

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΕΜΒΟΛΩΝ – ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΘΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ



υπό

ΦΑΙΔΩΝΟΣ ΤΑΣΣΟΠΟΥΛΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος 2011



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 9695/1  
Ημερ. Εισ.: 14-07-2011  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ  
2011  
ΤΑΣ

© 2011 Φαίδων Τασσόπουλος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



*Στους γονείς μου*

r. 1. 1

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Πανταζάρας Κωνσταντίνος  
Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης  
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Χασιώτης  
Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας





## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου κ. Κωνσταντίνο Πανταζάρα για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγησή και συμπαράστασή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Αλέξιο Κερμανίδη και Νικόλαο Χασιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου Παντελή Νικολαΐδη, Σαράντη Πανταζή, Ναταλένα Ζάχου, Φώτη Τζώρτζογλου, Αλκμήνη Λύτρα και Σπύρο Τσιρνόβα για την βοήθεια τους όλα αυτά τα χρόνια που περάσαμε μαζί στο Βόλο.

Πάνω απ' όλα είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Έκτορα Τασσόπουλο και Μαρία Λυριτζή, και στα ξαδέλφια μου, Βαγγέλη και Νάντια Λυριτζή, που όλα αυτά τα χρόνια με στήριζαν και ήταν πάντα δίπλα μου, γιατί χωρίς αυτούς τίποτε από όλα αυτά δεν θα ήταν εφικτό.

Φαίδων Τασσόπουλος



η απάντηση στο ερώτημα,  
γιατί να υπάρχει κάτι ενώ δεν υπάρχει τίποτε,  
είναι ίσως ότι,  
«το κάτι υπάρχει επειδή το τίποτα, δηλαδή το κενό, είναι ασταθές»

-Γιώργος Γραμματικάκης



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο **“Θεωρητική προσομοίωση τριβολογικής συμπεριφοράς δακτυλίων εμβόλων Μ.Ε.Κ. – Επίδραση φθοράς δακτυλίου”** χωρίζεται σε 4 κεφάλαια και 3 παραρτήματα.

- Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται νέα στοιχεία με σκοπό τη βελτίωση των μοντέλων Patir-Cheng και Greenwood-Tripp με ρεαλιστικά χαρακτηριστικά τραχύτητας τεχνολογικών επιφανειών που αποτέλεσαν βάση του υπολογιστικού κώδικα Oil Film.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται οι θεωρητικές καμπύλες των τιμών για τη συνολική δύναμη τριβής και το ελάχιστο πάχος λαδιού που εξήχθησαν από τον πηγαίο κώδικα Oil Film και συσχετισμοί αυτών για το συντελεστή φθοράς-τριβής.
- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η αναλυτική προσέγγιση των θεωρητικών καμπυλών καθώς και η κατάρτιση της Μεθόδου Ταχείας Προσέγγισης με βοήθεια εφαρμογή του παρόντος μοντέλου σε σύστημα δακτυλίων εμβόλου Μ.Ε.Κ. και ειδικότερα στον πρώτο δακτύλιο.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και ενδεχόμενες μελλοντικές προοπτικές για συνέχιση και εμπάθυνση της συγκεκριμένης εργασίας.

Στα παραρτήματα που ακολουθούν δίνεται ο πηγαίος κώδικας “Oil Film” στον οποίο έγιναν οι απαραίτητες παρεμβάσεις προσαρμογής στα νέα δεδομένα, διαγράμματα που δείχνουν την εγκυρότητα της Μεθόδου Ταχείας Προσέγγισης με πολυώνυμα.

Τέλος δίνονται αποτελέσματα τα οποία δεν εμφανίζονται στο κυρίως κείμενο και σχετίζονται με την εφαρμογή του μοντέλου κατά την λειτουργική συμπεριφορά δακτυλίου-χιτωνίου κυλίνδρου Μ.Ε.Κ καθώς και διαγράμματα χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Ταχείας Προσέγγισης.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|               |    |
|---------------|----|
| Περίληψη..... | 13 |
| Εισαγωγή..... | 17 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### Επαφή και λίπανση τραχειών τεχνολογικών επιφανειών

|  |    |
|--|----|
| 1.1 Απαιτήσεις εισαγωγής νέων δεδομένων.....   | 21 |
| 1.2 Μεθοδολογία για την θεωρητική προσομοίωση της συμπεριφοράς<br>δακτυλίων εμβόλων MEK..... | 26 |
| 1.3 Στοιχεία του μοντέλου Greenwood-Tripp .....  | 29 |
| 1.4 Λίπανση δακτυλίου-χιτωνίου .....   | 34 |
| 1.4.1 Επίδραση της μικρογεωμετρίας των επιφανειών κυλίνδρου και<br>δακτυλίου.....            | 35 |
| 1.4.2 Τραχύτητα και πάχος της λιπαντικής μεμβράνης (Patir-Cheng) .....                       | 39 |
| 1.4.3 Υδροδυναμική συνιστώσα .....   | 40 |
| 1.5 Δακτύλιοι εμβόλων MEK.....   | 45 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### Χρήση κώδικα Oil Film

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Ονομαστικά αποτελέσματα κώδικα για το δακτύλιο της φωτιάς.....   | 57 |
| 2.1.1 Αποτελέσματα κώδικα για 1 <sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.....   | 59 |
| 2.1.2 Αποτελέσματα κώδικα για 2 <sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.....   | 63 |
| 2.1.3 Αποτελέσματα κώδικα για 3 <sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.....   | 67 |
| 2.2 Συσχετισμός ονομαστικών τιμών κώδικα.....  | 71 |
| 2.2.1 Ενδεικτικά αποτελέσματα για χαμηλή τιμή ιξώδους<br>και ταχύτητας στις τρεις καταστάσεις λειτουργίας..... | 73 |
| 2.2.2 Ενδεικτικά αποτελέσματα για μέτρια τιμή ιξώδους<br>και ταχύτητας στις τρεις καταστάσεις λειτουργίας..... | 75 |
| 2.2.3 Ενδεικτικά αποτελέσματα για υψηλή τιμή ιξώδους<br>και ταχύτητας στις τρεις καταστάσεις λειτουργίας.....  | 77 |
| 2.3 Ιστογράμματα μεταβολής μέσων τιμών $h_{min}$ και $F_{tot}$ των μετρήσεων.....                              | 79 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### Μέθοδος Ταχείας Προσέγγισης θεωρητικών αποτελεσμάτων με τη βοήθεια πολυωνύμων

|   |     |
|---|-----|
| 3.1 Προσεγγιστική μέθοδος των ονομαστικών καμπυλών.....                 | 87  |
| 3.2 Αναλυτικές μορφές καμπυλών  |     |
| θεωρητικών αποτελεσμάτων κώδικα Oil Film.....                           | 91  |
| 3.2.1 Αναλυτικές μορφές καμπυλών 1 <sup>ης</sup> κατάστασης φθοράς..... | 92  |
| 3.2.2 Αναλυτικές μορφές καμπυλών 2 <sup>ης</sup> κατάστασης φθοράς..... | 96  |
| 3.2.3 Αναλυτικές μορφές καμπυλών 3 <sup>ης</sup> κατάστασης φθοράς..... | 100 |
| 3.3 Μέθοδος Ταχείας Προσέγγισης.....                                    | 104 |
| 3.3.1 Πολυωνυμική παρεμβολή.....  | 107 |
| 3.3.2 Επαλήθευση εγκυρότητας της μεθόδου.....                           | 114 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 4.1 Συμπεράσματα.....        | 119 |
| 4.2 Κεντρικό Συμπέρασμα..... | 124 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 129 |
|-------------------|-----|

|                  |     |
|------------------|-----|
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1..... | 131 |
|------------------|-----|

#### Πηγαίος Κώδικας “Oil Film”

|                  |     |
|------------------|-----|
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2..... | 145 |
|------------------|-----|

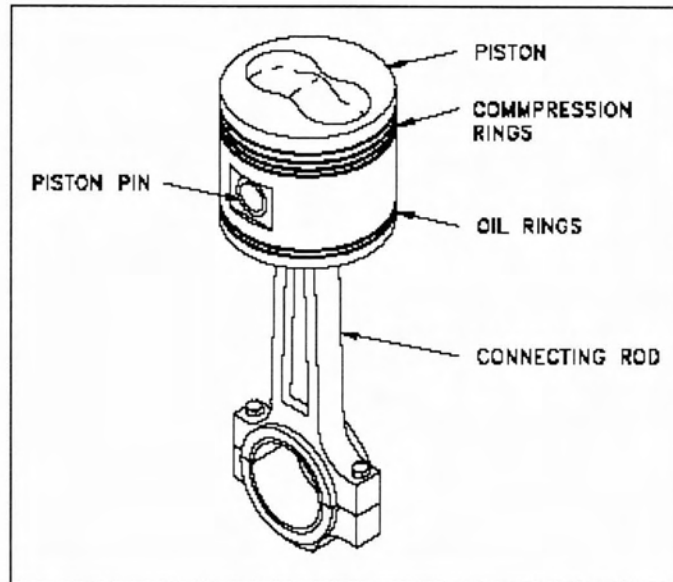
#### Εγκυρότητα Ταχείας Μεθόδου Προσέγγισης

|                  |     |
|------------------|-----|
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3..... | 151 |
|------------------|-----|

#### Επαλήθευση προσέγγισης καμπυλών



# ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο

## **“Θεωρητική προσομοίωση τριβολογικής συμπεριφοράς δακτυλίων εμβόλων Μ.Ε.Κ. – Επίδραση φθοράς δακτυλίου”**

αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα μιας σειράς διπλωματικών εργασιών που εκπονούνται κατά την τελευταία δεκαετία στο τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας και πραγματοποιούνται την θεωρητική και πειραματική προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος έμβολο – δακτύλιοι – κύλινδρος Μ.Ε.Κ.

Με την συνεχή ανάπτυξη – εξέλιξη υπολογιστικού πηγαίου κώδικα ο οποίος περιγράφει λεπτομερώς την λειτουργική συμπεριφορά του προαναφερθέντος συνόλου καθώς και την κατασκευή και λειτουργία πειραματικού προσομοιωτή, στόχος κάθε μιας από τις διπλωματικές εργασίες που εκπονηθήκαν μέχρι σήμερα ήταν μια εμπειριστατωμένη διερεύνηση με κεντρικούς άξονες συγκεκριμένα στοιχεία δεδομένων, όπως για παράδειγμα η επίδραση του φορτίου του κινητήρα πάνω στην συμπεριφορά του δακτυλίου εμβόλου, η επίδραση της τραχύτητας στην υδροδυναμική λίπανση του συστήματος, λεπτομερέστερη ανάλυση της τραχύτητας των επιφανειών με σκοπό την ρεαλιστικότερη τροφοδότηση του μοντέλου κλπ.

Ο κεντρικός άξονας της παρούσας διπλωματικής σχετίζεται με την επίδραση της φθοράς των τριβομένων τεχνολογικών επιφανειών στην συμπεριφορά του

δακτυλίου-χιτωνίου στον χρόνο. Με τον τρόπο αυτό κλείνει ένας κύκλος διερεύνησης του πηγαίου κώδικα με βάση δεδομένα της βιβλιογραφίας και ανοίγει ένας νέος με βάση τα επεξεργασμένα δεδομένα σε ρεαλιστικότερη βάση .

Επίκεντρο της διπλωματικής εργασίας είναι η Μέθοδος Ταχείας Προσεγγίσεως με βοήθεια αναλυτικών συντελεστών πολυωνύμων των ονομαστικών καταστάσεων, ώστε να αναδειχθεί η άρρηκτη πρότυπη σχέση που υπάρχει μεταξύ φθοράς-τριβής του συστήματος εμβόλου-χιτωνίου κυλίνδρου M.E.K., ορμώμενη από το νέφος των σημείων των καμπυλών του Stribeck. Άρα διαφοροποίηση θα αναζητηθεί στις περιοχές των νεκρών σημείων όπου εκ των πραγμάτων η λιπαντική μεμβράνη είναι λεπτή.

Για περιοχές μεγάλων ταχυτήτων του εμβόλου όπου η λιπαντική μεμβράνη είναι αυξημένου πάχους η τραχύτητα θεωρείται ότι παίζει αμελητέο ρολό τόσο στη δημιουργία της λιπαντικής μεμβράνης καθώς και της δύναμης υδροδυναμικής τριβής .

Οι προαναφερθέντες συντελεστές έχουν εισαχθεί από τους Patir-Cheng το μοντέλο των οποίων χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με το μοντέλο των Greenwood και Tripp από τον S.M.Rohde της General Motors .

# Κεφάλαιο 1

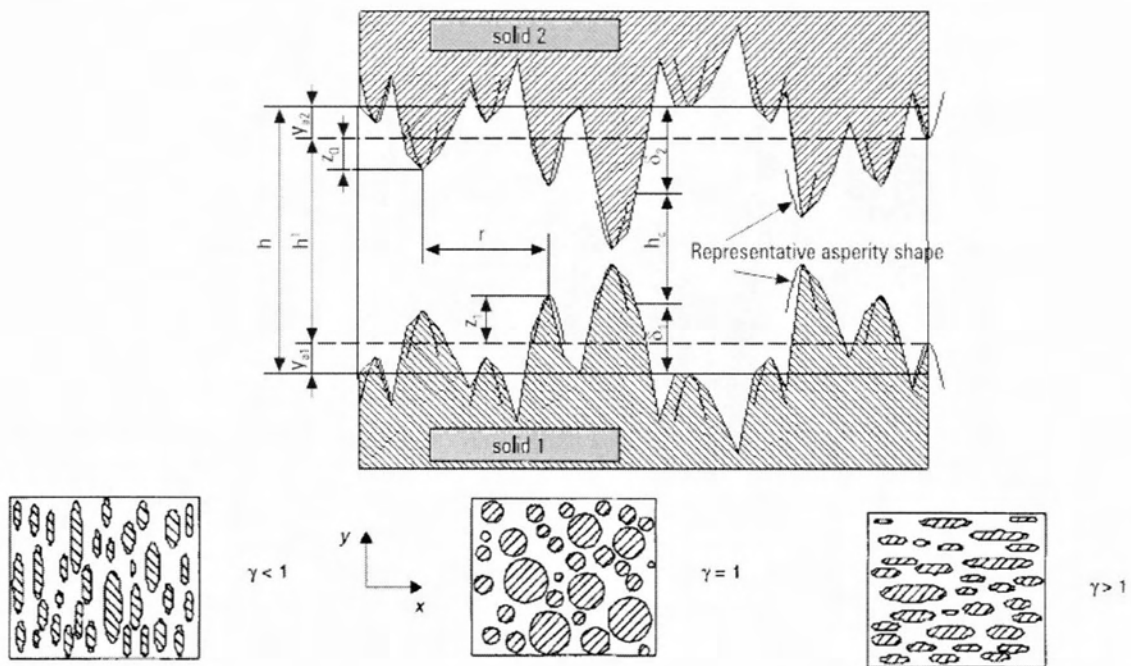
## Επαφή και λίπανση τεχνολογικών επιφανειών



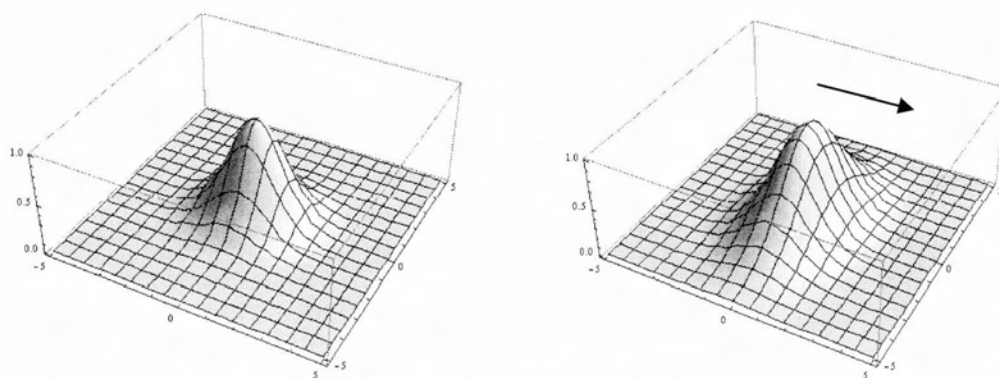
## 1.1 Απαιτήσεις εισαγωγής νέων δεδομένων

Κατά τη δεκαετία του 1980 μέχρι τις μέρες μας αναπτύσσονται θεωρητικά μοντέλα στα οποία γίνεται συνδυασμός δύο συγχρόνων θεωριών για τον λεπτομερέστερο προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών λιπανόμενης τραχείας επιφάνειας κατά τη λειτουργία ποικίλων μηχανισμών (περιστροφή, παλινδρόμηση κλπ).

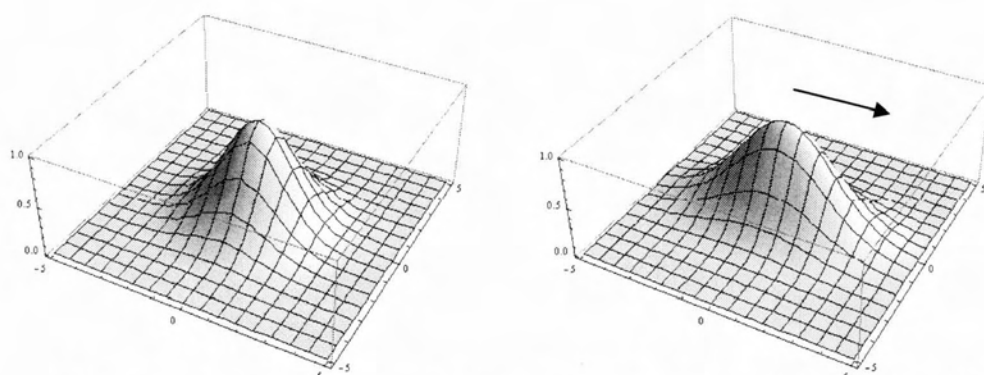
Έτσι, αφενός γίνεται χρήση για την λίπανση μιας εξίσωσης του **Reynolds** (**Navier-Stokes**) στην οποία λαμβάνονται υπόψη μεγέθη της λιπαντικής μεμβράνης με στατιστικά χαρακτηριστικά της τραχύτητας με επιπρόσθετο στοιχείο την ανισοτροπία της (**Patir-Cheng**), καθώς και ενός μοντέλου επαφής τραχειών επιφανειών που προτάθηκε από τους **Greenwood - Tripp** (Γενικευμένο μοντέλο **Hertz**).



**Σχήμα 1.1.1 :** Το μοντέλο των λοφίσκων τραχύτητας και τα χαρακτηριστικά ανισοτροπίας.  $\gamma$ : δείκτης ανισοτροπίας,  $\gamma < 1$ : εγκάρσια ανισοτροπία,  $\gamma = 1$ : ισότροπη επιφάνεια,  $\gamma > 1$ : διαμήκης ανισοτροπία



Σχηματική παράσταση λοφίσκου ισότροπης (αριστερά) και λοφίσκου ανισότροπης(δεξιά) τραχείας επιφάνειας με βαθμό ανισοτροπίας  $\gamma < 1.00$  , κύρια κατεύθυνση είναι αυτή του βέλους



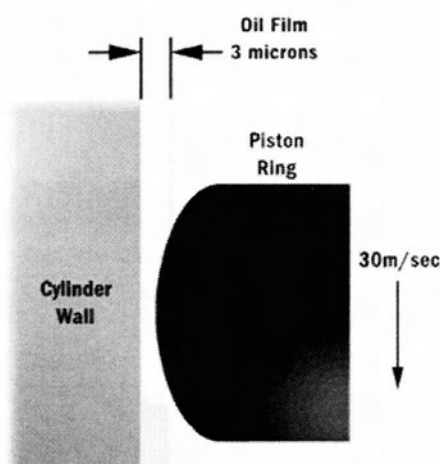
Σχηματική παράσταση λοφίσκου ισότροπης (δεξιά) και λοφίσκου ανισότροπης (αριστερά) τραχείας επιφάνειας με βαθμό ανισοτροπίας  $\gamma > 1.00$  , κύρια κατεύθυνση είναι αυτή του βέλους

Η προσπάθεια λεπτομερούς προσδιορισμού της **τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων των εμβόλων** ιστορικά ξεκίνησε κατά την εποχή των ατμομηχανών και βρήκε έντονη ανταπόκριση κατά τα μεταπολεμικά χρόνια. Από τότε έως τις μέρες μας, πληθώρα πειραματικών, θεωρητικών αλλά και μικτού τύπου προσεγγίσεων βλέπουν το φως της δημοσιότητας, αναδεικνύοντας σημαντικά αποτελέσματα,

Η ποικιλία των δραστηριοτήτων σχετικά με το συγκεκριμένο αντικείμενο φαίνεται ότι δεν έχει ακόμη δώσει τις απαιτούμενες πλήρεις, σαφείς και τελικές απαντήσεις και για το λόγο αυτό εμφανίζεται συνεχής έρευνα για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των δακτυλίων, για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, διαφορετικούς τύπους δακτυλίων Μ.Ε.Κ. , διαφορετικά και νέα υλικά, ποικίλη τοπογραφία των τραχειών συνεργαζομένων επιφανειών, υφιστάμενες μεταβολές στο πεδίο του χρόνου κ.α.

Η σημαντική απόκλιση της πραγματικής λειτουργίας των δακτυλίων σε σχέση με τις βασικές υποθέσεις που λαμβάνονται υπ' όψη στην θεωρητική ερμηνεία/αποσαφήνιση της τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλου MEK οφείλεται στα παρακάτω στοιχεία:

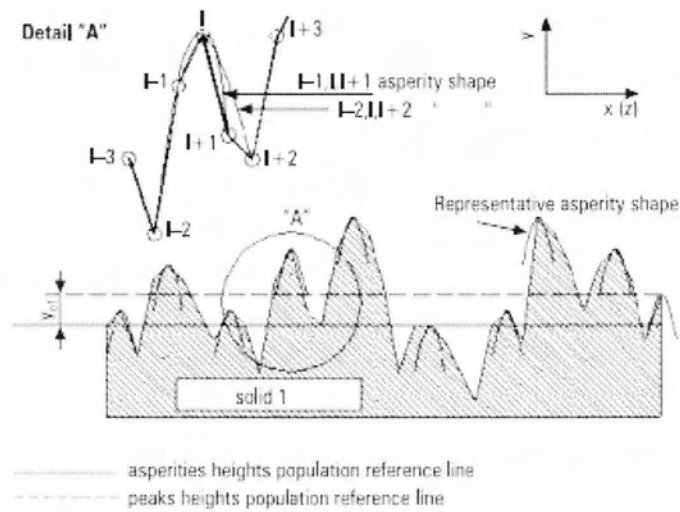
- Η τραχύτητα των τριβομένων επιφανειών πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπ' όψη και μάλιστα στην μακράν απέχουσα από κανονικές κατανομές μορφή της.
- Το συνολικό πρόβλημα απαιτεί λύση λαμβανομένης υπ' όψη της αλληλεπίδρασης των δακτυλίων μέσα στην πλήρη συστοιχία τους, γεγονός που απαιτεί αλληπάλληλους διαδοχικούς υπολογισμούς, αποτελέσματα των οποίων οφείλουν να τροφοδοτούν, υπό την μορφή δεδομένων πλέον τους υπολογισμούς που έπονται.



**Σχήμα.1.1.2 :** Κλασικό μοντέλο που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση του προβλήματος λίπανσης (πρώτου) δακτυλίου εμβόλου MEK. Κατατομή με ακτίνα καμπυλότητας R.

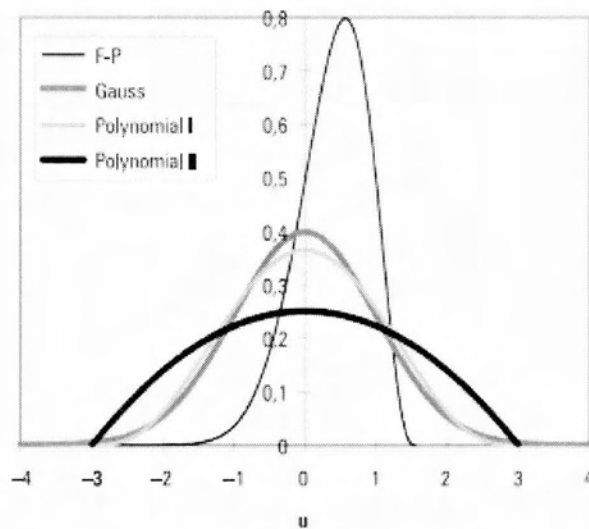
Επειδή όμως, η θεωρητική προσομοίωση αποτελεί κατ' εξοχήν χρήσιμο εργαλείο για την πλήρη κατανόηση της τριβολογικής λειτουργίας των δακτυλίων εμβόλου MEK, η συνεχής επικοινωνία με την πειραματική επιβεβαίωση ή διαφοροποίηση, θεωρείται ικανή και αναγκαία συνθήκη για κάθε προσεχές βήμα.

Surface characterization – distinction of populations



**Σχήμα 1.1.3:** Το μοντέλο των λοφίσκων τραχύτητας και τα χαρακτηριστικά των κορυφών των λόφων που ελήφθησαν σε συνδυασμό κατά την ανάπτυξη του υπολογιστικού κώδικα.

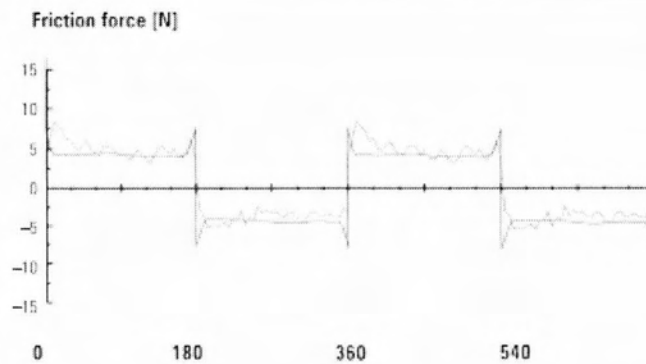
Comparison between standardized probability density functions proposed for surface asperities heights or peaks heights distribution and a representative worn liner Fisher-Pearson peaks heights distribution curve



**Σχήμα 1.1.4:** Κατανομές που χρησιμοποιούνται σε θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης για σύγχρονους ισχυρούς υπολογιστικούς κώδικες.

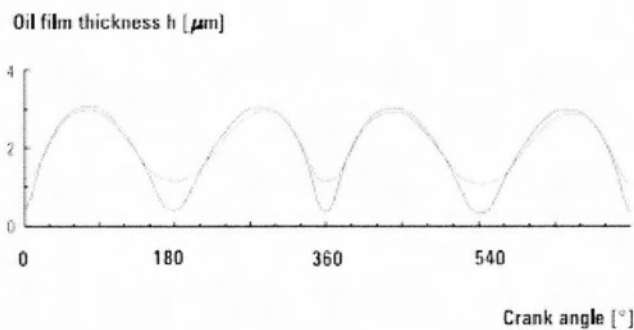


Measured and calculated via real wornliner roughness integral functions piston ring-liner friction force  $L = 1.75\text{mm}$ ,  $R = 18.00\text{mm}$  (unloaded conditions)  $\sigma_{P01} = 0.62\mu\text{m}$ ,  $\sigma_{P02} = 0.40\mu\text{m}$ ,  $\gamma_1 = 0.60$ ,  $N = 510\text{rpm}$ ,  $n = 0.020\text{Pa}\cdot\text{s}$



**Σχήμα1.1.5:** Αντιπροσωπευτικά: θεωρητικό και πειραματικό διάγραμμα μεταβολής δύναμης τριβής πρώτου δακτυλίου.

Calculated piston ring-liner minimum film thickness  $L = 1.75\text{mm}$ ,  $R = 18.00\text{mm}$  (unloaded conditions)  $N = 510\text{rpm}$ ,  $n = 0.020\text{Pa}\cdot\text{s}$



**Σχήμα1.1.6:** Αντιπροσωπευτικά : θεωρητικό διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης πρώτου δακτυλίου για διαφορετικές φάσεις φθοράς της επιφάνειας του κυλίνδρου

Στη διεπιφάνεια μεταξύ τεμαχίων μηχανολογικής χρήσης, ως προς την τριβολογική τους συμπεριφορά πρωταγωνιστικό ρόλο παίζουν αφενός το υλικό (μέτρο ελαστικότητας  $E$ , λόγος του Poisson  $\nu$ , σκληρότητα  $H$ ), αφετέρου χαρακτηριστικά της μικρογεωμετρίας των μικροεπιφανειών που κατά κανόνα συμπεριλαμβάνονται μεταξύ των τυποποιημένων τιμών που δίνονται από τα λογισμικά τραχυμέτρησης.

Τα σύγχρονα Μοντέλα με τα οποία υπολογίζονται φορτία και ρεαλιστικές επιφάνειες επαφής βασίζονται κατά κανόνα στην υπόθεση μιας κανονικής κατανομής (**Gauss**) και για αρχική κατάσταση φθοράς όπως και για τελική, με ίσως μοναδική

διόρθωση την διαφοροποίηση- μείωση του εύρους για την κανονική κατανομή φθαρμένης επιφανείας.

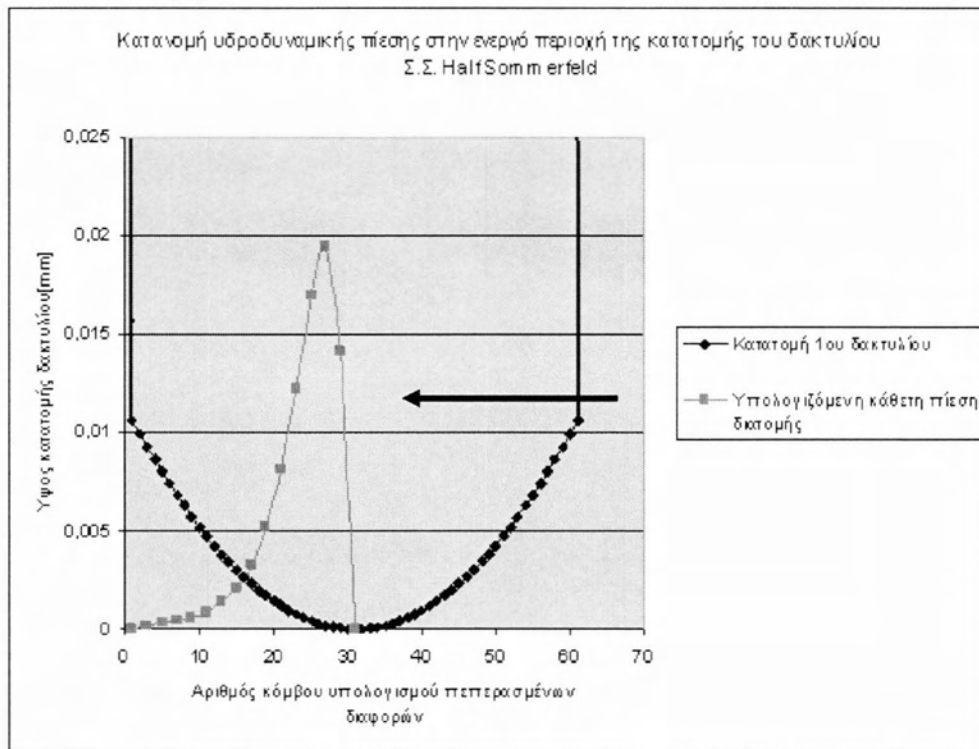
Τα δυο θεωρητικά μοντέλα **Patir-Cheng & Greenwood-Tripp** απαιτούν πρόσθετες, γενικά μη τυποποιημένες παραμέτρους των κατατομών (profil) καθώς και προσαρμοσμένες ρεαλιστικές τιμές διορθωτικών συντελεστών που λαμβάνονται υπόψη.

Η τεκμηρίωση των συμπερασμάτων και προτάσεων που έπονται γίνεται όπως έχει ήδη προαναφερθεί με βάση υπολογιστικό κώδικα (θεωρητική προσομοίωση τριβολογικής συμπεριφοράς τραχειών επιφανειών) που αναπτύσσεται συνεχώς και εξελίσσεται στο τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η αξία της συγκεκριμένης προσέγγισης.

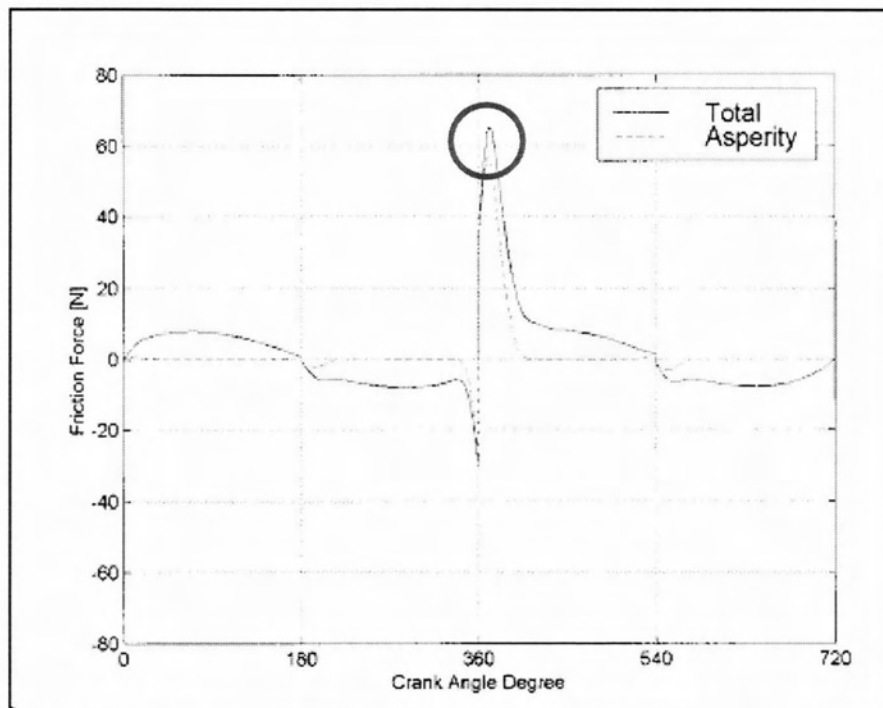
## **1.2. Μεθοδολογία για την θεωρητική προσομοίωση της συμπεριφοράς δακτυλίων εμβόλων MEK**

Οι σύγχρονες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της θεωρητικής προσέγγισης της τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλων έχουν ήδη εγκαταλείψει τις κλασικές μεθόδους περί πλήρους και υδροδυναμικής λίπανσης. Γενικά, αποδέχονται ένα είδος μικτής λίπανσης κυρίως στις περιοχές των νεκρών σημείων όπου η υδροδυναμική συνιστώσα της παραλαβής φορτίου ελαχιστοποιείται ενώ παράλληλα εμφανίζεται η συνιστώσα παραλαβής φορτίου από τους λοφίσκους των τραχειών επιφανειών οι οποίοι παραμορφώνονται υπό την επίδραση του φορτίου αυτού ελαστικά ή πλαστικά (ένα είδος μικρο-έλαστο-υδροδυναμικής συμπεριφοράς).

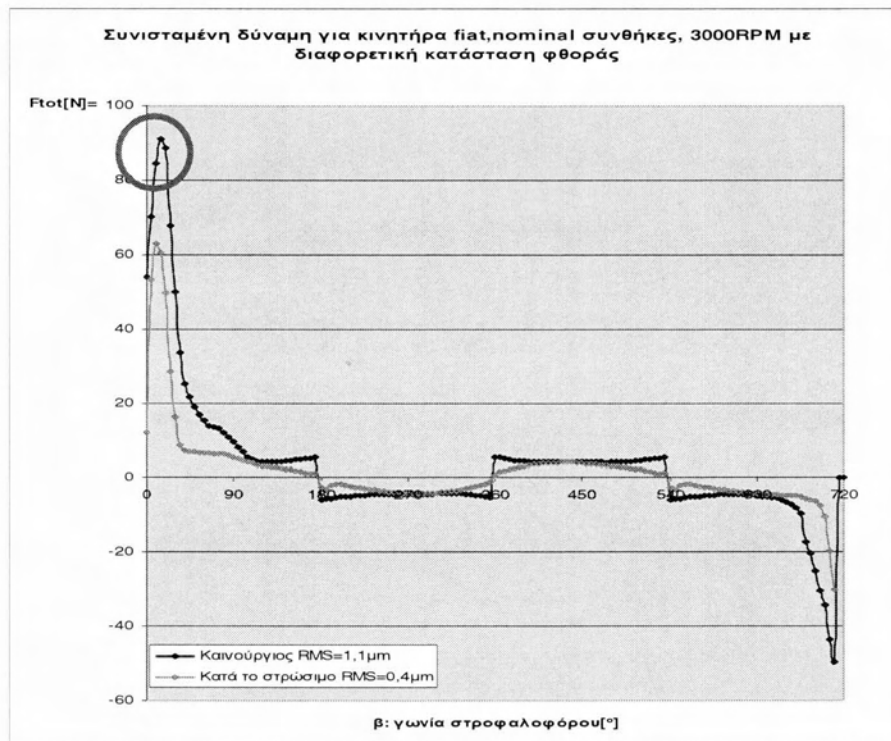
Επιπλέον στα μοντέλα αυτά Τα μοντέλα αυτά θεωρούνται στην πιο απλή μορφή τους ισόθερμα. Προχωρημένα μοντέλα προσομοίωσης θεωρούνται σήμερα τα θέρμο-μικρο-έλαστο υδροδυναμικά όπου εκτός των άλλων σε πρώτο βαθμό επιβάλλεται ενεργειακό- θερμικό ισοζύγιο, και αφετέρου γίνεται και υπολογισμός του διαθέσιμου λιπαντικού που απομένει για να λιπάνει τους δακτυλίους που έπονται μέσα σ' ένα πλήρες σύστημα εμβόλου δακτυλίων.



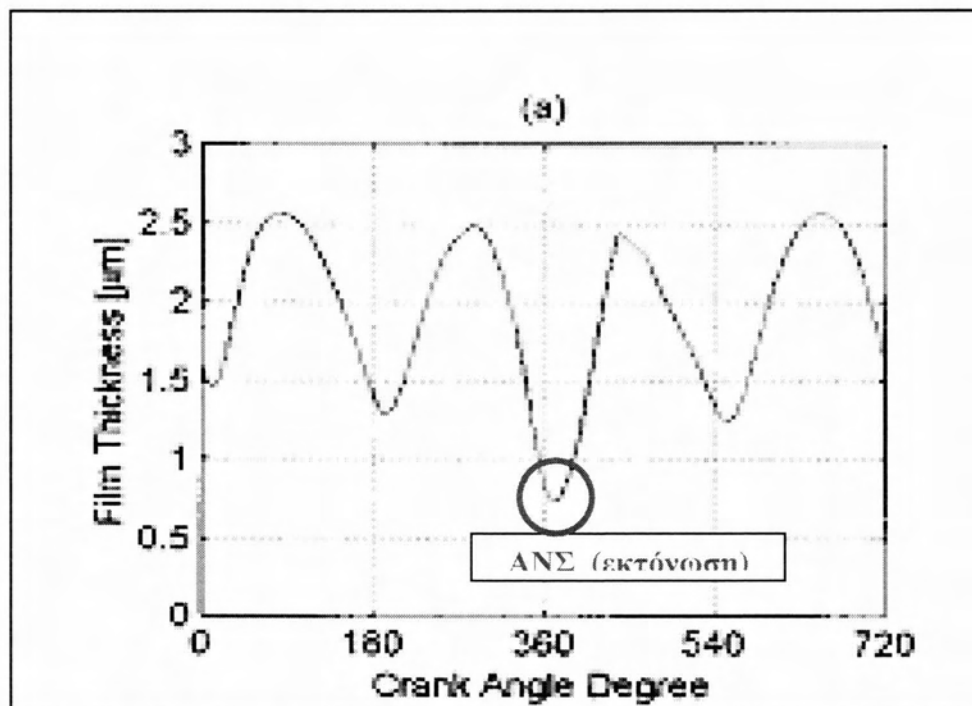
**Σχήμα 1.2.1 :** Τυπική καμπύλη κατανομής 1<sup>ου</sup> δακτυλίου με την κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων κατά την κίνηση προς τα αριστερά-από κάτω νεκρό σημείο προς άνω νεκρό σημείο (αναπτυσσόμενο μοντέλο ΠΘ).



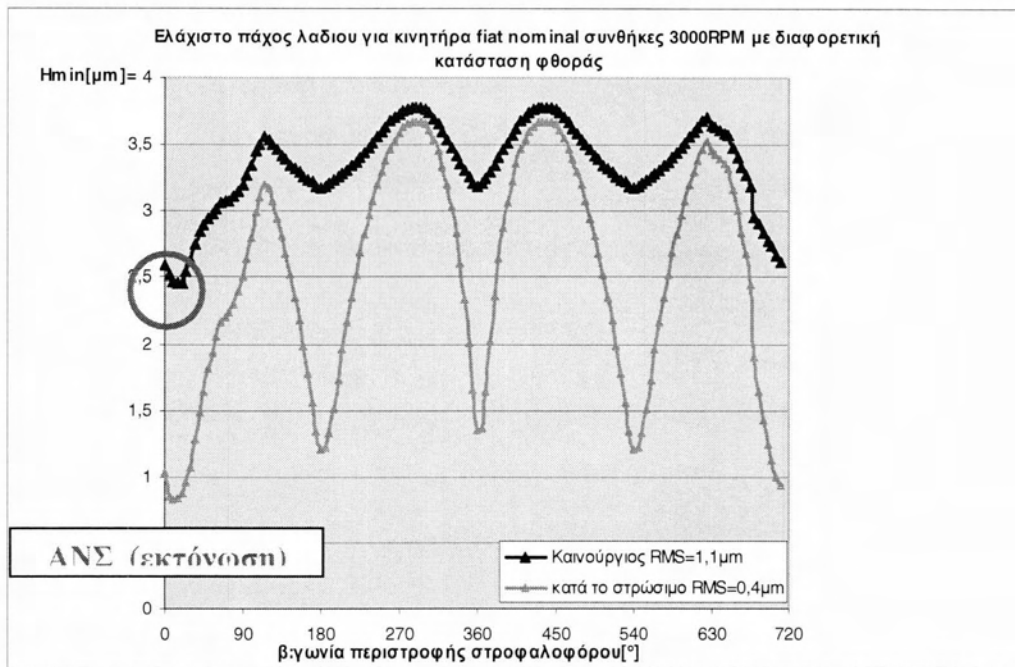
**Σχήμα 1.2.2 :** Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1<sup>ου</sup> δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (δεδομένο από σύγχρονη βιβλιογραφία-θεωρητική προσομοίωση)



Σχήμα 1.2.3 : Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1<sup>ου</sup> δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (Αναπτυσσόμενο μοντέλο ΠΘ)



Σχήμα 1.2.4 : Τυπική συμπεριφορά 1<sup>ου</sup> δακτυλίου όσον αφορά το αναπτυσσόμενο πάχος λαδιού στη διεπιφάνεια δακτυλίου κυλίνδρων. (Δεδομένο από βιβλιογραφία )



**Σχήμα 1.2.5 :** Τυπική συμπεριφορά 1<sup>ου</sup> δακτυλίου όσον αφορά το αναπτυσσόμενο πάχος λαδιού στη διεπιφάνεια δακτυλίου κυλίνδρων για λειτουργία υπό φορτίο (Αναπτυσσόμενο μοντέλο ΠΘ).

Έτσι ο τεχνικός συμβιβασμός οδήγησε στην χρήση **δύο θεωριών** κάθε μία των οποίων αντιμετωπίζει μία συνιστώσα παραλαβής φορτίου και κατά συνέπεια και μία συνιστώσα της ολικής δύναμης τριβής.

### 1.3 Στοιχεία του μοντέλου Greenwood-Tripp

Ο υπολογιστικός κώδικας σε περίπτωση λείων επιφανειών απαιτεί σα δεδομένο μία ελάχιστη αλλά μη μηδενική τιμή της τραχύτητας (τυπική απόκλιση της κατανομής των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων), ενώ στη γενική περίπτωση απαιτεί την γνώση επιπλέον των παρακάτω χαρακτηριστικών:

- **Πυκνότητα λοφίσκων** (αριθμός λοφίσκων ανά μονάδα επιφάνειας) ( $\eta$ )
- **Μέση ακτίνα καμπυλότητας του πληθυσμού των κορυφών των λοφίσκων** ( $\beta$ )

Θεωρείται σημαντικό να αναφερθεί ότι τελικά στην διαδικασία υπολογισμού των απωλειών λόγω τριβών στο υπό μελέτη σύστημα σημαντικό ρόλο παίζει η ισχύς τριβής η οποία ελαχιστοποιείται στις περιοχές των άνω και κάτω νεκρών σημείων, όπου μηδενίζεται η τραχύτητα. Άρα για τον υπολογισμό της παραμέτρου  $P_{mf}$  (μέση

πίεση που αντιστοιχεί στις μηχανικές απώλειες) η ακρίβεια με βάση την υδροδυναμική συνιστώσα θεωρείται ικανοποιητική .

Αντίθετα, στις περιοχές των **νεκρών σημείων** το μοντέλο φιλοδοξεί να ερμηνεύσει το μηχανισμό της φθοράς. Σημειωτέον, ότι ο κώδικας που υποστηρίζει την παρούσα εργασία είναι εφαρμόσιμος σε περίπτωση ανοιχτού κυλίνδρου αλλά και σε περίπτωση προσομοίωσης ρεαλιστικής λειτουργίας με διακεκριμένους τους τέσσερις χρόνους λειτουργίας τετράχρονης ΜΕΚ εφαρμόζεται σε διαφορετικές γεωμετρίες κινητήρων και κατατομών δακτυλίων (κυρτών-κολουροκωνικών-επίπεδων), καθώς και σε διαφορετικά στάδια φθοράς των διεπιφανειών (χωρίς ώρες λειτουργίας, μετά το στρώσιμο και φθαρμένες).

Στο **μοντέλο του Greenwood** λαμβάνεται υπόψη συντελεστής τριβής τάξεως μεγέθους 0,16 που αφορά στο μηχανισμό τριβής των κορυφών των λοφίσκων. Η τιμή αυτή ευελπιστούμε ότι θα καθοριστεί και στον πειραματικό προσομοιωτή. Η δεύτερη παράμετρος που αντιστοιχεί στην διατμητική δύναμη που «απαιτείται» για την υπερνίκηση της αντίστασης της λεγόμενης επιφανειακής μονομοριακής μεμβράνης  $\tau_0$  στο μοντέλο μας, θεωρείται αμελητέα.

$$W_{tot} = W_{tota} + W_{toth}$$

$W_{tot}$  = Ολικό φορτίο επαφής

$W_{tota}$  = Φορτίο που παραλαμβάνεται από την τραχύτητα

$W_{toth}$  = Υδροδυναμικό φορτίο

$$F_{tot} = F_{tota} + F_{toth}$$

$F_{tot}$  = ολική δύναμη τριβής

$F_{tota}$  = Συνιστώσα της τριβής που οφείλεται στην παραμόρφωση της τραχύτητας

$F_{toth}$  = υδροδυναμική συνιστώσα της τριβής

$F_{tota} = aW_{tota} + \tau_0 * A$

**Όπου:**  $A$ : πραγματική επιφάνεια επαφής Greenwood

$A = \pi DL$ : φαινόμενη επιφάνεια επαφής

Τα προηγούμενα, όπως προαναφέρθηκε **αφορούν σε συμμετρικές κατανομές υψομέτρων** των κορυφών των λοφίσκων που στη γενικότητα τους λαμβάνονται κανονικές (Gauss). Στις περιπτώσεις αυτές συνάρτηση του μεγέθους που καθορίζει το διαχωρισμό των μέσων τιμών του υψομέτρου των λοφίσκων των δύο τραχειών επιφανειών είναι αφενός το φορτίο που παραλαμβάνεται από τις ελαστικά παραμορφωμένες μικρογεωμετρικές ανωμαλίες των επιφανειών και αφετέρου η

πραγματική επιφάνεια επαφής καθώς και ο αριθμός των επαφών ανά μονάδα επιφάνειας.

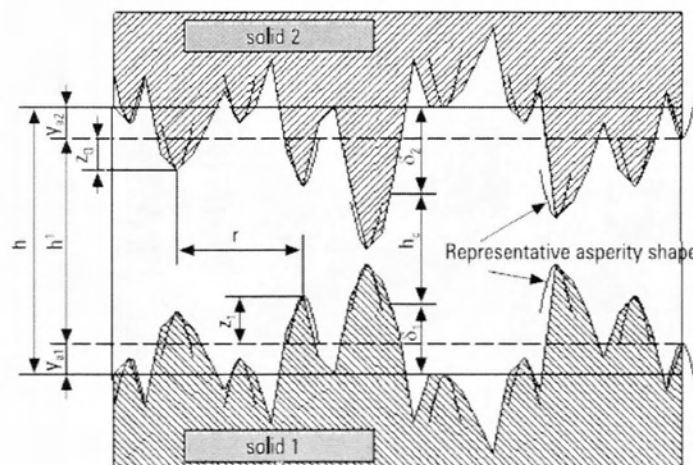
Αυτό που αναφέρεται στη θεωρία Greenwood σαν διαχωρισμός των επιφανειών (surface separation- $d$  ή σπανιότερα και  $h$ ) θα μπορούσε να ισοδυναμεί με το αντίστοιχο μέγεθος του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης αν οι δύο πληθυσμοί υψομέτρων δηλαδή ο πληθυσμός υψομέτρων όλων των σημείων της κατατομής της επιφάνειας ( $\sigma_{po}$ :τυπική απόκλιση) και το υποσύνολο του δηλαδή ο πληθυσμός των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων( $\sigma_p$ : τυπική απόκλιση) εμφανίζουν τον ίδιο μέσο όρο.

Σε αντίθετη περίπτωση όπως συμβαίνει στην πράξη υπάρχει διαφορά μη μηδενική των μέσων όρων των δύο πληθυσμών ( $y_o > 0$ ) με την τιμή του μέσου όρου των πληθυσμού των pick μεγαλύτερη.

Έτσι το  $d$  γίνεται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :

$$d = h - y_o \text{ ή } (d(i,j) = h(i,j) + y_o)$$

Συνεπώς, λαμβάνουμε αντίστοιχα για το φορτίο  $W(d)$  την πραγματική επιφάνεια επαφής  $A(d)$  και τον πραγματικό αριθμό λοφίσκων σε επαφή  $N(d)$  τις παρακάτω εκφράσεις



$$W(d) = \pi(\eta\beta\sigma)^2 A[F_{5/2}(d/\sigma)]^{(16/15)} \sqrt{2} E_{\text{corm}} \sqrt{\sigma/\beta}$$

$$A(d) = \pi^2 (\eta\beta\sigma)^2 A[F_2(d/\sigma)]$$

$$N(d) = 4\pi(\eta\beta\sigma) A \eta[F_1(d/\sigma)]$$

Στις παραπάνω σχέσεις εκτός από τους συντελεστές την παρουσία της φαινόμενης επιφάνειας επαφής και του μέτρου ελαστικότητας των υλικών εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά  $\eta$ ,  $\beta$  και  $\sigma$  είτε σαν γινόμενο  $\eta\beta\sigma$  είτε σαν λόγος  $\sigma/\beta$  και αναφέρονται σε χαρακτηριστικά του πληθυσμού υψομέτρων κορυφών λόφων, καθώς και του πληθυσμού των ακτινών καμπυλότητας των λοφίσκων που σε πρώτη προσέγγιση θεωρείται ότι παραμορφώνεται ελαστικώς.

Εννοείται ότι σε περίπτωση διαφοροποίησης των τιμών  $\sigma_{p0}$  και  $\sigma_{pi}$  τότε στους παραπάνω τύπους όπου  $\sigma = \sigma_{pi}$

Επίσης οι συναρτήσεις που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του  $F_{5/2}$  και  $F_2$  προτείνεται στη βιβλιογραφία να παίρνουν τις ακόλουθες τιμές ( $H=d/\sigma$ ) για λόγους απλότητας, ενώ στη πραγματικότητα οι συναρτήσεις αυτές συνδέονται άμεσα με τη συνάρτηση κατανομής των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων..

$$F_2(H) = \begin{cases} d_1 e^{\left( d_2 \log(H^* - H) + d_3 (\log(H^* - H))^2 \right)}, & H \leq 3,5 \\ d_1^H (H^* - H)^{d_2^H}, & H^* \geq H \geq 3,5 \\ 0, & H \geq H^* \end{cases}$$



$$F_{5/2}(H) = \begin{cases} f_1 e^{\left( f_2 \log(H^* - H) + f_3 (\log(H^* - H))^2 \right)}, & H \leq 3,5 \\ f_1^H (H^* - H)^{f_2^H}, & H^* \geq H \geq 3,5 \\ 0, & H \geq H^* \end{cases}$$

Όπου:  $H^* = 4, d_1 = 1.705 \times 10^{-4}, d_2 = 4.05419, d_3 = 1.37025, d_1^H = 8.8123 \times 10^{-5}$   
 $d_2^H = 2.1523, f_1 = 2.1339 \times 10^{-4}, f_2 = 3.804467, f_3 = 1.341516, f_1^H = 1.1201 \times 10^{-4}$   
 $f_1^H = 1.9447$

Η μοντελοποίηση της τριβής δακτυλίου-χιτωνίου, που παρουσιάζεται στη συνέχεια όπως προαναφέρθηκε, βασίζεται στην ιδέα του Rhode που πρώτος πρότεινε το συνδυασμό δύο ανεπτυγμένων στοχαστικών θεωριών, που περιγράφουν τη λιπαινόμενη επαφή μεταξύ δύο τραχειών τριβόμενων επιφανειών.

Στοχαστικές θεωρίες που εμφανίστηκαν σε μηχανισμό παραλαβής φορτιών, κατά την επαφή δύο στερεών και μάλιστα στην περίπτωση επιφανειών που εμφανίζουν ανισοτροπία τραχύτητας αναπτύχθηκαν από τον Christensen.

Οι **Patir-Cheng** προτείνουν την μορφή μιας εξίσωσης του Reynolds εισάγοντας διορθωτικούς συντελεστές ροής (flow factors) οι οποίοι εξάγονται βάσει θεωρητικής προσομοίωσης. Αυτή η εξίσωση που ισχύει για λιπαντικό ισόθερμο και ασυμπιεστο, οδηγεί στον προσδιορισμό το πεδίου των πιέσεων λαμβάνοντας υπόψη τις συναρτήσεις κατανομής των υψομέτρων των σημείων καθεμιάς από τις δύο επιφάνειες, καθώς και τους αντίστοιχους χαρακτήρες, ως προς την ανισοτροπία των τραχυτήτων αυτών.

