

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

υπό

ΤΣΟΛΑΚΗ Κ. ΝΑΟΥΜ

Διπλωματούχου Μηχανικού Παραγωγής & Διοίκησης Δ.Π.Θ., 2006

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2008



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

Αριθ. Εισ.: 6448/1
Ημερ. Εισ.: 17-07-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
671.3
ΤΣΟ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

υπό

ΤΣΟΛΑΚΗΣ Κ. ΝΑΟΥΜ

Διπλωματούχου Μηχανικού Παραγωγής & Διοίκησης Δ.Π.Θ., 2006

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2008

© 2008 Ναούμ Τσολάκης

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Πενταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής:
(Επιβλέπων)

Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής:

Δρ. Σπυρίδων Καραμάνος
Επίκουρος Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής:

Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης
Λέκτορας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τέταρτος Εξεταστής:

Δρ. Πανταζάρας Κωνσταντίνος
Διδάσκων ΠΔ 407/80 (βαθμίδα Επίκουρου Καθηγητή),
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πέμπτος Εξεταστής:

Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης
Λέκτορας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Πετρόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Σ. Καραμάνο, Κ. Πανταζάρα, Α. Κερμανίδη και Γ. Κοζανίδη. Οφείλω ευχαριστίες στο Κοινοφελές Ίδρυμα Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης για τη χορήγηση υποτροφίας προκειμένου να είναι δυνατή η απόκτηση του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης στις «Σύγχρονες Μεθόδους Σχεδιασμού & Ανάλυσης στη Βιομηχανία» από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου Κωνσταντίνο και Πετρούλα για την ηθική υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου. Αφιερώνω αυτή την μεταπτυχιακή εργασία σε αυτούς.

Τσολάκης Κ. Ναούμ

Βόλος, Ιούλιος 2008

**ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ**

ΤΣΟΛΑΚΗΣ Κ. ΝΑΟΥΜ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2008

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής,
Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής

Περίληψη

Η αξιολόγηση της τραχύτητας επιφάνειας είναι πολύ σημαντική για πολλά θεμελιώδη προβλήματα όπως η τριβή, η παραμόρφωση επαφών, η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η στιβαρότητα των ενώσεων κ.α. Γι' αυτό το λόγο, η επιφανειακή τραχύτητα έχει αποτελέσει το αντικείμενο των πειραματικών και θεωρητικών ερευνών εδώ και δεκαετίες. Η πραγματική γεωμετρία της επιφάνειας είναι τόσο περίπλοκη που ένας πεπερασμένος αριθμός παραμέτρων δεν μπορεί να παρέχει μια πλήρη περιγραφή. Με την αύξηση των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων, μπορεί να ληφθεί μια ακριβέστερη περιγραφή. Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τις νέες παραμέτρους στην αξιολόγηση της επιφάνειας. Οι παράμετροι τραχύτητας επιφάνειας είναι ταξινομούνται κανονικά σε τρεις ομάδες σύμφωνα με τη λειτουργία της. Αυτές οι ομάδες ορίζονται ως οι παράμετροι εύρους, οι παράμετροι διαστήματος και οι υβριδικές παράμετροι. Τα τελευταία χρόνια, πέρα από τις παραπάνω συμβατικές μεθόδους, έχουν αναπτυχθεί και άλλες μη συμβατικές μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό της γεωμετρίας των κατεργασμένων επιφανειών. Στην εργασία αυτή θα μας απασχολήσουν οι μη συμβατικές παράμετροι χαρακτηρισμού της τραχύτητας όπως το μήκος συσχέτισης, η fractal dimension, η corner frequency, η φασματική πυκνότητα ισχύος καθώς επίσης και οι wavelet. Ειδικότερα, για τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων αναπτύχθηκε πρόγραμμα στον Η/Υ και έπειτα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τους αντίστοιχους υπολογισμούς ήδη υπάρχοντος λογισμικού

που συνοδεύει το τραχύμετρο του εργαστηρίου “Μηχανουργικών Κατεργασιών” για τις διάφορες τιμές της ανεξάρτητης παραμέτρου κοπής, της προώσεως.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΣΧΗΜΑΤΩΝ

	Σελ.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	
Σχήμα 1.1	Αντικειμενικοί στόχοι της τριβολογίας. 22
Σχήμα 1.2	Διάγραμμα ροής που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ λειτουργικών συνθηκών και είδους της φθοράς. 28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	
Σχήμα 2.1	Μοντέλο επιφάνειας TLK και επαφή μεταξύ δύο διαφορετικών πραγματικών επιφανειών. 35
Σχήμα 2.2	Τομή μίας μεταλλικής επιφάνειας ύστερα από κατεργασία κοπής. 37
Σχήμα 2.3	Ομοιότητες μεταξύ τυχαίων προφίλ από τραχείες επιφάνειες είτε φυσικές, είτε τεχνητές. 39
Σχήμα 2.4	Ομοιότητα στο προφίλ μίας επιφάνειας, ανεξαρτήτως της μεγεθύνσεως. Η τραχύτητα της επιφάνειας είναι η ίδια. 40
Σχήμα 2.5	Ορισμός της bearing area curve μιας τραχείας επιφάνειας. Το z είναι η κάθετη απόσταση από το επίπεδο της επιφάνειας, Δz είναι το διάστημα μεταξύ δύο υψών, h είναι η μέση απόσταση από την επιφάνεια, $\rho(z)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας του ύψους και $P(z)$ είναι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας. 41
Σχήμα 2.6	Πειραματικό παράδειγμα ενός προφίλ Gaussian επιφάνειας σε μία τραχεία επιφάνεια. 42
Σχήμα 2.7	Επίδραση της εξομάλυνσης στην τιμή της “Ra”. 45
Σχήμα 2.8	Ορισμός κεντρικής γραμμής και δειγματοληπτικού μήκους L 49
Σχήμα 2.9	Παράδειγμα εφαρμογής του μετασχηματισμού wavelet στην επιφάνεια κράματος αλουμινίου. 52
Σχήμα 2.10	Παράδειγμα προφίλ επιφάνειας που λαμβάνεται από στυλίσκο ή οπτικές μετρήσεις. 54
Σχήμα 2.11	Εικόνα της επιφάνειας ενός μαλακού χάλυβα όπου τα “self-transformable” τμήματα σημειώνονται με τετράγωνα. 58
Σχήμα 2.12	Εφαρμογή της μεθόδου PIFS για την επιφάνεια του μαλακού χάλυβα που παρουσιάζεται στο Σχήμα : α) αρχική εικόνα, β) 1 επανάληψη, γ) 4 επαναλήψεις και δ) 12 επαναλήψεις. 59
Σχήμα 2.13	Σχέση μεταξύ ασφαλούς και επισφαλούς λειτουργικής περιοχής σε σχέση με τα χωρικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά ύψους της επιφάνειας. 60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

Σχήμα 3.1	Περιεχόμενο και συντεταγμένες της δισδιάστατης διαδικασίας FFT.	76
Σχήμα 3.2	Συμβατική άποψη των συντεταγμένων του FFT μετά την ανακατανομή.	76
Σχήμα 3.3(α)	Ένας 8×8 πίνακας δισδιάστατου FFT.	77
Σχήμα 3.3(β)	Ένας 9×9 πίνακας δισδιάστατου FFT μετά την μετατόπιση περιοχής.	78
Σχήμα 3.4(α)	Ένας 8×8 πίνακας δισδιάστατου FFT.	79
Σχήμα 3.4(β)	Ένας 8×8 πίνακας δισδιάστατου FFT μετά από μετατόπιση τεταρτημορίων.	79
Σχήμα 3.5	Επιφάνεια EDM.	94
Σχήμα 3.6	Επιφάνεια EDT.	95
Σχήμα 3.7	Επιφάνεια εδάφους.	96
Σχήμα 3.8	Κατεργασμένη επιφάνεια.	97
Σχήμα 3.9	Λειασμένη επιφάνεια.	98
Σχήμα 3.10	Τορνευμένη επιφάνεια.	99
Σχήμα 3.11	Ορισμός της κατευθυντικότητας της υφής.	102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

Εικόνα 4.1	Γενικής χρήσης τόννος.	108
Εικόνα 4.2	Τραχύμετρο τύπου Rank Taylor-Hobson Surtronic3+.	110
Εικόνα 4.3	Ηλεκτρομικρογραφία μιας ακίδας 40ο κατασκευασμένη από διαμάντι.	111
Σχήμα 4.1	Μέτρηση επιφανειακής ανωμαλίας με ακίδα μεγάλης κωνικότητας.	111
Σχήμα 4.2	Παρουσίαση της πραγματικής διαδρομής της ακίδας καθώς ανιχνεύει την επιφάνεια.	112
Εικόνα 4.4	Τραχύμετρο.	114
Εικόνα 4.5	Διαστάσεις του Pick up.	115
Εικόνα 4.6	Η κινηματική της εξωτερικής κατά μήκος τórνευσης.	117
Εικόνα 4.7	Η κινηματική της μετωπικής τórνευσης: α) κίνηση του εργαλείου από την περιφέρεια του τεμαχίου προς το κέντρο του και β) αντιθέτως.	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

Σχήμα 6.1-16.1	Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της επιφάνειας που μελετάται.
Σχήμα 6.1-16.2	Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειας μας.
Σχήμα 6.1-16.3	Η structure function.
Σχήμα 6.1-16.4	Η power spectrum density.
Σχήμα 6.1-16.5	Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.
Σχήμα 6.1-16.6	Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

Σχήμα 6.7	Διακύμανση της συχνότητας του autocorrelation length συναρτήσει της προώσεως.	.....	221
Σχήμα 6.8	Διακύμανση της corner frequency συναρτήσει της προώσεως.	.....	223
Σχήμα 6.9	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	225
Σχήμα 6.10	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	227
Σχήμα 6.11	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	227
Σχήμα 6.12-15.1	Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της επιφάνειας που μελετάται.		
Σχήμα 6.12-15.2	Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειας μας.		
Σχήμα 6.12-15.3	Η structure function.		
Σχήμα 6.12-15.4	Η power spectrum density.		
Σχήμα 6.12-15.5	Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.		
Σχήμα 6.12-15.6	Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.		
Σχήμα 6.16	Διακύμανση της συχνότητας του autocorrelation length συναρτήσει της προώσεως.	.....	253
Σχήμα 6.17	Διακύμανση της corner frequency συναρτήσει της προώσεως.	.....	255
Σχήμα 6.18	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	256
Σχήμα 6.19	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	257
Σχήμα 6.20	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	258
Σχήμα 6.21	Διακύμανση της συχνότητας του autocorrelation length συναρτήσει της προώσεως.	.....	260
Σχήμα 6.22	Διακύμανση της corner frequency συναρτήσει της προώσεως.	.....	261
Σχήμα 6.23	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	263
Σχήμα 6.24	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	264
Σχήμα 6.25	Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.	.....	265

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

		Σελ.
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:</u>		
Πίνακας 1.1	Γενικός οδηγός επιλογής υλικών για αντίσταση στη φθορά.	..... 30
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:</u>		
Πίνακας 2.1	Κοινά χρησιμοποιούμενες παράμετροι ύψους.	..... 44
Πίνακας 2.2	Στατιστικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των χωρικών χαρακτηριστικών στις πραγματικές επιφάνειες.	..... 47
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:</u>		
Πίνακας 3.1	Συνοπτική παρουσίαση ορισμένων ιδιοτήτων του δισδιάστατου DFT.	..... 71
Πίνακας 3.2	Σύγκριση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας των διαφορετικών αλγορίθμων DFT.	..... 74
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:</u>		
Πίνακας 4.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά του συμβατικού τόννου.	..... 109
Πίνακας 4.2	Μήκος κύματος αποκοπής συναρτήσει κατεργασίας κοπής που έχει προηγηθεί.	..... 114
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:</u>		
Πίνακας 5.1	Σύσταση υλικού κατεργαζόμενου τεμαχίου.	..... 122
Πίνακας 5.2	Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες υλικού κατεργαζόμενου τεμαχίου.	..... 122
Πίνακας 5.3	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου.	..... 122
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:</u>		
Πίνακας 6.1-16	Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).	
Πίνακας 6.17	Πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της προώσεως.	..... 220
Πίνακας 6.18	Πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency	..... 222

	συναρτήσει της προώσεως.	
Πίνακας 6.19	Πειραματικά αποτελέσματα για τη διάσταση fractal συναρτήσει της προώσεως.	224
Πίνακας 6.20	Πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή προσομοίωσης του θορύβου συναρτήσει της προώσεως.	226
Πίνακας 6.21-24	Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).	
Πίνακας 6.25	Πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της προώσεως.	253
Πίνακας 6.26	Πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency συναρτήσει της προώσεως.	254
Πίνακας 6.27	Πειραματικά αποτελέσματα για τη διάσταση fractal συναρτήσει της προώσεως.	256
Πίνακας 6.28	Πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή προσομοίωσης του θορύβου συναρτήσει της προώσεως.	257
Πίνακας 6.29	Πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της προώσεως.	259
Πίνακας 6.30	Πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency συναρτήσει της προώσεως.	261
Πίνακας 6.31	Πειραματικά αποτελέσματα για τη διάσταση fractal συναρτήσει της προώσεως.	262
Πίνακας 6.32	Πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή προσομοίωσης του θορύβου συναρτήσει της προώσεως.	264

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ:</u>	
<i>ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</i>	15
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:</u>	
<i>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</i>	17
1.1 Ιστορικό Πλαίσιο	17
1.2 Έννοια Της Τριβολογίας	19
1.3 Κόστος Απωλειών Λόγω Τριβής Και Φθοράς	23
1.4 Περίληψη	28
Αναφορές	31
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:</u>	
<i>ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ</i>	33
2.1 Εισαγωγή	33
2.2 Επιφάνειες Των Στερεών	34
Επιφάνειες σε νάνο-κλίμακα	34
Επιφανειακή τοπογραφία	37
Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας	43
Πολυδιάστατος χαρακτηρισμός της επιφανειακής τοπογραφίας	48
• Περιγραφή συστήματος M	49
• Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας από το μετασχηματισμό Fourier	50
• Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας από κυματίδια (wavelets)	51
• Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας από Fractals	52
Βέλτιστη τραχύτητα επιφάνειας	59
Αναφορές	60
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:</u>	
<i>ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ</i>	65
3.1 Μετασχηματισμός Fourier (Συνεχούς) Επιφάνειας	66
3.2 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier	69
3.3 Δισδιάστατος Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT) Της Τοπογραφίας Επιφάνειας	71
3.4 Εφαρμογή Του Δισδιάστατου DFT Χρησιμοποιώντας Τον FFT	74
3.5 Εκτίμηση Των AACF Και APSD Μιας Επιφάνειας	80
3.6 Μερικές Θεωρήσεις Για Την Επεξεργασία Σήματος	85
❖ 3.6.1 Όριο Μήκους Κύματος	85
❖ 3.6.2 Aliasing και κριτήρια Nyquist για 2-D DFT	86

❖ 3.6.3 Διαρροή και 2-D παράθυρα	87
❖ 3.6.4 Φασματικός μέσος όρος για βελτίωση της εκτίμησης	87
3.7 Διαδικασίες Για Τον Υπολογισμό Των AACF Και APSD	88
3.8 Ιδιότητες Και Εξαγωγή Χαρακτηριστικών Γνωρισμάτων Μέσω Της APSD	92
3.9 Ιδιότητες Και Εξαγωγή Χαρακτηριστικών Γνωρισμάτων Με Την AACF	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

4.1 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Της Εργαλειομηχανής	108
4.2 Τραχύμετρο	109
4.2.1 Γενικά	109
4.2.2 Taylor-Hobson Surtronic3+	110
Αρχή λειτουργίας του Surtronic3+	110
TalyProfile	112
4.2.3 Τα χαρακτηριστικά του	114
4.2.4 Φίλτρο	115
4.3 Τόρνευση	117
4.3.1 Διαμήκης τόρνευση	117
4.3.2 Μετωπική τόρνευση	118
4.3.2.1 Μετωπική τόρνευση με σταθερή ταχύτητα κοπής	119
4.3.2.2 Μετωπική τόρνευση με αυξανόμενη ταχύτητα κοπής	120
4.3.2.3 Μετωπική τόρνευση με ελαττούμενη την ταχύτητα κοπής	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.1 Συνθήκες Κοπής Κατά Την Τόρνευση	121
5.2 Υλικό Τεμαχίου Και Ιδιότητές Του	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

6.1.1 Ανάλυση Περιπτώσεων Επιφανειών Χάλυβα ck60 – Χαμηλές Τιμές Προώσεως	123
❖ 01 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.036mm/στρ.	124
❖ 02 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.040mm/στρ.	130
❖ 03 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.045mm/στρ.	136
❖ 04 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.050mm/στρ.	142
❖ 05 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.060mm/στρ.	148
❖ 06 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.070mm/στρ.	154
❖ 07 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.080mm/στρ.	160
❖ 08 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.090mm/στρ.	166
❖ 09 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.100mm/στρ.	172
❖ 10 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.110mm/στρ.	178

	❖ 11 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.120mm/στρ.	.....	184
	❖ 12 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.140mm/στρ.	.....	190
	❖ 13 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.160mm/στρ.	.....	196
	❖ 14 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.180mm/στρ.	.....	202
	❖ 15 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.200mm/στρ.	.....	208
	❖ 16 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.220mm/στρ.	.....	214
6.1.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων	.....	220
	❖ 6.1.2.1 Μήκος Αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation Length)	.....	220
	❖ 6.1.2.2 Corner Frequency	.....	222
	❖ 6.1.2.3 Fractal Dimension	.....	224
	❖ 6.1.2.4 Θόρυβος και Fractal Dimension	.....	226
6.2.1	Ανάλυση Περιπτώσεων Επιφανειών Χάλυβα ck60 – Υψηλές Τιμές Προώσεως	.....	228
	❖ 01 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.05mm/στρ.	.....	229
	❖ 02 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.16mm/στρ.	.....	235
	❖ 03 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.32mm/στρ.	.....	242
	❖ 04 ^η Περίπτωση – Feed Rate 0.60mm/στρ.	.....	247
6.2.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων	.....	253
	❖ 6.2.2.1 Μήκος Αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation Length)	.....	253
	❖ 6.2.2.2 Corner Frequency	.....	254
	❖ 6.2.2.3 Fractal Dimension	.....	255
	❖ 6.2.2.4 Θόρυβος και Fractal Dimension	.....	257
6.3	Συγκεντρωτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων (Χαμηλές & Υψηλές Τιμές Προώσεως)	.....	259
6.3.1	Μήκος Αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation Length)	.....	259
6.3.2	Corner Frequency	.....	260
6.3.3	Fractal Dimension	.....	262
6.3.4	Θόρυβος και Fractal Dimension	.....	263

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

	<i>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ</i>	.....	266
7.1	Συμπεράσματα	.....	266
7.2	Προτάσεις Για Μελλοντική Έρευνα	.....	269

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	270
----------------------------	-------	-----

<u>ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ</u>	272
-------------------------	-------	-----

<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u>	277
-------------------------	-------	-----

Εισαγωγή:

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει τις μη συμβατικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται, τα τελευταία μόλις χρόνια, για τον γεωμετρικό χαρακτηρισμό των κατεργασμένων επιφανειών. Επιπλέον, γίνεται προσπάθεια χαρακτηρισμού της τραχύτητας των επιφανειών με βάση αυτές τις παραμέτρους, αντικαθιστώντας τις πολλές συμβατικές μεθόδους που ήδη χρησιμοποιούνται ευρέως.

Η αναγκαιότητα αντικατάστασης των υπάρχουσών συμβατικών παραμέτρων και μεθόδων χαρακτηρισμού της τραχύτητας των επιφανειών, απαιτεί την μελέτη και την βελτιστοποίηση καινοτόμων μεθόδων χαρακτηρισμού μιας επιφάνειας ούτως ώστε το κατεργαζόμενο κάθε φορά τεμάχιο να μπορέσει να εκπληρώσει το ρόλο του μέσα σε ένα μηχανισμό με καλά υπολογισμένη τιμή κόστους. Επομένως, ενδιαφερόμαστε για την ανάπτυξη μη συμβατικών μεθόδων που να μας δίνουν άμεσα πληροφορίες για την τραχύτητα της επιφάνειας που προκύπτει μετά από κάθε συγκεκριμένη μηχανουργική κατεργασία μορφοποίησης υλικών.

Οι εξαγόμενες τιμές των παραμέτρων συγκρίνονται, τόσο με αναλυτικές σχέσεις θεωρητικής τραχύτητας, αν υπάρχουν, όσο και με πειραματικές τιμές από ήδη έτοιμα λογισμικά που συνοδεύουν τα σύγχρονα τραχύμετρα.

Οι παράμετροι τραχύτητας που μελετούνται εδώ είναι: το μήκος συσχέτισης β και η φασματική πυκνότητα ισχύος (APSD). Αναφορά γίνεται επίσης στη fractal dimension, καθώς επίσης και στην corner frequency. Ακόμα υπολογίζεται η κυμάτωση (wavelet) της επιφάνειας, που αποτελεί την πιο πρόσφατη μέθοδο που χρησιμοποιείται.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο είναι μια βιβλιογραφική ανασκόπηση που έχει σκοπό την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της Τριβολογίας καθώς επίσης και της αναγκαιότητας που προκύπτει για τη μελέτη αυτής. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια εμβάθυνσης στην κατεργασία των υλικών, εκθέτοντας τους διαφορετικούς τύπους των επιφανειακών σφαλμάτων, τις παραμέτρους και τα κριτήρια που χαρακτηρίζουν την τοπογραφία μιας επιφάνειας σε συνδυασμό με την μελέτη της τραχύτητας προβάλλοντας παράλληλα τα επεξεργασμένα μοντέλα. Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της φασματικής ανάλυσης και της ανάλυσης αυτοσυσχέτισης που βρίσκουν εφαρμογή στην επιφανειακή τοπογραφία μιας επιφάνειας. Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η περιγραφή της εργαλειομηχανής, των εργαλείων και των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν καθώς επίσης και ο διαθέσιμος εξοπλισμός.

Το έκτο κεφάλαιο αφιερώνεται στην παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων της μέτρησης της τραχύτητας των επιφανειών των δοκιμίων μας. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα μας και οι υπολογιζόμενες παράμετροι επιβεβαιώνονται χάρη στη σύγκριση τους με τους αντίστοιχους υπολογισμούς που προκύπτουν με βάση το ειδικό λογισμικό που συνοδεύει το τραχύμετρο του εργαστηρίου.

Τέλος, ένας επιστημονικός και τεχνολογικός απολογισμός καθώς επίσης και οι προοπτικές ανάπτυξης αυτής της μελέτης ολοκληρώνουν αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία, στο κεφάλαιο 7.

Κεφάλαιο 1:

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η τριβολογία (tribology) στην παραδοσιακή της μορφή υφίσταται από την αρχή της καταγεγραμμένης ιστορίας. Υπάρχουν πολύ καλά τεκμηριωμένα παραδείγματα για το πώς οι πρόωροι πολιτισμοί ανέπτυξαν τριβείς (bearings) και επιφάνειες χαμηλής τριβής [1]. Η επιστημονική μελέτη της τριβολογίας έχει επίσης μια μακροχρόνια ιστορία και πολλοί από τους βασικούς νόμους της τριβής, όπως είναι η αναλογία μεταξύ της κανονικής δύναμης και του περιορισμού της δύναμης τριβής, θεωρείται ότι έχουν αναπτυχθεί από τον Leonardo da Vinci προς τα τέλη του 15^{ου} αιώνα. Εντεύτοις, η προσπάθεια κατανόησης της τριβής (friction) και της φθοράς (wear) ήταν υποτονική για πολλούς αιώνες, ενώ αναπτύσσονταν μόνο υποθετικές-φανταστικές θεωρίες προκειμένου να εξηγηθούν οι μηχανισμοί οι οποίοι διέπουν τα φαινόμενα αυτά. Παραδείγματος χάριν το 1699 προτάθηκε από τον Amontons, ότι οι επιφάνειες καλύπτονται από μικρές σφαίρες και ότι ο συντελεστής τριβής είναι αποτέλεσμα της γωνίας επαφής μεταξύ των σφαιρών των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή. Έγινε συνεπώς η υπόθεση ότι η κίνηση μεταξύ δύο ολισθήσιμων επιφανειών θα έπρεπε να χαρακτηρίζεται από μία λογική τιμή του συντελεστή τριβής, γύρω στο 0.3, και ως εκ τούτου η κίνηση θα έπρεπε να πραγματοποιείται πάντα στην κορυφή αυτών των σφαιρών. Η σχετικά χαμηλή προτεραιότητα που προσέδιδε στην τριβολογία η επιστημονική κοινότητα εκείνη την εποχή σήμαινε ότι δεν υπήρχε οποιαδήποτε πραγματικά αμφισβήτηση ως προς τις υπάρχουσες έως τότε θεωρίες. Δεν εγείρονταν συνεπώς ερωτήματα του τύπου: “Τι θα συνέβαινε εάν η κίνηση των σφαιρών πραγματοποιούνταν σε διαφορετική κατεύθυνση;”. Αντίθετα, σε άλλους επιστημονικούς τομείς όπως η θερμοδυναμική, εσφαλμένες έννοιες όπως τα “phlogiston” αναθεωρούνταν αρκετά γρήγορα από τους ερευνητές του ενεργειακού τομέα, όπως ο Lavoisier. Ως συνέπεια μέχρι τα τέλη του 18^{ου} αιώνα η τριβολογία ήταν δύσκολα κατανοητή μέχρι το 1886 όπου έγινε η δημοσίευση της κλασικής

διατριβής του Osborne Reynolds για την υδροδυναμική των λιπαντικών. Ο Reynolds απέδειξε ότι η υδροδυναμική πίεση του υγρού που βρίσκεται μεταξύ δύο επιφανειών ολίσθησης ήταν επαρκής έτσι ώστε να αποτραπεί η επαφή μεταξύ των επιφανειών ακόμη και με πολύ χαμηλές ταχύτητες ολίσθησης. Η έρευνά του είχε άμεση πρακτική εφαρμογή και οδήγησε στην αφαίρεση των οπών λιπάνσεως (oil hole) από τα ρουλεμάν που χρησιμοποιούνταν στους άξονες των τροχών στους σιδηρόδρομους. Το λιπαντικό, αντί να διαφεύγει από την οπή, είναι δυνατό να δημιουργεί ένα πολύ λεπτό υδροδυναμικό στρώμα (hydrodynamic film) και αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πολύ χαμηλότερη τριβή. Η εργασία του Reynolds υπήρξε έναυσμα για αμέτρητες άλλες ερευνητικές προσπάθειες που στόχευαν στη βελτίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο διαφορετικών επιφανειών σε επαφή. Αυτές οι ερευνητικές προσπάθειες συνεχίζονται σε έως και σήμερα και μάλιστα με αρκετά έντονους ρυθμούς. Κατά συνέπεια η λίπανση των εδράνων ολίσθησης (journal bearings) σχεδιάζεται στις μέρες μας με ένα πιο τεχνολογικά εξελιγμένο επίπεδο. Η φθορά και οι βασικές αρχές της τριβής είναι πολύ πιο σύνθετα προβλήματα για τα οποία η πειραματική έρευνα εξαρτάται από την τεχνολογική εξέλιξη των διαθέσιμων οργάνων, όπως είναι το μικροσκόπιο αντίχτυσης ηλεκτρονίων και η δυνατότητα αντίχτυσης δυνάμεων σε ατομικό επίπεδο. Επομένως, μόνο πρόσφατα ήτο δυνατό να μελετηθούν όλες αυτές οι διαδικασίες σε μικροσκοπική κλίμακα.

Η τριβολογία είναι επομένως ένας πολύ νέος τομέας της επιστήμης, για τον οποίο το μεγαλύτερο μέρος των γνώσεων αποκτήθηκε μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Αντίθετα, πολλά βασικά θέματα της εφαρμοσμένης μηχανικής, π.χ. η θερμοδυναμική, η μηχανική και η πλαστικότητα, είναι σχετικά παλαιοί και ισχυρά θεμελιωμένοι τομείς. Η τριβολογία βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης, γεγονός που οφείλεται και στις υφιστάμενες διαμάχες μεταξύ των τεχνολόγων που δεν επιτρέπουν γενικά τη διάχυση της γνώσεως. Η ανάγκη για γνώση είναι εντούτοις κρίσιμη ακόμη και για τα πιο απλά γεγονότα όπως για παράδειγμα ο τύπος του λιπαντικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ιδιαίτερη μηχανολογική εφαρμογή.

1.2 ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑΣ

Η τριβολογία, που εστιάζεται στην τριβή, τη φθορά και τη λίπανση των επιφανειών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, είναι ένας νέος τομέας της επιστήμης που θεσμοθετήθηκε το 1967 από μια επιτροπή του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organization for Economic Cooperation and Development). Ο όρος “τριβολογία” προέρχεται από την ελληνική λέξη “τρίβειν”, που έχει την έννοια της τριβής ή της ολίσθησης. Μετά από μια αρχική περίοδο σκεπτικισμού, όπως είναι αναπόφευκτο για οποιαδήποτε πρόσφατα εισαχθείσα λέξη ή έννοια, η λέξη “τριβολογία” έχει κερδίσει βαθμιαία ευρεία αποδοχή. Δεδομένου ότι ο όρος τριβολογία είναι σχετικά καινούριος, η έννοιά του είναι ακόμα ασαφής στο γενικό σύνολο.

Η φθορά είναι η σημαντικότερη αιτία της απώλειας υλικού και μηχανικής απόδοσης και ως επί το πλείστον οποιαδήποτε μείωση της φθοράς μπορεί να οδηγήσει στην ιδιαίτερη εξοικονόμηση χρήματος γενικά. Η τριβή είναι η κύρια αιτία της φθοράς και της κατανάλωσης ενέργειας. Η εξοικονόμηση μπορεί να γίνει με έλεγχο της τριβής. Υπολογίζεται ότι σήμερα απαιτείται το ένα τρίτο των ενεργειακών πόρων παγκοσμίως προκειμένου να υπερκεραστεί το φαινόμενο της τριβής, με την οποιαδήποτε μορφή που αυτό εμφανίζεται. Η λίπανση είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ελέγχου της φθοράς και της τριβής. Η τριβολογία είναι ένας τομέας της επιστήμης που εφαρμόζει μια λειτουργική ανάλυση σε προβλήματα με μεγάλη οικονομική σημασία όπως είναι η αξιοπιστία, η συντήρηση και η φθορά του τεχνικού εξοπλισμού που περιλαμβάνει από τις οικιακές συσκευές έως ένα διαστημικό σκάφος.

Το ερώτημα είναι γιατί "οι αλληλεπιδρούσες επιφάνειες που βρίσκονται σε σχετική κίνηση", (που σημαίνει ουσιαστικά έλαση, ολίσθηση, κανονική προσέγγιση ή διαχωρισμός των επιφανειών), είναι τόσο σημαντικές για την οικονομία και γιατί έχουν επιπτώσεις στο βιοτικό μας επίπεδο. Η απάντηση είναι ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειών καθορίζει τη λειτουργία σχεδόν κάθε συσκευής που αναπτύσσεται από τον άνθρωπο. Οτιδήποτε κατασκευάζει ο άνθρωπος υπόκειται σε φθορά ως αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης μεταξύ των επιφανειών των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν τη συσκευή. Η ανάλυση της αστοχίας των μηχανών δείχνει

ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι αστοχίες και οι δυσλειτουργίες συνδέονται με τα αλληλεπιδρώντα κινούμενα μέρη όπως είναι οι οδοντωτοί τροχοί (gears), τα ρουλεμάν (bearings), οι σύνδεσμοι (couplings), τα παρεμβύσματα στεγανότητας (sealings), τα έκκεντρα (cams), οι συμπλέκτες (clutches), κ.λπ. Η πλειονότητα των προβλημάτων σχετίζεται συνεπώς με την τριβολογία. Το ανθρώπινο σώμα μας περιέχει επίσης αλληλεπιδρώσες επιφάνειες, π.χ. οι ανθρώπινες αρθρώσεις, οι οποίες υπόκεινται σε λίπανση και σε φθορά. Παρόλο που το γνωστικό μας επίπεδο καλύπτει αρκετά βασικές αρχές, η λίπανση των ανθρώπινων αρθρώσεων απέχει ακόμα αρκετά από την πλήρη κατανόηση της.

Η τριβολογία έχει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό επιπτώσεις στη ζωή μας σε αντίθεση με ότι μπορεί να φανταστεί κανείς. Είναι ευρέως γνωστό ότι το ανθρώπινο δέρμα παρουσιάζει εφίδρωση ως αντίδραση στην πίεση ή το φόβο. Μόνο πρόσφατα έχει ανακαλυφθεί ότι ο ιδρώτας στις παλάμες των χεριών ή των πελμάτων των ποδιών των ανθρώπων και των σκυλιών, αλλά όχι στα κουνέλια, έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την τριβή μεταξύ των παλαμών ή των ποδιών και μιας στερεάς επιφάνειας [2]. Με άλλα λόγια, όταν ένας ζωικός ή ανθρώπινος οργανισμός αισθανθεί τον κίνδυνο, εμφανίζεται ιδρώτας που ενεργοποιεί είτε τη γρήγορη πτήση για διαφυγή από τον κίνδυνο, είτε τη δυνατότητα αναρρίχησης στο κοντινότερο δέντρο ή χρησιμοποίησης ενός όπλου.

Ένα γενικό συμπέρασμα που βγαίνει από αναρίθμητα πειράματα και θεωρίες είναι ότι η τριβολογία περιλαμβάνει τη μελέτη:

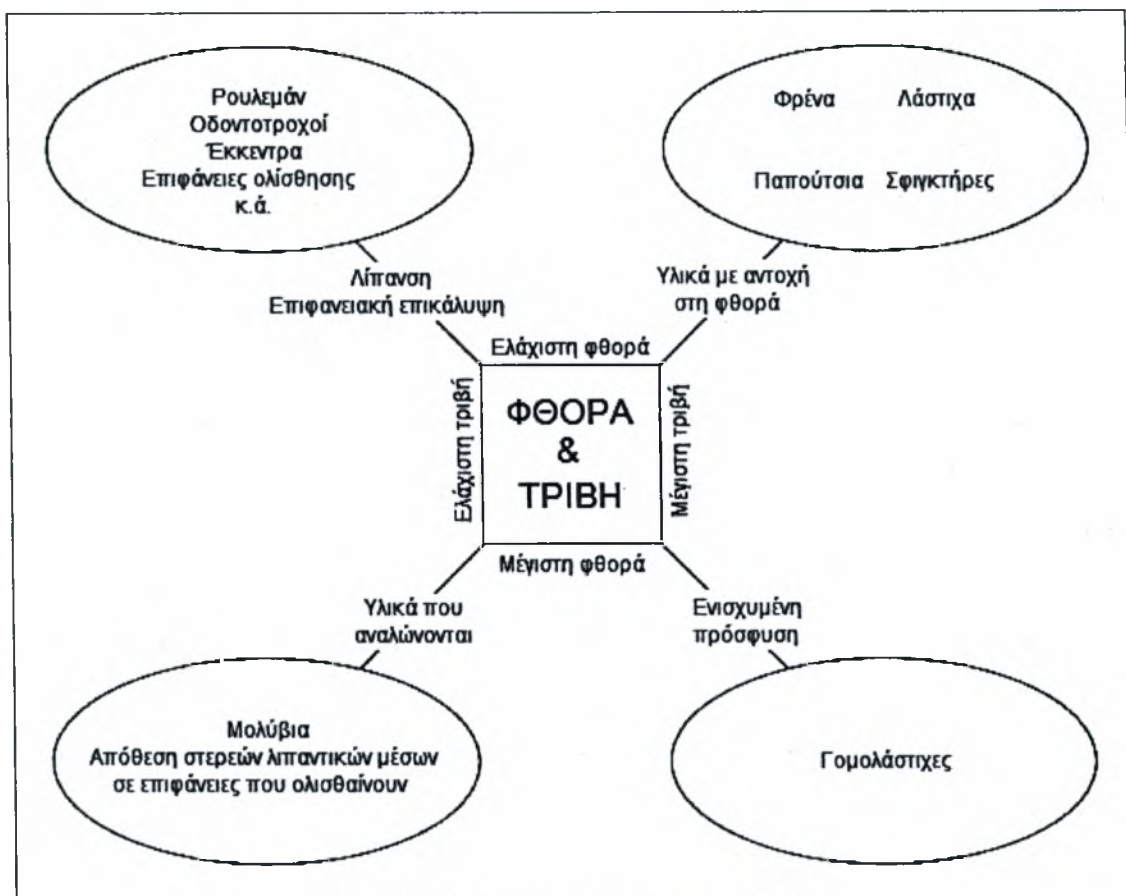
- των χαρακτηριστικών από τα λεπτά επικαλυπτικά στρώματα (films) του υλικού που παρεμβάλλονται μεταξύ των σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή και
- των συνεπειών είτε της αστοχίας των film, είτε της απουσίας τους, γεγονός που διαπιστώνεται από τη μεγάλη τριβή και την εκτεταμένη φθορά.

Ο σχηματισμός των films μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους ολισθήσιμων αντικειμένων είναι ένα φυσικό φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Ο σχηματισμός των λεπτών επικαλυπτικών στρωμάτων μπορεί να είναι ο

θεμελιώδης μηχανισμός αποτροπής των εξαιρετικά υψηλών ποσοστών διάτμησης στη διεπαφή μεταξύ δύο δύσκαμπτων αντικειμένων που ολισθαίνουν. Τα μη μηχανικά συστήματα ολίσθησης παρέχουν πολλά παραδείγματα αυτού του είδους σχηματισμού των films. Παραδείγματος χάριν, οι μελέτες μετακίνησης μεταξύ των παρακείμενων γεωλογικών πλακών στην επιφάνεια της γης, αποκαλύπτουν ότι μεταξύ των αντιτιθέμενων βραχώδεις μαζών σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα από βράχο και ύδωρ. Οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του βράχου και του ύδατος που πραγματοποιούνται υπό τις επικρατούσες συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (περίπου 600°C) και πίεσης (περίπου 100 [MPa]), θεωρείται ότι βελτιώνουν τη λίπανση του υλικού σε αυτό το στρώμα [3].

Ο σχηματισμός των λεπτών επικαλυπτικών στρωμάτων μεταξύ στερεών αντικειμένων που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, καθώς και η μελέτη και η εφαρμογή αυτών των films προς όφελος της ανθρωπότητας είναι το *raison d'etre* (“λόγος ύπυρξης”) της επιστήμης της τριβολογίας.

Με απλούς όρους, φαίνεται ότι ο αντικειμενικός σκοπός της τριβολογίας είναι να ελαχιστοποιηθούν τα δύο κύρια μειονεκτήματα που παρουσιάζονται κατά την επαφή δύο στερεών σωμάτων: η τριβή και η φθορά. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως διευκρινίζεται και στο Σχήμα 1.1, κρίνεται επιθυμητή η ελαχιστοποίηση της τριβής και η μεγιστοποίηση της φθοράς ή η ελαχιστοποίηση της φθοράς και η μεγιστοποίηση της τριβής ή η μεγιστοποίηση και της φθοράς και της τριβής. Παραδείγματος χάριν, η μείωση της φθοράς, αλλά όχι της τριβής, είναι επιθυμητή στα φρένα και στις λιπαινόμενες σιαγόνες. Αντιθέτως, είναι προτιμητέα η μείωση της τριβής, αλλά όχι της φθοράς, στα μολύβια, ενώ η αύξηση της τριβής και της φθοράς είναι επιθυμητή στις γομολάστιχες.



Σχήμα 1.1: Αντικειμενικοί στόχοι της τριβολογίας.

Φθορά

Η αστοχία των films δυσχεραίνει τη σχετική κίνηση μεταξύ των στερεών σωμάτων και προκαλεί αναπόφευκτα σοβαρές ζημιές στις επιφάνειες επαφής. Η κύρια συνέπεια επομένως της αστοχίας των λεπτών επικαλυπτικών στρωμάτων είναι η εκτεταμένη φθορά. Η φθορά σε αυτές τις περιπτώσεις είναι το αποτέλεσμα της προσκόλλησης μεταξύ των σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή και καλείται “φθορά πρόσφυσης” (adhesive wear). Όταν τα films που παρεμβάλλονται είναι μερικώς αποτελεσματικά, τότε εμφανίζονται ηπιότερες μορφές φθοράς και αυτές συνήθως κάνουν αισθητή την παρουσία τους εξ’ αιτίας της κόπωσης λόγω των επαναλαμβανόμενων πιέσεων είτε κατά την ολίσθηση είτε κατά την κύλιση. Αυτές οι ηπιότερες μορφές φθοράς μπορούν επομένως να κληθούν ως “φθορά κοπώσεως” (fatigue wear). Από την άλλη πλευρά, εάν το υλικό των films αποτελείται από σκληρά μόρια ή ρέει μόνο πάνω σε ένα σώμα χωρίς να παρέχει υποστήριξη σε ένα άλλο σώμα, τότε εμφανίζεται μια μορφή φθοράς, που μπορεί μερικές φορές να είναι πολύ γρήγορη, γνωστή ως “λειαντική φθορά” (abrasive wear). Δύο άλλες σχετικές μορφές φθοράς είναι η

“διαβρωτική φθορά” (erosive wear) (λόγω της πρόσκρουσης μεταξύ των μορίων) και η “φθορά σπηλαίωσης” (cavitation wear) που προκαλείται από ταχεία ροή των υγρών. Σε μερικές πρακτικές καταστάσεις το υλικό των στρωμάτων διαμορφώνεται από τη χημική προσβολή μεταξύ των σωμάτων που έρχονται σε επαφή, και ενώ αυτό μπορεί να παρέχει κάποια μορφή λίπανσης, η φθορά είναι ουσιαστικά αναπόφευκτη. Αυτή η μορφή φθοράς είναι γνωστή ως “διαβρωτική φθορά” (corrosive wear) και όταν το ατμοσφαιρικό οξυγόνο είναι ο διαβρωτικός παράγοντας, τότε λέμε ότι εμφανίζεται η “οξειδωτική φθορά” (oxidative wear). Όταν περιορίζεται το εύρος της μετατόπισης μεταξύ των σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή, παραδείγματος χάριν σε μερικά μικρόμετρα, το υλικό των στρωμάτων εγκλωβίζεται μέσα στην επιφάνεια επαφής και μπορεί τελικά να αποδειχθεί καταστρεπτικό. Υπό αυτές της συνθήκες εμφανίζεται η “παλμική φθορά” (fretting wear). Υπάρχουν επίσης πολλές άλλες μορφές ή μηχανισμοί φθοράς. Σχεδόν οποιαδήποτε αλληλεπίδραση μεταξύ των στερεών σωμάτων θα προκαλέσει φθορά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η “φθορά κρούσεως” (impact wear) που προκαλείται από την κρούση μεταξύ δύο στερεών, η “φθορά τήξεως” (melting wear) που εμφανίζεται όταν τα φορτία και οι ταχύτητες επαφής είναι αρκετά υψηλά έτσι ώστε να επιτρέπουν την τήξη των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή και η “φθορά διαχύσεως” (diffusive wear) που εμφανίζεται σε διεπαφές με υψηλή θερμοκρασία. Αυτή η εξάρτηση της φθοράς από τους διάφορους λειτουργικούς παράγοντες μπορεί να συνοψιστεί σε ένα διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2.

1.3 ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑΣ

Το τεράστιο κόστος των τριβολογικών απωλειών-ατελειών που επιβαρύνει συνήθως οποιαδήποτε εθνική οικονομία, οφείλεται στο μεγάλο ποσό ενέργειας και υλικών απωλειών που εμφανίζονται ουσιαστικά ταυτόχρονα σε κάθε μηχανική συσκευή που βρίσκεται σε λειτουργία. Όταν αναφερόμαστε βάσει μιας απλής συσκευής, οι απώλειες είναι μικρές. Εντούτοις, όταν επαναλαμβάνεται η ίδια απώλεια, ίσως σε εκατομμύρια μηχανές παρόμοιου τύπου, τότε οι συνολικές απώλειες είναι πολύ μεγάλες.

Παραδείγματος χάριν, περίπου διακόσια χρόνια πριν, προτάθηκε από τον Jacobs Rowe ότι με την εφαρμογή των κυλισιοτριβέων (rolling bearings) στις άμαξες, ο αριθμός των αλόγων που απαιτούνταν για όλες τις άμαξες μεταφοράς στο Ηνωμένο Βασίλειο θα μπορούσε να μειωθεί στο μισό. Δεδομένου ότι ο κατ' εκτίμηση συνολικός αριθμός αλόγων που χρησιμοποιούνταν εκείνη την περίοδο έφτανε τις 40000, η πιθανή εξοικονόμηση από τις δαπάνες συντήρησης των αλόγων ήταν περίπου ένα εκατομμύριο λίβρες το χρόνο σε εθνικό επίπεδο (στις αρχές του 18^{ου} αιώνα [1, 4]).

Στις μέρες μας, μια απλή μελέτη αποκαλύπτει ότι η παροχή λιπαντικού στους κινούμενους οδοντοτροχούς στις Ηνωμένες Πολιτείες οδηγεί σε μία σχετική αύξηση της τάξεως του 5% στη μηχανική απόδοση, έναντι αυτής ενός συμβατικού ορυκτελαίου, και έχει ως αποτέλεσμα την αποταμίευση περίπου 0.6 δισεκατομμυρίων δολαρίων το χρόνο [5]. Η αιτιολογία είναι ότι υπάρχουν 3 εκατομμύρια οδοντοτροχοί που λειτουργούν στις ΗΠΑ, με μια μέση εκτίμηση ισχύος περίπου 7.5 [KW]. Η ετήσια εθνική εξοικονόμηση ενέργειας είναι 9.8 δισεκατομμύρια κιλοβάτ ανά ώρα και η αντίστοιχη αξία αυτής της ενέργειας είναι 0.6 δισεκατομμύρια δολάρια με κόστος ηλεκτρικής ενέργειας τα 0.06 δολάρια ανά κιλοβατώρα.

Με βάση αυτά τα παραδείγματα είναι δυνατόν να προκύψει μια εξίσωση για την τριβολογία, η οποία να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του κόστους ή του οφέλους από το υπάρχον επίπεδο τριβολογικής εξέλιξης. Μία τέτοια εξίσωση μπορεί να συνοψιστεί ως ακολούθως:

$$\text{Συνολικό τριβολογικό κόστος/κέρδος} = \text{Σύνολο του κόστους/κέρδους από κάθε μεμονωμένη μηχανή} \times \text{Αριθμός μηχανών}$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε άλλο πρόβλημα προκειμένου να υπολογιστεί, κατά προσέγγιση, η σχέση της τριβολογίας με μία ιδιαίτερη κατάσταση.

Το 1966 υπολογίστηκε από τον Peter Jost ότι με την εφαρμογή των βασικών αρχών της τριβολογίας, η οικονομία του Ηνωμένου Βασιλείου θα μπορούσε να είχε εξοικονομήσει περίπου £515 εκατομμύρια ετησίως με βάσει τις χρηματιστικές τιμές

του 1965 [6]. Μια παρόμοια έκθεση που δημοσιεύθηκε στη Δυτική Γερμανία το 1976, αποκάλυψε ότι οι οικονομικές απώλειες που προκαλούνται από την τριβή και τη φθορά κοστίζουν περίπου 10 δισεκατομμύρια DM το χρόνο, σε τιμές του 1975. Αυτό το ποσό ισοδυναμεί με το 1% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος [7]. Περίπου το 50% αυτών των απωλειών οφείλονταν στη φθορά. Στις ΗΠΑ έχει υπολογιστεί ότι περίπου το 11% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται ετησίως είναι δυνατόν να εξοικονομηθεί (σε τέσσερις σημαντικούς τομείς: στις μεταφορές, στις στροβιλομηχανές, στην ηλεκτρική παραγωγή και στις βιομηχανικές κατεργασίες) μέσω της προόδου στην τριβολογία [8]. Παραδείγματος χάριν, μόνο οι τριβολογικές βελτιώσεις στα αυτοκίνητα είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση περίπου του 18.6% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται ετησίως από τα αυτοκίνητα στις ΗΠΑ και οι οποίες ισοδυναμούν σε περίπου 14.3 δισεκατομμύρια US\$ το χρόνο [9]. Στο UK η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας (σε εθνική κλίμακα) που επιτυγχάνεται από την εφαρμογή των βασικών αρχών της τριβολογίας έχει υπολογιστεί ότι κυμαίνεται μεταξύ £468 και £700 εκατομμύρια το χρόνο [10]. Τα οικονομικά ζητήματα που σχετίζονται με την τριβολογία είναι τέτοιων γιγαντιαίων αναλογιών, που η βιομηχανία και οι κυβερνήσεις σε πολλές χώρες στον κόσμο αποτελούν τους βασικούς χρηματοδότες σε ερευνητικά προγράμματα που αφορούν την επιστήμη της τριβολογίας.

Τα προβλήματα που απορρέουν σε σχέση με τις οικονομικές επιπτώσεις της τριβολογίας είναι προβλήματα πολύ μεγάλης σημασίας για έναν μηχανικό. Παραδείγματος χάριν, στην πνευματική μεταφορά υλικών μέσω σωληνώσεων (σύστημα μεταφοράς υλικών που λειτουργεί με συμπιεσμένο αέρα), η φθορά στις καμπύλες των κυματοδηγών (bends) μπορεί να είναι μέχρι 50 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι στα ευθεία τμήματα [11]. Προφανώς τα μη-αποξεστικά (non-abrasive) υλικά, όπως είναι τα ζαχαρότευτλα [12] και τα ροκανίδια από ξύλο, μπορούν πραγματικά να προκαλέσουν σημαντικά επίπεδα φθοράς. Ακόμη, πολλές τριβολογικές αποτυχίες συνδέονται με τα ρουλεμάν. Οι απλές αστοχίες στα ρουλεμάν που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα σύνολα γεννητριών στις ΗΠΑ κοστίζουν περίπου US\$25,000 ημερησίως, ενώ για να αντικατασταθεί ένα ρουλεμάν αξίας £200,000 σε ένα σημείο πρόσδεσης σε μία εγκατάσταση γεώτρησης πετρελαίου στη Βόρεια Θάλασσα πιθανότατα απαιτείται ένας προϋπολογισμός της τάξεως του £1 εκατομμυρίου [13]. Επιπλέον, υπάρχουν μερικές απώλειες στην παραγωγή που είναι πολύ δαπανηρές. Το

συνολικό κόστος φθοράς για ένα απλό αεροσκάφος του αμερικανικού ναυτικού έχει υπολογιστεί ότι είναι US\$243 ανά ώρα πτήσης [14]. Ακόμη, στην Αυστραλία εξορύσσονται περίπου 1000 μεγάτοι ορυκτών υλών. Ένα μεγάλο μέρος αυτού είναι υλικά απόβλητα που πρέπει να υποστούν επεξεργασία προκειμένου να εξαχθούν μεταλλοφόρα ορυκτά ή άνθρακας. Το κόστος της φθοράς υπολογίζεται περίπου στο 2% του εμπορεύσιμου προϊόντος. Η ετήσια παραγωγή από μια μεγάλη επιχείρηση εμπορίας μεταλλεύματος σιδήρου προσεγγίζει τους 40 μεγατόνους, που περιλαμβάνουν ένα άμεσο κόστος αντικατάστασης των φθαρμένων μηχανικών τμημάτων της τάξεως των 6 εκατομμυρίων δολαρίων ετησίως με βάση στις νομισματικές αξίες του 1977 [15, 16].

Η ανάλυση των περιπτώσεων της τριβής και της φθοράς μπορεί να έχουν άμεση εμπορική εφαρμογή, από την πλευρά αυτού που υφίσταται το κόστος της υπέρμετρης φθοράς και τριβής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός αεροστροβίλου που κινείται από καυσαέρια εξαγωγής και που έχει υποστεί εκτεταμένη βλάβη στα πτερύγια πρώτου επιπέδου, η λεπτομερής ανάλυση των αιτιών της φθοράς βοήθησε στο να διαπιστωθεί ποιος θα πλήρωνε το κόστος της ζημιάς (ο ιδιοκτήτης ή η ασφαλιστική εταιρία) [17].

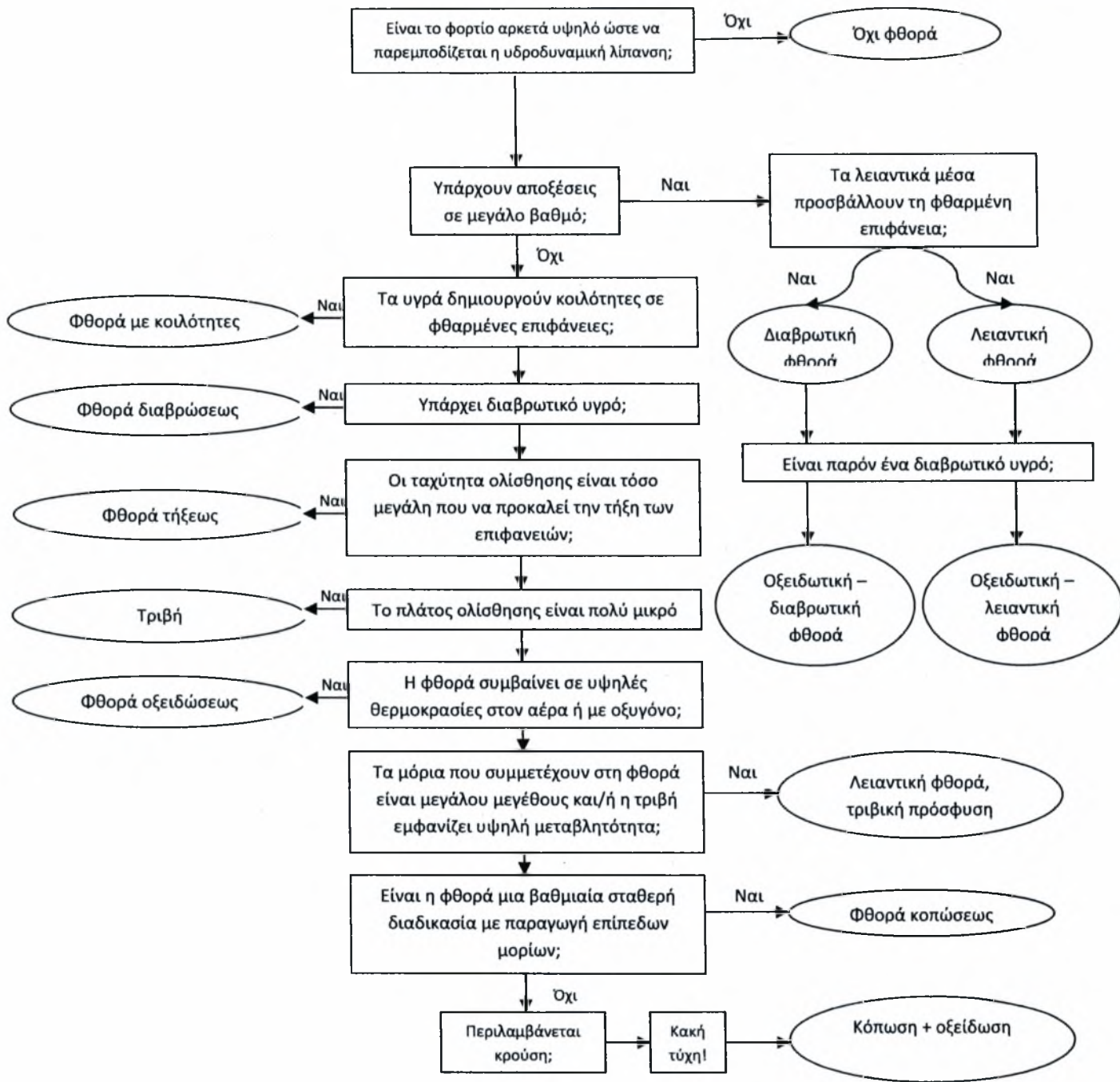
Μόλις έγινε σαφές το εύρος των οικονομικών απωλειών λόγω της τριβής και της φθοράς, οι ερευνητές και οι μηχανικοί απέρριψαν πολλούς από τους παραδοσιακούς περιορισμούς στη μηχανική απόδοση και έχουν βρει ή ψάχνουν για νέα υλικά και λιπαντικά μέσα προκειμένου να ξεπεράσουν τα όρια αυτά. Μερικές από αυτές τις βελτιώσεις είναι τόσο ριζικές που μπορεί να προκαλέσουν μεταβολή σε ολόκληρη την τεχνολογία και στα οικονομικά δεδομένα του προϊόντος. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η αδιαβατική μηχανή. Η αρχή πίσω από αυτή την εξέλιξη είναι να αφαιρεθεί το έλαιο και το λιπαντικό σύστημα, και να χρησιμοποιηθεί στη θέση τους ένα μόνο υλικό, ξηράς αυτό-λίπανσης, με αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Εάν η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει αδιαβατικά σε υψηλές θερμοκρασίες τότε η διαφορά μεταξύ της απώλειας θερμότητας και του θερμαντικού σώματος μπορεί να μεταφραστεί ως μηχανικό έργο. Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια πολύ χαμηλού βάρους μηχανή που να καταναλώνει σημαντικά λιγότερα καύσιμα, έλαια και κόστη συντήρησης των οχημάτων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή. Μια μηχανή που χαρακτηρίζεται από οικονομική κατανάλωση σε βενζίνη είναι

ζωτικής σημασίας στη μείωση των μεταφορικών και γεωργικών δαπανών και επομένως είναι ένας πολύ σημαντικός τομέας για έρευνα και ανάπτυξη.

Νέα τεχνολογικά εγχειρήματα, ακόμα και αν περιλαμβάνουν κυρίως συμβατική τεχνολογία, όπως είναι για παράδειγμα η εξόρυξη ορυκτών στα μεταλλεία μέχρι και η επεξεργασία λιπαινόμενων γυαλόχαρτων, θέτουν νέους όρους στον τεχνολογικό εξοπλισμό και επιβάλλουν την αναγκαιότητα ανάπτυξης καινοτόμων υλικών με μεγάλη αντοχή στη φθορά.

Άλλα παραδείγματα τέτοιων καινοτομιών περιλαμβάνουν την ειδική επεξεργασία των επιφανειών των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την κουρά των προβάτων, την επιφανειακή σκλήρυνση των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για εδαφολογικές εργασίες, τους σωλήνες πολυαιθυλενίου και τα κράματα τιτανίου που βρίσκουν εφαρμογή σε ορθοπεδικά εμφυτεύματα. Όποτε η φθορά και η τριβή περιορίζουν τη λειτουργικότητα ή τη διάρκεια ζωής μιας συσκευής ή εφαρμογής γενικά, υπάρχει πάντοτε ένα πεδίο της τριβολογίας που μπορεί να προσφέρει κάποια βελτίωση.

Γενικά, η φθορά μπορεί να ελεγχθεί αποτελεσματικά με την επιλογή υλικών με συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.1.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ λειτουργικών συνθηκών και είδους της φθοράς.

1.4 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μολονότι η μελέτη της τριβής και της φθοράς προσέλκυσε τον ενδιαφέρον πολλών διαπρεπών επιστημόνων κατά τη διάρκεια των προηγούμενων αιώνων, η συνεπής και συνεχής επιστημονική έρευνα σχετικά με την τριβή και τη φθορά είναι ένα σχετικά πρόσφατο φαινόμενο. Η τριβολογία είναι επομένως μια συγκριτικά νέα επιστήμη

όπου δεν έχουν καθιερωθεί ακόμα αυστηρά αναλυτικές έννοιες που να παρέχουν έναν σαφή οδηγό για τα σύνθετα χαρακτηριστικά της φθοράς και της τριβής. Ένα μεγάλο μέρος της τριβολογικής έρευνας εφαρμόζεται ή προσανατολίζεται εμπορικά και έχει ήδη αναπτυχθεί ένα ευρύ φάσμα υλικών που παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στη φθορά και που μειώνουν σημαντικά την τριβή. Η ιδέα της ανάπτυξης ειδικών υλικών και επιστρωμάτων για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της τριβής και της φθοράς γίνεται πραγματικότητα. Τα περισσότερα αναλυτικά μοντέλα και οι πειραματικές γνώσεις πάνω στην τριβολογία έχουν ολοκληρωθεί μέσα σε λίγες μόνο δεκαετίες και κάποια στιγμή στο μέλλον η κατανόησή των μηχανισμών της τριβής και της φθοράς μπορεί να αλλάξουν ριζικά και το επίπεδο ανάλυσής τους να βελτιωθεί σε εκπληκτικό βαθμό.

Το τεράστιο εύρος των πειραματικών δεδομένων και των θεωριών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα έχει βοηθήσει στο να δημιουργηθεί η εντύπωση ότι η τριβολογία, αν και αναμφισβήτητα σημαντικός τομέας της επιστήμης, είναι μυστηριώδης και όχι εύκολα εφαρμόσιμη σε προβλήματα μηχανικής. Η τριβολογία δεν μπορεί, εντούτοις, να αγνοηθεί διότι πολλές κυβερνήσεις και ιδιωτικές μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το κόστος της τριβής και της φθοράς αποτελεί ένα αναπόφευκτα δαπανηρό παράγοντα στις βιομηχανικές χώρες. Μέρος της δυσκολίας στον έλεγχο της τριβής και της φθοράς είναι ότι το συνολικό κόστος που απορρέει από τις ενεργειακές και υλικές απώλειες, είναι κοινό σε κάθε τύπο βιομηχανίας. Αν και το μέσο μηχανικό κόστος της τριβής και της φθοράς μπορεί να μοιάζει μικρό, όταν συνυπολογιστούν οι δαπάνες αυτού του είδους για μια ολόκληρη χώρα, τότε γίνεται προφανής η πολύ μεγάλη απώλεια πόρων. Το μεγάλο εύρος και η συχνότητα των τριβολογικών προβλημάτων σημαίνει ότι η τριβολογία δεν μπορεί να εφαρμοστεί απλώς από ορισμένους ειδικούς, αλλά αντί αυτού πρέπει να έχουν γνώση του ζητήματος σε εργασιακά θέματα πολλοί μηχανικοί ή τεχνολόγοι.

Πίνακας 1.1: Γενικός οδηγός επιλογής υλικών για αντίσταση στη φθορά.

Κρίσιμη ιδιότητα υλικών	Μηχανισμός Φθοράς			
	Λείανση	Διάβρωση	Κουλόττες	Οξειδωση
Σκληρότητα	√	√	○	○
Αντοχή	○	√	√	○
Αντίσταση στην Κόπωση	√	√	√	○
Αδράνεια	○	○	○	√
Υψηλό Σημείο Τήξεως	○	○	○	○
Ετερογενής Μικροδομή	√	○	○	x (2)
Μη-μεταλλικός Χαρακτήρας	○	○	○	√

Κρίσιμη ιδιότητα υλικών	Μηχανισμός Φθοράς			
	Τριβή	Συγκόλληση	Τήξη	Κόπωση
Σκληρότητα	○	√	○	○
Αντοχή	○	○	○	√
Αντίσταση στην Κόπωση	√	○	○	√
Αδράνεια	√ (1)	○	○	○
Υψηλό Σημείο Τήξεως	○	√	√	○
Ετερογενής Μικροδομή	○	√	○	○
Μη-μεταλλικός Χαρακτήρας	○	√	○	○

- √ Σημαντική (1) Τριβή με τον αέρα για τα μέταλλα
 ○ Οριακή (2) Η ομοιογενής μικροδομή εμποδίζει την ηλεκτροχημική διάβρωση και έτσι εμφανίζεται φθορά οξειδωσης
 x Ανεπιθύμητη

Η βασική έννοια της τριβολογίας είναι ότι η τριβή και η φθορά ελέγχονται καλύτερα με μια λεπτή διαχωριστική επιφάνεια ή ένα στρώμα (film) που να περιορίζει την άμεση επαφή μεταξύ των σωμάτων που βρίσκονται σε ολίσθηση, κύλιση ή οποιαδήποτε άλλη αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Δεν υπάρχει σχεδόν κανένας περιορισμός στον τύπο του υλικού από το οποίο μπορεί να διαμορφωθεί ένα τέτοιο film. Μάλιστα ορισμένα στερεά, υγρά και αέρια είναι εξίσου αποτελεσματικά. Εάν δεν παρέχεται κανένα είδους film, τότε θα δημιουργηθεί ένα υποκατάστατο film από την ίδια τη διαδικασία της φθοράς. Ο στόχος της τριβολογίας είναι είτε να βρεθεί το βέλτιστο υλικό ενός film για μια δεδομένη εφαρμογή, είτε να προβλεφθεί η ακολουθία γεγονότων για την παραγωγή ενός στρώματος από επιφάνειες που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. D. Dowson, History of Tribology, Longman Group Limited, 1979.
2. S. Adelman, C.R. Taylor and N.C. Heglund, Sweating on Paws and Palms: What is Its Function, *American Journal of Physiology*, Vol. 29, 1975, pp. 1400-1402.
3. N.H. Sleep and M.L. Blanpied, Creep, Compaction and the Weak Rheology of Major Faults, *Nature*, Vol. 359, 1992, pp. 687-692.
4. B.W. Kelley, Lubrication of Concentrated Contacts, Interdisciplinary Approach to the Lubrication of Concentrated Contacts, Troy, New York, NASA SP-237, 1969, pp. 1-26.
5. P.A. Pacholke and K.M. Marshek, Improved Worm Gear Performance With Colloidal Molybdenum Disulfide Containing Lubricants, *Lubrication Engineering*, Vol. 43, 1986, pp. 623-628.
6. Lubrication (Tribology) - Education and Research. A Report on the Present Position and Industry Needs, (Jost Report), Department of Education and Science, HM Stationary Office, London, 1966.
7. Research Report (T76-38) Tribologie (Code BMFT-FBT76-38), Bundesministerium Fur Forschung und Technologie (Federal Ministry for Research and Technology), West Germany, 1976.
8. Strategy for Energy Conservation Through Tribology, ASME, New York, November, 1977.
9. L.S. Dake, J.A. Russell and D.C. Debrodt, A Review of DOE ECT Tribology Surveys, Transactions ASME, *Journal of Tribology*, Vol. 108, 1986, pp. 497-501.
10. H.P. Jost and J. Schofield, Energy Savings Through Tribology: A Techno-Economic Study, *Proc. Inst. Mech. Engrs., London*, Vol. 195, No. 16, 1981, pp. 151-173.
11. M.H. Jones and D. Scott (editors), Industrial Tribology, The Practical Aspects of Friction, Lubrication and Wear, Elsevier, Amsterdam, 1983.
12. K.F. Dolman, Alloy Development: Shredder Hammer Tips, Proc. 5th Conference of Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1983, pp. 281-287.
13. E.W. Hemingway, Preface, Proc. Int. Tribology Conference, Melbourne, The Institution of Engineers, Australia, National Conference Publication No. 87/18, December, 1987.

14. M.J. Devine (editor), Proceedings of a Workshop on Wear Control to Achieve Product Durability, sponsored by the Office of Technology Assessment, United States Congress, Naval Air Development Centre, Warminster, 1977.
15. C.M. Perrott, Ten Years of Tribology in Australia, *Tribology International*, Vol. 11, 1978, pp. 35-36.
16. P.F. Booth, Metals in Mining-Wear in the Mining Industry, *Metals Austr.*, Vol. 9, 1977, pp. 7-9.
17. J.M. Gallardo, J.A. Rodriguez and E.J. Herrera, Failure of Gas Turbine Blades, *Wear*, Vol. 252, 2002. Pp. 264-268.

Κεφάλαιο 2:

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι επιφάνειες των στερεών σωμάτων αποτελούν ένα πολύ σύνθετο ζήτημα μελέτης, πολύ πιο περίπλοκο από την ανάλυση μίας απλής επίπεδης επιφάνειας. Υπάρχουν ποικίλες ατέλειες και στρεβλώσεις που είναι παρούσες σε οποιαδήποτε πραγματική επιφάνεια. Αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών, που κυμαίνονται από τις μαζικές στρεβλώσεις στη επιφάνεια μέχρι τις τοπικές μικροσκοπικές ανωμαλίες, έχουν σημαντική επίδραση στα φαινόμενα της τριβής και της φθοράς. Οι ατέλειες και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μιας πραγματικής επιφάνειας επηρεάζουν ακόμα τις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την επαφή με υγρά ή λιπαντικά μέσα, ενώ η τραχύτητα των περισσότερων επιφανειών διαμορφώνει τους μηχανισμούς επαφής μεταξύ των στερεών καθώς και την προκύπτουσα φθορά. Η μελέτη των επιφανειών, σε ερευνητικό επίπεδο, είναι σχετικά πρόσφατη και οι συνεχείς ανακαλύψεις έχουν σαν αποτέλεσμα να εγείρεται ένα ευρύ φάσμα ερωτήσεων από τους τεχνολόγους ή τους τριβολόγους, όπως: ποιά είναι η βέλτιστη επιφάνεια; Υπάρχει ένας ιδιαίτερος τύπος βέλτιστης επιφάνειας για οποιαδήποτε συγκεκριμένη εφαρμογή; Γιατί είναι οι επιφάνειες ολίσθησης τόσο επιρρεπής σε θερμική φθορά; Πώς είναι δυνατόν να υπάρξει διαμόρφωση με πλαστική παραμόρφωση όταν οι δυνάμεις που ενεργούν μεταξύ των κατεργάσιμων επιφανειών είναι σχετικά χαμηλές; Αν και μερικές από αυτές τις ερωτήσεις μπορούν να απαντηθούν με βάση το ήδη υπάρχων γνωστικό επίπεδο, άλλες συνεχίζουν να αποτελούν βασικά ερευνητικά θέματα προς μελέτη. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της τριβής έχουν επίσης μεγάλη σπουδαιότητα και στην εφαρμοσμένη μηχανική. Κοινότυπα φαινόμενα, όπως η διαφορά μεταξύ της στατικής και της κινηματικής τριβής, δεν έχουν κατανοηθεί ακόμα πλήρως και συνεπώς είναι ελλιπής ο έλεγχος

τους προκειμένου να αποτραπούν διάφορα τεχνικά προβλήματα. Το βασικό ερώτημα όμως παραμένει: ποιος είναι ο μηχανισμός της παλμολίσθησης (stick-slip), δηλαδή ποιο είναι το μοντέλο με το οποίο είναι δυνατό να περιγραφούν οι δονήσεις των στοιχείων που ολισθαίνουν και που προκαλούνται από τη μεγάλη διαφορά μεταξύ της στατικής και κινηματικής τριβής.

2.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ

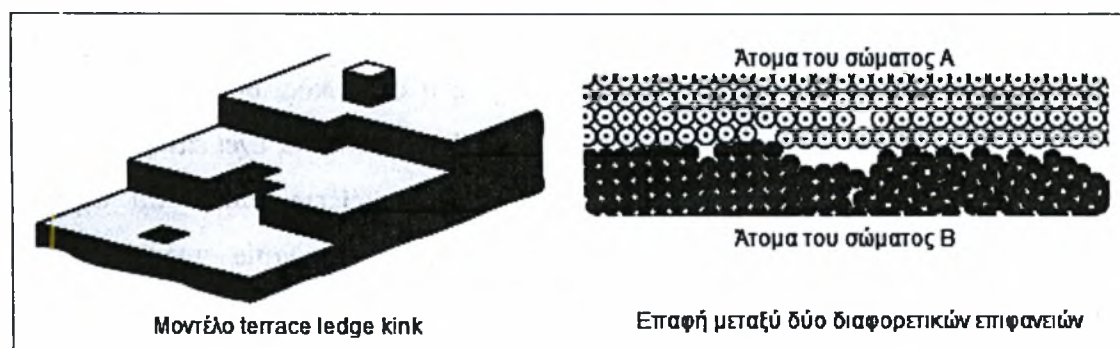
Σε όλες τις κλίμακες μεγέθους, οι επιφάνειες των στερεών περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά γνωρίσματα που επηρεάζουν την τριβή, τη φθορά και τη λίπανση, ανεξαρτήτως της φύσεως του εκάστοτε υλικού. Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις τύποι χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που σχετίζονται με τη φθορά και την τριβή:

- ❖ ατέλειες σε ατομικό επίπεδο-κλίμακα, που σε μία συμβατική επιφάνεια έχουν καταλυτικό ρόλο στην αλληλεπίδραση μεταξύ των λιπαντικών ουσιών και της φερόμενης επιφάνειας,
- ❖ η τραχύτητα της επιφάνειας που περιορίζει την επαφή μεταξύ των στερεών σωμάτων σε ένα μικρό μόνο ποσοστό από αυτό της ονομαστικά διαθέσιμης περιοχής για επαφή.

Επιφάνειες σε νάνο-κλίμακα

Οποιαδήποτε επιφάνεια αποτελείται από άτομα τα οποία κατανέμονται σε μία περίπου δισδιάστατη διαρθρωτική δομή. Αυτή η διαμόρφωση προσεγγίζει τις περισσότερες φορές τη διάταξη των ατόμων σε ένα επίπεδο, αλλά υπάρχουν σχεδόν πάντοτε σημαντικές αποκλίσεις από ένα πραγματικό επίπεδο. Τα άτομα του στερεού σώματος μπορούν να αναπαρασταθούν ως σκληρές σφαίρες που στοιβάζονται χωρίς κενά διαστήματα μεταξύ τους. Για τη διαμόρφωση ενός πραγματικού επιπέδου ή μιας τέλεια επίπεδης εξωτερικής επιφάνειας, οι κυβικές δομές των κρυσταλλικών επιπέδων πρέπει να είναι προσανατολισμένες έτσι ώστε να είναι δυνατόν το στρώμα των ατόμων να είναι παράλληλο στην επιφάνεια. Κατά συνέπεια διαμορφώνεται μια σειρά επιπέδων στην επιφάνεια που σχηματίζει μακροσκοπικά μία σχεδόν επίπεδη επιφάνεια [1]. Τα σχηματιζόμενα επίπεδα μεταξύ των ατομικών στρωμάτων παρουσιάζουν επίσης ατέλειες, δηλαδή ο άξονας των σχηματιζόμενων επιπέδων

μπορεί να παρεκκλίνει από ένα ευθύ επίπεδο και μερικά άτομα μπορεί να παραλείπονται από τις ακριανές επιφάνειες του σχηματιζόμενου επιπέδου. Συνήθως εμφανίζονται μικρότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως τα μεμονωμένα άτομα που λείπουν από την επιφάνεια ή ένα μεμονωμένο άτομο που είναι παρόν στην επιφάνεια. Αυτό το πρότυπο της επιφάνειας είναι γνωστό στη βιβλιογραφία ως “terrace ledge kink” (TLK). Έχει προταθεί ότι η στενή επαφή μεταξύ των ατόμων, ανάμεσα σε διαφορετικές επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή, παρεμποδίζεται από αυτού του είδους την επιφανειακή μορφολογία. Συνεπώς η φθορά και η τριβή θεωρούνται ότι είναι δυνατόν να μειωθούν, σε μεγάλο βαθμό, από την έλλειψη ενδιάμεσης ατομικής επαφής [2]. Το πρότυπο επαφής και η επιφάνεια TLK μεταξύ δύο διαφορετικών πραγματικών επιφανειών παρουσιάζονται σχηματικά στο παρακάτω Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Μοντέλο επιφάνειας TLK και επαφή μεταξύ δύο διαφορετικών πραγματικών επιφανειών [2].

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών TLK όπως είναι οι αναβαθμίδες (terraces), οι προεξοχές (ledges), οι ιδιοβαθμίδες (kinks) καθώς επίσης και τα περίσσεια ή ελλείποντα άτομα, έχουν ως αποτέλεσμα ένας μεγάλος αριθμός ατόμων να συνδέονται με ασθενείς δεσμούς. Τα άτομα που υπάρχουν στην επιφάνεια συνδέονται με ασθενείς δεσμούς σε σχέση με τα εσωτερικά άτομα, επειδή διαθέτουν μικρότερο αριθμό πλησιέστερων γειτονικών ατόμων. Έχει παρατηρηθεί ότι χωρίς όλες αυτές τις ατέλειες, οι επιφάνειες θα ήταν πιθανώς ουσιαστικά αδρανείς με όλα τα χημικά αντιδραστήρια [3]. Αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μιας επιφάνειας διευκολύνουν τις χημικές αντιδράσεις μεταξύ της επιφάνειας και του εκάστοτε λιπαντικού μέσου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μείωση της τριβής. Η αντίδραση μεταξύ του λιπαντικού και της επιφάνειας οδηγεί πολύ συχνά σε ένα επιφανειακό στρώμα ή "μια πολύ λεπτή επικαλυπτική ταινία" που μειώνουν την τριβή και τη φθορά. Επιπλέον, το υλικό που υπάρχει στο υπόστρωμα μπορεί να

παραμορφωθεί πλαστικά, γεγονός που αυξάνει τον αριθμό των γραμμοαταξιών (dislocations) που φθάνουν στην επιφάνεια. Οι γραμμοαταξίες διαμορφώνουν ισχυρά καταλυτικές περιοχές για τις χημικές αντιδράσεις και αυτή η επίδραση είναι γνωστή ως "μηχανική ενεργοποίηση" [4]. Η δημιουργία έντονης πλαστικής παραμόρφωσης σε μια φθαρμένη επιφάνεια, είναι γενικά κοινό χαρακτηριστικό κατά τη διάρκεια της φθοράς και της τριβής. Όλα αυτά μαζί με την επακόλουθη μηχανική ενεργοποίηση ασκούν μεγάλη επίδραση στο σχηματισμό ενός λεπτού λιπαντικού επικαλυπτικού στρώματος.

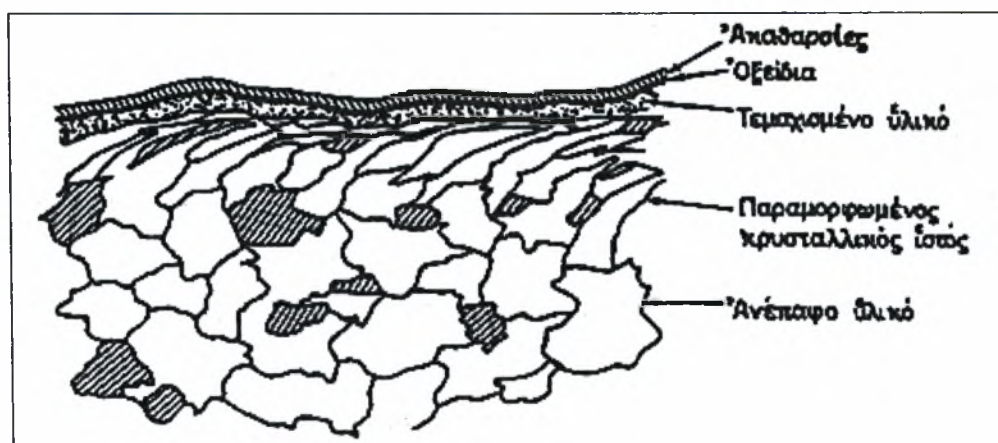
Η διάταξη των ατόμων στην επιφάνεια μπορεί να είναι διαφορετική από την θεωρητική διάταξη ή την διάταξη της μάζας, από τη στιγμή που τα κραματικά στοιχεία και οι προσμείξεις σε ένα υλικό τείνουν να απομονώνονται-διαχωρίζονται (segregate) στην επιφάνεια. Παραδείγματος χάριν, ο άνθρακας, το θείο και το πυρίτιο τείνουν να διαχωριστούν στο χάλυβα, ενώ το αλουμίνιο θα διαχωριστεί στο χαλκό [5]. Τα περισσότερα υλικά, όπως π.χ. ο χάλυβας ή ο χαλκός, δεν παράγονται σε συνθήκες θερμοδυναμικής ή χημικής ισορροπίας. Τα υλικά αυτά έχει επικρατήσει να παράγονται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου οι προσμείξεις διαλύονται σχετικά εύκολα, και στη συνέχεια ψύχονται γρήγορα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επομένως τα περισσότερα μηχανολογικά υλικά περιέχουν κάποιο υπέρκορο διάλυμα ακαθαρσιών που τείνουν να αποδεσμευτούν σταδιακά από το διάλυμα. Η επιφανειακή θέρμανση και η χημική προσβολή από λιπαντικές ουσίες κατά τη διάρκεια της τριβικής επαφής, συμβάλλουν επίσης στο διαχωρισμό της επιφάνειας από τους επιπρόσθετους παράγοντες και τις δευτερεύουσες προσμείξεις [6]. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει το διαχωρισμό της επιφάνειας είναι η πλαστική παραμόρφωση του φθαρμένου υλικού υπό τη θερμοκρασία ανοπτήσεως [7]. Η έντονη παραμόρφωση του υλικού κάτω από τη φθαρμένη επιφάνεια πραγματοποιείται σε μη λιπαινόμενες επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή και η προκύπτουσα πυκνότητα εξάρθρωσης θεωρείται ότι προκαλεί τη δημιουργία πυκνότητας ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα, γεγονός που διευκολύνει τη διάχυση των ατομικών ακαθαρσιών. Από την ανάλυση των επιφανειών έχει αποδειχθεί ότι ο διαχωρισμός της επιφάνειας συνοδεύεται συνήθως από σημαντικές μεταβολές στους συντελεστές τριβής και φθοράς [5].

Επιφανειακή τοπογραφία

Κάθε τεχνολογικό αντικείμενο στο τελικό στάδιο της παραγωγής του έχει περάσει από μία σειρά κατεργασιών οι οποίες συνεπάγονται μηχανικές, θερμικές και ίσως χημικές δράσεις στην επιφάνεια του. Η κατεργασμένη επιφάνεια αποκτά ορισμένες νέες ιδιότητες και χαρακτηριστικά τα οποία συνιστούν την "ποιότητα επιφανείας". Ο όρος αυτός συμπεριλαμβάνει τόσο τα φυσικοχημικά όσο και τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας. Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν τα είχε φυσικά η επιφάνεια προ της κατεργασίας, δηλαδή ως ακατέργαστη επιφάνεια. Οι μεταβολές που επέρχονται εν γένει σε ιδιότητες και χαρακτηριστικά με την κατεργασία, οφείλονται σε επιρροές, τόσο της κατεργασίας καθεαυτής όσο και του περιβάλλοντος με το οποίο κάθε πρόσφατα κατεργασμένη επιφάνεια ενός τεμαχίου έρχεται σε επαφή.

Έτσι η κατεργασμένη επιφάνεια αποκτά ιδιαίζουσα τοπογραφία, ορισμένη ακρίβεια διαστάσεων και μορφής, ξεχωριστές ιδιότητες και χαρακτηριστικά τα οποία εκτείνονται σε ορισμένο βάθος στην επιφανειακή στοιβάδα του τεμαχίου.

Στο Σχήμα 2.2 μπορούμε να δούμε την κάθετη τομή μίας μεταλλικής επιφάνειας ύστερα από κατεργασία κοπής, όπου εκδηλώνεται έντονα και παραστατικά η επιρροή της κατεργασίας και του περιβάλλοντος με την δημιουργία επάλληλων κατά βάθος στρώσεων που χαρακτηρίζονται από διαφορετική «κατάσταση» (σύσταση, δομή, ιδιότητες). Λαμβάνουν δηλαδή χώρα αλλαγές, άλλες σε μικρό και άλλες σε μεγάλο βαθμό, τόσο από μηχανικές και χημικές επιδράσεις όσο και από κρυσταλλογραφικούς μετασχηματισμούς.



Σχήμα 2.2: Τομή μίας μεταλλικής επιφάνειας ύστερα από κατεργασία κοπής.

Η ενδεδειγμένη για κάθε εφαρμογή ποιότητα των κατεργασμένων επιφανειών συντείνει αποφασιστικά στην αποδοτική λειτουργία και στην ασφάλεια εργασίας των συναφών τεμαχίων.

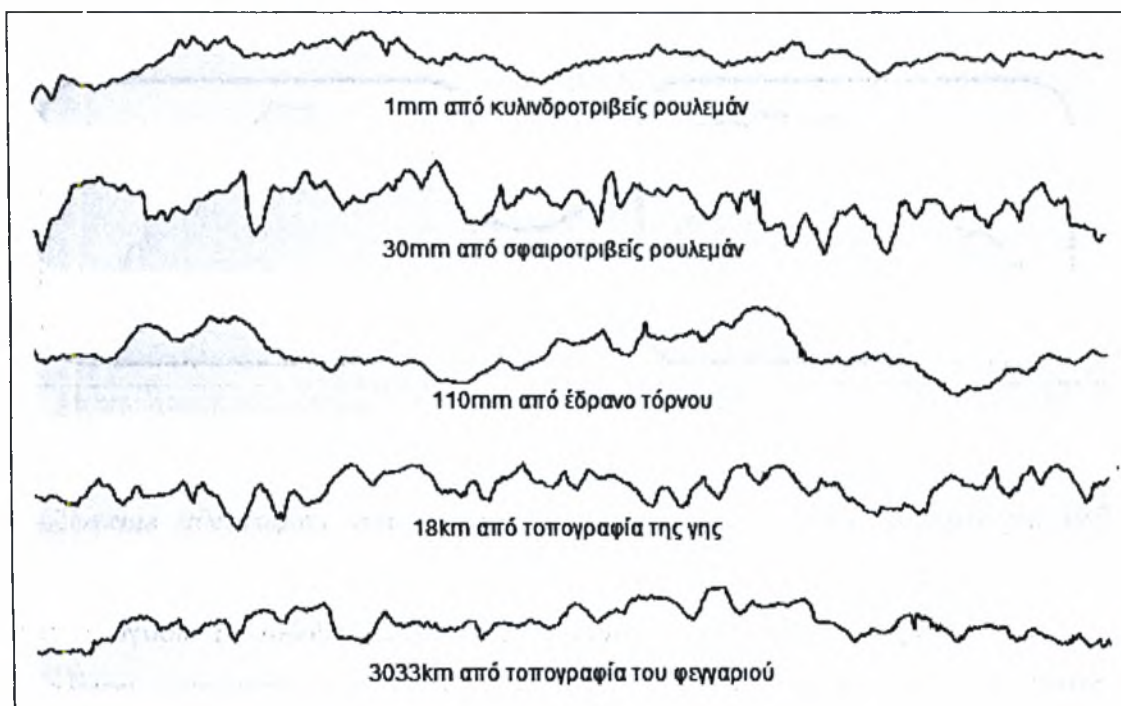
Γίνεται κατά συνέπεια, διάκριση μεταξύ ιδιοτήτων επιφάνειας και ιδιοτήτων όγκου ή εσωτερικών ιδιοτήτων του υλικού. Οι ιδιότητες όγκου (bulk properties), γενικά, καθορίζουν την ολική (μακροσκοπική) μηχανική συμπεριφορά του κατεργασμένου αντικειμένου, ενώ οι ιδιότητες της επιφάνειας (surface properties) καθορίζουν χαρακτηριστικά όπως η συμπεριφορά του τεμαχίου σε επαφή με άλλα σώματα ή με το περιβάλλον λειτουργίας.

Οι ιδιότητες μιας επιφάνειας εξαρτώνται από την "ποιότητα της επιφάνειας" και πιο συγκεκριμένα όταν λέμε "ποιότητα της επιφάνειας" αναφερόμαστε:

- ❖ Στην ακρίβεια διαστάσεων της μορφής.
- ❖ Στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τοπογραφία).
- ❖ Στα φυσικά, μηχανικά, χημικά και κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά του υλικού της επιφάνειας όπως είναι η σκληρότητα, οι παραμένουσες τάσεις, η αντίσταση σε διάβρωση ή οξείδωση, ο κρυσταλλικός ιστός (βαφή, επαναφορά, αλλαγή φάσεων, μεταβολές στο μέγεθος των κρυσταλλιτών κ.α.), ο χρωματισμός, η εμφάνιση, διάφορα ελαττώματα κ.α.

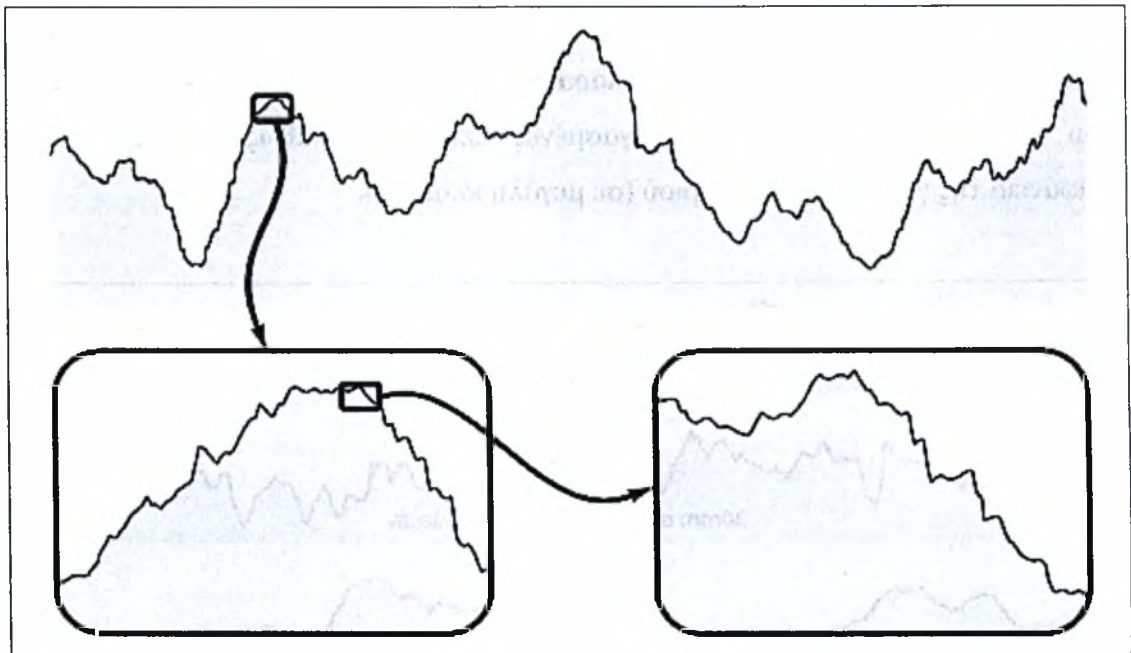
Οι ατέλειες των επιφανειών σε ατομικό επίπεδο επιδρούν άμεσα στη μακροσκοπική επιφάνεια και δημιουργούν σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με μία λεία επιφάνεια. Σχεδόν κάθε γνωστή επιφάνεια, εκτός από τις χαρακτηριστικές επιφάνειες του λεπιδόλιθου (mica) [8], εμφανίζουν τραχύτητα. Ο όρος τραχύτητα καταδεικνύει ότι το μεγαλύτερο μέρος μιας επιφάνειας δεν είναι επίπεδο, αλλά χαρακτηρίζεται είτε από εξάρσεις-κορυφές (peaks), είτε από βυθίσεις-κοιλιάδες (valleys). Το χαρακτηριστικό εύρος μεταξύ των peaks και των valleys για τις επιφάνειες που μελετώνται από την επιστήμη της εφαρμοσμένης μηχανικής είναι περίπου ένα μικρόμετρο [μm]. Το προφίλ μιας επιφάνειας που εμφανίζει τραχύτητα είναι σχεδόν πάντα τυχαίο, εκτός και αν μερικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα έχουν εισαχθεί μετά από μηχανική κατεργασία. Τα τυχαία παρελκόμενα των προφίλ μιας επιφάνειας φαίνεται σε μεγάλο βαθμό να είναι τα ίδια, οποιαδήποτε και αν είναι η πηγή τους,

ανεξάρτητα από την κλίμακα μεγέθους που χρησιμοποιήθηκε [9]. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3, όπου παρατίθεται μια σειρά από προφίλ τραχύτητας που περιγράφουν μηχανικά κατεργασμένες επιφάνειες καθώς επίσης και την επιφάνεια της γης και του φεγγαριού (σε μεγάλη κλίμακα).



Σχήμα 2.3: Ομοιότητες μεταξύ τυχαίων προφίλ από τραχείες επιφάνειες είτε φυσικές, είτε τεχνητές [9].

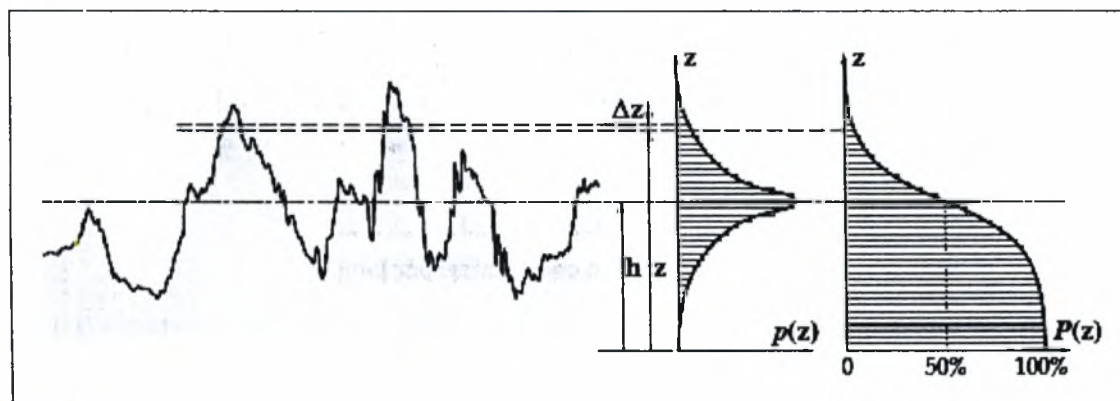
Μια άλλη μοναδική ιδιότητα της τραχύτητας μιας επιφάνειας είναι ότι, κατά τη διαδικασία της βαθμιαίας μεγέθυνσης, αυξάνονται συνεχώς οι λεπτομέρειες των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που είναι δυνατό να παρατηρηθούν σε κλίμακα νάνο-μέτρου (nanoscales). Επίσης, το προφίλ της κάθε επιφάνειας είναι το ίδιο, ανεξάρτητα από το βαθμό μεγεθύνσεως [9, 10]. Αυτή η ομοιότητα στο προφίλ, ανεξαρτήτως του βαθμού μεγεθύνσεως, φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Ομοιότητα στο προφίλ μίας επιφάνειας, ανεξαρτήτως της μεγεθύνσεως. Η τραχύτητα της επιφάνειας είναι η ίδια.

Έχει παρατηρηθεί ότι τα προφίλ της τραχύτητας των επιφανειών εμφανίζουν ομοιότητες με τις ηλεκτρικές καταγραφές του λευκού θορύβου και επομένως για την ανάλυσή τους έχουν υιοθετηθεί παρόμοιες στατιστικές μέθοδοι. Η εισαγωγή των στατιστικών μεθόδων στην ανάλυση της τοπογραφίας μίας επιφάνειας οφείλεται πιθανώς στους Abbott και Firestone οι οποίοι το 1933 [11] πρότειναν την καμπύλη φέρουσας επιφάνειας (bearing area curve) ως μέσο αντιπροσωπευτικό του προφίλ [9]. Αυτή η καμπύλη που αντιπροσωπεύει την πραγματική περιοχή επαφής, επίσης γνωστή ως καμπύλη Abbott, λαμβάνεται από το προφίλ της επιφάνειας. Προκύπτει θεωρώντας ένα τμήμα του προφίλ επιφάνειας στο οποίο παρεμβάλλεται ένα απειροστό λεπτό επίπεδο που τοποθετείται επάνω από ένα άλλο δεδομένο επίπεδο. Το μήκος του επιπέδου παρεμβολής μαζί με τη δεδομένη επιφάνεια, αθροίζονται μαζί και εκτυπώνονται ως ποσοστό/αναλογία του συνολικού μήκους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε διάφορα μήκη. Η αναλογία αυτού του αθροίσματος στο συνολικό μήκος της bearing curve θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το ποσοστό της πραγματικής περιοχής στην θεωρητική περιοχή [9]. Αν και μπορεί να τεθεί υπό αμφισβήτηση ότι αυτή η διαδικασία δίνει το φέρον μήκος κατά μήκος ενός προφίλ, έχει αποδειχθεί ότι για μια τυχαία επιφάνεια το bearing length και τα bearing area fractions είναι ίδια [12, 9]. Η καμπύλη που προκύπτει είναι στην πραγματικότητα ένα ολοκλήρωμα του ύψους της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $p(z)$ και εάν η κατανομή του ύψους είναι Gaussian, τότε αυτή η καμπύλη δεν είναι τίποτα άλλο από

την αθροιστική συνάρτηση $P(z)$ της κλασσικής στατιστικής. Η κατανομή του ύψους των ανωμαλιών προκύπτει με τον προσδιορισμό του αριθμού ή του ποσοστού των ανωμαλιών της επιφάνειας που βρίσκονται μεταξύ δύο συγκεκριμένων υψών, σαν συνάρτηση του ύψους των ανωμαλιών [9]. Είναι ένας τρόπος αναπαράστασης για όλα τα ύψη που προκαλούν ανωμαλίες σε μία επιφάνεια. Η μέθοδος για την εξαγωγή της bearing area curve παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.5. Φαίνεται εύκολα από το Σχήμα 2.5 ότι είναι εύκολο να αξιολογηθεί το ποσοστό της φέρουσας επιφάνειας (bearing area) που βρίσκεται επάνω από ένα ορισμένο ύψος.

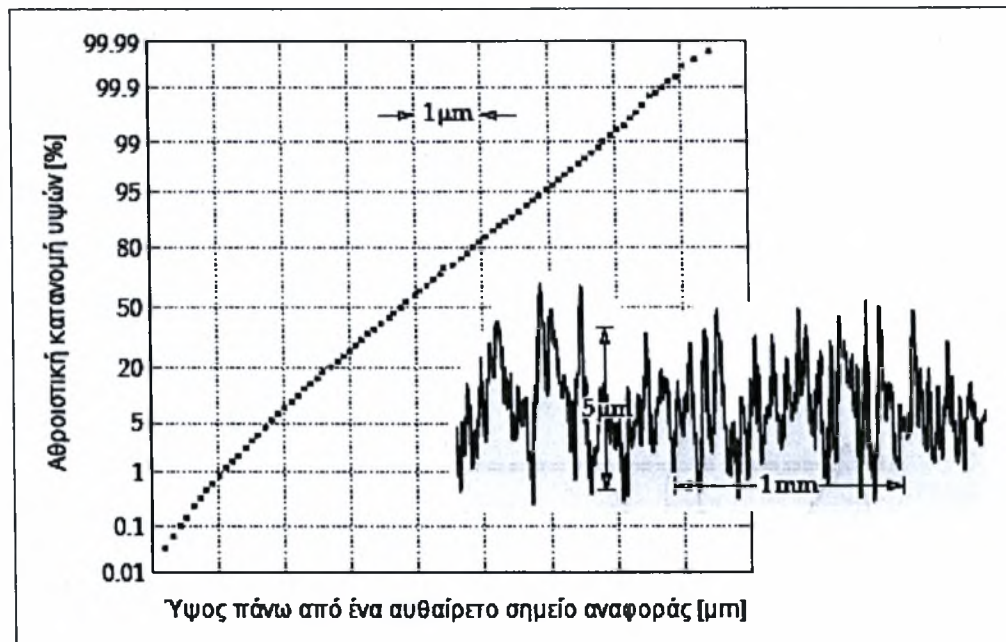


Σχήμα 2.5: Ορισμός της bearing are curve μιας τραχείας επιφάνειας. Το z είναι η κάθετη απόσταση από το επίπεδο της επιφάνειας, Δz είναι το διάστημα μεταξύ δύο υψών, h είναι η μέση απόσταση από την επιφάνεια, $p(z)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας του ύψους και $P(z)$ είναι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας [9].

