



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ  
ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ - ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ**

**Συγγραφέας: Αθανάσιος Νεκτάριος ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ (Α.Μ. 46147689)**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Πανδώρα Π. ΨΥΛΛΑΚΗ**

*Αιγάλεω, Οκτώβριος 2022*



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

**Diploma Thesis**

**EXPERIMENTAL STUDY OF CERAMIC MATERIALS**  
**SUBJECTED TO CAVITATION - EROSION**

**Student: Athanasios Nektarios NIKOLOPOULOS (Registr. No: 46147689)**

**Supervisor: Professor Pandora P. PSYLLAKI**

*Egaleo, October 2022*




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ - ΣΠΗΛΛΙΩΣΗΣ

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	Πανδώρα Π. Ψυλλάκη	Καθηγήτρια	
2.	Ανδρέας Θεοδωρακάκος	Αναπληρωτής Καθηγητής	
3.	Αθανάσιος Μουρλάς	Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αθανάσιος Νεκτάριος ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 46147689 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/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 πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Αθανάσιος Νεκτάριος Νικολόπουλος

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Ψυλλάκη Πανδώρα για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας και την καθοδήγησή της στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Μουρλά Αθανάσιο χωρίς την υποστήριξη και καθοδήγηση του οποίου το πειραματικό μέρος της εργασίας θα ήταν πολύ πιο δύσκολο.

## Σύνοψη

Η Διπλωματική Εργασία υλοποιήθηκε σε συνεργασία με το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, το οποίο ανέλαβε την παρασκευή πρότυπων δοκιμίων κεραμικών υλικών με την τεχνική της κονιομεταλλουργίας, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της κυρίας Σ. Γκιουζέλ με τίτλο «Παρασκευή αργιλοπυριτικών και μαγνησιακών πυρίμαχων υλικών με νανοπρόσθετα και μελέτη ιδιοτήτων». Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της φθοράς κεραμικών υλικών, όταν αυτά εκτίθενται σε συνθήκες μηχανικής διάβρωσης-σπηλαιώσης. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα των δοκιμών αυτών συγκρίθηκαν με τη φθορά των ίδιων δοκιμίων υπό καθεστώς τριβής ολίσθησης. Η διπλωματική εργασία είναι πειραματική και για τις εργαστηριακές δοκιμές των υλικών χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένες διατάξεις (α) δονήσεων με υπερήχους και (β) ολίσθησης τύπου «σφαίρας-δίσκου». Ο προσδιορισμός της φθοράς των κεραμικών υλικών και των μηχανισμών που ενεργοποιούνται έγινε με ζύγιση, με τη χρήση οπτικής μικροσκοπίας και με τραχυμέτρηση.

**Λέξεις κλειδιά:** Κεραμικά υλικά, Μαγνησιακά πυρίμαχα, Κονιομεταλλουργία. Μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση, Ολίσθηση, Φθορά.

## Abstract

The present Diploma Thesis is focused on the determination of the wear of ceramic materials that are subjected to cavitation-erosion and was implemented in collaboration with the Department of Materials Science and Engineering of the University of Ioannina that has assumed the preparation via powder metallurgy of the prototype ceramic materials to be tested, in the framework of the Ph.D. thesis of Mrs. S. Giouzel, titled “Preparation and properties of aluminosilicate and magnesia-based refractory materials with nano-additives”. The study is an experimental one and the laboratory tests were performed using two standardized devices, namely (a) an ultrasonic vibrational apparatus and (b) a ball-on-disk tribometer. Post-testing characterization of the worn ceramic materials was carried out via weighting, optical microscopy and profilometry to determine the activated wear mechanisms and compare them to those concerning the wear of the same materials under sliding conditions.

**Key Words:** Ceramic materials; Magnesia-based refractories; Powder metallurgy; Cavitation-erosion; Sliding; Wear.

## Περιεχόμενα

<b>Ευχαριστίες</b> .....	<b>1</b>
<b>Σύνοψη</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Ευρετήριο Σχημάτων</b> .....	<b>6</b>
<b>1.Εισαγωγή</b> .....	<b>11</b>
1.1 Κεραμικά Υλικά .....	11
1.2 Τύποι Κεραμικών Υλικών .....	12
1.2.1 Κρυσταλλικά Κεραμικά .....	12
1.2.2 Πυριτικά και ανόργανες ύαλοι .....	13
1.2.3 Υαλοκεραμικά .....	14
1.2.4 Πυρίμαχα .....	14
1.3 Ατέλειες Δομής Κεραμικών Υλικών .....	15
1.3.1 Ψαθυρή Φύση των Κεραμικών Υλικών .....	17
1.4 Σύνθεση Κεραμικών Υλικών και Κατεργασία τους.....	18
1.5 Ορισμός της διάβρωσης .....	19
1.5.1 Δυναμικές και στατικές καταπονήσεις .....	19
1.5.2 Η δοκιμή της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης.....	20
1.5.3 Χρόνος ή περίοδος επώασης .....	21
1.5.4 Μαθηματικό μοντέλο της μηχανικής διάβρωσης σπηλαίωσης .....	22
1.5.5 Τριβολογική δοκιμή .....	24
1.5.6 Μέτρηση της Τραχύτητας ή Προφίλομετρία.....	25
1.5.7 Συντελεστής φθοράς.....	25
<b>2. Ανασκόπηση παλαιότερων εργασιών</b> .....	<b>26</b>
2.1 Έρευνες σχετικά με την επίδραση της μηχανικής διάβρωσης και σπηλαίωσης σε κεραμικά υλικά.....	27
2.2 Πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στις παραπάνω έρευνες και πειραματική διαδικασία.....	28
2.3 Αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών .....	30
2.4 Συμπεράσματα των παραπάνω ερευνών .....	32
<b>3.Πειραματικό Μέρος</b> .....	<b>33</b>
3.1 Πειραματικά δοκίμια .....	33
3.2 Ιδιότητες κεραμικών υλικών ρητίνης / γραφίτη .....	40
3.3 Πρακτικό πειραματικής διαδικασίας .....	41
<b>4. Αποτελέσματα δοκιμών</b> .....	<b>49</b>



<b>5. Συμπεράσματα .....</b>	<b>74</b>
5.1 Συμπεράσματα για τη δοκιμή μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης .....	74
5.2 Συμπεράσματα για την τριβολογική δοκιμή των υλικών .....	75
5.3 Συμπεράσματα για την τραχυμέτρηση των δοκιμίων.....	76
5.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνες.....	77
<b>6. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>78</b>
<b>7. Παράρτημα.....</b>	<b>82</b>
7.1 Λοιπά διαγράμματα t-μ και Laps – μ τριβολικών δοκιμών.....	82
7.2 Διαγράμματα τραχυμέτρησεων: .....	90
7.3 Πίνακες υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστών φθοράς λόγω τριβολογικής δοκιμής .....	103

## Ευρετήριο Σχημάτων

### Εικόνες

Εικόνα 1: Παράδειγμα προφίλ επιφάνειας υλικού.....	25
Εικόνα 2: Τα υπό μελέτη δοκίμια SG106, SG105, SG090 και SG076 προ των πειραματικών δοκιμών.....	35
Εικόνα 3: Τα δοκίμια μεμονωμένα.....	37
Εικόνα 4: Μεγέθυνση της επιφάνειας των δοκιμίων Sg076 (πάνω αριστερά), SG090 (πάνω δεξιά), SG105 (κάτω αριστερά) και SG106 (κάτω δεξιά).....	38
Εικόνα 5: Ζυγός ακριβείας 0.01 g του εργαστηρίου Presica 4000C.....	41
Εικόνα 6: Το στερεοσκόπιο του εργαστηρίου.....	42
Εικόνα 7: Συσκευή μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης UIP1000hdT (αριστερά), Κεφαλή-Horn tip (πάνω δεξιά) και συσκευή ρύθμισης παραμέτρων για τη δοκιμή μηχανικής διάβρωσης - σπηλαιώσης (κάτω δεξιά).....	43
Εικόνα 8: Τριβόμετρο CSEM Instruments του εργαστηρίου.....	45
Εικόνα 9: Χρησιμοποιημένα μπίλια από Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (πάνω), Τα βαρίδια 2N, 5N και 10N που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές τριβής (κάτω).....	47
Εικόνα 10: Αποτελέσματα στην επιφάνεια του δοκιμίου SG105 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση και αποκομμένοι κόκκοι λόγω δοκιμής (πάνω), και ποτελέσματα στην επιφάνεια του δοκιμίου SG106 μετά από μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση και αποκομμένοι κόκκοι λόγω δοκιμής (κάτω).....	50
Εικόνα 11: Το SG105 μετά από δοκιμή μηχανικής διάβρωσης - σπηλαιώσης και λεπτομέρειες επιφάνειας.....	51
Εικόνα 12: Λεπτομέρειες επιφάνειας SG105 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση.....	52
Εικόνα 13: Κόκκοι του SG105 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση.....	53

Εικόνα 14: Το SG106 μετά από δοκιμή μηχανικής διάβρωσης - σπηλαιώσης και λεπτομέρειες επιφάνειας. ....	54
Εικόνα 15: Λεπτομέρειες SG106 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση.....	55
Εικόνα 16: Κόκκοι του SG106 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση.....	56
Εικόνα 17: Το SG076 πριν και μετά την τριβομέτρησή του (πάνω) και το SG076 μετά την τριβολογική του δοκιμή με λεπτομέρειες (κάτω). ....	64
Εικόνα 18: Το SG090 πριν και μετά την τριβομέτρησή του (πάνω) και το SG090 μετά την τριβολογική του δοκιμή με λεπτομέρειες (κάτω). ....	65
Εικόνα 19: Το SG105 πριν και μετά την τριβομέτρησή του. Στο κέντρο φαίνεται η επιφάνεια, η οποία έχει καταπονηθεί σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση (πάνω) και Το SG105 μετά την τριβολογική του δοκιμή με λεπτομέρειες (κάτω).....	66
Εικόνα 20: Το SG106 πριν και μετά την τριβομέτρησή του. Στο κέντρο φαίνεται η επιφάνεια, η οποία έχει καταπονηθεί σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση (πάνω) και Το SG106 μετά την τριβολογική του δοκιμή με λεπτομέρειες (κάτω).....	67

## **Πίνακες**

Πίνακας 1: Κατάλογος υλικών .....	33
Πίνακας 2: Αρχική μάζα των υπό μελέτη υλικών .....	34
Πίνακας 3: Ιδιότητες πορώδους των δοκιμίων. ....	40
Πίνακας 4: Ιδιότητες του ανταγωνιστικού σώματος [27].....	46
Πίνακας 5: Παράμετροι των δοκιμών τριβής των κεραμικών υλικών. ....	48
Πίνακας 6: Διαφορά μάζας των δοκιμίων μετά από καταπόνηση σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση για 2 ώρες. ....	49
Πίνακας 7: Τελική μάζα των δοκιμίων μετά την καταπόνηση τους σε μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση για 2 ώρες. ....	49

Πίνακας 8: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG090 σε 4mm - 2N. ....	103
Πίνακας 9: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG090 σε 8mm - 5N. ....	103
Πίνακας 10: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG090 σε 12mm - 10N. ....	103
Πίνακας 11: Συνολική απώλεια όγκου SG090. ....	103
Πίνακας 12: Μέσος συντελεστής φθοράς SG090.....	104
Πίνακας 13: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG105 σε 12mm - 10N. ....	104
Πίνακας 14: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG106 σε 12mm - 10N. ....	104

## Σχήματα

Σχήμα 1: Ιστόγραμμα απώλειας μάζας των δοκιμίων μετά από 2 ώρες καταπόνησης σε μηχανική διάβρωση σπηλαιώση. ....	57
Σχήμα 2: Γράφημα απόστασης ολίσθησης s - συντελεστή τριβής μ του δοκιμίου SG105 για τρεις διαφορετικές ονομαστικές ακτίνες και τρεις κάθετες δυνάμεις.....	58
Σχήμα 3:Γράφημα απόστασης ολίσθησης s - συντελεστή τριβής μ του δοκιμίου SG106 για τρεις διαφορετικές ονομαστικές ακτίνες και τρεις κάθετες δυνάμεις.....	59
Σχήμα 4: Γράφημα απόστασης ολίσθησης s - συντελεστή τριβής μ του δοκιμίου SG090 για τρεις διαφορετικές ονομαστικές ακτίνες και τρεις κάθετες δυνάμεις.....	60
Σχήμα 5: Γράφημα απόστασης ολίσθησης s - συντελεστή τριβής μ του δοκιμίου SG076. ....	61
Σχήμα 6: Γράφημα απόστασης ολίσθησης s - συντελεστή τριβής μ των δοκιμίων για την ίδια ονομαστική ακτίνα και κάθετη δύναμη.....	62

Σχήμα 7: Γράφημα απόστασης ολίσθησης $s$ - συντελεστή τριβής $\mu$ των δοκιμίων για την ίδια ονομαστική ακτίνα και κάθετη δύναμη.....	62
Σχήμα 8: Γράφημα απόστασης ολίσθησης $s$ - συντελεστή τριβής $\mu$ των δοκιμίων για την ίδια ονομαστική ακτίνα και κάθετη δύναμη.....	63
Σχήμα 9: Απώλεια όγκου για κάθε ονομαστική ακτίνα του SG090.....	68
Σχήμα 10: Συντελεστής φθοράς $k$ του SG090 για τις τρεις ονομαστικές ακτίνες. ....	69
Σχήμα 11: Σύγκριση απώλειας όγκου των δοκιμίων σε ονομαστική ακτίνα 12 mm και κάθετη δύναμη 10N. ....	69
Σχήμα 12: Σύγκριση συντελεστών φθοράς δοκιμίων στην ονομαστική ακτίνα 12 mm και κάθετης δύναμης 10 N.....	70
Σχήμα 13: Παράδειγμα αρχικής επιφάνειας SG090. ....	70
Σχήμα 14: Παράδειγμα μέτρησης αύλακας SG090. ....	71
Σχήμα 15: Το μετρήσιμο εμβαδό του του σχήματος 14. ....	71
Σχήμα 16: Παράδειγμα αρχικής επιφάνειας SG105. ....	71
Σχήμα 17: Παράδειγμα μέτρησης αύλακας SG105. ....	72
Σχήμα 18: Το μετρήσιμο εμβαδό του του σχήματος 17. ....	72
Σχήμα 19: Παράδειγμα αρχικής επιφάνειας SG106. ....	72
Σχήμα 20: Παράδειγμα μέτρησης αύλακας SG106. ....	73
Σχήμα 21: Το μετρήσιμο εμβαδό του του σχήματος 20. ....	73
Σχήμα 22: Διάγραμμα $t$ - $\mu$ του SG105.....	82
Σχήμα 23: Διάγραμμα $laps$ - $\mu$ του SG105. ....	83

Σχήμα 24: Διάγραμμα t-μ του SG106.....	84
Σχήμα 25: Διάγραμμα laps-μ του SG105. ....	85
Σχήμα 26: Διάγραμμα t-μ του SG090.....	86
Σχήμα 27: Διάγραμμα laps-μ του SG090. ....	87
Σχήμα 28: Διάγραμμα t-μ του SG076.....	88
Σχήμα 29: Διάγραμμα laps-μ του SG076. ....	89

# 1.Εισαγωγή

## 1.1 Κεραμικά Υλικά

Καταρχάς, για τη σύνταξη της διπλωματικής εργασίας θα πρέπει πρώτα να οριστούν τα κεραμικά υλικά. Τα κεραμικά υλικά, λοιπόν, κατά τον Askeland είναι μη μεταλλικά και ανόργανα υλικά, υψηλής σκληρότητας με υψηλό σημείο τήξης. Μπορεί να είναι μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά ή άμορφα κεραμικά όπως τα υαλοκεραμικά και οι ανόργανες ύαλοι. Τα συνήθη κεραμικά υλικά είναι μονωτές του ηλεκτρισμού καθώς και της θερμότητας, έχουν χημική σταθερότητα και παρουσιάζουν καλή αντοχή σε δοκιμή θλίψης (οξειδία). [1,2]

## 1.2 Τύποι Κεραμικών Υλικών

### 1.2.1 Κρυσταλλικά Κεραμικά

Τα κρυσταλλικά κεραμικά βρίσκονται παντού στη φύση και υπάρχουν πολλές κρυσταλλικές δομές, με τη πιο σημαντική να είναι εκείνη του διαμαντιού, της κυβικής, δηλαδή δομής του άνθρακα. Άλλα παραδείγματα αποτελούν το Χλωριούχο Νάτριο ( $\text{NaCl}$ ), ο Φθορίτης ( $\text{CaF}_2$ ), ο Περοβσκίτης ( $\text{CaTiO}_3$ ), το οξείδιο του ζirkονίου ή αλλιώς Ζirkονία ( $\text{ZrO}_2$ ) καθώς και το οξείδιο του αλουμινίου ή αλλιώς αλουμίνα ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Το τελευταίο είναι και ένα από τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα κρυσταλλικά κεραμικά, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιος για πλήθος εφαρμογών [1]. Παραδείγματος χάρη επειδή παρουσιάζει υψηλή σκληρότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λειαντικές κατεργασίες, καθώς και για να προσδώσει σε διαφανή καλύμματα, όπως στο τζάμι του ρολογιού, καλύτερη αντοχή σε χαράξεις και φθορά. Επιπλέον μπορεί να λειτουργήσει και σε εφαρμογές που χρειάζεται όχι μόνο καλή μηχανική αντοχή αλλά και θερμική [1,2].



### 1.2.2 Πυριτικά και ανόργανες ύαλοι

Τα πυριτικά είναι κεραμικά υλικά που έχουν ως βάση το διοξείδιο του πυριτίου ή όπως είναι αλλιώς γνωστό την πυριτία. Η πυριτία με τη μορφή του χαλαζία (κρυσταλλικό ορυκτό) απαντάται στη φύση και αποτελεί βασικό συστατικό της λιθόσφαιρας όπως και της άμμου. Εφόσον συναντάται και ως άμορφο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην κατασκευή υάλων. Επίσης, αν μεταβληθεί η σύσταση και οι συνθήκες κατεργασίας τέτοιων υάλων μπορεί να αλλάξουν σημαντικά οι μηχανικές και οπτικές ιδιότητες αυτών. Οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες ή οι ύαλοι επαναφοράς τα επονομαζόμενα *tempered glasses* αποτελούν τρανά παραδείγματα για το πόσο διαφορετικές μπορεί να είναι οι ιδιότητες αυτές μεταξύ τους αναλόγως τον σκοπό εφαρμογής [1,2].

### 1.2.3 Υαλοκεραμικά

Τα υλικά αυτά αποτελούν παράγωγα των άμορφων υάλων. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να παρουσιάζουν αρκετά υψηλή μηχανική αντοχή και δυσθραυστότητα, καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες καλές διηλεκτρικές ιδιότητες. Μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα αφού μπορούν να εφαρμοστούν ίδιες μέθοδοι παρασκευής όπως των κοινών υάλων και μπορεί να είναι διαφανή αλλά και αδιαφανή [1,2].

### 1.2.4 Πυρίμαχα

Τα πυρίμαχα κεραμικά υλικά όπως λέει και το όνομά τους είναι τέτοια υλικά παρασκευασμένα με τον σκοπό καλής αντοχής σε υψηλές θερμικές φορτίσεις. Συνήθως απαρτίζονται από χονδρόκοκκα σωματίδια οξειδίων, τα οποία συνδέονται με ένα λεπτόκοκκο πυρίμαχο υλικό με τη διαδικασία της έψησης. Τα υλικά αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη χημική τους συμπεριφορά. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα όξινα, τα βασικά και τα ουδέτερα. Τα όξινα πυρίμαχα χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που βρίσκονται σε όξινο περιβάλλον λειτουργίας, αντίστοιχα τα βασικά χρησιμοποιούνται σε βασικό περιβάλλον, ενώ τα ουδέτερα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στα δύο περιβάλλοντα [1,2].

### 1.3 Ατέλειες Δομής Κεραμικών Υλικών

Καταρχάς, στα κρυσταλλικά κεραμικά υλικά συναντώνται διάφοροι τύποι σημειακών ατελειών στη δομή των κρυστάλλων τους. Αυτές οι ατέλειες είναι: οι ακαθαρσίες που μπορεί να εμφανιστούν, κάποια ενισχυτικά στοιχεία, τα πλεγματικά κενά, οι ατέλειες παρεμβολής και οι ατέλειες αντικατάστασης όπως οι ατέλειες τύπου Frenkel και τύπου Shottky, με τις τελευταίες να είναι οι πιο συνήθεις στα κεραμικά υλικά. Άλλες ατέλειες δομής που μπορεί να παρατηρήσει κάποιος στα κεραμικά υλικά είναι οι ρωγμές, οι εγκοπές και οι πόροι. Πολλά κεραμικά υλικά, ειδικότερα τα προϊόντα κοννιομεταλλουργείας επίσης μπορούν να χαρακτηριστούν και πορώδη. Οι πόροι αυτοί, όμως, είναι ένα μείζον ελάττωμα των πολυκρυσταλλικών κεραμικών υλικών, διότι μπορεί να αποτελέσουν την αφετηρία δημιουργίας ρωγμών στο κεραμικό αντικείμενο. Αξιοσημείωτο είναι ότι όσο πιο πορώδες είναι το υλικό, το μέτρο ελαστικότητας και η μηχανική του αντοχή μειώνονται, ευθύνονται, δηλαδή, για την ψαθυρότητα των κεραμικών. Παρόλα αυτά οι πόροι στη μικροδομή αποφέρουν και ευεργετικά αποτελέσματα στο υλικό, όπως είναι η υψηλή αντοχή σε θερμικά φορτία και πιο συγκεκριμένα σε απότομες αυξήσεις της θερμοκρασίας [1].

Υπάρχουν δύο τρόποι μέτρησης του πορώδους σε ένα υλικό: το φαινομενικό πορώδες (apparent porosity) και το πραγματικό πορώδες (true porosity). Το φαινομενικό πορώδες ορίζεται ως το ποσοστό του συνολικού όγκου του υλικού, το οποίο καταλαμβάνεται από διασυνδεδεμένους (ανοιχτούς) πόρους [1]. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο είδη πόρων οι διασυνδεδεμένοι ή ανοιχτοί όπως προαναφέρθηκε καθώς και οι κλειστοί. Οι ανοιχτοί πόροι επιτρέπουν διέλευση ρευστών υγρών και αερίων μέσα από το υλικό σε αντίθεση με τους κλειστούς, οι οποίοι είτε ξεκινάνε από την επιφάνεια του αντικειμένου και σταματάνε σε κάποιο μήκος ή είναι εσωτερικοί πόροι.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τον Askeland και Wright το φαινομενικό πορώδες ορίζεται ως εξής:

$$\text{Φαινομενικό Πορώδες} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100 \quad (1 - 1)$$

- $W_d$ : Βάρος του ξηρού κεραμικού
- $W_s$ : Το βάρος του κεραμικού αιωρούμενο μέσα στο νερό
- $W_w$ : Το βάρος του κεραμικού αφού βγει από το νερό

Το φαινομενικό πορώδες αποτελεί και το μέτρο διαπερατότητας των κεραμικών υλικών. Η ιδιότητα αυτή δείχνει πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορεί ένα ρευστό να διαρρέυσει μέσα από το υπό εξέταση υλικό.

Το πραγματικό πορώδες είναι ο άλλος τρόπος μέτρησης του πορώδους. Η διαφορά του μέτρου αυτού με το φαινομενικό πορώδες είναι ότι χρησιμοποιείται και ο όγκος των κλειστών πόρων, κάτι που δίνει στον ερευνητή σωστότερα αποτελέσματα για τις ιδιότητες του εξεταζόμενου υλικού. Το πραγματικό πορώδες ορίζεται από την εξίσωση:

$$\text{Πραγματικό Πορώδες} = \frac{\rho - B}{\rho} \times 100 \quad (1 - 2)$$

Όπου:

- $\rho$ : Η θεωρητική πυκνότητα του υλικού, δεν λαμβάνει υπόψη τους πόρους του υλικού
- $B$ : Γεωμετρική πυκνότητα ή αλλιώς bulk density, η οποία ορίζεται ως:

$$B = \frac{W_d}{W_w - W_s} \quad (1 - 3)$$

### 1.3.1 Ψαθυρή Φύση των Κεραμικών Υλικών

Ψαθυρό υλικό ονομάζεται εκείνο όπου θραύεται πριν την οποιαδήποτε εμφάνιση πλαστικής παραμόρφωσης στο υλικό μετά από καταπόνηση σε εφελκυσμό. Η ψαθυρότητα χαρακτηρίζει κατά κόρον τα κεραμικά υλικά, τα οποία κρυσταλλικά και άμορφα δεν παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση και θραύονται. Αυτό συμβαίνει, διότι, όταν τα κεραμικά φορτίζονται εφελκυστικά αρχίζουν και διαμορφώνονται ρωγμές, οι οποίες διαδίδονται κάθετα στη διεύθυνση της καταπόνησης. Είναι γνωστό ότι το όριο θραύσης των κεραμικών είναι μικρότερο από εκείνο των μεταλλικών υλικών [24,25]. Αυτό εξηγείται από τις ατέλειες μικροδομής στα κεραμικά, οι οποίες λειτουργούν ως ενίσχυση της διάδοσης των ρωγμών. [2]

## 1.4 Σύνθεση Κεραμικών Υλικών και Κατεργασία τους

Σε γενικές γραμμές τα κεραμικά υλικά αναλόγως τη δομή και τη μορφή τους έχουν διαφορετικό τρόπο σύνθεσης και κατεργασίας. Τα κρυσταλλικά κεραμικά για αρχή δημιουργούνται από κεραμικές κόνεις, αυτή η σκόνη λοιπόν μορφοποιείται στο κεραμικό αντικείμενο που θέλουμε μέσω διαφόρων μεθόδων. Αυτές οι μέθοδοι είναι η συμπίεση, η χύτευση σε ταινίες, η υγρή χύτευση, όπως και η εξώθηση και η έγχυση υπό πίεση.

Στη συμπίεση, η μορφοποίηση του αντικειμένου γίνεται μέσω μηχανικού φορτίου. Η μέθοδος αυτή είναι γρήγορη και αποτελεσματική για μικρά αντικείμενα, όπως κοπτικά εργαλεία και ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

Η χύτευση σε ταινίες χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κεραμικών ταινιών πάχους 3-100 mm. Η κόνις πρέπει να αναμειχθεί με πρόσθετα υλικά για να δημιουργήσει τον επονομαζόμενο πολφό ένα μείγμα έτοιμο προς επεξεργασία.

Στην υγρή χύτευση η κόνις πάλι αναμιγνύεται με άλλα προσθετικά για να δημιουργηθεί πολφός. Το μείγμα αυτό εναποτίθεται σε ένα καλούπι φτιαγμένο από γύψο, το οποίο ουσιαστικά τραβάει τα υγρά του πολφού, αφήνοντας έτσι μόνο το συμπαγές αντικείμενο επιθυμητού πάχους που χρειαζόμαστε.

Τέλος οι μέθοδοι της εξώθησης και της έγχυσης υπό πίεση χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή διαφόρων αντικειμένων για οικοδομική χρήση όπως τούβλα, σωλήνες και κεραμίδια καθώς και για αντικείμενα ηλεκτρονικής χρήσης όπως οι ηλεκτρικοί μονωτές. Πιο συγκεκριμένα η κόνις αναμιγμένη με συνδέτες και άλλα προσθετικά δίνει μια άμορφη πλαστική μάζα. Η μάζα αυτή, λοιπόν, εισέρχεται σε ένα «blender» με σχήμα κοχλία και από εκεί αφού ομογενοποιείται και ξηραίνεται, μπαίνει υπό πίεση με τη βοήθεια εμβόλου σε ένα καλούπι όπου και δημιουργείται το κεραμικό αντικείμενο. Στην έγχυση υπό πίεση, σε αντίθεση με τη μέθοδο της εξώθησης, τα αντικείμενα που παράγονται είναι περίπλοκου σχήματος. Αν και η διαδικασία είναι περίπου η ίδια, μείγμα δηλαδή κεραμικής κόνεως με άλλα προσθετικά υλικά σε αυτή την περίπτωση με θερμοπλαστικούς πλαστικοποιητές και άλλα οργανικά μπαίνει σε αναμικτήριο και εξέρχεται με πίεση σε ένα καλούπι και ακολουθεί η διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης. Ουσιαστικά με τη διαδικασία αυτή η πυκνότητα του υλικού αυξάνεται [1].