Στις περιπτώσεις που υπάρχουν επαφές έχει παρατηρηθεί μια αμελητέα διασπορά αποτελεσμάτων αναλόγως με τις συναρτήσεις κατανομής των υψομέτρων των σημείων των επιφανειών. Η διασπορά αυτή οφείλεται επίσης στον υπολογισμό συνθετικών τραχειών επιφανειών βάσει των οποίων υπολογίζονται οι υπόλοιποι συντελεστές. Στο θεωρητικό μοντέλο που ακολουθεί σαν πρώτο βήμα στην θεωρία **Patir-Cheng** θα λάβουμε υπόψη επιφάνειες που χαρακτηρίζονται από κανονική συνάρτηση (**Gauss**) και στη συνέχεια θα ληφθούν υπόψη επιφάνειες με

ρεαλιστικότερες συναρτήσεις κατανομής που υπολογίζονται με βάση το μοντέλο **Fisher-Pearson**.

Όσον αφορά στη μελέτη του φορτίου που παραλαμβάνεται από τους παραμορφώσιμους λοφίσκους των δύο επιφανειών και εν συνεχεία τον υπολογισμό της αντίστοιχης συνιστώσας της τριβής θα γίνει χρήση της θεωρίας Greenwood και Tripp για επιφάνειες όχι κανονικές όπου οι λοφίσκοι είναι παραβολοειδή εκ περιστροφής, σταθερής ακτίνας καμπυλότητας, αλλά μεταβαλλόμενου ύψους και φορτίζονται αξονικά με απουσία μεμονωμένων συγκρούσεων των λοφίσκων αυτών κατά τη σχετική κίνηση των επιφανειών αυτών.

Σημειώνεται ότι η θεωρία αυτή βασίζεται σε μια γενίκευση της επαφής τύπου Hertz, μεταξύ δυο παραβολοειδών εκ περιστροφής, λαμβάνοντας υπόψη κριτήρια που συνδέονται αυστηρά με τον πληθυσμό των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων, της επιφανειακής πυκνότητάς τους, καθώς και την καμπυλότητα των κορυφών τους.

Στα σημεία των επαφών η παροχή μηδενίζεται, ενώ παράλληλα θεωρούμε ότι στις περιοχές αυτές υπάρχει ένα επιφανειακό φιλμ λιπαντικού  $\mu\chi$  του τύπου μονοστρωματικό, δηλαδή σε μοριακά μορφή. Το πάχος της μεμβράνης αυτής είναι της τάξεως nm και επιδέχεται μια διατμητική τάση της τάξης  $10^6$  έως  $10^8$  Pa. Σε περίπτωση απουσίας ακριβέστερων δεδομένων στο μαθηματικό μοντέλο είναι αποδεκτή μια συμπεριφορά, σύμφωνα με τη μελέτη που αναφέρεται σε οργανικής υφής λιπαντικές μεμβράνες χαμηλού πάχους.

#### **1.4 Λίπανση δακτυλίου-χιτωνίου**

Στο γενικό πρόβλημα της λίπανσης δύο γενικά τραχειών επιφανειών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση διακρίνουμε δύο τρόπους λίπανσης:

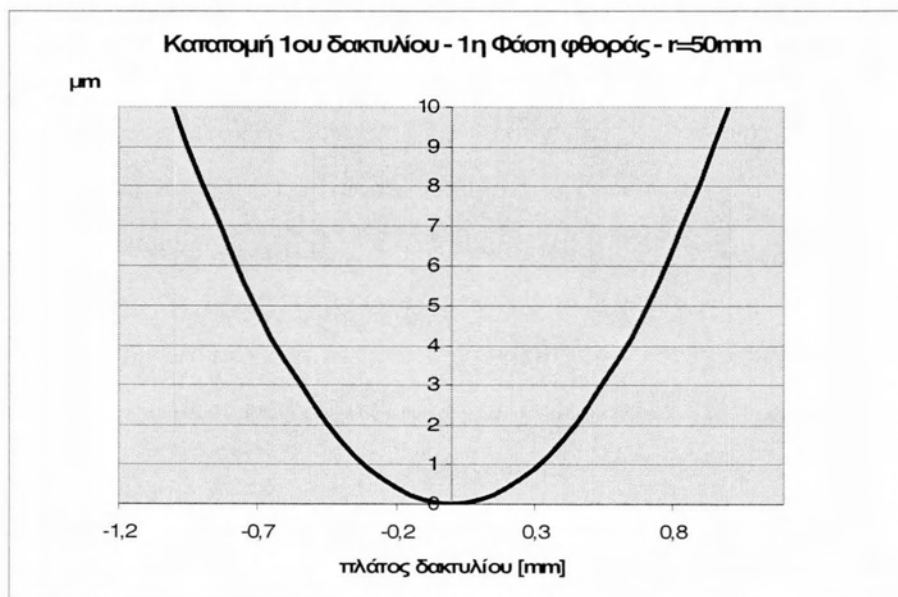
1. **Τη μη υδροδυναμική λίπανση** που περιλαμβάνει την οριακή λίπανση και τη μεικτή λίπανση.
2. **Την υδροδυναμική λίπανση** που ονομάζεται και λίπανση με μεγάλο πάχος λιπαντικής μεμβράνης.

Κατά τις βέλτιστες συνθήκες λίπανσης η λιπαντική μεμβράνη διαχωρίζει σαφώς τις δύο τραχείες επιφάνειες και εμποδίζει κάθε επαφή μεταξύ των λοφίσκων της τραχύτητας.

Στην πράξη στο σύστημα δακτυλίου χιτώνιου παρατηρούμε ένα τύπο λίπανσης με έντονο μεταβατικό χαρακτήρα που τον χαρακτηρίζουμε σαν λίπανση μεικτού χαρακτήρα στην περίπτωση αυτή αν και το λιπαντικό υφίσταται πάντοτε, υπάρχει συγχρόνως επαφή μεταξύ των δυο στερεών σε περιπτώσεις χαμηλών γραμμικών ταχυτήτων, δηλαδή στις περιοχές πλησίον των νεκρών σημείων καθώς και σε περιπτώσεις ισχυρών φορτίων στη διεπιφάνεια κυρίως κατά τη φάση εκτόνωσης. Είναι αποδεκτό λοιπόν ότι το φορτίο στη διεπιφάνεια παραλαμβάνεται αφενός μεν από τη λιπαντική μεμβράνη αφετέρου από τους παραμορφώσιμους λοφίσκους των τραχυτήτων. Αυτοί οι δύο μηχανισμοί παραλαβής του φορτίου περιγράφονται από μαθηματικά μοντέλα ανεξάρτητα μεταξύ τους. Γίνεται λοιπόν αποδεκτό ότι τα δύο μοντέλα συνυπάρχουν με τη δυνατότητα απουσίας του ενός ή του άλλου. Η μετάβαση από το ένα μηχανισμό, παραλαβής φορτίου, στον άλλο, προφανώς γίνεται προοδευτικά προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση. Η συνολική δύναμη τριβής είναι συνισταμένη επίσης δύο ανεξάρτητων συνιστωσών που αναφέρονται αντίστοιχα στην υδροδυναμική συνιστώσα και στη συνιστώσα που συνδέεται με τη διάτμηση μίας επιφανειακής μεμβράνης που εμφανίζεται στις περιοχές επαφής των λοφίσκων.

#### **1.4.1 Επίδραση της μικρογεωμετρίας των επιφανειών κυλίνδρου και δακτυλίου.**

Κατά τη θεωρητική προσομοίωση της μικτής λίπανσης συστήματος δακτύλιος χιτώνιο συνηθίζεται αντί της μελέτης της επαφής μεταξύ δύο τραχειών επιφανειών να γίνεται προσέγγιση της μικρογεωμετρίας στην περιοχή της επιφάνειας με το ισοδύναμο μοντέλο μικτής λίπανσης μεταξύ λείας κινούμενης και τραχείας σταθεράς επιφάνειας. Στη συγκεκριμένη υπό μελέτη περίπτωση θεωρούμε κατά συνέπεια ότι ο δακτύλιος είναι λείος ενώ παράλληλα το χιτώνιο εμφανίζει ισοδύναμη τραχύτητα τέτοια ώστε  $\sigma_1^2 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ . Όπου  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  οι τυπικές αποκλίσεις των κατανομών για το χιτώνιο και τον δακτύλιο αντίστοιχα. Αντιπροσωπευτικά πειραματικά αποτελέσματα δίνουν, για τα χαρακτηριστικά της μικρογεωμετρίας αυτής, ότι η μεταβολή τους σε τρία διαφορετικά στάδια φθοράς συμφωνεί με τα παρακάτω δεδομένα.



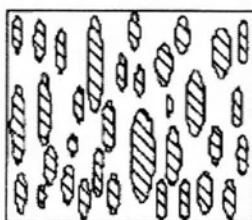
**Στάδιο 1:** Πριν από τη λειτουργία

$$\sigma_{p0} = 1,1\mu\text{m} , \sigma_{pi} = 0,95 \quad y_0 = 0,40$$

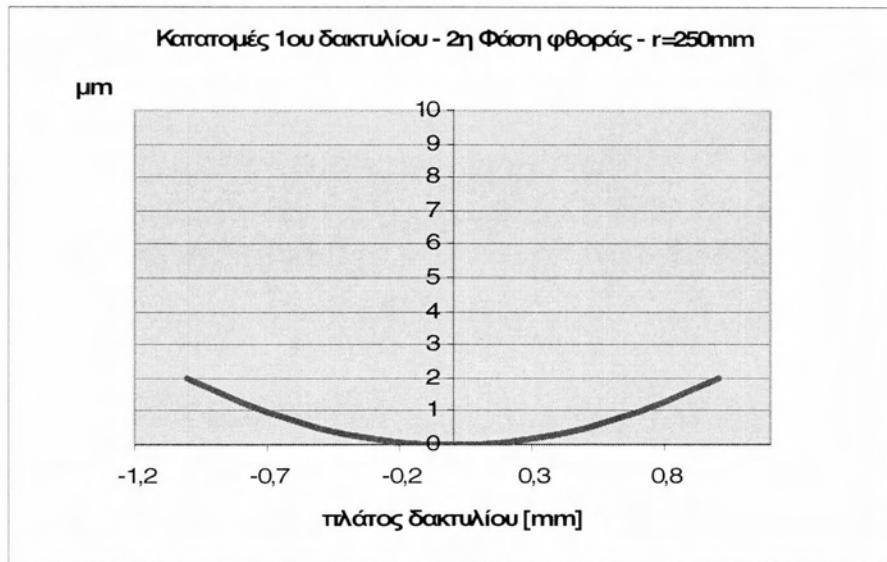
$$\eta\beta\sigma = 0,20$$

$$\sigma/\beta = 0,05$$

$$\gamma = 1/3$$



$$\gamma < 1$$



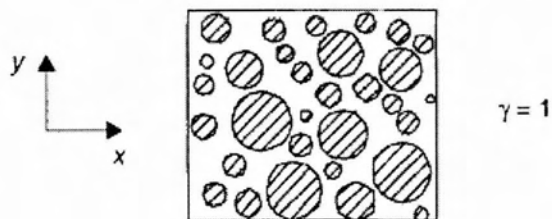
**Στάδιο 2:** Μετά από 10 ώρες λειτουργίας

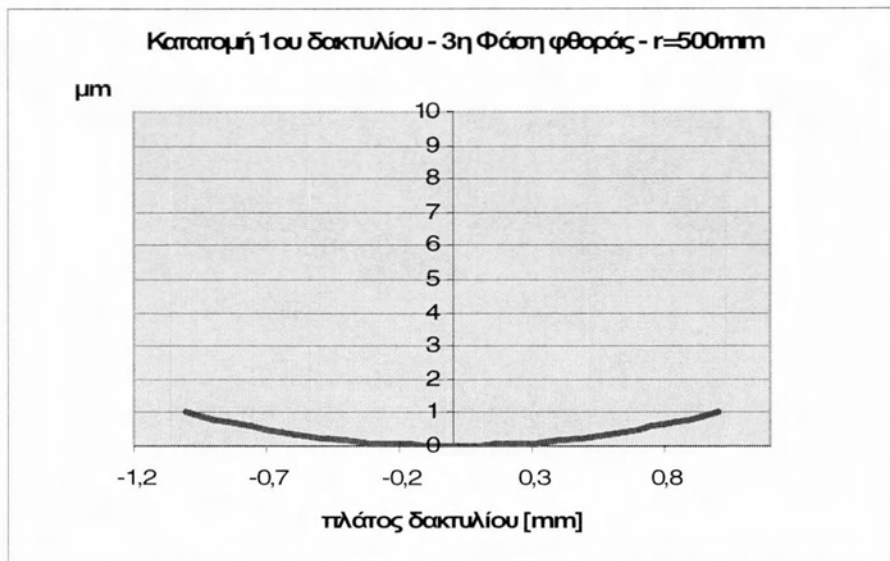
$$\sigma_{p0} = 0,82\mu\text{m} , \sigma_{pi} = 0,40 \quad y_0 = 0,17$$

$$\eta\beta\sigma = 0,17$$

$$\sigma/\beta = 0,004$$

$$\gamma = 1$$





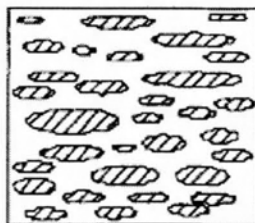
**Στάδιο 3:** Μετά από 100 ώρες λειτουργίας

$$\sigma_{p0} = 0,55 \mu\text{m} , \sigma_{pi} = 0,30 \quad y_0 = 0,14$$

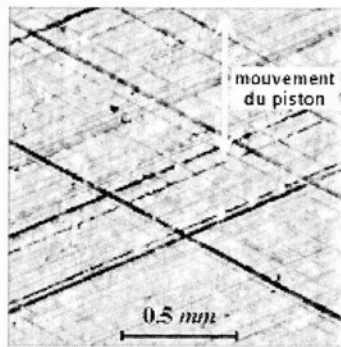
$$\eta\beta\sigma = 0,30$$

$$\sigma/\beta = 0,0028$$

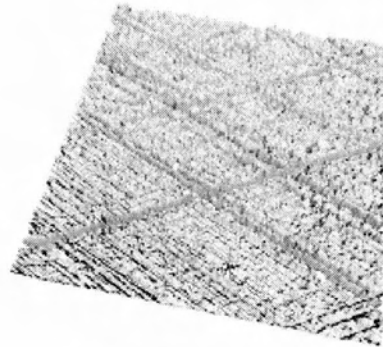
$$\gamma = 3$$



$$\gamma > 1$$



(a) image topographique 2D



(b) représentation 3D

**Σχήμα 1.4.1.1:** Τυπική μικρογεωμετρία επιφάνειας κυλίνδρου (κατεργασία honning), με εμφανή τα πλέγματα παραλλήλων γραμμών και το σχήμα των ρόμβων με μικρή την διαγώνιο κατά το μήκος του κυλίνδρου. Τυπική ανισότροπη επιφάνεια με  $\gamma < 1$  (εγκάρσια ανισοτροπία). (α) διδιάστατη απεικόνιση (β) τρισδιάστατη απεικόνιση

#### 1.4.2 Τραχύτητα και πάχος της λιπαντικής μεμβράνης (Patir-Cheng)

Τοπικά το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης  $h_T$  είναι συνάρτηση:

- του τοπικού πάχους της λιπαντικής μεμβράνης  $h$  που αντιστοιχεί στην τοπική απόσταση μεταξύ των μέσων γραμμών των δύο κατατομών. Το μέγεθος μπορεί να καθοριστεί και από μέτρηση.
- των μεγεθών  $\delta_1, \delta_2$  των υσομέτρων των σημείων των επιφανειών 1 και 2 αντίστοιχα που μετρώνται από τις μέσες γραμμές. Οι κατανομές  $f_i(\delta)$  με  $i=1,2$  είναι γενικά μη κανονικές.
- Της απόστασης  $y_{0,i}$ ,  $i=1,2$  που αντιστοιχεί στη απόσταση μεταξύ των μέσων γραμμών των πληθυσμών που λαμβάνονται υπόψη για κάθε επιφάνεια. Δηλαδή, αφενός του πληθυσμού των υσομέτρων των σημείων και αφετέρου του πληθυσμού των υσομέτρων των κορυφών των λόφων, απόσταση που είναι γενικά αρνητική.
- Τις  $\sigma_{p0}$  και  $\sigma_{pi}$  δηλαδή τις τυπικές αποκλίσεις των δυο προαναφερθέντων πληθυσμών.

Έτσι λοιπόν έχουμε:  $h_T = h + \delta_1 + \delta_2$

Η συνθετική τραχύτητα  $\delta_1 + \delta_2$  έχει τυπική απόκλιση έχει  $\sigma_{p0}$  έτσι ώστε:

$$\sigma_{\rho 0}^2 = \sigma_{\rho 01}^2 + \sigma_{\rho 02}^2$$

Δεχόμαστε γενικά ότι για  $h/3 \sigma_{\rho 0} > 1$  η επίδραση στις τραχύτητες είναι αμελητέα. Η κατατομή κάθε λοφίσκου θεωρείται ότι περιγράφεται με μία παραβολική συνάρτηση  $y = f(x)$ . Αν  $\nu$  η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών λοφίσκων δύο σωμάτων υπάρχει επαφή όταν το  $h + y_{01} + y_{02} < z_1 + z_2 - 2f(r/2)$ , όπου  $z_1$  και  $z_2$  είναι τα υψόμετρα των λοφίσκων που μετρώνται από την μέση της γραμμής αναφοράς. Ορίζεται λοιπόν το μέγεθος  $w$  όπου.

- 1)  $w = z_1 + z_2 - 2f(r/2) - (h + y_{01} + y_{02})$ , [m]
- 2)  $\beta$  είναι η μέση τιμή της ακτίνας καμπυλότητας της ακτίνας των λοφίσκων. [m]
- 3)  $n$  η πυκνότητα των λοφίσκων. [m<sup>-2</sup>]

### 1.4.3 Υδροδυναμική συνιστώσα:

Η εξίσωση του Reynolds που με τον δυναμικό της όρο δίνεται στη συνέχεια:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6\eta u \frac{\partial h}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h}{\partial t}$$

Η εξίσωση αυτή προέρχεται από τις εξισώσεις NAVIER-STOKES είναι προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά λιπαινομένων επιφανειών με λεπτή αλλά ικανού πάχους λιπαντική μεμβράνη και στην ουσία ερμηνεύει την ισορροπία φορτίων στο σύστημα έτσι ώστε το επιβαλλόμενο φορτίο επαφής να παραλαμβάνεται από το πεδίο υδροδυναμικών πιέσεων που δημιουργείται στη διεπιφάνεια με τη παρουσία ιξώδους λιπαντικού σχετικής ταχύτητας μεταξύ των λιπαινομένων επιφανειών, διαφοροποίηση του πάχους λιπαντικής μεμβράνης κατά τη διεύθυνση της κίνησης ( $dh/dx$ ) και ενδεχομένως διαφοροποίηση του πάχους λιπαντικής μεμβράνης στο πεδίο του χρόνου ( $dh/dt$ ).

σε περίπτωση τραχειών επιφανειών γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Phi_x h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Phi_y h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta(u_1 - u_2) \frac{\partial h_T}{\partial x} + 6(u_1 - u_2) \frac{\partial h_T}{\partial x} \sigma_{\rho 0} \frac{\partial \Phi_s}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h_T}{\partial t}$$

Όπου  $u_i$  με  $i = 1, 2$  οι ταχύτητες των 2 επιφανειών σ' επαφή:



**P:** η μέση τοπική πίεση

$\Phi_x, \Phi_y, \Phi_s$ : συντελεστές ροής που εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της τραχύτητας τις τυπικές αποκλίσεις των κατανομών της και της τοπικής τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης, δηλαδή συντελεστές που εξαρτώνται από το πληθυσμό των υψομέτρων όλων των σημείων των τραχειών επιφανειών. Πάλι όμως, όπως θα δούμε στη συνέχεια οι συναρτήσεις κατανομής οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των προαναφερθέντων διορθωτικών συντελεστών ροής είναι συμμετρικές κατά κανόνα τύπου Gauss η για απλούστευση συμμετρικές πολυωνυμικές πχ  $f(x) = k(c^2 - x^2)/c^7$  όπου  $c = 3\sigma_{p0}$

**η:** δυναμικό ή απόλυτο ιξώδες [Pas]

Οι δύο πρώτοι όροι της προηγούμενης έκφρασης προέρχονται από τους όρους που ακολουθούν, όπου η τιμή  $h_T$  αντικαθίσταται από τη διορθωμένη τιμή του τοπικού πάχους λιπαντικής μεμβράνης  $h$  λαμβανομένου υπόψη του συντελεστή ροής  $\Phi_x, \Phi_y$ :

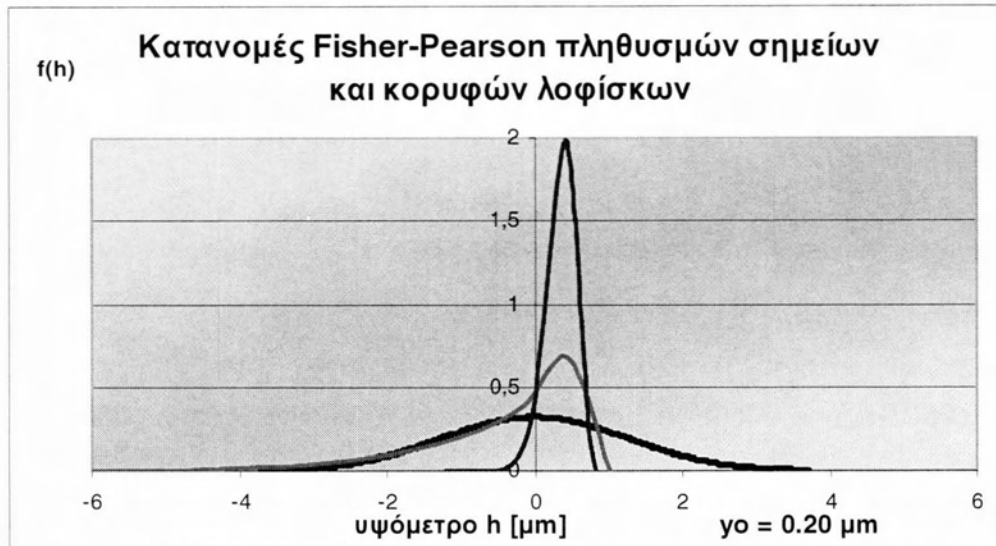
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h_T^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h_T^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right)$$

Ο συντελεστής  $\Phi_x$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi_x = \frac{1}{L_y} \frac{\int_0^{L_y} \left( \frac{h_T^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) dy}{\left( \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right)} \quad \text{όπου: } \frac{\overline{\partial p}}{\partial x} = \frac{P_B - P_A}{L_x}$$

Σύμφωνα με τη θεωρία **Patir-Cheng** οι τιμές των συντελεστών αυτών που εξάγονται κατόπιν μαθηματικής προσομοίωσης τραχειών και ανισοτρόπων επιφανειών προσεγγίζονται ως εξής:

$$\Phi_x(H, \gamma) = \begin{cases} 1 - ce^{-rH}, & \gamma \leq 1 \\ 1 + cH^{-r}, & \gamma > 1 \end{cases} \quad \Phi_y(H, \gamma) = \Phi_x \left( H, \frac{1}{\gamma} \right)$$



$$f(x) = f_0 (x + 1.42)^{(13.26-1)} (0.62-x)^{(3.93-1)}$$

$$f(x) = f_0 (x + 10.6689)^{(6.864064-1)} (0.994434-x)^{(0.639788-1)}$$

Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα κατανομών Fisher –Pearson σε σύγκριση με κατανομή Gauss για μέσο στάδιο φθοράς. Παρατηρείται το σημαντικά μικρότερο εύρος της συνάρτησης κατανομής των κορυφών των λοφίσκων, η ταύτιση του άνω ορίου των δύο συναρτήσεων Fisher –Pearson, καθώς και η διαφοροποίηση των μέσων όρων τους ( $\gamma_0 = 0.20 \mu\text{m}$ ).

Όπου:  $H = \frac{h}{\sigma}$  και  $\gamma = \frac{\lambda_{0.5x}}{\lambda_{0.5y}}$ ,  $\gamma$ : ο δείκτης ανισοτροπίας της τραχείας επιφάνειας

που χαρακτηρίζεται από τον λόγο των μηκών κύματος  $\lambda_{0.5x}$  και  $\lambda_{0.5y}$ , οι τιμές των οποίων ισοδυναμούν με το μήκος κύματος  $\lambda$  στο οποίο η αρχική τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης της τραχύτητας πέφτει στο ήμισυ της αρχικής τιμής της. Οι κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$  ισοδυναμούν αντίστοιχα στην διαμήκη και την περιφερειακή κατεύθυνση. Η συνάρτηση αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$R_{xx}(\lambda) = \frac{1}{N-\lambda} \sum_{i=1}^{N-\lambda} X(l_i) X(l_i + \lambda)$$

Όπου:  $N$ : Ο αριθμός των σημείων τη κατατομής της επιφάνειας.

$\lambda$ : Η απόσταση μεταξύ δύο τεταγμένων ( $R_{xx}(0) = \sigma_x^2$ ).

Αν  $h$  η τοπική τιμή της λιπαντικής μεμβράνης  $\bar{h}_r$  ορίζεται σαν:

$$\bar{h}_T = \int_{-h}^{\infty} (h - \delta) f_{\rho 0}(\delta) d\delta$$

Για την επίλυση της εξίσωσης του Reynolds γίνεται χρήση των Συνοριακών Συνθηκών που είναι γνωστές ως Half Sommerfeld, αγνοούμε λοιπόν το πεδίο των πιέσεων της αποκλίνουσας περιοχής στην οποία οι τιμές των πιέσεων σύμφωνα με το Reynolds είναι αρνητικές.

Όταν οι επιφάνειες μπορούν να θεωρηθούν λείες τότε  $\Phi_x = 1$  και  $\Phi_y = 1$  και επειδή  $\sigma_{\rho 0} = 0$  και το  $h_T = h$  και  $(u_1 - u_2) = u$  σχετική ταχύτητα. Έτσι η εξίσωση παίρνει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta u \frac{\partial h}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h}{\partial t}$$

Στην περιοχή που αναφέρεται στο μέσον της διαδρομής η μοναδική συνιστώσα είναι υδροδυναμικής φύσης και έχει τη μορφή:

$$F_H = \iint_s \tau_h ds$$

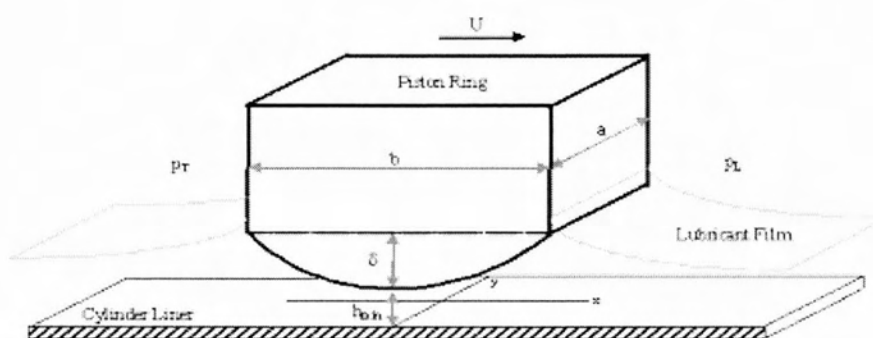
Το άθροισμα λοιπόν αυτών των δύο συνιστωσών θα δίνει την:

$$F_{total} = F_a + F_H$$

Η σημαντική απόκλιση της πραγματικής λειτουργίας των δακτυλίων σε σχέση με τις βασικές υποθέσεις που λαμβάνονται υπ' όψη στην θεωρητική ερμηνεία/αποσαφήνιση της τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλων ΜΕΚ οφείλεται στα παρακάτω στοιχεία:

- Η γεωμετρία των τριβομένων στοιχείων (δακτυλίου και κυλίνδρου) απέχει της γεωμετρίας κυλινδρικής συμμετρίας που πλείστες όσες φορές γίνεται δεκτή σε θεωρητικά προσομοιωτικά μοντέλα.
- Η υπόθεση του πλήρως και με αφθονία λιπαντικού λιπανομένου δακτυλίου όχι μόνο δεν αποδεικνύεται στην πράξη αλλά αντιθέτως απαιτεί εκ βάθρων αναθεώρηση, χωρίς όμως συγχρόνως να διατίθενται επαρκή στοιχεία επανατοποθέτησης του προβλήματος.

- Η τραχύτητα των τριβομένων επιφανειών πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπ' όψη και μάλιστα στην μακράν απέχουσα από κανονικές κατανομές μορφή της.
- Η ισορροπία του δακτυλίου αποτελεί δυσεπίλυτο πρόβλημα σε περίπτωση που ληφθούν υπ' όψη όλες οι παράμετροι (βαθμοί ελευθερίας, δυνάμεις-ροπές που εξασκούνται) σε συνδυασμό με υπολογιστικές πολυπλοκότητες (μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων, πεπερασμένων διαφορών) για τον λεπτομερή προσδιορισμό της λιπαινόμενης επαφής και την επίλυση της εξίσωσης λίπανσης.
- Το συνολικό πρόβλημα απαιτεί λύση λαμβανομένης υπ' όψη της αλληλεπίδρασης των δακτυλίων μέσα στην πλήρη συστοιχία τους, γεγονός που απαιτεί αλληπάλληλους διαδοχικούς υπολογισμούς, αποτελέσματα των οποίων οφείλουν να τροφοδοτούν, υπό την μορφή δεδομένων πλέον, τους υπολογισμούς που έπονται.



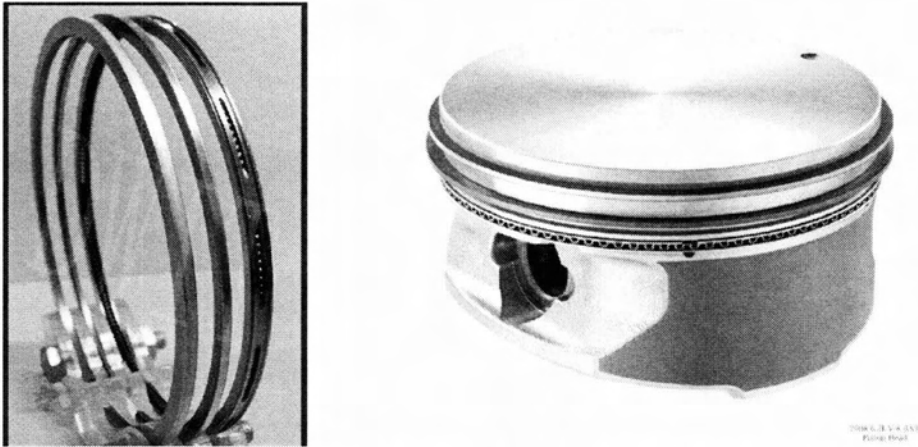
**Σχήμα 1.4.3.5 :** Κλασικό μοντέλο που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση του προβλήματος λίπανσης δακτυλίου εμβόλου MEK.

Επειδή όμως, η θεωρητική προσομοιωτική επεξεργασία αποτελεί κατ' εξοχήν χρήσιμο εργαλείο για την πλήρη κατανόηση της τριβολογικής λειτουργίας των δακτυλίων εμβόλου MEK, η συνεχής επικοινωνία με την πειραματική επιβεβαίωση ή διαφοροποίηση, θεωρείται ικανή και αναγκαία συνθήκη για κάθε προσεχές βήμα.

Στα πλαίσια λοιπόν μίας συνεχούς ροής πληροφοριών μεταξύ θεωρίας και πράξης στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα που φαινομενολογικά χαρακτηρίζουν την τριβολογική συμπεριφορά

μεμονωμένων δακτυλίων, ζευγών και τριάδας (συστοιχίας) δακτυλίων εμβόλων ΜΕΚ. Η συγκεκριμένη γεωμετρία και κινηματική καθώς και οι συνθήκες λίπανσης του κυλίνδρου που επελέγησαν, χαρακτηρίζουν πραγματικούς κινητήρες ΜΕΚ, χωρίς καμία επιπρόσθετη μετατροπή.

### 1.5 Δακτύλιοι εμβόλων ΜΕΚ.



**Σχήμα 1.5.1 :** Δακτύλιοι και πλήρες έμβολο ΜΕΚ διαφορετικών κατατομών.

Ο δακτύλιος του εμβόλου είναι ένα πολύπλοκης συμπεριφοράς, ίσως δε το πιο ενδιαφέρον τριβολογικό στοιχείο που συναντάται στο αυτοκίνητο. Υφίσταται ευρείες και ταχείες μεταβολές του φορτίου του, της ταχύτητάς του, της θερμοκρασίας και της διαθεσιμότητας λιπαντικού, με αποτέλεσμα μια λειτουργία κάτω από συνθήκες οριακής, μικτής, πλήρως υδροδυναμικής αλλά ακόμη και μικροελαστοϋδροδυναμικής λίπανσης σε περιπτώσεις κινητήρων Diesel ή βενζίνης κατά τη φάση της εκτόνωσης μετά την ανάφλεξη του μίγματος.

Έχει ήδη γίνει κοινή αντίληψη ότι στους σύγχρονους κινητήρες, οι απώλειες ισχύος λόγω τριβών στους κυλίνδρους οφειλόμενες εν μέρει στο τριβοςύστημα εμβόλου-κυλίνδρου και εν μέρει στο τριβοςύστημα ελατηριωτών δακτυλίων εμβόλου - κυλίνδρου έχουν μειωθεί σημαντικά μέσα από διαδικασίες ανάλυσης και βελτίωσης του σχεδιασμού. Γενικά είναι επίσης δεκτό, ότι το ποσοστό απωλειών που οφείλεται στους δακτυλίους είναι σημαντικότερο απ' αυτό του εμβόλου κυρίως λόγω της συνεχούς επαφής τους κατά την διάρκεια του κύκλου σε αντίθεση με το έμβολο που ο βαθμός ελευθερίας του σε περιορισμένη περιστροφή γύρω από τον άξονα/πίερό του, το υποχρεώνει σε μερική επαφή με τον κύλινδρο σε συγκεκριμένες περιοχές της

διαδρομής του (εξ ου και η ιδιαίτερη μορφή της ποδιάς του, σχήμα μπομπέ - οβάλ, αφαίρεση πλαϊνών για μείωση τριβής κλπ).

Το ποσοστό αυτό των απωλειών που οφείλονται στους δακτυλίους και μόνο αγγίζει το 20% των συνολικών μηχανικών απωλειών ενός κινητήρα. Οι απώλειες συνήθως χαρακτηρίζονται από την τιμή της  $p_{mf}$  (kPa). Η  $p_{mf}$  είναι η απώλεια μέσης πίεσης λόγω τριβών μέσα στον πλήρη κύκλο 4-χρονου κινητήρα:

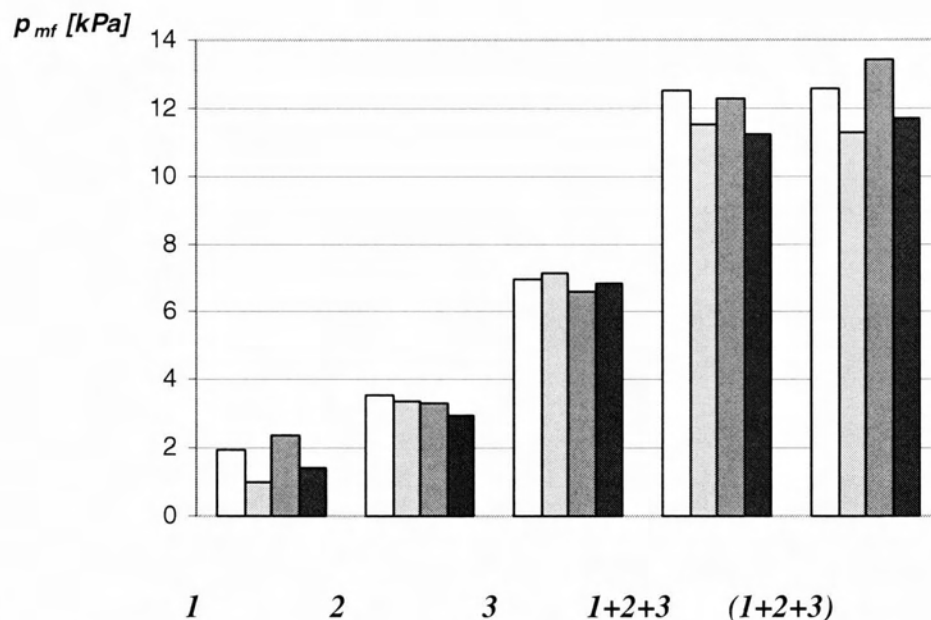
$$p_{mf} = \int_0^{4\pi} F(\beta)U(\beta)d\beta / V$$

Όπου:  $F$ : η δύναμη τριβής,

$U$ : η γραμμική ταχύτητα κίνησης του εμβόλου,

$\beta$ : η γωνία περιστροφής του στροφαλοφόρου

και  $V$ : ο όγκος του κυλίνδρου.



**Σχήμα 1.5.2** : Απώλειες από τριβή  $p_{mf}$  [kPa] για τους δακτυλίους εμβόλου σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας\*.

1: ο πρώτος δακτύλιος (της φωτιάς)

2: ο δεύτερος δακτύλιος (στεγάνωσης)

3: ο τρίτος δακτύλιος (στράγγισης)

1+2+3 : συνθετικές απώλειες, άθροισμα των απωλειών μεμονωμένων δακτυλίων

(1+2+3): ολικές απώλειες συστοιχίας, οι τρεις δακτύλιοι μαζί σε οδηγούμενο έμβολο

\* Συνθήκες λειτουργίας: περιστροφική ταχύτητα/ιξώδες λιπαντικού

500 rpm/70 mPa.s, 500 rpm/11 mPa.s, 955 rpm/70 mPa.s, 955 rpm/11 mPa.s

Μετρήσεως σε προσομοιωτή πρώτης γενιάς, γεωμετρία MEK Renault 851-541cm<sup>3</sup>/κύλινδρος

Είναι αυτονόητο ότι στον υπολογισμό της  $p_{mf}$  σημαντική είναι η συνεισφορά της δύναμης τριβής στο μέσο της διαδρομής παρά στις περιοχές των νεκρών σημείων (ΑΝΣ και ΚΝΣ), και αυτό διότι ενώ στις περιοχές αυτές οι δυνάμεις τριβής αυξάνονται λόγω επαφών των μεταλλικών στοιχείων, οι μικρές ή μηδενικές τιμές της ταχύτητας έχουν σαν συνέπεια τον μηδενισμό της ισχύος απωλειών άρα της τιμής του γινομένου  $F(\beta)U(\beta)$  μέσα στο ολοκλήρωμα της  $p_{mf}$ .

Έτσι, μπορεί κανείς γενικά να δεχθεί ότι η σύγκριση με βάση την  $p_{mf}$  εμπεριέχει και χαρακτηριστικά σύγκρισης δυνάμεων τριβής σε περιοχές αυξημένης τιμής της ταχύτητας του εμβόλου.

Το υλικό του κυλίνδρου απαιτεί συγκεκριμένη συμπεριφορά ελατηρίων. Βάση για τις δύο βασικότερες κατηγορίες υλικών κυλίνδρου είναι αφ' ενός ο χυτοσίδηρος και αφ' ετέρου τα κράματα αλουμινίου. Στη δεύτερη κατηγορία, τα συνεργαζόμενα έμβολα διαθέτουν ελατήρια μεγάλης στιβαρότητας, με ρόλο να μην επιτρέπουν εκτός των άλλων την παραμικρή επαφή κυλίνδρου-εμβόλου.

Οι κύλινδροι ελαφρών κραμάτων θεωρούνται ότι εμφανίζουν σημαντικά μειωμένες φθορές σε σχέση με τους παραδοσιακούς και εκτός των άλλων συγκριτικών πλεονεκτημάτων τους αναφέρονται οι παρόμοιοι συντελεστές θερμικής διαστολής εμβόλου-κυλίνδρου που οδηγούν σε μικρότερα διάκενα συναρμολόγησης-λειτουργίας, βελτιωμένη στεγανότητα, μειωμένη κατανάλωση λαδιού, μικρότερο βάρος και καλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Στη γενικότητά τους όμως, οι κύλινδροι MEK κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο. Χυτοσίδηρος (ή και χάλυβας) χρησιμοποιείται και για την κατασκευή των ελατηριωτών δακτυλίων του εμβόλου. Η ποιότητα που απαιτείται για τον χυτοσίδηρο των δακτυλίων είναι βελτιωμένη έτσι ώστε να τους προσδίδει την απαιτούμενη ελαστικότητα και να καθίσταται δυνατή η χωρίς πρόβλημα τοποθέτησή τους στις αντίστοιχες εγκοπές/φωλιές του εμβόλου, τοποθέτηση που απαιτεί σημαντικό «άνοιγμα» του δακτυλίου.

Ο διακριτός ρόλος κάθε δακτυλίου χαρακτηρίζεται από την θέση, την διατομή του που καθορίζει και τα χαρακτηριστικά επαφής του με τον κύλινδρο, καθώς και την

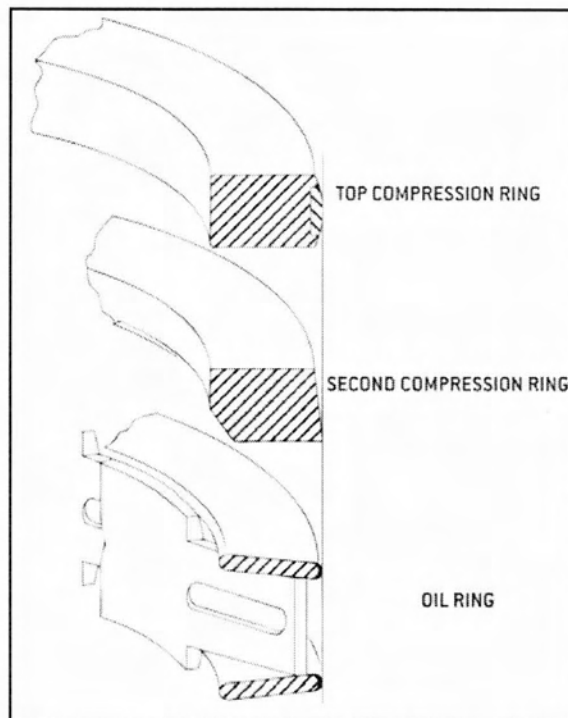
ελαστική του επενέργεια που στοχεύει στην δημιουργία φορτίου επαφής και δίνει την δυνατότητα ώστε σε συστοιχία με τους υπόλοιπους δακτυλίους να επιτελέσει το σύνθετο έργο του, δηλαδή την στεγανοποίηση του θαλάμου καύσης και την αποφυγή blow by, την οδήγηση του εμβόλου, τον έλεγχο της λίπανσης ολοκλήρου του παλινδρομούντος συστήματος εμβόλου-δακτυλίων, καθώς και τον έλεγχο κατανάλωσης λιπαντικού.

Κάθε δακτύλιος, μετά την τοποθέτησή του σε θέση λειτουργίας δρα αναλόγως ή με ομοιόμορφα κατανεμημένη ή ακόμη και μεταβαλλόμενη ακτινική πίεση πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Εμφανίζοντας διάκενο, το οποίο του αφαιρεί την κυλινδρική του συμμετρία, ξεπερνά αστοχίες κατά το άνοιγμα και την τοποθέτησή του πάνω στο έμβολο (άνοιγμα 8 φορές το ονομαστικό διάκενο χωρίς προβλήματα παραμενουσών παραμορφώσεων και λοιπές αστοχίες) με εσωτερική σφυρηλασία και ισχυρότερα κτυπήματα στην περιοχή που βρίσκεται αντιδιαμετρικά της τομής/διακένου. Το ελεύθερο διάκενο στην περιοχή τομής του δακτυλίου, αντιστοιχεί σε ποσοστό 0.25 % της διαμέτρου του κυλίνδρου και οφείλει να παραμένει, έστω και μερικώς, ανοικτό κατά την λειτουργία της MEK κάτω από εξόχως έντονα θερμοκρασιακά πεδία.

Τα ελατήρια-δακτύλιοι κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα ελατήρια συμπίεσης-στεγανοποίησης του θαλάμου καύσης και στα ελατήρια λαδιού, σκοπός των οποίων είναι η απόξεση του κυλίνδρου. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται από οπές διέλευσης λιπαντικού, ώστε το λάδι να επιστρέφει μέσα από διαύλους στην κάτω του εμβόλου περιοχή και τελικά στην ελαιολεκάνη. Οι δακτύλιοι της δεύτερης κατηγορίας συναντώνται είτε στο πάνω μέρος του εμβόλου, τελευταίοι σε συστοιχία με τους υπόλοιπους, είτε και μεμονωμένοι στην κάτω περιοχή της ποδιάς του εμβόλου.



## Κατηγοριοποίηση δακτυλίων εμβόλων ΜΕΚ.



**Σχήμα 1.5.3 :** α) δακτύλιος πρώτος «της φωτιάς»

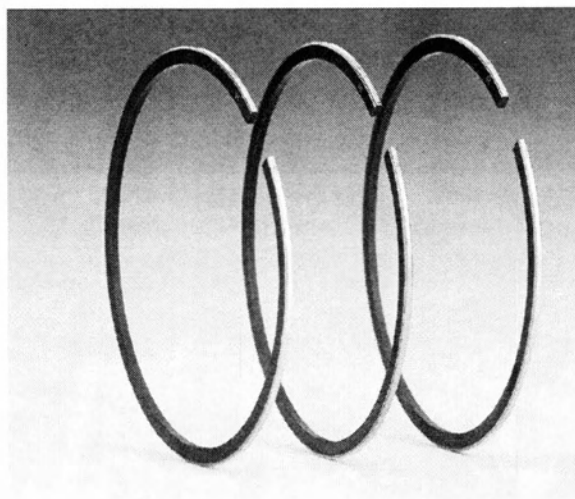
β) δακτύλιος δεύτερος «στεγανωτικός»

γ) δακτύλιος τρίτος «αποξεστικός»

Κατά το λεγόμενο Αμερικανικό μοντέλο, ο αριθμός των δακτυλίων είναι 3. Οι δύο πρώτοι (προς τον Θάλαμο Καύσης) είναι δακτύλιοι στεγανοποίησης και ο τρίτος (προς την ελαιολεκάνη) είναι δακτύλιος απόξεσης.

Ο πρώτος (*N<sup>ο</sup> 1*) δακτύλιος ονομάζεται και «της φωτιάς», ο δεύτερος (*N<sup>ο</sup> 2*), ο μεσαίος, είναι ο κατ' εξοχήν «στεγανωτικός» όπως συνηθίζεται να ονομάζεται, και ο τρίτος (*N<sup>ο</sup> 3*) καλείται «αποξεστικός» ή «του λαδιού».

Η λίπανση των δακτυλίων αυτών επιτελούμενη με την βοήθεια υγρού λιπαντικού που συγχρόνως πρέπει να ικανοποιεί και απαιτήσεις λίπανσης εδράνων καθώς και ωστηρίων - έκκεντρων, μπορεί να θεωρηθεί μικτού χαρακτήρα με σημαντική συνιστώσα αυτή της μη υδροδυναμικής λίπανσης-τριβής.



Ο πρώτος δακτύλιος «της φωτιάς», δέχεται κατά την φάση της εκτόνωσης εντονότερα αλλά και κατά την συμπίεση λιγότερο έντονα, την επιπρόσθετη πίεση του αερίου μίγματος που προστίθεται στην ελαστική του πίεση. Έτσι, το φορτίο επαφής του μεταβάλλεται σημαντικά μέσα στον θερμοδυναμικό κύκλο, γεγονός που εμφανίζεται πολύ πιο υποβαθμισμένης σημασίας στον δεύτερο δακτύλιο (έως και αμελητέο, αν και υπαρκτό λόγω blow by).

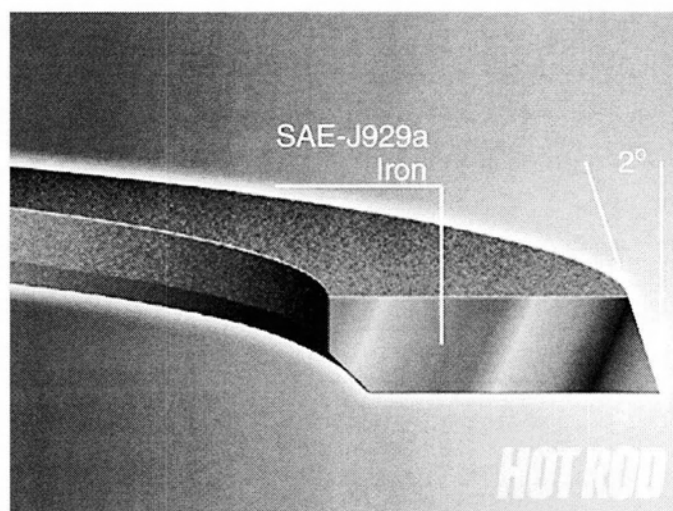
Ο δακτύλιος της φωτιάς είναι ο μόνος που παρουσιάζεται με κατατομή που εμφανίζει συγκλίνουσα και αποκλίνουσα περιοχή, με αποτέλεσμα να δύναται να παραλάβει υδροδυναμικό φορτίο, δηλαδή να λιπανθεί υδροδυναμικά, υπό την προϋπόθεση ότι του παρέχεται η απαιτούμενη ποσότητα λιπαντικού και κατά τις δύο φάσεις κίνησης (ανόδου και καθόδου), από το Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) προς το Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ) και αντίστροφα. Κατά τους χρόνους εξαγωγής και εισαγωγής μίγματος στον κύλινδρο ΜΕΚ, ο δακτύλιος αυτός λόγω της μορφής του και του μειωμένου φορτίου επαφής παρουσιάζει, αν και μερικά λιπαινόμενος, τις περισσότερες πιθανότητες υδροδυναμικής λίπανσης.

Ειδικότερα σ' ότι αφορά σε κινητήρες βενζίνης, κυβισμού από 277-541  $\text{cm}^3$ /κύλινδρο, οι δακτύλιοι της φωτιάς έχουν πλάτος της τάξης του mm (πχ 1.75 mm), με τάση μείωσής του, ώστε να μειωθεί και το επιπρόσθετο φορτίο λόγω πίεσης αερίων. Η κατατομή (profil) τους, κατασκευαστικά επιτυγχάνεται με αρχικές ακτίνες καμπυλότητας της τάξης μερικών δεκάδων χιλιοστών (πχ 20-50 mm). Η καμπυλότητα αυτή αυξάνεται με την φθορά κατά τον χρόνο λειτουργίας και έχει σαν αποτέλεσμα η φθαρμένη διατομή του δακτυλίου να εμφανίζεται τελικά περίπου επίπεδη. Η ελαστική πίεση που οι κατασκευαστές συνήθως προτείνουν κυμαίνεται από 0.50 έως  $2.0 \cdot 10^5$  Pa. Θεωρητικό προσομοιωτικό μοντέλο δίδει για περιστροφή

στροφαλοφόρου από 1500–6000 rpm και λιπαντικό ιξώδους 7.4 mPa.s (15W40-130° C), μέγιστο πάχος απαιτούμενης λιπαντικής μεμβράνης κατά την παλινδρόμηση από 4-9 μm σε συνθήκες επαρκούς λίπανσης. Αντίστοιχες τιμές για κινητήρα Diesel, το έμβολο του οποίου έχει 4 δακτυλίους δίνονται για αρχικό στάδιο φθοράς, 3-6 μm, για μεμονωμένο δακτύλιο, ενώ η εκτίμηση του πάχους μεμβράνης λιπαντικού κατά την λειτουργία συστοιχίας πέφτει στην τιμή 0.25 – 0.80 μm και ακόμη περισσότερο με τη φθορά μετά από 120 – 630 h λειτουργίας.

Ο δακτύλιος της φωτιάς γενικά λόγω της κατατομής του δύναται να λειτουργεί ακόμη και όταν το έμβολο περιστρέφεται ελαφρά κατά την διαδρομή του. Η απουσία ακμών απομακρύνει την πιθανότητα διακοπής της λιπαντικής μεμβράνης και η μικρή επιφάνεια επαφής του με τον κύλινδρο λόγω της σχεδόν γραμμικής επαφής, μειώνει την περίοδο «του στρωσίματος» του κινητήρα. Δακτύλιοι της φωτιάς κυκλοφορούν στο εμπόριο κατασκευασμένοι από χυτοσίδηρο σφαιροειδούς γραφίτη ή/και επενδυμένοι περιφερειακά με μολυβδαίνιο, φωσφατωμένοι ή ακόμη και επιχρωμιωμένοι.

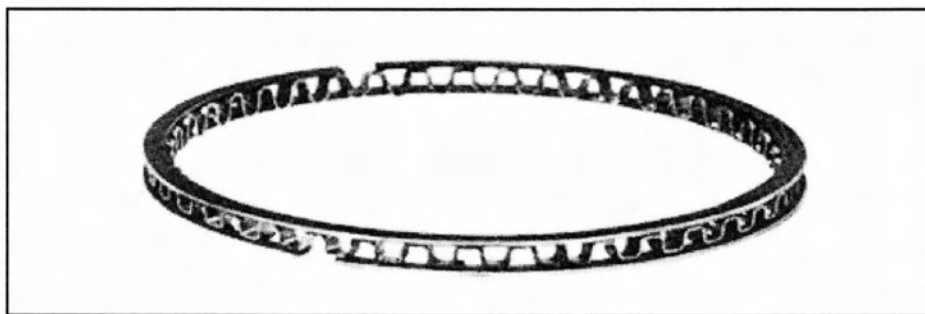
Για τους επιχρωμιωμένους βαρελοειδούς κατατομής, ενδείκνυται κατ' αρχάς η δημιουργία εσωτερικού στρώματος από σκληρό χρώμιο, πάχους 60-90 μm, ενώ ένα εξωτερικό στρώμα πάχους 40-60 μm από πορώδες χρώμιο δίνει το τελικό επιθυμητό προφίλ στον δακτύλιο. Έντονες κοιλάδες που παρατηρούνται στην μικροτοπογραφία είναι πόροι/συνέπειες της κατεργασίας του.