Αν και είναι γενικά αποδεκτό ότι οι περισσότερες επιφάνειες εμφανίζουν Gaussian κατανομές για τις διάφορες υψομετρικές ανωμαλίες, αυτό δεν ισχύει πάντα. Παραδείγματος χάριν, έχει αποδειχθεί ότι οι μηχανουργικές κατεργασίες όπως η λείανση (grinding), το honing και το lapping παράγουν κατανομές υψών με αρνητική κλίση [13], ενώ μερικές κατεργασίες φρεζαρίσματος (milling) και τορναρίσματος (turning) μπορούν να παραγάγουν κατανομές υψών με θετική στατιστική ασυμμετρία [9]. Στην πράξη, εντούτοις, πολλές επιφάνειες εμφανίζουν για τις υψομετρικές ανωμαλίες συμμετρικές Γκαουσιανές κατανομές.

Η αναπαράσταση της απόκλισης του ύψους της επιφάνειας από ένα μέσο επίπεδο αναφοράς, όσον αφορά την αθροιστική Gaussian κατανομή, δίνει συνήθως μια γραμμική σχέση [14, 15]. Ένα κλασικό παράδειγμα προφίλ Gaussian κατανομής που παρατηρείται σε μια επιφάνεια η οποία έχει υποστεί διαμόρφωση με σφαιροβολή (bead-blasted surface), παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Η κλίμακα του διαγράμματος

έχει οριστεί έτσι ώστε να προκύπτει ευθεία γραμμή εάν παρουσιάζεται Gaussian κατανομή.



Σχήμα 2.6: Πειραματικό παράδειγμα ενός προφίλ Gaussian επιφάνειας σε μία τραχεία επιφάνεια [14].

Κατά τη διάρκεια ήπιας φθοράς οι κορυφές που χαρακτηρίζουν την τραχύτητα της επιφάνειας αποκóπτονται με συνέπεια το προφίλ της επιφάνειας να αποτελείται από επίπεδες επιφάνειες (plateaux) και αιχμηρές αυλακώσεις. Σε τέτοια προφίλ η κατανομή των υψών που χαρακτηρίζουν την τραχύτητα είναι σύμφωνη με όχι μία, αλλά δύο Gaussian σταθερές, δηλαδή το Gaussian προφίλ της επιφάνειας εμφανίζει διπλή συμπεριφορά [40]. Η αφαίρεση της τραχύτητας της επιφάνειας σχετίζεται με μία πειραματική διαδικασία, όπου μια πρόσφατα μηχανικά κατεργασμένη επιφάνεια υποβάλλεται σε μικρά φορτία προκειμένου να είναι σε θέση να φέρει ένα αρκετά υψηλό φορτίο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Πρέπει επίσης να γίνει κατανοητό ότι οι περισσότερες πραγματικές τεχνολογικές επιφάνειες αποτελούνται από ένα σύνολο τυχαίων και μη τυχαίων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Οι σειρές από αυλακώσεις που προκύπτουν από έναν μηχανουργικό διαμορφωτή σε μια μεταλλική επιφάνεια είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μη τυχαίων τοπογραφικών χαρακτηριστικών. Αφ' ετέρου, οι bead-blasted επιφάνειες αποτελούνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από τυχαία χαρακτηριστικά γνωρίσματα λόγω της τυχειότητας που διέπει αυτή τη διαδικασία. Η διαμορφωμένη επιφάνεια περιέχει

επίσης σε αρκετά υψηλό βαθμό τυχαία χαρακτηριστικά γνωρίσματα που προσδίδουν στην εν λόγω επιφάνεια τραχύτητα. Γενικά, τα μη τυχαία χαρακτηριστικά γνωρίσματα δεν έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην περιοχή επαφής και την πίεση επαφής, με την προϋπόθεση ότι η τυχαία τραχύτητα επιβάλλεται στα μη τυχαία χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας

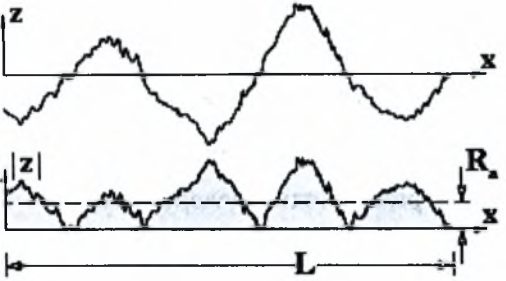
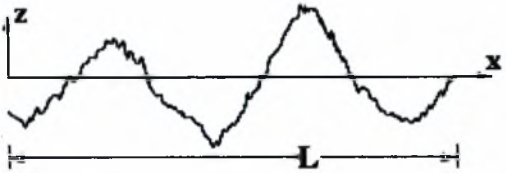
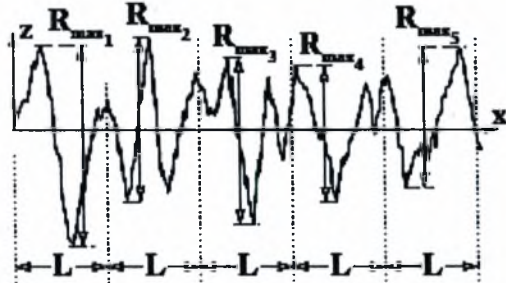

Προκειμένου να είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός της τοπογραφίας μίας επιφάνειας, έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός από τεχνικές και παραμέτρους. Αυτοί που χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την περιγραφή των επιφανειών, είναι οι στατικές παράμετροι. Ένα πρόσφατο βήμα εξέλιξης σε αυτή την περιοχή αποτελεί ο χαρακτηρισμός των επιφανειών με τη χρήση των fractals.

- *Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας με στατιστικές παραμέτρους*

Οι πραγματικές επιφάνειες είναι δύσκολο να καθοριστούν. Προκειμένου να περιγραφεί η επιφάνεια απαιτούνται τουλάχιστον δύο παράμετροι, μία για την περιγραφή των αποκλίσεων όσον αφορά το ύψος (δηλαδή παράμετρος ύψους) και μία άλλη για την περιγραφή της μεταβολής του ύψους με βάση το επίπεδο της επιφάνειας (δηλαδή χωρική παράμετρος) [9]. Η απόκλιση μιας επιφάνειας από το μέσο επίπεδό της θεωρείται ότι είναι μια τυχαία διαδικασία που μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας διάφορες στατιστικές παραμέτρους.

Τα χαρακτηριστικά ύψους περιγράφονται συνήθως από παραμέτρους όπως η κεντρική γραμμή του μέσου όρου ή η μέση τραχύτητα (CLA ή “ R_a ”), η τετραγωνική ρίζα της τραχύτητα (RMS ή “ R_q ”), η μέση τιμή της μέγιστης απόκλισης μεταξύ peaks-και-valleys (“ R_m ”), το ύψος δέκα σημείων (“ R_z ”) και πολλές άλλες. Στην πράξη, στην εφαρμοσμένη μηχανική, η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη παράμετρος είναι η μέση τιμή της τραχύτητας. Μερικές από τις παραμέτρους ύψους παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Κοινά χρησιμοποιούμενες παράμετροι ύψους.

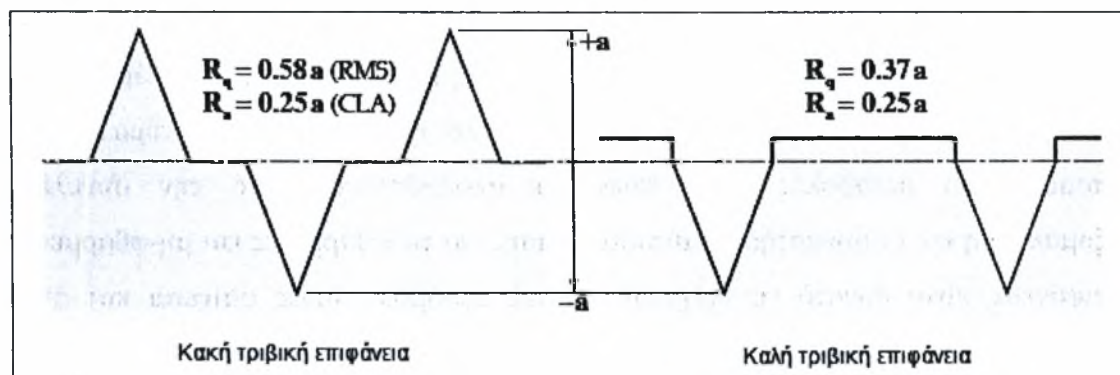
<p>Μέση Τραχύτητα (Roughness average) (<i>CLA or R_a</i>)</p>	$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z| dx$	
<p>Τετραγωνική Ρίζα Μέσης Τραχύτητας (Root mean square roughness) (<i>RMS or R_q</i>)</p>	$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$	
<p>Μέγιστο Εύρος Ύψους (Maximum peak-to-valley height) (<i>R_t</i>)</p>	$R_t = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{max,i}$	
<p>Ύψος δέκα σημείων (Ten-point height) (<i>R_z</i>)</p>	$R_z = \frac{p_1 + \dots + p_5 + v_1 + \dots + v_5}{5}$	

όπου:

- L είναι το μήκος δειγματοληψίας [m]
- z είναι το ύψος του προφίλ ως προς x [m]

Η παράμετρος “ R_a ” αντιπροσωπεύει τη μέση τραχύτητα σε ένα συγκεκριμένο μήκος δειγματοληψίας. Η επίδραση μιας μικρής επιφανειακής ανωμαλίας, η οποία δεν αποτελεί χαρακτηριστικό peak ή valley (π.χ. μία αμυχή) δεν εξομαλύνεται και έχει μόνο μικρή επίδραση στην τελική τιμή. Επομένως, λόγω αυτής της ιδιότητας που υιοθετείται, ένα από τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της παραμέτρου είναι ότι μπορεί να δώσει τις ίδιες ακριβώς τιμές για επιφάνειες με συνολικά διαφορετικά χαρακτηριστικά. Δεδομένου ότι τιμή της παραμέτρου “ R_a ” σχετίζεται άμεσα με τη μέση τιμή για την περιοχή που απεικονίζεται στο προφίλ της επιφάνειας, οποιαδήποτε

ανακατανομή του υλικού δεν έχει καμία επίδραση στην τιμή αυτή. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.7 όπου το υλικό από τις κορυφές μιας "κακής" τριβικής επιφάνειας ανακατανέμεται για να διαμορφώσει μια "καλή" τριβική επιφάνεια χωρίς οποιαδήποτε αλλαγή στην τιμή της " R_a " [9].



Σχήμα 2.7: Επίδραση της εξομάλυνσης στην τιμή της " R_a " [9].

Η "καλή" τριβική επιφάνεια που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7 προσεγγίζει τις περισσότερες φορές πραγματικές επιφάνειες που έχουν υποστεί φθορά και όπου η λίπανση είναι αποτελεσματική. Τέτοιες επιφάνειες τείνουν να αποτελούν το ευνοϊκό προφίλ μιας επιφάνειας, δηλαδή σχεδόν επίπεδα plateaux που διακόπτονται κατά διαστήματα από τυχαία και στενά αυλάκια.

Το πρόβλημα που συνδέεται με την επίδραση της εξομάλυνσης μπορεί να διορθωθεί από την εφαρμογή της παραμέτρου RMS από τη στιγμή που, επειδή σταθμίζεται από το τετράγωνο των υψών, είναι πιο ευαίσθητη από την " R_a " στις αποκλίσεις από τη μέση γραμμή.

Τα χωρικά χαρακτηριστικά (ή χαρακτηριστικά διαστήματος) των πραγματικών επιφανειών μπορούν να περιγραφούν από διάφορες στατιστικές συναρτήσεις. Μερικές από αυτές τις συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2. Αν και δύο επιφάνειες μπορούν να έχουν τις ίδιες παραμέτρους ύψους, η χωρική τους διεύθυνση και συνεπώς η φθορά τους και η τριβική τους συμπεριφορά μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές. Για να περιγραφεί η χωρική διεύθυνση μιας επιφάνειας χρησιμοποιούνται διάφορες συναρτήσεις. Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενες είναι η autocovariance function (ACVF) ή η κανονικοποιημένη της μορφή, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function - ACF) και η

συνάρτηση φασματικής πυκνότητας (power spectrum density - PSDF) [9]. Η autocovariance function ή η autocorrelation function είναι οι πιο δημοφιλείς στην αναπαράσταση των διακυμάνσεων σε μία επιφάνεια. Αυτές οι συναρτήσεις χρησιμοποιούνται στη μελέτη των διαφορετικών χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας με την μελέτη των επιμέρους ιδιοτήτων της. Οι περιορισμοί τους, εντούτοις, αφορούν στο ότι δεν παρουσιάζουν τέτοια ευαισθησία ώστε να είναι δυνατή η μελέτη των μεταβολών στα τοπογραφικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας κατά τη διάρκεια της φθοράς. Η φθορά εμφανίζεται συνήθως σε όλα σχεδόν τα μήκη κύματος και επομένως οι μεταβολές στην επιφάνεια αποκρύπτονται από την συνολική εξομάλυνση και οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης για τις φθαρμένες και μη-φθαρμένες επιφάνειες είναι δυνατό να δείχνουν αρκετά παρόμοιες όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.2 [9].

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί με την εφαρμογή μιας συνάρτησης δομής (structure function) [9, 16]. Αν και αυτή η συνάρτηση περιλαμβάνει της ίδιες ποσοτικά πληροφορίες με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, επιτρέπει μια ακριβέστερη περιγραφή των χαρακτηριστικών της εκάστοτε επιφάνειας. Η power spectral density function έχει μικρή αξία στην χωρική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων μιας επιφάνειας. Αν και η αναπαράσταση μιας επιφάνειας με βάση το Fourier είναι μαθηματικά αποδεκτή, η πολύ σύνθετη φύση των επιφανειών σημαίνει ότι ακόμα και μία απλή δομή απαιτεί ένα πολύ ευρύ φάσμα για να αναπαρασταθεί σε ικανοποιητικό βαθμό [9].

Λεπτομερής περιγραφή των χωρικών παραμέτρων και των παραμέτρων ύψους μπορεί να αναζητηθεί σε άλλες βιβλιογραφικές αναφορές [παραδείγματος χάριν 9, 41].

Πίνακας 2.2: Στατιστικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των χωρικών χαρακτηριστικών στις πραγματικές επιφάνειες [9].

<p>Autocovariance function (ACVF ή $R(\tau)$)</p>	$R(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L z(x) z(x + \tau) dx$	
<p>Autocorrelation function (ACF ή $\rho(\tau)$)</p>	$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{R_q^2}$ <p>συντά χρησιμοποιείται στη μορφή: $\rho(\tau) = e^{-\tau/\beta^*}$</p>	
<p>Structure function (SF ή $S(\tau)$)</p>	$S(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L [z(x) - z(x + \tau)]^2 dx$	
<p>Power spectral density function (PSDF ή $G(\omega)$)</p>	$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau$	

όπου:

- τ είναι η χωρική απόσταση [m]
- β^* είναι το μήκος συσχέτισης της εκθετικής μορφής της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης [m]
- ω είναι η συχνότητα [m^{-1}], για παράδειγμα $\omega = 2\pi/\lambda$, όπου λ είναι το μήκος κύματος [m]

Πολυδιάστατος χαρακτηρισμός της επιφανειακής τοπογραφίας

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των τεχνολογικών επιφανειών είναι ότι παρουσιάζουν τοπογραφικές λεπτομέρειες σε ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων, από νάνο-κλίμακα μέχρι μικρό-κλίμακα. Έχει αποδειχθεί ότι η τοπογραφία μιας επιφάνειας είναι μια μη γεωστατική τυχαία διαδικασία για την οποία η διακύμανση στην κατανομή του ύψους των ανωμαλιών (RMS^2) εξαρτάται από το μήκος δειγματοληψίας (δηλαδή το μήκος της επιφάνειας στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση) [17]. Επομένως, η ίδια επιφάνεια μπορεί να δώσει διαφορετικές τιμές για τις στατιστικές παραμέτρους όταν χρησιμοποιηθεί ένα διαφορετικό μήκος δειγματοληψίας ή ένα όργανο με διαφορετική διακριτική ικανότητα. Αυτό οδηγεί σε ορισμένες ασυνέπειες όσον αφορά το χαρακτηρισμό μιας επιφάνειας [18]. Το κυριότερο πρόβλημα συνδέεται με την απόκλιση μεταξύ του μεγάλου αριθμού κλιμάκων μήκους που περιέχει μια τραχιά επιφάνεια και του μικρού αριθμού των ιδιαίτερων κλιμάκων μήκους, όπως είναι δηλαδή το μήκος δειγματοληψίας και η βαθμονόμηση των οργάνων, τα οποία χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν οι παράμετροι κάποιας επιφάνειας. Επομένως, οι παραδοσιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον τρισδιάστατο χαρακτηρισμό (3-D) της τοπογραφίας μιας επιφάνειας παρέχουν συναρτήσεις ή παραμέτρους που εξαρτώνται δραστικά από την κλίμακα μεγέθους στην οποία υπολογίζονται. Αυτό σημαίνει ότι αυτές οι παράμετροι δεν είναι μοναδικές για μια συγκεκριμένη επιφάνεια (π.χ., [42-44]). Από τη στιγμή που αυτού του είδους ο χαρακτηρισμός που παρέχεται από τις στατιστικές συναρτήσεις και παραμέτρους βρίσκεται σε σύγκρουση με τη φύση των μεθόδων πολύ-κλίμακας χαρακτηρισμού οποιασδήποτε τριβικής επιφάνειας, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν ακόμα πιο καινούριες και καινοτόμες μέθοδοι. Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα αυτό εστιάζονται σε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις:

- ❖ μέθοδοι μετασχηματισμού Fourier,
- ❖ μέθοδοι μετασχηματισμού wavelets (κυματίδια),
- ❖ μέθοδοι fractal και
- ❖ υβριδικές μέθοδοι fractal-wavelets

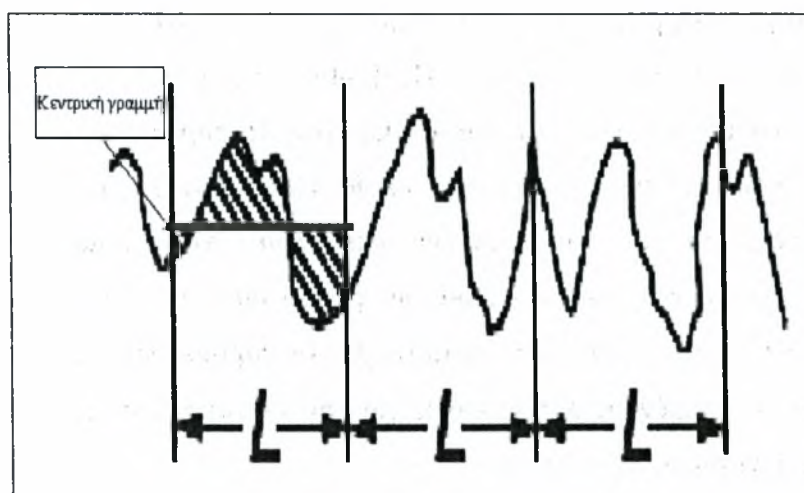
Για το χαρακτηρισμό των επιφανειών με τις μεθόδους wavelets και fractal η τρισδιάστατη αναπαράσταση μιας επιφάνειας παρουσιάζεται υπό μορφή εικόνων σε σειρά [45, 46]. Σε αυτές τις εικόνες τα τοπογραφικά δεδομένα μιας επιφάνειας

κωδικοποιούνται ως τιμές για την φωτεινότητα εικονοστοιχείων (pixels), δηλαδή το φωτεινότερο pixel, που απεικονίζεται από το γκριζο χρώμα επιπέδου "255", αντιπροσωπεύει το υψηλότερο σημείο στην επιφάνεια, ενώ το σκοτεινότερο pixel, που απεικονίζεται από το γκριζο χρώμα επιπέδου "0", αντιπροσωπεύει το χαμηλότερο σημείο στην επιφάνεια [46].

- *Περιγραφή συστήματος M*

Για μπορέσουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα μίας επιφάνειας με το σύστημα Μέσης Γραμμής (Mean Line System) ή πιο απλά το σύστημα M χρησιμοποιούμε ένα προφιλόμετρο στυλίσκου. Το όργανο αυτό χρησιμοποιεί έναν ειδικό δρομέα (στυλίσκος) με τον οποίο όχι μόνο μετράει το μέγεθος των ανωμαλιών, αλλά ανιχνεύει και το σχήμα τους.

Για την μέτρηση των παραμέτρων τραχύτητας μιας επιφάνειας το σύστημα M κατ' αρχήν ορίζει ένα καθορισμένο μήκος L το οποίο καλούμαι δειγματοληπτικό μήκος. Στην συνέχεια το σύστημα χαράσσει τη κεντρική γραμμή αναφοράς. Η γραμμή αυτή είναι παράλληλη προς τη γενική κατεύθυνση του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας (πραγματική κατατομή) ως προς την οποία αναφέρονται οι κάθετες τοπικές αποκλίσεις y , και έχει την ιδιότητα να διαιρεί το χώρο έτσι ώστε το εμβαδόν των περιοχών ανάμεσα σε αυτή και τις κορυφές να ισούται με το εμβαδόν των περιοχών ανάμεσα σε αυτή και τις κοιλάδες, όπως στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Ορισμός κεντρικής γραμμής και δειγματοληπτικού μήκους L .

Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συστήματος Μ συνοψίζονται στα εξής:

1. Είναι απλό από μετροτεχνική άποψη και ιδανικό για ηλεκτρική μέτρηση.
2. Ο ορισμός της κεντρικής γραμμής έχει χαρακτηριστεί σαν αυθαίρετος, ανακριβής και αντιεπιστημονικός. Ωστόσο, τελευταίες έρευνες έχουν δείξει ότι τα σφάλματα που προκύπτουν από αυτή την προσέγγιση είναι πρακτικά αμελητέα.
3. Έχει υποστηριχθεί ότι η περιβάλλουσα επαφής του συστήματος Ε προσδιορίζεται ευκολότερα από τη μέση γραμμή του Μ. Όμως για να χαραχθεί η περιβάλλουσα πρέπει η πραγματική κατατομή να είναι ακριβώς γνωστή, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πράξη, παρά μόνο όταν γίνεται πλήρης καταγραφή της κατατομής και όχι απλά μέτρηση της τραχύτητας.
4. Στην πραγματικότητα τα σημερινά τραχύμετρα του συστήματος Μ χρησιμοποιούν σφαιρικό πέδilo το οποίο ακολουθεί τη στάθμη αναφοράς. Λειτουργούν κατά συνέπεια με γεωμετρία του συστήματος Ε αποτελώντας έτσι ένα συμβιβασμό μεταξύ των δύο συστημάτων.

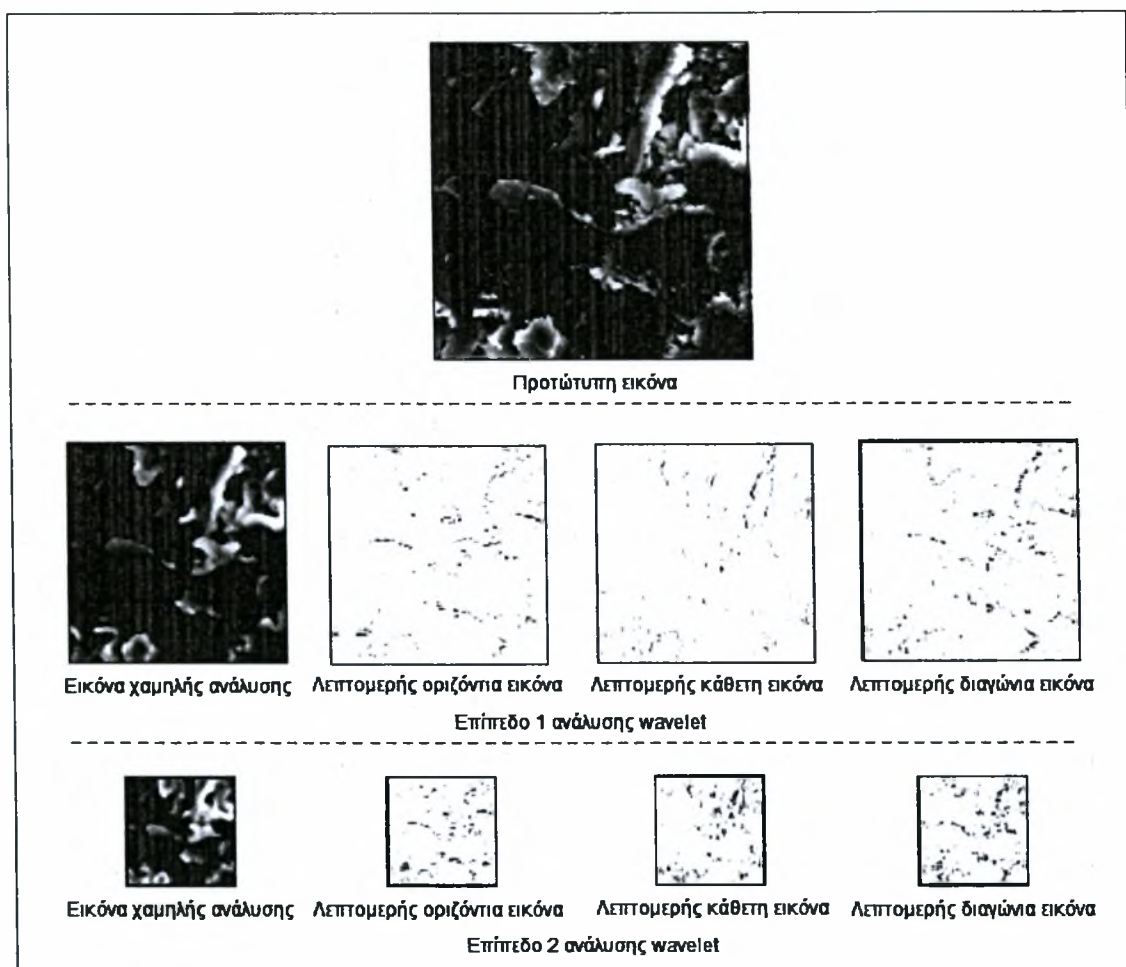
- *Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας από το μετασχηματισμό Fourier*

Οι μέθοδοι μετασχηματισμού Fourier επιτρέπουν την ανάλυση μιας επιφάνειας σε σύνθετες εκθετικές συναρτήσεις διαφορετικών συχνοτήτων. Οι μέθοδοι Fourier χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του φάσματος ισχύος και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης εφαρμόζεται προκειμένου να υπολογιστούν οι τοπογραφικές παράμετροι της κάθε επιφάνειας [π.χ. 41, 47-49]. Εντούτοις, το πρόβλημα με την εφαρμογή αυτών των μεθόδων στις επιφάνειες είναι ότι παρέχουν αποτελέσματα που εξαρτώνται άμεσα από την κλίμακα στην οποία υπολογίζονται και ως εκ τούτου δεν είναι μοναδικές για μια συγκεκριμένη επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει επειδή ο μετασχηματισμός Fourier παρέχει πληροφορίες μόνο για το εάν υπάρχει μία ορισμένη συνιστώσα συχνότητας ή όχι. Σαν αποτέλεσμα, οι παράμετροι της επιφάνειας που υπολογίζονται δεν παρέχουν πληροφορίες για την κλίμακα στην οποία εμφανίζεται μία ιδιαίτερη συνιστώσα συχνότητας.

- *Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας από wavelets (κυματίδια)*

Οι μέθοδοι των wavelets επιτρέπουν την ανάλυση της επιφάνειας σε διαφορετικές συχνότητες και έπειτα το χαρακτηρισμό της σε κάθε μεμονωμένη κλίμακα αναφοράς. Οι μέθοδοι των wavelets χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της τοπογραφίας μιας επιφάνειας ενός τροχού λειάνσεως (grinding wheel) σε μεγάλα και μικρά μήκη κύματος [50], προκειμένου να αναλυθεί τρισδιάστατα η τοπογραφία της επιφάνειας των πρόσθετων ορθοπεδικών αρθρώσεων [51] καθώς και σε άλλες ιατρικές εφαρμογές. Κατά την εφαρμογή των wavelets οι επιφάνειες αναλύονται αρχικά ως προς την τραχύτητα, την κυμάτωση (waviness) και τη μακρογεωμετρική μορφή τους. Στη συνέχεια λαμβάνονται υπ' όψιν οι αλλαγές στα peaks, τα κοιλώματα και τις αμυχές της επιφάνειας σε σχέση με τη θέση τους, σε διαφορετικές κλίμακες μεγέθους. Εντούτοις, υπάρχουν ακόμα σημαντικές δυσκολίες στην εξαγωγή των κατάλληλων παραμέτρων που περιγράφουν την επιφάνεια, από τα wavelets [44].

Ένα παράδειγμα εφαρμογής του μετασχηματισμού wavelet στην ανάλυση της επιφάνειας ενός κράματος τιτανίου σε δύο διαφορετικά επίπεδα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Κάθε επίπεδο ανάλυσης περιέχει μία εικόνα χαμηλής ανάλυσης και τρεις εικόνες που περιέχουν τις κάθετες, οριζόντιες και διαγώνιες λεπτομέρειες της αρχικής εικόνας σε μια συγκεκριμένη κλίμακα. Οι εικόνες χαμηλής ανάλυσης και οι λεπτομερέστερες εικόνες λήφθηκαν με την εφαρμογή ενός συνδυασμού φίλτρων διέλευσης χαμηλών ή/και υψηλών συχνοτήτων κατά μήκος της αρχικής εικόνας και ενός downsampling χειριστή. Η αρχική εικόνα μπορεί να ανασυντεθεί από αυτές τις εικόνες με τη χρησιμοποίηση των φίλτρων και ενός upsampling χειριστή [52].



Σχήμα 2.9: Παράδειγμα εφαρμογής του μετασχηματισμού wavelet στην επιφάνεια κράματος αλουμινίου.

- *Χαρακτηρισμός της τοπογραφίας επιφάνειας από Fractals*

Οι μέθοδοι Fractals (μορφοκλασματικές) επιτρέπουν το χαρακτηρισμό των στοιχείων μιας επιφάνειας ανεξάρτητα από την κλίμακα μεγέθους. Συνήθως οι διαστάσεις των fractals, δεδομένου ότι είναι και "σταθερής-κλίμακας", είναι αυτές που υιοθετούνται για το χαρακτηρισμό των επιφανειών οι οποίες εμφανίζουν τραχύτητα [19]. Η βασική διαφορά μεταξύ του χαρακτηρισμού των πραγματικών επιφανειών με βάσει τις στατιστικές μεθόδους και των fractals είναι ότι οι στατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τις διακυμάνσεις της τραχύτητας μιας επιφάνειας, ενώ τα fractals χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την ευταξία που βρίσκεται πίσω από αυτή την προφανή αταξία [10].

Η διαφορά στο ύψος "z" επάνω από μία μέση θέση σε σχέση με την απόσταση κατά μήκος του άξονα "x" στο προφίλ μιας επιφάνειας λαμβάνεται από ένα στυλίσκο ή από οπτικές μετρήσεις των τραχυμέτρων. Το Σχήμα 2.10, μπορεί να περιγραφεί-

προσδιορίζεται από τη συνάρτηση Weierstrass-Mandelbrot, η οποία περιλαμβάνει τη διάσταση fractal “ D ” και δίδεται στην ακόλουθη μορφή [19]:

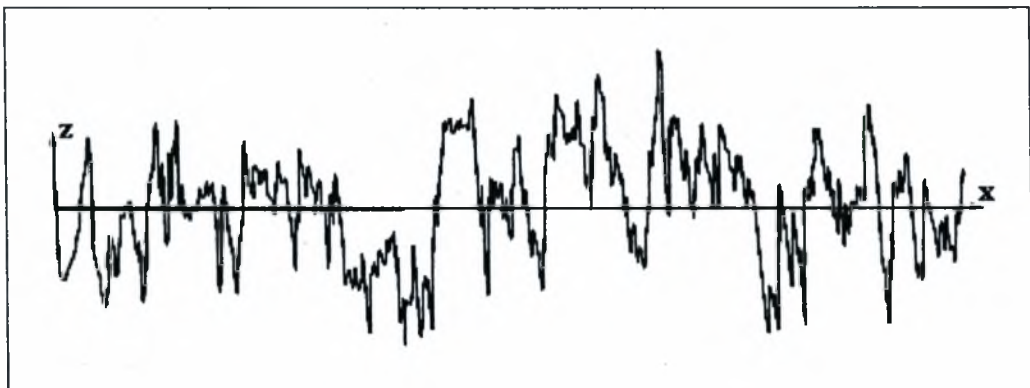
$$z(x) = G^{(D-1)} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi\gamma^n x}{\gamma^{(2-D)n}}, \quad \begin{array}{l} 1 < D < 2 \text{ και} \\ \gamma > 1 \end{array} \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

όπου:

- $z(x)$: είναι η συνάρτηση που περιγράφει τη διακύμανση του ύψους της επιφάνειας κατά μήκος του άξονα “ x ”.
- G : είναι το χαρακτηριστικό μήκος κλίμακας μιας επιφάνειας [m]. Εξαρτάται από το βαθμό φινιρίσματος της επιφάνειας. Για παράδειγμα, η τιμή της “ G ” για επιφάνειες που έχουν υποστεί λείανση, έχει βρεθεί πειραματικά ότι κυμαίνεται μεταξύ 1×10^{-9} και 12.5×10^{-9} [m]. Στην περίπτωση του εδάφους είναι μεταξύ 0.1×10^{-9} - 10×10^{-9} [m], ενώ για επιφάνειες που έχουν υποστεί επεξεργασία με τόρνο το “ G ” είναι περίπου 7.6×10^{-9} [m] [20].
- n_1 : είναι η χαμηλότερη συχνότητα του προφίλ, δηλαδή η συχνότητα αποκοπής, η οποία εξαρτάται από το μήκος δειγματοληψίας “ L ”, δηλαδή $\gamma^{n_1} = 1/L$ [m⁻¹] [17, 19].
- γ : είναι η παράμετρος που καθορίζει την πυκνότητα του φάσματος και τη σχετική διαφορά φάσης μεταξύ των φασματικών μεθόδων. Συνήθως $\gamma = 1.5$ [20].
- γ^n : είναι οι μέθοδοι συχνότητας που αντιστοιχούν στο αντίστροφο μήκος κύματος της τραχύτητας, δηλαδή $\gamma^n = 1/\lambda_n$ [m⁻¹] [19].
- D : είναι η διάσταση fractal που κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2. Εξαρτάται από το βαθμό φινιρίσματος της επιφάνειας. Παραδείγματος χάριν, το “ D ” για λειασμένες επιφάνειες βρίσκεται μεταξύ 1.7 και 1.9, για την επιφάνεια του εδάφους περίπου 1.6, ενώ για επιφάνειες που έχουν υποστεί επεξεργασία με τόρνο το “ D ” είναι περίπου 1.8 [20].

Η συνάρτηση Weierstrass-Mandelbrot έχει την ιδιότητα της παραγωγής προφίλ επιφάνειας που δεν εμφανίζεται να μεταβάλλονται, ανεξάρτητα από το βαθμό

μεγέθυνσης στο οποίο γίνεται η παρατήρησή τους. Καθώς ο βαθμός μεγέθυνσης αυξάνεται, όλο και περισσότερες μικρές λεπτομέρειες γίνονται ορατές και έτσι το προφίλ που παράγεται από αυτήν τη συνάρτηση παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με μια πραγματική επιφάνεια. Με πιο εξειδικευμένους όρους, η συνάρτηση Weierstrass-Mandelbrot δεν είναι διαφορική (non-differentiable) επειδή είναι αδύνατο να ληφθεί η εφαπτομένη σε οποιαδήποτε τιμή της συνάρτησης. Η διάσταση fractal και οι άλλες παράμετροι που περιλαμβάνονται στη συνάρτηση Weierstrass-Mandelbrot παρέχουν συνεπέστερους δείκτες για την τραχύτητα μιας επιφάνειας σε σχέση με τις συμβατικές παραμέτρους, όπως είναι η σταθερή απόκλιση από το μέσο επίπεδο. Αυτό συμβαίνει επειδή η διάσταση fractal είναι ανεξάρτητη από το μήκος δειγματοληψίας και την δυνατότητα ανάλυσης του οργάνου που έτσι κι αλλιώς έχει άμεσα επιπτώσεις στη μετρούμενη τραχύτητα [17].



Σχήμα 2.10: Παράδειγμα προφίλ επιφάνειας που λαμβάνεται από στυλίσκο ή οπτικές μετρήσεις.

Αν και η συνάρτηση Weierstrass-Mandelbrot φαίνεται να είναι παρόμοια με μια σειρά Fourier, ωστόσο υπάρχει μία βασική διαφορά. Οι συχνότητες σε μια σειρά Fourier αυξάνονται με αριθμητική πρόοδο ως πολλαπλάσια μιας βασικής συχνότητας, ενώ στη συνάρτηση Weierstrass-Mandelbrot οι συχνότητες αυξάνονται με γεωμετρική πρόοδο [19]. Στη σειρά Fourier οι φάσεις μερικών συχνοτήτων συγκλίνουν σε ορισμένα σημεία που κάνουν τη συνάρτηση να εμφανίζεται ως μη τυχαία. Με την εφαρμογή της συνάρτησης Weierstrass-Mandelbrot αυτό το πρόβλημα παραβλέπεται με την επιλογή ενός μη ακέραιου αριθμού “ γ ”, και τη διαμόρφωση μιας γεωμετρικής σειράς. Διαπιστώθηκε ότι η τιμή $\gamma = 1.5$ παρέχει και τυχειότητα της φάσης και υψηλή φασματική πυκνότητα [20].

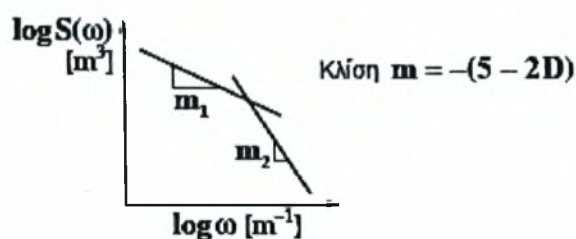
Οι παράμετροι “ G ” και “ D ” μπορούν να προσδιοριστούν από το φάσμα ισχύος (power spectrum) της συνάρτησης Weierstrass-Mandelbrot (Εξίσωση 2.1) που είναι στη μορφή [19, 21]:

$$S(\omega) = \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln \gamma} \frac{1}{\omega^{(5-2D)}} \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

όπου:

- $S(\omega)$: είναι το φάσμα ισχύος [m^3].
- ω : είναι η συχνότητα, δηλαδή το αντίστροφο μήκος κύματος της τραχύτητας [m^{-1}], δηλαδή το όριο χαμηλής συχνότητας αντιστοιχεί στο μήκος δειγματοληψίας, ενώ το όριο υψηλής συχνότητας αντιστοιχεί στη συχνότητα Nyquist που σχετίζεται με την διακριτική ικανότητα του οργάνου [19].

Η διάσταση fractal “ D ” λαμβάνεται από την κλίση “ m ” της γραφικής απεικόνισης log-log της “ $S(\omega)$ ” σε σχέση με την “ ω ”, δηλαδή:



Η παράμετρος “ G ” καθορίζει τη θέση του φάσματος κατά μήκος του άξονα της ισχύος και είναι χαρακτηριστική της κλίμακα για το μήκος της επιφάνειας. Η παράμετρος αυτή λαμβάνεται από την εξίσωση της πειραματικής διαφοράς του προφίλ σε σχέση με αυτό της συνάρτησης των Weierstrass-Mandelbrot [19, 20].

Οι σταθερές “ D ”, “ G ” και “ n_1 ” της συνάρτησης των Weierstrass-Mandelbrot διαμορφώνουν ένα πλήρες σύνολο ανεξάρτητων παραμέτρων κλίμακας που χαρακτηρίζουν μια ισοτροπική τραχεία επιφάνεια [20]. Όταν είναι γνωστοί είναι δυνατό να προσδιοριστεί η τραχύτητα οποιασδήποτε επιφάνειας και σε οποιαδήποτε κλίμακα μήκους, βάσει της συνάρτησης Weierstrass-Mandelbrot [20].

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι στο μοντέλο των fractals για την τραχύτητα, όπως έχει αναπτυχθεί μέχρι τώρα, η κλίμακα της τραχύτητας φαντάζεται να είναι απεριόριστη. Παραδείγματος χάριν, εάν επιλεγεί ένα ικανοποιητικό μήκος δειγματοληψίας, τότε θα είναι δυνατό να παρατηρήσουμε τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας, δηλαδή τις κορυφογραμμές και τις κοιλότητες. Στην πράξη, οι μηχανολογικές επιφάνειες περιέχουν ένα όριο στην τραχύτητα, δηλαδή οι επιφάνειες επιδέχονται ήπιας μηχανικής κατεργασίας και από την άποψη αυτή, το μοντέλο του fractal θα αποκλίνει από την πραγματικότητα.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τον υπολογισμό της διάστασης fractal ενός προφίλ, π.χ. μέθοδος οριζόντιας διευθέτησης των στοιχείων (Horizontal Structuring Element Method - HSEM) [53], συσχετισμός ακεραίων (correlation integral) [54, 55], γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) [π.χ. 56], η τροποποιημένη μονοδιάστατη μέθοδος του Richardson [57] καθώς και διάφορες άλλες. Εντούτοις, διαπιστώθηκε ότι οι διαστάσεις fractal που υπολογίζονται από τα προφίλ επιφάνειας παρουσιάζουν μερικούς θεμελιώδεις περιορισμούς, ειδικά όταν εφαρμόζονται για το χαρακτηρισμό των φθαρμένων επιφανειών [56, 58, 59]. Παραδείγματος χάριν, αποδείχθηκε ότι οι διαστάσεις fractal που έχουν υπολογιστεί σε διάφορες περιπτώσεις δεν μας δίνουν τη δυνατότητα να διακρίνουμε δύο φθαρμένες επιφάνειες μεταξύ τους [60]. Επίσης, δοκιμές που έχουν γίνει σε τεχνητά παραγμένα προφίλ κατέδειξαν ότι το πρόβλημα επιλογής ενός οποιοδήποτε ιδιαίτερου αλγόριθμου για τον υπολογισμό της fractal διάστασης δεν είναι απλό. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει κάποιος τρόπος να γνωρίζουμε την αληθινή ή ακόμα και την ονομαστική διάσταση fractal του υπό εξέταση προφίλ επιφάνειας [59].

Έχουν γίνει επίσης προσπάθειες εφαρμογής των fractal μεθόδων για το χαρακτηρισμό της τρισδιάστατης τοπογραφίας των επιφανειών. Παραδείγματος χάριν, έχει αποδειχθεί ότι διαστάσεις fractal των επιφανειών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για το χαρακτηρισμό των επιφανειών που εμφανίζουν τη φύση των fractal [56], σε προφίλ επιφάνειας που παράγονται με τórνευση, στην ηλεκτρική λείανση [61], στις ανισότροπες επιφάνειες του εδάφους [62], σε μηχανολογικές επιφάνειες που μετρήθηκαν με διαφορετικές αναλύσεις [63], κ.λπ. Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διαστάσεως fractal μιας επιφάνειας είναι η ε -blanket [64], η box-counting [65], η δισδιάστατη ανάλυση του Hurst [56], η

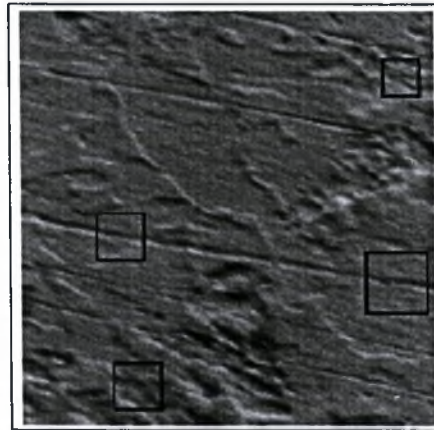
ανάλυση της επιφάνειας με τρίγωνα [66], η μέθοδος διακυμάνσεως [67], η γενικευμένη ανάλυση fractal βασισμένη στο μοντέλο των Ganti-Bhushan [63] και η μέθοδος patchwork [68]. Ο βασικός περιορισμός αυτών των μεθόδων είναι ότι λειτουργούν καλά μόνο σε ισότροπες επιφάνειες, δηλαδή σε επιφάνειες που εμφανίζουν τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά σε όλες τις κατευθύνσεις [45]. Η πλειοψηφία των επιφανειών, εντούτοις, είναι ανισότροπες, δηλαδή παρουσιάζουν διαφορετικά προφίλ επιφάνειας κατά μήκος διαφορετικών κατευθύνσεων.

Προκειμένου να υπερκεραστεί αυτός ο περιορισμός και να είναι δυνατόν να προκύψει ένας χαρακτηρισμός που να περιγράφει μια επιφάνεια σε όλες τις κατευθύνσεις, έχει αναπτυχθεί η τροποποιημένη μέθοδος Hurst Orientation Transform (HOT) [69]. Η μέθοδος HOT μας δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των συντελεστών Hurst (H), οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με τη διάσταση fractal μιας επιφάνειας, δηλαδή $D = 3 - H$, σε όλες τις πιθανές κατευθύνσεις. Αυτοί οι συντελεστές, όταν αναπαρασταθούν συναρτήσει του προσανατολισμού, αποκαλύπτουν την ανισοτροπία της επιφάνειας [45, 69].

Το πρόβλημα είναι ότι καμία από τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί έως τώρα δεν παρέχει μια πλήρη περιγραφή της τοπογραφίας μιας επιφάνειας, δεδομένου ότι είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να περιγράφουν μόνο ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας όπως είναι η τραχύτητα μιας επιφάνειας και η κατευθυντικότητα της. Ακόμα κι αν μια τροποποιημένη μέθοδος HOT μας δίνει τη δυνατότητα χαρακτηρισμού της ανισοτροπίας μιας επιφάνειας, ακόμα δεν παρέχει μια πλήρη περιγραφή της τοπογραφίας της επιφάνειας. Φαίνεται ότι οι μέθοδοι των fractals που χρησιμοποιούνται αυτή την περίοδο είναι αποτελεσματικές μόνο για επιφάνειες που προσαρμόζονται σε ένα πρότυπο fractional Brownian motion (FBM) και είναι πανομοιότυπες με μία ομοιόμορφη διαβάθμιση.

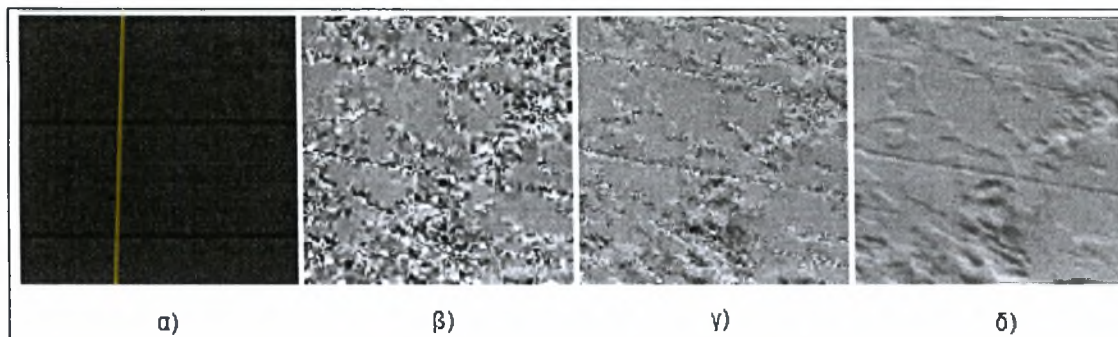
Πρόσφατα έχει δοκιμαστεί μια νέα προσέγγιση, αποκαλούμενη Partitioned Iterated Function System (PIFS). Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην ιδέα ότι, δεδομένου ότι οι περισσότερες από τις σύνθετες δομές που παρατηρούνται στη φύση μπορούν να περιγραφούν και να μοντελοποιηθούν από έναν συνδυασμό απλών μαθηματικών κανόνων [π.χ. 70, 71], είναι λογικό να θεωρηθεί ότι, σε γενικές γραμμές, πρέπει να είναι δυνατό να περιγραφεί μια επιφάνεια από ένα σύνολο τέτοιων κανόνων.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οποιαδήποτε εικόνα επιφάνειας, που περιέχει δεδομένα για την τρισδιάστατη αναπαράσταση της τοπογραφίας αυτής της επιφάνειας, παρουσιάζει έναν ορισμένο βαθμό “self-transformability” ή ικανότητας αυτομετασχηματισμού, δηλαδή ένα τμήμα μιας εικόνας μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα άλλο τμήμα της εικόνας και να αναπαράγεται σχεδόν με τον ίδιο τρόπο [72]. Με άλλα λόγια, η εικόνα μιας επιφάνειας αποτελείται από τα τμήματα εικόνων που μπορούν να μετατραπούν έτσι ώστε να ταιριάζουν με άλλα τμήματα που βρίσκονται αλλού στην εικόνα [45]. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11, όπου απεικονίζεται η επιφάνεια ενός μαλακού χάλυβα με τα “self-transformable” τμήματα να επισημαίνονται από τα τετράγωνα.



Σχήμα 2.11: Εικόνα της επιφάνειας ενός μαλακού χάλυβα όπου τα “self-transformable” τμήματα σημειώνονται με τετράγωνα.

Η μέθοδος PIFS βασίζεται σε αυτούς τους μετασχηματισμούς και δίνει τη δυνατότητα να συμπεριληφθούν όλες οι πληροφορίες που αφορούν την επιφάνεια σε ένα σύνολο μαθηματικών τύπων [44, 45]. Αυτοί οι τύποι όταν εφαρμόζονται κατ’ επανάληψη σε οποιοδήποτε αρχική εικόνα, έχουν ως αποτέλεσμα μία ακολουθία εικόνων που κατατείνουν στην αρχική επιφάνεια. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12, όπου το σύνολο των κανόνων που αφορούν την εικόνα της επιφάνειας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11 εφαρμόστηκαν σε κάποια αρχική εικόνα, για παράδειγμα σε ένα μαύρο τετράγωνο.



Σχήμα 2.12: Εφαρμογή της μεθόδου PIFS για την επιφάνεια του μαλακού χάλυβα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11: α) αρχική εικόνα, β) 1 επαναλήψη, γ) 4 επαναλήψεις και δ) 12 επαναλήψεις.

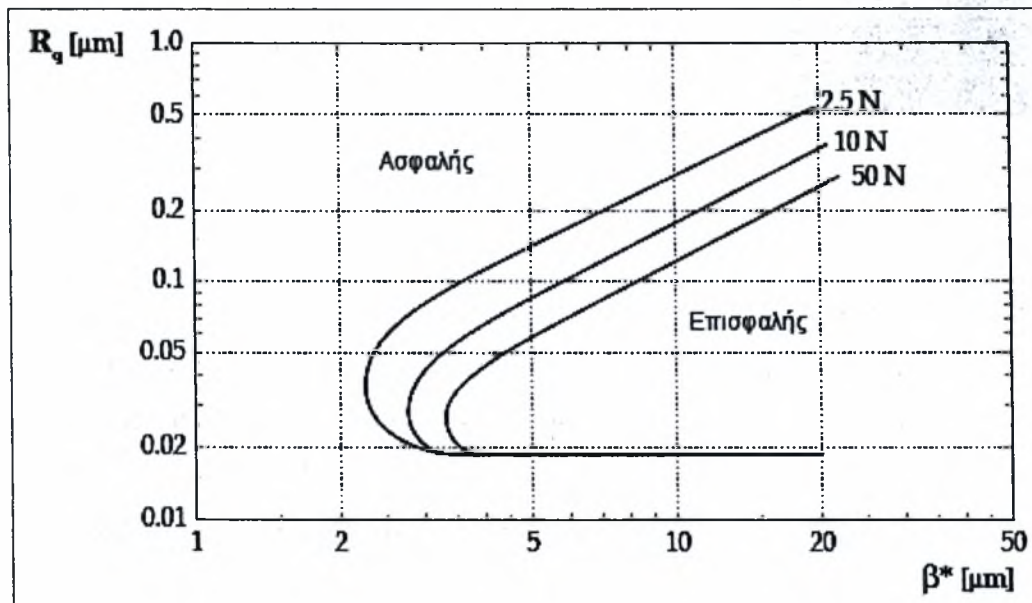
Μπορεί να φανεί από το Σχήμα 2.12 ότι ένα σχεδόν ακριβές αντίγραφο της αρχικής εικόνας έχει ληφθεί από τη "μαύρη" εικόνα μόνο μετά από 12 επαναλήψεις των δεδομένων της μεθόδου PIFS. Δεδομένου ότι λαμβάνεται μια σχετικά ακριβής απεικόνιση ολόκληρης της επιφάνειας, η μέθοδος PIFS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση των επιφανειών σε συγκεκριμένες ομάδες.

Βέλτιστη τραχύτητα επιφάνειας

Σε πρακτικές εφαρμογές εφαρμοσμένης μηχανικής η τραχύτητα των επιμέρους μηχανικών μερών είναι κρίσιμη δεδομένου ότι καθορίζει τη δυνατότητα των επιφανειών να υποστηρίξουν τα διάφορα φορτία [22]. Έχει διαπιστωθεί ότι για πολύ υψηλές ή χαμηλές τιμές του " R_q " είναι δυνατό να υποστηριχθούν χαμηλά μόνο φορτία. Αντίθετα, ενδιάμεσες τιμές του " R_q " επιτρέπουν την παραλαβή πολύ υψηλότερων φορτίων. Αυτό διευκρινίζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.13, όπου η περιοχή βέλτιστης λειτουργίας (υπό συνθήκες λίπανσης) ορίζεται σε σχέση με τα χαρακτηριστικά ύψους και τα χωρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Εάν οι επιφάνειες είναι πάρα πολύ τραχείες, τότε είναι δυνατό να παρουσιαστεί υπερβολική φθορά και υπερθερμάνσεις σε διαφορετικά σημεία. Αντιθέτως, εάν οι επιφάνειες είναι πάρα πολύ ομαλές, δηλαδή όταν εμφανίζεται $\beta^* < 2$ [μm], τότε συμβαίνουν απότομα αστοχίες στην επιφάνεια ακόμη και σε πολύ χαμηλά φορτία [22].

Διαπιστώνεται ότι οι περισσότερες φθαρμένες επιφάνειες, όπου η λίπανση είναι αποτελεσματική, τείνουν να παρουσιάζουν ένα ομαλό σχεδιάγραμμα για την επιφάνεια, δηλαδή ένα σχεδόν επίπεδο plateau όπου διακρίνονται τυχαία κατά διαστήματα στενά αυλάκια. Σε αυτή την περίπτωση, το σχεδιάγραμμα είναι ακόμα

ποιο τυχαίο γεγονός που επιτρέπει την ανάλυση της επιφάνειας επαφής μεταξύ των τραχειών επιφανειών όπως περιγράφεται παραπάνω.



Σχήμα 2.13: Σχέση μεταξύ ασφαλούς και επισφαλούς λειτουργικής περιοχής σε σχέση με τα χωρικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά ύψους της επιφάνειας [22].

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. J. Benard (editor), Adsorption on Metal Surfaces, Elsevier, Amsterdam, 1983.
2. D. Landheer, A.J.G. Dackus and J.A. Klostermann, Fundamental Aspects and Technological Implications of the Solubility Concept for the Prediction of Running Properties, *Wear*, Vol. 62, 1980, pp. 255-286.
3. E.A. Gulbransen, The Role of Minor Elements in the Oxidation of Metals, *Corrosion*, Vol. 12, 1956, pp. 61-67.
4. K. Meyer, Physikalisch-Chemische Kristallographie, Copyright VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Gutenberg Buchdruckerei, Weimar, 1988.
5. D.H. Buckley, Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication, Elsevier, Amsterdam, 1981.
6. D. Godfrey, Chemical Changes in Steel Surfaces during Extreme-Pressure Lubrication, *ASLE Transactions*, Vol. 5, 1962, pp. 51-66.

7. R. Kothari and R.W. Vook, The Effect of Cold Work on Surface Segregation of Sulphur on Oxygen-Free High Conductivity Copper, *Wear*, Vol. 157, 1992, pp. 65-79.
8. J. Van Alsten and S. Granick, Friction Measured With a Surface Forces Apparatus, *Tribology Transactions*, Vol. 32, 1989, pp. 246-250.
9. T.R. Thomas (editor), *Rough Surfaces*, Longman Group Limited, 1982.
10. A. Majumdar and B. Bhushan, Fractal Model of Elastic-Plastic Contact Between Rough Surfaces, *Transactions ASME, Journal of Tribology*, Vol. 113, 1991, pp. 1-11.
11. E.J. Abbott and F.A. Firestone, Specifying Surface Quality, *Mechanical Engineering*, Vol. 55, 1933, pp. 569-572.
12. E.F. Finklin, The Bearing Area of Surfaces, Transactions ASME, *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 90, 1968, pp. 329-330.
13. R.S. Sayles and T.R. Thomas, A Stochastic Explanation of Some Structural Properties of a Ground Surface, *Int. Journal of Production Research*, Vol. 14, 1976, pp. 641-655.
14. J.A. Greenwood and J.B.P. Williamson, Contact of Nominally Flat Surfaces, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, Vol. 295, 1966, pp. 300-319.
15. J.B.P. Williamson, The Microtopography of Surfaces, *Proc. Inst. of Mech. Engrs.*, Vol. 182, Pt. 3K, 1967-1968, pp. 21-30.
16. R.S. Sayles and T.R. Thomas, The Spatial Representation of Surface Roughness by Means of the Structure Function: a Practical Alternative to Correlation, *Wear*, Vol. 42, 1977, pp. 263-276.
17. R.S. Sayles and T.R. Thomas, Surface Topography as a Non-Stationary Random Process, *Nature*, Vol. 271, 1978, pp. 431-434.
18. J.I. McCool, Relating Profile Instrument Measurements to the Functional Performances of Rough Surfaces, *Transactions ASME, Journal of Tribology*, Vol. 109, 1987, pp. 264-270.
19. A. Majumdar and B. Bhushan, Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces, *Transactions ASME, Journal of Tribology*, Vol. 112, 1990, pp. 205-216.
20. A. Majumdar and C.L. Tien, Fractal Characterization and Simulation of Rough Surfaces, *Wear*, Vol. 136, 1990, pp. 313-327.

21. M.V. Berry and Z.V. Lewis, On the Weierstrass-Mandelbrot Fractal Function, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, Vol. 370, 1980, pp. 459-484.
22. W. Hirst and A.E. Hollander, Surface Finish and Damage in Sliding, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, Vol. 337, 1974, pp. 379-394.
23. H. Czichos, *Tribology; A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*, Elsevier, Amsterdam, 1978.
24. F.P. Bowden and D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids, Part I*, Clarendon Press, Oxford, 1954.
25. D.J. Whitehouse and J.F. Archard, The Properties of Random Surfaces of Significance in Their Contact, *Proc. Roy. Soc. London, Series A*, Vol. 316, 1970, pp. 97-121.
26. R.A. Onions and J.F. Archard, The Contact of Surfaces Having a Random Structure, *Journal of Physics, Series D: Appl. Phys.*, Vol. 6, 1973, pp. 289-304.
27. J.F. Archard, Elastic Deformation and the Laws of Friction, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, Vol. 243, 1957, pp. 190-205.
28. J. Pullen and J.B.P. Williamson, On the Plastic Contact of Rough Surfaces, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, Vol. 327, 1972, pp. 159-173.
29. P.R. Nayak, Random Process Model of Rough Surfaces, *Transactions ASME, Journal of Lubrication Technology*, Vol. 93, 1971, pp. 398-407.
30. A.W. Bush, R.D. Gibson and T. R Thomas, The Elastic Contact of a Rough Surface, *Wear*, Vol. 35, 1975, pp. 87-111.
31. P.K. Gupta and N.H. Cook, Junction Deformation Models for Asperities in Sliding Interactions, *Wear*, Vol. 20, 1972, pp. 73-87.
32. B. Bhushan, *Tribology of Mechanics of Magnetic Storage Devices*, Sprigler-Verlag, 1990.
33. B. Bhushan, Analysis of the Real Area of Contact Between a Polymeric Magnetic Medium and a Rigid Surface, *Transactions ASME, Journal of Tribology*, Vol. 106, 1984, pp. 26-34.
34. J.M. Challen, L.J. MacLean and P.L.B. Oxley, Plastic Deformation of a Metal Surface in Sliding Contact With a Hard Wedge: Its Relation to Friction and Wear, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, Vol. 394, 1984, pp. 161-181.
35. J.T. Burwell and E. Rabinowicz, The Nature of the Coefficient of Friction, *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, 1953, pp. 136-139.

36. M. Eguchi and T. Yamamoto, Dynamic Behaviour of a Slider Under Various Tangential Loading Conditions, Proc. JSLE. Int. Tribology Conference, 8-10 July 1985, Tokyo, Japan, Elsevier, 1986, pp. 1047-1052.
37. J.F. Archard, Single Contacts and Multiple Encounters, *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, 1961, pp. 1420-1425.
38. Y. Kimura and H. Okabe, Review of Tribology, Youkandou Press, Tokyo, (in Japanese), 1982.
39. S.C. Lim, C.J. Goh and L.C. Tang, The Interdependence of Wear Events During Slow Sliding - a Statistical Viewpoint, *Wear*, Vol. 137, 1990, pp. 99-105.
40. K. Naoi, K. Sasjima and T. Tsukuda, A Quantitative Evaluation of Truncation Wear Based on Three-Dimensional Surface Asperity Changes, *Proc. JAST*, Vol. 4, 1999, pp. 452-459.
41. D.J. Whitehouse, Handbook of Surface Metrology, Bristol; Philadelphia: Institute of Physics Pub., 1994.
42. C.Y. Poon, B. Bhushan, Comparison of Surface Roughness Measurements by Stylus Profiler, AFM and Non-Contact Optical Profiler, *Wear*, Vol. 190, 1995, pp. 76-88.
43. H. Zahouani, R. Vargiolu, Ph. Kapsa, J.L. Loubat, T.G. Mathia, Effect of Lateral Resolution on Topographical Images and Three-Dimensional Functional Parameters, *Wear*, Vol. 219, 1998, pp. 114-123.
44. P. Podsiadlo and G.W. Stachowiak, Scale-Invariant Analysis Tribological Surfaces, Proceedings of the International Leeds-Lyon Tribology Symposium, 'Lubrication at the Frontier', September 1999, Elsevier, 2000.
45. G.W. Stachowiak and P. Podsiadlo, Surface Characterization of Wear Particles, *Wear*, Vol. 225-229, 1999, pp. 1171-1185.
46. P. Podsiadlo and G.W. Stachowiak, 3-D Imaging of Wear Particles Found in Synovial Joints, *Wear*, Vol. 230, 1999, pp. 184-193.
47. W.P. Dong, P.J. Sullivan and K.J. Stout, Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Topography. IV: Parameters for Characterizing Spatial and Hybrid Properties, *Wear*, Vol. 178, 1994, pp. 45-60.
48. Z. Peng and T.B. Kirk, Two-Dimensional Fast Fourier Transform and Power Spectrum for Wear Particle Analysis, *Tribology International*, Vol. 30, 1997, pp. 583-590.

49. D.M. Tsai and C.F. Tseng, Surface Roughness Classification for Castings, *Pattern Recognition*, Vol. 32, 1999, pp. 389-405.
50. Y. Wang, K. S. Moon, A methodology for the multi-resolution simulation of grinding wheel surface, *Wear*, Vol. 211, 1997, pp. 218-225.
51. X.Q. Jiang, L. Blunt, K.J. Stout, Three-Dimensional Surface Characterization for Orthopedic Joint Prostheses, *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers*, Part H, Vol. 213, 1999, pp. 49-68.
52. J.-L. Starck, F. Murtagh, A. Bijaoui, Image Processing and Data Analysis: The Multiscale Approach, New York, Cambridge University Press, 1998.
53. G. Borgerfors, Distance Transforms in Arbitrary Dimensions, *Comp. Vision, Graphics Image Proc.*, Vol. 27, 1984, pp. 321-345.
54. P. Grassberger and I. Procaccia, Characterization of Strange Attractors, *Phys. Rev. Letters*, Vol. 50, 1983, pp. 346-349.
55. K. Judd, An Improved Estimator of Dimension and Comments on Providing Confidence Intervals, *Phys. D.*, Vol. 56, 1992, pp. 216-228.
56. J.C. Russ, Fractal Surfaces, Plenum Press, New York, 1994.
57. M.G. Hamblin and G.W. Stachowiak, Application of the Richardson Technique to the Analysis of Surface Profiles and Particle Boundaries, *Tribology Letters*, Vol. 1, 1995, pp. 95-108.
58. W. P. Dong, P. J. Sullivan and K. J. Stout, Comprehensive Study of Parameters for Characterizing Three-Dimensional Surface Topography, II: Statistical Properties of Parameter Variation, *Wear*, Vol. 167, 1993, pp. 9-21.
59. M.G. Hamblin and G.W. Stachowiak, Measurement of Fractal Surface Profiles Obtained from Scanning Electron and Laser Scanning Microscope Images and Contact Profile Meter, *Journal of Computer Assisted Microscopy*, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 181-194.
60. C. Tricot, P. Ferland and G. Baran, Fractal Analysis of Worn Surfaces, *Wear*, Vol. 172, 1994, pp. 127-133.

Κεφάλαιο 3:

ΑΥΤΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Εκτός από τις στατιστικές και γεωμετρικές μεθόδους ανάλυσης, οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης και οι τεχνικές φασματικής ανάλυσης είναι επίσης πολύ σημαντικά εργαλεία για την εξαγωγή και αναπαράσταση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της τρισδιάστατης τοπογραφίας μιας επιφάνειας. Δεδομένου ότι μια τρισδιάστατη επιφάνεια μπορεί πάντα να αντιπροσωπευθεί από μια ιδιαίτερη μήτρα στοιχείων, είναι δυνατό να υποβληθεί σε επεξεργασία με βάσει τις προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ χρήσιμη διότι μας δίνει τη δυνατότητα μελέτης των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που δεν μπορούν εύκολα να μελετηθούν με άλλες μεθόδους.

Οποιαδήποτε τρισδιάστατη τοπογραφία μιας επιφάνειας αντιπροσωπεύεται από μια σειρά υψών $z(x, y)$, αλλά αυτή η μορφή θεωρείται ως ένα δισδιάστατο σήμα στην περιοχή επεξεργασίας σημάτων. Επομένως, γενικά, η επεξεργασία της τρισδιάστατης τοπογραφίας μιας επιφάνειας καλείται συνήθως επεξεργασία δισδιάστατου σήματος. Προκειμένου να μην υπάρξει σύγχυση με τους όρους "τρειςδιάστατη τοπογραφία επιφάνειας" και "δισδιάστατη επεξεργασία σήματος", διατηρούμε την ορολογία της "τρειςδιάστατης τοπογραφίας επιφάνειας" και αντικαθιστούμε τον όρο "επεξεργασία δισδιάστατου σήματος" με τη "χωρική επεξεργασία σήματος". Συνεπώς, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και η φασματική πυκνότητα ισχύος της τρισδιάστατης τοπογραφίας επιφάνειας καλούνται η χωρική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (AACF) και η χωρική φασματική πυκνότητα ισχύος (APSD) αντίστοιχα.

Δεδομένου ότι, στην πράξη, μια εκτίμηση των AACF και APSD περιλαμβάνει την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier, θα κάνουμε μια αναλυτική αναφορά στους δισδιάστατους ή χωρικούς μετασχηματισμούς Fourier και έπειτα στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της AACF και της APSD.

3.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER (ΣΥΝΕΧΟΥΣ) ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι ένα γνωστό μαθηματικό εργαλείο που ενδείκνυται για την επεξεργασία σήματος. Ορίζεται στα μαθηματικά ως συγκεκριμένη ολοκλήρωση που προέρχεται από τους συντελεστές της σειράς Fourier ενός συνεχούς περιοδικού σήματος. Οι μετασχηματισμοί Fourier των συνεχών και των διακριτών σημάτων είναι πραγματικά παρόμοιοι, αλλά παρουσιάζουν μικρές, αν και όχι σημαντικές, διαφορές.

Ας θεωρήσουμε το συνεχές σήμα χαρακτηριστικό της τοπογραφίας μιας επιφάνειας, $z(x, y)$, το οποίο έχει άπειρο πεδίο ορισμού, δηλαδή ας θεωρήσουμε ότι υπάρχει διαθέσιμη η τοπογραφία της επιφάνειας ενός άπειρου επιπέδου. Το ολοκλήρωμα Fourier ή ο μετασχηματισμός Fourier εκφράζεται ως:

$$Z(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

Αυτή η εξίσωση μετασχηματίζει το σήμα στη χωρική περιοχή σε μια ισοδύναμη περιγραφή στην περιοχή της συχνότητας. Αντί ενός ρητού προσδιορισμού του ύψους σε κάθε σημείο, η επιφάνεια απεικονίζεται ως σύνολο εκτεταμένων οριζόντιων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που έχουν συγκεκριμένο μήκος κύματος, λ_x και λ_y , ή χωρικές συχνότητες, $f_x = \frac{1}{\lambda_x}$ και $f_y = \frac{1}{\lambda_y}$. Προϋπόθεση της Εξίσωσης (3.1) είναι ότι το σήμα πρέπει να έχει πεπερασμένη ενέργεια ή να είναι απολύτως ολοκληρώσιμο, δηλαδή:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |z(x, y)| dx dy < \infty \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

Για πραγματικές μηχανολογικές επιφάνειες (ή δείγματα των τεχνολογικών επιφανειών), το ύψος και οι διαστάσεις x, y είναι φραγμένες, δηλαδή $|x, y| < \infty$ για $(x, y) \leq (x_0, y_0)$ και $z(x, y) = 0$ για $(x, y) > (x_0, y_0)$. Επομένως, πρέπει να ικανοποιείται η Εξίσωση (3.2) για να είναι δυνατό να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός Fourier σε μηχανολογικές επιφάνειες.

Γενικά, η $Z(f_x, f_y)$ είναι μια σύνθετη συνάρτηση που ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} Z(f_x, f_y) &= \operatorname{Re}[Z(f_x, f_y)] + j \operatorname{Im}[Z(f_x, f_y)] = |Z(f_x, f_y)| e^{j\theta(f_x, f_y)} \\ \theta(f_x, f_y) &= \tan^{-1} \left(\frac{\operatorname{Im}[Z(f_x, f_y)]}{\operatorname{Re}[Z(f_x, f_y)]} \right) \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

όπου $|Z(f_x, f_y)|$ είναι το πλάτος και $\theta(f_x, f_y)$ είναι η φάση του μετασχηματισμού Fourier του σήματος $z(x, y)$.

Εάν ένα δισδιάστατο σήμα είναι διαχωρίσιμο, δηλαδή $z(x, y) = z_1(x)z_2(y)$, ο μετασχηματισμός Fourier του δισδιάστατου σήματος είναι απλά το γινόμενο δύο μονοδιάστατων μετασχηματισμών Fourier που δίνονται από:

$$\begin{aligned} Z(f_x, f_y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} z_1(x) e^{-j2\pi f_x x} dx \int_{-\infty}^{\infty} z_2(y) e^{-j2\pi f_y y} dy = Z_1(f_x) Z_2(f_y) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Εξίσωση} \\ 3.4 \end{array}$$

Γενικά, οι περισσότερες πραγματικές επιφάνειες δεν είναι διαχωρίσιμες. Η διπλή ολοκλήρωση του μετασχηματισμού Fourier που εκφράζεται στην Εξίσωση (3.1) μπορεί να εφαρμοστεί από δύο διαδοχικές μονοδιάστατες ολοκληρώσεις στη δισδιάστατη σειρά δεδομένων:

$$\begin{aligned}
 Z(f_x, f_y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi f_y y} \left[\int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) e^{-j2\pi f_x x} dx \right] dy \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} Z_a(f_x, y) e^{-j2\pi f_y y} dy
 \end{aligned}
 \tag{Εξίσωση 3.5}$$

όπου

$$Z_a(f_x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) e^{-j2\pi f_x x} dx
 \tag{Εξίσωση 3.6}$$

Οι Εξισώσεις (3.5) και (3.6) χρησιμεύουν ως βασικοί τύποι για την εφαρμογή του δισδιάστατου μετασχηματισμού Fourier μιας συνεχούς επιφάνειας.

Προκειμένου να ανασυνθέσουμε το αρχικό χωρικό σήμα από το σήμα συχνότητας που παρουσιάζεται στην Εξίσωση (3.1), μπορεί να εφαρμοστεί ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier ως εξής (Brigham, 1988):

$$\begin{aligned}
 z(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Z(f_x, f_y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} df_x df_y \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi f_x x} \left[\int_{-\infty}^{\infty} Z(f_x, f_y) e^{-j2\pi f_y y} df_y \right] df_x \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} z_b(f_x, y) e^{-j2\pi f_x x} df_x
 \end{aligned}
 \tag{Εξίσωση 3.7}$$

όπου

$$z_b(f_x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(f_x, f_y) e^{j2\pi f_y y} df_y
 \tag{Εξίσωση 3.8}$$

Συνεπώς, ο αντίστροφος δισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier μπορεί επίσης να εφαρμοστεί από δύο διαδοχικούς αντίστροφους μονοδιάστατους μετασχηματισμούς Fourier.

Οι Εξισώσεις (3.1) και (3.7) αποτελούν το ζεύγος μετασχηματισμού Fourier για ένα συνεχές σήμα της τοπογραφίας μιας επιφάνειας. Εάν είναι γνωστή μια μορφή του σήματος, η άλλη μορφή μπορεί να ληφθεί με την εφαρμογή είτε του ευθύ μετασχηματισμού Fourier, Εξίσωση (3.1), είτε του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier, Εξίσωση (3.7).

Μια εναλλακτική και αρκετά συχνά χρησιμοποιημένη έκφραση για το μετασχηματισμό, είναι να χρησιμοποιηθεί η ακτινική συχνότητα, $\omega_x = 2\pi f_x$ και $\omega_y = 2\pi f_y$, αντί της συχνότητας f_x και f_y . Κατόπιν το ζεύγος μετασχηματισμού Fourier παρατίθεται ως:

$$Z(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) e^{-j2\pi(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy \quad \text{Εξίσωση 3.9}$$

$$z(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega_x, \omega_y) e^{j(x\omega_x + y\omega_y)} d\omega_x d\omega_y \quad \text{Εξίσωση 3.10}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές μπροστά από τα σημεία ολοκλήρωσης του ζεύγους μετασχηματισμού Fourier, των Εξισώσεων (3.9) και (3.10), δεν είναι μοναδικοί (Brigham, 1988). Γενικά, το γινόμενο τους πρέπει να είναι $\frac{1}{4\pi^2}$. Εδώ, ο συντελεστής στην Εξίσωση (3.9) ορίζεται ως 1, ενώ ο συντελεστής στην Εξίσωση (3.10) ορίζεται ως $\frac{1}{4\pi^2}$. Σε άλλες αναφορές μπορεί να χρησιμοποιείται ορθώς ο συντελεστής $\frac{1}{2\pi}$ ανά κάθε μία από τις εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν το ζεύγος μετασχηματισμού.

3.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER

Σε γενικές γραμμές, ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) αποτελεί μία ειδική περίπτωση του Συνεχούς Μετασχηματισμού Fourier (Continuous Fourier Transform). Όπως υποδεικνύει και η ονομασία του, ο DFT είναι μετασχηματισμός Fourier ενός διακριτού σήματος με πεπερασμένη διάρκεια ή χωρική αλληλουχία. Στην πράξη, όσον αφορά την ψηφιοποίηση μιας

συνεχούς επιφάνειας $z(x, y)$, η ψηφιοποιημένη επιφάνεια $z(m, n)$ πρέπει στην πραγματικότητα να έχει πεπερασμένη χωρική αλληλουχία ή να είναι διακριτή περιοχή.

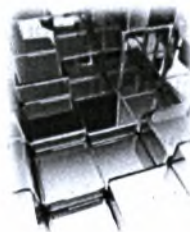
Για οποιαδήποτε πεπερασμένη περιοχή ή διακριτή αλληλουχία, η $z(m, n)$ ορίζεται στο πεπερασμένο εύρος των διακριτών ανεξάρτητων μεταβλητών, $0 \leq m \leq M-1$ και $0 \leq n \leq N-1$, και ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier δίδεται ως (Lim, 1990):

$$Z(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) e^{-j2\pi \left(\frac{k}{M} m + \frac{l}{N} n \right)}, \quad \begin{array}{l} 0 \leq k \leq M-1, \\ 0 \leq l \leq N-1 \end{array} \quad \text{Εξίσωση 3.11}$$

Αντιθέτως, κάθε διακριτή επιφάνεια είναι δυνατόν να ανακτηθεί από την παραπάνω Εξίσωση 3.11, χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (IDFT):

$$z(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} Z(k, l) e^{j2\pi \left(\frac{m}{M} k + \frac{n}{N} l \right)}, \quad \begin{array}{l} 0 \leq m \leq M-1, \\ 0 \leq l \leq N-1 \end{array} \quad \text{Εξίσωση 3.12}$$

Οι Εξισώσεις 3.11 και 3.12 περιλαμβάνουν το ζεύγος των μετασχηματισμών Fourier για την ψηφιοποίηση της τοπογραφίας μιας επιφάνειας. Γενικά, ο ευθύς μετασχηματισμός Fourier, Εξίσωση 3.11, ονομάζεται “εξίσωση ανάλυσης” (analysis equation) και ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier, Εξίσωση 3.12, καλείται “εξίσωση συνθέσεως” (synthesis equation). Ο DFT έχει μερικές ενδιαφέρουσες ιδιότητες που είναι πολύ σημαντικές και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να απλοποιηθεί ο υπολογισμός του DFT. Μερικές από τις ιδιότητες που αφορούν την επεξεργασία των τοπογραφικών σημάτων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1.



Πίνακας 3.1: Συνοπτική παρουσίαση ορισμένων ιδιοτήτων του δισδιάστατου DFT.

	<u>Εξισώσεις Συνθέσεως</u>	<u>Εξισώσεις Αναλύσεως</u>
Γραμμικότητα	$\alpha_1 z_1(m, n) + \alpha_2 z_2(m, n)$	$\alpha_1 Z_1(k, l) + \alpha_2 Z_2(k, l)$
Χωρική Μετατόπιση	$z(m-p, n-q)$	$Z(k, l)e^{-j2\pi(kp/M+lq/N)}$
Μετατόπιση Συχνότητας	$z(m, n)e^{-j2\pi(pm/M+qn/N)}$	$Z(k-p, l-q)$
Διαχωριστικότητα	$z_1(m)z_2(n)$	$z_1(k)z_2(l)$
Συμμετρία	$z(m, n)$ είναι πραγματική αλληλουχία	$z^*(k, l) = Z(M-k, N-l)$
Κυκλική Συνέλιξη	$z_1(m, n) \otimes \otimes z_2(m, n)$	$z_1(k, l)z_2(k, l)$

Όπως είναι εύκολα κατανοητό, η μοντελοποίηση και η ανάλυση της τραχύτητας μιας επιφάνειας είναι αρκετά σύνθετη και πολύπλοκη διαδικασία και γι' αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητο να διατίθεται το κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα. Για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού Matlab. Το Matlab είναι μία υψηλού επιπέδου γλώσσα τεχνικού προγραμματισμού και ένα αλληλεπιδραστικό περιβάλλον για την ανάλυση στοιχείων και την ανάπτυξη αλγορίθμων και εφαρμογών. Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία που περιλαμβάνει είναι ότι μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε μια πληθώρα από διαγράμματα. Η δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων μας δίνει μια συνολική εικόνα της δουλειάς μας που αφενός μας διευκολύνει να τα κατανοήσουμε ευκολότερα και αφετέρου μας παρέχει την δυνατότητα να ερμηνεύσουμε σχέσεις και τάσεις που δεν είναι ευδιάκριτες από μια απλή μαθηματική σχέση.

3.3 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΓΡΗΓΟΡΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER (FFT) ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



Συμφώς, ο υπολογισμός των DFT και IDFT με βάση τις Εξισώσεις (3.11) και (3.12), περιλαμβάνει σύνθετους πολλαπλασιασμούς και προσθέσεις. Ο άμεσος υπολογισμός του δισδιάστατου DFT είναι συνήθως χρονοβόρος. Γενικά, ο υπολογιστικός χρόνος εξαρτάται κυρίως από τους πολλαπλασιασμούς παρά από τις προσθέσεις. Έτσι μπορούμε απλά, για οικονομία χρόνου, να επαναπροσδιορίσουμε το πλήθος των σύνθετων πολλαπλασιασμών που απαιτούνται από τις διαφορετικές υπολογιστικές μεθόδους. Δεδομένου ότι ο σύνθετος εκθέτης $e^{-j2\pi(mk/M+nl/N)}$ είναι δυνατό να υπολογιστεί και να αποθηκευτεί εκ των προτέρων, απαιτούνται $M \times N$ σύνθετοι πολλαπλασιασμοί προκειμένου να ληφθεί ένα σημείο του DFT που

αντιπροσωπεύεται στην Εξίσωση (3.11) από άμεσο υπολογισμό. Ένα σημείο $M \times N$ του DFT θα απαιτούσε $M^2 \times N^2$ σύνθετους πολλαπλασιασμούς. Εάν $M = N$, οι σύνθετοι χρόνοι πολλαπλασιασμού θα αυξάνονται καθώς το N αυξάνεται ως την τέταρτη δύναμη. Η αύξηση στον υπολογιστικό χρόνο, που αφορά τον χρόνο που απαιτείται για να εκτελεστούν οι σύνθετοι πολλαπλασιασμοί, θα ήταν πολύ μεγάλη. Ο αριθμός των σύνθετων πολλαπλασιασμών μπορεί να μειωθεί σε $M \times N * (M + N)$ με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου της αποσύνθεσης κατά γραμμές-στήλες που θα παρουσιαστεί στην επόμενη ενότητα. Παραδείγματος χάριν, για μία δειγματοληπτική επιφάνεια που απαρτίζεται από 128×128 σημεία, υπάρχουν 2^{28} σύνθετοι πολλαπλασιασμοί για τον άμεσο υπολογισμό χωρίς την αποσύνθεση κατά γραμμές-στήλες. Επίσης, υπάρχουν 2^{22} σύνθετοι πολλαπλασιασμοί με τη μέθοδο αποσύνθεσης κατά γραμμές-στήλες.

Εξ' αιτίας αυτού του είδους των υπολογιστικών ιδιαιτεροτήτων, σπάνια υιοθετείται ο άμεσος υπολογισμός του διδιάστατου DFT για την επεξεργασία των τοπογραφικών δεδομένων μιας επιφάνειας, ιδιαίτερα όταν το M και το N είναι μεγαλύτερα. Γι' αυτό το σκοπό, απαιτείται μια γρήγορη και αποτελεσματική προσέγγιση για την εφαρμογή του διδιάστατου DFT και αυτό μπορεί να βρεθεί στην τεχνική του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT).

Η τεχνική του FFT αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1960 από τους Cooley και Tukey (1965). Αυτός ο αλγόριθμος έχει καταστήσει δυνατή την επεξεργασία των DFT, ακόμη και ενός μεγάλου αριθμού σημείων, με τη χρήση των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η τεχνική μπορεί εύκολα να επεκταθεί για την εφαρμογή διδιάστατων DFT.

Υπάρχουν πολλά βιβλία (Oppenheim και Schaffer, 1975 - Brigham, 1988 - Proakis και Manolakis, 1992) που εισάγουν λεπτομερείς διαδικασίες, που βασίζονται στους διαφορετικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθεί ο μονοδιάστατος FFT. Κατά συνέπεια δεν επαναλαμβάνουμε αυτές τις λεπτομέρειες. Επικεντρωνόμαστε στη χρησιμοποίηση των υπαρχουσών διαδικασιών μονοδιάστατου FFT για την εκτέλεση διδιάστατων FFT.

Προκειμένου να εκτελεσθεί ένας δισδιάστατος DFT με την τεχνική του μονοδιάστατου DFT, μπορούμε να αναλύσουμε την Εξίσωση (3.11) σε δύο επιμέρους συναρτήσεις:

$$\begin{aligned}
 Z(k, l) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) e^{-2\pi j \left(\frac{k}{M} m + \frac{l}{N} n \right)} \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) e^{-2\pi j \frac{k}{M} m} \right) e^{-j2\pi \frac{l}{N} n} \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \psi(k, n) e^{-j2\pi \frac{l}{N} n},
 \end{aligned}$$

Εξίσωση 3.13

$$k = 0, 1, \dots, M-1 \quad \text{και} \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

όπου

$$\psi(k, n) = \sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) e^{-j2\pi \frac{k}{M} m}, \quad k = 0, 1, \dots, M-1; \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad \text{Εξίσωση 3.14}$$

Οι Εξισώσεις (3.13) και (3.14) εκφράζουν μία μέθοδο που αποκαλείται μέθοδος ανάλυσης κατά γραμμές-στήλες. Μια δισδιάστατη διαδικασία DFT διακρίνεται σε δύο μονοδιάστατες διαδικασίες DFTs. Η πρώτη μονοδιάστατη διαδικασία DFT περιέχει N γραμμές από μονοδιάστατους DFT (για την Εξίσωση (3.14)). Η δεύτερη μονοδιάστατη διαδικασία DFT περιέχει M στήλες από μονοδιάστατους DFT (για την Εξίσωση (3.13)). Εναλλακτικά η σειρά των μονοδιάστατων διαδικασιών DFT μπορεί να μεταβληθεί. Σε αυτές τις περιπτώσεις, κάθε μονοδιάστατη διαδικασία DFT μπορεί να εφαρμοστεί από ένα υπάρχον πρόγραμμα μονοδιάστατου FFT. Με άλλα λόγια, ο δισδιάστατος DFT μπορεί να εκτελεσθεί από N μονοδιάστατους FFTs για κάθε γραμμή πραγματικών χωρικών δεδομένων και στη συνέχεια να εκτελεστούν M μονοδιάστατοι FFTs για κάθε στήλη σύνθετων δεδομένων συχνότητας.

Δεδομένου ότι ένας μονοδιάστατος FFT μήκους M (όπου M είναι μια δύναμη του 2) απαιτεί $(M/2) \log_2 M$ σύνθετους πολλαπλασιασμούς, ο δισδιάστατος FFT που χρησιμοποιεί τη μέθοδο ανάλυσης κατά γραμμές-στήλες απαιτεί

$M \cdot N (\log_2 M \cdot N) / 2$ σύνθετους πολλαπλασιασμούς. Για τα σημεία 128×128 , ο αριθμός των σύνθετων πολλαπλασιασμών είναι μικρότερος από 2^{17} . Σε σύγκριση με τον άμεσο υπολογισμό του DFT με τη μέθοδο ανάλυσης κατά γραμμές-στήλες, ο FFT μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο κατά έναν παράγοντα μεγαλύτερο από 32. Στον Πίνακα 3.2 παρατίθενται οι συγκρίσεις μεταξύ του σύνθετου πολλαπλασιασμού του άμεσου υπολογισμού και του αλγόριθμου FFT, για διαφορετικά μεγέθη της μήτρας δεδομένων.

Πίνακας 3.2: Σύγκριση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας των διαφορετικών αλγορίθμων DFT.

Μέγεθος Πίνακα Δεδομένων	Σύνθετοι Πολλαπλασιασμοί του Άμεσου Υπολογισμού με τη Μέθοδο Ανάλυσης κατά Γραμμές-Στήλες	Σύνθετοι Πολλαπλασιασμοί του FFT με τη μέθοδο Ανάλυσης κατά Γραμμές-Στήλες	Ταχύτητα Αύξησης Παράγοντα
$M \times N$	$MN(M+N)$	$MN(\log_2 MN)/2$	
32×32	65 536	5 120	12.8
64×64	524 288	24 576	21.3
128×128	4 194 304	114 688	36.6
256×256	33 554 432	524 288	64.0
512×512	268 435 456	2 359 296	113.8
1024×1024	2 147 483 648	10 485 760	204.8

3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ DFT ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟΝ FFT

Στο σημείο αυτό γίνεται λεπτομερής αναφορά στην εφαρμογή του δισδιάστατου DFT με την ανάλυση κατά γραμμές-στήλες. Υποθέτουμε ότι τα αρχικά τοπογραφικά δεδομένα μιας επιφάνειας έχουν N σειρές και M στήλες με το αρχικό σημείο προέλευσή τους το $(0,0)$ στην κάτω αριστερή γωνία ενός πλαισίου συντεταγμένων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1(α). Μετά από τους μονοδιάστατους FFT των N γραμμών, οι μετασχηματιζόμενες συναρτήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1(β). Αξίζει να σημειωθεί ότι η αριστερή πλευρά της διαστιγμένης γραμμής στο Σχήμα 3.1(β) δίδεται από:

$$\begin{aligned} \Psi(k, n) &= \sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) e^{-j2\pi \frac{k}{M} m} \\ &= \text{Re} [\Psi(k_p, n)] + j \text{Im} [\Psi(k, n)] \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 3.15}$$

$$k = 0, 1, \dots, M/2; \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

ενώ η δεξιά πλευρά της διαστιγμένης γραμμής (για $M/2 < k \leq M-1$) του Σχήματος 3.1(β) καθορίζεται από την ιδιότητα της συμμετρίας του FFT που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1 (Dudgeon και Mersereau, 1984; Brigham 1988) και που δίδεται ως:

$$\Psi(M-k, n) = \Psi^*(k, n) = \text{Re}[\Psi(k, n)] - j \text{Im}[\Psi(k, n)],$$

$$k = 0, 1, \dots, M/2-1; \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

Εξίσωση 3.16

Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (3.15) και (3.16) στην Εξίσωση (3.13) και εκταλώντας μονοδιάστατους FFTs στις M στήλες, προκύπτει ο συνολικός δισδιάστατος FFT που χωρίζεται σε τέσσερις μερικώς επικαλυπτόμενες περιοχές (Σχήμα 3.1(γ)). Στην περιοχή I, ο δισδιάστατος DFT είναι:

$$Z(k, l) = \text{Re}[U(k, l)] - \text{Im}[V(k, l)] + j(\text{Im}[U(k, l)] + \text{Re}[V(k, l)])$$

$$k = 0, 1, \dots, M/2; \quad n = 0, 1, \dots, N/2$$

Εξίσωση 3.17

όπου

$$\left. \begin{aligned} U(k, l) &= \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re}[\Psi(k, n)] e^{-j2\pi \frac{l}{N} n} = \text{Re}[U(k, l)] + j \text{Im}[U(k, l)] \\ V(k, l) &= \sum_{n=0}^{N-1} \text{Im}[\Psi(k, n)] e^{-j2\pi \frac{l}{N} n} = \text{Re}[V(k, l)] + j \text{Im}[V(k, l)] \end{aligned} \right\}$$

Εξίσωση 3.18

Στη συνέχεια ανακαλούμε την ιδιότητα του μονοδιάστατου FFT ότι το δεύτερο μισό των μετασχηματισμένων δεδομένων αντιπροσωπεύει τα συστατικά στοιχεία των αρνητικών συχνοτήτων. Έτσι ο δισδιάστατος DFT μέσα στις περιοχές II, III και IV του Σχήματος 3.1(γ) δίνεται ως (Dong *et al.*, 1995):

Περιοχή II

$$Z(k, N-l) = Z(k, -l) = \text{Re}[U(k, l)] - \text{Im}[V(k, l)] + j(\text{Im}[U(k, l)] - \text{Re}[V(k, l)])$$

$$k = 0, 1, \dots, M/2; \quad n = 0, 1, \dots, N/2$$

Εξίσωση 3.19

Περιοχή III

$$Z(M-k, N-l) = Z(-k, -l) = \text{Re}[U(f_p, f_q)] - \text{Im}[V(k, l)] - j(\text{Im}[U(k, l)] + \text{Re}[V(k, l)])$$

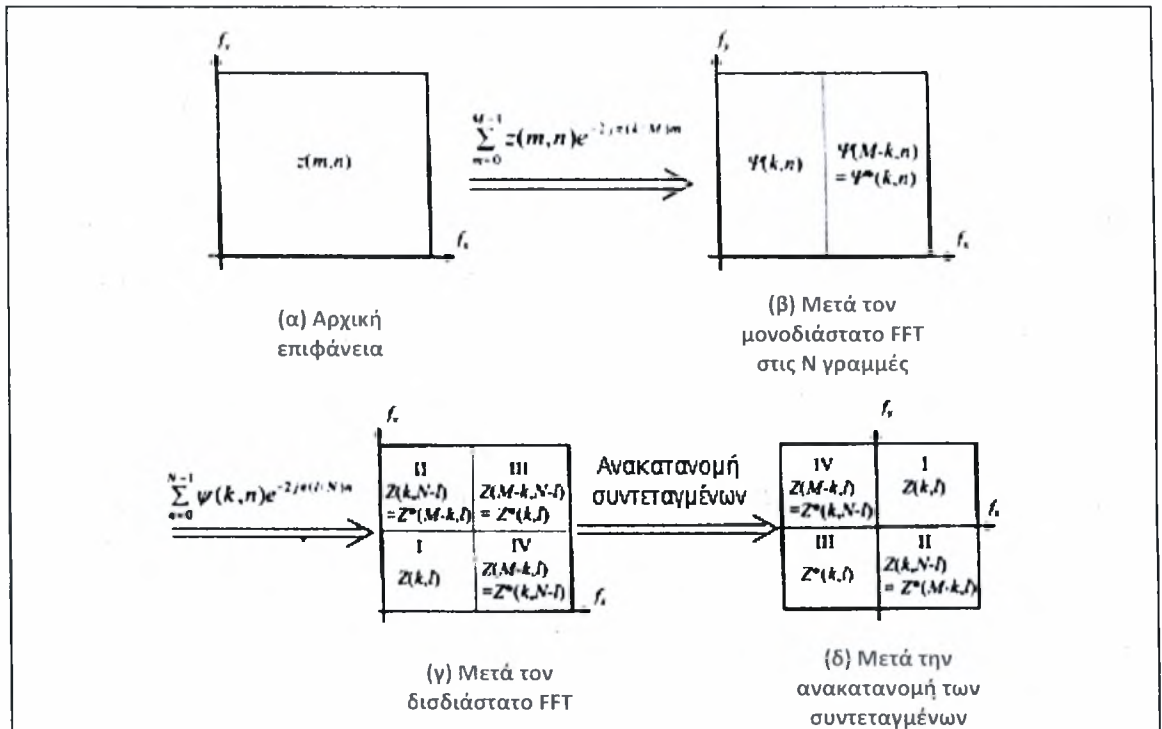
$$k = 0, 1, \dots, M/2; \quad n = 0, 1, \dots, N/2$$

Εξίσωση 3.20

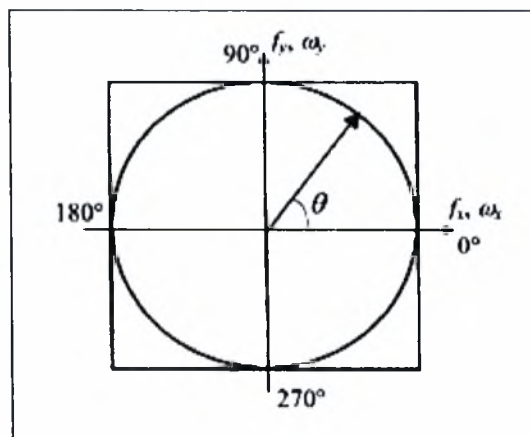
Περιοχή IV

$$Z(M-k, l) = Z(-k, l) = \text{Re}[U(k, l)] - \text{Im}[V(f_q, f_q)] - j(\text{Im}[U(k, l)] - \text{Re}[V(k, l)]) \quad \text{Εξίσωση 3.21}$$

$$k = 0, 1, \dots, M/2; \quad n = 0, 1, \dots, N/2$$



Σχήμα 3.1: Περιεχόμενο και συντεταγμένες της δισδιάστατης διαδικασίας FFT.



Σχήμα 3.2: Συμβατική άποψη των συντεταγμένων του FFT μετά την ανακατανομή.

Οι Εξισώσεις (3.19)-(3.21) αποκαλύπτουν την Ερμητιανή (Hermitian) συμμετρία (Dudgeon και Mersereau, 1984). Είναι γνωστό ότι για τον πίνακα πραγματικών δεδομένων, η περιοχή III είναι θετική αναπαράσταση της περιοχής I και η περιοχή IV είναι θετική αναπαράσταση της II. Για τον πίνακα φανταστικών δεδομένων, η περιοχή III είναι αρνητική αναπαράσταση της περιοχής I και η περιοχή IV είναι αρνητική αναπαράσταση της II.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.1(γ), τέτοιου είδους μετασχηματιζόμενα δεδομένα δεν δίνουν μια συμβατική άποψη ενός δισδιάστατου FFT. Ο τελευταίος θα παρουσίαζε την ανακατανομή συντεταγμένων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2, επειδή οι συντεταγμένες συχνότητας, k & l ή f_x & f_y , της περιοχής I είναι μη-διαδοχικές με τις άλλες περιοχές. Επομένως απαιτείται η ανακατανομή των αποτελεσμάτων του δισδιάστατου FFT. Το Σχήμα 3.1(δ) δίνει μια συμβατική άποψη του δισδιάστατου FFT και του περιεχομένου μετά από την ανακατανομή των συντεταγμένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν $(M/2+1) \cdot (N/2+1)$ σημεία στην περιοχή I, $(M/2+1) \cdot N/2$ σημεία στην περιοχή II, $(M/2) \cdot (N/2)$ σημεία στην περιοχή III και $(M/2) \cdot (N/2+1)$ σημεία στην περιοχή IV. Τα δεδομένα στη γραμμή (αρχίζοντας από το 0) $N/2$ και τα δεδομένα στη στήλη (αρχίζοντας από το 0) $M/2$ μοιράζονται μερικώς στις τέσσερις περιοχές. Η εκ νέου κατανομή των δεικτών των συντεταγμένων σε μια διαδοχική σειρά περιλαμβάνει και μία κυκλική μετατόπιση ή ανταλλαγή περιοχής.

f_y			II	|		III		
	(7, 0)	(7, 1)	(7, 2)	(7, 3)	(7, 4)	(7, 5)	(7, 6)	(7, 7)
	(6, 0)	(6, 1)	(6, 2)	(6, 3)	(6, 4)	(6, 5)	(6, 6)	(6, 7)
	(5, 0)	(5, 1)	(5, 2)	(5, 3)	(5, 4)	(5, 5)	(5, 6)	(5, 7)
	(4, 0) —	(4, 1) —	(4, 2) —	(4, 3) —	(4, 4) —	(4, 5) —	(4, 6) —	(4, 7) —
	(3, 0)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)	(3, 4)	(3, 5)	(3, 6)	(3, 7)
	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	(2, 4)	(2, 5)	(2, 6)	(2, 7)
	(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(1, 4)	(1, 5)	(1, 6)	(1, 7)
(0, 0)	(0, 1)	(0, 2)	(0, 3)	(0, 4)	(0, 5)	(0, 6)	(0, 7)	
		I	|		IV			f_x

Σχήμα 3.3(α): Ένας 8x8 πίνακας δισδιάστατου FFT.

