

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΤΑΧΕΙΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ Μ.Ε.Κ. ΜΕ ΒΑΣΗ ΚΑΜΠΥΛΕΣ
ΤΥΠΟΥ STRIBECK

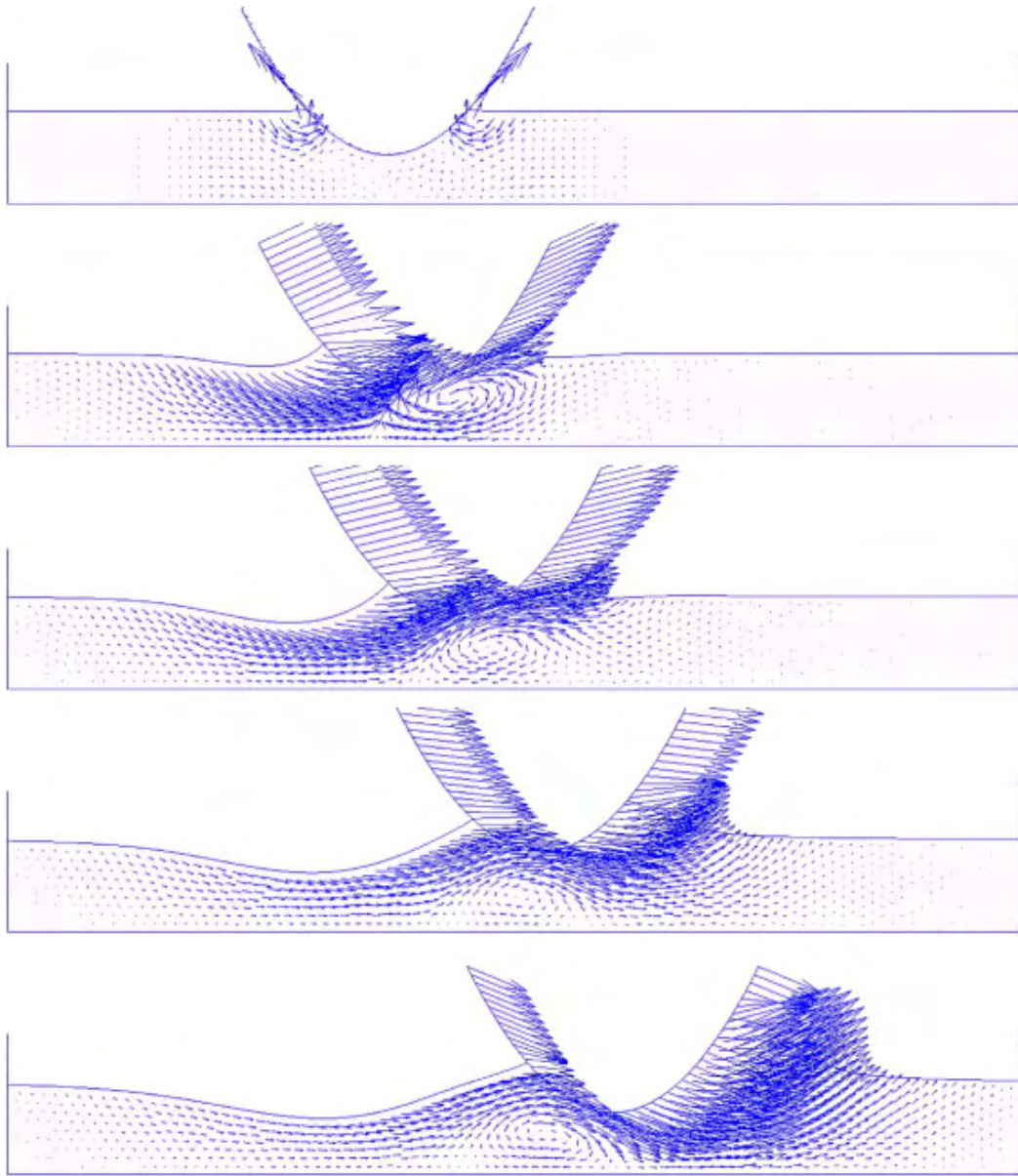


υπό

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΠΑΡΙΣΗ

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

Βόλος 2011



© 2011 Παρίσης Δημήτριος

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Κερμανίδης Αλέξιος
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. Οφείλω ευχαριστίες σε όλους τους καθηγητές και το προσωπικό του τμήματος που αφιέρωσαν το χρόνο τους βοηθώντας με σε πολλές περιπτώσεις να συνεχίσω τον ανηφορικό δρόμο της μάθησης του αντικειμένου με το οποίο ασχολήθηκα.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου Ελένη Χουλιάρá, Γιάννη Ζυγογιώργο, Αλέξανδρο Παπαϊωάννου, Χριστόφορο Λαζαρίδη, Αλέξανδρο Κλέπκο, Χρήστο Σάββα, Σωτήρη Μπάτο, Χρήστο Γίδαρη για την βοήθεια τους όλα αυτά τα χρόνια που περάσαμε μαζί στο Βόλο.

Ακόμη να ευχαριστήσω τους γονείς μου Κωνσταντίνο και Βαρσάμω και τον αδερφό μου Θανάση που όλα αυτά τα χρόνια με στήριζαν και ήταν πάντα δίπλα μου, γιατί χωρίς αυτούς τίποτε από όλα αυτά δεν θα ήταν εφικτό.

Παρίσης Δημήτριος

ΤΑΧΕΙΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ Μ.Ε.Κ. ΜΕ ΒΑΣΗ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΥΠΟΥ STRIBECK

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΡΙΣΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 20011

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Κωνσταντίνος Πανταζάρας, Διδάσκων Πανεπιστημίου
Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μέσα στα πλαίσια του γενικού προβλήματος της εξοικονόμησης ενέργειας, εμφανίζεται έντονο το ενδιαφέρον εκτίμησης και εν συνεχεία λειτουργικής βελτιστοποίησης με βάση τις απώλειες λόγω τριβών εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.).

Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση πολύπλοκων υπολογιστικών κωδικών που δεν είναι πάντοτε φιλικό προς τους χρήστες – μελετητές.

Έχοντας τούτο σαν κύριο άξονα, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο την πρόταση μιας μεθόδου ταχείας προσέγγισης λειτουργικών παραμέτρων δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ.

Η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια :

- Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται ως βάση για τη θεωρητική προσομοίωση (κώδικας OILFILM – Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας).
- Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία της μεθόδου ταχείας προσέγγισης των λειτουργικών παραμέτρων δακτυλίου με βάση καμπύλες τύπου Stribeck καθώς και τα διαγράμματα των καμπυλών Stribeck για το συντελεστή τριβής (μ) και για το πάχος λιπαντικού (h_{\min}).
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου τα οποία συγκρίνονται με άλλες μεθόδους θεωρητικής προσομοίωσης.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για μετέπειτα έρευνα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---------------|----|
| Περίληψη..... | 11 |
|---------------|----|

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Η θεωρία επαφής και λίπανσης δακτυλίου – χιτωνίου. Μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού πάχους λιπαντικής μεμβράνης και συντελεστή τριβής

| | |
|---|----|
| 1.1 Εισαγωγή..... | 16 |
| 1.2 Δακτύλιοι εμβόλου Μ.Ε.Κ..... | 17 |
| 1.3 Κατηγοριοποίηση δακτυλίων εμβόλου Μ.Ε.Κ..... | 21 |
| 1.4 Επίδραση του λειτουργικού περιβάλλοντος..... | 25 |
| 1.4.1 Λίπανση δακτυλίου – χιτωνίου..... | 25 |
| 1.4.2 Επίδραση της μικρογεωμετρίας των επιφανειών κυλίνδρου και δακτυλίου..... | 26 |
| 1.4.3 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας (δακτύλιος 1 ^{ος} : της φωτιάς)..... | 28 |
| 1.4.4 Τραχύτητα και πάχος λιπαντικής μεμβράνης..... | 28 |
| 1.4.5 Υδροδυναμική συνιστώσα..... | 29 |
| 1.5 Απαιτήσεις εισαγωγής νέων δεδομένων στη λίπανση δακτυλίων εμβόλου Μ.Ε.Κ..... | 32 |
| 1.6 Θεωρητική προσομοίωση λειτουργικής συμπεριφοράς δακτυλίων εμβόλου Μ.Ε.Κ..... | 34 |
| 1.7 Το θεωρητικό μοντέλο – επεξηγήσεις, λεπτομέρειες..... | 44 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

| | |
|--|----|
| Μέθοδος ταχείας προσέγγισης τριβολογικών χαρακτηριστικών δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ. βασισμένη στις καμπύλες τύπου Stribeck | |
| 2.1 Δεδομένα τεχνικού προβλήματος..... | 62 |
| 2.2 Περιγραφή μεθοδολογίας..... | 62 |
| 2.3 Αποτελέσματα υπολογισμών..... | 66 |
| 2.3.1 Καμπύλες για υπολογισμό δύναμης τριβής..... | 66 |
| 2.3.1.1 Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενη συχνότητα περιστροφής..... | 67 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 2.3.1.2 | Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενη πίεση..... | 78 |
| 2.3.1.3 | Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενο ιξώδες λιπαντικού..... | 85 |
| 2.3.1.4 | Πρώτος δακτύλιος, συγκεντρωτικά διαγράμματα τύπου Stribeck.... | 94 |
| 2.3.2 | Καμπύλες για υπολογισμό του πάχους λιπαντικής μεμβράνης..... | 96 |
| 2.3.2.1 | Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενη συχνότητα περιστροφής..... | 98 |
| 2.3.2.2 | Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενη πίεση..... | 109 |
| 2.3.2.3 | Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενο ιξώδες λιπαντικού..... | 116 |
| 2.3.2.4 | Πρώτος δακτύλιος, συγκεντρωτικά διαγράμματα τύπου Stribeck... | 125 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Αποτελέσματα ταχείας μεθόδου προσδιορισμού συμπεριφοράς δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ. και σύγκριση με άλλες μεθόδους θεωρητικής προσομοίωσης

| | | |
|-----|---|-----|
| 3.1 | Αποτελέσματα ταχείας μεθόδου για τη συνολική δύναμη τριβής, f_{tot} | 128 |
| 3.2 | Αποτελέσματα ταχείας μεθόδου για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης, h_{min} ... | 142 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Συμπεράσματα – Προτάσεις - Προοπτικές

| | | |
|-------------------|--|-----|
| 4.1 | Μεθοδολογία προσδιορισμού δύναμης τριβής και πάχους λιπαντικής μεμβράνης με τη βοήθεια διαγραμμάτων | 158 |
| 4.1.1 | Υπολογισμός δύναμης τριβής..... | 158 |
| 4.1.2 | Υπολογισμός πάχους λιπαντικής μεμβράνης..... | 165 |
| 4.2 | Συμπεράσματα – Προτάσεις..... | 169 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | | 171 |

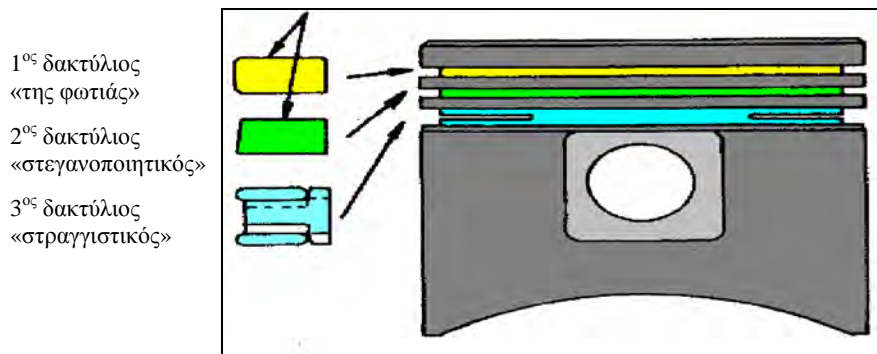
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η θεωρία επαφής και λίπανσης δακτυλίου – χιτωνίου.

Μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού πάχους
λιπαντικής μεμβράνης και συντελεστή τριβής



1.1 Εισαγωγή



Η προσπάθεια για τον προσδιορισμό των απωλειών λόγω των αναπτυσσόμενων τριβών κατά τη λειτουργία των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. είναι ιδιαίτερης σημασίας στις μέρες μας.

Η διαρκώς αυξανόμενη τιμή των καυσίμων σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθιστούν αναγκαία τη βελτίωση της μηχανικής απόδοσης των Μ.Ε.Κ.. Έτσι σημαντική παρουσία έχουν εργασίες που πραγματεύονται τη θεωρητική και πειραματική προσομοίωση της τριβολογικής συμπεριφοράς του συστήματος εμβόλου – δακτυλίου – χιτωνίου Μ.Ε.Κ.

Στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας στα πλαίσια της θεωρητικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς των προαναφερθέντων δακτυλίων έχει αναπτυχθεί υπολογιστικός κώδικας που βασίζεται σε σύγχρονα μοντέλα λιπαινόμενης επαφής.

Ο κώδικας αυτός θεωρείται λεπτομερής αλλά και πολύπλοκος σε μεγάλο βαθμό και για το λόγο αυτό αναπτύσσονται παράλληλα μέθοδοι ταχείας προσέγγισης των λειτουργικών χαρακτηριστικών δακτυλίων διαφορετικού τύπου για κινητήρα με ή χωρίς φορτίο, για επιφάνειες λείες ή τραχείες και για λίπανση είτε με λιπαντικό έλαιο σε αφθονία είτε σε συνθήκες μερικής διαβροχής του δακτυλίου.

Από τα αποτελέσματα του υπολογιστικού αυτού κώδικα (oilfilm) έχει ήδη δημιουργηθεί ένα αρχείο το οποίο είναι η βάση για την ταχεία μέθοδο προσέγγισης στην οποία καθοριστικό ρόλο παίζουν οι παράμετροι : U, w, R, L, η .

Καμπύλες για διαφορετικές τιμές των λοιπών παραμέτρων εκτός της ταχύτητας ανάγονται σε αντίστοιχες που ισοδυναμούν σε καμπύλες του πλέγματος αυτών και των διαφορετικών ταχυτήτων. Η προσεγγιστική αυτή μέθοδος θεωρείται επιτυχής. Σε ένα δεύτερο στάδιο ταχείας προσέγγισης στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια για προσδιορισμό λειτουργικών χαρακτηριστικών μέσω του πλέγματος καμπυλών τύπου Stribeck.

1.2 Δακτύλιοι εμβόλων Μ.Ε.Κ



Σχήμα 1.2.1 : Δακτύλιοι διαφορετικών κατατομών και έμβολο Μ.Ε.Κ.

Ο δακτύλιος του εμβόλου είναι ένα πολύπλοκης συμπεριφοράς, ίσως δε το πιο ενδιαφέρον τριβολογικό στοιχείο που συναντάτε 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 τριβόσύστημα εμβόλου-κυλίνδρου και εν μέρει στο τριβόσύστημα 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/πείρο 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:

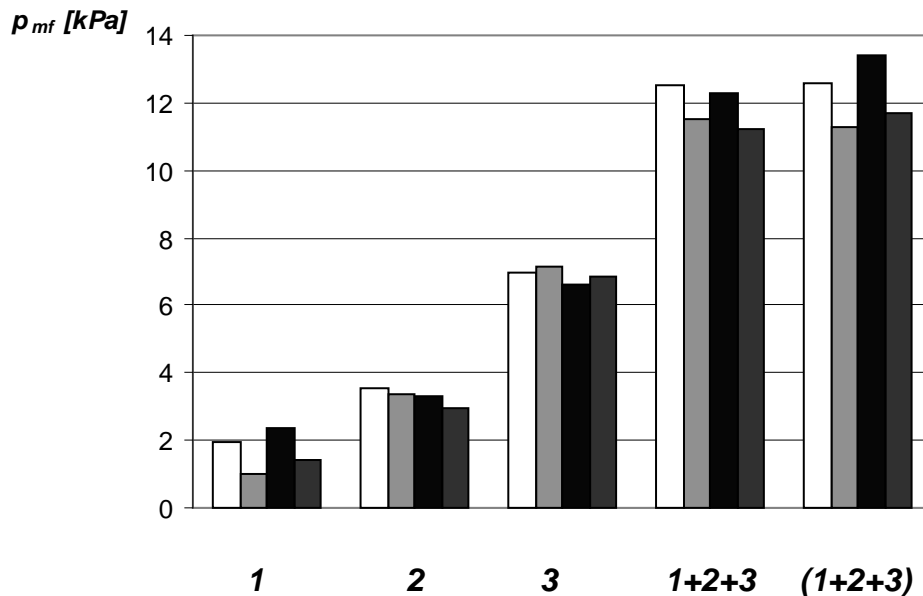
$$p_{mf} = \int_0^{4\pi} F(\beta)U(\beta)db / V$$

Όπου: F : η δύναμη τριβής,

U : η γραμμική ταχύτητα κίνησης του εμβόλου,

β : η γωνία περιστροφής του στροφαλοφόρου

και V : ο όγκος του κυλίνδρου.



Σχήμα 1.2.2 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 851-541cm³/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.

Οι δακτύλιοι ελέγχουν τη λίπανση μεταξύ εμβόλου – χιτωνίου σχηματίζοντας ένα στρώμα λιπαντικού ανάμεσά τους. Όπως προαναφέρθηκε το έμβολο διαθέτει δύο είδη δακτυλίων. Τους δακτυλίους συμπίεσης και τους δακτυλίους λίπανσης.

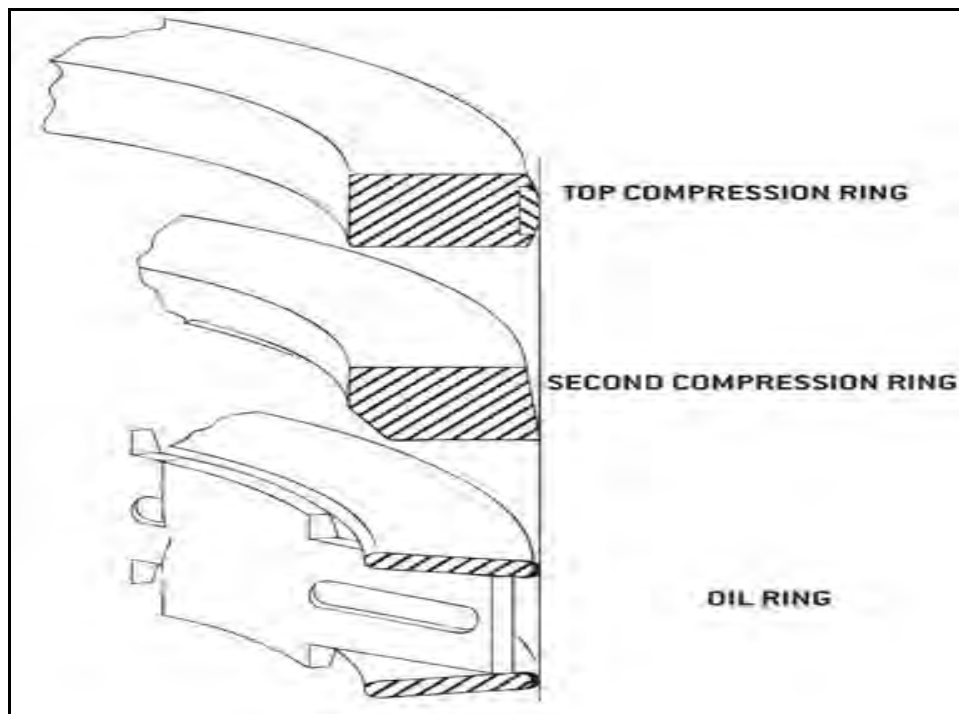
Ο σκοπός ύπαρξής τους είναι:

1. Στεγανοποιούν το χώρο μεταξύ της άνω επιφάνειας του εμβόλου και του κυλίνδρου . Είναι ο χώρος μέσα στον οποίο πραγματοποιείται η καύση (θάλαμος καύσης). Επομένως οι δακτύλιοι συμπίεσης έχουν σαν στόχο τη αποφυγή διαφυγής αερίων προς τον στροφαλοθάλαμο και την διατήρηση μιας υψηλής πίεσης στον θάλαμο καύσης.
2. Παρέχουν την ακριβή ποσότητα λιπαντικού στην επιφάνεια του χιτωνίου ώστε να αντέξει την ροπή και τις υψηλές δυνάμεις που απορρέουν από την καύση σε υψηλές ταχύτητες. Την ίδια στιγμή ελέγχουν τη ποσότητα του λιπαντικού

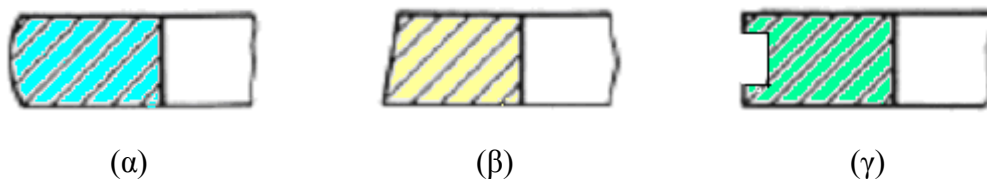
φροντίζοντας να διατηρείται μέσα σε επιθυμητά όρια ώστε να μην γίνεται υπερκατανάλωση με αρνητικές επιπτώσεις.

3. ελέγχουν τη θερμοκρασία του εμβόλου. Αυτό επιτυγχάνεται με την μεταφορά θερμότητας μέσω του λιπαντικού στα τοιχώματα του κυλίνδρου και εν συνεχεία στο ψυκτικό μέσο.

1.3 Κατηγοριοποίηση δακτυλίων εμβόλων Μ.Ε.Κ.



Σχήμα 1.3.1 Δακτύλιοι εμβόλου Μ.Ε.Κ. διαφορετικών κατατομών



Σχήμα 1.3.2: 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 ($N^{\circ} 1$) δακτύλιος ονομάζεται και «της φωτιάς», ο δεύτερος ($N^{\circ} 2$), ο μεσαίος, είναι ο κατ' εξοχήν «στεγανωτικός» όπως συνηθίζεται να ονομάζεται, και ο τρίτος ($N^{\circ} 3$) 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 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 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 δακτύλιους 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 μm ακτινική απόσταση ακμών. Η αιχμηρή περιοχή του είναι τοποθετημένη-στραμμένη 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 $2.0 \cdot 10^5$ 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 μm . και για την κάθοδο σταθερό πάχος 2 μm .

Αντίστοιχες τιμές για κινητήρα Diesel, το έμβολο του οποίου έχει 4 δακτυλίους δίνονται για αρχικό στάδιο φθοράς, κατά την άνοδο 6.5 μm και για την κάθοδο (σταθερό πάχος) 1 μm για μεμονωμένο δακτύλιο, ενώ η εκτίμηση του πάχους μεμβράνης λιπαντικού κατά την λειτουργία συστοιχίας πέφτει στην τιμή 0.80 μm 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 δέκατων χιλιοστού πχ 0.2-0.4mm, συνολικό πλάτος περίπου 4.5mm και ελαστική πίεση $7.8 \cdot 10^5$ Pa. Θεωρητικό προσομοιωτικό μοντέλο 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^ο 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.

1.4 Επίδραση του λειτουργικού περιβάλλοντος.

1.4.1 Λίπανση δακτυλίου-χιτωνίου

Το σύστημα λίπανσης και το χρησιμοποιούμενο λιπαντικό μέσο επιτελούν τις εξής διεργασίες:

1. Μειώνουν την αντίσταση τριβής ώστε η μηχανή να έχει μέγιστη μηχανική απόδοση
2. Προστατεύουν τη μηχανή από τη φθορά που προκαλείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της
3. Συμβάλουν στην ψύξη του εμβόλου και όλων των καταπονούμενων περιοχών της μηχανής
4. Συμβάλουν στην απομάκρυνση των υπολειμμάτων καύσης από τις λιπαινόμενες περιοχές
5. Διατηρούν τη διαρροή αερίων και λαδιού σε χαμηλά επίπεδα στην περιοχή των δακτυλίων του εμβόλου

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 χιτωνίου 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.

1.4.2 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 $\sigma_1^2 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$.

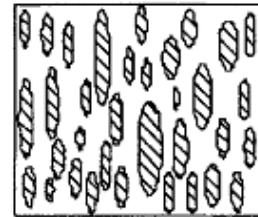
Όπου σ_1 , σ_2 οι τυπικές αποκλίσεις των κατανομών για το χιτώνιο και τον δακτύλιο αντίστοιχα. Αντιπροσωπευτικά πειραματικά αποτελέσματα δίνουν για τα χαρακτηριστικά της μικρογεωμετρίας αυτής, ότι η μεταβολή τους σε τρία διαφορετικά στάδια φθοράς συμφωνεί με τα παρακάτω δεδομένα.

Στάδιο 1: Πριν από τη λειτουργία

$$\sigma_{po} = 1,1\mu\text{m}$$

$$\eta\beta\sigma_{pi} = 0,20$$

$$\sigma_{pi}/\beta = 0,05$$



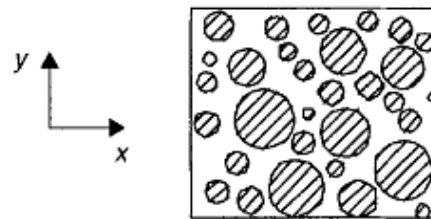
$\gamma < 1$

Στάδιο 2: Μετά από 10 ώρες λειτουργίας

$$\sigma_{po} = 0,40\mu\text{m}$$

$$\eta\beta\sigma_{pi} = 0,17$$

$$\sigma_{pi}/\beta = 0,004$$



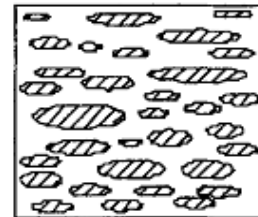
$\gamma = 1$

Στάδιο 3: Μετά από 100 ώρες λειτουργίας

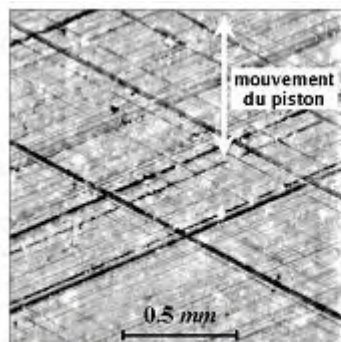
$$\sigma_{po} = 0,30\mu\text{m}$$

$$\eta\beta\sigma_{pi} = 0,30$$

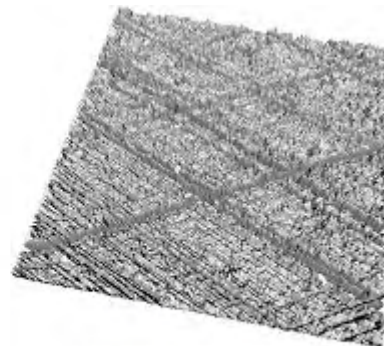
$$\sigma_{pi}/\beta = 0,0028$$



$\gamma > 1$



(a) image topographique 2D



(b) représentation 3D

Σχήμα 1.4.2.1: 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

1.4.3 Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας (δακτύλιος 1^{ος} :της φωτιάς)

Αποδεικνύεται και με βάση το θεωρητικό μοντέλο ότι ακτίνες καμπυλότητας της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιοστών δίνουν παρόμοια αποτελέσματα (βελτιστοποιημένη περιοχή) γεγονός που αποδεικνύει τη συσσωρευμένη εμπειρία και την τεχνογνωσία των κατασκευαστών μηχανών για το συγκεκριμένο υποσύστημα της ΜΕΚ, μείωση της ακτίνας καμπυλότητας αυτής μειώνει το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης κατά το σύνολο της διαδρομής ενώ αντίθετως, αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας οδηγεί σε κατατομές που τείνουν σε επίπεδο σχήμα με αυξημένες τις συνθήκες τριβής και φθοράς, επίσης καθ' όλη τη διαδρομή με συνεχή επαφή δακτυλίου – κυλίνδρου.

Πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταδείξει ότι μάλλον η υδροδυναμική συνιστώσα είναι απύσχα στις περιπτώσεις αυτές. Η παρατήρηση μιας ελαφριάς μείωσης της συνολικής δύναμης τριβής στο μέσο της διαδρομής ερμηνεύεται με την υποτιθέμενη παραμόρφωση της διεπιφάνειας κυρίως στην περιοχή της μέγιστης μεταφορικής ταχύτητας όπου ελαφρά περιστροφή της κατατομής οδηγεί σε παρόμοια θεωρητικά αποτελέσματα

1.4.4 Τραχύτητα και πάχος της λιπαντικής μεμβράνης

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 δ_1, δ_2 των υψομέτρων 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 υψομέτρων των σημείων και αφετέρου του πληθυσμού των υψομέτρων των κορυφών των λόφων, απόσταση που είναι γενικά αρνητική.
- Τις σ_{ρ_0} και σ_{ρ_i} 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 σ_{ρ_0} 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 τραχύτητας είναι αμελητέα. Η κατατομή κάθε λοφίσκου θεωρείται ότι περιγράφεται με μία παραβολική συνάρτηση $y = f(x)$.

Αν w 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) β είναι η μέση τιμή της ακτίνας καμπυλότητας της ακτίνας των λοφίσκων. [m]
- 3) n η πυκνότητα των λοφίσκων. [m⁻²]

1.4.5 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:

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

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

P: η μέση τοπική πίεση

Φ_x, Φ_y, Φ_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.

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 Φ_x, Φ_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 Φ_x υπολογίζεται ως εξής:

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

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

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

Όπου: $H = \frac{h}{\sigma}$ και $\gamma = \frac{\lambda_{0,5x}}{\lambda_{0,5y}}$, γ : 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 λ 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:

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

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

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

Αν η η τοπική τιμή της λιπαντικής μεμβράνης \bar{h}_T 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:

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

Επειδή θεωρήθηκε βασικό στοιχείο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μία θεωρητική προσομοίωση ταχείας σύγκλισης που όμως να δίνει αποτελέσματα αξιόπιστα αποφασίστηκε να γίνει μια βασική υπέρβαση που ορίζεται ως εξής:

Αν θεωρηθεί με βάση την κεκτημένη εμπειρία ότι οι συγκεκριμένες περιοχές που γειτνιάζουν με τα «νεκρά» σημεία, αντιστοιχούν σε τιμές του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης από συγκεκριμένη οριακή τιμή, τότε στην περιοχή αυτή θα θεωρήσουμε μοναδική συνιστώσα της τριβής με μορφή $f_a = \mu U$ (όπου μ : ο συντελεστής τριβής και U : η ταχύτητα).

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

$$F_H = \iint_s \tau_h ds$$

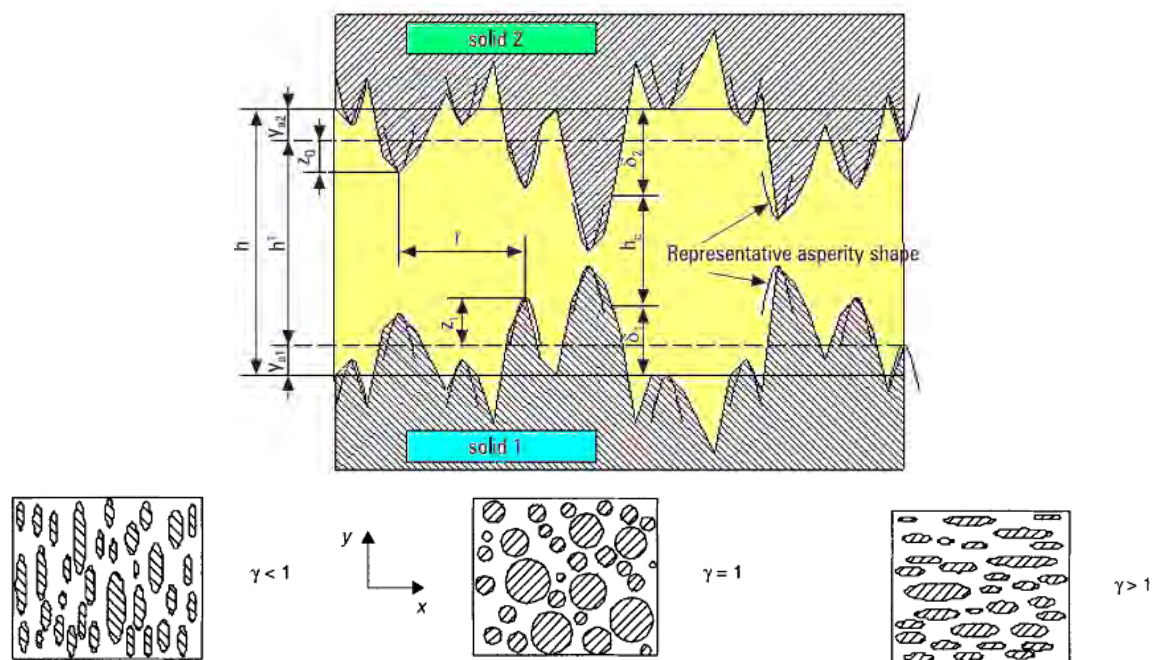
Το άθροισμα λοιπόν αυτών των δύο συνιστωσών θα μας δίνει την:

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

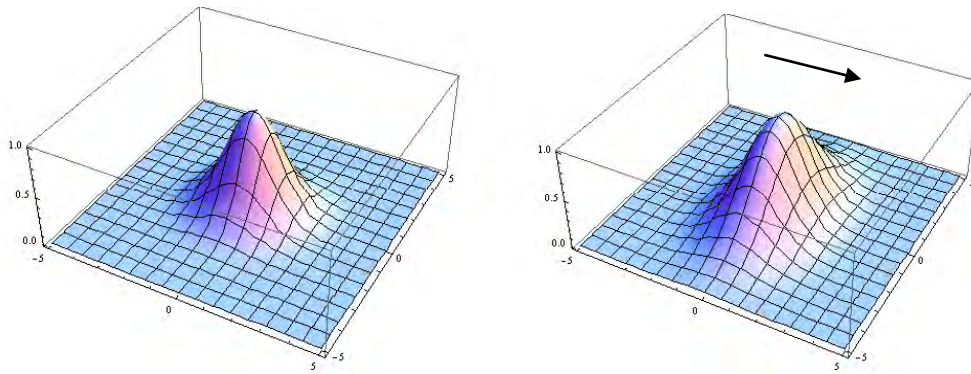
1.5 Απαιτήσεις εισαγωγής νέων δεδομένων στη λίπανση δακτυλίων εμβόλου Μ.Ε.Κ.

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

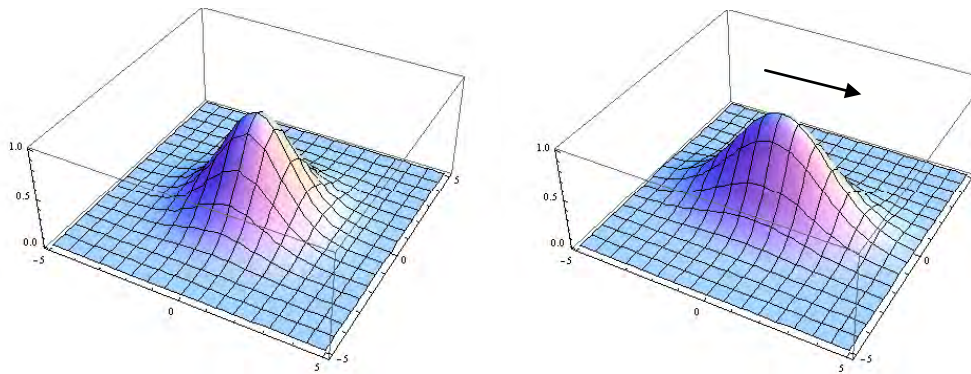
Έτσι, αφενός γίνεται χρήση για την λίπανση μιας εξίσωσης του **Reynolds (Navier – Stokes)** στην οποία λαμβάνονται υπόψη μεγέθη της λιπαντικής μεμβράνης με στατιστικά χαρακτηριστικά της τραχύτητας των **Patir** και **Cheng**, καθώς και ενός μοντέλου επαφής τραχειών επιφανειών που προτάθηκε από τους **Greenwood**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



Σχήμα 1.5.1 Το μοντέλο των λοφίσκων τραχύτητας και τα χαρακτηριστικά ανισοτροπίας που ελήφθησαν σε συνδυασμό κατά την ανάπτυξη του υπολογιστικού κώδικα.



Σχηματική παράσταση λοφίσκου **ισότροπης** (αριστερά) και λοφίσκου **ανισότροπης**(δεξιά) τραχείας επιφάνειας με βαθμό ανισοτροπίας $\gamma < 1.00$, κύρια κατεύθυνση είναι αυτή του βέλους (συνημμένο στο Σχήμα 1.1.1)



Σχηματική παράσταση λοφίσκου **ισότροπης** (δεξιά) και λοφίσκου **ανισότροπης** (αριστερά) τραχείας επιφάνειας με βαθμό ανισοτροπίας $\gamma > 1.00$, κύρια κατεύθυνση είναι αυτή του βέλους (συνημμένο στο Σχήμα 1.1.1)

Η προσπάθεια λεπτομερούς προσδιορισμού της **τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων 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 από τα βήματα που έχουν ήδη επιτευχθεί.

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, διαφορετικά και νέα υλικά, ποικίλη τοπογραφία των τραχειών συνεργαζομένων επιφανειών, υφιστάμενες μεταβολές στο πεδίο του χρόνου κ.α.

1.6 Θεωρητική προσομοίωση λειτουργικής συμπεριφοράς δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ.

Η θεωρητική προσομοίωση λειτουργικής συμπεριφοράς δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ. βασίζεται κυρίως σε μοντέλα μικτής λίπανσης όπου ο υδροδυναμικός χαρακτήρας εμφανίζεται κυρίως στην περιοχή κοντά στο μέσο της διαδρομής του εμβόλου (περιοχή μέγιστης μεταφορικής ταχύτητας) ενώ ο μη υδροδυναμικός χαρακτήρας που οφείλεται στις επαφές μεταξύ των συνεργαζόμενων στερεών εμφανίζεται στις περιοχές των νεκρών σημείων.

Η απαίτηση ισοροπίας του συστήματος στην διεπιφάνεια οδηγεί στον διαχωρισμό του μηχανισμού παραλαβής φορτίου. Αφενός η υδροδυναμική φορτοϊκανότητα προσδιορίζεται με βάση την εξίσωση του **Reynolds** για γενικά τραχείες επιφάνειες επαφής (**Patir – Cheng**) και αφετέρου η μη υδροδυναμική φορτοϊκανότητα (επαφές μεταξύ λοφίσκων τραχύτητας) σε ελαστική (ή πλαστική) παραμόρφωση βασίζεται σε ένα μοντέλο προσδιορισμού αριθμού επαφών , πραγματικής επιφάνειας επαφής , φορτίου επαφής των **Greenwood – Trip**.

Κάθε ένα από τα προαναφερθέντα μοντέλα λαμβάνει υπόψη μη τυποποιημένες γενικά τιμές της τραχύτητας στη διεπιφάνεια. Το μοντέλο **Patir – Cheng** βασίζεται κυρίως στον πληθυσμό υψομέτρων των σημείων της κατατομής της τραχείας επιφάνειας καθώς και στην ανισοτροπία της τραχύτητας (σχήμα λοφίσκου κυκλική τομή αντιστοιχεί σε ισότροπη επιφάνεια , μη κυκλική αντιστοιχεί σε ανισότροπη επιφάνεια). Το μοντέλο των **Greenwood – Trip** βασίζεται κυρίως στον πληθυσμό των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων καθώς και στην καμπυλότητα των κορυφών αυτών.

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της τραχύτητας στα δύο προηγούμενα μοντέλα διαφοροποιούνται από μελετητή σε μελετητή για λόγους ευκολίας. Είναι δεκτή ακόμη και η ταύτιση των δύο πληθυσμών και μάλιστα με χαρακτηριστικά κανονικής καμπύλης κατανομής (**Rohde**) ενώ στον κώδικα του **Πανεπιστημίου Θεσσαλίας** γίνεται λεπτομερέστερη συστηματική ανάλυση που βασίζεται στη διάκριση τριών πληθυσμών:

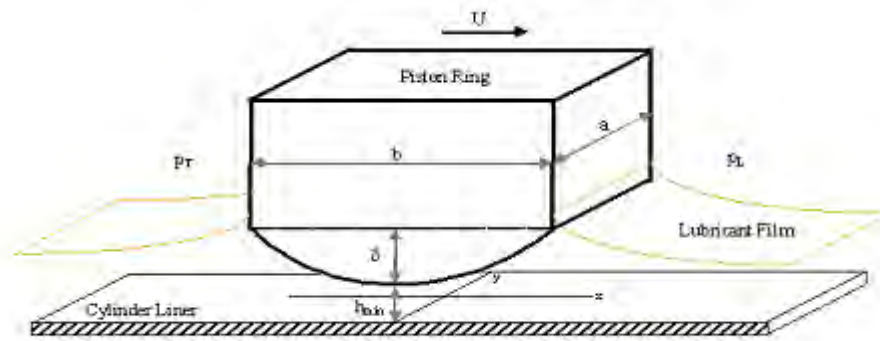
1. Του πληθυσμού υψομέτρων όλων των σημείων όλης της κατατομής
2. Του πληθυσμού υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων της κατατομής
3. Του πληθυσμού των ακτίνων καμπυλότητας των κορυφών αυτών

Δυσκολία αντιμετωπίζεται κυρίως στον προσδιορισμό της **ακτίνας καμπυλότητας** των κορυφών των λοφίσκων και τούτο διότι σε περίπτωση φθαρμένης επιφάνειας, τα οροπέδια που δημιουργούνται μετά τη φθορά έχουν πάρα πολύ μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας που τείνει στο άπειρο, οδηγώντας το αντίστοιχο ιστόγραμμα σε πολύ μεγάλη εξάπλωση μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής, γεγονός που οδηγεί στη μορφή καμπύλης τύπου ‘**J**’ που δε μπορεί να περιγράψει με σαφήνεια και ακρίβεια σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων.

Ο προσδιορισμός της ισορροπίας των στερεών σε επαφή οδηγεί στη συνέχεια στον προσδιορισμό των τριβών – αντιστάσεων. Πρόκειται για δύο συνιστώσες εκ των οποίων η πρώτη αναφέρεται στη διάτμηση της λιπαντικής μεμβράνης και η δεύτερη αναφέρεται στη διάτμηση μιας επιφανειακής μεμβράνης στις περιοχές επαφών μεταξύ των λοφίσκων καθώς και ενός συντελεστή τριβής η τιμή των οποίων προσδιορίζεται πειραματικά.

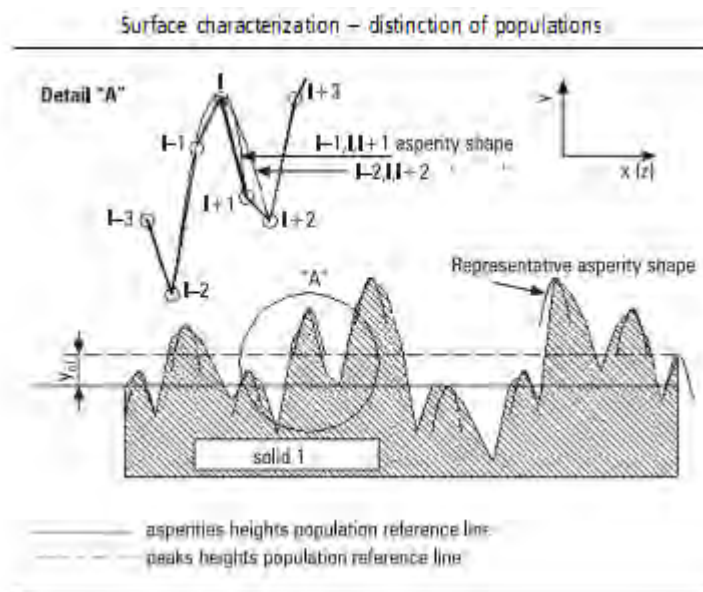
Η σημαντική απόκλιση της πραγματικής λειτουργίας των δακτυλίων σε σχέση με τις βασικές υποθέσεις που λαμβάνονται υπ’ όψη στην θεωρητική ερμηνεία/αποσαφήνιση της τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλων ΜΕΚ οφείλεται στα παρακάτω στοιχεία:

- Η 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 αλληπάληλους διαδοχικούς υπολογισμούς, αποτελέσματα των οποίων οφείλουν να τροφοδοτούν, υπό την μορφή δεδομένων πλέον, τους υπολογισμούς που έπονται.



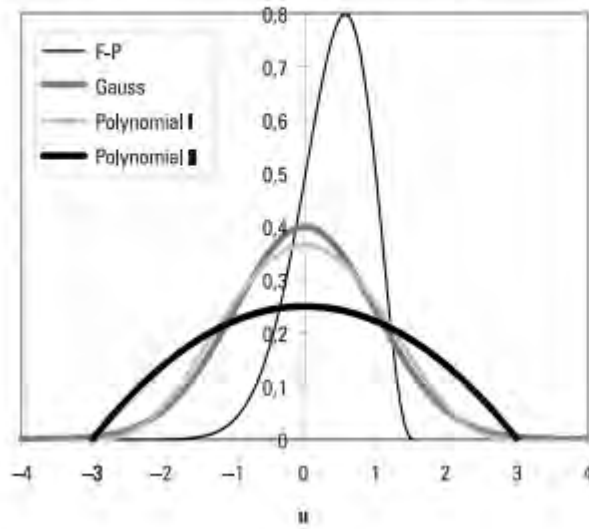
Σχήμα 1.6.1 Κλασικό μοντέλο που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση του προβλήματος λίπανσης (πρώτου) δακτυλίου εμβόλου MEK.

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.



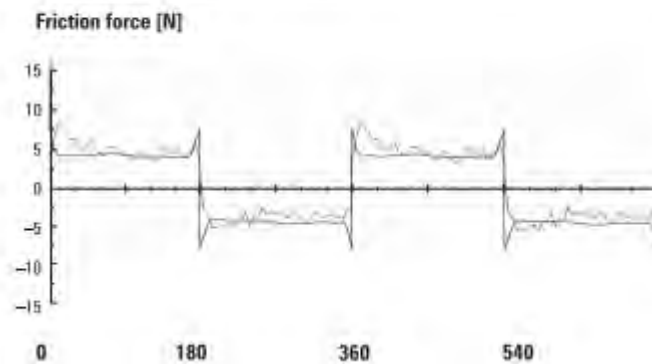
Σχήμα 1.6.2 Το μοντέλο των λοφίσκων ταχύτητας και τα χαρακτηριστικά των κορυφών των λόφων που ελήφθησαν σε συνδυασμό κατά την ανάπτυξη του υπολογιστικού κώδικα.

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



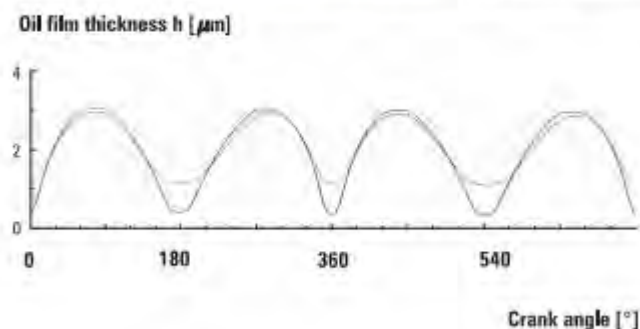
Σχήμα 1.6.3 Κατανομές που χρησιμοποιούνται σε θεωρητικά προσωμοιοτικά μοντέλα για σύγχρονους ισχυρούς υπολογιστικούς κώδικες.

Measured and calculated via real womliner roughness integral functions piston ring-liner friction force $L = 1.75\text{mm}$, $R = 18.00\text{mm}$ (unloaded conditions) $\sigma_{p01} = 0.62\ \mu\text{m}$, $\sigma_{p11} = 0.40\ \mu\text{m}$, $\gamma_1 = 0.60$, $N = 510\text{rpm}$, $\eta = 0.020\text{Pa}\cdot\text{s}$



Σχήμα 1.6.4 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) $N = 510\text{rpm}$, $n = 0.020\text{ Pa}\cdot\text{s}$



Σχήμα 1.6.5 Θεωρητικό διάγραμμα μεταβολής ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης πρώτου δακτυλίου για διαφορετικές φάσεις φθοράς της επιφάνειας του κυλίνδρου

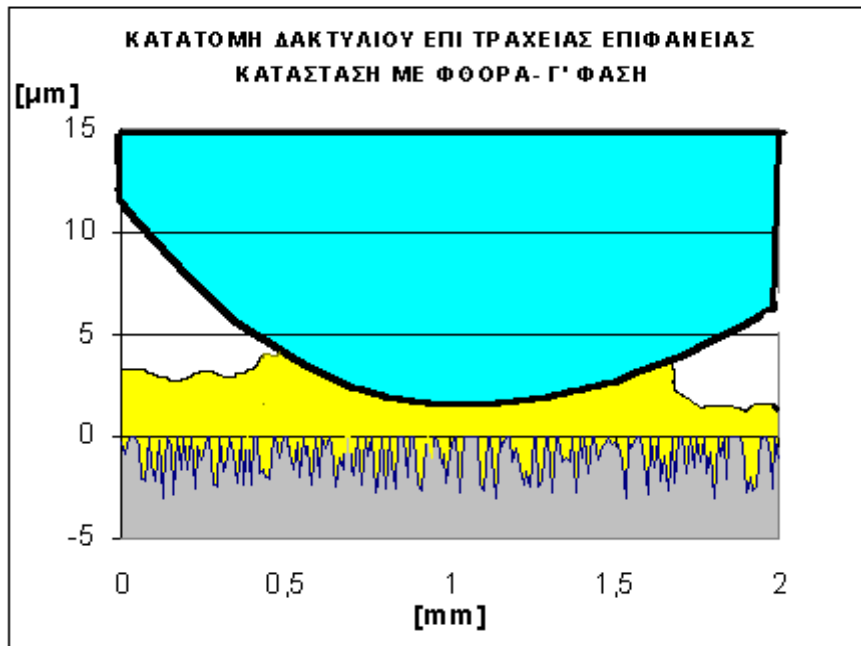
Στη διεπιφάνεια μεταξύ τεμαχίων μηχανολογικής χρήσης, ως προς την τριβολογική τους συμπεριφορά πρωταγωνιστικό ρόλο παίζει αφενός το υλικό (μέτρο ελαστικότητας E , λόγος του Poisson ν , σκληρότητα H) σε περίπτωση πλαστικής παραμόρφωσης και αφετέρου χαρακτηριστικά της μικρογεωμετρίας των μικροεπιφανειών που κατά κανόνα συμπεριλαμβάνονται μέσα στις τυποποιημένες τιμές που δίνονται από τα λογισμικά τραχυμέτρησης.

Στα 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 επιφάνειας.

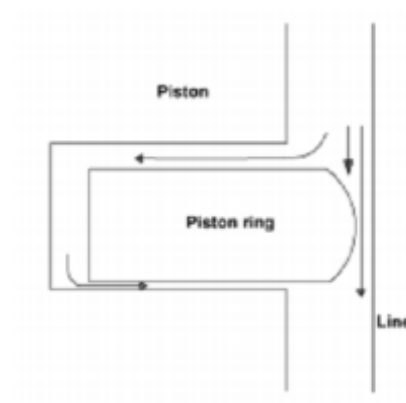
Τα δυο θεωρητικά μοντέλα **Patir-Cheng & Greenwood -Tripp** απαιτούν χρήση τιμών για πρόσθετες, γενικά μη τυποποιημένες παραμέτρους των κατατομών (profil). Η απαίτηση αυτή λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα διπλωματική εργασία κατά την οποία γίνεται αφενός διάκριση μεταξύ των πληθυσμών των υψομέτρων όλων των σημείων του προφίλ- κατατομής (τραχυμέτρηση) και υψομέτρων των κορυφών των λόφων και αφετέρου λεπτομερής αποκωδικοποίηση της επίδρασης της καμπυλότητας στην κορυφή του λοφίσκου.

Η τεκμηρίωση των συμπερασμάτων και προτάσεων που έπονται γίνεται όπως έχει ήδη προαναφερθεί με βάση υπολογιστικό κώδικα που αναπτύσσεται συνεχώς και

εξελίσσεται στο τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η αξία της συγκεκριμένης προσέγγισης.

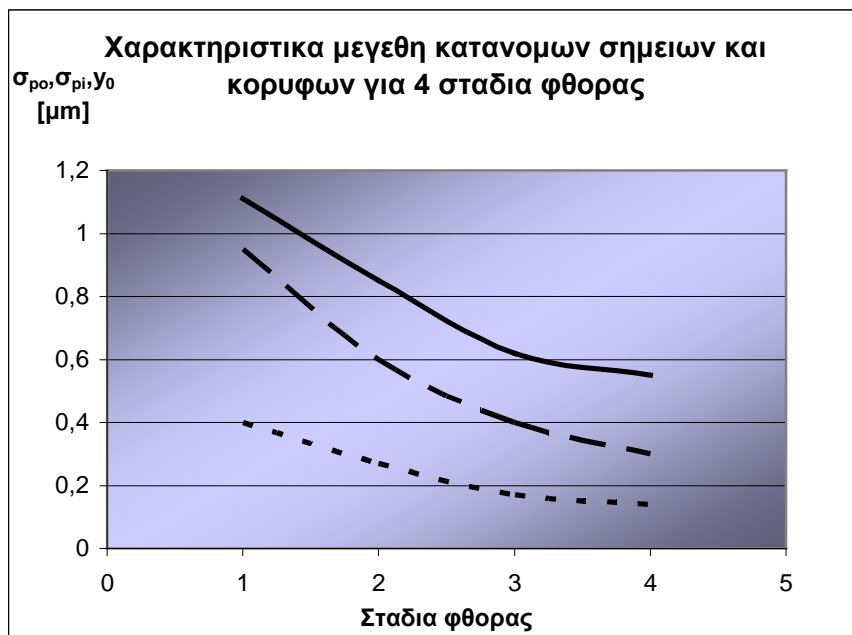


Σχήμα 1.6.6 Λεπτομέρεια επιφάνειας επαφής 1^{ου} δακτυλίου και κυλίνδρου ΜΕΚ. Κατατομή δακτυλίου καμπύλη (συγκλίνουσα + αποκλίνουσα περιοχή) , επιφάνεια κυλίνδρου τραχεία .

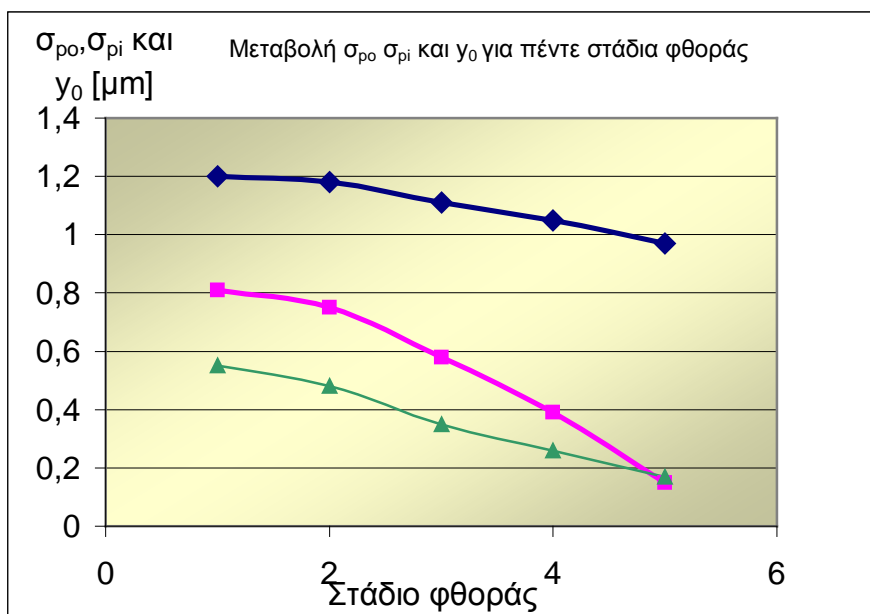


Σχήμα 1.6.7 Επίδραση της πίεσης του κυλίνδρου πάνω στην λειτουργική συμπεριφορά του 1^{ου} δακτυλίου (αύξηση φορτίου επαφής)

Εκτός των προαναφερθέντων δεδομένων που απαιτούνται για την επίλυση του τεχνικού προβλήματος της επαφής τραχειών επιφανειών κυλίνδρου- δακτυλίων δίνονται στη συνέχεια τιμές μεγεθών μικτού χαρακτήρα όπως $\eta\beta\sigma_{pi}$, σ_{pi}/β , καθώς και των μεγεθών σ_{pi} και σ_{po} και y_o που αναφέρονται αντίστοιχα στους πληθυσμούς των κορυφών και των σημείων καθώς και στην διαφορά των μέσων όρων τους



(A)



(B)

Σχήμα 1.6.8: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων $\sigma_{\rho o}$ $\sigma_{\rho i}$ και γ_0 για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς.(α) Μέτρηση σε κύλινδρο MEK Renault. (β) Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.

$\sigma_{\rho o}$: τυπική απόκλιση κατανομής υψομέτρων σημείων

$\sigma_{\rho i}$: τυπική απόκλιση κατανομής υψομέτρων κορυφών λόφων

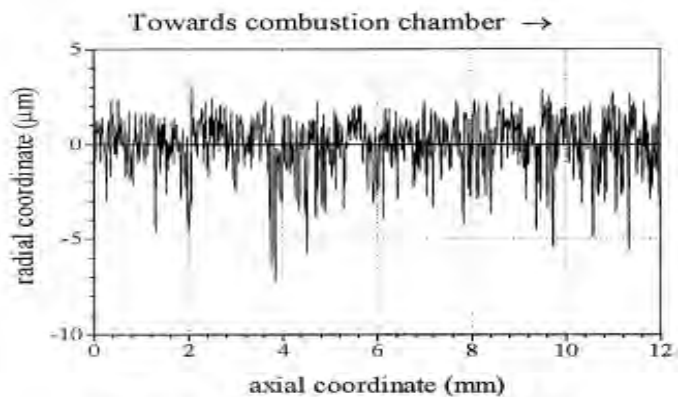
γ_0 : διαφορά μεταξύ μέσων τιμών των δύο προαναφερθέντων πληθυσμών



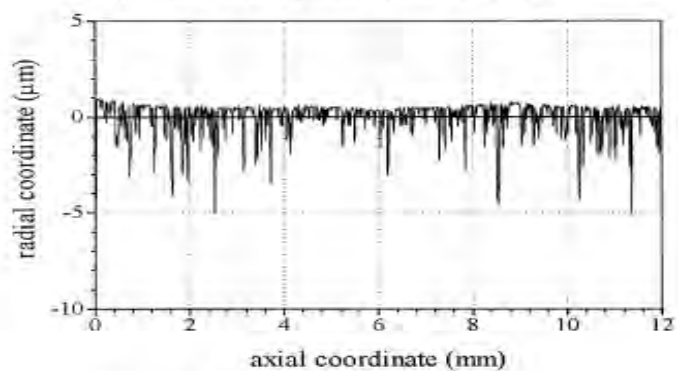
Σχήμα 1.6.9: Δακτύλιοι εμβόλου MEK διαφορετικών κατατομών.



Σχήμα 1.6.10 Αποψη κυλίνδρων τετρακύλινδρης MEK σε σειρά, ορατές οι παράλληλες ελικώσεις που προσδίδουν τα χαρακτηριστικά ανισοτροπίας των επιφανειών των κυλίνδρων.



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



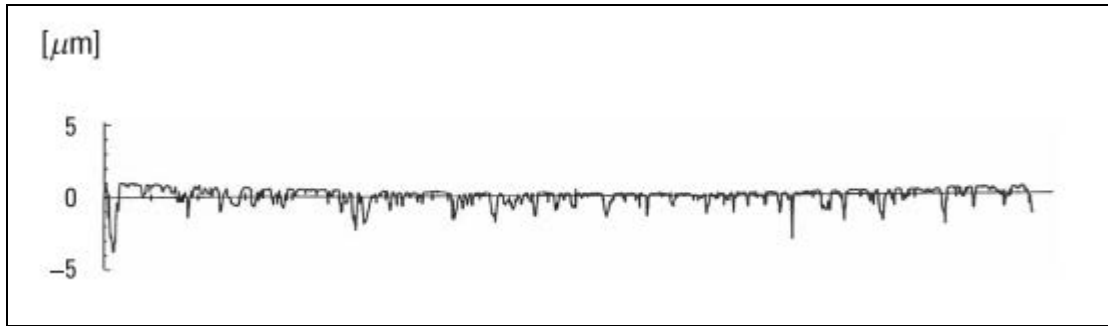
(b) mid-stroke, thrust plane at 120 hours

Fig. 7. Cylinder wall topography variation [21].

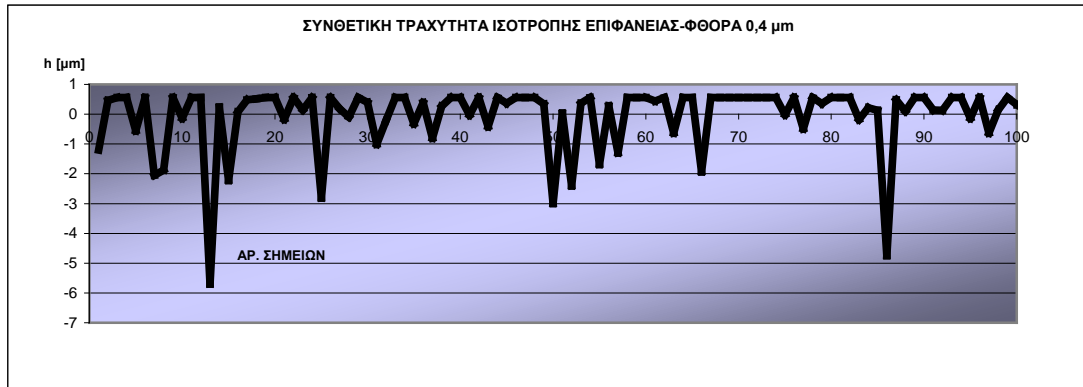
Σχήμα 1.6.11 Αντίγραφα αποτελεσμάτων τραχυμέτρησης (βιβλιογραφία) για επιφάνεια κυλίνδρου α) πριν τη χρήση (0 ώρες λειτουργίας) και β)μετά από 120 ώρες λειτουργίας στο μέσο της διαδρομής του εμβόλου.



Σχήμα 1.6.12 Συνθετική τραχύτητα (προσομοίωση) που λαμβάνεται υπόψη στον υπολογιστικό κώδικα.

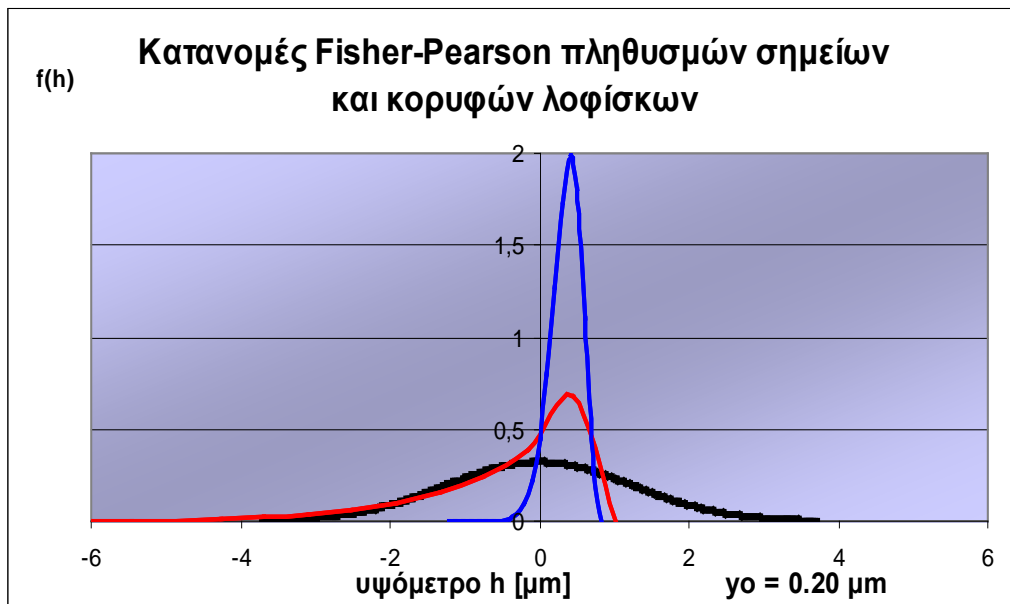


(α) Renault

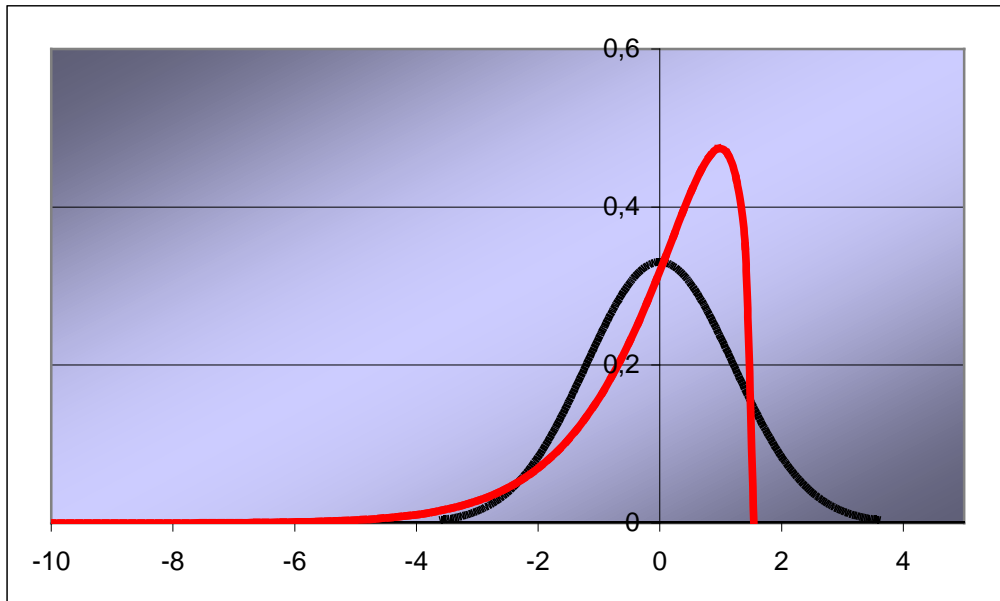


(β) Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Σχήμα 1.6.13 Τραχυμέτρηση “στρωμένης” επιφάνειας κυλίνδρου MEK (α) και (β) συνθετική ισοδύναμη τραχύτητα του υπολογιστικού κώδικα.



Σχήμα 1.6.14 Κατανομές υψομέτρων σημείων (κόκκινη γραμμή) και υψομέτρων κορυφών λοφίσκων (μπλε γραμμή) σε σύγκριση με την κατανομή Gauss που προτείνεται και για τους δυο πληθυσμούς για λόγους απλότητας στην διεθνή βιβλιογραφία.



Σχήμα 1.6.15 Ασύμμετρη κατανομή υψομέτρων σημείων για φθαρμένη επιφάνεια σύμφωνα με το μοντέλο Fisher Pearson (κόκκινη γραμμή) σε σύγκριση με την κατανομή Gauss.

Στα πλαίσια λοιπόν μίας συνεχούς ροής πληροφοριών μεταξύ θεωρίας και πράξης στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται θεωρητικά αποτελέσματα που χαρακτηρίζουν την τριβολογική συμπεριφορά μεμονωμένου δακτυλίου (πρώτος δακτύλιος), κατατομή με ακτίνα καμπυλότητας R . Η συγκεκριμένη γεωμετρία και κινηματική καθώς και οι συνθήκες λίπανσης του κυλίνδρου που επελέγησαν, χαρακτηρίζουν πραγματικό κινητήρα MEK, χωρίς καμία επιπρόσθετη μετατροπή.

1.7 Το θεωρητικό Μοντέλο- επεξηγήσεις, λεπτομέρειες

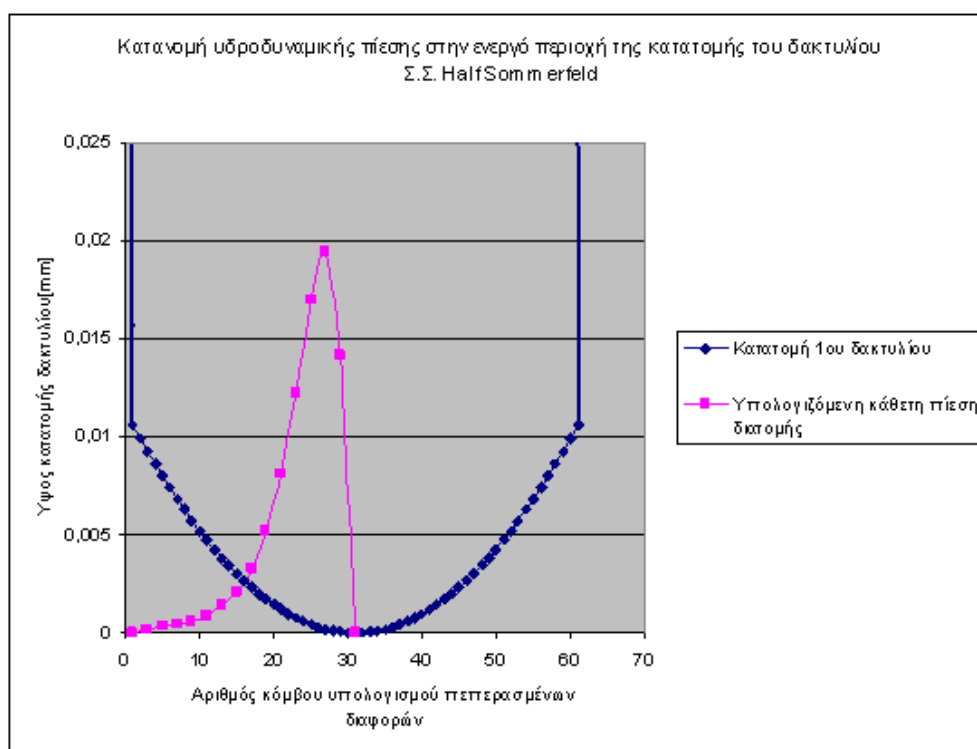
Οι σύγχρονες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της θεωρητικής προσέγγισης της τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλων έχουν ήδη εγκαταλείψει τις κλασικές μεθόδους περί πλήρους και υδροδυναμικής λίπανσης.

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

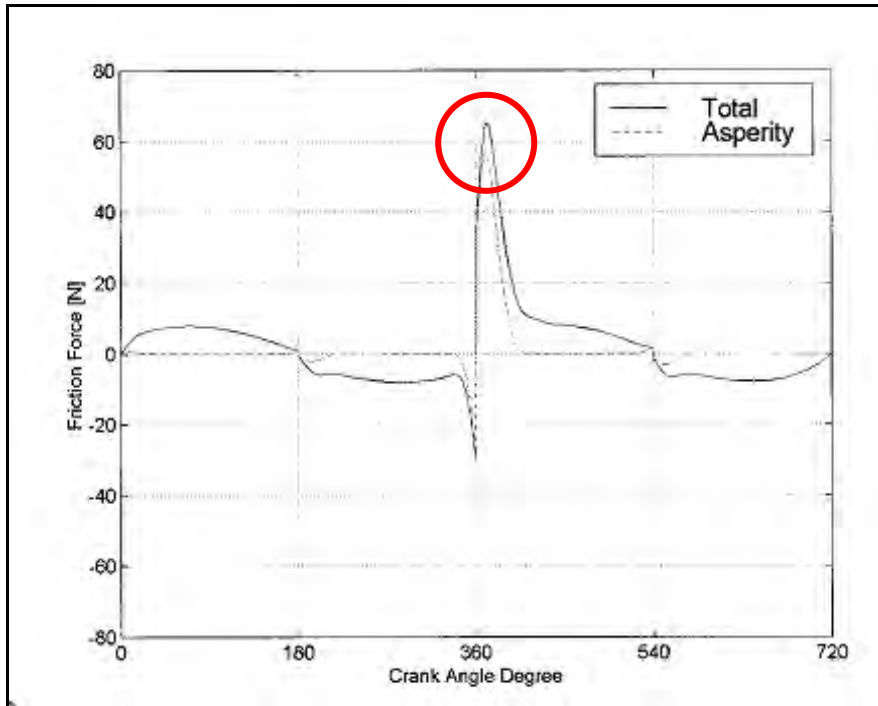
επίδραση του φορτίου αυτού ελαστικά ή πλαστικά (ένα είδος μικρο-ελαστο-υδροδυναμικής συμπεριφοράς).

Επιπλέον στα μοντέλα αυτά λαμβάνεται υπόψη ο ισότροπος ή ανισότροπος χαρακτήρας των τραχειών επιφανειών με αποτέλεσμα την διόρθωση της εξίσωσης του **Reynolds** με χρήση παραμέτρων ροής (παροχής) του λιπαντικού. Τα μοντέλα αυτά θεωρούνται στην πιο απλή μορφή τους ισόθερμα.

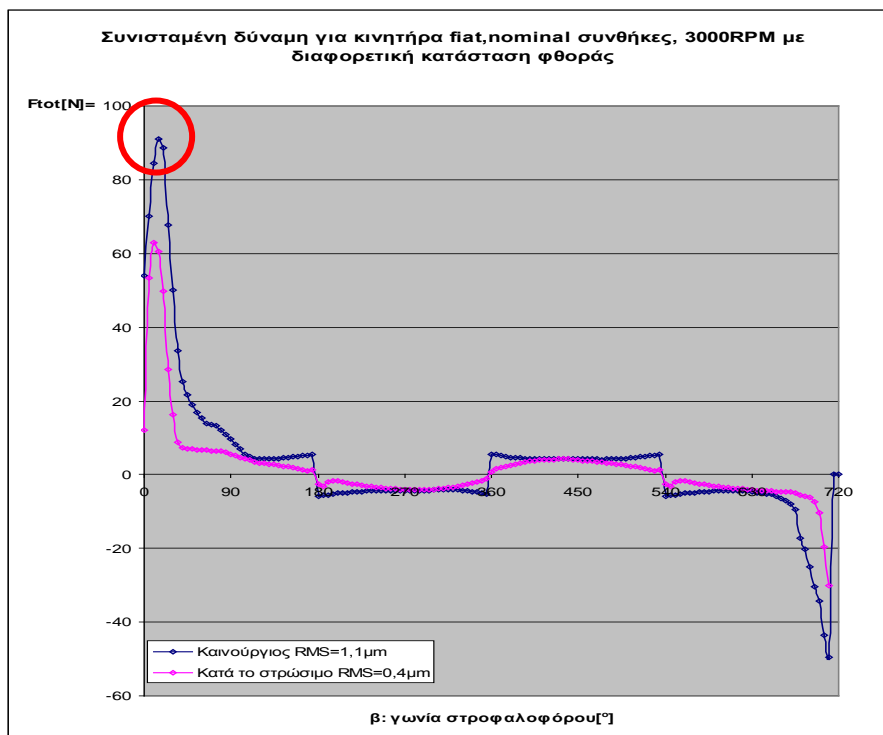
Προχωρημένα μοντέλα προσομοίωσης θεωρούνται σήμερα τα θέρμο-μικρο-ελαστο υδροδυναμικά όπου εκτός των άλλων σε πρώτο βαθμό επιβάλλεται ενεργειακό-θερμικό ισοζύγιο, και αφετέρου γίνεται και υπολογισμός του διαθέσιμου λιπαντικού που απομένει για να λιπάνει τους δακτυλίους που έπονται μέσα σ' ένα πλήρες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



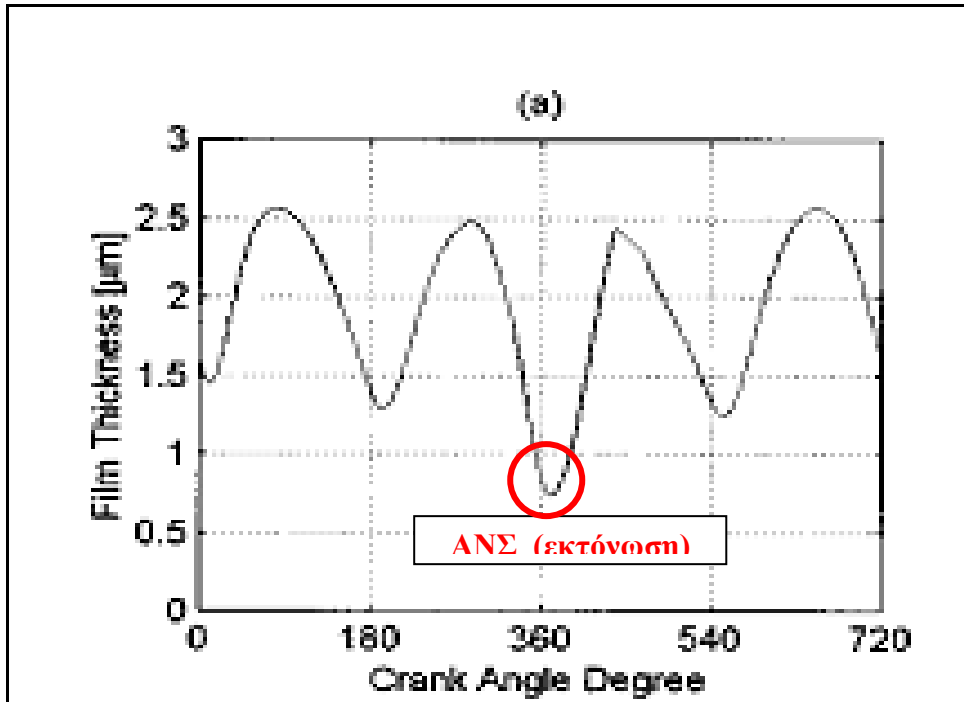
Σχήμα 1.7.1 : Τυπική καμπύλη κατανομής 1^{ου} δακτυλίου με την κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων κατά την κίνηση προς τα αριστερά-από κάτω νεκρό σημείο προς άνω νεκρό σημείο (**αναπτυσσόμενο μοντέλο ΠΘ**).