Ο **δεύτερος δακτύλιος** συνήθως είναι κόλouro-κωνικής φυσιογνωμίας με διατομή ορθογωνίου τραπεζίου, πλάτους περίπου 2 mm, με κωνικότητα που χαρακτηρίζεται από περίπου 35  $\mu\text{m}$  ακτινική απόσταση ακμών. Η αιχμηρή περιοχή του είναι τοποθετημένη-εστραμμένη προς το κάτω νεκρό σημείο με στόχο την αποφυγή υδροδυναμικού σφήνα κατά την κάθοδο του εμβόλου και παράλληλα την επίτευξη στράγγισης του λιπαντικού. Η ελαστική πίεση που ενδείκνυται είναι περίπου  $2.0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . Θεωρητικό προσομοιωτικό μοντέλο δίδει για περιστροφή στροφαλοφόρου από 1500 – 4500 rpm και λιπαντικό ιξώδους 7.4 mPas (15W40-130° C), μέγιστο πάχος απαιτούμενης λιπαντικής μεμβράνης κατά την παλινδρόμηση για την άνοδο από 8-13  $\mu\text{m}$ . και για την κάθοδο σταθερό πάχος 2  $\mu\text{m}$ .

Αντίστοιχες τιμές για κινητήρα Diesel, το έμβολο του οποίου έχει 4 δακτυλίους δίνονται για αρχικό στάδιο φθοράς, κατά την άνοδο 6.5  $\mu\text{m}$  και για την κάθοδο (σταθερό πάχος) 1  $\mu\text{m}$  για μεμονωμένο δακτύλιο, ενώ η εκτίμηση του πάχους μεμβράνης λιπαντικού κατά την λειτουργία συστοιχίας πέφτει στην τιμή 0.80  $\mu\text{m}$  και ακόμη περισσότερο με τη φθορά μετά από 120 – 630 h λειτουργίας.

Δακτύλιοι αυτού του τύπου γενικά κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο ή χάλυβα, υφίστανται επιφανειακή κατεργασία ή επικάλυψη περιφερειακά και σπανιότερα στην επίπεδες επιφάνειές τους για αύξηση της αντίστασής τους σε φθορά. Ο δακτύλιος στεγάνωσης θεωρείται επίσης ότι μειώνει την περίοδο στρωσίματος λόγω της εξ αρχής γραμμικής του επαφής με τον κύλινδρο και ότι δρα συμπληρωματικά με τον τρίτο δακτύλιο (του λαδιού) στον έλεγχο κατανάλωσης λιπαντικού.



Ο **τρίτος δακτύλιος** είναι σχεδόν αδύνατο να λειτουργήσει κάτω από συνθήκες υδροδυναμικής λίπανσης, εκτός των περιπτώσεων παρέκκλισης από την ονομαστική του γεωμετρία επαφής λόγω φθοράς ή παραμορφώσεων.

Γενικά, η υψηλή τιμή της πίεσης επαφής του δεν είναι δυνατό να αντισταθμιστεί από υδροδυναμικό μηχανισμό ώστε να αποκολληθεί ο δακτύλιος αυτός από τον κύλινδρο, αν και είναι ο μόνος που του παρέχεται λιπαντικό σε αφθονία. Συνήθως εμφανίζει δύο χείλη πλάτους δεκάτων χιλιοστού πχ 0.2-0.4mm, συνολικό πλάτος περίπου 4.5mm και ελαστική πίεση  $7.8 \times 10^5$  Pa. Θεωρητικό προσομοιωτικό μοντέλο [93-96] δίδει για περιστροφή στροφαλοφόρου από 1500 – 6000 rpm και λιπαντικό ιξώδους 7.4 mPas (15W40-130° C), μέγιστο πάχος απαιτούμενης λιπαντικής μεμβράνης κατά την παλινδρόμηση της τάξης των 3 μm. Η μεγάλη τιμή της ελαστικής πίεσης στον 3<sup>ο</sup> δακτύλιο επιτυγχάνεται με εσωτερικό ελατηριωτό εκτατήρα. Τέτοιου τύπου εκτατήρες χρησιμοποιούνται και για τους άλλους δακτυλίους σε περιπτώσεις πολύ φθαρμένων κυλίνδρων (έως 0.50mm φθορά στην διάμετρό τους) προς αποφυγή ανεπιθύμητων συμβάντων (διαρροή λιπαντικού, υπερβολική κατανάλωση λιπαντικού, αύξηση blow by) χωρίς να είναι και η βέλτιστη ενδεδειγμένη λύση από την άποψη τριβής-φθοράς.



# Κεφάλαιο 2

Αποτελέσματα υπολογισμών  
Χρήση κώδικα Oil Film

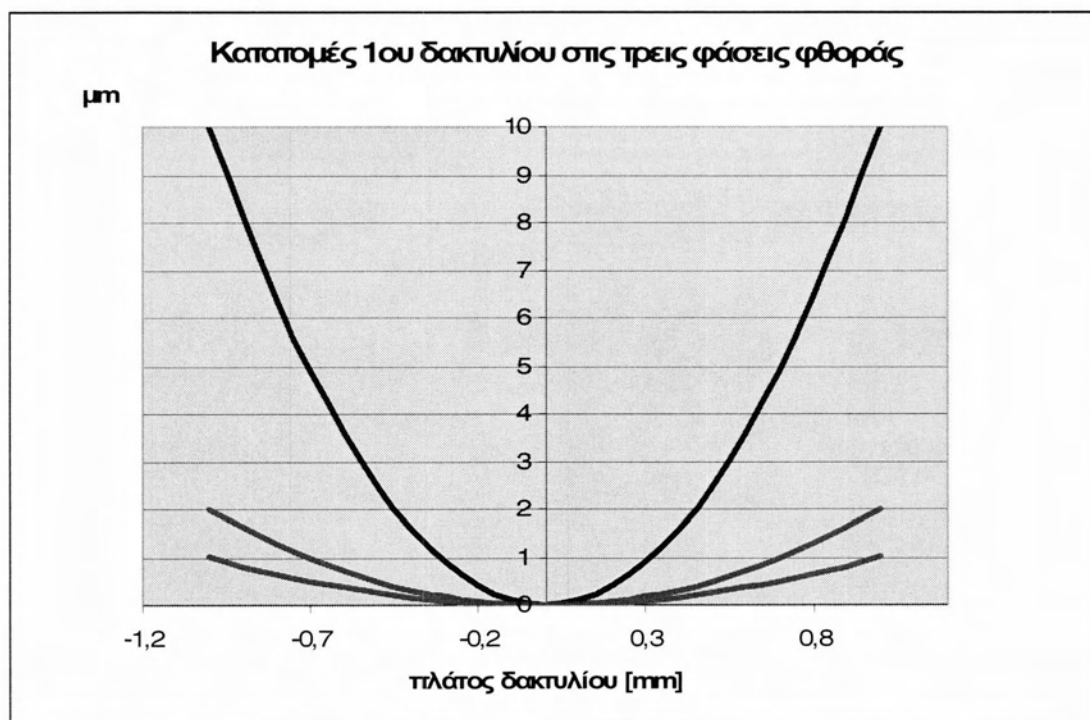




## 2.1 Ονομαστικά αποτελέσματα κώδικα για το δακτύλιο της φωτιάς

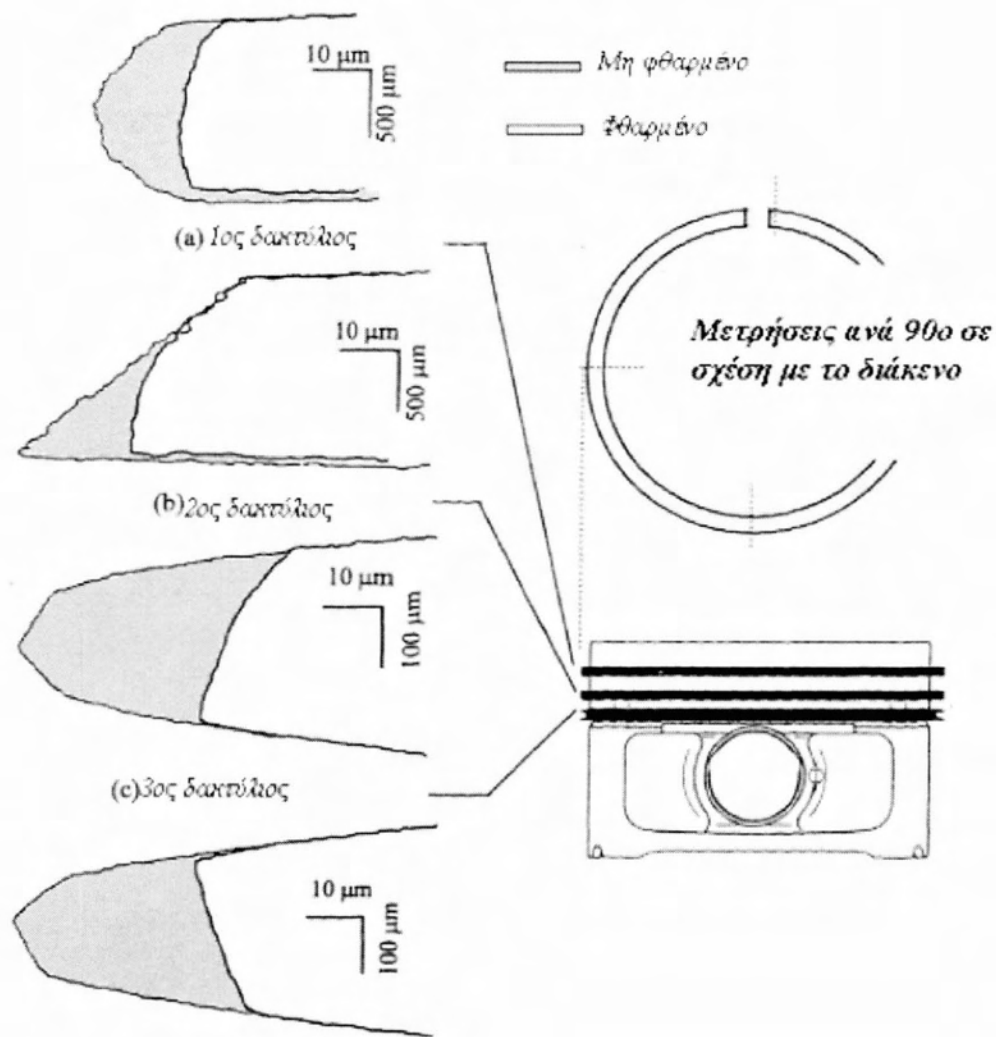
Σύμφωνα με τον υπολογιστικό κώδικα Oil Film που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Fortran στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Παράρτημα 1) και αφού έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις του προγράμματος για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ελήφθησαν τιμές για διάφορα σημεία λειτουργίας (συχνότητα περιστροφής), ιξώδη λιπαντικού μέσου και καμπυλοτήτων του 1<sup>ου</sup> δακτυλίου «της φωτιάς» για τις τρεις φάσεις φθοράς. Σε πρώτη φάση μελετήθηκε το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης από 0-380 μοίρες για συνθήκες κυλίνδρου εκτός λειτουργίας φορτίου δηλαδή ουσιαστικά με τον κύλινδρο ανοιχτό και τούτο για να μην υπάρχει διαφοροποίηση της καμπύλης κατά τις δυο φάσεις παλινδρόμησης (άνοδο και κάθοδο) που θεωρείται ότι προσεγγίζουν αντίστοιχα τις φάσεις εξαγωγής-εισαγωγής.

Οι γραφικές παραστάσεις που παρατίθενται αφορούν κυρίως το ελάχιστο πάχος λιπαντικής μεμβράνης που υπολογίστηκε καθώς και τη συνολική δύναμη τριβής στα αναφερόμενα σημεία λειτουργίας.

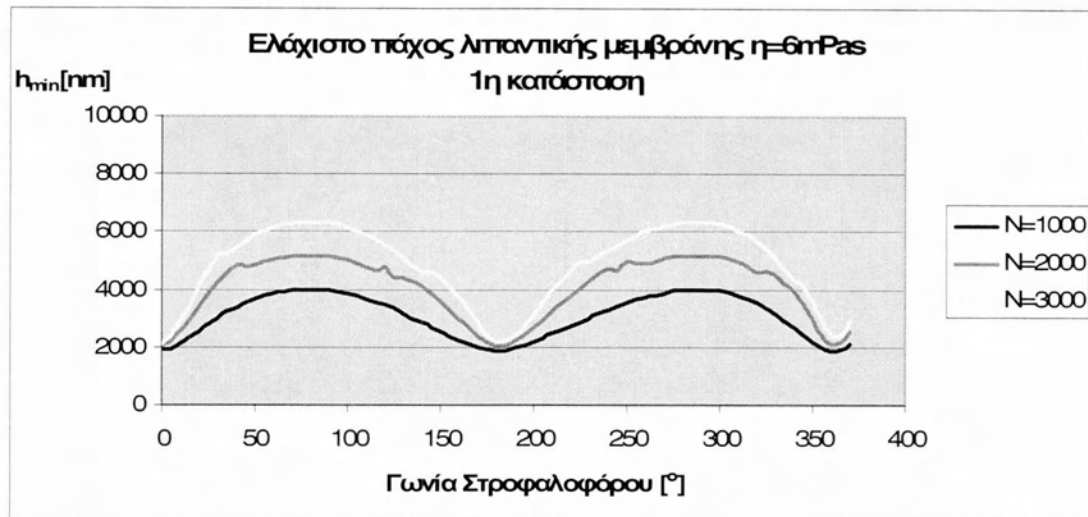


**Σχήμα 2.1:** Κατατομές διαφορετικής καμπυλότητας 1<sup>ου</sup> δακτυλίου στις τρεις φάσεις φθοράς. Μπλε (αρχική φθορά) R=50mm, Πράσινη (ενδιάμεση): R=250mm, Κόκκινη (προχωρημένη): R=500mm.

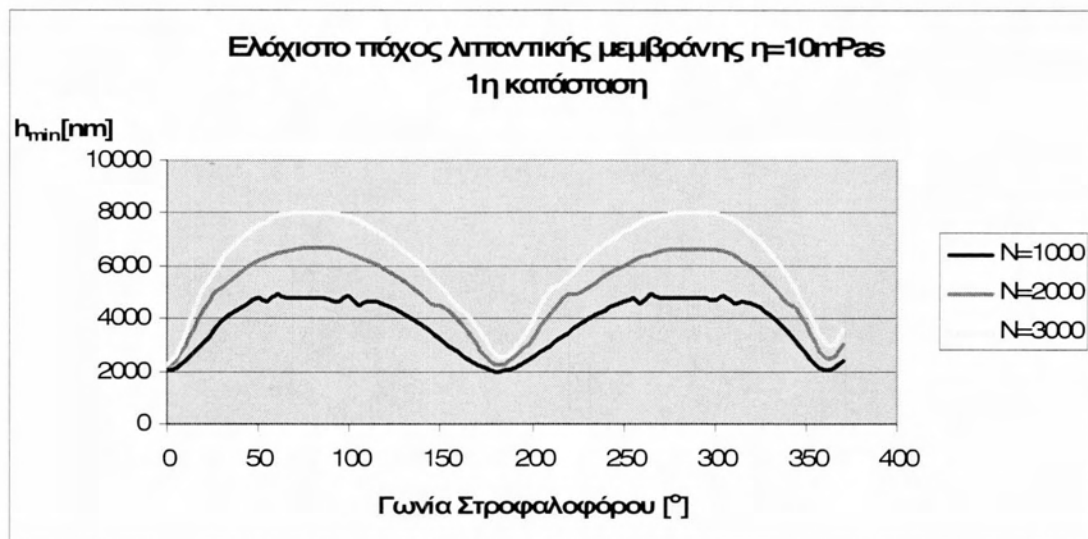
**Παρατήρηση:** Με την πάροδο των ωρών λειτουργίας, η κατατομή τείνει να έχει πεπλατυσμένο προφίλ, γεγονός που αποτελεί καίριο παράγοντα στην επίδραση της φθοράς του συστήματος.



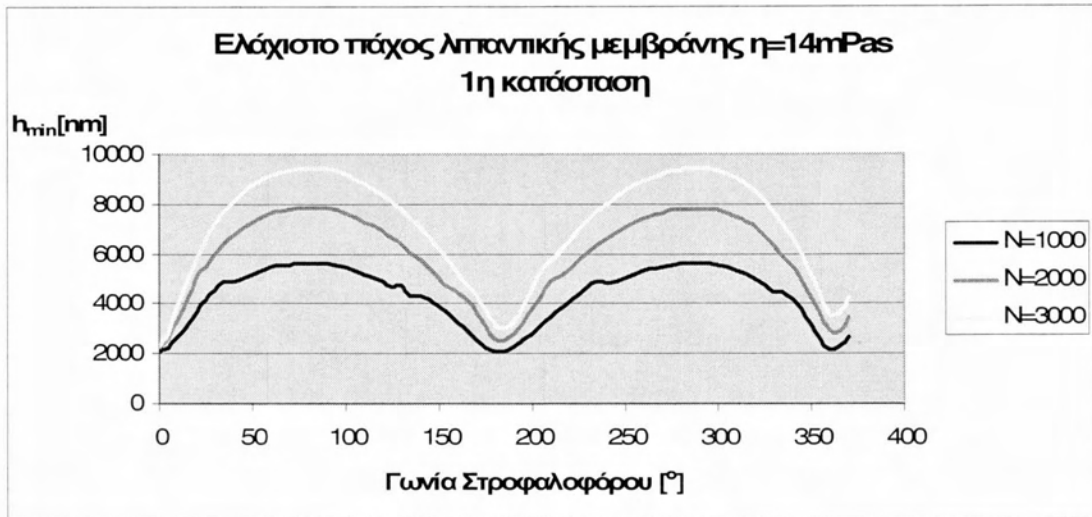
### 2.1.1 Αποτελέσματα κώδικα για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς



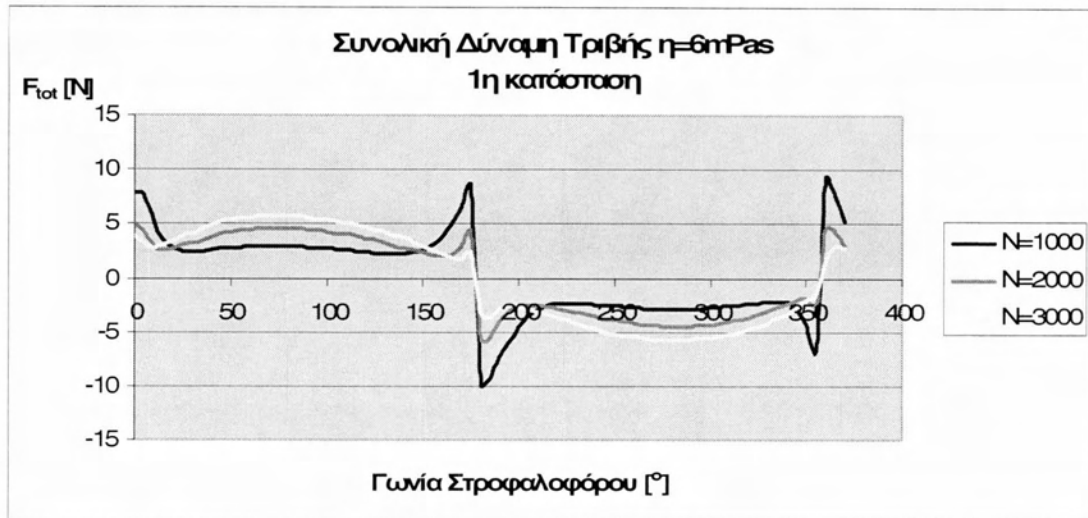
**Σχήμα 2.1.1:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



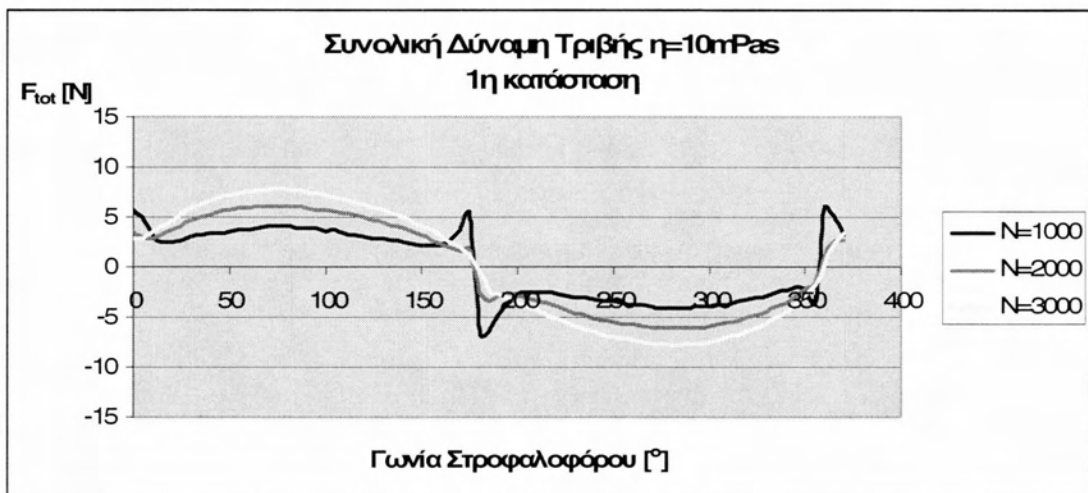
**Σχήμα 2.1.2:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



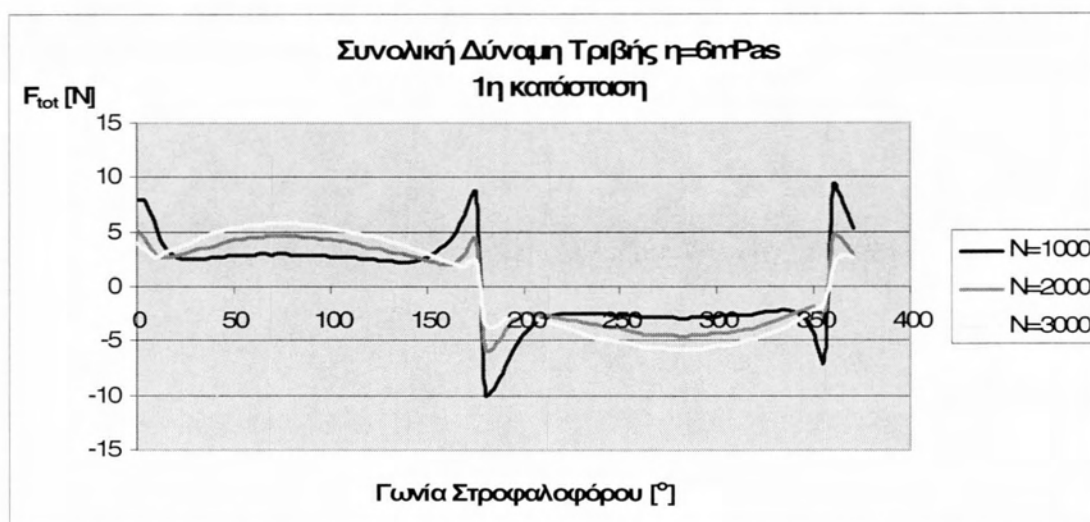
**Σχήμα 2.1.3:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=14\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



**Σχήμα 2.1.4:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000\text{-}2000\text{-}3000\text{rpm}$ .



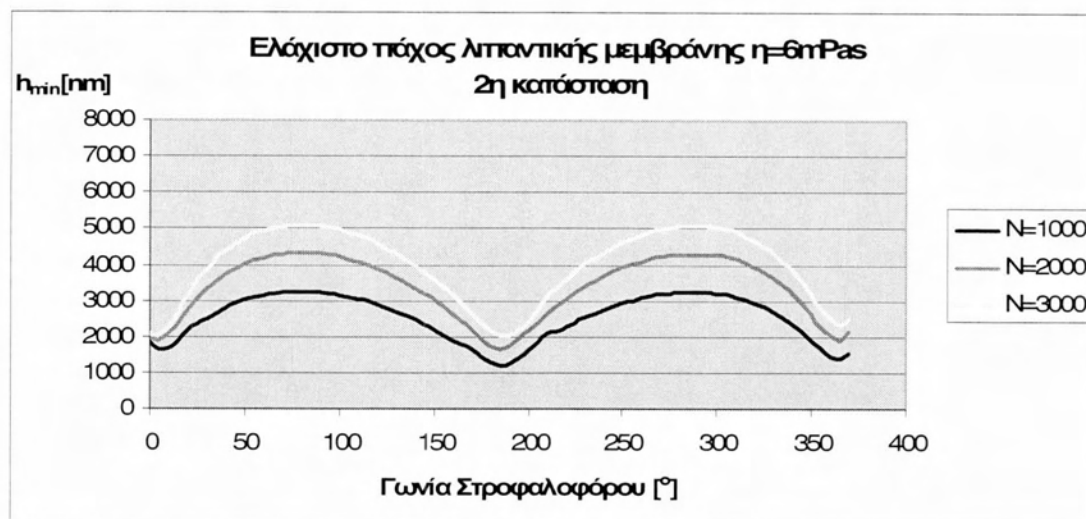
**Σχήμα 2.1.5:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000\text{-}2000\text{-}3000\text{rpm}$ .



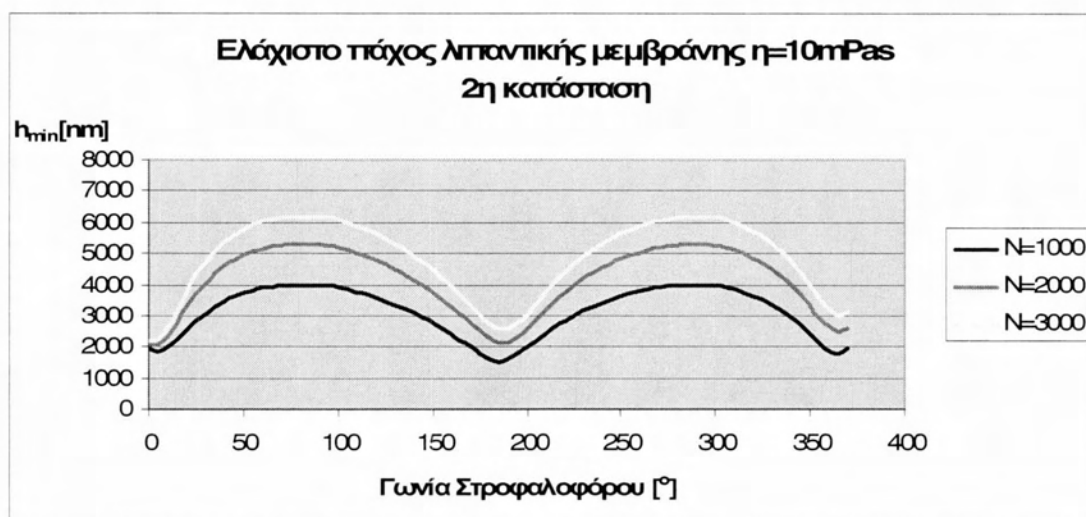
**Σχήμα 2.1.6:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=14\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

**Παρατηρήσεις:** Για το ελάχιστο πάχος λαδιού παρατηρείται αναμενόμενη σύμπτωση τιμών στα νεκρά σημεία και η επίσης αναμενόμενη απόκλιση των καμπυλών στις περιοχές μεγάλων ταχυτήτων. Η μη λεία μορφή των καμπυλών οφείλεται σε αύξηση της τιμής του συγκριτή  $E$  του κώδικα με σκοπό τη μείωση του χρόνου υπολογισμού. Το γεγονός αυτό δεν θεωρείται ότι επηρεάζει την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Όσον αφορά τη συνολική δύναμη τριβής παρατηρείται η αναμενόμενη μορφή της καμπύλης της δύναμης για χαμηλό ιξώδες χαμηλές στροφές, δηλαδή με μέγιστο στα νεκρά σημεία και μείωση στα μέσα της διαδρομής. Αντίστοιχη μείωση εμφανίζεται στη μη-υδροδυναμική συνιστώσα σε αυξημένες στροφές και αυξημένη τιμή ιξώδους.

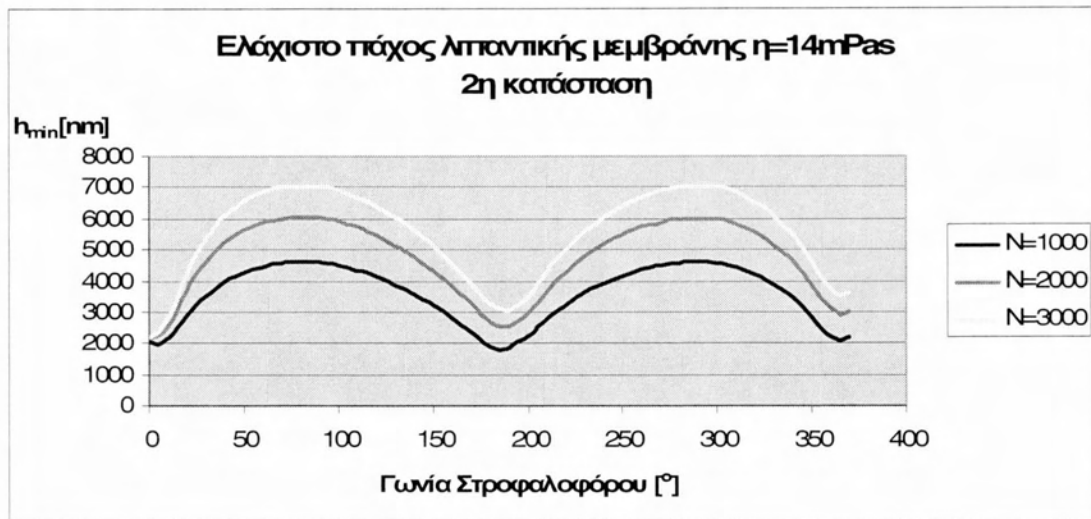
## 2.1.2 Αποτελέσματα κώδικα για 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς



**Σχήμα 2.1.7:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=250\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

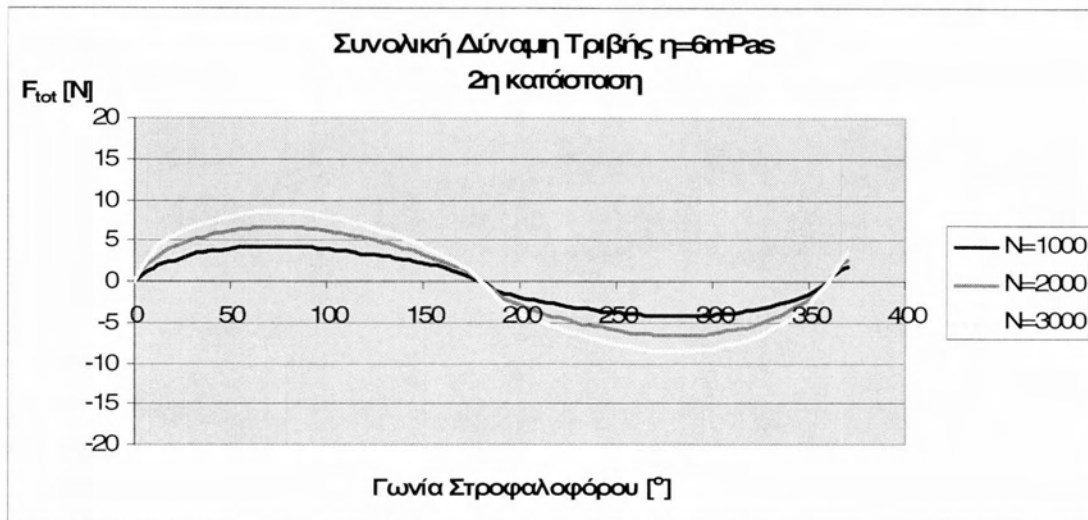


**Σχήμα 2.1.8:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=250\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

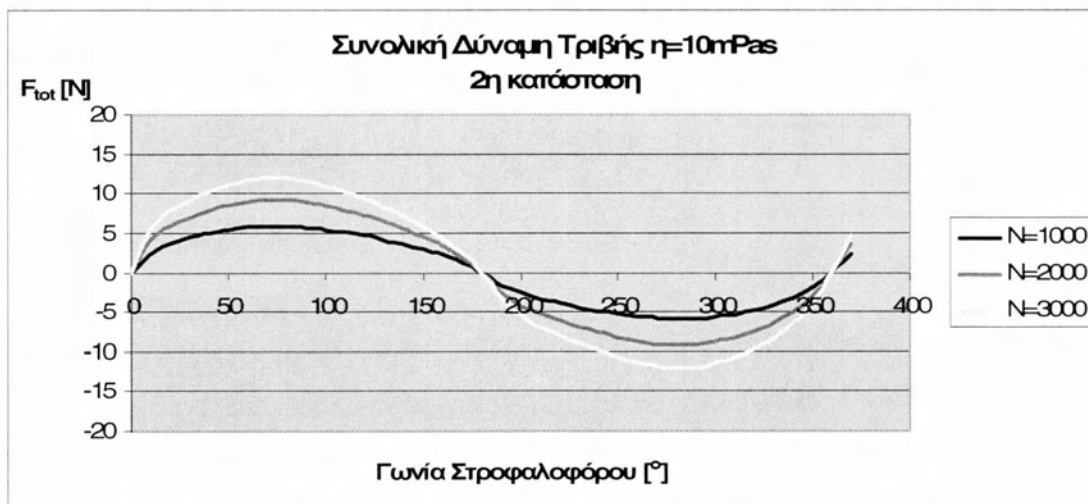


**Σχήμα 2.1.9:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=250\text{mm}$ ,  $\eta=14\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

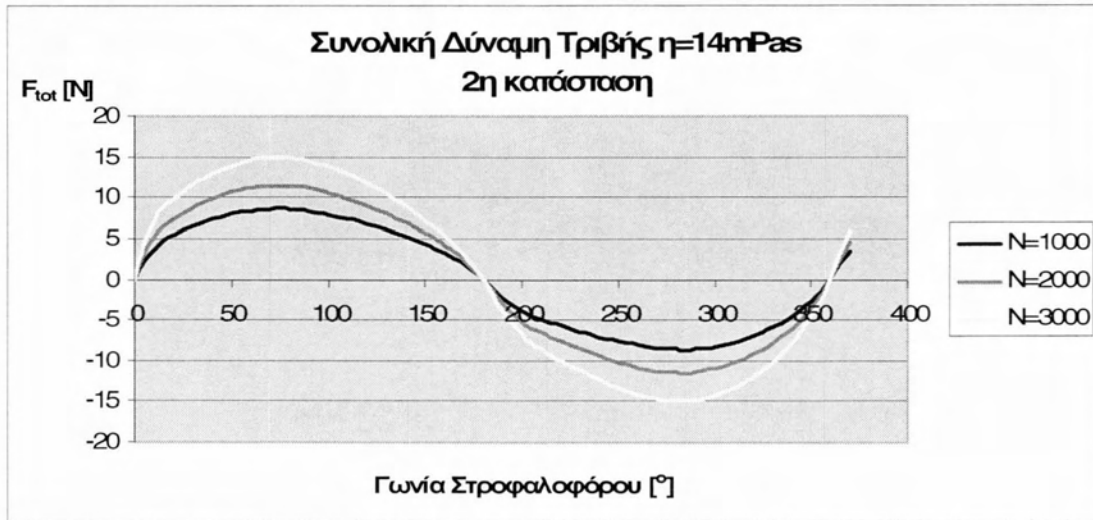




**Σχήμα 2.1.10:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=250\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



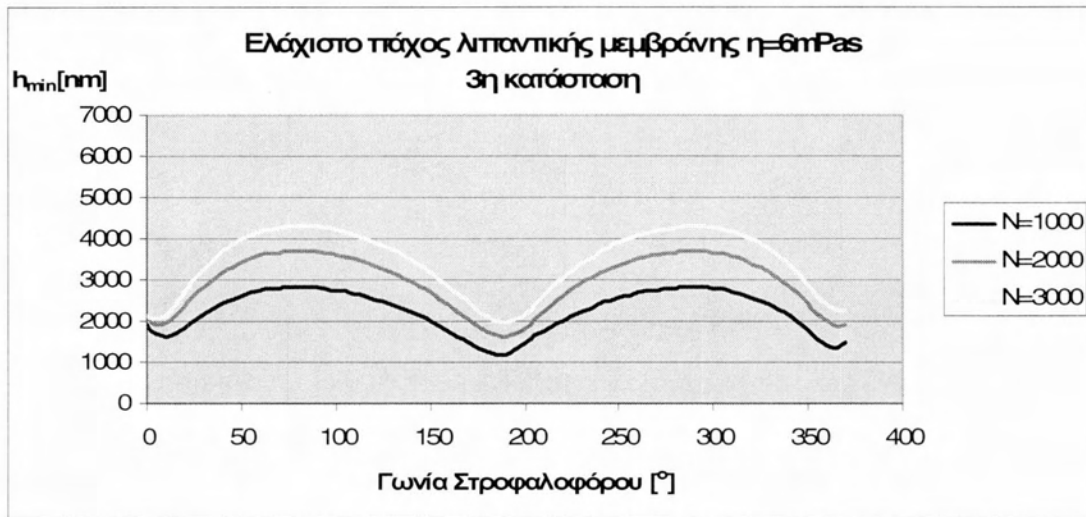
**Σχήμα 2.1.11:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=250\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



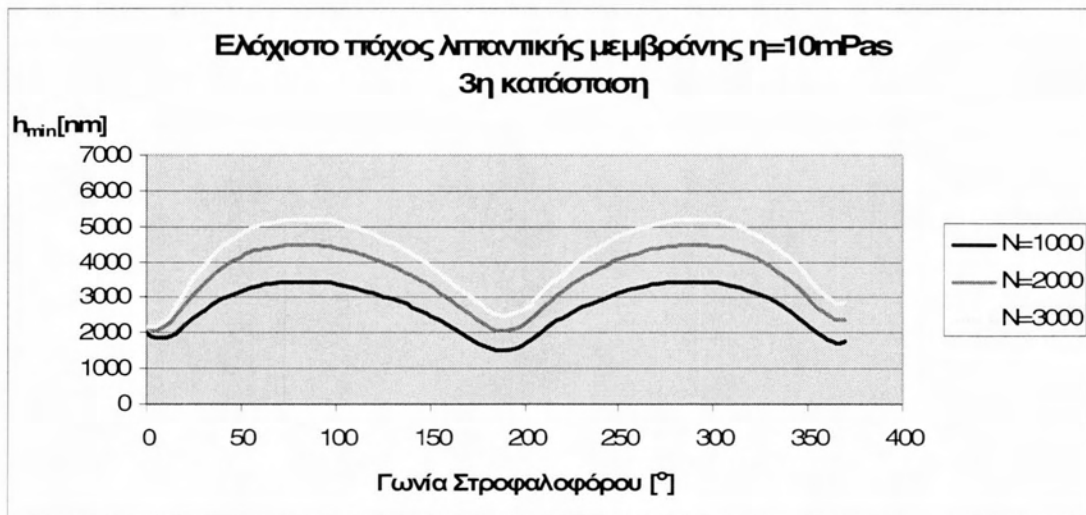
**Σχήμα 2.1.12:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=250\text{mm}$ ,  $\eta=14\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

**Παρατήρηση:** Για το πάχος λαδιού, λόγω της αύξησης της ακτίνας καμπυλότητας στη 2<sup>η</sup> φάση φθοράς, παρατηρείται απόκλιση μετρήσιμη στο κάτω νεκρό σημείο. Όσον αφορά την συνολική δύναμη τριβής, εμφανίζεται βαθμιαία ελάττωση της μη-υδροδυναμικής συνιστώσας μέχρι πλήρους απουσίας.

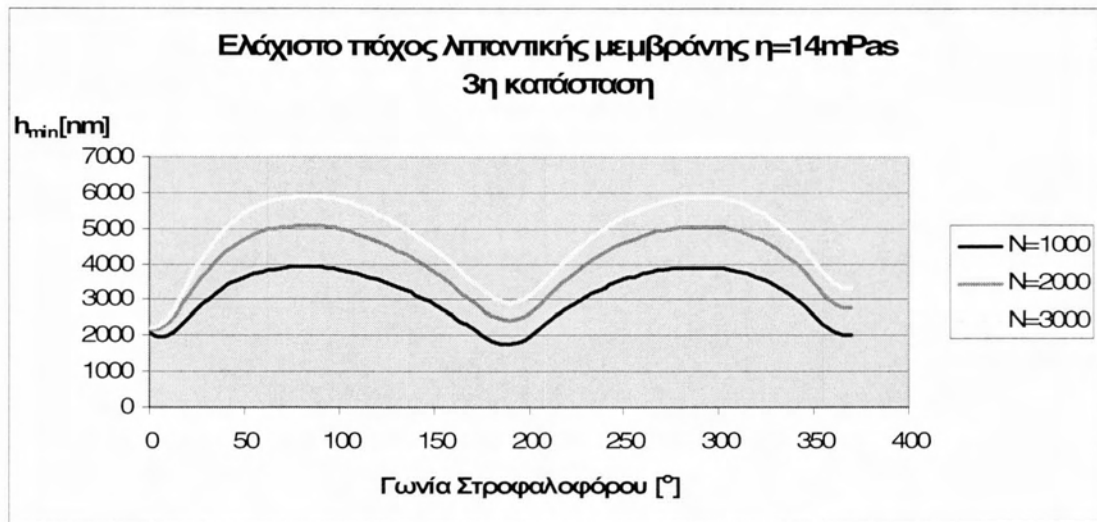
### 2.1.3 Αποτελέσματα κώδικα για 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς



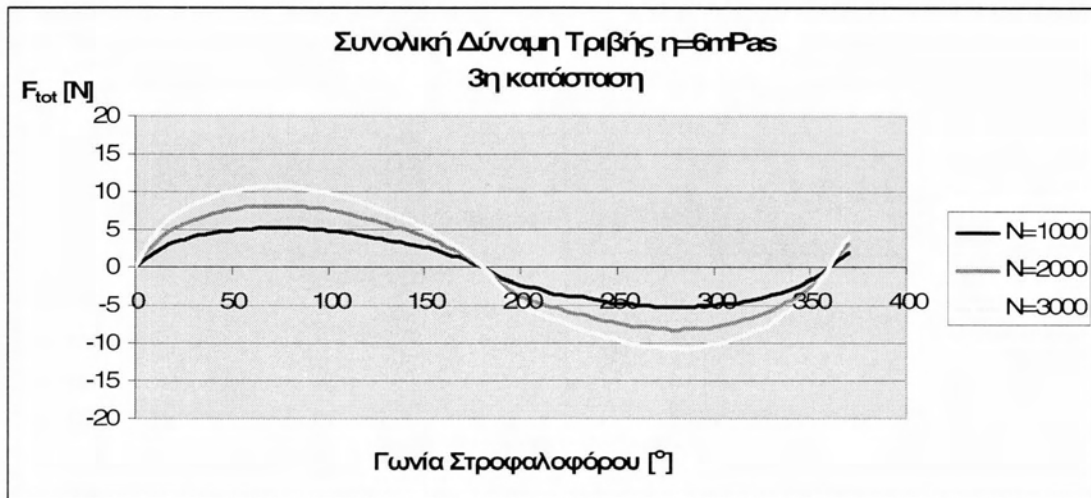
**Σχήμα 2.1.13:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000\text{-}2000\text{-}3000\text{rpm}$ .



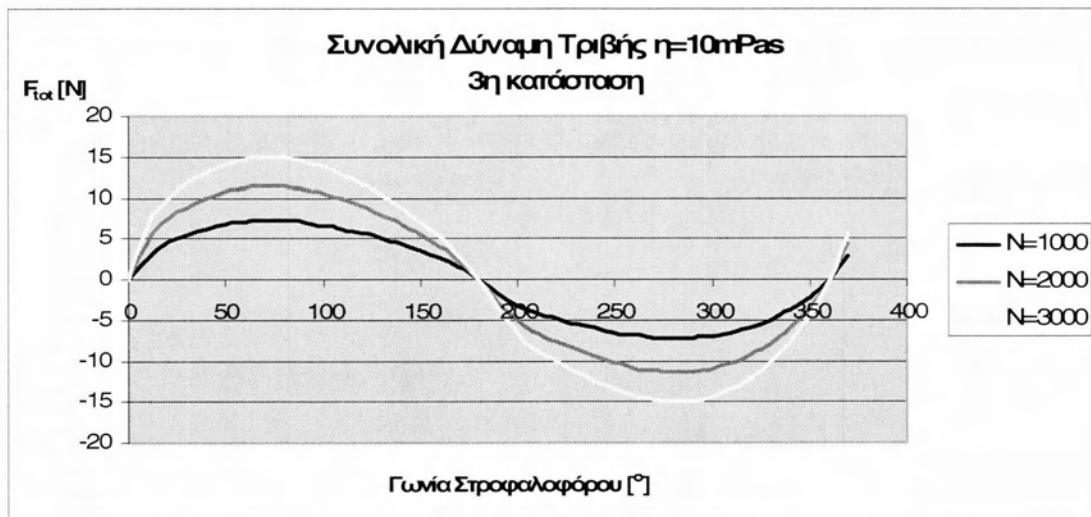
**Σχήμα 2.1.14:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000\text{-}2000\text{-}3000\text{rpm}$ .



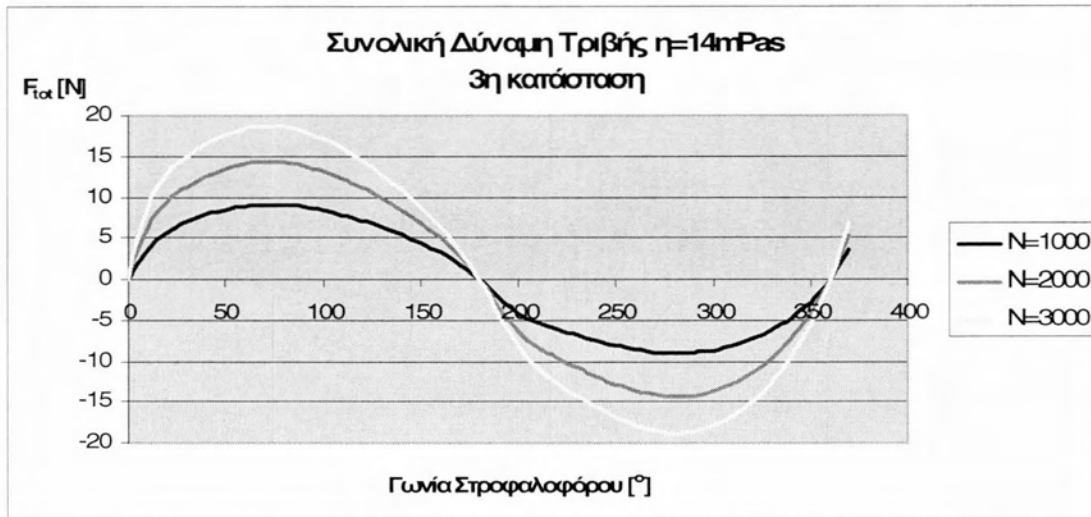
**Σχήμα 2.1.15:** Διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=14\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



**Σχήμα 2.1.16:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



**Σχήμα 2.1.17:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



**Σχήμα 2.1.18:** Διάγραμμα μεταβολής συνολικής δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου. 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=14\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

**Παρατήρηση:** Για το πάχος λαδιού, λόγω της αύξησης της ακτίνας καμπυλότητας στη 3<sup>η</sup> φάση φθοράς παρατηρείται απόκλιση μετρήσιμη στο κάτω νεκρό σημείο. Όσον αφορά την συνολική δύναμη τριβής, εμφανίζεται βαθμιαία ελάττωση της μη υδροδυναμικής συνιστώσας μέχρι πλήρους απουσίας.

## 2.2 Συσχετισμός ονομαστικών τιμών κώδικα

Παρατηρείται, λόγω της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των δακτυλίων, σημαντική ομοιότητα στα πολικά διαγράμματα με αντιστροφή των μεγίστων. Το μικρό πάχος λιπαντικής μεμβράνης οδηγεί σε μεγάλη τιμή της υδροδυναμικής συνιστώσας της τριβής.

Η σημαντική υδροδυναμική συμπεριφορά οδηγεί στο μηδενισμό της δύναμης τριβής στα Άνω και Κάτω Νεκρά Σημεία.

Συσχετίζοντας ύστερα τις απώλειες λόγω τριβών με την απόλυτη συνολική δύναμη τριβής καθώς και τη φθορά με το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης επιλέγουμε σαν κριτήριο *φθοράς – τριβής* το λόγο  $|F_{tot}|/h_{min}$ , διαγράμματα του οποίου είτε στην κλασσική τους μορφή είτε σε μορφή πολικού διαγράμματος μας δίνουν σαφέστερη και πιο άμεση εικόνα της συμπεριφοράς του δακτυλίου.

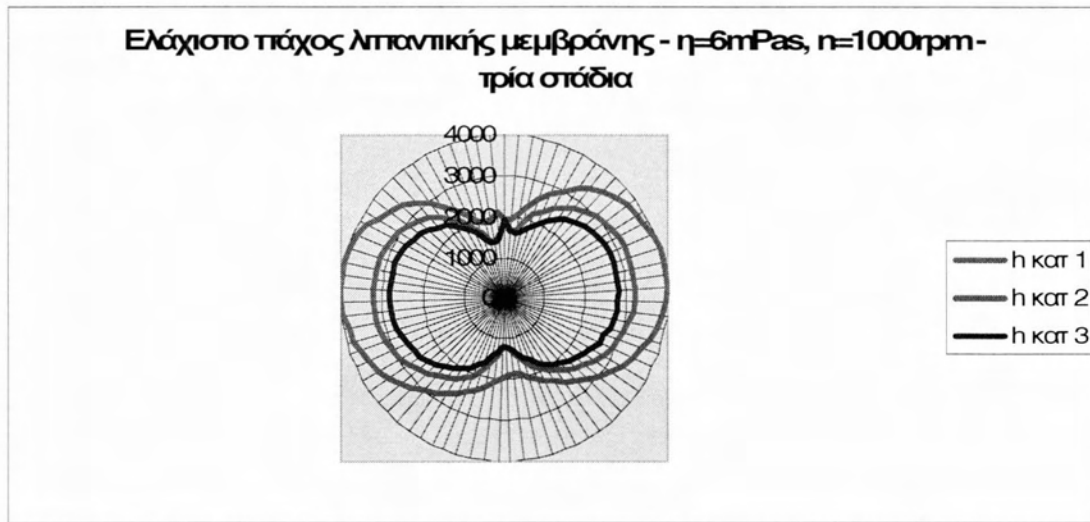
Τέλος, σημειώνεται σαφής επιβάρυνση της λειτουργίας κατά τη 2<sup>η</sup> και ιδιαίτερα κατά την 3<sup>η</sup> φάση φθοράς με μοναδική την υπέρβαση στα νεκρά σημεία όπου η 1<sup>η</sup> κατάσταση επιβαρύνεται περισσότερο.

Παρατίθενται ενδεικτικά τα πολικά διαγράμματα των μετρήσεων για τρία ιξώδη ( $\eta=6,10$  και  $14\text{mPas}$ ) και τρία σημεία λειτουργίας ( $N=1000, 2000$  και  $3000$  rpm) για την γραφική ανάδειξη των παραπάνω συσχετισμών και διαπιστώσεων.

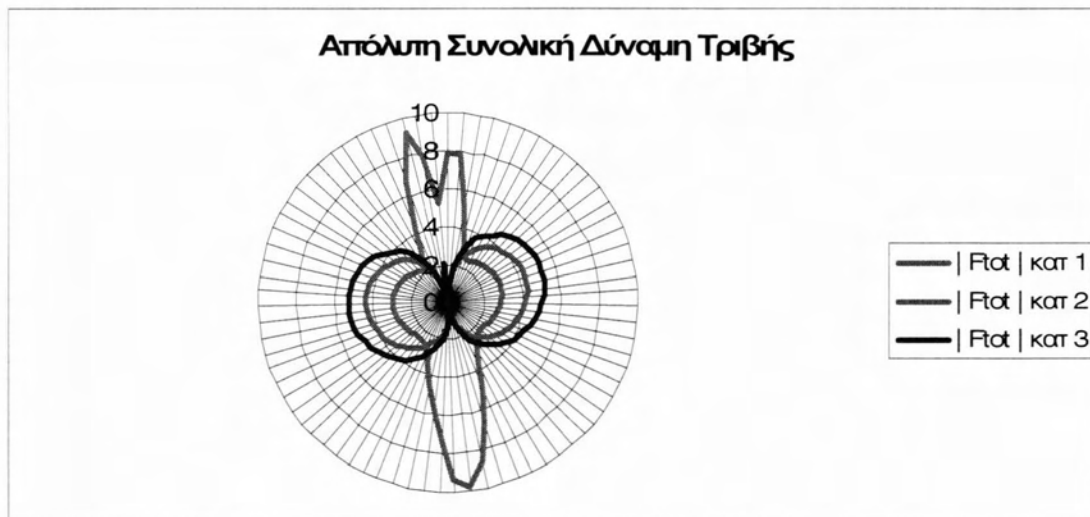




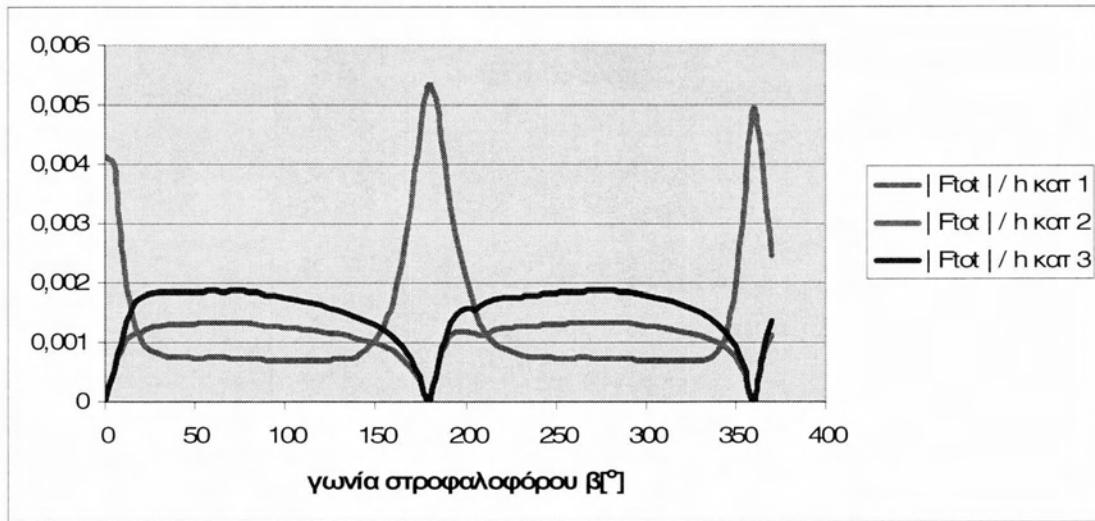
**2.2.1 Ενδεικτικά αποτελέσματα για χαμηλή τιμή ιξώδους και ταχύτητας στις τρεις καταστάσεις λειτουργίας.**



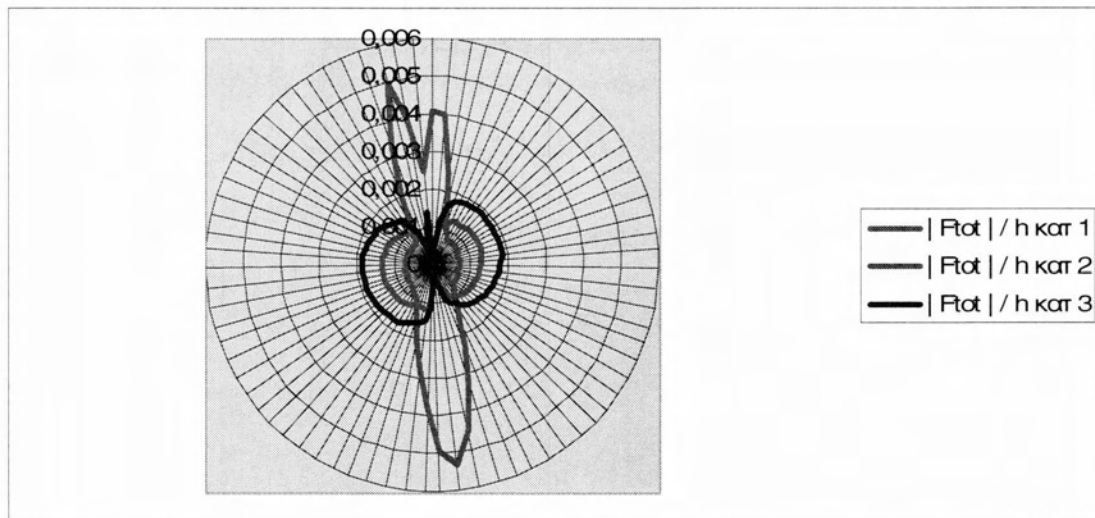
**Σχήμα. 2.2.1:** Πολικό διάγραμμα  $h_{\min} = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 1000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.