		IV		f_y		I		
(4, 4)	(4, 5)	(4, 6)	(4, 7)	(4, 0)	(4, 1)	(4, 2)	(4, 3)	(4, 4)
(3, 4)	(3, 5)	(3, 6)	(3, 7)	(3, 0)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)	(3, 4)
(2, 4)	(2, 5)	(2, 6)	(2, 7)	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	(2, 4)
(1, 4)	(1, 5)	(1, 6)	(1, 7)	(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(1, 4)
— (0, 4) —	(0, 5)	(0, 6)	(0, 7)	(0, 0)	(0, 1)	(0, 2)	(0, 3)	(0, 4) —
(7, 4)	(7, 5)	(7, 6)	(7, 7)	(7, 0)	(7, 1)	(7, 2)	(7, 3)	(7, 4)
(6, 4)	(6, 5)	(6, 6)	(6, 7)	(6, 0)	(6, 1)	(6, 2)	(6, 3)	(6, 4)
(5, 4)	(5, 5)	(5, 6)	(5, 7)	(5, 0)	(5, 1)	(5, 2)	(5, 3)	(5, 4)
(4, 4)	(4, 5)	(4, 6)	(4, 7)	(4, 0)	(4, 1)	(4, 2)	(4, 3)	(4, 4)
		III				II		

Σχήμα 3.3(β): Ένας 9×9 πίνακας δισδιάστατου FFT μετά την μετατόπιση περιοχής.



f_y	II				III				
	(7, 0)	(7, 1)	(7, 2)	(7, 3)	(7, 4)	(7, 5)	(7, 6)	(7, 7)	
	(6, 0)	(6, 1)	(6, 2)	(6, 3)	(6, 4)	(6, 5)	(6, 6)	(6, 7)	
	(5, 0)	(5, 1)	(5, 2)	(5, 3)	(5, 4)	(5, 5)	(5, 6)	(5, 7)	
	(4, 0)	(4, 1)	(4, 2)	(4, 3)	(4, 4)	(4, 5)	(4, 6)	(4, 7)	
	(3, 0)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)	(3, 4)	(3, 5)	(3, 6)	(3, 7)	
	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	(2, 4)	(2, 5)	(2, 6)	(2, 7)	
	(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(1, 4)	(1, 5)	(1, 6)	(1, 7)	
(0, 0)	(0, 1)	(0, 2)	(0, 3)	(0, 4)	(0, 5)	(0, 6)	(0, 7)		
	I				IV				f_x

Σχήμα 3.4(α): Ένας 8×8 πίνακας δισδιάστατου FFT.

f_y	IV				I				
	(3, 4)	(3, 5)	(3, 6)	(3, 7)	(3, 0)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)	
	(2, 4)	(2, 5)	(2, 6)	(2, 7)	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	
	(1, 4)	(1, 5)	(1, 6)	(1, 7)	(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	
	(0, 4)	(0, 5)	(0, 6)	(0, 7)	(0, 0)	(0, 1)	(0, 2)	(0, 3)	
	(7, 4)	(7, 5)	(7, 6)	(7, 7)	(7, 0)	(7, 1)	(7, 2)	(7, 3)	
	(6, 4)	(6, 5)	(6, 6)	(6, 7)	(6, 0)	(6, 1)	(6, 2)	(6, 3)	
	(5, 4)	(5, 5)	(5, 6)	(5, 7)	(5, 0)	(5, 1)	(5, 2)	(5, 3)	
(4, 4)	(4, 5)	(4, 6)	(4, 7)	(4, 0)	(4, 1)	(4, 2)	(4, 3)		
	III				II				f_x

Σχήμα 3.4(β): Ένας 8×8 πίνακας δισδιάστατου FFT μετά από μετατόπιση τεταρτημορίων.

Υπάρχουν δύο τρόποι ανακατανομής. Ο πρώτος περιλαμβάνει απλά τη μεταβολή μιας περιοχής. Για παράδειγμα, μια συνοπτική γραφική απεικόνιση της κυκλικής μεταβολής της περιοχής ενός δισδιάστατου FFT παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, το

οποίο έχει ένα πίνακα δεδομένων FFT διαστάσεων 8×8 . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3(α), η γραμμή $N/2$ (ή 4 στο παράδειγμα) και η στήλη $M/2$ μοιράζεται από τέσσερις περιοχές. Στην εκτέλεση της κυκλικής μετατόπισης των περιοχών τα στοιχεία στην περιοχή I μετατοπίζονται στην περιοχή III, τα στοιχεία στην περιοχή II μετατοπίζονται στην IV, τα στοιχεία της περιοχής III στην I και της IV στην II. Η μετατοπισμένη μήτρα στοιχείων έχει μια επιπλέον γραμμή και στήλη από την αρχική μήτρα στοιχείων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3(β), επειδή κάθε περιοχή είχε μια κοινή γραμμή και στήλη με μια άλλη κοντινή περιοχή. Επίσης δεδομένου ότι το μέγεθος της μήτρας στοιχείων γίνεται περίεργο, μια γραμμή ($n=0$) και μια στήλη ($m=0$) γίνονται συμμετρικοί άξονες. Ο τρόπος μετατόπισης της περιοχής χρησιμοποιείται συνήθως για να εξαχθούν φασματικές ιδιότητες του δισδιάστατου DFT, π.χ. το φάσμα ισχύος.

Ο δεύτερος τρόπος ανακατανομής του δισδιάστατου FFT είναι η μετατόπιση των τεταρτημόριων. Το αποτέλεσμα του προ-μετατοπισμένου δισδιάστατου FFT χωρίζεται πραγματικά σε τέσσερα τεταρτημόρια, κάθε ένα από τα οποία περιέχει τον ίδιο αριθμό στοιχείων. Δεν υπάρχει καμία κοινή γραμμή και στήλη ανάμεσα στα τεταρτημόρια. Επομένως η μετατόπιση των τεταρτημόριων περιλαμβάνει απλά μια κυκλική μετατόπιση κάθε τεταρτημόριου κατά απόσταση ίση με δύο τεταρτημόρια. Η μετατόπιση τεταρτημόριων μιας 8×8 μήτρας στοιχείων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται συχνά για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων ενός δισδιάστατου FFT, π.χ. για το σχεδιασμό φίλτρων.

3.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ AACF ΚΑΙ APSD ΜΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Η κεντρική ιδέα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και του φάσματος ισχύος βασίζεται στη θεωρία των τυχαίων διαδικασιών. Μια τυχαία διαδικασία ορίζεται ως το σύνολο άπειρου αριθμού τυχαίων μεταβλητών. Εάν $z(x, y)$ είναι μια τυχαία μεταβλητή συγκεκριμένα x και y , τότε το σύνολο όλων αυτών των τυχαίων μεταβλητών αποτελεί την τυχαία διαδικασία. Είναι δυνατό να χαρακτηριστεί πλήρως από μια κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Συμβατικά, αυτό το σύνολο των τυχαίων μεταβλητών περιγράφεται επίσης από το $z(x, y)$ για $-\infty < x < \infty$ και $-\infty < y < \infty$. Συνήθως, η τοπογραφία μιας επιφάνειας μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μια πραγματική

τυχαία διαδικασία. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας πραγματικής τυχαίας διαδικασίας ορίζεται ως:

$$R(x, y; \tau_x, \tau_y) = E[(z(x, y) - m_z(x, y))(z(x + \tau_x, y + \tau_y) - m_z(x, y))] \quad \text{Εξίσωση 3.22}$$

όπου $E[]$ είναι ο μέσος όρος του συνόλου και $m_z(x, y)$ είναι ο συνολικός μέσος που δίδεται ως:

$$m_z(x, y) = E[z(x, y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z(u, v) p_z(u, v; x, y) du dv \quad \text{Εξίσωση 3.23}$$

Εάν η τυχαία διαδικασία δεν είναι στάσιμη (non-stationary), η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και ο συνολικός μέσος, στις Εξισώσεις (3.22) και (3.23), θα εξαρτώνται πάντα από τα x και y . Τότε είναι δύσκολο να αξιολογηθεί αποτελεσματικά η διαδικασία επειδή οποιαδήποτε απλή στατιστική εκτίμηση δεν μπορεί να αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες ολόκληρης της τυχαίας διαδικασίας.

Σε μερικές περιπτώσεις, μια τυχαία διαδικασία μπορεί να θεωρείται ότι είναι στάσιμη ή ομοιογενής εφ' όσον (Bendat & Piersol, 1986):

1. η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι ανεξάρτητη από τα x και y , δηλαδή:

$$R(x, y, \tau_x, \tau_y) = R(\tau_x, \tau_y) \quad \text{Εξίσωση 3.24}$$

2. ο ολικός μέσος, m_z , είναι μια σταθερά, δηλαδή:

$$m(x, y) = m_z \quad \text{Εξίσωση 3.25}$$

Για μια στάσιμη τυχαία επιφάνεια, αυτές οι δύο προϋποθέσεις απαιτούν ότι ο συνολικός μέσος και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι και οι δύο μοναδικοί και ανεξάρτητοι από τη χωρική θέση.

Στην πράξη, είναι πολύ δύσκολο να αξιολογηθεί ο ολικός μέσος και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, επειδή είναι αδύνατο να συλλεχθεί ένα πλήρες σύνολο δειγμάτων ή μεταβλητών. Ευτυχώς, πολλές στατικές τυχαίες διαδικασίες μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν έναν συγκεκριμένο χαρακτήρα, εργοδικότητα ή ergodicity (Bendat & Piersol, 1986; Lim J., 1990). Η εργοδικότητα εξασφαλίζει ότι ο συνολικός μέσος όρος μπορεί να αντικατασταθεί από τον τοπικό μέσο όρο. Με άλλα λόγια, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και ο μέσος όρος μιας τυχαίας διαδικασίας μπορούν να ληφθούν μέσω ενός τοπικού ή χωρικού μέσου όρου. Με αυτήν την ιδιότητα, εάν $z(x, y)$ ($-\infty < x < \infty$, $-\infty < y < \infty$) είναι η πραγματοποίηση μιας τυχαίας διαδικασίας, τότε ο συνολικός μέσος όρος είναι ισοδύναμος με τον τοπικό μέσο όρο που δίνεται από:

$$m_z = E[z(x, y)] = \lim_{\substack{L_x \rightarrow \infty \\ L_y \rightarrow \infty}} \frac{1}{4L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} z(x, y) dx dy \quad \text{Εξίσωση 3.26}$$

$$\begin{aligned} R(\tau_x, \tau_y) &= E[(z(x, y) - m_z)(z(x + \tau_x, y + \tau_y) - m_z)] \\ &= \lim_{\substack{L_x \rightarrow \infty \\ L_y \rightarrow \infty}} \frac{1}{4L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} (z(x, y) - m_z)(z(x + \tau_x, y + \tau_y) - m_z) dx dy \quad \text{Εξίσωση 3.27} \end{aligned}$$

Δεδομένου ότι οι μηχανολογικές επιφάνειες μπορούν να θεωρηθούν πάντοτε ως τυχαίες διαδικασίες, είναι σημαντικό να είναι στάσιμες και να εμφανίζουν ergodicity έτσι ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι Εξισώσεις (3.26) και (3.27). Ευτυχώς, οι τοπογραφίες πολλών τεχνολογικών επιφανειών, όπως είναι οι επιφάνειες που προκύπτουν μετά από κατεργασία σε τόρνο καθώς και επιφάνειες που έχουν υποστεί ηλεκτροδιάβρωση (EDM) και αμμοβολή, είναι ομοιογενείς. Αυτό καταδεικνύει ότι πολλές τεχνολογικές επιφάνειες είναι στάσιμες. Οι Dong, Sullivan και Stout (1993) έχουν επίσης καταδείξει ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των δειγμάτων πολλών μηχανολογικών επιφανειών είναι αρκετά μικρές. Από στατιστική άποψη, αυτό σημαίνει ότι ο μέσος όρος των τυχαίων επιφανειών συγκλίνει σε μια σταθερά.

Για τις επιφάνειες που είναι σίγουρα μη-στατικές, όπως είναι αυτές με σημαντικές κυματοειδείς τάσεις (π.χ. κυλινδρικές και σφαιρικές κυρτότητες) μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία ώστε να αφαιρεθεί η κυμάτωση, έτσι ώστε τα κατάλοιπα να μπορούν να θεωρηθούν ως στάσιμα και ergodic.

Με βάση τις ανωτέρω συζητήσεις, εάν η φυσική πραγματοποίηση μιας τυχαίας επιφάνειας είναι από μια ομοιογενή ή στάσιμη επιφάνεια κατά μήκος μιας σειράς ιδιαίτερων συντεταγμένων $(0 \leq m \leq M-1, 0 \leq n \leq N-1)$, ο μέσος όρος και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της στάσιμης ergodic τυχαίας επιφάνειας μπορεί να προσεγγιστεί από:

$$m_z = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) \quad \text{Εξίσωση 3.28}$$

$$R(k, l) = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} (z(m, n) - m_z)(z(m+k, n+l) - m_z) \quad \text{Εξίσωση 3.29}$$

$$k = 0, 1, \dots, M-1; l = 0, 1, \dots, N-1$$

Σημειώνεται ότι η $R(k, l)$ είναι ακόμα μια χωρική συνάρτηση. Ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης αποκαλύπτει τα χαρακτηριστικά της στάσιμης τυχαίας διαδικασίας στο πεδίο της συχνότητας, η οποία καλείται φασματική πυκνότητα ισχύος που δίνεται ως εξής:

$$P(\omega_x, \omega_y) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} R(m, n) e^{-j2\pi(\omega_x m + \omega_y n)} \quad \text{Εξίσωση 3.30}$$

ή

$$P(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} R(m, n) e^{-j2\pi\left(\frac{m}{M} + \frac{n}{N}\right)} \quad \text{Εξίσωση 3.31}$$

$$k = 0, 1, \dots, M-1; l = 0, 1, \dots, N-1$$

Στα παραπάνω, ο προσδιορισμός της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης γίνεται μέσω της διαδικασίας συνελίξεως, Εξίσωση (3.29), και η φασματική πυκνότητα ισχύος λαμβάνεται μετά από εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Αυτή η διαδικασία εκτίμησης θα ήταν πολύ χρονοβόρα. Ένας εναλλακτικός και συμβατικός τρόπος απλοποίησης της εκτίμησης της φασματικής πυκνότητας ισχύος είναι να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του periodogram, η οποία υπολογίζει άμεσα την πυκνότητα του φάσματος ισχύος από τον μετασχηματισμό Fourier της επιφάνειας. Παραδείγματος χάριν, εάν υποθέσουμε ότι μια τυχαία

επιφάνεια έχει ένα μηδενικό μέσο όρο, δηλαδή $m_z = 0$, τότε το periodogram της φασματικής εκτίμησης μπορεί να εξαχθεί από τις Εξισώσεις (3.9), (3.11) και (3.31) (Oppenheim & Schaffer, 1975, Brigham 1988, Lim, 1990):

$$\begin{aligned}
 P(\omega_x, \omega_y) &= \frac{1}{MN} |Z(\omega_x, \omega_y)|^2 \\
 &= \left| \frac{1}{MN} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(x, y) e^{-j(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy \right|^2 \\
 P(k, l) &= \frac{1}{MN} |Z(k, l)|^2 \\
 &= \left| \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) e^{-j2\pi \left(\frac{k}{M} m + \frac{l}{N} n \right)} \right|^2
 \end{aligned}
 \tag{Εξίσωση 3.32}$$

$k = 0, 1, \dots, M-1; l = 0, 1, \dots, N-1$

Η Εξίσωση (3.32) παρουσιάζει έναν εύκολο και γρήγορο τρόπο για την τοπική εκτίμηση της φασματικής πυκνότητας ισχύος. Δηλαδή, ο προσδιορισμός του $Z(k, l)$ με τον υπολογισμό του DFT ενός $z(m, n)$ από έναν FFT αλγόριθμο. Στη συνέχεια τετραγωνίζεται το πλάτος του $Z(k, l)$ για να ληφθεί η APSD. Επιπλέον, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μπορεί να υπολογιστεί μέσω ενός αντίστροφου FFT της φασματικής πυκνότητας ισχύος που δίνεται από:

$$\begin{aligned}
 R(m, n) &= \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} P(k, l) e^{j2\pi \left(\frac{k}{M} m + \frac{l}{N} n \right)} \\
 & \quad k = 0, 1, \dots, M-1; l = 0, 1, \dots, N-1
 \end{aligned}
 \tag{Εξίσωση 3.33}$$



3.6 ΜΕΡΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ

Μέχρι τώρα, έχουμε αναφέρει απλά μια γενική διαδικασία για την εφαρμογή του δισδιάστατου FFT, της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και τη φασματική πυκνότητα ισχύος. Εντούτοις, στην πράξη οι διαδικασίες που συζητούνται ανωτέρω περιλαμβάνουν την ψηφιοποίηση μιας συνεχούς επιφάνειας, την περιορισμένη εφαρμογή τους σε μια πεπερασμένη περιοχή και την εκτίμηση μιας στατιστικά τυχαίας διαδικασίας. Κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Επομένως πρέπει να μελετηθούν σοβαρά μερικά από τα ζητήματα που ανακύπτουν ως αποτέλεσμα τέτοιων διαδικασιών, προτού να υπολογιστούν οι 2-D FFTs, οι AACFs και οι APSDs.

3.6.1 Όριο μήκους κύματος

Σαφώς, εάν ψηφιοποιηθεί μια επιφάνεια, είναι αναγκαίο να επιβληθεί ένα όριο μήκους κύματος στα ψηφιοποιημένα τοπογραφικά δεδομένα κατά τη διάρκεια της μέτρησης και της ψηφιοποίησης. Όσον αφορά στο μικρό όριο μήκους κύματος, αρχικά ένα όριο επιβάλλεται σε οποιοδήποτε όργανο τρισδιάστατης μέτρησης μιας επιφάνειας από την πεπερασμένη ακτίνα του καθετήρα του (μηχανικός στυλίσκος, οπτικό σημείο ή καθετήρας ηλεκτρονίων). Αυτός ο καθετήρας λειτουργεί ως μηχανικό φίλτρο στη μέτρηση έτσι ώστε οι συνιστώσες των οποίων τα μήκη κύματος είναι πιο μικρά από την ακτίνα του καθετήρα να απαλείφονται. Επιπλέον, οποιοδήποτε όργανο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά συχνότητάς. Η μέγιστη συχνότητα απόκρισης του οργάνου περιορίζει τη δυνατότητα μέτρησης συνισταμένων υψηλότερης συχνότητας. Τρίτον, η ψηφιοποίηση της επιφάνειας περιλαμβάνει πεπερασμένα διαστήματα δειγματοληψίας Δx και Δy . Αυτές οι τρεις συνθήκες περιορίζουν το πιο μικρά μήκη κύματος των ψηφιοποιημένων τοπογραφικών δεδομένων ώστε να είναι επάνω από μία συγκεκριμένη τιμή. Με άλλα λόγια, περιορίζουν την χωρική ανάλυση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και την υψηλότερη συχνότητα της φασματικής πυκνότητας ισχύος.

Το μεγάλα όρια μήκους κύματος συσχετίζονται με το μέγεθος της ψηφιοποιημένης επιφάνειας, το οποίο είναι $(M-1)\Delta x$ από $(N-1)\Delta y$. Ο Dong *et al.* (1994b) έδειξαν ότι ένα ολικό φίλτρο ή ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, πρέπει να

χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη μέτρηση μιας επιφάνειας προκειμένου να υπάρχει ένα κοινό τρισδιάστατο στοιχείο αναφοράς για όλα τα σχεδιαγράμματα. Επομένως, το μεγαλύτερο μήκος κύματος των τμημάτων μιας επιφάνειας θα ήταν πιθανότατα άπειρο. Εντούτοις, δεδομένου ότι ψηφιοποιείται μόνο μια πεπερασμένη περιοχή, τα μεγαλύτερα μήκη κύματος που μπορούν να προσδιοριστούν στις κατευθύνσεις x και y είναι $(M-1)\Delta x$ και $(N-1)\Delta y$ αντίστοιχα. Αυτά τα μήκη κύματος καθορίζουν τη χωρική ανάλυση της συχνότητας. Η ψηφιοποιημένη περιοχή μπορεί να περιλαμβάνει την τοπογραφική δομή που ορίζεται ως η τραχύτητα, την κυμάτωση και το σφάλμα μορφής. Δεδομένου ότι οι τιμές των παραμέτρων εύρους και της φασματικής ισχύος της επιφανειακής τοπογραφίας διέπονται γενικά από μεγάλα όριο μήκους κύματος, είναι πρακτικού ενδιαφέροντος το γεγονός ότι το πραγματικό μέγεθος της ψηφιοποιημένης περιοχής ή η περιοχή αποκοπής ταιριάζει με τις συνιστώμενες τιμές (Stout *et al.*, 1993).

3.6.2 Aliasing και κριτήρια Nyquist για 2-D DFT

Αναφερόμενοι στην περίπτωση του 1-D DFT, το aliasing συμβαίνει εάν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μικρότερη από το διπλάσιο της υψηλότερης συχνότητας που μας ενδιαφέρει για το σήμα. Αυτό ισχύει επίσης και για την 2-D περίπτωση. Οι συνιστώσες υψηλής συχνότητας, εάν δεν φιλτράρονται από τα μηχανικά φίλτρα των οργάνων, θα εκπέσουν στην περιοχή συνιστωσών χαμηλής συχνότητας εάν τα διαστήματα δειγματοληψίας δεν είναι αρκετά μικρά. Το κριτήριο Nyquist καθορίζει ότι οι συνιστώσες με συχνότητα μεγαλύτερη από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας δεν θα διαβιβαστούν μειωμένες. Το κριτήριο αυτό μπορεί να επεκταθεί και στην 2-D περίπτωση. Εάν οι υψηλότερες συχνότητες της επιφάνειας είναι $f_{x\max}$ και $f_{y\max}$ στις δύο ανεξάρτητες διαστάσεις x και y , τα διαστήματα δειγματοληψίας πρέπει να ικανοποιήσουν τις σχέσεις:

$$\Delta x \leq \frac{1}{2 f_{x\max}}, \quad \Delta y \leq \frac{1}{2 f_{y\max}} \quad \text{Εξίσωση 3.34}$$

προκειμένου να απαλειφθεί η επιρροή του aliasing (εμφάνιση τεθλασμένων γραμμών).

3.6.3 Διαρροή και 2-D παράθυρα

Όπως είναι γνωστό στην περίπτωση του 1-D DFT, είναι πιθανή η διαρροή φασματικής ισχύος εάν το σήμα εμφανίζει απότομες αλλαγές που προκαλούνται από την αποκοπή του μήκους του σήματος. Η αποκοπή ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό του αρχικού σήματος με ένα ορθογώνιο παράθυρο. Για τον ίδιο λόγο, η χαρτογράφηση της επιφάνειας με τον πολλαπλασιασμό με ένα κυβοειδές παράθυρο οδηγεί επίσης στη διαρροή φασματικής ισχύος και ο 2-D DFT της επιφάνειας διαστρεβλώνεται από μια τέτοια διαρροή. Η φασματική διαστρέβλωση ή διαρροή μπορεί να μειωθεί με τη χρησιμοποίηση ενός από τα πολλά και διαφορετικά 2-D παράθυρα δεδομένων. Όπως έχει σημειωθεί από τον Huang (1972), εάν $w_1(x)$ είναι ένα καλά συμμετρικό 1-D παράθυρο, τότε $w_2(x, y) = w_1(\sqrt{x^2 + y^2})$ είναι ένα καλά κυκλικό συμμετρικό 2-D παράθυρο.

Επιπλέον, ένα 2-D παράθυρο μπορεί να σχηματιστεί από δύο ξεχωριστά μονοδιάστατα παράθυρα έτσι ώστε $w_2(x, y) = w_1(x)w_1(y)$ (Dudgeon και Mersereau, 1984). Ωστόσο, τα κοινώς χρησιμοποιούμενα μονοδιάστατα παράθυρα (Harris, 1978), όπως το τρίγωνο του Hamming, μπορούν εύκολα να επεκταθούν και στη δισδιάστατη περίπτωση και να εφαρμοστούν πριν την εκτέλεση του δισδιάστατου FFT.

3.6.4 Φασματικός μέσος όρος για βελτίωση της εκτίμησης

Αν και η δισδιάστατη φασματική εκτίμηση με τη χρησιμοποίηση του αλγορίθμου του periodogram είναι αρκετά γρήγορη, δεν μας παρέχει την τέλεια εκτίμηση και οδηγεί σε μερικές περιπτώσεις σε αρκετά σημαντικές στατιστικές διακυμάνσεις. Θεωρητικά, η διακύμανση της APSD που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο periodogram προσεγγίζει το τετράγωνο της ποσότητας που υπολογίζεται. Οι συνιστώσες των μεγάλων μηκών κύματος περιέχουν συνήθως υψηλότερη φασματική ενέργεια, έτσι ώστε η διακύμανση των συνιστωσών μεγάλου μήκους κύματος να είναι μεγαλύτερη. Αντιθέτως, οι συνιστώσες μικρού μήκους κύματος έχουν μικρότερη φασματική ενέργεια και έτσι η διακύμανση των συνιστωσών μικρού μήκους κύματος είναι σχετικά μικρότερη. Στην πραγματικότητα η διακύμανση στην εκτίμηση της APSD μπορεί να μειωθεί με τον υπολογισμό του ολικού μέσου όρου. Η μείωση της διακύμανσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη προς τον συνολικό αριθμό των

μέσων όρων. Κατά συνέπεια, εάν είναι απαραίτητο, μπορεί να υπολογιστεί μια καλύτερη εκτίμηση της APSD με τον προσδιορισμό του μέσου όρου των φασμάτων που λαμβάνονται από τους διαφορετικούς τομείς της ίδιας επιφάνειας (Duncheon και Mersereau, 1984).

3.7 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ AACF ΚΑΙ APSD

Σύμφωνα με την παραπάνω συζήτηση, οι διαδικασίες για την εκτίμηση του χωρικού φάσματος και της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης που βασίζεται στη μέθοδο του periodogram, μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

I. Εκτίμηση της χωρικής φασματικής πυκνότητας ισχύος (APSD):

1. Ψηφιοποίηση μιας συνεχούς επιφάνειας για τη λήψη πίνακα τοπογραφικών δεδομένων, $z(m, n)$ με $m = 0, 1, \dots, M - 1$ και $n = 0, 1, \dots, N - 1$.
2. Επίπεδη προσαρμογή (ή decurve εάν κρίνετε απαραίτητο) της ψηφιοποιημένης επιφάνειας με τη χρησιμοποίηση του αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων έτσι ώστε το $z(m, n)$ να έχει μηδενικό μέσο όρο.
3. Πολλαπλασιασμός των χωρικών δεδομένων $z(m, n)$ με μία συνάρτηση παραθύρου $w(m, n)$, δηλαδή:

$$z_w(m, n) = z(m, n) w(m, n), \quad \text{Εξίσωση 3.35}$$

$$m = 0, 1, \dots, M - 1; \quad n = 0, 1, \dots, N - 1$$

4. Εκτέλεση μονοδιάστατων FFTs στις N γραμμές του $z_w(m, n)$ σύμφωνα με την Εξίσωση (3.14),

$$\left(\psi_w(k, n) = \sum_{m=0}^{M-1} z_w(m, n) e^{-j2\pi \frac{k}{M} m}, \quad k = 0, 1, \dots, M - 1 \right), \quad \text{Εξίσωση 3.36}$$

για $k = 0, 1, \dots, M - 1$

που καταλήγει σε μία αρκετά σύνθετη μήτρα στοιχείων $\psi_w(k, n)$
 $k = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N-1$.

5. Εκτέλεση μονοδιάστατων FFTs στις M στήλες του $\psi_w(k, n)$ σύμφωνα με την Εξίσωση (3.13),

$$\left(Z(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} \psi_w(k, n) e^{-j2\pi \frac{l}{N} n}, l = 0, 1, \dots, N-1 \right), \quad \text{Εξίσωση 3.37}$$

για $l = 0, 1, \dots, N-1$

προκειμένου να ληφθεί ο DFT των δεδομένων $z_w(m, n)$.

6. Λήψη του φάσματος ισχύος, $P(k, l)$ με τον τετραγωνισμό του $Z(k, l)$ όπως στην Εξίσωση (3.32),

$$P(k, l) = \frac{1}{MN} |Z(k, l)|^2, \quad \text{Εξίσωση 3.38}$$

$k = 0, 1, \dots, M-1; l = 0, 1, \dots, N-1$

7. Εκτέλεση ανακατανομής μιας περιοχής ή μετατόπισης τεταρτημορίων για τη λήψη της μετατοπισμένης APSD, $P_s(k, l)$ $k = 0, 1, \dots, M-1; l = 0, 1, \dots, N-1$. Αν και οι δείκτες συντεταγμένων της μετατοπισμένης APSD κυμαίνονται από 0 έως $M-1$ και από 0 έως $N-1$, η προέλευση της συχνότητας έχει μετακινηθεί προς το δείκτη ($k = M/2, l = N/2$).

II. Εκτίμηση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης (AACF):

1. - 6. Ίδια όπως για την εκτίμηση της APSD.
7. Μετά από το βήμα (6) για την εκτίμηση της APSD, εκτελείται ένας αντίστροφος διδιάστατος FFT για να ληφθεί η χωρική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μέσω της Εξισώσεως (3.33),

$$R(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} P(k, l) e^{j2\pi \left(\frac{k}{M} + \frac{l}{N} \right)} \quad \begin{matrix} m = 0, 1, \dots, M-1 \\ n = 0, 1, \dots, N-1 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Εξίσωση} \\ 3.39 \end{matrix}$$

8. Εκτέλεση μετατόπισης μιας περιοχής ή τεταρτημορίων για την AACF, $R_s(m, n)$, $m = 0, 1, \dots, M-1$ και $n = 0, 1, \dots, N-1$. Αν και οι ισότιμοι δείκτες της μετατοπισμένης AACF κυμαίνονται ακόμα από 0 έως $M-1$ και από 0 έως $N-1$, η προέλευση της υστέρησης στη θέση συσχετισμού έχει κινηθεί προς το δείκτη ($k = M/2, l = N/2$).

Σημειώνεται ότι στην εκτίμηση της APSD, εάν τα διαστήματα δειγματοληψίας είναι Δx χιλιοστάμετρα, τα ψηφίσματα συχνότητας στους δύο ορθογώνιους άξονες συχνότητας είναι:

$$\Delta f_x = \frac{1}{M \times \Delta x} \text{ (1/mm)} \quad \Delta f_y = \frac{1}{N \times \Delta y} \text{ (1/mm)} \quad \begin{matrix} \text{Εξίσωση} \\ 3.40 \end{matrix}$$

Σε μορφή ακτινίων, αυτά θα είναι:

$$\Delta \omega_x = \frac{2\pi}{M \times \Delta x} \text{ (rad./mm)} \quad \Delta \omega_y = \frac{2\pi}{N \times \Delta y} \text{ (rad./mm)} \quad \begin{matrix} \text{Εξίσωση} \\ 3.41 \end{matrix}$$

Τα φάσματα συχνότητας και οι συχνότητες ακτινίου της μετατοπισμένης APSD είναι:

- I. Κατάσταση μετατόπισης περιοχής:

$$\begin{matrix} \frac{-1}{2 \times \Delta x} \leq f_x \leq \frac{1}{2 \times \Delta x} , & \frac{-1}{2 \times \Delta y} \leq f_y \leq \frac{1}{2 \times \Delta y} . \\ \frac{-\pi}{\Delta x} \leq \omega_x \leq \frac{\pi}{\Delta x} , & \frac{-\pi}{\Delta y} \leq \omega_y \leq \frac{\pi}{\Delta y} . \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Εξίσωση} \\ 3.42 \end{matrix}$$

II. Κατάσταση μετατόπισης τεταρτημορίων:

$$\begin{aligned} \frac{-1}{2 \times \Delta x} \leq f_x \leq \frac{\left(\frac{M}{2}-1\right)}{M \times \Delta x}, & \quad \frac{-1}{2 \times \Delta y} \leq f_y \leq \frac{\left(\frac{N}{2}-1\right)}{N \times \Delta y}. \\ \frac{-\pi}{\Delta x} \leq \omega_x \leq \frac{(M-2)\pi}{M \times \Delta x}, & \quad \frac{-\pi}{\Delta y} \leq \omega_y \leq \frac{(N-2)\pi}{N \times \Delta y}. \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 3.43}$$

Εάν το εύρος των τοπογραφικών δεδομένων $z(m, n)$ εκφράζεται σε μικρόμετρα (μm), η μονάδα εύρους του DFT είναι επίσης (μm) και έτσι αυτή του periodogram είναι (μm)². Αυτό είναι ένα μέτρο της τοπογραφικής ισχύος που χρησιμοποιείται συνήθως για λόγους ευκολίας κατά την μελέτη της φασματικής ισχύος. Εντούτοις, η APSD είναι πιο περίπλοκη. Η μονάδα μιας φασματικής πυκνότητας πρέπει να είναι ισχύς ανά μονάδα συχνότητας και εάν η χωρική συχνότητα σε κάθε άξονα εκφράζεται σε κύκλους ανά (μm), η αληθινή μονάδα εύρους του χωρικού APSD είναι (μm)⁴. Τέτοιες μονάδες τείνουν να προκαλούν σύγχυση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται παραπάνω η απλούστερη μορφή, αλλά αντιπροσωπεύει την πραγματική τοπογραφική ενέργεια. (Μπορεί να είναι χρήσιμο να εξεταστεί γραφικά η περίπτωση της μονοδιάστατης χρονικά μεταβολής της ηλεκτρικής τάσης).

Το φυσιολογικό εύρος των οριζόντιων συντεταγμένων ή των μηκών υστέρησης, τ_x , τ_y , της χωρικής AACF είναι:

$$\frac{-\Delta x}{2} \leq \tau_x \leq \frac{\Delta x}{2}, \quad \frac{-\Delta y}{2} \leq \tau_y \leq \frac{\Delta y}{2}. \quad \text{Εξίσωση 3.44}$$

Η μονάδα εύρους της AACF είναι επίσης (μm)². Εντούτοις, συνήθως ομαλοποιείται σε μια μέγιστη τιμή ίση με 1 (με μηδενική υστέρηση) διαιρώντας με τη διακύμανση του σήματος. Σημειώνεται ότι μερικοί συγγραφείς περιορίζουν τον όρο "συνάρτηση αυτοσυσχέτισης" στην ομαλοποιημένη μορφή, που αποτελεί την άλλη μορφή, την "συνάρτηση autocovariance".

3.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ APSD

Από στατιστική άποψη, οι επιφάνειες που παράγονται με μια δεδομένη κατασκευαστική μέθοδο και υπό διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας, έχουν παρόμοια τοπογραφικά προφίλ ανεξάρτητα από το εάν οι επιφάνειες είναι τραχιές ή σχετικά ομαλές. Τα τοπογραφικά υποδείγματα παίζουν σημαντικό ρόλο στις λειτουργικές εφαρμογές. Μερικά από αυτά τα υποδείγματα μπορούν να τονιστούν από την APSD. Προτού να αναλυθούν περαιτέρω τις ιδιότητες της APSD των διαφορετικών μηχανολογικών επιφανειών, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.5 έως 3.10 ορισμένα παραδείγματα APSDs, αντιπροσωπευτικά των τεχνολογικών επιφανειών. Οι επιφάνειες που χρησιμοποιούνται εδώ είναι – Σχήμα 3.5(α) μία κατεργασμένη επιφάνεια με ηλεκτρική εκκένωση (EDM) που αντιπροσωπεύει τις τυχαίες ισότροπες επιφάνειες, Σχήμα 3.6(α) μία επιφάνεια κατεργασμένη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBT) για τις ισότροπες ψευδο-αιτιοκρατικές επιφάνειες, Σχήμα 3.7(α) μία επίγεια επιφάνεια για τις τυχαίες ανισότροπες επιφάνειες, Σχήμα 3.8(α) μία διαμορφωμένη επιφάνεια για τις ανισότροπες ψευδο-αιτιοκρατικές επιφάνειες, Σχήμα 3.9(α) μία λειασμένη επιφάνεια για τις διαγώνια κατασκευασμένες επιφάνειες και Σχήμα 3.10(α) η όψη μιας торνεμένης επιφάνειας για τις καμπύλες επιφάνειες. Οι APSDs αυτών των επιφανειών, με τις συντεταγμένες συχνότητας κατάλληλα ρυθμισμένες σύμφωνα με τη μετατόπιση των τεταρτημορίων που συζητήθηκε στην παράγραφο 3.7, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.5(β) έως 3.10(β).

Με σκοπό να λάβουμε περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της APSD στις διαφορετικές χωρικές κατευθύνσεις (γωνιακή κατανομή) και σε διαφορετικά μήκη κύματος (ακτινική κατανομή), η APSD υπόκειται σε περαιτέρω επεξεργασία έτσι ώστε να προκύψει το γωνιακό και το ακτινικό φάσμα (Sherrington, 1985; Stout: *et al.*, 1993). Καθώς η APSD σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων εκφράζεται ως $P(f_x, f_y)$, μπορεί να μετατραπεί σε ένα σύστημα πολικών συντεταγμένων και να εκφραστεί ως $P(f_r, \theta)$ χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις συντεταγμένων:

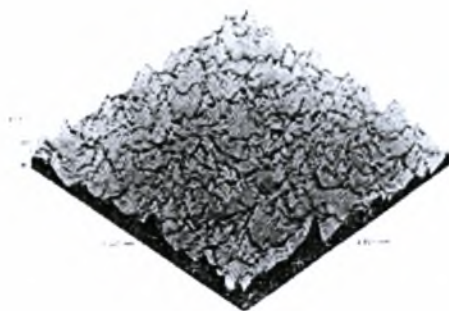
$$P(f_x, f_y) \Leftrightarrow P(f_r, \theta), \quad f_x = f_r \cos \theta, \quad f_y = f_r \sin \theta, \quad f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad \theta = \arctg \frac{f_y}{f_x}$$

Εξίσωση (3.45)

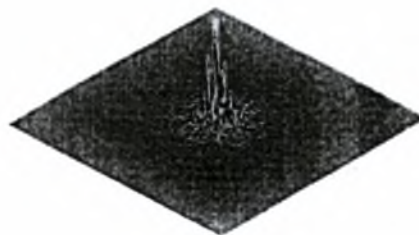
τότε το γωνιακό φάσμα $P_\alpha(\theta)$ δίδεται ως:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_\alpha(\theta) = \int_0^{f_{r \max}(\theta)} P(f_r, \theta) df_r \\ f_{r \max}(\theta) = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\cos \theta}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\sin \theta}{\Delta y} \right)^2 \right)^{1/2}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \end{array} \right. \quad \text{Εξίσωση 3.46}$$

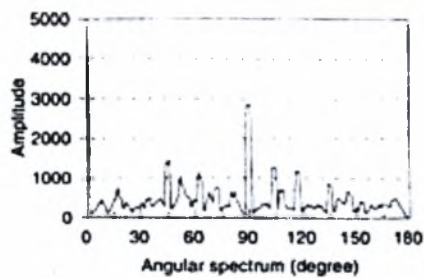
Το γωνιακό φάσμα αποκαλύπτει την κατανομή της φασματικής ενέργειας στις διαφορετικές κατευθύνσεις. Συνήθως, η υψηλότερη φασματική ενέργεια εντοπίζεται στην κατεύθυνση κάθετα στο προφίλ της επιφάνειας. Το γωνιακό φάσμα των επιφανειών παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.5(γ) έως 3.10(γ).



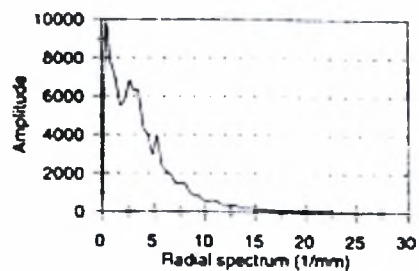
(α) Αρχική επιφάνεια



(β) APD



(γ) Γωνιακό φάσμα



(δ) Ακτινωτό φάσμα

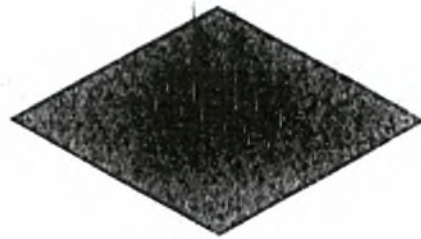


(ε) AACF

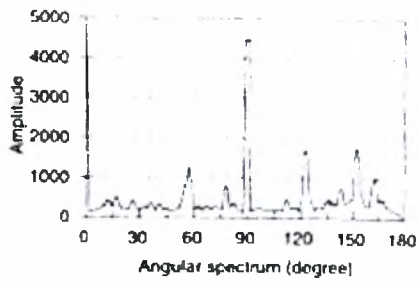
Σχήμα 3.5: Επιφάνεια EDM.



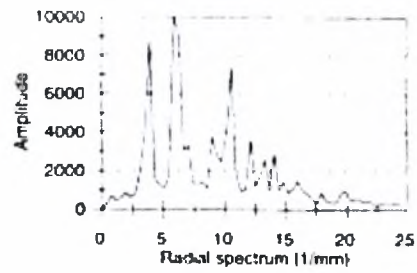
(α) Αρχική επιφάνεια



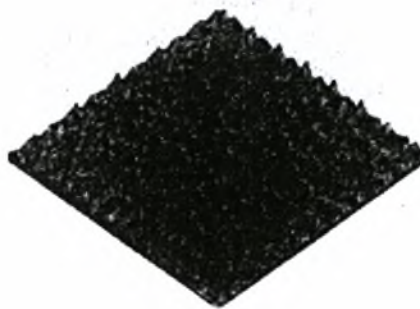
(β) APSD



(γ) Γωνιακό φάσμα

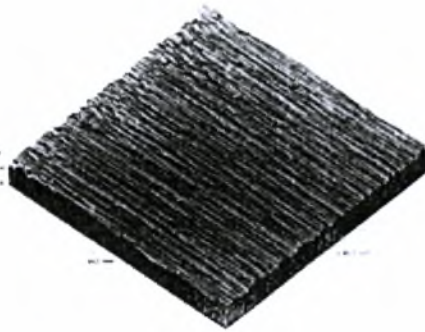


(δ) Ακτινωτό φάσμα

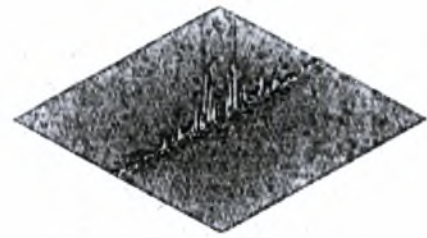


(ε) AACF

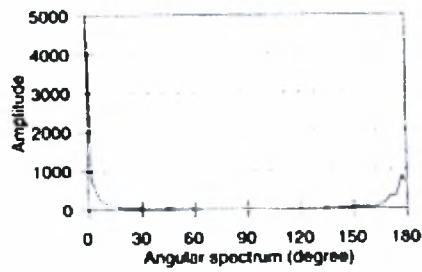
Σχήμα 3.6: Επιφάνεια EDT.



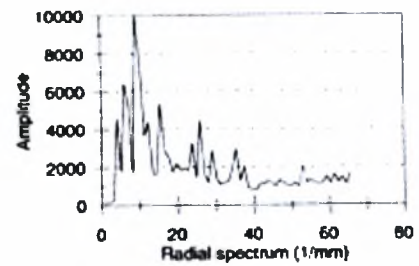
(α) Αρχική επιφάνεια



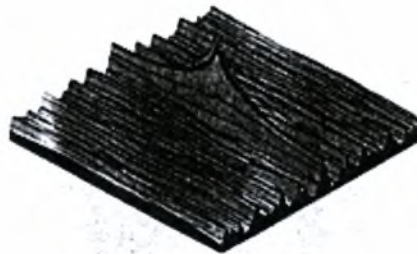
(β) APSD



(γ) Γωνιακό φάσμα

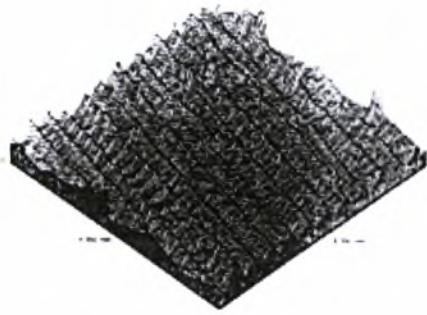


(δ) Ακτινωτό φάσμα

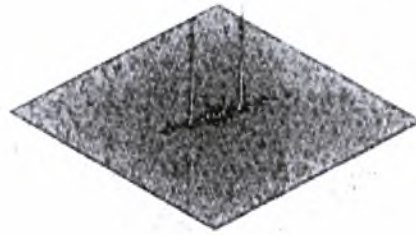


(ε) AACF

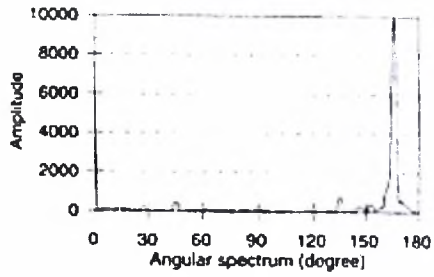
Σχήμα 3.7: Επιφάνεια εδάφους.



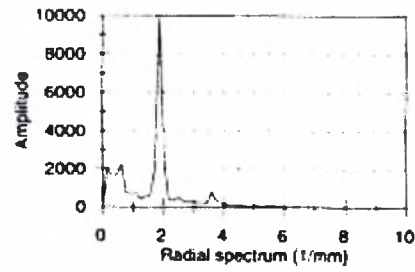
(α) Αρχική επιφάνεια



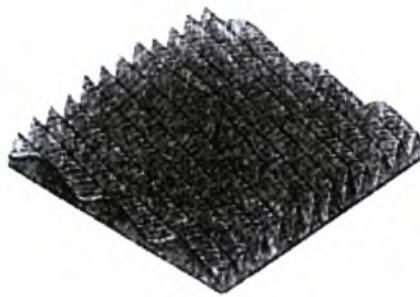
(β) APSD



(γ) Γωνιακό φάσμα

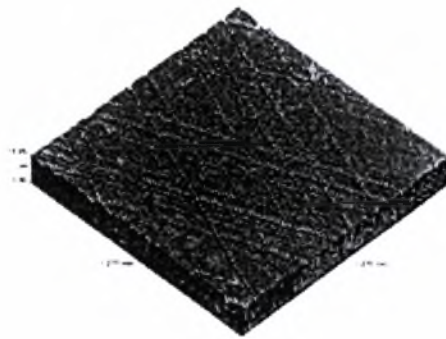


(δ) Ακτινωτό φάσμα

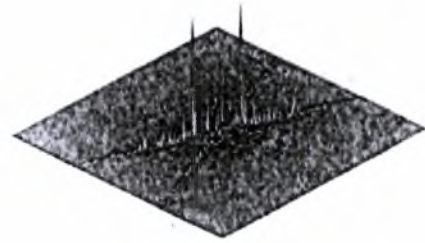


(ε) AACF

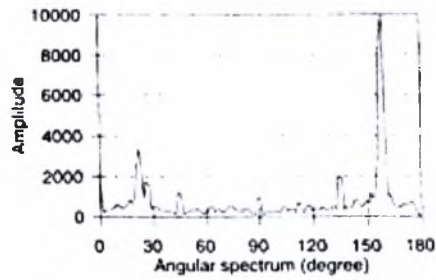
Σχήμα 3.8: Κατεργασμένη επιφάνεια.



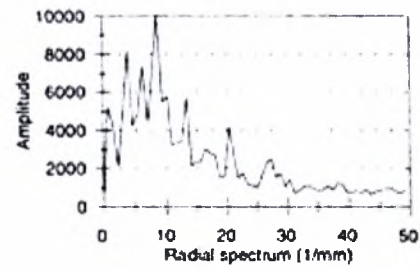
(α) Αρχική επιφάνεια



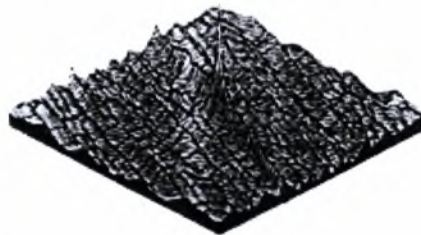
(β) APSD



(γ) Γωνιακό φάσμα

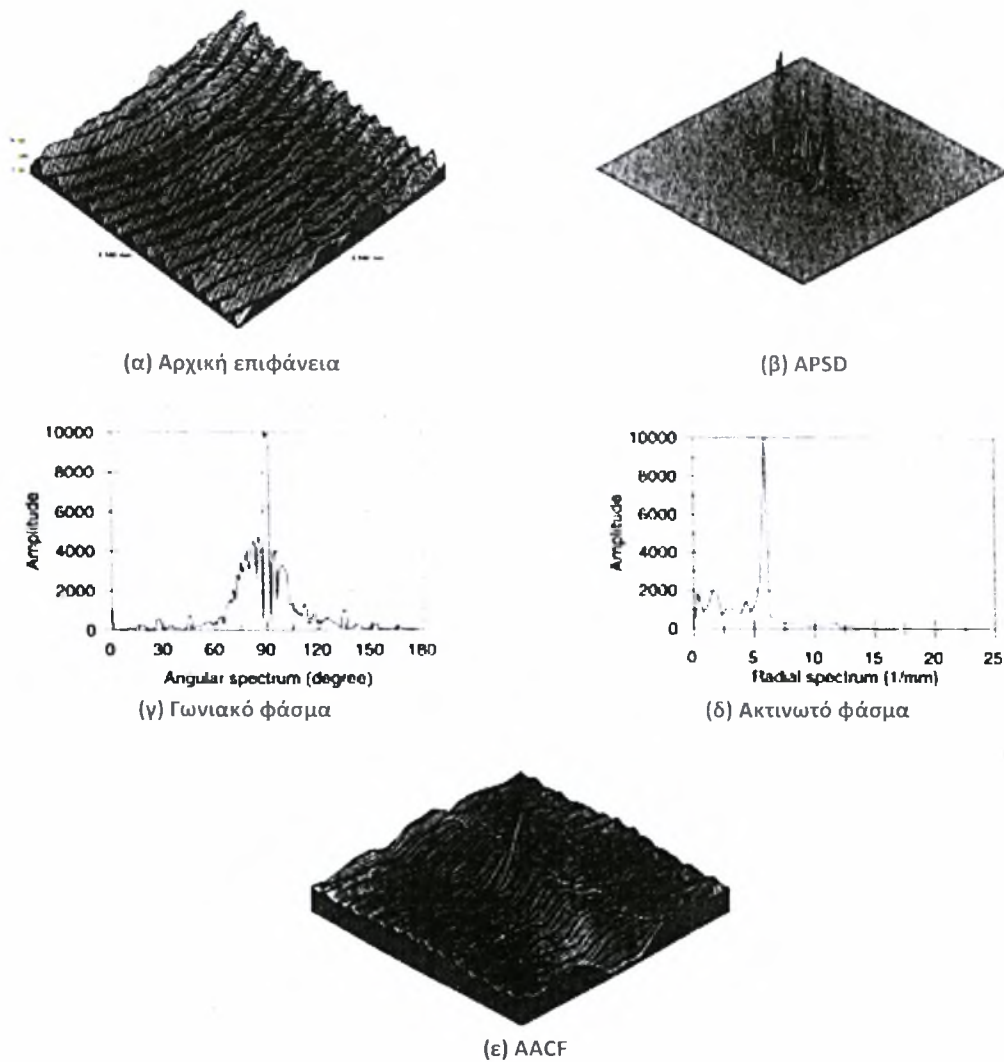


(δ) Ακτινωτό φάσμα



(ε) AACF

Σχήμα 3.9: Λειασμένη επιφάνεια.



Σχήμα 3.10: Τορνευμένη επιφάνεια.

Ένα ακτινωτό φάσμα, $P_r(f_r)$, μπορεί επίσης να εξαχθεί από την APSD ως εξής:

$$P_r(f_r) = \int_0^{179} P(f_r, \theta) d\theta, \quad 0 \leq f_r \leq \frac{1}{2}(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)^{-1/2} \quad \text{Εξίσωση 3.22}$$

Παρέχει πληροφορίες για την ισχύ των συνιστωσών στις διάφορες μεμονωμένες συχνότητες με την απαλοιφή της κατανομής στην κατεύθυνση αυτών των συνιστωσών. Τα ακτινωτά φάσματα των επιφανειών στα παραδείγματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.5(δ) έως 3.10(δ).

Με την εξέταση των επιφανειών και των APSDs τους στα Σχήματα 3.5 έως 3.10, είναι δυνατόν να συνοψιστούν μερικές σημαντικές ιδιότητες των APSDs αυτών αντιπροσωπευτικών επιφανειών:

- (1) Μέσω κατάλληλης μετατόπισης των στοιχείων, όπως συζητήθηκε στη διαδικασία για την εκτίμηση της APSD, η προέλευση των συντεταγμένων της συχνότητας εντοπίζεται στο κέντρο της γραφικής παράστασης της APSD, Σχήμα 3.2. Η APSD εμφανίζει συμμετρία μεταξύ οποιωνδήποτε δύο διαγώνιων τεταρτημορίων, δηλαδή:

$$P(f_p, f_q) = P(-f_p, -f_q) \quad p = 1, 2, \dots, M/2; \quad q = 1, 2, \dots, N/2 \quad \begin{array}{l} \text{Εξίσωση} \\ 3.48 \end{array}$$

Η μέγιστη συχνότητα κάθε άξονα είναι $1/(2\Delta x)$ και $1/(2\Delta y)$.

- (2) Θεωρητικά, ο προσδιορισμός της συχνότητας δειγματοληψίας βασίζεται στο κριτήριο Nyquist, το οποίο απαιτεί ότι η συχνότητα δειγματοληψίας είναι διπλάσια της υψηλότερης συχνότητας που μας ενδιαφέρει. Εντούτοις, στην ανάλυση της τοπογραφίας μιας επιφάνειας για τον προσδιορισμό της συχνότητας δειγματοληψίας πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι λειτουργικές απαιτήσεις των εφαρμογών (Thomas, 1982). Δεδομένου ότι οι λειτουργικές απαιτήσεις συχνά σχετίζονται με τις αιχμές/τα μέγιστα ύψη ή την κυρτότητα, υπάρχει έμμεση πρακτικά σύνδεση μεταξύ του φάσματος ισχύος της επιφάνειας και της συχνότητας δειγματοληψίας. Κατά συνέπεια στην πράξη για οποιοδήποτε φάσμα συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει, η συχνότητα δειγματοληψίας επιλέγεται συχνά να είναι πάνω από τέσσερις φορές της συχνότητας Nyquist, προκειμένου να ληφθεί μια καλύτερη εκτίμηση της APSD. Σε αυτήν την περίπτωση το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας APSD θα εστιάζεται στο εύρος χαμηλών συχνοτήτων όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.5(β) έως 3.10(β). Αυτή η ιδιότητα μπορεί φανεί χρήσιμη στον καθορισμό ενός κατάλληλου διαστήματος δειγματοληψίας. Η αναλογία της φασματικής ενέργειας, δ , μπορεί να οριστεί ως η συνολική ισχύς κάτω από μια δεδομένη ακτινωτή συχνότητα, f_{r0} , πάνω

από τη συνολική ισχύ και κάτω από τη συχνότητα Nyquist, f_m , για οποιοδήποτε εύρος συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει – δηλαδή:

$$\delta = \frac{\int_0^{f_0} P_r(f_r) df_r}{\int_0^{f_m} P_r(f_r) df_r} \quad \text{Εξίσωση 3.49}$$

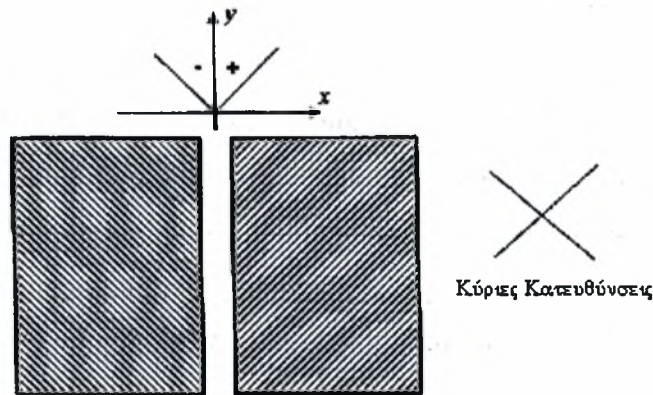
Οι Dong, Mainsah και η Stout (1996) έχουν πραγματοποιήσει εμπειρικές μελέτες που δείχνουν ότι εάν η αναλογία της φασματικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από 80% όταν η f_{r0} είναι περίπου ίση με το 1/8 της f_m , τότε μπορούμε να πούμε ότι το επιλεγμένο διάστημα δειγματοληψίας είναι κατάλληλο από την άποψη του μικρού μήκους κύματος.

- (3) Για τις ισότροπες επιφάνειες (Σχήματα 3.5 και 3.6), η ενέργεια της APSD κατανέμεται σχεδόν ισότιμα γύρω από τον άξονα προέλευσης της συχνότητας. Το γωνιακό φάσμα δεν εκθέτει κάποια σαφή πληροφορία. Εντούτοις, το ακτινωτό φάσμα αποτελεί μια βελτιωμένη εκτίμηση του μονοδιάστατου φάσματος επειδή είναι ένας μέσος όρος των φασμάτων του προφίλ σε όλες τις κατευθύνσεις.
- (4) Για τις ανισότροπες επιφάνειες (Σχήματα 3.7 και 3.8), η κύρια ενέργεια της APSD εντοπίζεται κατά μήκος της καθέτου κατεύθυνσης στο προφίλ της επιφάνειας. Το γωνιακό φάσμα είναι σε θέση να δείξει σαφέστατα τη γωνιακή θέση της υφής της επιφάνειας σε σχέση με τη συντεταγμένη της μέτρησης. Το Σχήμα 3.11 είναι ο ορισμός της κατεύθυνσης της υφής όσον αφορά τη συντεταγμένη της μέτρησης. Η κατευθυντικότητα μιας ανισότροπης επιφάνειας μπορεί να ληφθεί από το σημείο που το γωνιακό φάσμα έχει τη μέγιστη φασματική ενέργεια, δηλαδή:

$$S_{id} = \begin{cases} -\beta & , \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \beta & , \frac{\pi}{2} < \beta \leq \pi \end{cases} \quad , \text{ με } P_\alpha(\beta) \geq P_\alpha(\theta), \text{ για } 0 \leq \theta \leq \pi \quad \text{Εξίσωση 3.50}$$

όπου β είναι η τιμή της θ για την οποία η $P_a(\theta)$ γίνεται μέγιστη. Από αυτό τον ορισμό, η κατεύθυνση της υφής της επιφάνειας λέγεται ότι είναι μηδέν εάν η κατεύθυνση στην οποία πραγματοποιήθηκε η μέτρηση είναι κάθετη στο προφίλ της επιφάνειας.

- (5) Για τις τυχαίες επιφάνειες (Σχήματα 3.5 και 3.7), το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας της APSD φαίνεται ότι διανέμεται με συνεχή τρόπο. Στην πράξη οι περισσότερες τυχαίες επιφάνειες δεν είναι πραγματικά "τυχαίες" - αρκετά σημαντικές χαμηλές συνιστώσες συχνοτήτων, που σχετίζονται με την κατεργασία των επιφανειών, μπορούν ακόμα να παρατηρηθούν μέσω της APSD των περισσότερων τυχαίων επιφανειών.



Σχήμα 3.11: Ορισμός της κατευθυντικότητας της υφής.

- (6) Για τις ψευδο-αιτιοκρατικές επιφάνειες στις οποίες επιβάλλεται μικρό μήκος κύματος για την τραχύτητα (Σχήματα 3.6 και 3.8), το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας της APSD φαίνεται ότι διανέμεται με ασυνεχή τρόπο. Εάν η περιοδικότητα μιας επιφάνειας είναι σημαντική, θα υπάρξει σημαντική ισχύς που εντοπίζεται στην αντίστοιχη συχνότητα της APSD. Η συχνότητα και η γωνιακή θέση της, όσον αφορά τη συντεταγμένη μέτρησης, μπορούν να καθοριστούν από τα ακτινωτά και γωνιακά φάσματα. Εντούτοις εάν η αιτιοκρατία είναι πολύ διαστρεβλωμένη, είναι δυνατό να εξαχθούν σημαντικές συνιστώσες από την APSD (Stout *et al.*, 1993). Σε αυτή την περίπτωση είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ακριβώς η αιτιοκρατία από την APSD.

- (7) Για τις επιφάνειες όπου τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα διασταυρώνονται (Σχήμα 5.9), η APSD μας παρέχει μια καλή εικόνα για τα διασταυρωμένα επίπεδα της επιφάνειας. Το γεγονός αυτό μας πληροφορεί εμμέσως ότι εάν μια επιφάνεια παρουσιάζει κατευθυντικότητα, τότε και η APSD του θα εμφανίζει κατευθυντικότητα. Η γωνία μεταξύ των διασταυρωμένων επιπέδων μπορεί να καθοριστεί από δύο μέγιστες αιχμές του γωνιακού φάσματος (Σχήμα 3.9(γ)). Αυτή η ιδιότητα είναι χρήσιμη για τον ποιοτικό έλεγχο, ελέγχοντας εάν επιτυγχάνεται μια σωστή γωνία μέσω της διαδικασίας κατασκευής μιας επιφάνειας.
- (8) Για τις επιφάνειες που έχουν καμπύλες μορφές (Σχήμα 3.10), παρατηρούμε ότι διευρύνεται η κατανομή της ενέργειας APSD. Το γωνιακό φάσμα μπορεί μόνο να μας δώσει πληροφορίες για μια γενική εφαπτόμενη κατεύθυνση της επιφάνειας.
- (9) Δεδομένου ότι η περιοχή δειγματοληψίας διαιρείται κατά μήκος δύο ορθογώνιων κατευθύνσεων, ενδεχομένως να εισάγονται τεχνητές συνιστώσες συχνότητας στους δύο ορθογώνιους άξονες συχνότητας. Αυτή η επίδραση είναι γνωστή ως φαινόμενο Gibbs (Bendat & Piersol, 1986). Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί από τις θέσεις 0° και 90° των γωνιακών φασμάτων των ισότροπων τυχαίων επιφανειών που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.5(γ) και 3.6(γ). Θεωρητικά, δεν πρέπει να υπάρχουν οποιεσδήποτε συγκεκριμένες συνιστώσες σε 0° και 90° για τις ισότροπες τυχαίες επιφάνειες. Εντούτοις, τα Σχήματα 3.5(γ) και 3.6(γ) παρουσιάζουν σημαντικές συνιστώσες σε αυτές τις δύο γωνίες λόγω της επίδρασης του φαινομένου Gibbs.

Οι προαναφερθείσες ιδιότητες είναι πολύτιμες για τον χαρακτηρισμό μιας επιφάνειας, με μερικές απλές εφαρμογές που είναι:

- για να προσδιοριστεί ο τύπος της επιφάνειας και για να αναγνωριστεί το σχέδιο των επιφανειών,
- για να ελεγχθεί η διαδικασία κατασκευής των επιφανειών,
- για να αξιολογηθεί η ποιότητα της επιφάνειας,

- για να αξιολογηθεί το μήκος κύματος και η συχνότητα συγκεκριμένων συνιστωσών,
- για να καθοριστεί το κατάλληλο διάστημα δειγματοληψίας,
- για να αναδημιουργηθεί η επιφάνεια χρησιμοποιώντας μόνο τις σημαντικότερες ενεργειακά φασματικές συνιστώσες.

3.9 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ AACF

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης περιγράφει τη γενική εξάρτηση των τιμών των στοιχείων σε μια θέση από τις τιμές σε μια άλλη θέση. Η συνάρτηση αυτή αντιμετωπίζεται ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο ανάλυσης τυχαίων σημάτων. Παρέχει βασικές πληροφορίες σχετικά με την εξάρτηση των στοιχείων από τα χωρικά χαρακτηριστικά. Ως εκ τούτου, όταν χρησιμοποιείται για την τοπογραφική εκτίμηση μιας επιφάνειας, κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη στον προσδιορισμό της τυχειότητας και της ομοιογένειας που χαρακτηρίζει την τοπογραφία μιας επιφάνειας.

Σε σχέση με τα παραδείγματα AACF που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.5(ε)-3.10(ε) και τις μαθηματικές εξισώσεις, μερικές ιδιότητες της AACF μπορούν να συνοψιστούν ως εξής.

(1) Η AACF είναι μια πραγματική συνάρτηση και υπάρχει συμμετρία:

$$R(-\tau_x, -\tau_y) = E[\eta(x, y)\eta(x-\tau_x, y-\tau_y)] = R(\tau_x, \tau_y) \quad \text{Εξίσωση 3.51}$$

όπου $\eta(x, y)$ είναι η κανονικοποιημένη επιφάνεια.

(2) Η AACF με μηδενική υστέρηση αυτοσυσχέτισης αντιστοιχεί στη διακύμανση της επιφάνειας:

$$R(0, 0) = E[\eta(x, y)\eta(x, y)] = \sigma^2 \quad \text{Εξίσωση 3.52}$$

- (3) Η μέγιστη τιμή της AACF αντιστοιχεί στη μηδενική υστέρηση αυτοσυσχέτισης, δηλαδή:

$$R(0, 0) \geq R(\tau_x, \tau_y), \quad \tau_x, \tau_y \neq 0 \quad \text{Εξίσωση 3.53}$$

Για αυτό τον σκοπό, η κανονικοποιημένη AACF ενδείκνυται για εφαρμογές μηχανικής, δηλαδή:

$$-1 \leq \tilde{R}(\tau_x, \tau_y) = \frac{R(\tau_x, \tau_y)}{R(0, 0)} \leq 1 \quad \text{Εξίσωση 3.54}$$

- (4) Εάν μια επιφάνεια, $z(x, y)$ είναι περιοδική σε κάθε μία από τις δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις, η AACF είναι περιοδική με την ίδια περιοδικότητα σε καθεμία από τις δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να παρατηρηθεί επίσης από τα Σχήματα 3.6(ε) και 3.8(ε) όπου παρουσιάζονται οι AACF ενός EBT και μιας κατεργασμένης επιφάνειας. Αν και αυτοί οι δύο τύποι επιφανειών δεν είναι πραγματικά περιοδικοί, η ψευδο-περιοδικότητα των δύο επιφανειών φαίνεται σαφέστερα στην AACF. Γενικά, εάν μια επιφάνεια είναι αιτιοκρατική, η AACF είναι επίσης αιτιοκρατική.

- (5) Εάν $z(x, y)$ και $z(x + \tau_x, y + \tau_y)$ είναι ανεξάρτητα όταν τα τ_x και τ_y είναι αρκετά μεγάλα, τότε η AACF στη θέση υστέρησης (τ_x, τ_y) τείνει στο μηδέν, δηλαδή:

$$\lim_{\tau_x, \tau_y \rightarrow \infty} R(\tau_x, \tau_y) = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.55}$$

Για πολλές επιφάνειες εφαρμοσμένης μηχανικής, η εξάρτηση των γειτονικών σημείων μειώνεται καθώς η απόσταση μεταξύ τους (ή τ_x και τ_y) αυξάνεται. Έτσι η AACF φθίνει προς το μηδέν σε όλες τις κατευθύνσεις καθώς τα τ_x και τ_y αυξάνονται. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να φανεί από τα Σχήματα 3.5(ε), 3.7(ε) και 3.9(ε) όπου παρουσιάζονται οι AACF ενός EDM, ενός εδάφους και μιας ακονισμένης επιφάνειας. Γενικά, εάν μια επιφάνεια είναι τυχαία, η

AACF της τείνει στο μηδέν εφ' όσον τα τ_x και τ_y είναι αρκετά μεγάλα. Αφ' ετέρου, εάν μια επιφάνεια είναι αιτιοκρατική, π.χ. η διαμορφωμένη επιφάνεια που φαίνεται στο Σχήμα 3.8(α), ο συσχετισμός των τυχαίων συνιστωσών θα φθίνει γρήγορα και η AACF διέπεται από την αιτιοκρατική συνιστώσα σε πιο μακροχρόνιες υστερήσεις, Σχήμα 3.8(ε).

- (6) Για να συνοψίσουμε τις ιδιότητες (4) και (5), είναι γνωστό ότι, γενικά, οι μηχανολογικές επιφάνειες περιλαμβάνουν τόσο αιτιοκρατικά, όσο και τυχαία συστατικά οι τιμές μήκους κύματος των οποίων είναι καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα. Η εξάρτηση μεταξύ των σημείων που βρίσκονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις μπορεί να μην είναι η ίδια. Επομένως, η ιδιότητα της φθίνουσας τάσης της AACF είναι δυνατό να είναι διαφορετική σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Για τις ισοτροπικές επιφάνειες, η φθίνουσα τάση είναι παρόμοια σε όλες τις κατευθύνσεις, Σχήμα 3.5(ε) και 3.6(ε). Για τις ανισότροπες επιφάνειες, υπάρχει μια γρηγορότερη φθίνουσα τάση εγκάρσια της κατεύθυνσης αναφοράς και μια πιο αργή φθίνουσα τάση κατά μήκος της κατεύθυνσης αναφοράς, Σχήμα 3.7(ε) και 3.8(ε). Η ισοτροπία ή ανισοτροπία είναι δυνατό να μετρηθεί από μια ποσοτική παράμετρο που ονομάζεται λόγος αναλογίας, S_r . Αυτός ορίζεται ως η αναλογία υστέρησης της αυτοσυσχέτισης πέρα από την οποία η κανονικοποιημένη AACF πέφτει αρχικά στην τιμή 0.2 (κατά μήκος της κατεύθυνσης γρήγορης φθίνουσας τάσης) διαιρούμενη με την υστέρηση αυτοσυσχέτισης πέρα από την οποία η AACF μειώνονται για πρώτη φορά σε 0,2 (κατά μήκος της κατεύθυνσης πιο αργής φθίνουσας τάσης) (Stout et al., 1993; Dong, Sullivan και Stout, 1994), δηλαδή:

$$0 < S_r = \frac{\text{Κατεύθυνση γρήγορης φθίνουσας τάσης στην τιμή 0.2 της κανονικοποιημένης AACF}}{\text{Κατεύθυνση αργής φθίνουσας τάσης στην τιμή 0.2 της κανονικοποιημένης AACF}} \leq 1 \quad \text{Εξίσωση 3.56}$$

ή

$$0 < S_r = \frac{\text{Min} \{ \tau : R(\tau, \theta) \rightarrow 0.2 \}}{\text{Max} \{ \tau : R(\tau, \theta) \rightarrow 0.2 \}} \leq 1 \quad \text{Εξίσωση 3.57}$$

Για $0.5 < S_{rr} \leq 1$, η επιφάνεια λέμε ότι είναι λίγο πολύ ισότροπη. Εντούτοις, για $0 < S_{rr} \leq 0.5$, η επιφάνεια λέμε ότι είναι λίγο πολύ ανισότροπη. Οι τιμές S_{rr} των επιφανειών EDM και EBT στα Σχήματα 3.5(α) και 3.6(α) είναι 0.91 και 0.87 αντίστοιχα. Αντίθετα, οι τιμές S_{rr} για το έδαφος και τις κατεργασμένες επιφάνειες (Σχήμα 3.7(α) και 3.8(α)), είναι 0.015 και 0.11 αντίστοιχα.

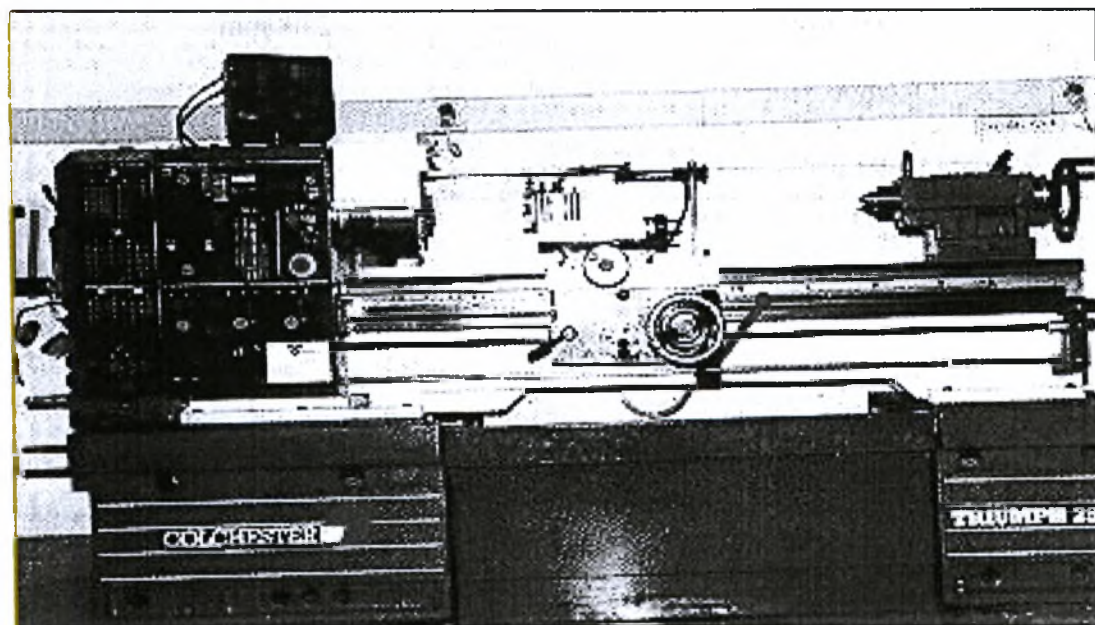
Γίνεται σαφές από τα παραπάνω ότι η AACF είναι ένα χρήσιμο εργαλείο που μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις χωρικές ιδιότητες των επιφανειών.

Κεφάλαιο 4:

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ

Οι κοπές των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν στο *Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών* του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Χρησιμοποιήθηκε συμβατικός τόρνος τύπου TRIUMPH 2500 της εταιρίας COLCHESTER (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Γενικής χρήσης τόρνος.

Τα κυριότερα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του συμβατικού τόνου.

Απόσταση μεταξύ των κέντρων	L=1250mm
Ύψος κέντρων	H=195mm
Ονομαστική ισχύς	Pe=7.5KW (10HP)
	15-300
Εύρος περιστροφικών ταχυτήτων ανάλογα με την επιλεγόμενη κλίμακα	35-830
	110-2500στροφές/λεπτό
Εύρος προώσεων	S=0.036-1.2mm/στροφή
Καθαρό βάρος	G=1500kgr
Χώρα προέλευσης	UK
Ύψος μηχανής (από το έδαφος έως το κέντρο περιστροφής)	1050mm
Ολικό μήκος	2500mm
Ολικό πλάτος	1100mm
Ολικό ύψος	1300mm

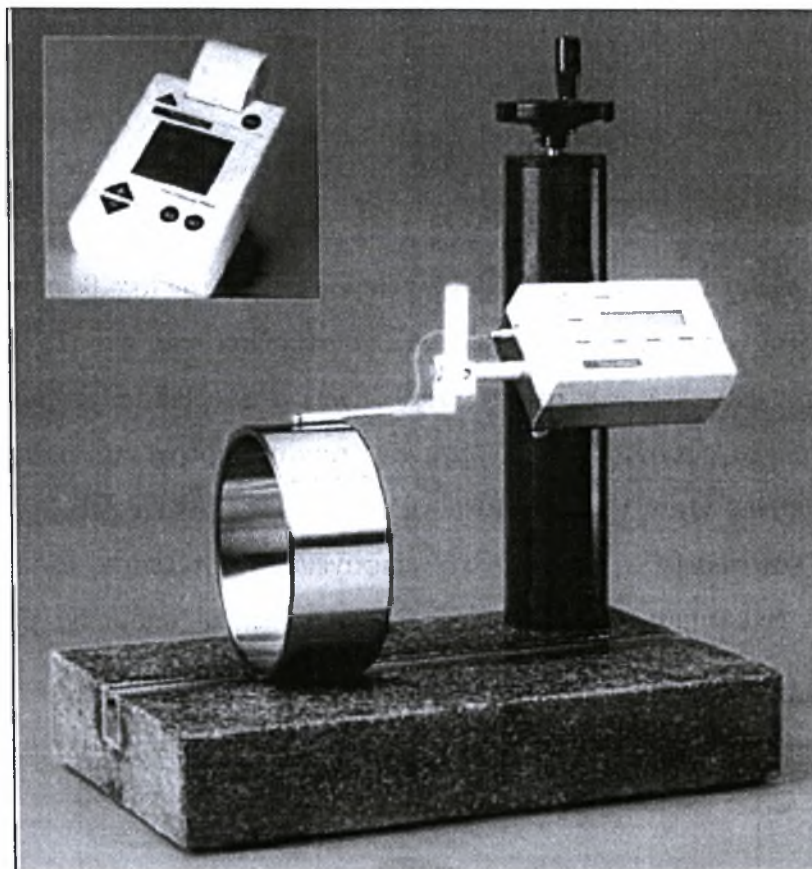
4.2 ΤΡΑΧΥΜΕΤΡΟ

4.2.1 Γενικά

Όπως έχει προαναφερθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε την τραχύτητα μίας επιφάνειας. Για τη σημασία της επιφανειακής τοπογραφίας έχει ήδη γίνει διεξοδική αναφορά. Η μέτρηση της τραχύτητας έγινε χρησιμοποιώντας το προφίλόμετρο στυλίσκου της Taylor-Hobson Surtonic3+ το οποίο χρησιμοποιεί το μετρικό σύστημα M (Μέσης γραμμής) και είναι εφοδιασμένο με το λογισμικό TalyProfile.

4.2.2 Taylor-Hobson Surtronic3+

Το Surtronic3+ είναι ένα τραχύμετρο προηγμένης τεχνολογίας που αποδίδει μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Το όργανο έχει μεγάλη ευελιξία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως φορητό, είτε να συνδεθεί με υπολογιστή. Χρησιμοποιείται τόσο σε εργαστηριακές, όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές και λόγω του μεγέθους του είναι πολύ εύχρηστο, ενώ έχει την δυνατότητα να λαμβάνει μετρήσεις από κεκλιμένες ή κάθετες επιφάνειες.



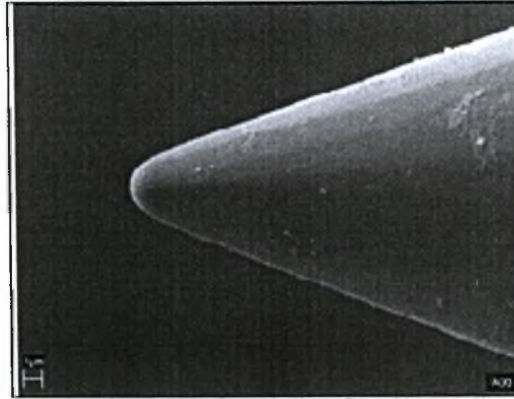
Εικόνα 4.2: Τραχύμετρο τύπου Rank Taylor-Hobson Surtronic3+.

Αρχή λειτουργίας του Surtronic3+

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, το Surtronic3+ είναι ένα προφιλόμετρο στυλίσκου, δηλαδή χρησιμοποιεί μία ακίδα προκειμένου να πάρει μετρήσεις για την τραχύτητα μιας επιφάνειας. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πως λειτουργεί αυτή ακίδα, ποιοι είναι οι βασικοί παράμετροι της και πώς γίνεται η μέτρηση.

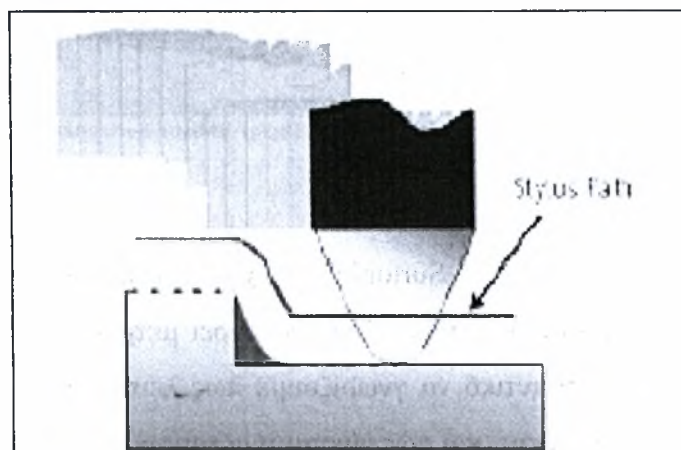
Η ακίδα έχει την μορφή παραβολοειδούς και είναι κατασκευασμένη από διαμάντι το οποίο έχει επεξεργασθεί κατάλληλα έτσι ώστε να έχει σφαιρικό τελείωμα. Για να

πραγματοποιηθεί μία μέτρηση δεν χρησιμοποιείται όλο το εύρος της γεωμετρίας της ακίδας πάρα μόνο το σφαιρικό της τμήμα. Στην παρακάτω φωτογραφία μπορούμε να δούμε μία τυπική ακίδα σε μεγέθυνση.



Εικόνα 4.3: Ηλεκτρομικρογραφία μιας ακίδας 40° κατασκευασμένη από διαμάντι.

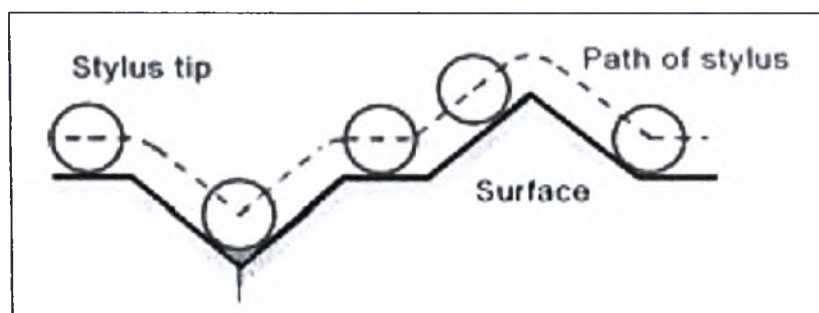
Η κωνικότητα της ακίδας είναι ιδιόζουσας σημασίας για την ακρίβεια της μέτρησης που θα ληφθεί, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει και στο Σχήμα 4.1 που παριστάνει την μέτρηση ενός σκαλοπατιού. Έχει αναφερθεί και παραπάνω ότι τα στοιχεία που καταγράφονται από το όργανο μέτρησης προέρχονται από το σφαιρικό τμήμα της ακίδας. Όταν η κωνικότητα της ακίδας δεν είναι κατάλληλη, δεν είναι δυνατό να καταγραφεί η πραγματική επιφάνεια. Αποτέλεσμα αυτού είναι να υπεισέρχεται ένα σημαντικό σφάλμα στις μετρήσεις, το οποίο θα μπορούσε να αποφευχθεί αν είχε χρησιμοποιηθεί κατάλληλη κωνικότητα.



Σχήμα 4.1: Μέτρηση επιφανειακής ανωμαλίας με ακίδα μεγάλης κωνικότητας.

Εξίσου και ίσως πιο σημαντική για την ακρίβεια της μέτρησης είναι η διάμετρος του σφαιρικού τμήματος της ακίδας. Πιο συγκεκριμένα, ο γεωμετρικός τύπος του

κέντρου του σφαιρικού τμήματος της ακίδας συνιστά το προφίλ της επιφάνειας που παίρνουμε από το τραχύμετρο. Στο παρακάτω Σχήμα 4.2 μπορούμε να δούμε ποια είναι η πραγματική διαδρομή της ακίδας συγκρινόμενη με την πραγματική επιφανειακή ανωμαλία. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε το γεγονός ότι υπερεκτιμούνται οι κορυφές (peaks) και υποεκτιμούνται οι κοιλάδες (valleys).



Σχήμα 4.2: Παρουσίαση της πραγματικής διαδρομής της ακίδας καθώς ανιχνεύει την επιφάνεια.

Για την αποφυγή του χάους που μπορεί να προέρθει από ασύμβατες μετρήσεις λόγω κακής εκτίμησης τόσο της κωνικότητας όσο και της διαμέτρου του σφαιρικού τμήματος της ακίδας, έχουν υιοθετηθεί τα πρότυπα ISO. Ο στόχος των προτύπων αυτών είναι να εξασφαλίζεται η ομοιομορφία των αποτελεσμάτων ανεξάρτητα από τα όργανα που χρησιμοποιούνται για να γίνουν οι μετρήσεις. Στον τομέα της επιφάνειας έχει επικρατήσει το ISO 3274, το οποίο θα ακολουθήσουμε και εμείς στις μετρήσεις μας.

TalyProfile

Για την επεξεργασία των μετρήσεων που έγιναν στο τραχύμετρο χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα TalyProfile 1.1.2 της ίδιας εταιρείας. Συνοπτικά τα βασικότερα χαρακτηριστικά του προγράμματος TalyProfile είναι τα εξής:

- Απεικόνιση τόσο του φιλτραρισμένου, όσο και του αφιλτράριστου περιγράμματος της επιφάνειας, με δυνατότητες επιλογής εναλλακτικών φίλτρων, αλλά και διαφόρων τιμών όσον αφορά το μήκος κύματος αποκοπής.
- Φασματική ανάλυση του περιγράμματος.
- Παρουσίαση της καμπύλης κατανομής του εύρους (amplitude distribution) και της καμπύλης φέρουσας επιφάνειας (bearing area curve ή material ratio curve ή Abbott-Firestone curve).

- Μέτρηση απόστασης μεταξύ δύο σημείων του περιγράμματος.
- Εμβαδομέτρηση σε επιλεγμένη περιοχή του περιγράμματος.
- Υπολογισμός πληθώρας παραμέτρων κατά τα διεθνή πρότυπα (π.χ. R_a , R_{sk}), αλλά και παραμέτρων κατά DIN 4776 (R_k , R_p κ.α.) και κατά ISO. Όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν σε φιλτραρισμένο και αφιλτράριστο περίγραμμα, αλλά και για το περίγραμμα της κυμάτωσης.

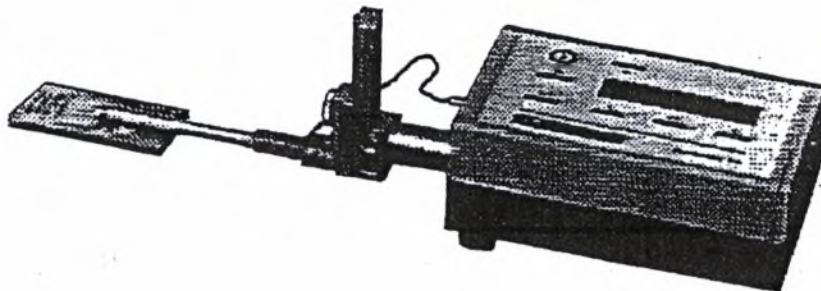
Πολύ σημαντική ρύθμιση για το TalyProfile είναι η επιλογή του φίλτρου. Το τελευταίο αποκόπτει τις χαμηλές συχνότητες της κυματομορφής όπως για παράδειγμα την κυμάτωση και τις ανωμαλίες της τραχύτητας. Παράλληλα μειώνει την επίδραση των ταλαντώσεων στο περίγραμμα χωρίς να χάνει ουσιώδεις πληροφορίες της επιφάνειας, ενώ ελαττώνει και το σφάλμα λόγω μη κατάλληλης τοποθέτησης του στυλίσκου, ο οποίος πρέπει να είναι όσο πιο κάθετος γίνεται σε σχέση με την μετρούμενη επιφάνεια.

Άλλη μία σημαντική παράμετρος είναι η αποκοπή (cut-off) η οποία σε γενικές γραμμές μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένα φίλτρο που χρησιμοποιείται ως μέσο φιλτραρίσματος (αποκοπής) του μήκους κύματος. Η αποκοπή ανάλογα με την αριθμητική τιμή που έχει επιλεγεί αφαιρεί τα μήκη κύματος που δεν θέλουμε. Για παράδειγμα ένα φίλτρο αποκοπής με τιμή 0.8mm, επιτρέπει στα μήκη κύματος κάτω από 0.8mm να υπολογισθούν, ενώ τα μήκη κύματος πάνω από 0.8mm μειώνονται σε πλάτος. Έτσι, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του πλάτους.



4.2.3 Τα χαρακτηριστικά του

Οι μετρήσεις έγιναν σε μηχανικό τραχύμετρο στυλίσκου τύπου Sutronic3+ της εταιρίας RANK TAYLOR HOBSON LIMITED (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Τραχύμετρο.

Το βασικό χαρακτηριστικό των προφιλόμετρων είναι το μήκος κύματος αποκοπής. Αυτό επιλέγεται ανάλογα με την κατεργασία κοπής που έχει προηγηθεί όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Μήκος κύματος αποκοπής συναρτήσει κατεργασίας κοπής που έχει προηγηθεί.

Κατεργασία υποπεράτωσης	Αναμενόμενο εύρος τιμών R_a	Προτεινόμενο Μήκος cut-off		
		0.25mm	0.8mm	2.5mm
Υπερλείανση	0.05-0.2 μm	*	*	
Lapping	0.05-0.4	*	*	
Honing	0.1-0.8	*	*	
Ακόνισμα	0.1-1.6	*	*	*
Τόρνευση με διαμάντι	0.1-0.4	*	*	
Τόρνευση	0.4-12.3		*	*
Διάτρηση	0.4-12.3		*	*
Φρεζάρισμα	0.8-12.3		*	*

Για την τόρνευση αποπεράτωσης επιλέχθηκε μήκος κύματος αποκοπής (cut-off length) ίσο με 0.8mm, ενώ το υπολογιζόμενο μήκος ήταν $L_n=4\text{mm}$.

Το προφιλόμετρο είχε τις παρακάτω δυνατότητες μεγέθυνσης του περιγράμματος της επιφανείας:

- * στην οριζόντια διεύθυνση V_h : $\times 20, \times 50, \times 100, \times 200$.
- * στην κατακόρυφη διεύθυνση V_v : (ανάλογα με την κλίμακα)

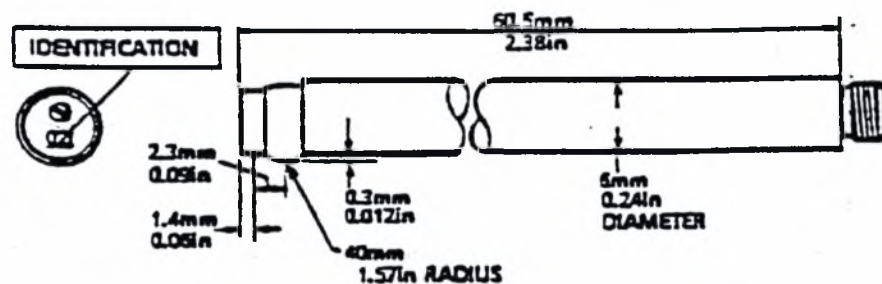
κλίμακα 1: $\times 5000, \times 10000, \times 20000$

κλίμακα 2: $\times 500, \times 1000, \times 2000$

κλίμακα 3: $\times 100 \times 200, \times 500$.

Οι μεγεθύνσεις που επιλέχθηκαν κατά τις μετρήσεις ήταν $V_h = \times 100$, $V_v = \times 1000$.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Pick up του προφιλόμετρου φαίνονται στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5: Διαστάσεις του Pick up.

4.2.4 Φίλτρο

Σε ένα ηλεκτρικό όργανο το μήκος cut-off για παραμέτρους τραχύτητας καθορίζεται από ένα φίλτρο που αποκόπτει τις χαμηλές συχνότητες της κυματομορφής (π.χ. την κυμάτωση και τις ανωμαλίες της τραχύτητας που έχουν μεγάλο εύρος διαστήματος). Ιδεατά τα χαρακτηριστικά του φίλτρου πρέπει να αλλάζουν σύμφωνα με το επιλεγόμενο cut-off μήκος, οπότε όλες οι ανωμαλίες με διάστημα μικρότερο του cut-off δεν αλλάζουν, ενώ αυτές με μεγαλύτερο αποκόπονται. Αυτή η ιδέα δεν μπορεί να επιτευχθεί οικονομικά, έτσι τα φίλτρα έχουν τυποποιηθεί να δίνουν μία εκπομπή περίπου 75% του cut-off. Αυτό σημαίνει ότι τα εύρη των ανωμαλιών που έχουν διάστημα ίσο με το cut-off θα μειώνονται στο 75% της πραγματικής τους τιμής. Τα εύρη των ανωμαλιών με μικρότερο μήκος κύματος θα παραμένουν τα ίδια, ενώ αυτά με μεγαλύτερο θα μειωθούν ανάλογα.

Τα φίλτρα συνήθως χρησιμοποιούνται μόνο σε σήματα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των παραμέτρων, οι περισσότερες καταγραφές γίνονται από σήματα του περιγράμματος χωρίς φίλτρο οι οποίες περιέχουν όλες τις πληροφορίες για την τοπομορφία της επιφάνειας που είναι δυνατό παραληφθούν από το pick up. Μερικές φορές είναι χρήσιμη η χρήση του φίλτρου και όταν καταγράφουμε μια επιφάνεια. Αυτό το φίλτρο μπορεί να είναι το κανονικό cut-off φίλτρο στον ενισχυτή, είτε ένα ξεχωριστό φίλτρο με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τυπικές χρήσεις του φίλτρου όταν καταγράφουμε είναι:

- i) Να αποκόπτει την κυμάτωση από το περίγραμμα και να δίνει μια άμεση οπτική παράσταση του πραγματικού σήματος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων.
- ii) Να αποκόπτει συχνότητες της τραχύτητας και να δίνει μόνο την κυμάτωση.
- iii) Να μειώνει την επίδραση ταλαντώσεων στο περίγραμμα χωρίς να χάνει ουσιώδη πληροφορίες της επιφανείας.
- iv) Να μειώνει την ανάγκη για ακριβή τοποθέτηση του στυλίσκου όταν χρησιμοποιεί ανεξάρτητα δεδομένα. Για παράδειγμα όταν η γενική μορφή της επιφανείας δεν είναι παράλληλη προς το pick up. Τότε το περίγραμμα θα έχει κλίση κατά μήκος του γραφήματος και γρήγορα θα φτάσει στο ανώτερο όριο του. Αυτή η κεκλιμένη κίνηση παρίσταται από μια χαμηλή συχνότητα στην κυματομορφή και μπορεί να φιλτραριστεί, με αποτέλεσμα ένα περίγραμμα που θα είναι παράλληλο στις συντεταγμένες του γραφήματος.

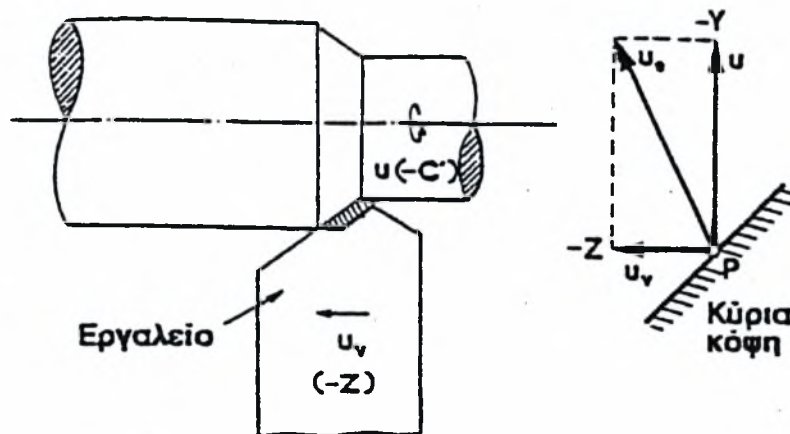
Το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε κατά την μέτρηση των παραμέτρων όπως έχει ήδη αναφερθεί ήταν το Gaussian. Το φίλτρο αυτό δεν είναι ένα ηλεκτρονικό φίλτρο, αλλά μια μαθηματική συνάρτηση που εφαρμόζεται στα δεδομένα του περιγράμματος. Το φίλτρο αυτό είναι ένας μέσος όρος των ευρών του περιγράμματος, όπου τα εύρη ακολουθούν κατανομή Gauss. Μια ιδιότητα του Gaussian φίλτρου είναι η ικανότητα του να υπολογίζει τα δεδομένα πριν και μετά την ενεργή θέση του στυλίσκου. Η απόκριση στην τιμή του cut-off μήκους είναι 50% της μέγιστης εκπομπής. Η συνάρτηση ευρών για το Gaussian φίλτρο έχει την εξίσωση της κατανομής πυκνότητας Gauss. Τα χαρακτηριστικά εκπομπής αποτελούνται από δύο συστατικά: α) τα χαρακτηριστικά εκπομπής της κεντρικής γραμμής και β) τα χαρακτηριστικά του μήκους κύματος του περιγράμματος της τραχύτητας.

- α) τα χαρακτηριστικά του φίλτρου καθορίζονται από την κατανομή ευρών ευνοώντας το μετασχηματισμό Fourier.
- β) το περίγραμμα της τραχύτητας είναι η διαφορά μεταξύ του πραγματικού περιγράμματος και της κεντρικής γραμμής.

4.3 ΤΟΡΝΕΥΣΗ

4.3.1. Διαμήκης τórνευση

Κατά τη διαμήκη τórνευση το τεμάχιο εκτελεί περιστροφική ομοιόμορφη κίνηση (C'), γύρω από τον άξονά του (άξονας τórνευσεως), ενώ το εργαλείο μετατοπίζεται ευθύγραμμα (συνεχής κίνηση πρόωσης $-Z$) και ισοταχώς, παράλληλα προς τον άξονα του τεμαχίου (Εικόνα 4.6). Το εργαλείο της τórνευσης ήταν δεξιόκοπο διμεταλλικό με ένθετο πλακίδιο



Εικόνα 4.6: Η κινηματική της εξωτερικής κατά μήκος τórνευσης.

