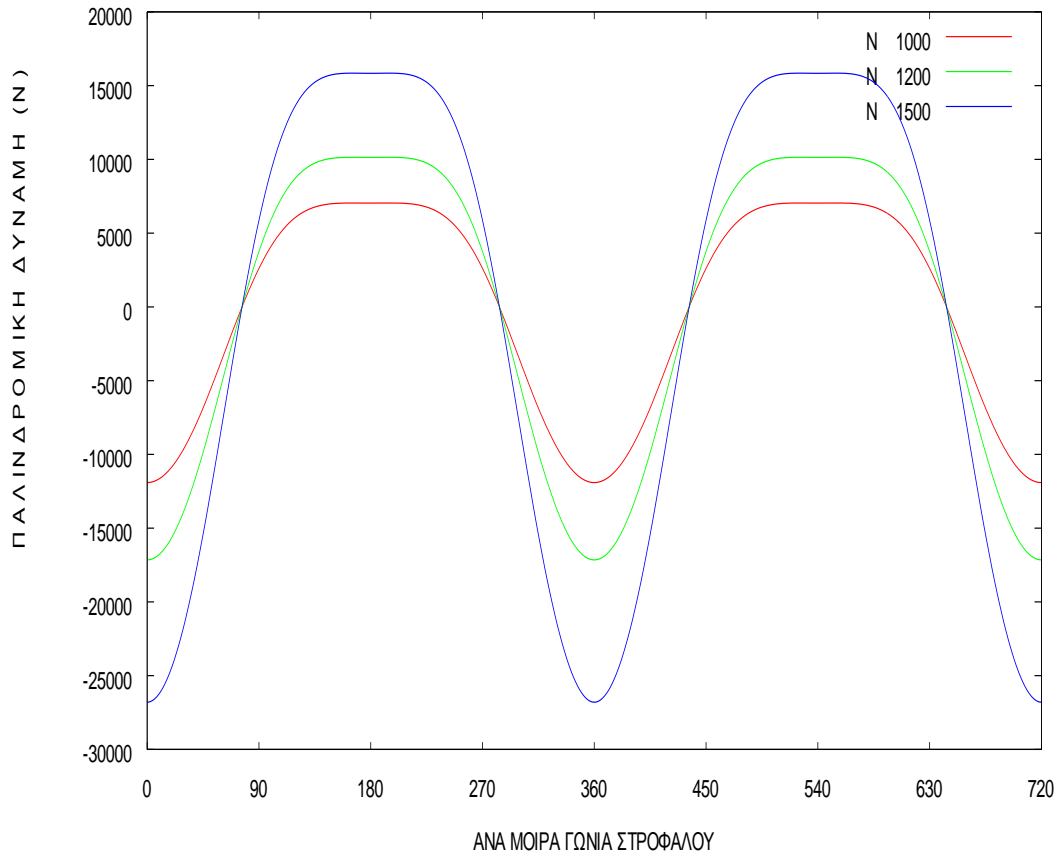


**Σχ. 7.30 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

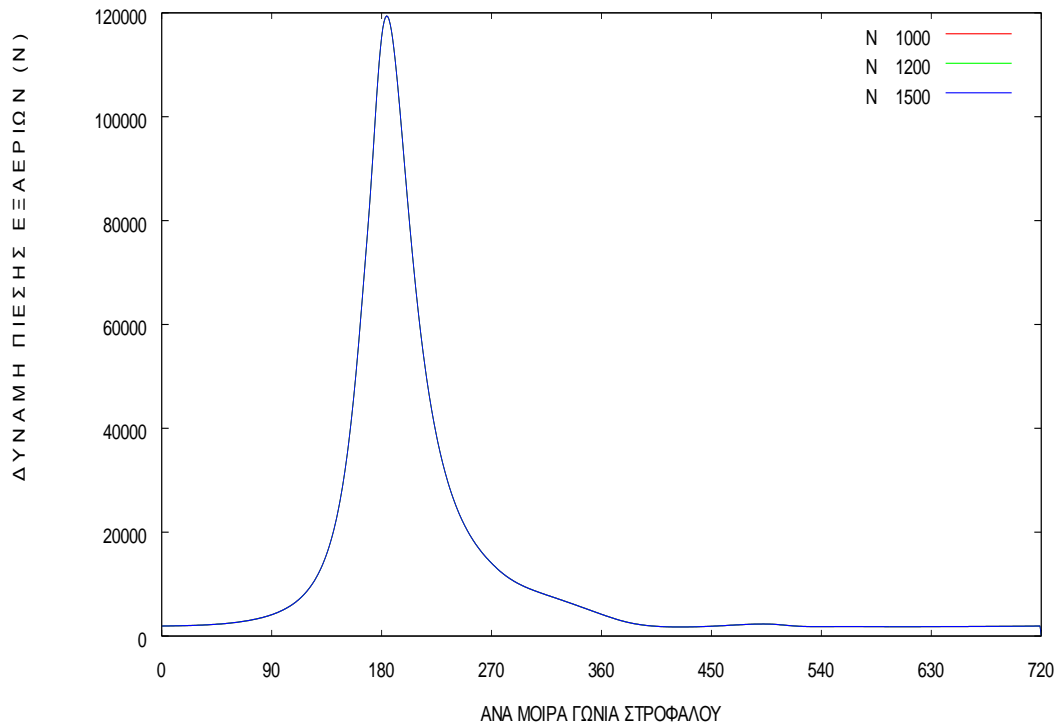




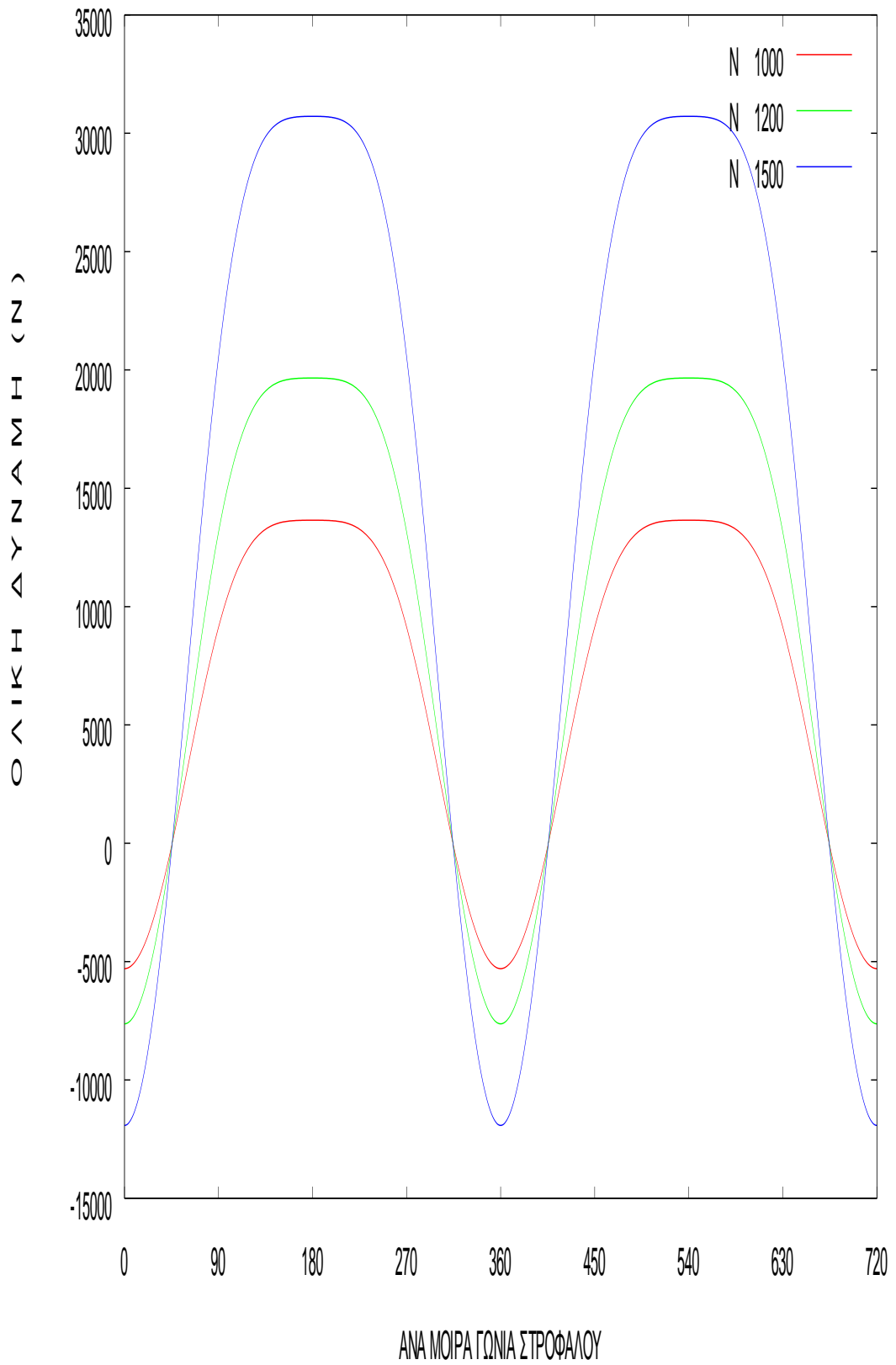
Σχ.7.31 Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



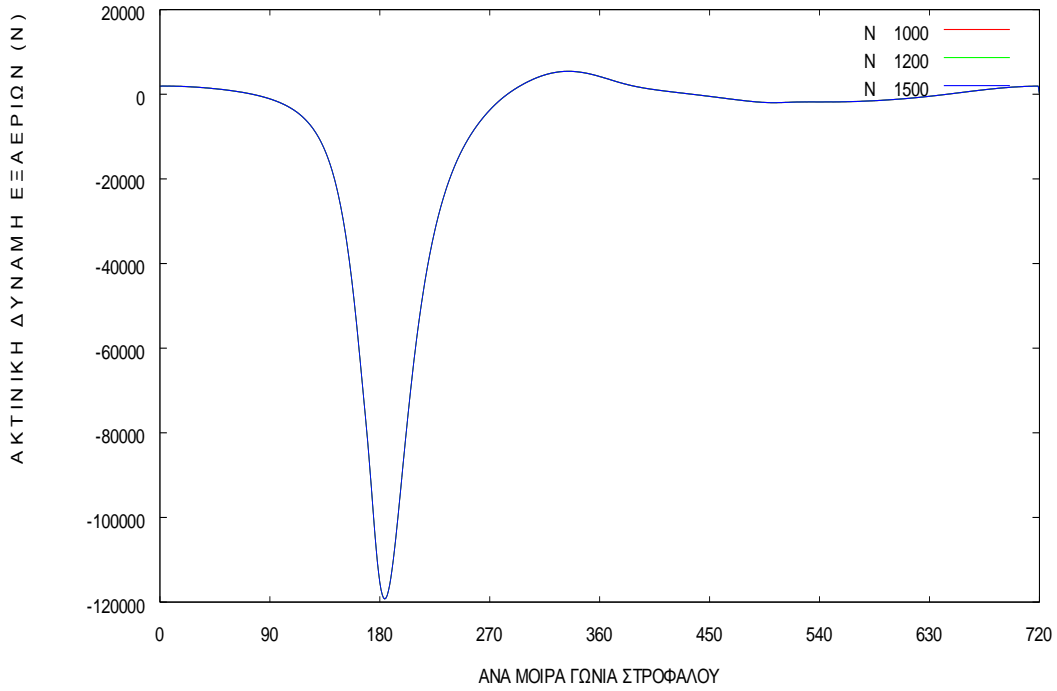
Σχ. 7.32 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



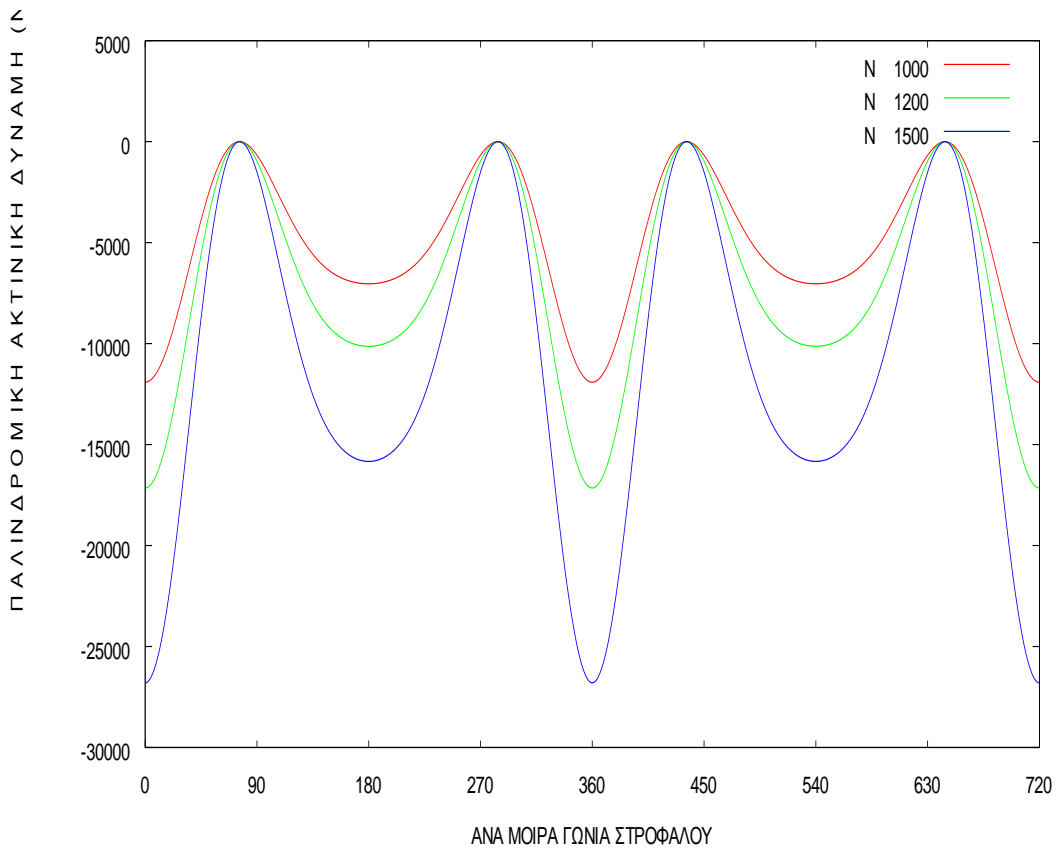
Σχ.7.33 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



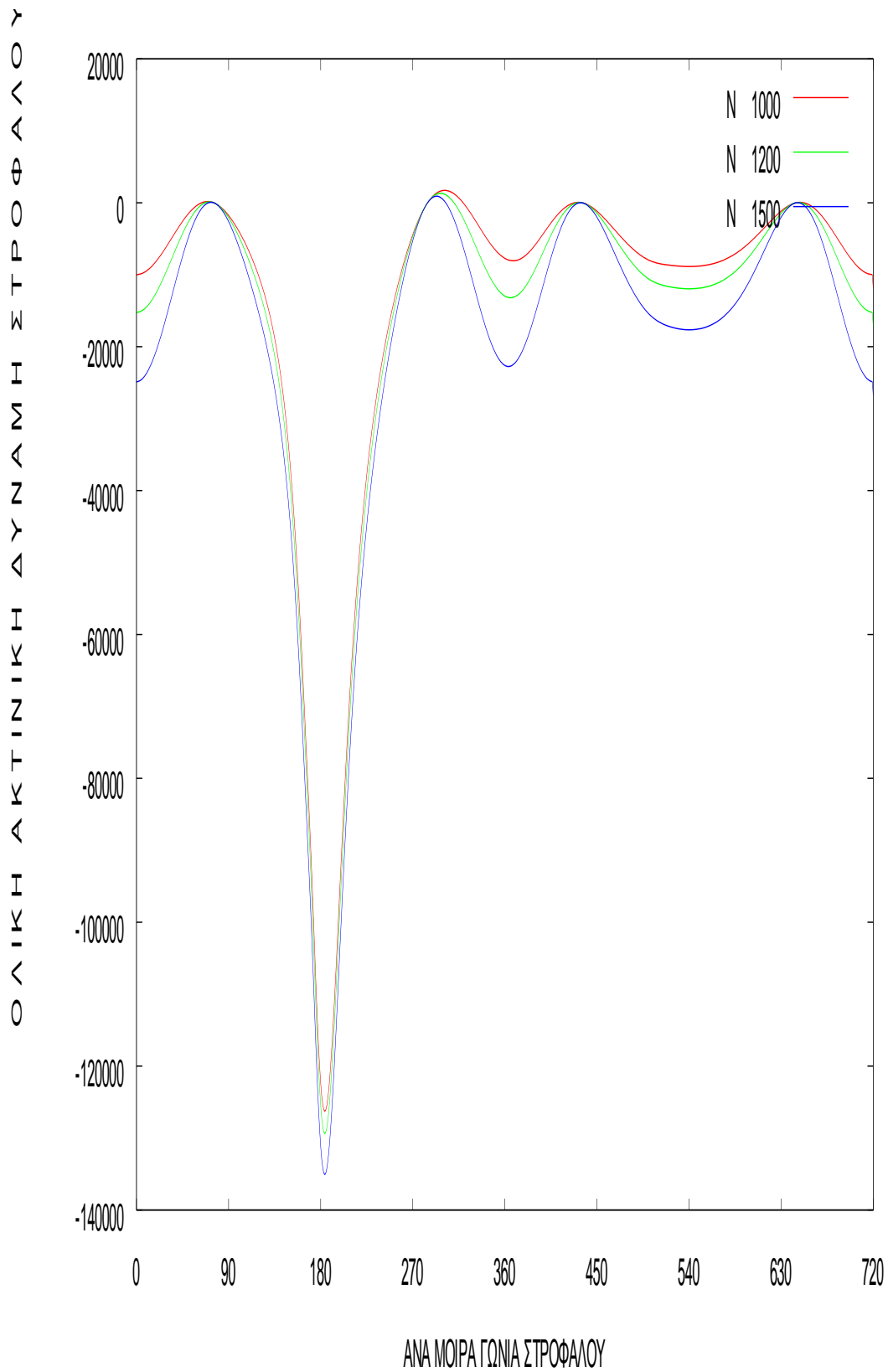
Σχ.7.34 Ολική Δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



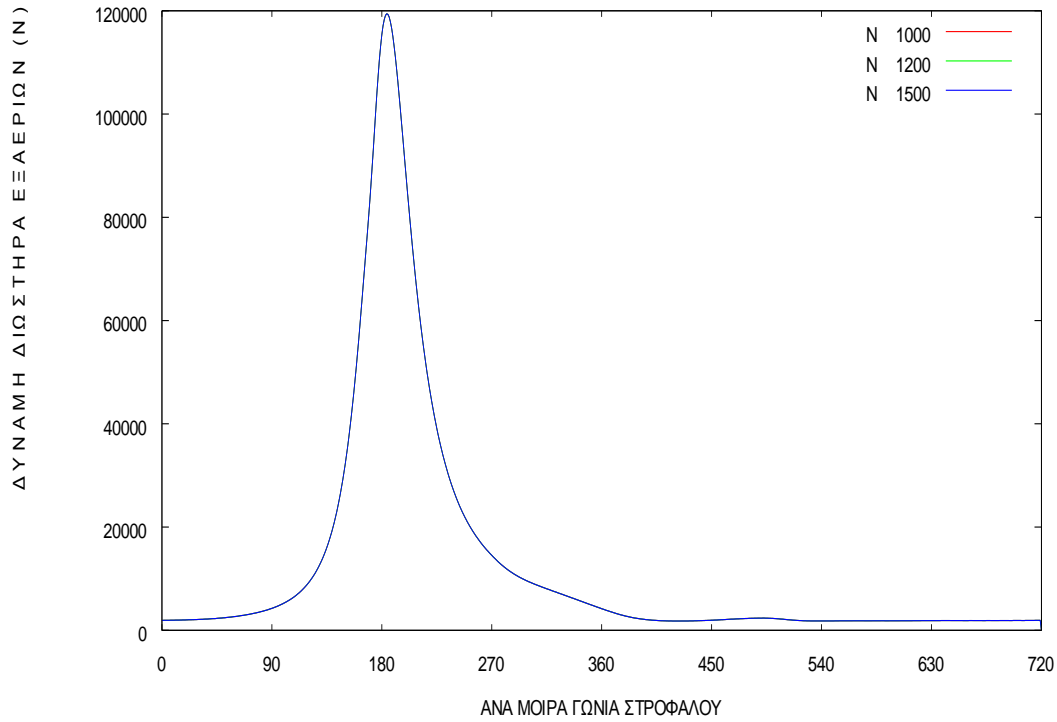
Σχ.7.35 Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



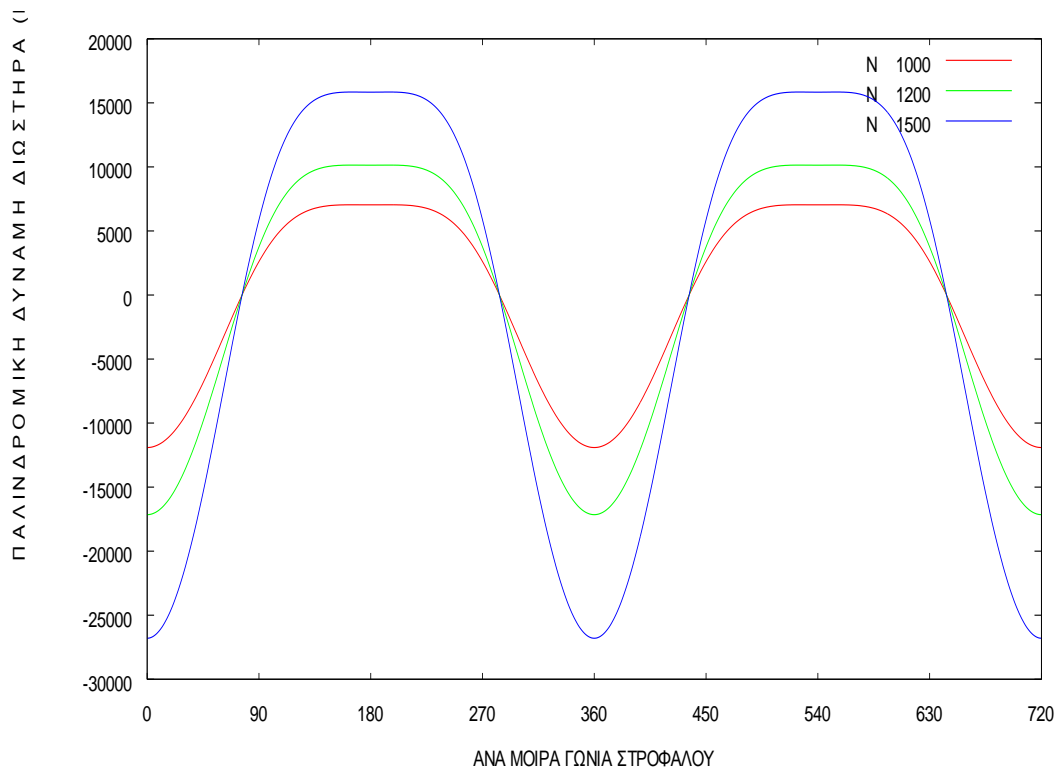
Σχ. 7.36 Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



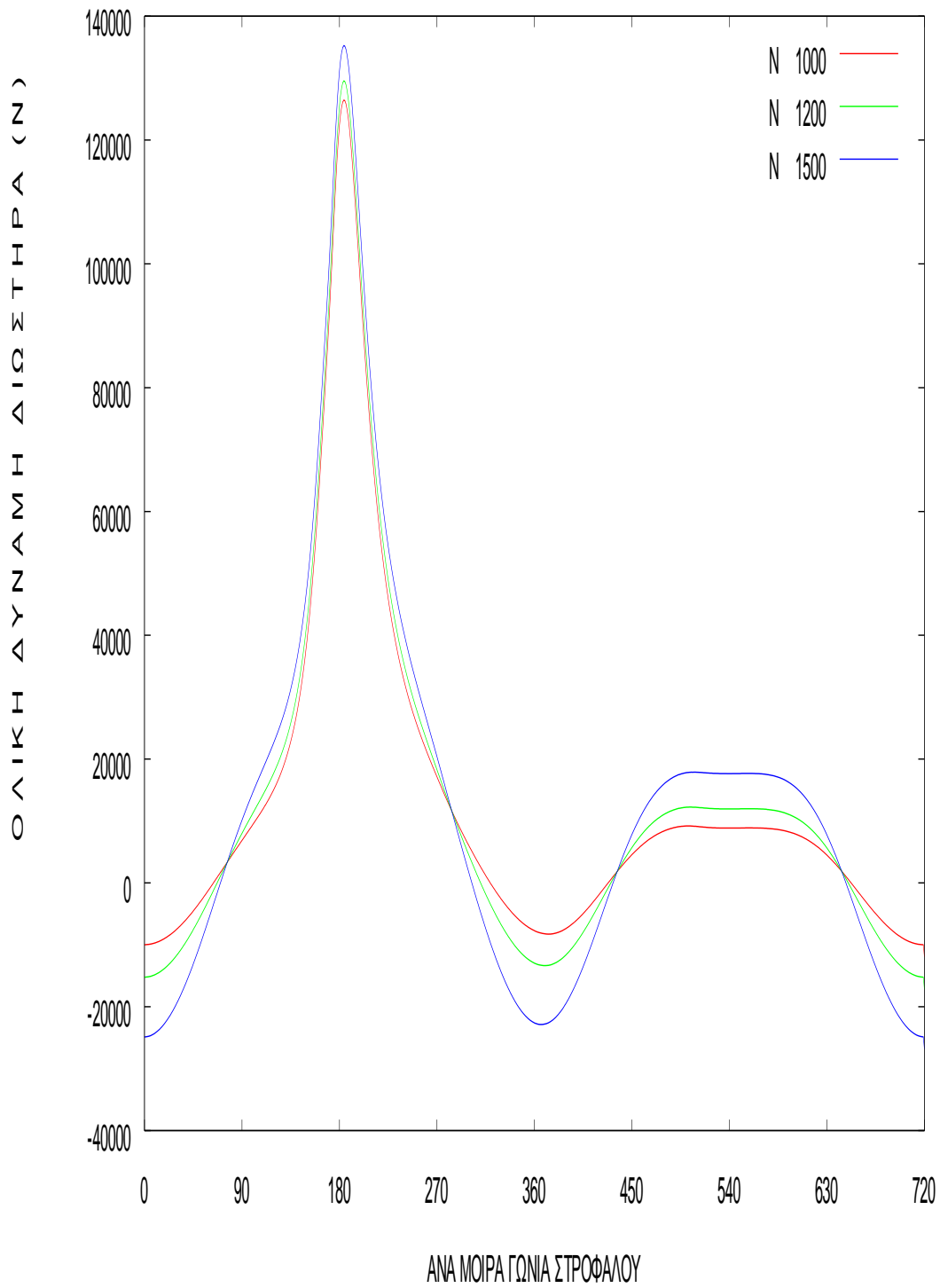
Σχ.7.37 Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



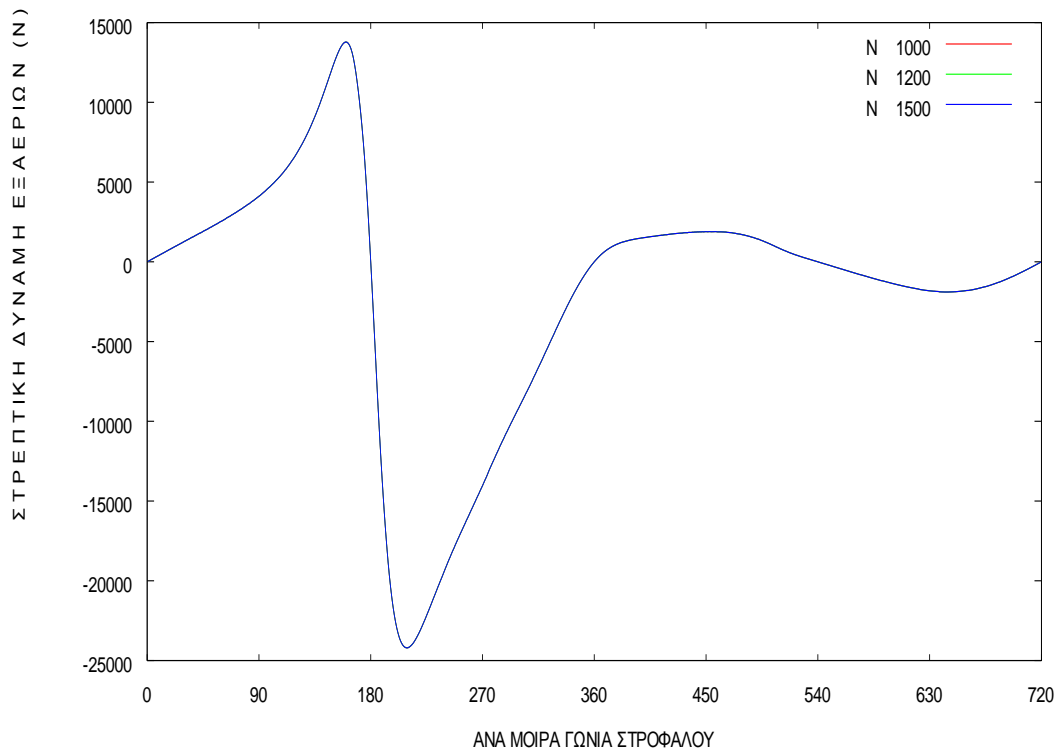
**Σχ.7.38 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



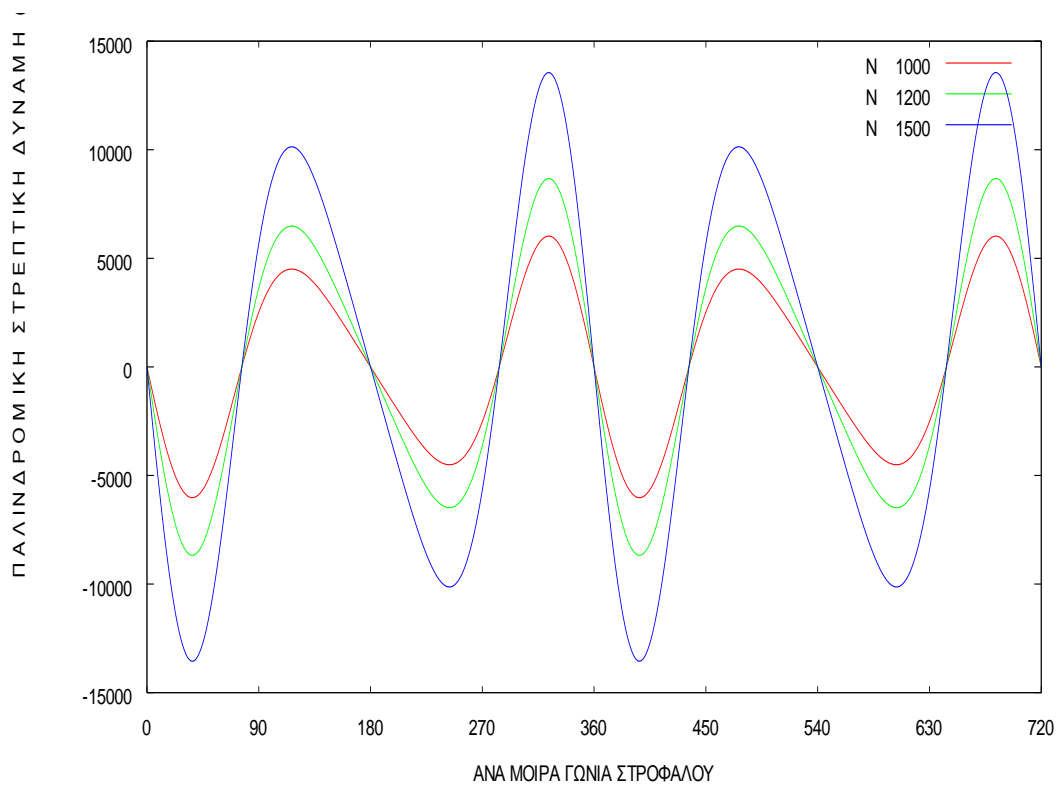
**Σχ.7.39 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.40 Ολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

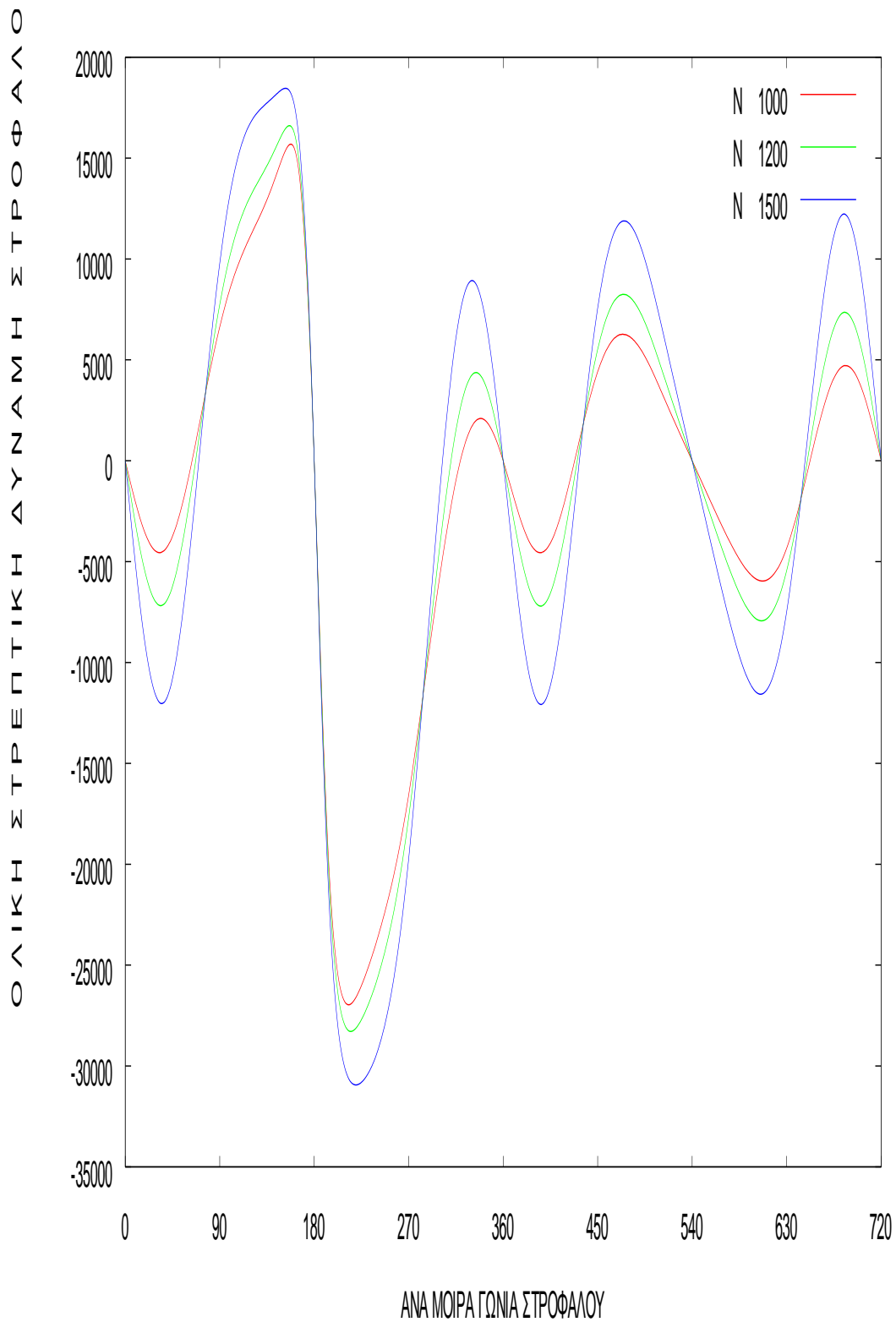


**Σχ.7.41** Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



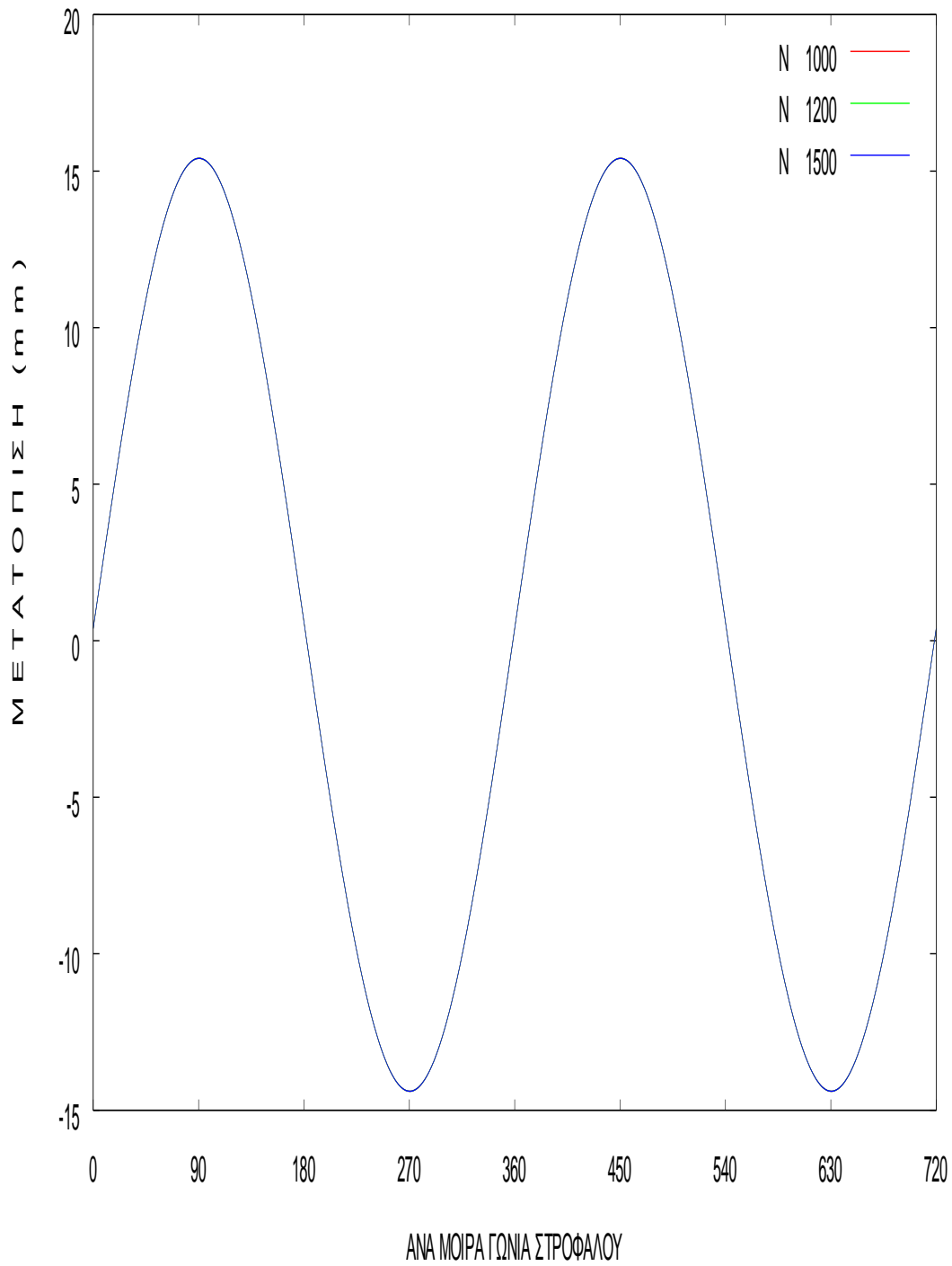
**Σχ.7.42** Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



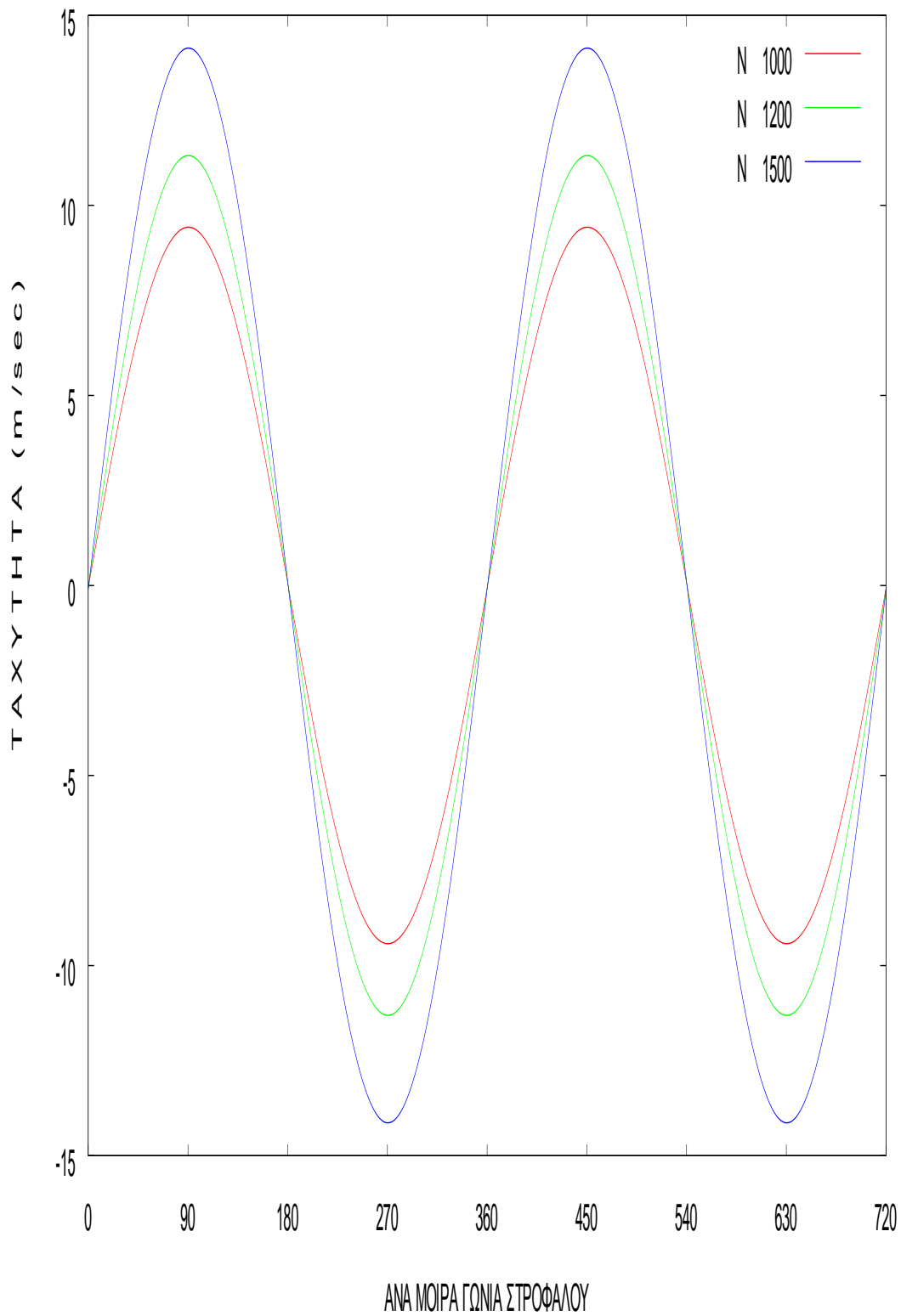


Σχ.7.43 Ολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

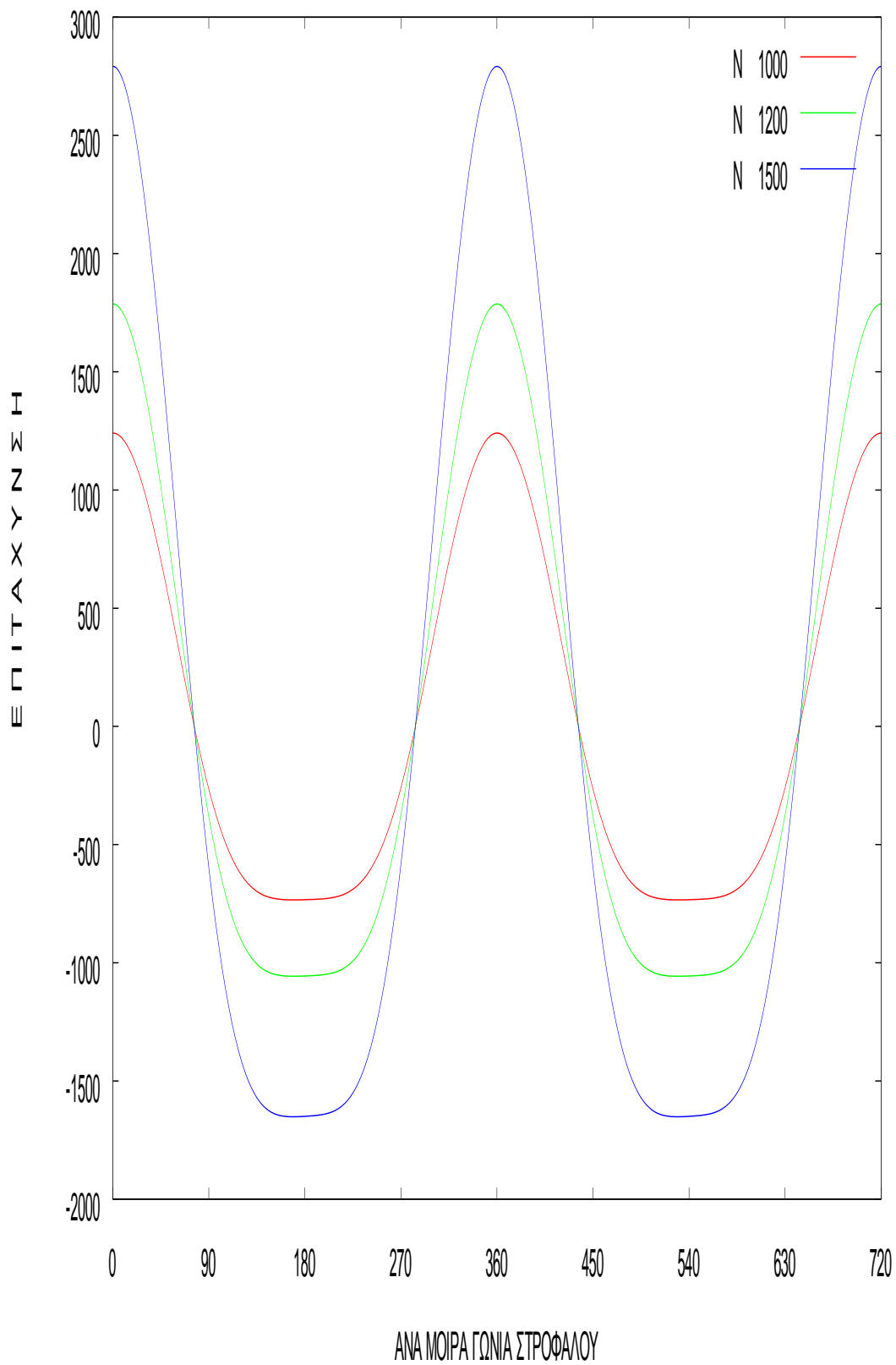
**Με Εκκεντρότητα 3mm (Offset=3mm)**



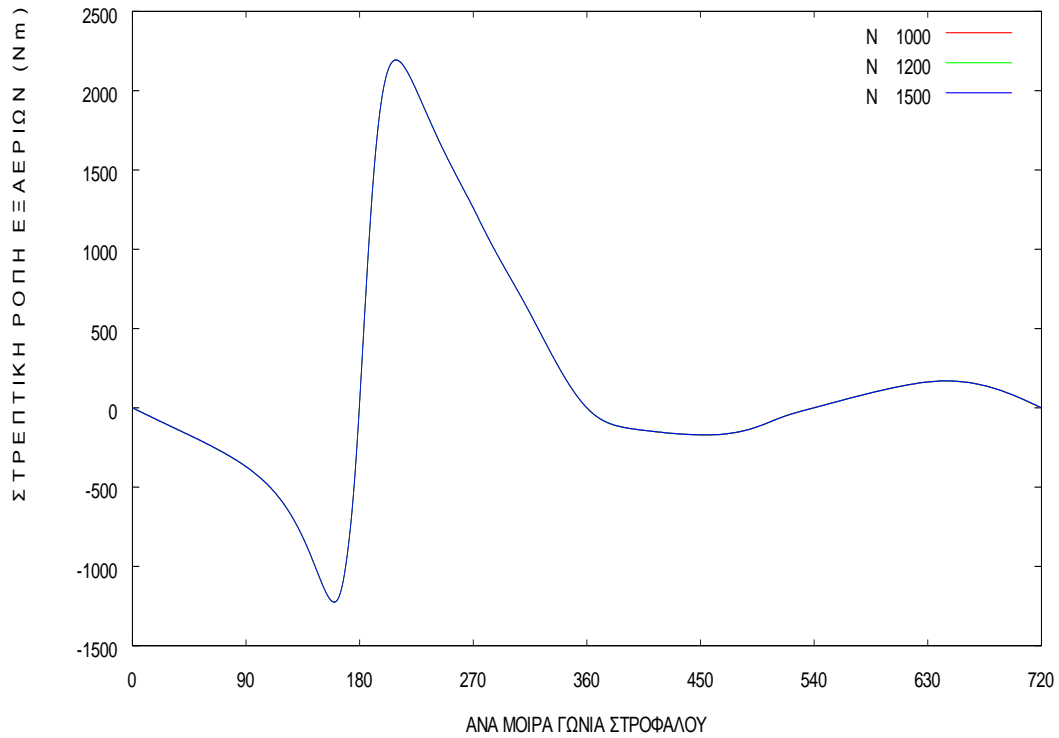
**Σχ.7.44 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνίας στρόφαλου**



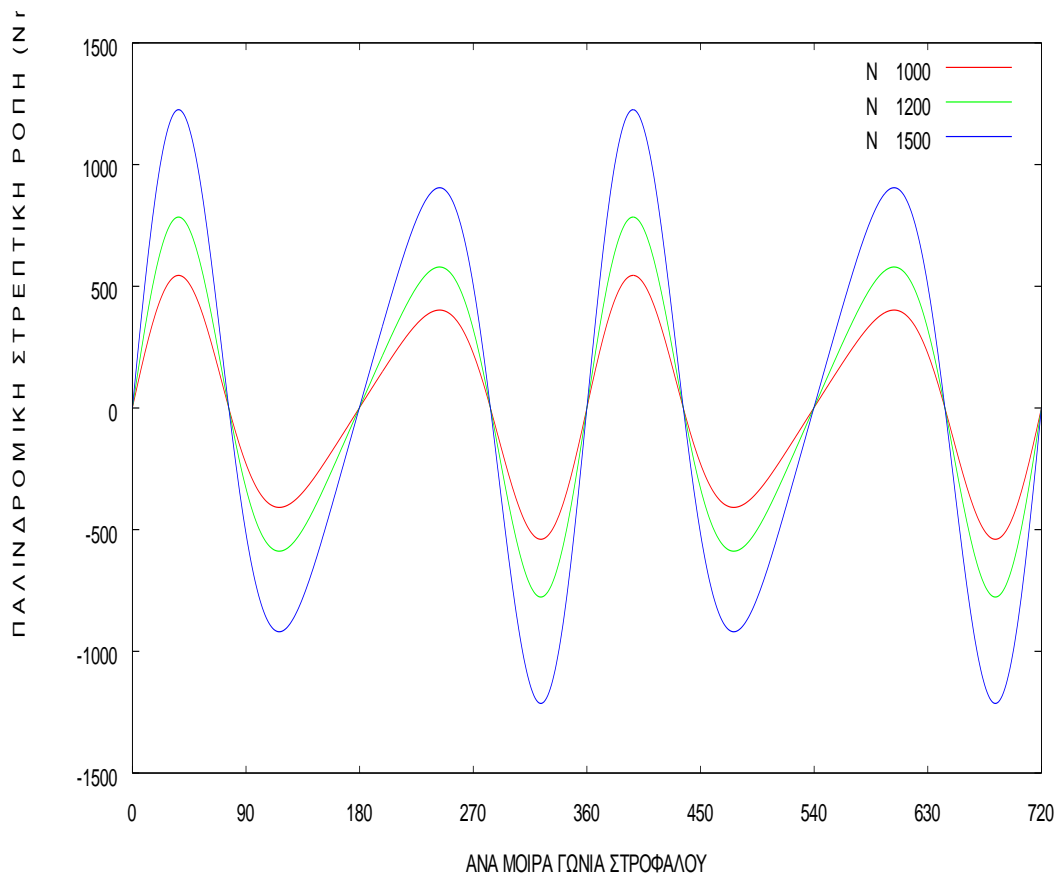
Σχ.7.45 Ταχύτητα σε ( m/s) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



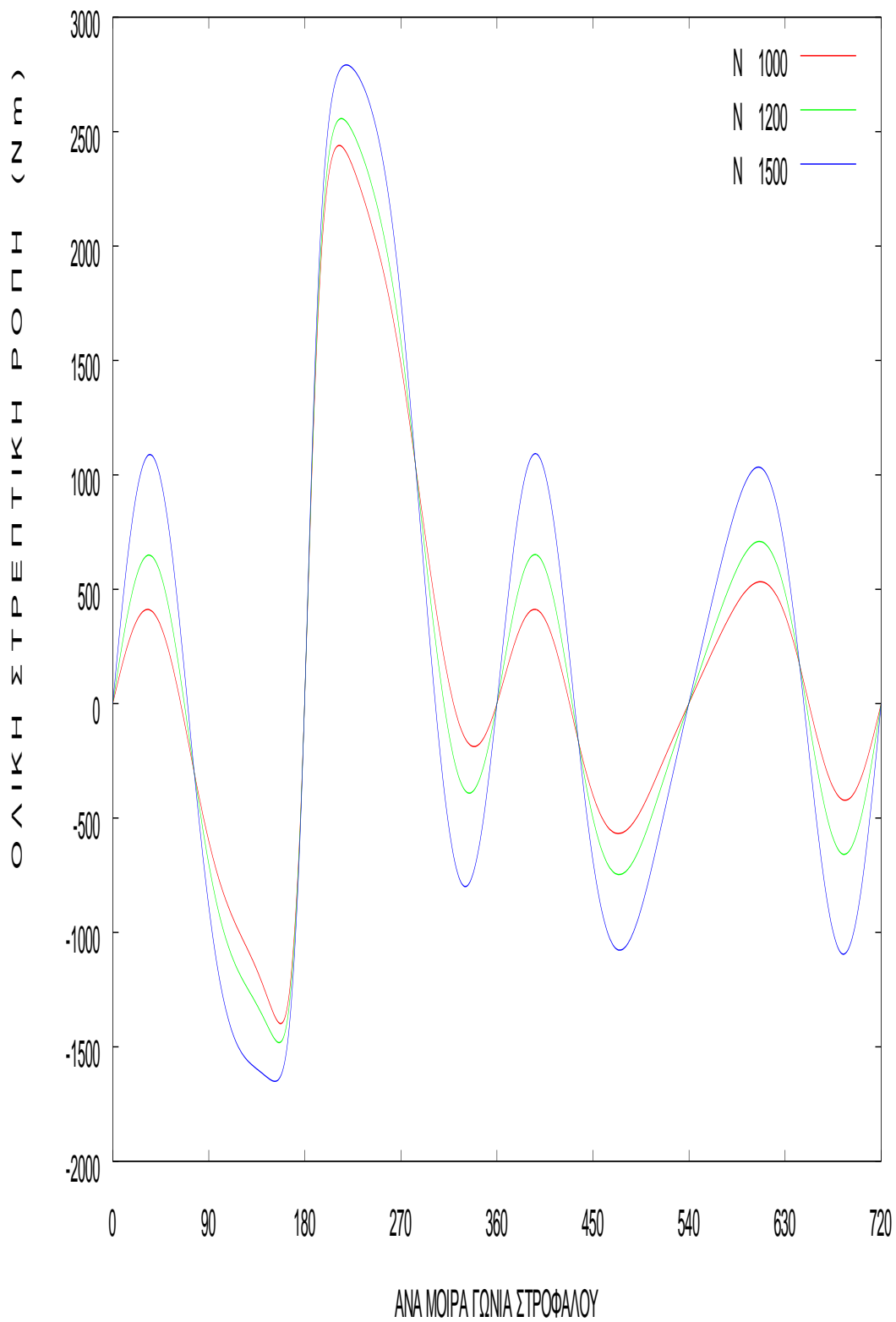
Σχ. 7.46 Επιτάχυνση σε ( $\text{m/s}^2$ ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



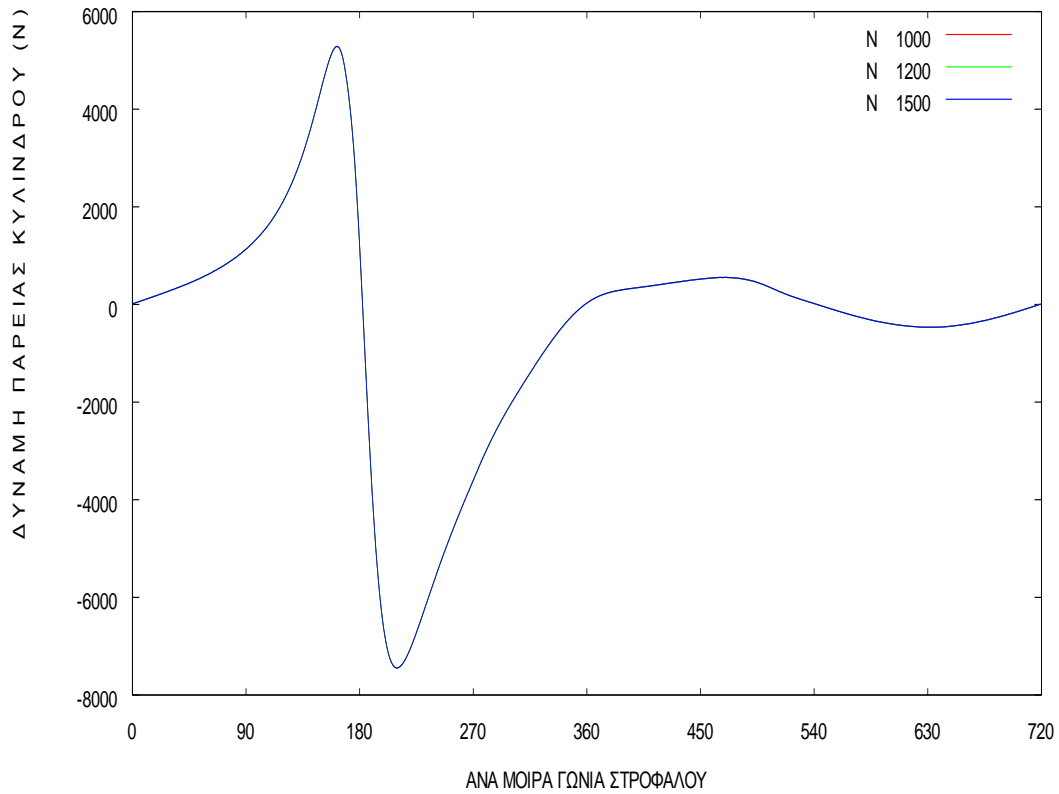
**Σχ.7.47 Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



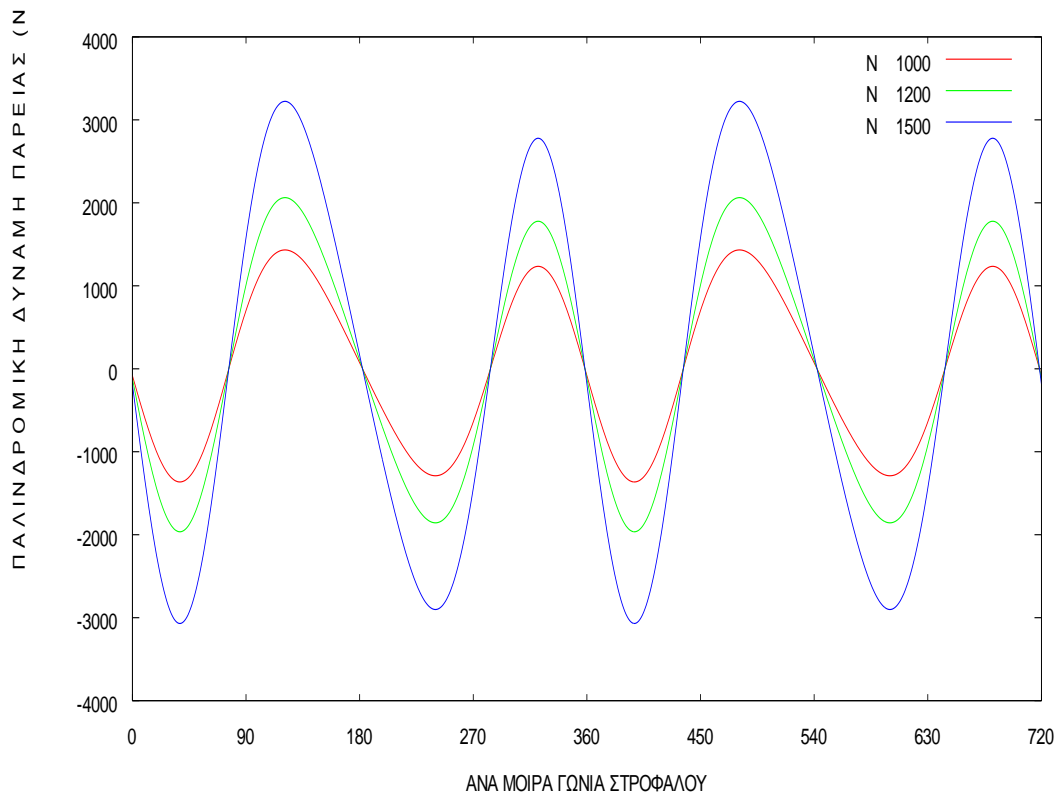
**Σχ. 7.48 Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N)/ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



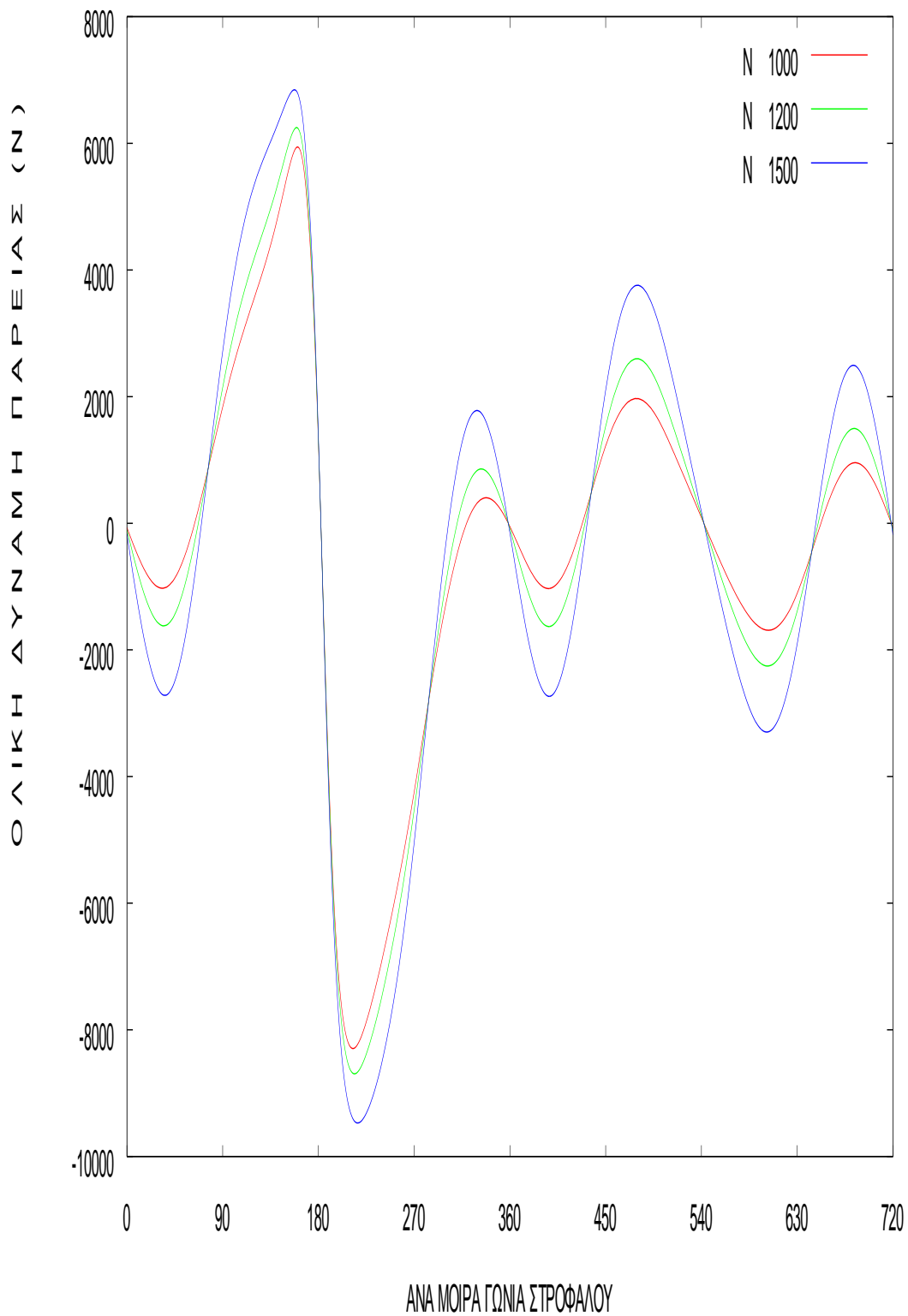
**Σχ.7.49** Ολική στρεπτική ροπή σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στρόφαλου



**Σχ. 7.50 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνία στροφάλου**

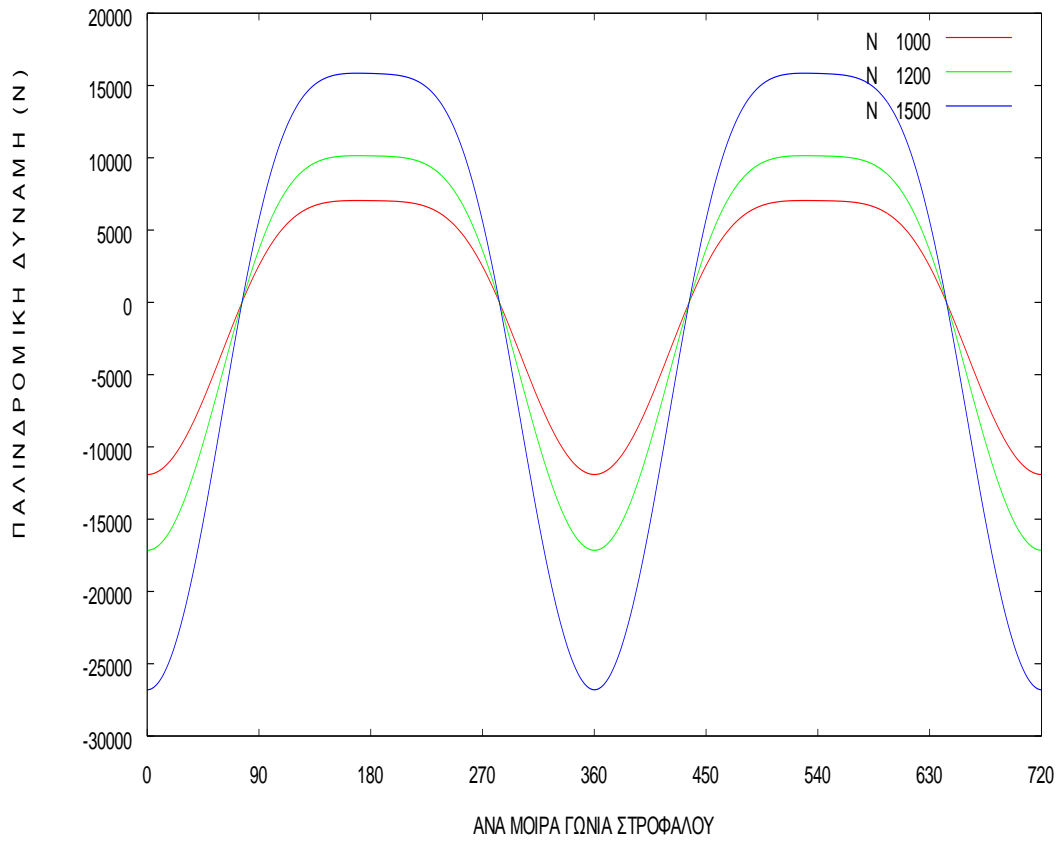


**Σχ. 7.51 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνία στροφάλου**

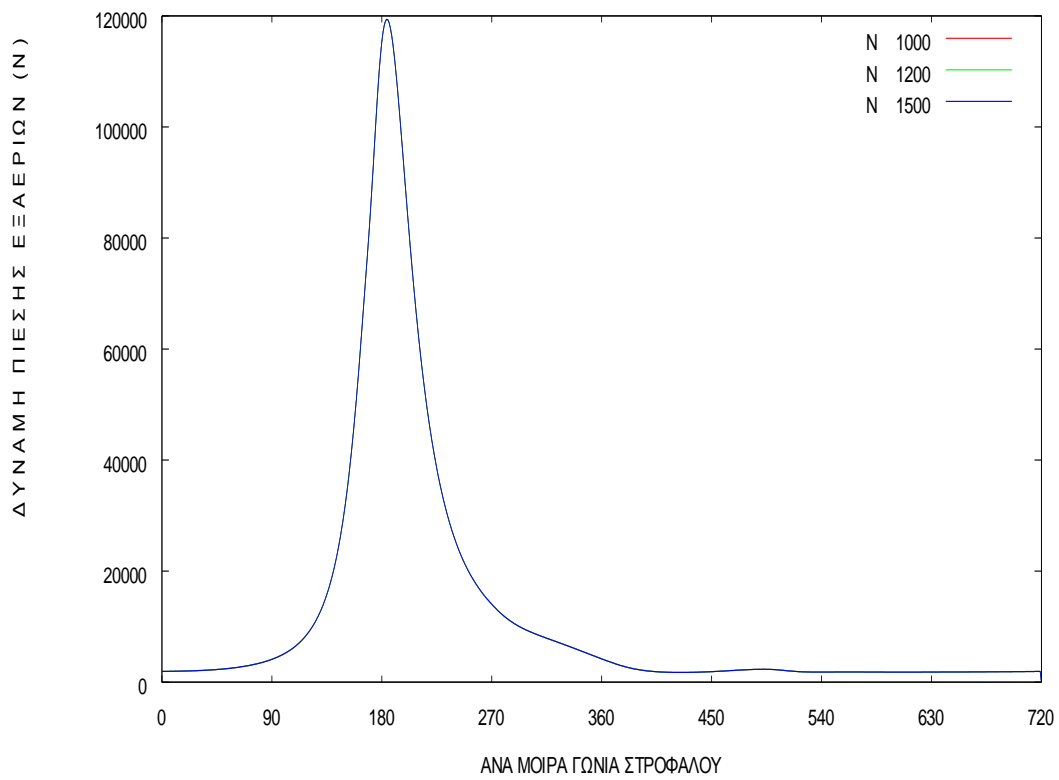


**Σχ. 7.52 Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

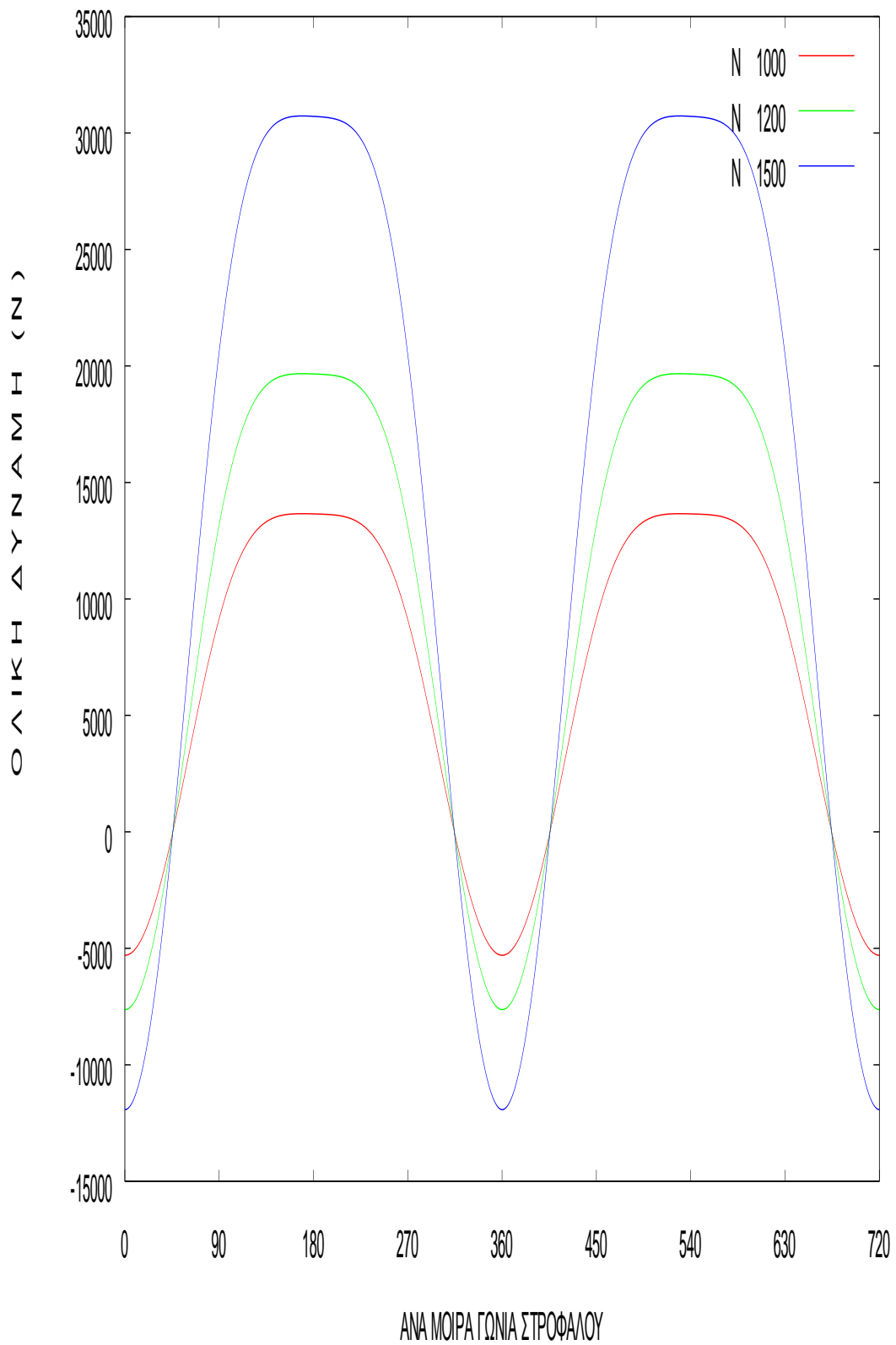




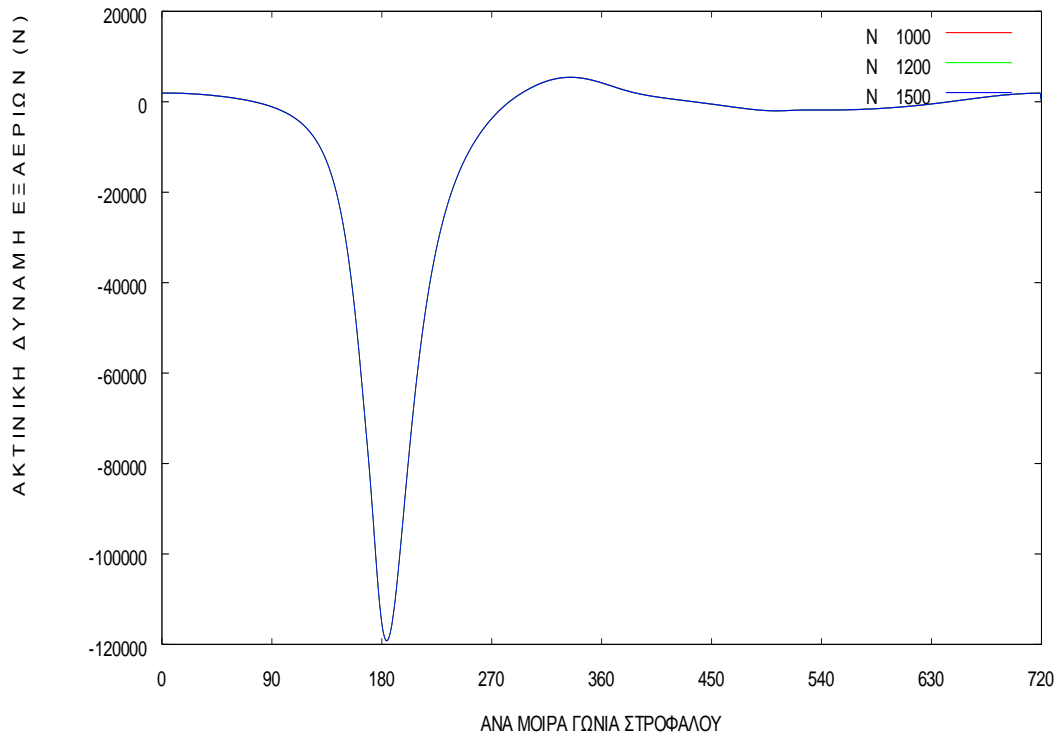
**Σχ.7.53 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