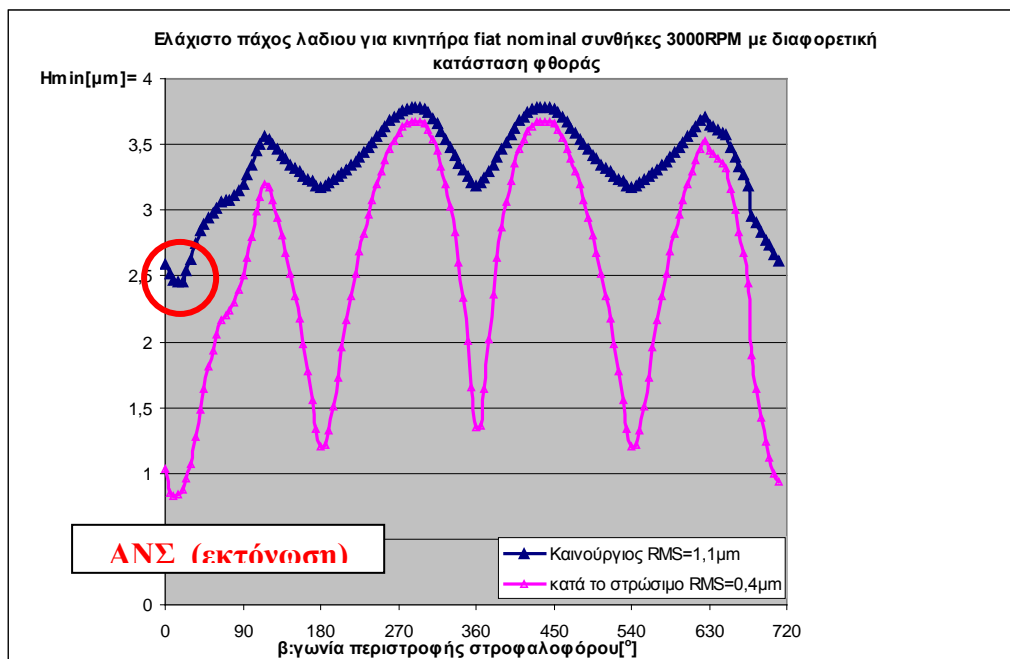
Σχήμα 1.7.2 : Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1^{ου} δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (δεδομένο από σύγχρονη βιβλιογραφία-θεωρητική προσομοίωση)



Σχήμα 1.7.3 : Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1^{ου} δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (Αναπτυσσόμενο μοντέλο ΠΘ)



Σχήμα 1.7.4 : Τυπική συμπεριφορά 1^{ου} δακτυλίου όσον αφορά το αναπτυσσόμενο πάχος λαδιού στη διεπιφάνεια δακτυλίου κυλίνδρων. (Δεδομένο από βιβλιογραφία)



Σχήμα 1.7.5 : Τυπική συμπεριφορά 1^{ου} 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.

Επειδή οι δύο μηχανισμοί παραλαβής φορτίου συνυπάρχουν γενικά, αλλά η απουσία του ενός ή του άλλου είναι σχεδόν αναπόφευκτη, στις περιοχές, όπου ο ένας μηχανισμός παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο ο άλλος λαμβάνεται υπόψη αλλά με μικρότερο συντελεστή βαρύτητας.

Δηλαδή στις περιοχές μικρών ταχυτήτων λαμβάνεται υπόψη το λεπτομερές μοντέλο γνωστό σαν μοντέλο του **Greenwood**, ενώ δε θεωρείται σκόπιμο να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η υδροδυναμική συνιστώσα η οποία παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στις μεγάλες ταχύτητες όπου τα πάχη της λιπαντικής μεμβράνης είναι σημαντικά, άρα η τραχύτητα μπορεί να αγνοηθεί στις περιπτώσεις αυτές.

Η σημασία της τραχύτητας και ειδικότερα η σημασία της ανισοτροπίας της που εσκεμμένα παραλείπεται όπως προαναφέρθηκε στις περιοχές χαμηλών ταχυτήτων, ερμηνεύεται στη συνέχεια.

Η απλουστευτική υπόθεση στο μοντέλο που υιοθετήθηκε ερμηνεύεται με τη αρχική ανισοτροπία της τραχύτητας του κυλίνδρου η οποία είναι εγκάρσια ($\text{transversal } 1/9 < \gamma < 1/3$) και δεν παρουσιάζει ουσιώδης διαφορές για τις τιμές αυτές. Ενδεχομένως σε άλλης μορφής επιφάνειες με ανισοτροπία διαμήκη ($\text{longitudinal } 1 < \gamma < 9$) οι διαφορές αυτές είναι σημαντικές και κρίνεται απαραίτητο να καταγραφούν με τη χρήση πληρέστερης προσέγγισης

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) (**η**)
- **Μέση ακτίνα καμπυλότητας του πληθυσμού των κορυφών των λοφίσκων** (**β**)

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. Σημειωτέων, 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 MEK εφαρμόζεται σε διαφορετικές γεωμετρικές 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 τ_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.

Η βασικότερη των υποθέσεων στην περίπτωση της θεωρητικής προσομοίωσης συνδέεται με την κυλινδρική συμμετρία που αποδεχόμαστε ότι χαρακτηρίζει το υπό μελέτη σύστημα. Δηλαδή σε πρώτη προσέγγιση δεχόμαστε ότι το διάκενο που εμφανίζει ο κάθε δακτύλιος είναι αμελητέου μεγέθους και δεν επηρεάζει τη λειτουργία του δακτυλίου, υπόθεση που δεν θεωρείται αρκούντως ρεαλιστική.

Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας εξάγεται το συμπέρασμα ότι:

- Δεν μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι υπάρχει βέλτιστη μέθοδος για την αξιολόγηση – αποτίμηση και πλήρη καθορισμό των τριβών στο σύστημα εμβόλου – δακτυλίων
- Κάθε μέθοδος είναι σε μεγάλο βαθμό συνδεδεμένη στενά με τον αντίστοιχο κινητήρα
- Εξαρτάται από μια ομάδα παραμέτρων που δεν έχουν ακόμη μέχρι σήμερα πλήρως καθοριστεί και μελετηθεί.

Συνήθως θεωρούμε ότι στη γενική ανάλυση του προβλήματος των απωλειών λόγω τριβής, εμφανίζονται οι παρακάτω βασικοί άξονες και οι επιδράσεις τους. Ειδικότερα αναφέρουμε την επίδραση του λειτουργικού περιβάλλοντος, των λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα, παραμέτρων που σχετίζονται με το έμβολο το χιτώνιο και τους δακτυλίους καθώς και την επίδραση της εξέλιξης των τιμών τους αυτών μέσα στο πεδίο του χρόνου.

Η μοντελοποίηση της τριβής δακτυλίου-χιτωνίου, που παρουσιάζεται στη συνέχεια όπως προαναφέρθηκε, βασίζεται στην ιδέα του Rhode [67] 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 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.

Παράλληλα ο Elrod και μετέπειτα ο Trip έχουν προτείνει μία θεωρία τοπικών μεταβολών προτείνοντας την εισαγωγή σφαλμάτων, που οφείλονται στην τραχύτητα των επιφανειών, μέσα από την εφαρμογή μετασχηματισμών Fourier. Εντούτοις, τα αποτελέσματα αυτών των θεωριών συγκλίνουν, όπως είναι προφανές, είτε για τιμές της τραχύτητας πολύ μικρές, είτε για σημαντικές τιμές του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.

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 Trip 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.

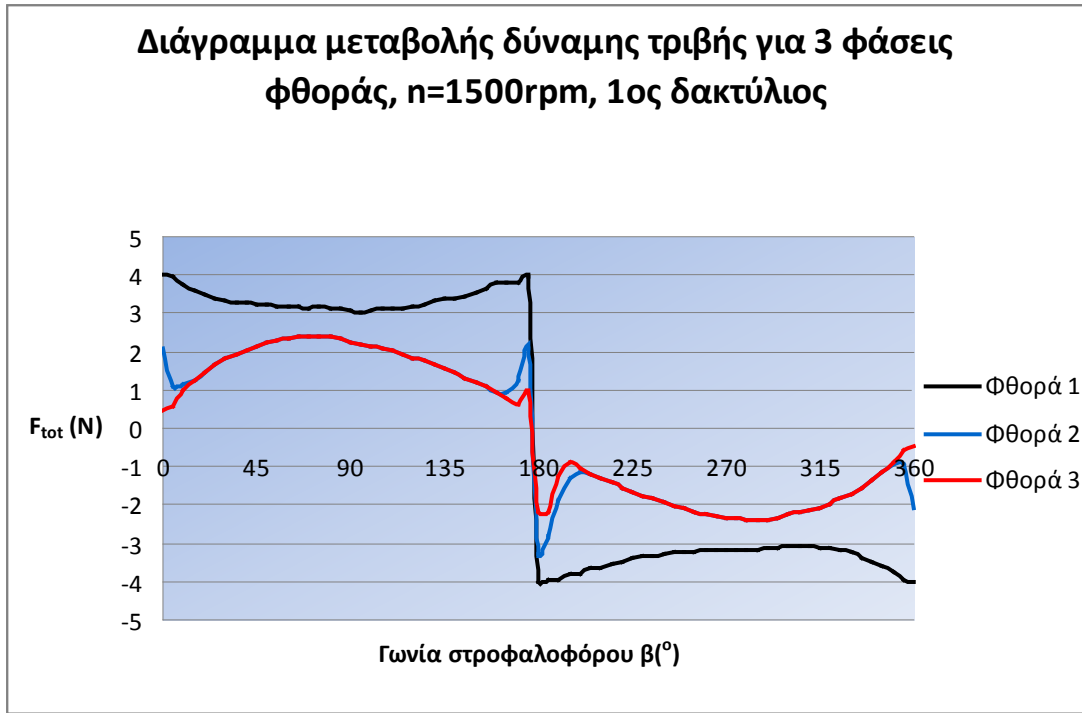
Οι τιμές αυτές θεωρούνται τυχαίες και εργοδεικτικές. Στα σημεία των επαφών η παροχή μηδενίζεται, ενώ παράλληλα θεωρούμε ότι στις περιοχές αυτές υπάρχει ένα επιφανειακό φιλμ λιπαντικού $\pi\chi$ του τύπου μονοστρωματικό, δηλαδή σε μοριακά μορφή.

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.

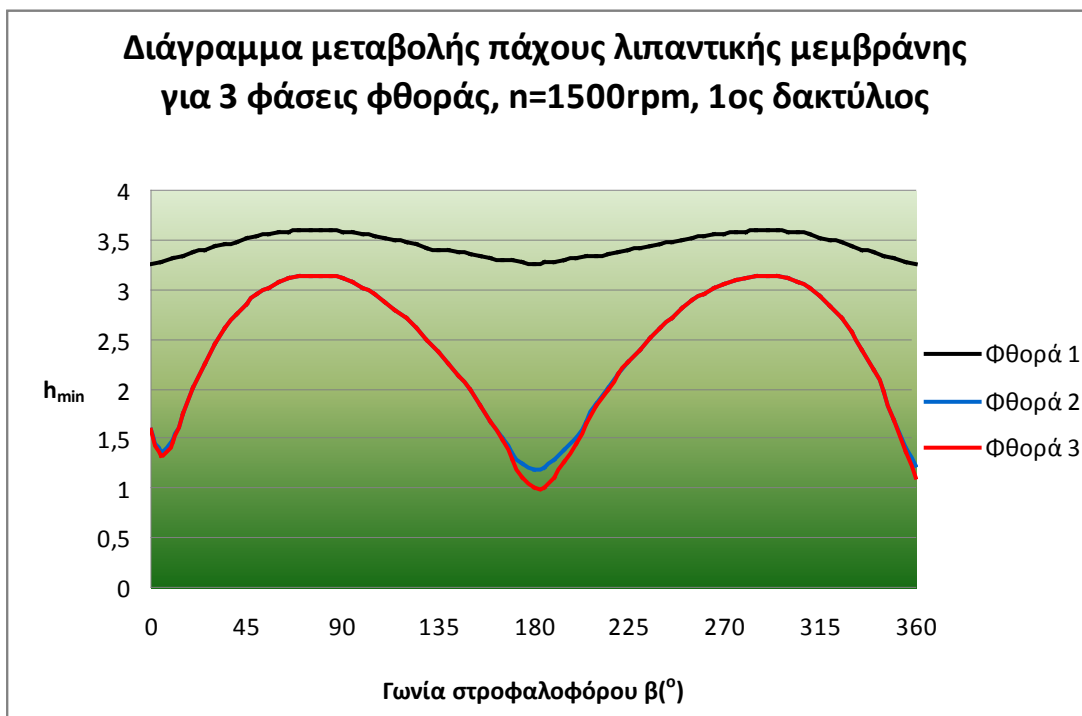
Στο συγκεκριμένο μοντέλο παίρνουμε τις παραδοχές:

1. Το λιπαντικό μέσο είναι συνεχές.
2. Το λιπαντικό ακολουθεί το νόμο του Νεύτωνα ,παρουσιάζει ισότροπη συμπεριφορά και είναι ασυμπίεστο.
3. Η ροή είναι στρωτή (Υπόθεση που δικαιολογείται σχεδόν πάντοτε).
4. Δεν υπάρχει ολίσθηση στην επαφή λιπαντικού μεταλλικής επιφάνειας.
5. Το βάρος της ποσότητας του λιπαντικού είναι αμελητέο όπως επίσης και τα αδρανειακά φαινόμενα (Αυτή η υπόθεση δικαιολογείται από την πολύ μικρή τομή του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης).
6. Το λιπαντικό θεωρείται ισόθερμο και η θερμοκρασία του συμπίπτει με τη θερμοκρασία που μετράται κατά τη είσοδο του λιπαντικού στην είσοδο των εδράνων του στροφαλοφόρου.
7. Η υδροδυναμική πίεση δεν μεταβάλλεται κατά την ακτινική κατεύθυνση δηλαδή μέσα στο πάχος της λιπαντικής μεμβράνης.
8. Ο δακτύλιος λιπαίνεται πλήρως σε μία περιοχή σταθερού πλάτους κατά τη διαδρομή (γεγονός που δεν επαληθεύεται στην πράξη).
9. Υπάρχει παραλληλότητα μεταξύ των αξόνων του κυλίνδρου και του δακτυλίου και το διάκενο του δακτυλίου παραμένει σταθερό κατά τη διαδρομή.
10. Ο δακτύλιος είναι παραμορφώσιμος και ακολουθεί το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης.

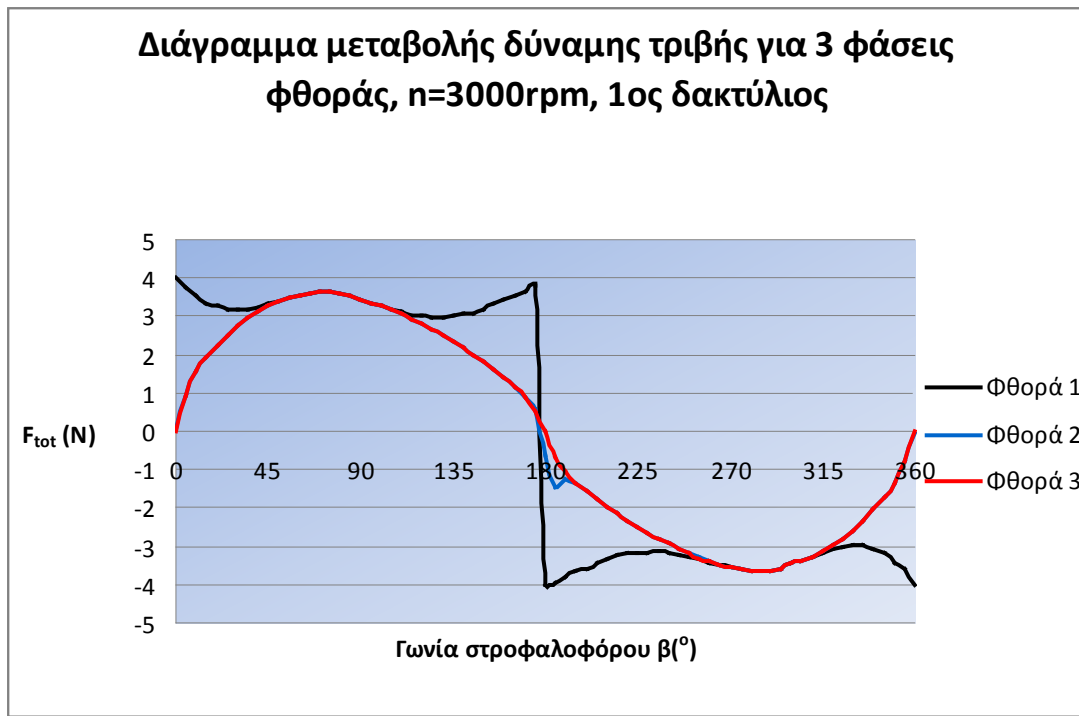
Στη συνέχεια δίνονται διαγράμματα μεταβολής πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνολικής δύναμης τριβής για τον πρώτο δακτύλιο κυκλικής κατατομής ακτίνας $R=36\text{mm}$ για διάφορες συνθήκες λειτουργίας με μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής (N) από 1500 rpm έως 6000 rpm , για μεταβαλλόμενο ιξώδες λιπαντικού (η) από 6 mPas έως 10 mPas και για μεταβαλλόμενη πίεση (p_{tar}) από 160kPa έως 240 kPa και για τρεις διαφορετικές φάσεις φθοράς.



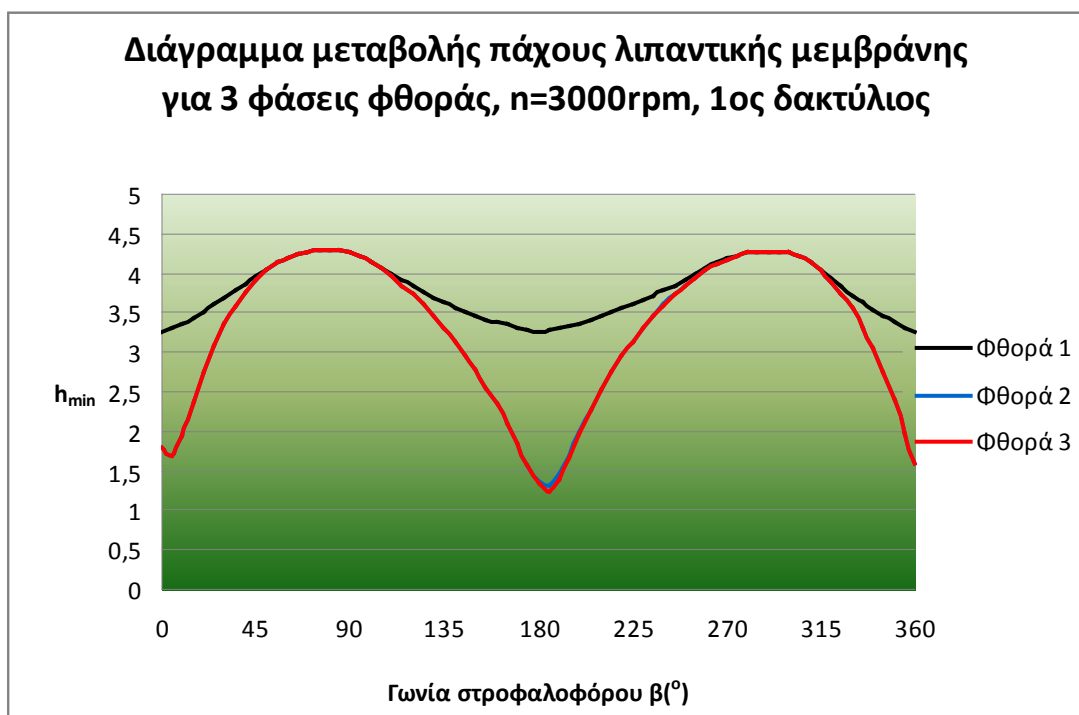
Σχήμα 1.7.6 Διάγραμμα μεταβολής δύναμης τριβής για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για **$N=1500\text{ rpm}$** , $p_{\text{tar}}=200\text{ kPa}$, $R=36\text{mm}$ και $\eta=8\text{ mPas}$



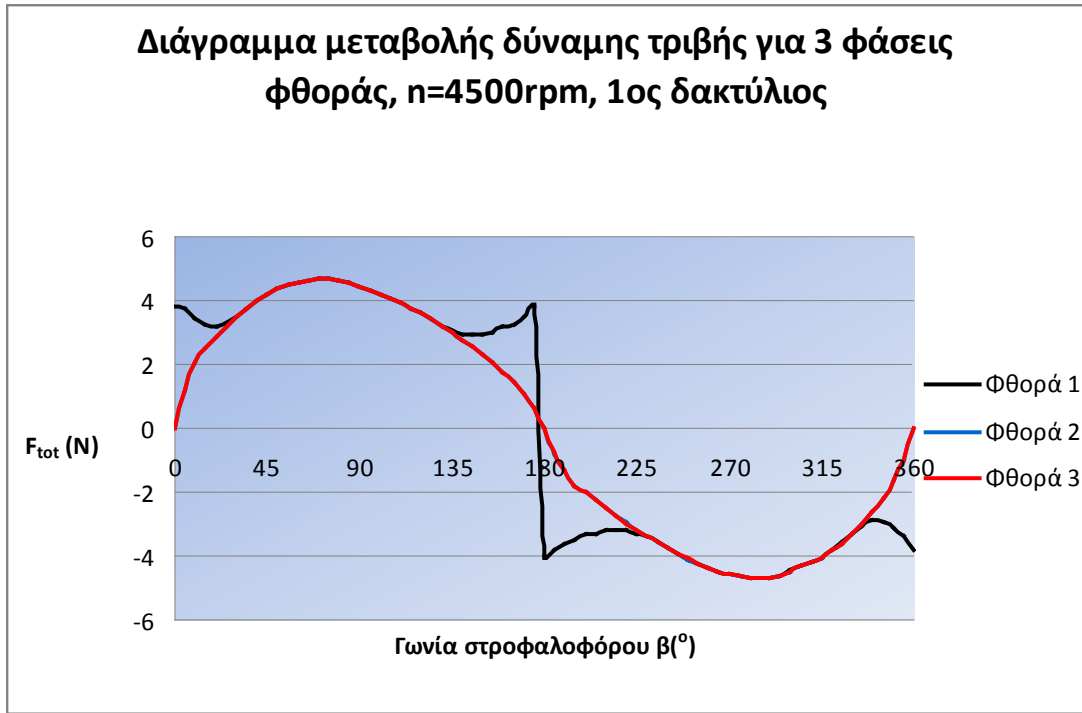
Σχήμα 1.7.7 Διάγραμμα μεταβολής πάχους λιπαντικής μεμβράνης για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για **$N=1500\text{ rpm}$** , $p_{\text{tar}}=200\text{ kPa}$, $R=36\text{mm}$ και $\eta=8\text{ mPas}$



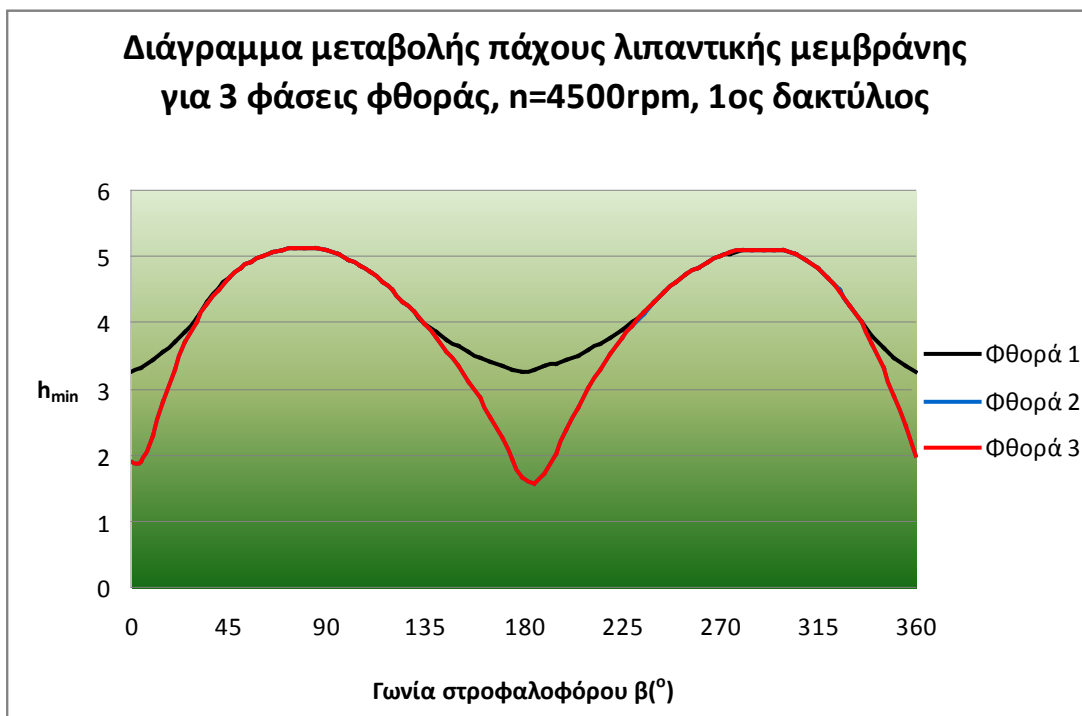
Σχήμα 1.7.8 Διάγραμμα μεταβολής δύναμης τριβής για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για $N=3000 \text{ rpm}$, $p_{\text{tar}}=200 \text{ kPa}$, $R= 36\text{mm}$ και $\eta=8 \text{ mPas}$



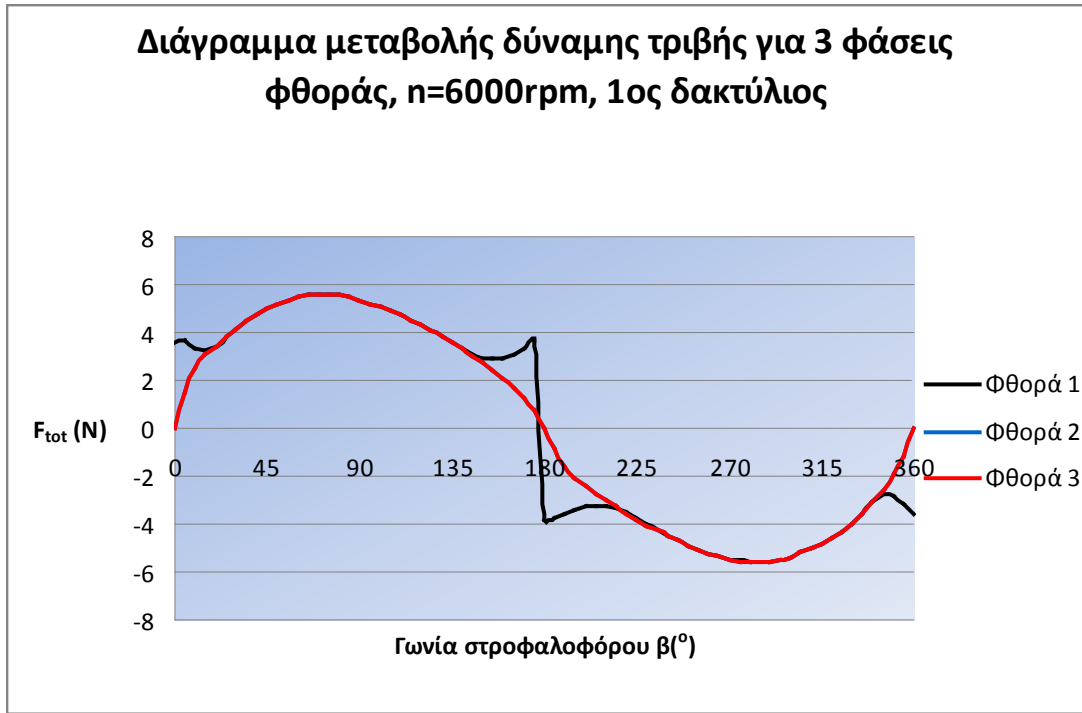
Σχήμα 1.7.9 Διάγραμμα μεταβολής πάχους λιπαντικής μεμβράνης για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για $N=3000 \text{ rpm}$, $p_{\text{tar}}=200 \text{ kPa}$, $R= 36\text{mm}$ και $\eta=8 \text{ mPas}$



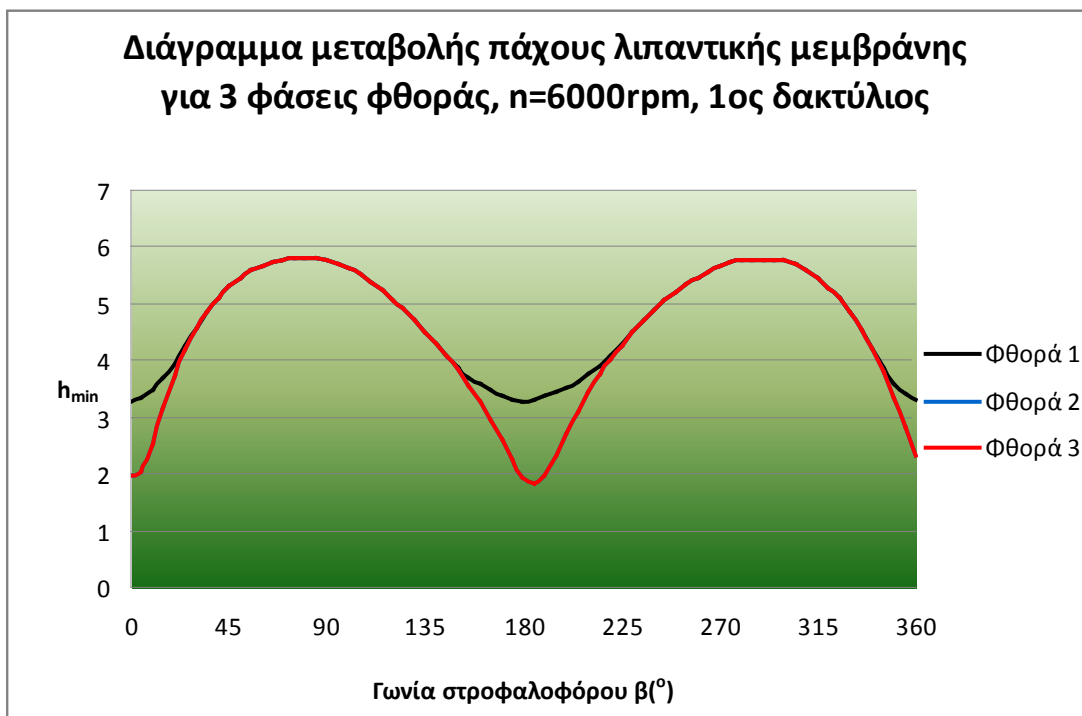
Σχήμα1.7.10 Διάγραμμα μεταβολής δύναμης τριβής για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για **$N=4500\text{ rpm}$** , $p_{\text{tar}}=200\text{ kPa}$, $R=36\text{mm}$ και $\eta=8\text{ mPas}$



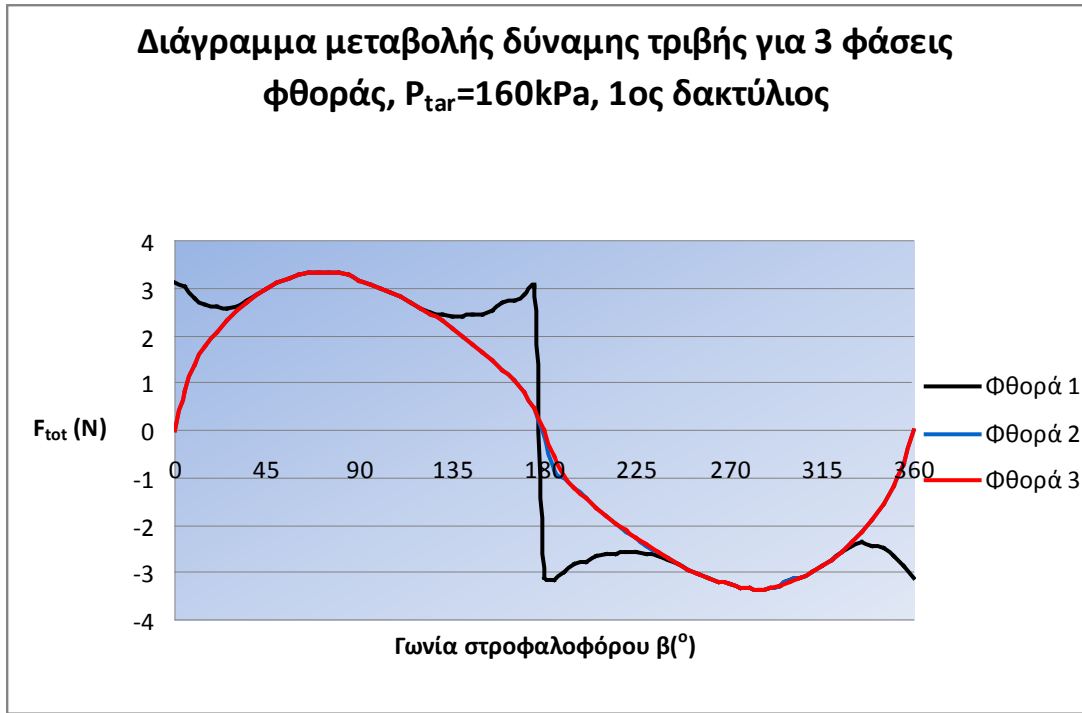
Σχήμα1.7.11 Διάγραμμα μεταβολής πάχους λιπαντικής μεμβράνης για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για **$N=4500\text{ rpm}$** , $p_{\text{tar}}=200\text{ kPa}$, $R=36\text{mm}$ και $\eta=8\text{ mPas}$



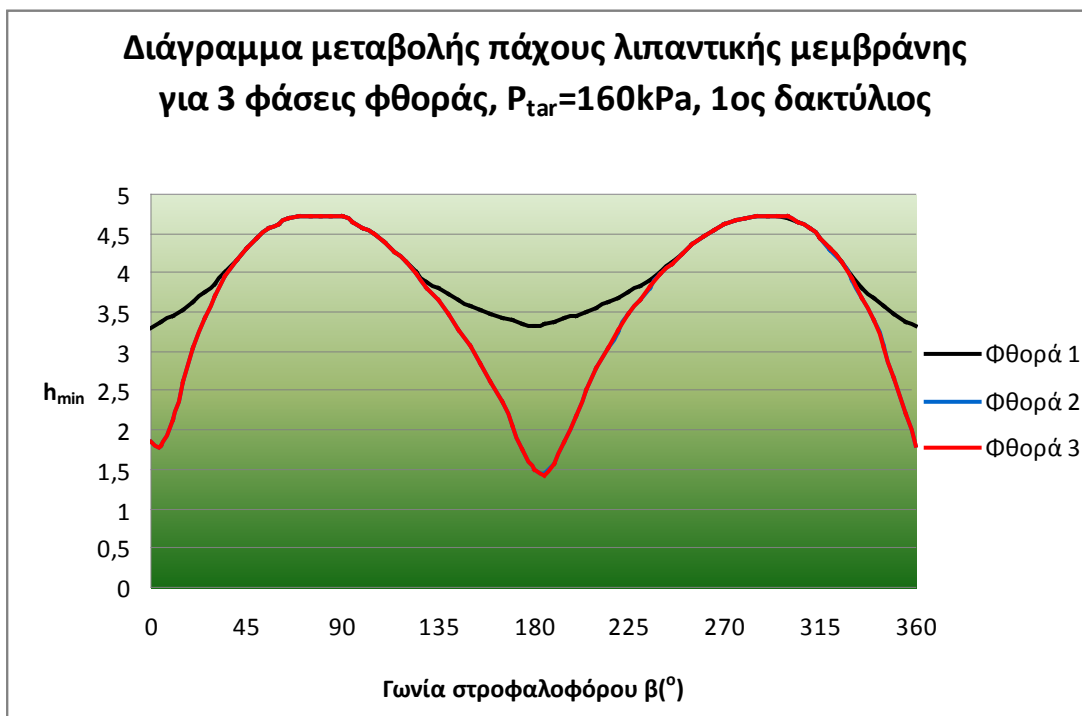
Σχήμα 1.7.12 Διάγραμμα μεταβολής δύναμης τριβής για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για **$N=6000 \text{ rpm}$** , $p_{\text{tar}}=200 \text{ kPa}$, $R= 36\text{mm}$ και $\eta=8 \text{ mPas}$



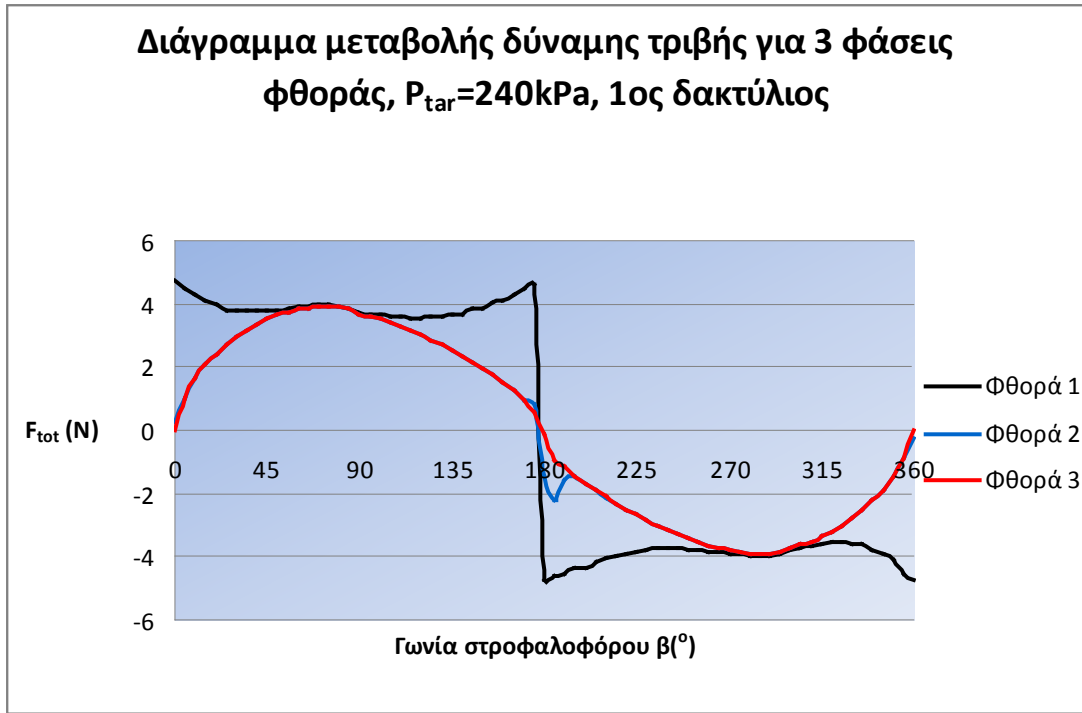
Σχήμα 1.7.13 Διάγραμμα μεταβολής πάχους λιπαντικής μεμβράνης για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για **$N=6000 \text{ rpm}$** , $p_{\text{tar}}=200 \text{ kPa}$, $R= 36\text{mm}$ και $\eta=8 \text{ mPas}$



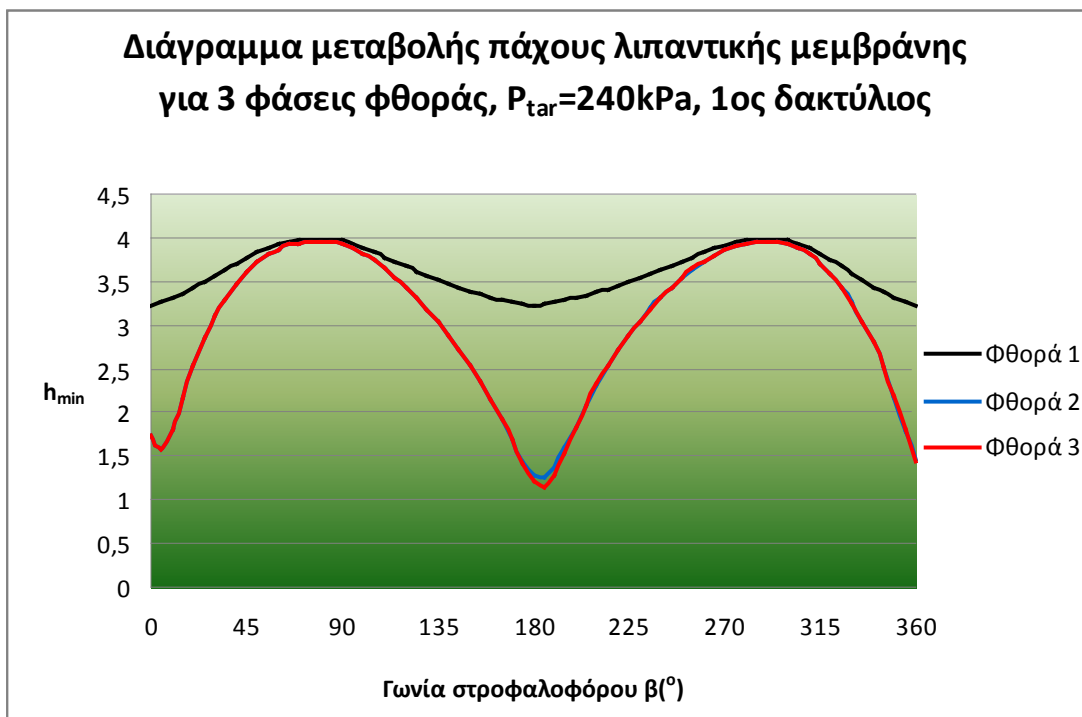
Σχήμα 1.7.14 Διάγραμμα μεταβολής δύναμης τριβής για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για $N=3000\text{ rpm}$, $p_{tar}=160\text{ kPa}$, $R=36\text{ mm}$ και $\eta=8\text{ mPas}$



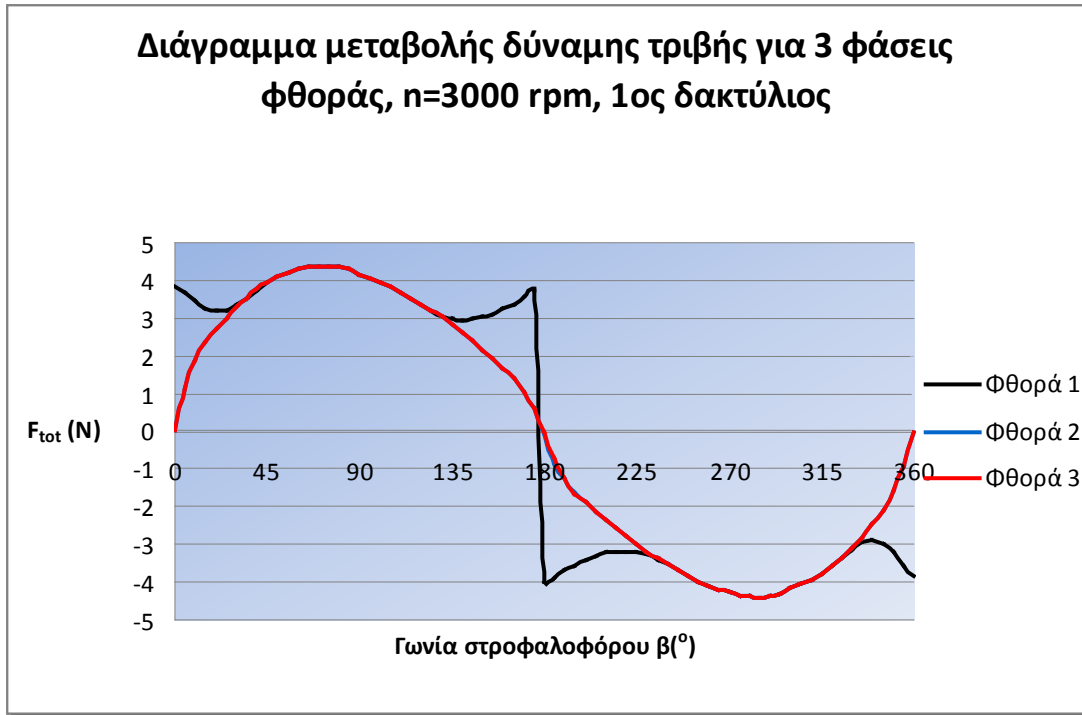
Σχήμα 1.7.15 Διάγραμμα μεταβολής πάχους λιπαντικής μεμβράνης για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για $N=3000\text{ rpm}$, $p_{tar}=160\text{ kPa}$, $R=36\text{ mm}$ και $\eta=8\text{ mPas}$



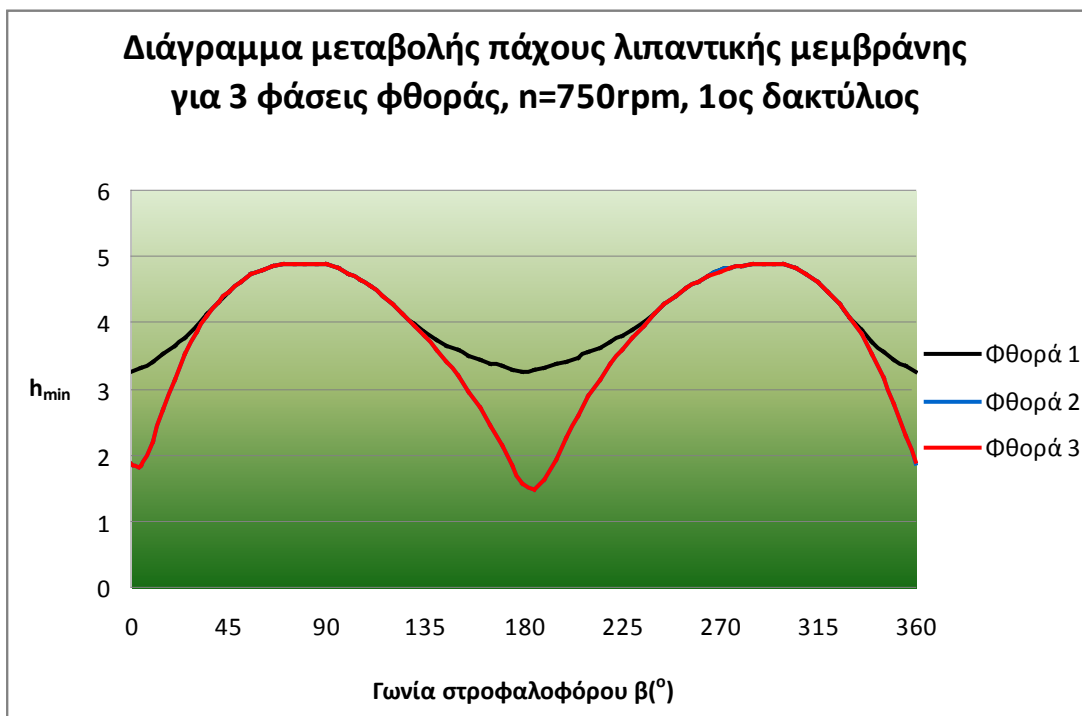
Σχήμα 1.7.16 Διάγραμμα μεταβολής δύναμης τριβής για 3 στάδια φθοράς. $1^{ος}$ δακτύλιος για $N=3000$ rpm , $p_{tar}=240$ kPa , $R= 36$ mm και $\eta=8$ mPas



Σχήμα 1.7.17 Διάγραμμα μεταβολής πάχους λιπαντικής μεμβράνης για 3 στάδια φθοράς. $1^{ος}$ δακτύλιος για $N=3000$ rpm , $p_{tar}=240$ kPa , $R= 36$ mm και $\eta=8$ mPas



Σχήμα 1.7.18 Διάγραμμα μεταβολής δύναμης τριβής για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για $N=3000$ rpm , $p_{\text{tar}}=200$ kPa , $R=36$ mm και $\eta=10$ mPas



Σχήμα 1.7.19 Διάγραμμα μεταβολής πάχους λιπαντικής μεμβράνης για 3 στάδια φθοράς. $1^{\text{ος}}$ δακτύλιος για $N=3000$ rpm , $p_{\text{tar}}=200$ kPa , $R=36$ mm και $\eta=10$ mPas

Οι υπολογισμοί που ελήφθησαν υπόψη για την δημιουργία καμπυλών τύπου Stribeck έγιναν για 3 διαφορετικές καταστάσεις μικρογεωμετρίας της επιφάνειας του κυλίνδρου όπως φαίνεται στα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Η πρώτη κατάσταση αναφέρεται σε δεδομένα που σχετίζονται με την αρχική κατάσταση της μικρογεωμετρίας του κυλίνδρου (πριν το στρώσιμο) , η δεύτερη αντιστοιχεί σε μικρογεωμετρικά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν μετά το στρώσιμο πάνω σε κύλινδρο M.E.K. και τέλος η τρίτη κατάσταση αντιστοιχεί σε φθαρμένο κύλινδρο ο οποίος υπέστη φθορά μετά από 150 ώρες λειτουργίας περίπου. Τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται υπόψη στον πηγαίο κώδικα OILFILM με βάση τον οποίο υπολογίστηκε το πάχος λιπαντικής μεμβράνης και η δύναμη τριβής είναι:

σ (σ_{po}) : τυπική απόκλιση του πληθυσμού των υψομέτρων όλων των σημείων της κατατομής

σ' (σ_{pi}) : τυπική απόκλιση του πληθυσμού των υψομέτρων των κορυφών των λόφων

η : πυκνότητα των λοφίσκων (αριθμός λοφίσκων ανά μονάδα επιφάνειας π.χ. ανά mm^2)

β : μέσος όρος ακτίνας καμπυλότητας των κορυφών των λόφων

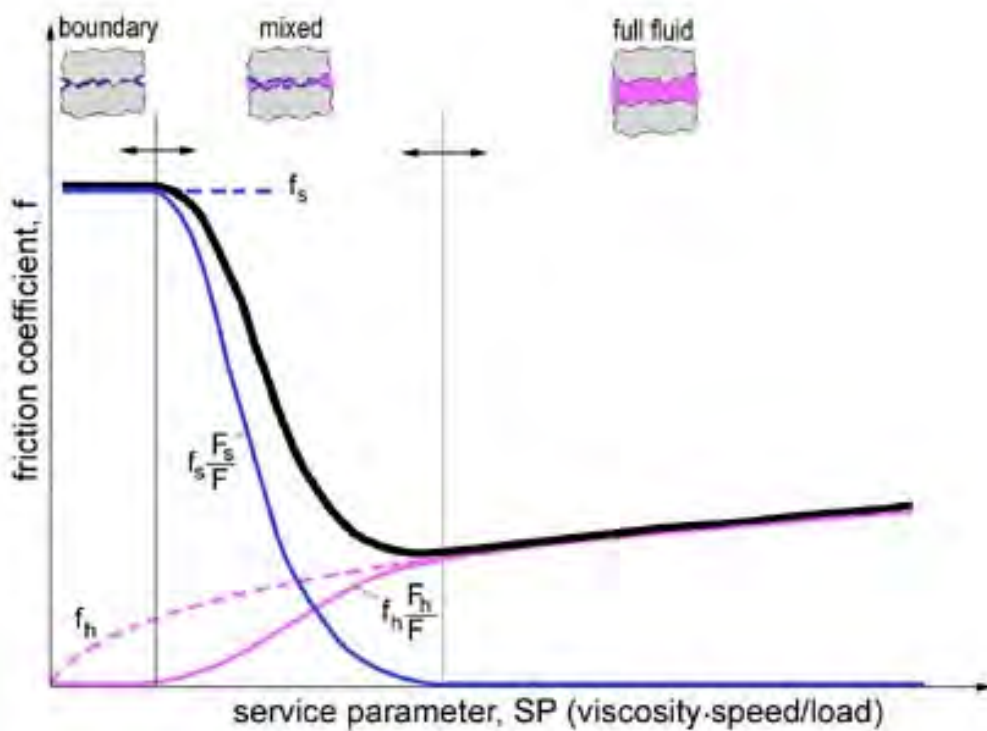
Οι τιμές που ενδιαφέρουν στην περίπτωση αυτή είναι : **σ , σ' , $\eta\beta\sigma'$ και σ'/β**

Οι τρεις διαφορετικές αυτές καταστάσεις της μικρογεωμετρίας – φθοράς διαφοροποιούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων στα νεκρά σημεία.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα αποφασίστηκε να μελετήσουμε της καμπύλες (τύπου Stribeck) της δύναμης τριβής για την πρώτη κατάσταση και για το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης για τη δεύτερη κατάσταση. Οι καμπύλες αυτές που θα προκύψουν (τύπου Stribeck) θα δημιουργήσουν τη βάση για την ταχεία μέθοδο προσέγγισης των λειτουργικών χαρακτηριστικών του πρώτου δακτυλίου στο δεδομένο πεδίο λειτουργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μέθοδος ταχείας προσέγγισης τριβολογικών
χαρακτηριστικών δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ
βασισμένη σε καμπύλες τύπου Stribeck



2.1 Δεδομένα τεχνικού προβλήματος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για δακτυλίους εμβόλων Μ.Ε.Κ. και μάλιστα για τον πρώτο δακτύλιο (της φωτιάς) συγκεκριμένης γεωμετρίας με μεταβαλλόμενες τιμές των εξής παραμέτρων:

- Συχνότητα περιστροφής, μεταβολή από 1500 έως 6000 rpm (1500, 3000, 4500, 6000 rpm)
- Πίεση, μεταβολή από 160 έως 240 kPa (160, 200, 240 kPa)
- Ιξώδες λιπαντικής μεμβράνης, μεταβολή από 6 έως 10 mPas (6, 8, 10 mPas)

Η γεωμετρία του κινητήρα βάση της οποίας έχει κατασκευαστεί και πειραματικός προσομοιωτής τριβολογικής συμπεριφοράς του συστήματος εμβόλου – δακτυλίου Μ.Ε.Κ. έχει ως εξής:

- Διάμετρος εμβόλου: 70 mm
- Πάχος (μήκος) δακτυλίων : 1,15 mm (για 1^ο και 2^ο δακτύλιο)
- Ελαστική πίεση επαφής : 200000 Pa (για 1^ο και 2^ο δακτύλιο)
- Διαδρομή εμβόλου : 71,95 mm
- Μήκος διωστήρα : 111,45 mm
- Όγκος κυλίνδρου : 277 cm³
- Συνολικός κυβισμός : 1108cm³ ή 1,1lt

2.2 Περιγραφή μεθοδολογίας

Το ζητούμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η εξεύρεση μιας ταχείας μεθόδου προσέγγισης των λειτουργικών χαρακτηριστικών ελατηριωτού δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ. με βάση μια εκ των προτέρων χαρτογράφηση που έγινε με την χρήση υπολογιστικού κώδικα (oilfilm) ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο **Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας** στα πλαίσια της θεωρητικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς των προαναφερθέντων δακτυλίων.

Ο συγκεκριμένος κώδικας βασίζεται σε σύγχρονα μοντέλα λιπαινόμενης επαφής και θεωρείται λεπτομερής αλλά και πολύπλοκος και χρονοβόρος σε μεγάλο βαθμό από τους χρήστες -μελετητές. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται παράλληλα μέθοδοι ταχείας προσέγγισης των λειτουργικών χαρακτηριστικών δακτυλίων διαφορετικού τύπου για κινητήρα με ή χωρίς φορτίο, για επιφάνειες λείες η τραχείες και για λίπανση είτε με λιπαντικό έλαιο σε αφθονία είτε σε συνθήκες μερικής διαβροχής του δακτυλίου.

Έτσι στόχος είναι η χρήση ενός προγράμματος τύπου Excel για την ταχεία πρόβλεψη μεγεθών όπως το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) μεταξύ δακτυλίου – χιτωνίου και η συνολική αναπτυσσόμενη δύναμη τριβής (f_{tot}). Στη γενική της μορφή η μέθοδος που ακολουθήθηκε δίνει αποτελέσματα αρκετά υψηλής πιστότητας για λειτουργία του κινητήρα με ή χωρίς φορτίο (κατάσταση λειτουργίας με πίεση διάφορη του μηδενός στο κύλινδρο – κατάσταση “motoring”, δηλαδή κύλινδρος που λειτουργεί μόνο με συμπίεση, χωρίς εκτόνωση – κατάσταση λειτουργίας ανοιχτού κυλίνδρου $P=P_{atm}$).

Τα αποτελέσματα του κώδικα για τον συγκεκριμένο κινητήρα βασίστηκαν σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας $N=3000$ rpm, $p_{tar}=200$ kPa, $\eta=7,39$ mPas και ακτίνα καμπυλότητας δακτυλίου ρεαλιστικής τιμής $R=36$ mm. Έγιναν συνολικά 3 χαρτογραφήσεις:

1. Για μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής (N [rpm]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων
2. Για μεταβαλλόμενη πίεση του δακτυλίου (p_{tar} [kPa]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων
3. Για μεταβαλλόμενο ιξώδες λιπαντικού (η [mPas]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων

Στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε θεωρήσαμε λειτουργία ανοιχτού κυλίνδρου δηλαδή χωρίς την πίεση που δημιουργούν τα αέρια της καύσης και με χρήση των δεδομένων του υπολογιστικού κώδικα (oilfilm) έγινε προσπάθεια υπολογισμού των λειτουργικών χαρακτηριστικών του δακτυλίου. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε θεωρητικά το πάχος λιπαντικής μεμβράνης καθώς και η συνολική δύναμη τριβής.

Για τον προσδιορισμό της συνολικής δύναμης τριβής f_{tot} έγινε προσπάθεια ανάπλασης καμπυλών τύπου Stribeck (για διάφορες συνθήκες λειτουργίας) κατά την

κάθοδο του εμβόλου (διαδρομή από ΑΝΣ 0° προς ΚΝΣ 180°) που δίνουν τη μεταβολή του συντελεστή τριβής $\mu = \frac{f_{tot}}{w}$ (κατακόρυφος άξονας) όπου:

f_{tot} : η συνολική δύναμη τριβής [N] και

w : το φορτίο επαφής [N] $w = p_{tar} \times A$ όπου

P_{tar} : η πίεση του ελαστικού δακτυλίου [N/ m²] και

A : η επιφάνεια επαφής του δακτυλίου με το χιτώνιο [m²]

Στις καμπύλες αυτές παράμετρος στον οριζόντιο άξονα λαμβάνεται το μέγεθος $\frac{\eta \times U}{w}$

όπου:

η : το δυναμικό ή απόλυτο ιξώδες του λιπαντικού [mPas]

U : η ταχύτητα ολίσθησης [m/s] και

w : το φορτίο επαφής [N]

Εξάγοντας τις παραπάνω καμπύλες του Stribeck για διάφορες συνθήκες λειτουργίας επιχειρούμε τον εμπλουτισμό του πλέγματος καμπυλών αυτής της μορφής όπως θα δειχθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου. Εν συνεχεία αφού ολοκληρωθεί ο εμπλουτισμός ενός συνολικού διαγράμματος που εμπεριέχει δεδομένα για κάθε συνθήκη λειτουργίας για τον συντελεστή τριβής (μ) συναρτήσει του μεγέθους $\frac{\eta \times U}{w}$ εξάγουμε (με τη βοήθεια Excel) την εξίσωση του πολυωνύμου της γραμμής τάσης των καμπυλών αυτών. Έτσι οδηγούμαστε σε μία και μόνο καμπύλη που εμπεριέχει όλα τα δεδομένα μας και από αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική δύναμη τριβής για οποιαδήποτε σημείο λειτουργίας επιθυμούμε.

Όπως θα παρατηρηθεί και στην επόμενη παράγραφο εμφανίζεται μια υστέρηση στη συμπεριφορά του συντελεστή τριβής (μ) σε όλες τις καμπύλες Stribeck η οποία δημιουργεί μια κυκλική συμπεριφορά. Η υστέρηση αυτή αντιμετωπίστηκε λαμβάνοντας δύο διακεκριμένα τμήματα για το πεδίο λειτουργίας δηλαδή χωρίζοντας την επιταχυνόμενη κίνηση (0°-70°) από την επιβραδυνόμενη (70°-180°) για κάθε σημείο λειτουργίας. Για λόγους απλούστευσης ελήφθη όριο των δύο αυτών περιοχών η τιμή της γωνίας του στροφαλοφόρου $\beta=70^\circ$ όπου εμφανίζεται και η μέγιστη τιμή της ταχύτητας του εμβόλου (U).

Για τον υπολογισμό του πάχους λιπαντικής μεμβράνης h_{\min} ακολουθήθηκε η ίδια ακριβώς διαδικασία όπως θα δειχθεί παρακάτω στην **παράγραφο 2.3.2** η οποία έδειξε ότι παρόμοιας μορφής καμπύλες (τύπου Stribeck) μπορούν να χαραχθούν και γι' αυτό.

Στην περίπτωση αυτή έγινε προσπάθεια ανάπλασης καμπυλών τύπου Stribeck κατά την κάθοδο του εμβόλου (ΑΝΣ προς ΚΝΣ) που δίνουν τη μεταβολή του μεγέθους $\frac{1}{h_{\min}}$ συναρτήσει του μεγέθους $\frac{\eta \times U}{w}$.

Βάση για τα παρακάτω αποτελέσματα αποτελούν τα αποτελέσματα θεωρητικής προσομοίωσης με βάση τον πηγαίο κώδικα oilfilm που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για τον προσδιορισμό της δύναμης τριβής καθώς και για την προσέγγιση του πάχους λιπαντικής μεμβράνης παρουσιάζονται διαγράμματα με βάση τον παράγοντα $\frac{\eta \times U}{w}$ που ακολουθούν στη συνέχεια.

2.3 Αποτελέσματα υπολογισμών

2.3.1 Καμπύλες για τον υπολογισμό της συνολικής δύναμης τριβής f_{tot}

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα των καμπυλών τύπου Stribeck για τον πρώτο δακτύλιο κυκλικής κατατομής με ακτίνα καμπυλότητας $R=36$ mm για τον υπολογισμό της δύναμης τριβής για συνολικά τρεις χαρτογραφήσεις:

1. Για μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής (N [rpm]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων (παράγραφος 2.3.1.1.)
2. Για μεταβαλλόμενη πίεση του δακτυλίου (p_{tar} [kPa]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων (παράγραφος 2.3.1.2.)
3. Για μεταβαλλόμενο ιξώδες λιπαντικού (η [mPas]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων (παράγραφος 2.3.1.3.)

Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια 4 διαγράμματα για κάθε σημείο λειτουργίας.

Το πρώτο απεικονίζει τη μεταβολή του συντελεστή τριβής μ στη φάση καθόδου του εμβόλου (0° - 180°).

Στο δεύτερο διαχωρίζονται χρωματικά οι φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70° κόκκινο χρώμα) και επιβράδυνσης (70° - 180° μπλε χρώμα).

Στο τρίτο διάγραμμα απομονώνεται η επιταχυνόμενη κίνηση και εξάγεται το πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού της εξίσωσης της γραμμής τάσης.

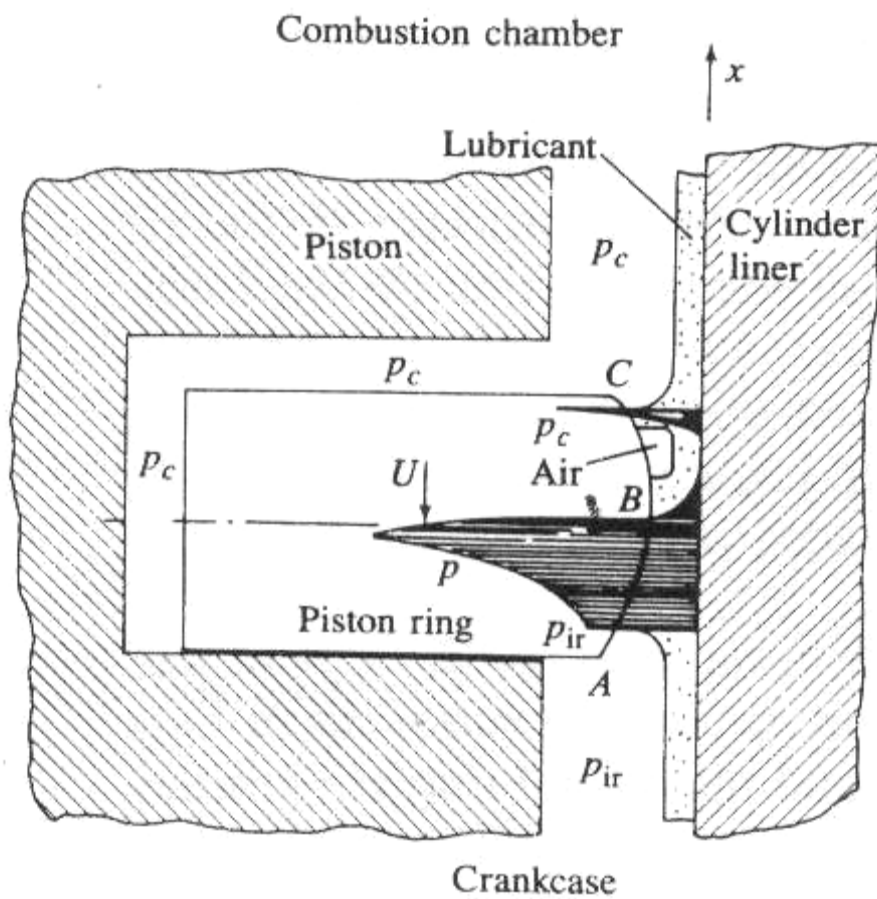
Στο τέταρτο διάγραμμα απομονώνεται η επιβραδυνόμενη κίνηση και εξάγεται το πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού της εξίσωσης της γραμμής τάσης.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΡΙΒΗΣ

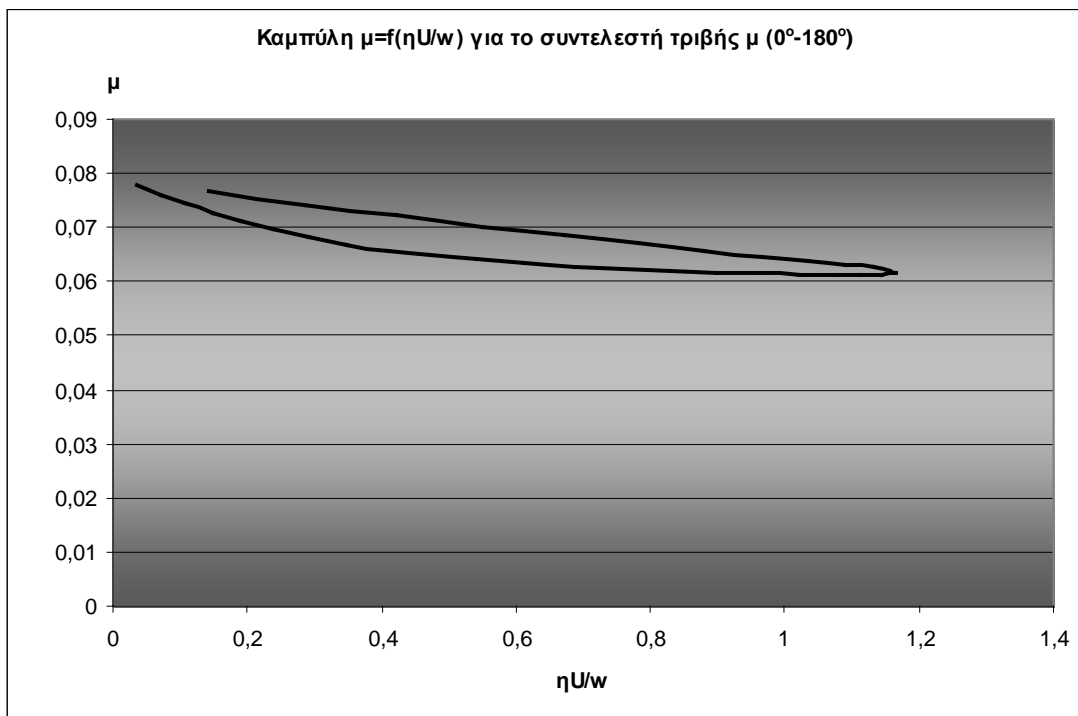
2.3.1.1 Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενη συχνότητα

περιστροφής N

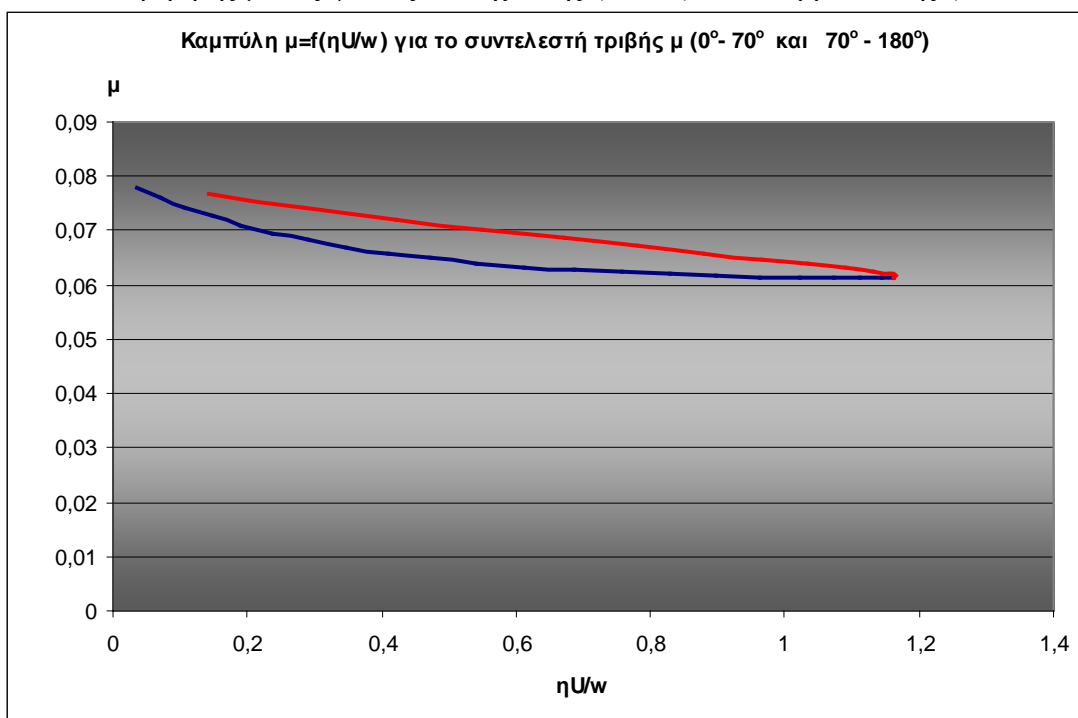
($N=1500$ rpm έως $N=6000$ rpm)



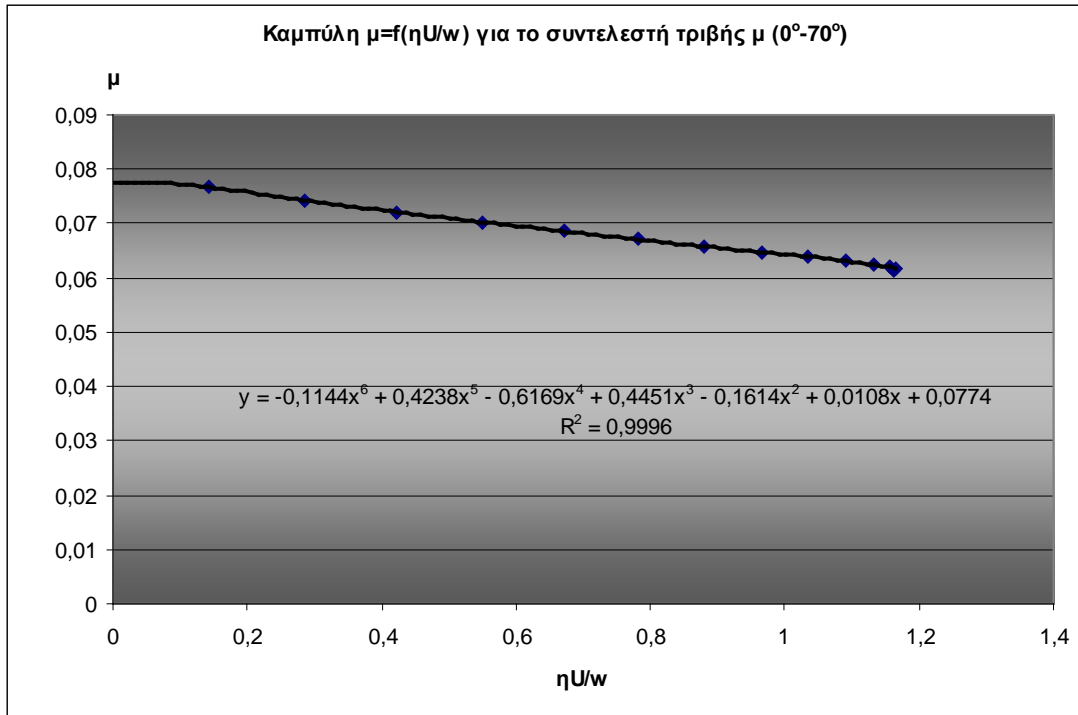
- $N=1500 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$



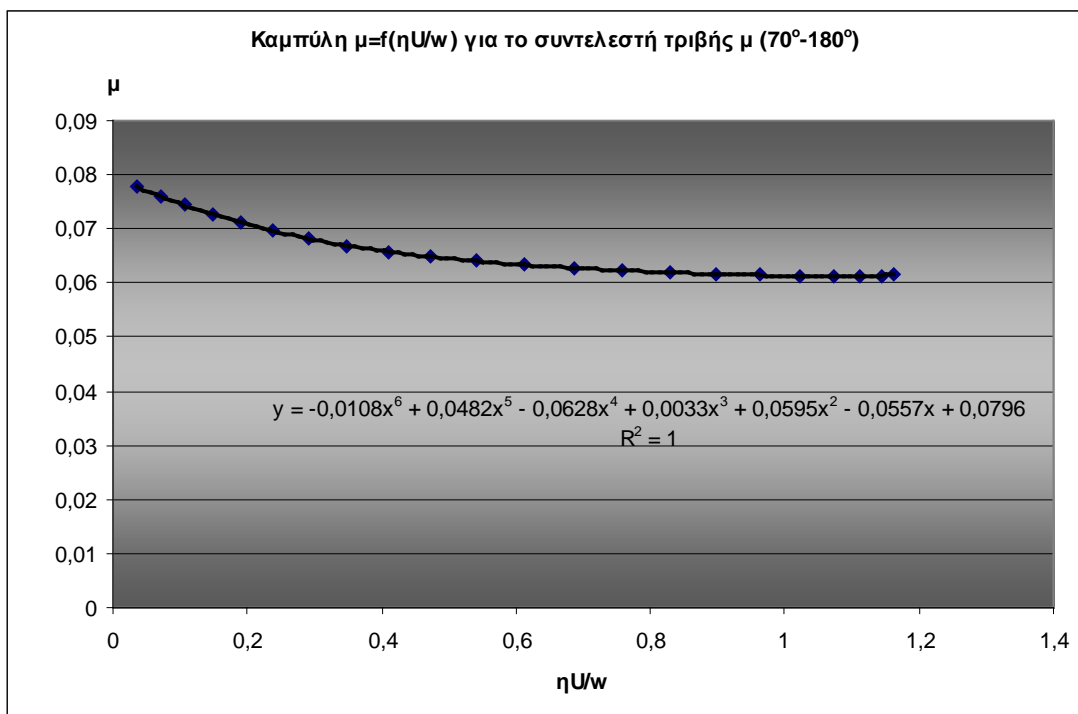
Σχήμα 2.3.1.1.1. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=1500 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.1.2. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=1500 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}=200\text{kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

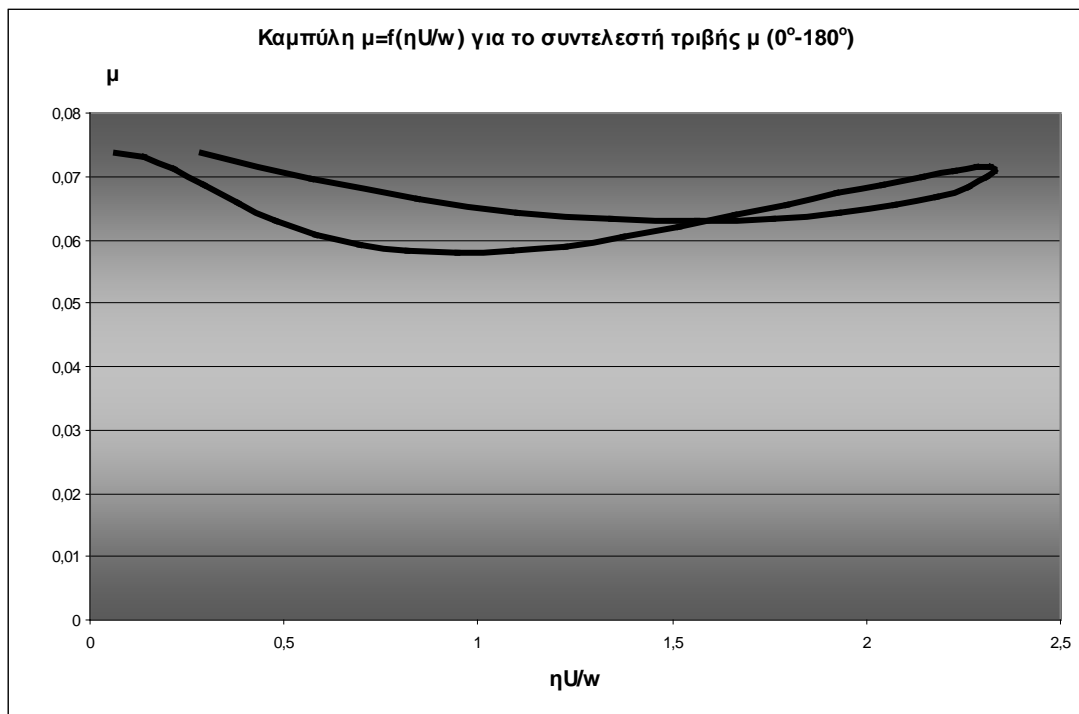


Σχήμα 2.3.1.1.3. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **$N=1500$ rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού.