Τα δοκίμια που κατεργαστήκαμε ήταν κυλινδρικής μορφής διαμέτρου $d=50\text{mm}$ και μήκους $\lambda=25\text{mm}$. Για την αποφυγή βέλους κάμψης του τεμαχίου και όλων των αρνητικών επιπτώσεων που θα είχε αυτό στην τραχύτητα της επιφάνειας, προσδέναμε το δοκίμιο στο σιαγωνινό σφιγκτήρα (τσοκ) του τórνου, έτσι ώστε να εξέχει από αυτόν ένα μήκος περίπου 10cm .

Από το συνδυασμό των ταχυτήτων κοπής U και προώσεων S είναι φανερό ότι πραγματοποιήθηκαν 30 διαφορετικές κοπές. Τα δοκίμια μετά από κάθε μία από αυτές

μεταφέρονταν στη βάση του τραχυμέτρου, όπου και τοποθετούνταν κατάλληλα, ώστε να αποφεύγεται η επαφή της νεοκατεργασμένης επιφάνειας με οτιδήποτε θα μπορούσε να της προκαλέσει φθορά και επομένως αλλοίωση των αποτελεσμάτων.

Πριν από τη διαδικασία της μέτρησης ακολουθούσαμε τα παρακάτω βήματα:

- Η προς μέτρηση επιφάνεια πρέπει να μην επιδέχεται ταλαντώσεις και το όργανο να είναι απόλυτα σταθερό κατά τη διάρκεια της μέτρησης.
- Πάντα τοποθετούνταν το pick up έτσι ώστε ο στυλίσκος να είναι ορατά κάθετος προς τη μετρήσιμη επιφάνεια.
- Η μονάδα του τραχυμέτρου τοποθετούνταν έτσι ώστε να γίνει παράλληλη προς τη μετρήσιμη επιφάνεια.
- Μετά από κάθε μέτρηση η μονάδα του τραχυμέτρου μπορούσε να μετακινηθεί μόλις το pick up άρχιζε το διάστημα επιστροφής.
- Η μέτρηση γίνονταν σε κατεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της πρόωσης και όχι κάθετα προς τον άξονα αυτό.

4.3.2 Μετωπική τόννευση

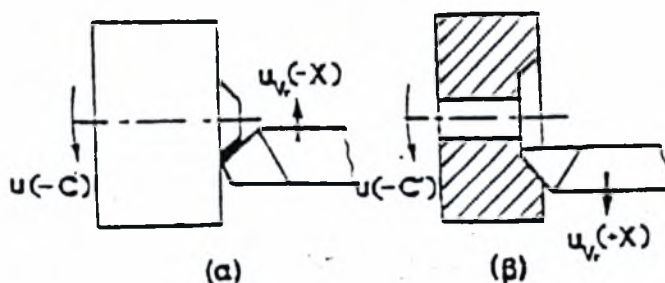
Στη μετωπική τόννευση το τεμάχιο εκτελεί περιστροφική ομοιόμορφη κίνηση (-C) γύρω από τον άξονά του ενώ το εργαλείο κινείται ακτινικά κατά τον άξονα X της εργαλειομηχανής. Ανάλογα με τη φορά κίνησης του εργαλείου και τη μεταβολή της ταχύτητας κοπής διακρίνουμε τρία είδη μετωπικής τόννευσης:

- ❖ τη μετωπική τόννευση με σταθερή ταχύτητα κοπής, όπου η κίνηση του εργαλείου γίνεται από την περιφέρεια του τεμαχίου προς το κέντρο του (κίνηση πρόωσης -X σταθερή), ενώ η ταχύτητα κοπής είναι σταθερή,
- ❖ τη μετωπική τόννευση με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και αυξανόμενη την ταχύτητα κοπής, όπου η κίνηση του εργαλείου γίνεται από το κέντρο προς την περιφέρεια του τεμαχίου (κίνηση πρόωσης +X σταθερή).
- ❖ τη μετωπική τόννευση με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και ελαττούμενη την ταχύτητα κοπής, όπου η κίνηση του εργαλείου γίνεται από την περιφέρεια του τεμαχίου προς το κέντρο του (κίνηση πρόωσης -X σταθερή).

Κύριο χαρακτηριστικό της μετωπικής τόννευσης είναι ότι η ταχύτητα κοπής U μεταβάλλεται γραμμικά με τη διάμετρο του τεμαχίου σύμφωνα με τη σχέση:

$$U = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

Αυτό έχει σαν συνέπεια την εμφάνιση επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης στη διατμητική παραμόρφωση στη ζώνη διάτμησης, ανάλογα με τη φορά της κίνησης της πρόωσης, γεγονός που δημιουργεί διαφορετικές συνθήκες σχηματισμού του αποβλήτου από τη διαμήκη τόννευση ή τη μετωπική με σταθερή ταχύτητα κοπής, με συνακόλουθες επιπτώσεις στις δυνάμεις κοπής, στη φθορά και ζωή του εργαλείου, στην τραχύτητα των κατεργασμένων επιφανειών και σε παράγωγα μεγέθη της κοπής των μετάλλων. Η κινηματική της μετωπικής τόννευσης δίνεται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Η κινηματική της μετωπικής τόννευσης: α) κίνηση του εργαλείου από την περιφέρεια του τεμαχίου προς το κέντρο του και β) αντιθέτως.

4.3.2.1 Μετωπική τόννευση με σταθερή ταχύτητα κοπής

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, κατά τη μετωπική τόννευση η ταχύτητα κοπής μεταβάλλεται γραμμικά με τη διάμετρο του τεμαχίου. Συνεπώς για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων έπρεπε η ταχύτητα κοπής να παραμένει σταθερή. Ο τόννος είχε αυτή τη δυνατότητα μέσω του προγράμματος Surface Constant Speed.

Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικής μορφής διαμέτρου $d=165\text{mm}$ και μήκους $l=50\text{mm}$. Το εργαλείο ήταν αριστερόκοπο διμεταλλικό με ένθετο πλακίδιο. Το υλικό του εργαλείου ήταν σκληρομέταλλο T10. Όπως και στην εξωτερική διαμήκη τόννευση έγιναν 30 διαφορετικές κοπές.

Όπως είδαμε στη διαμήκη τόννευση, βασική προϋπόθεση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, ήταν η νεοκατεργασμένη επιφάνεια να μένει ανέπαφη. Τα κατεργασμένα δοκίμια τοποθετούνταν στη βάση του τραχυμέτρου, με την μετωπική τους επιφάνεια παράλληλα σε αυτή. Ο στυλίσκος του τραχυμέτρου προσαρμοζόταν κατάλληλα στην προς μέτρηση επιφάνεια ακολουθώντας τα βήματα που περιγράψαμε αναλυτικά στην παράγραφο 4.2. Για να έχουμε καλύτερη προσέγγιση της νεοκατεργασμένης επιφάνειας ήταν απαραίτητος ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων για κάθε διαφορετική κοπή. Για το σκοπό αυτό πάρθηκαν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικές περιοχές του τεμαχίου με μέση διάμετρο $d=40$, $d=80$, $d=120$ mm. Τέλος σε κάθε μία από τις παραπάνω περιοχές ακολουθούσαν τρεις μετρήσεις σε διαφορετικές γωνίες (περίπου ανά 120 μοίρες). Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι στη μετωπική τόννευση με σταθερή ταχύτητα κοπής έγιναν 270 μετρήσεις.

4.3.2.2 Μετωπική τόννευση με αυξανόμενη ταχύτητα κοπής

Το εργαλείο, στην τρίτη σειρά των μετρήσεων, κινούνταν από το κέντρο του τεμαχίου προς την περιφέρειά του. Έπρεπε συνεπώς, το κέντρο να ήταν διάτρητο (έως ένα βάθος περίπου 10mm), έτσι ώστε να μπορεί να δοθεί το βάθος κοπής $a=0.5$ mm. Το εργαλείο της τόννευσης ήταν δεξιόκοπο, διμεταλλικό με ένθετο πλακίδιο από σκληρομέταλλο T10. Οι συνθήκες κοπής (ταχύτητες κοπής και προώσεις) είναι εκείνες που εφαρμόστηκαν στις δύο προηγούμενες σειρές κοπών. Οι διαστάσεις των κυλινδρικών δοκιμίων ήταν: διάμετρος $d=165$ mm και μήκος $l=100$ mm. Κατά τη μέτρηση των επιφανειών πάρθηκαν 270 μετρήσεις στις περιοχές που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

4.3.2.3 Μετωπική τόννευση με ελαττούμενη την ταχύτητα κοπής

Η κινηματική της τόννευσης αυτής εξηγήθηκε στην γενική περιγραφή της μετωπικής τόννευσης. Το εργαλείο ήταν το ίδιο με εκείνο της μετωπικής τόννευσης με σταθερή ταχύτητα κοπής. Οι διαστάσεις των κυλινδρικών δοκιμίων ήταν: διάμετρος $d=165$ mm και μήκος $l=100$ mm. Οι συνθήκες κοπής καθώς και η διαδικασία των μετρήσεων είναι οι ίδιες με εκείνες των δύο προηγούμενων κατεργασιών μετωπικής τόννευσης.

Κεφάλαιο 5:

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΟΠΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΟΡΝΕΥΣΗ

Κατά το πειραματικό μέρος της εργασίας έγινε μέτρηση των μεγεθών της τραχύτητας επιφανειών που έχουν προκύψει από κατεργασίες τórνευσης. Η τórνευση ανήκει στην ομάδα των κατεργασιών κοπής με περιστροφική την πρωτεύουσα κίνηση και μεταφορική την κίνηση της πρόωσης.

Το είδος της τórνευσης που εξετάστηκε, ήταν η εξωτερική διαμήκης.

Οι συνθήκες κοπής ήταν:

- * Ταχύτητα κοπής $V_c=100$ και 185m/min .
- * Πρόωση (χρησιμοποιήθηκαν χαμηλές και υψηλές τιμές), ενδεικτικά $f=0.036 - 0.050 - 0.220\text{mm/στρ. κ.α.}$
- * Ακτίνα καμπυλότητας ακής εργαλείου $r_e=0.8\text{mm}$
- * Βάθος κοπής $p=1\text{mm}$ (σταθερό για όλες τις κοπές).

Όλες οι κοπές έγιναν χωρίς τη χρήση υγρού κοπής.

Από τις μέχρι σήμερα δημοσιευμένες έρευνες προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κυριότερη παράμετρος της τórνευσης είναι η πρόωση. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε τόσο μεγάλο εύρος προώσεων.

5.2 ΥΛΙΚΟ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ

Τα τεμάχια που κατεργάστηκαν ήταν από χάλυβα Ck60. Πρόκειται για ανθρακούχο χάλυβα κατασκευών ευρείας χρήσης με καλή κατεργαστικότητα, για τον οποίο υπάρχουν αρκετά δημοσιευμένα στοιχεία για τις παραμέτρους κατεργαστικότητάς του, με σύσταση:

Σύσταση	%κ.β.
Άνθρακας C	0.57-0.65
Πυρίτιο Si	<0.4
Μαγγάνιο Mn	0.6-0.9
Φώσφορος P	0.045
Θείο S	<0.043

Πίνακας 5.1: Σύσταση υλικού κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Οι κυριότερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του είναι:

Πυκνότητα ρ	7.800 kg/m ³
Θερμική αγωγιμότητα λ	46.8 W/m °C
Θερμοδιαχυτότητα α	0.00001278 m ² /sec
Ειδική θερμότητα C	544 J/kg °C
Σκληρότητα	220 HV

Πίνακας 5.2: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες υλικού κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Όλες οι κοπές έγιναν με διμεταλλικό εργαλείο κοπής με ένθετο πλακίδιο από σκληρομέταλλο T10 με τα παρακάτω γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

Γωνία αποβλήτου	$\gamma=6^0$
Γωνία ελευθερίας	$\alpha=11^0$
Γωνία λοξότητας	$\lambda_s=0^0$
Γωνία θέσης κύριας κόψης	$\kappa=75^0$
Γωνία θέσης δευτερεύουσας κόψης	$\kappa_1=15^0$
Ακτίνα καμπυλότητας της ακής	$r_e=0.8$ mm

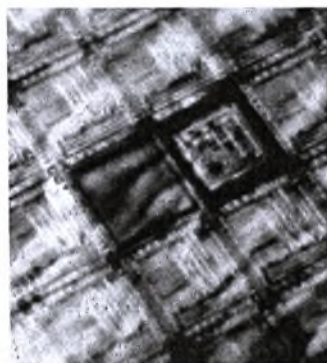
Πίνακας 5.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου.

Κεφάλαιο 6:

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

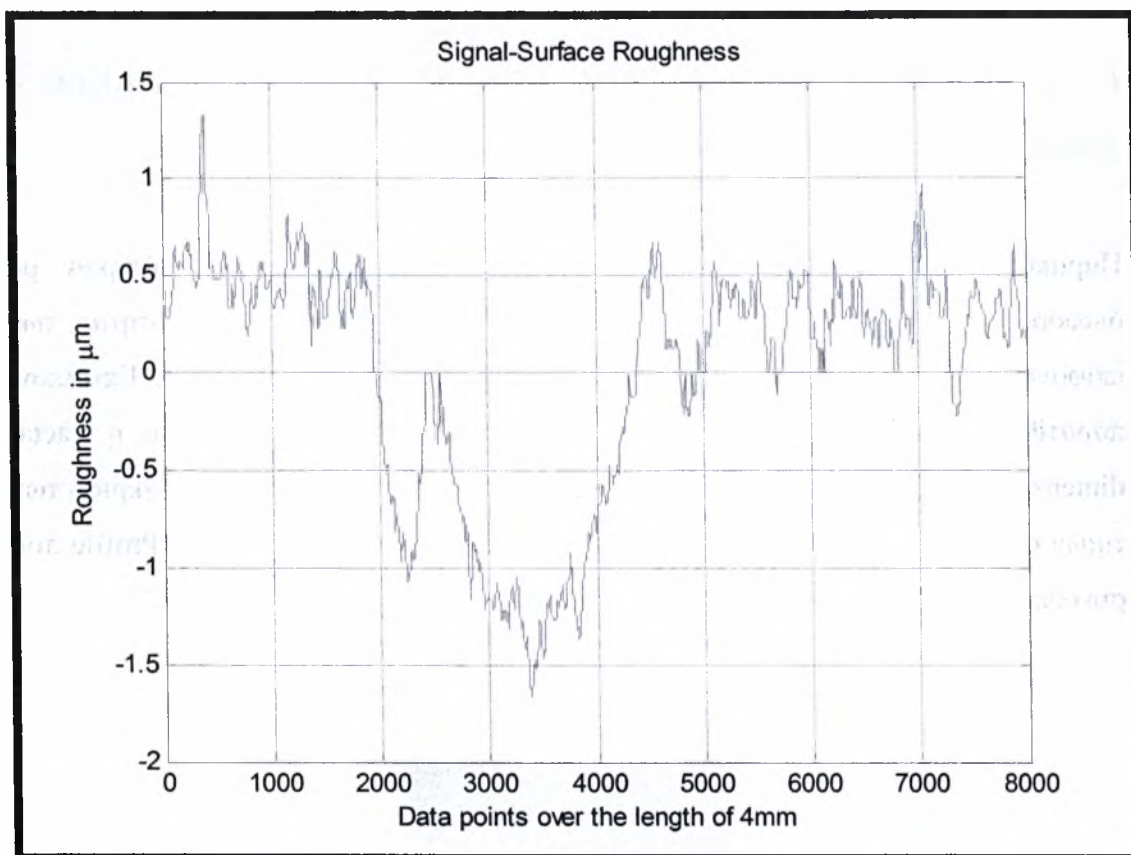
6.1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΧΑΛΥΒΑ CK60 – ΧΑΜΗΛΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΩΣΕΩΣ

Παρακάτω γίνεται ανάλυση των 16 δοκιμίων χάλυβα ck60 που κόπηκαν με διαφορετικές, μικρές όμως, τιμές προώσεως. Η ανάλυση της τραχύτητας των επιφανειών έγινε με βάση το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε Matlab. Επιπλέον, παρατίθενται τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων όπως είναι η fractal dimension, η corner frequency και το μήκος συσχέτισης. Τέλος, γίνεται σύγκριση των τιμών αυτών με βάση τις τιμές που λαμβάνονται από το λογισμικό TalyProfile που συνοδεύει το τραχύμετρο του εργαστηρίου “Μηχανουργικών Κατεργασιών”.



❖ 1^η Περίπτωση - Feed Rate 0.036mm/στρ.

Στο παρακάτω Σχήμα 6.1.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



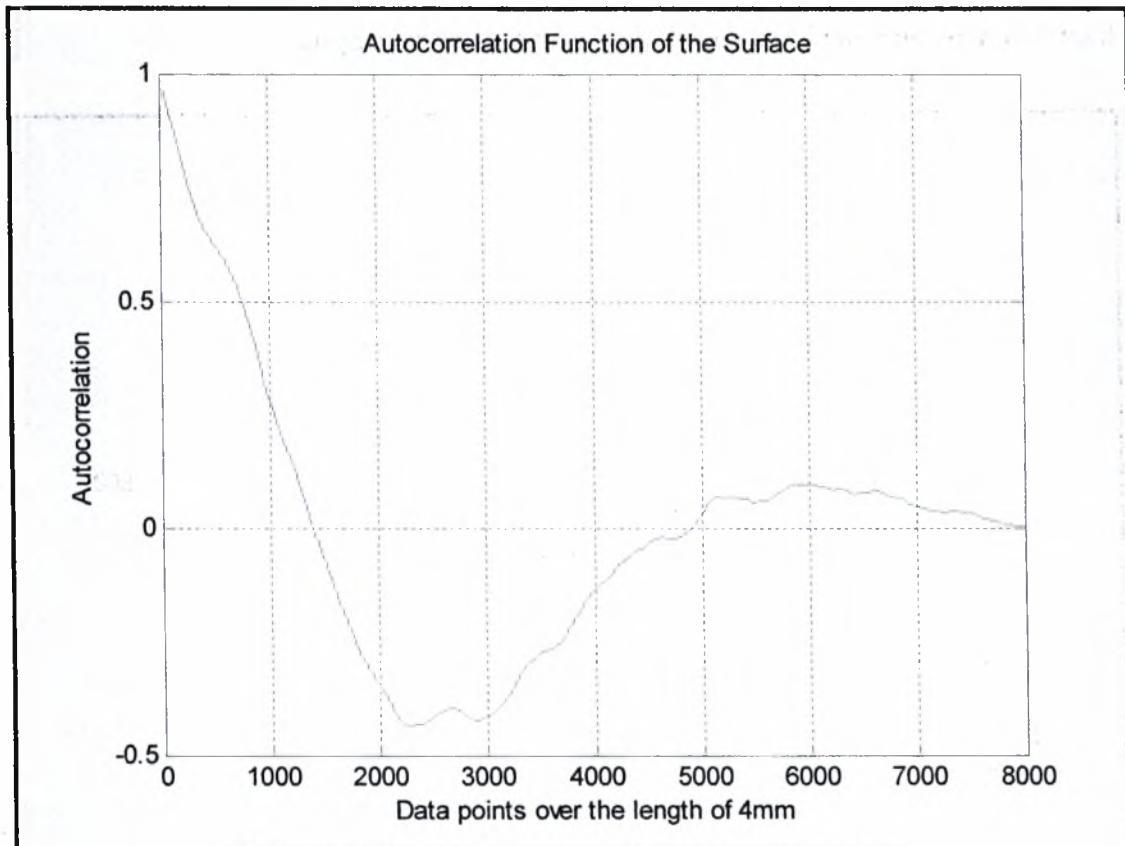
Σχήμα 6.1.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της επιφάνειας που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.1.1.

Πίνακας 6.1: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.810	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	13.200	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	5.750	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.095	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.081	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	3.260	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.340	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	2.790	
Παράμετρος,	R_k	=	1.700	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.1.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

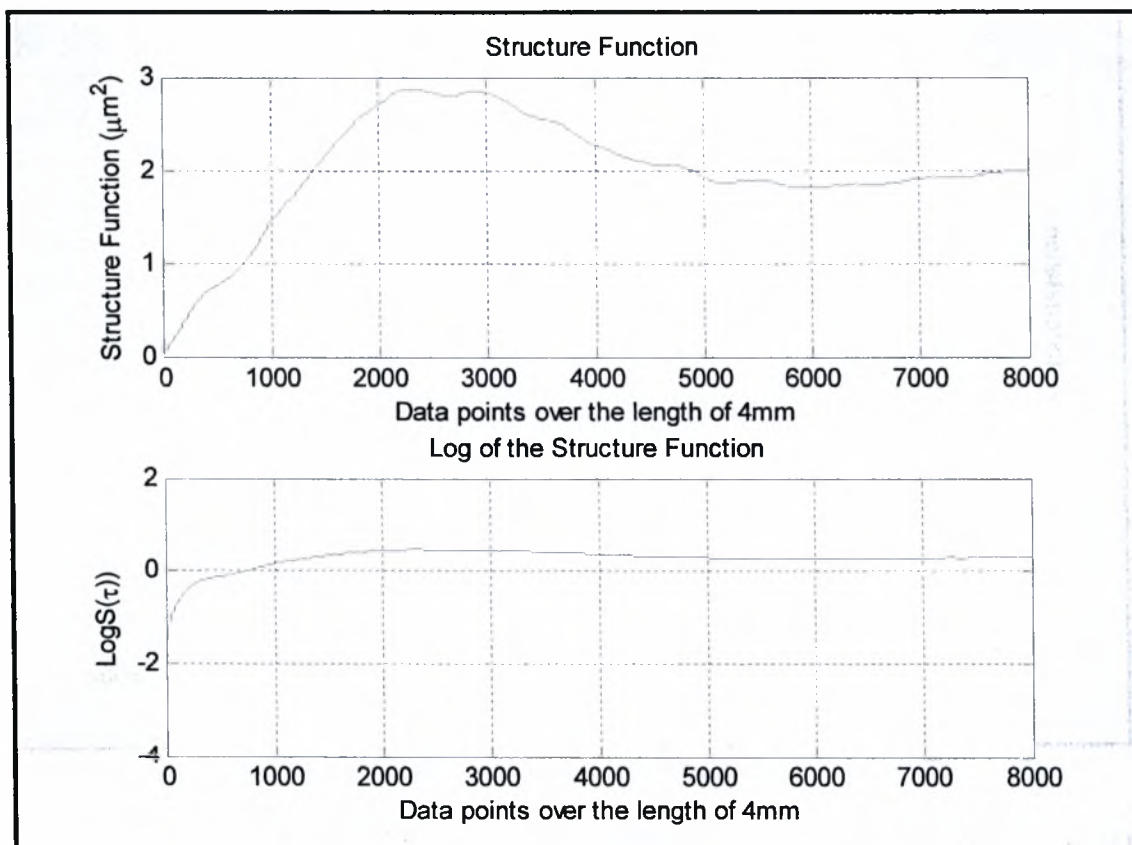


Σχήμα 6.1.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
1495/8000	0.7475sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
1263/8000	0.6315sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.1.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



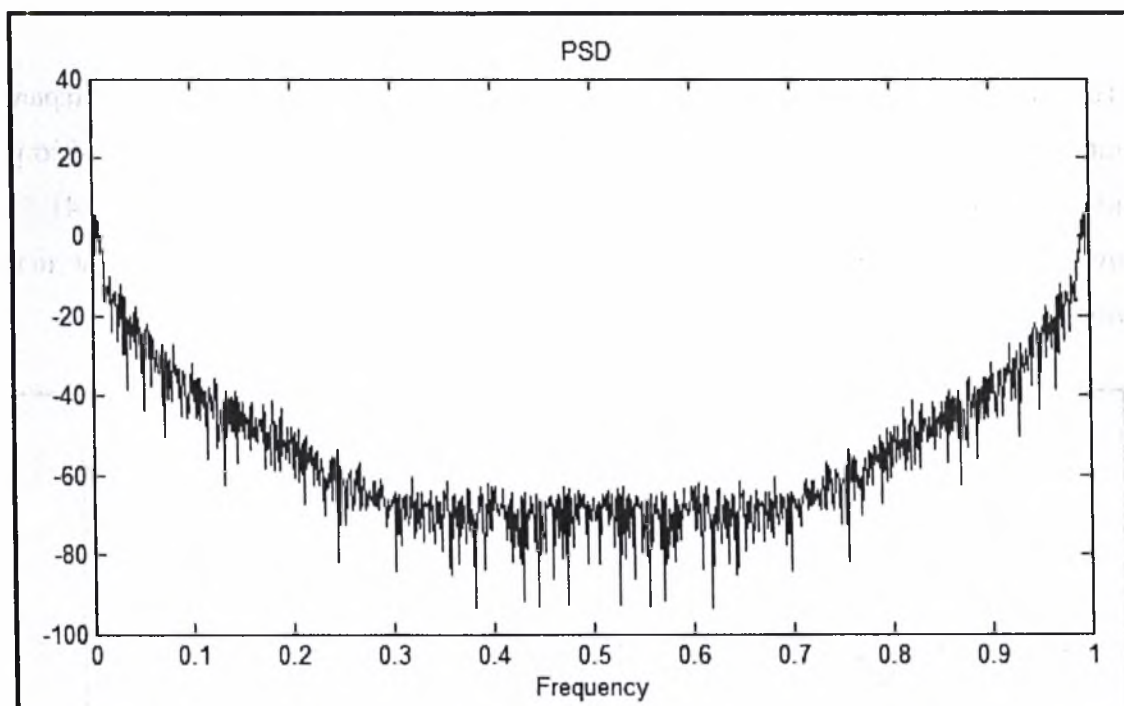
Σχήμα 6.1.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency
Σημείο μετάβασης: 386/8000
Corner Frequency = 0.193mm

Fractal Dimension
Slope = 1.111
1.111 = 4-2D ⇒
-2.889 = -2D ⇒
Fractal Dimension, D = 1.445

Στο παρακάτω Σχήμα 6.1.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.1.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

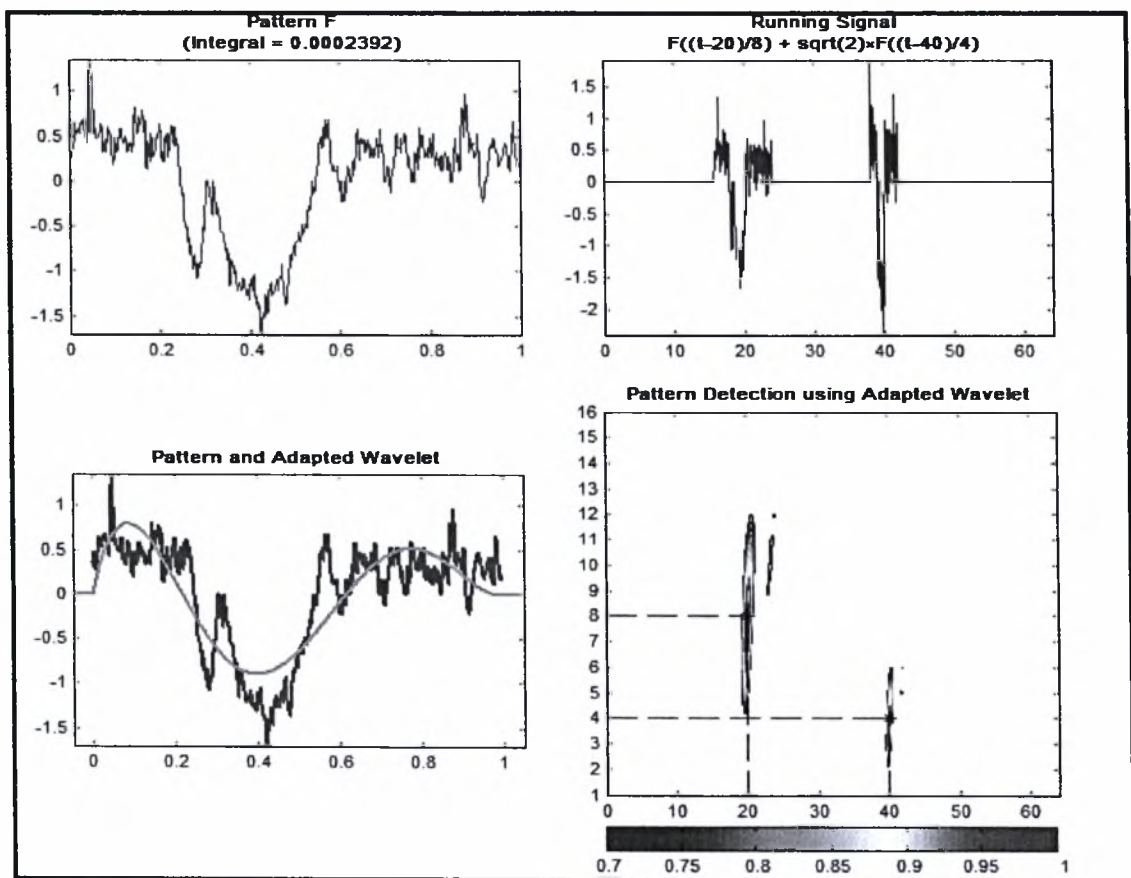
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 1.294$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.273, 1.294)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.1.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολύωνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

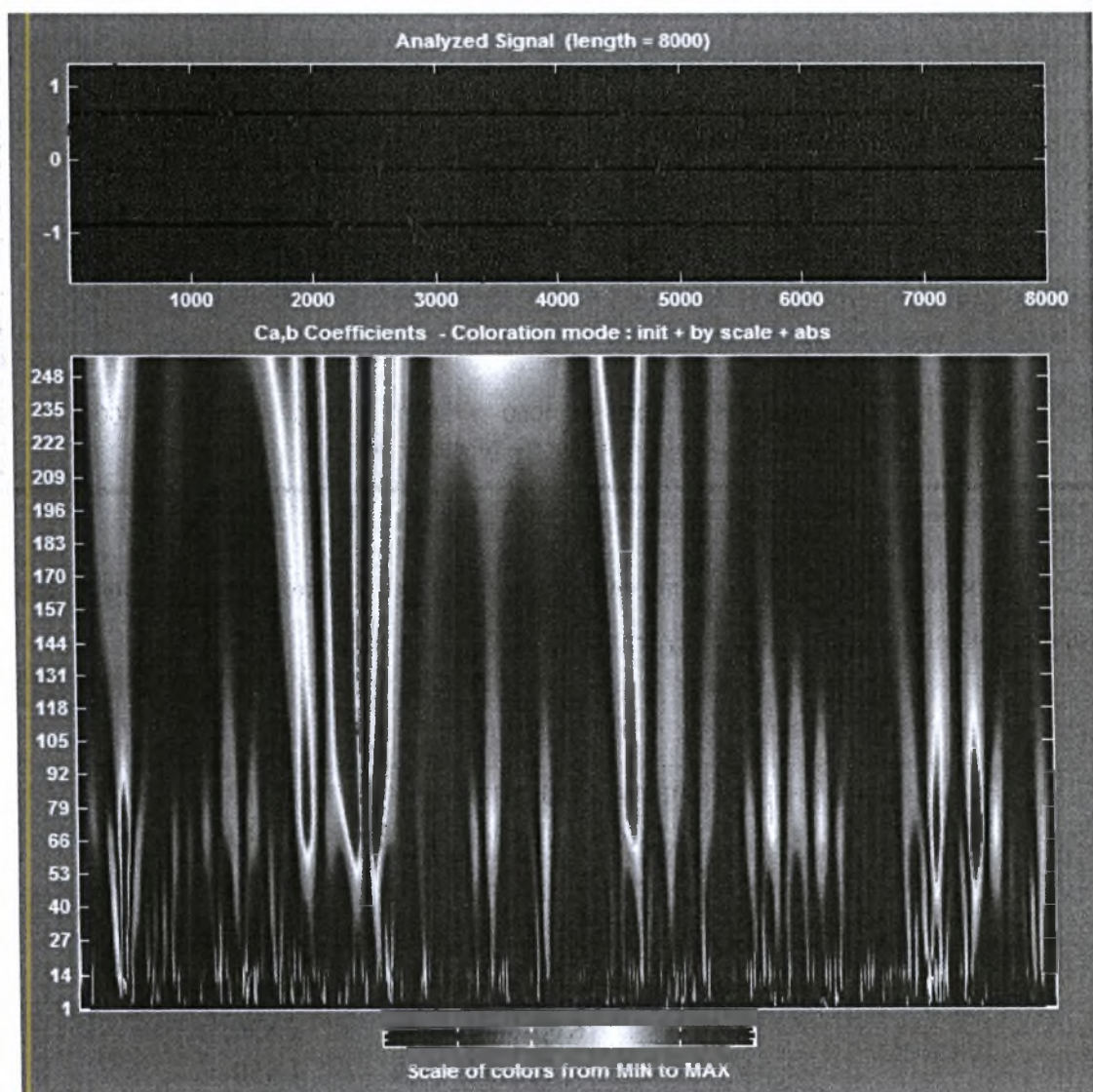
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.1.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

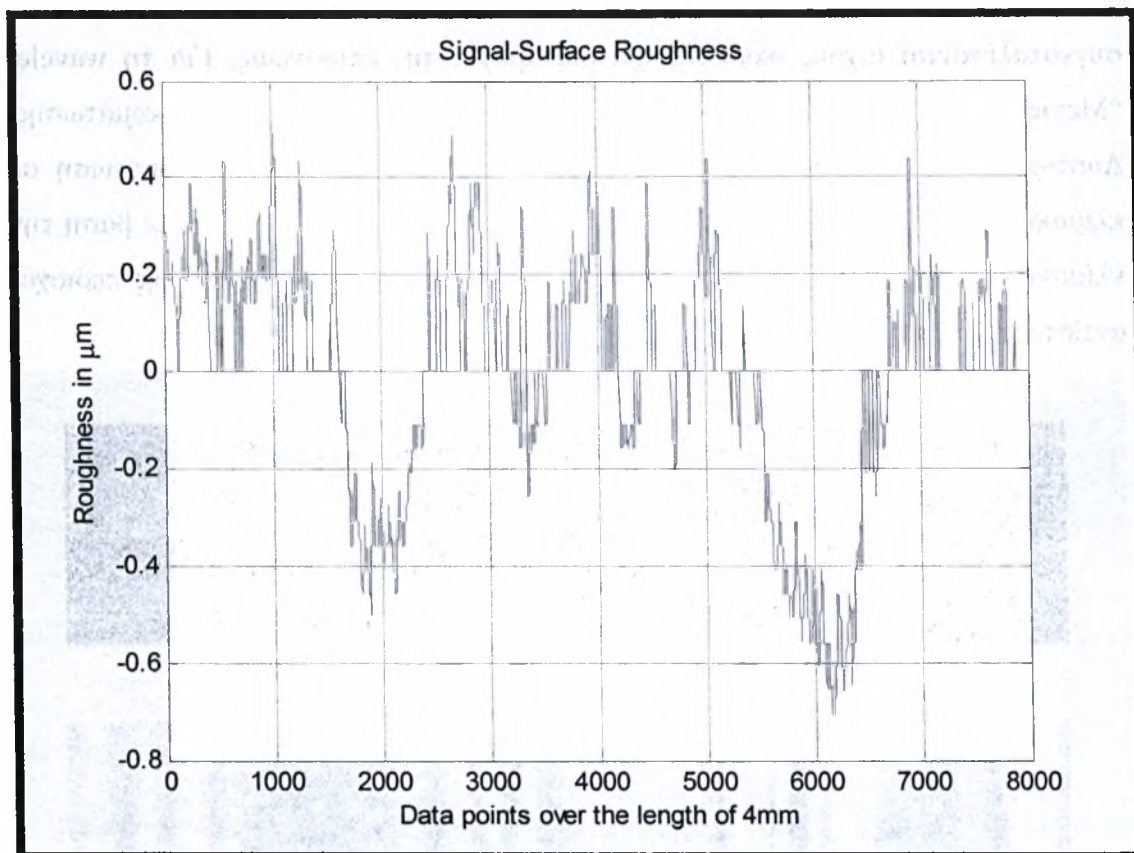
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.1.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.1.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **2^η Περίπτωση - Feed Rate 0.040mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.2.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



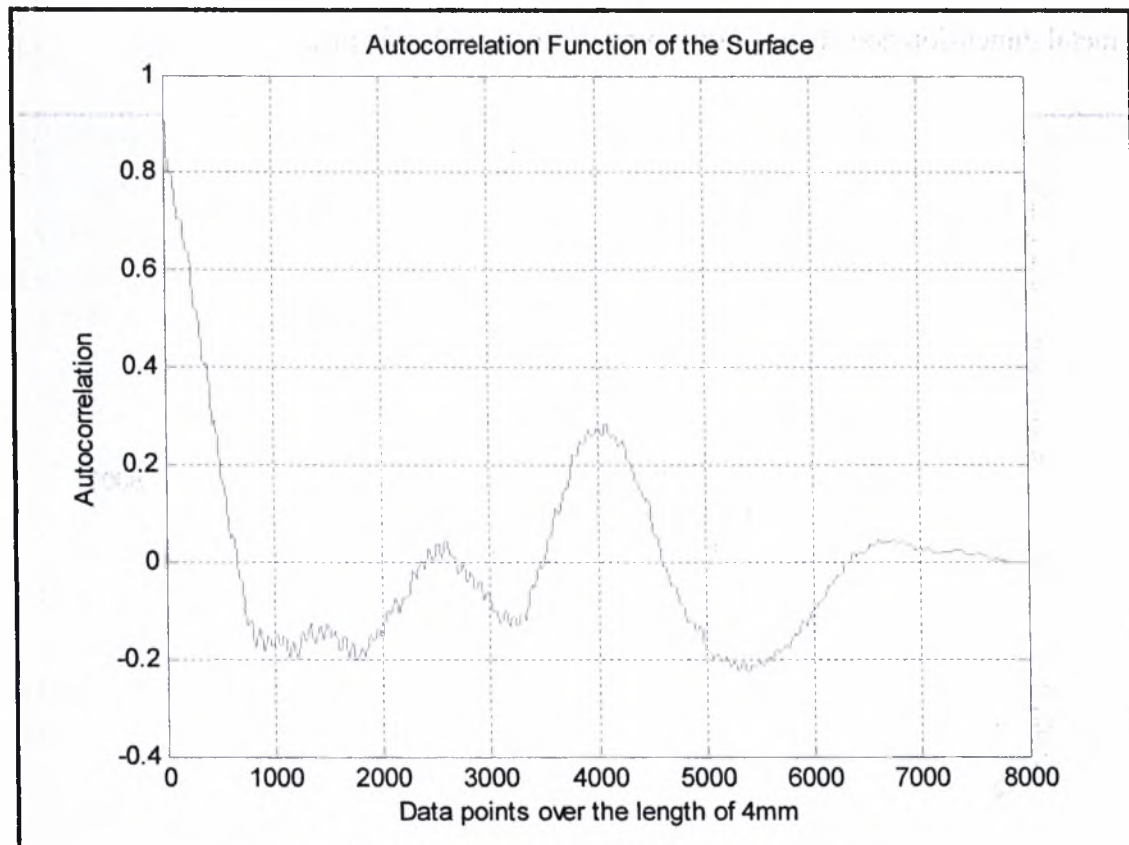
Σχήμα 6.2.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.2.1.

Πίνακας 6.2: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TaluProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.070	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	7.240	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	3.730	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.071	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.462	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.830	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.430	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.550	
Παράμετρος,	R_k	=	4.260	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.2.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

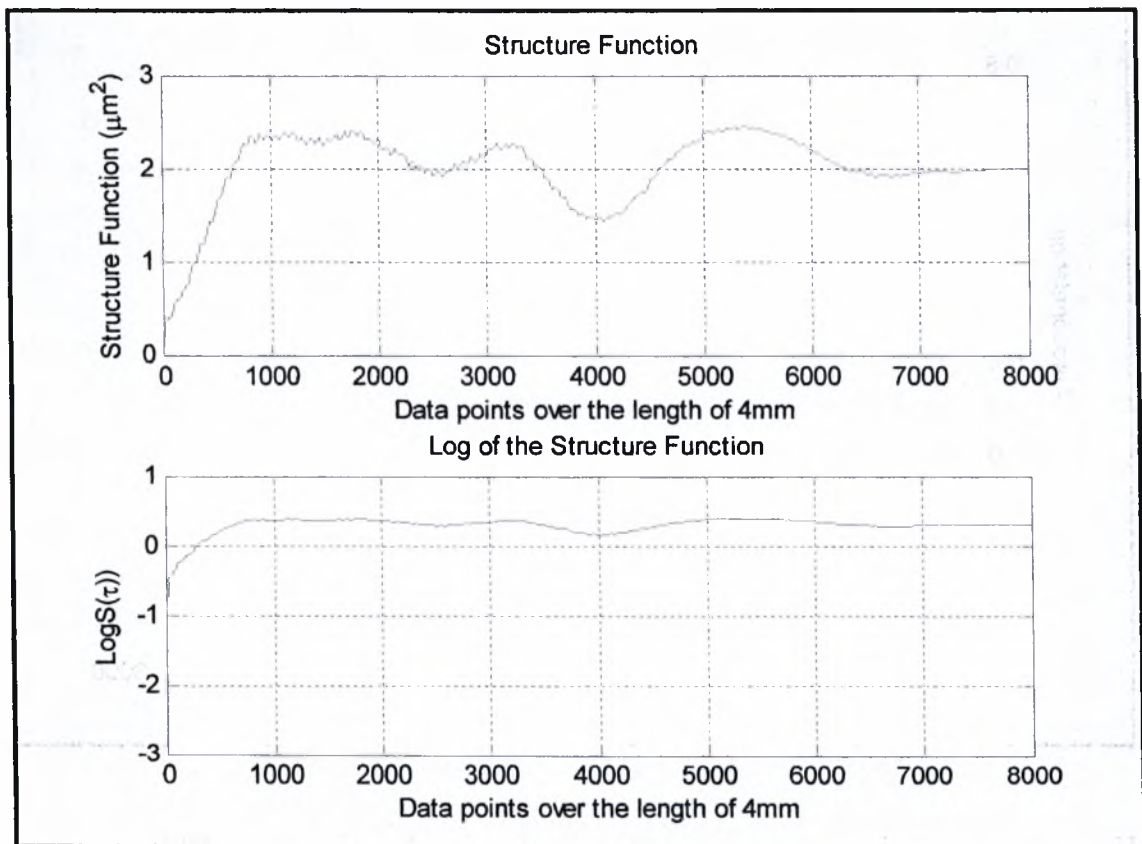


Σχήμα 6.2.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
688/8000	0.344sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
570/8000	0.2850sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.2.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



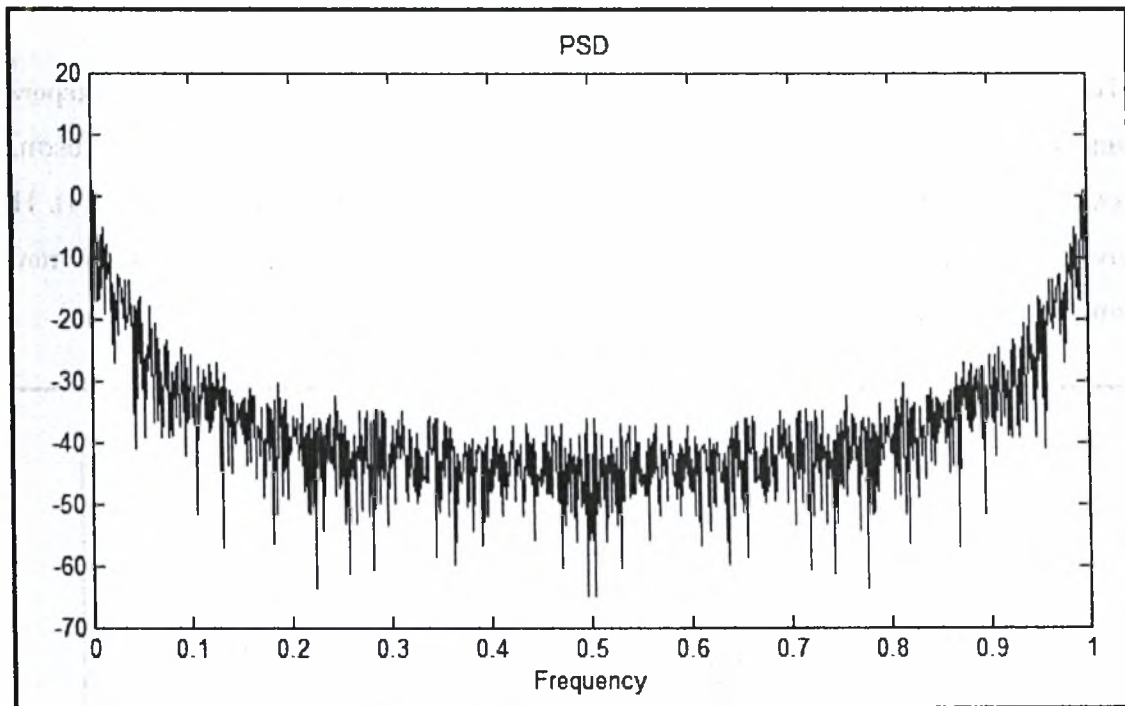
Σχήμα 6.2.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
364/8000	
Corner Frequency	= 0.182mm

Fractal Dimension	
Slope = 0.914	
0.914	= 4-2D ⇒
-3.086	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.543

Στο παρακάτω Σχήμα 6.2.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.2.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

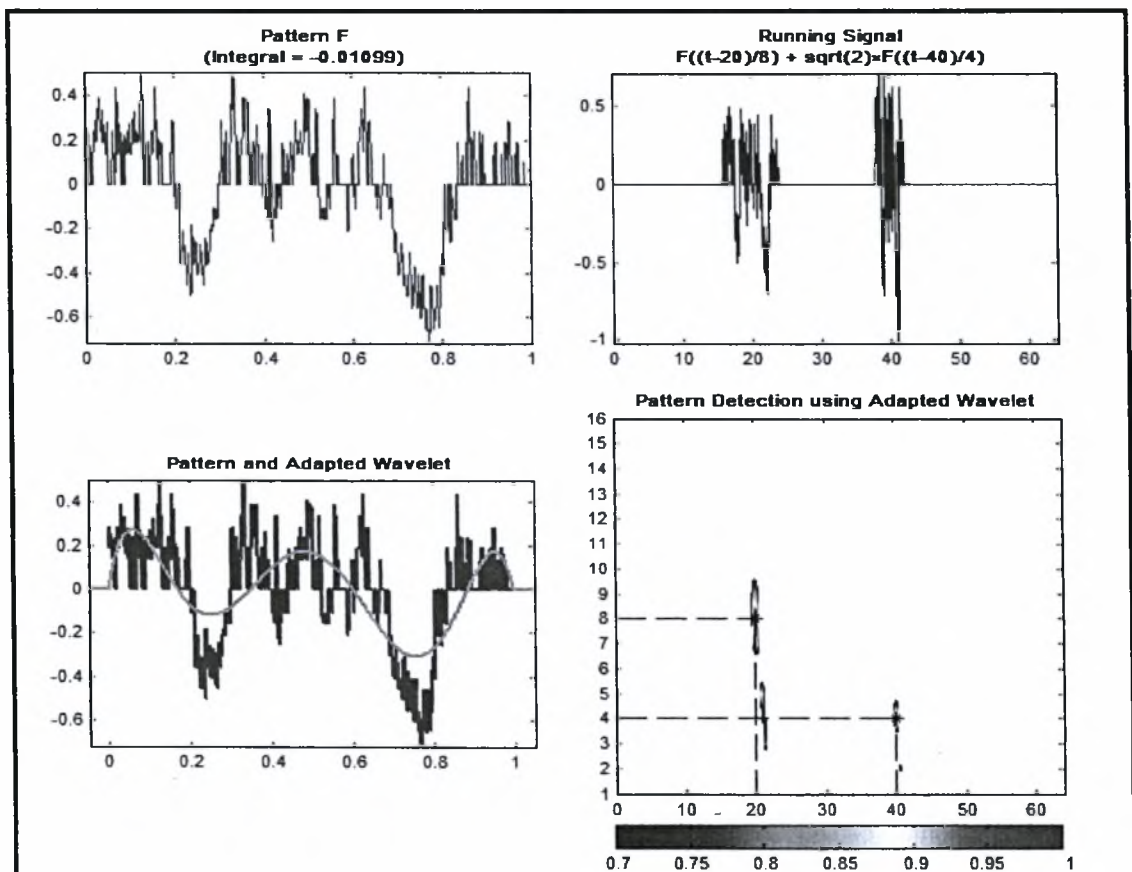
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.324$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.314, 1.334)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.2.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

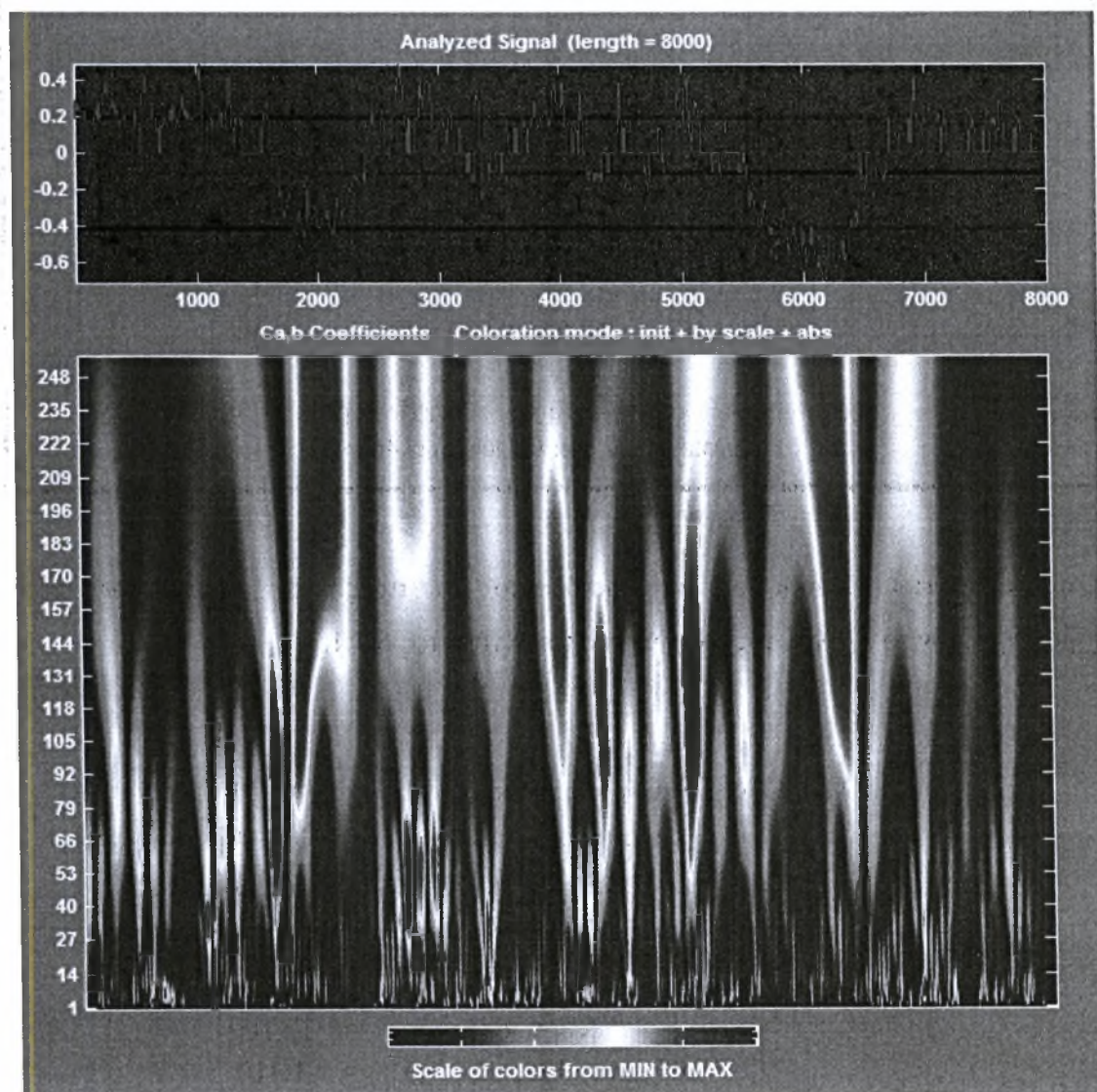
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.2.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

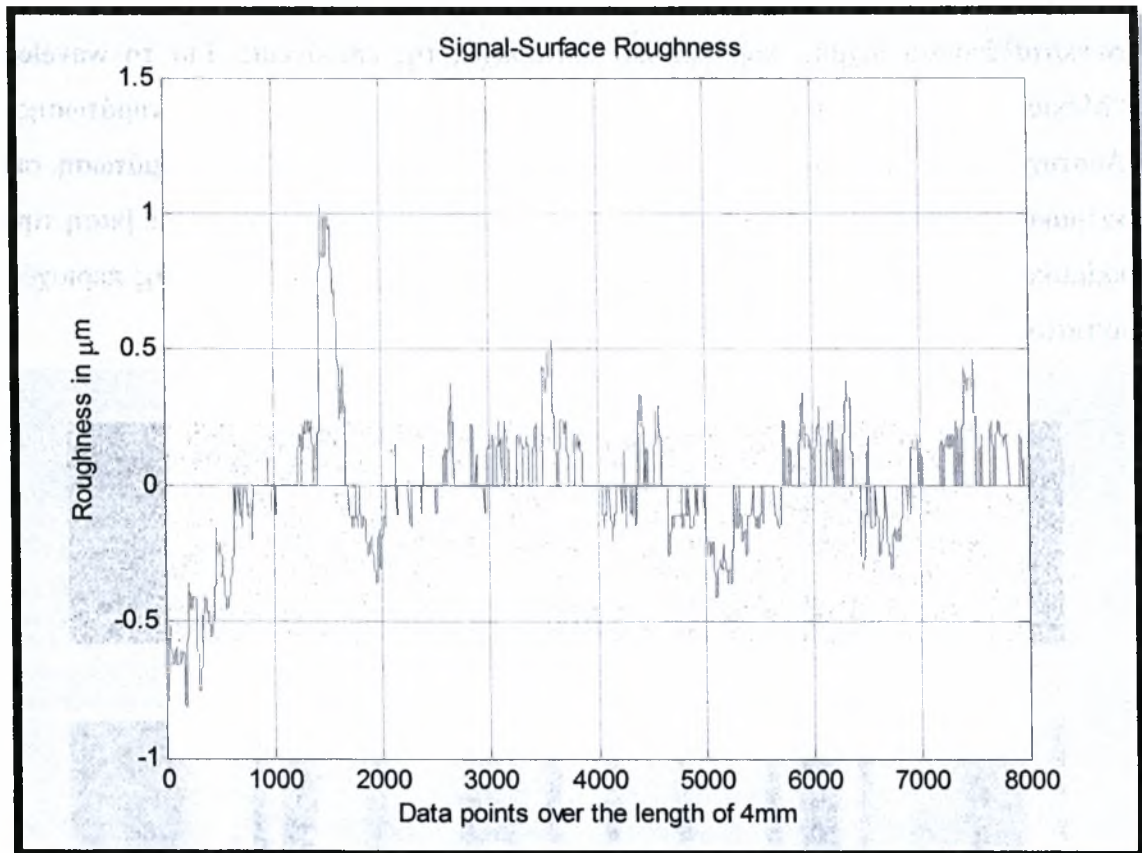
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.2.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.2.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ 3^η Περίπτωση - Feed Rate 0.045mm/στρ.

Στο παρακάτω Σχήμα 6.3.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



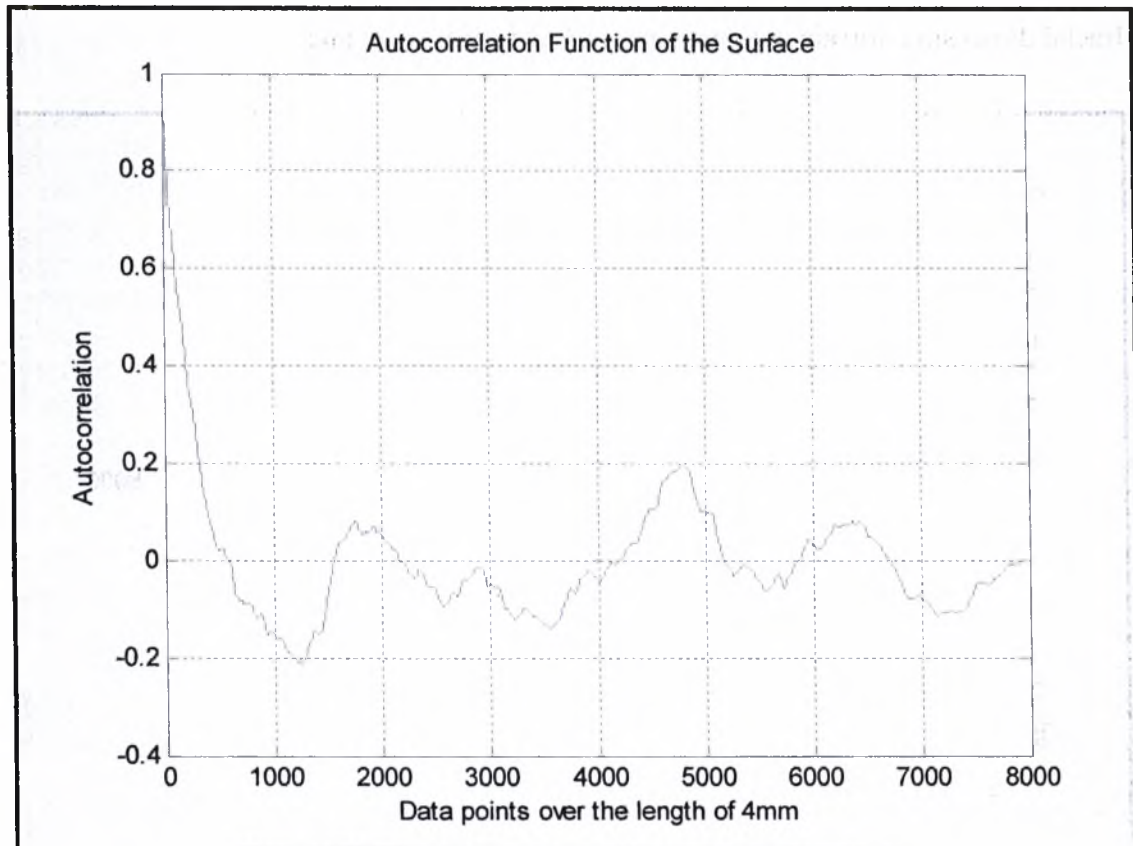
Σχήμα 6.3.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.3.1.

Πίνακας 6.3: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.120	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	11.800	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	5.150	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.070	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	2.390	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	12.100	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.410	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.710	
Παράμετρος,	R_k	=	2.740	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.3.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

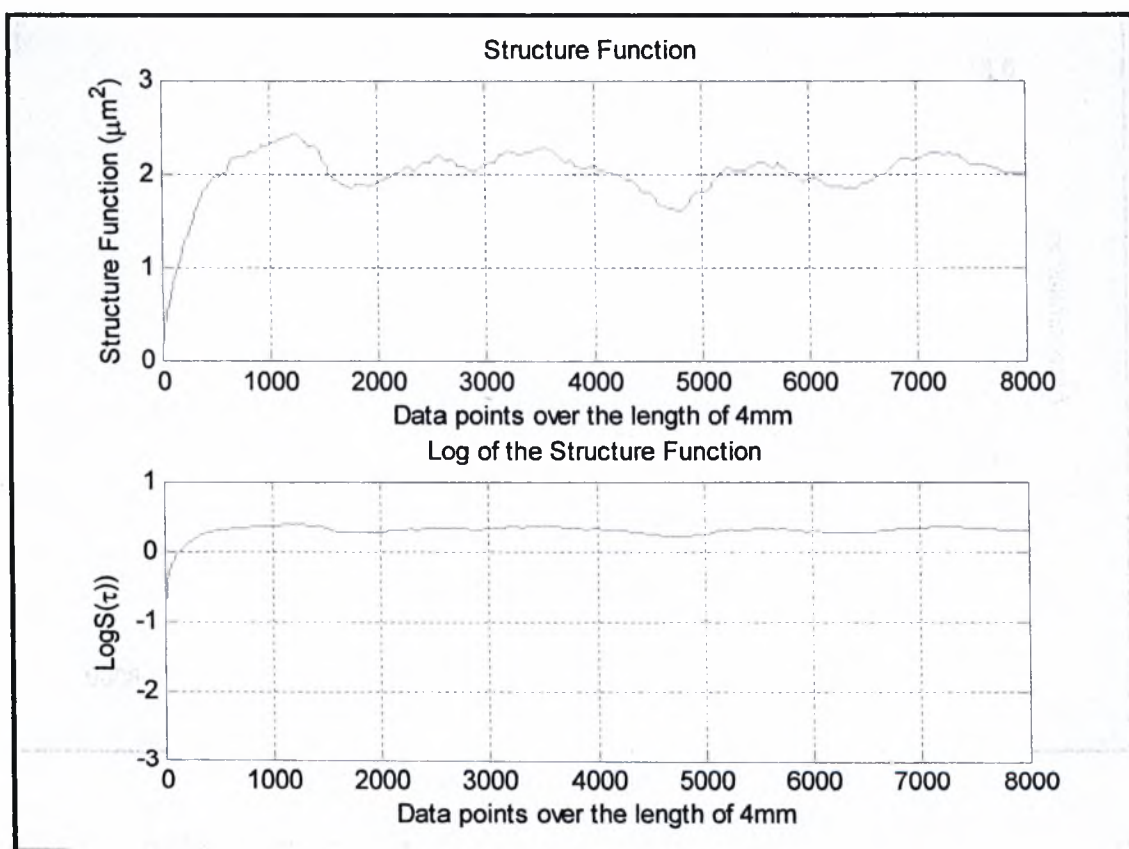


Σχήμα 6.3.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
470/8000	0.235sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
390/8000	0.195sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.3.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



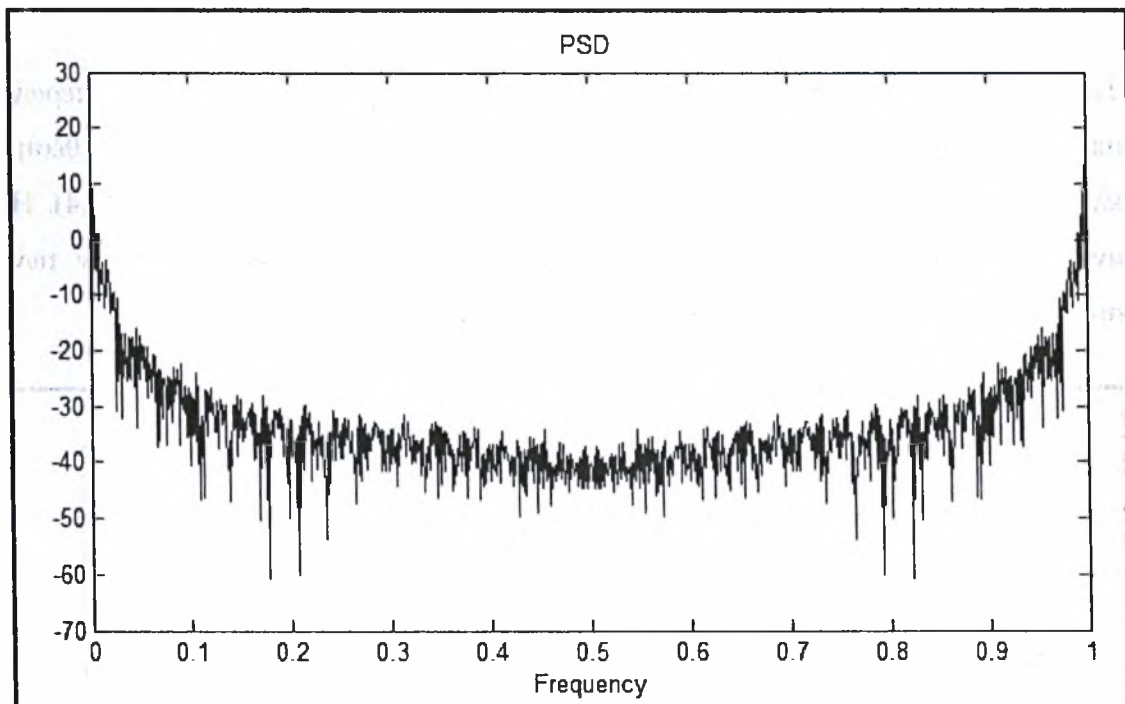
Σχήμα 6.3.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
<u>Σημείο μετάβασης:</u>	
474/8000	
Corner Frequency	= 0.237mm

Fractal Dimension	
<u>Slope = 0.816</u>	
0.816	= 4-2D ⇒
-3.184	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.592

Στο παρακάτω Σχήμα 6.3.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.3.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

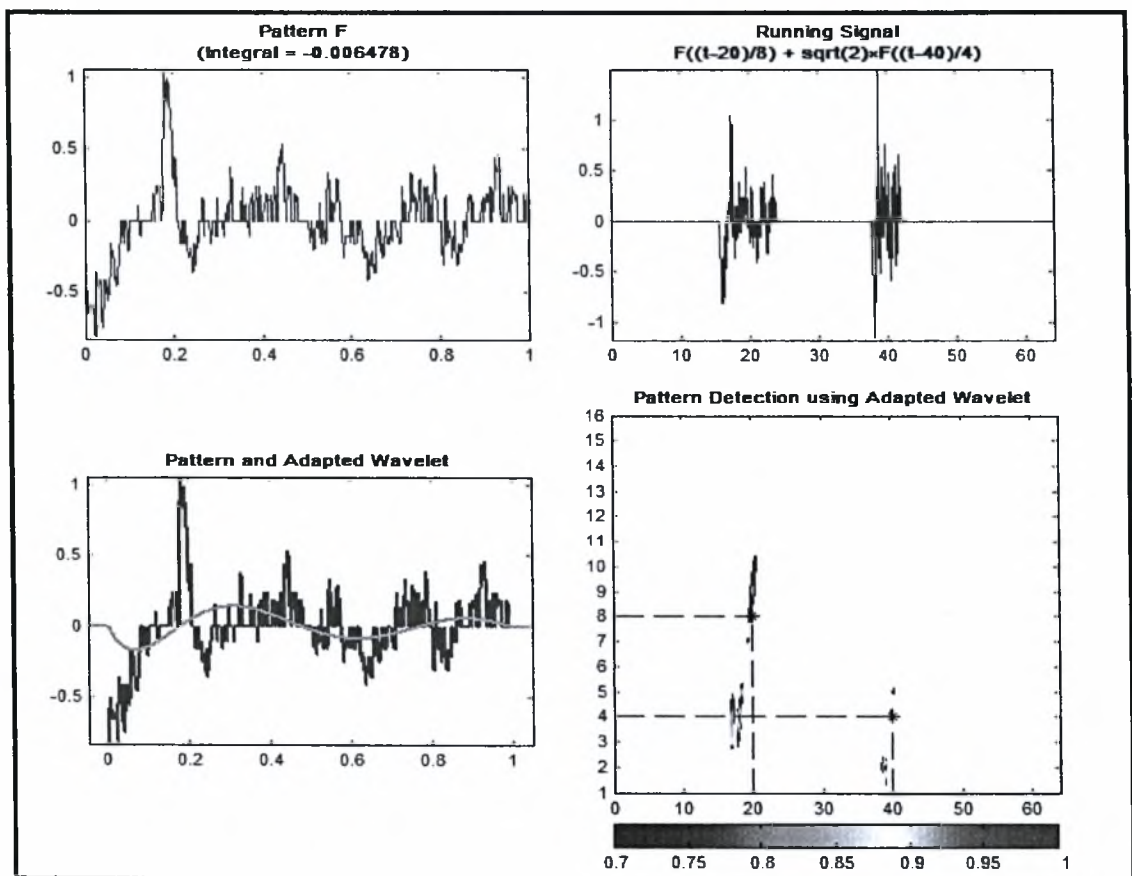
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.347$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.337, 1.357)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.3.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

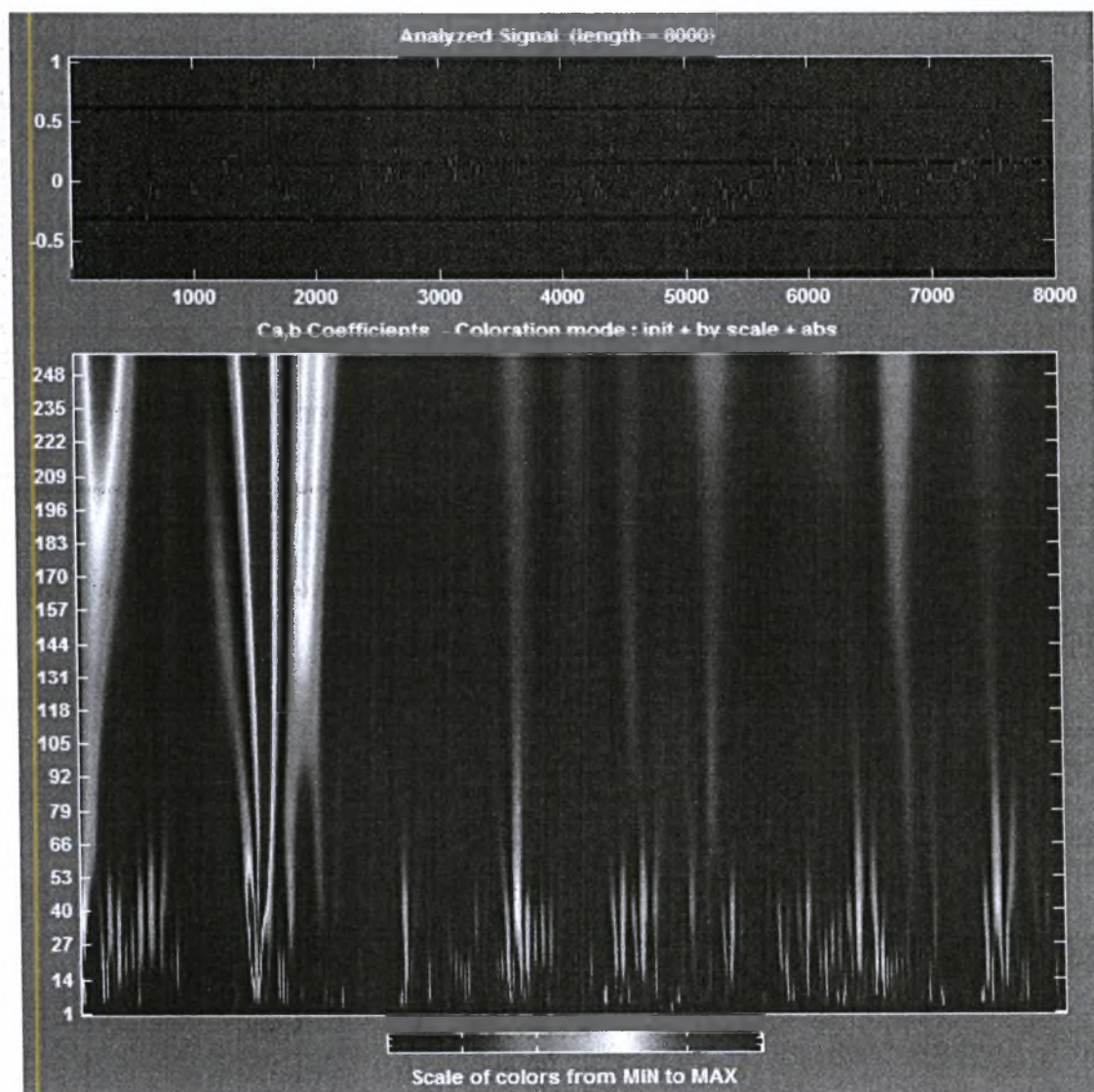
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.3.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

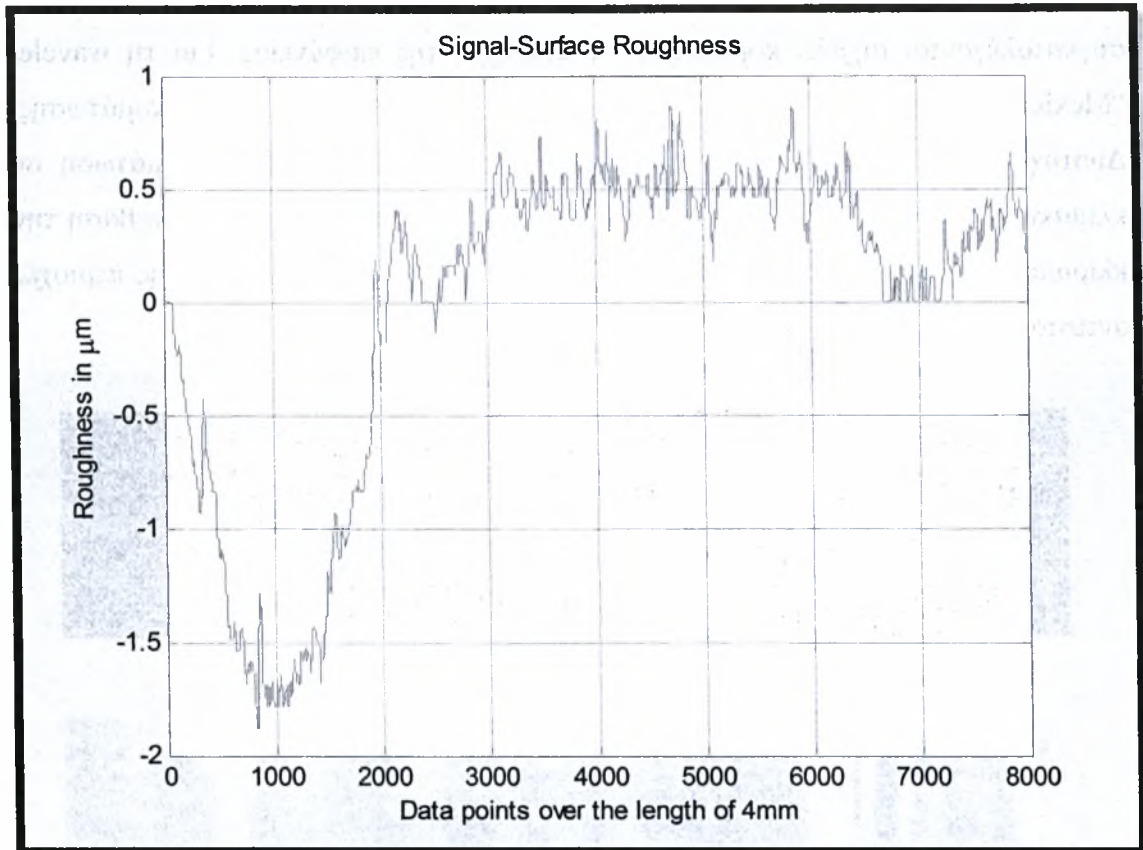
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.3.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.3.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **4^η Περίπτωση - Feed Rate 0.050mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.4.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



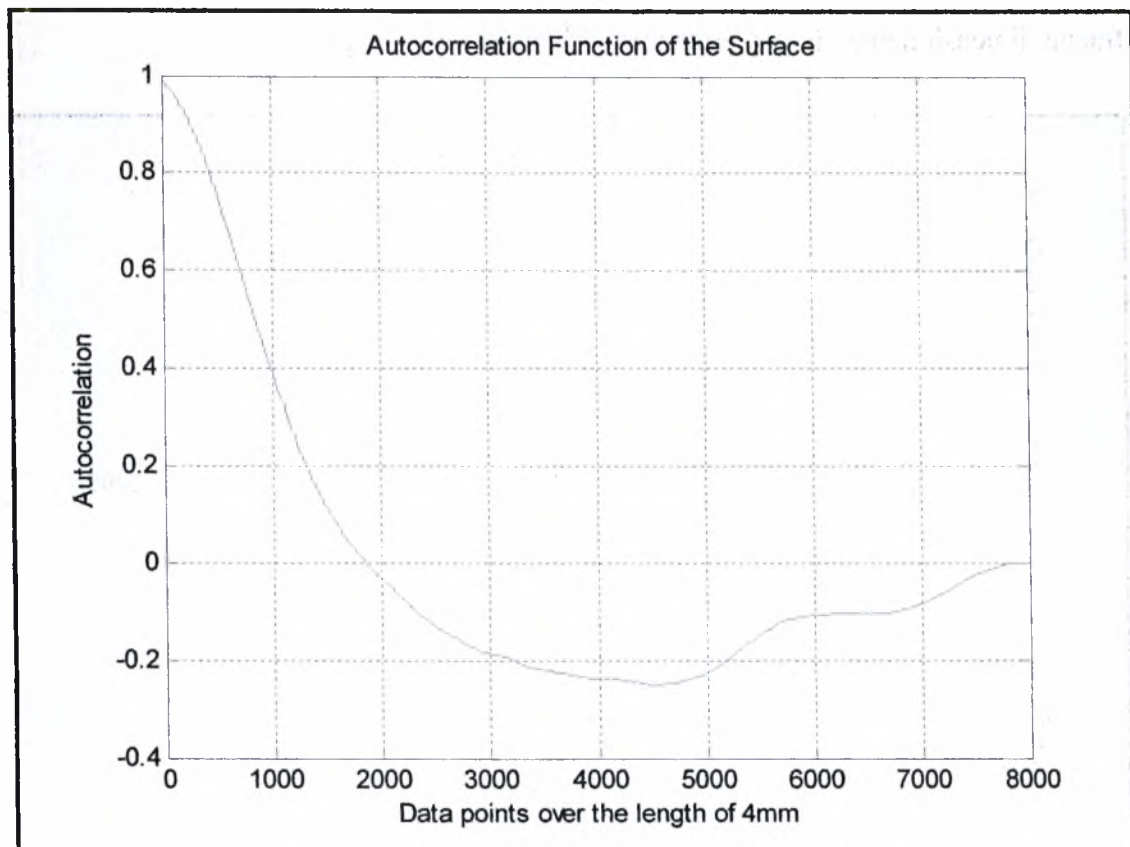
Σχήμα 6.4.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.4.1.

Πίνακας 6.4: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.090	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	9.800	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	3.930	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.113	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.893	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	5.980	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.370	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	2.470	
Παράμετρος,	R_k	=	2.770	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.4.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

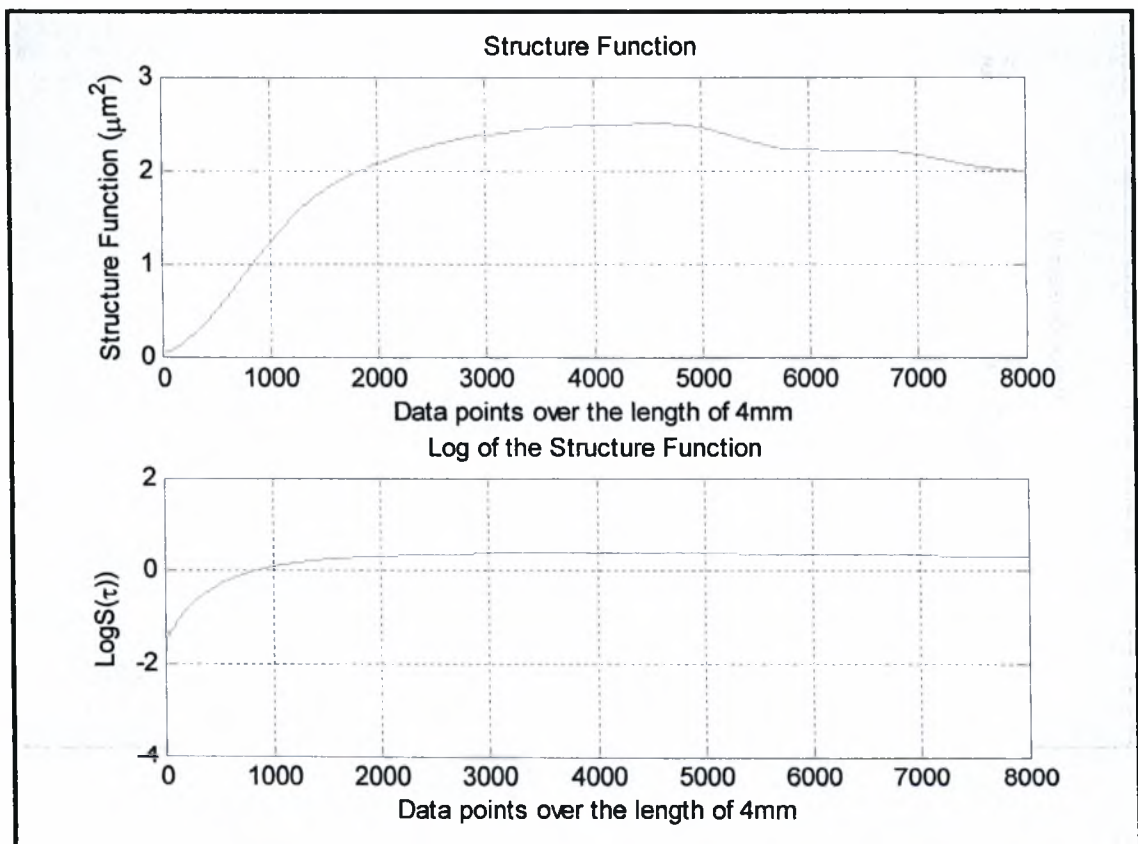


Σχήμα 6.4.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalynProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalynProfile)
1430/8000	0.715sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
1534/8000	0.767sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.4.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



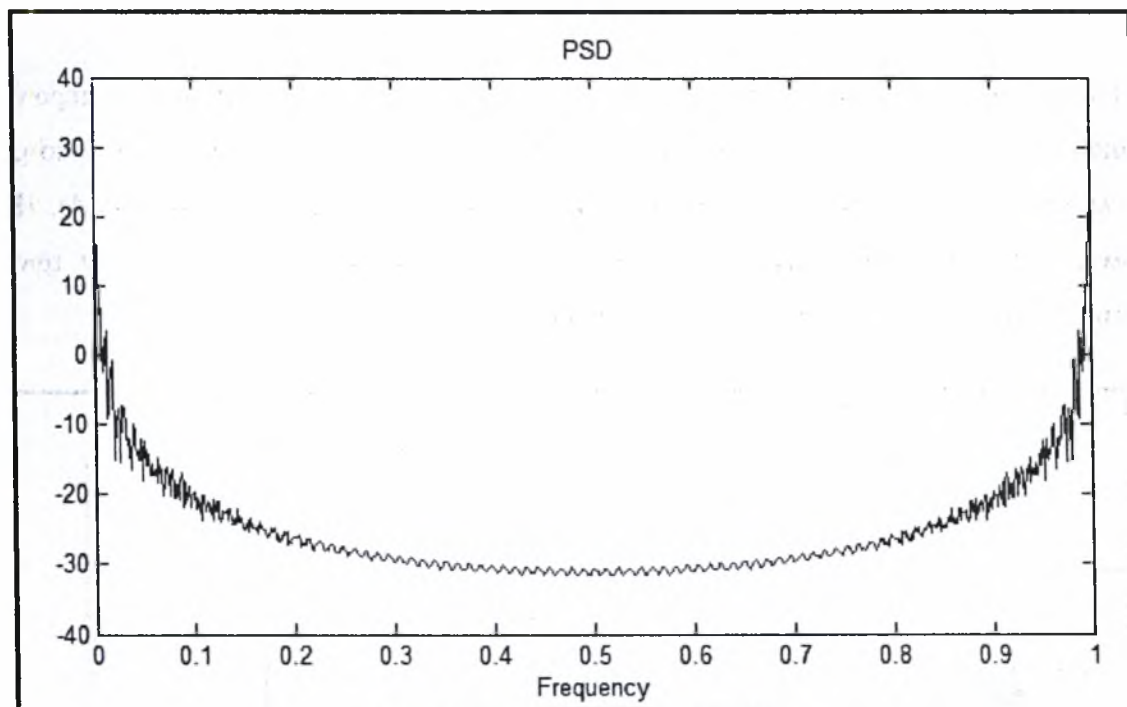
Σχήμα 6.4.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency
Σημείο μετάβασης: 368/8000
Corner Frequency = 0.184mm

Fractal Dimension
Slope = 1.116
1.116 = 4-2D ⇒
-2.884 = -2D ⇒
Fractal Dimension, D = 1.442

Στο παρακάτω Σχήμα 6.4.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.4.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

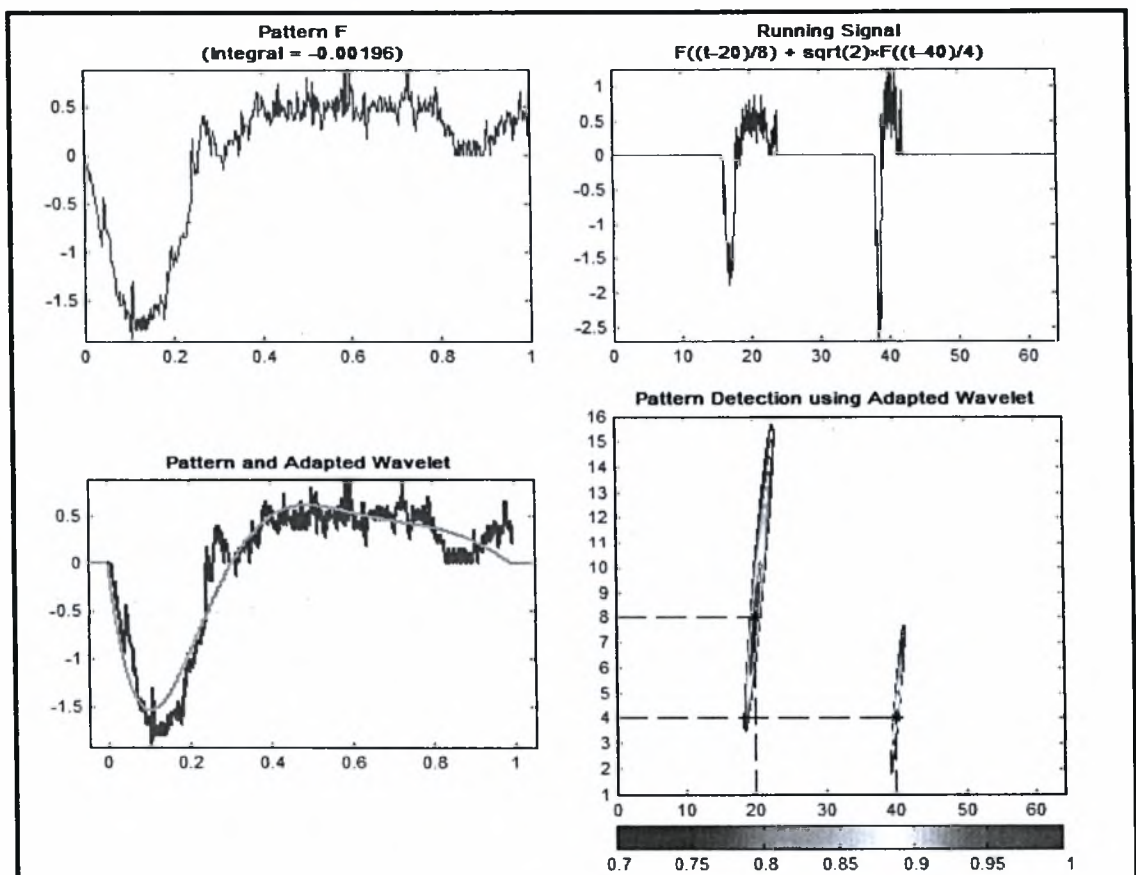
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.364$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.354, 1.374)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.4.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

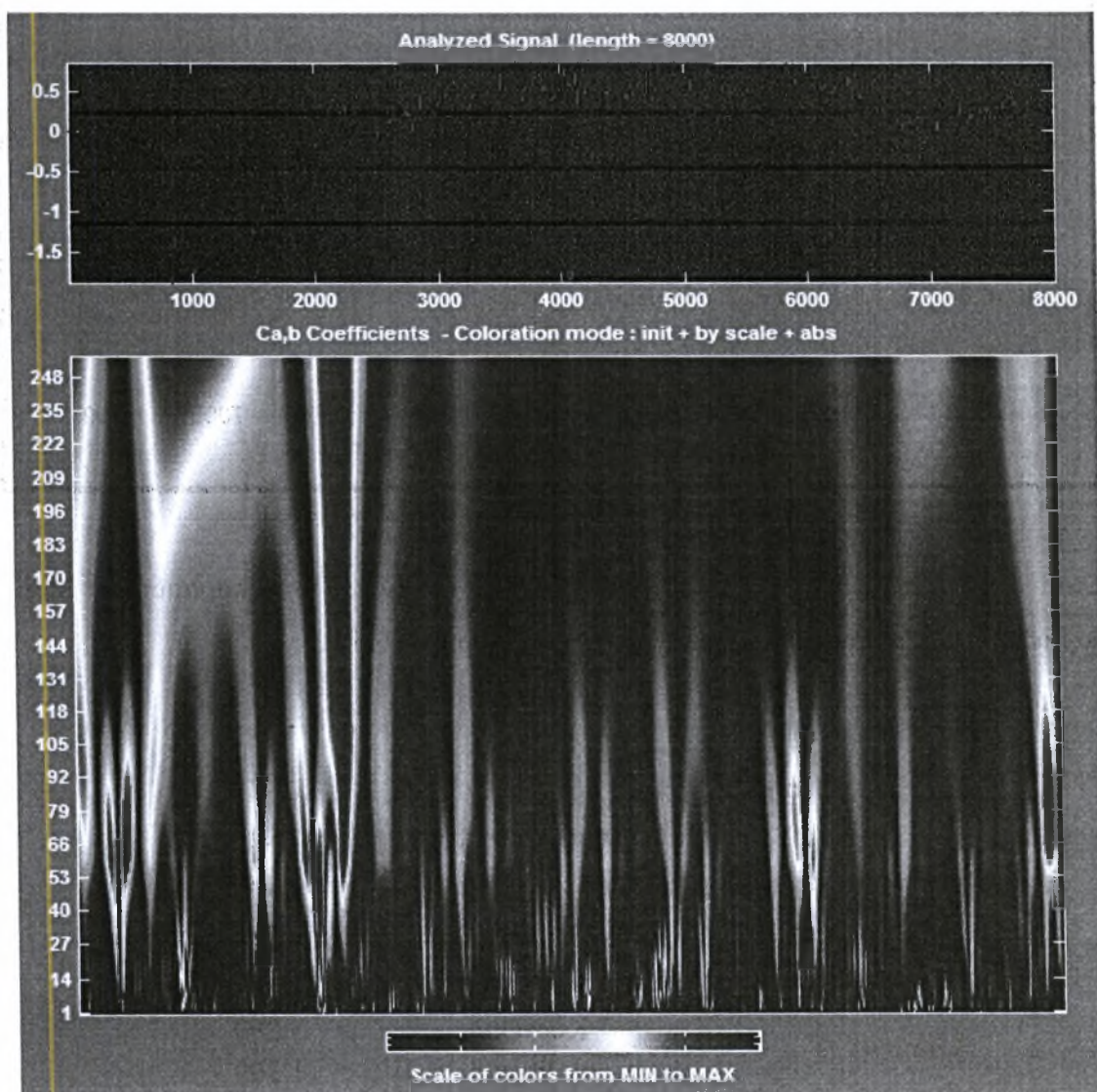
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.4.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

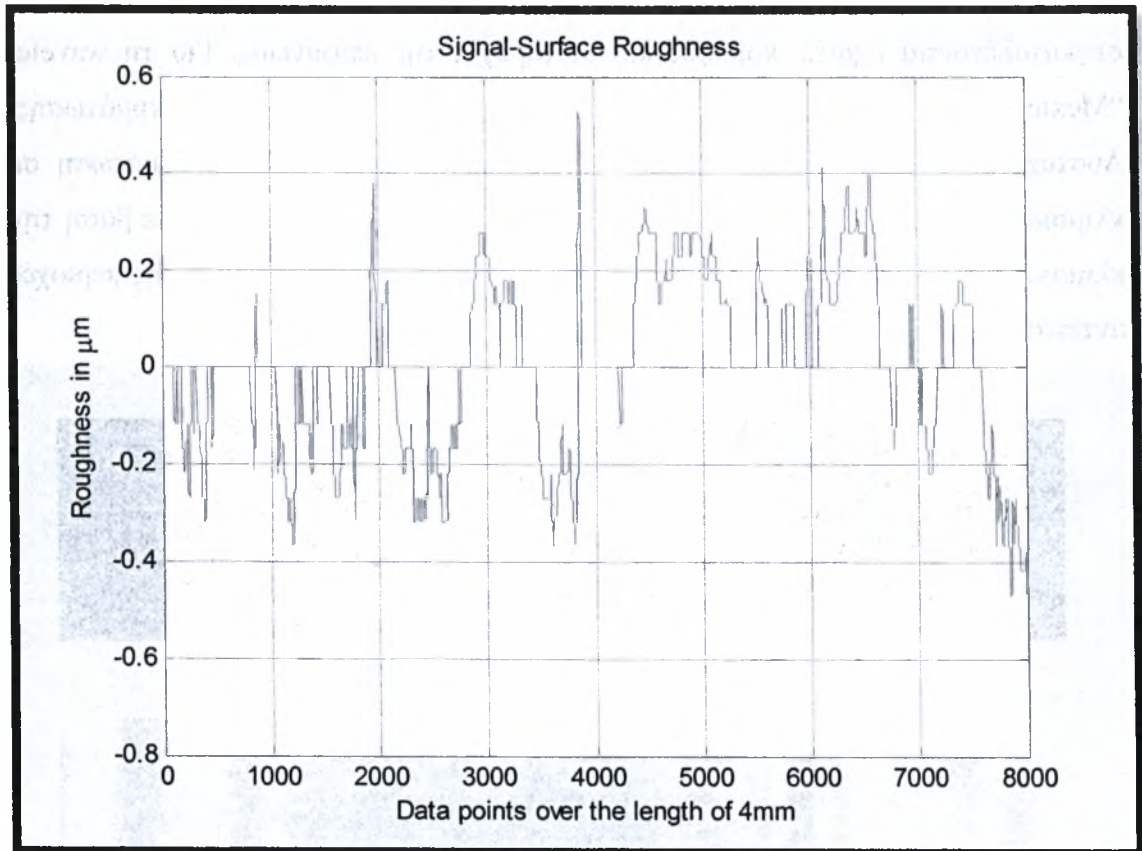
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.4.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.4.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ 5^η Περίπτωση - Feed Rate 0.060mm/στρ.

Στο παρακάτω Σχήμα 6.5.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



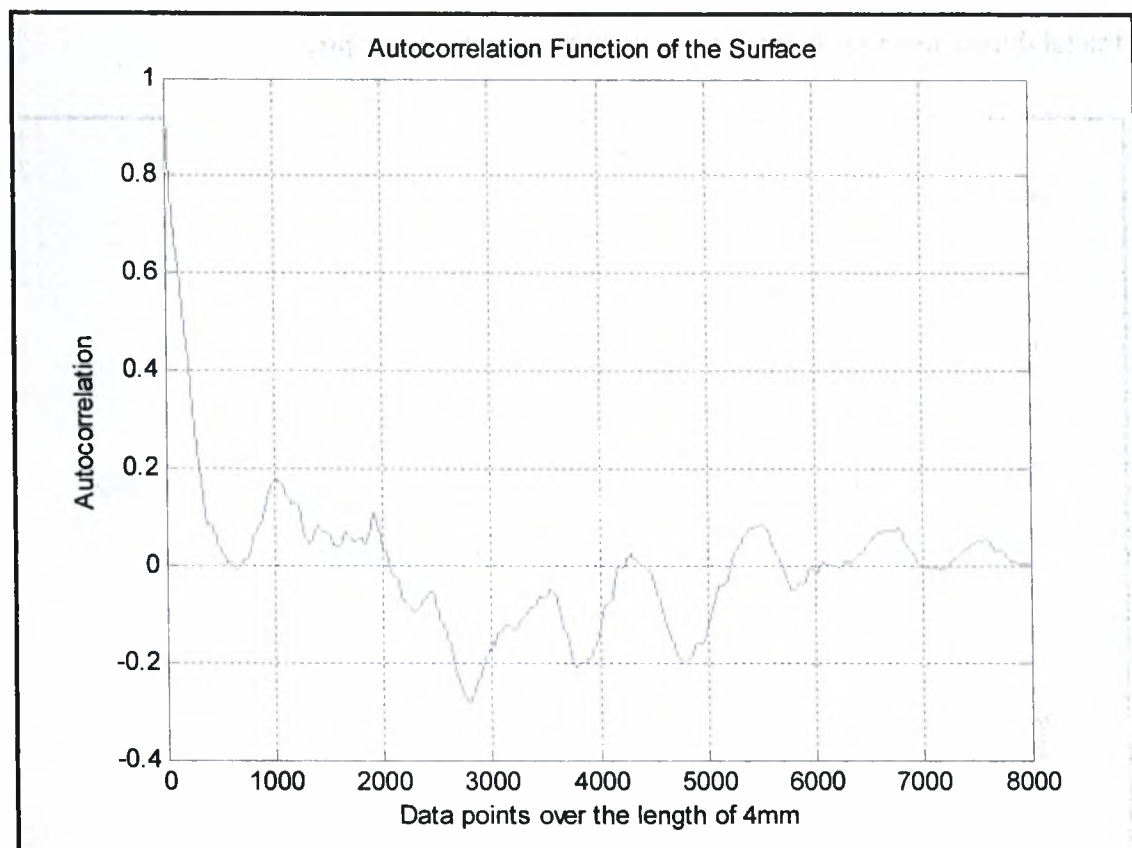
Σχήμα 6.5.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.5.1.