## 1.5 Ορισμός της διάβρωσης

Διάβρωση ονομάζεται κάθε αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής, κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια υλικού [17]. Το φαινόμενο της διάβρωσης φυσικά μπορεί να συναντηθεί και σε μη μεταλλικά υλικά, όπως τα κεραμικά, τα πλαστικά και τα υλικά βιολογικής φύσεως όπως η πέτρα και το ξύλο [17,18].

### 1.5.1 Δυναμικές και στατικές καταπονήσεις

Δυναμικές καταπονήσεις ονομάζονται εκείνες όπου η θέση και το μέγεθος του φορτίου που δέχεται ένα σώμα είναι μεταβλητό με την πάροδο του χρόνου, μια τέτοια καταπόνηση είναι η δοκιμή ενός υλικού σε κόπωση. Σε αντίθεση οι στατικές καταπονήσεις ονομάζονται εκείνες όπου το μέγεθος και η θέση του φορτίου δεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, τέτοιες καταπόνηση αποτελεί η δοκιμή του εφελκυσμού και της θλίψης [22, 23].

### 1.5.2 Η δοκιμή της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης

Μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση (cavitation erosion) είναι ένα είδος φθοράς (δυναμική καταπόνηση), που προκαλείται σε μια στέρεη επιφάνεια από τον σχηματισμό φυσαλίδων σε ένα υγρό ρευστό μέσο, όταν η πίεση του μειώνεται κάτω από μία κρίσιμη τιμή, μετά από γρήγορες αλλαγές στη ροή του ρευστού καθώς και από δονήσεις στη ρευστομηχανή [5]. Όταν ένας μεγάλος αριθμός φυσαλίδων, λοιπόν, σχηματιστεί και αυτές καταρρεύσουν, παράγουν κρουστικά κύματα (shock – waves) και μικροτζέτ (micro jets). Οι έντονοι παλμοί που δημιουργούνται καταπονούν τις στερεές επιφάνειες που βρίσκονται κοντά και η επαναλαμβανόμενη κόπωση επιφέρει συνέπειες στην επιφάνεια αυτή, όπως η αφαίρεση υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών, κοιλοτήτων και λάκκων στην επιφάνεια και έτσι τη φθορά και τη μείωση του βαθμού απόδοσης της ρευστομηχανής ή του υδραυλικού εξαρτήματος [4].

Το συγκεκριμένο είδος φθοράς παρατηρείται κυρίως, όπως προαναφέρθηκε, σε ρευστομηχανικά εξαρτήματα, δηλαδή, σε αγωγούς και αντλίες. [3] Μια συνηθισμένη βλάβη που παρατηρείται από μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση είναι στα πτερύγια υδροστροβίλων δράσης και αντίδρασης που χρησιμοποιούνται σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια [10]. Οι Bakhshandi et al. υποστηρίζουν ότι η χρήση υγρού λιπαντικού σε συναρμογές που υπάρχει τριβή μεταξύ επιφανειών, όπως εκείνη ενός εμβόλου με ένα στέλεχος, μπορεί να προκαλέσει μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση στις επιφάνειες αυτές [11].

Παρόλα αυτά, το φαινόμενο της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ευεργετικά σε ιατρικές εφαρμογές. Καταρχάς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του μεγέθους πετρών στο ήπαρ ή στη χολή μέσω λιθοτριψίας. Πιο σημαντικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί χειρουργικά για μικρές τομές ή για την στόχευση καρκινικών κυττάρων με σκοπό τη θεραπεία του ασθενή [13].

Στη δοκιμή της μηχανικής διάβρωσης και σπηλαιώσης προσομοιώνεται η ακριβώς παραπάνω περιγραφή, χρησιμοποιώντας μια εγκατάσταση ικανή για την παραγωγή υπερήχων, βοηθώντας έτσι τις φυσαλίδες που δημιουργούνται να προσκρούσουν στο υλικό που δοκιμάζεται με υπερηχητική ταχύτητα [6,7].



### 1.5.3 Χρόνος ή περίοδο επώασης

Ορίζουμε ως χρόνο ή περίοδο επώασης (incubation period) ενός υλικού που δοκιμάζεται σε μηχανική διάβρωση – σπηλαίωση, τον χρόνο όπου το υλικό κάτω από συνθήκες μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης δεν παρατηρείται αφαίρεση μάζας ή φθορά στην επιφάνειά του. [5]

#### 1.5.4 Μαθηματικό μοντέλο της μηχανικής διάβρωσης σπηλαιώσης

Ακριβές μαθηματικό μοντέλο που να περιγράφει την μηχανική διάβρωση και σπηλαιώση δυστυχώς δεν υπάρχει, για αυτό το λόγο λοιπόν το μέγεθος της φθοράς υπολογίζεται μέσα από πειράματα στο κάθε υλικό μελέτης και σχηματίζοντας τις επονομαζόμενες καμπύλες μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης για το κάθε υλικό ξεχωριστά. Οι Szdoko et al. [3] επιχείρησαν να παρουσιάσουν ένα τέτοιου είδους μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στην πιθανότητα απώλειας όγκου κατά τη διάρκεια μιας πειραματικής δοκιμής μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης.

Πρώτα θέτουν κάποιες παραμέτρους για τον επιτυχή υπολογισμό της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης:

1. Η ένταση της δοκιμής της μηχανικής διάβρωσης σπηλαιώσης θα πρέπει να παραμένει σταθερή.
2. Θα πρέπει να καταστεί κατανοητό ότι το φαινόμενο της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης μπορεί να περιγραφεί από μια συνάρτηση κατανομής.
3. Η πιθανότητα απώλειας όγκου εξαρτάται φυσικά από την ένταση της δοκιμής μηχανικής διάβρωσης σπηλαιώσης, τις ιδιότητες του κάθε υπό μελέτη υλικού καθώς και από τις διαστάσεις του.

Η συνολική πιθανότητα απώλειας όγκου μπορεί  $V_0$  να περιγραφεί από τη συνάρτηση Weibull:

$$P(V_0) = 1 - \exp \left[ -IV_0 \left( \frac{t}{Kc} \right)^{\frac{1}{Wpl}} \right] \quad (1 - 4)$$

Όπου το  $V_0$  είναι ο αρχικός όγκος,

$$V_0 = A * h \quad (1 - 5)$$

- A: επιφάνεια μελέτης
- h: βάθος των αρχικών ρωγμών μετά από τον χρόνο επώασης

Η συνολική απώλεια όγκου για έναν αυθαίρετα διαβρωμένο όγκο είναι:

$$P(V) = [P(V_0)]^n = [P(V_0)]^{\frac{V}{V_0}} \quad (1 - 6)$$

Λογαριθμίζοντας την (1-4) εξίσωση έχουμε:

$$\ln P(V) = \frac{V}{V_0} * \ln P(V_0) \quad (1 - 7)$$

Και θέλοντας να απαλείψουμε τον λογάριθμο έχουμε:

$$P(V) = \exp \left[ \frac{V}{V_0} * \ln P(V_0) \right] \quad (1 - 8)$$

Αντικαθιστώντας την (1-4) στην (1-8) έχουμε:

$$P(V) = \exp \left\{ \frac{V}{V_0} \ln \left[ 1 - \exp \left( -I * V_0 \left( \frac{t}{Kc} \right)^{\frac{1}{W_{pl}}} \right) \right] \right\} \quad (1 - 9)$$

Και επειδή ξέρουμε ότι  $V=A*H$  και  $V_0=A*h$  έχουμε:

$$P(V) = \exp \left\{ \frac{H}{h} \ln \left[ 1 - \exp \left( -I * Ah \left( \frac{t}{Kc} \right)^{\frac{1}{W_{pl}}} \right) \right] \right\} \quad (1 - 10)$$

Εν τέλει έχουμε συνάρτηση χρόνου δοκιμής – όγκου:

$$V(t) = V * \exp \left\{ \frac{H}{h} \ln \left[ 1 - \exp \left( -I * Ah \left( \frac{t}{Kc} \right)^{\frac{1}{W_{pl}}} \right) \right] \right\} \quad (1 - 11)$$

Όπου:

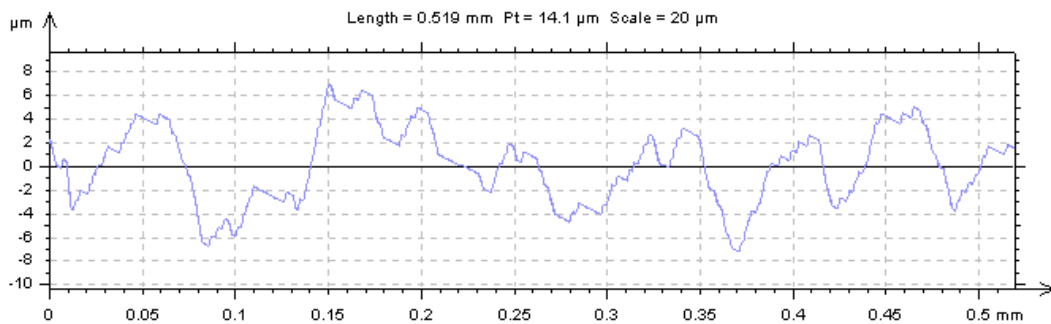
- $I$ : ένταση μηχανικής διάβρωσης σπηλαίωσης
- $t$ : χρόνος δοκιμής
- $W_{pl}$ : σχετικό έργο της πλαστικής παραμόρφωσης στην διαβρωμένη επιφάνεια
- $1/W_{pl}$ : η αντίσταση του υλικού σε πλαστική παραμόρφωση υπό συνθήκες μηχανικής διάβρωσης σπηλαίωσης
- $K_c$ : συντελεστής σχετικής έντασης καταπόνησης υλικού κάτω από συνθήκες μηχανικής διάβρωσης σπηλαίωσης. [3]

### 1.5.5 Τριβολογική δοκιμή

Μια τριβολογική δοκιμή εκτελείται με σκοπό τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής του υπό μελέτη υλικού. Συνήθως για τη μέτρηση αυτή χρησιμοποιούνται πειραματικές συσκευές, τα επονομαζόμενα τριβόμετρα. Τα τριβόμετρα αυτά φέρουν έναν δίσκο, ο οποίος μπορεί και περιστρέφεται, όπου πάνω σε αυτόν πακτώνεται το υλικό του οποίου θέλουμε να προσδιορίσουμε τον συντελεστή τριβής. Ένα ανταγωνιστικό σώμα, συνήθως μεγαλύτερης σκληρότητας από το υπό μελέτη υλικό, καθώς και ένα κάθετο φορτίο με τη μορφή βαριδιού, τοποθετούνται πάνω από το τελευταίο και ο δίσκος αρχίζει και περιστρέφεται δημιουργώντας έτσι ένα τριβόσυστημα. Από το τριβόσυστημα αυτό και με τη βοήθεια προγράμματος υπολογιστή, μπορεί κάποιος να πάρει μετρήσεις του συντελεστή τριβής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δοκιμές μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με το τριβόσυστημα να μην περιέχει είδος λιπαντικού, δηλαδή η τριβομέτρηση να είναι ξηρή (dry), είτε με τη χρήση λιπαντικού [25,26].

### 1.5.6 Μέτρηση της Τραχύτητας ή Προφίλομετρία

Η τραχυμέτρηση ή προφίλομετρία ενός υλικού περιγράφει τη διαδικασία προσδιορισμού της τοπογραφίας της επιφάνειάς του. Με τον όρο αυτό εννοούμε τις εξάρσεις και τις βυθίσεις, την τραχύτητα ή το προφίλ δηλαδή, της επιφάνειας του υλικού. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται με τη βοήθεια ενός τραχυμέτρου, όπου με μια ακίδα «σκανάρει» την επιφάνεια και εξάγει το προφίλ της. Παραδείγματος χάρη:



Εικόνα 1: Παράδειγμα προφίλ επιφάνειας υλικού

Από μια τραχυμέτρηση μπορεί κάποιος να εξάγει και τη μέση αριθμητική τραχύτητα ή τραχύτητα κεντρικής γραμμής  $R_a$ , την ενδεικνυόμενη τραχύτητα  $R_q$ , το μέγιστο βάθος  $R_t$  και το μέσο βάθος  $R_{tm}$ . Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί η  $R_a$ , διότι είναι η γραμμή που τοποθετείται έτσι ώστε ο αριθμητικός μέσος όρος των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων του προφίλ να είναι το ελάχιστο [27,28].

### 1.5.7 Συντελεστής φθοράς

Ο συντελεστής φθοράς των υλικών είναι ένας διαστατικοποιημένος συντελεστής, ο οποίος εκφράζει την ποσότητα του όγκου που αφαιρέθηκε λόγω φθοράς προς την κάθετη δύναμη που ασκήθηκε επί την απόσταση ολίσθησης.

$$k = \frac{V}{P * s} \left( \frac{mm^3}{N * m} \right) \quad (1 - 12)$$

Εξαρτάται, βέβαια, από το τριβόσυστημα καθώς και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος που βρίσκεται το τριβόσυστημα αυτό όπως και από το την τραχύτητα των εξεταζόμενων επιφανειών [31].

## 2. Ανασκόπηση παλαιότερων εργασιών

Με τη μελέτη μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης σε μεταλλικά υλικά και επικαλύψεις κεραμικές και μη έχουν ασχοληθεί αρκετοί. Δεν είναι όμως πολλοί, οι οποίοι έχουν ασχοληθεί με τη δοκιμή αυτή σε κατά κόρον κεραμικά υλικά. Με τη δοκιμή της μηχανικής διάβρωσης και σπηλαίωσης τα υλικά υπόκεινται σε διαρκή κρούση με φυσαλίδες, οι οποίες με υπερηχητική ταχύτητα προσκρούονται στο υλικό με αποτέλεσμα την αφαίρεσή του, μετά από κάποιο συγκεκριμένο και μετρημένο χρονικό διάστημα. Παρακάτω παρουσιάζονται εργασίες όπου οι ερευνητές έχουν κάνει δοκιμές μηχανικής διάβρωσης - σπηλαίωσης σε διάφορα κεραμικά υλικά.

## 2.1 Έρευνες σχετικά με την επίδραση της μηχανικής διάβρωσης και σπηλαιώσης σε κεραμικά υλικά

Αν και οι έρευνες που έχουν γίνει σε δοκιμές μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης είναι λίγες, οι ερευνητές έχουν φροντίσει να δοκιμάσουν πλήθος διαφορετικών κεραμικών υλικών. Οι Tomlinson και Matthews δοκίμασαν τα SC, SC25BC, SC50BC, SC75BC, BC, RBSC, SiAlON, ALOX, ALOX975, PSZ και TZP. Τα υλικά αυτά τα προμηθεύτηκαν από διάφορα εργαστήρια του Ηνωμένου Βασιλείου [5]. Οι Tomlinson, Kalitsounakis και Vekinis μελέτησαν τη φθορά που προκαλεί η δοκιμή αυτή σε έντεκα διαφορετικά είδη αλουμίνιας [14]. Οι Garcia – Atance Fatjo, Hadfield, Vieillard και Sekulic πειραματίστηκαν πάνω σε ζirkονία τύπου Y-TZP, νιτρίδιο του πυριτίου και σε αλουμίνα υψηλής καθαρότητας [16]. Οι Litzow, Zum Gahr και Schneider ασχολήθηκαν με τα προηγμένα κεραμικά υλικά  $Al_2O_3$ : F99.9, F99D;  $Al_2O_3$  –  $ZrO_2$ : FZT, AL24ZYS;  $ZrO_2$ : FZMK; SSiC: EKasic F, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που έδωσε χάλυβας 100Cr<sub>6</sub> για τη σύγκρισή προηγμένων κεραμικών και μεταλλικών υλικών σε συνθήκες μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης [19]. Ο Niebuhr δοκίμασε τα  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , Macor<sup>TM</sup> και  $Si_3N_4$ , τα οποία μέσω σύντηξης παρουσίασαν 0% φαινομενικό πορώδες. Τα υλικά αυτά τα δοκίμασε σε τέσσερα διαφορετικά υγρά διαλύματα, έκανε δοκιμές σε απιονισμένο νερό, προσομοίωσε θαλασσινό νερό με σύσταση 3.5% NaCl και σε διαλυμένη βάση και οξύ [20].

## 2.2 Πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στις παραπάνω έρευνες και πειραματική διαδικασία

Οι Tomlinson et al. [5] χρησιμοποίησαν μια εγκατάσταση ικανή για την παραγωγή υπερήχων, η οποία δούλεψε στα 20 kHz και ρύθμισαν την κεφαλή να πάλλεται στα 50  $\mu\text{m}$ . Αν και δεν μας δίνουν τις ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων, σημειώνουν ότι αυτά είχαν 5 mm πάχος και ότι τοποθετήθηκαν  $1 \pm 0.1$  mm από την παλλόμενη κεφαλή, σε νερό θερμοκρασίας  $18 \pm 1$  °C ποσότητας 800 ml. Για τον προσδιορισμό του χρόνου επώασης έλαβαν μετρήσεις για περιοδική δοκιμή από ένα λεπτό μέχρι 15 λεπτά και έπειτα άλλα 5 λεπτά μέχρι την αφαίρεση μάζας 0.1 mg. Έπειτα από τον προσδιορισμό της περιόδου επώασης τα δοκίμια ζυγίζοντουσαν κάθε ώρα για 15 ώρες, για τις περιπτώσεις των SiC, B<sub>4</sub>C και SiC - B<sub>4</sub>C, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια δοκιμάστηκαν για 30 ώρες [5]. Σε ίδιες συνθήκες με τις ίδιες παραμέτρους και διαστάσεις έκαναν τις μετρήσεις τους και οι Tomlinson et al. [14]. Αν και οι Garcia – Atance Fatjo et al. [16] χρησιμοποίησαν επίσης διάταξη που δούλεψε σε συχνότητα 20 kHz και 50  $\mu\text{m}$  δόνηση κεφαλής, εξέτασαν τα υλικά σε διαφορετική θερμοκρασία νερού και πιο συγκεκριμένα στους 22 °C και βύθισαν τα δοκίμια σε βάθος 10 mm. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις παραπάνω εργασίες που μελετούσαν την αφαίρεση μάζας από την επιφάνεια των δοκιμίων έπειτα από μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση, οι ερευνητές της εργασίας αυτής θέλανε να μελετήσουν την τοπογραφία της επιφάνειας μετά τη δοκιμή αυτή. Για αυτό το λόγο και χρησιμοποίησαν ένα Profiler Interferometer για τον υπολογισμό της επιφανειακής καταστροφής και λάβανε μετρήσεις πριν την αρχή της δοκιμής, στη μία ώρα και στις δύο ώρες. Ένα ηλεκτρονικό στερεοσκόπιο SEM χρησιμοποιήθηκε, επίσης, για την αποτύπωση του αποτελέσματος της δοκιμής μετά από τρεις ώρες [16]. Τα δοκίμια των Litzow et al. [19] ήταν σε σχήμα πλακιδίου με διαστάσεις 18 mm x 5 mm x 20 mm, για τη δοκιμή της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης χρησιμοποίησαν μηχανήμα ικανό να παράγει υπερήχους σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G32-92. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η πειραματική συσκευή τους δούλεψε με συχνότητα 20 kHz και με την κεφαλή του να πάλλεται στα  $25 \pm 1.25$   $\mu\text{m}$ . Τα δοκίμια είχαν απόσταση από την παλλόμενη κεφαλή 0.5 mm. Το υγρό, στο οποίο βυθίστηκαν τα υπό δοκιμή υλικά ήταν απιονισμένο νερό και η θερμοκρασία του κρατήθηκε σταθερή στους  $25 \pm 2$  °C κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Τα δοκίμια ήταν τοποθετήθηκαν σε βάθος  $12 \pm 4$



mm και ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας  $10^{-5}$  g, σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής. Τέλος σημειώνουν ότι ο χρόνος επώασης των δοκιμίων μετρήθηκε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος προσδιορισμού του χρόνου επώασης ορίστηκε ως η χρονική στιγμή της δοκιμής όπου η αφαίρεση μάζας του υλικού, που μετρήθηκε ξεπέρασε τα  $10^{-4}$  g, ενώ ο δεύτερος τρόπος ήταν ότι η περίοδος επώασης, προσδιορίστηκε γραφικά από τα πειραματικά δεδομένα και τις γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από αυτά. Ο προσδιορισμός έγινε στο σημείο τομής της καθέτου της καμπύλης της γραμμικής απώλειας μάζας με τον άξονα του χρόνου [19]. Ο Niebuhr παρομοίως χρησιμοποίησε μια συσκευή Branson<sup>TM</sup> σύμφωνα με το ASTM G32 – 03 πρότυπο. Όπως και οι προηγούμενοι ερευνητές ρύθμισε τον μετατροπέα της συσκευής να δουλεύει με συχνότητα 20 kHz και την κεφαλή να πάλλεται στα 50  $\mu\text{m}$ . Τα δοκίμια τα τοποθέτησε σε απόσταση  $1 \text{ mm} \pm 100 \mu\text{m}$  από την άκρη της κεφαλής, τα οποία βυθίστηκαν σε βάθος υγρού 30 mm. Τα δοκίμιά του είχαν σχήμα κυλίνδρου (button) και είχαν διάμετρο 15.9 mm, τα ύψη των δοκιμίων, όμως, διέφεραν μεταξύ τους από 4 – 10 mm. Χρησιμοποίησε τρία δοκίμια από το κάθε υλικό που εξέτασε και τέσσερα είδη υγρών όπου έγινε η δοκιμή: απιονισμένο νερό, προσομοιωμένο θαλασσινό νερό με 3.5% NaCl, HCl οξύτητας pH = 1 και NaOH. Τα υγρά διαλύματα αυτά τα διατήρησε στην σταθερή θερμοκρασία των  $25 \pm 2$  °C και τέλος χρησιμοποίησε ζυγό για τον καθορισμό της απώλειας μάζας των δοκιμίων ακρίβειας 0.5 mg. Αναφέρει επίσης ότι κάθε δοκιμή διήρκησε 25 ώρες, καθώς και εξέτασε τα δοκίμια μικροσκοπικά χρησιμοποιώντας και ένα κοινό μικροσκόπιο αλλά και ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (scanning electron microscope) [20].

### 2.3 Αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών

Οι Tomlinson et al [5] παρατήρησαν ότι μετά την περίοδο επώασης τα υλικά αρχίζουν και χάνουν μάζα σχεδόν γραμμικά με το πέρασμα του κόσμου. Έχοντας δώσει περισσότερη βάση στη μελέτη του χρόνου επώασης, σημειώνουν ότι ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τη μικροδομή και από την τραχύτητα της επιφάνειας του δοκιμίου. Παρατήρησαν ότι το μεγαλύτερο χρόνο επώασης τον είχαν τα δοκίμια, όπου παρουσίαζαν λεία επιφάνεια, σε αντίθεση με δοκίμια που είχαν πορώδη και τραχιά επιφάνεια όπου η περίοδος επώασης τους μειώθηκε δραματικά [5]. Οι Tomlinson et al [14], αφού δοκίμασαν διάφορα εμπορικά και ειδικά προετοιμασμένα είδη αλουμίνιας, εκ των οποίων, τα οχτώ είχαν 99% καθαρότητα (purity) και τα άλλα 3 περιείχαν από 4% - 6% γυαλί (debase), έφτασαν στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος επώασης για όλα τα υλικά ήταν από δεκαπέντε μέχρι τριάντα λεπτά, καθώς και ότι οι debased αλουμίνες παρουσίασαν μεγαλύτερο ρυθμό αφαίρεσης μάζας κατά τη δοκιμή τους σε μηχανική διάβρωση – σπηλαίωση. Επισημαίνουν, βέβαια, ότι υπήρξε και περίπτωση καθαρής αλουμίνιας, η οποία παρουσίασε μεγαλύτερο ρυθμό αφαίρεσης μάζας σε σχέση με τους ρυθμούς που παρουσίασαν οι υπόλοιπες καθαρές αλουμίνες, αλλά αυτό οφειλόταν σε πολύ μεγάλους κόκκους στη μικροδομή της. Σημειώνουν, επίσης, ότι στα καθαρά είδη αλουμίνιας η αφαίρεση του υλικού ξεκίνησε από όρια των πόρων, ενώ στις debased ξεκίνησε από τα σημεία όπου ύαλος και αλουμίνα συναντιώντουσαν [14]. Οι Litzow et al. [19] προτείνουν λύσεις για το πως μπορούν οι συνέπειες της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης να μειωθούν. Μετά από τις πειραματικές δοκιμές φτάνουν στο συμπέρασμα ότι η μείωση του μεγέθους των κόκκων του υλικού, η ύπαρξη δευτερευουσών φάσεων, οι οποίες αυξάνουν τις δυνάμεις ένωσης στα όρια των κόκκων, οι compressive stresses και τέλος η μείωση της επιφάνειας τριβής κοιλοτήτων, βοηθούν στην αύξηση αντοχής των προηγμένων κεραμικών υλικών σε μηχανικής διάβρωση – σπηλαίωση [19]. Οι Garcia – Atance Fatjo et al [16] αφού μελέτησαν τα υλικά που υπέβαλλαν σε δοκιμή μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης βρήκαν πως η ζirkονία και το νιτρίδιο του πυριτίου είναι ικανά να παρουσιάσουν κοιλοότητες που δημιουργούνται λόγω ψευδοπλαστικής

παραμόρφωσης, μια ιδιότητα που είναι καθοριστική στην αντοχή του υλικού σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση. Σε αντίθεση, σημειώνουν πως η αλουμίνα, επειδή δεν είναι ικανή σαν υλικό να απορροφήσει ενέργεια μέσω πλαστικότητας, αρχίζει το υλικό και αφαιρείται από την επιφάνειά της γρήγορα μετά την αρχική της έκθεση στη δοκιμή αυτή [16]. Ο Niebuhr διαπίστωσε ότι τα δοκίμια που μελέτησε δεν παρουσίασαν μεγάλη διαφορά ως προς την απώλεια μάζας τους μετά το πέρας των δοκιμών τους σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση στα διαφορετικά υγρά διαλύματα, εκτός από την περίπτωση της αλουμίνας και της ζirkονίας. Πιο συγκεκριμένα ο ρυθμός απώλεια μάζας της αλουμίνας φαίνεται να αυξήθηκε κατά 60% όταν δοκιμάστηκε σε NaOH, και η ζirkονία παρουσίασε επίσης αύξηση 25% ρυθμού απώλειας μάζας στη δοκιμή σε HCl. Επιπλέον την μεγαλύτερη αντοχή στη μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση έδειξε να παρουσιάζει το νιτρίδιο του πυριτίου, ενώ το Macor<sup>TM</sup> παρουσίασε τον μεγαλύτερο ρυθμό απώλειας μάζας σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια σε όλα τα υγρά διαλύματα. Τέλος, όλα τα υλικά μετά τις 4 εβδομάδες που παραμείνανε στα υγρά διαλύματα χωρίς να δοκιμάζονται δεν παρουσίασαν μετρήσιμη απώλεια μάζας. Η απώλεια μάζας των κεραμικών υλικών φαίνεται, μέσα από φωτογραφίες που παρουσιάζει, να έχει παρέλθει από τα όρια των κόκκων και των πόρων [20].