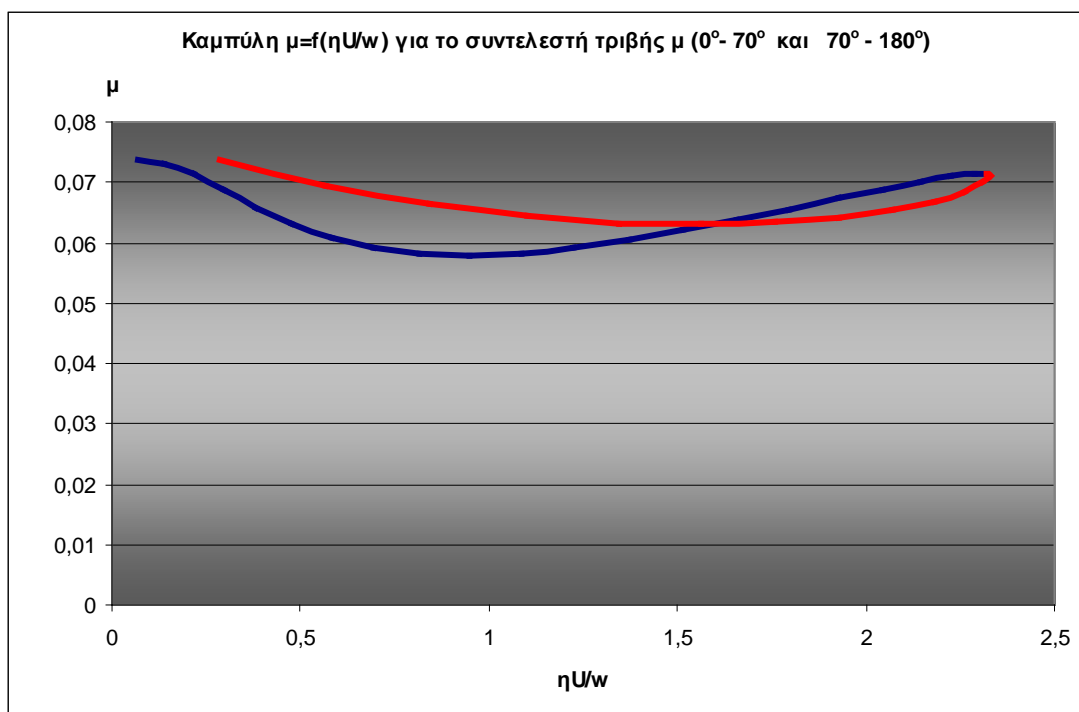


Σχήμα 2.3.1.1.4. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **$N=1500$ rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού.

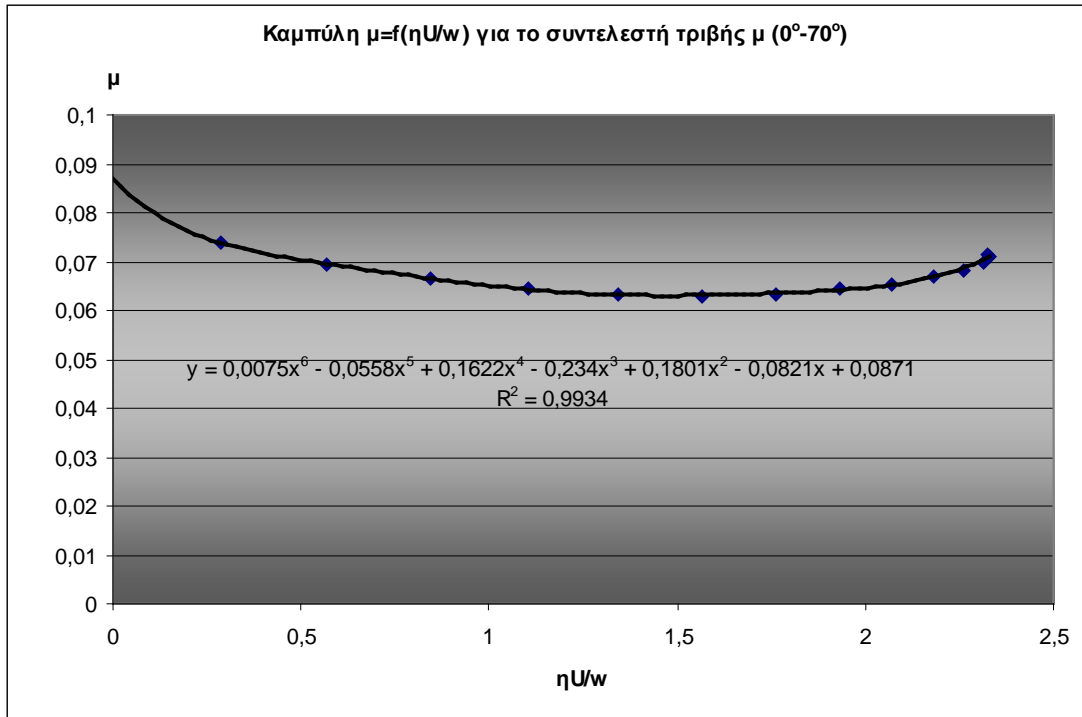
- **$N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas, $p_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm**



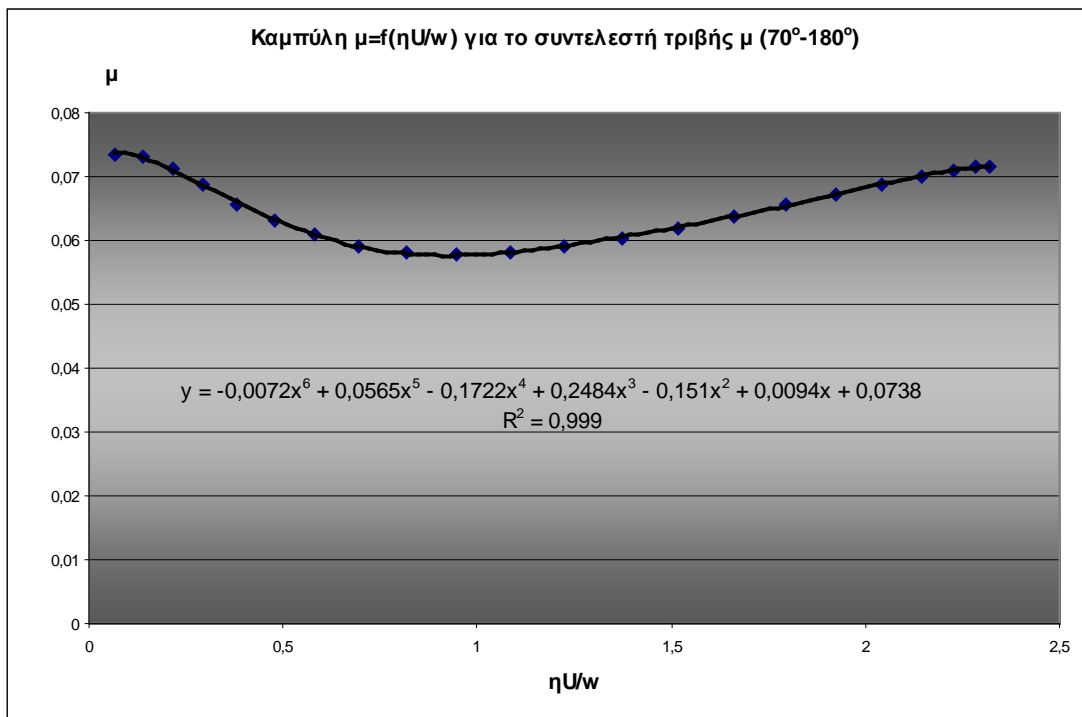
Σχήμα 2.3.1.1.5 Διάγραμμα τύπου Stribeck , **$N=3000$ rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.1.6. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **$N=3000$ rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

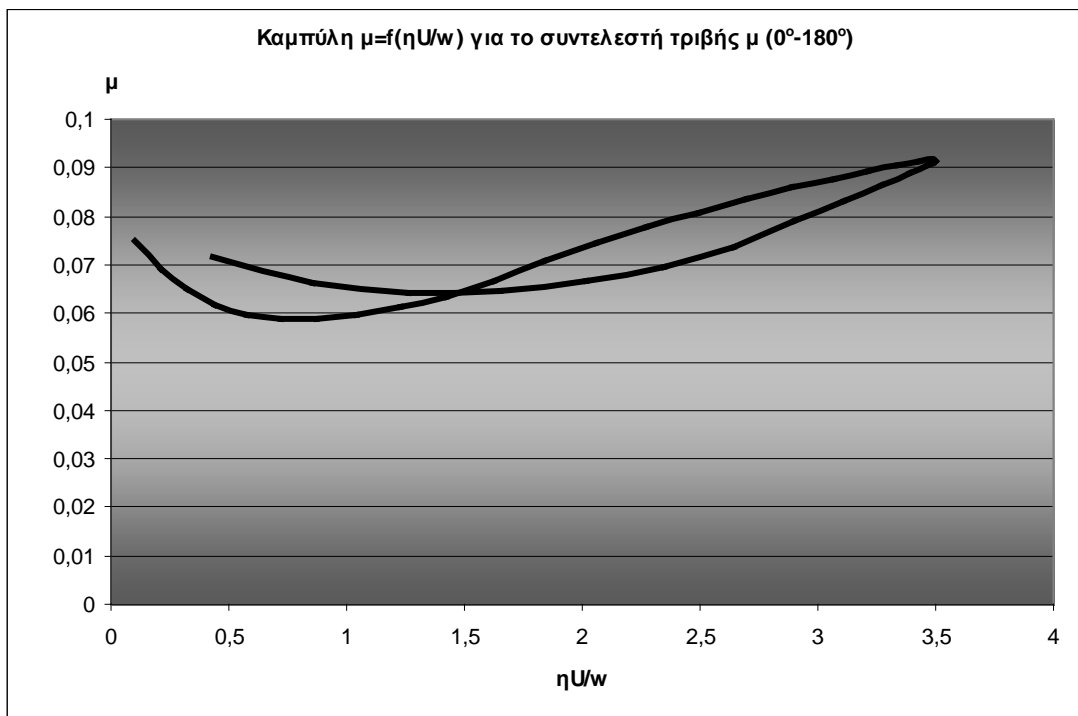


Σχήμα 2.3.1.1.7. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=3000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

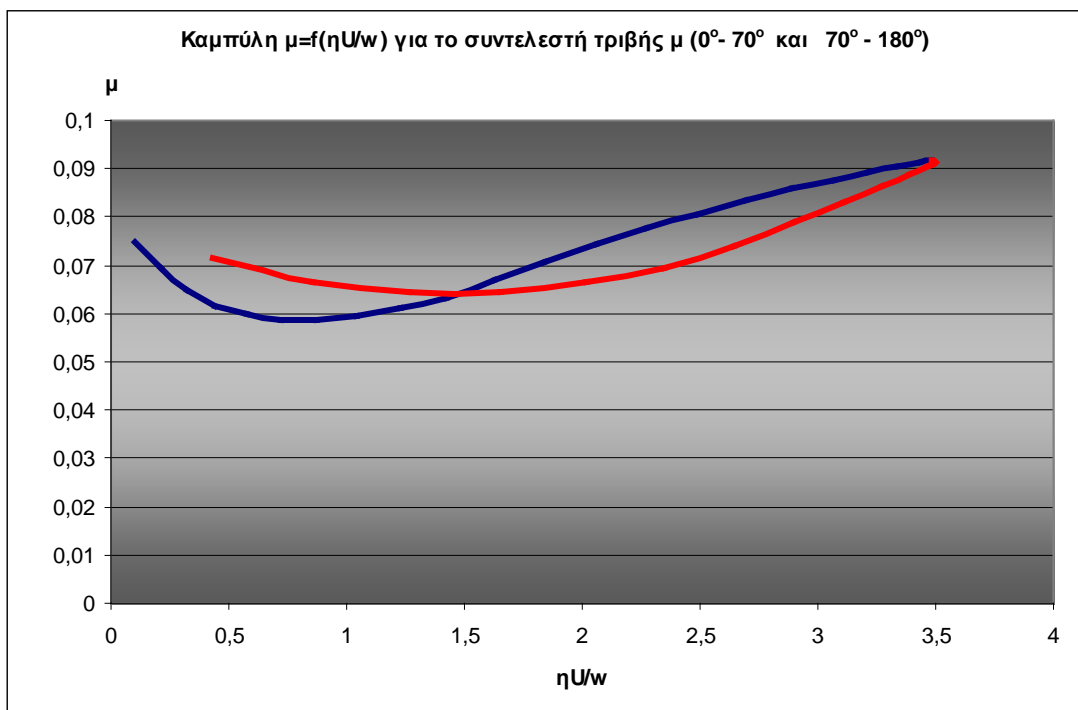


Σχήμα 2.3.1.1.8. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=3000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού.

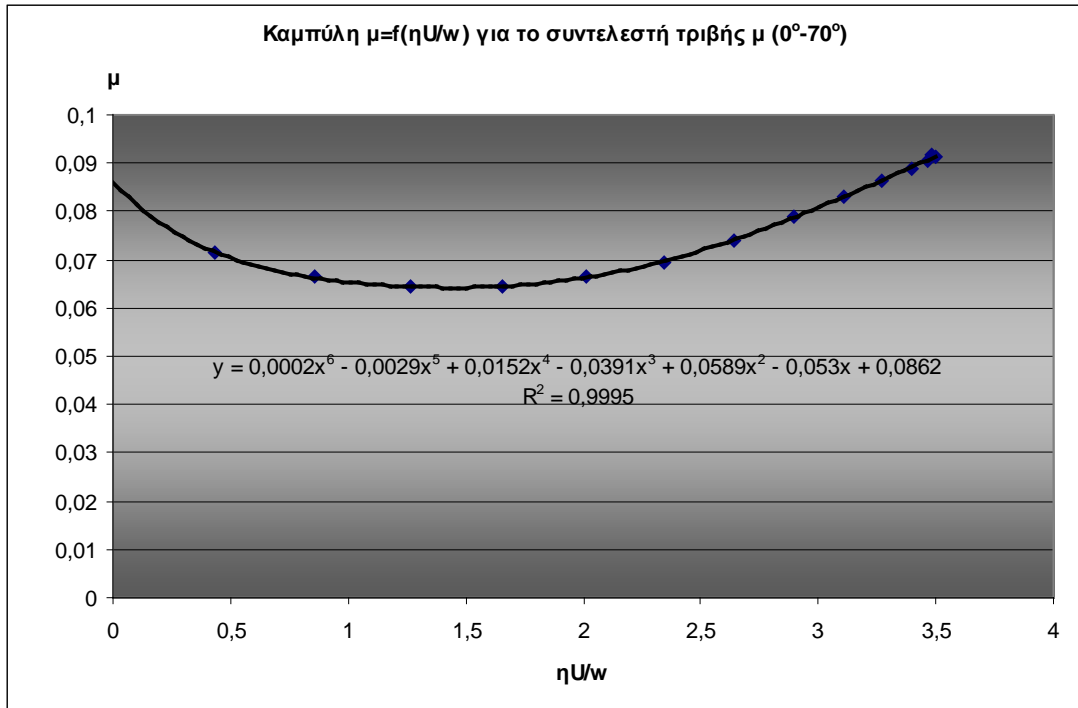
- $N=4500 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$



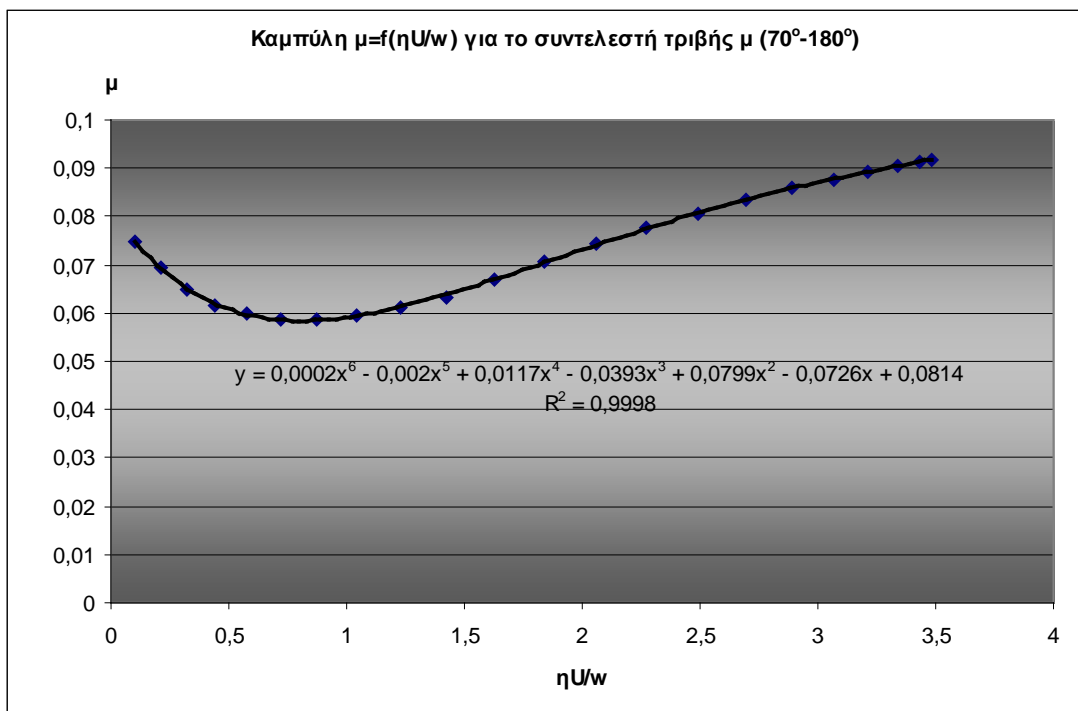
Σχήμα 2.3.1.1.9. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=4500 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.1.10. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=4500 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

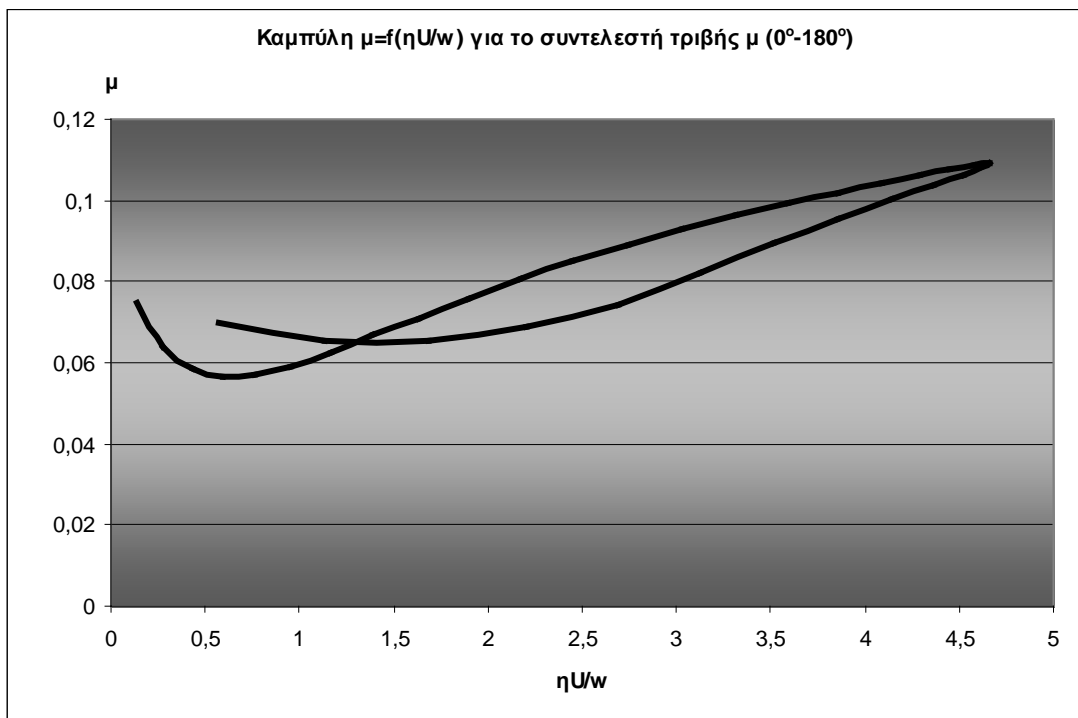


Σχήμα 2.3.1.1.11. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=4500 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

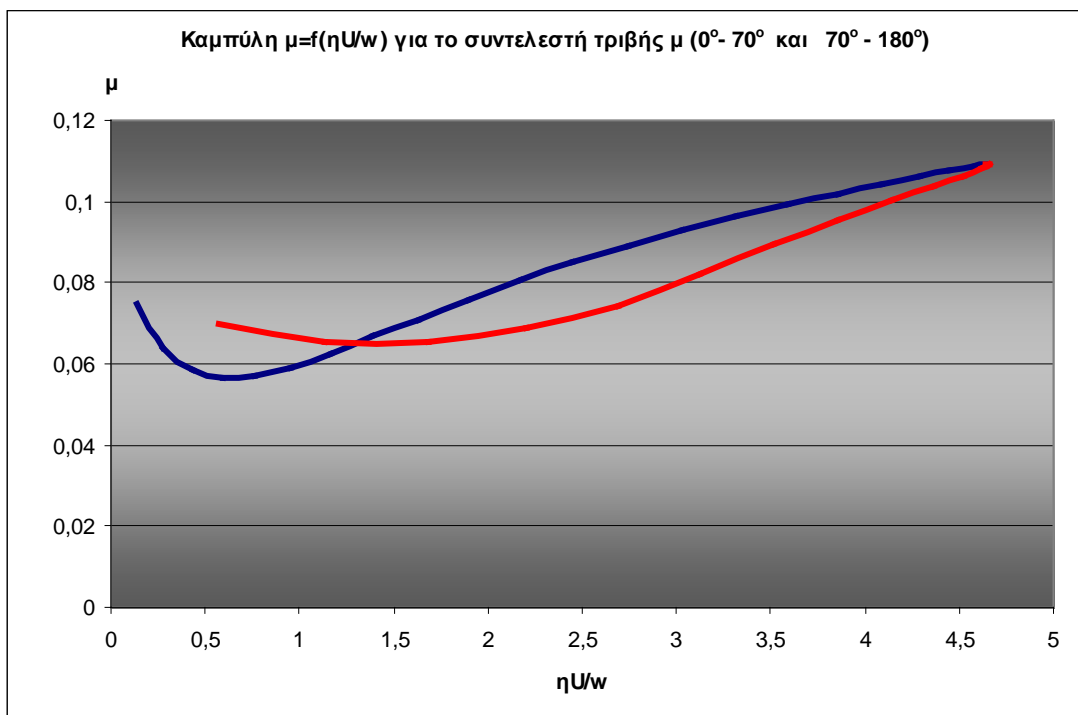


Σχήμα 2.3.1.1.12. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=4500 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού.

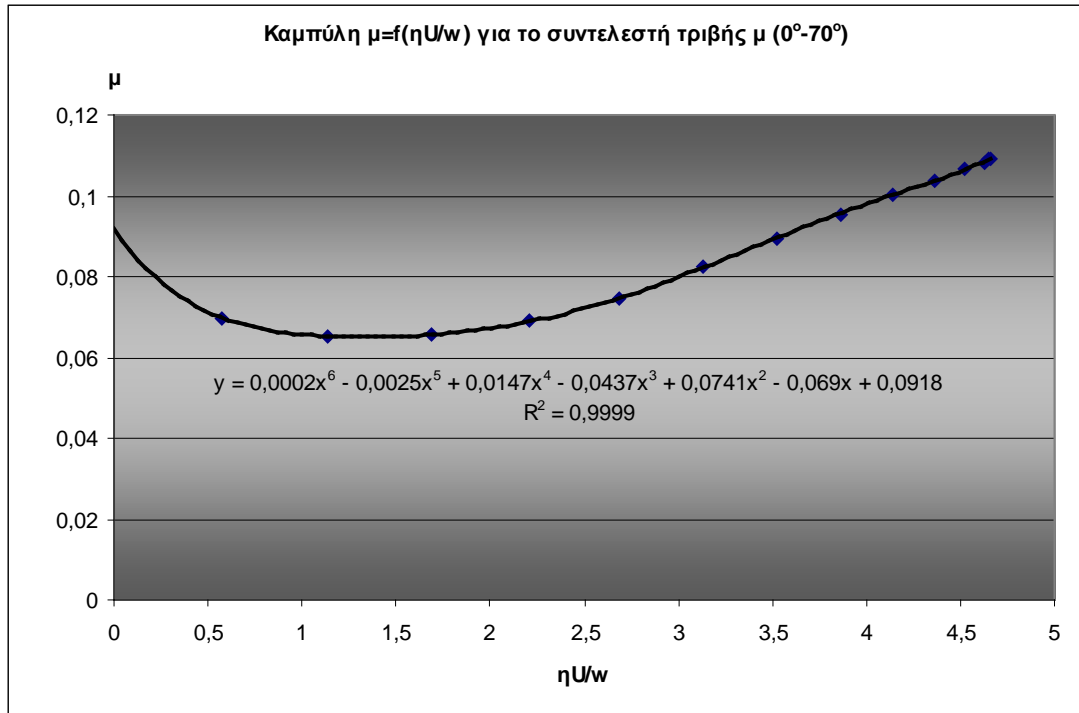
- $N=6000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$



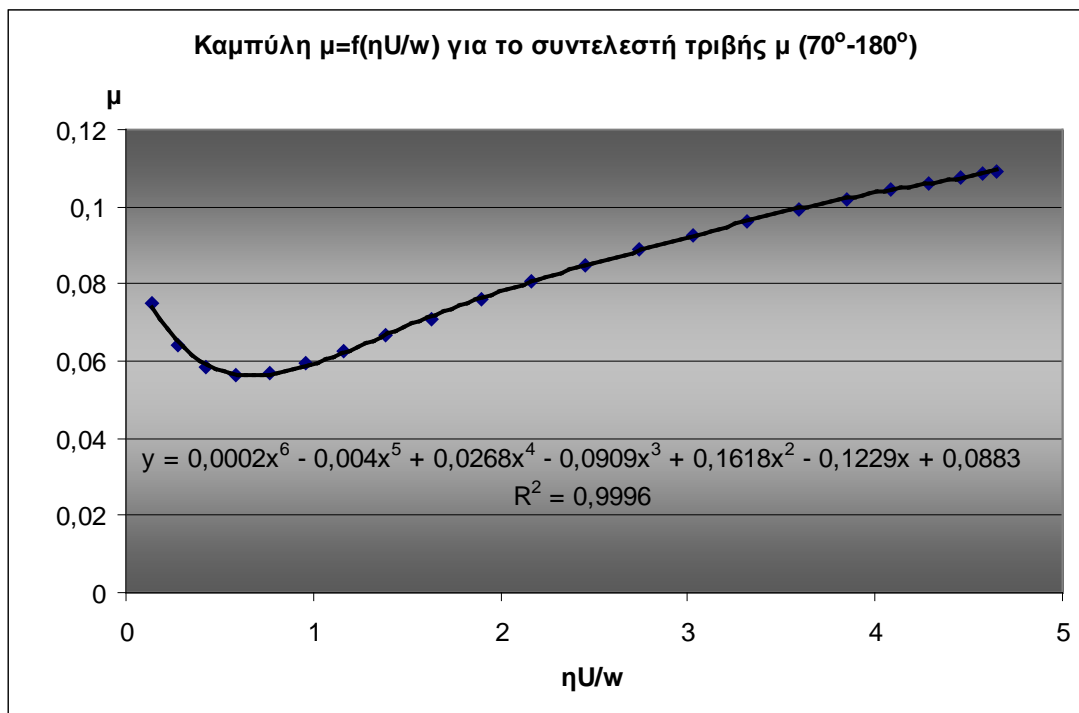
Σχήμα 2.3.1.1.13. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=6000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.1.14. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=6000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

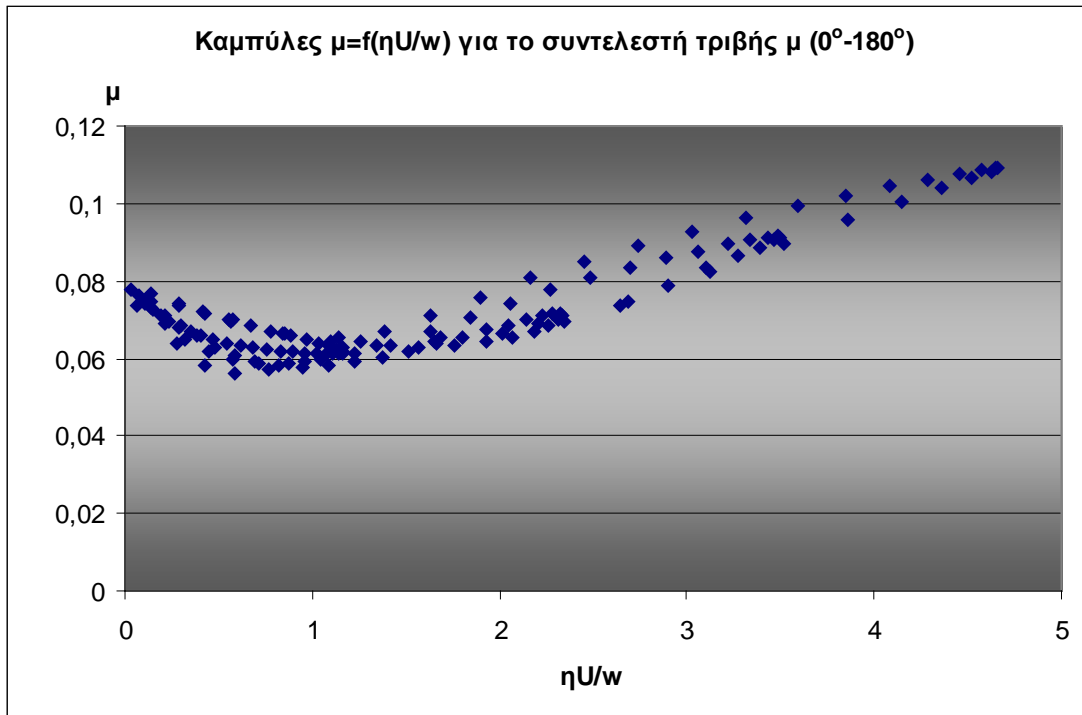


Σχήμα 2.3.1.15. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=6000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού

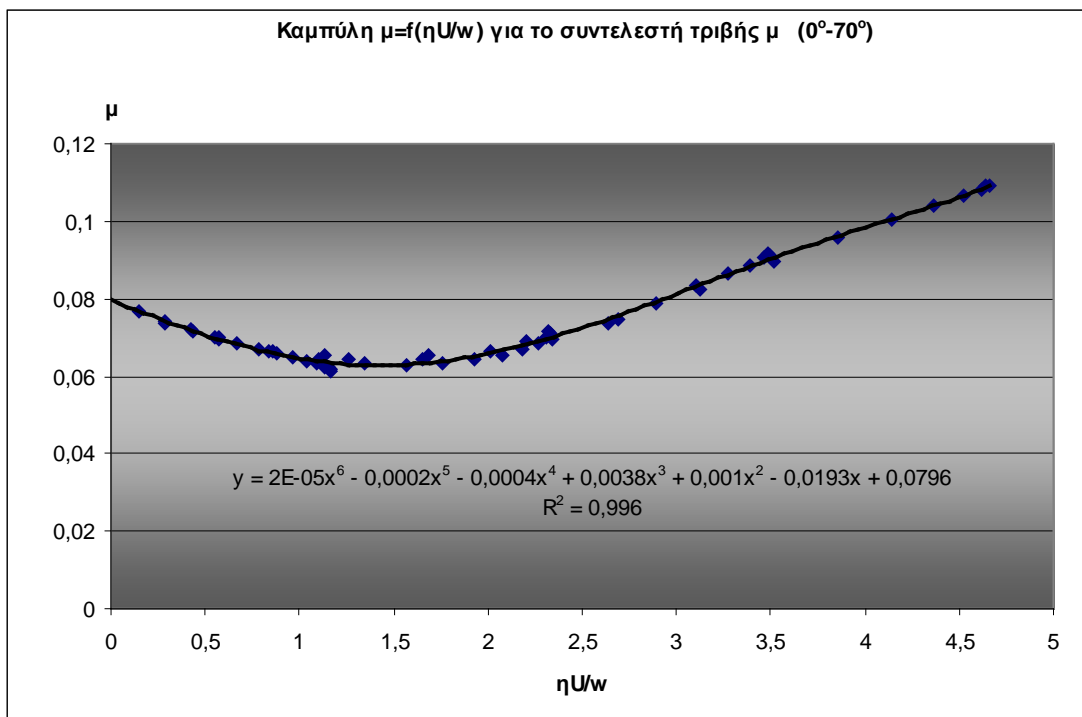


Σχήμα 2.3.1.16. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=6000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού.

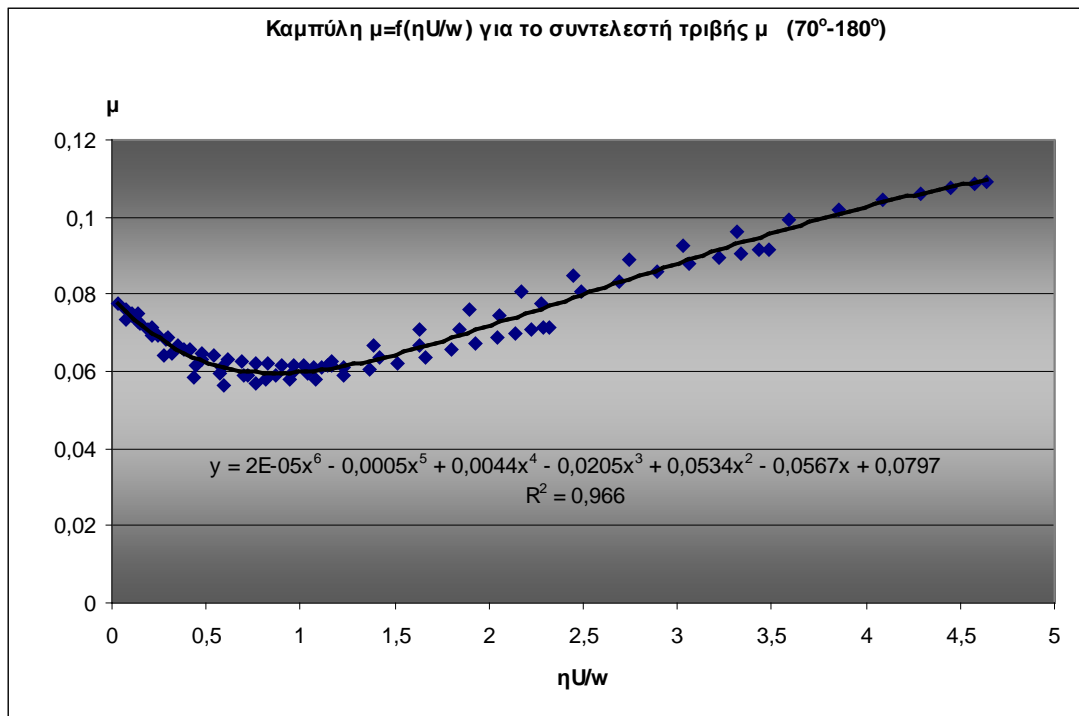
- $N=1500,3000,4500,6000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas, $p_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm



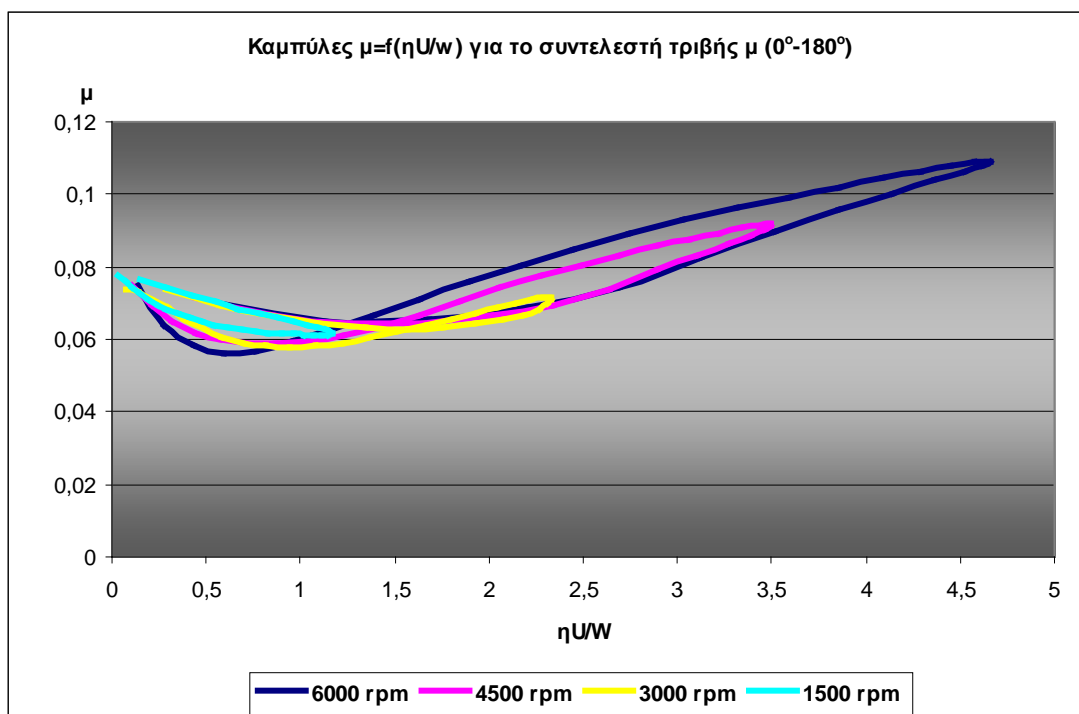
Σχήμα 2.3.1.1.17. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές στροφών) για το συντελεστή τριβής μ ($0^\circ-180^\circ$) για $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm , $N=1500$ rpm , $N=3000$ rpm , $N=4500$ rpm και $N=6000$ rpm



Σχήμα 2.3.1.1.18. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές στροφών) για το συντελεστή τριβής μ στη φάση επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{oo} βαθμού για $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm , $N=1500$ rpm , $N=3000$ rpm , $N=4500$ rpm και $N=6000$ rpm



Σχήμα 2.3.1.1.19. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck(για διαφορετικές τιμές στροφών) για το συντελεστή τριβής μ στη φάση επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{00} βαθμού για $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm , **$N=1500$ rpm , $N=3000$ rpm , $N=4500$ rpm και $N=6000$ rpm**

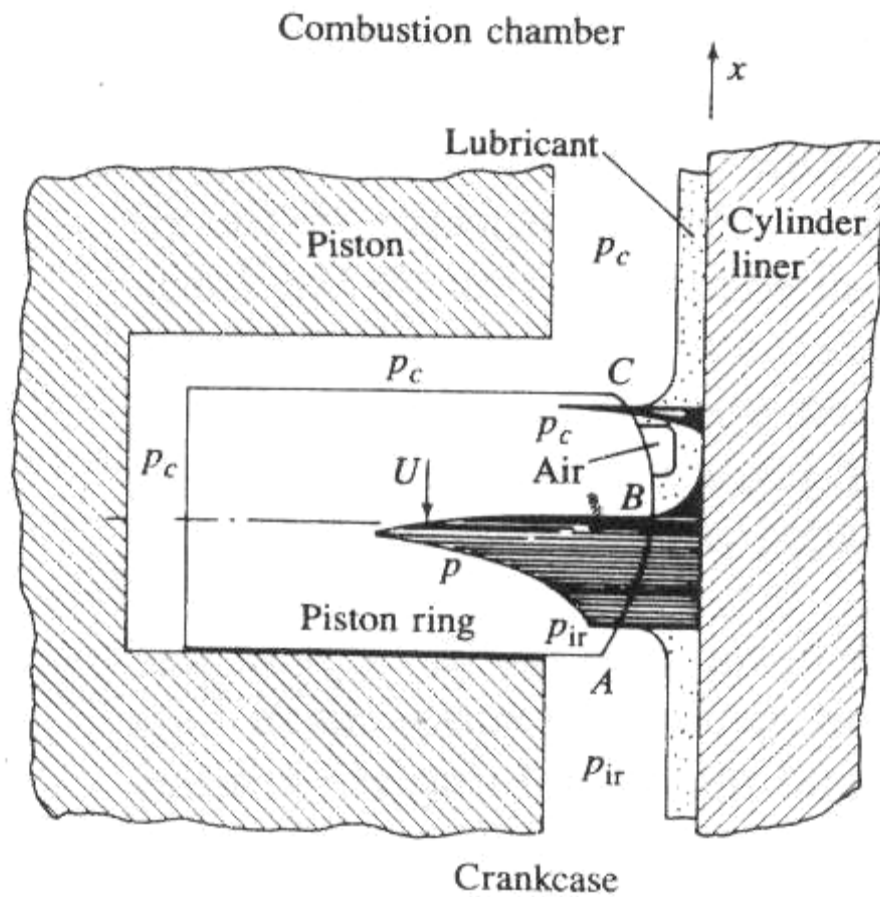


Σχήμα 2.3.1.1.20. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές στροφών) για το συντελεστή τριβής μ ($0^\circ-180^\circ$) για $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm , **$N=1500$ rpm , $N=3000$ rpm , $N=4500$ rpm και $N=6000$ rpm**

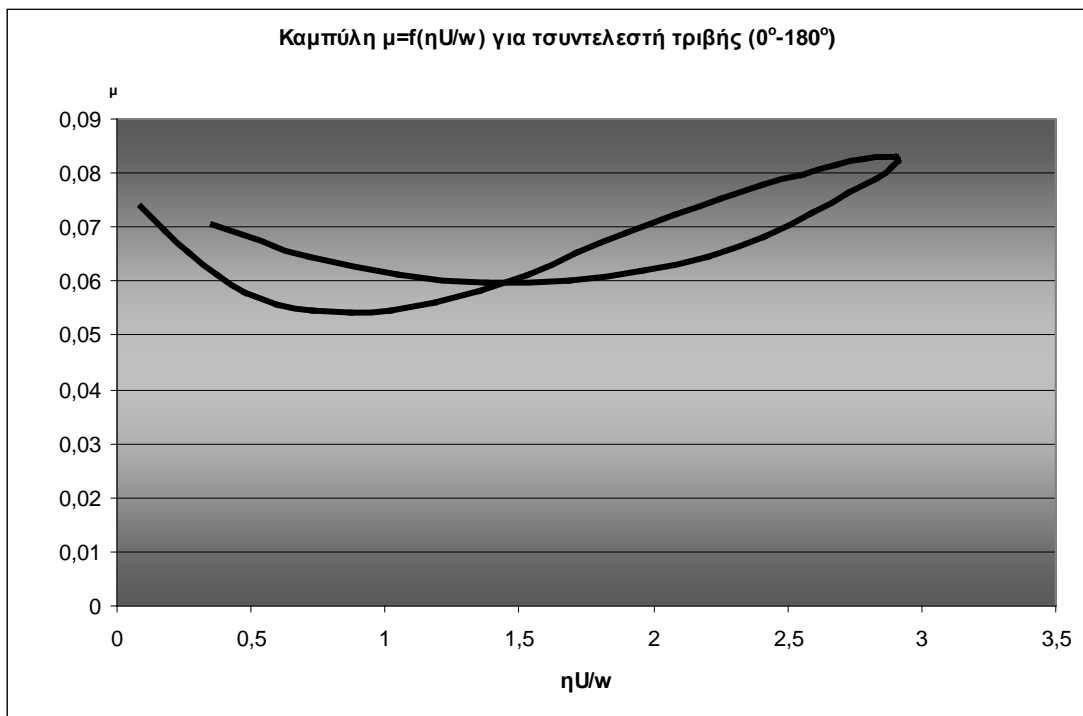
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΡΙΒΗΣ

2.3.1.2 Πρώτος δακτύλιος , μεταβαλλόμενη πίεση p_{tar}

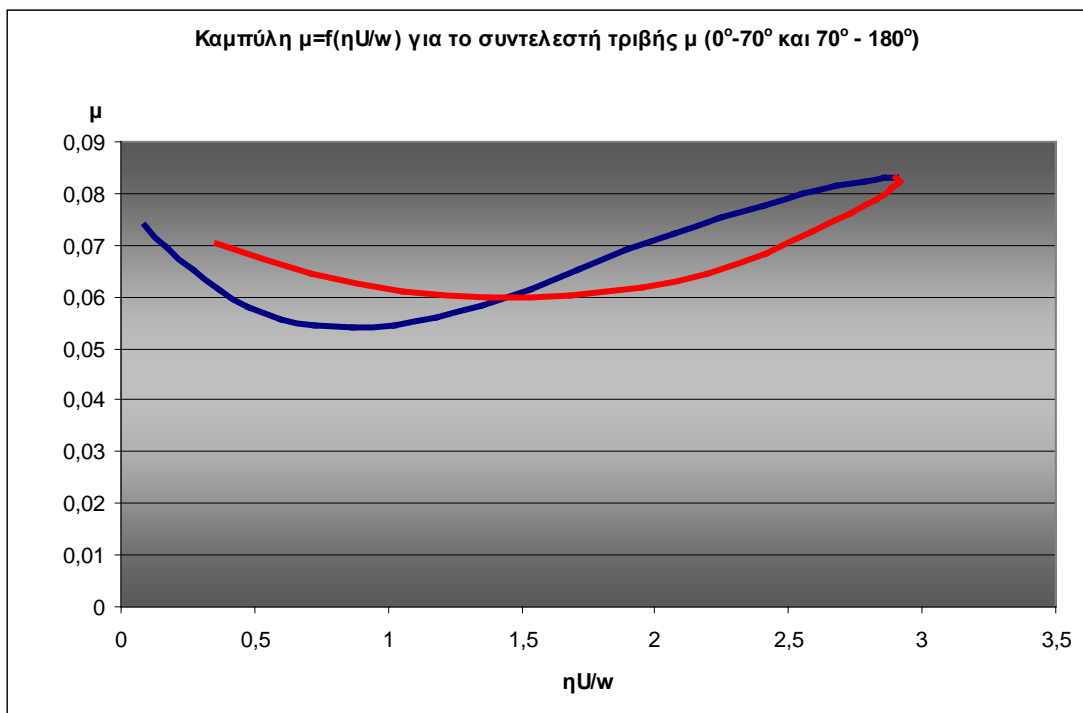
($p_{tar}=160\text{kPa}$ έως $p_{tar}=240\text{kPa}$)



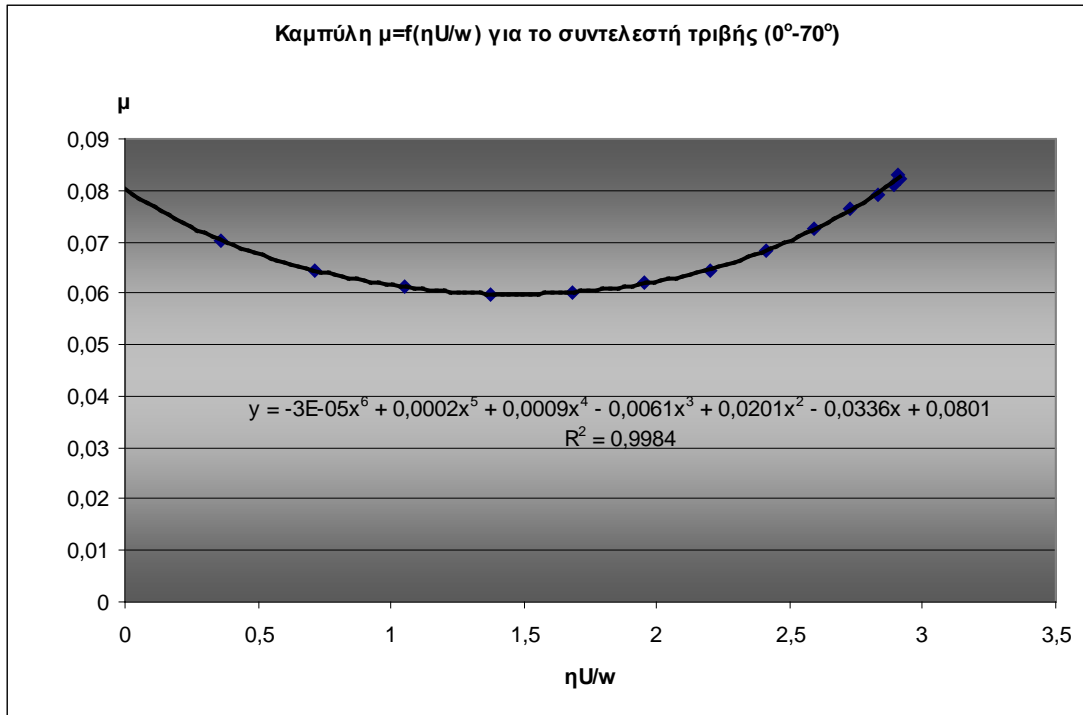
- $p_{tar} = 160 \text{ kPa}$, $N = 3000 \text{ rpm}$ $\eta = 7,39 \text{ mPas}$, $R = 36 \text{ mm}$



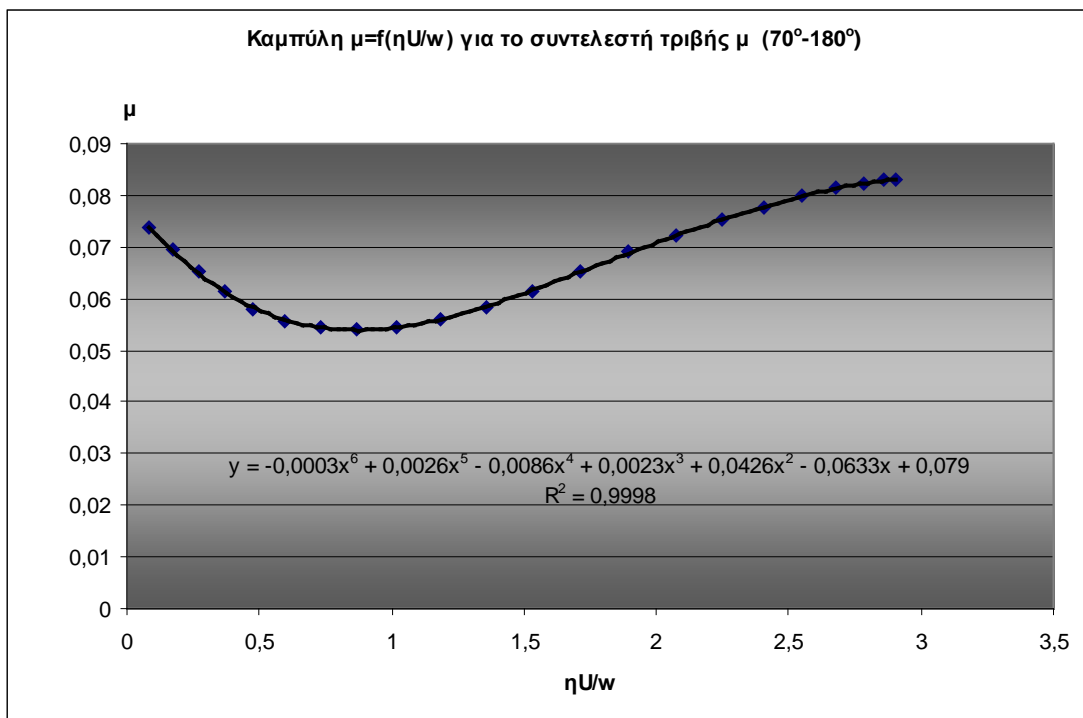
Σχήμα 2.3.1.2.1. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N = 3000 \text{ rpm}$, $\eta = 7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar} = 160 \text{ kPa}$, $R = 36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ - 70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ - 180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.2.2. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N = 3000 \text{ rpm}$, $\eta = 7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar} = 160 \text{ kPa}$, $R = 36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ - 70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ - 180^\circ$ μπλε καμπύλη)

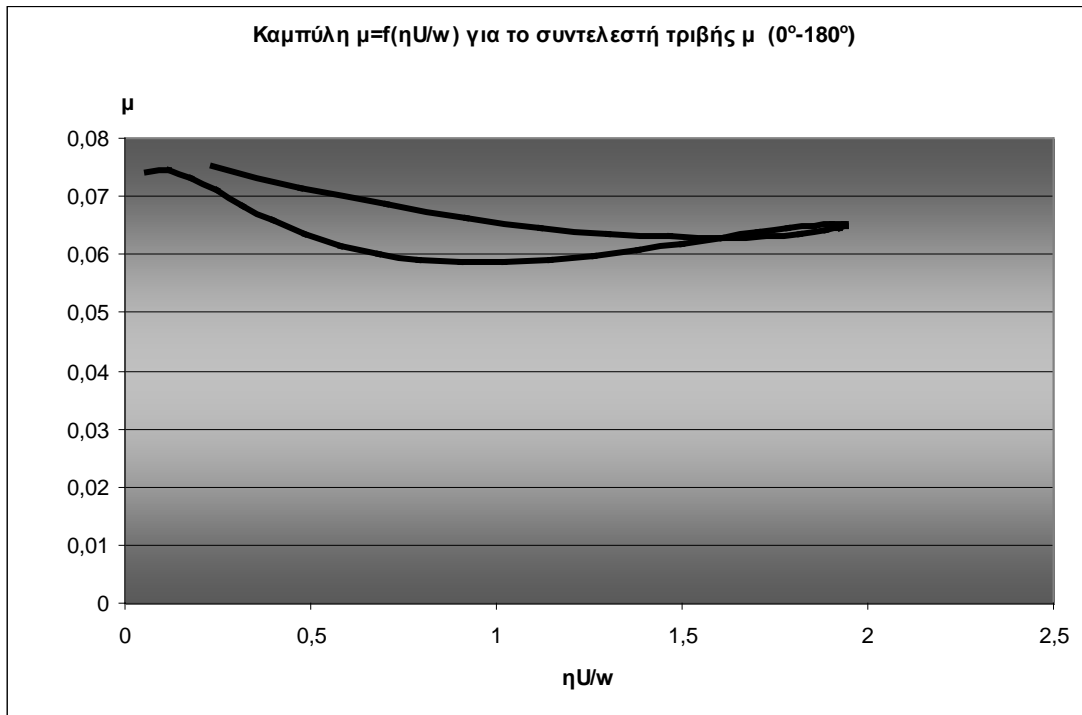


Σχήμα 2.3.1.2.3. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}=160$ kPa , $R=36$ mm στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

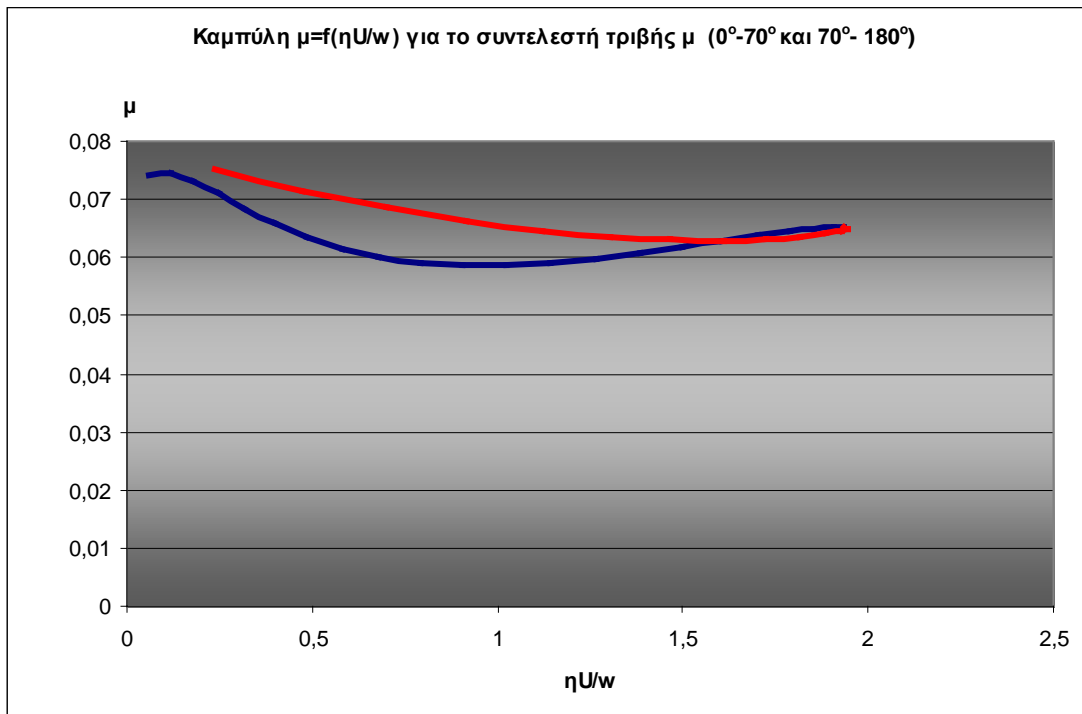


Σχήμα 2.3.1.2.4. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}=160$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

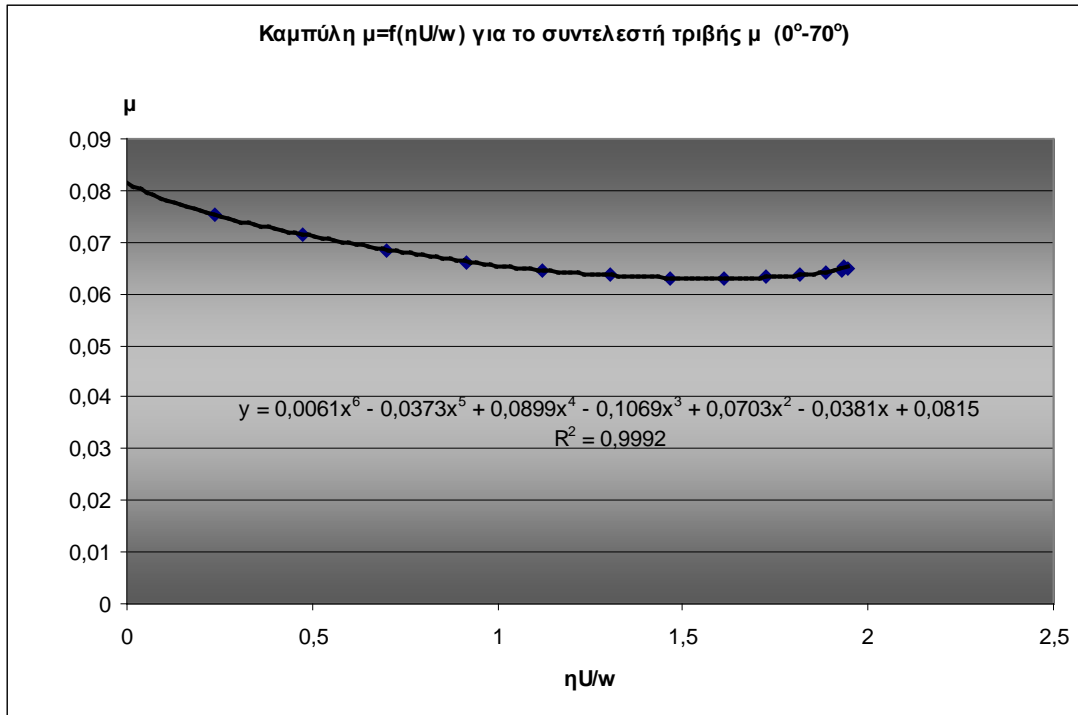
- $p_{tar} = 240 \text{ kPa}$, $N=3000 \text{ rpm}$ $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $R=36 \text{ mm}$



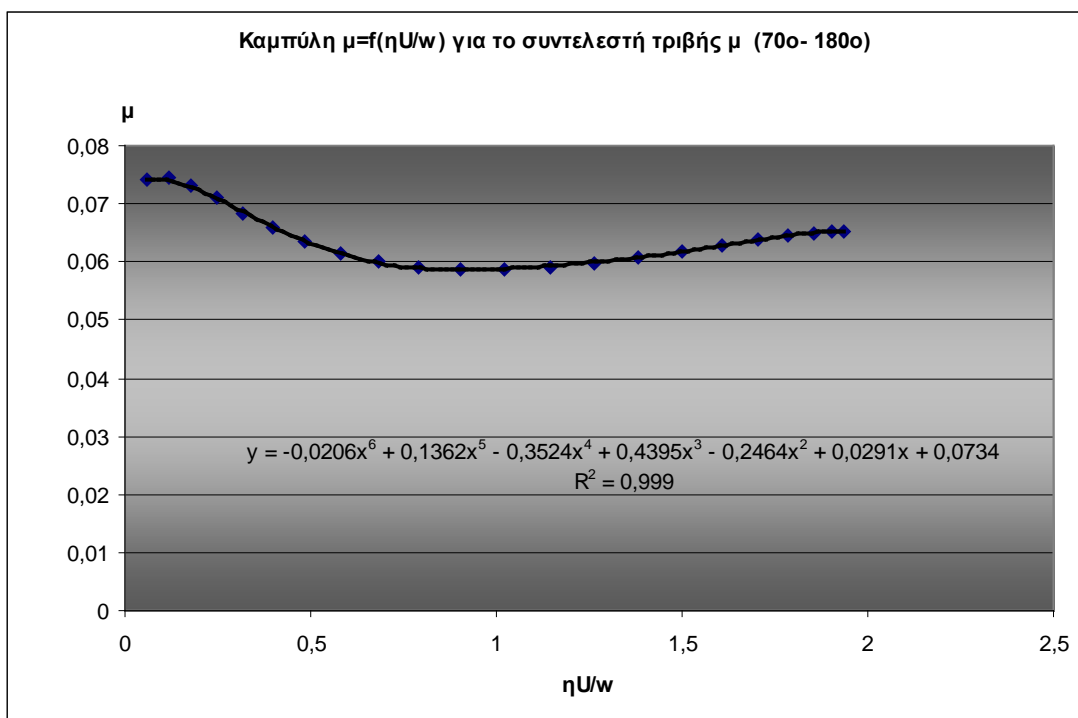
Σχήμα 2.3.1.2.5. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar} = 240 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.2.6. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar} = 240 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

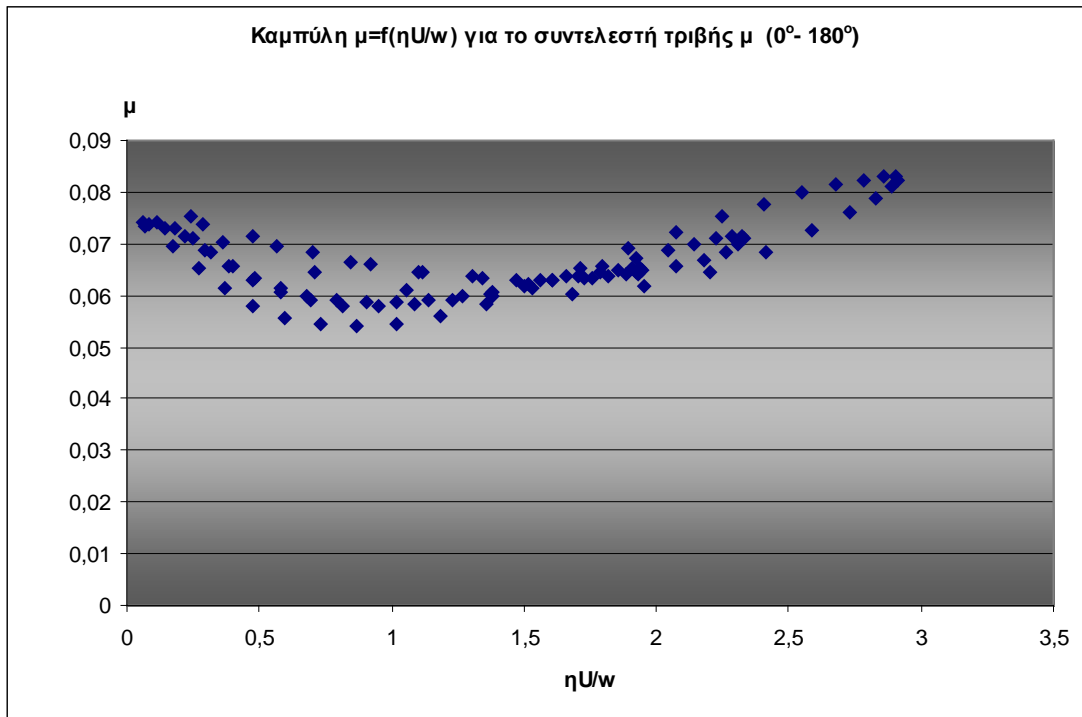


Σχήμα 2.3.1.2.7. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 240$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού

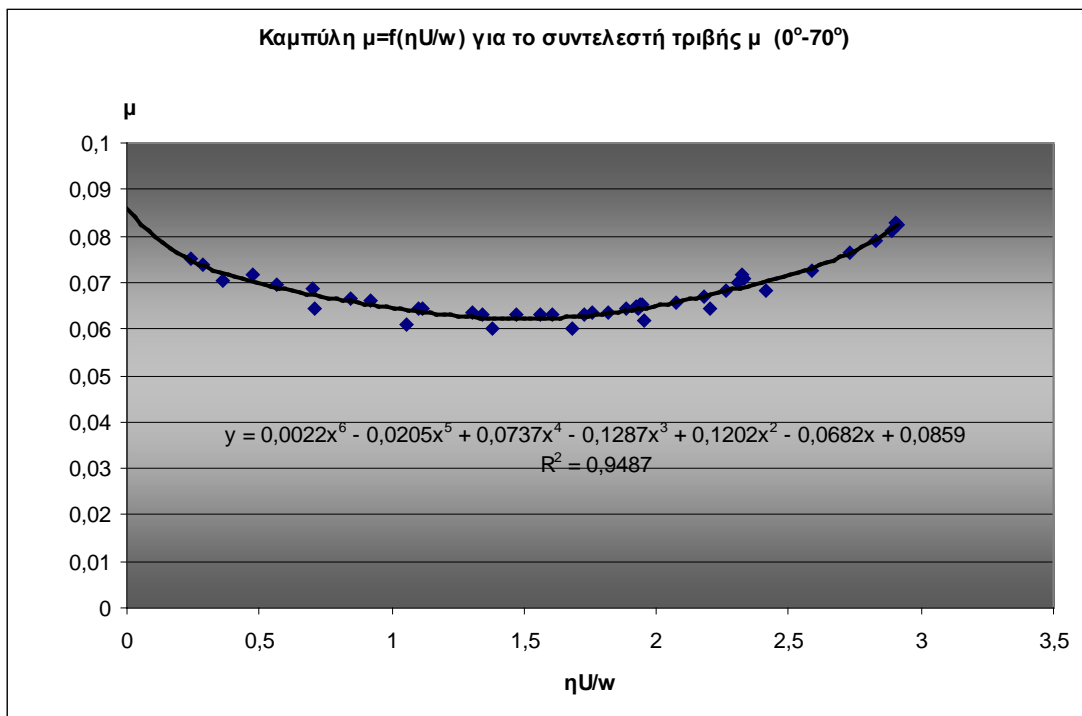


Σχήμα 2.3.1.2.8. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 240$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού

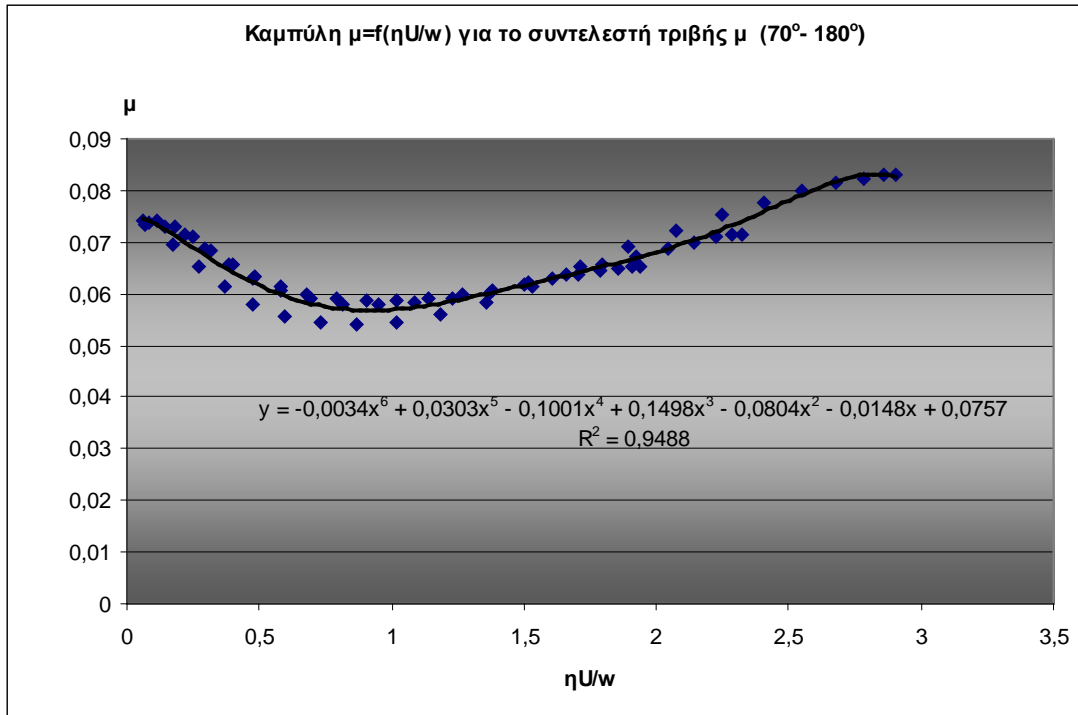
- $p_{tar} = 160, 200, 240 \text{ kPa}$, $N = 3000 \text{ rpm}$ $\eta = 7,39 \text{ mPas}$, $R = 36 \text{ mm}$



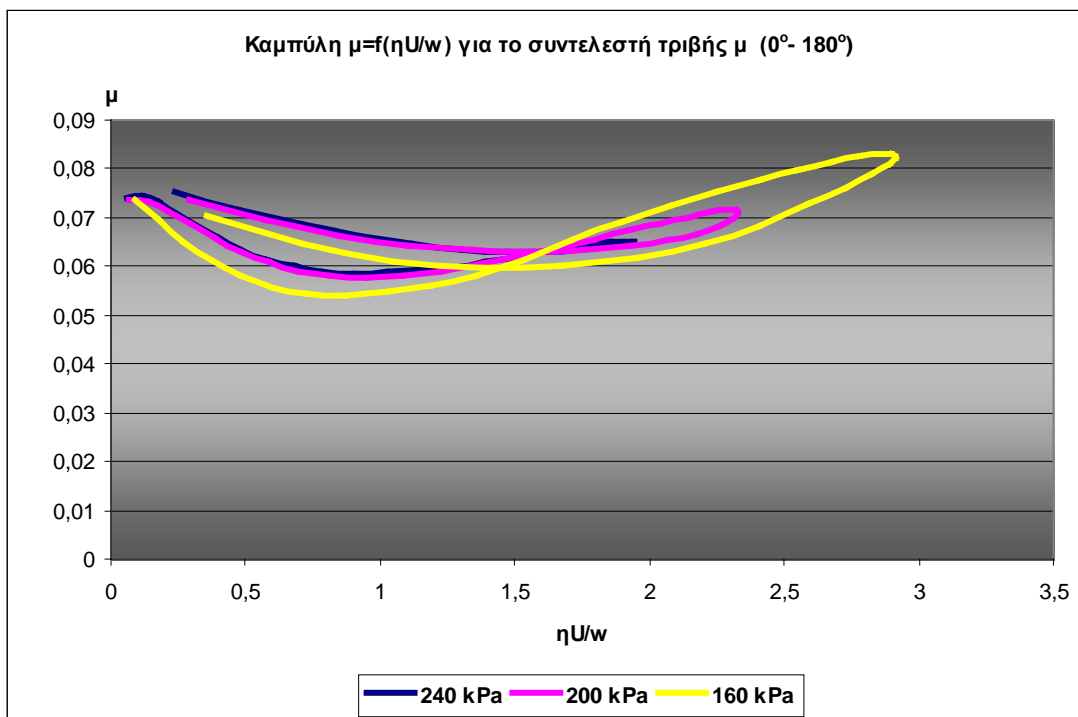
Σχήμα 2.3.1.2.9. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές πίεσης) για το συντελεστή τριβής μ ($0^\circ - 180^\circ$) για $N = 3000 \text{ rpm}$, $\eta = 7,39 \text{ mPas}$, $R = 36 \text{ mm}$, $p_{tar} = 160 \text{ kPa}$, $p_{tar} = 200 \text{ kPa}$ και $p_{tar} = 240 \text{ kPa}$



