



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

# Απόδοση Πολυστρωματικών Πολυμερικών Υλικών σε Επιφανειακές Φορτίσεις

Διπλωματική Εργασία

Μανουσάκης Αριστοτέλης (46146412)

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Ψυλλάκη Π. Πανδώρα

*Αθήνα, Οκτώβριος 2021*



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**SCHOOL ENGINEERING**  
**DEPARTMENT MECHANICAL ENGINEERING**

# **Performance of Multi-Layered Polymers Under Surface Loading**

**Diploma Thesis**

**Manousakis Aristotelis (46146412)**

**Supervisor**

**Psyllaki P. Pandora**

***Athens, October 2021***

## Απόδοση Πολυστρωματικών Πολυμερικών Υλικών σε Επιφανειακές Φορτίσεις

### Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	Πανδώρα Π. Ψυλλάκη	Καθηγήτρια Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΠΑ.Δ.Α.	
2.	Γεράσιμος Παναγιωτάτος	Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΠΑ.Δ.Α.	
3.	Ανδρέας Θεοδωρακάκος	Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΠΑ.Δ.Α.	

## **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αριστοτέλης Μανουσάκης του Εμμανουήλ, με αριθμό μητρώου 46146412 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



Αριστοτέλης Μανουσάκης

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα ερευνητική εργασία αναλύεται η τριβολογική συμπεριφορά 3D-printed πολυμερικού υλικού. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σε σχήμα δίσκου με διάμετρο 30 mm και πάχος 5 mm, κατασκευασμένων από το πολυμερές PETG και η πειραματική διάταξη ήταν τύπου σφαίρας-δίσκου. Εξετάσθηκε η επίδραση των παραμέτρων των τριβολογικών δοκιμών (ποιότητα ανταγωνιστικού υλικού, επιβαλλόμενο φορτίο, ακτίνα και ταχύτητα ολίσθησης) στην εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς ολίσθησης. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών έγινε με τραχυμέτρηση και ζύγιση, ενώ οι επιφάνειες φθοράς παρατηρήθηκαν σε στερεοσκόπιο.

Λέξεις Κλειδιά: Τριβή, Φθορά, Τριβοςύστημα, ball-on-disk, Πολυμερές, PETG, 3D-printing, ανταγωνιστικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ανταγωνιστικό χρωμιο-νικελιούχου χάλυβα.

## **ABSTRACT**

In the present experimental work, the tribological performance of a 3D-printed polymer is investigated. PETG specimens were disks with a diameter of 30 mm and a thickness of 5mm and they were tested in a ball-on-disk device. The influence of the testing parameters (counterbody nature, applied load, sliding radius and linear speed) on the evolution of the friction and wear coefficients was evaluated. After testing, all worn specimens were investigated by means of mechanical profilometry, weighting and stereoscopic observations.

Keywords: Friction, Wear, Tribosystem, pin-on-disk, Polymer, PETG, 3D-printing, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> counterbody, Cr-Ni steel counterbody.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
<b>A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	
1. Ανασκόπηση θεωρητικού υπόβαθρου	1
1.1. Τριβή-Φθορά-Τριβοσύστημα	1
1.2. Πολυμερικά Υλικά	2
1.2.1. Πολυμερισμός	3
1.2.2. Θερμοπλαστικά	3
1.2.3. Θερμοσκληρυνόμενα	4
1.2.4. Ιδιότητες - Εφαρμογές Θερμοπλαστικών και Θερμοσκληρυνόμενων Πολυμερών	4
1.2.5. Ελαστομερή – Ιδιότητες και Εφαρμογές	5
1.3. Τεχνολογία 3D-printing	6
1.3.1 Βασικές αρχές της τεχνολογίας	6
1.3.2. Μοντέλο εναπόθεσης τήγματος - Fused Deposition Modeling (FDM)	7
1.3.3. Τήξη κλίνης κόνεως - Powder Bed Fusion (PBF)	7
1.3.4. Φωτοπολυμερισμός - Photopolymerization	7
2. Ανασκόπηση πρόσφατων μελετών	8
2.1. Συμπεριφορά σε φθορά ολίσθησης FDM υλικών	8
2.2. Απόδοση του τριβικού ζεύγους PA66-Steel	9
2.3. Επίδραση των παραμέτρων παραγωγής στην τριβολογική απόδοση 3D-printed πολυμερών	13
2.4. Τριβολογική απόδοση FDM ακρυλονιτριλίου-βουταδενίου-στυρενίου (ABS) με ενίσχυση χαλκού	15
2.5. Τριβολογική απόδοση συνθέτων PEEK/PTFE με ενίσχυση ινιδίων τιτανικού καλίου	18
2.6. Τριβολογική απόδοση συνθέτων PEEK με ενίσχυση ανθρακονημάτων μικρού μήκους και νανο-πυριτίας	21
2.7. Αξιολόγηση της παραγωγής 3D-printed υλικών PLA με τη μέθοδο τήξης νήματος	22
<b>B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	
3. Υλικά και πειραματικές διατάξεις	26
3.1. Παραγωγή των 3D-printed δισκίων	26
3.2. Διάταξη δοκιμής τριβής ολίσθησης σημειακής επαφής	27

3.3. Διαγνωστικές τεχνικές	31
4. Πειραματικά ευρήματα	32
4.1. Πειραματικά αποτελέσματα	32
4.2. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα	39
5. Προοπτικές περαιτέρω έρευνας	39
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	46
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ</b>	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Εξέλιξη του συντελεστή τριβής	i-xi
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Μετρήσεις επιφανειακής τραχύτητας	xii-xxxii
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Κατόψεις των αυλάκων φθοράς	xxxiii- 7

## **A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**



# 1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

## 1.1. Τριβή-Φθορά-Τριβοσύστημα

Η **τριβή (friction)** ορίζεται ως η αντίσταση που προβάλλεται κατά τη σχετική κίνηση σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή [1]. Ο τρόπος έκφρασης του όρου της τριβής είναι ο **συντελεστής τριβής** ( $\mu$ ), ο οποίος ορίζεται από τον λόγο της εφαπτομενικής δύναμης ( $F_T$ ), η οποία προκαλεί την κίνηση, προς τη δύναμη ( $F_N$ ), η οποία ασκείται κάθετα στην επιφάνεια επαφής των δύο σωμάτων.

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}$$

Τα αποτελέσματα της τριβής κατά κύριο λόγο είναι οι απώλειες ενέργειας, όπου έχουμε παραγωγή θερμότητας, και η παρεμπόδιση της ελεύθερης κίνησης των εφαπτομενικών επιφανειών.

Η δύναμη τριβής μπορεί να διακριθεί σε δύο μέρη την **στατική τριβή** και η **τριβή ολίσθησης ή κινητική τριβή**. Η στατική τριβή αποτελεί τη δύναμη που παρεμποδίζει ένα σώμα να κινηθεί όσο ακόμα βρίσκεται στην κατάσταση της ισορροπίας. Από την άλλη, η τριβή ολίσθησης είναι η δύναμη που αντιστέκεται στην σχετική κίνηση των σωμάτων που εφάπτονται και βρίσκονται σε κίνηση.

Η **φθορά (wear)** περιγράφει την διαδικασία απομάκρυνσης υλικού, από το ένα ή και από τα δύο σώματα, τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε κίνηση [1]. Παράλληλα, η φθορά εξαρτάται από στοιχεία του τριβοσυστήματος, δηλαδή το εξεταζόμενο υλικό, το υλικό αναφοράς, τα παραμένοντα στο σύστημα προϊόντα της φθοράς και το ίδιο το περιβάλλον [1].

Οι κύριες ομάδες τύπων φθοράς είναι δύο και διαχωρίζονται ανάλογα με τον **τρόπο σχετικής κίνησης των δύο υλικών σε επαφή** και ανάλογα με το **μηχανισμό που υπεισέρχεται στο φαινόμενο της φθοράς** [1].

Αυτές οι παραπάνω ομάδες διαχωρίζονται και σε μικρότερες υποομάδες, ειδικότερα για τους τύπους φθοράς που διαφοροποιούνται με τον τρόπο σχετικής κίνησης των δύο υλικών σε επαφή, έχουμε:

- **Φθορά λόγω ολίσθησης** παρατηρείται όταν δύο επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή ολισθαίνουν η μια πάνω στην άλλη.
- **Φθορά λόγω κύλισης** την βλέπουμε κατά την κύλιση μιας σφαίρας ή ενός κυλίνδρου σε μια στερεή επιφάνεια.
- **Φθορά λόγω παλλινδρομής** οφείλεται σε παλλινδρομικές κινήσεις υψηλής ταχύτητας και μικρής έντασης.

- **Φθορά λόγω πρόσκρουσης** συναντάται σε πρόσκρουση στερεών σωματιδίων, σταγονών ή υγρών εκτοξευμάτων.
- **Φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης** προκαλείται στην επιφάνεια του υλικού, από στερεά σωματίδια μεταφερόμενα από κάποιο ρευστό.
- **Φθορά λόγω δόνησης** προκύπτει στις διεπιφάνειες των εν επαφή υλικών όταν αυτά υποβάλλονται σε ταυτόχρονη φόρτιση παλλινδρόμησης και ολίσθησης.

Για τους τύπους φθοράς που διαφοροποιούνται με τον μηχανισμό που υπεισέρχεται στο φαινόμενο της φθοράς, έχουμε:

- **Φθορά λόγω πρόσφυσης** παρατηρείται όταν δύο ομαλές επιφάνειες ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη, ενώ τμήματα της μιας αποκόπτονται και προσφύονται στην άλλη.
- **Φθορά λόγω εκτριβής** προκαλείται όταν μια επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με σκληρά σωματίδια, τα οποία αποτελούν είτε το ανταγωνιστικό υλικό, είτε τα προϊόντα φθοράς των δύο επιφανειών.
- **Λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων** είναι δυνατόν να παραχθούν στη διεπιφάνεια επαφής προϊόντα διαφορετικής χημικής σύστασης από τα υλικά που βρίσκονται σε επαφή.
- **Μηχανισμός της επιφανειακής κόπωσης** οδηγεί σε επιφανειακή ρωγμάτωση του υλικού, εξαιτίας κυκλικών φορτίσεων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ένα **τριβοσύστημα** ορίζεται ως μια διάταξη με δύο εφραπτόμενες επιφάνειες, καθώς και οι συνθήκες στις οποίες εξελίσσεται το φαινόμενο. Πιο συγκεκριμένα, το τριβοσύστημα σχετίζεται με την σχετική κίνηση των εφραπτομενικών επιφανειών, η οποία οδηγεί στην φθορά τους, μέσω τριβολογικών μηχανισμών που μπορεί να είναι χημικής ή μηχανικής φύσεως, ή συνδυασμός των δύο παραπάνω [1].

## 1.2. Πολυμερή Υλικά

Ως **πολυμερές (polymer)** υλικό ορίζονται οι χημικές ενώσεις με μεγάλα μόρια, τα μακρομόρια, όπου γίνεται ο σχηματισμός τους από την σύνδεση πολλών όμοιων μικρών μορίων που λέγονται μονομερή [2]. Σημαντικό σε αυτό το σημείο είναι να γίνει η ανάλυση της δομής των πολυμερών, διότι από την δομή εξαρτώνται πολλές από τις ιδιότητες τους. Τα πολυμερή είναι μακρομοριακές αλυσίδες που σχηματίζονται μέσω του **πολυμερισμού**, δηλαδή με διασύνδεση και διασταύρωση διαφορετικών μονομερών. Το μονομερές είναι το βασικό συστατικό ενός πολυμερούς.

Τα διάφορα είδη πολυμερών που προκύπτουν είναι τα **θερμοπλαστικά**, τα **θερμοσκληρυνόμενα** και τα **ελαστομερή**.

### **1.2.1. Πολυμερισμός**

Ο πολυμερισμός αποτελεί μια χημική αντίδραση κατά την οποία τα μονομερή διασυνδέονται σε επαναλαμβανόμενες χημικές μονάδες για την κατασκευή μεγαλύτερων μορίων. Υπάρχουν αρκετές μορφές πολυμερισμού, οι δύο σημαντικότερες είναι ο **πολυμερισμός προσθήκης** και ο **πολυμερισμός συμπύκνωσης** [2].

Στον πολυμερισμό προσθήκης, γνωστός και ως **αλυσιδωτός πολυμερισμός**, ο σχηματισμός δεσμών λαμβάνει χώρα χωρίς υποπροϊόντα αντίδρασης. Ο λόγος που αποκαλείται αλυσιδωτή αντίδραση οφείλεται στον υψηλό ρυθμό με τον οποίο σχηματίζονται ταυτόχρονα μόρια μεγάλου μήκους. Αυτός ο ρυθμός είναι πολύ υψηλότερος σε σχέση με αυτόν του πολυμερισμού συμπύκνωσης.

Στον πολυμερισμό συμπύκνωσης τα πολυμερή παράγονται με τον σχηματισμό δεσμών ανάμεσα σε δύο τύπους αντιδρώντων μονομερών. Ο λόγος που ονομάζεται πολυμερισμός συμπύκνωσης είναι, διότι τα υποπροϊόντα της αντίδρασης συμπυκνώνονται και απομακρύνονται. Αυτή η διαδικασία είναι επίσης γνώστη και ως **σταδιακός πολυμερισμός**, επειδή το μόριο του πολυμερούς δημιουργείται βηματικά έως ότου να αναλώσει πλήρως ένα από τα συστατικά αντίδρασης.

Το μέγεθος μιας αλυσίδας, που δημιουργείται με έναν από τους παραπάνω τρόπους, είναι βολικό να εκφράζεται με βάση τον **βαθμό πολυμερισμού (degree of polymerization)**. Αυτός ο βαθμός ορίζεται ως ο λόγος του μοριακού βάρους του πολυμερούς προς το **μοριακό βάρος** της επαναλαμβανόμενης αλυσίδας [2].

### **1.2.2. Θερμοπλαστικά**

Τα θερμοπλαστικά αποτελούν κατηγορία πολυμερών, τα οποία διακρίνονται από την συμπεριφορά τους στην αλλαγή της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από την **θερμοκρασία υαλόδους μετάπτωσης  $T_g$** , ή το **σημείο τήξης  $T_m$** , γίνεται ευκολότερη η διαμόρφωση τους στα επιθυμητά σχήματα γεωμετρίας. Στην συνέχεια, όταν το πολυμερές ψύχεται επανέρχεται στην αρχική του σκληρότητα και αντοχή, δηλαδή η κατεργασία είναι αναστρέψιμη. Παραδείγματα τέτοιων πολυμερών αποτελούν τα ακρυλικά, οι κυταρρίνες, τα νάιλον, πολυαιθυλένια και το πολυβινυλοχλωρίδιο [2].

Βέβαια, η συμπεριφορά των θερμοπλαστικών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η δομή και η σύσταση τους, από τις πιο σημαντικές είναι η θερμοκρασία και ο ρυθμός παραμόρφωσης. Για

παράδειγμα, όταν βρίσκονται κάτω από την θερμοκρασία υαλόδους μετάπτωσης είναι ψαθυρά και συμπεριφέρονται ως ένα ελαστικό στερεό [2].

Όσον αφορά τις **θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες** τους συγκριτικά με τα μέταλλα, τα πλαστικά χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, χαμηλό ειδικό βάρος και υψηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Αυτό είναι που τα κάνει κατάλληλα για χρήση ως μονωτές σε ηλεκτρικά κυκλώματα ή ως υλικό συσκευασίας για ηλεκτρονικά εξαρτήματα [2].

Όμως, έχουμε την δυνατότητα να επηρεάσουμε αυτές τις ιδιότητες και να τις αυξήσουμε με εισαγωγές προσμείξεων και να δημιουργήσουμε τα **ηλεκτρικά αγωγά πολυμερή**, όπως είναι το οξειδίο του πολυαιθυλενίου, και τα **θερμικά αγωγά πολυμερή**, ένα τέτοιο πολυμερές είναι το πολυπροπυλένιο με ενσωματωμένα θερμικά αγωγά σωματίδια [2].

### **1.2.3. Θερμοσκληρυνόμενα**

Θερμοσκληρυνόμενα αποκαλούνται εκείνα τα πολυμερή, όπου τα μακρομόρια τους διασταυρώνονται σε τρισδιάστατη διάταξη. Η δομή ουσιαστικά γίνεται ένα μεγάλο μόριο με **ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς**. Σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά, κατά την διάρκεια του πολυμερισμού, το δίκτυο ολοκληρώνεται και το σχήμα του υλικού γίνεται μόνιμο, δηλαδή αυτή η αντίδραση **διασταύρωσης-σκλήρυνσης** είναι μη αναστρέψιμη [2].

Αυτή η διαδικασία του πολυμερισμού για τα θερμοσκληρυνόμενα αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται σε χημικό εργοστάσιο, όπου τα μόρια υφίστανται μερικό πολυμερισμό και μετατρέπονται σε γραμμικές αλυσίδες. Το δεύτερο στάδιο συμβαίνει κατά το τελικό βήμα της παραγωγής του εξαρτήματος, όταν η διασταύρωση ολοκληρώνεται υπό θερμότητα και πίεση κατά την διάρκεια χύτευσης και διαμόρφωσης του εξαρτήματος [2].

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δεν έχουν ορισμένη θερμοκρασία υαλόδους μετάπτωσης. Επίσης, λόγω της φύσης των δεσμών η σκληρότητα τους δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία ή από τον ρυθμό παραμόρφωσης, σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά [2].

### **1.2.4. Ιδιότητες-Εφαρμογές Θερμοπλαστικών και Θερμοσκληρυνόμενων Πολυμερών**

Σημαντικό είναι σε αυτό το σημείο να δοθούν παραδείγματα πολυμερών των ανωτέρων κατηγοριών όσον αφορά τις ιδιότητες και τις εφαρμογές τους για την καλύτερη κατανόηση τους.

Στην περίπτωση των θερμοπλαστικών έχουμε τις **ακετάλες (acetals)**, οι οποίες έχουν καλή αντοχή και δυσκαμψία και καλή αντίσταση στον ερπυσμό, εκτριβή, υγρασία, θερμότητα και χημικά και χρησιμοποιούνται σε δομικά στοιχεία και εξαρτήματα μηχανολογικών κατασκευών που απαιτείται υψηλή απόδοση για παρατεταμένο χρόνο [2]. Επίσης, έχουμε τα **ακρυλικά (acrylics)**,

που διαθέτουν μέτρια αντοχή, καλές οπτικές ιδιότητες, ικανοποιητική αντίσταση σε χρονική γήρανση και είναι γενικά ανθεκτικά σε χημικά και εφαρμογή βρίσκουν σε φακούς οπτικών, φωτεινές πινακίδες, βιτρίνες κλπ [2]. Ένα ακόμη παράδειγμα θερμοπλαστικού πολυμερούς είναι οι **φθοράνθρακες (fluorocarbons)**, οι οποίοι έχουν καλή αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες, χημικά, φυσική γήρανση και ηλεκτρισμό, οι οποίες ιδιότητες τα καθιστούν κατάλληλα σε εφαρμογές επένδυσης για εξοπλισμό χημικής επεξεργασίας, ηλεκτρική μόνωση κ.α [2].

Από την άλλη, παραδείγματα θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών είναι τα **αλκύδια (alkyds)**, όπου έχουν καλές ιδιότητες ηλεκτρικής μόνωσης, αντίσταση σε κρούση, διαστατικής σταθερότητας και χαμηλής απορρόφησης νερού και βρίσκουν εφαρμογή σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα [2]. Άλλο είναι οι **πολυεστέρες (thermosetting polyesters)**, ο οποίοι έχουν καλές χημικές και ηλεκτρικές ιδιότητες και χρησιμοποιούνται σε σκάφη, είδη αποσκευών, αμαξώματα αυτοκινήτων, πισίνες κλπ [2]. Οι **σιλικόνες (silicones)** έχουν ιδιότητες που εξαρτώνται από τη σύσταση τους όμως, γενικά έχουν καλή συμπεριφορά στη γήρανση, διαθέτουν άριστες ηλεκτρικές ιδιότητες σε ευρύ φάσμα υγρασίας και θερμοκρασίας και καλή αντίσταση σε χημικά και θερμότητα και σύμφωνα με αυτές τις ιδιότητες βρίσκει εφαρμογές σε ηλεκτρικές διατάξεις που απαιτούν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, στοιχεία θερμικής στεγάνωσης κλπ [2].

### **1.2.5. Ελαστομερή – Ιδιότητες και εφαρμογές**

Η τελευταία κύρια κατηγορία των πολυμερών υλικών είναι τα ελαστομερή. **Ελαστομερές (elastomer)** ορίζεται ένα υλικό που έχει την δυνατότητα ανάκτησης, στο μεγαλύτερο μέρος, του σχήματος και του μεγέθους του, αφού απομακρυνθεί το εφαρμοζόμενο φορτίο. Εξίσου σημαντικό είναι να αναφερθούμε στον όρο **ελαστικό (rubber)**, που αναφέρεται σε ένα υλικό που έχει δυνατότητα ταχείας ανάκαμψης μετά από μεγάλες παραμορφώσεις [2].

Πιο συγκεκριμένα, τα ελαστομερή είναι άμορφα πολυμερή με χαμηλή θερμοκρασία υαλόδους μετάπτωσης. Μερικές από τις ιδιότητες αυτών των υλικών είναι να έχουν την χαρακτηριστική ικανότητα να υφίστανται μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις χωρίς θραύση, επιπλέον είναι μαλακά και έχουν χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η σκληρότητα τους αυξάνεται αυξανόμενης της διασταύρωσης των μοριακών αλυσίδων [2].

Μερικές κατηγορίες ελαστομερών είναι το **φυσικό ελαστικό, συνθετικό ελαστικό, σιλικόνες** και **πολυουρεθάνη**.

Η βάση για το φυσικό ελαστικό είναι το **κόμμι (latex)**, το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό φλοιό ενός τροπικού δένδρου. Οι ιδιότητες που έχει αυτό το υλικό είναι ότι έχει καλύτερη αντίσταση σε εκτριβή και κόπωση και αυξημένη τριβική συμπεριφορά, αλλά χαμηλή αντίσταση σε έλαια,

θερμότητα, όζον και ηλιακό φως. Αυτές οι ιδιότητες επιτρέπουν να εφαρμοστούν σε ελαστικά αυτοκινήτων, στοιχεία στεγάνωσης, ζεύκτες και εδράσεις κινητήρων [2].

Συνθετικά ελαστικά για παράδειγμα είναι το **βουτύλιο** και το **αιθυλένιο-προπυλένιο**. Σε σχέση με τα φυσικά ελαστικά, στα συνθετικά παρατηρούνται καλύτερη αντίσταση στην θερμότητα, βενζίνη και άλλα χημικά κι έχουν μεγαλύτερο εύρος ωφέλιμων θερμοκρασιών. Τυπικές εφαρμογές κυμαίνονται από ελαστικά αυτοκινήτων, αμορτισέρ, στοιχεία στεγάνωσης και ζώνες [2].

Οι σιλικόνες έχουν το μεγαλύτερο εύρος ωφέλιμων θερμοκρασιών απ' όλα τα ελαστομερή. Άλλες ιδιότητες όπως η αντοχή και η αντίσταση στην φθορά και έλαια, είναι γενικά υποδεέστερες έναντι άλλων ελαστομερών. Οι εφαρμογές είναι σε στοιχεία στεγάνωσης, φλάντζες, θερμικές μονώσεις, ηλεκτρικούς διακόπτες υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας και διάφορα ηλεκτρονικά όργανα [2].

Τέλος, η πολυουρεθάνη έχει πολύ καλές ιδιότητες όσον αφορά την αντοχή, δυσκαμψία και σκληρότητα και εξαιρετική αντίσταση σε εκτριβή, κοπή και απόσχιση. Το υλικό αυτό βρίσκει εφαρμογές σε στοιχεία στεγάνωσης, φλάντζες, προστατευτικές επενδύσεις, διαφράγματα για μορφοποίηση μεταλλικών ελασμάτων και εξαρτήματα αμαξωμάτων αυτοκινήτων [2].

### 1.3. Τεχνολογία 3D-printing

Το **3D-Printing** είναι η κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων, κυρίως από μοντέλα **CAD**. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους (**Material Jetting, Fused Filament Fabrication, Fused Deposition Modeling, Powder Bed Fusion Techniques** κ.α.), κατά τις οποίες το υλικό τοποθετείται, ενώνεται και στερεοποιείται με την βοήθεια υπολογιστή σε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία του 3D-Printing κατά κύριο λόγο είναι τα **πολυμερή**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, τα πολυμερή είναι πολύ εύκολα στην κατασκευή τους, στην επεξεργασία και τον χηρισμό τους. Όμως, με την εξέλιξη της τεχνολογίας μας έχει δωθεί η ικανότητα να χρησιμοποιούμε **μέταλλα** και **κεραμικά** κατά την διαδικασία του 3D-Printing, κάνοντας έτσι την συγκεκριμένη μέθοδο κατασκευής πολλαπλών εφαρμογών και χρήσεων.

Μερικές από τις βιομηχανίες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία του 3D-Printing είναι η βιομηχανία του φαγητού, του ρουχισμού, των μεταφορών, του τομέα της υγείας κλπ.

#### 1.3.1. Βασικές αρχές της τεχνολογίας

Ο τρόπος εφαρμογής της μεθοδολογίας του 3D-Printing δεν περιορίζεται σε έναν. Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι είναι το **Vat Photopolymerization, Material Jetting, Binder Jetting,**

**Powder Bed Fusion, Material Extrusion, Directed Energy Deposition** και **Sheet Lamination**. Η κύρια διαφορά μεταξύ των διάφορων μεθόδων είναι ο τρόπος κατά τον οποίο οι στρώσεις του υλικού τοποθετούνται για την δημιουργία των αντικειμένων και στα υλικά που χρησιμοποιούνται. Ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος 3D-Printing είναι η ταχύτητα και το κόστος του 3D-Printer, του πρωτότυπου αντικειμένου που εκτυπώθηκε, καθώς και την επιλογή και το κόστος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

### ***1.3.2. Μοντέλο εναπόθεσης τήγματος - Fused Deposition Modeling (FDM)***

Στην συγκεκριμένη μέθοδο το αντικείμενο παράγεται με εξώθηση υλικού σε μικρά σφαιρίδια ή σε μακρόστενες λωρίδες που στερεοποιούνται αμέσως δημιουργώντας έτσι τις στρώσεις για την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Ειδικότερα, το υλικό τροφοδοτείται σε ένα ακροφύσιο, το οποίο ζεσταίνει το υλικό και έχει την δυνατότητα να ανοίγει και να κλείνει την ροή του υλικού. Η μέθοδος FDM είναι περιοριστική όσον αφορά την ποικιλία των σχημάτων που μπορούν δημιουργηθούν από την συγκεκριμένη μεθοδολογία.

### ***1.3.3. Τήξη κλίνης κόνεως - Powder Bed Fusion (PBF)***

Αυτή η τεχνική εμπεριέχει πολλές διαφορετικές μεθόδους, όπως Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Multi Jet Fusion (MJF) και Electron Beam Melting (EBM). Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πληθώρα υλικών και η ευελιξία τους επιτρέπει την δημιουργία περίπλοκων γεωμετρικών σχημάτων δίνοντας τους ένα σαφές πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες μεθόδους.

### ***1.3.4. Φωτοπολυμερισμός - Photopolymerization***

Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται στην στερεολιθογραφία για την παραγωγή ενός στερεού αντικειμένου από ένα υλικό που βρίσκεται σε υγρή μορφή. Τα αντίστοιχα συστήματα ψεκάζουν φωτοπολυμερικά υλικά σε ένα κατασκευασμένο δίσκο σε πολύ λεπτές στρώσεις (16-30 μm) μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Στην συνέχεια κάθε στρώση φωτοπολυμερικού υλικού σκληραίνεται (cured) με την βοήθεια φωτός UV, δημιουργώντας έτσι μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να τα μεταχειριστούμε κατευθείαν μετά το πέρας της διαδικασίας.

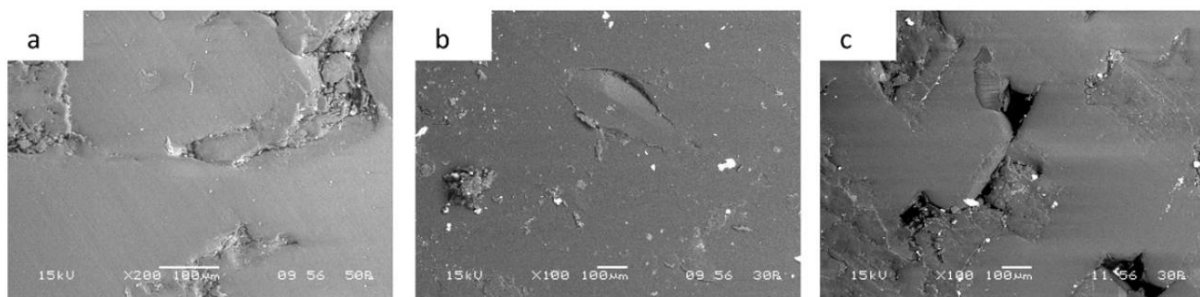
## 2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΟΣΦΑΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ

Σημαντικό σε αυτό το σημείο, για την καλύτερη κατανόηση του θέματος της διπλωματικής, είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση διαφόρων μελετών που σχετίζονται με την μέλετη της συμπεριφοράς πολυστρωματικών πολυμερικών υλικών σε επιφανειακές φορτίσεις.

### 2.1. Συμπεριφορά σε φθορά ολίσθησης FDM υλικών

Οι Anoop Kumar Sood et al [3] εξέτασαν την επιρροή που έχουν πέντε σημαντικές παράμετροι στην τριβολογική συμπεριφορά, όσον αφορά την φθορά κατα την ολίσθηση. Αυτές οι παράμετροι ήταν το πάχος των στρωμάτων (layer thickness), των προσανατολισμό των κομματιών του αντικειμένου (part build orientation), την γωνία μεταξύ του ακροφυσίου και τον άξονα των X του επιπέδου κατασκευής του αντικείμενου (raster angle), το πλάτος του εναποτιθέμενου υλικού στην επιφάνεια (raster width) και το κενό αέρα (air gap). Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του αντικείμενου ήταν ακριλονιτρίλιο βουταδένιο στυρόλιο (ABS P400), όπου το δοκίμιο κατασκευάστηκε με την μεθοδολογία FDM (fused deposition modeling).

Κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρήθηκαν τα εξής, όταν τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε μικροσκόπιο (SEM) μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εφαρμογής επιφανειακών φορτίσεων, φάνηκαν διαφορετικού είδους συμπεριφορές στην καταπόνηση. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αποκόλληση υλικού, δημιουργία ρωγμών και σχηματισμός οπών, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχ.1.



Σχήμα 1: Εικόνα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) της επιφάνειας εφαρμογής των φορτίσεων: a) Αποκόλληση υλικού, b) Δημιουργία ρωγμών, c) Σχηματισμός οπών.

Από τα δεδομένα που πάρθηκαν κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατέληξαν πως για την παράμετρο του πάχους των στρωμάτων αρχικά με την αύξηση του πάχους αυξάνεται η φθορά, ενώ

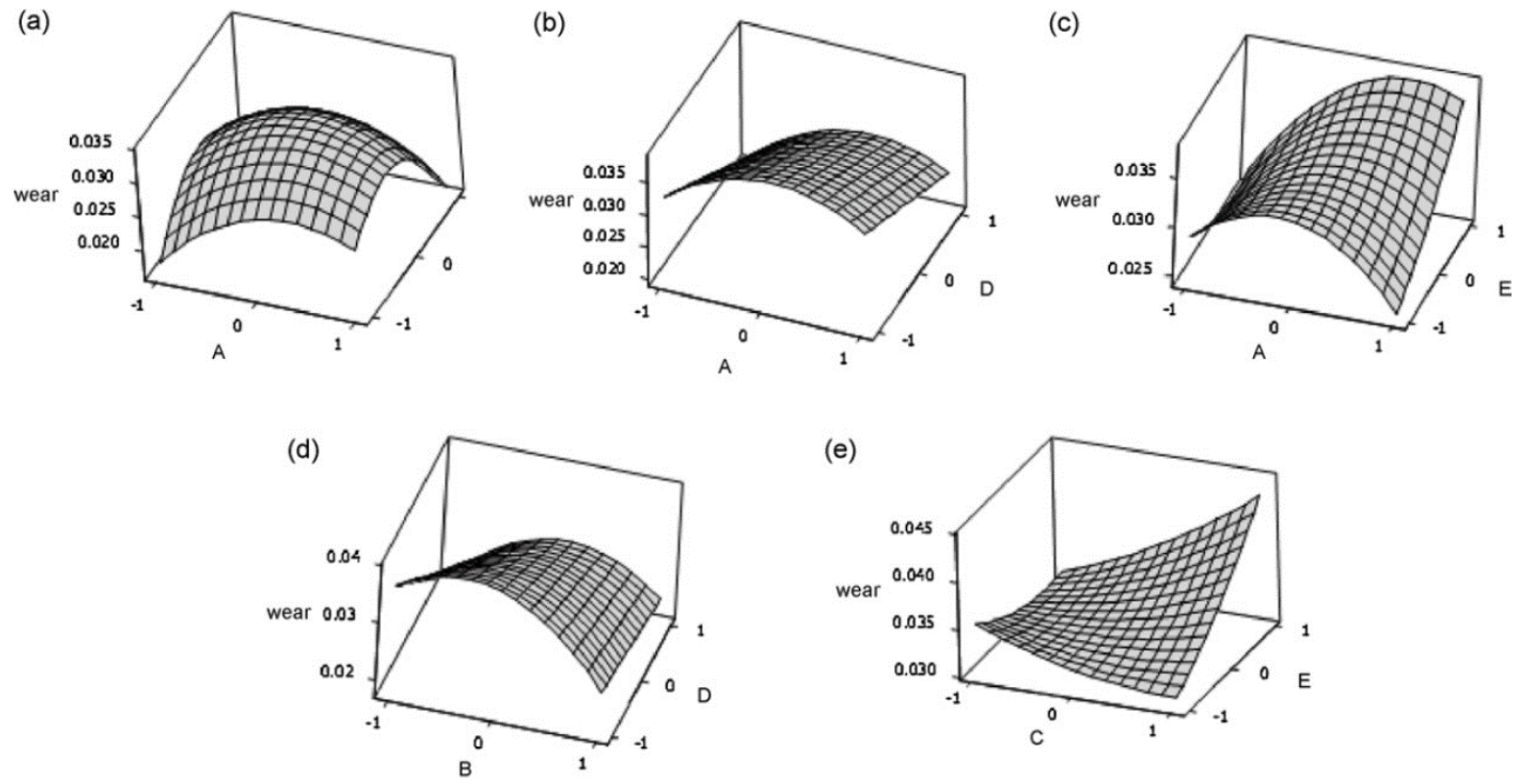


στην συνέχεια η περαιτέρω αύξηση του πάχους οδηγεί στην μείωση του φαινομένου της παραμόρφωσης και κατά συνέπεια της φθοράς. Όσον αφορά την γωνία και πλάτος raster, διαπιστώθηκε ότι με την αύξηση της γωνίας raster μειώνεται η φθορά, όταν έχουμε χαμηλού επιπέδου κενό αέρος. Αντίθετα, η φθορά αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας raster, όταν το κενό αέρος βρίσκεται σε υψηλό επίπεδο. Τέλος, στην περίπτωση του κενού αέρος έχουμε αύξηση της φθοράς, όταν αυξάνεται η παράμετρος αυτή για υψηλό επίπεδο πάχους στρώματος. Από την άλλη, παρατηρείται μείωση της φθοράς με την αύξηση του κενού αέρος, όταν το πάχος στρωμάτων διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Το γενικότερο συμπέρασμα που διατυπώνεται είναι πως με την αύξηση του κενού αέρος και την μείωση της γωνίας raster, έχουμε μείωση της φθοράς. Αυτά τα συμπεράσματα φαίνονται πιο αναλυτικά στο σχ.2.

## **2.2. Απόδοση του τριβικού ζεύγους PA66-Steel**

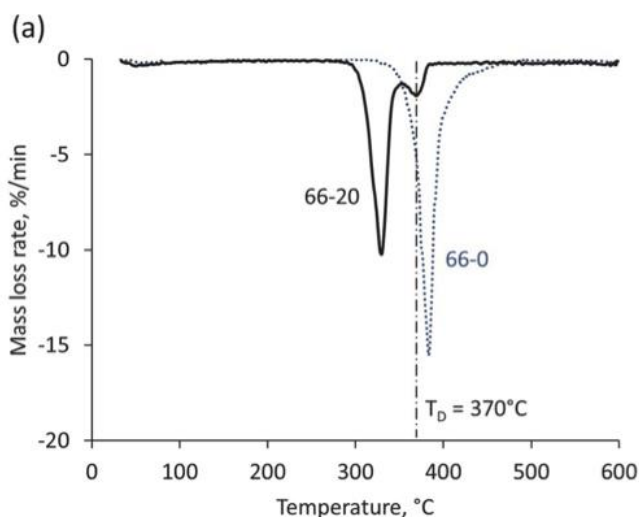
Οι Sebastian Kamerling et al [4] εξέτασαν την επιρροή του υδροξειδίου του μαγνησίου ( $Mg(OH)_2$ ) στην αύξηση της επίδοσης και της αξιοπιστίας τριβολογικού συστήματος πολυαμίδιου/χάλυβα (PA66/Steel). Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλή πυκνότητα και η ευκολία κατασκευής των πλαστικών, καθώς και η ικανότητα αυτολύπανσης και η καλή αντίσταση στην διάβρωση, έχουν οδηγήσει στην αύξηση χρήσης τους σε τριβολογικά σύστημα. Ειδικότερα, οι πολυαμίδες χρησιμοποιούνται ως πολυμερική μήτρα λόγω της πολύ καλής αναλογίας επίδοσης - κόστους. Στην βελτιστοποίηση αυτών των χαρακτηριστικών, αλλά και στην αντίσταση που παρουσιάζουν στην τριβή και την φθορά, βοηθάει η συνεχής έρευνα με καινούρια υλικά πλήρωσης (filler materials).

Στην συγκεκριμένη έρευνα εστίασαν στην ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων του υδροξειδίου του μαγνησίου, πρώτον όσον αφορά την τριβολογική συμπεριφορά χρησιμοποιώντας βασικές εξισώσεις της θερμοδυναμικής και δεύτερον χρησιμοποιώντας τεχνικές χημικής ανάλυσης έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί πως η αντίδραση του υλικού πλήρωσης έλαβε χώρα κατά την τριβολογική καταπόνηση του δοκιμίου. Περαιτέρω, έγιναν δοκιμές με συνεχώς αυξανόμενα φορτία σε διάταξη pin-on-disk με αναλύσεις EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis) και FTIR (Fourier Transformation Infrared Spectroscopy) των χαλύβδινων ανταγωνιστικών υλικών. Παράλληλα, συγκριτικά με αφόρτιστα δοκίμια, αλλαγές στην χημική σύσταση μπορούν να μετρηθούν, το οποίο δίνει την δυνατότητα για την έμμεση εξακρίβωση του θερμοκρασιακού προφίλ, καθώς και του μηχανισμού. Συμπληρωματικά, πραγματοποιήθηκε θερμοσταθμική ανάλυση για την καλύτερη κατηγοριοποίηση της αποσυνθετικής συμπεριφοράς των τριβολογικών συστημάτων.



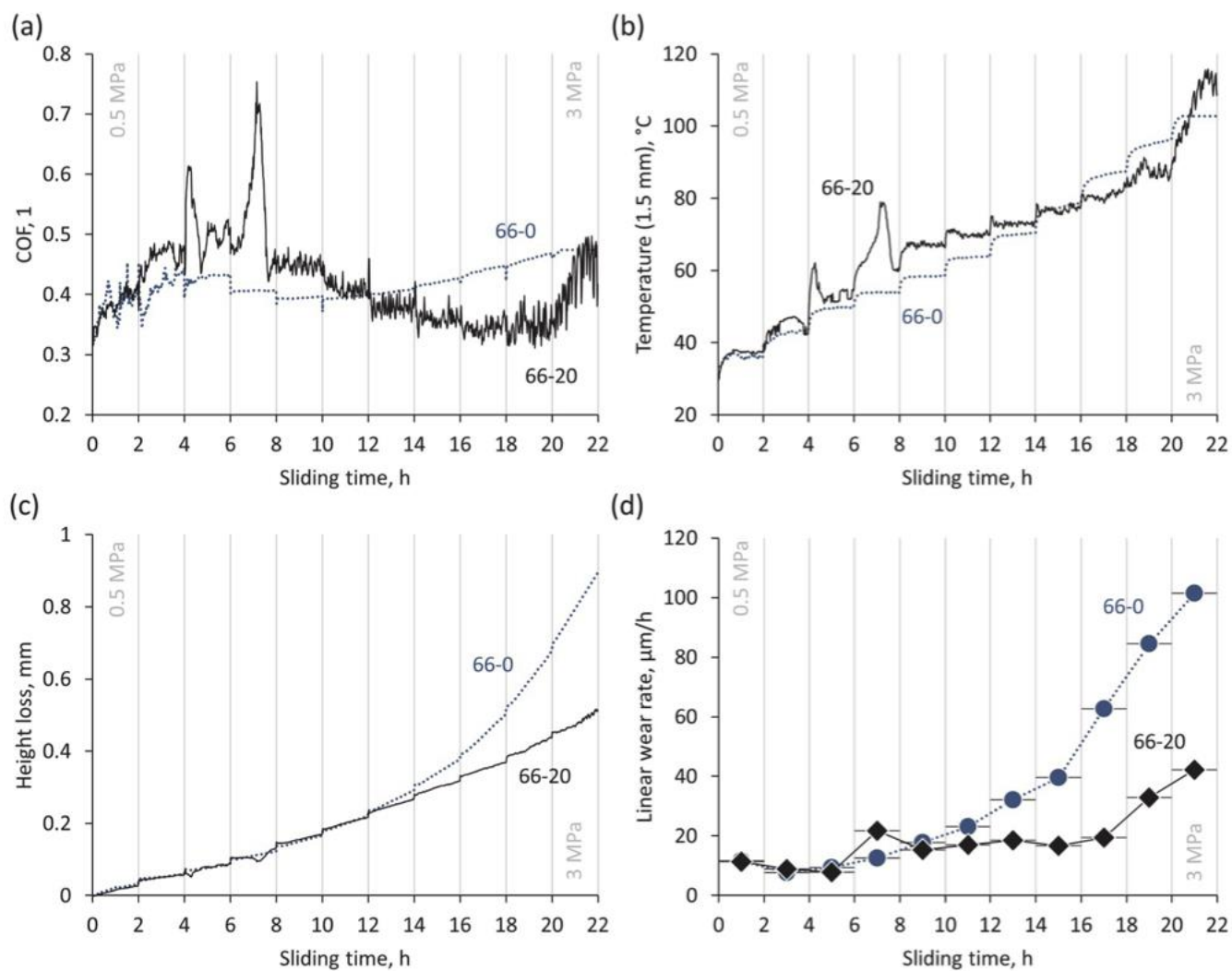
Σχήμα 2: Τριδιάστατη γραφική απεικόνιση επιφανείας της φθοράς (hold value  $A=0, B=0, C=0, D=0, E=0$ ).

Τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξαν οι ερευνητές όσον αφορά την αποσύνθεση του υλικού, είναι πως στο ρυθμό απώλειας μάζας του 66-20 υλικού παρατηρούνται δυο χαρακτηριστικά τοπικά ελάχιστα μεταξύ των θερμοκρασιών 300 οC και 400 οC, όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Παράλληλα, παρατηρήθηκε πως η αποσύνθεση του υλικού 66-20 συμβαίνει σε χαμηλότερη θερμοκρασία απ' ότι το δοκίμιο χωρίς το υλικό πλήρωσης, το οποίο συμβαίνει λόγω της μερικής υδρόλυσης οφειλόμενη στο υδροξείδιο του μαγνησίου.



Σχήμα 3: Ρυθμός μείωσης μάζας.