**Σχήμα. 2.2.2:** Πολικό διάγραμμα  $F_{\text{tot}} = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 1000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

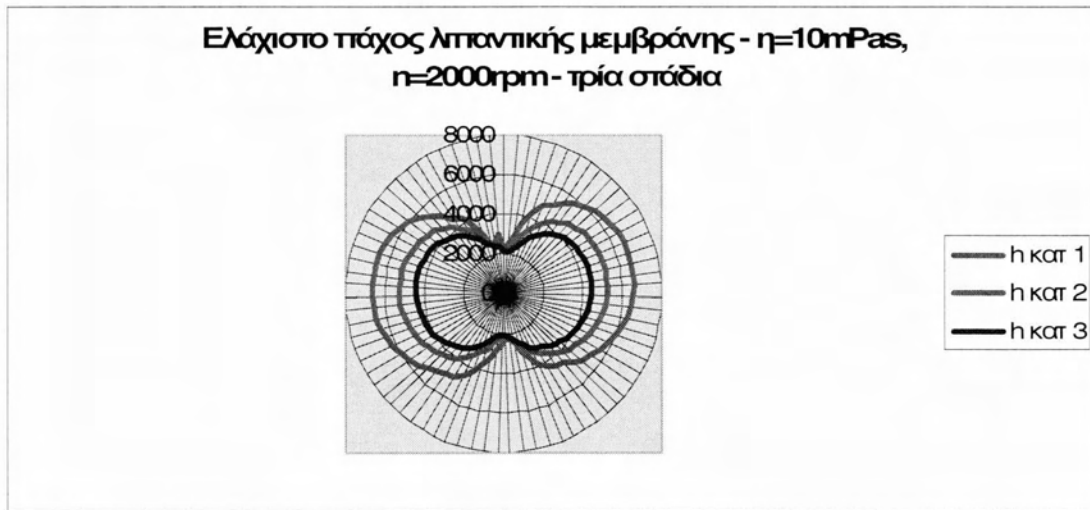


**Σχήμα 2.2.3:** Διάγραμμα  $|F_{tot}|/h = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 1000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

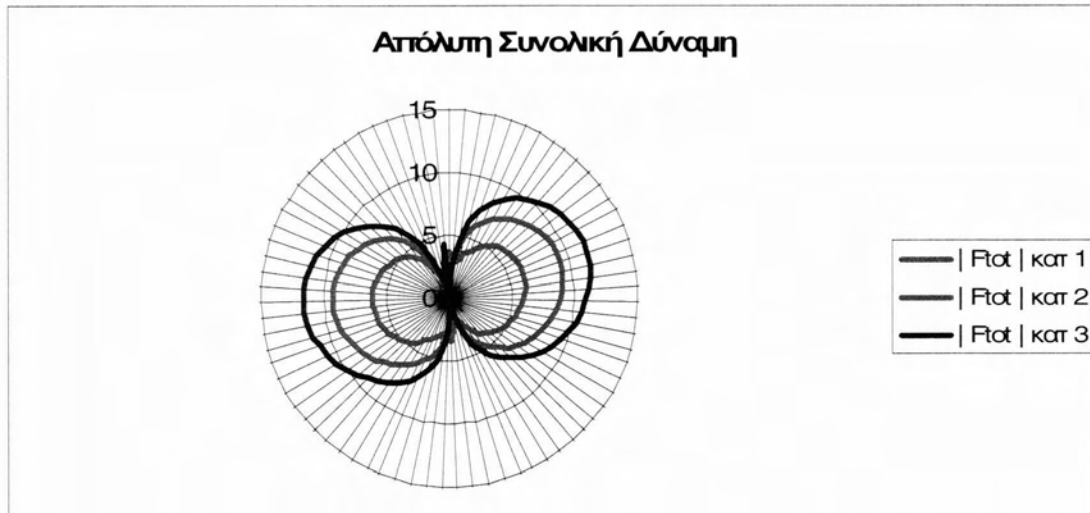


**Σχήμα 2.2.4:** Πολικό διάγραμμα  $|F_{tot}|/h = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 1000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

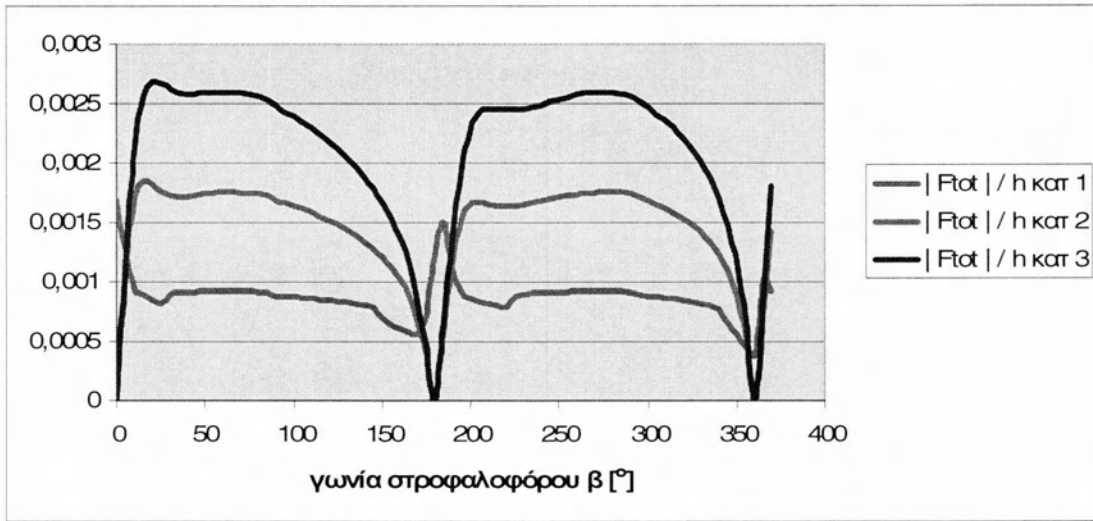
**2.2.2 Ενδεικτικά αποτελέσματα για μέτρια τιμή ιξώδους και ταχύτητας στις τρεις καταστάσεις λειτουργίας.**



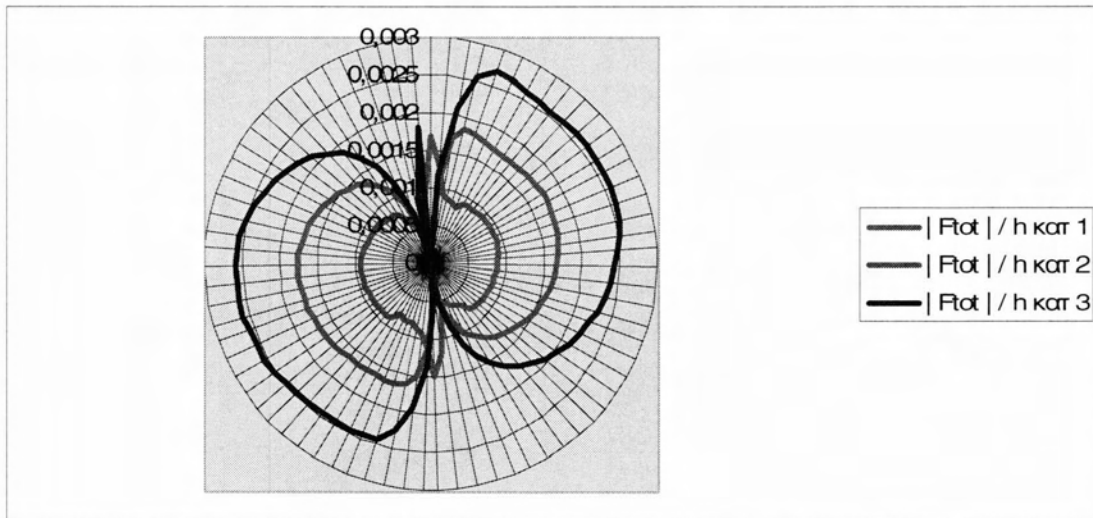
**Σχήμα 2.2.5:** Πολικό διάγραμμα  $h_{\min} = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου - τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 2000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.



**Σχήμα. 2.2.6:** Πολικό διάγραμμα  $|F_{\text{tot}}| = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου - τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 2000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

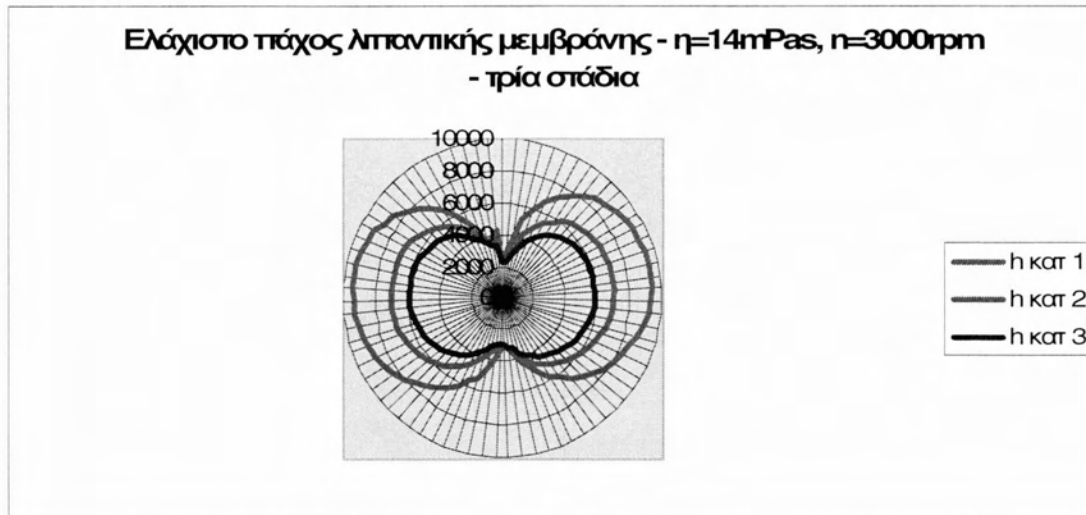


**Σχήμα 2.2.7:** Διάγραμμα  $|F_{tot}|/h = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 2000 \text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

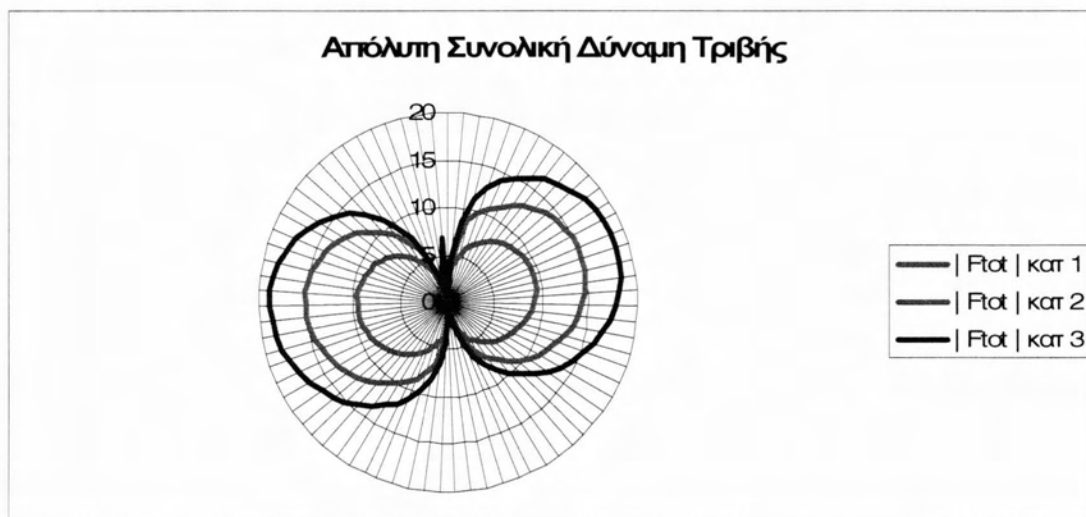


**Σχήμα 2.2.8:** Πολικό διάγραμμα  $|F_{tot}|/h = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 2000 \text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

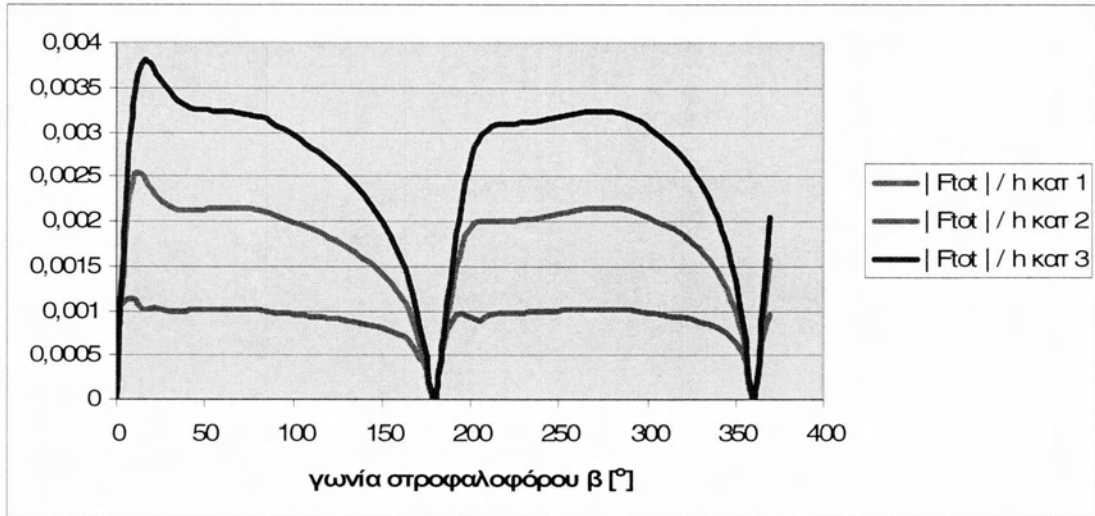
**2.2.3 Ενδεικτικά αποτελέσματα για υψηλή τιμή ιξώδους και ταχύτητας στις τρεις καταστάσεις λειτουργίας.**



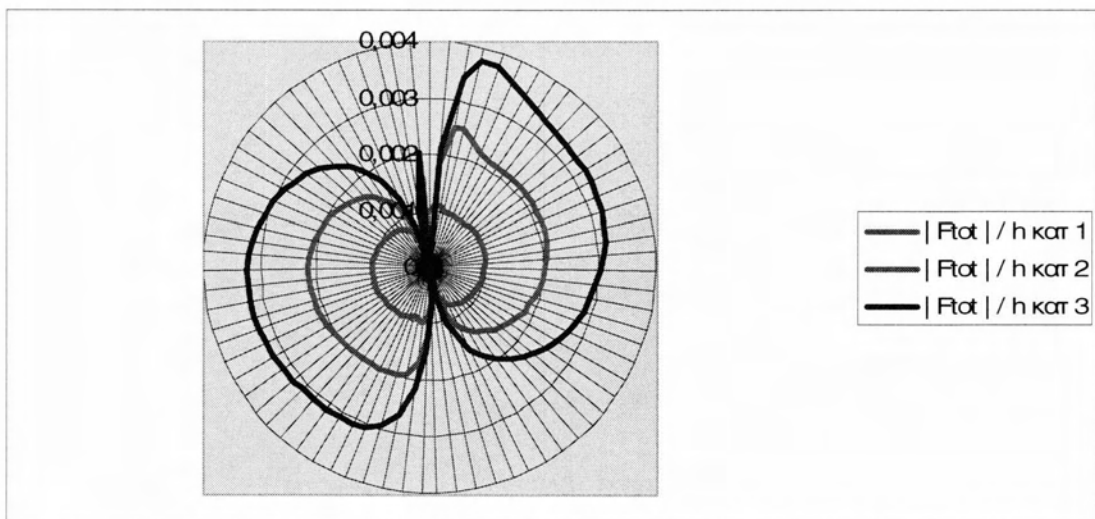
**Σχήμα 2.2.9:** Πολικό διάγραμμα  $h_{\min} = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 3000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.



**Σχήμα 2.2.10:** Πολικό διάγραμμα  $|F_{\text{tot}}| = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 3000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.



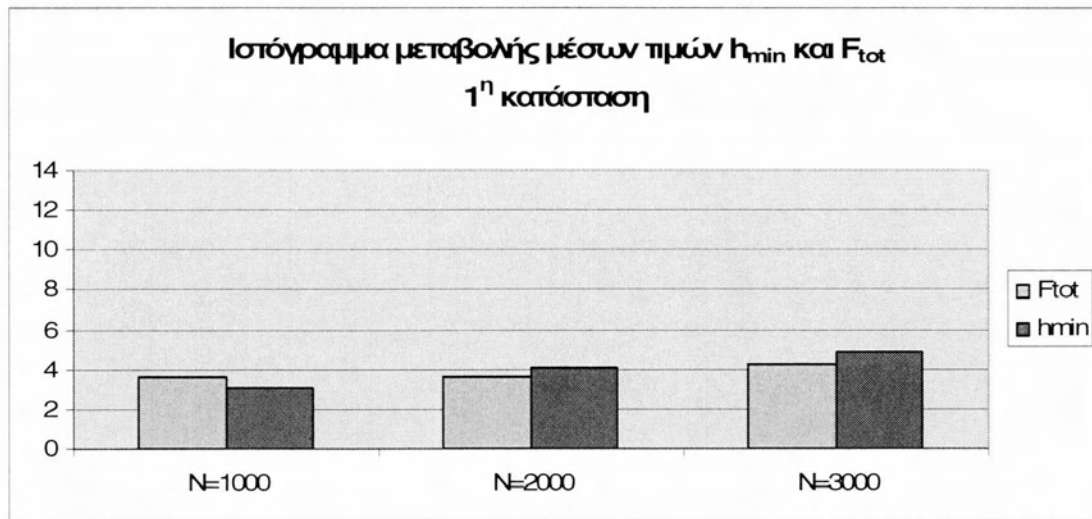
**Σχήμα. 2.2.11:** Διάγραμμα  $|F_{tot}|/h = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 3000 \text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.



**Σχήμα 2.2.12:** Πολικό διάγραμμα  $|F_{tot}|/h = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n = 3000 \text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

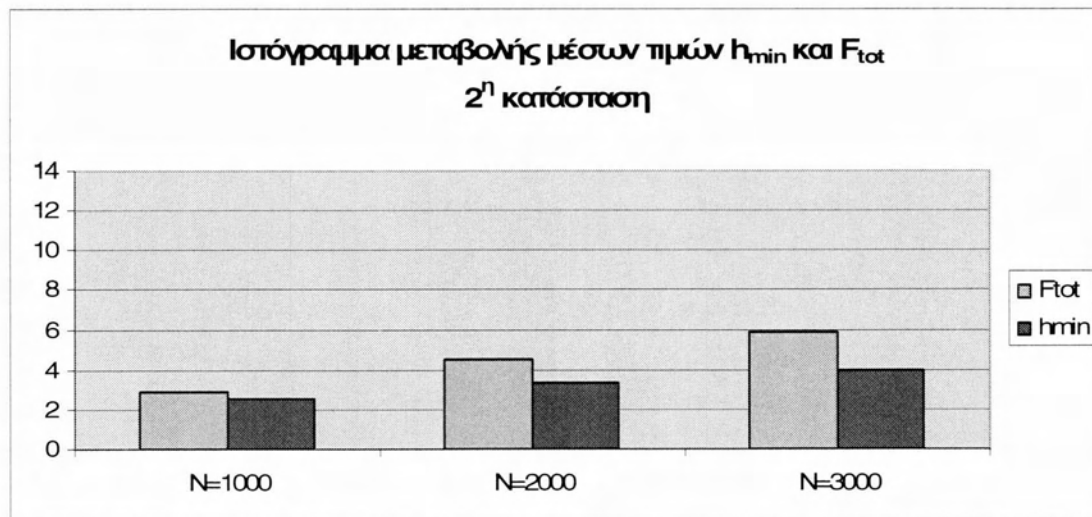
### 2.3 Ιστογράμματα μεταβολής μέσω των τιμών $h_{min}$ και $F_{tot}$ των μετρήσεων

Χαμηλή τιμή ιξώδους ( $\eta=6mPas$ )



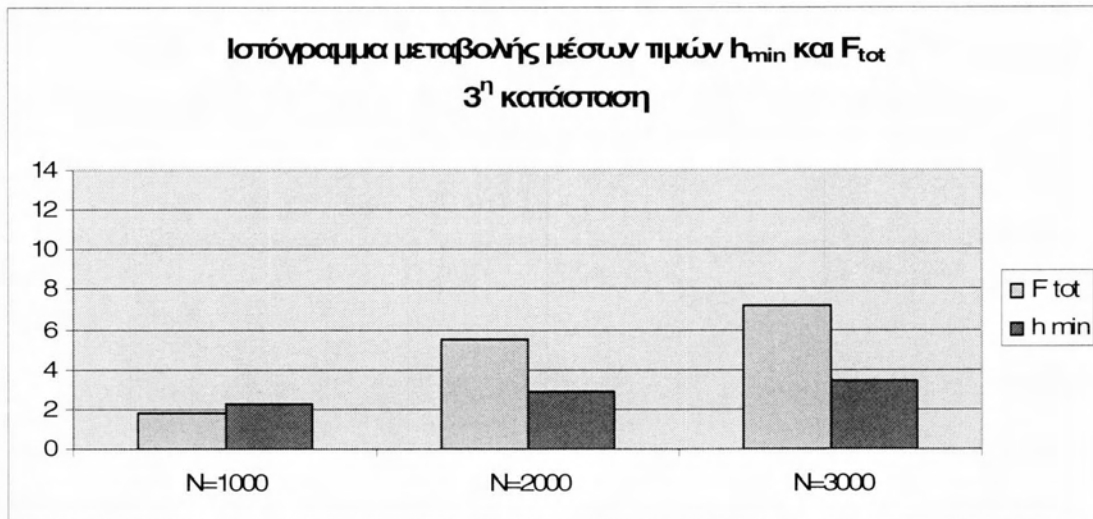
Σχήμα 2.3.1: Ιστογράμματα μεταβολής μέσω των τιμών  $F_{tot}$  και  $h_{min}$  για  $\eta=6mPas$  - 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

Παρατηρείται αύξηση της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης ενώ στη τιμή της συνολικής δύναμης τριβής παρατηρείται αυξητική τάση μόνο όταν αυξηθεί σημαντικά η ταχύτητα.



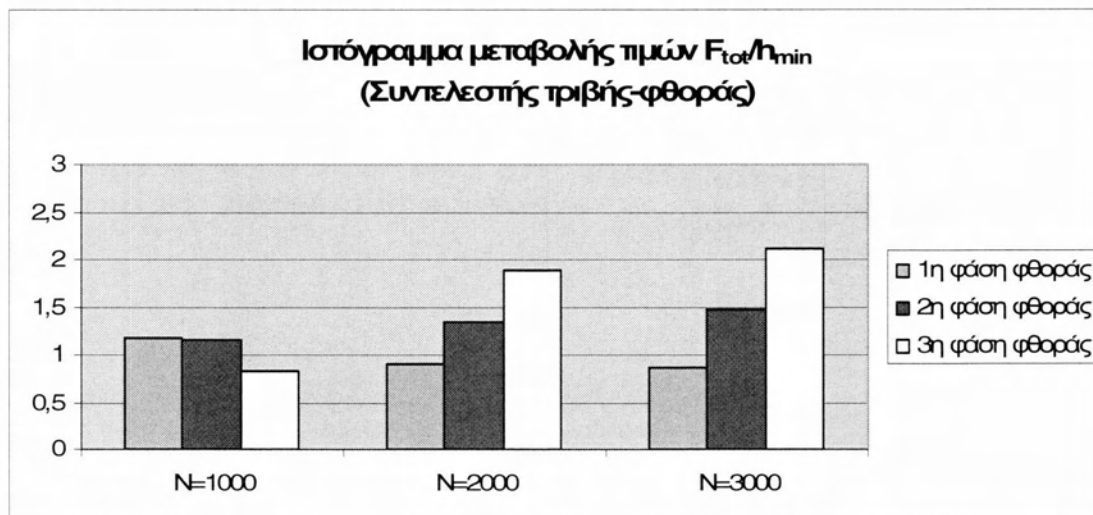
Σχήμα 2.3.2: Ιστογράμματα μεταβολής μέσω των τιμών  $F_{tot}$  και  $h_{min}$   $\eta=6mPas$  - 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

Παρατηρείται αύξηση της τιμής της δύναμης τριβής και της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.



**Σχήμα 2.3.3:** Ιστόγραμμα μεταβολής μέσω των τιμών  $F_{\text{tot}}$  και  $h_{\min}$   $\eta=6mPas$  - 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

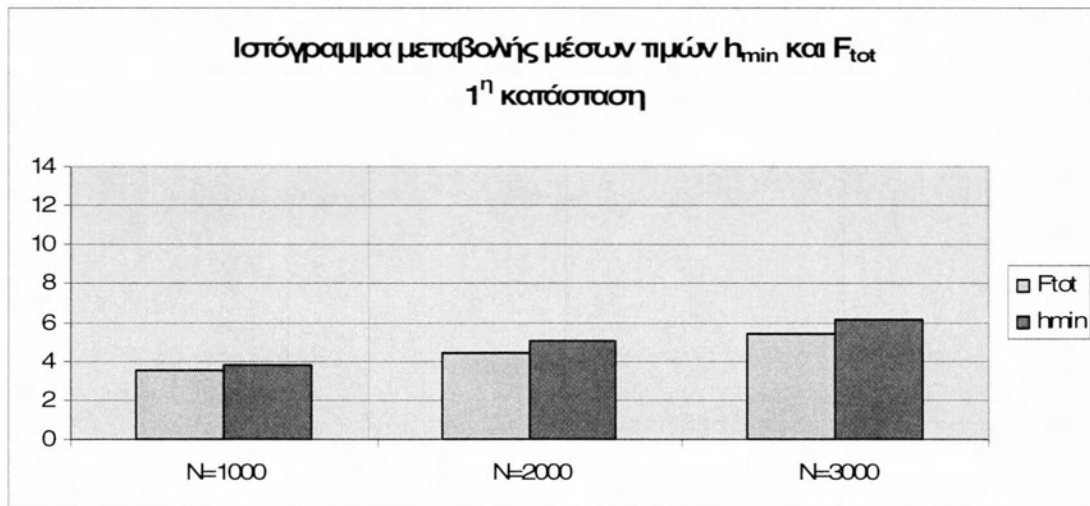
Παρατηρείται πιο απότομη αύξηση της τιμής της δύναμης τριβής από την αντίστοιχη της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.



**Σχήμα 2.3.4:** Ιστόγραμμα μεταβολής τιμών  $F_{\text{tot}}/h_{\min}$  (Συντελεστής τριβής-φθοράς) για  $\eta=6mPas$  όπου εμφανίζεται φθίνουσα τάση κατά τη 1<sup>η</sup> φάση φθοράς, ελάχιστα αυξητική κατά τη 2<sup>η</sup> φάση φθοράς και σημαντικά αυξητική κατά το 3<sup>ο</sup> στάδιο φθοράς.

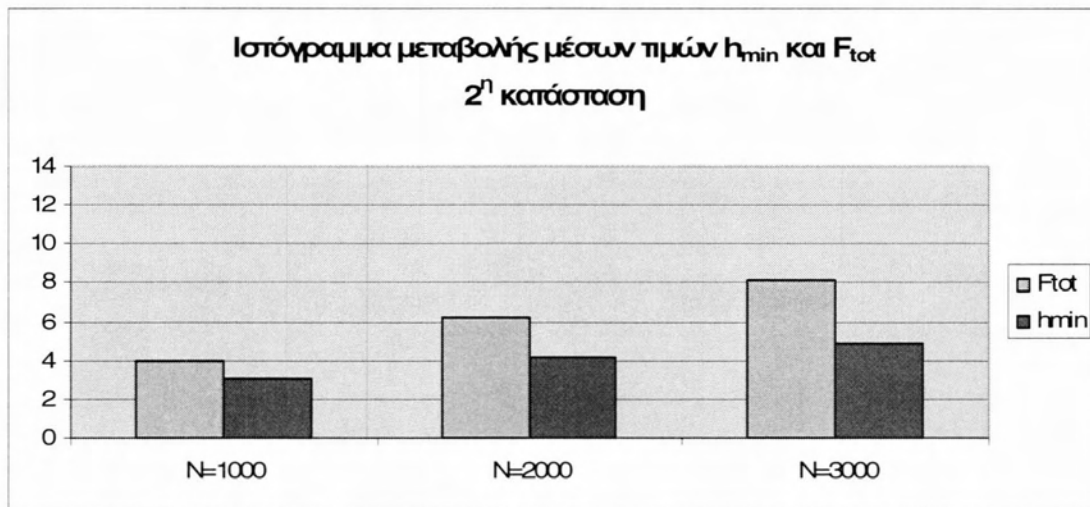


Μεσαία τιμή ιξώδους ( $\eta=10mPas$ )



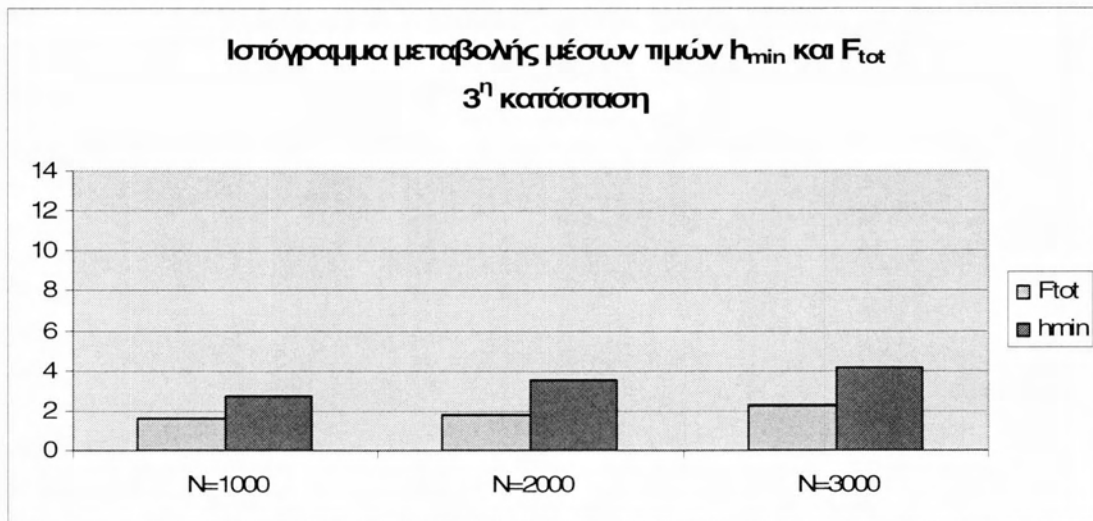
**Σχήμα 2.3.5:** Ιστόγραμμα μεταβολής μέσων τιμών  $F_{tot}$  και  $h_{min}$   $\eta=10mPas$  - 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

Παρατηρείται παράλληλη αύξηση της τιμής της δύναμης τριβής και της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.



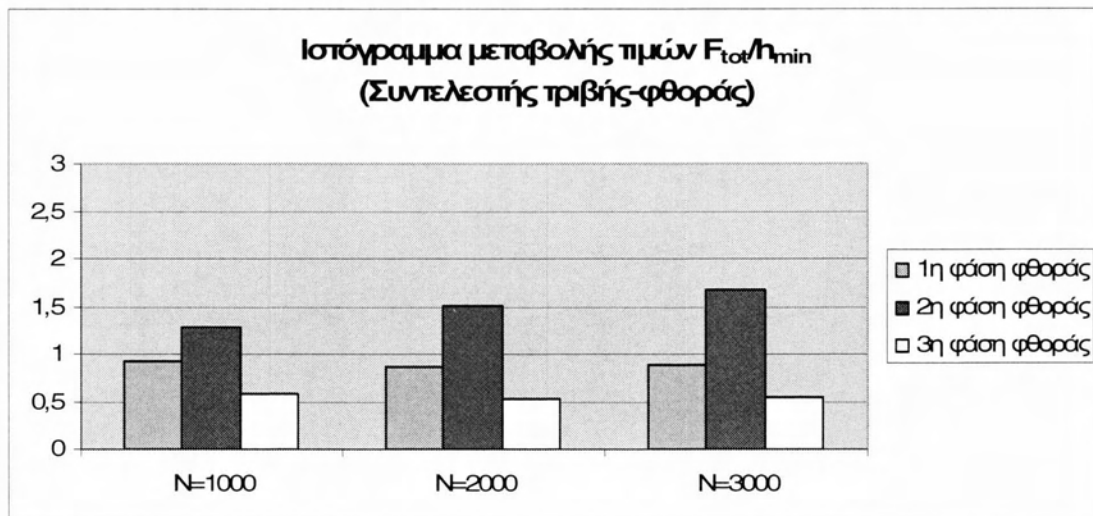
**Σχήμα 2.3.6:** Ιστόγραμμα μεταβολής τιμών  $F_{tot}$  και  $h_{min}$  μέσω των τιμών  $\eta=10mPas$  - 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

Παρατηρείται αύξηση της τιμής της δύναμης τριβής και της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.



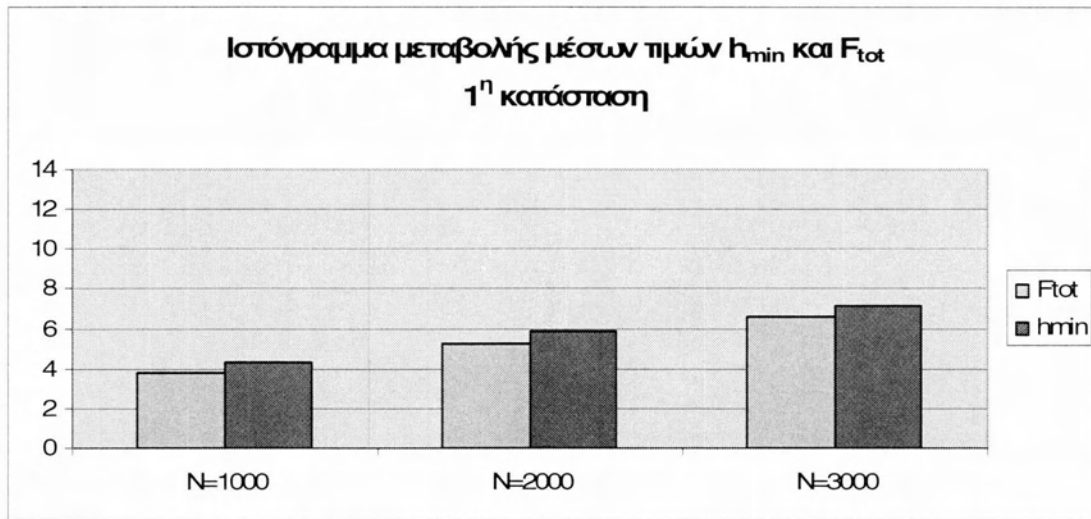
**Σχήμα 2.3.7:** Ιστόγραμμα μεταβολής μέσω των τιμών  $F_{tot}$  και  $h_{min}$   $\eta=10mPas$  - 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

Παρατηρείται πιο απότομη αύξηση της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης από την αντίστοιχη της τιμής της δύναμης τριβής.



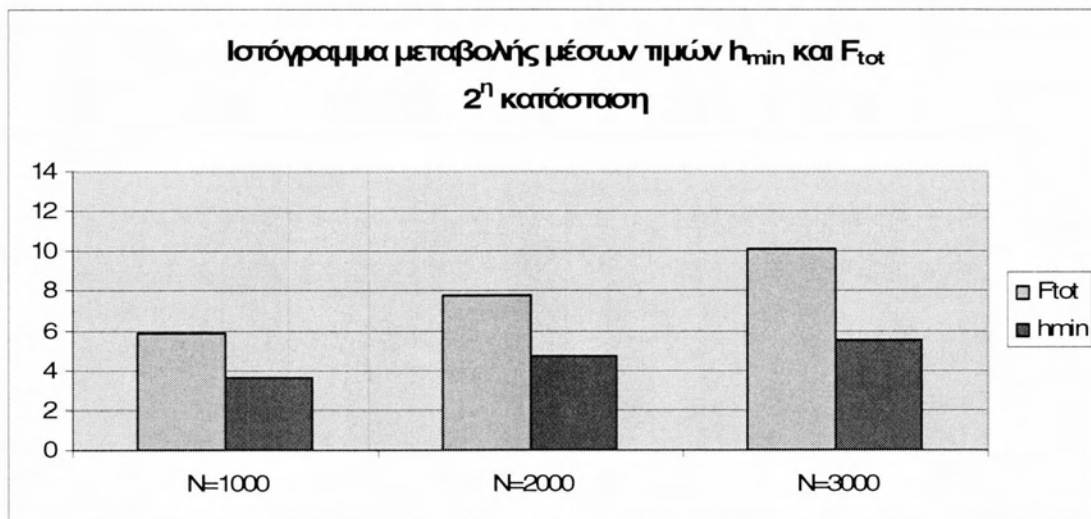
**Σχήμα 2.3.8:** Ιστόγραμμα μεταβολής τιμών  $F_{tot}/h_{min}$  (Συντελεστής τριβής-φθοράς) για  $\eta=10mPas$  όπου εμφανίζεται σταθερότητα κατά τη 1<sup>η</sup> φάση φθοράς, αυξητική τάση κατά τη 2<sup>η</sup> φάση φθοράς και ελαφρά αυξομείωση κατά το 3<sup>ο</sup> στάδιο φθοράς.

Υψηλή τιμή ιξώδους ( $\eta=14mPas$ )



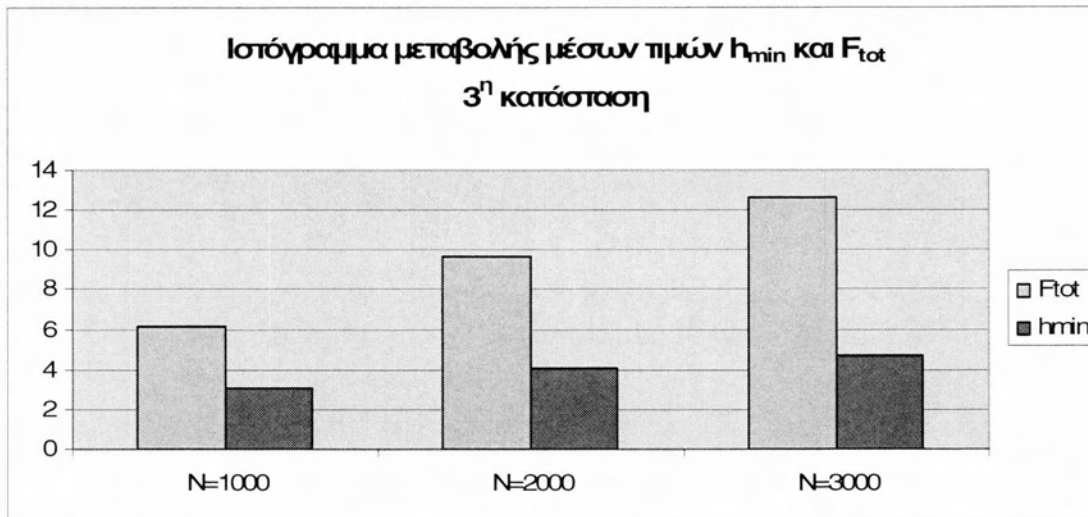
**Σχήμα 2.3.9:** Ιστόγραμμα μεταβολής μέσω των τιμών  $F_{tot}$  και  $h_{min}$   $\eta=14mPas$  - 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

Παρατηρείται αύξηση της τιμής της δύναμης τριβής και της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.



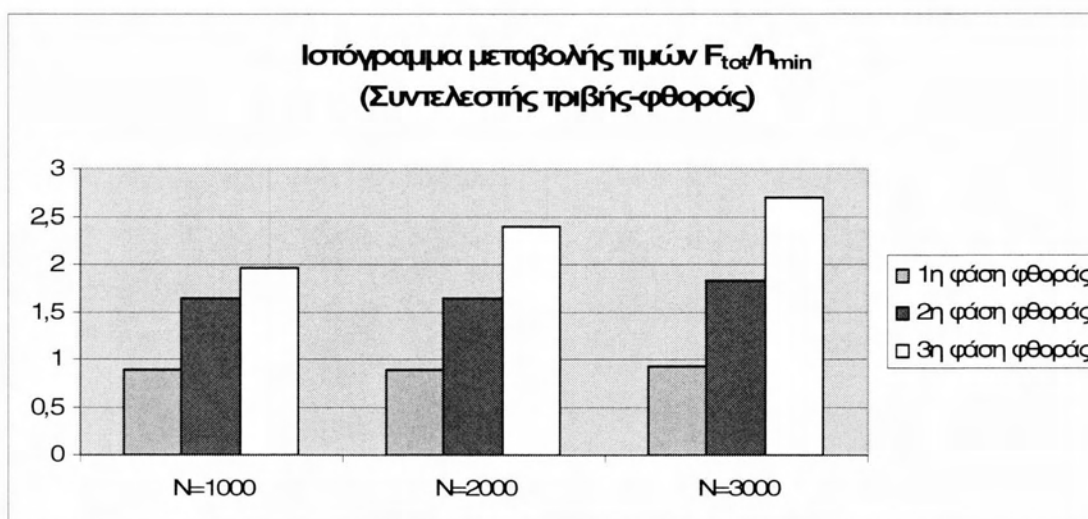
**Σχήμα 2.3.10:** Ιστόγραμμα μεταβολής μέσω των τιμών  $F_{tot}$  και  $h_{min}$   $\eta=14mPas$  - 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

Παρατηρείται αύξηση της τιμής της δύναμης τριβής και της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.



**Σχήμα 2.3.11:** Ιστόγραμμα μεταβολής μέσω των τιμών  $h_{min}$  και  $F_{tot}$   $\eta=14mPas$  -31<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

Παρατηρείται πιο απότομη αύξηση της τιμής της δύναμης τριβής από την αντίστοιχη της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.



**Σχήμα 2.3.12:** Ιστόγραμμα μεταβολής τιμών  $F_{tot}/h_{min}$  (Συντελεστής τριβής-φθοράς) για  $\eta=14mPas$  όπου εμφανίζεται σταθερότητα κατά τη 1<sup>η</sup> φάση φθοράς και αυξητική τάση κατά τη 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> φάση φθοράς.

# Κεφάλαιο 3

Μέθοδος Ταχείας Προσέγγισης  
θεωρητικών αποτελεσμάτων  
με τη βοήθεια πολυωνύμων



### 3.1 Προσεγγιστική μέθοδος των ονομαστικών καμπυλών

Από προηγούμενες μελέτες και στοιχεία της βιβλιογραφίας έχει καταστεί σαφές ότι στις καμπύλες τύπου Stribeck, το μη αδιάστατο μέγεθος γνωστό και ως παράμετρος ισολειτουργίας (γνωστό και από την εφαρμογή σε έδρανα ολίσθησης), είναι δυνατό να οδηγήσει στη χάραξη ενιαίας καμπύλης συμπεριφοράς δακτυλίου-εμβόλου MEK με χαρακτηριστική ειδοποιό διαφορά την κατατομή του.

Ισχύει η μοναδικότητα της καμπύλης του συντελεστή τριβής συναρτήσσει του  $\eta^*U/w$ , δηλαδή ενός δακτυλίου που δύναται να λειτουργεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες λιπαντικού, άρα μεταβαλλόμενο ιξώδες  $\eta$ , μεταβαλλόμενες στροφές κινητήρα  $N$  καθώς και μεταβαλλόμενη τιμή της ελαστικής πίεσης (συνήθως ομοιόμορφα περιμετρικά κατανεμημένης, προσδιοριζόμενης από την κατασκευή). Παρόλα αυτά ο υπολογιστικός κώδικας εμφανίζει ορατή υστέρηση υπολογισθέντων σημείων με διαφοροποίηση σε σχέση με την επιταχυνόμενη ή επιβραδυνόμενη κίνηση του δακτυλίου (βλ. σχήμα Stribeck).

Επειδή λοιπόν ο συντελεστής τριβής, συνεπώς η δύναμη τριβής δακτυλίου κυλίνδρου, θεωρήθηκε ότι εν μέρει μέχρι σήμερα έχει διερευνηθεί, το άλλο εξίσου σημαντικό μέγεθος που καθορίζεται από την ισορροπία του συστήματος, δηλαδή η ελάχιστη τιμή της λιπαντικής μεμβράνης κάτω από τις συνθήκες που μπορεί να μελετήσει ο πηγαίος κώδικας Oil Film, διερευνήθηκε και χαρτογραφήθηκε ως εξής:

1. Θεωρήθηκε ότι ο δακτύλιος είναι συγκεκριμένης ελαστικής συμπεριφοράς (ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση στη διεπιφάνεια, σταθερή 200 kPa)
2. Ελήφθη ένα πεδίο λειτουργίας βασισμένο σε ρεαλιστικές τιμές συχνότητας περιστροφής του κινητήρα, περιορισμένου όμως εύρους (1000 έως 3000rpm) που θεωρήθηκε και πεδίο μικρών μεταβολών της συχνότητας  $N$ [rpm].
3. Ελήφθη ένα πεδίο λειτουργίας βασισμένο σε ρεαλιστικές τιμές ιξώδους (π.χ. λιπαντικό τύπου Elf 15W40) σε θερμοκρασίες από 100 έως 140 °C.

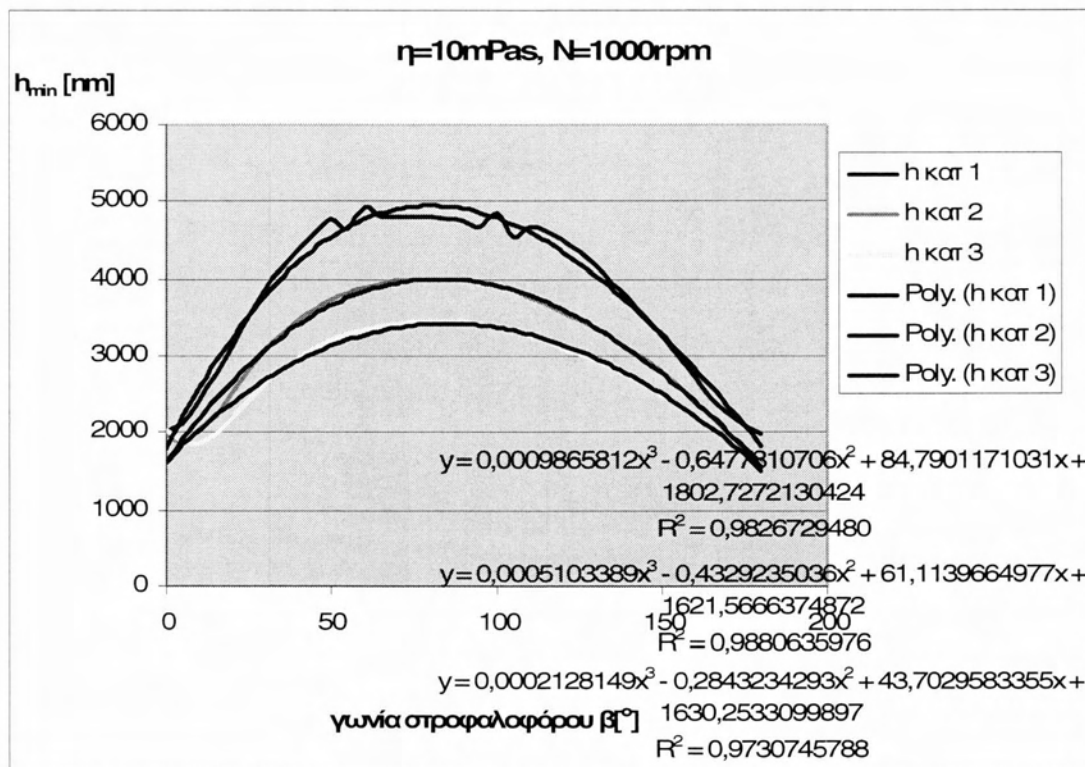
Λαμβάνοντας επίσης από τις παραμέτρους του παράγοντα ισολειτουργίας εκείνη που μεταβάλλεται ταχύτερα και σε συνεχή βάση, δηλ. τη συχνότητα περιστροφής  $N$ , αποδεικνύουμε στη συνέχεια ότι για κάθε κατάσταση φθοράς οι συγκεκριμένες τιμές της συχνότητας περιστροφής για ονομαστικό ιξώδες λιπαντικού μέσου 10mPas ισοδυναμούν σε διαφοροποιημένες τιμές αντίστοιχες της τιμής του ιξώδους, όπως εμφανίζεται στη συνέχεια στο Σχήμα 3.3.2 (Α).

Με τον τρόπο αυτό, εκτός της επιτυχημένης πολυωνομικής προσέγγισης για ενδιάμεσες τιμές της συχνότητας περιστροφής ( $1000\text{rpm} < N < 3000\text{rpm}$ ), πραγματοποιείται με απόλυτη επιτυχία και η προσέγγιση στο πεδίο μεταβολών του απολύτου ιξώδους του λιπαντικού.

Η μέθοδος επειδή βασίζεται σε κεντρικό σημείο  $10\text{mPas}-2000\text{rpm}$  είναι αναμενόμενο να μην προσεγγίζει με την ίδια επιτυχία ακραίες τιμές στο μητρώο των μεταβολών των παραμέτρων, π.χ. ( $\eta_{\min} - N_{\min}$ ) ή/και  $\eta_{\max} - N_{\max}$ .

Μετά από συγκέντρωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων, έγινε μελέτη μεταβολής των συντελεστών των εξισώσεων γραμμής τάσης των καμπυλών με πολυώνυμα 3<sup>ου</sup> βαθμού με ακρίβεια δέκα δεκαδικών ψηφίων για το ελάχιστο πάχος λιπαντικής μεμβράνης. Όσον αφορά στην δύναμη τριβής θεωρήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ότι είναι δυνατή η εκτίμηση της μέσα από τις καμπύλες τύπου Stribeck. Για το λόγο αυτό, αλλά συγχρόνως επειδή η διαδικασία αυτή ξεπερνούσε κατά την άποψη του επιβλέποντα τα όρια της παρούσας εργασίας δεν ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με πολυωνομικές προσεγγίσεις στο πεδίο των δυνάμεων τριβής.

Δίνεται ενδεικτικά η μεθοδολογία για  $\eta=10\text{mPas}$  και σημείο λειτουργίας  $N=1000\text{rpm}$ .



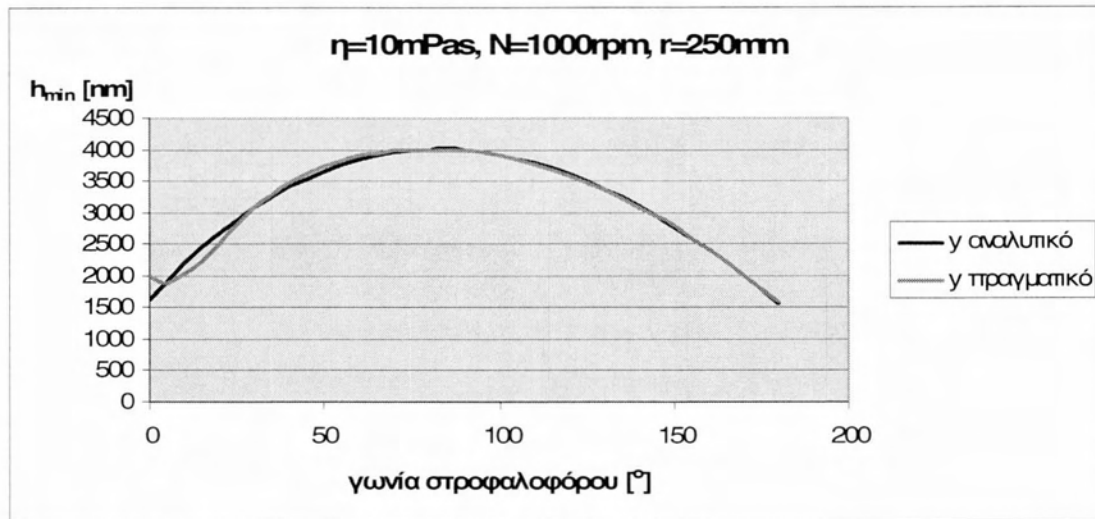
**Σχήμα 3.1.1:** Διάγραμμα ονομαστικών καμπυλών ελαχίστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης για τις τρεις καταστάσεις με τις αντίστοιχες γραμμές τάσης.