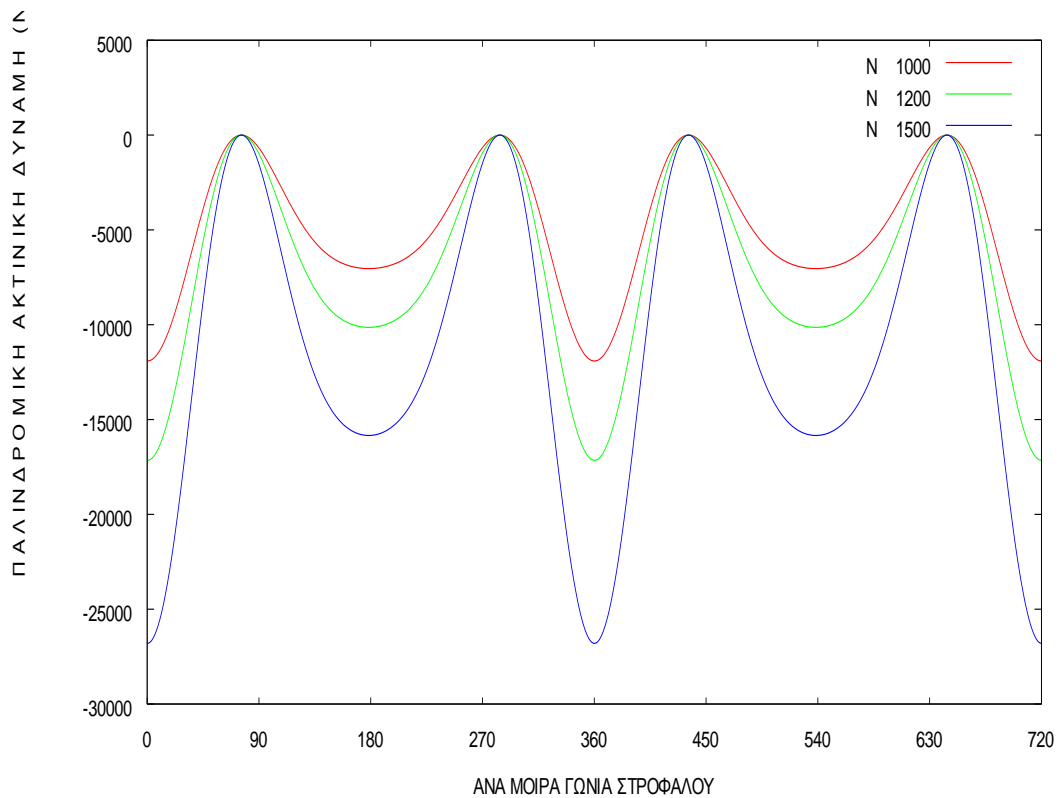
**Σχ.7.54 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνία στροφάλου**



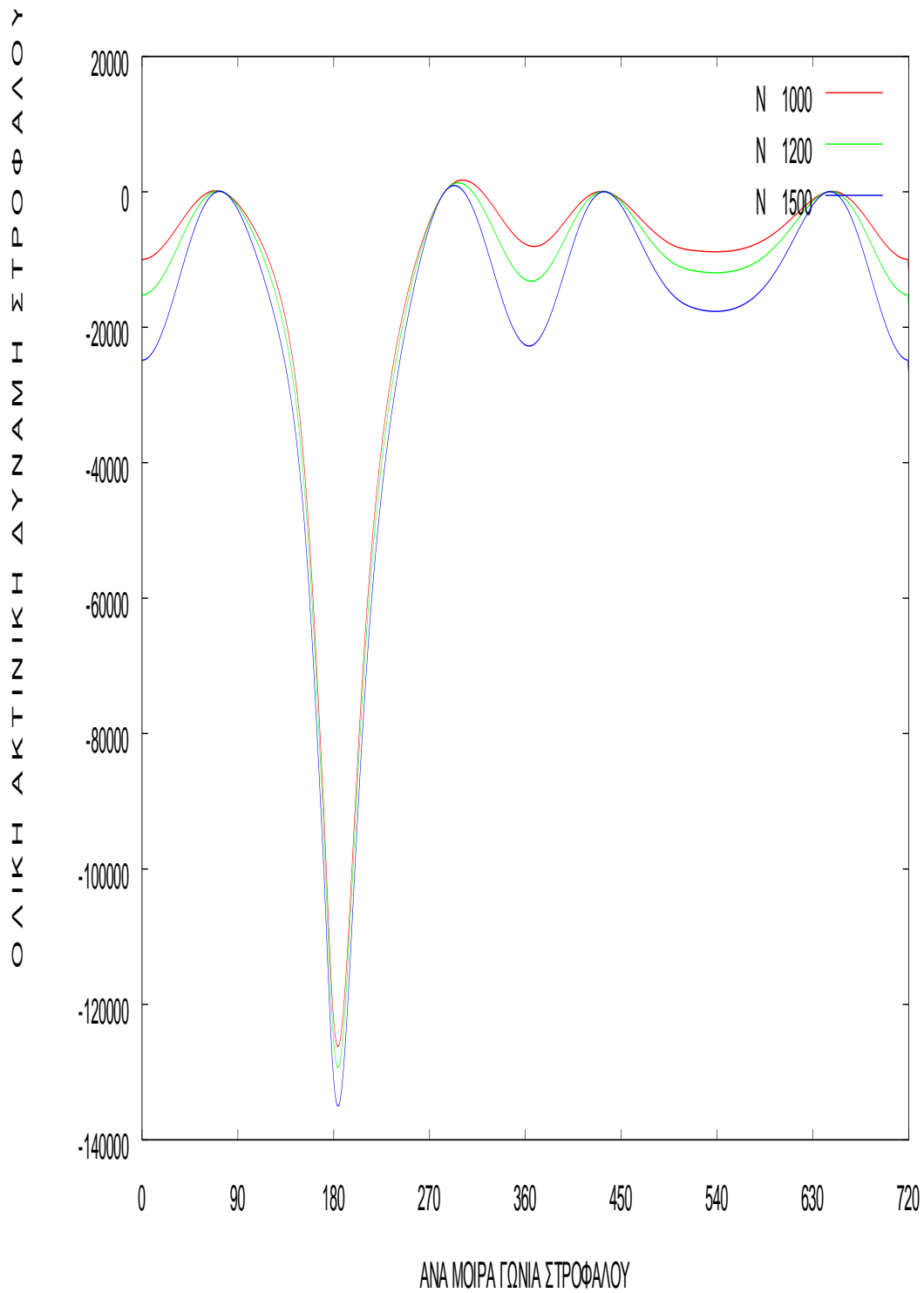
**Σχ.7.55** Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



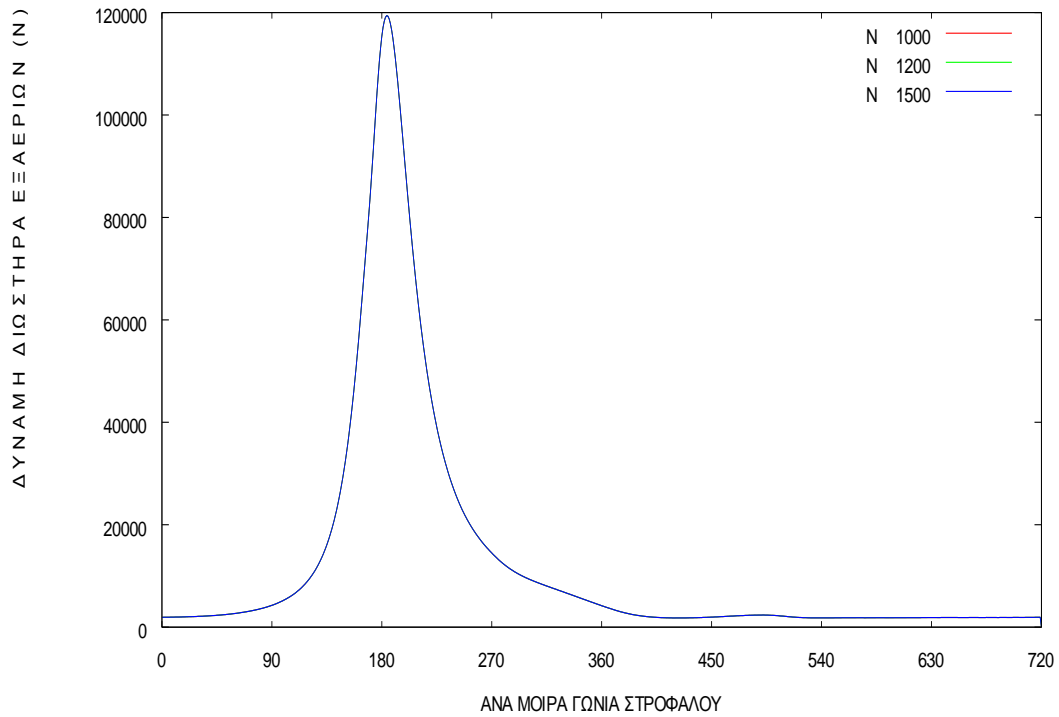
**Σχ.7.56** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



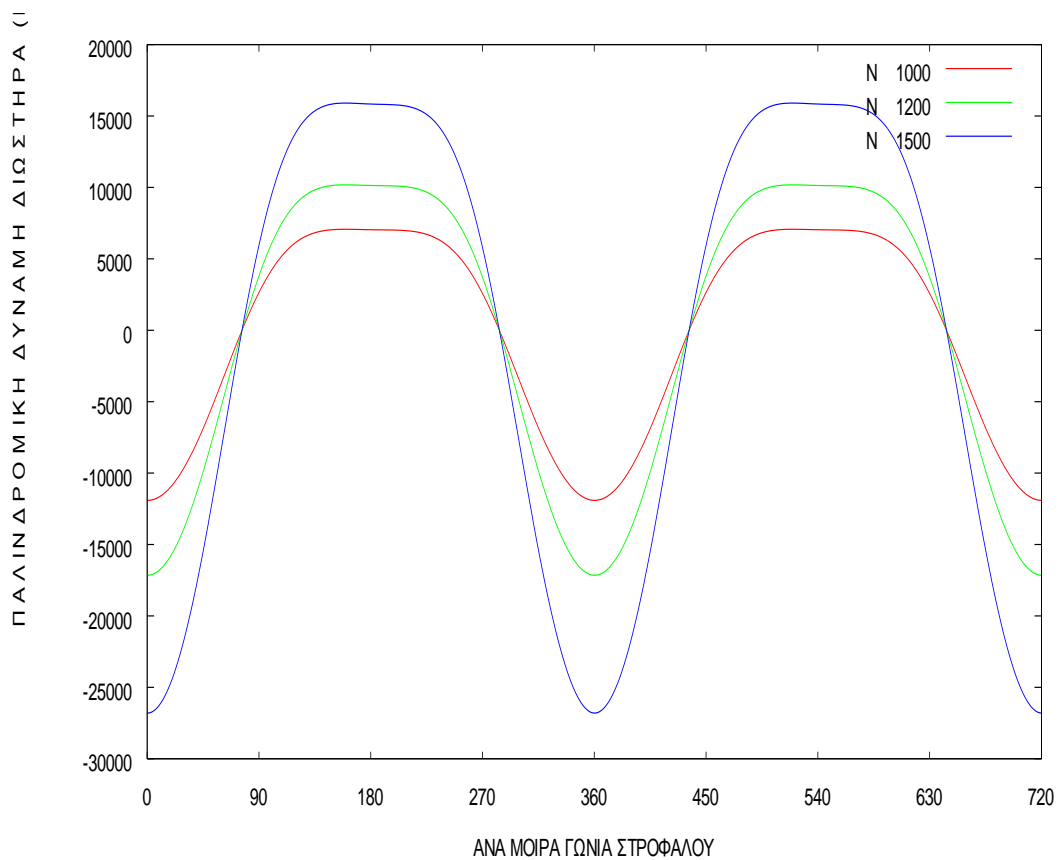
**Σχ.7.57** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



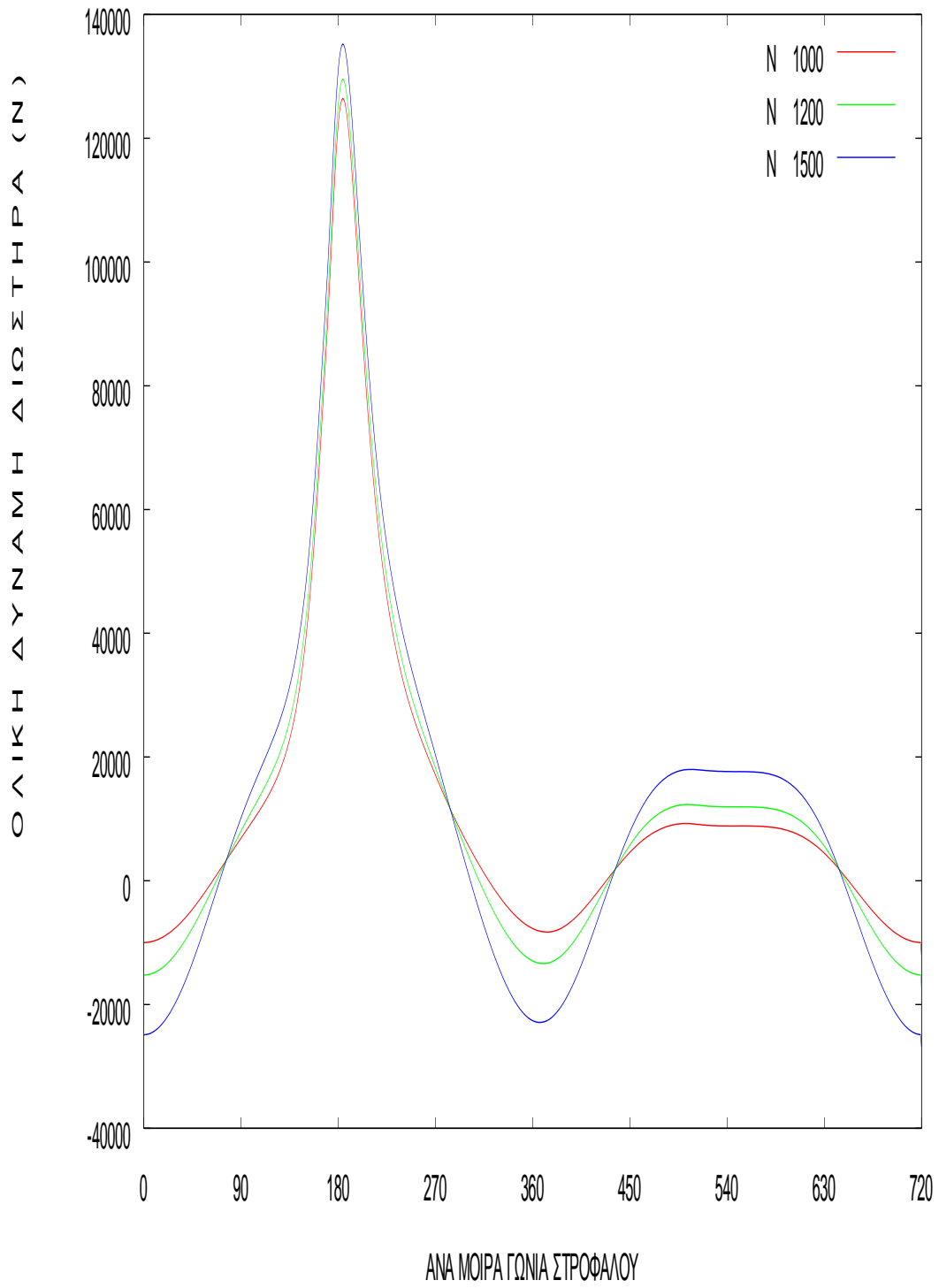
**Σχ.7.58** Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



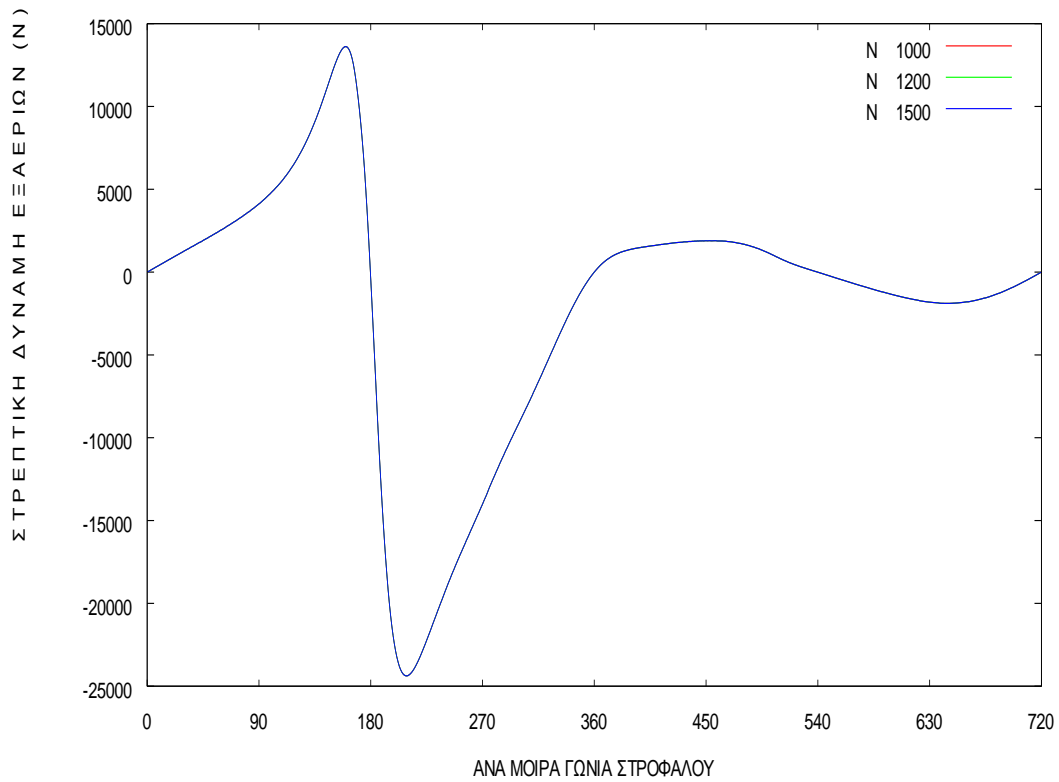
**Σχ. 7.59 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



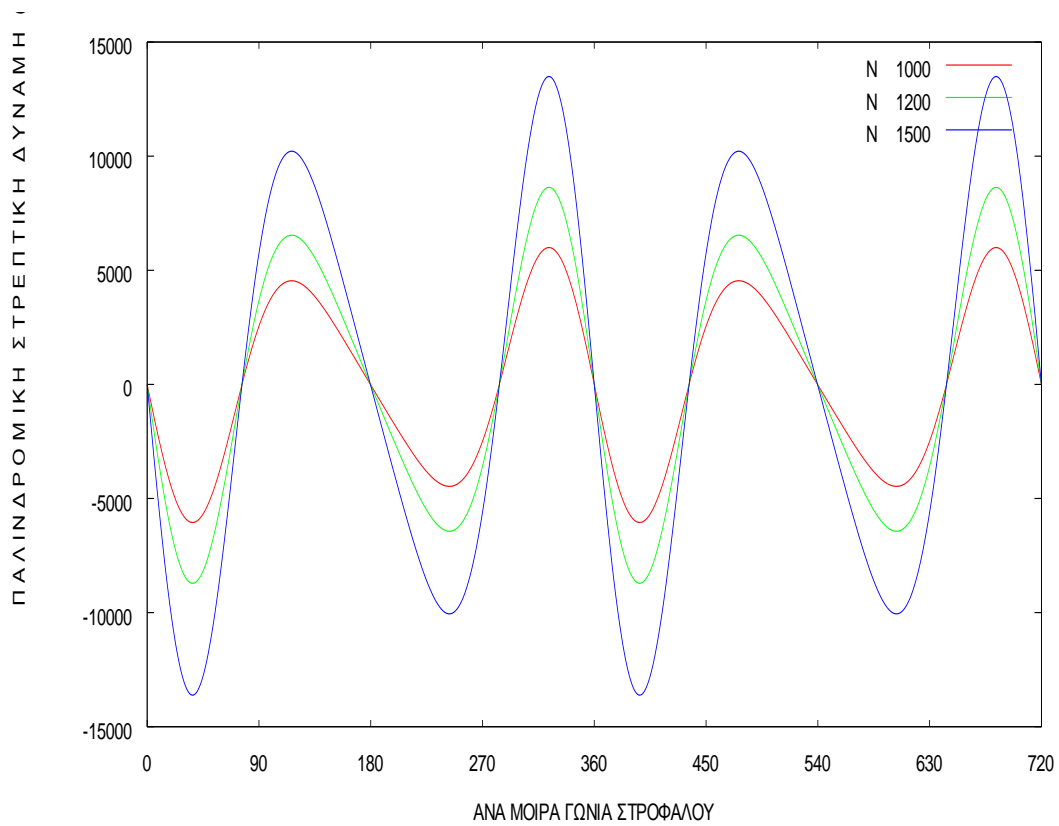
**Σχ. 7.60 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



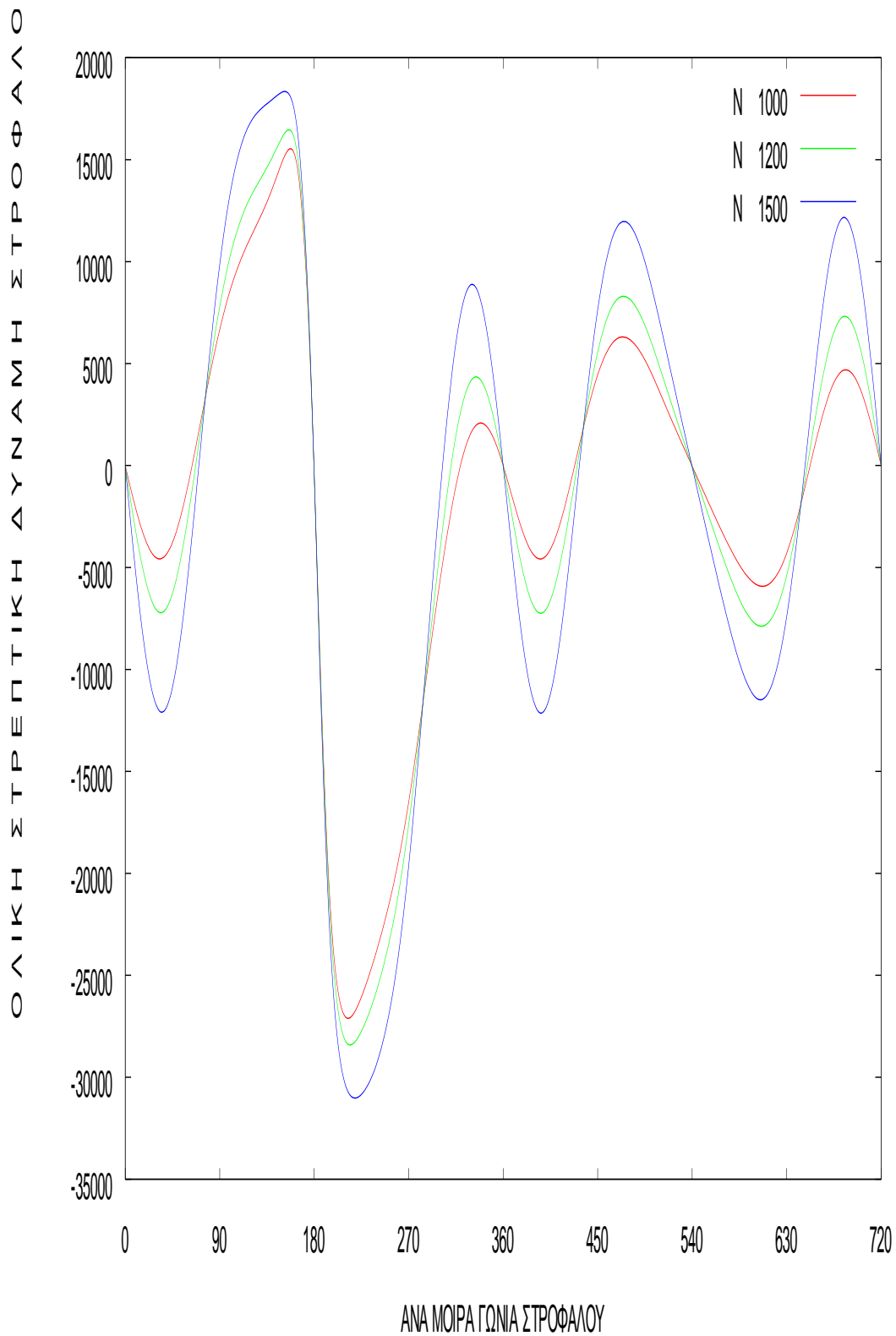
**Σχ. 7.61** Ολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στρόφαλου



Σχ. 7.62 Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνία στροφάλου



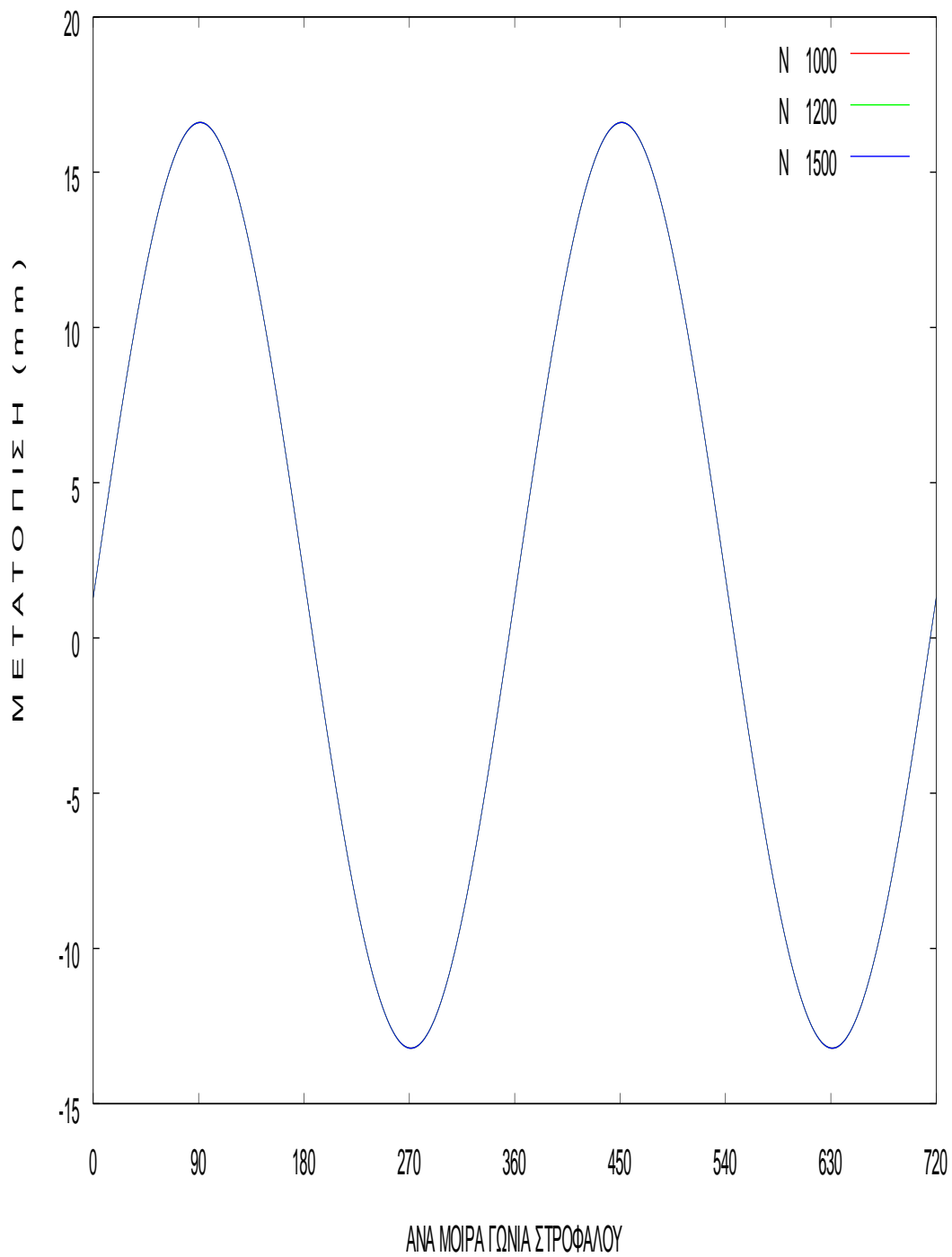
Σχ. 7.63 Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



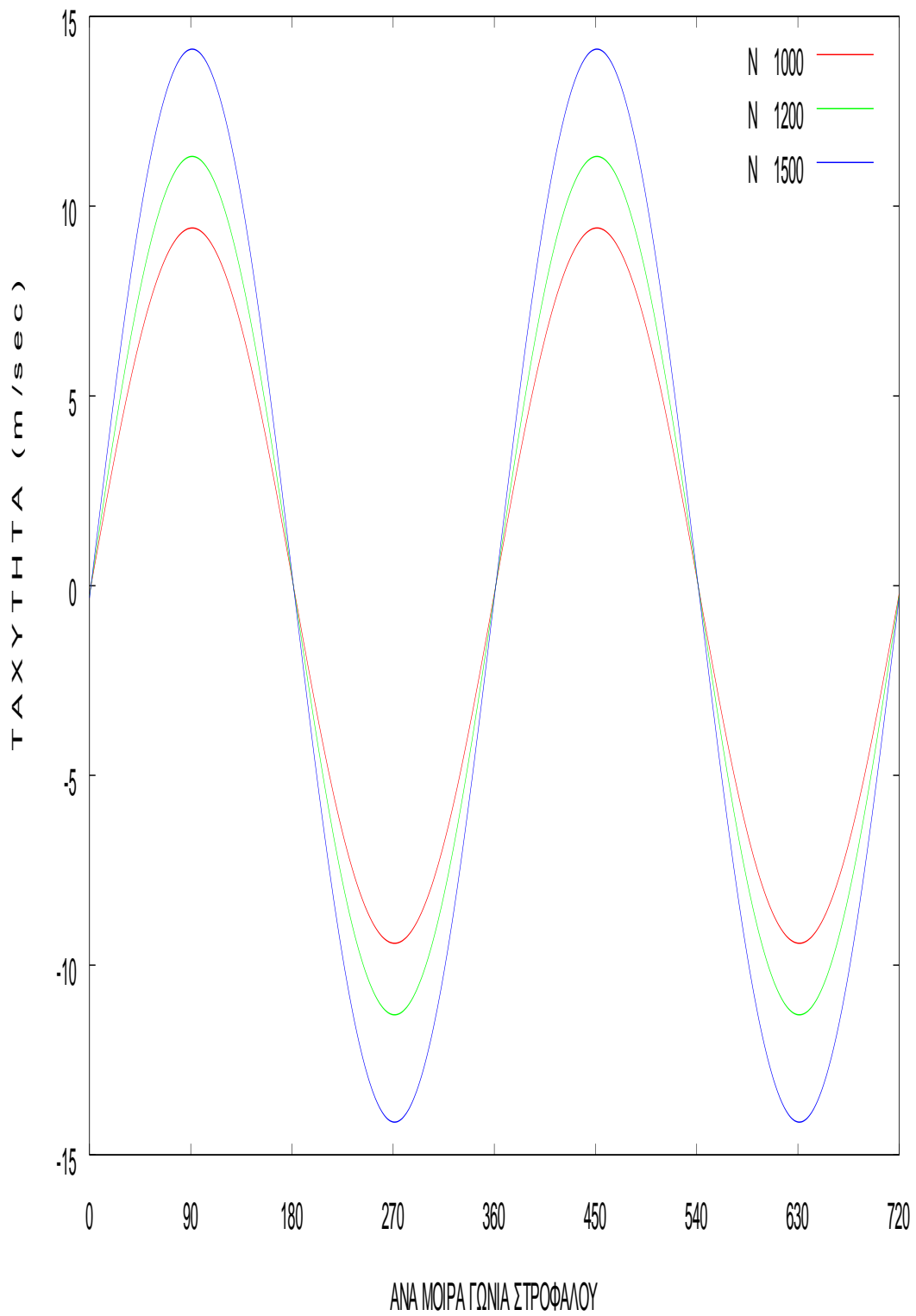
**Σχ.7.64** Ολική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνία στροφάλου



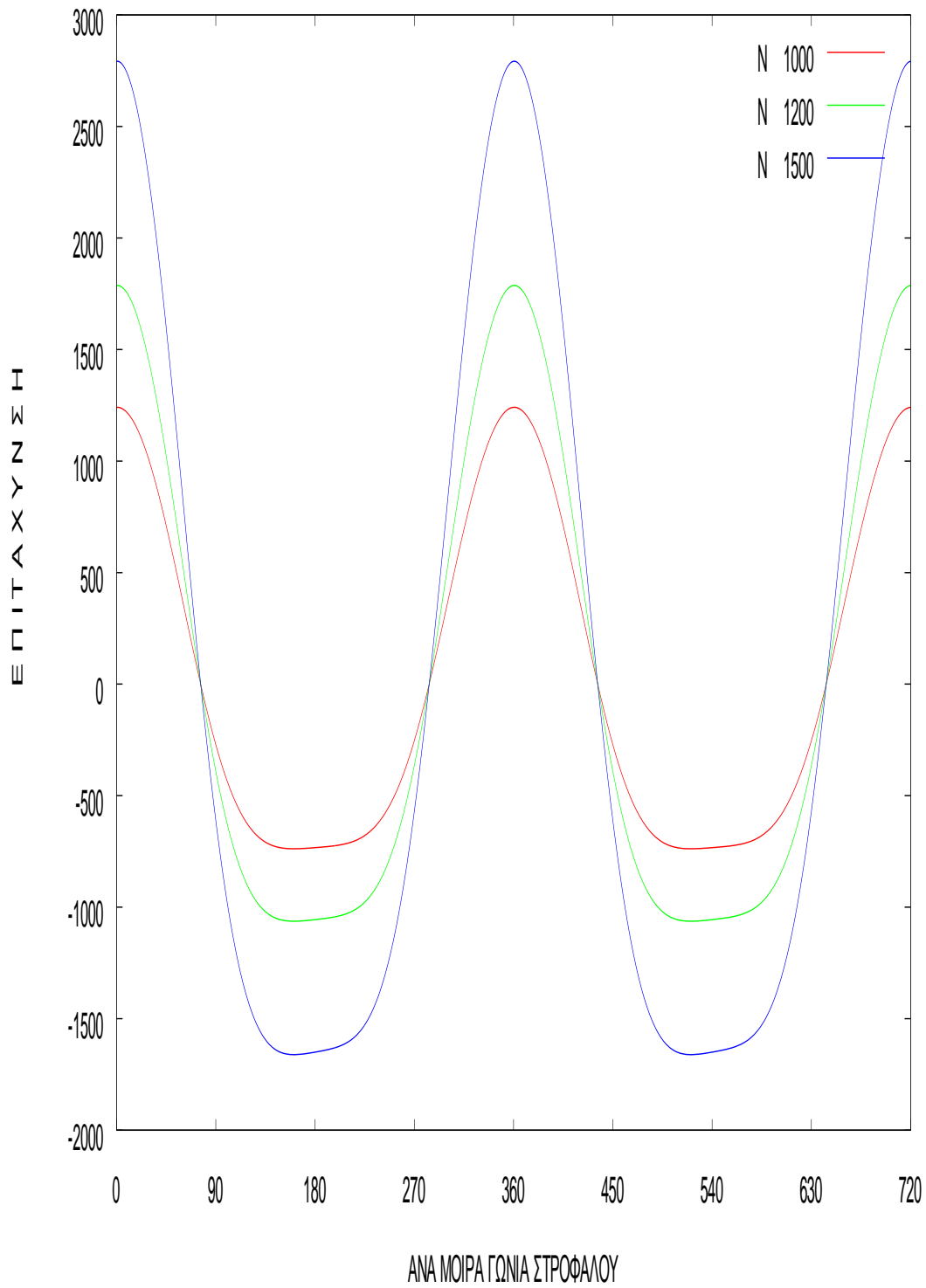
**Με Εκκεντρότητα 10 mm (Offset = 10mm)**



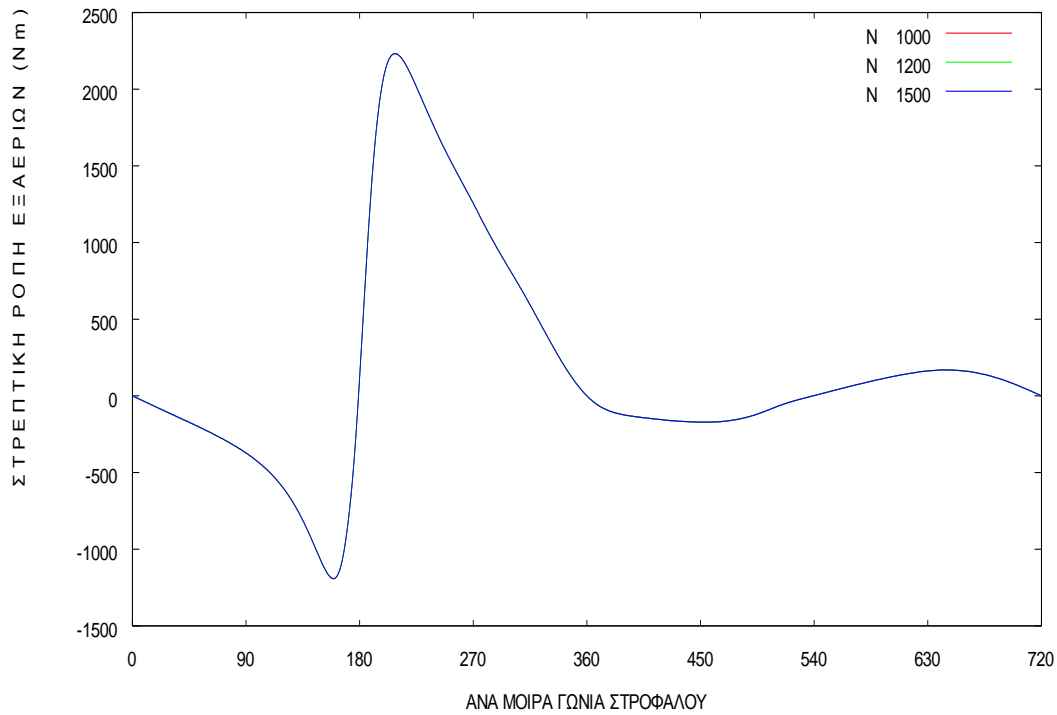
**Σχ.7.65 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνία στροφάλου**



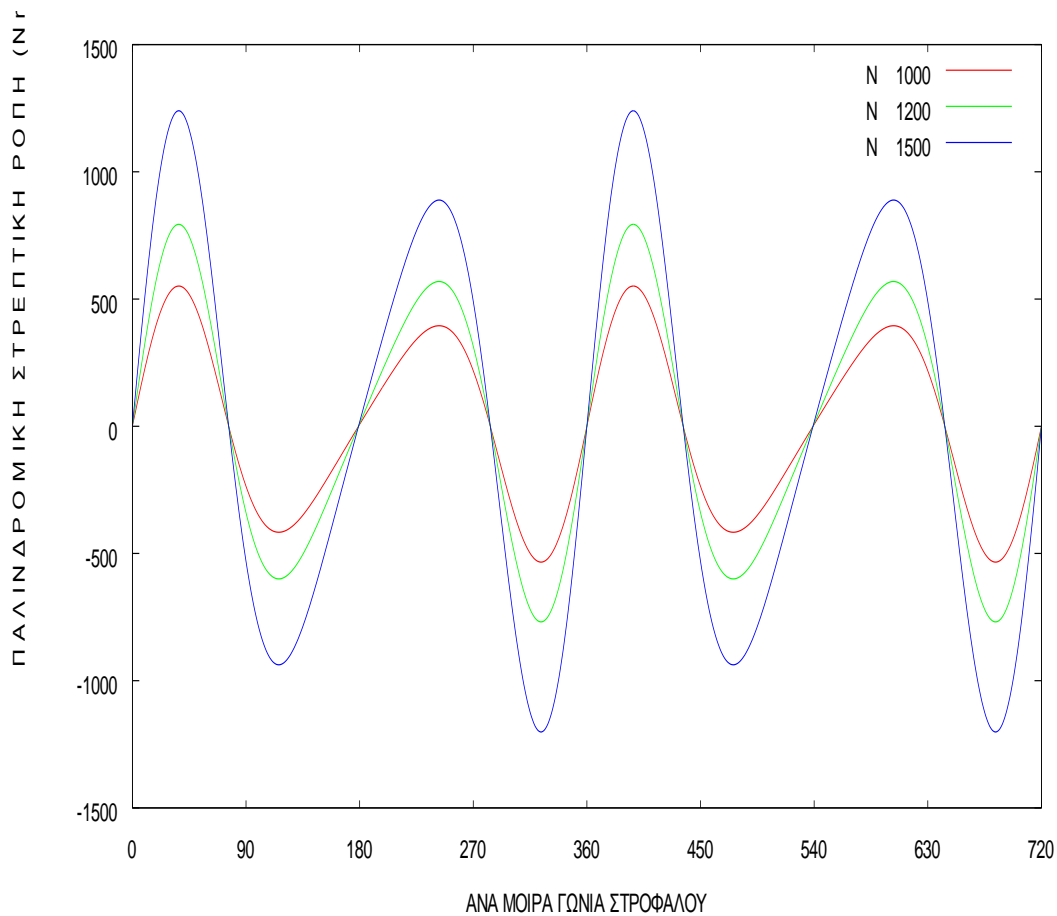
**Σχ.7.66 Ταχύτητα σε ( m/s) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



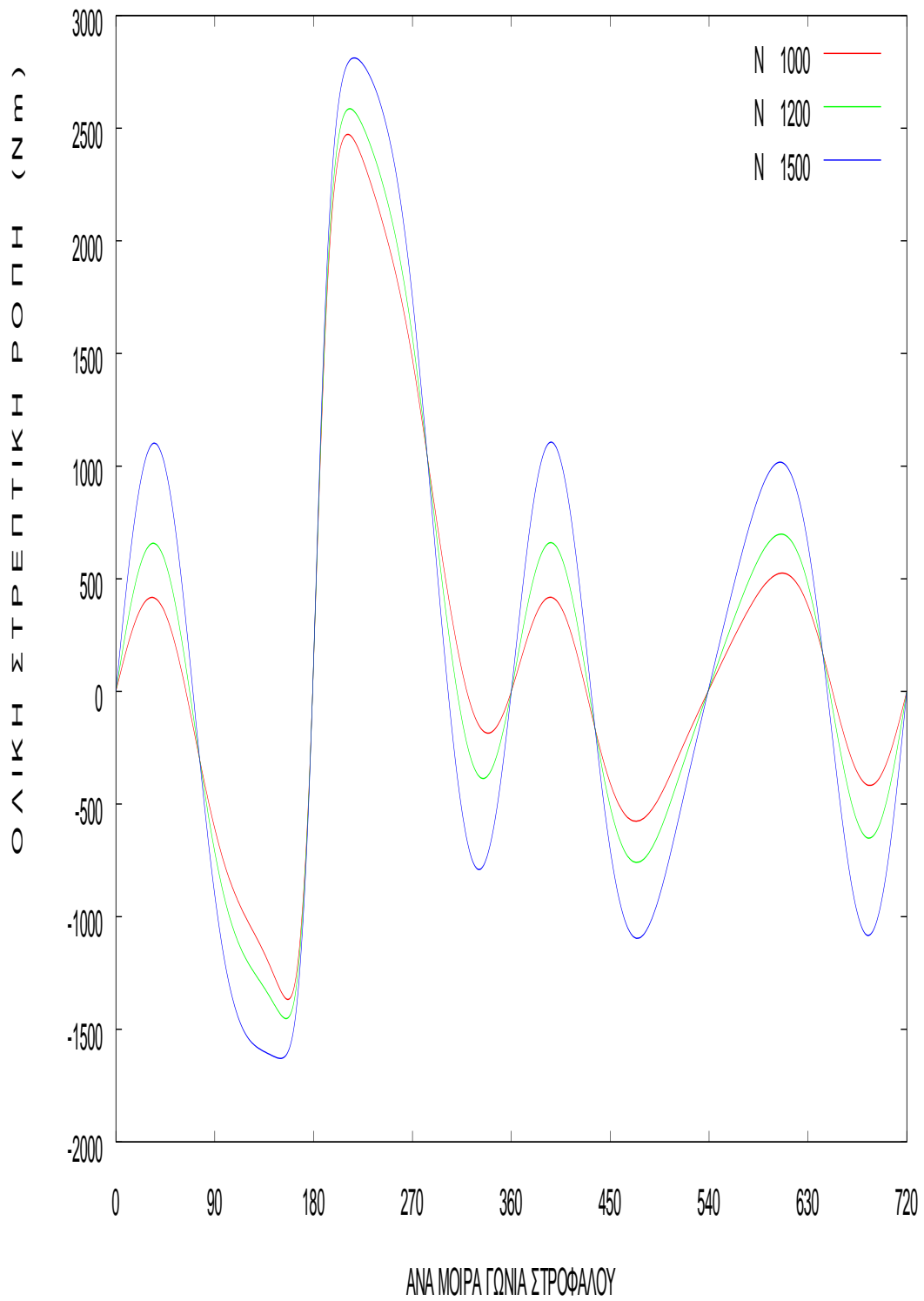
Σχ. 7.67 Επιτάχυνση σε ( $m/s^2$ ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



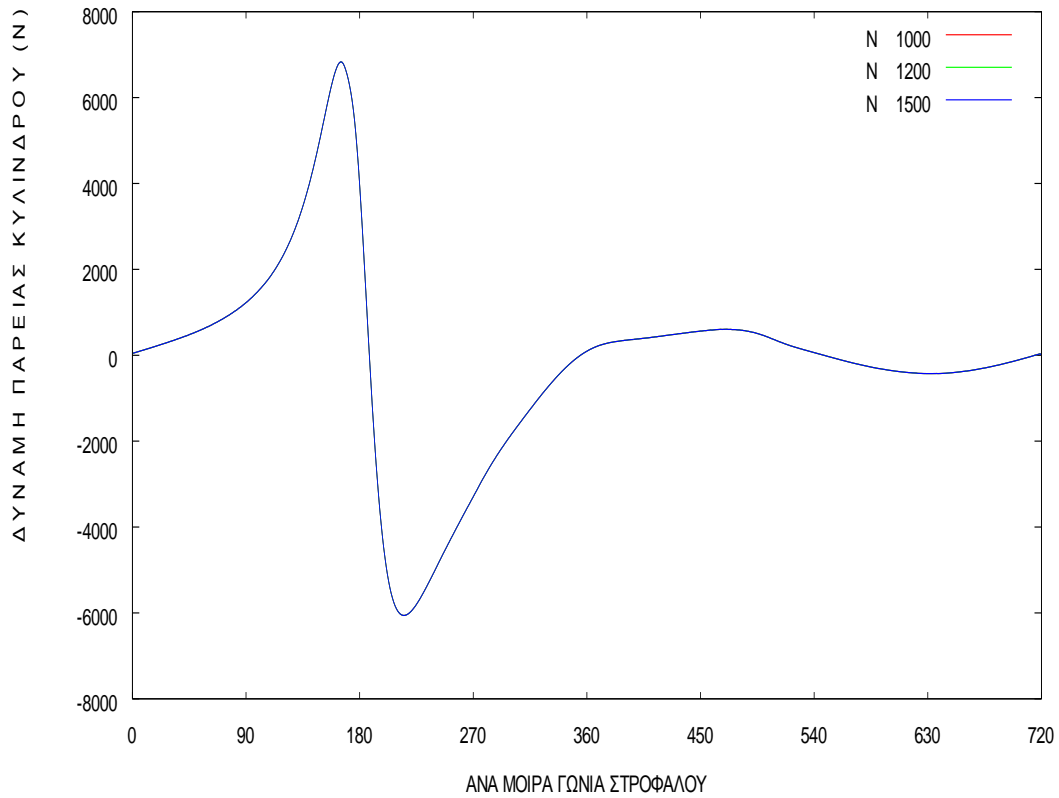
**Σχ.7.68** Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



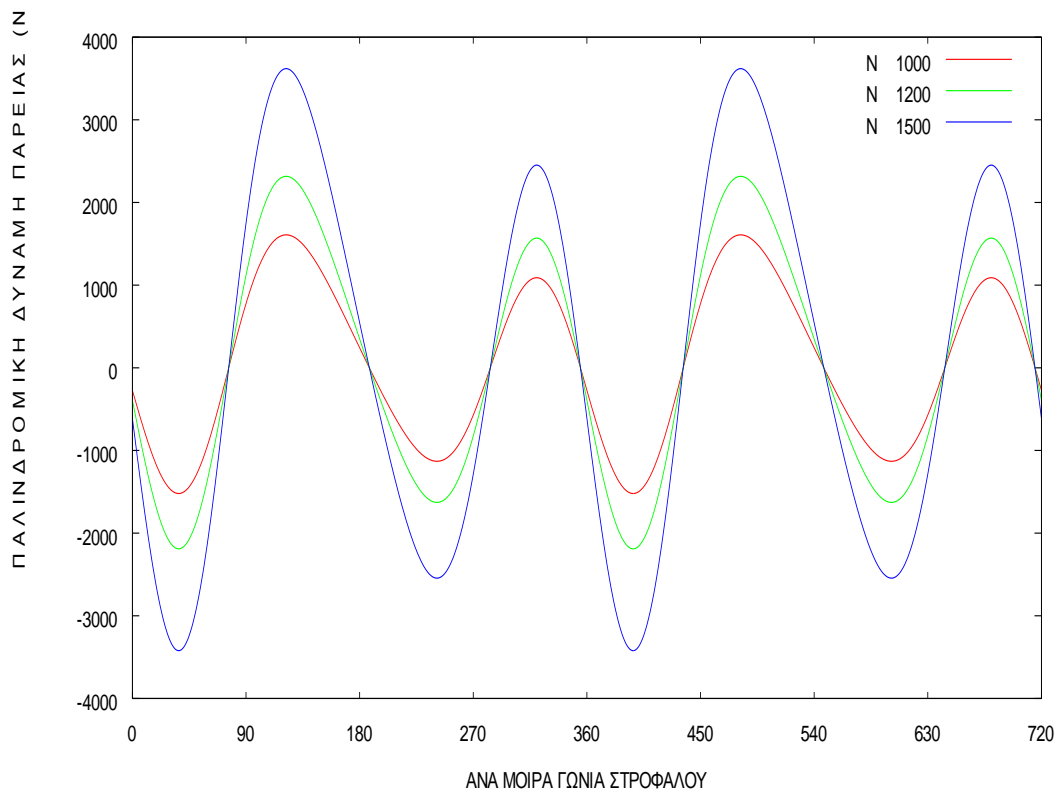
**Σχ.7.69** Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



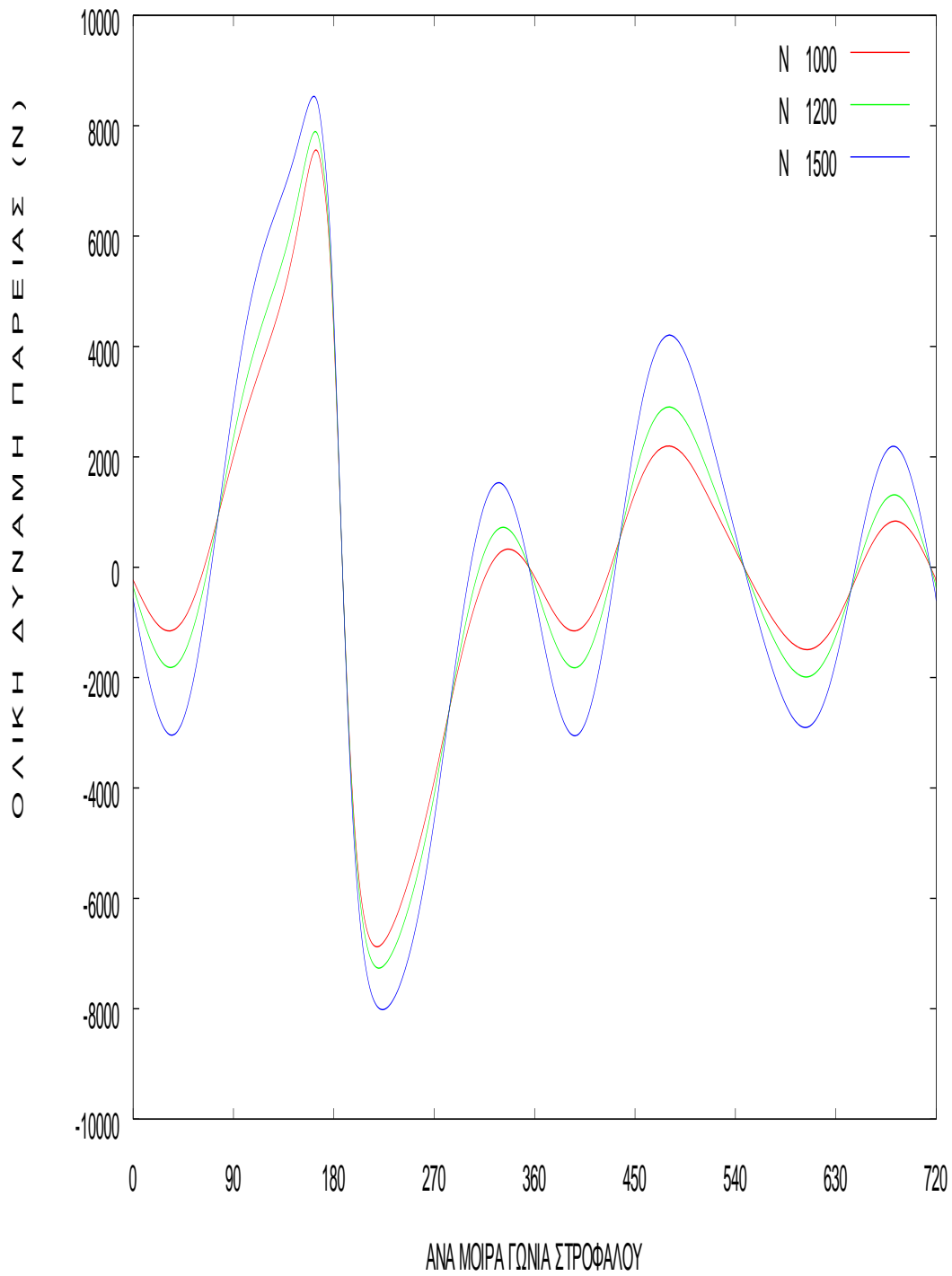
**Σχ.7.70** Ολική στρεπτική ροπή σε (Nm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



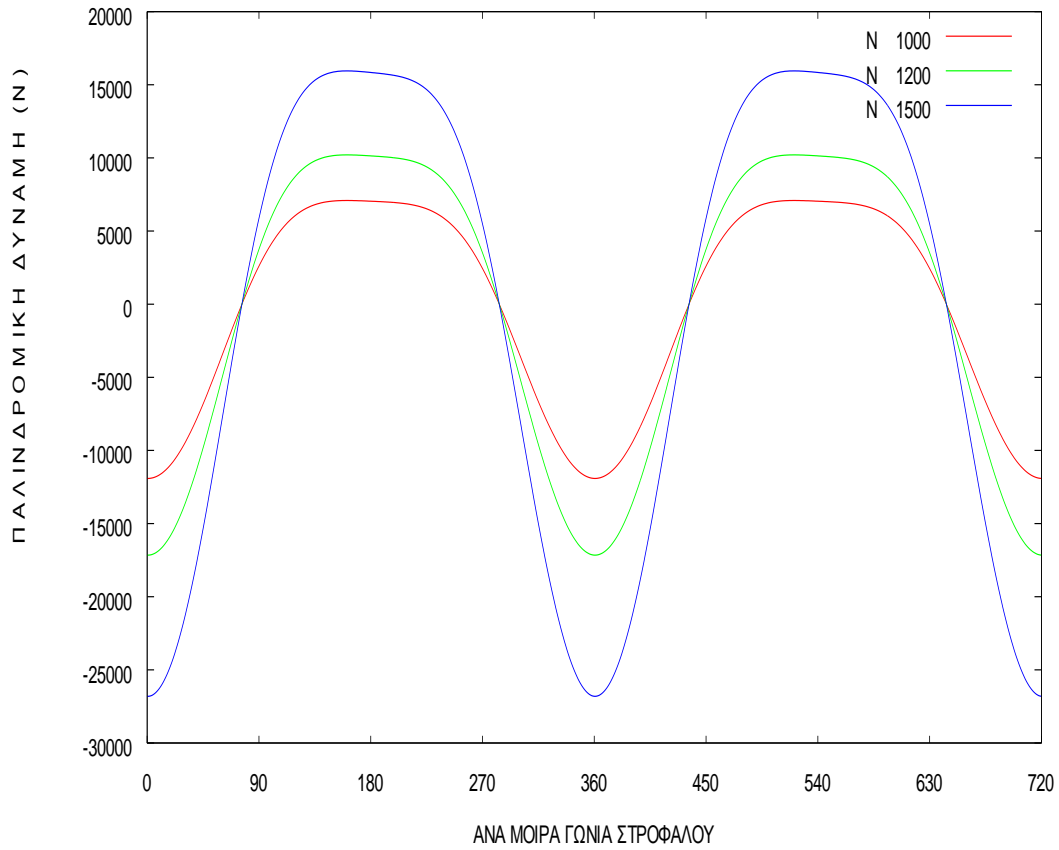
Σχ. 7.71 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



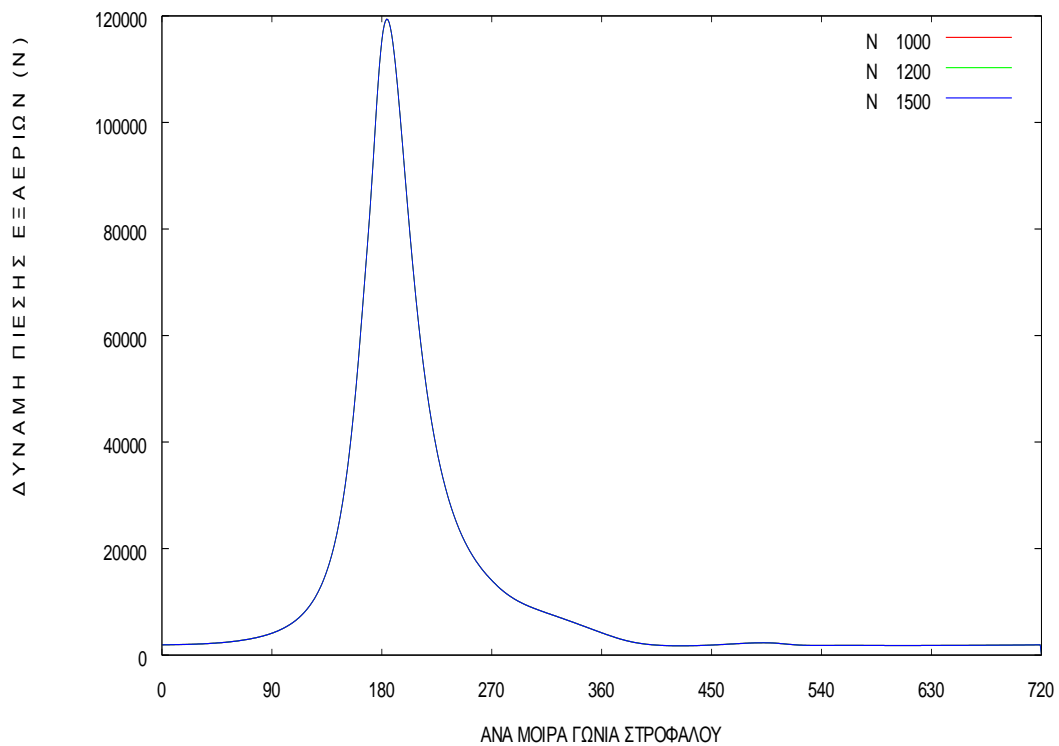
Σχ. 7.72 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.73 Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

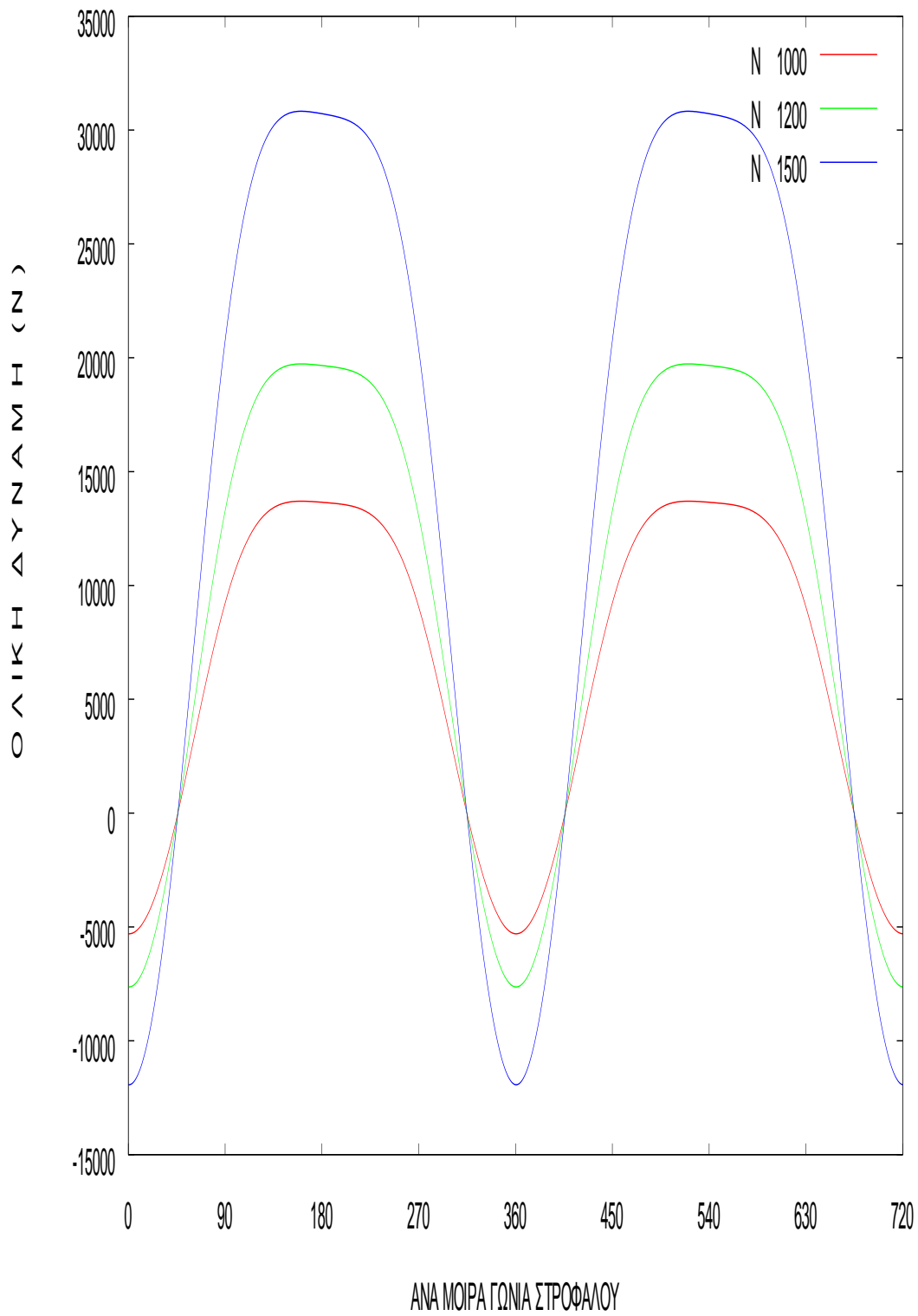


**Σχ. 7.74 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

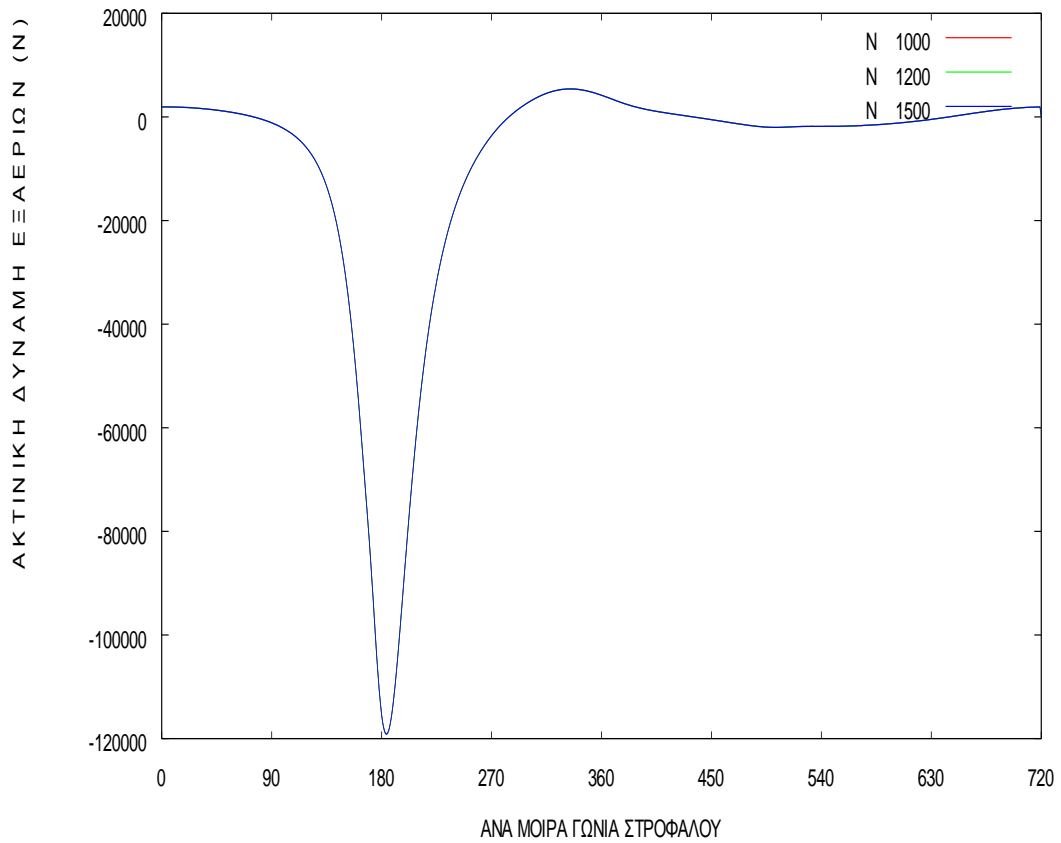


**Σχ. 7.75 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

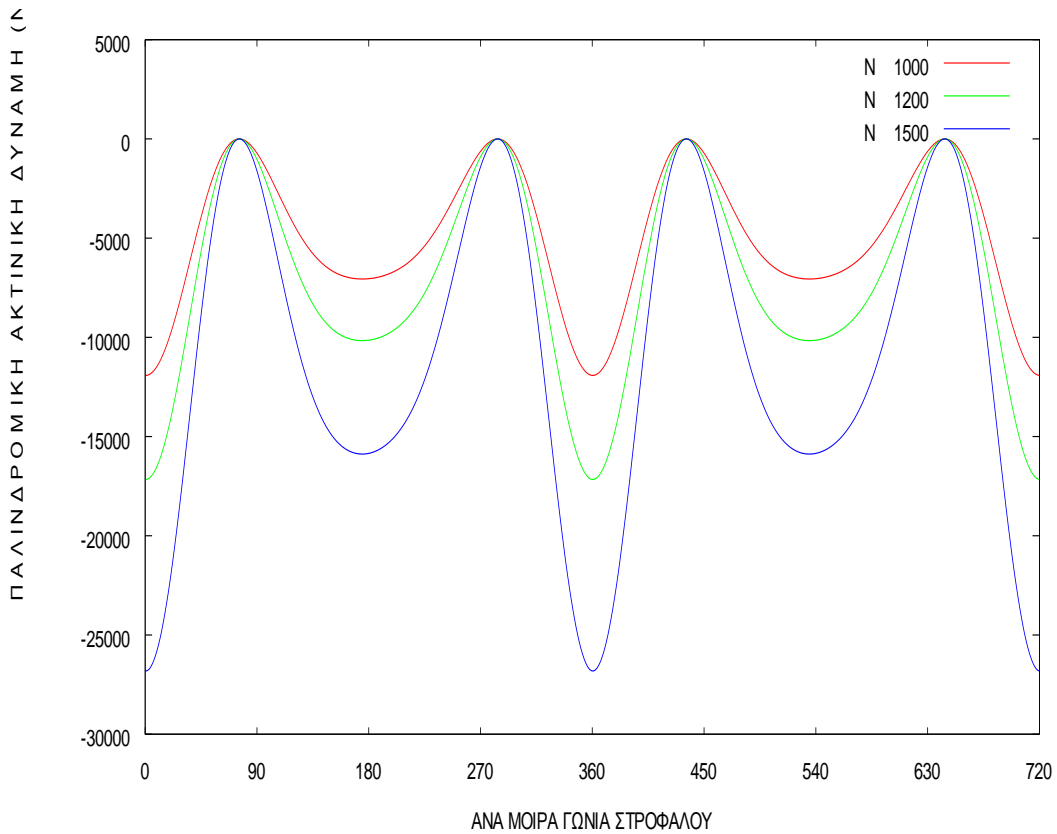




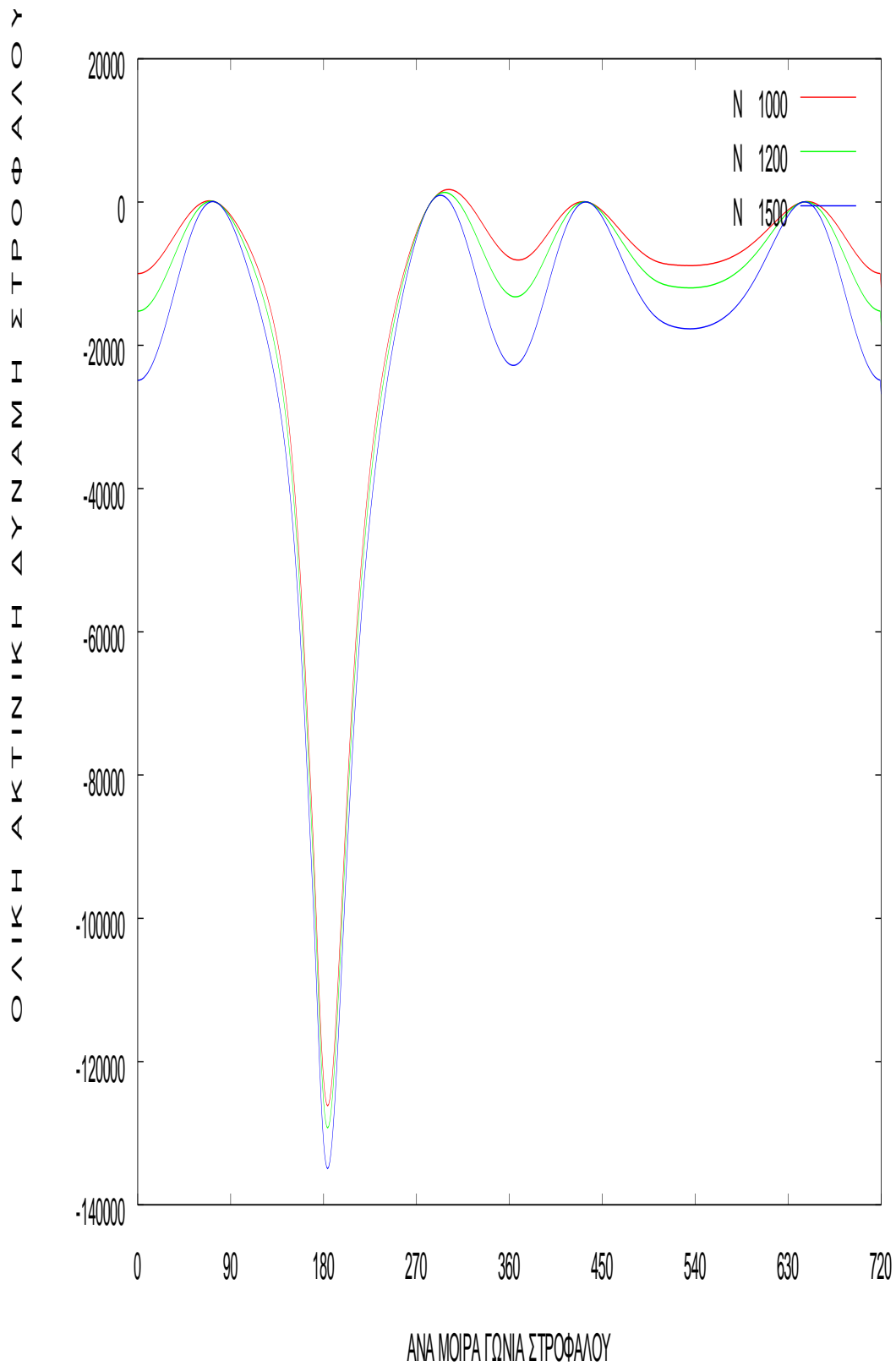
**Σχ. 7.76 Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