Σχήμα 2.3.1.2.10. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές πίεσης) για το συντελεστή τριβής μ στη φάση επιτάχυνσης ($0^\circ - 70^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού για $N = 3000 \text{ rpm}$, $\eta = 7,39 \text{ mPas}$, $R = 36 \text{ mm}$, $p_{tar} = 160 \text{ kPa}$, $p_{tar} = 200 \text{ kPa}$ και $p_{tar} = 240 \text{ kPa}$



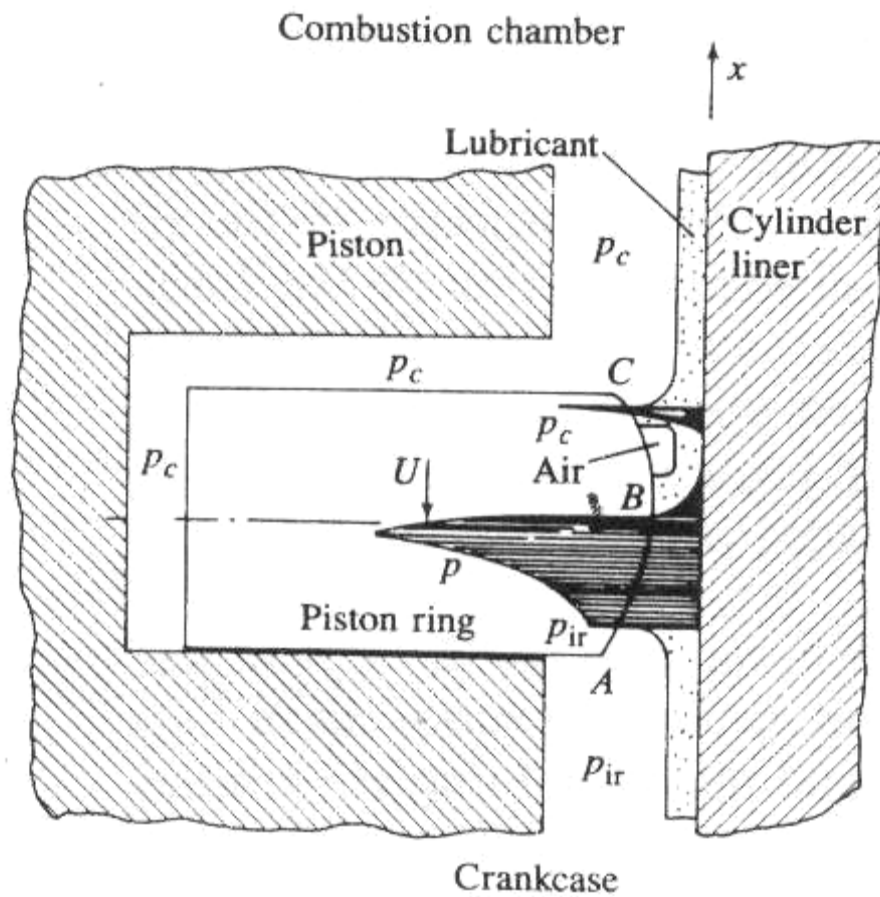
Σχήμα 2.3.1.2.11. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές πίεσης) για το συντελεστή τριβής μ στη φάση επιβράδυνσης (70°-180°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ου} βαθμού για N=3000 rpm , $\eta=7,39$ mPas , R=36 mm , **$p_{tar}= 160$ kPa , $p_{tar}= 200$ kPa και $p_{tar}= 240$ kPa**



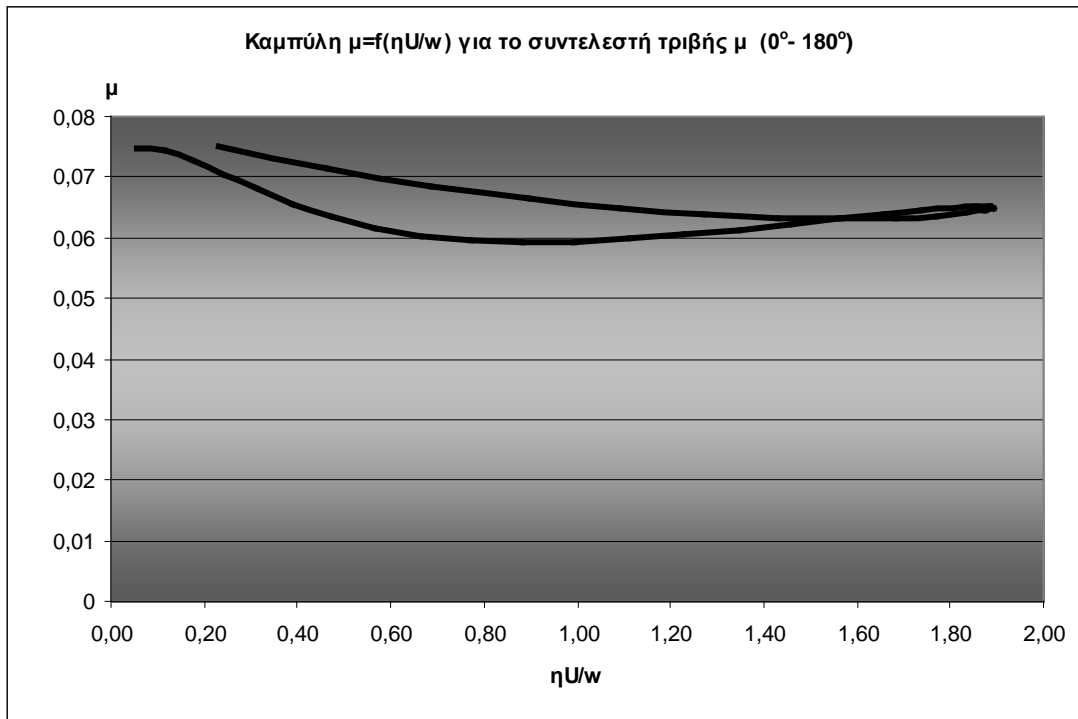
Σχήμα 2.3.1.2.12. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck(για διαφορετικές τιμές πίεσης) για το συντελεστή τριβής μ (0°-180°) για N=3000 rpm , $\eta=7,39$ mPas , R=36mm, **$p_{tar}= 160$ kPa , $p_{tar}= 200$ kPa και $p_{tar}= 240$ kPa**

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΡΙΒΗΣ

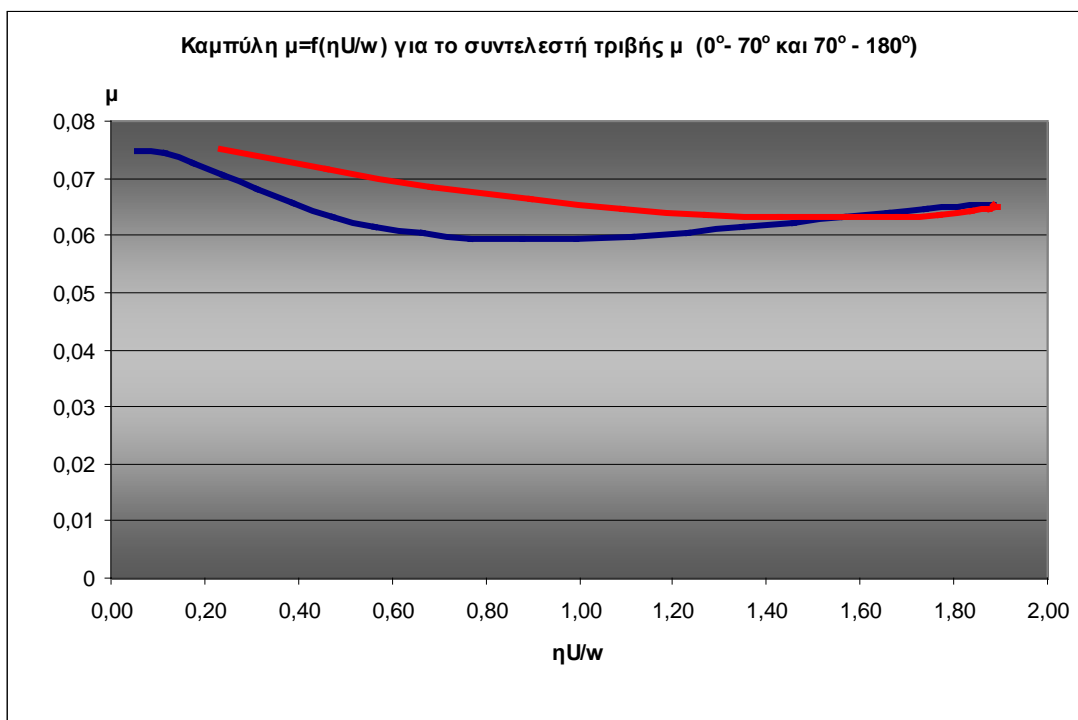
2.3.1.3 Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενο ιξώδες λιπαντικού η ($\eta=6$ mPas έως $\eta=10$ mPas)



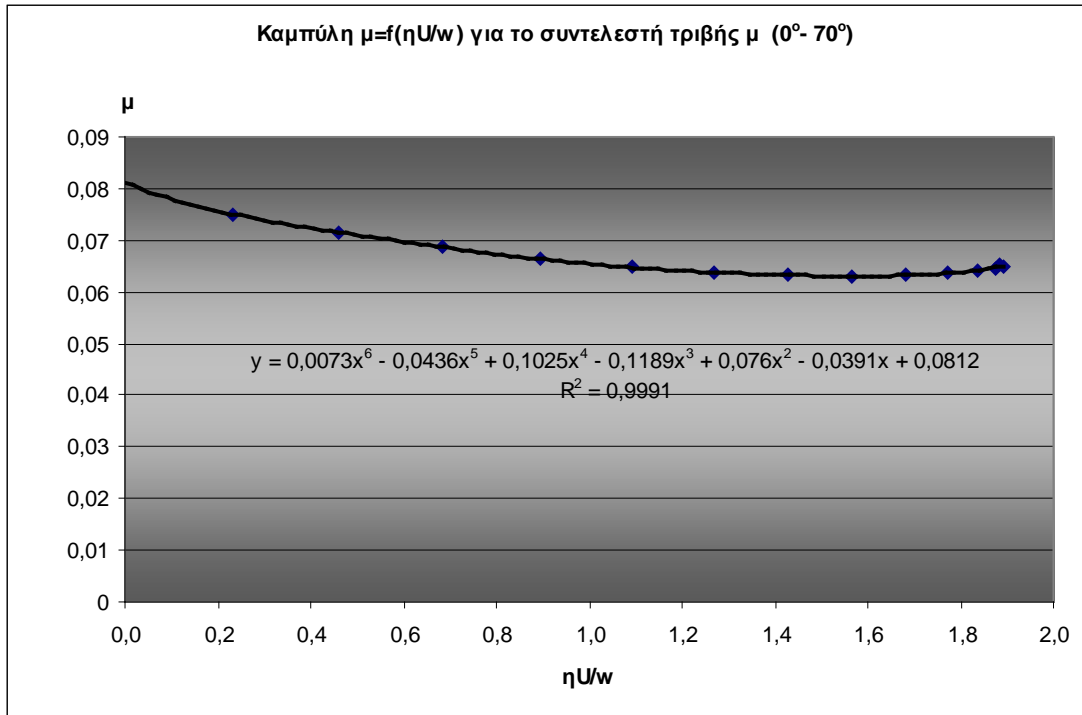
- $\eta=6 \text{ mPas}$, , $N=3000 \text{ rpm}$, $p_{\text{tar}}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$



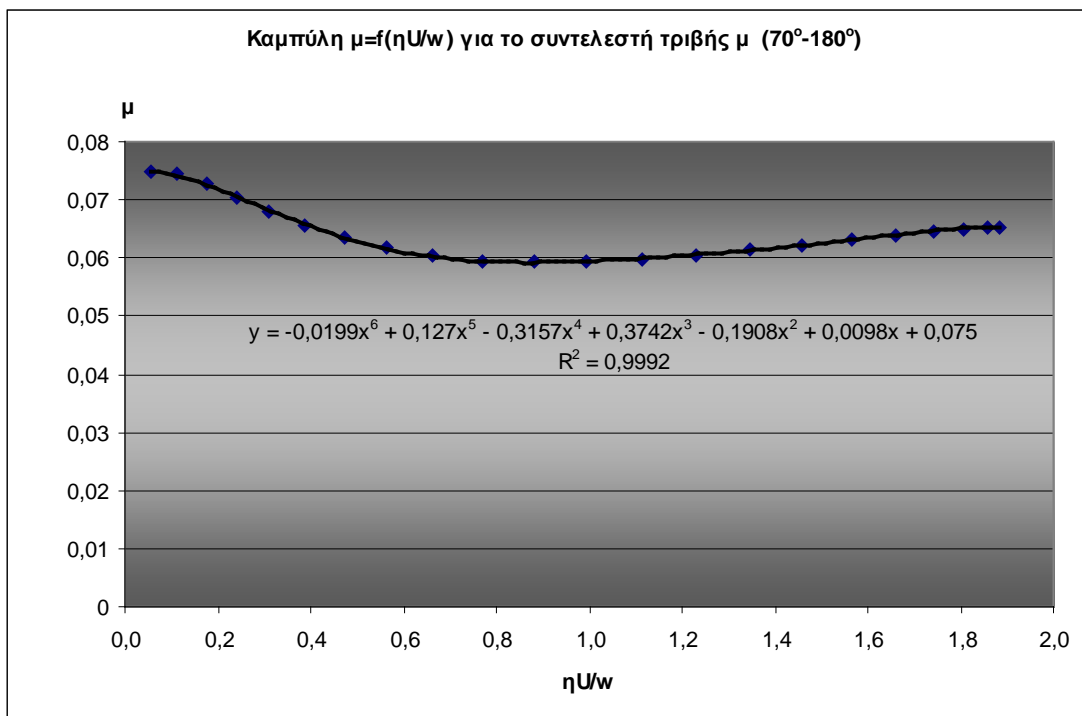
Σχήμα 2.3.1.3.1. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=6 \text{ mPas}$, $p_{\text{tar}}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.3.2. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rp}$, $\eta=6 \text{ mPas}$, $p_{\text{tar}}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

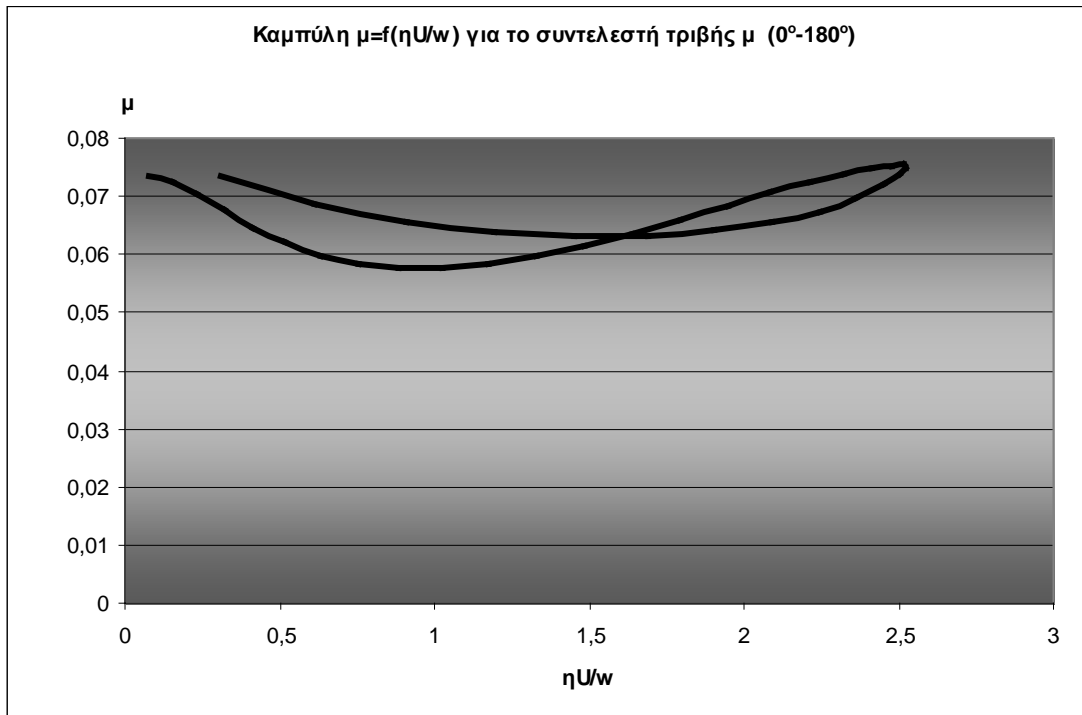


Σχήμα 2.3.1.3.3. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm, **$\eta=6$ mPas**, $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ou} βαθμού

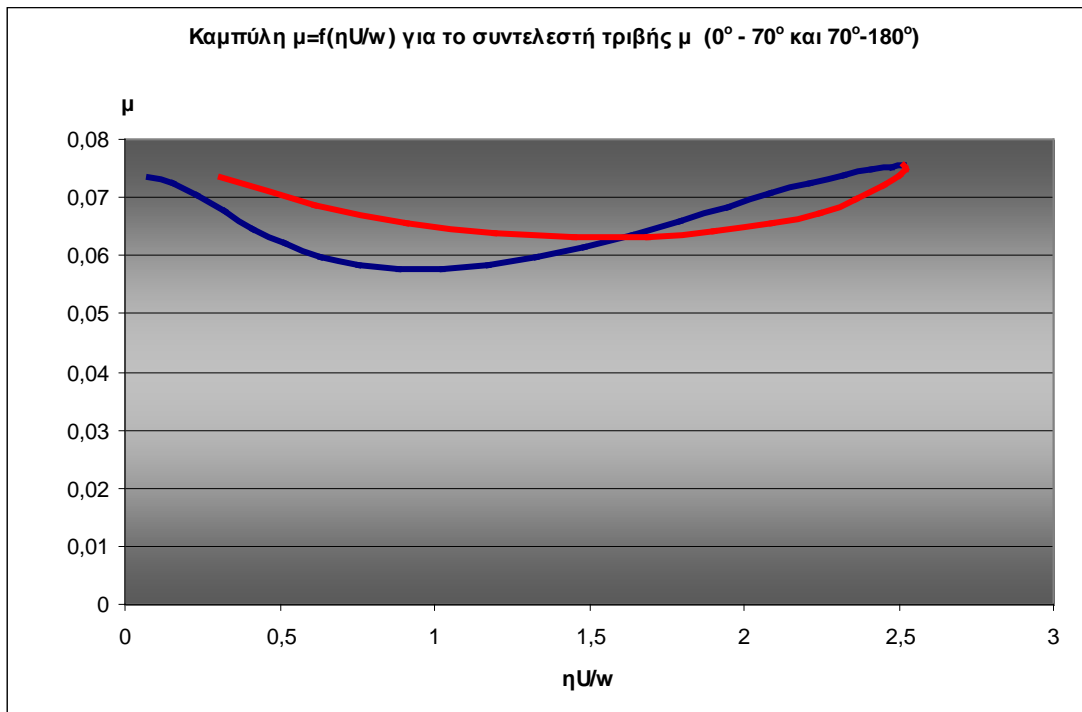


Σχήμα 2.3.1.3.4. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm, **$\eta=6$ mPas**, $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ou} βαθμού

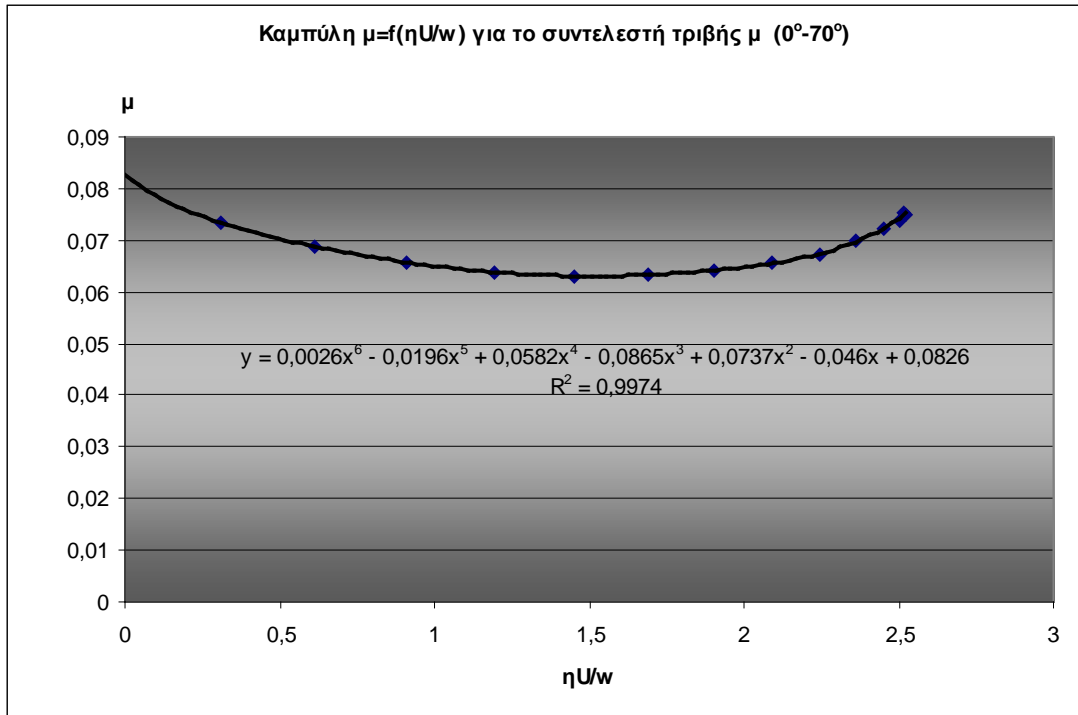
- $\eta=8 \text{ mPas}$, , $N=3000 \text{ rpm}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$



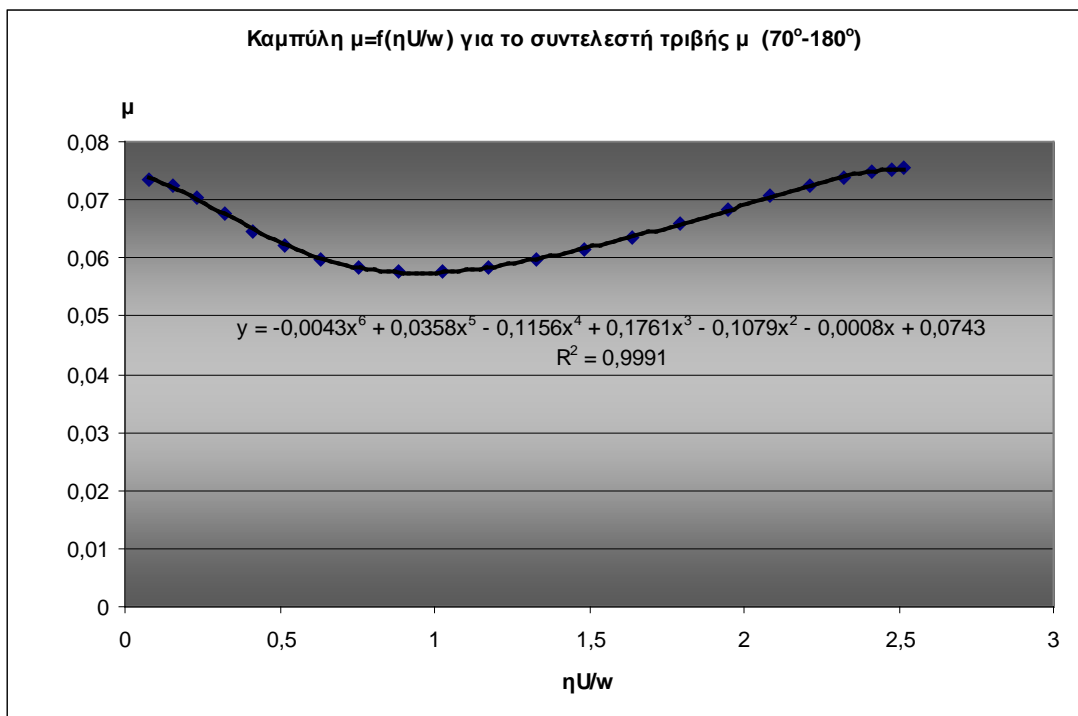
Σχήμα 2.3.1.3.5. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=8 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.3.6. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=8 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

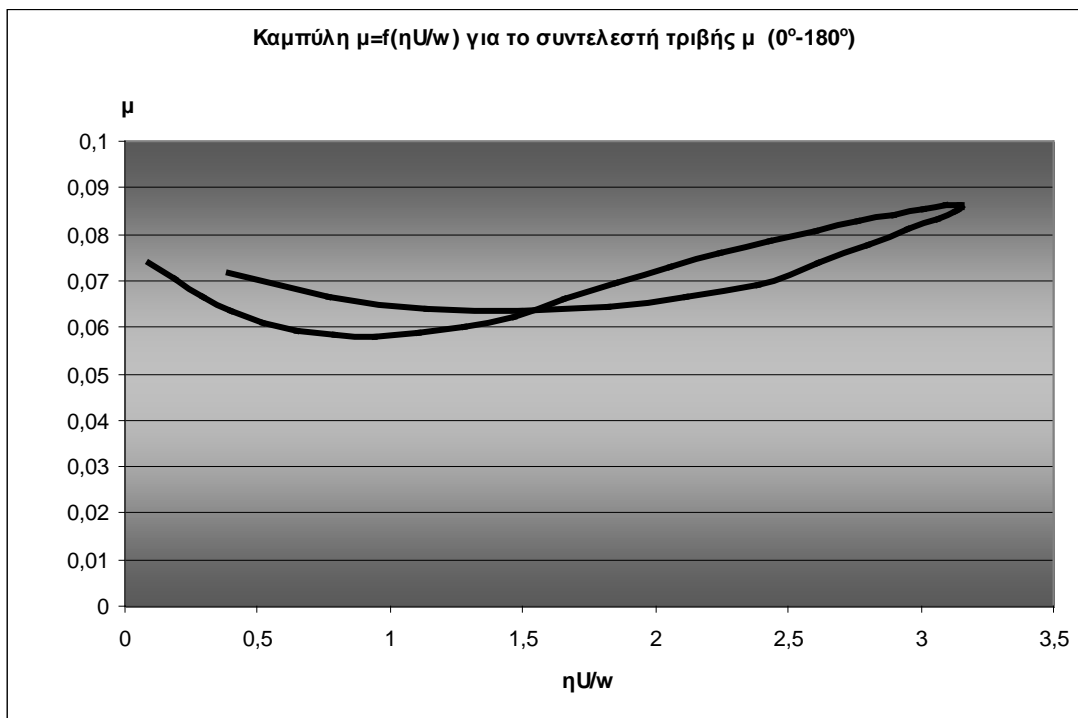


Σχήμα 2.3.1.3.7. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm, $\eta=8$ mPas, $p_{tar}=200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ou} βαθμού

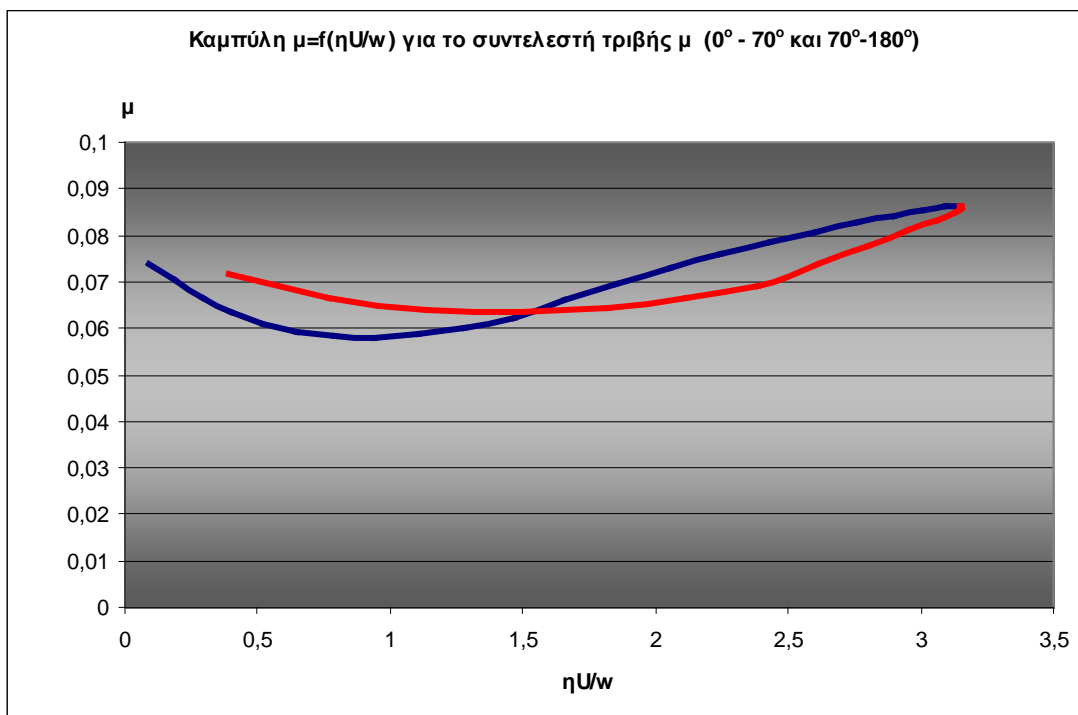


Σχήμα 2.3.1.3.8. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm, $\eta=8$ mPas, $p_{tar}=200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ou} βαθμού

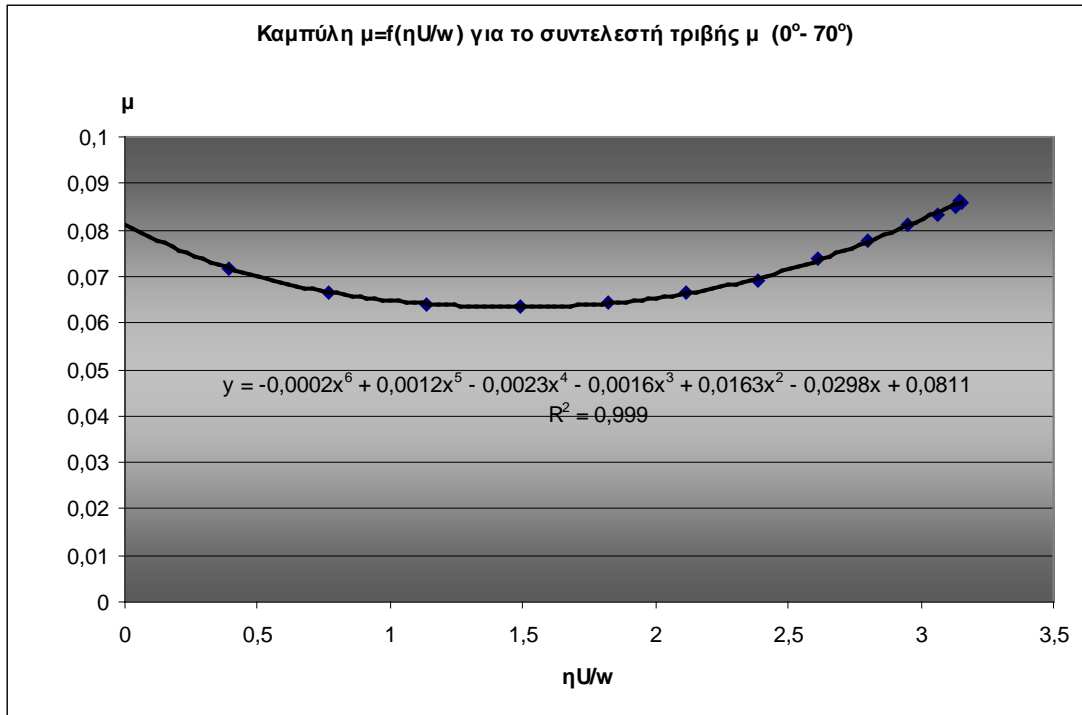
- $\eta=10$ mPas, , $N=3000$ rpm, $p_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm



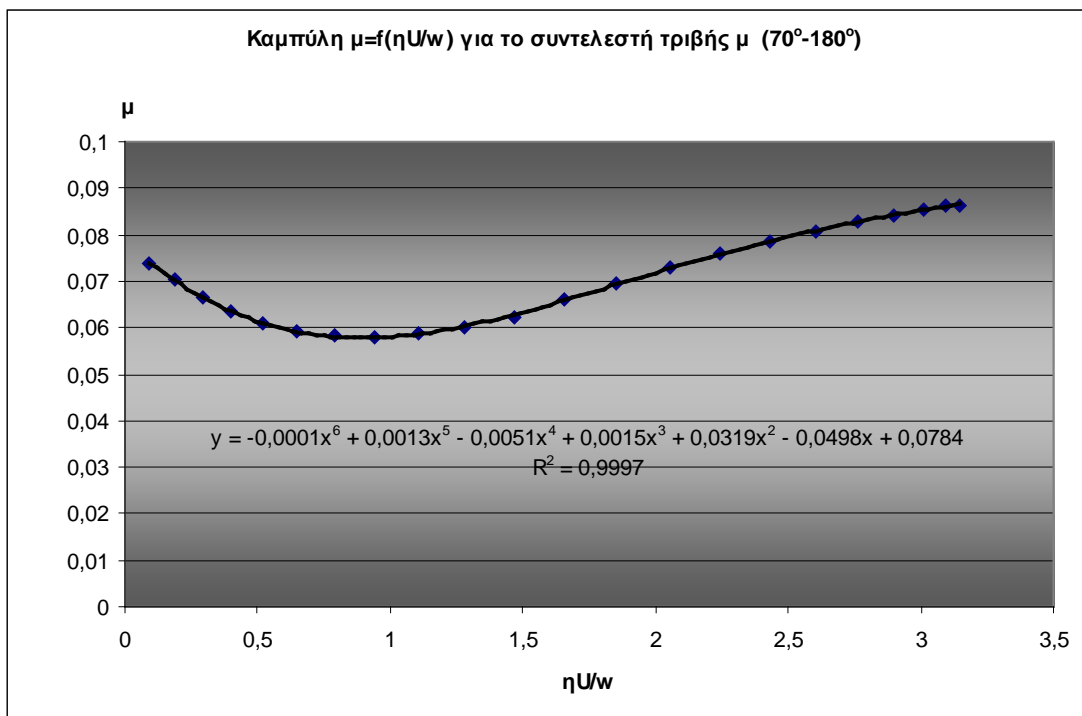
Σχήμα 2.3.1.3.9. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=10$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή τριβής μ στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.1.3.10. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=10$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

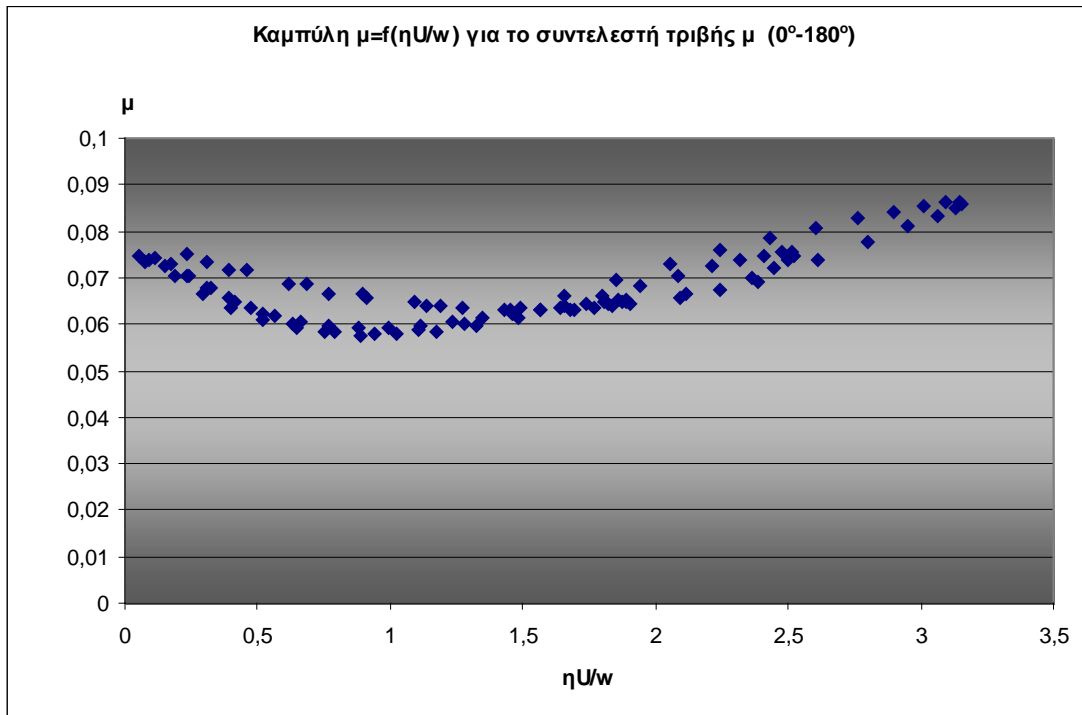


Σχήμα 2.3.1.3.11. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=10$ mPas , $p_{tar}=200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού

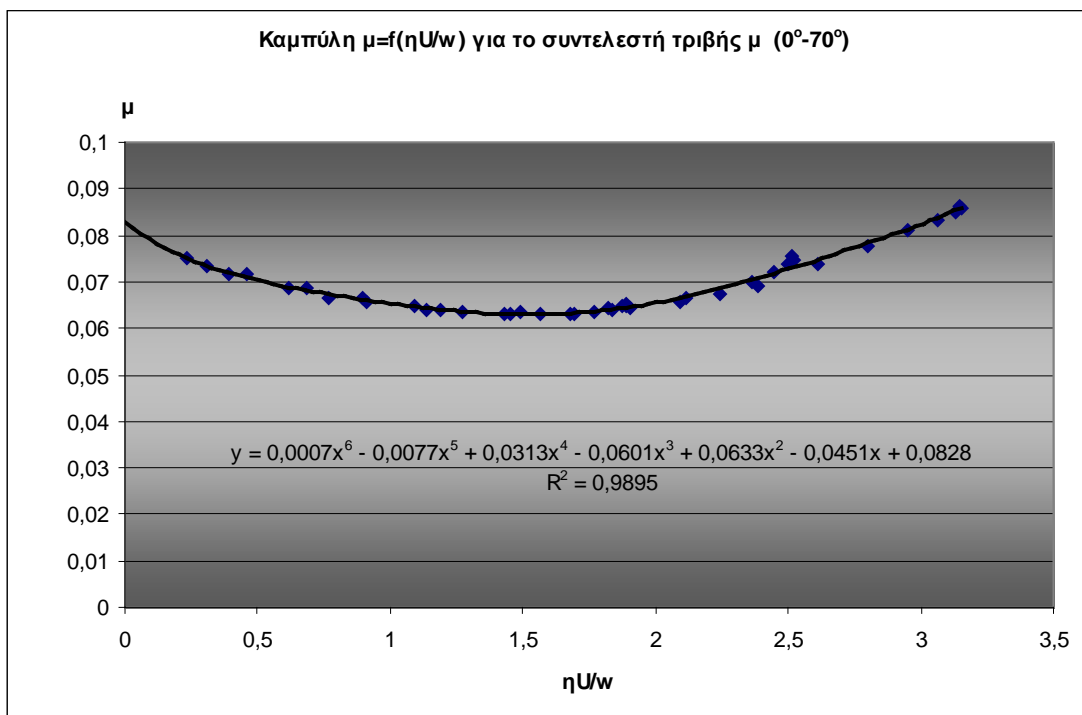


Σχήμα 2.3.1.3.12. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=10$ mPas , $p_{tar}=200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού

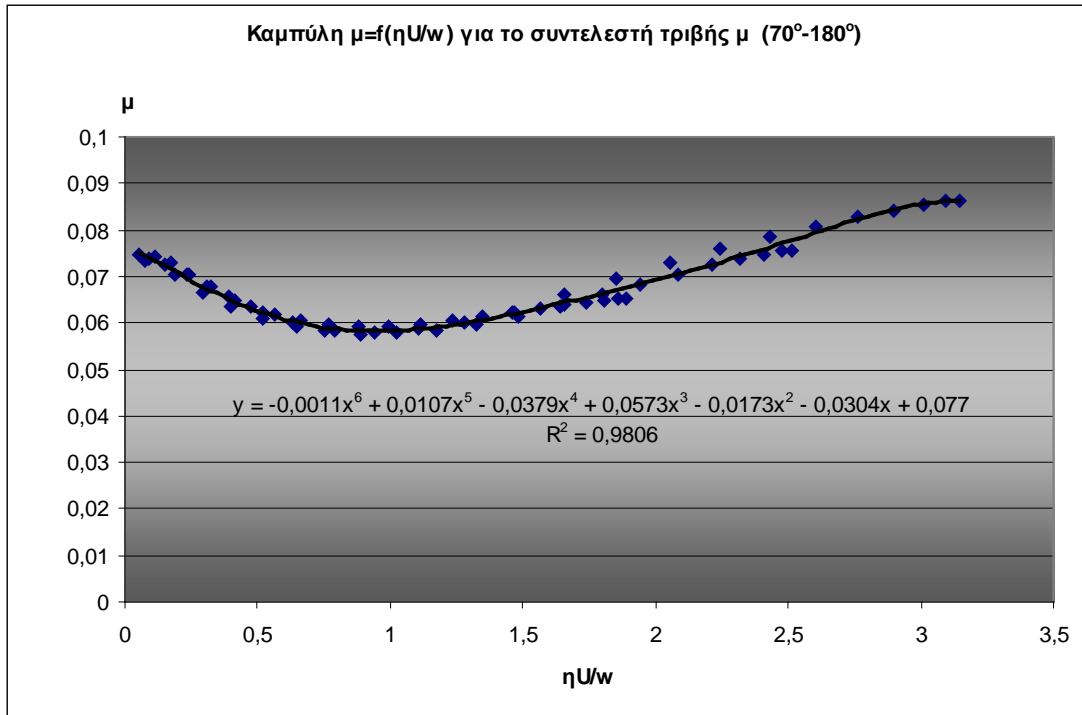
- $\eta=6,8,10$ mPas, , $N=3000$ rpm, $P_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm



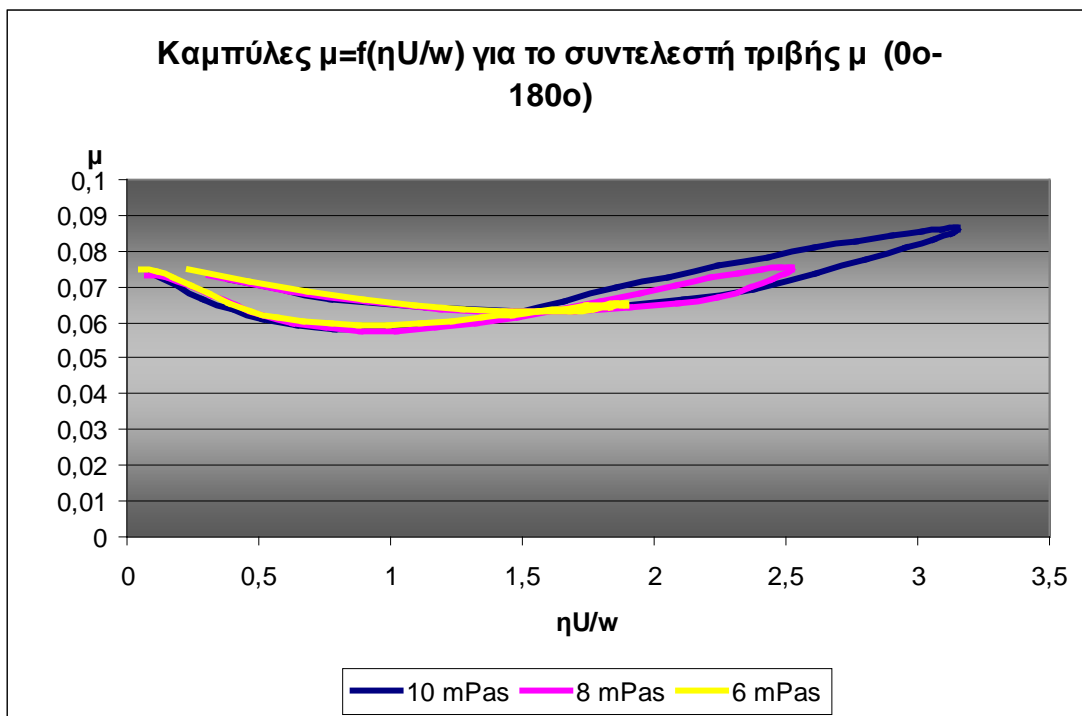
Σχήμα 2.3.1.3.13. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές ιξώδους) για το συντελεστή τριβής μ ($0^\circ-180^\circ$) για $N=3000$ rpm, $p_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm, $\eta=6$ mPas , $\eta=8$ mPas , $\eta=10$ mPas



Σχήμα 2.3.1.3.14. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές ιξώδους) για το συντελεστή τριβής μ στη φάση επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) για $N=3000$ rpm , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm , $\eta=6$ mPas, $\eta=8$ mPas και $\eta=10$ mPas



Σχήμα 2.3.1.3.15. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές ιξώδους) για το συντελεστή τριβής μ στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) για $N=3000$ rpm , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm , $\eta=6$ mPas , $\eta=8$ mPas και $\eta=10$ mPas



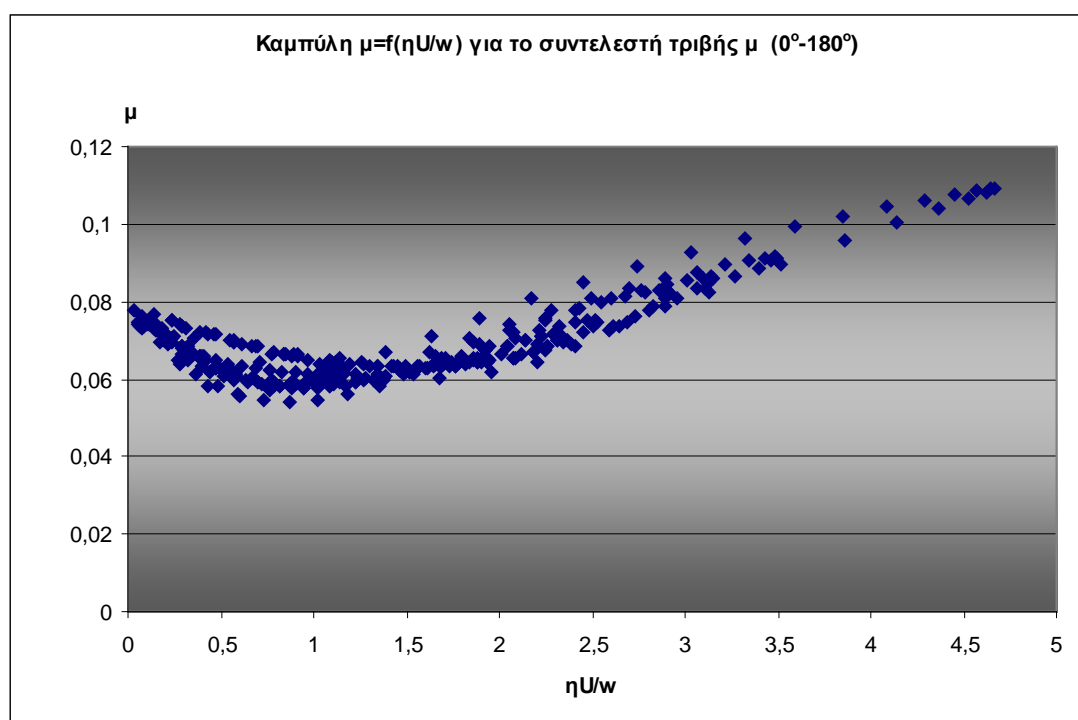
Σχήμα 2.3.1.3.16. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές ιξώδους) για το συντελεστή τριβής μ (0° - 180°) για $N=3000$ rpm , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm, $\eta=6$ mPas , $\eta=8$ mPas και $\eta=10$ mPas

2.3.1.4 Πρώτος δακτύλιος, συγκεντρωτικά ολικά διαγράμματα τύπου Stribeck

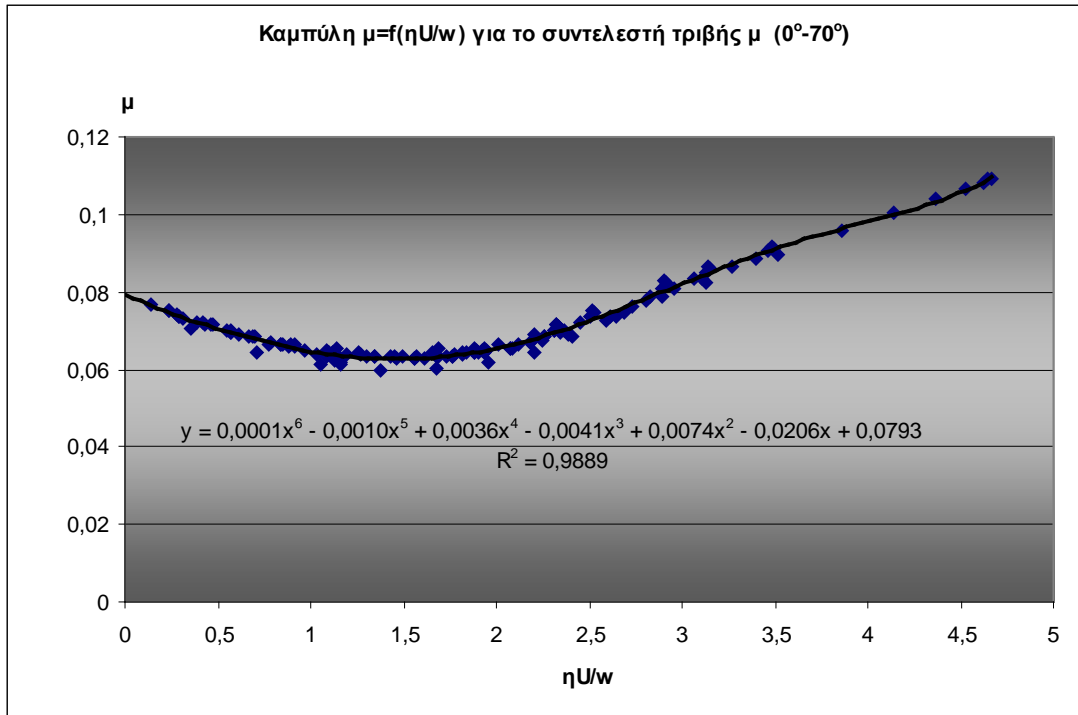
Σε τελική φάση όπως είχαμε προαναφέρει στην αρχή του κεφαλαίου επιχειρούμε τον εμπλουτισμό του πλέγματος καμπυλών τύπου Stribeck με σκοπό να καταλήξουμε σε μία και μόνο συγκεντρωτική καμπύλη (σχήμα 2.3.1.4.1) που να εμπεριέχει όλα τα παραπάνω δεδομένα των διαφορετικών σημείων λειτουργίας.

Έτσι διαχωρίζοντας τη φάση της επιτάχυνσης (σχήμα 2.3.1.4.2) από τη φάση επιβράδυνσης (σχήμα 2.3.1.4.3) και εξάγοντας τις εξισώσεις των πολυωνύμων των γραμμών τάσης μπορούμε να υπολογίσουμε τη **συνολική δύναμη τριβής f_{tot}** για οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας επιθυμούμε μέσω των πολυωνύμων αυτών.

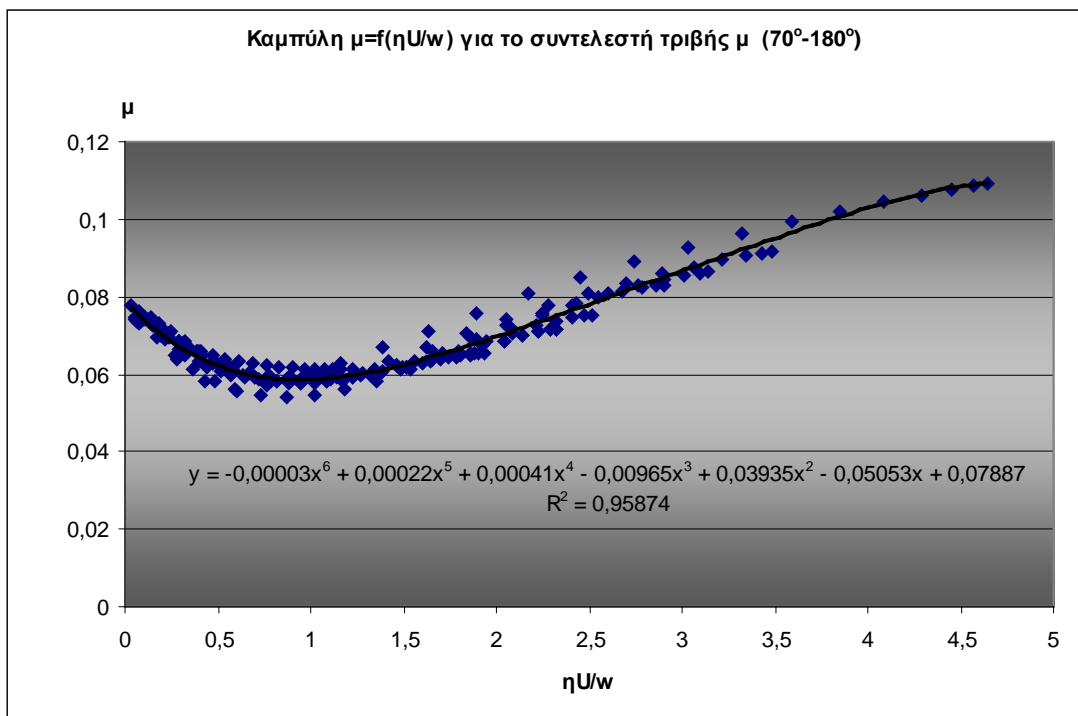
Τα αποτελέσματα αυτά των υπολογισμών για τη δύναμη τριβής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ταχείας προσέγγισης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο και συγκρίνονται με αντίστοιχα από άλλες μεθόδους θεωρητικής προσέγγισης.



Σχήμα 2.3.1.4.1. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck για το συντελεστή τριβής μ (0° - 180°) για όλες τις παραπάνω συνθήκες λειτουργίας



Σχήμα 2.3.1.4.2. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck για το συντελεστή τριβής μ στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) για όλες τις συνθήκες λειτουργίας με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού.



Σχήμα 2.3.1.4.3. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck για το συντελεστή τριβής μ στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) για όλες τις συνθήκες λειτουργίας με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού.

2.3.2 Καμπύλες για τον προσδιορισμό του πάχους λιπαντικής μεμβράνης h_{\min}

ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:

Επειδή στα χρονικά πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρήθηκε ότι η λεπτομερέστερη μελέτη και των τριών φάσεων φθοράς δεν έδινε περισσότερα στοιχεία τεκμηρίωσης της μεθόδου τη στιγμή που αναδείχθηκε η ισχύς της τουλάχιστον ως προς τον συντελεστή τριβής για την πρώτη φάση φθοράς προτάθηκε από τον επιβλέποντα διδάσκοντα ως προς το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης να επιλεγεί η δεύτερη φάση φθοράς για τους εξής λόγους:

α) αναφέρεται σε κατάσταση μικρογεωμετρίας του συστήματος που προσεγγίζει και την τρίτη κατάσταση φθοράς άρα είναι αντιπροσωπευτικότερη από αυτή της πρώτης κατάστασης και

β) επειδή οι τιμές του πάχους λιπαντικής μεμβράνης είναι μικρότερες στα νεκρά σημεία απ' ότι στην προηγούμενη κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η καμπύλη τύπου Stribeck με χαρακτηριστικά εντονότερων διαφοροποιήσεων των τιμών της.

Για τους προηγούμενους λόγους δεν θεωρήθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν και οι καμπύλες τύπου Stribeck σε σχέση με το κριτήριο <<τριβής-φθοράς>> που οπωσδήποτε αναφέρεται στην ίδια κατάσταση φθοράς και ταυτόχρονη μεταβολή του λόγου μ/h_{\min}

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα των καμπυλών τύπου Stribeck για τον πρώτο δακτύλιο κυκλικής κατατομής με ακτίνα καμπυλότητας $R=36\text{mm}$ για τον υπολογισμό του πάχους λιπαντικής μεμβράνης για συνολικά τρεις χαρτογραφήσεις:

1. Για μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής (N [rpm]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων (παράγραφος 2.3.2.1.)
2. Για μεταβαλλόμενη πίεση του δακτυλίου (p_{tar} [kPa]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων (παράγραφος 2.3.2.2.)
3. Για μεταβαλλόμενο ιξώδες λιπαντικού (η [mPas]) με σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων (παράγραφος 2.3.2.3)

Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια 4 διαγράμματα για κάθε σημείο λειτουργίας.

Το πρώτο απεικονίζει τη μεταβολή του μεγέθους $1/h_{\min}$ στη φάση καθόδου του εμβόλου (0° - 180°).

Στο δεύτερο διαχωρίζονται χρωματικά οι φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70° κόκκινο χρώμα) και επιβράδυνσης (70° - 180° μπλε χρώμα).

Στο τρίτο διάγραμμα απομονώνεται η επιταχυνόμενη κίνηση και εξάγεται το πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού της εξίσωσης της γραμμής τάσης.

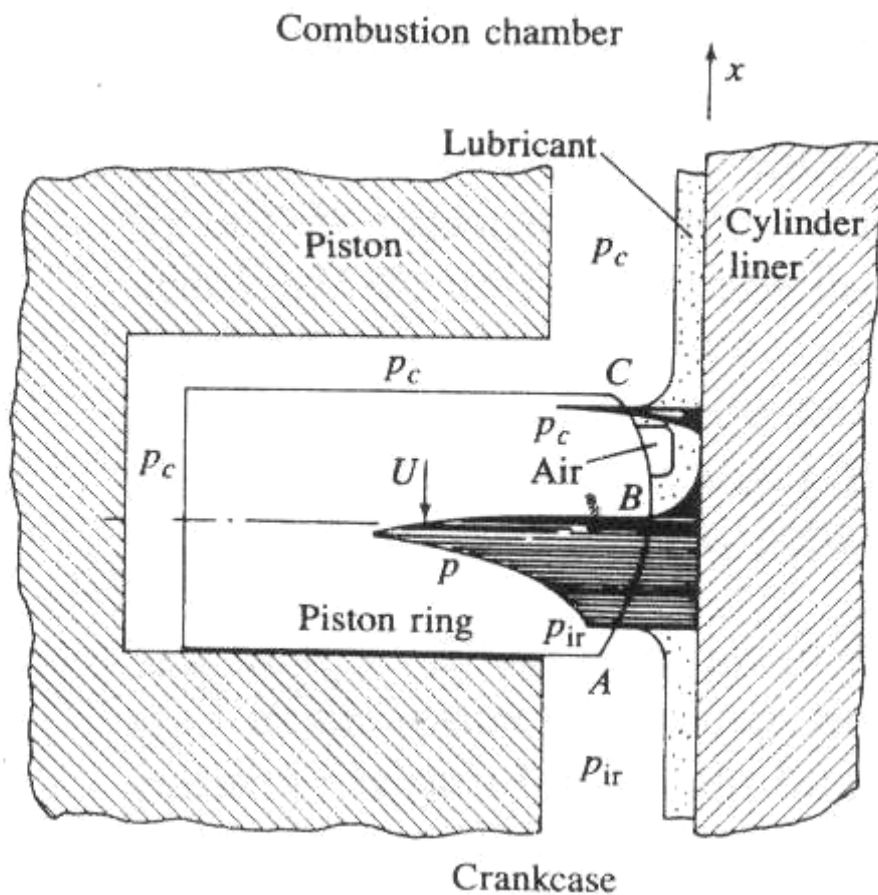
Στο τέταρτο διάγραμμα απομονώνεται η επιβραδυνόμενη κίνηση και εξάγεται το πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού της εξίσωσης της γραμμής τάσης.

ΠΑΧΗ ΛΙΠΑΝΤΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
(ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ)

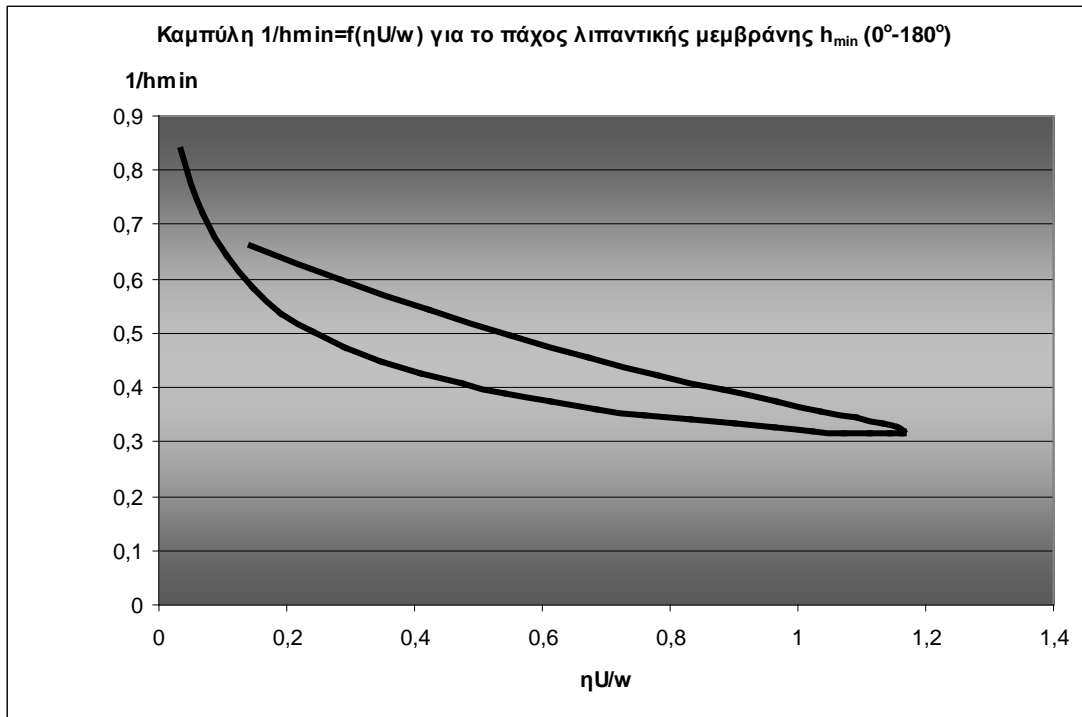
2.3.2.1 Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενη συχνότητα

περιστροφής N

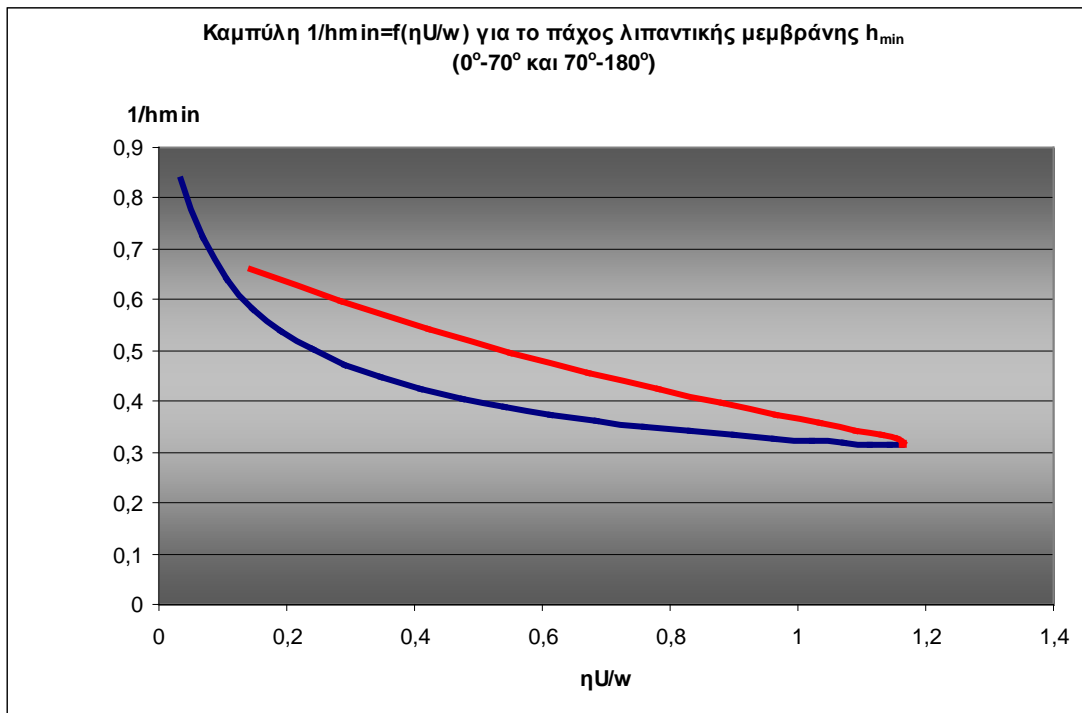
($N=1500$ rpm έως $N=6000$ rpm)



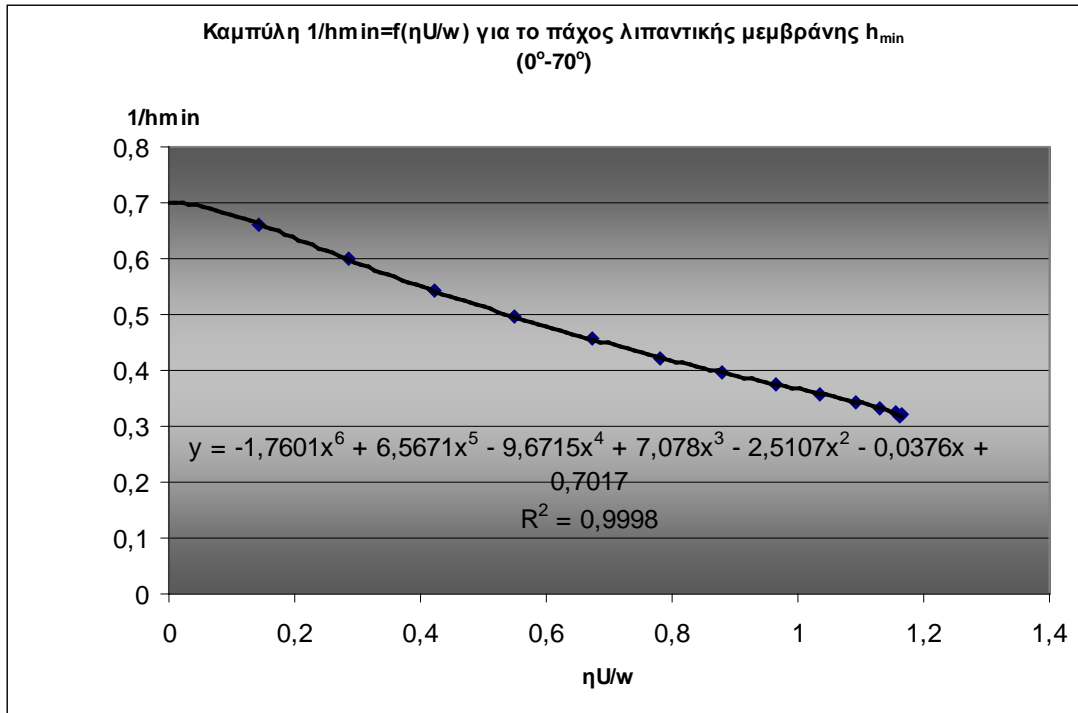
- **N=1500 rpm, $\eta=7,39$ mPas, $p_{tar}= 200$ kPa, R=36 mm**



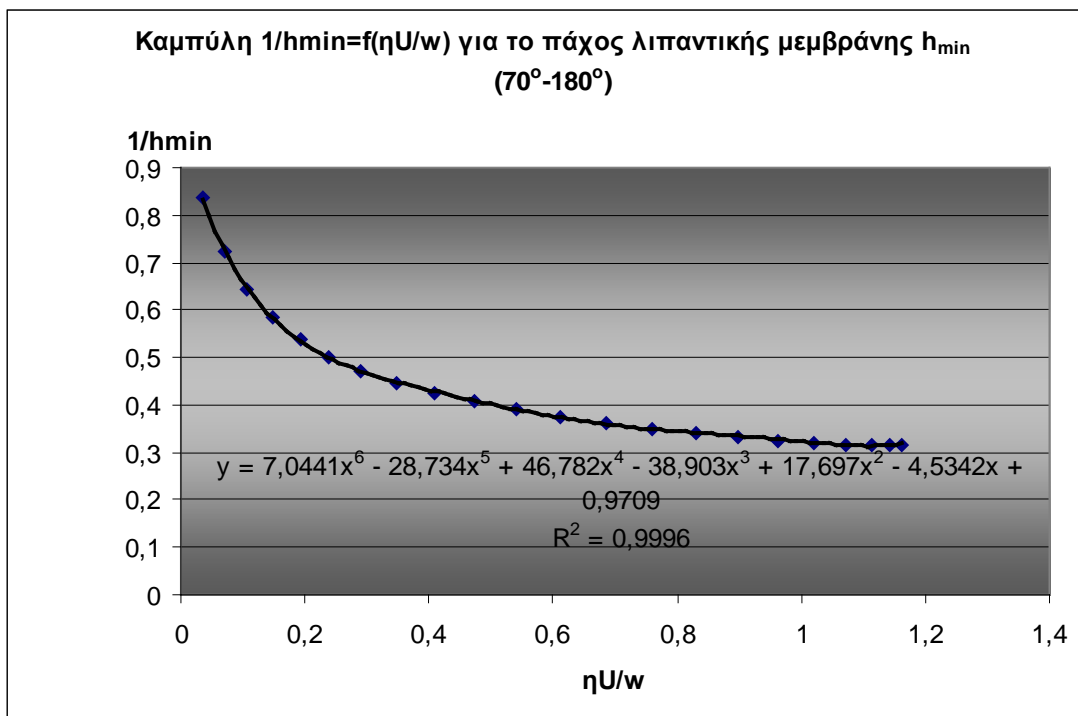
Σχήμα 2.3.2.1.1. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=1500 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , R=36 mm. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70°) και επιβράδυνσης (70° - 180°)



Σχήμα 2.3.2.1.2. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=1500 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , R=36 mm. στις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70° κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης (70° - 180° μπλε καμπύλη)

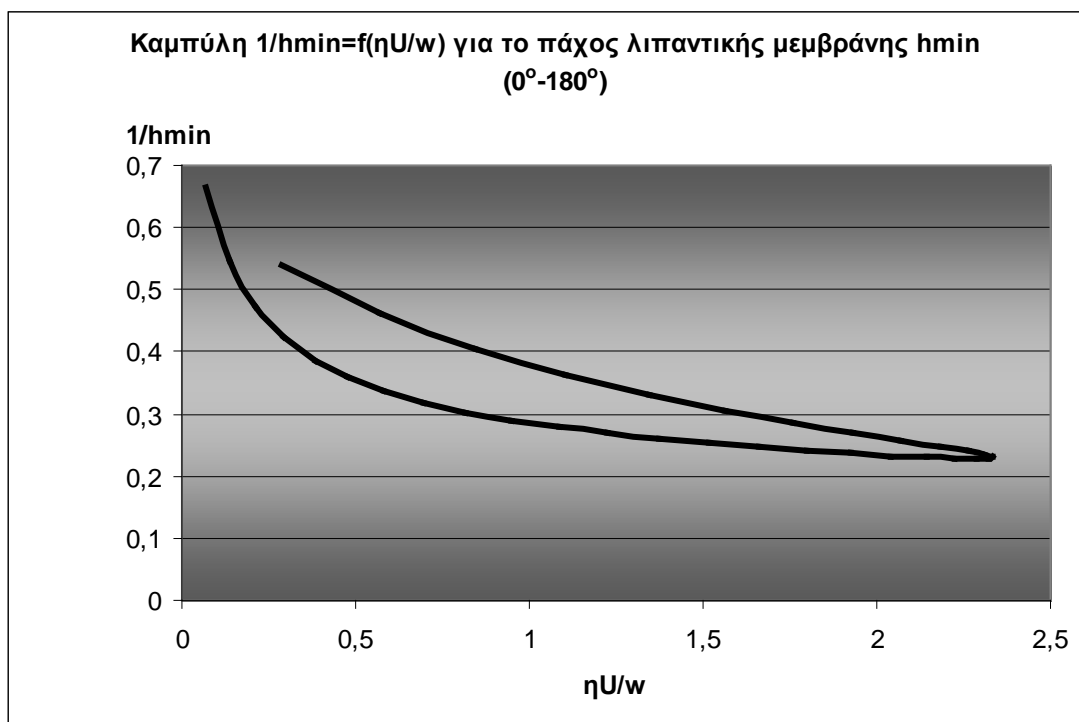


Σχήμα 2.3.2.1.3. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=1500 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

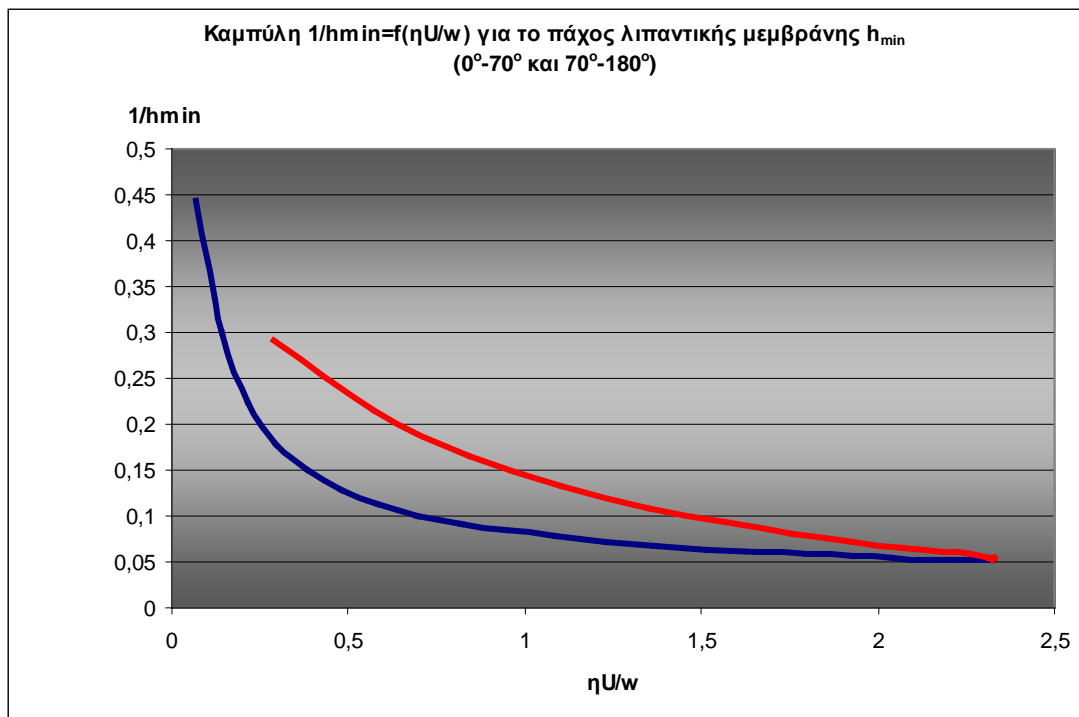


Σχήμα 2.3.2.1.4. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=1500 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

