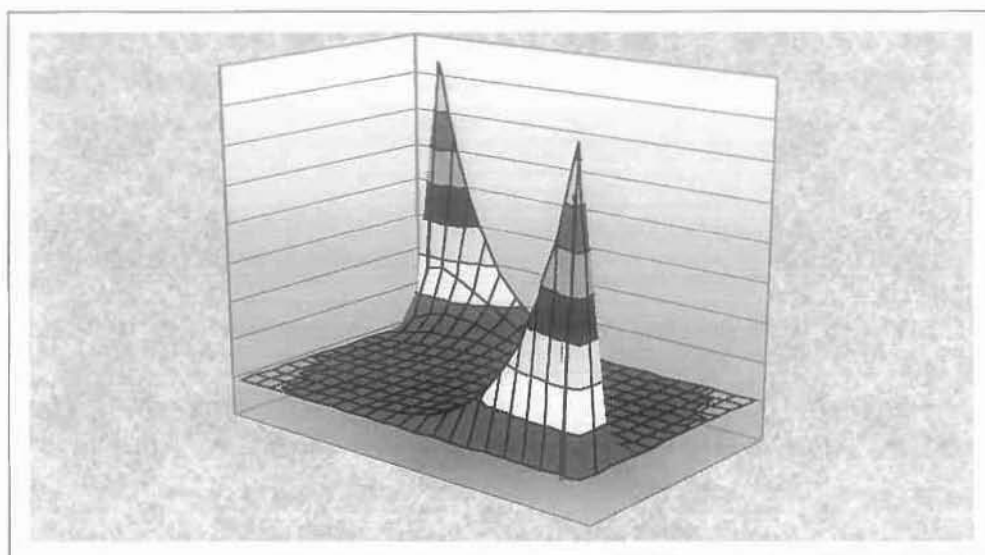


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**«ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑΣ
ΤΡΑΧΕΙΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΕΜΒΟΛΟΥ ΜΕΚ»**



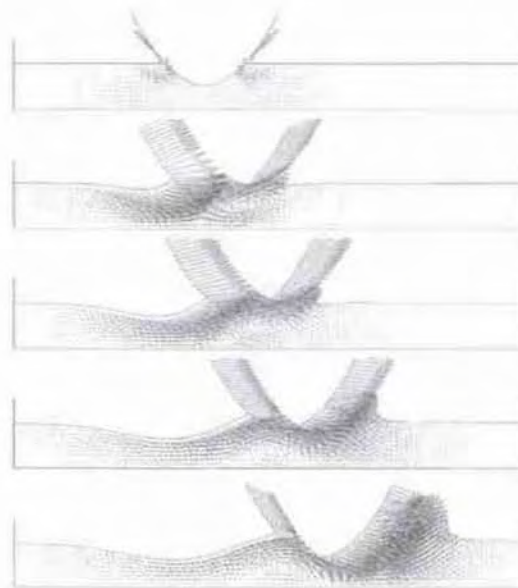
Καλαμπούκας Γρηγόριος
Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

Βόλος 2010



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

Αριθ. Εισ.: 8307/1
Ημερ. Εισ.: 30-03-2010
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2010
ΚΑΛ



© 2009 Καλαμπούκας Γρηγόριος

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. Καραμάνος Σπυρίδων
Επ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γραμμένος Θεοφάνης
Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον κ.κ 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. Καραμάνο, Γραμμένο 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..

Καλαμπούκας Γρηγόριος

ΚΑΛΑΜΠΟΥΚΑΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010

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

**«ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑΣ
ΤΡΑΧΕΙΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΕΜΒΟΛΟΥ ΜΕΚ»**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει νέα δεδομένα για μια λεπτομερέστερη θεωρητική μελέτη της τριβολογικής συμπεριφοράς των ελατηριωτών δακτυλίων εμβόλων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ). Τα αποτελέσματα αναδεικνύονται μέσα από την χρήση του στατιστικού μοντέλου *Fischer- Pearson* το οποίο χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό 3 πληθυσμών που λαμβάνονται υπόψη στα τριβολογικά μοντέλα: του πληθυσμού των σημείων της κατατομής, του πληθυσμού των κορυφών των λοφίσκων καθώς και τον πληθυσμό των ακτινών καμπυλότητας των λοφίσκων της τραχείας επιφάνειας.

Παράλληλα λεπτομερής μελέτη των συγκεκριμένων τραχειών επιφανειών (κυλίνδρων ΜΕΚ) οδήγησε στην χρήση συνθετικής τραχύτητας σε διαφορετικά στάδια φθοράς με σκοπό τον προσδιορισμό του επίπεδου φθοράς της τραχείας επιφάνειας με βάση χαρακτηριστικά των κατανομών που χαρακτηρίζουν τους προαναφερθέντες πληθυσμούς. Τίθενται έτσι βάσεις για μελλοντική βαθύτερη ανάλυση του θέματος με σκοπό την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων διεπαφής τεχνολογικών επιφανειών.

Η πτυχιακή εργασία χωρίζεται σε 4 κεφάλαια.:

- Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται η **Εισαγωγή** και παρουσιάζεται η ανάγκη και η απαίτηση χρήσης συμπληρωματικών χαρακτηριστικών τραχύτητας
- Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στο **σύστημα Fisher-Pearson**
- Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται τα **αποτελέσματα**
- Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η **επικύρωση των αποτελεσμάτων** και μία **εφαρμογή** του προτεινόμενου μοντέλου και
- Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα **συμπεράσματα** και οι **προοπτικές** που προκύπτουν από την εργασία αυτή

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	σελ.6
---------------	-------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1. Εισαγωγή.....	σελ.9
1.2. Απαιτήσεις εισαγωγής νέων δεδομένων.....	σελ.23
1.3 Μεθοδολογία για την θεωρητική προσομοίωση της συμπεριφοράς δακτυλίων εμβόλων MEK	σελ.30
1.4.Το θεωρητικό Μοντέλο προσομοίωσης τριβολογικής συμπεριφοράς δακτυλίων MEK	σελ.37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στατιστική ανάλυση τραχύτητας- Το σύστημα Fischer-Pearson

2.1. Διαδικασία αναζήτησης - έρευνας του νόμου κατανομής τιμών πειραματικών αποτελεσμάτων κατά Fisher-Pearson :.....	σελ.45
2.2 Εφαρμογή υπολογισμού παραμέτρων Fisher-Pearson	σελ.56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο **Αποτελέσματα**

- 3.1 Αποτελέσματα της διερεύνησης μοντελοποίησης τραχύτητας επιφάνειας με την μέθοδο Fischer-Pearsonσελ.60**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο **Εφαρμογή -Επικύρωση αποτελεσμάτων**

- 4.1 Επικύρωση αποτελεσμάτων.....σελ.104**
4.2 Εφαρμογήσελ.113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο **Συμπεράσματα και προοπτικές**

- Συμπεράσματα-Προοπτικές.....σελ.120**
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.131
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....σελ.133

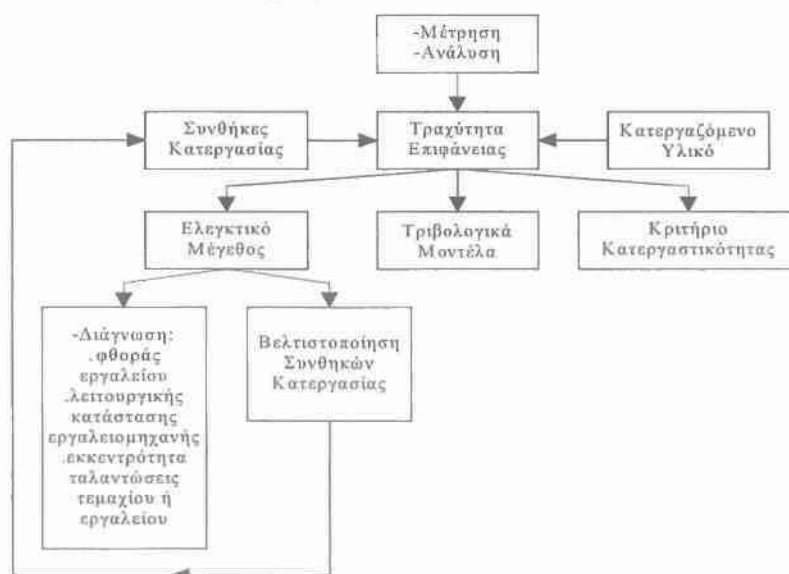
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Η τραχύτητα επιφάνειας που προκύπτει από την εκτέλεση των ποικίλων κατεργασιών μορφοποίησης είναι ένα βασικό κριτήριο κατεργαστικότητας. Αποτελεί έτσι, ένα κρίσιμο παράγοντα παραδοχής ή απόρριψης των τελικών τεμαχίων. Είτε πρόκειται για ένα απλό διακοσμητικό αντικείμενο, είτε για ένα υψηλών απαιτήσεων λειτουργικότητας στοιχείο μηχανής (π.χ. οδοντωτό τροχό, στροφαλοφόρο άξονα, έδρανο) οι μετρήσεις τραχύτητας πρέπει να είναι ακριβείς και αντιπροσωπευτικές για την κάθε επιφάνεια. Μάλιστα, οι τραχυμετρήσεις σε διάφορες φάσεις του κύκλου παραγωγής επιτρέπουν εκτός από διαπίστωση σφαλμάτων στα αρχικά στάδια, έλεγχο και βελτιστοποίηση της κατεργασίας. Η τραχύτητα άλλωστε αποτελεί και ελεγκτικό μέγεθος σε προβλήματα αυτομάτου ελέγχου και διαγνωστικής δυσλειτουργιών ή βλαβών στα σύγχρονα συστήματα κατεργασιών (Σχήμα 1).

Στα επόμενα θα εστιάσουμε σε ορισμένα παραδείγματα συνήθων προβλημάτων, σφαλμάτων και παρανοήσεων που ανακύπτουν στις μετρήσεις και στην ανάλυση της τραχύτητας.



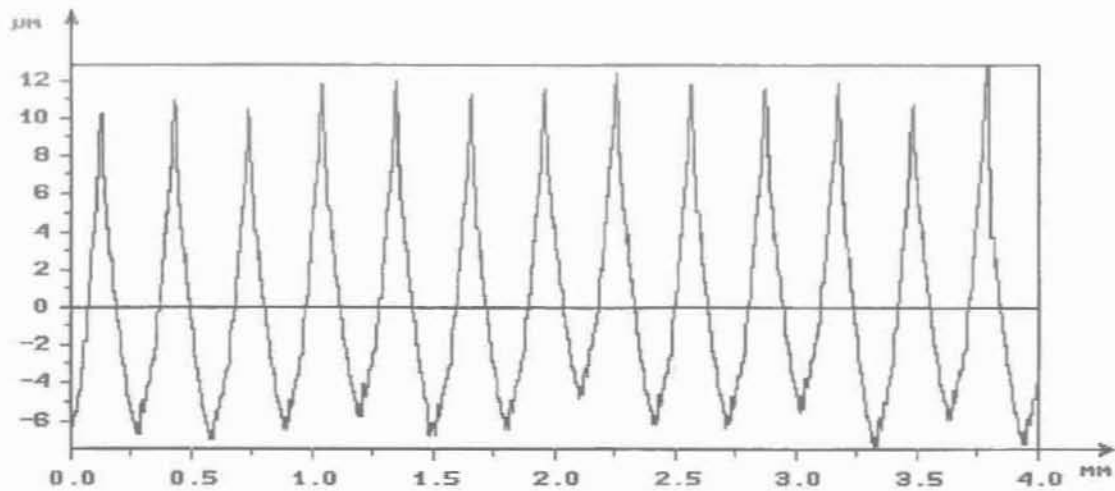
Σχήμα 1. Σημασία της τραχύτητας επιφάνειας σε σχέση με την παραγωγή και την έρευνα

1. Ποιες παράμετροι προσδιορίζονται και τι αυτές χαρακτηρίζουν ;

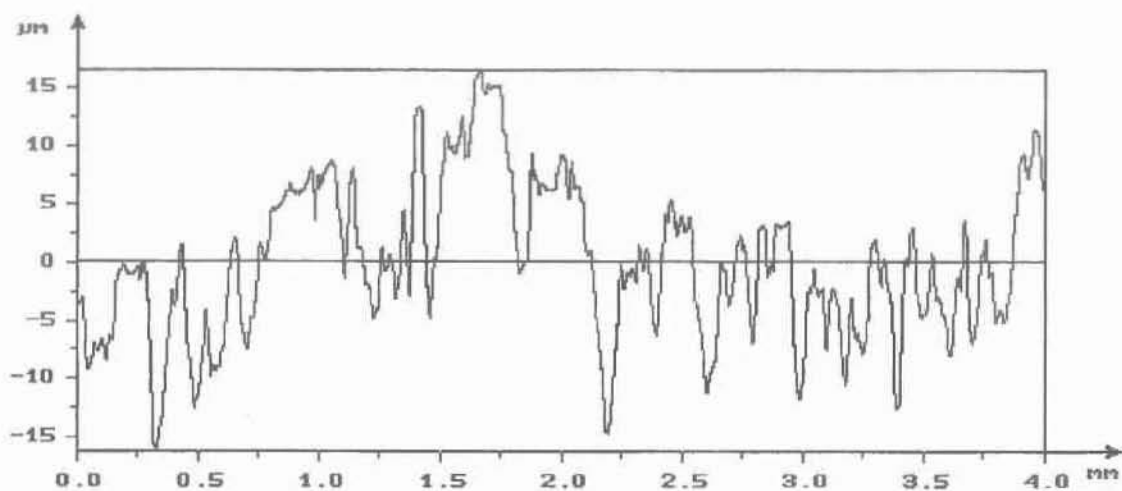
(Χρήσιμο ιστορικό) Παλαιότερα, ο καθορισμός της τραχύτητας κατεργασμένης επιφάνειας διεξάγεται καθαρά εμπειρικά, όσο και κατά υποκειμενικό τρόπο, δηλαδή με απλή οπτική επιθεώρηση ή επιθεώρηση δι' αφής σε σύγκριση με πρότυπες επιφάνειες δεδομένου βαθμού τραχύτητας. Επομένως, δεν ήταν αναγκαίες στενές ανοχές, ούτε ο προσδιορισμός και ο συμβολισμός της τραχύτητας. Ο έλεγχος της τραχύτητας βελτιώθηκε με την εισαγωγή των αντεστραμμένων τριγώνων κατά DIN 140, όμως ο ποσοτικός προσδιορισμός επετεύχθη με τα πρότυπα ASA (1940) και BS (1950), όπου ορίζονται παράμετροι τραχύτητας, οι οποίες εκφράζονται αριθμητικά και μετρούνται από κατάλληλα όργανα (προφιλόμετρα). Οι πρώτες αριθμητικές παράμετροι, οι οποίες προτάθηκαν ήταν το μέγιστο ύψος και το μέσο ύψος τραχύτητας συμβολιζόμενες ως R_{max} και R_a , αντιστοίχως. Η τελευταία μάλιστα έχει καθιερωθεί ως η πιο δημοφιλής παράμετρος. Το μεταγενέστερο πρότυπο ISO R468 (1966) εισηγείται τον υπολογισμό τριών παραμέτρων (R_{max} , R_a και R_z) παράλληλα με αναφορά στη σχετική κατεργασία κοπής. Όμως, ο χαρακτηρισμός της επιφάνειας μόνον υψομετρικά, με απόλυτες τιμές και αντίστοιχους μέσους όρους, έχει σαφείς περιορισμούς. Η σταθερότητα ή διακύμανση των τιμών της R_a μπορεί να επιτρέπει στοιχειώδη έλεγχο της κατεργασίας όμως δεν δίνει καμία πληροφορία για την μορφή της επιφάνειας. Οι σύγχρονες υψηλές απαιτήσεις για μεγαλύτερη λειτουργική ακρίβεια και υψηλότερη διάρκεια ζωής των τεχνολογικών επιφανειών επιβάλλουν την θεώρηση και άλλων παραμέτρων, τόσο αριθμητικών, όσο και στατιστικών, που καταρχήν είχαν προταθεί σε ερευνητικές εργασίες για να περιγράψουν και άλλα χαρακτηριστικά της επιφάνειας καθ' ύψος και κατά μήκος. Ορισμένες τελικά υιοθετήθηκαν από το ISO 4287 (1997).

Η βασική διάκριση μεταξύ των παραγόμενων περιγραμμάτων εντοπίζεται σε περιοδικά και σε τυχαία (Σχήμα 2). Τα πρώτα οφείλονται σε κατεργασίες με εργαλείο καθορισμένης γεωμετρίας (τόρνευση, φραιζάρισμα, πλάνισμα). Η υφή τους χαρακτηρίζεται από τα αποτυπώματα της ακής του εργαλείου που ισαπέχουν κατά την τιμή της εκάστοτε εφαρμοζόμενης πρόωσης. Αυτό πάντως δεν ισχύει σε περιπτώσεις μη ομαλού σχηματισμού

του αποβλήτου, όπως για ασυνεχές απόβλητο, ψευδόκοψη και σοβαρή φθορά του εργαλείου.



Σχήμα 2α. Περιοδικό περίγραμμα
 $s=0.32 \text{ mm.rev}^{-1}$, $v=185 \text{ m.min}^{-1}$, $R_a=3.82 \text{ μm}$, $R_t=17.6 \text{ μm}$, $R_{Ir}=101.7 \%$,
 $R_{DelQ}=10.7^\circ$



Σχήμα 2β. Τυχαίο περίγραμμα
 $s=0.08 \text{ mm.rev}^{-1}$, $v=20 \text{ m.min}^{-1}$, $R_a=3.29 \text{ μm}$, $R_t=20.9 \text{ μm}$, $R_{Ir}=102.9 \%$,
 $R_{DelQ}=14.2^\circ$

Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά περιγράμματα επιφάνειας, περιοδικό (2α) και μη περιοδικό (2β).

Τα δεύτερα παράγονται από λειαντικές κατεργασίες ή μη συμβατικές κατεργασίες (π.χ. ηλεκτροδιάβρωση). Είναι σαφώς αναγνωρίσιμα αν και δύσκολα περιγράψιμα.

Εμπορικά λογισμικά λογικού κόστους που συνεργάζονται με τα σύγχρονα τραχύμετρα υπολογίζουν πάνω από 100 (!) παραμέτρους. Από αυτές έως 6 χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία , αλλά και για έρευνα και ανάπτυξη.

Δεν υφίσταται λοιπόν πλέον η δυσκολία προσδιορισμού κάποιων παραμέτρων, αλλά από την άλλη πλευρά γεννιέται σύγχυση ως προς τις επιλέξιμες από αυτές βάσει ή όχι των προτύπων.

Επομένως, παίζει σημαντικό ρόλο η εξειδίκευση της παραγωγής του μηχανουργείου, η συμμόρφωση προς σύγχρονες προδιαγραφές επιφανειών και η κατάρτιση του τεχνικού προσωπικού του τμήματος του ποιοτικού ελέγχου.

Εδώ, πρέπει να τονιστούν τρία σημεία:

- α) Οι παρανοήσεις μεταξύ συναφών παραμέτρων, όπως ανάμεσα σε R_a και R_q ή R_t και R_z , είναι συχνές και πρέπει να γίνονται οι αντίστοιχες διορθώσεις.
- β) Δεν είναι εύκολη η επιλογή των παραμέτρων, καθώς υφίσταται άμεση εξάρτηση από την κατεργασία που προηγήθηκε, αλλά και την μετέπειτα λειτουργική (τριβολογική) συμπεριφορά της επιφάνειας.
- γ) Πρέπει να συμπληρωθεί η έρευνα σχετικά με την αλληλεξάρτηση των εν χρήσει παραμέτρων για όσο το δυνατόν περισσότερες μηχανουργικές κατεργασίες και ευρεία περιοχή μεταβολής παραγόντων κοπής (πρόωση, ταχύτητα κοπής, γεωμετρία κοπτικού κ.ά.). Έτσι, θα προκύψει ένα ελάχιστο σύνολο ασυσχέτιστων μεταξύ των παραμέτρων που θα περιγράψει διαφορετικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

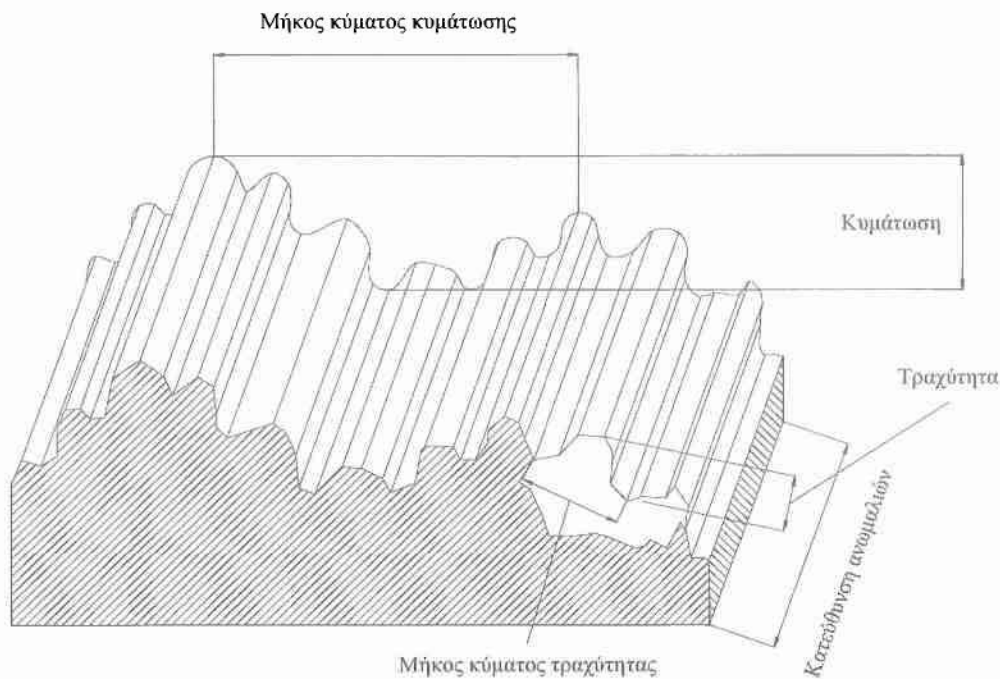
2. Επιλογή αισθητηρίου (pick up)

Διατίθενται δύο τύποι αισθητηρίων: με πέδιλο και χωρίς πέδιλο.

Το πέδιλο χαρακτηρίζεται από πολύ μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας σε σχέση με τον στυλίσκο και ακολουθώντας εφαπτομενικά το περίγραμμα της επιφάνειας δρα ως μηχανικό φίλτρο, το οποίο αποκόπτει την κυμάτωση (Σχήμα 3). Τούτο σημαίνει πως μόνο παραμέτρους τραχύτητας μπορούμε να μετρήσουμε. Με τα αισθητήρια χωρίς πέδιλο υπολογίζουμε αξιόπιστα όλα τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (μακρογεωμετρικά και μικρογεωμετρικά). Άρα,

πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διαφορά αυτή των δυνατοτήτων μέτρησης κατά την αγορά του αισθητηρίου.

Επίσης, υπάρχουν ευθέα και πλευρικά αισθητήρια, τα οποία χαρακτηρίζουν επίπεδες και καμπύλες επιφάνειες, αντιστοίχως. Το ζητούμενο, που όμως δεν έχει διευκρινιστεί, είναι αν τα πλευρικά αισθητήρια μπορούν να μετρήσουν αξιόπιστα επίπεδες επιφάνειες, κάτι που θα προσέφερε συμφερότερη λύση.



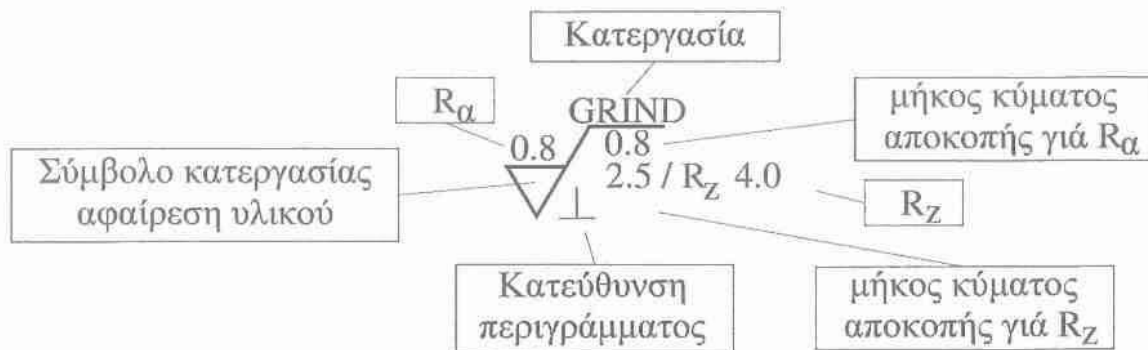
Σχήμα 3. Τοπογραφία κατεργασμένης επιφάνειας, ορισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών επιφάνειας κατά ANSI/ASME B46.1 με βάση τον οποίο αναπτύσσεται η μετρολογία μικροεπιφανειών.

3.Επιλογή μήκους κύματος αποκοπής (cut-off)

Ο στυλίσκος του τραχυμέτρου εκτελεί μία ρυθμιζόμενη προκαθορισμένη διαδρομή πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ του συνολικού διαστήματος της τροχιάς του και του δειγματοληπτικού μήκους μέτρησης, το οποίο είναι μικρότερο από το πρώτο και συνίσταται από συνήθως 5 μήκη κύματος αποκοπής (Σχήμα 4). Αυτό το μήκος έχει αναγνωρισθεί από δεκαετίες ως μείζον στοιχείο στην αποτίμηση της τραχύτητας, καθώς είναι το ελάχιστο μήκος όπου συλλέγονται τα δεδομένα της τραχυμέτρησης. Αν είναι μικρότερο από το αναγκαίο, ο

χαρακτηρισμός της τραχύτητας δεν θα αντιπροσωπεύει το περίγραμμα, αν είναι πολύ μεγαλύτερο θα αποδίδει στην τραχύτητα μακρογεωμετρικά χαρακτηριστικά. Συστηματικά, η τελική επιλογή του μήκους κύματος αποκοπής συναρτάται άμεσα προς την κατεργασία και την μορφή των περιγραμμάτων που αυτή παράγει, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Σαφώς, η περιοδικότητα ή τυχαιότητα του περιγράμματος παίζει σημαντικό ρόλο και από το παράδειγμα που ακολουθεί συνάγεται ότι και οι συνθήκες κατεργασίας, όπως η πρόωση, επιβάλλουν διαφορετικές τιμές cut-off, ακόμη και κατά την ίδια κατεργασία. Ίσως, ένας πρακτικός κανόνας του να περιλαμβάνονται σε ένα μήκος κύματος αποκοπής 10-15 αποτυπώματα του εργαλείου δίνει μία συμβιβαστική λύση.

Μία συνιστώμενη τιμή αποκοπής παλαιότερα ήταν τα 0,8 mm (πρότυπο ANSI B46.1-1985), επειδή ήταν αποτελεσματική για πολλά είδη κατεργασιών, αλλά και με αρκετές εξαιρέσεις.



Σχήμα 4. Προδιαγραφή της τραχύτητας

ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ (cutoff) λ_c		
DIN EN ISO 4288, ASME B46.1		
ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ	ΜΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ	cutoff

R_{sm} (mm)	R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)
0.013 έως 0.04	έως 0.10	έως 0.02	0.08
0.04 έως 0.13	0.10 έως 0.50	0.02 έως 0.10	0.25
0.13 έως 0.4	0.5 έως 10	0.1 έως 2	0.80
0.4 έως 1.3	10 έως 50	2 έως 10	2.50
1.3 έως 4	50 έως 200	10 έως 80	8.00

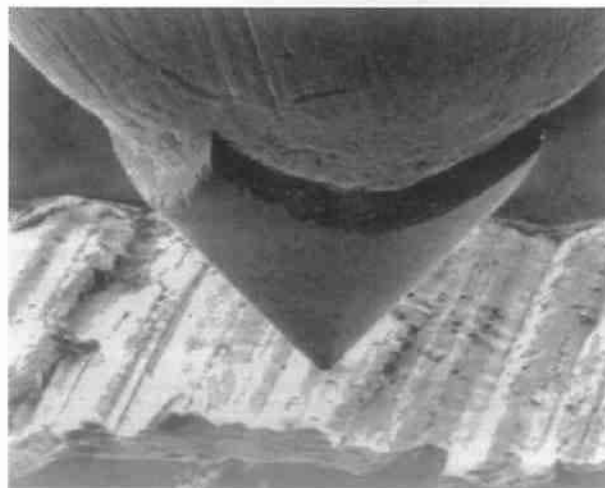
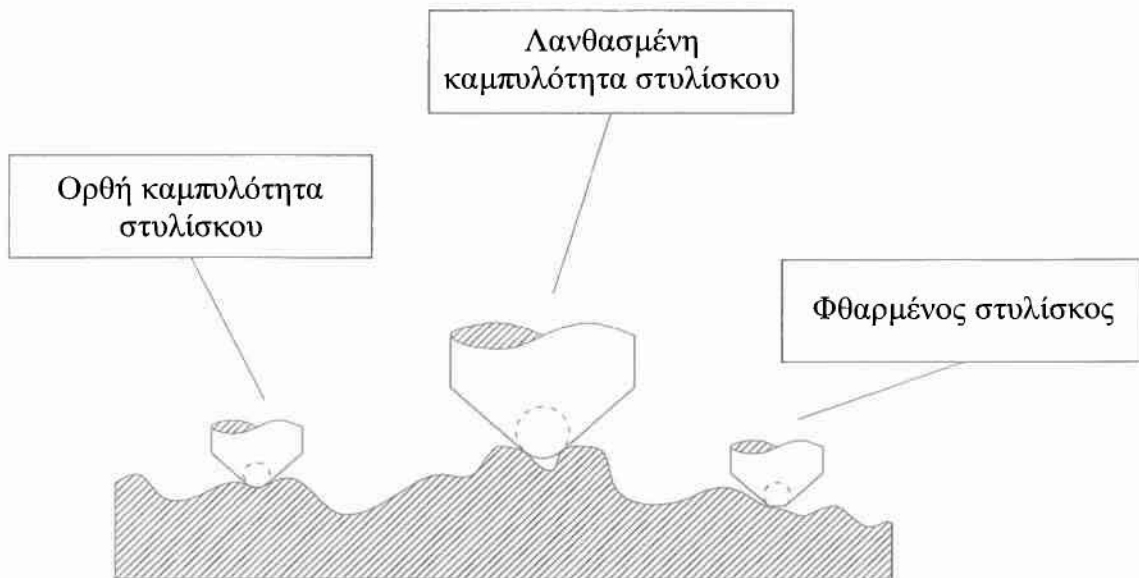
Πίνακας 1. Προτεινόμενα μήκη cutoff για διάφορες κατεργασίες

4. Επιλογή φίλτρου

Το σήμα που λαμβάνεται από το αισθητήριο πρέπει να φιλτραρισθεί ηλεκτρονικά πριν γίνει η ψηφιακή επεξεργασία της μέτρησης, ούτως ώστε να παρέχονται οι χρήσιμες πληροφορίες και λεπτομέρειες για την τραχύτητα. Δηλαδή, το χρησιμοποιούμενο φίλτρο πρέπει να αποκόπτει την κυμάτωση και το σφάλμα μορφής με ταυτόχρονη μικρή παραμόρφωση φάσης. Το νεότερο φίλτρο είναι το Gauss (ISO 11562), που είναι βελτιωμένο σχετικά με το παλαιότερο αναλογικό 2RC. Οι σύγχρονες προδιαγραφές ταχύτητας αποπεράτωσης καθορίζουν τον τύπο του φίλτρου. Δεδομένου ότι η εφαρμογή διαφορετικού φίλτρου αλλοιώνει τις τιμές των παραμέτρων επιβάλλεται η διασαφήνιση του θέματος αυτού από τον σχεδιαστή- κατασκευαστή. Βεβαίως, η επιλογή του κατάλληλου φίλτρου έχει ιδιαίτερη σημασία σε ερευνητική αντιμετώπιση θεμάτων, όπως ο έλεγχος της κατεργασίας, τριβολογικές ιδιότητες (τριβή -φθορά-λίπανση), διαγνωστική της κατάστασης της εργαλειομηχανής κλπ.

5. Μέγεθος στυλίσκου

Οι ακτίνες καμπυλότητας των στυλίσκων του εμπορίου κυμαίνονται από 2μπι έως 10μπι. Υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στην καμπυλότητα και στην ιχνηλασία πολύ μικρών ανωμαλιών του περιγράμματος, όπως και στην δυνατότητα χάραξης της επιφάνειας του δοκιμίου. Ο μεγάλης καμπυλότητας στυλίσκος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5 αδυνατεί να διακρίνει ιδιαίτερες λεπτομέρειες (πολύ μικρά μήκη κύματος). Αντιθέτως, η πίεσή του επί της επιφάνειας αυξάνει και μπορεί να χαράξει μαλακά υλικά, όπως: πλαστικά, ελαστομερή, μόλυβδο κ.ά. Σε τέτοιες περιπτώσεις άλλωστε πρέπει να είναι ελαττωμένο και το φορτίο «ανάγνωσης» του στυλίσκου.



Σχήμα 5. Καμπυλότητα στυλίσκου – φθορά στυλίσκου

6. Χρήση φθαρμένου στυλίσκου

Το υλικό κατασκευής του στυλίσκου, φυσικό ή τεχνητό διαμάντι, είναι πολύ σκληρό, αλλά και έχει χαμηλή δυσθραυστότητα. Κατά συνέπεια, εφόσον δεν αποφεύγονται και οι κρούσεις με το δοκίμιο κατά τις μετρήσεις, απολεπίσεις ή θραύση είναι αναμενόμενες μετά από κάποιο χρονικό διάστημα χρήσης. Σε αυτή την περίπτωση ο στυλίσκος δεν διεισδύει επαρκώς και τούτο διαπιστώνεται από τις εσφαλμένες τιμές των παραμέτρων. Αν υπάρχει υποψία φθοράς μπορεί αυτή να διαπιστωθεί με ένα μηχανουργικό μικροσκόπιο (χαμηλής ισχύος) ή με μέτρηση του προτύπου πλακιδίου διακρίβωσης.

7. Λανθασμένη κατεύθυνση ή θέση μέτρησης

Σε πολλές κατεργασίες εξ αιτίας της κινηματικής τους το κοπτικό εργαλείο αφήνει το αποτύπωμά του προς καθορισμένες διευθύνσεις, δηλαδή η επιφάνεια αποκτά προσανατολισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (Σχήμα 3). Κατά μία διεύθυνση θα εμφανίζεται η μέγιστη τιμή εύρους της τραχύτητας (κάθετη στην ταχύτητα κοπής), ενώ η κάθετη σε αυτήν διεύθυνση εμφανίζει την ελάχιστη τραχύτητα. Επομένως, οι ιδιότητες αυτές δεν πρέπει να αγνοούνται για να μην υποεκτιμάται η τραχύτητα. Ο προσανατολισμός είναι δυνατόν να μεταβληθεί σε περίπτωση έντονων ταλαντώσεων ή φθοράς του εργαλείου.

Εκτός από την κατεύθυνση μερικές φορές έχουν σημασία και οι θέσεις μέτρησης στην επιφάνεια, οι οποίες εξαρτώνται από φθορά του εργαλείου και δυναμικά φαινόμενα. Για παράδειγμα, η τραχύτητα κατά μήκος ενός торνευμένου άξονα επιδεινώνεται αν δεν έχει αλλαχθεί το κοπτικό. Ή κατά φραιζάρισμα με μεγάλο βάθος κοπής ή σε χαμηλής ισχύος φραιζομηχανή (άρα και χαμηλής στιβαρότητας) υφίσταται ανομοιογένεια των τιμών τραχύτητας σε διάφορες θέσεις.

8. Ύπαρξη επιφανειακών ελαττωμάτων

Υπάρχει πιθανότητα να ευρεθούν στην επιφάνεια σχισίματα, πόροι ή και ρωγμές, που δεν οφείλονται στην κατεργασία ή δεν είναι αντιπροσωπευτικά της κατεργασίας π.χ. τραυματισμός της επιφάνειας κατά την απόσυρση του τεμαχίου από την εργαλειομηχανή. Με τα φορητά τραχύμετρα που υπολογίζουν μία ή δύο παραμέτρους ή για παλαιά όργανα χωρίς λογισμικό η μόνη λύση είναι η αποφυγή τέτοιων περιοχών πριν ληφθεί η μέτρηση. Με την υποστήριξη των σύγχρονων λογισμικών μέτρησης της τραχύτητας μπορεί το ελάττωμα να απαλειφθεί κατά την ανάλυση και να μην επηρεάσει την τελική αποτίμηση.

Επίσης, μία άλλη αιτία είναι η διάβρωση, χημική ή φυσική, που οφείλεται στο περιβάλλον π.χ. ταχεία οξείδωση της επιφάνειας αν η μέτρηση διεξαχθεί καθυστερημένα. Σε αυτή την περίπτωση μεταβάλλονται οι κορυφές των ανωμαλιών και επηρεάζονται κατά περίπτωση οι παράμετροι. Η έκταση της οξείδωσης εξαρτάται και από το υλικό π.χ. μεγάλη έκταση σε χάλυβα, σημειακή (spots) σε κράμα αλουμινίου.

9. Ταλαντώσεις κατά την μέτρηση

Αν το τραχύμετρο, και αυτό είναι σύνηθες, λειτουργεί μέσα σε μηχανουργείο είναι δυνατόν οι μετρήσεις να επηρεάζονται από ταλαντώσεις. Συγκεκριμένα, ταλαντώσεις που προέρχονται από την λειτουργία παρακείμενων εργαλειομηχανών μεταδίδονται μέσω του δαπέδου και διεγείρουν τον στυλίσκο με αποτέλεσμα την παραποίηση του σήματος του περιγράφοντος την επιφάνεια και επακόλουθη μείωση της αξιοπιστίας και της επαναληψιμότητας της μέτρησης. Οι πηγές των ταλαντώσεων αναγνωρίζονται μάλλον εύκολα, εκτός αν είναι χρονικά απρόβλεπτες π.χ. διέλευση βαρέων οχημάτων από γειτονικό δρόμο και η λύση μπορεί να είναι η τοποθέτηση του τραχυμέτρου πάνω σε ένα βαρύ τραπέζι ή αν η ταλάντωση είναι εντονότερη, η έδραση με αντικραδασμικά πέλματα. Φυσικά, πρέπει να καταβληθεί προσπάθεια δραστικής μείωσης των ταλαντώσεων σε ένα μηχανουργικό

περιβάλλον διότι καταπονούνται και οι ίδιες οι εργαλειομηχανές με κίνδυνο εμφάνισης αστοχιών (πλαστικές παραμορφώσεις μερών, ρωγμές κ.ά.).

10. Ασυμβατότητα λογισμικών μέτρησης

Η πληθώρα λογισμικών που διατίθεται για την μέτρηση των παραμέτρων από διάφορους οίκους κατασκευής τραχυμέτρων έχει καταστήσει την ανάλυση της τραχύτητας προσιτή σε βιομηχανικούς χρήστες και ερευνητές. Έχει δημιουργήσει όμως και προβλήματα, καθώς δεν είναι δυνατό για εμπορικούς λόγους να έχει κάποιος πρόσβαση στον πηγαίο κώδικα αυτών των προγραμμάτων και να εξακριβώσει πώς υπολογίζεται η κάθε παράμετρος. Το αποτέλεσμα είναι προφανώς ασυμφωνία μεταξύ ομοειδών μετρήσεων που επηρεάζει περισσότερο τις απαιτήσεις ακρίβειας και επικοινωνίας ανάμεσα σε ομάδες που δραστηριοποιούνται σε αυτό το πεδίο. Καταβάλλεται προσπάθεια θέσπισης ενός κοινού format δεδομένων, το οποίο θα γίνει γενικά αποδεκτό.

11. Νέες εξελίξεις στην οργανολογία

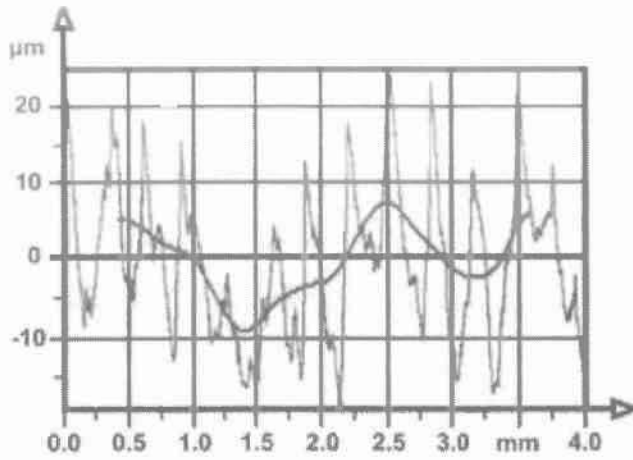
Τα τραχύμετρα τύπου στυλίσκου είναι καθιερωμένα στην βιομηχανική και εργαστηριακή πρακτική και κατά βάση παρέχουν δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας, η οποία είναι επαρκής για αρκετές κατεργασίες. Οι δυνατότητες των σύγχρονων τραχυμέτρων επιτρέπουν αξιόπιστο γεωμετρικό προσδιορισμό για την πλειονότητα των τεχνολογικών επιφανειών και το κόστος τους, όπως και του συνοδευόντος λογισμικού, είναι σαφώς προσιτό. Στην πραγματικότητα η επιφανειακή τοπογραφία είναι τριών διαστάσεων και υπάρχουν περιπτώσεις όπου η εξέταση μιας τομής κάθετα προς τον προσανατολισμό του αποτυπώματος του εργαλείου (ιδέ και παραγρ. 7) δεν είναι ικανοποιητική. Επομένως, ένας τρισδιάστατος υψομετρικός χάρτης θα περιέγραφε καλύτερα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και θα προσέφερε νέες δυνατότητες.. Προς την κατεύθυνση αυτή υπάρχουν οπτικά τραχύμετρα που σαρώνουν την επιφάνεια και εξάγουν τρισδιάστατες τοπογραφικές παραστάσεις. Για την αποτίμηση της τραχύτητας ορίζονται νέες παράμετροι αντίστοιχες με του δισδιάστατου χαρακτηρισμού π.χ. S_a αντί R_a , αλλά και παράμετροι που δεν ορίζονται σε δύο διαστάσεις, όπως η Std που περιγράφει την κατευθυντικότητα του περιγράμματος.

Η αντιμετώπιση αυτή επιβάλλεται και από λειτουργικές απαιτήσεις και θα έδινε ώθηση σε νέα αντιμετώπιση φαινομένων όπως η λίπανση και η φθορά. Ο κύκλος των μετρήσεων διεξάγεται ταχύτερα συγκριτικά με τα μηχανικά όργανα, παρουσιάζουν πάντως και αυτά προβλήματα, όπως συχνά σφάλματα λόγω διάχυσης και συμβολής.

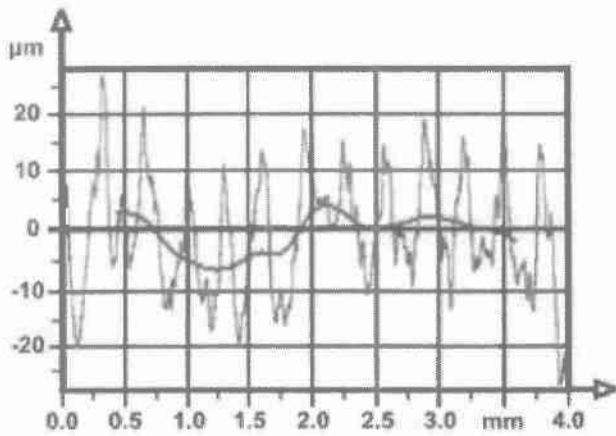
Συμπεράσματα- Κατευθύνσεις

Όπως παρουσιάστηκαν ανωτέρω, τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τις τραχυμετρήσεις είναι διττού χαρακτήρα: συνδέονται με μετροτεχνικά χαρακτηριστικά ή και αδυναμίες και από την άλλη πλευρά με επιλογές του χρήστη τεχνικού.

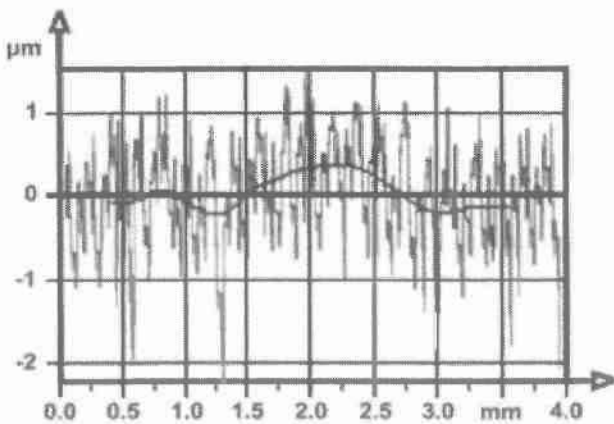
Κατά συνέπεια, είναι αναγκαία η ενημέρωση για τις δυνατότητες των συστημάτων μέτρησης τραχύτητας (συσκευή εργαστηριακή ή φορητή, αισθητήριο, στυλίσκος, λογισμικό) στο στάδιο προμήθειάς των, διότι αυτές συμπορεύονται με τις απαιτήσεις της βιομηχανίας και της έρευνας. Οποιαδήποτε βελτίωση της επιτυγχανόμενης τραχύτητας, που απαιτεί με την σειρά της καλύτερο και συνεπώς ακριβότερο εξοπλισμό, επιβαρύνει το κόστος των παραγόμενων προϊόντων και επομένως είναι θέμα καθαρά των αιτούμενων προδιαγραφών. Πάντως, δέον να τονιστεί η σημασία των μετρήσεων και της ανάλυσης των κατεργασμένων επιφανειών, ως τομέα της τεχνολογικής επιστήμης της Μετρολογίας, η οποία με μεγάλη καθυστέρηση έχει εκτιμηθεί στη χώρα μας και είναι απαραίτητη για λόγους συντήρησης, παραγωγής και ανάπτυξης.



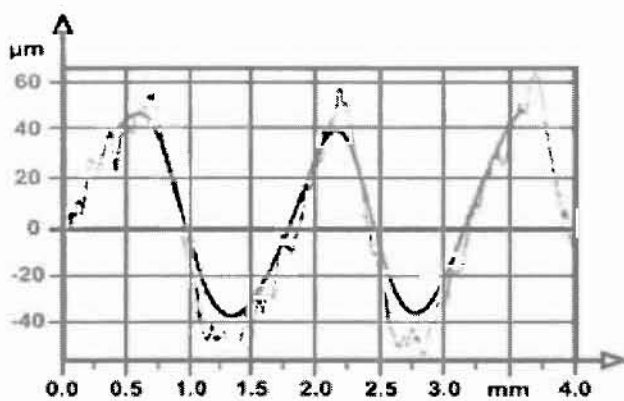
Σχήμα 6. Χαρακτηριστικά περιγράμματα τорνευμένης επιφάνειας παρουσία ψευδόκοψης.



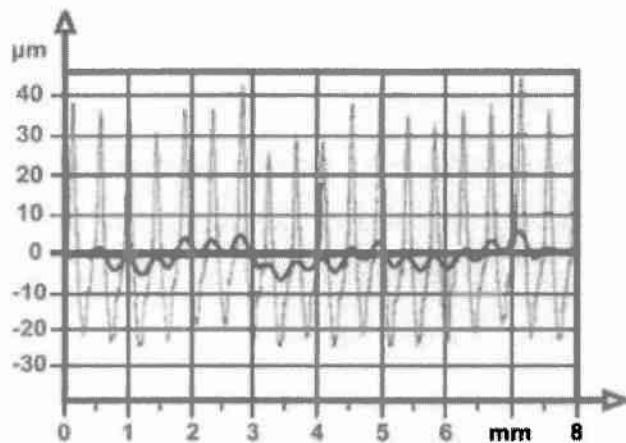
Σχήμα 7. Χαρακτηριστικά περιγράμματα τорνευμένης επιφάνειας με ασυνεχές απόβλιττο.



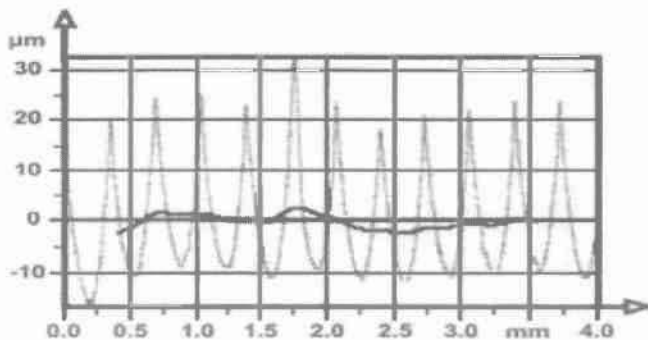
Σχήμα 8. Χαρακτηριστικά περιγράμματα τорνευμένης επιφάνειας με πολύ χαμηλή πρόωση.