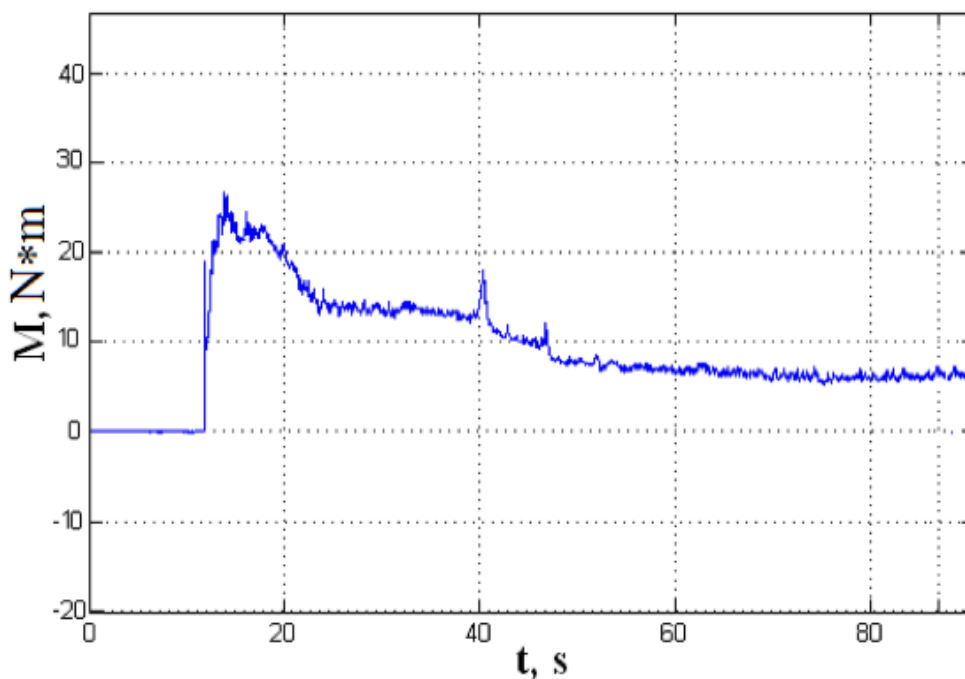
Για την τριβολογική συμπεριφορά, τα αποτελέσματα τα οποία προήλθαν από την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας, είναι τα εξής. Παρατηρήθηκε για την περίπτωση του υλικού 66-0 μια σταθερή συμπεριφορά όσον αφορά τον συντελεστή τριβής, δηλαδή για όλη την διάρκεια του πειράματος βρισκόταν σε τιμές της τάξης του 0.4. Αντίθετα, στην περίπτωση του 66-20 παρατηρήθηκε από τους ερευνητές μια μεγαλύτερη διακύμανση του συντελεστή τριβής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4(α). Παράλληλα, μετρήθηκαν η θερμοκρασία, η απώλεια υλικού σε ύψος και ο γραμμικός ρυθμός φθοράς σε σχέση με την ώρα καταπόνησης του υλικού. Αυτό που διαπίστωσαν είναι πως στην περίπτωση απώλειας υλικού και του γραμμικού ρυθμού φθοράς τα δύο υλικά είχαν παρόμοια συμπεριφορά μέχρι την 10<sup>η</sup> – 12<sup>η</sup> ώρα διεξαγωγής του πειράματος. Έπειτα από αυτό το σημείο το δοκίμιο με το υλικό πλήρωσης (66-20), όπως φαίνεται και στα σχήματα 4(γ), (δ), αντιδρά καλύτερα στο φορτίο που του υποβάλλεται για το υπόλοιπο της διαδικασίας.



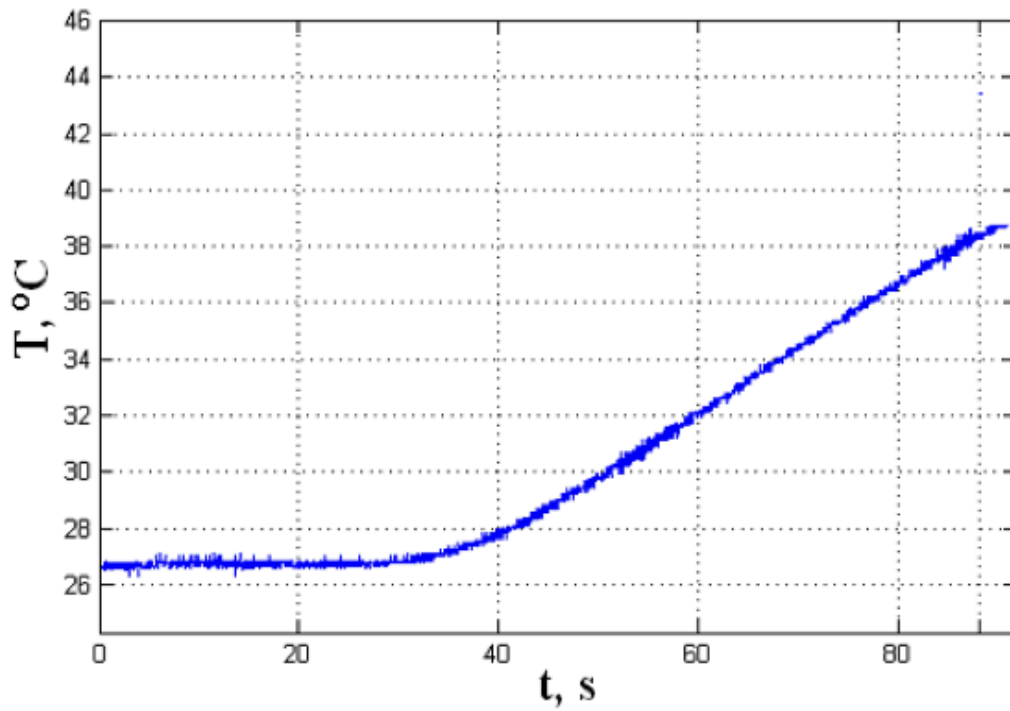
Σχήμα 4: Τριβολογική συμπεριφορά σε συνάρτηση του χρόνου: (α) συντελεστής τριβής, (β) θερμοκρασία, (γ) απώλεια υλικού σε ύψος, (δ) γραμμικός ρυθμός φθοράς. Κάθε κάθετη γραμμή στα διαγράμματα σηματοδοτεί αύξηση πίεσης  $\Delta p = 0.25$  MPa.

### 2.3. Επίδραση των παραμέτρων παραγωγής στην τριβολογική απόδοση 3D-printed πολυμερών

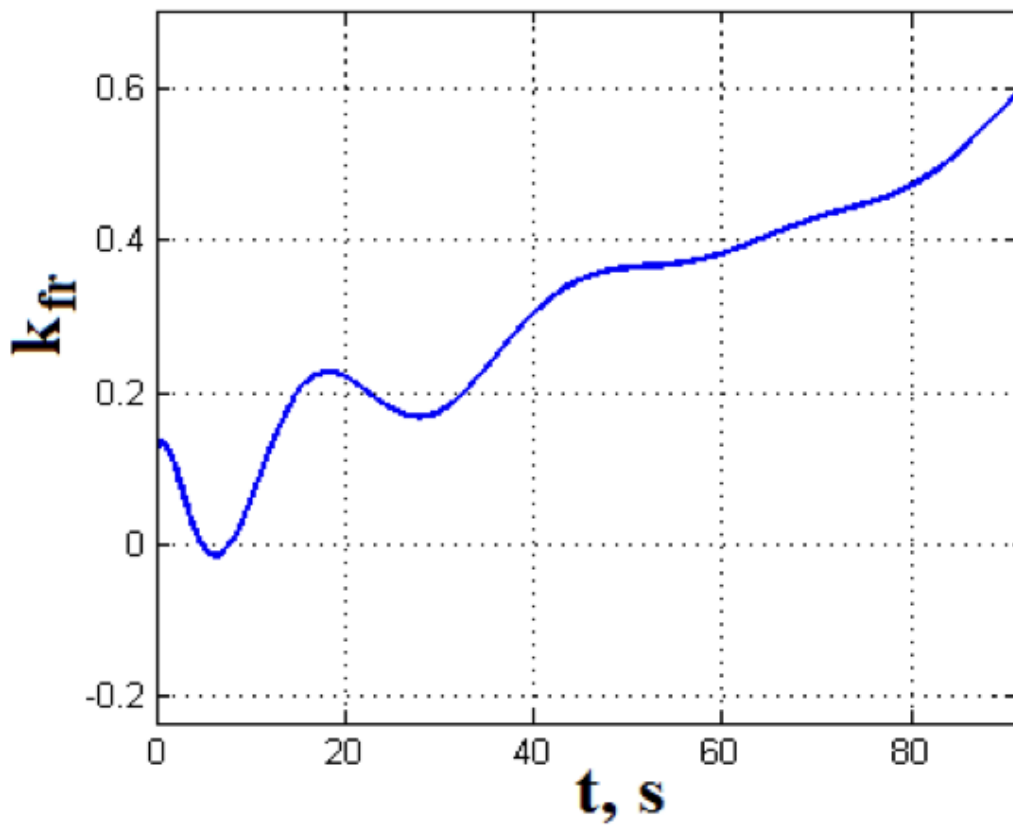
Οι S.Perepelkina et al [5] εξέτασαν την συμπεριφορά του συντελεστή τριβής σε διάφορα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την κατασκευή δοκιμίων με τεχνολογία γρήγορης κατασκευής πρωτοτύπων με διαφορετικές ρυθμίσεις της διαδικασίας 3D-Printing. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται είναι plate-on-plate και δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο λιπαντικό. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι η MTU-1 με το υλικό να είναι PLA (polylactic acid) με 100% υλικό πλήρωσης. Οι συνθήκες που επικράτησαν ήταν η ταχύτητα περιστροφής 300 rpm και το επιβαλλόμενο φορτίο ξεκινούσε από 500 Newton. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρήθηκε πως στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας υπήρχε μια αύξηση ροπής, η οποία συνδέεται με την εκκίνηση της διαδικασίας και στην συνέχεια παρατηρείται μια σταθεροποίηση, όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Συνδυαστικά, η θερμοκρασία παρουσιάζει αύξηση με το πέρασμα του χρονικού διαστήματος, καθώς και ο συντελεστής τριβής παρουσιάζει μια παρόμοια αύξηση, όπως φαίνεται στα σχήματα 6 και 7.



Σχήμα 5:Ροπή τριβής σε συνάρτηση του χρόνου.



Σχήμα 6:Θερμοκρασία σε συνάρτηση του χρόνου.



Σχήμα 7:Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση του χρόνου.

## 2.4. Τριβολογική απόδοση FDM ακρυλονιτριλίου-βουταδενίου-στυρενίου (ABS) με ενίσχυση χαλκού

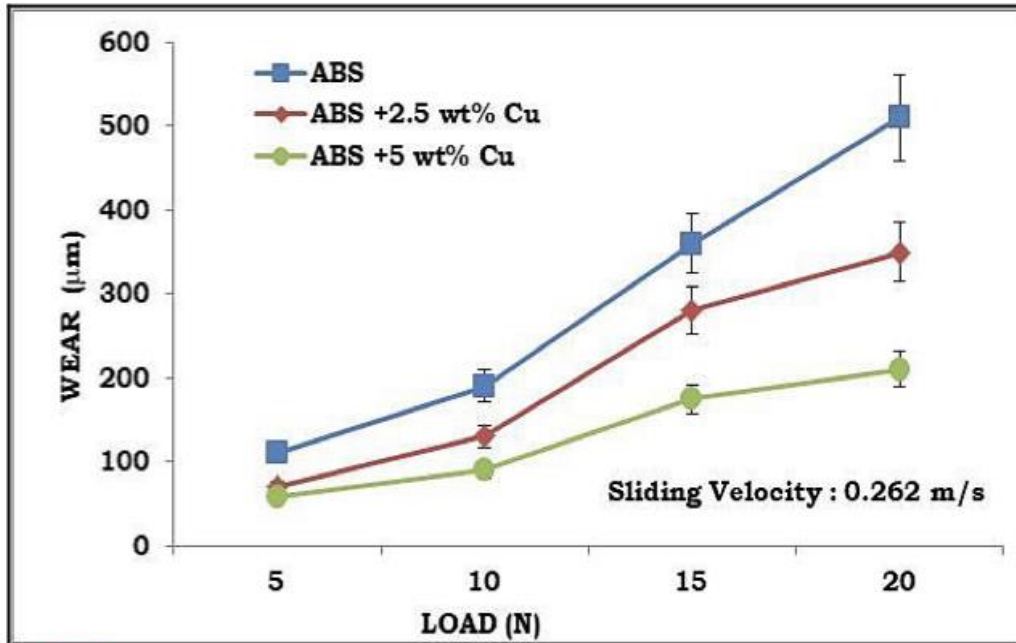
Οι R. Keshavamurthy et al [6] επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη πολυμερούς ABS με πρόσμιξη χαλκού, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία δοκιμίων με την μέθοδο Fused Deposition Modeling (FDM) και εξέτασαν την συμπεριφορά του σε τριβή και σε φθορά κάτω από διαφορετικά φορτία και ταχύτητες. Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά υλικά ABS, ABS+2.5wt%Cu, ABS+5wt%Cu.

Σύμφωνα με αντίστοιχες φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο των δοκιμίων, παρατήρησαν οι ερευνητές πως δεν υπάρχουν εμφανή σφάλματα στην δομή τους. Περαιτέρω, τα δοκίμια παρουσιάζουν μικρό πορώδες, διότι η προσθήκη σωματιδίων χαλκού δείχνει καλή διαβρεκτικότητα. Παράλληλα, δεν υπάρχουν σχηματισμοί συσσωμάτων χαλκού στην μήτρα ABS. Τα παραπάνω αποδεικνύουν μια ομοιόμορφη κατανομή και πρόσμιξη σφαιρικών σωματιδίων χαλκού στην μήτρα ABS.

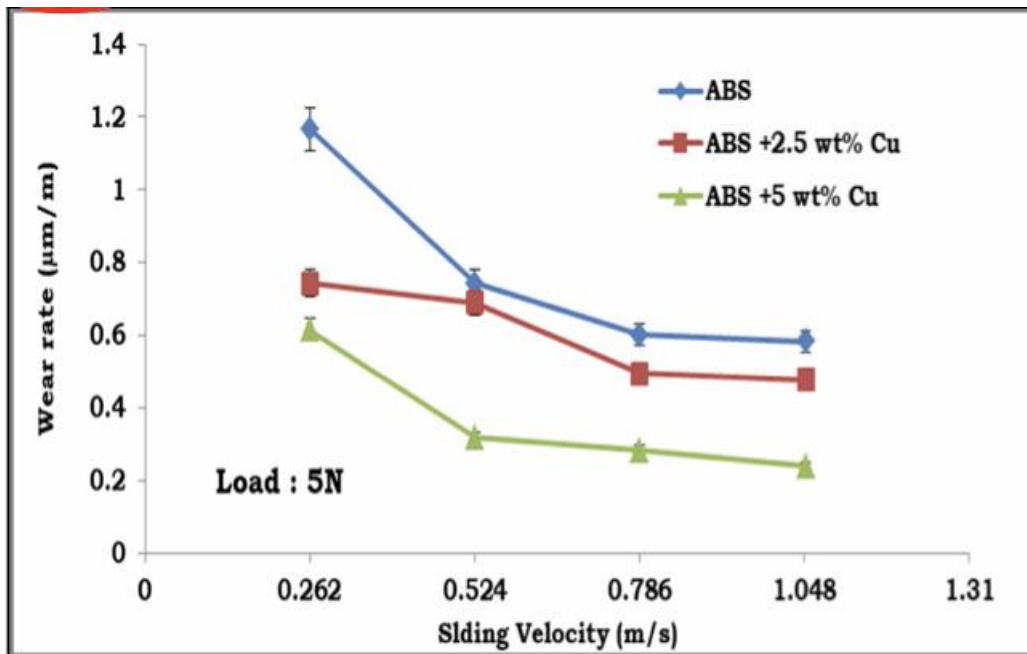
Κατά την διαδικασία των πειραμάτων τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε καταπονήσεις διαφορετικών φορτίων και ταχυτήτων. Στην περίπτωση των διαφορετικών φορτίων παρατηρήθηκε από τους ερευνητές πως η συμπεριφορά των δοκιμίων βελτιωνόταν με την προσθήκη του χαλκού. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίστηκε βελτίωση στην φθορά του ενισχυμένου υλικού έναντι του υλικού χωρίς ενίσχυση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8. Στην συνέχεια, έγινε σύγκριση των διαφορετικών ταχυτήτων για φορτίο 5N και παρατηρήθηκε πως το υλικό ABS+5wt%Cu παρουσίασε μικρότερο ρυθμό φθοράς σε σύγκριση με τα άλλα δύο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 9. Αυτό σύμφωνα με τους ερευνητές οφείλεται στην παρουσία χαλκού στην μήτρα, όπου ελαχιστοποιεί την μορφοποίηση ρωγμών στην επιφάνεια λειτουργώντας έτσι σαν φέρων (load-bearing) στοιχείο του υλικού.

Επιπρόσθετα, έγινε ανάλυση του συντελεστή τριβής των διαφορετικών υλικών και παρατηρήθηκε πως τα δοκίμια που περιέχουν χαλκό παρουσιάζουν μικρότερο συντελεστή τριβής από τα δοκίμια χωρίς την προσθήκη ενίσχυσης. Αυτό φαίνεται και στα σχήματα 10 και 11 αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους ερευνητές η αύξηση στον συντελεστή τριβής σε συνδυασμό με την αύξηση της γραμμικής ταχύτητας μπορεί να οφείλεται στην αύξηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωματιδίων.

Συμπερασματικά, τα δοκίμια με ενίσχυση χαλκού παρουσιάζουν μικρότερη φθορά και μικρότερο συντελεστή τριβής σε σχέση με τα υλικά χωρίς το υλικό ενίσχυσης.

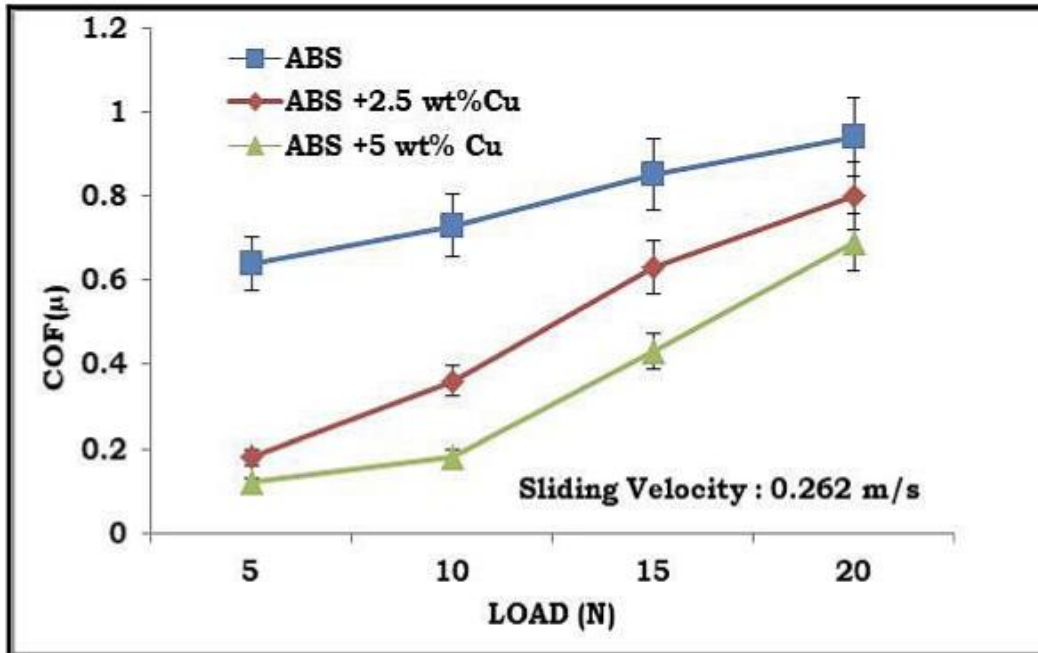


Σχήμα 8: Μεταβολή φθοράς σε συνάρτηση με το φορτίο επιβολής.

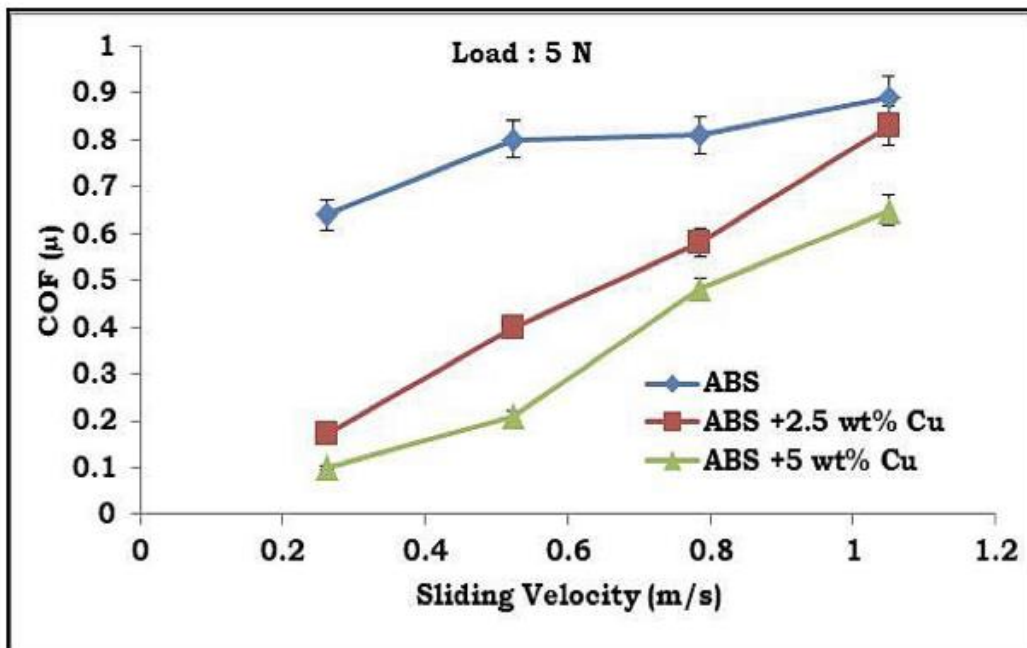


Σχήμα 9: Ρυθμός μεταβολής φθοράς σε συνάρτηση της γραμμικής ταχύτητας.





Σχήμα 10: Μεταβολή του συντελεστή τριβής σε συνάρτηση του επιβαλλόμενου φορτίου.



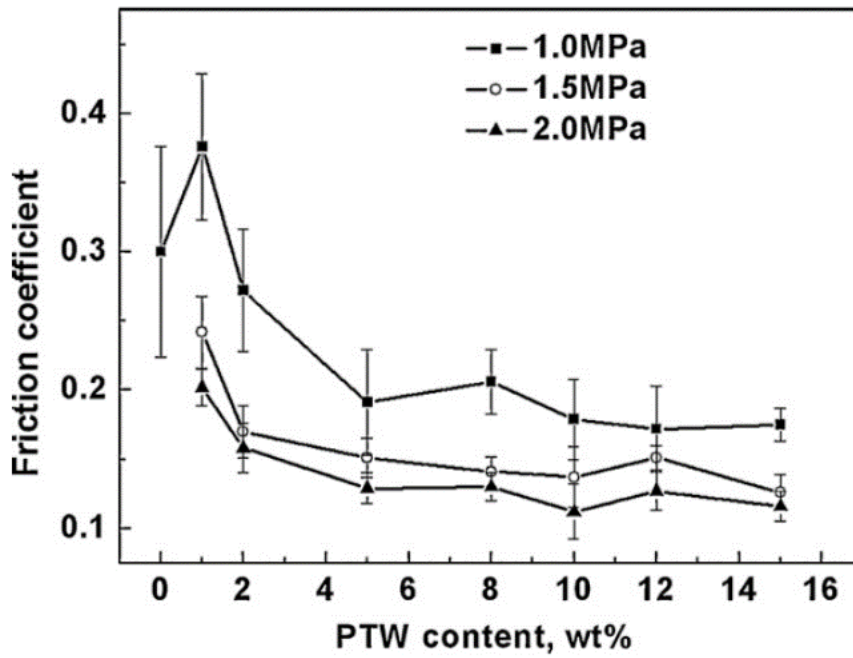
Σχήμα 11: Μετοβολή του συντελεστή τριβής σε συνάρτηση της γραμμικής ταχύτητας.

## 2.5. Τριβολογική απόδοση συνθέτων PEEK/PTFE με ενίσχυση ινιδίων τιτανικού καλίου

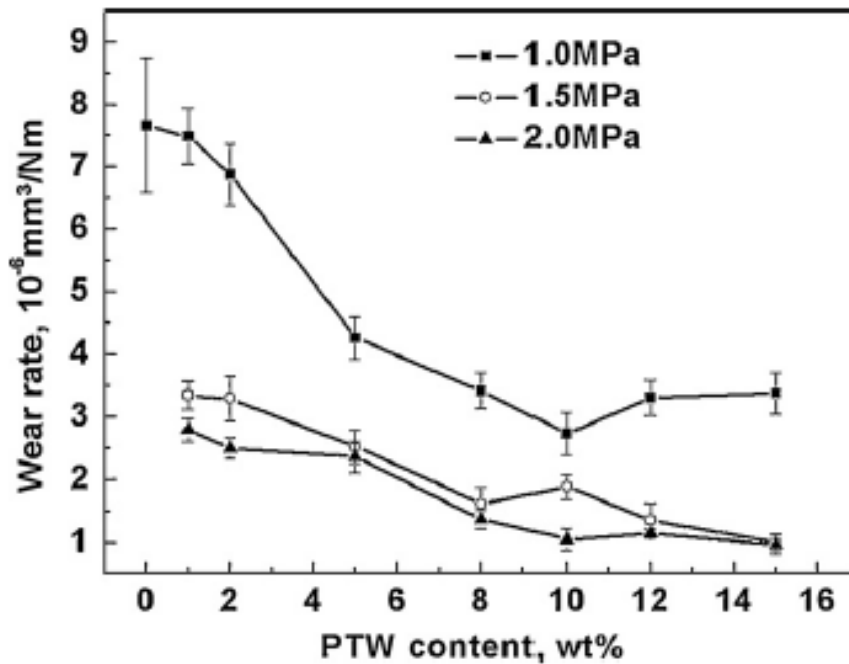
Οι G.Y.Xie et al [7] εξέτασαν την τριβολογική συμπεριφορά των υλικών PEEK (Polyetheretherketone) και PTFE (Polytetrafluoroethylene) με ενίσχυση PTW (Potassium Titanate Whiskers), τα οποία δημιουργήθηκαν με την μέθοδο συμπίεσης σε καλούπι (compression molding). Η διάταξη που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές για την διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας είναι η three-pin-on-disk διάταξη. Τα φορτία επιβολής κατά την διαδικασία ήταν 1.0MPa, 1.5MPa και 2.0MPa με ταχύτητα 2m/s. Τα αποτελέσματα, τα οποία πάρθηκαν μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας, έδειξαν μια σαφή μείωση του συντελεστή τριβής με την αύξηση σε περιεκτικότητα PTW (wt%) στο συνθετικό υλικό PEEK/PTFE. Παράλληλα, παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή τριβής με την αύξηση της επιβαλλόμενης πίεσης. Αντίστοιχη εικόνα φαίνεται και στην περίπτωση του ρυθμού φθοράς, όπως απεικονίζονται και στα σχήματα 12α,β.

Βρέθηκε πως η αντίσταση στην τριβή μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση κάποιων μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η σκληρότητα, επιμήκυνση κατά την θραύση, το μέτρο κάμψης (flexural modulus), αντοχή σε εφελκυσμό. Η βελτίωση μερικών ιδιοτήτων του υλικού οδηγούν στην βελτίωση της αντίστασης στην τριβή. Πιο συγκεκριμένα, η βελτίωση της μικροσκληρότητας του συνθετικού υλικού με PWT μπορεί να είναι ωφέλιμο για την μείωση του ρυθμού φθοράς. Επομένως, συμπεραίνουν οι ερευνητές πως το φαινόμενο της ενίσχυσης που προσφέρει το PTW στο PEEK/PTFE μπορεί να θεωρηθεί ως παράγοντας μείωσης του συντελεστή τριβής. Ένα ακόμα φαινόμενο που παρατηρήθηκε ήταν το φαινόμενο της λείανσης κατά την διάρκεια του πειράματος. Ειδικότερα, έγινε σύγκριση των καμπύλων του συντελεστή τριβής των συνθετικών υλικών με και χωρίς το PTW σε συνάρτηση της απόστασης. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν πως στην αρχή το υλικό με το PTW έχει μεγαλύτερο συντελεστή τριβής σε σχέση με αυτό που δεν έχει, αλλά μετά το running-in period στην περίπτωση του δοκιμίου χωρίς το PTW υπήρχε μεγαλύτερη διακύμανση στον συντελεστή τριβής σε σχέση με το δοκίμιο με το PTW, που φαίνεται να έχει μια πιο σταθερή και χαμηλότερη τιμή καθόλη την διάρκεια της πειραματικής δοκιμής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 13. Αυτό συνέβη λόγω του φαινομένου της λείανσης από το PTW. Η τελευταία σύγκριση που έγινε ήταν στο ίδιο υλικό PEEK/15%PTW/5%PTFE σε διαφορετικές επιβαλλόμενες πιέσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 14. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι το running-in period στην περίπτωση των 1.5MPa ήταν κατά πολύ μικρότερο σε σχέση με την περίπτωση του 1.0MPa, το οποίο μπορεί να δικαιολογηθεί με το φαινόμενο της λείανσης που παρατηρήθηκε και στο σχήμα 13.

Συμπερασματικά οι ερευνητές καταλήγουν στο ότι η ενίσχυση του PEEK/PTFE με PTW μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αντίσταση στην τριβή και να μειώσει τον συντελεστή τριβής.

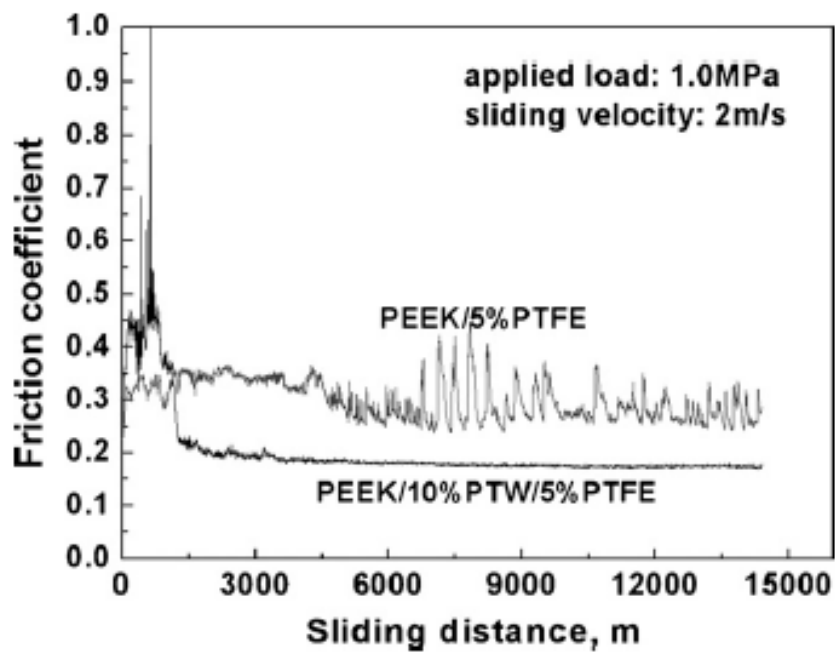


(α)

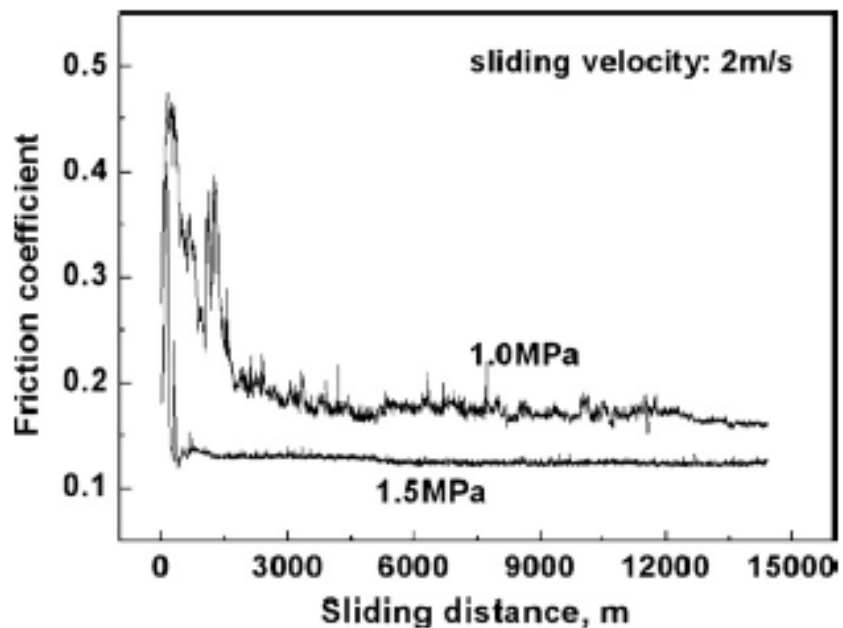


(β)

Σχήμα 12:(α) Συντελεστής τριβής συνάρτηση της περιεκτικότητας σε PTW wt% και επιβαλλόμενης πίεσης, (β) Ρυθμός φθοράς συνάρτηση της περιεκτικότητας σε PTW wt% και επιβαλλόμενης πίεσης.



Σχήμα 13: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση της απόστασης για υλικά PEEK/5%PTFE και PEEK/10%PTW/5%PTFE αντίστοιχα.



Σχήμα 14: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση της απόστασης για υλικό PEEK/15%PTW/5%PTFE σε πιέσεις 1.0MPa και 1.5MPa αντίστοιχα.

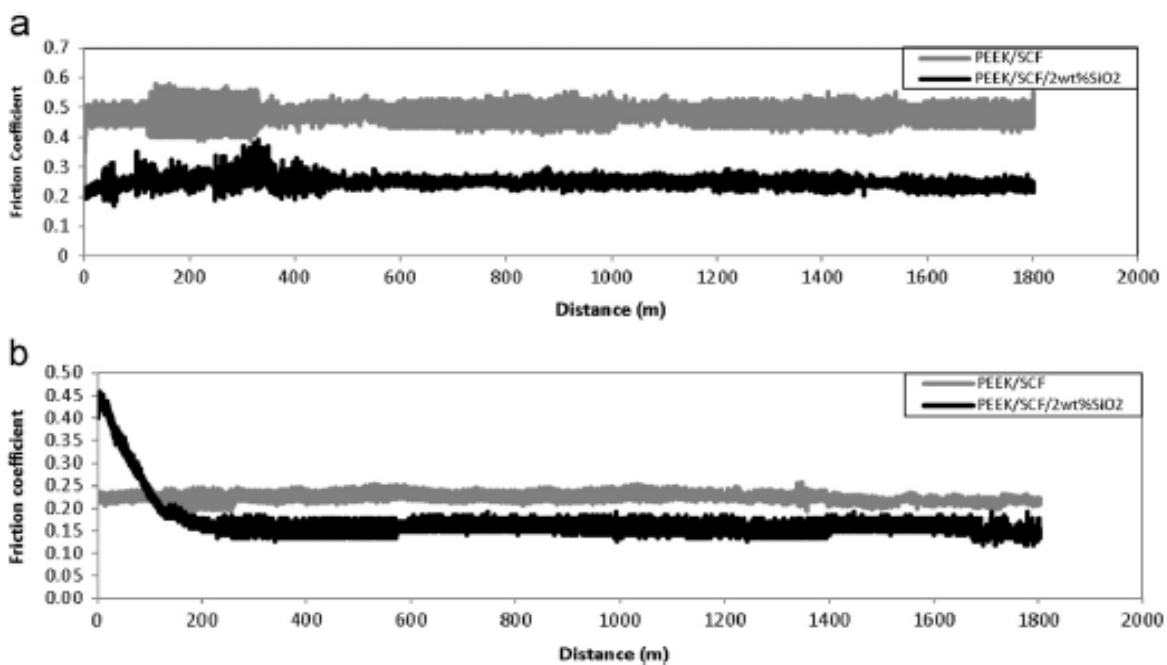
## 2.6. Τριβολογική απόδοση συνθέτων PEEK με ενίσχυση ανθρακονημάτων μικρού μήκους και νανο-πυριτίας

Οι A. Molazemhosseini et al [8] διερεύνησαν την τριβολογική συμπεριφορά των συνθετικών υλικών PEEK (Polyetheretherketone) με ενίσχυση ανθρακοϊνών (Short carbon fibers-SCF) και διοξείδιο του πυριτίου (Nano-SiO<sub>2</sub>). Τα δοκίμια δημιουργήθηκαν με την μέθοδο συμπίεσης σε καλούπι (compression molding). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας είναι η pin-on-disk διάταξη. Η πίεση που επιβλήθηκε κατά την διαδικασία ήταν 2.0MPa, 3.75MPa, 6.25MPa και 10.0MPa με ταχύτητα 0.25m/s. Επίσης, το ανταγωνιστικό υλικό ήταν 100Cr6.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, έδειξαν στην περίπτωση της πίεσης των 2MPa μια σταθερή κατάσταση σε όλη την διάρκεια του πειράματος με το PEEK/SCF/2wt%SiO<sub>2</sub> να έχει ένα μικρότερο συντελεστή τριβής σε σύγκριση με το PEEK/SCF, όπως φαίνεται και στο σχήμα 15a. Στην περίπτωση, όπου επιβλήθηκε φορτίο 10MPa, παρά το γεγονός ότι κι εδώ φάνηκε μια σταθερή κατάσταση σε όλη την διάρκεια του πειράματος με το PEEK/SCF/2wt%SiO<sub>2</sub> να έχει μικρότερο συντελεστή τριβής από το PEEK/SCF, παρατηρήθηκε μια αρχική μεγάλη τιμή όσον αφορά τον συντελεστή τριβής στην περίπτωση του υλικού με την πρόσμιξη του διοξειδίου του πυριτίου και μια συνεχή μείωση για τα πρώτα 500 μέτρα, όπου και σταθεροποιείται η κατάσταση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 15b. Σύμφωνα με τους ερευνητές αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, τα νανοσωματίδια του διοξειδίου του πυριτίου είναι υπεύθυνα για την δημιουργία ενός στρώματος αποβλήτων-γρεζιών, όπου αυτό το στρώμα λειτουργεί σαν λιπαντικό. Επίσης, ένας ακόμα λόγος για την μείωση του συντελεστή τριβής είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στο σημείο επαφής.

Παράλληλα, αυτό που παρατηρήθηκε ήταν πως στην περίπτωση των 10MPa ο συντελεστής τριβής βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με την περίπτωση των 2MPa και για τα δύο υλικά. Οι ερευνητές αυτό το αποδίδουν στο γεγονός ότι, όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε χαμηλότερες πιέσεις τα συσσωματώματα των νανοσωματιδίων μπορούν να λειτουργήσουν ως λειαντικό (abrasive third body materials) και να προκαλέσουν σημαντική φθορά στην ανθρακοΐνα και στην μήτρα συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση του ρυθμού φθοράς των δειγμάτων. Αντίθετα, όταν αυξάνεται η πίεση, στην συγκεκριμένη έρευνα 10MPa, τα νανοσωματίδια βελτιώνουν την αντοχή και την δυσκαμψία της πολυμερικής μήτρας, το οποίο οδηγεί στην μείωση της συγκέντρωσης πίεσης που υπεισέρχεται στην μήτρα και στις ίνες του συνθετικού υλικού. Αυτό συμβάλλει στην μικρότερη απώλεια ινών και διεπαφική αποσύνδεση.

Εν κατακλείδι, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα είναι πως η πρόσθεση 2wt%SiO<sub>2</sub> μπορεί να μειώσει σημαντικά τον συντελεστή τριβής του συνθετικού υλικού υπό κανονικές πιέσεις. Όταν η πίεση είναι μικρότερη από 3.75MPa τα συσσωματώματα των νανοσωματιδίων λειτουργούν ως λειαντικά τρίτου σώματος (third-body abrasive materials) και τα νανοσωματίδια παίζουν θετικό ρόλο στην αντίσταση στη φθορά, καθώς μειώνουν τον ρυθμό φθοράς σημαντικά. Τέλος, σε αντίθεση με την τριβολογική συμπεριφορά του PEEK/SCF συνθετικού υλικού, η αύξηση στην πίεση για το PEEK/SCF/2wt%SiO<sub>2</sub> συνέβαλλε σημαντικά στην μείωση του ρυθμού φθοράς.



Σχήμα 15: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε υλικά PEEK/SCF και PEEK/SCF/2wt%SiO<sub>2</sub> για α) 2N και β) 10N.

## 2.7. Αξιολόγηση της παραγωγής 3D-printed υλικών PLA με τη μέθοδο τήξης νήματος

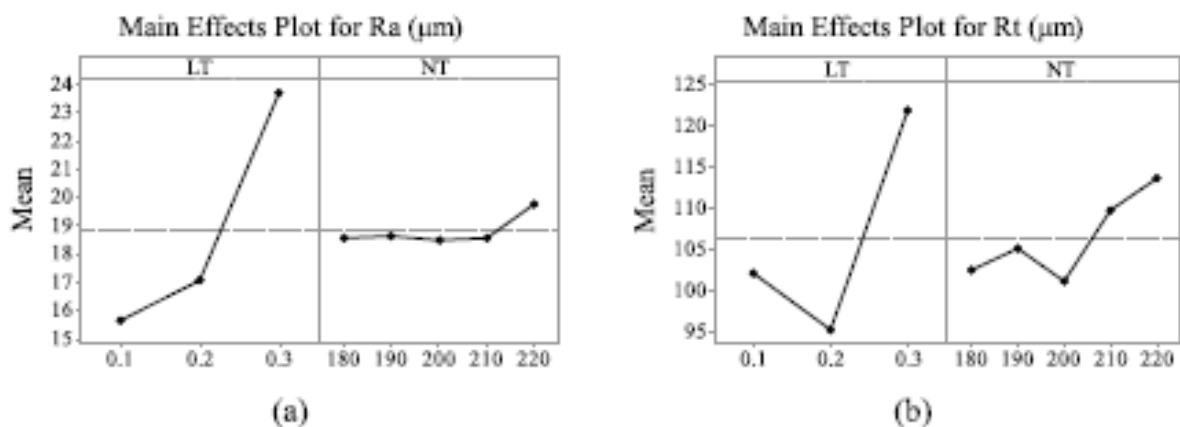
Οι D. Chaidas et al [9] διερεύνησαν την ποιότητα κομματιών κατασκευασμένα από Wood-flour PLA με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σύμφωνα με τους ερευνητές οι κύριες παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ποιότητα του αντικειμένου, είναι η ποιότητα της επιφάνειας (Surface Quality/SQ) και η ακρίβεια των διαστάσεων (Dimensional Accuracy/DA).

Κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας ερευνήθηκε η επιρροή της θερμοκρασίας του ακροφυσίου (Nozzle Temperature/NT) του εκτυπωτή, καθώς και του πάχους των στρωμάτων

(Layer Thickness/LT). Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές, όπως για παράδειγμα ο προσανατολισμός του αντικειμένου. Για να υπάρχει ικανοποιητικό δείγμα αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν 15 αντικείμενα με ίδιες διαστάσεις και γεωμετρία αλλάζοντας το LT και NT, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

Επίσης, οι παράμετροι της ποιότητας της επιφάνειας που μετρήθηκαν ήταν το Ra και Rt ( $\mu\text{m}$ ). Το Ra αποτελεί την περιοχή μεταξύ του προφίλ τραχύτητας και της μέσης γραμμής του, ενώ το Rt αποτελεί συνολικό ύψος του προφίλ τραχύτητας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διεξαγωγή των πειραμάτων παρατηρήθηκε πως όταν το LT αυξάνεται, το Ra και Rt αυξάνονται και άρα μειώνεται το SQ. Πιο συγκεκριμένα, όταν αυξάνεται το LT οι κορυφές και οι κοιλάδες γίνονται πιο τραχιές με βαθύτερα αυλάκια. Από την άλλη, το NT επηρεάζει λίγο το Ra και το Rt. Όταν το NT αυξάνεται από 180 °C σε 200 °C το Ra και Rt μειώνονται. Έπειτα, από 200 °C σε 220 °C το Ra και Rt γίνονται λίγο χειρότερα με την αύξηση τους. Η ιδανικότερη θερμοκρασία είναι 200 °C που οδηγεί σε καλύτερη επιφάνεια με μικρότερες κορυφές και κοιλάδες. Αυτή η συμπεριφορά απεικονίζεται και στο σχήμα 16.