Πίνακας 6.5: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	$R_a = 0.954 \mu\text{m}$
Μέγιστο βάθος,	$R_t = 8.910 \mu\text{m}$
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	$R_p = 4.140 \mu\text{m}$
Παράμετρος διαστήματος,	$R_{sm} = 0.158 \text{ mm}$
Λοξότητα,	$R_{sk} = 0.576$
Κύρτωση,	$R_{ku} = 5.290$
Διάσταση Fractal,	$D = 1.300$
Παράμετρος,	$R_{pk} = 1.570$
Παράμετρος,	$R_k = 3.130$

Στο παρακάτω Σχήμα 6.5.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

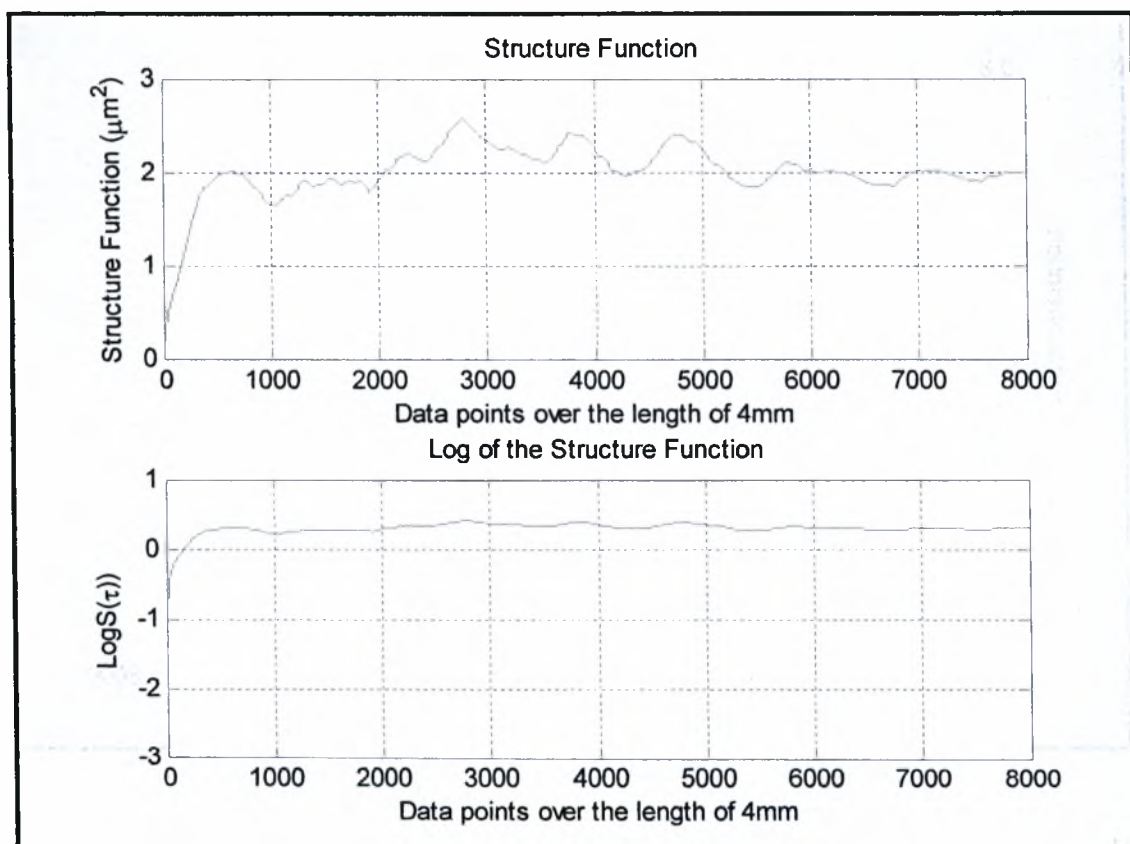


Σχήμα 6.5.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalynProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalynProfile)
719/8000	0.3595sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
367/8000	0.1835sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.5.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



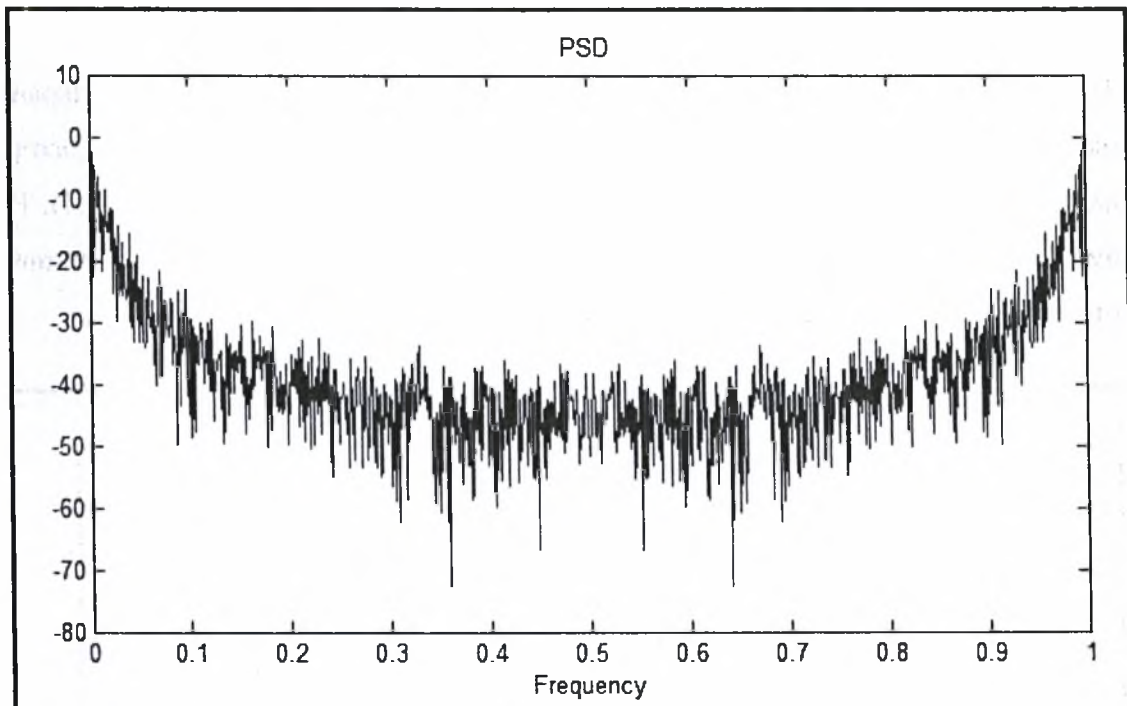
Σχήμα 6.5.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
	389/8000
Corner Frequency	= 0.1945mm

Fractal Dimension	
Slope = 1.268	
1.268	= 4-2D ⇒
-2.732	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.366

Στο παρακάτω Σχήμα 6.5.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.5.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

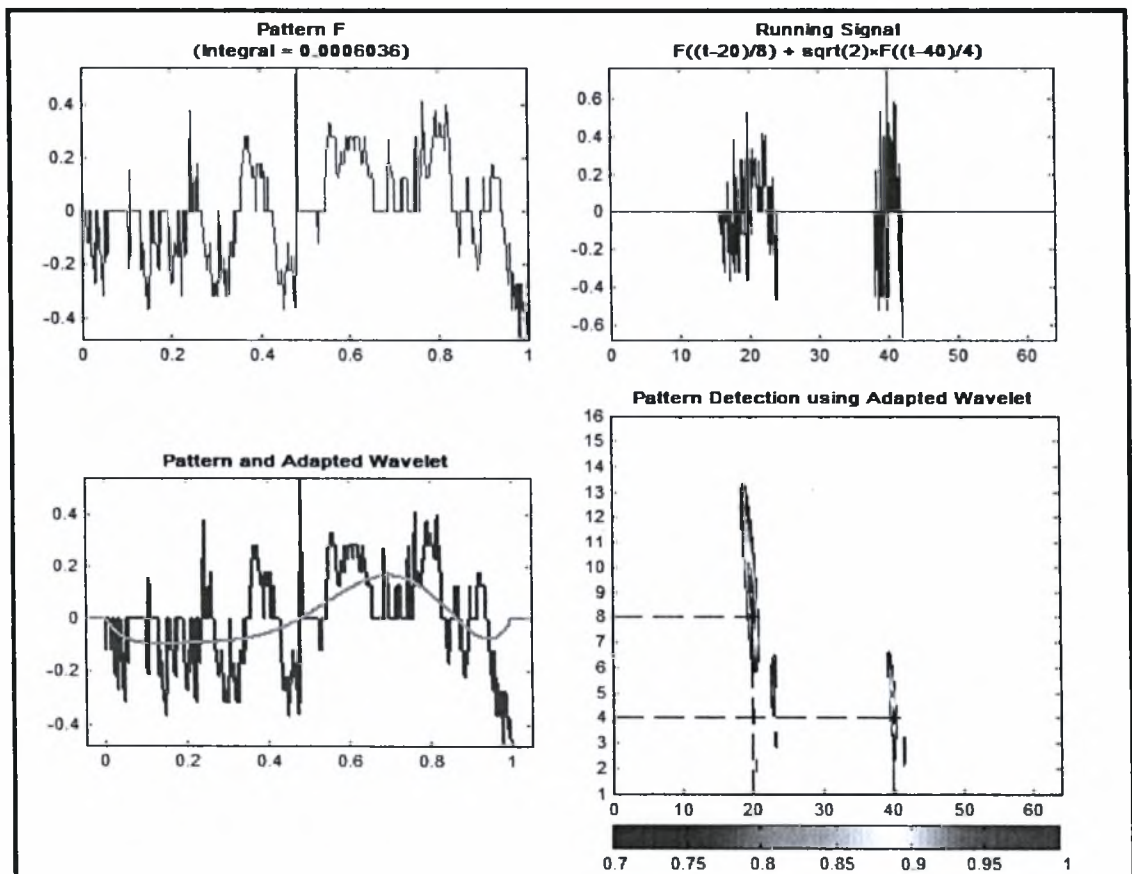
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 1.300$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.290, 1.310)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.5.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολώνυμο 6^ο βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

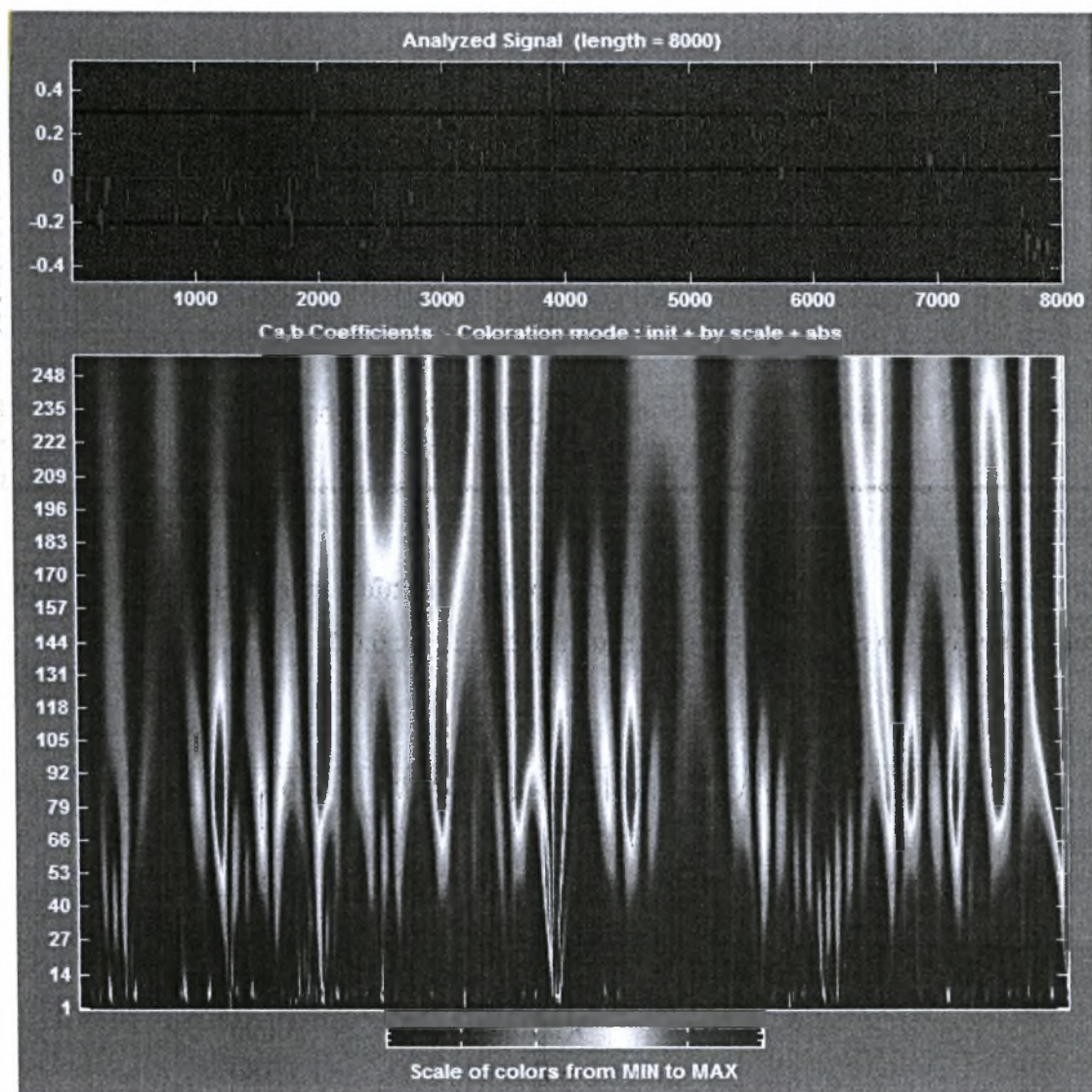
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.5.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

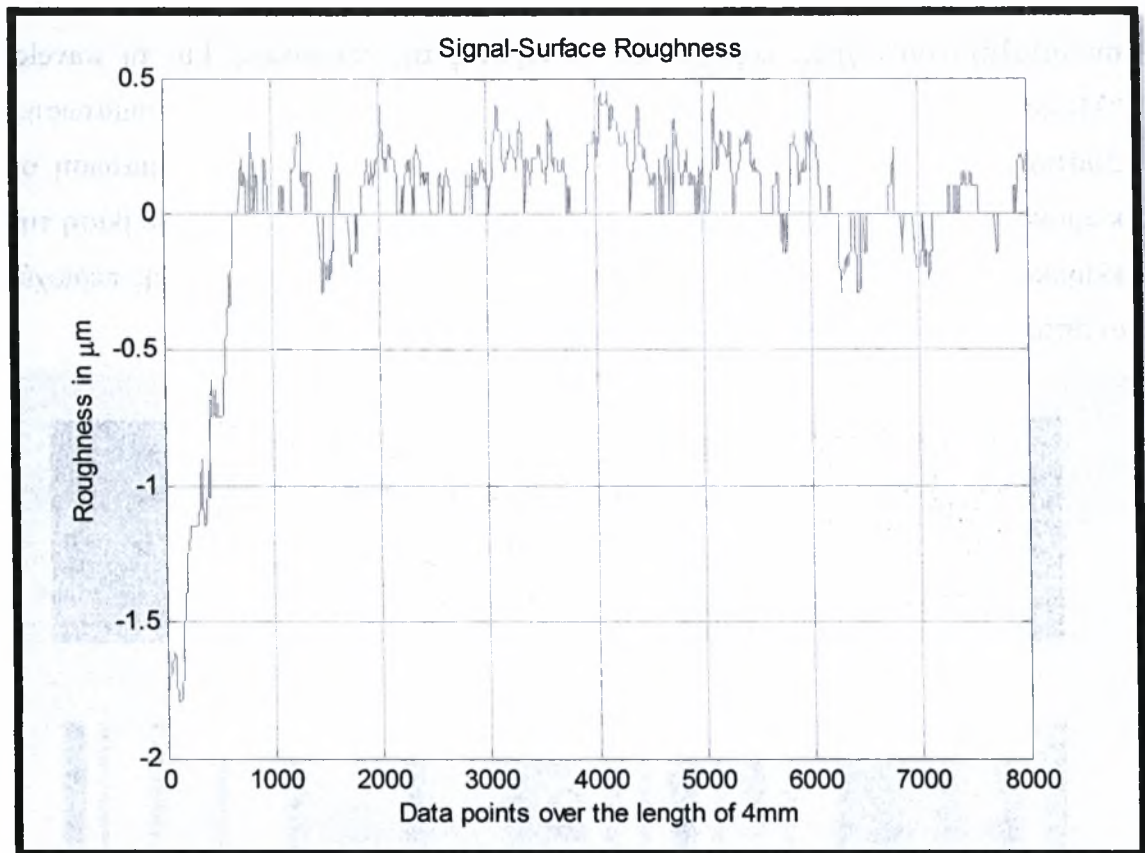
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.5.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.5.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **6^η Περίπτωση - Feed Rate 0.070mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.6.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



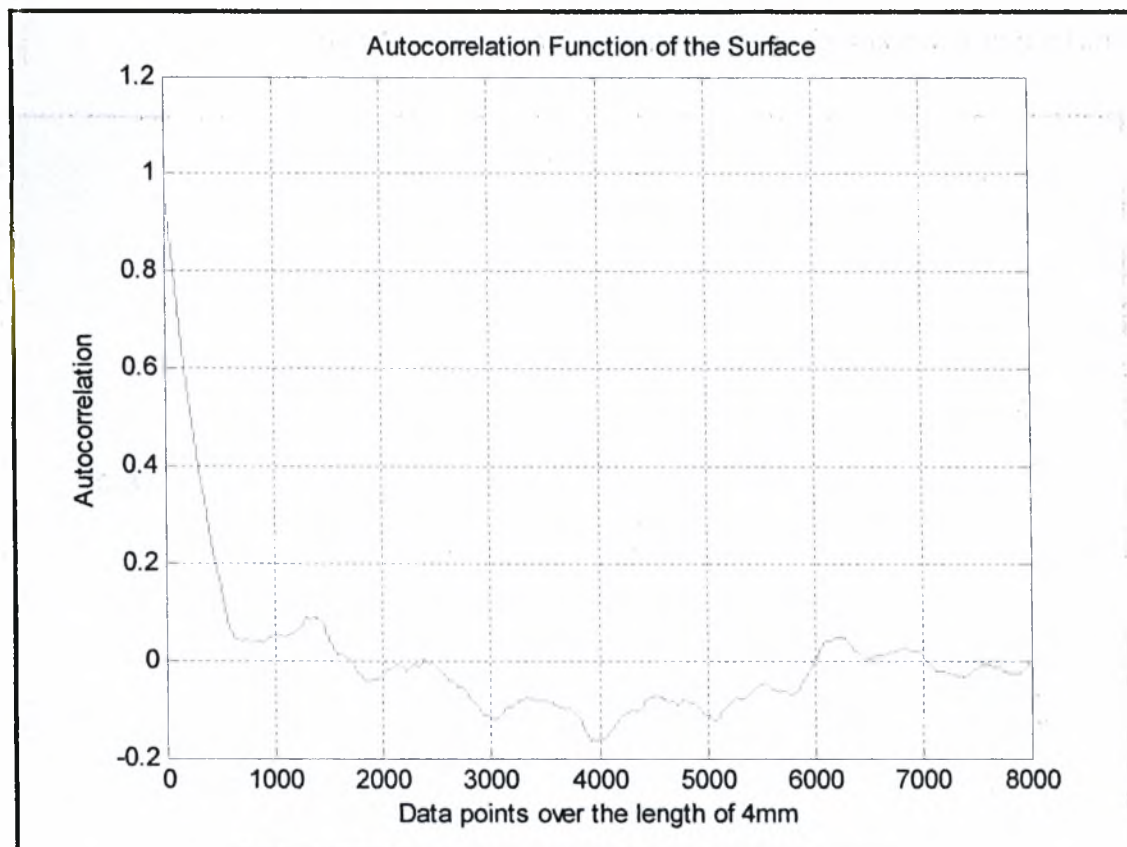
Σχήμα 6.6.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.6.1.

Πίνακας 6.6: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	0.874	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	7.710	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	3.250	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.081	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.358	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	3.690	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.380	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	0.889	
Παράμετρος,	R_k	=	2.570	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.6.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

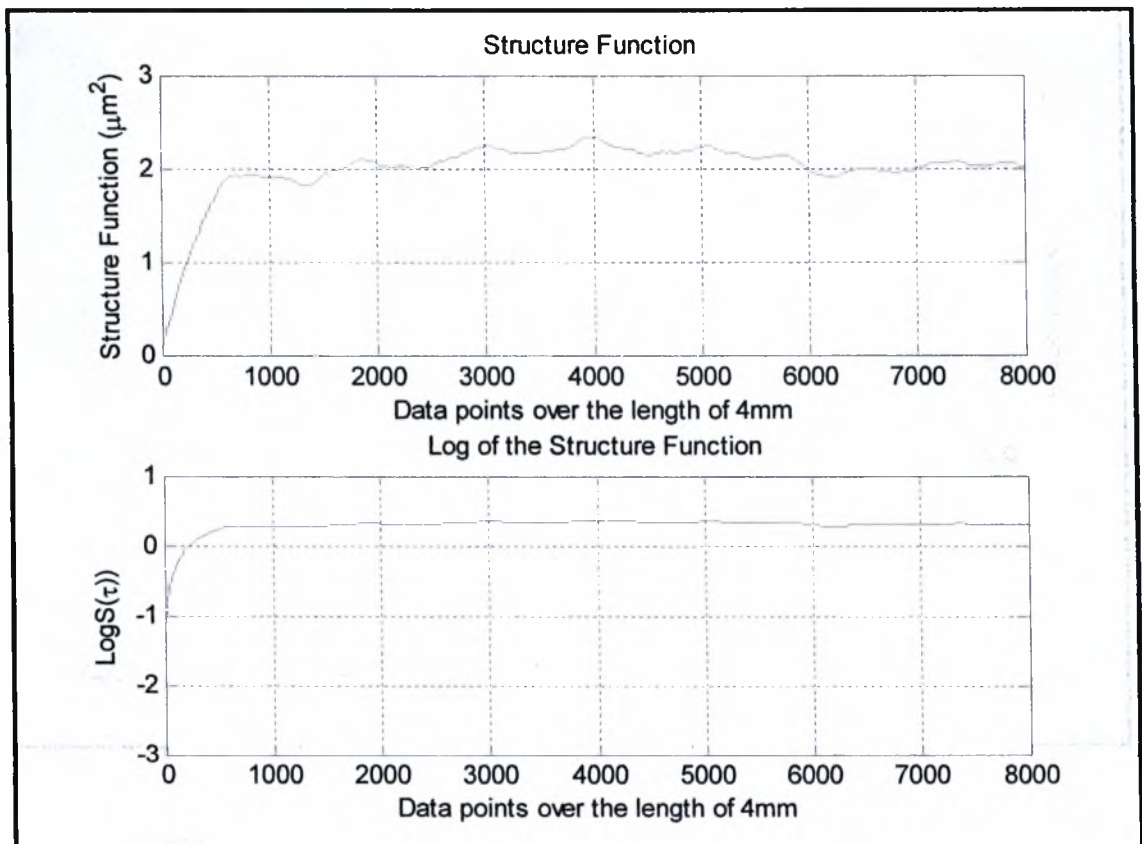


Σχήμα 6.6.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
635/8000	0.3175sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
547/8000	0.2735sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.6.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



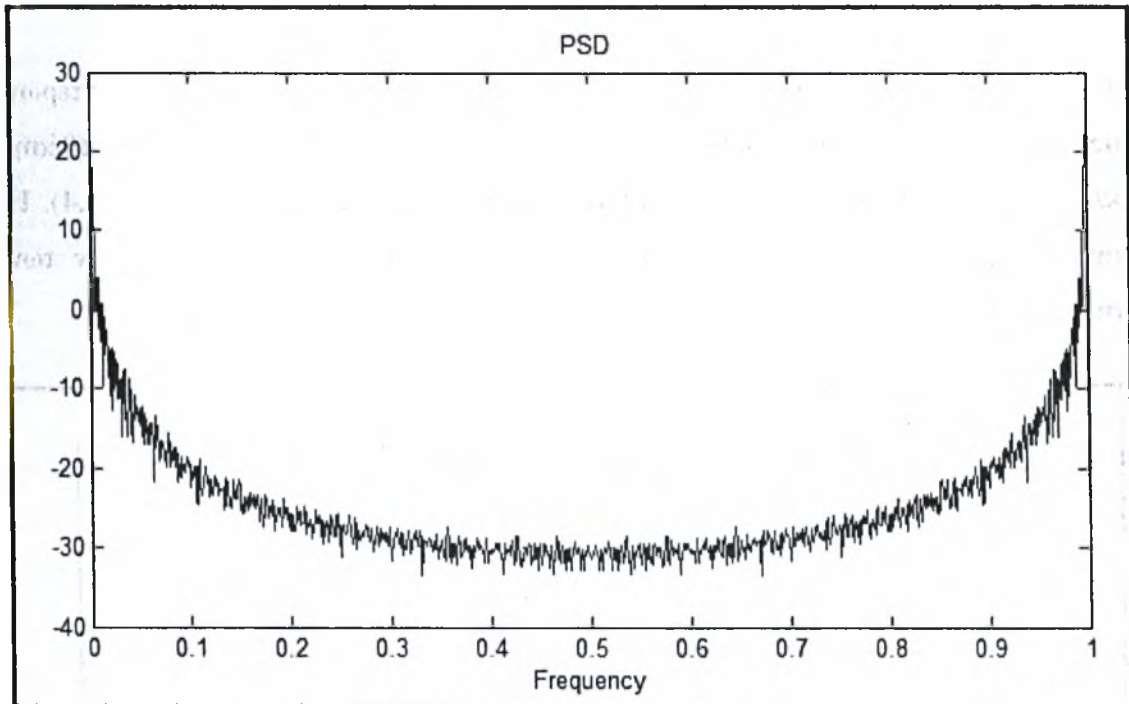
Σχήμα 6.6.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	439/8000
Corner Frequency =	0.2195mm

Fractal Dimension	
Slope =	1.156
1.156	= 4-2D ⇒
-2.844	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D =	1.422

Στο παρακάτω Σχήμα 6.6.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, Fs]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.6.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

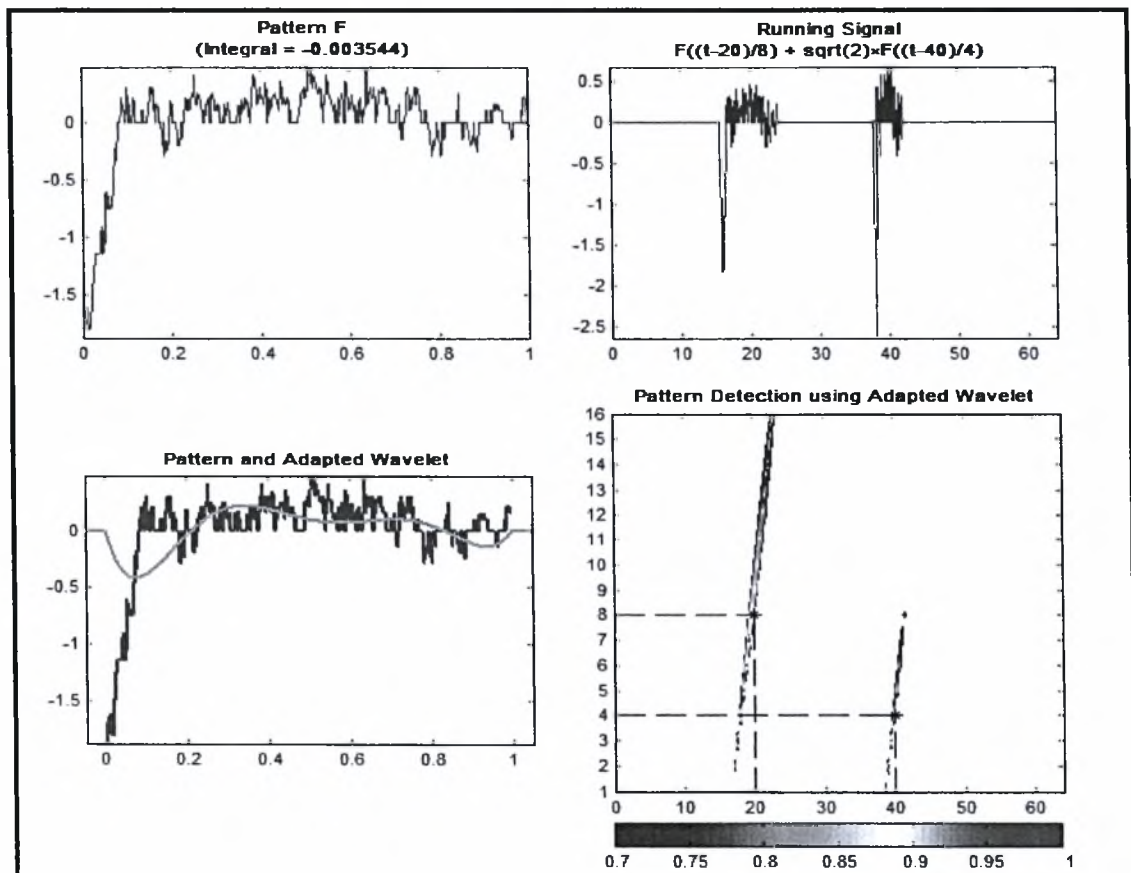
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.408$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.398, 1.418)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.6.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

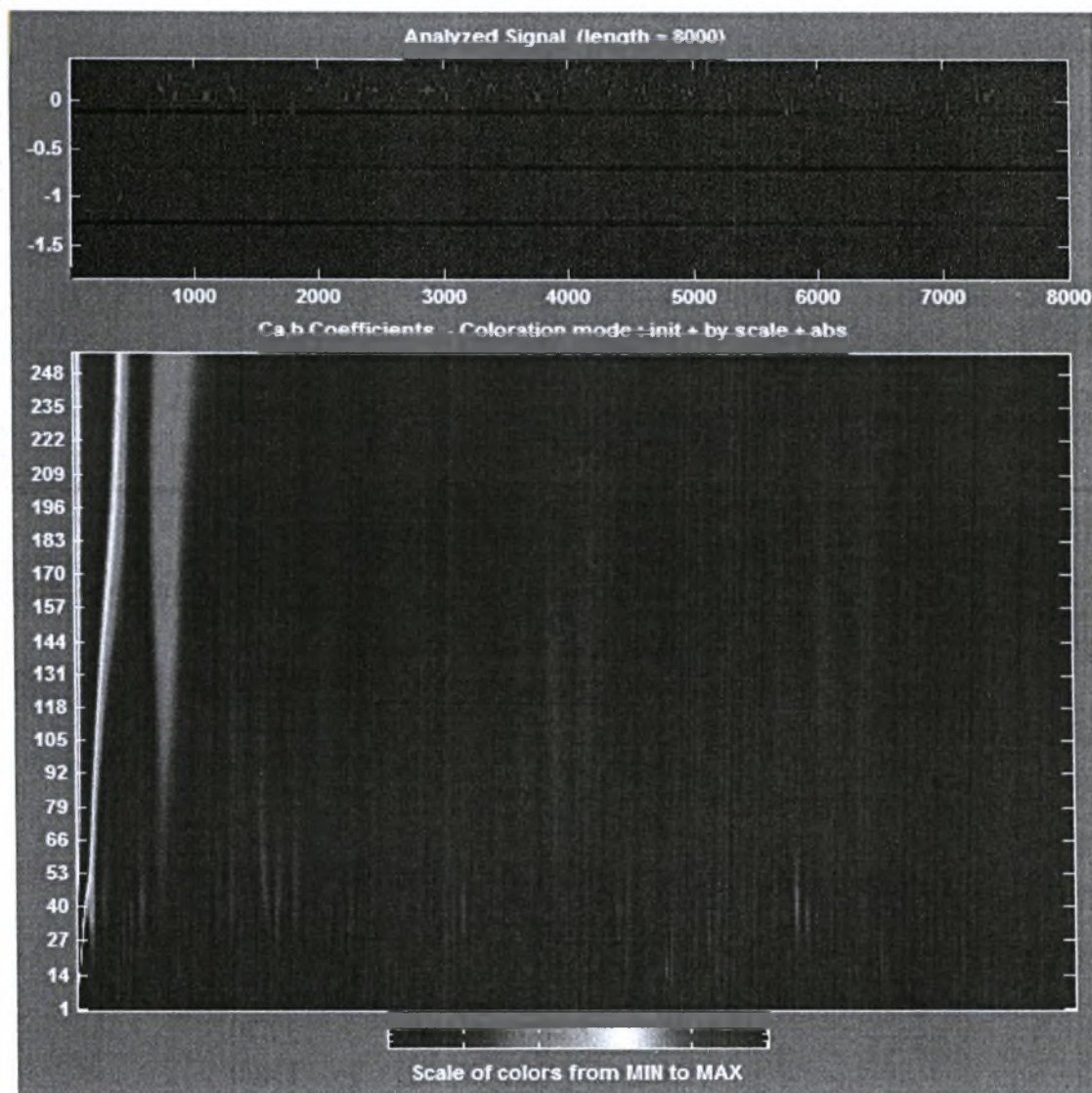
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.6.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

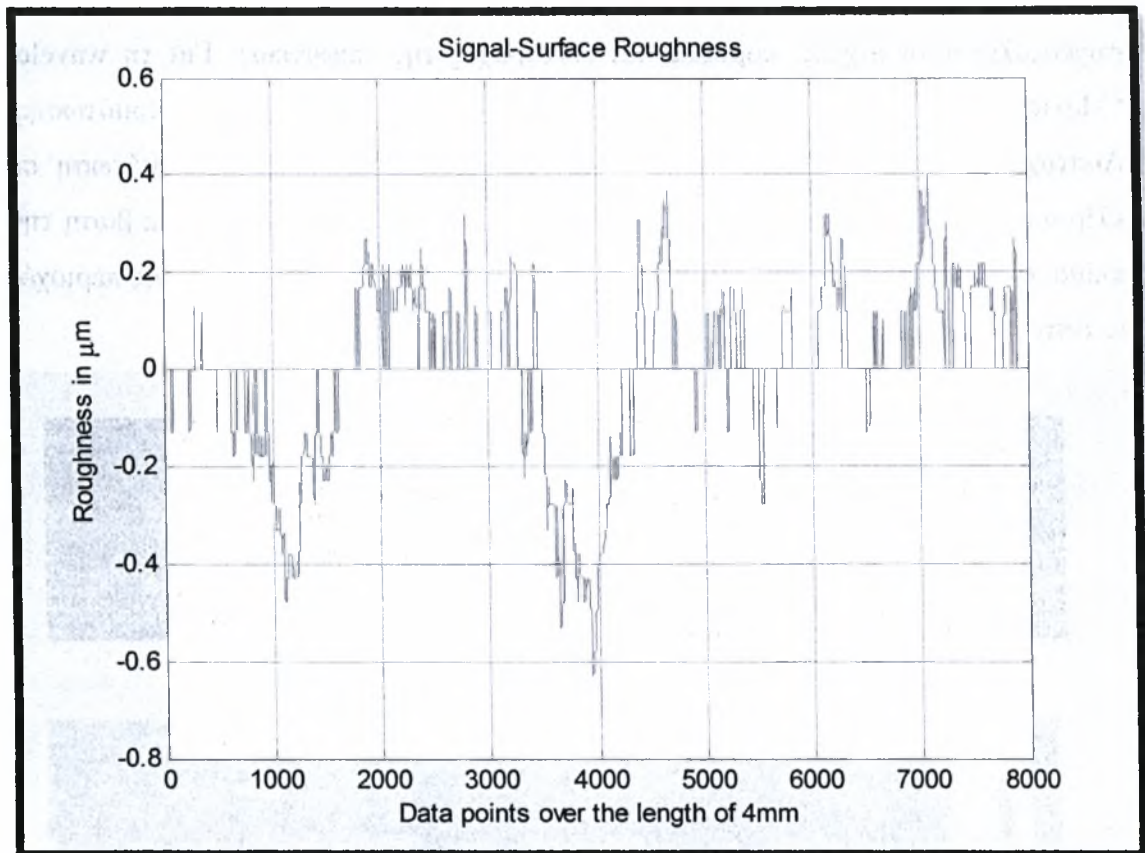
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.6.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.6.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ 7^η Περίπτωση - Feed Rate 0.080mm/στρ.

Στο παρακάτω Σχήμα 6.7.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



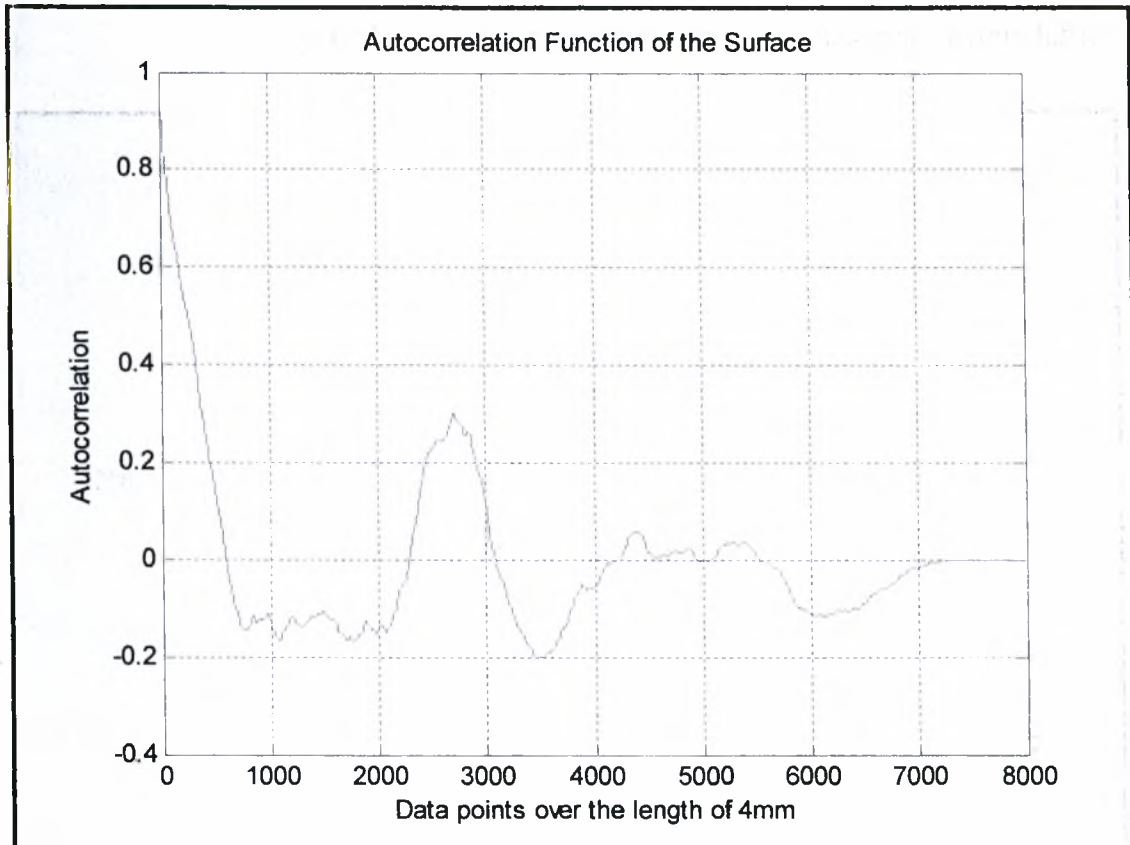
Σχήμα 6.7.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.7.1.

Πίνακας 1.7: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TaluProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	0.860	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	7.070	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	2.950	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.083	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	-0.181	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	3.670	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.400	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.480	
Παράμετρος,	R_k	=	2.400	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.7.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

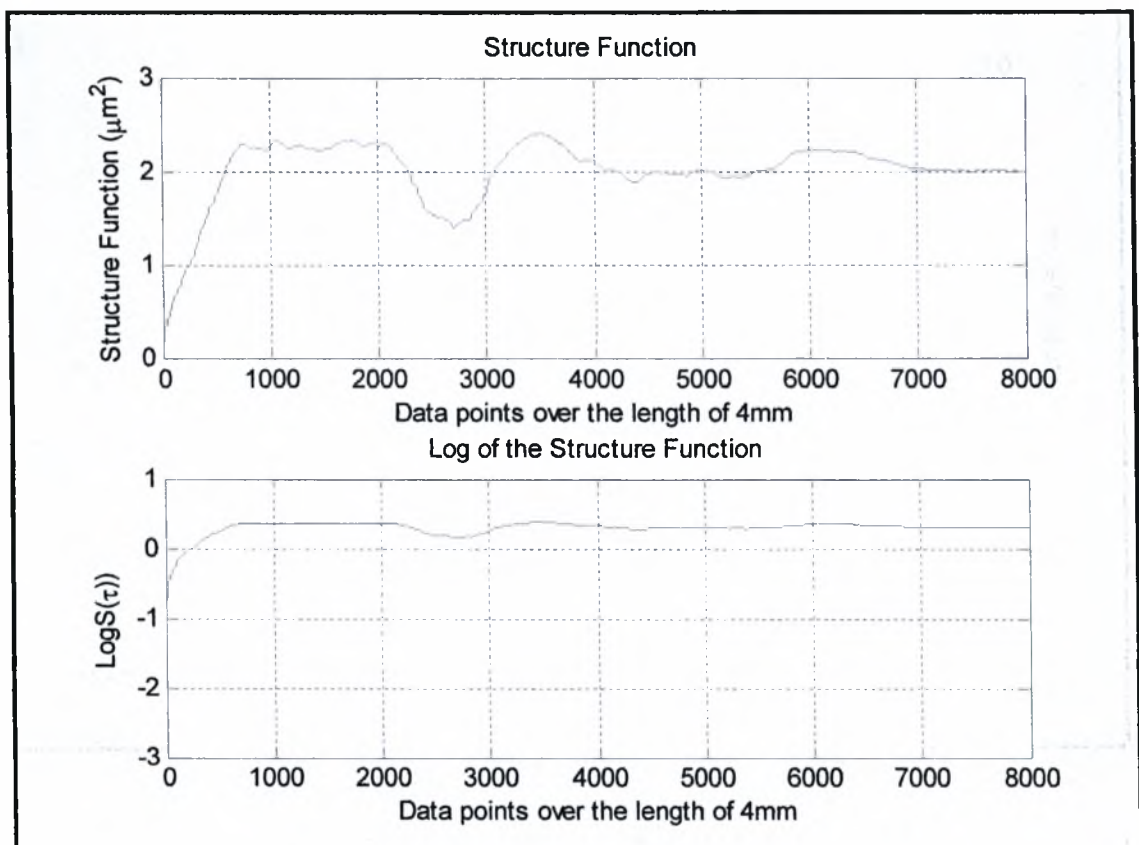


Σχήμα 6.7.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
644/8000	0.322sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
524/8000	0.262sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.7.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



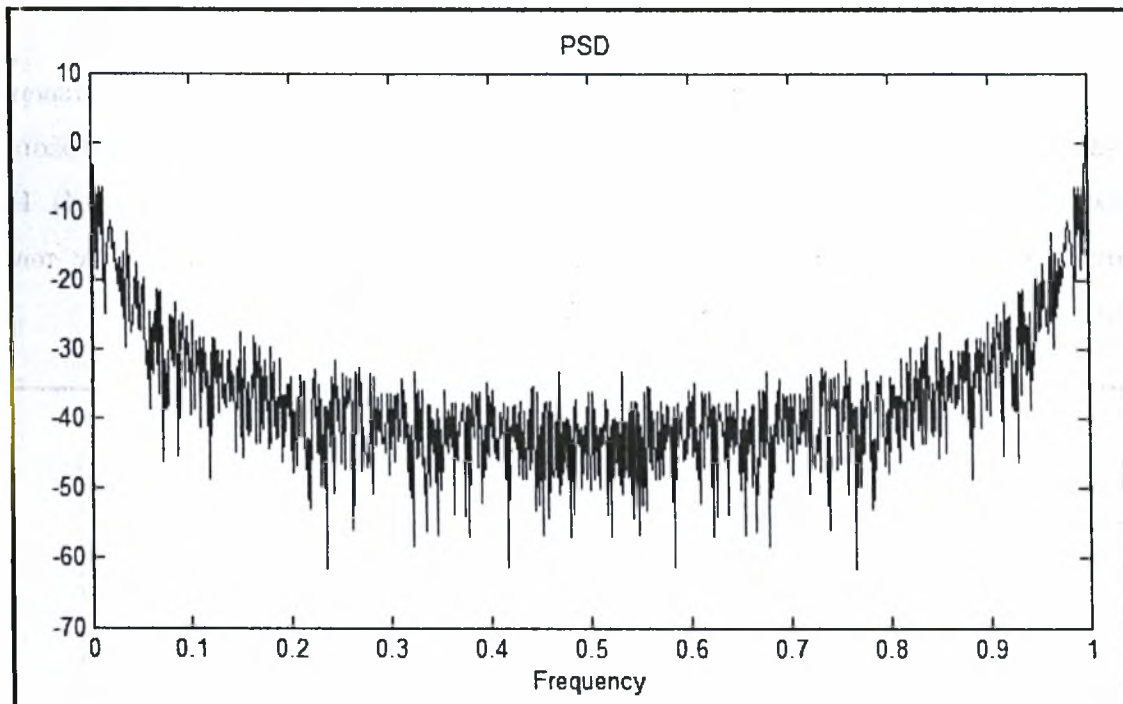
Σχήμα 6.7.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
	356/8000
Corner Frequency =	0.178mm

Fractal Dimension	
Slope =	0.964
	0.964 = 4-2D ⇒
	-3.036 = -2D ⇒
Fractal Dimension, D =	1.518

Στο παρακάτω Σχήμα 6.7.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.7.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

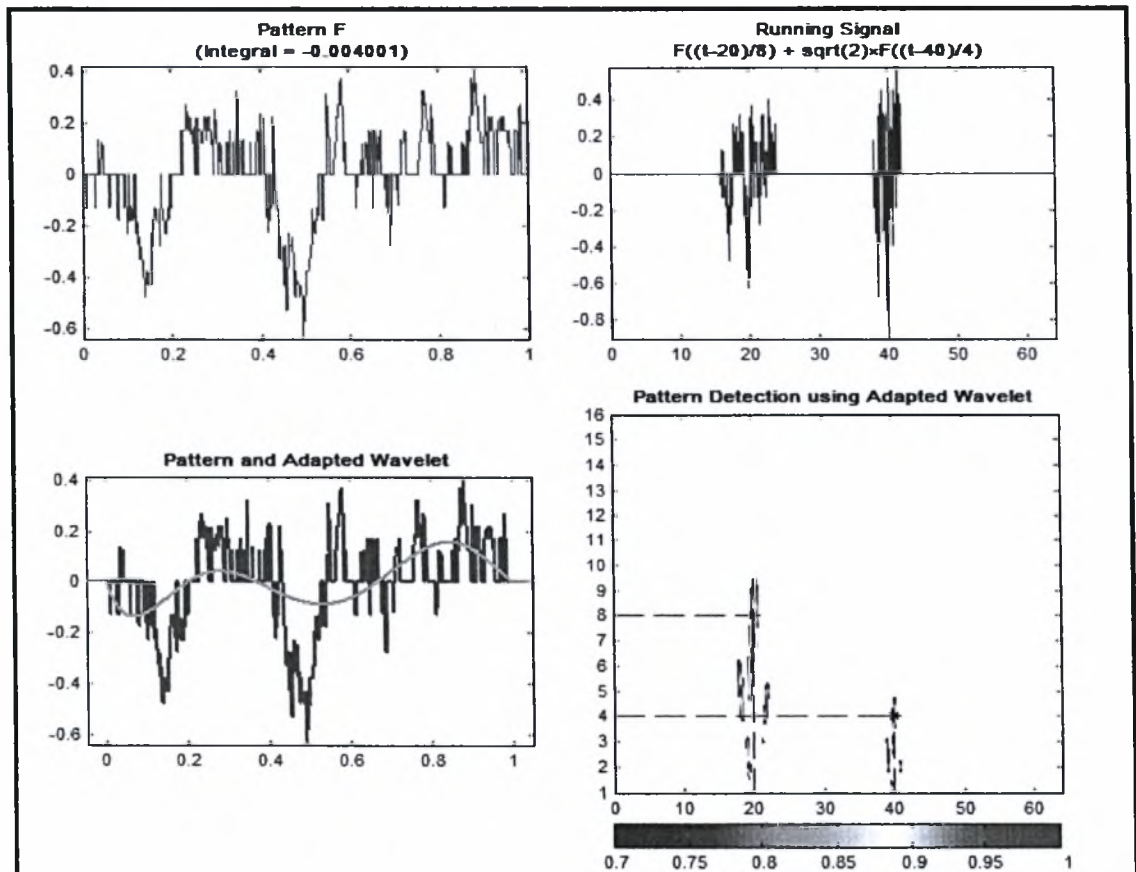
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 1.363$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.353, 1.373)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.7.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

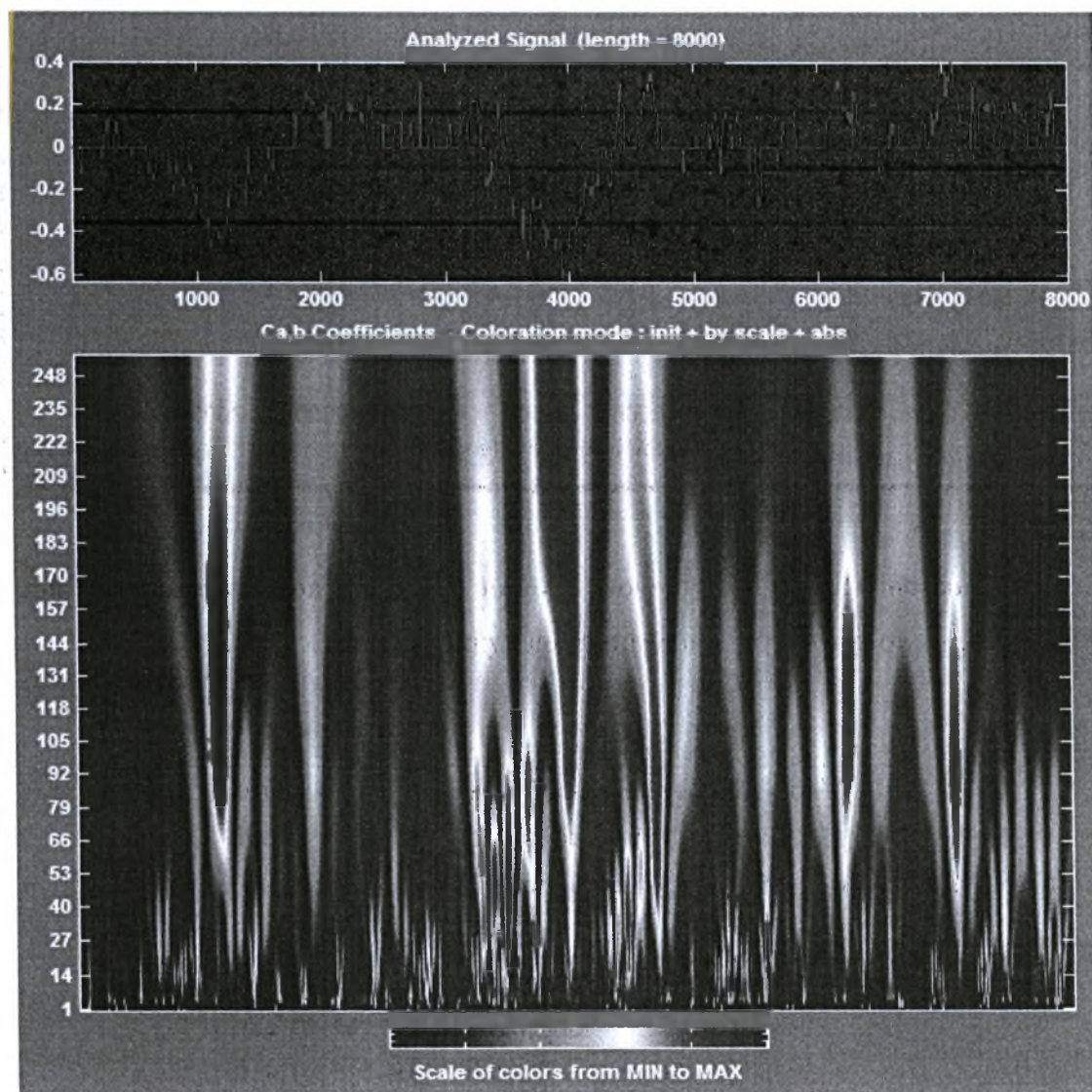
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.7.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

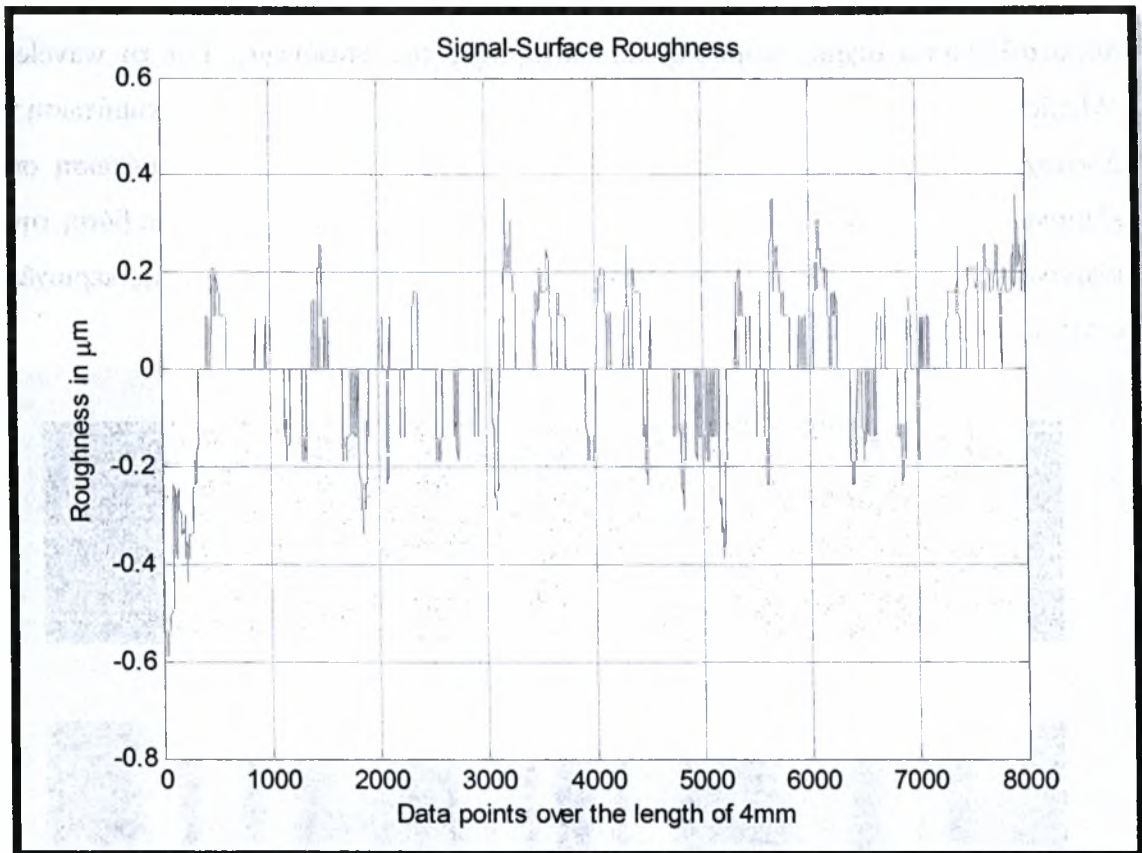
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.7.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.7.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **8^η Περίπτωση - Feed Rate 0.090mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.8.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



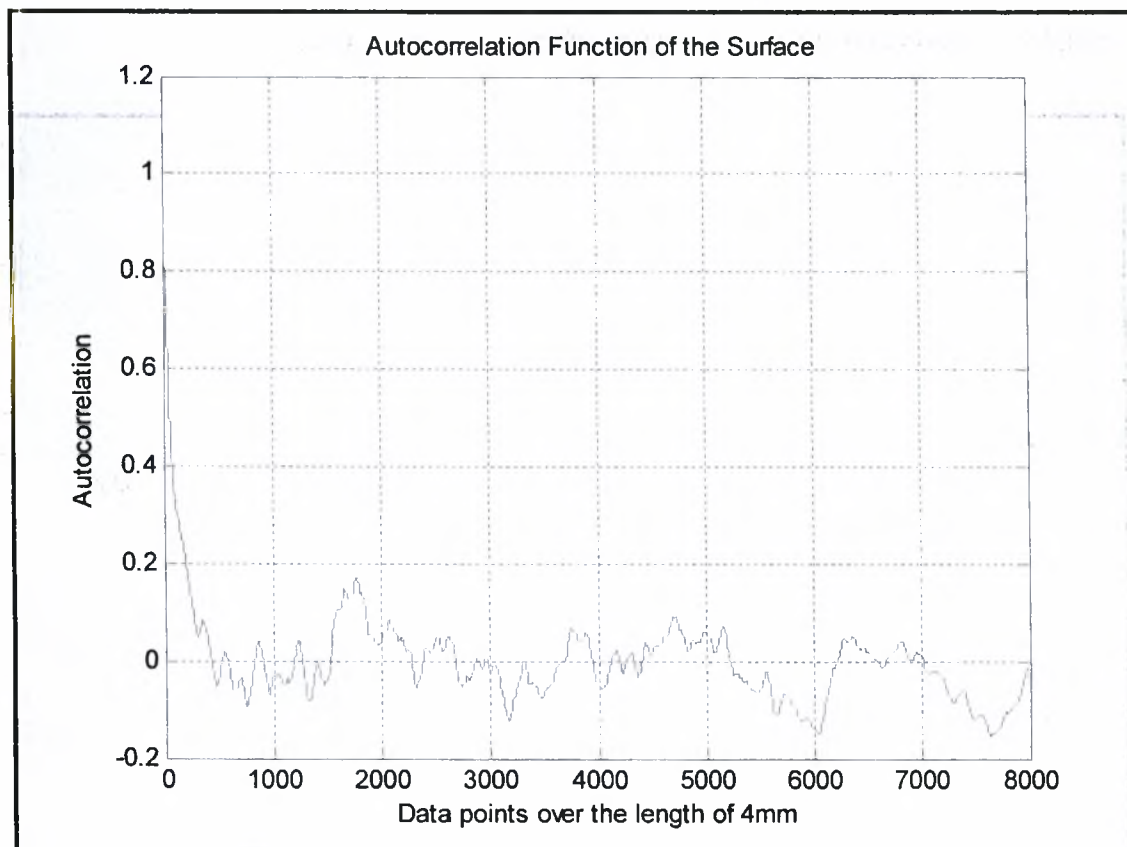
Σχήμα 6.8.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.8 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.8.1.

Πίνακας 6.8: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	0.798	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	6.670	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	2.840	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.072	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	-0.311	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	3.440	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.410	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.040	
Παράμετρος,	R_k	=	2.500	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.8.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

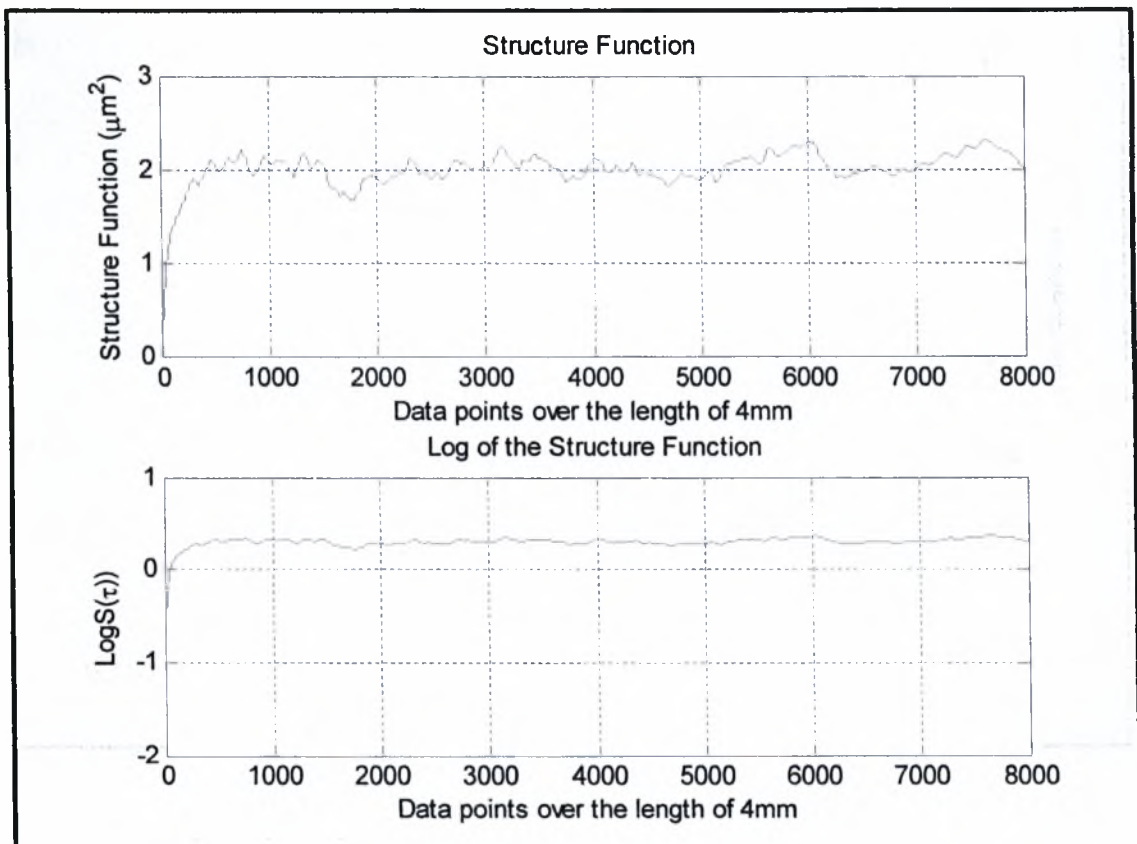


Σχήμα 6.8.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
308/8000	0.154sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
263/8000	0.1315sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.8.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



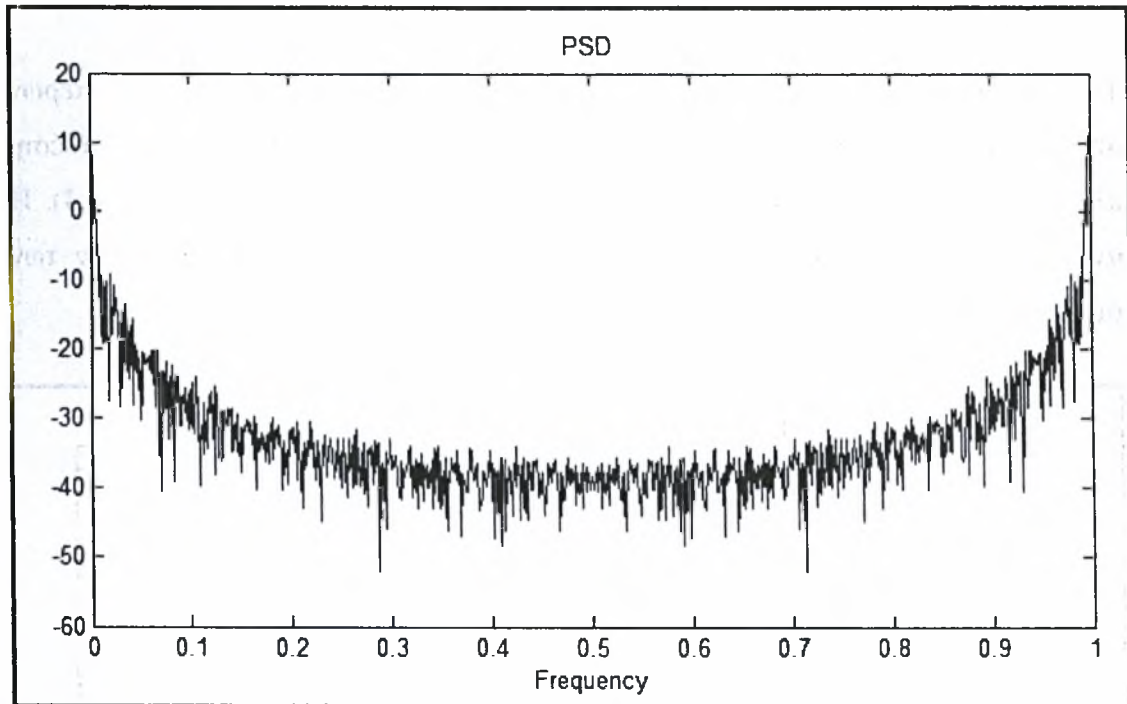
Σχήμα 6.8.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
	302/8000
Corner Frequency =	0.151mm

Fractal Dimension	
Slope =	0.924
	0.924 = 4-2D ⇒
	-3.076 = -2D ⇒
Fractal Dimension, D =	1.538

Στο παρακάτω Σχήμα 6.8.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.8.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

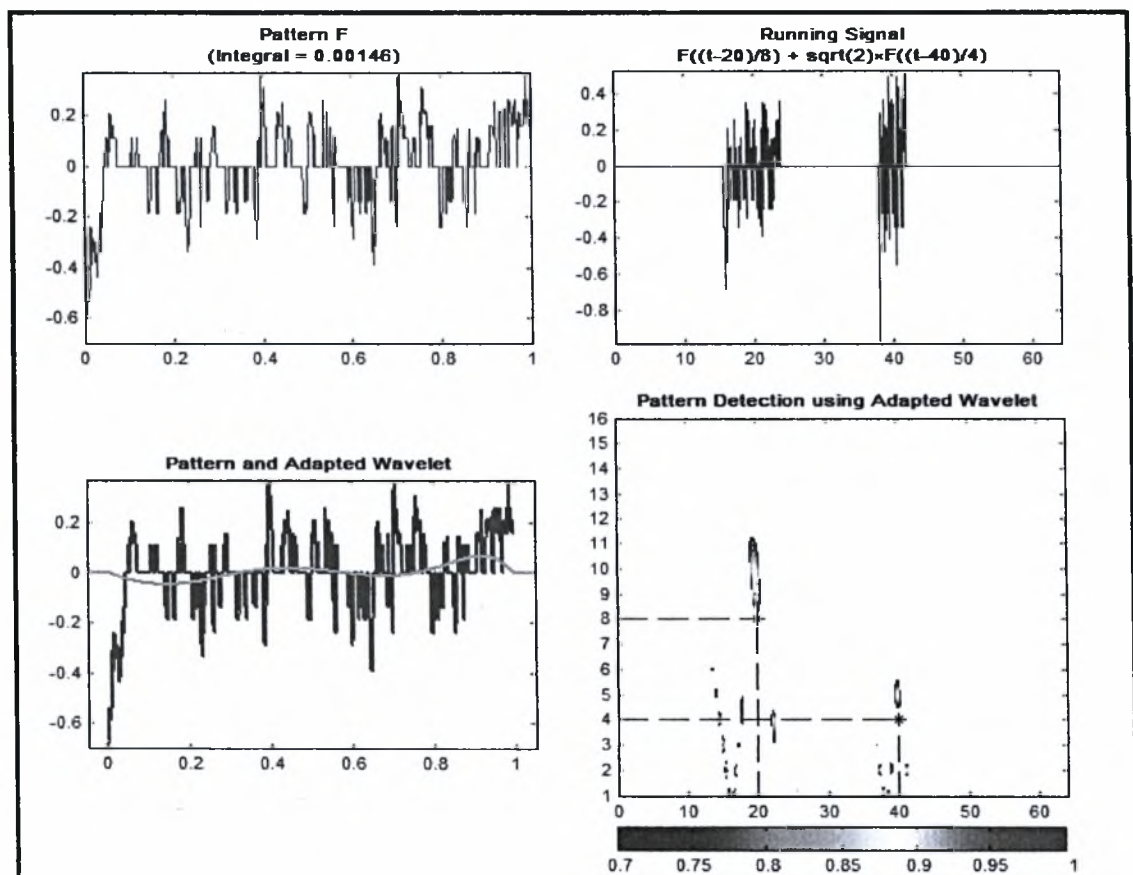
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 1.344$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.334, 1.354)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.8.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

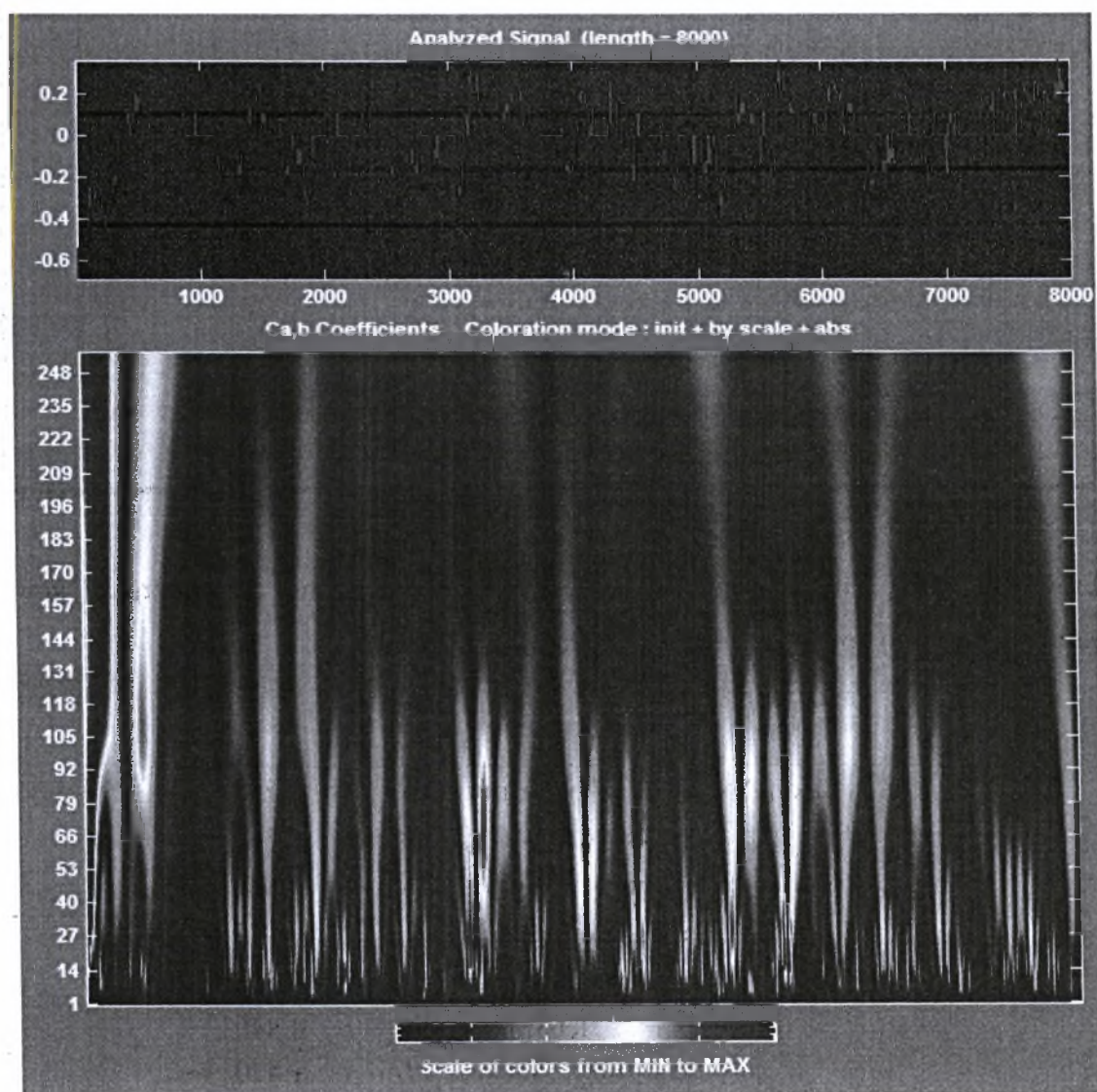
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.8.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

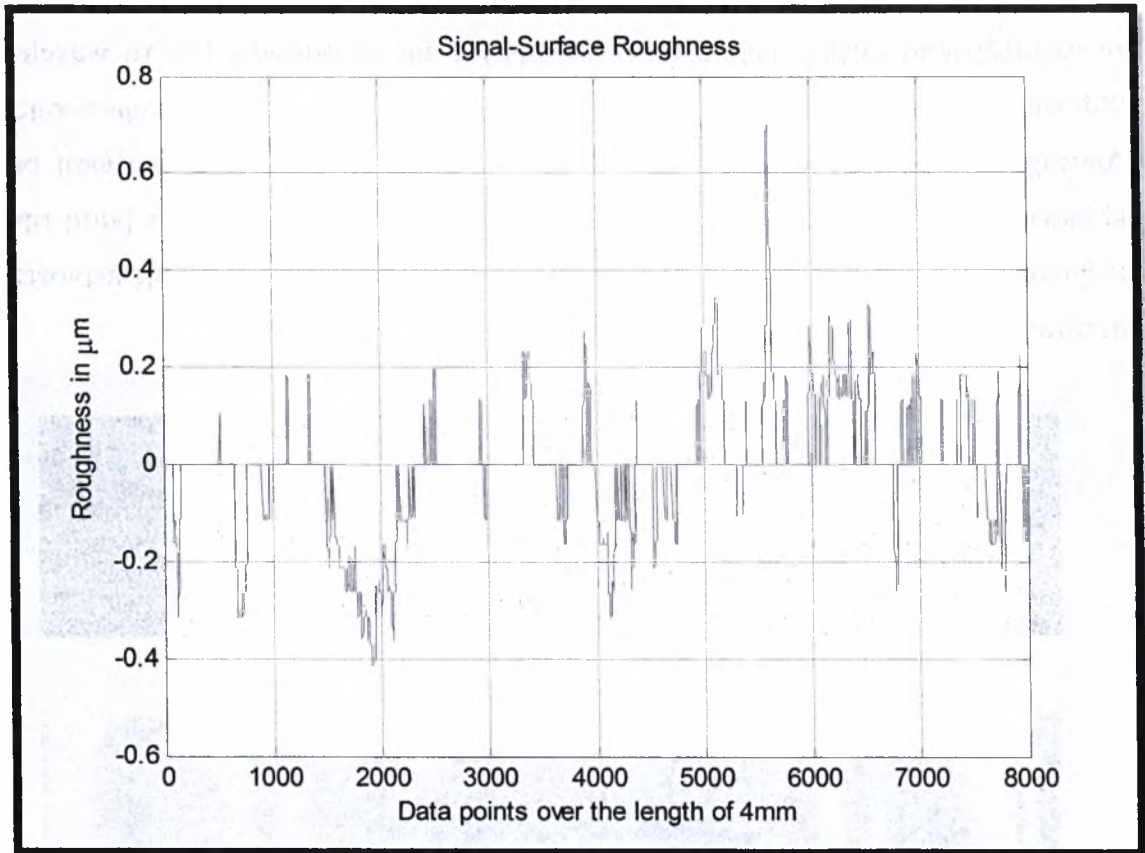
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.8.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.8.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **9^η Περίπτωση - Feed Rate 0.100mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.9.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



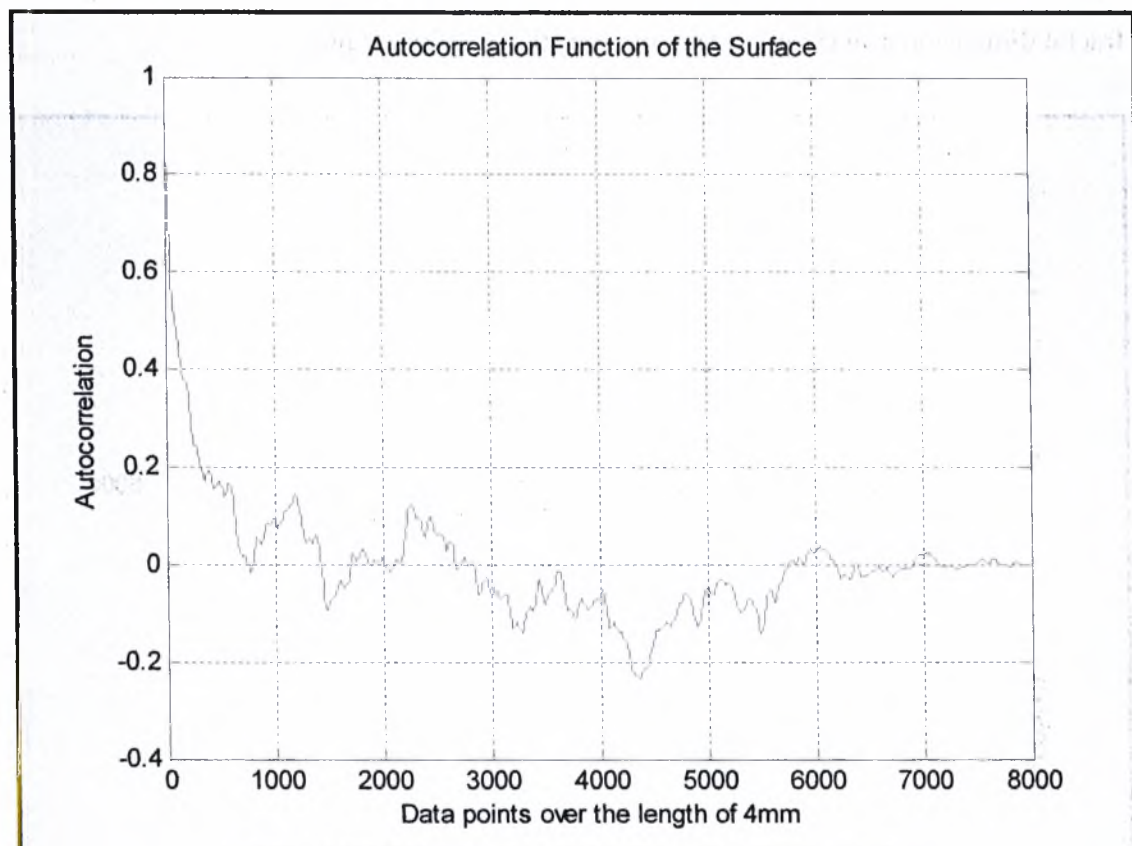
Σχήμα 6.9.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.9 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.9.1.

Πίνακας 6.9: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	0.759	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	9.360	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	3.820	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.072	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.508	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	4.840	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.420	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.320	
Παράμετρος,	R_k	=	2.560	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.9.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

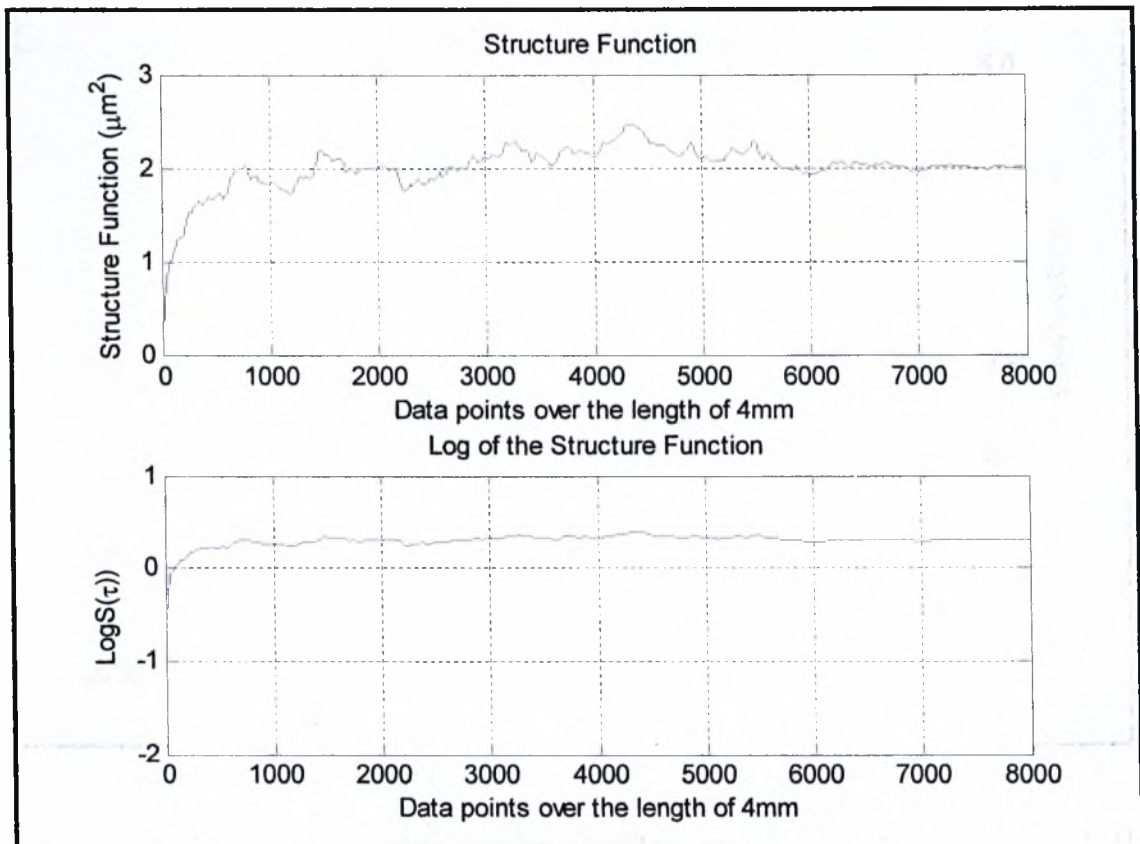


Σχήμα 6.9.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
739/8000	0.3695sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
626/8000	0.313sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.9.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



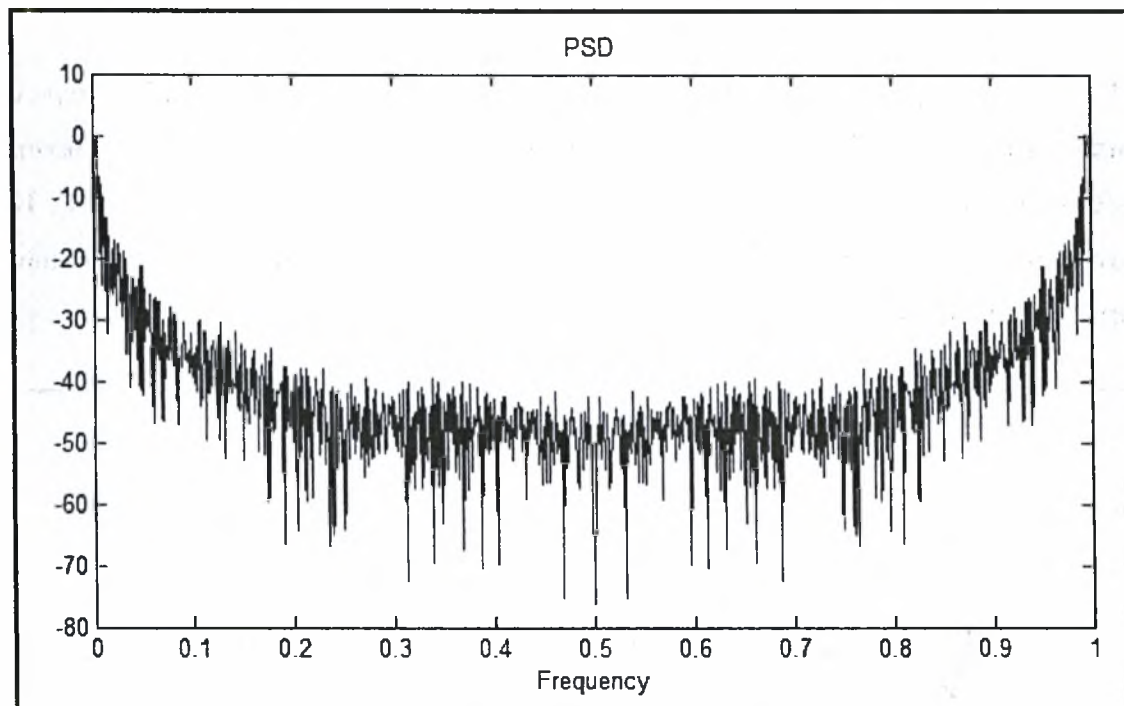
Σχήμα 6.9.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
159/8000	
Corner Frequency	= 0.0795mm

Fractal Dimension	
Slope = 0.958	
0.958	= 4-2D ⇒
-3.042	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.521

Στο παρακάτω Σχήμα 6.9.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.9.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

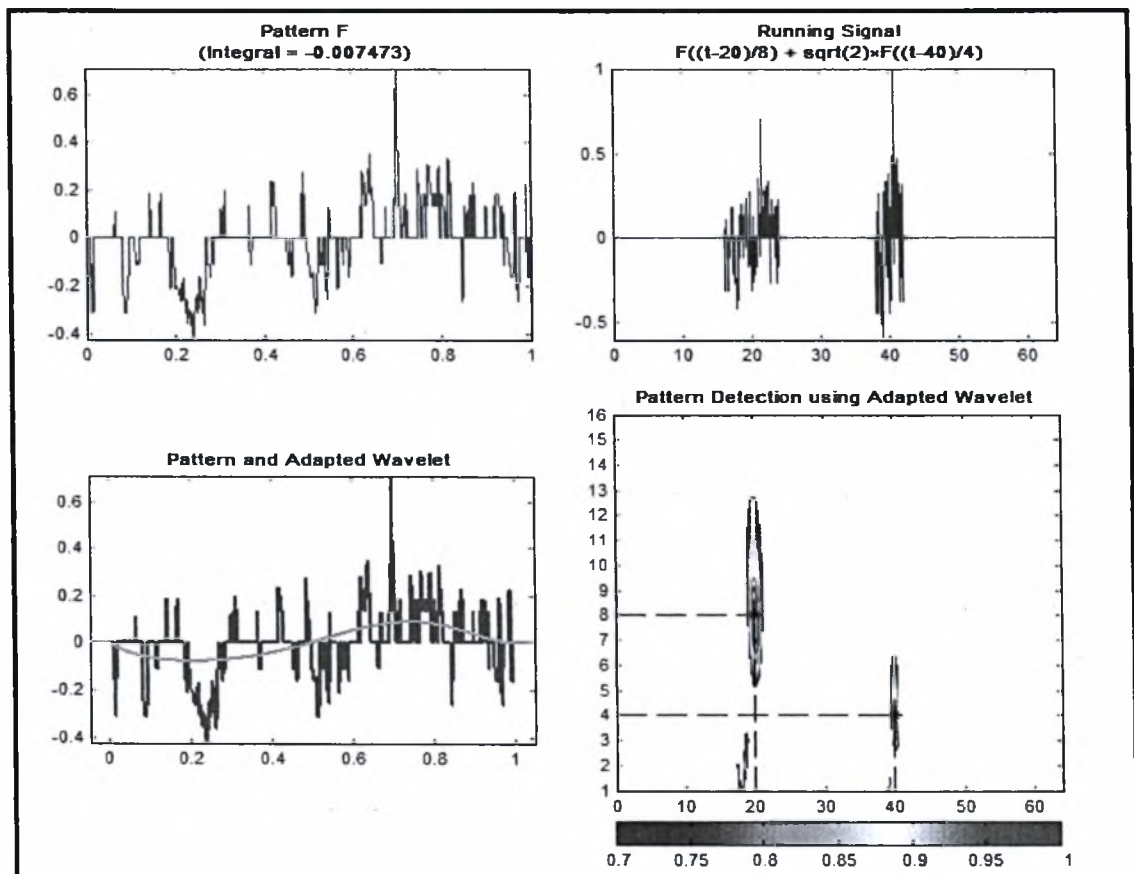
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.325$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.315, 1.335)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.9.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

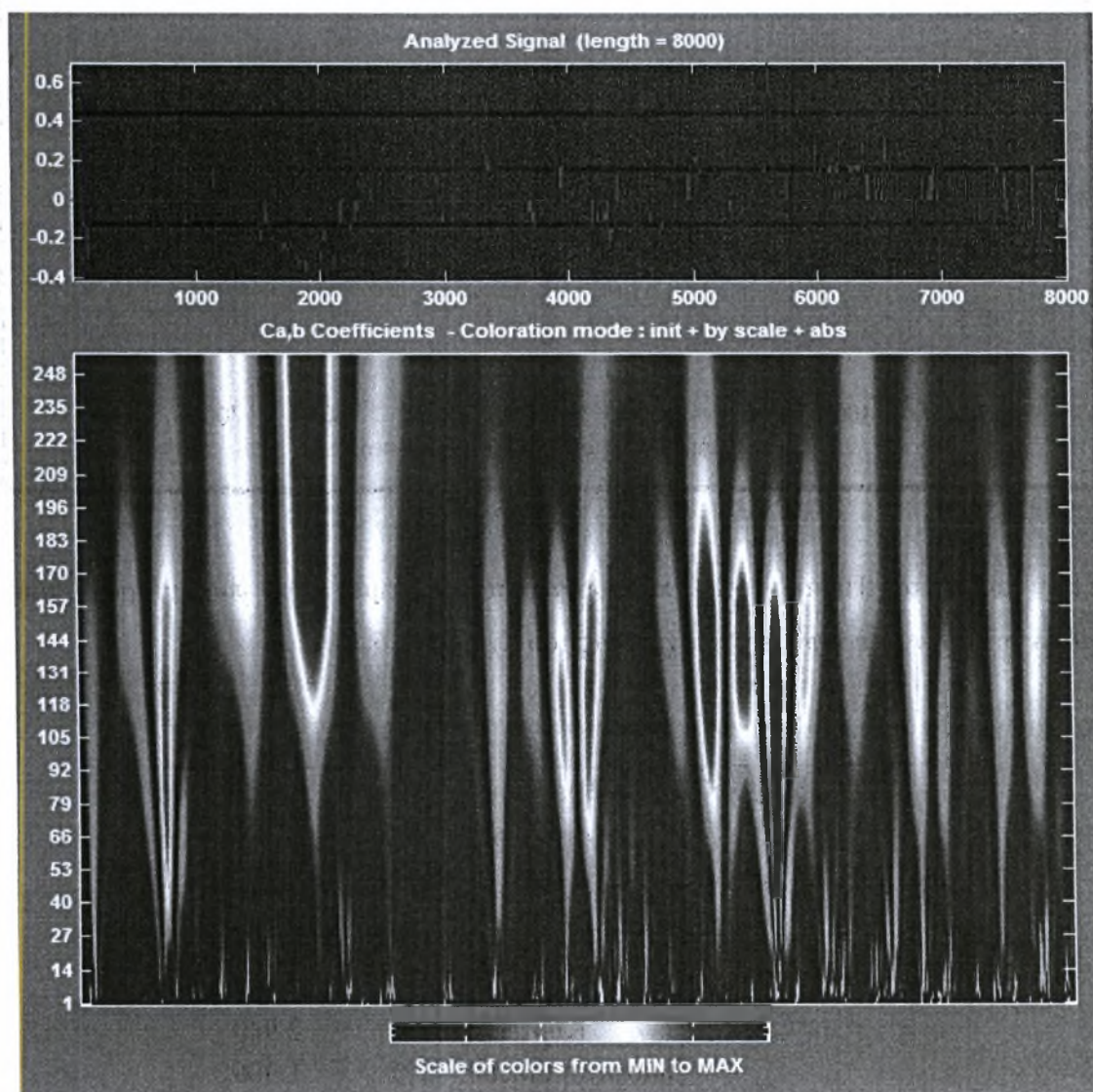
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.9.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

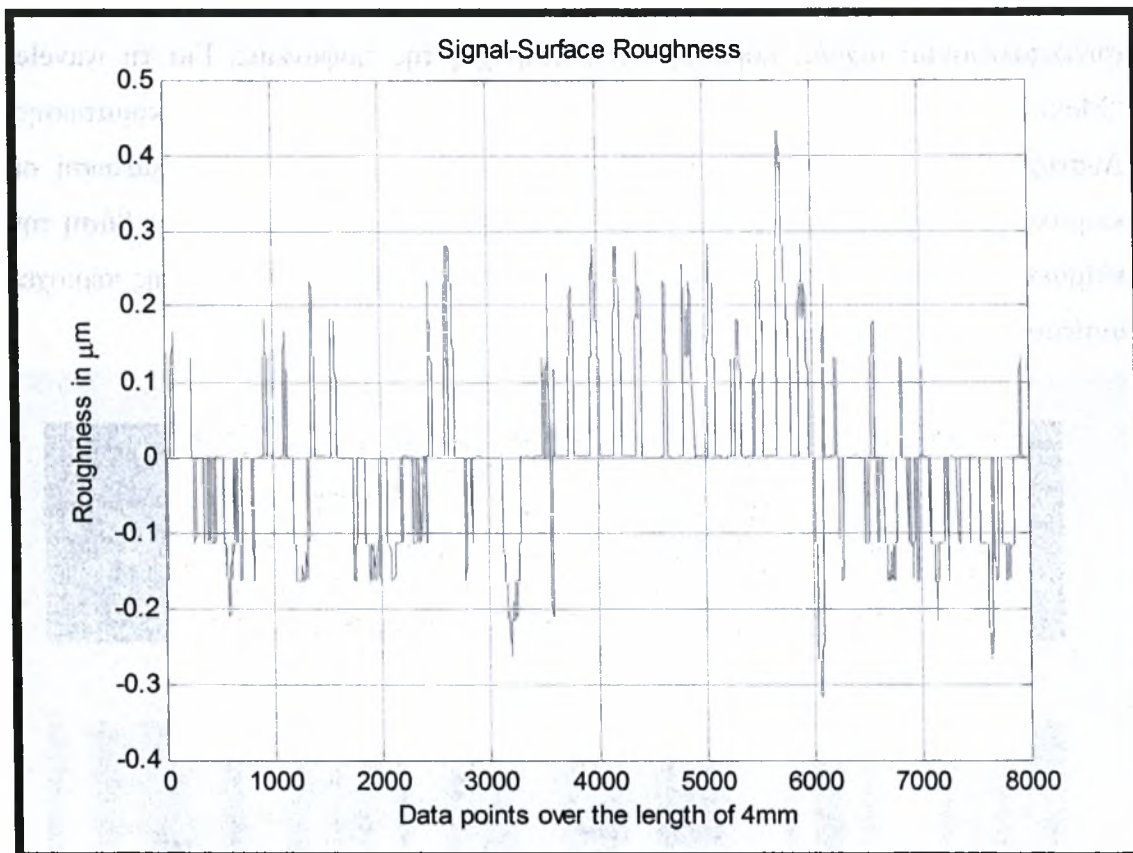
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.9.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.9.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **10^η Περίπτωση - Feed Rate 0.110mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.10.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



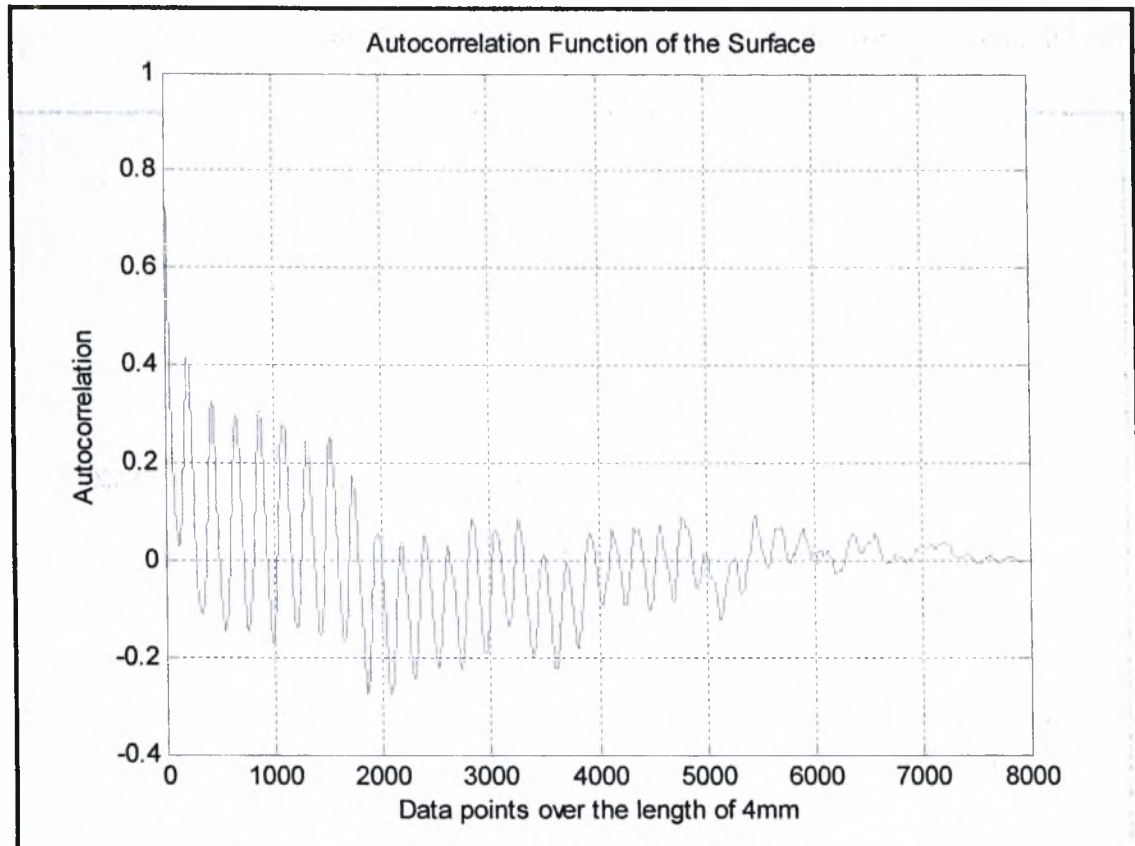
Σχήμα 6.10.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.10.1.