Σχήμα 9. Χαρακτηριστικά περιγράμματα τорνευμένης επιφάνειας υπό την επίδραση ταλάντωσης του συστήματος.



Σχήμα 10. Χαρακτηριστικά περιγράμματα τорνευμένης επιφάνειας υπό την παρουσία κρατήρα στο κοπτικό εργαλείο.

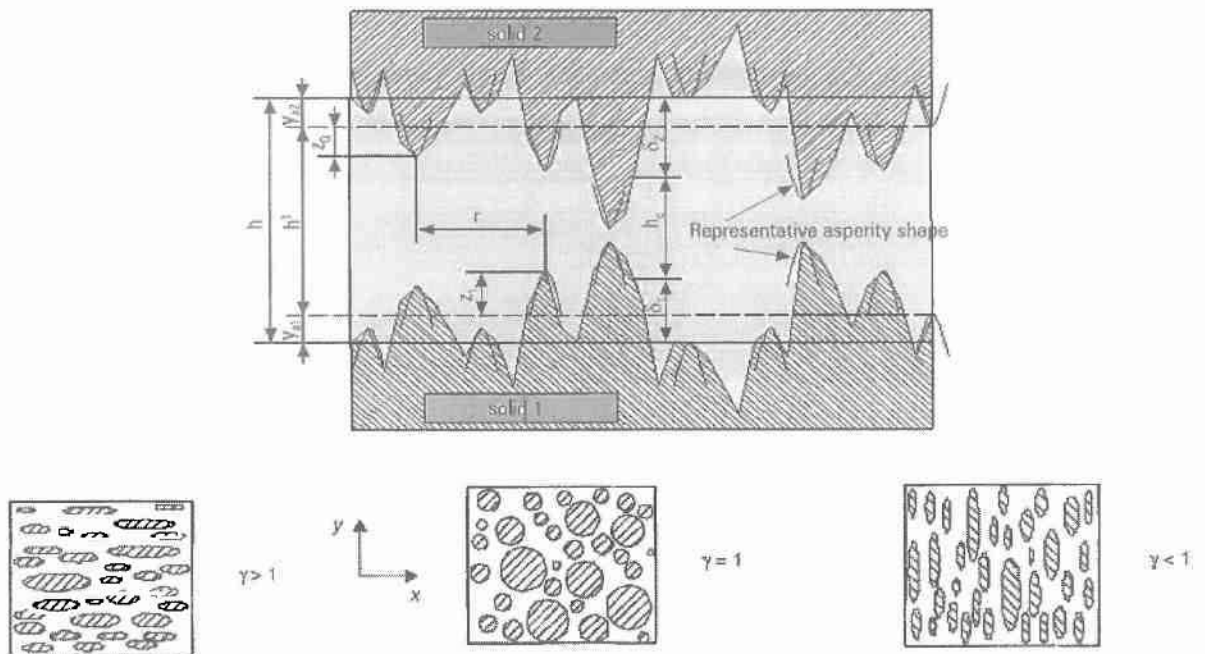


Σχήμα 11. Χαρακτηριστικά περιγράμματα τорνευμένης επιφάνειας με κανονική παραγωγή αποβλίττου.

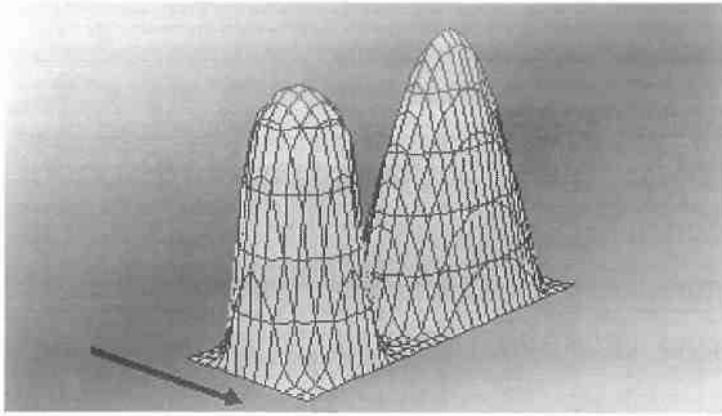
1.2. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΝΕΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

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).

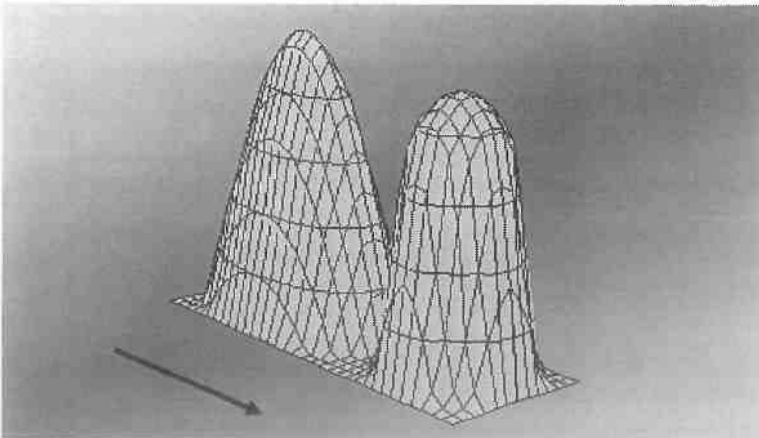
Έτσι, αφενός γίνεται χρήση για την λίπανση μιας εξίσωσης του **Reynolds** στην οποία λαμβάνονται υπόψη μεγέθη της λιπαντικής μεμβράνης με στοχαστικό χαρακτήρα (**Patir-Cheng**), καθώς και ενός μοντέλου τραχύτητας που προτάθηκε από τους **Greenwood - Tripp**



Σχήμα 1.2.1 : Το μοντέλο των λοφίσκων ταχύτητας και τα χαρακτηριστικά ανισοτροπίας.



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



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

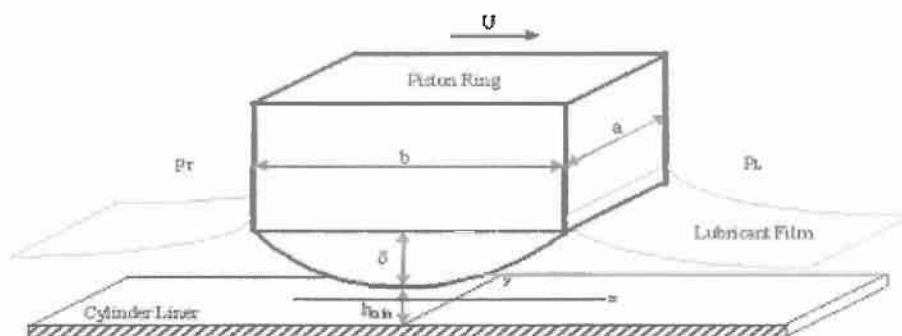
Ειδικότερα, η προσπάθεια λεπτομερούς προσδιορισμού της **τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμφόλων** ιστορικά ξεκίνησε κατά την εποχή των ατμομηχανών και βρήκε έντονη ανταπόκριση κατά τα μεταπολεμικά χρόνια. Από τότε έως τις μέρες μας, πληθώρα πειραματικών, θεωρητικών αλλά και μικτού τύπου προσεγγίσεων 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 τελεσίδικες 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.

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:

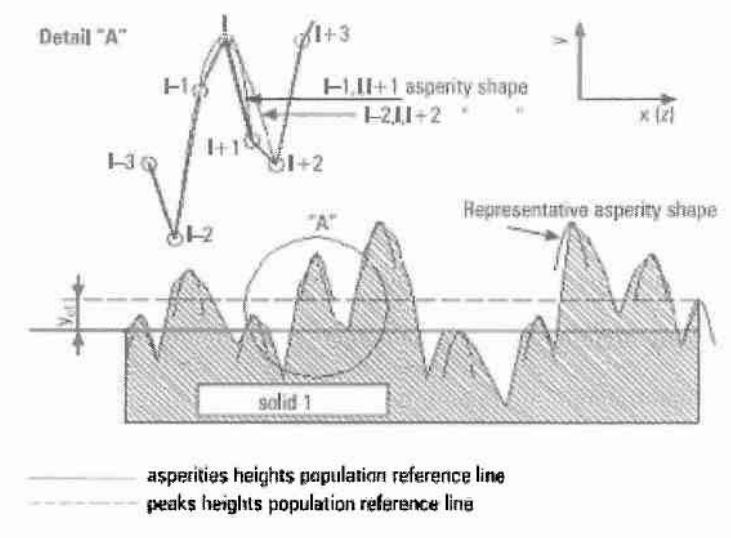
- Η τραχύτητα των τριβομένων επιφανειών πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπ' όψη και μάλιστα στην μακράν απέχουσα από κανονικές κατανομές μορφή της.
- Το συνολικό πρόβλημα απαιτεί λύση λαμβανομένης υπ' όψη της αλληλεπίδρασης των δακτυλίων μέσα στην πλήρη συστοιχία τους, γεγονός που απαιτεί αλλητάλληλους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



Σχήμα.1.2.2 : Κλασικό μοντέλο που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση του προβλήματος λίπανσης (πρώτου) δακτυλίου εμβόλου ΜΕΚ.

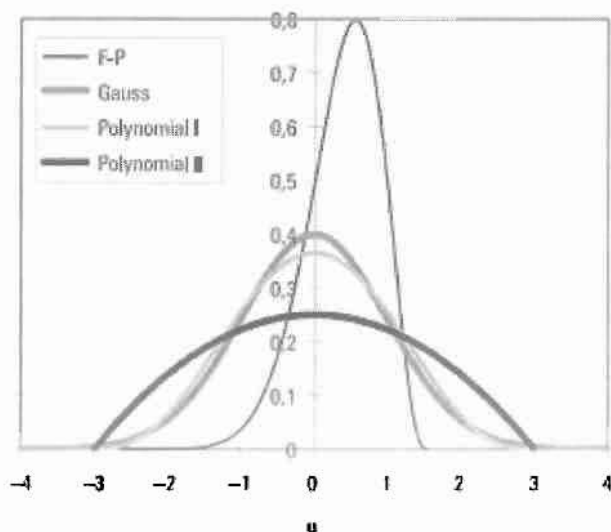
Επειδή όμως, η θεωρητική προσομοιωτική επεξεργασία αποτελεί κατ' εξοχήν χρήσιμο εργαλείο για την πλήρη κατανόηση της τριβολογικής λειτουργίας των δακτυλίων εμβόλου ΜΕΚ, η συνεχής επικοινωνία με την πειραματική επιβεβαίωση ή διαφοροποίηση, θεωρείται ικανή και αναγκαία συνθήκη για κάθε προσεχές βήμα.

Surface characterization – distinction of populations



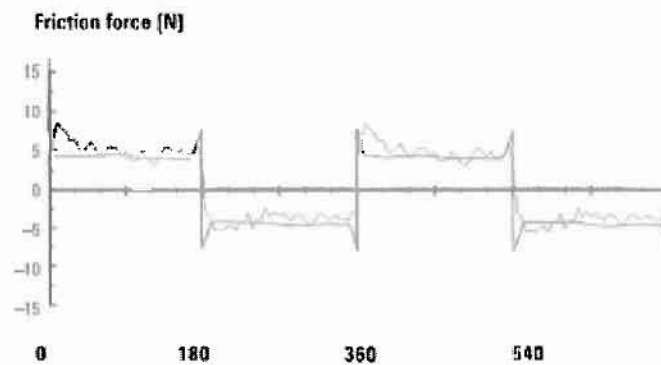
Σχήμα2.2: Το μοντέλο των λοφίσκων ταχύτητας και τα χαρακτηριστικά των κορυφών των λόφων που ελήφθησαν σε συνδυασμό κατά την ανάπτυξη του υπολογιστικού κώδικα.

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



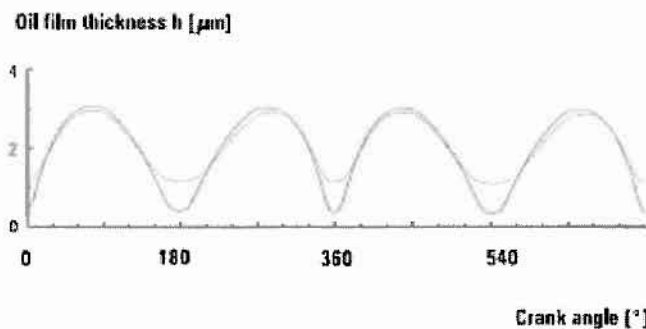
Σχήμα2.3: Κατανομές που χρησιμοποιούνται σε θεωρητικά προσωμειοτικά μοντέλα για σύγχρονους ισχυρούς υπολογιστικούς κώδικες.

Measured and calculated via real wornliner roughness integral functions piston ring-liner friction force $L = 1.75\text{mm}$, $R = 18.00\text{mm}$ (unloaded conditions) $\sigma_{Ra1} = 0.62\mu\text{m}$, $\sigma_{Rt1} = 0.40\mu\text{m}$, $\gamma_1 = 0.60$, $N = 510\text{rpm}$, $\eta = 0.020\text{Pa}\cdot\text{s}$



Σχήμα2.4: 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) $N = 510\text{rpm}$, $\eta = 0.020\text{Pa}\cdot\text{s}$



Σχήμα2.5: 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 αφενός το υλικό (μέτρο ελαστικότητας, λόγος του Poisson, σκληρότητα), αφετέρου χαρακτηριστικά της μικρογεωμετρίας των μικροεπιφανειών που κατά κανόνα

συμπεριλαμβάνονται μεταξύ των τυποποιημένων τιμών που δίνονται από τα λογισμικά τραχυμέτρησης.

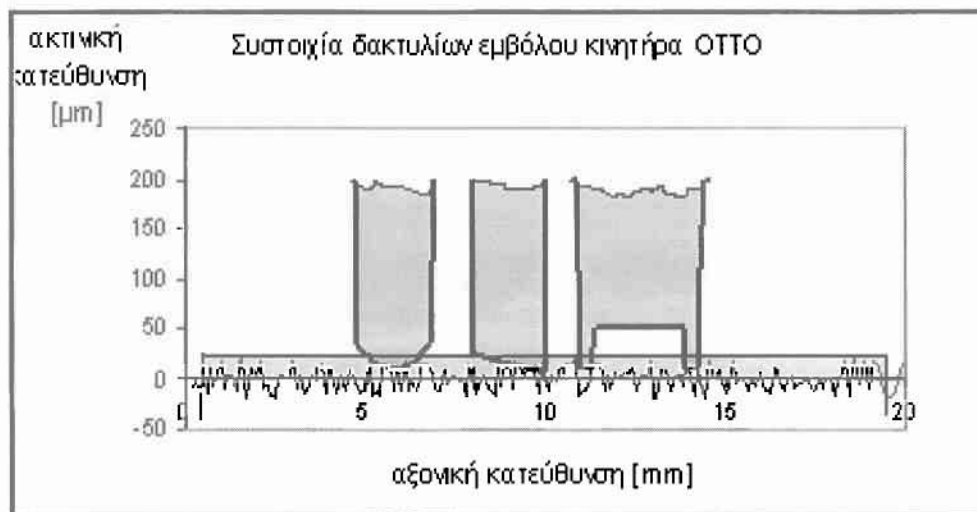
Τα σύγχρονα Μοντέλα με τα οποία υπολογίζονται φορτία και ρεαλιστικές επιφάνειες επαφής βασίζονται κατά κανόνα στην υπόθεση μιας κανονικής κατανομής και για αρχική κατάσταση φθοράς όπως και για τελική, με ίσως μοναδική διόρθωση την διαφοροποίηση- μείωση του εύρους για την κανονική κατανομή φθαρμένης επιφανείας.

Τα δυο θεωρητικά μοντέλα **Patir-Cheng & Greenwood-Tripp** απαιτούν πρόσθετες, γενικά μη τυποποιημένες παραμέτρους των κατανομών. Η απαίτηση αυτή οδήγησε στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατά την οποία γίνεται αφενός διάκριση μεταξύ των πληθυσμών των υψόμετρων όλων των σημείων του προφίλ-κατατομής(τραχυμετρηση) και των υψομέτρων των κορυφών των λόφων. Αφετέρου γίνεται προσπάθεια λεπτομερούς αποκωδικοποίησης της επίδρασης της καμπυλότητας στην κορυφή του λοφίσκου.

Ένας από τους στόχους της διπλωματικής είναι ο καθορισμός ορίων μεταξύ τραχείας επιφανείας η οποία κατόπιν φθοράς λογικά μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζεται με λεία. Δηλαδή αναζητείται απλουστευμένη λύση για τις περιπτώσεις των πολύ φθαρμένων επιφανειών.

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

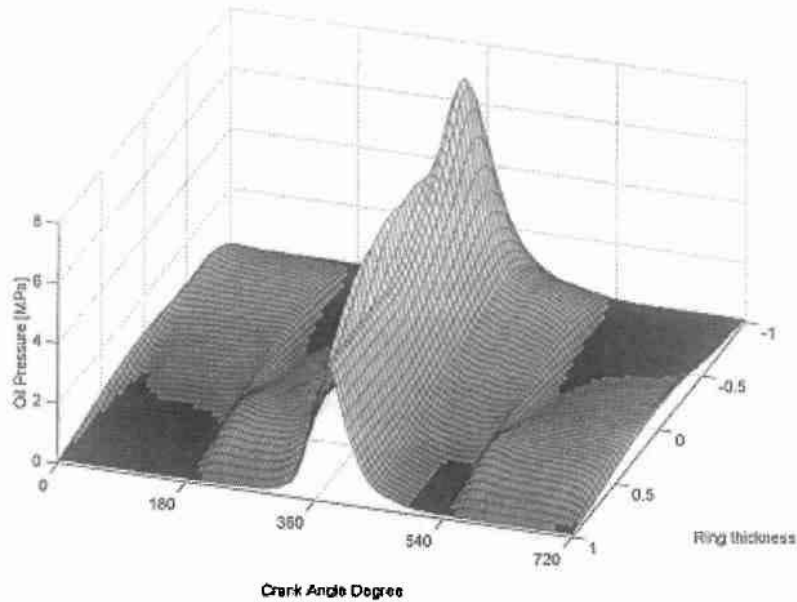
1.3. Μεθοδολογία για την θεωρητική προσομοίωση της συμπεριφοράς δακτυλίων εμβόλων ΜΕΚ



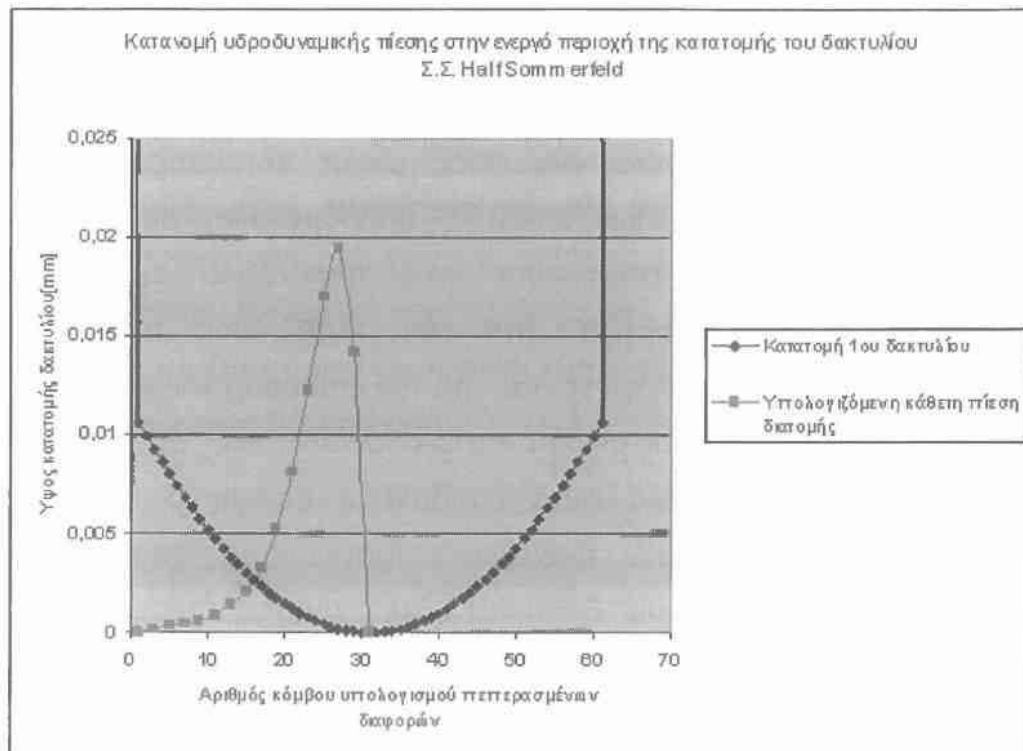
Οι σύγχρονες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της θεωρητικής προσέγγισης της τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλων έχουν ήδη εγκαταλείψει τις κλασικές μεθόδους περί πλήρους και υδροδυναμικής λίπανσης. Γενικά, αποδέχονται ένα είδος μικτής λίπανσης κυρίως στις περιοχές των νεκρών σημείων όπου η υδροδυναμική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

Επιπλέον στα μοντέλα αυτά 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 θερμο-μικρο-έλαστο υδροδυναμικά όπου εκτός των άλλων σε πρώτο βαθμό επιβάλλεται ενεργειακό-θερμικό ισοζύγιο, και αφετέρου γίνεται

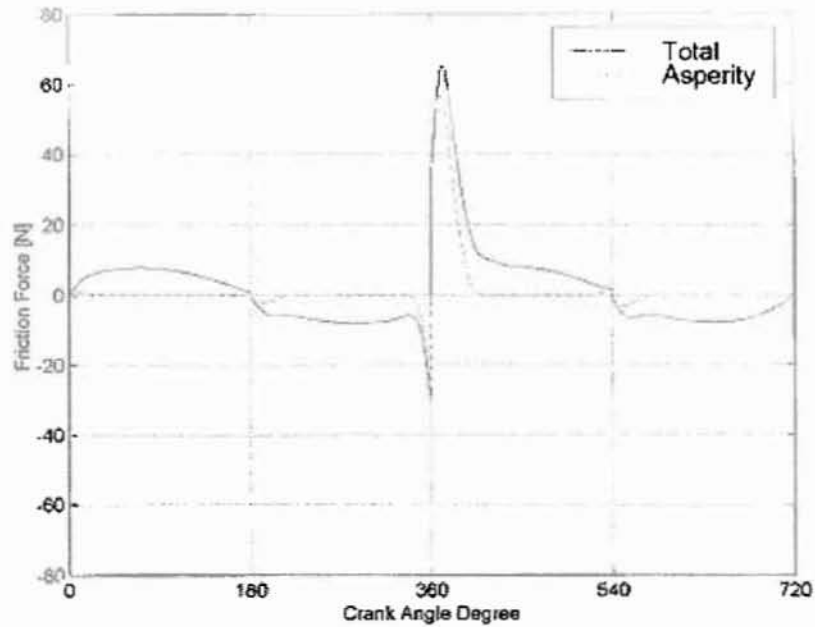
και υπολογισμός του διαθέσιμου λιπαντικού που απομένει για να λιπάνει τους δακτυλίους που έπονται μέσα σ' ένα πλήρες σύστημα εμβόλου δακτυλίων.



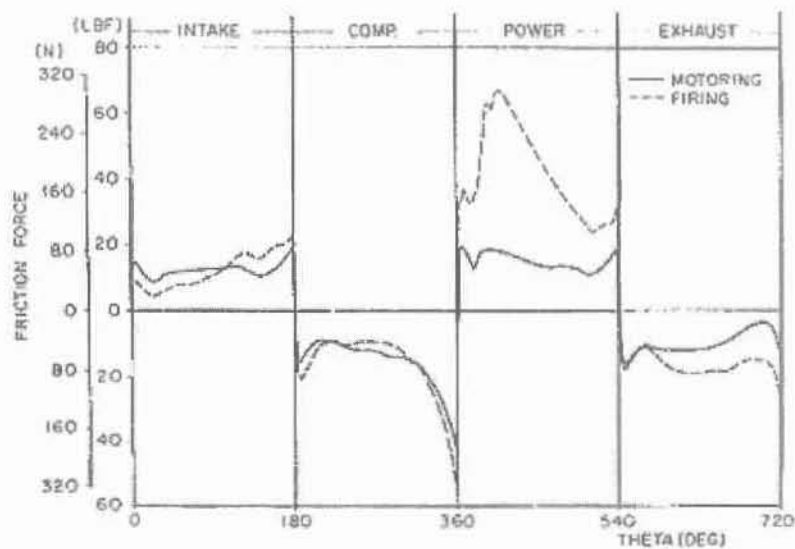
Σχήμα 1.1: Κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων κατά την κίνηση - δεδομένο από βιβλιογραφία.



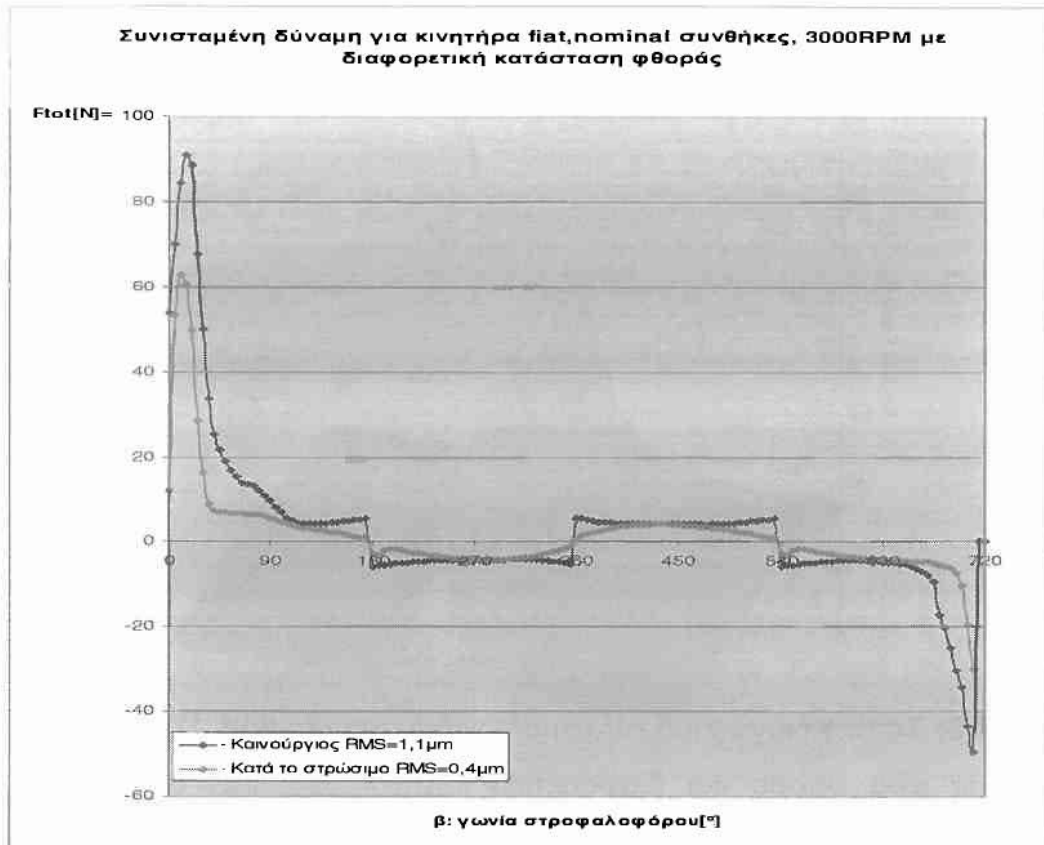
Σχήμα 1.2: Τυπική κατατομή 1^{ου} δακτυλίου με την κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων κατά την κίνηση προς τα αριστερά-από κάτω νεκρό σημείο προς άνω νεκρό σημείο (αναπτυσσόμενο μοντέλο ΠΘ).



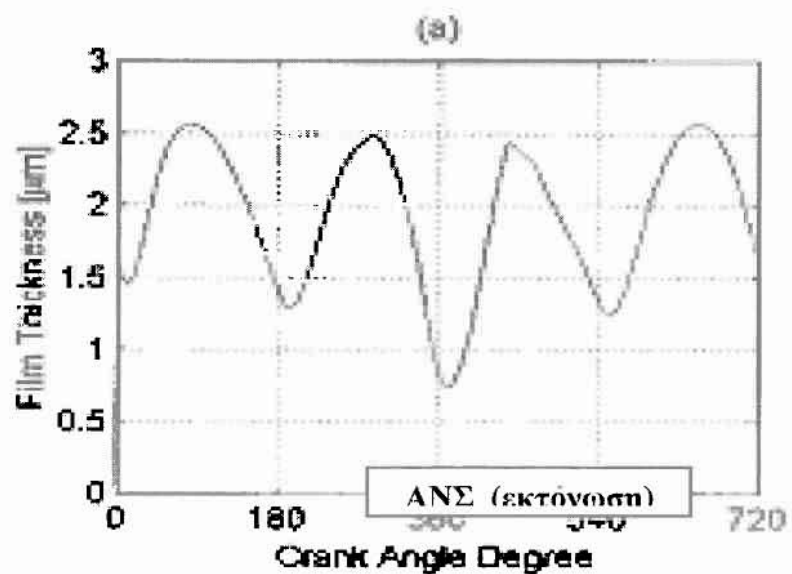
Σχήμα 1.3: Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1^{ου} δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (δεδομένο από σύγχρονη **βιβλιογραφία**-θεωρητική προσομοίωση)



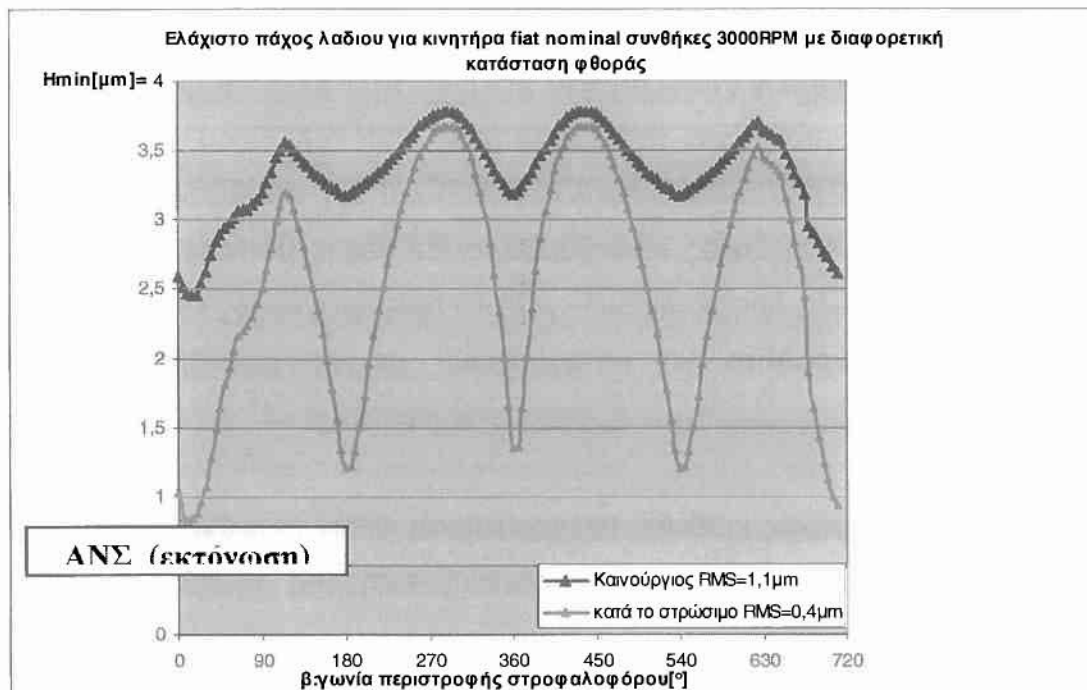
Σχήμα 1.4: Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1^{ου} δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (δεδομένο από σύγχρονη **βιβλιογραφία**-πειραματική προσομοίωση)



Σχήμα 1.5: Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1^{ου} δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. **(Αναπτυσσόμενο μοντέλο ΠΘ)**



Σχήμα 1.6: Τυπική συμπεριφορά 1^{ου} δακτυλίου όσον αφορά το αναπτυσσόμενο πάχος λαδιού στη διεπιφάνεια δακτυλίου κυλίνδρων. (Δεδομένο από βιβλιογραφία)



Σχήμα 1.7: 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 σα **μοντέλο του Greenwood** (ή Greenwood-Williamson ή Greenwood-Trip), 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 μικρών τραχυτήτων, ερμηνεύεται στη συνέχεια.

Η απλουστευτική υπόθεση στο μοντέλο που υιοθετήθηκε ερμηνεύεται με την αρχική ανισοτροπία της τραχύτητας του κυλίνδρου η οποία είναι εγκάρσια (σχήμα 2.1) (transversal $1/9 < \gamma < 1/3$) και δεν παρουσιάζει ουσιώδεις διαφορές για τις τιμές αυτές. Ενδεχομένως, σε άλλης μορφής επιφάνειες με ανισοτροπία διαμήκη (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)
- **Μέση ακτίνα καμπυλότητας του πληθυσμού των κορυφών των λοφίσκων.**

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 ΜΕΚ

εφαρμόζεται σε διαφορετικές γεωμετρίες κινητήρων και κατατομών δακτυλίων (κυρτών-κολουροκωνικών- επίπεδων), καθώς και σε διαφορετικά στάδια φθοράς των διεπιφανειών (χωρίς ώρες λειτουργίας, μετά το στρώσιμο και φθαρμένες).

Στο **μοντέλο του Greenwood** λαμβάνεται υπόψη συντελεστής τριβής τάξεως μεγέθους 0,16 που αφορά στο μηχανισμό τριβής των κορυφών των λοφίσκων. Η τιμή αυτή ευελπιστούμε ότι θα καθοριστεί και πειραματικά 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

$F_{tota} = a W_{tota} + \tau_0 * A$

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

$A = \pi DL$: φαινόμενη επιφάνεια επαφής

Τα προηγούμενα, όπως προαναφέρθηκε προτείνονται από την ομάδα του Greenwood και αφορούν σε συμμετρικές κατανομές υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων που στη γενικότητα τους λαμβάνονται κανονικές (Gauss). Στις περιπτώσεις αυτές συνάρτηση του μεγέθους που καθορίζει το διαχωρισμό των μέσων τιμών του υψομέτρου των λοφίσκων των δύο τραχειών επιφανειών είναι αφενός το φορτίο που παραλαμβάνεται από τις ελαστικά παραμορφωμένες μικρογεωμετρικές ανωμαλίες των επιφανειών και αφετέρου η πραγματική επιφάνεια επαφής καθώς και ο αριθμός των επαφών ανά μονάδα επιφάνειας.

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

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

Έτσι το d γίνεται :

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

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

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

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

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

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

$$\text{Όπου } F_n(U) = \int_U^\infty (s - U)^n \Phi_s ds \text{ όπου } \Phi_s \text{ η κανονικοποιημένη κατανομή,}$$

$$s = d/\sigma$$

Οι συναρτήσεις που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του $F_{5/2}$ και F_2 προτείνεται να παίρνουν τις ακόλουθες τιμές.

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

$$F_{\frac{1}{2}}(H) = \begin{cases} f_1 e^{\left(f_2 \log(H^* - H) + f_3 (\log(H^* - H))^2 \right)}, & H \leq 3,5 \\ f_1^H (H^* - H)^{f_2^H}, & H^* \geq H \geq 3,5 \\ 0, & H \geq H^* \end{cases}$$

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

1.4 Το θεωρητικό μοντέλο προσομοίωσης τριβολογικής συμπεριφοράς δακτυλίων ΜΕΚ

1.4.1 Σύγκριση με την βιβλιογραφία και υποθέσεις επίλυσης

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 ασυμπύεστο, 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 πχ του τύπου μονοστρωματικό, δηλαδή σε μοριακά μορφή. Το πάχος της μεμβράνης αυτής είναι της τάξεως nm και επιδέχεται μια διατμητική τάση της τάξης 10^6 έως 10^8 Pa. Σε περίπτωση απουσίας ακριβέστερων δεδομένων στο μαθηματικό μοντέλο είναι αποδεκτή μια συμπεριφορά, σύμφωνα με τη μελέτη που αναφέρεται σε οργανικής υφής λιπαντικές μεμβράνες χαμηλού πάχους.

1.4.2 Επίδραση του λειτουργικού περιβάλλοντος.

Λίπανση δακτυλίου-χιτωνίου

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

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

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

Στην πράξη στο σύστημα δακτυλίου 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 λοιπό 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.

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 $\sigma^2 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$. Όπου σ_1 , σ_2 οι τυπικές αποκλίσεις των κατανομών για το χιτώνιο και τον δακτύλιο αντίστοιχα.

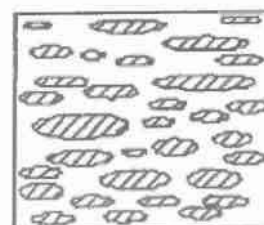
Αντιπροσωπευτικά πειραματικά αποτελέσματα δίνουν, για τα χαρακτηριστικά της μικρογεωμετρίας αυτής, ότι η μεταβολή τους σε τρία διαφορετικά στάδια φθοράς συμφωνεί με τα παρακάτω δεδομένα.

Στάδιο 1: Πριν από τη λειτουργία

$$\sigma_i = 1,1 \mu\text{m}$$

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

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



$\gamma > 1$

Στάδιο 2: Μετά από 10 ώρες λειτουργία

$$\sigma_i = 0,40 \mu\text{m}$$

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



$\gamma = 1$

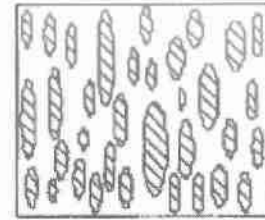
$$\sigma/\beta = 0,004$$

Στάδιο 3: Μετά από 100 ώρες λειτουργίας

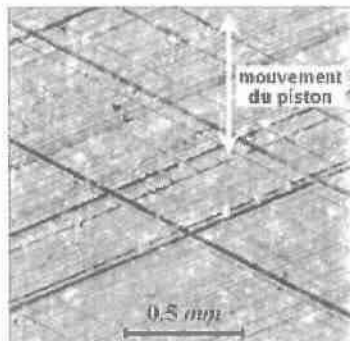
$$\sigma_i = 0,30 \mu\text{m}$$

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

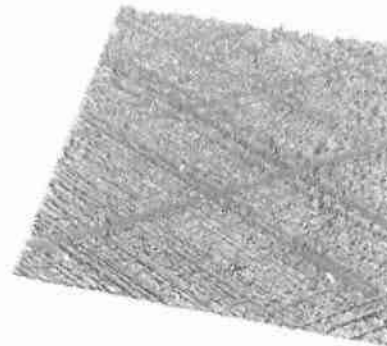
$$\sigma/\beta = 0,0028$$



$\gamma < 1$



(a) image topographique 2D



(b) représentation 3D

Σχήμα 1.10: 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

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 $\sigma_{\rho 0}$ και $\sigma_{\rho i}$ 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 $\sigma_{\rho 0}$ 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 στην τραχύτητα είναι αμελητέα. Η κατατομή κάθε λοφίσκου θεωρείται ότι περιγράφεται με μία παραβολική συνάρτηση $y = f(x)$. Αν v 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]

Υδροδυναμική συνιστώσα :

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

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

σε περίπτωση τραχειών επιφανειών γράφεται ως εξής:

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

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_r αντικαθίσταται από τη διορθωμένη τιμή του τοπικού πάχους λιπαντικής μεμβράνης h λαμβανομένου υπόψη του συντελεστή ροής Φ_x, Φ_y :

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

Ο συντελεστής Φ_x υπολογίζεται ως εξής:

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

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

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

Όπου: $H = \frac{h}{\sigma}$ και $\gamma = \frac{\lambda_{0,5x}^2}{\lambda_{0,5y}}$, 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}_r ορίζεται σαν:

$$\bar{h}_r = \int_{-h}^{\infty} (h-\delta) f_{\rho_0}(\delta) d\delta$$

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:

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

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 : το φορτίο).

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 δίνει την:

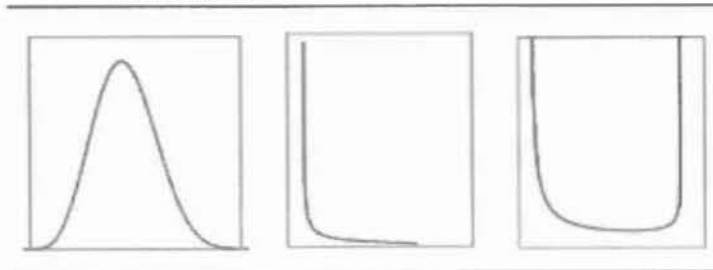
$$F_{total} = F_a + F_H$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

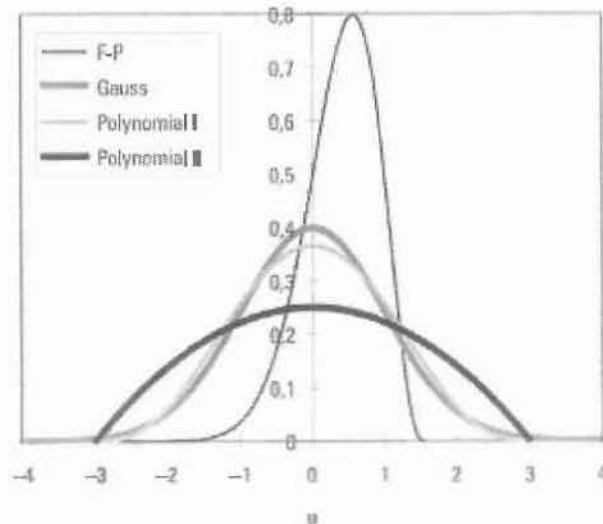
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ FISHER-PEARSON

Probability curve

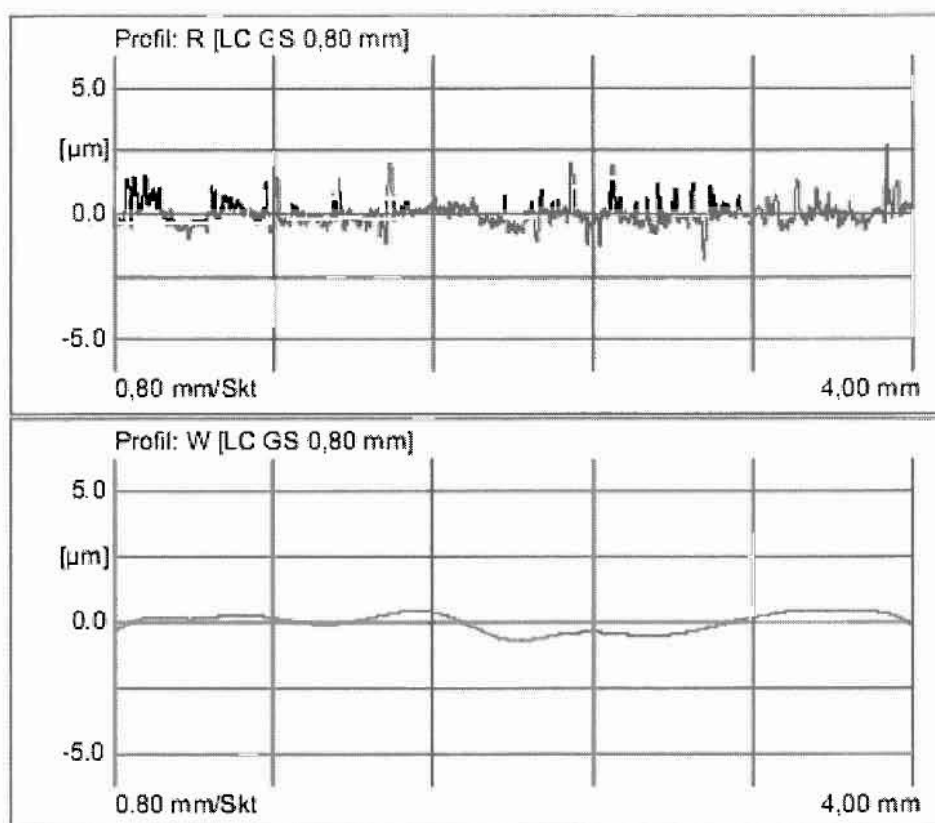


Comparison between standardized probability density functions proposed for surface asperities heights or peaks heights distribution and a representative worn liner Fisher-Pearson peaks heights distribution curve

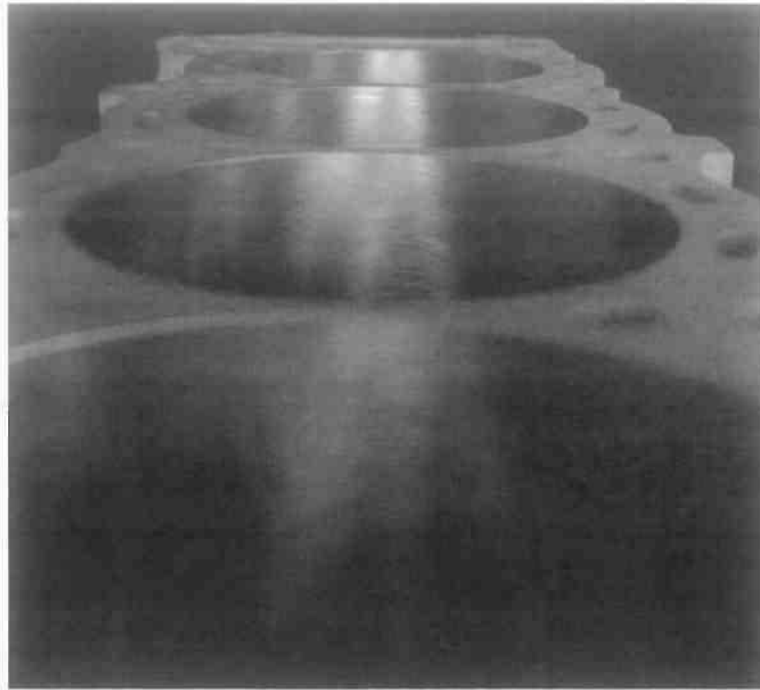


2.1. Διαδικασία αναζήτησης – έρευνας του νόμου κατανομής τιμών πειραματικών αποτελεσμάτων κατά **Fisher-Pearson** :

Βάση για το παρών κεφαλαίο αποτέλεσε μια σειρά δεδομένων από την βιβλιογραφία που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό των τραχειών επιφανειών σε διάφορα στάδια φθοράς τους όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα 2.1.1 . Χαρακτηριστικά περιγράμματα τεχνολογικής επιφάνειας, διαχωρισμός τραχύτητας (α-roughness) και κυμάτωσης (β-waviness).