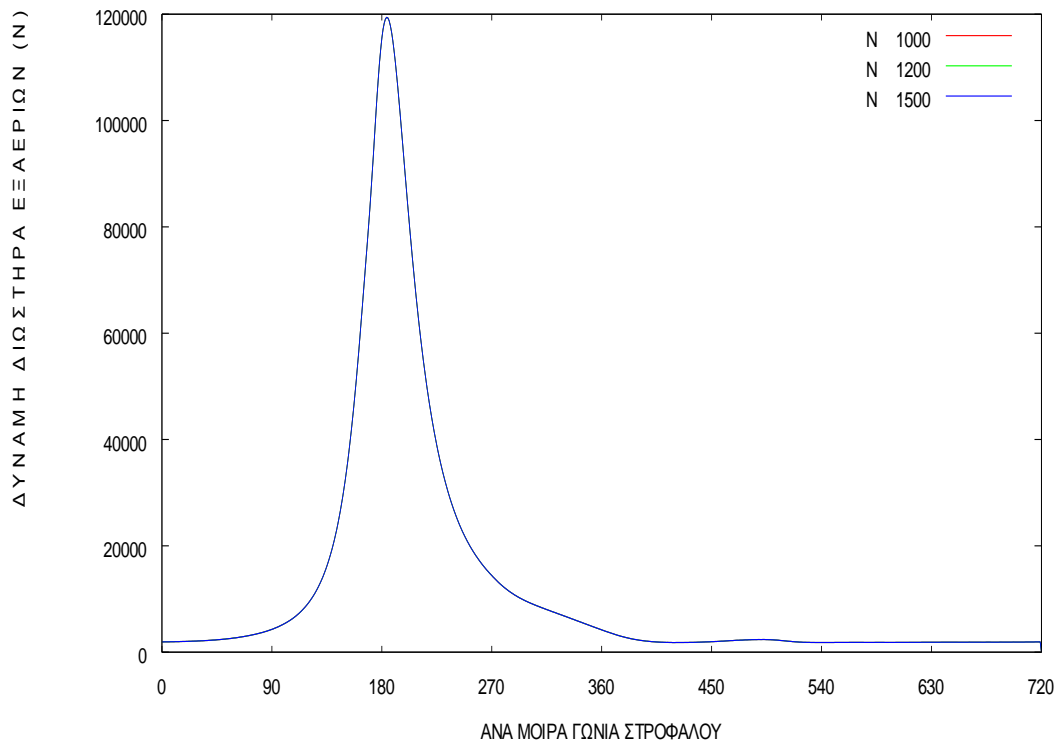
**Σχ.7.77** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



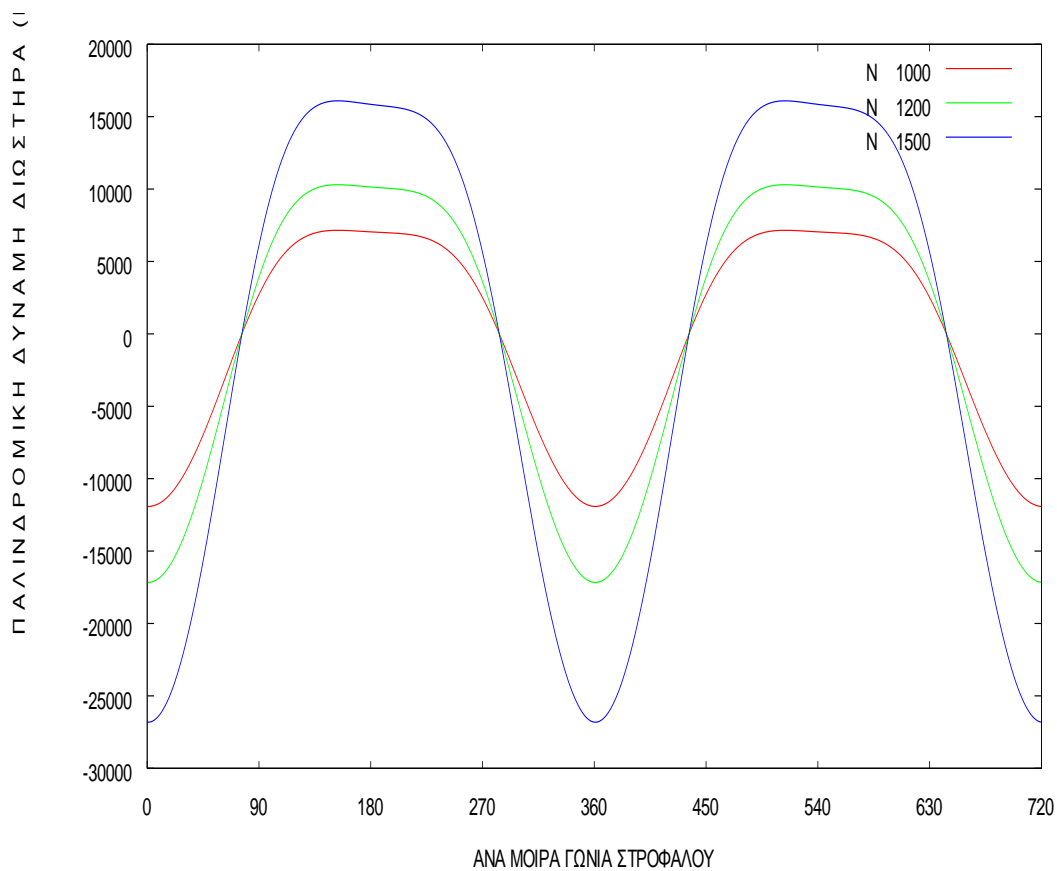
**Σχ.7.78** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



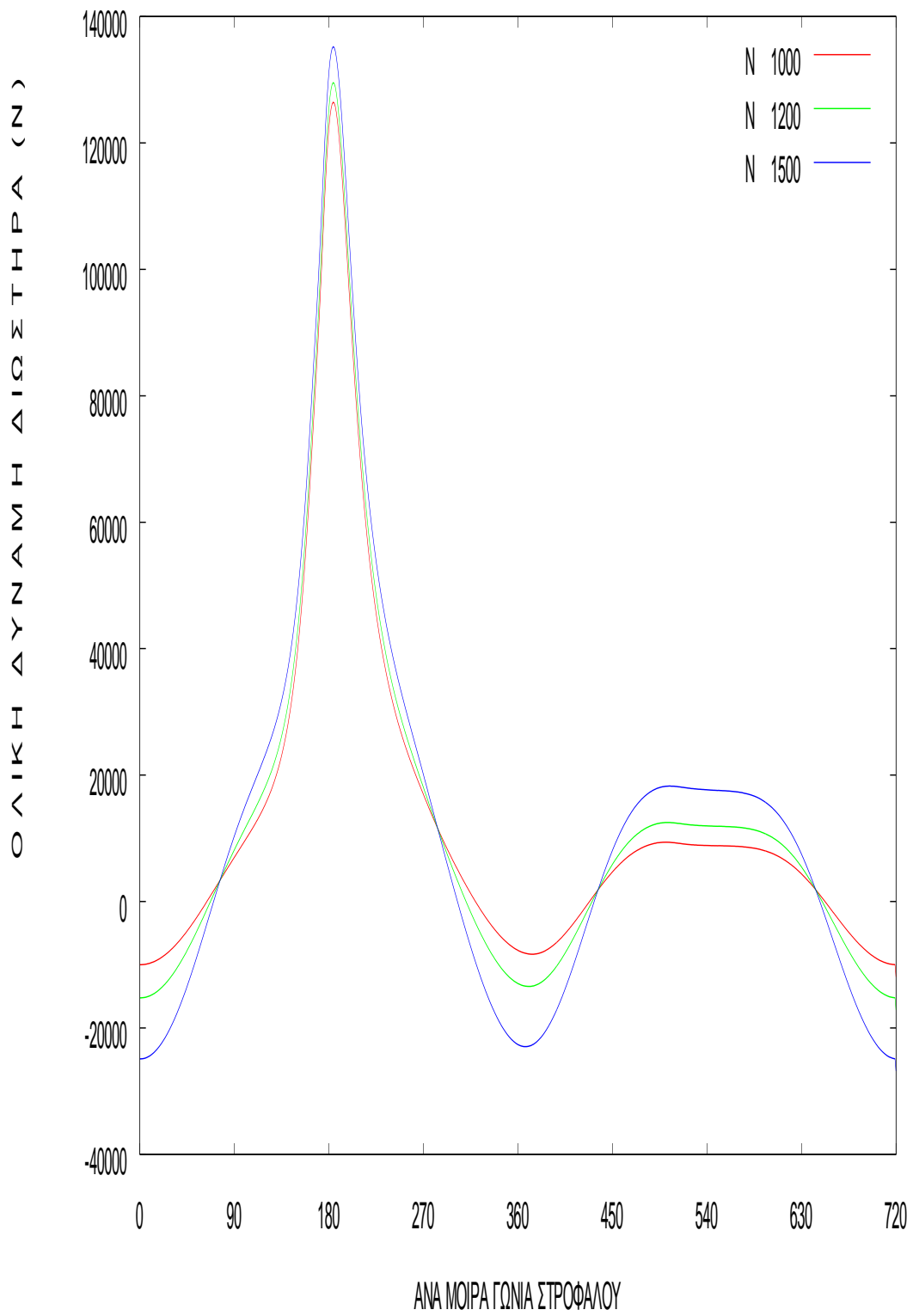
**Σχ. 7.79** Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



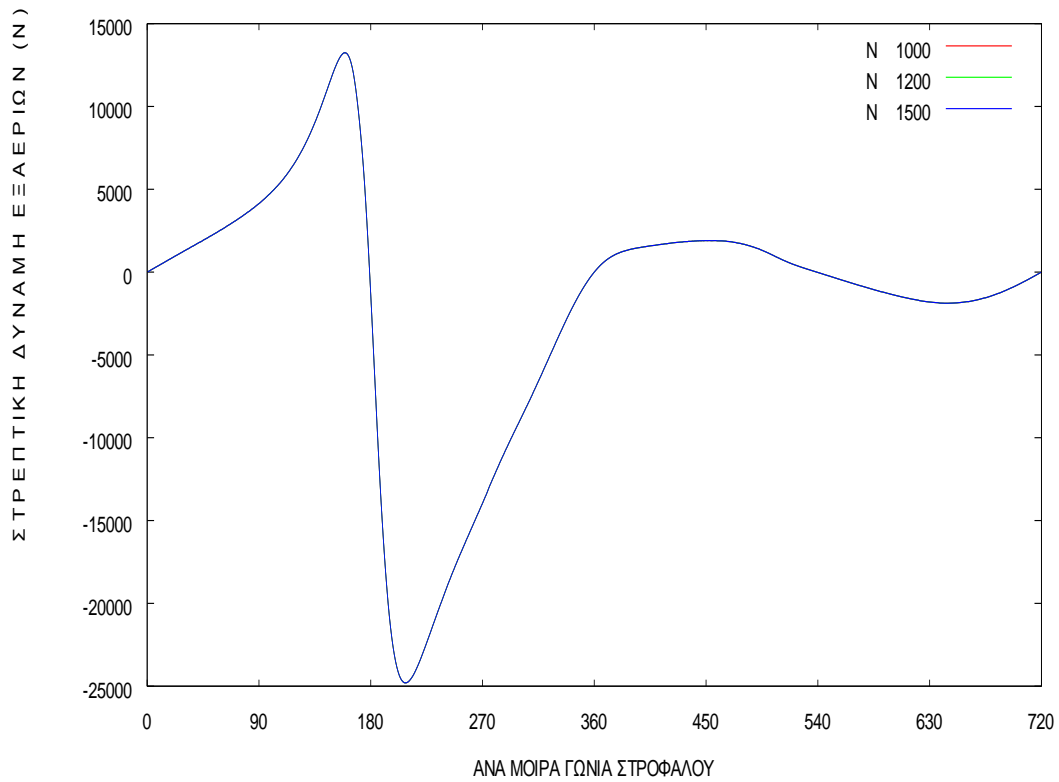
**Σχ. 7.80 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



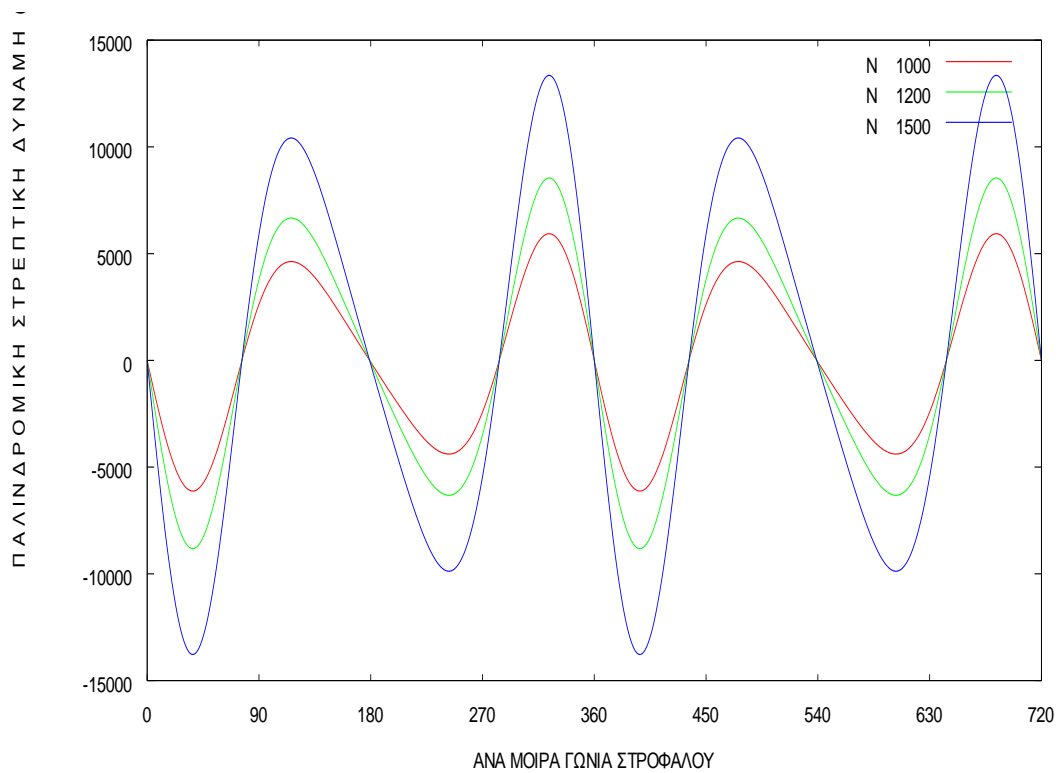
**Σχ.7.81 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



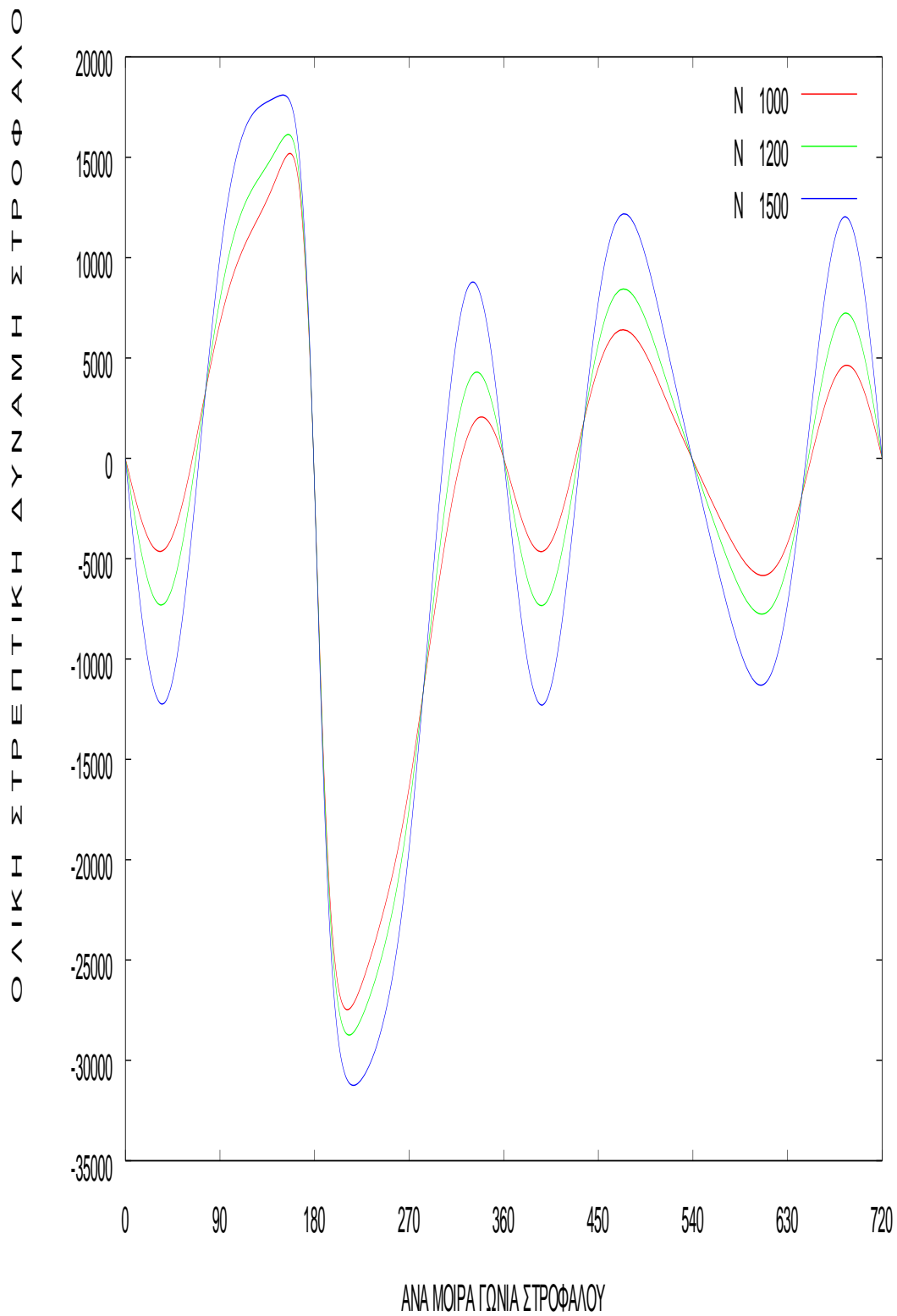
**Σχ.7.82 Ολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.83** Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ. 7.84** Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.85 Συνολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

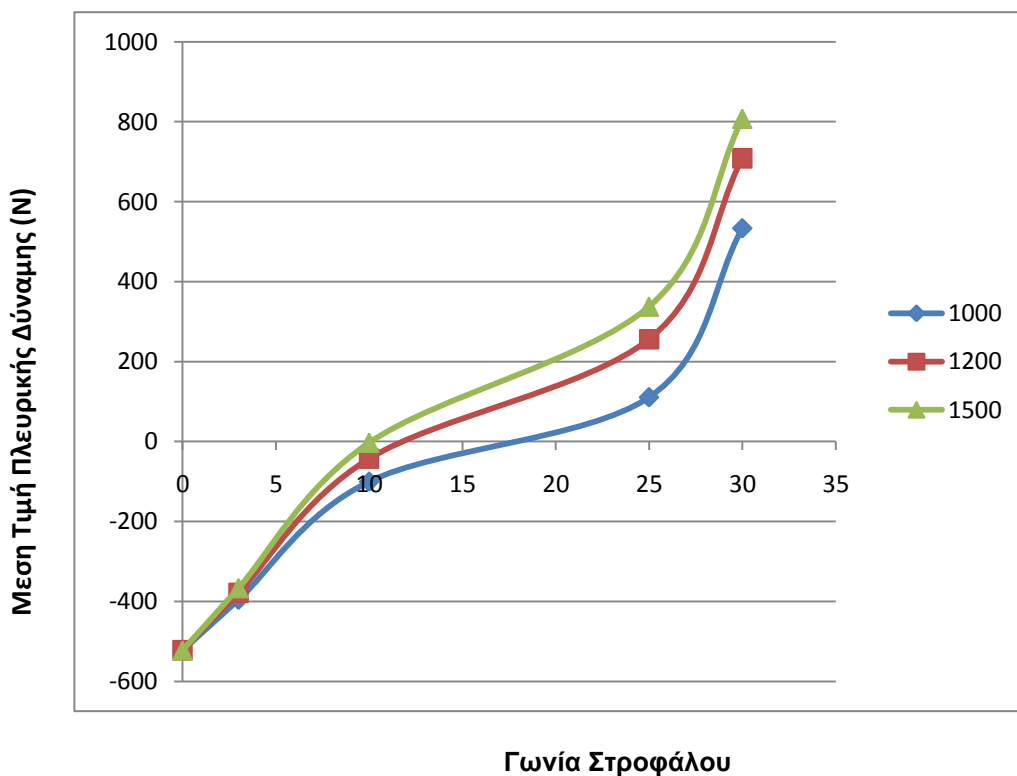
Από τα παραπάνω διαγράμματα 7.23 έως 7.85 γίνεται εμφανές ότι όσο οι στροφές αυξάνονται τόσο αυξάνονται και και μεγέθη των δυνάμεων ενώ η αύξηση αυτή γίνεται ακόμα μεγαλύτερη όσο αυξάνεται το μέγεθος της εκκεντρότητας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της πλευρικής δύναμης για τα αντίστοιχα μεγέθη εκκεντροτήτων που εφαρμόζονται σε σχέση με τις στροφές.

Πίνακας Μέσης Τιμής Πλευρικής Δύναμης (N)

rpm /offset	0	3	10	25	30
1000	-522.16	-395.469	-100.098	110.8937	533.7091
1200	-522.16	-378.284	-42.712	255.8789	708.6593
1500	-522.16	-366.351	-2.86066	337.433	807.0687

**Σχ. 7.86 Διαγραμμα Μέσης Πλευρικής Δύναμης (N)**

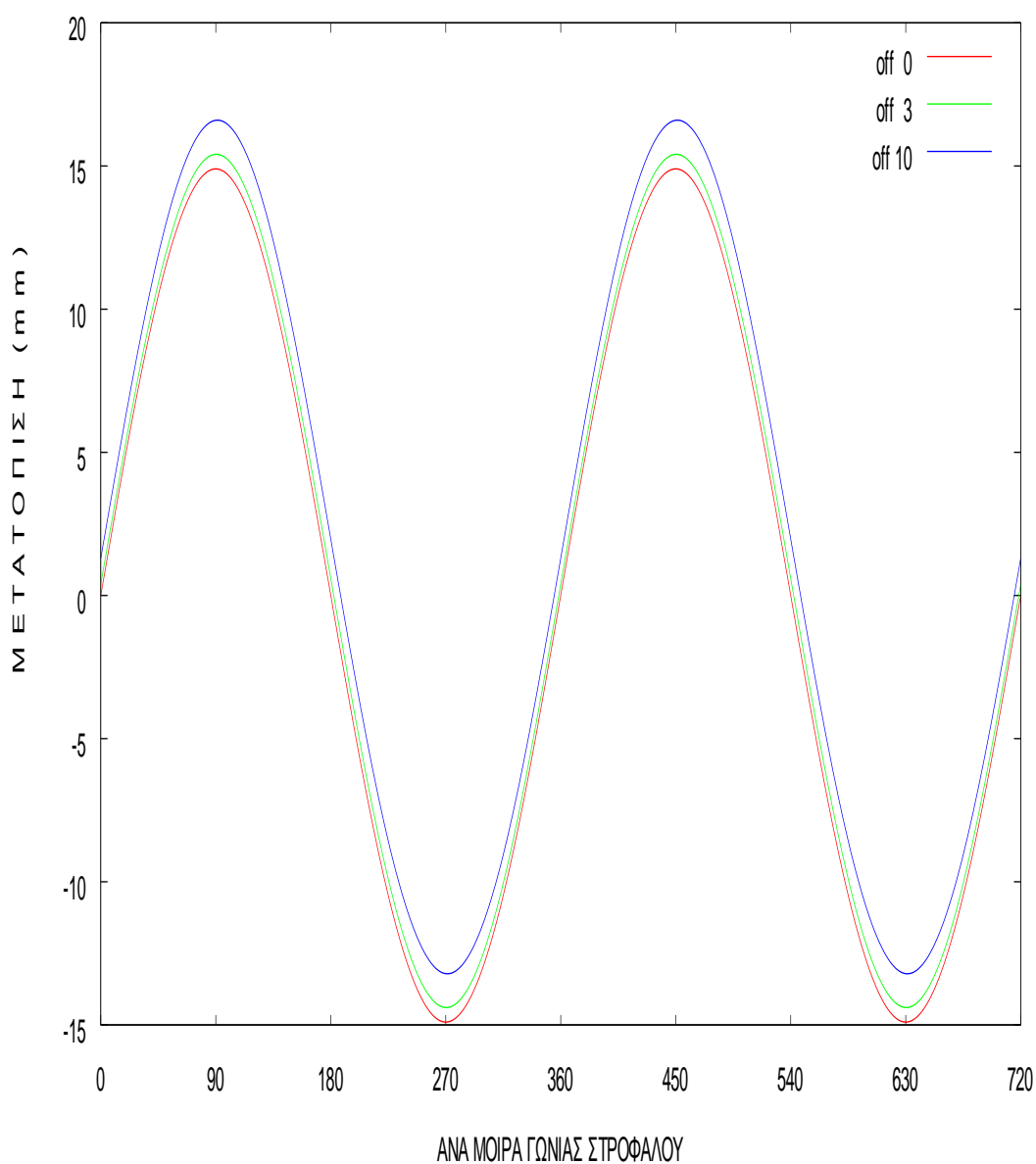




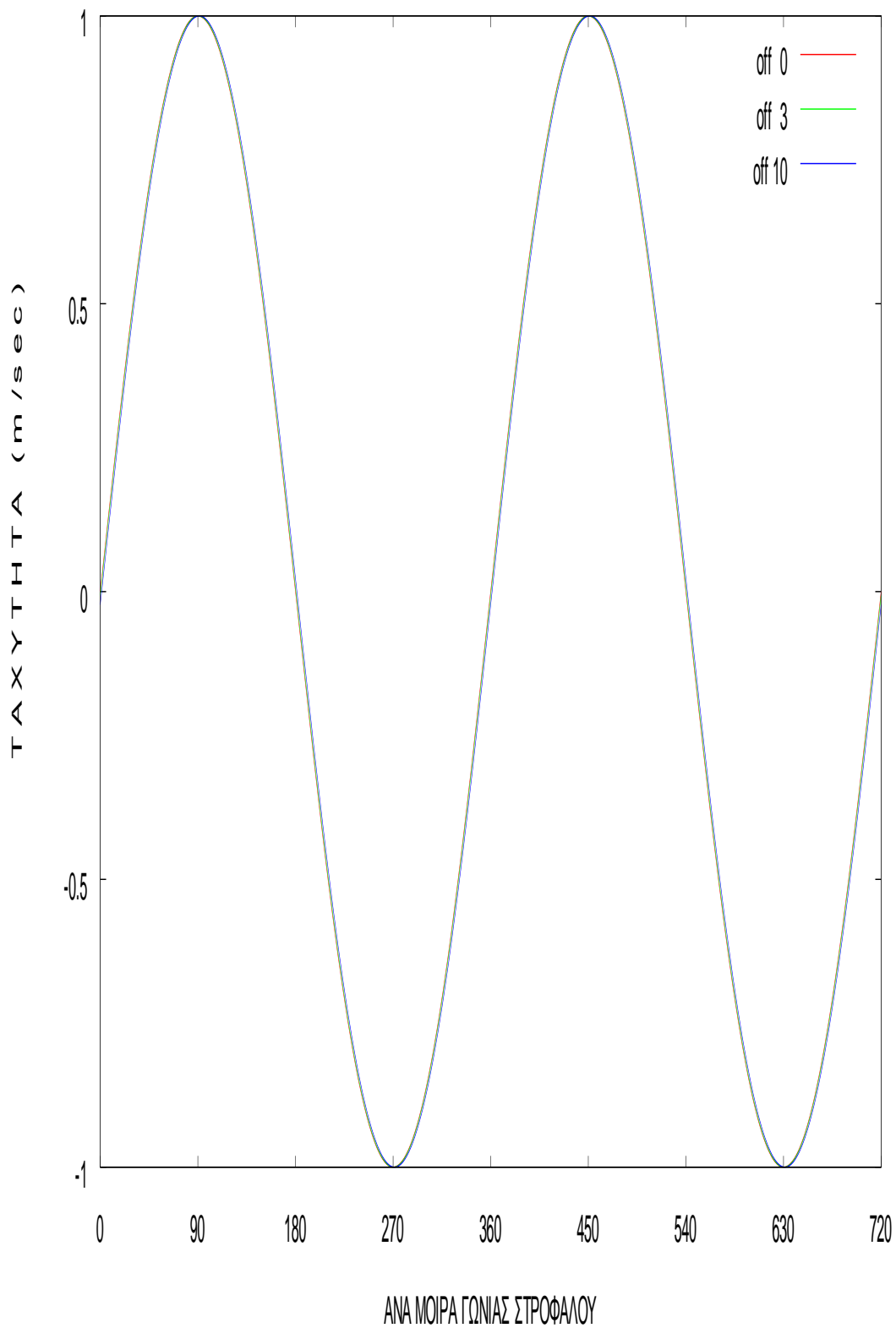
### 7.1.3 Εκκεντρότητα Πείρου- Εμβόλου - Ανάλυση επίδρασης μεγέθους μαζών κινηματικού μηχανισμού.

Στη παρούσα ενότητα εξετάζεται η συμπεριφορά του μηχανισμού με μειωμένες τις αρχικές μάζες των επιμέρους εξαρτημάτων κατά 50% ενώ όλα τα άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παραμένουν τα ίδια. Δηλαδή μάζα εμβόλου  $m_e = 2,5 \text{ kgr}$  , μάζα διωστήρα  $m_\delta = 3,20 \text{ kgr}$  , μάζα στροφάλου  $m_\sigma = 2,5 \text{ kgr}$ .

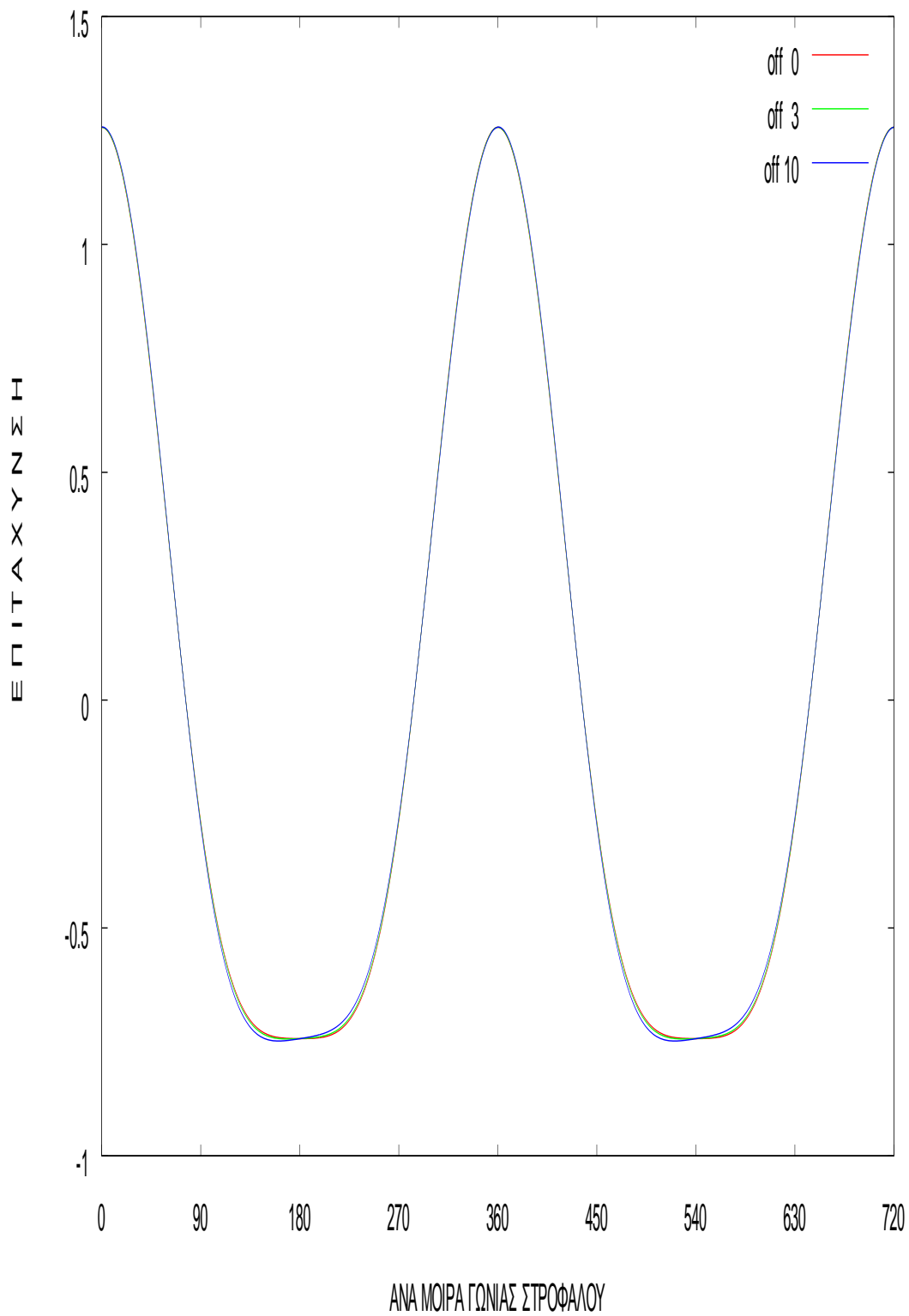
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



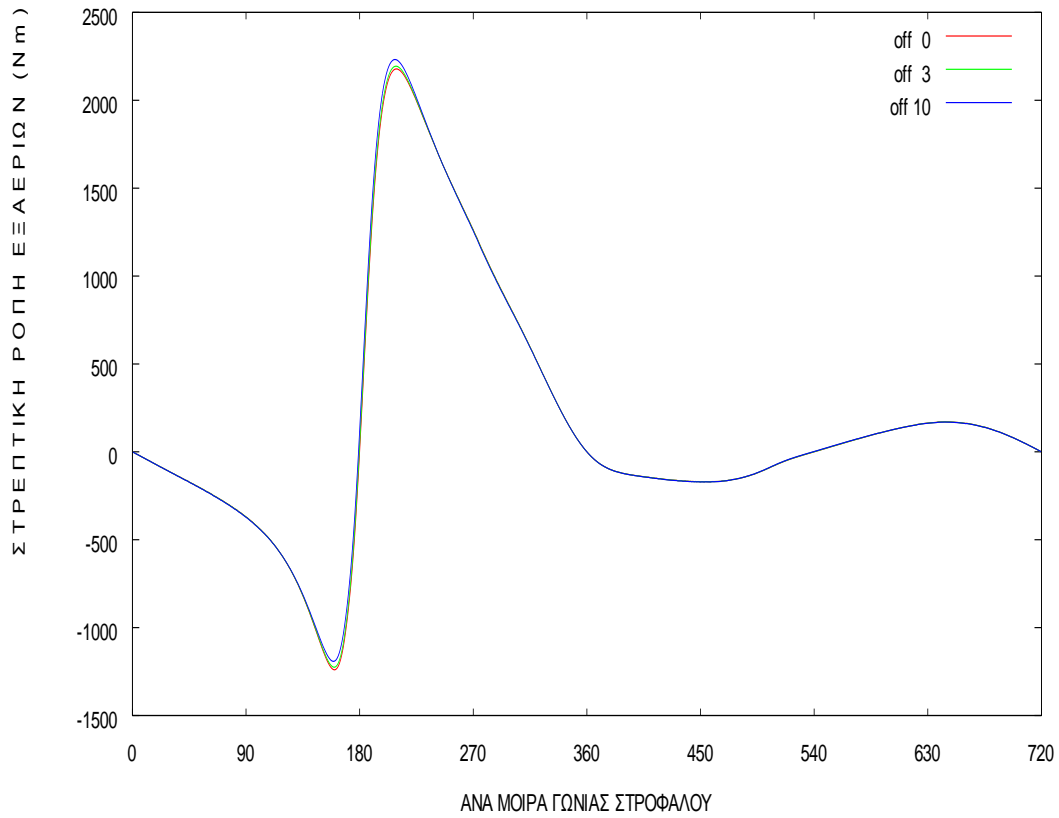
Σχ. 7.87 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



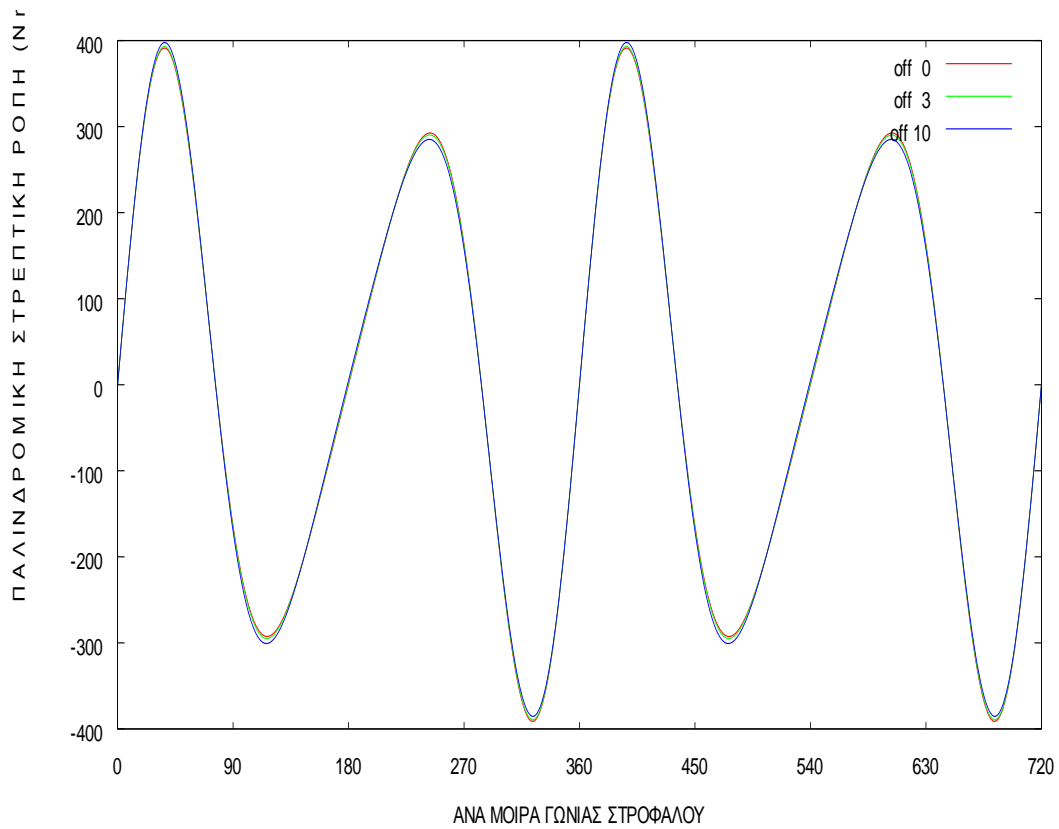
**Σχ.7.88 Ταχύτητα σε ( m/s ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



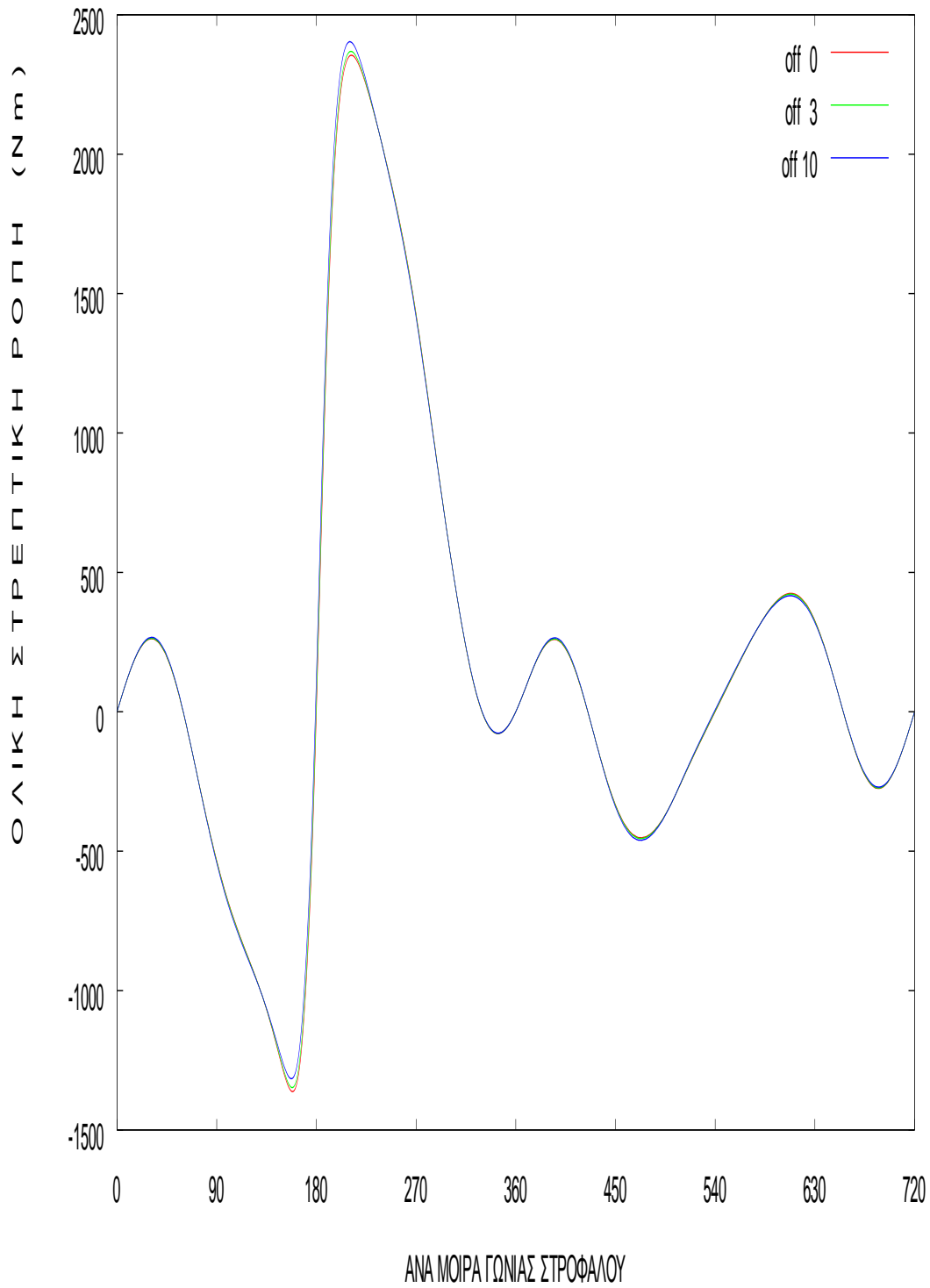
**Σχ.7.89 Επιτάχυνση σε ( m/s<sup>2</sup> ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



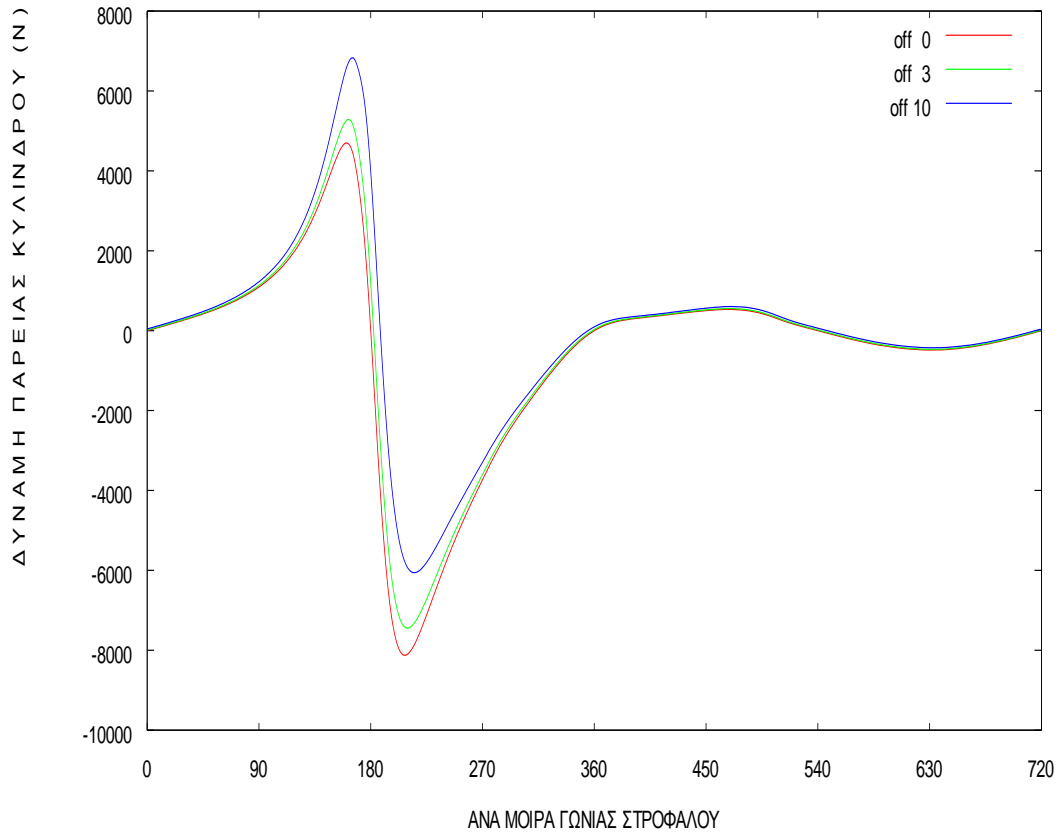
**Σχ.7.90** Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



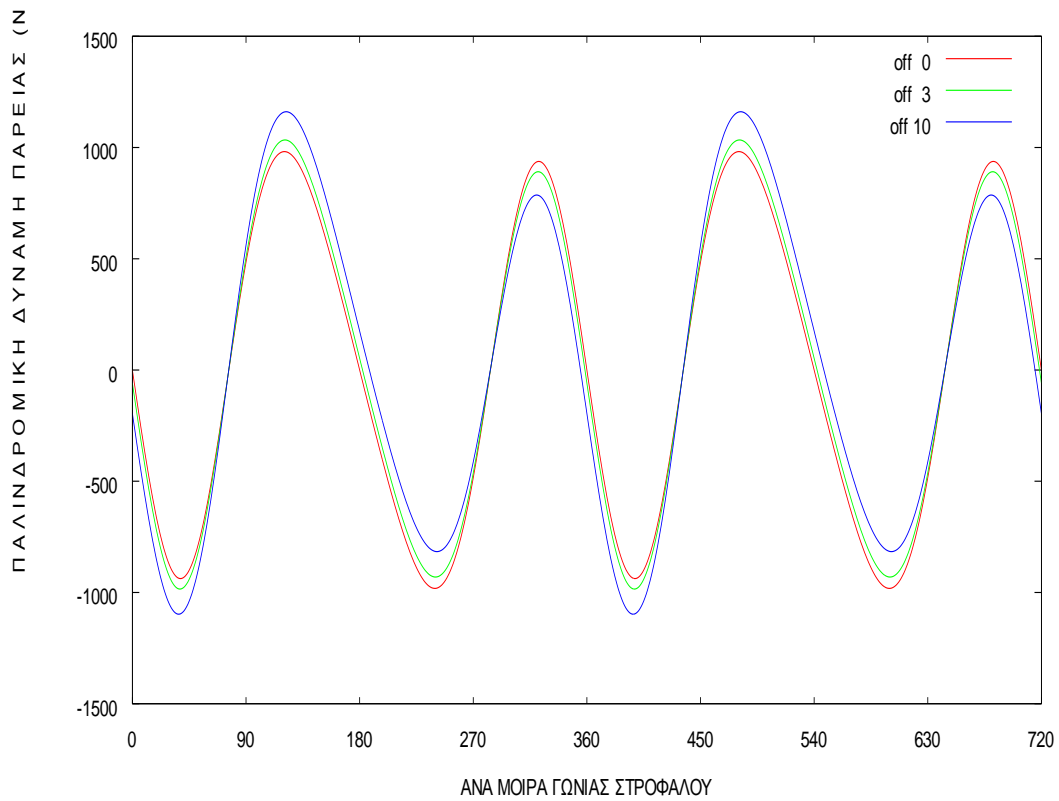
**Σχ.7.91** Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



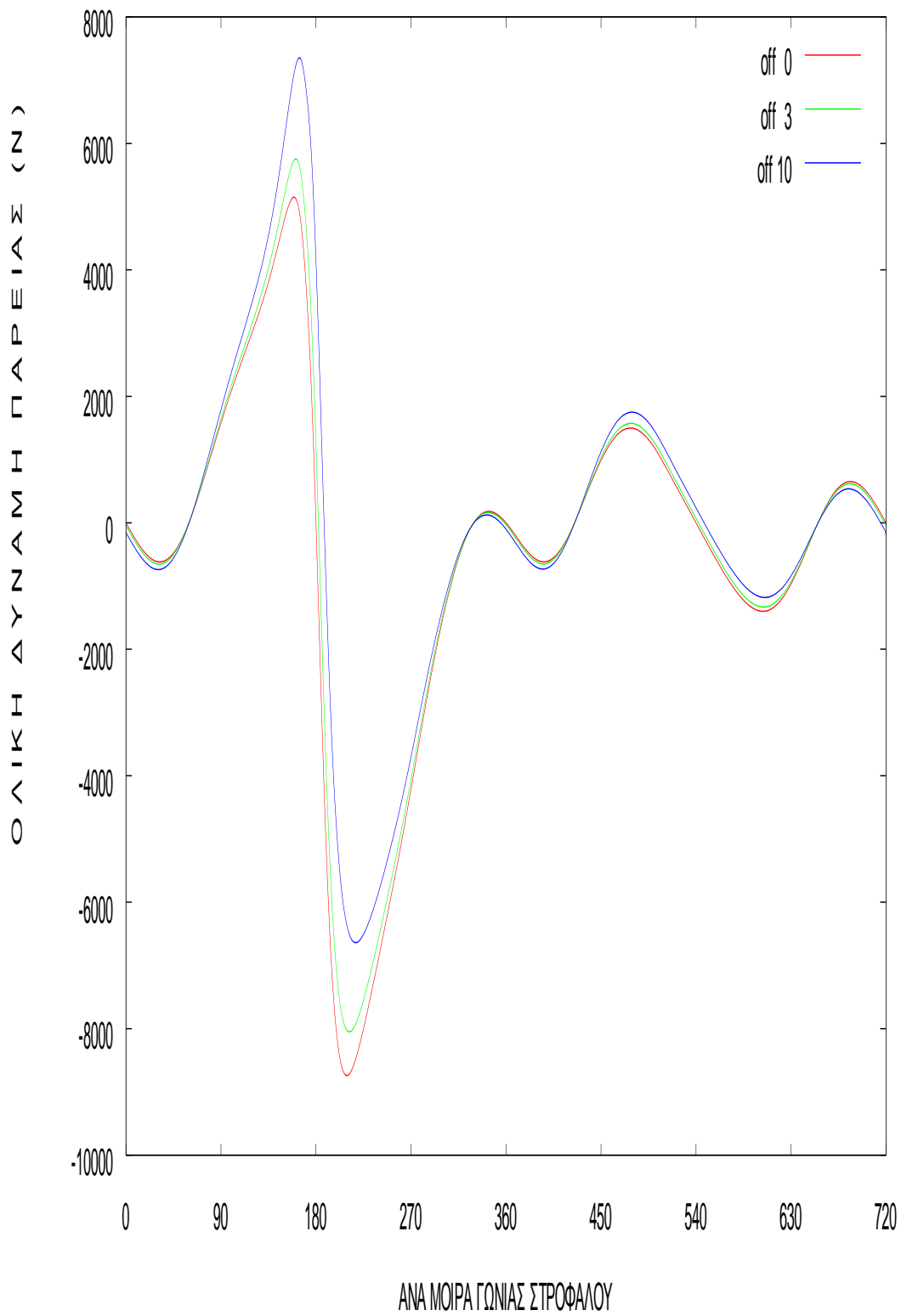
**Σχ.7.92** Ολική στρεπτική ροπή σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στρόφαλου



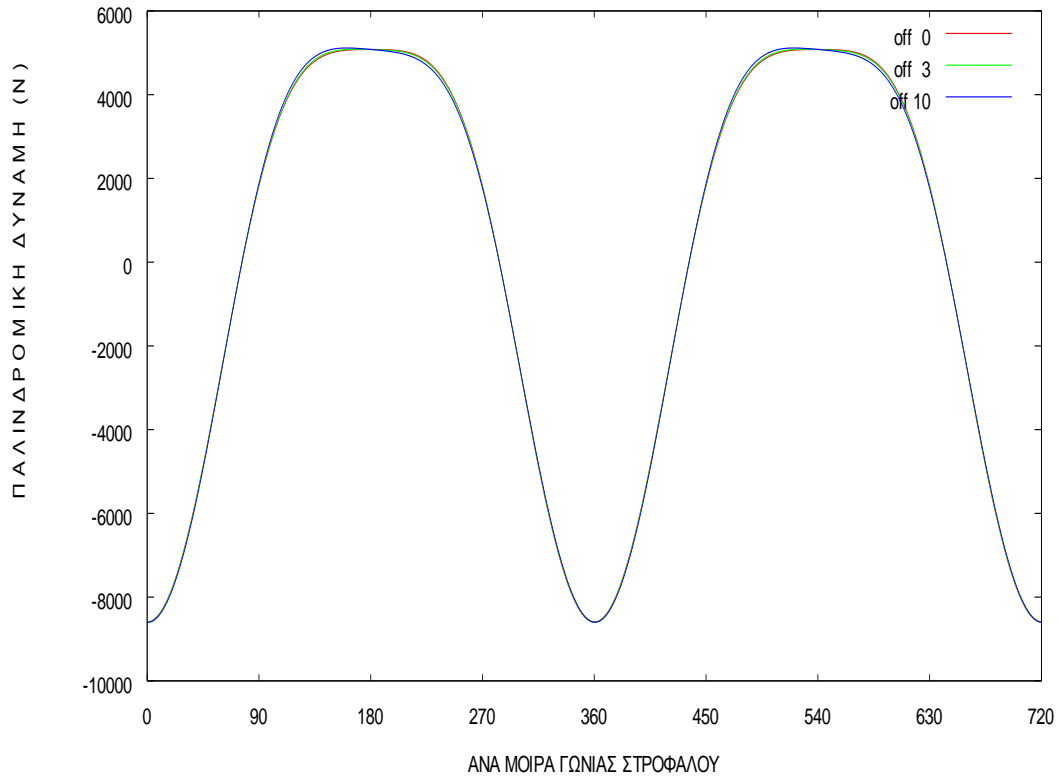
**Σχ. 7.93 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



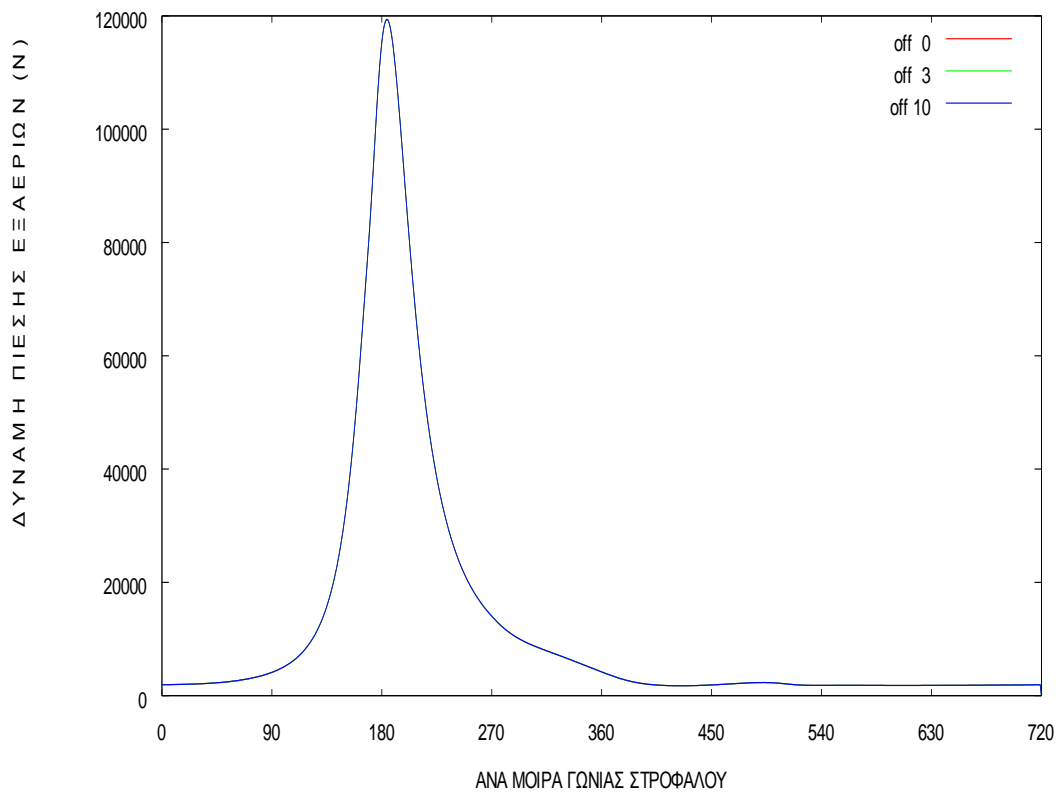
**Σχ. 7.94 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.95** Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

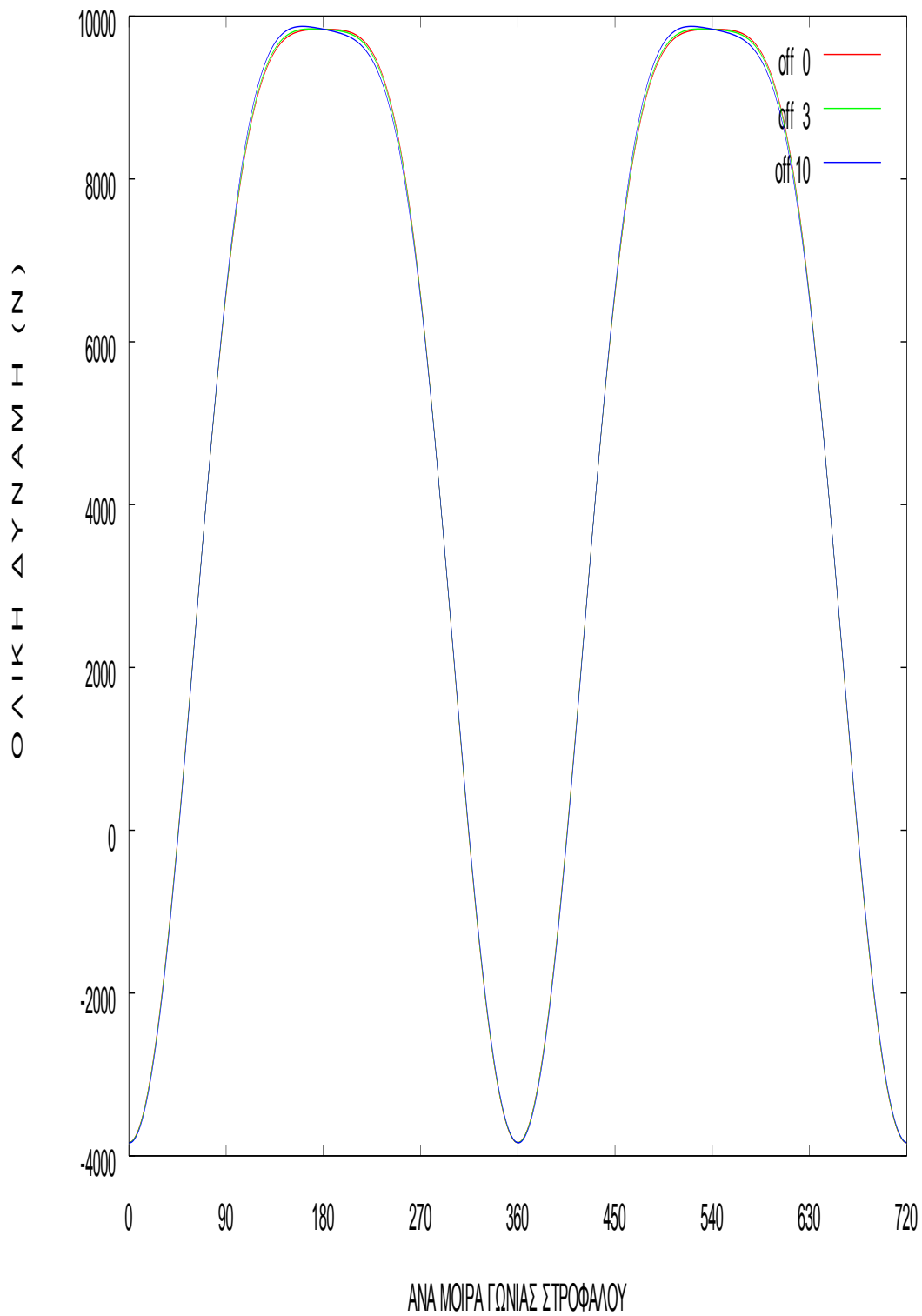


**Σχ.7.96 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

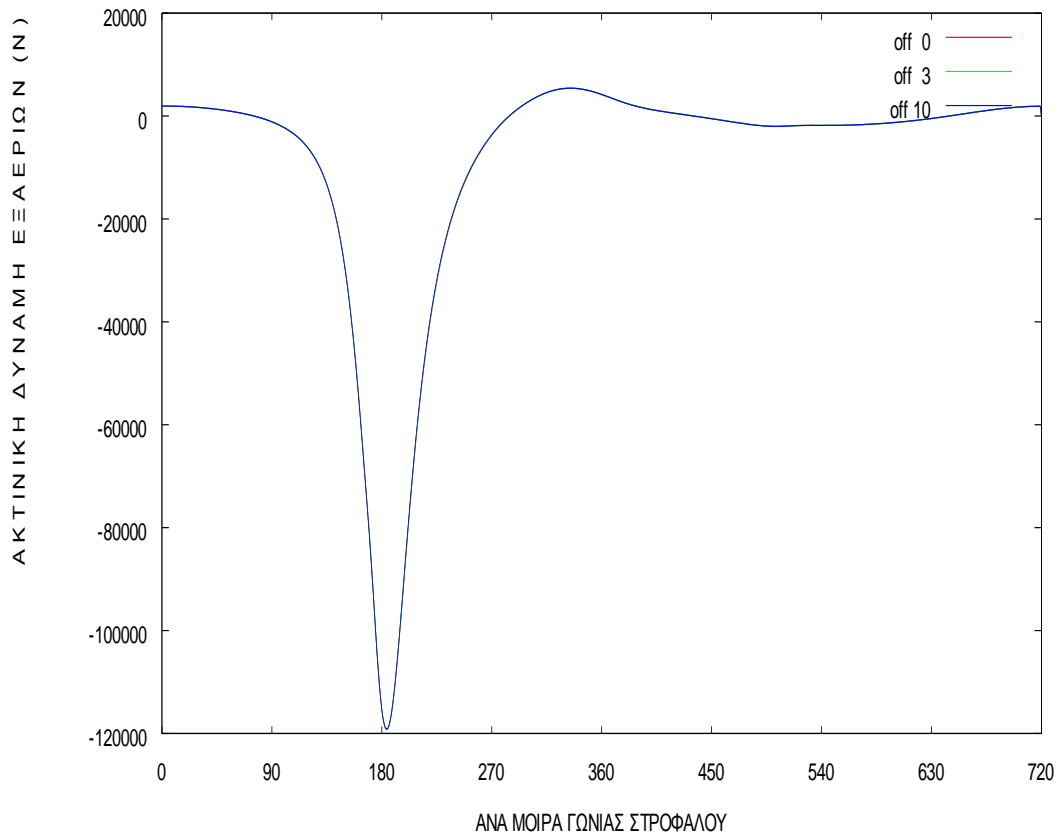


**Σχ.7.97 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

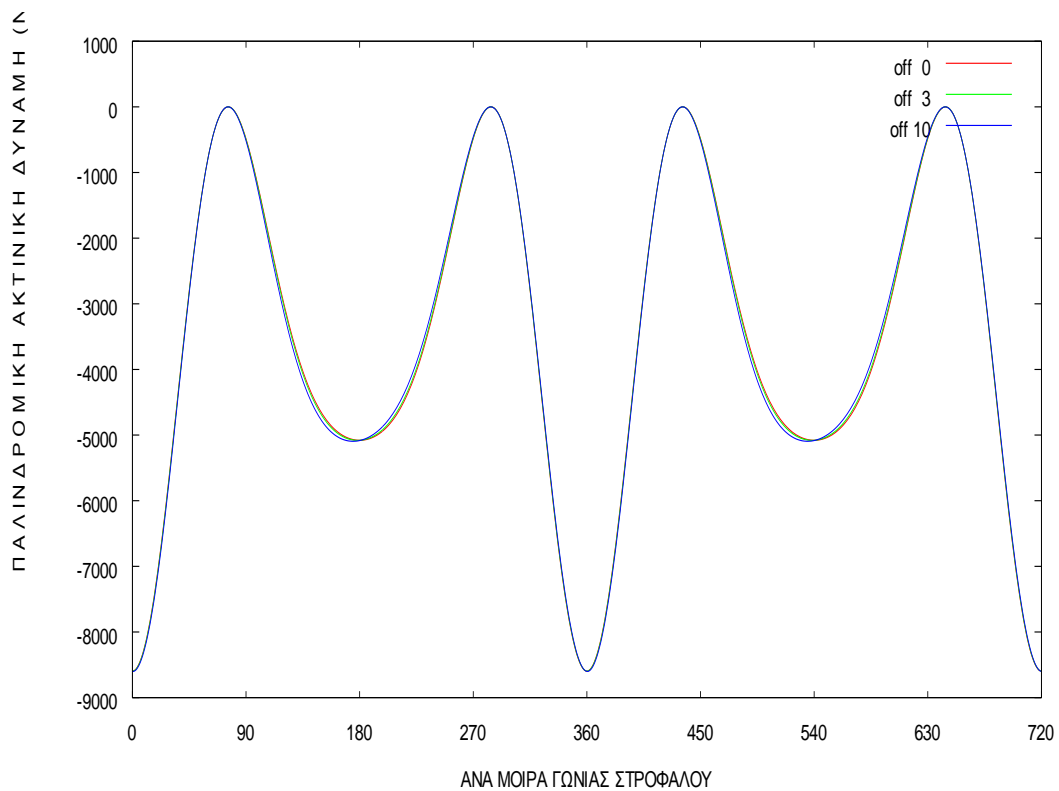




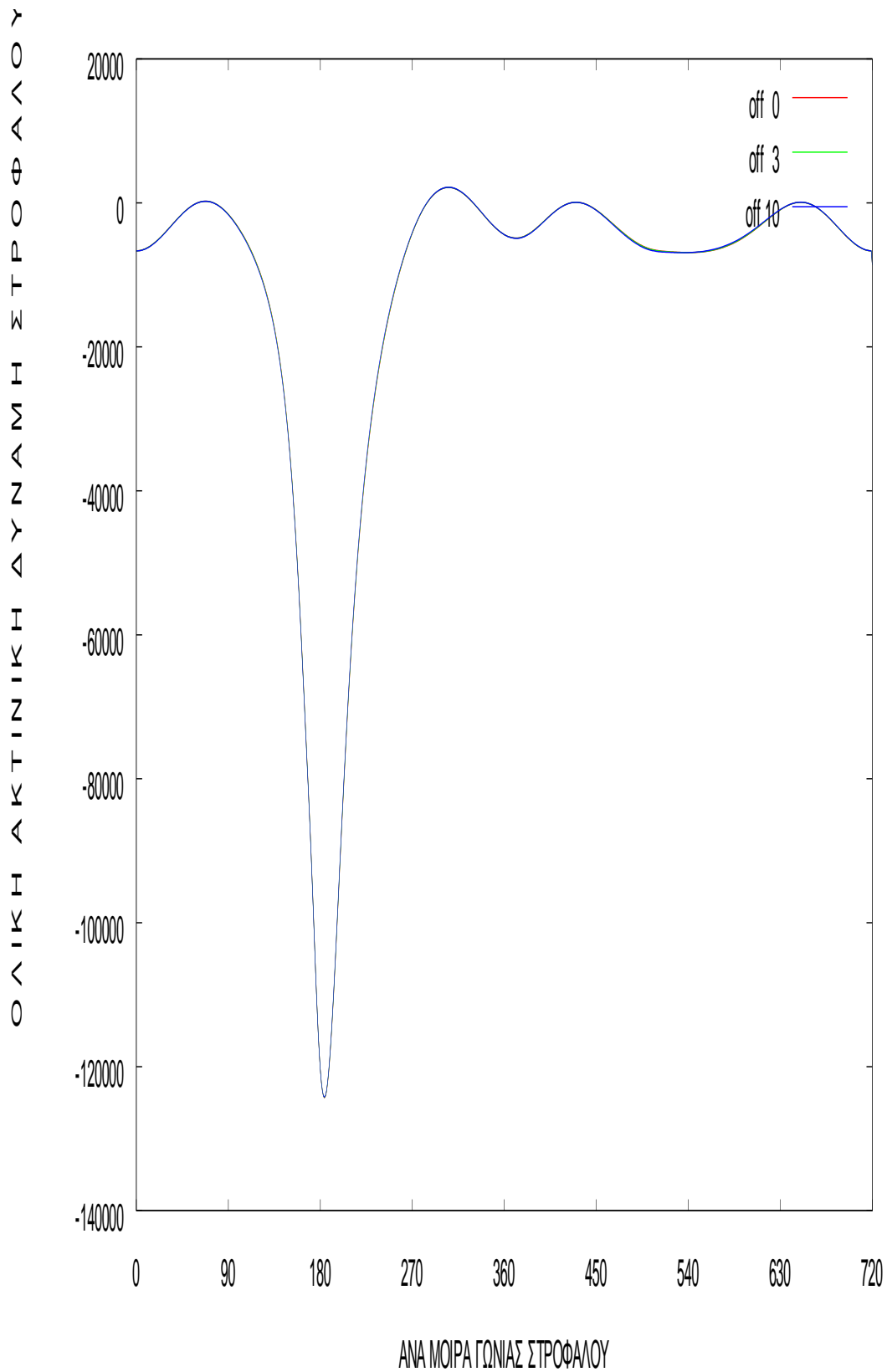
**Σχ. 7.98 Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



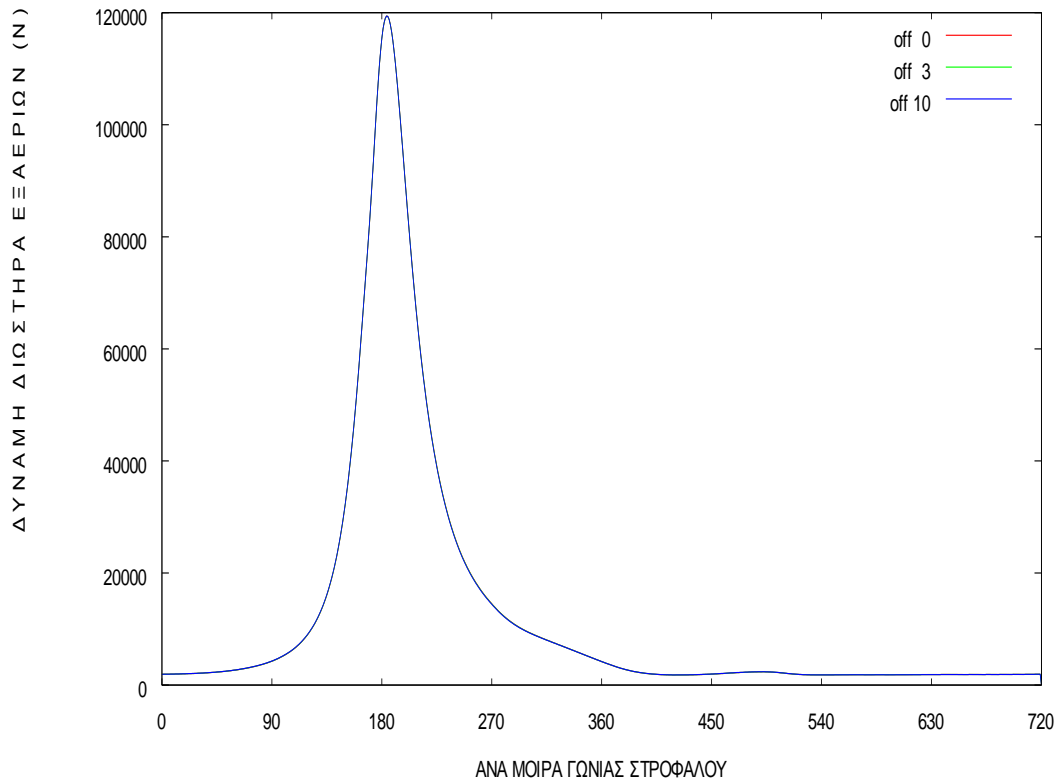
**Σχ.7.99** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