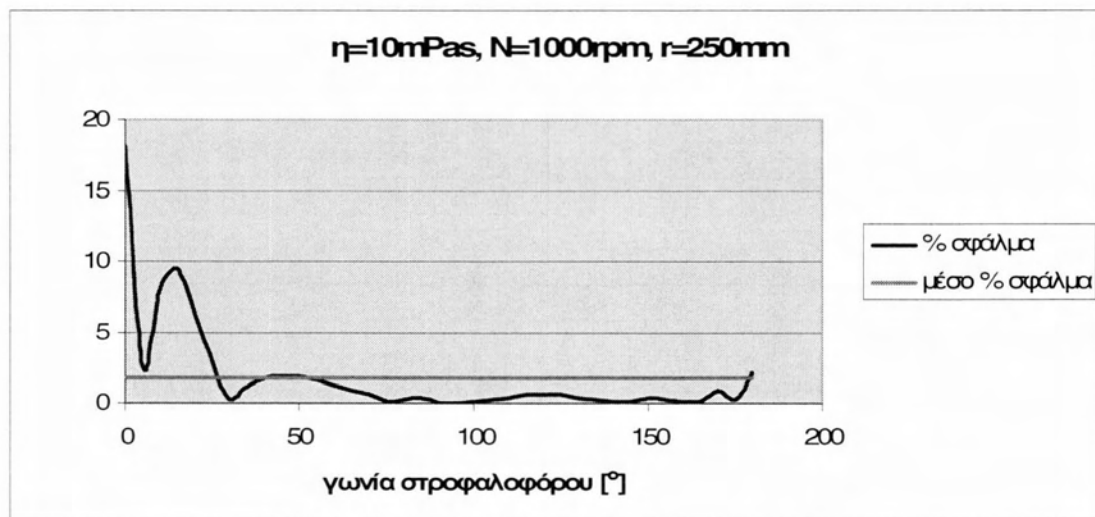
Διακρίνοντας την εξίσωση της γραμμής τάσης για την 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς και ελέγχοντας παράλληλα και το σφάλμα R<sup>2</sup> που προκύπτει για την εγκυρότητά της, καταστρώθηκαν πίνακες υπολογισμού των αναλυτικών τιμών καθώς και το ποσοστιαίο σφάλμα αποκλίσεως. Παρατίθεται ο αντίστοιχος πίνακας για την πληρέστερη κατανόηση της μεθόδου:

| x   | a3*x^3 | a2*x^2 | a1*x   | a0   | y αναλυτικό | y πραγματικό | % σφάλμα |
|-----|--------|--------|--------|------|-------------|--------------|----------|
| 0   | 0      | 0      | 0      | 1803 | 1802,727    | 2020         | 10,75608 |
| 5   | 0,12   | -16,19 | 423,95 | 1803 | 2210,607    | 2120         | 4,273896 |
| 10  | 0,99   | -64,78 | 847,9  | 1803 | 2586,837    | 2400         | 7,784869 |
| 15  | 3,33   | -145,8 | 1271,9 | 1803 | 2932,158    | 2760         | 6,237607 |
| 20  | 7,89   | -259,1 | 1695,8 | 1803 | 3247,31     | 3130         | 3,747916 |
| 25  | 15,4   | -404,9 | 2119,8 | 1803 | 3533,032    | 3509         | 0,684876 |
| 30  | 26,6   | -583   | 2543,7 | 1803 | 3790,065    | 3859         | 1,786332 |
| 35  | 42,3   | -793,5 | 2967,7 | 1803 | 4019,149    | 4159         | 3,362607 |
| 40  | 63,1   | -1036  | 3391,6 | 1803 | 4221,023    | 4379         | 3,607596 |
| 45  | 89,9   | -1312  | 3815,6 | 1803 | 4396,428    | 4599         | 4,404696 |
| 50  | 123    | -1619  | 4239,5 | 1803 | 4546,103    | 4769         | 4,673872 |
| 55  | 164    | -1960  | 4663,5 | 1803 | 4670,788    | 4639         | 0,685242 |
| 60  | 213    | -2332  | 5087,4 | 1803 | 4771,224    | 4939         | 3,396964 |
| 65  | 271    | -2737  | 5511,4 | 1803 | 4848,15     | 4789         | 1,235115 |
| 70  | 338    | -3174  | 5935,3 | 1803 | 4902,306    | 4789         | 2,365954 |
| 75  | 416    | -3644  | 6359,3 | 1803 | 4934,431    | 4789         | 3,03678  |
| 80  | 505    | -4146  | 6783,2 | 1803 | 4945,267    | 4789         | 3,263047 |
| 85  | 606    | -4680  | 7207,2 | 1803 | 4935,553    | 4779         | 3,275855 |
| 90  | 719    | -5247  | 7631,1 | 1803 | 4906,029    | 4739         | 3,524557 |
| 95  | 846    | -5846  | 8055,1 | 1803 | 4857,434    | 4679         | 3,813512 |
| 100 | 987    | -6478  | 8479   | 1803 | 4790,509    | 4849         | 1,20624  |
| 105 | 1142   | -7142  | 8903   | 1803 | 4705,994    | 4539         | 3,679098 |
| 110 | 1313   | -7838  | 9326,9 | 1803 | 4604,629    | 4659         | 1,167016 |
| 115 | 1500   | -8567  | 9750,9 | 1803 | 4487,153    | 4629         | 3,064318 |
| 120 | 1705   | -9328  | 10175  | 1803 | 4354,306    | 4509         | 3,430779 |
| 125 | 1927   | -10122 | 10599  | 1803 | 4206,829    | 4369         | 3,711856 |
| 130 | 2168   | 10948  | 11023  | 1803 | 4045,461    | 4169         | 2,963271 |
| 135 | 2427   | -11806 | 11447  | 1803 | 3870,943    | 3949         | 1,976634 |
| 140 | 2707   | -12697 | 11871  | 1803 | 3684,013    | 3749         | 1,733437 |
| 145 | 3008   | -13620 | 12295  | 1803 | 3485,413    | 3499         | 0,388303 |
| 150 | 3330   | -14575 | 12719  | 1803 | 3275,882    | 3269         | 0,21053  |
| 155 | 3674   | -15563 | 13142  | 1803 | 3056,16     | 2990         | 2,212716 |
| 160 | 4041   | -16583 | 13566  | 1803 | 2826,987    | 2730         | 3,552642 |
| 165 | 4432   | -17636 | 13990  | 1803 | 2589,103    | 2460         | 5,248088 |
| 170 | 4847   | -18721 | 14414  | 1803 | 2343,248    | 2250         | 4,144338 |
| 175 | 5287   | -19838 | 14838  | 1803 | 2090,161    | 2080         | 0,488511 |
| 180 | 5754   | -20988 | 15262  | 1803 | 1830,583    | 1970         | 7,076997 |

Τελικά, η αναλυτική προσέγγιση χαρακτηρίζεται αποδεκτή εφόσον το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα βρίσκεται σε λογικές τιμές. Του λόγου το αληθές φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



(A)



(B)

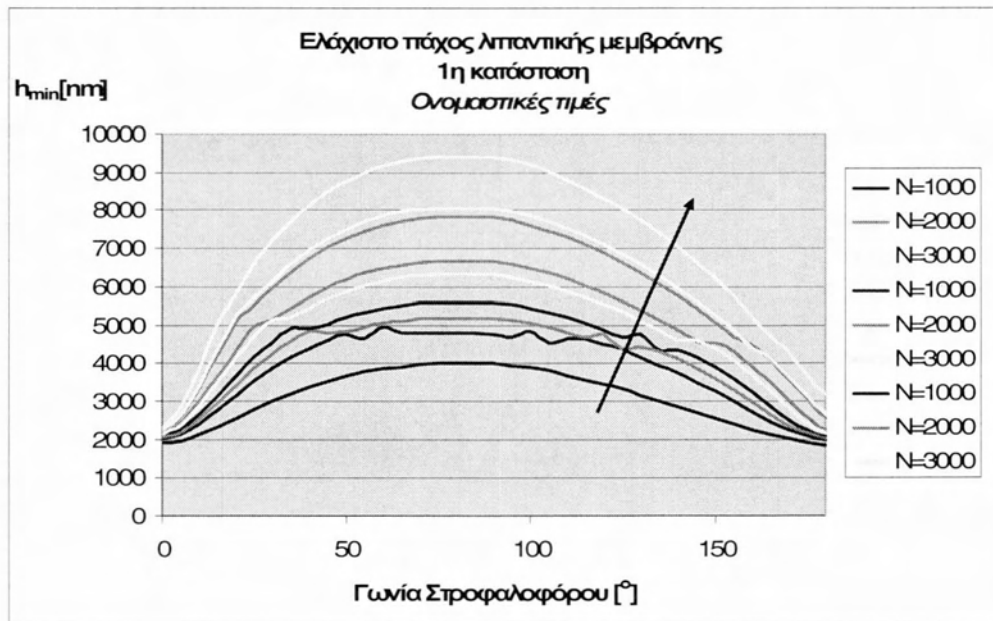
**Σχήμα 3.1.2:** (A) Αναλυτική προσέγγιση ονομαστικής καμπύλης και (B) διακύμανση ποσοστιαίου σφάλματος προσέγγισης καθώς και η μέση τιμή αυτού.

### **3.2 Αναλυτικές μορφές καμπυλών θεωρητικών αποτελεσμάτων κώδικα Oil Film**

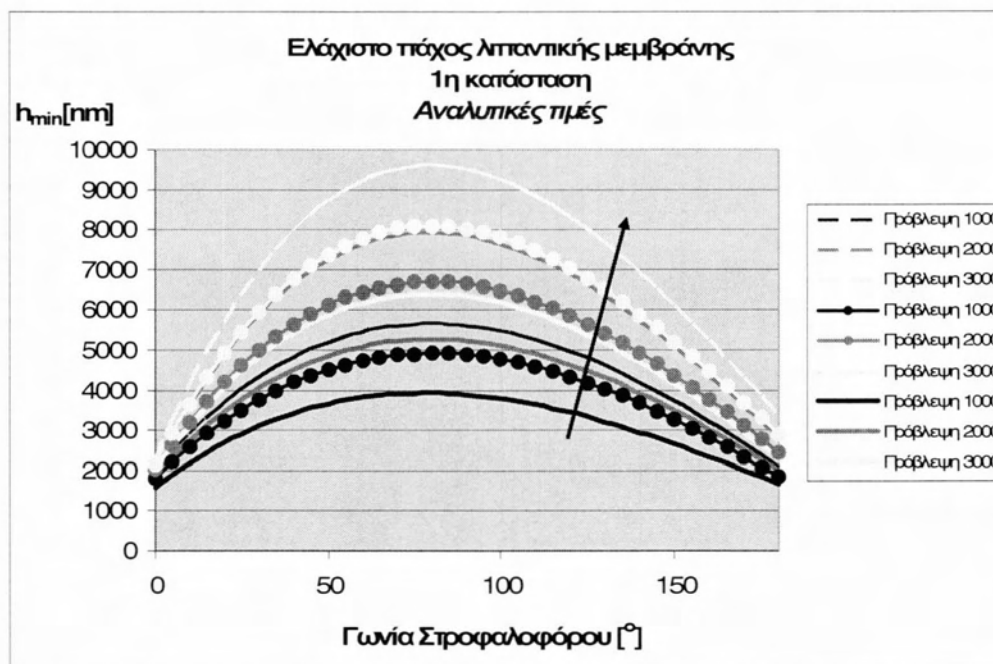
Βάσει της προαναφερθείσας μεθόδου, κατασκευάστηκαν οι αναλυτικές μορφές καμπυλών των θεωρητικών αποτελεσμάτων ώστε να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω διερεύνηση της τριβολογικής συμπεριφοράς του συστήματος δακτυλίου-χιτωνίου.

Παρατηρείται άριστη προσέγγιση τόσο των καμπυλών της λιπαντικής μεμβράνης όσο και των καμπυλών της υδροδυναμικής συνιστώσας τριβής (με πολώνυμα τρίτου ή τετάρτου βαθμού κατά περίπτωση με βαθμό ακρίβειας δέκα δεκαδικών ψηφίων). Δίνονται τα αναλυτικά γραφήματα για τις τρεις καταστάσεις φθοράς στα τρία ιξώδη που έγιναν οι μετρήσεις.

### 3.2.1 Αναλυτικές μορφές καμπυλών 1<sup>ης</sup> κατάστασης φθοράς

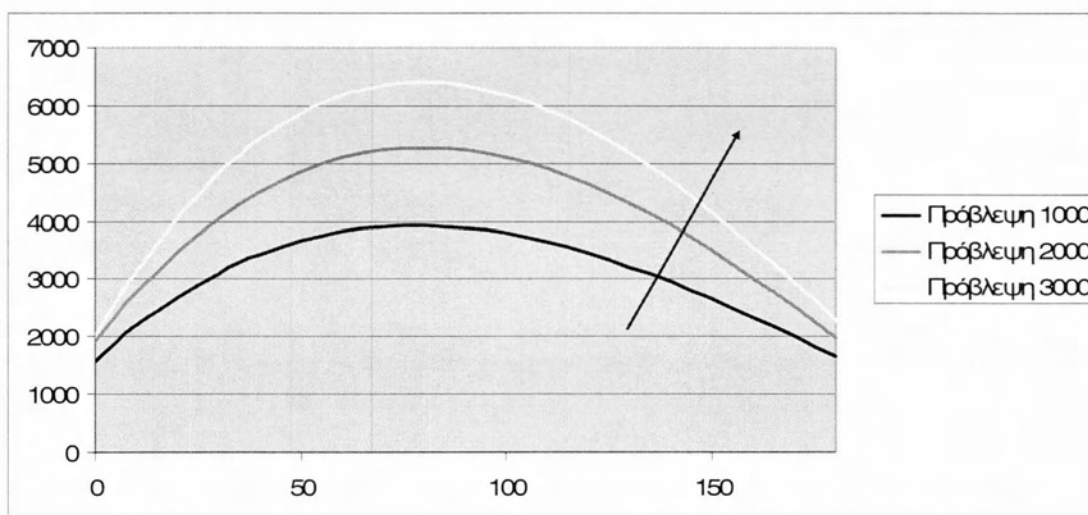


(A)



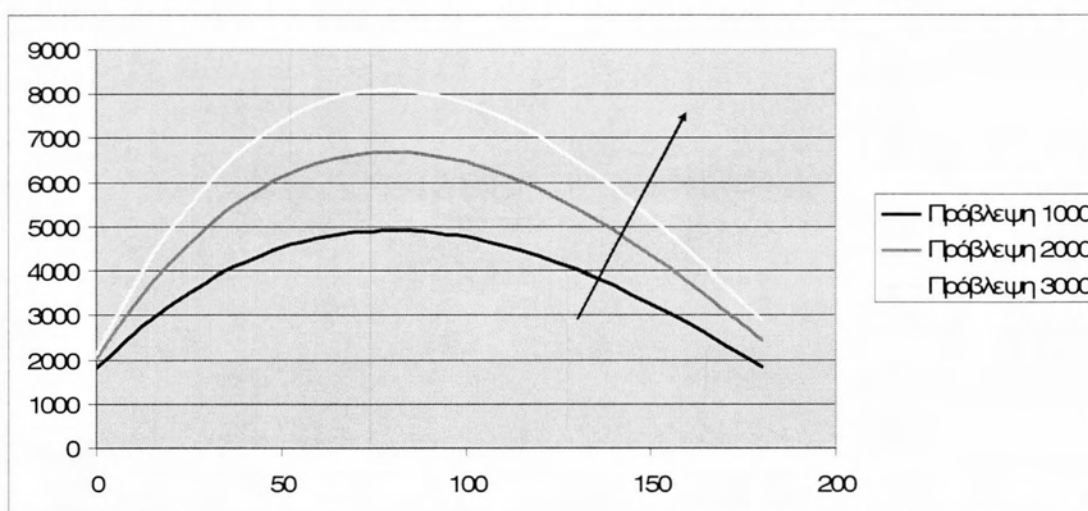
(B)

**Σχήμα 3.2.1:** Οι ονομαστικές καμπύλες (A) και οι προβλεπόμενες αναλυτικές τους (B) προσεγγίσεις. Παρατηρείται μια αντιστοιχία συμπεριφοράς των καμπυλών ανάλογα των τιμών του ιξώδους.



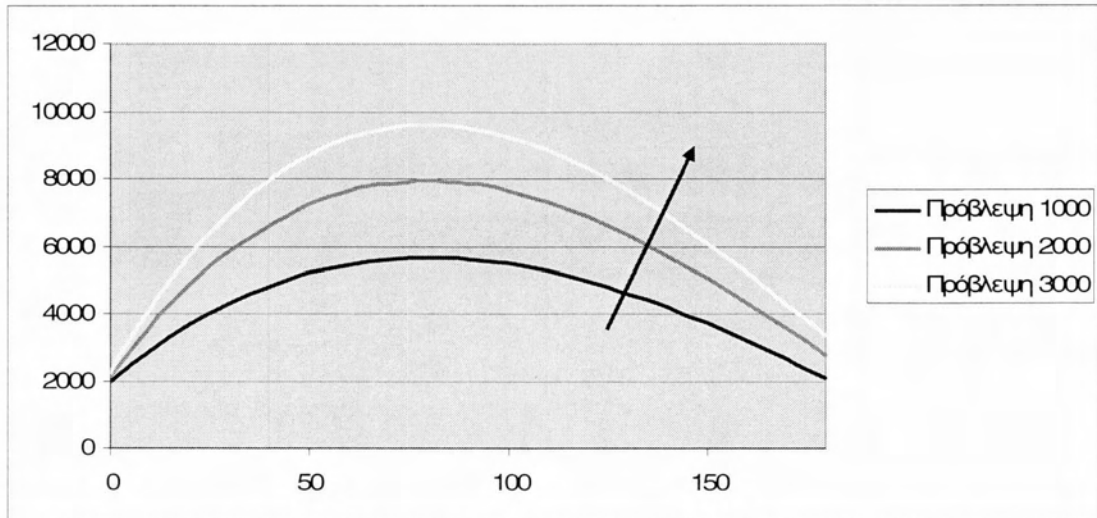
**Σχήμα 3.2.2:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



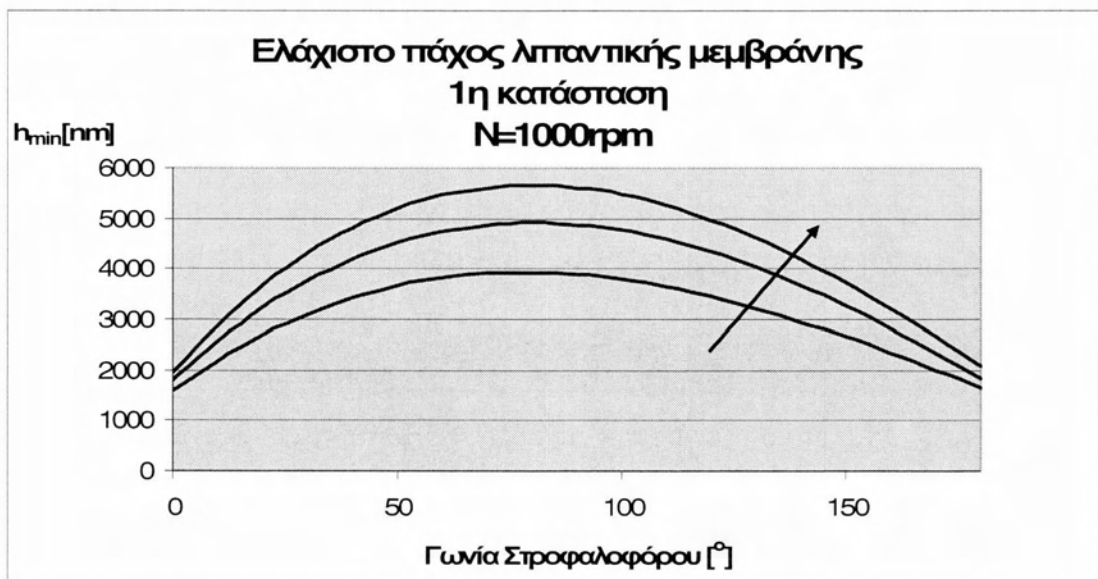
**Σχήμα 3.2.3:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

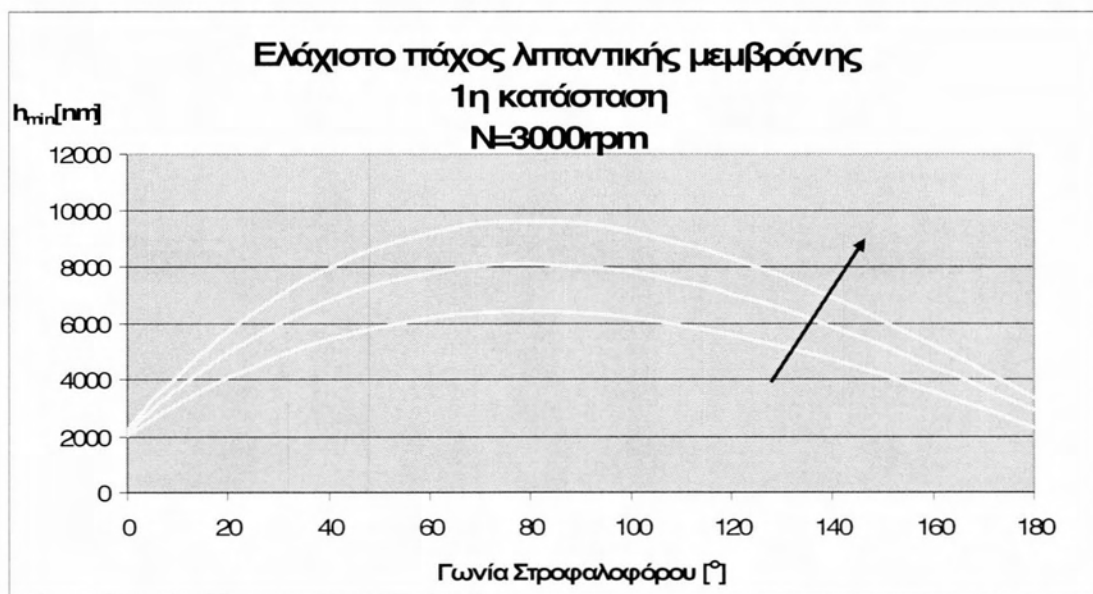
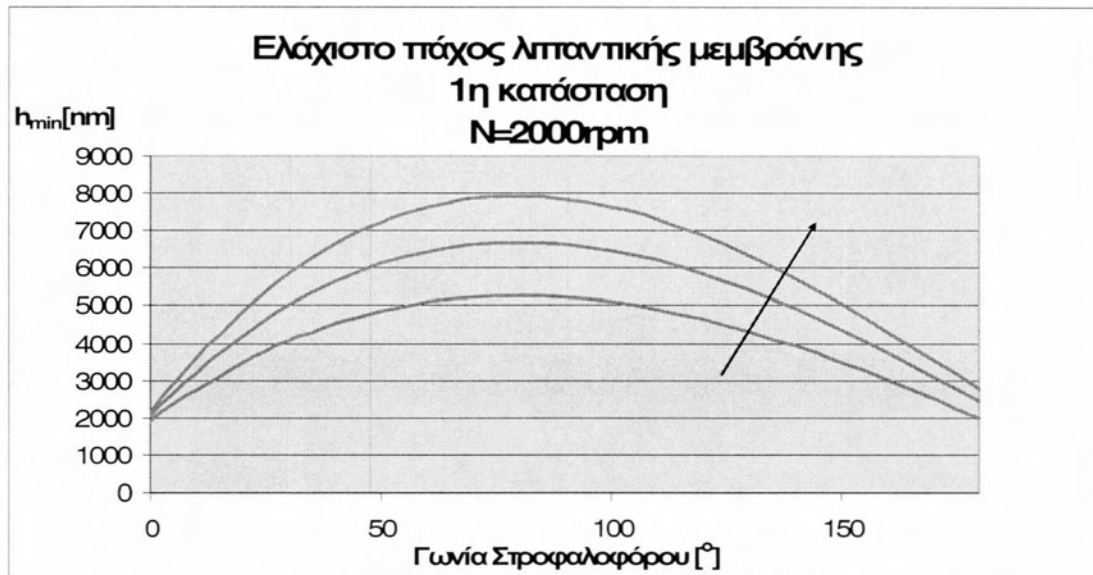


**Σχήμα 3.2.4:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=50\text{mm}$ ,  $\eta=14\text{mPas}$ ,  $N=1000\text{-}2000\text{-}3000\text{rpm}$ .

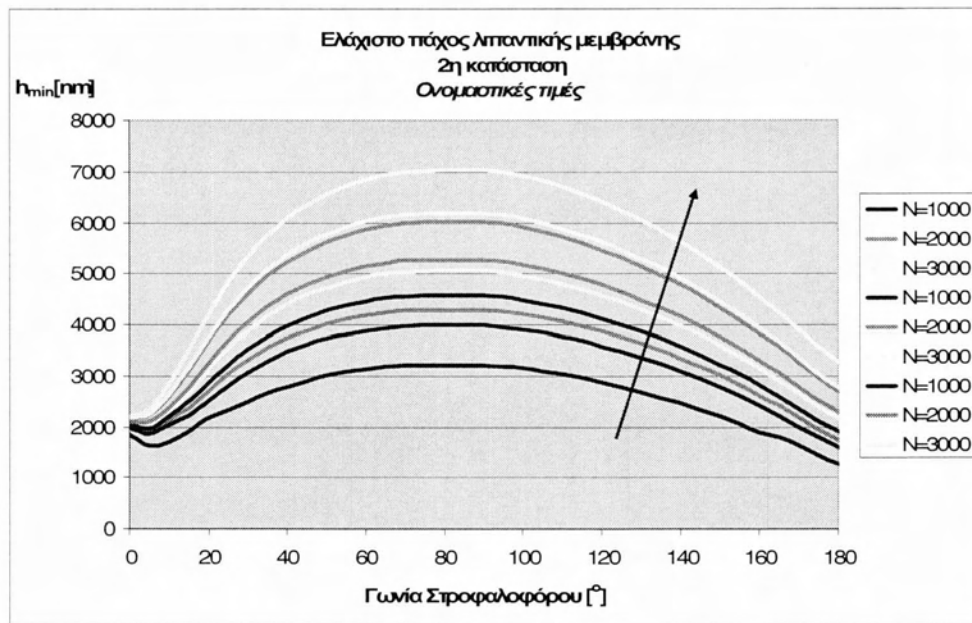


(A)

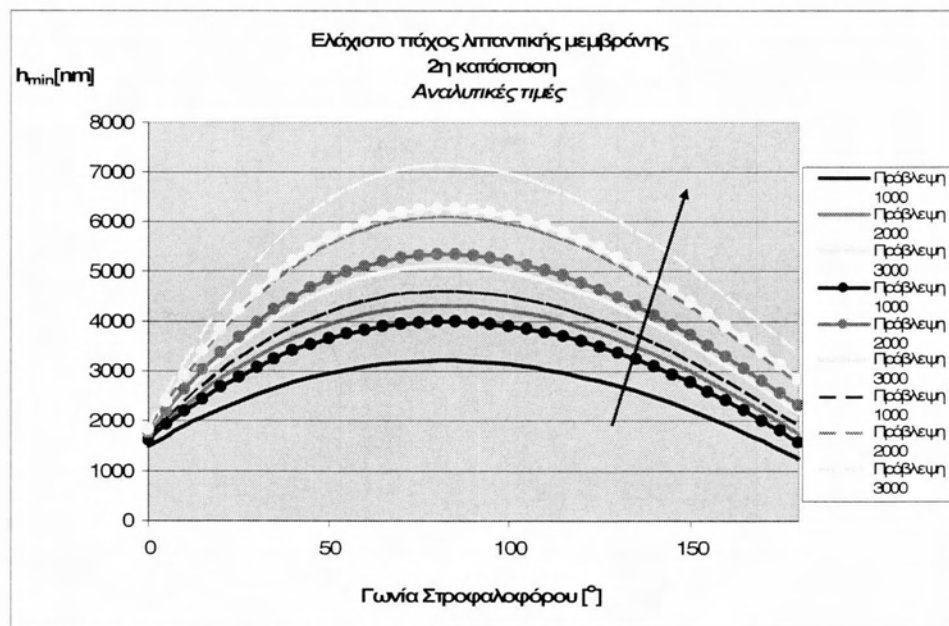


**Σχήμα 3.2.5:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου για τα τρία ιξώδη.

### 3.2.2 Αναλυτικές μορφές καμπυλών 2<sup>ης</sup> κατάστασης φθοράς



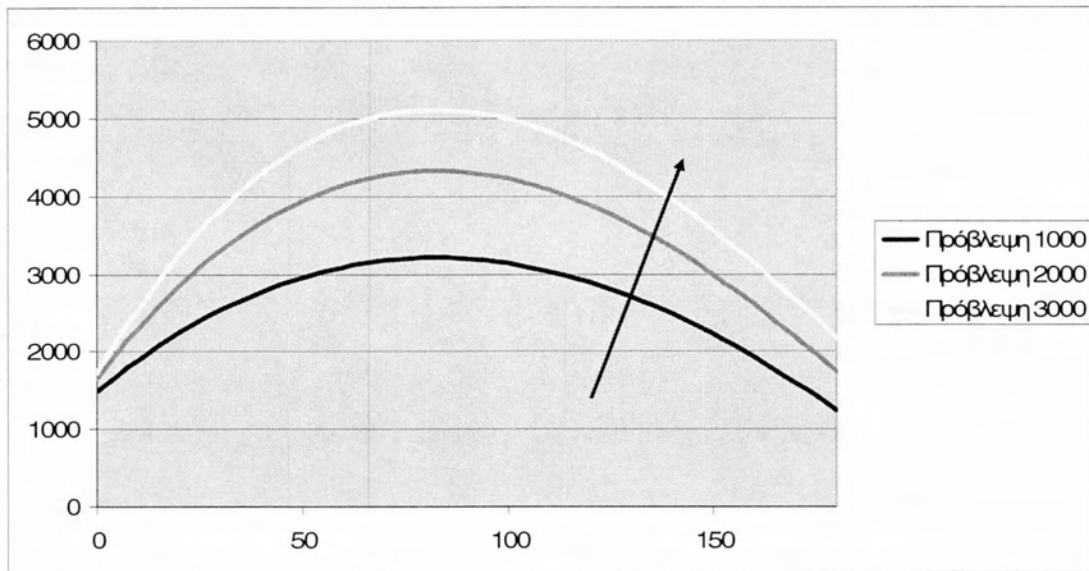
(A)



(B)

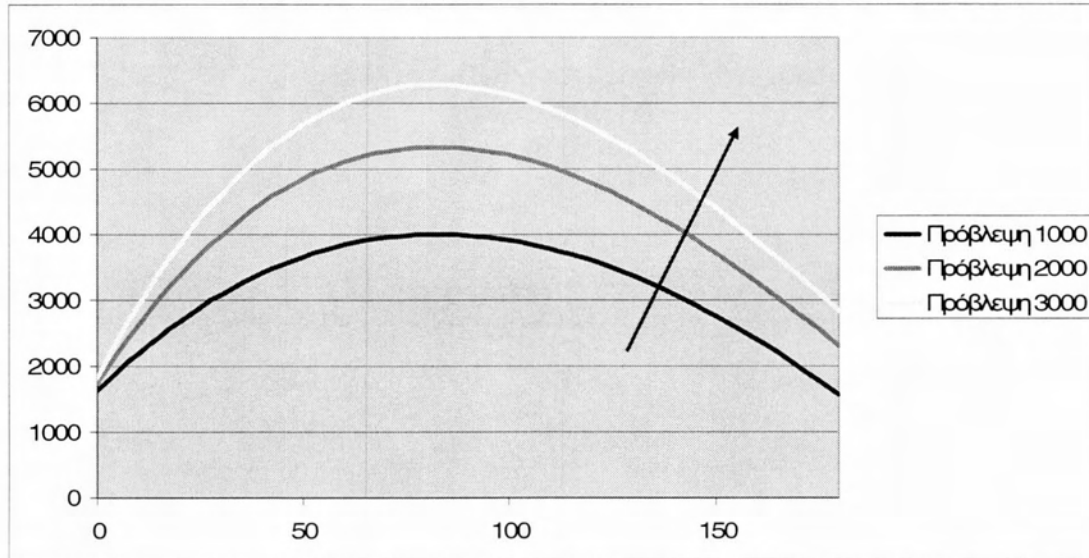
**Σχήμα 3.2.6:** Οι ονομαστικές καμπύλες (A) και οι προβλεπόμενες αναλυτικές τους (B) προσεγγίσεις. Παρατηρείται μια αντιστοιχία συμπεριφοράς των καμπυλών ανάλογα των τιμών του ιξώδους





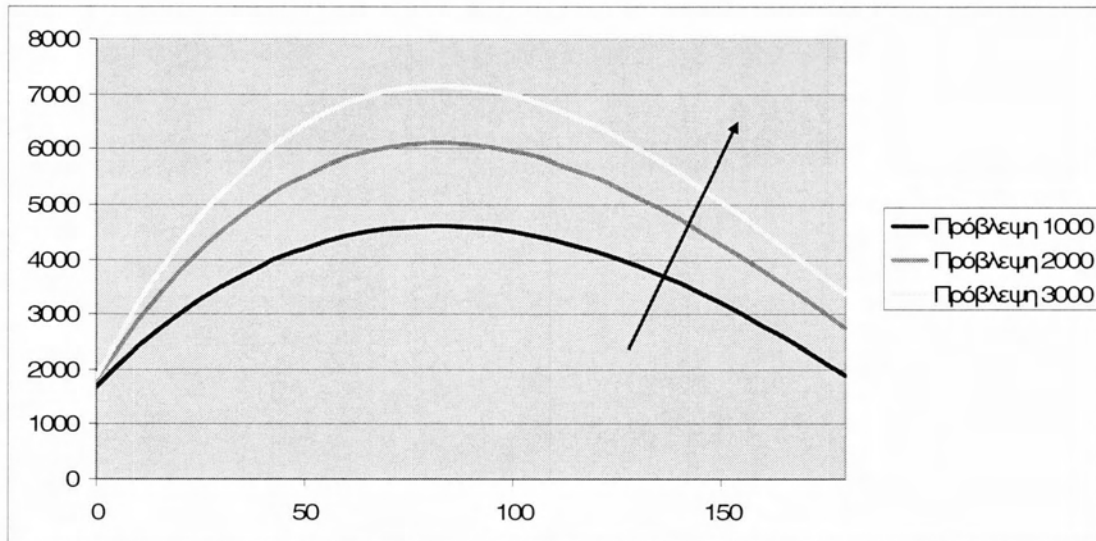
**Σχήμα 3.2.7:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=250\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



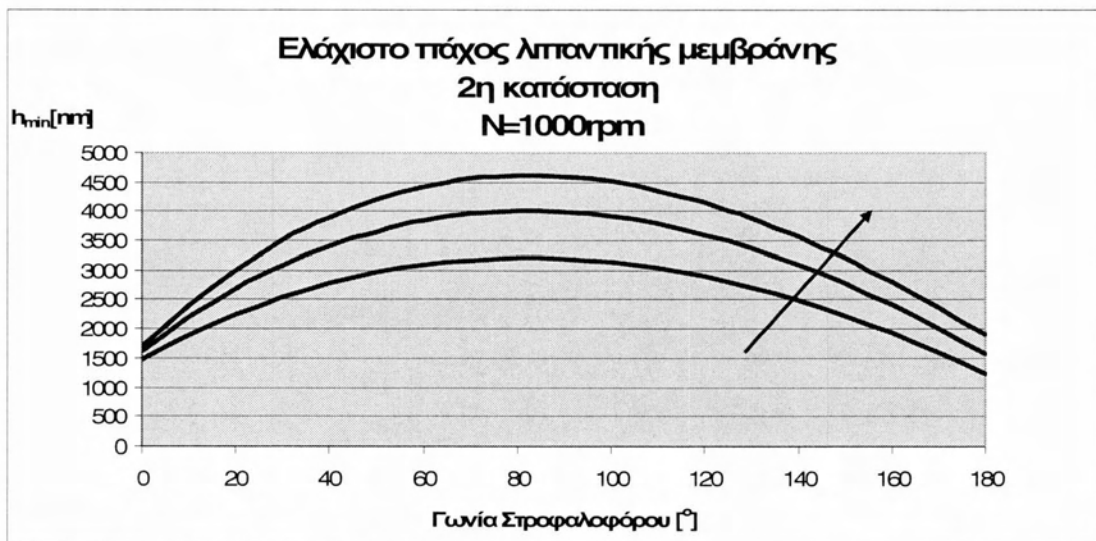
**Σχήμα 3.2.8:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς  $R=250\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

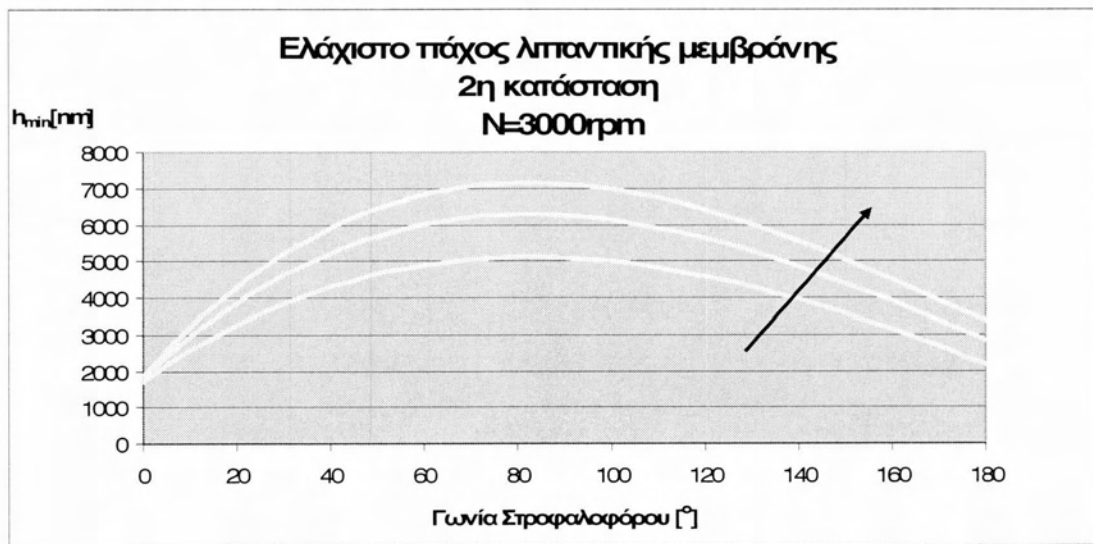
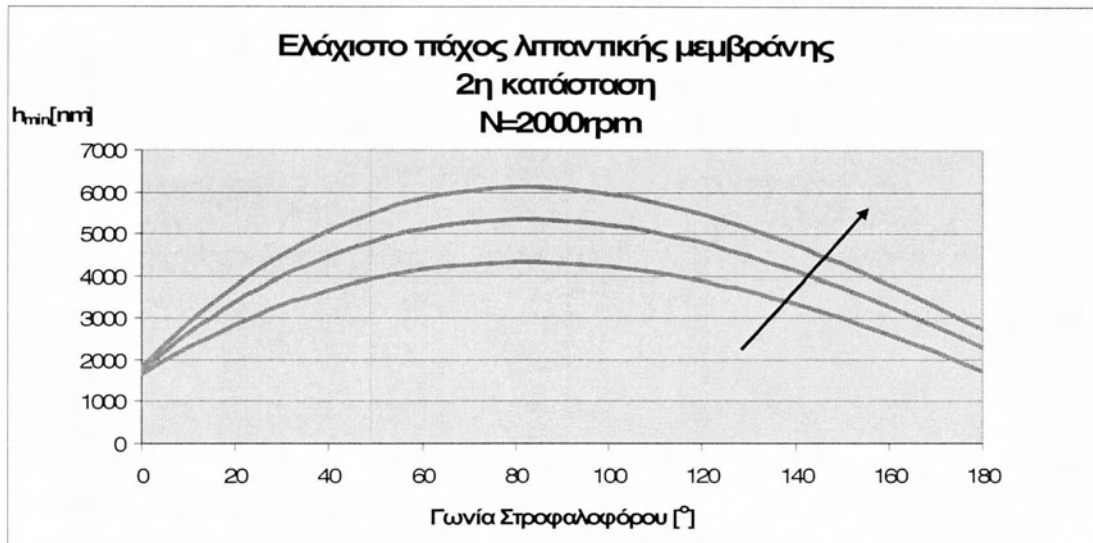


**Σχήμα 3.2.9:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς R=250mm, η=10mPas, N=1000-2000-3000rpm.

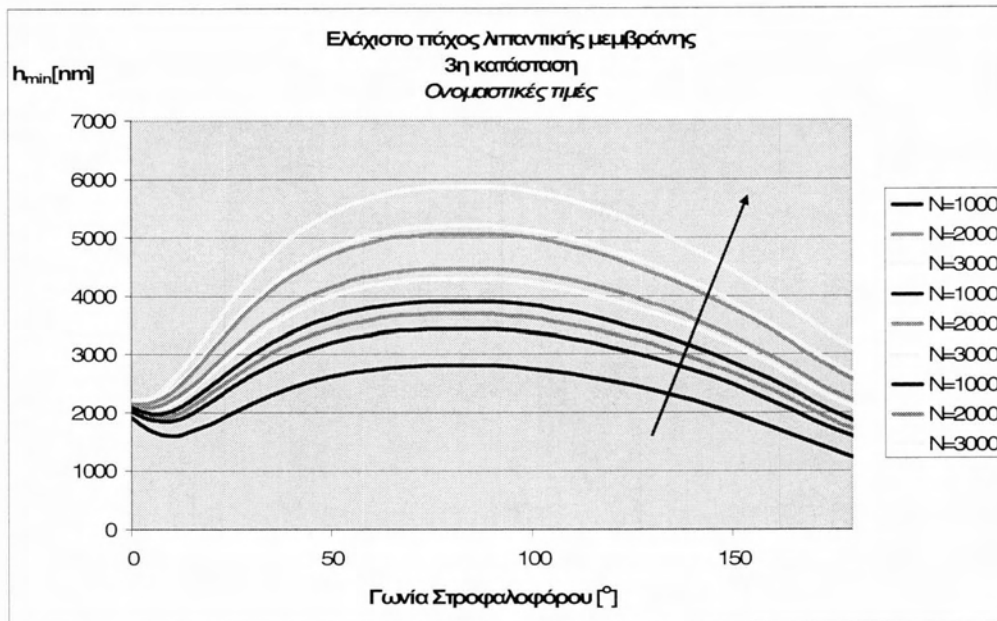


(A)

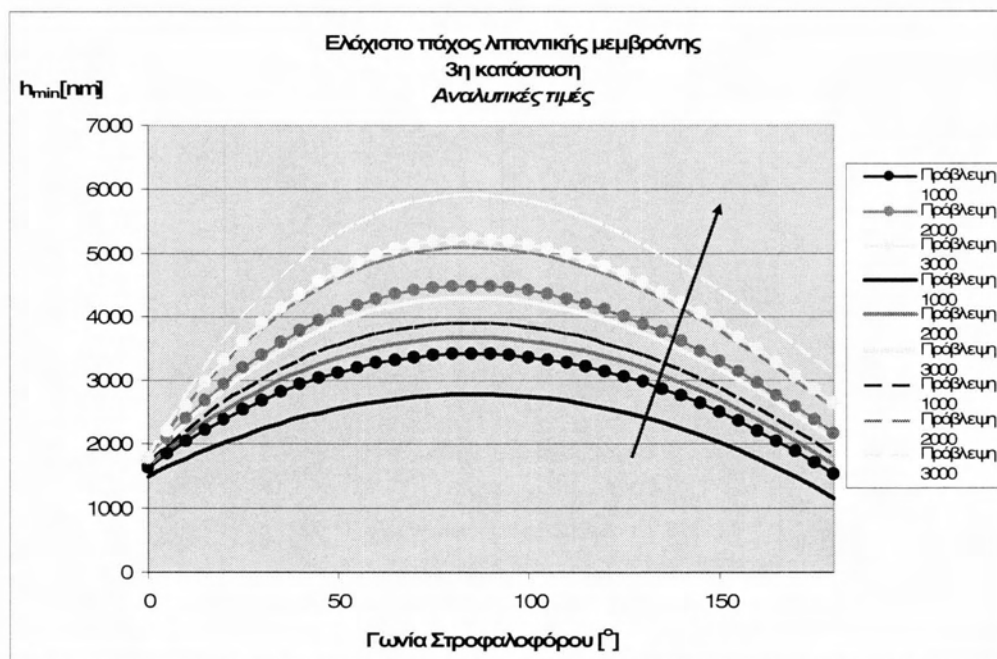


**Σχήμα 3.2.10:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου για τα τρία ιξώδη.

### 2.4.2 Αναλυτικές μορφές καμπυλών $3^{115}$ κατάστασης φθοράς

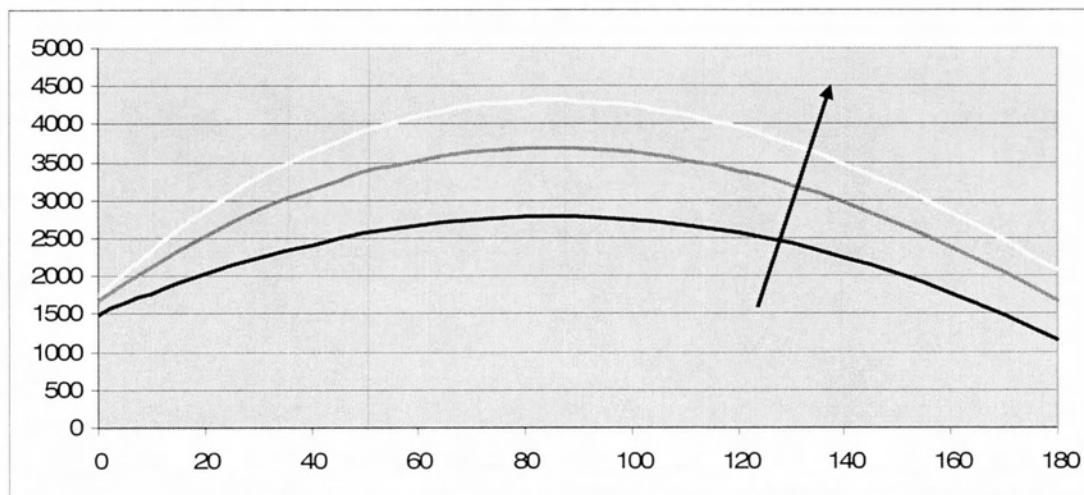


(A)



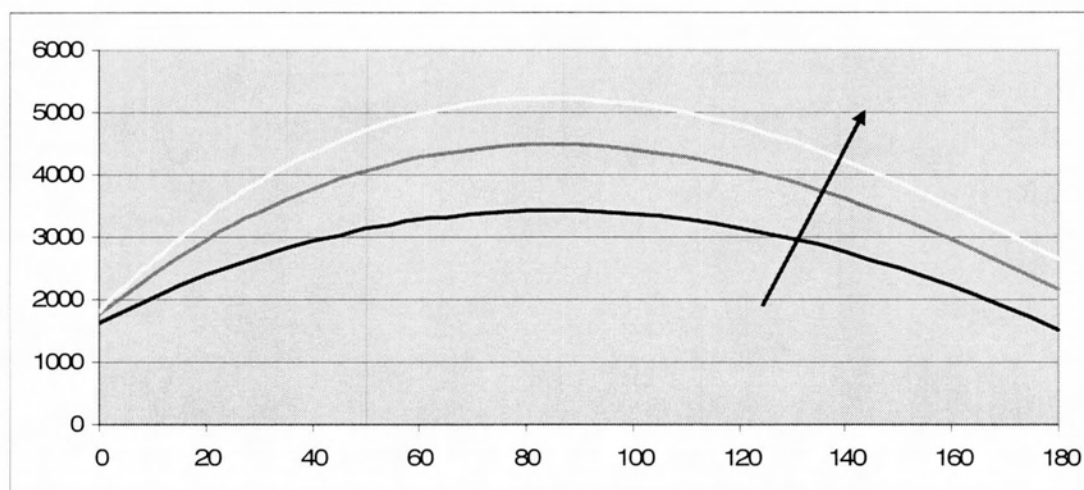
(B)

**Σχήμα 3.2.11:** Οι ονομαστικές καμπύλες (A) και οι προβλεπόμενες αναλυτικές τους (B) προσεγγίσεις. Παρατηρείται μια αντιστοιχία συμπεριφοράς των καμπυλών ανάλογα των τιμών του ιξώδους



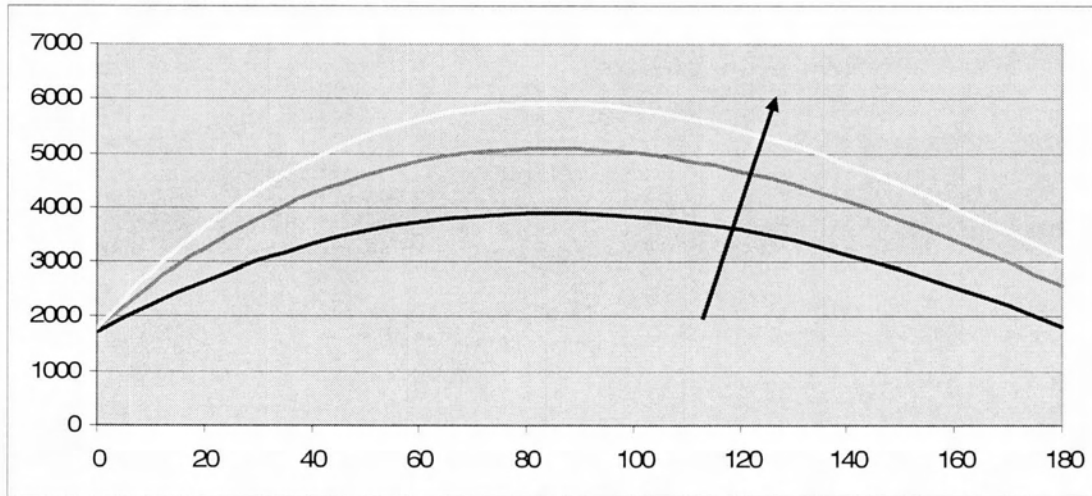
**Σχήμα 3.2.12:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=6\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



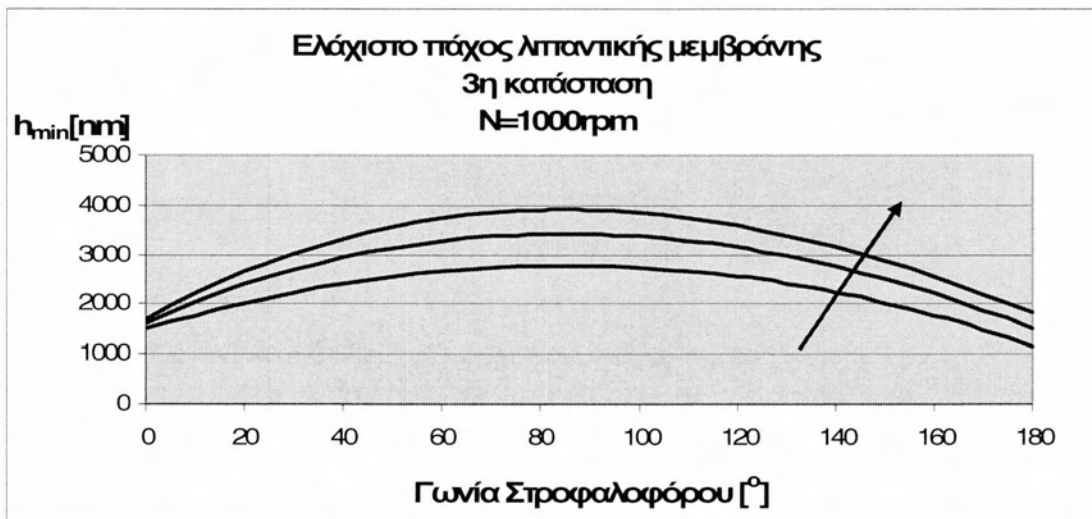
**Σχήμα 3.2.13:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=10\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .

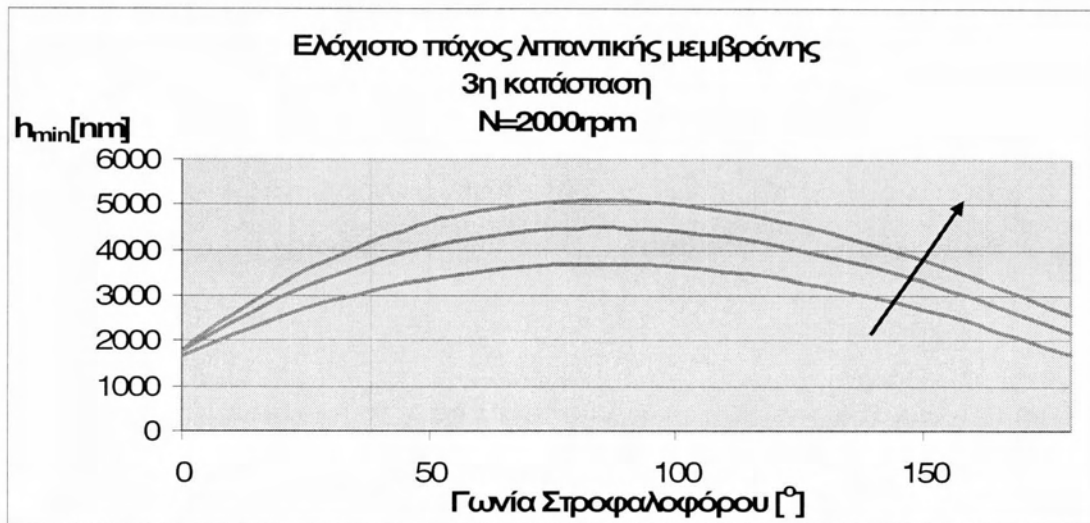


**Σχήμα 3.2.14:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου.

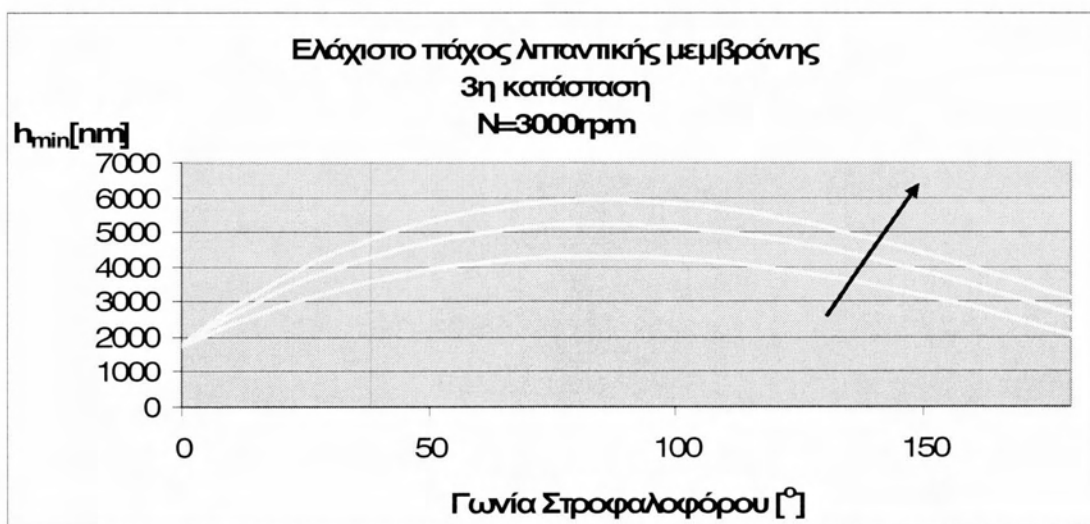
3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς -  $R=500\text{mm}$ ,  $\eta=14\text{mPas}$ ,  $N=1000-2000-3000\text{rpm}$ .