Σχήμα2.1.2 Χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογικής επιφάνειας κατεργασμένης με λείανση, κύλινδροι MEK

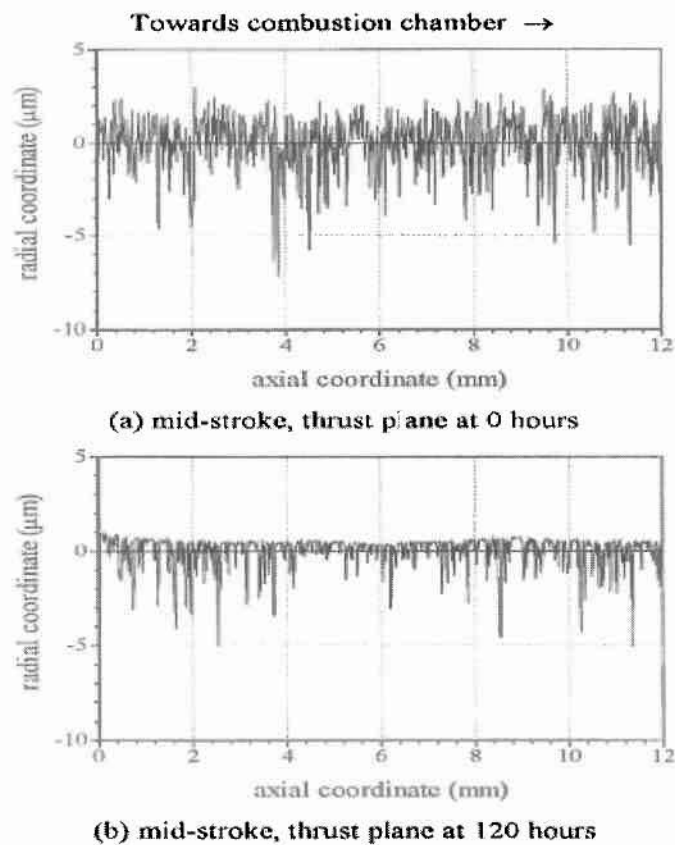
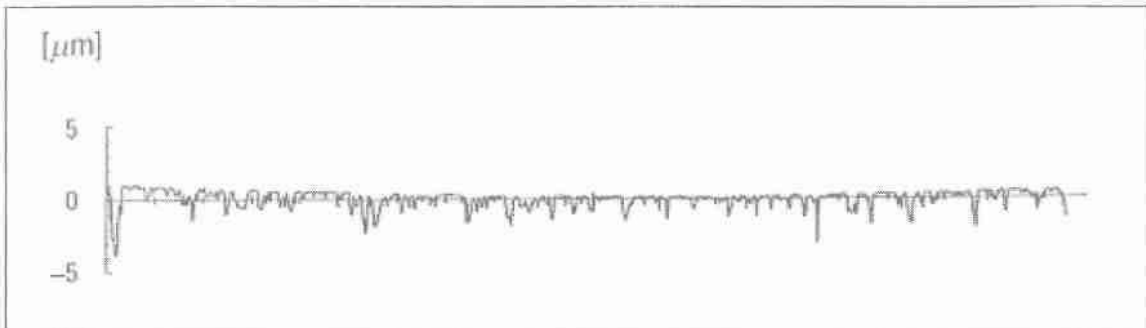
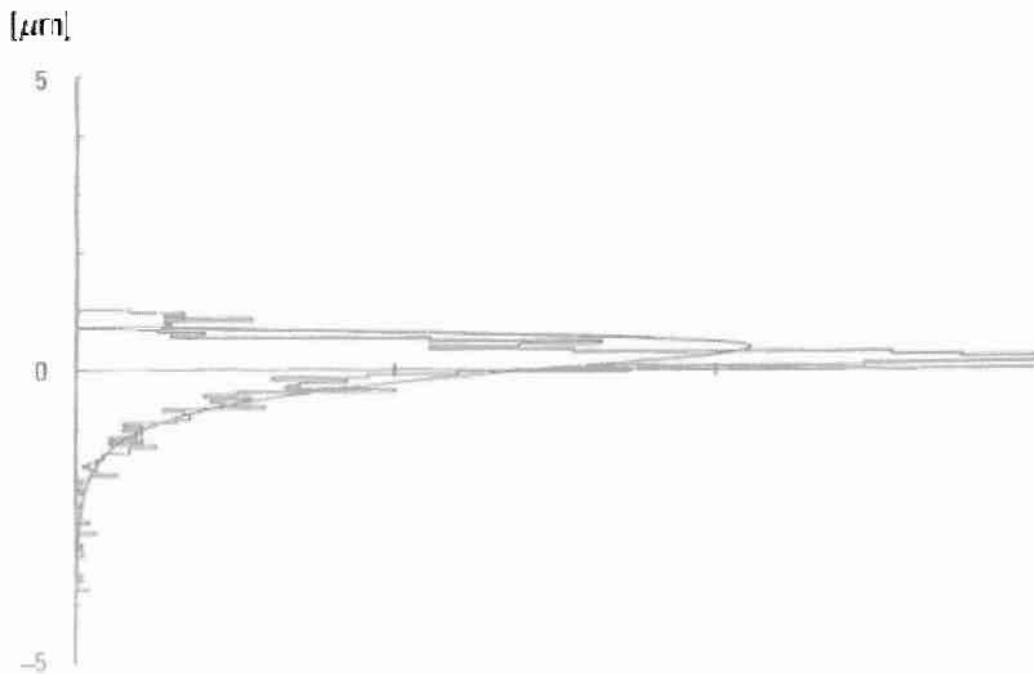


Fig. 7. Cylinder wall topography variation [21].

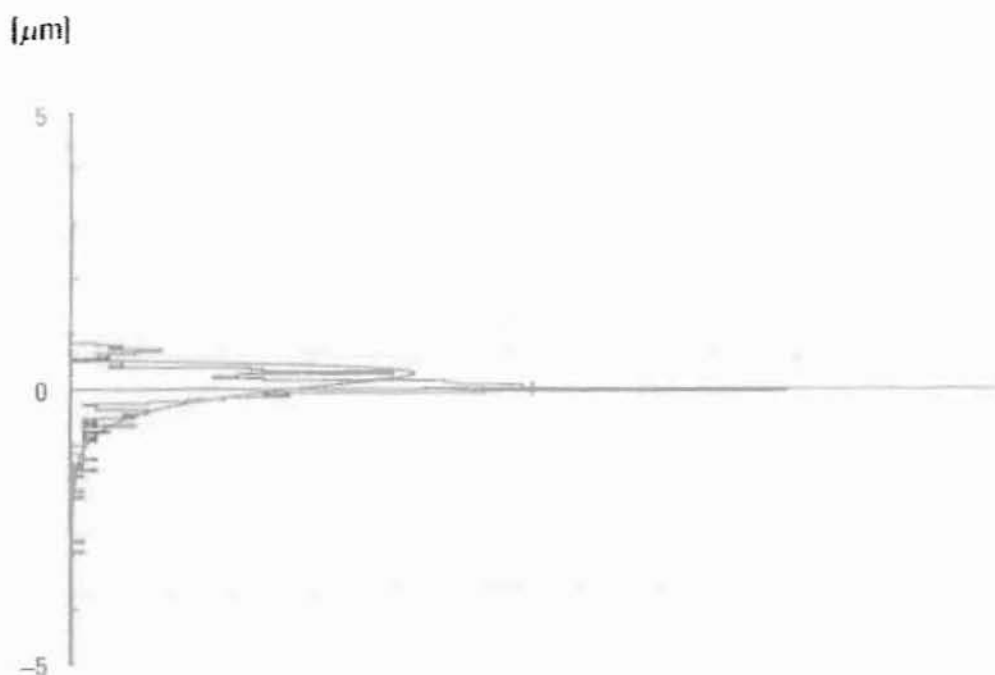
Σχήμα2.1.3 Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατατομών επιφάνειας κυλίνδρου MEK σε αρχική κατάσταση και σε κατάσταση μετά το στρώσιμο αντίστοιχα(βιβλιογραφία).



Σχήμα2.1.4 Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατατομών επιφάνειας κυλίνδρου ΜΕΚ σε κατάσταση μετά το στρώσιμο (βιβλιογραφία)- και συνθετική τραχύτητα πρόταση της παρούσας διπλωματικής.

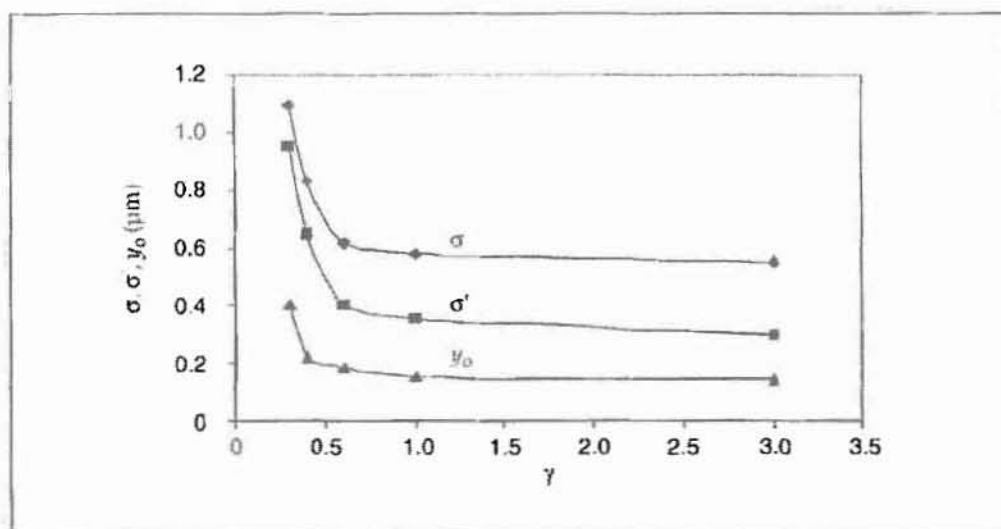


(A)

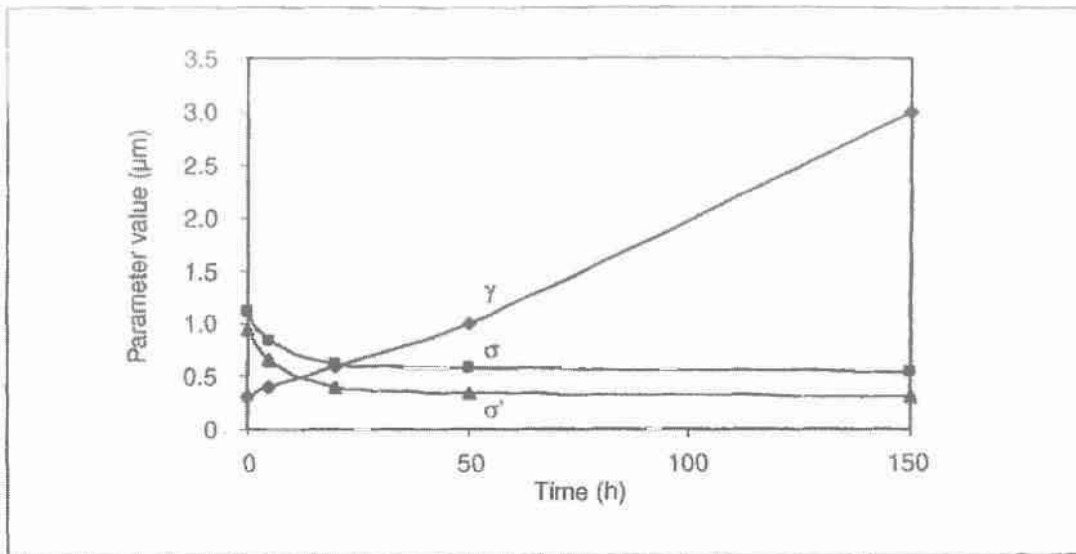


(B)

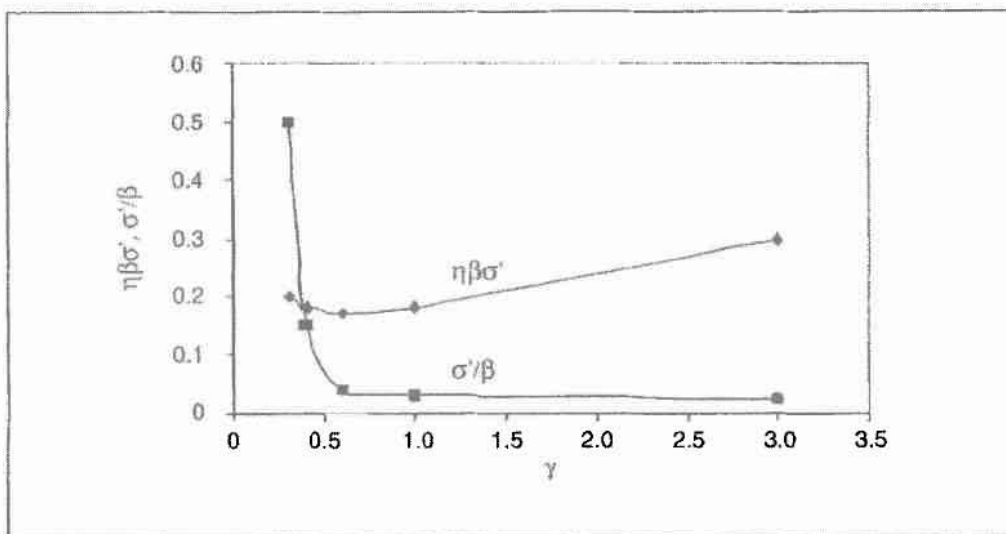
Σχήμα 2.1.5(A) Κατανομή υψομέτρων σημείων κατατομής προηγούμενου σχήματος και (B) Κατανομή υψομέτρων κορυφών λόφων κατατομής προηγούμενου σχήματος



(A)



(B)



(Γ)

Σχήμα 2.1.6 Χαρακτηριστικά διαγράμματα μεταβολής παραμέτρων τραχύτητας στο πεδίο του χρόνου (βιβλιογραφία).

Παρατηρήσεις

A) Είναι σαφής η μείωση των τιμών των παραμέτρων κυρίως κατά την πρώτη φάση φθοράς- στρώσιμο, δεν είναι σαφής η φάση φθοράς που θα μπορούσε να θεωρηθεί οριακή και κρίσιμη λόγω σταθερότητας των τιμών μέσα στο πεδίο του χρόνου για μεγάλο χρονικό διάστημα.

B) Καθίσταται σαφής η διαφοροποίηση της ανισοτροπίας της τραχύτητας με τη φθορά.

Γ) Μη τυποποιημένες παράμετροι σχετικές με πυκνότητα λοφίσκων και καμπυλότητα λοφίσκων.

Το κριτήριο του **Pearson**, το οποίο μάλιστα εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία ως προς την ασυμμετρία της καμπύλης κατανομής, έχει αποδειχθεί ότι είναι δυνατό να συνεισφέρει στην ταξινόμηση των υπό μελέτη πληθυσμών (υψομέτρων σημείων, υψομέτρων κορυφών λόφων και των ακτινών καμπυλότητας κορυφών λόφων).

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό η παράμετρος **k** καταδεικνύει αν η κατανομή είναι φραγμένη ή όχι όπως αυτό φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί

$k < 0$	Καμπύλη κατανομής άνω και κάτω φραγμένη	α_1 α_2
$0 < k < 1$	Κατανομή χωρίς φράγμα άνω και κάτω	$-\infty$ $+\infty$
$1 < k$	Καμπύλη κατανομής έχει ένα φράγμα (άνω ή κάτω)	$\gamma_1 > 0$ $\gamma_1 < 0$ α $+\infty$ $-\infty$ α

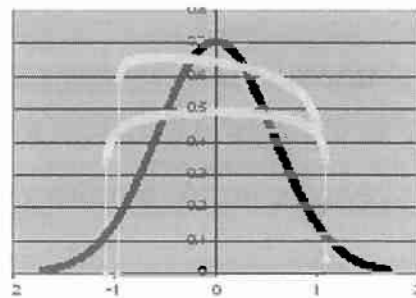
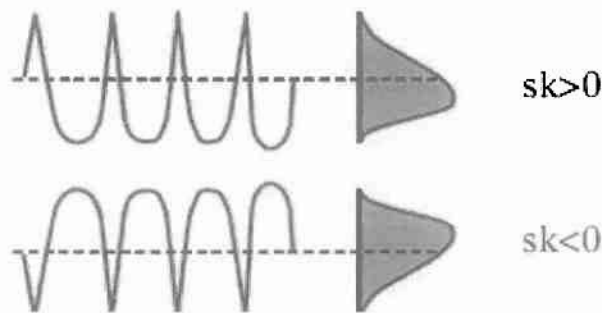
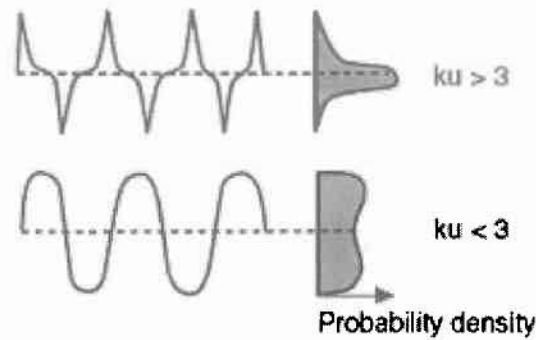
Όπου γ_1 είναι η παράμετρος «skewness» (ένδειξη συμμετρίας-ασυμμετρίας) σύμφωνα με το κριτήριο του Fisher. Κατά κανόνα η παράμετρος **k** είναι αρνητική και το γεγονός αυτό αποδεικνύεται και στην παρούσα εργασία.

Η παράμετρος **k** δίνεται από την σχέση:

$$k = \frac{\beta_1 (\beta_2 + 3)^2}{4(4\beta_2 - 3\beta_1)(2\beta_2 - 3\beta_1 - 6)}$$

1. Συντελεστές του Pearson και του Fischer- Αρχή της μεθόδου

$\beta_1 = \gamma_1^2$ και $\beta_2 = \gamma_2 + 3$, γ_2 είναι η κύρτωση («kurtosis») σύμφωνα με το κριτήριο του **Fisher**.



Χαρακτηριστικές κατανομές (κίτρινο χρώμα) με $\gamma_2 < 0$ σε σύγκριση με την κανονική κατανομή

2. Οικογένειες καμπυλών

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, η καμπύλη της κατανομής πιθανότητας στην περίπτωση $\gamma_1 > 0$ δίνεται από τη σχέση:

$$f = f_0(x - a_1)^{q_1-1}(a_2 - x)^{q_2-1}$$

Όπου a_1, a_2 τα δύο όρια και q_1, q_2 εκθέτες ως ακολούθως:

$$q_1 = \frac{r}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \right), \quad q_2 = r - q_1 \quad \text{and} \quad r = \frac{6(\beta_2 - \beta_1 - 1)}{3\beta_1 - 2\beta_2 + 6}$$

Τα δύο όρια (κάτω και άνω) δίνονται στη συνέχεια:

$$a_1 = \bar{x} - \frac{wq_1}{q_2}, \quad a_2 = w - a_1 \quad \text{and} \quad w = 2\sqrt{s^2(1-k)(1+r)}$$

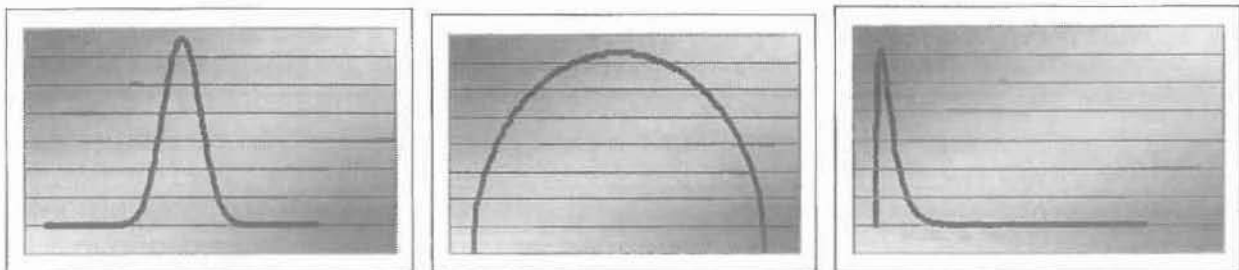
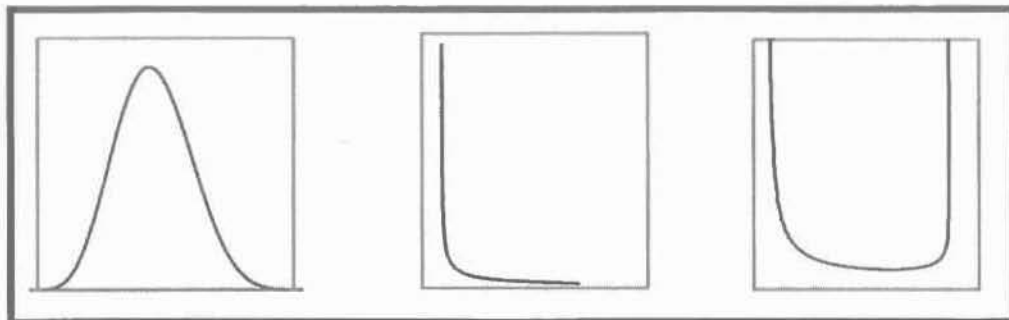
Και f_0 δίνεται από τη σχέση

$$f_0 = \frac{1}{\int_{a_1}^{a_2} (x - a_1)^{(q_1-1)}(a_2 - x)^{(q_2-1)} dx}$$

Σε περίπτωση που $\gamma_1 < 0$ τότε $x = -x$ and $\bar{x} = -\bar{x}$

$$f = f_0(x - a_1)^{q_2-1}(a_2 - x)^{q_1-1}$$

Συνεπώς οι μορφές των αντιστοίχων καμπυλών θα είναι τύπου καμπάνας («Π» ή «Λ»), L/J ή U.



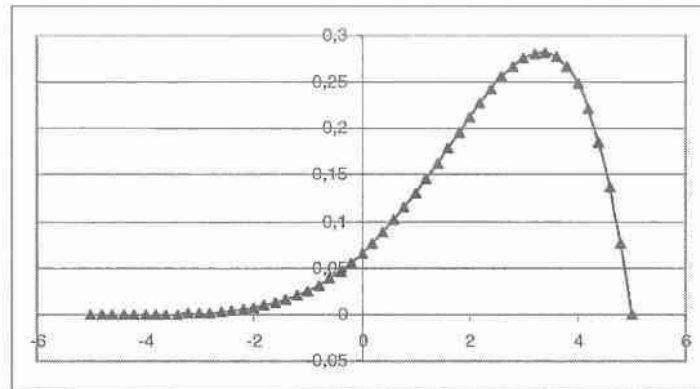
Στις περιπτώσεις που το k είναι μεγαλύτερο του 0 οι καμπύλες που προκύπτουν όπως προαναφέρθηκε είναι είτε μη φραγμένες ($0 < k < 1$) είτε φραγμένες από τη μια πλευρά ($k > 1$) όπως θα παρουσιασθεί στη συνέχεια. Για την αναζήτηση των καμπυλών που αντιπροσωπευθούν τα αντίστοιχα ιστογράμματα απαιτείται ο υπολογισμός των συντελεστών k_2, k_3, k_4 .

$$K2 = (\sum (xi - xm)^2) / (n-1) = (n \sum xi^2 - (\sum xi)^2) / (n(n-1))$$

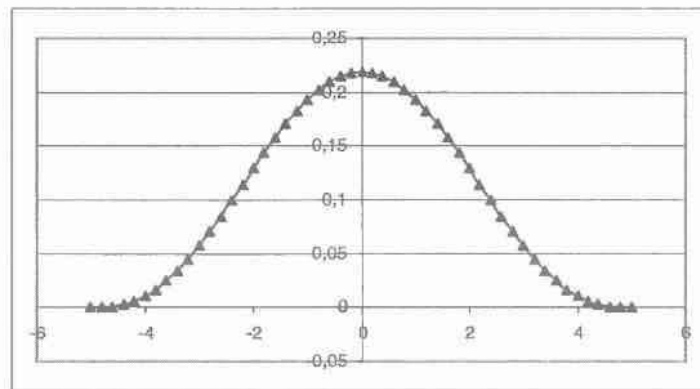
$$K3 = (n / ((n-1)(n-2))) \sum (xi - xm)^3 = (n^2 \sum xi^3 - 3n \sum xi^2 \sum xi + 2(\sum xi)^3) / (n(n-1)(n-2))$$

$$K4 = n(n+1) \sum (xi - xm)^4 - 3(n-1) [\sum (xi - xm)^2]^2 / ((n-1)(n-2)(n-3)) =$$

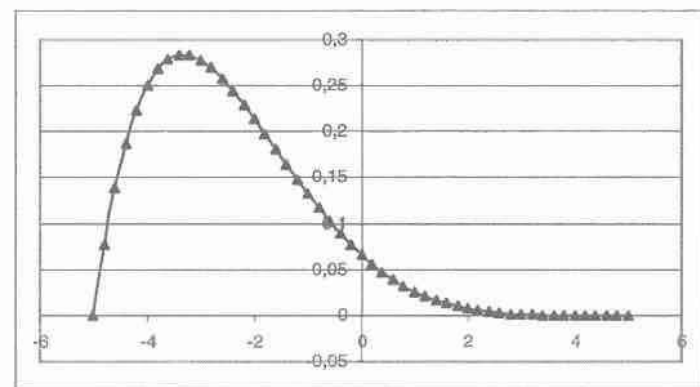
$$= (n^2(n+1) \sum xi^4 - 4n(n+1) \sum xi^3 \sum xi - 3n(n-1) (\sum xi^2)^2 + 12n \sum xi^2 (\sum xi)^2 - 6(\sum xi)^4) / ((n-1)(n-2)(n-3))$$



$\Gamma 1 < 0$



$\Gamma 1 = 0$



$\Gamma 1 > 0$

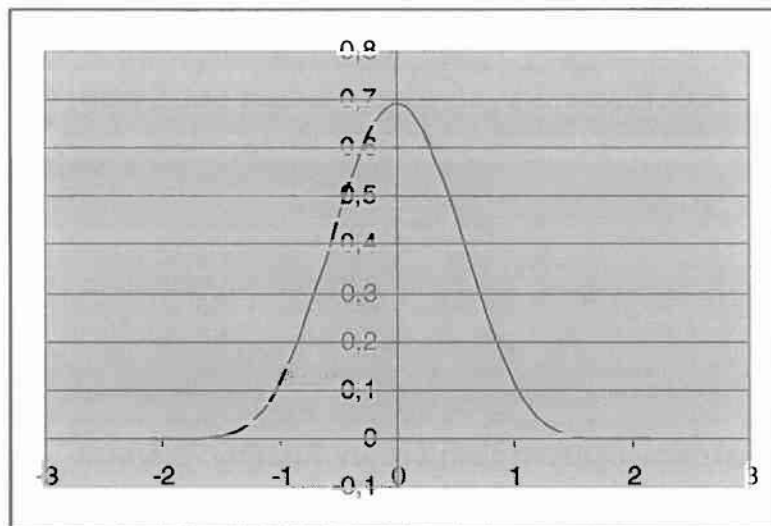
Η εκτίμηση των τιμών των συντελεστών γ_1 και γ_2 γίνεται χρησιμοποιώντας τους παρακάτω τύπους: $g_1 = k_2 / \sqrt{k_2^3}$ και $g_2 = k_4 / k_2^2$.

$\gamma_1, \gamma_2, \beta_1, \beta_2$ θεωρητικές τιμές των κατανομών
 g_1, g_2, b_1, b_2 υπολογιστικές τιμές των κατανομών

Αντίστοιχα οι συντελεστές του Pearson δίνονται από τους τύπους:
 $b_1 = g_1^2$ και $b_2 = g_2 + 3$

Σπανιότερη είναι η περίπτωση συμμετρικών καμπυλών που διακρίνονται σε 2 κατηγορίες, στην κατηγορία των φραγμένων καμπυλών στην περιοχή $m-a \dots m+a$, καθώς και την κατηγορία των μη φραγμένων καμπυλών (από $-\infty$ έως $+\infty$). Στις περιπτώσεις αυτές δίνονται: $a = \sqrt{(2b_2 \cdot s^2)/(3-b_2)}$ ($s^2 = k^2$) και η μορφή της συνάρτησης γίνεται: $f = f_0 [1 - (x - x_m)^2 / a^2]^\alpha$ όπου $\alpha = (5b_2 - 9)/(2(3 - b_2))$.

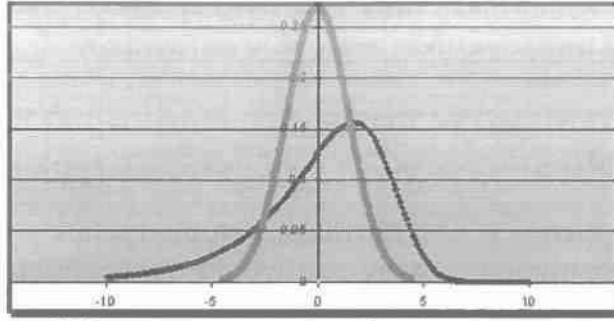
Στις περιπτώσεις που η καμπύλη είναι μη φραγμένη η συνάρτηση γίνεται $f = f_0 / [1 + (x - x_m)^2 / a^2]^\alpha$ όπου $\alpha = \sqrt{(2b_2 \cdot s^2)/(b_2 - 3)}$ και $\alpha = (5b_2 - 9)/(2(b_2 - 3))$.



Συμμετρική καμπύλη φραγμένη άνω και κάτω.

Σε περιπτώσεις ασύμμετρων μη φραγμένων καμπυλών (βλ. ακόλουθο σχήμα) η συνάρτηση γίνεται $f = f_0 (\cos \theta)^2 q e^{p \theta}$ όπου $\tan \theta = (X - c)/a$ με $r = 6(b_2 - b_1 - 1)/(2b_2 - 3b_1 - 6)$

$q = 1 + r/2$, $p = r\sqrt{k}/(1 - k)$, $a = \sqrt{s^2(r - 1)(1 - k)}$, $c = x_m - pa/r$. Οι καμπύλες αυτής της μορφής με $\gamma_1 < 0$ εντοπίζονται συνήθως για αρχική κατάσταση φθοράς. Είναι αδύνατον να συναντηθούν σε φθαρμένες επιφάνειες.



Διάγραμμα: Κατανομή F-P για αρχική κατάσταση τραχύτητας, χωρίς φθορά, καμπύλη τύπου «Λ» χωρίς άνω και κάτω όρια, $0 < \kappa < 1$.

Σε περιπτώσεις καμπυλών με ένα φράγμα η συνάρτηση γίνεται $f=f_0(x-a)^{\gamma_1-1}/(x-a+c)^{\gamma_2+1}$. Οι καμπύλες αυτής της μορφής με $\gamma_1 < 0$ και άνω φράγμα εμφανίζονται σπάνια και μόνο σε περιπτώσεις πολύ φθαρμένων επιφανειών που θα μπορούσαν ακόμη και να θεωρηθούν λείες.

2.2 Εφαρμογή υπολογισμού παραμέτρων Fisher- Pearson

Συνθήκες κοπής: $v=160\text{m/min}$, $s=0.08\text{mm/rev}$ (συνθήκες κοπής)

Στοιχεία μετρήσεων: $\text{mean}=0$ $\text{std.dev}=0.511$ $\text{skewness}=-0.0093$

$\text{kurtosis}=2.69$ $b_1=\text{skewness}^2=8.65 \times 10^{-5}$ $b_2=\text{kurtosis}=2.69$

$$k = \frac{b_1(b_2 + 3)^2}{4(4b_2 - 3b_1)(2b_2 - 3b_1 - 6)} = -0.0001 \quad r = \frac{6(b_2 - b_1 - 1)}{3b_1 - 2b_2 + 6} = 16.347$$

$$q_1 = \sqrt{\frac{\frac{r}{2}(1 - (-k))}{1 - k}} = 8.089$$

$$q_2 = r - q_1 = 8.257$$

$$w = 2\sqrt{(\text{std.dev})^2(1 - k)(1 + r)} = 4.257$$

$$a_1 = \text{mean} - \frac{wq_1}{r} = -2.106 \quad a_2 = w + a_1 = 2.15$$

$$\int_{a_1}^{a_2} \frac{1}{f_0} (x - a_1)^{(q_1-1)} (a_2 - x)^{(q_2-1)} dx = 1 \Leftrightarrow f_0 = 6.799 \times 10^4$$



Χαρακτηριστικό προφίλ του προαναφερθέντος παραδείγματος.

Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιηθήκαν για την μορφοποίηση των συνθετικών τραχυτήτων έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$1. F1 = 2 * \text{RAND}() - 1$$

$$2. F2 = (2 * \text{RAND}() - 1) * \text{RAND}()$$

$$3. F3 = \text{SIN}((2 * \text{RAND}() - 1) * \text{RAND}())$$

$$4. F4 = \text{SIN}(B1/10) + 2 * \text{SIN}(2 * B1/10) + 1 * \text{SIN}(3 * B1/10)$$

$$5. F5 = \text{RAND}() * \text{SIN}(\text{RAND}()) * 2$$

$$6. F6 = (\text{SIN}(A1 * 2/3.14158))^3 * \text{SIN}(10 * A1)^2)^3$$

Οι συνθετικές τραχύτητες που έχουν επιλεγεί βασίζονται σε σημαντικό ποσοστό στην συνάρτηση rand() του προγράμματος excel της εταιρείας Microsoft. Η δημιουργία των τυχαίων αριθμών πραγματοποιείται αρχικά για ένα πεδίο ορισμού μεταξύ 0 και 1 και στη συνέχεια με χρήση διορθωτικών

συντελεστών που ακολουθούν συγκεκριμένες επιλεγμένες συναρτήσεις μεταβολής τους, οδηγούν στην παραγωγή τεχνητών τραχύ-γραφημάτων.

Θεωρώντας ότι το βήμα δειγματοληψίας είναι είτε 2,5 μm είτε 5 μm η επεξεργασία κάθε τεχνητής κατατομής γίνεται μέσα από φύλλα εργασίας excel σε πρώτη προσέγγιση ενώ παράλληλα αναπτύσσεται κώδικας σε γλώσσα fortran.

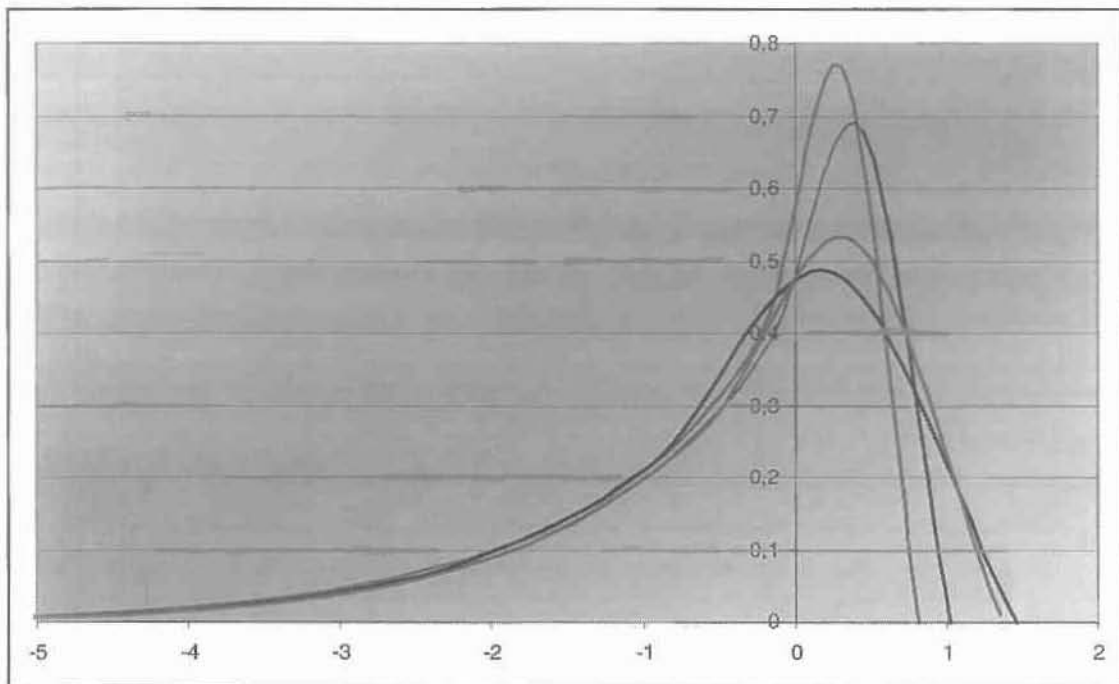
Τυπικά παραδείγματα τεχνητών τραχυμετρησεων εμφανίζονται στη συνέχεια με χαρακτηριστικά που σχετίζονται με κατεργασία honing και αναφέρονται σε εφαρμογή του προγράμματος PPR(points-pics-radii) σε τραχύτητα επιφάνειας κυλίνδρου MEK.

Η προσομοίωση της φθοράς επιτυγχάνεται με αποκοπή-(ψηφιακό φίλτρο) το κατωφλιο του οποίου αναγράφεται σε κάθε τραχυμετρηση σαν "φθορά A μm" που σημαίνει ότι έχουν αποκοπεί-φθαρεί όλα τα σημεία της κατατομής με υψόμετρο μεγαλύτερο η ίσο του A.

Αποτελέσματα και διαγράμματα ποικίλων μορφών ακολουθούν στο κεφάλαιο 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

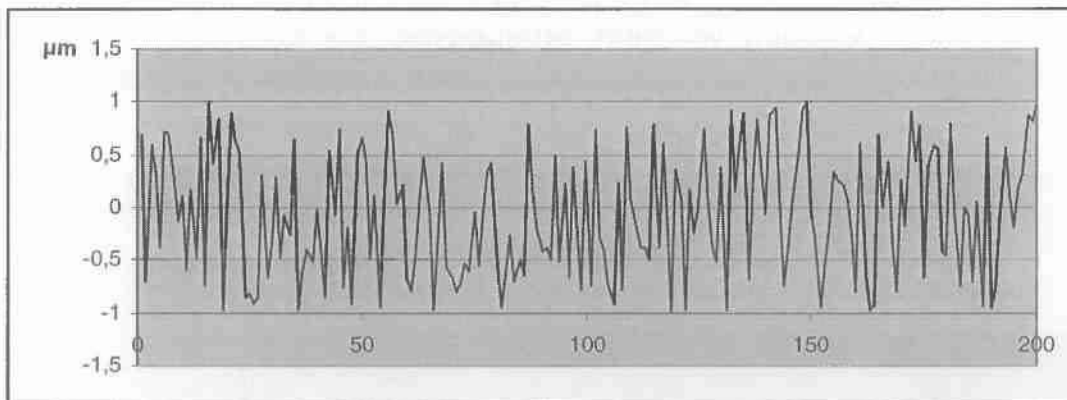
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



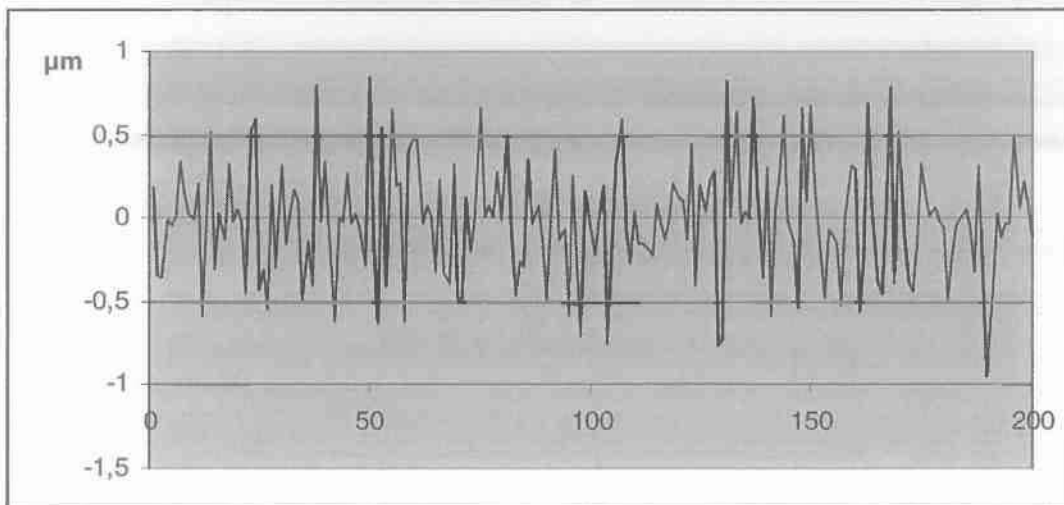
3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ FISHER-PEARSON

Για ταχεία και αξιόπιστη διαδικασία έγινε προσέγγιση των τραχυτήτων τεχνολογικών επιφανειών με τις παρακάτω συναρτήσεις και τα αντίστοιχα γραφήματα:

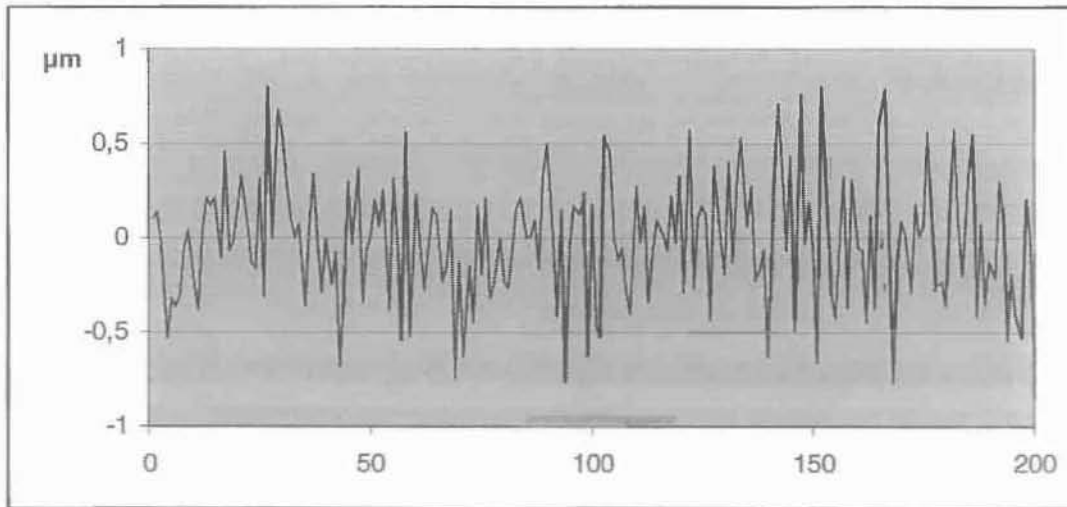
α) $Y=2 \cdot \text{RAND}() - 1$ (rand() η γεννήτρια τυχαίων αριθμών του προγράμματος XL (αριθμοί μεταξύ 0 και 1))



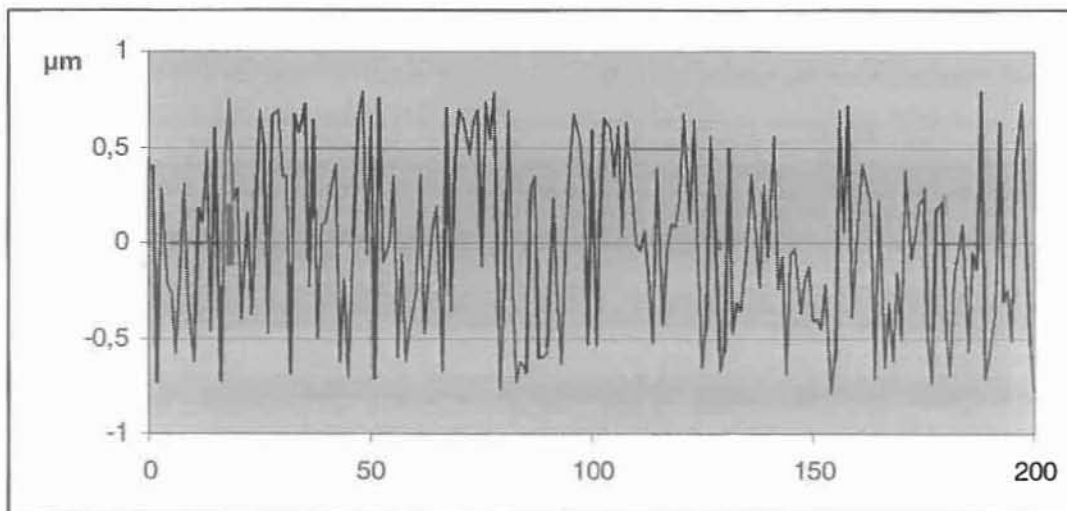
β) $Y=(2 \cdot \text{RAND}() - 1) \cdot \text{RAND}()$



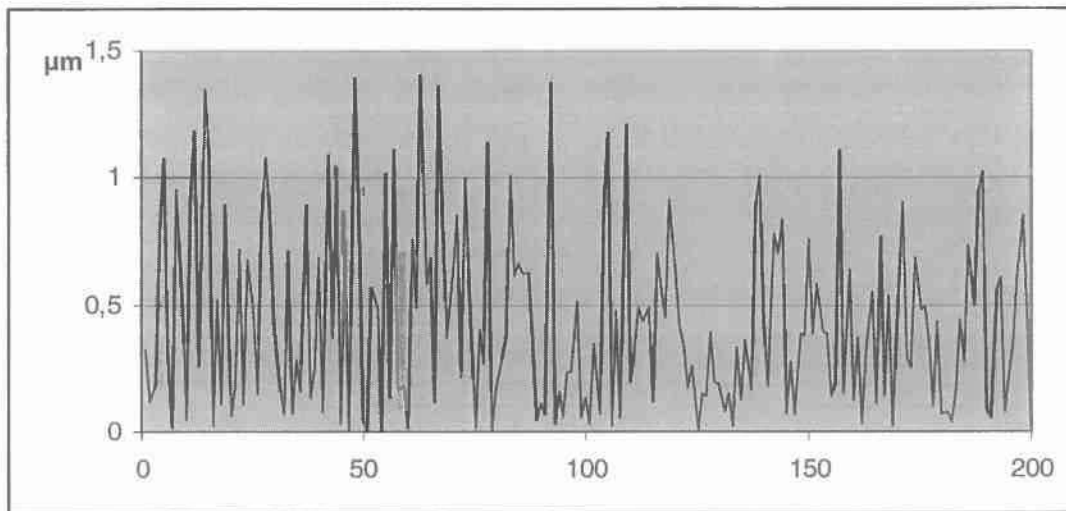
$$\gamma) Y = \text{SIN}((2 * \text{RAND}() - 1) * \text{RAND}())$$



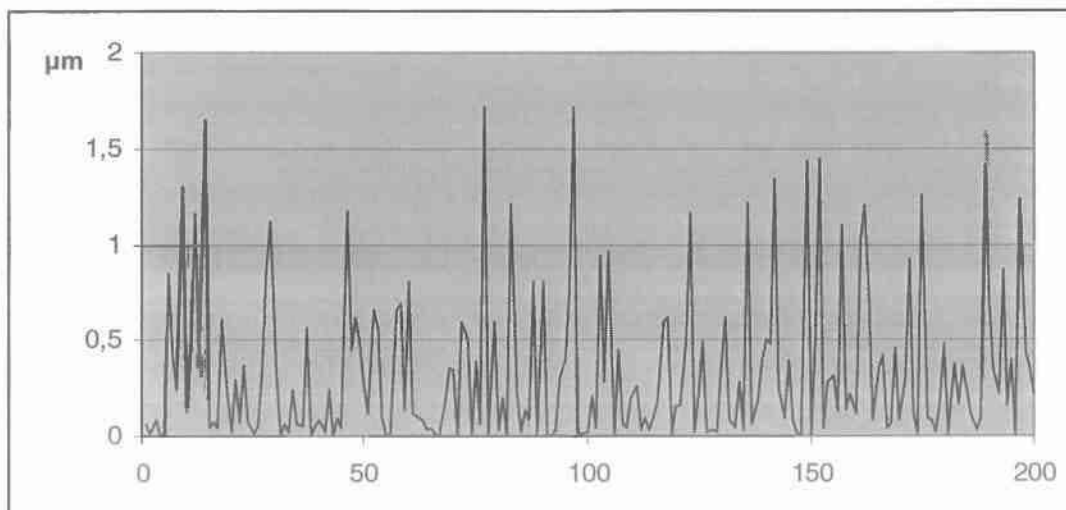
$$\delta) Y = \text{SIN}(\text{RAND}()/10) + 2 * \text{SIN}(2 * \text{RAND}()/10) + 1 * \text{SIN}(3 * \text{RAND}()/10)$$



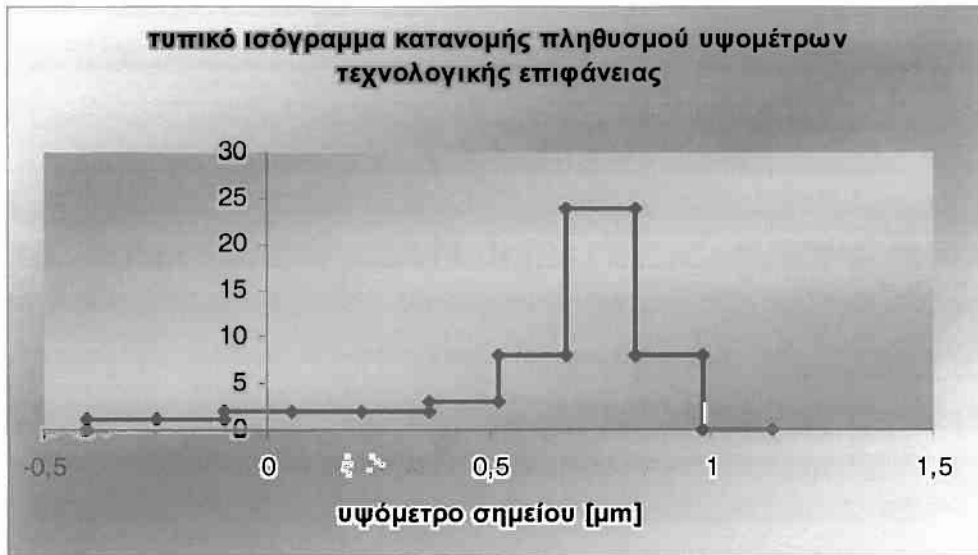
ε) $Y = \text{RAND()} * \text{SIN}(\text{RAND()} * 2)$



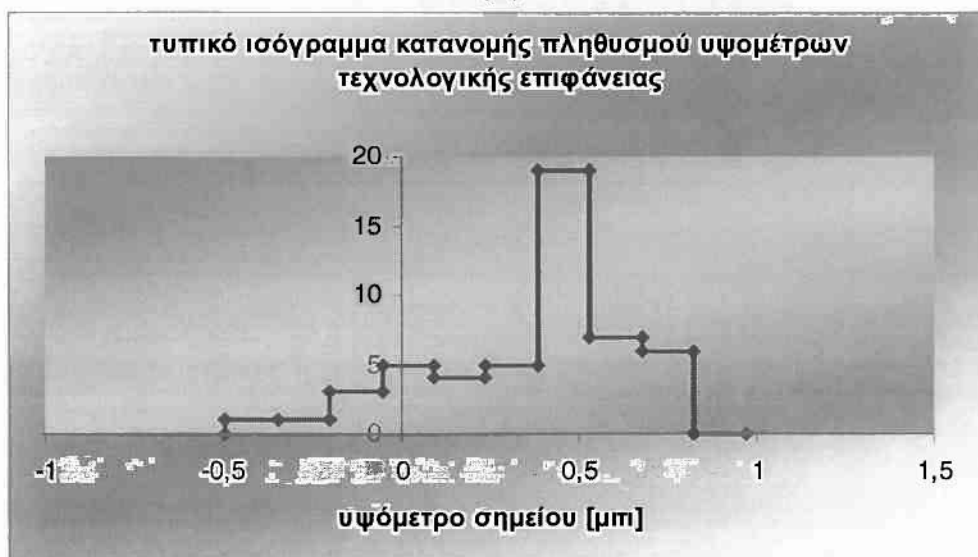
ζ) $Y = \text{RAND()} * \text{SIN}(\text{RAND()} * 3 * \text{RAND}()$



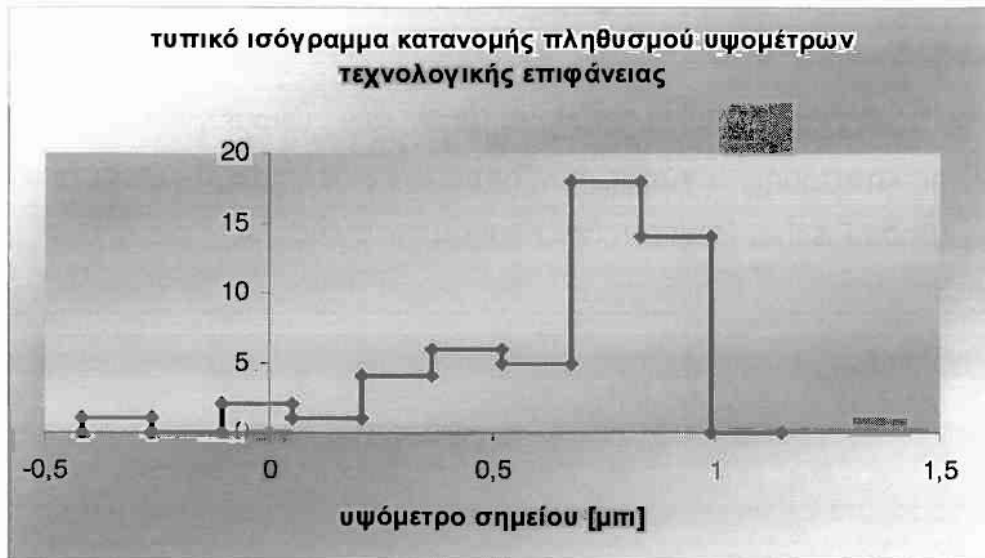
Στη συνέχεια δίνονται ιστογράμματα των υψομέτρων όλων των σημείων της κατατομής, ο τύπος των οποίων αν δεν γίνει η προσέγγιση με βάση τη μέθοδο Fischer-Pearson δεν είναι εκμεταλλεύσιμος.