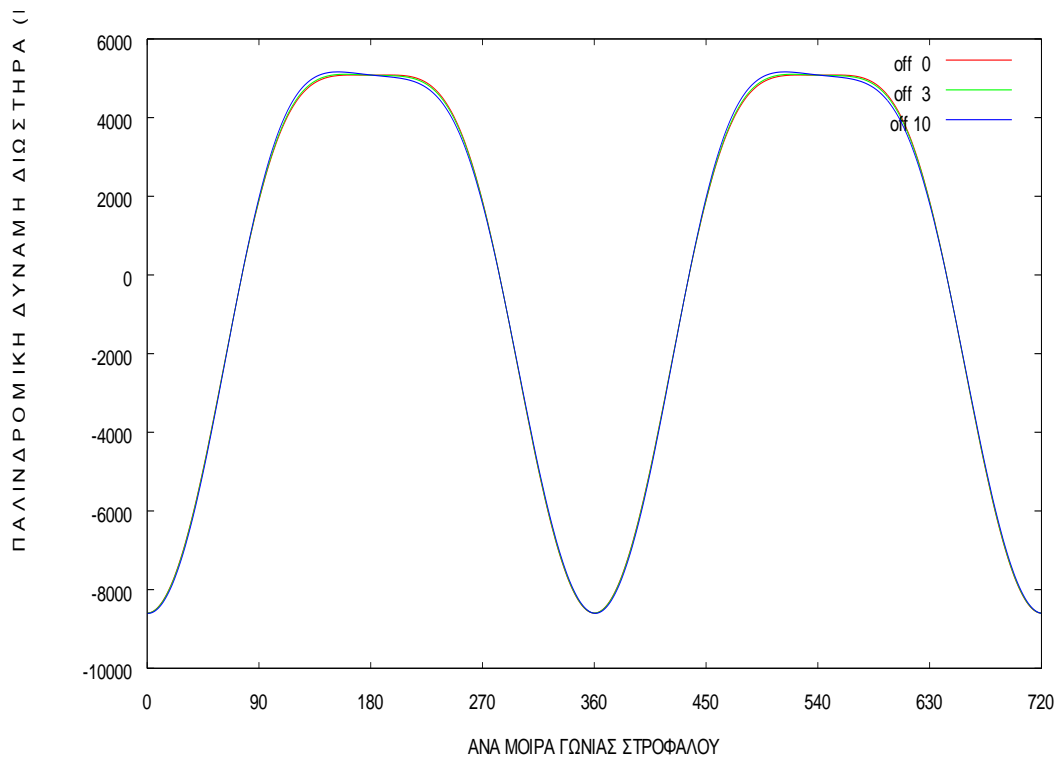
**Σχ.7.100** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



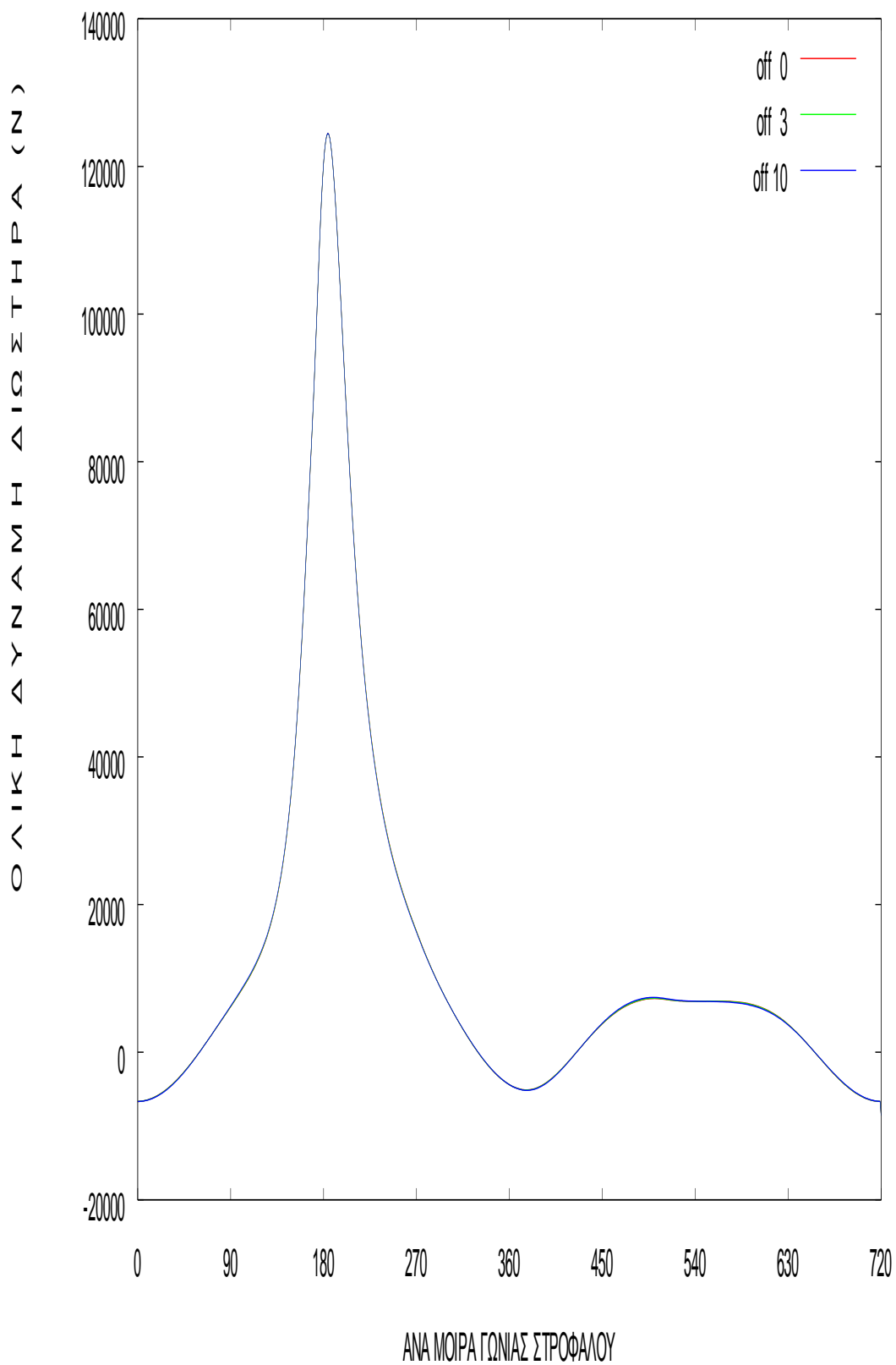
Σχ.101 Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



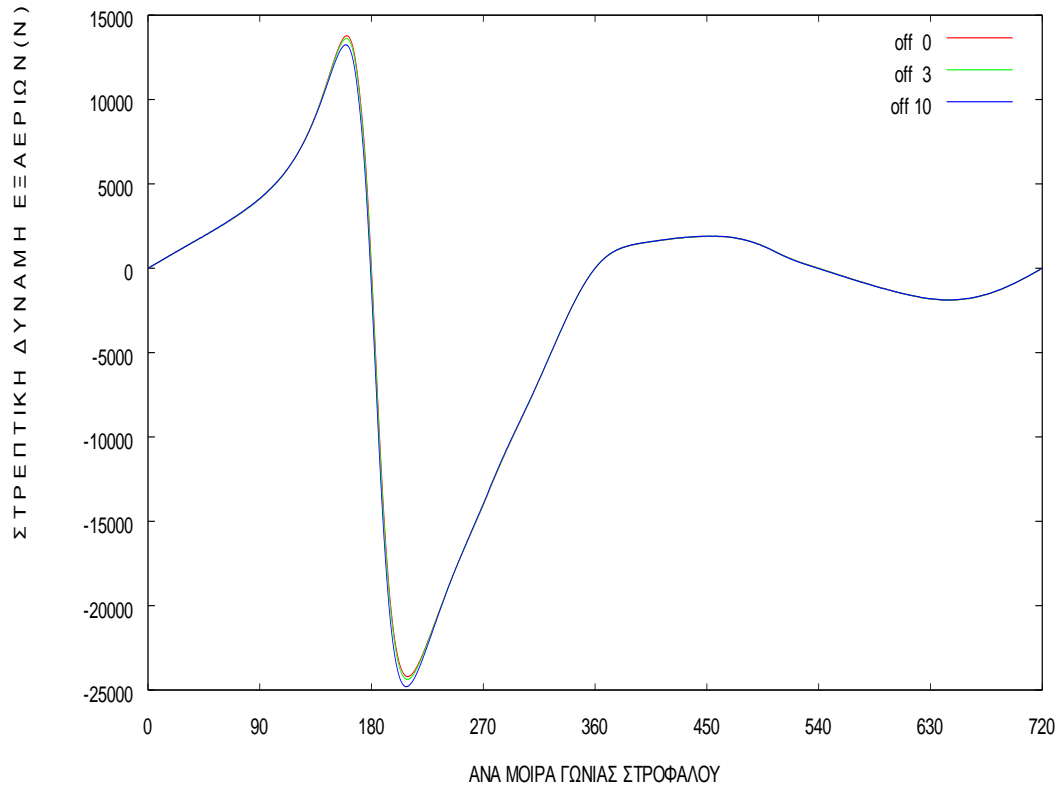
**Σχ.102 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



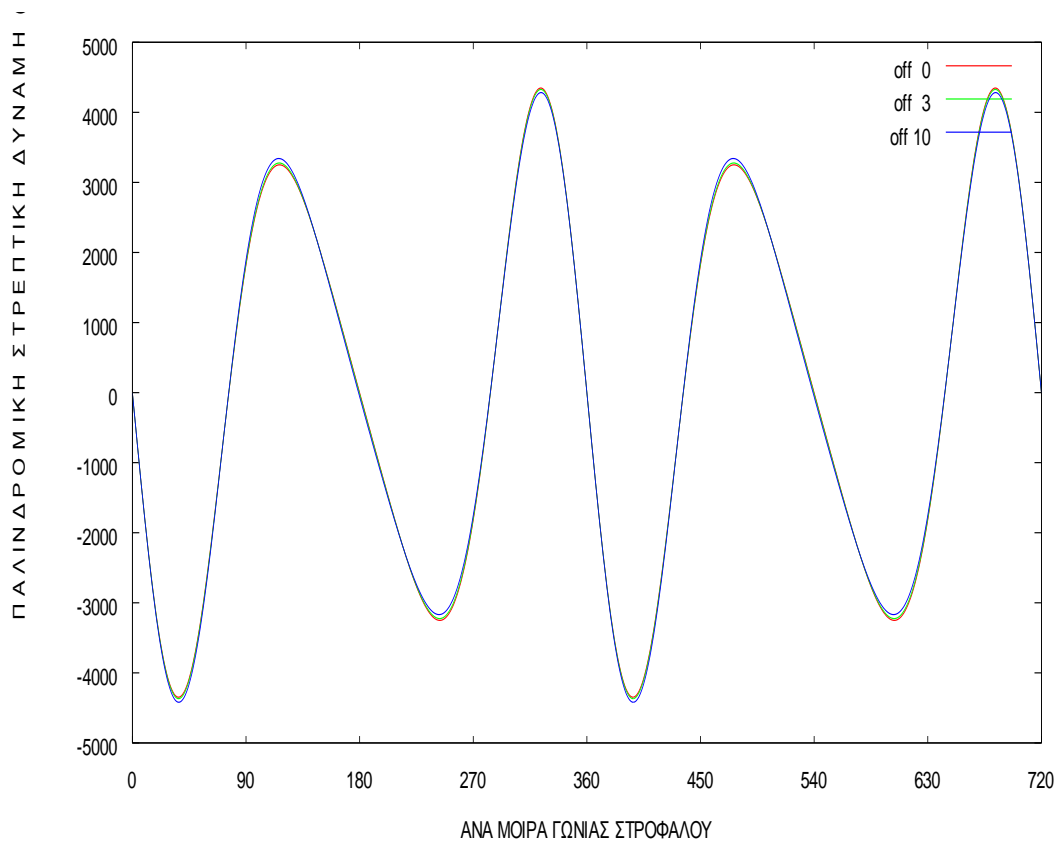
**Σχ.7.103 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



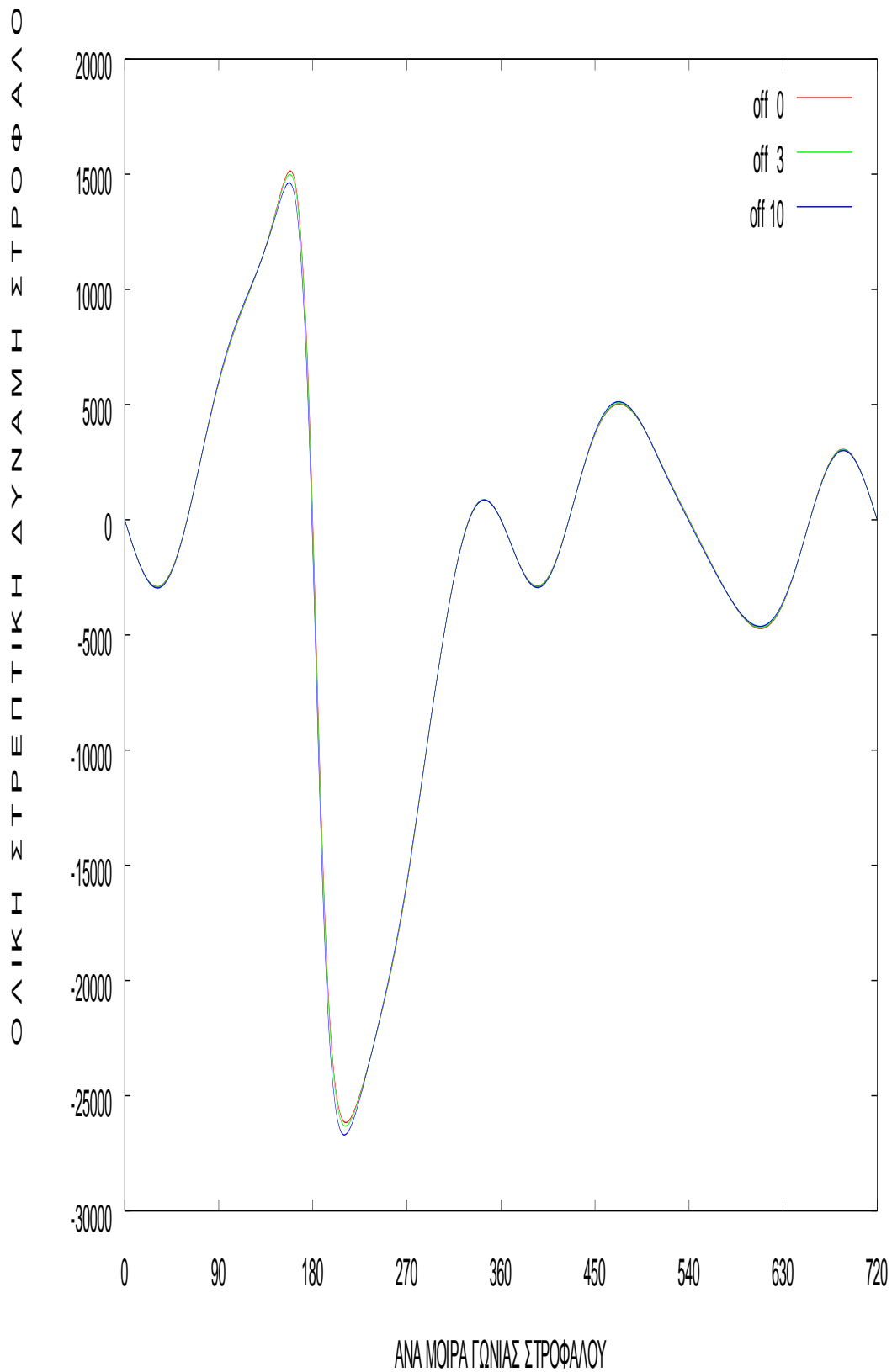
**Σχ.104** Συνολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.105 Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.106 Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

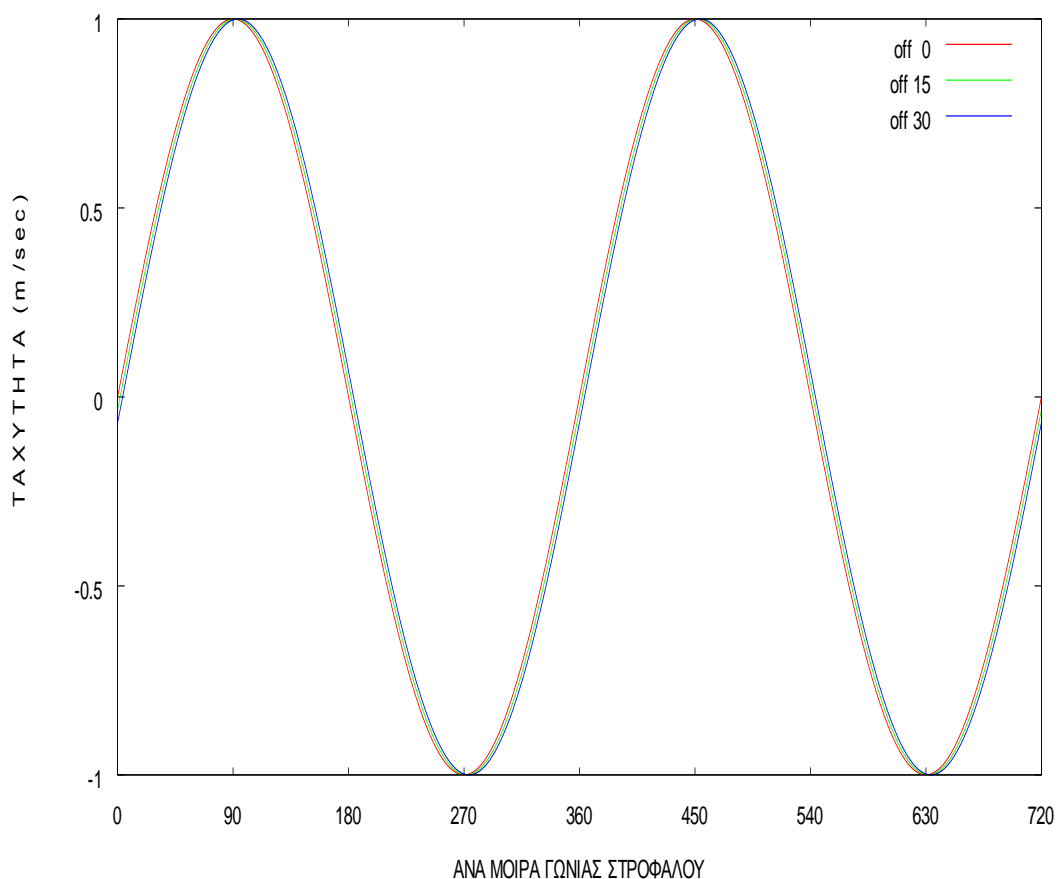


**Σχ.107** Ολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

Όλες οι δυνάμεις που δημιουργούνται από την παλινδρομική κίνηση έχουν μικρότερο μέγεθος σχεδόν κατά 50% όσο είναι και η μείωση στα μεγέθη των μαζών. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από το τύπο της παλινδρομικής δύναμης της οποίας η μείωση

$$P_l = -m_l b = -m_l r \omega^2 \frac{b}{r \omega^2}$$

αυξάνει όσο ελαττώνονται οι μάζες. Άρα κράματα μετάλλων με μικρότερο ειδικό βάρος προσφέρουν καλύτερη μηχανική αντοχή, παράγοντας μικρότερου μεγέθους δυνάμεις ενώ οι αποκλίσεις που έχουν στις συνολικές δυνάμεις και ροπές είναι αμελητέες. Επίσης με εφαρμογή εκκεντρότητας επιδρούν θετικά στην ελάττωση της ταχύτητας ολίσθησης του εμβόλου ελαττώνοντας ταυτόχρονα την τριβή στα ελατήρια και στο σώμα του εμβόλου, όπου η μείωση αυτή αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους της εφαρμοζόμενης εκκεντρότητας, όπως φαίνεται με την βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος (Σχ. 108)

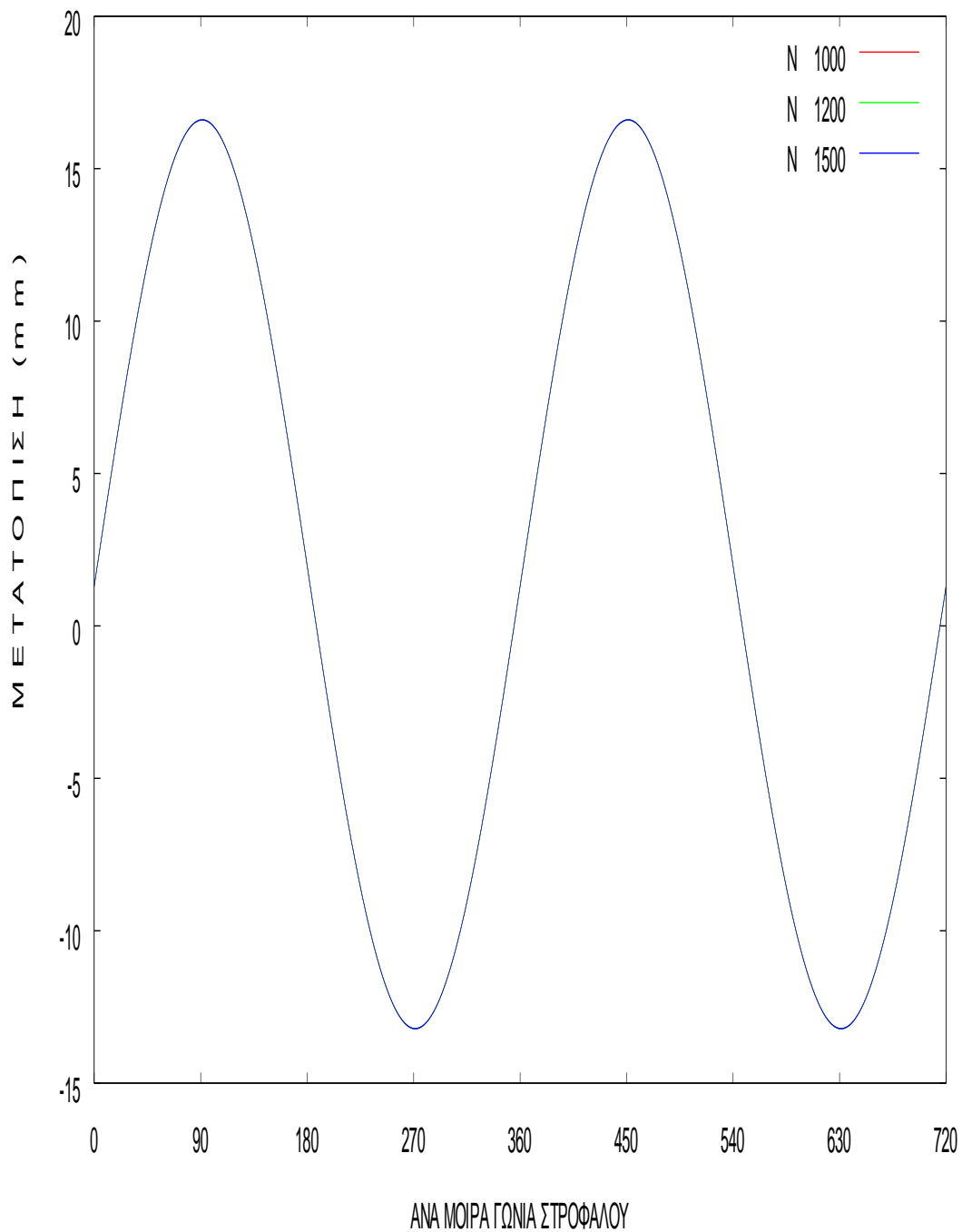


**Σχ.108 Ταχύτητα σε (m/sec) / ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

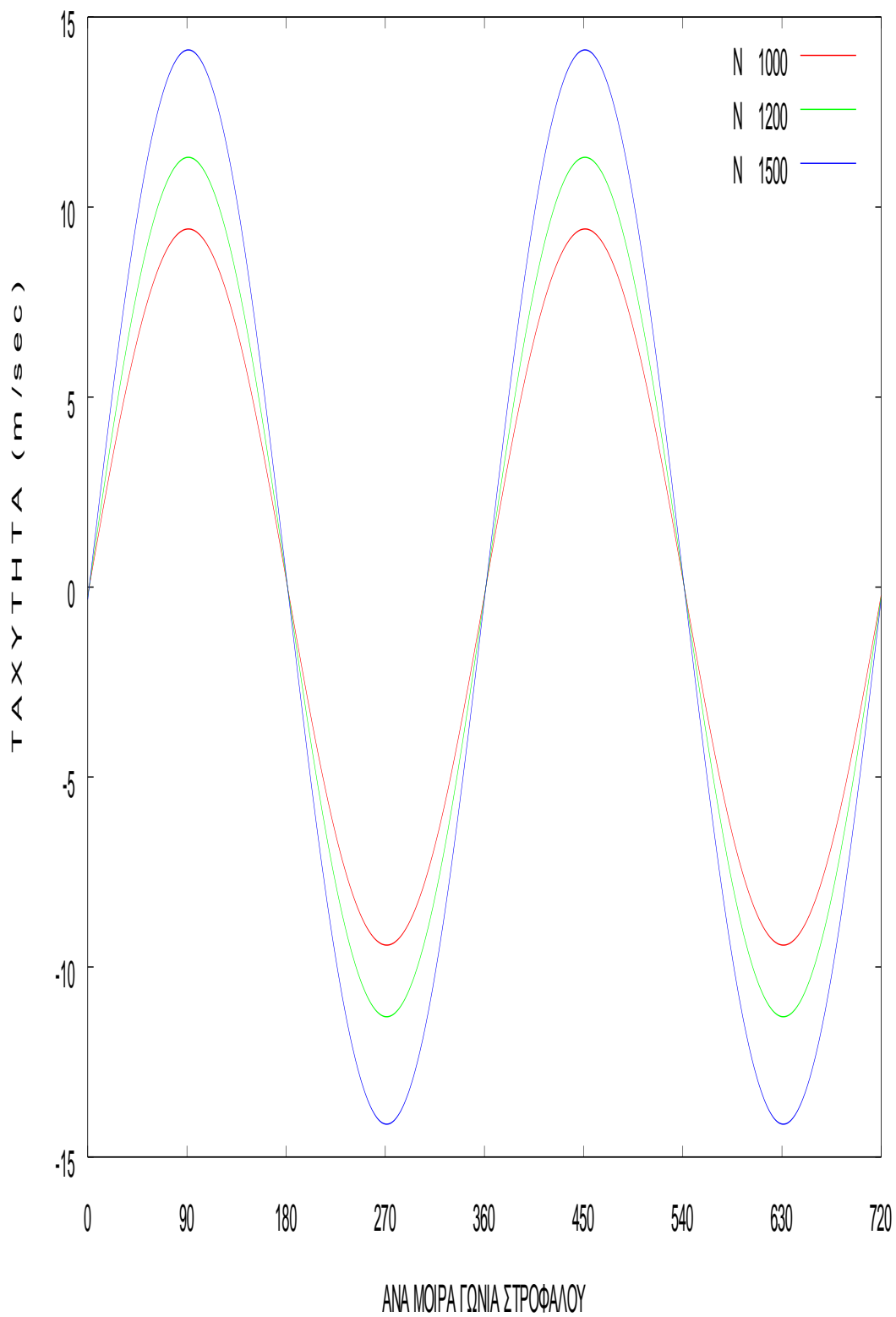


### 7.1.4 Εκκεντρότητα Πείρου Εμβόλου –Παραμετρική Ανάλυση. Επίδραση μεγέθους μάζας.

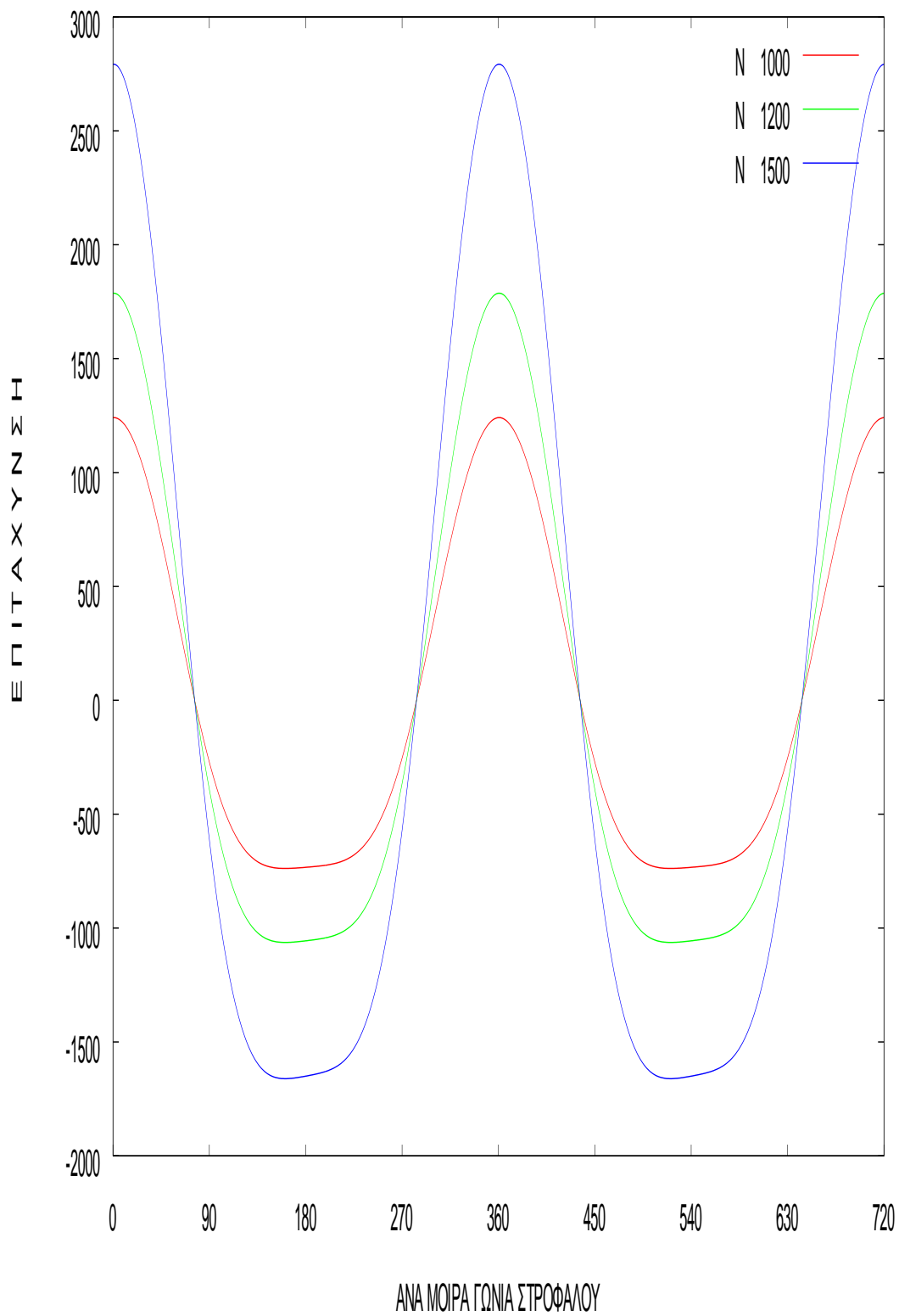
Για εκκεντρότητα offset = 10 mm



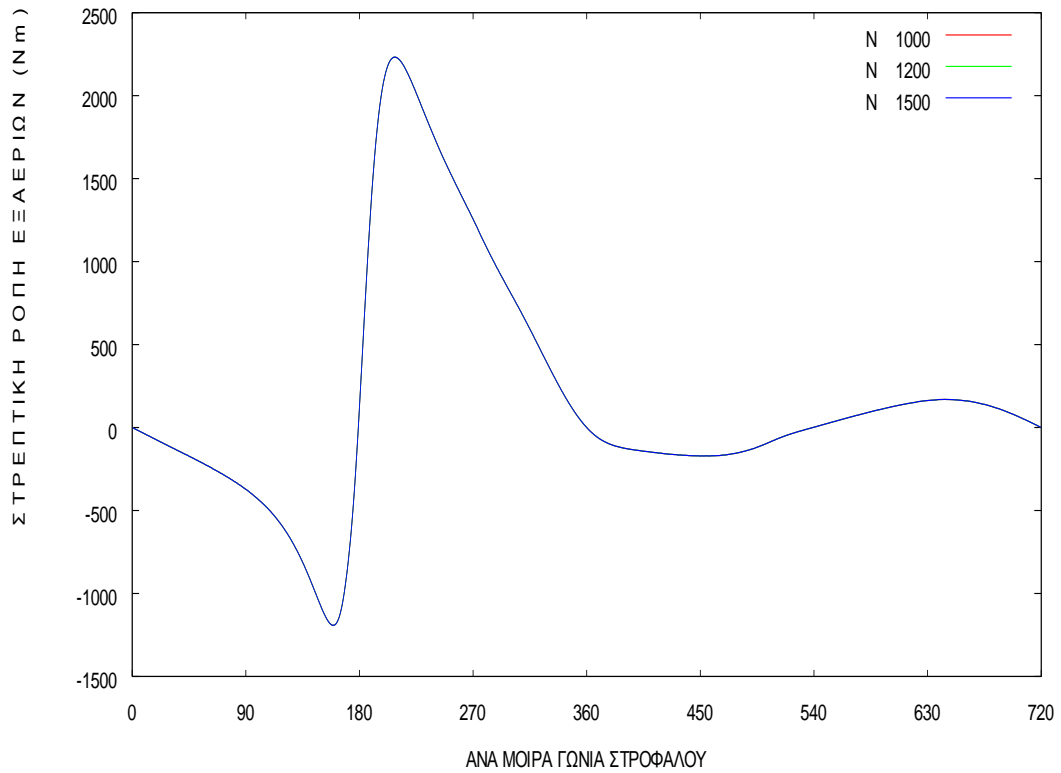
**Σχ. 7.109 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



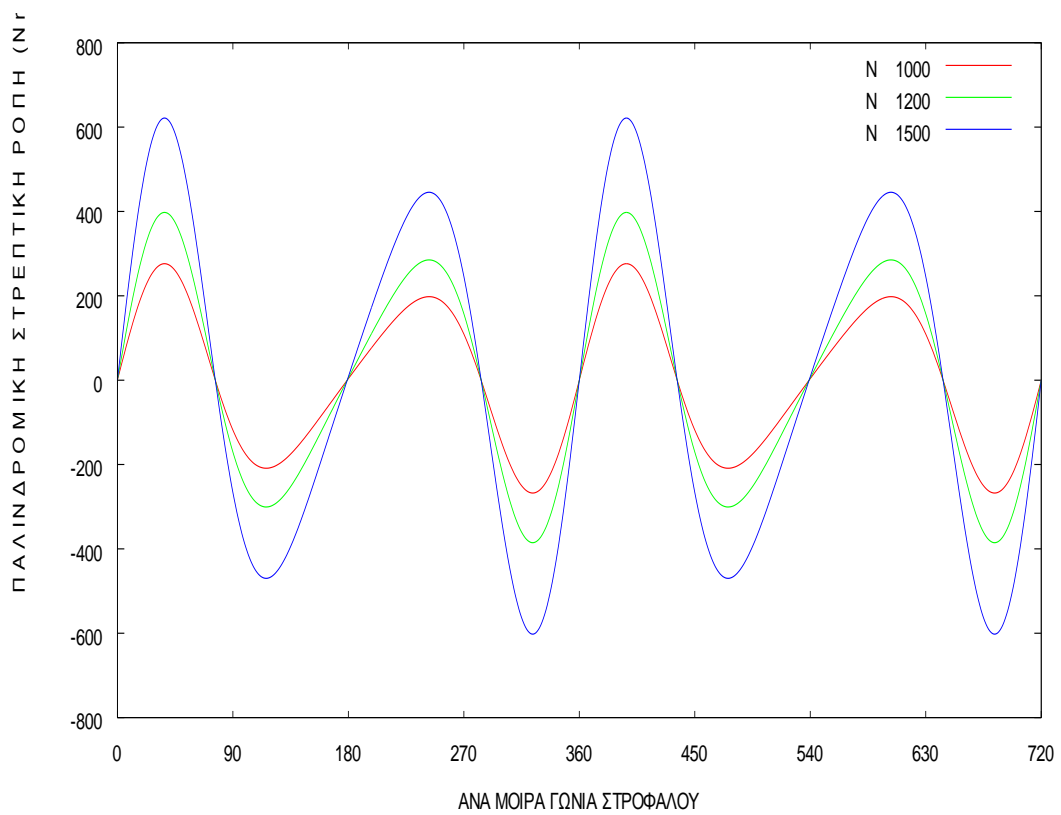
**Σχ.7.110 Ταχύτητα σε ( m/s ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



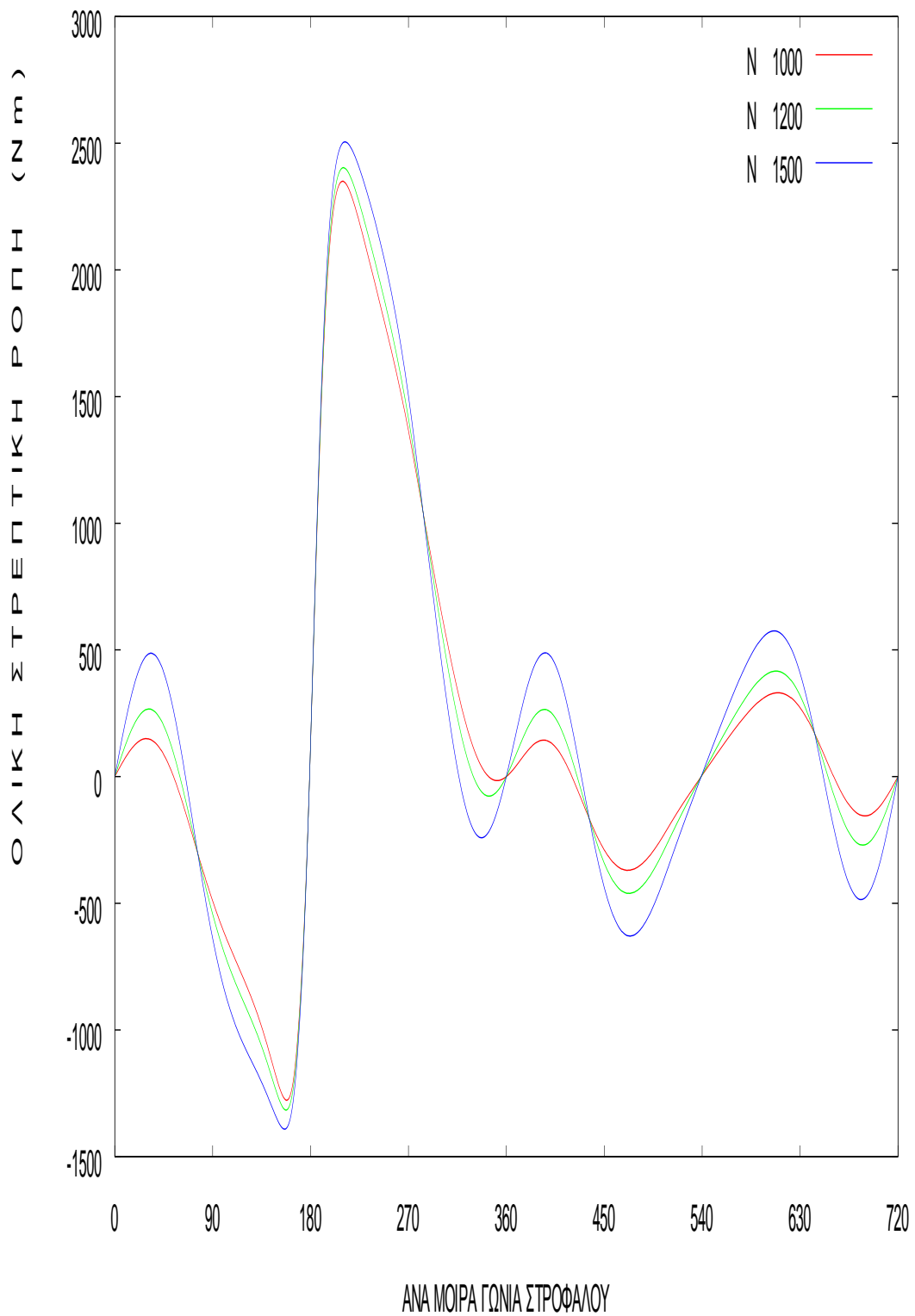
Σχ.7.111 Επιτάχυνση σε ( $m/s^2$ ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



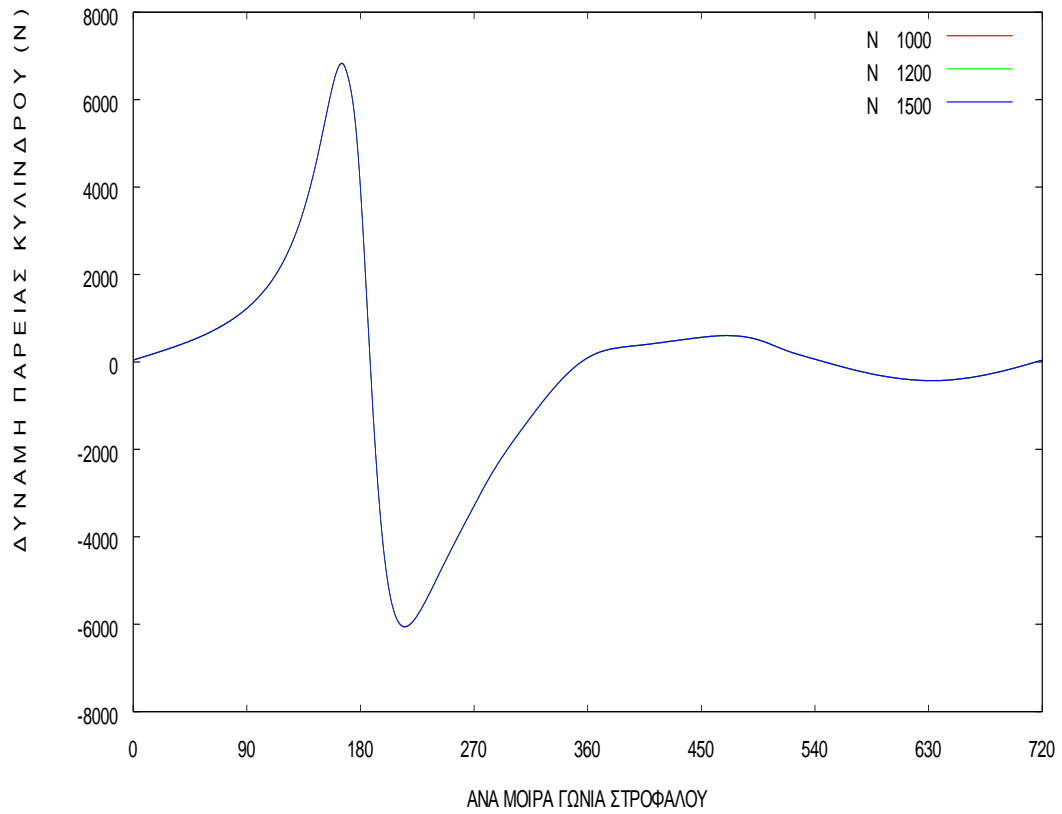
**Σχ.7.112 Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (Nm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



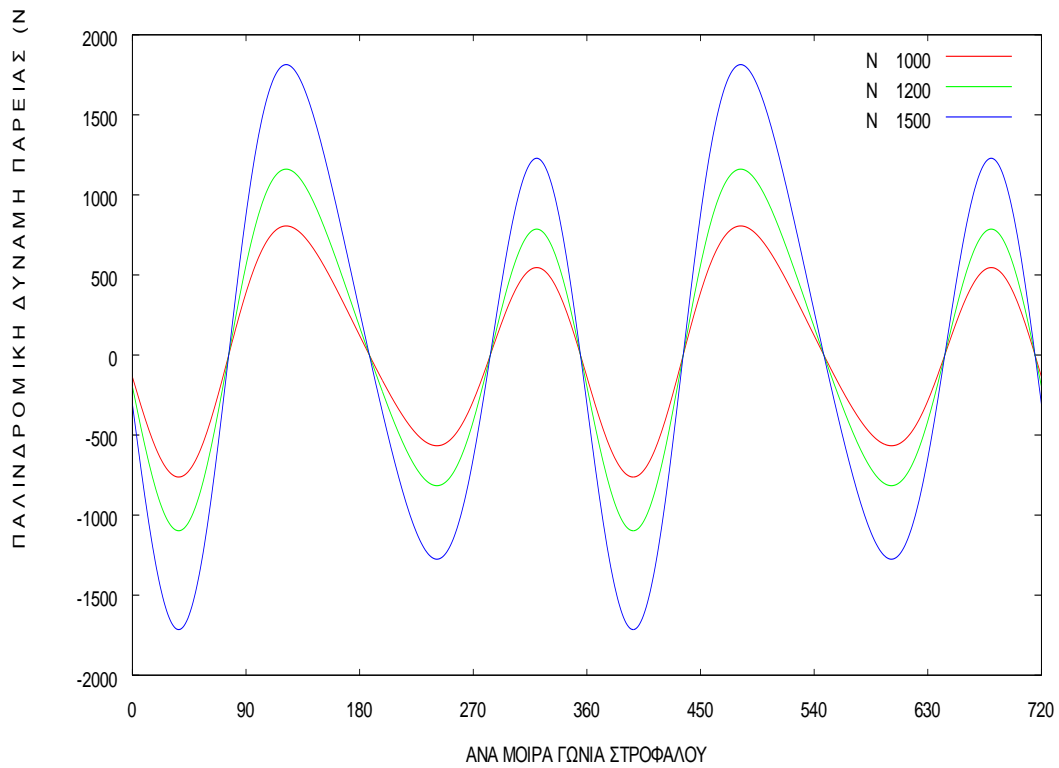
**Σχ.7.113 Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (Nm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



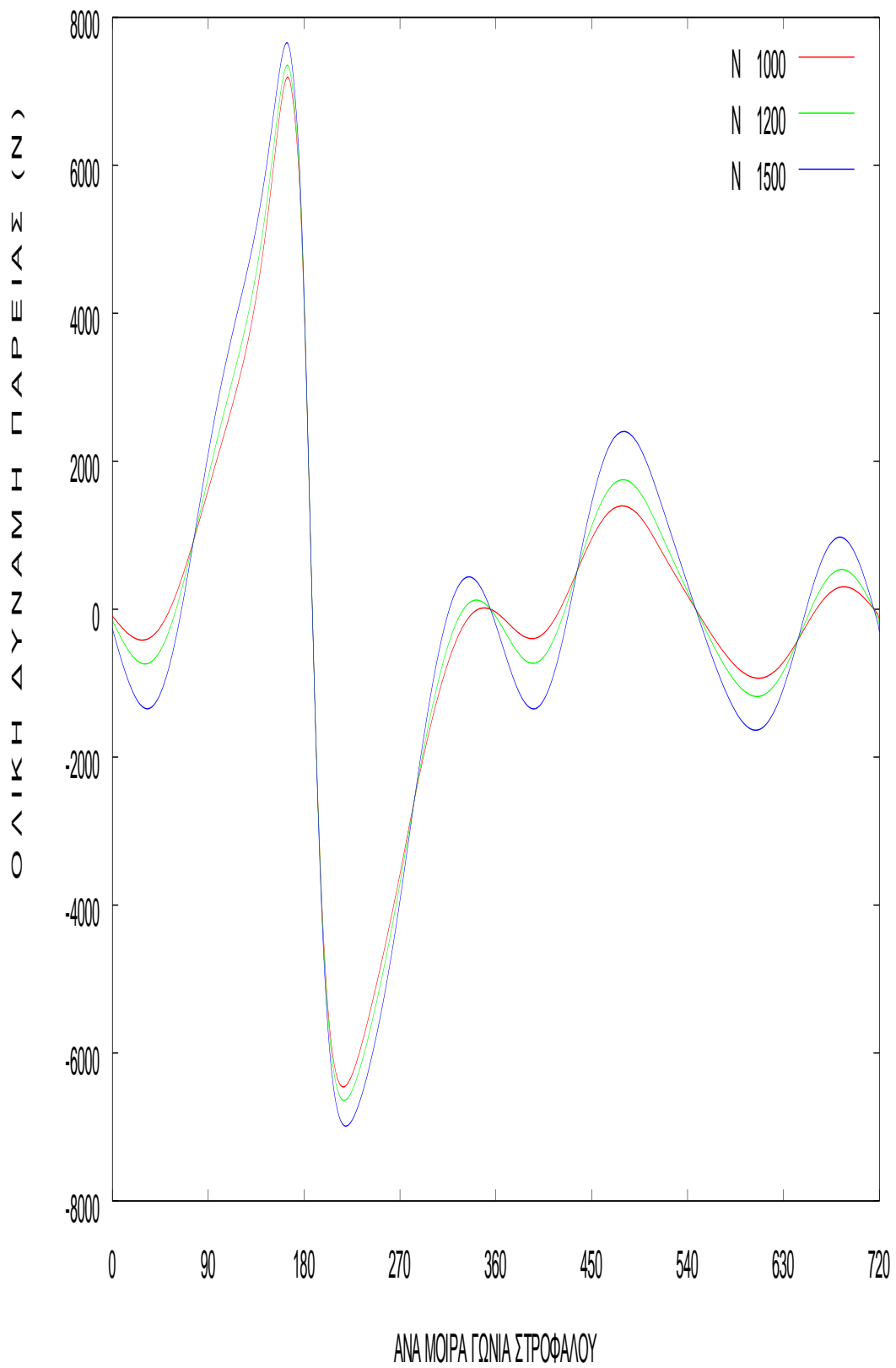
**Σχ.7.114** Ολική στρεπτική ροπή σε (Nm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



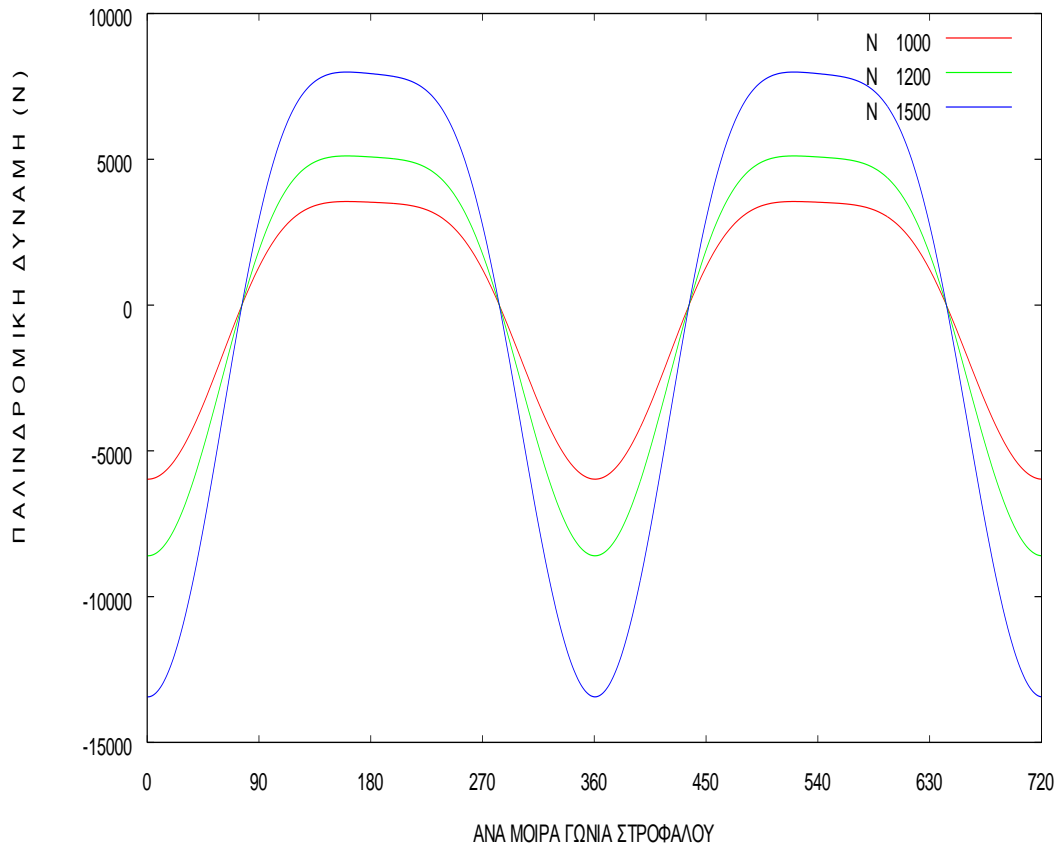
**Σχ. 7.115 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



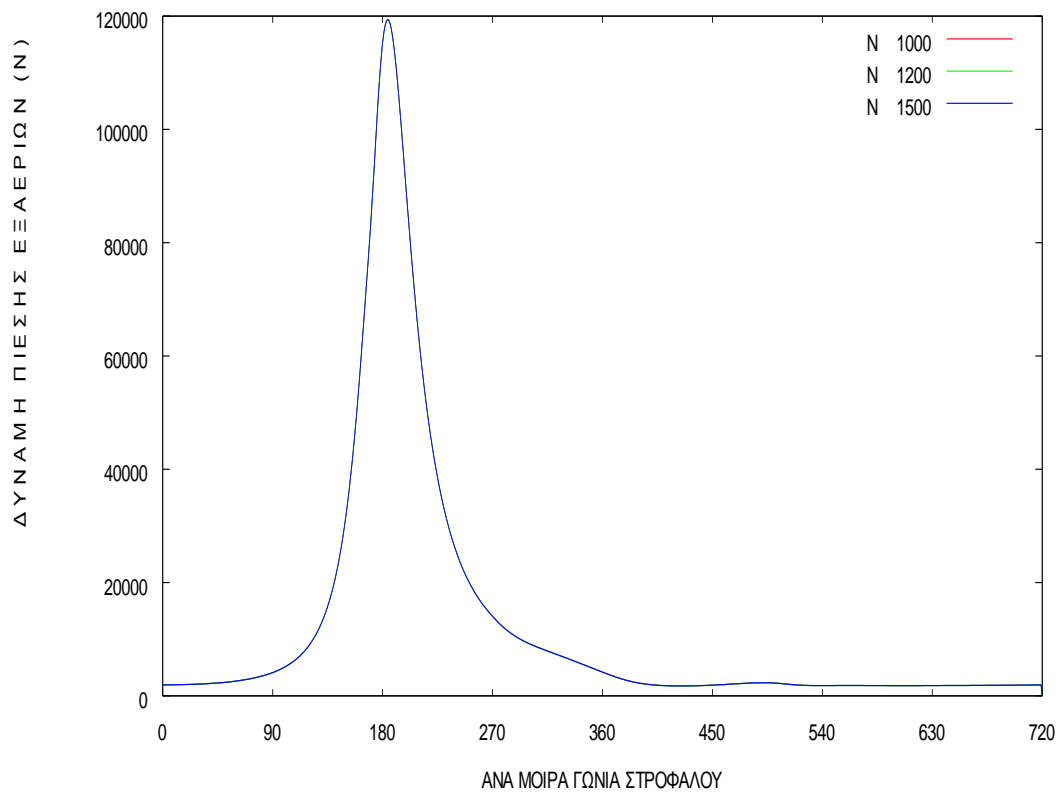
**Σχ. 7.116 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



Σχ.7.117 Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

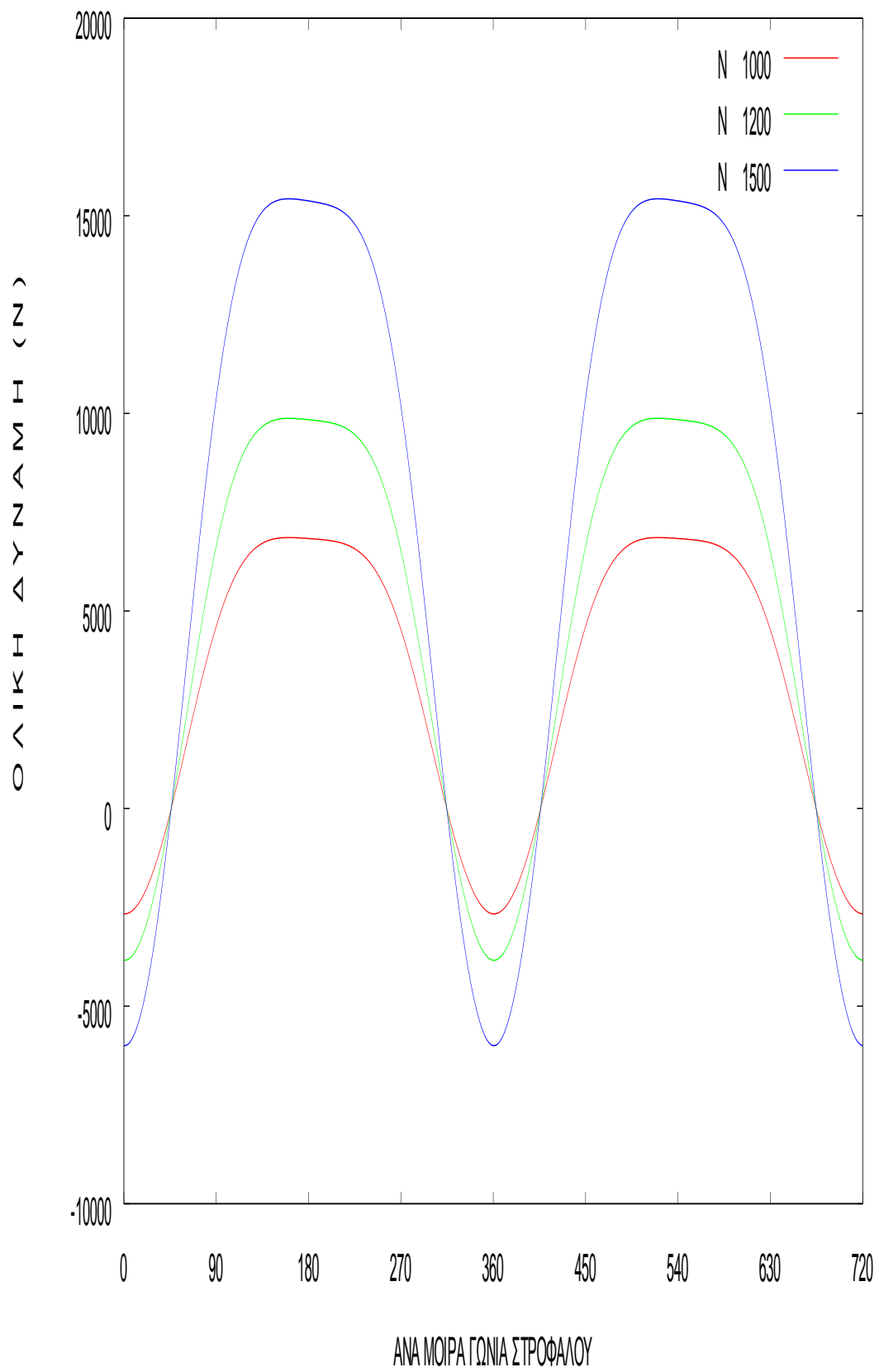


**Σχ.7.118 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

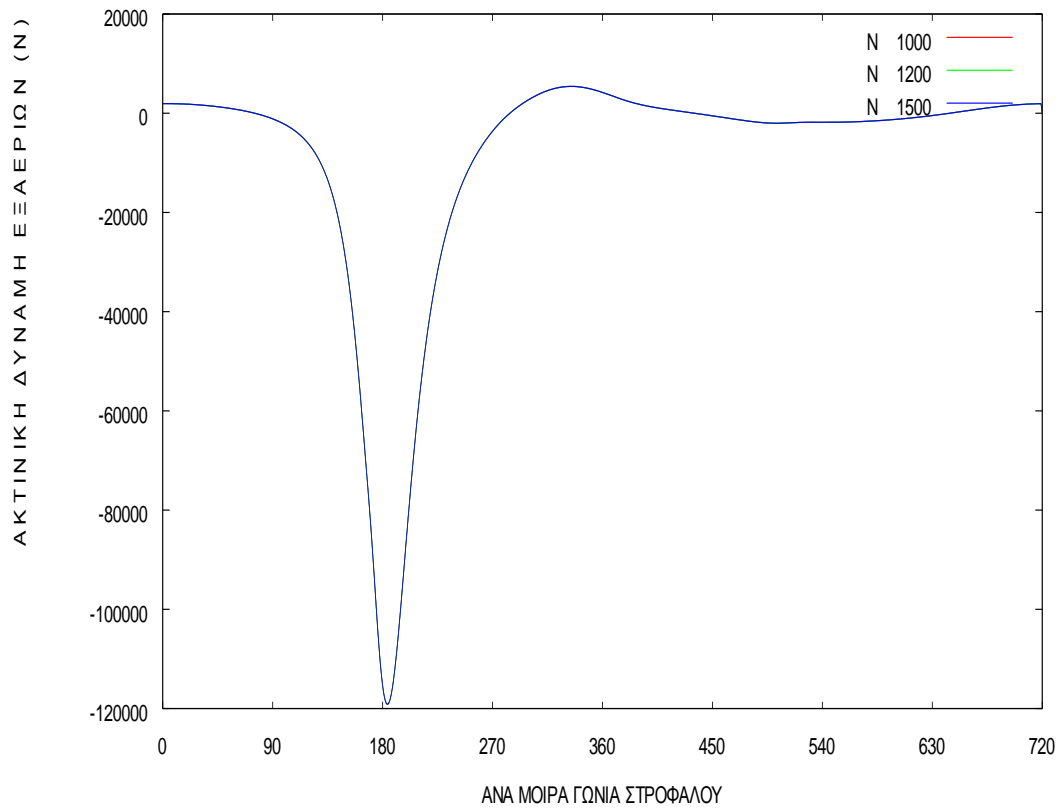


**Σχ.7.119 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

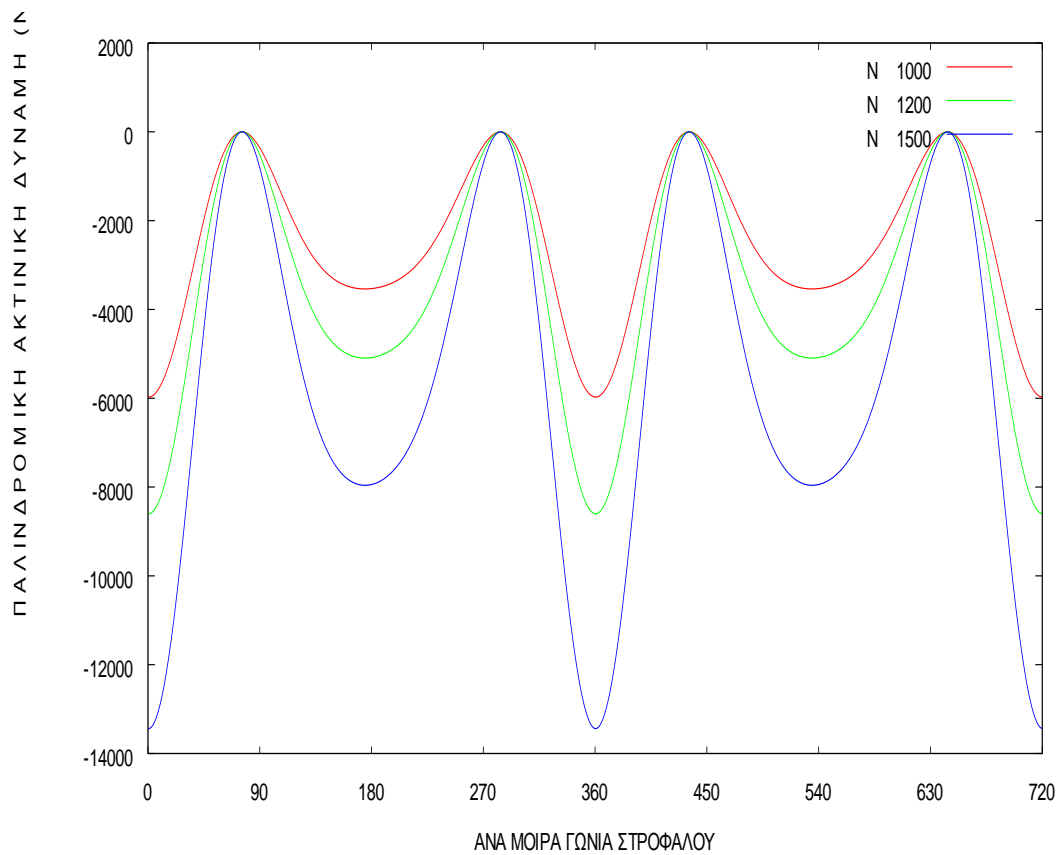




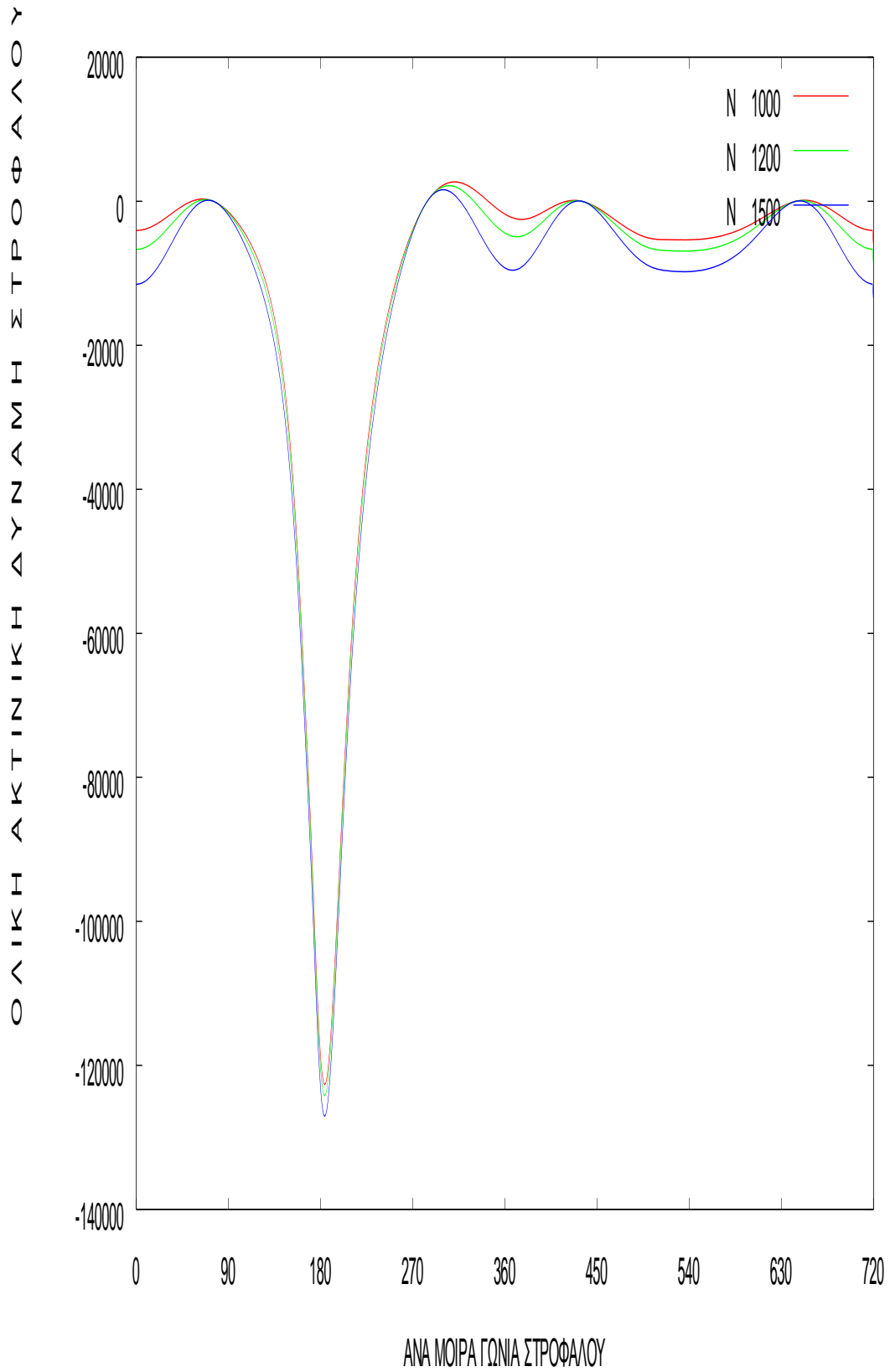
Σχ. 7.120 Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



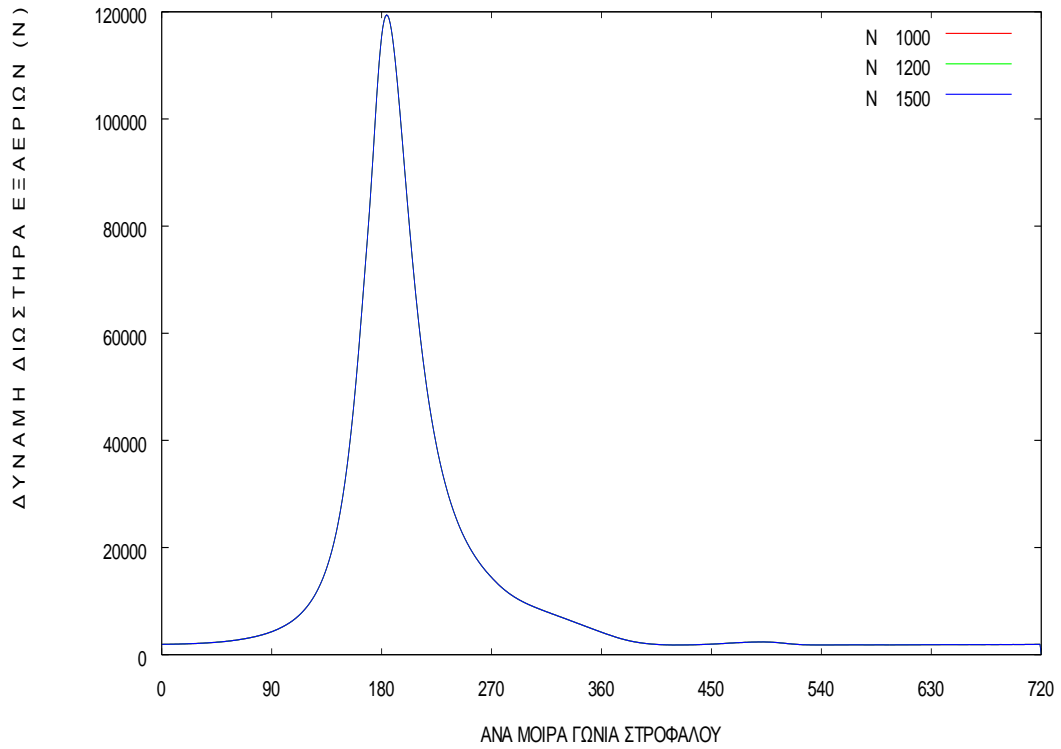
**Σχ.7.121** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



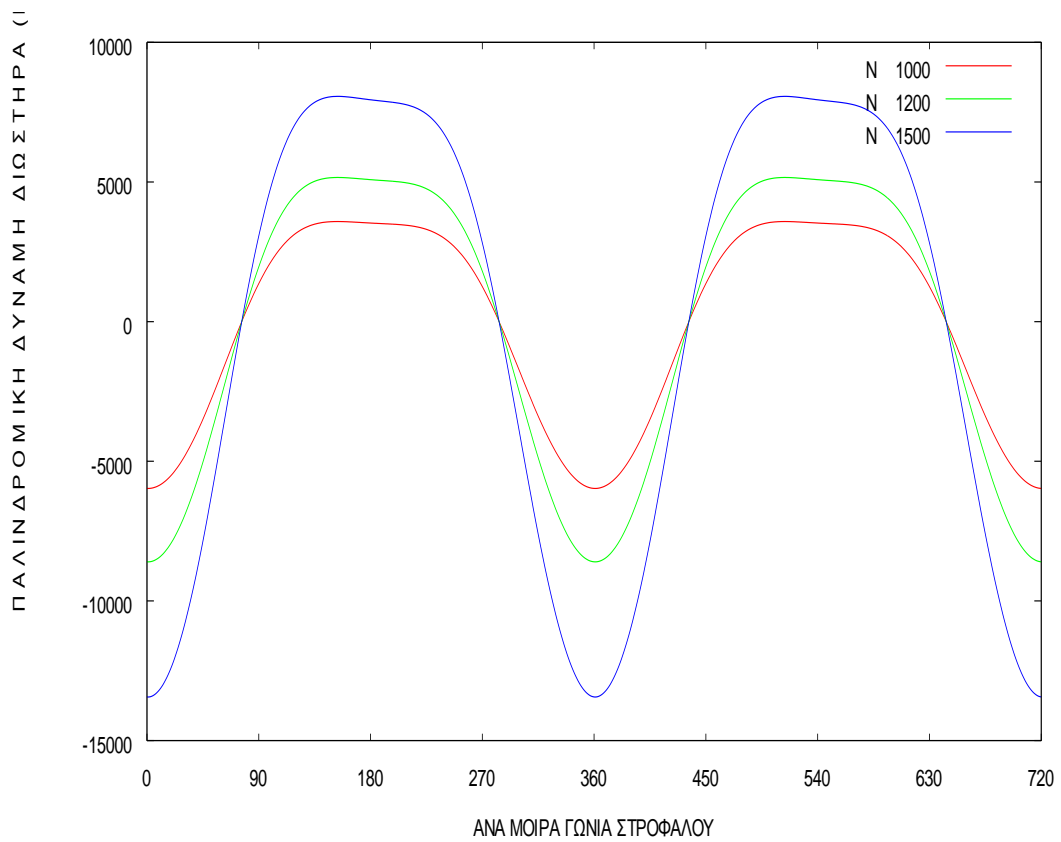
**Σχ.7.122** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