Πίνακας 6.10: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	0.726	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	6.890	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	2.450	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.063	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.431	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.940	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.300	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.400	
Παράμετρος,	R_k	=	2.060	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.10.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

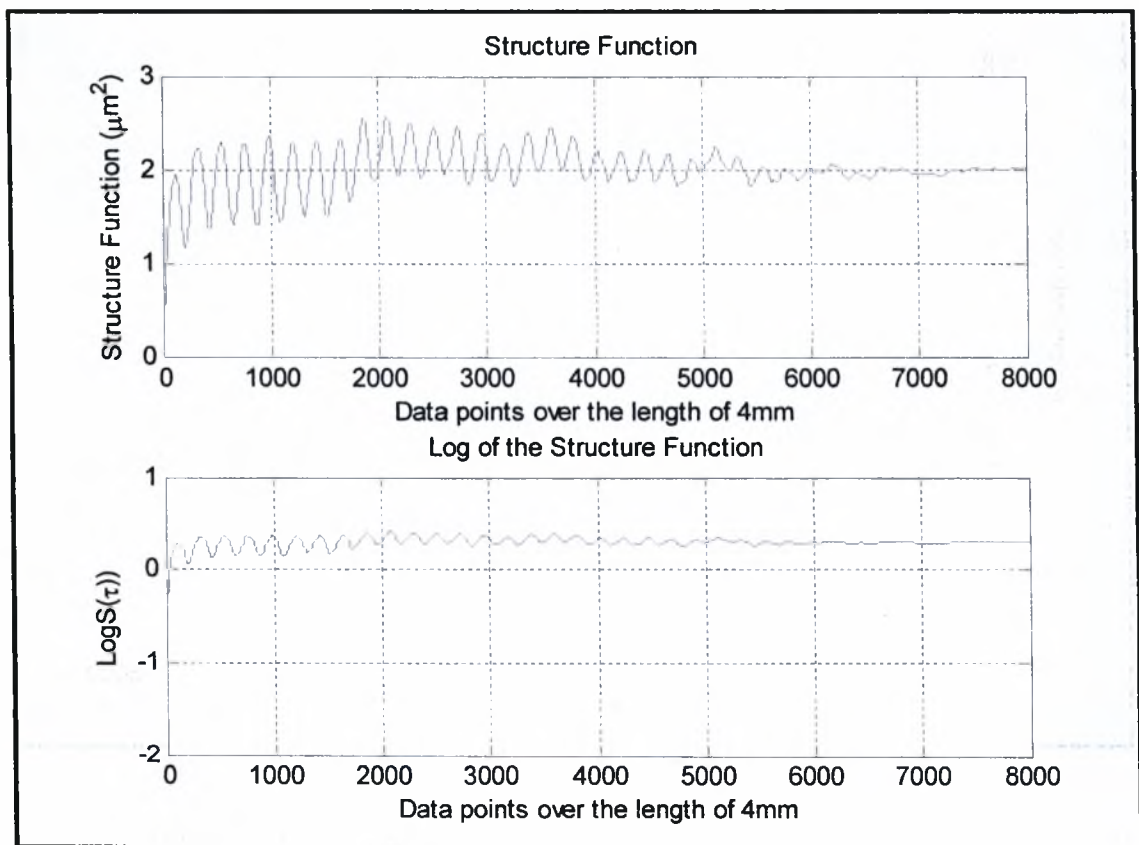


Σχήμα 6.10.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
385/8000	0.1925sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
90/8000	0.0450sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.10.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



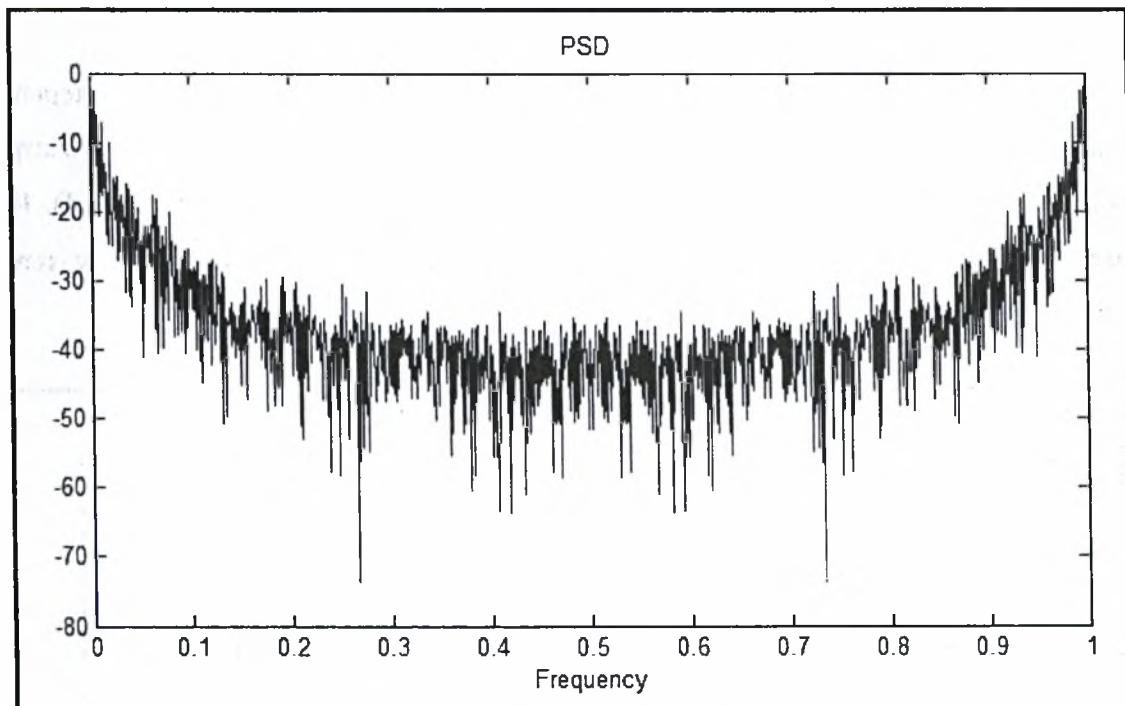
Σχήμα 6.10.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
<u>Σημείο μετάβασης:</u>	
129/8000	
Corner Frequency = 0.0645mm	

Fractal Dimension	
<u>Slope = 1.204</u>	
1.204	= 4-2D ⇒
-2.796	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D = 1.398	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.10.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.10.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

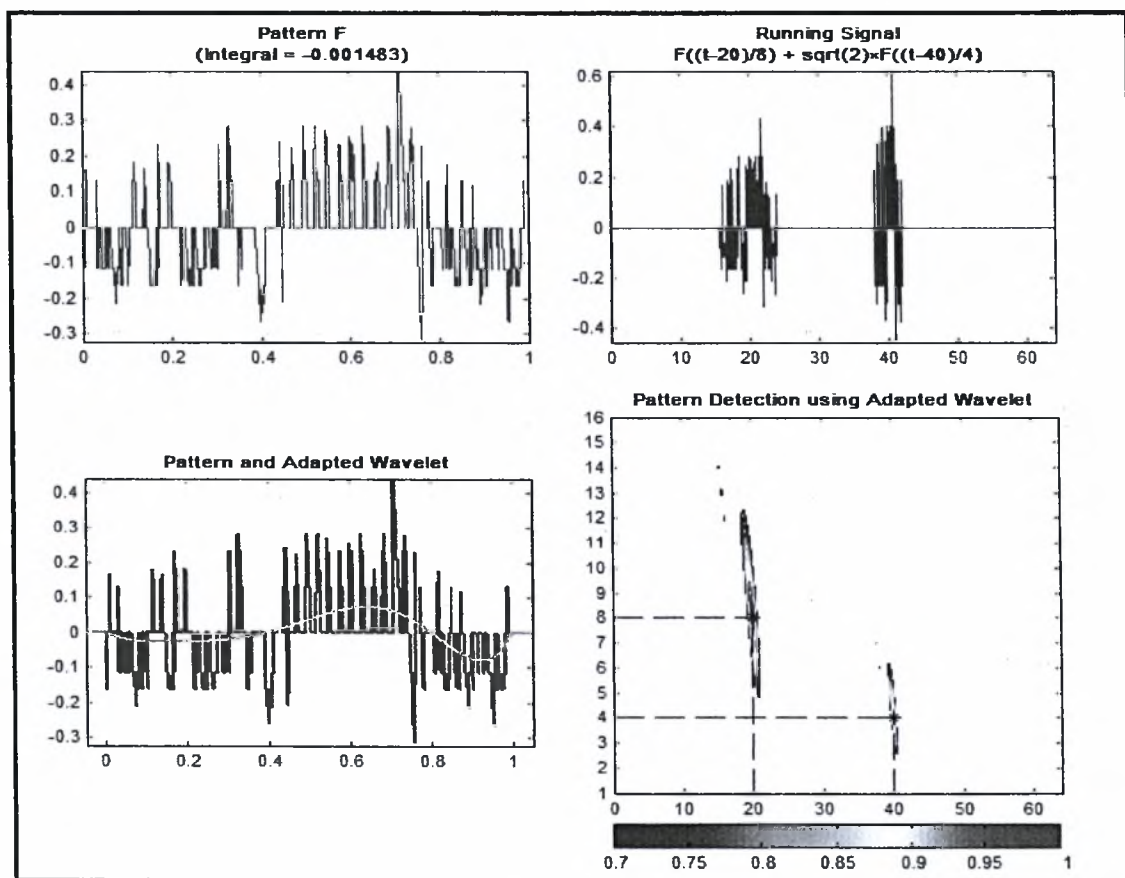
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.318$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.308, 1.328)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.10.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

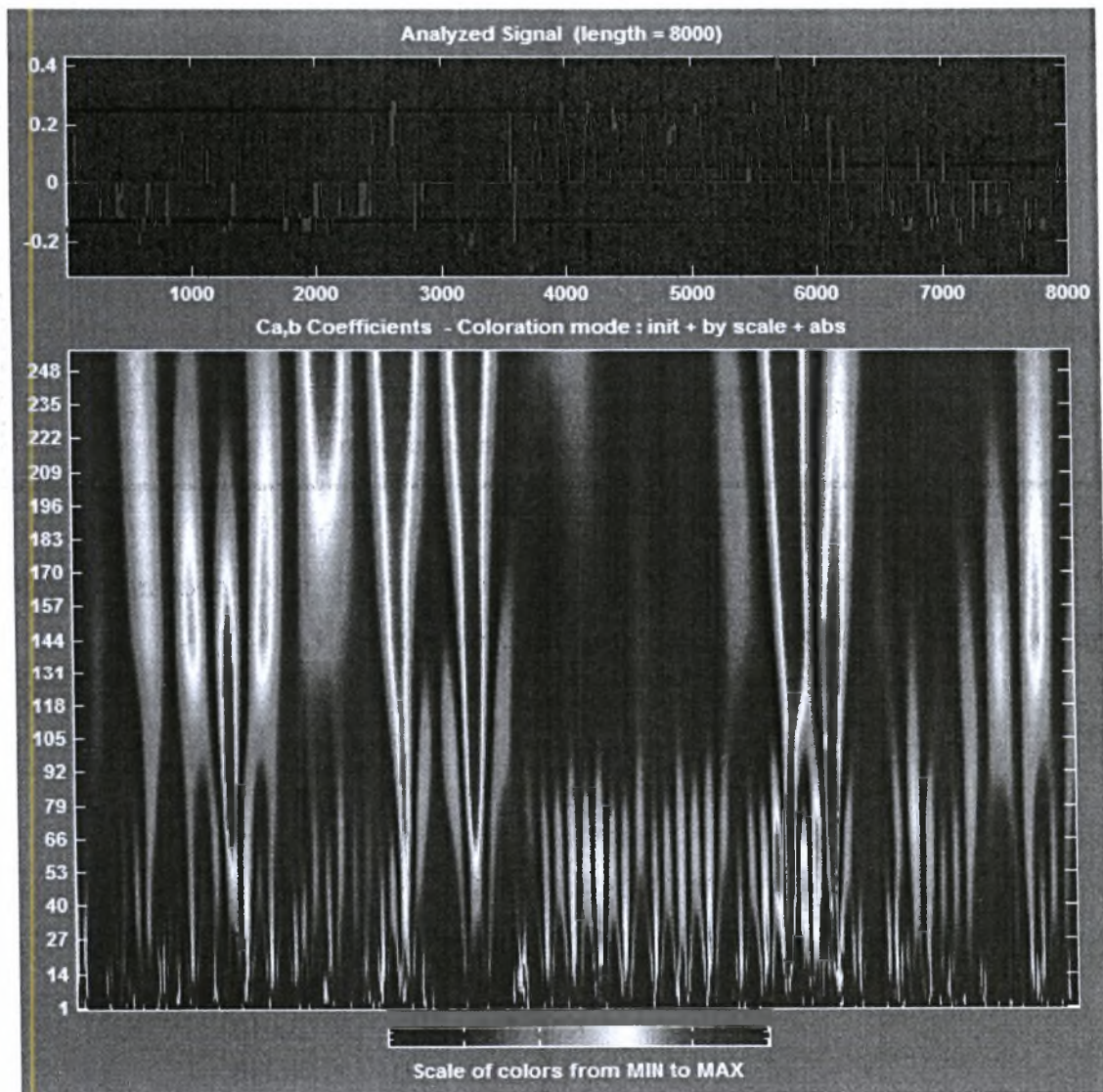
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.10.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

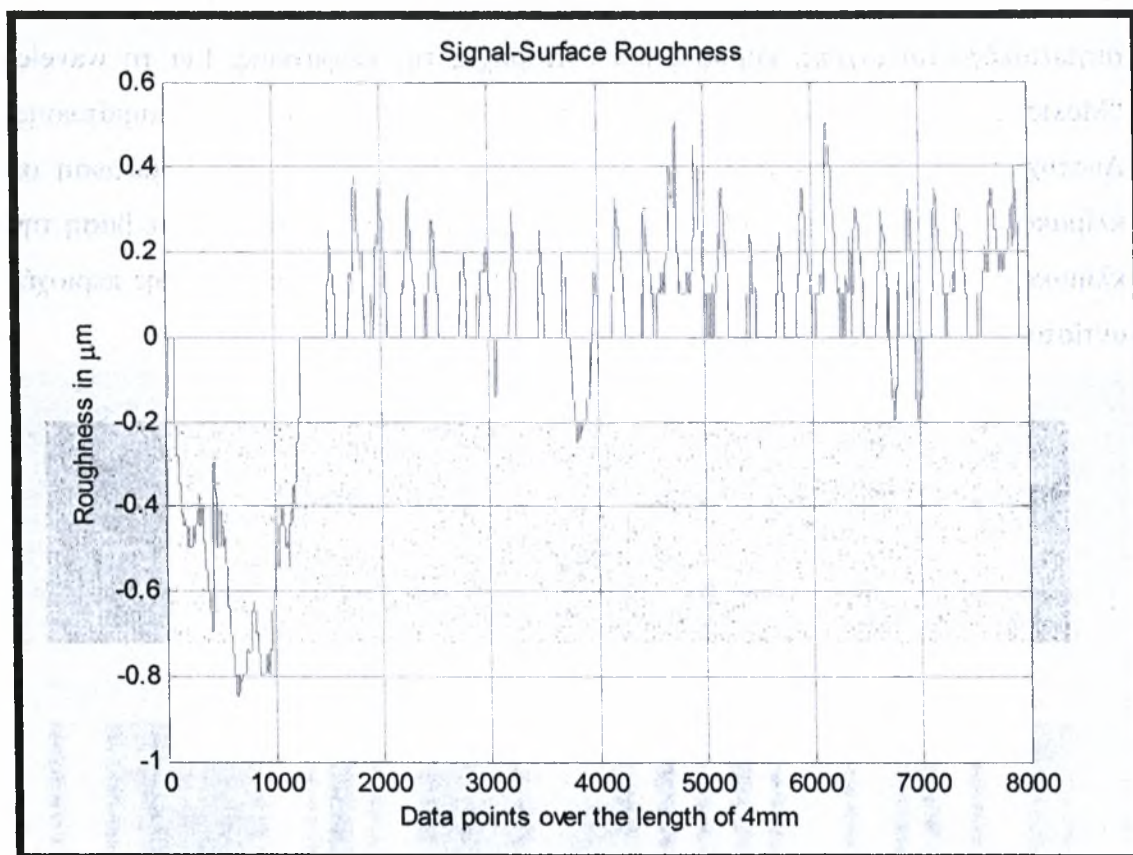
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.10.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.10.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **11^η Περίπτωση - Feed Rate 0.120mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.11.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



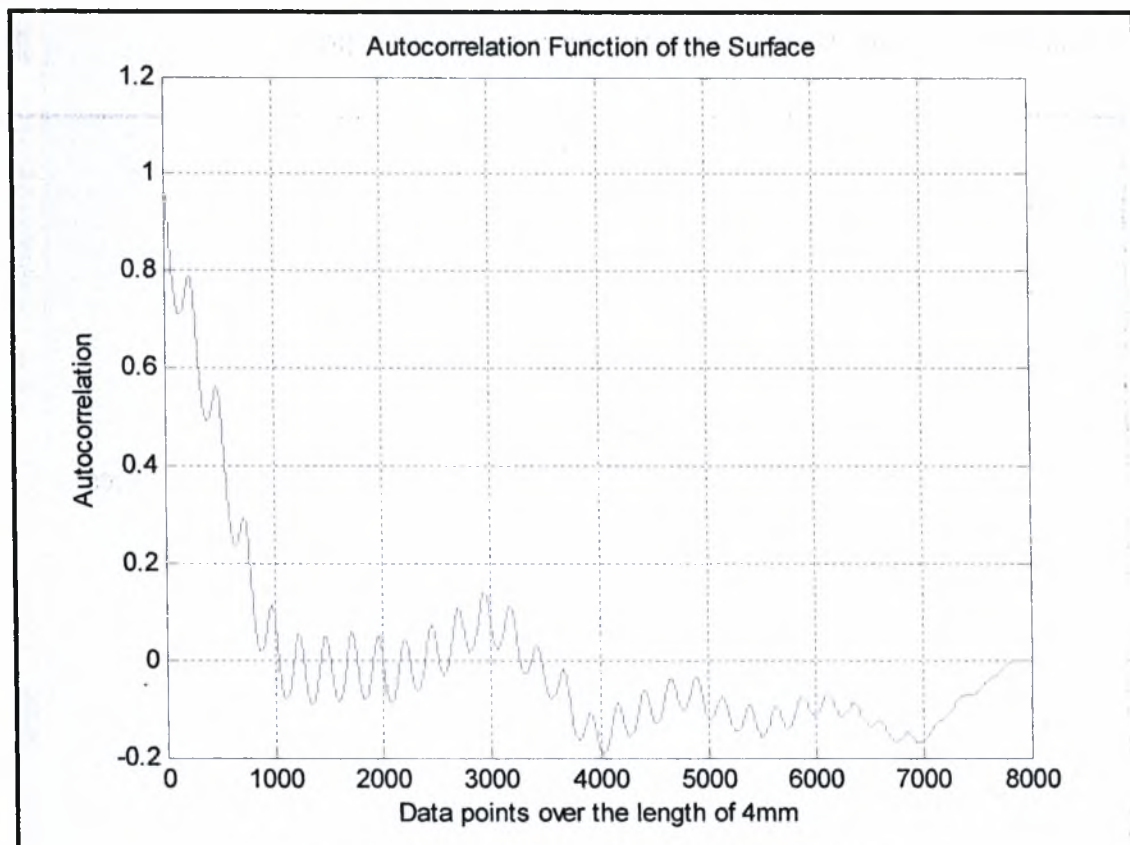
Σχήμα 6.11.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της επιφάνειας που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.11 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.11.1.

Πίνακας 6.11: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	0.897	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	6.360	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	3.010	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.095	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.337	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	3.010	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.240	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.560	
Παράμετρος,	R_k	=	2.340	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.11.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

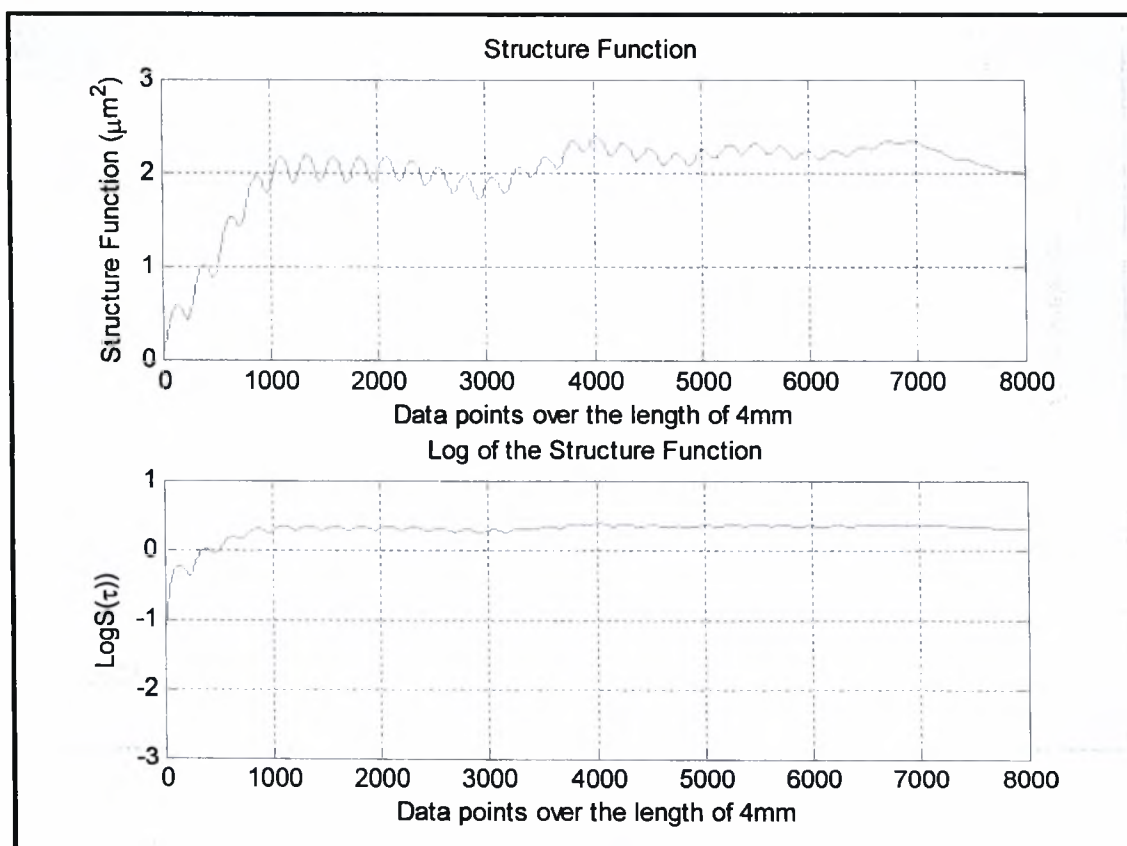


Σχήμα 6.11.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalynProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalynProfile)
886/8000	0.443sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
808/8000	0.404sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.11.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



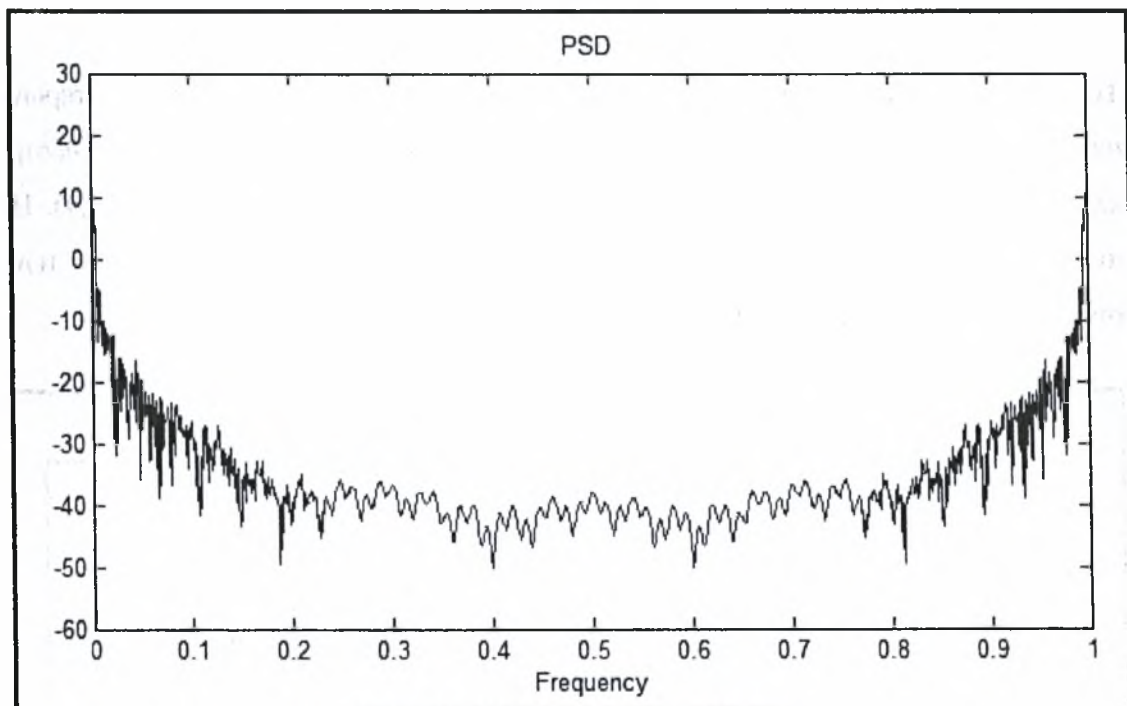
Σχήμα 6.11.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
	143/8000
Corner Frequency	= 0.0715mm

Fractal Dimension	
Slope = 1.460	
1.460	= 4-2D ⇒
-2.540	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.270

Στο παρακάτω Σχήμα 6.11.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.11.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

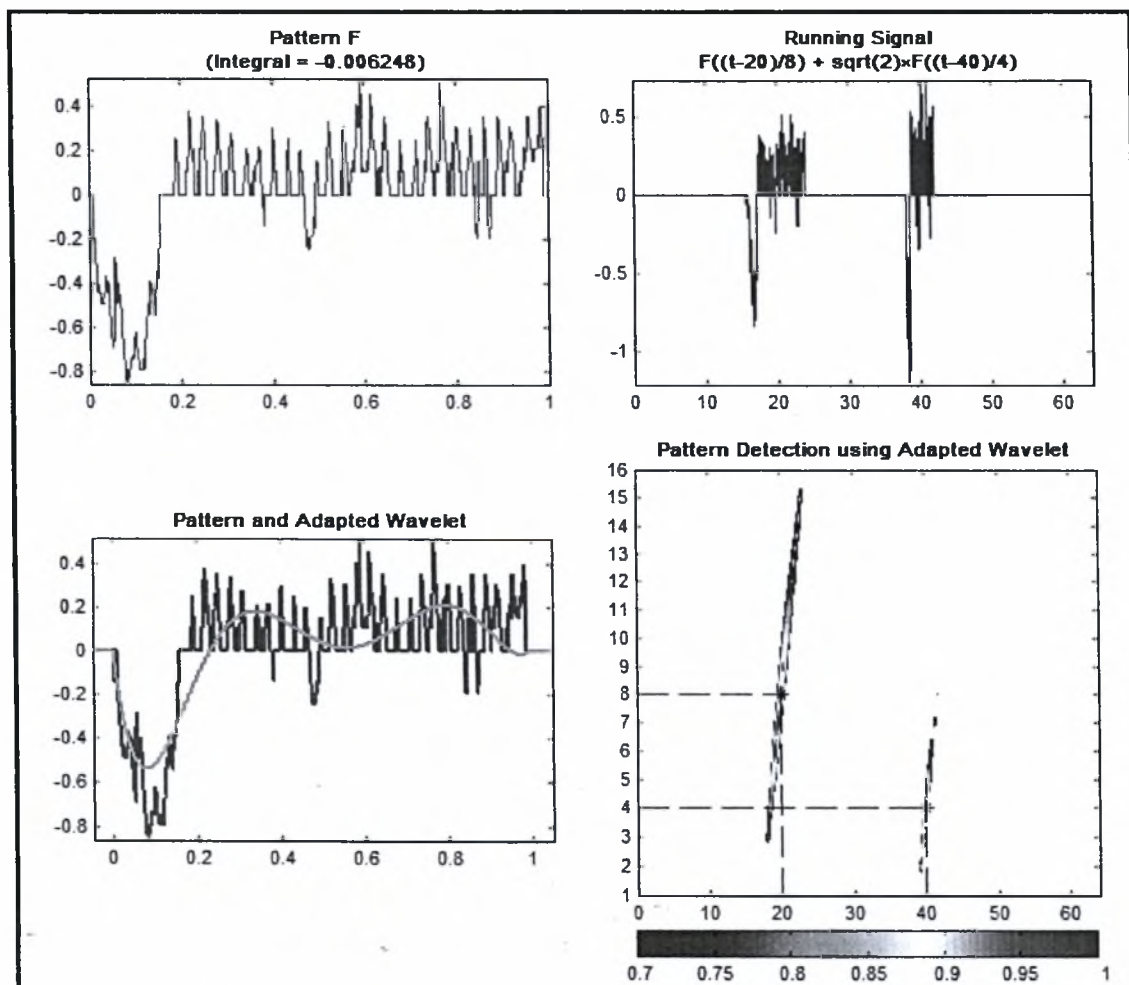
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.316$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.306, 1.326)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.11.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

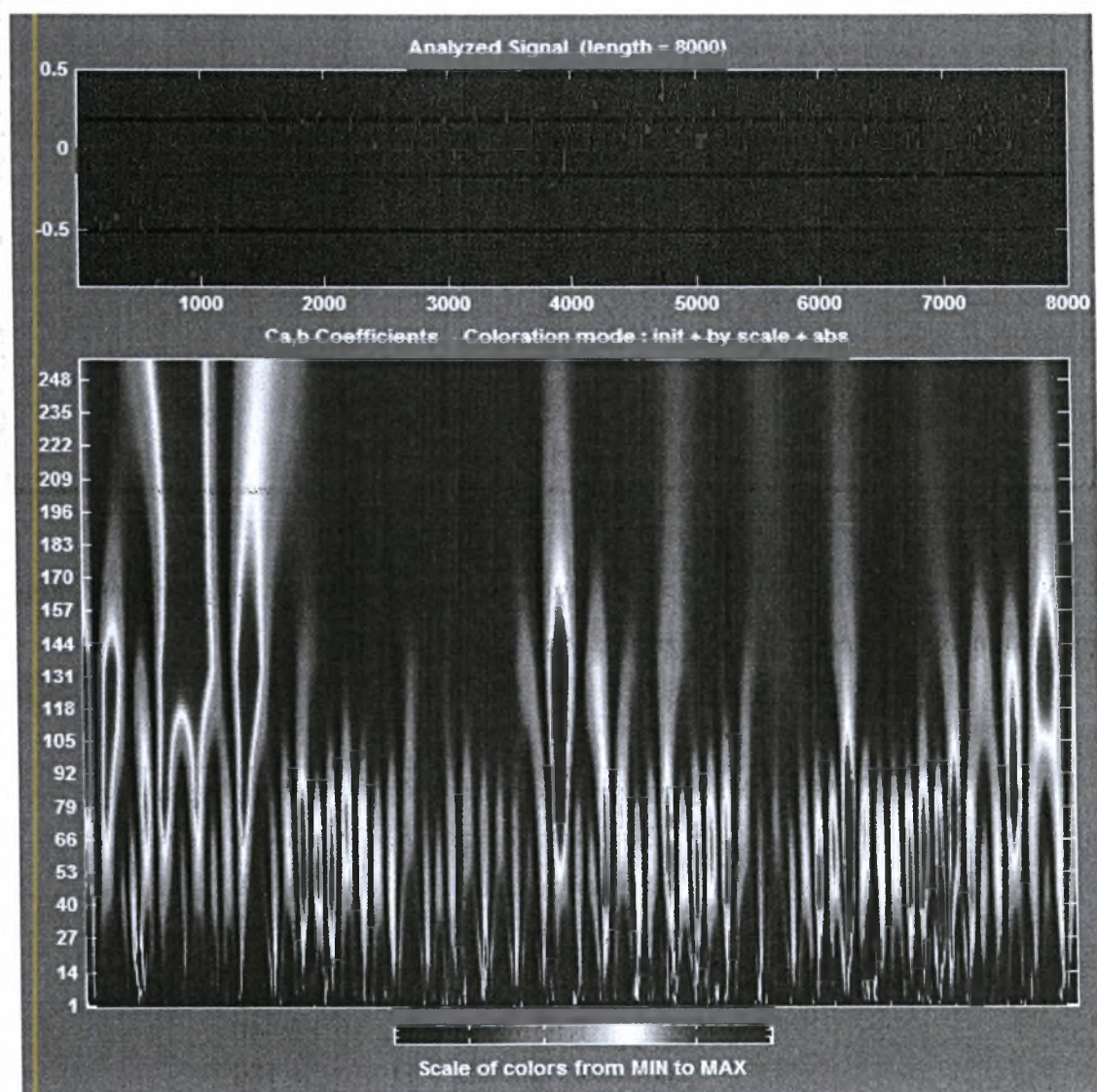
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.11.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

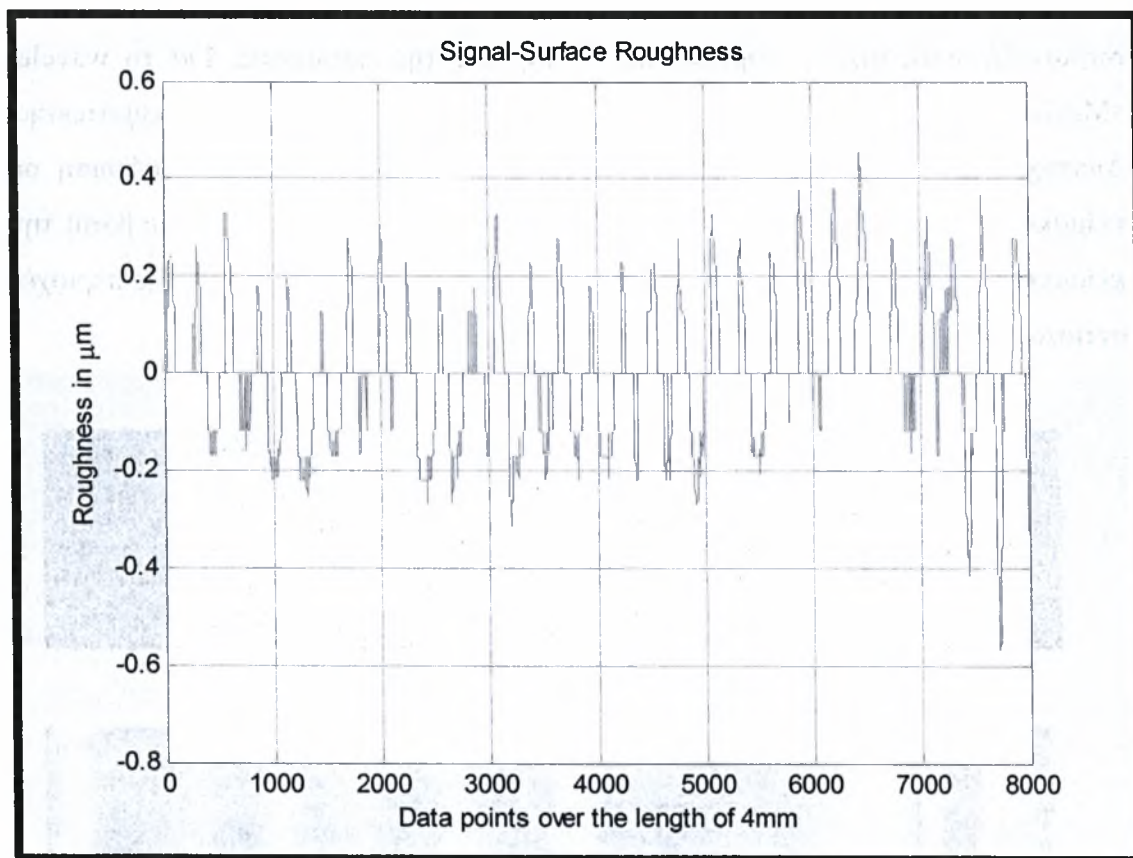
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.11.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.11.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **12^η Περίπτωση - Feed Rate 0.140mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.12.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



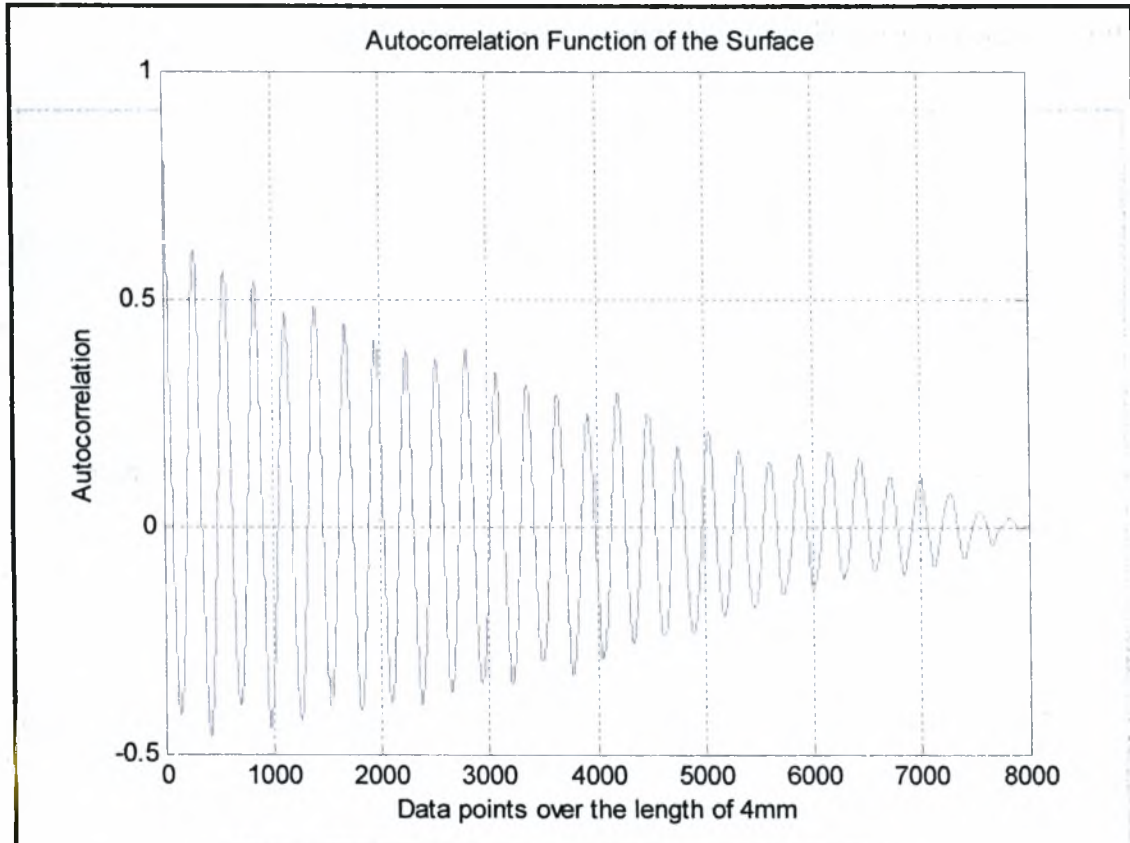
Σχήμα 6.12.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.12 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.12.1.

Πίνακας 6.12: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.060	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	6.490	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	3.360	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.124	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.395	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.440	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.180	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.540	
Παράμετρος,	R_k	=	3.180	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.12.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

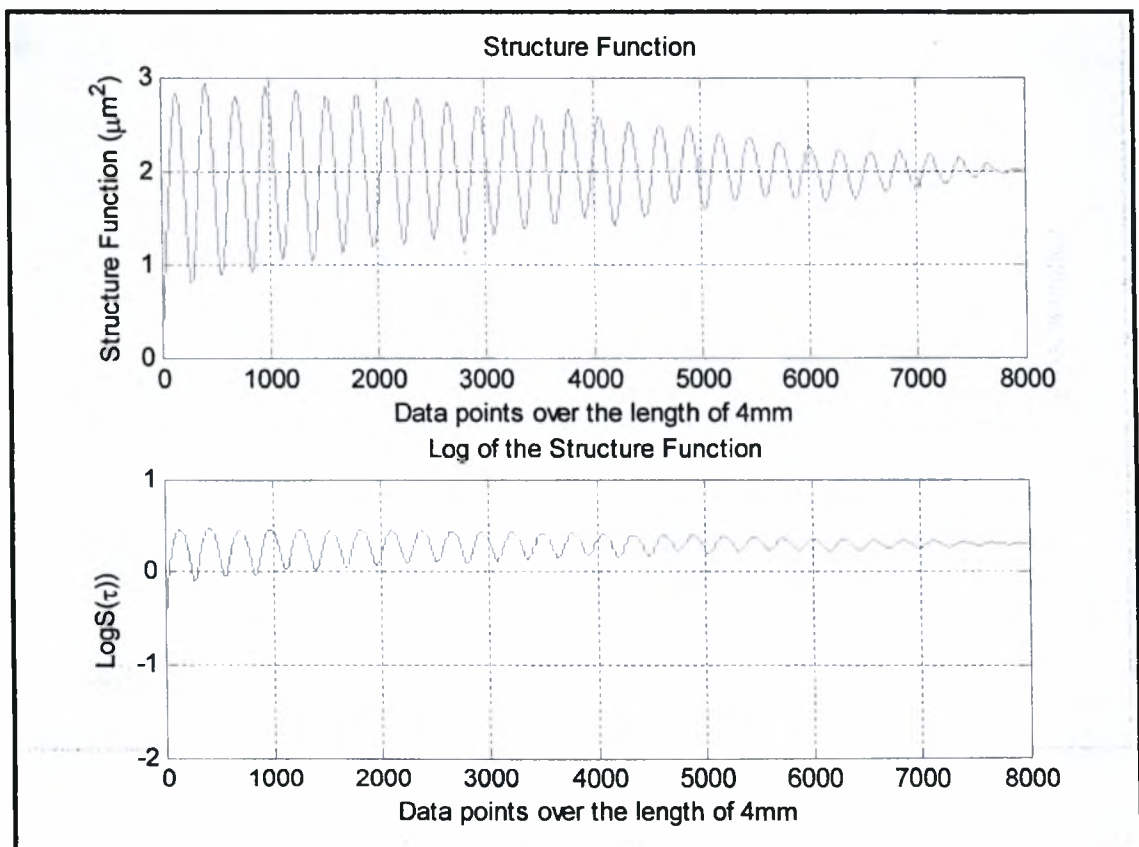


Σχήμα 6.12.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
169/8000	0.0845sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
72/8000	0.0360sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.12.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



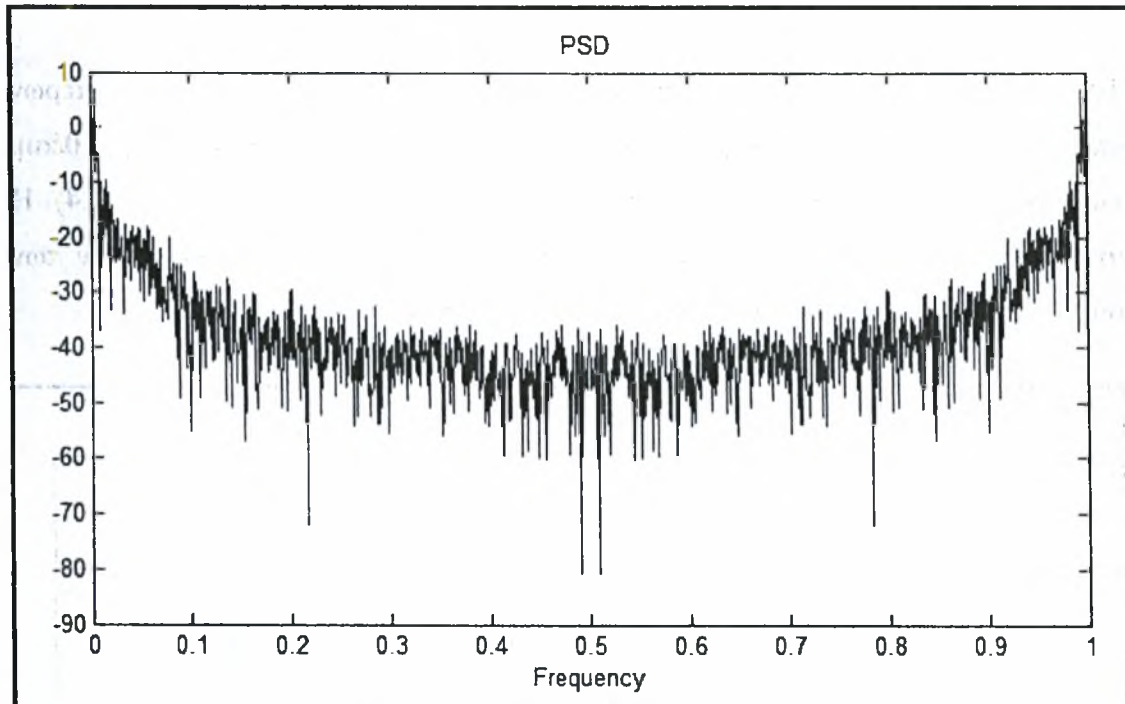
Σχήμα 6.12.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
<u>Σημείο μετάβασης:</u>	
141/8000	
Corner Frequency	= 0.0705mm

Fractal Dimension	
<u>Slope = 1.438</u>	
1.438	= 4-2D ⇒
-2.562	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.281

Στο παρακάτω Σχήμα 6.12.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.12.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

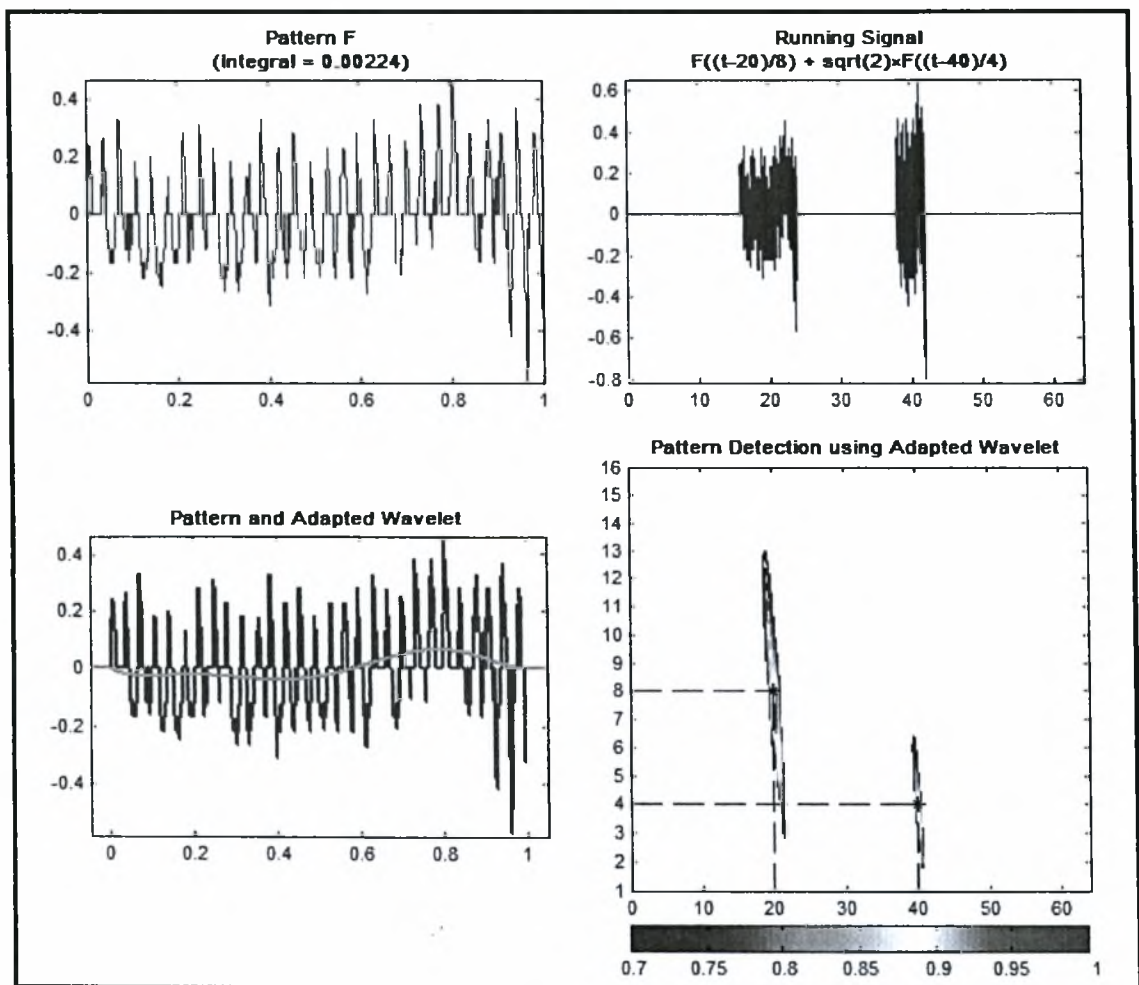
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 1.311$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.301, 1.321)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.12.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^ο βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

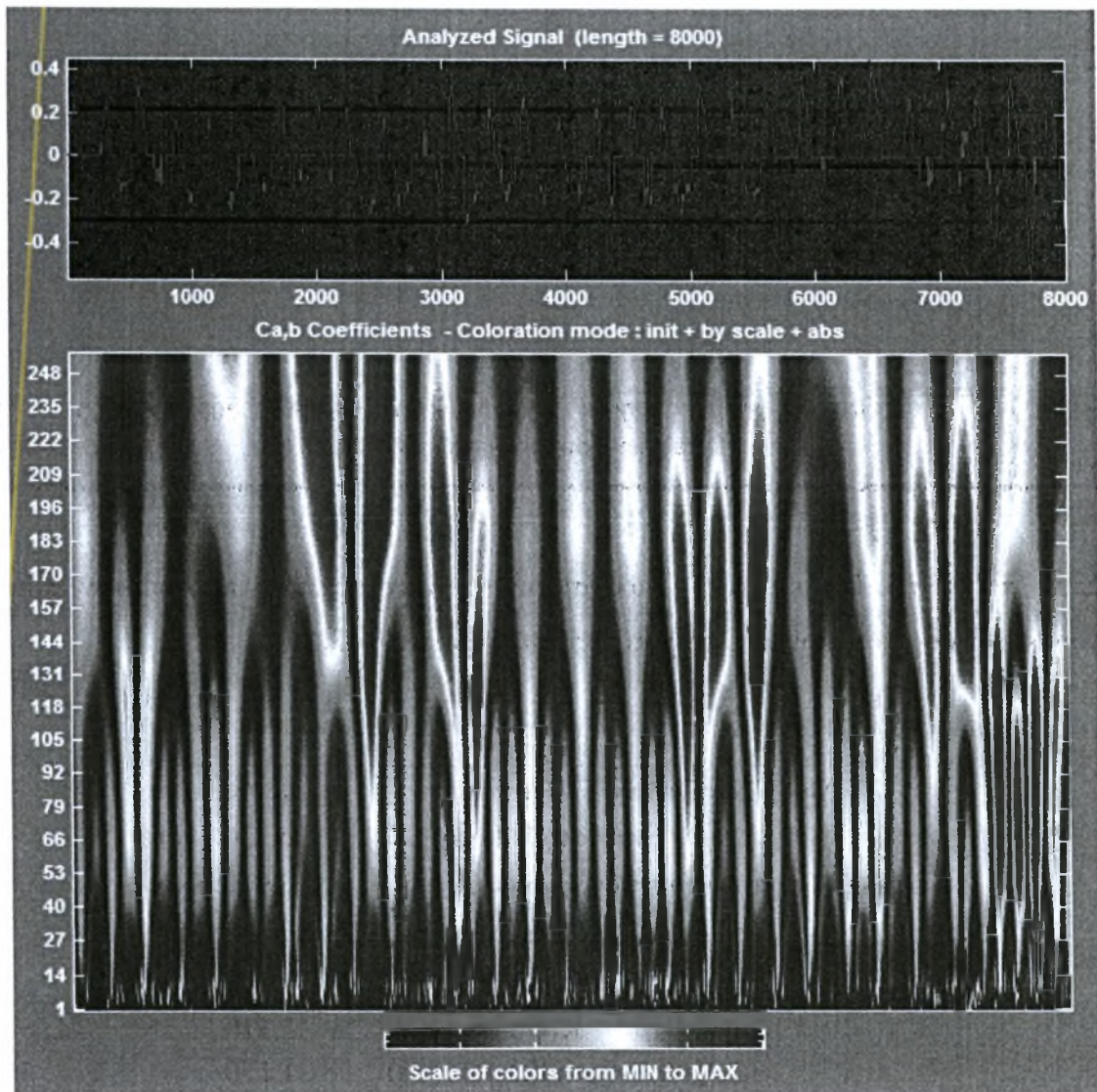
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.12.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

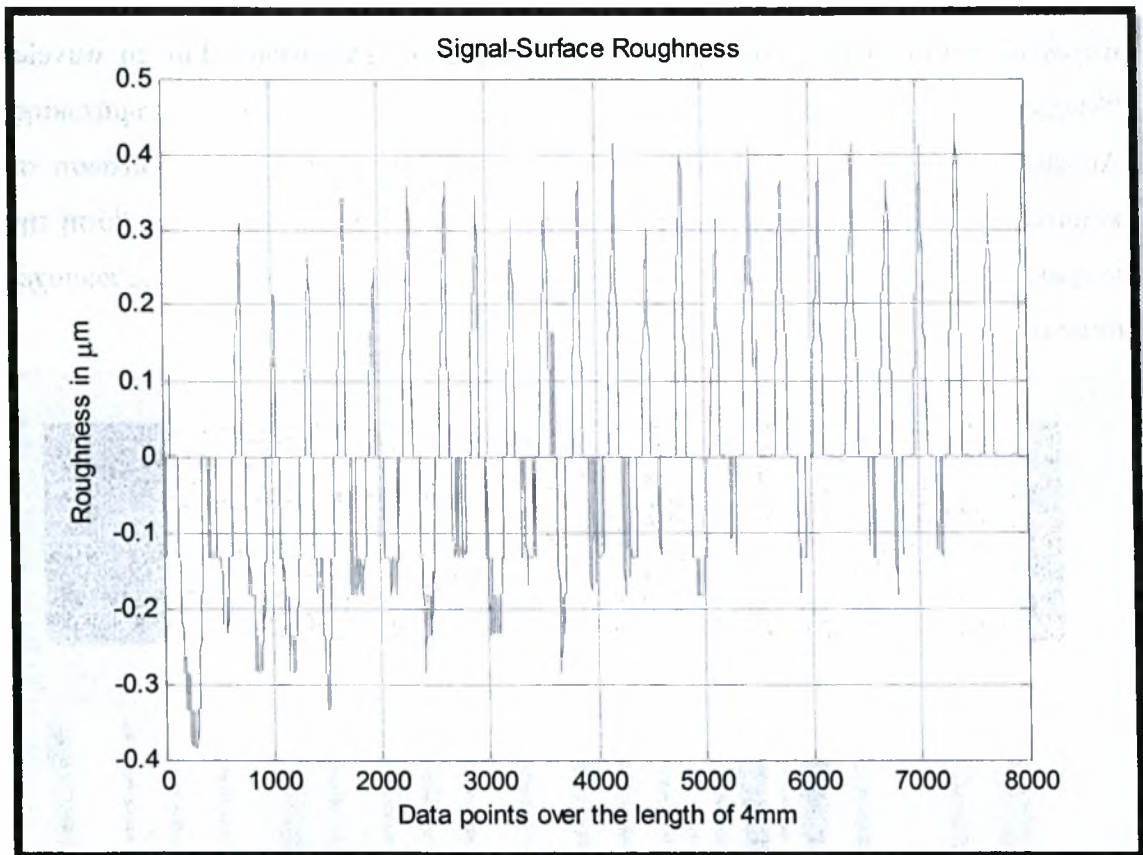
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.12.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.12.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **13^η Περίπτωση - Feed Rate 0.160mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



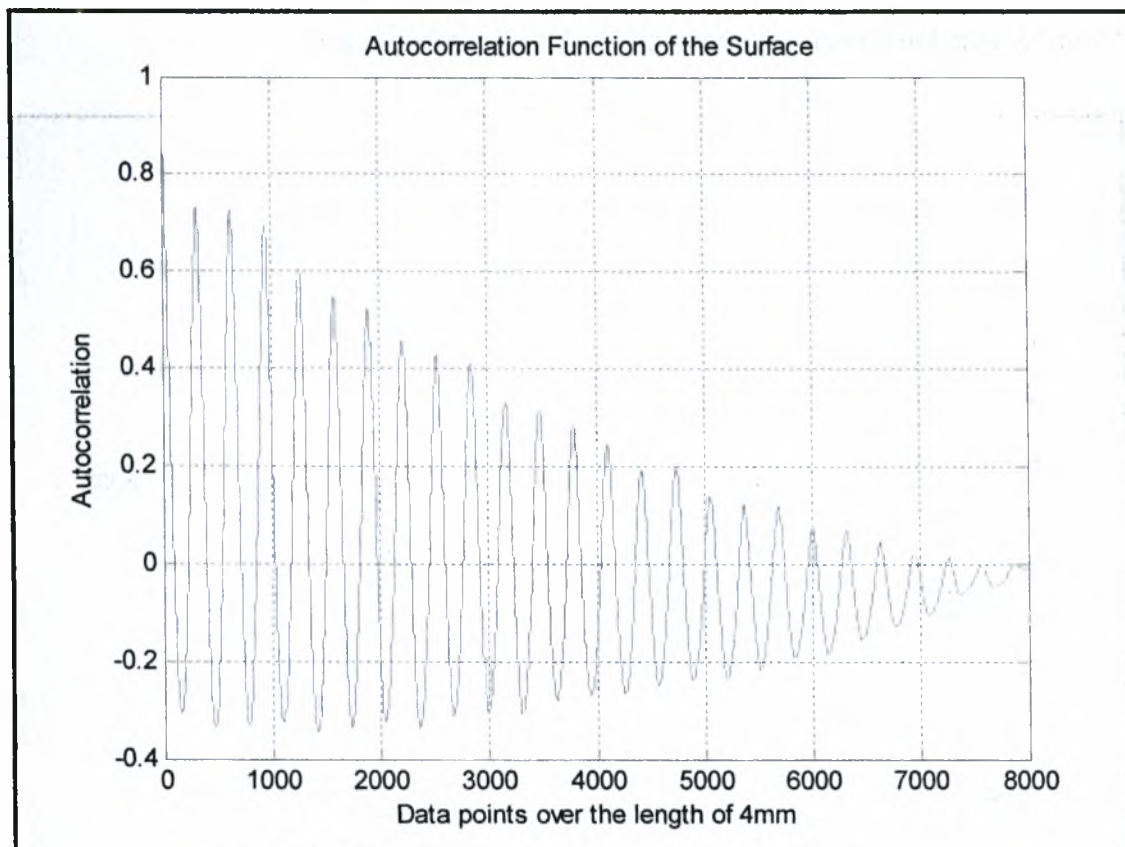
Σχήμα 6.13.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.13 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.13.1.

Πίνακας 6.13: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TaluProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.260	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	6.930	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	3.900	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.144	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.615	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.510	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.170	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	2.230	
Παράμετρος,	R_k	=	2.960	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

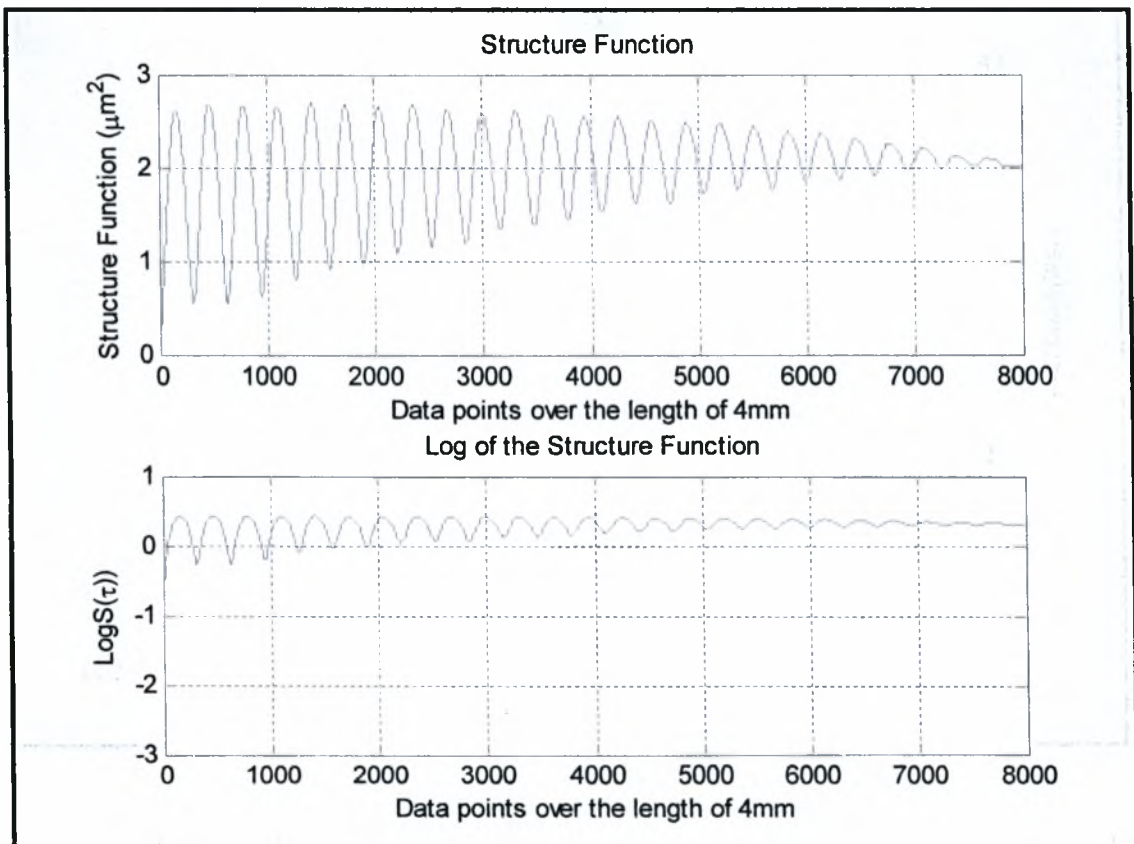


Σχήμα 6.13.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalvProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalvProfile)
179/8000	0.0895sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
84/8000	0.0420sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.13.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



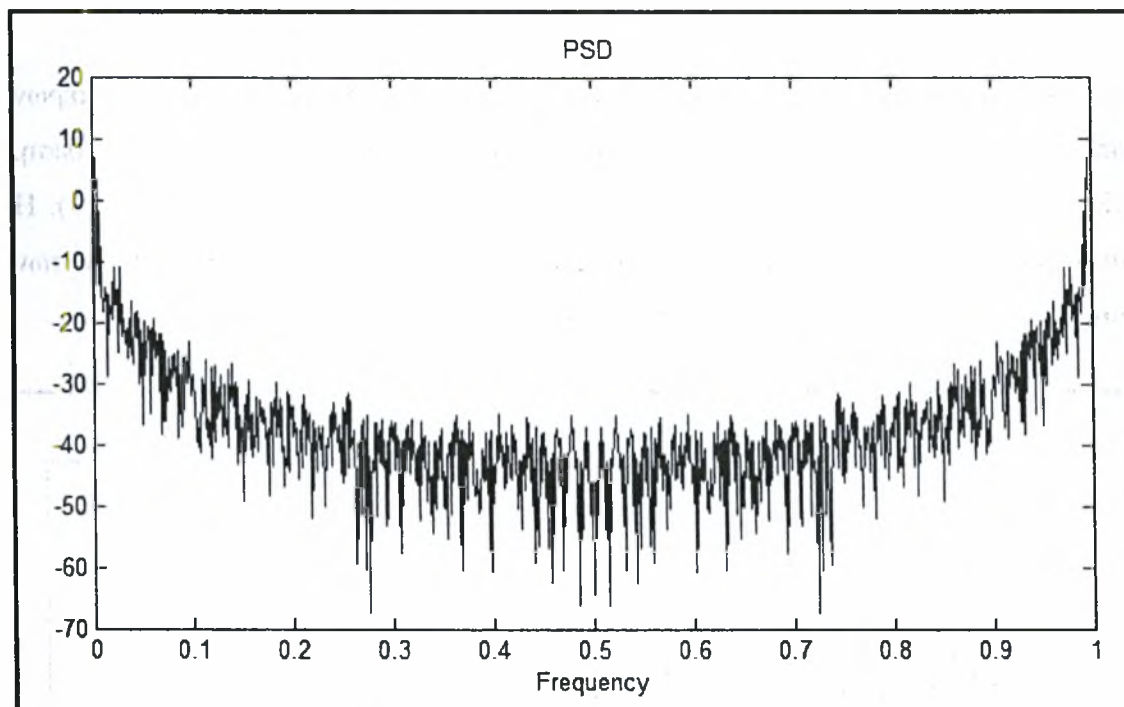
Σχήμα 6.13.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
158/8000	
Corner Frequency = 0.0790mm	

Fractal Dimension	
Slope = 1.440	
1.440	= 4-2D ⇒
-2.560	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D = 1.280	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.13.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

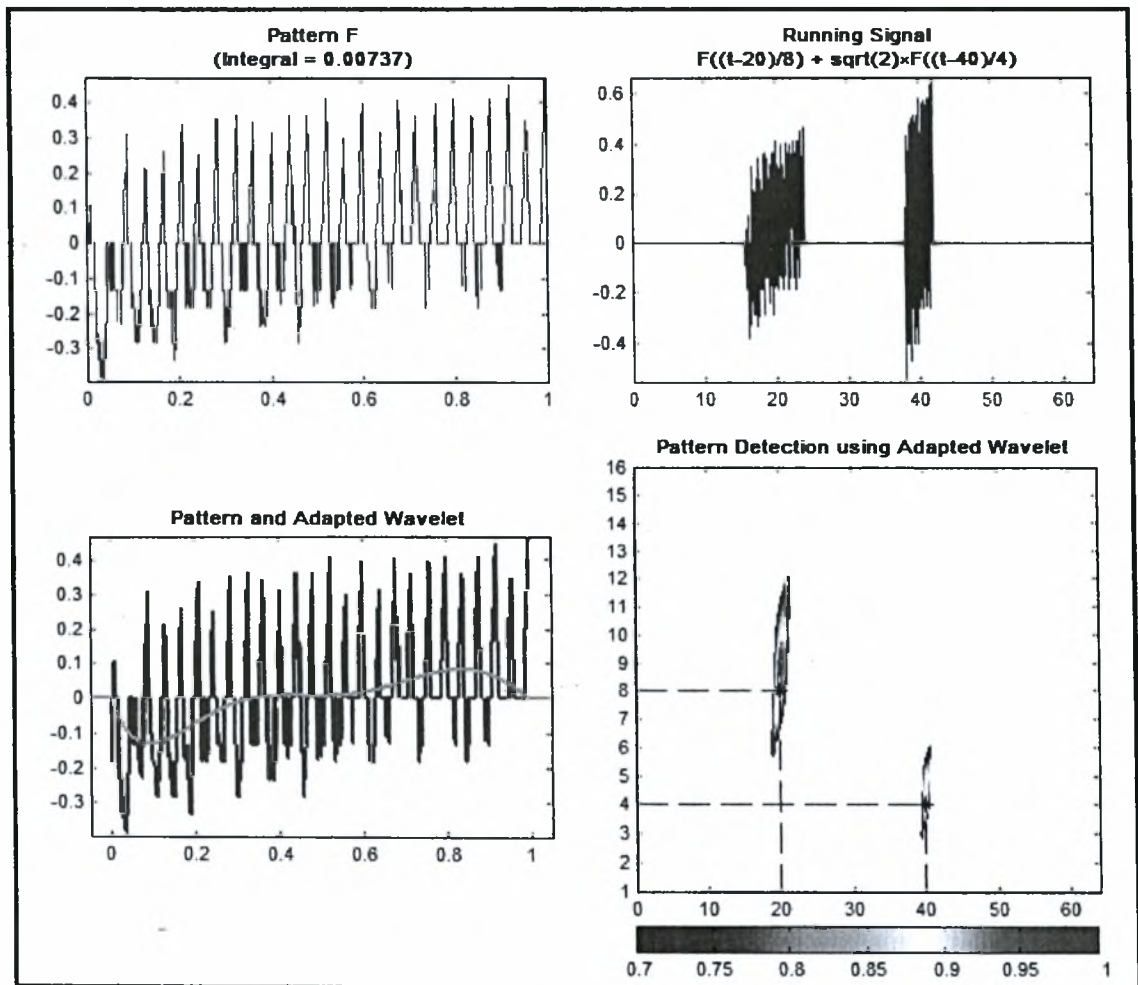
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.308$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.298, 1.318)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

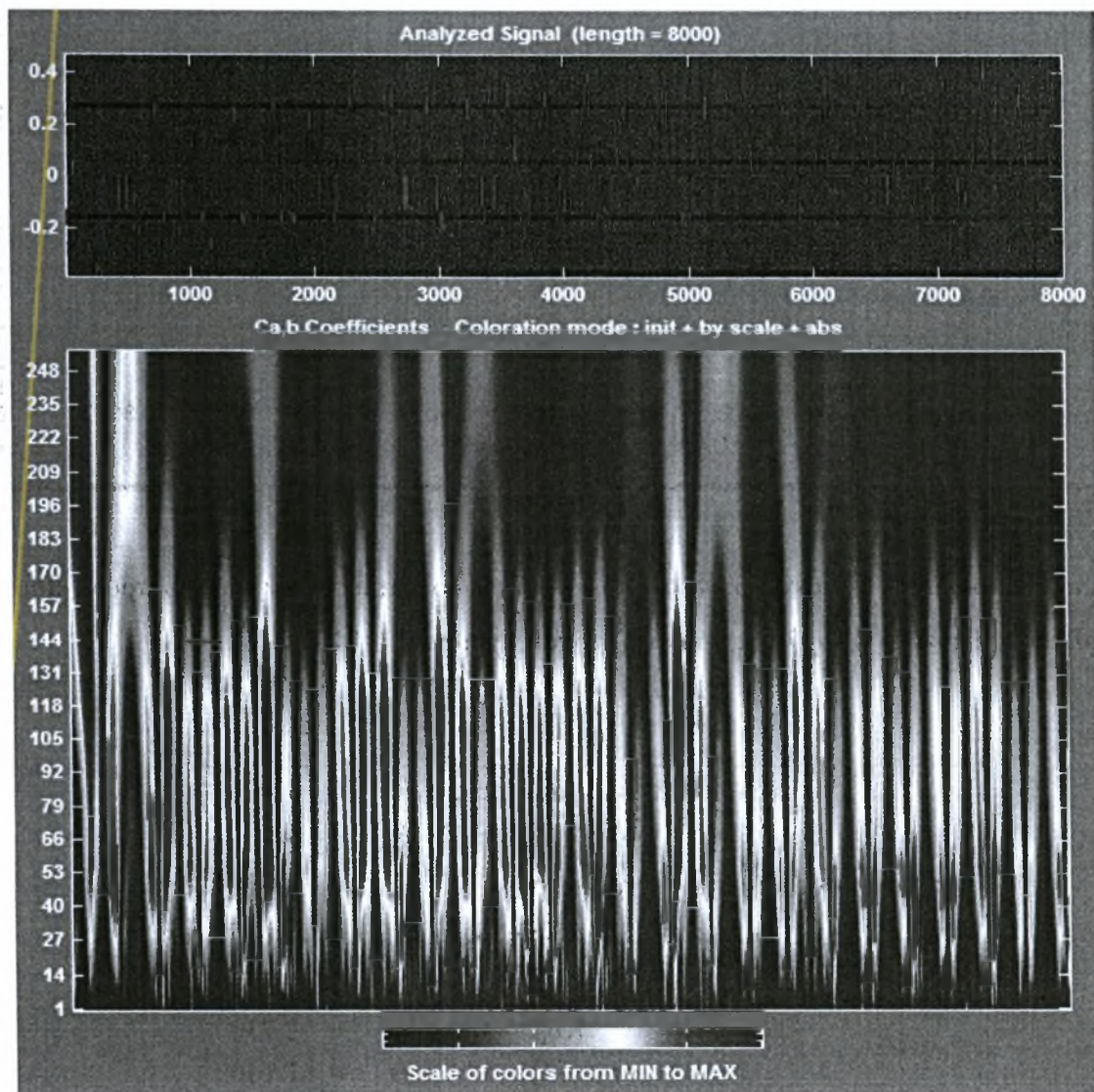
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.13.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

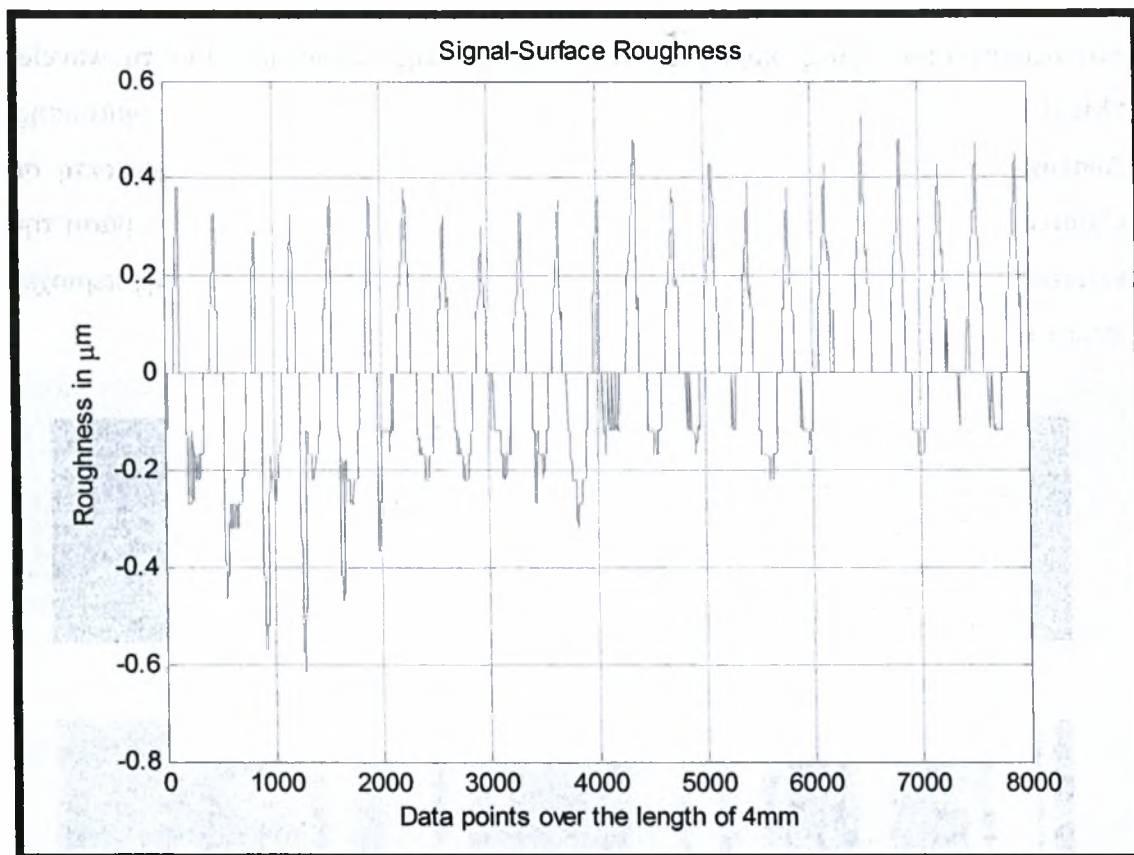
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.13.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.13.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **14^η Περίπτωση - Feed Rate 0.180mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.14.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



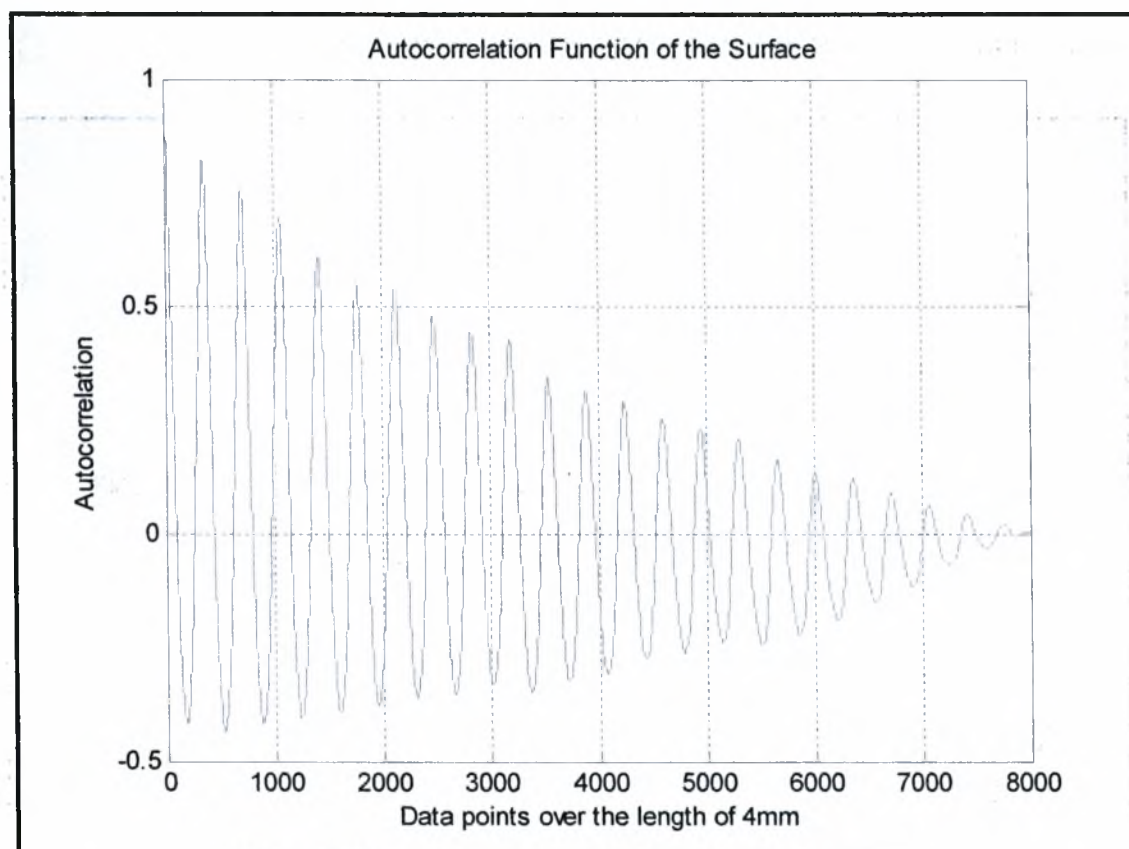
Σχήμα 6.14.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.14 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.14.1.

Πίνακας 6.14: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.520	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	9.780	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	4.330	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.175	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.325	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.730	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.140	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	2.610	
Παράμετρος,	R_k	=	2.980	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.14.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

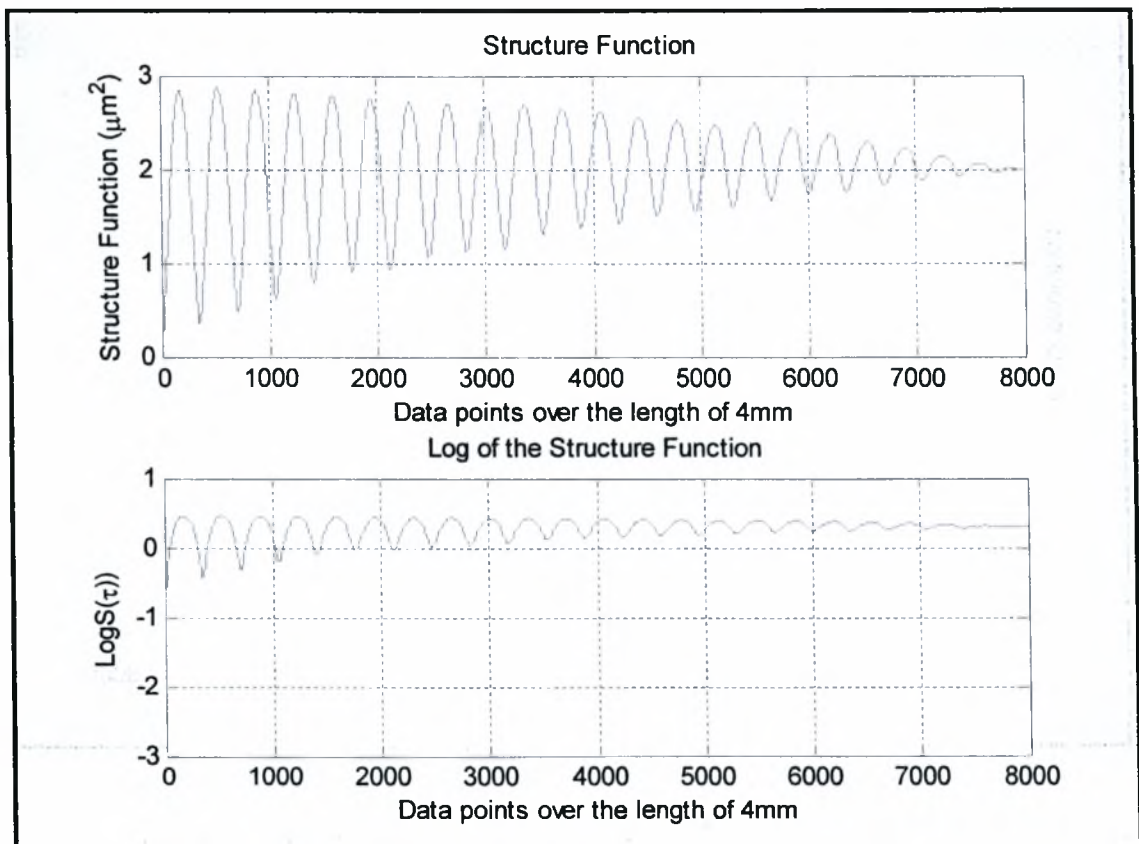


Σχήμα 6.14.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
182/8000	0.0910sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
87/8000	0.0435sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.14.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



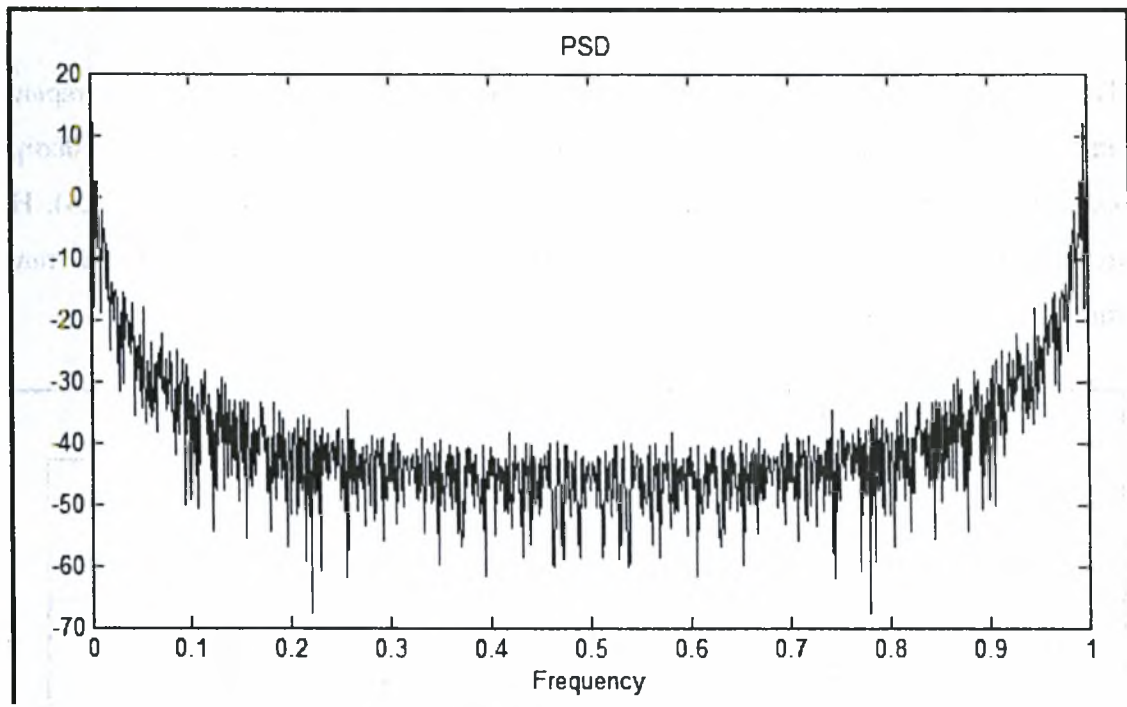
Σχήμα 6.14.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
180/8000	
Corner Frequency	= 0.0900mm

Fractal Dimension	
Slope = 1.476	
1.476	= 4-2D ⇒
-2.524	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.262

Στο παρακάτω Σχήμα 6.14.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.14.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

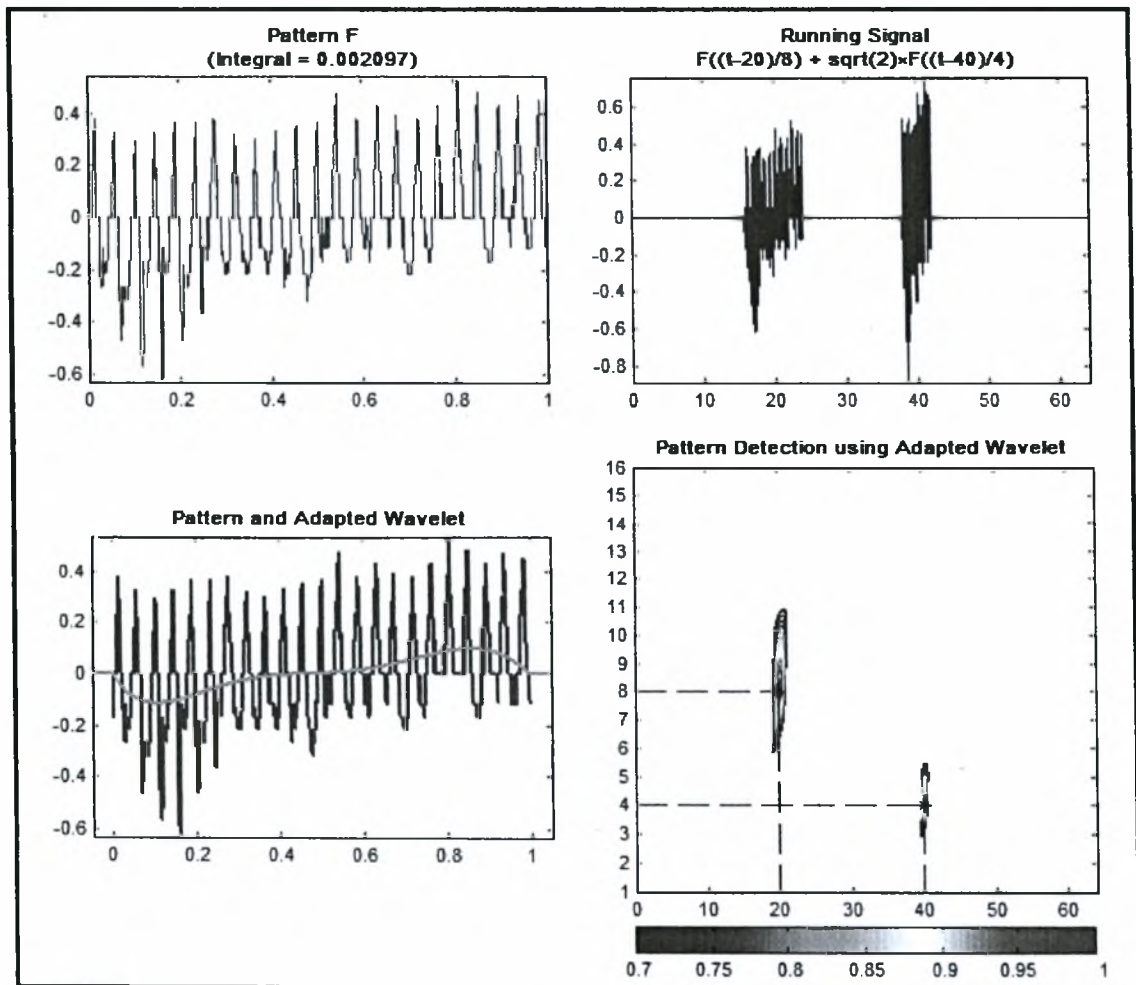
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=1.297$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.277, 1.297)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.14.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

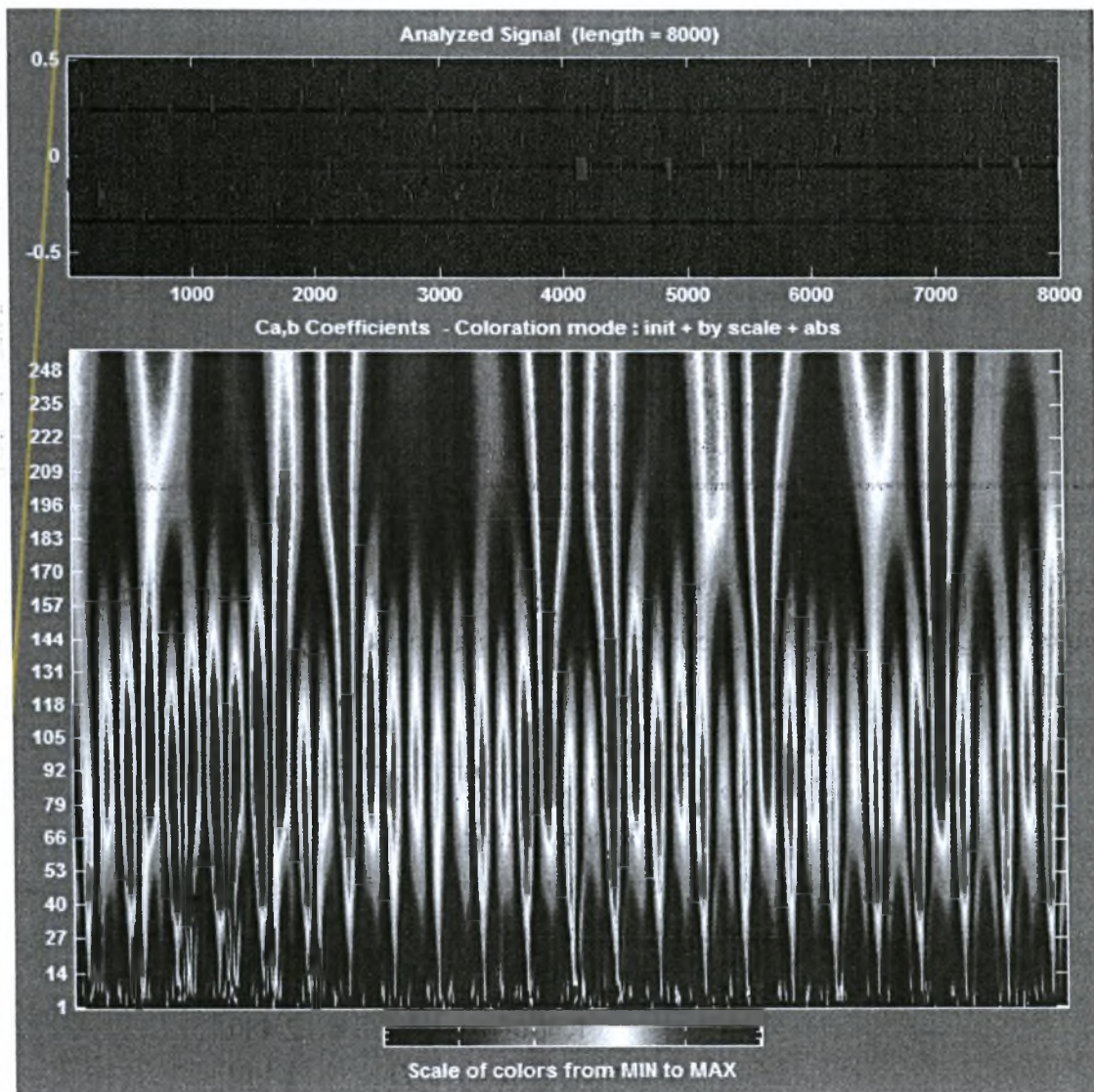
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.14.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

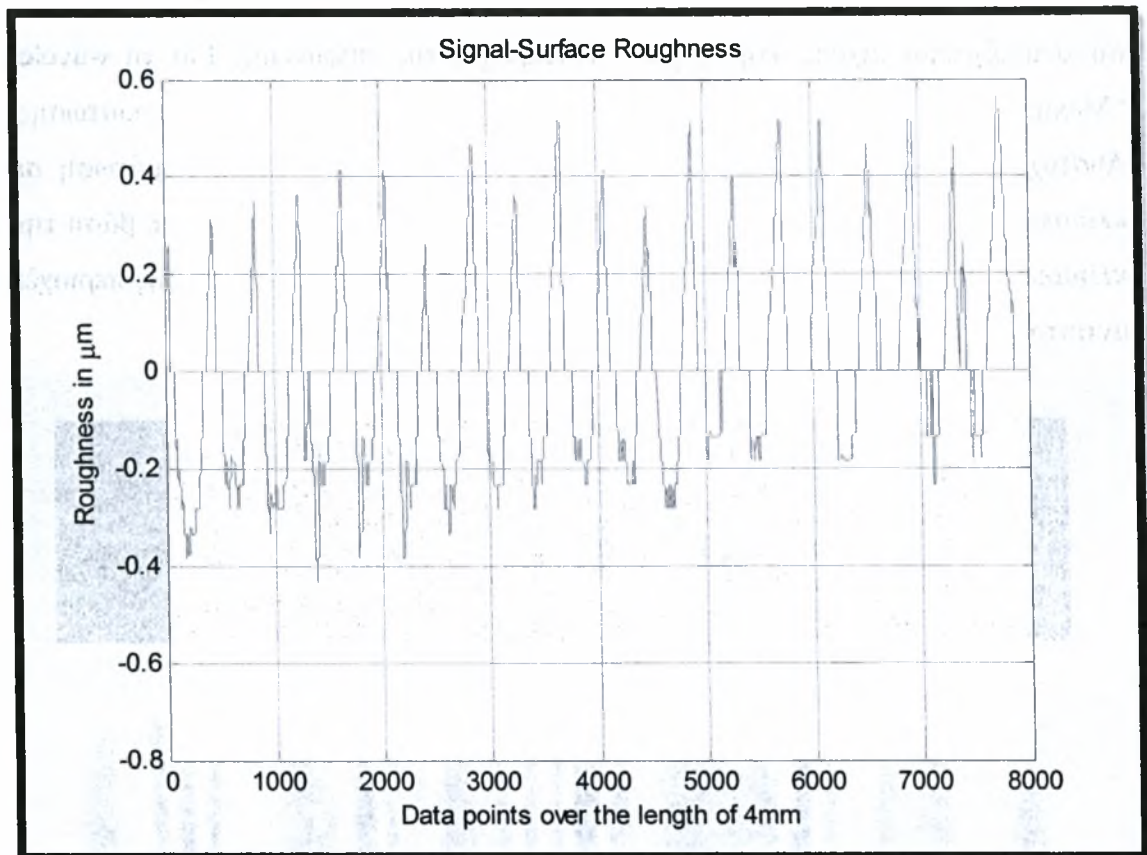
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.14.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.14.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **15^η Περίπτωση - Feed Rate 0.20 mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.15.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



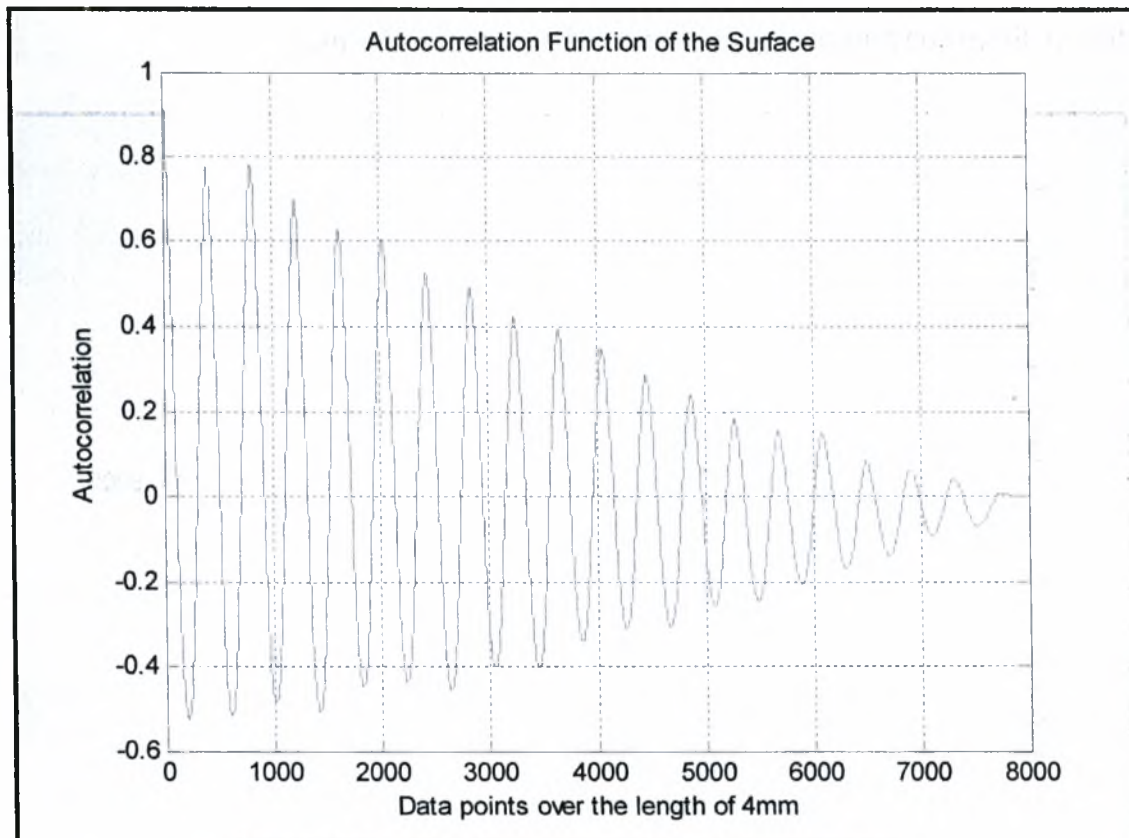
Σχήμα 6.15.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.15 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.15.1.