Σχήμα 16 : Διαγράμματα μέσης τιμής συνάρτηση για της παραμέτρους LT και NT για α) Ra και β) Rt.

Παράλληλα, για την περίπτωση της ακρίβειας των διαστάσεων (DA) παρατηρήθηκε πως με την αύξηση του LT όλες οι διαστασιακές διαφορές αυξάνονται, καταλήγοντας έτσι σε μεγαλύτερες τελικές διαστάσεις.

Έτσι, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η ποιότητα της επιφάνειας και η ακρίβεια των διαστάσεων των αντικειμένων PLA/W κατασκευασμένα από τρισδιάστατο εκτυπωτή, επηρεάζονται από το πάχος του στρώματος και την θερμοκρασία του ακροφυσίου. Επίσης, το LT επηρεάζει σημαντικά τις παραμέτρους του SQ (Ra και Rt), καθώς και τις παραμέτρους του DA (DX,

DY, DWX και DXY). Όταν το LT αυξάνεται, τότε αυξάνονται και οι παράμετροι των SQ και DA. Αντίστοιχα, το NT δεν επηρεάζει τόσο σημαντικά τις παραμέτρους του SQ, σε αντίθεση με τις παραμέτρους του DA. Πιο συγκεκριμένα, όταν αυξάνεται το NT, το Ra και το Rt αυξάνονται λίγο μετά τα 210 °C, ενώ το DA αυξάνεται σημαντικά.



Πίνακας 1: Πειραματική ταξινόμηση και μετρήσεων της ποιότητας της επιφάνειας SQ και της ακρίβειας των διαστάσεων DA.

No exp.	Parameters	Measurements						
	NT (°C)	LT (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)	DX (mm)	DY (mm)	DWX (mm)	DWY (mm)
1	180	0.3	23.6	117.3	0.463	0.417	0.530	0.530
2	190	0.3	23.3	117.2	0.470	0.460	0.550	0.560
3	200	0.3	23.5	116.3	0.510	0.510	0.580	0.580
4	210	0.3	24.0	132.4	0.527	0.527	0.610	0.610
5	220	0.3	24.3	126.6	0.627	0.583	0.640	0.650
6	180	0.2	16.1	89.5	0.450	0.323	0.470	0.460
7	190	0.2	17.6	95.0	0.427	0.370	0.510	0.500
8	200	0.2	15.2	81.4	0.460	0.427	0.530	0.510
9	210	0.2	18.4	105.3	0.497	0.457	0.550	0.550
10	220	0.2	18.0	104.8	0.580	0.507	0.580	0.580
11	180	0.1	16.0	100.6	0.383	0.330	0.450	0.470
12	190	0.1	15.0	103.3	0.410	0.337	0.460	0.480
13	200	0.1	16.9	105.5	0.420	0.343	0.490	0.480
14	210	0.1	13.3	91.6	0.433	0.387	0.480	0.490
15	220	0.1	17.0	109.4	0.443	0.407	0.510	0.520
Average			18.8	106.4	0.473	0.426	0.529	0.531
Min			13.3	81.4	0.383	0.323	0.450	0.460
Max			24.3	132.4	0.627	0.583	0.640	0.650

## **B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

# 1. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

## 1.1. Παραγωγή των 3D-printed δισκίων

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας του Εργαστηρίου Μηχανικής Επιφανειών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΠΑ.Δ.Α. με το Τμήμα Εκαπιδευτικών Μηχανολόγων Μηχανικών της Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε., το οποίο ανέλαβε την παραγωγή των δοκιμίων που υποβλήθηκαν στις τριβολογικές δοκιμές.

Για την παραγωγή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μηχανή τριδιάστατης εκτύπωσης Craftbot Plus Pro 3D-Printer (Σχήμα 17α), όπου τροφοδοτήθηκε νήμα Polyethylene Terephthalate Glycol-modified (PET-G) διαμέτρου 1.75mm (Σχήμα 17β).



(α)



(β)

Σχήμα 17: (α) Μηχάνημα τριδιάστατης εκτύπωσης Craftbot Plus Pro 3D-Printer. (β) Υλικό τροφοδοσίας Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified (PETG) υπό τη μορφή νήματος.

Το Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified (PETG) είναι ένα ανθεκτικό υλικό και βρίσκει πολλές εφαρμογές, καθώς έχει και υψηλή αντοχή στην θερμική καταπόνηση. Αποτελεί ένα από τα σημαντικά υλικά για χρήση σε τριδιάστατους εκτυπωτές. Χρησιμοποιείται κυρίως για εκτύπωση μεγάλων αντικειμένων, διότι δεν καταπονείται σχεδόν καθόλου λόγω λυγισμού.

Το συγκεκριμένο υλικό συνδυάζει την ευκολία χρήσης του νήματος PLA με την αντοχή και την ανθεκτικότητα του νήματος ABS. Η αντοχή του είναι πολύ υψηλότερη από το PLA και πληροί τις

προδιαγραφές του FDA (Food and Drug Administration) που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συσκευασίες τροφίμων και φαρμάκων. Από την άλλη, αντίθετα από το ABS, το PETG σπάνια λυγίζει και δεν παράγει οσμές και αναθυμιάσεις όταν χρησιμοποιείται για εκτύπωση. Τα νήματα PETG δεν είναι βιοδιασπώμενα, αλλά είναι 100% επαναχρησιμοποιήσιμα.

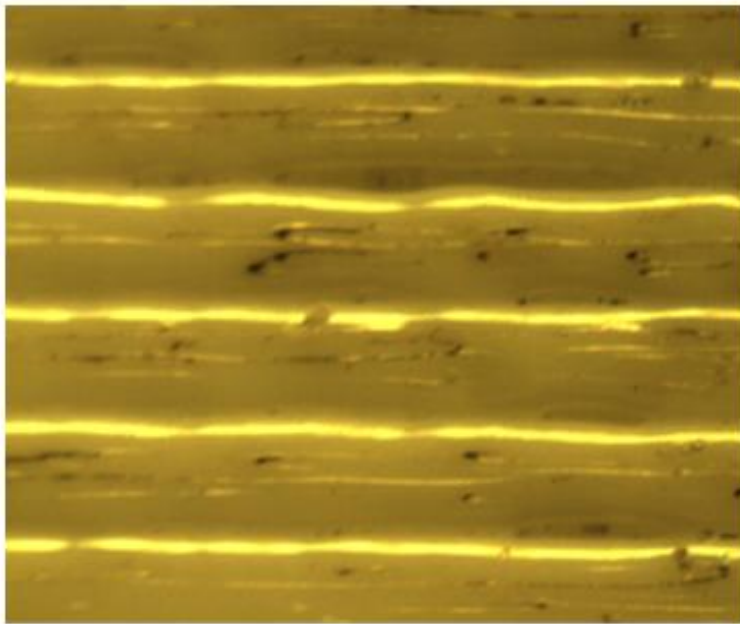
*Πίνακας 1: Παράμετροι τριδιάστατης εκτύπωσης δοκιμών.*

Υψος στρώσης (mm)	100
Ποσοστό πλήρωσης (%)	100
Γωνία εναπόθεσης (°)	±45
Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/s)	50
Θερμοκρασία παραγωγής (°C)	240

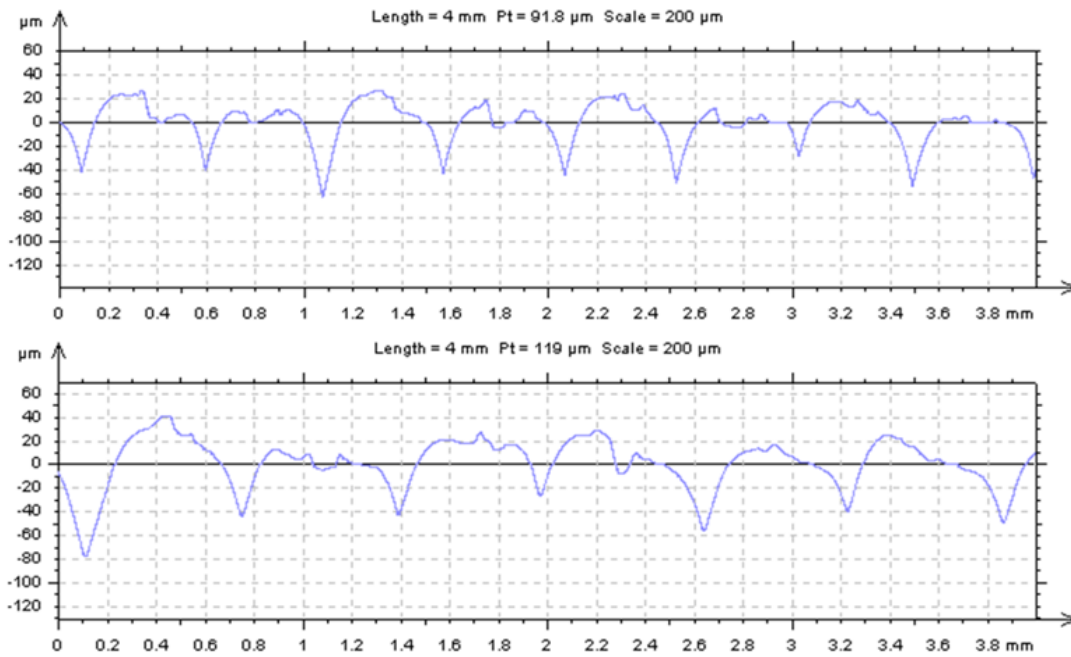
Με τη χρήση του προαναφερόμενου μηχανήματος και υλικού παραχθήκανε δεκαέξι (16) δοκίμια, μορφής δισκίων διαμέτρου 30 mm και πάχους 5 mm. Οι παράμετροι εκτύπωσης παρέμειναν σταθερές (Πίνακας 2) για όλα τα δοκίμια, γι' αυτό και θεωρούνται όμοια μεταξύ τους με μέσο βάρος 4.17 gr. Στο Σχήμα 18, παρουσιάζεται μια αντιπροσωπευτική εικόνα της επιφάνειάς τους (α) και η αντίστοιχη μικρο-μικρογεωμετρία της επιφάνειάς τους μετρημένη σε δύο κάθετες διευθύνσεις (ενδεικτικό παράδειγμα, άλλες σχετικές μετρήσεις αρχικής τραχύτητας και εικόνες αρχικής επιφάνειας περιέχονται στα Παραρτήματα Β και Γ, αντίστοιχα).

## **1.2. Διάταξη δοκιμής τριβής ολίσθησης σημειακής επαφής**

Οι δοκιμές τριβής ολίσθησης τύπου σφαίρας-δίσκου (ball-on-disk) έγιναν με τη χρήση του τριβομέτρου CSEM Instruments (Σχήμα 19). Στη συγκεκριμένη διάταξη, ως δίσκος χρησιμοποιήθηκαν τα προς χαρακτηρισμό δοκίμια έναντι των οποίων ολίσθαινε σφαίρα του ανταγωνιστικού υλικού που έχει το ρόλο του υλικού αναφοράς. Οι μετρήσεις της δύναμης τριβής κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων γίνονται με τη μετακίνηση του στελέχους του δυναμομέτρου που συνδέεται με αισθητήρα LVDT (Low Voltage Distance Transducer). Το τριβόμετρο συνδέεται με υπολογιστή με το λογισμικό TriboX, με δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων σε αρχεία .txt που επιτρέπει την περαιτέρω επεξεργασία και αναπαραγωγή τους με κοινά λογιστικά (excel) ή σχεδιαστικά (origin) προγράμματα.



(α)



Σχήμα 1: Ενδεικτική δομή δοκιμίου 1 α) Φωτογραφία μικροσκοπίου, β) Τραχυμέτρηση σε γωνία 90° (άνω σχήμα) και σε γωνία 45° (κάτω σχήμα).



Εικόνα 19: Τριβόμετρο τύπου *ball-on-disk* CSEM Instruments.

Ως ανταγωνιστικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν δύο σφαίρες διαμέτρου 6 mm:

- (α) σφαίρα αλουμίνιας ( $Al_2O_3$ ), προκειμένου να μελετηθεί η περίπτωση της επαφής ενός αντιπροσωπευτικού κεραμικού με το υπό εξέταση υλικό, και
- (β) σφαίρα χρωμο-νικελιούχου χάλυβα, προκειμένου να μελετηθεί η περίπτωση της επαφής ενός αντιπροσωπευτικού μετάλλου με το υπό εξέταση υλικό.

Όλες οι δοκιμές έγιναν εν ξηρώ σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (25 °C, 25 %RH), υπό διαφορετικές συνθήκες ολίσθησης (επιβαλλόμενο φορτίο και γραμμική ταχύτητα ολίσθησης):

- Η πρώτη σειρά δοκιμών με τα δύο ανταγωνιστικά έγινε στην ίδια ακτίνα ολίσθησης (10 mm) με την επιβολή φορτίων 1, 2, 5 και 10 N και με γραμμική ταχύτητα 5 και 50 cm/s (16 δοκιμές), προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ολίσθησης για τις δύο εξεταζόμενες επαφές (Πίνακας 3).
- Η δεύτερη σειρά δοκιμών με τα δύο ανταγωνιστικά έγιναν σε μικρότερη ακτίνα ολίσθησης (5 mm) και την επιβολή φορτίου 5N και με ενδιάμεσες τιμές γραμμικής ταχύτητας, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της ταχύτητας στην εξέλιξη των συντελεστών τριβής και φθοράς (Πίνακας 4).

Πίνακας 2: Τιμές των παραμέτρων των δοκιμών της πρώτης σειράς πειραμάτων τριβής.

Αριθμός δοκιμίου	Επιβαλλόμενο φορτίο (N)	Ταχύτητα (cm/s)	Ακτίνα (mm)	Ανταγωνιστικό υλικό	Ημερομηνία δοκιμής
1	10	50	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	23-Aug
2	5	50	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	23-Aug
3	2	50	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	23-Aug
4	1	50	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	23-Aug
5	10	50	10	CrNi-χάλυβας (Met)	23-Aug
6	5	50	10	CrNi-χάλυβας (Met)	23-Aug
7	2	50	10	CrNi-χάλυβας (Met)	23-Aug
8	1	50	10	CrNi-χάλυβας (Met)	23-Aug
9	10	5	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	24-Aug
10	5	5	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	27-Aug
11	2	5	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	31-Aug
12	1	5	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	2-Sep
13	10	5	10	CrNi-χάλυβας (Met)	26-Aug
14	5	5	10	CrNi-χάλυβας (Met)	30-Aug
15	2	5	10	CrNi-χάλυβας (Met)	1-Sep
16	1	5	10	CrNi-χάλυβας (Met)	3-Sep

Πίνακας 3: Τιμές των παραμέτρων των δοκιμών της δεύτερης σειράς πειραμάτων τριβής.

Αριθμός δοκιμίου	Επιβαλλόμενο φορτίο (N)	Ταχύτητα (cm/s)	Ακτίνα (mm)	Ανταγωνιστικό υλικό	Ημερομηνία δοκιμής
1	5	10	5	CrNi-χάλυβας (Met)	5-Oct
2	5	20	5	CrNi-χάλυβας (Met)	5-Oct
3	5	30	5	CrNi-χάλυβας (Met)	5-Oct
4	5	10	5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	5-Oct
5	5	20	5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	5-Oct
6	5	30	5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	5-Oct

### 1.3. Διαγνωστικές τεχνικές

Για την μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας, καθώς και του όγκου της φθοράς του εξεταζόμενου υλικού χρησιμοποιήθηκε Taylor/Hobson Pneumo Surtronic 3t (Σχήμα 20). Το συγκεκριμένο τραχύμετρο είναι τύπου στυλίσκου (stylus profiler), δηλαδή χρησιμοποιεί μια ακίδα στην άκρη ενός στελέχους για την καταγραφή του προφίλ της επιφάνειας του δοκιμίου και χρησιμοποιεί το λογισμικό Talysrprofile για την εξαγωγή διαφόρων μέτρων της τραχύτητας. Η μέτρηση της φθοράς στηρίζεται στο γεγονός ότι κατά την πειραματική δοκιμή τριβής-φθοράς δημιουργείται μία αύλακα φθοράς, λόγω του απομακρυνόμενου υλικού. Η μέτρηση των διαστάσεων της αύλακας αυτής σε κάθετη τομή (εμβαδόν κρατήρα αύλακας), επιτρέπει τον υπολογισμό του όγκου του υλικού που απομακρύνεται, αφού η δοκιμή γίνεται σε σταθερή ακτίνα.



*Εικόνα 20: Μηχανικό τραχύμετρο Taylor/Hobson Pneumo Surtronic 3T.*

Για την αξιολόγηση της φθοράς του υλικού, χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά στερεοσκόπιο LW Scientific Z2, ζυγός με ακρίβεια εκατοστού του γραμμαρίου (2 δεκαδικών) και παχύμετρο.

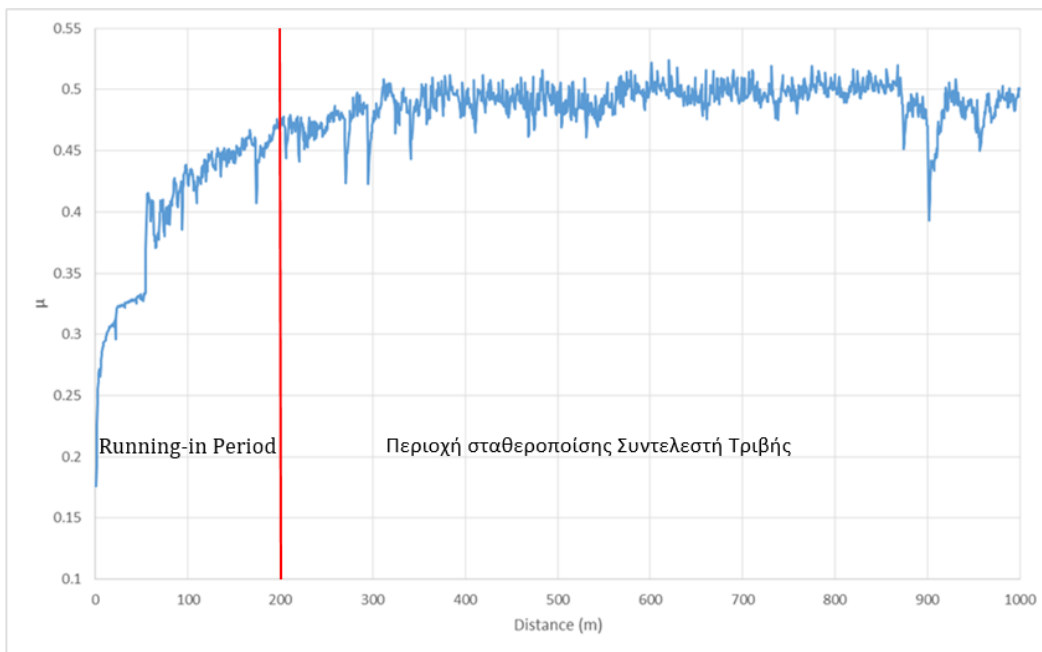


## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ

### 4.1. Πειραματικά ποτελέσματα

#### Εξέλιξη του συντελεστή τριβής

Στο Σχήμα 21, παρουσιάζεται μία αντιπροσωπευτική καμπύλη της εξέλιξης της τιμής του συντελεστή τριβής συναρτήσει της απόστασης ολίσθησης του ανταγωνιστικού υλικού επί της εξεταζόμενης επιφάνειας (οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις 22 δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν περιέχονται στο Παράρτημα Α). Παρατηρείται η ύπαρξη δύο χαρακτηριστικών περιοχών: (α) της περιοχής **Running-in Period** και (β) της περιοχής **σταθεροποίησης του συντελεστή τριβής**. Η running-in period αντιστοιχεί στη χρονική περίοδο που απαιτείται, ώστε το ανταγωνιστικό υλικό για να αρχίσει να δημιουργεί την αύλακα φθοράς στην επιφάνεια του δοκιμίου, δηλαδή να αρχίσει να φθείρει αισθητά το εξεταζόμενο υλικό. Η περιοχή σταθεροποίησης του συντελεστή τριβής αντιστοιχεί στην περίοδο λειτουργίας του συστήματος σε σταθερή κατάσταση, όπου ο συντελεστής τριβής τείνει προς σταθερή μέση τιμή. Για όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, οι τιμές του συντελεστή τριβής μόνιμης κατάστασης παρουσιάζονται στους Πίνακες 5 και 6, για τις δοκιμές της πρώτης και της δεύτερης σειράς αντίστοιχα.



Σχήμα 21: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση για το δοκίμιο 9, όπου έχουμε γραμμική ταχύτητα 5m/s, επιβαλλόμενη δύναμη 5N και ανταγωνιστικό υλικό  $Al_2O_3$ .

Πίνακας 5: Μέση τιμή του συντελεστή τριβής για όλες τις δοκιμές της πρώτης σειράς.

Αριθμός δοκιμίου	Επιβαλλόμενο φορτίο (N)	Ταχύτητα (cm/s)	Ανταγωνιστικό υλικό	Μέση τιμή του συντελεστή τριβής μόνιμης κατάστασης
1	10	50	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,27
2	5	50	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,26
3	2	50	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,37
4	1	50	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,33
5	10	50	CrNi-χάλυβας (Met)	0,33
6	5	50	CrNi-χάλυβας (Met)	0,32
7	2	50	CrNi-χάλυβας (Met)	0,35
8	1	50	CrNi-χάλυβας (Met)	0,31
9	10	5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,49
10	5	5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,39
11	2	5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,30
12	1	5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,31
13	10	5	CrNi-χάλυβας (Met)	0,39
14	5	5	CrNi-χάλυβας (Met)	0,34
15	2	5	CrNi-χάλυβας (Met)	0,28
16	1	5	CrNi-χάλυβας (Met)	0,17

Πίνακας 6: Μέση τιμή του συντελεστή τριβής για όλες τις δοκιμές της δεύτερης σειράς.

Αριθμός δοκιμίου	Επιβαλλόμενο φορτίο (N)	Ταχύτητα (cm/s)	Ανταγωνιστικό υλικό	Μέση τιμή του συντελεστή τριβής μόνιμης κατάστασης
1	5	10	CrNi-χάλυβας (Met)	0,40
2	5	20	CrNi-χάλυβας (Met)	0,36
3	5	30	CrNi-χάλυβας (Met)	0,36
4	5	10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,37
5	5	20	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,38
6	5	30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cer)	0,33

## Μετρήσεις φθοράς

Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται μια αντιπροσωπευτική εικόνα και διαδοχικές μεγεθύνσεις της για την μικρο-γεωμετρία της επιφάνειας στην περιοχή της αύλακας φθοράς, που έγινε με τη χρήση του μηχανικού τραχυμέτρου (οι τραχυμετρήσεις για τις δοκιμές που έγιναν περιέχονται στο Παράρτημα Β). Η εικόνα αυτή αφορά μέτρηση σε μία ευθεία κάθετη στην αύλακα φθοράς από την οποία μπορεί να μετρηθεί το εμβαδόν της τομής του όγκου υλικού που απομακρύνθηκε (κόκκινη περιοχή).

Ο όγκος του υλικού που απομακρύνθηκε ( $w$ ) δίνεται από τη σχέση (1):

$$W = (\text{μετρούμενο εμβαδόν}) \times 2\pi \times (\text{ακτίνα ολίσθησης}) \quad (1)$$

Ο υπολογισμός του συντελεστή φθοράς για κάθε δοκίμιο γίνεται με τη χρήση της σχέσης (2):

$$k = \frac{w}{s \cdot F_N} \quad (2)$$

Όπου :

$k$ , ο συντελεστής φθοράς ( $\text{mm}^3/\text{m} \cdot \text{N}$ ).

$w$ , ο όγκος του υλικού που απομακρύνεται ( $\text{mm}^3$ ).

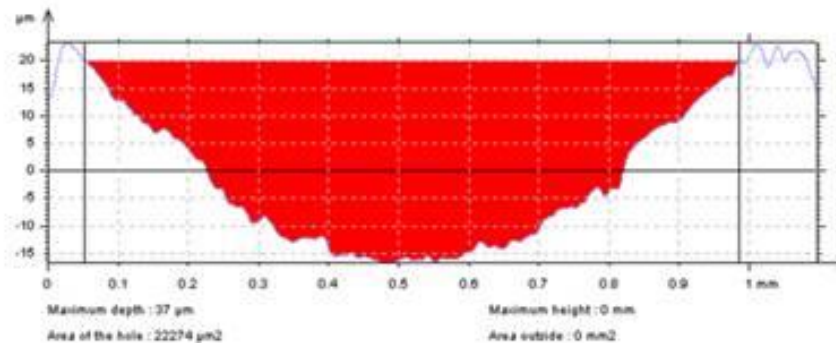
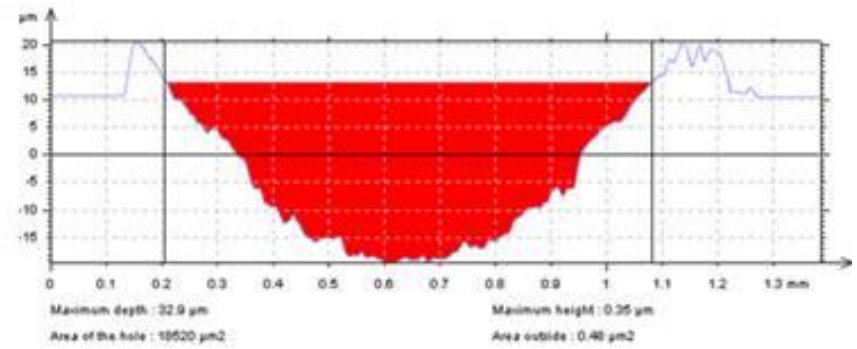
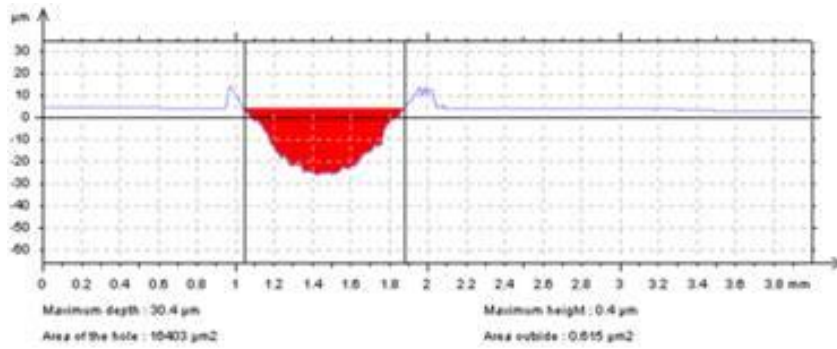
$s$ , το μήκος ολίσθησης (m).

$F_N$ , το κάθετα επιβαλλόμενο φορτίο (N).

Για κάθε δοκίμιο πάρθηκαν τέσσερις (4) μετρήσεις ανά αύλακα φθοράς και υπολογίστηκε η μέση τιμή για κάθε συνδυασμό παραμέτρων πειράματος. Τα σχετικά αποτελέσματα για την πρώτη και τη δεύτερη σειρά δοκιμών δίνονται στους Πίνακες 7 και 8, αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για ακραίες τιμές της αύλακας φθοράς (πολύ υψηλές, π.χ.  $10 \text{ N}/50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  ή πολύ χαμηλές, π.χ. 1 και 2N), δεν έγινε δυνατή η αποτύπωση της φθοράς.

Η ζύγιση των δοκιμών πριν και μετά από κάθε δοκιμή δεν οδήγησε σε αξιόπιστο αποτέλεσμα, κάτι που οφείλεται στο συνδυασμό του χαμηλού ειδικού βάρους του υλικού και της περιορισμένης ακρίβειας του ζυγού του εργαστηρίου.

Τέλος, η αύλακα φθοράς παρατηρήθηκε σε στερεοσκόπιο και μετρήθηκε το πλάτος της (Σχήμα 23), το οποίο βρέθηκε σε ικανοποιητική συμφωνία με τις μετρήσεις με τη χρήση του μηχανικού τραχυμέτρου. Η εικόνες της αύλακας φθοράς για όλες τις δοκιμές δίνονται στο Παράρτημα Γ.



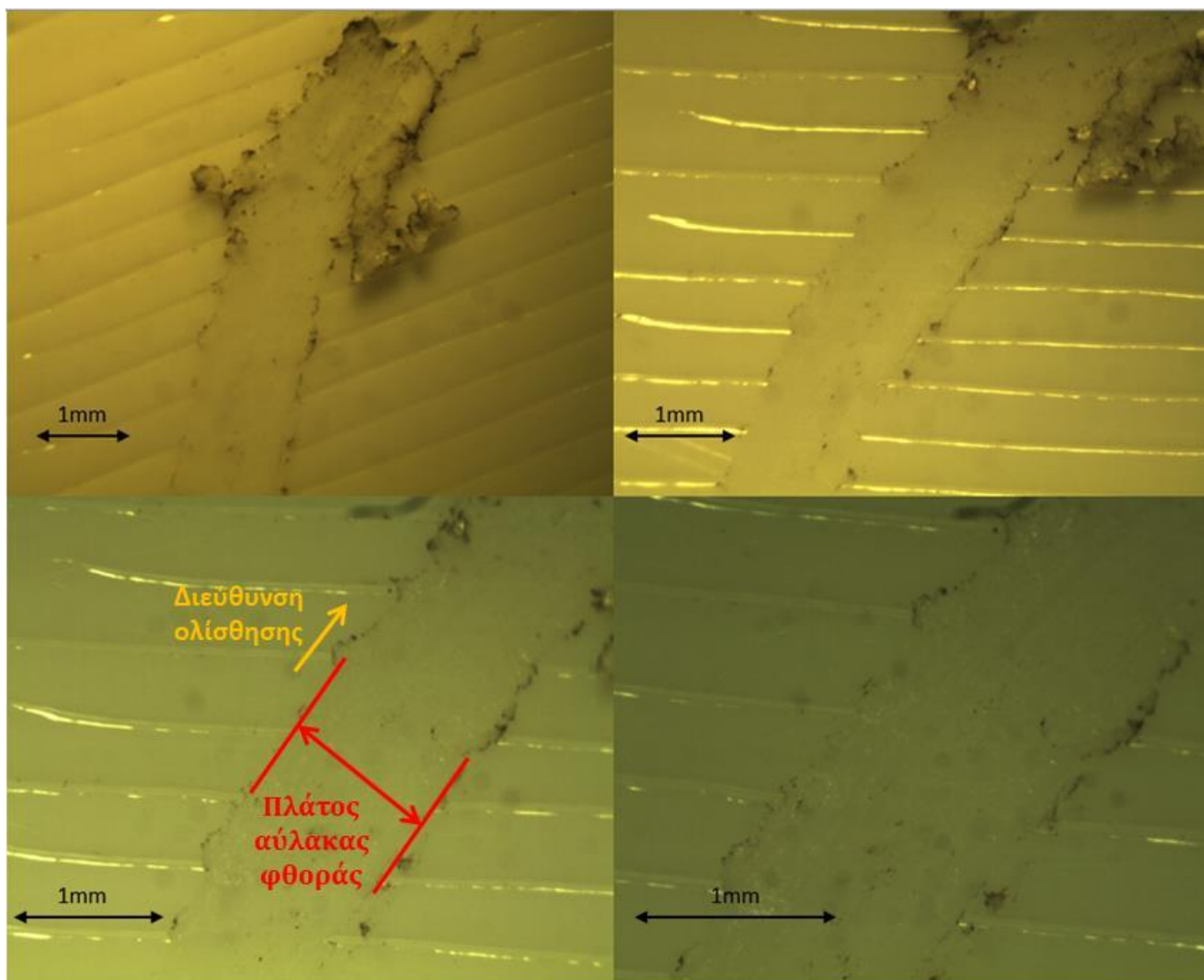
Σχήμα 22: Διαδοχικές μεγεθύνσεις του προφίλ της επιφάνειας σε ευθεία κάθετη στην αύλακα φθοράς, από το οποίο μπορεί να υπολογισθεί το εμβαδόν της κάθετης τομής του όγκου που απομακρύνθηκε (κόκκινη περιοχή).

Πίνακας 7: Υπολογισμός του συντελεστή φθοράς για δοκιμές της πρώτης σειράς.

Specimen	Distance (m)	Radius (mm)	Force (N)	Area of Hole (mm <sup>2</sup> )	Mean Area of Hole (mm <sup>2</sup> )	Volume of Hole (mm <sup>3</sup> )	Wear Coefficient (mm <sup>3</sup> /m*N)
2	1000	10	5	0.0164	0.0124	0.124	2.49E-05
				0.0105			
				0.0109			
				0.0127			
				0.0116			
4	1000	10	1	0.0175	0.0147	0.147	1.47E-04
				0.0192			
				0.0114			
				0.0160			
				0.0096			
5	1000	10	10	0.104	0.194	1.94	1.94E-04
				0.284			
6	1000	10	5	0.0332	0.0350	0.350	7.00E-05
				0.0492			
				0.0373			
				0.0349			
				0.0204			
9	1000	10	10	0.0873	0.08234	0.823	8.23E-05
				0.0927			
				0.0834			
				0.0669			
				0.0814			
10	1000	10	5	0.0166	0.0205	0.205	4.10E-05
				0.0126			
				0.0386			
				0.0170			
				0.0178			
13	1000	10	10	0.0294	0.0217	0.217	2.17E-05
				0.0200			
				0.0108			
				0.0240			
				0.0243			

Πίνακας 8: Υπολογισμός του συντελεστή φθοράς για δοκιμές της δεύτερης σειράς.

Specimen	Distance (m)	Radius (mm)	Force (N)	Area of Hole (mm <sup>2</sup> )	Mean Area of Hole (mm <sup>2</sup> )	Volume of Hole (mm <sup>3</sup> )	Wear Coefficient (mm <sup>3</sup> /m*N)
1	1000	5	5	0.0320	0.0236	0.118	2.36E-05
				0.0147			
				0.0308			
				0.0071			
				0.0333			
2	1000	5	5	0.0247	0.0219	0.109	2.19E-05
				0.0265			
				0.0255			
				0.0148			
				0.0180			
3	1000	5	5	0.0190	0.0386	0.193	3.86E-05
				0.0473			
				0.0352			
				0.0462			
				0.0455			
4	1000	5	5	0.0175	0.0219644	0.110	2.20E-05
				0.0073			
				0.0181			
				0.0383			
				0.0285			
5	1000	5	5	0.0341	0.0261	0.131	2.61E-05
				0.0290			
				0.0139			
				0.0246			
				0.0292			
6	1000	5	5	0.0559	0.0476	0.238	4.76E-05
				0.0398			
				0.0325			
				0.0578			
				0.0520			



Σχήμα 23: Κάτοψη τεσσάρων αυλάκων φθοράς που δημιουργήθηκαν με την επιβολή φορτίου 1, 2, 5 και 10 N, υπό τις ίδιες λοιπές παραμέτρους ολίσθησης (εικόνες στερεοσκοπίου).

## 4.2. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Στα Σχήματα 24-28, παρουσιάζεται συγκριτικά η εξέλιξη των συντελεστών τριβής με τη χρήση των δύο διαφορετικών ανταγωνιστικών υλικών ( μεταλλικό και κεραμικό), για ίδια ταχύτητα και φορτίο:

**Επίδραση του ανταγωνιστικού υλικού.** Η χρήση κεραμικού υλικού ως ανταγωνιστικού, οδηγεί σε μετατόπιση του συντελεστή τριβής προς υψηλότερες τιμές από αυτές που καταγράφονται όταν χρησιμοποιείται μεταλλική σφαίρα, ως ανταγωνιστικό σώμα. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται αφενός στην πλαστική παραμόρφωση του χάλυβα (αύξηση της επιφάνειας επαφής), και αφετέρου στη δημιουργία ενός στρώματος οξειδίων του σιδήρου λόγω της οξείδωσης των μεταλλικών ψηγμάτων της φθοράς που παραμένουν στην επιφάνεια επαφής και δρουν ως στερεά λιπαντικά.

**Επίδραση κάθετου φορτίου.** Η αύξηση του κάθετου φορτίου οδηγεί σε μείωση του συντελεστή τριβής.

**Επίδραση γραμμικής ταχύτητας.** Η μείωση της γραμμικής ταχύτητας ολίσθησης οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή τριβής για την περίπτωση των 5 και 10 N. Με την αύξηση της ταχύτητας (2<sup>η</sup> σειρά δοκιμών) παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών του συντελεστή τριβής.

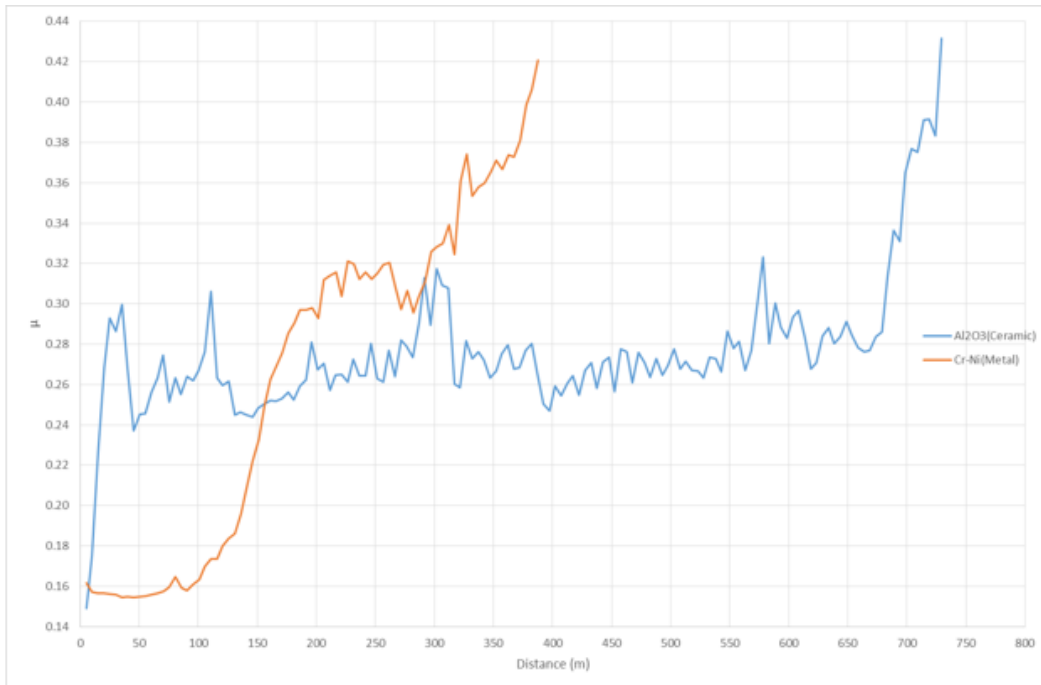
**Συντελεστής Φθοράς.** Για την ίδια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου και για το ίδιο ανταγωνιστικό υλικό, η αύξηση της γραμμικής ταχύτητας οδηγεί σε αύξηση του συντελεστής φθοράς, ειδικά για τιμές στην περιοχή των 30 cm/s. Για το ίδιο κάθετο φορτίο και γραμμική ταχύτητα, ο συντελεστής φθοράς βρέθηκε υψηλότερος όταν ως ανταγωνιστικό υλικό χρησιμοποιείται αλουμίνια (Σχήμα 29).

## 3. Προοπτικές περαιτέρω έρευνας

Τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία υποδεικνύουν τους άξονες για την περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο της απόδοσης σε επιφανειακές φορτίσεις πολυμερικών υλικών που έχουν κατασκευαστεί με τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης:

- Επίδραση του πορώδους του PETG στην τριβολογική του συμπεριφορά.
- Συμπεριφορά του PETG σε διαφορετικές επιφανειακές καταπονήσεις.
- Συμπεριφορά άλλων οργανικών 3D-printed πολυμερών σε επιφανειακές φορτίσεις.





α



β

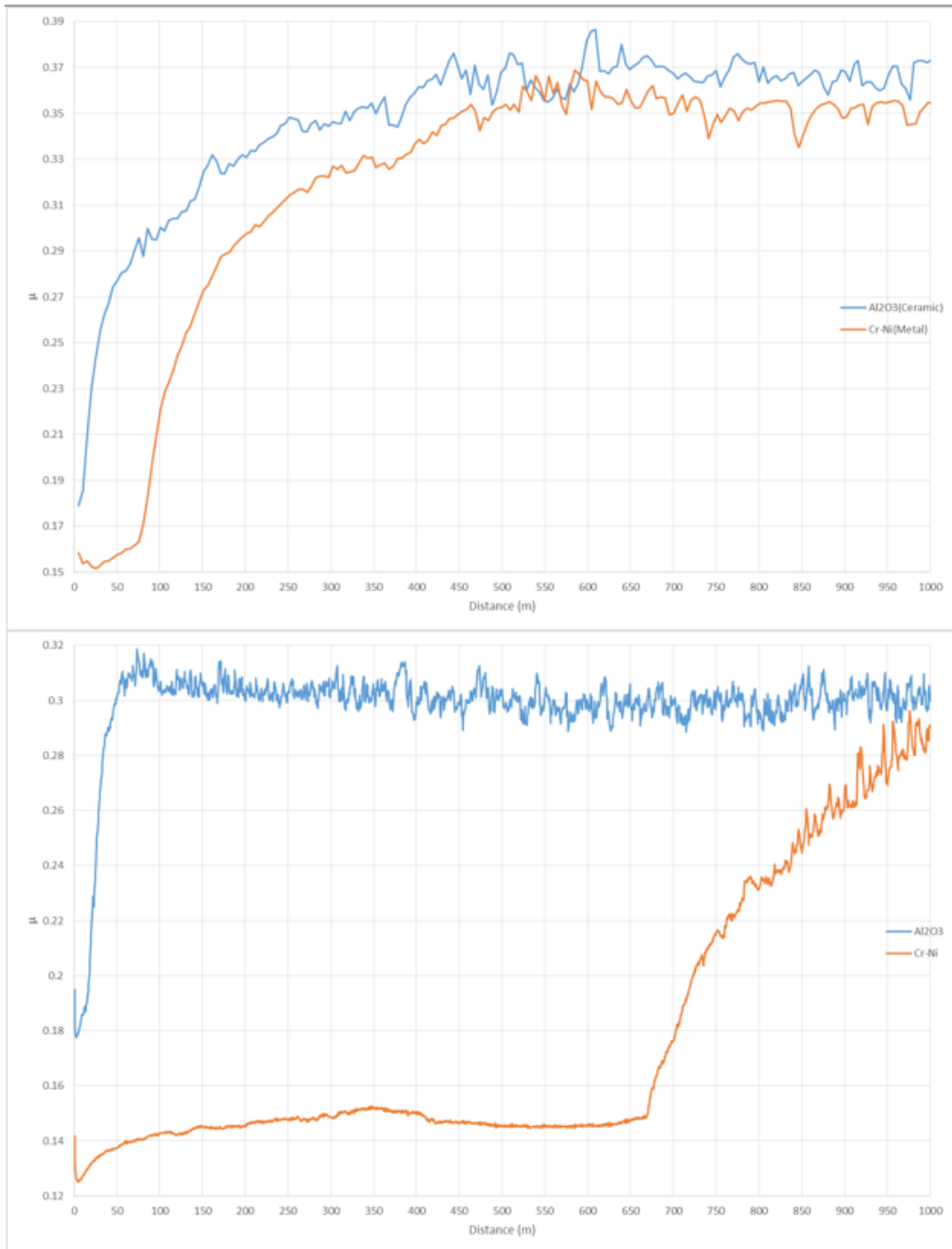
Σχήμα 24: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση ολίσθησης για δύο ανταγωνιστικά υλικά  $Al_2O_3$  και Cr-Ni χάλυβα για επιβαλλόμενο κάθετο φορτίο 10N και ταχύτητα α) 50cm/s, β) 5cm/s.