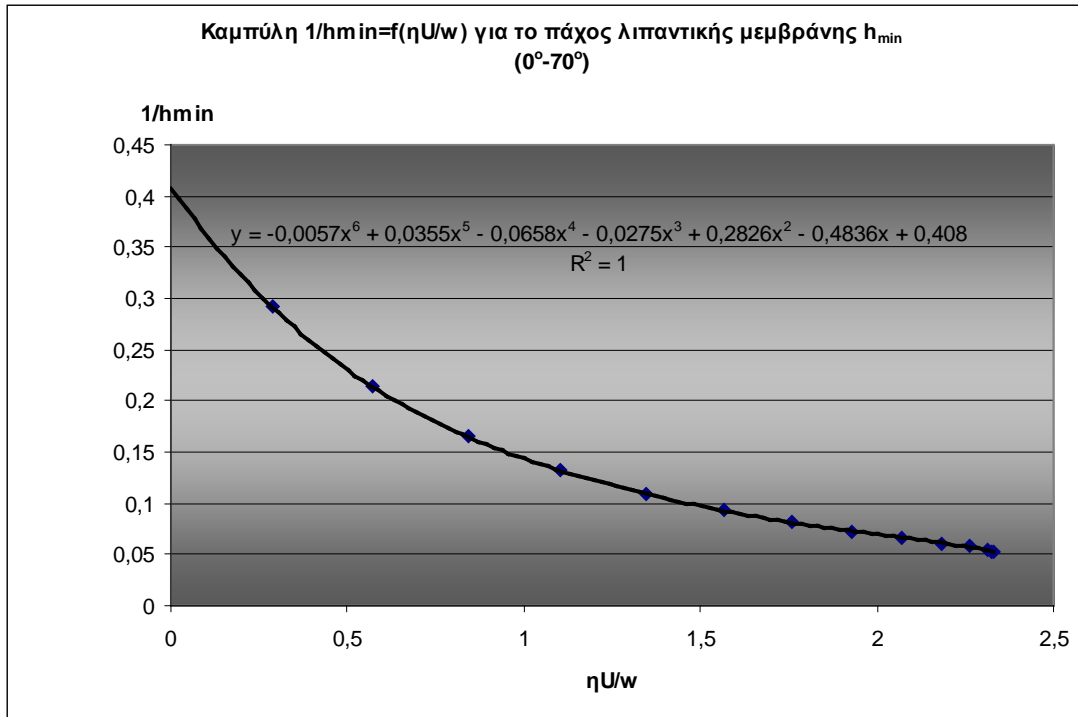
- $N=3000$ rpm, $\eta=7,39$ mPas, $p_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm



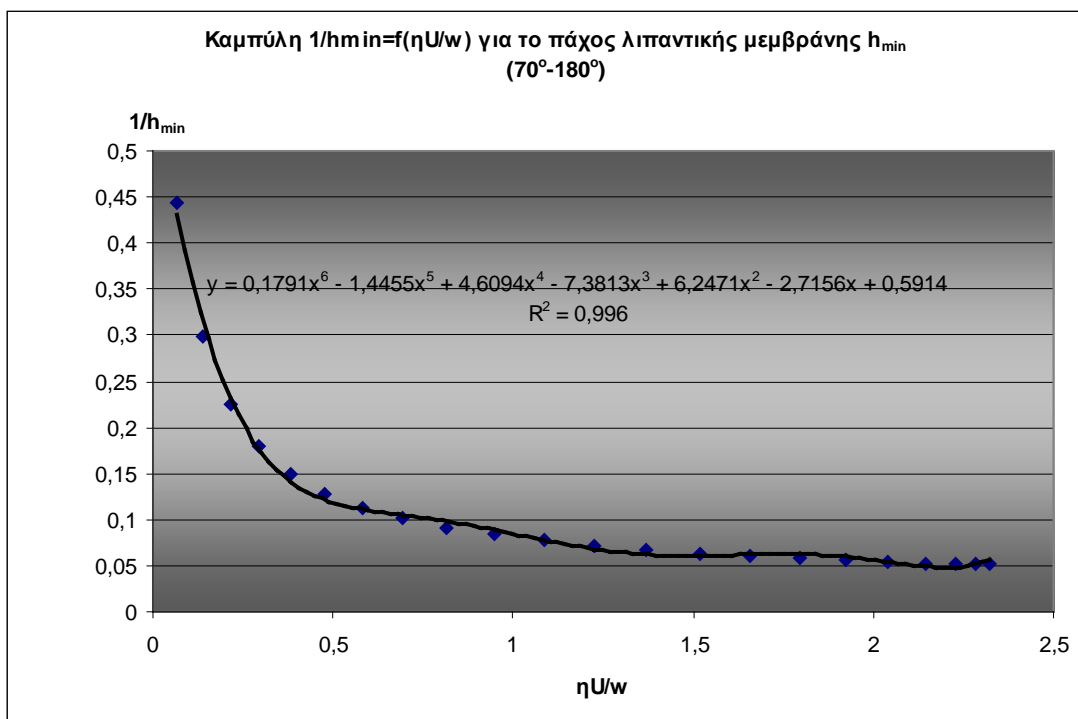
Σχήμα 2.3.2.1.5. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.2.1.6. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

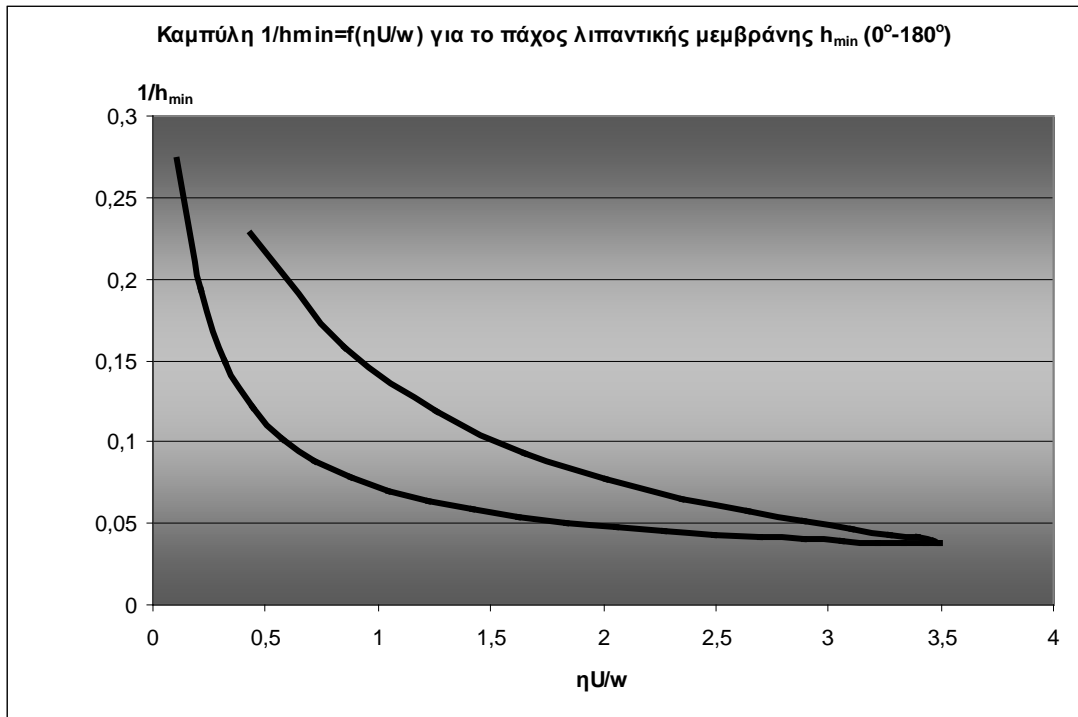


Σχήμα 2.3.2.1.7. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=3000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

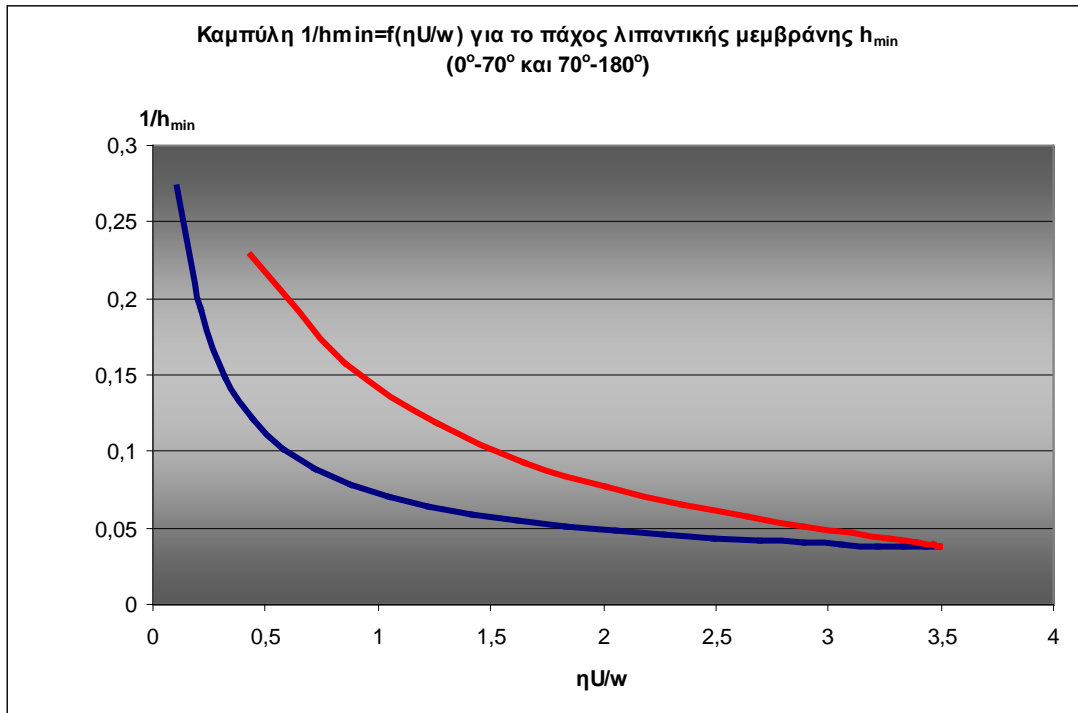


Σχήμα 2.3.2.1.8. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=3000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

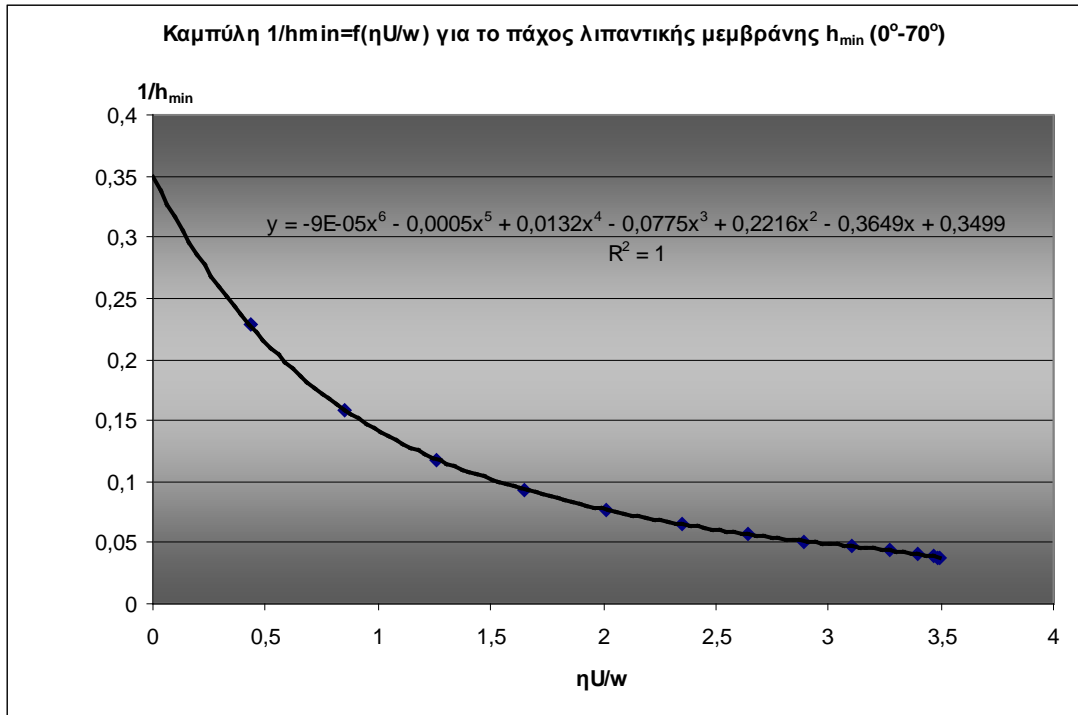
- $N=4500$ rpm, $\eta=7,39$ mPas, $p_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm



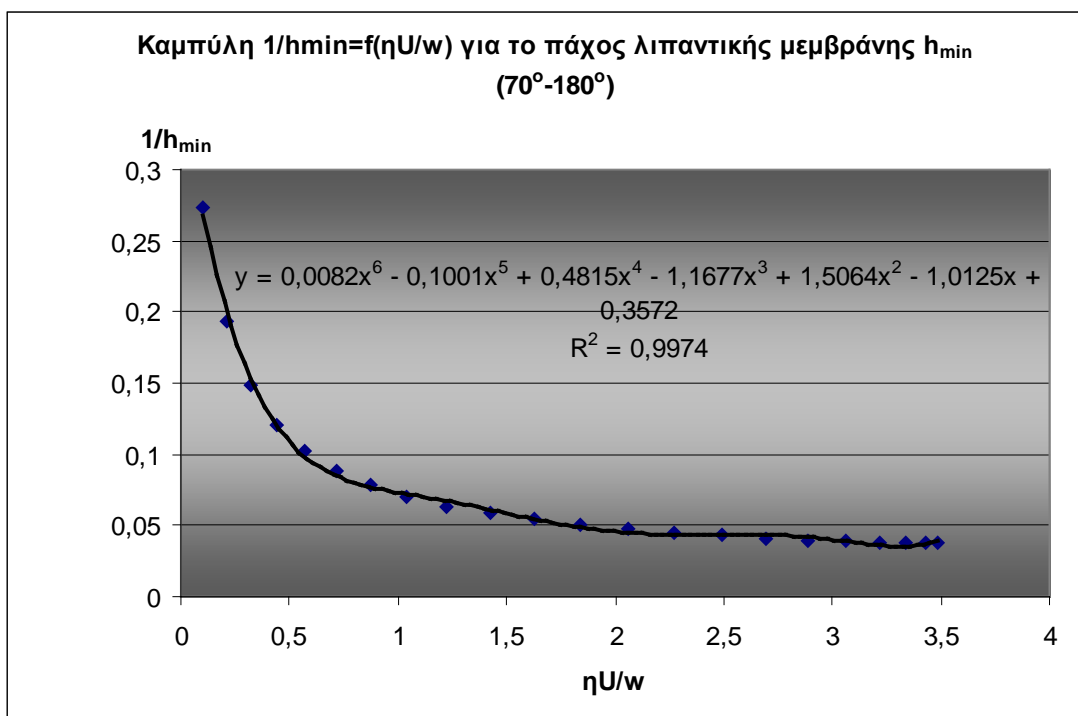
Σχήμα 2.3.2.1.9. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=4500$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70°) και επιβράδυνσης (70° - 180°)



Σχήμα 2.3.2.1.10. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=4500$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70° κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης (70° - 180° μπλε καμπύλη)

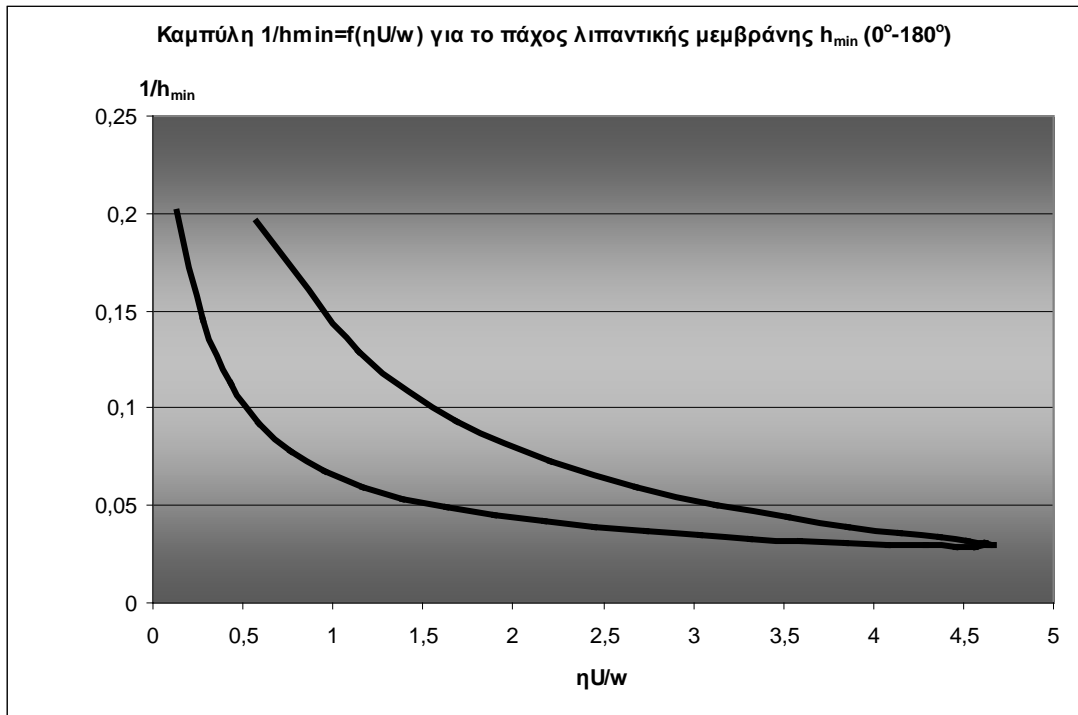


Σχήμα 2.3.2.1.11. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=4500 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

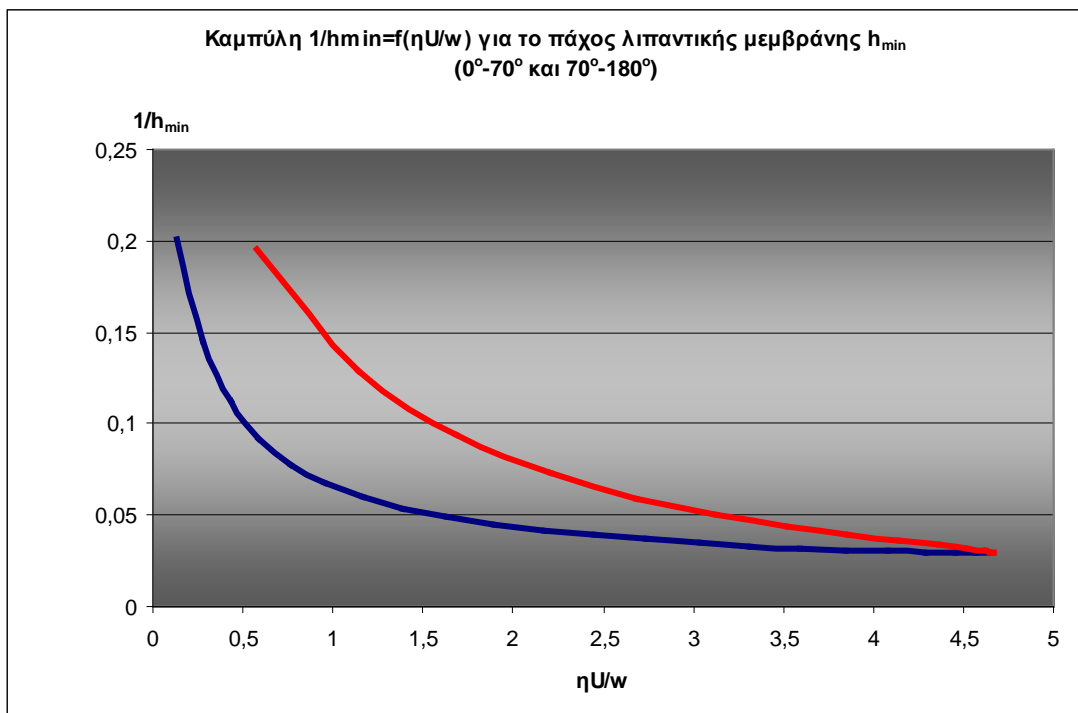


Σχήμα 2.3.2.1.12. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=4500 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

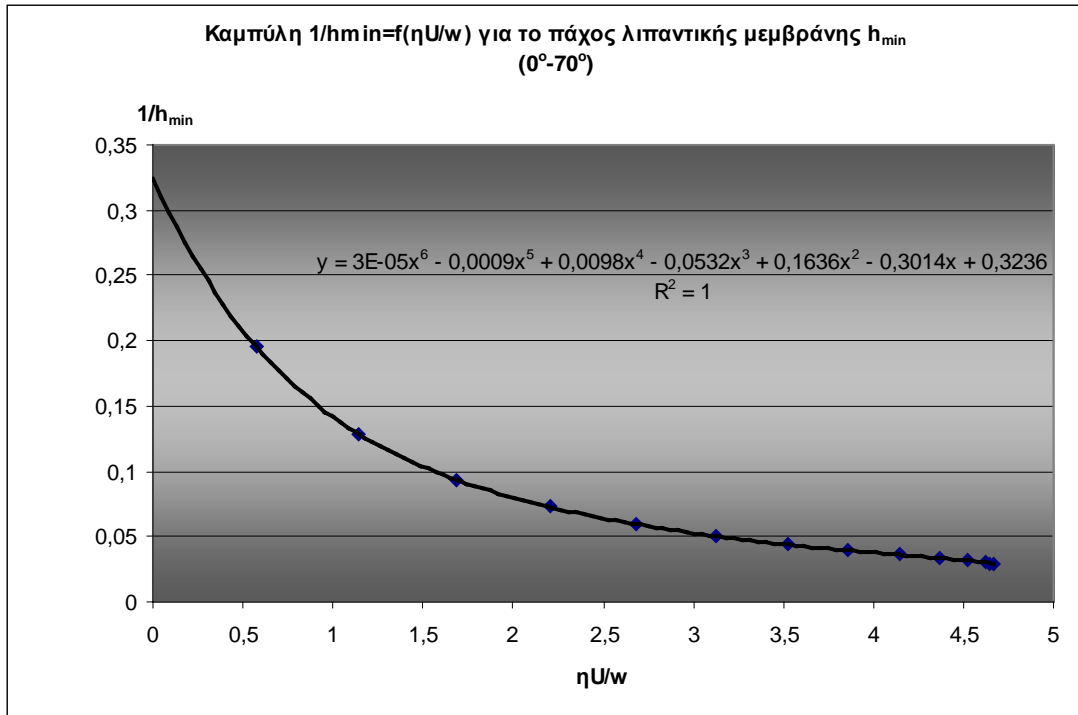
- **N=6000 rpm, $\eta=7,39$ mPas, $p_{tar}= 200$ kPa, R=36 mm**



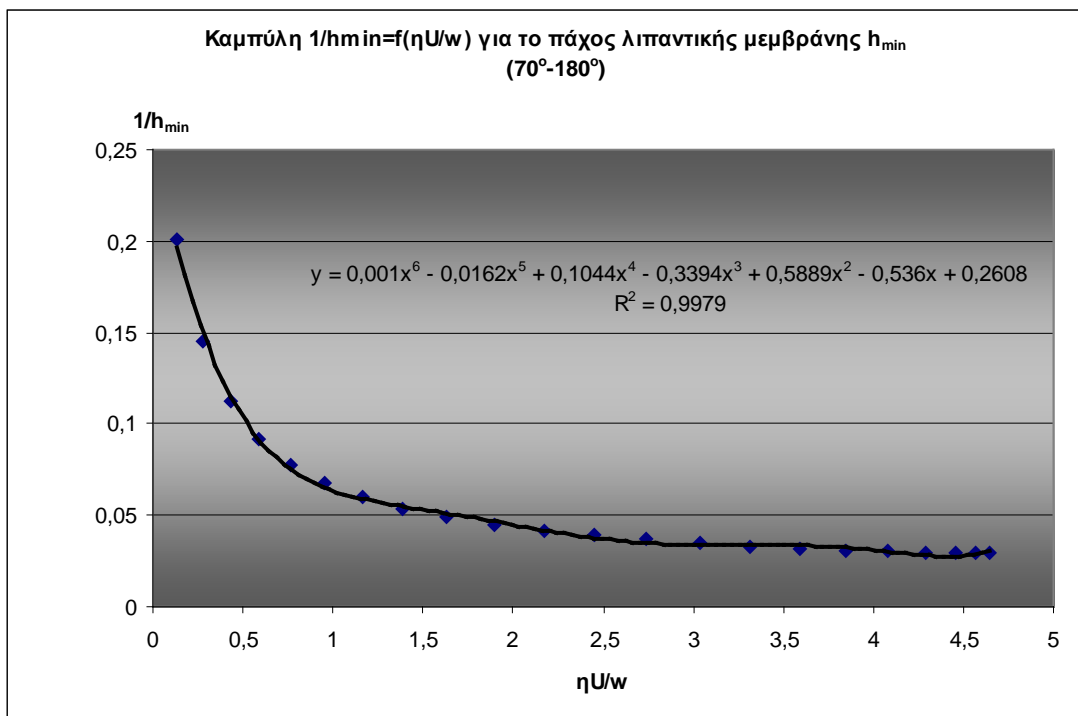
Σχήμα 2.3.2.1.13. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=6000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , R=36 mm. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.2.1.14. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=6000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , R=36 mm. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

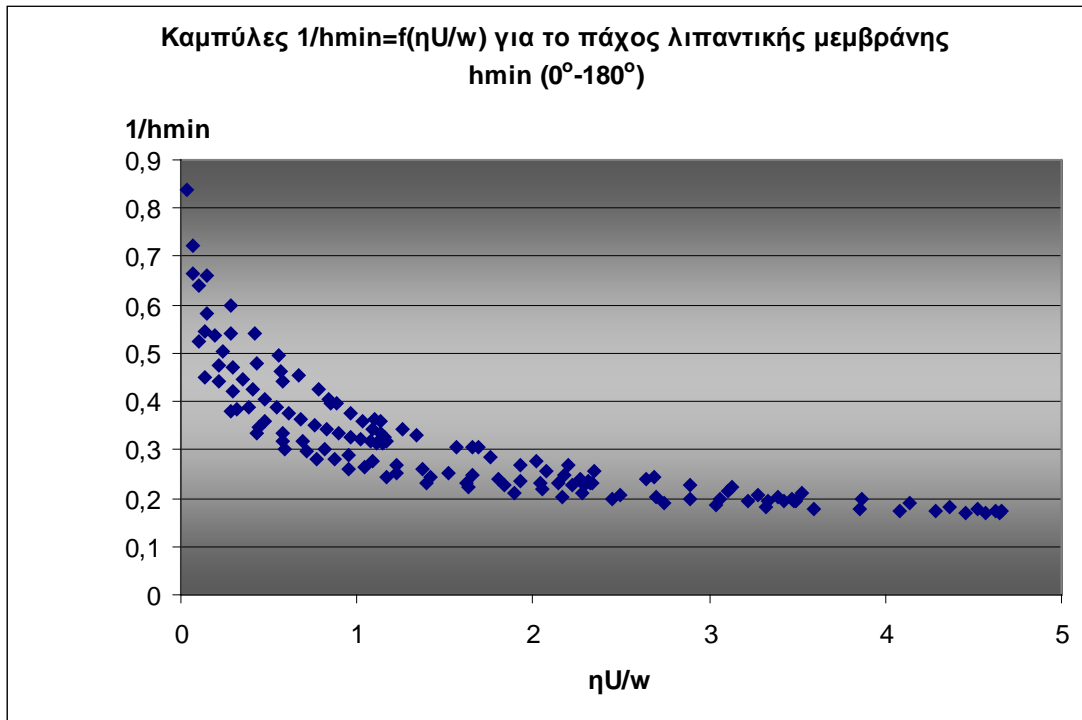


Σχήμα 2.3.2.1.15. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=6000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

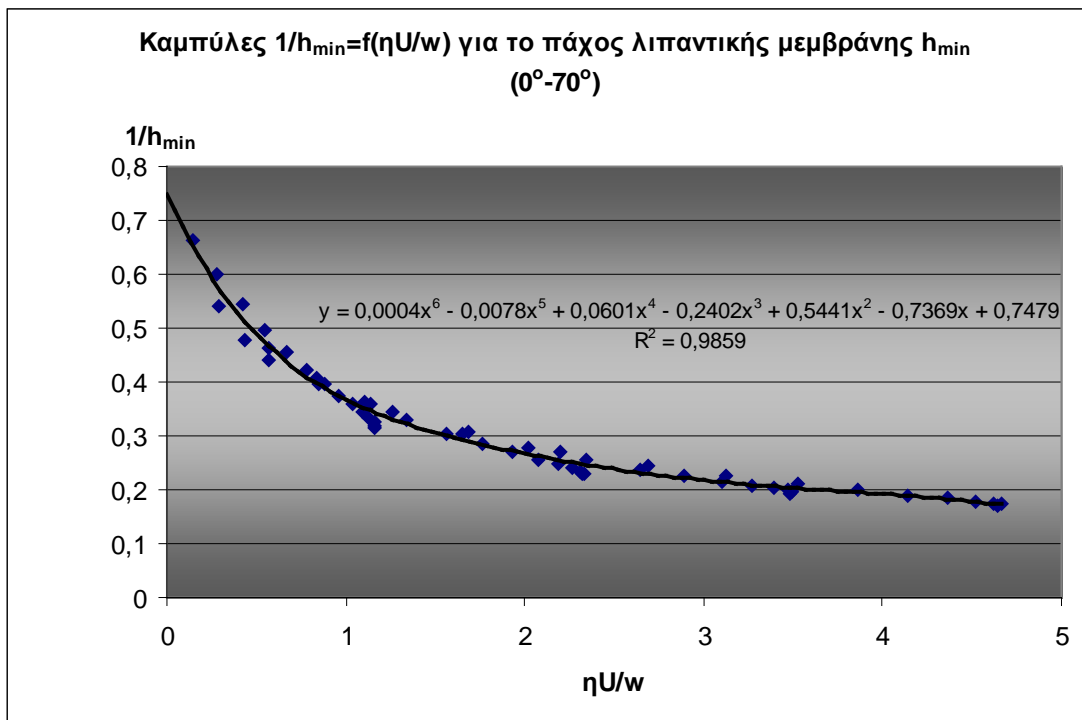


Σχήμα 2.3.2.1.16. Διάγραμμα τύπου Stribeck , **N=6000 rpm** , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

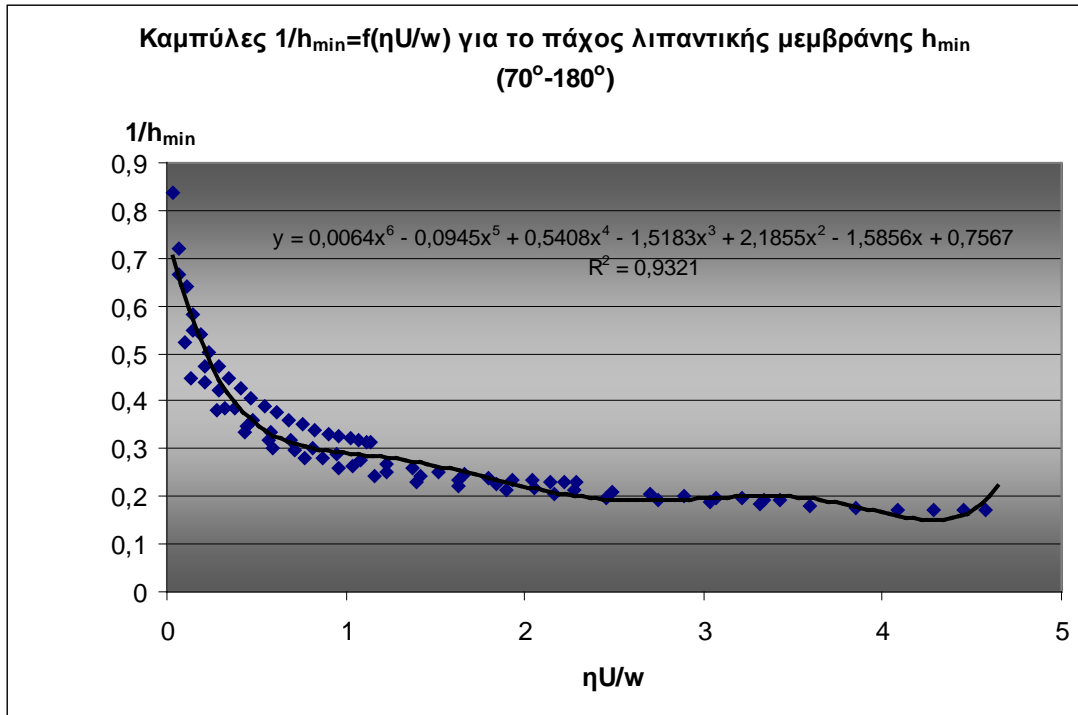
- $N=1500,3000,4500,6000$ rpm, $\eta=7,39$ mPas, $p_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm



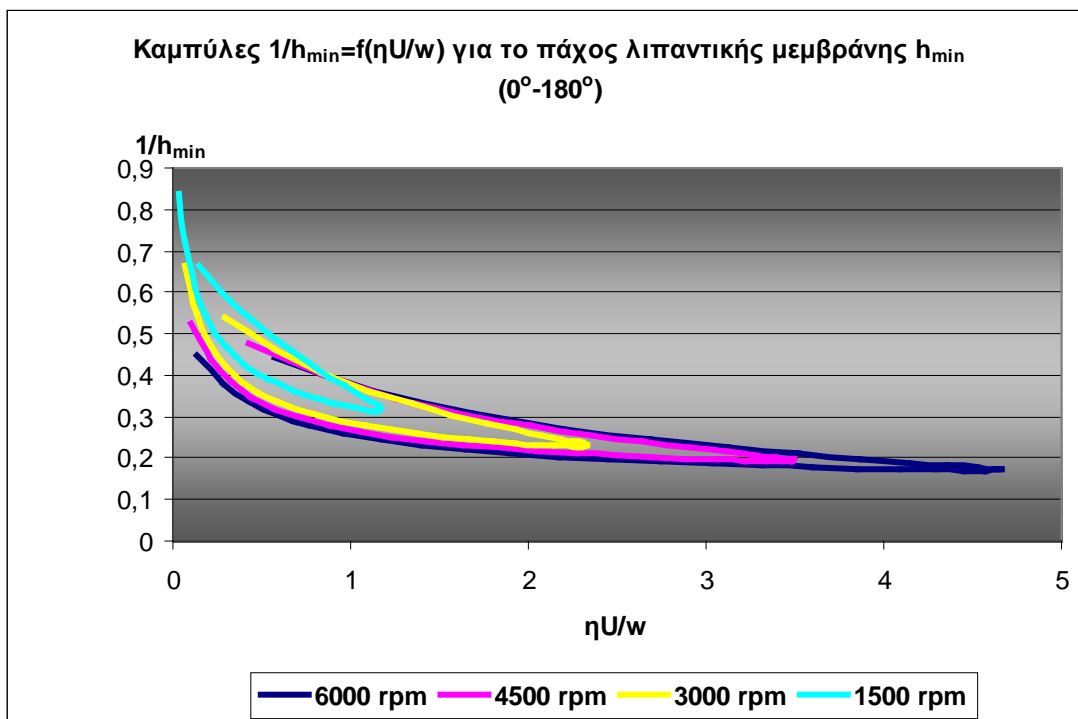
Σχήμα 2.3.2.1.17. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές στροφών) για το συντελεστή $1/h_{min}$ ($0^\circ-180^\circ$) για $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm, $N=1500$ rpm , $N=3000$ rpm , $N=4500$ rpm και $N=6000$ rpm



Σχήμα 2.3.2.1.18. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές στροφών) για το συντελεστή $1/h_{min}$ στη φάση επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού για $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 200$ kPa , $R=36$ mm , $N=1500$ rpm, $N=3000$ rpm , $N=4500$ rpm και $N=6000$ rpm



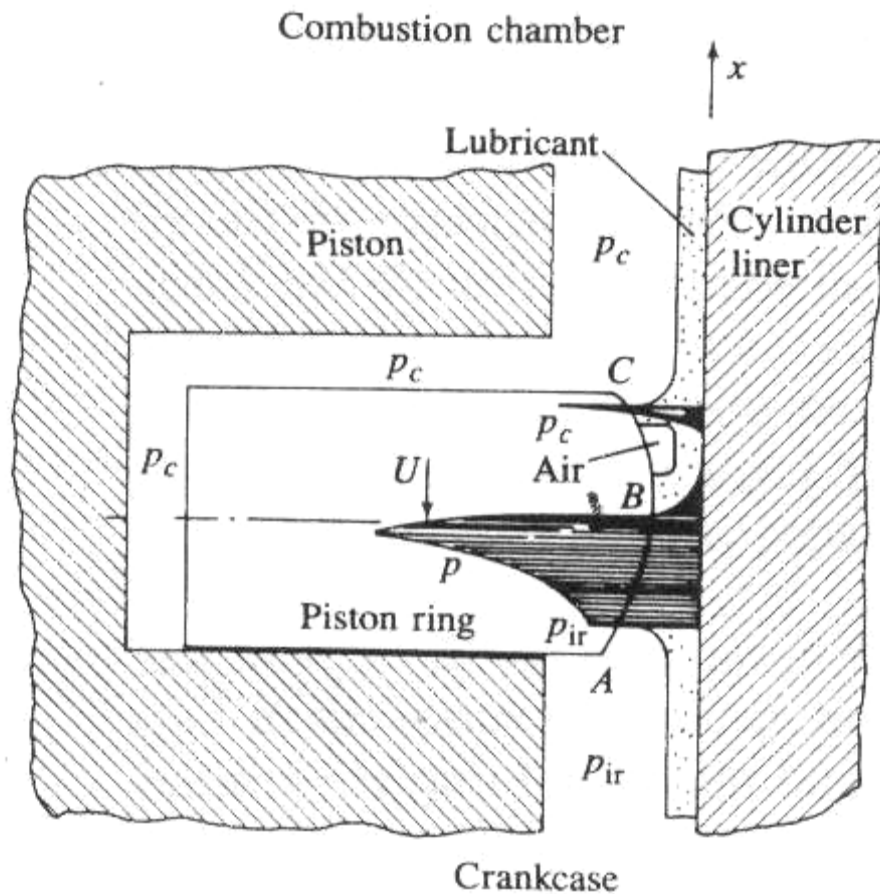
Σχήμα 2.3.2.1.19. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές στροφών) για το συντελεστή $1/h_{\min}$ στη φάση επιβράδυνσης (0°-70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6⁰⁰ βαθμού για $\eta=7,39$ mPas , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa , $R=36$ mm , **N=1500 rpm , N=3000 rpm , N=4500 rpm και N=6000 rpm**



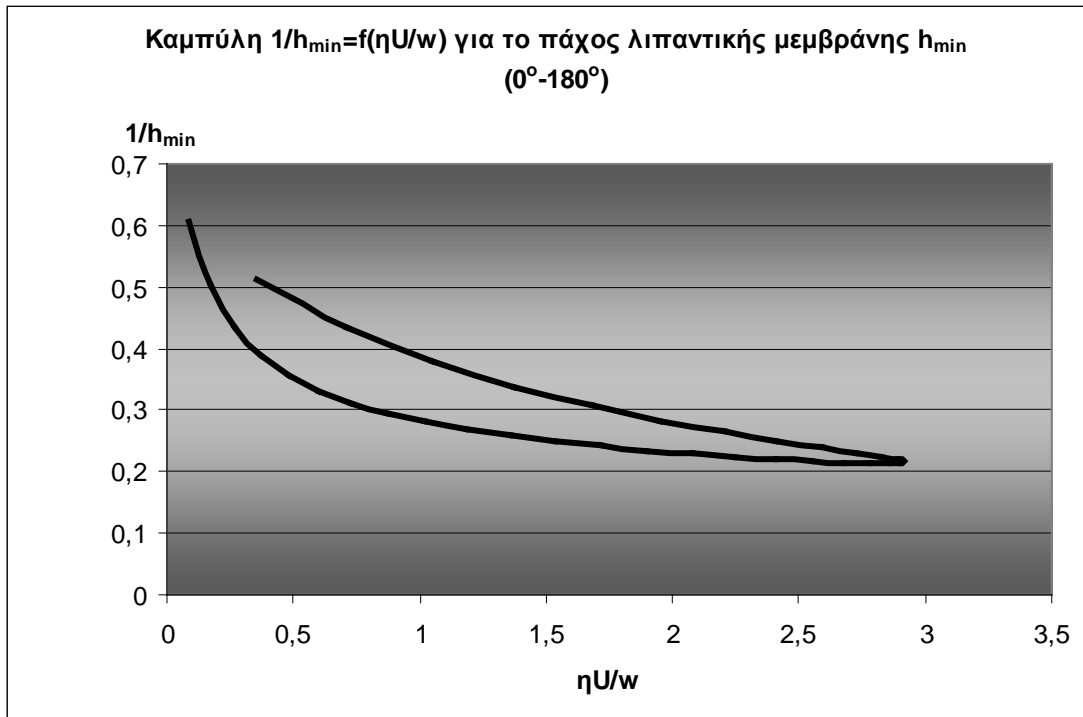
Σχήμα 2.3.2.1.20. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές στροφών) για το συντελεστή $1/h_{\min}$ (0°-180°) για $\eta=7,39$ mPas , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa , $R=36$ mm , **N=1500 rpm , N=3000 rpm , N=4500 rpm και N=6000 rpm**

ΠΑΧΗ ΛΙΠΑΝΤΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
(ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ)

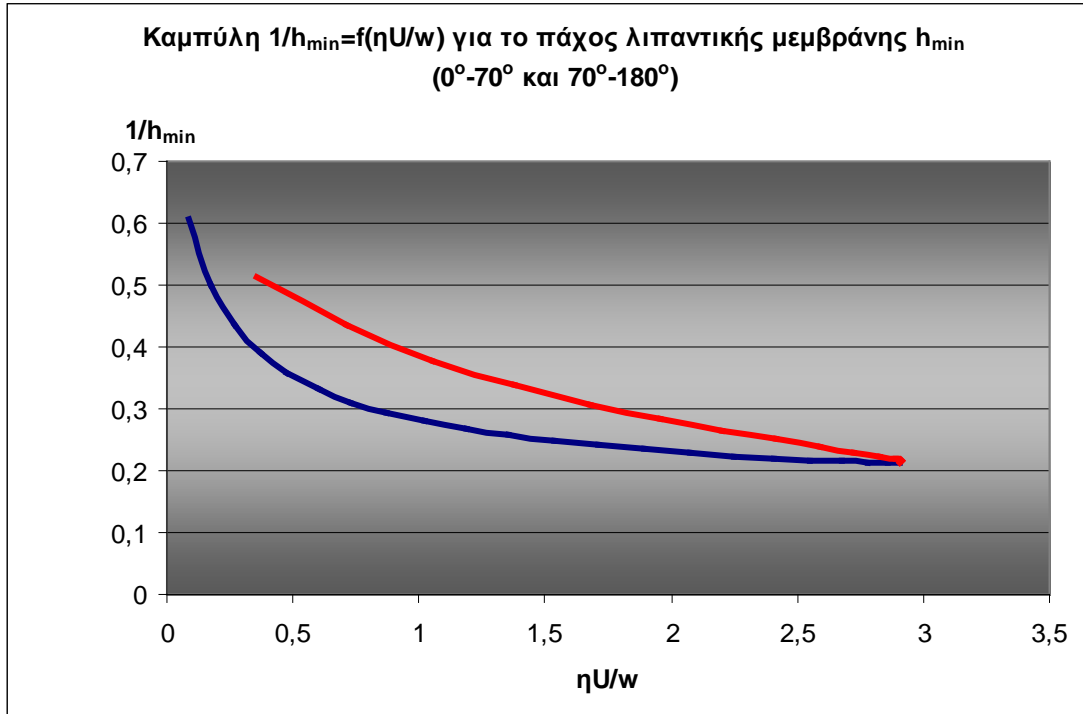
2.3.2.2 Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενη πίεση p_{tar}
($p_{tar}=160$ kPa έως $p_{tar}=240$ kPa)



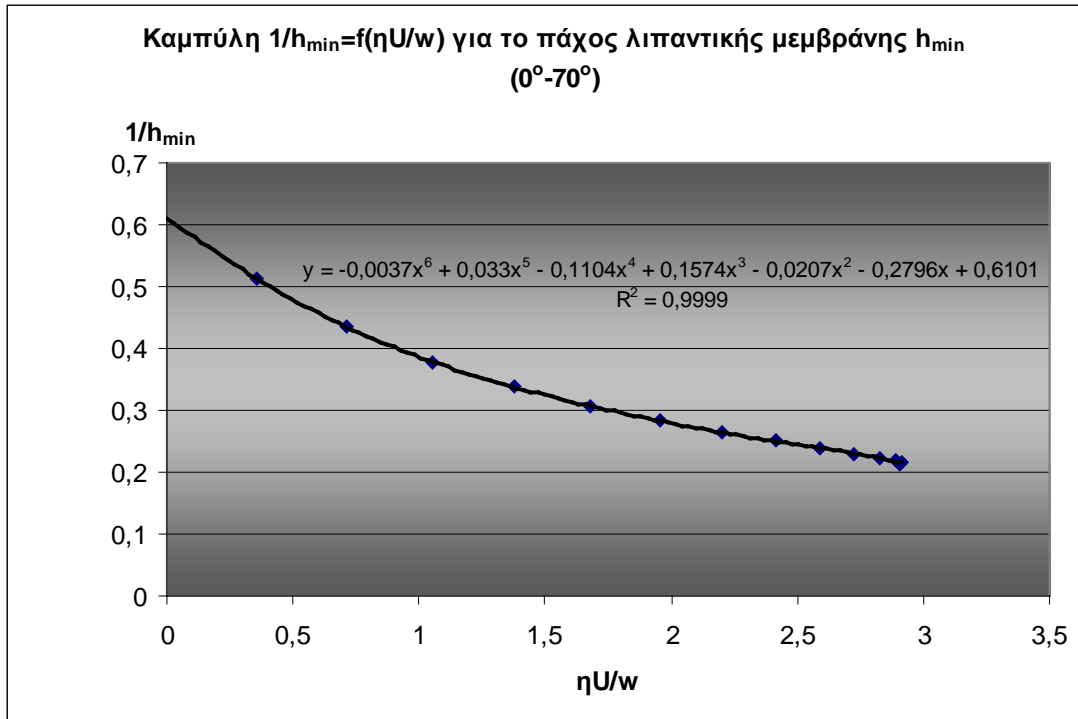
- $p_{tar}= 160 \text{ kPa}$, $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $R=36 \text{ mm}$



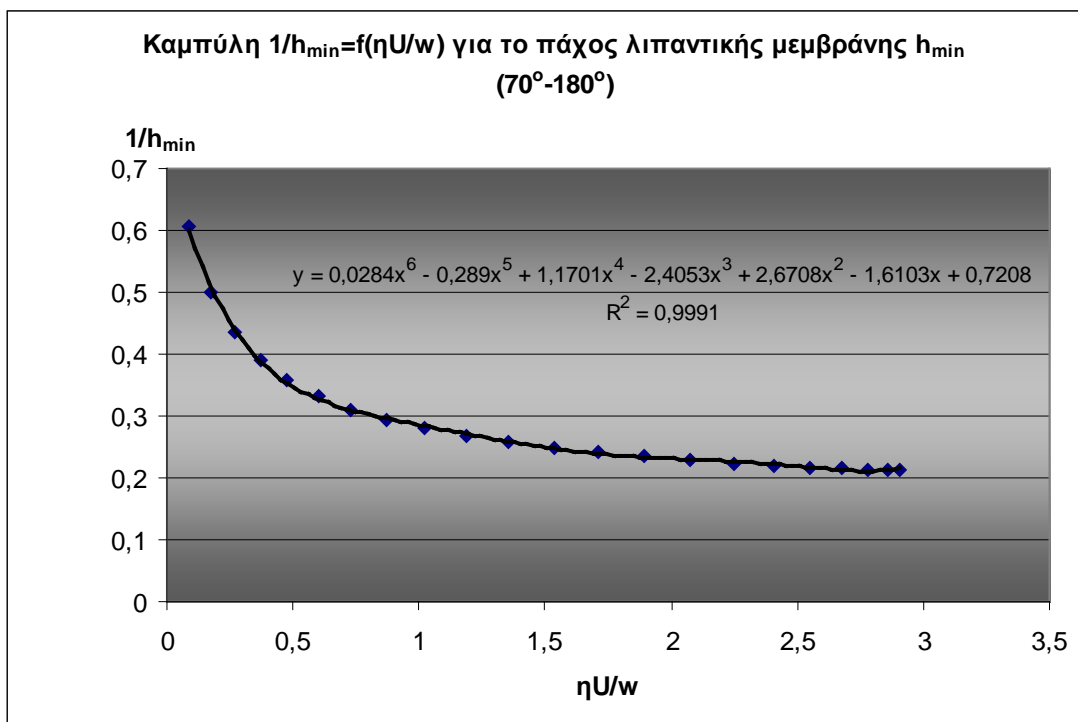
Σχήμα 2.3.2.2.1. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 160 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.2.2.2. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar}= 160 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

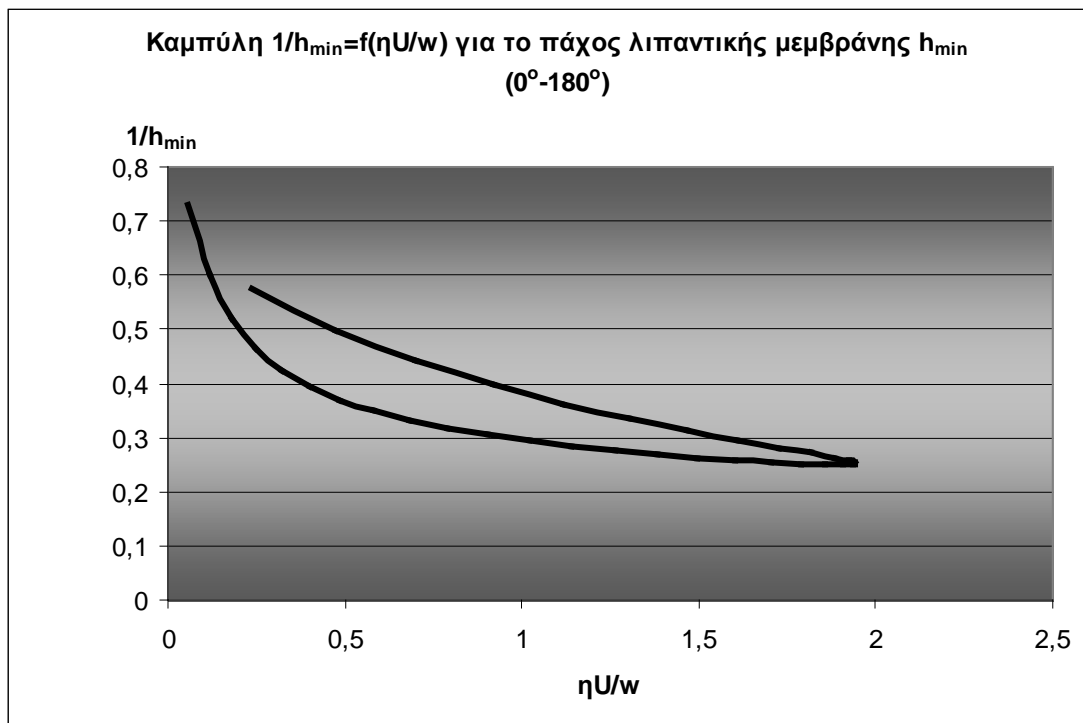


Σχήμα 2.3.2.2.3. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 160$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ou} βαθμού

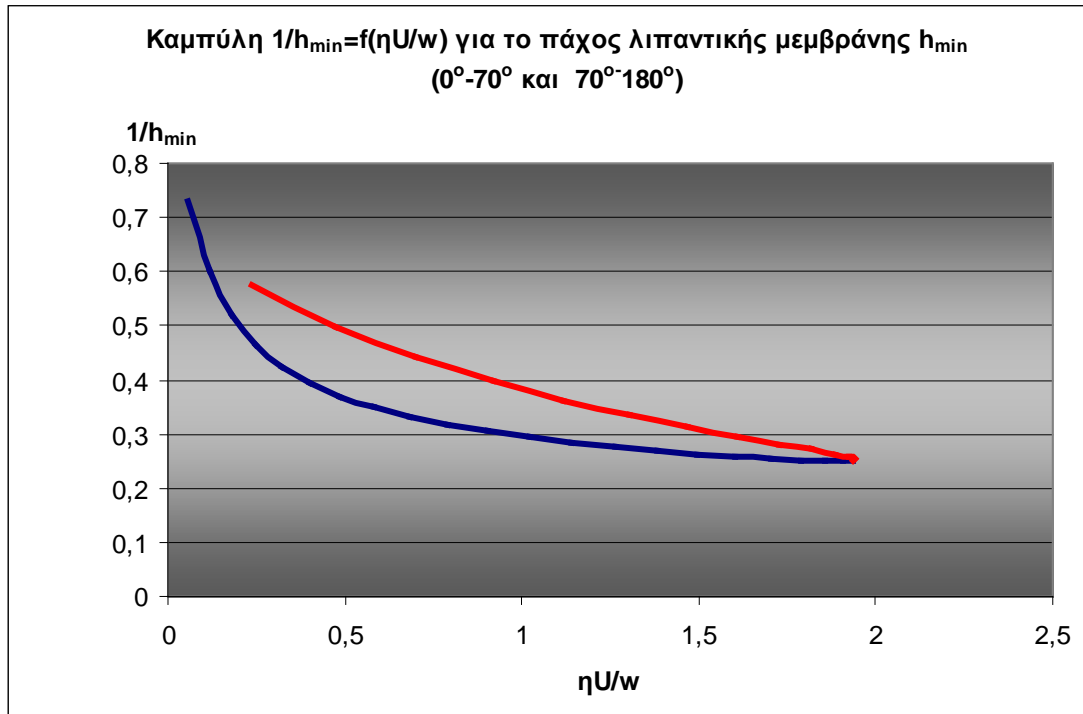


Σχήμα 2.3.2.2.4. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar}= 160$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ou} βαθμού

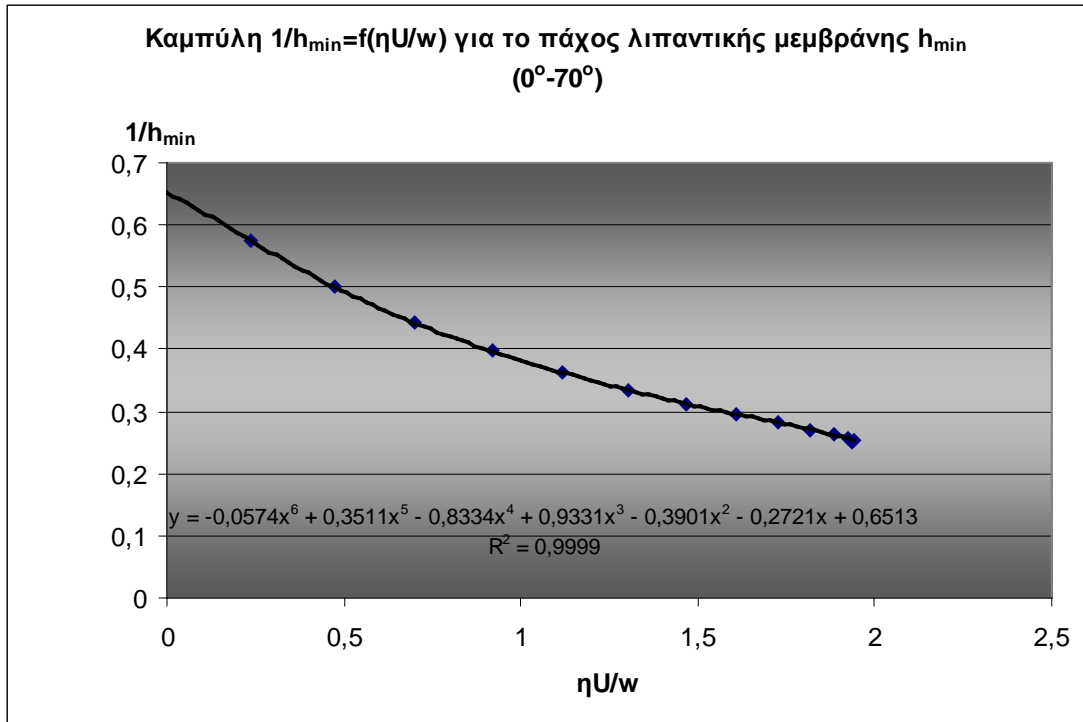
- $p_{tar} = 240 \text{ kPa}$, $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $R=36 \text{ mm}$



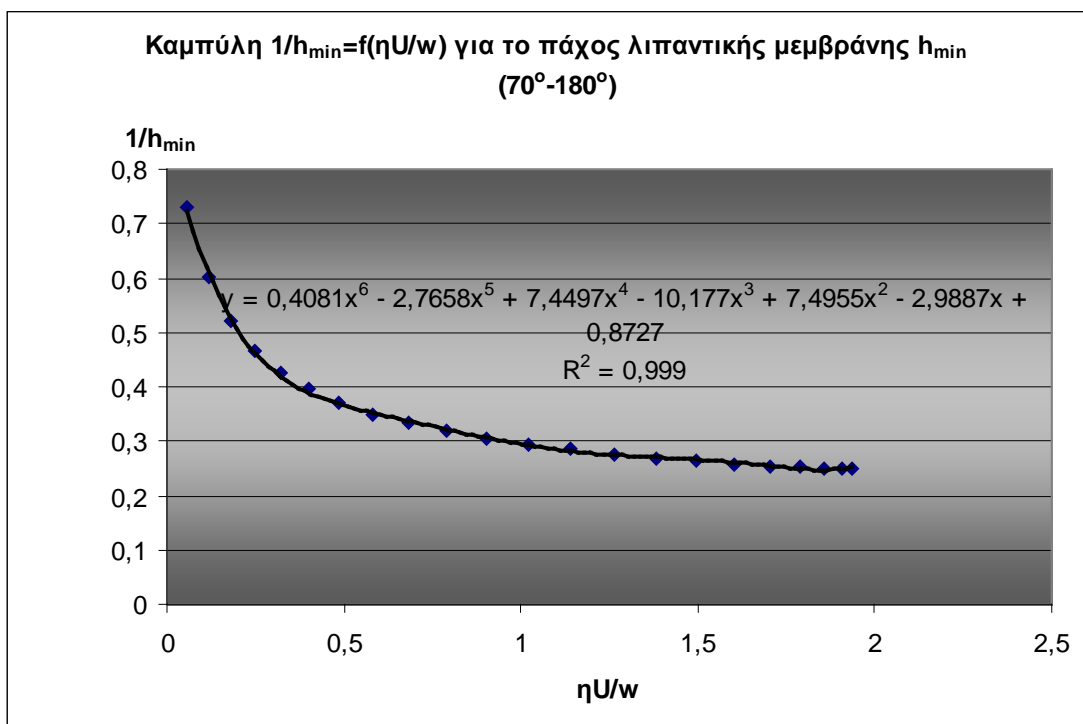
Σχήμα 2.3.2.2.5. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar} = 240 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.2.2.6. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=7,39 \text{ mPas}$, $p_{tar} = 240 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

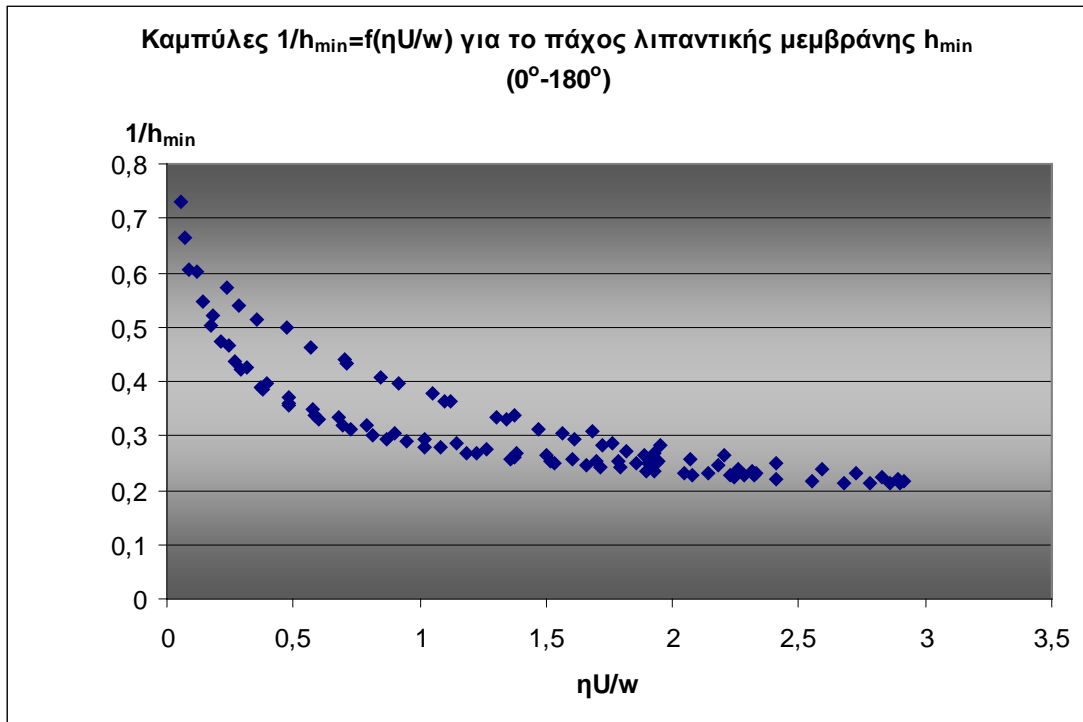


Σχήμα 2.3.2.2.7. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar} = 240$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης $6^{ου}$ βαθμού

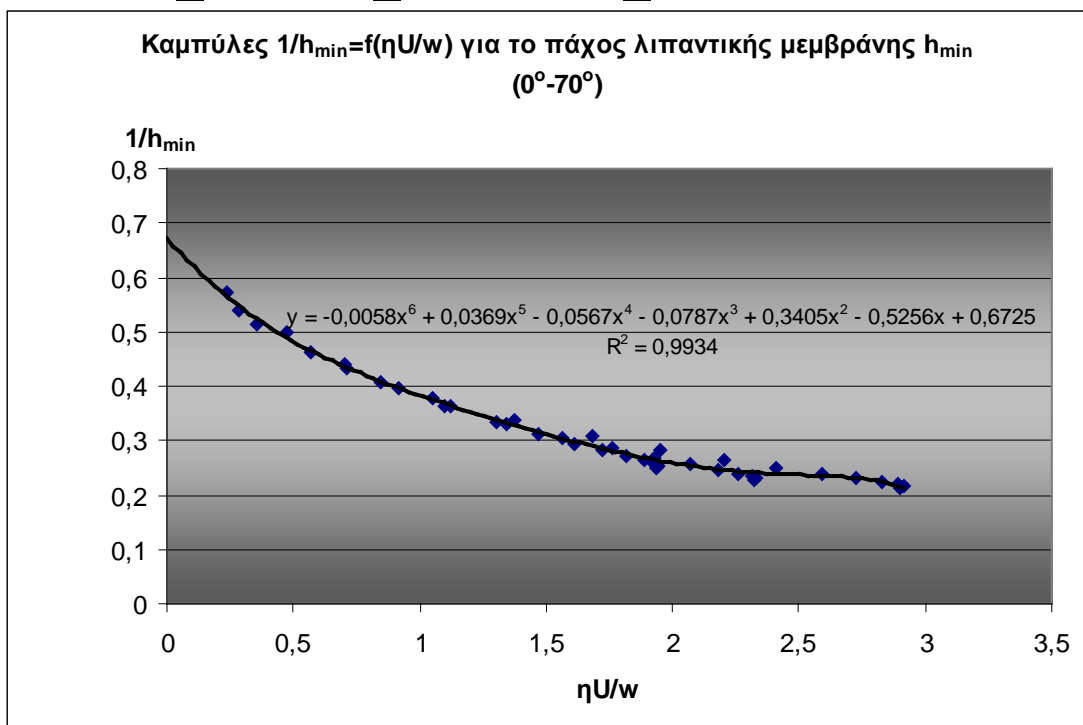


Σχήμα 2.3.2.2.8. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $p_{tar} = 240$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης $6^{ου}$ βαθμού

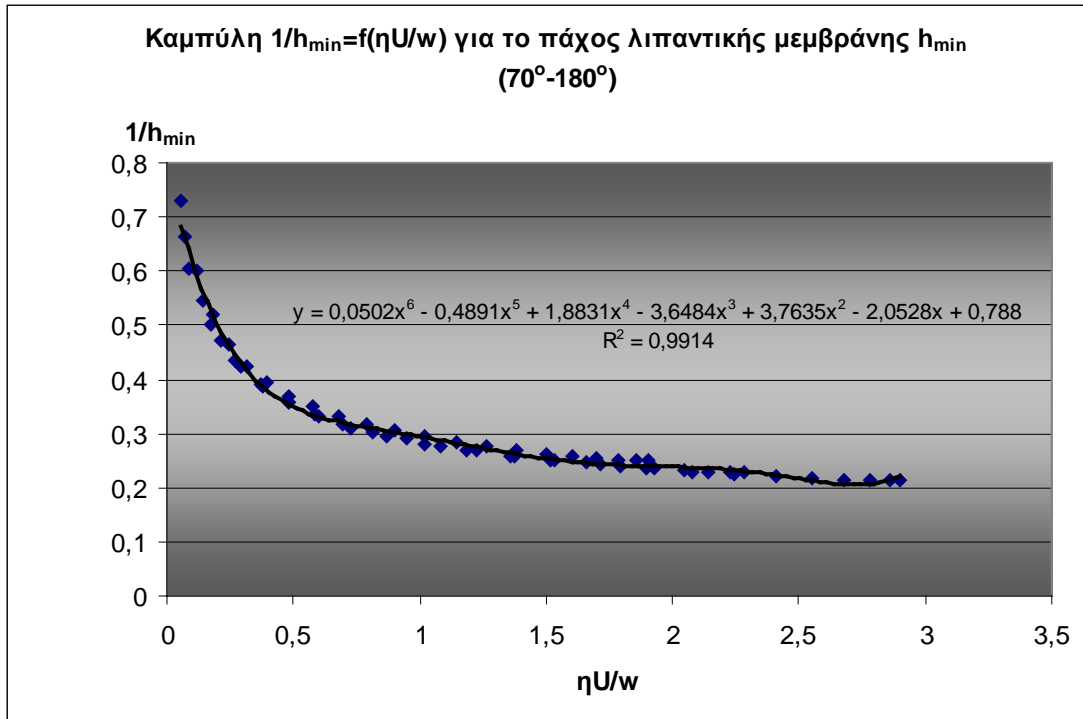
- $p_{tar} = 160, 200, 240$ kPa, $N = 3000$ rpm, $\eta = 7,39$ mPas, $R = 36$ mm



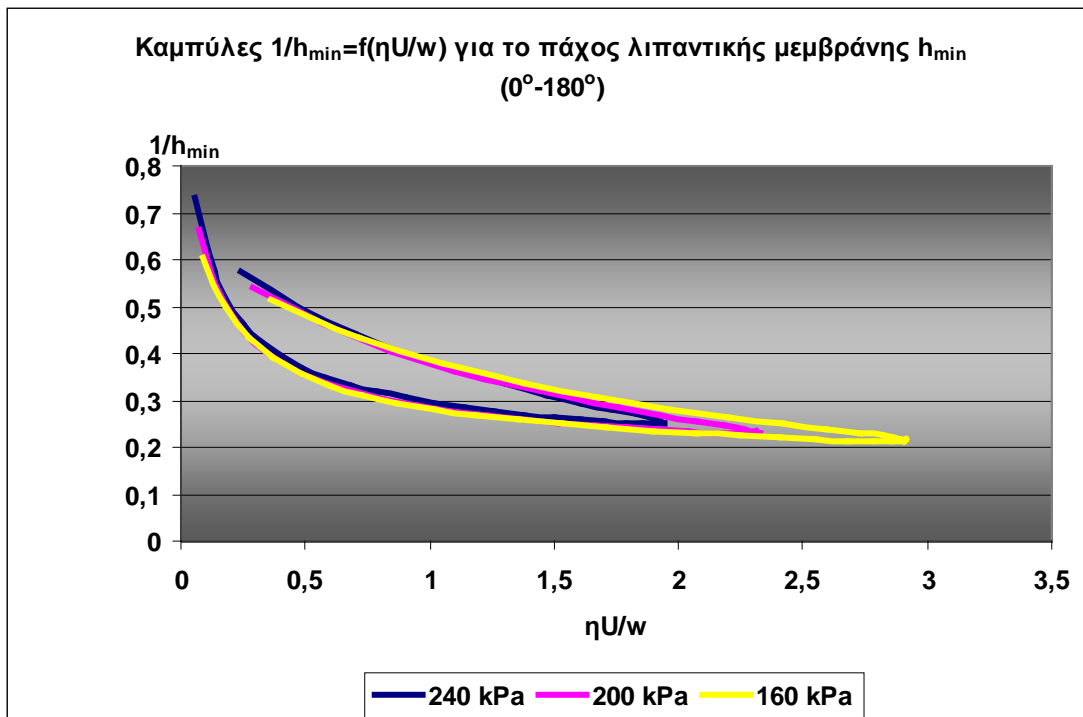
Σχήμα 2.3.2.2.9. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές πίεσης) για το συντελεστή $1/h_{min}$ ($0^\circ - 180^\circ$) για $N = 3000$ rpm, $\eta = 7,39$ mPas, $R = 36$ mm, $p_{tar} = 160$ kPa, $p_{tar} = 200$ kPa και $p_{tar} = 240$ kPa.