## 2.4 Συμπεράσματα των παραπάνω ερευνών


Διαβάζοντας κάποιος τις παραπάνω έρευνες μπορεί να διαπιστώσει κάποια από τα αποτελέσματα που δημιουργεί η δοκιμή της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης στα κεραμικά υλικά. Καταρχάς κάθε υλικό, λόγω μικροδομής ή σύστασης υλικών αντιδρά διαφορετικά στη δοκιμή αυτή. Συνήθως, όμως, όσο περνάει η ώρα συνεχόμενης δοκιμής η απώλεια μάζας αυξάνεται, σε άλλες περιπτώσεις γραμμικά και σε άλλες σχεδόν εκθετικά. Σε μερικές περιπτώσεις, η φθορά που έχει προκληθεί δεν είναι ομοιόμορφη, διότι στην αρχή της δοκιμής αφαιρέθηκε μεγάλο κομμάτι του υλικού σε συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια του, με αποτέλεσμα τη μεγέθυνση του αρχικού αυτού λάκκου με την πάροδο του χρόνου. Η περίοδος επώασης, ο χρόνος δηλαδή που απαιτείται για να ξεκινήσει η φθορά να λαμβάνει χώρα, επίσης εξαρτάται από τις ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού. Γενικότερα στα κεραμικά υλικά φάνηκε η αφετηρία της φθοράς να βρίσκεται στα όρια των πόρων και των κόκκων ή στις ενώσεις των δύο στοιχείων που απαρτίζουν το υλικό. Κάποια υλικά, είναι ικανά να παρουσιάσουν και ψευδοπλαστικότητα κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε μηχανική διάβρωση – σπηλαίωση, προσδίδοντας τους έτσι καλύτερη αντοχή στη δοκιμή αυτή. Για την εφαρμογή όμως των κεραμικών υλικών σε κατασκευές που δέχονται μηχανική διάβρωση – σπηλαίωση θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο οι ιδιότητες αλλά και η θερμοκρασία και το είδος του υγρού διαλύματος όπου θα βυθιστεί το υλικό, καθώς αυτό μπορεί να αντιδράσει διαφορετικά αν το υγρό είναι οξύ, βάση ή αν η θερμοκρασία του αυξάνεται με γρήγορο ή αργό ρυθμό.

### 3. Πειραματικό Μέρος

#### 3.1 Πειραματικά δοκίμια

Τα δοκίμια είναι κατασκευασμένα στο εργαστήριο του τμήματος υλικών του Πανεπιστήμιου Ιωαννίνων στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής της κυρίας Γκιουζέλ Σεβαστείας-Μαρίας με τίτλο: «Παρασκευή αργυλοπυριτικών και μαγνησιακών πυρίμαχων υλικών (μαζών και τούβλων) με νανοπρόσθετα και μελέτη ιδιοτήτων». Τα χαρακτηριστικά της παρασκευής τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Η διάμετρος τους και το ύψος τους μετρήθηκαν με μικρόμετρο ακρίβειας 0.05 mm και η μάζα τους με ζυγό τύπου Precisa 4000C ακρίβειας δύο δεκαδικών του γραμμαρίου (g).

Πίνακας 1: Κατάλογος υλικών

Υλικό	Φωτογραφία	Διαστάσεις		Παρασκευή
		Διάμετρος φ (mm)	Ύψος d (mm)	
SG076		27	11	Παρασκευασμένο από εργαστηριακές α' ύλες με ρητίνη χωρίς γραφίτη. Μέγιστη θερμοκρασία έψησης 1400 °C στις 3 ώρες, ο ρυθμός έψησης ήταν 5 °C/min, με παρουσία κάρβουνου και αρχική μάζα 16.19 gr

SG090		34	17	Παρασκευασμένο από εργαστηριακές α' ύλες με ρητίνη χωρίς γραφίτη. Μέγιστη θερμοκρασία έψησης 1000 °C στις 3 ώρες, ο ρυθμός έψησης ήταν 5 °C/min, με παρουσία κάρβουνου και N <sub>2</sub> , με αρχική μάζα 28.69 gr
SG105		30	13	Παρασκευασμένο από βιομηχανικές α' ύλες με ρητίνη και 6% γραφίτη. Μέγιστη θερμοκρασία έψησης 1400 °C στις 3 ώρες, ο ρυθμός έψησης ήταν 5 °C/min, με παρουσία κάρβουνου και αρχική μάζα 31.16 gr
SG106		31	20	Παρασκευασμένο από βιομηχανικές α' ύλες με ρητίνη και 6% γραφίτη. Μέγιστη θερμοκρασία έψησης 1400 °C στις 3 ώρες, ο ρυθμός έψησης ήταν 5 °C/min, με παρουσία κάρβουνου και αρχική μάζα 42.77 gr

Πίνακας 2: Αρχική μάζα των υπό μελέτη υλικών

Υλικό	Αρχική μάζα (gr)
-------	------------------

SG076	16.19
SG090	28.69
SG105	31.16
SG106	42.77

Το SG090 ενδέχεται να αστοχήσει κατά τη διάρκεια της δοκιμής, διότι παραλήφθηκε με ραγίσματα σε όλη του την επιφάνεια, τα οποία εμφανίστηκαν μετά την έψηση κατά τη διάρκεια παρασκευής του δοκιμίου.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε φωτογραφίες τα δοκίμια πριν τη δοκιμή της μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης, μαζί, το καθένα ξεχωριστά και τέλος η επιφάνεια τους σε μεγέθυνση.



Εικόνα 2: Τα υπό μελέτη δοκίμια SG106, SG105, SG090 και SG076 προ των πειραματικών δοκιμών.

SG076



SG090

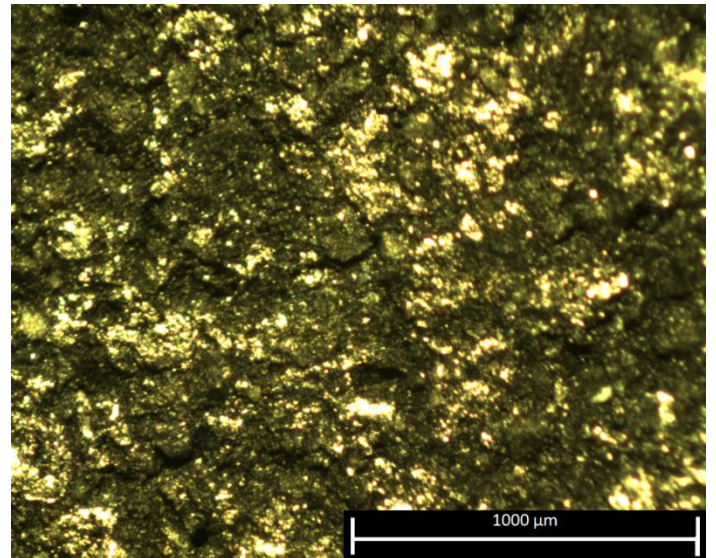
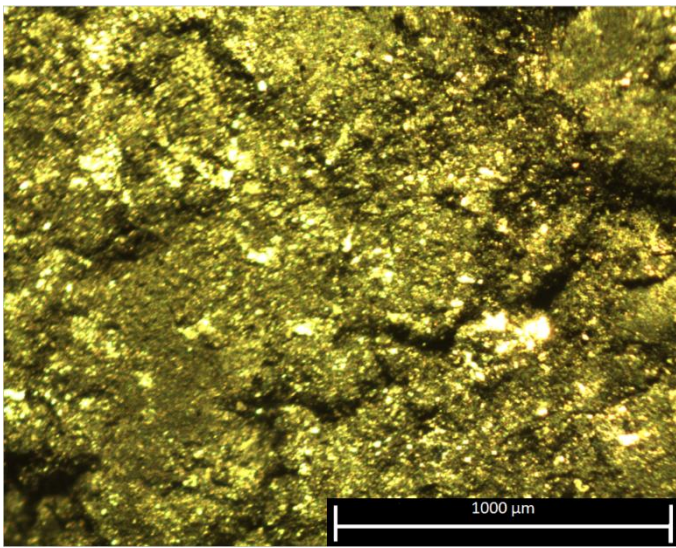
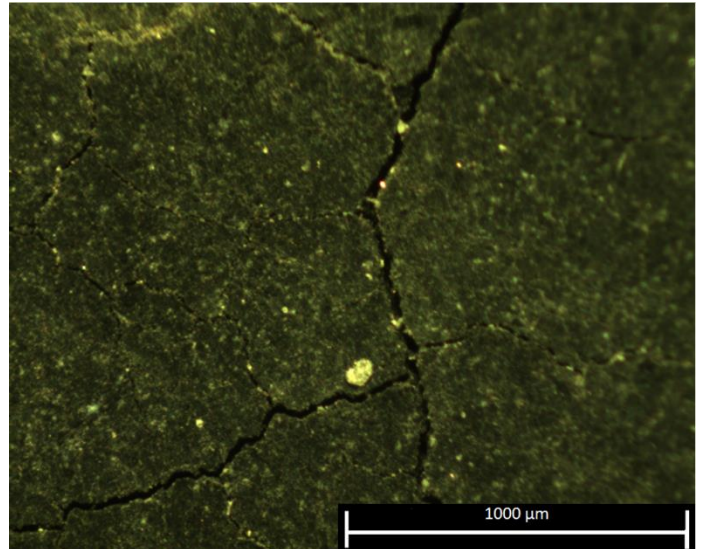
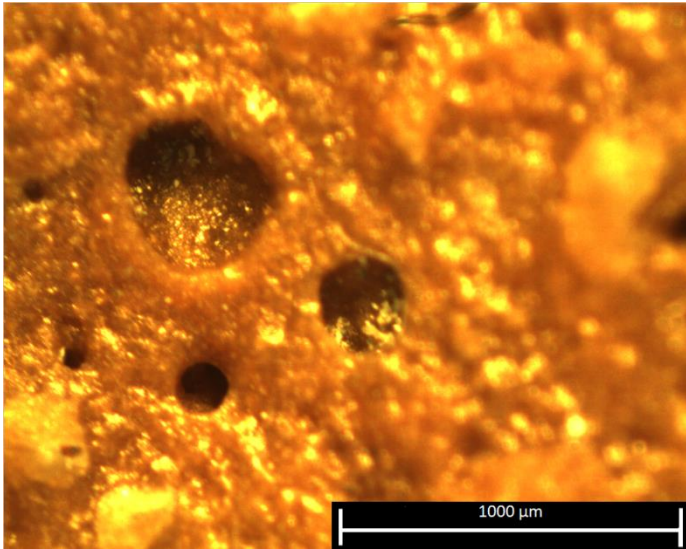




SG105

Εικόνα 3: Τα δοκίμια μεμονωμένα





Εικόνα 4: Μεγένθηση της επιφάνειας των δοκιμίων Sg076 (πάνω αριστερά), SG090 (πάνω δεξιά), SG105 (κάτω αριστερά) και SG106 (κάτω δεξιά).

Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια παρασκευασμένα από εργαστηριακές πρώτες ύλες εξ' ολοκλήρου από ρητίνη χωρίς γραφίτη διαφέρουν παντελώς και στο χρώμα αλλά και στη μορφολογία της επιφάνειάς τους. Αυτό μάλλον οφείλεται στη διαφορετική τελική θερμοκρασία έψησης αλλά και στην παρουσία N<sub>2</sub> στην περίπτωση του SG090. Το SG076 έχει μεγάλους πόρους, οι οποίοι είναι διακριτοί και με γυμνό μάτι και έχει χρώμα κεραμιδιού. Σε αντίθεση, το SG090 είναι μαύρο και η επιφάνεια του φαίνεται λεία και με γυμνό μάτι αλλά και με το μικροσκόπιο, φέρει όμως διάφορα ραγίσματα τα οποία παρουσιάστηκαν κατά την παρασκευή του στο Πανεπιστήμιο των Ιωαννίνων. Το συγκεκριμένο δοκίμιο, περιμέναμε ότι θα αστοχήσει γρήγορα σε δοκιμή μηχανικής διάβρωσης - σπηλαιώσης καθώς πιστεύαμε ότι θα ξεκολλήσουν τα κομμάτια στα σημεία των ρωγμών κατά τη διάρκεια της και δεν θα είχαμε στο τέλος σωστά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο SG090 είναι το πιο φινιρισμένο και λείο από όλα τα δοκίμια.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από βιομηχανικές πρώτες ύλες έχουν ρητίνη αλλά και 6% γραφίτη. Έχουν ψηθεί στην ίδια θερμοκρασία, για το ίδιο χρονικό διάστημα, καθώς και ο ρυθμός έψησης ήταν ο ίδιος. Και το SG105 και το SG106 είναι μαύρα και φαίνεται να γυαλίζουν με γυμνό μάτι, με το SG106 να γυαλίζει περισσότερο. Παρόλα αυτά κοιτώντας με το μικροσκόπιο η μορφολογία τους φαίνεται να είναι περίπου η ίδια, τραχιά με μικρούς πόρους.

### 3.2 Ιδιότητες κεραμικών υλικών ρητίνης / γραφίτη

Τα κεραμικά υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από καλή ηλεκτρική [14,15] και θερμική αγωγιμότητα, καλή αντοχή σε διάβρωση καλύτερη αντοχή σε σχέση με άλλα κεραμικά υλικά σε φορτίσεις εφελκυσμού [14,15]. Επίσης τα υλικά αυτά, λόγω της ρητίνης που περιέχουν, μπορούν παραχθούν μαζικά με σχετικά μικρό κόστος [15]. Η ύπαρξη γραφίτη πάνω από 6%, όμως, έχει αρνητικές συνέπειες για τις τριβολογικές ιδιότητες του υλικού, καθώς η επιφάνειά του γίνεται τραχύτερη [16], κάτι που μπορεί να παρατηρήσει κάποιος και στις παραπάνω φωτογραφίες. Η ύπαρξη του γραφίτη παρόλα αυτά δίνει θετικά αποτελέσματα στη διεπαφή θερμοκρασίας [16]. Τα κεραμικά δοκίμια είναι μαγνησιακά σε συνδυασμό με εργαστηριακές πρώτες ύλες (SG076 και SG090) και μαγνησιακά σε συνδυασμό με 6% γραφίτη (SG105 και SG106) Λεπτομέρειες για το πορώδες των SG105 και SG106 δεν έχουμε γιατί δεν μετρήθηκαν. Για τα SG076 και SG090 ισχύουν τα παρακάτω [30]:

Δοκίμιο	Exterior Volume, V	Volumes of Open Pores (cm <sup>3</sup> )	Volume of impervious portion (cm <sup>3</sup> )
SG076	6,09	0,55	5,54
SG090	8,03	5,79	2,24

Πίνακας 3: Ιδιότητες πορώδους των δοκίμων.

Δοκίμιο	Apparent Porosity, P	Water Absorption, A	Apparent Specific Gravity, T	Bulk Density, B
SG076	9,02	3,39	2,93	2,66
SG090	72,15	53,41	4,85	1,35

### 3.3 Πρακτικό πειραματικής διαδικασίας

Αρχικά όλα τα δοκίμια ζυγίστηκαν με τον ζυγό Precisa 4000C για την μέτρηση της μάζας τους πριν τις δοκιμές μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης. Ο ζυγός αυτός έχει ακρίβεια δύο δεκαδικά του γραμμαρίου (g) και έγιναν τρεις μετρήσεις για το κάθε δοκίμιο με σκοπό το σωστό προσδιορισμό της μάζας.



Εικόνα 5: Ζυγός ακριβείας 0.01 g του εργαστηρίου Precisa 4000C.

Έπειτα τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν με τη βοήθεια κάμερας κινητού τηλεφώνου SAMSUNG A32 5G πριν τη δοκιμή τους και στη συνέχεια φωτογραφήθηκαν οι επιφάνειες τους μέσω του στεροσκοπίου MEIJI TECHNO και του προγράμματος pixel fox της κάμερας αυτού, με μεγέθυνση x2, x3.5 και x4.5 για τη διευκόλυνση προσδιορισμού ύπαρξης πόρων και των ορίων των κόκκων της επιφάνειάς τους.



Εικόνα 6: Το στερεοσκόπιο του εργαστηρίου.

Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι οι δοκιμές μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης εκτελέστηκαν σύμφωνα με το ASTM G32 – 09 standard [6], και τα εγχειρίδια χρήσης που παρείχε η κατασκευαστική εταιρεία [7,8,9]. Οι δοκιμές γίνανε στα 20 kHz με peak to peak amplitude, πάλμωση κεφαλής 25μm, Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1 mm από το horn tip μέσα σε απιονισμένο νερό, όπου με τη βοήθεια ψυκτικού μηχανήματος η θερμοκρασία του παρέμεινε σταθερή στους  $25 \pm 2$  °C, η μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού έγινε με θερμοζεύγος. Τα δοκίμια πακτώθηκαν με κοχλίες στο πάτο του δοχείου, του οποίου τα τοιχώματα ήταν κούφια και συνδεδεμένα με σωλήνες στο ψυκτικό μηχάνημα με σκοπό την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του νερού κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης ήταν η UIP1000hdT κατασκευασμένη από την εταιρεία hielscher.



Εικόνα 7: Συσκευή μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης UIP1000hdT (αριστερά), Κεφαλή-Horn tip (πάνω δεξιά) και συσκευή ρύθμισης παραμέτρων για τη δοκιμή μηχανικής διάβρωσης - σπηλαιώσης (κάτω δεξιά).

Πρώτα υποβλήθηκε σε δοκιμή το δοκίμιο SG106, μετά από 6 min η δοκιμή σταμάτησε, νομίζοντας ότι το υλικό είχε αστοχήσει λόγω θόλωσης του απιονισμένου νερού, που από διαυγές είχε πάρει χρώμα μαύρο. Παρόλα αυτά, το δοκίμιο, απλώς, είχε χάσει ένα κομμάτι από την επιφάνεια του και έτσι η δοκιμή συνεχίστηκε για άλλα 24 min, για να διαπιστωθούν τα αποτελέσματα στη μισή ώρα και ύστερα η δοκιμή συνεχίστηκε αδιάκοπα για άλλη 1:30 hr για να ολοκληρωθεί το δίωρο που ήταν ο στόχος εξαρχής. Μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής το SG106, αφέθηκε να στεγνώσει και εξωτερικά αλλά και εσωτερικά και στο τέλος ζυγίστηκε στον ίδιο ζυγό με πριν, τρεις φορές, και διαπιστώθηκε η απώλεια μάζας του λόγω μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης.

Έπειτα, υποβλήθηκε σε δοκιμή το SG105, εκείνο δοκιμάστηκε πρώτα για μισή και έπειτα για 1:30 hr για να ολοκληρωθεί και πάλι το δίωρο. Το δοκίμιο ζυγίστηκε αμέσως μετά τη δοκιμή του αλλά διαπιστώθηκε ότι ήταν βαρύτερο επειδή δεν είχε φύγει η υγρασία από το εσωτερικό του λόγω του ότι είχε απορροφήσει υγρό λόγω των πόρων. Με αποτέλεσμα να χρειάζεται και άλλο ζύγισμα μετά από κάποιες μέρες.

Δεν έγιναν μετρήσεις απώλειας μάζας στα διαστήματα διακοπής της δοκιμής, αντ' αυτού γινόταν παρατήρηση των αποτελεσμάτων, που είχε επιφέρει η διάβρωση στην επιφάνεια των δοκιμίων.



Δυστυχώς το ψυκτικό μηχάνημα, το οποίο κρατούσε σταθερή τη θερμοκρασία του νερού που γινόταν η δοκιμή, χάλασε και έτσι γίνανε τριβολογικές δοκιμές για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής και της φθοράς του κάθε δοκιμίου στο τριβόμετρο του εργαστηρίου της εταιρείας CSEM instruments. Ως ανταγωνιστικό σώμα χρησιμοποιήθηκε μπίλια από αλουμίνα ( $Al_2O_3$ ) διαμέτρου 6 mm και υψηλής καθαρότητας 99% για τη μέτρηση του συντελεστή τριβής των δοκιμίων.



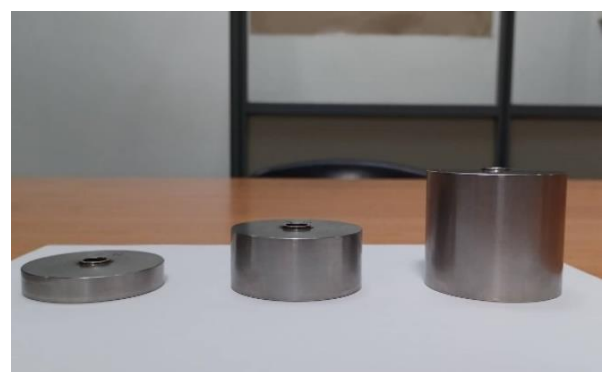
Εικόνα 8: Τριβόμετρο CSEM Instruments του εργαστηρίου.

Οι ιδιότητες του ανταγωνιστικού σώματος παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4: Ιδιότητες του ανταγωνιστικού σώματος [27].

Ένδειξη	Τιμή
Φαινομενικό πορώδες κατά βάρος	$\leq 7.0\%$
Σκληρότητα κατά κλίμακα Moh	$>8.0$
Απορρόφιση νερού	$<4.0 \text{ wt}\%$
Αντίσταση σε διάβρωση από οξέα	$>99.8\%$
Θερμική αγωγιμότητα	$0.7-0.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Θερμική διαστολή στους $500^\circ\text{C}$	$0.10\%$
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας	$1550 \text{ }^\circ\text{C}$
Ειδικό βάρος	$3.4 \text{ g/cm}^3$
Πυκνότητα συμπαγούς	$2.0 \text{ g/cm}^3$

Γίνανε τρεις δοκιμές σε κάθε δοκίμιο, μία δοκιμή σε ονομαστική ακτίνα 4 mm με 2 N κάθετη δύναμη, μία σε ονομαστική ακτίνα 8 mm με 5 N κάθετη δύναμη, και μία σε ονομαστική ακτίνα 12 mm με 10 N κάθετη δύναμη. Η κάθετη δύναμη που εφαρμόστηκε επιτεύχθηκε με τη χρήση τριών αντίζυγιων 2 N, 5N και 10 N, ίδιας διαμέτρου και ύψος 9.4 mm, 23.5 mm και 48 mm αντίστοιχα, η δοκιμή σταματούσε αυτόματα όταν η απόσταση ολίσθησης  $s$  συμπλήρωνε τα 1000 m



Εικόνα 9: Χρησιμοποιημένα μπιλία από  $Al_2O_3$  (πάνω), Τα βαρίδια 2N, 5N και 10N που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές τριβής (κάτω).

Λόγω των διαφορετικών ακτινών και γραμμικών ταχυτήτων που ορίστηκαν, οι δοκιμές κράτησαν αρκετές ώρες. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι παράμετροι δύναμης, ονομαστικής ακτίνας, γραμμικής ταχύτητα, απόστασης ολίσθησης, γύρων και χρόνου των δοκιμών στο τριβόμετρο

Πίνακας 5: Παράμετροι των δοκιμών τριβής των κεραμικών υλικών.

	N (N)	r (mm)	u (cm/s)	Απόσταση ολίσθησης s (m)	laps	t (hr)	
SG076	2	4	5	1000		5.5	
	5	8					
	10	12					
SG090	2	4					39801
	5	8					19881
	10	12					
SG105	2	4					19910
	5	8					19880
	10	12					13268
SG106	2	4					39800
	5	8					19882
	10	12					13271

#### 4. Αποτελέσματα δοκιμών

Τα αποτελέσματα διάβρωσης των δοκιμίων παρουσιάζονται παρακάτω σε μορφή πινάκων, η φθορά των δοκιμίων μετά τις δοκιμές μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης ερμηνεύεται ως η απώλεια και διαφορά μάζας πριν και μετά τη δοκιμή:

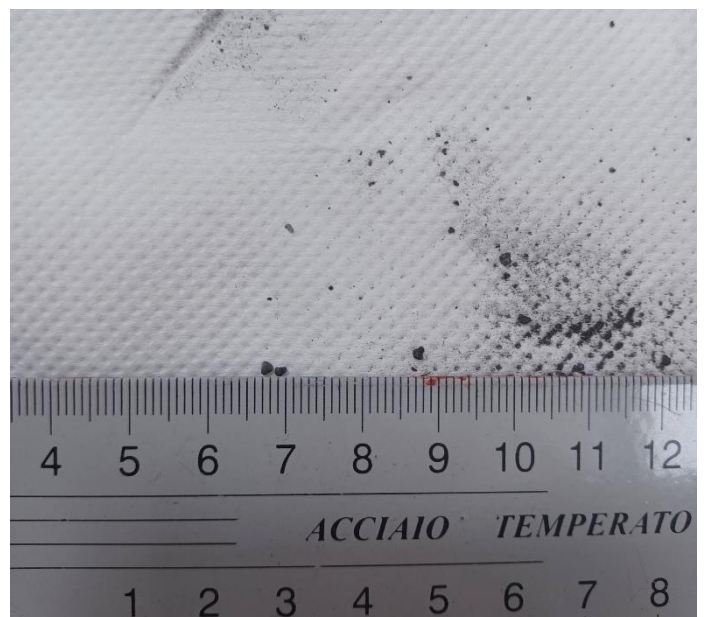
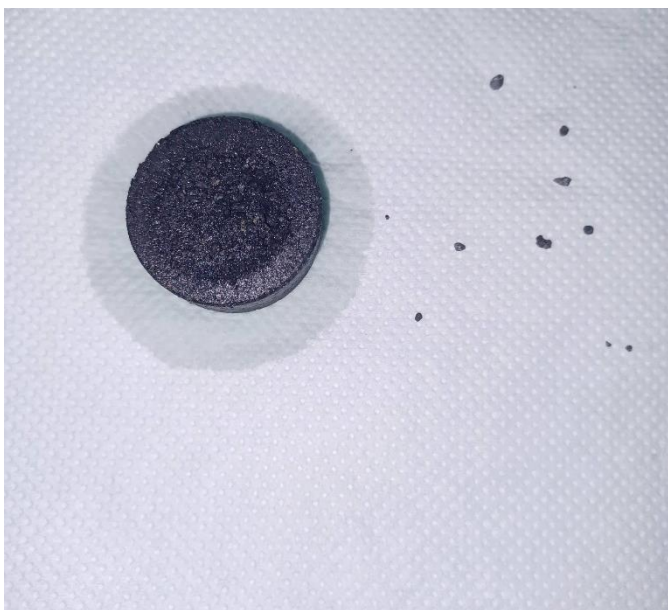
Πίνακας 6: Διαφορά μάζας των δοκιμίων μετά από καταπόνηση σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση για 2 ώρες.

Υλικό	dm 2h (g)
SG076	-
SG090	-
SG105	0,46
SG106	1,26

Πίνακας 7: Τελική μάζα των δοκιμίων μετά την καταπόνηση τους σε μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση για 2 ώρες.

	SG105	SG106
Time(hr)	Μάζα (gr)	
0	31.16	42.77
2	30.7	41.51

Τα δοκίμια φαίνεται να έχουν χάσει ολόκληρους κόκκους από τη δοκιμή τους σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση. Οι κόκκοι φαίνονται σαν να έχουν ξεκολλήσει από την επιφάνεια του υλικού. Παρακάτω παρουσιάζονται σε φωτογραφίες τα υλικά SG105 και SG106 μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής, καθώς και μερικοί ξεκολλημένοι από την επιφάνεια τους κόκκοι.