α

β

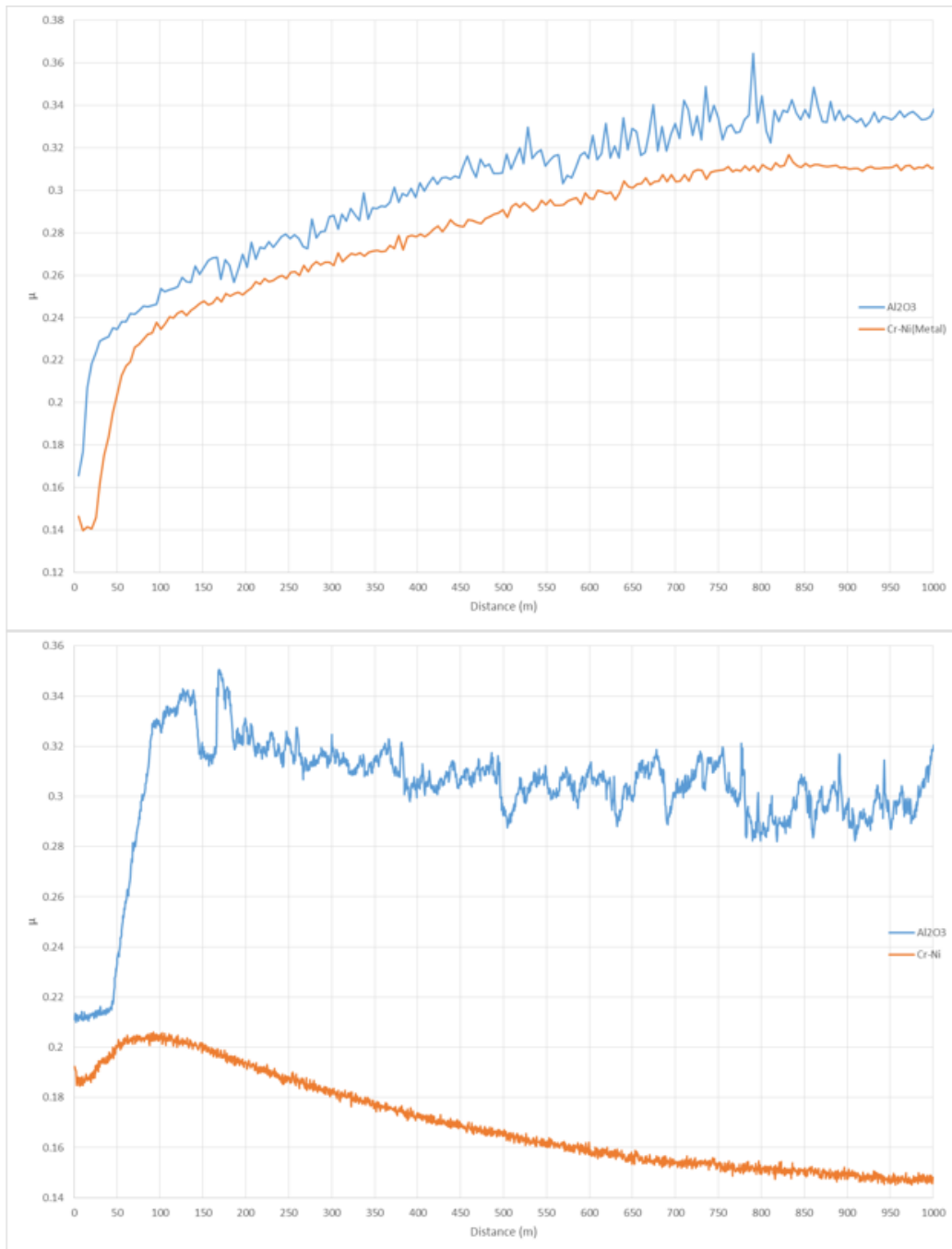
Σχήμα 25: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση ολίσθησης για δύο ανταγωνιστικά υλικά Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Cr-Ni χάλυβα για επιβαλλόμενο κάθετο φορτίο 5N και ταχύτητα α) 50cm/s, β) 5cm/s.



α

β

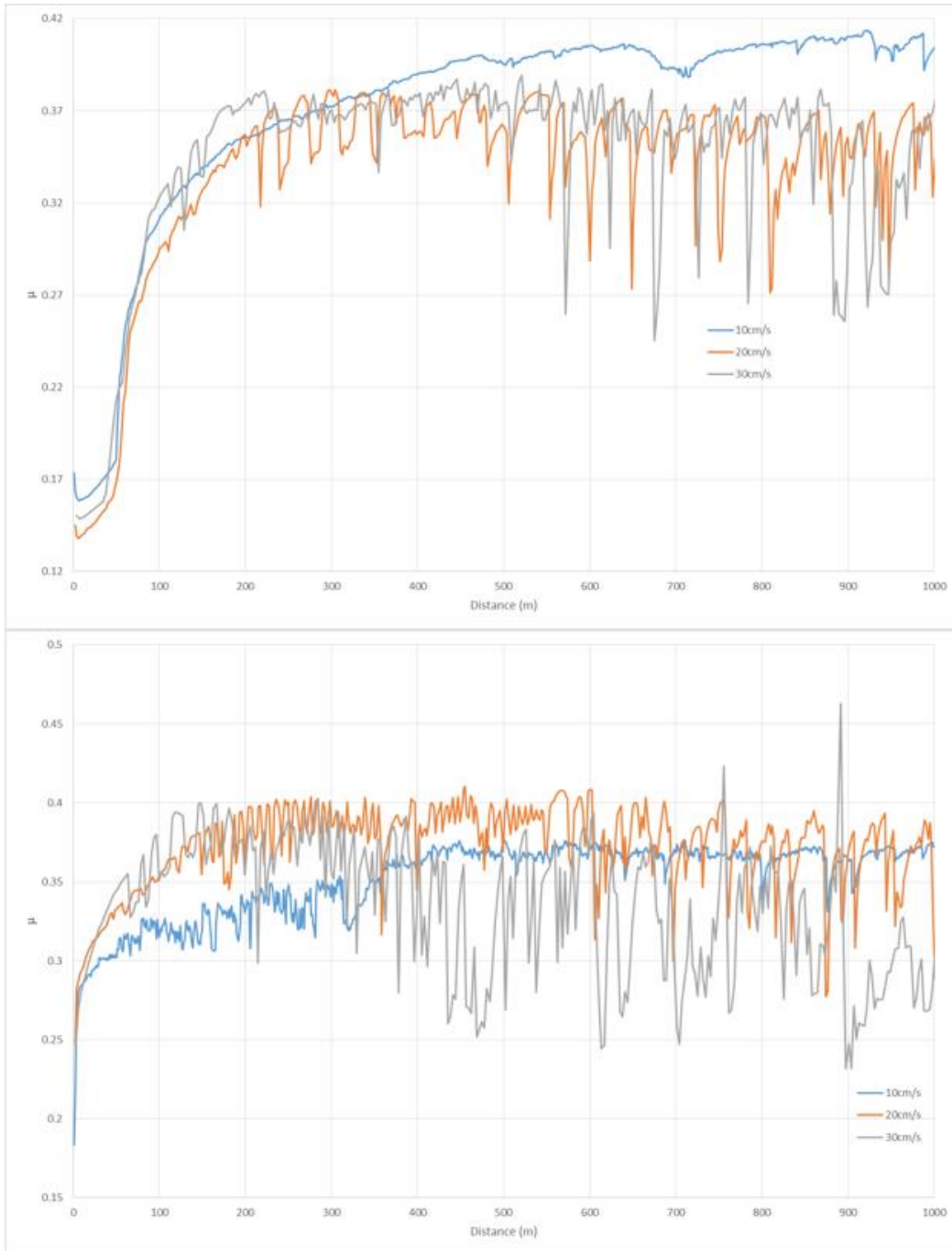
Σχήμα 2: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση ολίσθησης για δύο ανταγωνιστικά υλικά Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Cr-Ni χάλυβα για επιβαλλόμενο κάθετο φορτίο 2N και ταχύτητα α) 50cm/s, β) 5cm/s.



α

β

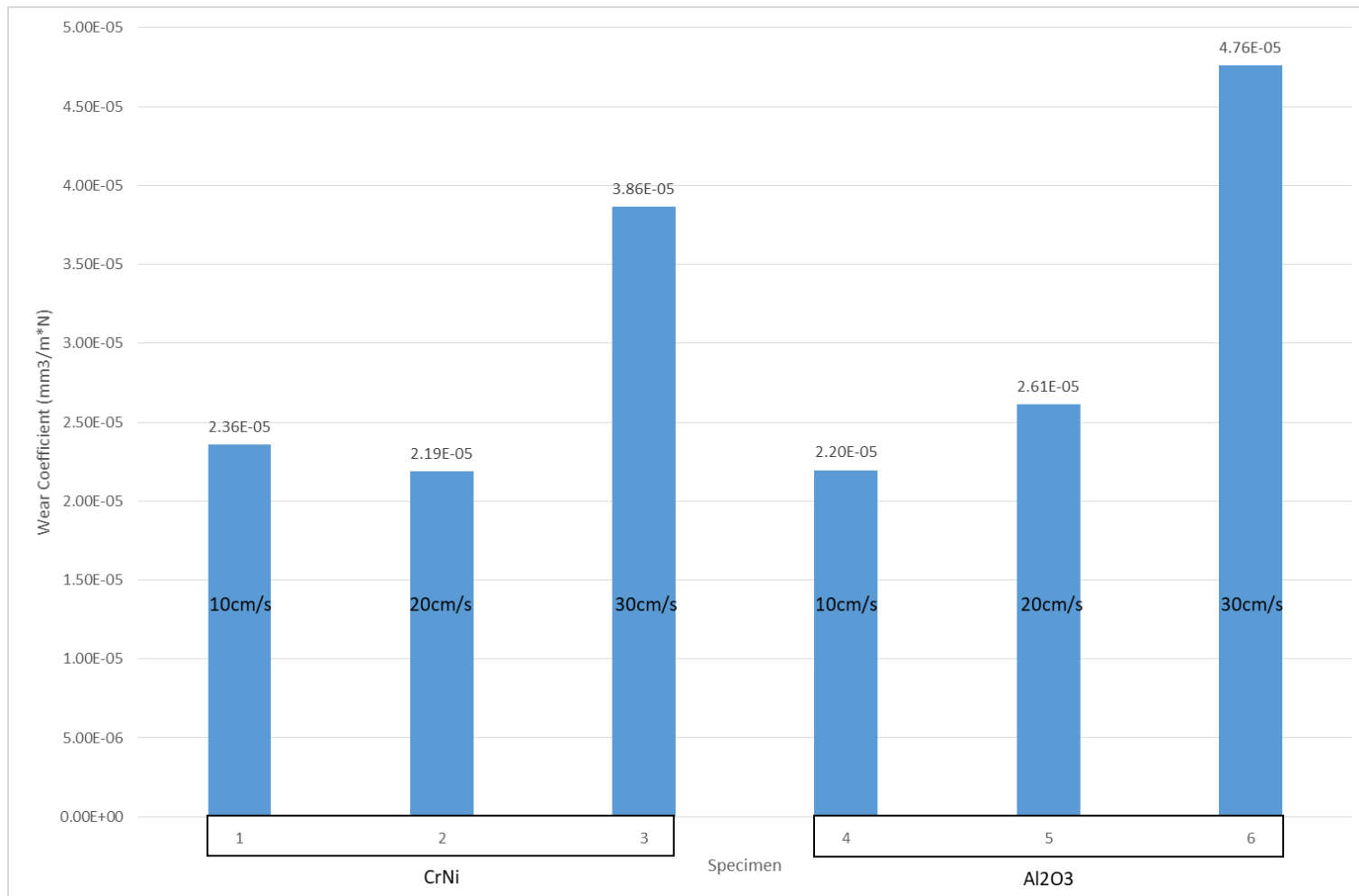
Σχήμα 3: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση ολίσθησης για δύο ανταγωνιστικά υλικά Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και CrNi για επιβαλλόμενο κάθετο φορτίο 1N και ταχύτητα α) 50cm/s, β) 5cm/s.



$\alpha$

$\beta$

Σχήμα 4: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση ολίσθησης για τρεις ταχύτητες 10,20 και 30 cm/s, για επιβαλλόμενο κάθετο φορτίο 5N και ανταγωνιστικό υλικό α) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, β) CrNi.



Σχήμα 5: Συντελεστής φθοράς για τα πειράματα της 2<sup>ης</sup> σειράς δοκιμών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]: Ψυλλάκη Π. Π., & Νικολακόπουλος Π. (2021), Μηχανική Επιφανειών και Εφαρμογές: Τριβολογία, Στοιχεία Μηχανών και Επιφανειακές Κατεργασίες, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [2]: Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2014). *The Science and Engineering of Materials 7th Edition*.
- [3]: Sood, A. K., Equbal, A., Toppo, V., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2012). An investigation on sliding wear of FDM built parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(1), 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.08.003>
- [4]: Kamerling, S., & Schlarb, A. K. (2003). Magnesium hydroxide - A new layer for increasing the performance and reliability of PA66/steel tribosystems. *Tribology International*, 36(4–6), I–II. [https://doi.org/10.1016/s0301-679x\(03\)00002-1](https://doi.org/10.1016/s0301-679x(03)00002-1)
- [5]: Perepelkina, S., Kovalenko, P., Pechenko, R., & Makhmudova, K. (2017). Investigation of friction coefficient of various polymers used in rapid prototyping technologies with different settings of 3D printing. *Tribology in Industry*, 39(4), 519–526. <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.04.11>
- [6]: Keshavamurthy, R., Tambrallimath, V., Badari, A., Krishna, A. R., Kumar, P. G. S., & Jeevan, M. C. (2020). Friction and wear behaviour of copper reinforced acrylonitrile butadiene styrene based polymer composite developed by fused deposition modelling process. *FME Transactions*, 48(3), 543–550. <https://doi.org/10.5937/fme2003543K>
- [7]: Xie, G. Y., Zhuang, G. S., Sui, G. X., & Yang, R. (2010). Tribological behavior of PEEK/PTFE composites reinforced with potassium titanate whiskers. *Wear*, 268(3–4), 424–430. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.032>
- [8]: Molazemhosseini, A., Tourani, H., Khavandi, A., & Eftekhari Yekta, B. (2013). Tribological performance of PEEK based hybrid composites reinforced with short carbon fibers and nano-silica. *Wear*, 303(1–2), 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.019>
- [9]: Chaidas, D., & Kechagias, J. D. (2021). An investigation of PLA/W parts quality fabricated by FFF. *Materials and Manufacturing Processes*, 00(00), 1–9. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1944193>

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

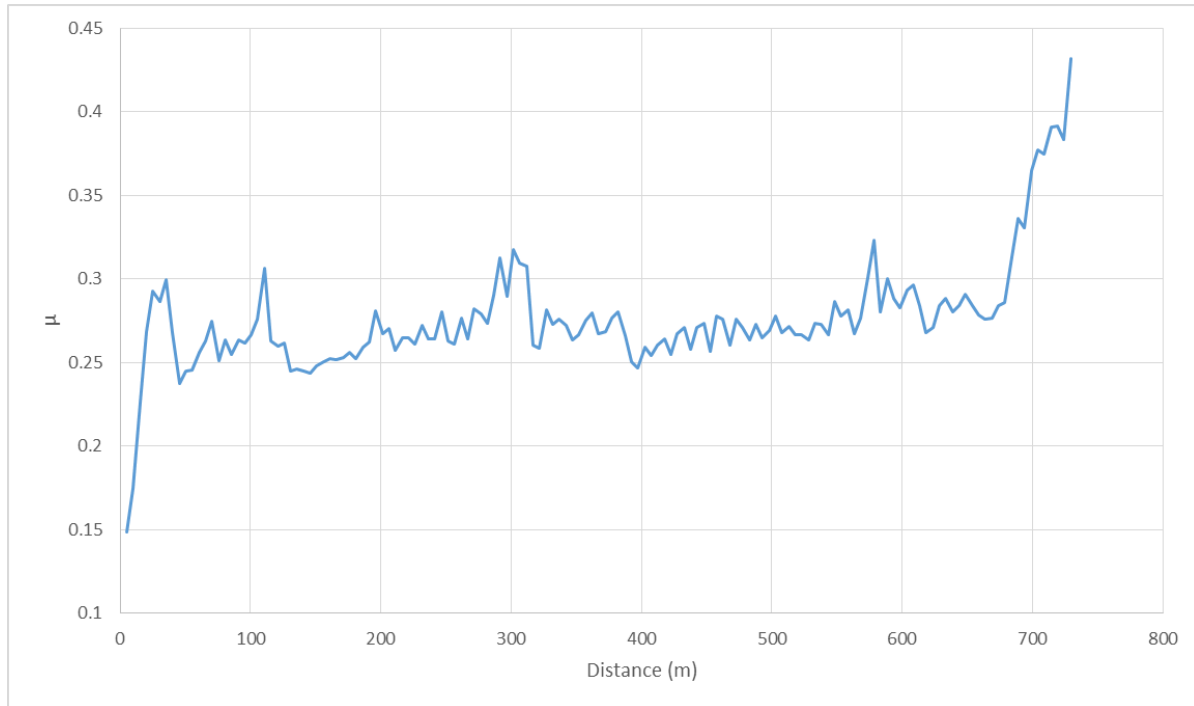
**A. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ**

**B. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ**

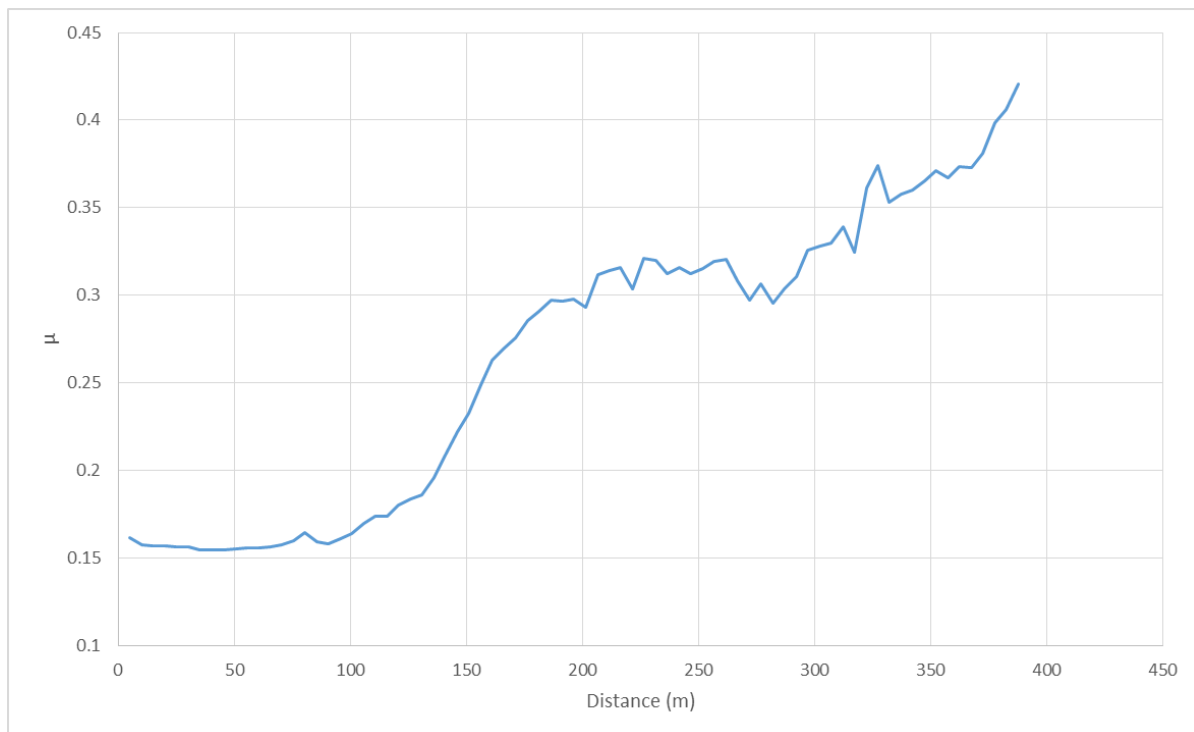
**Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ**



## Α. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

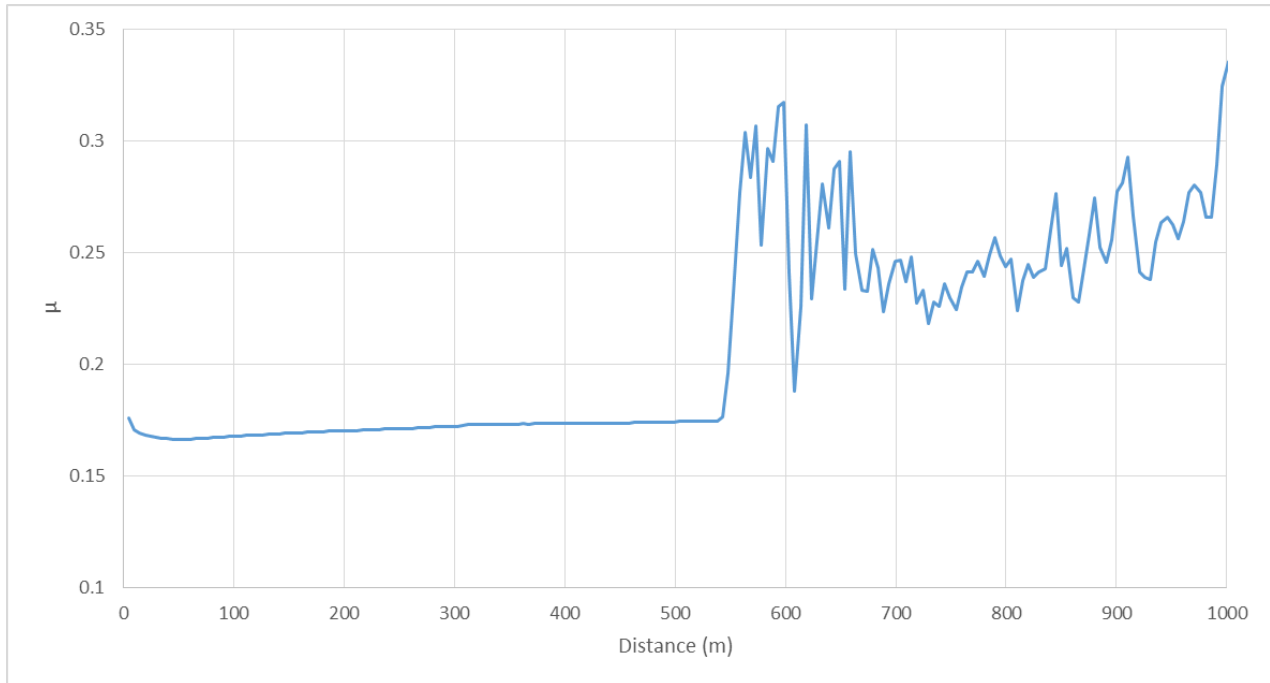


Σχήμα 1: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 50 cm/s, με φορτίο 10N για ανταγωνιστικό υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

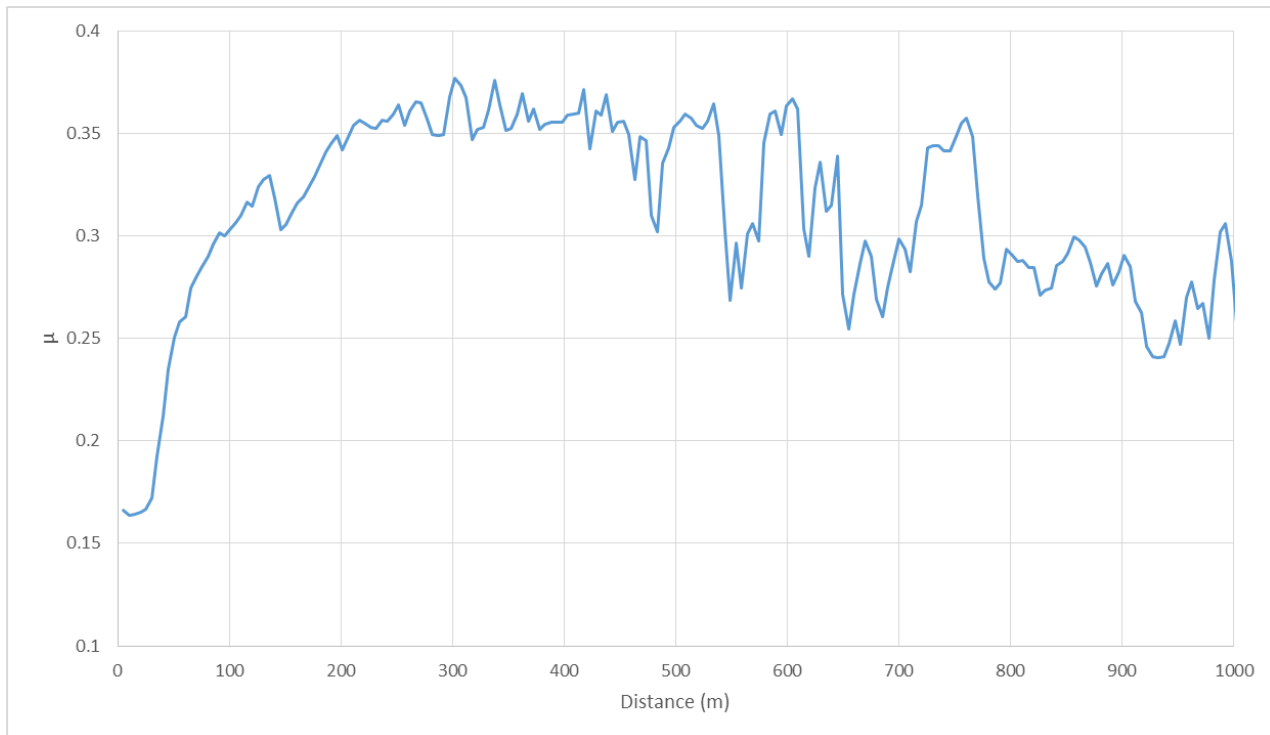


Σχήμα 2: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 50 cm/s, με φορτίο 10N για ανταγωνιστικό υλικό CrNi.

## A. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

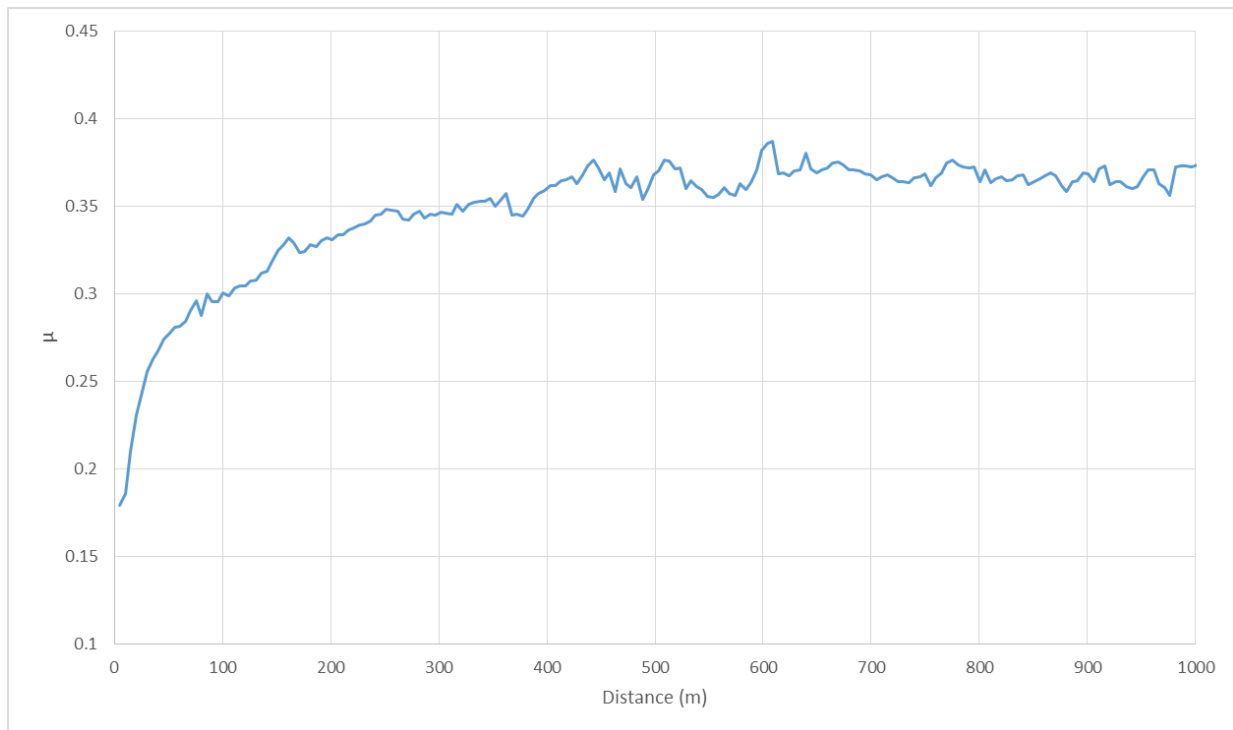


Σχήμα 3: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 50 cm/s, με φορτίο 5N για ανταγωνιστικό υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

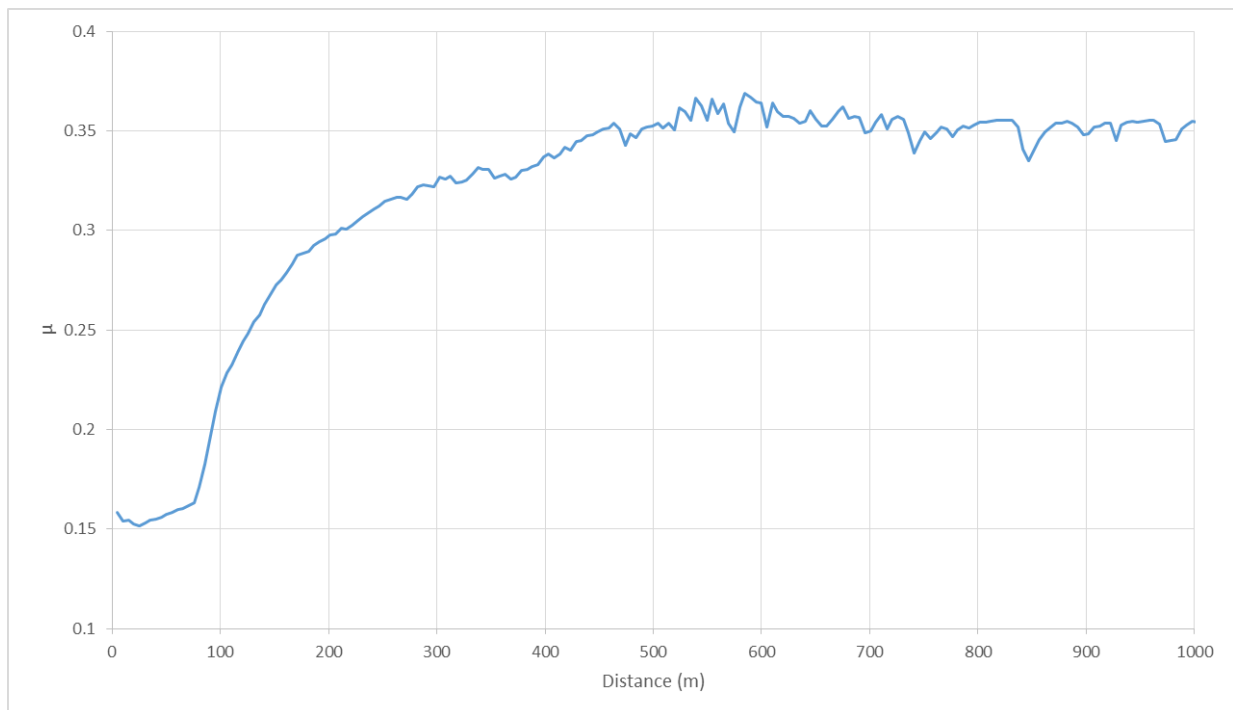


Σχήμα 4: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 50 cm/s, με φορτίο 5N για ανταγωνιστικό υλικό CrNi.

## Α. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

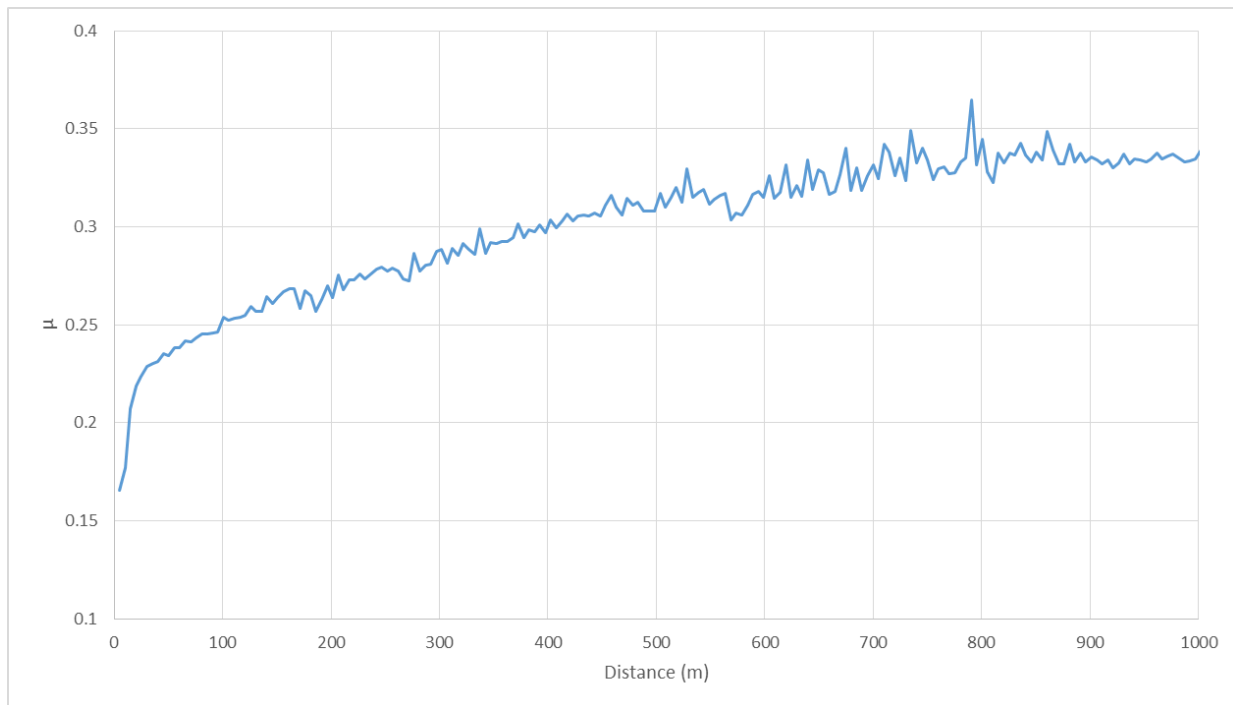


Σχήμα 5: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 50 cm/s, με φορτίο 2N για ανταγωνιστικό υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

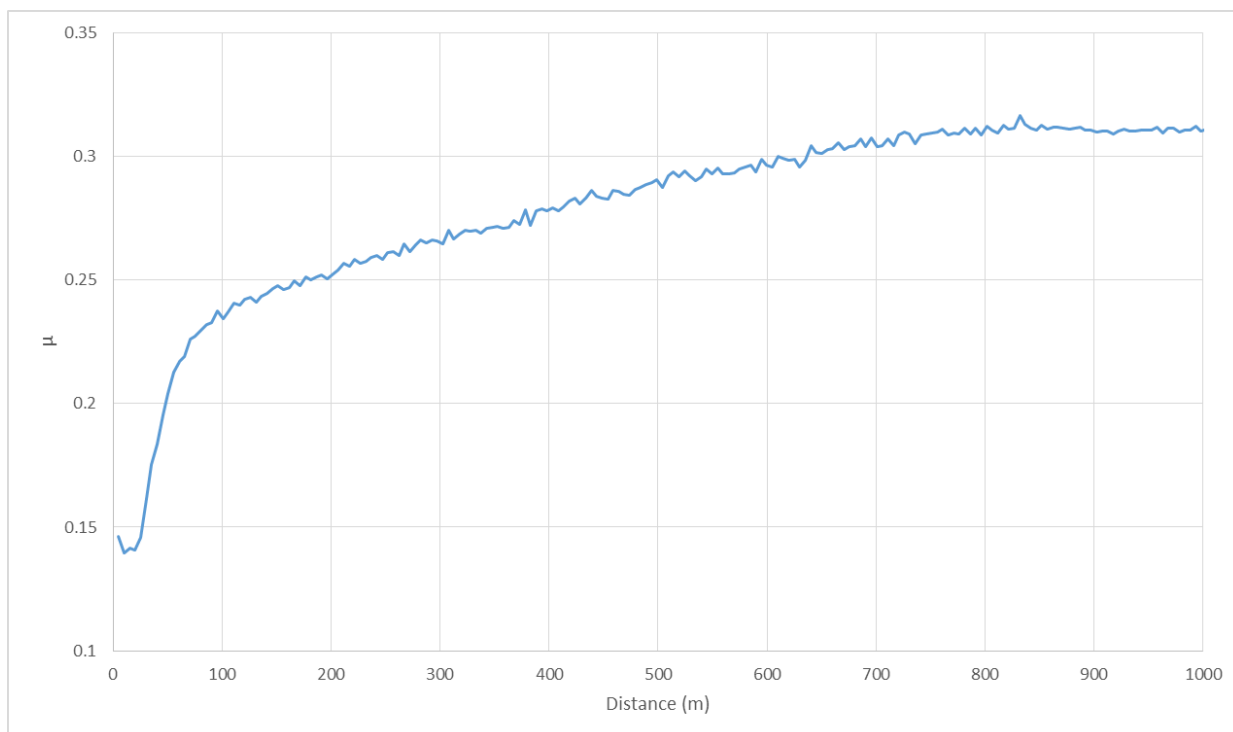


Σχήμα 6: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 50 cm/s, με φορτίο 2N για ανταγωνιστικά υλικά CrNi.

## Α. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

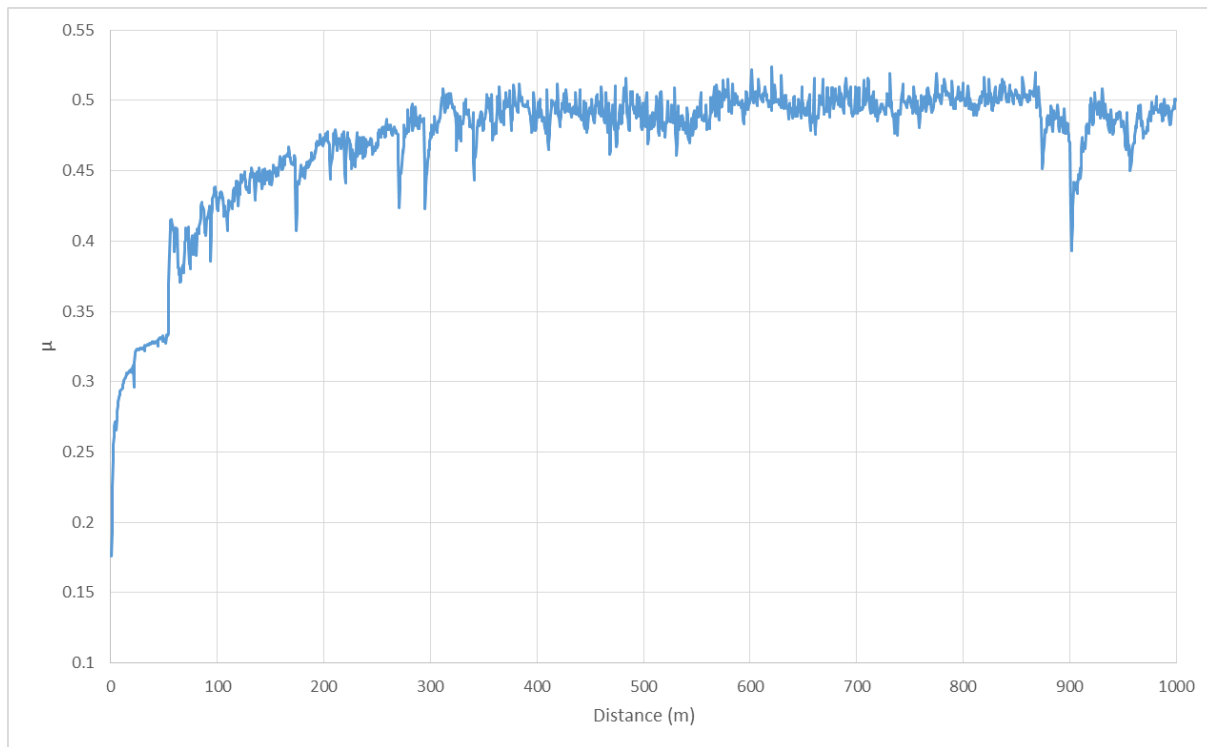


Σχήμα 7: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 50 cm/s, με φορτίο 1N για ανταγωνιστικά υλικά Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

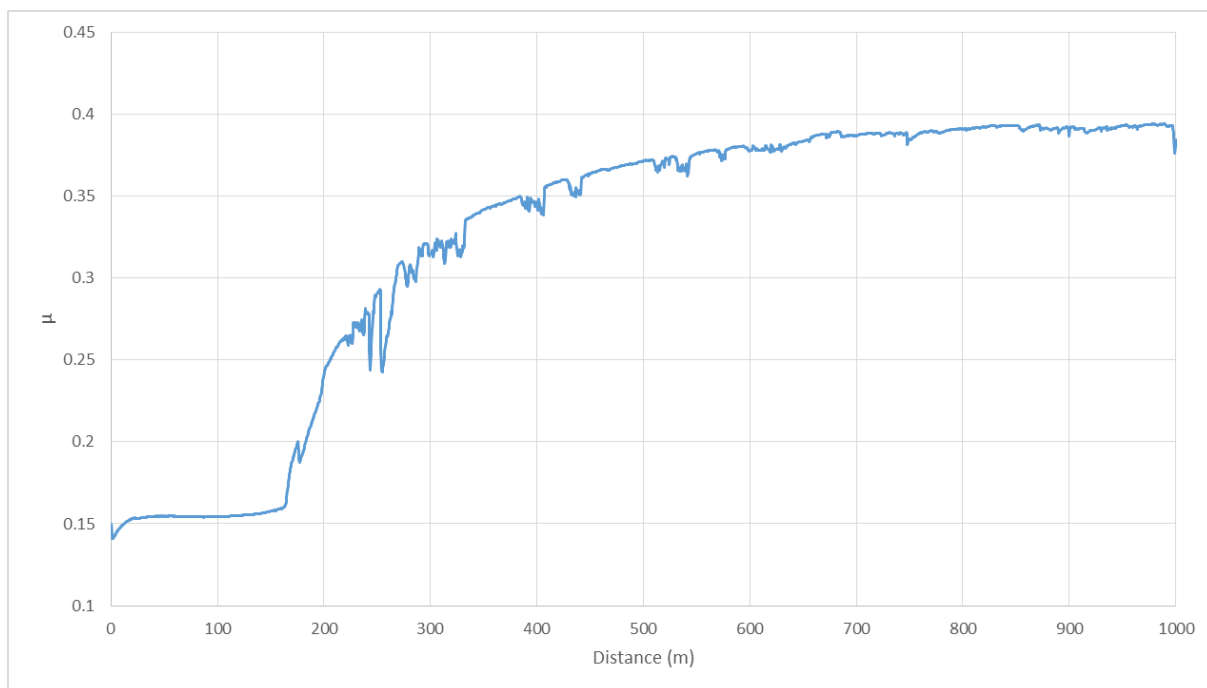


Σχήμα 8: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 50 cm/s, με φορτίο 1N για ανταγωνιστικό υλικό CrNi.