Σχήμα 2.3.2.2.10. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές πίεσης) για το συντελεστή $1/h_{min}$ στη φάση επιτάχυνσης ($0^\circ - 70^\circ$) με την αντίστοιχη γραμμική τάση 6^{ου} βαθμού για $\eta = 7,39$ mPas, $R = 36$ mm, $N = 3000$ rpm, $p_{tar} = 160$ kPa, $p_{tar} = 200$ kPa και $p_{tar} = 240$ kPa



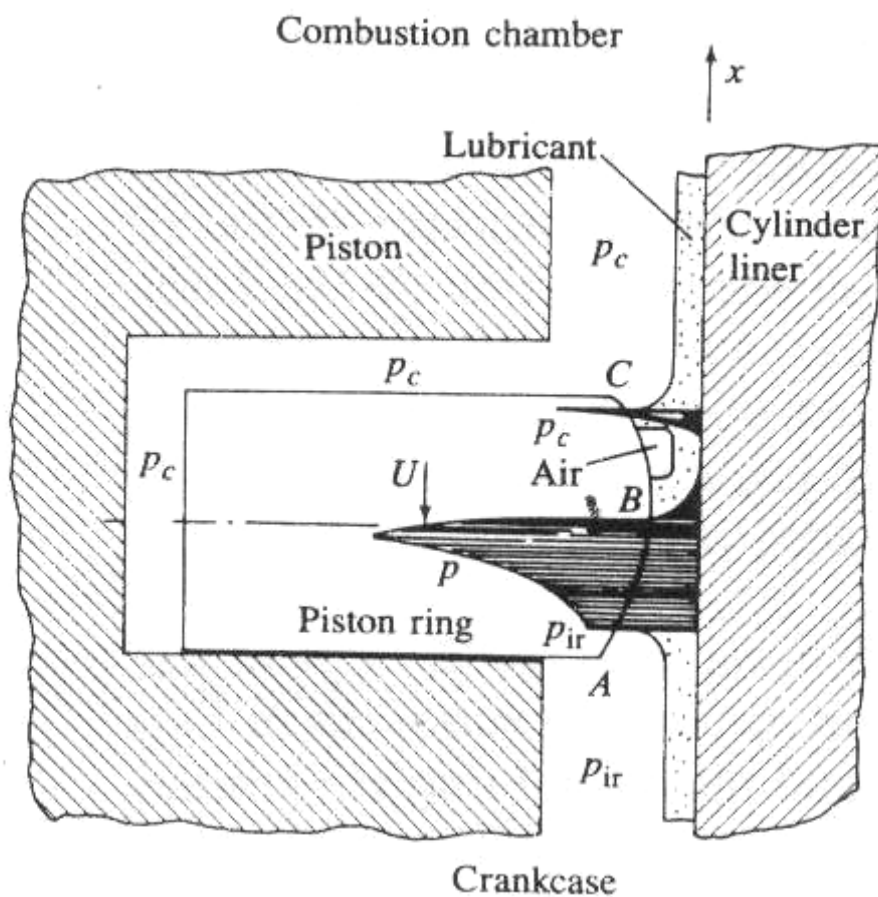
Σχήμα 2.3.2.2.11. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές πίεσης) για το συντελεστή $1/h_{\min}$ στη φάση επιβράδυνσης (70°-180°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ου} βαθμού για $\eta=7,39$ mPas , $R=36$ mm , $N=3000$ rpm , **$p_{\text{tar}}= 160$ kPa , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa και $p_{\text{tar}}= 240$ kPa**



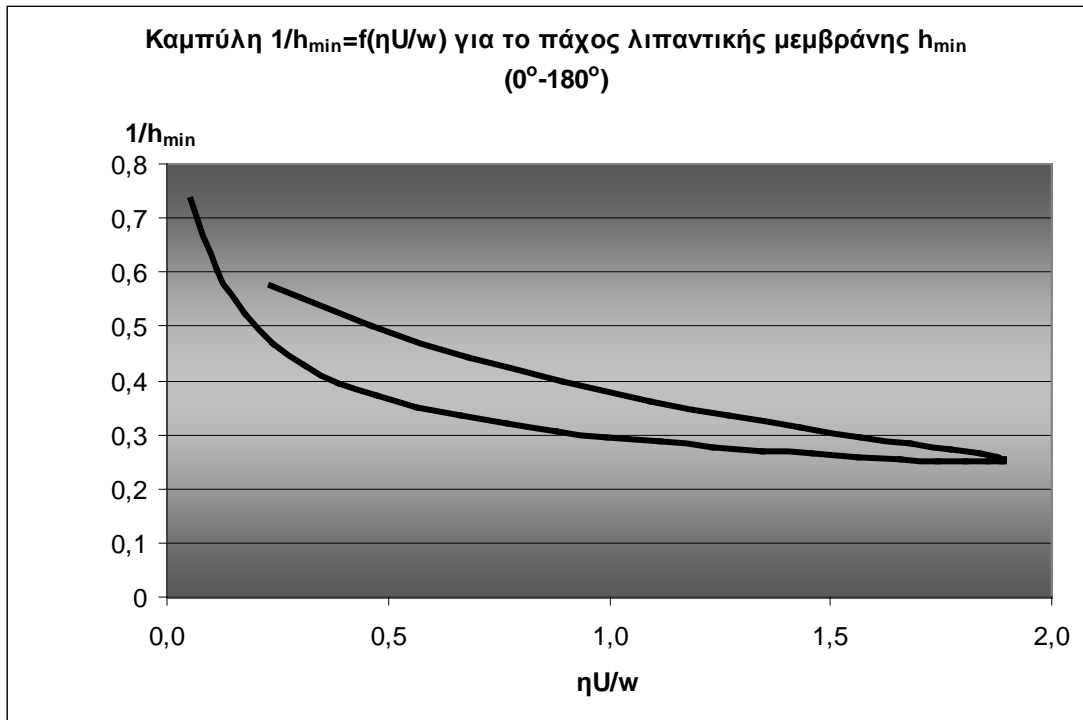
Σχήμα 2.3.2.2.12. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές πίεσης) για το συντελεστή $1/h_{\min}$ (0°-180°) για , $N=3000$ rpm , $\eta=7,39$ mPas , $R=36$ mm , **$p_{\text{tar}}= 160$ kPa , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa και $p_{\text{tar}}= 240$ kPa.**

ΠΑΧΗ ΛΙΠΑΝΤΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
(ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ)

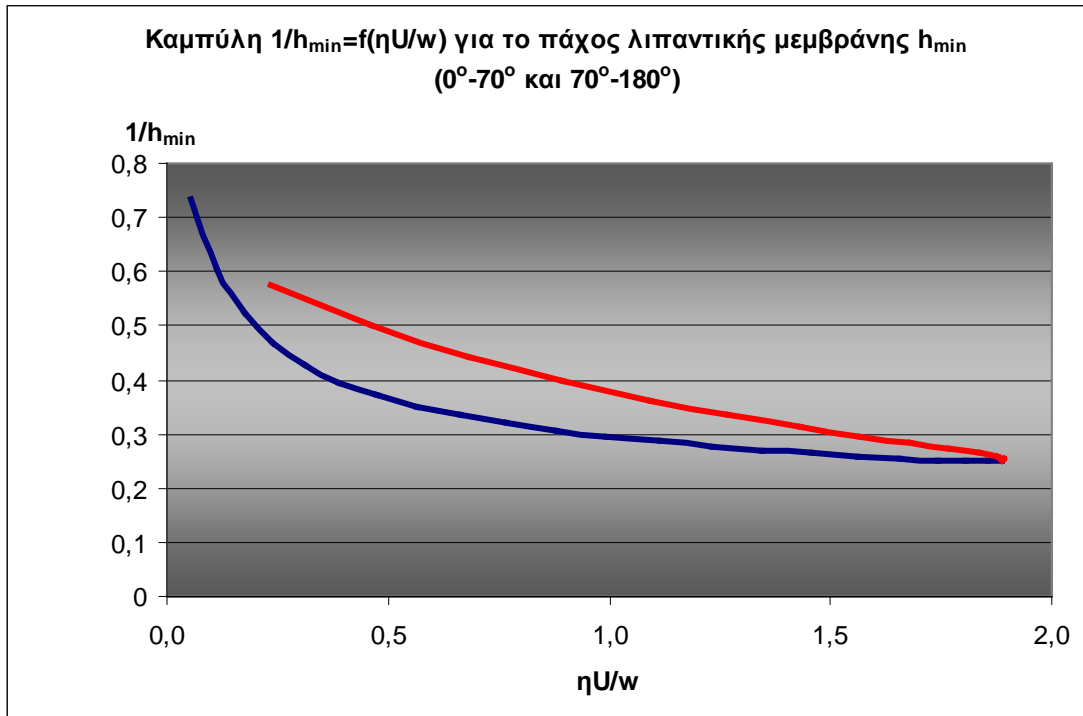
2.3.2.3 Πρώτος δακτύλιος, μεταβαλλόμενο ιξώδες
λιπαντικού η
($\eta=6$ mPas έως $\eta=10$ mPas)



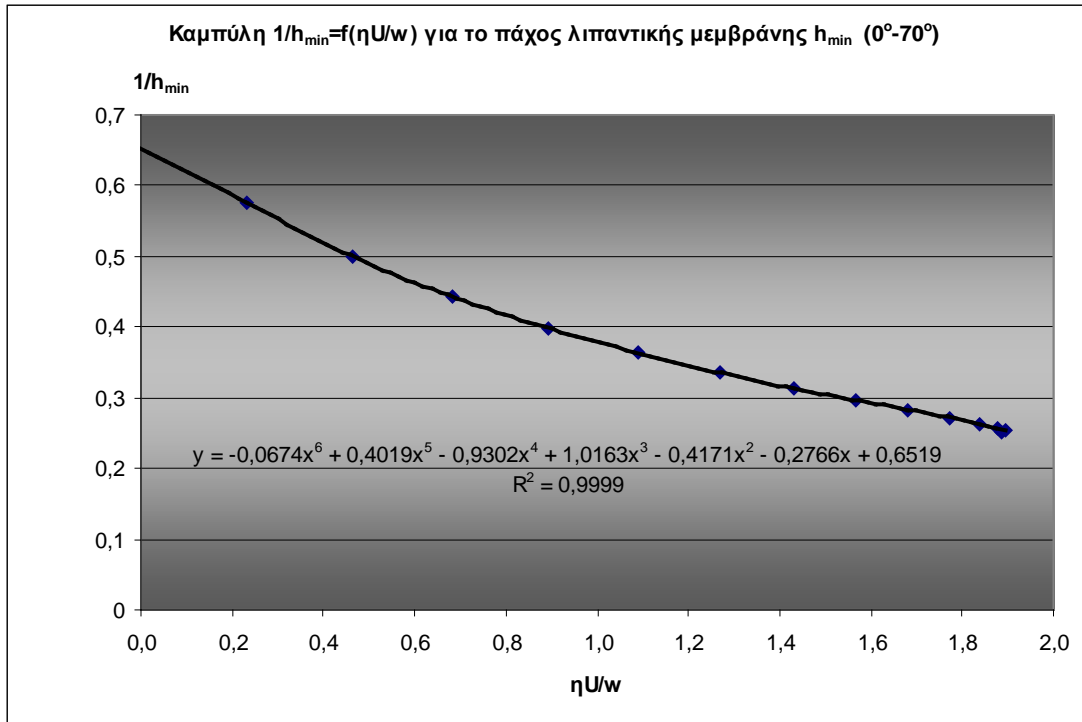
- $\eta=6 \text{ mPas}$, $N=3000 \text{ rpm}$, $p_{tar}=160 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$



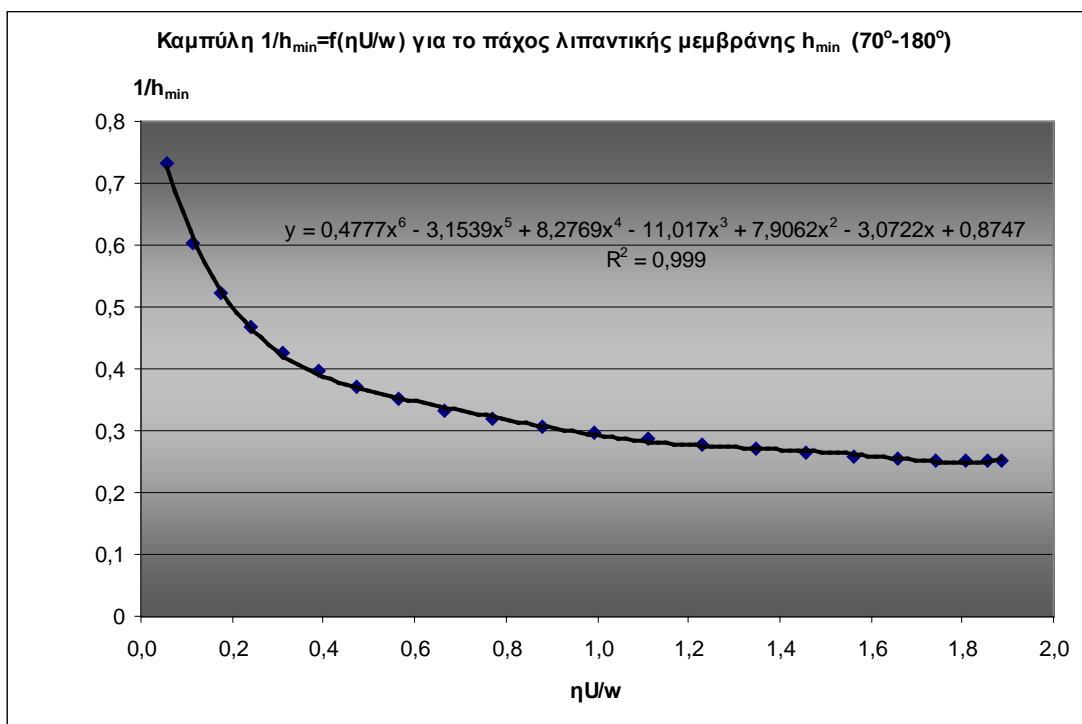
Σχήμα 2.3.2.3.1. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=6 \text{ mPas}$, $p_{tar}=200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$)



Σχήμα 2.3.2.3.2. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=6 \text{ mPas}$, $p_{tar}=200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης ($0^\circ-70^\circ$ κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης ($70^\circ-180^\circ$ μπλε καμπύλη)

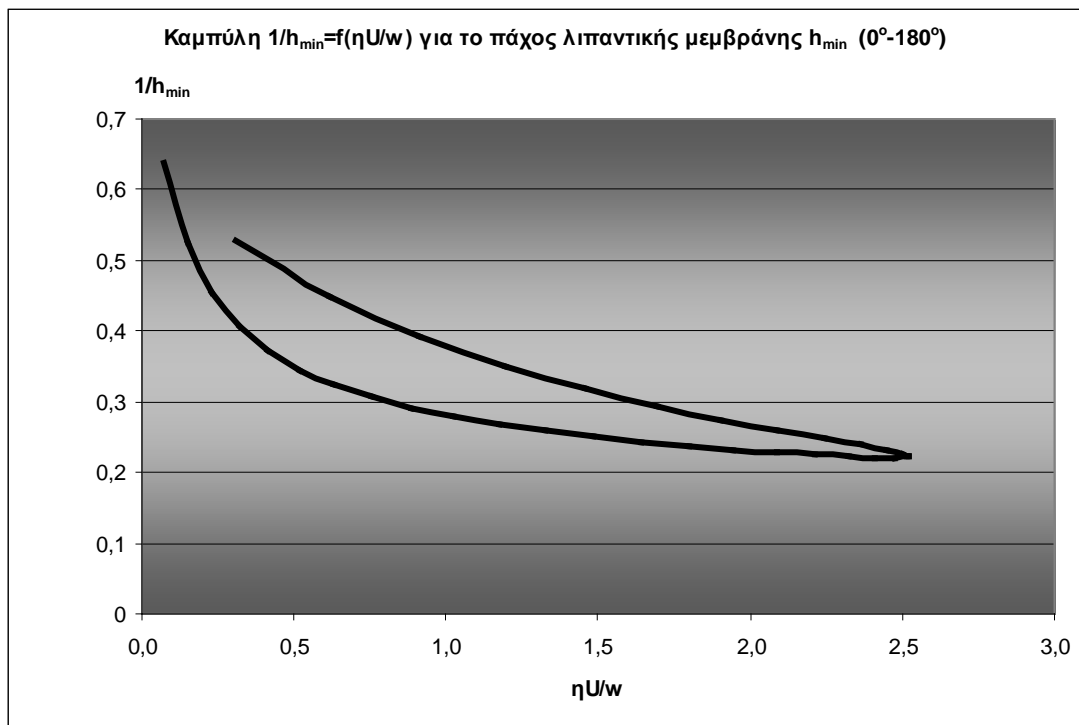


Σχήμα 2.3.2.3.3. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000$ rpm, $\eta=6$ mPas, $p_{\text{tar}}=200$ kPa, $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης $6^{\text{ου}}$ βαθμού

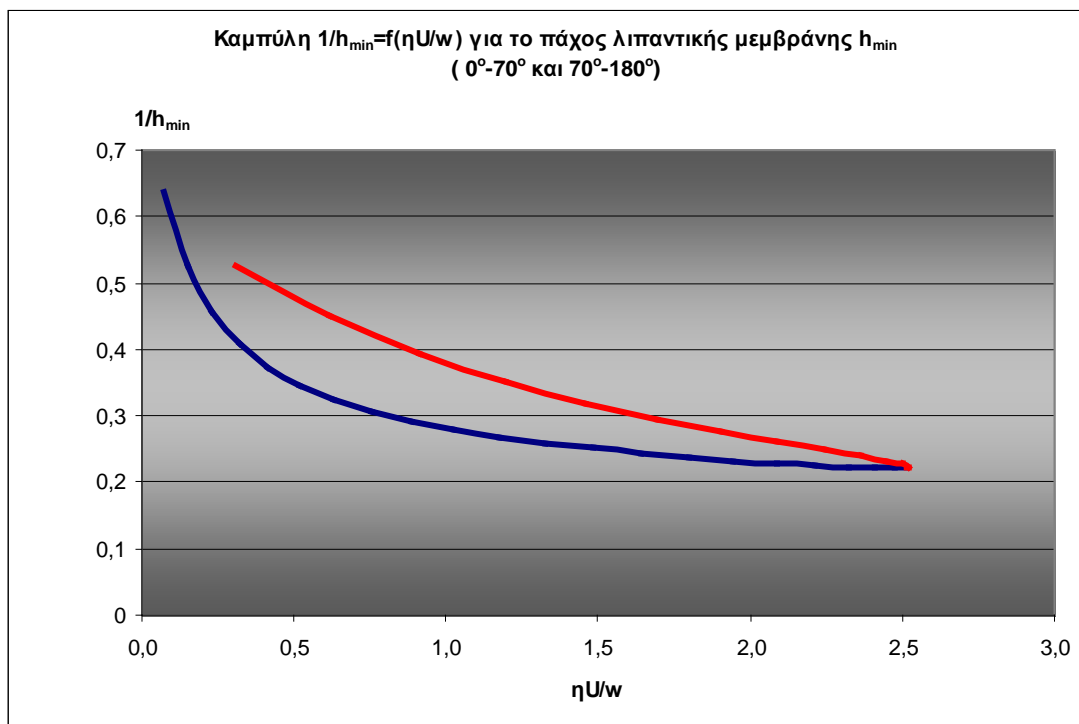


Σχήμα 2.3.2.3.4. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000$ rpm, $\eta=6$ mPas, $p_{\text{tar}}=200$ kPa, $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης $6^{\text{ου}}$ βαθμού

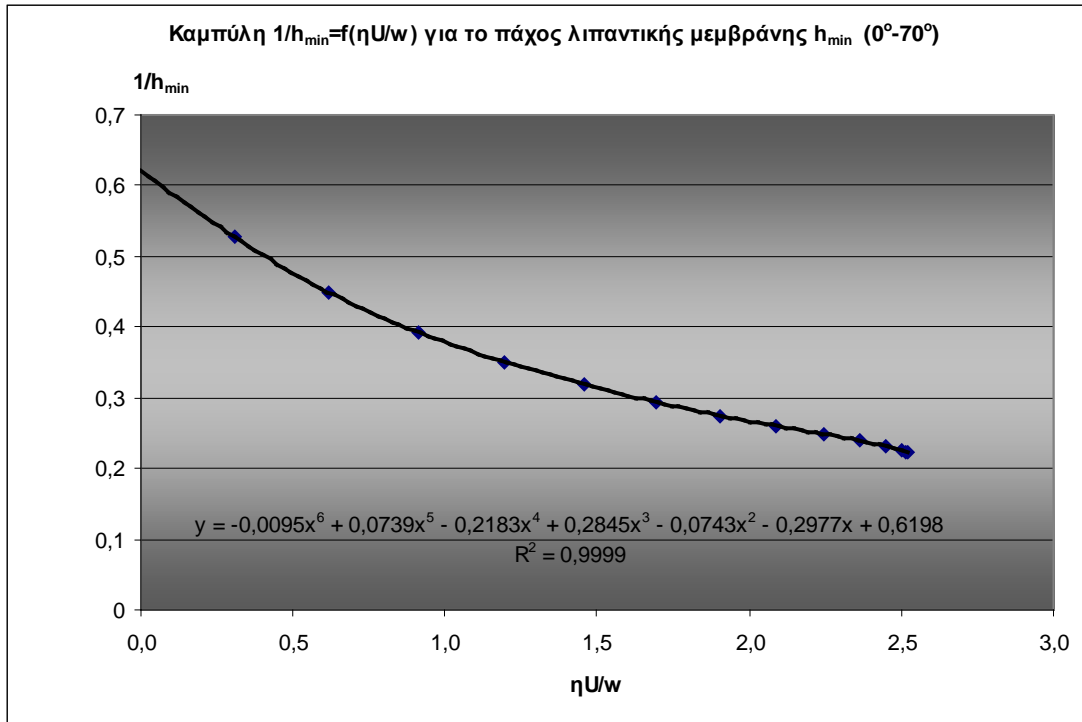
- $\eta=8 \text{ mPas}$, $N=3000 \text{ rpm}$, $p_{tar}=160 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$



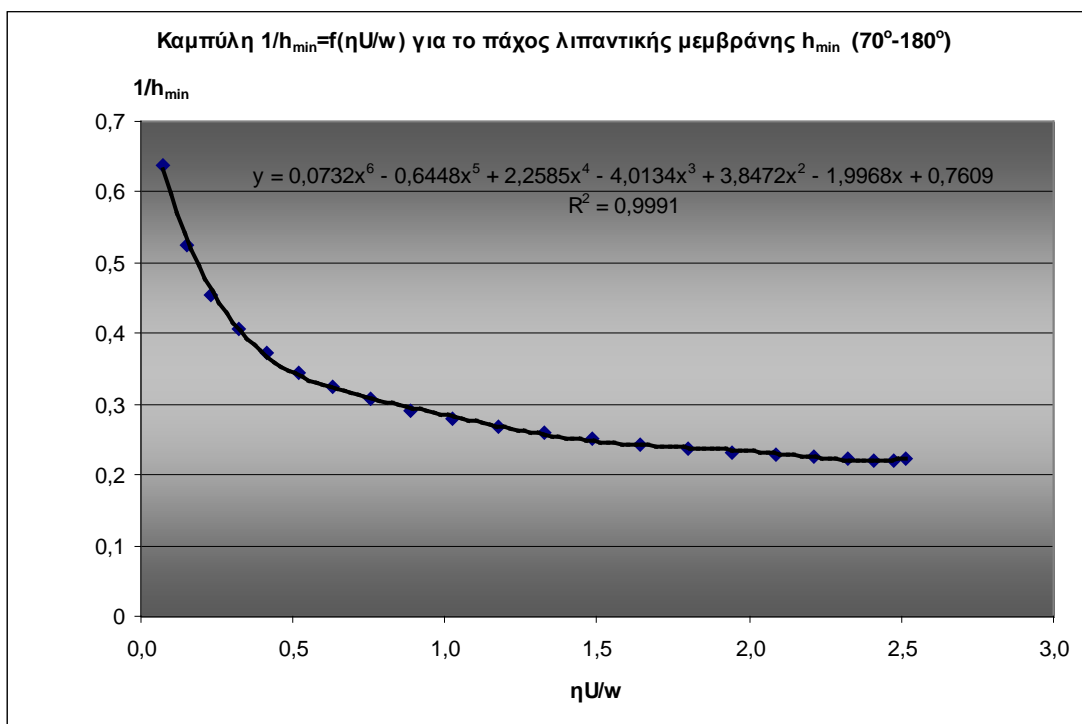
Σχήμα 2.3.2.3.5. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=8 \text{ mPas}$, $p_{tar}=240 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70°) και επιβράδυνσης (70° - 180°)



Σχήμα 2.3.2.3.6. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000 \text{ rpm}$, $\eta=8 \text{ mPas}$, $p_{tar}=200 \text{ kPa}$, $R=36 \text{ mm}$. στις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70° κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης (70° - 180° μπλε καμπύλη)

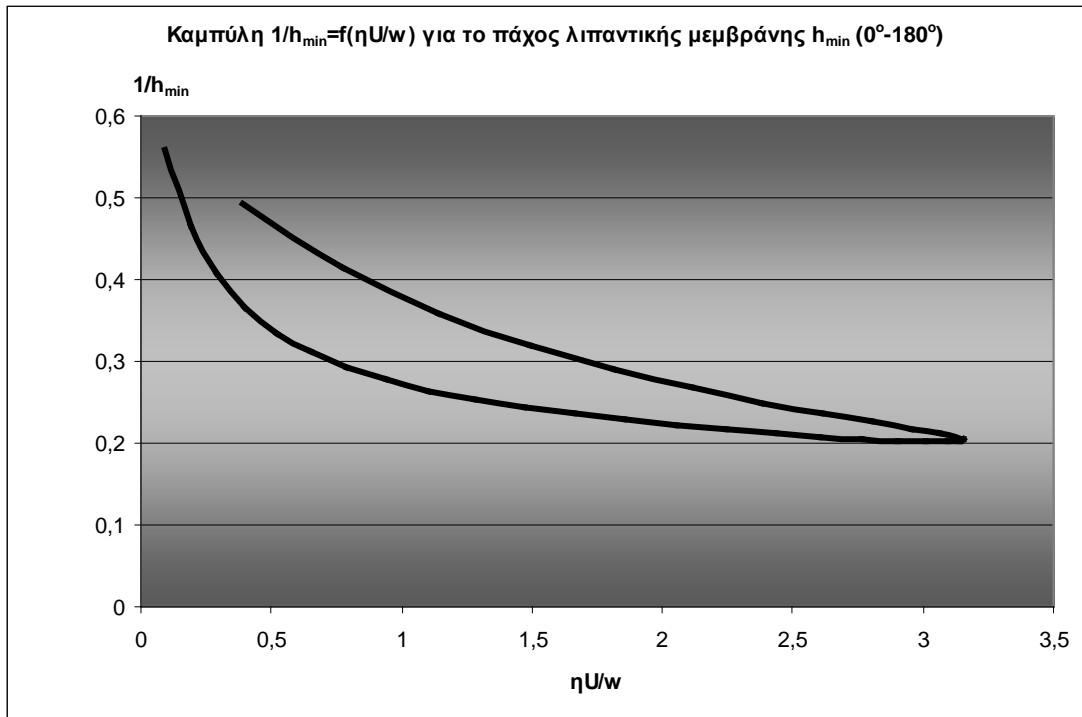


Σχήμα 2.3.2.3.7. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000$ rpm, $\eta=8$ mPas, $p_{\text{tar}}=200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

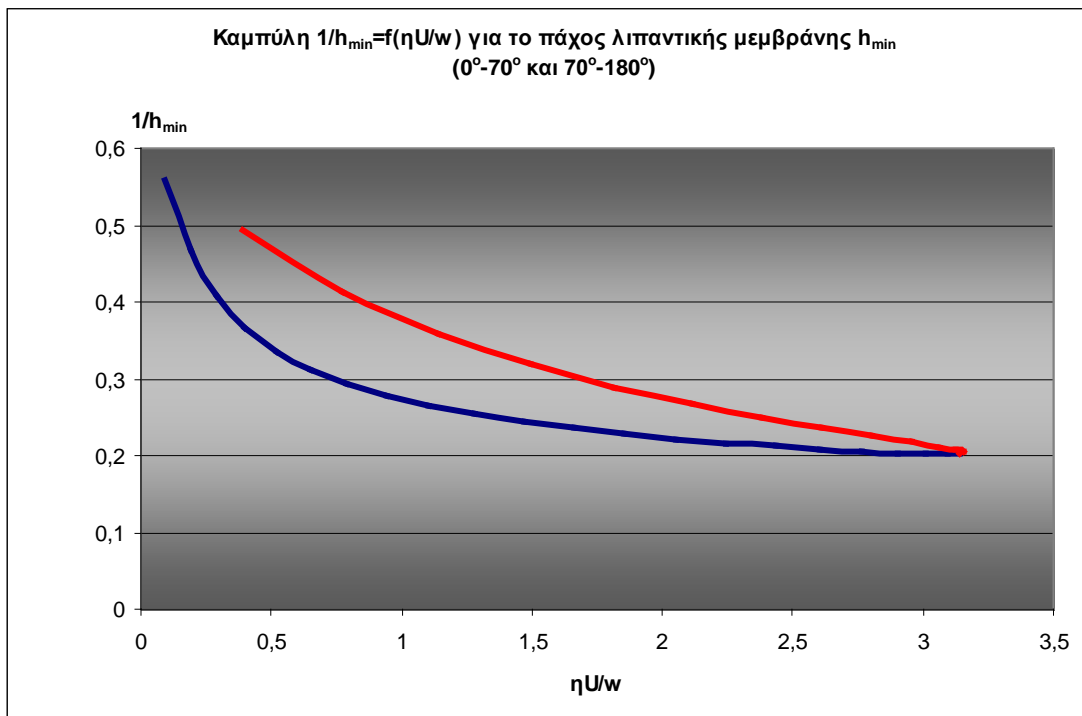


Σχήμα 2.3.2.3.8. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000$ rpm, $\eta=8$ mPas, $p_{\text{tar}}=200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού

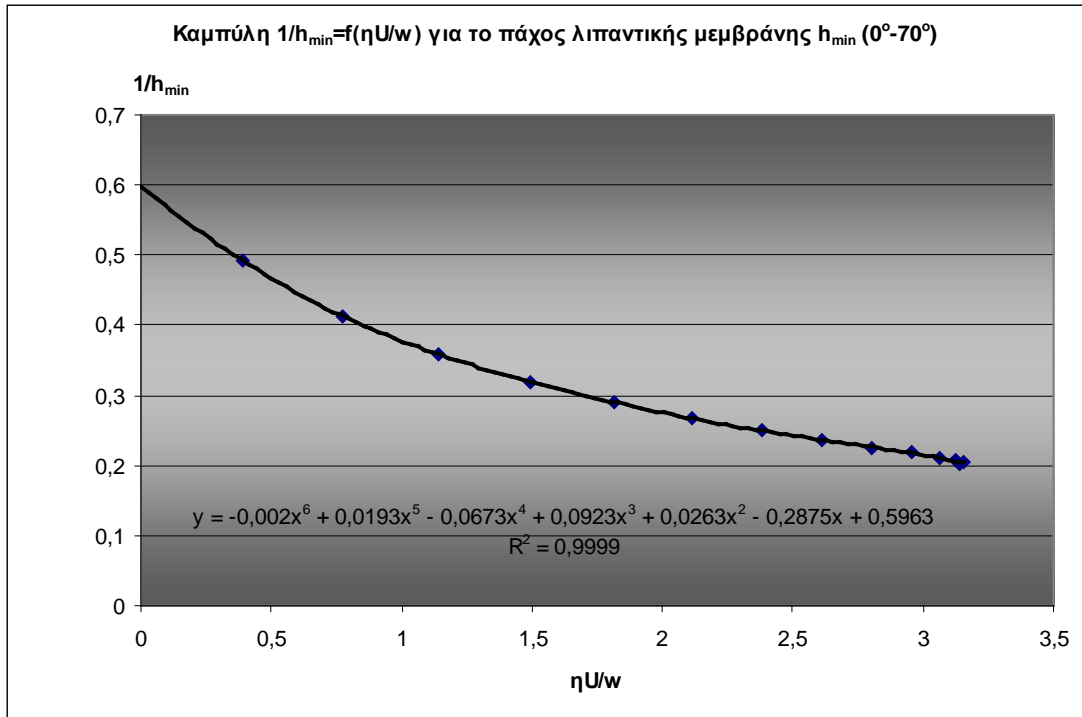
- $\eta=10$ mPas, $N=3000$ rpm, $p_{tar}= 160$ kPa, $R=36$ mm



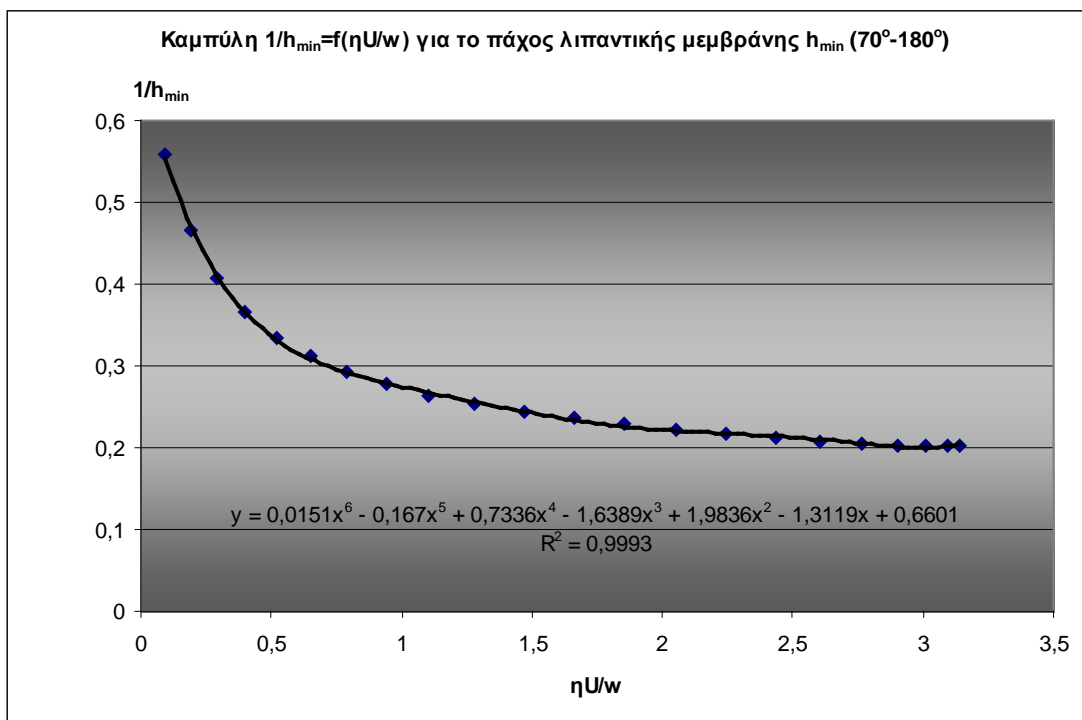
Σχήμα 2.3.2.3.9. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000$ rpm, $\eta=10$ mPas, $p_{tar}= 240$ kPa, $R=36$ mm. Διακρίνεται η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του συντελεστή $1/h_{min}$ για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης στις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70°) και επιβράδυνσης (70° - 180°)



Σχήμα 2.3.2.3.10. Διάγραμμα τύπου Stribeck, $N=3000$ rpm, $\eta=10$ mPas, $p_{tar}= 200$ kPa, $R=36$ mm. στις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70° κόκκινη καμπύλη) και επιβράδυνσης (70° - 180° μπλε καμπύλη)

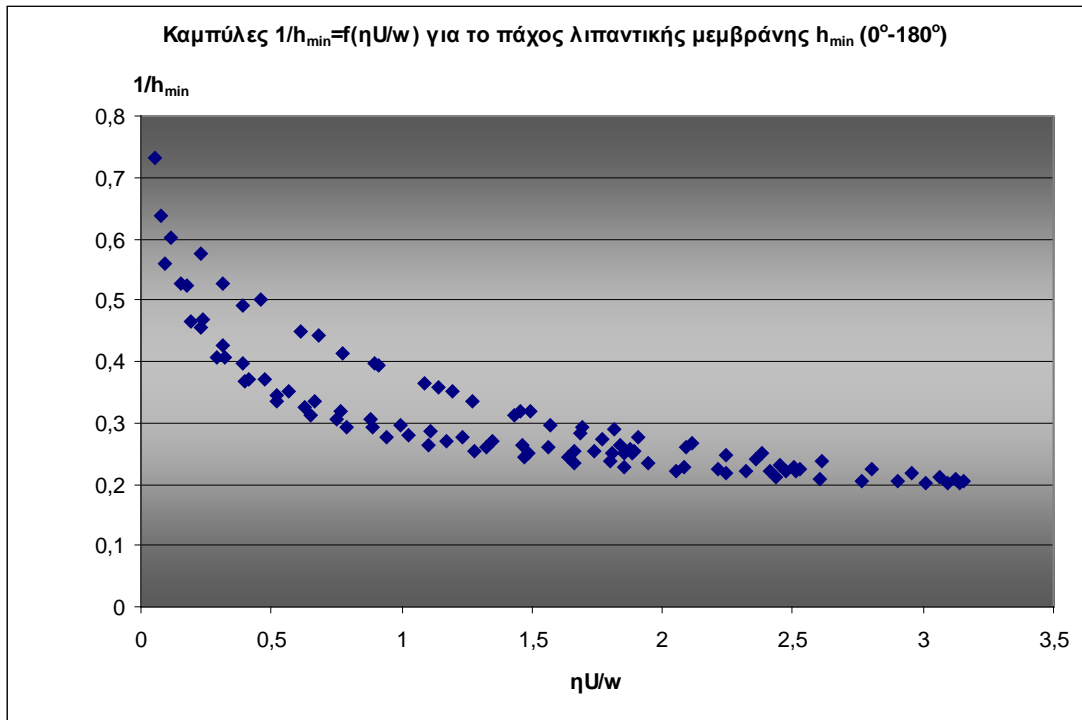


Σχήμα 2.3.2.3.11. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=10$ mPas , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού

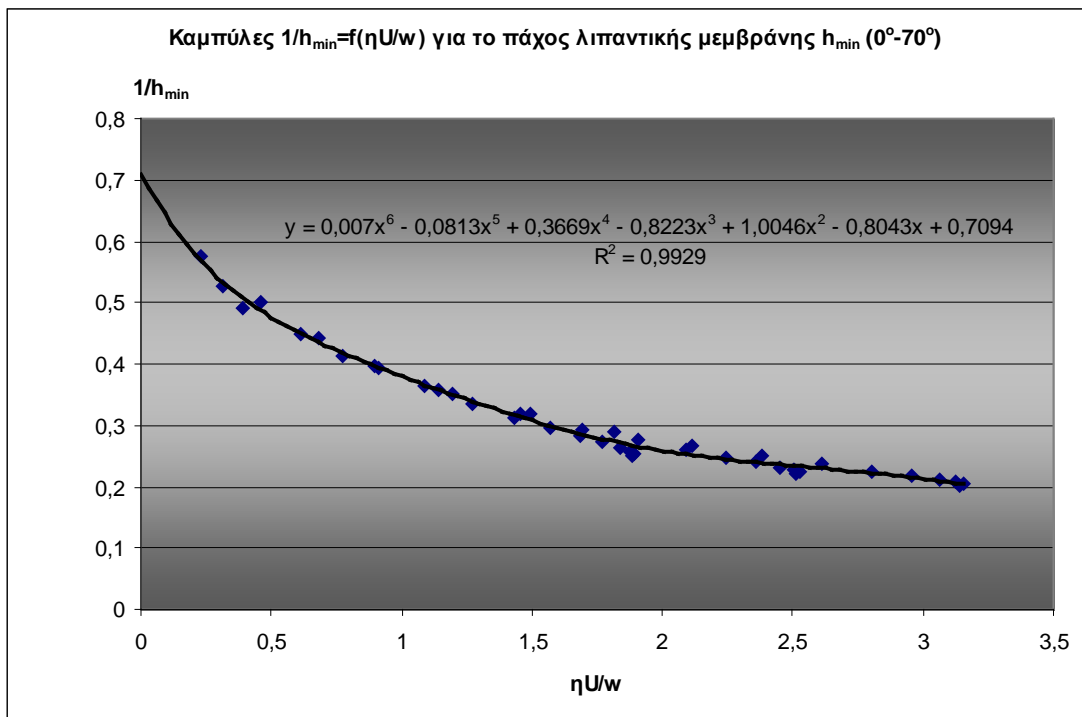


Σχήμα 2.3.2.3.12. Διάγραμμα τύπου Stribeck , $N=3000$ rpm , $\eta=10$ mPas , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa , $R=36$ mm. στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμική τάσης 6^{ov} βαθμού

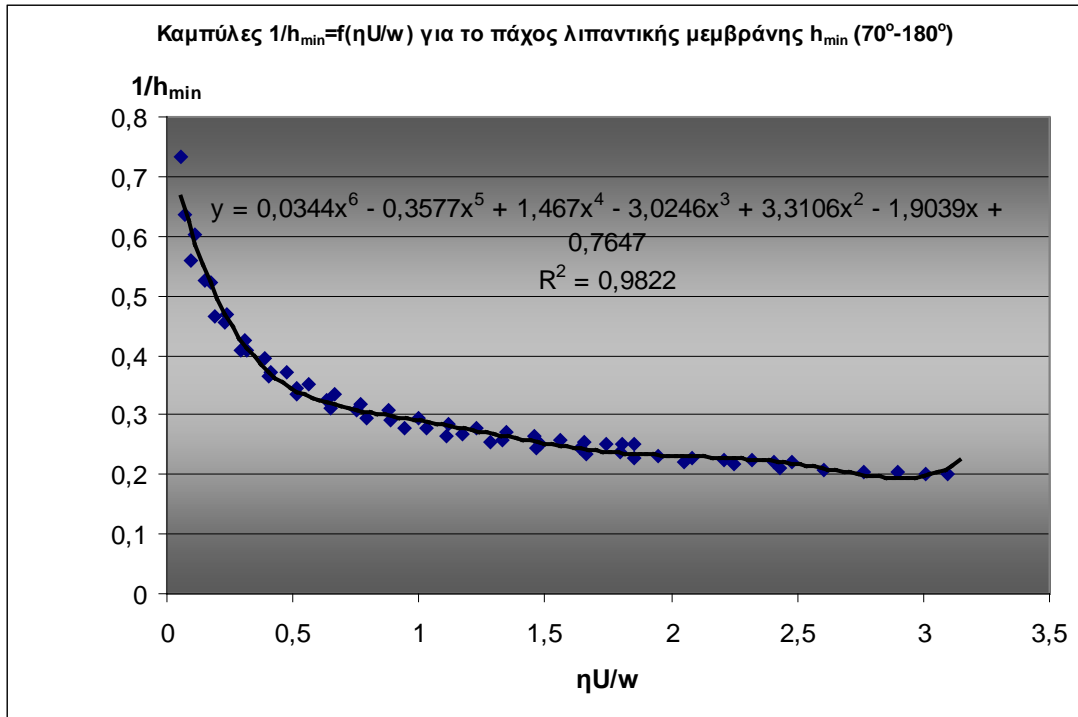
- $\eta=6,8,10$ mPas, $N=3000$ rpm, $p_{tar}= 160$ kPa, $R=36$ mm



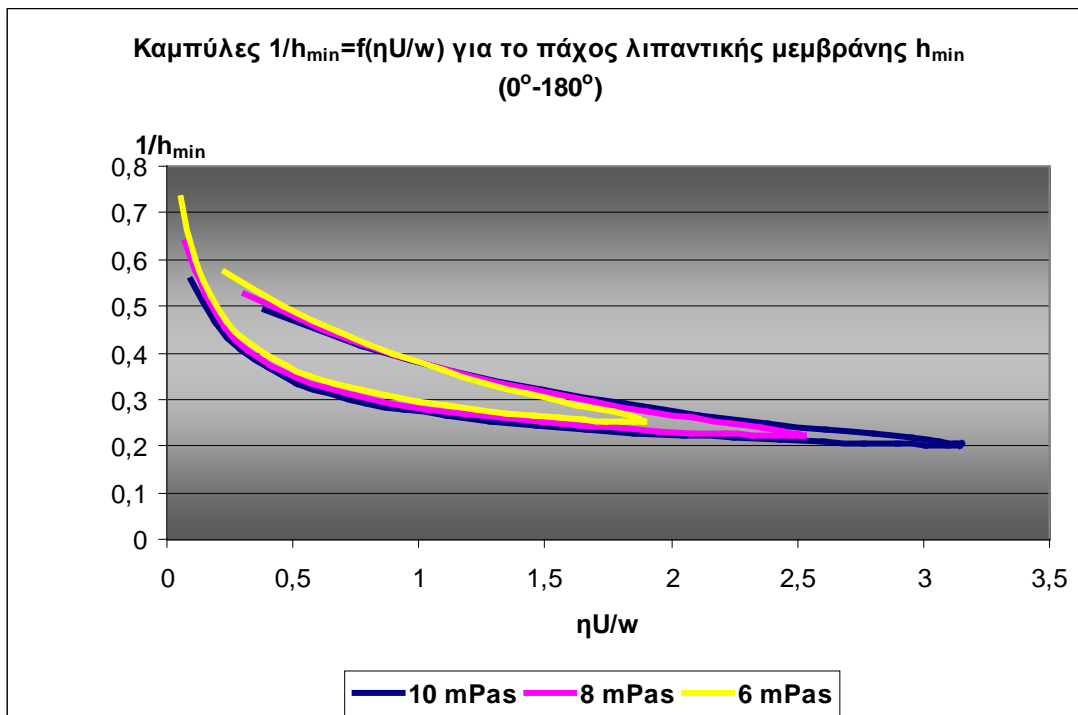
Σχήμα 2.3.2.3.13. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές ιξώδους) για το συντελεστή $1/h_{min}$ (0° - 180°) για $N=3000$ rpm , $R=36$ mm , $p_{tar}= 200$ kPa , $\eta=6$ mPas , $\eta=8$ mPas και $\eta=10$ mPas



Σχήμα 2.3.2.3.14. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές ιξώδους) για το συντελεστή $1/h_{min}$ στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού για $R=36$ mm , $N=3000$ rpm , $p_{tar}= 200$ kPa , $\eta=6$ mPas , $\eta=8$ mPas και $\eta=10$ mPas



Σχήμα 2.3.2.3.15. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές ιξώδους) για το συντελεστή $1/h_{\min}$ στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) με την αντίστοιχη γραμμή τάσης $6^{\text{ου}}$ βαθμού για $R=36$ mm , $N=3000$ rpm , $p_{\text{tar}}= 200$ kPa , **$\eta=6$ mPas , $\eta=8$ mPas και $\eta=10$ mPas**



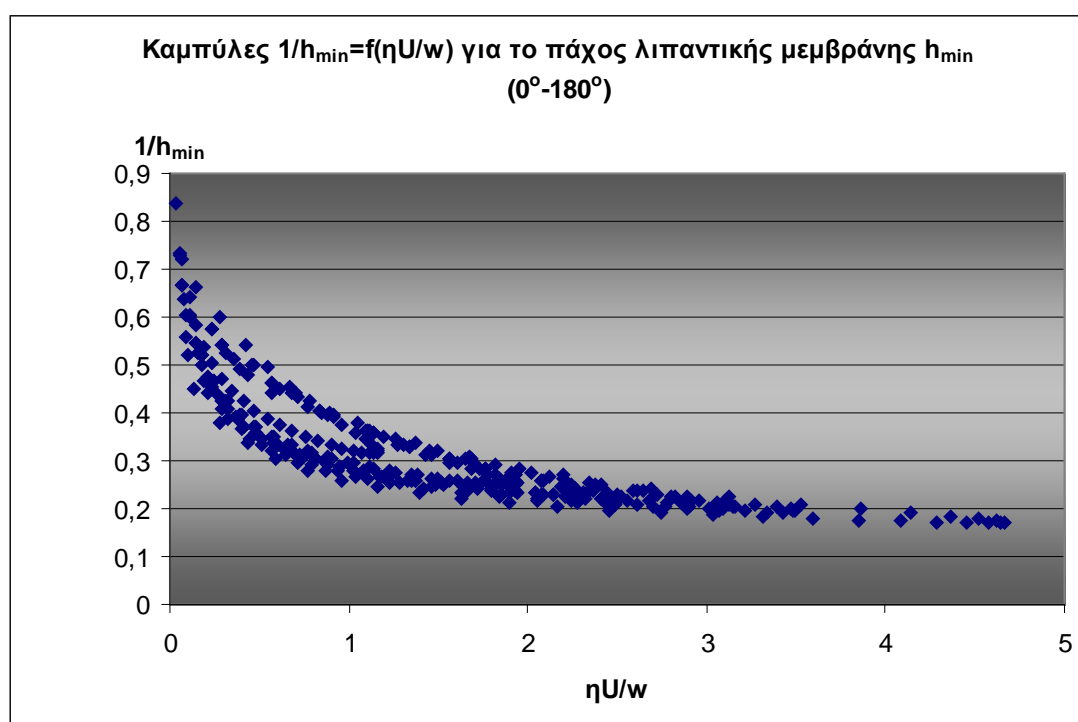
Σχήμα 2.3.2.3.16. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck (για διαφορετικές τιμές ιξώδους) για το συντελεστή $1/h_{\min}$ (0° - 180°) για , $N=3000$ rpm , $R=36$ mm , $p_{\text{tar}}=200$ kPa , **$\eta=6$ mPas , $\eta=8$ mPas και $\eta=10$ mPas**

2.3.2.4 Πρώτος δακτύλιος, συγκεντρωτικά ολικά διαγράμματα τύπου Stribeck

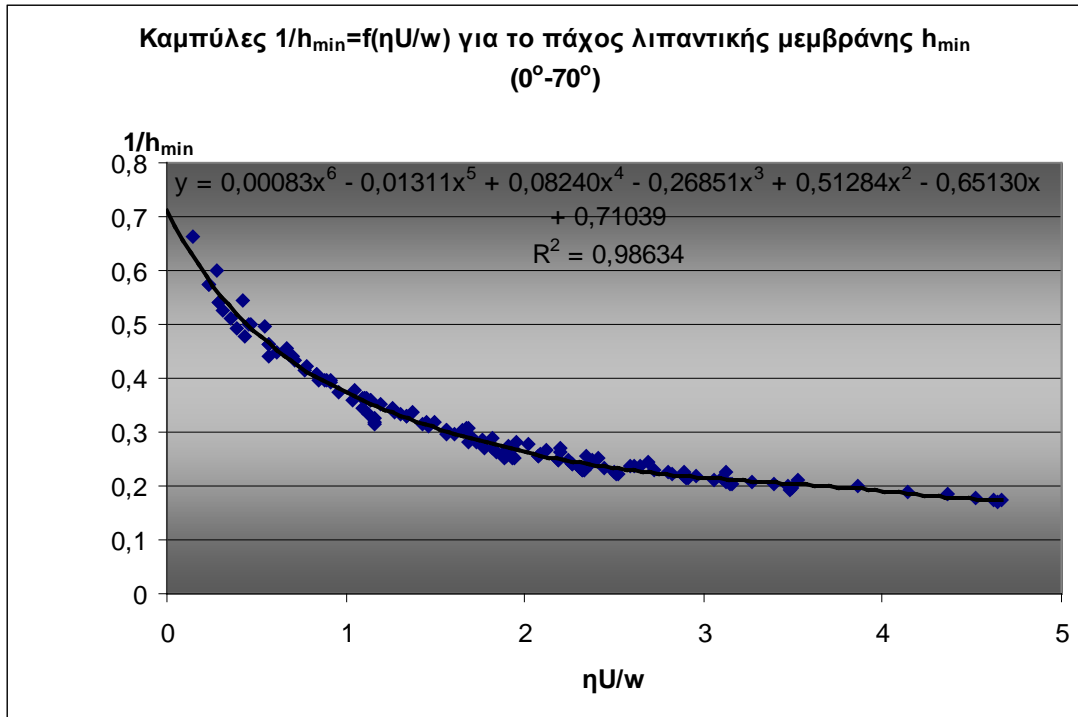
Σε τελική φάση όπως είχαμε προαναφέρει στην αρχή του κεφαλαίου επιχειρούμε τον εμπλουτισμό του πλέγματος καμπυλών τύπου Stribeck με σκοπό να καταλήξουμε σε μία και μόνο συγκεντρωτική καμπύλη (σχήμα 2.3.2.4.1) που να εμπεριέχει όλα τα παραπάνω δεδομένα των διαφορετικών σημείων λειτουργίας.

Έτσι διαχωρίζοντας τη φάση της επιτάχυνσης (σχήμα 2.3.2.4.2) από τη φάση επιβράδυνσης (σχήμα 2.3.2.4.3) και εξάγοντας τις εξισώσεις των πολυωνύμων των γραμμών τάσης μπορούμε να υπολογίσουμε **το πάχος λιπαντικής μεμβράνης h_{min}** για οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας επιθυμούμε μέσω των πολυωνύμων αυτών.

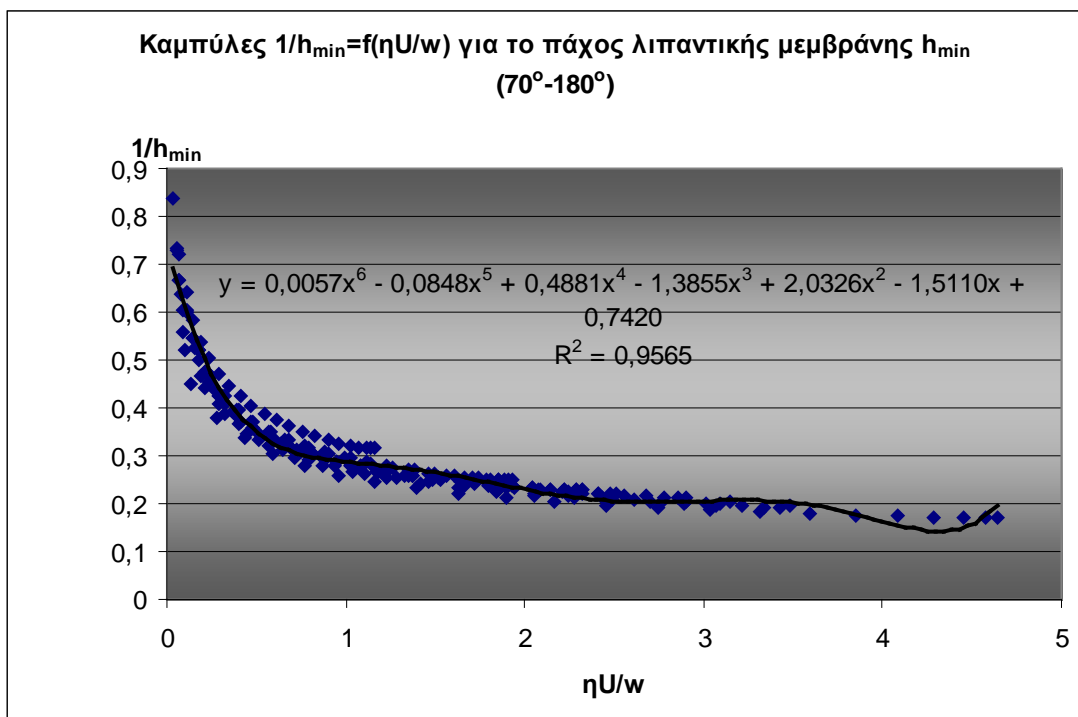
Τα αποτελέσματα αυτά των υπολογισμών για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ταχείας προσέγγισης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο και συγκρίνονται με αντίστοιχα από άλλες μεθόδους θεωρητικής προσέγγισης.



Σχήμα 2.3.2.4.1. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck για το συντελεστή $1/h_{min}$ ($0^\circ-180^\circ$) για όλες τις παραπάνω συνθήκες λειτουργίας



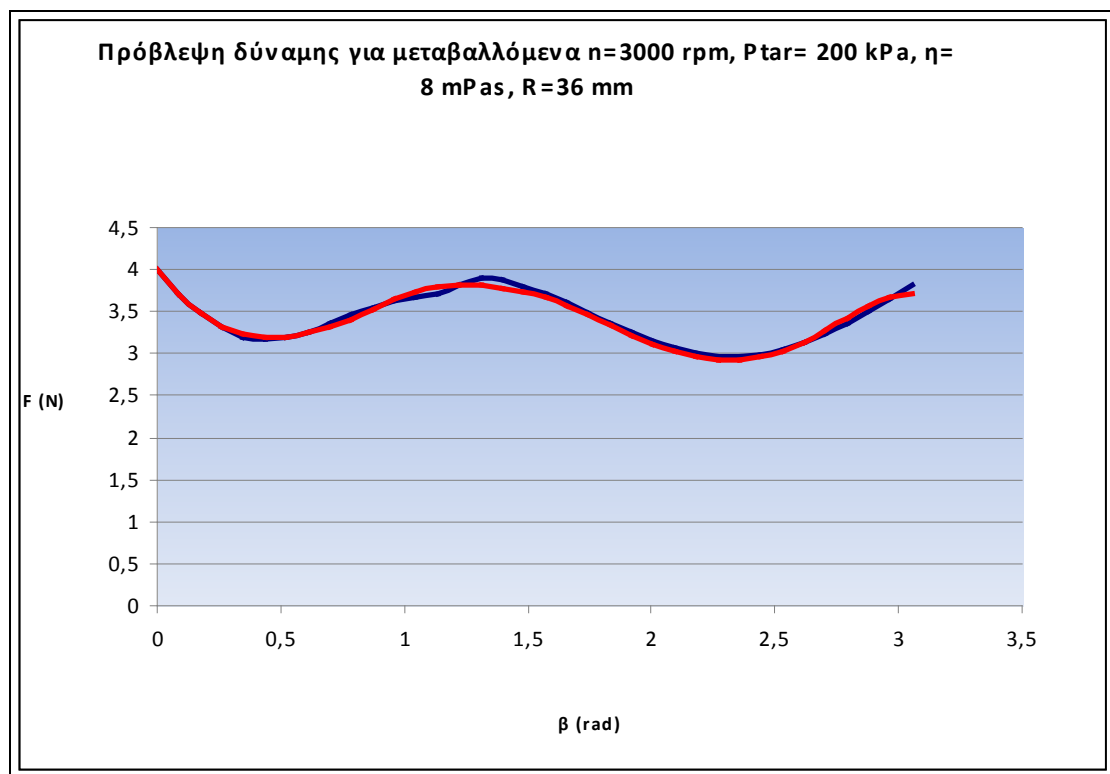
Σχήμα 2.3.2.4.2. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck για το συντελεστή $1/h_{\min}$ στη φάση επιτάχυνσης (0° - 70°) για όλες τις συνθήκες λειτουργίας με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού.



Σχήμα 2.3.2.4.3. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τύπου Stribeck για το συντελεστή $1/h_{\min}$ στη φάση επιβράδυνσης (70° - 180°) για όλες τις συνθήκες λειτουργίας με την αντίστοιχη γραμμή τάσης 6^{ov} βαθμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αποτελέσματα ταχείας μεθόδου προσδιορισμού συμπεριφοράς δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ. και σύγκριση με άλλες μεθόδους θεωρητικής προσομοίωσης



3.1 Αποτελέσματα ταχείας μεθόδου για τη συνολική δύναμη τριβής f_{tot}

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 η υστέρηση που εμφανίζεται στις καμπύλες τύπου Stribeck που δημιουργεί καμπύλες τύπου βρόγχου (κυκλική συμπεριφορά) αντιμετωπίστηκε λαμβάνοντας δύο διακεκριμένα τμήματα για το πεδίο λειτουργίας δηλαδή χωρίζοντας την επιταχυνόμενη κίνηση (0° - 70°) και την επιβραδυνόμενη (70° - 180°). Για λόγους απλούστευσης ελήφθη όριο των δύο περιοχών η τιμή της γωνίας στροφάλου $\beta=70^{\circ}$ όπου εμφανίζεται και το μέγιστο στην τιμή της ταχύτητας.

Η ανάπλαση των καμπυλών δύναμης τριβής και πάχους λιπαντικής μεμβράνης έγινε λοιπόν με βάση την αντίστοιχη καμπύλη Stribeck ($\alpha \rightarrow 0^{\circ}$ - 70° και $\beta \rightarrow 70^{\circ}$ - 180°) για την κάθοδο του εμβόλου (διαδρομή από ΑΝΣ προς ΚΝΣ)

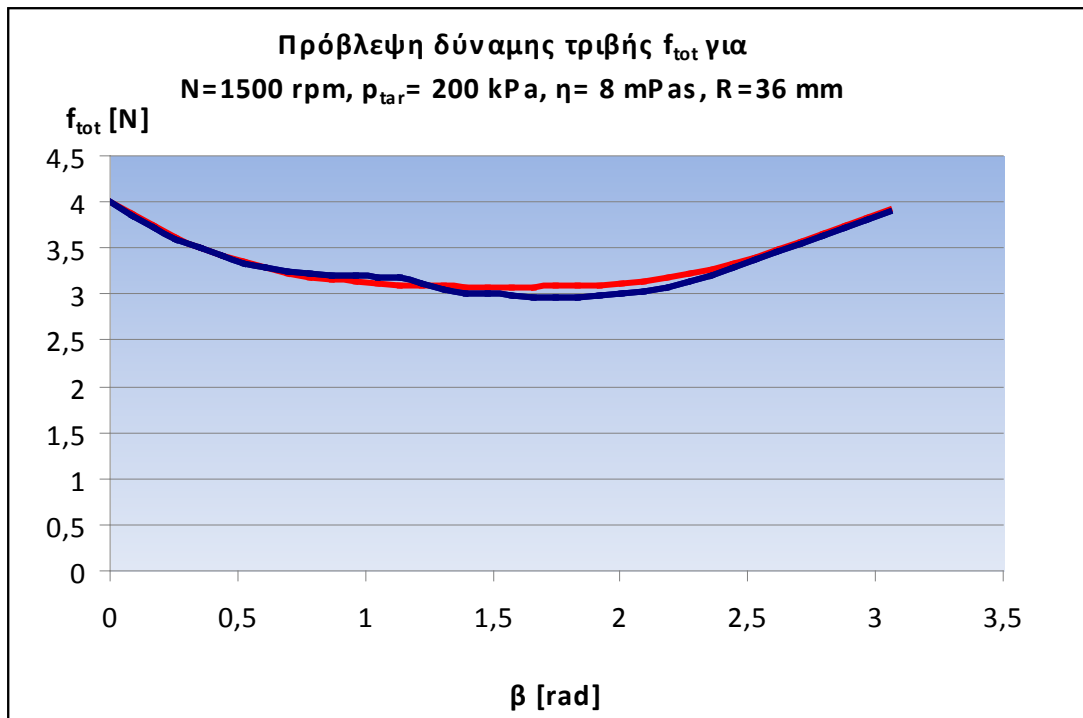
Παρόλα αυτά παρατηρείται ελαφρά διακύμανση τιμών στη σύνδεση των δύο καμπυλών δηλαδή στην περιοχή των 70° που γενικά δεν θεωρείται ότι αποτελεί μειονέκτημα της διαδικασίας ταχείας προσέγγισης μεγεθών που μας ενδιαφέρουν (εκτός ακραίων τιμών των λειτουργικών δεδομένων)

Τα παρακάτω διαγράμματα που επαληθεύουν την ανάπλαση των αντιστοίχων καμπυλών από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα τύπου Stribeck του προηγούμενου κεφαλαίου δίνουν δυνάμεις τριβής για τις συνθήκες που ελήφθησαν υπόψη κατά τον υπολογισμό με τον πηγαίο κώδικα oilfilm.

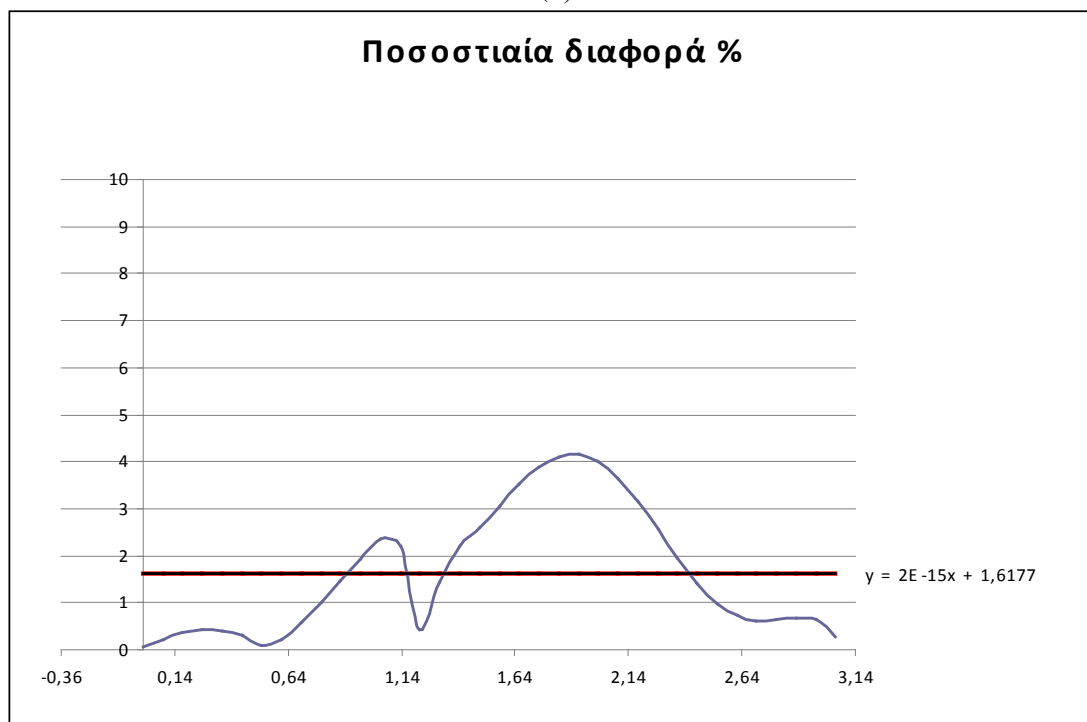
Οι συντελεστές των πολωνύμων $6^{ου}$ βαθμού από την χρήση των οποίων προήλθαν τα παρακάτω διαγράμματα για την πρόβλεψη της συνολικής δύναμης τριβής όπως παρουσιάστηκαν στα συγκεντρωτικά διαγράμματα του κεφαλαίου 2 για τις φάσεις επιτάχυνσης (0° - 70° σχήμα 2.3.1.4.2 σελ.95) και επιβράδυνσης (70° - 180° σχήμα 2.3.1.4.3 σελ.95) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

| | 0° - 70° | 70° - 180° |
|------------|----------------------------|------------------------------|
| α^6 | 0,0000930398587275505 | -0,0000274237368795838 |
| α^5 | -0,0010361810047356800 | 0,0002155108188826750 |
| α^4 | 0,0036188544734159200 | 0,0004135708781604900 |
| α^3 | -0,0041209353489648500 | -0,0096504912128263700 |
| α^2 | 0,0074175023128191200 | 0,0393479408093256000 |
| α^1 | -0,0206422661337911000 | -0,0505286793670450000 |
| α^0 | 0,0792898594236817000 | 0,0788690669759994000 |

Πίνακας 3.1.1 Συντελεστές πολωνύμων $6^{ου}$ βαθμού για την πρόβλεψη της συνολικής δύναμης τριβής f_{tot}

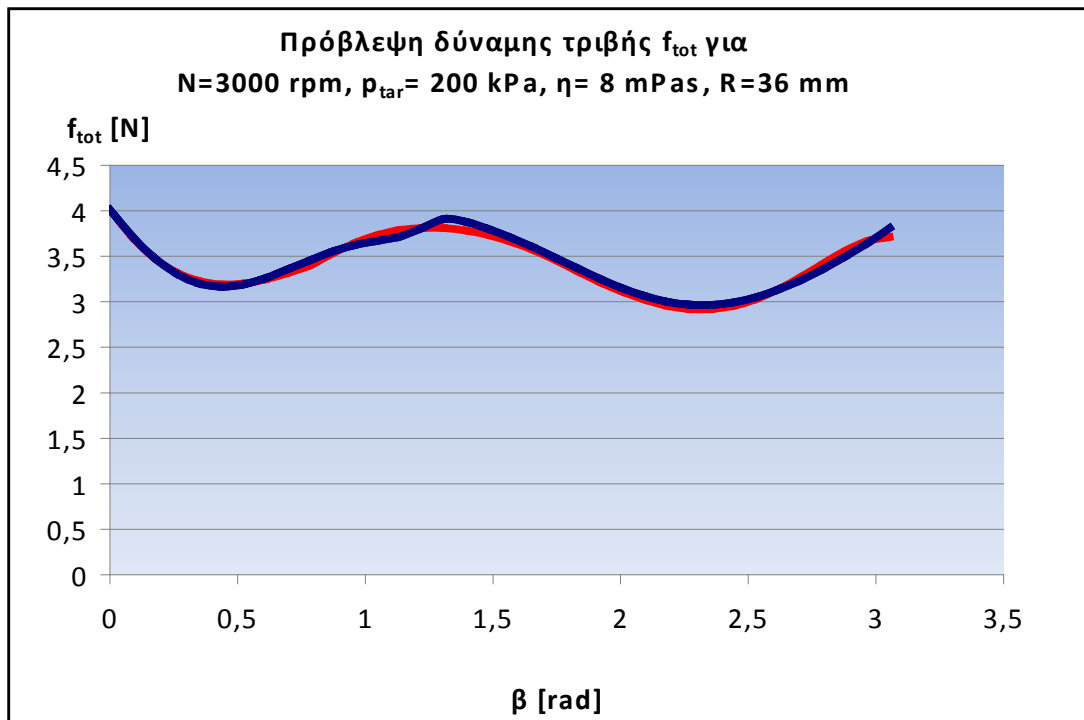


(α)



(β)

Σχήμα 3.1.1. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

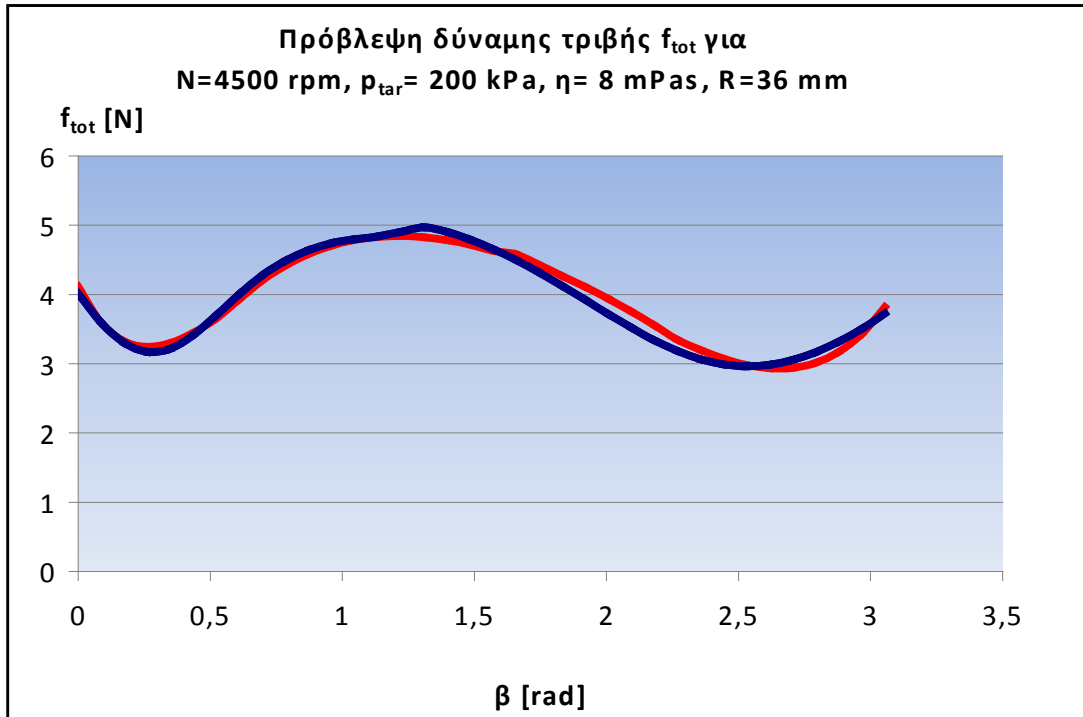


(α)

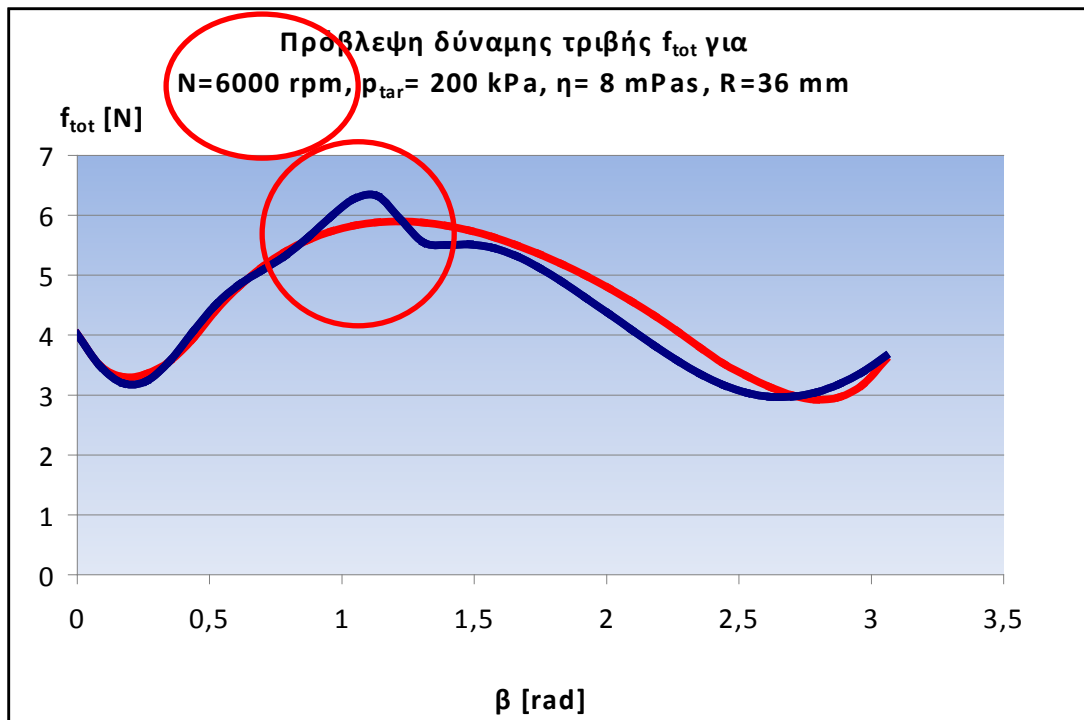


(β)

Σχήμα 3.1.2. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).