Πίνακας 6.15: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalysProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.650	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	8.870	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	4.980	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.161	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.608	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.480	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.140	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	2.800	
Παράμετρος,	R_k	=	4.130	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.15.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

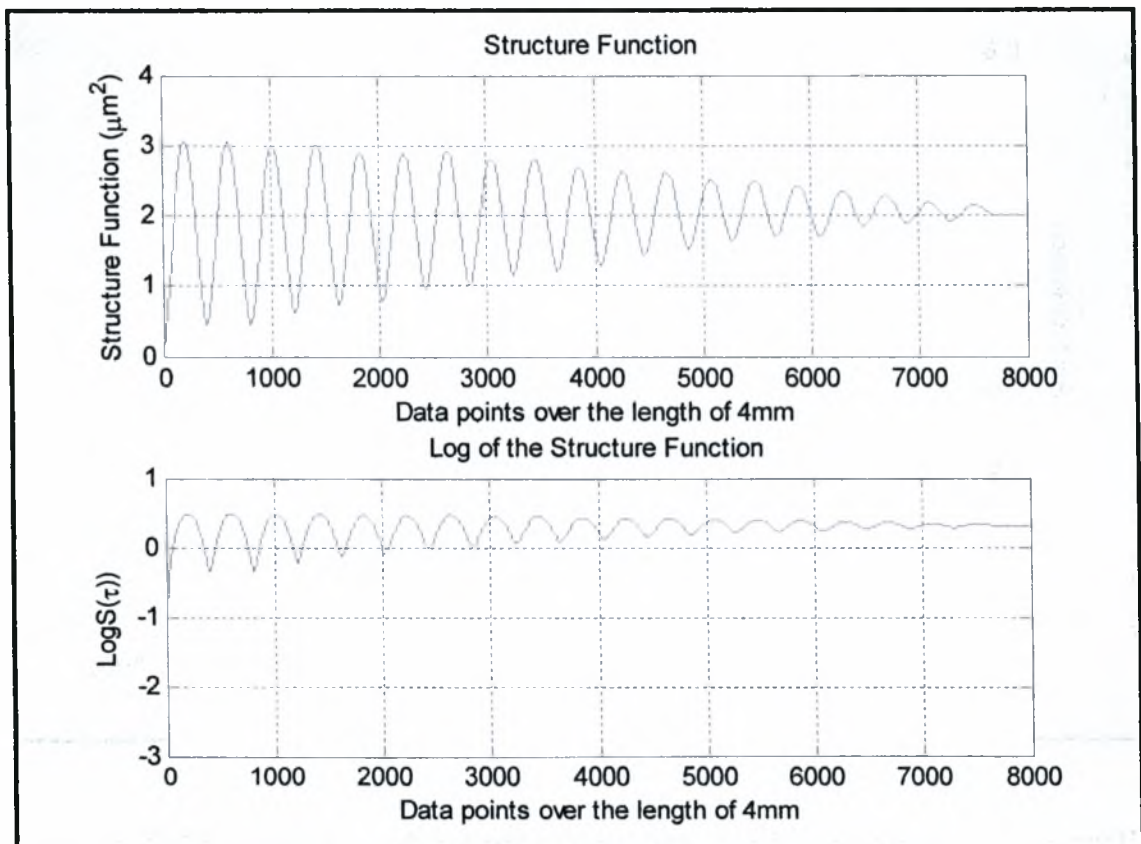


Σχήμα 6.15.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
201/8000	0.1005sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
106/8000	0.0530sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.15.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



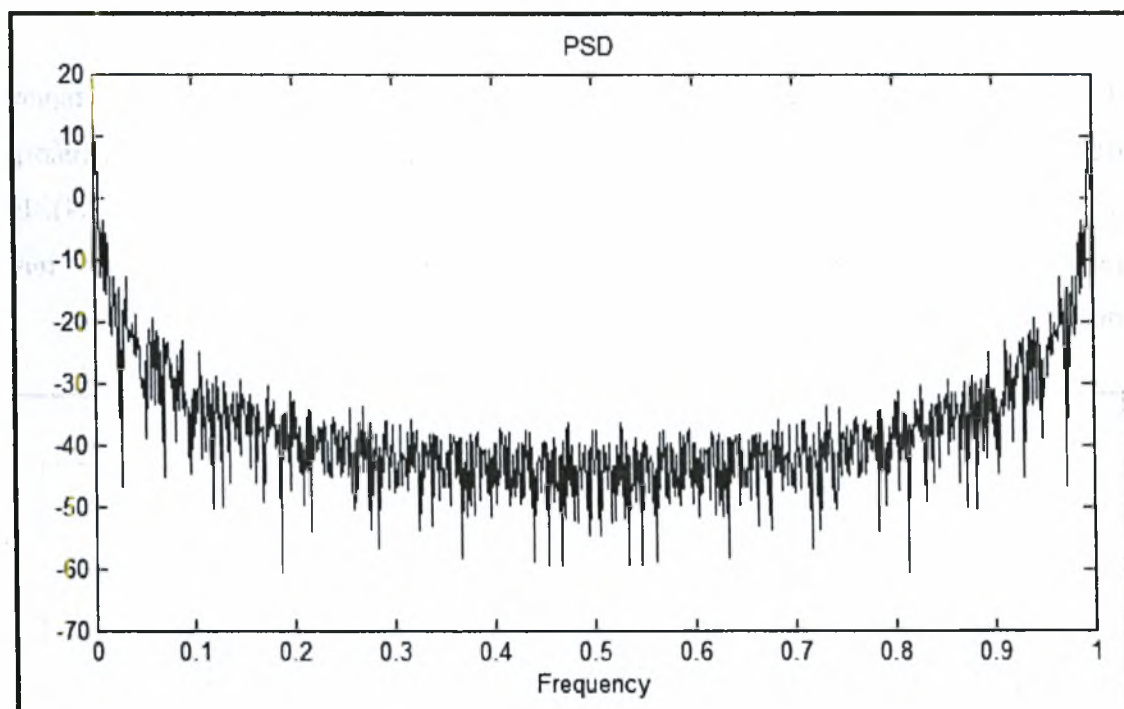
Σχήμα 6.15.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
207/8000	
Corner Frequency	= 0.1035mm

Fractal Dimension	
Slope = 1.498	
1.498	= 4-2D ⇒
-2.502	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.251

Στο παρακάτω Σχήμα 6.15.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.15.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

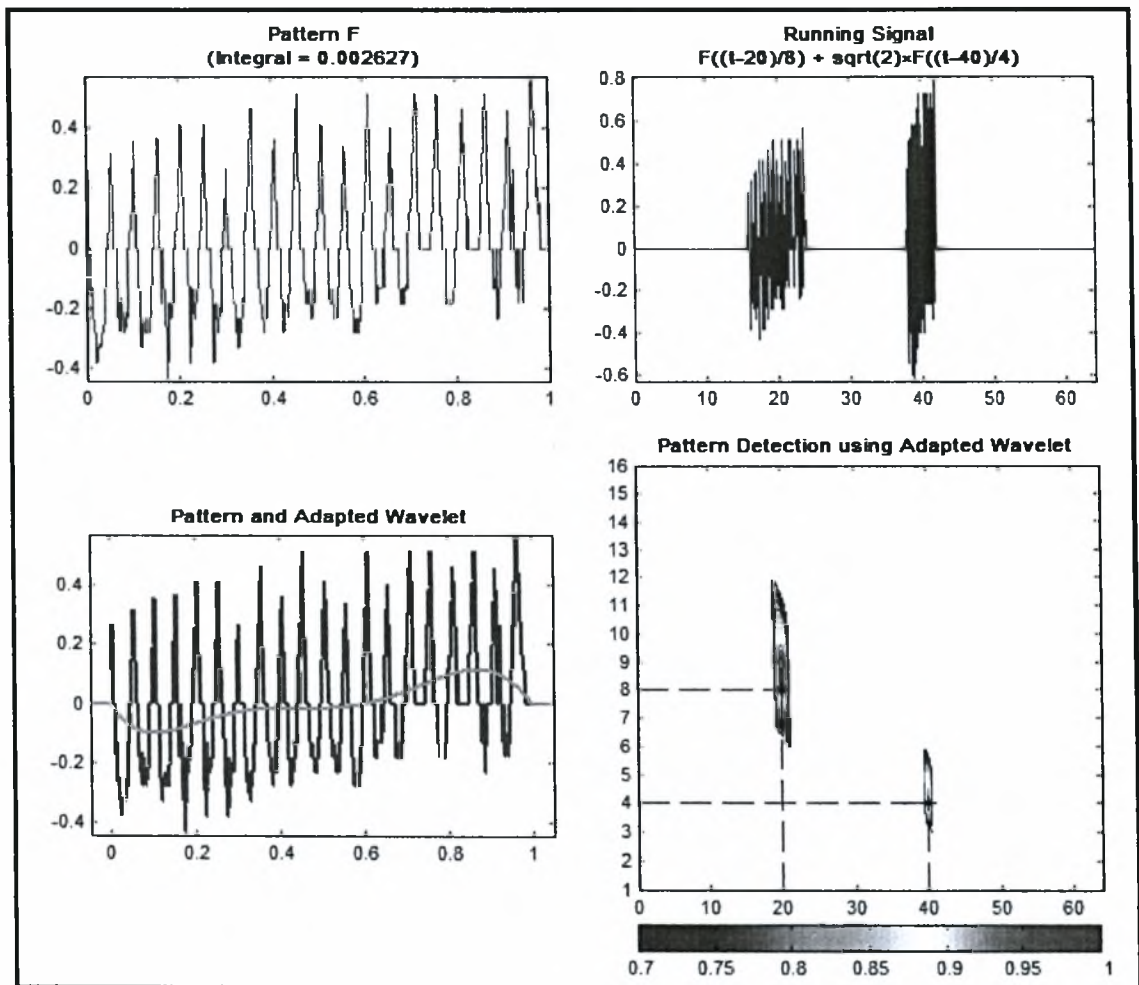
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 1.301$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.291, 1.311)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.15.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολώνυμο 6^ο βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

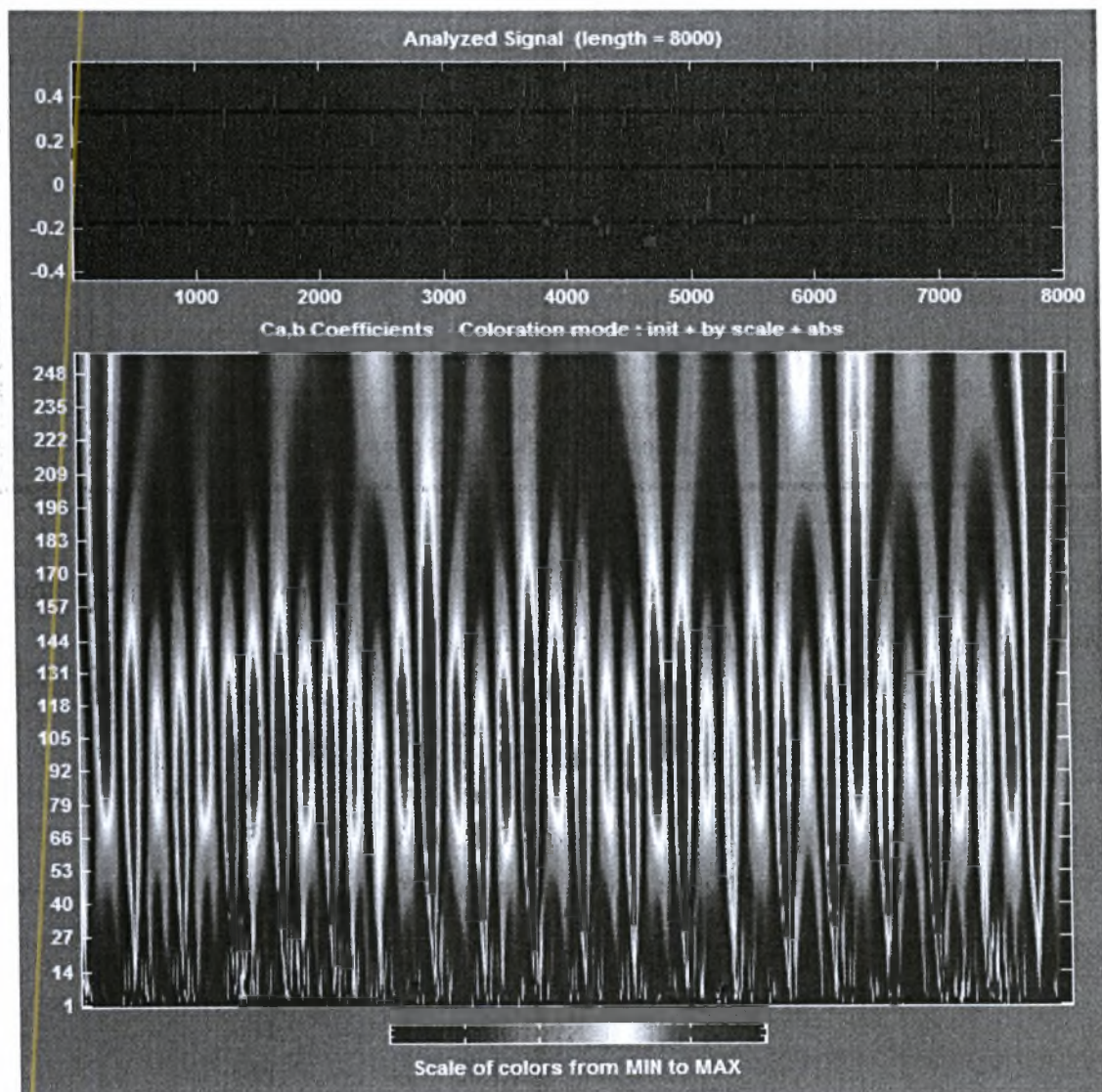
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.15.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

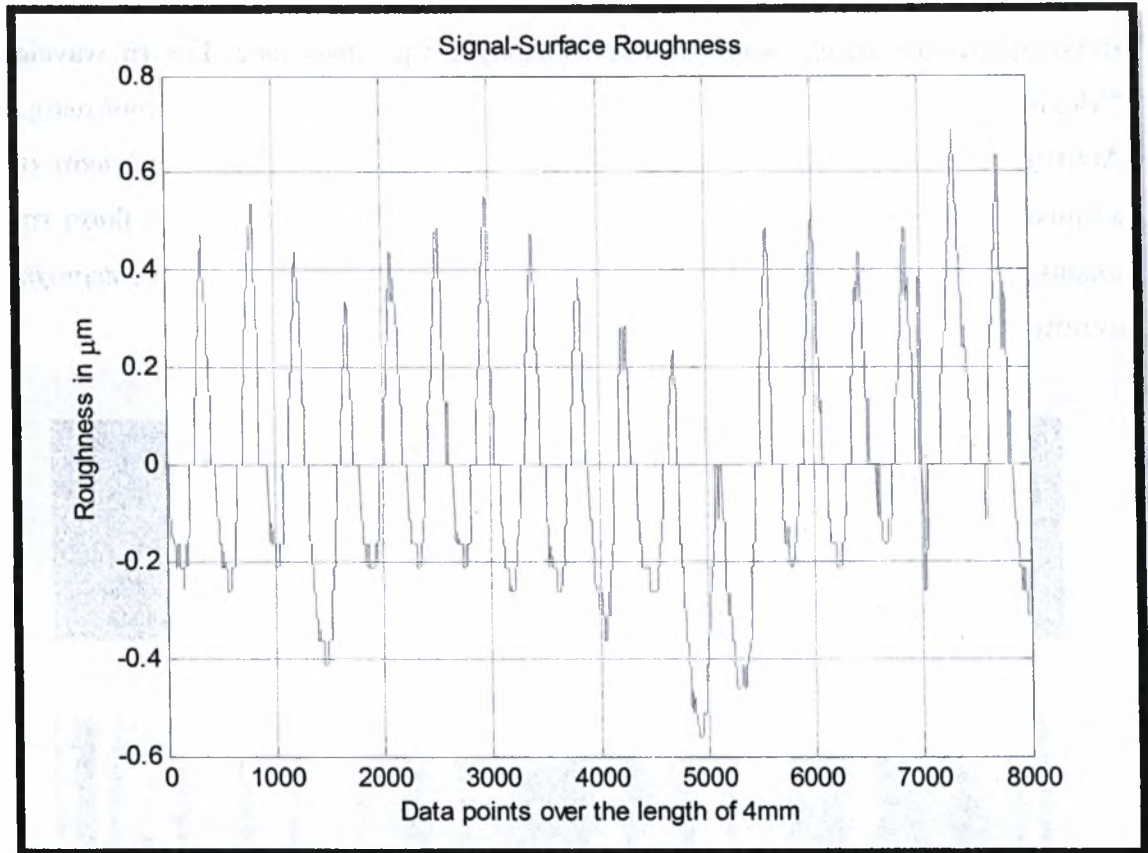
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.15.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.15.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **16^η Περίπτωση - Feed Rate 0.220mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.16.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



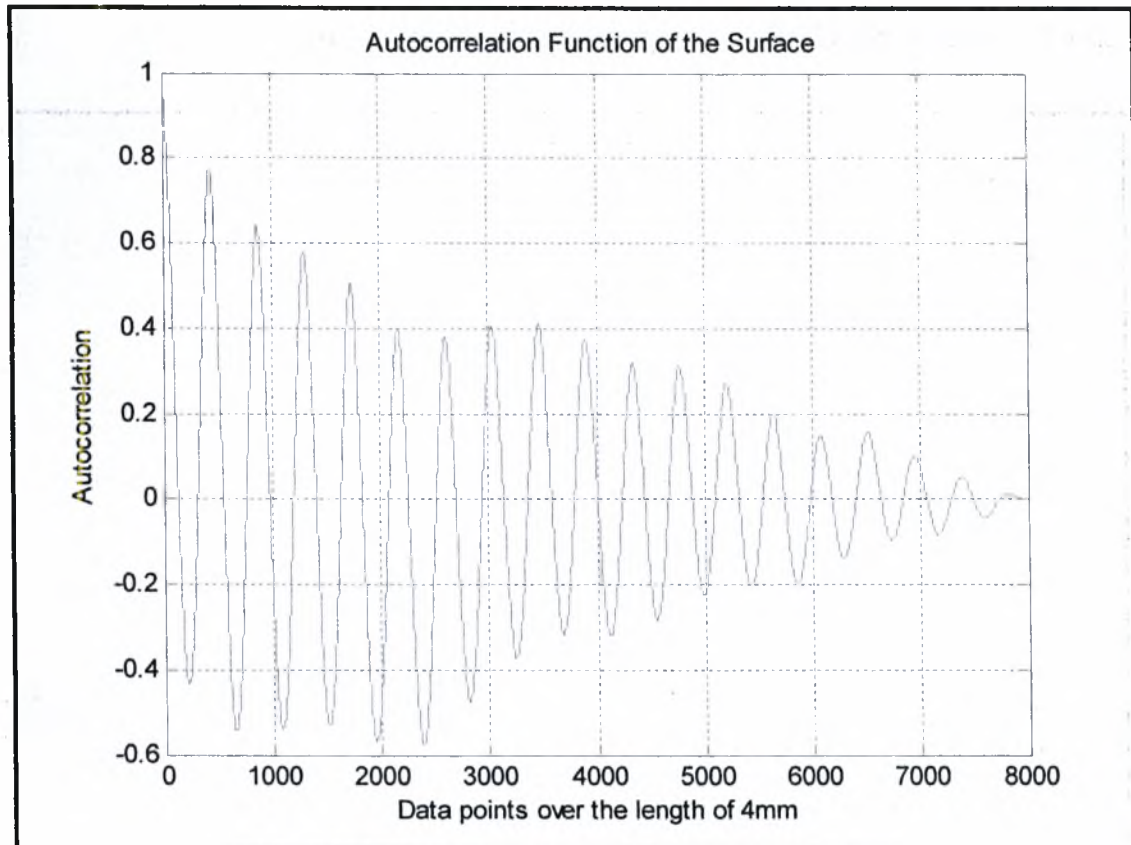
Σχήμα 6.16.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.16 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.16.1.

Πίνακας 6.16: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.880	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	9.550	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	5.200	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.200	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.475	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.160	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.110	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	2.500	
Παράμετρος,	R_k	=	5.160	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.16.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

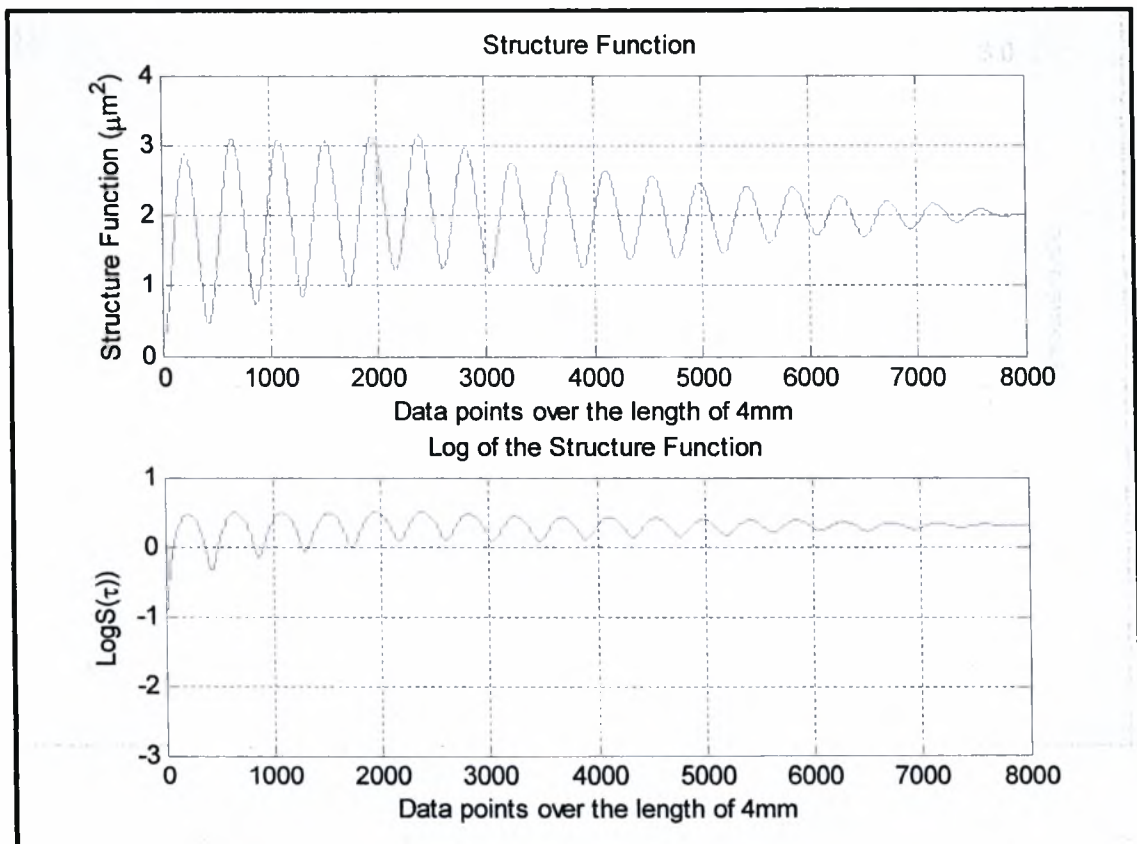


Σχήμα 6.16.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειας μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
220/8000	0.110sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
121/8000	0.0605sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.16.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



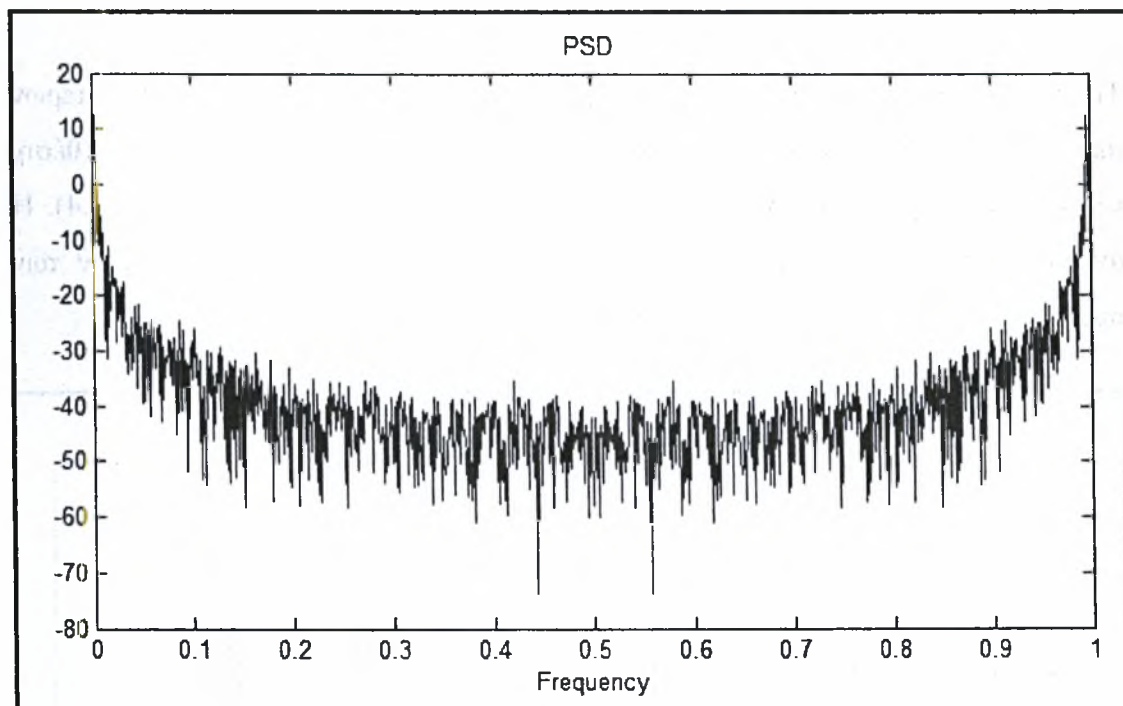
Σχήμα 6.16.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	220/8000
Corner Frequency	= 0.1100mm

Fractal Dimension	
Slope = 1.466	
1.466	= 4-2D ⇒
-2.534	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.267

Στο παρακάτω Σχήμα 6.16.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.16.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

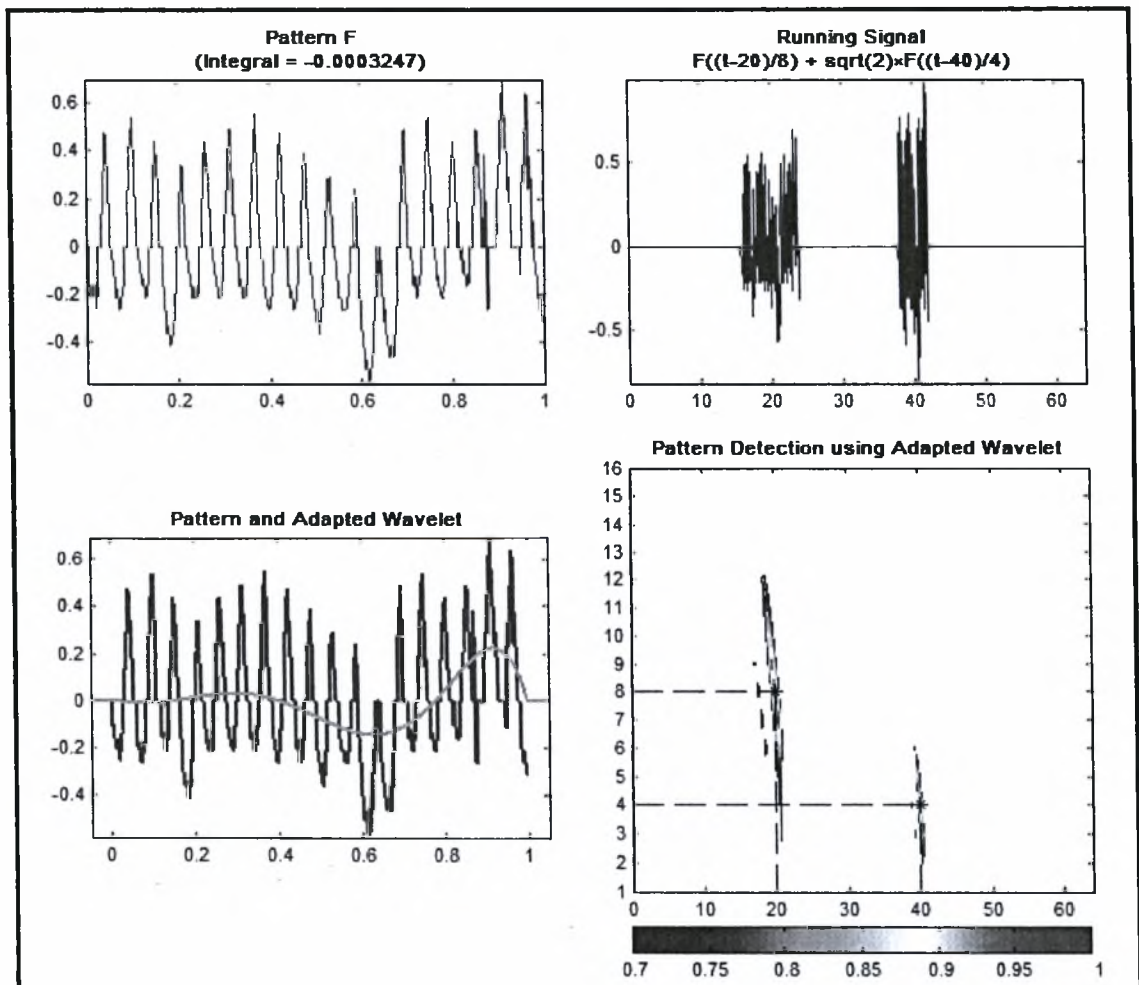
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 1.299$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (1.279, 1.299)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.16.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

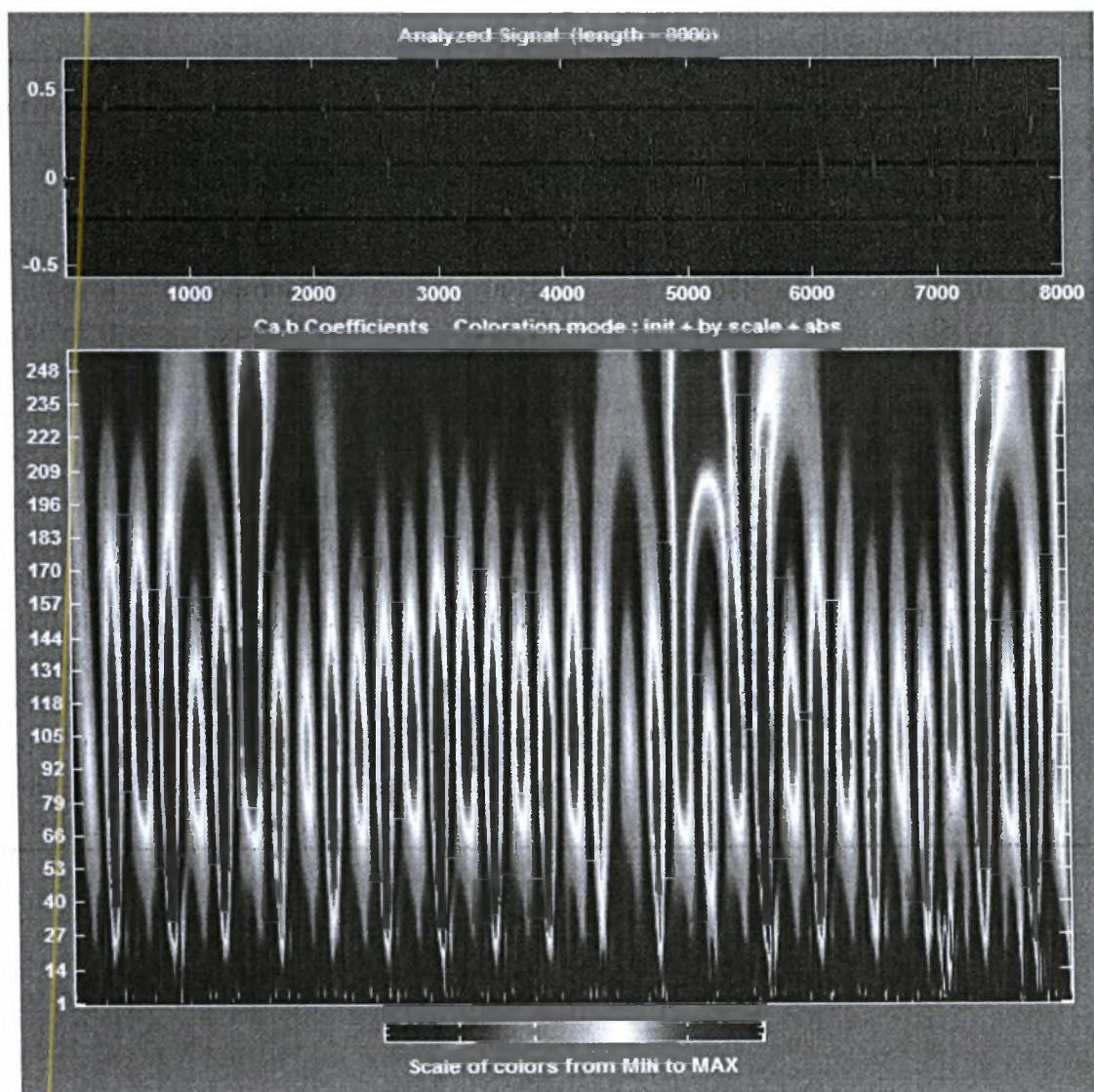
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.16.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.16.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.16.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

6.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

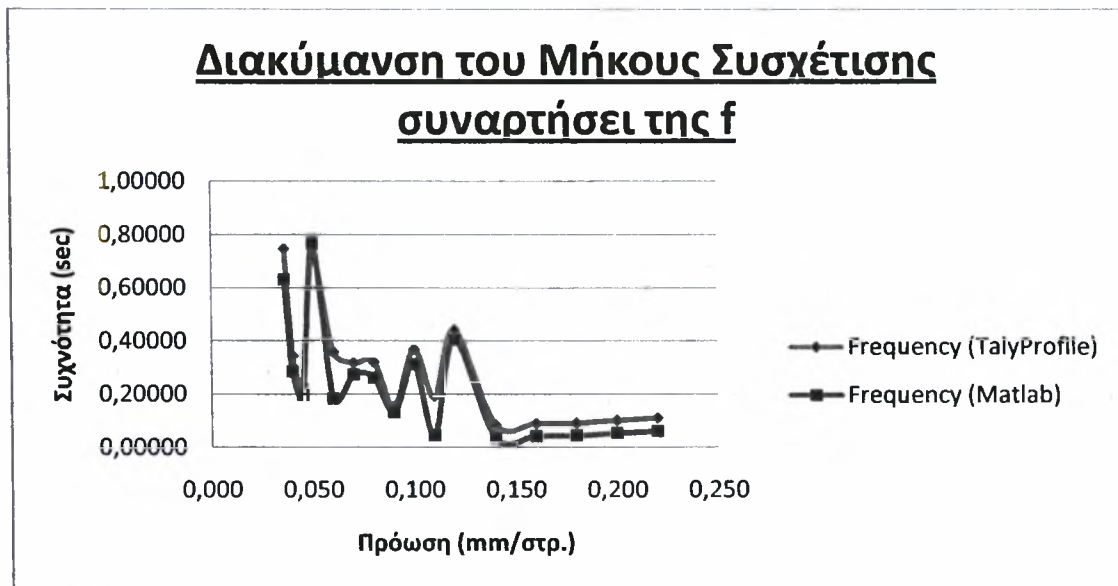
6.1.2.1 Μήκος Αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation length)

Στον παρακάτω Πίνακα 6.17 παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης β , που λάβαμε τόσο από το λογισμικό TalyProfile όσο και από το πρόγραμμα ανάλυσης της τραχύτητας που αναπτύξαμε στο Matlab. Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1. Παρέχει βασικές πληροφορίες που αφορούν την κυμάτωση της επιφάνειας σε σχέση με το πλάτος της.

Πίνακας 6.17: Πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της πρόωσης.

<u>A/A</u> <u>ck60</u>	<u>Πρόωση</u> <u>(mm/στρ.)</u>	<u>Σημείο</u> <u>Δείγματος</u> <u>(TalyProfile)</u>	<u>Σημείο</u> <u>Δείγματος</u> <u>(Matlab)</u>	<u>Συχνότητα</u> <u>(TalyProfile)</u>	<u>Συχνότητα</u> <u>(Matlab)</u>
1	0.036	1495	1263	0.74750sec	0.63150sec
2	0.040	688	570	0.34400sec	0.28500sec
3	0.045	470	390	0.23500sec	0.19500sec
4	0.050	1430	1534	0.71500sec	0.76700sec
5	0.060	719	367	0.35950sec	0.18350sec
6	0.070	635	547	0.31750sec	0.27350sec
7	0.080	644	524	0.32200sec	0.26200sec
8	0.090	308	263	0.15400sec	0.13150sec
9	0.100	739	626	0.36950sec	0.31300sec
10	0.110	385	90	0.19250sec	0.04500sec
11	0.120	886	808	0.44300sec	0.40400sec
12	0.140	169	72	0.08450sec	0.03600sec
13	0.160	179	84	0.08950sec	0.04200sec
14	0.180	182	87	0.09100sec	0.04350sec
15	0.200	201	106	0.10050sec	0.05300sec
16	0.220	220	121	0.11000sec	0.06050sec

Στο παρακάτω Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η διακύμανση για την συχνότητα του autocorrelation length σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.7: Διακύμανση της συχνότητας του autocorrelation length συναρτήσεως της προώσεως.

Μεταβολή της συχνότητας του autocorrelation length συνάρτησης της προώσεως

Κατ' αρχήν παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ίδια διακύμανση με πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Σε μεγάλες προώσεις παρατηρούμε ότι η τραχύτητα σε ένα συγκεκριμένο τομέας της επιφάνειας είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας σε κάποιο άλλο αντίστοιχο τομέα.

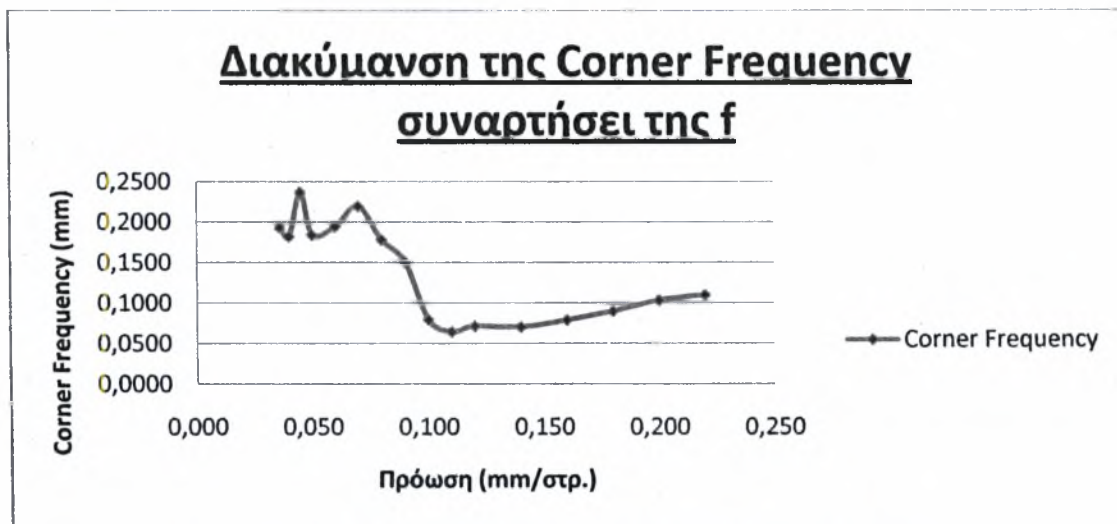
6.1.2.2 Corner Frequency

Στον παρακάτω Πίνακα 6.18 παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency. Το μήκος δειγματοληψίας του στυλίσκου είναι 4mm και στο οποίο λαμβάνονται 8000 σημεία. Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά.

Πίνακας 6.18: Πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency συναρτήσει της πρόωσης.

A/A ck60	Πρόωση (mm/στρ.)	Corner Point	Corner Frequency
1	0.036	386	0.1930mm
2	0.040	364	0.1820mm
3	0.045	474	0.2370mm
4	0.050	368	0.1840mm
5	0.060	389	0.1945mm
6	0.070	439	0.2195mm
7	0.080	356	0.1780mm
8	0.090	302	0.1510mm
9	0.100	159	0.0795mm
10	0.110	129	0.0645mm
11	0.120	143	0.0715mm
12	0.140	141	0.0705mm
13	0.160	158	0.0790mm
14	0.180	180	0.0900mm
15	0.200	207	0.1035mm
16	0.220	220	0.1100mm

Στο παρακάτω Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η διακύμανση της corner frequency σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.8: Διακύμανση της corner frequency συναρτήσεως της προώσεως.

Μεταβολή της corner frequency συνάρτηση της προώσεως

Με την αύξηση της προώσεως, εντατικοποιείται η προσπάθεια για κοπή. Εμφανίζεται επομένως η ύπαρξη ανωμαλιών στην περιοχή της κοπής που δημιουργεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Συνεπώς, η μεταβολή από την γραμμική στην ταραχώδη περιοχή της structure function εμφανίζεται νωρίτερα και έτσι η corner frequency μειώνεται.

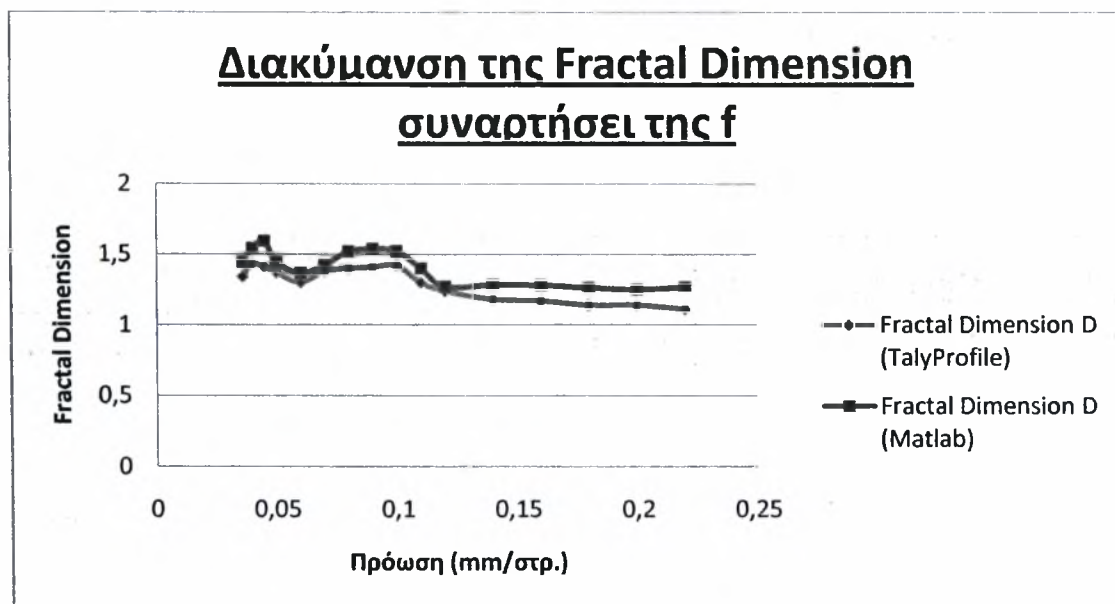
6.1.2.3 Fractal Dimension

Από τον λογάριθμο της structure function θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική των επιφανειών που μελετώνται. Η διάσταση fractal μιας επιφάνειας δεν αποτελεί σαφώς ένα μέτρο της τραχύτητας υπό την κλασσική έννοια της R_a ή κάποιας από τις άλλες κοινές παραμέτρους τραχύτητας που χρησιμοποιούνται για τα προφίλ ή τις επιφάνειες. Η διάσταση fractal δεν λέει τίποτα για το μέγεθος της τραχύτητας. Η επιμήκυνση μιας επιφάνειας στην κατεύθυνση z έτσι ώστε να αυξηθεί το εύρος της τραχύτητας, δεν προκαλεί μεταβολές στη διάσταση fractal!! Η fractal διάσταση εξαρτάται μόνο από την κλίμακα των στοιχείων τραχύτητας και είναι ευαίσθητη στη χωρική οργάνωση των δεδομένων υψομετρικών μεταβολών σε πολλές κλίμακες. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.19.

Πίνακας 6.19: Πειραματικά αποτελέσματα για τη διάσταση fractal συναρτήσει της πρόωσης.

<u>A/A</u> <u>ck60</u>	<u>Πρόωση (mm/στρ.)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D</u> <u>(TalyProfile)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D</u> <u>(Matlab)</u>
1	0.036	1.340	1.445
2	0.040	1.430	1.543
3	0.045	1.410	1.592
4	0.050	1.370	1.442
5	0.060	1.300	1.366
6	0.070	1.380	1.422
7	0.080	1.400	1.518
8	0.090	1.410	1.538
9	0.100	1.420	1.521
10	0.110	1.300	1.398
11	0.120	1.240	1.270
12	0.140	1.180	1.281
13	0.160	1.170	1.280
14	0.180	1.140	1.262
15	0.200	1.140	1.251
16	0.220	1.110	1.267

Στο παρακάτω Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η διακύμανση της fractal dimension σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.9: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.

Μεταβολή της fractal dimension συνάρτηση της πρόωσης

Με την αύξηση της πρόωσης, εντατικοποιείται η προσπάθεια για κοπή. Εμφανίζεται επομένως η ύπαρξη ανωμαλιών στην περιοχή της κοπής που δημιουργεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Παρατηρούμε ότι και οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν σχεδόν τον ίδιο ρυθμό, μεταξύ των δύο προγραμμάτων υπολογισμού (TalyProfile και Matlab). Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η πρόωση, η τραχύτητα που προκύπτει παρουσιάζει συνεχώς μειούμενη διακύμανση. Πρέπει, τέλος, να επισημάνουμε ότι η fractal dimension εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της σκληρότητας του μετάλλου που κατεργαζόμαστε και του μήκους κοπής.

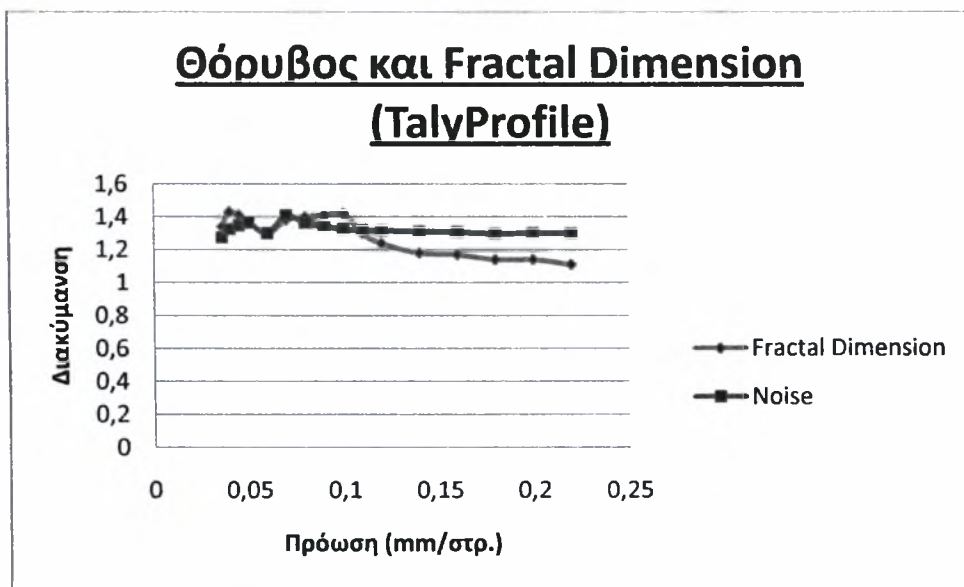
6.1.2.4 Θόρυβος και *Fractal Dimension*

Στον παρακάτω Πίνακα 6.20 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για τον συντελεστή προσομοίωσης θορύβου και οι τιμές της fractal dimension που έχουν ληφθεί από το λογισμικό TalyProfile και το πρόγραμμα στο Matlab.

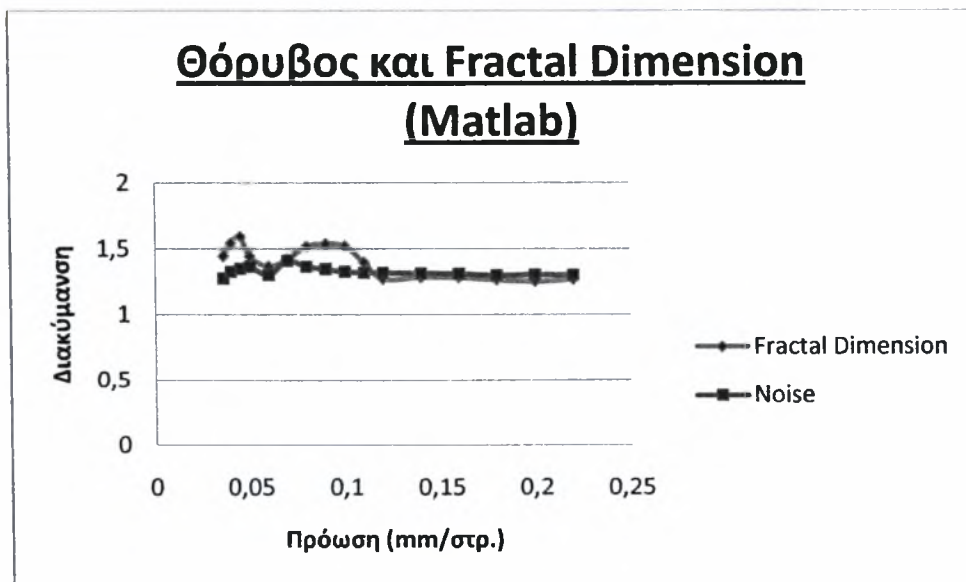
Πίνακας 6.20: Πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή προσομοίωσης του θορύβου συναρτήσει της προώσεως.

<u>A/A</u> <u>ck60</u>	<u>Πρόωση</u> <u>(mm/στρ.)</u>	<u>Διάσταση</u> <u>Fractal, D</u> <u>(TalyProfile)</u>	<u>Διάσταση</u> <u>Fractal, D</u> <u>(Matlab)</u>	<u>Συντελεστής</u> <u>Προσομοίωσης</u> <u>Θορύβου</u>
1	0.036	1.340	1.445	1.274
2	0.040	1.430	1.543	1.324
3	0.045	1.410	1.592	1.347
4	0.050	1.370	1.442	1.364
5	0.060	1.300	1.366	1.300
6	0.070	1.380	1.422	1.408
7	0.080	1.400	1.518	1.363
8	0.090	1.410	1.538	1.344
9	0.100	1.420	1.521	1.325
10	0.110	1.300	1.398	1.318
11	0.120	1.240	1.270	1.316
12	0.140	1.180	1.281	1.311
13	0.160	1.170	1.280	1.308
14	0.180	1.140	1.262	1.297
15	0.200	1.140	1.251	1.301
16	0.220	1.110	1.267	1.299

Στα παρακάτω Σχήματα 6.10 και 6.11 παρουσιάζεται η διακύμανση του συντελεστή που περιγράφει τον θόρυβο σε σχέση με τις τιμές της fractal dimension που παίρνουμε από τα δύο διαφορετικά διαθέσιμα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της τραχύτητας των επιφανειών.



Σχήμα 6.10: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της πρόωσης.

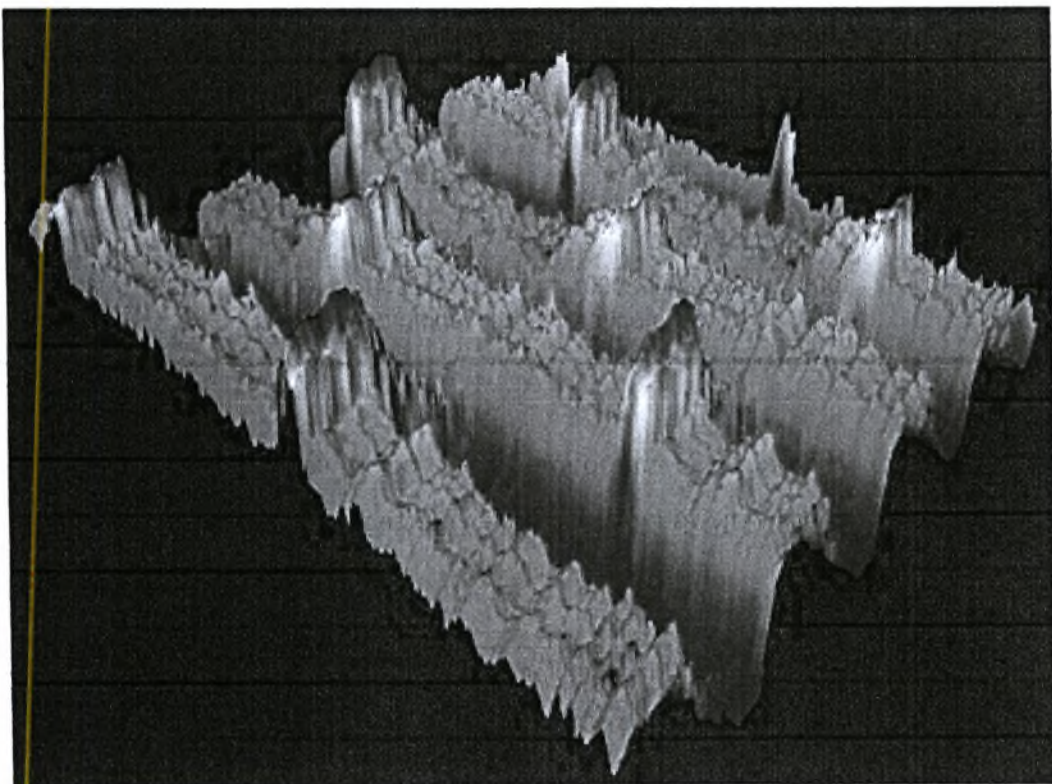


Σχήμα 6.11: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της πρόωσης.

Παρατηρούμε ότι και οι δύο καμπύλες (θόρυβος και fractal dimension) παρουσιάζουν σχεδόν τον ίδιο ρυθμό και μεταξύ των δύο προγραμμάτων υπολογισμού (TalyProfile και Matlab). Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η πρόωση, η τιμή του θορύβου και συνεπώς η τραχύτητα που προκύπτει παρουσιάζει συνεχώς μειούμενη διακύμανση.

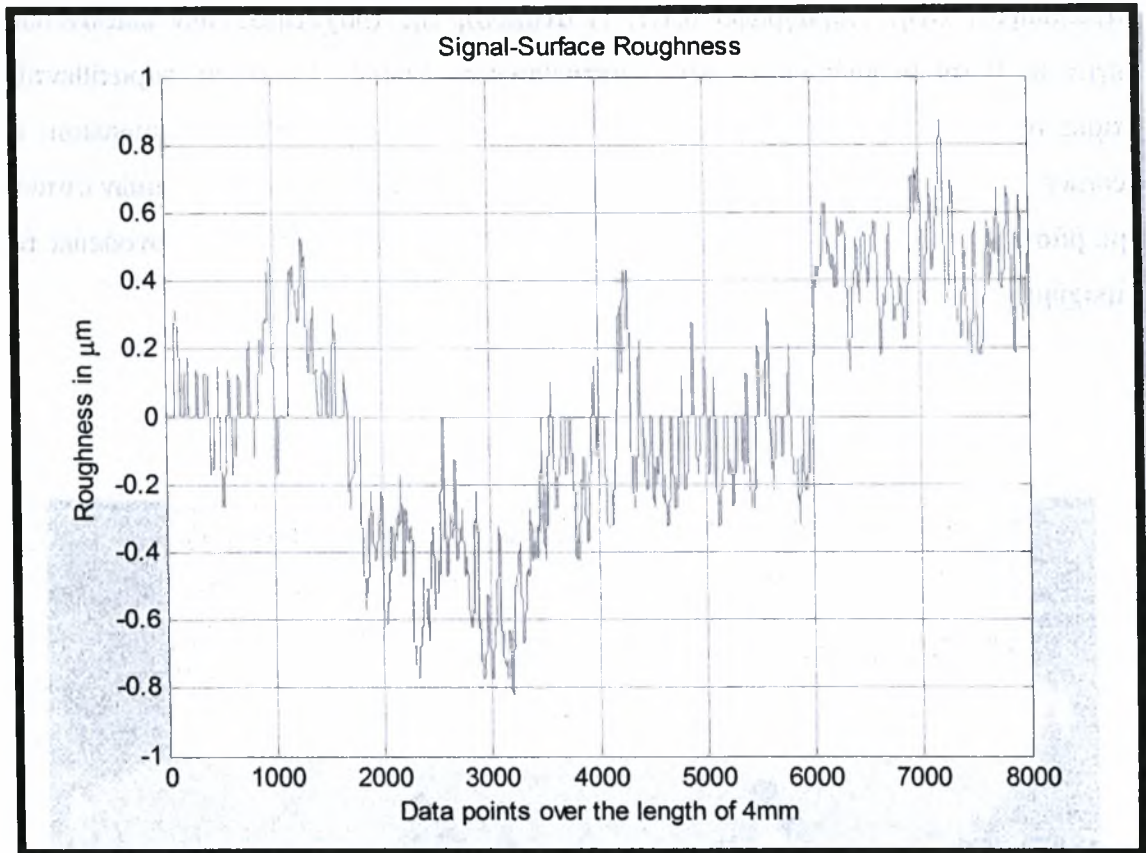
6.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΧΑΛΥΒΑ CK60 – ΥΨΗΛΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΩΣΕΩΣ

Παρακάτω γίνεται ανάλυση των 4 δοκιμίων χάλυβα ck60 που κόπηκαν με διαφορετικές, μεγαλύτερες όμως, τιμές προώσεως σε σχέση με τα δοκίμια που αναλύθηκαν στην Παράγραφο 6.1.1. Η ανάλυση της τραχύτητας των επιφανειών έγινε με βάση το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε Matlab. Επιπλέον, παρατίθενται τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων όπως είναι η fractal dimension, η corner frequency και το μήκος συσχέτισης. Τέλος, γίνεται σύγκριση των τιμών αυτών με βάση τις τιμές που λαμβάνονται από το λογισμικό TalyProfile που συνοδεύει το τραχύμετρο του εργαστηρίου “Μηχανουργικών Κατεργασιών”.



❖ 1^η Περίπτωση - Feed Rate 0.05mm/στρ.

Στο παρακάτω Σχήμα 6.12.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



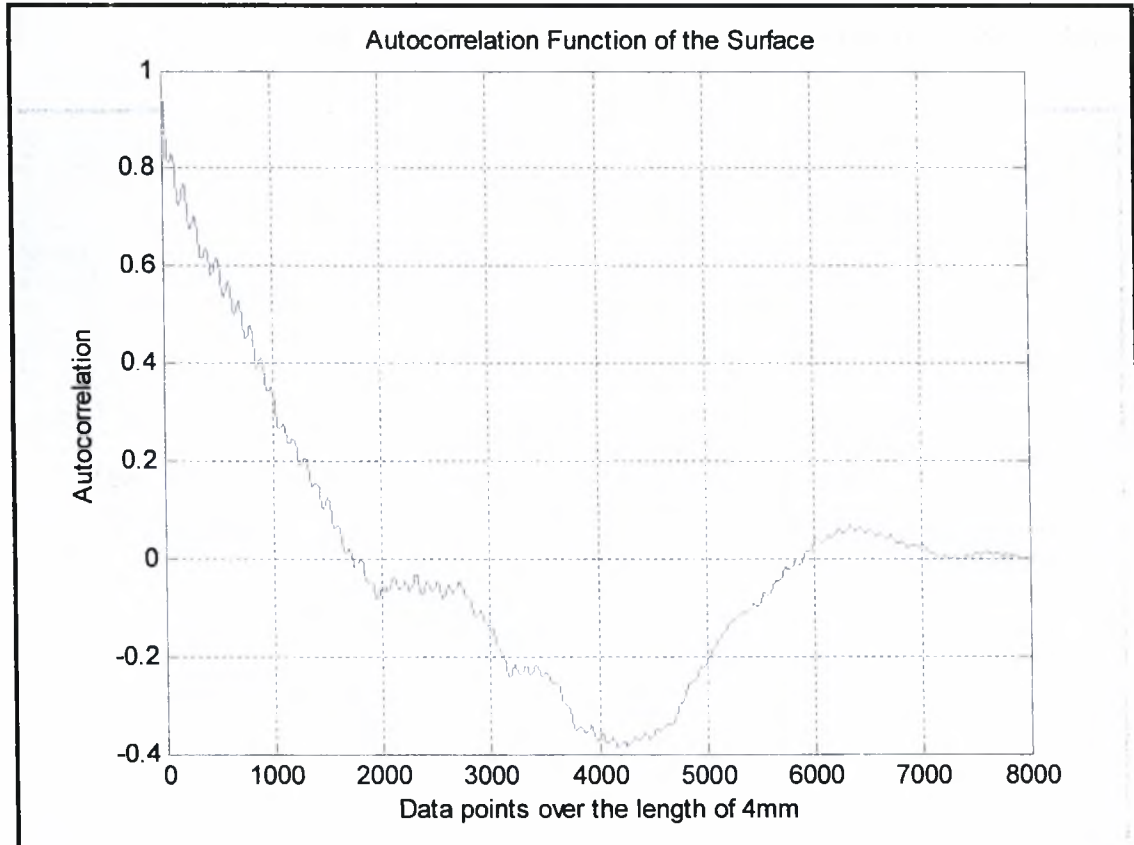
Σχήμα 6.12.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της επιφάνειας που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.21 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.12.1.

Πίνακας 6.21: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.31	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	9.14	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	4.24	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.07	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.40	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.83	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.09	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	1.17	
Παράμετρος,	R_k	=	4.43	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.12.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

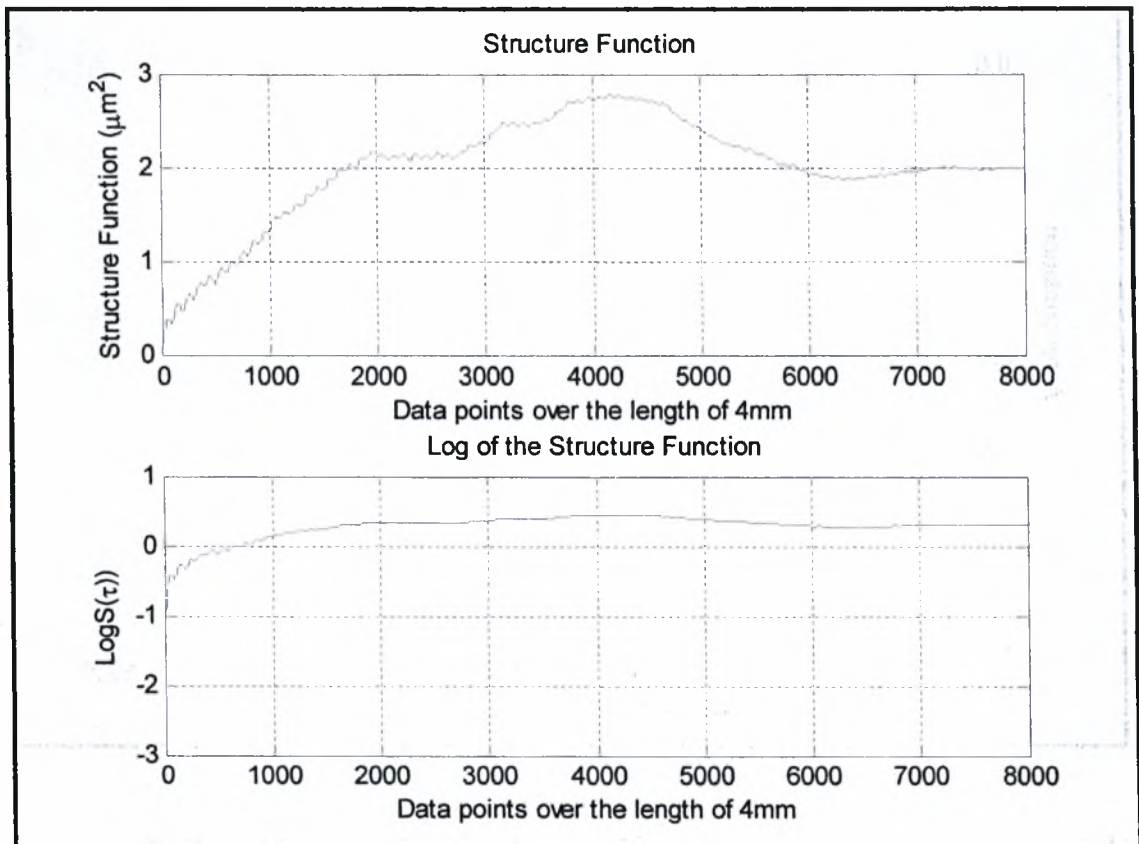


Σχήμα 6.12.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
1763/8000	0.8815sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
1530/8000	0.7650sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.12.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



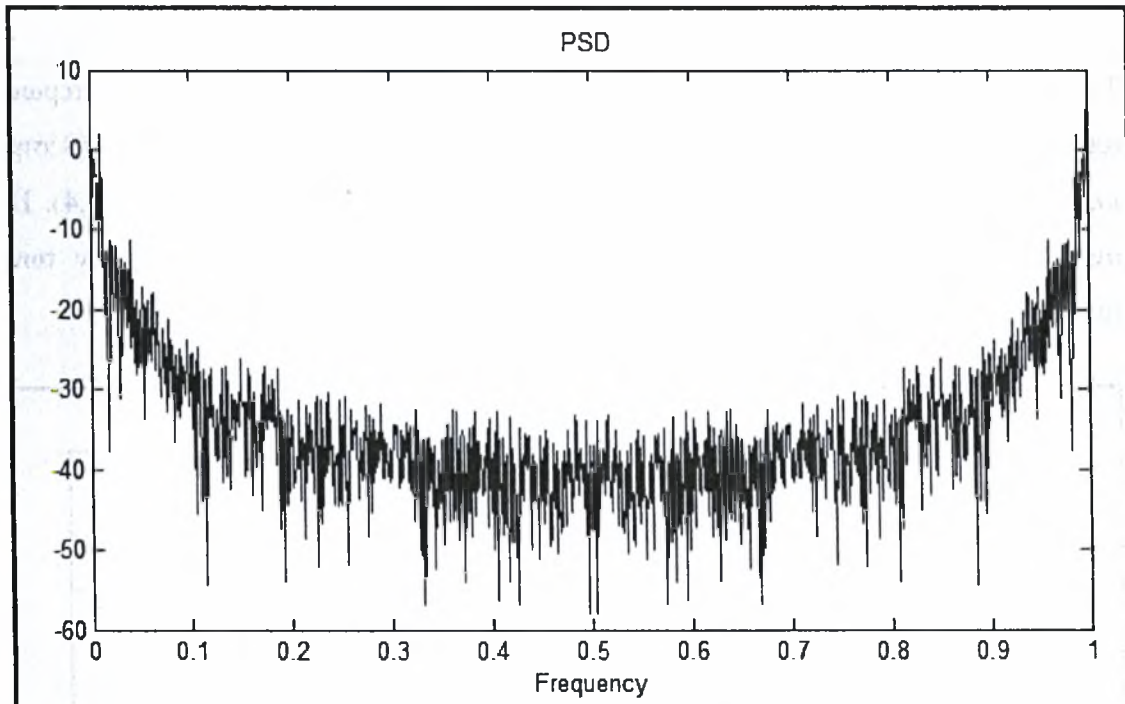
Σχήμα 6.12.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
	64/8000
Corner Frequency =	0.032mm

Fractal Dimension	
Slope =	1.765
	1.765 = 4-2D ⇒
	-2.235 = -2D ⇒
Fractal Dimension, D =	1.118

Στο παρακάτω Σχήμα 6.12.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.12.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

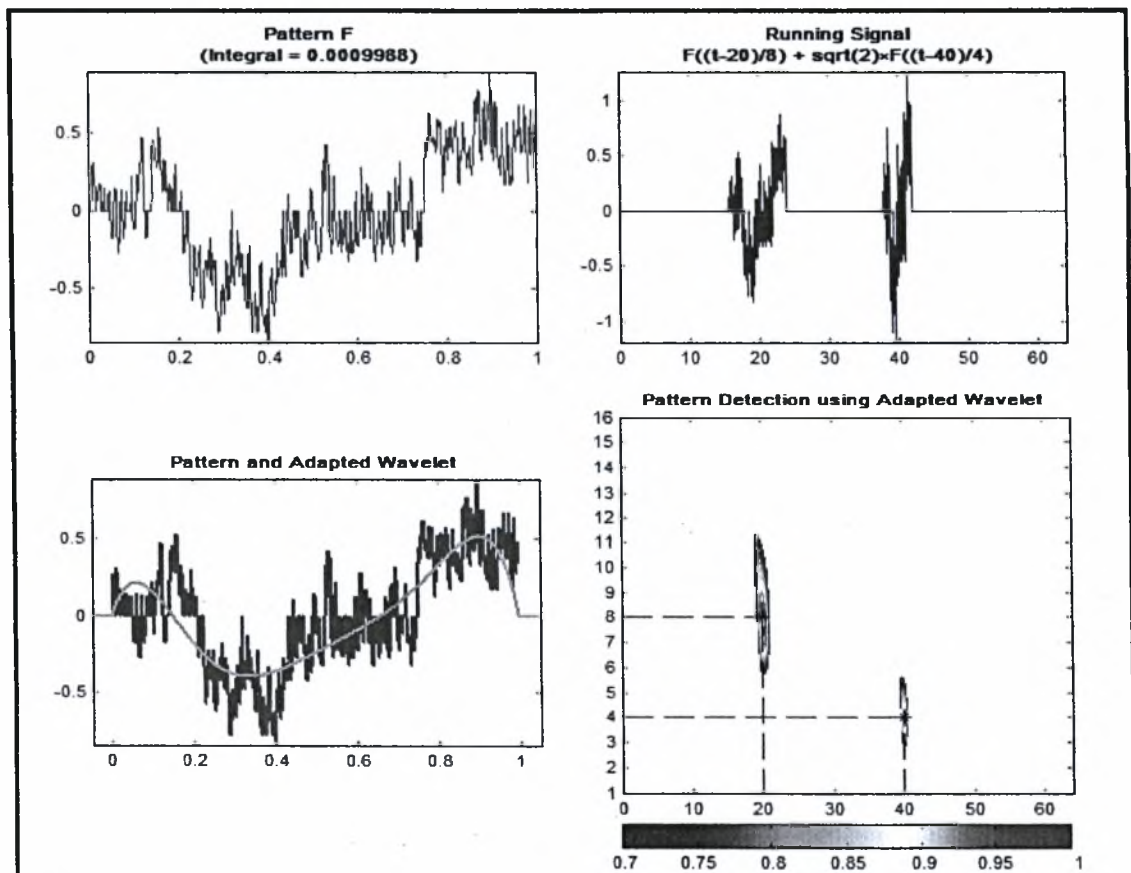
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 0.652$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (0.649, 0.655)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.12.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

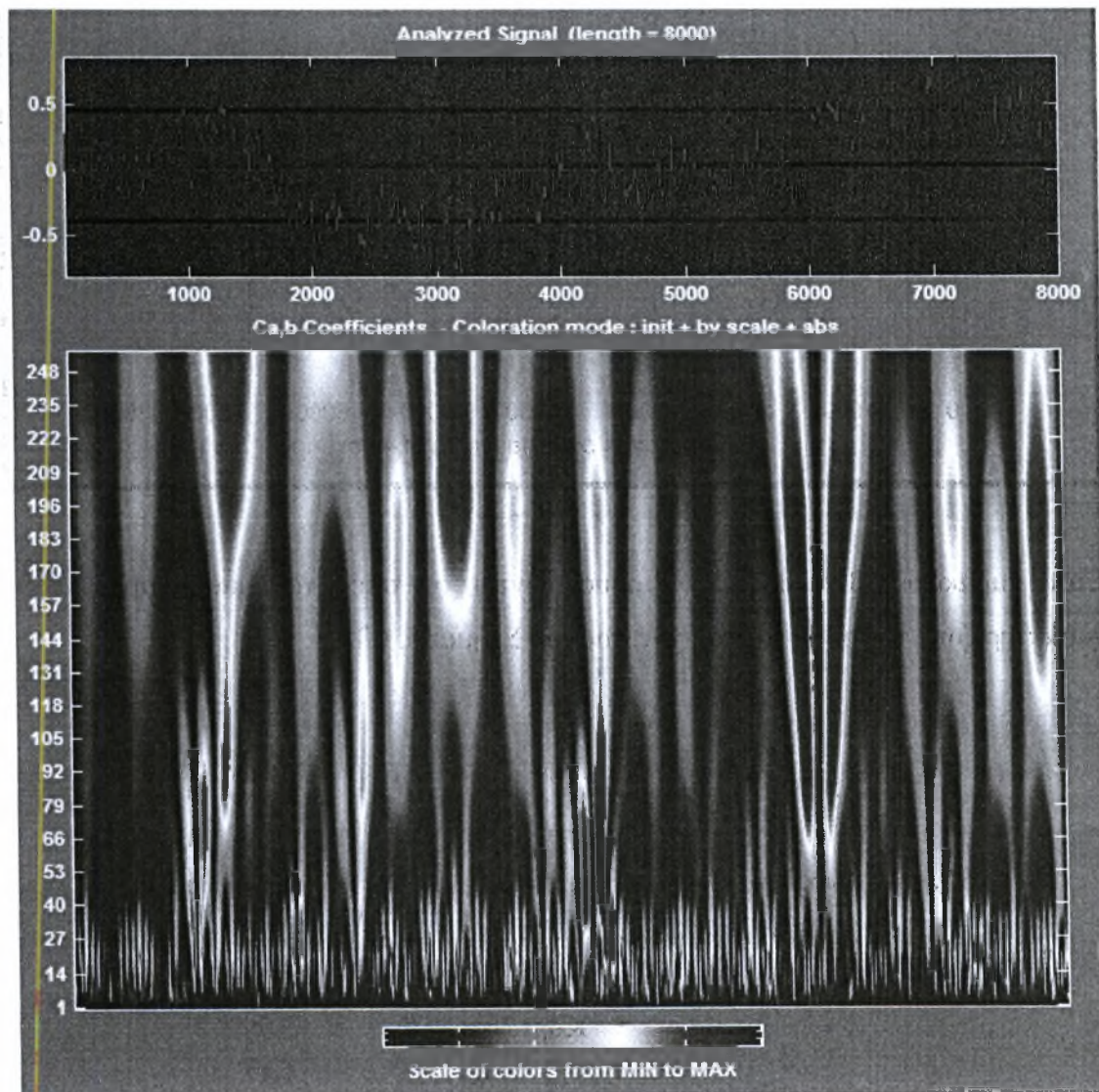
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.12.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

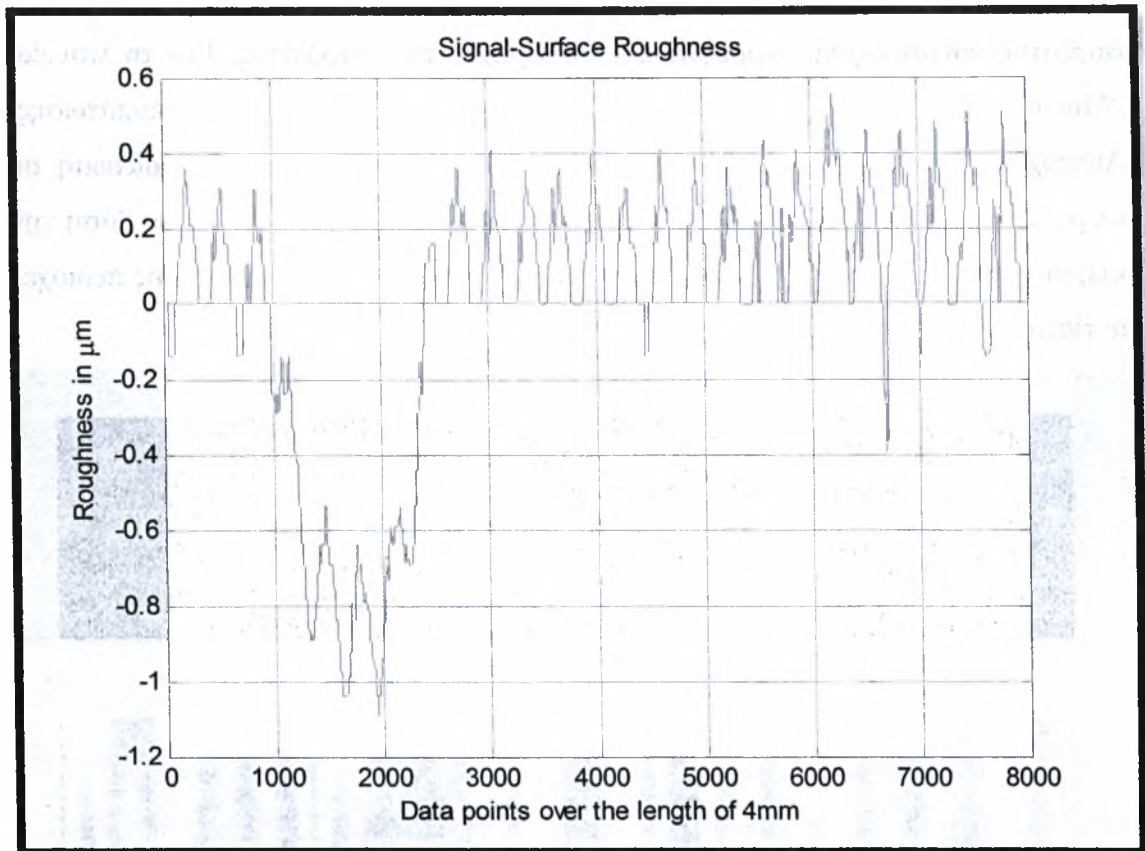
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.12.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντιστοιχίας τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.12.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ **2^η Περίπτωση - Feed Rate 0.16mm/στρ.**

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



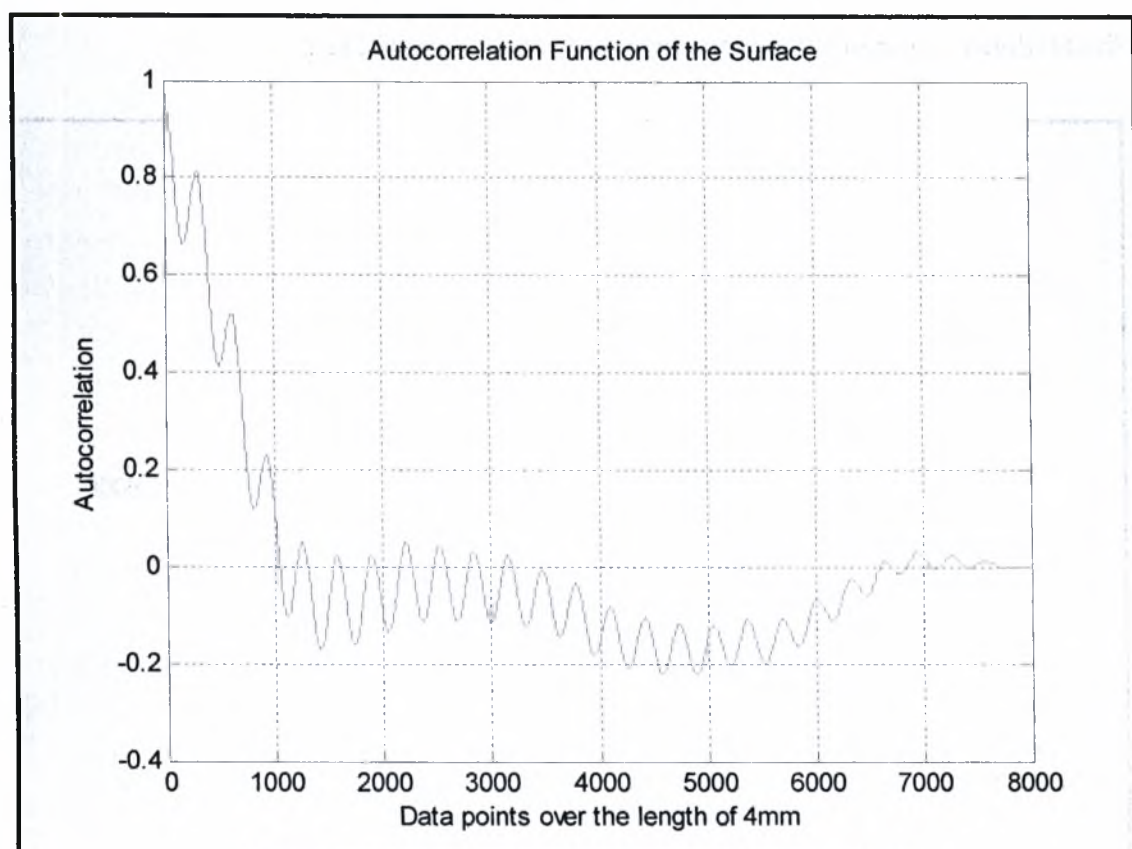
Σχήμα 6.13.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της επιφάνειας που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.22 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.13.1.

Πίνακας 6.22: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	1.31	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	9.73	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	3.38	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.15	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	-0.09	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.39	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.17	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	0.95	
Παράμετρος,	R_k	=	4.79	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

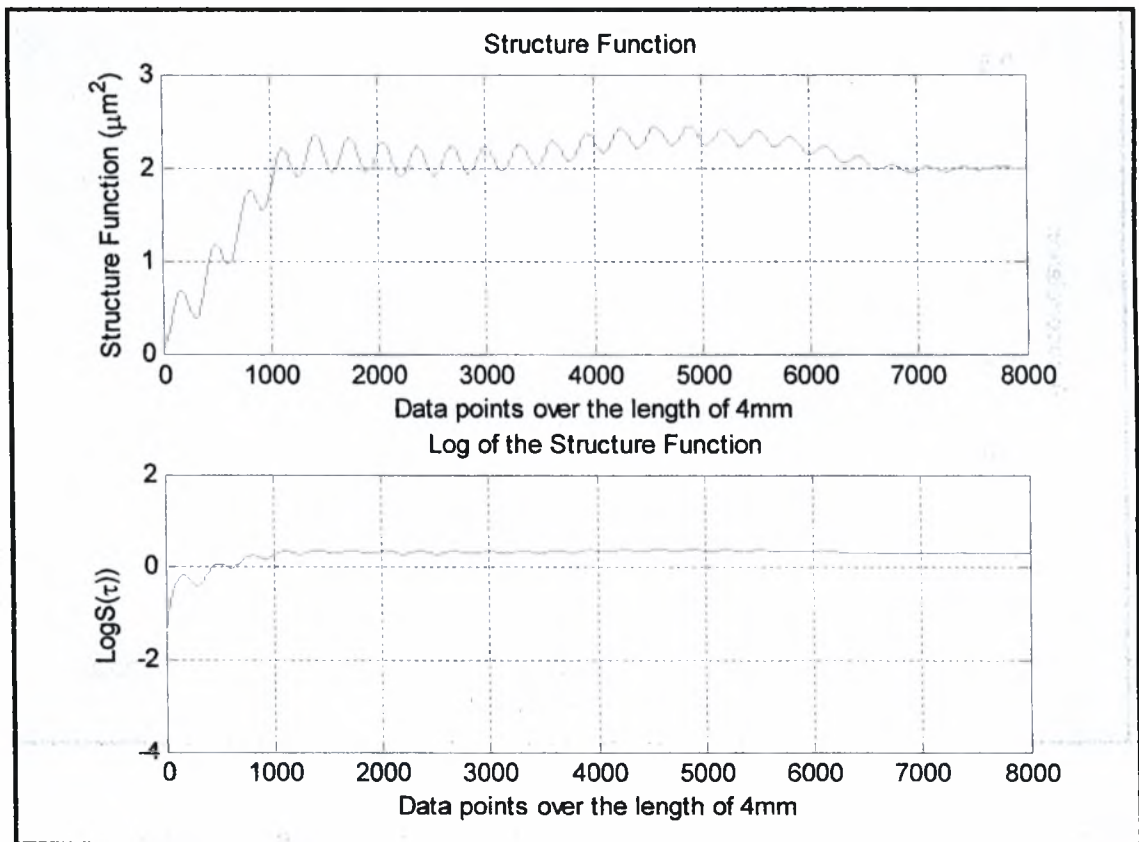


Σχήμα 6.13.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
1138/8000	0.5690sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
1011/8000	0.5055sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.13.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



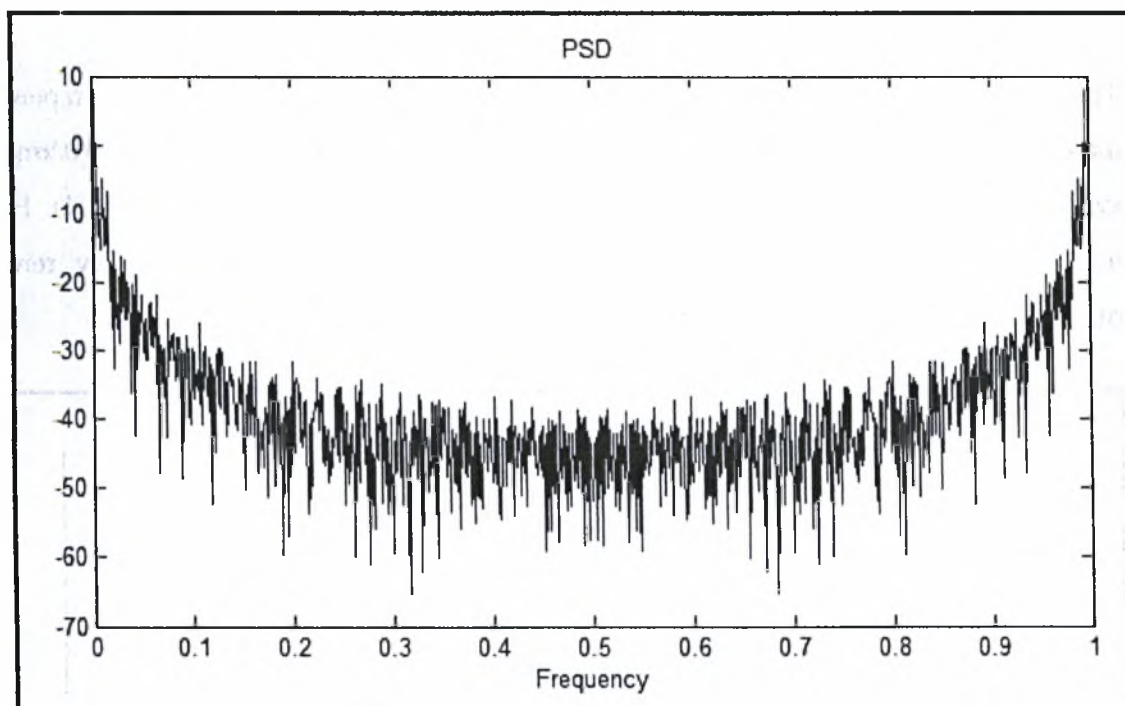
Σχήμα 6.13.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
<u>Σημείο μετάβασης:</u>	
170/8000	
Corner Frequency	= 0.085mm

Fractal Dimension	
<u>Slope = 1.734</u>	
1.734	= 4-2D ⇒
-2.266	= -2D ⇒
Fractal Dimension, D	= 1.133

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.13.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

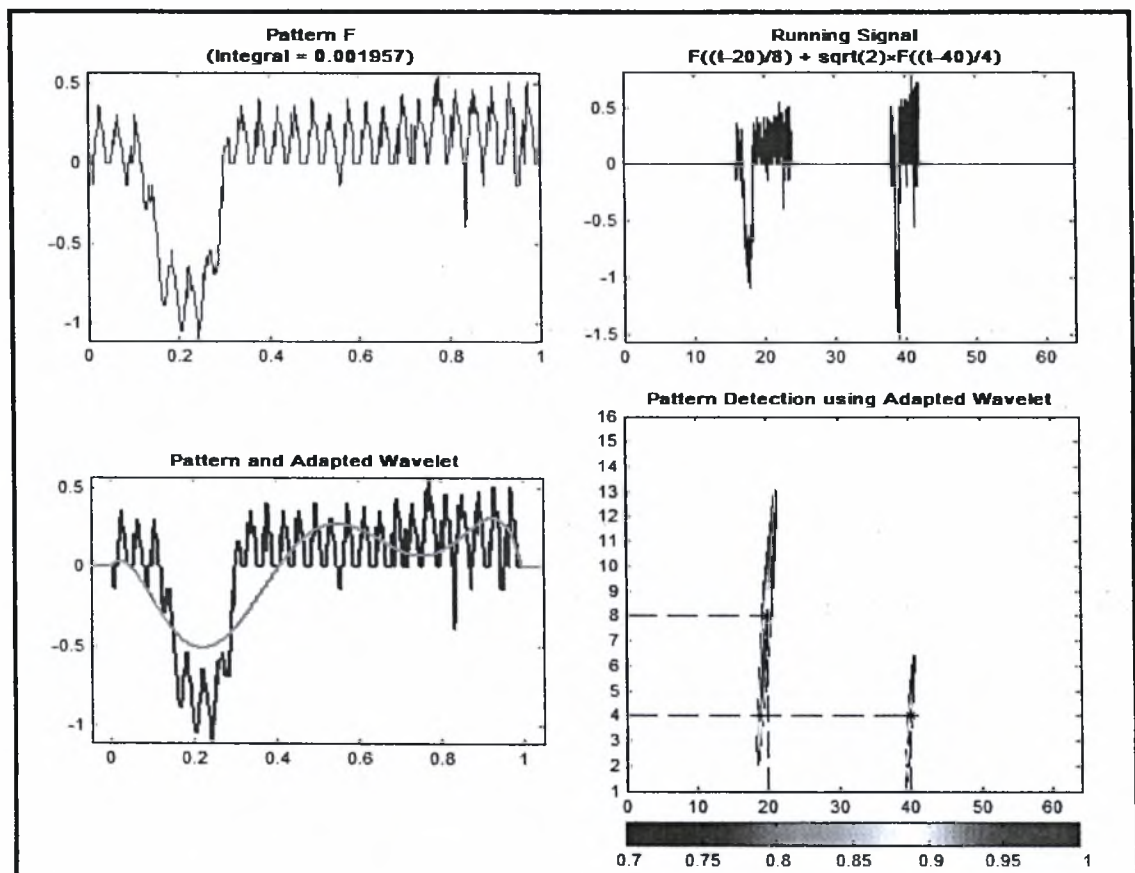
$$\log(y)=\log(1)-b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b=0.688$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (0.685, 0.690)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.13.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολύωνο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

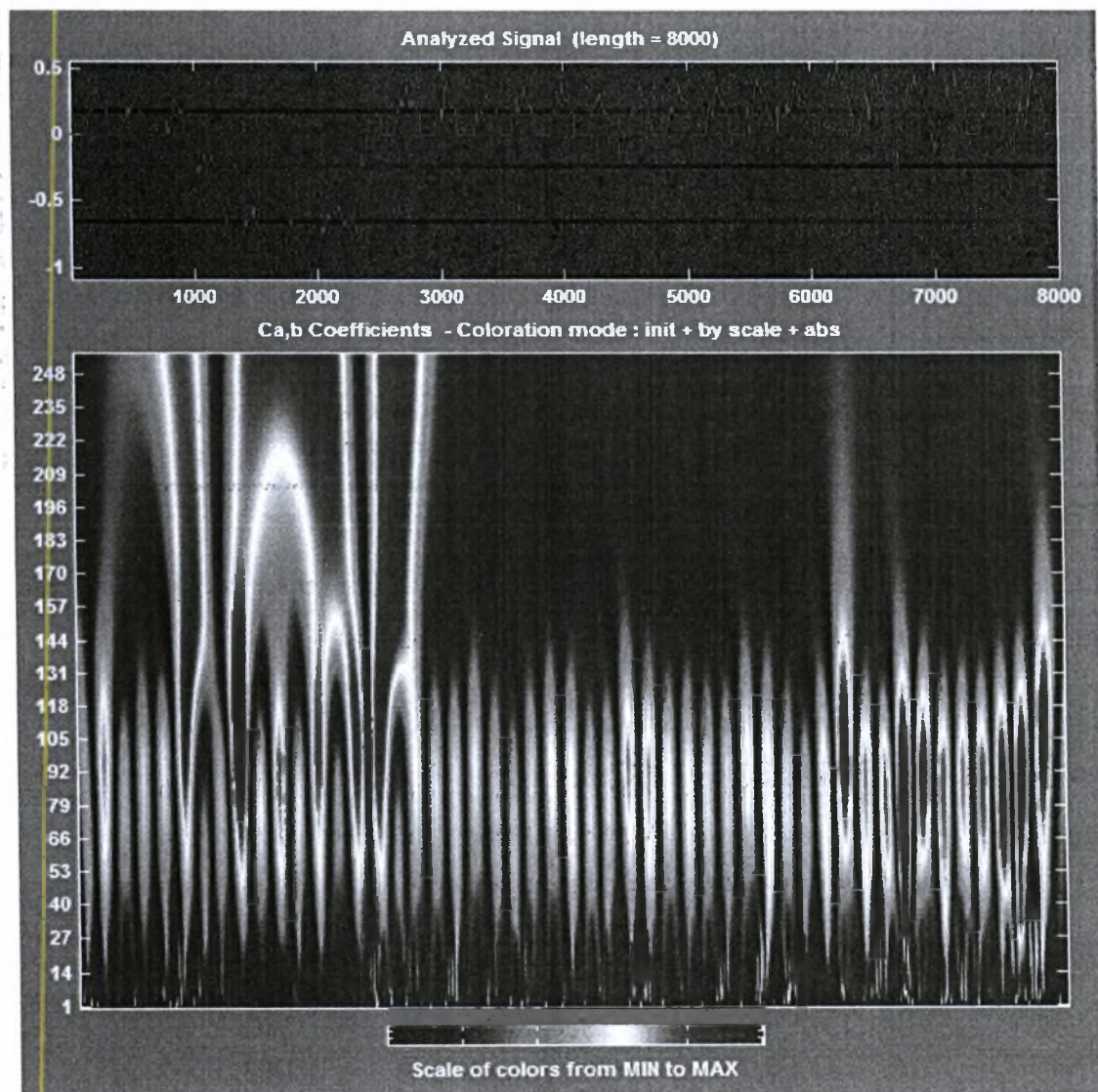
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.13.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

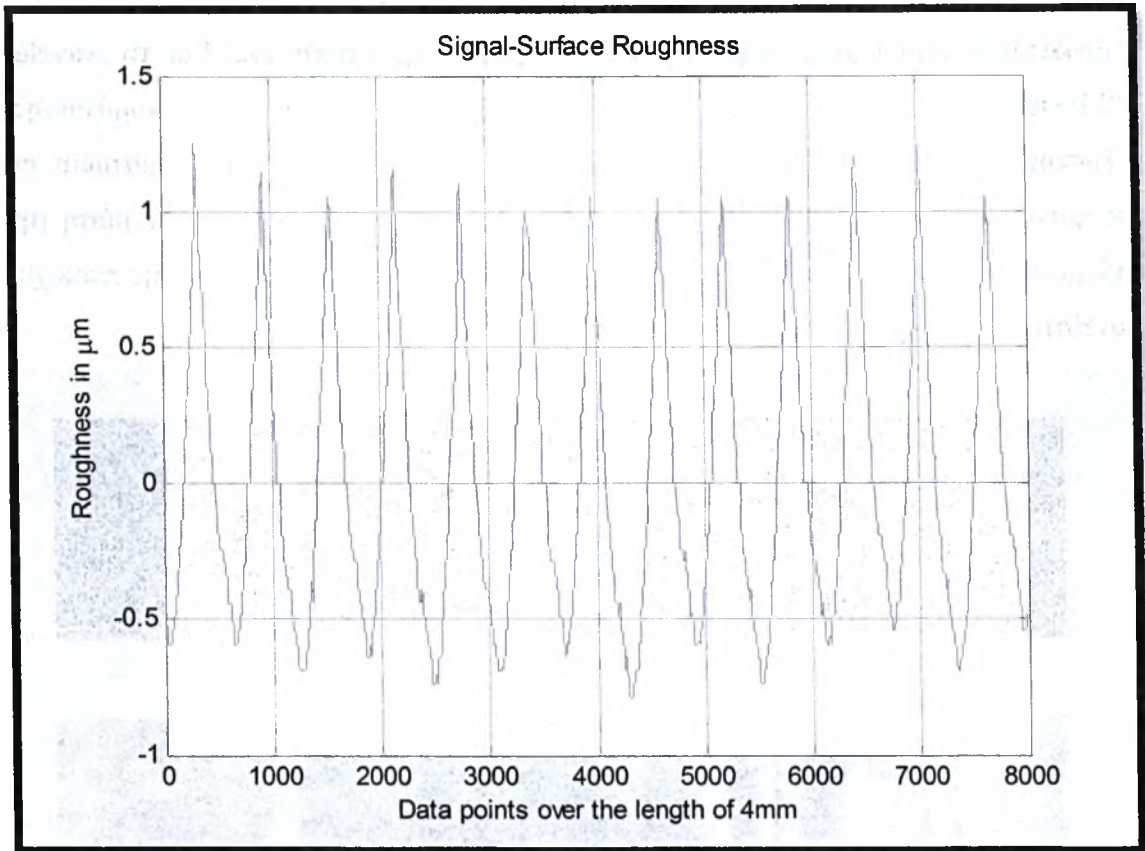
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.13.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.13.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ 3^η Περίπτωση - Feed Rate 0.32mm/στρ.

Στο παρακάτω Σχήμα 6.14.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



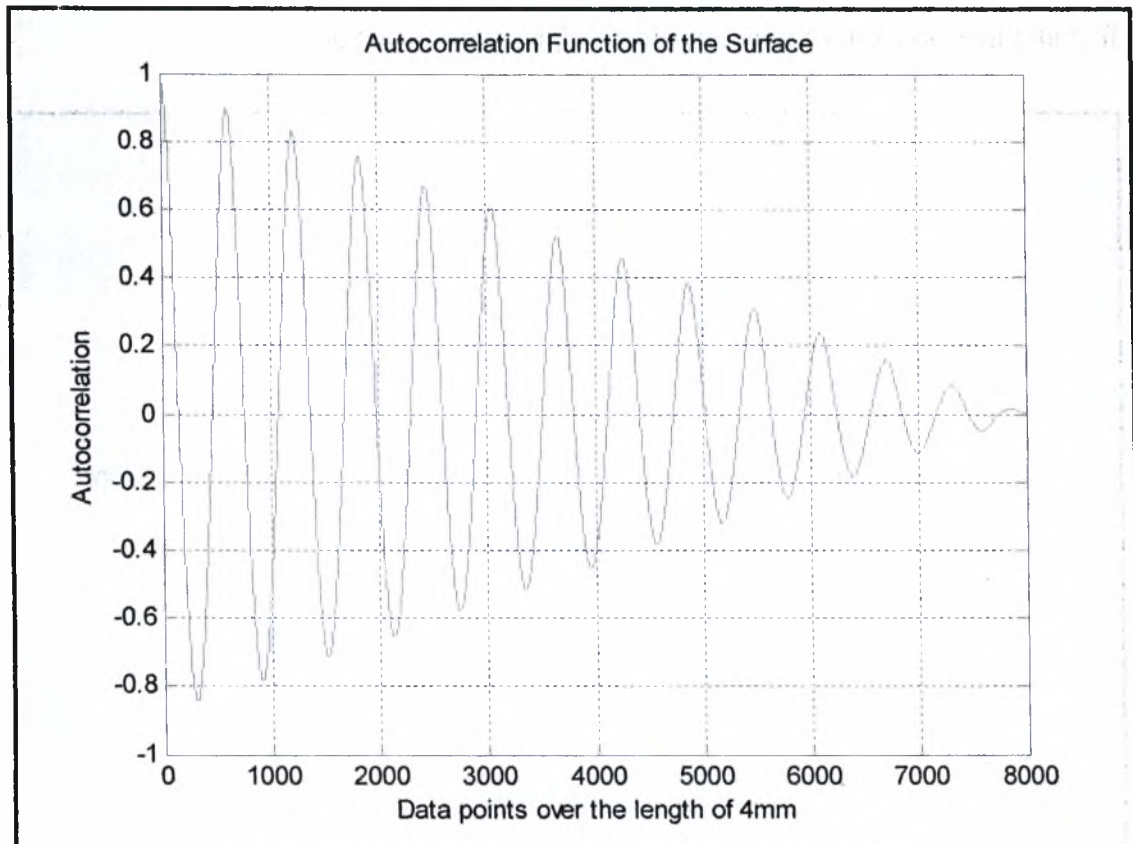
Σχήμα 6.14.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της επιφάνειας που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.23 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.14.1.