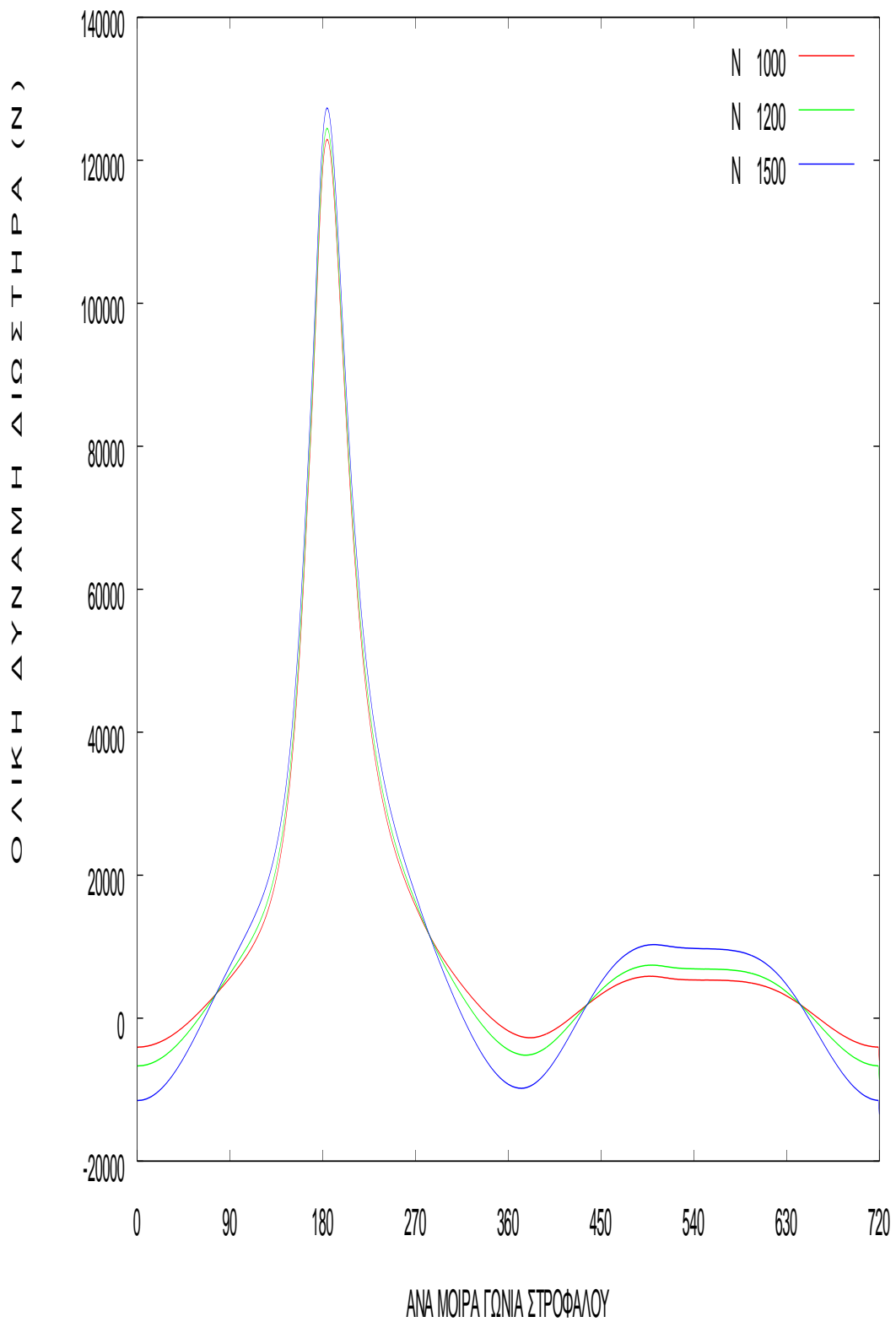
**Σχ.7.123** Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



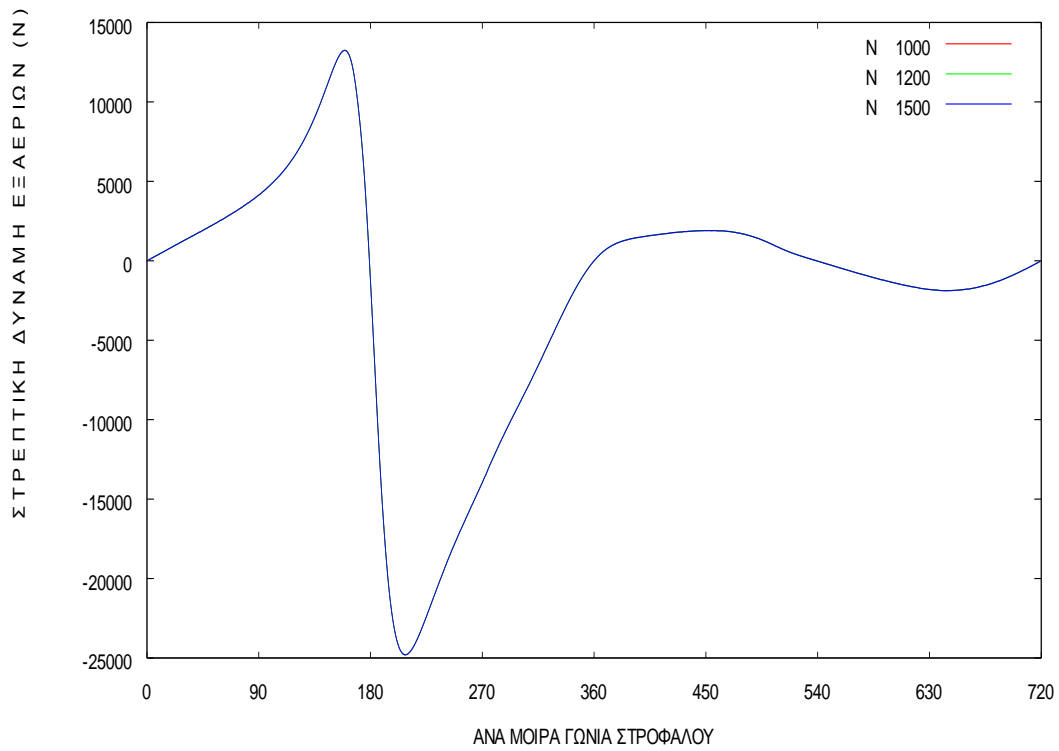
**Σχ.7.124** Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



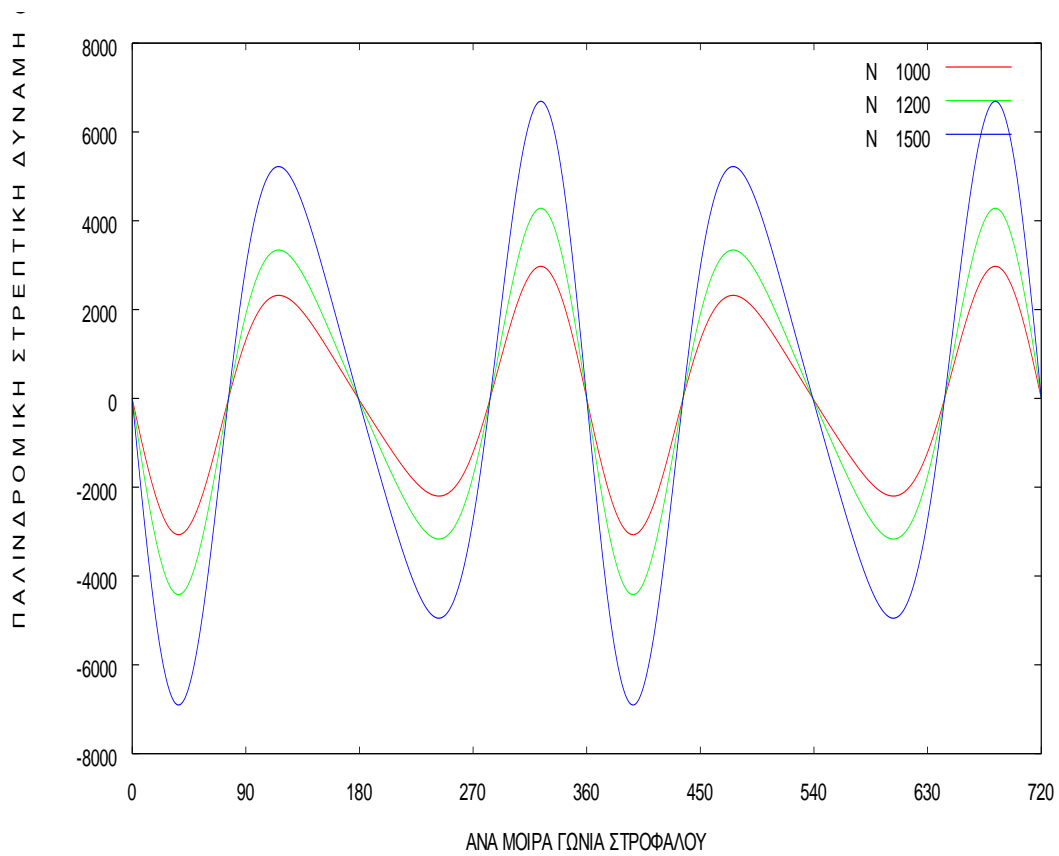
**Σχ.7.125** Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



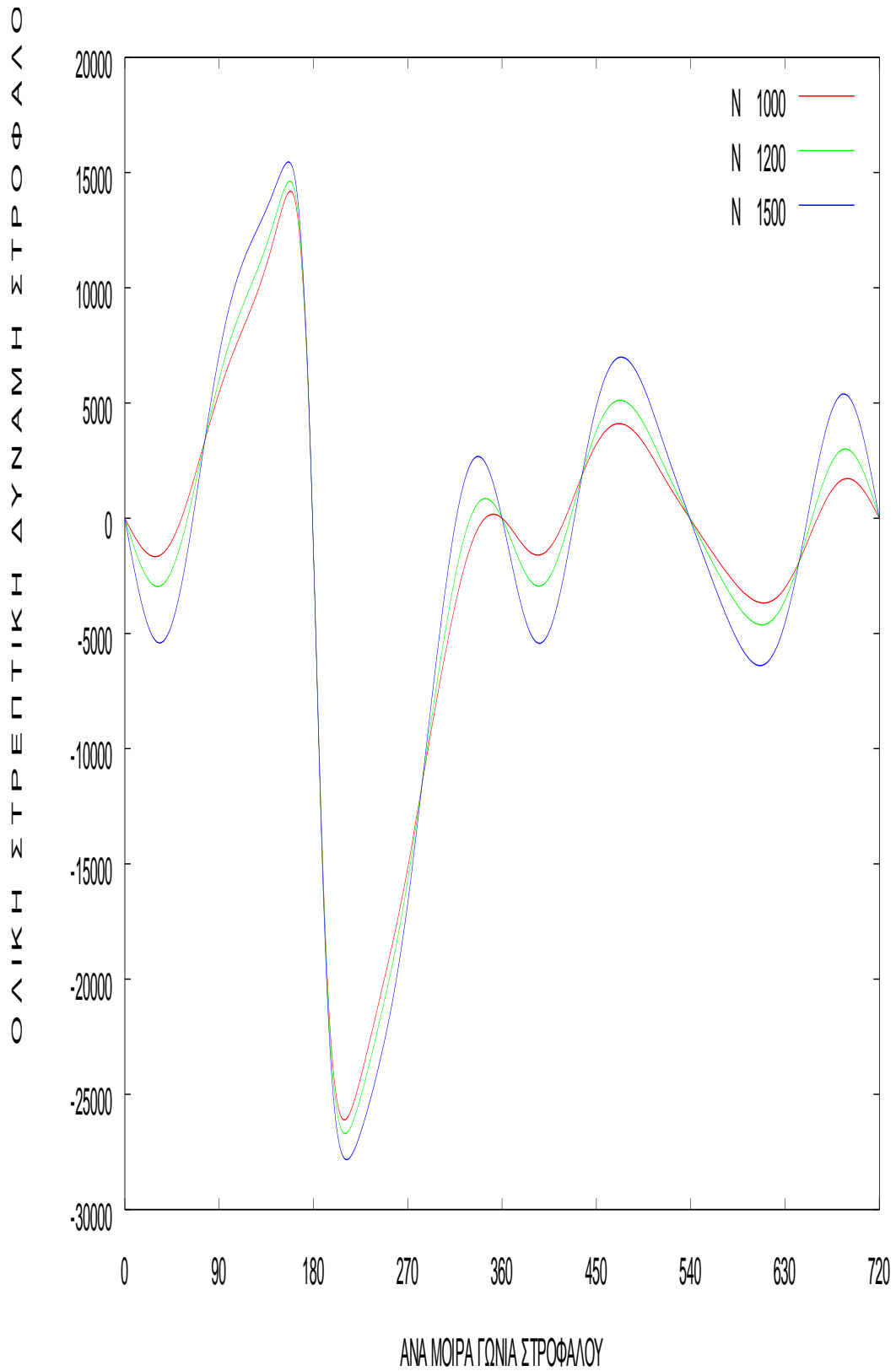
Σχ.7.126 Ολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.127** Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



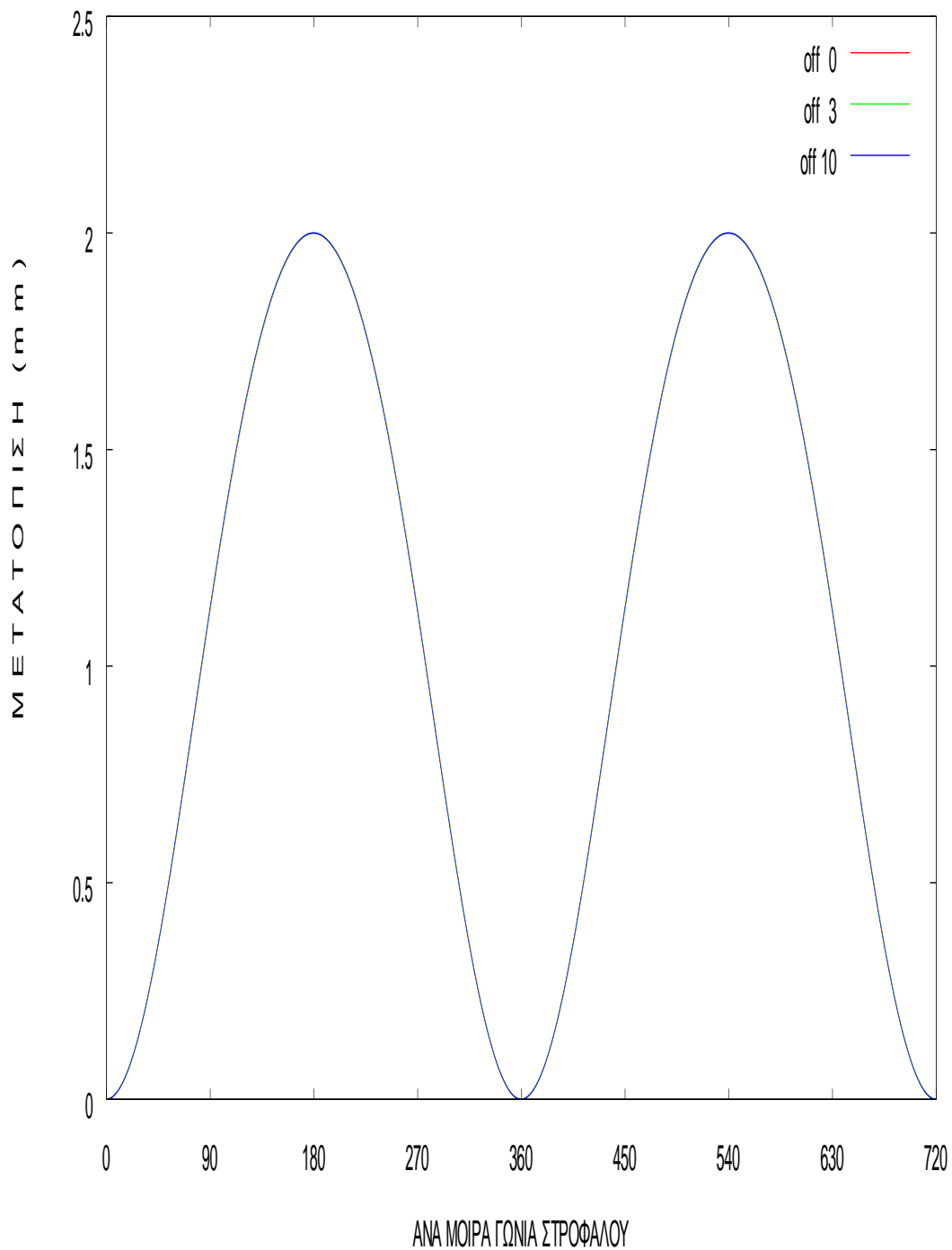
**Σχ.7.128** Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.129** Ολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

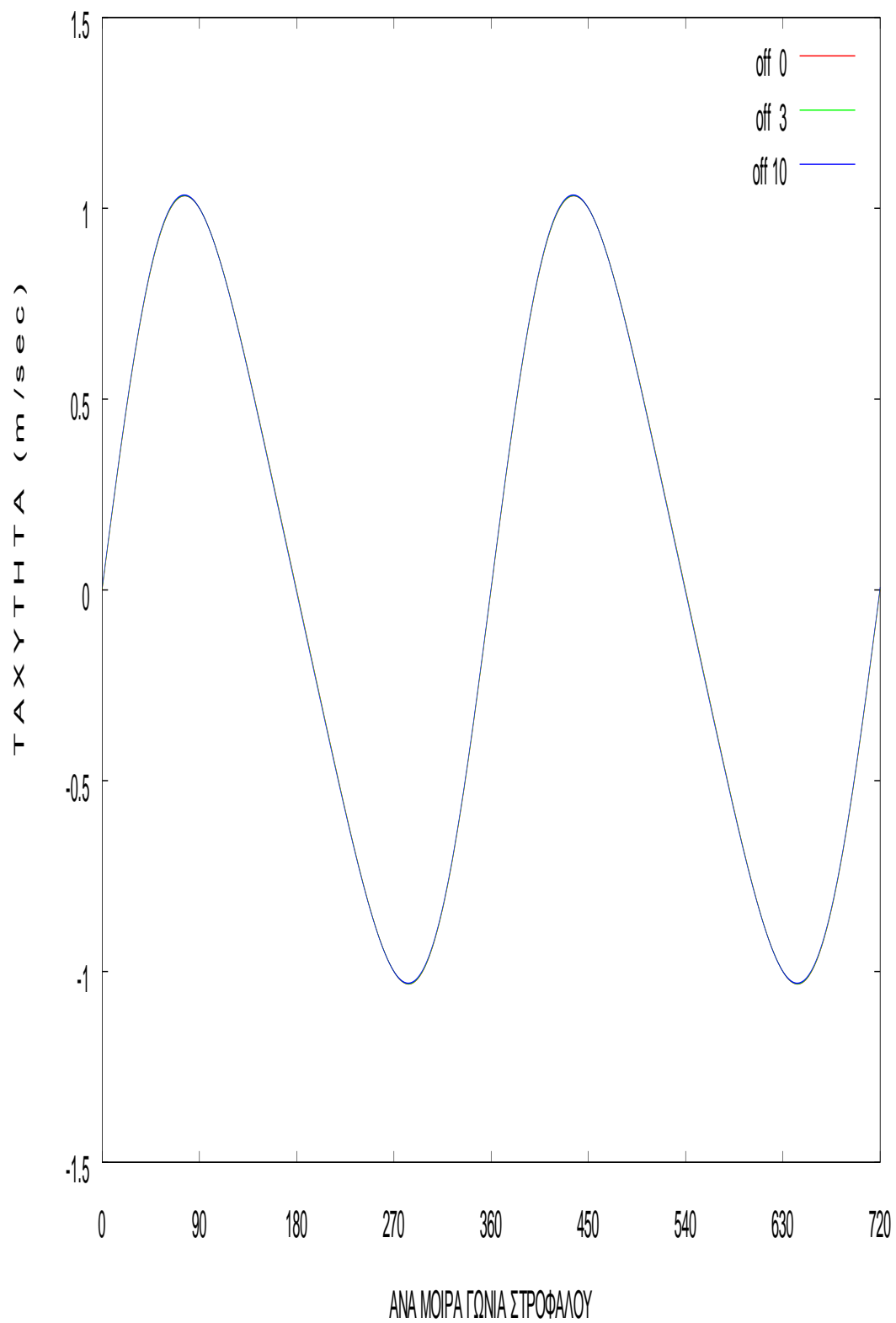
## 7.2 Διαγράμματα Εκκεντρότητας Στροφάλου (Crank Pin Offset)

### 7.2.1 Για εκκεντρότητα 0mm , 3mm , 10mm

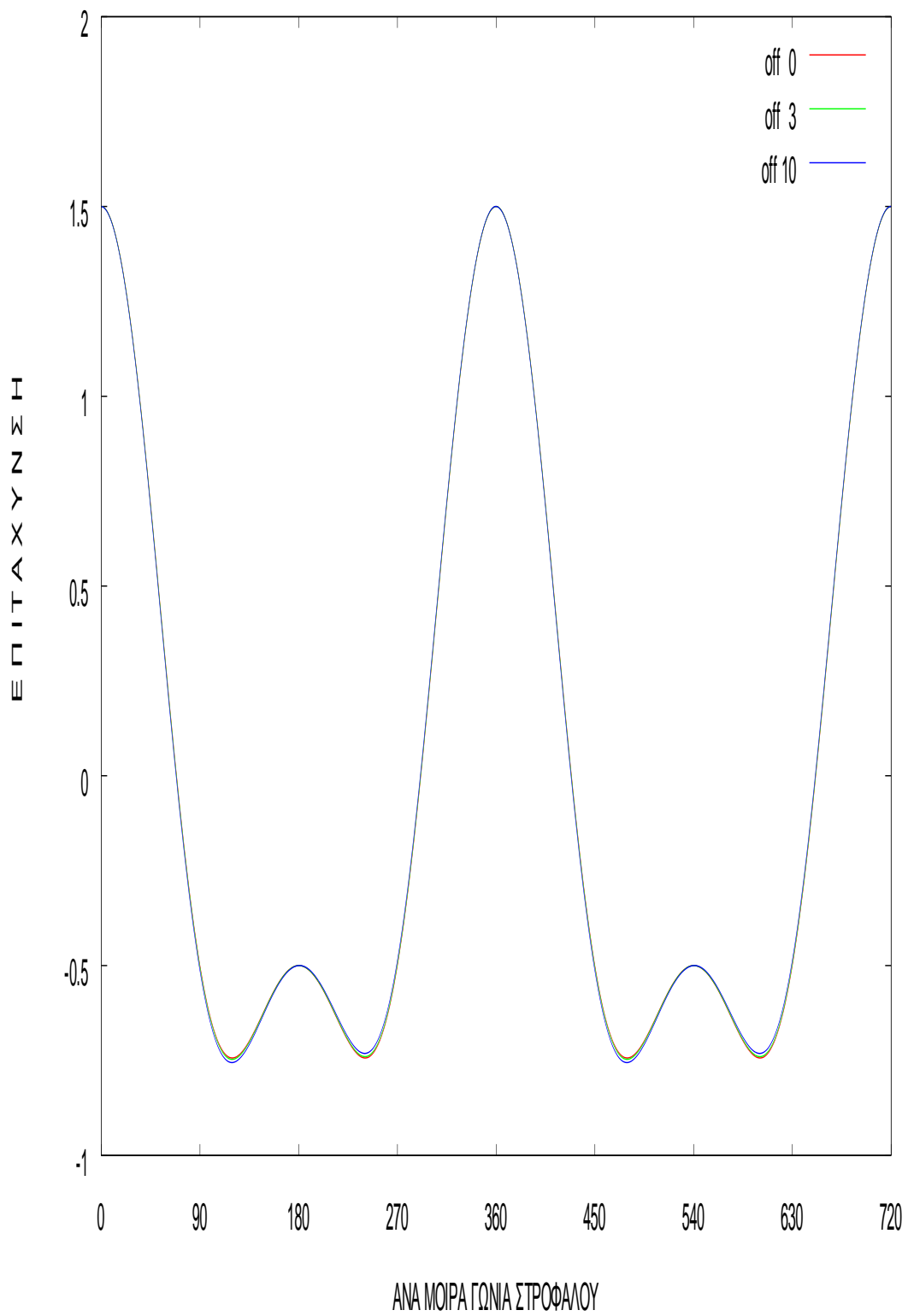


Σχ. 7.130 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

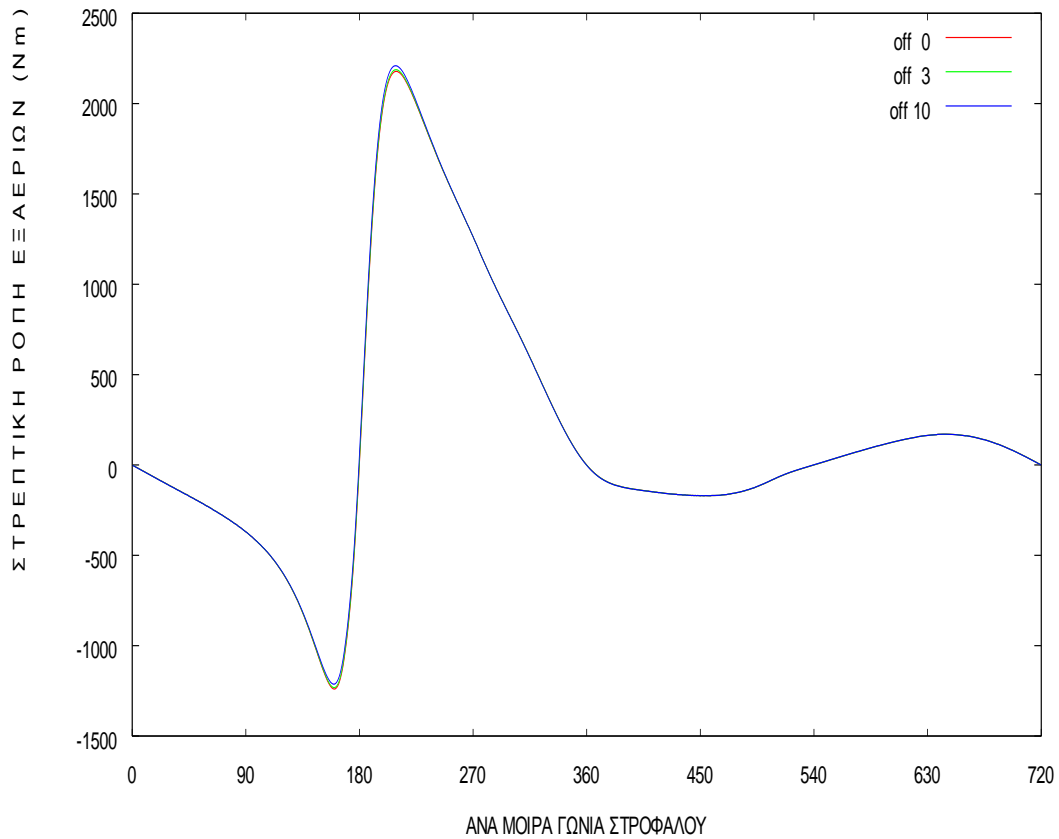




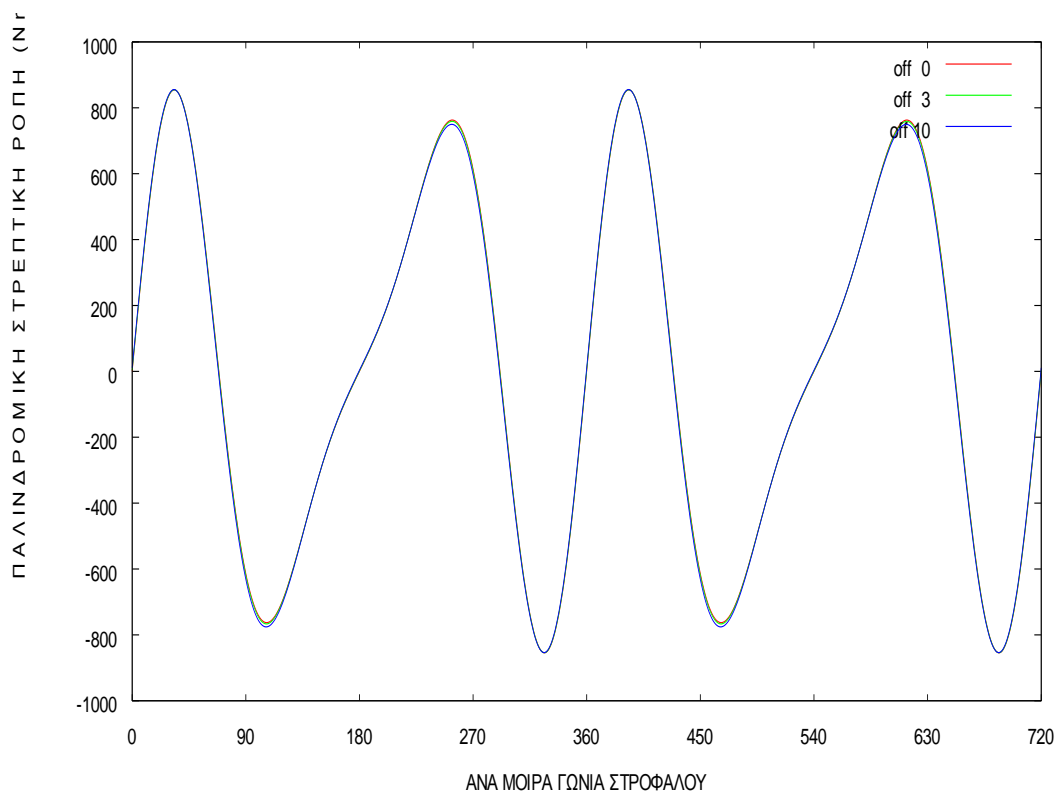
**Σχ.7.131 Ταχύτητα σε ( m/s ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



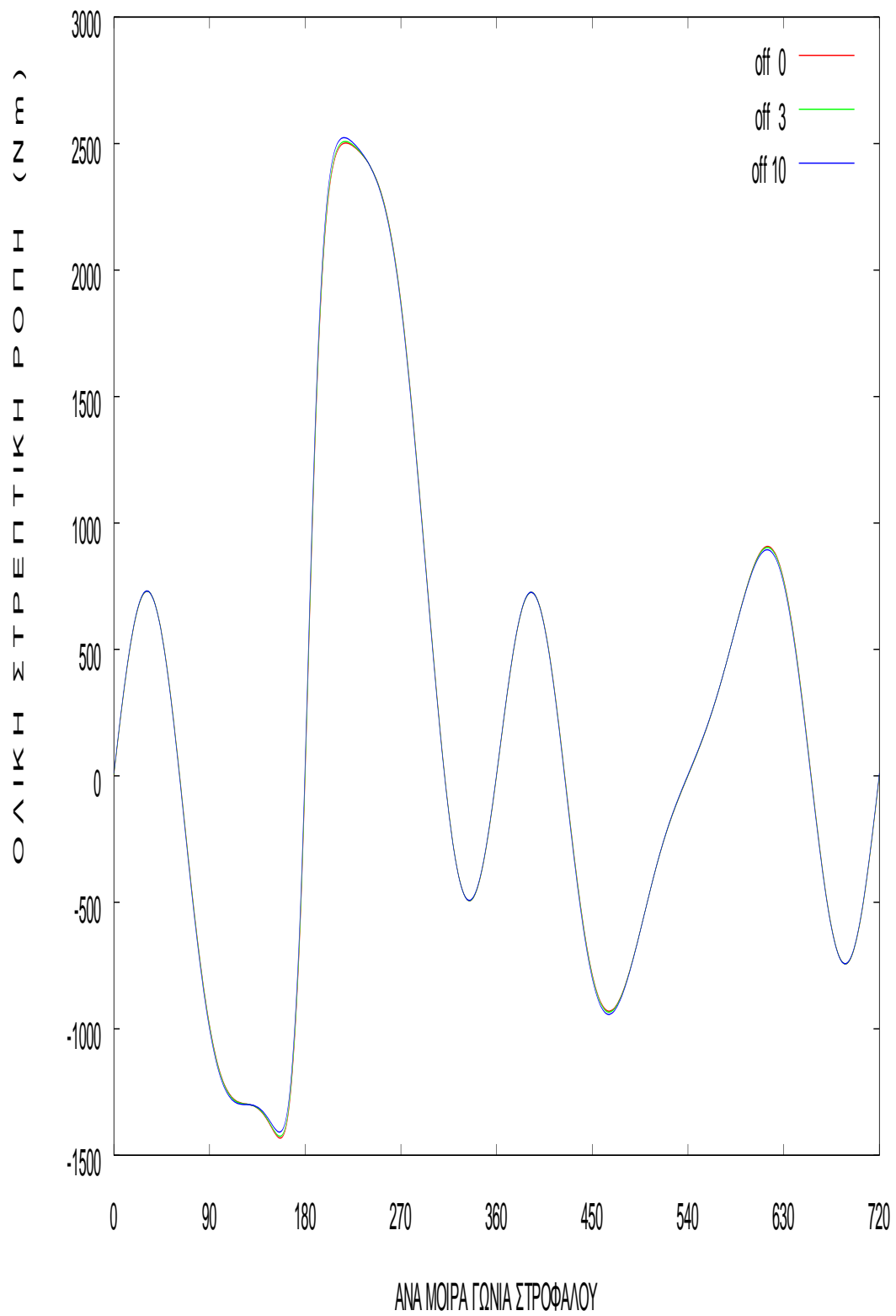
Σχ.7.132 Επιτάχυνση σε ( $m/s^2$ ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



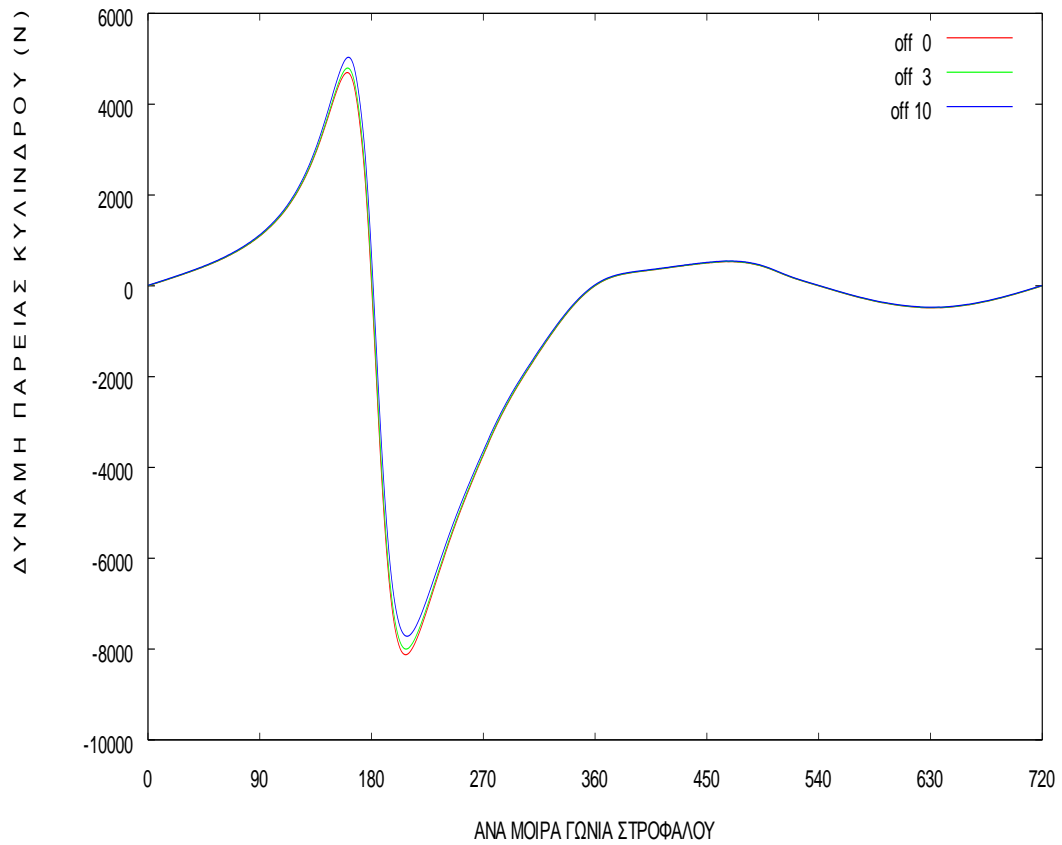
**Σχ.7.133 Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



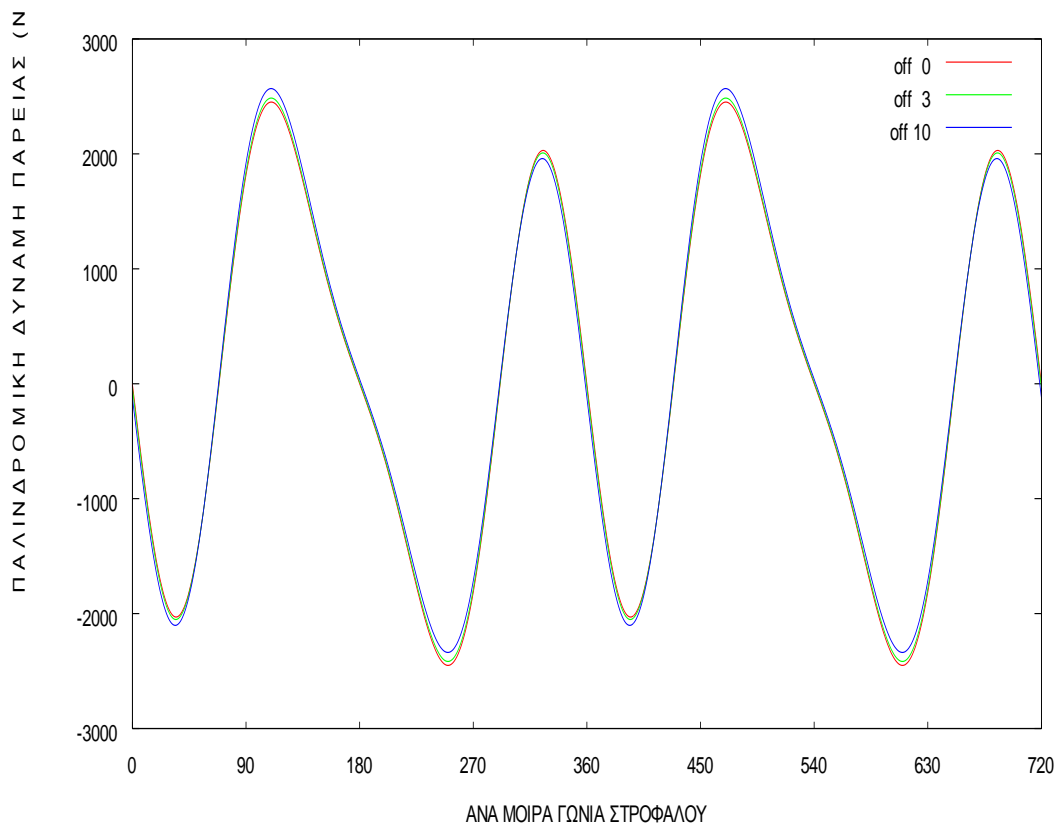
**Σχ.7.134 Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



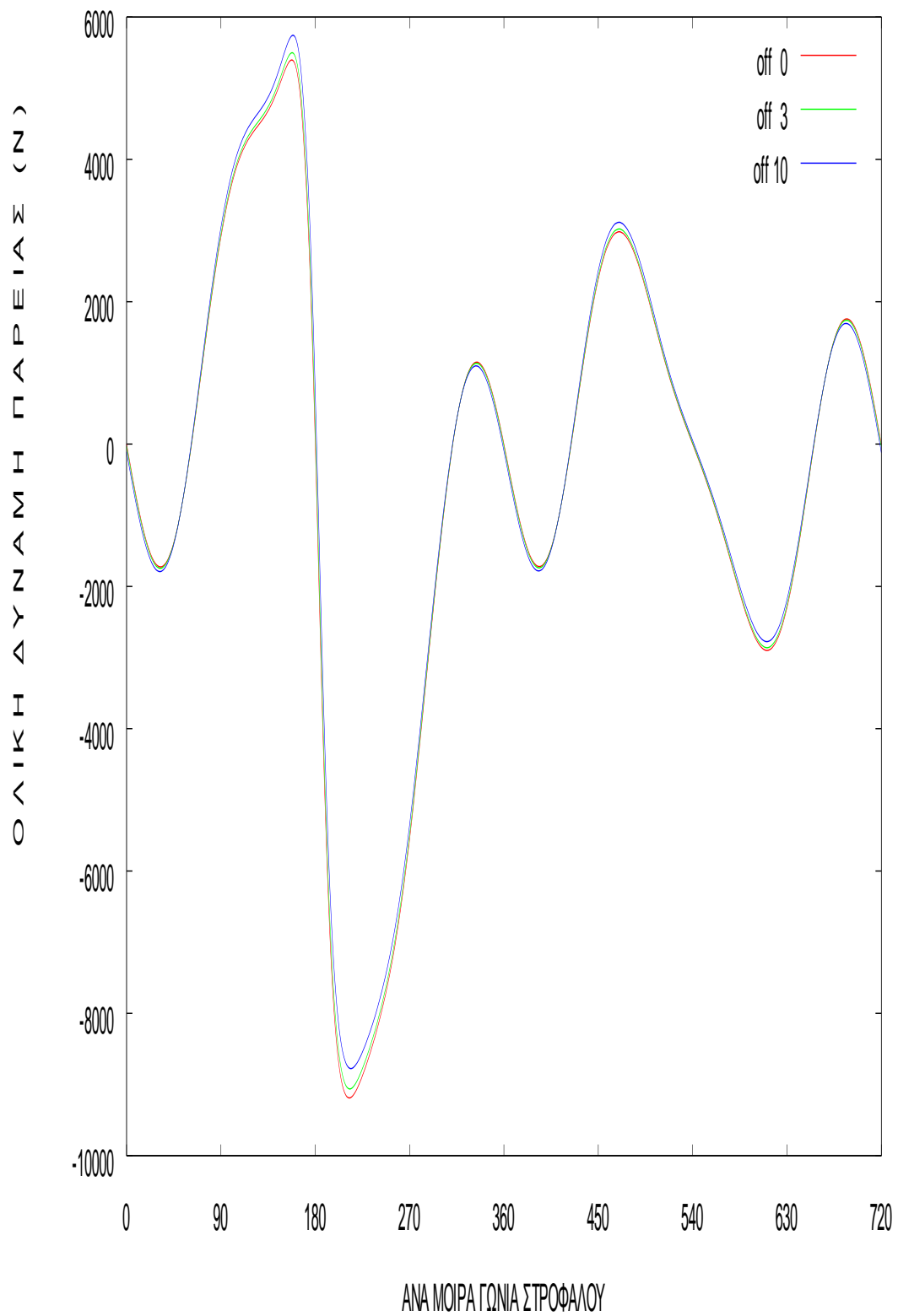
**Σχ.7.135** Ολική στρεπτική ροπή σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



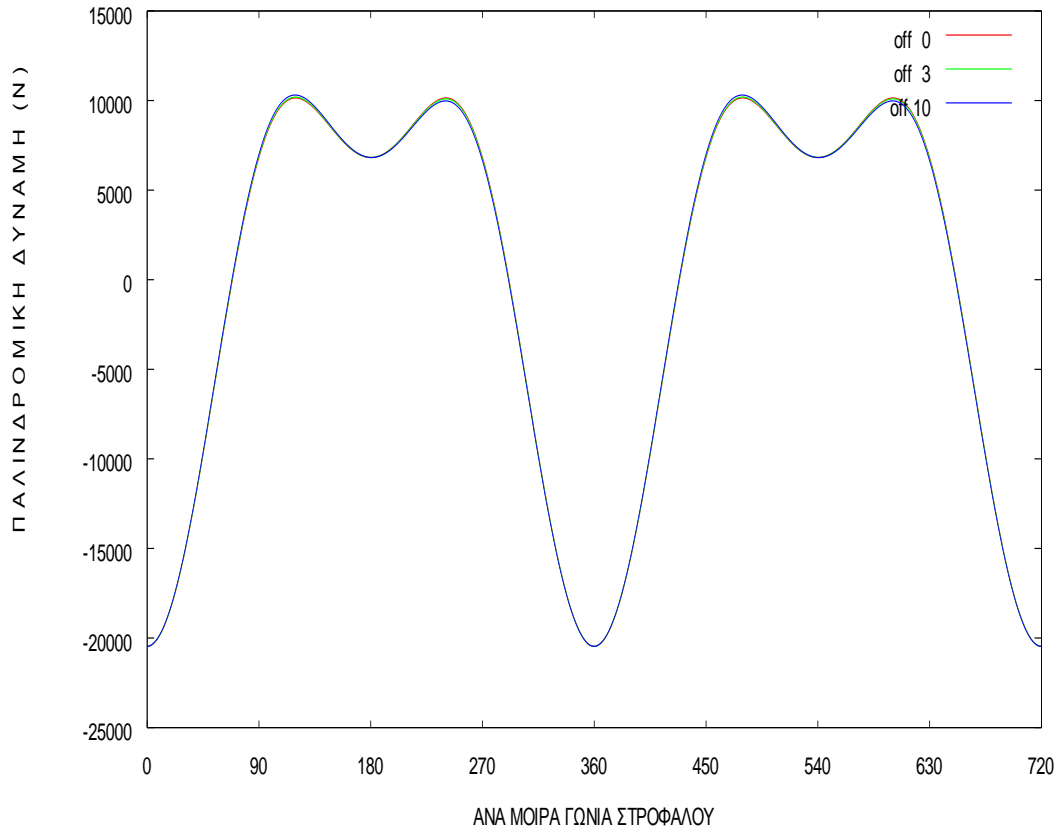
**Σχ. 7.136 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



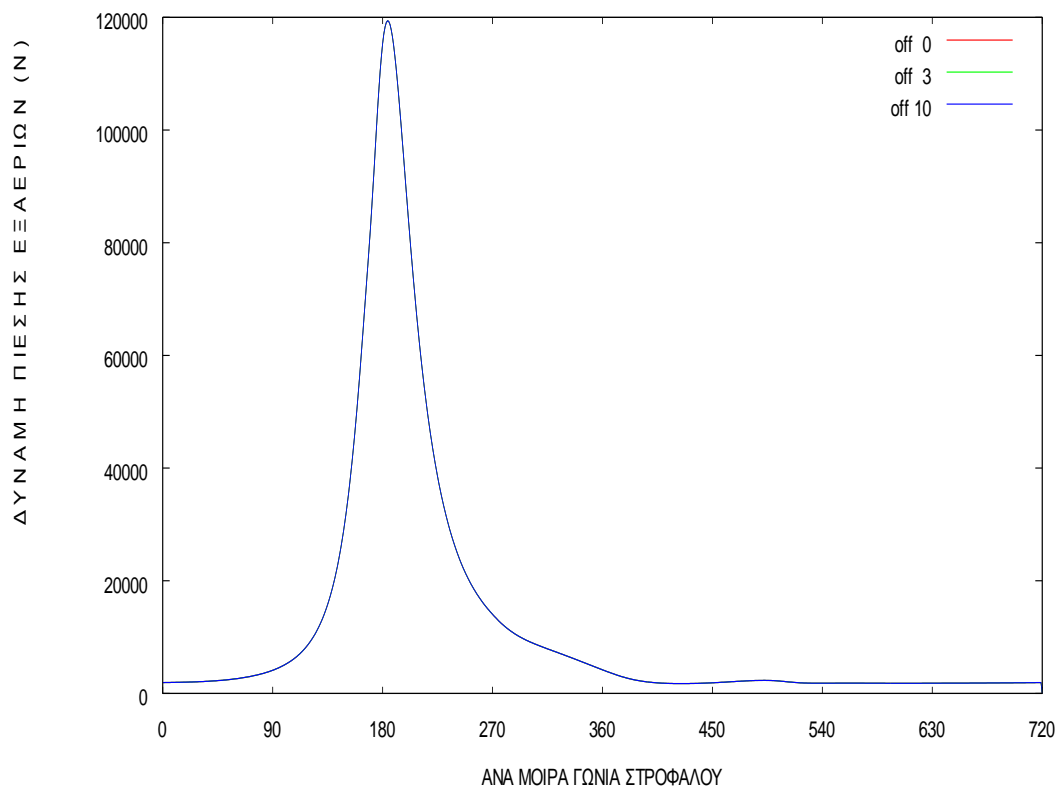
**Σχ. 7.137 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



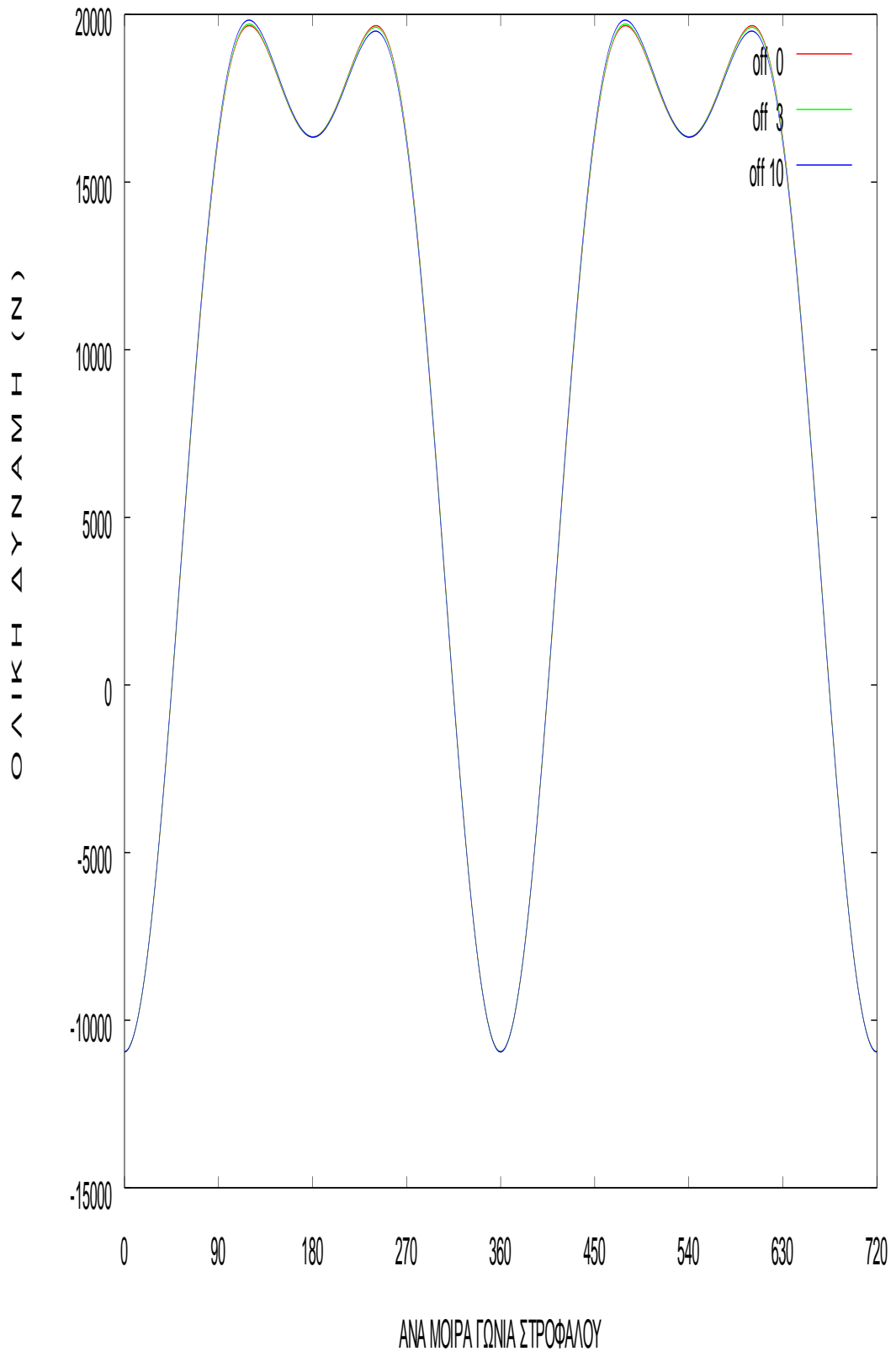
**Σχ.7.138** Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.139 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

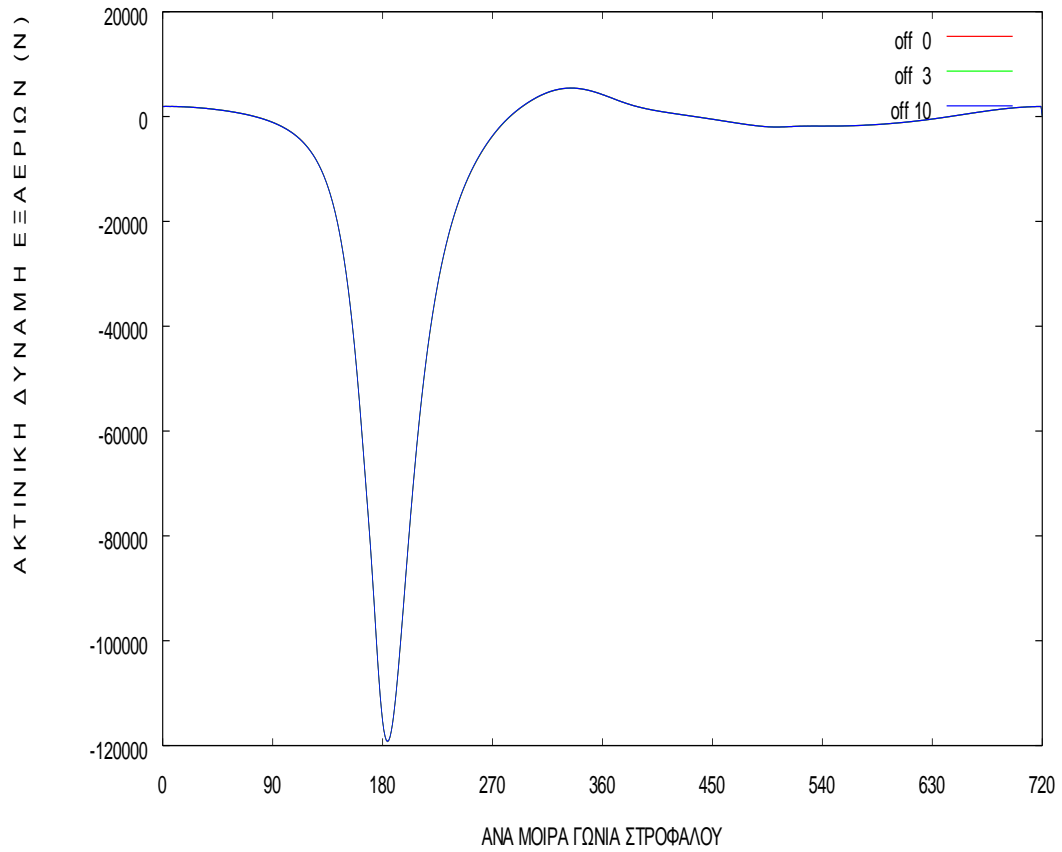


**Σχ.7.140 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

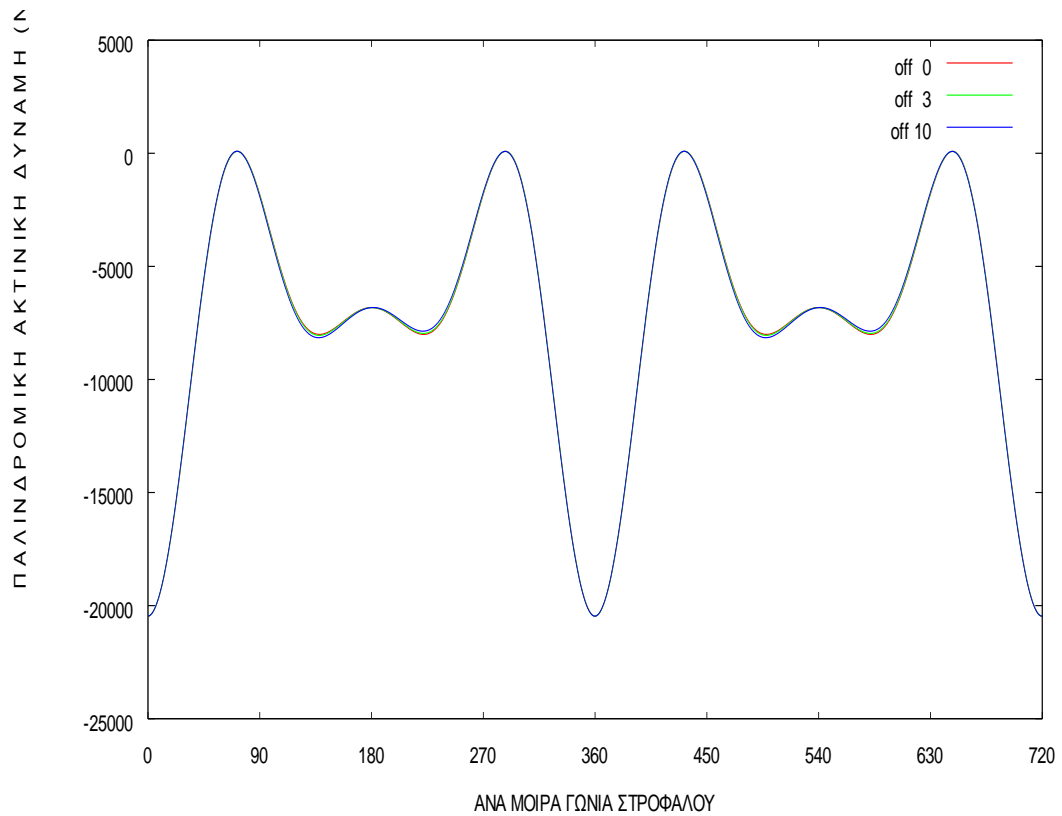


**Σχ. 7.141** Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

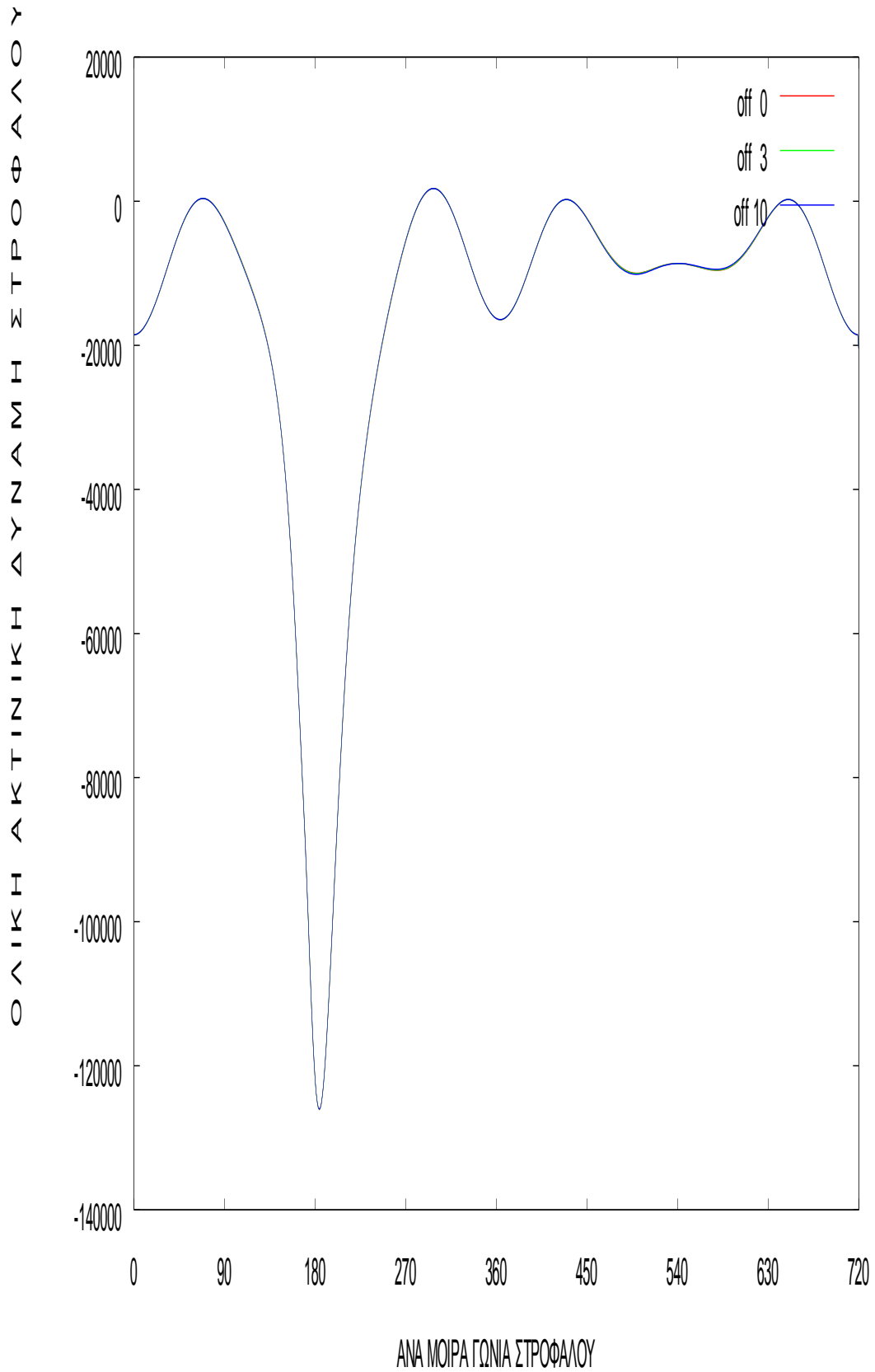




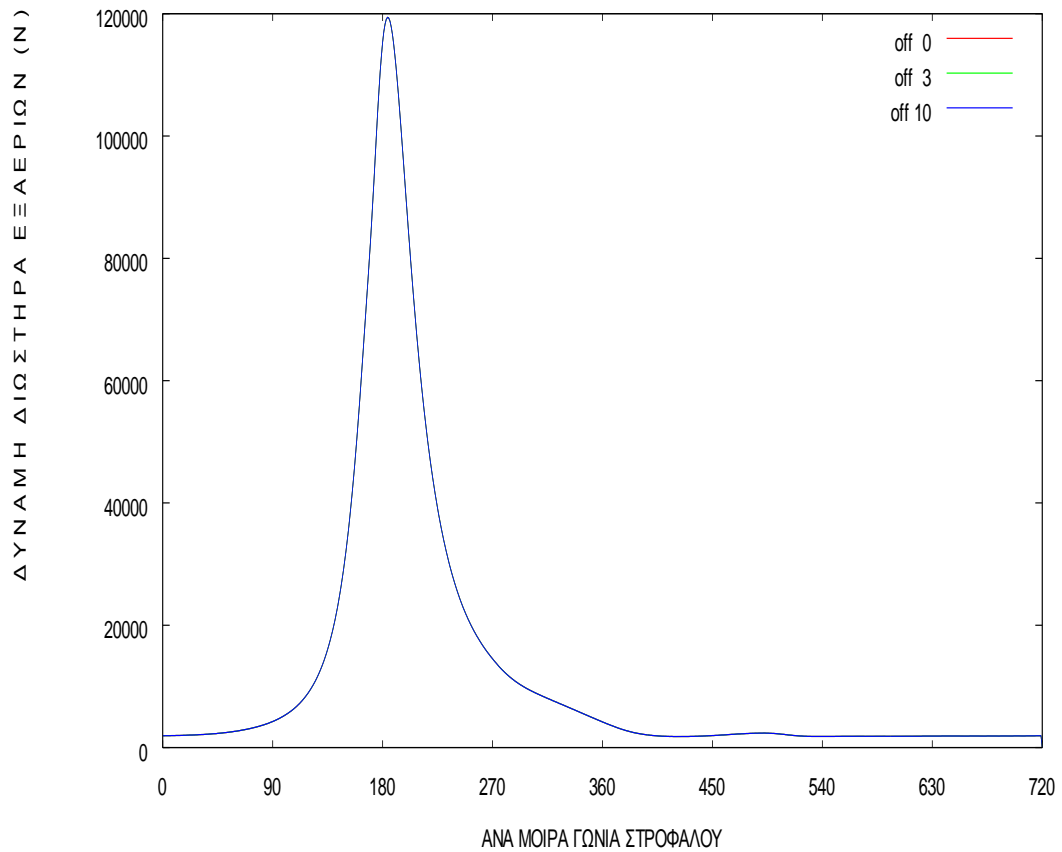
**Σχ.7.142** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



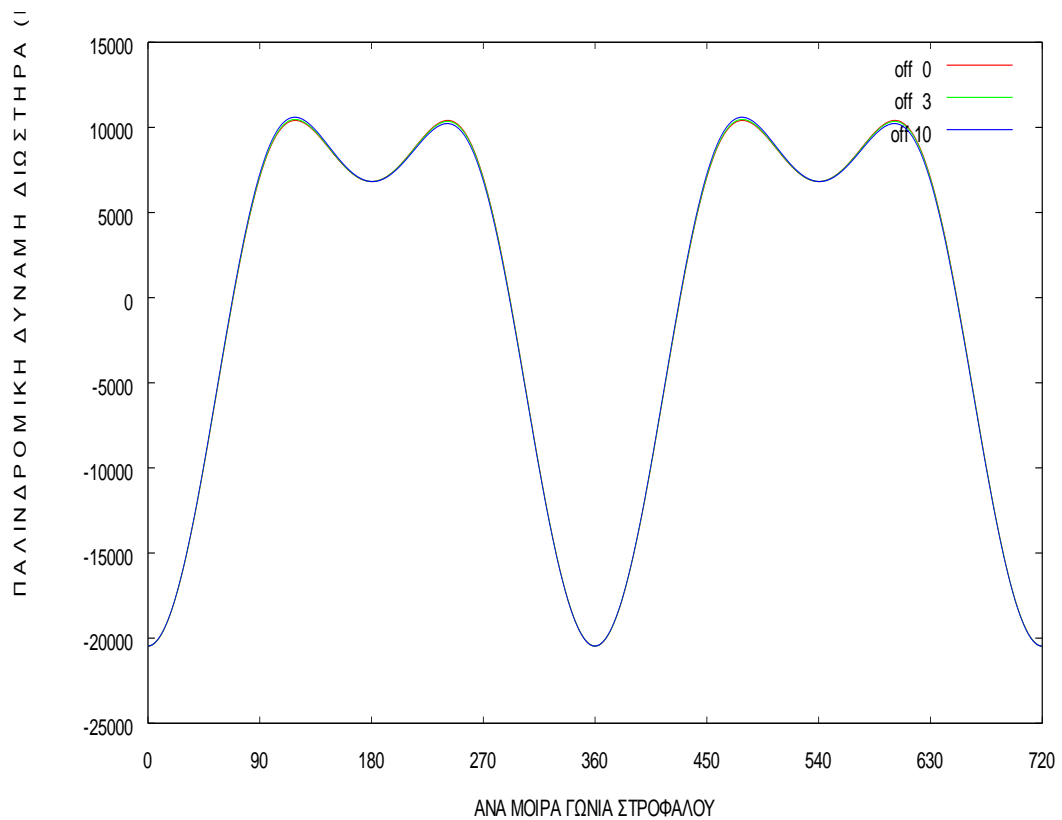
**Σχ.7.143** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



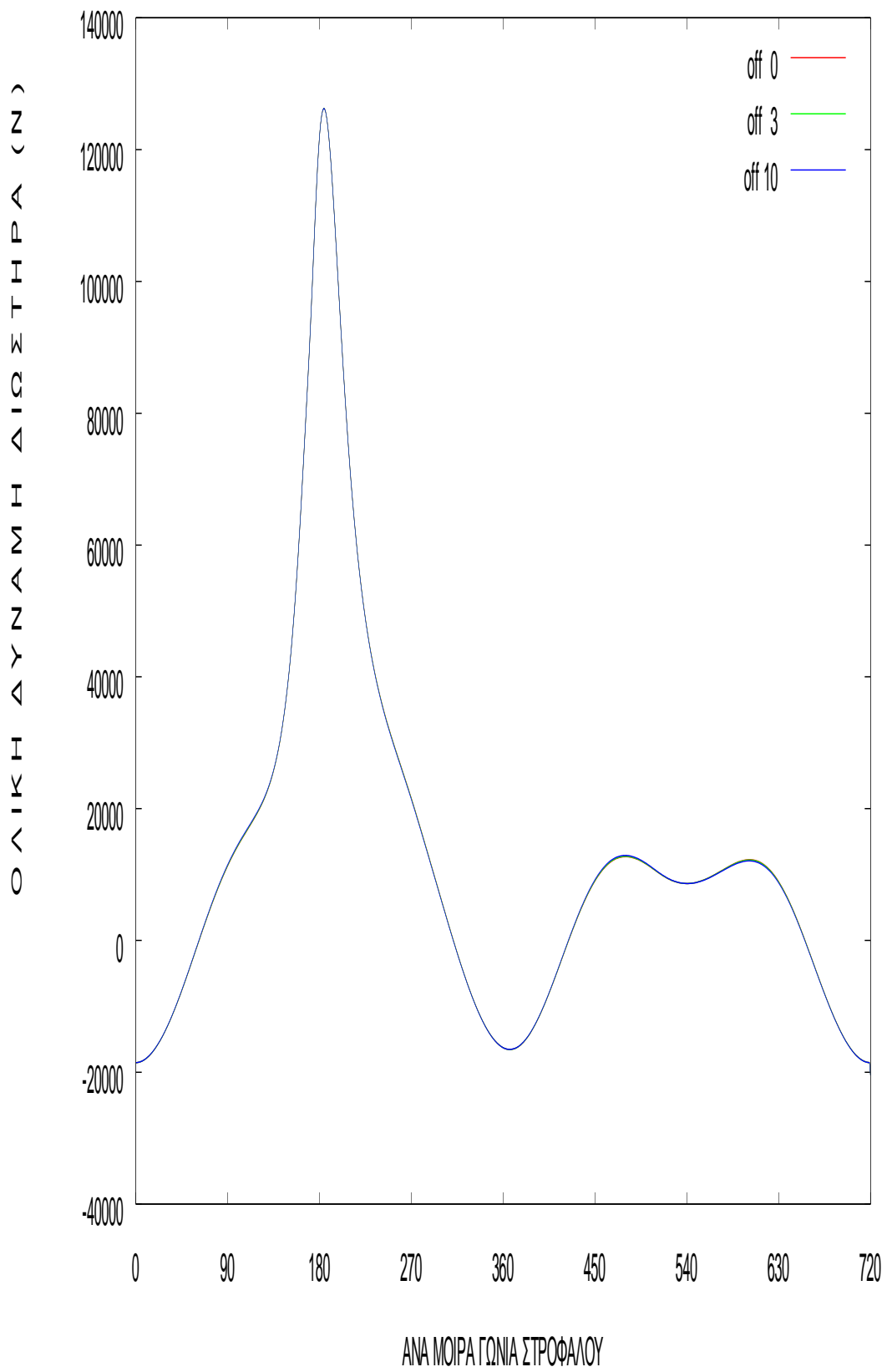
Σχ.144 Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



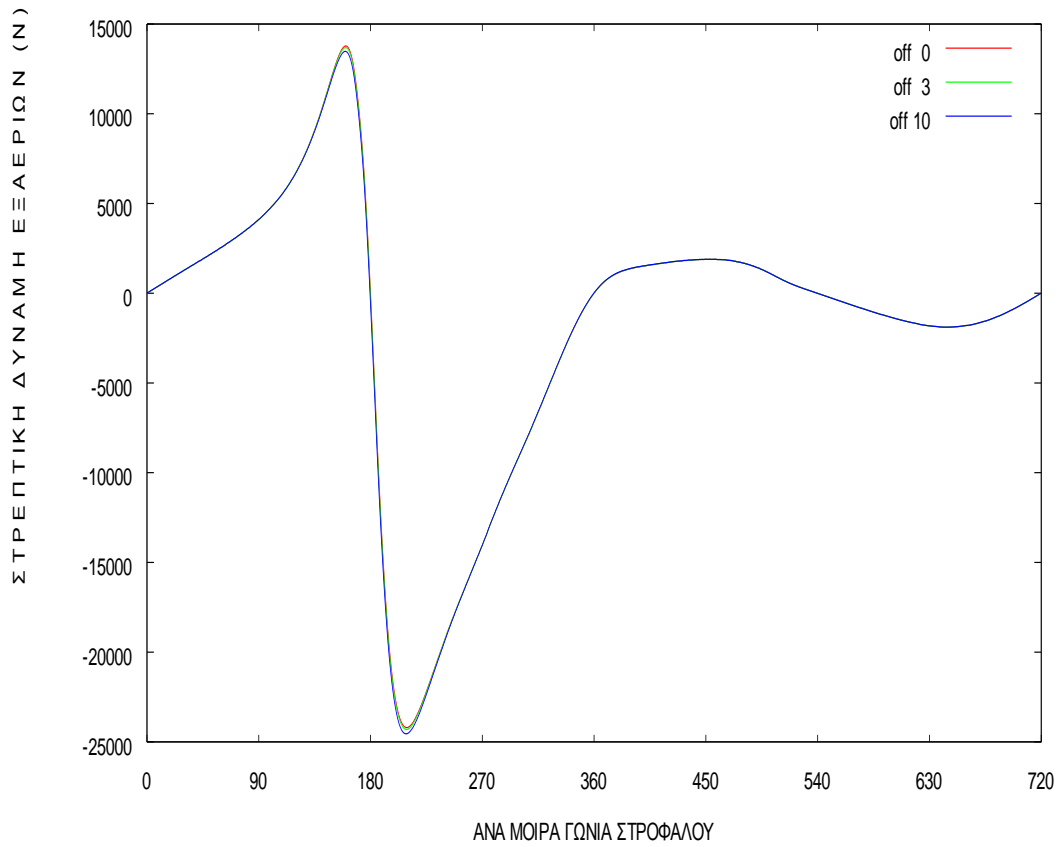
**Σχ.145 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