(A)

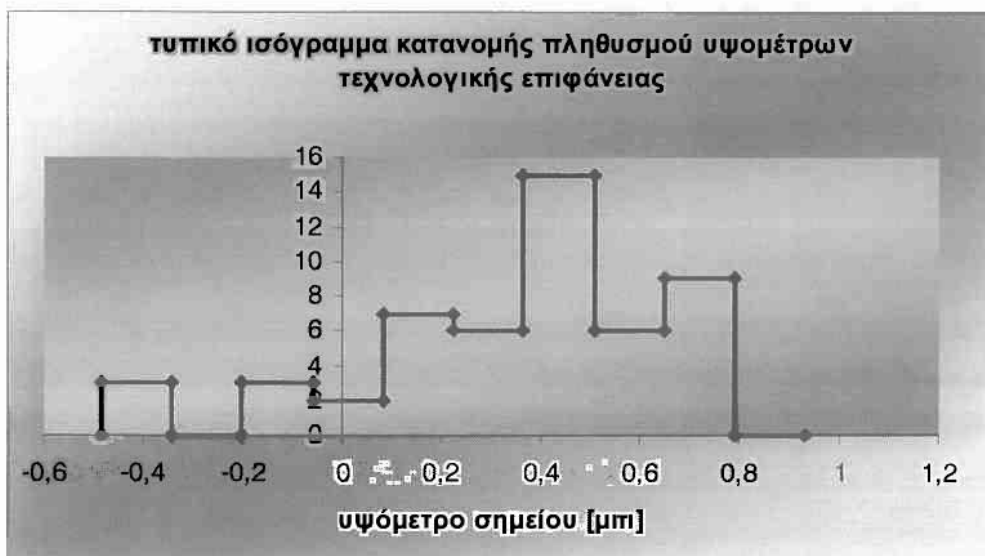


(B)

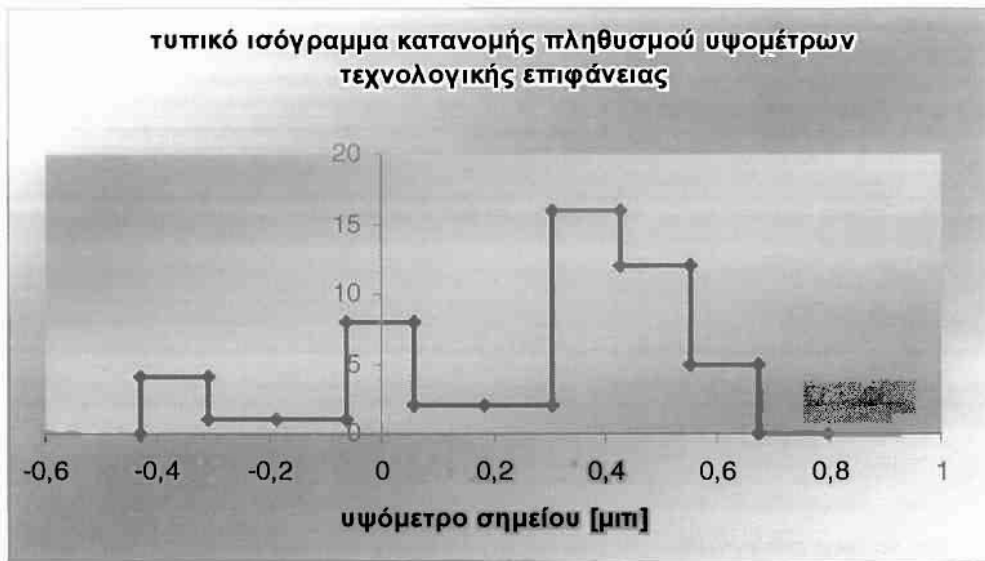


(Γ)

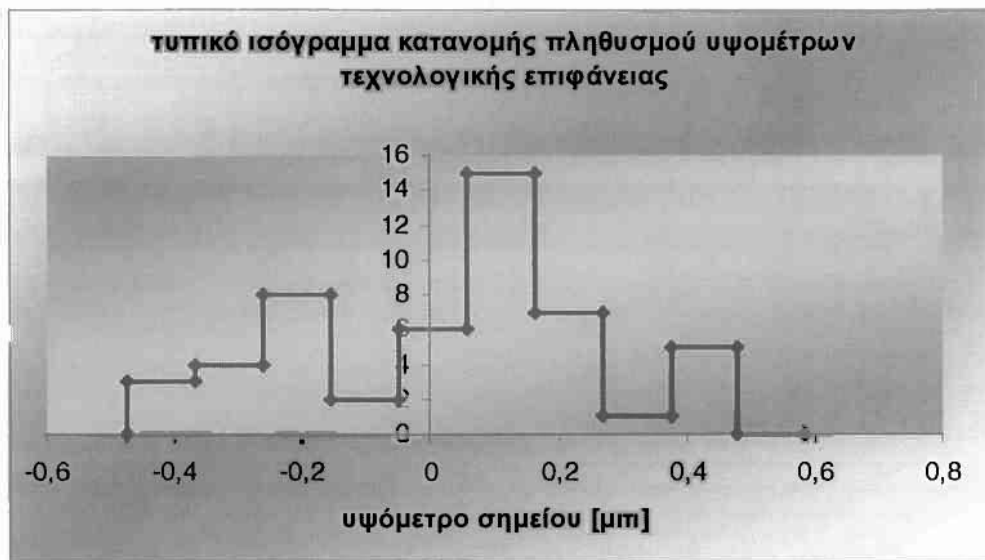
Σχήμα... Ασύμμετρες κατανομές οι συνεχείς καμπύλες των οποίων συνήθως εμφανίζουν άνω και κάτω όριο



(A)



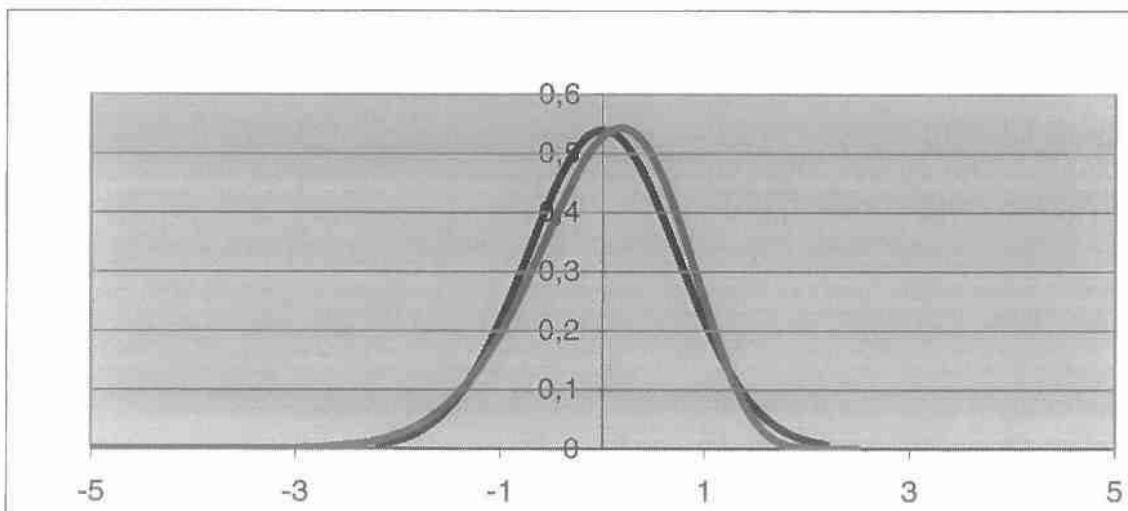
(B)



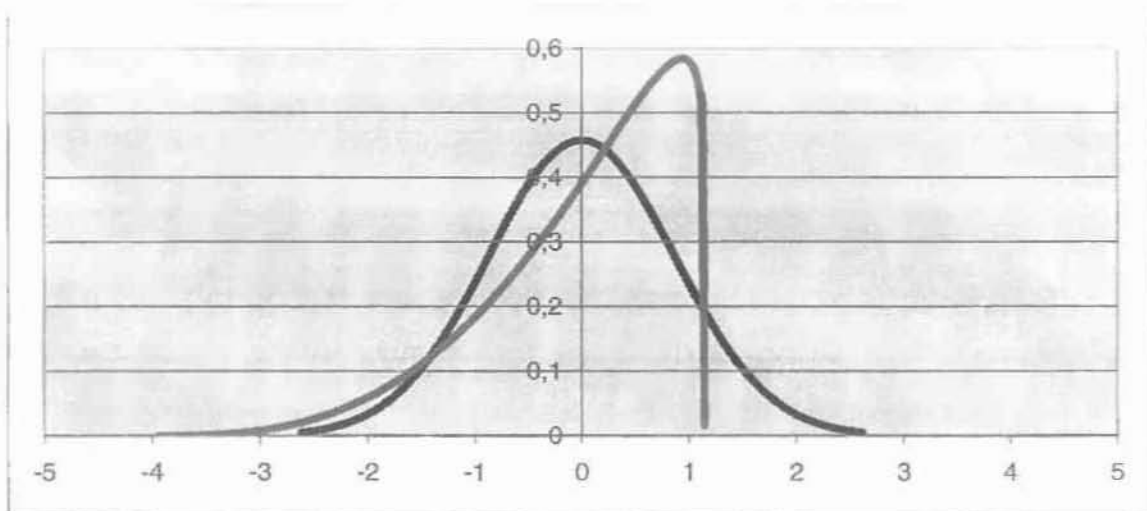
(Γ)

Σχήμα3.1 Ασύμμετρες κατανομές διαφόρων τύπων οι συνεχείς καμπύλες των οποίων συνήθως δεν είναι προβλέψιμες (μπορεί να είναι φραγμένες η μη φραγμένες, συμμετρικές η μη)

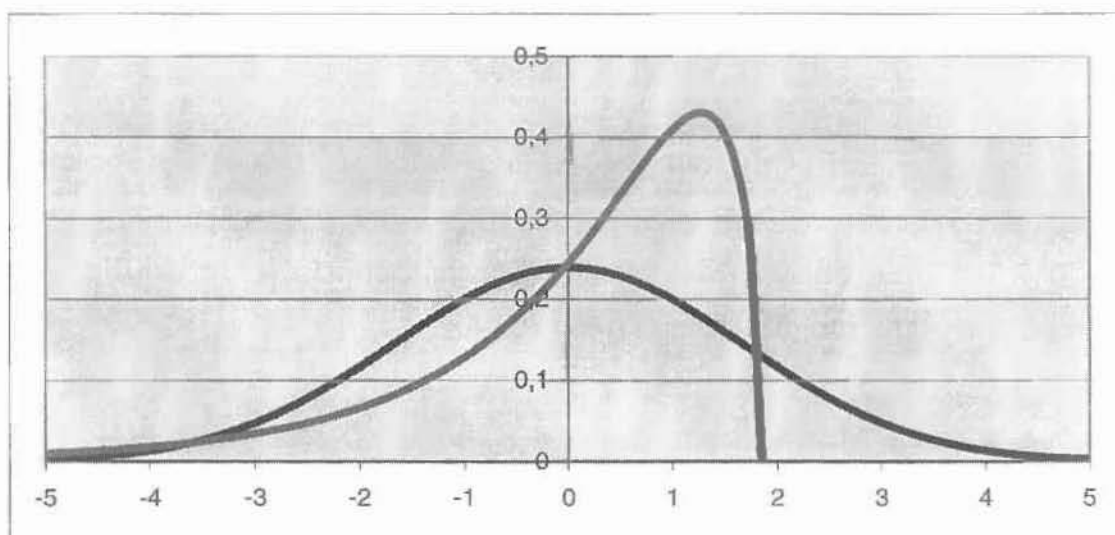
Στατιστική μελέτη κατά Fischer-Pearson πληθυσμού σημείων(2000 σημεία)



Σχήμα 3.2: Μορφή κατανομών για αρχική κατάσταση τραχύτητας, παρατηρείται η σύγκλιση των δύο μοντέλων Gauss και Fisher-Pearson.



(A)



$$f(x) = f_0 (x+27.6399)^{(26.82289-1)} (1.546329-x)^{(1.500621-1)}$$

(B)

Σχήμα 3.3. : Συνήθεις μορφές κατανομών ελαφρώς φθαρμένων επιφανειών ή προερχομένων από αντίστοιχη κατεργασία πχ. λείανση

Οι συνθετικές τραχύτητες που έχουν επιλεγεί βασίζονται σε σημαντικό ποσοστό στην συνάρτηση rand() του προγράμματος excel της εταιρείας Microsoft. Η δημιουργία των τυχαίων αριθμών πραγματοποιείται αρχικά για ένα πεδίο ορισμού μεταξύ 0 και 1 και στη συνέχεια με χρήση διορθωτικών συντελεστών που ακολουθούν συγκεκριμένες επιλεγμένες συναρτήσεις μεταβολής τους, οδηγούν στην παραγωγή τεχνητών τραχύ-γραφημάτων.

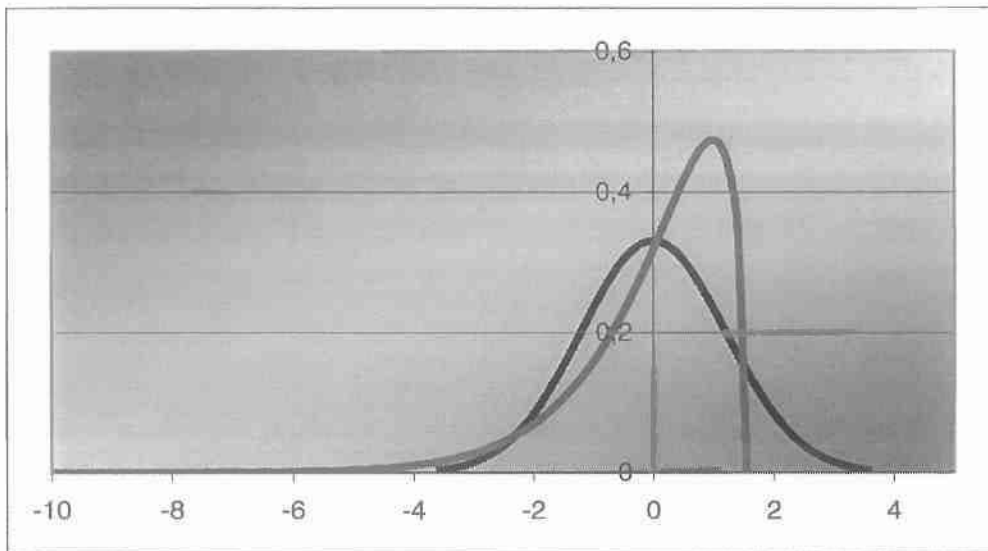
Θεωρώντας ότι το βήμα δειγματοληψίας είναι είτε 2,5 μm είτε 5 μm η επεξεργασία κάθε τεχνητής κατατομής γίνεται μέσα από φύλλα εργασίας excel σε πρώτη προσέγγιση ενώ παράλληλα αναπτύσσεται κώδικας σε γλώσσα fortran.

Τυπικά παραδείγματα τεχνητών τραχυμετρήσεων εμφανίζονται στη συνέχεια με χαρακτηριστικά που σχετίζονται με κατεργασία honing και αναφέρονται σε εφαρμογή του προγράμματος PPR(points-pics-radii) σε τραχύτητα επιφάνειας κυλίνδρου MEK.

Η προσομοίωση της φθοράς επιτυγχάνεται με αποκοπή-(ψηφιακό φίλτρο) το κατώφλιο του οποίου αναγράφεται σε κάθε τραχυμέτρηση σαν "φθορά A μm " που σημαίνει ότι έχουν αποκοπεί-φθαρεί όλα τα σημεία της κατατομής με υψόμετρο μεγαλύτερο ή ίσο του A.



(A)



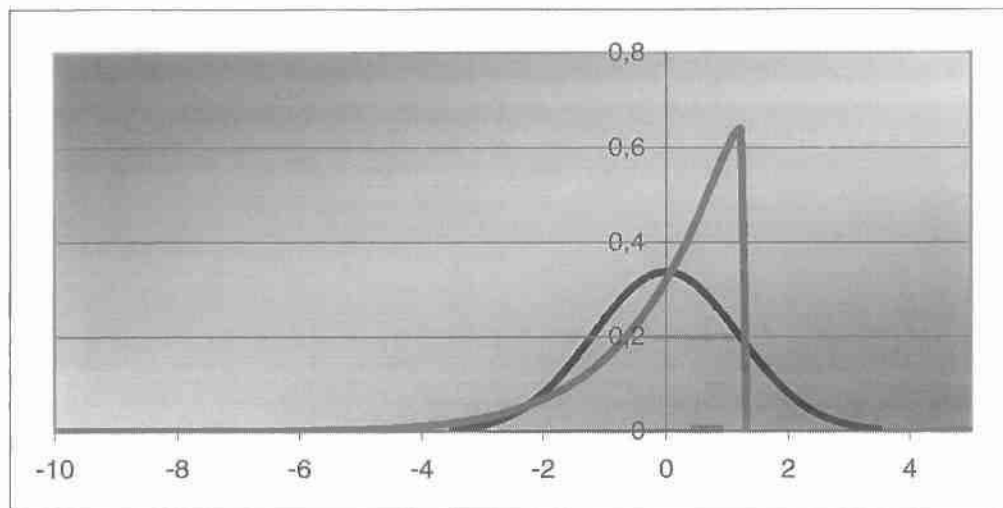
(B)

$$f(x) = f_0 (x + 16.5099)^{(13.48855-1)} (1.315741 - x)^{(1.074958-1)}$$

Σχήμα 3.4.(α): συνθετική κατατομή αρχικής κατάστασης, μηδενικής φθοράς, άνω όριο (κατωφλίο) 2 μm και (β) η κατανομή Fischer Pearson σε σύγκριση με την κανονική κατανομή (Gauss) των υψομέτρων των σημείων της. Παρατηρείται έντονη ασυμμετρία ακόμη και στην κατάσταση μη φθοράς.



(A)



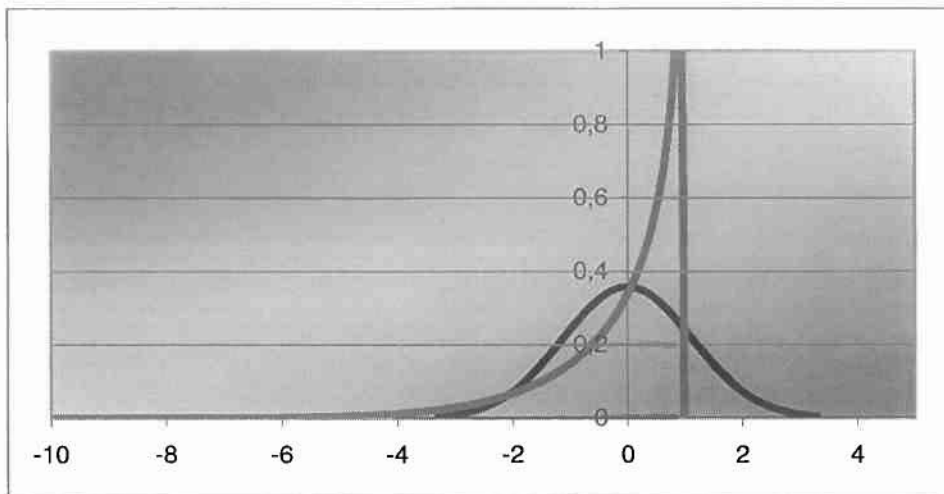
(B)

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

Σχήμα 3.5.(α): συνθετική κατατομή πρώτου σταδίου φθοράς, άνω όριο (κατωφλίο) 1,2 μm και (β) η κατανομή Fischer Pearson σε σύγκριση με την κανονική κατανομή (Gauss) των υψομέτρων των σημείων της. Παρατηρείται μετάβαση από τον τύπο Λ στον τύπο J.



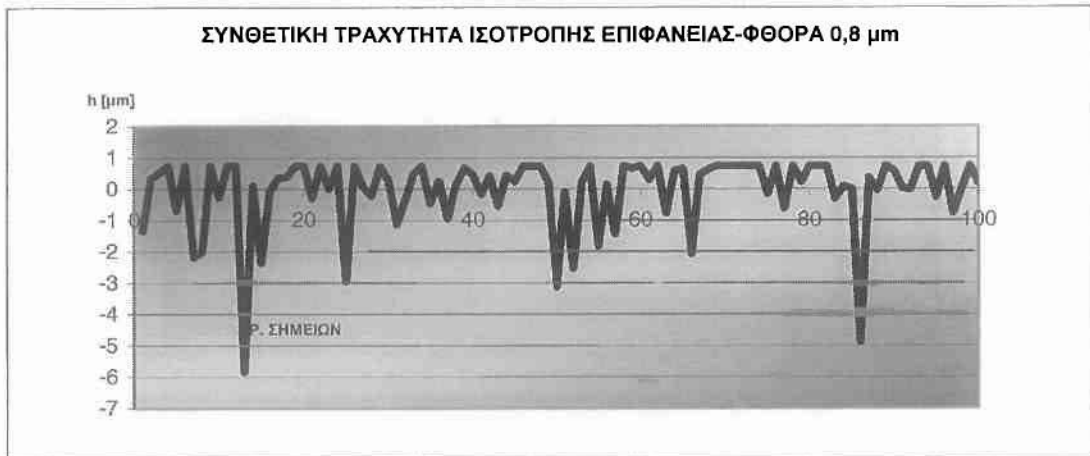
(A)



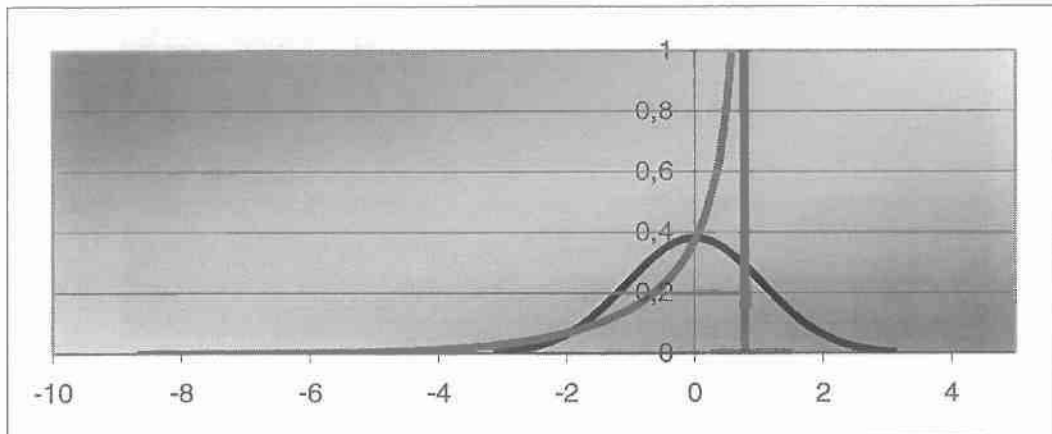
$$f(x) = f_0 (x + 8.62726)^{(4.715624-1)} (0.783402-x)^{(0.428204-1)}$$

(B)

Σχήμα 3.6.(α): συνθετική κατατομή δευτέρου σταδίου φθοράς, άνω όριο (κατωφλίο) 1 μm και (β) η κατανομή Fischer Pearson σε συγκριση με την κανονική κατανομή (Gauss) των υψομέτρων των σημείων της. Παρατηρείται μετάβαση από τον τύπο Λ στον τύπο J.



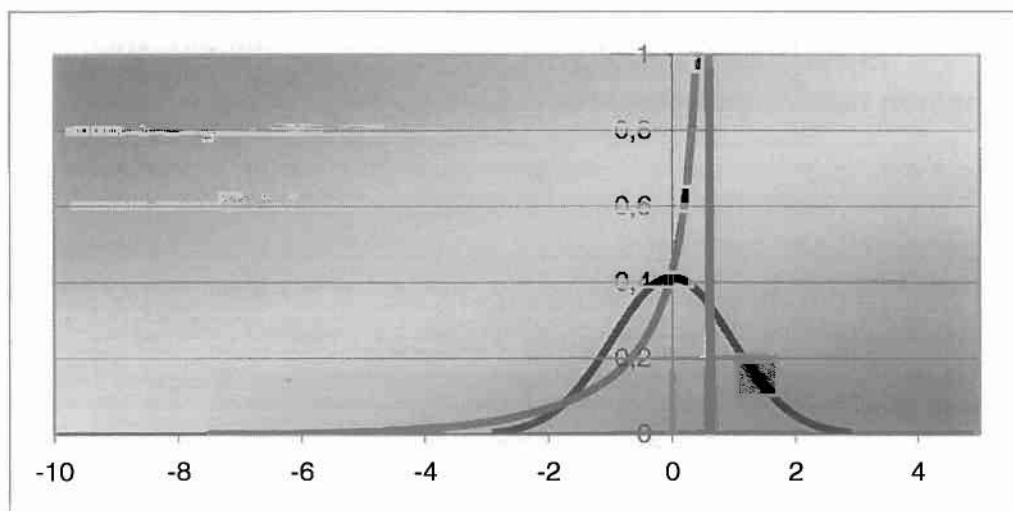
(A)



(B)

$$f(x) = f_0 (x + 7.50267)^{(3.612580-1)} 0,614428 - x)^{(0.295851-1)}$$

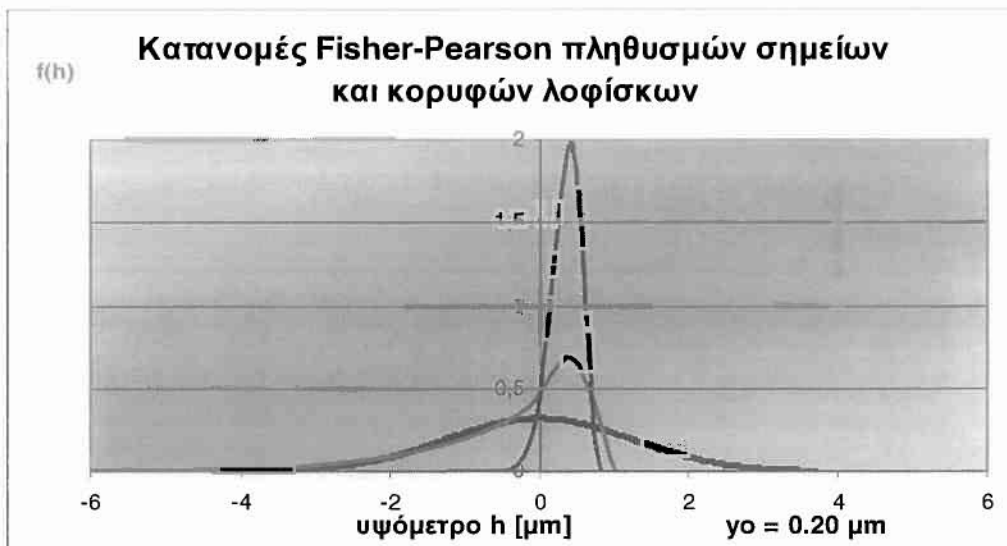
Σχήμα 3.7. (α): συνθετική κατατομή τρίτου σταδίου φθοράς, άνω όριο (κατωφλίο) **0,8 μm** και (β) η κατανομή Fischer Pearson σε σύγκριση με την κανονική κατανομή (Gauss) των υψομέτρων των σημείων της. Παρατηρείται μετάβαση από τον τύπο Λ στον τύπο J.



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

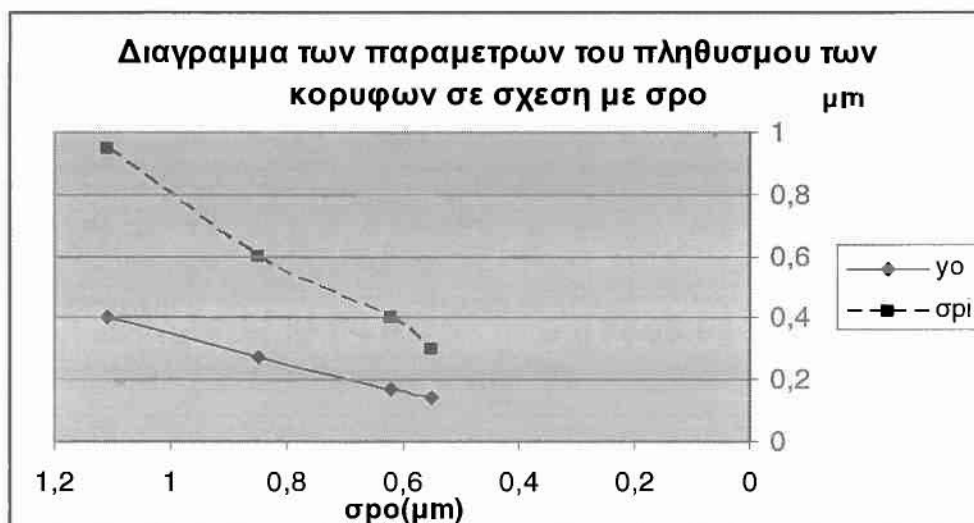
(B)

Σχήμα 3.8.(α): συνθετική κατατομή τετάρτου σταδίου φθοράς, άνω όριο (κατωφλίο) **0,4 μm** και (β) η κατανομή Fischer Pearson σε σύγκριση με την κανονική κατανομή (Gauss) των υψομέτρων των σημείων της. Παρατηρείται μετάβαση από τον τύπο Λ στον τύπο J.

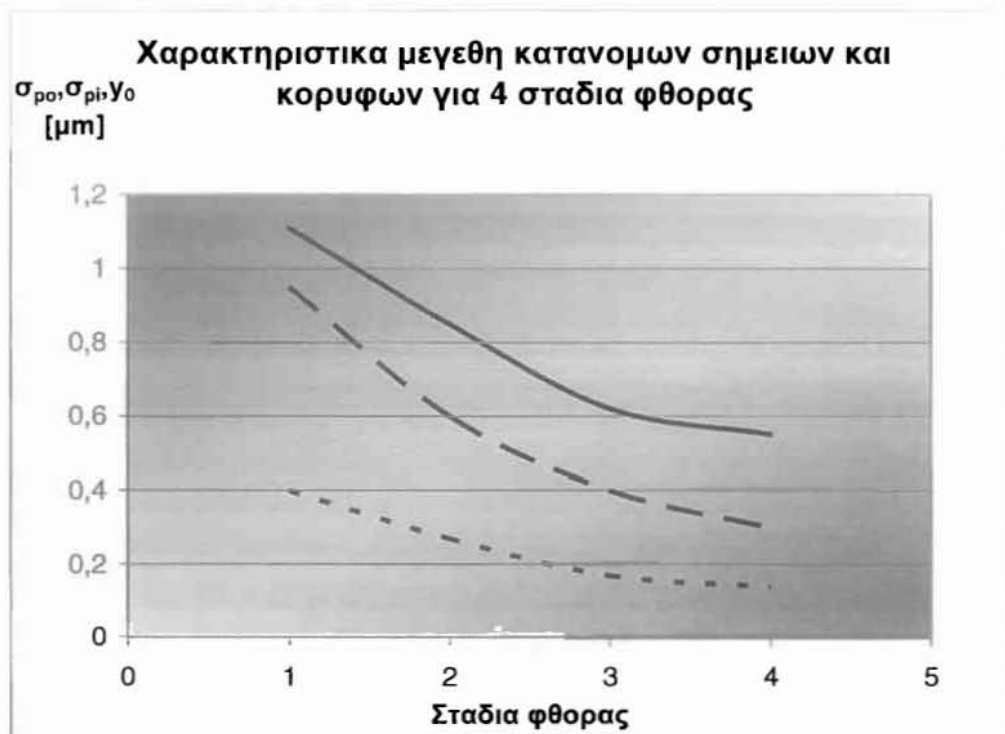


$$f(x) = f_0 (x + 1.42)^{(13.26-1)} (0.62-x)^{(3.93-1)}$$

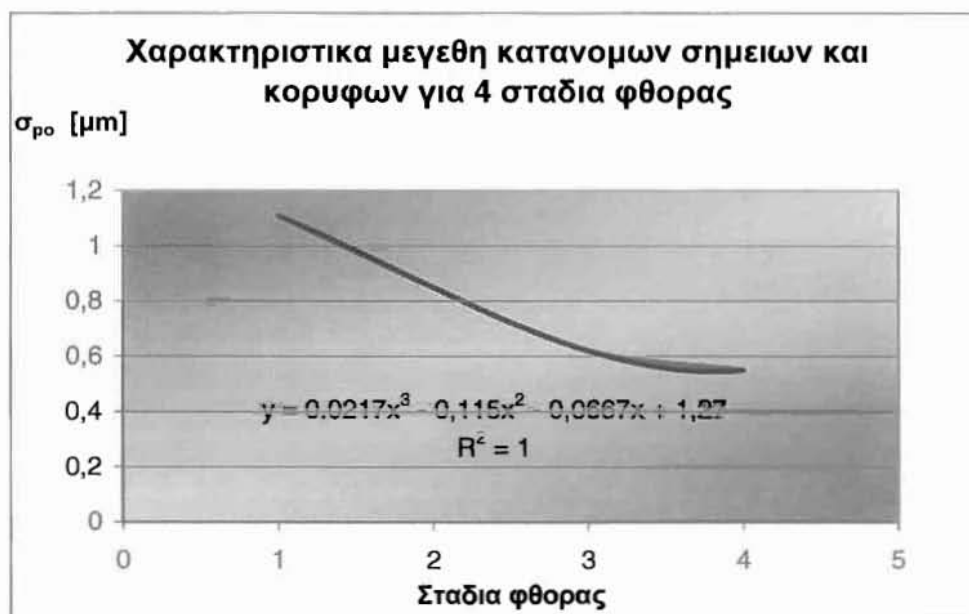
Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα κατανομών Fisher –Pearson σε σύγκριση με κατανομή Gauss για μέσο στάδιο φθοράς. Παρατηρείται το σημαντικά μικρότερο εύρος της συνάρτησης κατανομής των κορυφών των λοφίσκων, η ταύτιση του άνω ορίου των δύο συναρτήσεων Fisher –Pearson, καθώς και η διαφοροποίηση των μέσων όρων τους ($y_0 = 0.20 \mu\text{m}$).



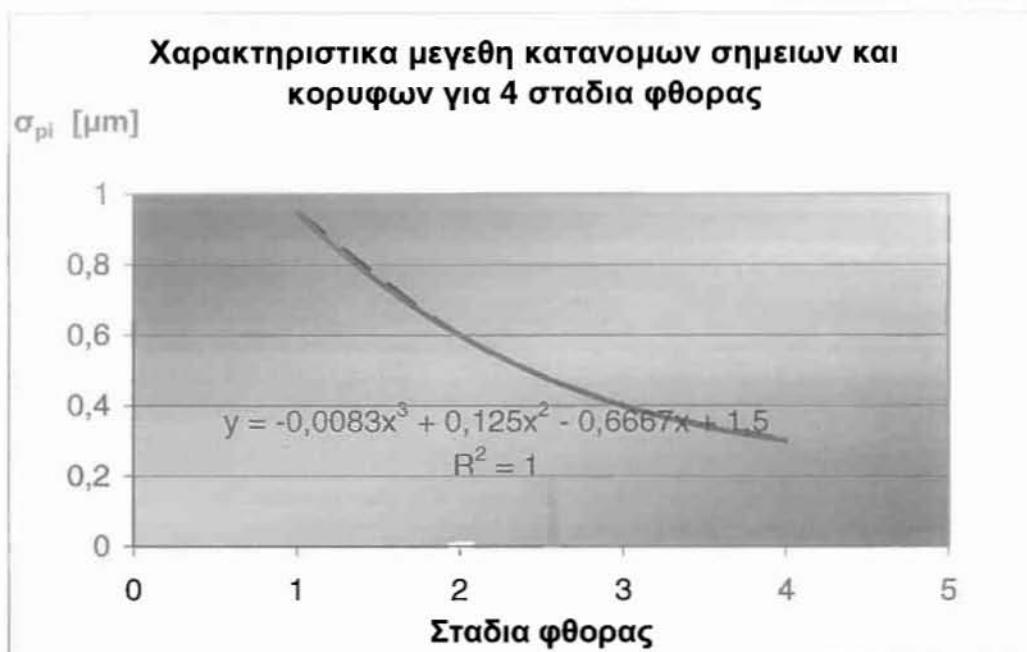
Σχήμα3.9: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων y_0 και $\sigma_{\pi i}$ και y_0 σε σχέση με σ_{p0} για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Μέτρηση σε κύλινδρο MEK



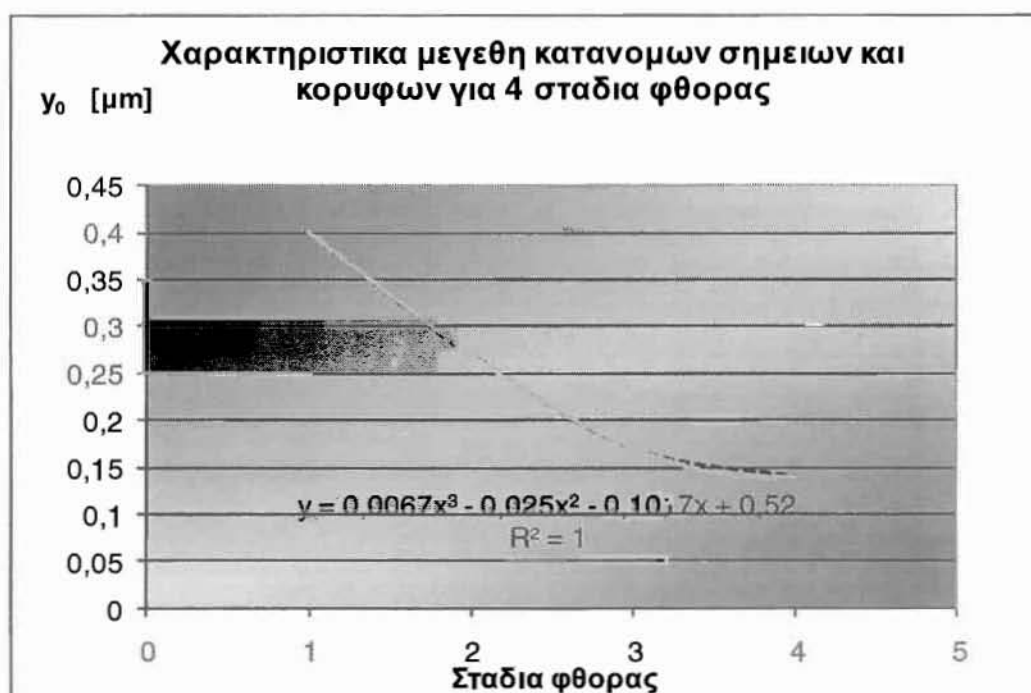
Σχήμα3.10: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων σ_{po} , σ_{pi} και γ_0 για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Μέτρηση σε κύλινδρο ΜΕΚ.



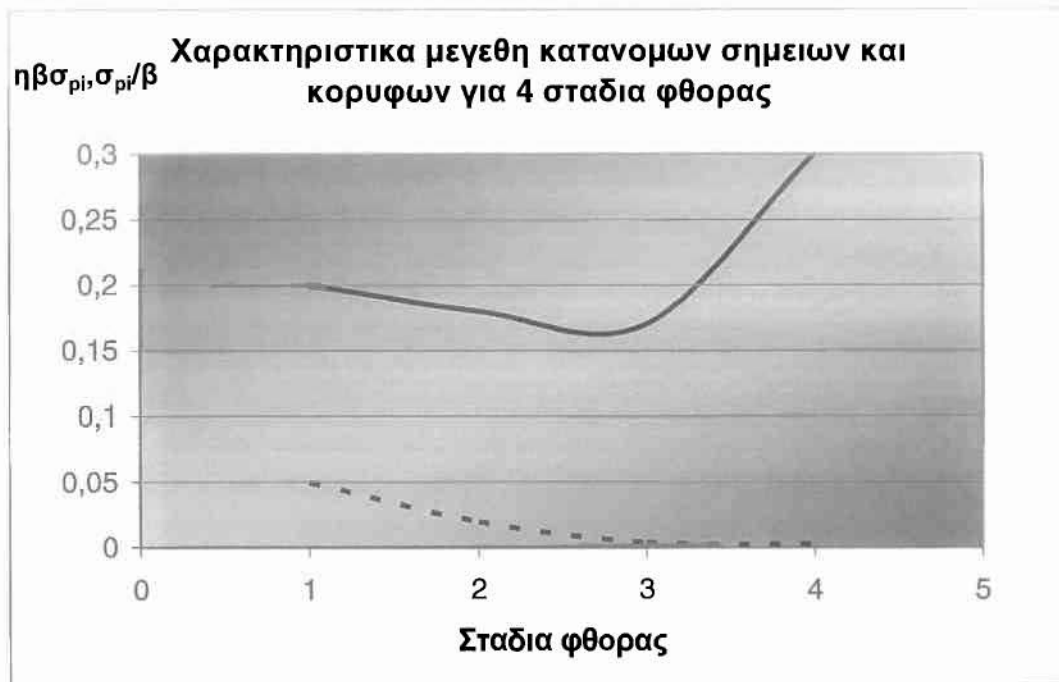
Σχήμα3.11: διάγραμμα μεταβολής της παραμέτρου σ_{po} και η αντίστοιχη γραμμή τάσης για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Μέτρηση σε κύλινδρο ΜΕΚ.



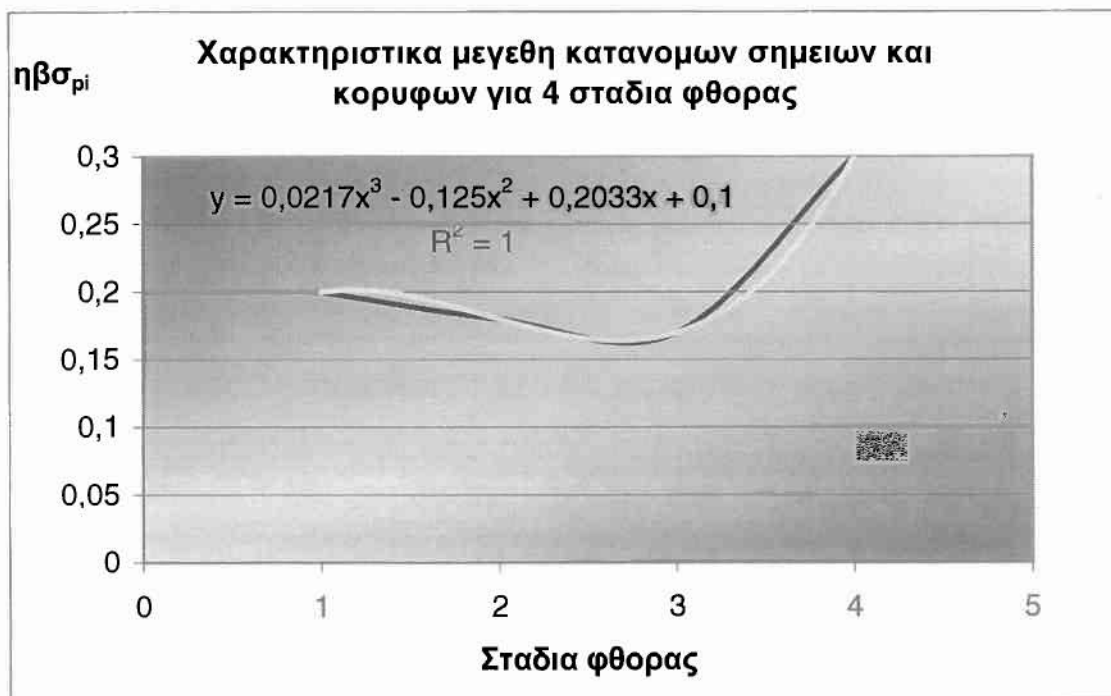
Σχήμα3.12: διάγραμμα μεταβολής τη παραμέτρου σ_{ρ_i} και η αντίστοιχη γραμμή τάσης για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Μέτρηση σε κύλινδρο ΜΕΚ .



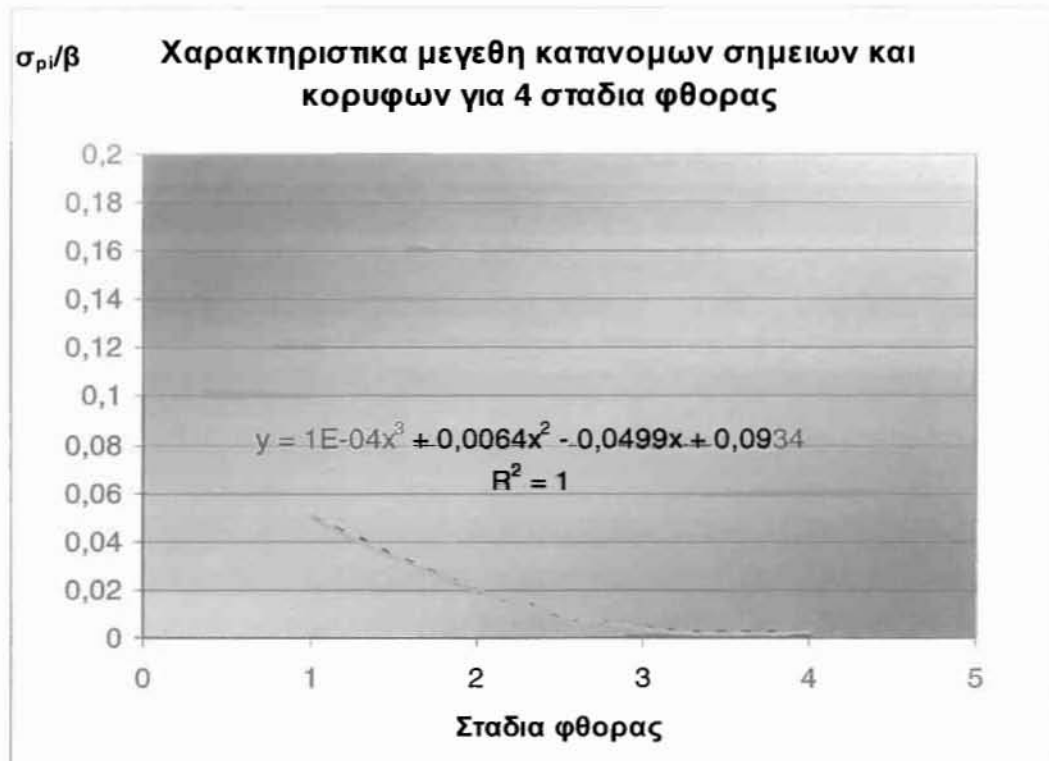
Σχήμα3.13: διάγραμμα μεταβολής της παραμέτρου y_0 και η αντίστοιχη γραμμή τάσης για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Μέτρηση σε κύλινδρο ΜΕΚ .