Σχήμα 3.1.3. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

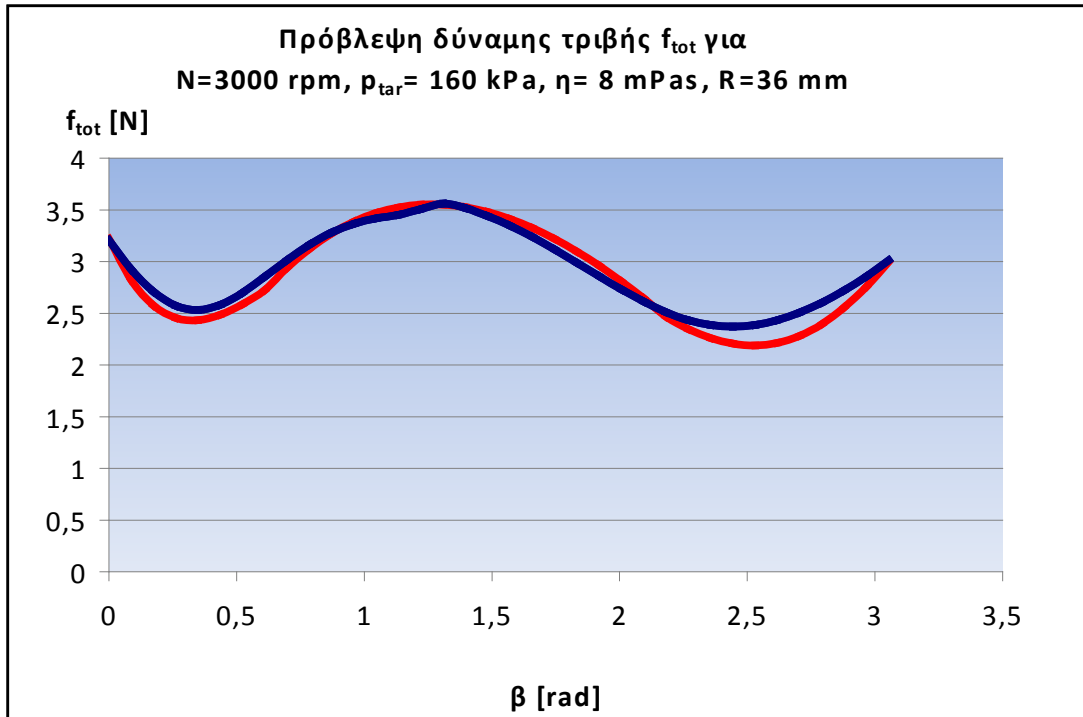


(α)



(β)

Σχήμα 3.1.4. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

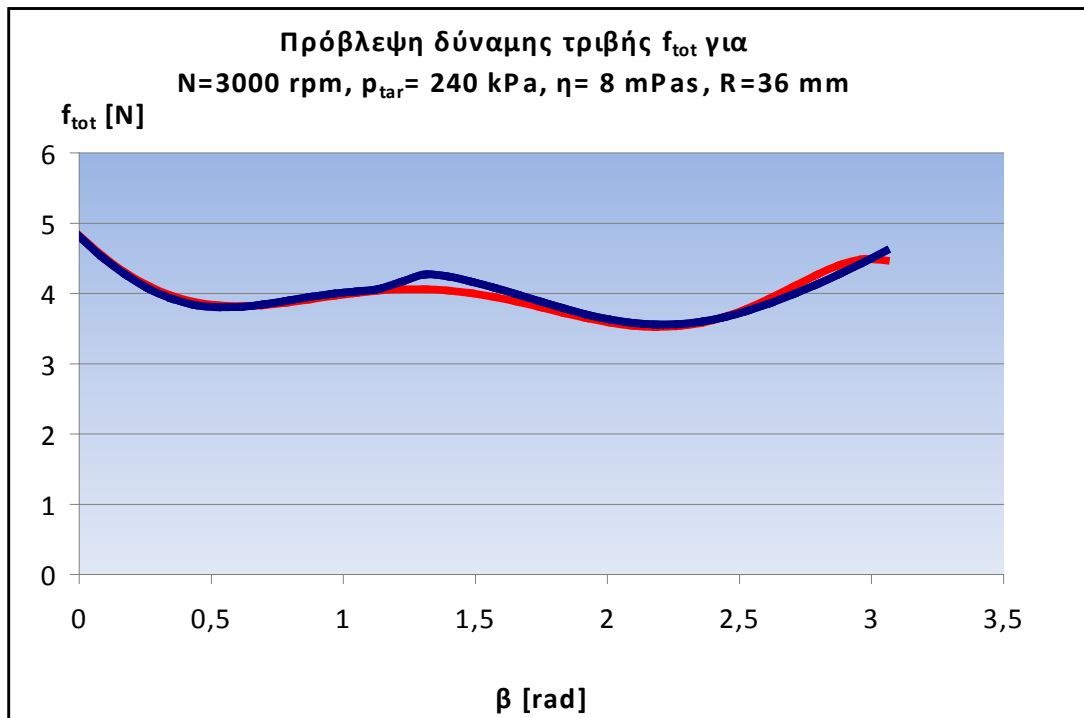


(α)



(β)

Σχήμα 3.1.5. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

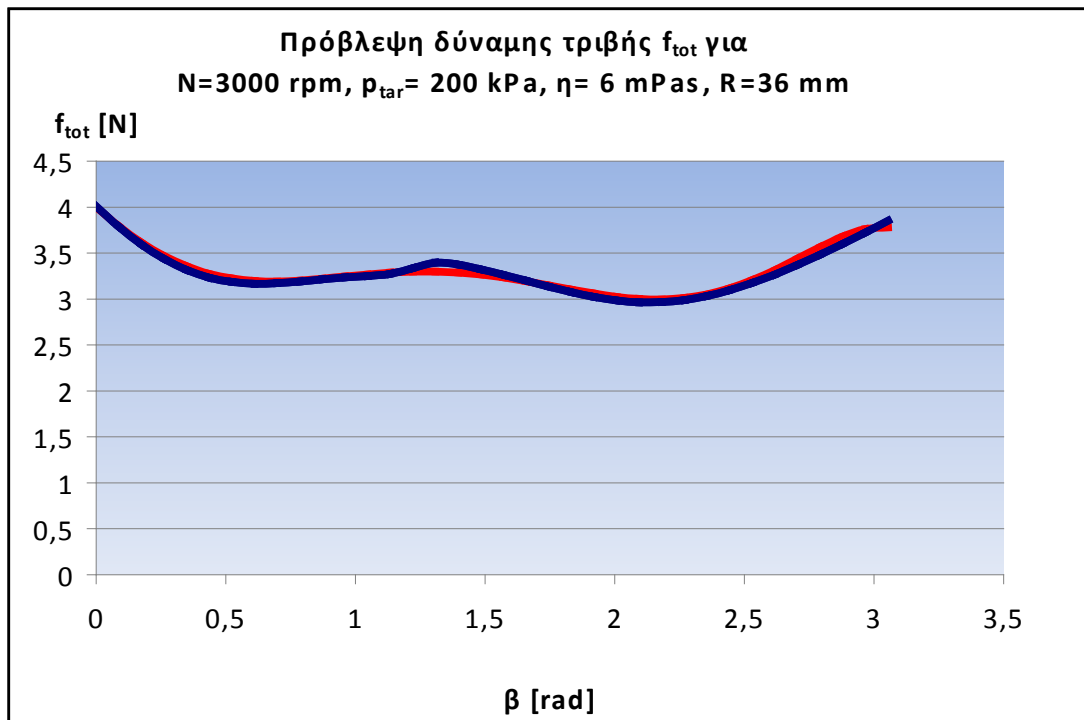


(α)



(β)

Σχήμα 3.1.6. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

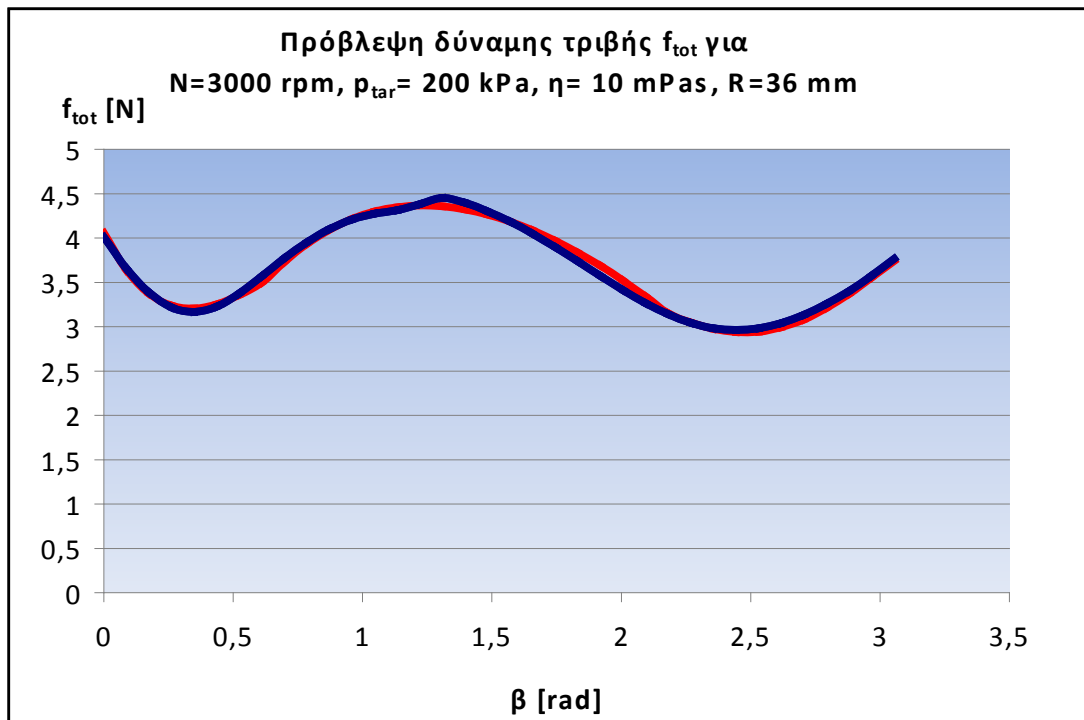


(α)

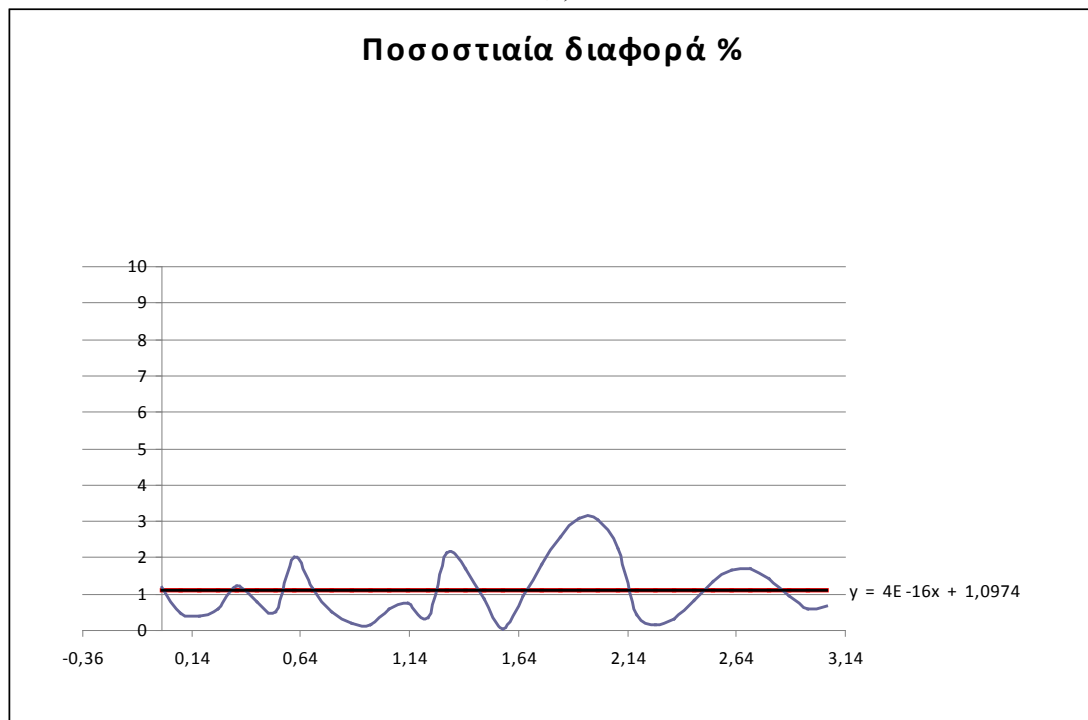


(β)

Σχήμα 3.1.7. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

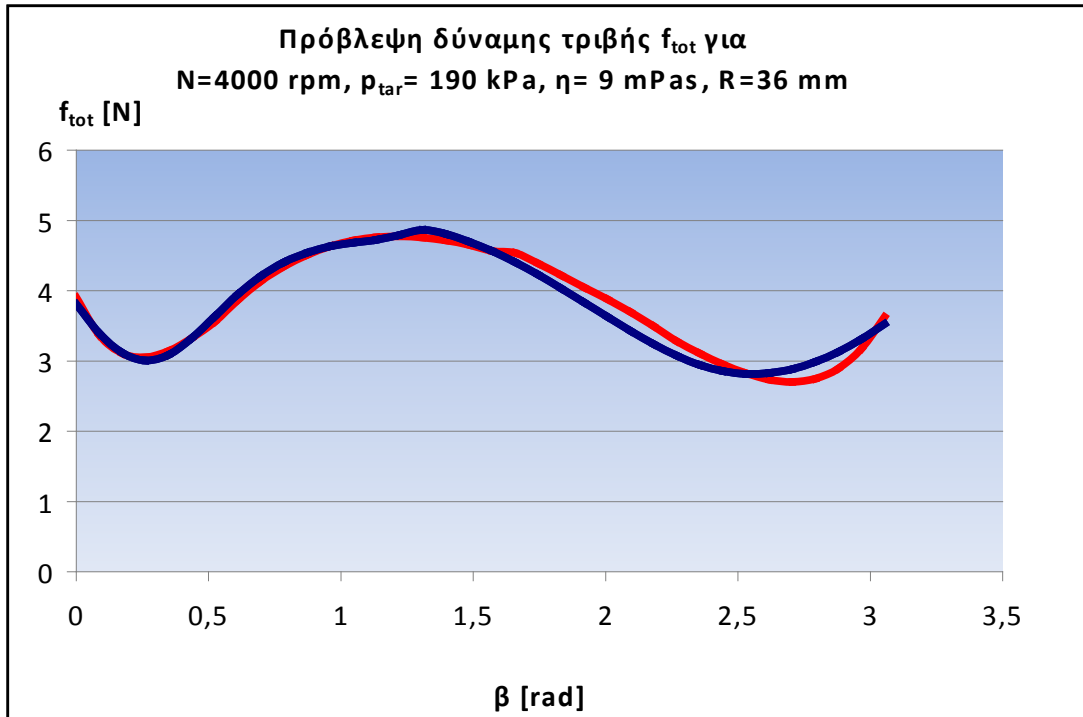


(α)



(β)

Σχήμα 3.1.8. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

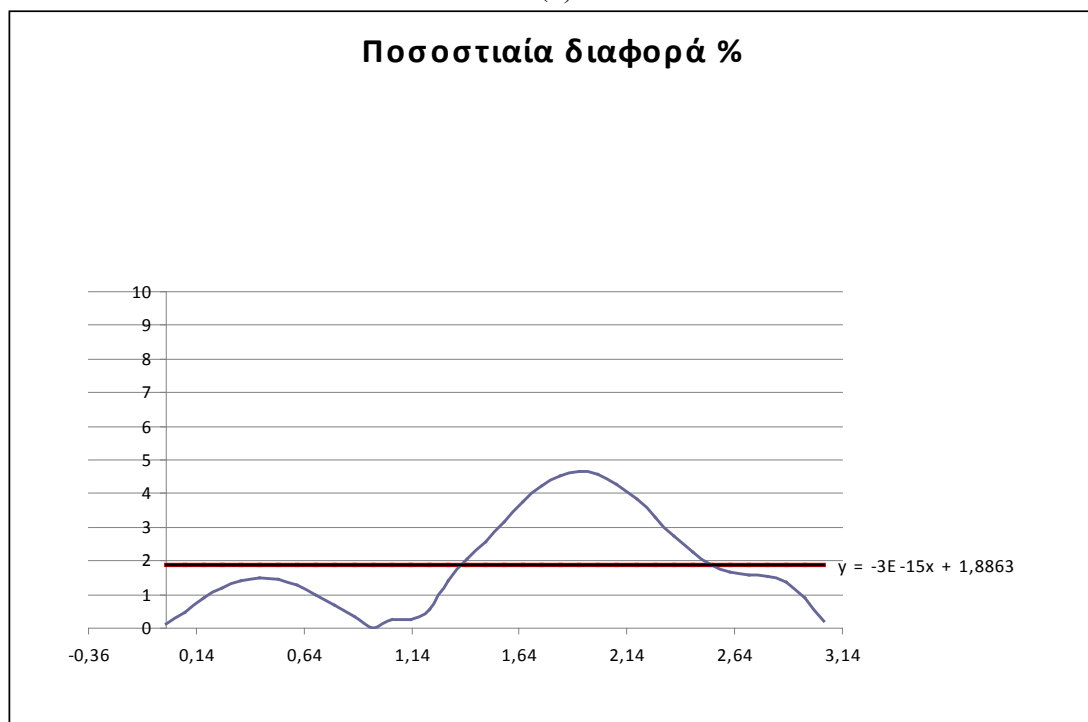
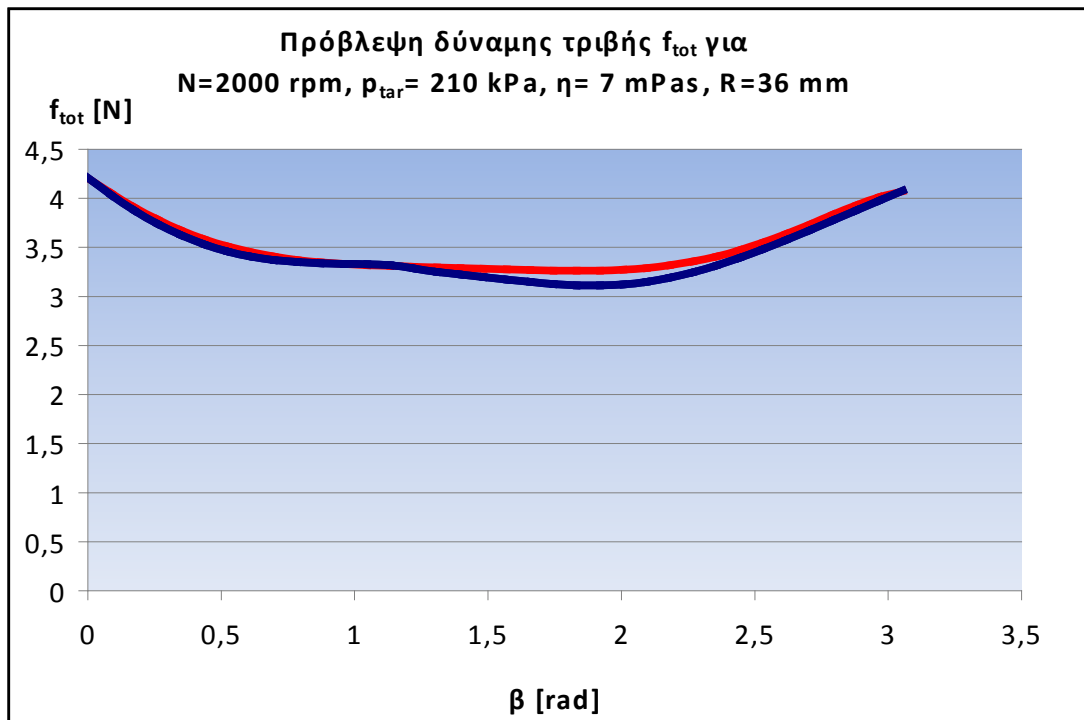


(α)

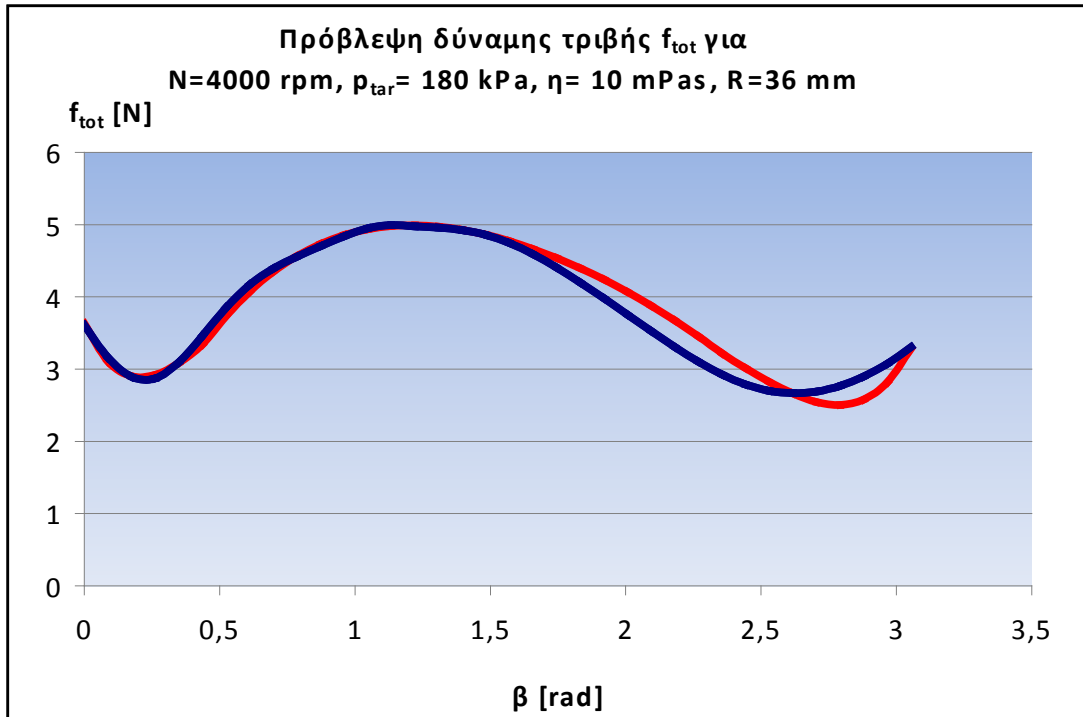


(β)

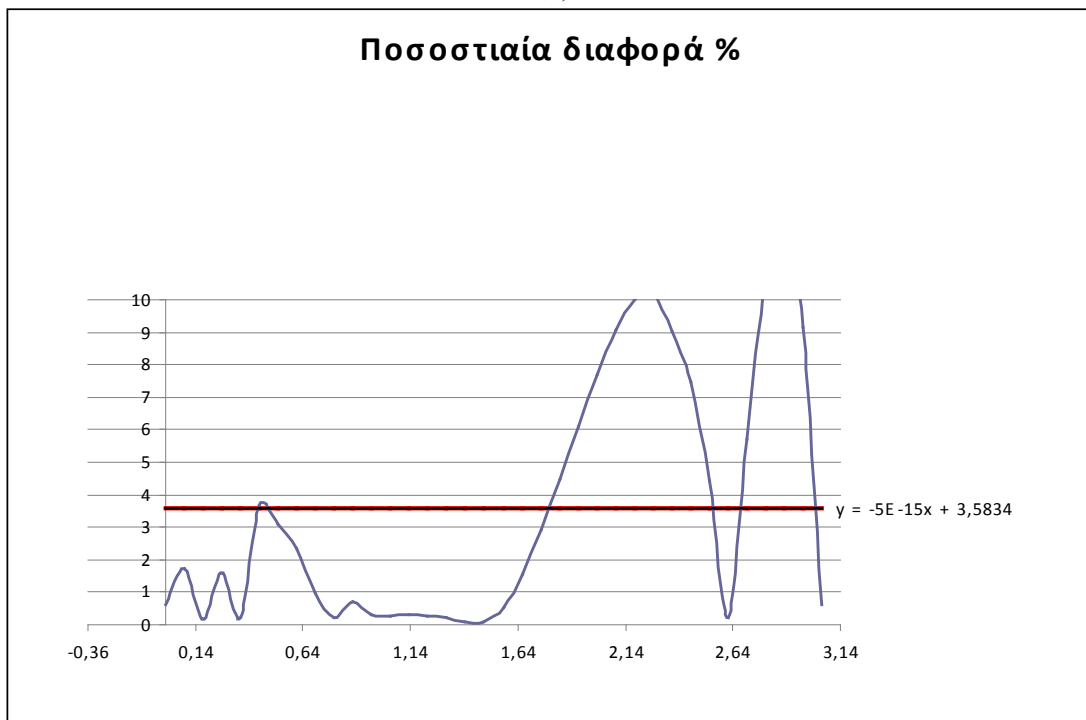
Σχήμα 3.1.9. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).



Σχήμα 3.1.10. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

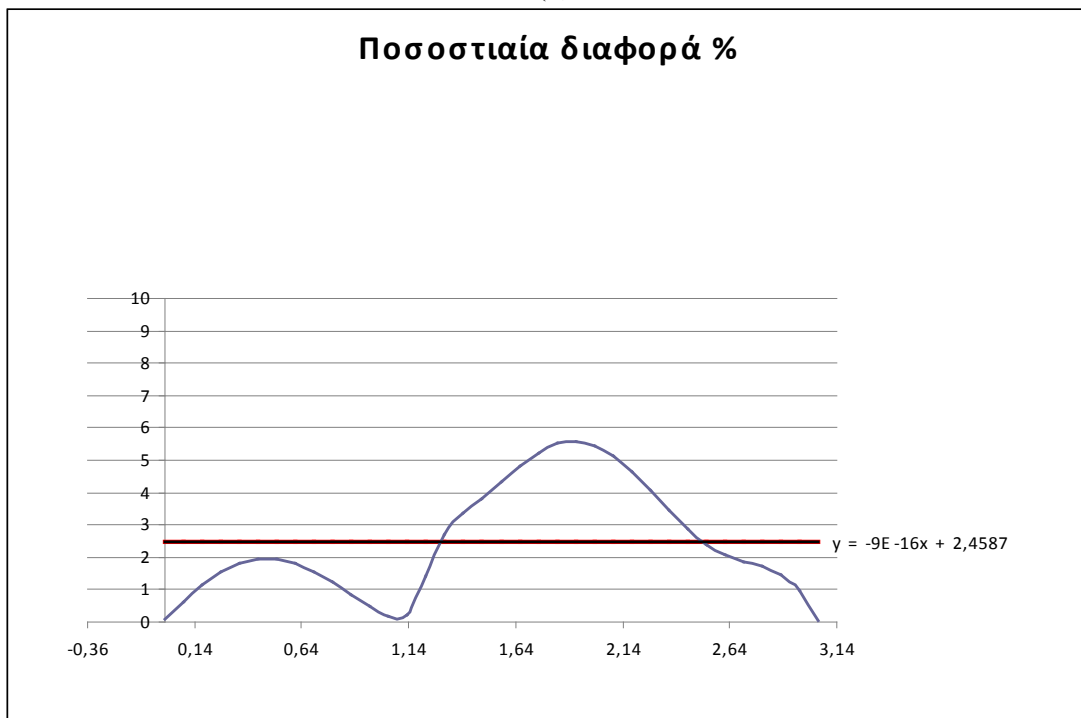
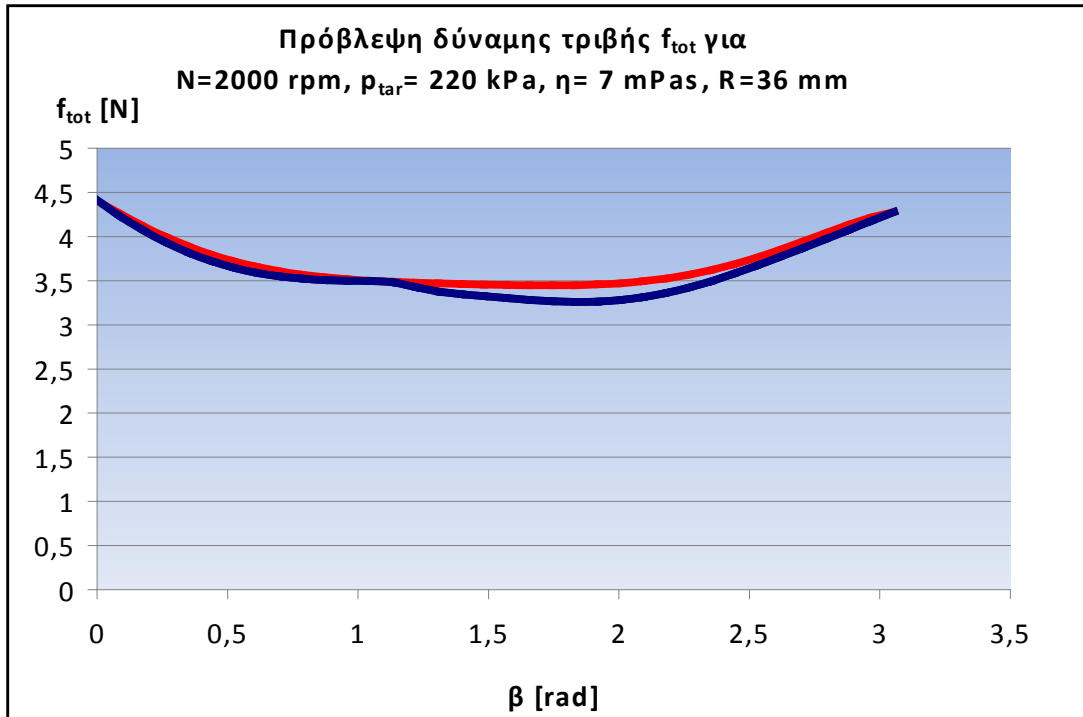


(α)

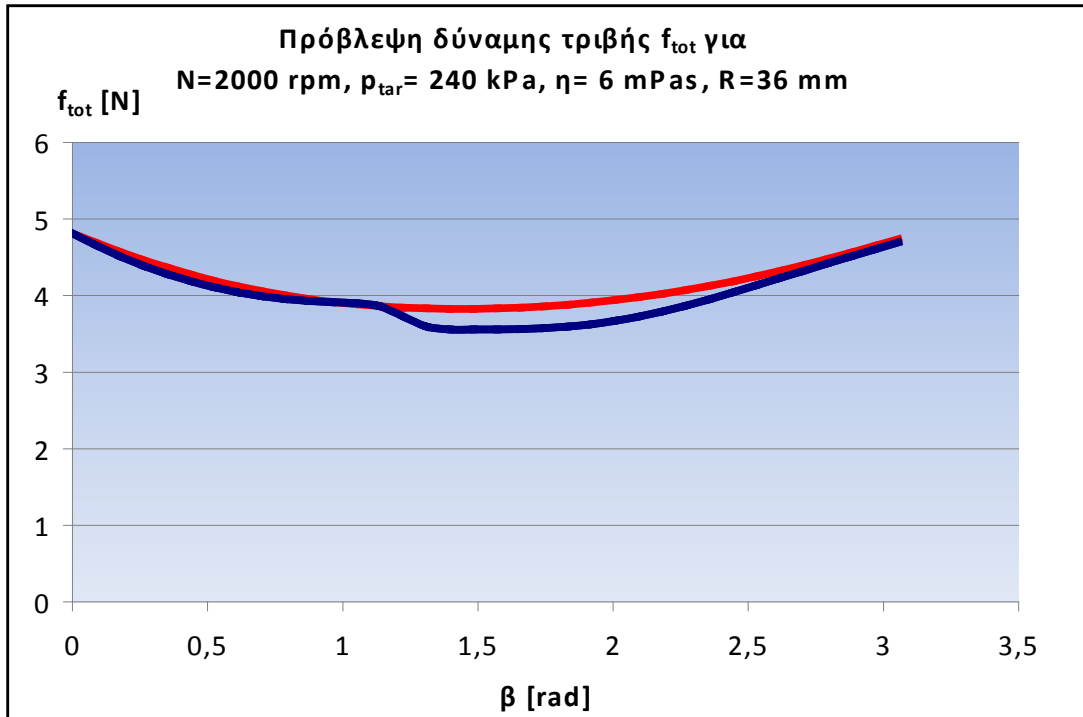


(β)

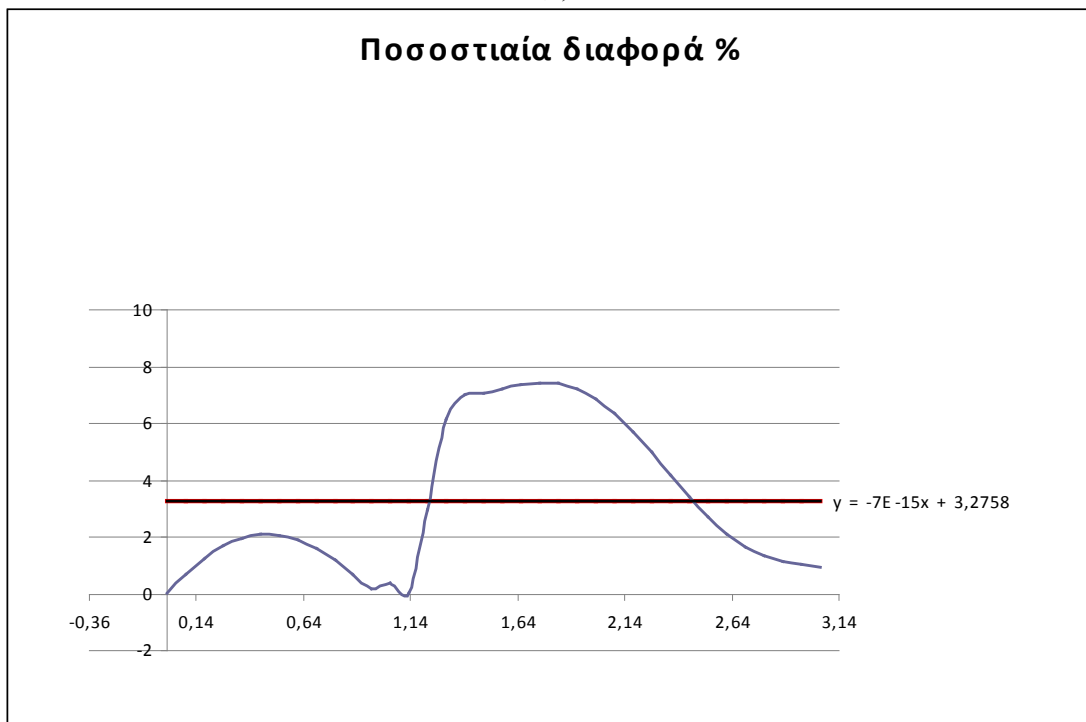
Σχήμα 3.1.11. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).



Σχήμα 3.1.12. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).



(α)



(β)

Σχήμα 3.1.13. Σύγκριση καμπύλης για τη συνολική δύναμη τριβής (f_{tot}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

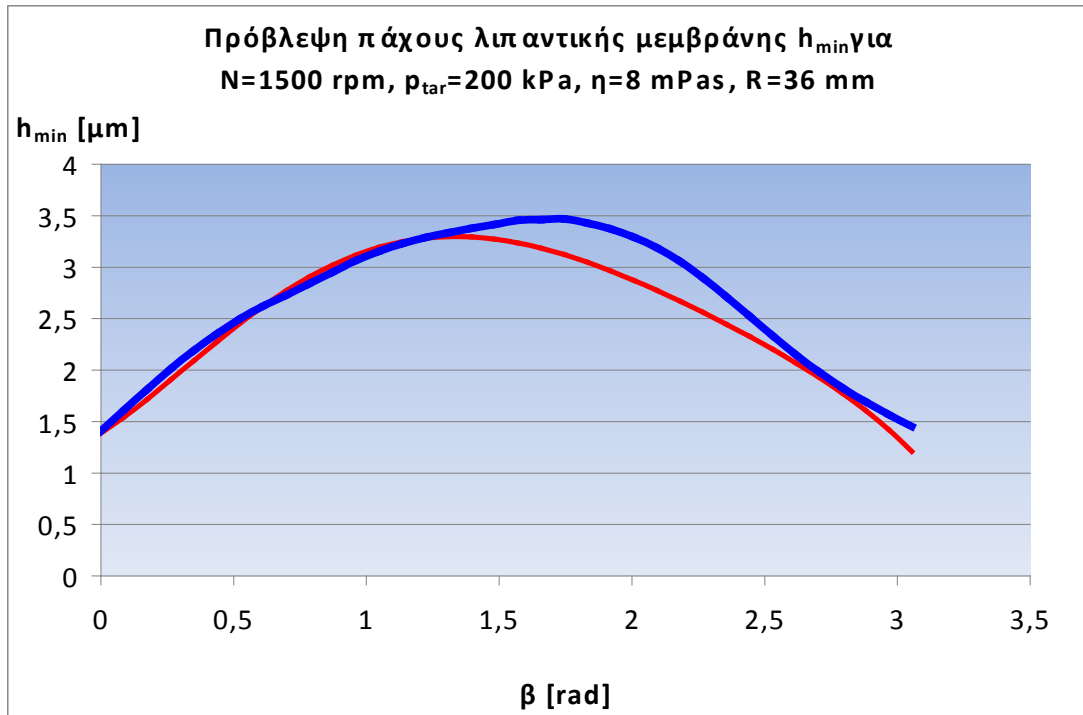
3.2 Αποτελέσματα ταχείας μεθόδου για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης h_{min}

Τα παρακάτω διαγράμματα που επαληθεύουν την ανάπλαση των αντιστοίχων καμπυλών από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα τύπου Stribeck του προηγούμενου κεφαλαίου δίνουν πάχη λιπαντικής μεμβράνης για τις συνθήκες που ελήφθησαν υπόψη κατά τον υπολογισμό με τον πηγαίο κώδικα oilfilm.

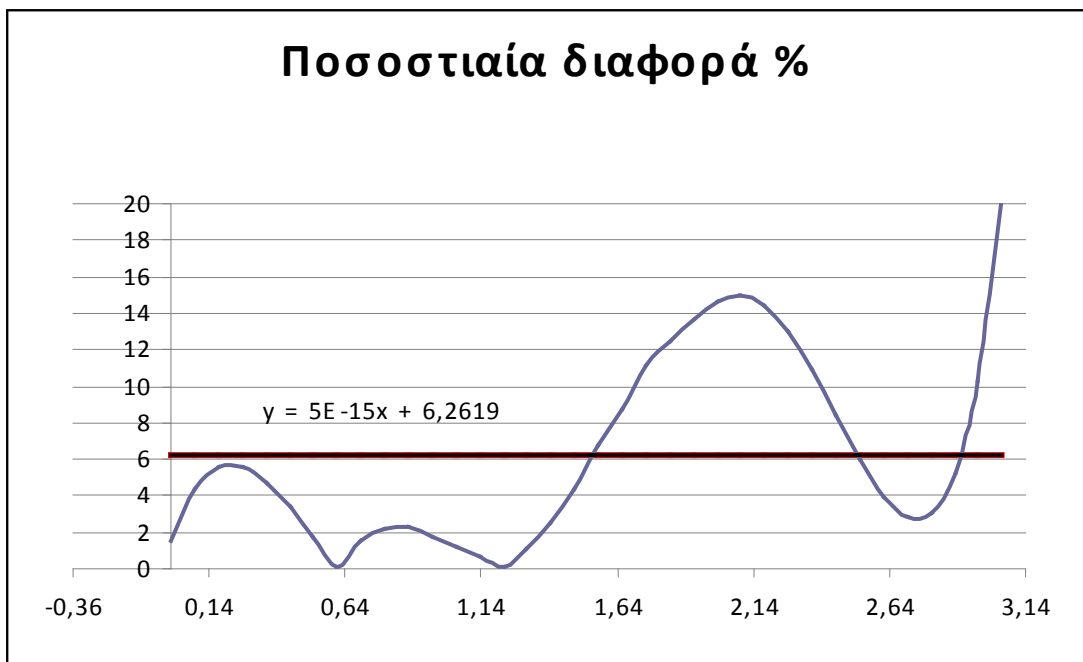
Οι συντελεστές των πολυωνύμων 6^{ου} βαθμού από την χρήση των οποίων προήλθαν τα παρακάτω διαγράμματα για την πρόβλεψη του πάχους λιπαντικής μεμβράνης όπως παρουσιάστηκαν στα συγκεντρωτικά διαγράμματα του κεφαλαίου 2 για τις φάσεις επιτάχυνσης (0°-70° σχήμα 2.3.2.4.2 σελ.125) και επιβράδυνσης (70°-180° σχήμα 2.3.2.4.3 σελ.125) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

| | 0°-70° | 70°-180° |
|------------|-----------------------|----------------------|
| α^6 | 0,000827975653624691 | 0,00573574158231507 |
| α^5 | -0,013106416718301300 | -0,08478962679443820 |
| α^4 | 0,082400283529523200 | 0,48806835003461100 |
| α^3 | -0,268512576587455000 | -1,38548416602494000 |
| α^2 | 0,512838778900914000 | 2,03260543067488000 |
| α^1 | -0,651297663541300000 | -1,51096443113453000 |
| α^0 | 0,710389445528335000 | 0,74197416504207400 |

Πίνακας 3.2.1 Συντελεστές πολυωνύμων 6^{ου} βαθμού για την πρόβλεψη του πάχους λιπαντικής μεμβράνης h_{min}

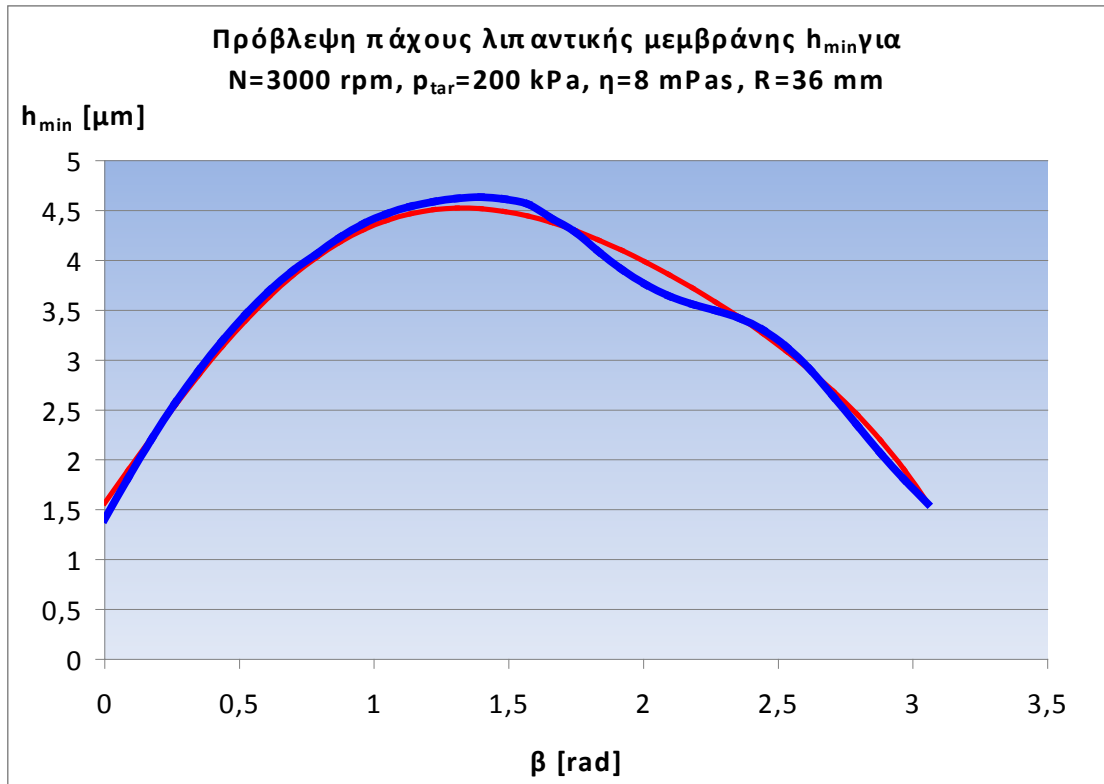


(α)

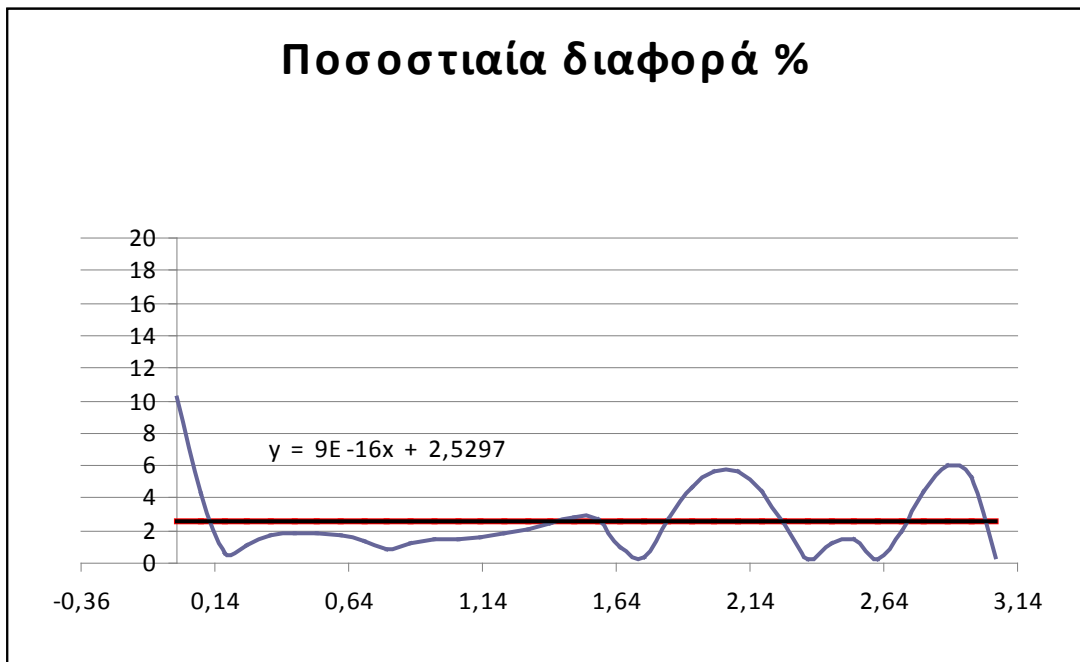


(β)

Σχήμα 3.2.1. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{\min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

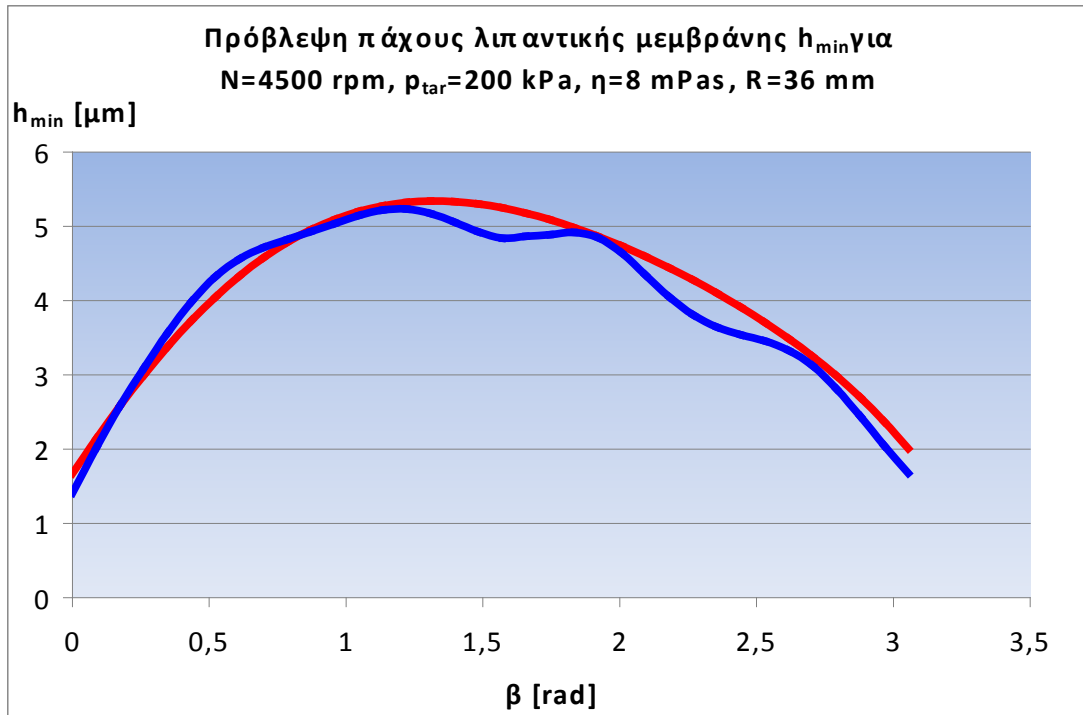


(α)

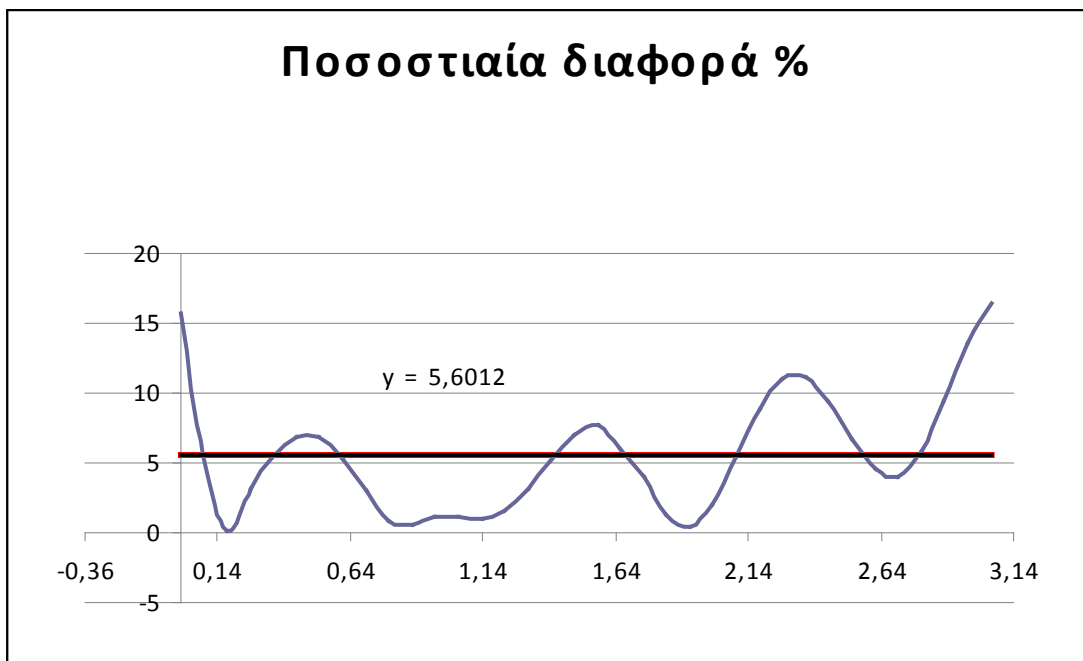


(β)

Σχήμα 3.2.2. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

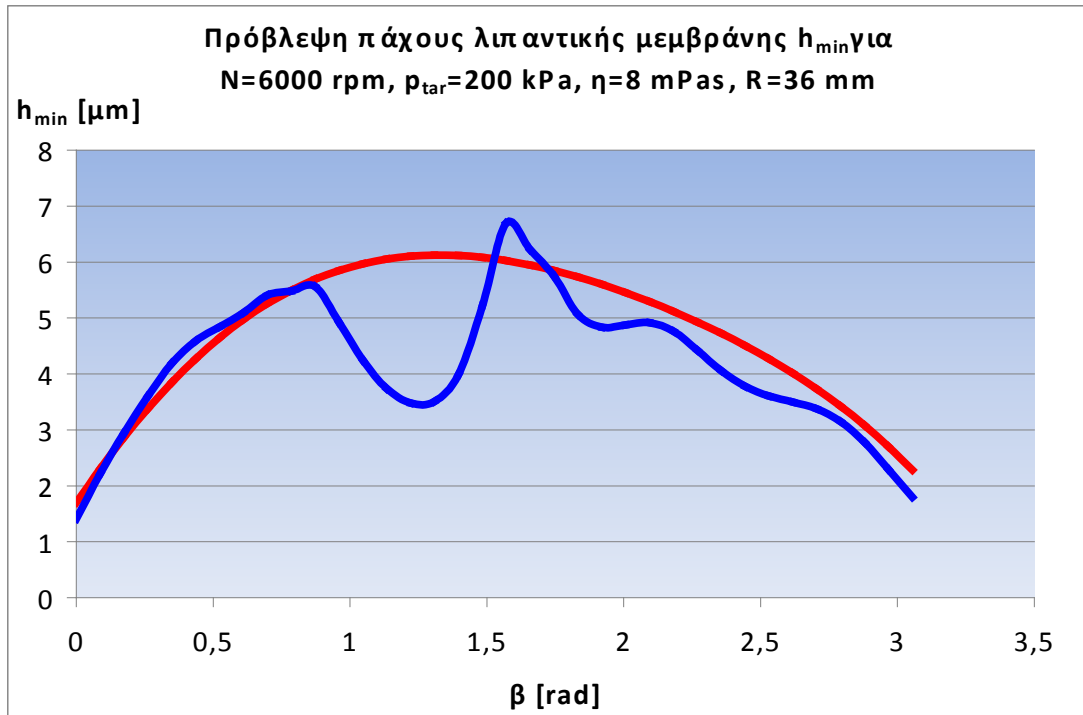


(α)

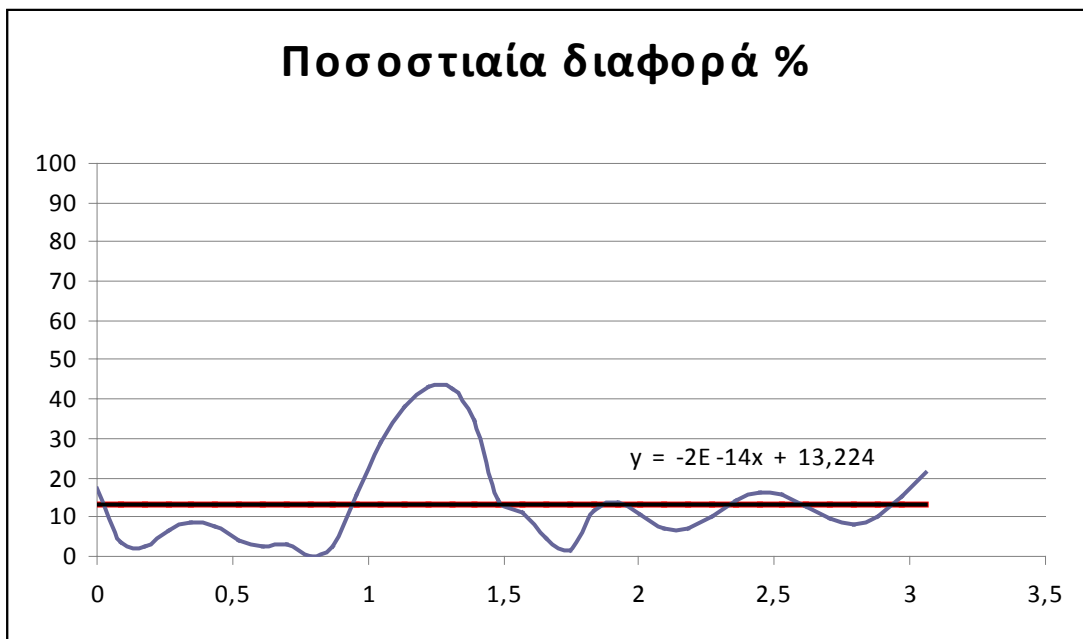


(β)

Σχήμα 3.2.3. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

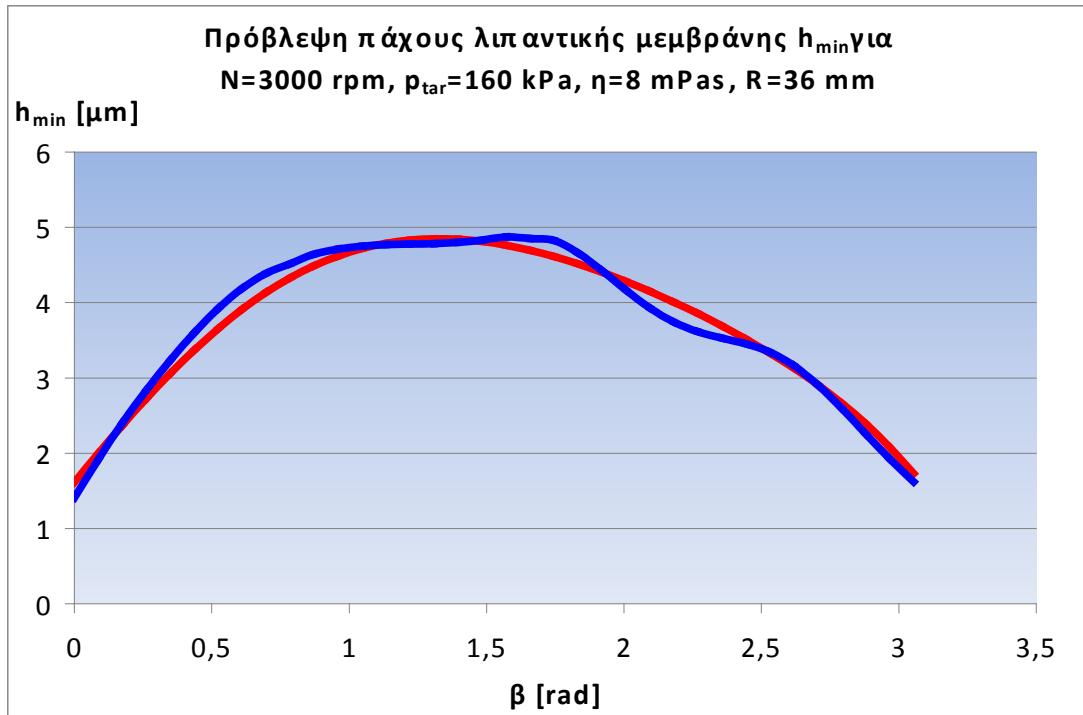


(α)

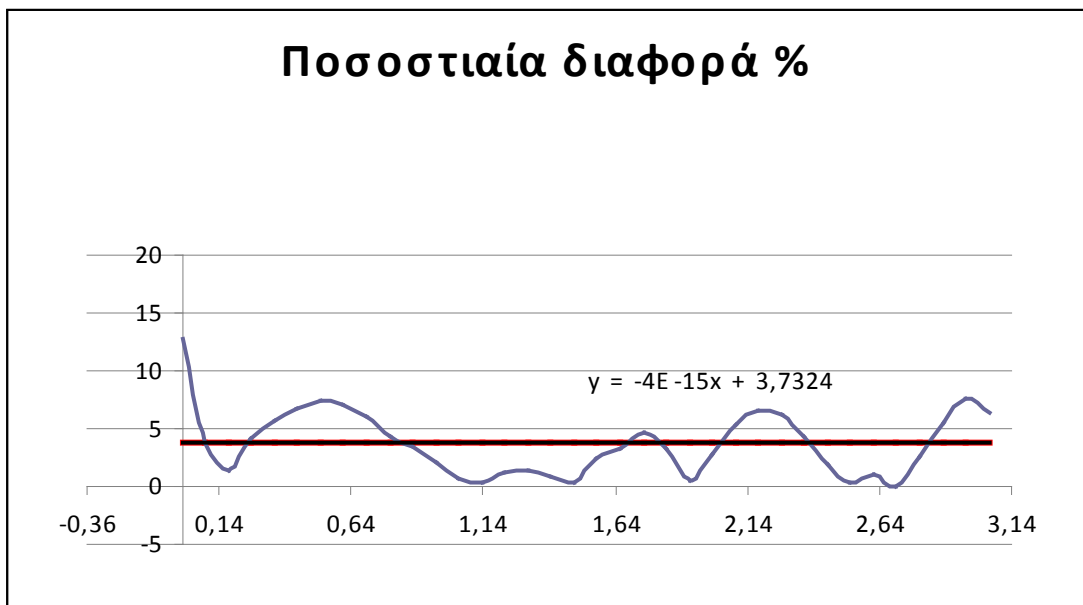


(β)

Σχήμα 3.2.4. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

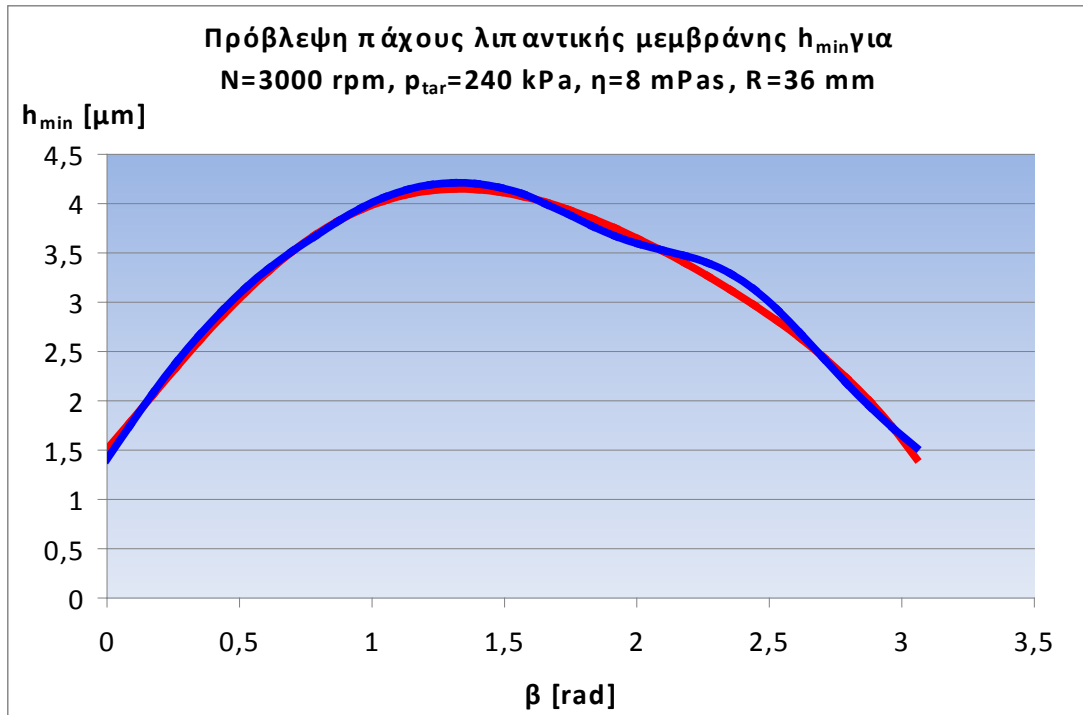


(α)

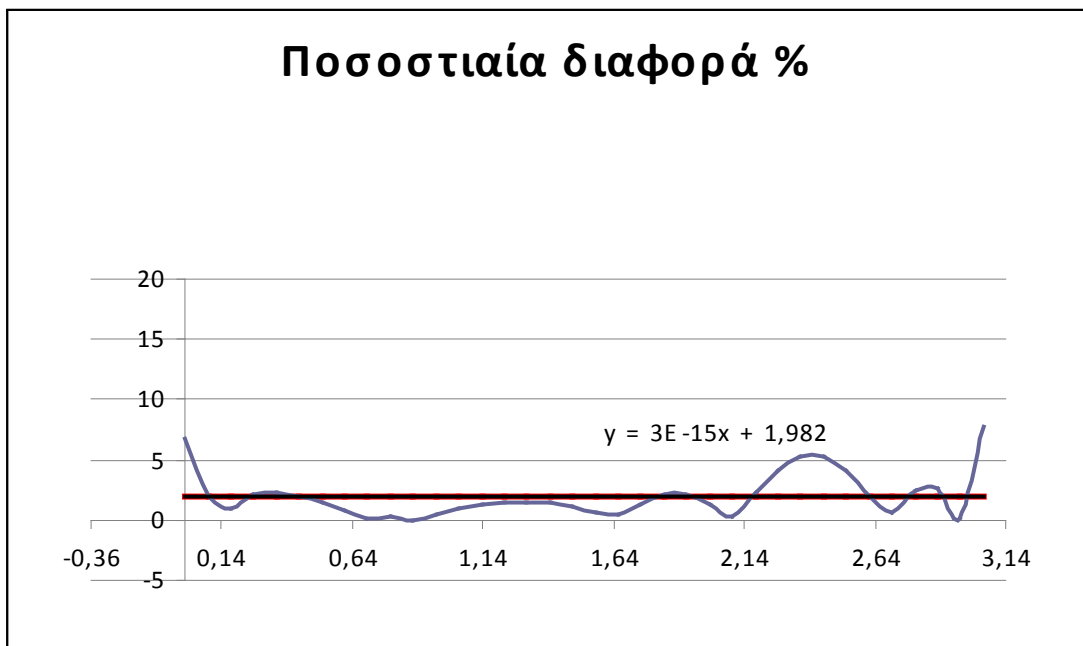


(β)

Σχήμα 3.2.5. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

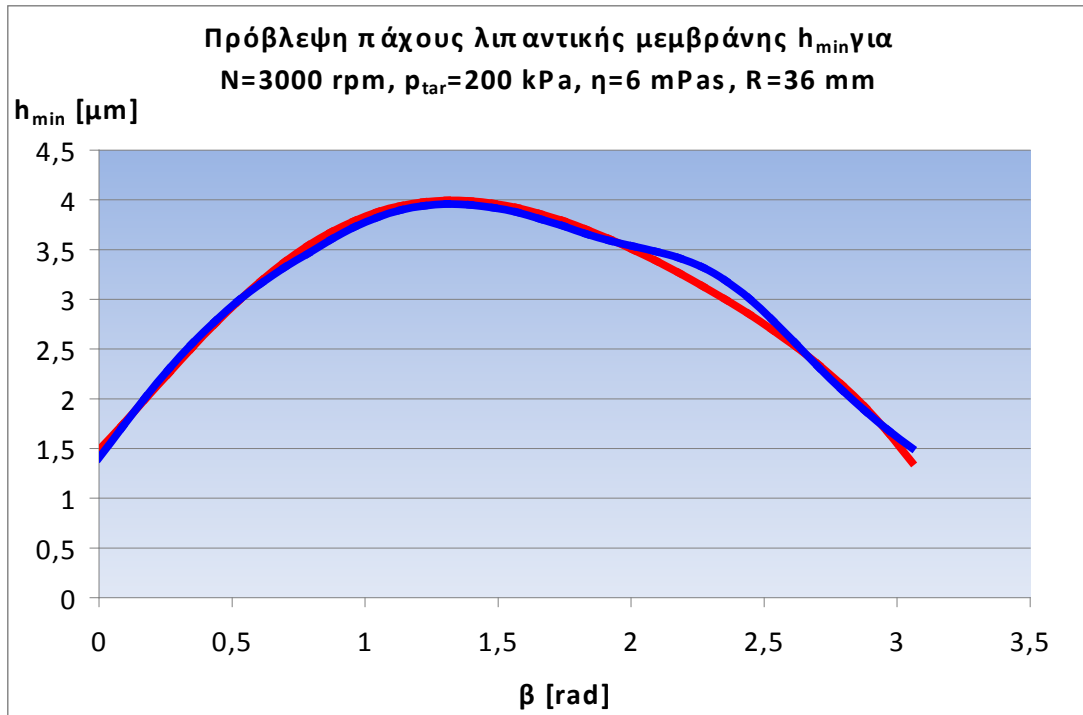


(α)

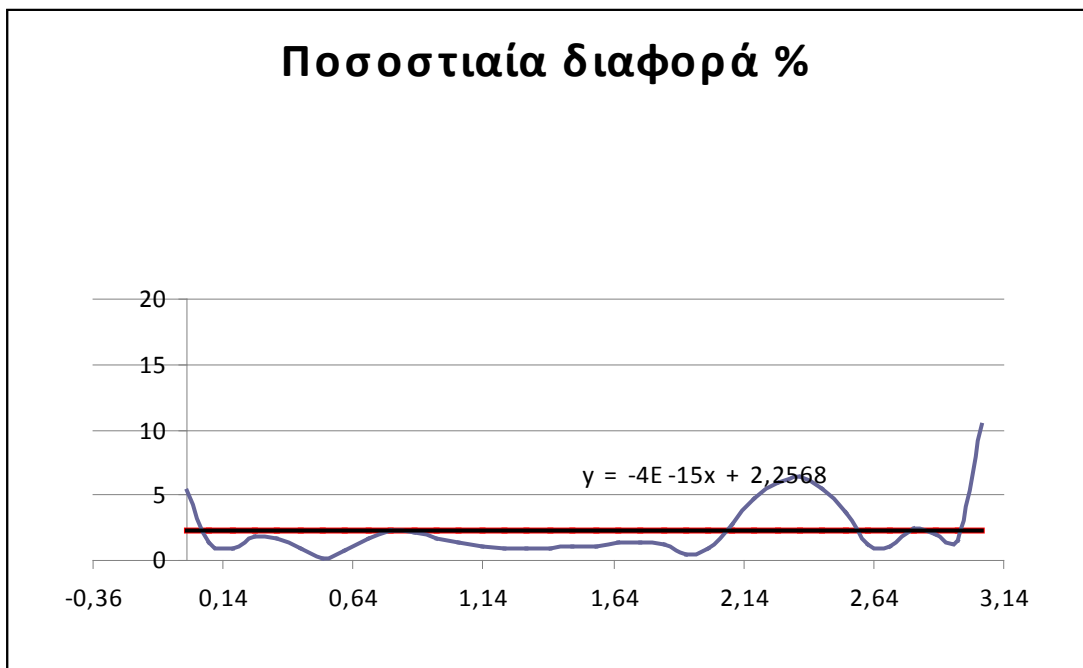


(β)

Σχήμα 3.2.6. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

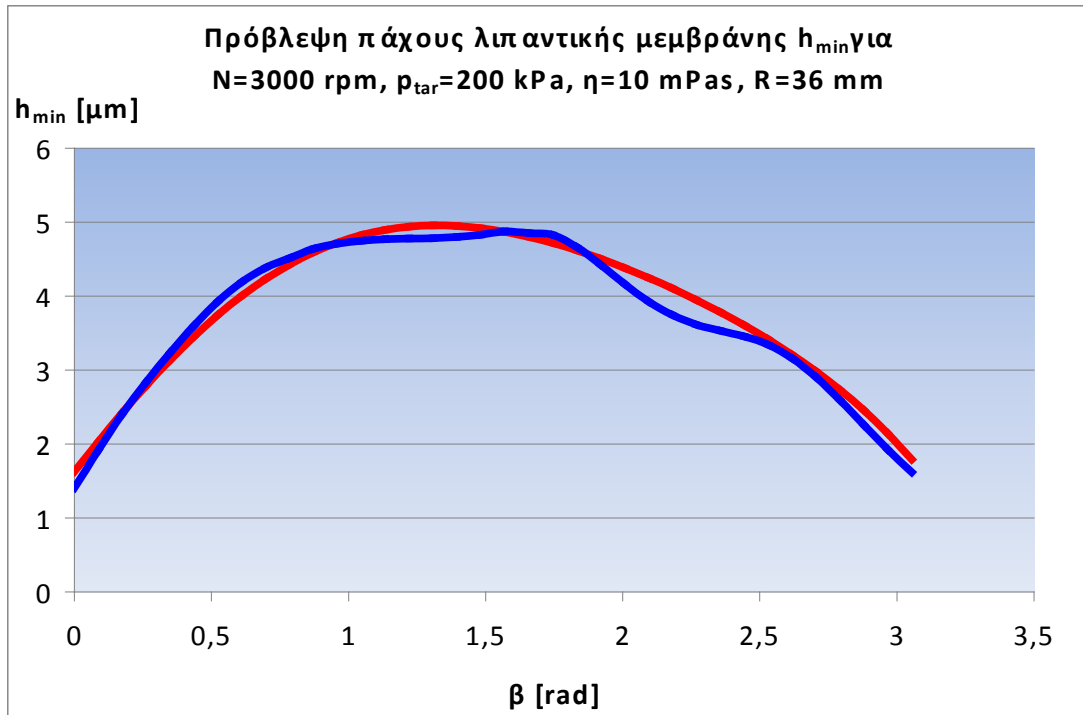


(α)

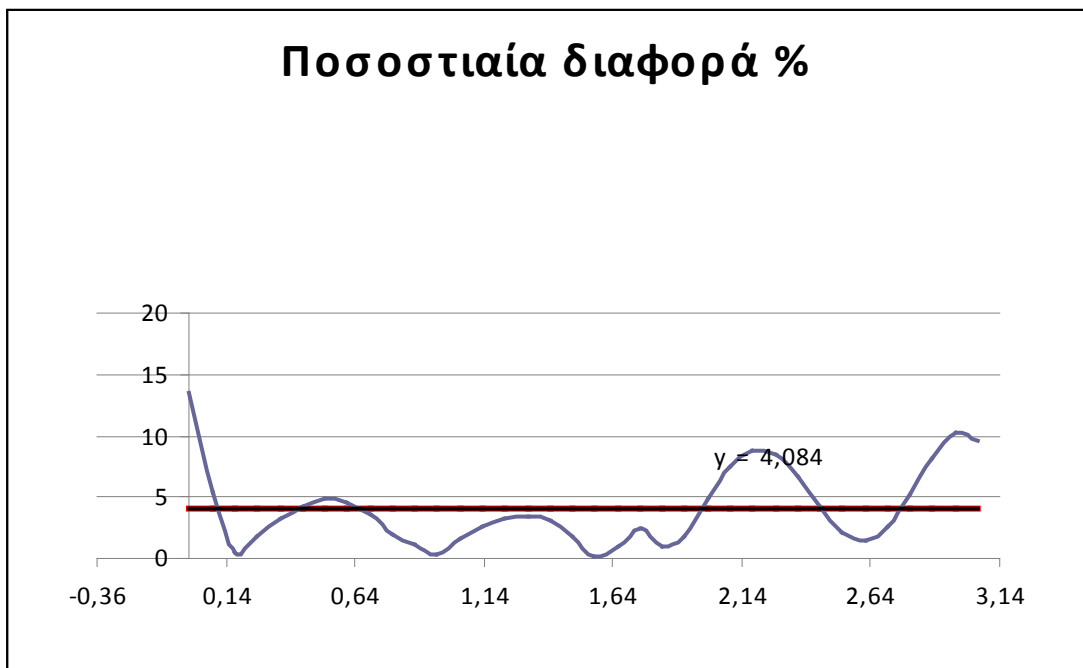


(β)

Σχήμα 3.2.7. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

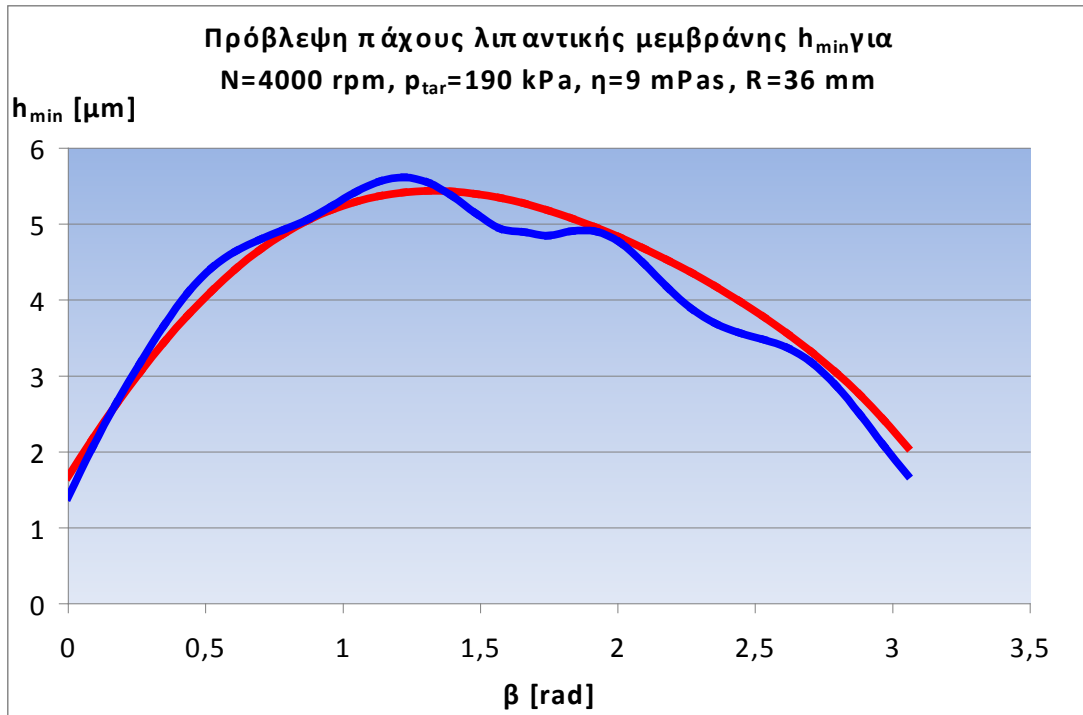


(α)

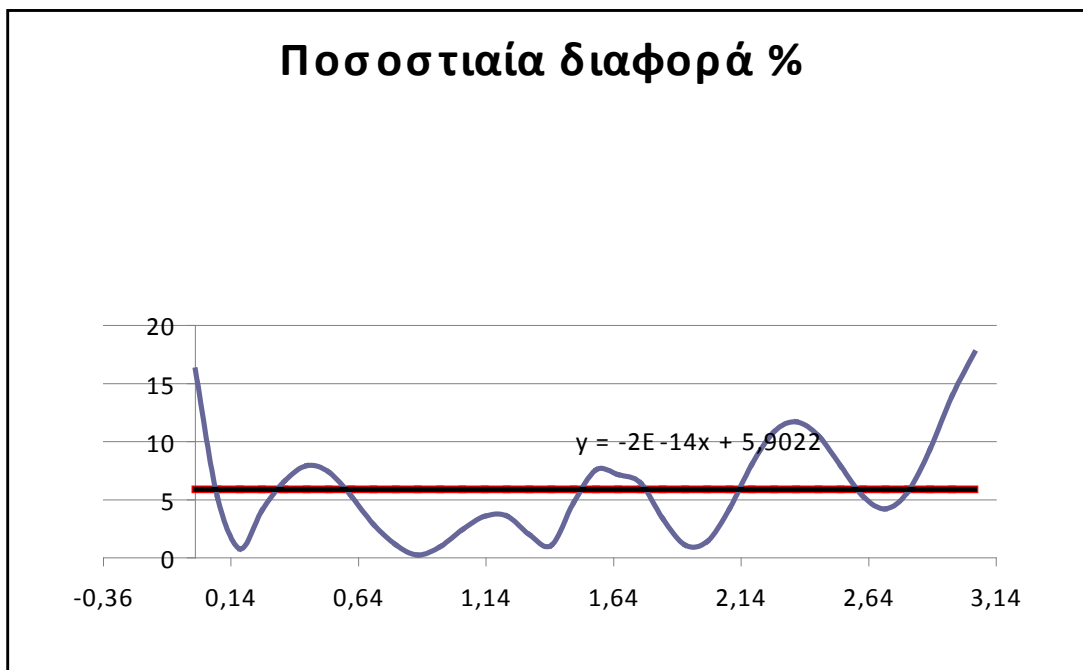


(β)

Σχήμα 3.2.8. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

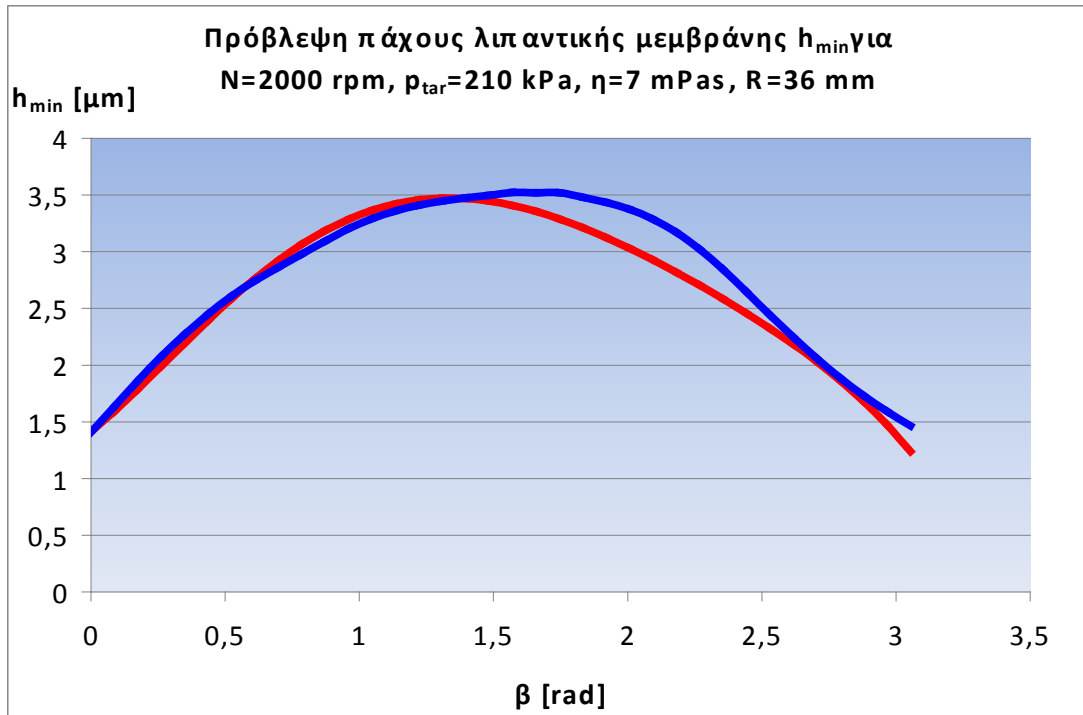


(α)