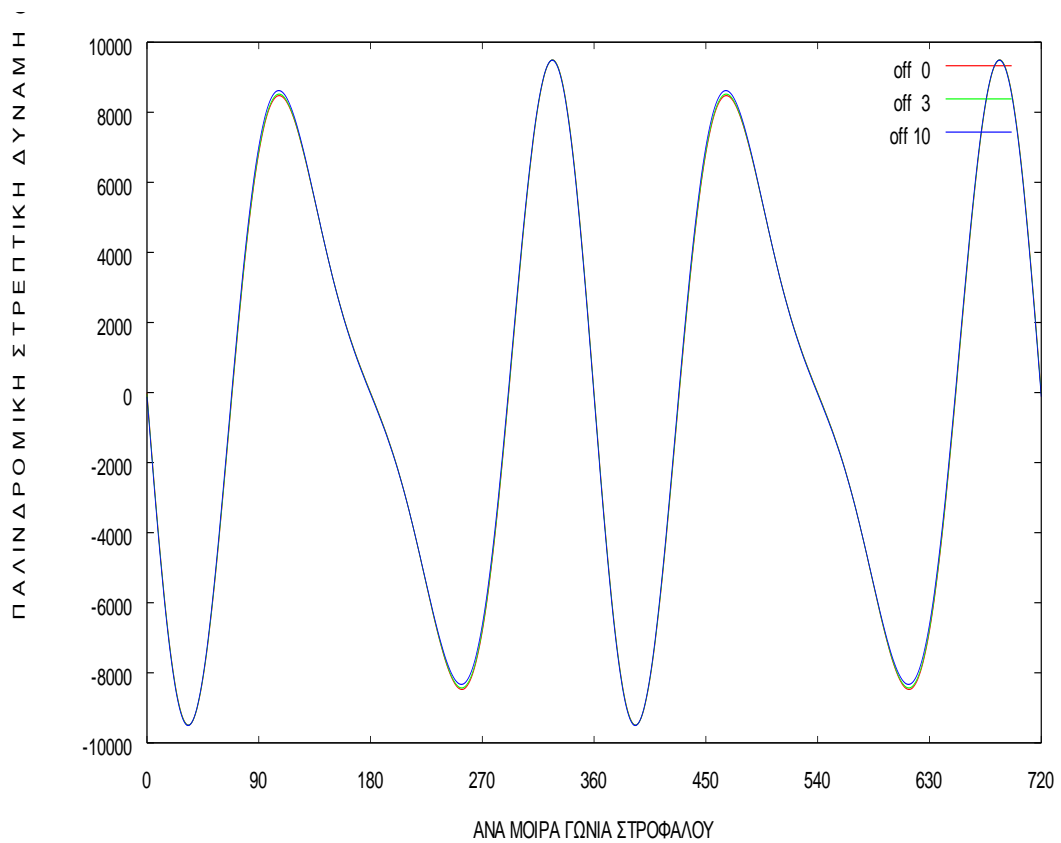
**Σχ.7.146 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



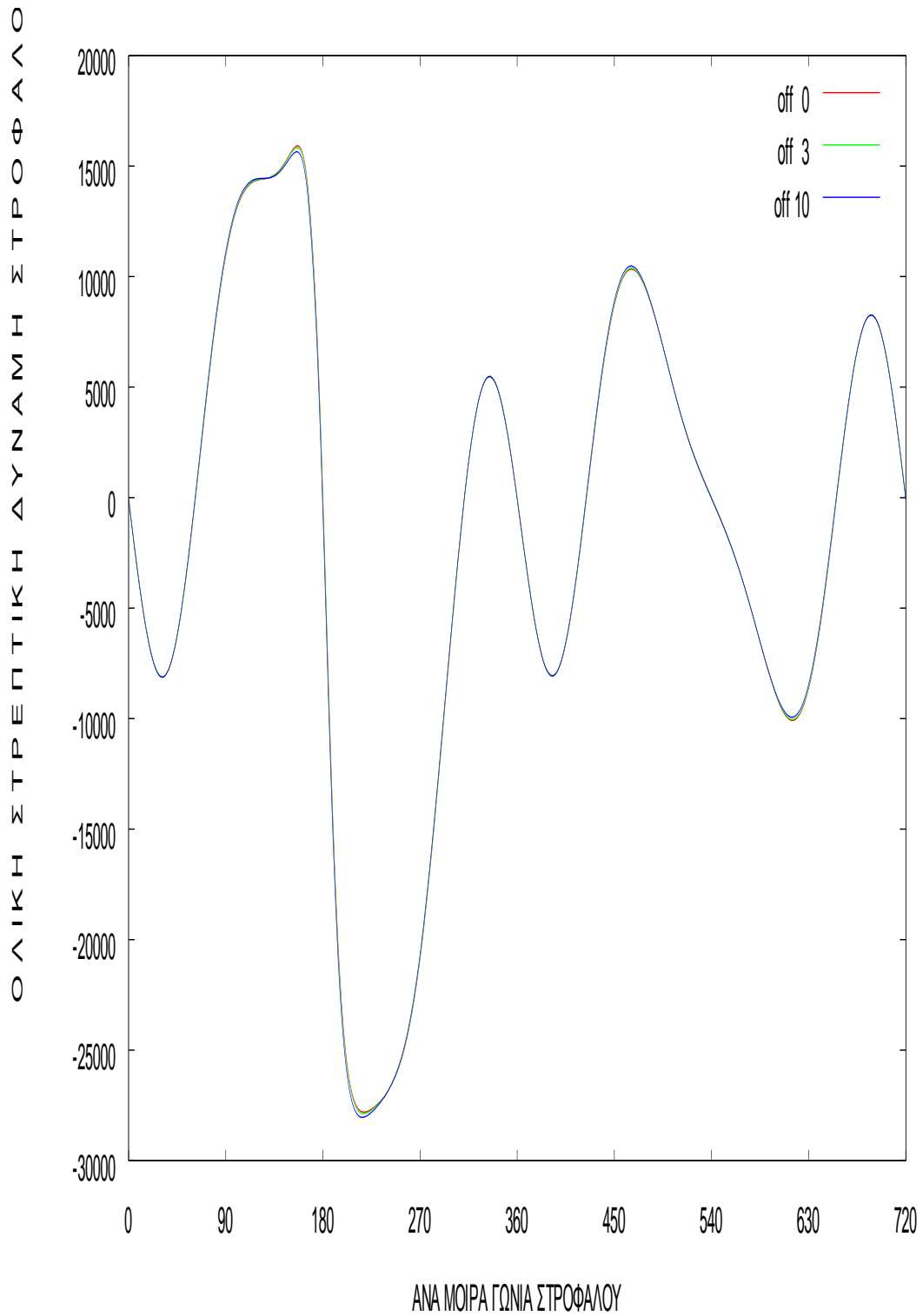
Σχ.7.147 Συνολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.148 Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.149 Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



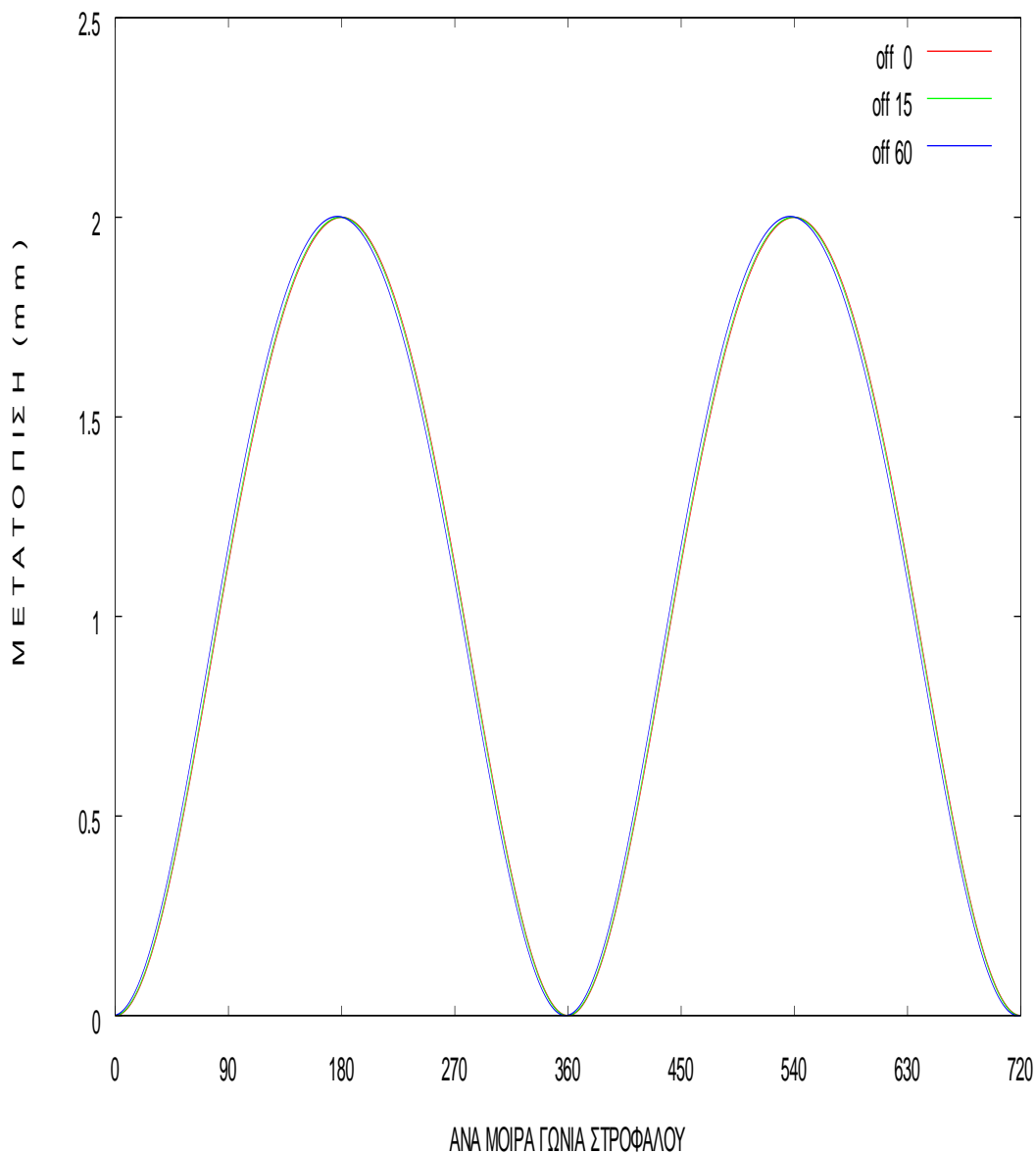
**Σχ.7.150 Ολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

Παραπάνω(Σχήματα 7.87 έως 7.150) παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα που προέκυψαν από την εφαρμογή εκκεντρότητας σε ένα εύρος απο 0 εως 10mm και όπως παρατηρείται τα κινηματικά ονομαστικά μεγέθη δεν επηρεάζονται από την εφαρμογή της εκκεντρότητας στο συγκεκριμένο εύρος.

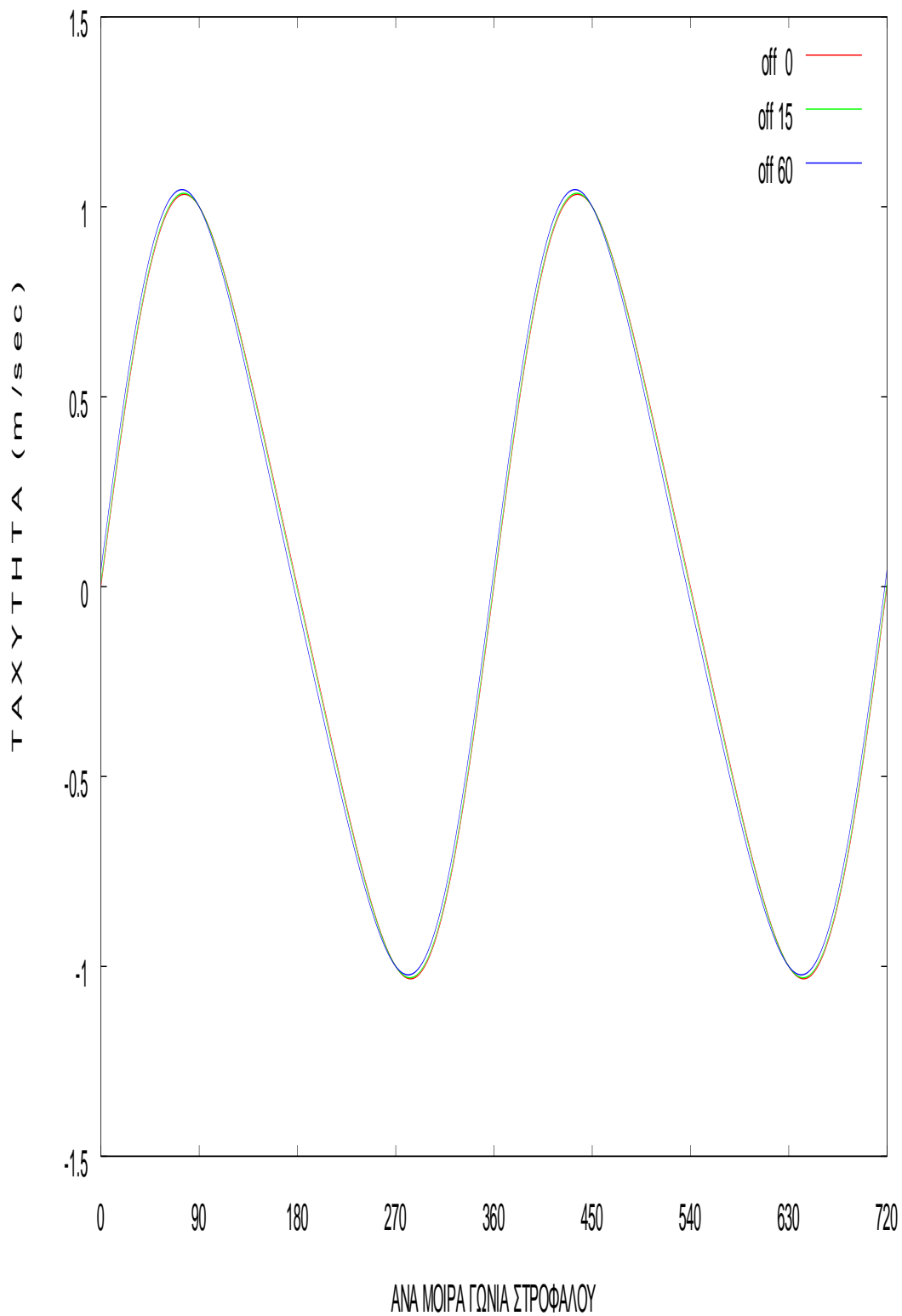
Κοιτώντας προσεκτικότερα παρατηρούμε ότι για μια εκκεντρότητα μεγέθους 10mm επηρεάζεται ελάχιστα η πλευρική δύναμη εξ αερίων  $N_g$ , η πλευρική δύναμη  $N_l$  , η συνολική δύναμη παρειάς  $N_{tot}$  καθώς και η δύναμη ροπής εξ αερίων  $T_g$  και  $T_l$ .

Έτσι θα εξετάσουμε την συμπεριφορά των κινηματικών μεγεθών του μηχανισμού όταν εφαρμόζεται μια εκκεντρότητα εύρους από 0 έως 60 mm.

### Διαγράμματα Εκκεντρότητας 0 , 15 ,60 mm

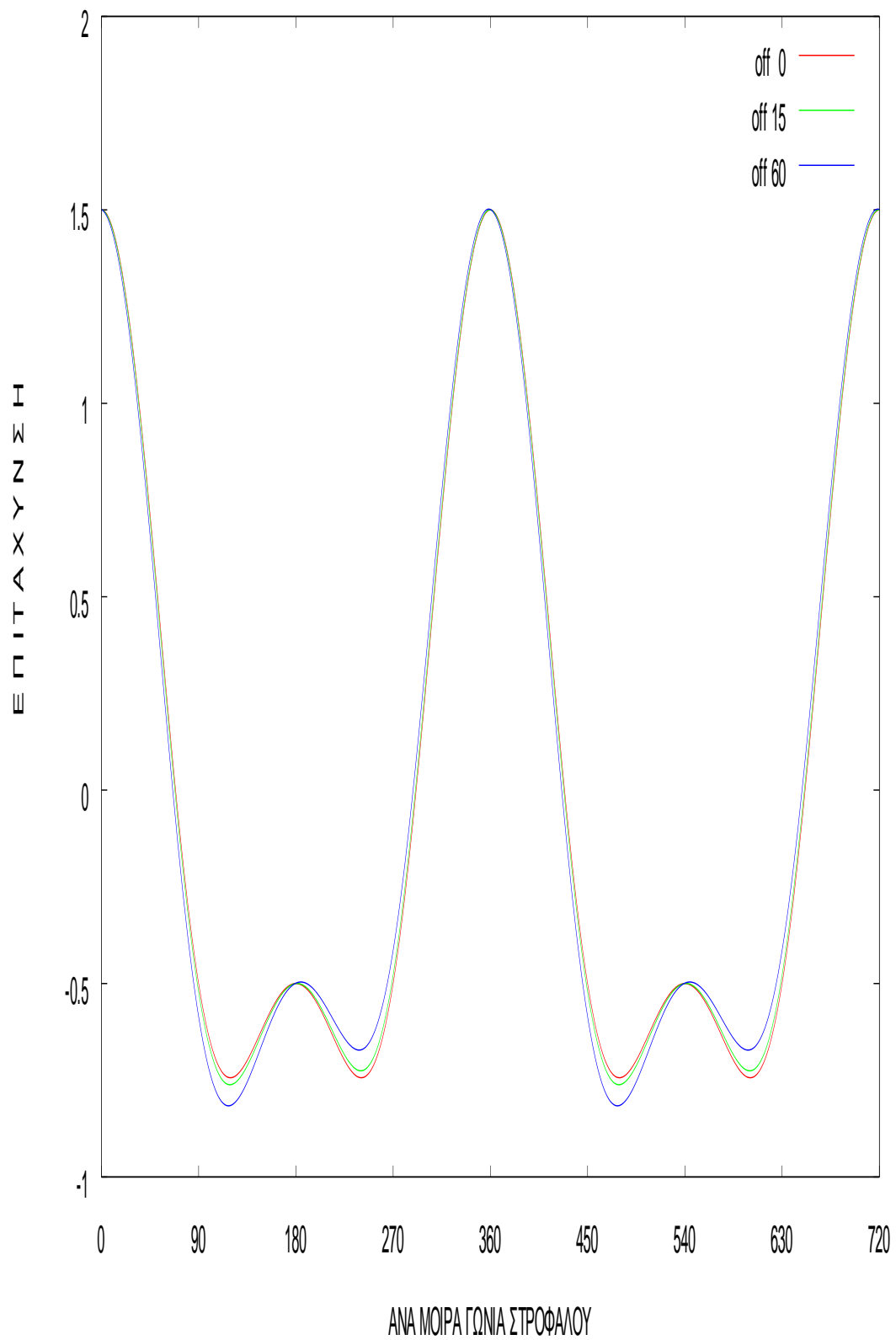


**Σχ. 7.151 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

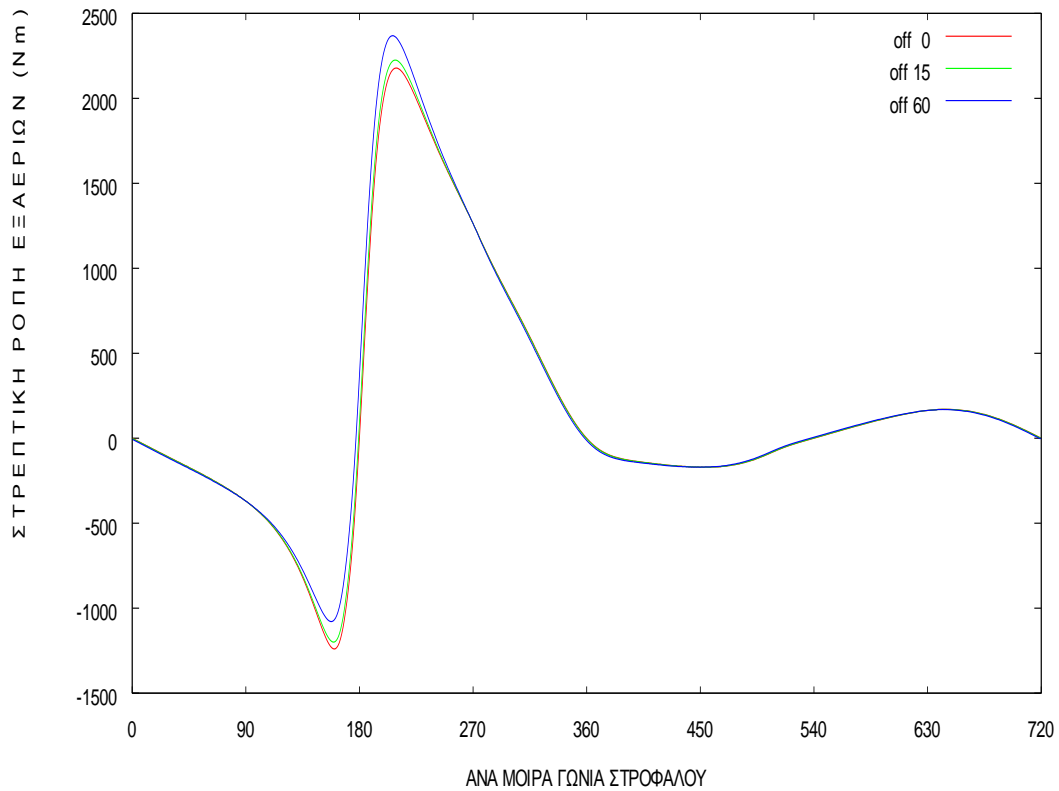


**Σχ.7.152 Ταχύτητα σε ( m/s) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

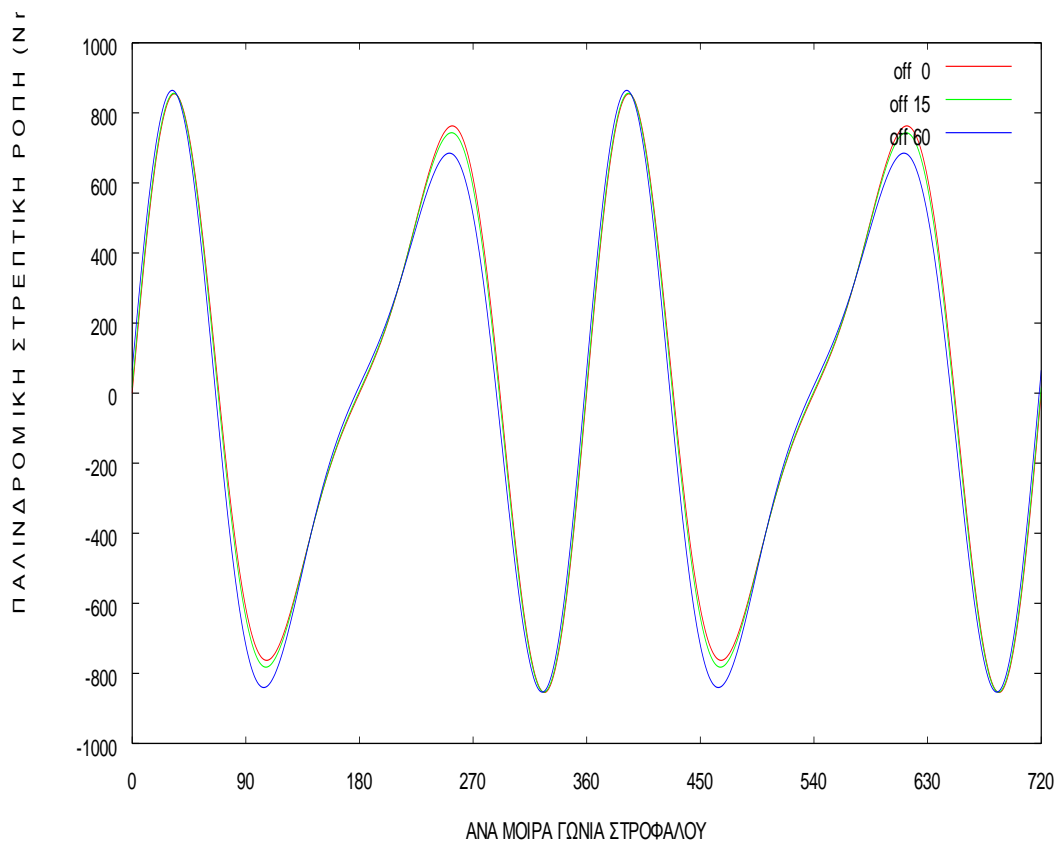




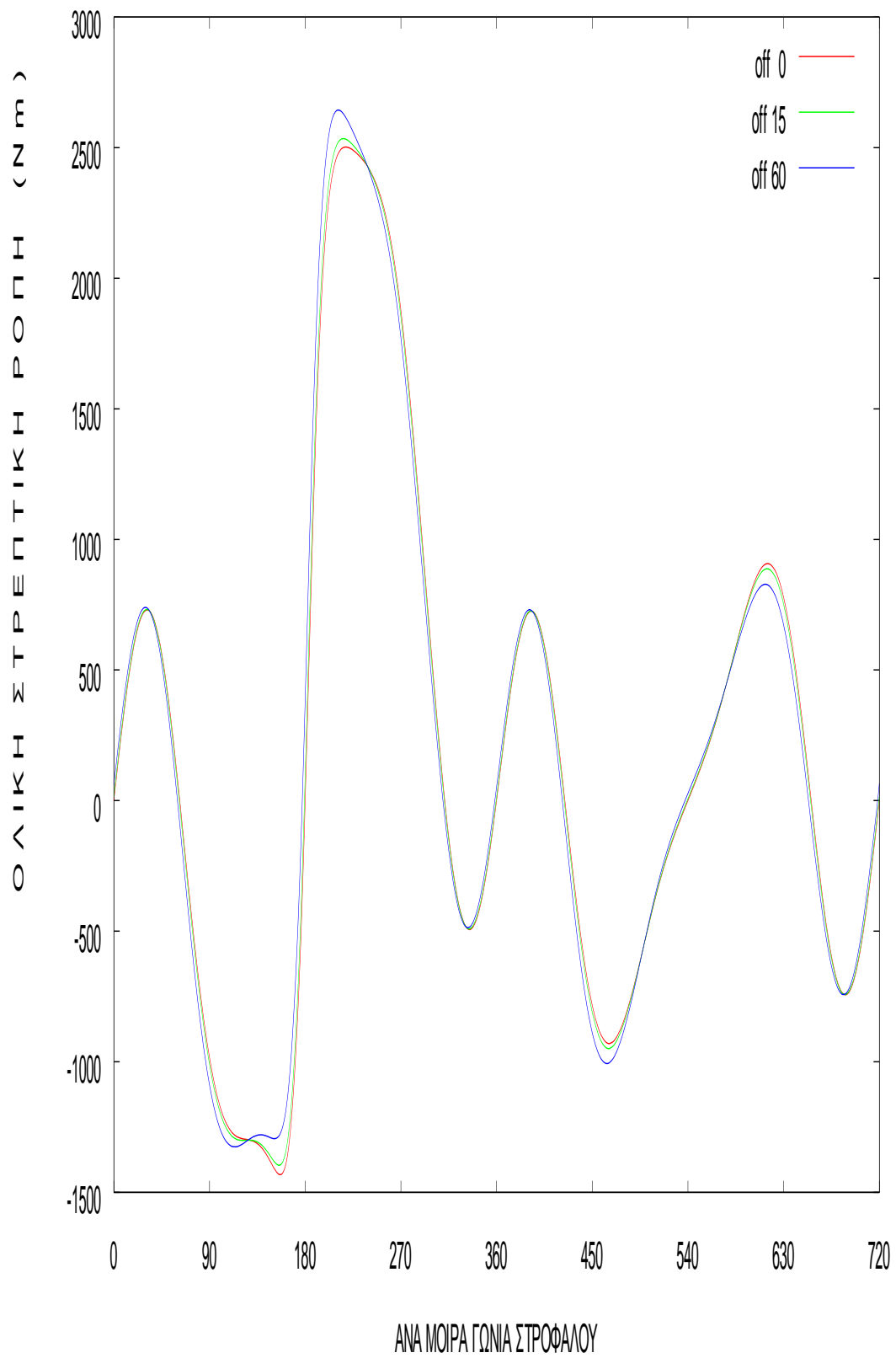
Σχ.7.153 Επιτάχυνση σε ( m/s<sup>2</sup> ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



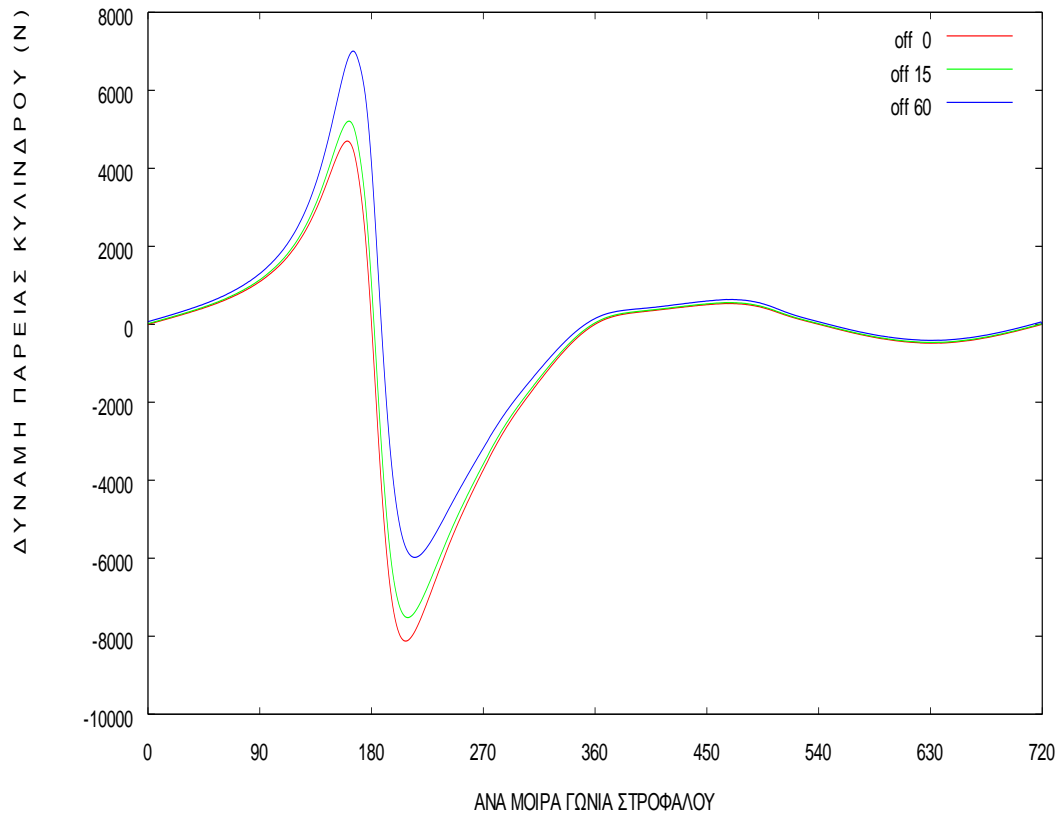
**Σχ.7.154** Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



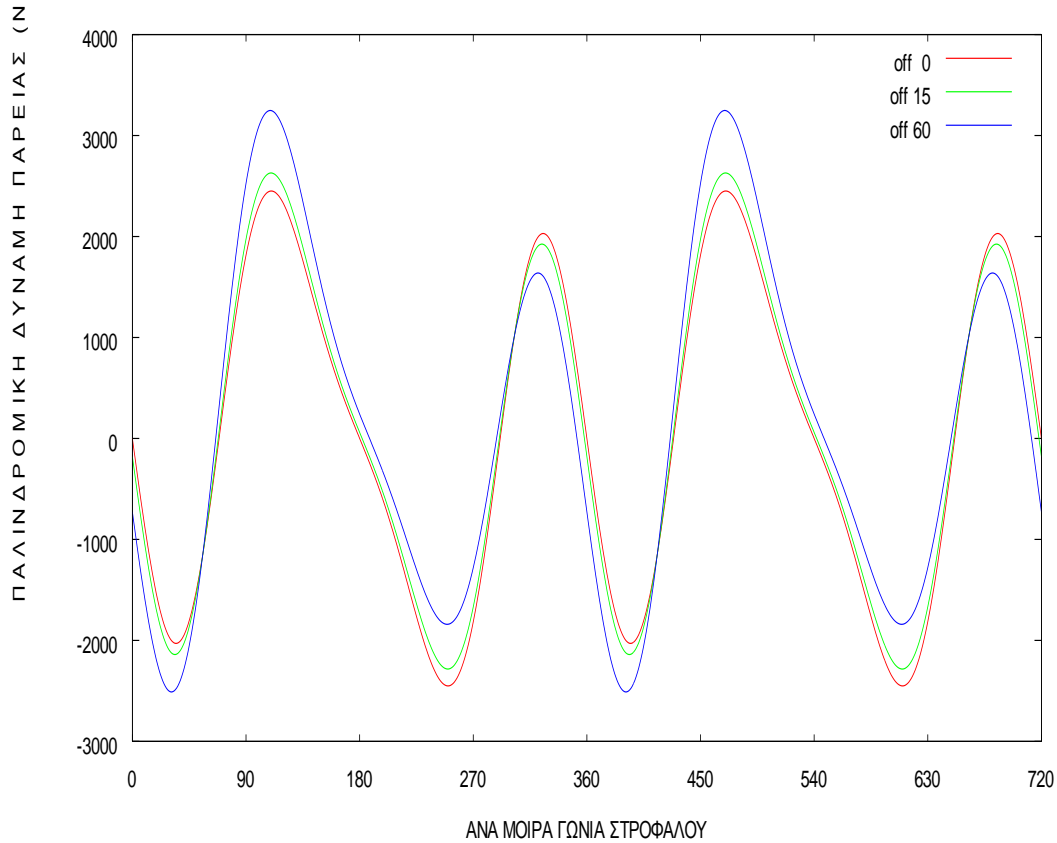
**Σχ.7.155** Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



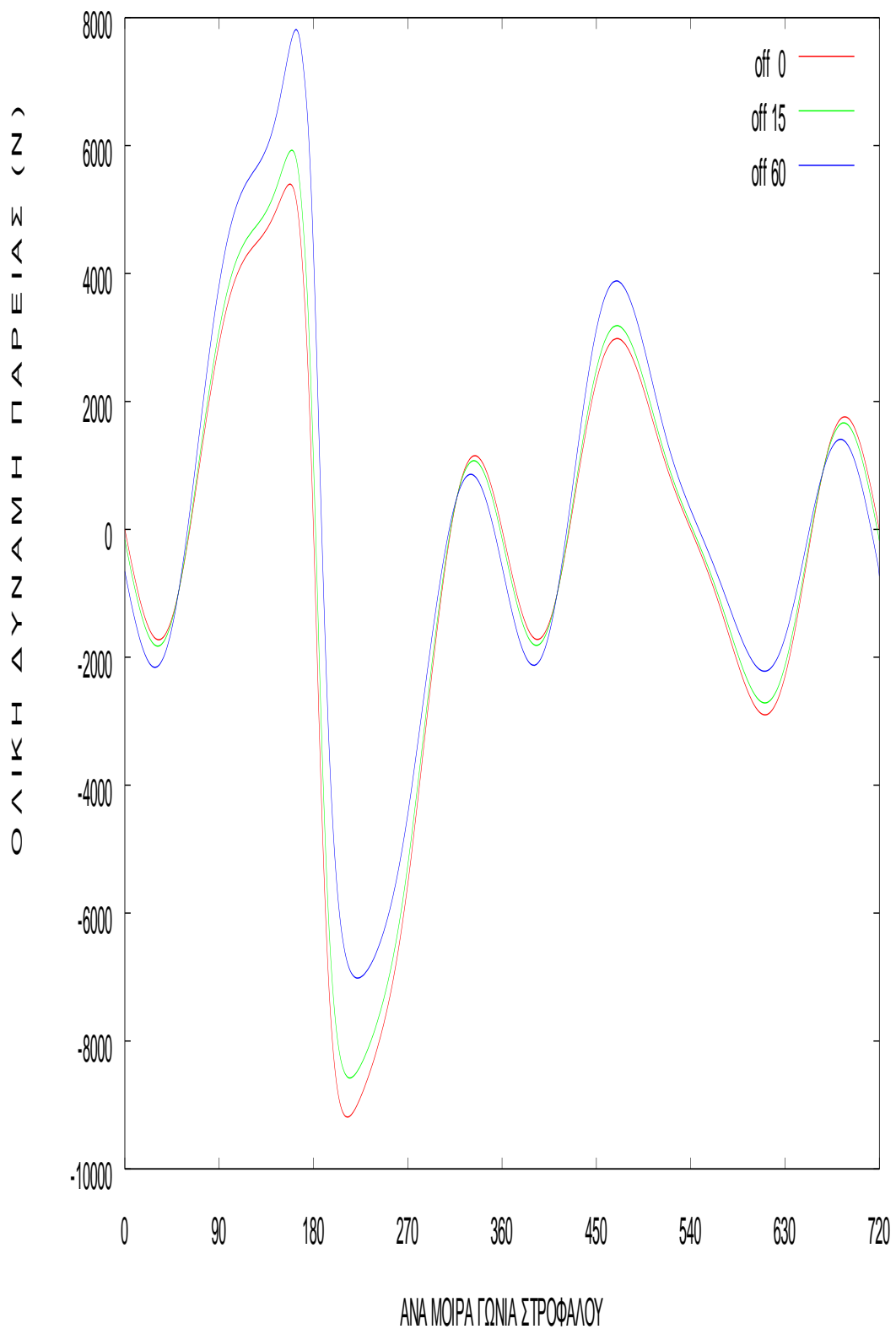
Σχ.7.156 Ολική στρεπτική ροπή σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



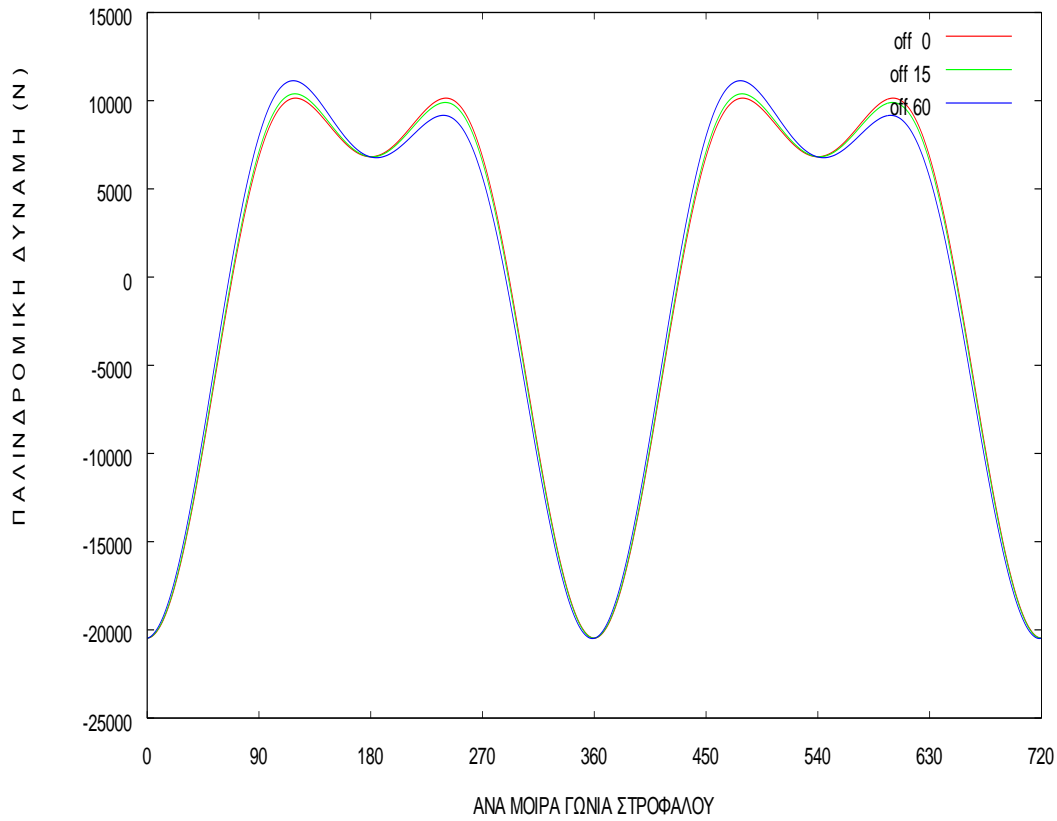
**Σχ. 7.157 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



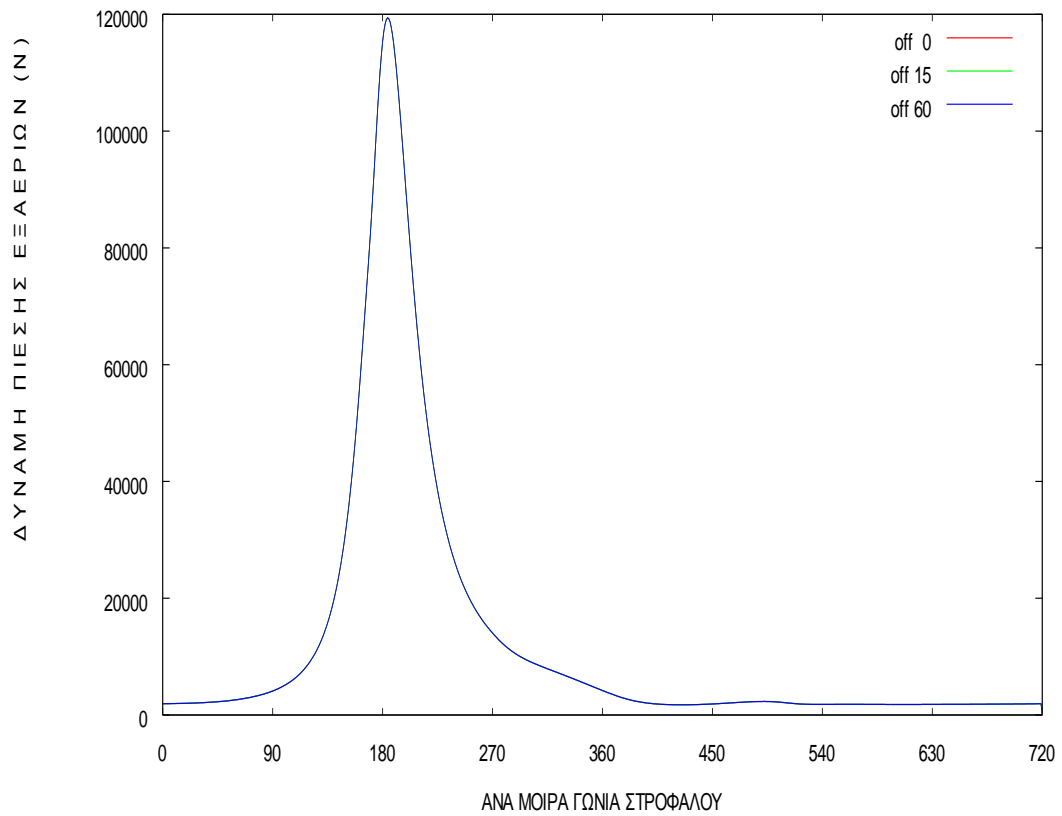
**Σχ. 7.158 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



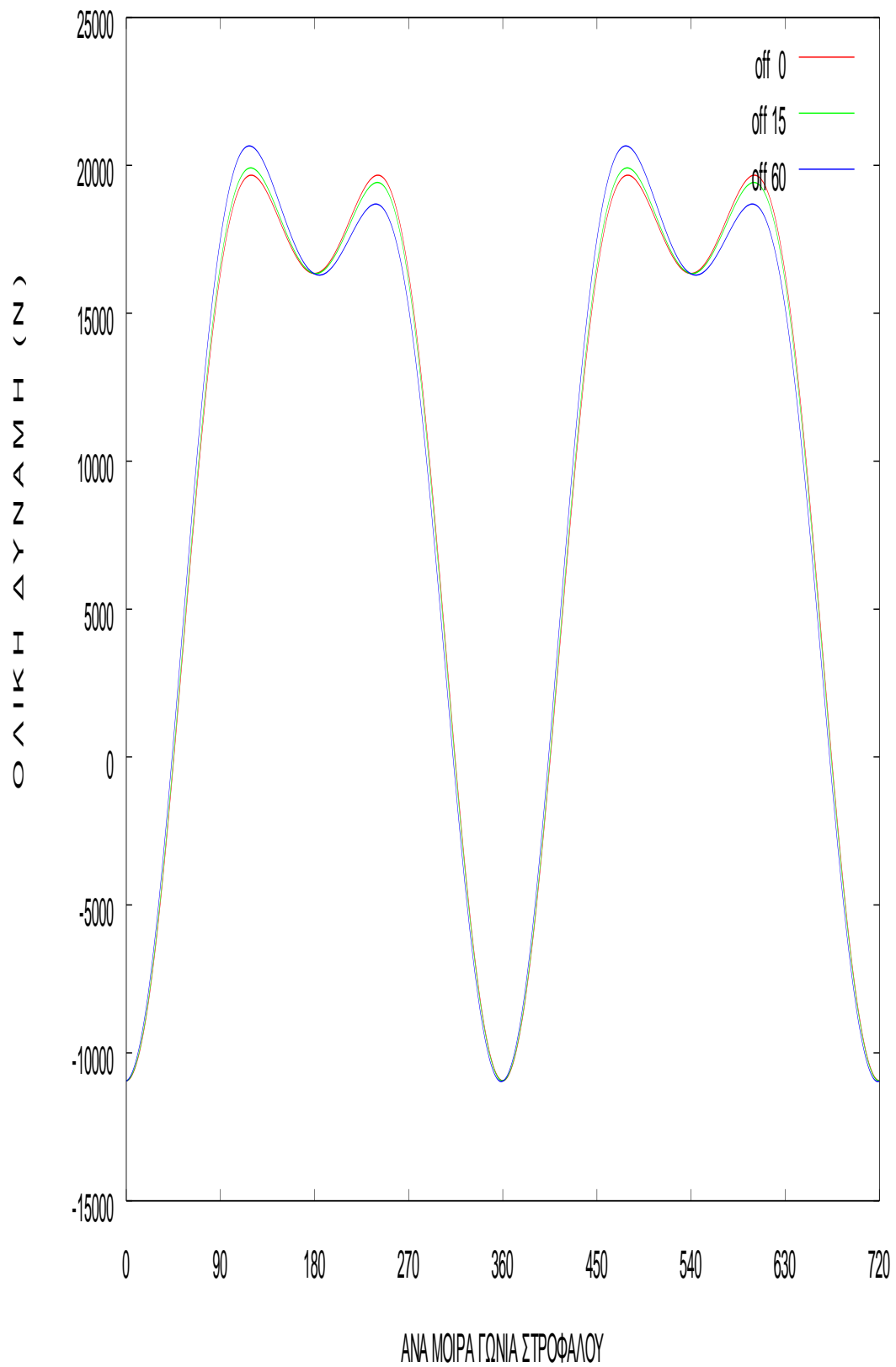
Σχ.7.159 Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



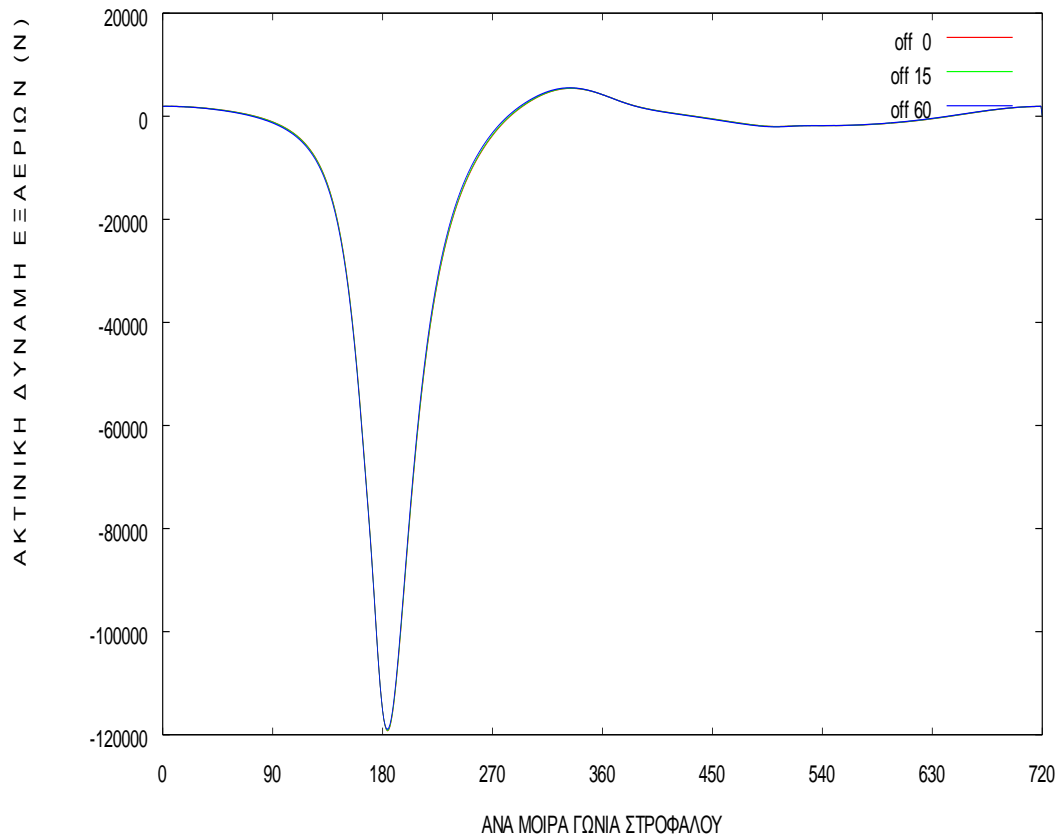
**Σχ.7.160** Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



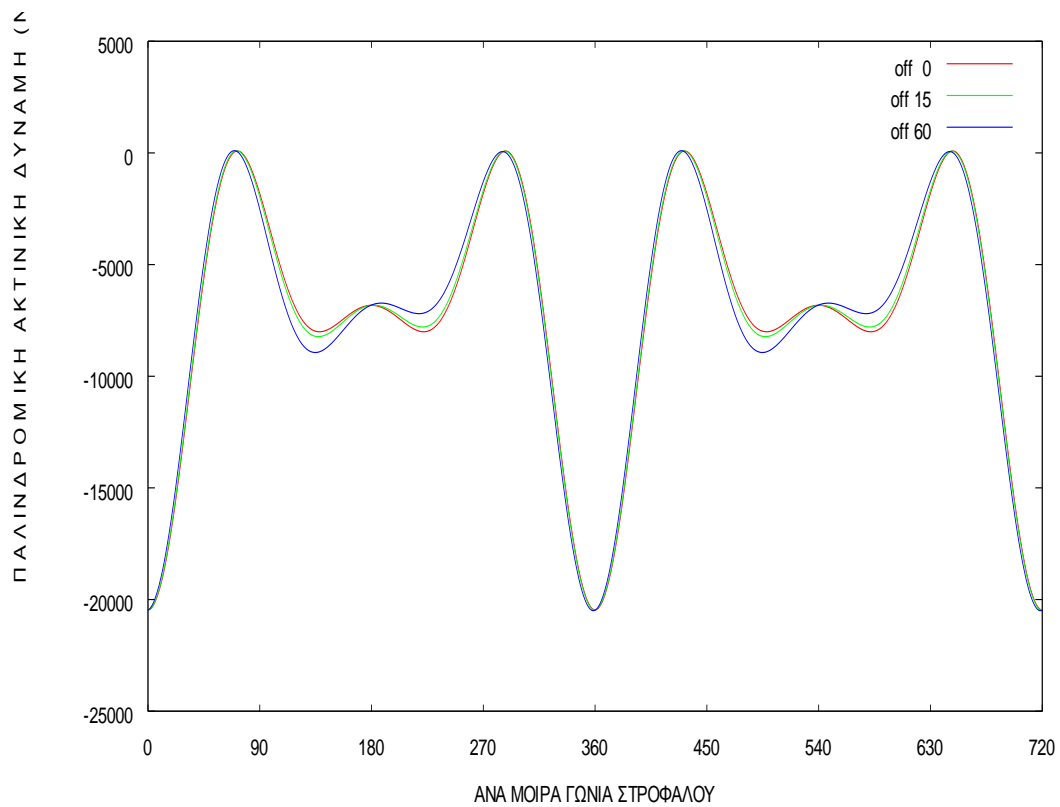
**Σχ.7.161** Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



Σχ. 7.162 Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

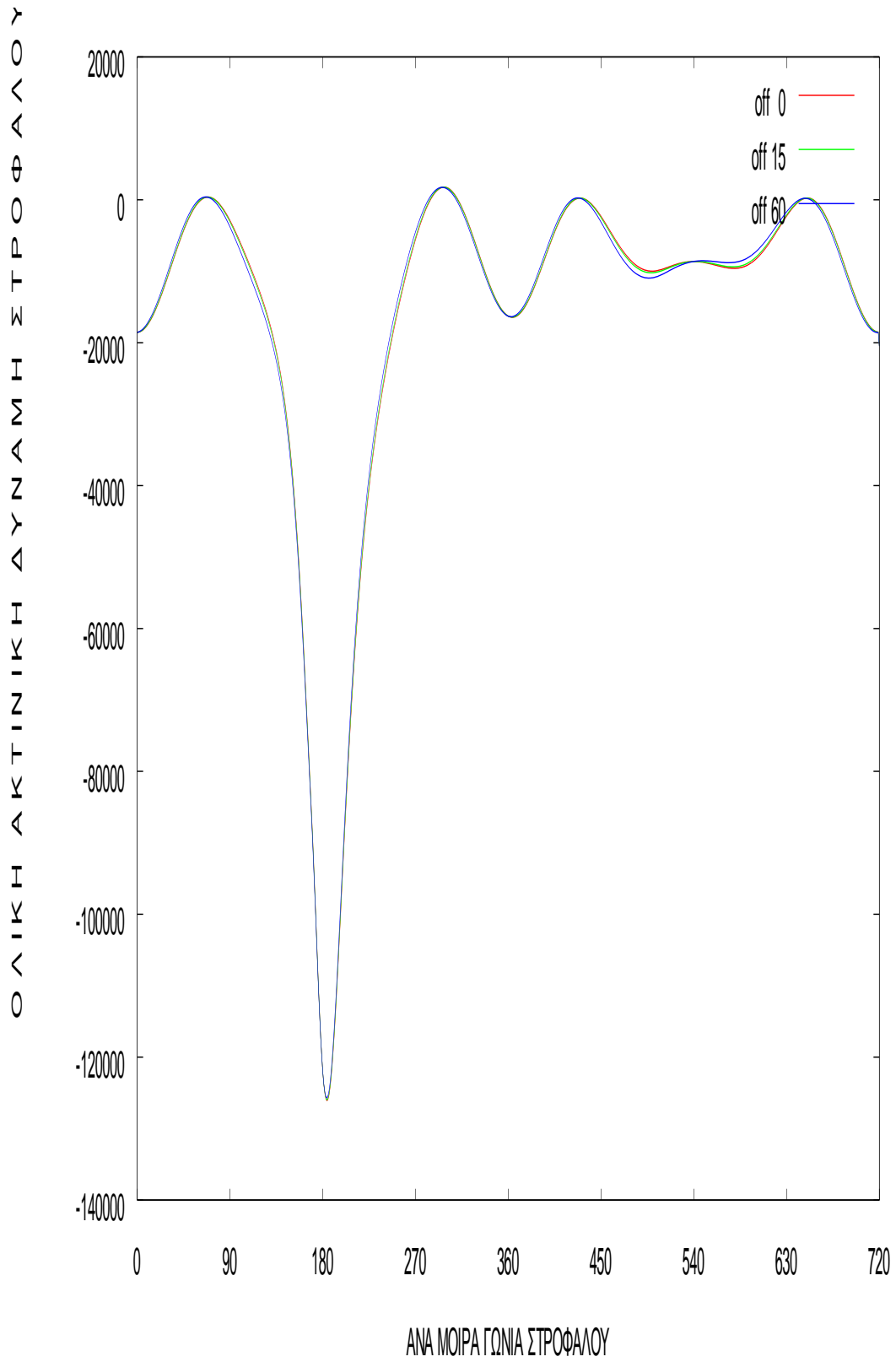


**Σχ.7.163** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

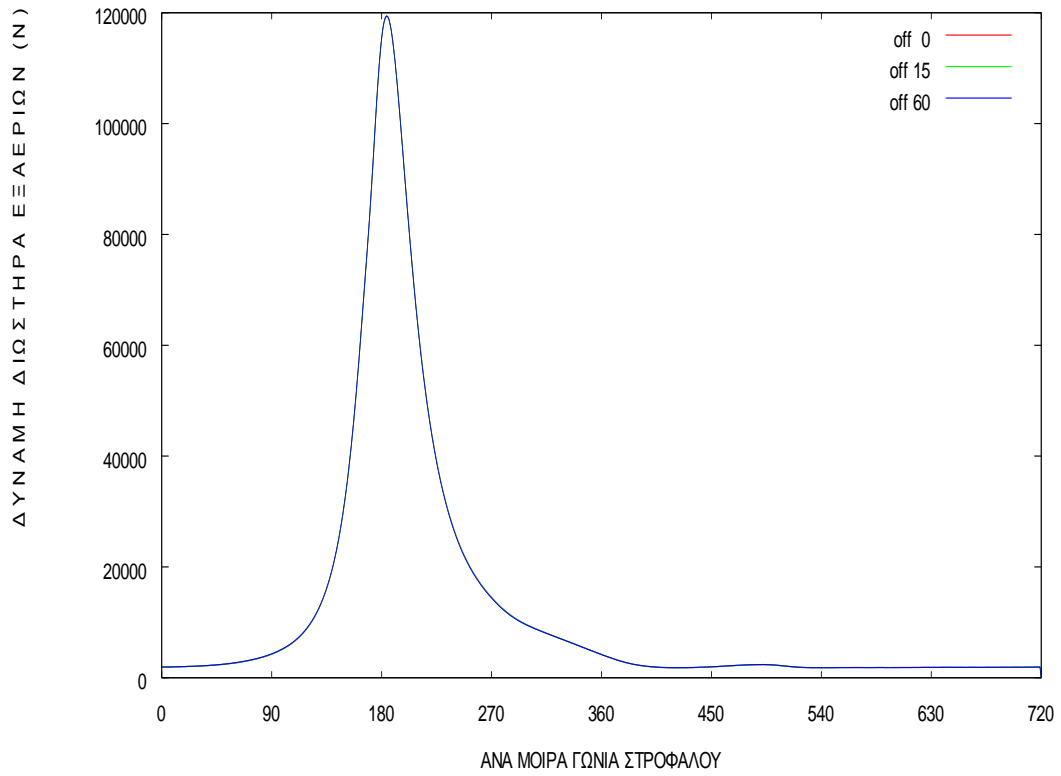


**Σχ.7.164** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

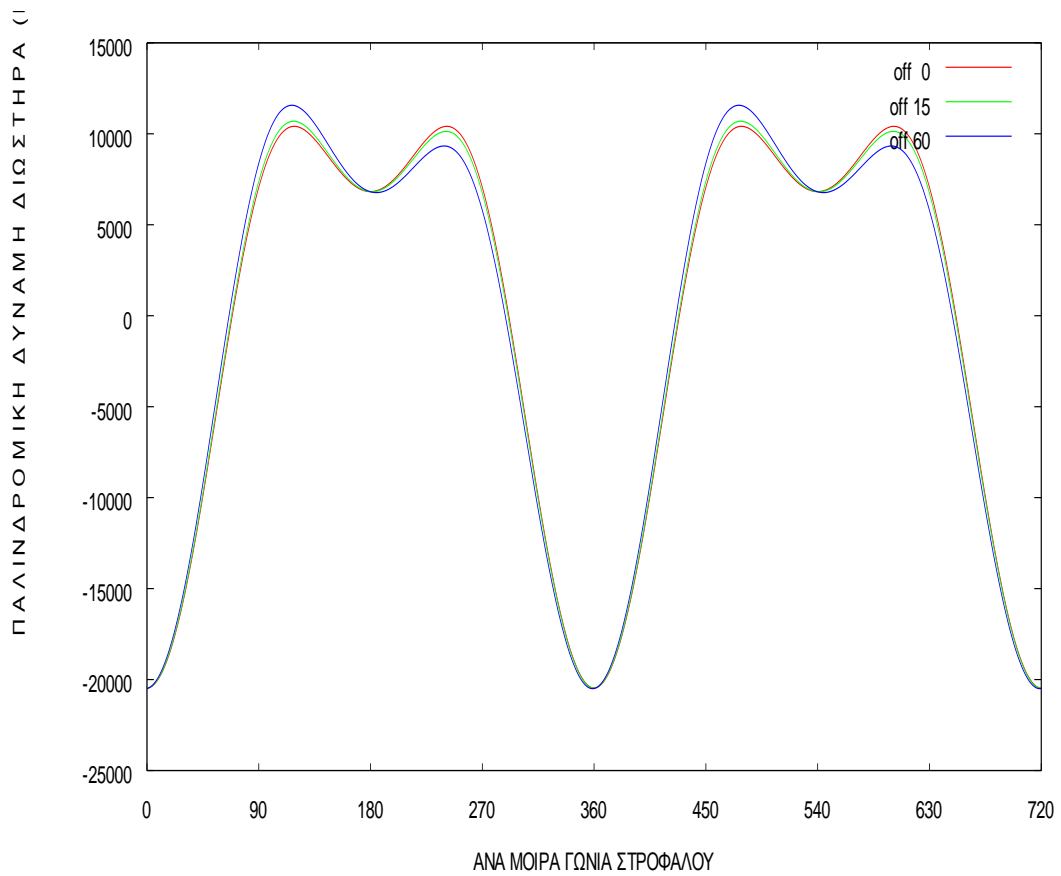




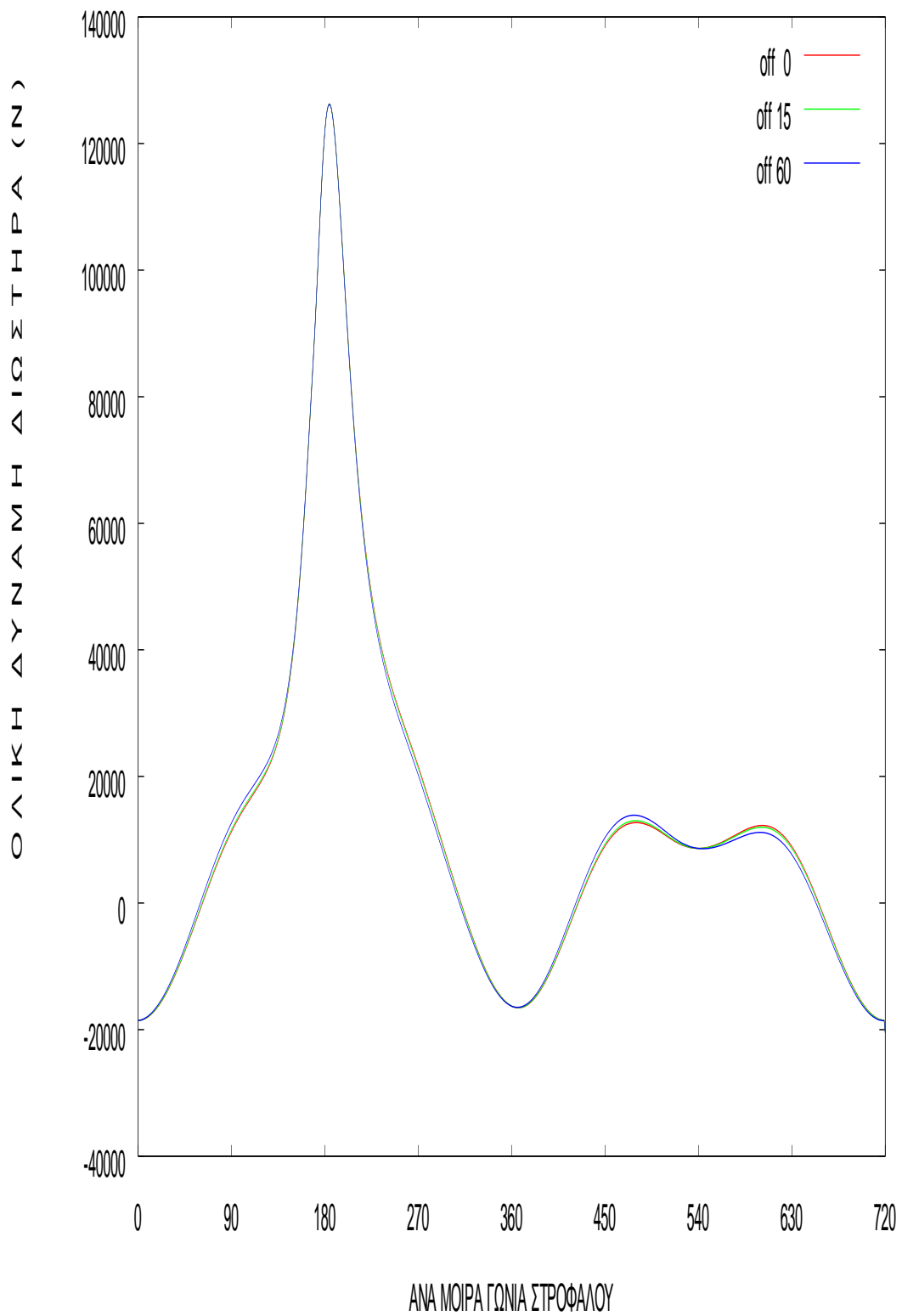
**Σχ.165 Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



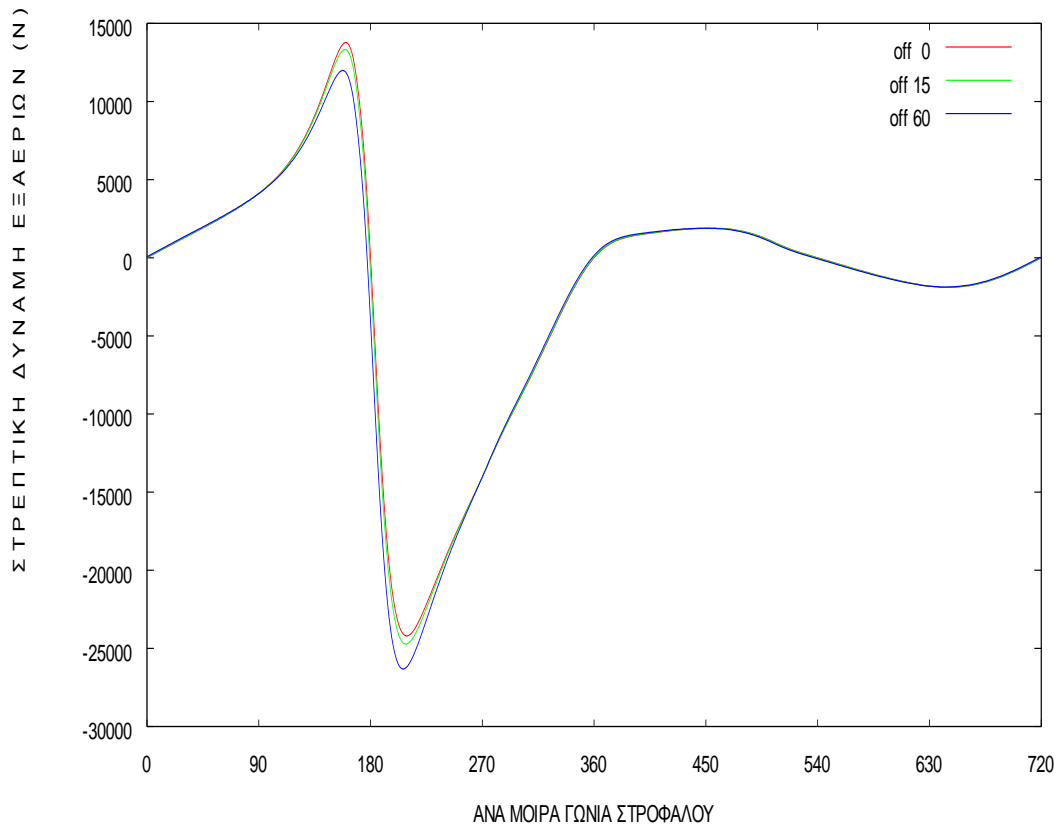
**Σχ.166 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



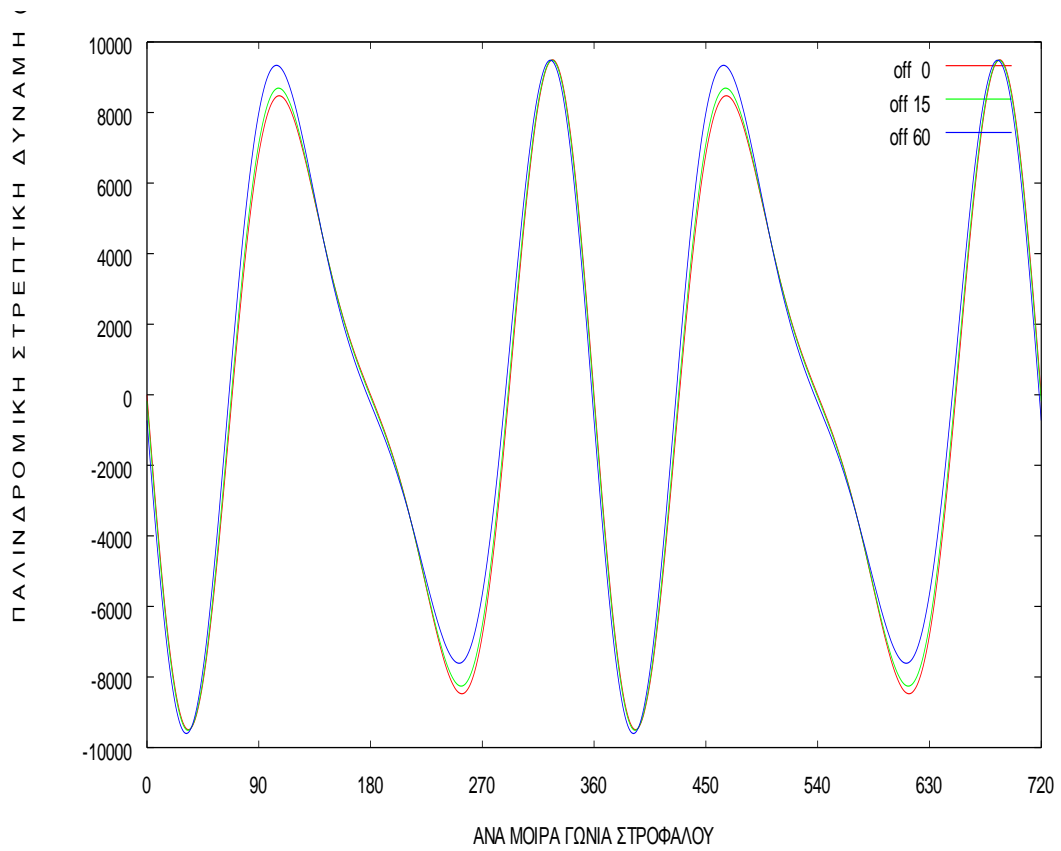
**Σχ.7.167 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



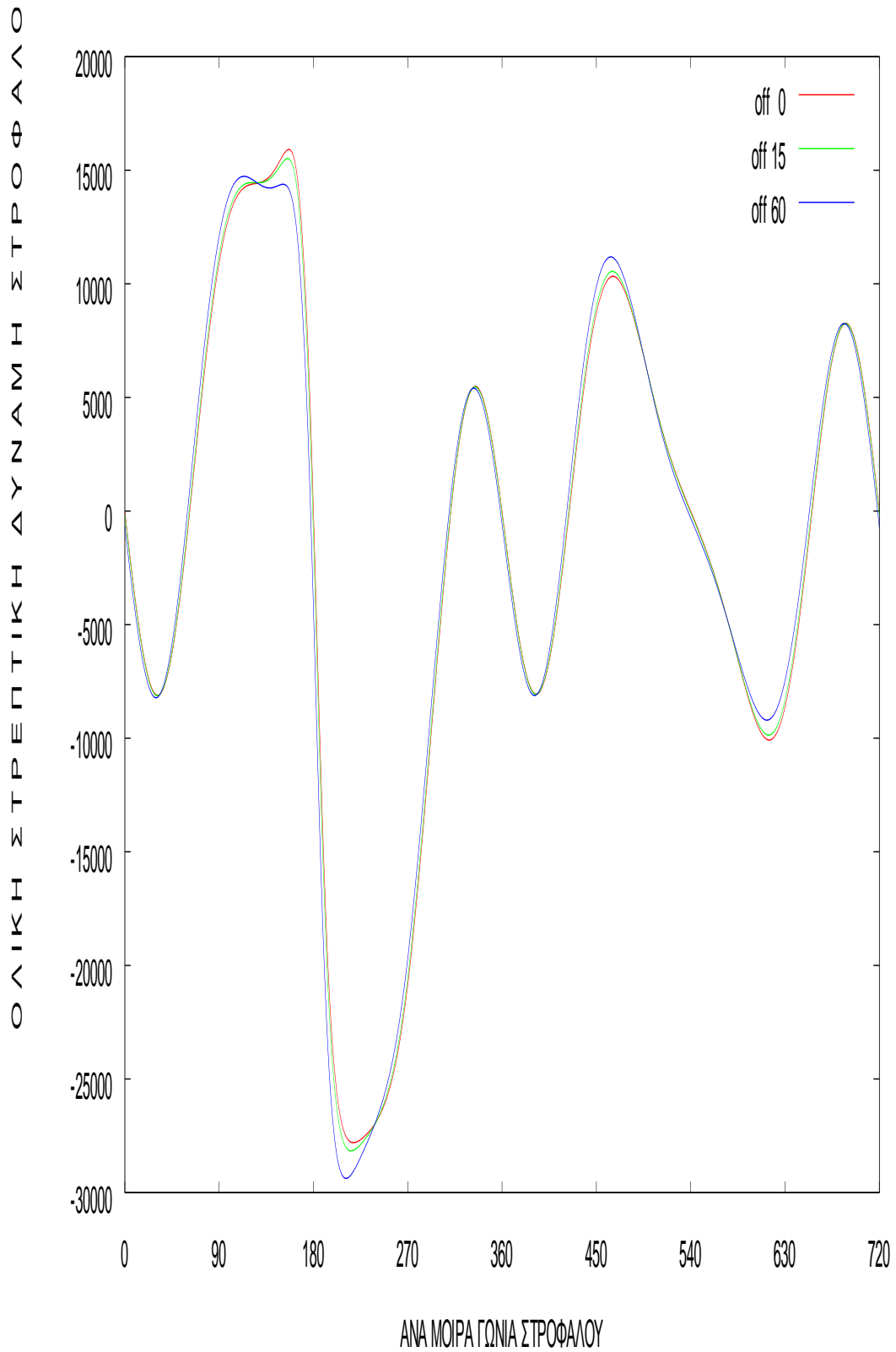
**Σχ.168 Συνολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.169 Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.170 Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.171** Ολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

Η εφαρμογή εκκεντρότητας μεγέθους απο 0 – 60mm επιδρά στην αύξηση της συνολικής δύναμης παρειάς γύρω από το ΑΝΣ αισθητά όπου βέβαια ένα μέρος της οφείλεται και στη καύση, ενώ το ίδιο αισθητή είναι και η μείωση αυτής όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΚΝΣ. Η αναφερόμενη αυξομείωση είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι και η εκκεντρότητα που εφαρμόζεται.