Πίνακας 6.23: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TalyProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	4.48	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	18.90	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	11.40	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.30	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.50	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.02	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.03	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	7.04	
Παράμετρος,	R_k	=	10.50	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.14.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

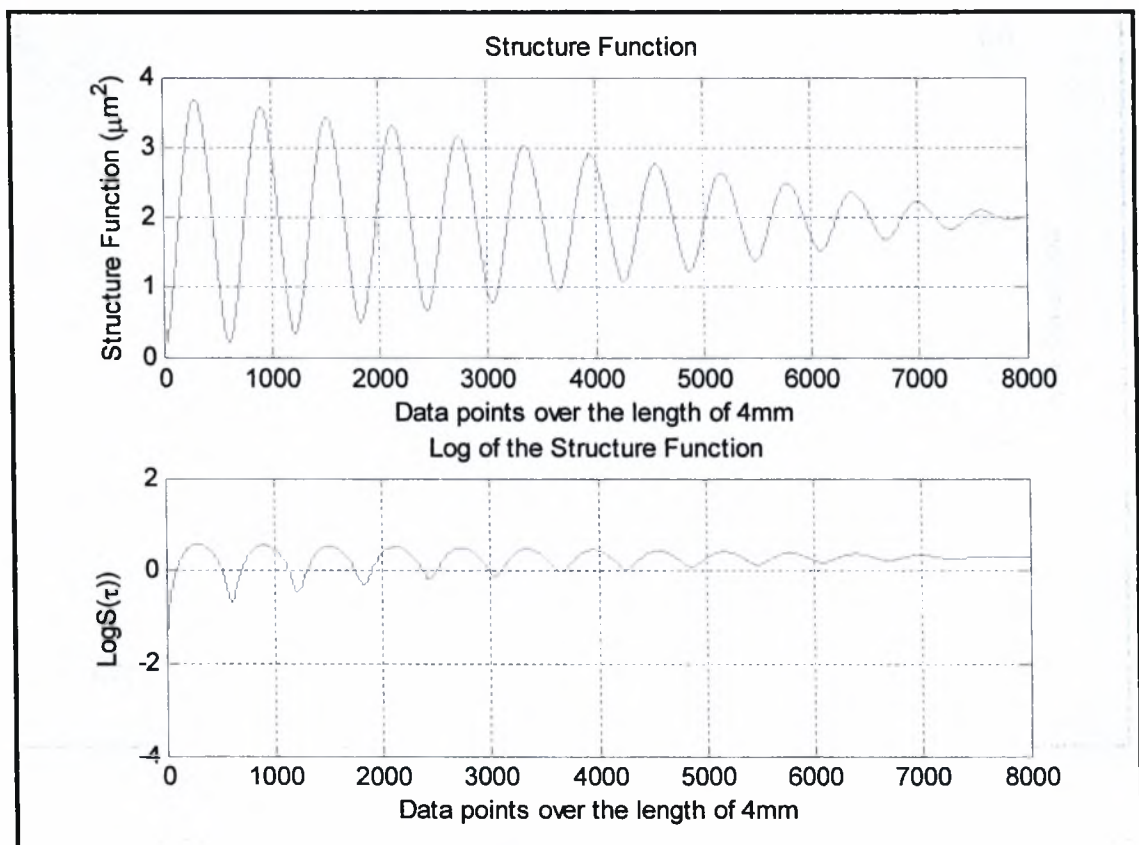


Σχήμα 6.14.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalvProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalvProfile)
238/8000	0.119sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
138/8000	0.069sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.14.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



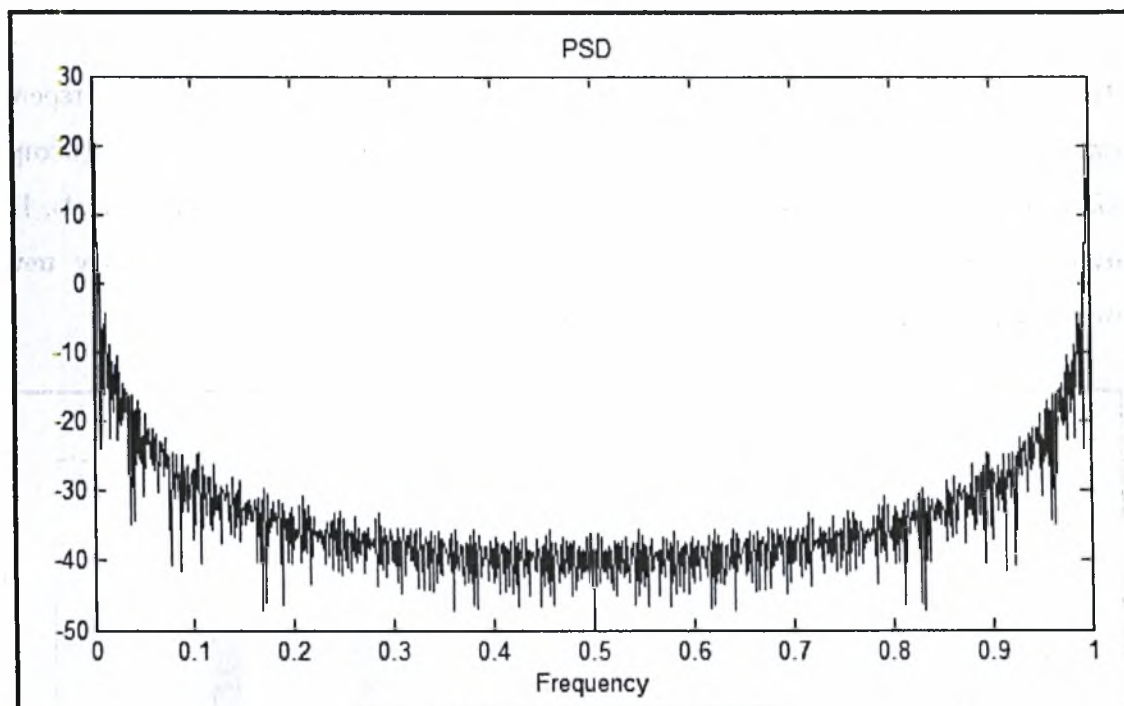
Σχήμα 6.14.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
	302/8000
Corner Frequency =	0.151mm

Fractal Dimension	
Slope =	1.784
	1.784 = 4-2D ⇒
	-2.216 = -2D ⇒
Fractal Dimension, D =	1.108

Στο παρακάτω Σχήμα 6.14.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με $N_{fft}:1024$ και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.14.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

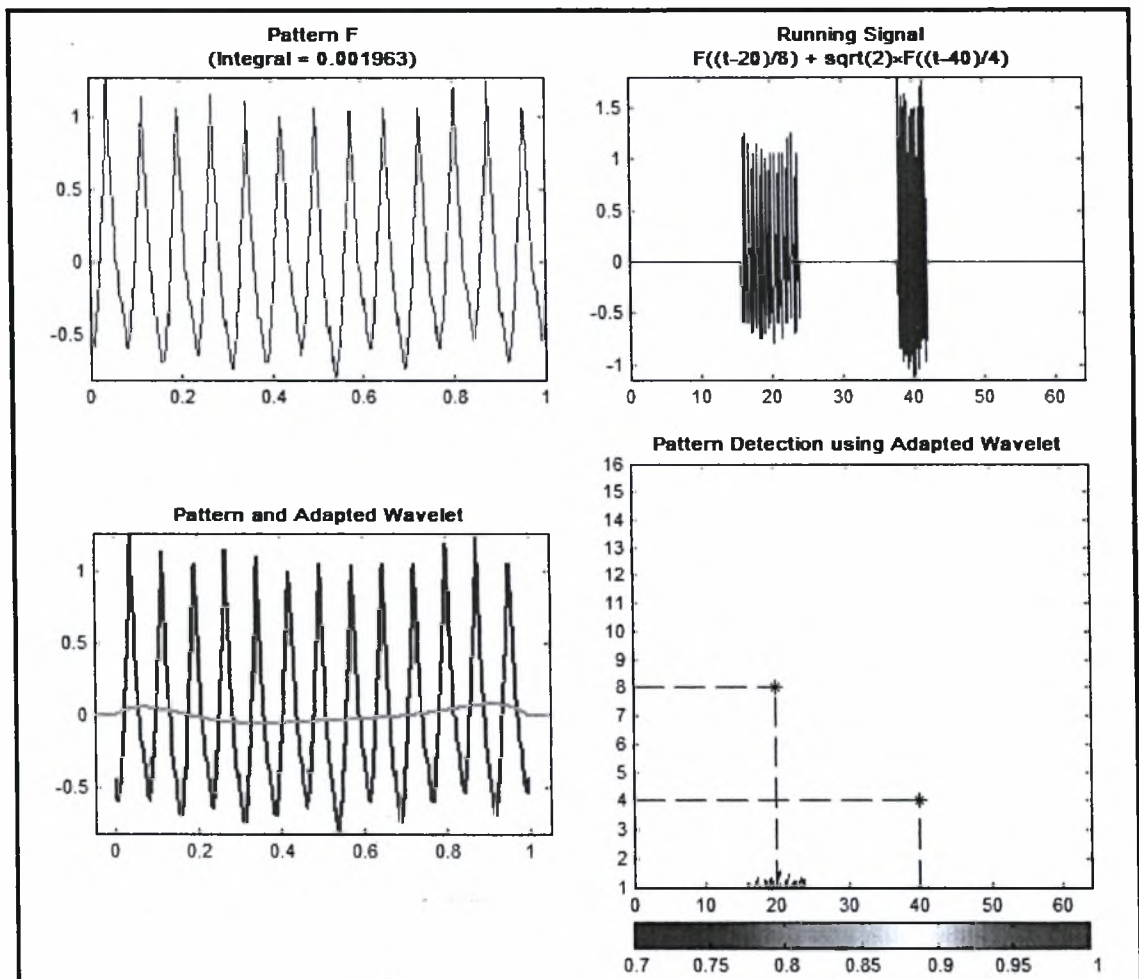
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 0.697$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (0.694, 0.699)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.14.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

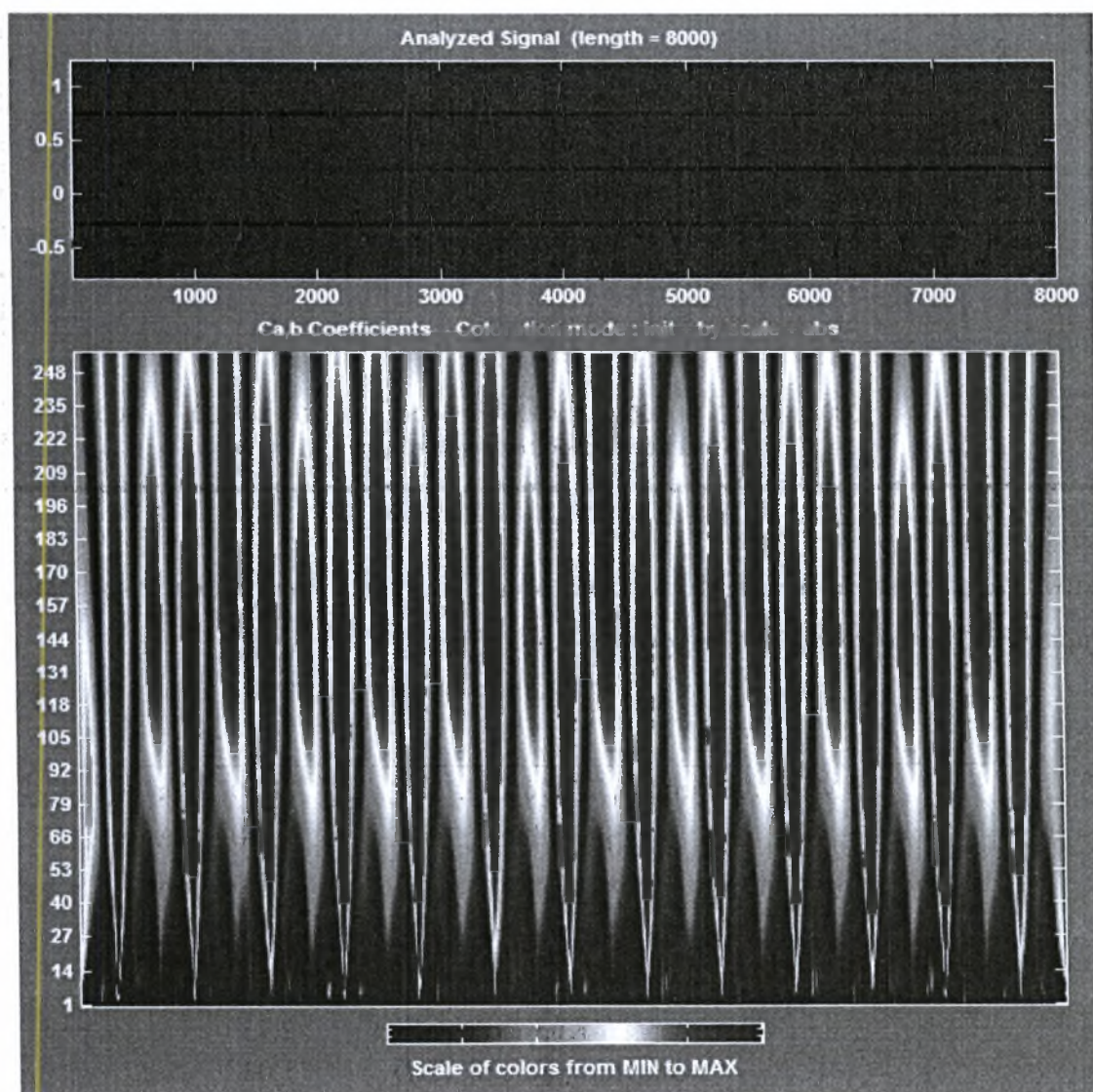
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.14.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

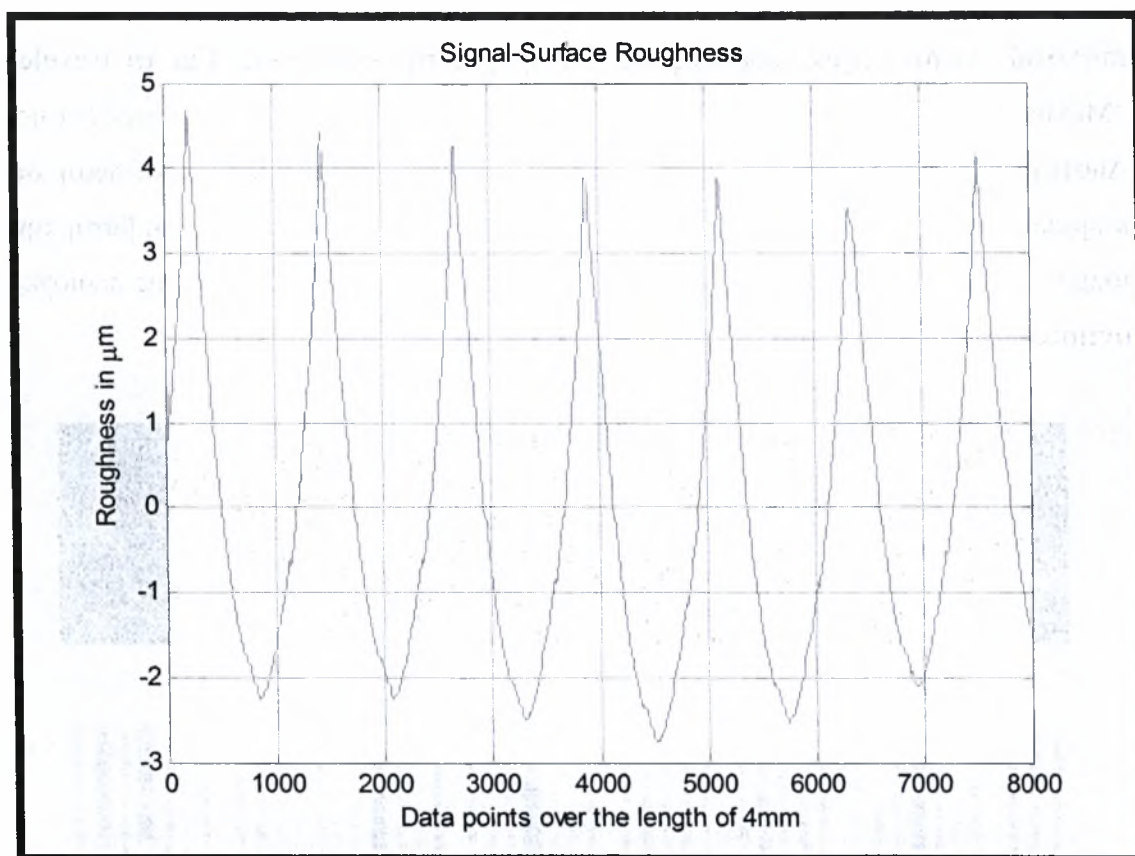
Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.14.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.14.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

❖ 4^η Περίπτωση - Feed Rate 0.60mm/στρ.

Στο παρακάτω Σχήμα 6.15.1 βλέπουμε το σήμα που περιγράφει την τραχύτητα της συγκεκριμένης επιφάνειας. Κατά την δειγματοληψία, έχουν ληφθεί 8000 σημεία σε ένα μήκος δειγματοληψίας ίσο με 4mm.



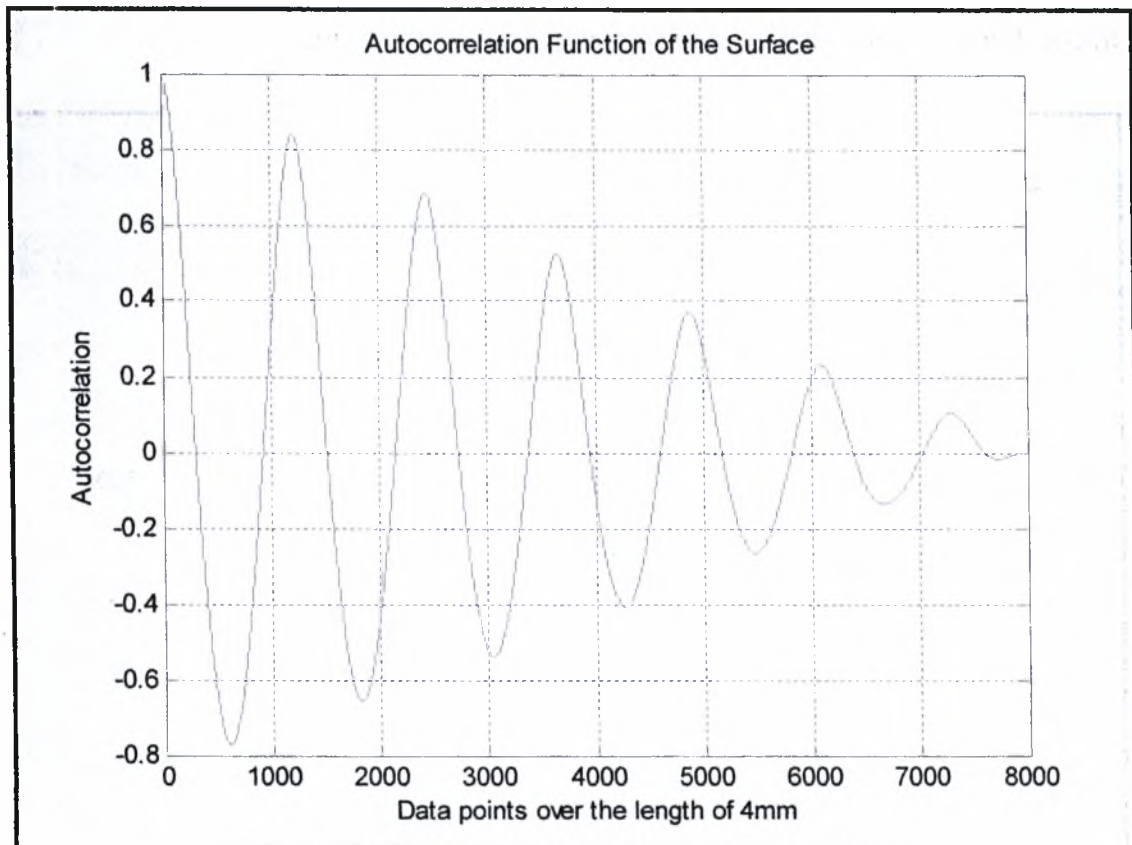
Σχήμα 6.15.1: Σήμα που αναπαριστά την τραχύτητα της επιφάνειας που μελετάται.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.24 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το προφίλ της τραχύτητας του Σχήματος 6.15.1.

Πίνακας 6.24: Παράμετροι χαρακτηριστικές της τραχύτητας της επιφάνειας που αναλύεται (Όπως προκύπτουν από το λογισμικό TaluProfile).

Μέση Αριθμητική Τραχύτητα,	R_a	=	11.50	μm
Μέγιστο βάθος,	R_t	=	51.00	μm
Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή,	R_p	=	35.20	μm
Παράμετρος διαστήματος,	R_{sm}	=	0.55	mm
Λοξότητα,	R_{sk}	=	0.94	
Κύρτωση,	R_{ku}	=	2.73	
Διάσταση Fractal,	D	=	1.04	
Παράμετρος,	R_{pk}	=	28.90	
Παράμετρος,	R_k	=	21.80	

Στο παρακάτω Σχήμα 6.15.2 παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος που περιγράφει την τραχύτητα της επιφάνειάς μας. Από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι δυνατό να υπολογίσουμε το μήκος συσχέτισης (correlation length), β . Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1.

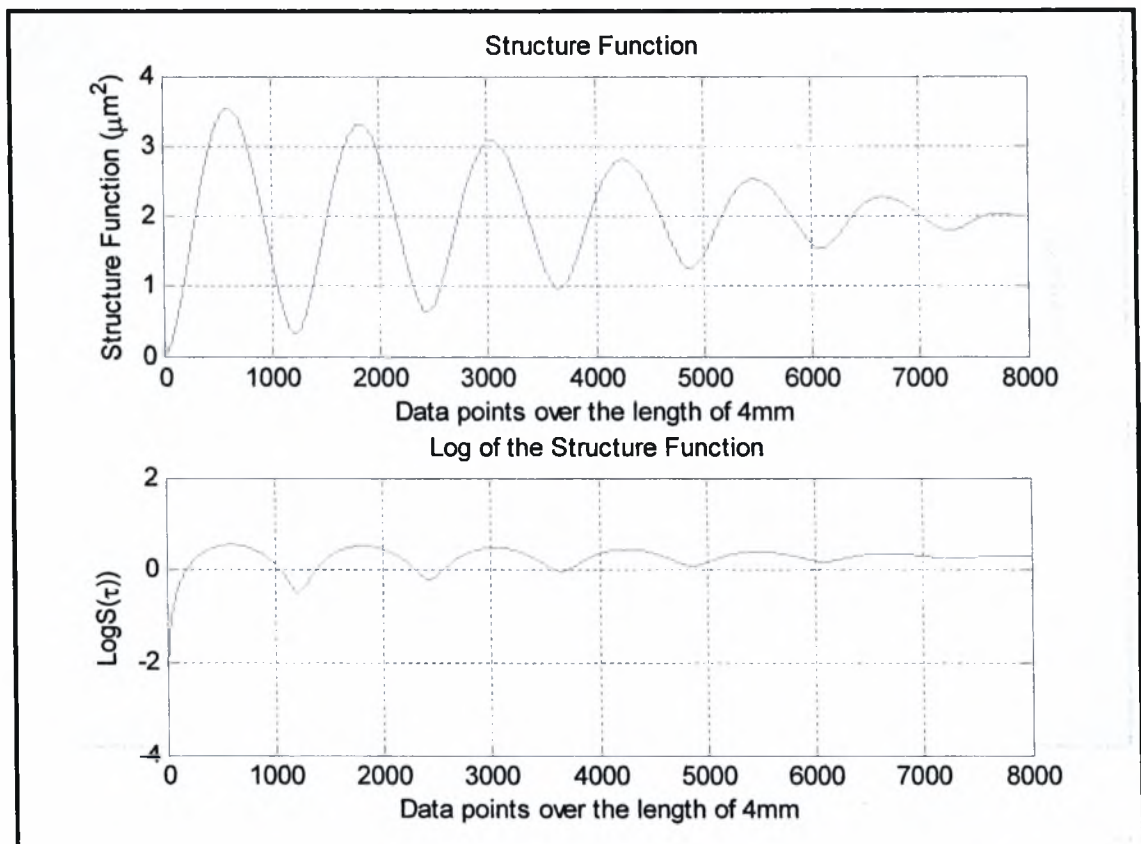


Σχήμα 6.15.2: Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της επιφάνειάς μας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στυλίσκος μέσα σε 4sec λαμβάνει 8000 από την επιφάνεια της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα. Συνεπώς, έχουμε ότι:

Σημείο (Λογισμικό TalyProfile)	Συχνότητα (Λογισμικό TalyProfile)
373/8000	0.1865sec
Σημείο (Πρόγραμμα Matlab)	Συχνότητα (Πρόγραμμα Matlab)
276/8000	0.1380sec

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.15.3 παρουσιάζεται η structure function από την οποία θα υπολογιστεί η συχνότητα μετάβασης (corner frequency). Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Επίσης υπάρχει και ο λογάριθμος αυτής, από την οποία θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική της επιφάνειάς μας.



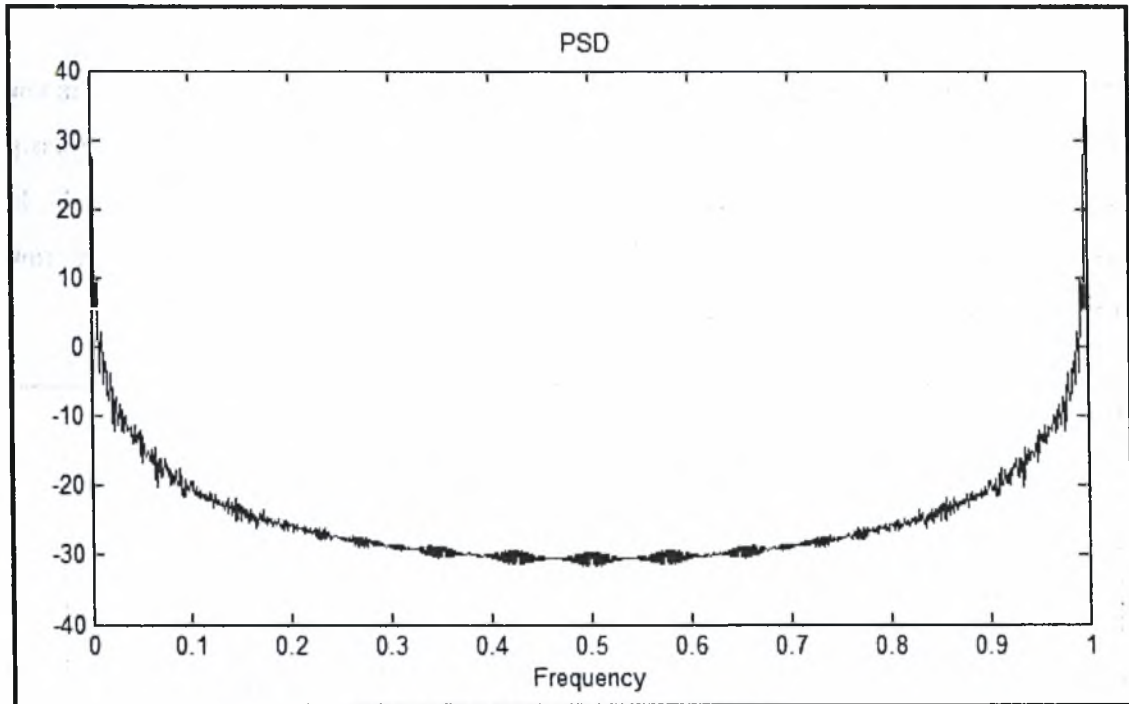
Σχήμα 6.15.3: Η structure function.

Συνεπώς, για τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν έχουμε ότι:

Corner Frequency	
Σημείο μετάβασης:	
	606/8000
Corner Frequency =	0.303mm

Fractal Dimension	
Slope =	1.781
	1.781 = 4-2D ⇒
	-2.219 = -2D ⇒
Fractal Dimension, D =	1.110

Στο παρακάτω Σχήμα 6.15.4 παρουσιάζεται το φάσμα ισχύος της τραχύτητας της επιφάνειας μας. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT) με Nfft:1024 και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με τη μονάδα. Το μέγεθος κλίμακας που χρησιμοποιείται είναι τα decibels και το εύρος της συχνότητας είναι $[0, F_s]$. Η κλίμακα της συχνότητας είναι γραμμική.



Σχήμα 6.15.4: Η power spectrum density.

Με βασική διασύνδεση προσαρμογή (fitting) έχουμε ότι:

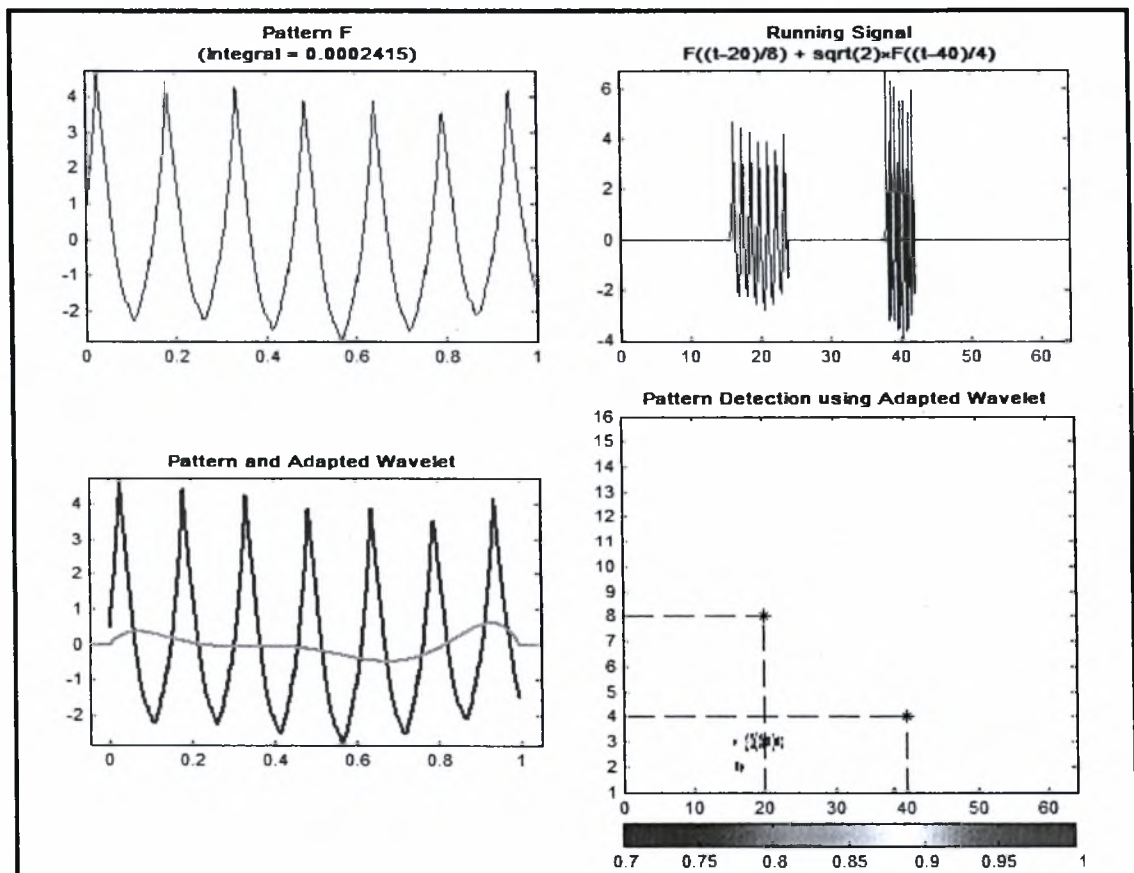
$$\log(y) = \log(1) - b \times \log(x) \quad \rightarrow \quad b = 0.558$$

Διάστημα Εμπιστοσύνης 95% (0.555, 0.561)

Με βάση αυτή την τιμή του b μπορούμε να πούμε ότι καλύτερη προσαρμογή βρίσκει ο ροζ θόρυβος (pink noise, $b = 1$).

Στο παρακάτω Σχήμα 6.15.5 παρουσιάζεται η κυμάτωση (wavelet) του σήματος μας. Αρχικά, χρησιμοποιούμε την μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Χρησιμοποιήθηκε η πολωνυμική μέθοδος προσέγγισης με ένα πολώνυμο 6^ο βαθμού. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η τραχύτητα (Pattern F). Με την εφαρμογή της μεθόδου η νέα wavelet σε πράσινο απεικονίζεται επίσης προσαρμοσμένη στο αρχικό σχήμα.

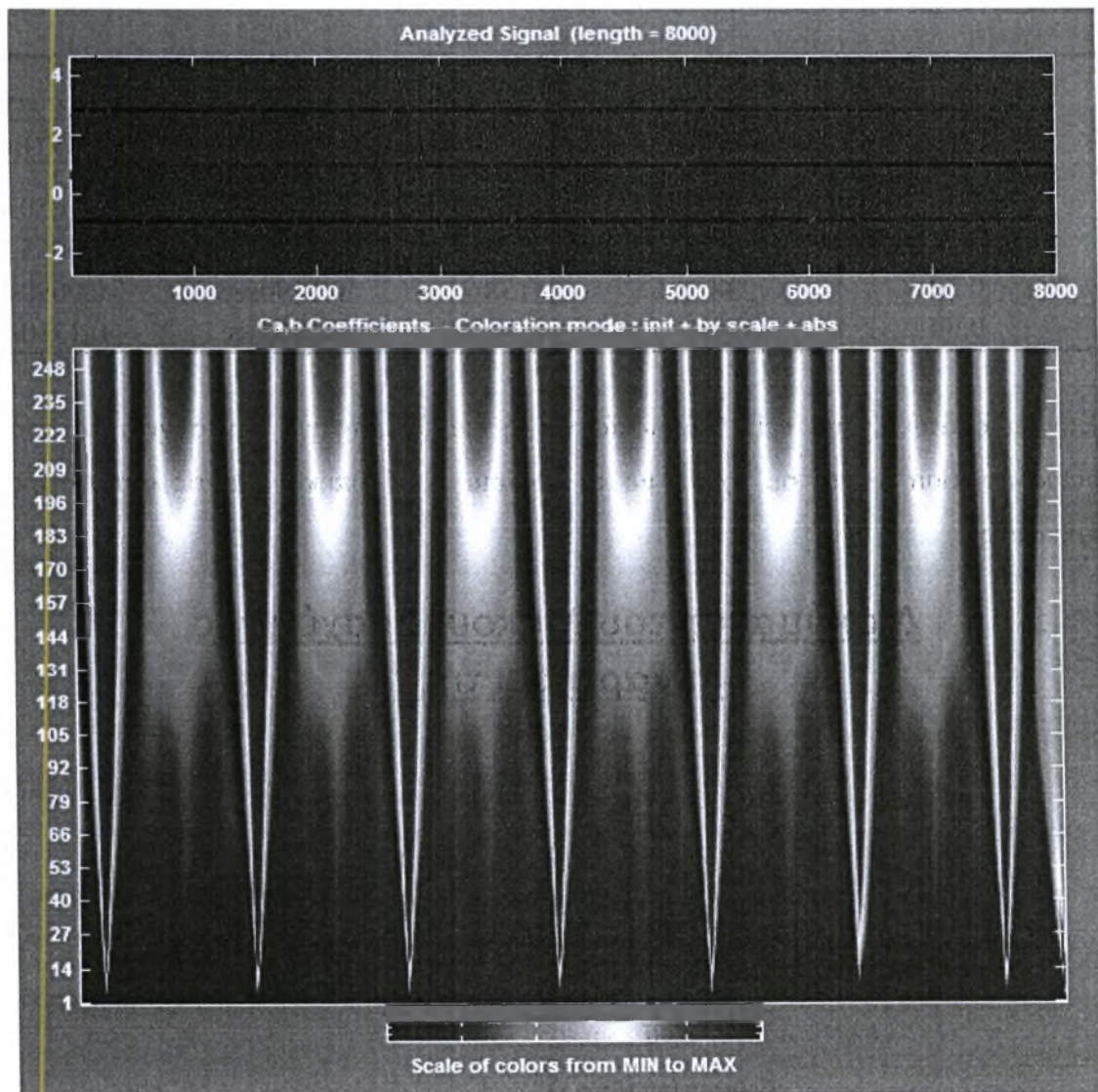
Το προσαρμοσμένο σήμα είναι η υπέρθεση δύο διευρυμένων και απλούστερων αποδόσεων του σχεδίου F, δηλαδή $F((t-20)/8)$ και $F((t-40)/4)$. Τα δύο ζεύγη (θέση, κλίμακα) που προσδιορίζονται δίδονται από τις συντεταγμένες (20,8) και (40,4). Η ανίχνευση είναι τέλεια επειδή τα δύο τοπικά μέγιστα των απόλυτων τιμών των συνεχών συντελεστών των wavelet ταιριάζουν απόλυτα.



Σχήμα 6.15.5: Σχεδιάγραμμα κυμάτωσης. Νέα Wavelet με τη μέθοδο Continuous Wavelet Transform.

Στο σημείο αυτό, γίνεται χαρακτηρισμός των προφίλ των επιφανειών χρησιμοποιώντας μία μη συμβατική μέθοδο, τη μέθοδο CWT (Continuous Wavelet Transform). Επιλέξαμε να εφαρμόσουμε τη wavelet που καλείται “Mexican hat”.

Είναι δυνατόν να διακρίνουμε στο Σχήμα 6.15.6 (που βασίζεται στην ανάλυση των τοπικών μεγίστων), ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών. Σε αυτά συγκαταλέγονται αιχμές, κορυφές και διαταραχές της επιφάνειας. Για τη wavelet “Mexican hat” παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των συντελεστών κυμάτωσης. Δυστυχώς, δεν είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους συντελεστές κυμάτωση σε κλίμακα συγκρινόμενη με το feed rate. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με βάση την κλίμακα των χρωμάτων στην κυμάτωση μπορούμε να προσδιορίσουμε της περιοχές αντίστοιχης τιμής της τραχύτητας.



Σχήμα 6.15.6: Συνεχής μονοδιάστατη wavelet.

6.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

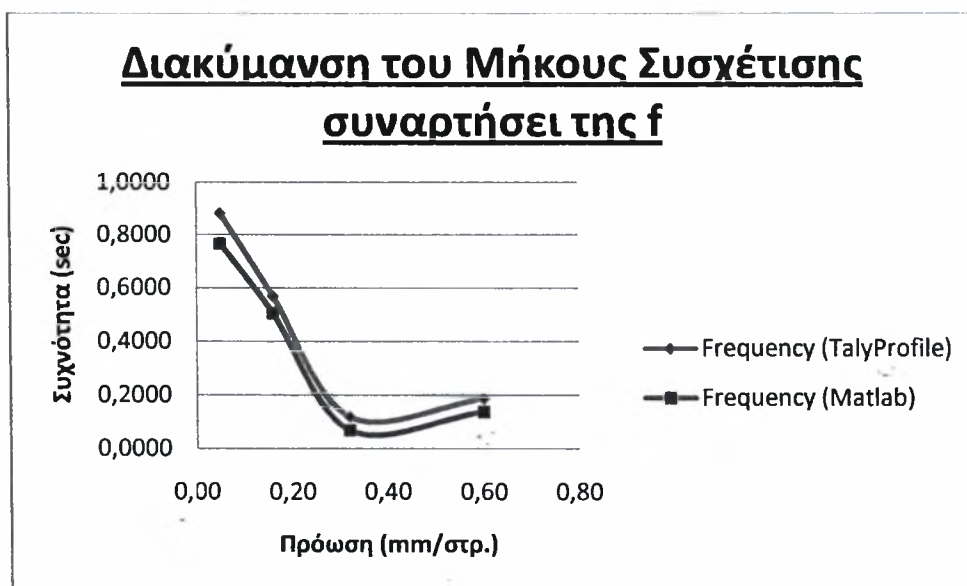
6.2.2.1 Μήκος Αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation length)

Στον παρακάτω Πίνακα 6.25 παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης β , που λάβαμε τόσο από το λογισμικό TalyProfile όσο και από το πρόγραμμα ανάλυσης της τραχύτητας που αναπτύξαμε στο Matlab. Αυτή η παράμετρος περιγράφει τα χαρακτηριστικά συσχέτισης της ACF. Ορίζεται ως το μικρότερο μήκος για το οποίο η ACF παίρνει για πρώτη φορά την τιμή 0.1. Παρέχει βασικές πληροφορίες που αφορούν την κυμάτωση της επιφάνειας σε σχέση με το πλάτος της.

Πίνακας 6.25: Πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της προώσεως.

<u>A/A</u>	<u>Πρόωση</u> (mm/στρ.)	<u>Σημείο</u> <u>Δείγματος</u> (TalyProfile)	<u>Σημείο</u> <u>Δείγματος</u> (Matlab)	<u>Συχνότητα</u> (TalyProfile)	<u>Συχνότητα</u> (Matlab)
1	0.05	1763	1530	0.8815sec	0.7650sec
2	0.16	1138	1011	0.5690sec	0.5055sec
3	0.32	238	138	0.1190sec	0.0690sec
4	0.60	373	276	0.1865sec	0.1380sec

Στο παρακάτω Σχήμα 6.16 παρουσιάζεται η διακύμανση για την συχνότητα του autocorrelation length σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.16: Διακύμανση της συχνότητας του autocorrelation length συναρτήσει της προώσεως.

Μεταβολή της συχνότητας του autocorrelation length συνάρτηση της πρόωσης

Κατ' αρχήν παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ίδια διακύμανση με πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Σε μεγάλες προώσεις παρατηρούμε ότι η τραχύτητα σε ένα συγκεκριμένο τομέας της επιφάνειας είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας σε κάποιο άλλο αντίστοιχο τομέα.

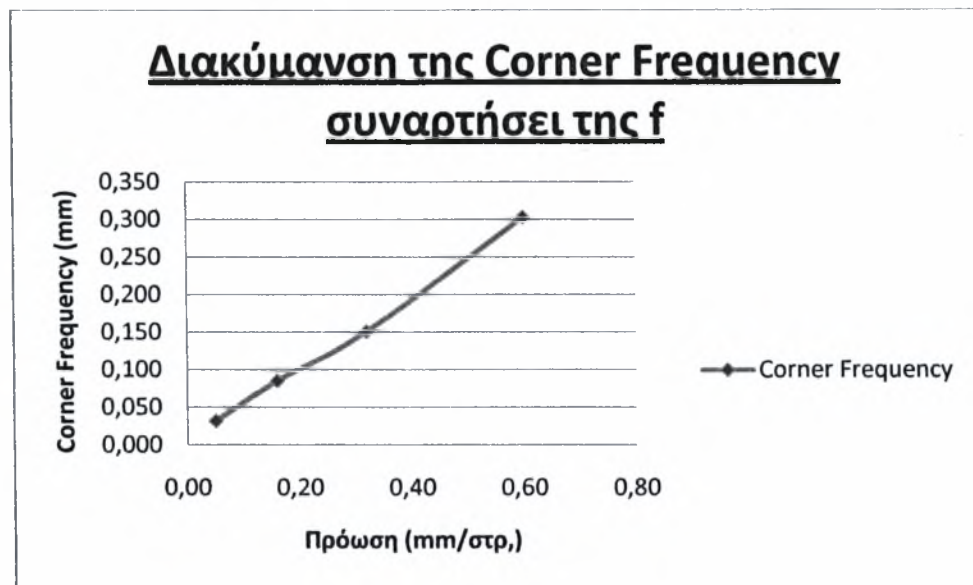
6.2.2.2 *Corner Frequency*

Στον παρακάτω Πίνακα 6.26 παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency. Το μήκος δειγματοληψίας του στυλίσκου είναι 4mm, μέσα στο οποίο λαμβάνονται 8000 σημεία. Η corner frequency είναι το σημείο μετάβασης, στο οποίο παρατηρείται μετάβαση από έναν μηχανισμό διαμόρφωσης της επιφάνειας σε έναν άλλο που μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικός. Πρακτικά, είναι το σημείο έως το οποίο η structure function παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά.

Πίνακας 6.26: Πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency συναρτήσει της πρόωσης.

A/A	Πρόωση (mm/στρ.)	Corner Point	Corner Frequency
1	0.05	64	0.032mm
2	0.16	170	0.085mm
3	0.32	302	0.151mm
4	0.60	606	0.303mm

Στο παρακάτω Σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η διακύμανση της corner frequency σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.17: Διακύμανση της corner frequency συναρτήσει της προώσεως.

Μεταβολή της corner frequency συνάρτηση της πρόωσης

Με την αύξηση της πρόωσης, εντατικοποιείται η προσπάθεια για κοπή. Εμφανίζεται επομένως η ύπαρξη ανωμαλιών στην περιοχή της κοπής που δημιουργεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Συνεπώς, η μεταβολή από την γραμμική στην ταραχώδη περιοχή της structure function εμφανίζεται νωρίτερα και έτσι η corner frequency αυξάνεται.

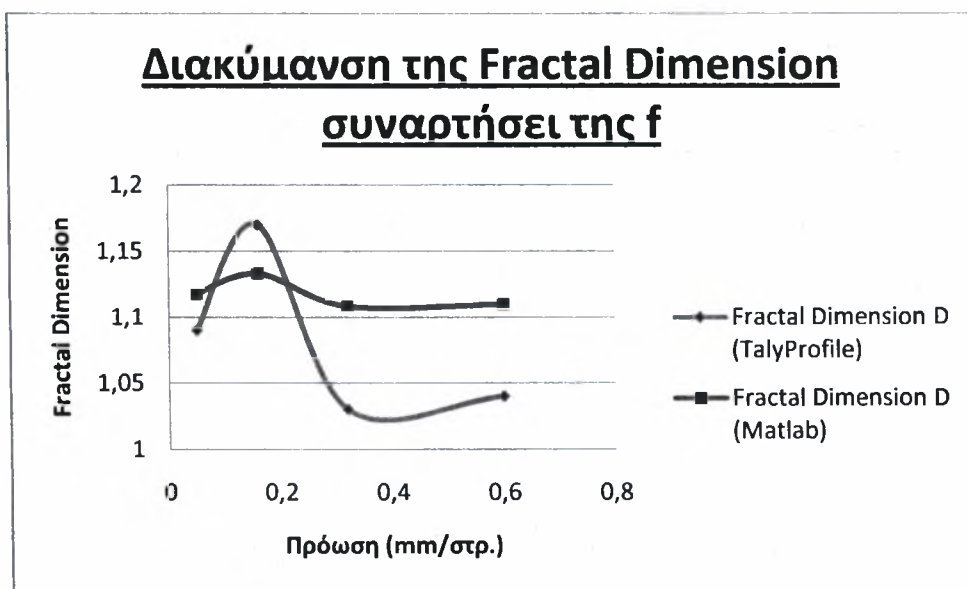
6.2.2.3 Fractal Dimension

Από τον λογάριθμο της structure function θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική των επιφανειών που μελετώνται. Η διάσταση fractal μιας επιφάνειας δεν αποτελεί σαφώς ένα μέτρο της τραχύτητας υπό την κλασική έννοια της R_a ή κάποιας από τις άλλες κοινές παραμέτρους τραχύτητας που χρησιμοποιούνται για τα προφίλ ή τις επιφάνειες. Η διάσταση fractal δεν λέει τίποτα για το μέγεθος της τραχύτητας. Η επιμήκυνση μιας επιφάνειας στην κατεύθυνση z έτσι ώστε να αυξηθεί το εύρος της τραχύτητας, δεν προκαλεί μεταβολές στη διάσταση fractal!! Η fractal διάσταση εξαρτάται μόνο από την κλίμακα των στοιχείων τραχύτητας και είναι ευαίσθητη στη χωρική οργάνωση των δεδομένων υψομετρικών μεταβολών σε πολλές κλίμακες. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.27.

Πίνακας 6.27: Πειραματικά αποτελέσματα για τη διάσταση fractal συναρτήσει της προώσεως.

<u>A/A</u>	<u>Πρόωση (mm/στρ.)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D (TalyProfile)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D (Matlab)</u>
1	0.05	1.090	1.118
2	0.16	1.170	1.133
3	0.32	1.030	1.108
4	0.60	1.040	1.110

Στο παρακάτω Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται η διακύμανση της fractal dimension σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.18: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.

Μεταβολή της fractal dimension συνάρτηση της προώσεως

Με την αύξηση της προώσεως, εντατικοποιείται η προσπάθεια για κοπή. Εμφανίζεται επομένως η ύπαρξη ανωμαλιών στην περιοχή της κοπής που δημιουργεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Παρατηρούμε ότι και οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν σχεδόν τον ίδιο ρυθμό, μεταξύ των δύο προγραμμάτων υπολογισμού (TalyProfile και Matlab). Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η πρόωση, η τραχύτητα που προκύπτει παρουσιάζει συνεχώς μειούμενη διακύμανση. Πρέπει, τέλος, να επισημάνουμε ότι η fractal dimension εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της σκληρότητας του μετάλλου που κατεργαζόμαστε και του μήκους κοπής.

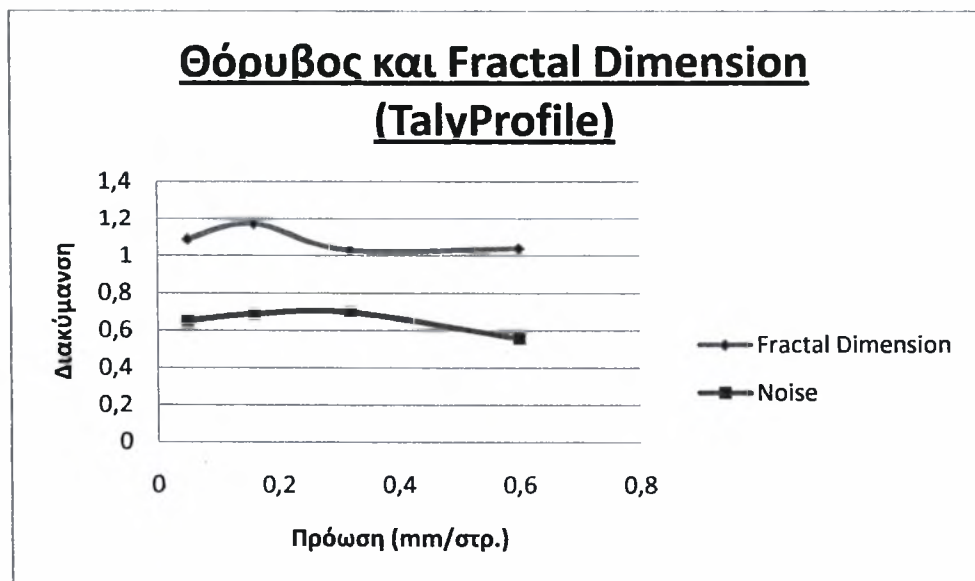
6.2.2.4 Θόρυβος και Fractal Dimension

Στον παρακάτω Πίνακα 6.28 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για τον συντελεστή προσομοίωσης θορύβου και οι τιμές της fractal dimension που έχουν ληφθεί από το λογισμικό TalyProfile και το πρόγραμμα στο Matlab.

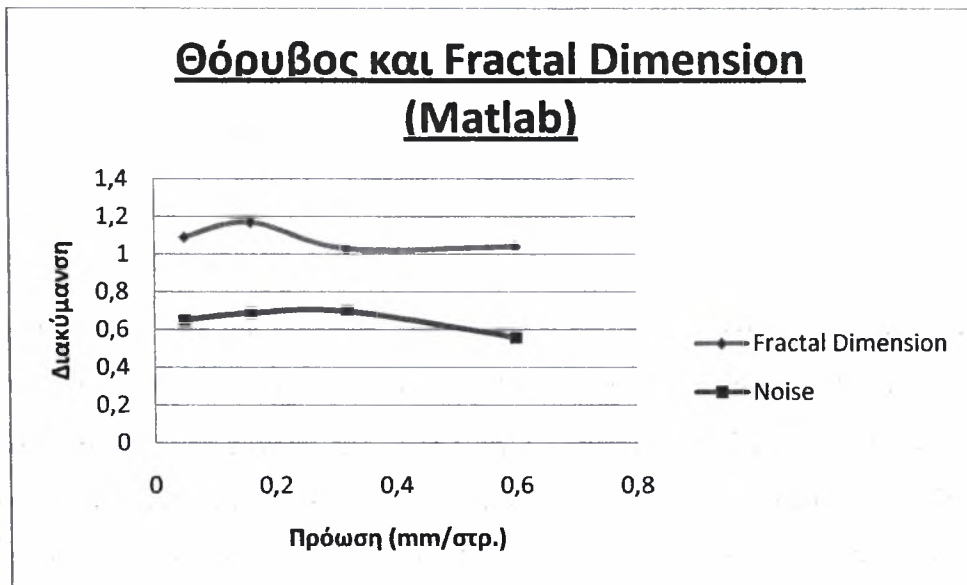
Πίνακας 6.28: Πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή προσομοίωσης του θορύβου συναρτήσει της πρόωσης.

<u>A/A</u>	<u>Πρόωση (mm/στρ.)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D (TalyProfile)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D (Matlab)</u>	<u>Συντελεστής Προσομοίωσης Θορύβου</u>
1	0.05	1.090	1.118	0.652
2	0.16	1.170	1.133	0.688
3	0.32	1.030	1.108	0.697
4	0.60	1.040	1.110	0.558

Στα παρακάτω Σχήματα 6.19 και 6.20 παρουσιάζεται η διακύμανση του συντελεστή που περιγράφει τον θόρυβο σε σχέση με τις τιμές της fractal dimension που παίρνουμε από τα δύο διαφορετικά διαθέσιμα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της τραχύτητας των επιφανειών.



Σχήμα 6.19: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της πρόωσης.



Σχήμα 6.20: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της πρόωσης.

Παρατηρούμε ότι και οι δύο καμπύλες (θόρυβος και fractal dimension) παρουσιάζουν σχεδόν τον ίδιο ρυθμό και μεταξύ των δύο προγραμμάτων υπολογισμού (TalyProfile και Matlab). Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η πρόωση, η τιμή του θορύβου και συνεπώς η τραχύτητα που προκύπτει παρουσιάζει συνεχώς μειούμενη διακύμανση.

6.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (ΧΑΜΗΛΕΣ & ΥΨΗΛΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΩΣΕΩΣ)

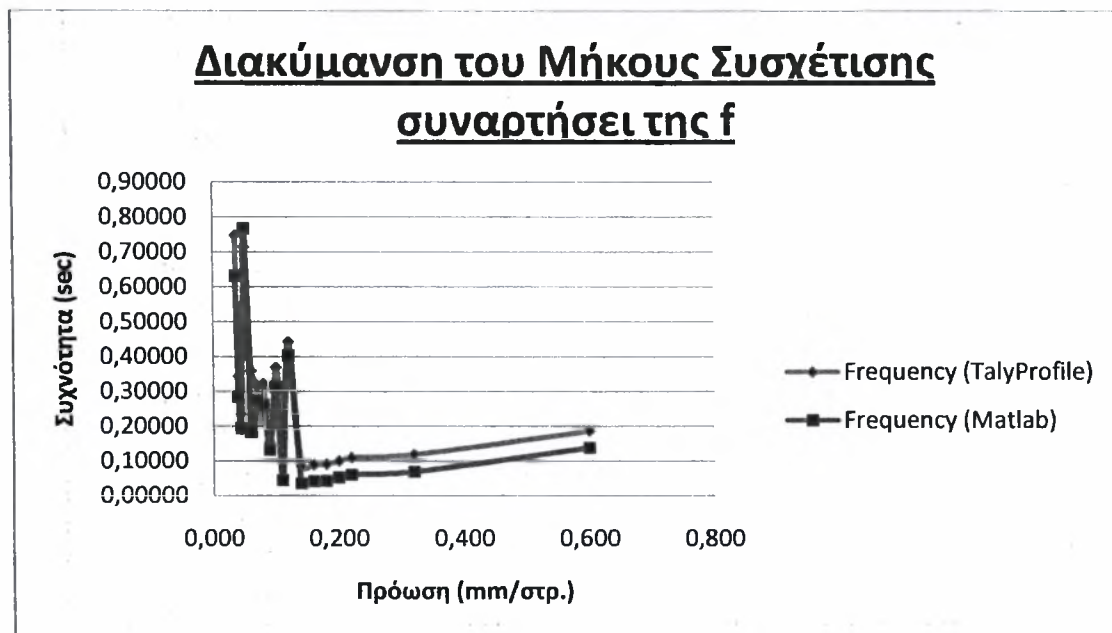
6.3.1 Μήκος Αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation length)

Στον παρακάτω Πίνακα 6.29 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης β , που λάβαμε τόσο από το λογισμικό TalyProfile όσο και από το πρόγραμμα ανάλυσης της τραχύτητας που αναπτύξαμε στο Matlab. Σκοπός αυτής της παρουσίασης είναι να δούμε τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το μήκος αυτοσυσχέτισης σε σχέση με την κλίμακα μεγέθους της προώσεως.

Πίνακας 6.29: Πειραματικά αποτελέσματα για το μήκος αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της προώσεως.

<u>A/A</u>	<u>Πρόωση (mm/στρ.)</u>	<u>Σημείο Δείγματος (TalyProfile)</u>	<u>Σημείο Δείγματος (Matlab)</u>	<u>Συχνότητα (TalyProfile)</u>	<u>Συχνότητα (Matlab)</u>
1	0.036	1495	1263	0.74750sec	0.63150sec
2	0.040	688	570	0.34400sec	0.28500sec
3	0.045	470	390	0.23500sec	0.19500sec
4	0.050	1430	1534	0.71500sec	0.76700sec
5	0.060	719	367	0.35950sec	0.18350sec
6	0.070	635	547	0.31750sec	0.27350sec
7	0.080	644	524	0.32200sec	0.26200sec
8	0.090	308	263	0.15400sec	0.13150sec
9	0.100	739	626	0.36950sec	0.31300sec
10	0.110	385	90	0.19250sec	0.04500sec
11	0.120	886	808	0.44300sec	0.40400sec
12	0.140	169	72	0.08450sec	0.03600sec
13	0.160	179	84	0.08950sec	0.04200sec
14	0.180	182	87	0.09100sec	0.04350sec
15	0.200	201	106	0.10050sec	0.05300sec
16	0.220	220	121	0.11000sec	0.06050sec
17	0.320	238	138	0.11900sec	0.06900sec
18	0.600	373	276	0.18650sec	0.13800sec

Στο παρακάτω Σχήμα 6.21 παρουσιάζεται η διακύμανση για την συχνότητα του autocorrelation length σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.21: Διακύμανση της συχνότητας του autocorrelation length συναρτήσεως της προώσεως.

Μεταβολή της συχνότητας του autocorrelation length συνάρτηση της πρόωσης

Καιτ' αρχήν παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ίδια διακύμανση με πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Σε μεγάλες προώσεις παρατηρούμε ότι η τραχύτητα σε ένα συγκεκριμένο τομέας της επιφάνειας είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας σε κάποιο άλλο αντίστοιχο τομέα. Σε αρκετά μεγάλες προώσεις (0.32 και 0.60 mm/στρ.) η εξάρτηση της τραχύτητας αυξάνεται σταθερά. Αντιθέτως, σε μικρές προώσεις υπάρχει αρκετά μεγάλη διακύμανση.

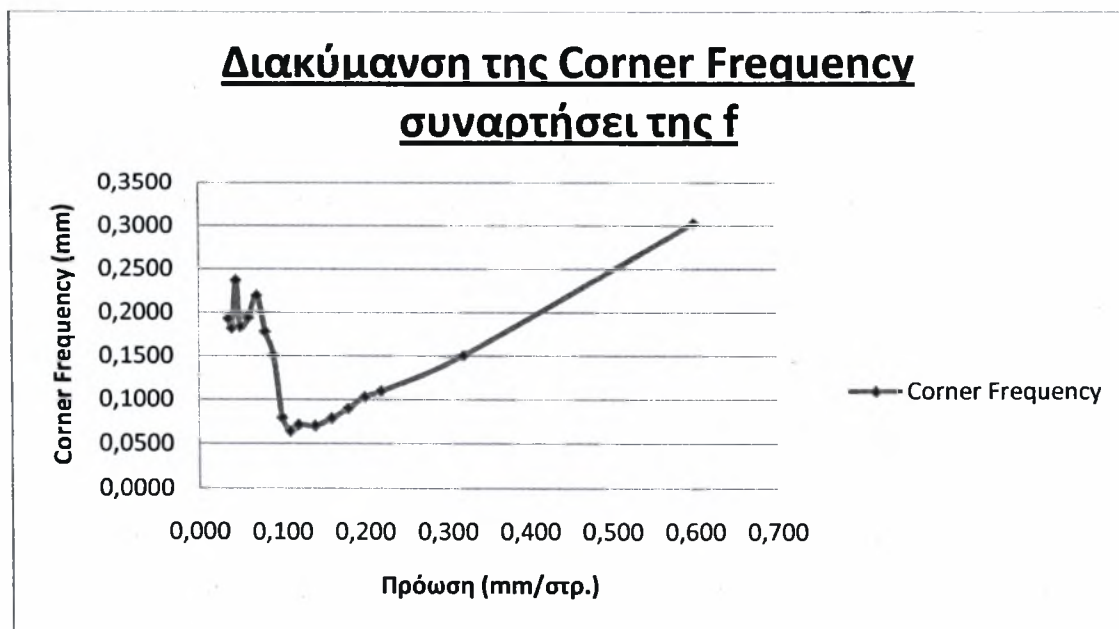
6.3.2 Corner Frequency

Στον παρακάτω Πίνακα 6.30 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency που λάβαμε για όλες τις προώσεις. Το μήκος δειγματοληψίας του στυλίσκου είναι 4mm, μέσα στο οποίο λαμβάνονται 8000 σημεία.

Πίνακας 6.30: Πειραματικά αποτελέσματα για την corner frequency συναρτήσει της προώσεως.

A/A	Πρόωση (mm/στρ.)	Corner Point	Corner Frequency
1	0.036	386	0.1930mm
2	0.040	364	0.1820mm
3	0.045	474	0.2370mm
4	0.050	368	0.1840mm
5	0.060	389	0.1945mm
6	0.070	439	0.2195mm
7	0.080	356	0.1780mm
8	0.090	302	0.1510mm
9	0.100	159	0.0795mm
10	0.110	129	0.0645mm
11	0.120	143	0.0715mm
12	0.140	141	0.0705mm
13	0.160	158	0.0790mm
14	0.180	180	0.0900mm
15	0.200	207	0.1035mm
16	0.220	220	0.1100mm
17	0.320	302	0.1510mm
18	0.600	606	0.3030mm

Στο παρακάτω Σχήμα 6.22 παρουσιάζεται η διακύμανση της corner frequency σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.22: Διακύμανση της corner frequency συναρτήσει της προώσεως.

Μεταβολή της corner frequency συνάρτηση της πρόωσης

Με την αύξηση της πρόωσης, εντατικοποιείται η προσπάθεια για κοπή. Εμφανίζεται επομένως η ύπαρξη ανωμαλιών στην περιοχή της κοπής που δημιουργεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Συνεπώς, η μεταβολή από την γραμμική στην ταραχώδη περιοχή της structure function εμφανίζεται νωρίτερα και έτσι η corner frequency αυξάνεται. Αυτό φαίνεται και από το παραπάνω Σχήμα 6.22, όπου για μεγάλες προώσεις η corner frequency αυξάνεται απότομα αλλά με σταθερό ρυθμό.

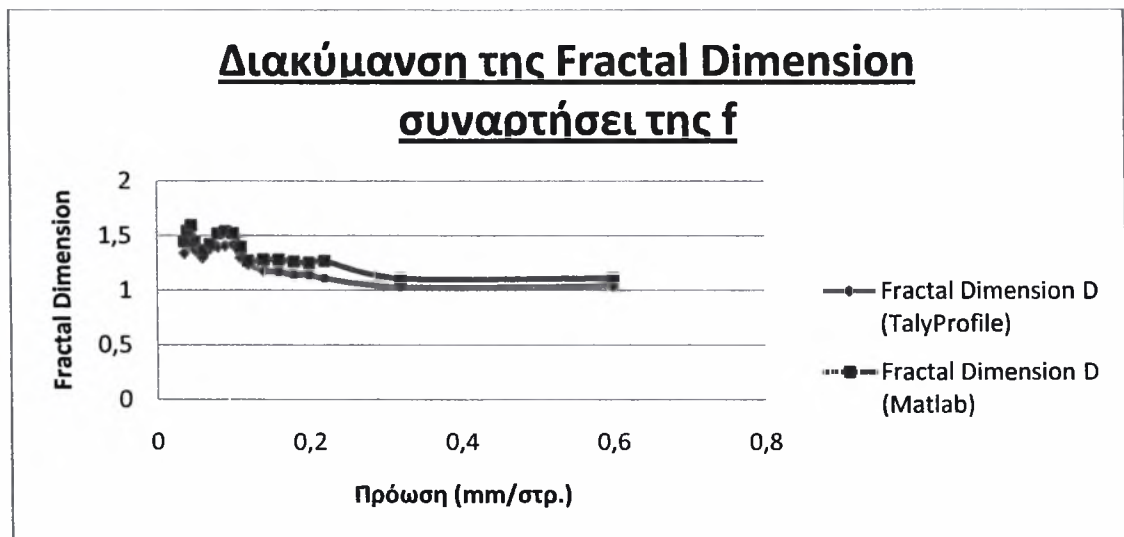
6.3.3 Fractal Dimension

Από τον λογάριθμο της structure function θα υπολογιστεί η κλίση που κρίνεται απαραίτητη για τον προσδιορισμό της fractal dimension που είναι χαρακτηριστική των επιφανειών που μελετώνται. Τα συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.31.

Πίνακας 6.31: Πειραματικά αποτελέσματα για τη διάσταση fractal συναρτήσει της πρόωσης.

<u>A/A</u>	<u>Πρόωση (mm/στρ.)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D (TalyProfile)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D (Matlab)</u>
1	0.036	1.340	1.445
2	0.040	1.430	1.543
3	0.045	1.410	1.592
4	0.050	1.370	1.442
5	0.060	1.300	1.366
6	0.070	1.380	1.422
7	0.080	1.400	1.518
8	0.090	1.410	1.538
9	0.100	1.420	1.521
10	0.110	1.300	1.398
11	0.120	1.240	1.270
12	0.140	1.180	1.281
13	0.160	1.170	1.280
14	0.180	1.140	1.262
15	0.200	1.140	1.251
16	0.220	1.110	1.267
17	0.320	1.030	1.108
18	0.600	1.040	1.110

Στο παρακάτω Σχήμα 6.23 παρουσιάζεται η διακύμανση της fractal dimension σε σχέση με τα δοκίμια που κόπηκαν με τις αντίστοιχες προώσεις.



Σχήμα 6.23: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.

Μεταβολή της fractal dimension συνάρτηση της πρόωσης

Με την αύξηση της πρόωσης, εντατικοποιείται η προσπάθεια για κοπή. Εμφανίζεται επομένως η ύπαρξη ανωμαλιών στην περιοχή της κοπής που δημιουργεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Παρατηρούμε ότι και οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν σχεδόν τον ίδιο ρυθμό, μεταξύ των δύο προγραμμάτων υπολογισμού (TalyProfile και Matlab). Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η πρόωση, η τραχύτητα που προκύπτει παρουσιάζει συνεχώς μειούμενη διακύμανση. Στις μεγάλες προώσεις παρατηρούμε ότι η fractal dimension σταθεροποιείται.

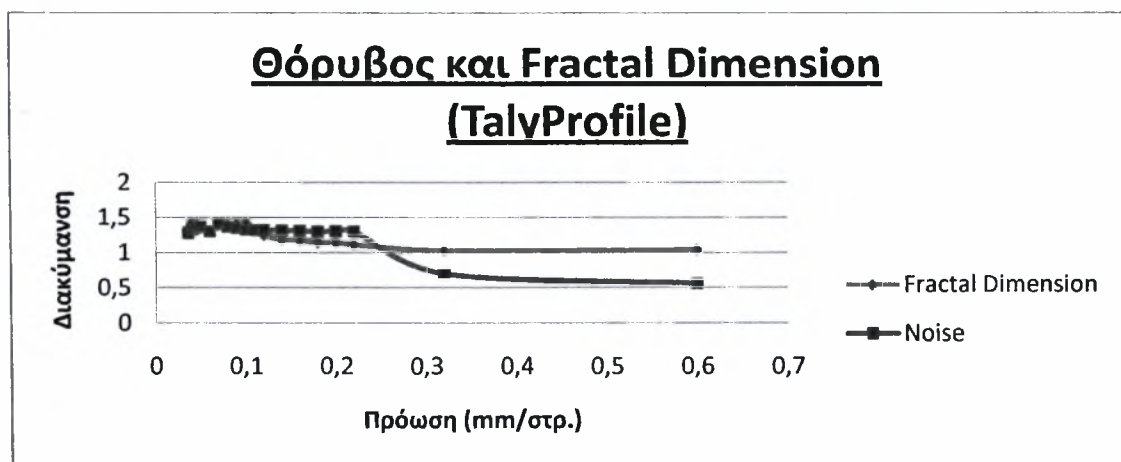
6.3.4 Θόρυβος και Fractal Dimension

Στον παρακάτω Πίνακα 6.32 παρουσιάζονται αναλυτικά τα συνολικά αποτελέσματα για τον συντελεστή προσομοίωσης θορύβου και οι τιμές της fractal dimension που έχουν ληφθεί από το λογισμικό TalyProfile και το πρόγραμμα στο Matlab, σε σχέση με τις διάφορες τιμές προώσεως.

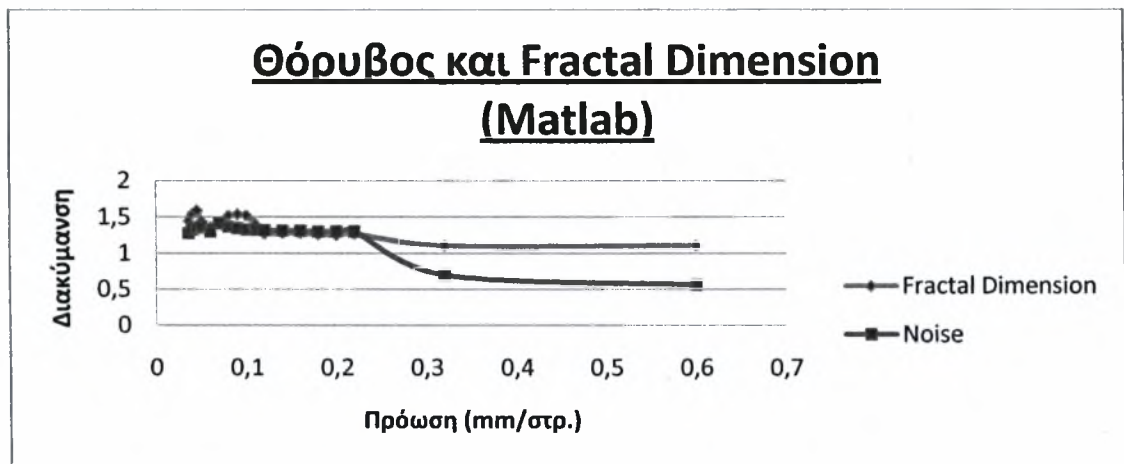
Πίνακας 6.32: Πειραματικά αποτελέσματα για το συντελεστή προσομοίωσης του θορύβου συναρτήσει της προώσεως.

<u>A/A</u>	<u>Πρόωση (mm/στρ.)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D (TalyProfile)</u>	<u>Διάσταση Fractal, D (Matlab)</u>	<u>Συντελεστής Προσομοίωσης Θορύβου</u>
1	0.036	1.340	1.445	1.274
2	0.040	1.430	1.543	1.324
3	0.045	1.410	1.592	1.347
4	0.050	1.370	1.442	1.364
5	0.060	1.300	1.366	1.300
6	0.070	1.380	1.422	1.408
7	0.080	1.400	1.518	1.363
8	0.090	1.410	1.538	1.344
9	0.100	1.420	1.521	1.325
10	0.110	1.300	1.398	1.318
11	0.120	1.240	1.270	1.316
12	0.140	1.180	1.281	1.311
13	0.160	1.170	1.280	1.308
14	0.180	1.140	1.262	1.297
15	0.200	1.140	1.251	1.301
16	0.220	1.110	1.267	1.299
17	0.320	1.030	1.108	0.697
18	0.600	1.040	1.110	0.558

Στα παρακάτω Σχήματα 6.24 και 6.25 παρουσιάζεται η διακύμανση του συντελεστή που περιγράφει τον θόρυβο σε σχέση με τις τιμές της fractal dimension που παίρνουμε από τα δύο διαφορετικά διαθέσιμα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της τραχύτητας των επιφανειών.



Σχήμα 6.24: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.



Σχήμα 6.25: Διακύμανση της fractal dimension συναρτήσει της προώσεως.

Παρατηρούμε ότι και οι δύο καμπύλες (θόρυβος και fractal dimension) παρουσιάζουν σχεδόν τον ίδιο ρυθμό και μεταξύ των δύο προγραμμάτων υπολογισμού (TalyProfile και Matlab). Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η πρόωση, η τιμή του θορύβου και συνεπώς η τραχύτητα που προκύπτει παρουσιάζει συνεχώς μειούμενη διακύμανση. Σε υψηλές τιμές προώσεως η διακύμανση σταθεροποιείται.

Κεφάλαιο 7:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι κατεργασίες κοπής για διάφορες τιμές παραμέτρων, και ιδιαίτερα της προώσεως, αποτελούν αντικείμενο πληθώρας ερευνητικών εργασιών που παρουσιάζουν στις μέρες μας πολλά πλεονεκτήματα και προσφέρουν στη βιομηχανία την αύξηση της παραγωγικότητας με μία βελτιστοποίηση του κόστους της παραγωγής και του χρόνου επεξεργασίας διαμέσου από την μία πλευρά της ελαχιστοποίησης του νεκρού χρόνου των κατεργασιών και από την άλλη την εγγύηση της παραγωγής μιας επιφάνειας με επιθυμητό φινίρισμα, αποφεύγοντας περαιτέρω εξομαλύνσεις. Η μεταβολή της τραχύτητας ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας μας επιτρέπει να μελετήσουμε την επίδραση πάνω στην ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας.

Η ανάλυση της μικρό-τοπογραφίας έχει αναπτυχθεί αρκετά με την πάροδο του χρόνου. Από την εργαστηριακή μελέτη σε λίγα αρχικά ερευνητικά κέντρα εξελίχθηκε και καλύπτει πλέον το πεδίο της εφαρμοσμένης μηχανικής. Αποτελεί πλέον το επίκεντρο των διαδικασιών ποιοτικού ελέγχου σε πολλές επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στον τομέα της τεχνολογίας των κατεργασιών και είναι ένας σημαντικός παράγοντας που συνεισφέρει τόσο στο κόστος όσο και στην αξία των αγαθών. Η μετατόπιση του ενδιαφέροντος από τις δισδιάστατες προς τις τρισδιάστατες παραμέτρους έχει γίνει κυρίως λόγω της προόδου στον εργαστηριακό εξοπλισμό.

Δυστυχώς, παραμένει ακόμα υπαρκτό το πρόβλημα της ύπαρξης πολλών, και με αμφίβολο όφελος, παραμέτρων χαρακτηρισμού της επιφανειακής τοπογραφίας. Απλουστευμένες θεωρήσεις της τραχύτητας κατά κατεργασίες κοπής, όπως

τόρνευση, φρεζάρισμα, διάτρηση, κλπ, οδηγούν σε αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν την «θεωρητική» ή «ιδανική» τραχύτητα σε σχέση με τις πειραματικά μετρούμενες τιμές. Κατά τη διάρκεια όμως των τελευταίων ετών, η κοινότητα της μετρολογίας έχει επικεντρωθεί στη δημιουργία μιας μικρότερης ομάδας παραμέτρων που να μπορεί να εξασφαλίσει τη γενικότερη εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών για την ποιότητα μιας επιφάνειας. Όπως είναι φυσικό, τα μεμονωμένα ιδρύματα θα συνεχίσουν να αναπτύσσουν νέες παραμέτρους για να ικανοποιήσουν συγκεκριμένες ανάγκες. Βέβαια αυτό το γεγονός και τα οποιαδήποτε αποτελέσματα θα είναι καλοδεχόμενα και θα προκαλέσουν ανάλογο ενθουσιασμό.

Μια σημαντική ανάπτυξη κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας είναι η συνεχής έρευνα για τη fractal μορφοκλασματική γεωμετρία και η εφαρμογή της στην ανάλυση της τοπογραφίας μιας επιφάνειας. Οι λύσεις των fractals έχουν τους δικούς τους περιορισμούς, και επομένως οι αρχικές ελπίδες περιμένουν ακόμα να πραγματοποιηθούν. Εντούτοις έχει σημειωθεί κάποια ενθαρρυντική πρόοδος κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας και τα fractals εμφανίζονται τώρα να κερδίζουν μια καθιερωμένη θέση ανάμεσα στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή της μικρό-τοπογραφίας.

Από τον ουσιαστικό αριθμό των ερευνών που διεξάγονται συνεχώς, είναι σαφές το σύνολο (αν και βεβαίως όχι όλες) των επιφανειών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που συναντάμε σε περιπτώσεις της εφαρμοσμένης μηχανικής, υπακούουν στους κανόνες της fractal γεωμετρίας, τουλάχιστον μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Αυτές οι λεπτομέρειες έχει παρατηρηθεί ότι ισχύουν και σε περιπτώσεις όπου οι διαστάσεις αναφέρονται σε πολλές κλίμακες μεγέθους.

Πρέπει να γίνει ακόμα αρκετή προσπάθεια προκειμένου να γίνει κατανοητό το γεγονός γιατί οι φυσικές διαδικασίες παράγουν τόσο συχνά fractal επιφάνειες, και πώς η διάσταση της επιφάνειας συνδέεται με τη διαδικασία παραγωγής και με τα υλικά. Απαιτούνται επίσης περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις επακόλουθες ιδιότητες αυτών των επιφανειών στις διάφορες εφαρμογές, προτού η διάσταση fractal να μπορεί να καταστεί μια χρήσιμη παράμετρος σχεδιασμού ή ελέγχου.

Η ανάλυση των fractals χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας είναι δυνατό να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας ποικίλες μεθόδους, εφ' όσον γίνεται διάκριση μεταξύ των self-similar και self-affine δεδομένων. Επιπλέον, οι οποιοσδήποτε συγκρίσεις μεταξύ των υλικών και των μεθόδων κατεργασίας πρέπει να γίνονται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που λαμβάνονται με την ίδια μέθοδο μέτρησης. Ωστόσο, απαιτείται περισσότερη μελέτη έτσι ώστε με βάση την ερμηνεία των αποτελεσμάτων να είναι δυνατό να δοθούν απαντήσεις στα ερωτήματα που εγείρονται από το παράδοξο των ανισότροπων επιφανειών.

Η μέθοδος Continuous Wavelet Transform, που χρησιμοποιεί το wavelet “Mexican hat”, δίνει πληροφορίες για την κατανομή των ακραίων τιμών ενός προφίλ, αλλά δεν μας δίνει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε με ακρίβεια το μήκος κύματος. Η διάσταση fractal και η CWT αποτελούν αξιόλογους δείκτες για τον χαρακτηρισμό των φασματικών ιδιοτήτων μιας κατεργασμένης επιφάνειας με την προϋπόθεση ότι εντοπίζονται περιοχές τοπικών μεγίστων στο αντίστοιχο προφίλ.

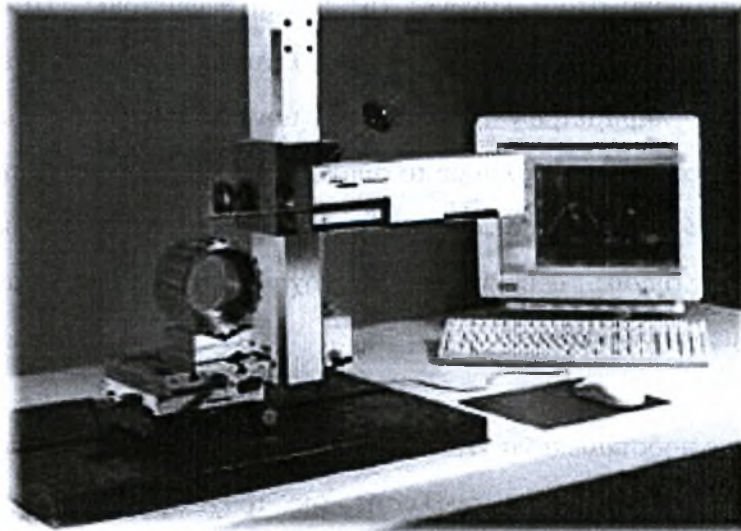
Είναι προφανές ότι οι περισσότερες (αν και όχι όλες) οι επιφάνειες, συμπεριλαμβανομένων των επιφανειών που συναντώνται στις μηχανολογικές εφαρμογές, υπακούουν στους κανόνες της fractal γεωμετρίας. Τα επικρατέστερα κριτήρια για την κατάσταση της επιφάνειας είναι ανάλογα της γεωμετρίας του εργαλείου και των παραμέτρων της κοπής. Η μοντελοποίηση της κατάστασης της επιφάνειας μας επέτρεψε να βγάλουμε το συμπέρασμα, πως η σύγκριση ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και σε αυτά που αποκτήθηκαν από αναλυτικό υπολογισμό και θεωρητικούς τύπους, δείχνουν μία συνοχή αποτελεσμάτων των οποίων οι μαθηματικές τιμές συγκλίνουν.

Κλείνοντας, έγινε προσπάθεια να γίνει σύγκριση μεταξύ των τιμών που λαμβάνονται από ένα κλασικό πρόγραμμα ανάλυσης της τραχύτητας, που συνοδεύει ένα προφιλόμετρο, και του προγράμματος που αναπτύχθηκε από τον συντάκτη της εργασίας στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Για την υλοποίηση αυτών των καινοτόμων – μη συμβατικών μεθόδων ανάλυσης της τραχύτητας, παρατίθενται στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας τα προγράμματα Matlab, τα οποία και είναι διαθέσιμα για κάθε ενδιαφερόμενο.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Μελλοντικά ως επικρατέστερες δείχνουν οι ακόλουθες βασικές κατευθύνσεις έρευνας, όπως:

- ❖ Καταγραφή της τοπογραφίας της επιφάνειας στις τρεις διαστάσεις (3D).
- ❖ Συσχετισμός των διαφόρων παραμέτρων χαρακτηρισμού των επιφανειών με μηχανικές ιδιότητες όπως η αντοχή του υλικού, η σκληρότητά του, η δυσθραυστότητα, κ.ά.
- ❖ Το μέλλον της Τριβολογίας αφορά κυρίως τους τομείς της Βιοτριβολογίας και Νανοτριβολογίας, δύο νέους τομείς της επιστήμης που παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, Engineering Tribology, Third Edition, Elsevier Butterworth Heinemann, United States of America, 2005.
2. E. Mainsah, J.A. Greenwood, D. G. Chetwynd, Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.
3. Αντωνίου Σ., Τριβολογία, Πειραιάς 1993.
4. Πετρόπουλου Γ. Π., Μαθήματα Μηχανουργικής Τεχνολογίας, Μετροτεχνία, Θεσσαλονίκη 1985.
5. E.S. Gadelmalwa, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa. H.H. Soliman, Roughness Parameters, Journal of Materials Processing Technology 123 (2002) 133–145.
6. BEN AHMED Mondher, Mastère Mécanique et Energétique (CFM), Modélisation de la rugosité des surfaces obtenues par tournage à grandes vitesses, 2005.
7. site Internet: www.predev.com/smg/.
8. R. D. Arnell, P. B. Davies. J. Halling, T. L. Whomes, Tribology: Principles and Design Applications, MacMillan Education Ltd, 1991.
9. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, John Wiley, N. York ,1966.
10. Sandvik Coromant, 1999.
11. Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: surface roughness prediction for turning operations *Yue Jiao, Shuting Lei, Z.J. Pei, E.S. Lee* International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 1643–1651.

12. J.D. Thiele, S.N. Melkote, R.A. Peascoe, T.R. Watkins, Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100 steel, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 122 (2000) 642–649.
13. X.D. Fang, H. Safi-Jahanshaki, A new algorithm for developing a reference model for predicting surface roughness in finish machining of steels, *International Journal of Production Research* 35 (1) (1997) 179–197.
14. J. Kopac, M. Bahor, M. Sokovic, Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold preformed steel workpieces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42 (2002) 707–716.
15. X. Feng, X. Wang, Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 20 (2002) 348–356.
16. Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool Yusuf Sahin, A. Riza Motorcu, *Materials and Design* 26 (2005) 321–326.
17. Alauddin M, El Baradie MA. Tool life model for end milling steel. *J Mater Process Tech* 1997;68:50–59.
18. Choudhury SK, Apparao IVK. Optimization of cutting parameters for maximizing tool life. *Int J Mach Tool Manu* 1999;39:343–353.
19. Taraman K. Multi-machining output-multi independent variable turning research by response surface methodology. *Int J Prod Res* 1974; 12(2):233–245.
20. El Baradie MA. Surface roughness prediction in the turning of high strength steel by factorial design of experiments. *J Mater Process Tech* 1997; 67:55–61.
21. Czichos, H.,: *Tribology*, Elsevier Publications Co.,1978.

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

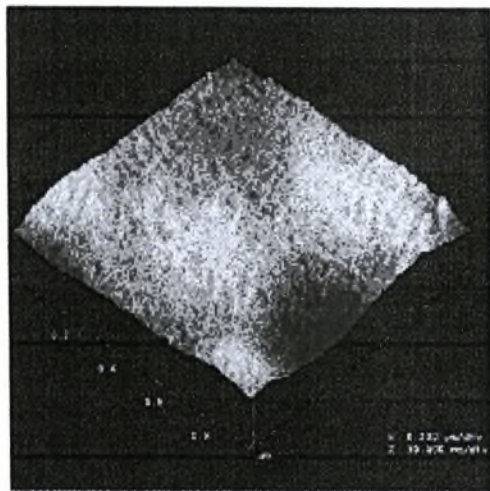
- AACF** : Χωρική Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης (η ACF όπως αυτή εφαρμόζεται σε μία περιοχή παρά σε ένα απλό προφίλ). Δείτε Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης.
- ACF** : Δείτε Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης.
- Aliasing** : Ασάφεια φάσης που εισάγεται σε ένα ψηφιακό σήμα λόγω μη σωστής επιλογής του διαστήματος δειγματοληψίας. Τα αποτελέσματα στο φάσμα, στο πεδίο της συχνότητας, έχουν σαν συνέπεια μια προφανή μίξη των συνιστωσών υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων.
- APSD** : Χωρικό Φάσμα Πυκνότητας Ισχύος.
- DFT** : Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier
- ECM** : Electro Chemical Machining.
- EDM** : Electro Discharge Machining.
- FFT** : Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier.
- Fractal** : Γεωμετρικός προσδιορισμός κάθε μέρος του οποίου έχει τον ίδιο στατιστικό χαρακτήρα με το σύνολο. Είναι χρήσιμοι στη διαμόρφωση των δομών (όπως οι διαβρωμένα ακτές, οι νιφάδες χιονιού και η τοπογραφία) στις οποίες παρόμοια σχήματα επαναλαμβάνονται στις σταδιακά μικρότερες κλίμακες και στην περιγραφή των εν μέρει τυχαίων ή χαστικών φαινομένων, όπως η αύξηση του κρυστάλλου, οι τυρβώδεις ροές και ο σχηματισμός των γαλαξιών (πρώτος το ανακάλυψε ο Πολωνός και γεννημένος στην Γαλλία μαθηματικός, Beniot Mandelbrot (1924).

- Ανάλυση Fourier** : Η ανάλυση μιας σύνθετης κυματομορφής που εκφράζεται ως σειρά ημιτονοειδών συναρτήσεων, οι συχνότητες των οποίων διαμορφώνουν μια αρμονική σειρά (που πήρε το όνομα της από τον Γάλλο μαθηματικό, Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830)).
- Επιφανειακή Ατέλεια** : Μια απόκλιση από τις αναμενόμενες στατιστικές τιμές μιας επιφάνειας.
- Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier** : Η εφαρμογή των DFTs που απαιτεί εντατική επεξεργασία λόγω του μεγάλου αριθμού των σχετικών σύνθετων πολλαπλασιασμών. Ο άμεσος υπολογισμός είναι επομένως μη πρακτικός, ιδιαίτερα για τους δισδιάστατους DFTs. Αρχικά αναπτύχθηκε ο μονοδιάστατος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (Cooley και Tukey, 1965) για να επιταχυνθεί ο υπολογισμός του μονοδιάστατου DFT. Χρησιμοποίησαν μια μέθοδο αποκαλούμενη ανάλυση κατά γραμμές-στήλες. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί τώρα στους δισδιάστατους DFTs και χρησιμοποιείται ευρέως στον υπολογισμό των DFTs.
- Διάσταση Fractal** : Η παράμετρος που απεικονίζει την κλίμακα του μεγέθους. Δίδεται από τον τύπο $\frac{1}{2}(5 - n)$ όπου n είναι ο εκθέτης του φάσματος ισχύος.
- Επίπεδο Εμπιστοσύνης** : Μια δήλωση της πιθανότητας ότι οποιαδήποτε μεμονωμένη τιμή βρίσκεται μέσα στη ζώνη αβεβαιότητας για τέτοιες τιμές. Π.χ., η εμπιστοσύνη 95% υπονοεί ότι μια τιμή έξω από τη ζώνη αβεβαιότητας θα βρισκόταν σε λιγότερο από το 5% των μετρήσεων, που αντιστοιχούν στη ζώνη που είναι ± 2 σταθερές αποκλίσεις για το μέσο όρο για μια Κανονικά κατανεμημένη μεταβλητή (επίσης γνωστό ως διάστημα εμπιστοσύνης).

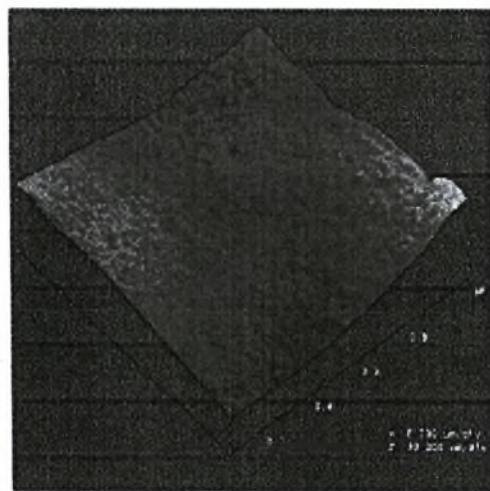
- Ζεύγος** : Δύο εξισώσεις, μια από τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει ένα σήμα από τη χωρική στην περιοχή συχνότητας και μια άλλη από τη συχνότητα στη χωρική περιοχή.
- Μετασχηματισμού Fourier**
- Ιδιότητα Fractal** : Μια multiscale ιδιότητα στην οποία οι παράμετροι είναι ίδιες για κάθε κλίμακα μεγέθους.
- Κυμάτωση** : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προσδίδονται στο κατεργαζόμενο δοκίμιο από σφάλματα στο εργαλείο κατεργασίας.
- Κυρτότητα** : Αντίστροφη της ακτίνας καμπυλότητας - που συχνά προσεγγίζεται ως το δεύτερο διαφορικό.
- Λάθη Μορφής** : Γεωμετρική απόκλιση από την επιδιωκόμενη μορφή (μεγάλο μήκος κύματος).
- Μετασχηματισμός Fourier** : Μια συνάρτηση που προέρχεται από μια δεδομένη συνάρτηση και την αντιπροσώπευση από μια σειρά ημιτονοειδών συναρτήσεων. Είναι μια συγκεκριμένη ολοκλήρωση που προέρχεται από τους συντελεστές της σειράς Fourier ενός συνεχούς περιοδικού σήματος (μετασχηματισμός που απεικονίζει το άθροισμα των ημιτονοειδών κυμάτων). Οι μετασχηματισμοί Fourier ισχύουν και για τα συνεχή και για τα διακριτά σήματα. Κάθε σήμα που μοντελοποιείται από έναν μετασχηματισμό Fourier μπορεί να αντιπροσωπευθεί από ένα ζεύγος μετασχηματισμού Fourier. Οι εξισώσεις είναι γνωστές ως η εξίσωση ανάλυσης και η εξίσωση σύνθεσης.
- Μετασχηματισμός Wavelet** : Χωρική συνάρτηση συχνότητας.
- Μήκος Αποκοπής** : Το μήκος κύματος κατά μήκος της επιφάνειας, η οποία αντιστοιχεί στο μήκος δειγματοληψίας.

- Μήκος Συσχέτισης (υστέρηση):** : Αυτή είναι η τιμή υστέρησης πέρα από την οποία η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης πέφτει σε μια μικρή τιμή, συνήθως στο 10% ή μερικές φορές στο $\frac{1}{e}$ (περίπου 37%).
- Σειρά Fourier** : Μια άπειρη σειρά τριγωνομετρικών συναρτήσεων, η οποία αντιπροσωπεύει επέκταση ή προσέγγιση μιας σύνθετης περιοδικής συνάρτησης.
- Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης** : Η αναμενόμενη τιμή του γινομένου ενός σήματος με τον εαυτό του, μετατοπισμένη (κατά ένα διάστημα που ονομάζεται υστέρηση, τ). Η συνάρτηση είναι η απεικόνιση της αναμενόμενης τιμής για ένα μεγάλο αριθμό μετατοπίσεων. Στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει το βαθμό στο οποίο η τιμή ενός σήματος σχετίζεται με την ίδια τιμή σε κάποια άλλη θέση ή χρονική στιγμή.
- Συνέλιξη** : Μια πράξη ολοκλήρωσης του γινομένου δύο συναρτήσεων, μια από τις οποίες μετατοπίζεται διαδοχικά σε σχέση με την άλλη. Εκφράζει τη φυσική συμπεριφορά, π.χ., πολλών τύπων φίλτρων.
- Συσχέτιση** : Η αναμενόμενη τιμή του γινομένου δύο μεταβλητών που ομαλοποιούνται όσον αφορά τις σταθερές αποκλίσεις τους.
- Τοπογραφία Επιφάνειας** : Μελέτη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας.
- Τραχύτητα Επιφανείς** : Ανωμαλίες στην υφή που προκύπτουν από το είδος της κατεργασίας, χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν η κυμάτωση και τα λάθη της μορφής.

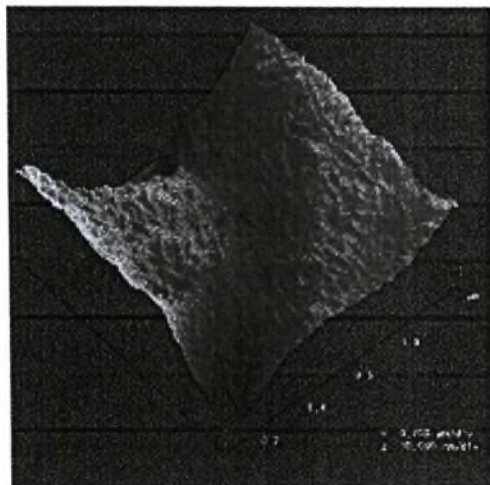
Υφή Επιφανείας : Γεωμετρία που προσδίδεται στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μορφοποίησης. Η υφή μπορεί να είναι προσανατολισμένη ή ισότροπη.



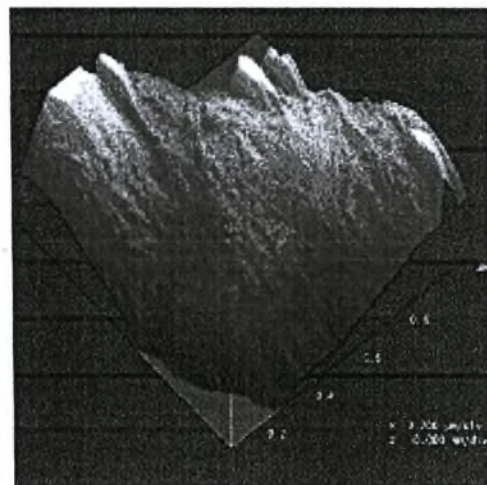
(a) Untreated PLGA (conventional)



(b) Cast PLGA (conventional)



(c) Treated PLGA (nano-structured)



(d) Cast PLGA (nano-structured)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ1. Υπολογιστικό Πρόγραμμα (MATLAB)

```
y=xlsread('Name of the excel file');

save randomsignal.mat y;

plot(y);
title('Signal-Surface Roughness')
xlabel('Data points over the length of 4mm')
ylabel('Roughness in \mum')
grid on;
figure;

[R,Lags,Bounds]=autocorr(y,8000-1,2);

plot(R);
title('Autocorrelation Function of the Surface')
xlabel('Data points over the length of 4mm')
ylabel('Autocorrelation')
grid on;
figure;

subplot(2,1,1)
St=2*(1-R);
plot(St);
title('Structure Function')
xlabel('Data points over the length of 4mm')
ylabel('Structure Function (\mum^2)')
grid on;

Y=fft(y,8000);
pwr=Y.*conj(Y)/8000;

b=1:8000;
fs = 1;
ts=(b-1)/(8000*fs);

%subplot(2,1,2)
%plot(ts,pwr); figure;
%title('Power Spectrum Density')

Stlog=log10(St);
ts2=(b-1)/(4000*fs*2);

subplot(2,1,2)
plot(Stlog);
```



```
title('Log of the Structure Function')
xlabel('Data points over the length of 4mm')
ylabel('LogS(\tau)')
grid on;

wavemenu;

waveinfo('mexh');

sptool;

cftool;
```



2. Πρόγραμμα Υπολογισμού της διάστασης Fractal

```
y=xlsread('Name of the excel file');

save randomsignal.mat y;

R=autocorr(y);

St=2*(1-R);

Stlog=log(St);
plot(Stlog);

sptool;
```

3. Πρόγραμμα Υπολογισμού της Structure Function

```
y=xlsread('Name of the excel file');  
  
save randomsignal.mat y;  
  
[R,Lags,Bounds]=autocorr(y,8000-1,2);  
  
St=2*(1-R);  
  
Stlog=log(St);  
plot(Stlog);  
title('Structure Function');  
  
sptool;
```

-ΤΕΛΟΣ-



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000097206