Εικόνα 10: Αποτελέσματα στην επιφάνεια του δοκιμίου SG105 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση και αποκομμένοι κόκκοι λόγω δοκιμής (πάνω), και ποτελέσματα στην επιφάνεια του δοκιμίου SG106 μετά από μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση και αποκομμένοι κόκκοι λόγω δοκιμής (κάτω)

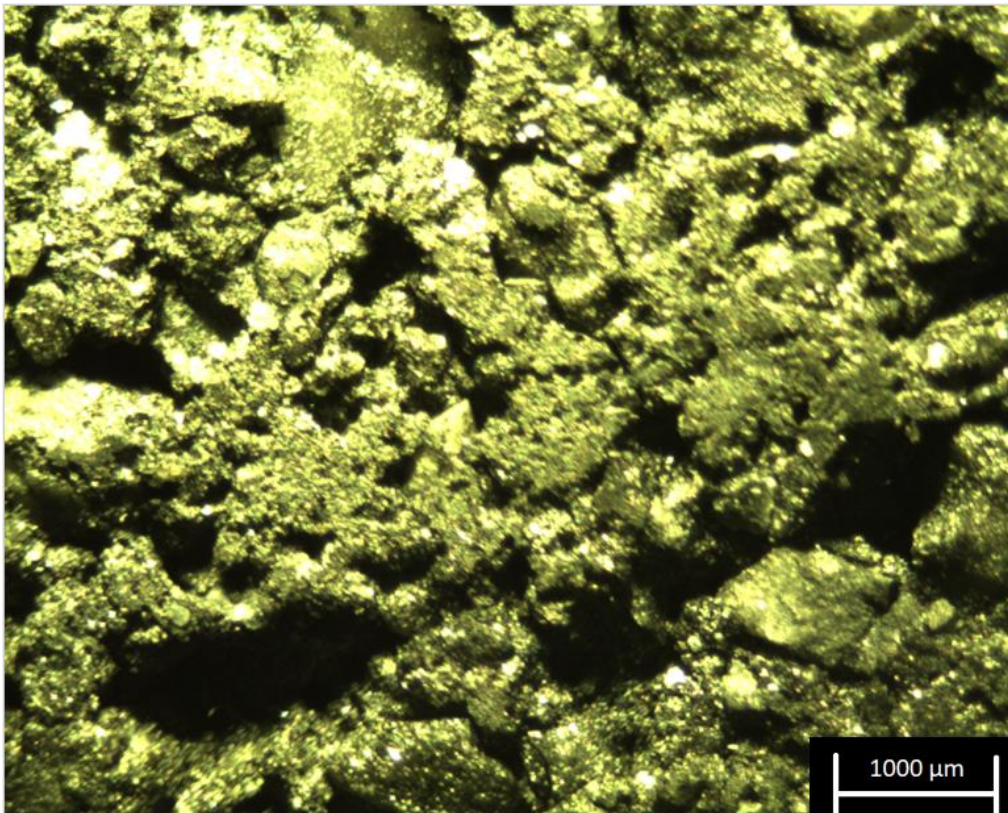
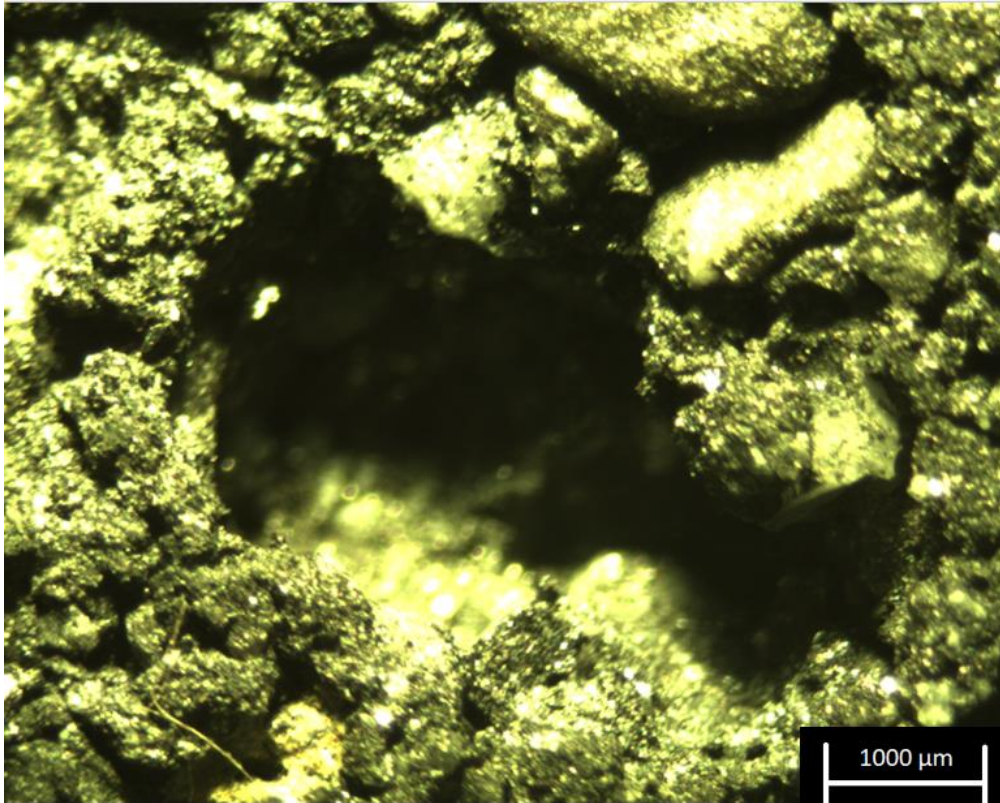
Και στα δύο υλικά φαίνεται πως οι κόκκοι έχουν ξεκολλήσει από την επιφάνεια. Η διάβρωση του υλικού SG105 φαίνεται να είναι συμμετρική στο σχήμα της κεφαλής της συσκευής μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης και οι κόκκοι που έχουν ξεκολλήσει από αυτό έχουν διάσταση από 1 μέχρι 5 mm. Σε αντίθεση το SG106 παρουσίασε διάβρωση σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Στο σημείο εκείνο λίγο μετά μετά την έναρξη της πειραματικής του δοκιμής ένα μεγάλο κομμάτι ξεκόλλησε και η διάβρωση συνεχίστηκε στο σημείο αυτό, οι κόκκοι όμως που ξεκόλλησαν είχαν μήκος μέχρι περίπου ένα 1 mm και οι υπόλοιποι θρυμματίστηκαν στο επίπεδο που έγιναν μια μαύρη πούδρα.

Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται παρακάτω σε μεγέθυνση τα αποτελέσματα της δοκιμής μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης στα δύο αυτά δοκίμια.



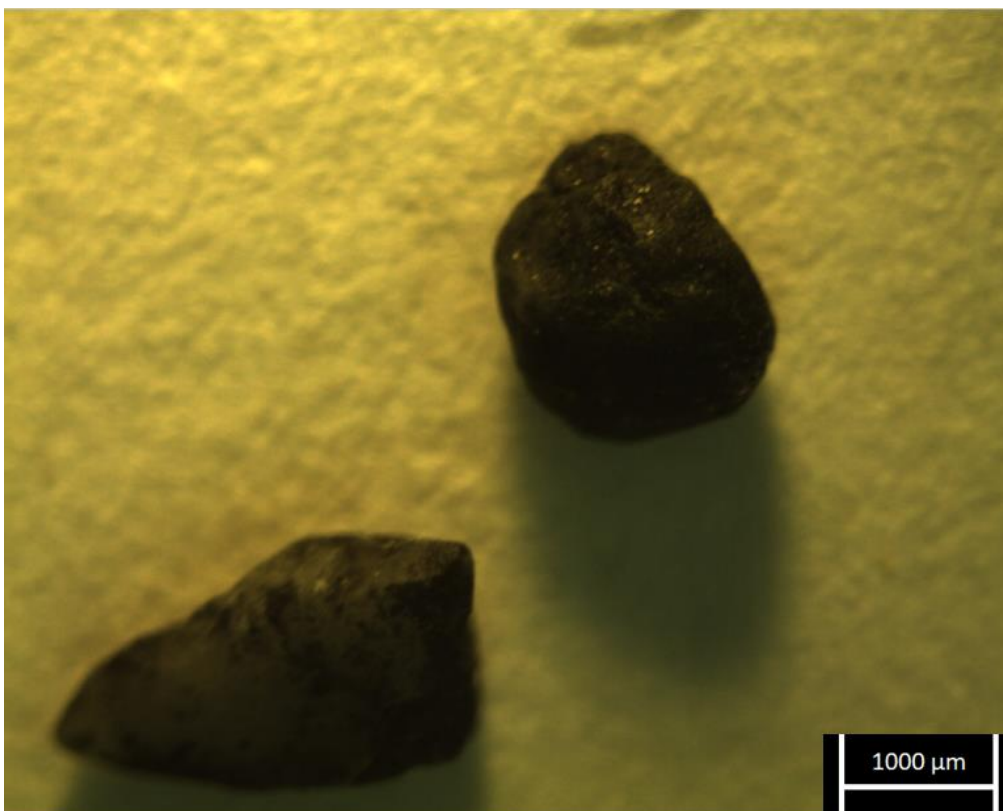
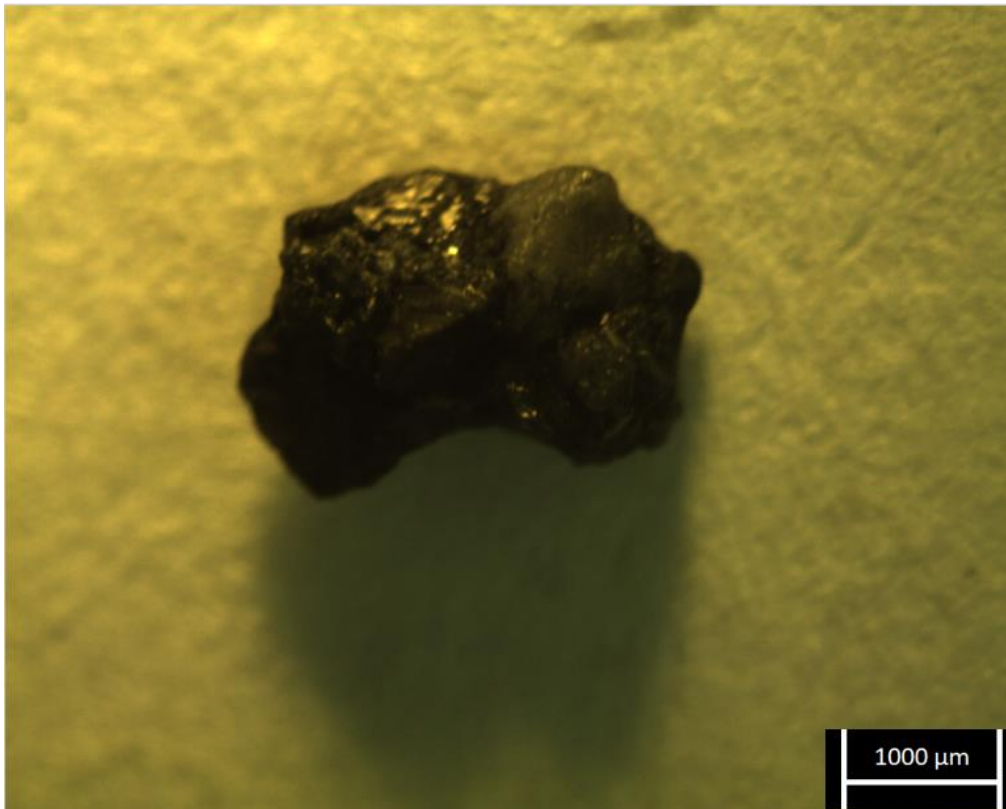
Εικόνα 11: Το SG105 μετά από δοκιμή μηχανικής διάβρωσης - σπηλαιώσης και λεπτομέρειες επιφάνειας

SG105:



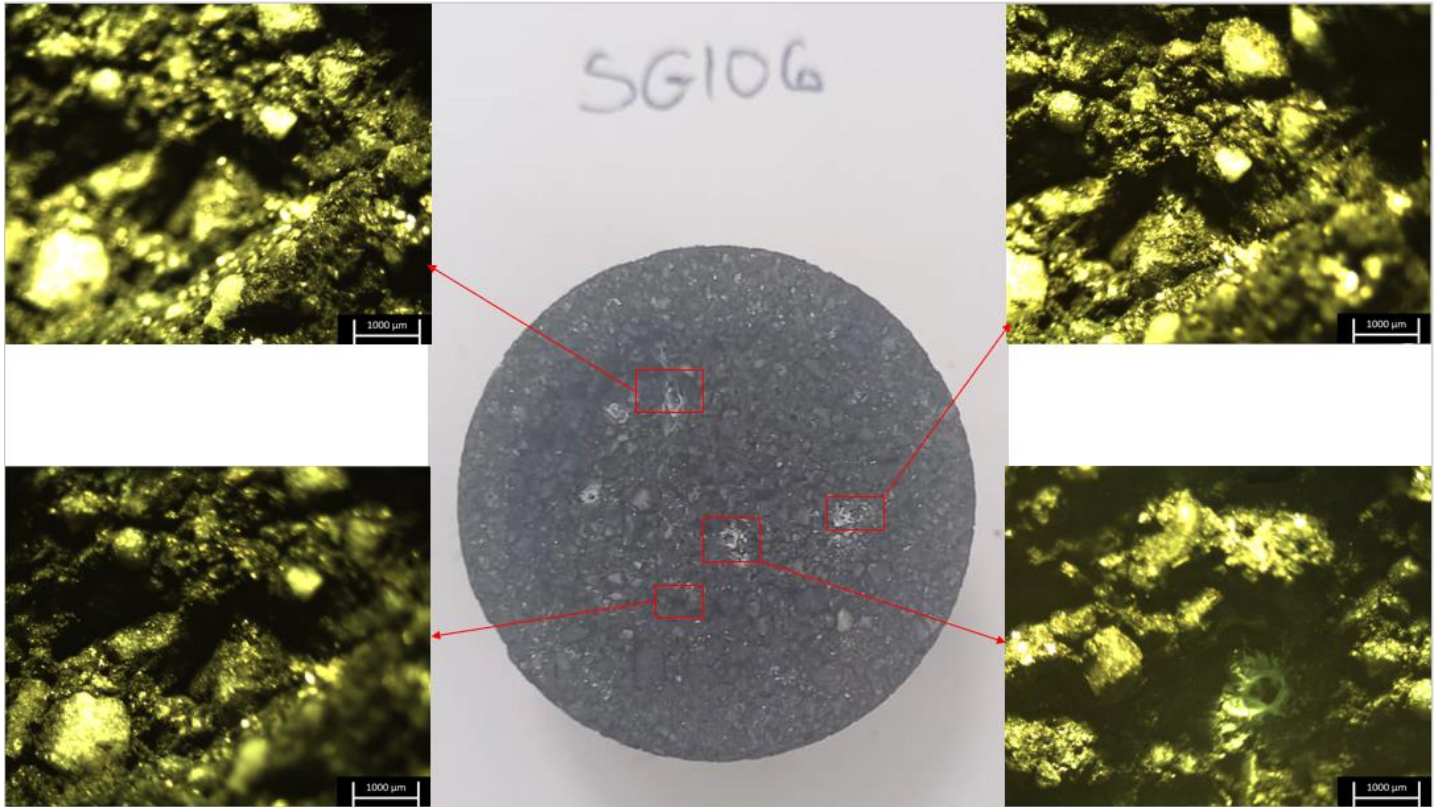
Εικόνα 12: Λεπτομέρειες επιφάνειας SG105 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση



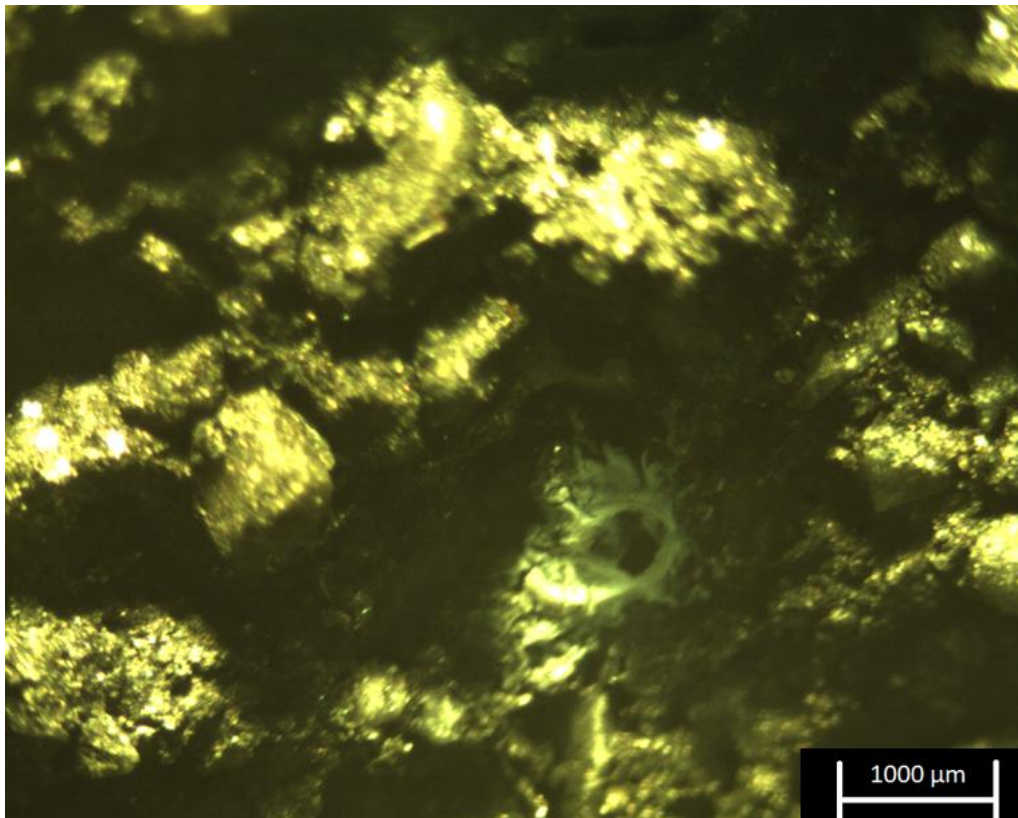
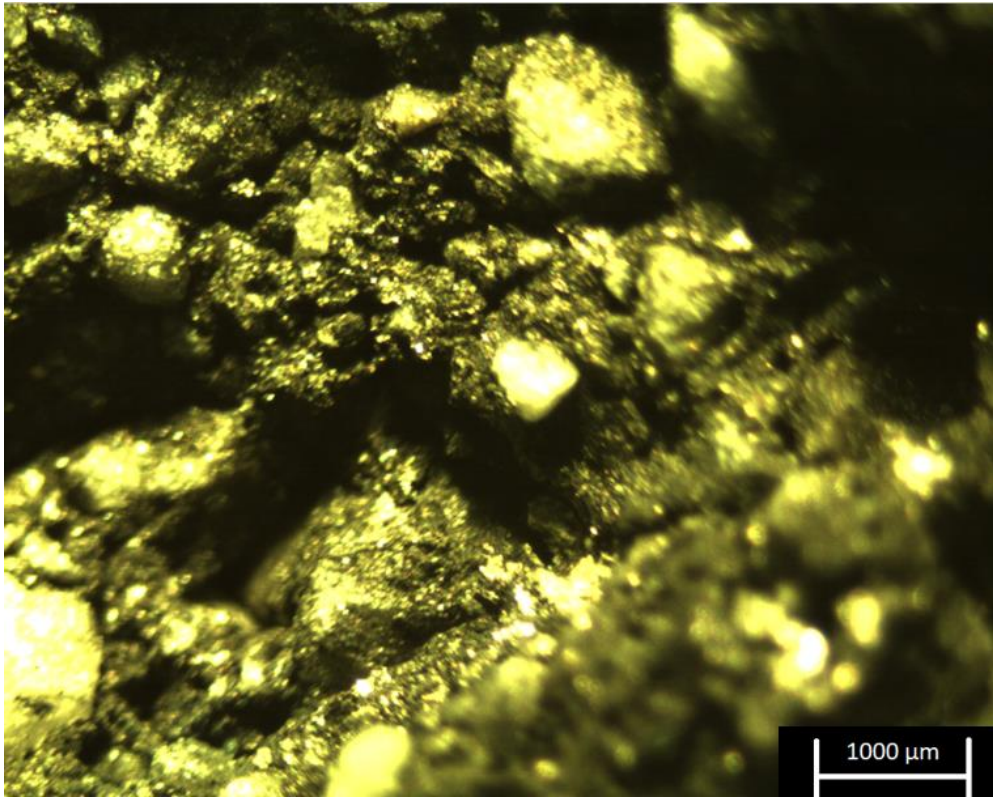


Εικόνα 13: Κόκκοι του SG105 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαίωση.

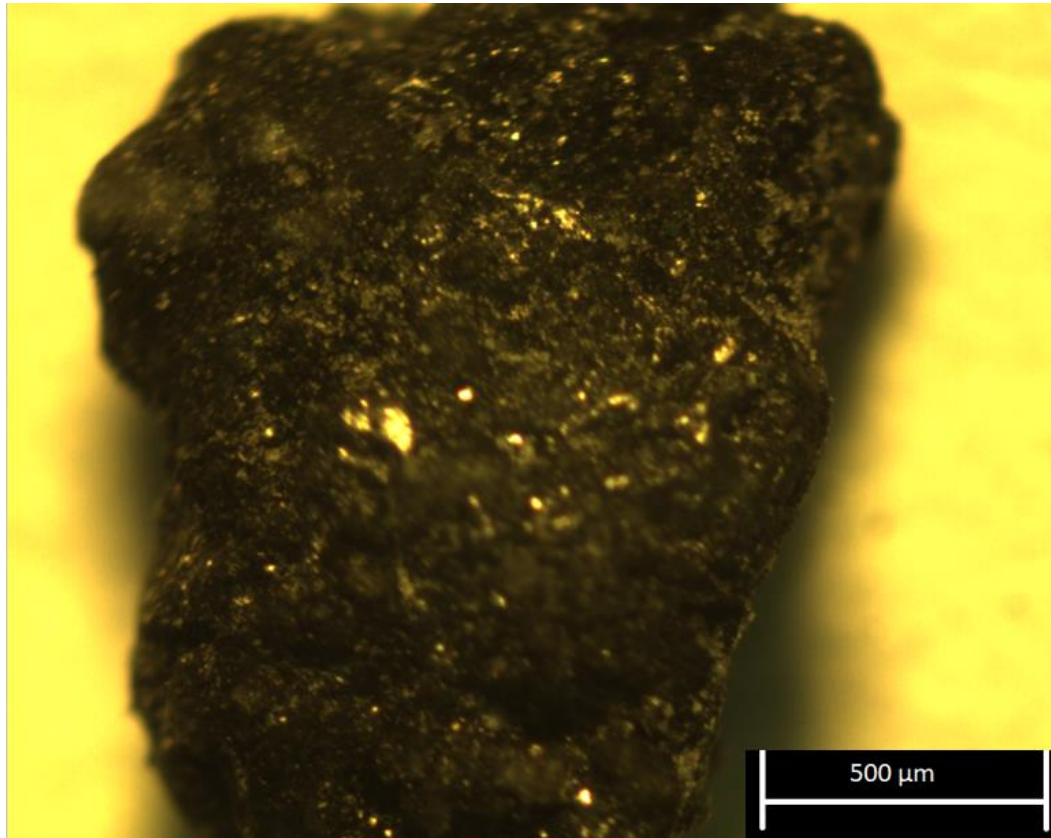
SG106:



Εικόνα 14: Το SG106 μετά από δοκιμή μηχανικής διάθρωσης - σπηλαιώσης και λεπτομέρειες επιφάνειας.

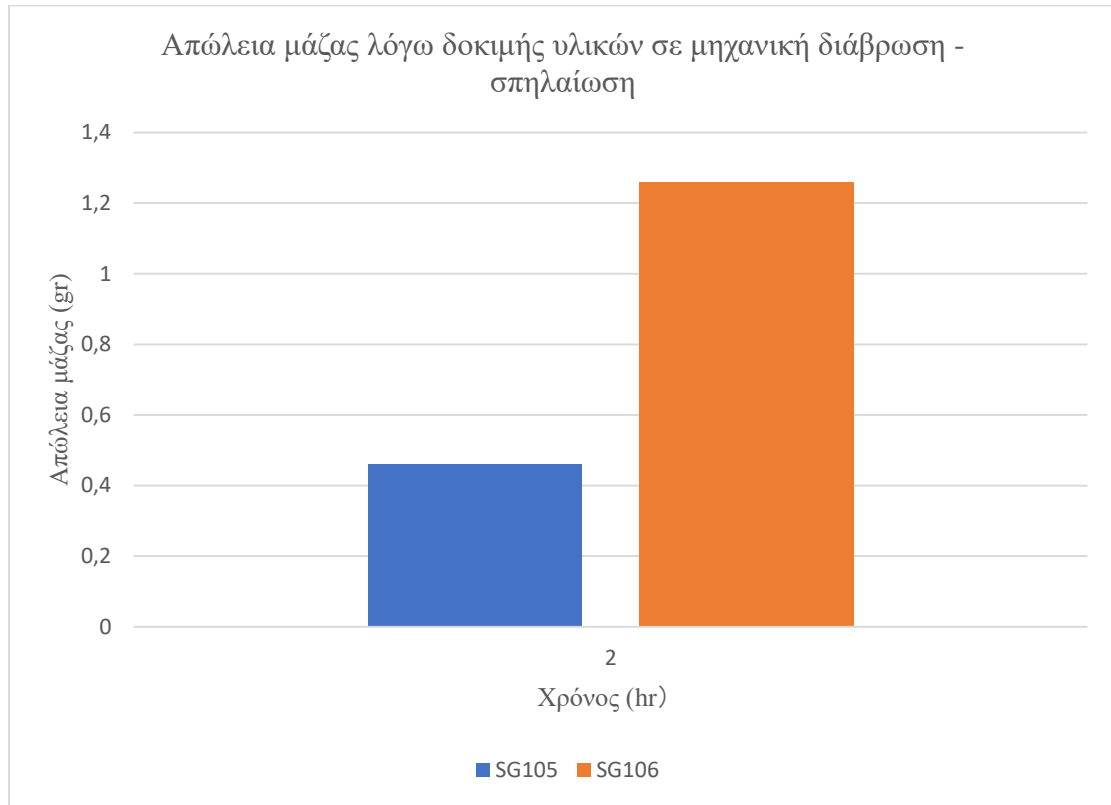


Εικόνα 15: Λεπτομέρειες SG106 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαιώση.



Εικόνα 16: Κόκκοι του SG106 μετά από μηχανική διάβρωση - σπηλαίωση.

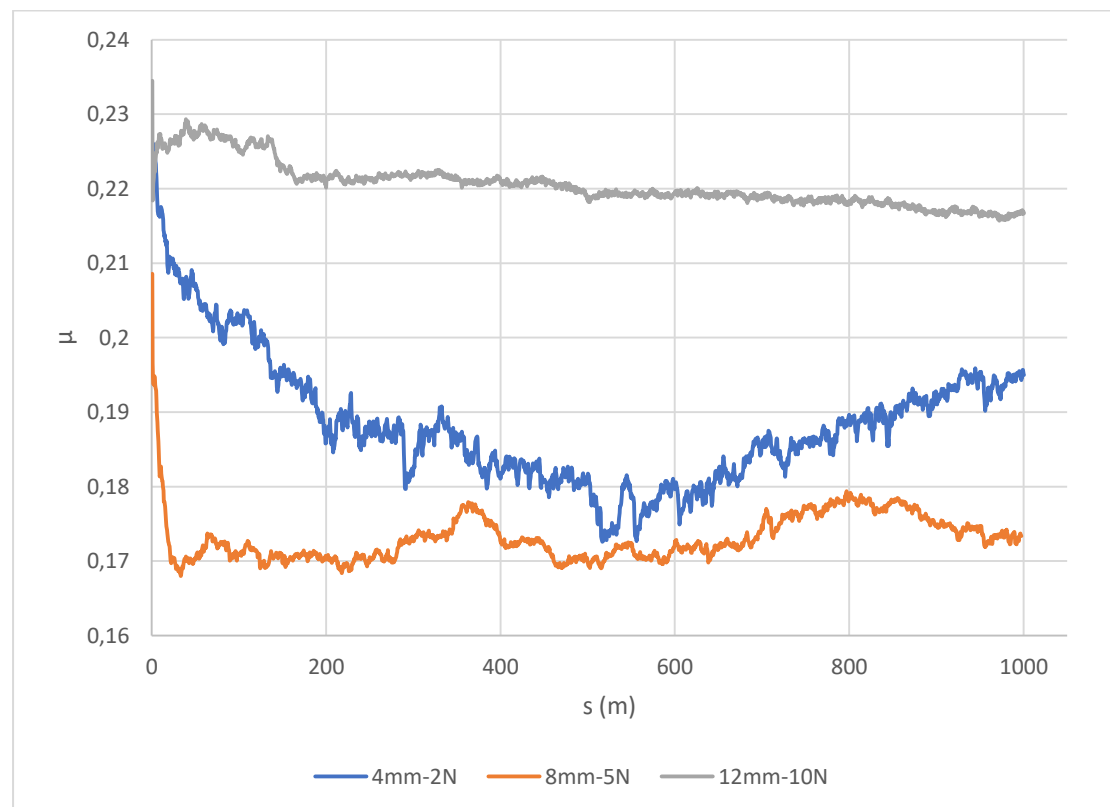
Ιστόγραμμα απώλειας μάζας κεραμικών δοκιμίων λόγω δοκιμής σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση μετά από δύο ώρες:



Σχήμα 1: Ιστόγραμμα απώλειας μάζας των δοκιμίων μετά από 2 ώρες καταπόνησης σε μηχανική διάβρωση σπηλαιώση.