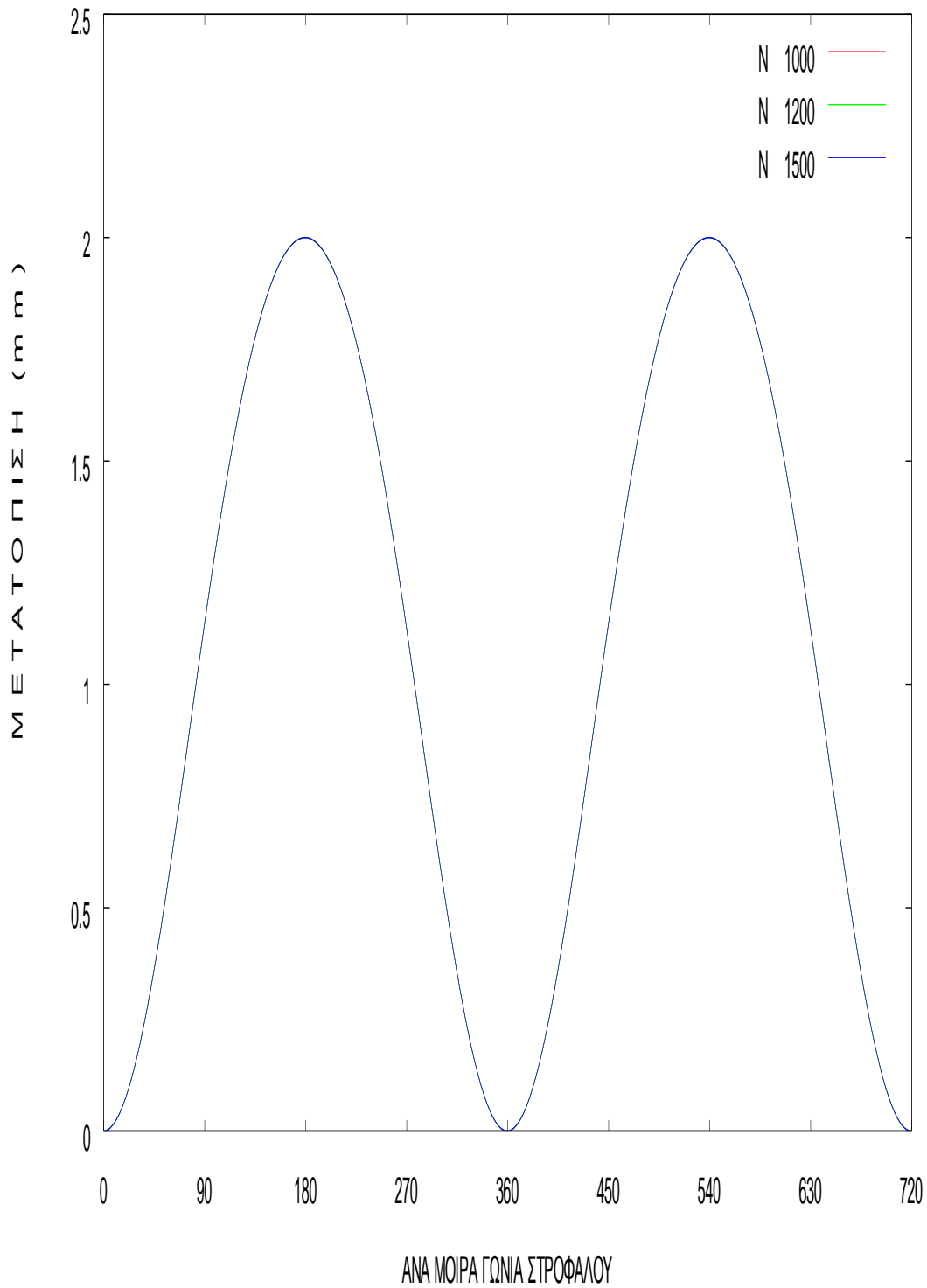
Επίσης η συνολική στρεπτική δύναμη μειώνεται όσο αυξάνει το μέγεθος εκκεντρότητας ενώ για μεγάλα μεγέθη (offset=60mm) σταθεροποιείται για κάποιες μοίρες στροφάλου κοντά στο ΑΝΣ και αυξάνει στο ΚΝΣ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της ροπής ενώ για τις ίδιες μοίρες στροφάλου όπως και στη στρεπτική δύναμη παραμένει σταθερή και δεν αυξάνει αρνητικά.

Από το διάγραμμα της ταχύτητας εμβόλου παρατηρείται ότι για μοίρες στροφάλου από  $0^{\circ}$  έως  $90^{\circ}$  αυξάνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η τριβή, ενώ για τις  $90^{\circ}$  –  $270^{\circ}$  ελαττώνεται η ταχύτητα με αντίστοιχη μείωση αυτής.

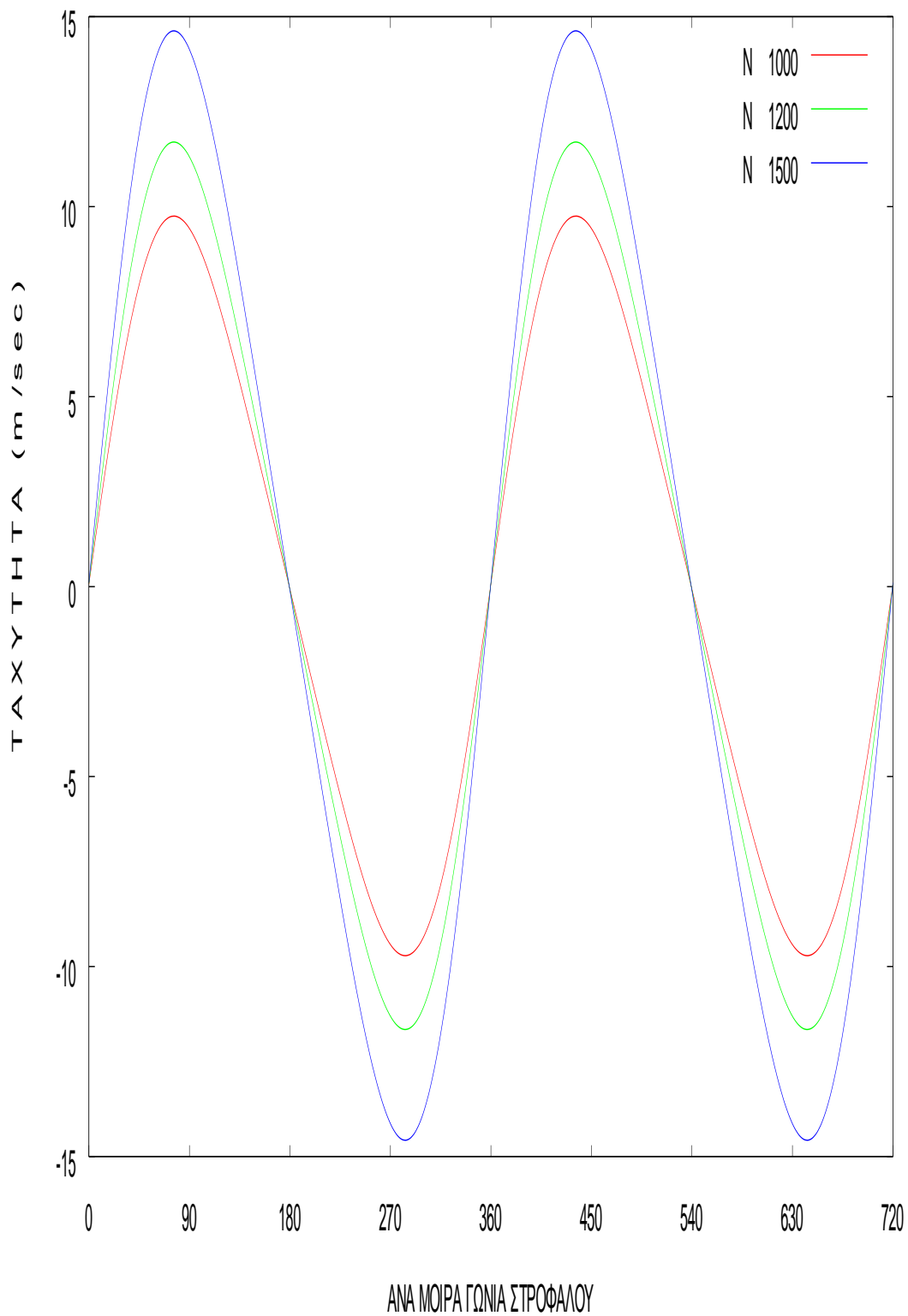
Τέλος η πλευρική δύναμη στην κατεύθυνση ώσης του εμβόλου ελαττώνεται σε ένα βαθμό που αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους της εκκεντρότητας όπου εξαιτίας αυτής η πλευρική δύναμη στην ελεύθερη πλευρά του εμβόλου (anti-thrust side) αυξάνει.

**7.2.2 Διαγράμματα Εφαρμογής Εκκεντρότητας Στροφάλου – Παραμετρική Ανάλυση.  
Επίδραση ταχύτητας περιστροφής N (1000, 1200, 1500 rpm)**

**Για εκκενρότητα offset = 10mm**

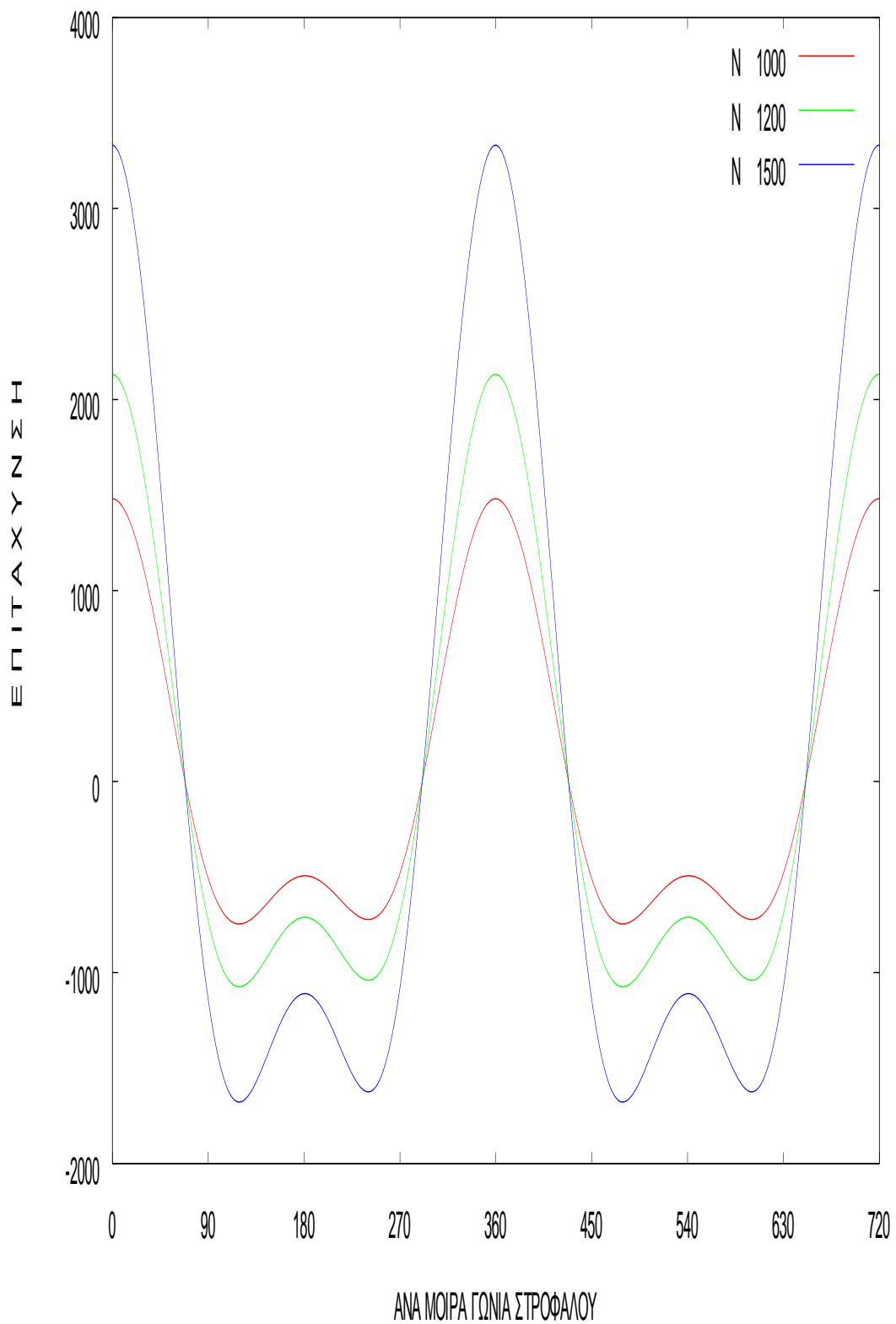


**Σχ. 7.172 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

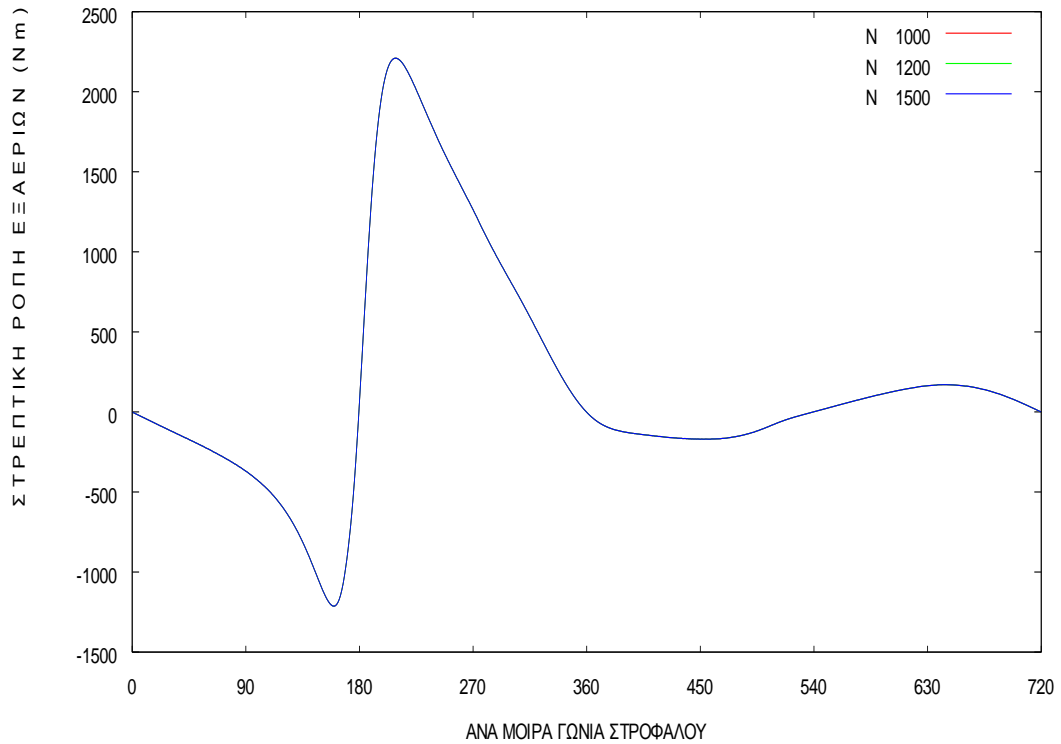


**Σχ.7.173 Ταχύτητα σε ( m/s ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

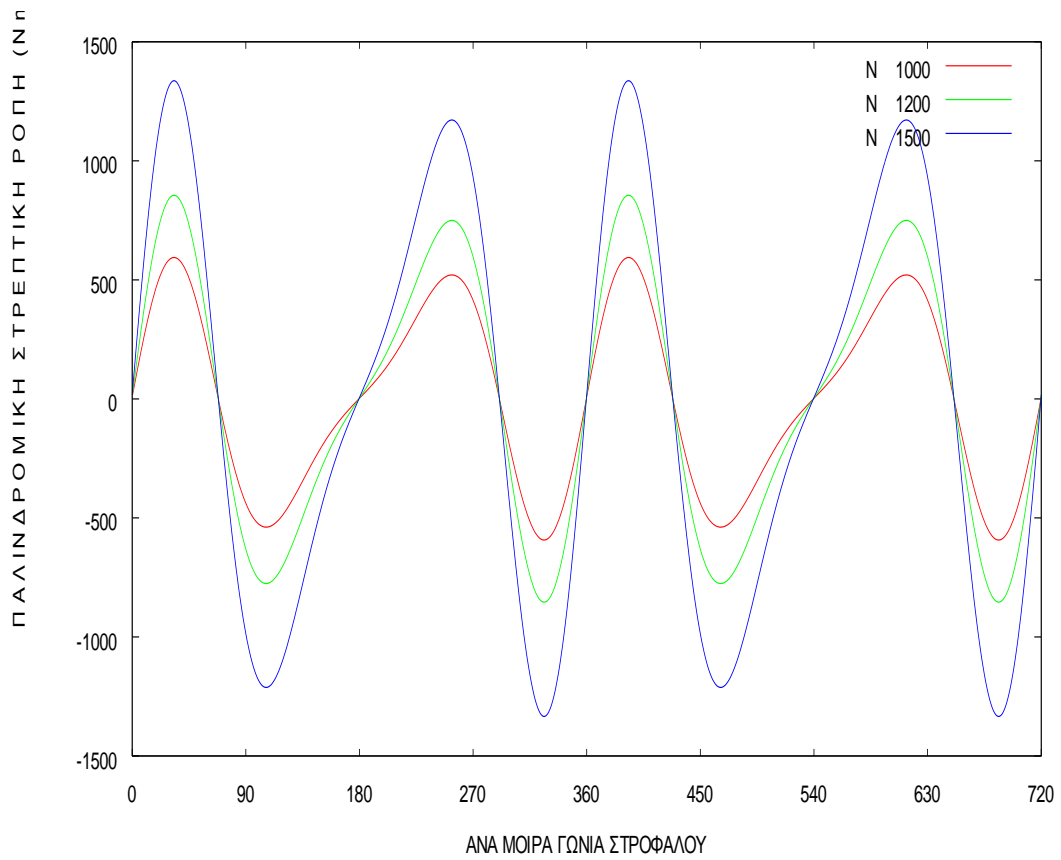




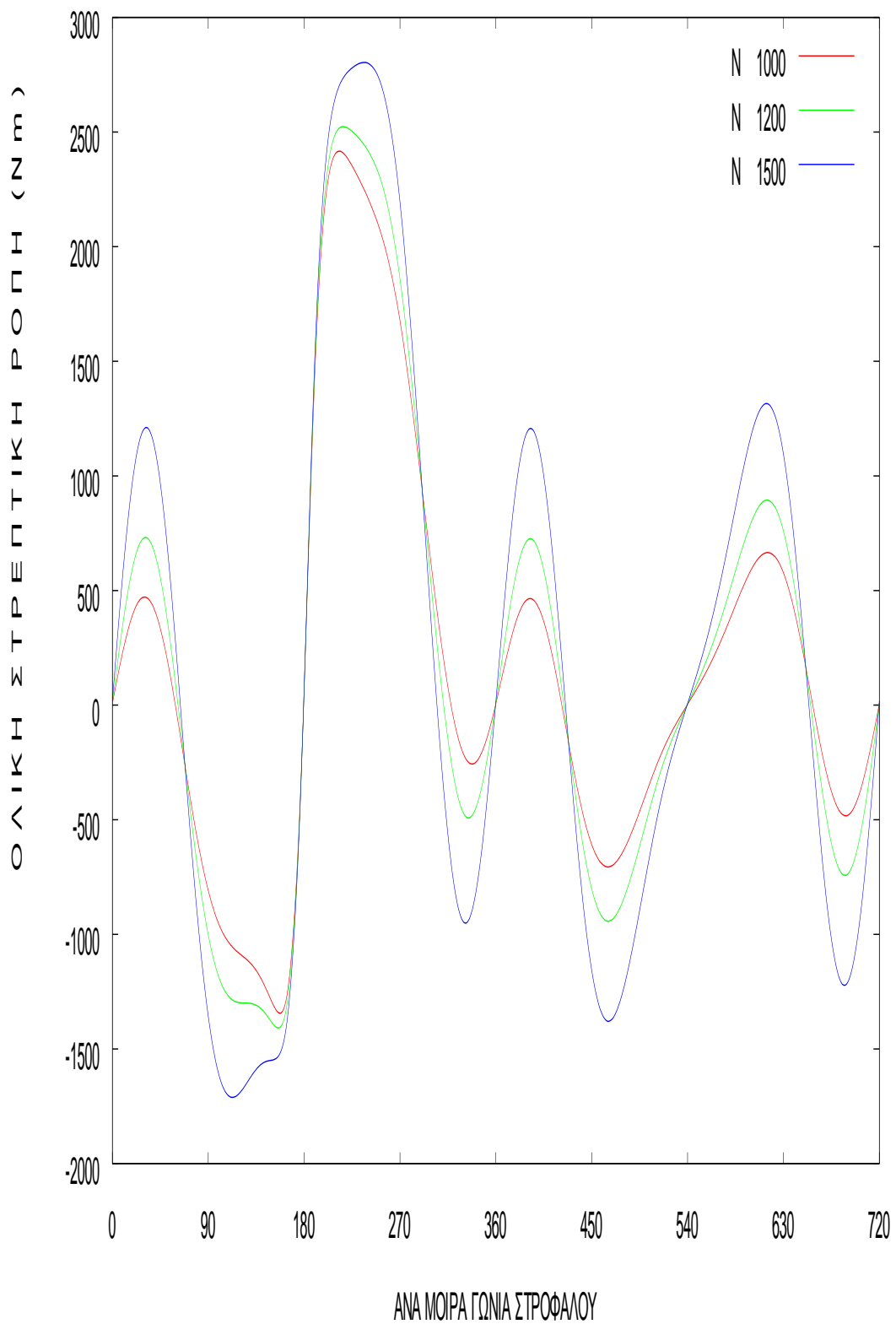
Σχ.7.174 Επιτάχυνση σε ( $m/s^2$ ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



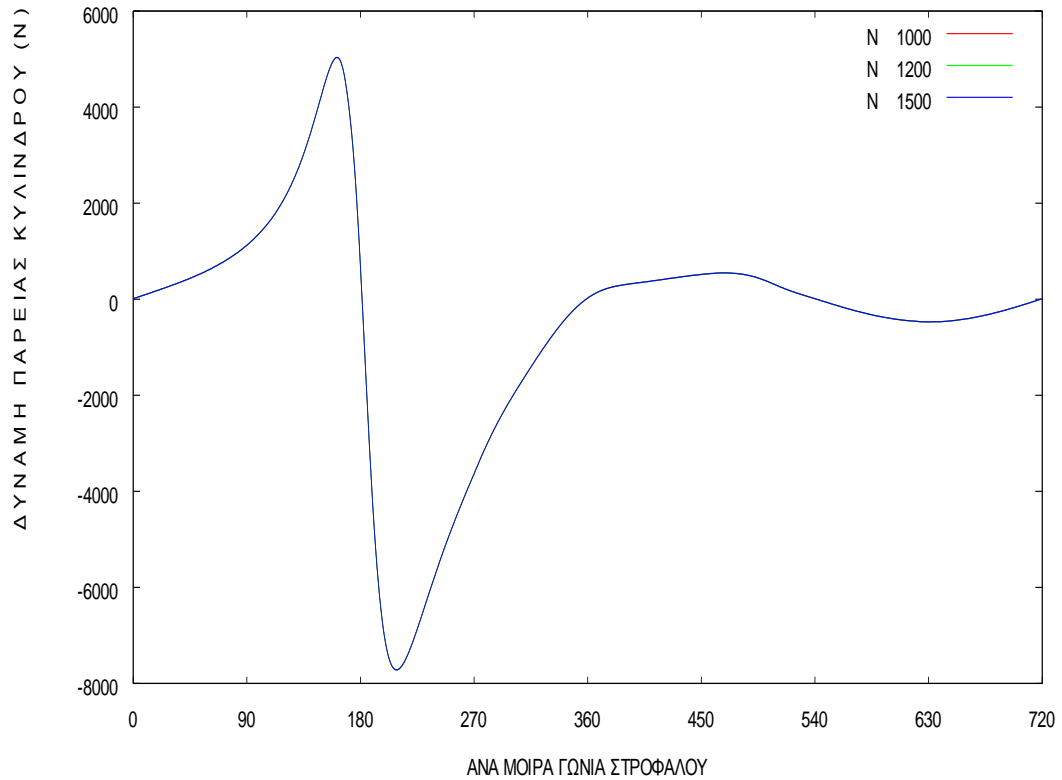
**Σχ.7.175 Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



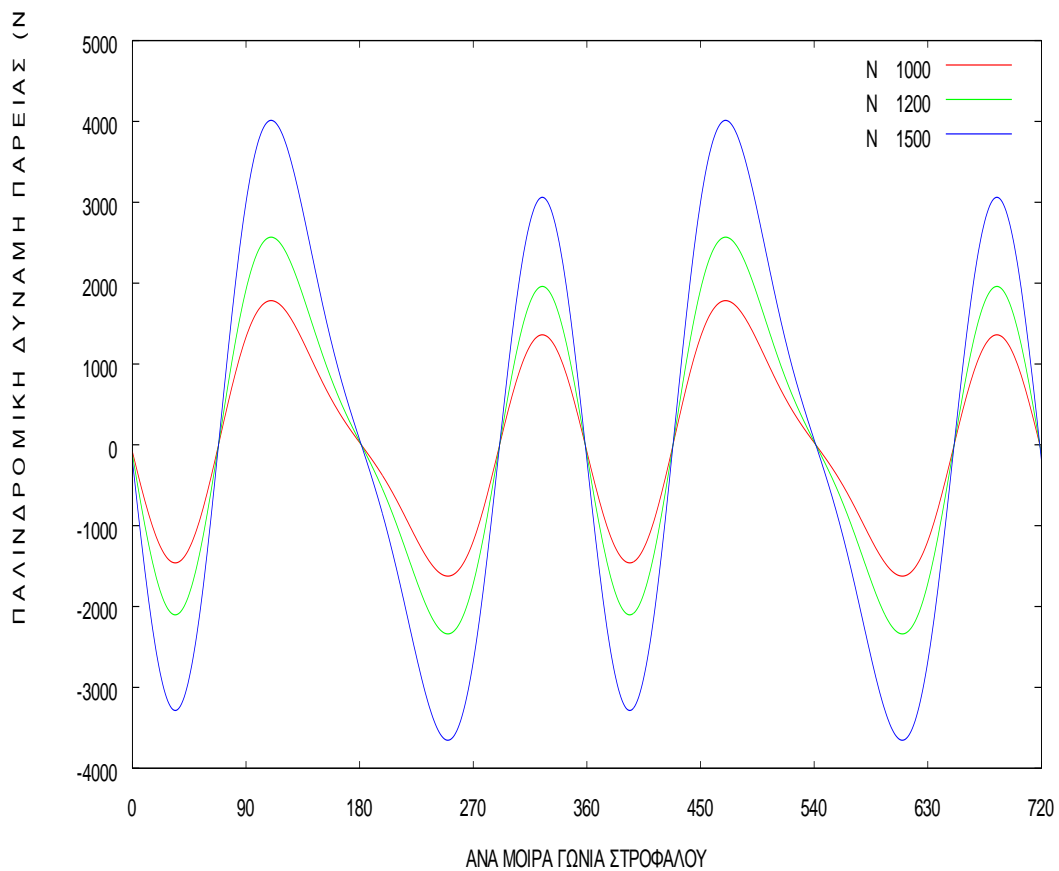
**Σχ.7.176 Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



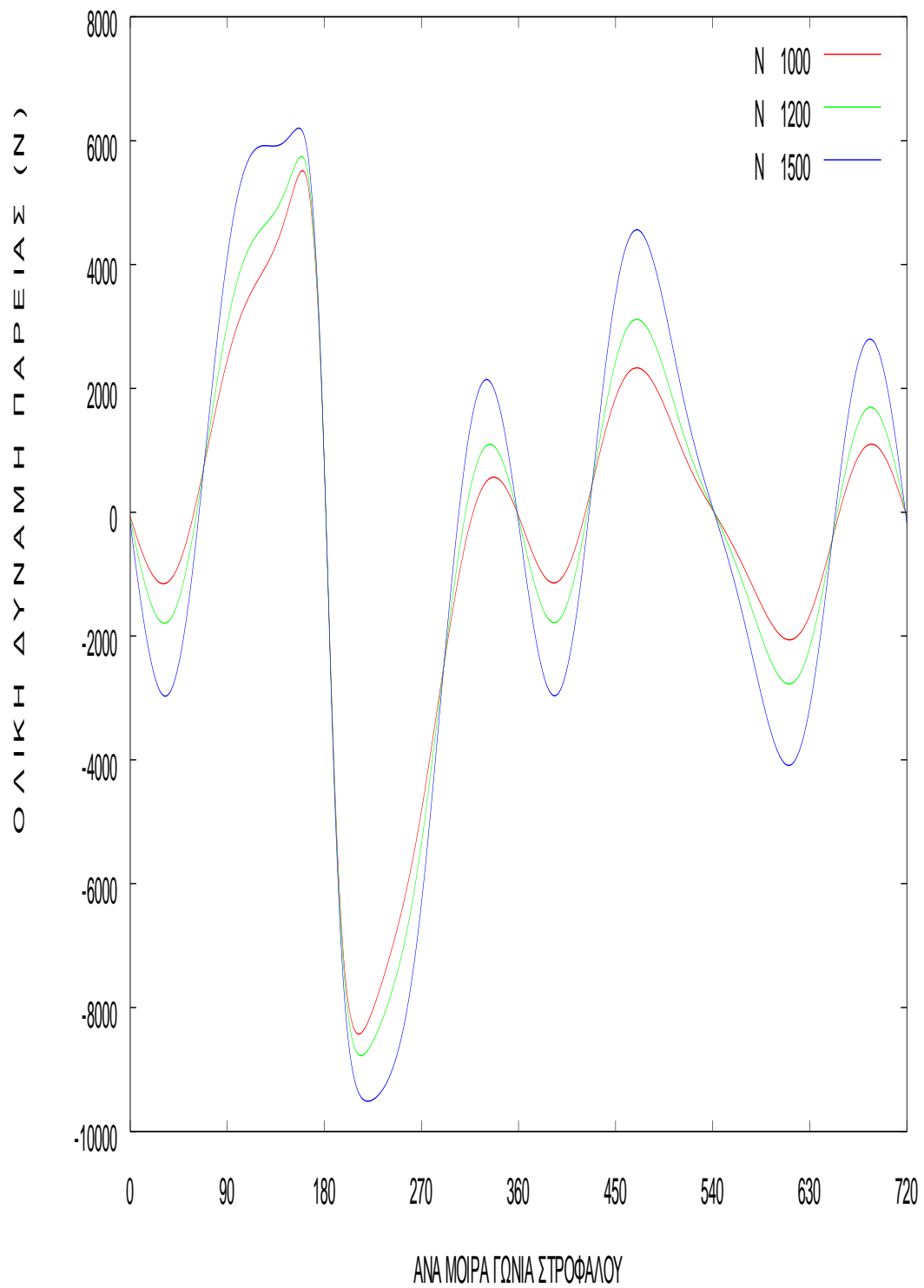
**Σχ.7.177** Ολική στρεπτική ροπή σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



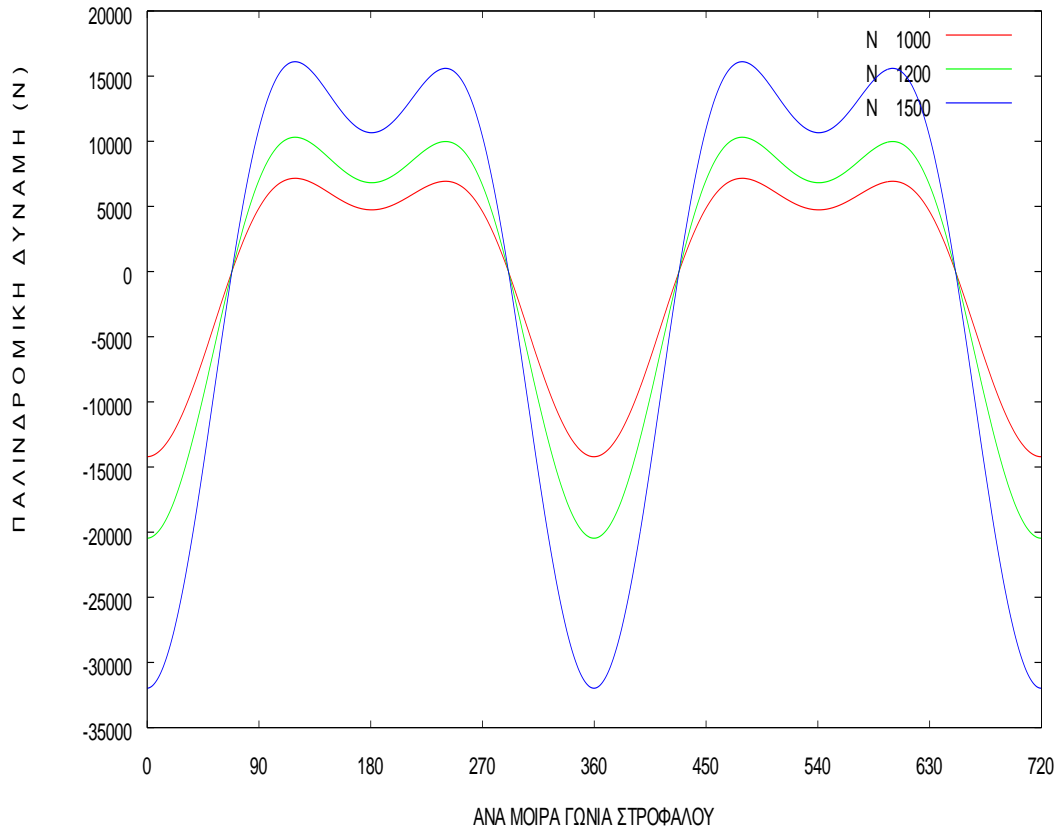
**Σχ. 7.178 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



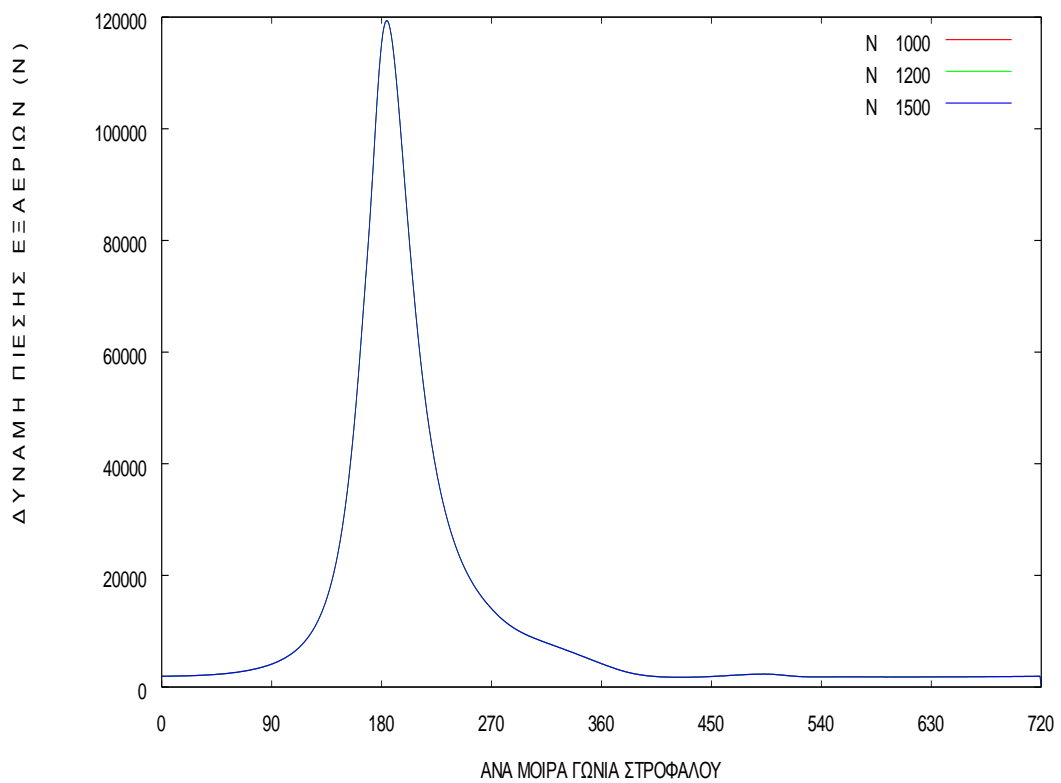
**Σχ. 7.179 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



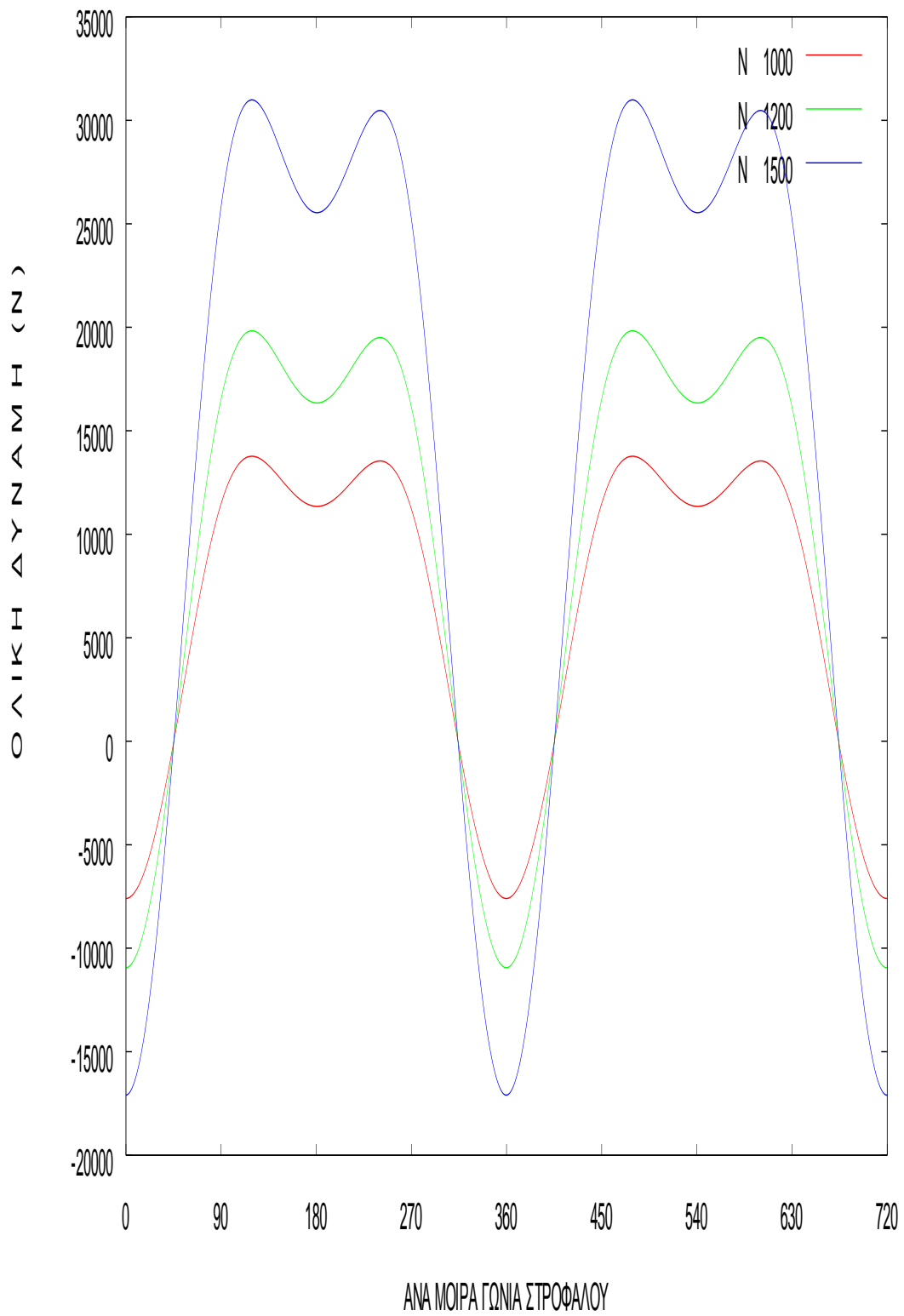
**Σχ.7.180** Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



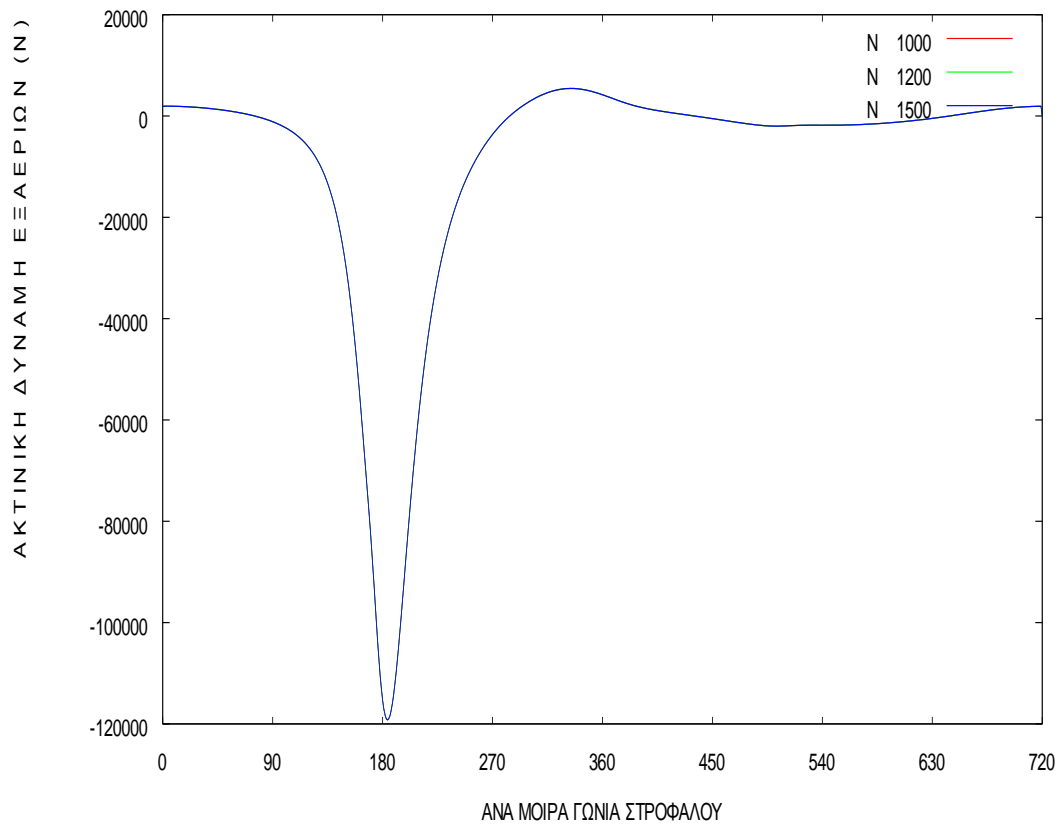
**Σχ.7.181 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



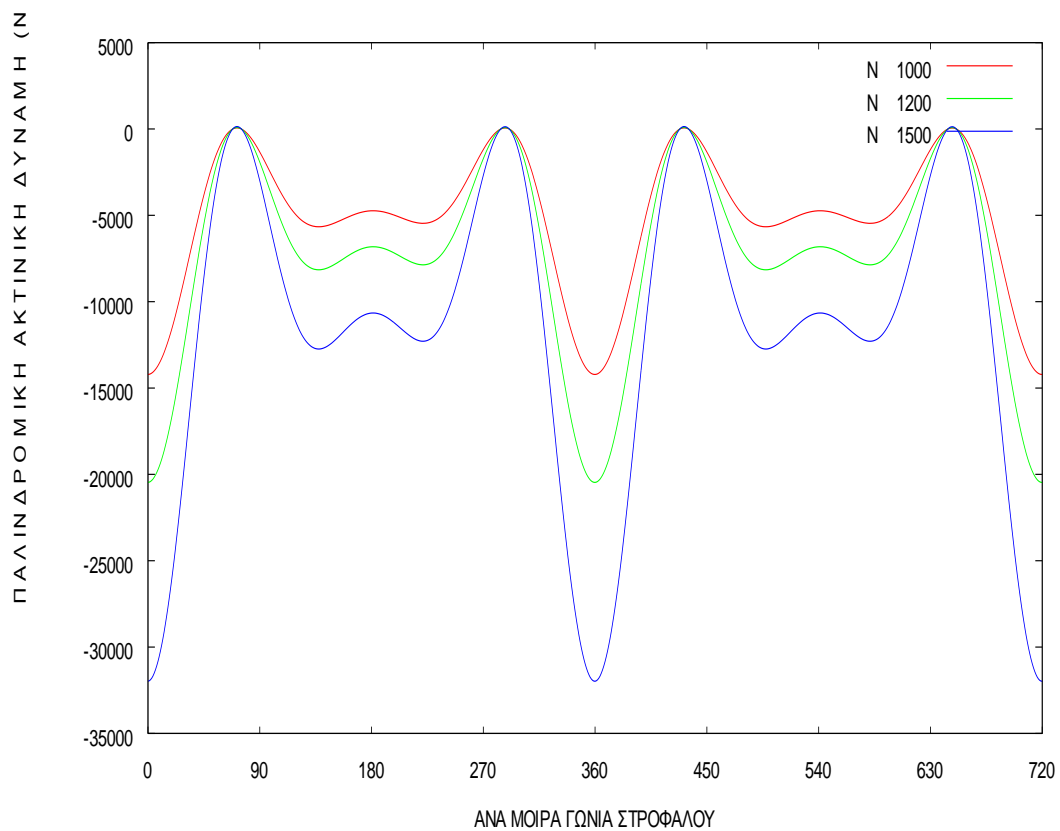
**Σχ.7.182 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ. 7.183** Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

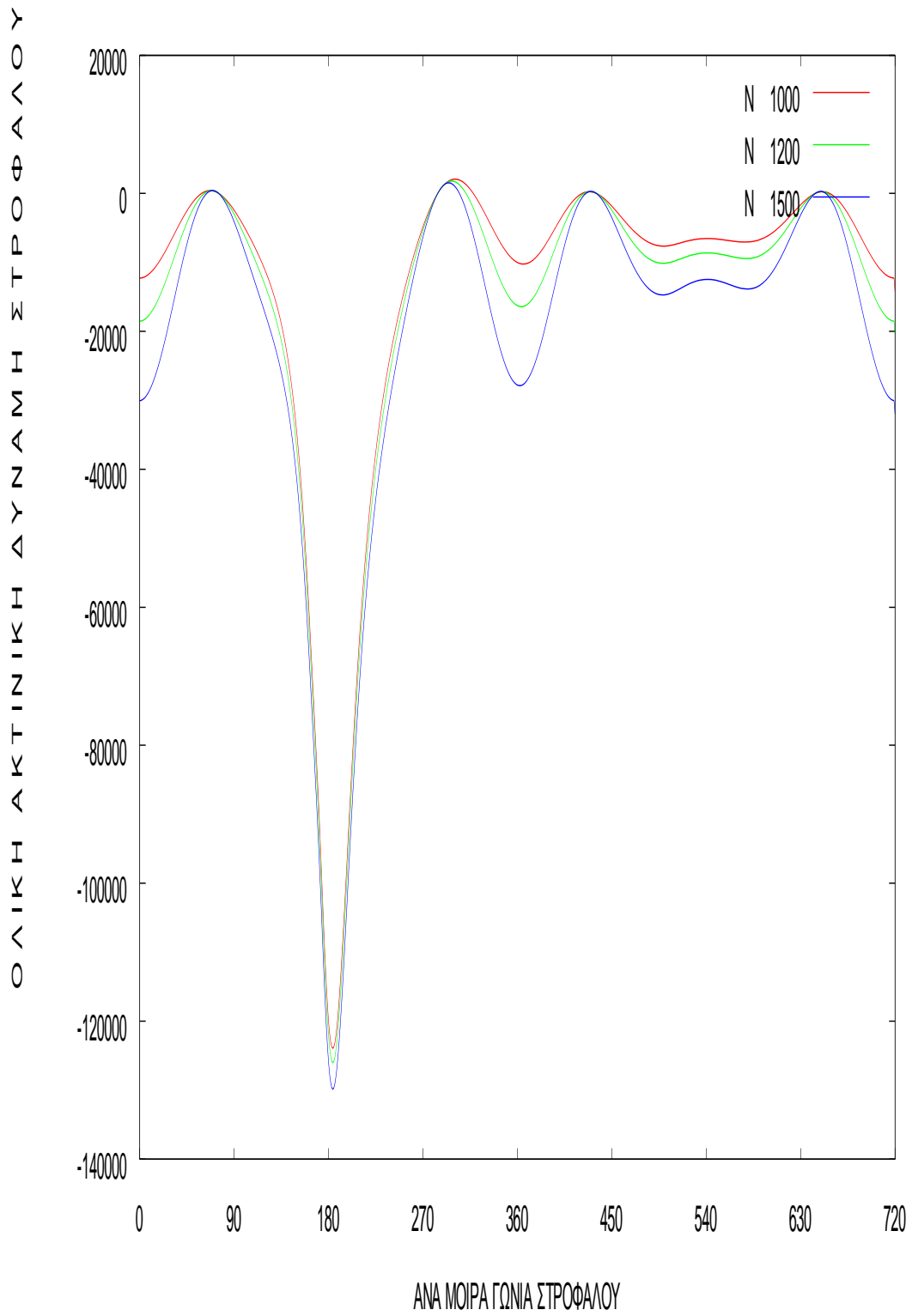


**Σχ.7.184** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

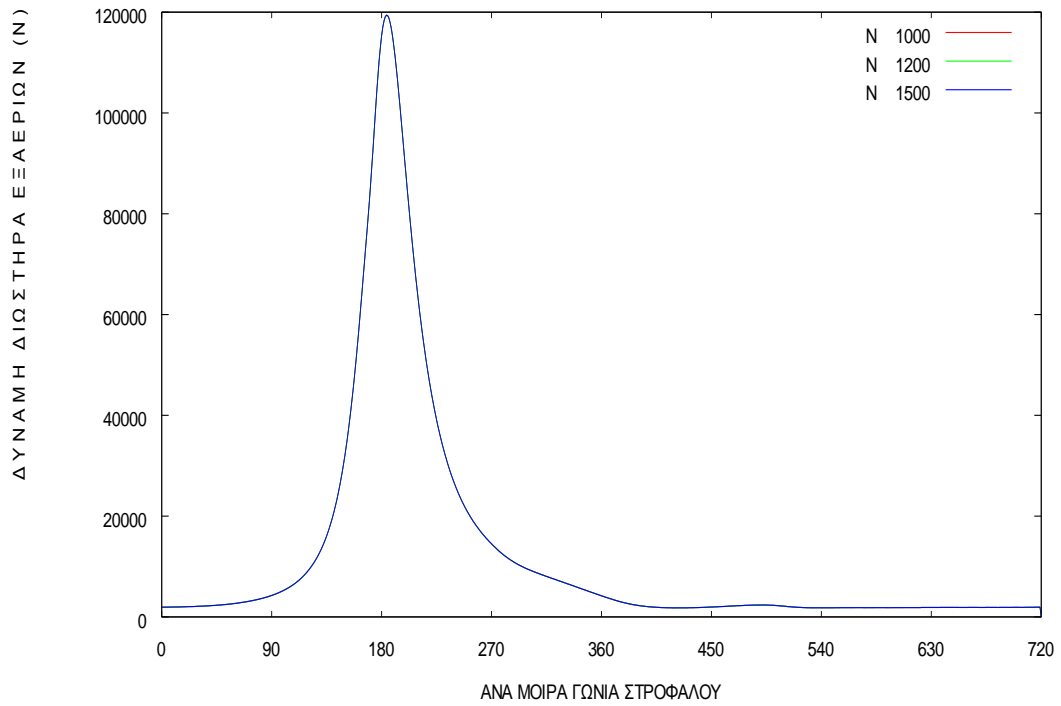


**Σχ.7.185** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

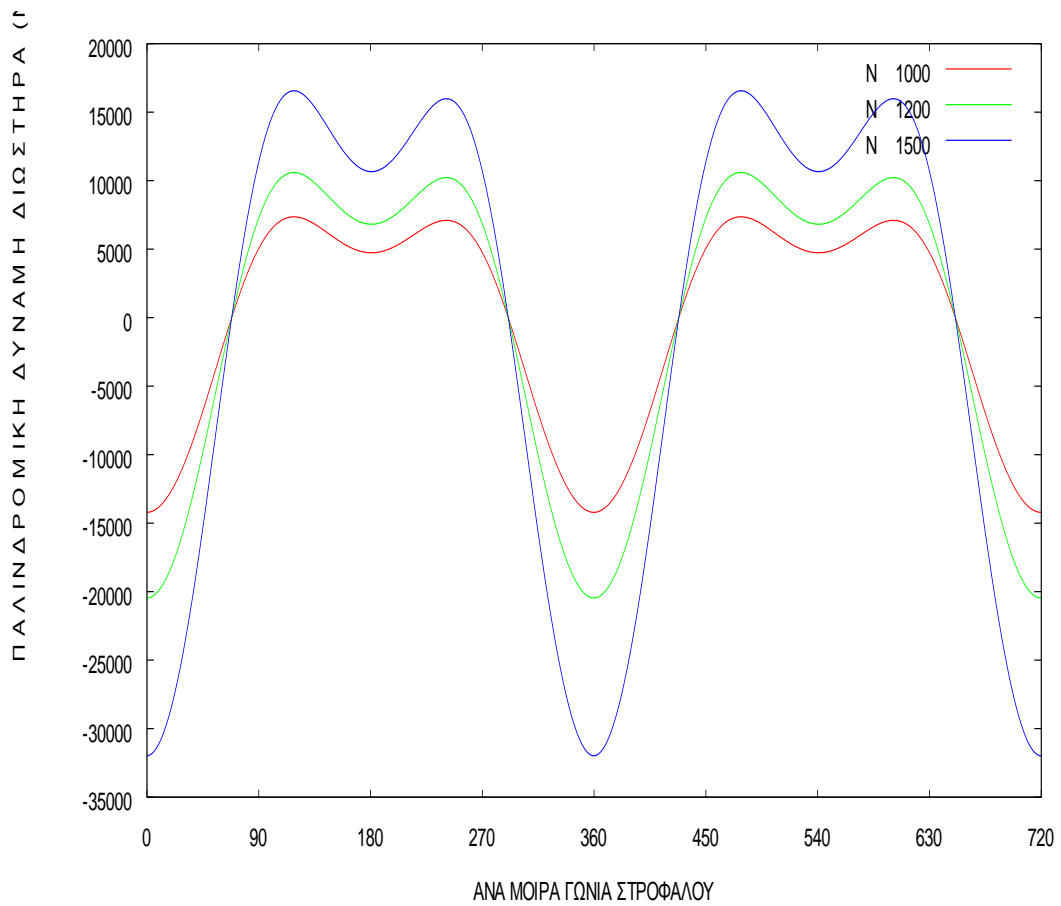




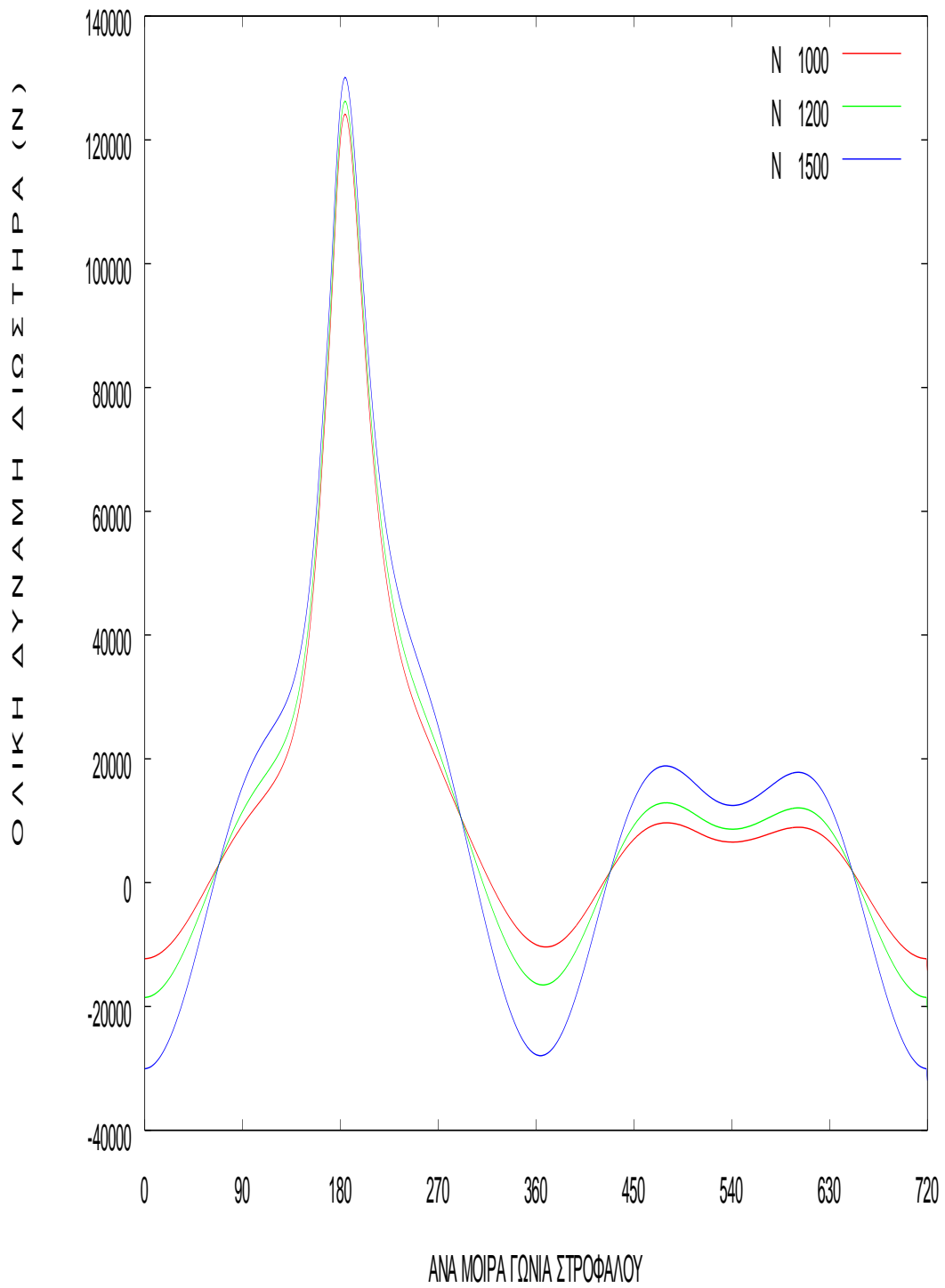
Σχ.186 Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



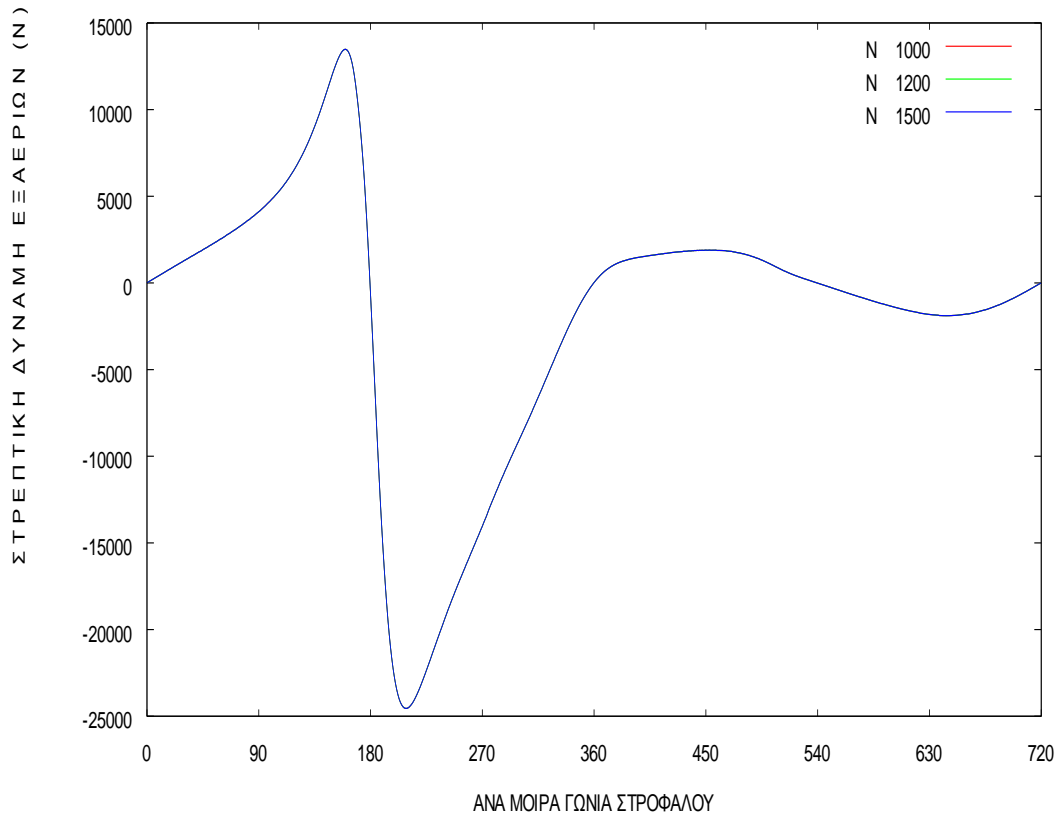
**Σχ.187 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



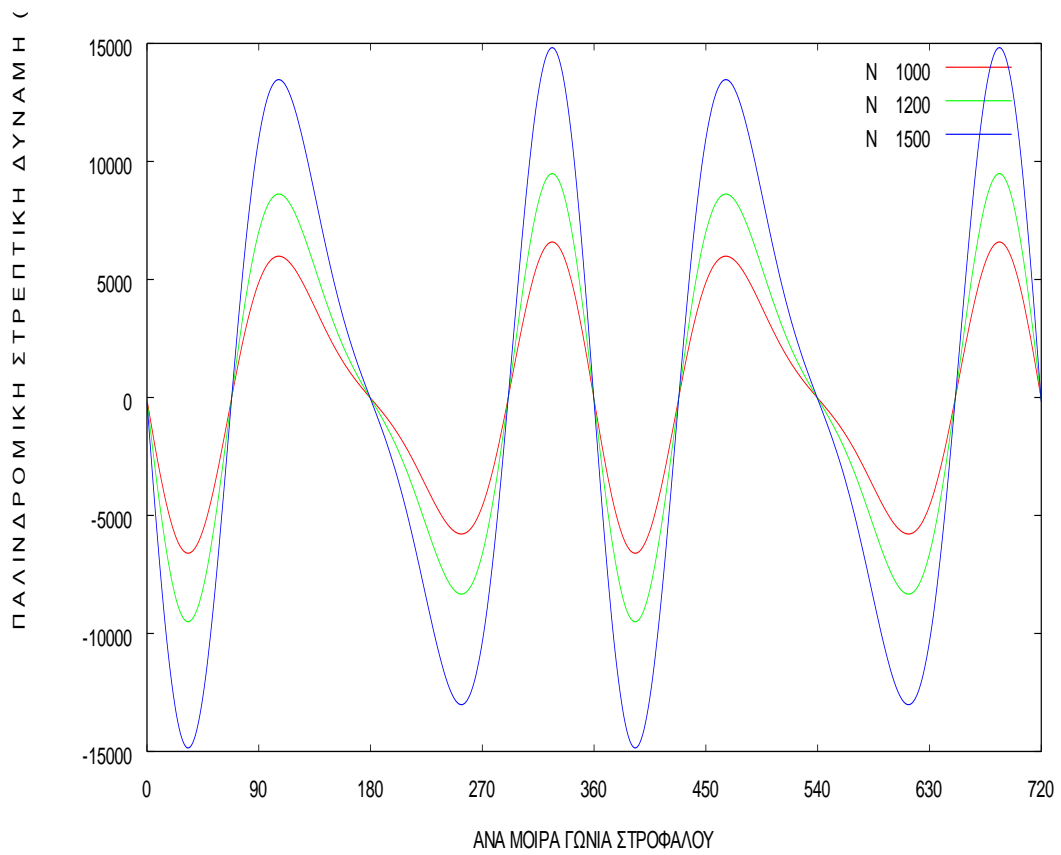
**Σχ.7.188 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



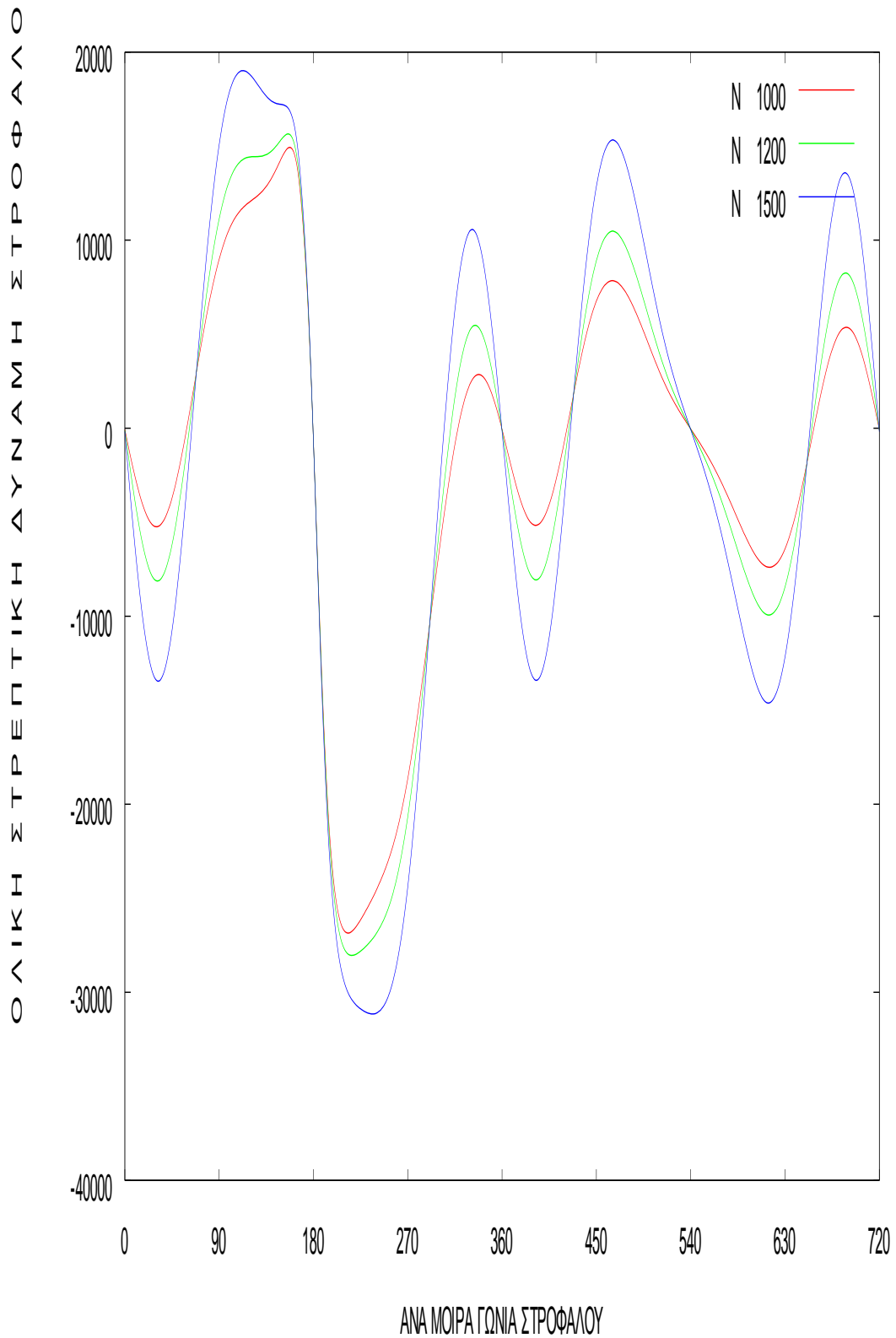
**Σχ.7.189 Ολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.7.190** Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.191** Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

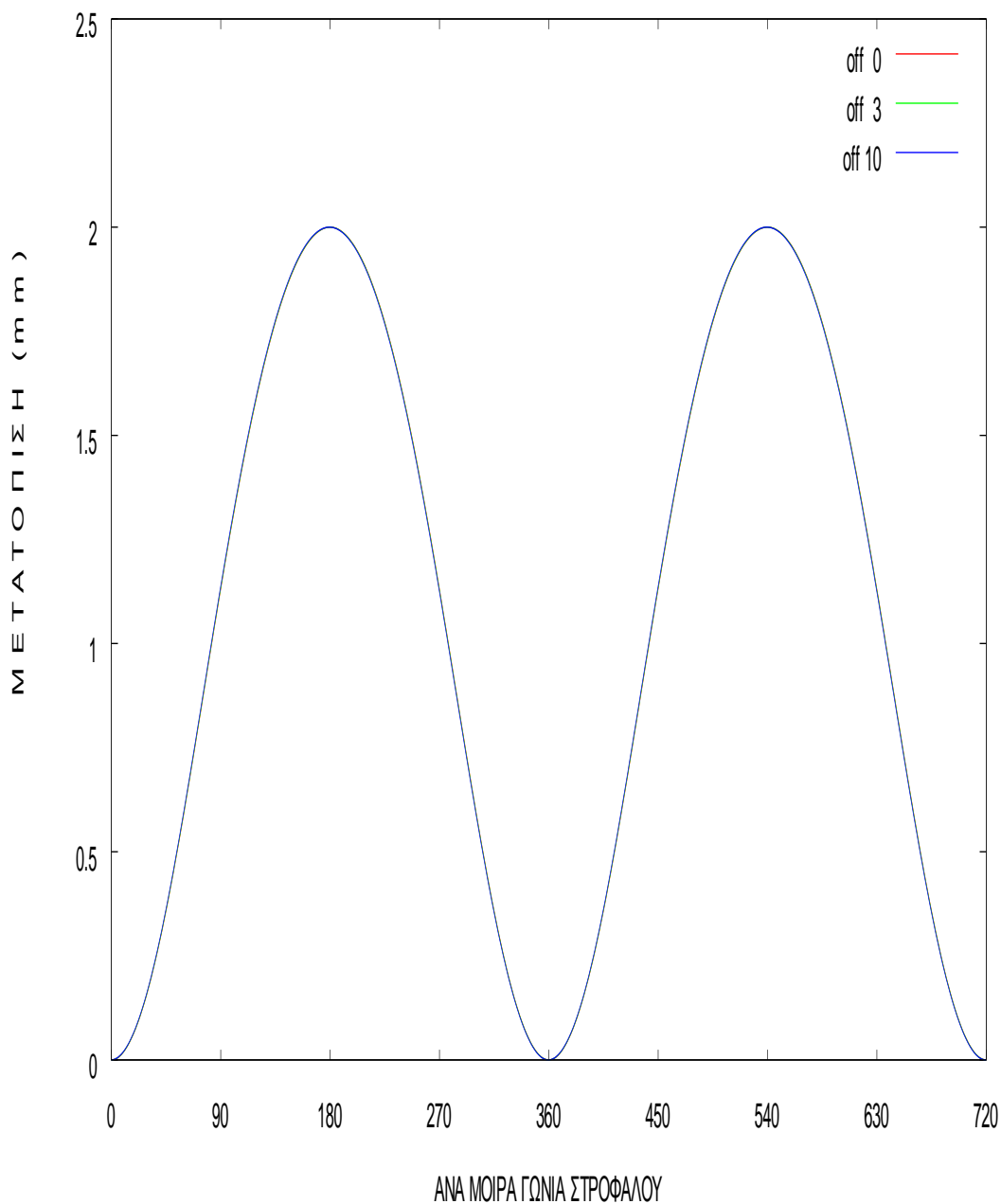


**Σχ.7.192** Ολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

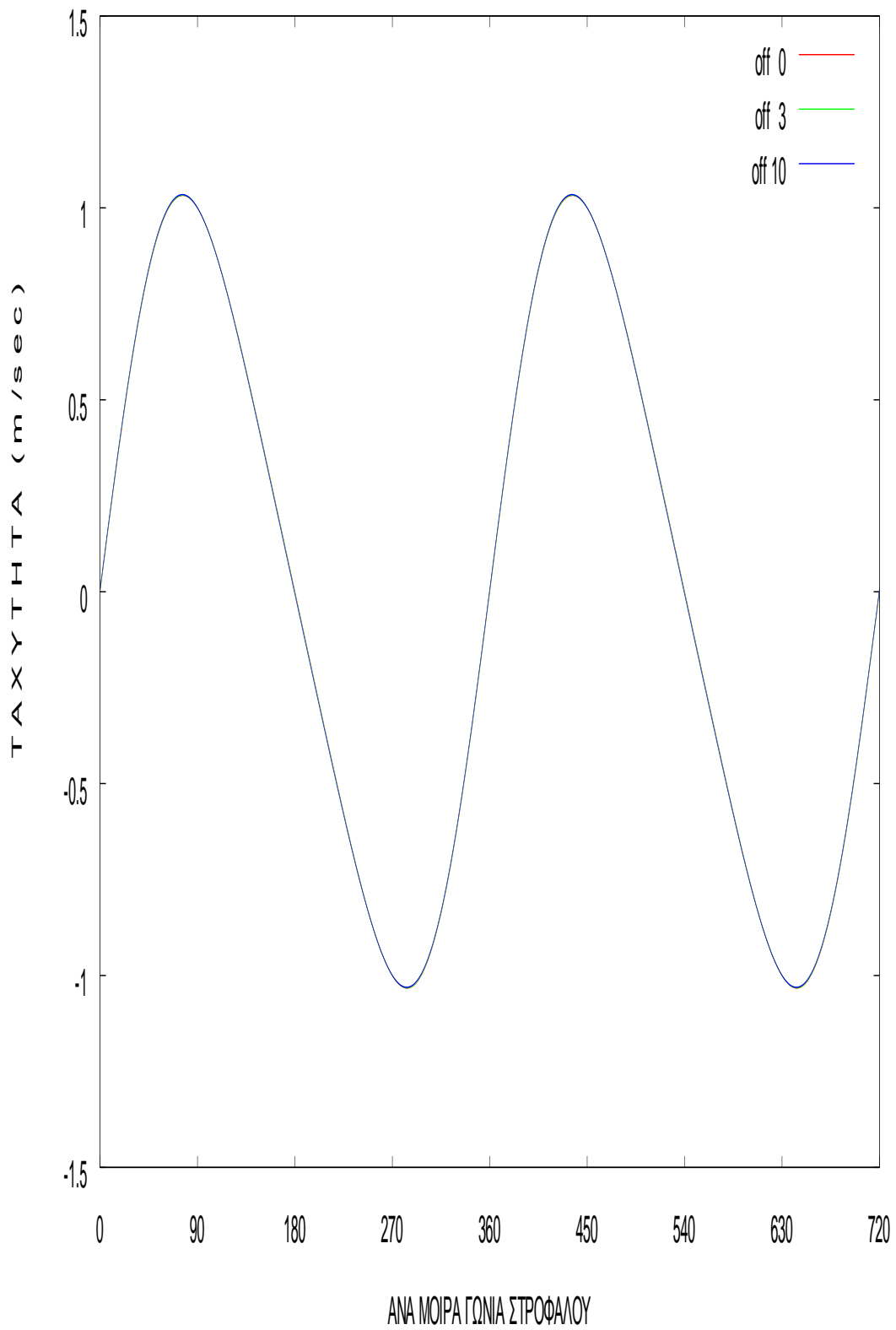
### 7.2.3 Εκκεντρότητα κομβίου στροφάλου – Ανάλυση επίδρασης μεγέθους μαζών κινηματικού μηχανισμού.