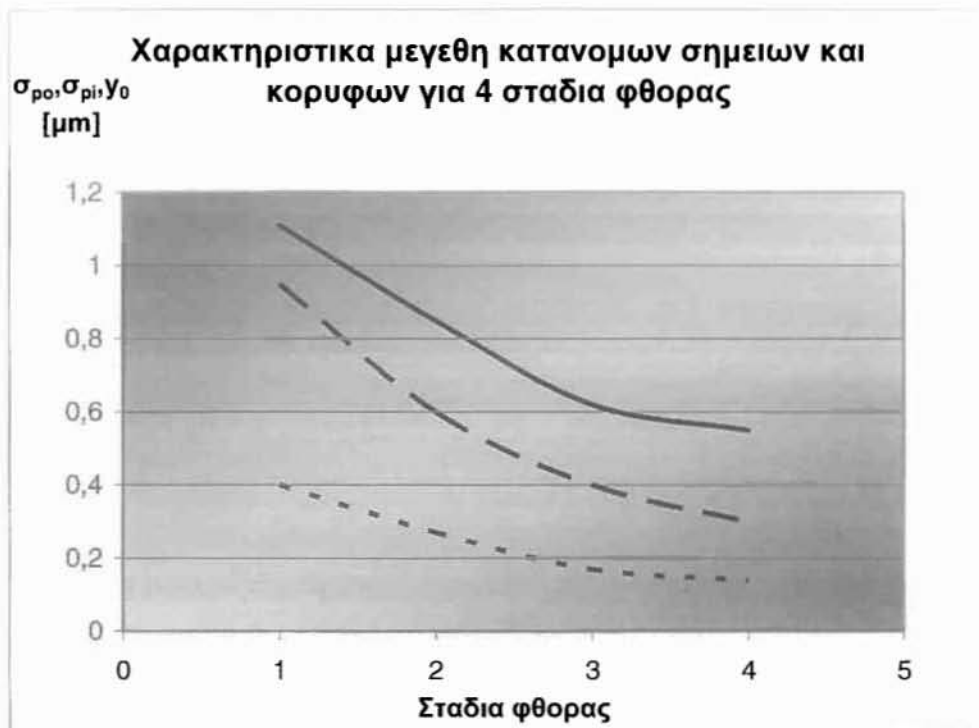
Σχήμα3.14: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων $\eta\beta\sigma_{\rho_i}, \sigma_{\rho_i}/\beta$ για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Μέτρηση σε κύλινδρο MEK.



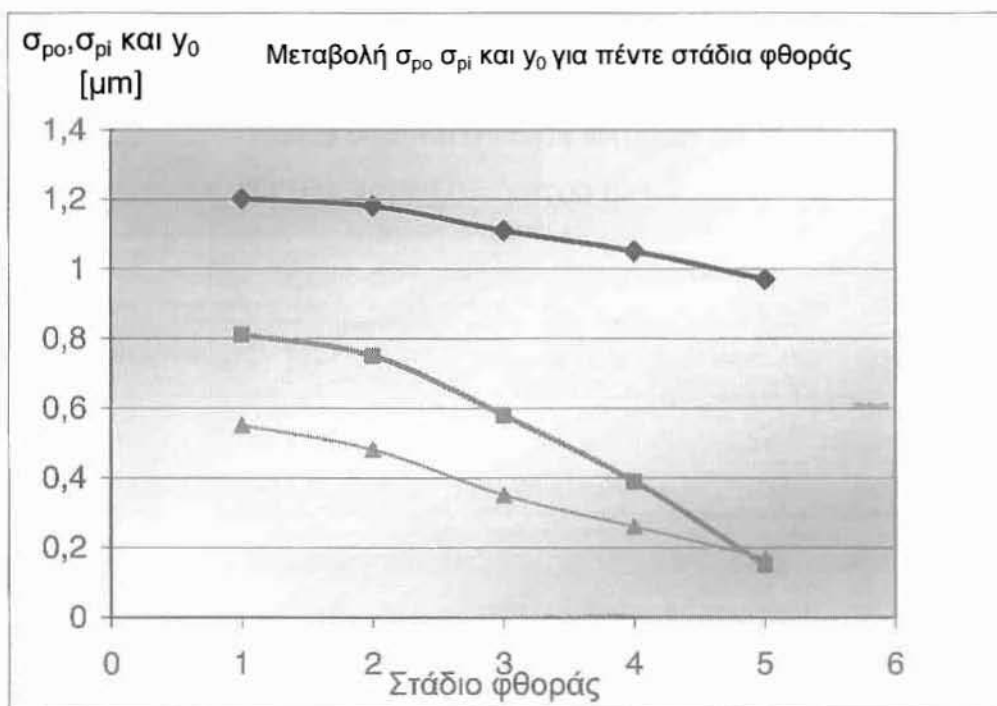
Σχήμα3.15: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων $\eta\beta\sigma_{\rho_i}$ και η γραμμή τάσης για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Μέτρηση σε κύλινδρο MEK.



Σχήμα3.16: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων $\sigma_{\rho i} / \beta$ και η γραμμή τάσης για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Μέτρηση σε κύλινδρο ΜΕΚ.

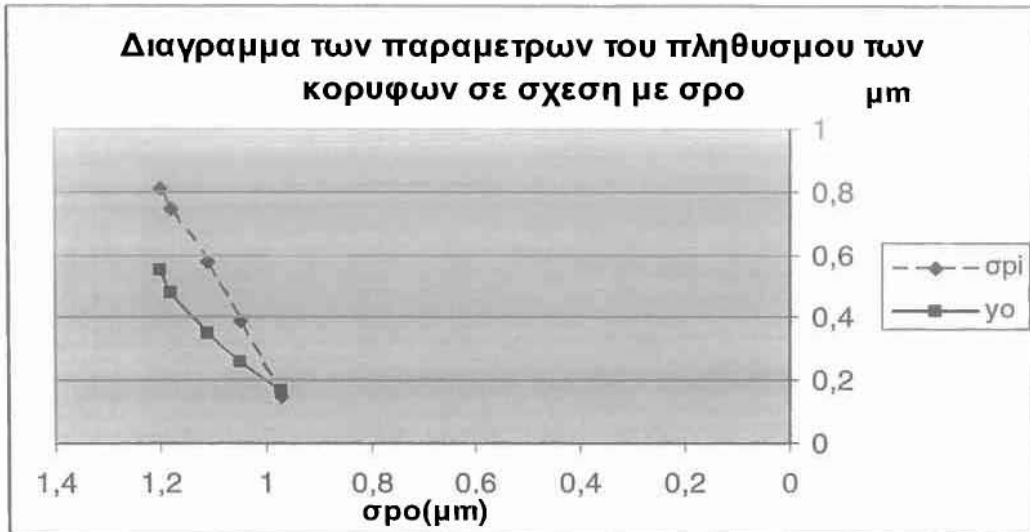


(A)

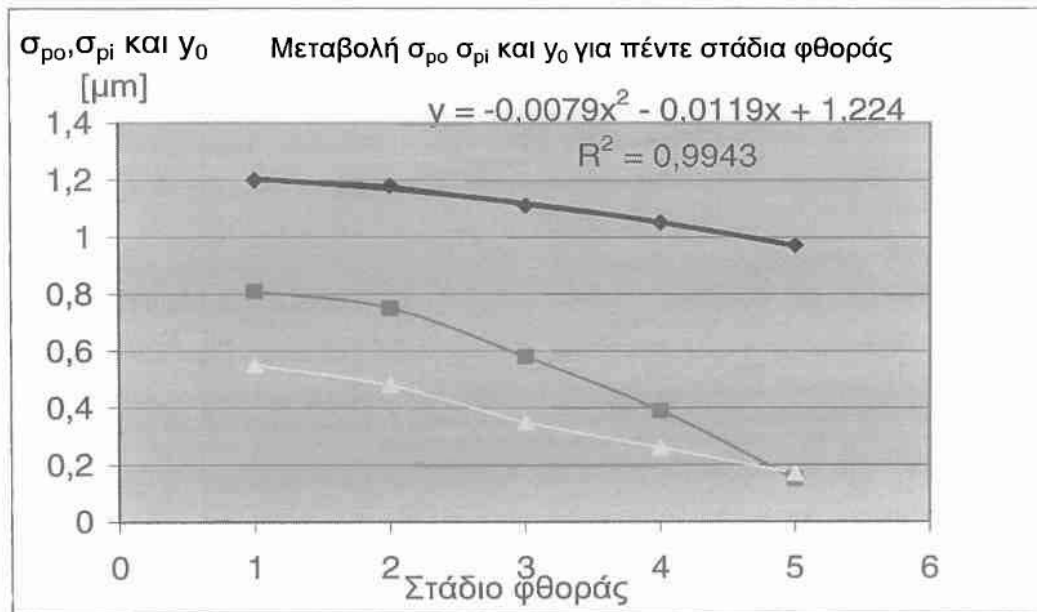


(B)

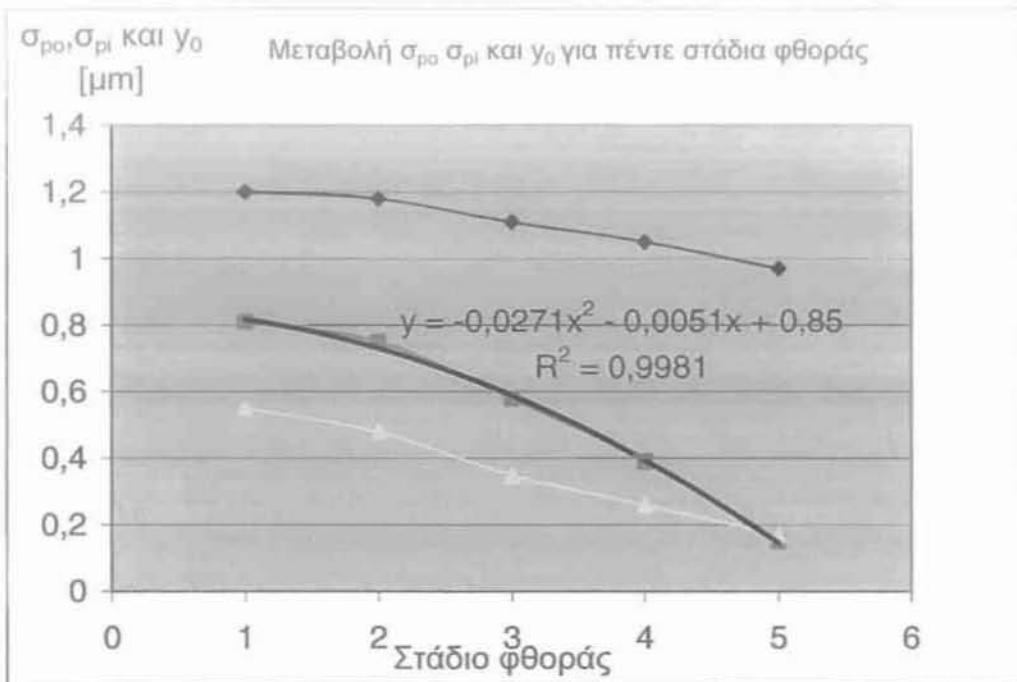
Σχήμα 3.17: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων $\sigma_{ρο}$, $\sigma_{ρι}$ και γ_0 για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. (α) Μέτρηση σε κύλινδρο ΜΕΚ. (β) Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



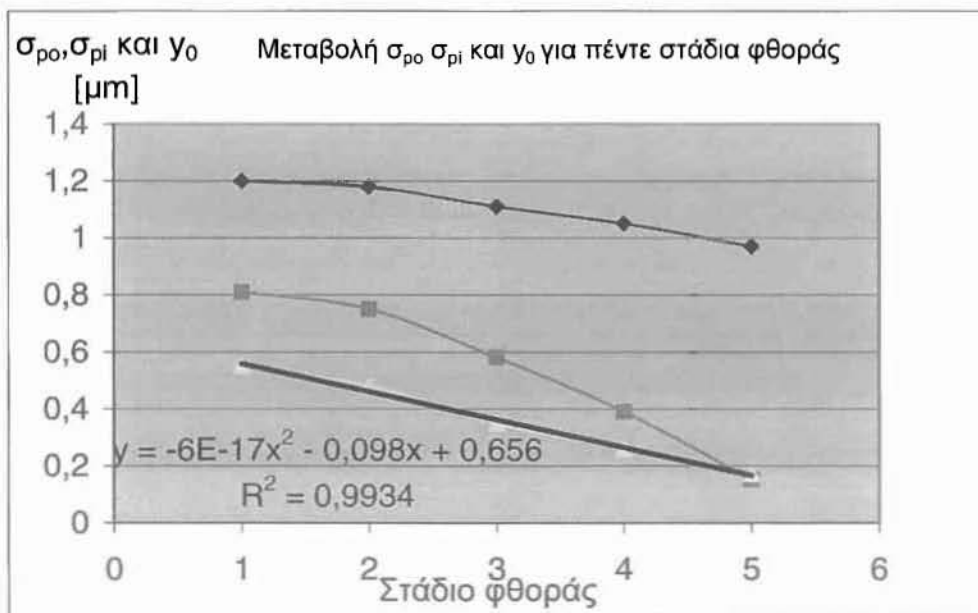
Σχήμα3.18: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων γ_0 και $\sigma_{\rho i}$ και γ_0 σε σχέση με σ_{ρ_0} για τέσσερα διαφορετικά στάδια φθοράς. Συνθετική επιφάνεια κυλίνδρου MEK.



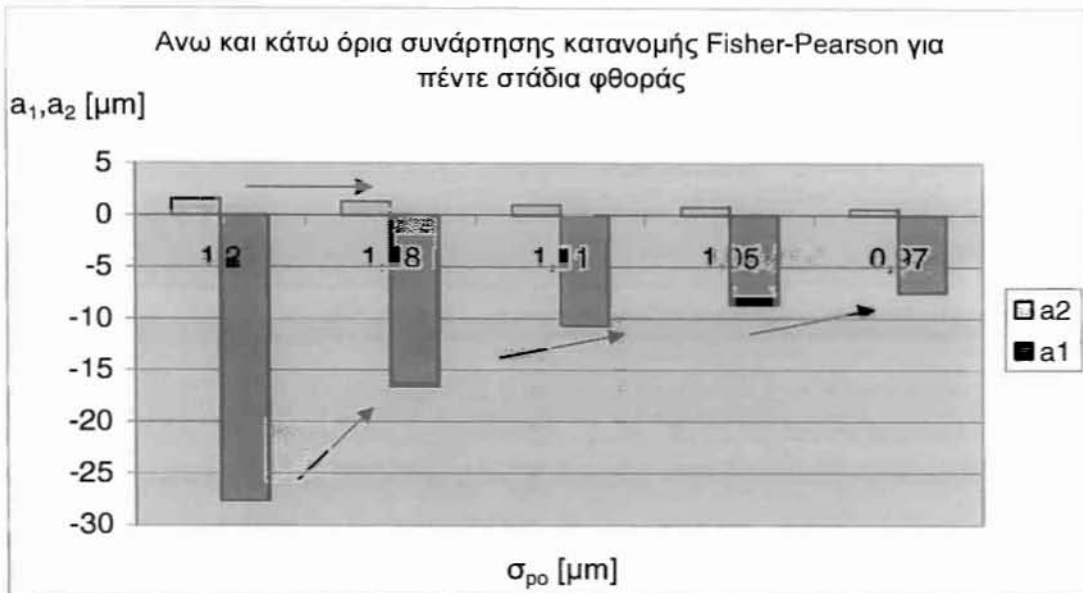
Σχήμα3.19: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων σ_{ρ_0} , $\sigma_{\rho i}$ και γ_0 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς και γραμμή τάσης σ_{ρ_0} . Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



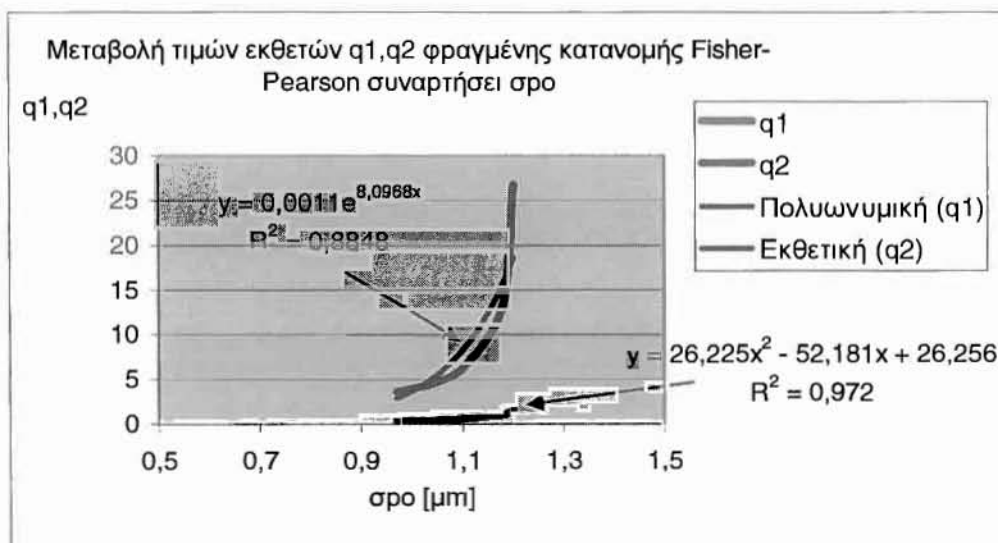
Σχήμα3.20: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων $\sigma_{\rho o}$ $\sigma_{\rho i}$ και γ_0 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς και γραμμή τάσης $\sigma_{\rho i}$. Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



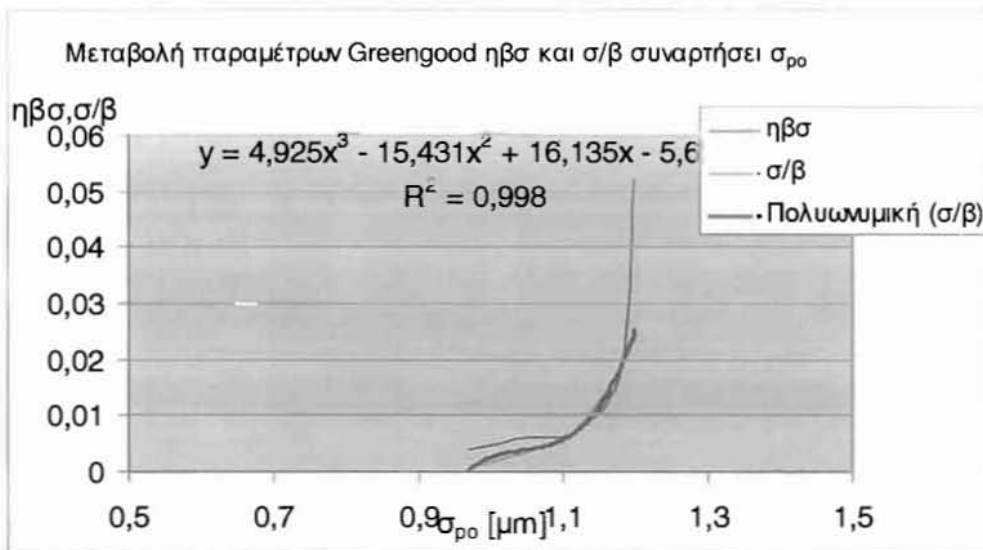
Σχήμα3.21: διάγραμμα μεταβολής των παραμέτρων $\sigma_{\rho o}$ $\sigma_{\rho i}$ και γ_0 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς και γραμμή τάσης γ_0 . Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



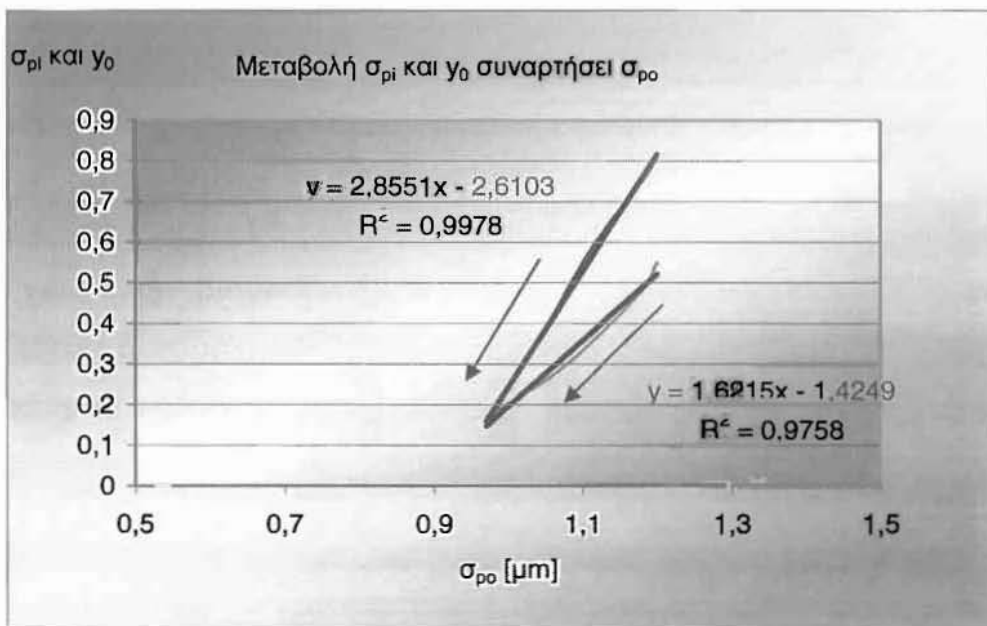
Σχήμα3.22: διάγραμμα μεταβολής κάτω και άνω φράγματος a_1 και a_2 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς . Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



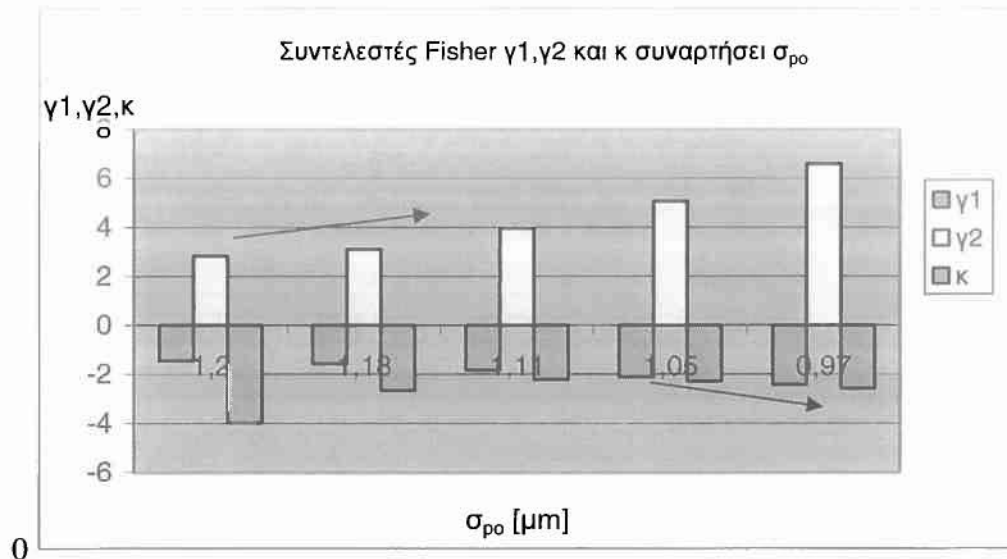
Σχήμα3.23: διάγραμμα μεταβολής εκθετών q_1 και q_2 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς και γραμμές τάσης. Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



Σχήμα3.24: διάγραμμα μεταβολής παραμέτρων $\eta\beta\sigma_{\rho i}$ $\sigma_{\rho i}/\beta$ για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς και γραμμές τάσης. Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.

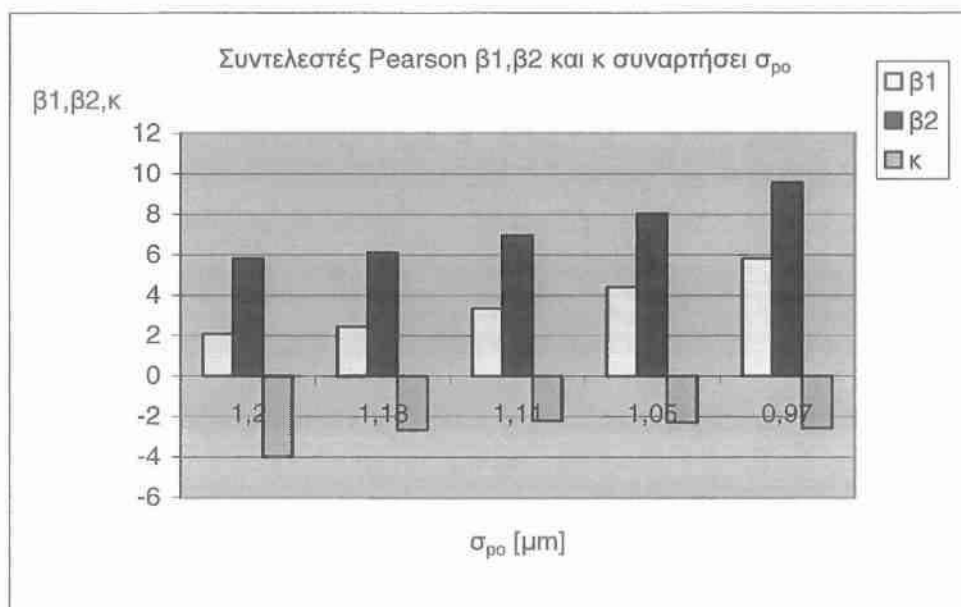


Σχήμα3.25: διάγραμμα μεταβολής παραμέτρων $\sigma_{\rho i}$ y_0 σαν συνάρτηση $\sigma_{\rho 0}$ του για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς και γραμμές τάσης. Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



Σχήμα 3.26: διάγραμμα μεταβολής των συντελεστών Fisher γ_1 (συντελεστής συμμετρίας) και γ_2 (συντελεστής κύρτωσης) συναρτήσει σ_{po} για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς παρουσία του συντελεστή κ .

Παρατήρηση: Είναι χαρακτηριστικές οι σαφώς θετικές τιμές του γ_2 που υποδηλώνουν αιχμηρές κατανομές ενώ οι έντονα αρνητικές τιμές του γ_1 μαρτυρούν ασυμμετρία με το μέγιστο της καμπύλης μετατοπισμένο προς τα δεξιά(θετικές τιμές).

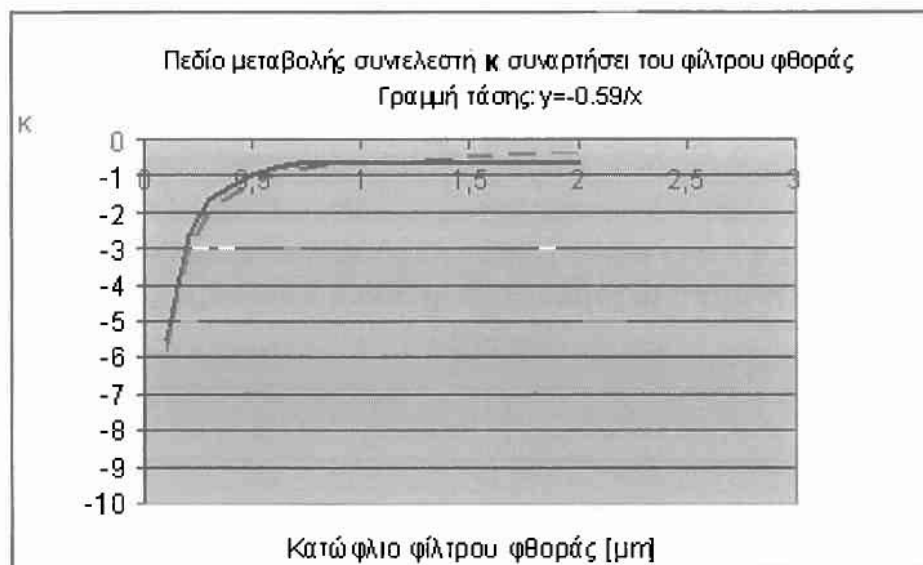


Σχήμα 3.27: διάγραμμα μεταβολής των συντελεστών Pearson β_1 (συντελεστής συμμετρίας) και β_2 (συντελεστής κύρτωσης) συναρτήσει σ_{po} για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς παρουσία του συντελεστή κ .

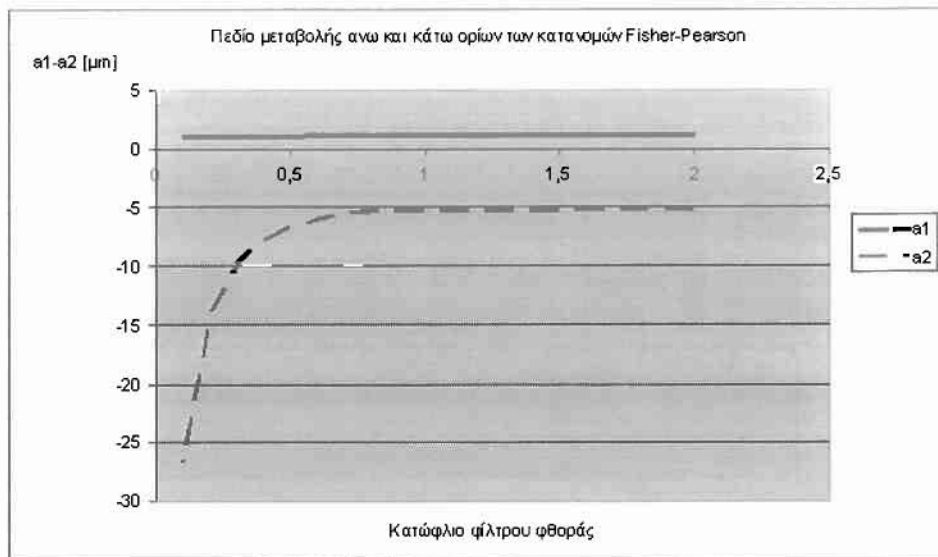
Παρατήρηση: $\beta_1 = \gamma_1^2$ και $\beta_2 = \gamma_2 + 3$ που υποδηλώνουν αιχμηρές κατανομές ενώ οι έντονα αρνητικές τιμές του γ_1 μαρτυρούν ασυμμετρία με το μέγιστο της καμπύλης μετατοπισμένο προς τα δεξιά (θετικές τιμές).

Η σταθερότητα των αρνητικών τιμών του κ παραπέμπει σε κατάταξη της καμπύλης κατανομής σε κατηγορία φραγμένων κατανομών του τύπου:

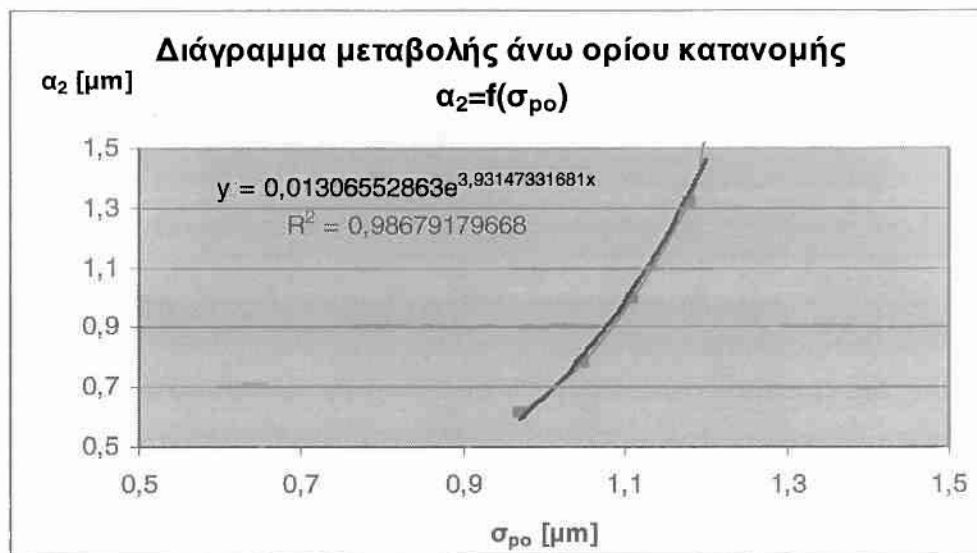
$$f(x) = f_0(x - a_1)^{(q_1 - 1)}(a_2 - x)^{(q_2 - 1)}$$



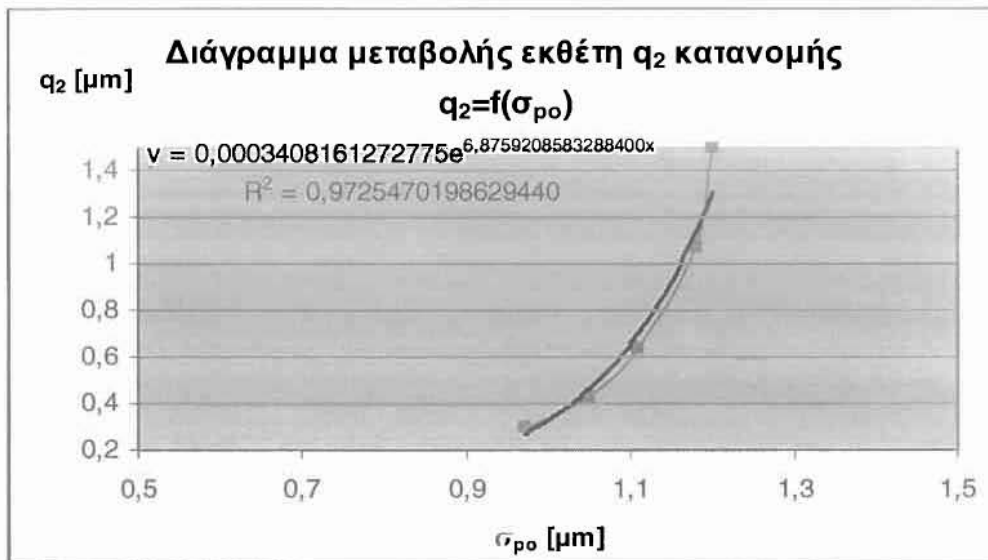
Σχήμα 3.28: διάγραμμα μεταβολής παραμέτρου κ συνάρτηση σ_{po} για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης). Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



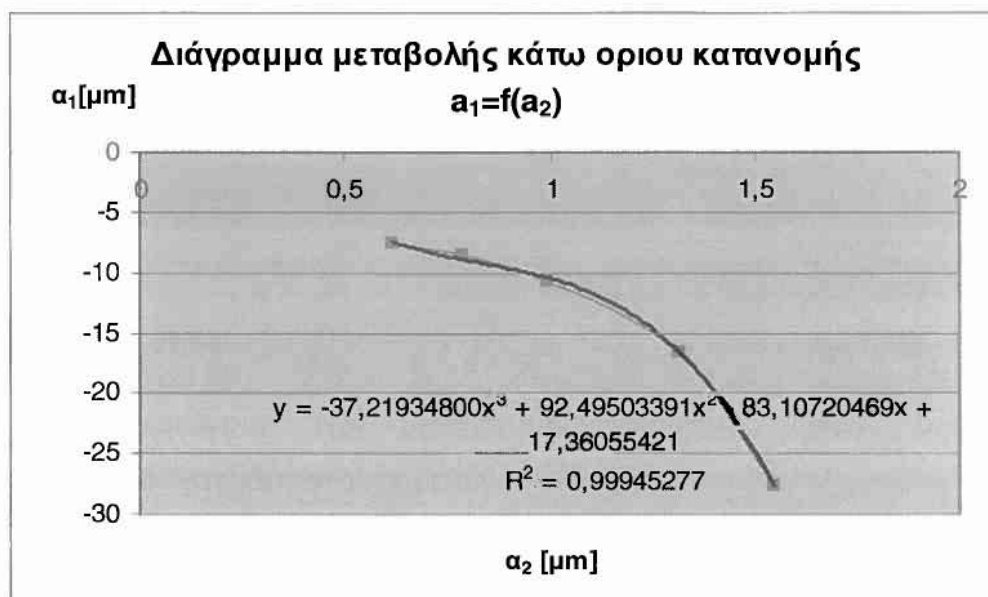
Σχήμα3.29: διάγραμμα μεταβολής άνω και κάτω φραγμάτων της συνάρτησης κατανομής των σημείων α_1 α_2 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης). Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



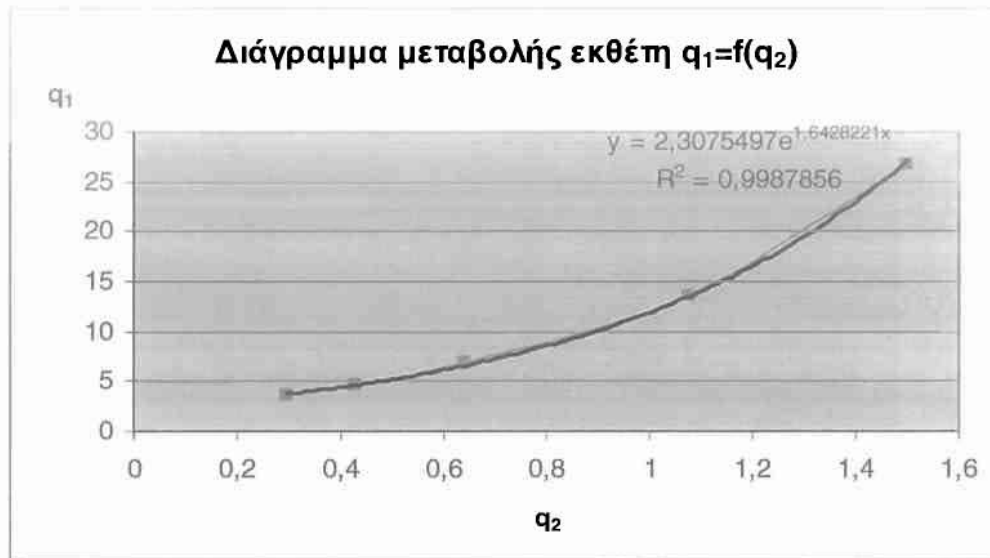
Σχήμα3.30: διάγραμμα μεταβολής άνω και κάτω φραγμάτων της συνάρτησης κατανομής των σημείων α_2 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης). Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



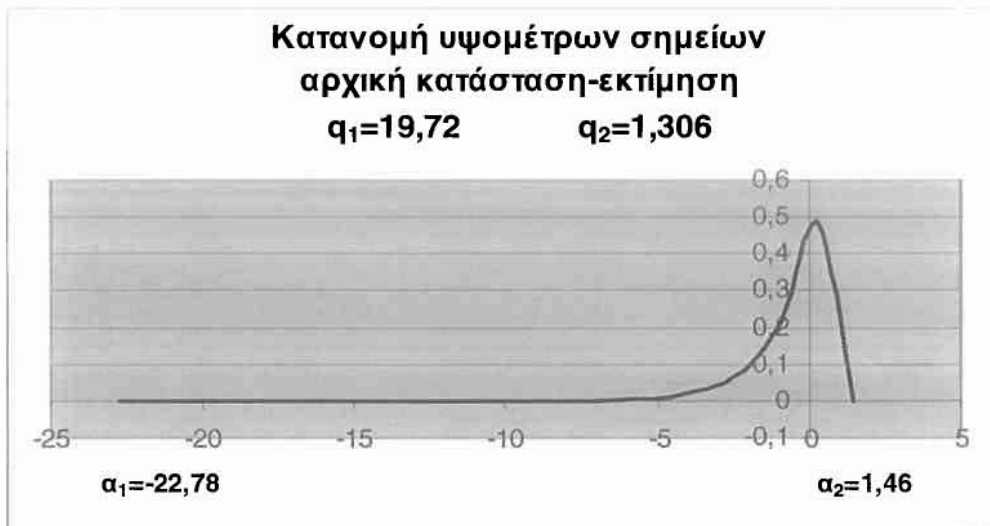
Σχήμα3.31: διάγραμμα μεταβολής άνω και κάτω φραγμάτων της συνάρτησης κατανομής των σημείων q_2 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης). Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ



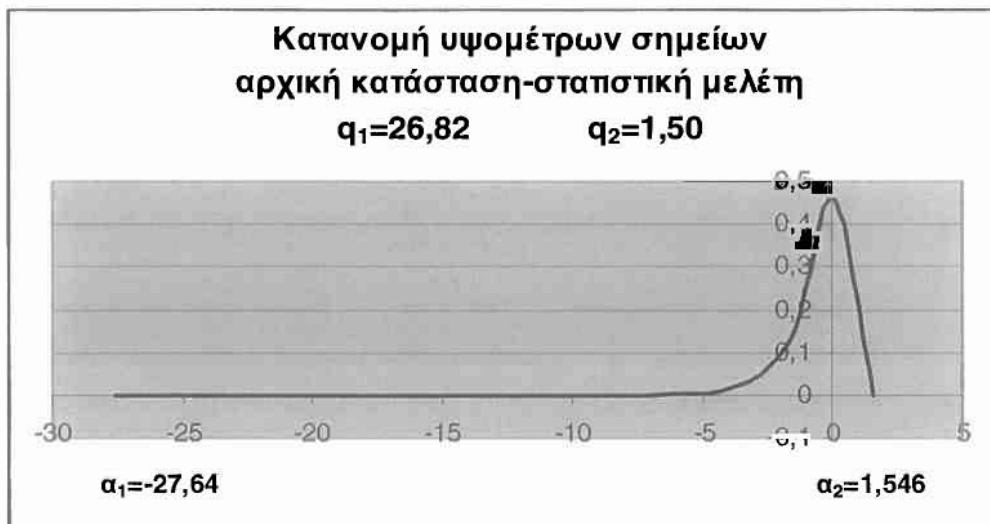
Σχήμα3.32: διάγραμμα μεταβολής κάτω φράγματος της συνάρτησης κατανομής των σημείων a_1 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης) σε σχέση με a_2 . Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ



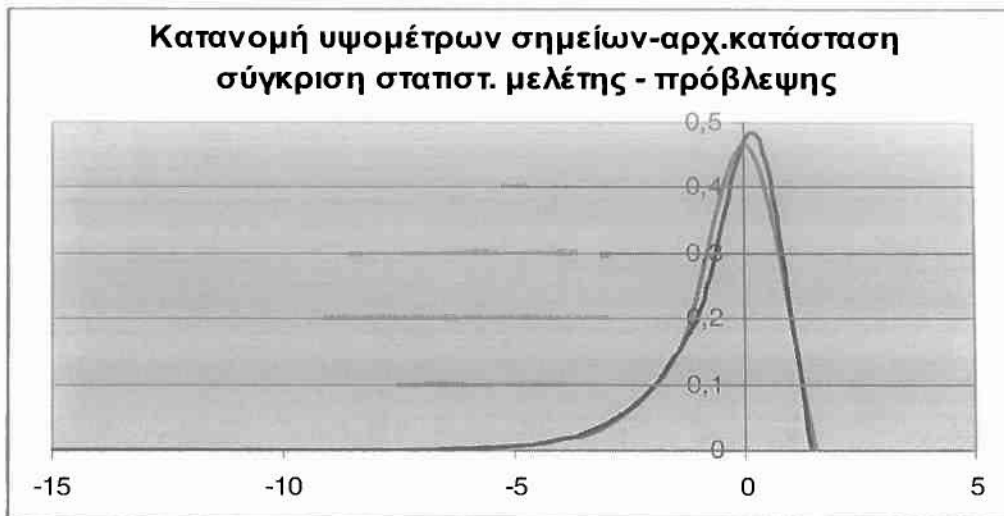
Σχήμα3.33: διάγραμμα μεταβολής κάτω φράγματος της συνάρτησης κατανομής των σημείων q_1 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης) σε σχέση με q_2 . Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ



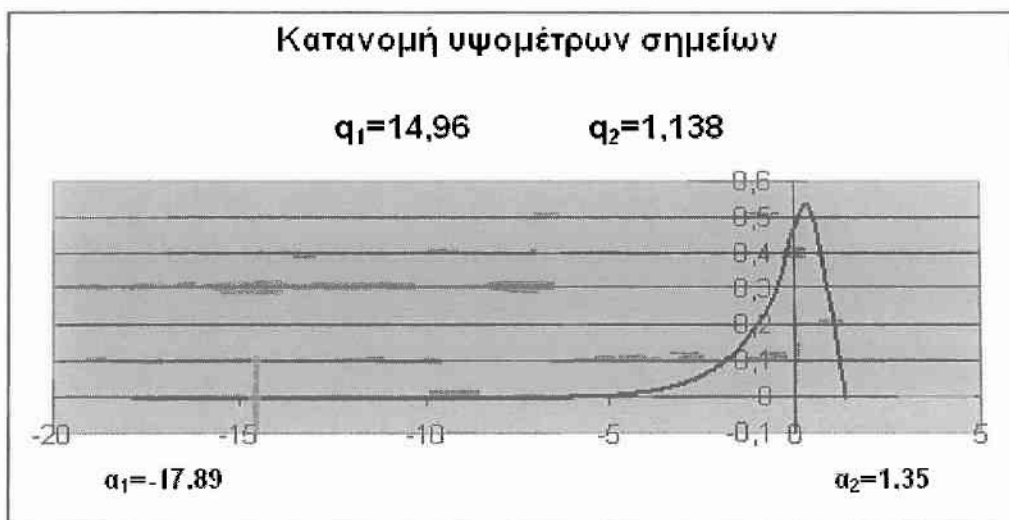
Σχήμα3.34: κατανομή των υψομέτρων κορυφών λόφων, συνάρτηση εξαγόμενη από διαγράμματα σημείων.



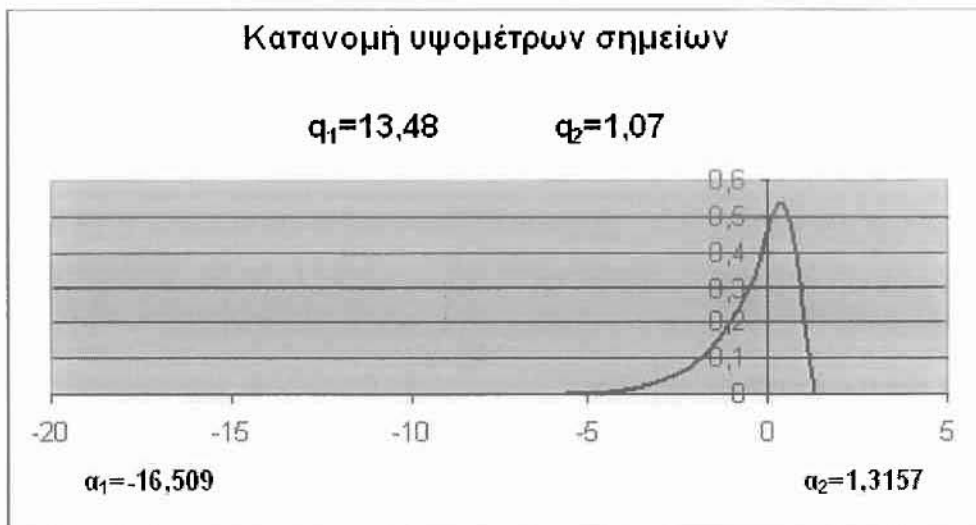
Σχήμα3.35: κατανομή των υψομέτρων κορυφών λόφων, συνάρτηση εξαγόμενη από διαγράμματα σημείων.