## A. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

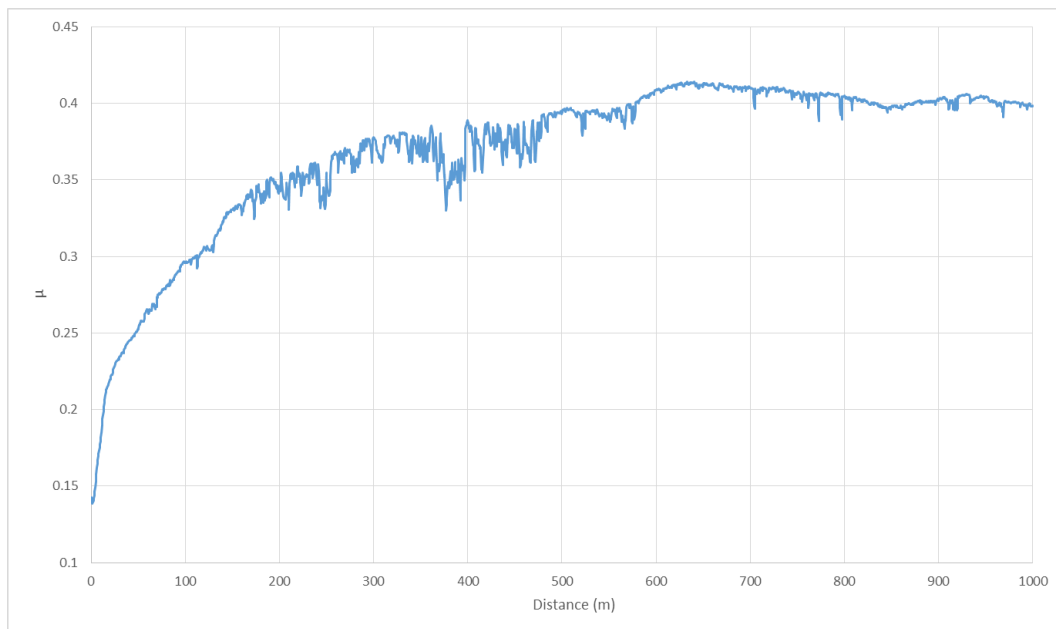


Σχήμα 9: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 5 cm/s, με φορτίο 10N για ανταγωνιστικό υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

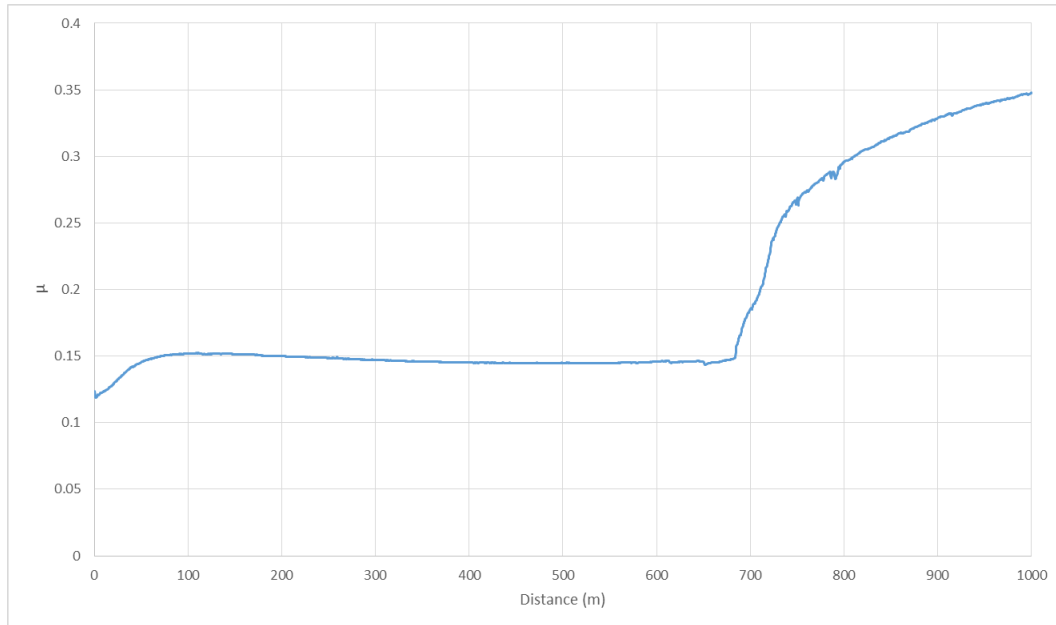


Σχήμα 10: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 5 cm/s, με φορτίο 10N για ανταγωνιστικό υλικό CrNi.

## A. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

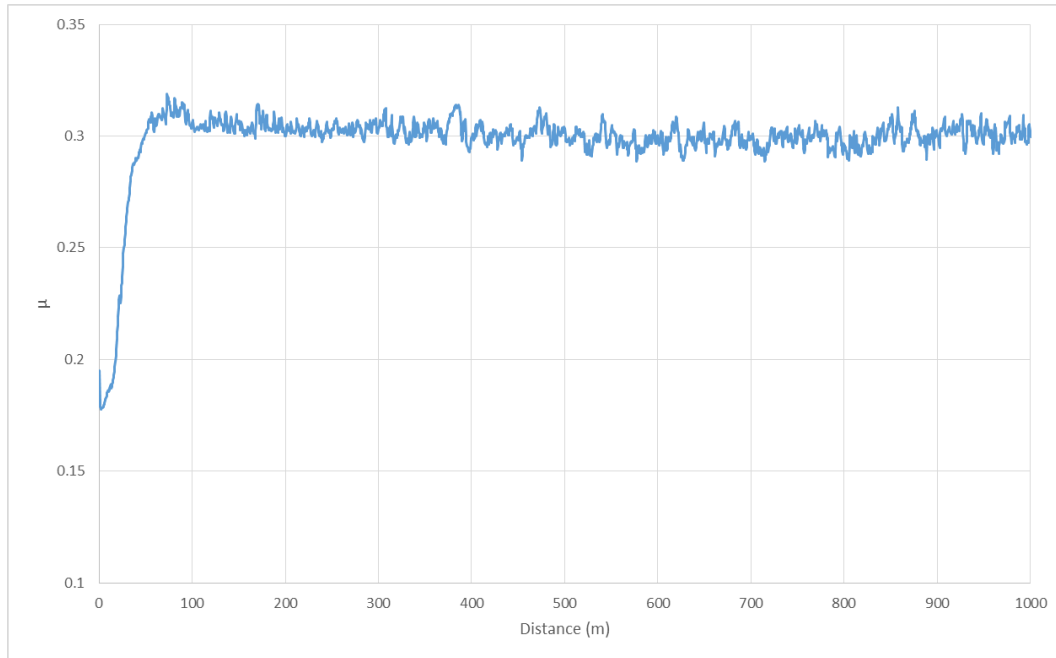


Σχήμα 11: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 5 cm/s, με φορτίο 5N για ανταγωνιστικό υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

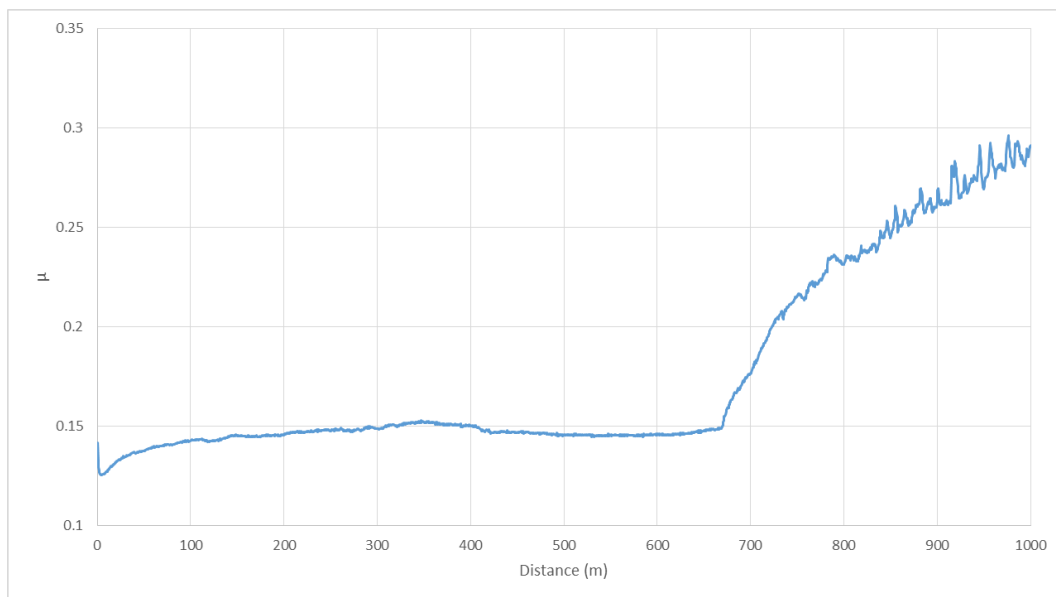


Σχήμα 12: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 5 cm/s, με φορτίο 5N για ανταγωνιστικό υλικό CrNi.

## A. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

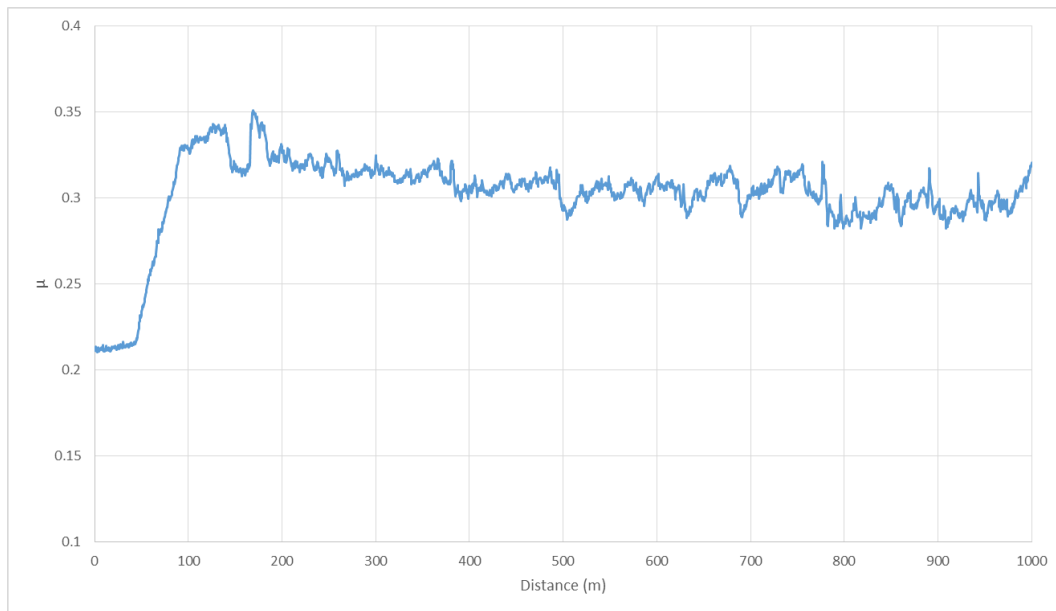


Σχήμα 13: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 5 cm/s, με φορτίο 2N για ανταγωνιστικό υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

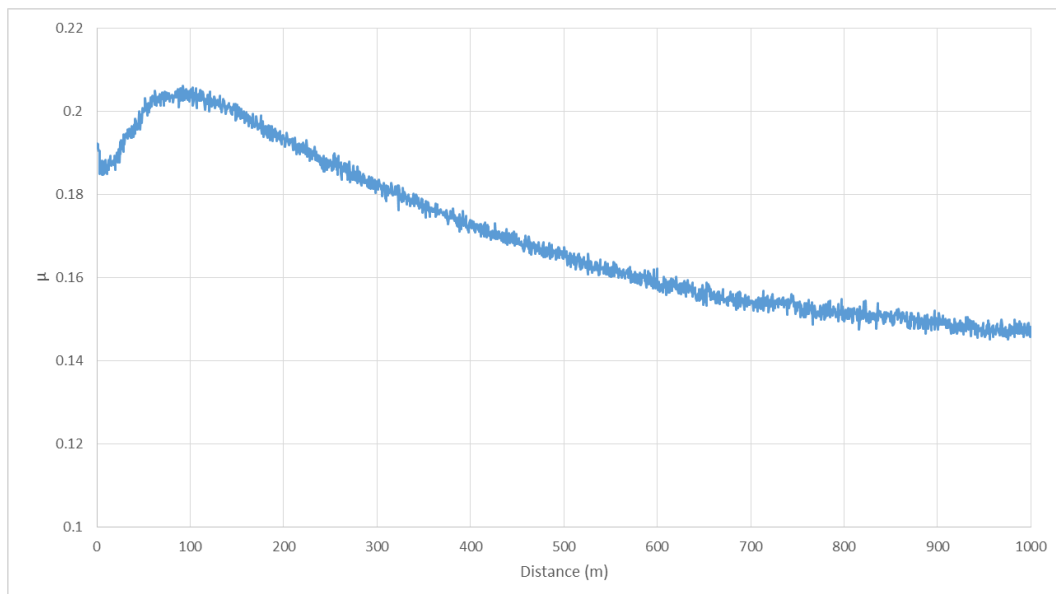


Σχήμα 14: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 5 cm/s, με φορτίο 2N για ανταγωνιστικό υλικό CrNi.

## Α. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ



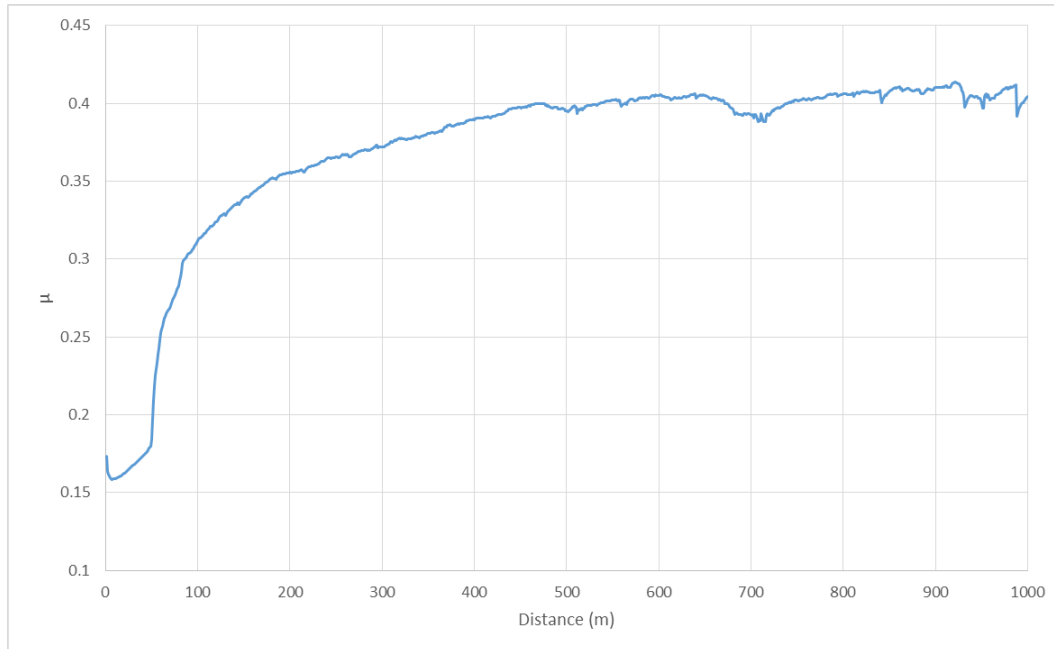
Σχήμα 15: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 5 cm/s, με φορτίο 1N για ανταγωνιστικό υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



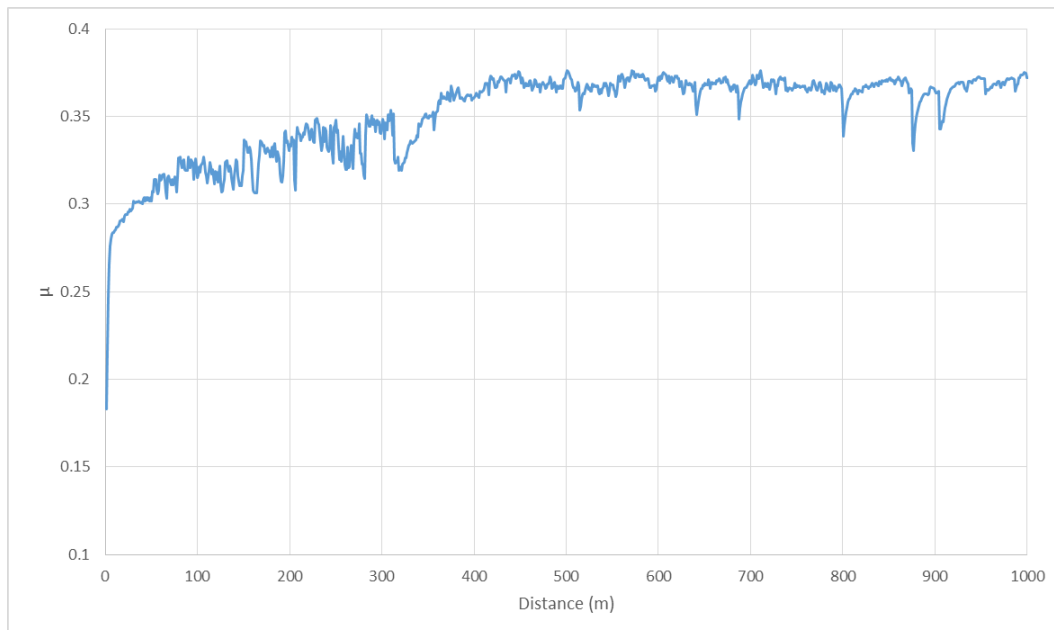
Σχήμα 16 : Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση σε μέτρα με ταχύτητα 5 cm/s, με φορτίο 1N για ανταγωνιστικό υλικό CrNi.



## A. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

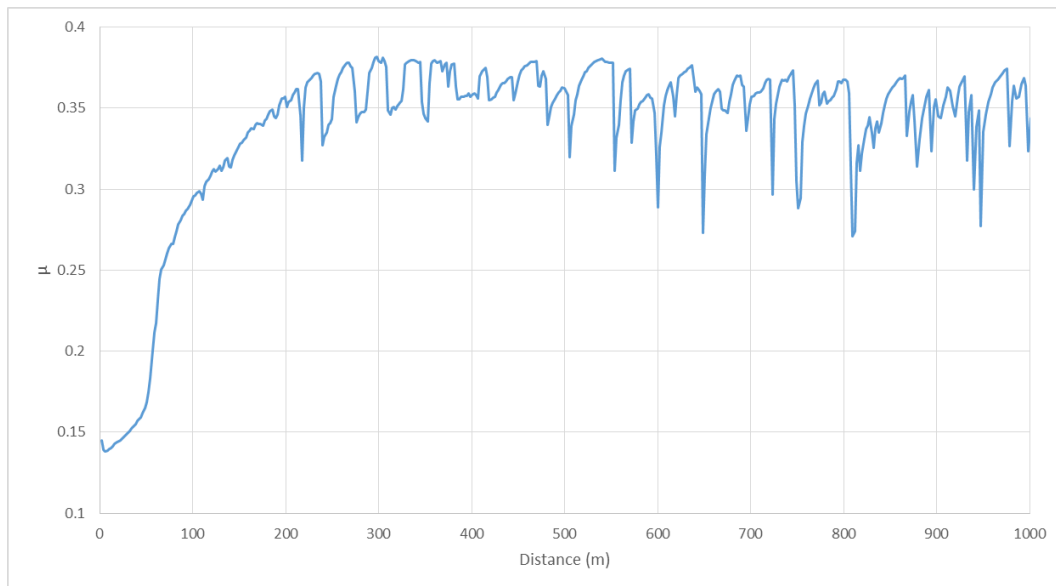


Σχήμα 17: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση με σταθερό φορτίο 5N, για ανταγωνιστικό υλικό  $Al_2O_3$ , σε ακτινική απόσταση  $r=5mm$  και γραμμική ταχύτητα 10cm/s.

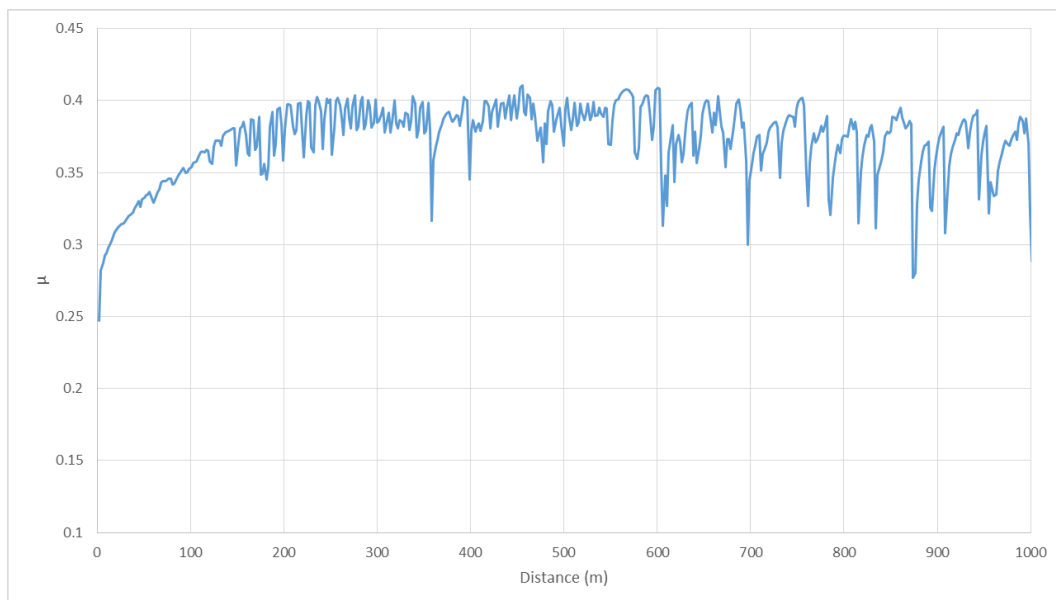


Σχήμα 18: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση με σταθερό φορτίο 5N, για ανταγωνιστικό υλικό CrNi, σε ακτινική απόσταση  $r=5mm$  και γραμμική ταχύτητα 10cm/s.

## A. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

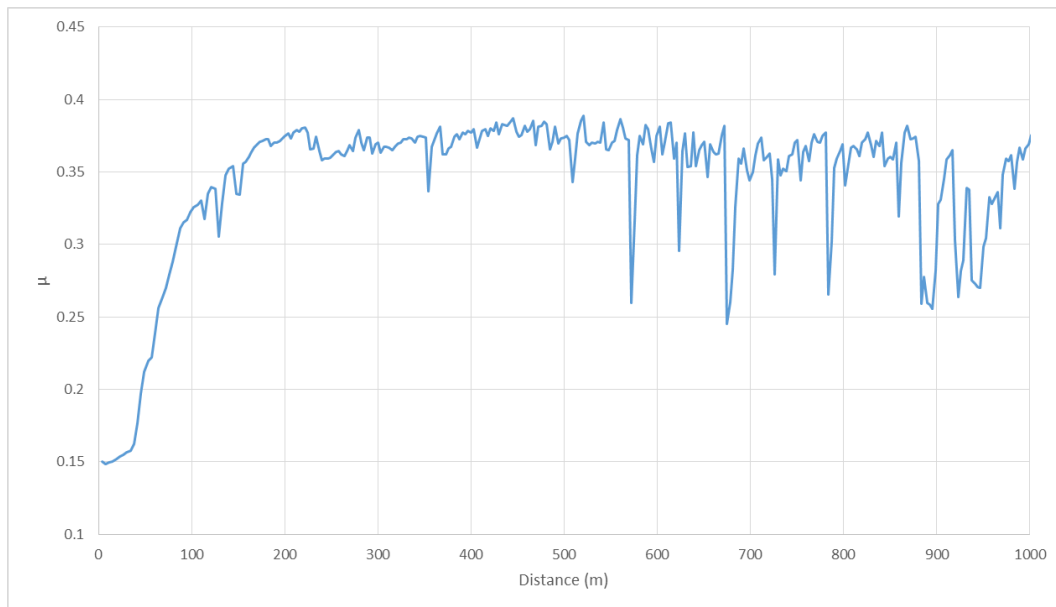


Σχήμα 19: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση με σταθερό φορτίο 5N, για ανταγωνιστικό υλικό Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, σε ακτινική απόσταση r=5mm και γραμμική ταχύτητα 20cm/s.

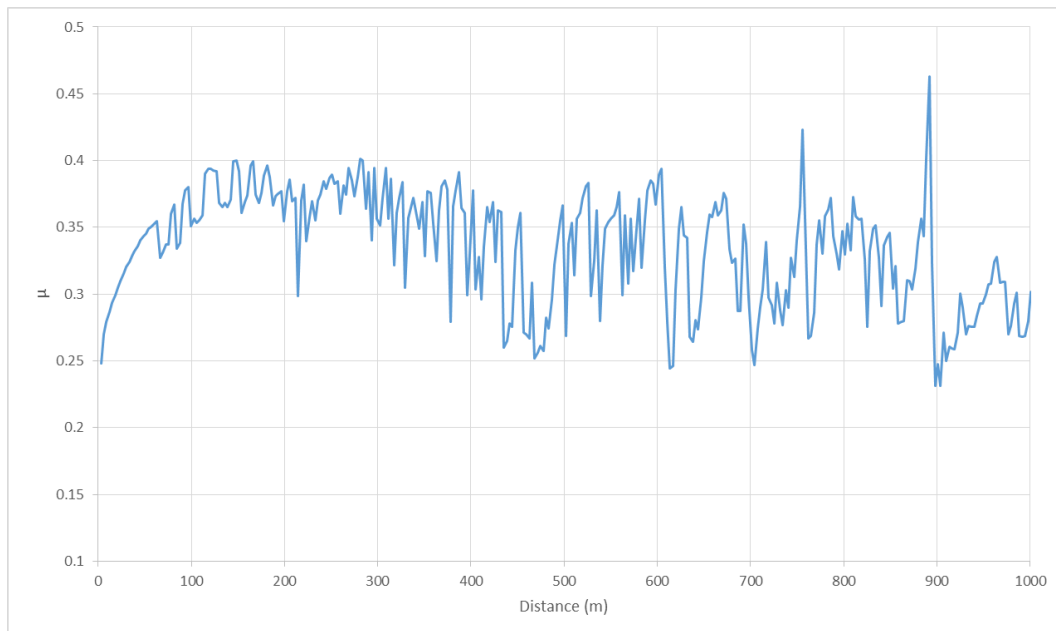


Σχήμα 20: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση με σταθερό φορτίο 5N, για ανταγωνιστικό υλικό CrNi, σε ακτινική απόσταση r=5mm και γραμμική ταχύτητα 20cm/s.

## Α. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ

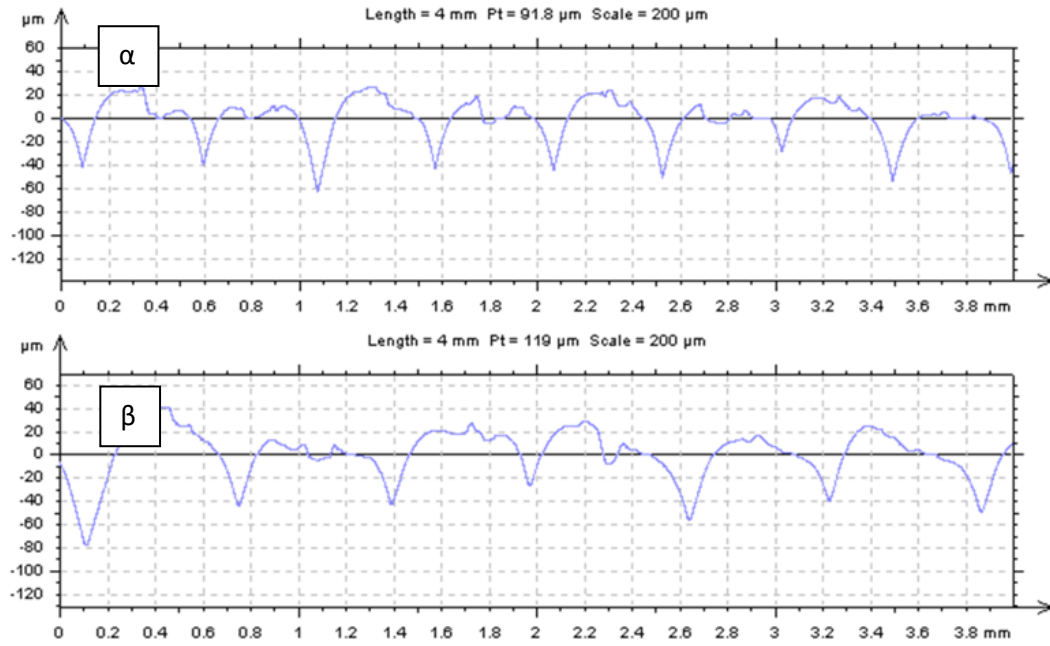


Σχήμα 21: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση με σταθερό φορτίο 5N, για ανταγωνιστικό υλικό  $Al_2O_3$ , σε ακτινική απόσταση  $r=5mm$  και γραμμική ταχύτητα 30cm/s.

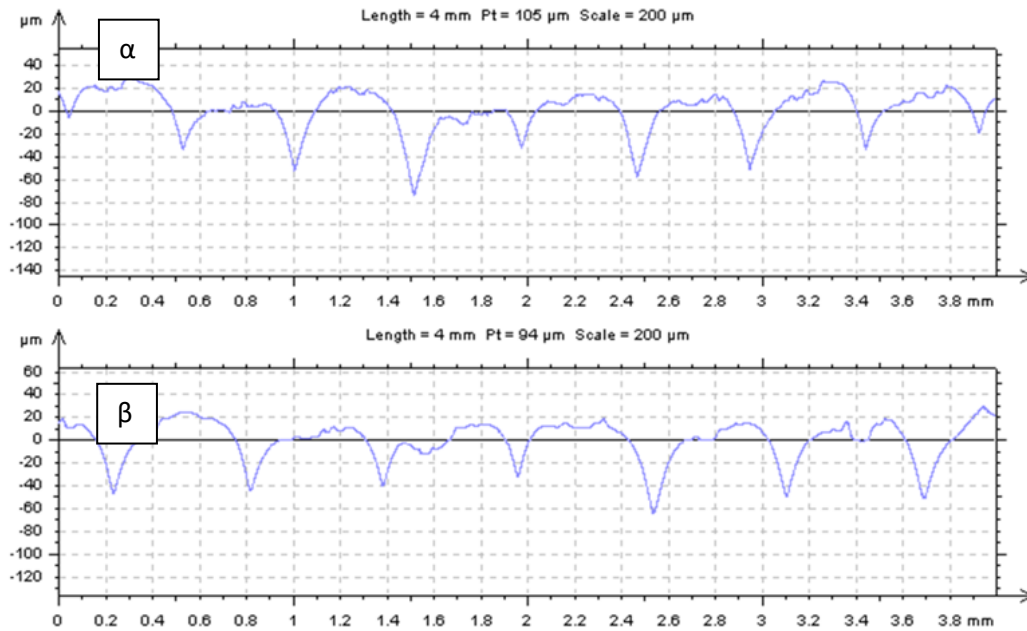


Σχήμα 22: Συντελεστής τριβής σε συνάρτηση με την απόσταση με σταθερό φορτίο 5N, για ανταγωνιστικό υλικό CrNi, σε ακτινική απόσταση  $r=5mm$  και γραμμική ταχύτητα 30cm/s.

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

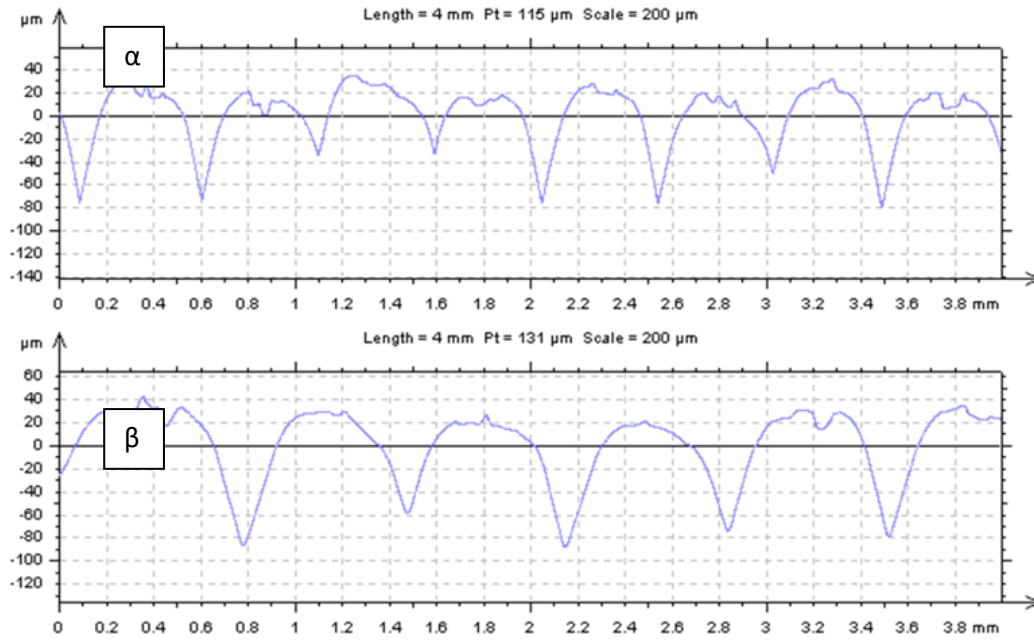


Σχήμα 23: Τραχυμέτρηση Specimen 1 σε γωνία  $\alpha$ ) 90° και  $\beta$ ) 45°.

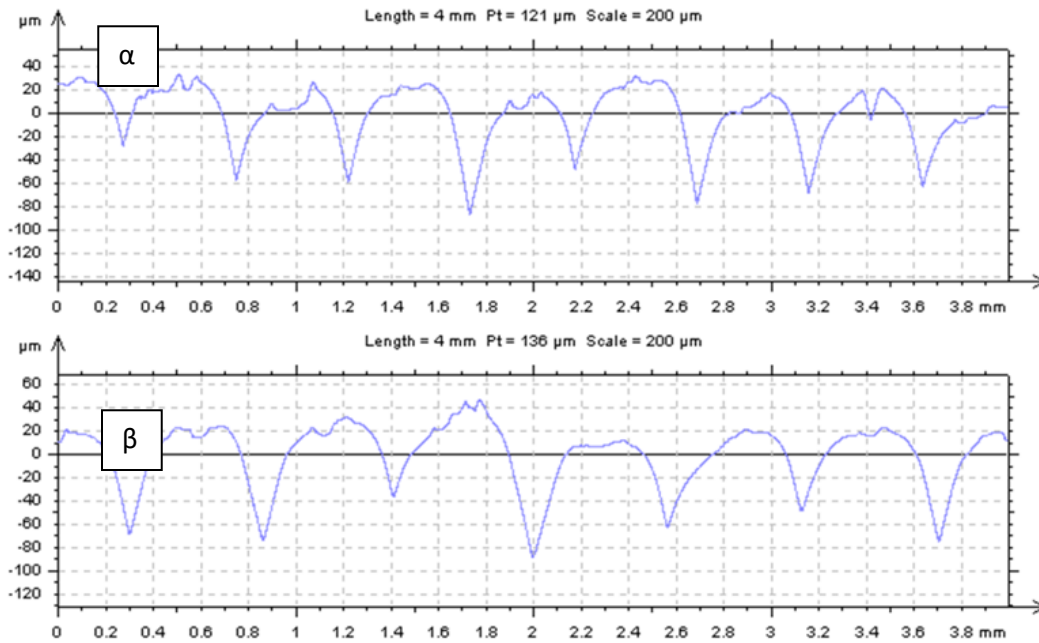


Σχήμα 24: Τραχυμέτρηση Specimen 2 σε γωνία  $\alpha$ ) 90° και  $\beta$ ) 45°.

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

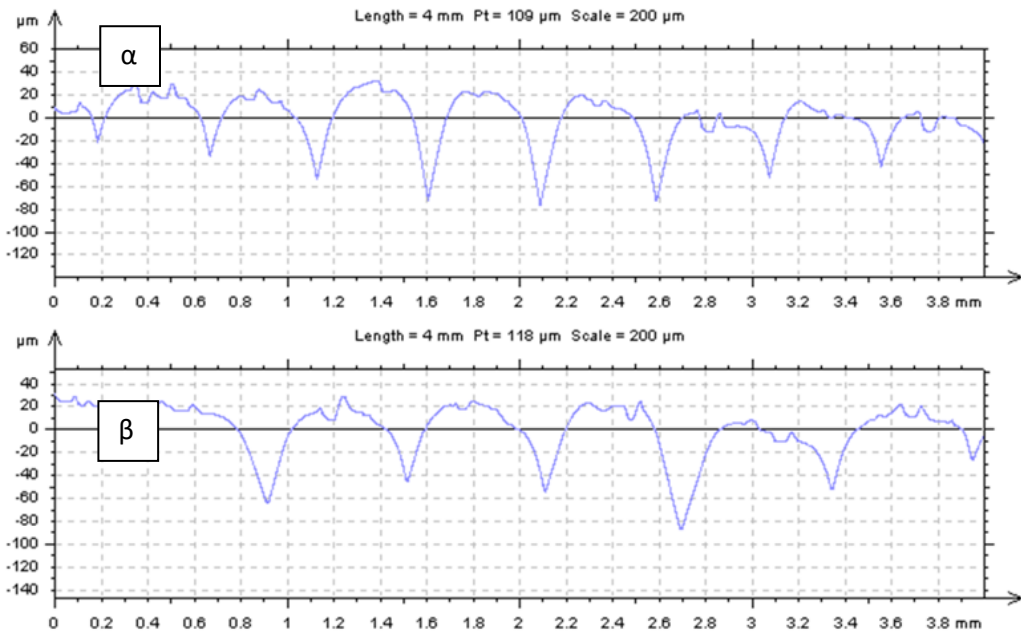


Σχήμα 25: Τραχυμέτρηση Specimen 3 σε γωνία  $\alpha$ )  $90^\circ$  και  $\beta$ )  $45^\circ$ .

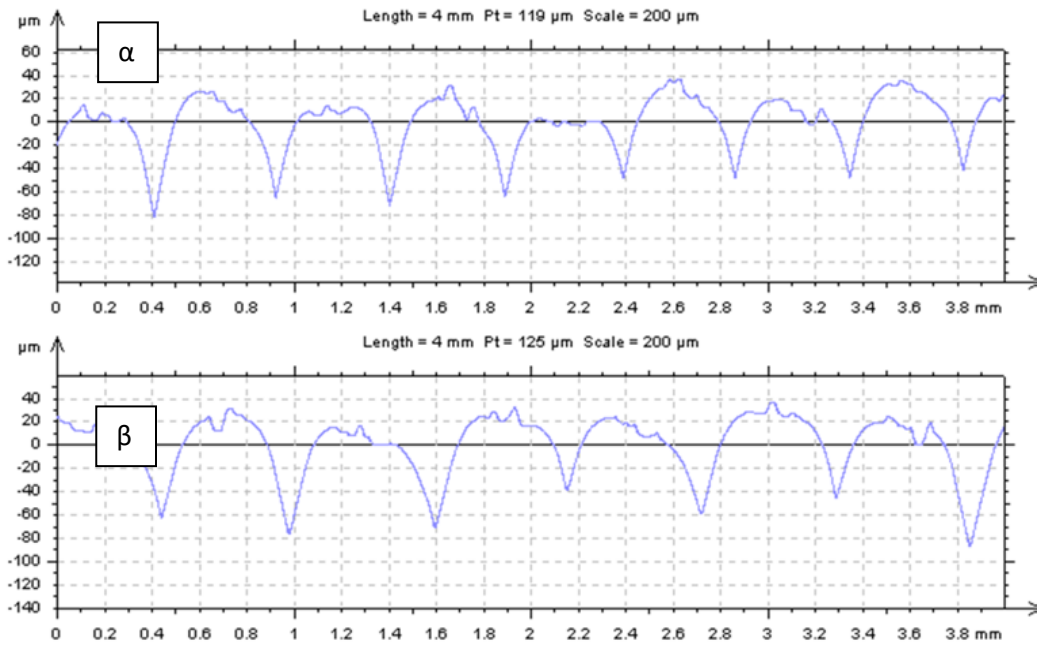


Σχήμα 26: Τραχυμέτρηση Specimen 4 σε γωνία  $\alpha$ )  $90^\circ$  και  $\beta$ )  $45^\circ$ .

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

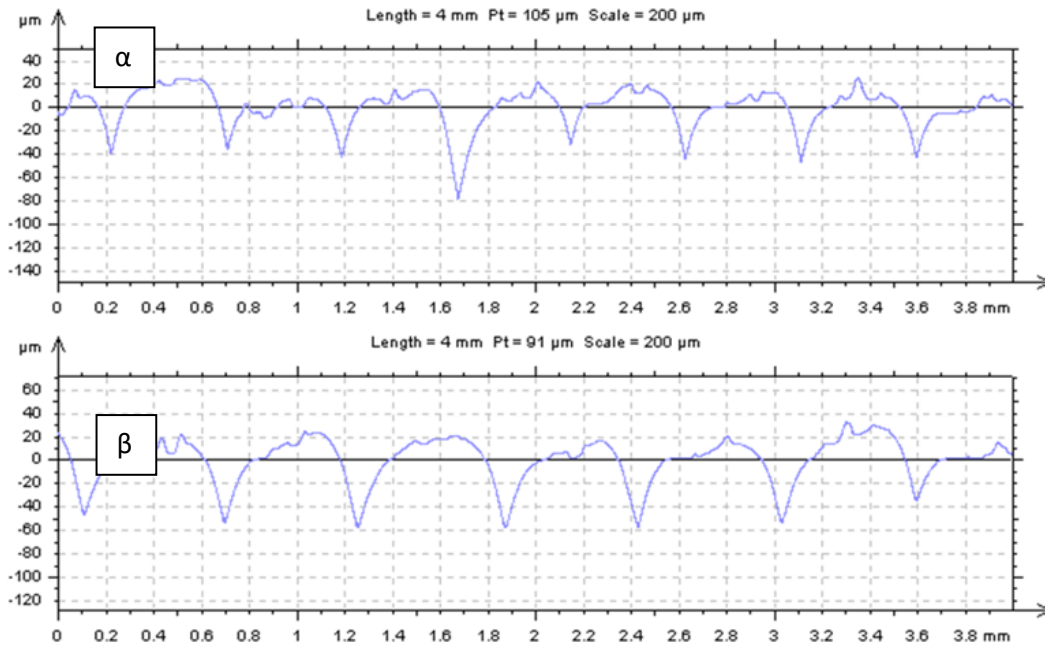


Σχήμα 27: Τραχυμέτρηση Specimen 5 σε γωνία  $\alpha$ )  $90^\circ$  και  $\beta$ )  $45^\circ$ .

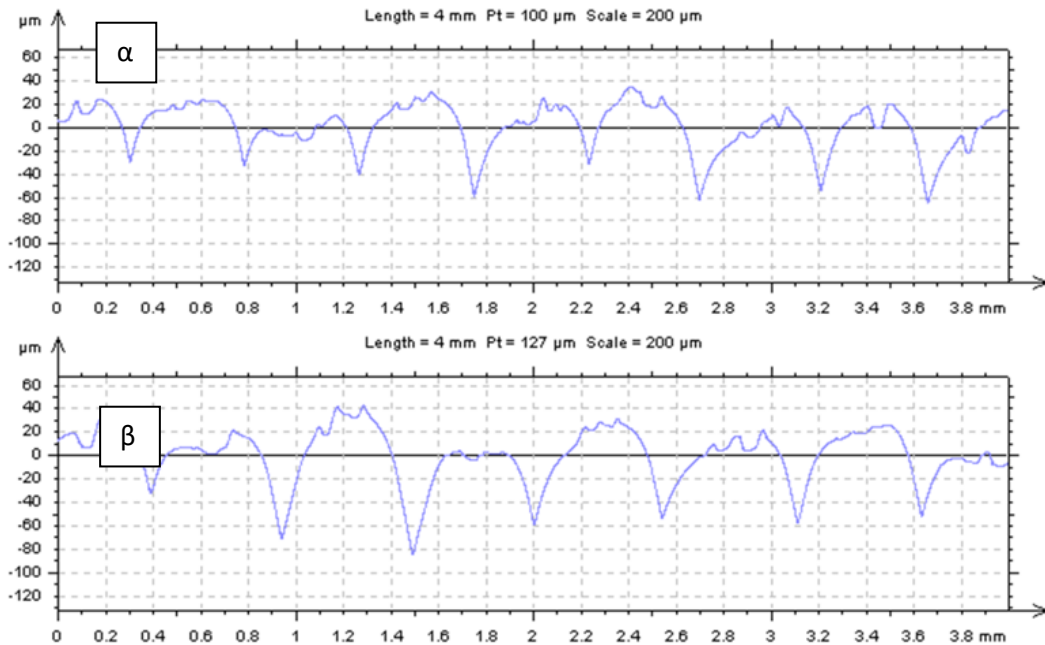


Σχήμα 28: Τραχυμέτρηση Specimen 6 σε γωνία  $\alpha$ )  $90^\circ$  και  $\beta$ )  $45^\circ$ .