(A)



(B)



(Γ)

**Σχήμα 3.2.15:** Αναλυτικό διάγραμμα πρόβλεψης μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου για τα τρία ιξώδη.

### 3.3 Μέθοδος Ταχείας Προσέγγισης

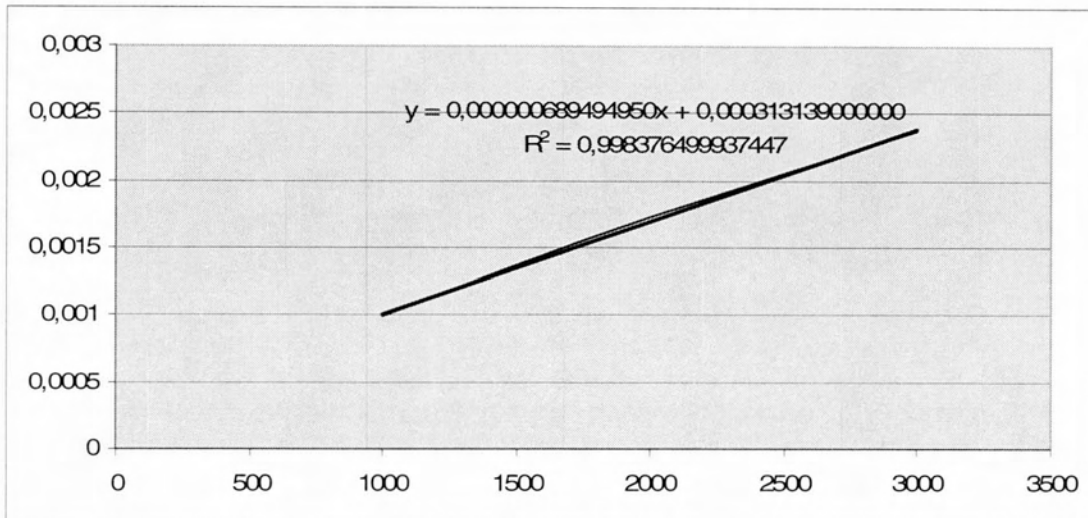
Στόχος της Μεθόδου Ταχείας Προσέγγισης με πολυώνυμα είναι να καταρτιστεί ένας «χάρτης» προσεγγίσεων σημείων λειτουργίας για οποιοδήποτε ιξώδες και ταχύτητα του εμβόλου. Στην ουσία, σκοπός είναι να γίνει μια προσεγγιστική αναγωγή ως προς ένα σημείο λειτουργίας για κάθε κατάσταση φθοράς. Η βέλτιστη λοιπόν επιλογή των σημείων του πλέγματος κάθε φορά, ως προς τα οποία γίνεται η αναγωγή, υπήρξαν οι αναλυτικές τιμές που υπολογίστηκαν για ιξώδες 10mPas και δεχόμεθα ότι βρίσκεται στο κέντρο αυτού. Συνεπώς ήταν απαραίτητο να βρεθούν εκ νέου νέα πολυώνυμα στις ήδη υπολογισμένες αναλυτικές καμπύλες κατά τέτοιο τρόπο όπως παραπάνω.

Πιο συγκεκριμένα, συγκροτήθηκε νέος πίνακας συντελεστών και αναλυτικό διάγραμμα για  $\eta=10\text{mPas}$  για κάθε κατάσταση, στον οποίο εισάγοντας τις αναλυτικές τιμές πάχους της λιπαντικής μεμβράνης του σημείου προς μελέτη παρατηρήθηκε σε ποιες αντίστοιχες τιμές έχουμε παρόμοια συμπεριφορά λειτουργίας. Δίνονται ενδεικτικά για την 1<sup>η</sup> κατάσταση παρακάτω ο πίνακας και οι καμπύλες των πολυωνύμων.

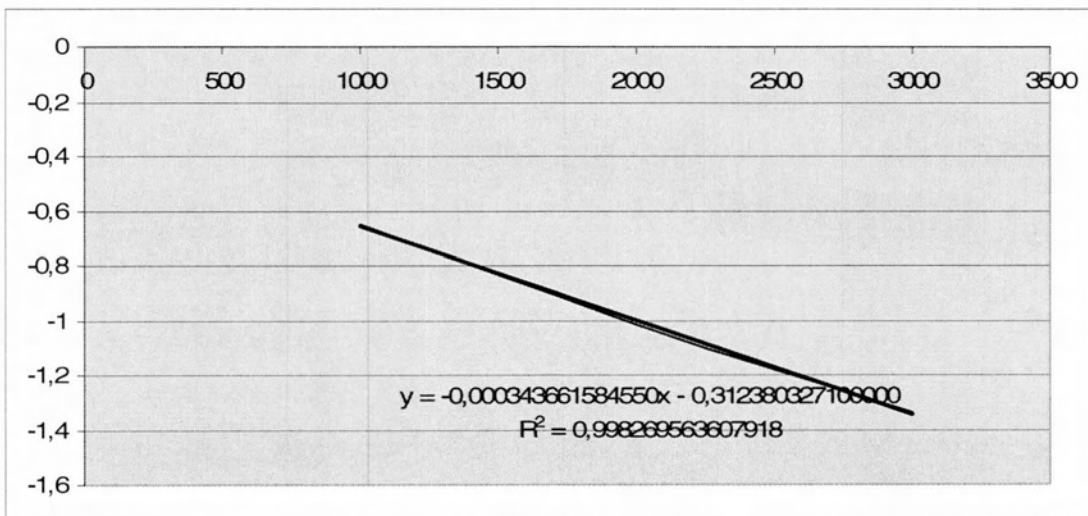
| <b>N[rpm]</b> | <b>a<sup>3</sup></b> | <b>a<sup>2</sup></b> | <b>a<sup>1</sup></b> | <b>a<sup>0</sup></b> |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1000          | 0,000987             | 0,64778              | 84,79012             | 1802,727             |
| 2000          | 0,001724             | 1,01623              | 129,1024             | 2028,438             |
| 3000          | 0,002366             | -1,3351              | 167,4387             | 2137,99              |

(A)

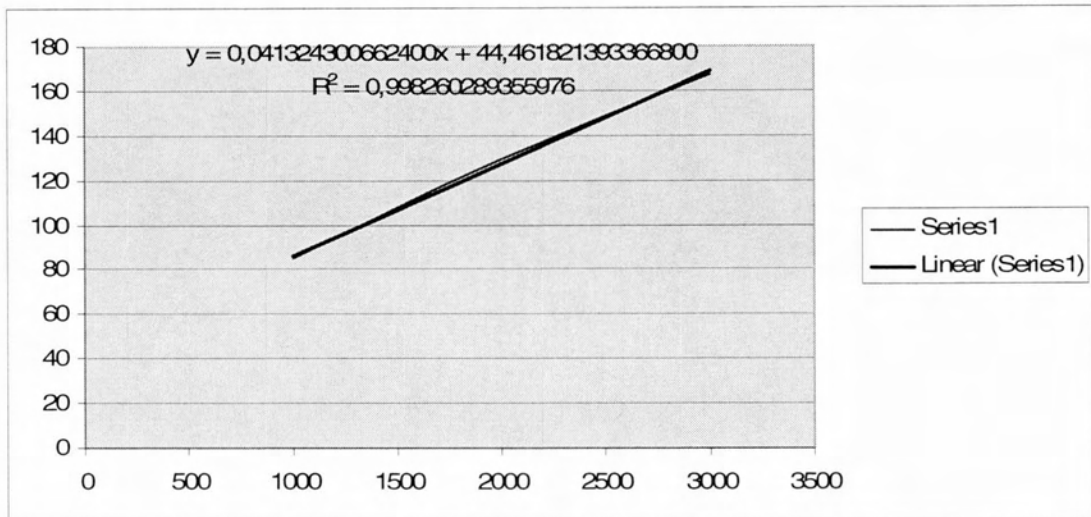




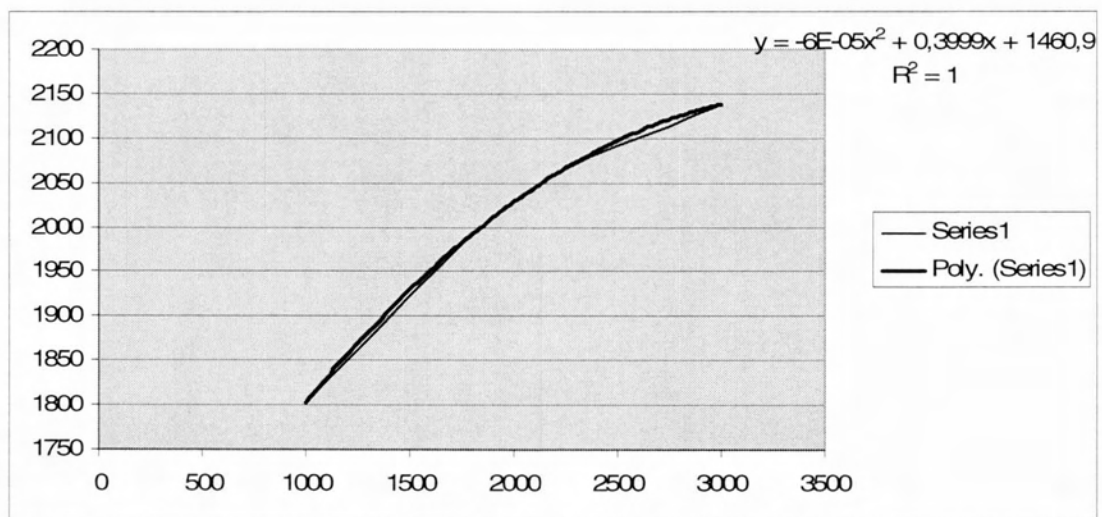
(B)



(Γ)



(Δ)



(E)

**Σχήμα 3.3.1:** πίνακας των συντελεστών της 1<sup>ης</sup> καταστάσεως φθοράς για  $\eta=10mPas$  (A) και διαγράμματα των συντελεστών των πολυωνύμων  $a^3$  (B),  $a^2$  (Γ),  $a^1$  (Δ) και  $a^0$  (E)

### 3.3.1 Πολυωνυμική παρεμβολή

Όπως έγινε ήδη κατανοητό, η μεθοδολογία με τη χρήση των πολυωνύμων 3<sup>ου</sup> βαθμού που ευνοούνται από την μορφή των συγκεκριμένων καμπυλών και για το λόγο αυτό έχουν επιλεγθεί, έγινε με πεδίο ορισμού της γωνίας του στροφαλοφόρου από  $-180$  μοίρες, δηλαδή μισή παλινδρόμηση (κίνηση από ΑΝΣ έως ΚΝΣ). Οι γραμμές τάσεις που εξάγονται από το πρόγραμμα αναλυτικής προσέγγισης απαιτήσαν αυξημένο αριθμό δεκαδικών ψηφίων («οριζόντια προσέγγιση»). Στη συνέχεια, για τη μετάβαση από καμπύλη συχνότητας σε άλλη, απαιτήθηκε επίσης προσεγγιστική διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών ιδίου βαθμού των προαναφερθέντων πολυωνύμων όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.

Παρατηρήθηκε ότι οι διαφορές των προσεγγιστικών τιμών σε κάθε κατάσταση δεν απείχαν παραπάνω από μια εκατοντάδα, αν και όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα οι τιμές που εξήχθησαν στην πλειονότητα τους ήταν ίδιες για τις τρεις καταστάσεις φθοράς. Αυτό οδηγεί σε μια αναγκαία πολυωνυμική παρεμβολή μεταξύ τους ώστε να μπορεί να γίνει ο υπολογισμός μετέπειτα για οποιοδήποτε ιξώδες και αριθμό στροφών και στις τρεις καταστάσεις φθοράς.

| 1η κατάσταση φθοράς |            |      |      |
|---------------------|------------|------|------|
| $\eta$ [mPas]       | $N'$ [rpm] |      |      |
| 6                   | 400        | 1200 | 1850 |
| 10                  | 1000       | 2000 | 3000 |
| 14                  | 1400       | 2800 | 3900 |

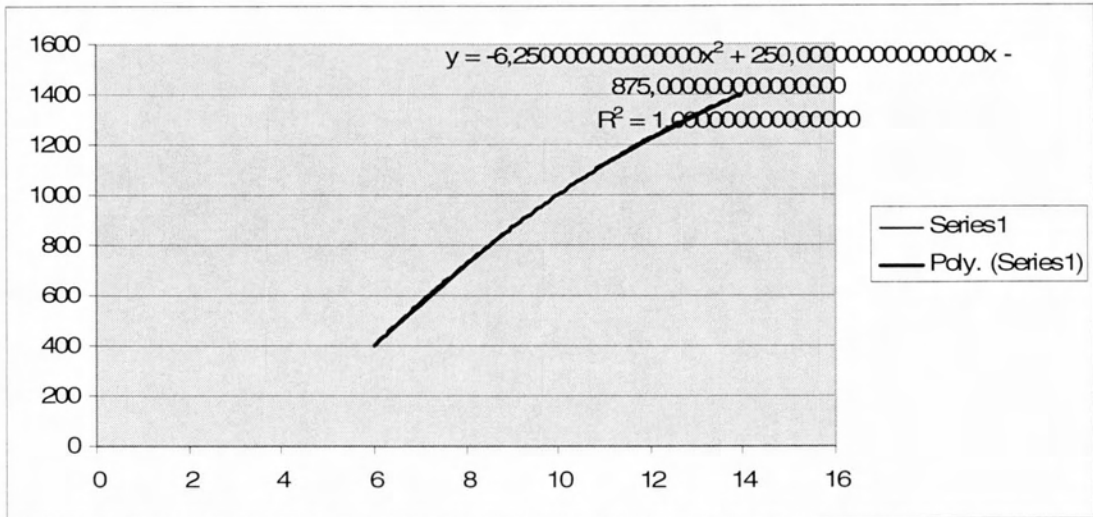
  

| 2η κατάσταση φθοράς |            |      |      |
|---------------------|------------|------|------|
| $\eta$ [mPas]       | $N'$ [rpm] |      |      |
| 6                   | 300        | 1200 | 1900 |
| 10                  | 1000       | 2000 | 3000 |
| 14                  | 1450       | 2800 | 3800 |

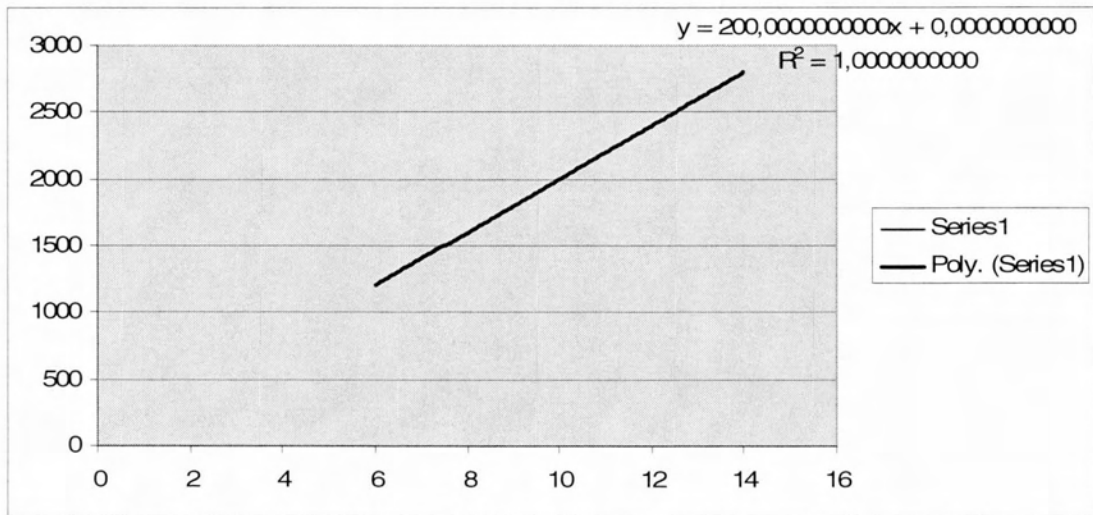
  

| 3η κατάσταση φθοράς |            |      |      |
|---------------------|------------|------|------|
| $\eta$ [mPas]       | $N'$ [rpm] |      |      |
| 6                   | 350        | 1200 | 1900 |
| 10                  | 1000       | 2000 | 3000 |
| 14                  | 1450       | 2800 | 3900 |

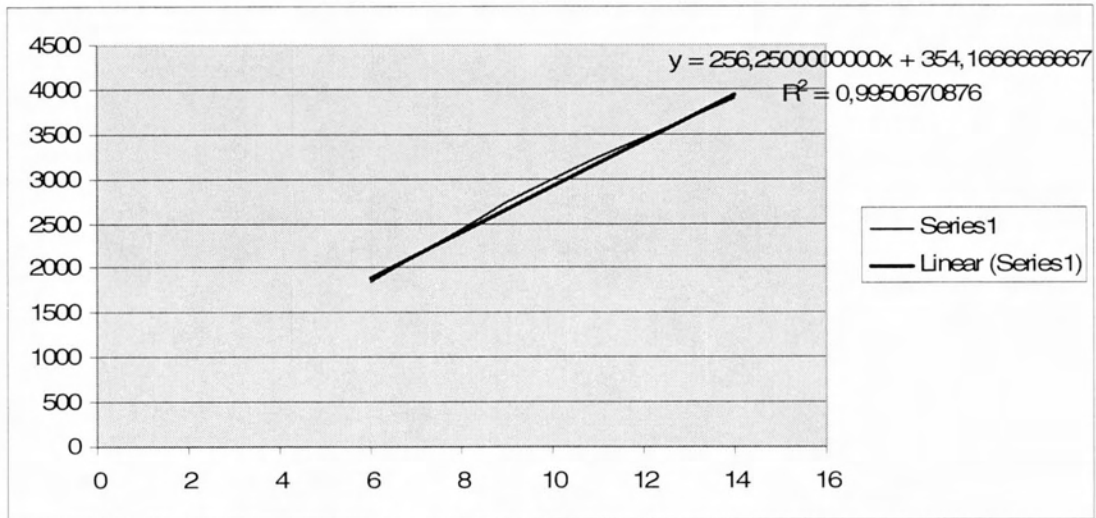
**Σχήμα 3.3.2:** «Χάρτης» προσεγγίσεων  $N'$  [rpm] για  $\eta=6$  και  $14\text{mPas}$  συναρτήσει των  $N=1000$ ,  $2000$  και  $3000$  rpm για  $\eta=10\text{mPas}$  στις τρεις καταστάσεις φθοράς



(A)

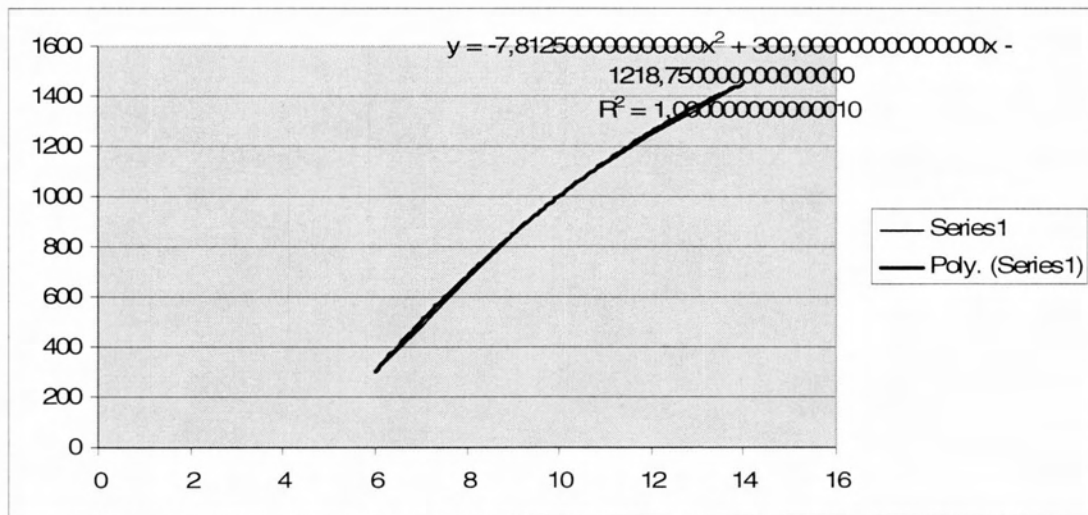


(B)

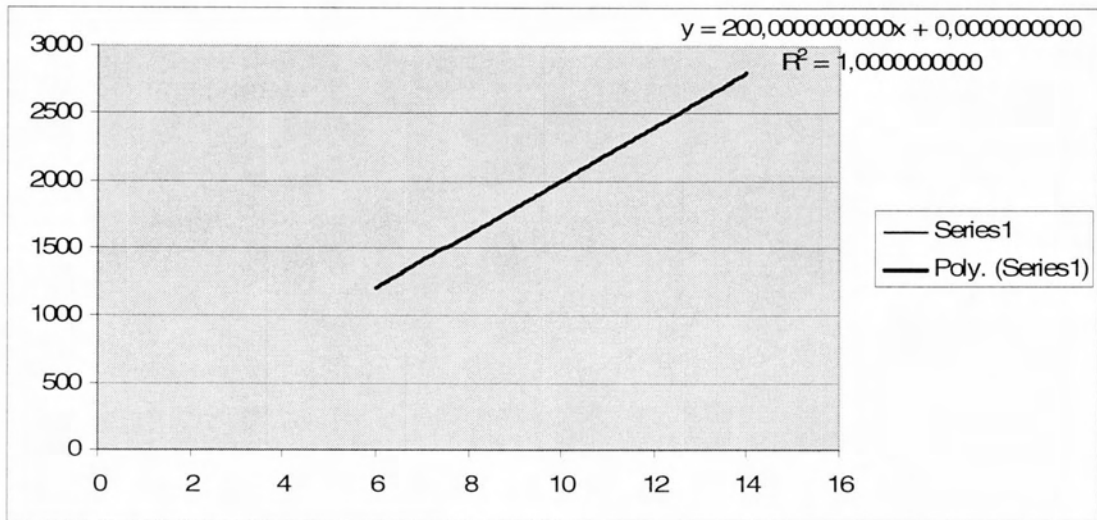


(Γ)

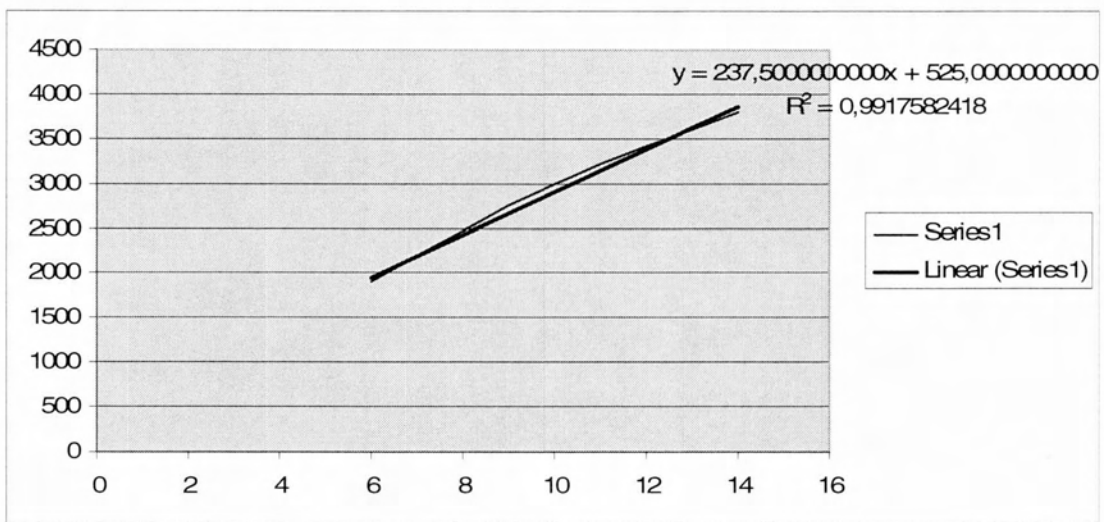
- Σχήμα 3.3.3:** (Α) πολυωνυμική προσέγγιση για  $N=1000$  του  $\eta=10mPas$  στην 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς  
 (Β) πολυωνυμική προσέγγιση για  $N=2000$  του  $\eta=10mPas$  στην 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς  
 (Γ) πολυώνυμο της προσέγγισης για  $N=3000$  του  $\eta=10mPas$  στην 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς



(Α)



(B)

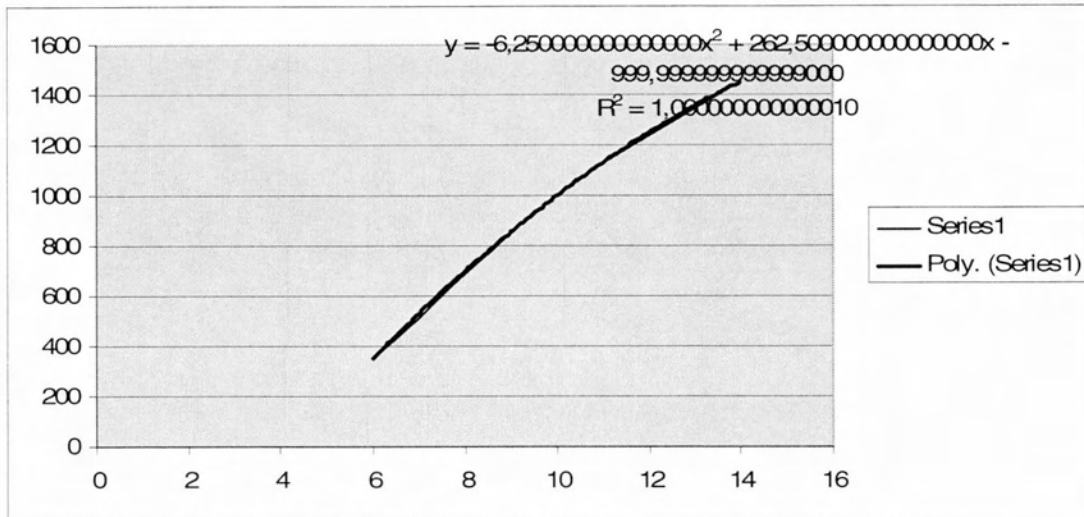


(Gamma)

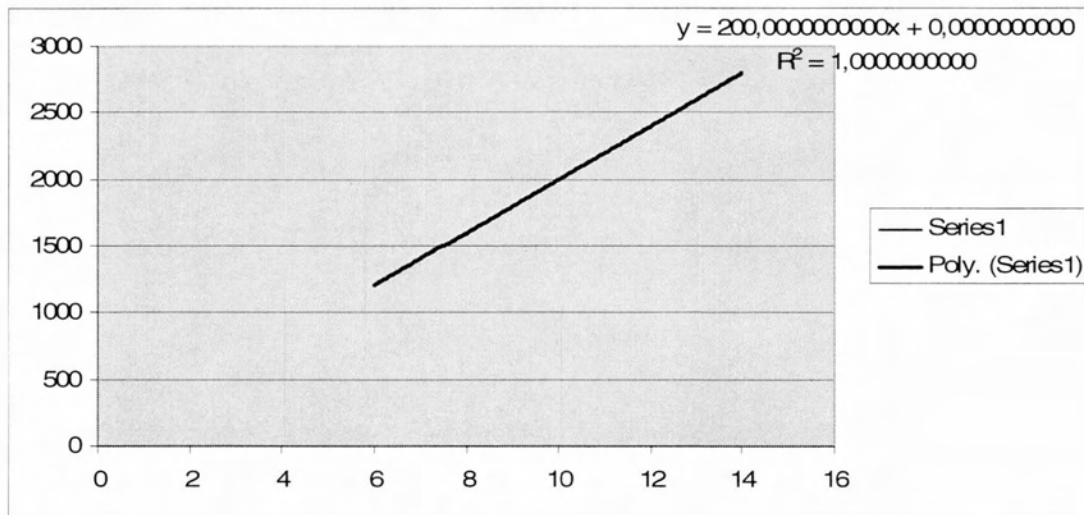
**Σχήμα 3.3.4:** (A) πολυωνυμική προσέγγιση για  $N=1000$  του  $\eta=10mPas$  στην  $2^{\eta}$  κατάσταση φθοράς

(B) πολυωνυμική προσέγγιση για  $N=2000$  του  $\eta=10mPas$  στην  $2^{\eta}$  κατάσταση φθοράς

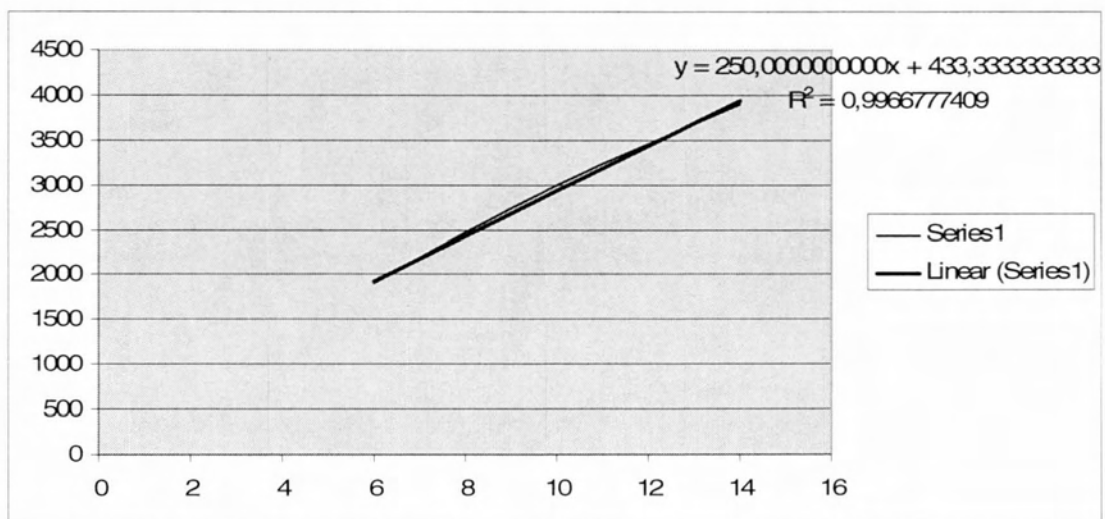
(Gamma) πολυωνυμική προσέγγιση για  $N=3000$  του  $\eta=10mPas$  στην  $2^{\eta}$  κατάσταση φθοράς



(A)



(B)



(Γ)

**Σχήμα 3.3.5:** (Α) πολυωνυμική προσέγγιση για  $N=1000$  του  $\eta=10mPas$  στην  $3^{\eta}$  κατάσταση φθοράς

(Β) πολυωνυμική προσέγγιση για  $N=2000$  του  $\eta=10mPas$  στην  $3^{\eta}$  κατάσταση φθοράς

(Γ) πολυωνυμική προσέγγιση για  $N=3000$  του  $\eta=10mPas$  στην  $3^{\eta}$  κατάσταση φθοράς

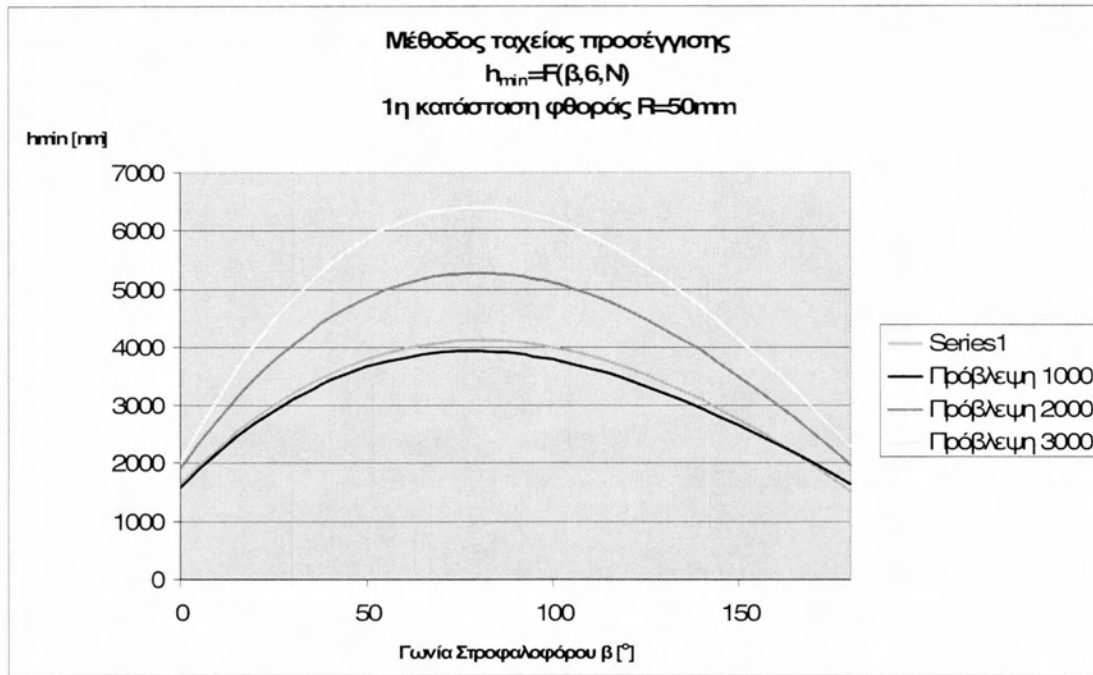
**Σημείωση:** Στο Παράρτημα 3 δίνονται προσεγγιστικές καμπύλες λειτουργίας για διάφορα ιξώδη.



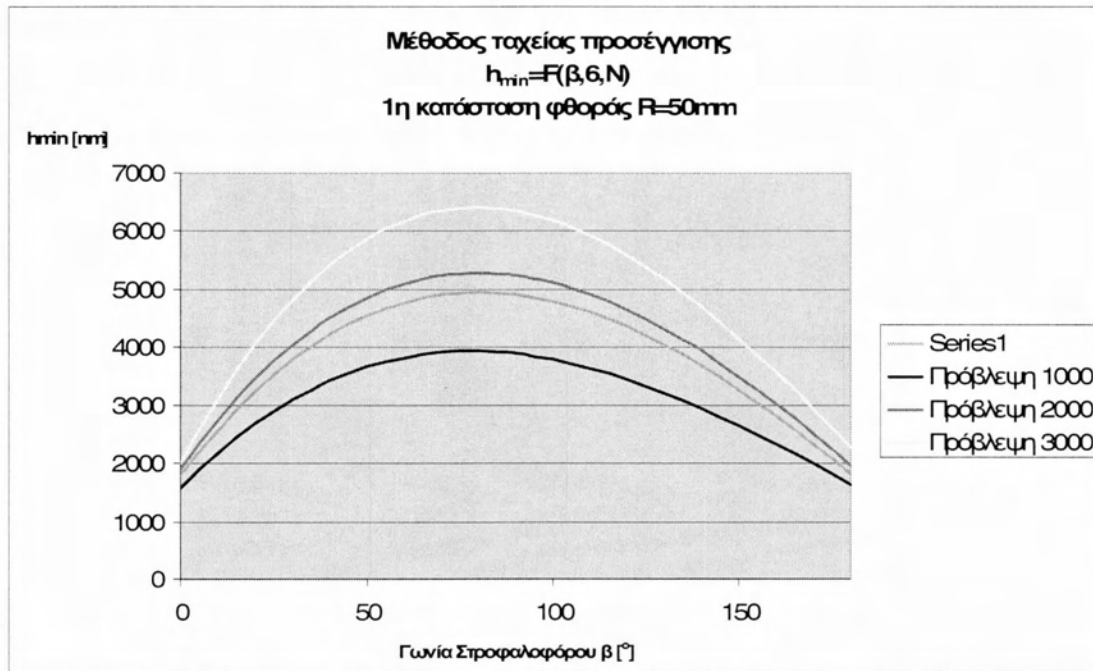
### 3.3.2 Επαλήθευση εγκυρότητας της μεθόδου πολυωνυμικών προσεγγίσεων

Δίνονται διαγράμματα τα οποία ανακατασκευάζουν την προσέγγιση η οποία έγινε και επαληθεύουν την Μέθοδο Ταχείας Προσέγγισης.

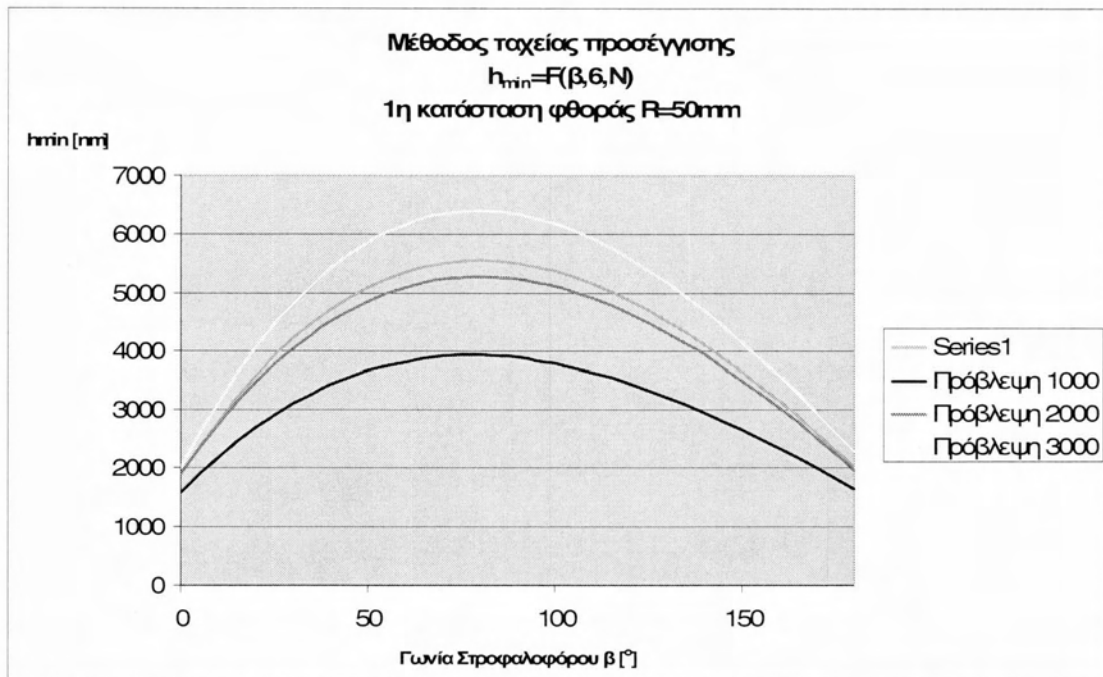
Χαμηλή τιμή ιξώδους  $1''$  κατάσταση φθοράς



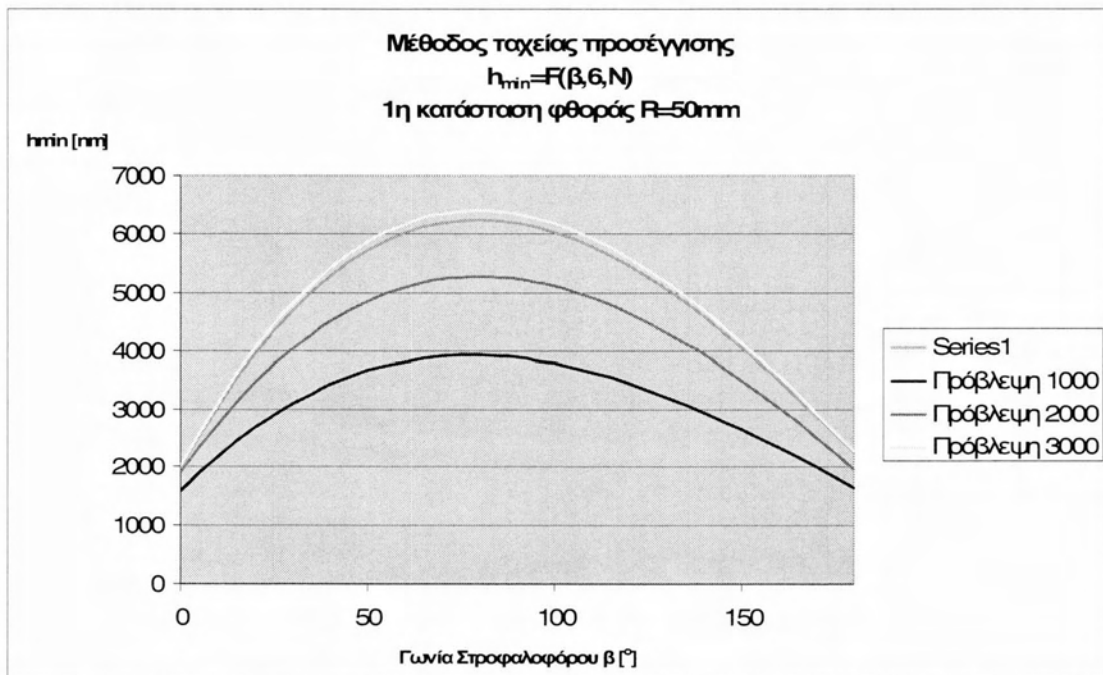
Σχήμα 3.3.6: Προσεγγιστική καμπύλη (πορτοκαλί) για  $\eta=6mPas$  και  $N=1100rpm$



Σχήμα 3.3.7: Προσεγγιστική καμπύλη (πορτοκαλί) για  $\eta=6Mpas$  και  $N=1900rpm$

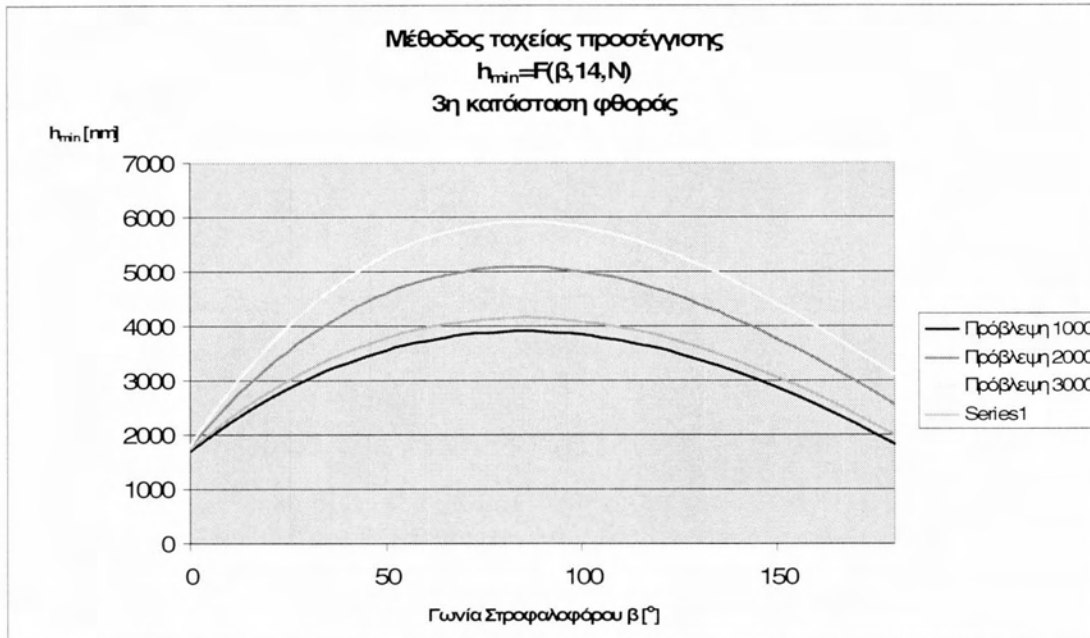


**Σχήμα 3.3.8:** Προσεγγιστική καμπύλη (πορτοκαλί) για  $\eta=6$  mPas και  $N=2100$ rpm

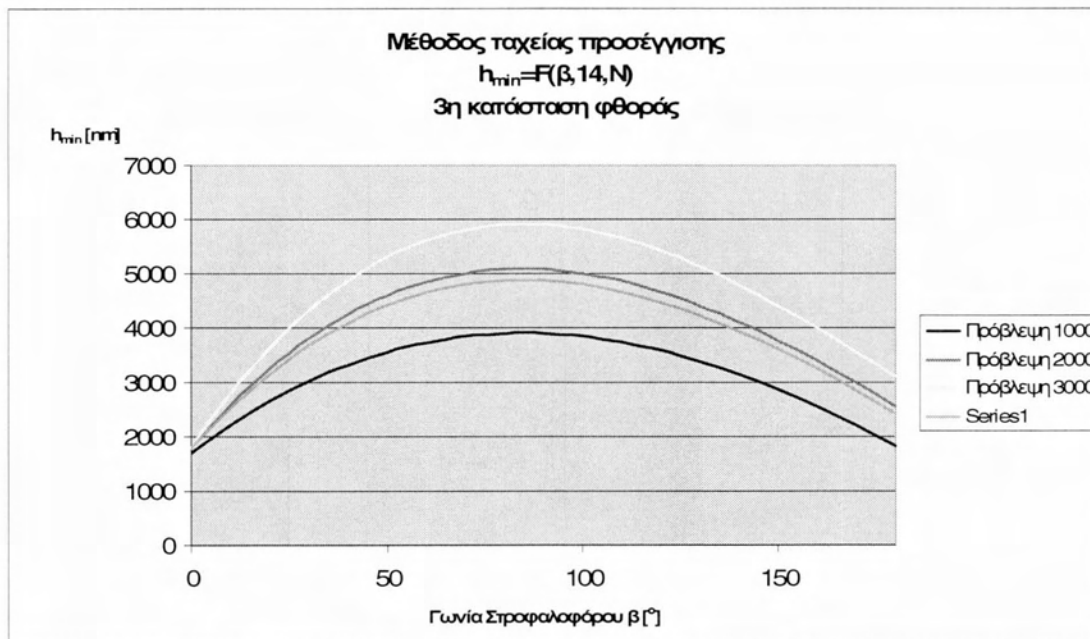


**Σχήμα 3.3.9:** Προσεγγιστική καμπύλη (πορτοκαλί) για  $\eta=6$ mPas και  $N=2900$ rpm

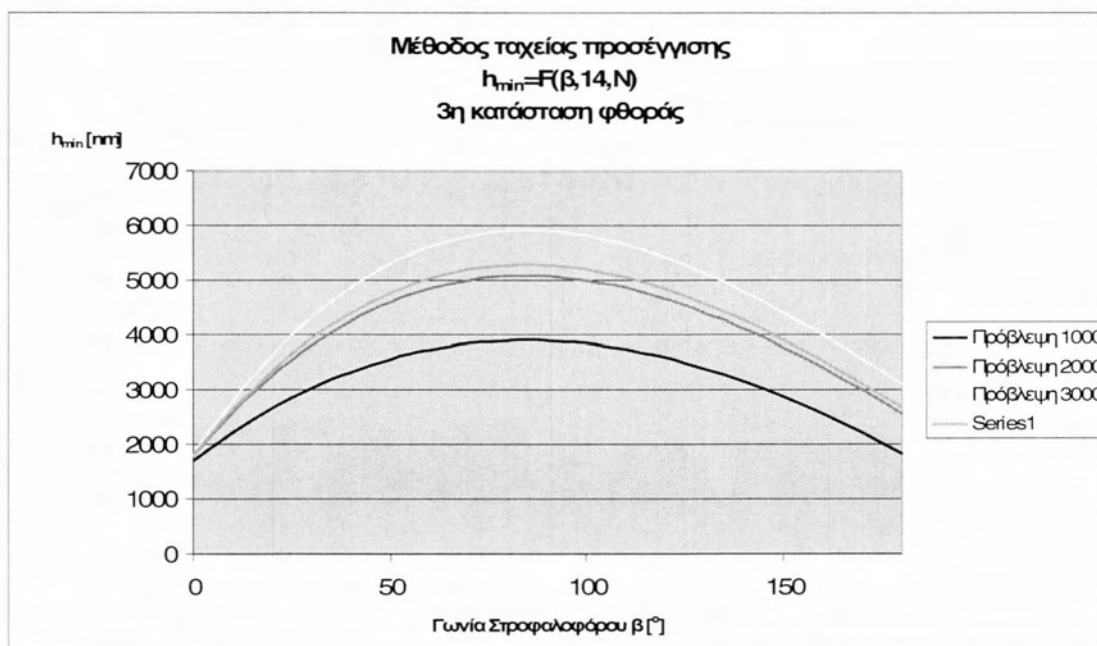
Υψηλή τιμή ιξώδους 3<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς



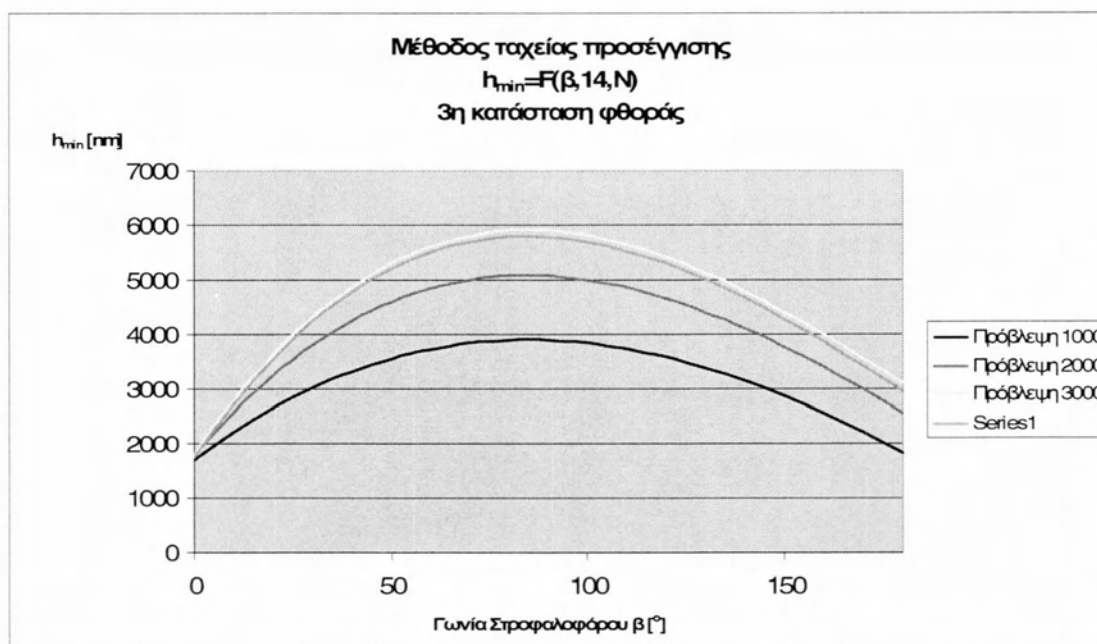
Σχήμα 3.3.10: Προσεγγιστική καμπύλη (πορτοκαλί) για  $\eta=14\text{mPas}$  και  $N=1100\text{rpm}$



Σχήμα 3.3.11: Προσεγγιστική καμπύλη (πορτοκαλί) για  $\eta=14\text{mPas}$  και  $N=1900\text{rpm}$



**Σχήμα 3.3.12:** Προσεγγιστική καμπύλη (πορτοκαλί) για  $\eta=14\text{mPas}$  και  $N=2100\text{rpm}$

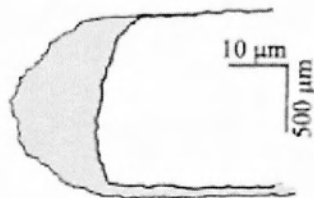


**Σχήμα 3.3.12:** Προσεγγιστική καμπύλη (πορτοκαλί) για  $\eta=14\text{mPas}$  και  $N=2900\text{rpm}$

# Κεφάλαιο 4

## Συμπεράσματα - Προοπτικές





(a) 1ος δακτύλιος

#### 4.1 Συμπεράσματα

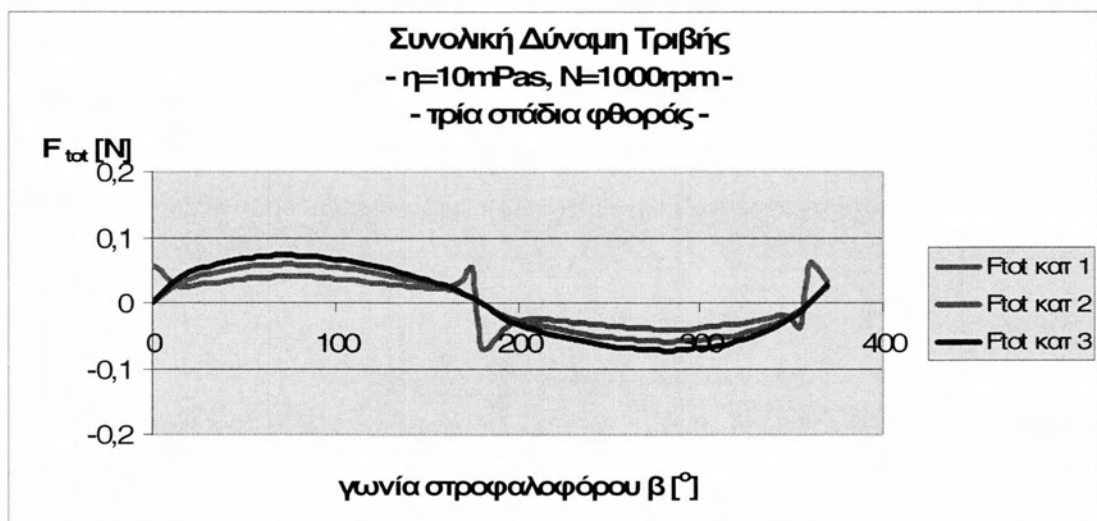
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς 1<sup>ου</sup> δακτυλίου εμβόλου MEK μέσα στο πεδίο του χρόνου και συγκεκριμένα σε τρεις διακριτές φάσεις φθοράς. Βέβαια στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν γίνεται μελέτη πλαστικών παραμορφώσεων των στερεών του συστήματος, ούτε γίνεται μοντελοποίηση του μηχανισμού της φθοράς. Όμως, θεωρώντας τρεις διακριτές περιπτώσεις σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η προσομοίωση της τριβολογικής συμπεριφοράς του δακτυλίου είναι έγκυρη για την μικρο-ελαστο-υδροδυναμική μοντελοποίηση που περιγράφεται στον πηγαίο κώδικα. Κάθε φάση φθοράς υπενθυμίζουμε ότι αναφέρεται αφενός μεν στην ακτίνα καμπυλότητας της κατατομής του δακτυλίου (μακρογεωμετρικό χαρακτηριστικό) και αφετέρου στην μικρογεωμετρία του κυλίνδρου. Η μικρογεωμετρία του κυλίνδρου θεωρήθηκε στην περίπτωση αυτή ότι αποτελεί την συνιστάμενη (σύνθετη) μικρογεωμετρία του συστήματος. Η προσομοίωση έγινε μέσω του πηγαίου κώδικα Oil Film για συγκεκριμένες αντιπροσωπευτικές συνθήκες λειτουργίας με ανοιχτό κύλινδρο, δηλαδή προσομοίωση κυρίως των χρόνο εισαγωγής- εξαγωγής (κύλινδρος σε κατάσταση motoring).