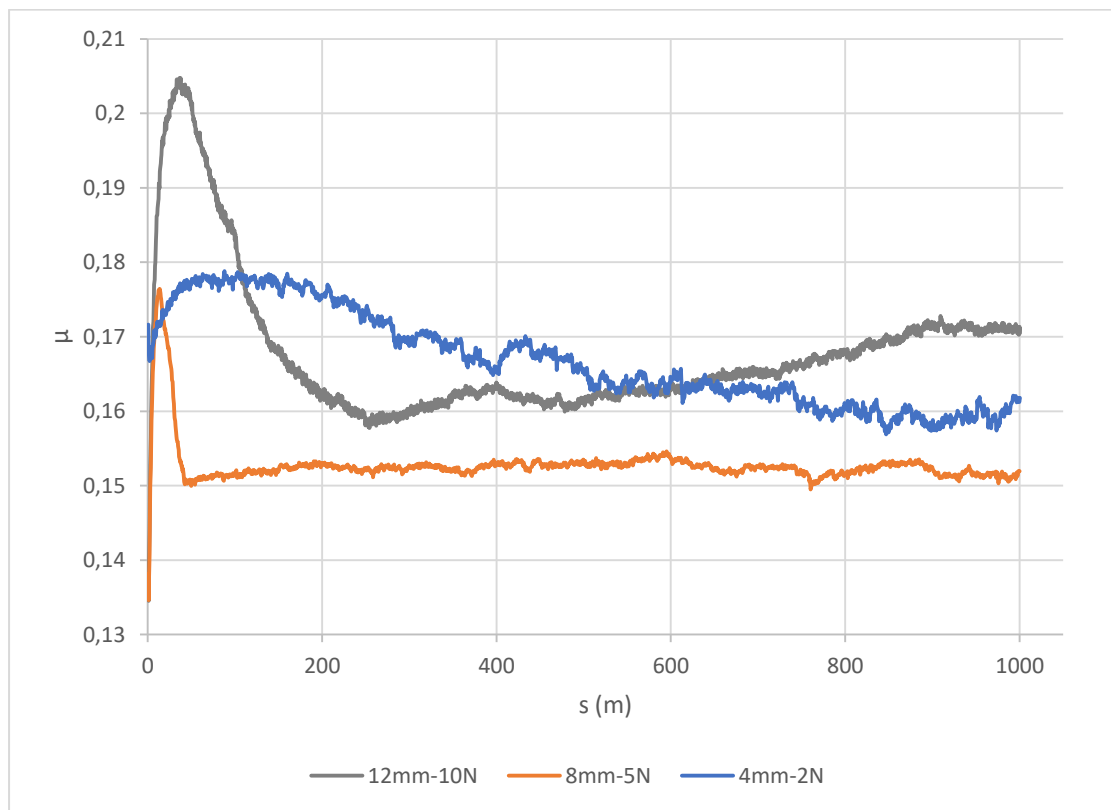
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο το ψυκτικό μηχάνημα που βοηθούσε στην σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του νερού για τη δοκιμή μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης παρουσίασε βλάβη. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η πειραματική δοκιμή αυτή να καταστεί αδύνατη. Για αυτό το λόγο και για την εκπόνηση της υπόλοιπης διπλωματικής εργασίας τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε δοκιμές τριβομέτρησης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τριβομέτρησης των δοκιμίων σε μορφή διαγραμμάτων  $t - \mu$ ,  $s - \mu$  και  $\text{laps} - \mu$ , συγκρίνοντας για το κάθε υλικό πως αλλάζει το μέτρο τριβής του σε σχέση με το χρόνο, την απόσταση που διάνυσε η ακίδα και τις συνολικές περιστροφές.

Για το δοκίμιο SG105:



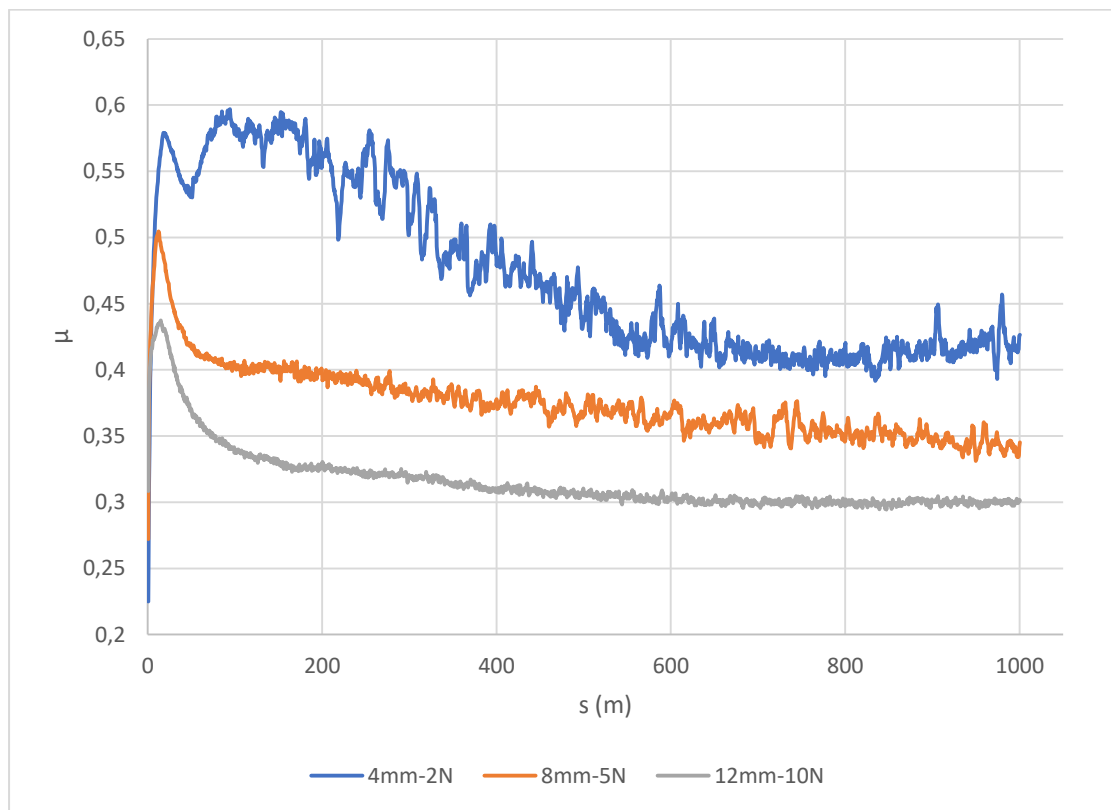
Σχήμα 2: Γράφημα απόστασης ολίσθησης  $s$  - συντελεστή τριβής  $\mu$  του δοκιμίου SG105 για τρεις διαφορετικές ονομαστικές ακτίνες και τρεις κάθετες δυνάμεις.

Για το δοκίμιο SG106:



Σχήμα 3: Γράφημα απόστασης ολίσθησης  $s$  - συντελεστή τριβής  $\mu$  του δοκίμιου SG106 για τρεις διαφορετικές ονομαστικές ακτίνες και τρεις κάθετες δυνάμεις.

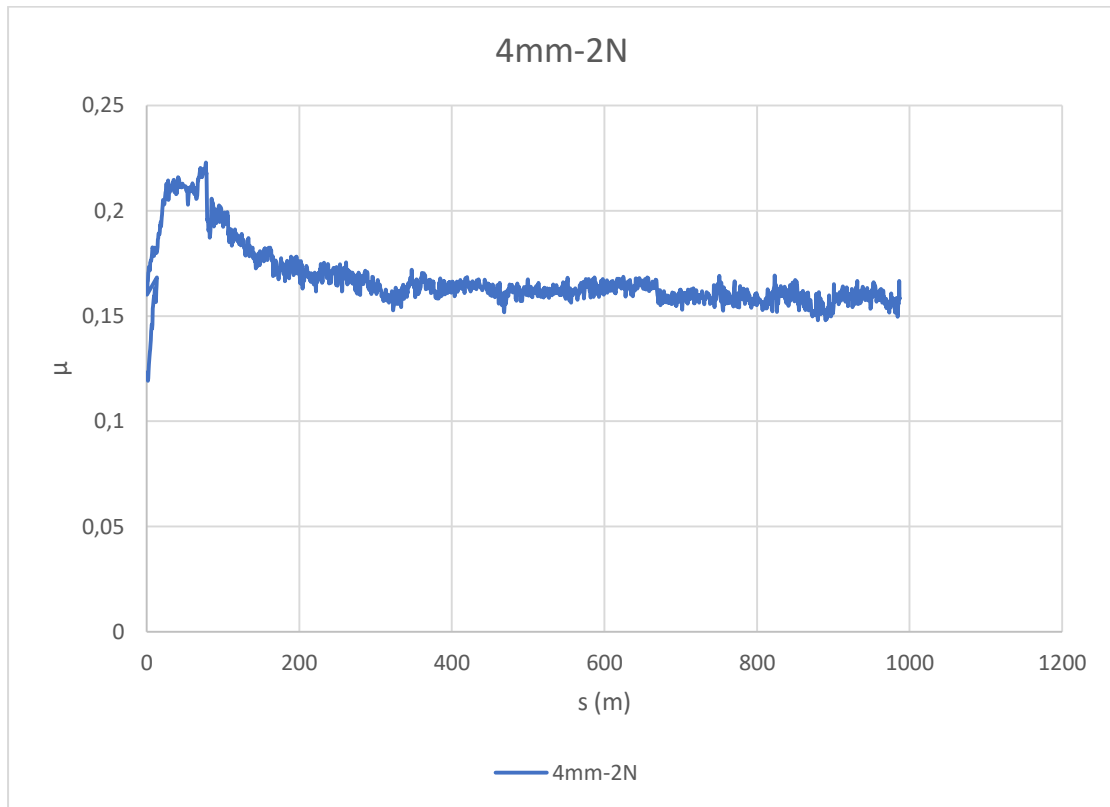
Για το δοκίμιο SG090:



Σχήμα 4: Γράφημα απόστασης ολίσθησης  $s$  - συντελεστή τριβής  $\mu$  του δοκιμίου SG090 για τρεις διαφορετικές ονομαστικές ακτίνες και τρεις κάθετες δυνάμεις.

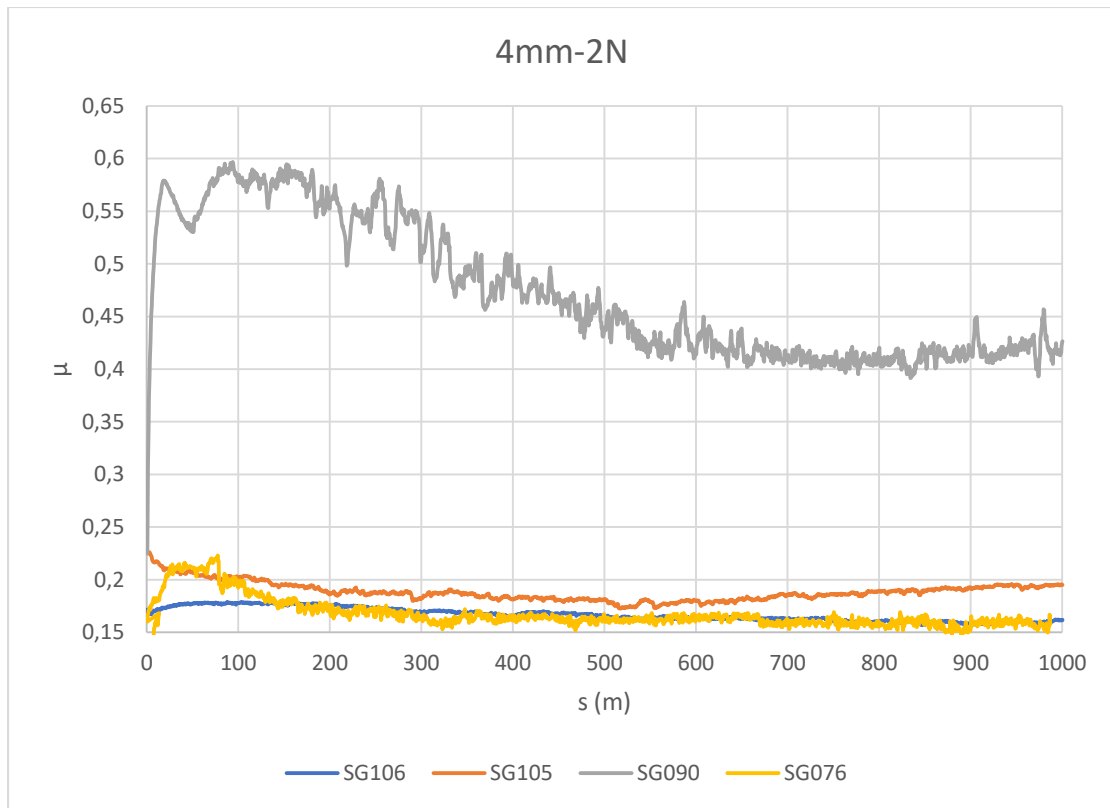


Για το SG076:

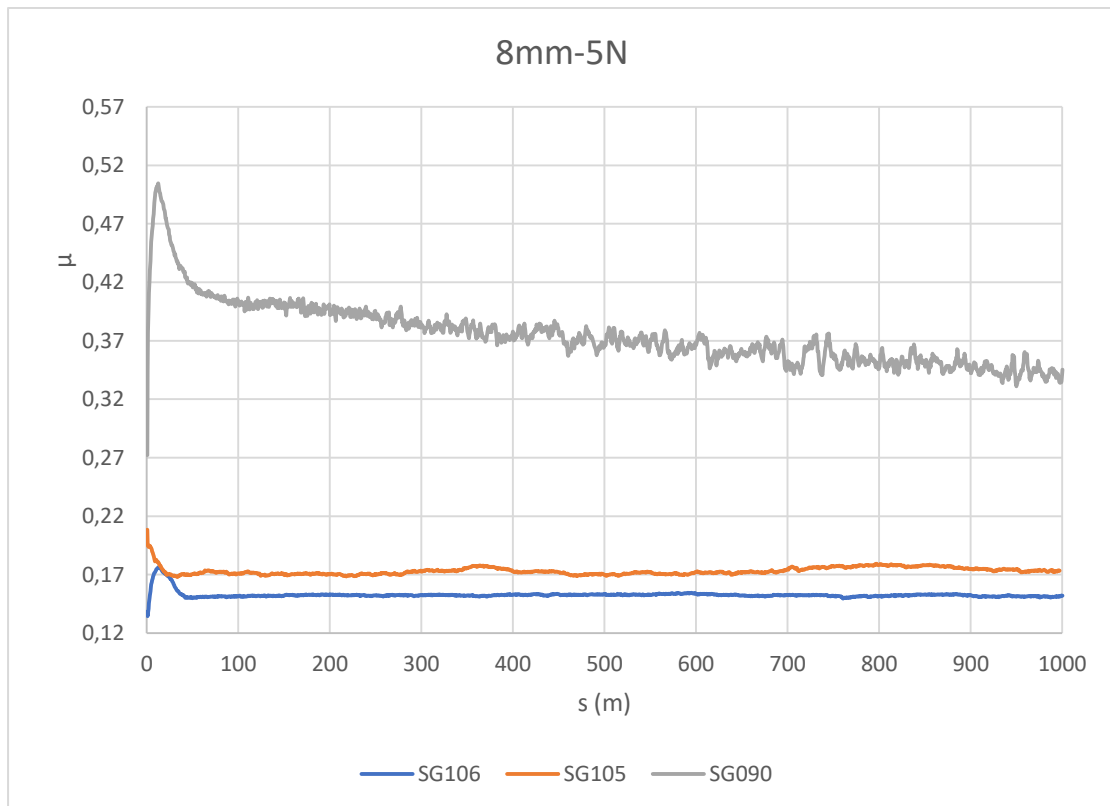


Σχήμα 5: Γράφημα απόστασης ολίσθησης  $s$  - συντελεστή τριβής  $\mu$  του δοκιμίου SG076.

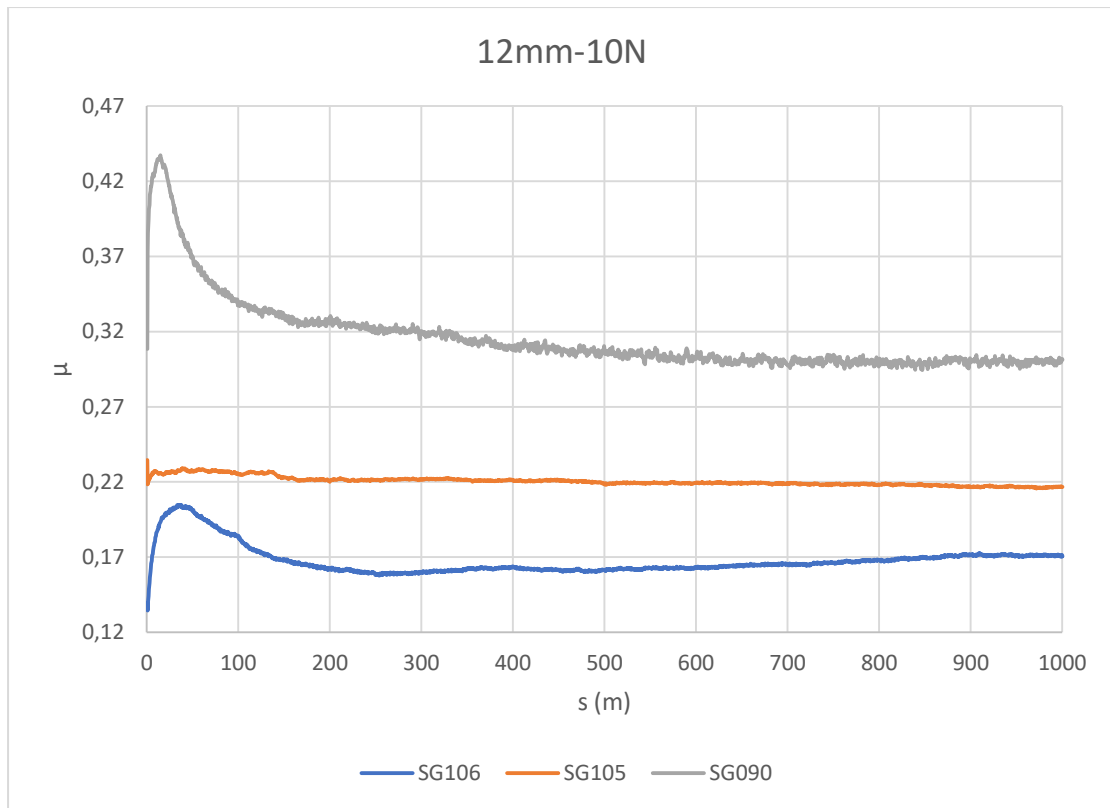
Επειδή η επιφάνεια του δοκιμίου ήταν τραχιά και ανώμαλη με πόρους και εξάρσεις, δεν μπορούσε το δοκίμιο να πακτωθεί σωστά στη βάση του τριβομέτρου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, στις δοκιμές με μεγαλύτερο βάρος από 2N, το δοκίμιο να αποσταθεροποιηθεί και να μην μπορεί έτσι να εκτελεστεί η τριβολογική δοκιμή σωστά και αξιόπιστα. Για αυτό, λοιπόν, το λόγο έγινε μόνο η δοκιμή του σε ονομαστική ακτίνα 4 mm και 2 N.



Σχήμα 6: Γράφημα απόστασης ολίσθησης  $s$  - συντελεστή τριβής  $\mu$  των δοκιμών για την ίδια ονομαστική ακτίνα και κάθετη δύναμη.



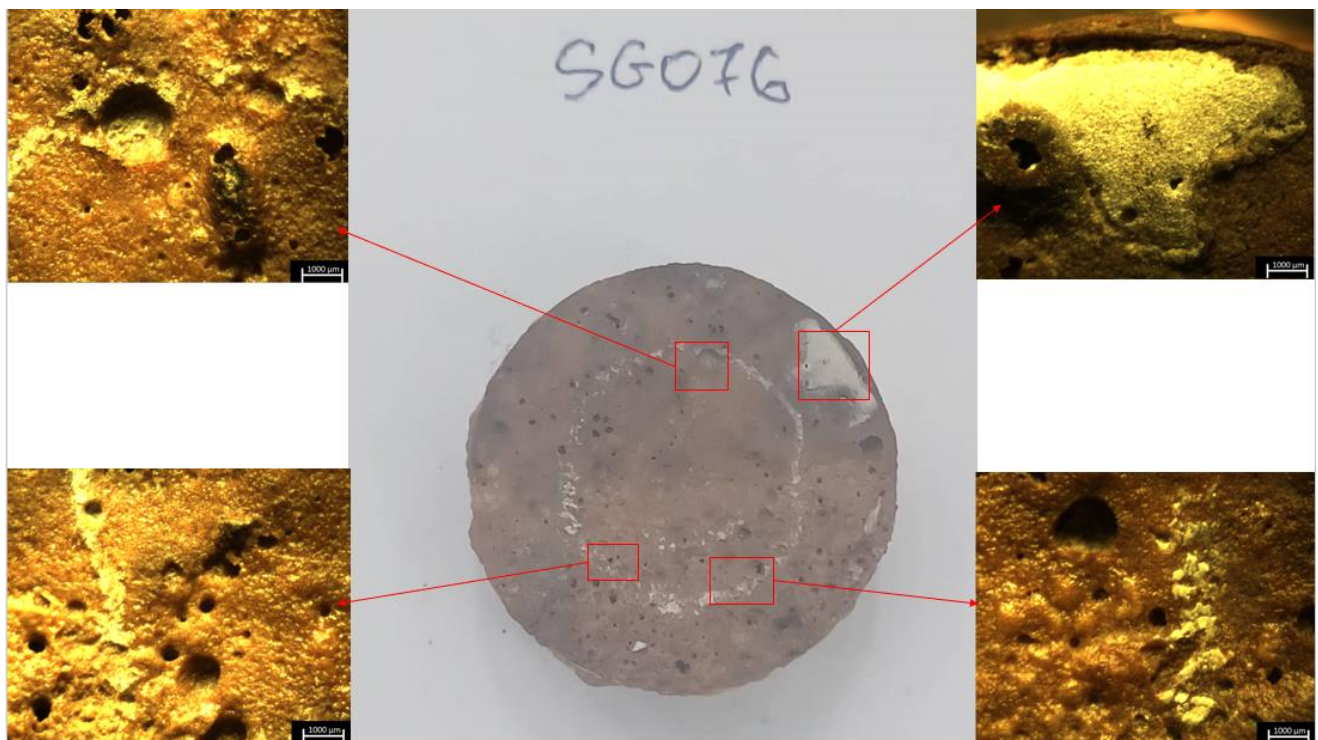
Σχήμα 7: Γράφημα απόστασης ολίσθησης  $s$  - συντελεστή τριβής  $\mu$  των δοκιμών για την ίδια ονομαστική ακτίνα και κάθετη δύναμη.



Σχήμα 8: Γράφημα απόστασης ολίσθησης  $s$  - συντελεστή τριβής  $\mu$  των δοκιμών για την ίδια ονομαστική ακτίνα και κάθετη δύναμη.

Τα αποτελέσματα της τριβολογικής δοκιμής στην επιφάνεια των δοκιμίων παρουσιάζονται στις παρακάτω φωτογραφίες:

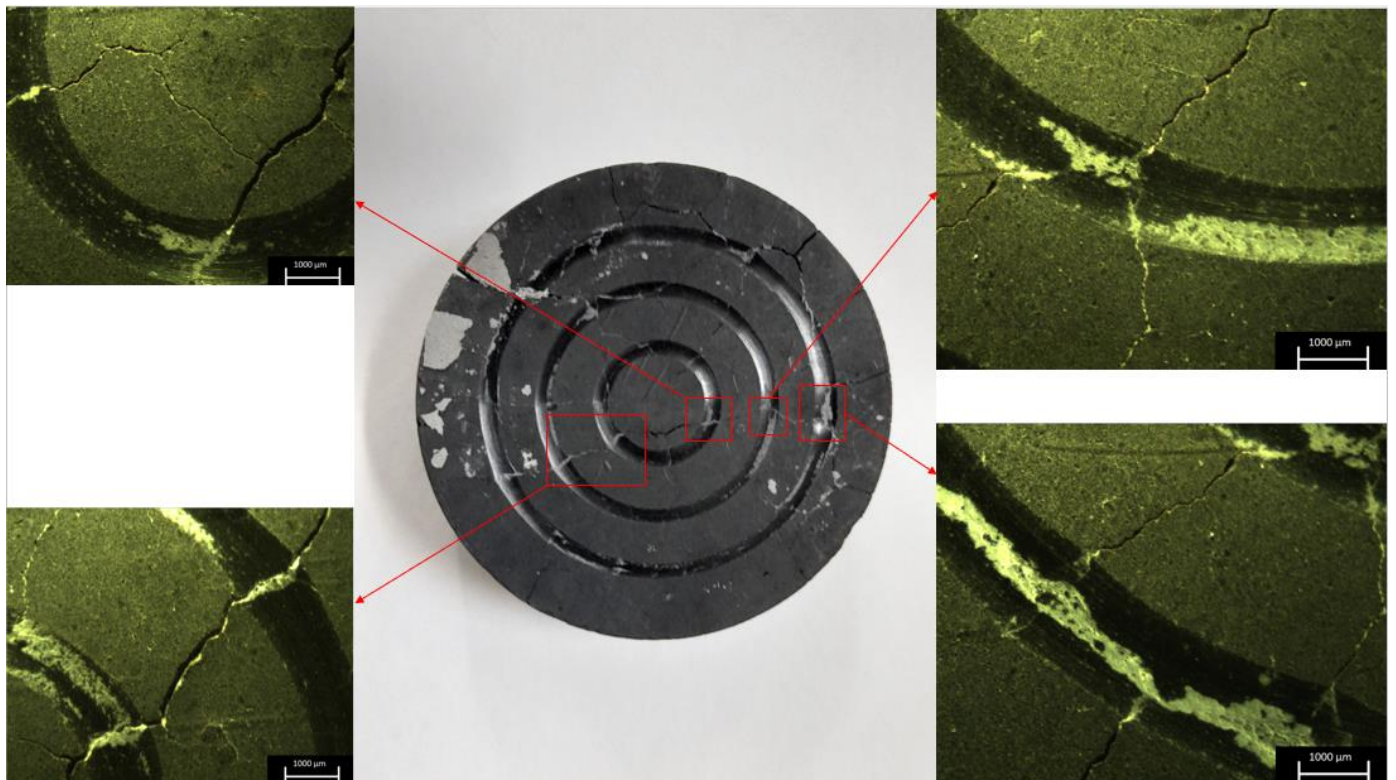
SG076:



Εικόνα 17: Το SG076 πριν και μετά την τριβομέτρησή του (πάνω) και το SG076 μετά την τριβολογική του δοκιμή με λεπτομέρειες (κάτω).



SG090:



Εικόνα 18: Το SG090 πριν και μετά την τριβομέτρησή του (πάνω) και το SG090 μετά την τριβολογική του δοκιμή με λεπτομέρειες (κάτω).