Στη παρούσα ενότητα εξετάζεται η συμπεριφορά του μηχανισμού με μειωμένες της αρχικές μάζες των επιμέρους εξαρτημάτων κατά 50% ενώ όλα τα άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παραμένουν τα ίδια. Δηλαδή μάζα εμβόλου  $m_e = 2,5 \text{ kgr}$  , μάζα διωστήρα  $m_\delta = 3,20 \text{ kgr}$  , μάζα στροφάλου  $m_\sigma = 2,5 \text{ kgr}$ .

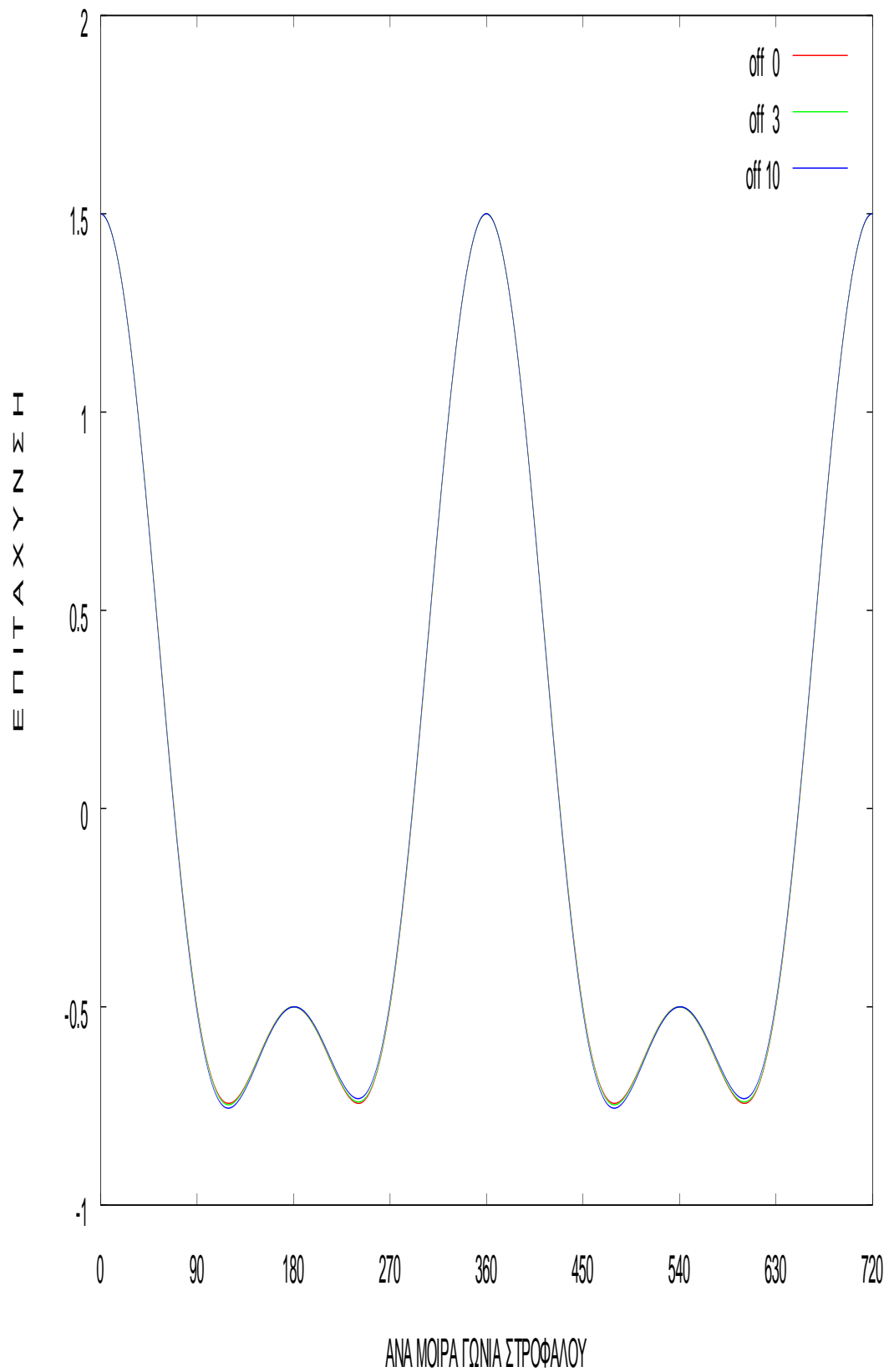
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



**Σχ. 7.193 Μετατόπιση σε (mm) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

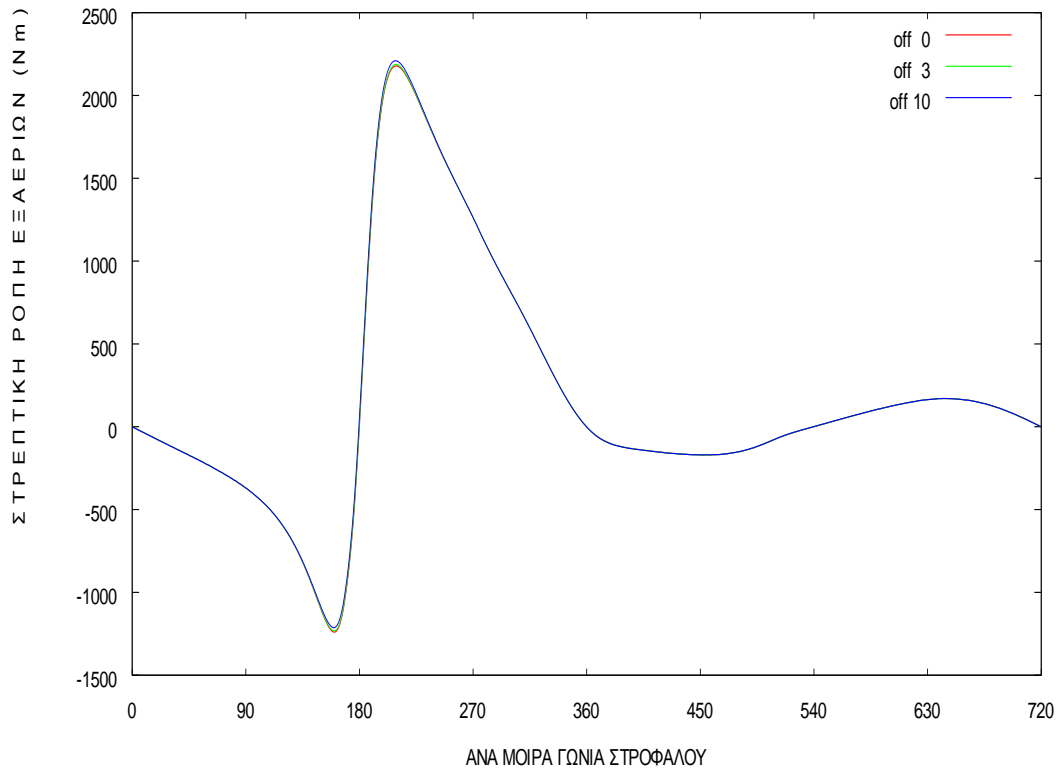


**Σχ.7.194 Ταχύτητα σε ( m/s ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

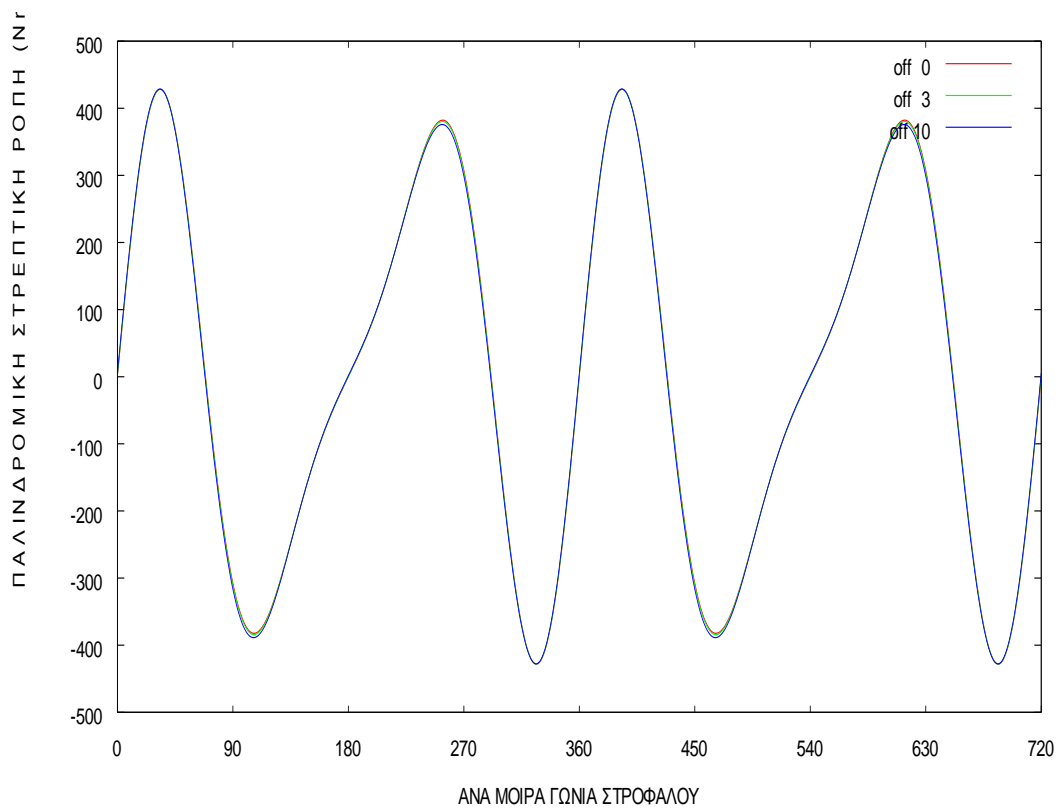


Σχ.7.195 Επιτάχυνση σε ( $m/s^2$ ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

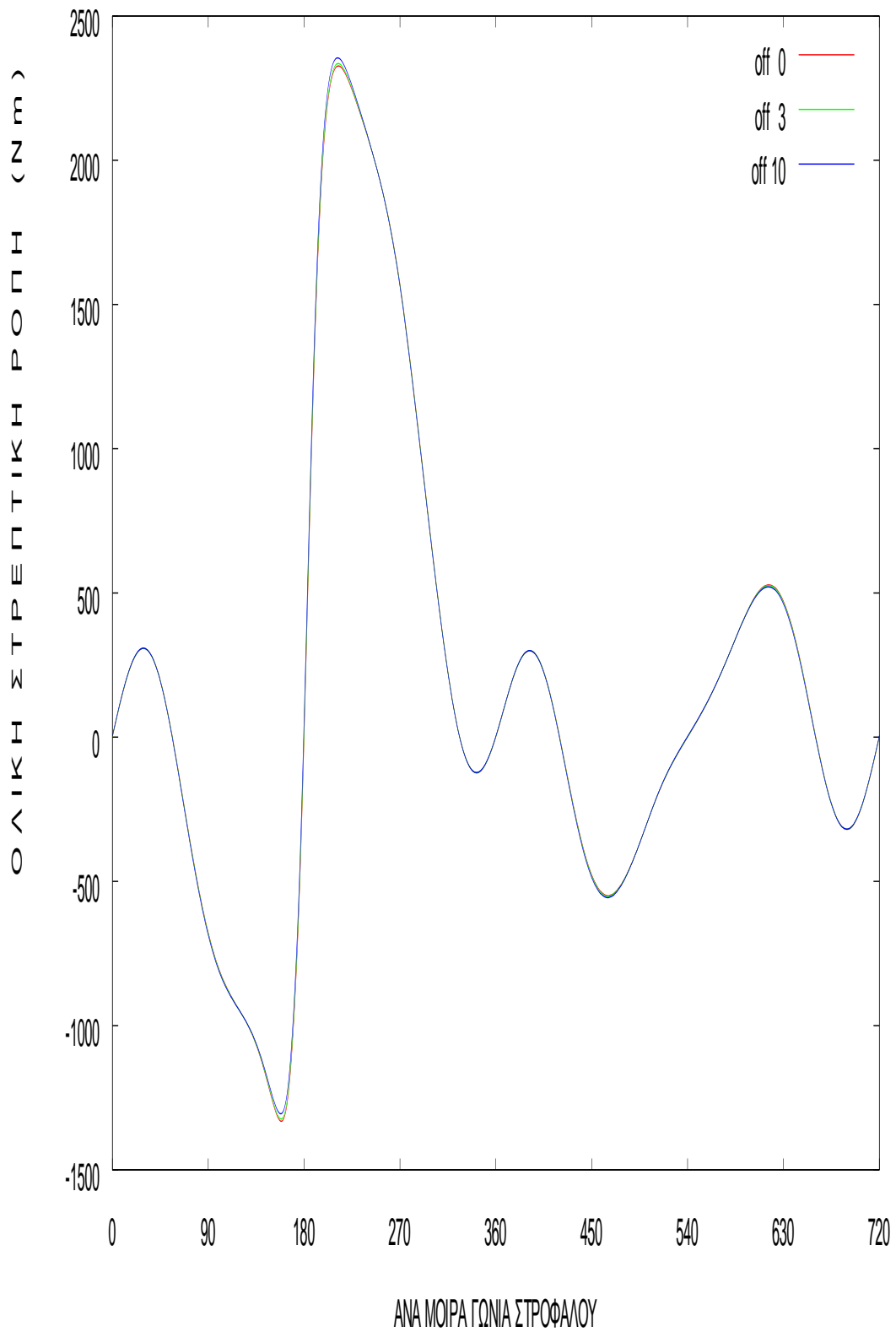




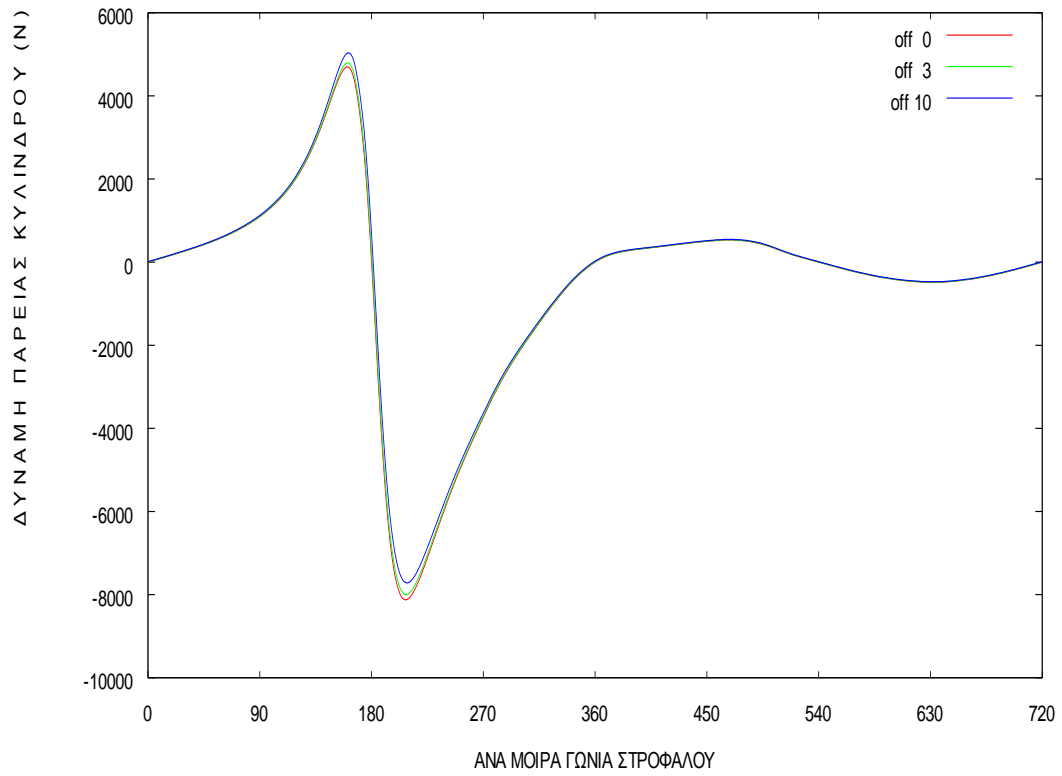
**Σχ.7.196 Στρεπτική ροπή εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



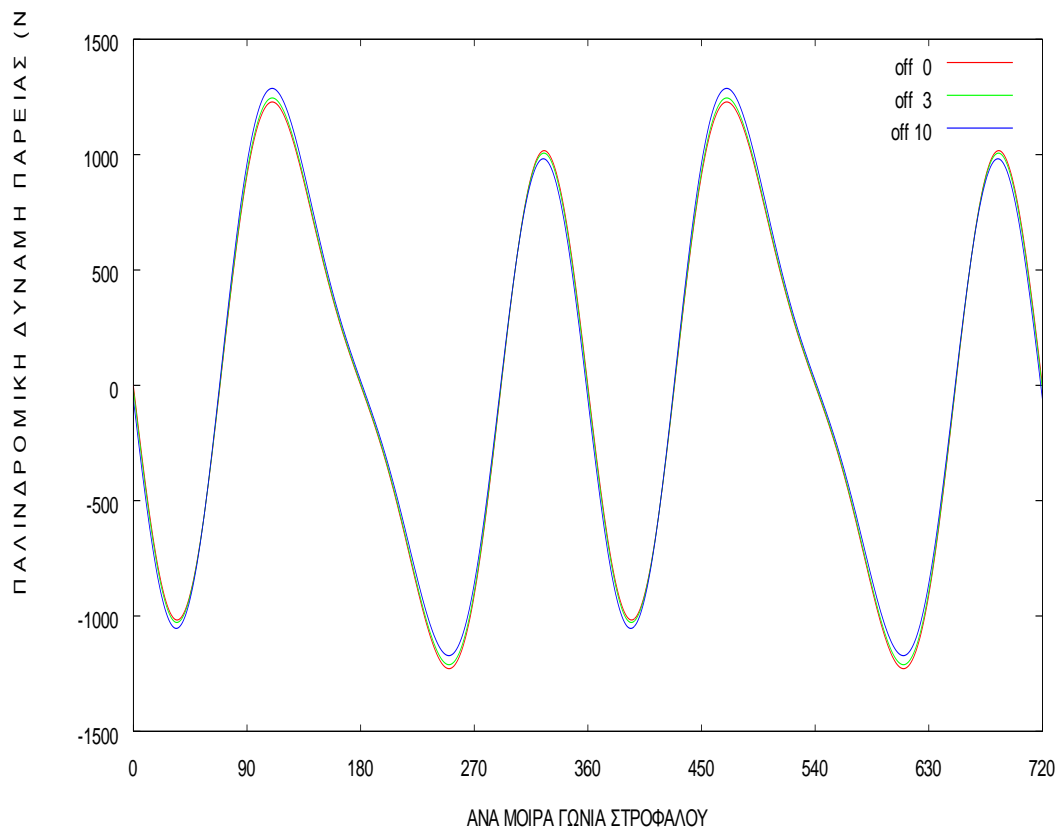
**Σχ.7.197 Στρεπτική ροπή από παλινδρόμηση σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



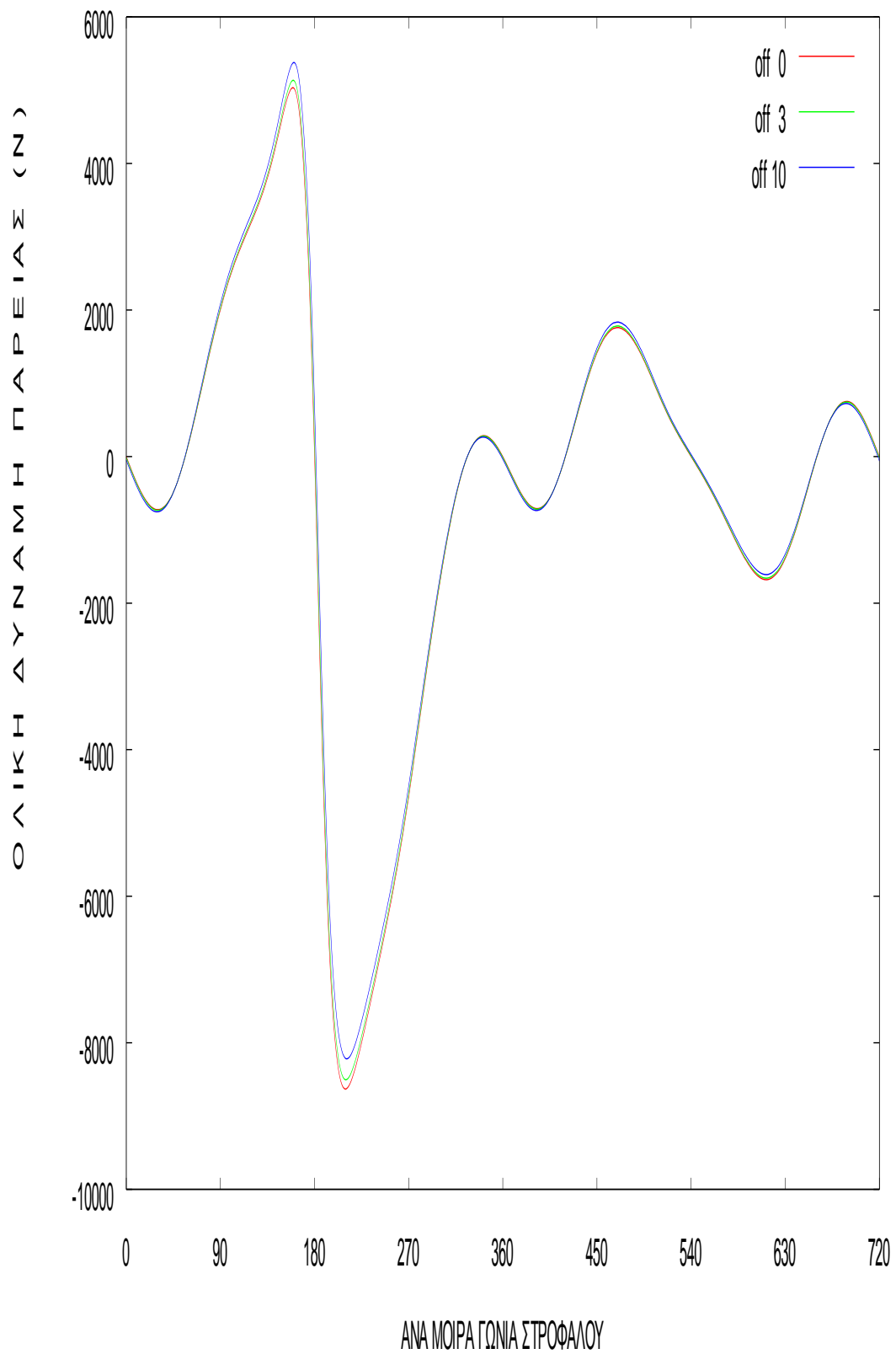
**Σχ.7.198** Ολική στρεπτική ροπή σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



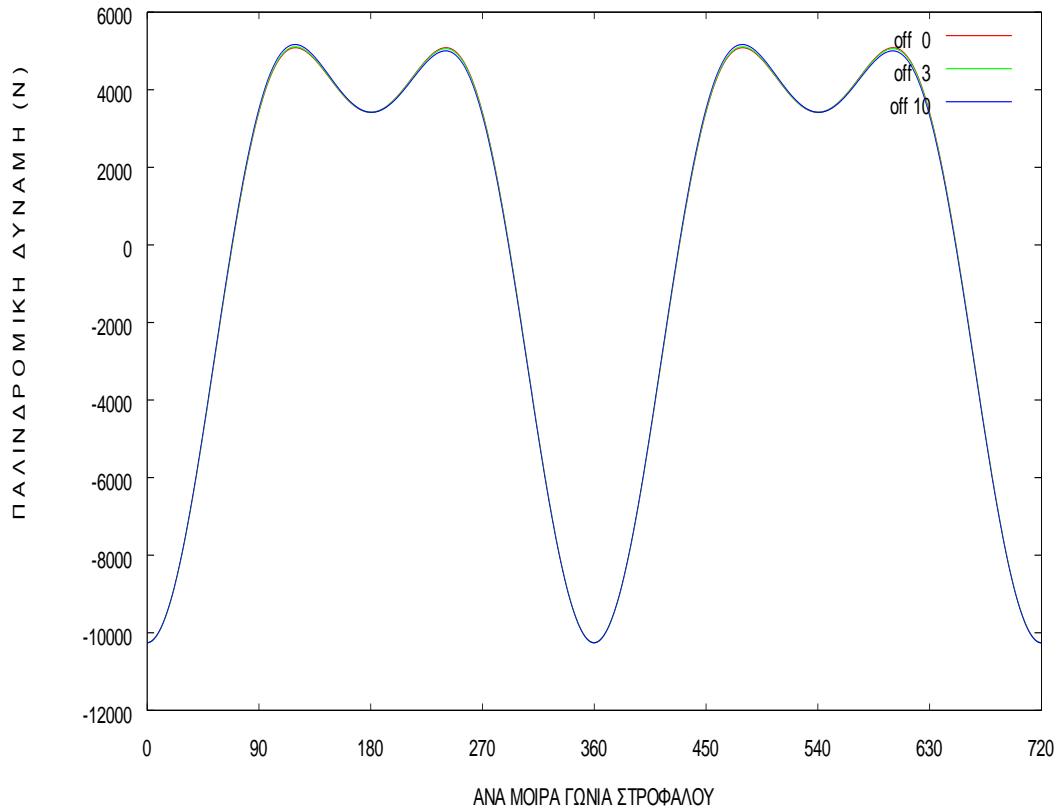
**Σχ. 7.199 Πλευρική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



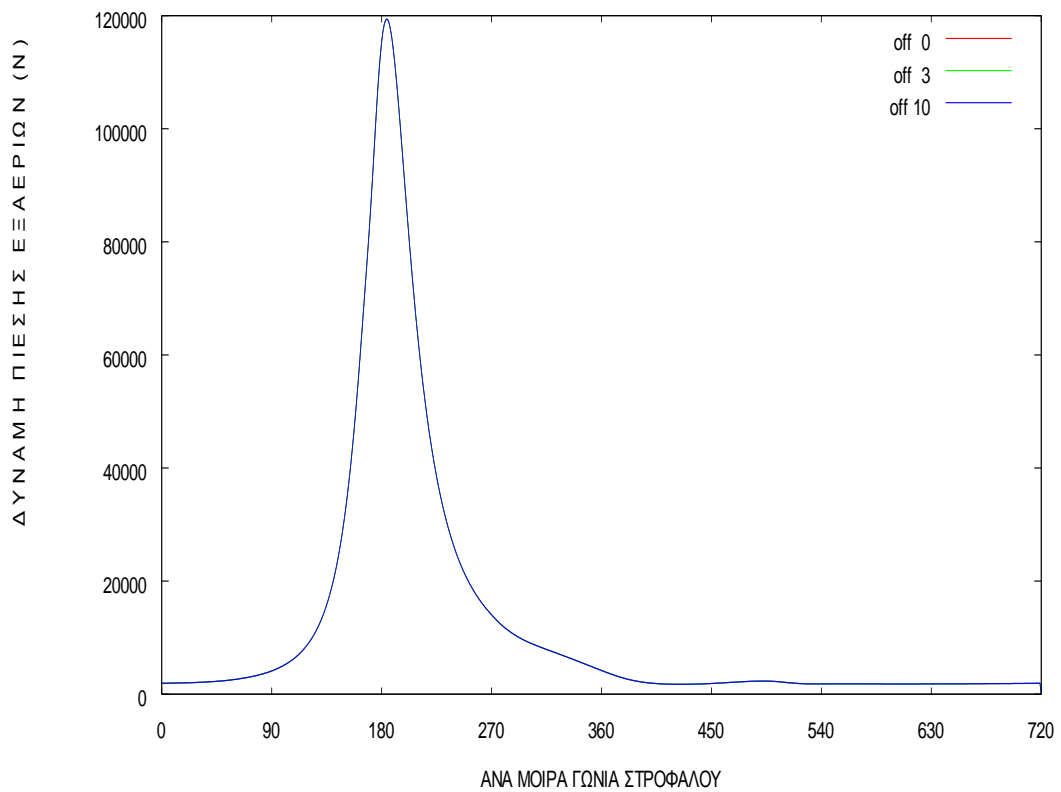
**Σχ. 7.200 Παλινδρομική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



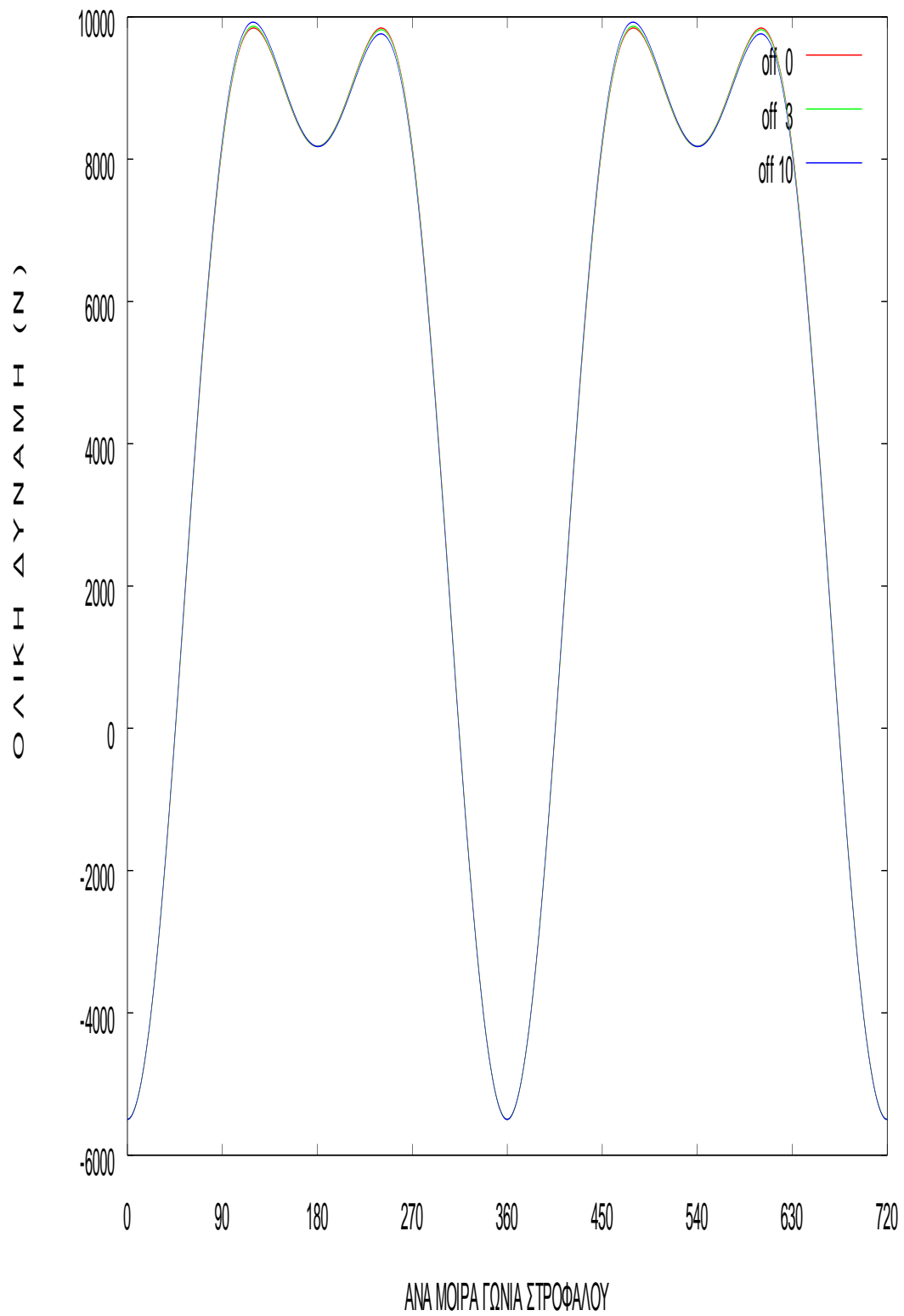
**Σχ.7.201** Ολική πλευρική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



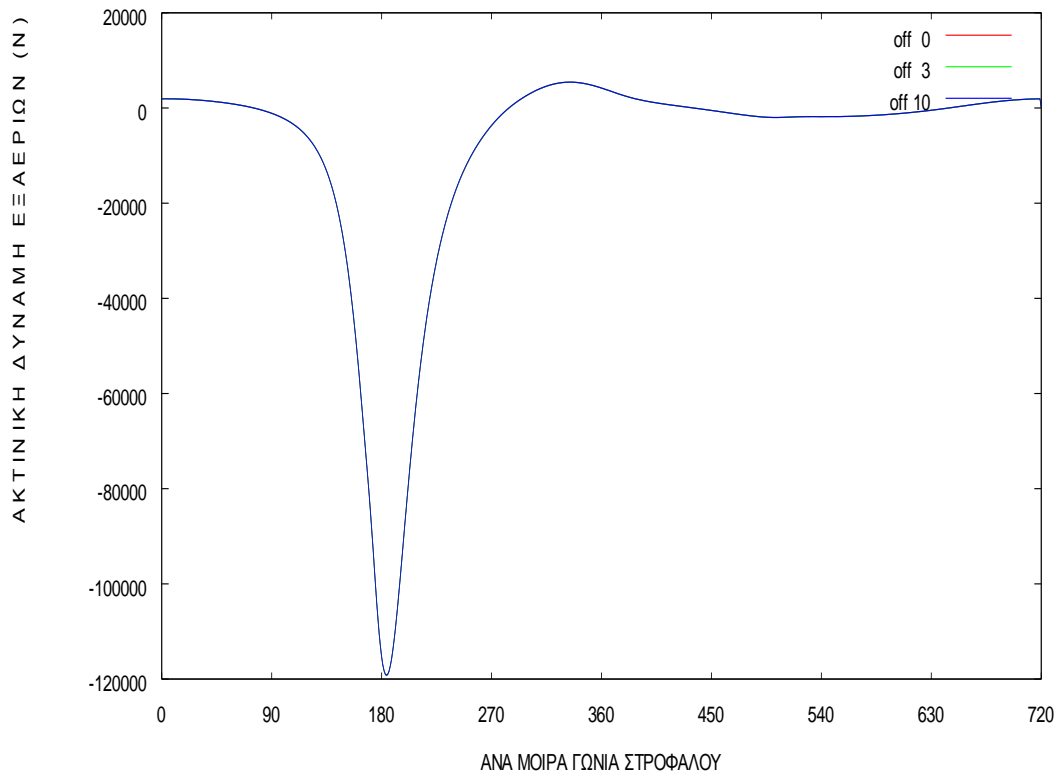
**Σχ.7.202 Παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



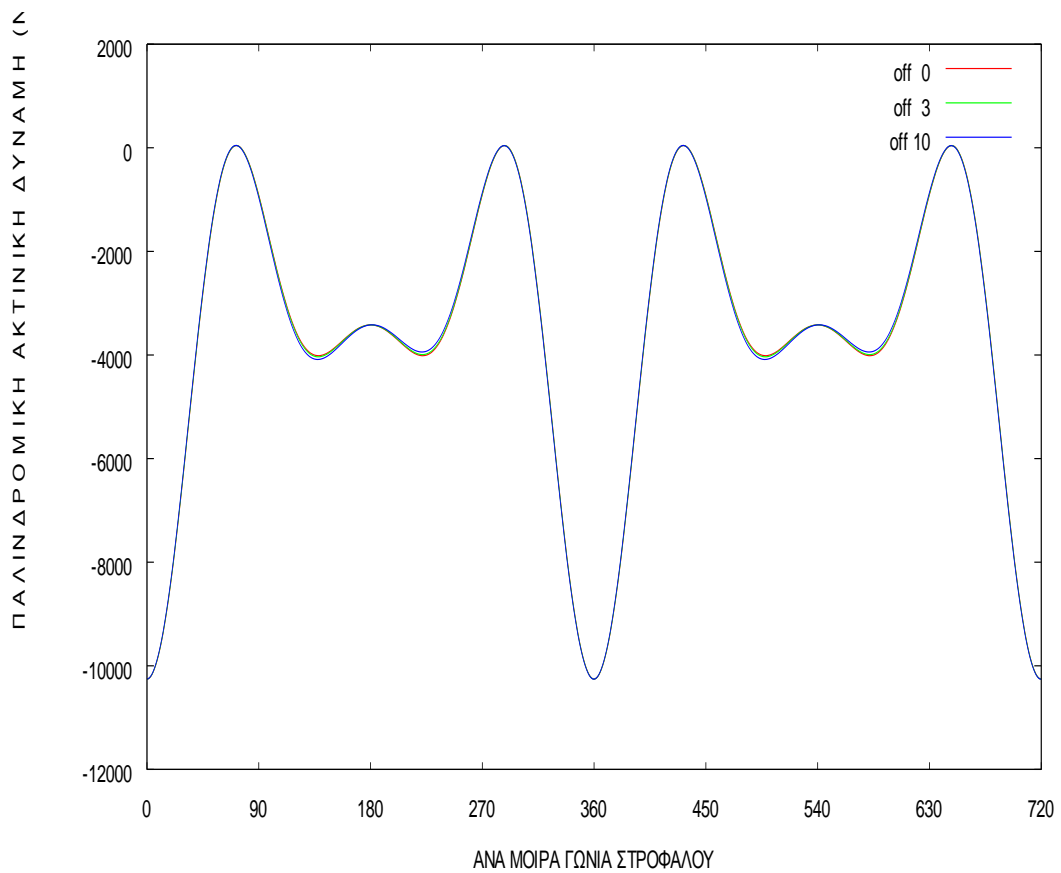
**Σχ.7.203 Δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



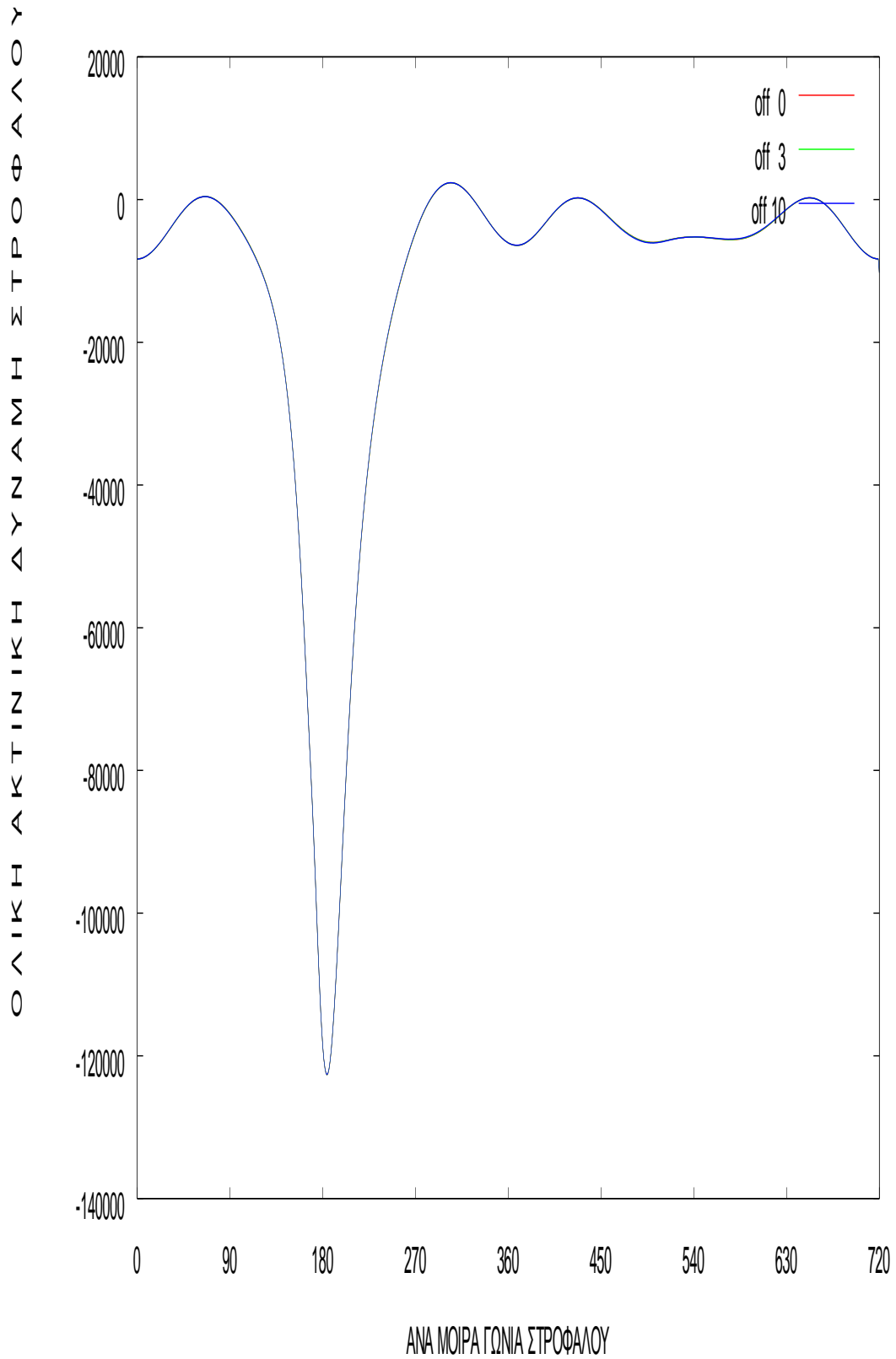
Σχ. 7.204 Ολική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.205** Ακτινική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

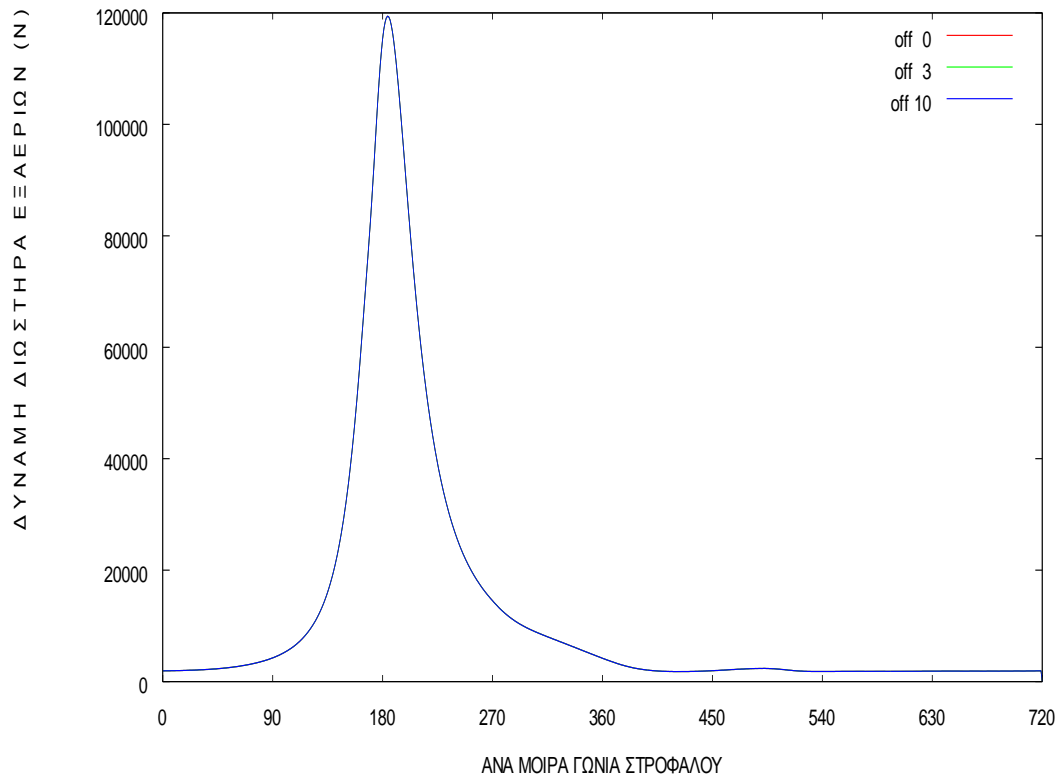


**Σχ.7.206** Ακτινική παλινδρομική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

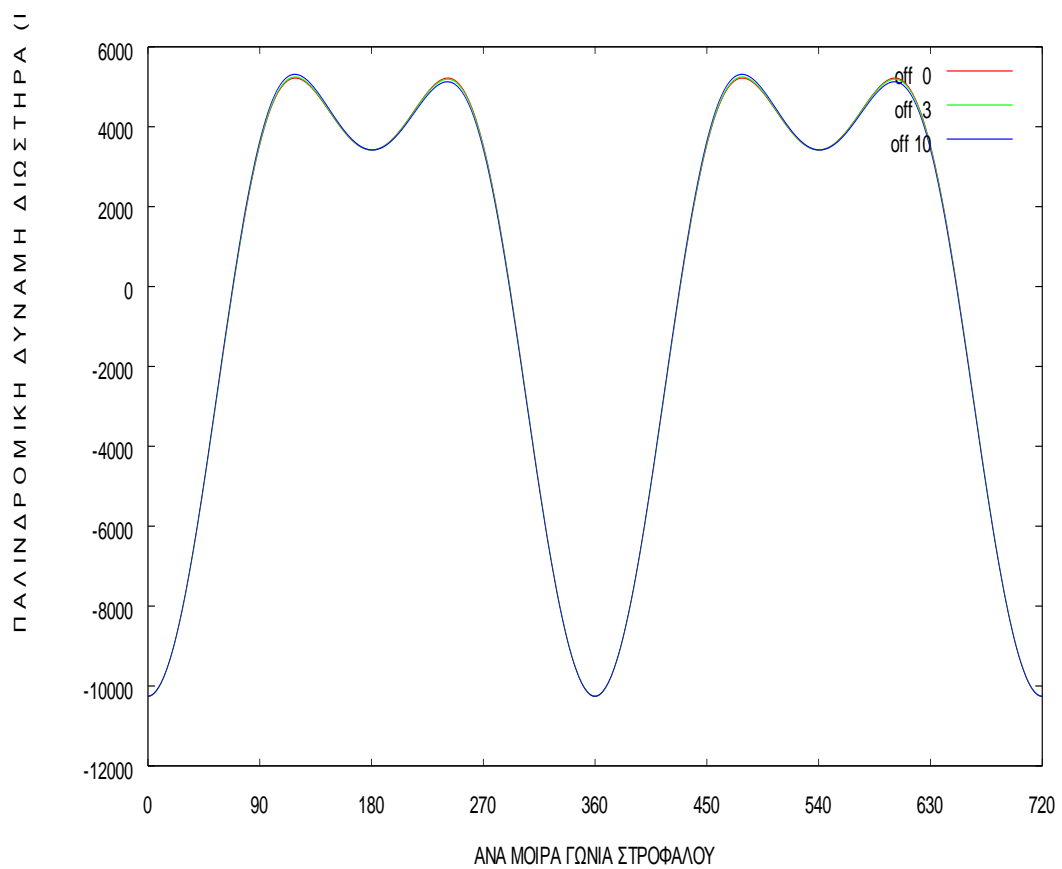


**Σχ.207** Ολική ακτινική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

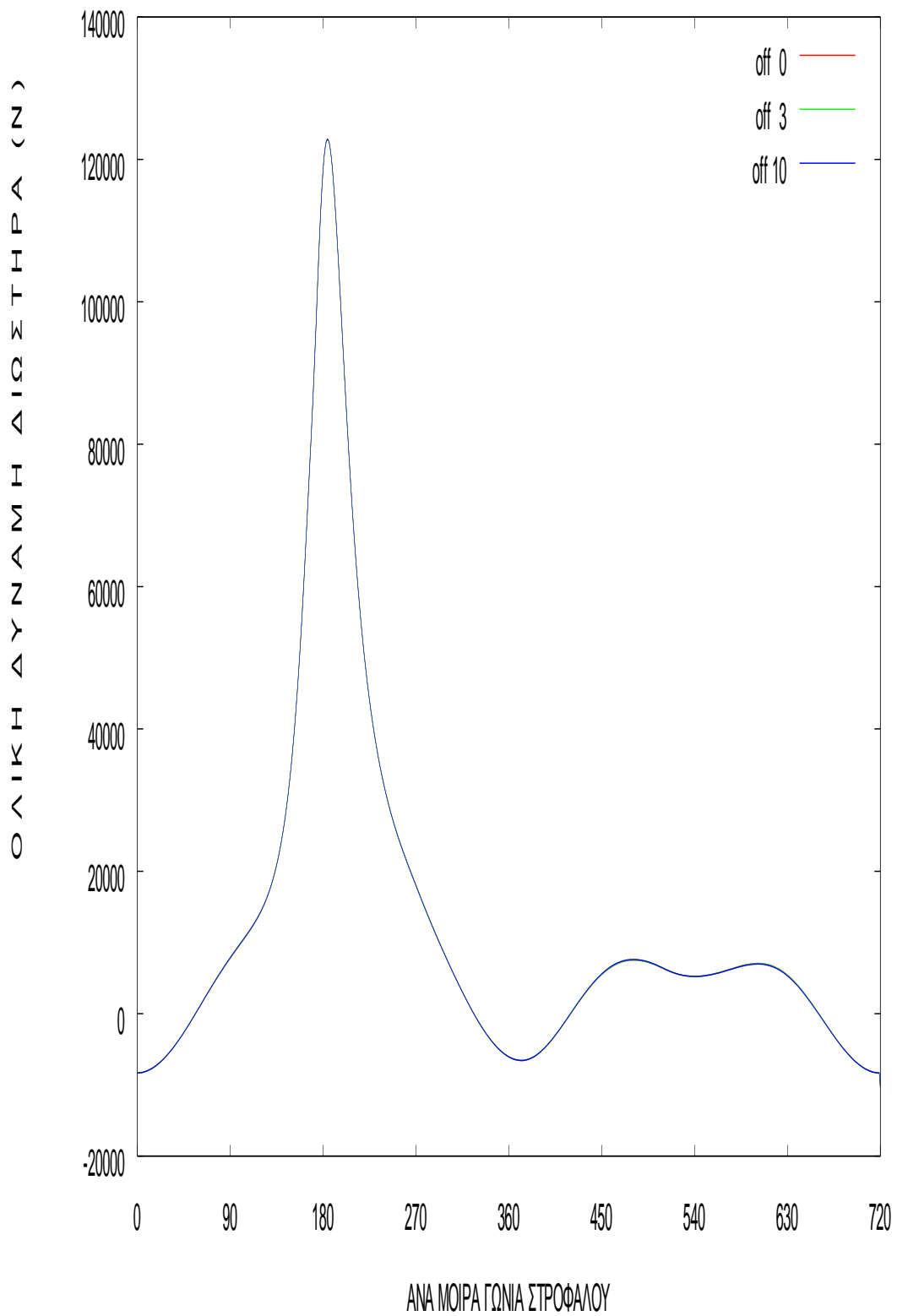




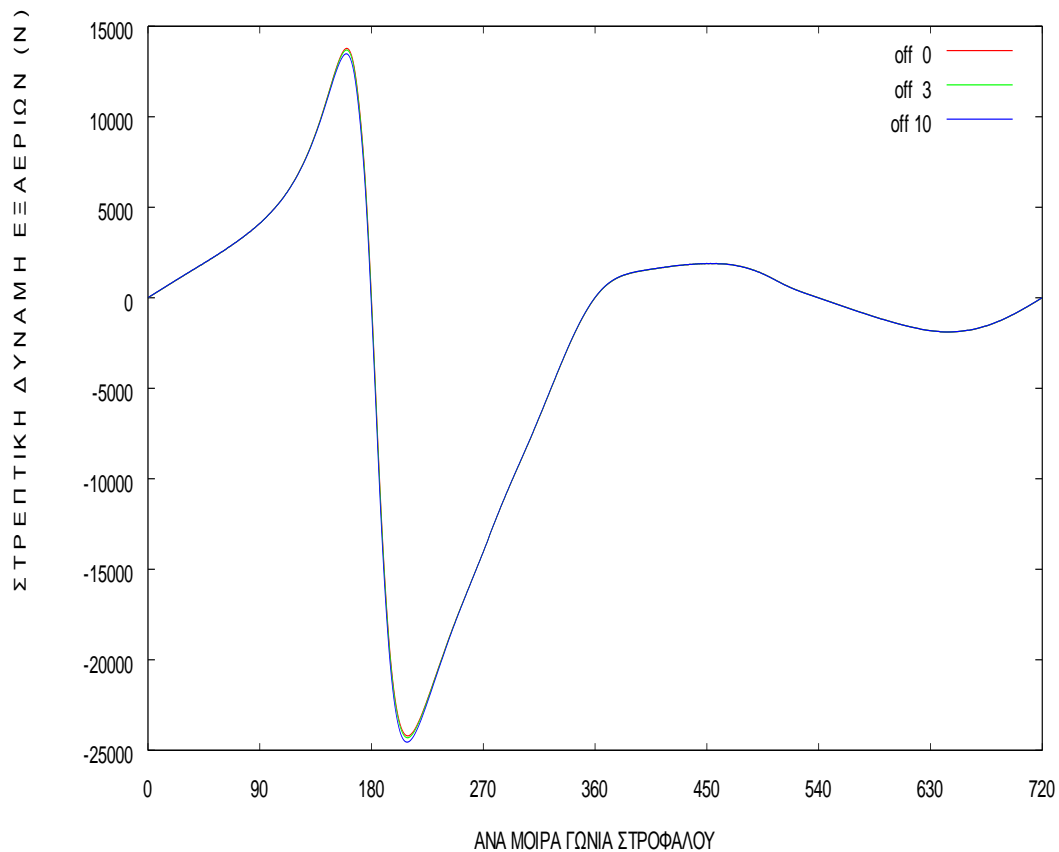
**Σχ.208 Δύναμη διωστήρα εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



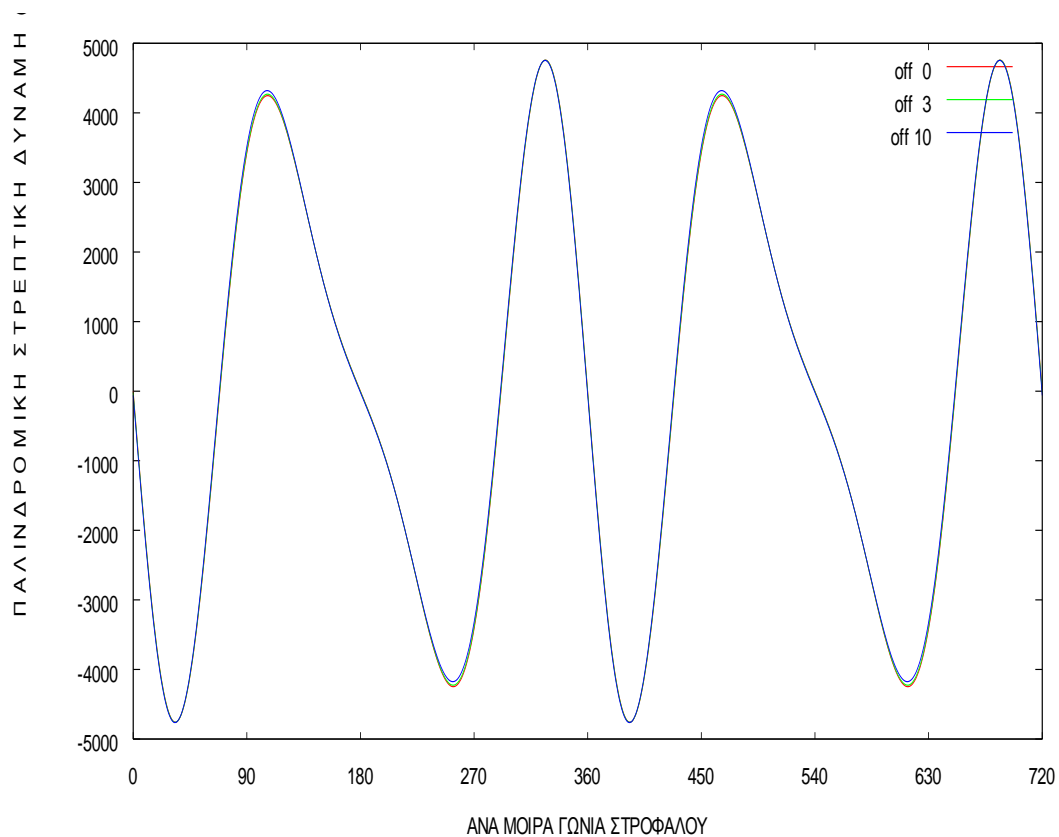
**Σχ.7.209 Παλινδρομική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



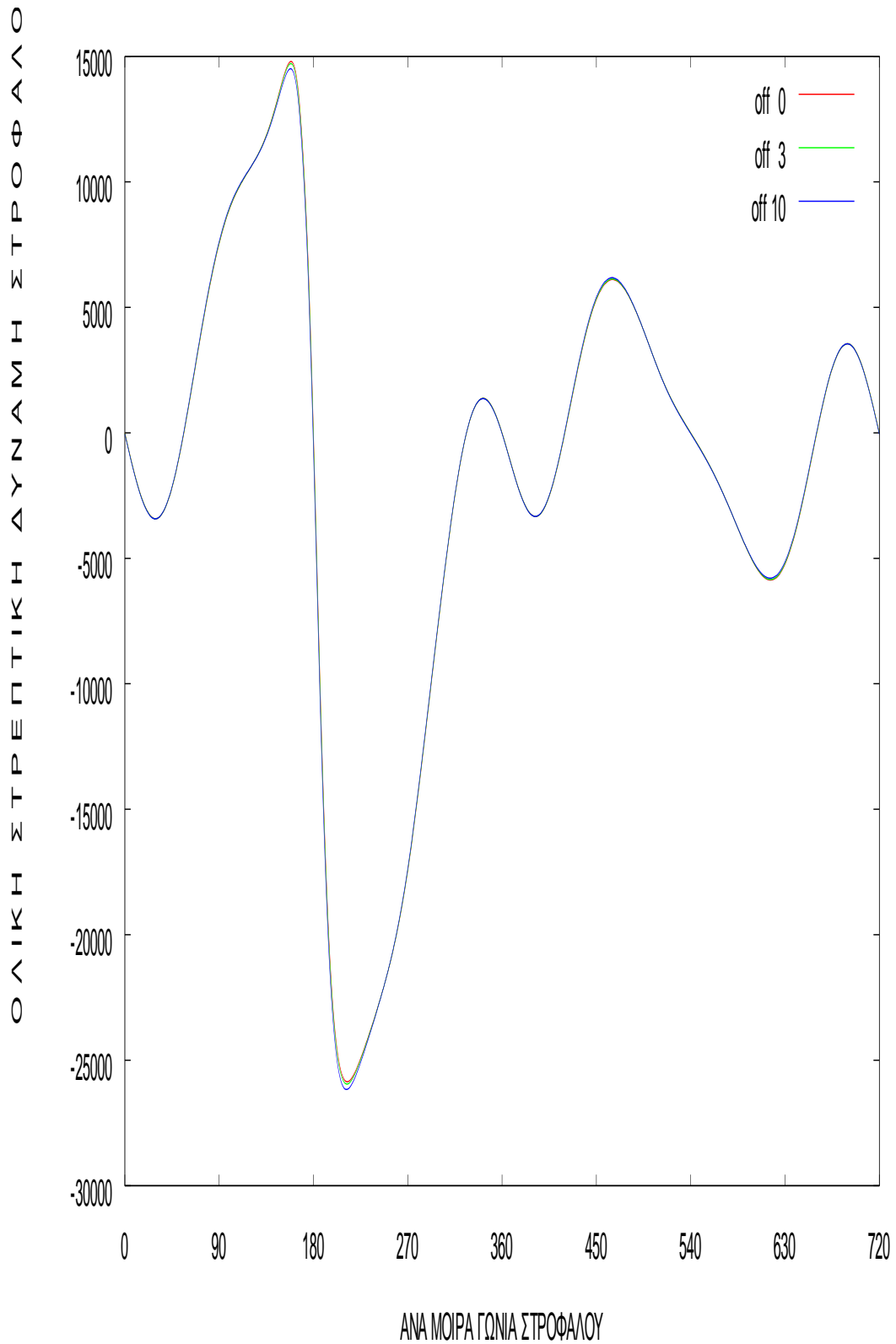
**Σχ.210 Ολική δύναμη διωστήρα σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**



**Σχ.211** Στρεπτική δύναμη εξ αερίων σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



**Σχ.7.212** Παλινδρομική στρεπτική δύναμη σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου



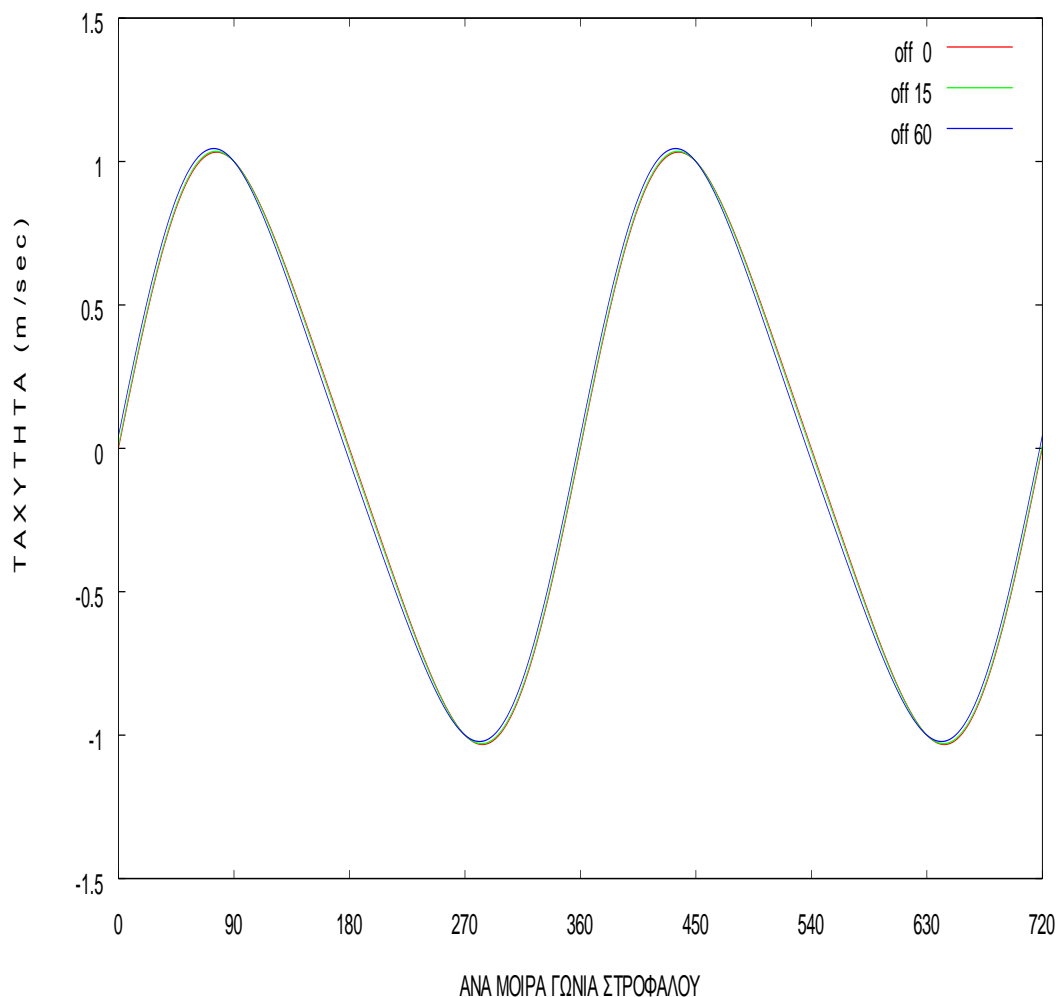
**Σχ.7.213** Ολική στρεπτική δύναμη στροφάλου σε (N) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου

Όλες οι δυνάμεις που δημιουργούνται από την παλινδρομική κίνηση έχουν μικρότερο μέγεθος σχεδόν κατά 50% όσο είναι και η μείωση στα μεγέθη των μαζών. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό από το τύπο της παλινδρομικής Δύναμης

$$P_l = -m_l b = -m_l r \omega^2 \frac{b}{r \omega^2}$$

της οποίας η μείωση αυξάνει όσο ελαττώνονται οι μάζες. Άρα κράματα μετάλλων με μικρότερο ειδικό βάρος προσφέρουν παράγον μικρότερου μεγέθους δυνάμεις ενώ οι αποκλίσεις που έχουν στις συνολικές δυνάμεις και ροπές είναι αμελητέες. Επίσης με εφαρμογή εκκεντρότητας επιδρούν θετικά στην ελάττωση της ταχύτητας ολίσθησης ελαττώνοντας ταυτόχρονα την τριβή στα ελατήρια και στο σώμα του εμβόλου, όπου η μείωση αυτή αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους της εφαρμοζόμενης εκκεντρότητας, όπως φαίνεται με την βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος (Σχήμα 7.214)

**Διάγραμμα για εκκεντρότητα 0mm 15mm 60mm**



**Σχ.7.214 Ταχύτητα σε ( m/s ) /ανά μοίρα γωνίας στροφάλου**

### 7.3 Συμπεράσματα

1. Από την παραπάνω μελέτη προκύπτει ότι η εφαρμογή εκκεντρότητας επιδρά στη μείωση της τριβής αφού μειώνεται η ταχύτητα εμβόλου άρα και στη βελτίωση του μηχανικού βαθμού απόδοσης  $\eta_m$  δηλαδή στη μείωση των μηχανικών απωλειών καθώς και στην αύξηση της στρεπτικής ροπής έστω και σε μικρό βαθμό.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της Ισχύς  $P_e$  της μηχανής της οποίας το μέγεθος υπολογίζεται απο τον παρακάτω τύπο.

$$P_e = M_\sigma * \omega$$

Επίσης θεωρώντας ότι ο **θεωρητικός πρότυπος βαθμός απόδοσης  $\eta_{ts}$**  παραμένει σταθερός δηλαδή καλός θεωρητικός πρότυπος θερμοδυναμικός κύκλος, με **καλό βαθμό ποιότητας  $\eta_g$**  (λίγες θερμοδυναμικές απώλειες δηλαδή μη αναστρεψιμότητες της πραγματικής μηχανής έναντι της αντίστοιχης ιδανικής) , και με βελτιωμένο τον **μηχανικό βαθμό απόδοσης  $\eta_m$**  , τότε βελτιώνεται και ο **πραγματικός (ή ωφέλιμος) βαθμός απόδοσης  $\eta_e$**  αφού

$$\eta_e = \eta_m \eta_g \eta_{ts}$$

Ταυτόχρονα με βελτίωση όλων των παραπάνω παραγόντων επιτυγχάνεται οικονομία καυσίμου αφού βελτιώνεται η **ειδική κατανάλωση καυσίμου**

2. Επίσης με εφαρμογή του κατάλληλου μεγέθους εκκεντρότητας, ελαχιστοποιείται η μέση τιμή της πλευρικής δύναμης με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μείωση του μηχανικού θορύβου, των δονήσεων της μηχανής και της τριβής αντίστοιχα. Εύκολα συμπεραίνεται ότι η πλευρική δύναμη του εμβόλου(ή δύναμη παρειάς), και η δυναμική τριβή που παράγεται μεταξύ εμβόλου – κυλίνδρου είναι αλληλοεξαρτώμενες.

Από την παραπάνω μελέτη αλλά και από μελέτες που έχουν προηγηθεί , αποδεικνύεται ότι σε κάθε ταχύτητα περιστροφής υπάρχει ένα μέγεθος εκκεντρότητας η οποία ελαχιστοποιεί την μέση πλευρική δύναμη.

3. Τέλος, με χρήση ελαφρύτερων μετάλλων οι δυνάμεις που παράγονται είναι μικρότερου μεγέθους, των οποίων η μείωση αυξάνεται όσο ελαφρύτερα είναι τα μέταλλα, ενώ για τα εξεταζόμενα μεγέθη εκκεντρότητας οι αποκλίσεις που

παρουσιάζουν μεταξύ τους οι συνολικές δυνάμεις και ροπές είναι αμελητέες. Επίσης το συνολικό βάρος της μηχανής ελαττώνεται με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται βελτίωση στην απόδοση της μηχανής και στην κατανάλωση καυσίμου, ενώ η εφαρμογή εκκεντρότητας επιδρά θετικά στην ελάττωση της ταχύτητας του εμβόλου, όπου η μείωση αυτή αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους της εφαρμοζόμενης εκκεντρότητας.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. **Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος** . Αρχές Εμβολοφόρων ΜΕΚ. Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα, 1988
2. **Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος**. Μ.Ε.Κ ΙΙ . Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα, 2000
3. **Ευθ. Α. Βούσουρα** Μηχανές Εσωτερικής Καύσης , Αθήνα, 1994
4. **A L Guzzoni , D C Hesterman , B J Stone**. Variable inertia effects of an engine including piston friction and a crank or gudgeon pin offset. Proc.IMechE,Vol.222,pp.397-414,2008
5. **Y H Zweir, J F Whidborne, L D Seneviratne**. Detailed analytical model of a single-cylinder diesel engine in the crank angle domain Seneviratne.Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol.215, pp1197-1216, 2001
6. **Myung –Rae Chao, Dae-Yoon Oh, Tae – Seon Moon, Dong – Chul Han**. Theoretical evaluation of the effects of crank offset on the reduction of engine friction. Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 217, pp.891 – 898, 2003
7. **S. D. Haddad**. An Analytical study of offset piston and crankshaft designs and the effect of oil film on piston slap excitation in a diesel engine. Mech. Mach. Theory. Vol.30, pp. 271-284, 1995
8. **Taj Elssir Hassan**. Theoretical Performance Comparison between Inline , Offset and Twin Crankshaft Internal Combustion Engines. ISBN: 978 – 988 – 17012 -3 -7, WCE 2008
9. **W. P. Boyle , K. Liu** . The offset slider crank : Kinematic Pseudographic Analysis.  
Int. J. Engng Ed., Vol. 13, No.3, p.198-203, 1997
10. **Y H Zweiri , J F Whidborne , L D Seneviratne**. Instantaneous friction components model for transient engine operation.Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 214, pp. 809-824, 2000.
11. **H D Desai**. Computr aided kinematic and dynamic analysis of a horizontal slider crank mechanism used for single – cylinder four stroke internal combustion engine. ISBN: 978 – 988 – 18210 -1 – 0, WCE 2009.
12. **C.D Rakopoulos, E.G Giakoymis**, Diesel Engine transient operation, Springer – Verlag, London, 2009