Απ' τα αποτελέσματα που εμφανίζονται σε διαγράμματα σε προηγούμενα κεφάλαια εξάγονται τα παρακάτω σημαντικά αποτελέσματα:

1. Αποδεικνύεται ότι από άποψη διαχωρισμού των επιφανειών μέσω της μεμβράνης του υγρού λιπαντικού, η κατατομή του δακτυλίου φέρνει ευνοϊκότερα αποτελέσματα στα αρχικά αυτά στάδια φθοράς. Παράλληλα, οι δυνάμεις τριβής εμφανίζουν μείωση της μη-υδροδυναμικής συνιστώσας για προχωρημένη φθορά με ταυτόχρονη αύξηση της υδροδυναμικής συνιστώσας στο μέσο της διαδρομής. Το γεγονός αυτό φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα, κυρίως στις χαμηλές στροφές για τη μη-υδροδυναμική συνιστώσα.

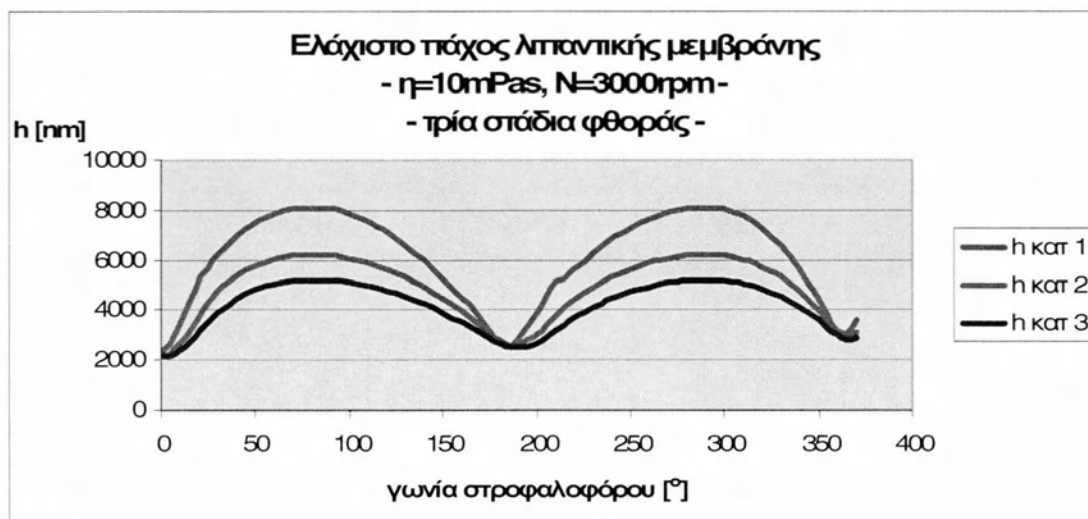


**Σχήμα 4.1:** Διάγραμμα  $h_{\min} = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $N= 1000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

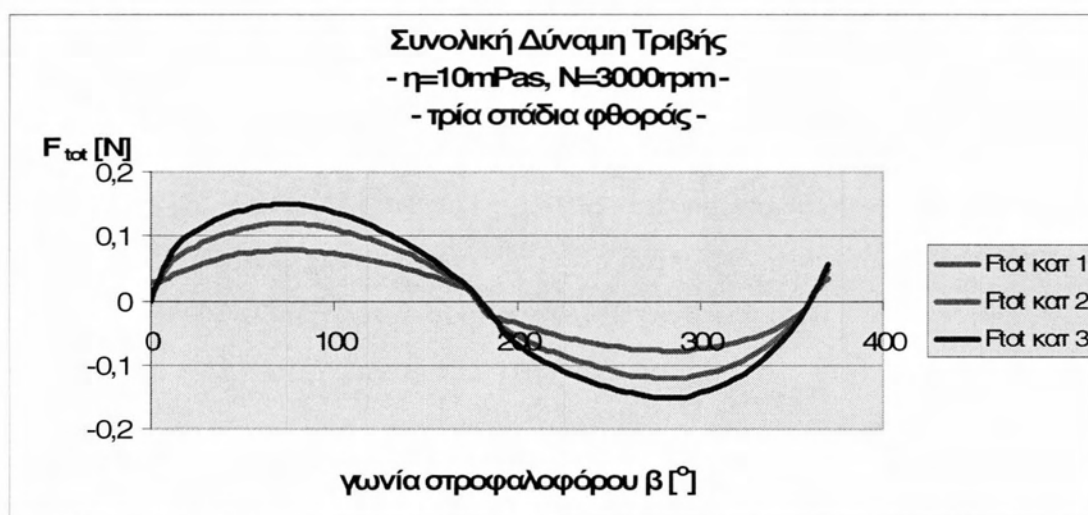


**Σχήμα 4.2:** Διάγραμμα  $F_{\text{tot}} = f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $N= 1000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.



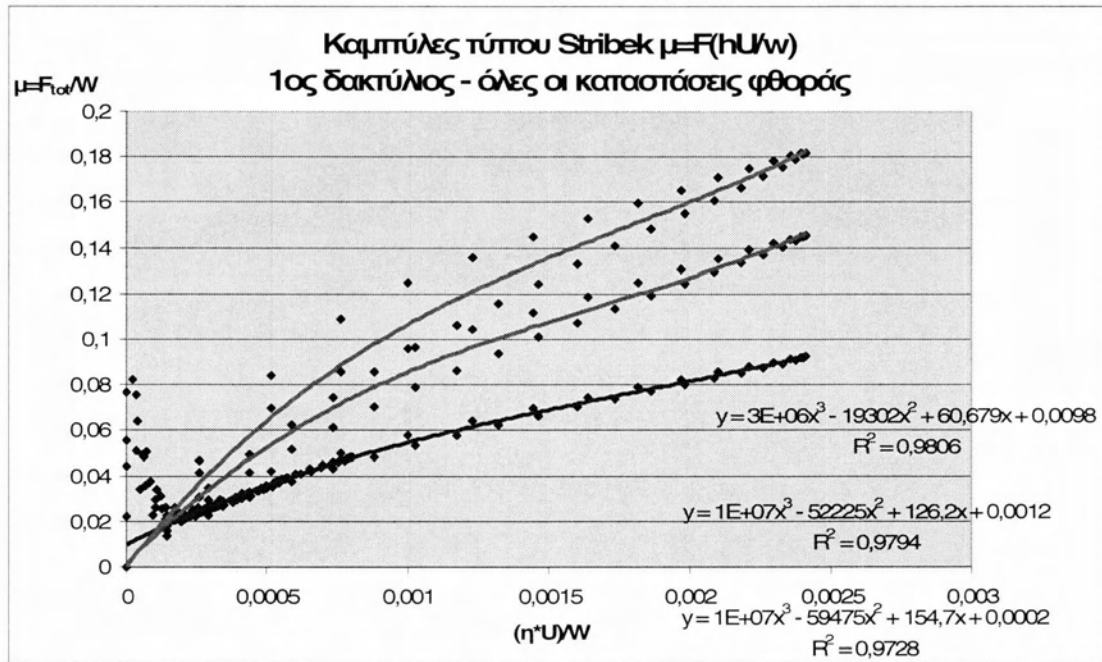


**Σχήμα 4.3:** Διάγραμμα  $h_{\min}=f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $N=3000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.



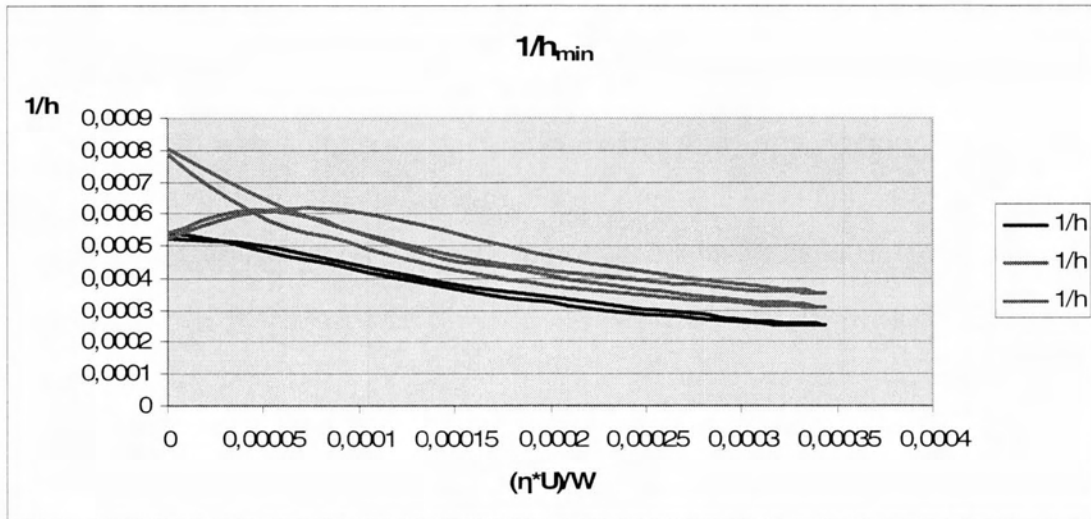
**Σχήμα 4.4:** Διάγραμμα  $F_{\text{tot}}=f(\beta)$  για τρία στάδια φθοράς κατατομής δακτυλίου – τραχύτητας κυλίνδρου  $n=3000\text{rpm}$ , ονομαστικές συνθήκες.

2. Η χρήση του διαγράμματος τύπου Stribeck για τον συντελεστή τριβής που εκφράζει γενικά την εκτίμηση των απωλειών ισχύος του συστήματος, οδηγεί στην εξαγωγή των ίδιων συμπερασμάτων με βάση την παράμετρο ισολειτουργίας  $\eta U/w$  όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

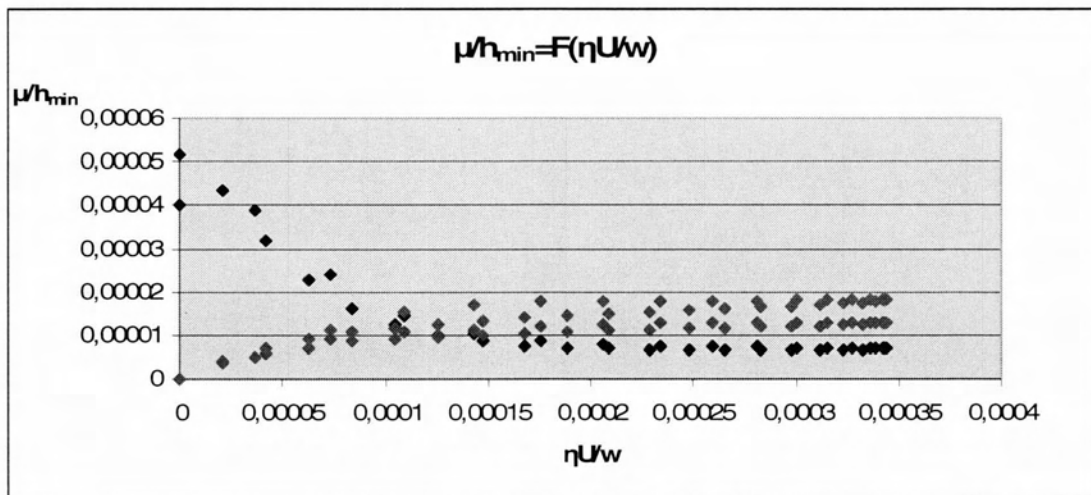


Στο διάγραμμα αυτό εμφανίζεται μεταβολή της μορφής της καμπύλης τύπου Stribeck για όλα τα σημεία λειτουργίας του συστήματος. Η σύγκριση των τριών καταστάσεων, αμεσότερη και ταχύτερη, αναδεικνύει την αλλαγή της μορφής της συγκεκριμένης καμπύλης κατά τη μετάβαση από την αρχική κατάσταση (καμπύλη μπλε χρώματος) στην τελική κατάσταση (καμπύλη κόκκινου χρώματος). Οι καμπύλες αυτές διαφέρουν κυρίως ως προς την υδροδυναμική τους συμπεριφορά λόγω της διαφοροποίησης της καμπυλότητας του προφίλ του δακτυλίου. Η καμπύλη στην αρχική κατάσταση εμφανίζει και τον κλάδο της μεικτής τριβής με τις επαφές μεταξύ των επιφανειών, γεγονός όμως που αν και παίζει σημαντικό ρόλο στη φθορά που λαμβάνει χώρα στο σύστημα, δεν αποτελεί κύριο παράγοντα αύξησης των απωλειών τριβής λόγω του μειωμένου συντελεστή βαρύτητας που εμφανίζει (περιοχές μικρών ταχυτήτων).

3. Η χρήση του διαγράμματος Stribeck ως προς την λιπαντική μεμβράνη (αντίστροφη τιμή  $1/h_{min}$ ) καθιστά σαφέστερη τη διαφοροποίηση με χαρακτηριστικό μονοτονίας των καμπυλών με την πρόοδο της φθοράς. Σημειώνεται ότι η παράμετρος  $1/h_{min}$  είναι δυνατόν να θεωρηθεί στοιχείο ανάλογο της φθοράς. Τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς αυτής φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

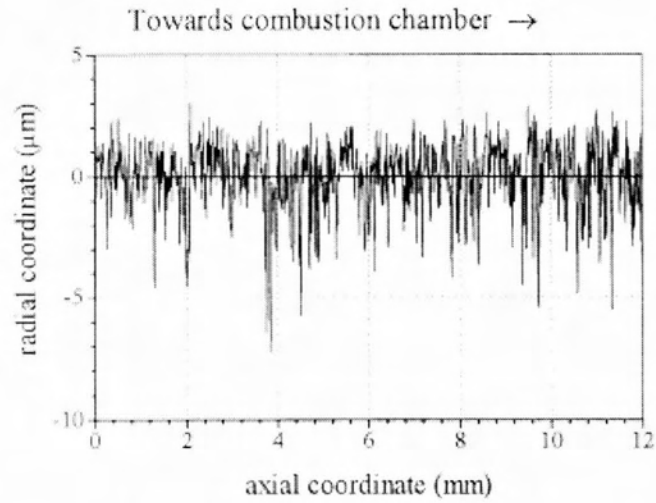


4. Ο συνδυασμός της ταυτόχρονης μεταβολής του συντελεστή τριβής και του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης δίνει ένα νέο διάγραμμα τύπου Stribeck το οποίο δίνει συγκριτικά αποτελέσματα για έναν δείκτη <<τριβής-φθοράς>>. Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται εντονότερη διαφοροποίηση των τριών καταστάσεων φθοράς τόσο στις περιοχές επαφών όσο και στις περιοχές ικανού διαχωρισμού των επιφανειών μέσω της υδροδυναμικής λιπαντικής μεμβράνης, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

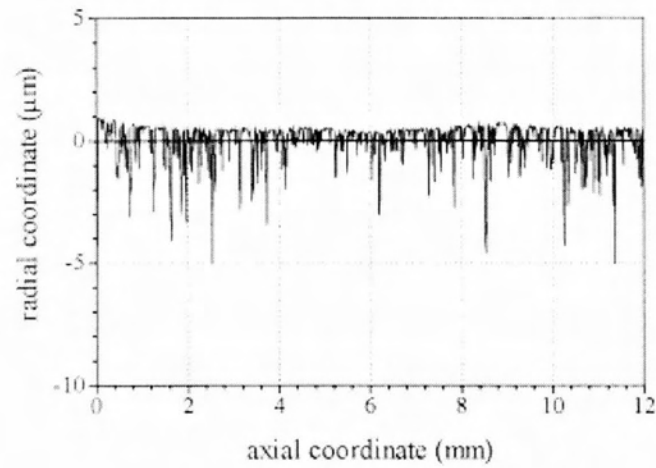


## **4.2 Κεντρικό συμπέρασμα**

Φθορά εμφανίζεται στο αρχικό στάδιο συνεργασίας των στοιχείων του συστήματος δακτυλίου-κυλίνδρου στα ακραία σημεία. Με την πάροδο του χρόνου, με την πρόοδο της φθοράς σε μακρογεωμετρική κλίμακα, η κατάσταση αντιστρέφεται. Αν και δεν εμφανίζεται απαίτηση μεγαλύτερης ποσότητας λιπαντικού στο μέσο της διαδρομής, στις περιοχές των νεκρών σημείων μειώνεται η πιθανότητα επαφής δακτυλίου-χιτωνίου. Το γεγονός αυτό ερμηνεύει και την αργή μεταβολή των χαρακτηριστικών της μικρογεωμετρίας του κυλίνδρου μετά το στρώσιμο (running-in) μέσα στο πεδίο του χρόνου που έχει καταγραφεί σε προηγούμενες εργασίες, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.

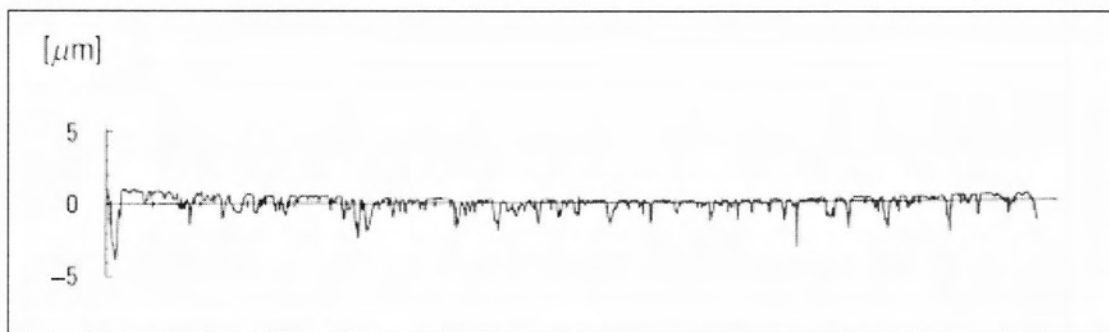


(a) mid-stroke, thrust plane at 0 hours

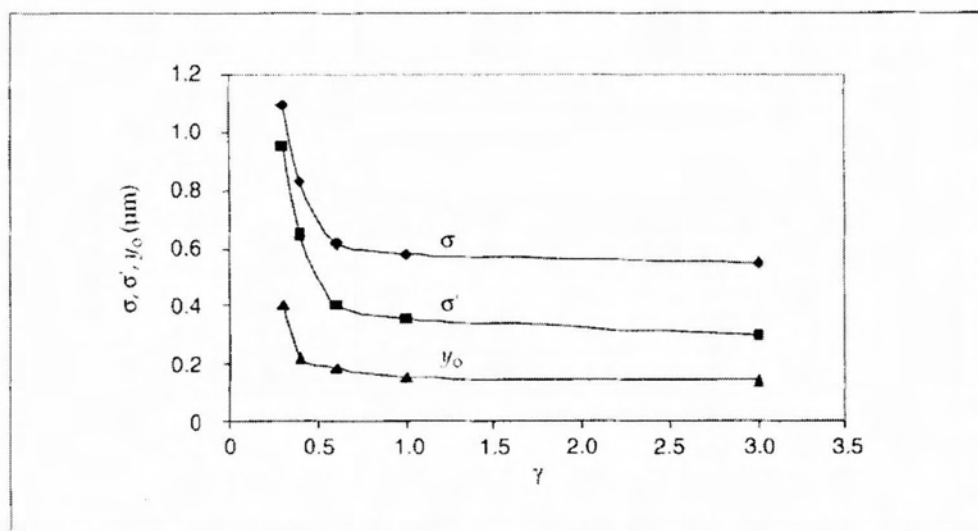


(b) mid-stroke, thrust plane at 120 hours

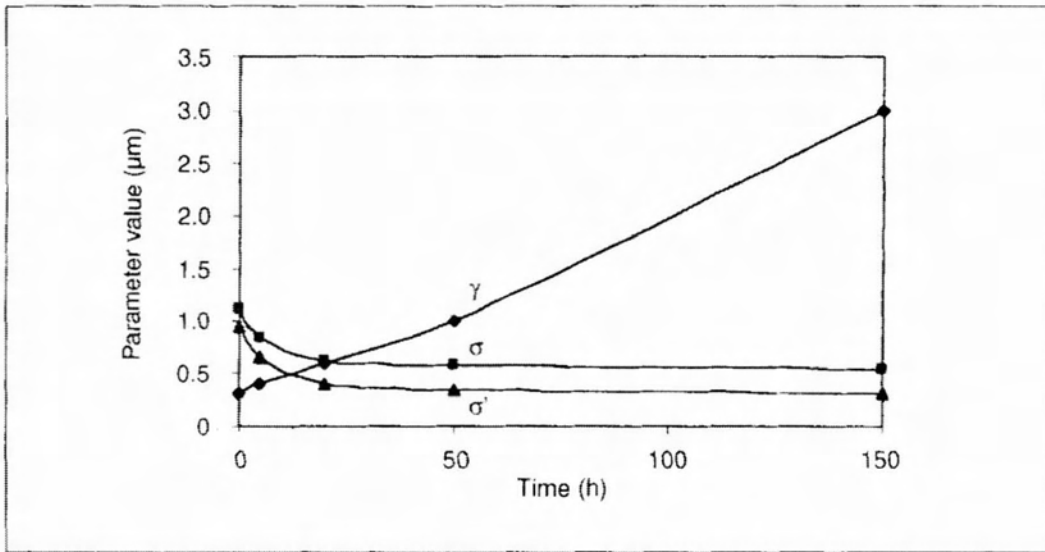
**Σχήμα 4.5:** Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατατομών επιφάνειας κυλίνδρου MEK σε αρχική κατάσταση και σε κατάσταση μετά το στρώσιμο αντίστοιχα(βιβλιογραφία).



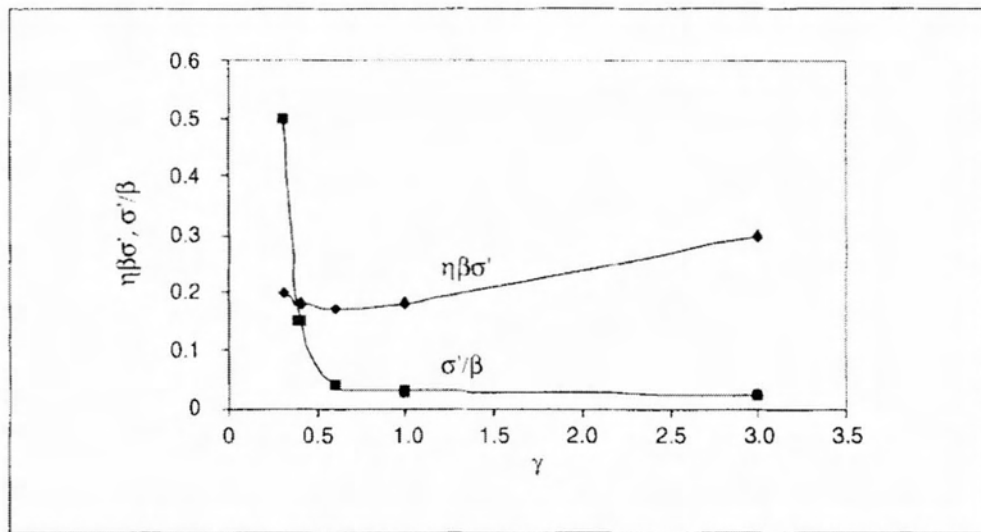
**Σχήμα 4.6:** Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατατομών επιφάνειας κυλίνδρου MEK σε κατάσταση μετά το στρώσιμο (βιβλιογραφία)- και συνθετική τραχύτητα (προσομοίωση).



(A)



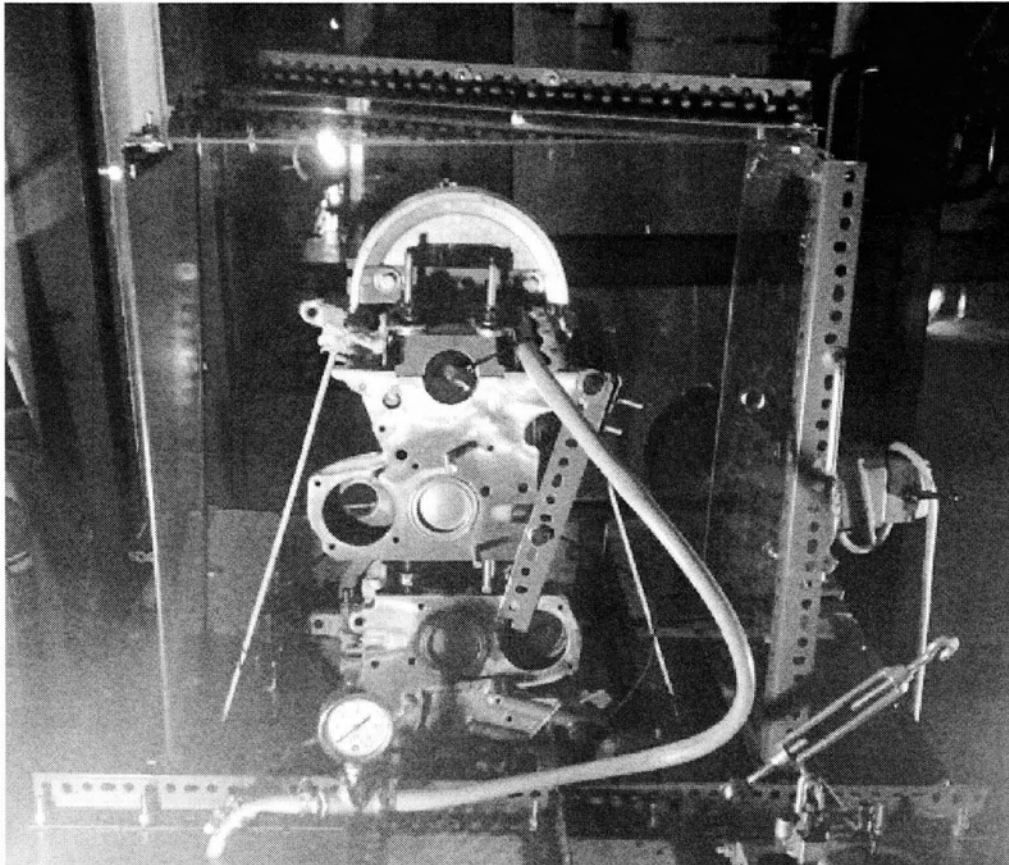
(B)



(Γ)

**Σχήμα 4.6:** Χαρακτηριστικά διαγράμματα μεταβολής παραμέτρων τραχύτητας στο πεδίο του χρόνου (βιβλιογραφία).

Τελικά, μένει να επαληθευτούν και πειραματικά τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τη βοήθεια του πειραματικού προσομοιωτή φθοράς-τριβής που έχει κατασκευαστεί και πρόκειται να λειτουργήσει στα εργαστήρια του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.





# BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. GREENWOOD, J.A., "Constriction resistance and the Real Area of Contact", BRIT J. APP. PHYS. Vol 17, pp. 1621-1632, 1966.
2. GREENWOOD, J.A., and WILLIAMSON, J.B.P., "Contact of Nominally Flat Surfaces", Proc. Roy Soc Lond, A. 295, pp. 300-319, 1966.
3. GREENWOOD, J.A., "The Area of contact Between Rough Surfaces and Flats", Journal of Lubrication technology, pp. 81-91, January 1967.
4. GREENWOOD, J.A., and TRIPP, J.H., "The Contact of two Nominally Flat Surfaces", Proc. Inst. Of Mech. Eng., Vol. 185; p. 625, 1971.
5. PANDAZARAS, C., "Diminution des Pertes par Frottement dans les ensembles Pistons-Segments-Chemises", Repport de stage de Fin d'etudes, ISMCM, 1981.
6. PANDAZARAS, C., "Etudes Experimentales et Theoriques sur les Pertes par Frottement dans les Ensembles Pistons-Segments-Chemises" DLA/RNUR, 1982.
7. PANDAZARAS C., "Modelisation du Frottement Segment-Chemise" DLA.RNUR, Note Technique no 5781, 1982.
8. PANDAZARAS, C., "Influence de la Forme des Segments sur le Frottement Segment-Chemise", PLA/RNUR, Note technique No 5808, 1983.
9. PATIR, N., and CHENG, H.S., "An Average Model for Determining Effects of Three Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication", Transaction of the ASME, Vol. 100, January 1978.
10. PATIR, N., and CHENG H.S., "Application of average Flow Model to Lubrication Between Rough Sliding Surfaces", Transaction of the ASME, 220/Vol 101, April 1979.
11. ROHDE, S.M., "A Mixed Friction Model for Dynamically Loaded Contacts with Application to Piston Ring lubrication", GENERAL MOTORS Research Laboratories, 1980.
12. ROHDE, S.M., WHITAKER, K., and mc ALLISTER, G.T., "A Study of the Effects of Piston Ring and Engine Design Variables on Piston Ring Friction, To Appear in Frontiers in Research and Design, ASME, 1979.
13. TRIPP, J.H., "Surface Roughness Effects in hydrodynamic Lubrication: The Flow Factor Method", Transactions of the ASME, Vol. 105, pp. 458-465, July 1983.
14. Priest M., «The Wear and Lubrication of Piston Rings», Ph. D. Thesis, University of Leeds (1996)

15. Ming-Tang Ma, Sherrington I., Smith E. H. and Grice N., «Development of a detailed model for piston ring lubrication in IC engines with circular and non circular cylinder bores», *Tribology International*, Vol. 30, No 11, (1997), pp 779-788
16. Pawlus Pawel, «Change of Cylinder Surface Topography in the Initial Stage of Engine Life», *Wear* 209, (1997), pp 69-83
17. You-Bai Xie, «On the Tribology Design», *Tribology International*, Volume 32, Issue 7, (1999), pp 351-358
18. Priest M., Dowson D. and Taylor C. M., «Predictive wear modeling of lubricated piston rings in a diesel engine», *Wear*, Volume 231, (1999), pp 89-101
19. Priest M. And Taylor C. M., «Automotive engine Tribology- Approaching the surface», *Wear*, Volume 241, Issue 2, (2000), pp 193-203
20. Sung-Woo Cho, Sang-Min Choi and Choong-Sik Bae, «Frictional modes of barrel shaped piston rings under flooded lubrication», *Tribology International*, Volume 33, Issue 8, (2000), pp 545-551
21. Akalin Ozgen and Newaz M. Golam, «Piston Ring-Cylinder Bore Friction Modelling in Mixed Lubrication Regime: Part I- Analytical Results», *Journal of Tribology*, Volume 123, No 1, (2001), pp 211-218
22. Akalin Ozgen and Newaz M. Golam, «Piston Ring-Cylinder Bore Friction Modelling in Mixed Lubrication Regime: Part II- Correlation with Bench Test Data», *Journal of Tribology*, Volume 123, No 1, (2001), pp 219-223
23. Ji-Young Kim, Jee-Woon Kim, Myung-Rae Cho and Dong-Chul Han, «Friction characteristics of piston ring pack with consideration of mixed lubrication Parametric investigation», *KSME International Journal*, Volume 16, No 4, (2002), pp 468-475

# Παράρτημα 1

## Πηγαίος κώδικας OIL FILM

```
!*****
!  
! PROGRAM: Paxh Ladiou  
!  
! PURPOSE: Entry point for the console application.  
!  
!*****  
  
    program Paxh_Ladiou  
!*****  
!  
!     HYDRODYNAMIC LUBRICATION ALGORITHM  
!  
!     "LUBRA" forth Edition  
!  
!     october 2010  
!  
!*****  
!  
!     DEVELOPED BY: George N. Koutlas / Constantinos Pandazaras /  
Nikolaos Baibas / Sotirios Batos /                               ! Phaedon  
Tassopoulos  
!  
!*****  
!   This Program Based on the code of George N.K.  
!   which has been developed in order to finish his graduate thesis  
!   with the title:  
!   "Theoretic and Experimental Modelling of finite Journal Bearings  
!   Concerning Dynamic Loading and Roughness Surface"  
!*****  
    implicit none  
  
    ! Variables  
  
    real(8):: R, L, D, DH, dx, dy, dt, H, Hmin, Hk_1, pi, angle, U, eta, RPM, Ptar, Wtar, Whtot, Watot, Fh,  
    Fa, A1, A2, A3, Vhma, g, E2, E1, Ecomp, Poisson1, Poisson2, RMS, NBS, SB, ho,  
    Pcyl(144),Hsat(144),Ftot(144)  
    integer:: i, j, k,k1, n, a, b, m, z, KH, ideg, Max_repeat, iring, katastasi_fthoras  
    real(8) ,allocatable::Paxos(:,.)  
    real(8) ,allocatable::Ypsos(:,.)  
    real(8) ,allocatable::YpsosO(:,.)  
    real(8) ,allocatable::Fx(:,.)  
    real(8) ,allocatable::Fy(:,.)  
    real(8) ,allocatable::Fs(:,.)
```

```

real(8) ,allocatable::F25(:,:)

real(8) ,allocatable::F1(:,:)
real(8) ,allocatable::F2(:,:)
real(8) ,allocatable::F3(:,:)
real(8) ,allocatable::F4(:,:)

real(8) ,allocatable::C(:,:)
real(8) , allocatable::Piesi(:)
real(8) , allocatable::Rad(:,:), Wh(:,:), Wa(:,:)
real(8) ,allocatable::P(:,:)
real(8) ,allocatable::Y(:,:)
real(8) ,allocatable::Yo(:,:)
real(8) ,allocatable::CC(:,:)
real(8) ,allocatable::Q(:)
    ! Body of Paxh Ladioy

```

! Εισαγωγή πίεσης κυλίνδρου, από δεδομένα από μετρήσεις της εταιρείας Renault για κινητήρα παρόμοιου κυβισμού υπό πλήρες φορτίο .

```

    OPEN(10,file='Pcyl.txt')
! OPEN(11,file='Flowfactor.txt')
! OPEN(12,file='Greenwood.txt')
! OPEN(1,FILE='input.dat',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
! READ(1,12) DIAMJ,DIAMB,WIDTHB
! READ(1,11) NX,NY
! READ(1,10) EX,EY
! READ(1,10) VELJ,LOADP
!     READ(1,10) VISCP
!     READ(1,12) H1,H2
!     READ(1,13) TIME,ROUGH,LOADD
! READ(1,11) NROUGH,NLOADD,IALG
!!10 FORMAT (9X,F10.5)
!!11 FORMAT (9X,I5)
!!12 FORMAT (9X,3PE13.5)
!!13 FORMAT (9X,L10)
! CLOSE(1)

```

! Έναρξη εισαγωγής δεδομένων. Τύπος δακτυλίου και κατάσταση φθοράς.

```

!!!g=deikths anisotropias epifaneias
!     print*,'dose mou paxos daktyliou'
!     read* , L
!     print*,'dose mou arithmo komvwn (mono)'
!     read* , n
!     print*,'dose mou elaxisth apostasi daktyliou apo kyliandro'
!     read* , Hmin
!     print*,'dose mou kampulothta daktyliou'
!     read* , R
!     print*,'dose mou to D'
!     read* , D
!     print*,'dose mou typo daktyliou 1(ths fwvias),2(steganopoihtiko),3(stragistiko)'
read*,iring
!     print*,'dose mou katastasi f8oras 1(kainoyrgio),2(meta to strwsimo),3(ftharmonos kinhthras)'
read*,katastasi_fthoras
do i=1,144
read(10,*),Pcyl(i)
enddo

```

```

! Δεδομένα κατάστασης φθοράς της επιφάνειας
! Υπόθεση Patir – Cheng / Greenwood – Trip
!  $h_0=0$  , RMS ενιαίο  $RMS_1=RMS$ 
! Υπόθεση Lubra  $RMS_1=1.1$  ,  $RMS=0.95$  ,  $h_0=0.4\mu m$ 
if (katastasi_fthoras==1) then
RMS=0.00000095 !0.0000011 !  $\sigma$ 
NBS=0.20 !  $\eta\beta\sigma$ 
SB=0.05 !  $\sigma/\beta$ 
ho=0.0000004 !  $y_0$ 
g=1/3 !  $\gamma$ 
else if (katastasi_fthoras==2) then
RMS=0.00000040 !0.00000082
NBS=0.17
SB=0.004
ho=0.00000017
g=1.
else if (katastasi_fthoras==3) then
RMS=0.00000030 !0.00000055
NBS=0.30
SB=0.0028
ho=0.00000014
g=3
endif
!g=1/9
!!Typiki apoklisi RMS
!RMS=0.0000015
!!N:pyknothta traxythtwon B:aktina lofiskoy S:RMS
!NBS=0.200
!!S/B
!SB=0.05
!ho=0.0000004

!!Poisson Factors 1 and 2
Poisson1=0.25
Poisson2=0.25
!!E1,E2,Ecomposite Metra elastikothtas gia xalyva kai mantemi
E1=100000000000
E2=100000000000
Ecomp=1/((1-poisson1**2)/E1+(1-poisson2**2)/E2)

Hsat(144)=0
Ftot(144)=0
Vhma=1
Hmin=0.0000023
Hk_1=Hmin
ideg=0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
do
KH=0
Vhma=1
ideg=ideg+1

do
!print*,'Hmin=',Hmin
n=61
KH=KH+1
!print*,'KH=',KH,'Hmin=',Hmin, n
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Δεδομένα κινητήρα και δακτυλίου

```



```

    Fy(i,j)=1-0.870*exp(-1.5*Ypsos(i,j)/RMS)
    Fx(i,j)=1-1.48*exp(-0.42*Ypsos(i,j)/RMS)
    Fs(i,j)=2.046*((Ypsos(i,j)/RMS)**(1.12))*exp(-
0.78*(Ypsos(i,j)/RMS)+0.03*(Ypsos(i,j)/RMS)**(2))
    if((Ypsos(i,j)/RMS)>=5.0)then
        Fs(i,j)=1.856*exp(-0.25*(Ypsos(i,j)/RMS))
    endif
    if((Ypsos(i,j)-ho)/RMS<=4.0 .and. (Ypsos(i,j)-ho)/RMS>3.5)then
        F25(i,j)=(1.1201/10000)*((4-(Ypsos(i,j)-ho)/RMS)**1.9447)
    else if((Ypsos(i,j)-ho)/RMS<=3.5)then
        F25(i,j)=(2.1339/10000)*exp(3.804467*log(4-(Ypsos(i,j)-ho)/RMS)+(1.341516*log(4-
(Ypsos(i,j)-ho)/RMS))**2)
    else
        F25(i,j)=0
    endif
endif

    if(iring==2)then
        Ypsos(i,j)=DH*(Paxos(i,j)/L)+Hmin
        Fx(i,j)=1 !-1.48*exp(-0.42*Ypsos(i,j)/RMS)
        Fy(i,j)=1 !+0.87*(Ypsos(i,j)/RMS)**(-1.5)
        Fs(i,j)=1.899*((Ypsos(i,j)/RMS)**(0.92))*exp(-
0.92*(Ypsos(i,j)/RMS)+0.05*(Ypsos(i,j)/RMS)**2)
!       Ypsos(i,j)=DH*(1-Paxos(i,j)/L)+Hmin
        if((Ypsos(i,j)-ho)/RMS<=4.0 .and. (Ypsos(i,j)-ho)/RMS>3.5)then
            F25(i,j)=(1.1201/10000)*((4-(Ypsos(i,j)-ho)/RMS)**1.9447)
        else if((Ypsos(i,j)-ho)/RMS<=3.5)then
            F25(i,j)=(2.1339/10000)*exp(3.804467*log(4-(Ypsos(i,j)-ho)/RMS)+(1.341516*log(4-
(Ypsos(i,j)-ho)/RMS))**2)
        else
            F25(i,j)=0
        endif
    endif
endif

    if(iring==3)then
        Ypsos(i,j)=Hmin
        Fx(i,j)=1 !-1.48*exp(-0.42*Ypsos(i,j)/RMS)
        Fy(i,j)=1 !+0.87*(Ypsos(i,j)/RMS)**(-1.5)
        Fs(i,j)=1
        if((Ypsos(i,j)-ho)/RMS<=4.0 .and. (Ypsos(i,j)-ho)/RMS>3.5)then
            F25(i,j)=(1.1201/10000)*((4-(Ypsos(i,j)-ho)/RMS)**1.9447)
        else if((Ypsos(i,j)-ho)/RMS<=3.5)then
            F25(i,j)=(2.1339/10000)*exp(3.804467*log(4-(Ypsos(i,j)-ho)/RMS)+(1.341516*log(4-
(Ypsos(i,j)-ho)/RMS))**2)
        else
            F25(i,j)=0
        endif
    endif
endif

!if(F25(i,j)/=0)then
! print*,F25(i,j) ,i,j
!endif

    enddo
    enddo

    do i=1,n
    do j=1,n
    if(iring==1)then
        YpsosO(i,j)=(R-(R**2-Paxos(i,j)**2)**(0.5))+Hk_1
        Fy(i,j)=1-0.870*exp(-1.5*YpsosO(i,j)/RMS)
        Fx(i,j)=1-1.480*exp(-0.42*YpsosO(i,j)/RMS)

```

```

    Fs(i,j)=2.046*((YpsosO(i,j)/RMS)**(1.12))*exp(-
0.78*(YpsosO(i,j)/RMS)+0.03*(YpsosO(i,j)/RMS)**2)
    if((YpsosO(i,j)/RMS)>=5.0)then
    Fs(i,j)=1.856*exp(-0.25*(YpsosO(i,j)/RMS))
    endif
    endif

    if(iring==2)then
    YpsosO(i,j)=DH*(Paxos(i,j)/L)+Hk_1
    Fx(i,j)=1 !-1.48*exp(-0.42*YpsosO(i,j)/RMS)
    Fy(i,j)=1 !+0.87*(YpsosO(i,j)/RMS)**(-1.5)
    Fs(i,j)=1
!    YpsosO(i,j)=DH*(1-Paxos(i,j)/L)+Hk_1
!print*,F25(i,j),YpsosO(i,j)/RMS
    endif

    if(iring==3)then
    YpsosO(i,j)=Hk_1
    Fx(i,j)=1 !-1.48*exp(-0.42*YpsosO(i,j)/RMS)
    Fy(i,j)=1 !+0.87*(YpsosO(i,j)/RMS)**(-1.5)
    Fs(i,j)=1
    endif

    enddo
    enddo

```

```

P(:,:)=0
Y(:,:)=0
Yo(:,:)=0
F1(:,:)=0
F2(:,:)=0
F3(:,:)=0
F4(:,:)=0
m=2
z=2
    do i=1,n
    do j=1,n
    P(m,z)=Paxos(i,j)
z=z+1
    enddo
z=2
m=m+1
    enddo

m=2
z=2
    do i=1,n
    do j=1,n
    Y(m,z)=Ypsos(i,j)
    F1(m,z)=Fx(i,j)
    F2(m,z)=Fy(i,j)
    F3(m,z)=Fs(i,j)
    F4(m,z)=F25(i,j)
z=z+1

```



```

!if(F25(i,j)/=0)then
! print*,F25(i,j) ,i,j
!endif

        enddo

z=2
m=m+1
        enddo

m=2
z=2
        do i=1,n
        do j=1,n
        !Yo(m,z)=YpsosO(i,j)
Yo(m,z)=(-
0.0688*(YpsosO(i,j)/RMS)**3+0.2042*(YpsosO(i,j)/RMS)**2+0.699*(YpsosO(i,j)/RMS)+0.9211)*R
MS
        if(YpsosO(i,j)>=3.0*RMS)then
Yo(m,z)=YpsosO(i,j)
        endif
        !print*,YpsosO(i,j)

z=z+1
        enddo

z=2
m=m+1
        enddo

angle=0.
angle=(ideg-1)*5*pi/180

! Υπολογισμός ταχύτητας παλινδρόμησης εμβόλου

!U=pi*0.07195*RPM*(sin(angle)+(71.95)*sin(2.*angle)/(4*111.45))/60 !fiat
U=pi*0.084*RPM*(sin(angle)+(84)*sin(2.*angle)/(4*136.5))/60 !R841
!U=pi*0.082*RPM*(sin(angle)+(82)*sin(2.*angle)/(4*152.5))/60 !R829
!U=pi*0.08900*RPM*(sin(angle)+(89.00)*sin(2.*angle)/(4*145.5))/60 !R851
!U=pi*0.072*RPM*(sin(angle)+(72)*sin(2.*angle)/(4*128))/60 !R688
z=n !orismos metrth
        m=(n+1)/2 !gia na dinw times syntelestwn sta Ci-2,j kai Ci+2,j
        k=(n+1)!gia na ftiaksw ton epaukshmeno pinaka syntelestwn piesewn
n=((n+1)/2)**2

        allocate(C(n,n+k))
        allocate(CC(n,n))
        allocate(Q(n))
        allocate(Piesi(n))
a=1
do i=2,k,2
do j=2,k,2

! Υπολογισμός ποσοτήτων δευτέρου σκέλους εξίσωσης Reynolds

Q(a)=-((6*eta*U*(Y(i,j+1)-Y(i,j-1))/(2*dx))-6*RMS*U*eta*(F3(i,j+1)-F3(i,j-1))/(2*dx)-
12*eta*(Y(i,j)-Yo(i,j))/(dt)!/[N/m]
a=a+1
enddo
enddo

```

```

a=1
do i=2,k,2
do j=2,k,2
if(j==2)then
Q(a)=Q(a+1)+(Q(a+1)-Q(a+2))
endif
if(j==k)then
Q(a)=Q(a-1)+(Q(a-1)-Q(a-2))
endif
a=a+1
enddo
enddo
C(:,:)=0
a=1
b=m+1

```

! Υπολογισμός όρων μητρώων συστήματος

```

do i=2,z+1,2
do j=2,z+1,2
!C(a,b)=-((Y(i+1,j)**3.+Y(i-1,j)**3.)/(4*dx)-(Y(i,j+1)**3.+Y(i,j-1)**3.)/(4*dy))
C(a,b-1)=-F1(i,j-1)*((Y(i,j-1)**3)/(4*dx*dx))/75
C(a,b+1)=-F1(i,j+1)*((Y(i,j+1)**3)/(4*dx*dx))/75
C(a,b-m)=-F2(i-1,1)*((Y(i-1,j)**3)/(4*dy*dy))/75
C(a,b+m)=-F2(i+1,1)*((Y(i+1,j)**3)/(4*dy*dy))/75
C(a,b)=(C(a,b-1)+C(a,b+1)+C(a,b-m)+C(a,b+m))*(-1)
!print*,C(a,b),F1(i,j-1),F2(i-1,j)
!C(a,b)=-((Y(i+1,j)**3.+Y(i-1,j)**3.)/(4*dx)-(Y(i,j+1)**3.+Y(i,j-1)**3.)/(4*dy))
!C(a,b-1)=-((Y(i,j-1)**3)/(4*dx*dx))/80
!C(a,b+1)=-((Y(i,j+1)**3)/(4*dx*dx))/80
!C(a,b-m)=-((Y(i-1,j)**3)/(4*dy*dy))/80
!C(a,b+m)=-((Y(i+1,j)**3)/(4*dy*dy))/80
!C(a,b)=(C(a,b-1)+C(a,b+1)+C(a,b-m)+C(a,b+m))*(-1)
a=a+1
b=b+1
enddo
enddo

```

```

a=1
b=m+1
do i=1,n
do j=1,n
CC(i,j)=C(a,b)
b=b+1
enddo
a=a+1
b=m+1
enddo

```

! Επίλυση συστήματος με τη μέθοδο του Gauss – Υπολογισμός πιέσεων κόμβων πρωτεύοντος πλέγματος.

```

call GAUSS_SIEDEL(CC,Q,Piesi,Max_repeat)
Whtot=0
Watot=0
Wh(:,:)=0
Wa(:,:)=0
a=1
k=0

```

! Υπολογισμός υδροδυναμικού φορτίου / Συνολικού φορτίου

```
do i=1, z, 2
do j=1, z, 2
Wh(i,j)=Rad(i,j)*Piesi(a)*4*dx*dy
!Wa(i,j)=F25(i,j)*4*dx*dy
!print*,i,j,F25(i,j)
if(Wh(i,j)<0)then
Wh=0
endif
Whtot=Whtot+Wh(i,j)
!Watot=Watot+Wa(i,j)
a=a+1
enddo
enddo

do i= 1, z
do j= 1, z
Wa(i,j)=F25(i,j)
!if(F25(i,j)/=0)then
!print*,i,j,F25(i,j)
!endif
Watot=Watot+Wa(i,j)
enddo
enddo
Watot=Watot*dx*dy
Watot=Watot*16*(2**0.5)*pi*(NBS**2)*Ecomp*(SB**0.5)/15
!print*, 'Whtot=', Whtot, 'Hmin=', Hmin
!Whtot=Whtot + Watot
!print*, 'Watot=', Watot
!print*, 'Whtot=', Whtot
```

Whtot=Whtot+Watot

```
if(KH-3*INT(KH/3)==1)then
A1=Whtot
endif
if(KH-3*INT(KH/3)==2)then
A1=Whtot
A2=A1
endif
if(KH-3*INT(KH/3)==0)then
A1=Whtot
A3=A2
A2=A1
endif
If(A1==A3.and.Whtot>0)then
Hmin=Hk_1
Vhma=Vhma*0.1
!print*, 'vlakas'
Endif
```

```
!Wtar=(Ptar+0.82*(Pcyl(ideg)-0.*100000))*pi*D*L
Wtar=Ptar*pi*D*L
```

! Υπολογισμός συνιστωσών δύναμης τριβής

```

Fh=0
a=0
k=1
k1=1
do i= 3, z-2, 2
do j= 3, z-2, 2

if(j==3)then
a=a+2
endif
if(Piesi(a+1)<=0)then
k=0
endif
if(Piesi(a-1)<=0)then
k1=0
endif
Fh=Fh+((Ypsos(i,j)/2)*((k*Piesi(a+1)-k1*Piesi(a-1))/(4*dx))+eta*U)/Ypsos(i,j)*4*dx*dy
a=a+1
k=1
k1=1
enddo
enddo

```

! Σύγκριση φορτίων

```

!print*,Whtot,Wtar
if(abs((Whtot-Wtar)/Wtar)<0.02)then
exit
endif
if(Whtot<Wtar)then
Hmin=Hmin-0.00000001*Vhma
endif
if(Whtot>Wtar)then
Hmin=Hmin+0.00000001*Vhma
endif
if(Hmin<0)then
Hmin=0.0000000
exit
endif

```

```

!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!