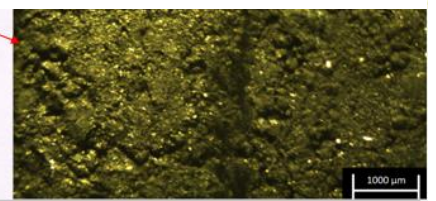
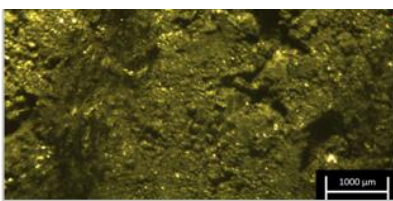
SG105:



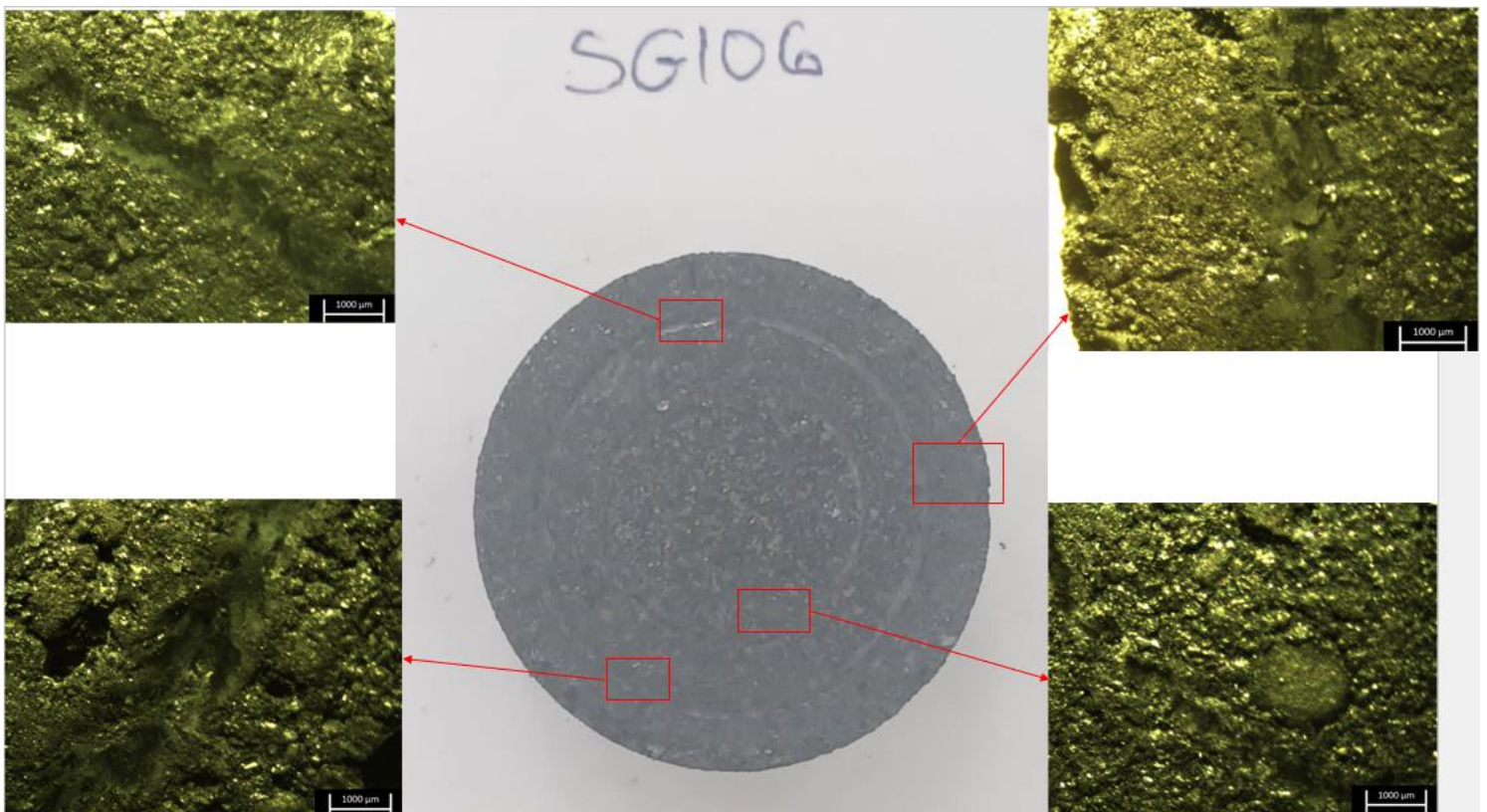
SG106:



Εικόνα 19: Το SG105 πριν και μετά την τριβομέτρησή του. Στο κέντρο φαίνεται η επιφάνεια, η οποία έχει καταπονηθεί σε μηχανική διάβρωση – σπηλαιώση (πάνω) και Το SG105 μετά την τριβολογική του δοκιμή με λεπτομέρειες (κάτω).



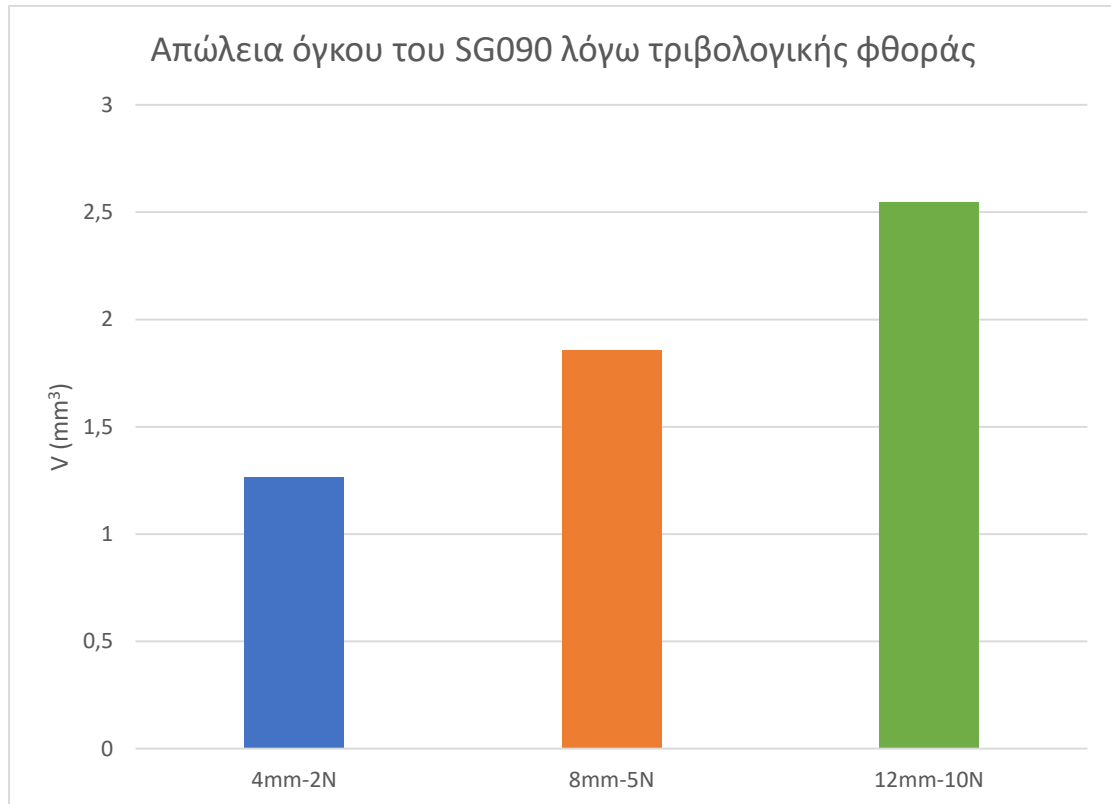
Για τον προσδιορισμό της απώλειας όγκου από την επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε τραχύμετρο. Με τη βοήθεια αυτού μετρήθηκε το εμβαδό των αυλάκων που δημιουργήθηκαν από την τριβολογική δοκιμή πέντε φορές σε διαφορετικά σημεία. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για το SG076 δεν πραγματοποιήθηκε τραχυμέτρηση, διότι δεν δημιουργήθηκε αύλακα λόγω τραχυμέτρησης, επίσης για τα SG105 και SG106 η τραχυμέτρηση έγινε στις εξωτερικές ακτίνες λόγω μεγαλύτερου βάθους της αύλακας. Στις υπόλοιπες δύο, επειδή το βάρος που ασκήθηκε ήταν λιγότερο και η υπόλοιπη επιφάνεια το ίδιο τραχιά, κρίθηκε ότι το εμβαδό των αυλάκων θα ήταν μη μετρήσιμο ή θα υπήρχε μεγάλη αβεβαιότητα στις μετρήσεις, για



Εικόνα 20: Το SG106 πριν και μετά την τριβομέτρησή του. Στο κέντρο φαίνεται η επιφάνεια, η οποία έχει καταπονηθεί σε μηχανική διάβρωση – σπηλαίωση (πάνω) και Το SG106 μετά την τριβολογική του δοκιμή με λεπτομέρειες (κάτω).

αυτό το λόγο και δεν μετρήθηκαν. Προσδιορίστηκε επίσης και ο συντελεστής φθοράς του κάθε δοκιμίου.

Πρώτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απώλειας όγκου του SG090, διότι ήταν το μόνο δοκίμιο όπου μπόρεσαν να προσδιοριστούν τα εμβαδό και των τριών αυλάκων. Όπως φαίνεται υπήρξε συνολική απώλεια όγκου  $V = 5.67 \text{ mm}^3$ , και ο συντελεστής φθοράς του συγκεκριμένου δοκιμίου είναι  $k = 0,000419485 \text{ mm}^3/\text{Nm}$

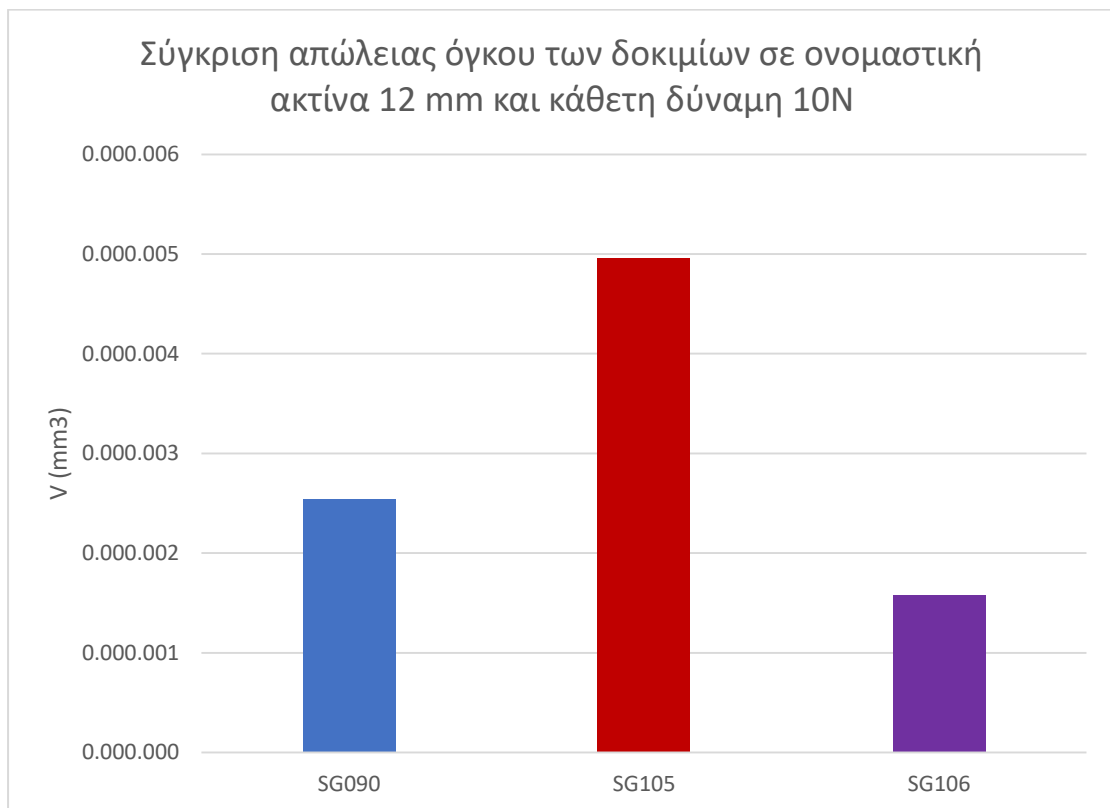


Σχήμα 9: Απώλεια όγκου για κάθε ονομαστική ακτίνα του SG090

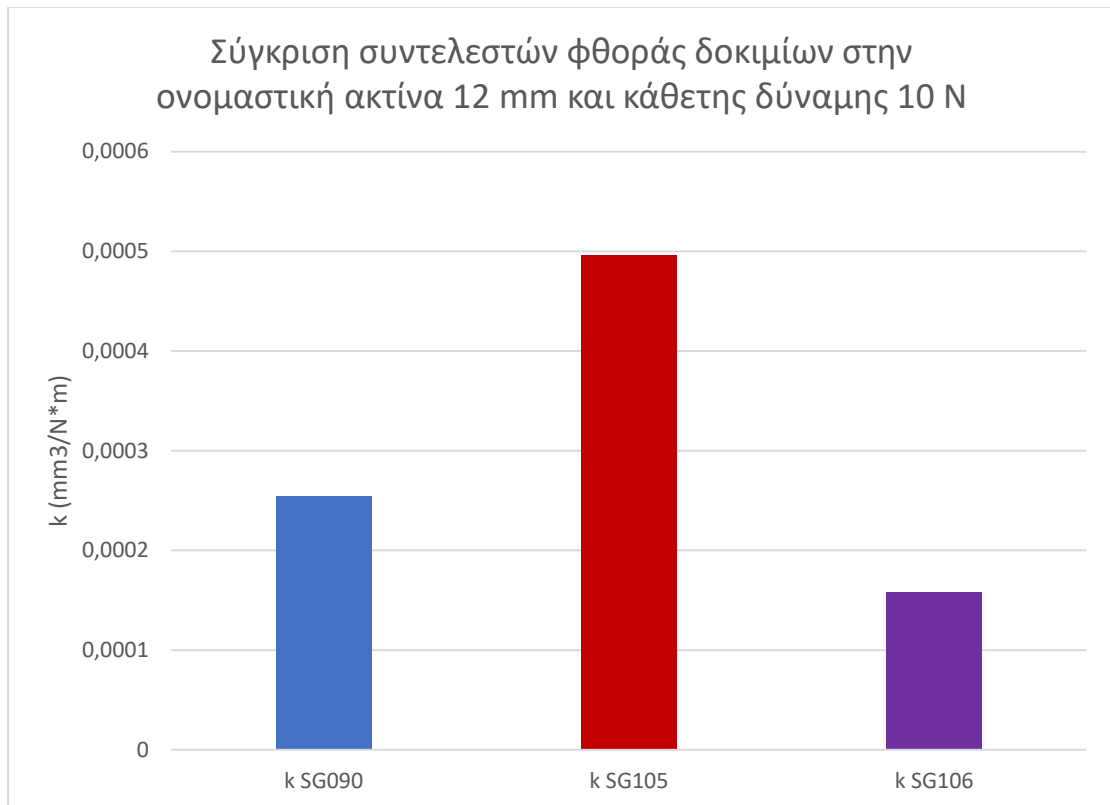




Σχήμα 10: Συντελεστής φθοράς k του SG090 για τις τρεις ονομαστικές ακτίνες.



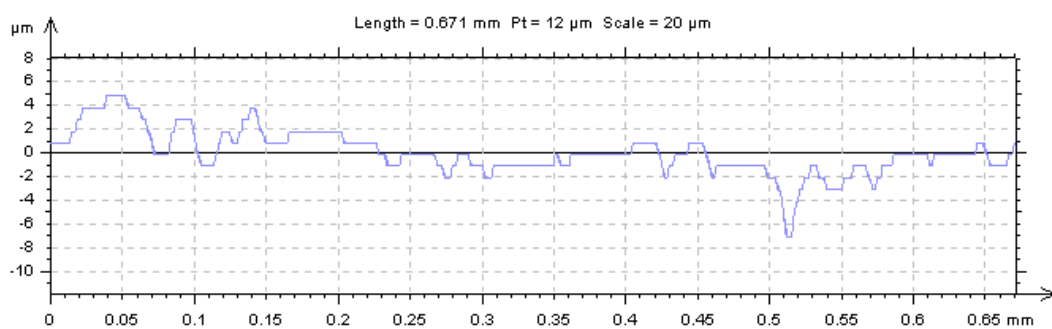
Σχήμα 11: Σύγκριση απώλειας όγκου των δοκιμών σε ονομαστική ακτίνα 12 mm και κάθετη δύναμη 10N.



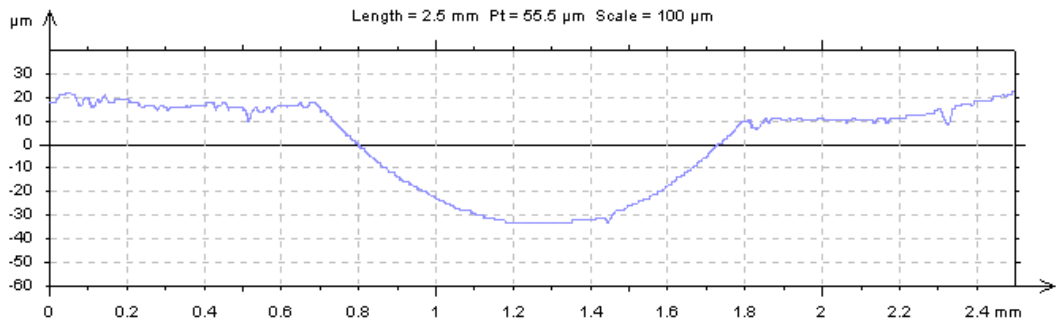
Σχήμα 12: Σύγκριση συντελεστών φθοράς δοκιμίων στην ονομαστική ακτίνα 12 mm και κάθετης δύναμης 10 N

Παράδειγμα της μέτρησης εμβαδού για τα τρία δοκίμια στην ονομαστική ακτίνα 12 mm:

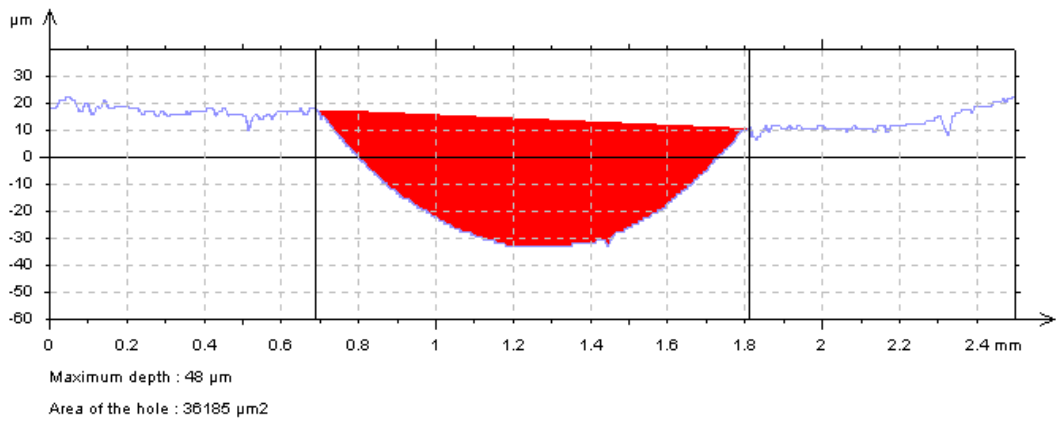
SG090:



Σχήμα 13: Παράδειγμα αρχικής επιφάνειας SG090.

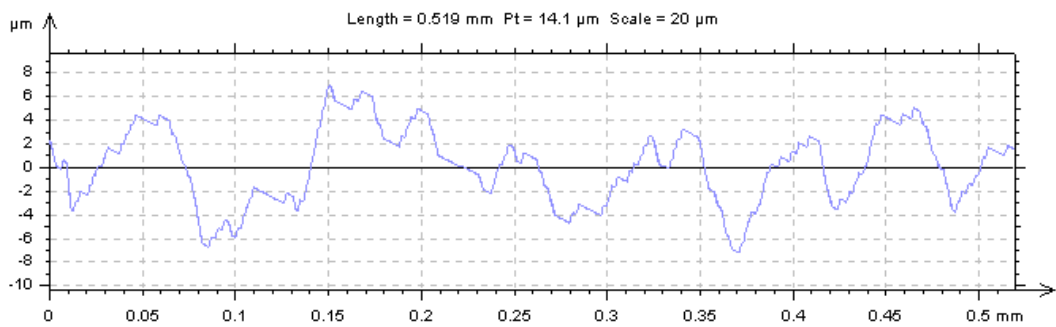


Σχήμα 14: Παράδειγμα μέτρησης αύλακας SG090.

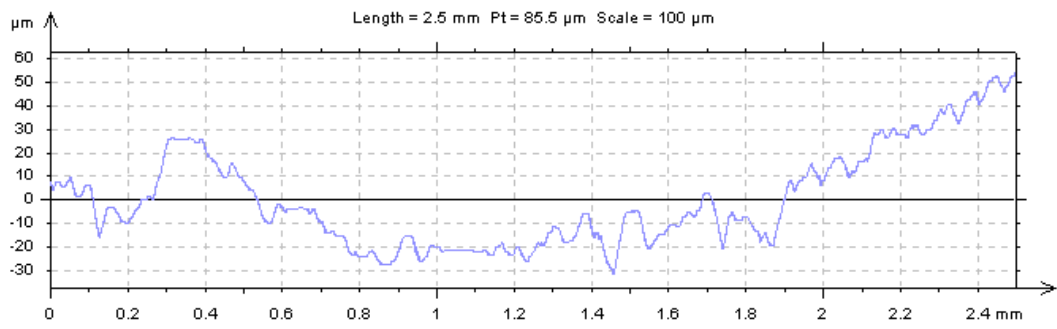


Σχήμα 15: Το μετρήσιμο εμβαδό του του σχήματος 14.

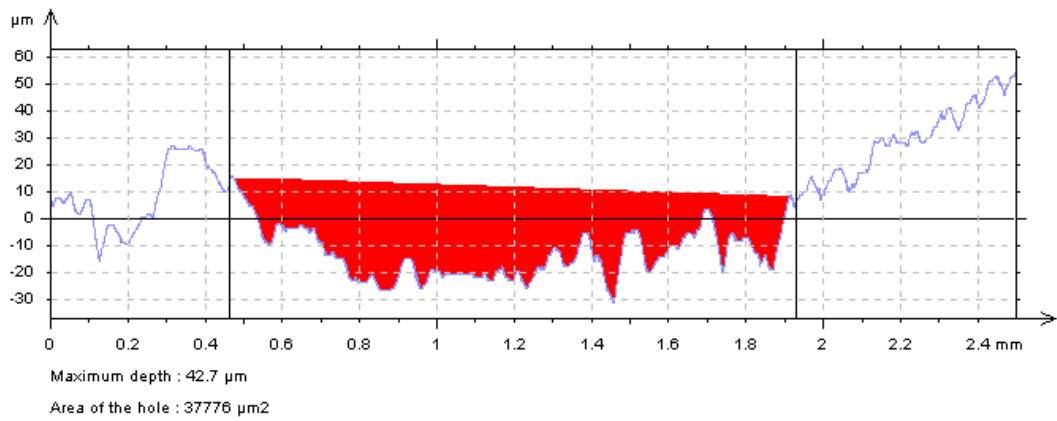
SG105:



Σχήμα 16: Παράδειγμα αρχικής επιφάνειας SG105.

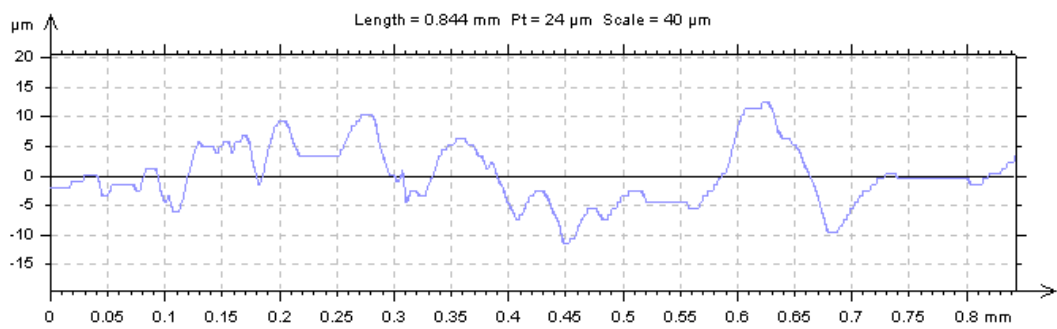


Σχήμα 17: Παράδειγμα μέτρησης αύλακας SG105.

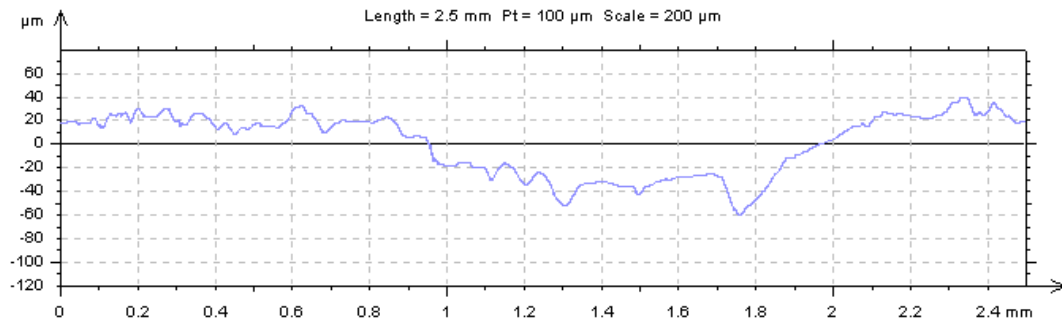


Σχήμα 18: Το μετρήσιμο εμβαδό του του σχήματος 17.

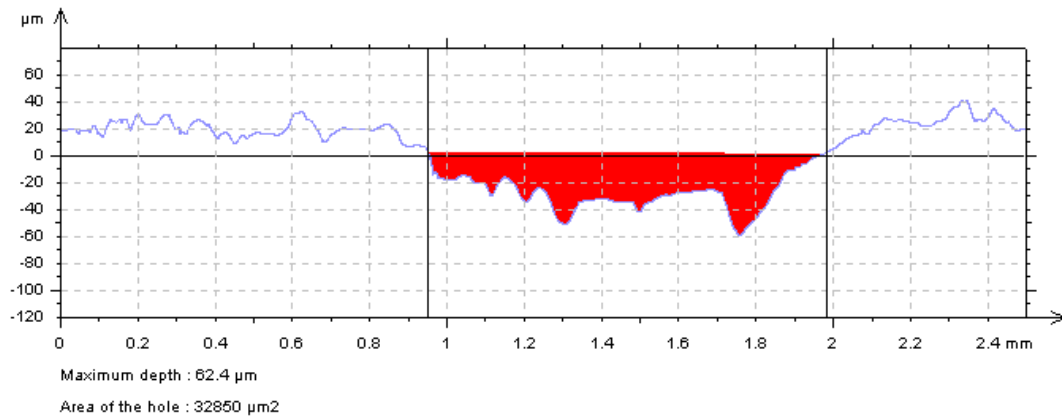
SG106:



Σχήμα 19: Παράδειγμα αρχικής επιφάνειας SG106.



Σχήμα 20: Παράδειγμα μέτρησης αύλακας SG106.



Σχήμα 21: Το μετρήσιμο εμβαδό του του σχήματος 20.

Η μέση τραχύτητα Ra δεν μπόρεσε να μετρηθεί για την αρχική επιφάνεια, διότι δεν υπήρχε η απαραίτητη επιφάνεια δειγματοληψίας.