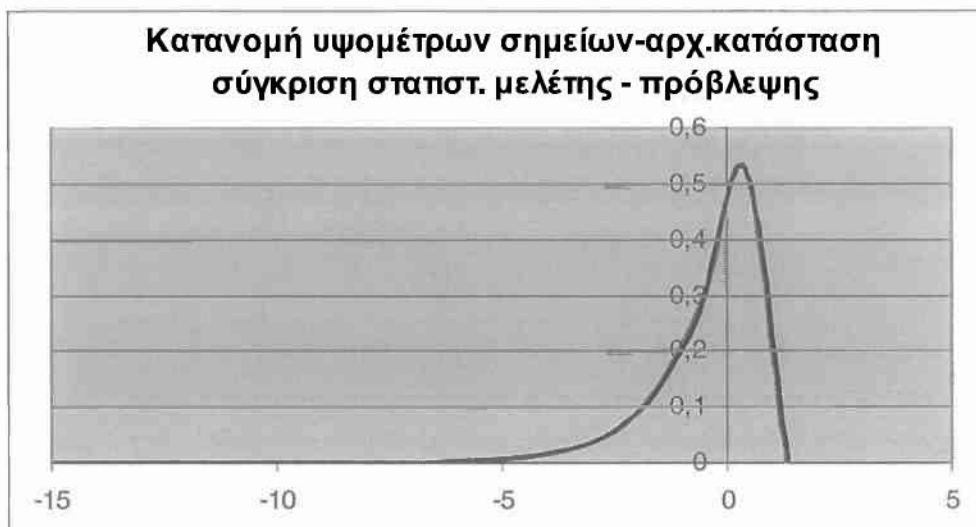
Σχήμα3.36: κατανομή των υψομέτρων κορυφών λόφων, σύγκριση στατιστικής μελέτης-πρόβλεψης



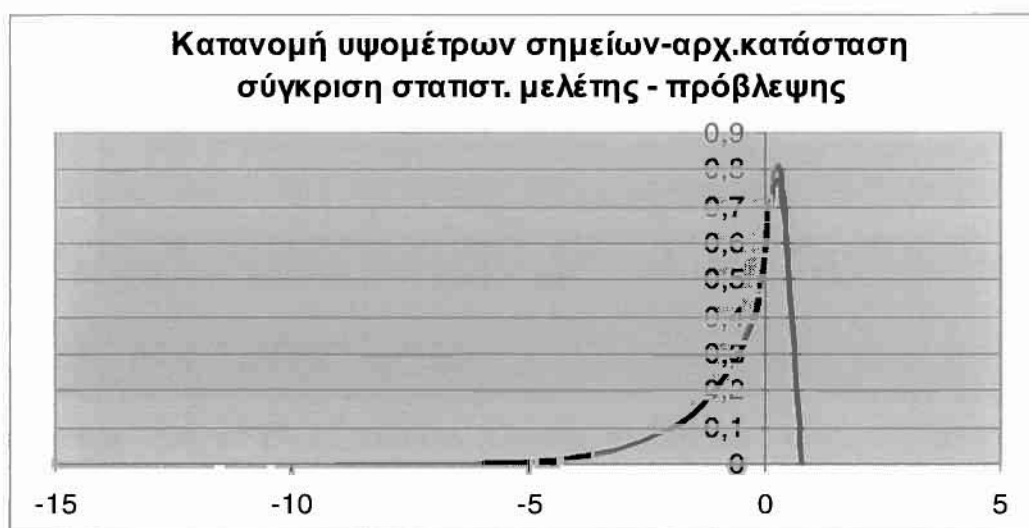
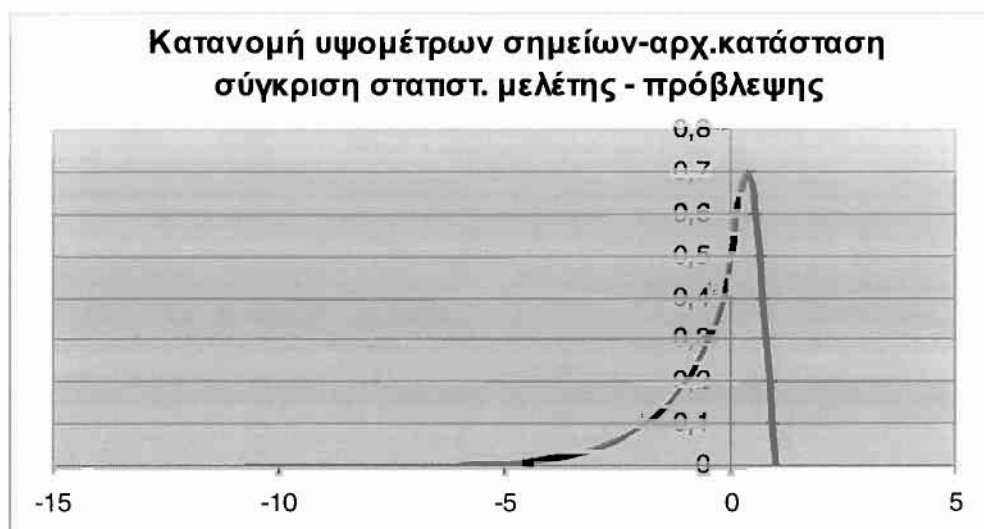
Σχήμα3.37: κατανομή των υψομέτρων κορυφών λόφων, συνάρτηση εξαγόμενη από διαγράμματα σημείων.



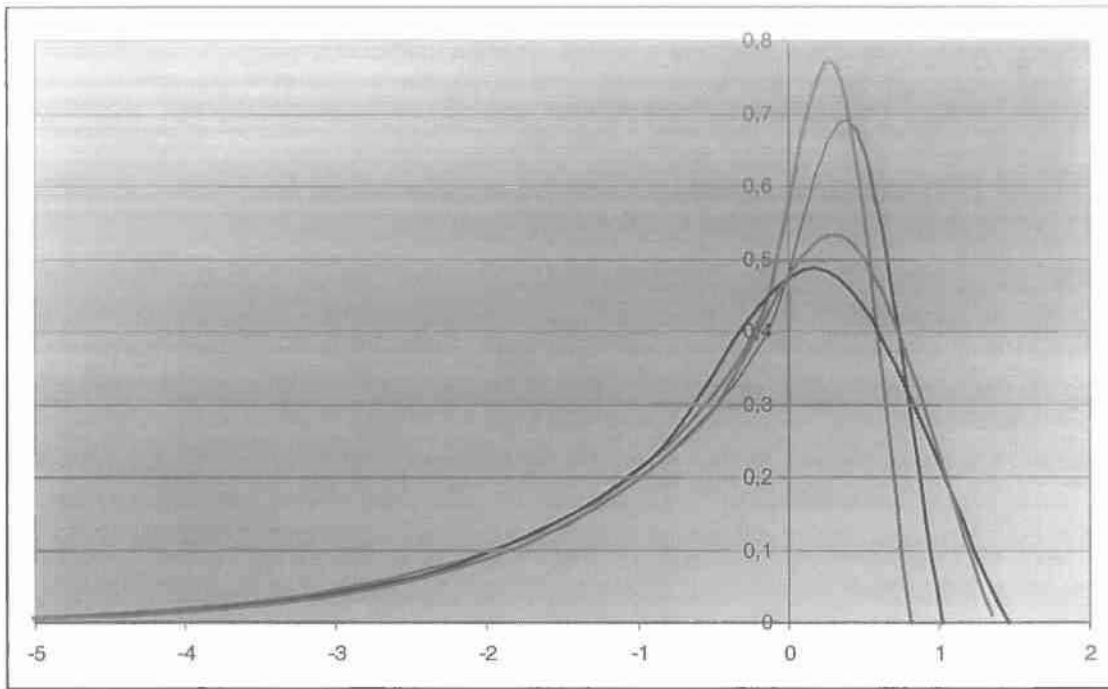
Σχήμα3.38: κατανομή των υψομέτρων κρυφών λόφων, συνάρτηση εξαγομένη από διαγράμματα σημείων.



Σχήμα3.39: κατανομή των υψομέτρων κορυφών κόφων, σύγκριση στατιστικής μελέτης-πρόβλεψης.



Σχήμα 3.40 : Σύγκριση κατανομής F-P που προέκυψε από στατιστική μελέτη (μαύρη γραμμή) με την αντίστοιχη που εκτιμήθηκε με βάση τους κανόνες μεταβολής των κατανομών για διάφορα στάδια φθοράς. Παρατηρείται πλήρης ταύτιση των δύο κατανομών.



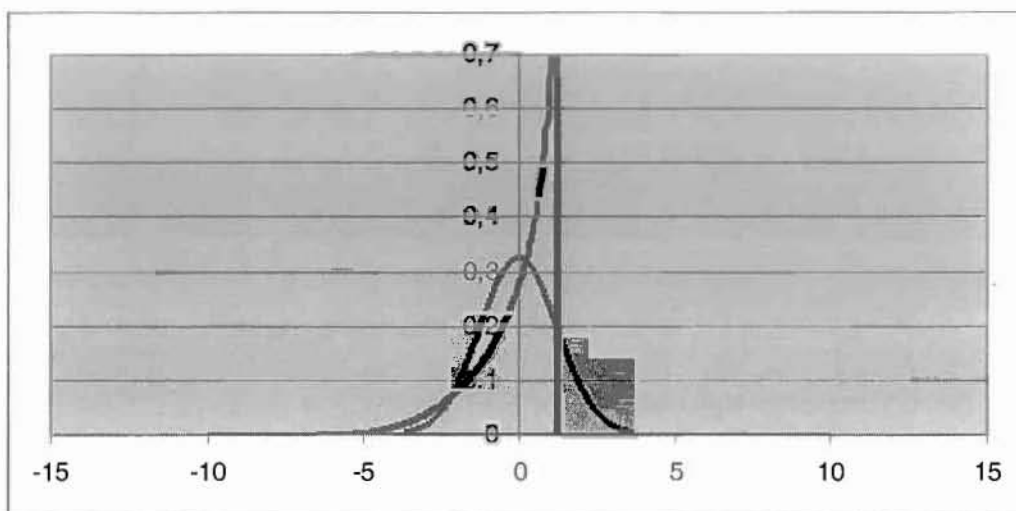
Σχήμα3.41 : Σύγκριση κατανομών F-P που αφορούν στον πληθυσμό των υψομέτρων των σημείων κατατομής που προέκυψαν από στατιστική μελέτη για διάφορα στάδια φθοράς (αρχική κατανομή → μαύρη γραμμή, και στη συνέχεια κόκκινη, κυανή, πράσινη)

ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΤΡΑΧΕΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Κύρια κατεύθυνση άξονας χ



(A)



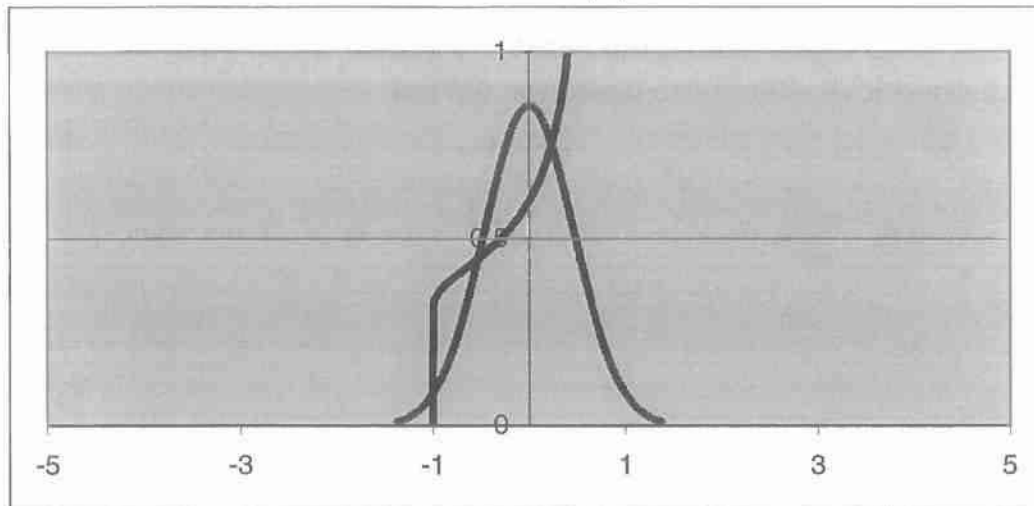
(B)

Σχήμα 3.42: (A) Κατατομή συνθετικής τραχείας επιφάνειας και (B) συνάρτηση κατανομής υψομέτρων σημείων κατά την κυρία κατεύθυνση χ ανισότροπης επιφάνειας.

Κύρια κατεύθυνση άξονας ψ



(A)



(B)

Σχήμα3.43: (α) Κατατομή συνθετικής τραχειάς επιφάνειας και (β) συνάρτηση κατανομής υψομέτρων σημείων κατά την κύρια κατεύθυνση ψ ανισότροπης επιφάνειας.

(α), (β)

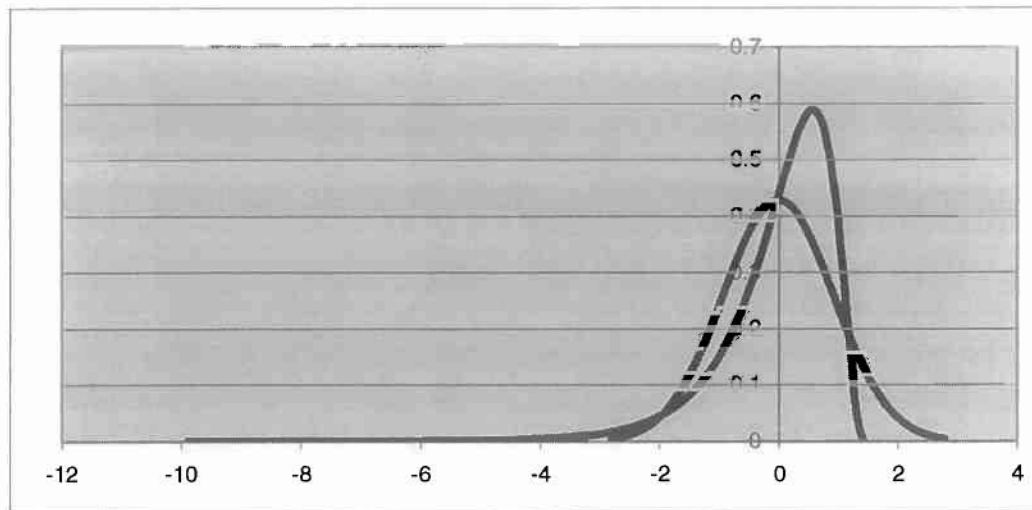
k	γ_1	γ_2	β_1	β_2	γ_0
-0.828417663	-1.330431	1.469383853	1.770046223	4.469383853	0.770010963
-0.079584212	0.5036	-0.992464152	0.253347726	2.007535848	0.691149252

r	q2	q1	w	α_2	α_1
4.3264078	0.707126613	3.619281202	7.679889551	1.255234023	-6.424656
1.6516648	0.601610989	1.050053858	1.577280154	0.574516722	-1.002763

Πίνακας3.1: Χαρακτηριστικές τιμές των κατανομών Fischer-Pearson για τις δυο κύριες κατευθύνσεις χ και ψ ανισότροπης τραχειάς επιφάνειας.

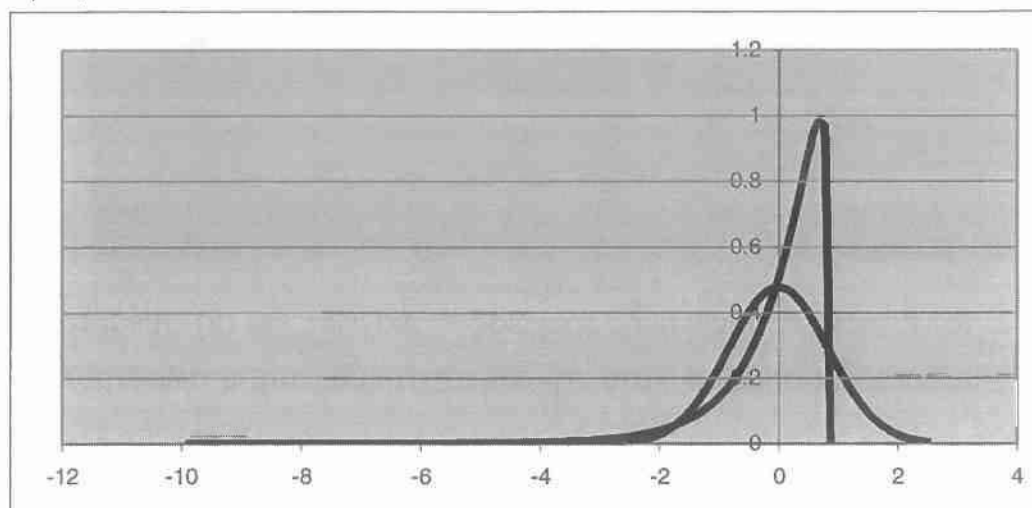
Συνδυασμός κυρίων αξόνων $\chi\psi$

$\chi\psi=0,9$



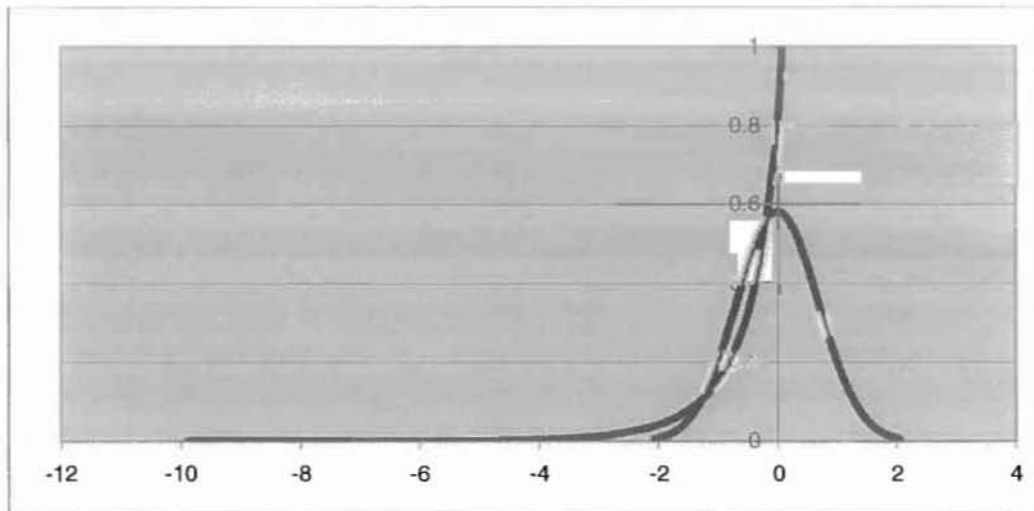
Σχήμα3.44: Συνάρτηση κατανομής υψομέτρων σημείων ανισότροπης τραχείας επιφάνειας με φθορά στο υψόμετρο 0,9 μm .

$\chi\psi=0,5$



Σχήμα3.45: Συνάρτηση κατανομής υψομέτρων σημείων ανισότροπης τραχείας επιφάνειας με φθορά στο υψόμετρο 0,5 μm

$\chi\psi=0$



Σχήμα3.46: Συνάρτηση κατανομής υψομέτρων σημείων ανισοτροπής τραχείας επιφάνειας με φθορά στο υψόμετρο 0 μm.

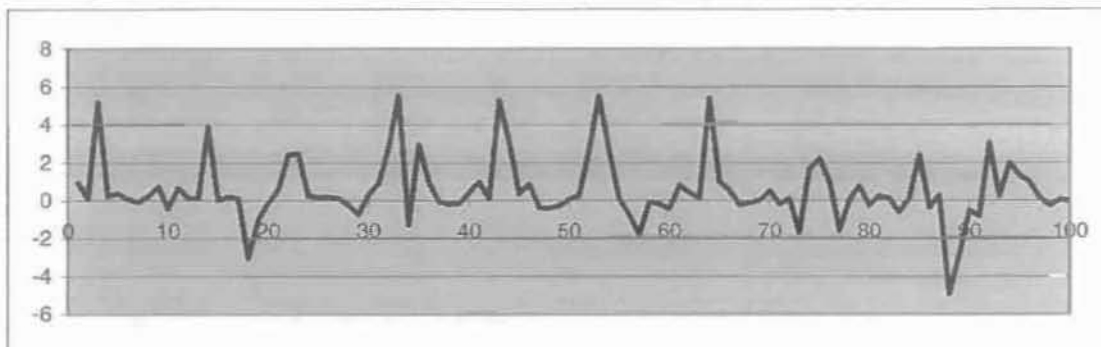
k	γ_1	γ_2	β_1	β_2
1.729800267	-1.73531	5.672547022	3.011301181	8.672547022
3.542517989	-2.223621	8.594817623	4.944490742	11.59481762
11.49641281	-3.247247	17.071294	10.54461263	20.071294

r	q2	q1	c	α	d
12.011181	3.240362675	15.25154391	5.276207978	1.423409327	-0.57975
14.253337	1.285550505	15.53888703	9.723065741	0.876952007	-0.70613
20.089118	0.46759217	20.55671004	19.4058612	0.45168876	-0.91942

Πίνακας3.2: Χαρακτηριστικές τιμές των κατανομών Fischer-Pearson για ανισότροπη τραχεία επιφάνεια για 3 στάδια φθοράς.

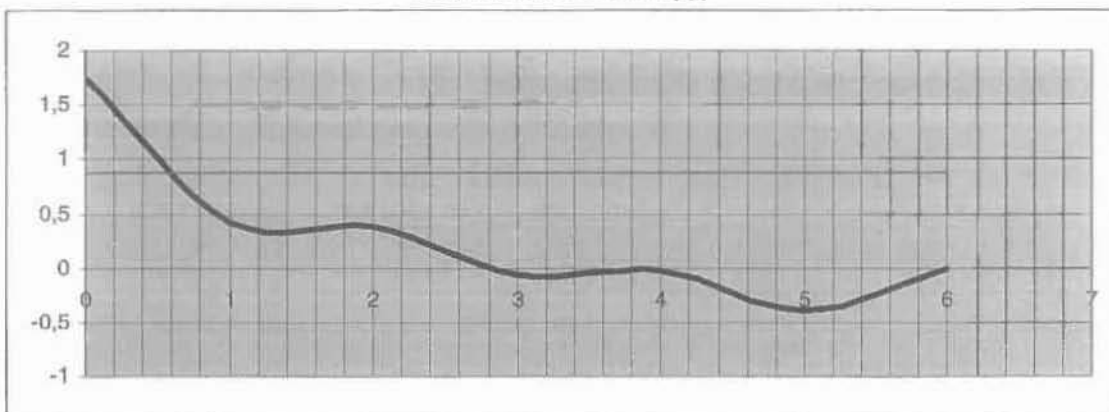
Για τα στάδια φθοράς της κατατομής για συνδυασμό αξόνων $\chi\psi$ εμφανίζεται δυνατότητα απεικόνισης της συνάρτησης κατανομής για προχωρημένα στάδια φθοράς με κύρια χαρακτηριστικά της κατεύθυνσης χ . Η καμπύλη τύπου J εμφανίζεται επίσης σε πιο πρώιμο στάδιο φθοράς.

Ισότροπη συνθετική τραχεία επιφάνεια $\lambda\chi\chi(0,5)/\lambda\psi\psi(0,5) \rightarrow 1,00$



(A)

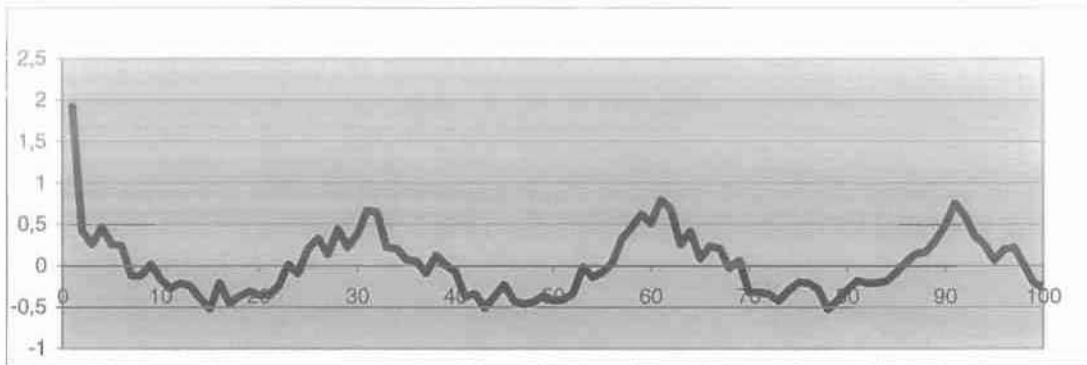
Κύρια κατεύθυνση χ



(B)

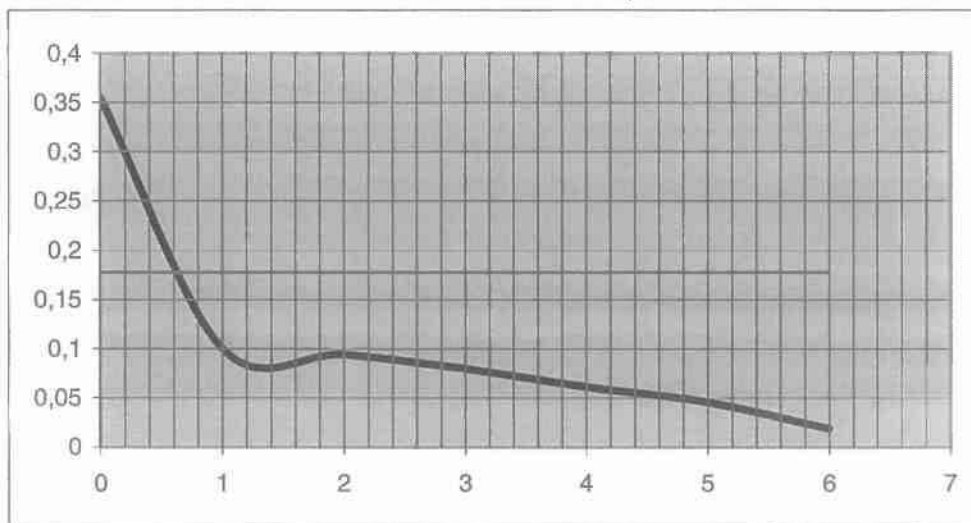
Κύρια κατεύθυνση χ

Σχήμα 3.47 : (A) Κατατομή συνθετικής τραχείας επιφάνειας και (β) συνάρτηση αυτοσυσχέτισης χαρακτηριστική τιμή της οποίας $\lambda\chi\chi(0,5)=0,6$ χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ανισοτροπίας.



(α)

Κύρια κατεύθυνση ψ

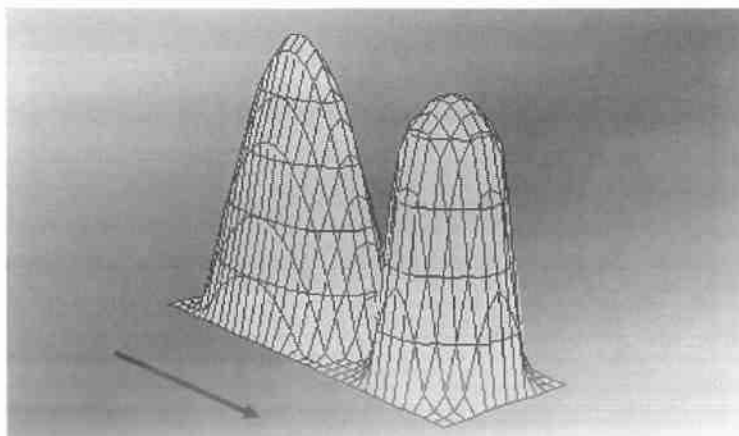


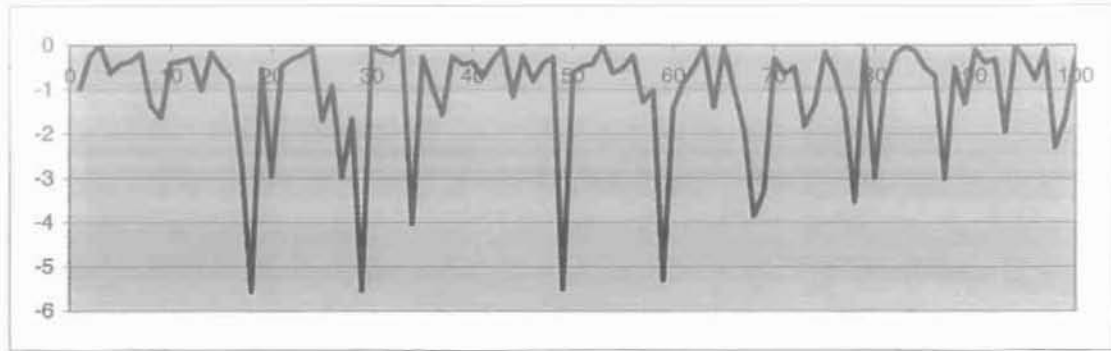
(B)

Κύρια κατεύθυνση ψ

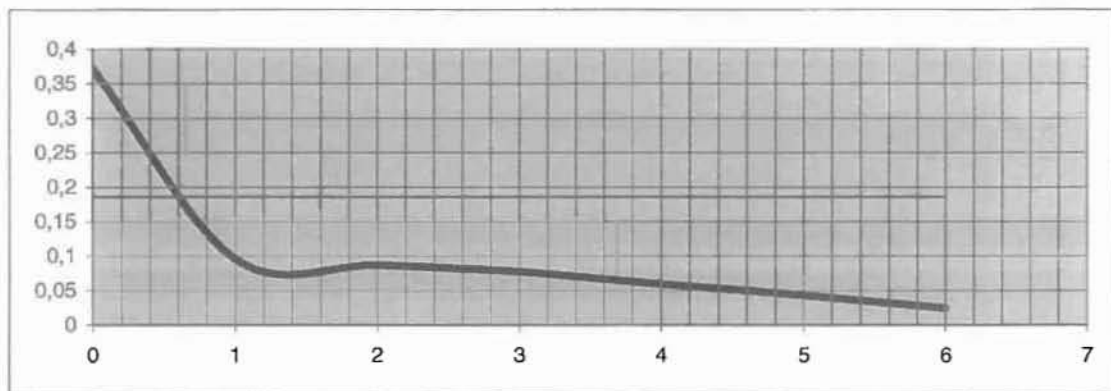
Σχήμα 3.48 : (A) Κατατομή συνθετικής τραχείας επιφάνειας και (B) συνάρτηση αυτοσυσχέτισης χαρακτηριστική τιμή της οποίας $\lambda\psi(0,5)=0,6$ χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ανισοτροπίας.

Ανισότροπη συνθετική τραχεία επιφάνεια $\lambda\chi\chi(0,5)/\lambda\psi\psi(0,5) \rightarrow 1$



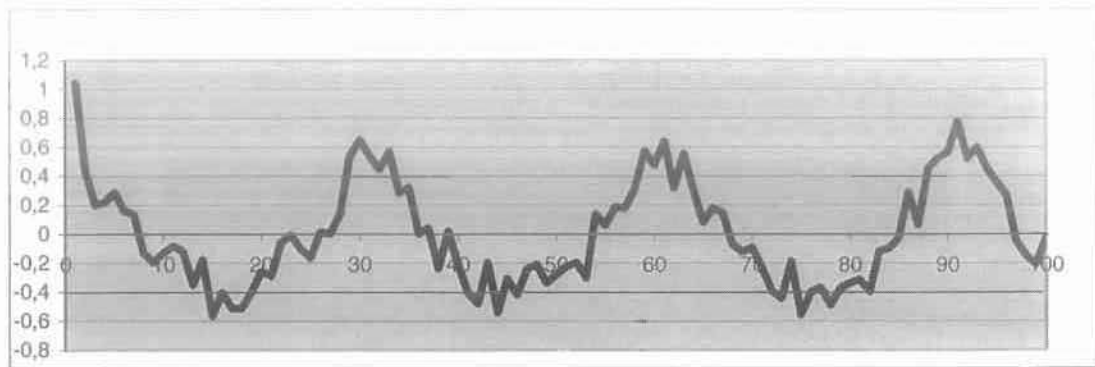


(A)
Κύρια κατεύθυνση χ



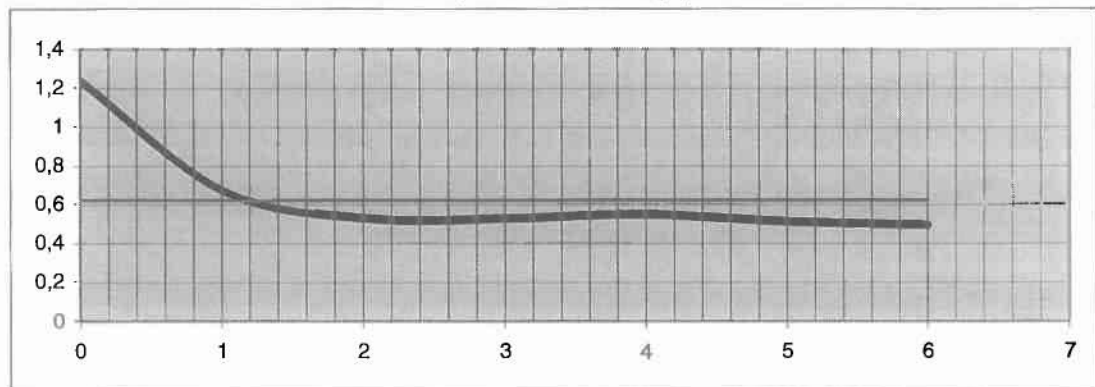
(B)
Κύρια κατεύθυνση χ

Σχήμα 3.49 : (A) Κατατομή συνθετικής τραχείας επιφάνειας και (β) συνάρτηση αυτοσυσχέτισης χαρακτηριστική τομή της οποίας $\lambda_{\chi\chi}(0,5)=0,6$ χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ανισοτροπίας.



(α)

Κύρια κατεύθυνση ψ

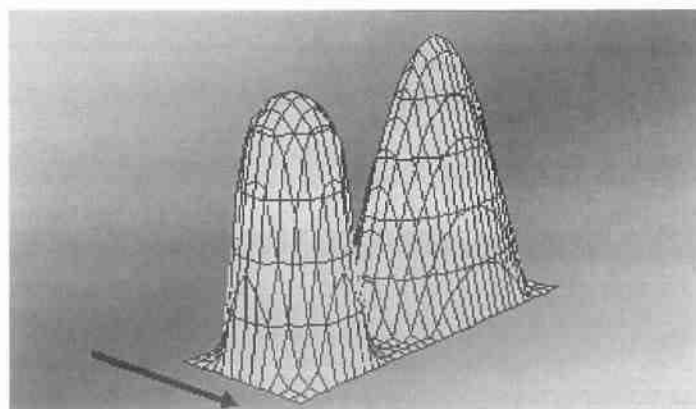


(β)

Κύρια κατεύθυνση ψ

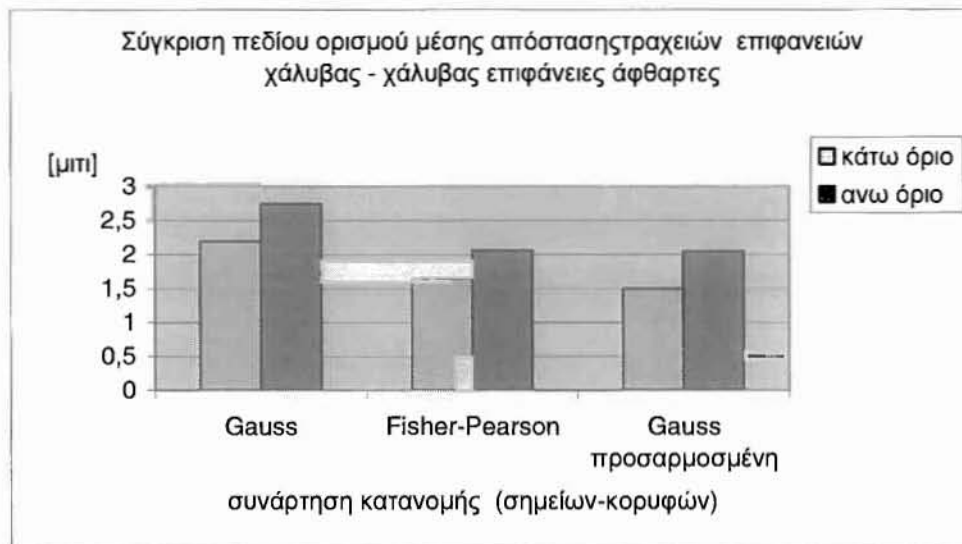
Σχήμα 3.50 : (Α) Κατατομή συνθετικής τραχείας επιφάνειας και (β) συνάρτηση αυτοσυσχέτισης χαρακτηριστική τιμή της οποίας $\lambda_{\psi}(0,5)=1,6$ χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ανισοτροπίας.

Ανισότροπη συνθετική τραχεία επιφάνεια $\lambda_{\chi\chi}(0,5)/\lambda_{\psi}(0,5) \rightarrow 1/3$

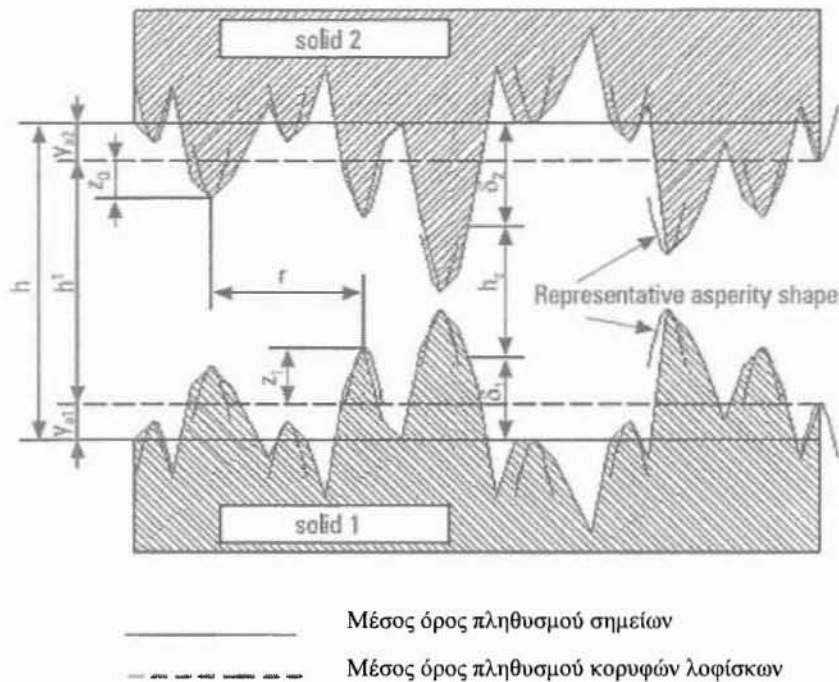


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ



Η προηγούμενη ανάλυση σύμφωνα με το μοντέλο στατιστικής Fischer-Pearson επιτρέπει την χρήση των καμπυλών των κατανομών σημείων-κορυφών λοφίσκων και ακτινών καμπυλότητας λοφίσκων μέσα στο μοντέλο επαφής μεταξύ τροχείων επιφανειών η μεταξύ λείας επιφάνειας και τραχειάς. Το μοντέλο αυτό είναι γνωστό σαν **Greenwood- Tripp** και η διαφοροποίηση του παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση επαφής τραχειών επιφανειών παρουσία λιπαντικού μέσου.

Αυτό που αναφέρεται στη θεωρία Greenwood σαν διαχωρισμός των επιφανειών (surface separation-d) θα μπορούσε να ισοδυναμεί με το αντίστοιχο μέγεθος του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης αν οι δύο πληθυσμοί υψομέτρων δηλαδή ο πληθυσμός υψομέτρων όλων των σημείων της κατατομής της επιφάνειας (σ_{p0} :τυπική απόκλιση) και το υποσύνολο του δηλαδή ο πληθυσμός των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων(σ_p :τυπική απόκλιση)εμφανίζουν τον ίδιο μέσο όρο.

Σε αντίθετη περίπτωση όπως συμβαίνει στην πράξη υπάρχει διαφορά μη μηδενική των μέσων όρων των δύο πληθυσμών ($y_0 > 0$) με την τιμή του μέσου όρου των πληθυσμού των pick μεγαλύτερη.

Έτσι το d γίνεται :

$$d = h - y_0 \quad \text{ή} \quad (d(i,j) = h(i,j) + y_0)$$

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

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

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

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

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

Όπου $F_n(U) = \int_U^{\infty} \int_U^{\infty} (s - U^n \Phi_s) ds$ όπου Φ_s η κανονικοποιημένη κατανομή, $s=d/\sigma$

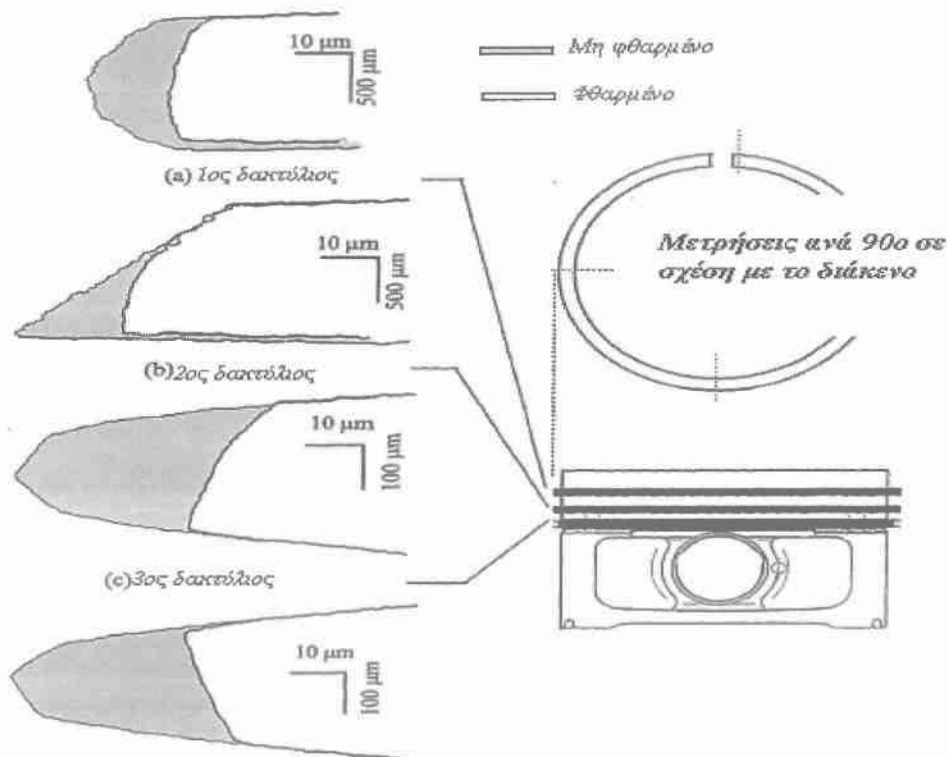
Οι συναρτήσεις που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του $F_{5/2}$ και F_2 προτείνεται να παίρνουν τις ακόλουθες τιμές.

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

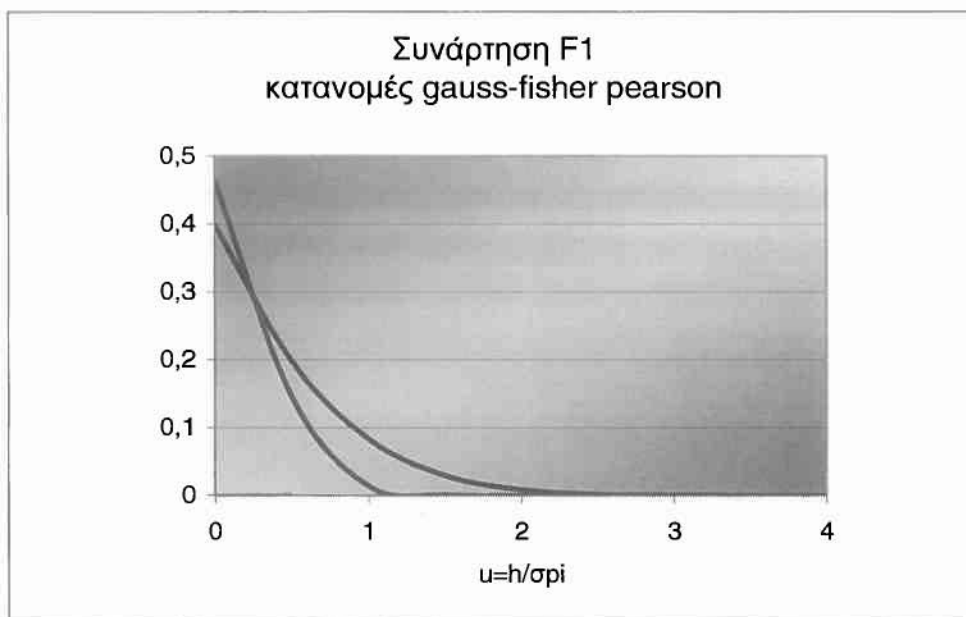
$$F_{5/2}(H) = \begin{cases} f_1 e^{\left(\frac{f_2 \ln \left(\frac{H^* - H}{d_1} \right) + f_3 \left(\frac{H^* - H}{d_1} \right)^2 \right)}, & H \leq 3,5 \\ f_1^H (H^* - H)^{f_2^H}, & H^* \geq H \geq 3,5 \\ 0, & H \geq H^* \end{cases}$$

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

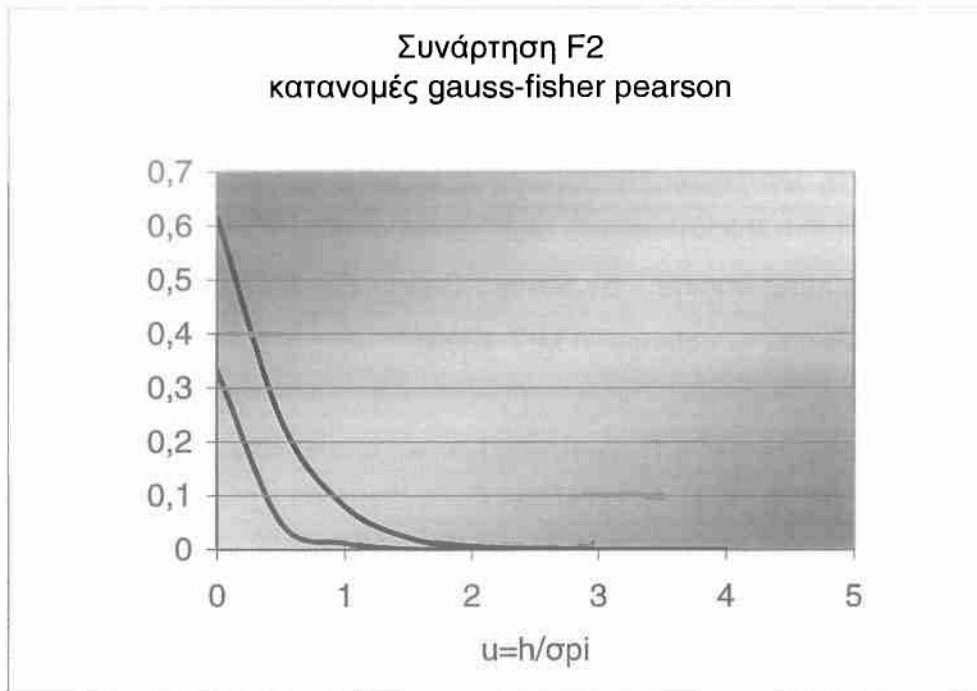
Η χρήση αντιπροσωπευτικής συνάρτησης Fischer- Pearson της μορφής ... Επιτρέπει τον ρεαλιστικότερο επαναπροσδιορισμό των συναρτήσεων F1, F2, F5/2 όπως εμφανίζονται στα παρακάτω διαγράμματα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συναρτήσεις **Greenwood- Tripp** που βασίζονται όπως προαναφέρθηκε σε κατανομή Gauss.



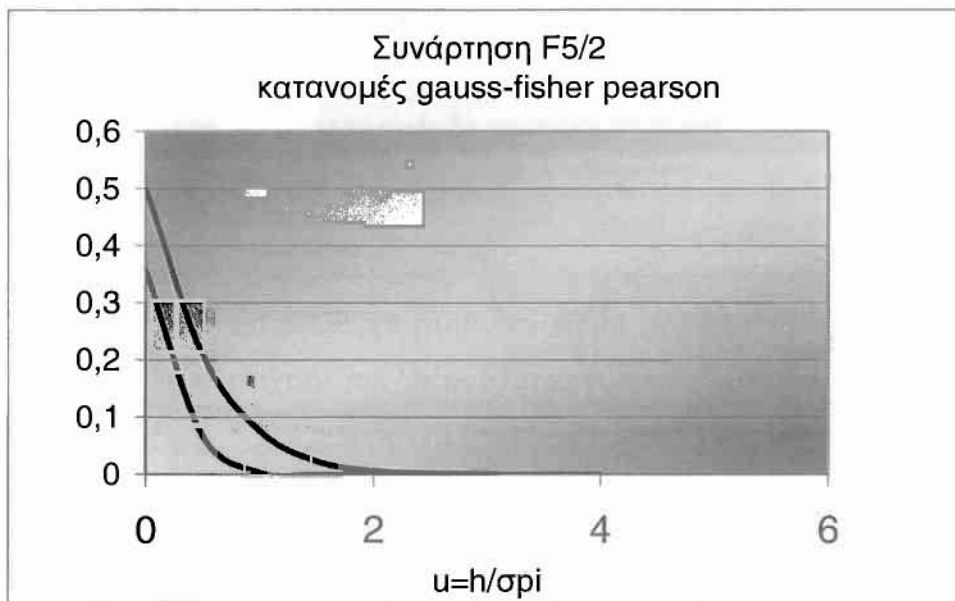
Διαφοροποίηση των κατατομών των δακτυλίων προ και μετά τη λειτουργία τους. Παρατηρείται αναλογία μεταξύ του φαινομένου φθοράς (απώλεια υλικού) και των απωλειών λόγω τριβής (ενδεικτικές κατανομές εκτός του πρώτου ο οποίος υφίσταται την έντονη επίδραση της καύσης). (Πηγή: «Analysis of lubricant film thickness and distribution along the piston/ring/liner interface in a reciprocating engine.» by Steven Casey, BS Mech. Eng. Urbana Champaign Illinois, Master of science in MIT 1998).