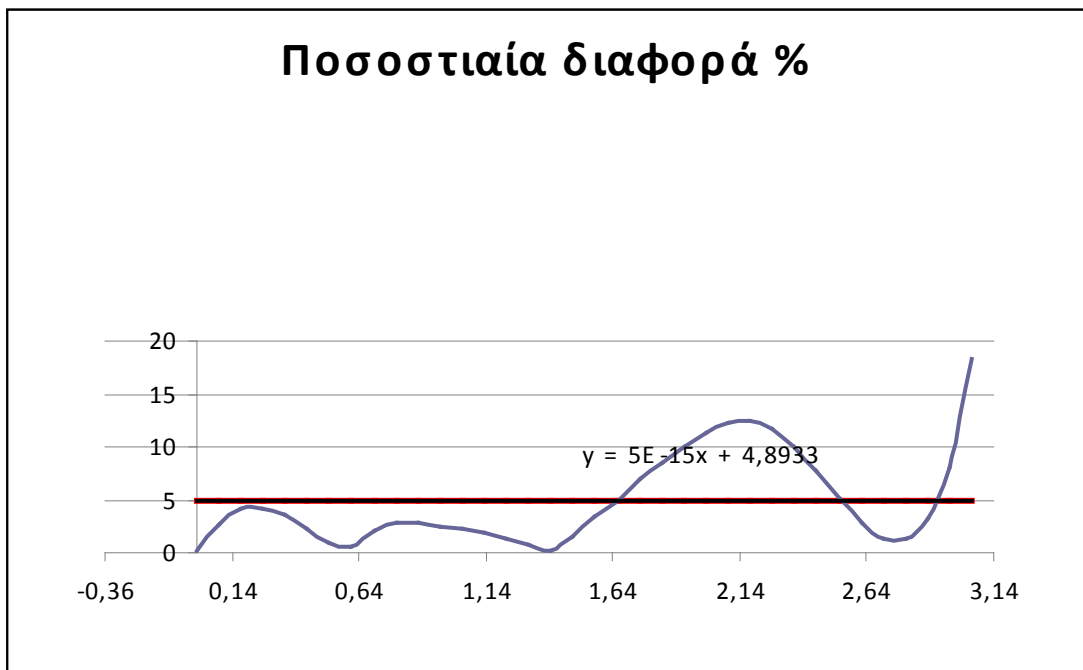


(β)

Σχήμα 3.2.9. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

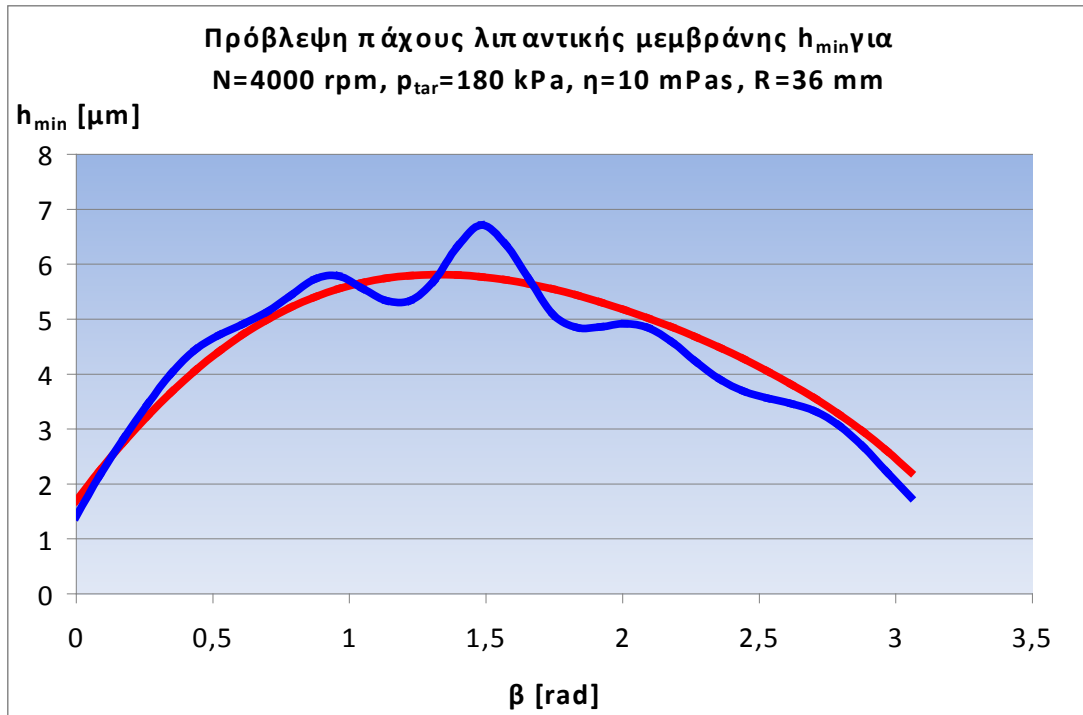


(α)

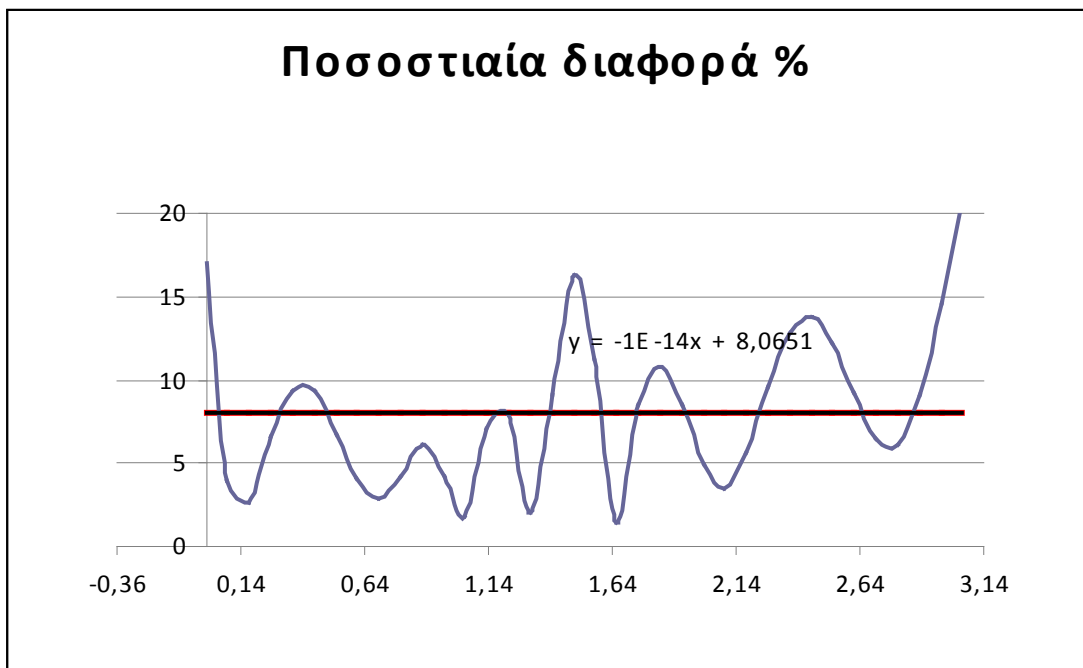


(β)

Σχήμα 3.2.10. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

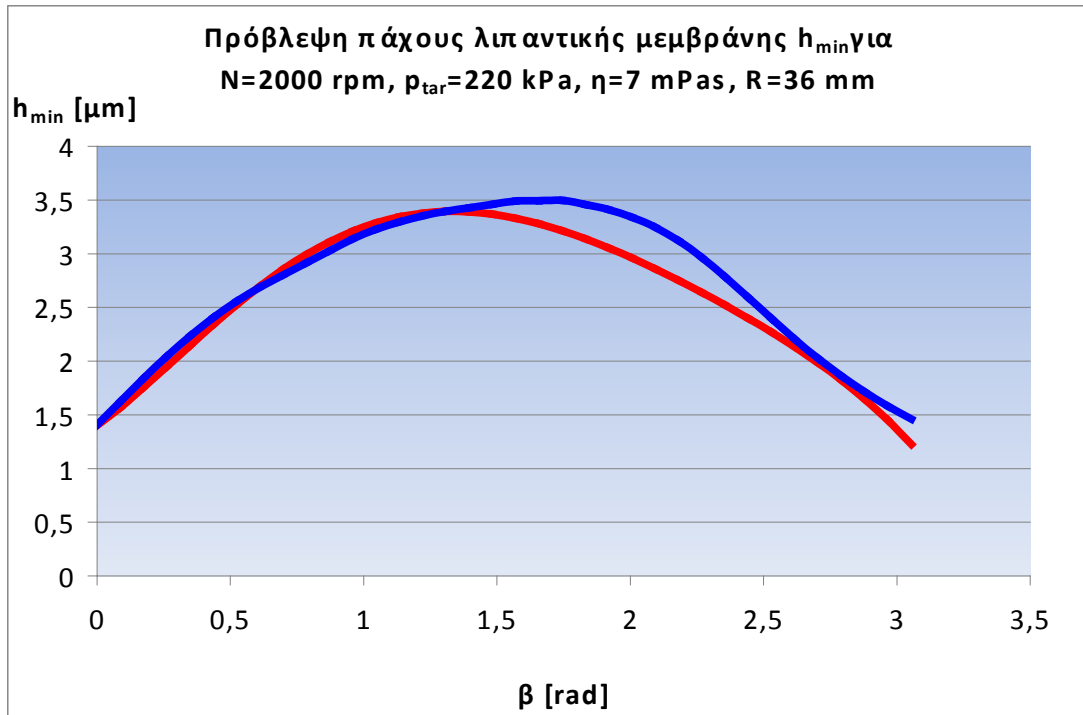


(α)

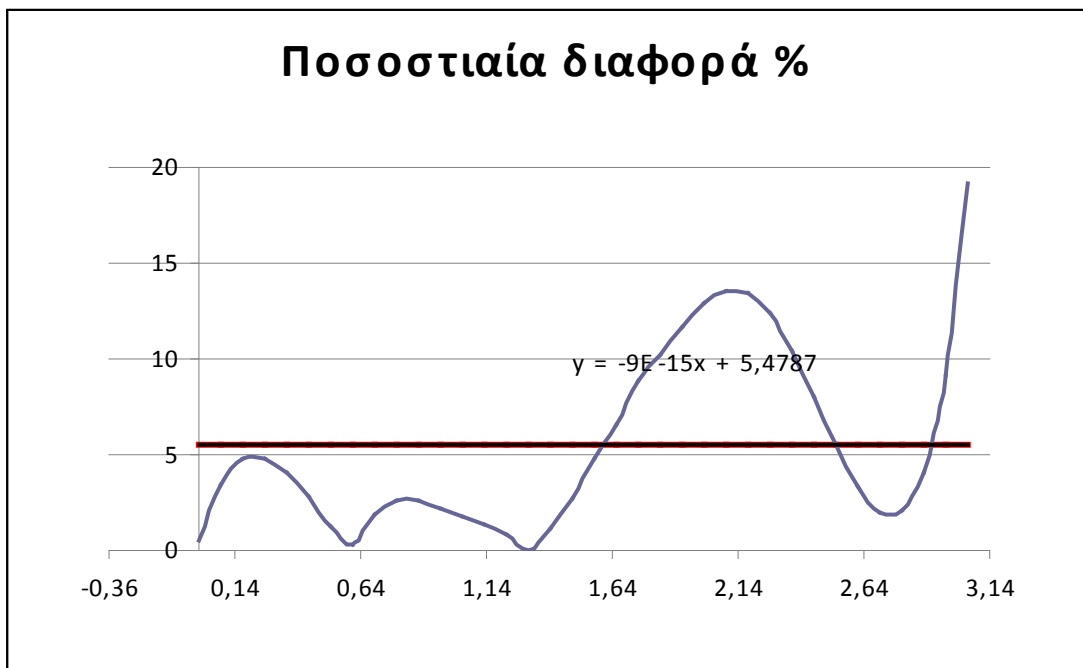


(β)

Σχήμα 3.2.11. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{\min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

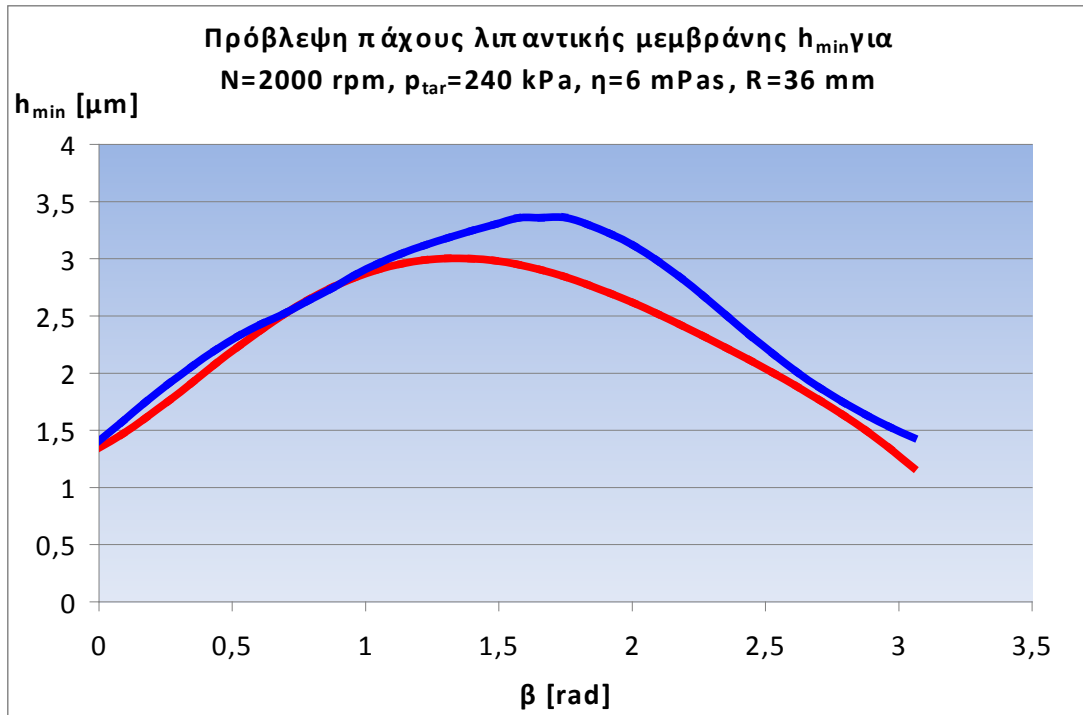


(α)

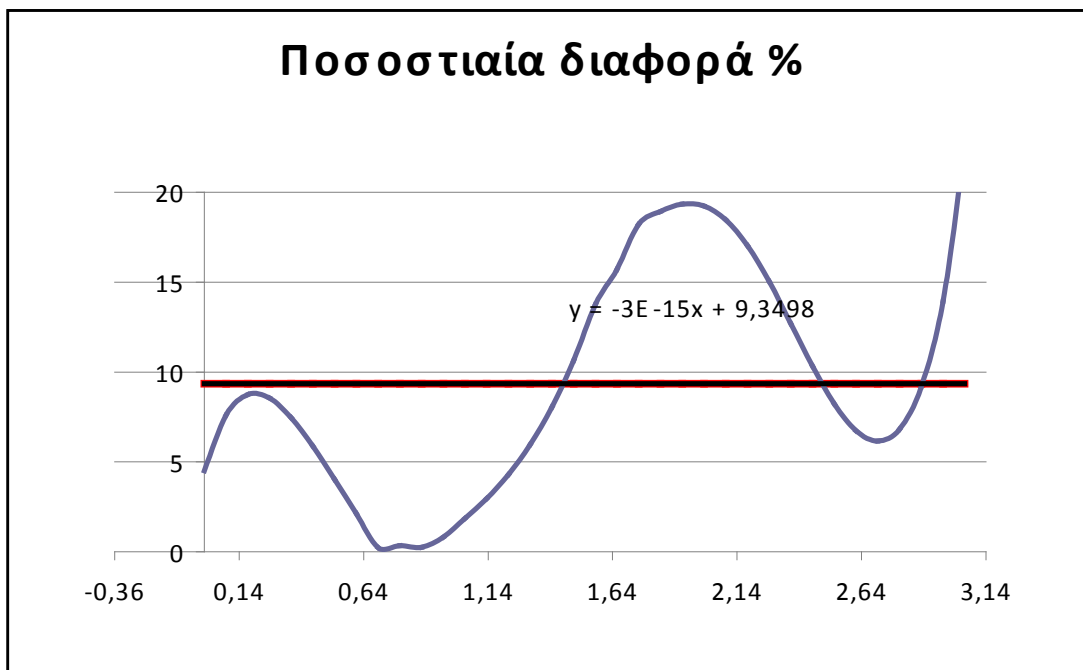


(β)

Σχήμα 3.2.12. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{\min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).



(α)

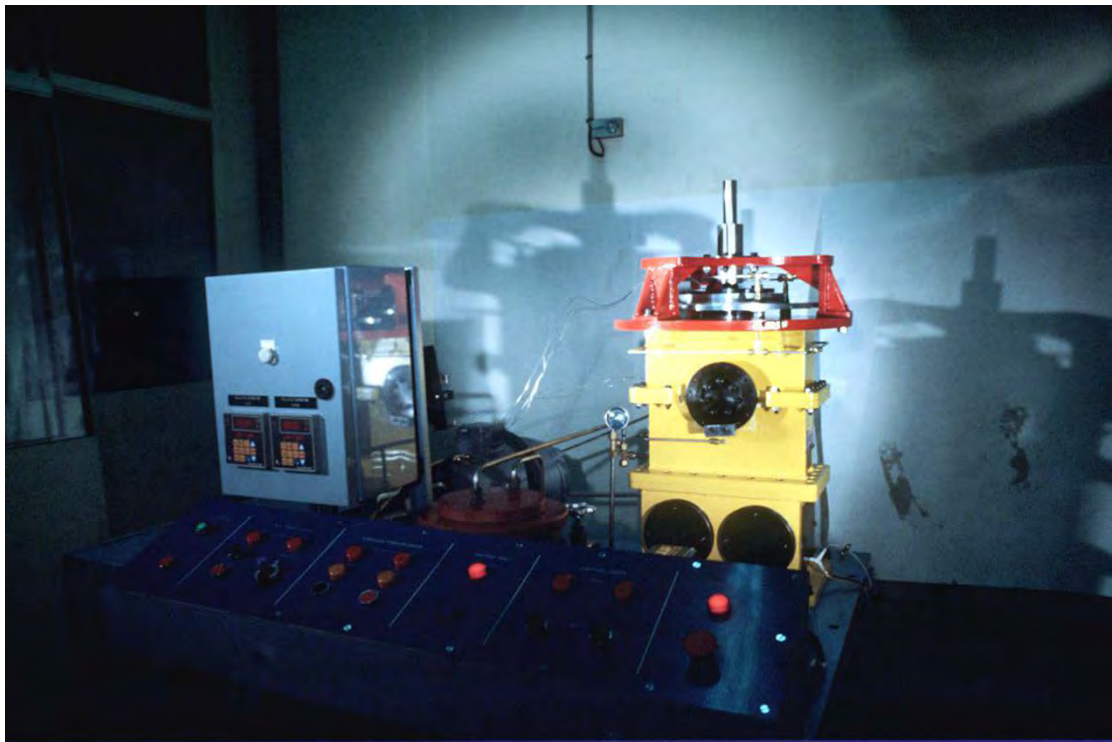


(β)

Σχήμα 3.2.13. Σύγκριση καμπύλης για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που υπολογίστηκε με τον πηγαίο κώδικα (κόκκινο) με καμπύλη ταχείας προσέγγισης προερχόμενη από τα διαγράμματα τύπου Stribeck (μπλε) (α). Ακολουθεί το συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο λύσεων (β).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα – Προτάσεις – Προοπτικές



4.1 Μεθοδολογία προσδιορισμού δύναμης τριβής και πάχους λιπαντικής μεμβράνης με τη βοήθεια διαγραμμάτων

(χρήση για φοιτητές πολυτεχνικών σχολών – Στοιχεία Μηχανών και Μ.Ε.Κ.)

4.1.1 Υπολογισμός δύναμης τριβής

Στην τριβολογία είναι γνωστή η καμπύλη στου Stribeck που δίνει τη μεταβολή του συντελεστή τριβής $\mu = f_{tot}/w$, όπου

f_{tot} : η συνολική δύναμη τριβής και

w : το φορτίο επαφής

Στις καμπύλες αυτές παράμετρος στον οριζόντιο άξονα λαμβάνεται το μέγεθος $\eta U/w$ όπου:

η : το δυναμικό ή απόλυτο ιξώδες του λιπαντικού σε mPas

U : η ταχύτητα ολίσθησης σε m/s και

w : το φορτίο επαφής σε N

Ο υπολογισμός των αντιστοίχων τιμών h_{min} (μm) δηλαδή του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου (β) έδειξε ότι παρόμοιας μορφής καμπύλες (τύπου Stribeck) μπορούν να χαραχθούν και για το πάχος λιπαντικής μεμβράνης.

Η σύμπτωση των αποτελεσμάτων ως προς f_{tot} αλλά και ως προς h_{min} που παρατηρήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δίνοντας μία και μόνο καμπύλη για διαφοροποίηση του μεγέθους $\eta U/w$ μέσα στο πεδίο τριών διαστάσεων $\eta * U * w$ μας επιτρέπει με βάση επεξεργασμένα διαγράμματα τον προσδιορισμό των μεγεθών f_{tot} και h_{min} μέσω της βοήθειας της ταχείας μεθόδου που αναπτύχθηκε. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις που αποδεικνύουν την εγκυρότητα της μεθοδολογίας αυτής.

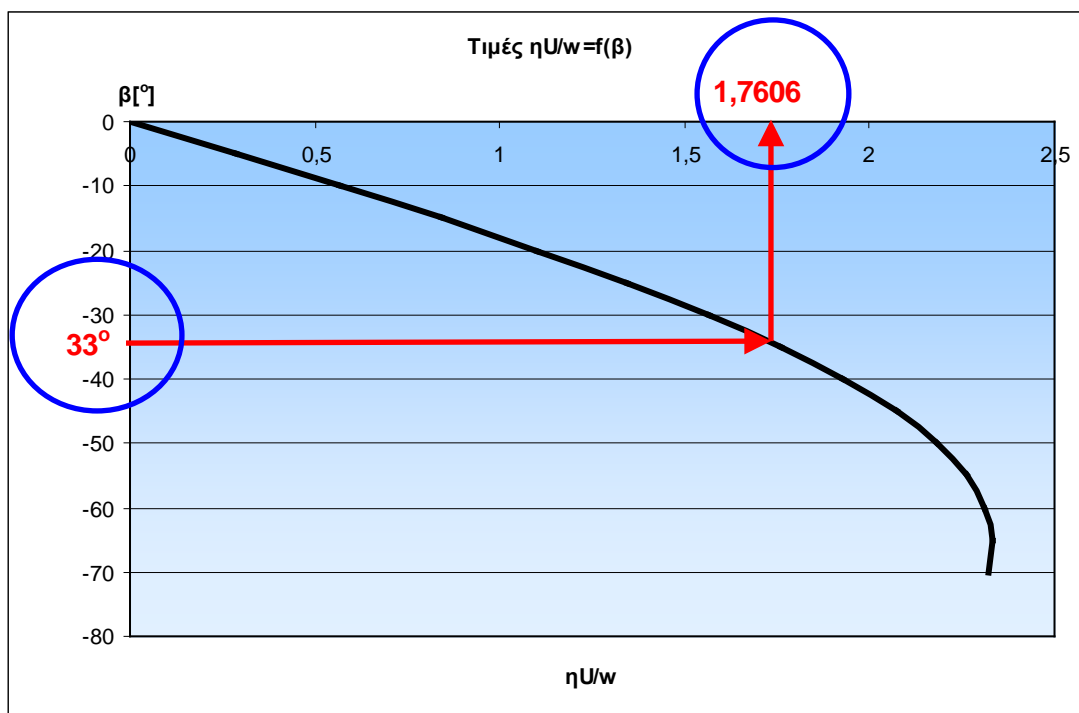
Η υπερταχεία λοιπόν αυτή μέθοδος δίνει γενικά καλά αποτελέσματα. Έτσι, θα αντιμετωπιστούν στο μέλλον όλες οι χαρτογραφήσεις σε σχέση με την τριβολογική συμπεριφορά ελατηριωτών δακτυλίων Μ.Ε.Κ. για επίλυση της εξίσωσης του Reynolds με πλέγμα τουλάχιστον 151x151 κόμβων (151 κόμβοι κατά μήκος της περιφέρειας και 151 κόμβοι επίσης, κατά μήκος του δακτυλίου) και τούτο διότι ο χρόνος υπολογισμού για περισσότερο πυκνό πλέγμα αυξάνεται απαγορευτικά σε τέτοιο βαθμό ώστε ο χρόνος υπολογισμού ακόμα και σε περιπτώσεις μεγάλης

εγκατεστημένης υπολογιστικής ισχύος είναι όχι απλά αμελητέος αλλά πάρα πολύ σημαντικός.

Στις δύο εφαρμογές που ακολουθούν για δεδομένες τιμές της γωνίας του στροφαλοφόρου $\beta=33^\circ$ και $\beta=60^\circ$ αντίστοιχα προσδιορίζονται άμεσα και σαφώς οι δυνάμεις τριβής.

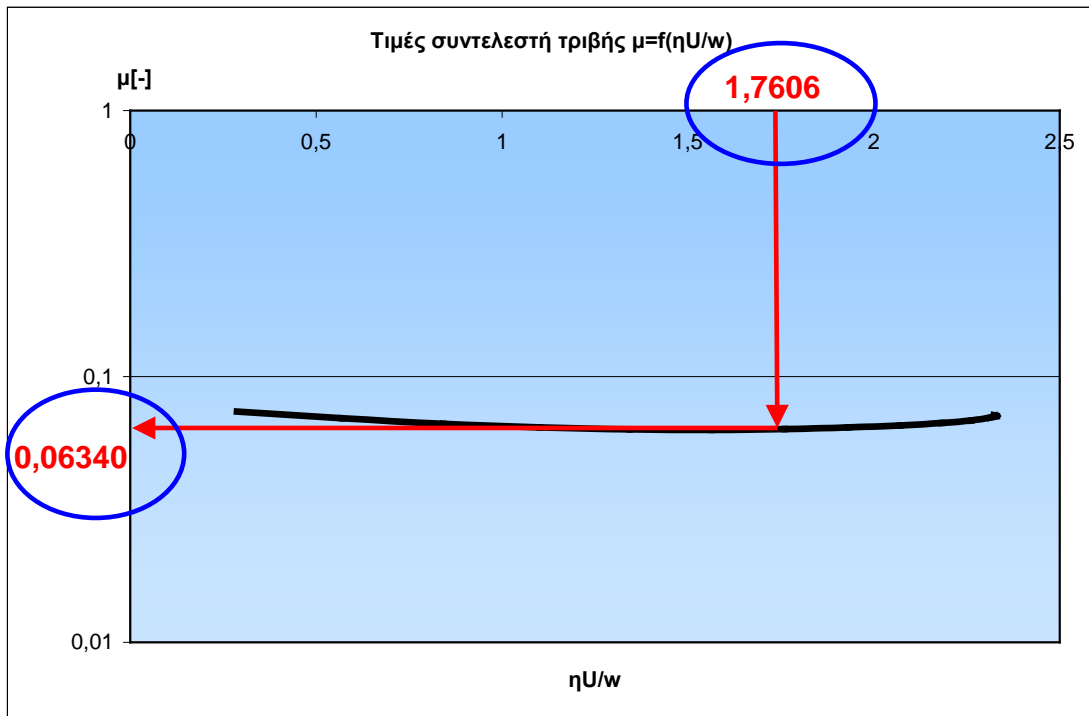
Εφαρμογή 1

$\beta=33^\circ$, $U= 13,21149$ m/s, $\eta=7.39$ mPas, $w=p_{tar}xLxD$, $p_{tar}=200$ kPa, $L=1.15$ mm, $D=0.070$ m



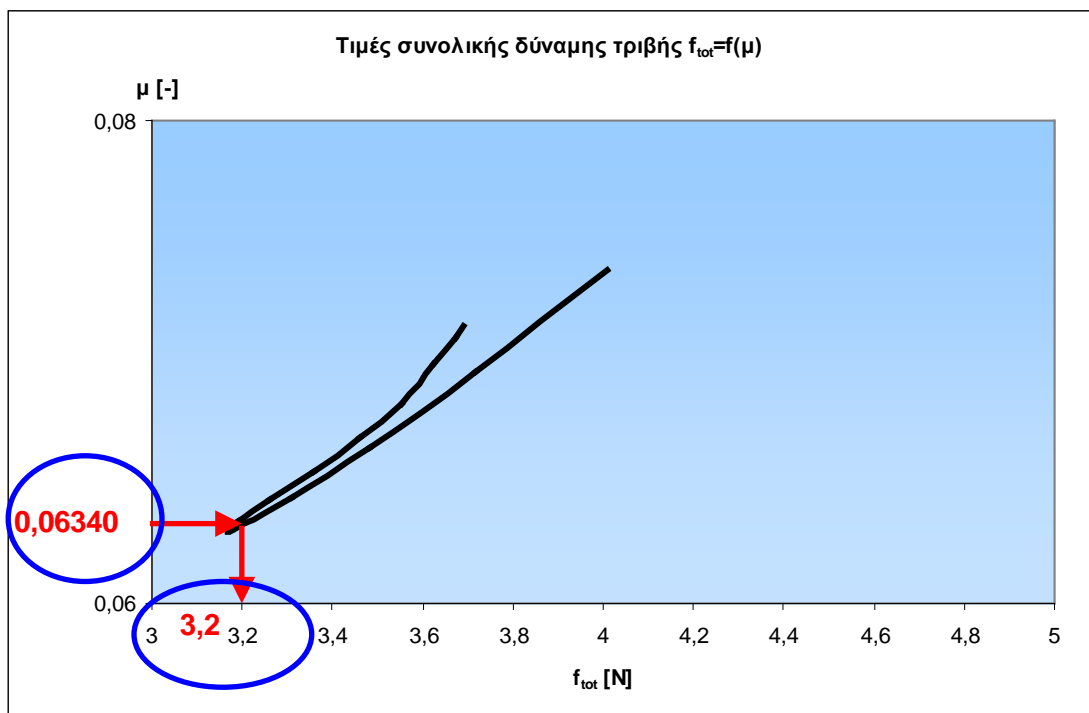
Σχήμα 4.1.1.1. Βήμα 1: Καθορισμός τιμής μεγέθους $\eta U/w$ με δεδομένη την ακτίνα στροφάλου

$$\beta=33^\circ \rightarrow \eta U/w = 1,7606$$



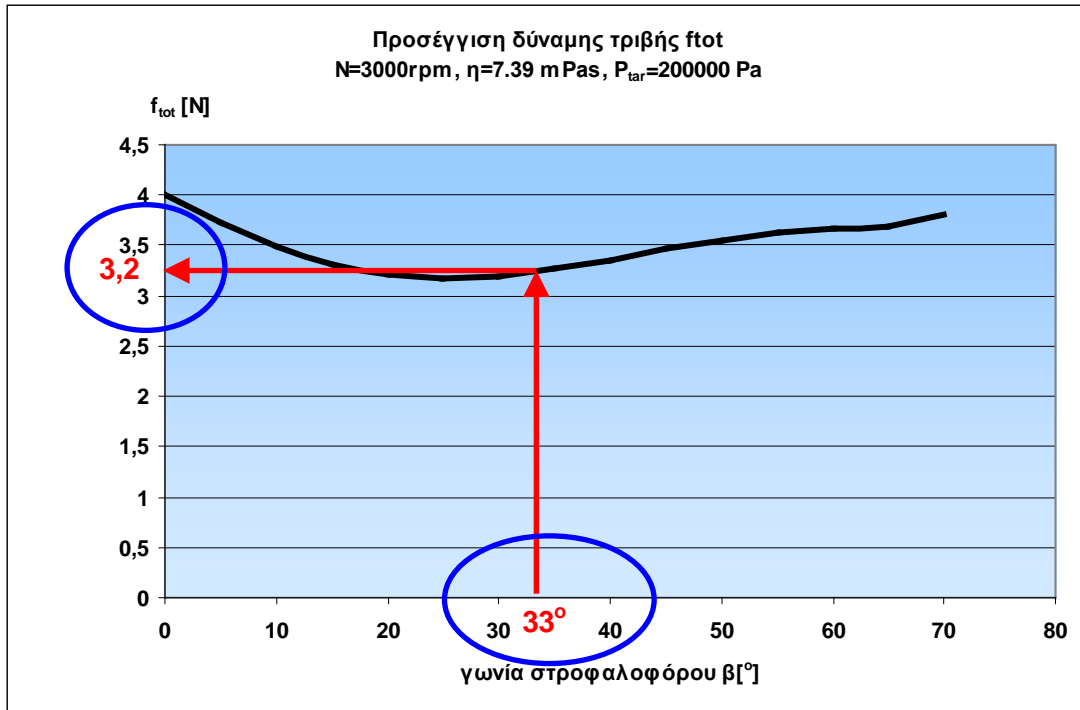
Σχήμα 4.1.1.2. Βήμα 2: Καθορισμός συντελεστή τριβής (μ) με δεδομένη την τιμή του παράγοντα $\eta U/w$ από το βήμα 1

$$\eta U/w = 1,7606 \rightarrow \mu = 0,06340$$



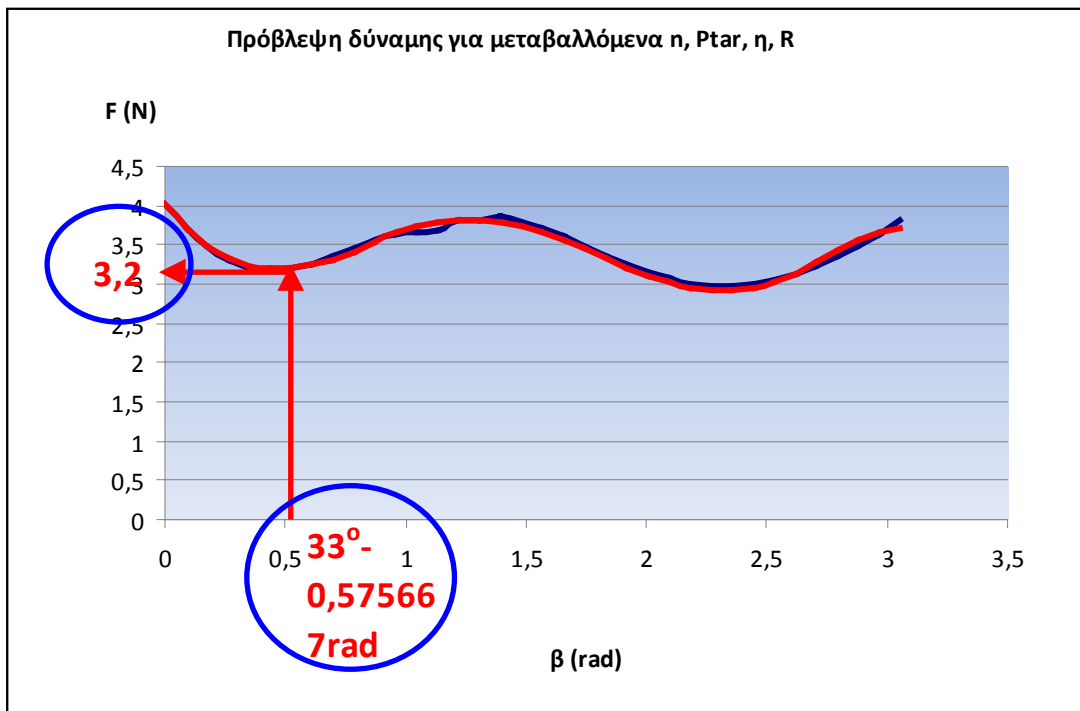
Σχήμα 4.1.1.3. Βήμα 3: Καθορισμός συνολικής δύναμης τριβής f_{tot} με δεδομένη την τιμή του συντελεστή τριβής μ από το βήμα 2

$$\mu=0,06340 \rightarrow f_{tot} = 3.2 \text{ N}$$



Σχήμα 4.1.1.4 Επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Γωνία στροφάλου $\beta=33^\circ \rightarrow f_{tot}= 3.2\text{ N}$ (καμπύλη $0^\circ-70^\circ$)

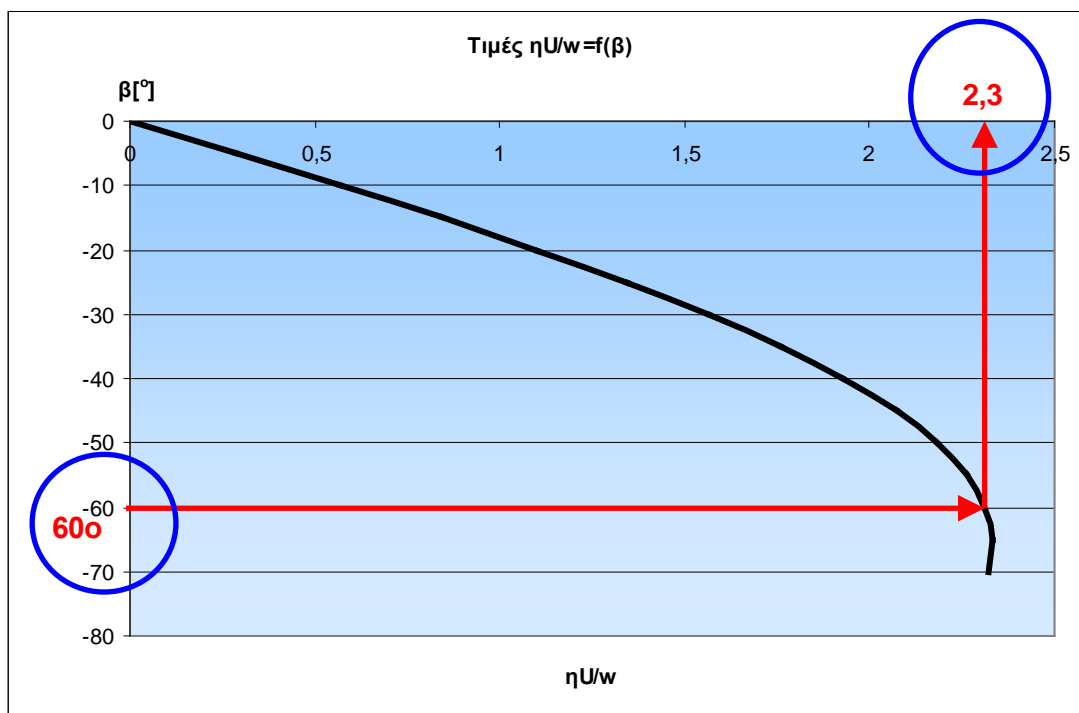


Σχήμα 4.1.1.5 Επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Γωνία στροφάλου $\beta=33^\circ \rightarrow f_{tot}= 3.2\text{ N}$ (καμπύλη $0^\circ-180^\circ$)

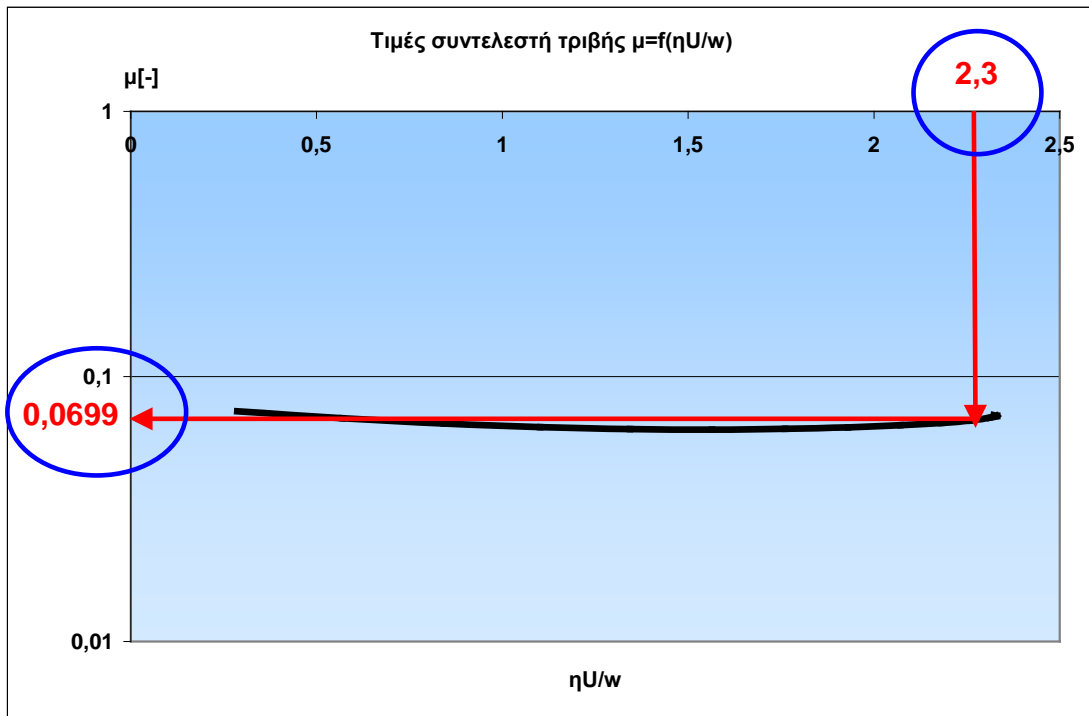
Εφαρμογή 2

$\beta=60^\circ$, $U= 15,82274$ m/s, $\eta=7.39$ mPas, $w=p_{tar} \times L \times D$, $P_{tar}=200$ kPa, $L=1.15$ mm, $D=0.070$ m



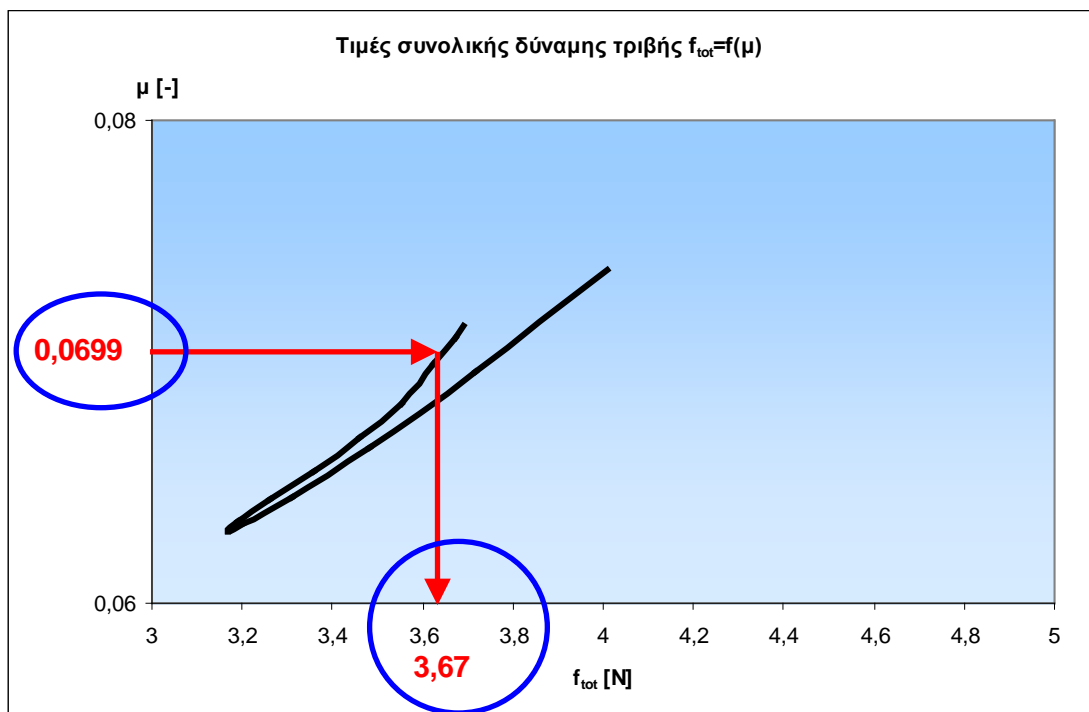
Σχήμα 4.1.1.6. Βήμα 1: Καθορισμός τιμής μεγέθους $\eta U/w$ με δεδομένη την ακτίνα στροφάλου

$$\beta=60^\circ \rightarrow \eta U/w = 2,3$$



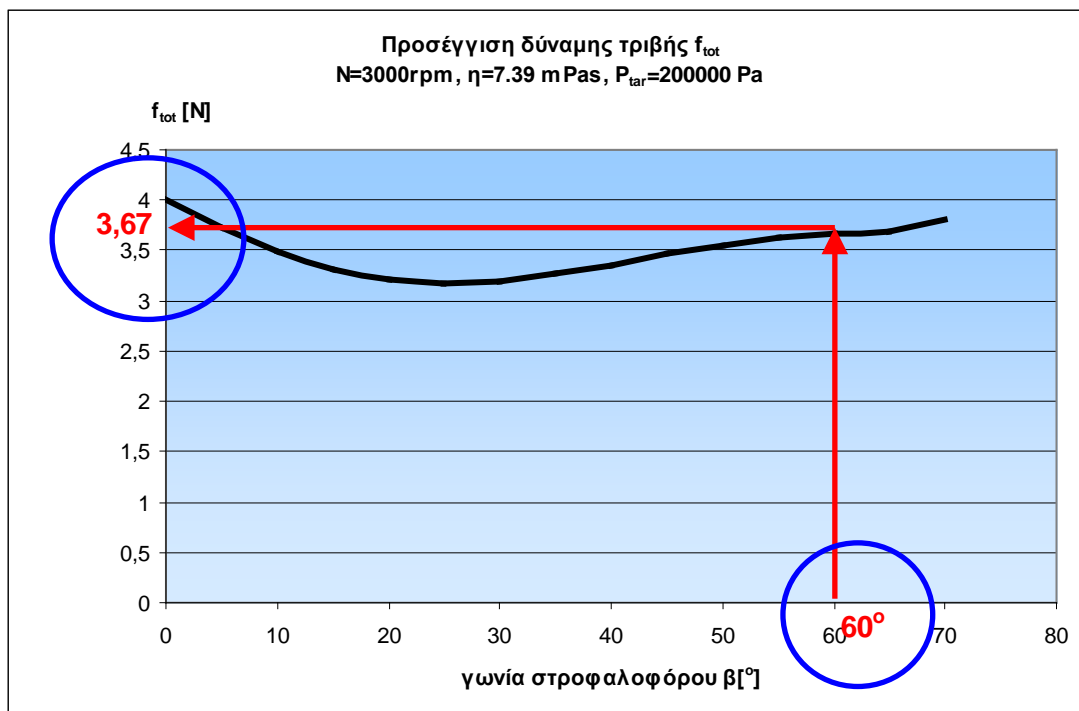
Σχήμα 4.1.1.7. Βήμα 2: Καθορισμός συντελεστή τριβής (μ) με δεδομένη την τιμή του παράγοντα $\eta U/w$ από το βήμα 1

$$\eta U/w = 2,3 \rightarrow \mu = 0,0699$$



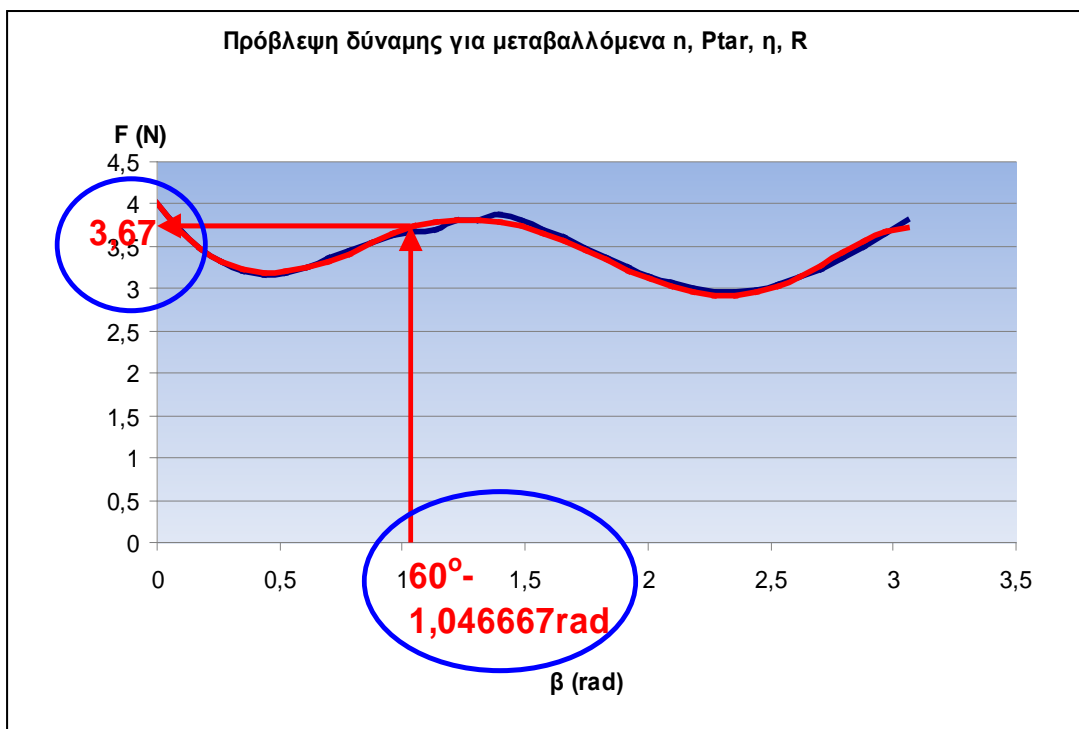
Σχήμα 4.1.1.8. Βήμα 3: Καθορισμός συνολικής δύναμης τριβής f_{tot} με δεδομένη την τιμή του συντελεστή τριβής μ από το βήμα 2

$$\mu = 0,0699 \rightarrow f_{tot} = 3,67 \text{ N}$$



Σχήμα 4.1.1.9 Επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Γωνία στροφάλου $\beta=60^\circ \rightarrow f_{tot}= 3.67\text{ N}$ (καμπύλη $0^\circ-70^\circ$)



Σχήμα 4.1.1.10 Επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας

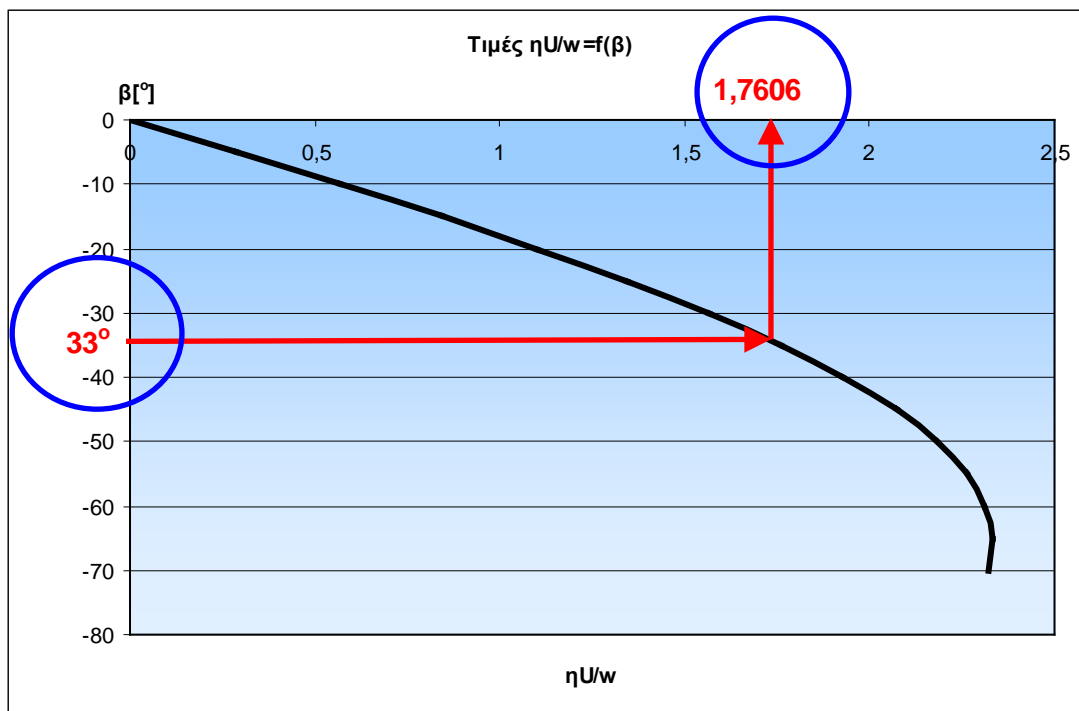
Γωνία στροφάλου $\beta=60^\circ \rightarrow f_{tot}= 3.67\text{ N}$ (καμπύλη $0^\circ-180^\circ$)

4.1.2 Υπολογισμός πάχους λιπαντικής μεμβράνης

Σύμφωνα με την προαναφερθείσα γραφική μεθοδολογία στις δύο εφαρμογές που ακολουθούν για δεδομένες τιμές της γωνίας του στροφαλοφόρου $\beta=33^\circ$ και $\beta=60^\circ$ αντίστοιχα προσδιορίζονται άμεσα και σαφώς τα πάχη λιπαντικής μεμβράνης h_{\min} .

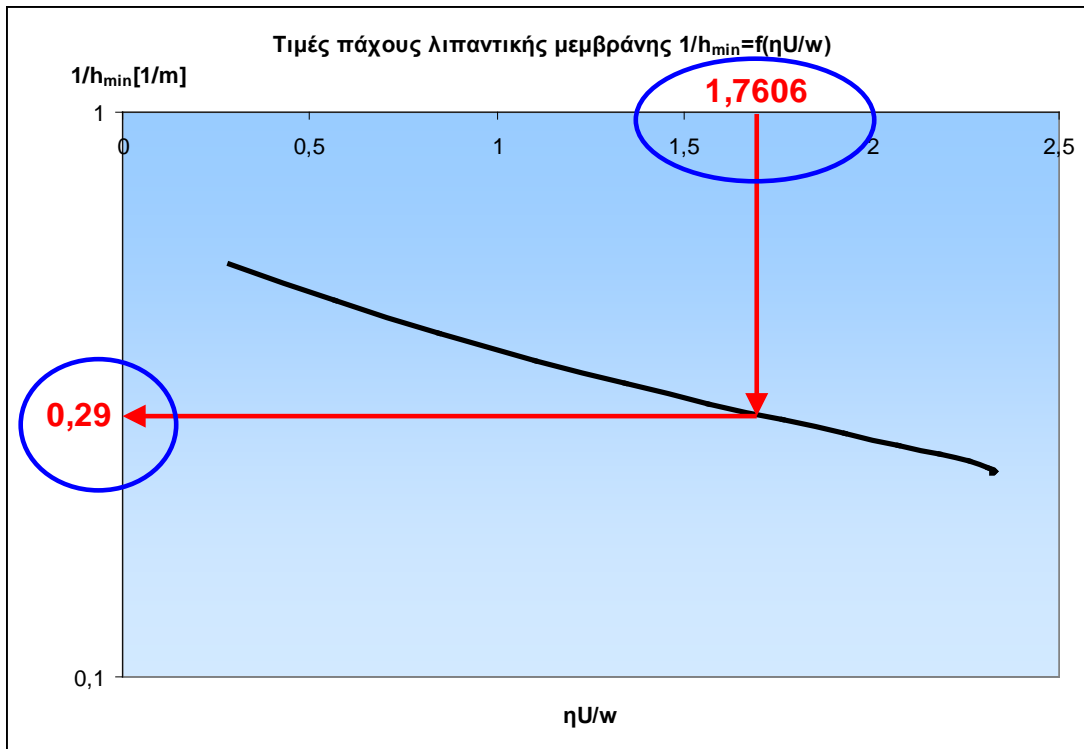
Εφαρμογή 1

$\beta=33^\circ$, $U= 13,21149$ m/s, $\eta=7.39$ mPas, $w=p_{\text{tar}} \times L \times D$, $P_{\text{tar}}=200\text{kPa}$, $L=1.15\text{mm}$,
 $D=0.070\text{m}$



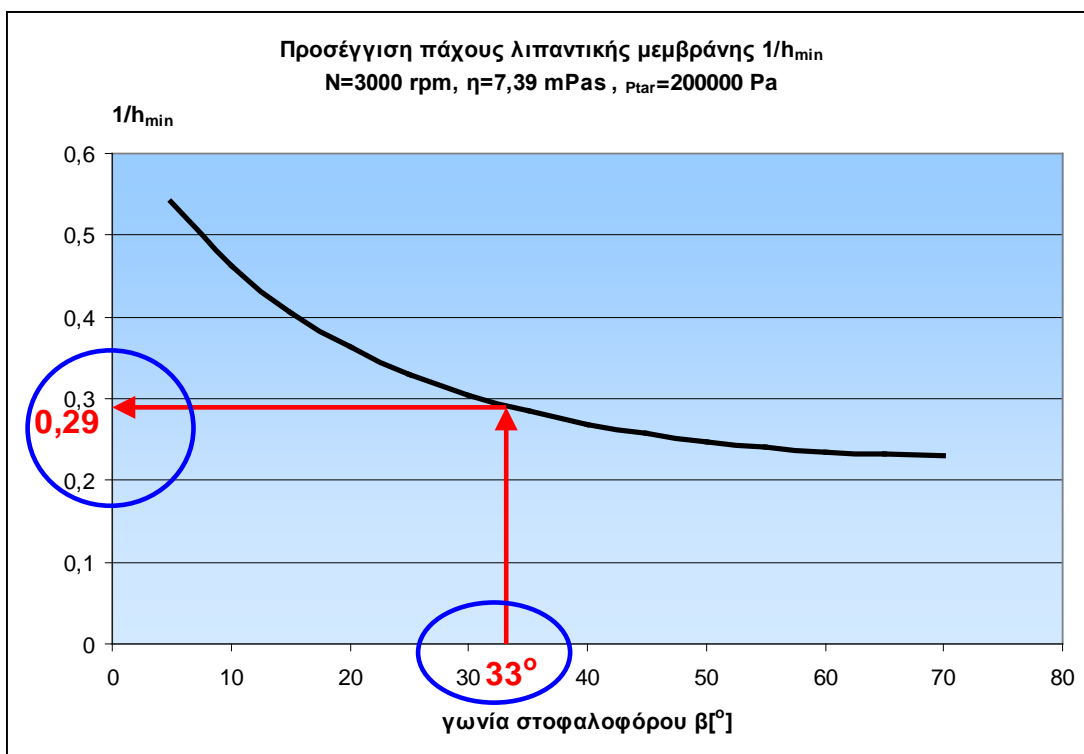
Σχήμα 4.1.2.1. Βήμα 1: Καθορισμός τιμής μεγέθους $\eta U/w$ με δεδομένη την ακτίνα στροφάλου

$$\beta=33^\circ \rightarrow \eta U/w = 1,7606$$



Σχήμα 4.1.2.2. Βήμα 2: Καθορισμός του μεγέθους $1/h_{\min}$ με δεδομένη την τιμή του παράγοντα $\eta U/w$ από το βήμα 1

$$\eta U/w = 1.7606 \rightarrow 1/h_{\min} = 0.29 \rightarrow h_{\min} = 3.45 \mu\text{m}$$

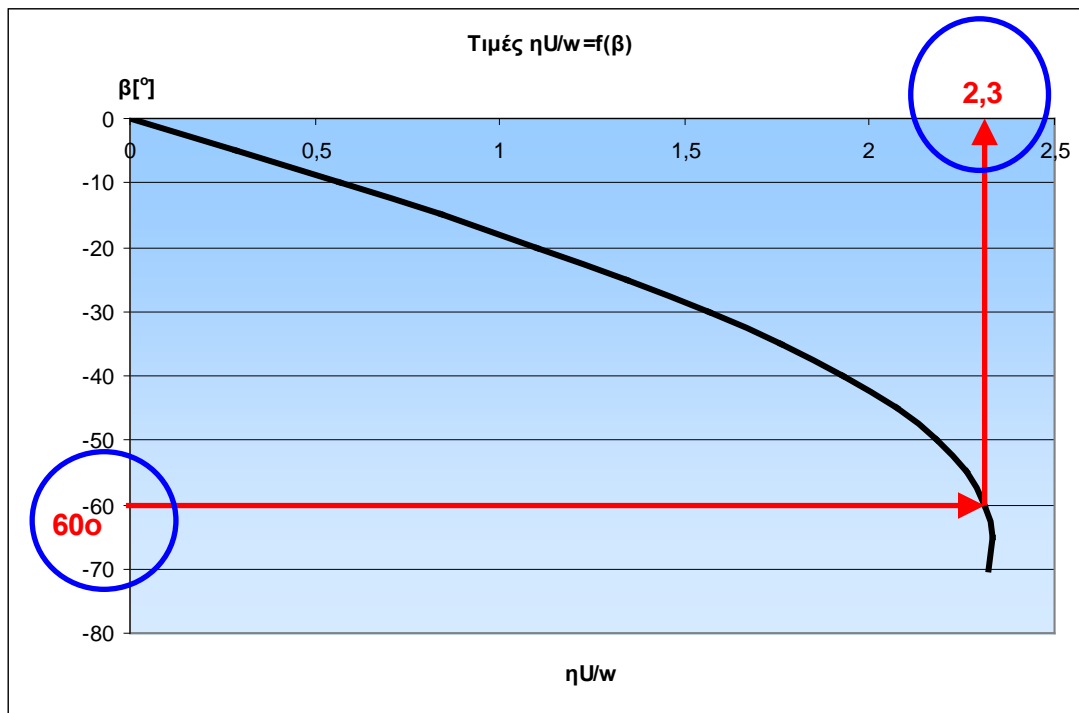


Σχήμα 4.1.2.3 Επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Γωνία στροφάλου $\beta=33^\circ \rightarrow 1/h_{\min} = 0.29 \rightarrow h_{\min} = 3.45 \mu\text{m}$ (καμπύλη $0^\circ-70^\circ$)

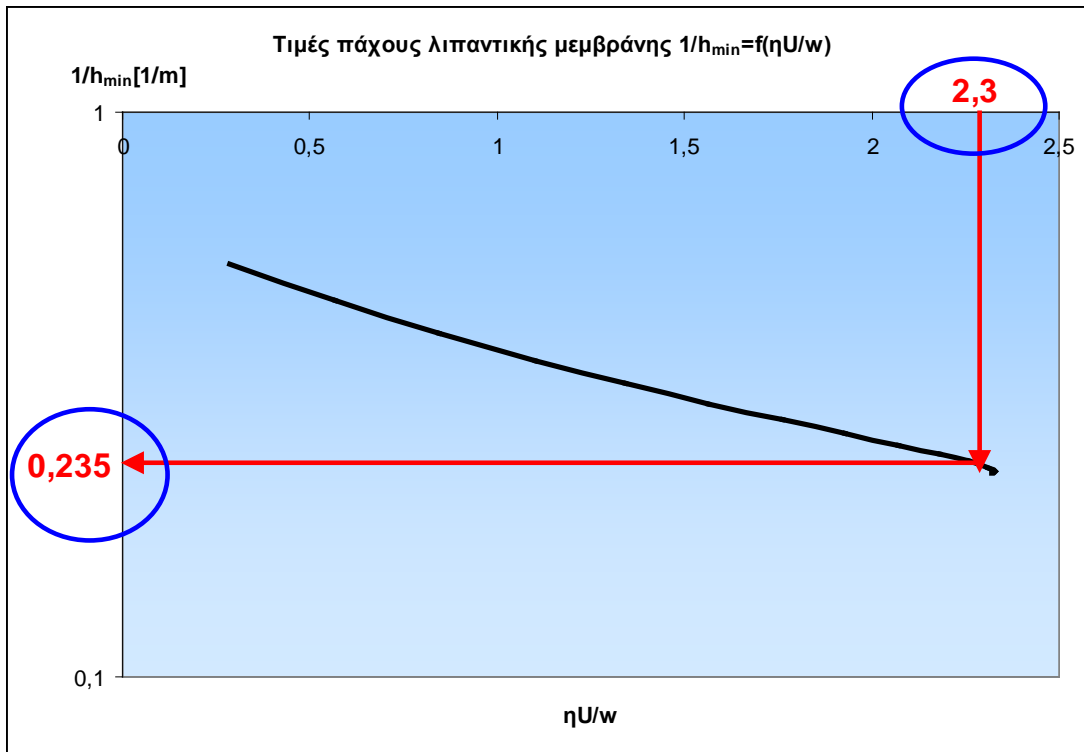
Εφαρμογή 2

$\beta=60^\circ$, $U= 15,82274$ m/s, $\eta=7.39$ mPas, $w=p_{tar} \times L \times D$, $P_{tar}=200$ kPa, $L=1.15$ mm, $D=0.070$ m



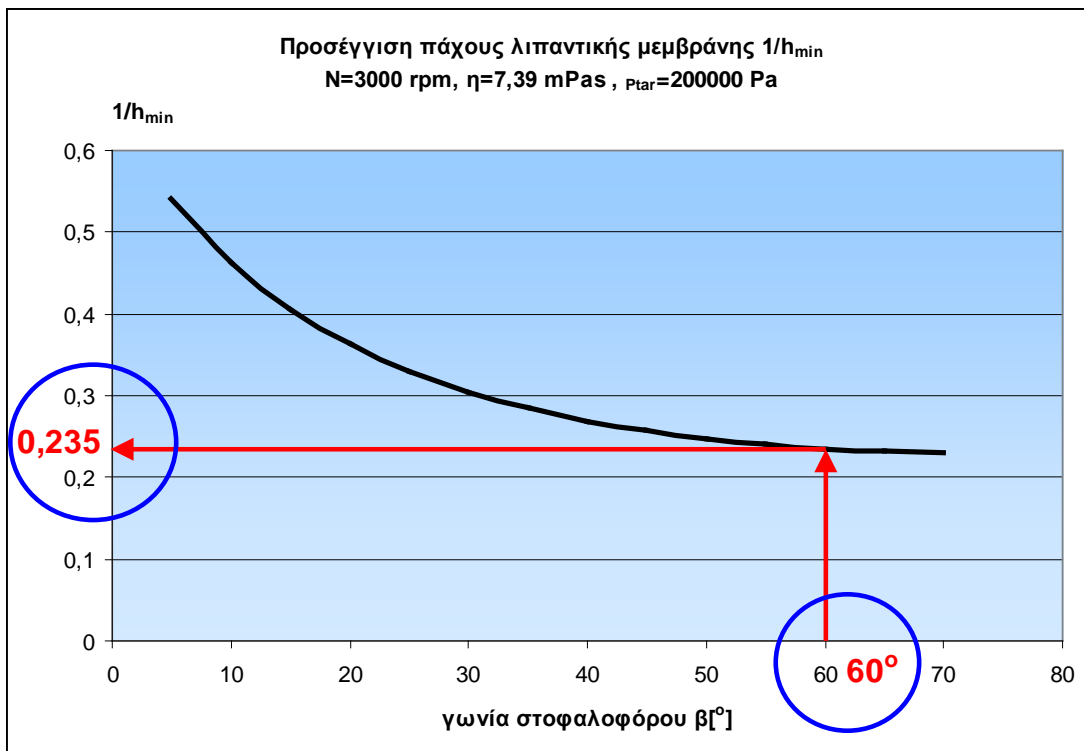
Σχήμα 4.1.2.4. Βήμα 1: Καθορισμός τιμής μεγέθους $\eta U/w$ με δεδομένη την ακτίνα στροφάλου

$$\beta=60^\circ \rightarrow \eta U/w = 2.3$$



Σχήμα 4.1.2.5. Βήμα 2: Καθορισμός του μεγέθους $1/h_{\min}$ με δεδομένη την τιμή του παράγοντα $\eta U/w$ από το βήμα 1

$$\eta U/w = 2.3 \rightarrow 1/h_{\min} = 0.235 \rightarrow h_{\min} = 4.25 \mu\text{m}$$



Σχήμα 4.1.2.3 Επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας

$$\text{Γωνία στροφάλου } \beta=60^\circ \rightarrow 1/h_{\min} = 0.235 \rightarrow h_{\min} = 4,25 \mu\text{m} \quad (\text{καμπύλη } 0^\circ\text{-}70^\circ)$$

4.2 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε η ταχεία μέθοδος προσδιορισμού λειτουργικών χαρακτηριστικών ελατηριωτού δακτυλίου εμβόλου Μ.Ε.Κ. καθώς και τα αποτελέσματα αυτής.

Τα λειτουργικά αυτά χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν θεωρητικά είναι η συνολική αναπτυσσόμενη (υδροδυναμική και μη υδροδυναμική) δύναμη τριβής (f_{tot}) καθώς και το πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) στον πρώτο δακτύλιο εμβόλου Μ.Ε.Κ. ο οποίος χαρακτηρίζεται από κατατομή που εμφανίζει ακτίνα καμπυλότητας.

Σε πρώτη φάση (στο κεφάλαιο 2) έγινε χαρτογράφηση των σημείων λειτουργίας του δακτυλίου για συνθήκες διαφορετικής συχνότητας περιστροφής (N rpm) με σταθερές τις τιμές των άλλων παραμέτρων και αντιστοίχως με διαφορετικές τιμές της πίεσης (p_{tar} N/m²) και του ιξώδους του λιπαντικού (η mPas) για σταθερές τιμές των άλλων παραμέτρων.

Από τα διαγράμματα αυτά που προέκυψαν (τύπου Stribeck) εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα σε σχέση με τη λειτουργία του πρώτου δακτυλίου σε λειτουργία ανοικτού κυλίνδρου (χωρίς την επίδραση της πίεσης των αερίων καύσης)

Στο τρίτο κεφάλαιο όπου και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των θεωρητικών προσεγγίσεων για τη δύναμη τριβής και το πάχος λιπαντικής μεμβράνης μέσω της ταχείας μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε παρατηρήθηκε ότι οι προσεγγίσεις αυτές είναι αξιόπιστες και μάλιστα σε κατά απόλυτη τιμή σχετικό σφάλμα σε σχέση με τα θεωρητικά αποτελέσματα του υπολογιστικού κώδικα (oilfilm) είναι πολύ περιορισμένες στο μέσο της διαδρομής, ενώ οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στις περιοχές των νεκρών σημείων.

Συνεπώς αποδεικνύεται και η χρησιμότητα της συγκεκριμένης μεθόδου ως εργαλείο του Μηχανολόγου Μηχανικού μέσα από τη δημιουργία συνθετικών χαρτών λειτουργίας δακτυλίου συγκεκριμένου προφίλ (κατατομής) για μεταβαλλόμενο πεδίο λειτουργίας.

Στα διαγράμματα τύπου Stribeck του δεύτερου κεφαλαίου όπως παρατηρήθηκε παρουσιάστηκε μια διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του συντελεστή τριβής (μ) καθώς και στο πάχος λιπαντικής μεμβράνης (h_{min}) που εμφάνιζε μια κυκλική συμπεριφορά της καμπύλης. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού έγινε διαχωρισμός της επιταχυνόμενης και της επιβραδυνόμενης κίνησης που είχε

σαν αποτέλεσμα τη χρήση δύο πολυωνυμικών εξισώσεων 6^{ου} βαθμού για την μετέπειτα ανάπλαση της καμπύλης της δύναμης τριβής και του πάχους λιπαντικής μεμβράνης. Η υστέρηση αυτή που παρουσιάζεται στις καμπύλες, υπάρχει βάσιμη ένδειξη ότι οφείλεται στην ακρίβεια που δέχεται ο κώδικας τόσο στην υπορουτίνα επίλυσης – υπολογισμού του μητρώου των υδροδυναμικών πιέσεων όσο και στον τελικό έλεγχο – σύγκριση επιβαλλόμενου φορτίου με το φορτίο επαφής. Οι τιμές που έχουν ληφθεί στον κώδικα θεωρήθηκαν προς το παρόν ότι δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με ταυτόχρονη επίσης ικανοποιητική διάρκεια των υπολογισμών.

Σημειώνεται ότι δεν έχει γίνει ακόμη διερεύνηση – βελτιστοποίηση των εξής χαρακτηριστικών του υπολογιστικού κώδικα: πλέγμα , μέθοδος αντιστροφής μητρώου / επίλυση συστήματος , αριθμός σημαντικών ψηφίων , ακρίβεια και τέλος ανοιγμένα μεγέθη.

Λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας θεωρούμε σκόπιμο να προτείνουμε συνέχιση της παρούσης εργασίας με σκοπό την ακόμη περισσότερο πλήρη και λεπτομερέστερη προσέγγιση των ζητούμενων τριβολογικών στοιχείων δακτυλίων εμβόλου Μ.Ε.Κ.

Πρόταση α

Προτείνουμε διεύρυνση της χαρτογράφησης λειτουργίας π.χ.

- αντί για συχνότητα περιστροφής από $N=1500$ rpm έως $N=6000$ rpm εφαρμογή της μεθόδου για $N=500$ rpm έως $N=8000$ rpm
- αντί για πίεση (p_{tar}) από 160 kPa έως 240 kPa εφαρμογή της μεθόδου για p_{tar} από 100 kPa έως 300 kPa
- και αντί για ιξώδες λιπαντικού (η) από 6 mPas έως 10 mPas εφαρμογή της μεθόδου για η από 2 mPas έως 14 mPas

Πρόταση β

Προτείνεται επίσης η κατάτμηση της καμπύλης του Stibeck σε μικρότερες περιοχές τιμών γωνίας στροφαλοφόρου π.χ. αντί για πεδίο τιμών από 0° έως 70° και 70° έως 180° να χωρίσουμε την καμπύλη σε περισσότερα μέρη π.χ. $0^\circ - 50^\circ$, $50^\circ - 90^\circ$, $90^\circ - 130^\circ$, $130^\circ - 180^\circ$ και τούτο γιατί παρατηρήθηκε ασυνέχεια όχι όμως με απαγορευτική τιμή κατά την σύνδεση των συνθετικών καμπυλών δύναμης τριβής και πάχους λιπαντικής μεμβράνης η οποία καλό θα είναι να αποφεύγεται.

BIBLIOΓΡΑΦΙΑ

1. CHRISTENSEN, H., "Stochastic Models for Hydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces", Proc. Inst. Mech. Engrs Tribology Group 184, Part 1, Vol.55. p. 1013, 1970.
2. CHRISTENSEN, H., "A Theory of Mixed Lubrication", Proc. 1 Mech. Engrs, Vol. 186, p. 421. 1972.
3. DAS, K.P., "Analysis of Piston Ring Lubrication", SAE Paper 750008, 1976.
4. DIEN, I.K., EUROD, H.G., "A Generalized Steady-State REYNOLD Equation for non-Newtonian Fluids, With Application to Journal Bearings", Journal of Lubrication Technology, Vol. 105, pp. 385-360, July 1983.
5. GREENWOOD, J.A., "Constriction resistance and the Real Area of Contact", BRIT J. APP. PHYS. Vol 17, pp. 1621-1632, 1966.
6. GREENWOOD, J.A., and WILLIAMSON, J.B.P., "Contact of Nominally Flat Surfaces", Proc. Roy Soc Land, A. 295, pp. 300-319, 1966.
7. GREENWOOD, J.A., "The Area of contact Between Rough Surfaces and Flats", Journal of Lubrication technology, pp. 81-91, January 1967.
8. GREENWOOD, J.A., and TRIPP, J.H., "The Contact of two Nominally Flat Surfaces", Proc. Inst. Of Mech. Eng., Vol. 185; p. 625, 1971.
9. PANDAZARAS, C., "Diminution des Pertes par Frottement dans les ensembles Pistons-Segments-Chemises", Repport de stage de Fin d'etudes, ISMCM, 1981.
10. PANDAZARAS, C., "Etudes Experimentales et Theoriques sur les Pertes par Frottement dans les Ensembles Pistons-Segments-Chemises" DLA/RNUR, 1982.
11. PANDAZARAS C., "Modelisation du Frottement Segment-Chemise" DLA.RNUR, Note Technique no 5781, 1982.
12. PANDAZARAS, C., "Influence de la Forme des Segments sur le Frottement Segment-Chemise", PLA/RNUR, Note technique No 5808, 1983.
13. 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.
14. 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.
15. PEKLENIK, J., "Properties and Metrology of surfaces" Oxford Inst. 4th, Paper 24, April 1968.

16. ROHDE, S.M., "A Mixed Friction Model for Dynamically Loaded Contacts with Application to Piston Ring lubrication", GENERAL MOTORS Research Laboratories, 1980.
17. 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.
18. "Statistique Appliquee e l' Exploitation des mesures "Tomes 1 et 2, Commissariat e l' energie Atomique, MASSON 1978.
19. "STATISTIQUES DE L'INGENIEUR APPLICATIONS", CAST, LYON, 1981.
20. TRIPP, J.H., "Surface Roughness Effects in hydrodynamic Lubrication: The Flow Factor Method", Transactions of the ASME, Vol. 105, pp. 458-465, July 1983.