## 5. Συμπεράσματα

### 5.1 Συμπεράσματα για τη δοκιμή μηχανικής διάβρωσης – σπηλαίωσης

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών της δοκιμής των δύο δοκιμίων σε μηχανική διάβρωση – σπηλαίωση για 2 ώρες μπορεί κάποιος να διακρίνει ότι το SG106 έχασε περισσότερη μάζα από το SG105. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 το συγκεκριμένο δοκίμιο έχασε αρκετό υλικό κατά την έναρξη της δοκιμής και έπειτα η φθορά συνεχίστηκε στο συγκεκριμένο σημείο. Αν και τα δύο υλικά παρασκευάστηκαν στις ίδιες συνθήκες, οι κόκκοι του SG106 στο συγκεκριμένο σημείο δεν είχαν δεθεί κατά την παρασκευή τους καλά με πυροσυσσωμάτωση και αυτό οδήγησε την αφαίρεση του υλικού να ξεκινήσει αρκετά γρήγορα. Σε αντίθεση το SG105 μετά τις δύο ώρες δοκιμής έχασε περίπου τη μισή μάζα από την αντίστοιχη του SG106 και δεν σχηματίστηκαν μεγάλες κοιλότητες στην επιφάνεια του. Και στα δύο υλικά οι κόκκοι που φαίνεται να αποκολλήθηκαν στα όρια τους ή στα σημεία όπου είχε γίνει η σύνδεση μεταξύ ρητίνης και γραφίτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κοιλότητες που δημιουργήθηκαν δεν παρουσίασαν καμία ομοιομορφία μεταξύ τους, όπως και οι κόκκοι που αποκολλήθηκαν και εξετάστηκαν, ήταν διαφορετικού σχήματος και μεγέθους. Η δοκιμή αυτή επίσης, εκτός από κοιλότητες, όμως μπορεί να προκαλέσει και ρωγμές στην επιφάνεια του υλικού όπως φαίνεται στην εικόνα 11. Αν και οι ώρες της πειραματικής διαδικασίας δεν ήταν αρκετές για να υπάρξει μια πλήρης εικόνα για τα αποτελέσματα της φθοράς που προκάλεσε η δοκιμή αυτή στα υλικά, μπορεί κάποιος να συμπεράνει ότι τα υλικά αυτά είναι ακατάλληλα για την εφαρμογή τους σε μηχανήματα και διατάξεις που καταπονούνται από μηχανική διάβρωση – σπηλαίωση, καθώς φθάρθηκαν πολύ γρήγορα.

## 5.2 Συμπεράσματα για την τριβολογική δοκιμή των υλικών

Αφού το ψυκτικό μηχάνημα που βοηθούσε στην σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του νερού στις δοκιμές μηχανικής διάβρωσης – σπηλαιώσης, και τα τέσσερα δοκίμια υποβλήθηκαν σε τριβολογική δοκιμή για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής τους. Τα SG105 και SG106 παρουσίασαν παρόμοιους συντελεστές τριβής και για τις τρεις ονομαστικές ακτίνες κάθετες δυνάμεις, το οποίο είναι λογικό καθώς παρασκευάστηκαν κάτω από τις ίδιες ακριβώς συνθήκες, και η διαφορά στη μικροδομή τους, όπως φάνηκε και από τη δοκιμή σε μηχανική διάβρωση -σπηλαιώση δεν έπαιξε καθοριστικό ρόλο. Γενικότερα, το SG105 φάνηκε να έχει μικρότερο συντελεστή τριβής, ενώ το SG090 από την άλλη πλευρά φάνηκε να έχει το μεγαλύτερο και από τα τέσσερα δοκίμια. Ενδιαφέρον προκαλεί, επίσης, το γεγονός ότι ενώ λογικά ο συντελεστής τριβής θα έπρεπε να μειώνεται καθώς αυξάνεται η κάθετη δύναμη, όπως συμβαίνει στη διεθνή βιβλιογραφία [29] και στο SG090, στο SG106 φαίνεται να αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η κάθετη δύναμη. Το SG076 αποτέλεσε ειδική περίπτωση, διότι όπως και προαναφέρθηκε, λόγω της τραχύτητας και επιφάνειας του ήταν αδύνατη η σταθεροποίηση του στο τριβόμετρο για δοκιμές κάθετης δύναμης πάνω από 2N. Παρόλα αυτά η μία δοκιμή που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι ο συντελεστής τριβής του είναι παρόμοιος με των SG105 και SG106. Αυτό μπορεί να φέρει κάποιον στο συμπέρασμα ότι όσο πιο τραχιά είναι μία επιφάνεια ο συντελεστής τριβής μειώνεται. Όπως φάνηκε και από την εικόνα 3 τα SG076, SG105 και SG106 παρουσιάζουν μια σαφώς πιο τραχιά επιφάνεια από εκείνη του SG090. Βέβαια αυτό δε συνάδει με την πραγματικότητα γιατί ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από το τριβόσυστημα που δημιουργείται μεταξύ της εξεταζόμενης επιφάνειας και του ανταγωνιστικού σώματος. Με κάποιο άλλο πιθανό ανταγωνιστικό σώμα, δηλαδή, ο συντελεστής τριβής ολίσθησης θα άλλαζε σε όλα τα δοκίμια.

### 5.3 Συμπεράσματα για την τραχυμέτρηση των δοκιμίων

Λόγω των τριβολογικών δοκιμών υπήρξαν διακυμάνσεις στη φθορά που προκλήθηκε στα δοκίμια. Καταρχάς στην περίπτωση του SG076 δεν υπήρξε καθόλου φθορά στην επιφάνεια του υλικού, ενώ φαίνεται το ίδιο να προκάλεσε φθορά στο ανταγωνιστικό σώμα, σωμάτια του οποίου φαίνονται να έχουν μαζευτεί μέσα στους επιφανειακούς πόρους του SG076. Από αυτό μπορεί κάποιος να συμπεράνει ότι οι πόροι κατάφεραν να απομακρύνουν υλικό από το ανταγωνιστικό σώμα. Το SG090 φαίνεται να φθάρθηκε περισσότερο από όλα, ενώ τα SG105 και SG106 αν και δείξαν οπτικά σημάδια φθοράς, η τραχυμέτρηση έγινε με αβεβαιότητα καθώς οι αύλακες που είχαν σχηματιστεί δεν είχαν αρκετά μεγάλο βάθος για να υπάρξει αξιοπιστία. Ακόμα και μικροσκοπικά όπως φαίνεται από τις εικόνες 19 και 20 είναι δύσκολο κάποιος σε πολλές περιπτώσεις να διακρίνει τις αύλακες που έχουν σχηματιστεί. Η απώλεια όγκου αλλά και ο συντελεστής φθοράς υπολογίστηκαν. Συγκεκριμένα για το SG090 ενώ η απώλεια όγκου αυξάνεται ενώ αυξάνεται η κάθετη δύναμη, πράγμα λογικό, ο συντελεστής φθοράς φαίνεται να μειώνεται. Παρόλα αυτά φαίνεται και η απώλεια όγκου αλλά και ο συντελεστής φθοράς να είναι μεγαλύτερος στην ονομαστική 12 mm και κάθετη δύναμη 10 N, κάτι το οποίο δεν συνάδει με τα οπτικά και τραχυμετρικά αποτελέσματα, αλλά όπως προαναφέρθηκε λόγω της τραχιάς επιφάνειας υπάρχουν αβεβαιότητα και αναξιοπιστία στις μετρήσεις και στα αποτελέσματα για τα SG105 και SG106. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στις αύλακες που δημιουργήθηκαν στο SG090 έχει προσκολληθεί σκόνη από το ανταγωνιστικό υλικό, το οποίο δεν μπορούσε να απομακρυνθεί, και έτσι κάποιος μπορεί να οδηγηθεί στο συμπέρασμα ότι από τη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε κατά της διάρκεια της δοκιμής τα δύο υλικά αυτά στα σημεία εκείνα δημιούργησαν δεσμούς. Τέλος τα SG076, SG105 και SG106 αποτελούν μια καλή επιλογή για την εφαρμογή τους σε διατάξεις που εργάζονται υπό συνθήκες τριβής, καθώς δεν παρουσίασαν φθορά κατά τις τριβολογικές δοκιμές.



## 5.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνες

Κάτι που δεν εξετάστηκε στην παρούσα εργασία λόγω έλλειψης χρόνου και τεχνικών προβλημάτων είναι η δοκιμή κεραμικών υλικών σε μηχανική διάβρωση – σπηλαίωση σε διαφορετικές συνθήκες πειράματος. Παραδείγματος χάριν θα μπορούσε κάποιος να εξετάσει τη συμπεριφορά των δοκιμίων σε διαφορετικά υγρά διαλύματα, δηλαδή τη δοκιμή τους όχι σε απιονισμένο νερό αλλά σε νερό δικτύου, νερό θαλάσσης, οξύ ή βάση. Επίσης θα μπορούσε κάποιος κρατώντας σταθερό το υγρό διάλυμα να αυξομειώνει τη θερμοκρασία κάνοντας δοκιμές στους 25 °C, 50 °C και 95 °C. Επιπλέον, θα μπορούσε να αλλάξει η ατμόσφαιρα γύρω από τη δοκιμή, πραγματοποιώντας τη σε συνθήκες κενού ή μεγαλύτερης πίεσης της ατμοσφαιρικής. Επίσης οι τριβολογικές δοκιμές θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν για περισσότερη ώρα, ή συνεχόμενα ή και διακοπόμενα. Πραγματοποιώντας διακοπόμενα τη δοκιμή μπορεί να δώσει και καλύτερα αποτελέσματα καθώς κάποιος μπορεί να παρατηρήσει και την εξέλιξη της φθοράς και του συντελεστή τριβή κατά το πέρασμα του χρόνου. Τέλος για να προσδιοριστεί πιο αξιόπιστα η φθορά έπειτα από τις δοκιμές, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας τρισδιάστατος scanner, ώστε αν προσομοιωθεί ηλεκτρονικά η επιφάνεια των δοκιμίων και έτσι να πάρει κάποιος ακριβής μετρήσεις του βάθους φθοράς.

## 6. Βιβλιογραφία

1. Askeland, D., Wright, W. (2016). The science and engineering of materials, 7th Ed., Cengage Learning, Inc., Mason, OH, United States (Ελληνική μετάφραση: Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2018).
2. Callister, W., & Rethwisch, D. (2014). Materials Science and Engineering: SI Version. Asia: John Wiley & Sons Pte Ltd.
3. Szdoko, M. (2005). Mathematical description and evaluation of cavitation erosion resistance of materials. Journal of Materials Processing Technology, 164 – 165, 1631 – 1636.
4. Kekes, D., Psyllaki, P., Vardavoulias, M., Vekinis, G. (2014). Wear Micro – Mechanisms of Composite WC – Co/Cr – NiCrFeBSiC Coatings. Part II: Cavitation Erosion. Tribology in Industry, Vol.36, No. 4, 375 – 383.
5. Tomlinson, W.J., Matthews, S.J. (1994). Cavitation Erosion of Structural Ceramics. Ceramics International, 20, 201 – 209.
6. ASTM International. Designation: G32 – 09. Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus.  
<https://standards.globalspec.com/std/3836015/astm-g32-09> (22/09/2022)
7. UIP500hdT- UI4000hdT Operation Manual  
[https://www.hielscher.com/i1000\\_p.htm](https://www.hielscher.com/i1000_p.htm) (22/09/2022)
8. Operation Software Manual  
[https://www.hielscher.com/i1000\\_p.htm](https://www.hielscher.com/i1000_p.htm) (22/09/2022)
9. Operation Manual Web-Interface [https://www.hielscher.com/i1000\\_p.htm](https://www.hielscher.com/i1000_p.htm)  
(22/09/2022)

10. Váz RF, Tristante R, Pukasiewicz AGM, Capra AR, Chicoski A, Filippin CG, et al. (2021). Welding and thermal spray processes for maintenance of hydraulic turbine runners: case studies. *Soldagem & Inspeção*, 26, 2540 – 2553.
11. Bakhshandi, RK., Tkachuk, A., Sadek, Mohamed., Bergström, J., Grahk, M. (2022). Failure analysis of two cylindrical impact pistons subjected to high velocity impacts in drilling applications. *Engineering Failure Analysis*, 140, 106623
12. Chi P., Shilong, Z. (2022). Erosion experiments of shale using a cavitation jet. *Ocean Engineering*, 261, 112115.
13. Brennen, CE. (2015). Cavitation in medicine. *Interface Focus*, 5, 20150022.
14. Tomlinson, WJ., Kalitsounakis, N., Vekinis, G. (1999). Cavitation erosion of aluminas. *Ceramics International*, 25, 331 – 338.
15. Yao, SS., Jiang, D., et al. (2020). Preparation and Properties of Graphite/Epoxy Resin Conductive Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 740, 012064.
16. Garcia – Atance Fatjo, G., Hadfield, M., Vieillard, C., Sekulic, J. (2009). Early stage cavitation erosion within ceramics: An experimental investigation. *Ceramics International*, 35, 3301 – 3312.
17. Σκουλικίδης, Θ. (1988). Εφαρμοσμένη Ηλεκτροχημεία Α: Διάβρωση και προστασία. Αθήνα:

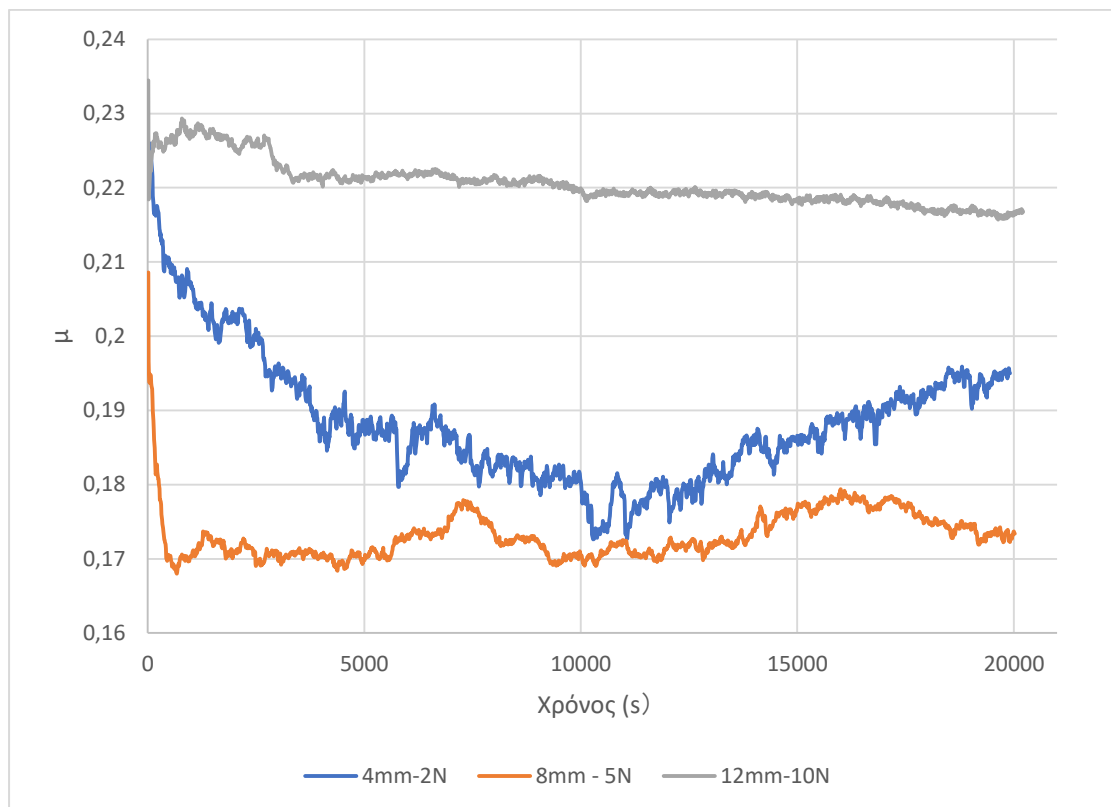
18. Fontana, M. (1987). Corrosion Engineering. Singapore: McGraw – Hill International Editions.
19. Litzow, U., et al. (2006). Cavitation erosion of advanced ceramics in water. Int. J. Mat. Res., 9, 10.
20. Niebuhr, D. (2007). Cavitation erosion behavior of ceramics in aqueous solutions. Wear, 263, 295 – 300.
21. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1506/1506.08979.pdf> (22/09/2022)
22. Βιβλίο ΕΠΑΛ Β' <http://lyk-ag-fylaxi-lem.schools.ac.cy/data/uploads/lessons/tecnologia/fortia-kataponhsh.pdf> (22/09/2022)
23. Διακάτος, Δ., Ζαρογιάννης, Ι. (2018). Κόπωση σύνθετων υλικών και κατασκευών. Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ. Ε., Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών.
24. <https://www.yamtop.com/products/99-high-alumina-ball.html>(22/09/2022)
25. Huang, ZP., Sun, Y., Bell, T. (1994). Friction behaviour of TiN, CrN and (TiAl)N coatings. Wear, 173, 13 – 20.
26. Alajmi, M., Alrashdan, K.R., Alsaeed, T., Shalwan, A. (2020). Tribological characteristics of graphite epoxy composites using adhesive wear experiments. Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 6, 13671 – 13681.

27. Ψυλλάκη, Π. (2021) Παρουσιάσεις Μηχανικής Επιφανειών. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, e-class.
28. Mitutoyo America Corporation. Quick guide to surface roughness measurement: Reference guide for laboratory and workshop. Bulletin No. 2229.
29. Mourlas, A., Psyllaki, P., Koutsomichalis. A., Vaxevanidis, N.M. (2011). Comparative study on the tribological behavior of metal and ceramic coatings. SERBIATRIB '11. 12<sup>th</sup> International Conference on Tribology. Kragujevac, Serbia, 11–13 May 2011.
30. Γκιουζέλ, Σ. (σε εξέλιξη): Παρασκευή αργυλοπυριτικών και μαγνησιακών πυρίμαχων υλικών (μαζών και τούβλων) με νανοπρόσθετα και μελέτη ιδιοτήτων. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών.
31. Παραδεισιάδης, Γ. (2012). Σημειώσεις ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΑ. Αριστοτέλειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Οχημάτων. Θεσσαλονίκη.

## 7. Παράρτημα

### 7.1 Λοιπά διαγράμματα t-μ και Laps – μ τριβολικών δοκιμών.

Για το SG105:

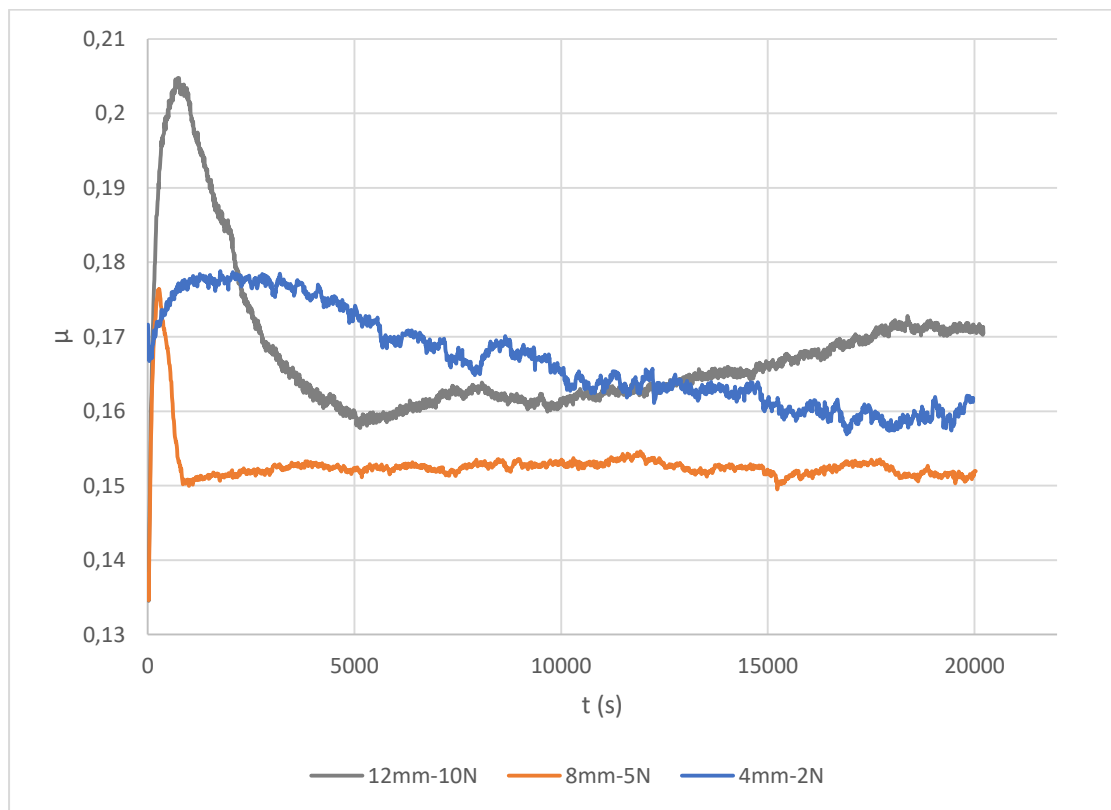


Σχήμα 22: Διάγραμμα t-μ του SG105.



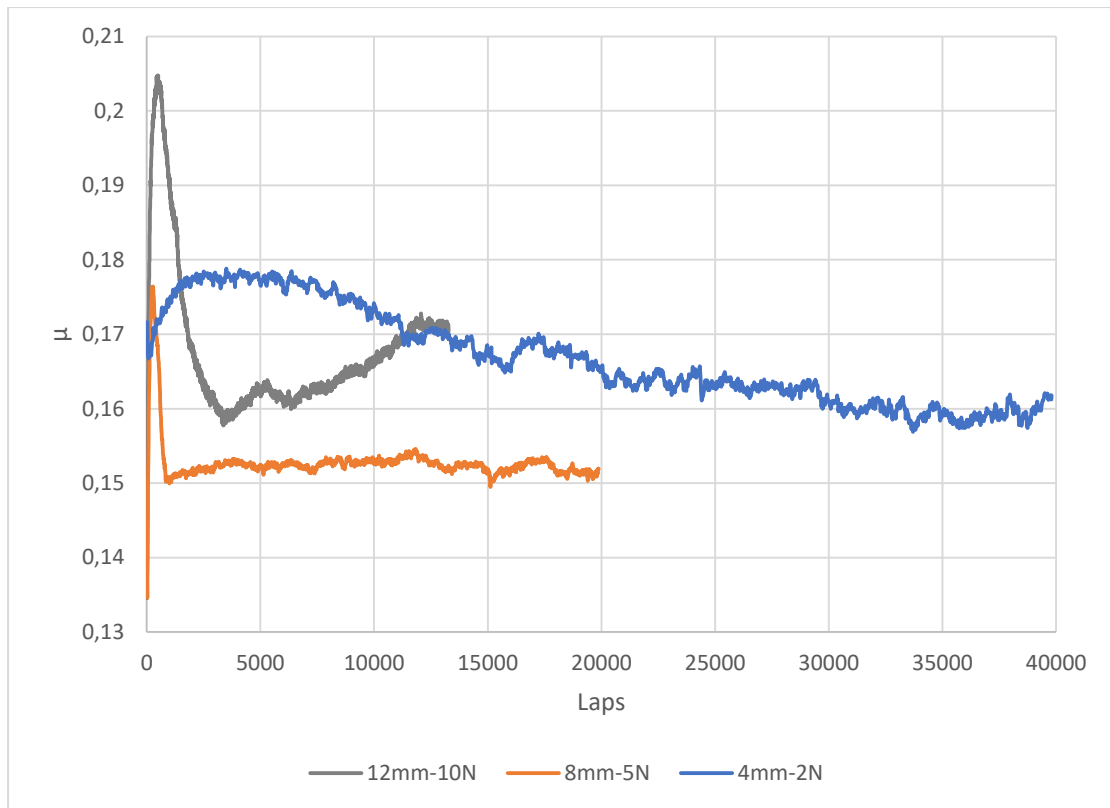
Σχήμα 23: Διάγραμμα laps- $\mu$  του SG105.

Για το SG106:



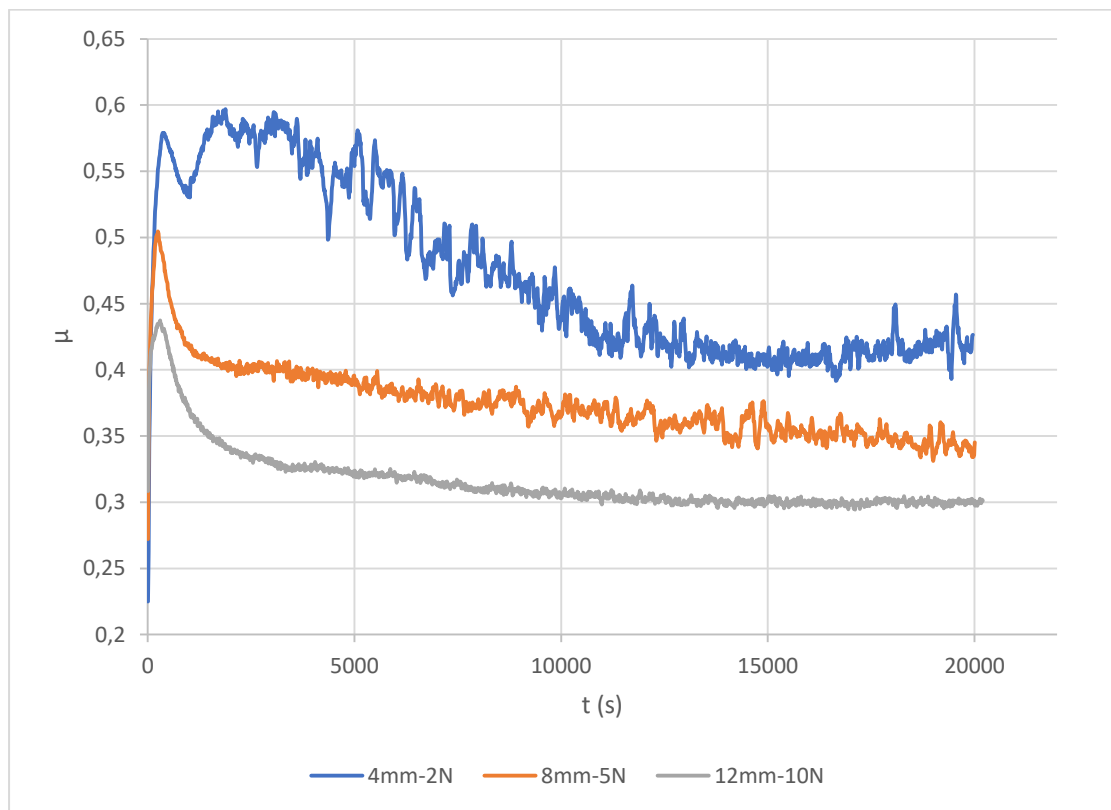
Σχήμα 24: Διάγραμμα  $t$ - $\mu$  του SG106.



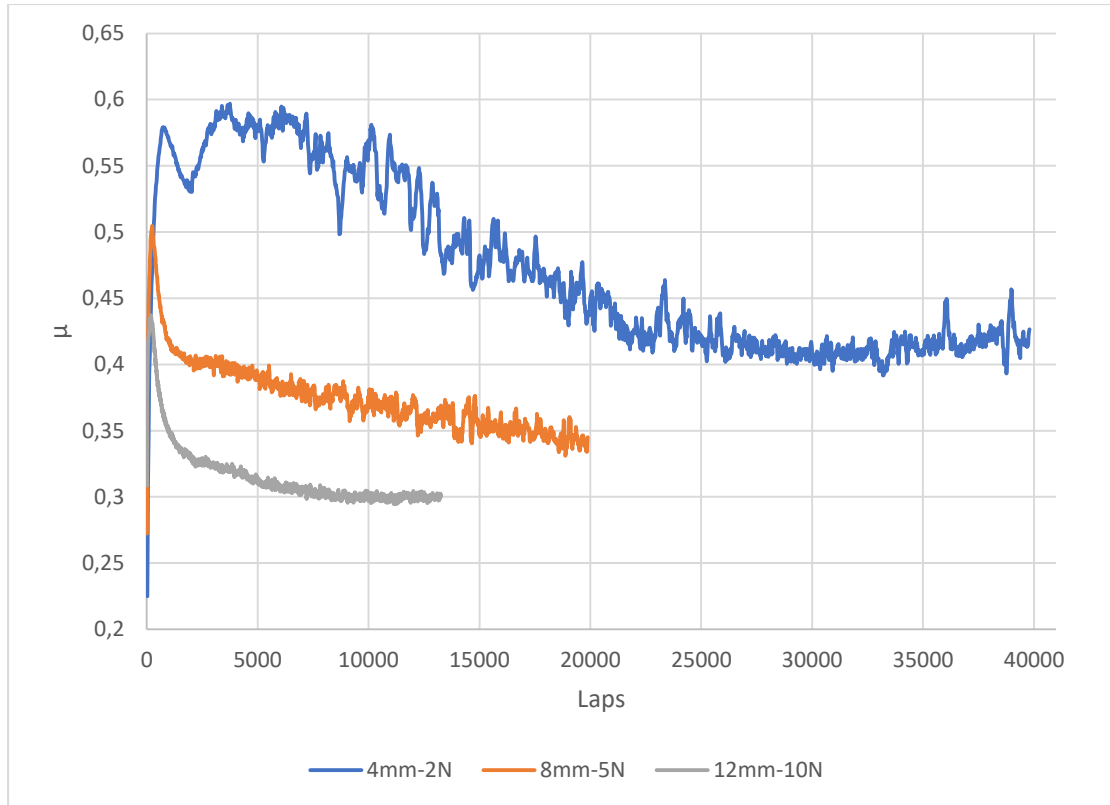


Σχήμα 25: Διάγραμμα laps- $\mu$  του SG105.