Σχήμα 4.2: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης F1 που απαιτείται για την εκτίμηση του αριθμού των επαφών μεταξύ λείας και τραχείας επιφάνειας. (μαύρη γραμμή **Gauss**-κυανή **Fisher-Pearson**) μετρήσεις

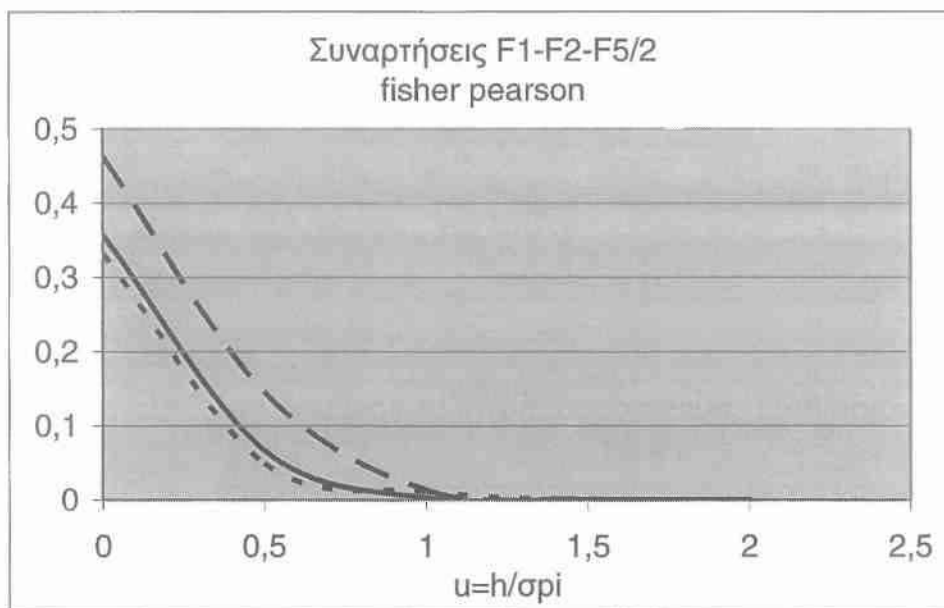


Σχήμα 4.3: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης F2 που απαιτείται για την εκτίμηση της πραγματικής επιφάνειας επαφής μεταξύ λείας και τραχείας επιφάνειας. (μαύρη γραμμή **Gauss**-κυανή **Fisher-Pearson**) μετρήσεις

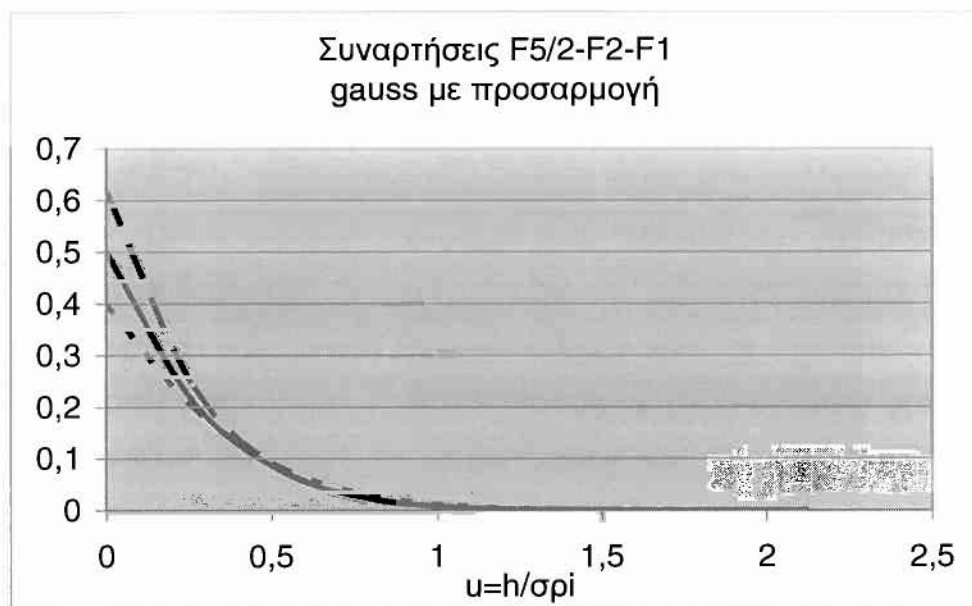


Σχήμα 4.4: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης F5/2 που απαιτείται για την εκτίμηση του φορτίου επαφής μεταξύ λείας και τραχείας επιφάνειας. (μαύρη γραμμή **Gauss**-κυανή **Fisher-Pearson**) μετρήσεις

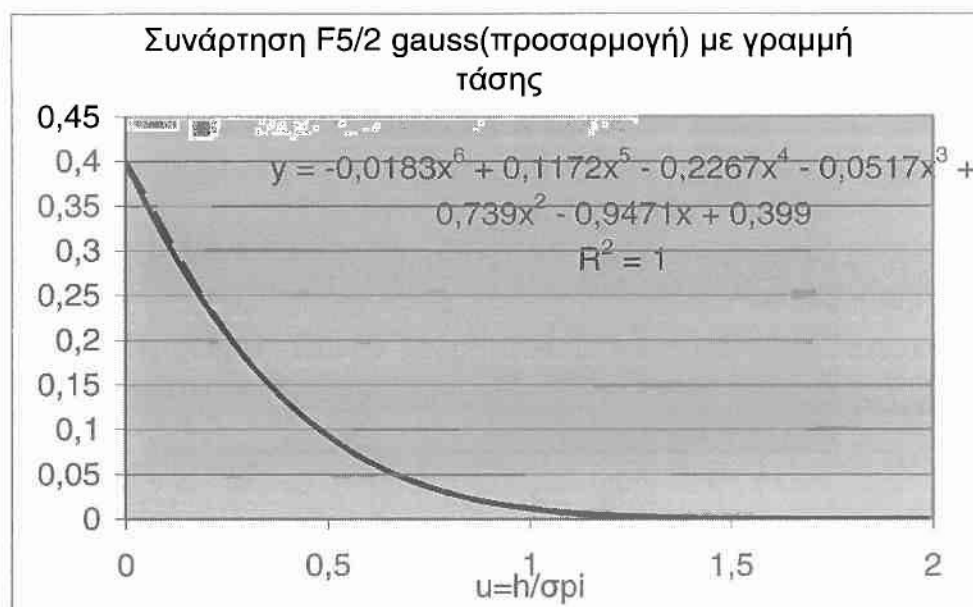
Θεωρώντας ότι η κατανομή Gauss είναι εύχρηστη και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην πράξη ενδεχομένως με προσαρμογή λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους της κατανομής Fischer-Pearson στη συνέχεια παρουσιάζονται καμπύλες στις οποίες επιπλέον προστίθεται μια διόρθωση της χρησιμοποιούμενης κατανομής Gauss, διόρθωση η οποία βασίζεται στον περιορισμό του εύρους της ώστε να προσεγγίζει καλύτερα την κατανομή Fischer-Pearson. Δηλαδή αντί να χρησιμοποιείται η τιμή σ/k έτσι ώστε η πρώτη επαφή της τραχείας να εμφανίζεται σε απόσταση αισθητά μικρότερη από ότι υπολογίζει το μοντέλο **Grenwood-Tripp**. Συνήθως ο συντελεστής k παίρνει τιμές από 2 έως 3.



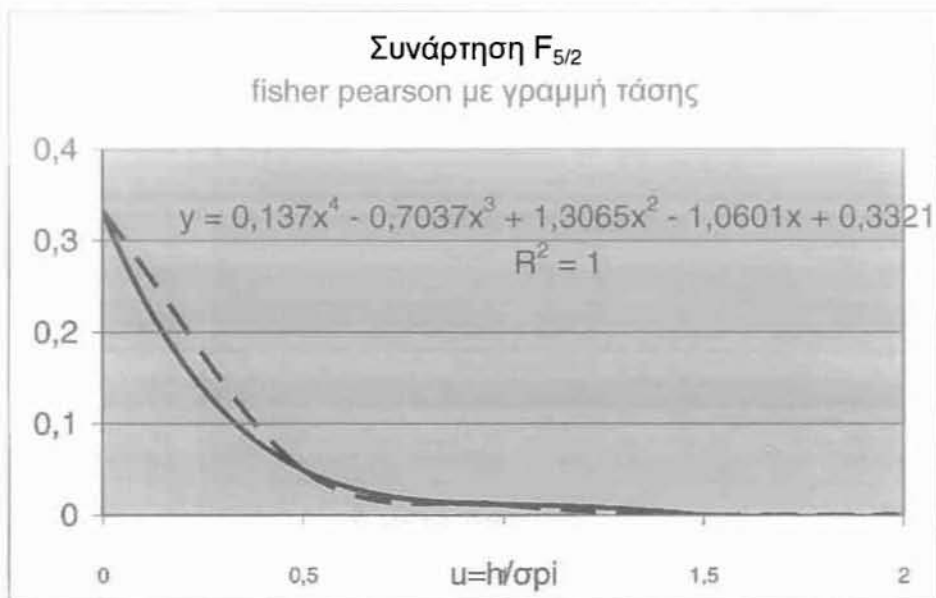
Σχήμα4.5: συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης **F_i Fisher-Pearson** μετρήσεις



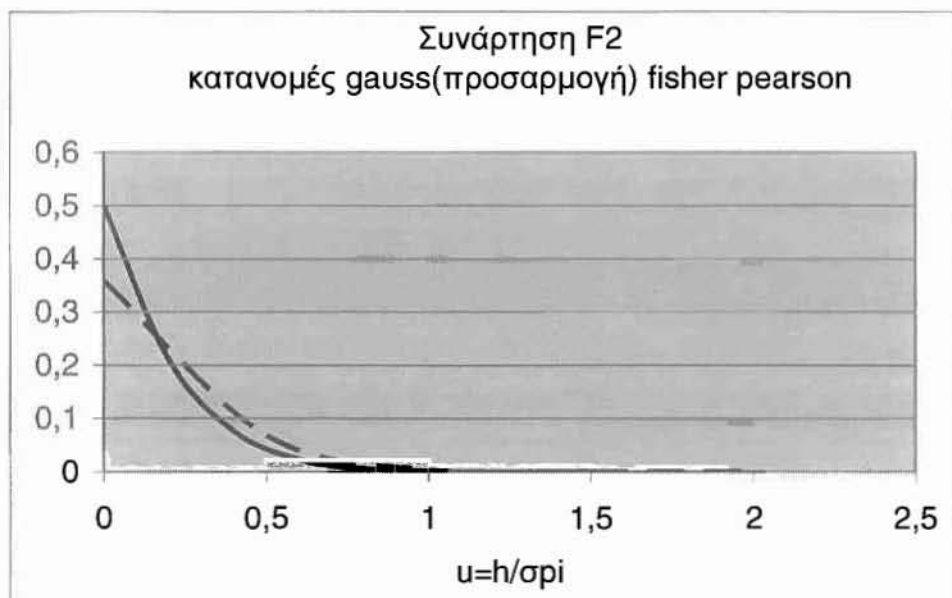
Σχήμα4.6: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης F_i **Gauss** με προσαρμογή μετρήσεις



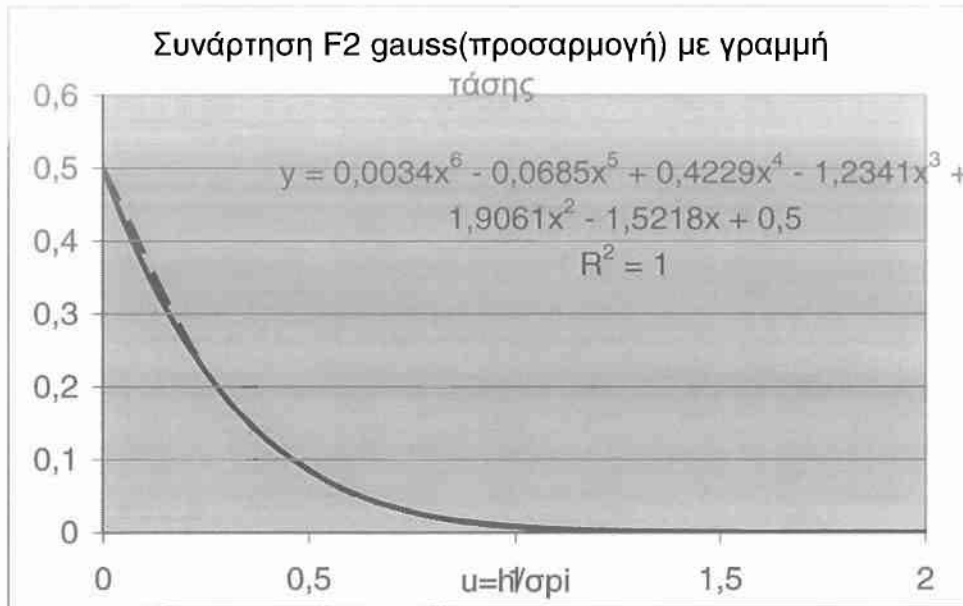
Σχήμα4.7: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης $F_{5/2}$ **Gauss** με προσαρμογή μετρήσεις



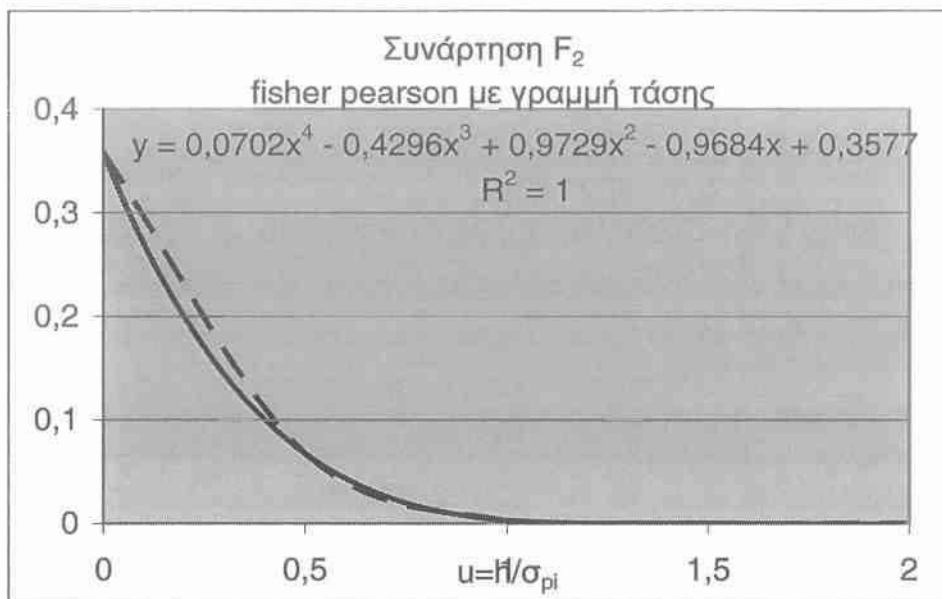
Σχήμα4.8: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης $F_{5/2}$ **Fisher-Pearson** μετρήσεις



Σχήμα4.9: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης F_2 , συνεχής μαύρη γραμμή **Gauss** προσαρμοσμένη, διακεκομμένη **Fisher-Pearson** μετρήσεις



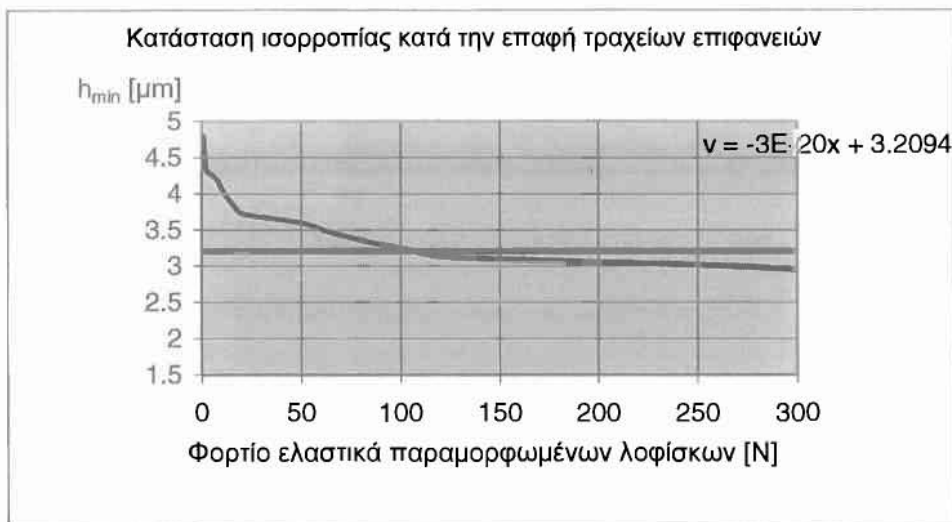
Σχήμα4.10: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης F2 **Gauss** με προσαρμογή μετρήσεις



Σχήμα4.11: διάγραμμα μεταβολής τιμών συνάρτησης F2 **Fisher-Pearson** μετρήσεις

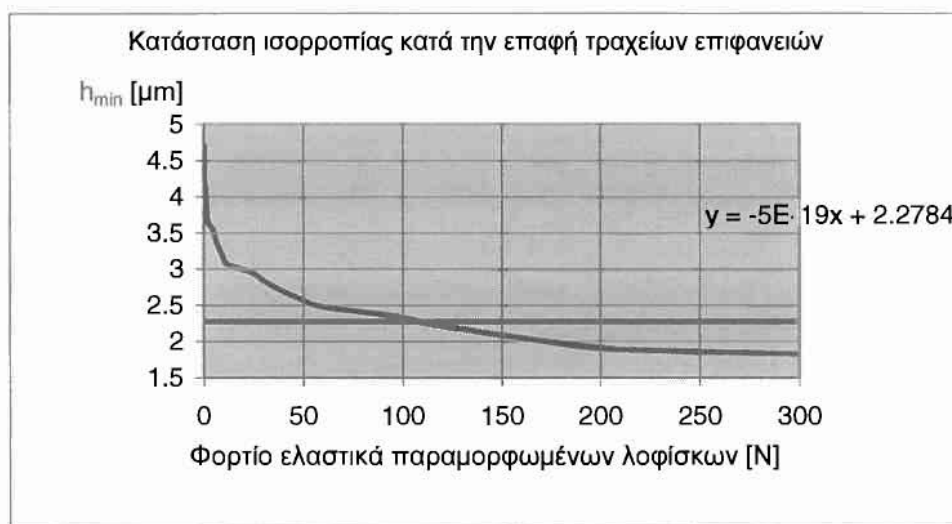
ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Με βάση τις συναρτήσεις που εξάγονται από τη συνθετική τραχύτητα



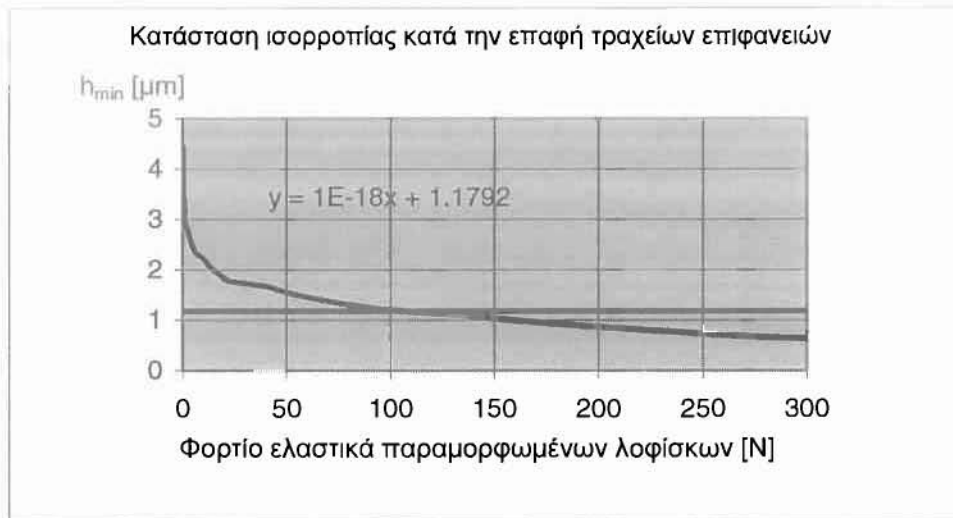
χαλ-χαλ 1

Σχήμα4.12 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 1, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο **Gauss**, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών **3.2094** μm .



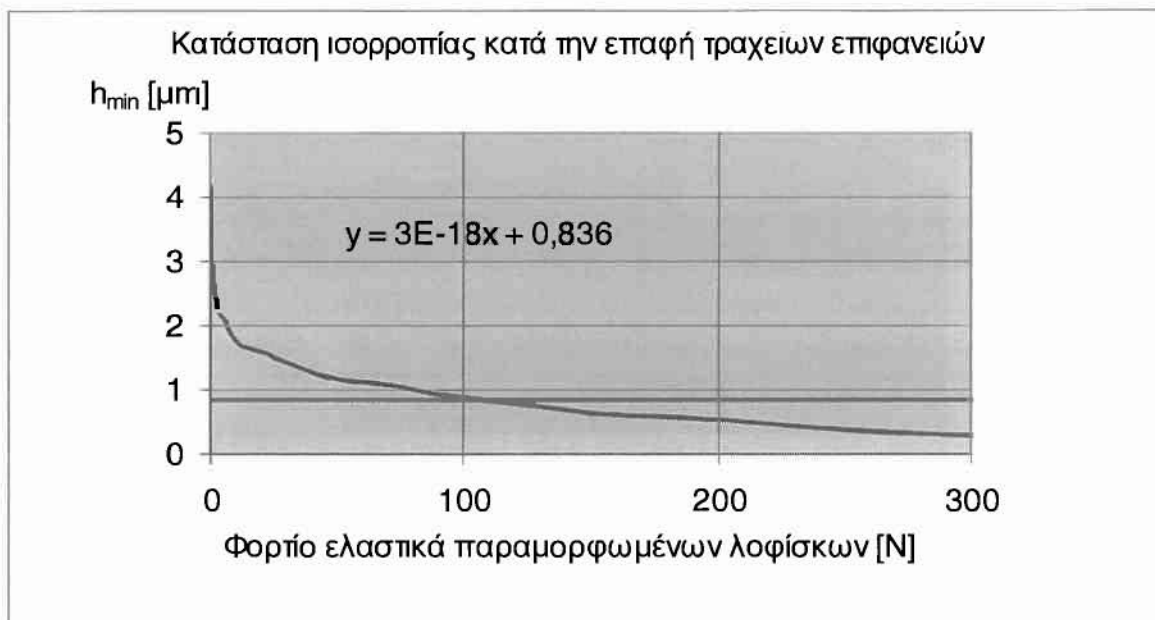
χαλ-χαλ 2

Σχήμα4.13 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 1, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο **Gauss**, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών **2,278** μm .



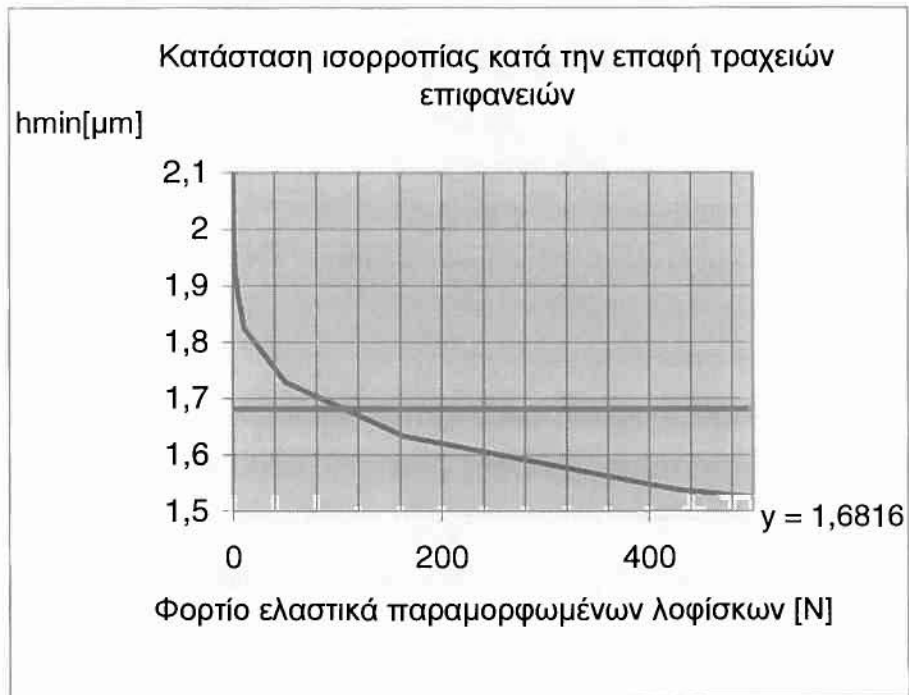
χαλ-χαλ 3

Σχήμα4.14 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 1, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο **Gauss**, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών **1,1792 μm** .



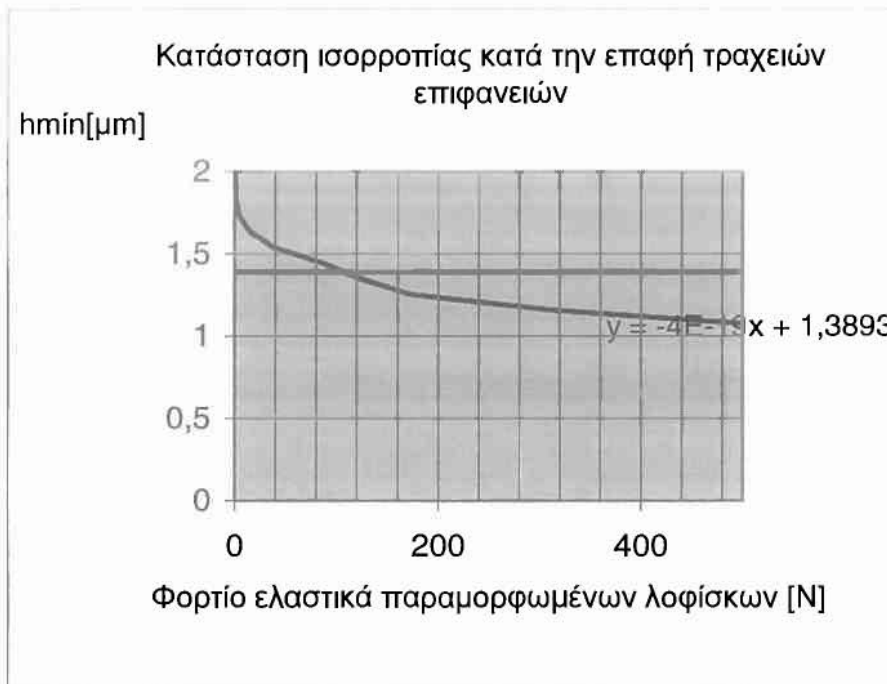
χαλ-χαλ 4

Σχήμα4.15 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 1, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο **Gauss**, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών **0,836 μm** .



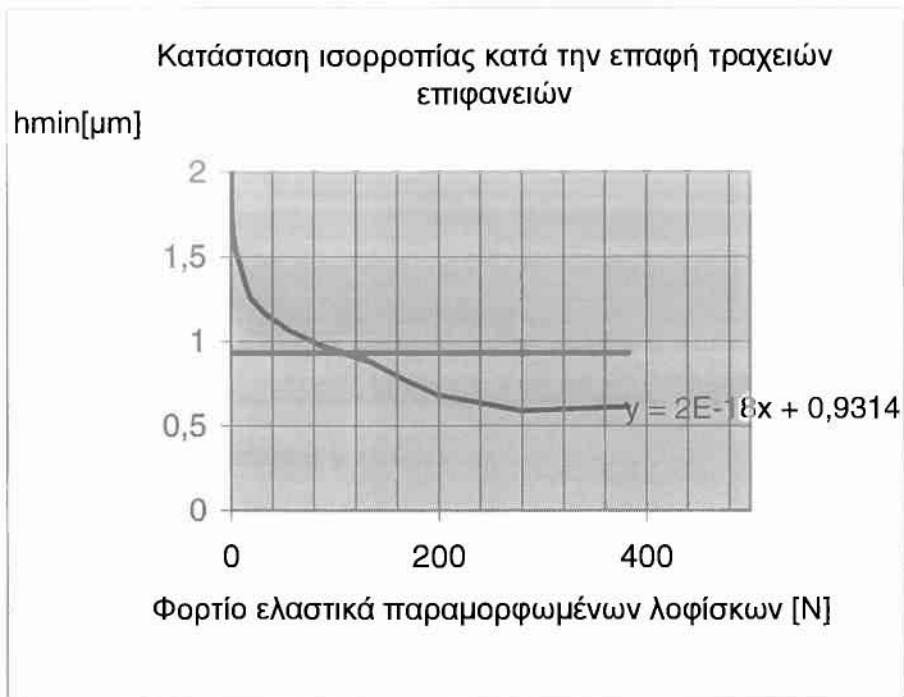
χαλ-χαλ 1

Σχήμα 4.16 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 1, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο **Fisher-Pearson**, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών **1,68 μm** .



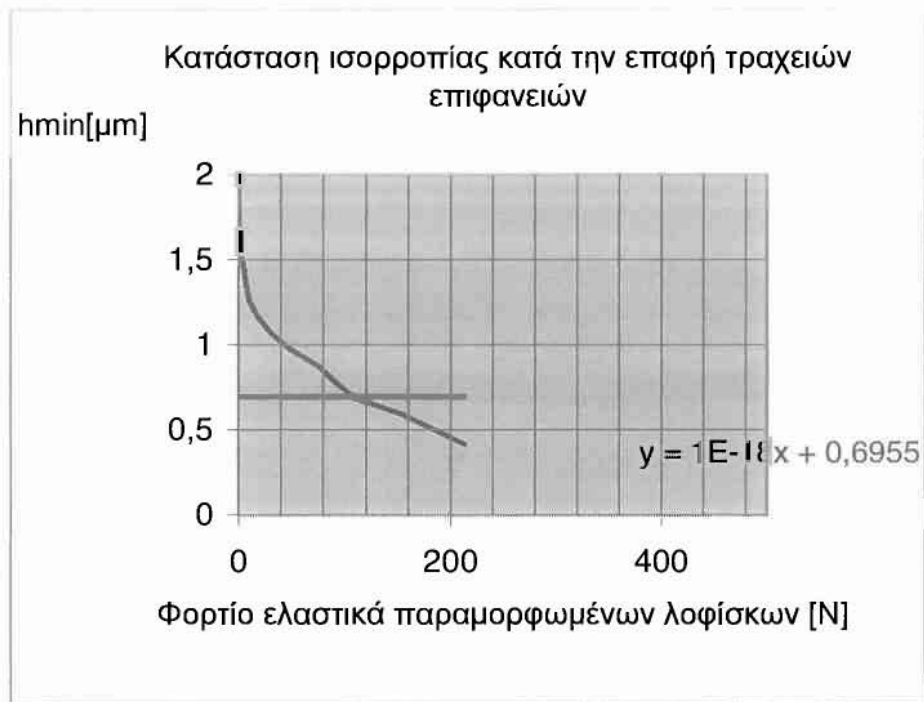
χαλ-χαλ 2

Σχήμα4.17 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 1, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο **Fisher-Pearson**, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών **1,389 μm**.



χαλ-χαλ 3

Σχήμα 4.18 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 1, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο **Fisher-Pearson**, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών **0,9314 μm**.



χαλ-χαλ 4

Σχήμα4.19 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 1, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο **Fisher-Pearson**, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών **0,6955 μm** .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η νεότερη εποχή μας χαρακτηρίζεται από ραγδαία ανάπτυξη πανεπιστημιακής και βιομηχανικής έρευνας σ' όλους τους τομείς των επιστημών του Μηχανικού. Αν γίνει χρονικός διαχωρισμός σε εικοσαετίες, η εικοσαετία 1920-1940 χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση έντονης βιομηχανικής ανάπτυξης και έρευνας, η μεταπολεμική εικοσαετία 1940-1960 από τον ισχυρή παρουσία βιομηχανικό ανταγωνισμό με έμφαση στην αυτοκινητοβιομηχανία, η εικοσαετία 1960-1980 από την αυτονόμηση της Τριβολογίας και την παρουσία της πλέον αυτοτελώς στον χώρο των επιστημών, ενώ η εικοσαετία 1980-2000 θεωρείται ότι καθιέρωσε στον χώρο τα πλεονεκτήματα της εποχής των ηλεκτρονικών υπολογιστών, της πληροφορικής και γενικά της πληροφορίας/πληροφόρησης.

Κατά την τελευταία περίοδο θεωρείται ότι η ανάπτυξη διαδικασιών βελτιστοποίησης στοιχείων μηχανών βασίζεται στην αποκτηθείσα τεχνογνωσία και την μεταφορά θεωρητικών ευρημάτων σε πρακτικής σημασίας λύσεις. Με στόχο την μακροζωία και εύρυθμη λειτουργία μηχανολογικών συστοιχιών και εξοπλισμών κάθε βελτιστοποίηση προκύπτει από τον συστηματικό μηχανολογικό σχεδιασμό με βάση την επιλογή υλικών, επιφανειακών κατεργασιών και λιπαντικών.

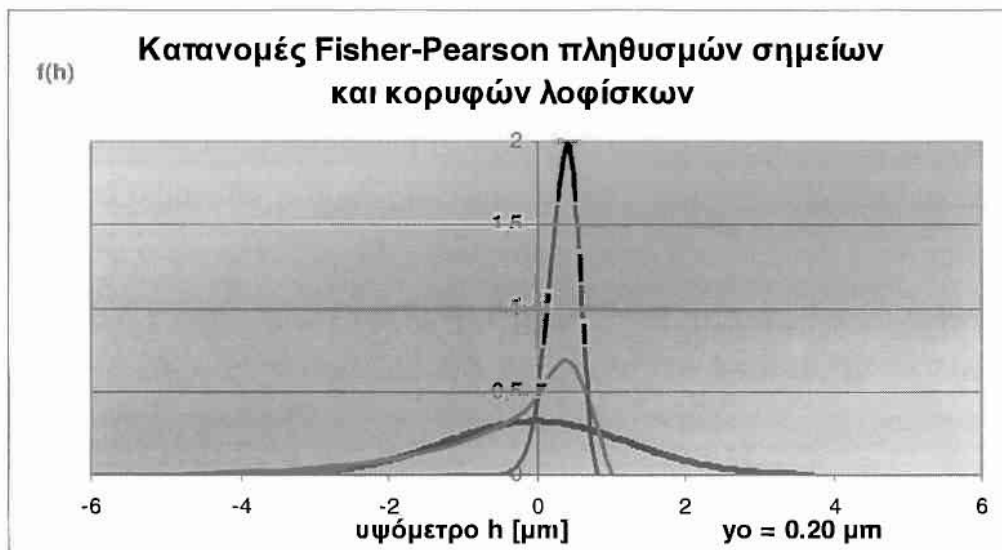
Στον χώρο των λιπαντικών, η ανάπτυξη και εισαγωγή χρήσης προσθέτων οδηγεί σε θεαματική βελτίωση των ιδιοτήτων τους ενώ παράλληλα αξιοσημείωτες βελτιώσεις επιτυγχάνονται στην περιοχή των ορυκτών λιπαντικών μέσα από την βελτίωση της παραγωγικής τους διαδικασίας.

Ακολουθεί η εισαγωγή συνθετικών λιπαντικών και η δημιουργία λιπαντικών υψηλών προδιαγραφών για **υψηλές/χαμηλές θερμοκρασίες για υψηλές φορτίσεις με σύγχρονη μεγάλη διάρκεια ζωής για απαιτήσεις μεγάλων χρονικών περιόδων μεταξύ συντηρήσεων.**

Με την παρούσα διπλωματική εργασία εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα που αποτελούν συγχρόνως και τη βάση για συνεχή βελτίωση της θεωρητικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς τραχειών επιφανειών λιπαινομένων ή μη και για κάθε επίπεδο φθοράς τους.

Με τη χρήση ακόμη και συνθετικών τραχειών επιφανειών που έχουν παραχθεί κατά την αναζήτηση μαθηματικών μοντέλων για τον χαρακτηρισμό των κατατομών τεχνολογικών επιφανειών έχουν αποδειχθεί τα εξής:

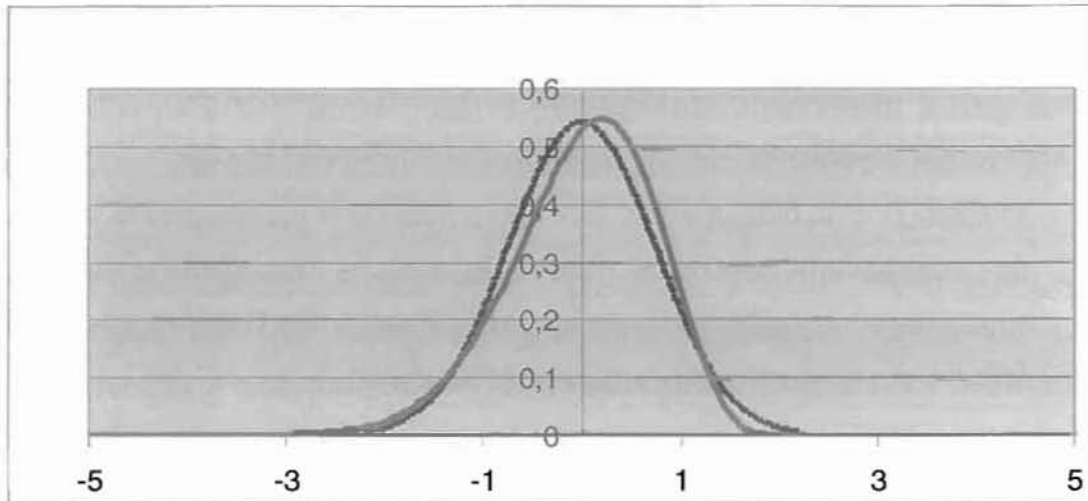
1. Υπάρχει σαφής διαχωρισμός των δυο κατανομών της κατανομής όλων των σημείων της κατατομής και της κατανομής των υψομέτρων των λοφίσκων που λαμβάνονται υπόψη στην θεωρία των Greenwood-Tripp όπως φαίνεται σαφέστατα στο παρακάτω σχήμα.



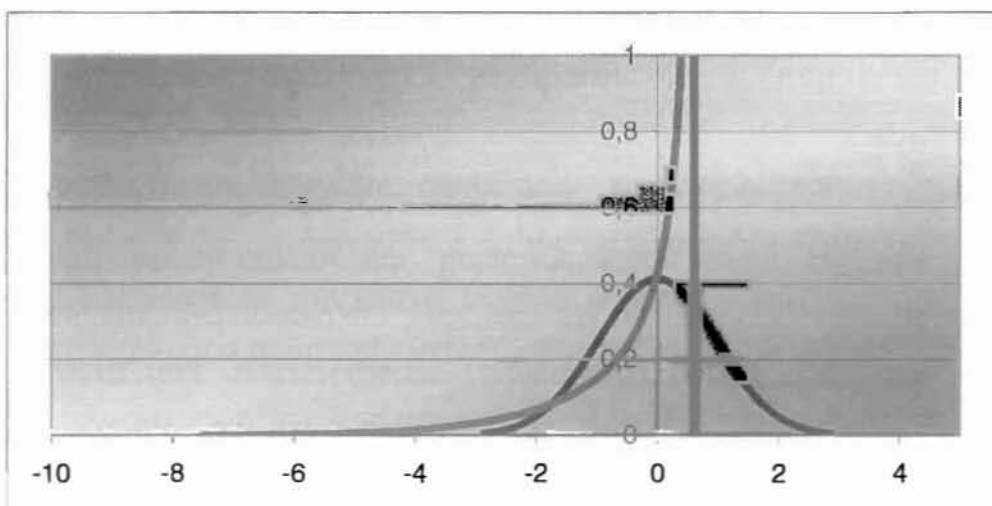
2. Υπάρχει σαφής διαφοροποίηση των συναρτήσεων των δυο προαναφερθεισών κατανομών αν και στις περισσότερες περιπτώσεις ανήκουν στην ίδια ομάδα κατανομών Fischer-Pearson, που εμφανίζουν ασυμμετρία, μέγιστο προς τις θετικές τιμές καθώς και άνω και κάτω όρια όπως η παρακάτω συνάρτηση αντιπροσωπευτικά περιγράφει.

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

3. Σε περιπτώσεις αρχικής κατάστασης (χωρίς φθορά) ορισμένων τεχνολογικών επιφανειών η κατανομή Fischer-Pearson, είναι δυνατόν να προσεγγίζει την κανονική κατανομή όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

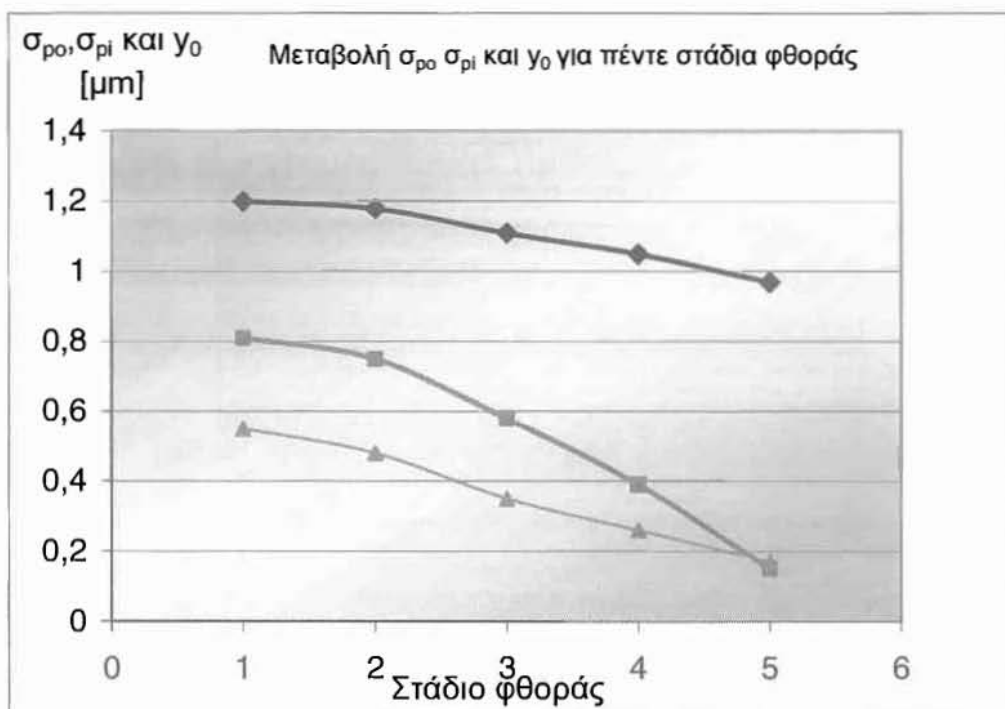


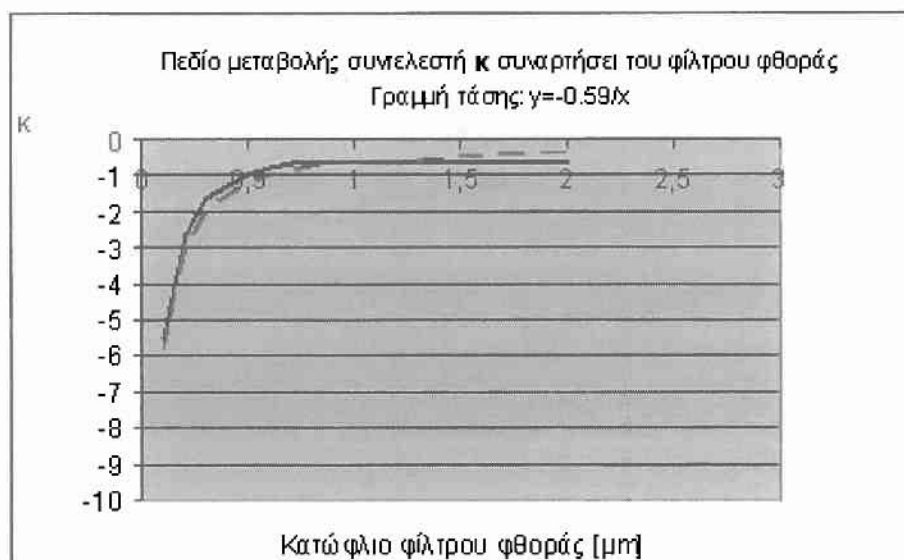
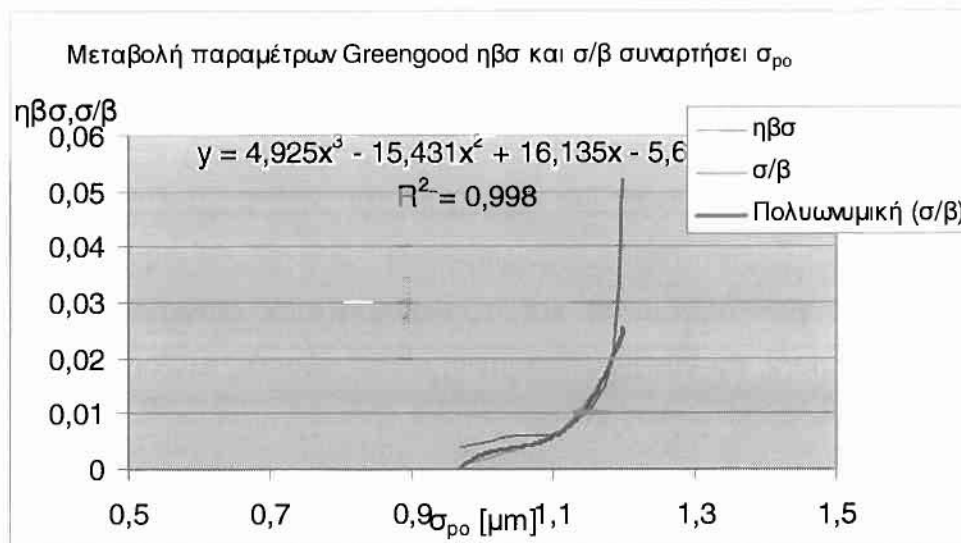
4. Για τις φθαρμένες επιφάνειες όπου υπάρχει εμφανής ασυμμετρία (ακόλουθο σχήμα) η κατανομή εμφανίζει χαρακτηρισικά τύπου J. Σε περιπτώσεις που στο άνω φράγμα η συνάρτηση απειρίζεται με αποτέλεσμα αδυναμία χρήσης της στο μοντέλο Greenwood- Tripp η αδυναμία αυτή είναι μικρής σημασίας στην πράξη διότι οι επιφάνειες θεωρούνται τόσο φθαρμένες ώστε μπορεί να θεωρούνται λείες δηλαδή με μηδενική τραχύτητα χωρίς αυτό να απέχει από την πραγματικότητα.