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

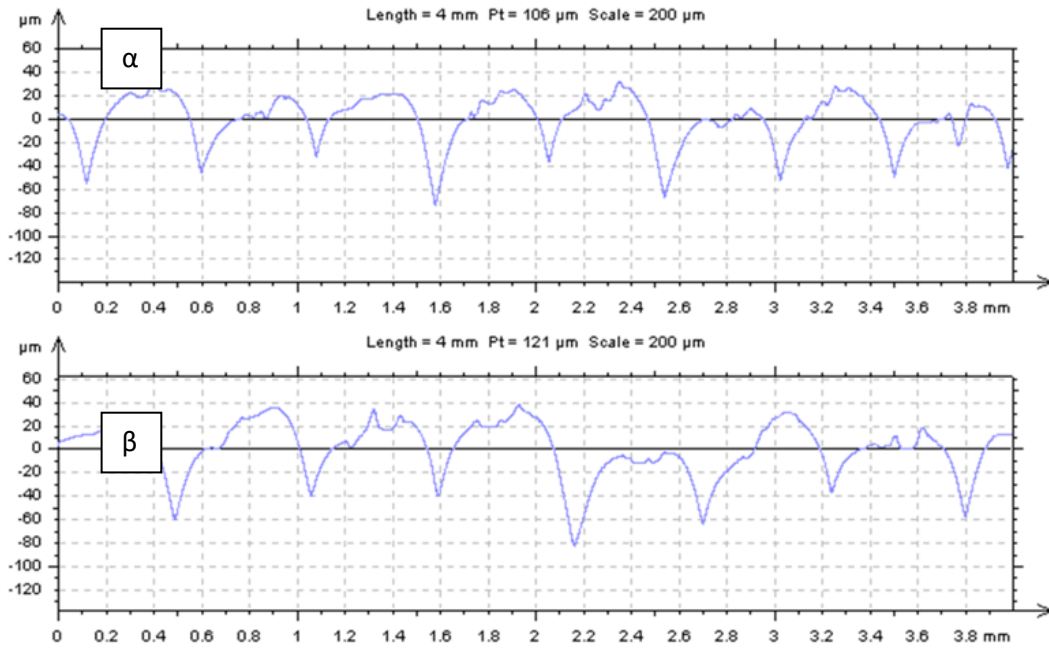


Σχήμα 29: Τραχυμέτρηση Specimen 7 σε γωνία  $\alpha) 90^\circ$  και  $\beta) 45^\circ$ .

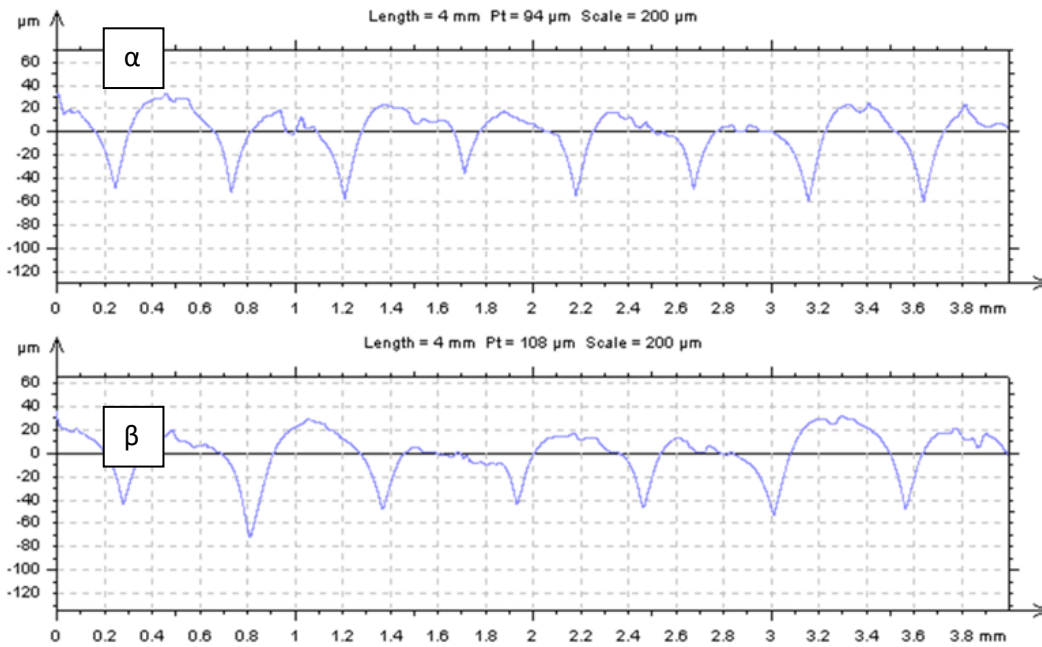


Σχήμα 30: Τραχυμέτρηση Specimen 8 σε γωνία  $\alpha) 90^\circ$  και  $\beta) 45^\circ$ .

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



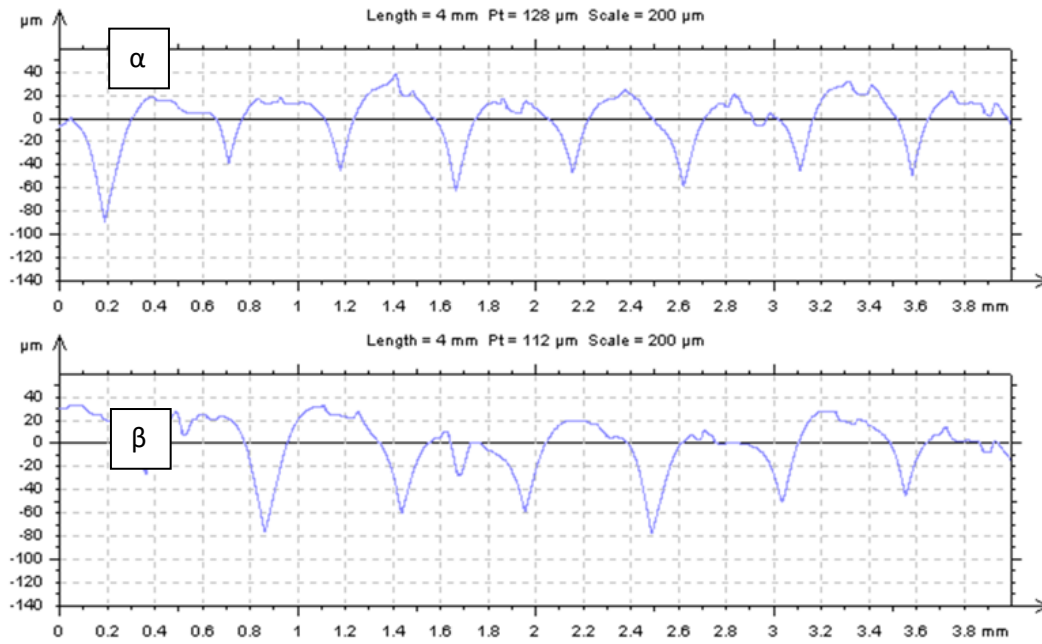
Σχήμα 31: Τραχυμέτρηση Specimen 9 σε γωνία  $\alpha) 90^\circ$  και  $\beta) 45^\circ$ .



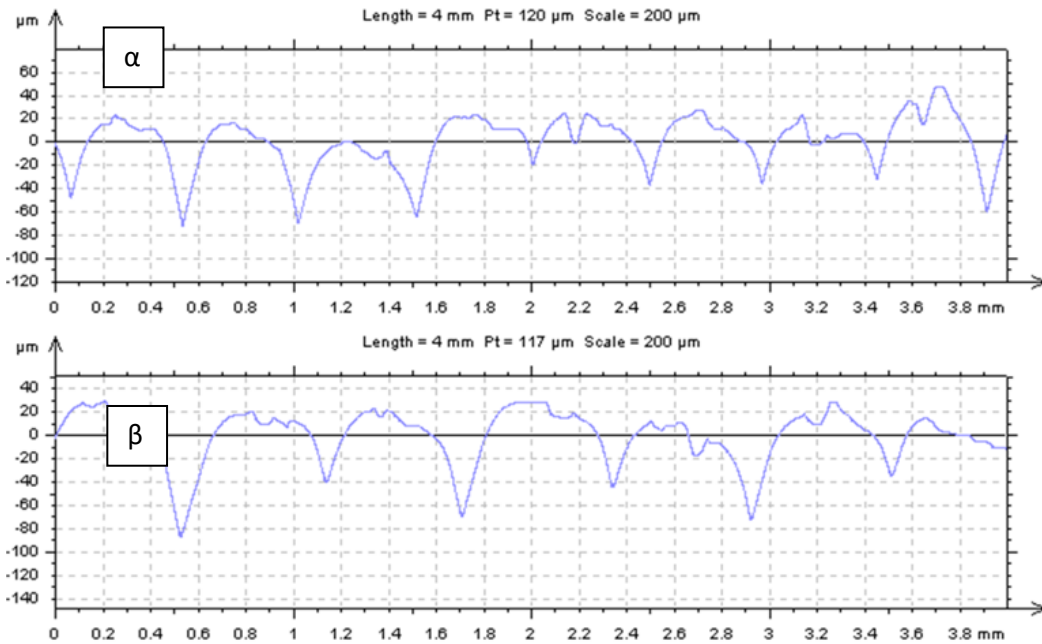
Σχήμα 32: Τραχυμέτρηση Specimen 10 σε γωνία  $\alpha) 90^\circ$  και  $\beta) 45^\circ$ .



## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

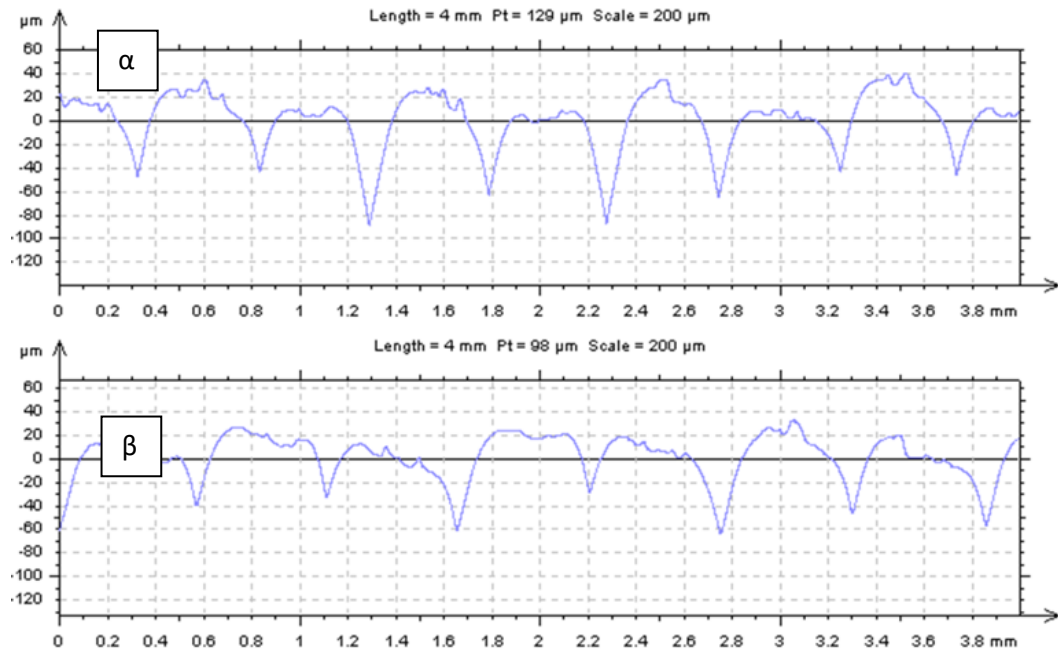


Σχήμα 33: Τραχυμέτρηση Specimen 11 σε γωνία  $\alpha$ )90° και  $\beta$ )45°.

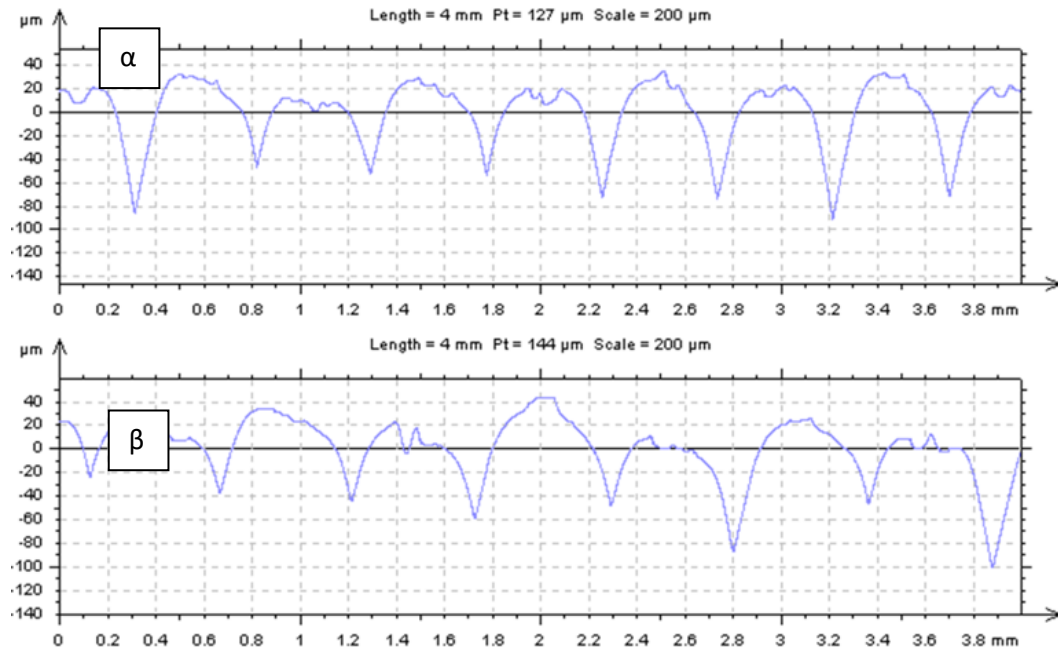


Σχήμα 34: Τραχυμέτρηση Specimen 12 σε γωνία  $\alpha$ )90° και  $\beta$ )45°.

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

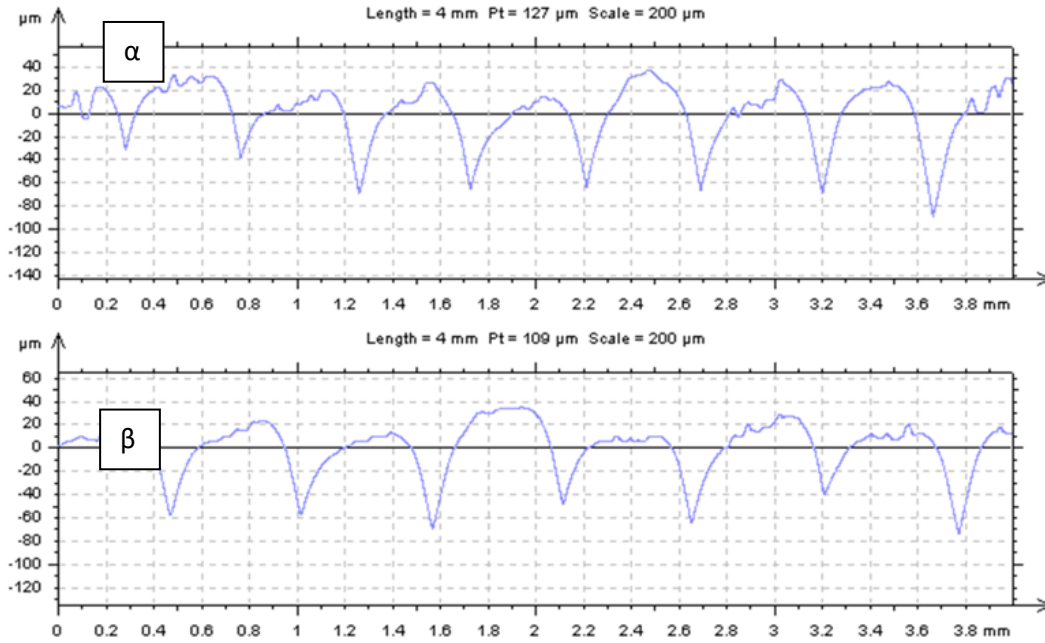


Σχήμα 35: Τραχυμέτρηση Specimen 13 σε γωνία  $\alpha$ ) 90° και  $\beta$ ) 45°.

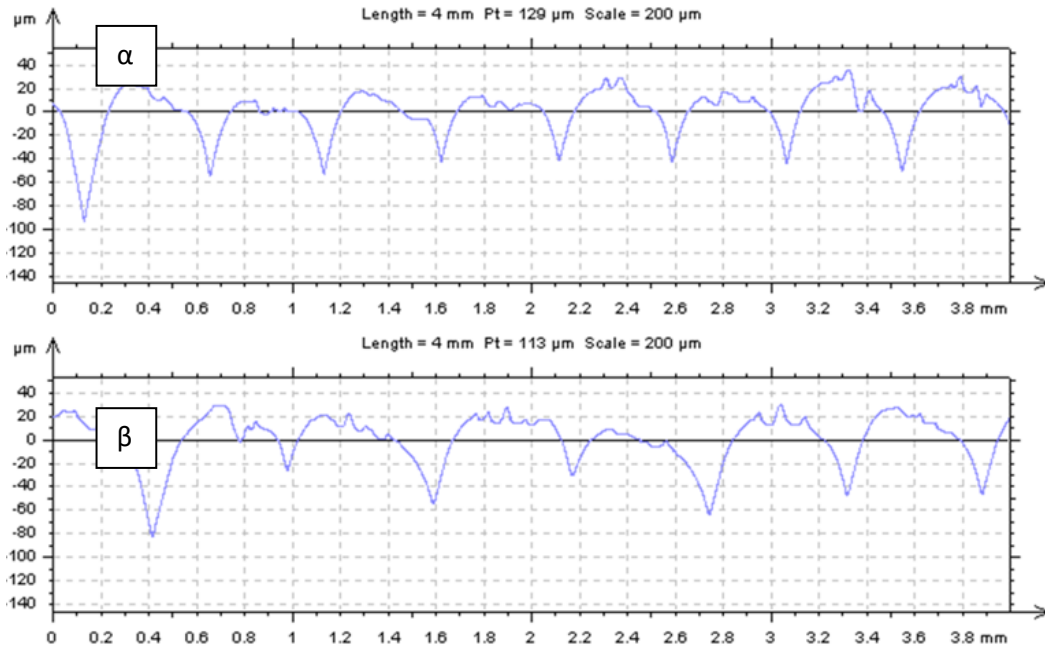


Σχήμα 36: Τραχυμέτρηση Specimen 14 σε γωνία  $\alpha$ ) 90° και  $\beta$ ) 45°.

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ

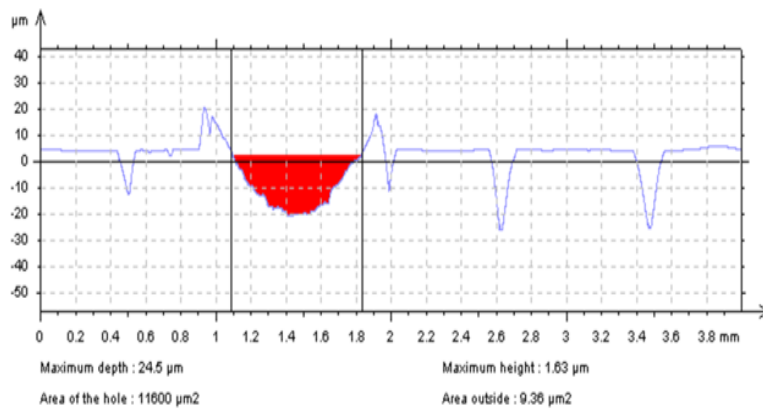
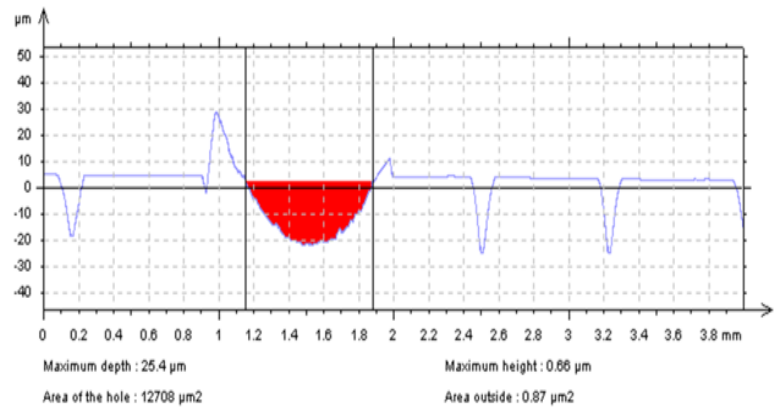
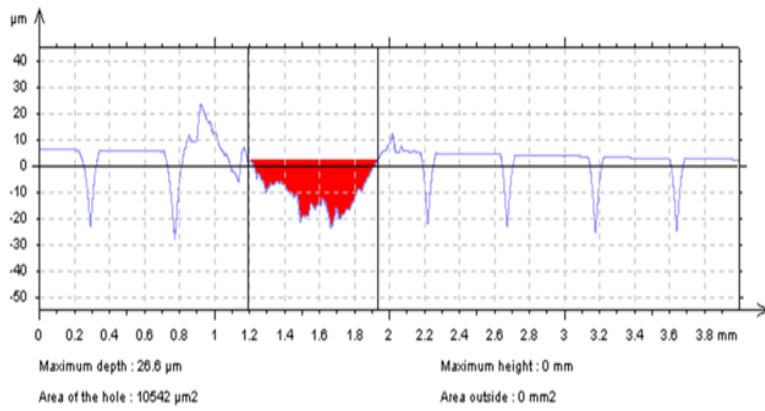
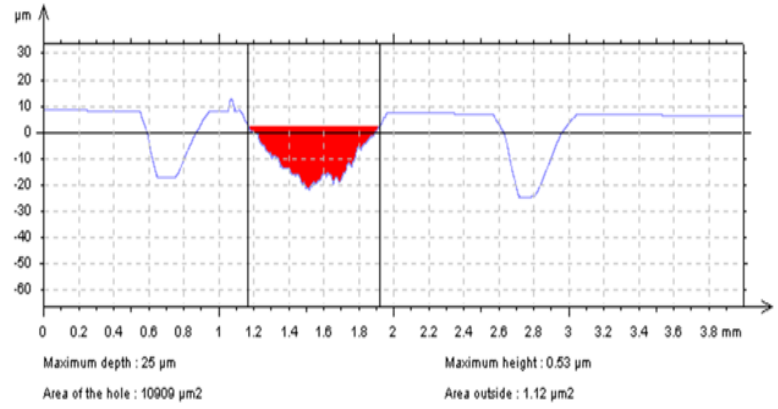
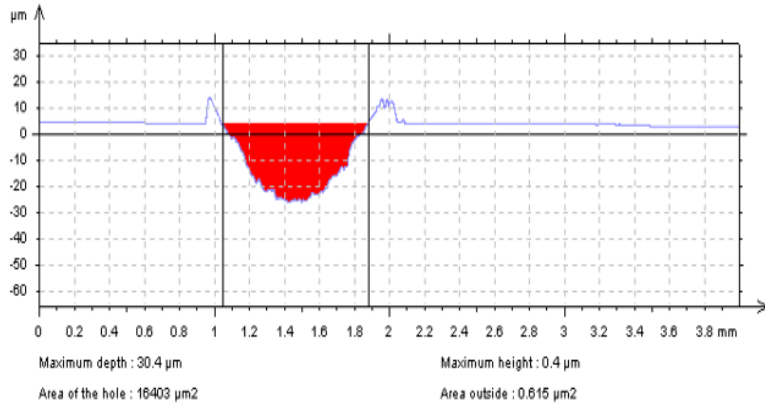


Σχήμα 37: Τραχυμέτρηση Specimen 15 σε γωνία  $\alpha) 90^\circ$  και  $\beta) 45^\circ$ .



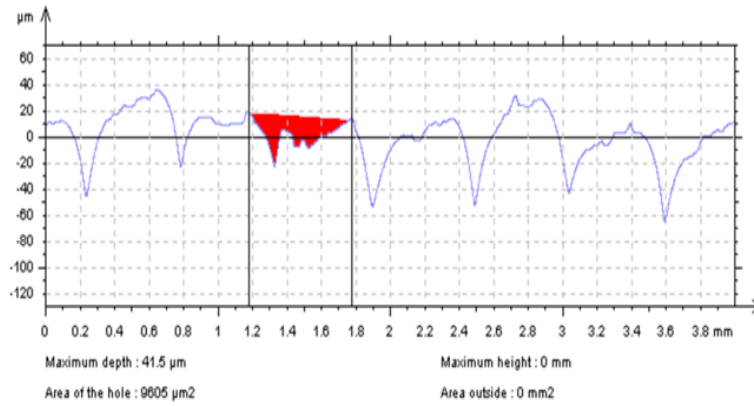
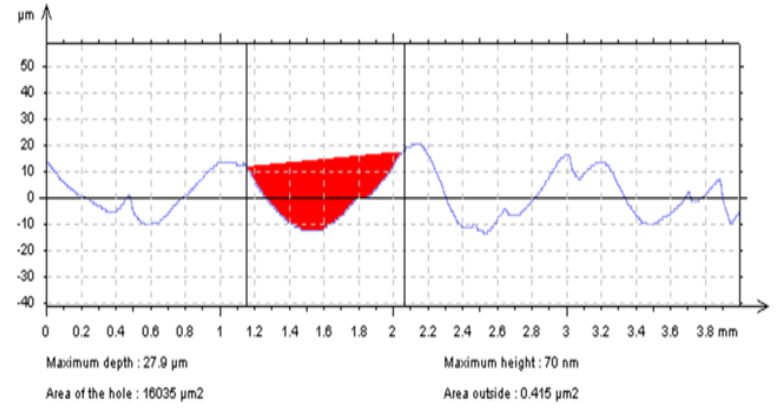
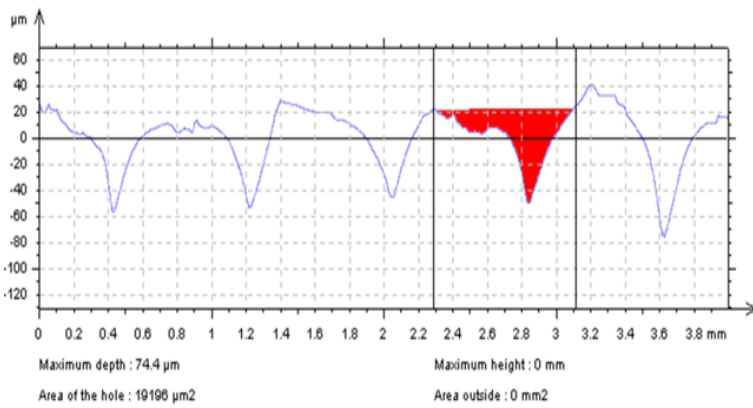
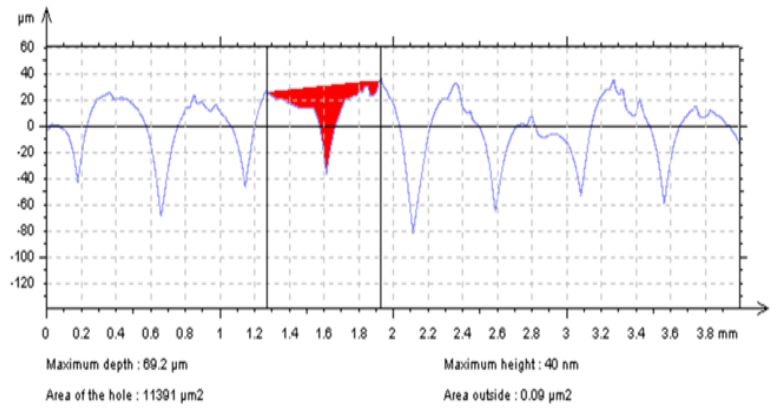
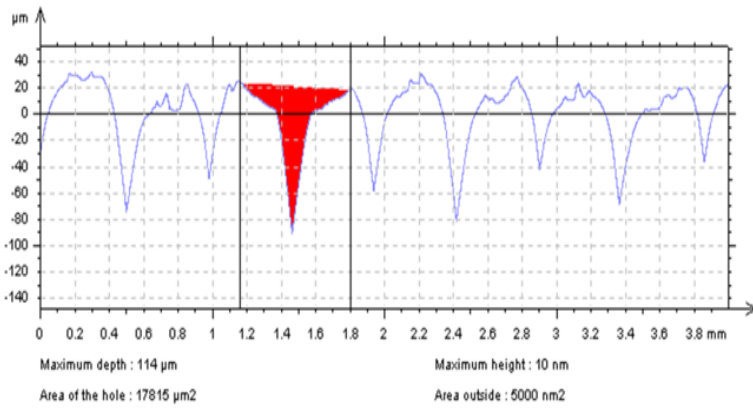
Σχήμα 38: Τραχυμέτρηση Specimen 16 σε γωνία  $\alpha) 90^\circ$  και  $\beta) 45^\circ$ .

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



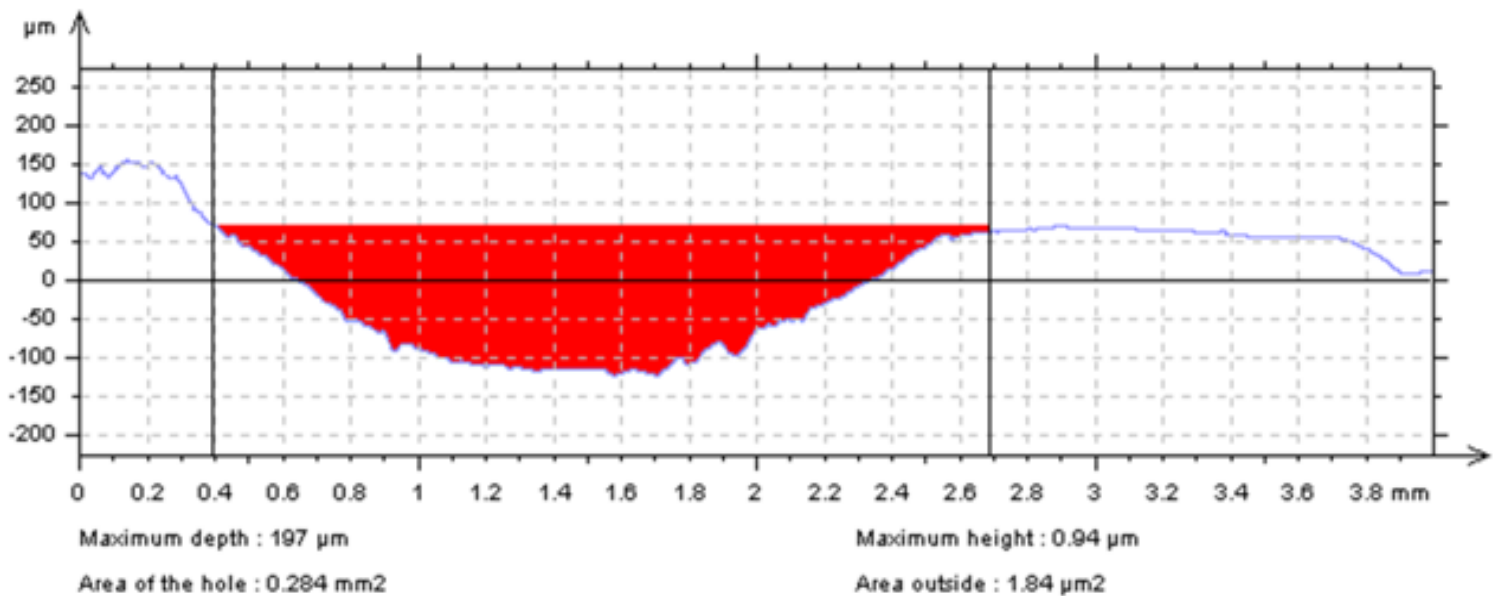
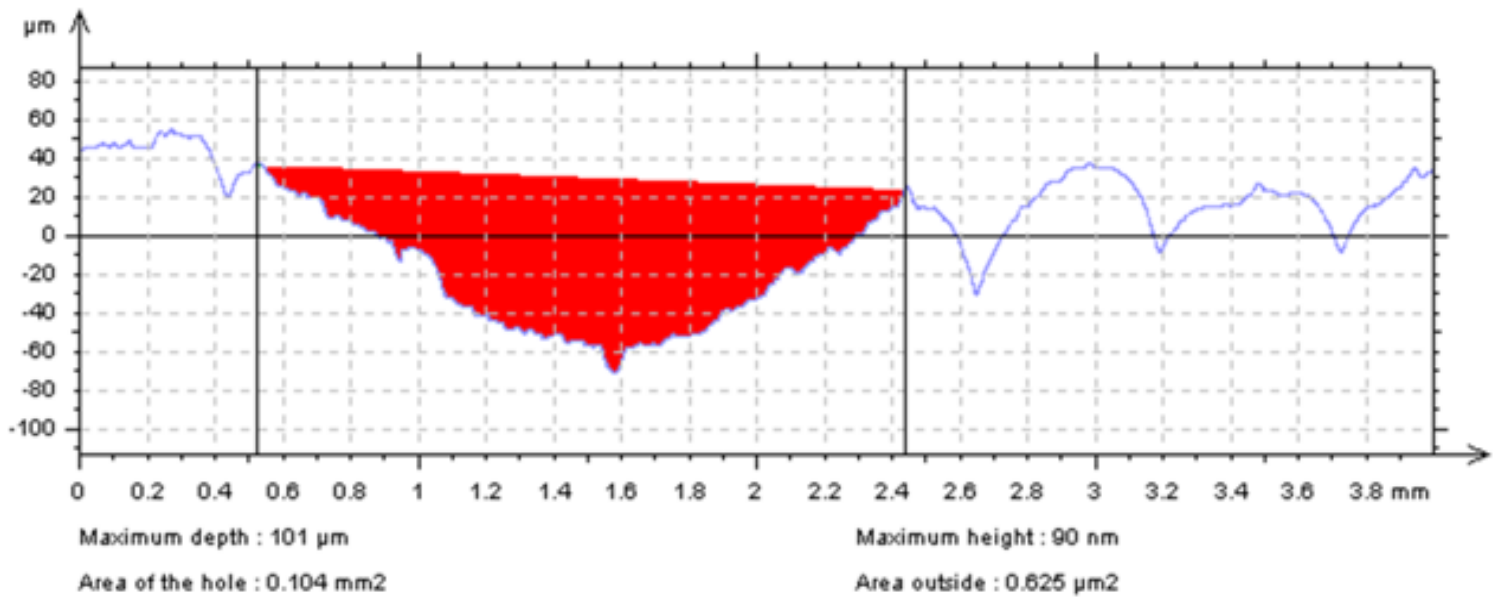
Σχήμα 39: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 2.

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



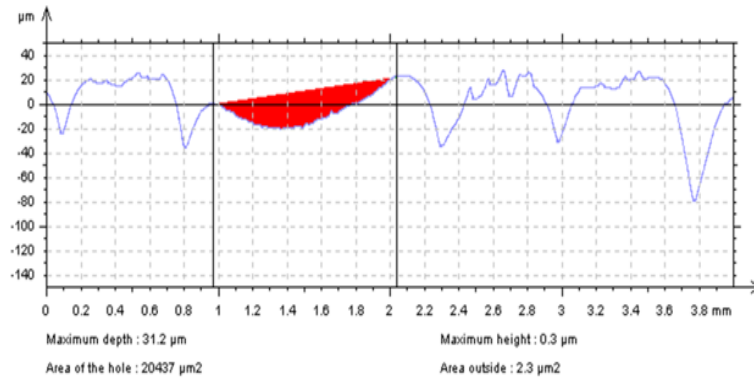
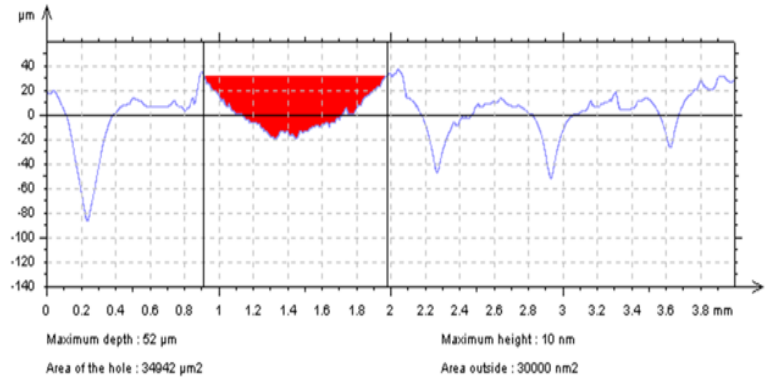
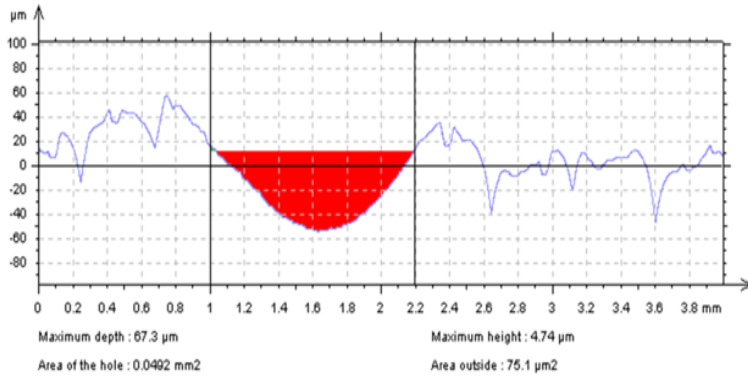
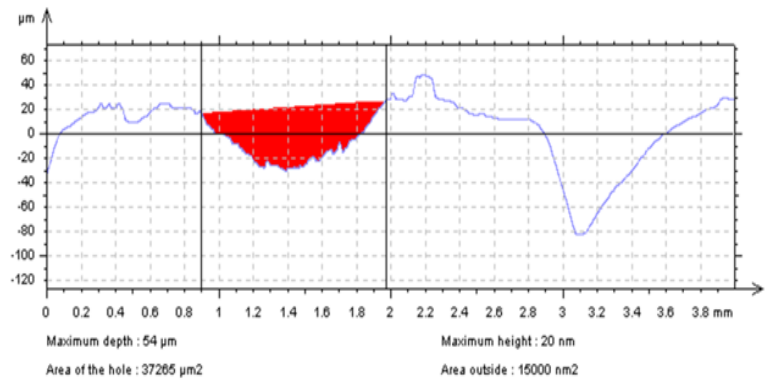
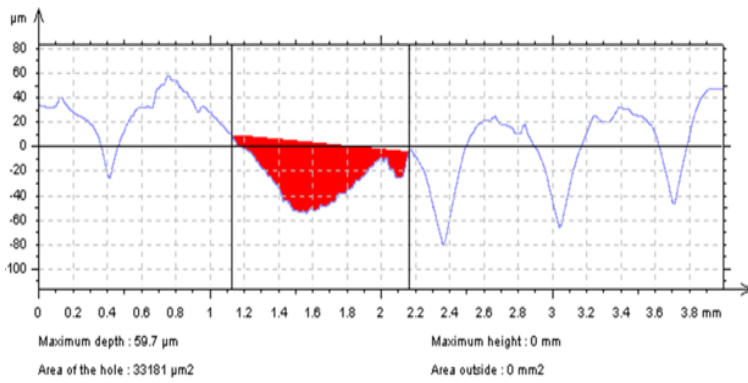
Σχήμα 40: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 4.

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



Σχήμα 41: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 5.

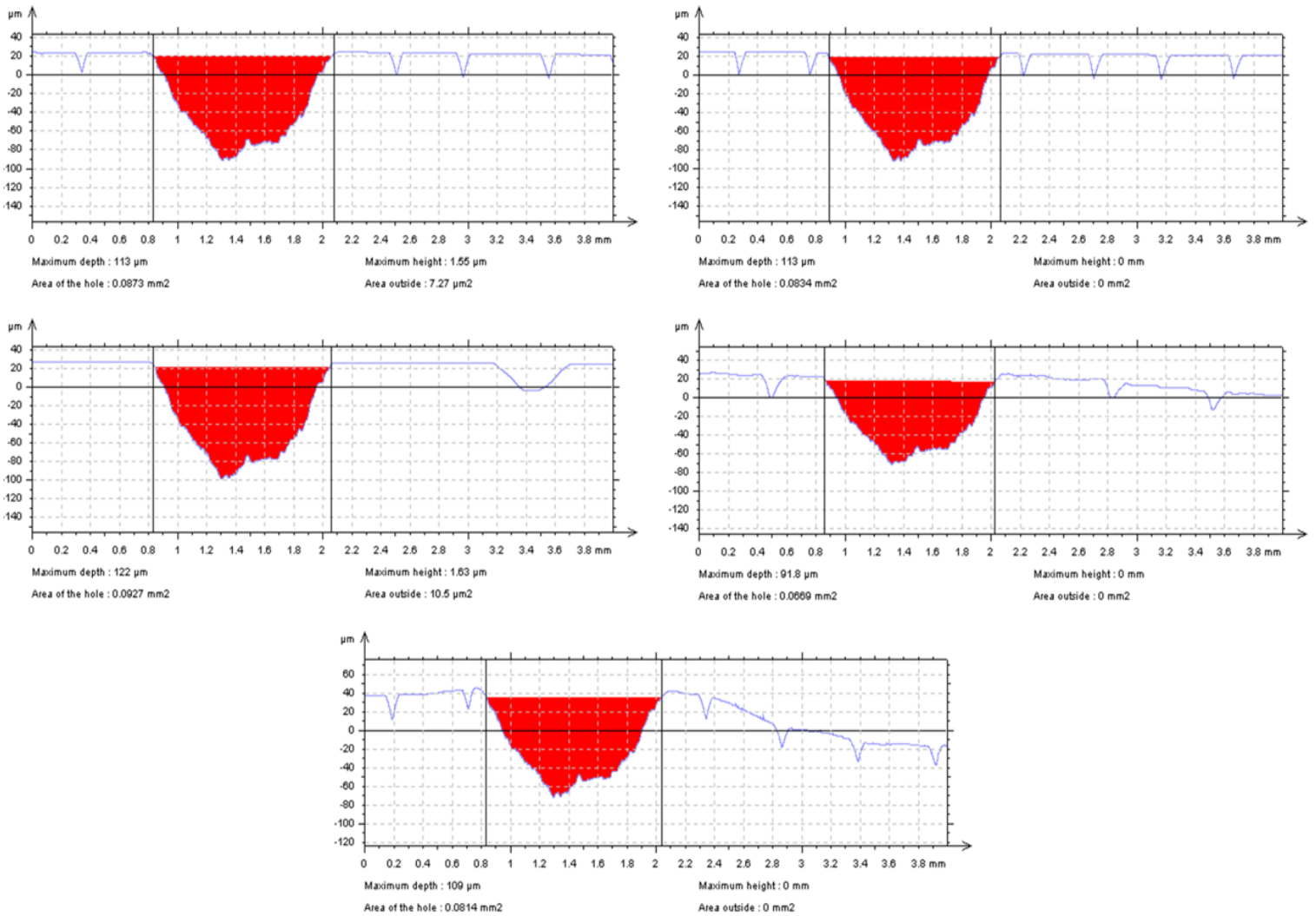
## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



Σχήμα 42: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen

6.