```

```

deallocate(Paxos)
deallocate(Ypsos)
deallocate(YpsosO)
deallocate(P)
deallocate(Y)
deallocate(Yo)
deallocate(Rad)
deallocate(Wh)
deallocate(C)
deallocate(CC)
deallocate(Q)
deallocate(Piesi)
deallocate(F1)
deallocate(F2)
deallocate(F3)
deallocate(F4)

```

```

        deallocate(Wa)
        deallocate(Fx)
        deallocate(Fy)
        deallocate(Fs)
        deallocate(F25)

    enddo
    ! Για πλήρη κύκλο το ideg=150
    if(ideg==76)thenprint*, 'TELOS YPOLOGISMWN'
    !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

    !print*, Hsat(:), Ftot(:)
    exit
    endif

    KH=0
    Fa=0.18*Watot
    !Fa=0.08*Watot
    if(U<0)then
    Fa=-Fa
    endif
    print*, Fh, Fa, INT(Hmin*1000000000) ,(ideg-1)*5
    !Print*, 'Hk_1', Hk_1, 'Hmin', Hmin
    Ftot(ideg)=Fa+Fh
    Hsat(ideg)=Hmin
    Hk_1=Hmin
        deallocate(Paxos)
        deallocate(Ypsos)
        deallocate(YpsosO)
        deallocate(P)
        deallocate(Y)
        deallocate(Yo)
        deallocate(Rad)
        deallocate(Wh)
        deallocate(C)
        deallocate(CC)
        deallocate(Q)
    deallocate(Piesi)
        deallocate(F1)
        deallocate(F2)
        deallocate(F3)
        deallocate(F4)
        deallocate(Wa)
        deallocate(Fx)
        deallocate(Fy)
        deallocate(Fs)
        deallocate(F25)

    enddo
    !!!!!!!!!!!!!!!
    !!!!!!!!!!!!!!!
    !!!!!!!!!!!!!!!
    !Print*, 'h piesi einai'

    do i=1,n
    do j=1,n
    CC(i,j)=CC(j,i)
    enddo
    enddo
        open(2, file='data1.txt')

```

```

open(3,file='data2.txt')
open(4,file='data3a.txt')
open(5,file='data4.txt')
open(6,file='data5.txt')
100 format(61(1x,f8.3),/)
120 format(36(1x,f16.14),/)
130 format(31(1x,f16.6),/)
140 format(1(1x,f8.4),/)
write(2,100), Paxos
write(3,100), Ypsos
write(4,120), CC
write(5,140), Ftot
write(6,140), Hsat*1000000
! write(6,130), Piesi

deallocate(Paxos)
deallocate(Ypsos)
deallocate(C)
deallocate(Y)

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

contains
subroutine GAUSS_SIEDEL(A,R,X,NTrips)
! integer, parameter :: Double=selected_real_kind (14)
!! INCOMING: A = a set of N coefficients for N equations;
!! R = a vector of N right-hand sides for the above equations;
!! NTrips = maximum number of iterations permitted.
!! OUTGOING: X = the solutions of the above equations.

real(8), dimension (:,:), intent(in out)::A
real(8), dimension (:), intent(in out)::R
real(8), dimension (:), intent(out)::X
integer, intent (in) :: NTrips

real(8) :: NewX, Partial_Sum
real, parameter :: Tolerance = 1.0e-12
integer :: J, K, N, M, NT
logical :: Too_Big

!! First check that the arrays are compatible.
N = ubound(A, 1)
M=N**(0.5) !! The number of equations.
if (N /= ubound(A, 2) .or. N /= ubound (R, 1) .or. N /= ubound (X, 1) ) then
print *, "***ERROR, the dimensions of the arrays for the " // &
" Gauss-Siedel equation solver are incompatible."
print *, "The coefficient matrix is of size ", N, &
" by ", ubound(A, 2)
print *, "The vector of right-hand sides is of size ", &
ubound (R, 1)
print *, "The solution vector X is of size ", &
ubound (X, 1)
print *, "The solution is abandoned."
return
end if

!! PREPARATION SECTION.

! do K = 1, N !! Set up the initial approximations for the
! X(K) = R(K) / A(K,K) !! solutions X, obtained by assuming that all

```

```

!   end do
!       do i=1,62
!           print*,X(i)
!       enddo                !! the X-values are zero.
do K = 1, N
    X(K) = 0
end do
!   do K = N-M, N
!       X(K) = 0
!   end do
!   do K = M, N, M
!       X(K) = 0
!   end do
!   do K = 1, N-M+1, M
!       X(K) = 0
!   end do

!! ITERATION SECTION.
do NT = 1, NTrips
!   do NT = 1, 30
!       Too_Big = .false.                !! Set, hoping that this coming iteration will suffice . . .
!       do K = M+1, N-M-1                !! This loop derives a solution for the K-th
!! unknown X(K).
!           Partial_Sum = 0
!           do J = 1, N                    !! This loop sums the products of coefficients
!! & unknowns.
!               if (J /= K) then
!                   Partial_Sum = Partial_Sum + 0.7 * A(K,J) * X(J)
!               end if
!           end do
!           NewX = (0.3)*(R(K) - Partial_Sum) / A(K,K) !! This is the new X(K).
!           if (abs(NewX-X(K)) > abs(NewX)*Tolerance) then
!               Too_Big = .true.          !! Solution X(K) is not accurate. Set to repeat . . .
!           end if
!           X(K) = NewX                    !! Update the solution for X(K), to be used in
!! iterating X(K+1).
!           if (K-M*INT(K/M)==0 .or. K-M*INT(K/M)==1) then
!               X(K)=0
!           endif
!       end do
!       if (.not. Too_Big) then
!           exit
!       end if
!   end do
!   if (Too_Big) then
!       print *, "***ERROR, the Gauss-Siedel algorithm did not converge."
!   end if
!   do i=32,61
!       print*,int(X(i))
!   enddo

end subroutine GAUSS_SIEDEL

end program Paxh_Ladiou

```

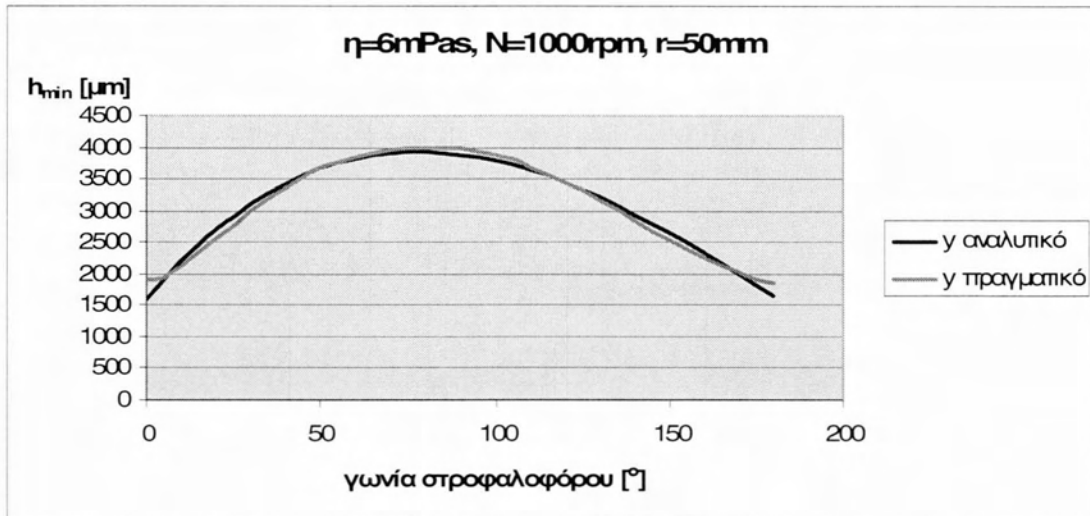




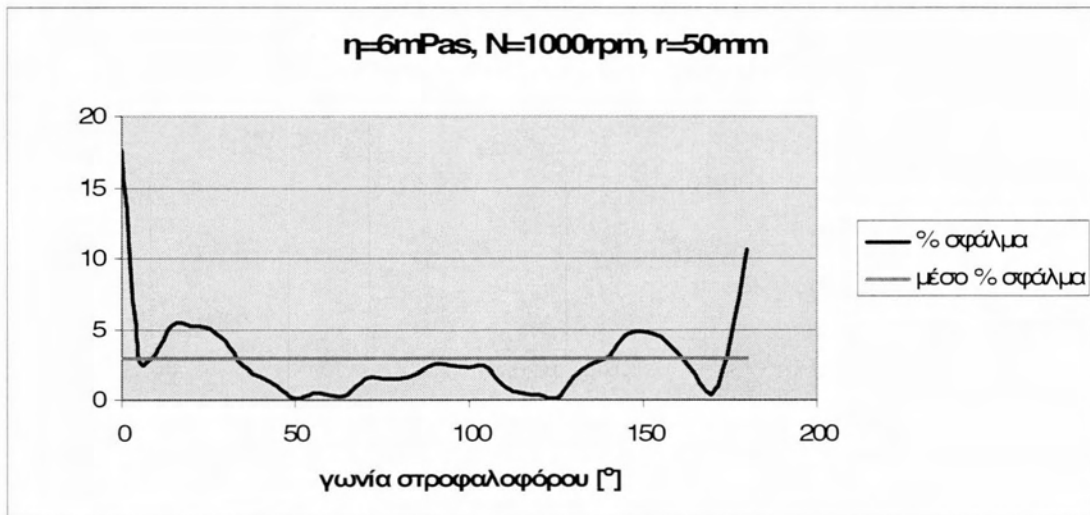
Παράρτημα 2  
Εγκυρότητα Ταχείας Μεθόδου Προσέγγισης



Στο παράρτημα αυτό, για την απόδειξη της εγκυρότητας της μεθόδου που ακολουθήθηκε, παρουσιάζονται δειγματοληπτικά χαρακτηριστικά συγκριτικά διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά συγκρίνουν θεωρητική τιμή του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης καθώς και την πολυωνυμική της προσέγγιση και συνοδεύονται επίσης από τα διαγράμματα εκατοστιαίας απόκλισης των τιμών αυτών.



(A)

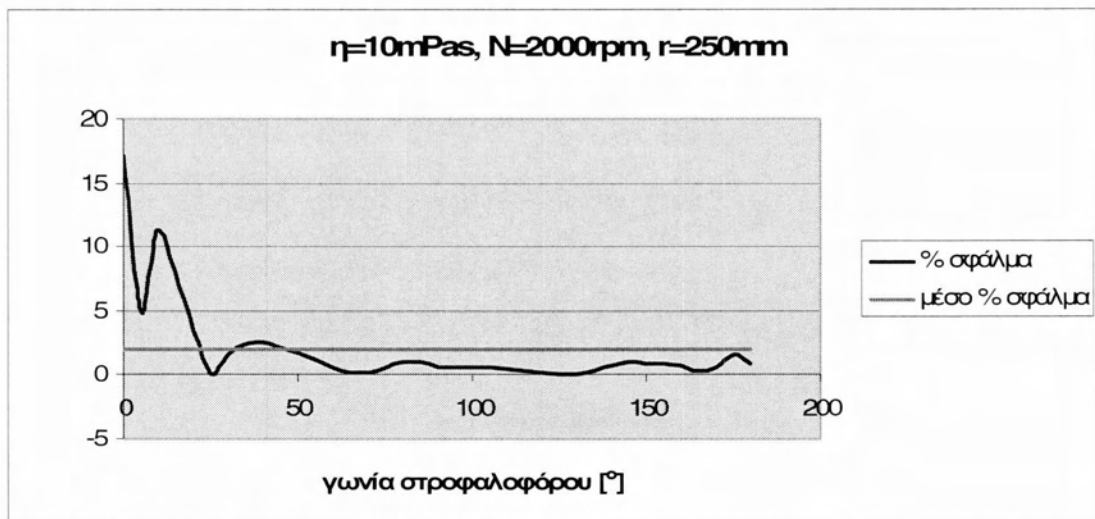
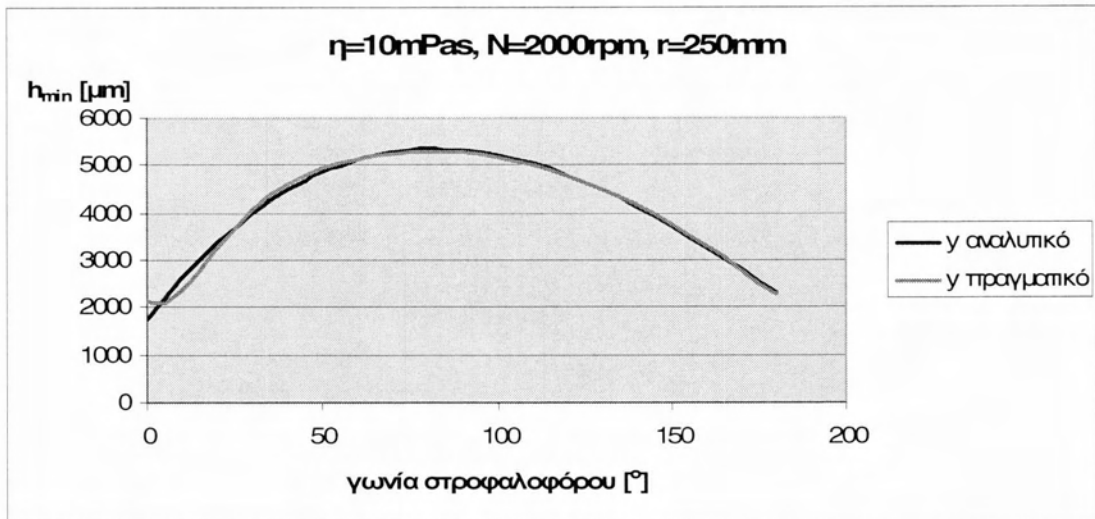


(B)

**Σχήμα Π 2.1.:** 1<sup>η</sup> κατάσταση για χαμηλή τιμή ιξώδους

(A) Αναλυτική προσέγγιση ονομαστικής καμπύλης και

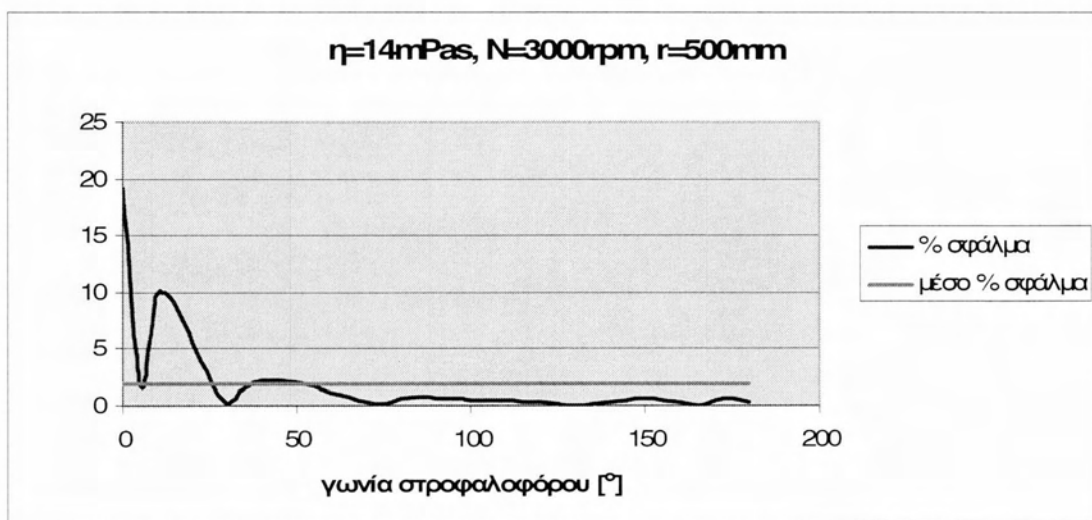
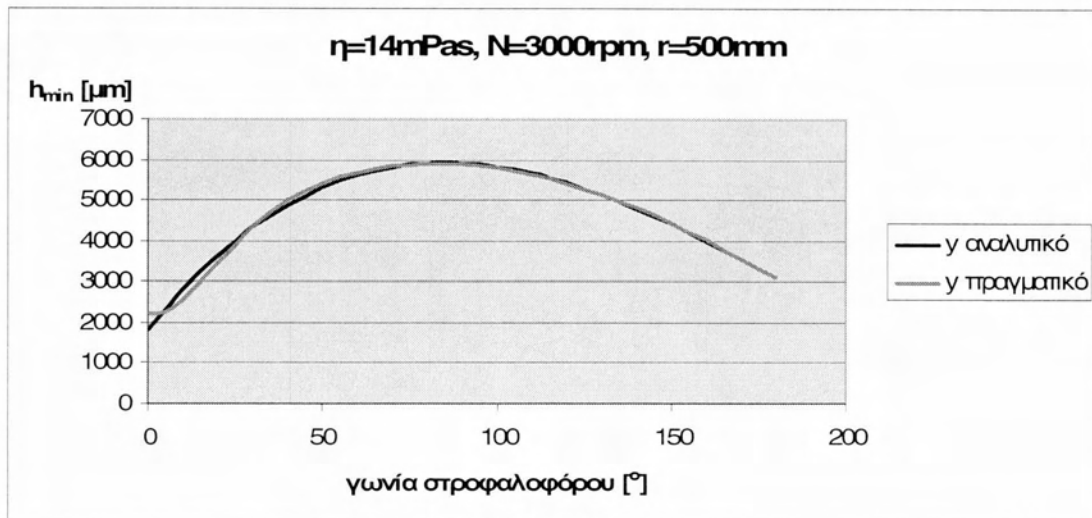
(B) διακύμανση ποσοστιαίου σφάλματος προσέγγισης καθώς και η μέση τιμή αυτού.



**Σχήμα Π 2.2.:** 2<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς για μεσαία τιμή ιξώδους

(A) Αναλυτική προσέγγιση ονομαστικής καμπύλης και

(B) διακύμανση ποσοστιαίου σφάλματος προσέγγισης καθώς και η μέση τιμή αυτού.



**Σχήμα Π 2.3:** 3<sup>η</sup> κατάσταση για υψηλή τιμή ιξώδους

(A) Αναλυτική προσέγγιση ονομαστικής καμπύλης και

(B) διακύμανση ποσοστιαίου σφάλματος προσέγγισης καθώς και η μέση τιμή αυτού.



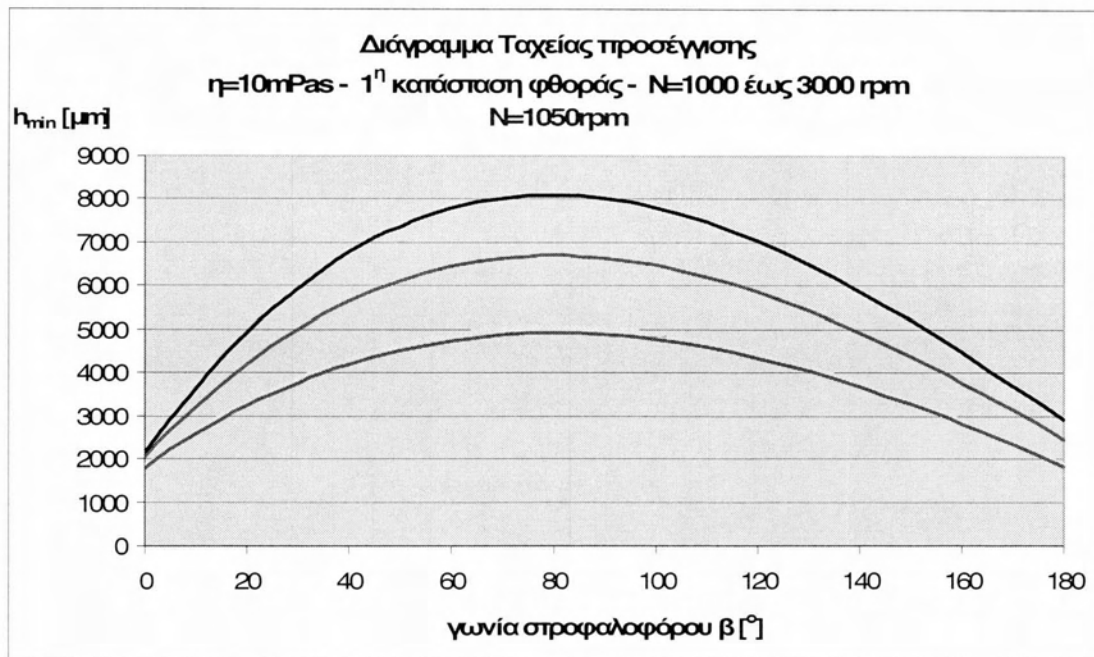
# Παράρτημα 3

## Επαλήθευση προσέγγισης καμπυλών

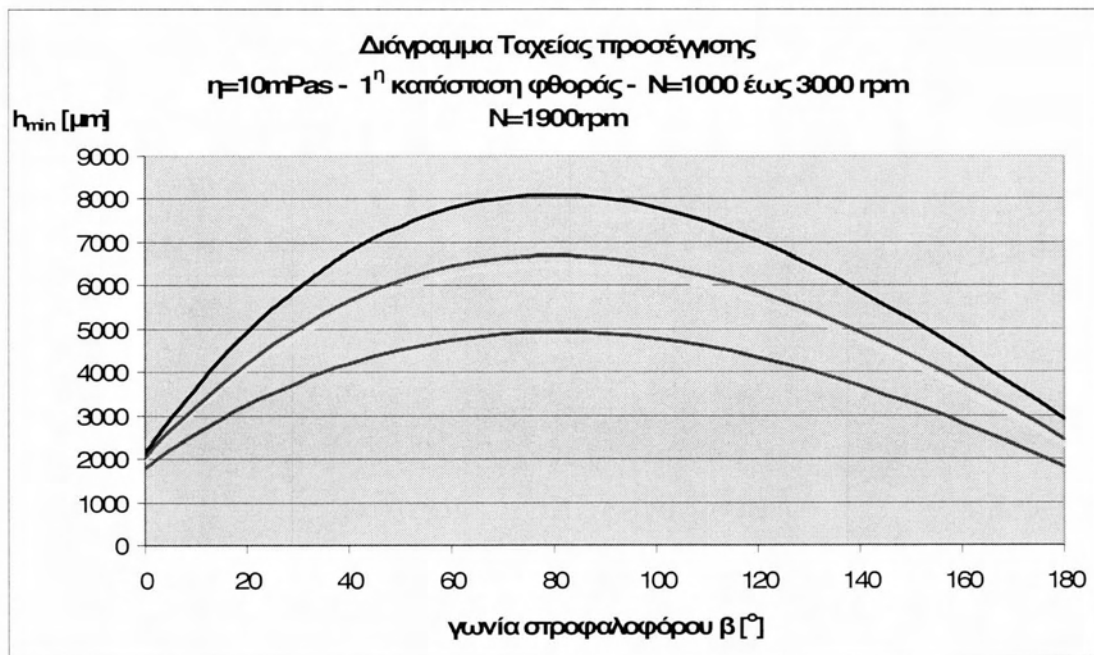




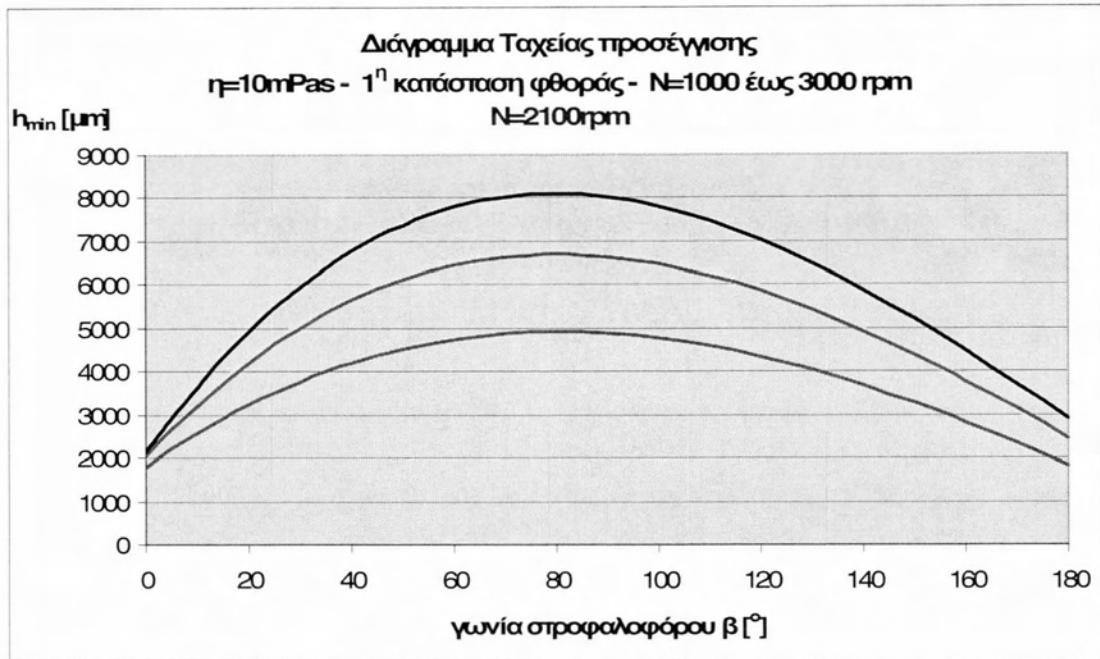
Επαλήθευση προσέγγισης καμπυλών μεταβολής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης με πολυωνυμικές γραμμές τάσεις 3<sup>ου</sup> βαθμού



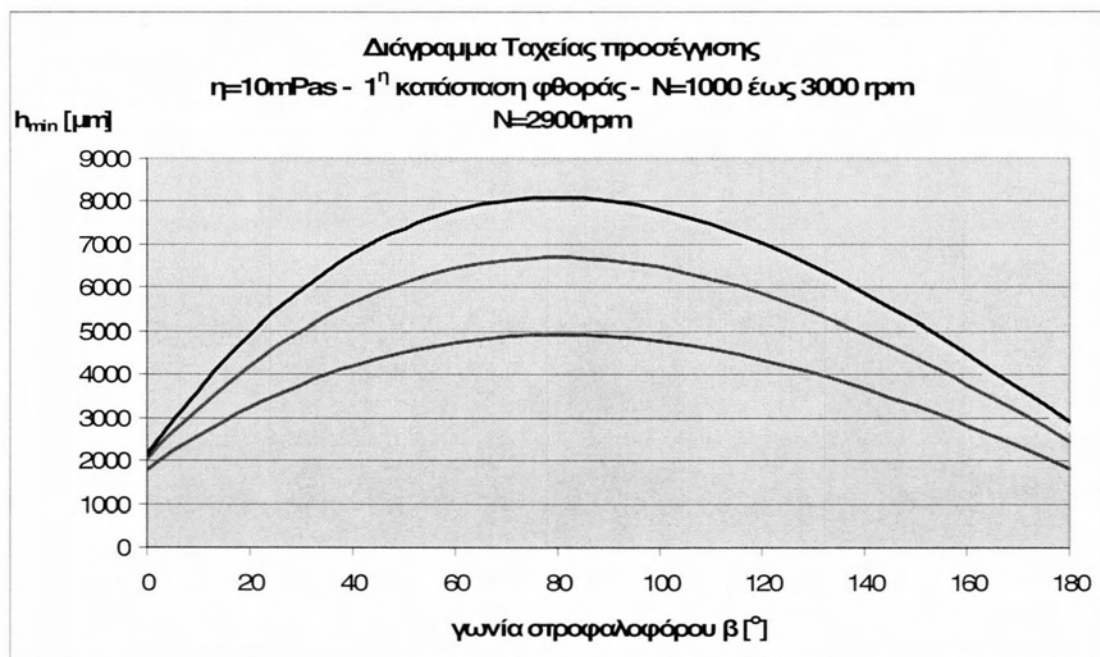
**Σχήμα Π3.1:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=10\text{mPas}$   $N=1050\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



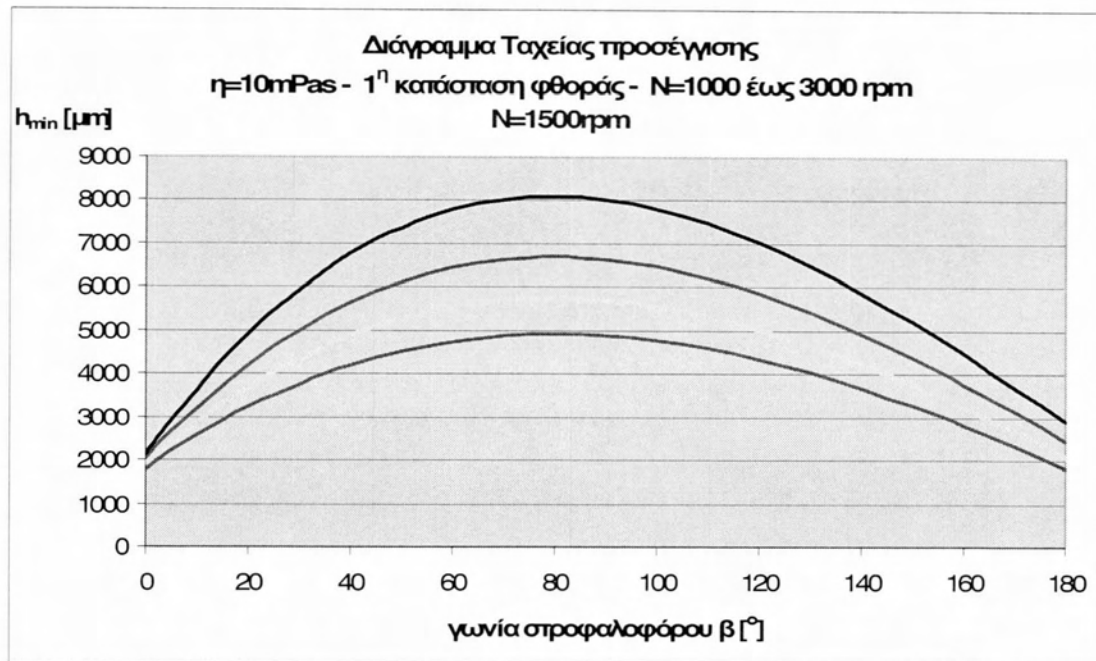
**Σχήμα Π3.2:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=10\text{mPas}$   $N=1900\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



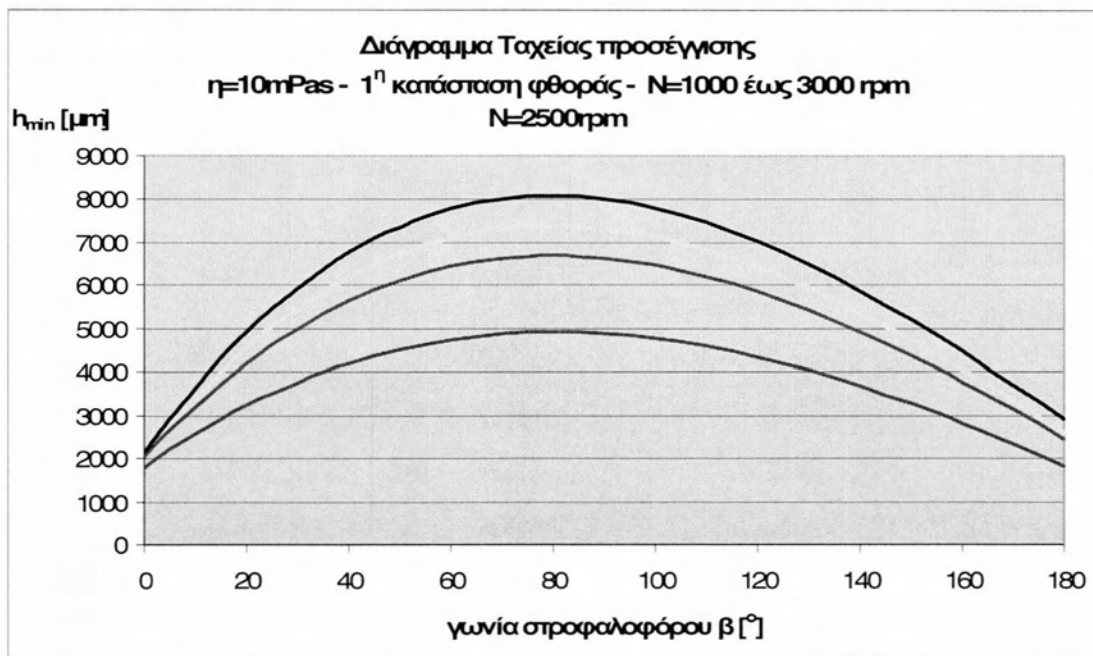
**Σχήμα Π3.3:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=10\text{mPas}$   $N=2100\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



**Σχήμα Π3.4:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=10\text{mPas}$   $N=2900\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

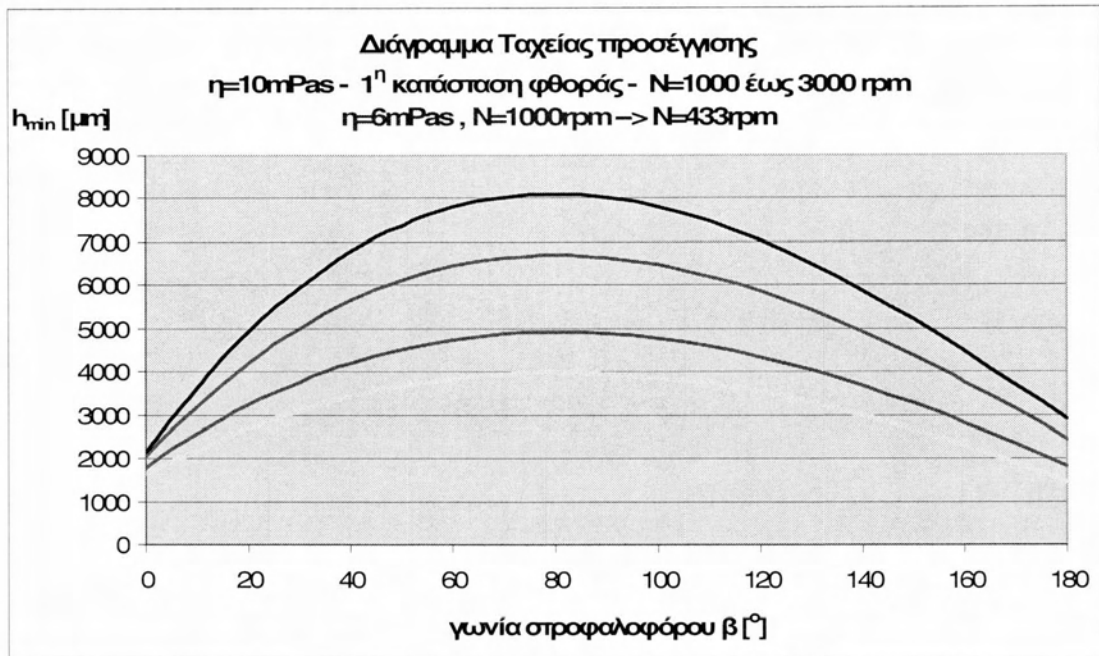


**Σχήμα Π3.5:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=10\text{mPas}$   $N=1500$ rpm για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

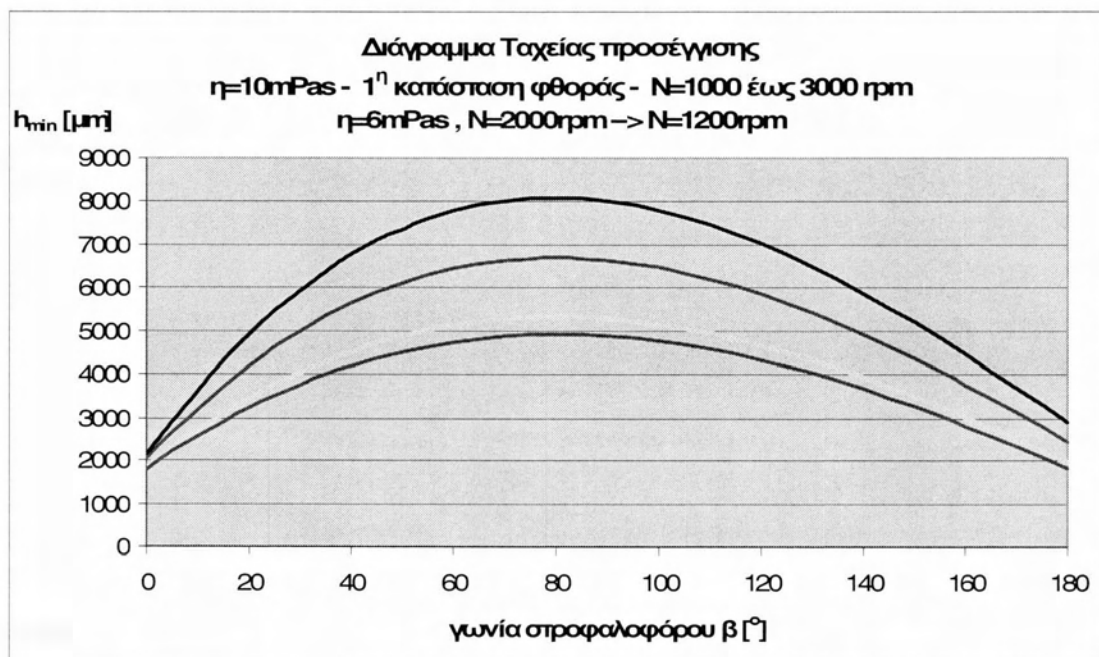


**Σχήμα Π3.6:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=10\text{mPas}$   $N=2500$ rpm για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

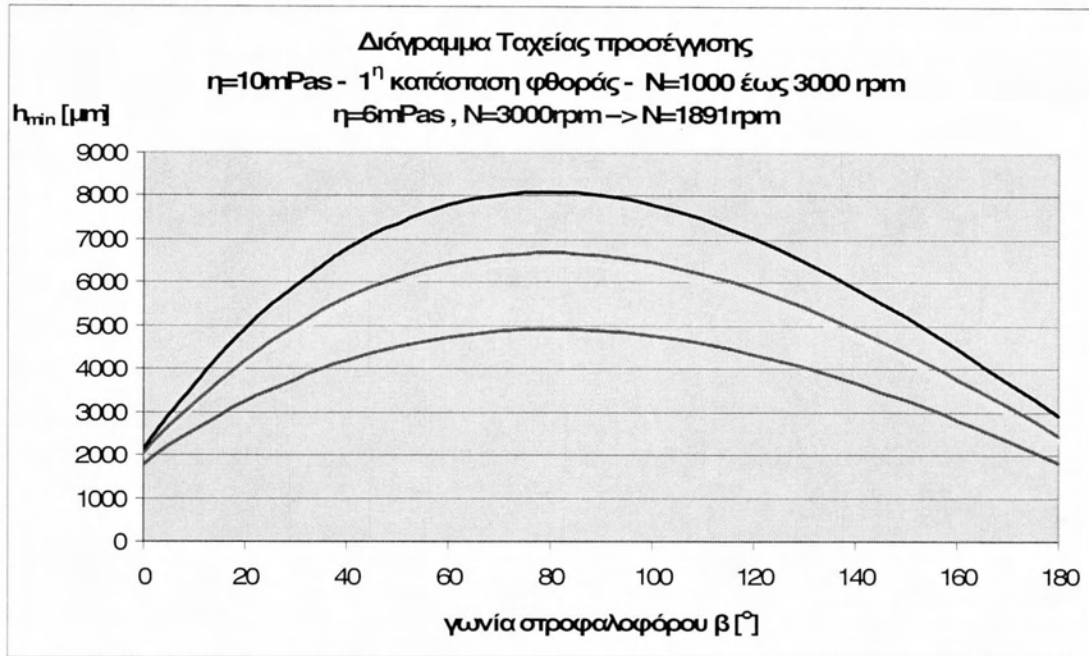
Προσέγγιση καμπυλών μεταβολής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης για μεταβλητό ιξώδες ( $\eta=6$  έως  $14$  mPas) και συχνότητα περιστροφής ( $N=1000$  έως  $3000$  rpm). Αναγωγή σε καμπύλη του πεδίου των ταχυτήτων για ιξώδες  $\eta=10$  mPas (τιμή ονομαστικών συνθηκών λειτουργίας)



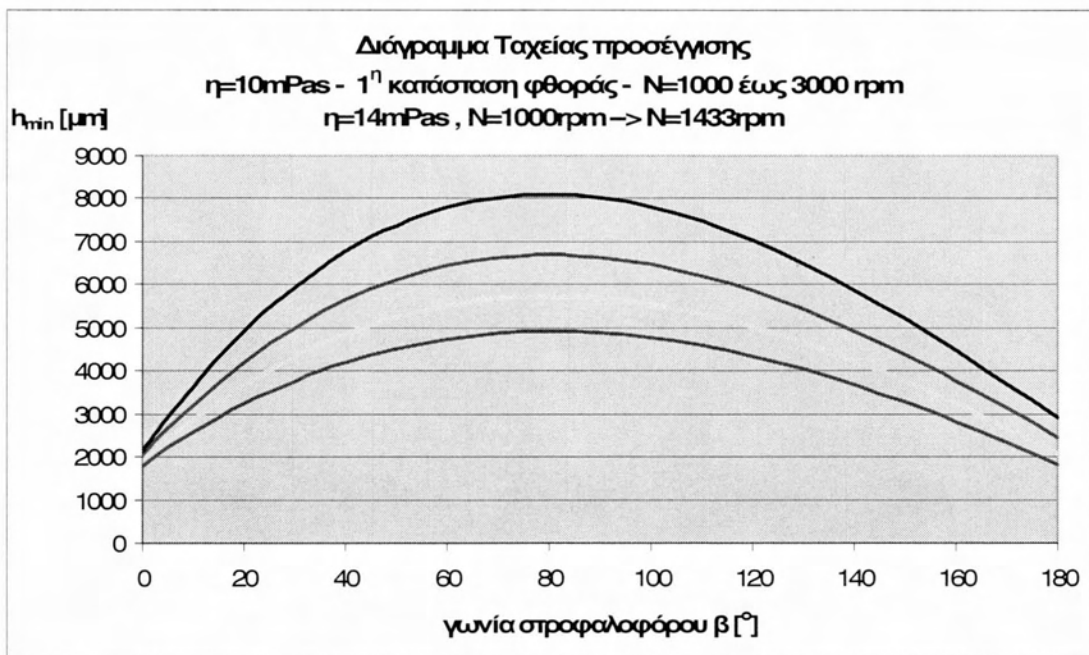
**Σχήμα Π3.7:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=6\text{mPas}$   $N=1000\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



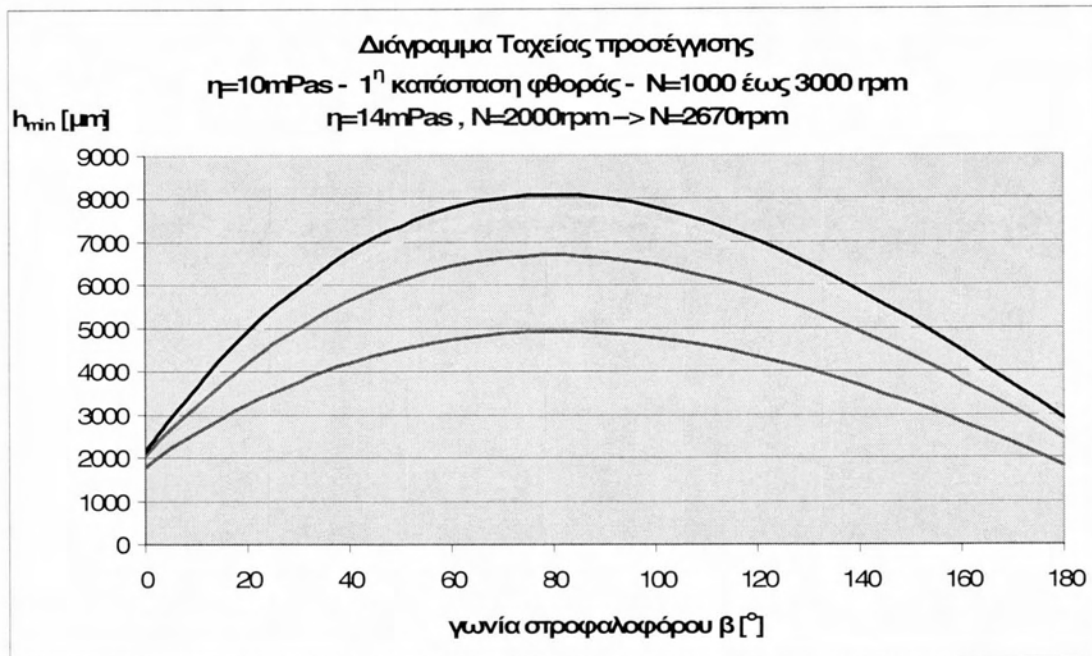
**Σχήμα Π3.8:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=6\text{mPas}$   $N=2000\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



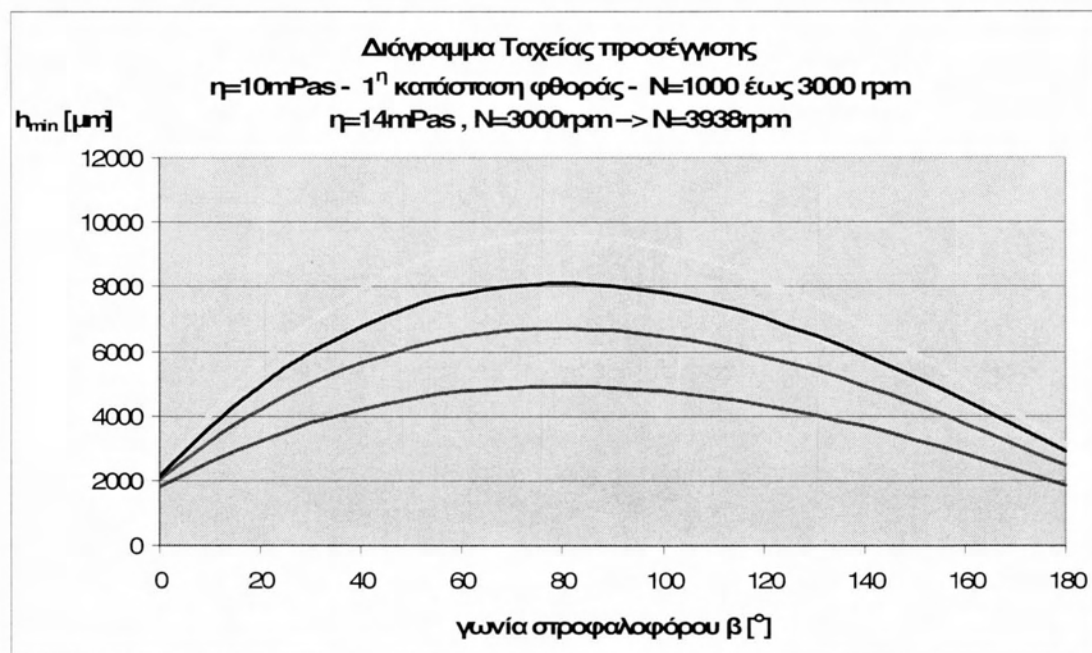
**Σχήμα Π3.9:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=6\text{mPas}$   $N=3000\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



**Σχήμα Π3.10:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=14\text{mPas}$   $N=1000\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

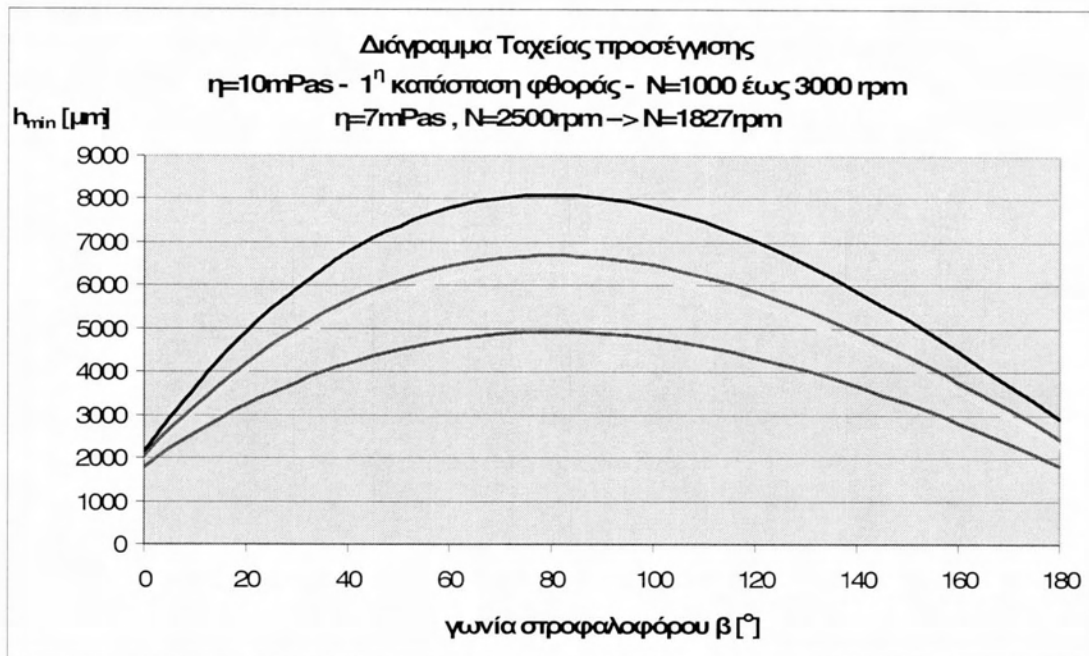


**Σχήμα Π3.11:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=14\text{mPas}$   $N=2000\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

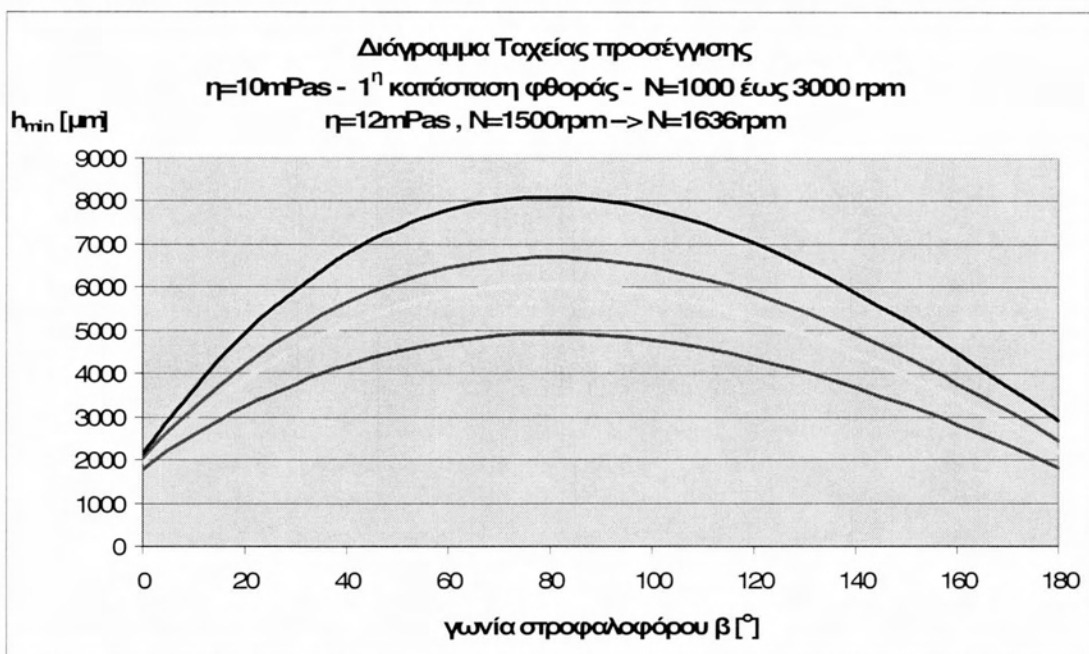


**Σχήμα Π3.12:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=14\text{mPas}$   $N=2000\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.

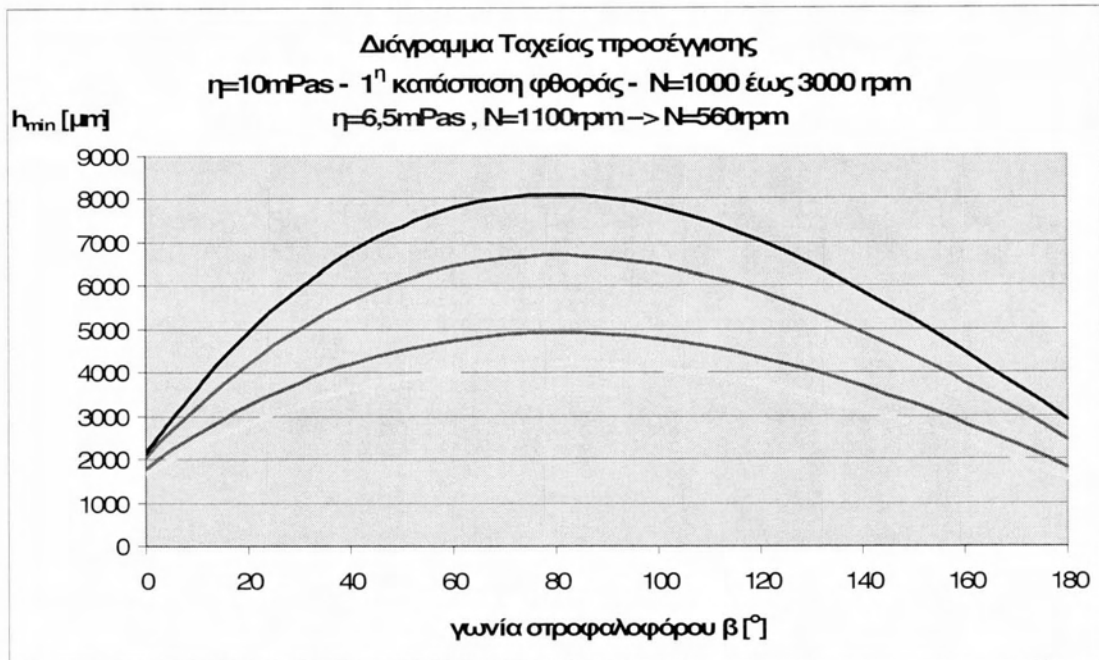
Παραδείγματα προσεγγίσεων για την 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς για κάθε τιμή  $\eta$  και  $N$  στο πεδίο ορισμού τους.



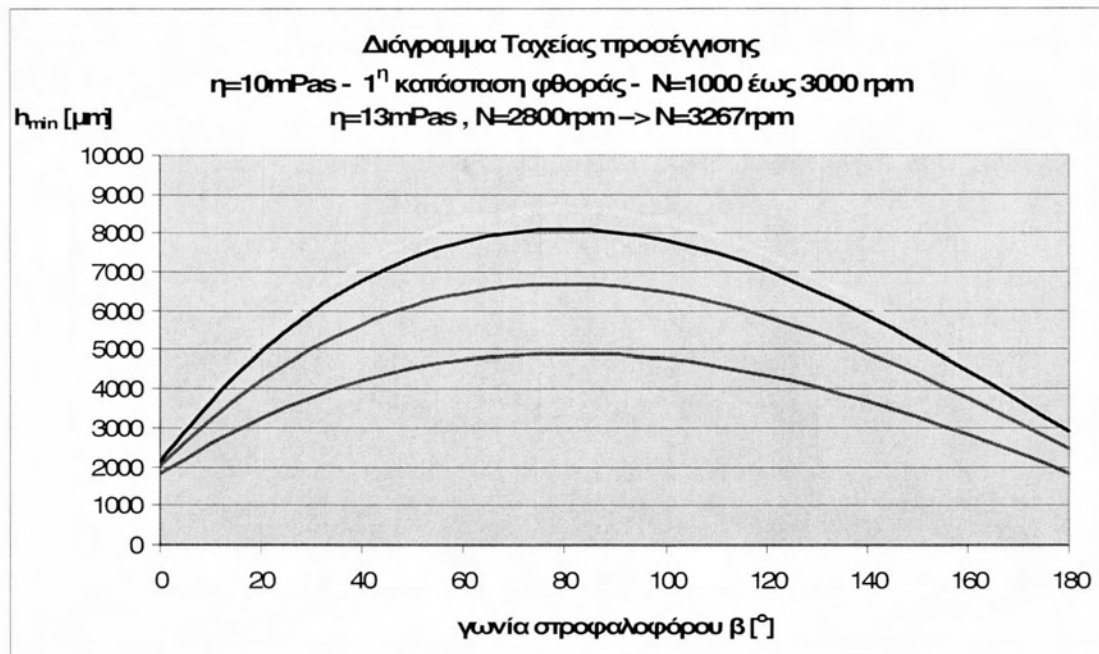
**Σχήμα Π3.13:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=7\text{mPas}$   $N=2500\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



**Σχήμα Π3.14:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=12\text{mPas}$   $N=1500\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



**Σχήμα Π3.15:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=6,5\text{mPas}$   $N=1100\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.



**Σχήμα Π3.16:** Προσεγγιστική αναλυτική καμπύλη (κίτρινη) για  $\eta=13\text{mPas}$   $N=2800\text{rpm}$  για 1<sup>η</sup> κατάσταση φθοράς.







ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000106298