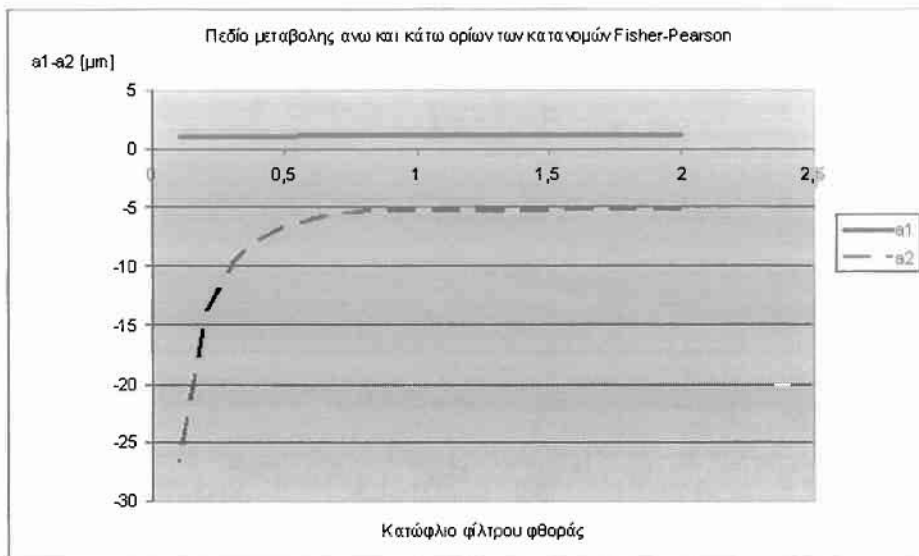
$$f(x) = f_0 (x + 10.6689)^{(6.864064-1)} (0.994434-x)^{(0.639788-1)}$$

5. Η μελέτη της μεταβολής των στατιστικών χαρακτηριστικών των τεχνολογικών τραχειών επιφανειών στο πεδίο του χρόνου αυξανόμενης της φθοράς μπορεί να δώσει τάσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για προβλέψεις είτε για ταξινόμηση και αξιολόγηση των επιφανειών αυτών. Αποδεικνύεται επίσης ότι για προχωρημένη φάση φθοράς τα χαρακτηριστικά των δυο πληθυσμών (υψομέτρων σημείων- υψομέτρων κορυφών) συγκλίνουν (βλ. ακόλουθο σχήμα)

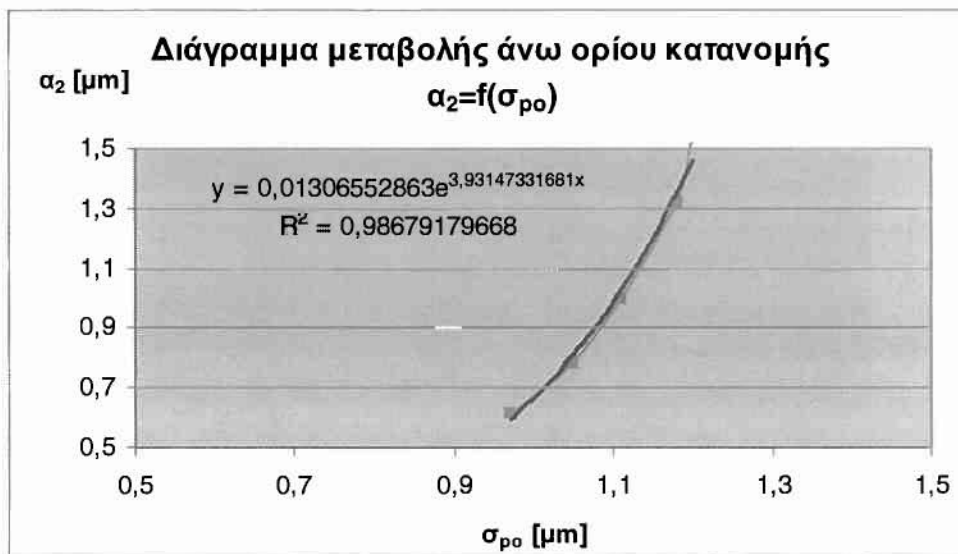




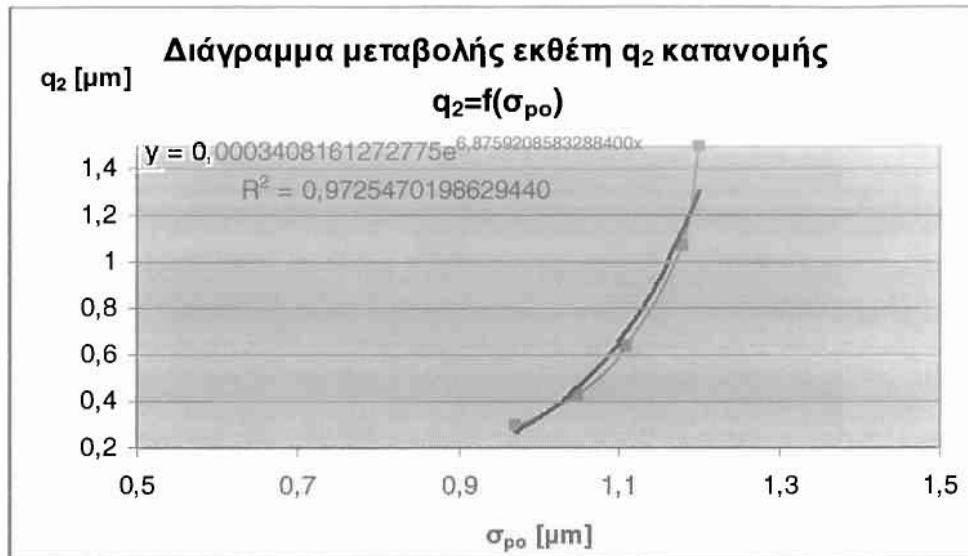
Σχήμα5.1: διάγραμμα μεταβολής παραμέτρου κ συνάρτηση σ_{po} για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης). Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



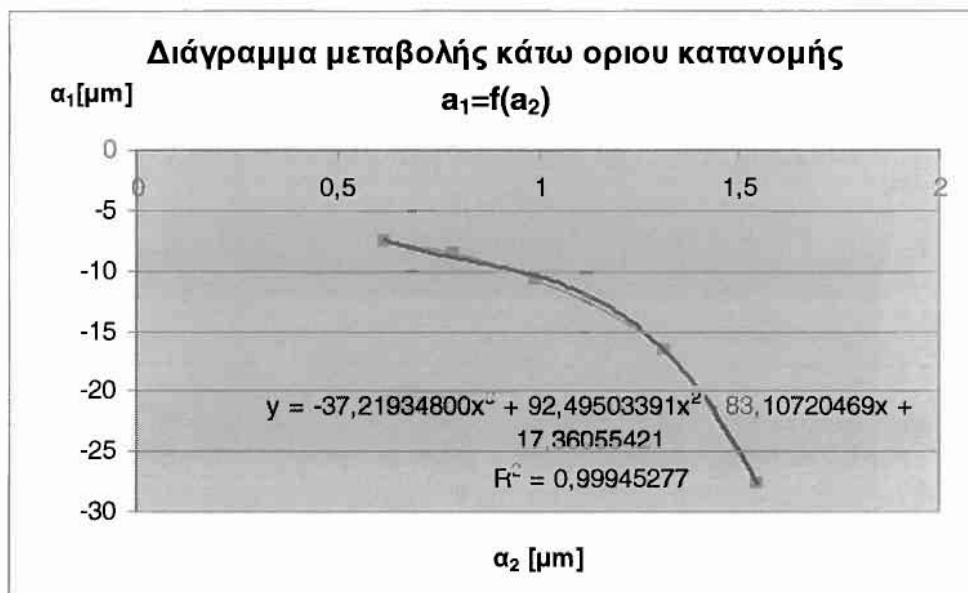
Σχήμα5.2: διάγραμμα μεταβολής άνω και κάτω φραγμάτων της συνάρτησης κατανομής των σημείων α_1 α_2 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης). Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ.



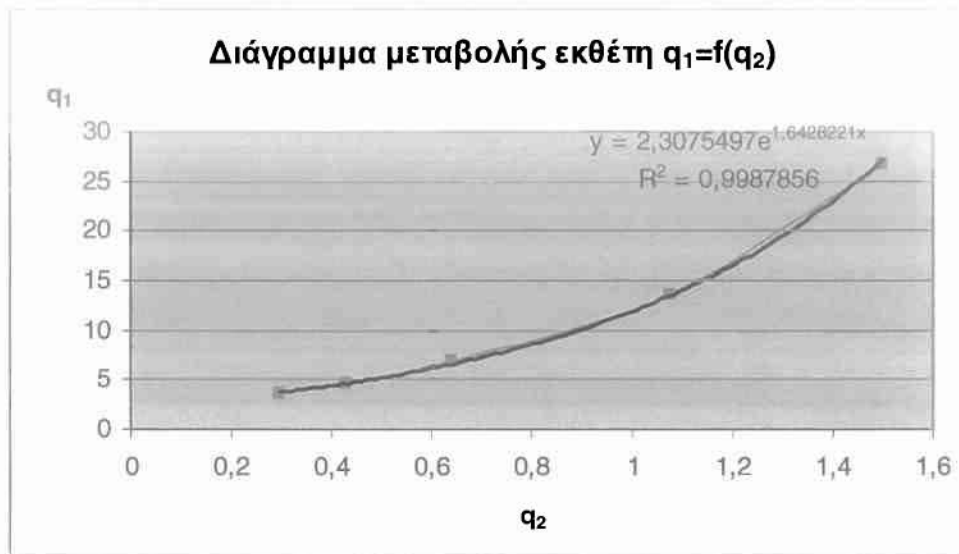
Σχήμα5.3: διάγραμμα μεταβολής άνω και κάτω φραγμάτων της συνάρτησης κατανομής των σημείων α_2 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης). Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ



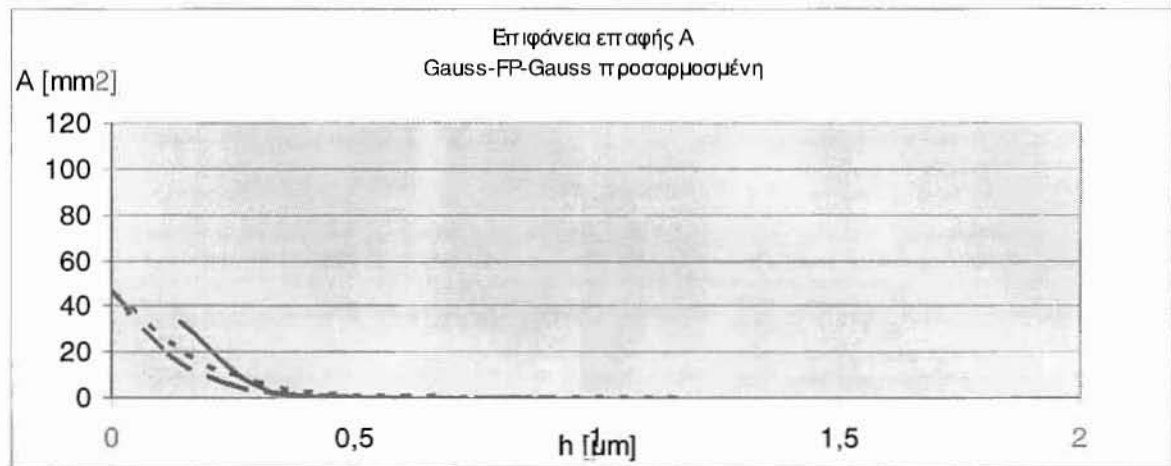
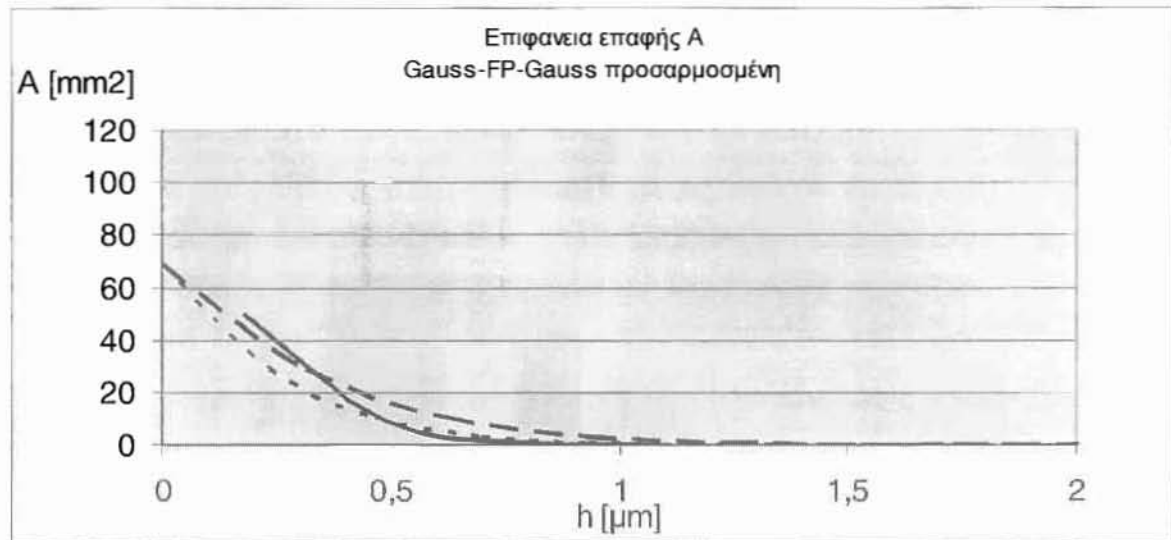
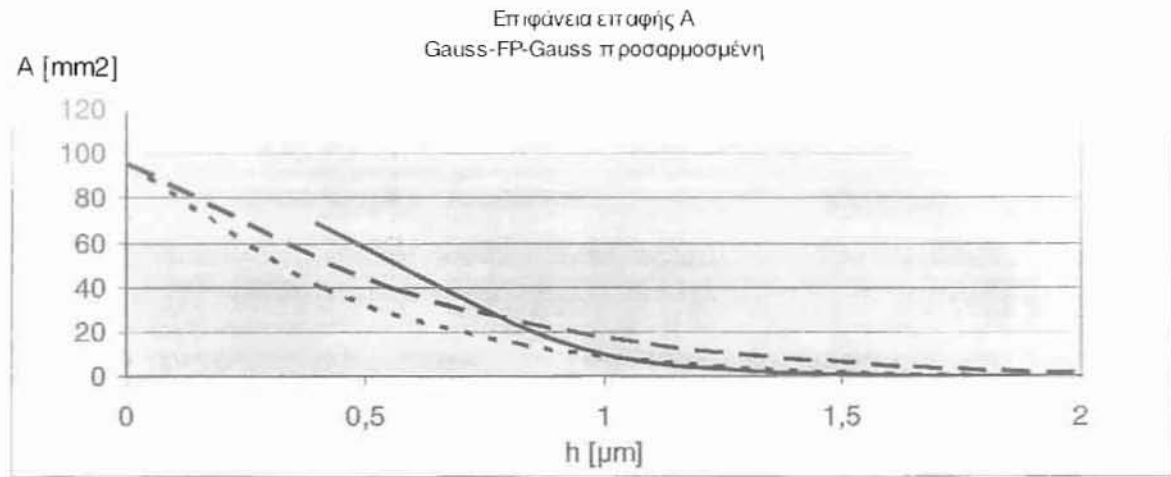
Σχήμα5.4: διάγραμμα μεταβολής άνω και κάτω φραγμάτων της συνάρτησης κατανομής των σημείων q_2 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης). Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ



Σχήμα5.5: διάγραμμα μεταβολής κάτω φραγματος της συνάρτησης κατανομής των σημείων a_1 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης) σε σχέση με a_2 . Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ

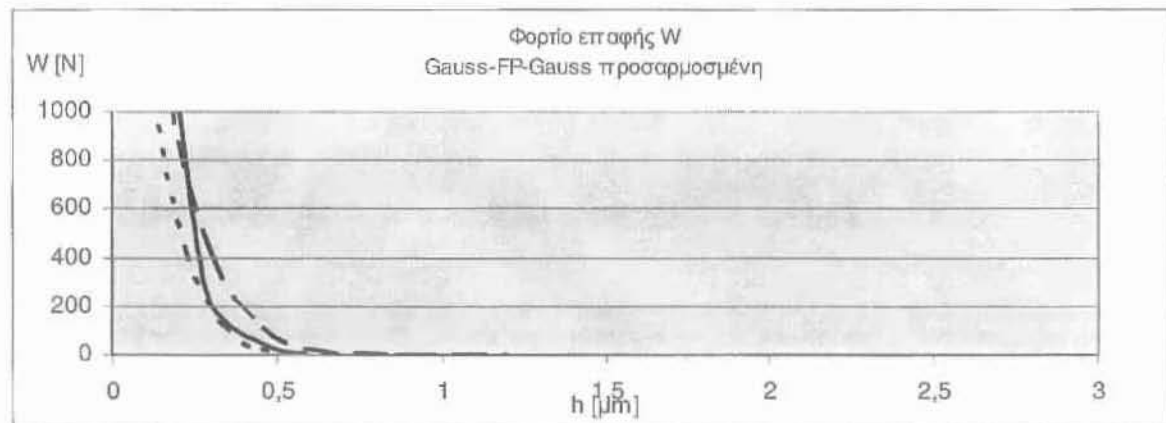
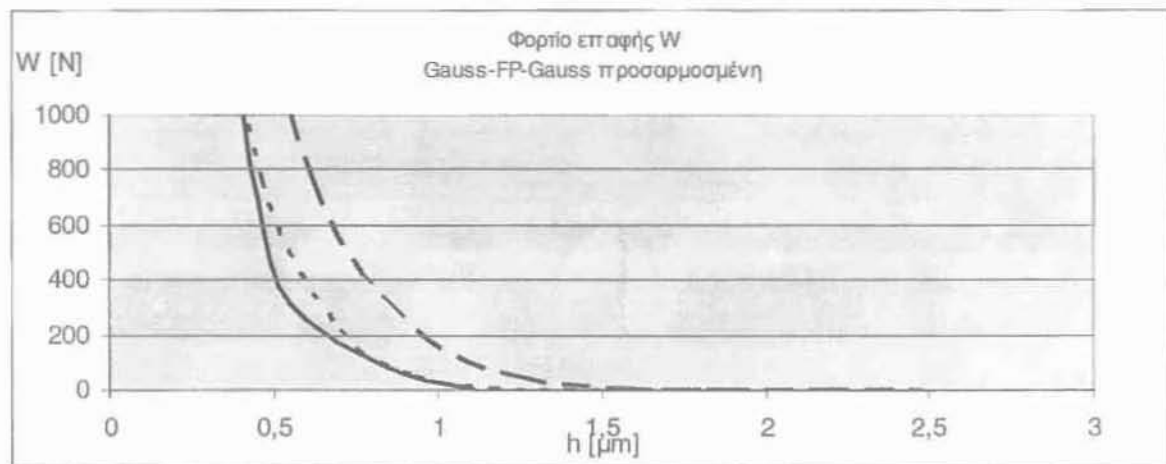
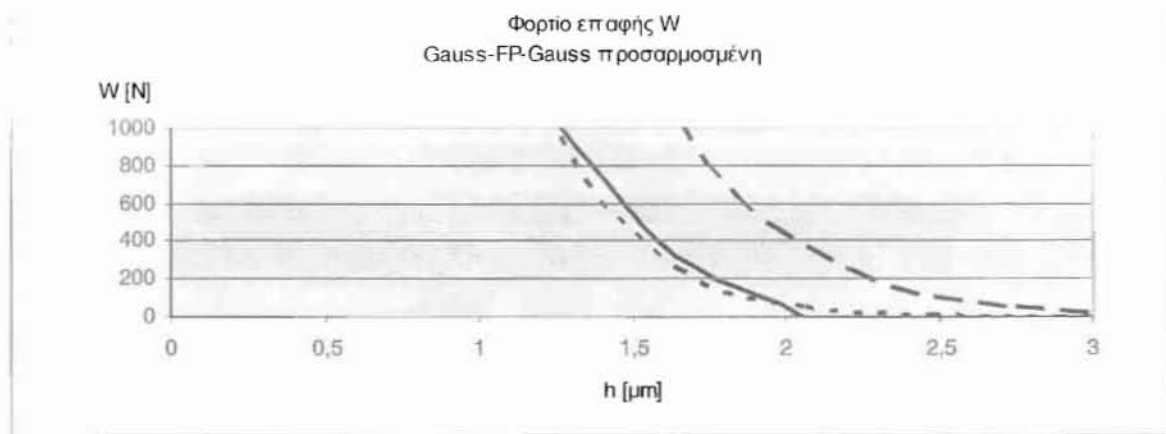


Σχήμα5.6: διάγραμμα μεταβολής κάτω φραγματος της συνάρτησης κατανομής των σημείων q_1 για πέντε διαφορετικά στάδια φθοράς (και γραμμή τάσης) σε σχέση με q_2 . Προσομοίωση φθοράς σε συνθετικά προφίλ



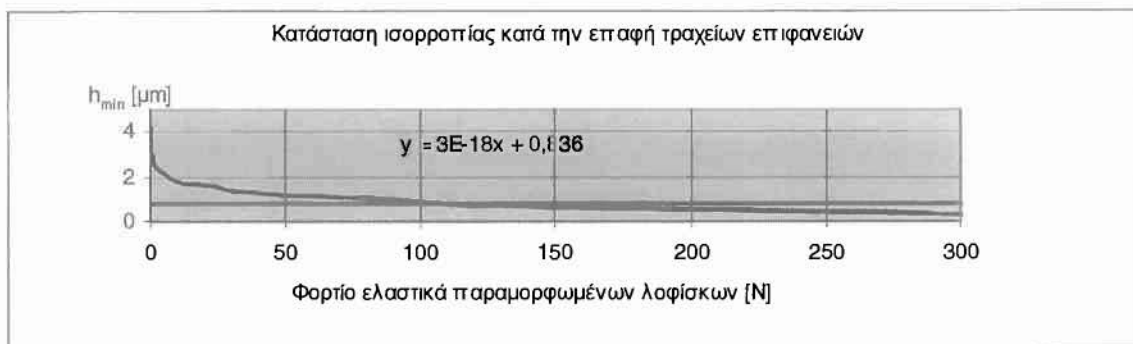
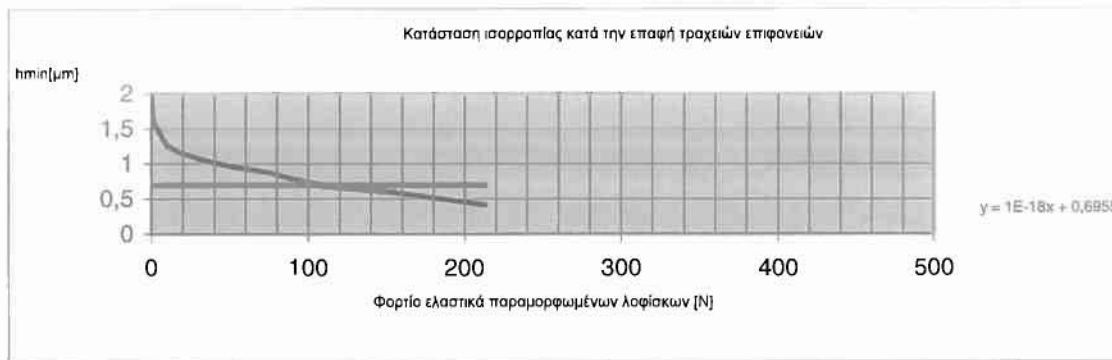
Σύγκριση επίδρασης κατανομών υψομέτρων κορυφών λοφίσκων επί της πραγματικής επιφάνειας επαφής τραχείας επιφάνειας με λείο επίπεδο.

(α) αρχική κατάσταση, (β) κατάσταση μετά το στρώσιμο, (γ) κατάσταση μετά από λειτουργική φθορά.



Σύγκριση επίδρασης κατανομών υψομέτρων κορυφών λοφίσκων επί του πραγματικού φορτίου επαφής.

(α) αρχική κατάσταση, (β) κατάσταση μετά το στρώσιμο, (γ) κατάσταση μετά από λειτουργική φθορά



χαλ-χαλ 4

Σχήμα 5.7 : Διάγραμμα κατάστασης επαφής μεταξύ λείου επιπέδου και τραχείας επιφάνειας για κατάσταση φθοράς 4, και υλικά χάλυβα – χάλυβα, μοντέλο Gauss, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών 0,836 μm./ μοντελο Fischer Pearson, απόσταση ισορροπίας μεταξύ επιφανειών 0,6955 μm

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

CETIM, "Les etats de surface", Note Technique No 19.

CHRISTENSEN, H., "Stochastic Models for Hydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces", Proc. Inst. Mech. Engrs Tribology Group 184, Part 1, Vol.55. p. 1013, 1970.

CHRISTENSEN, H., "A Theory of Mixed Lubrication", Proc. 1 Mech. Engrs, Vol. 186, p. 421. 1972.

GREENWOOD, J.A., "Constriction resistance and the Real Area of Contact", BRIT J. APP. PHYS. Vol 17, pp. 1621-1632, 1966.

GREENWOOD, J.A., and WILLIAMSON, J.B.P., "Contact of Nominally Flat Surfaces", Proc. Roy Soc Lond, A. 295, pp. 300-319, 1966.

GREENWOOD, J.A., "The Area of contact Between Rough Surfaces and Flats", Journal of Lubrication technology, pp. 81-91, January 1967.

GREENWOOD, J.A., and TRIPP, J.H., "The Contact of two Nominally Flat Surfaces", Proc. Inst. Of Mech. Eng., Vol. 185; p. 625, 1971.

PANDAZARAS, C., "Diminution des Pertes par Frottement dans les ensembles Pistons-Segments-Chemises", Repport de stage de Fin d'etudes, ISMCM, 1981.

PANDAZARAS, C., "Etudes Experimentales et Theoriques sur les Pertes par Frottement dans les Ensembles Pistons-Segments-Chemises" DLA/RNUR, 1982.

PANDAZARAS C., "Modelisation du Frottement Segment-Chemise"
DLA.RNUR, Note Technique no 5781, 1982.

PANDAZARAS, C., "Influence de la Forme des Segments sur le Frottement
Segment-Chemise', PLA/RNUR, Note technique No 5808, 1983.

PATIR, N., and CHENG, H.S., "An Average Model for Determining Effects of
Tree Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication",
Transaction of the ASME, Vol. 100, January 1978.

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.

PEKLENIK, J., "Properties and Metrology of surfaces" Oxford Inst. 4th, Paper
24, April 1968.

ROHDE, S.M., "A Mixed Friction Model for Dynamically Loaded Contacts with
Application to Piston Ring lubrication", GENERAL MOTORS Research
Laboratories, 1980.

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.

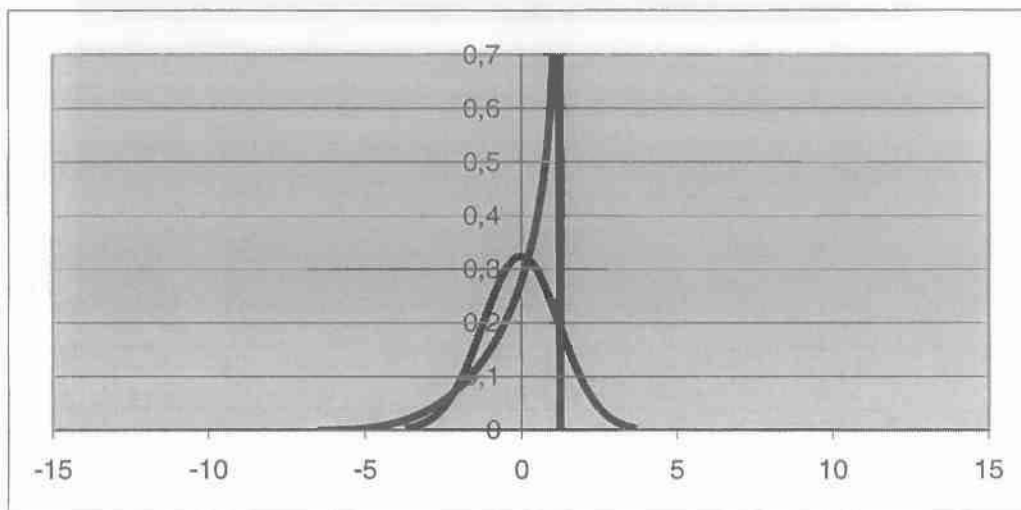
"Statistique Appliquee e l' Exploitation des mesures "Tomes 1 et 2,
Commissariat e l' energie Atomique, MASSON 1978.

Priest M., «The Wear and Lubrication of Piston Rings», Ph. D. Thesis,
University of Leeds (1996)

Pawlus Pawel, «Change of Cylinder Surface Topography in the Initial Stage of
Engine Life», Wear 209, (1997), pp 69-83

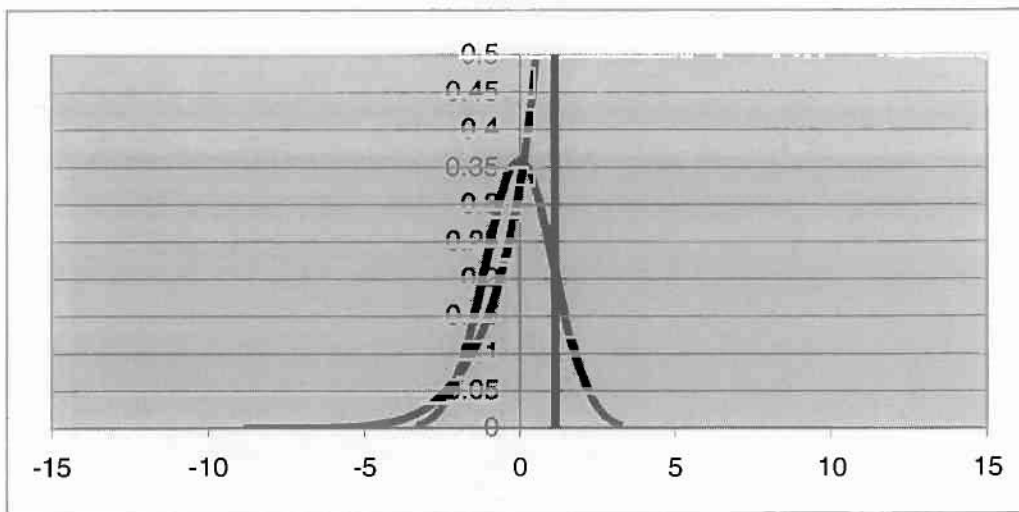
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κύρια κατεύθυνση άξονας χ

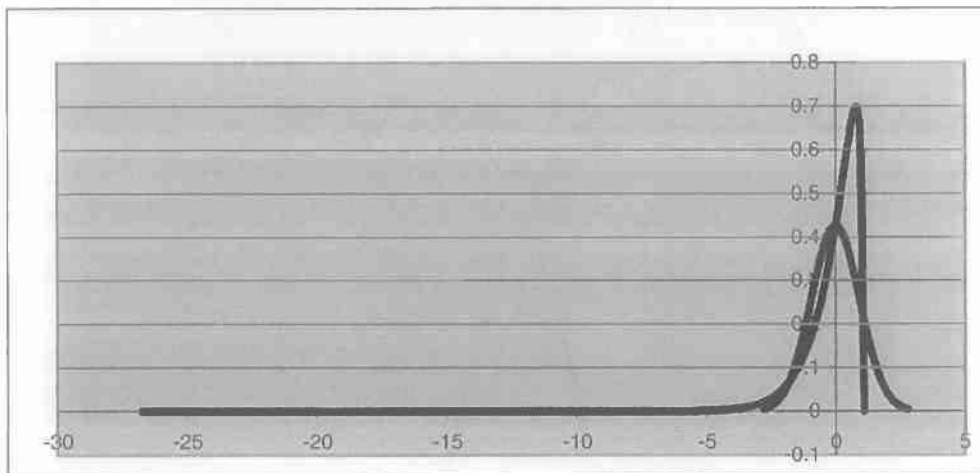


k	γ_1	γ_2	β_1	β_2	y_0
-0.828417663	-1.330431	1.469383853	1.770046223	4.469383853	0.770010963

r	q2	q1	w	a2	a1
4.3264078	0.707126613	3.619281202	7.679889551	1.255234023	-6.424656



γ_1	γ_2	β_1	β_2	κ^*		y_0
-1.496267	2.438879668	2.238813857	5.438879668	-1.441450449		0.77001096
						3
r	q1	q2	w	a1	a2	d
7.2435497	0.838876451	6.404673216	9.948247187	-1.152107831	8.796139	-1.4578

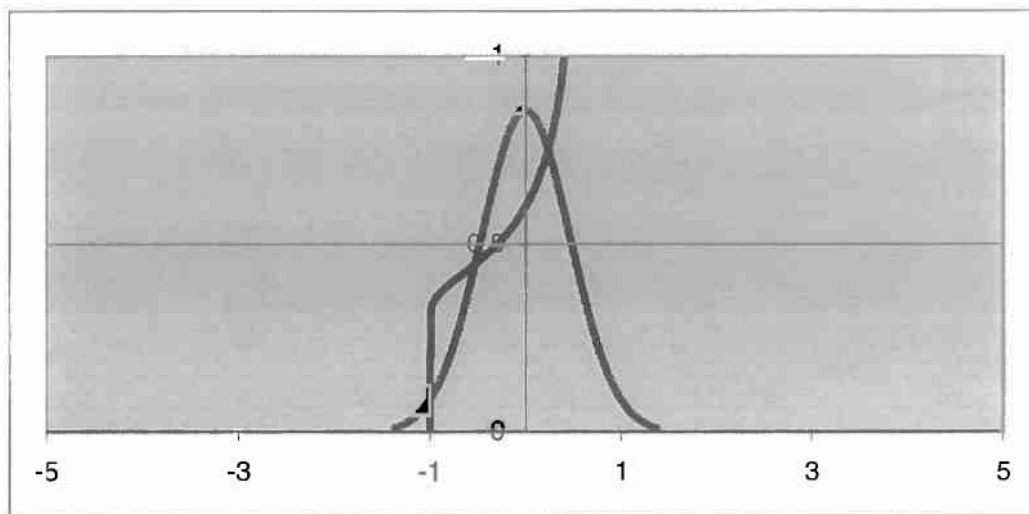
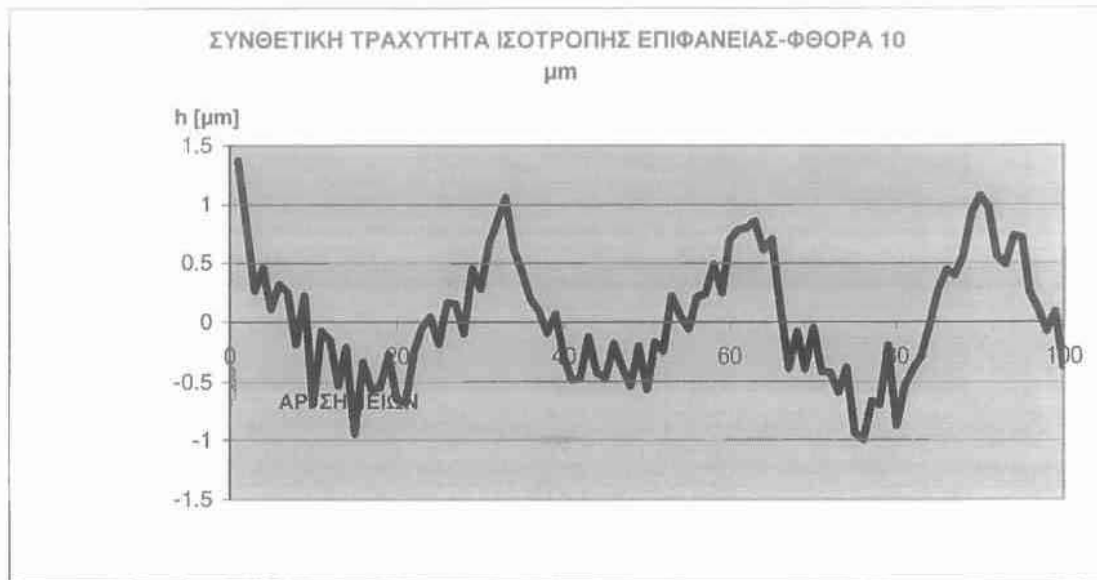


γ_1	γ_2	β_1	β_2	κ^*
-1.766576	4.559953441	3.120789678	7.559953441	-17.18728254

r	q_1	q_2	w	a_1	a_2	d
92.11666	1.284124478	90.83253582	77.91677365	-1.086175247	76.8306	-0.84052

Για τα στάδια φθοράς της κατατομής κατά τον άξονα x εμφανίζεται δυνατότητα απεικόνισης της συνάρτησης κατανομής και για προχωρημένα στάδια φθοράς.

Κύρια κατεύθυνση άξονας ψ

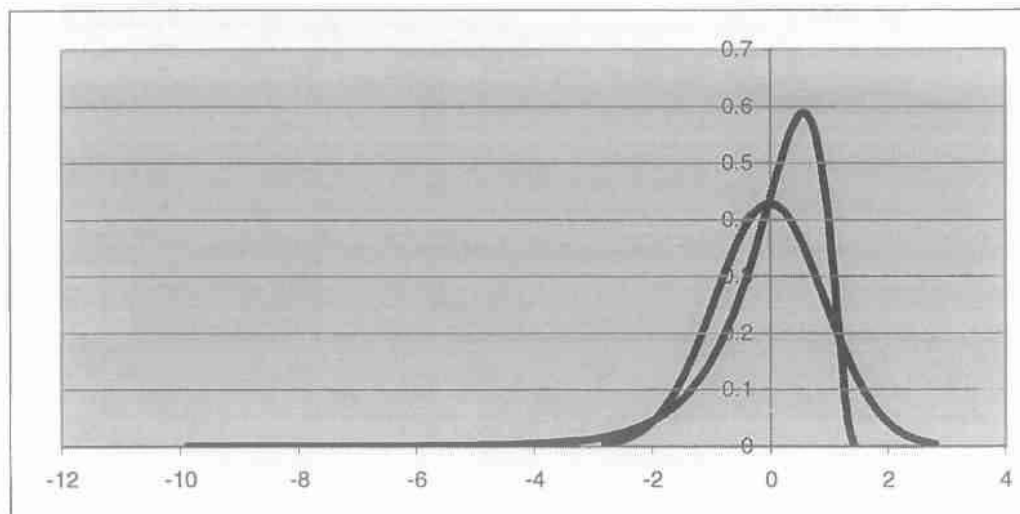


γ_1	γ_2	β_1	β_2	κ^*			
0.5033366	-0.992464152	0.253347726	2.007535848	-0.079584212			
					γ_0		
					0.691149252		
R	q2	q1	w	a2	a1	d	
1.6516648	0.601610989	1.050053858	1.577280154	0.574516722	-1.002763	1.22941	

Για τα στάδια φθοράς της κατατομής κατά τον άξονα ψ δεν εμφανίζεται δυνατότητα απεικόνισης της συνάρτησης κατανομής για προχωρημένα στάδια φθοράς(καμπύλη τύπου J)

Συνδυασμός κυρίων αξόνων $\chi\psi$

$X\psi=0,9$



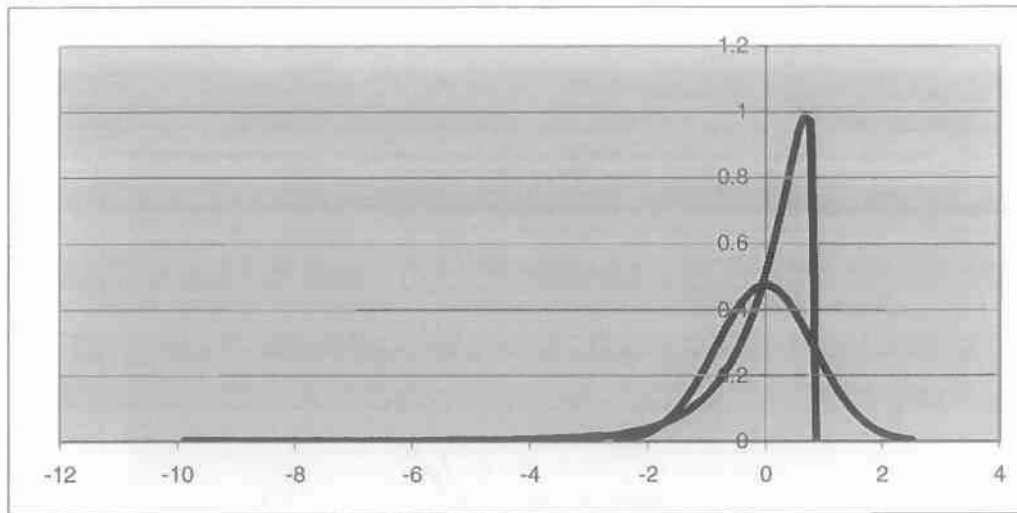
γ_1	γ_2	β_1	β_2	κ^*
-1.73531	5.672547022	3.011301181	8.672547022	1.729800267

y_0

0.77429885

R	q2	q1	c	a	d
12.011181	3.240362675	15.25154391	5.276207978	1.423409327	-0.57975

$X_{\psi}=0,5$



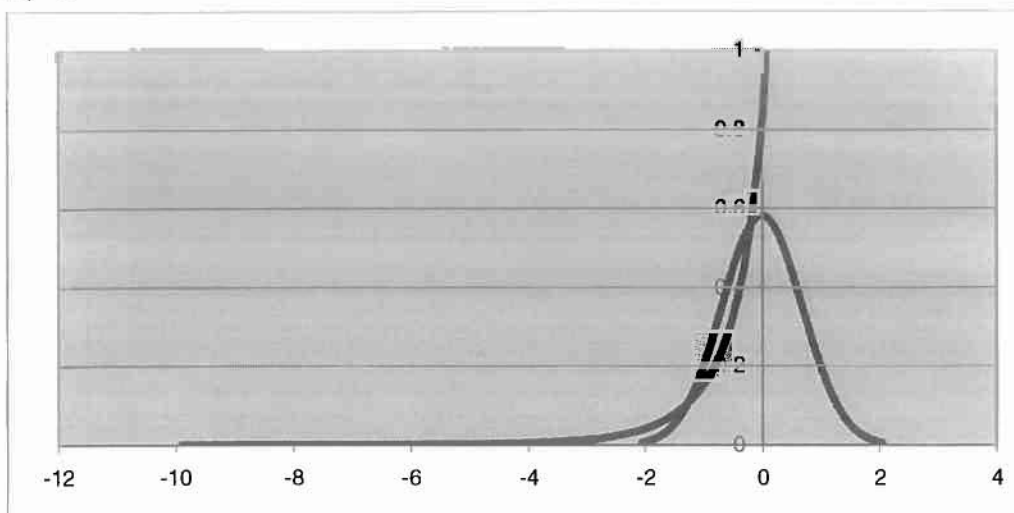
γ_1	γ_2	β_1	β_2	κ^*
-2.223621	8.594817623	4.944490742	11.59481762	3.542517989

y_0

0.77429885

R	q2	q1	c	a	d
14.253337	1.285550505	15.53888703	9.723065741	0.876952007	-0.70613

$X_{\psi}=0$



γ_1	γ_2	β_1	β_2	κ^*
-3.247247	17.071294	10.54461263	20.071294	11.49641281

y_0

0.77429885

r	q_2	q_1	c	a	d
20.089118	0.46759217	20.55671004	19.4058612	0.45168876	-0.91942

Για τα στάδια φθοράς της κατατομής για συνδυασμό αξόνων $\chi\psi$ εμφανίζεται δυνατότητα απεικόνισης της συνάρτησης κατανομής για προχωρημένα στάδια φθοράς με κύρια χαρακτηριστικά της κατεύθυνσης χ . Η καμπύλη τύπου J εμφανίζεται επίσης σε πιο πρώιμο στάδιο φθοράς.



(a)



(b)

Σχήμα : Τυπικά συνθετικά γραφήματα τραχύτητας προς επεξεργασία με τον υπολογιστικό κώδικα Fisher – Pearson P.P.R. (points-peaks-radii)



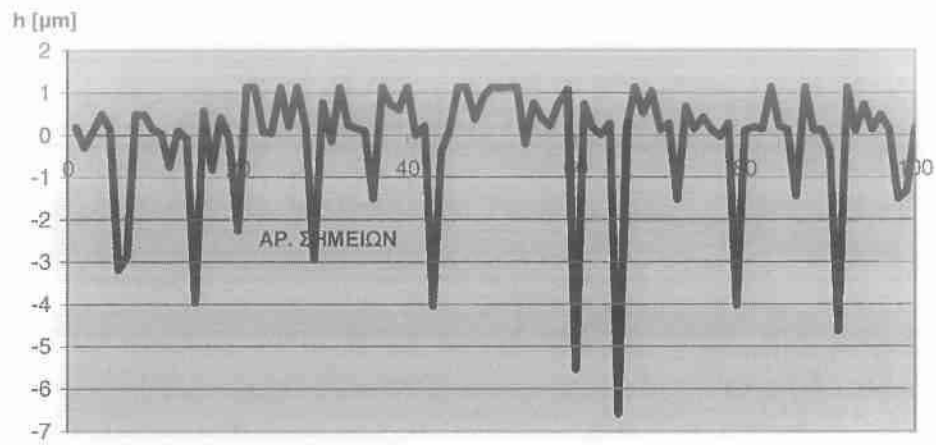
(c)



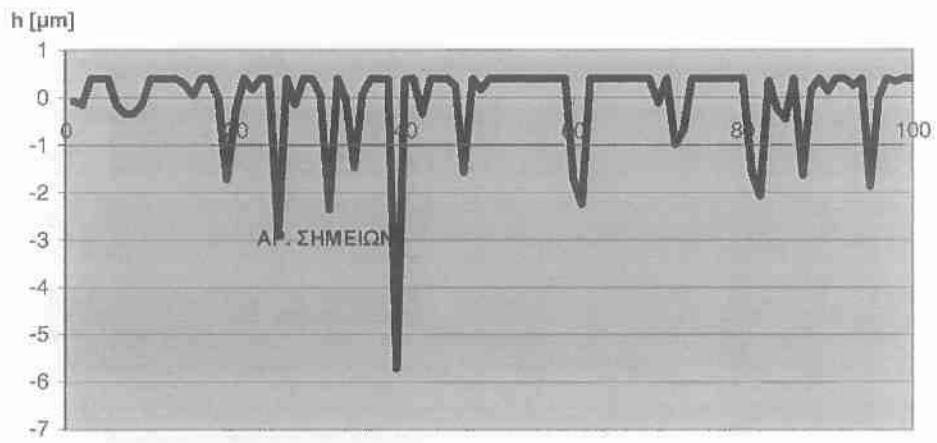
(d)

Σχήμα : Τυπικές κατατομές συνθετικής τραχείας επιφάνειας

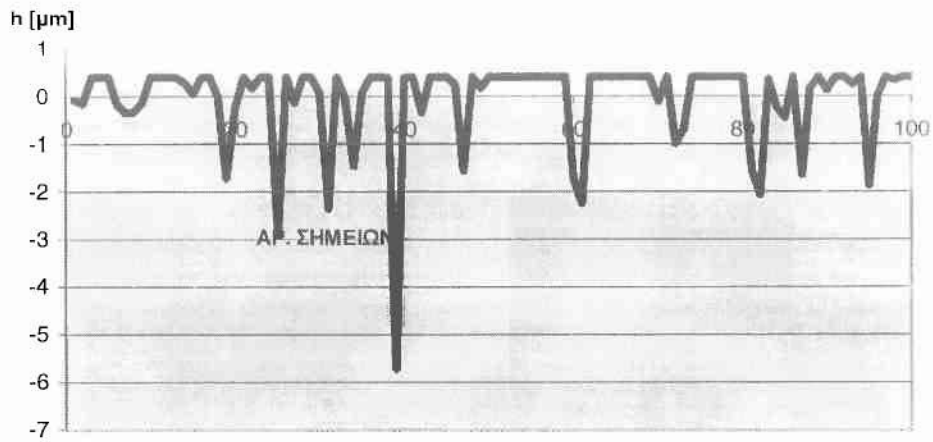
ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-φθορα/φίλτρο 1 μm



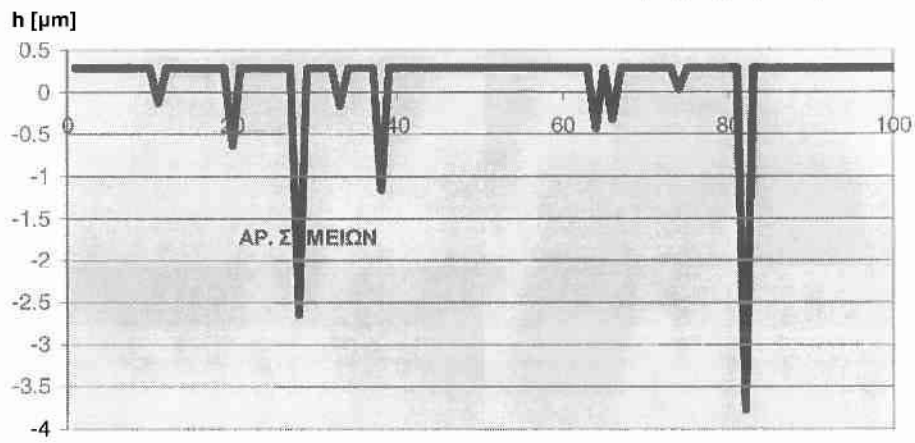
ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-φθορα/φίλτρο 0 μm



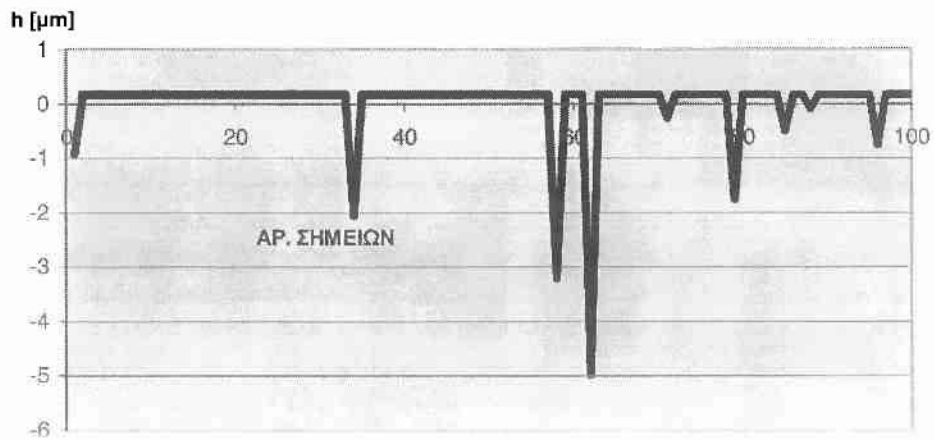
ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-φθορα/φίλτρο 0 μm



ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-φθορα/φίλτρο -1 μm



ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΙΣΟΤΡΟΠΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-φθορα/φίλτρο -2 μm



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104331