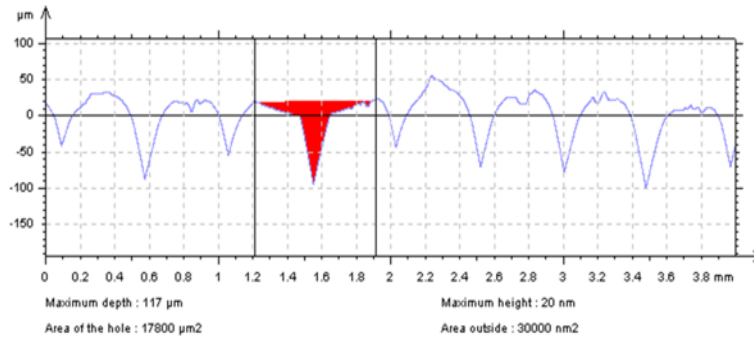
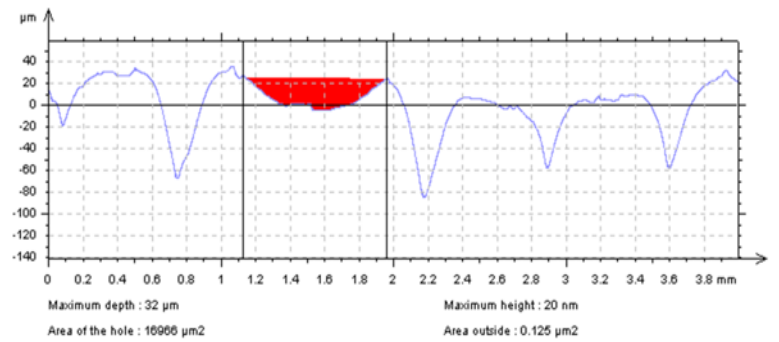
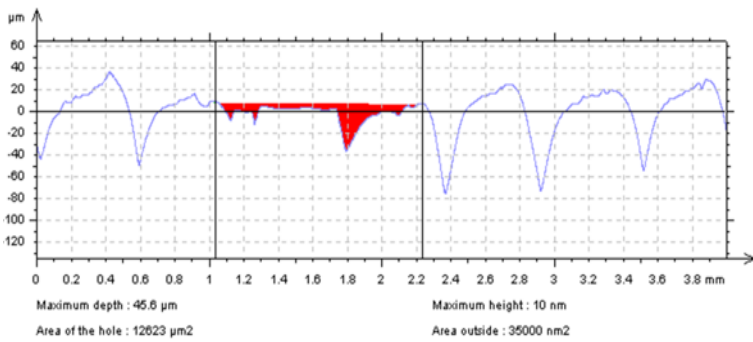
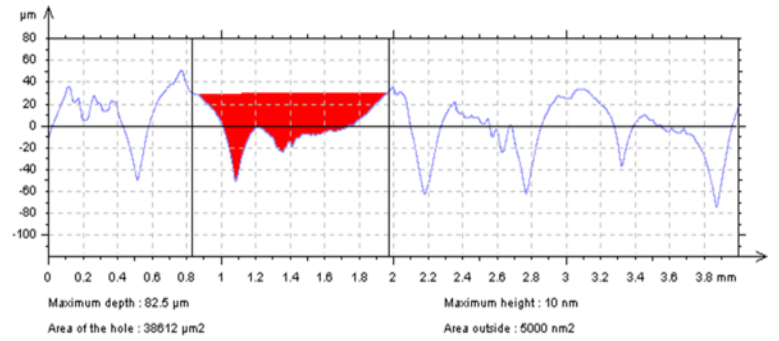
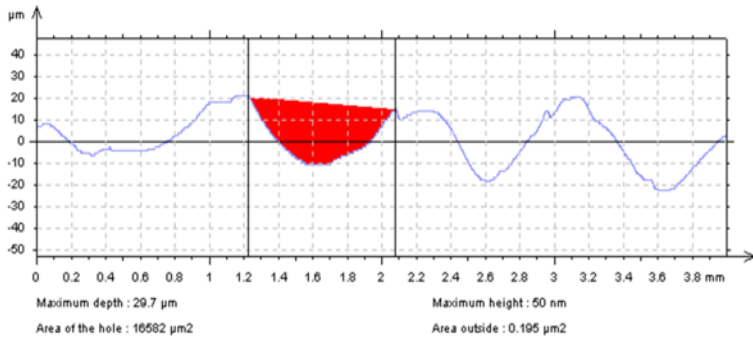
## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



Σχήμα 43: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 9.

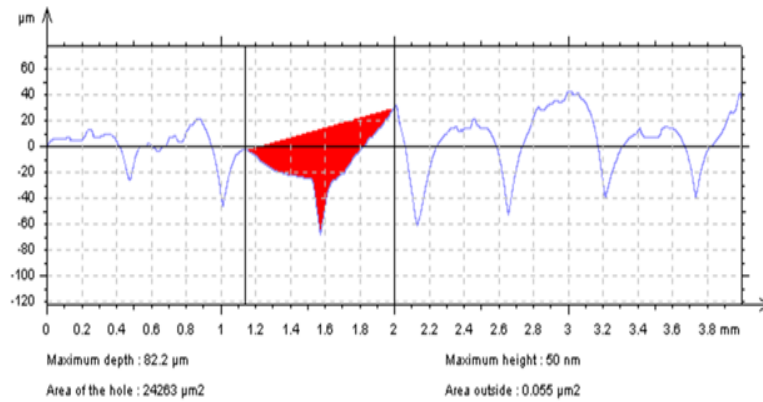
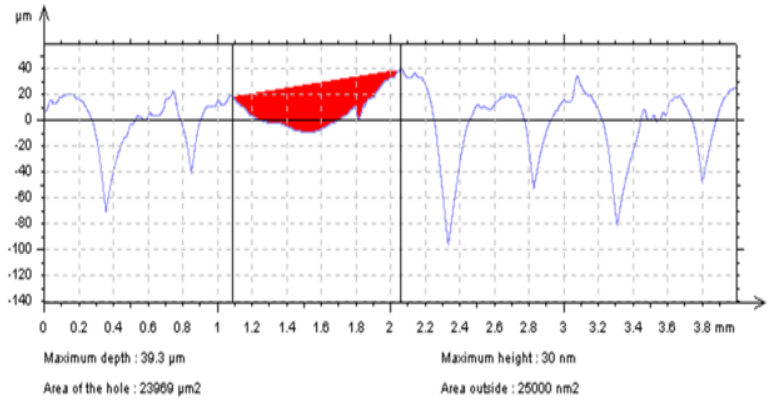
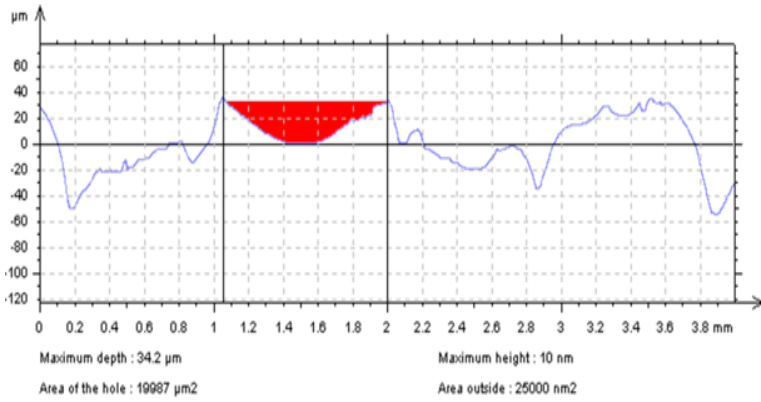
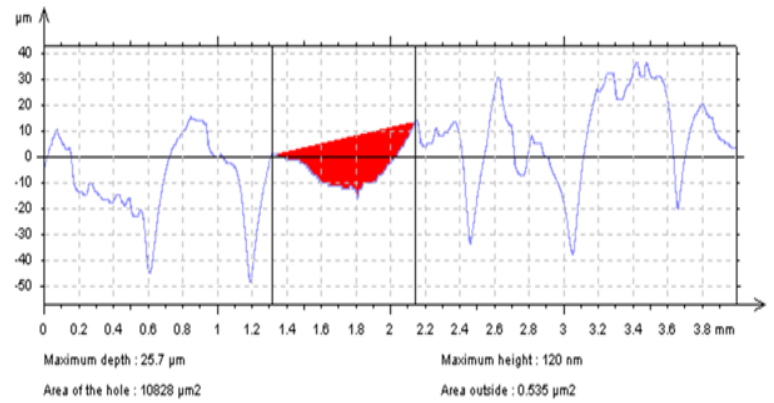
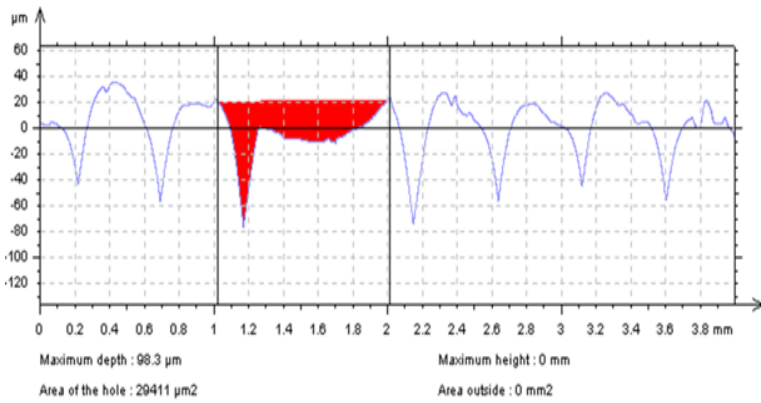


## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



Σχήμα 44: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 10.

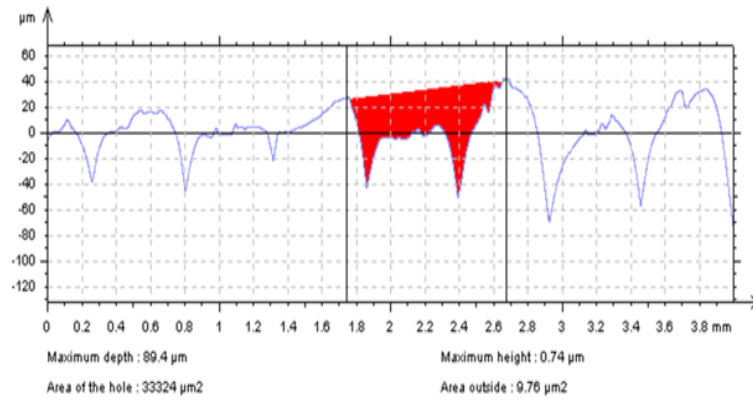
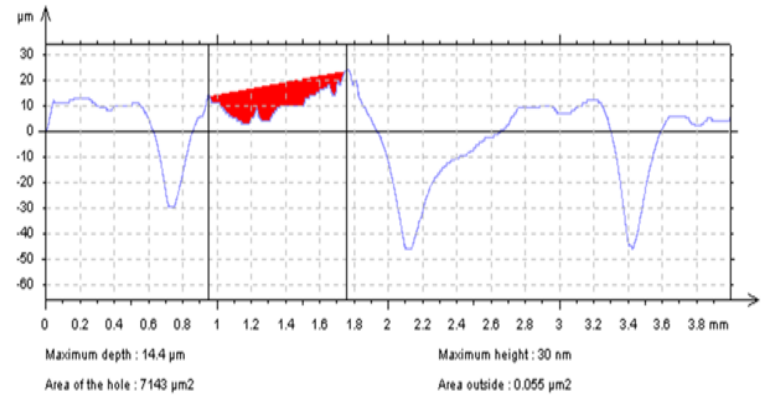
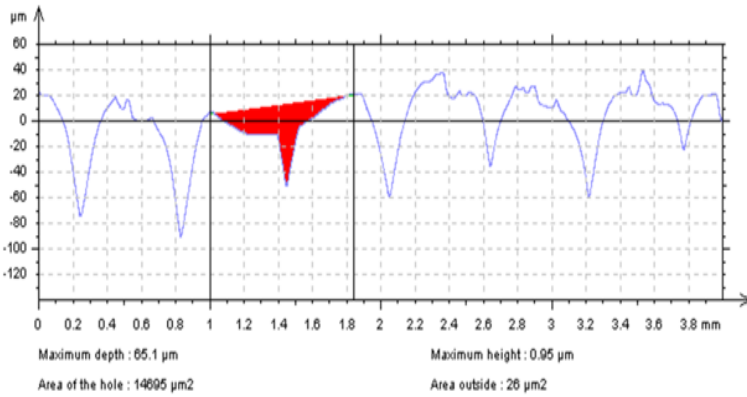
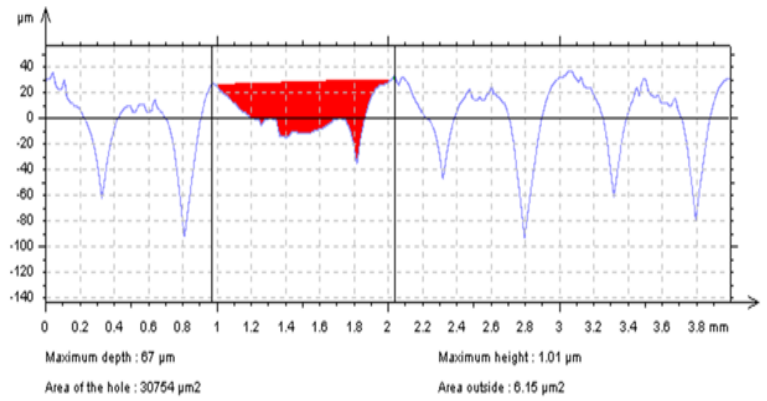
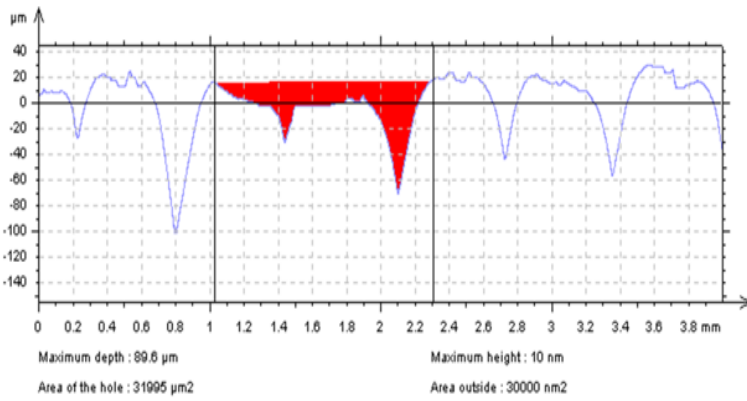
## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



Σχήμα 45: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen

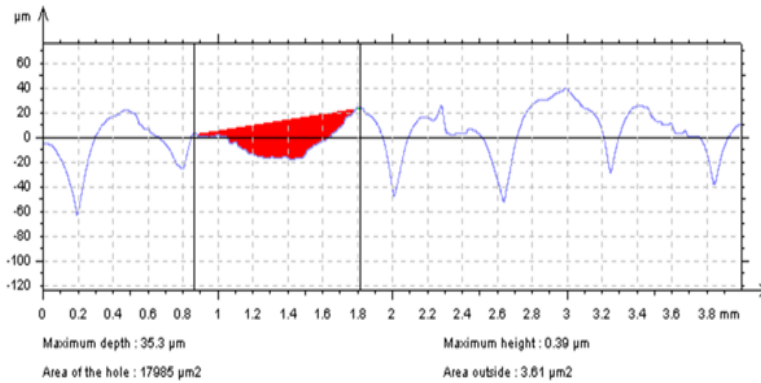
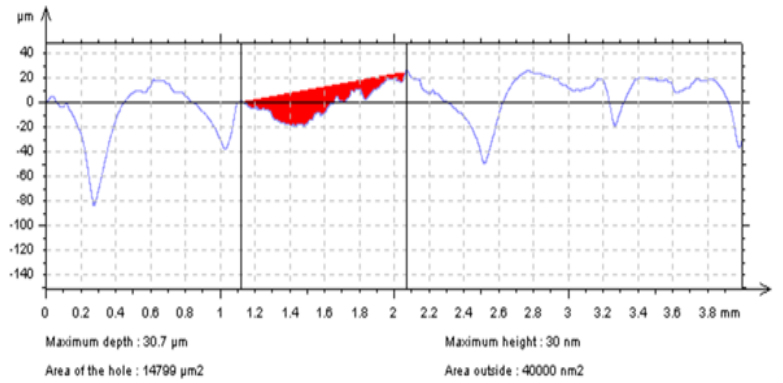
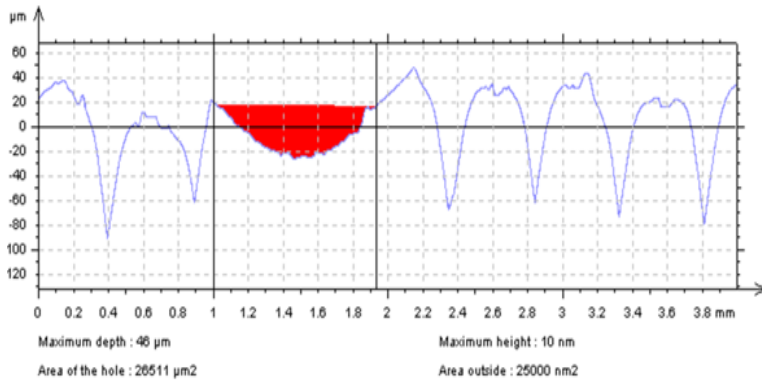
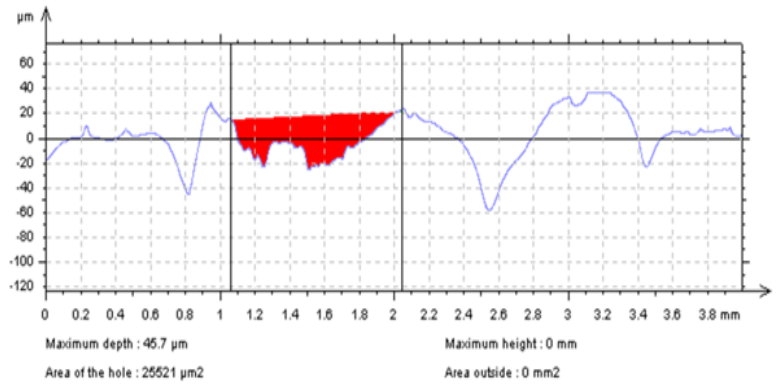
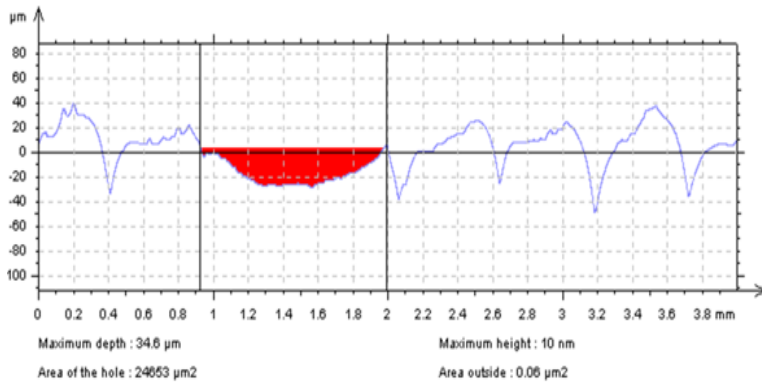
13.

## B. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



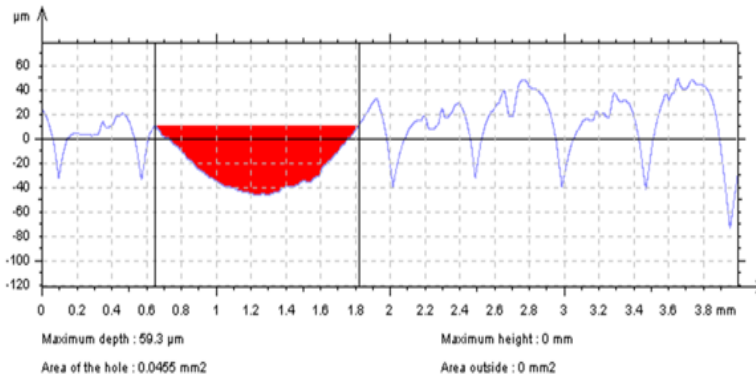
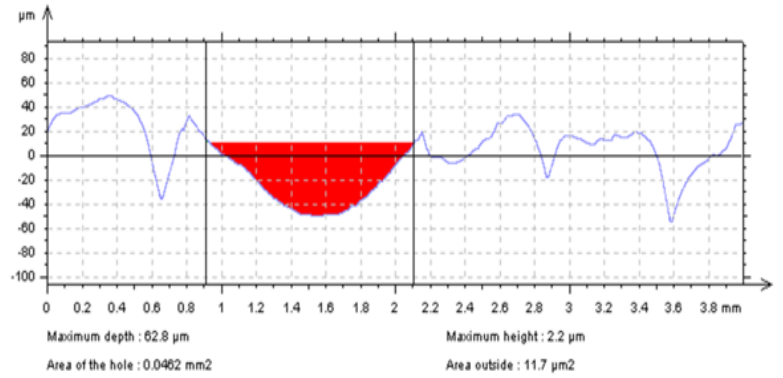
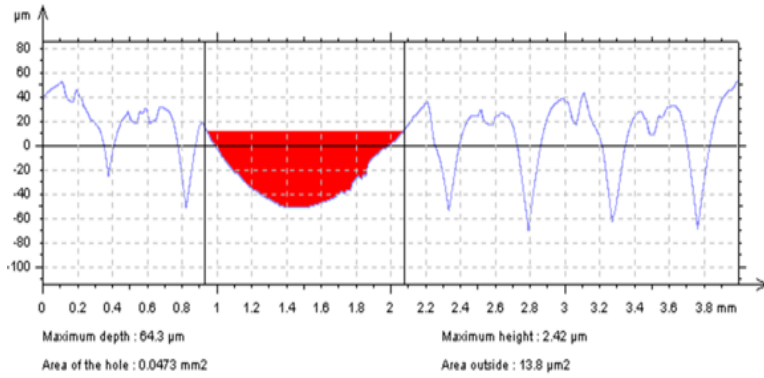
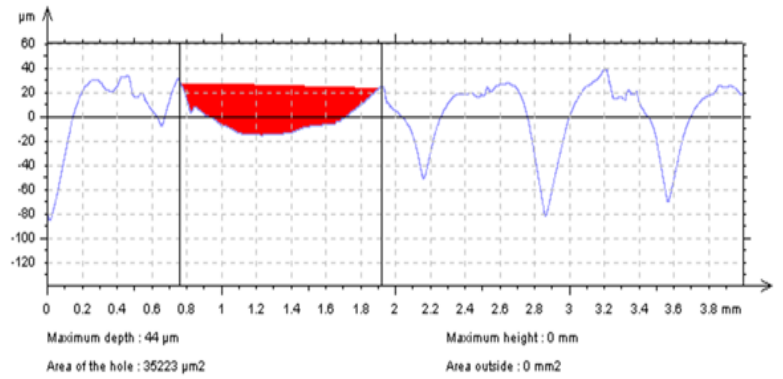
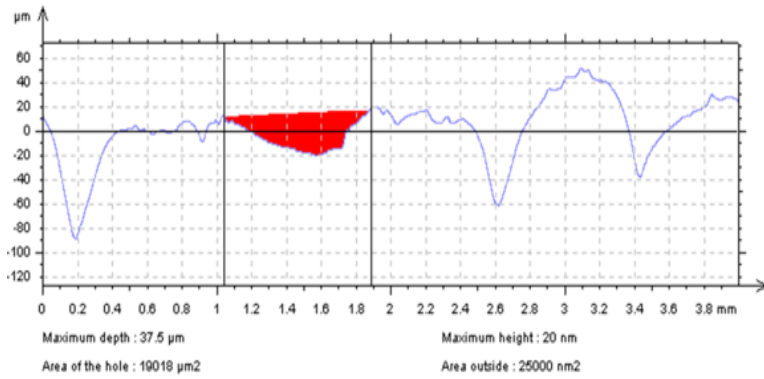
Σχήμα 46: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 1 για ακτίνα  $r=5\text{mm}$ .

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



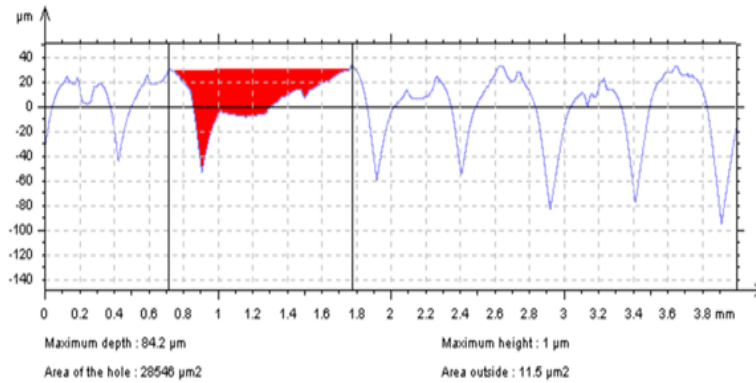
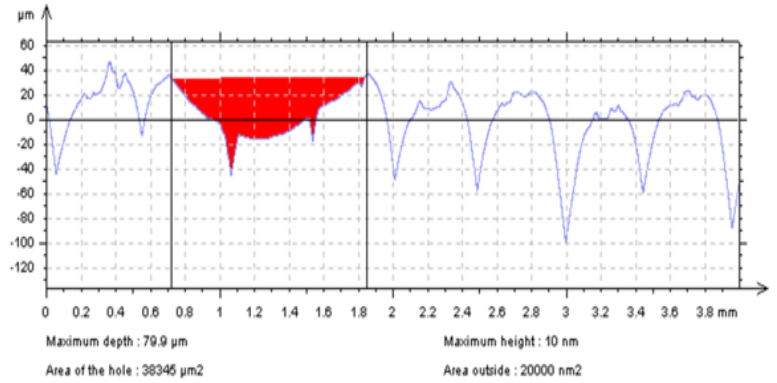
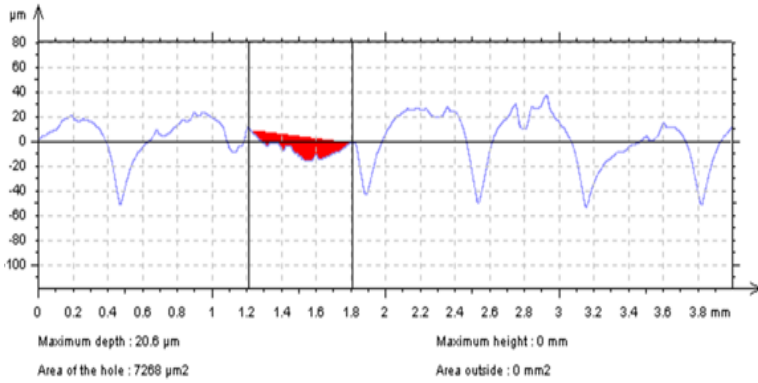
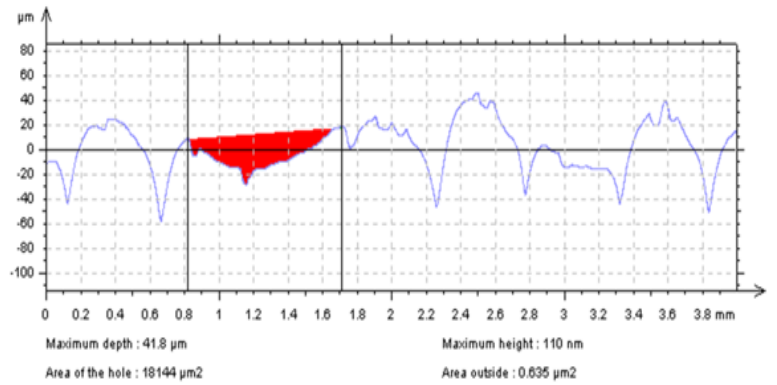
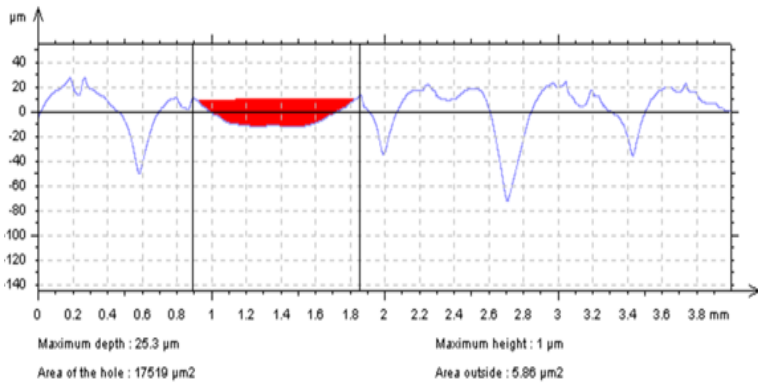
Σχήμα 47: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 2 για ακτίνα  $r=5\text{mm}$ .

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



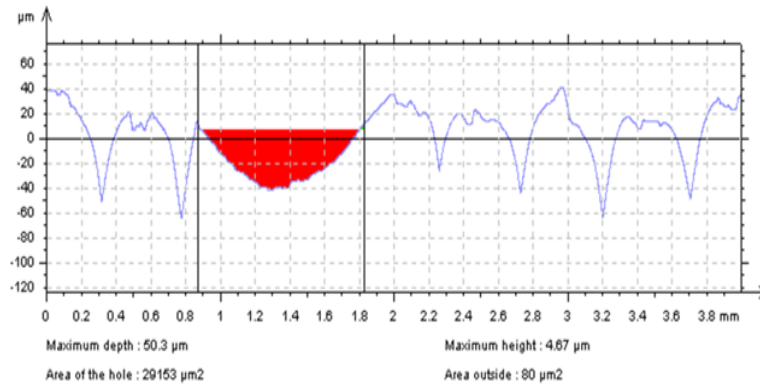
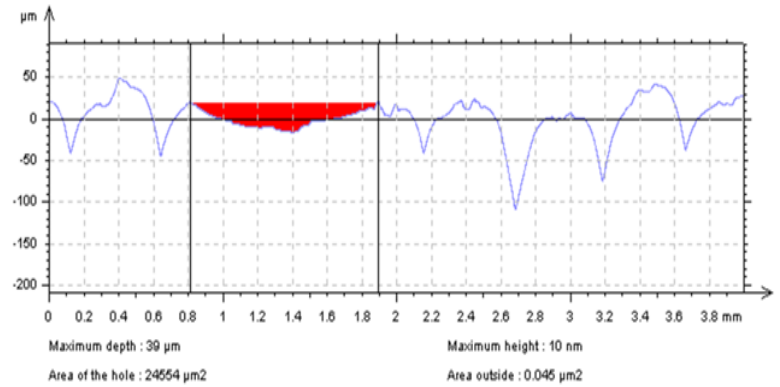
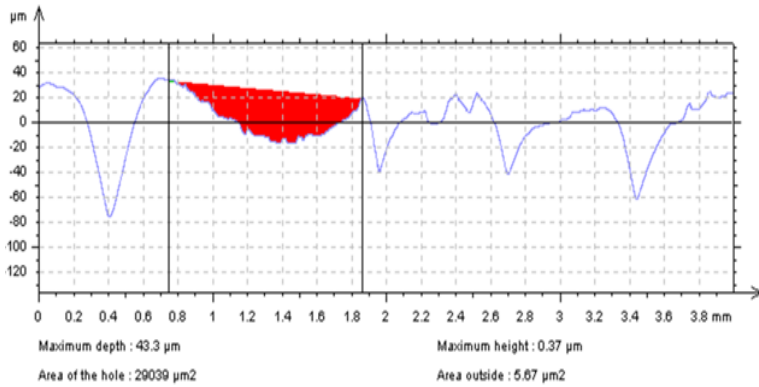
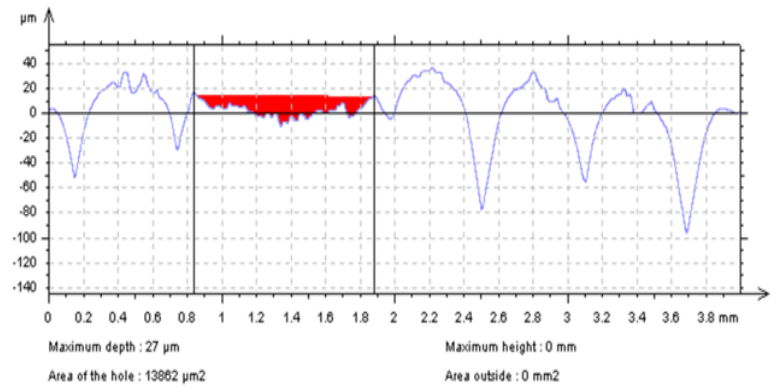
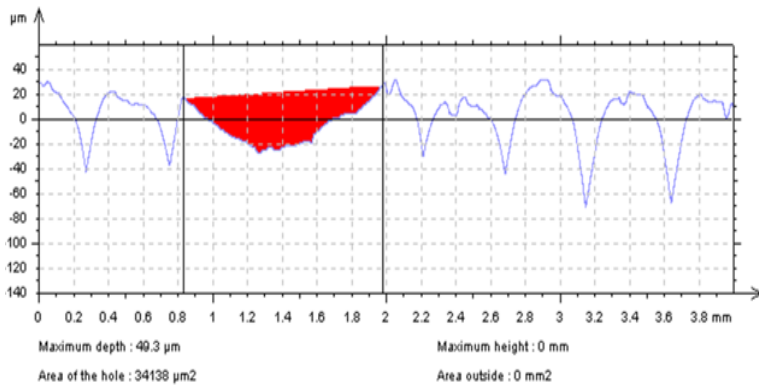
Σχήμα 48: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 3 για ακτίνα  $r=5\text{mm}$ .

## B. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



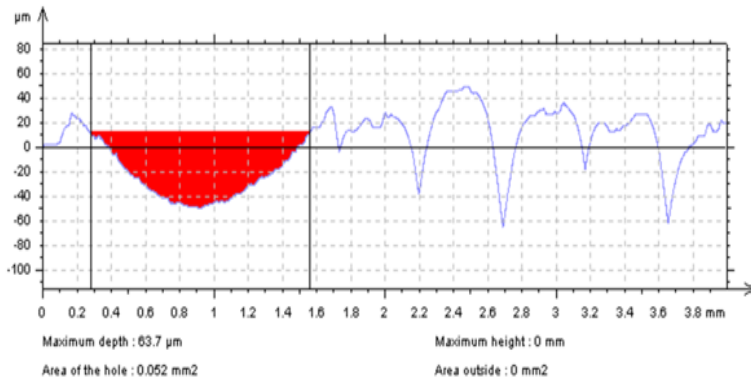
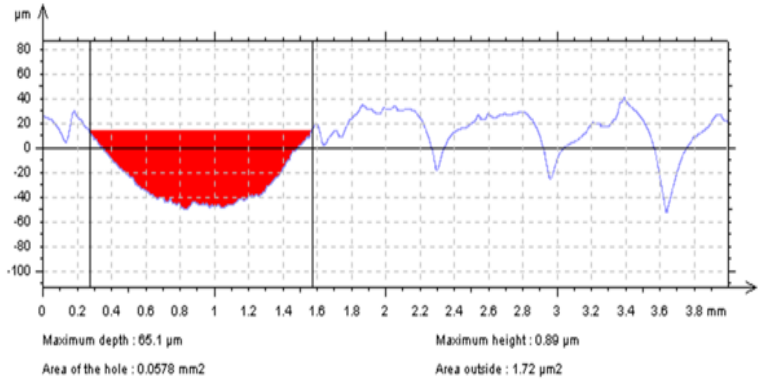
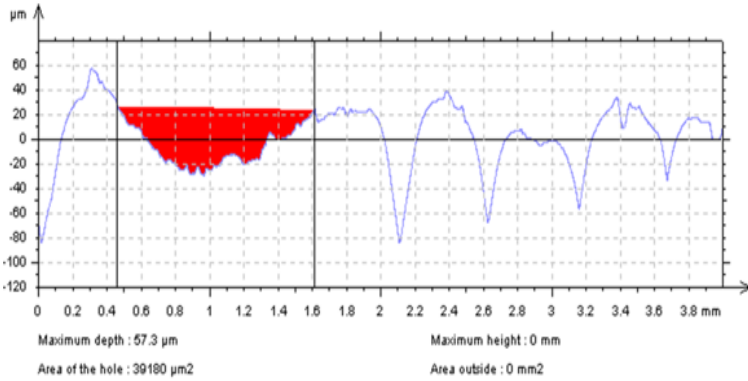
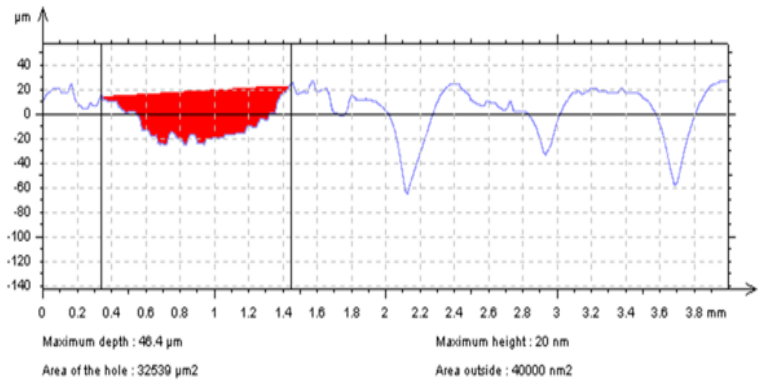
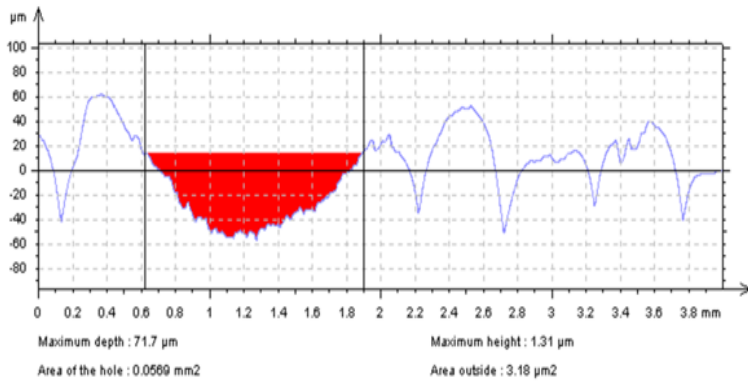
Σχήμα 49: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 4 για ακτίνα  $r=5\text{mm}$ .

## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



Σχήμα 50: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 5 για ακτίνα  $r=5\text{mm}$ .

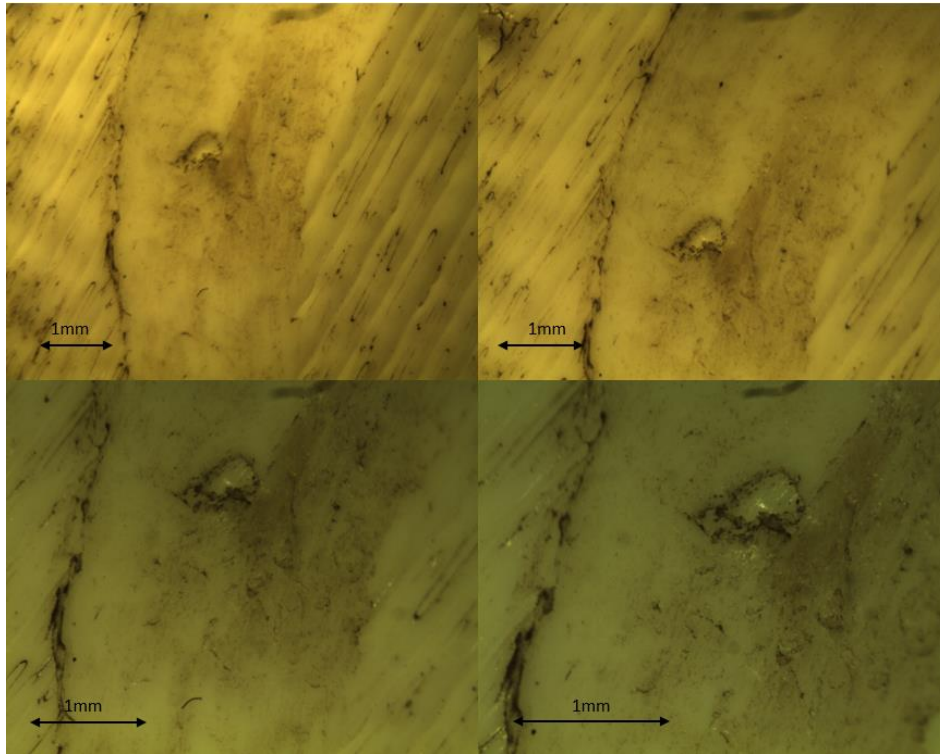
## Β. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ



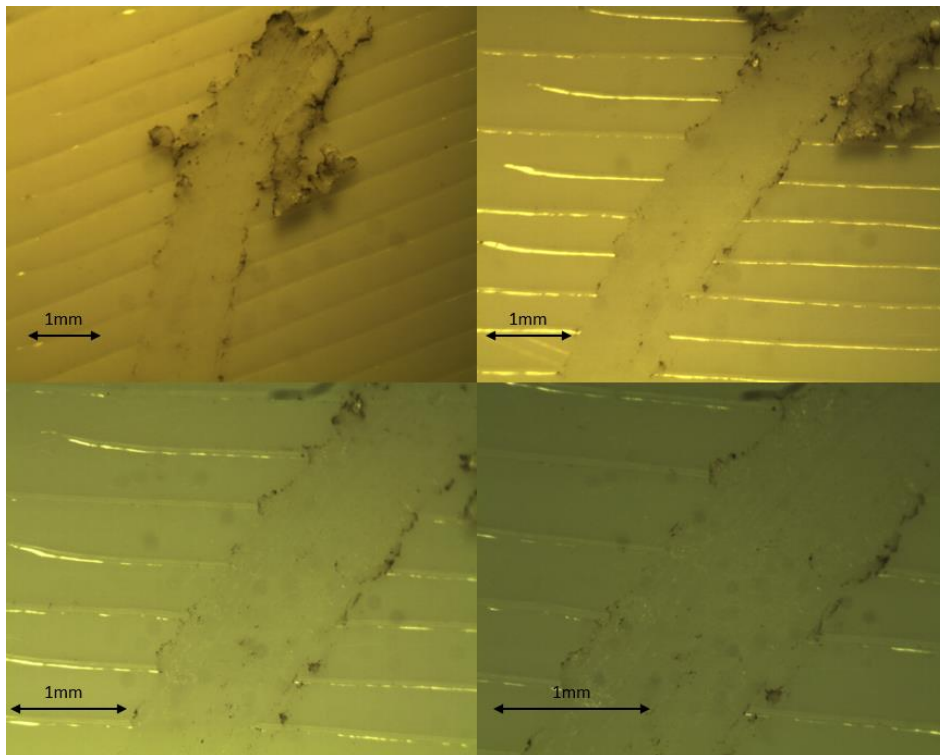
Σχήμα 51: Μέτρηση φθοράς (γούβας που δημιουργήθηκε από το ανταγωνιστικό υλικό) στο Specimen 6 για ακτίνα  $r=5\text{mm}$ .



## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

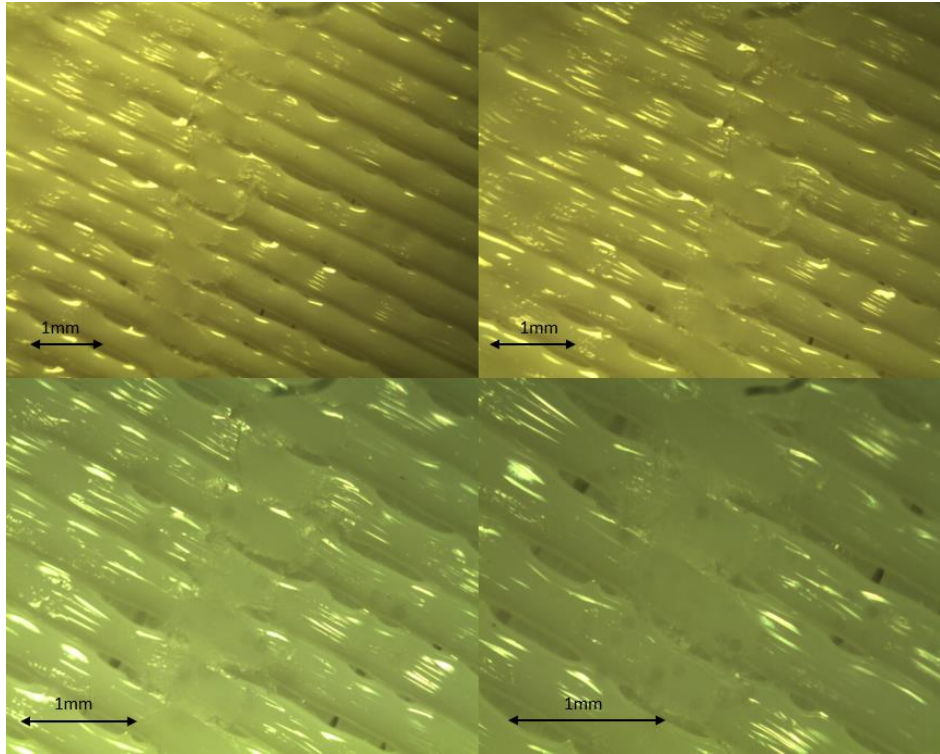


Σχήμα 52: Specimen 1.

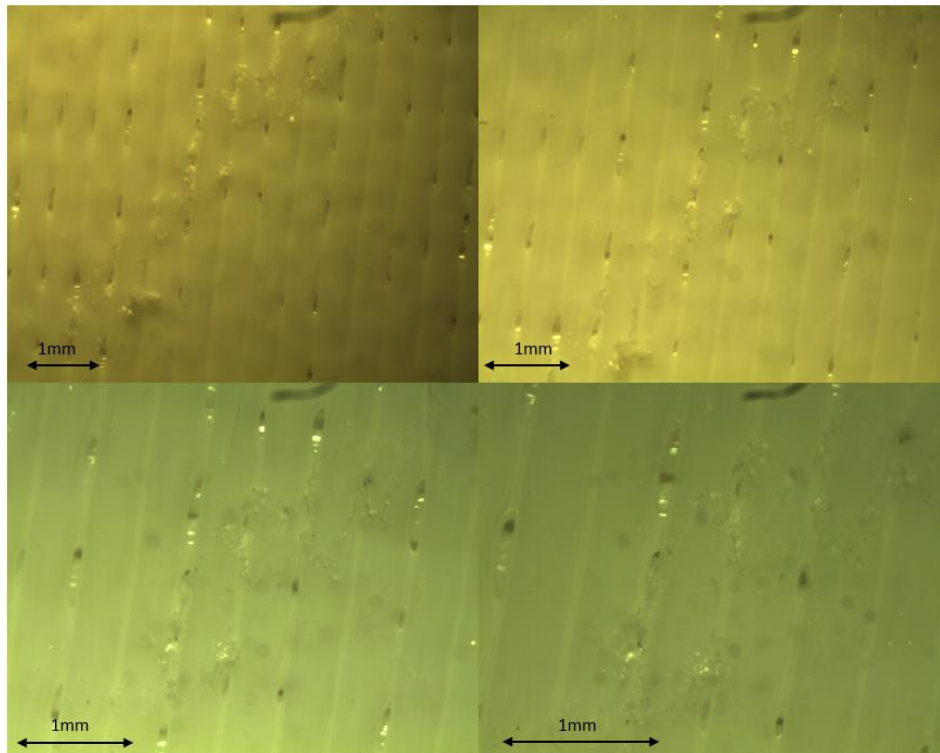


Σχήμα 53: Specimen 2.

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

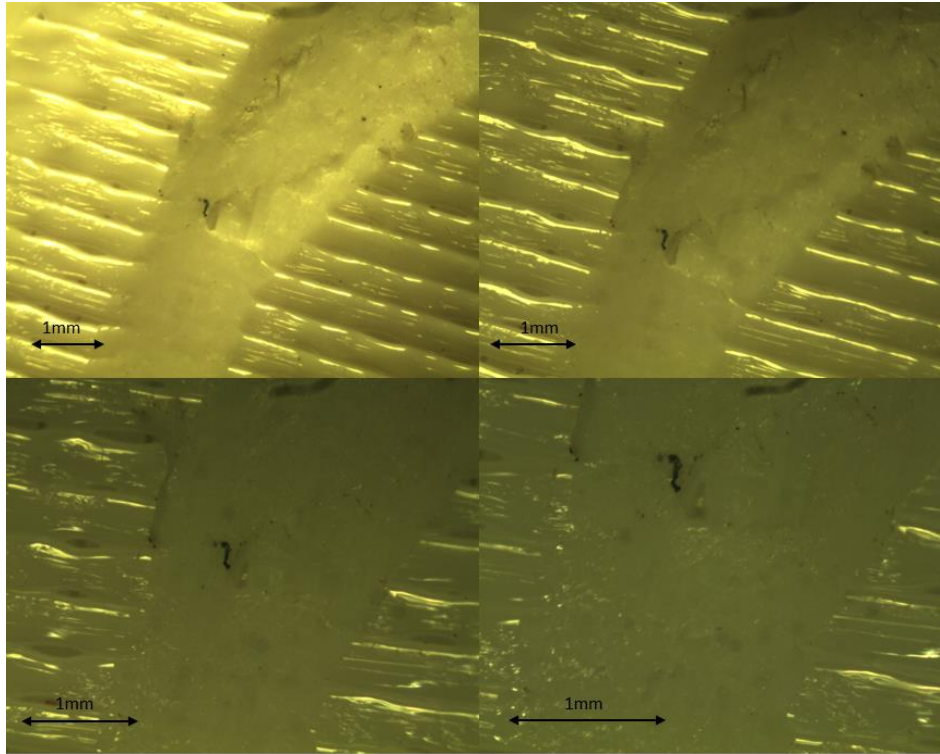


Σχήμα 54: Specimen 3.

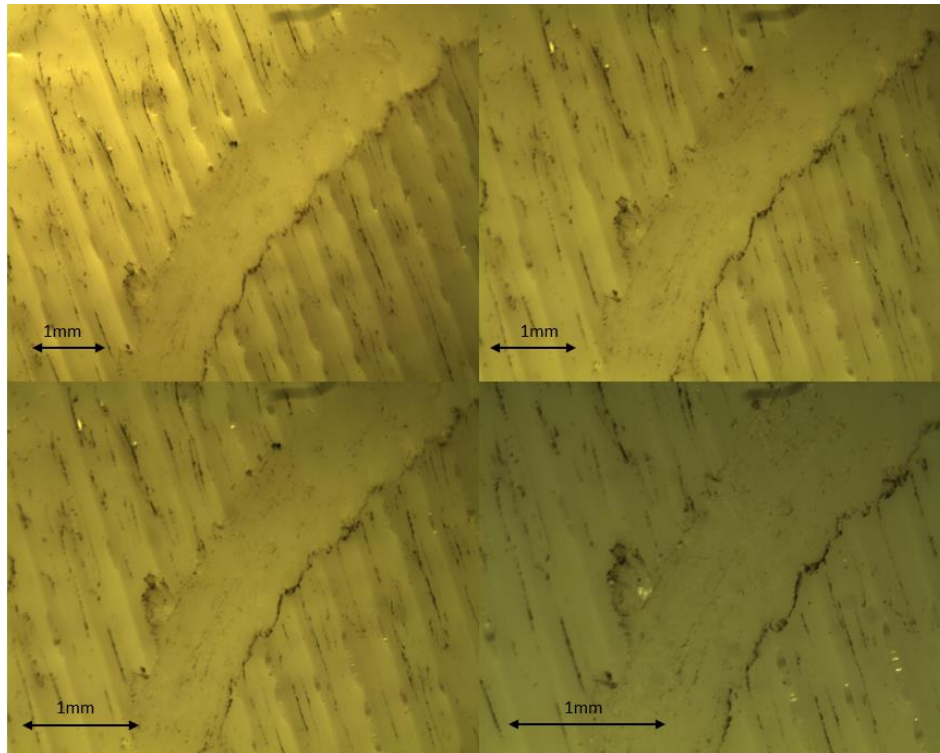


Σχήμα 55: Specimen 4.

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

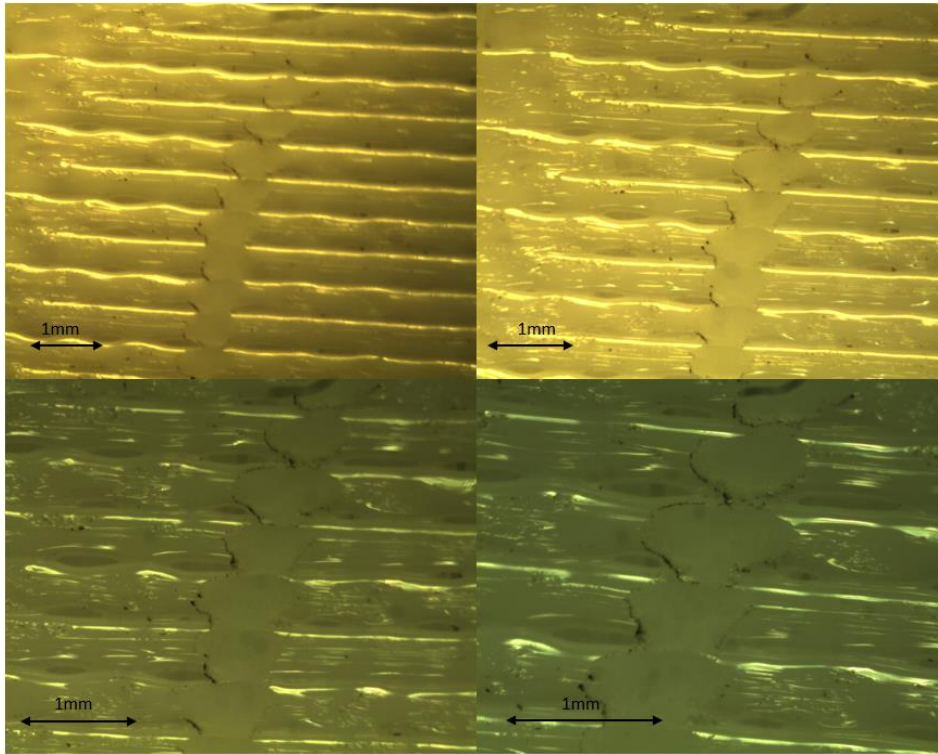


Σχήμα 56: Specimen 5.

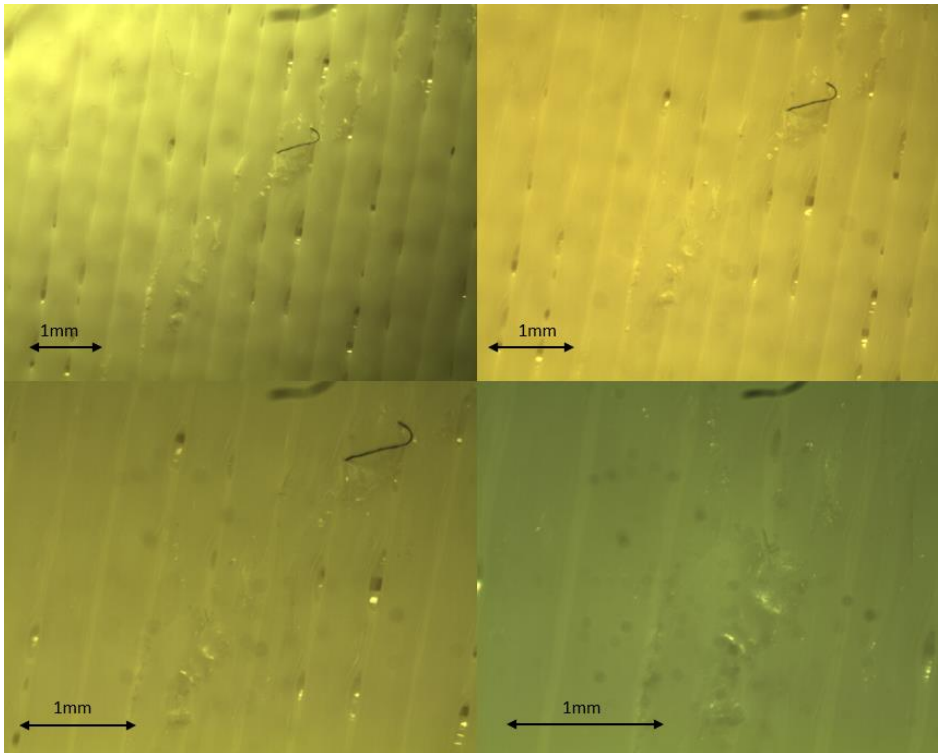


Σχήμα 57: Specimen 6.

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

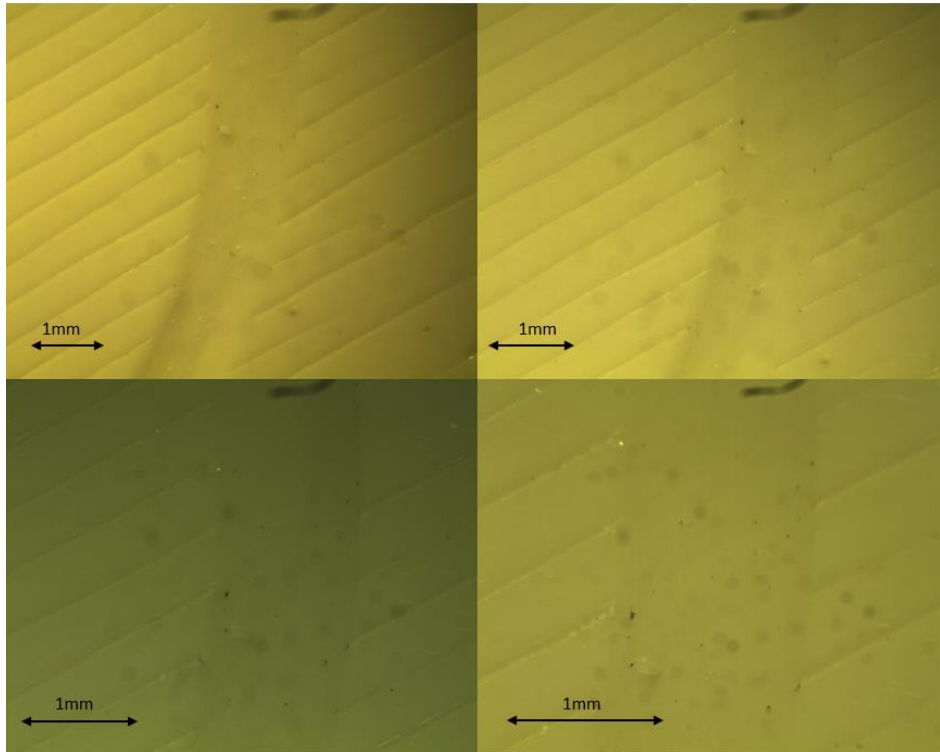


Σχήμα 58: Specimen 7.

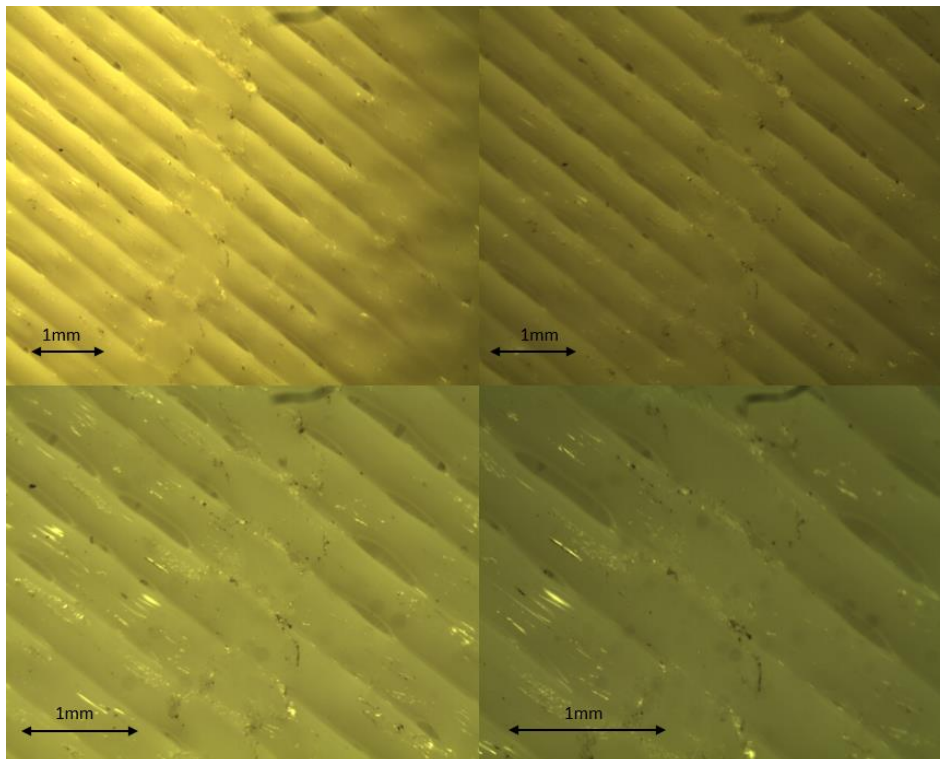


Σχήμα 59: Specimen 8.

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

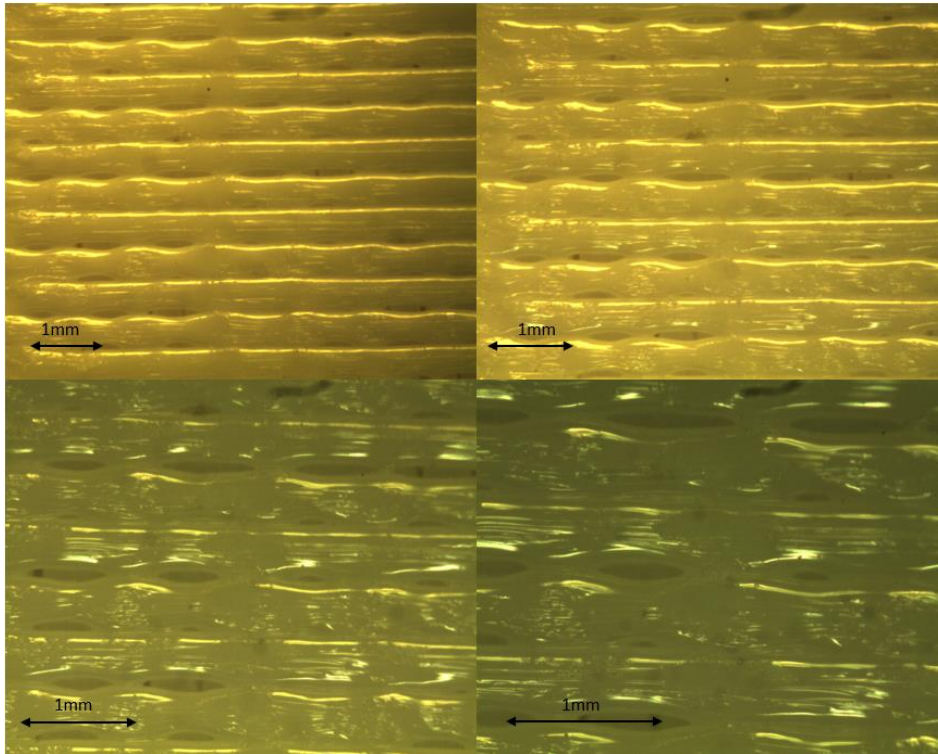


Σχήμα 60: Specimen 9.

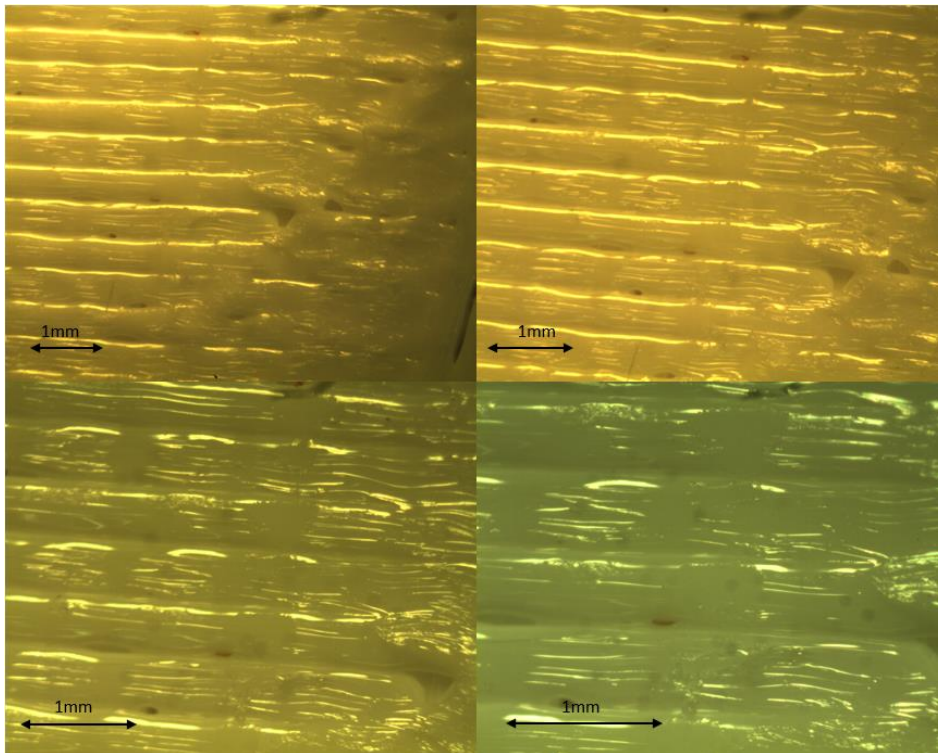


Σχήμα 61: Specimen 10.

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

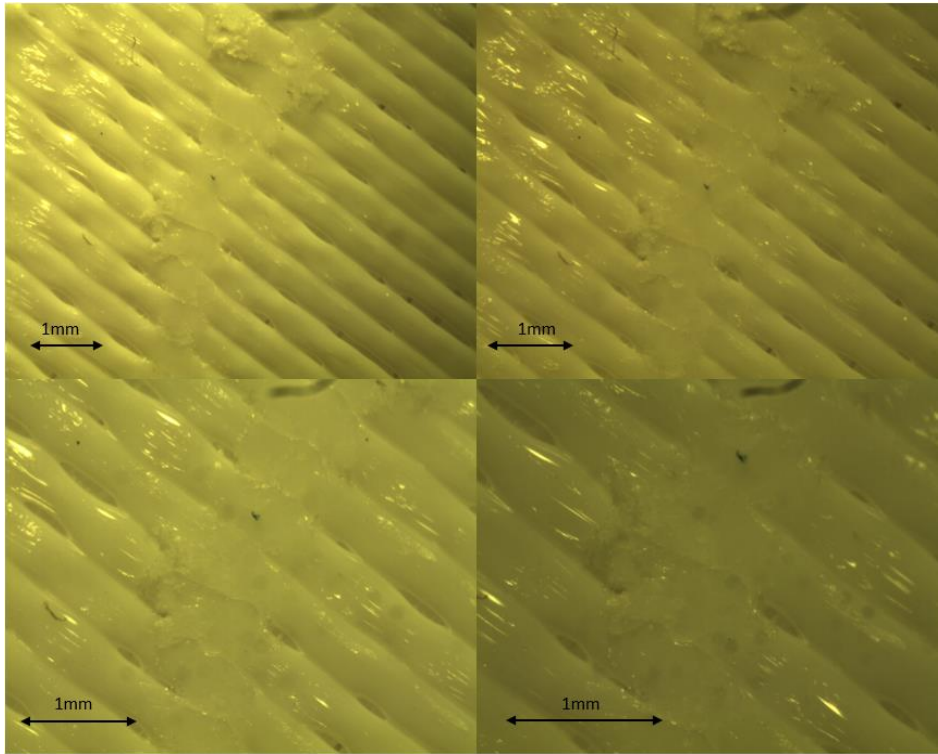


Σχήμα 62: Specimen 11.

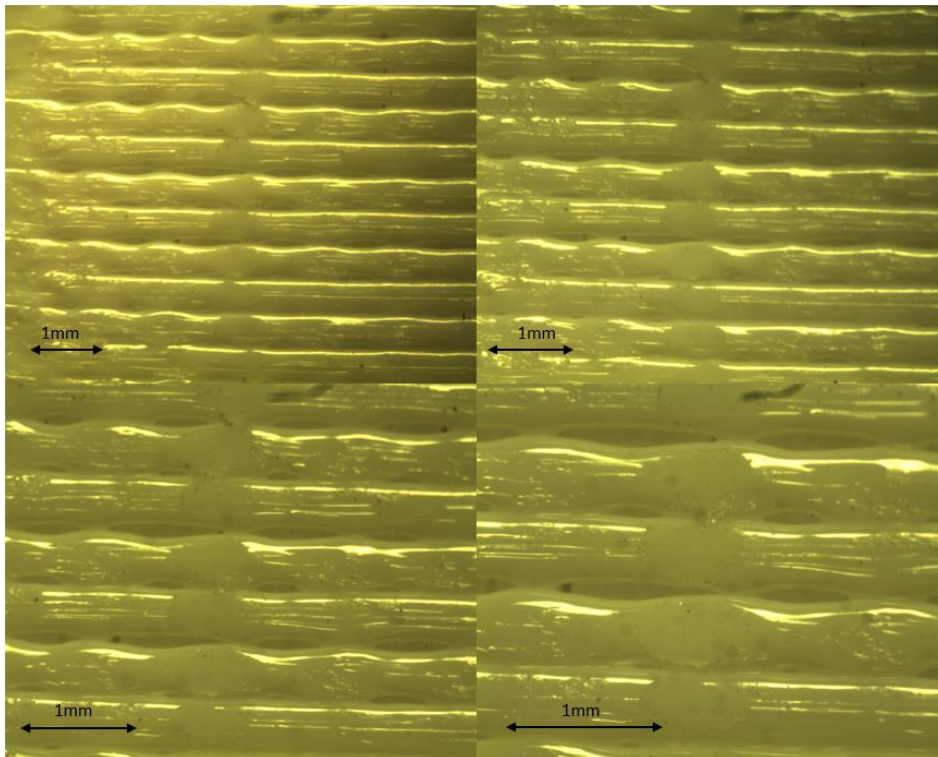


Σχήμα 63: Specimen 12.

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

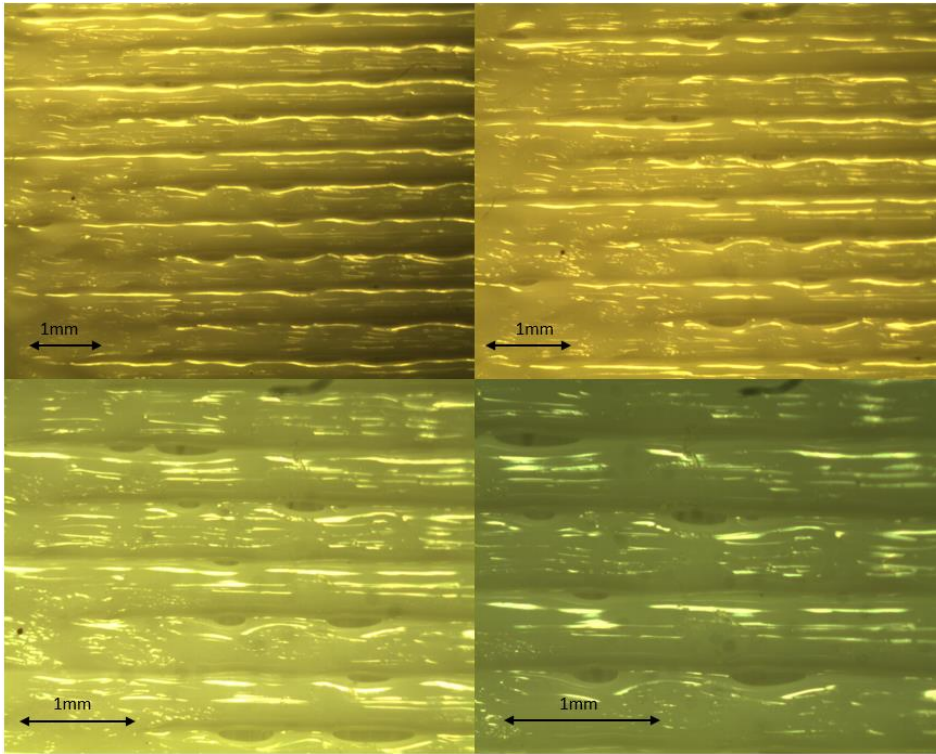


Σχήμα 64: Specimen 13.

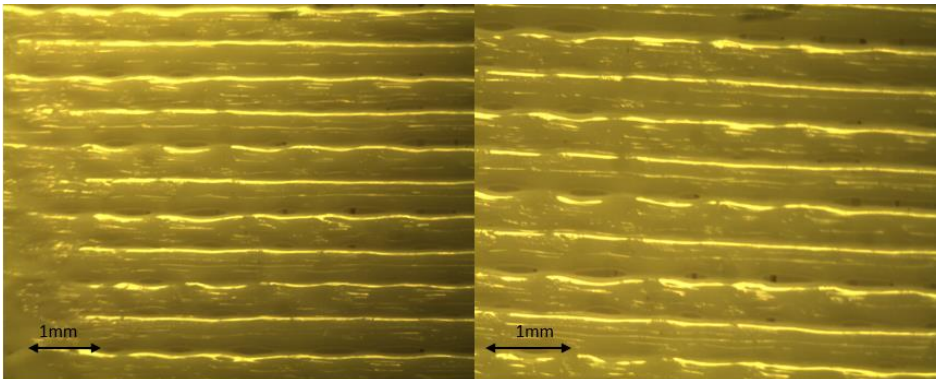


Σχήμα 65: Specimen 14.

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ



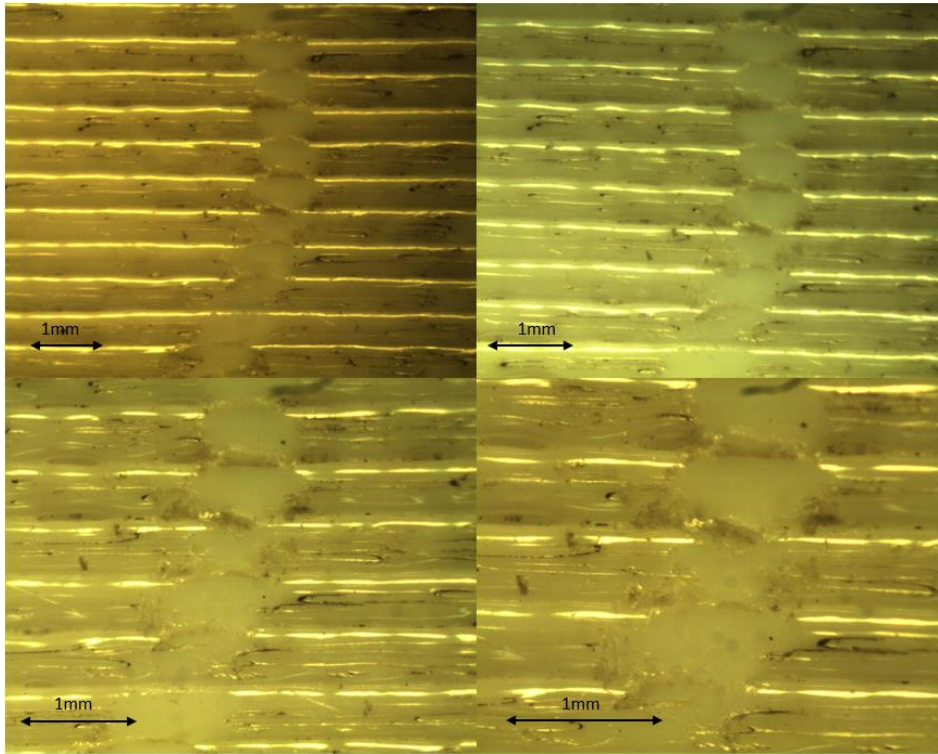
Σχήμα 66: Specimen 15.



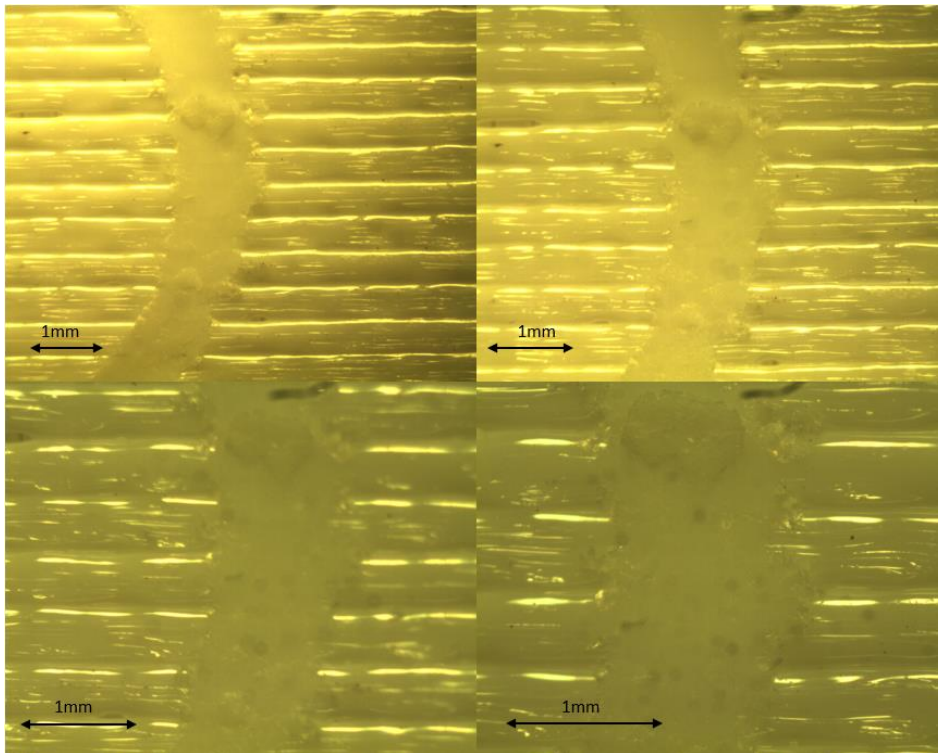
Σχήμα 67: Specimen 16.



## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

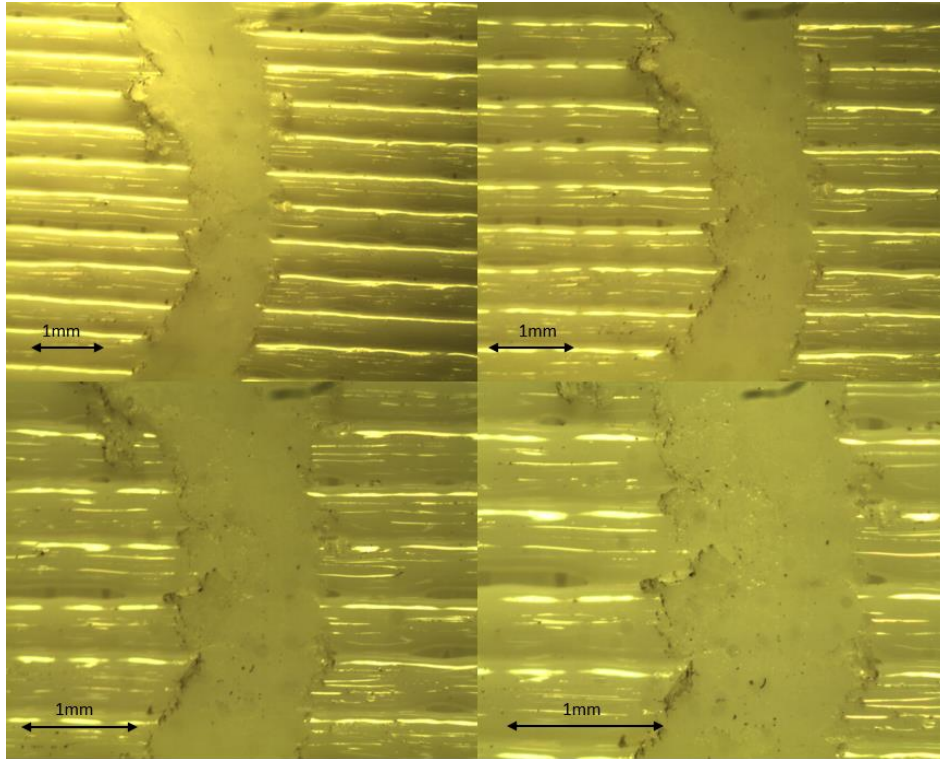


Σχήμα 68: Specimen 1 (Συμπληρωματικές Δοκιμές).

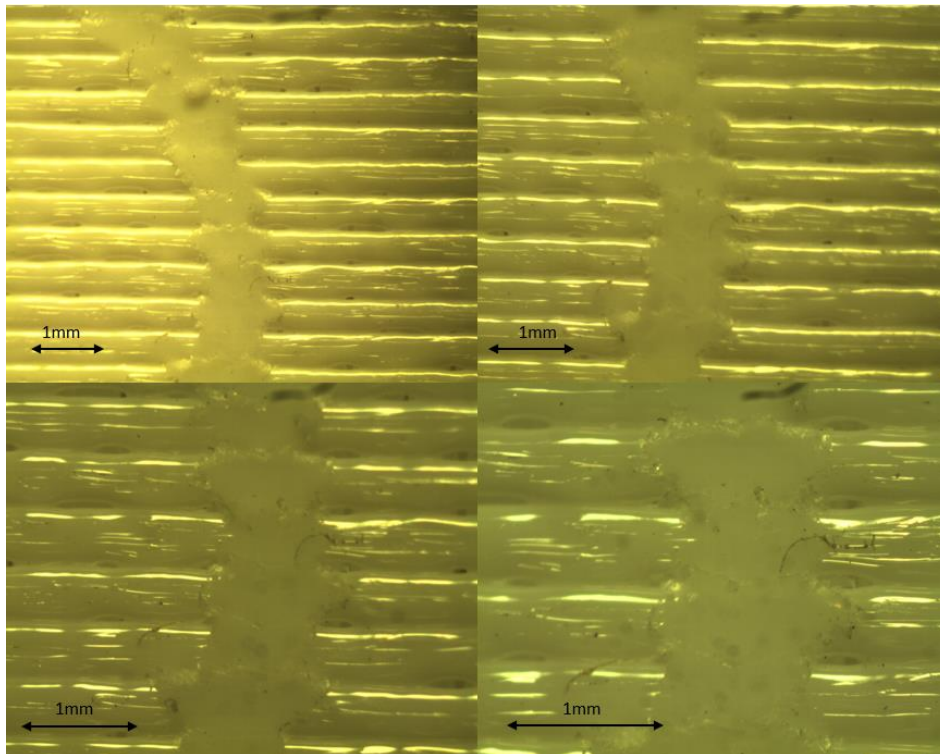


Σχήμα 69: Specimen 2 (Συμπληρωματικές Δοκιμές).

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ

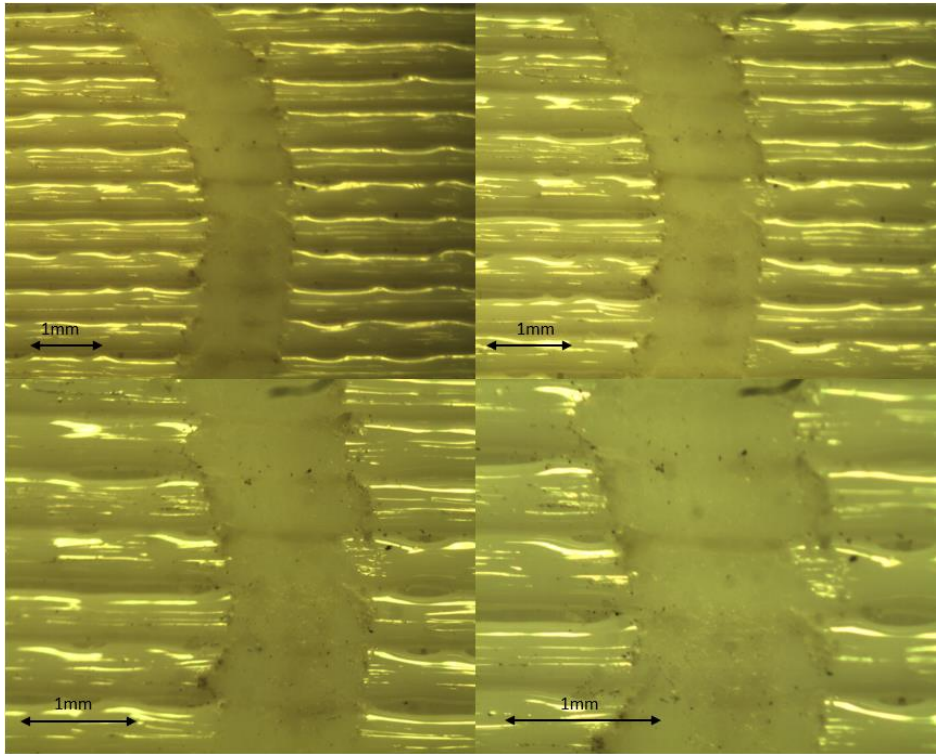


Σχήμα 70: Specimen 3 (Συμπληρωματικές Δοκιμές).

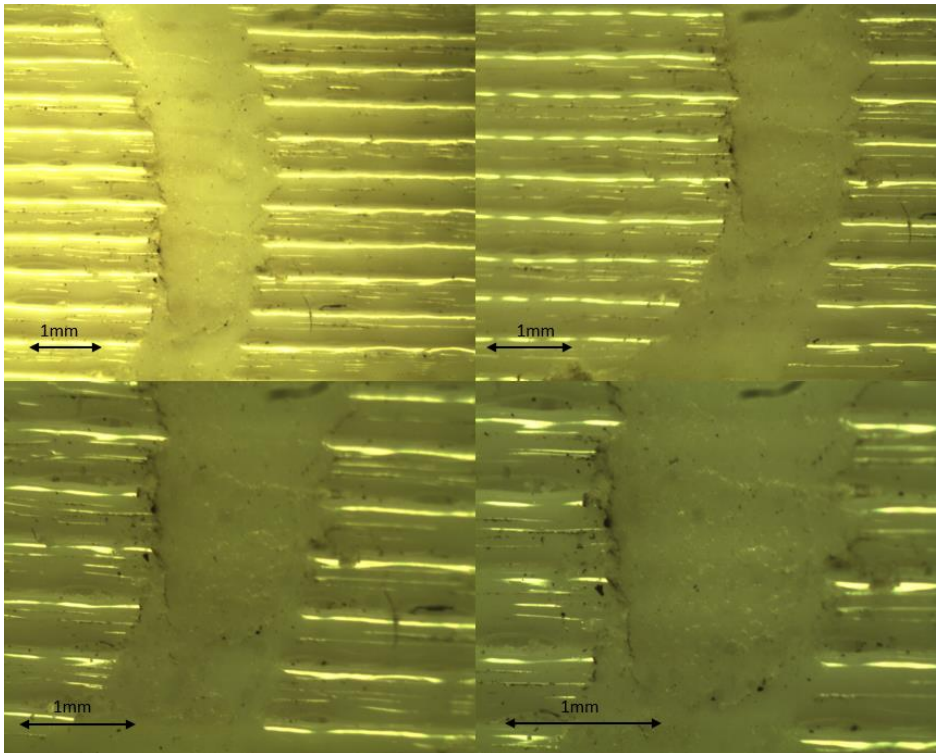


Σχήμα 71: Specimen 4 (Συμπληρωματικές Δοκιμές).

## Γ. ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΩΝ ΦΘΟΡΑΣ



Σχήμα 72: Specimen 5 (Συμπληρωματικές Δοκιμές).



Σχήμα 73: Specimen 6 (Συμπληρωματικές Δοκιμές).