Για το SG090:

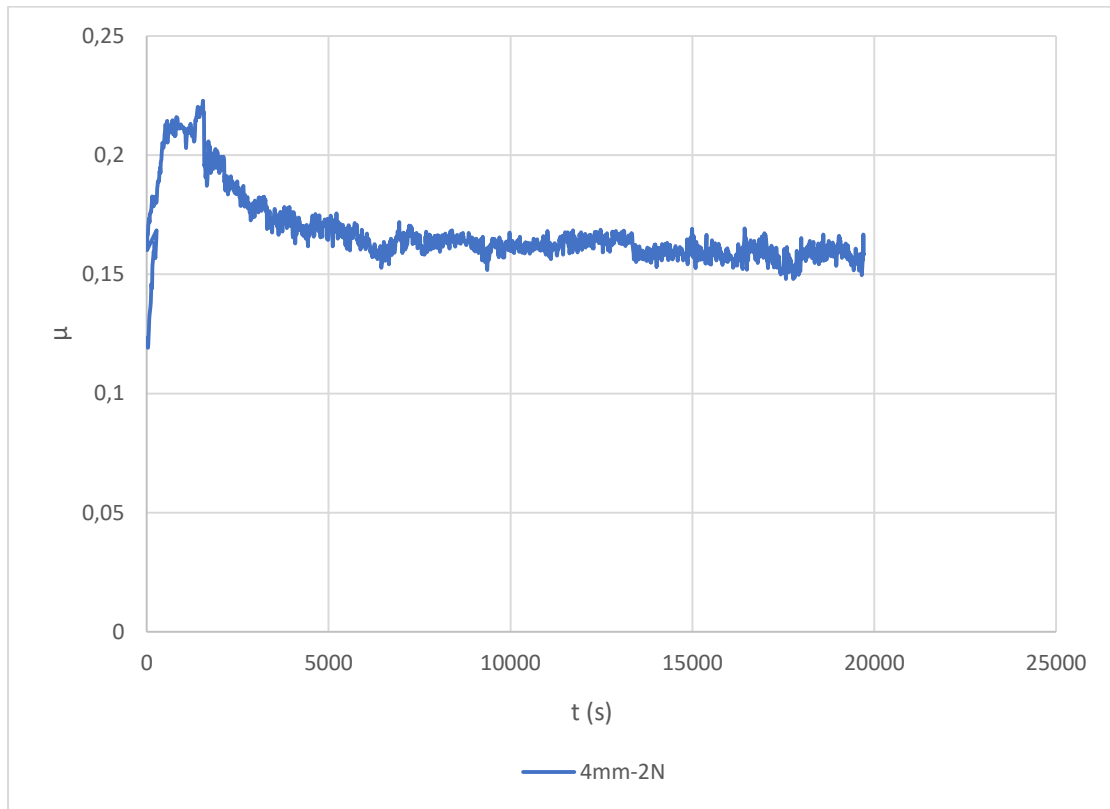


Σχήμα 26: Διάγραμμα  $t$ - $\mu$  του SG090.

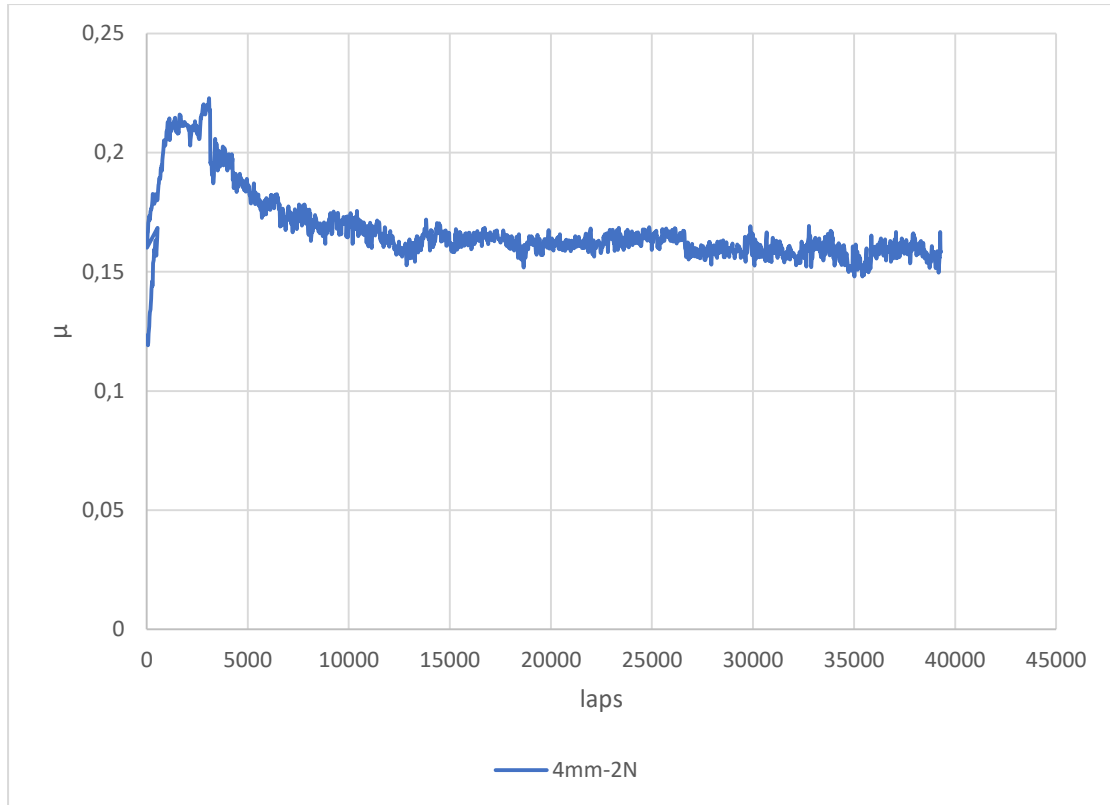


Σχήμα 27: Διάγραμμα laps- $\mu$  του SG090.

Για το SG076:



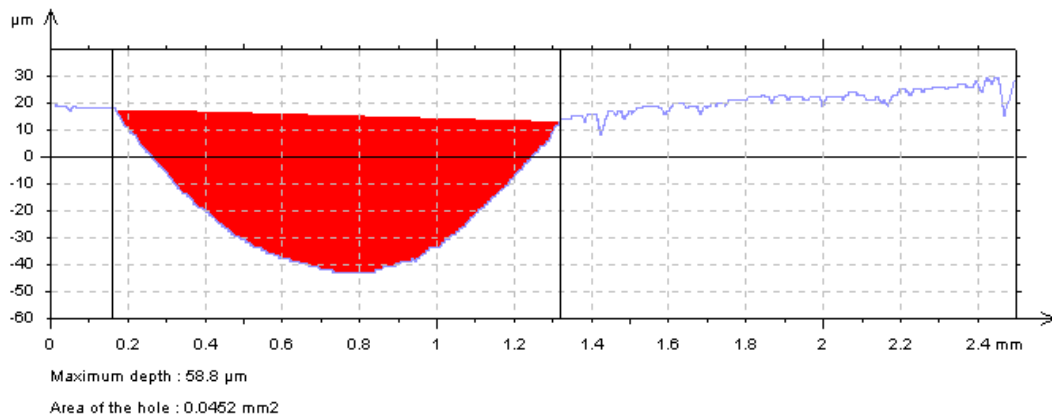
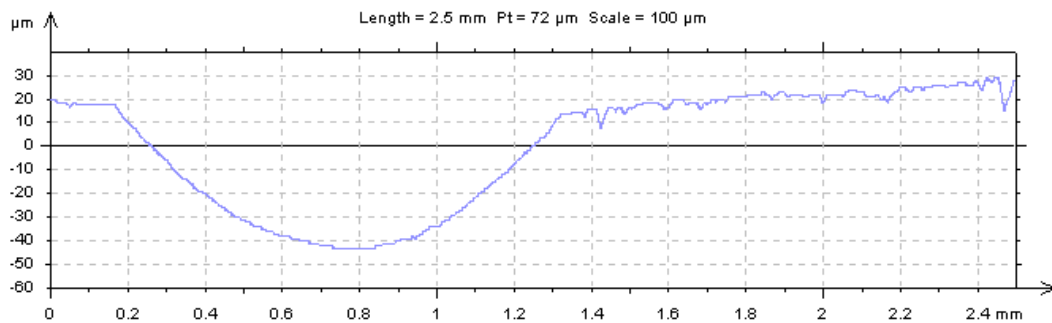
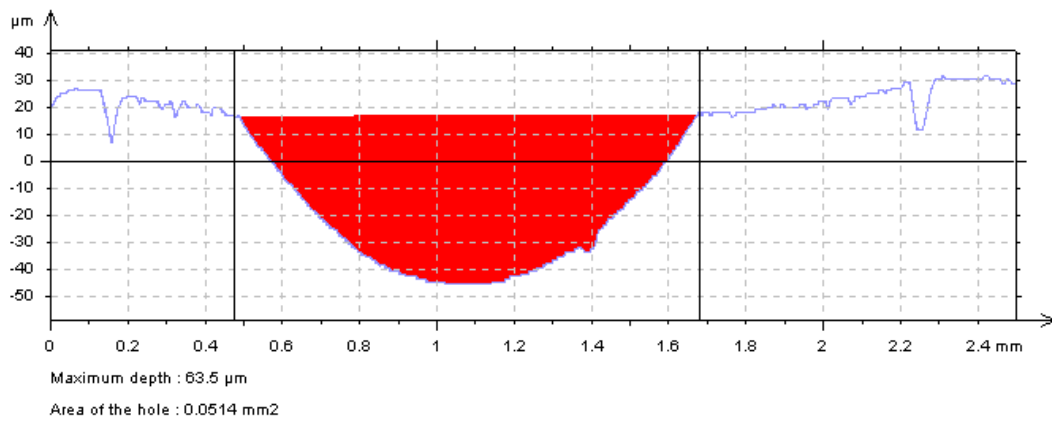
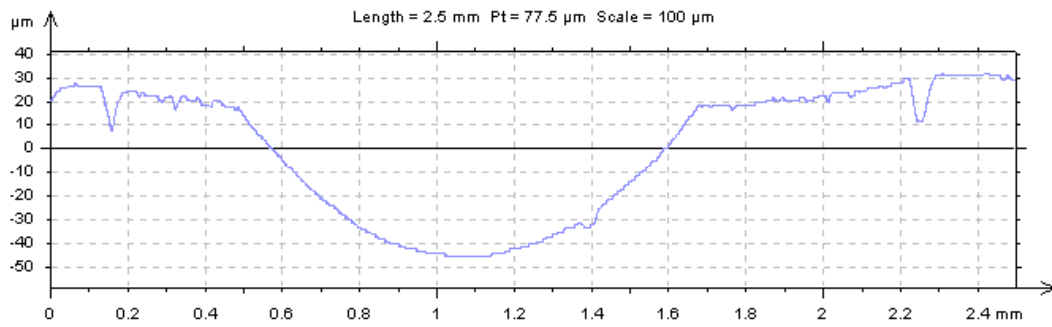
Σχήμα 28: Διάγραμμα  $t$ - $\mu$  του SG076.

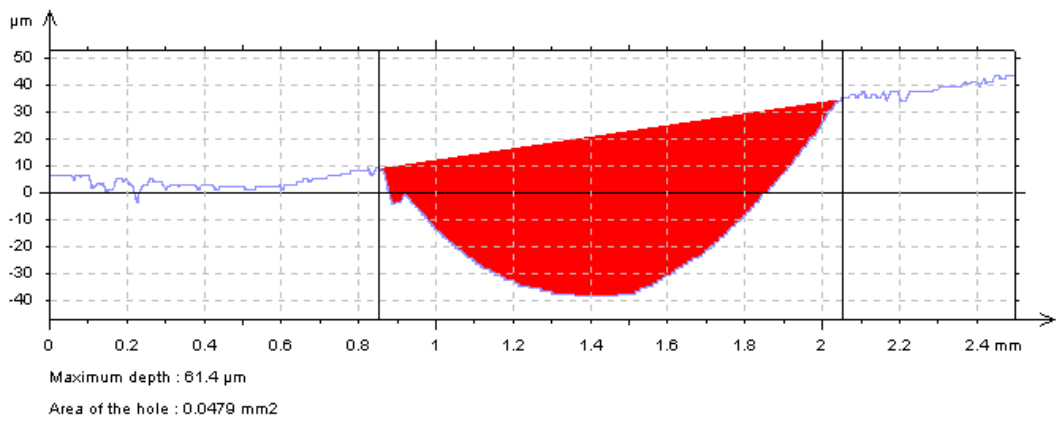
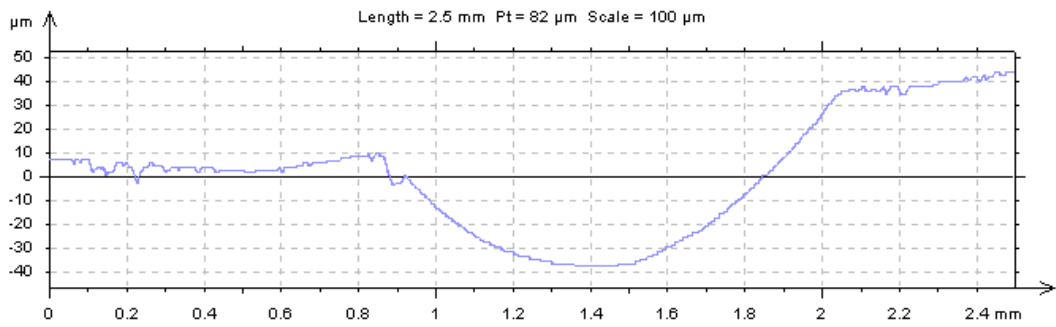
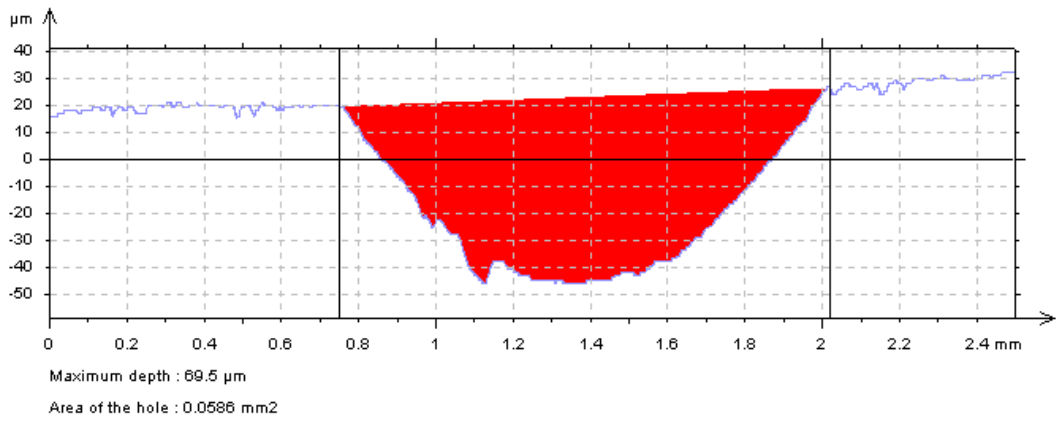
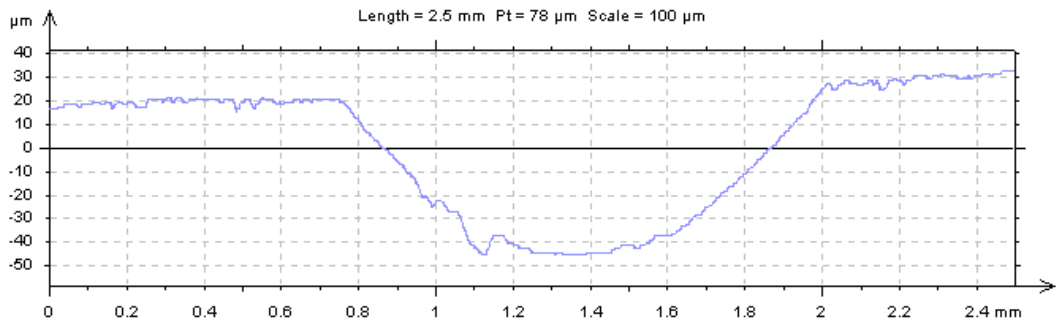


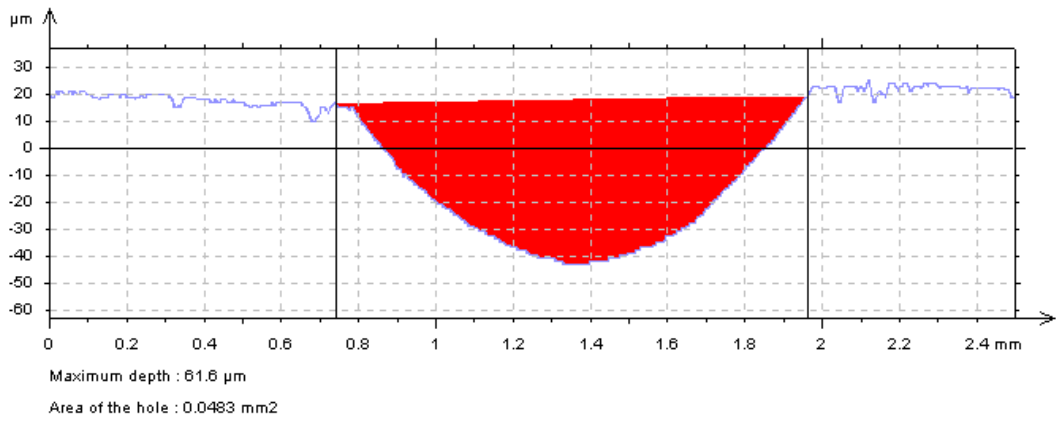
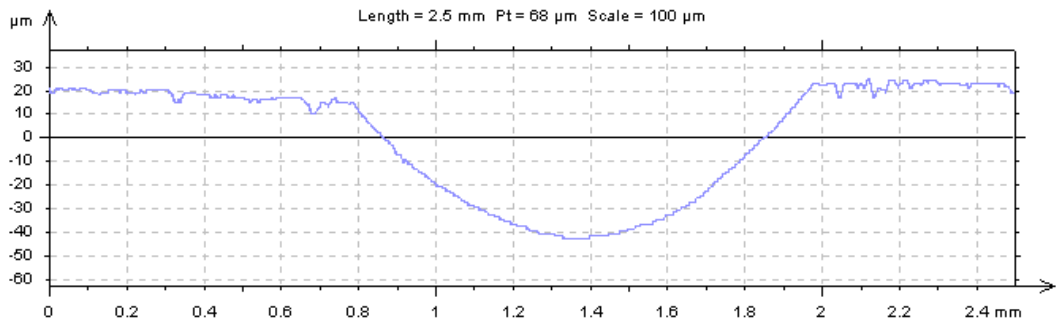
Σχήμα 29: Διάγραμμα laps- $\mu$  του SG076.

## 7.2 Διαγράμματα τραχυμέτρησης:

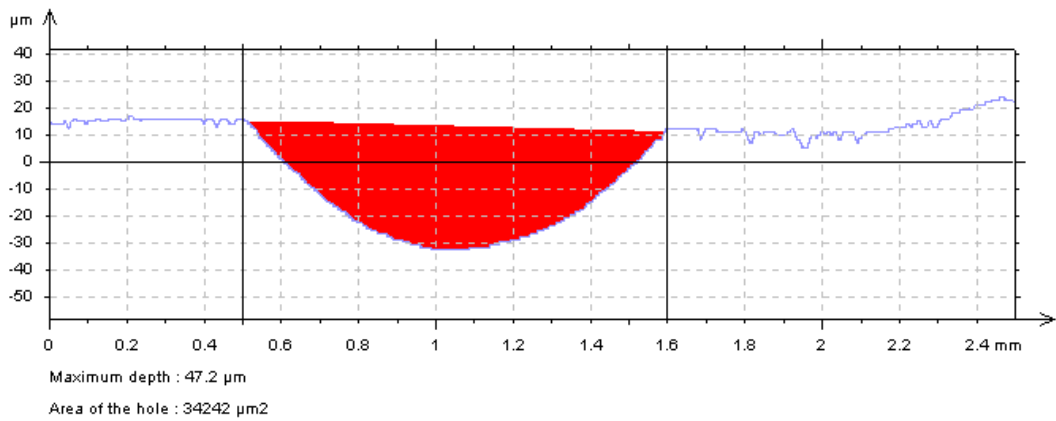
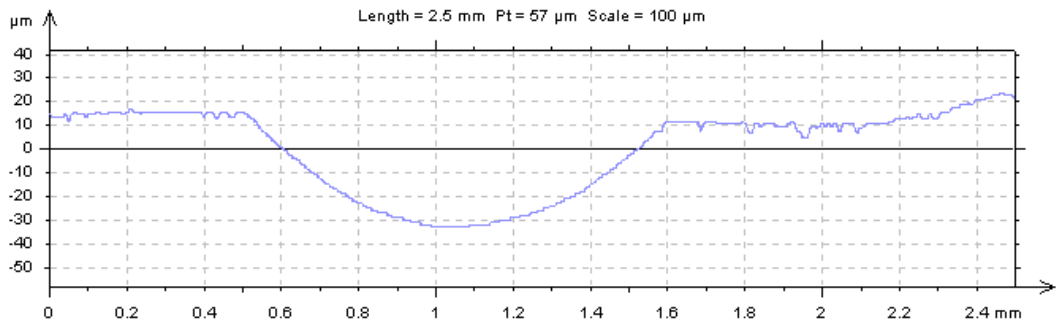
Για το SG090 σε ονομαστική ακτίνα 4mm κάθετης δύναμης 2N:



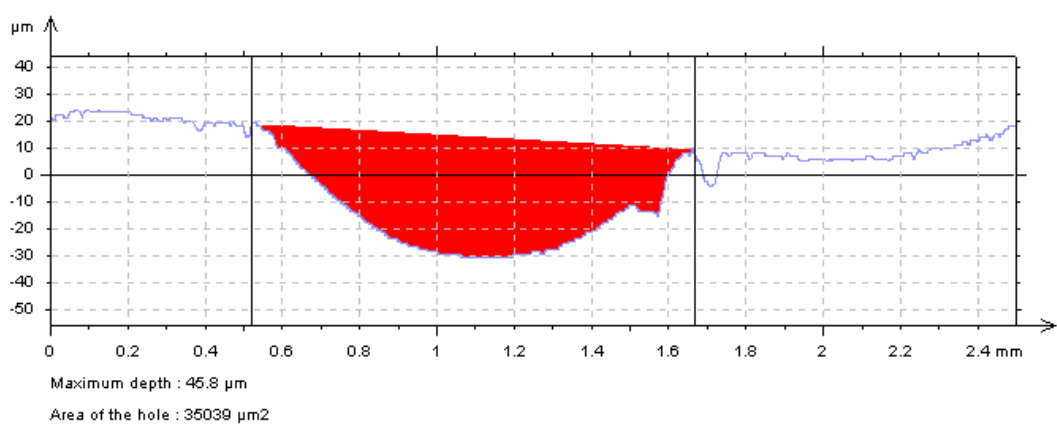
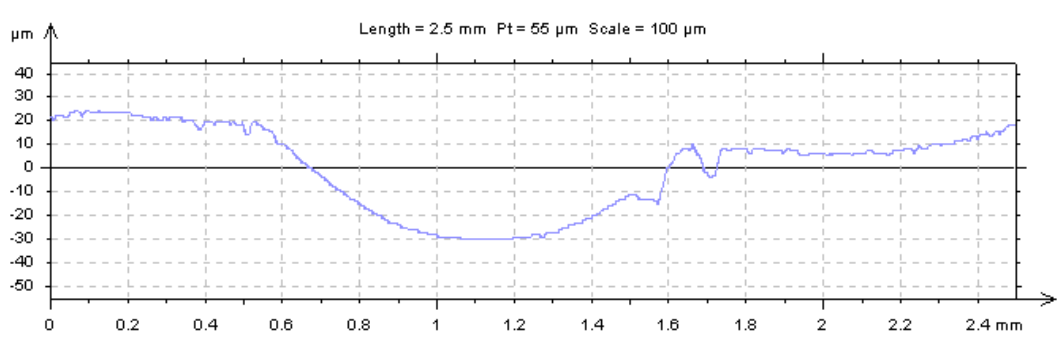
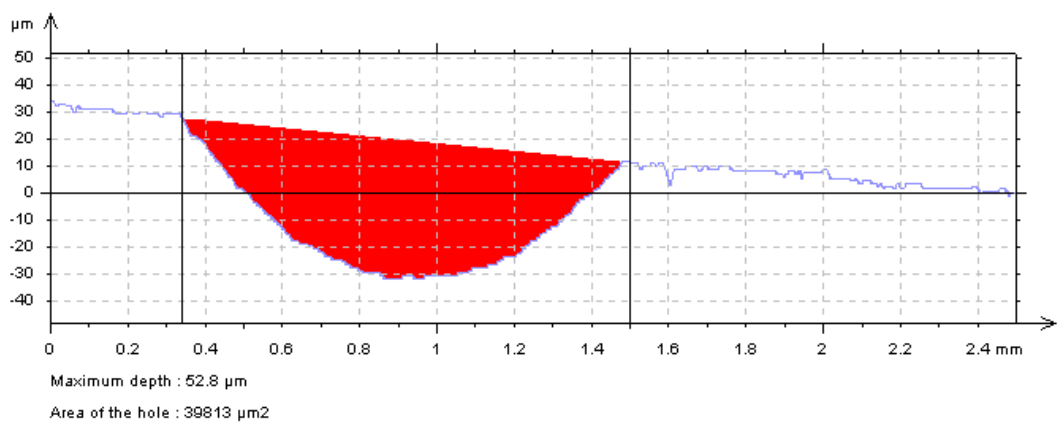
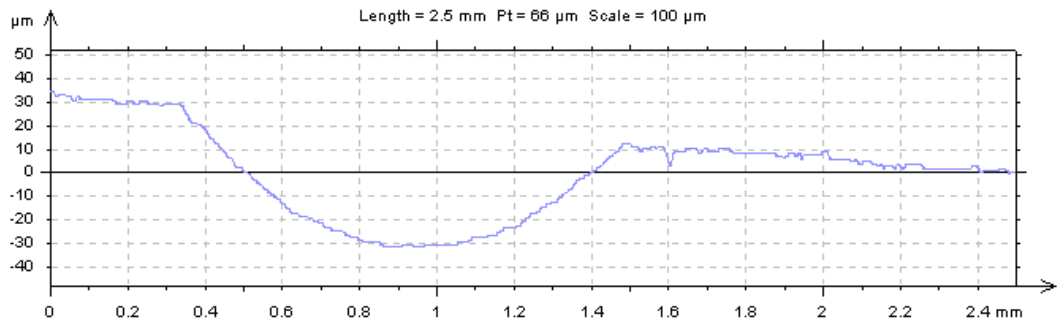


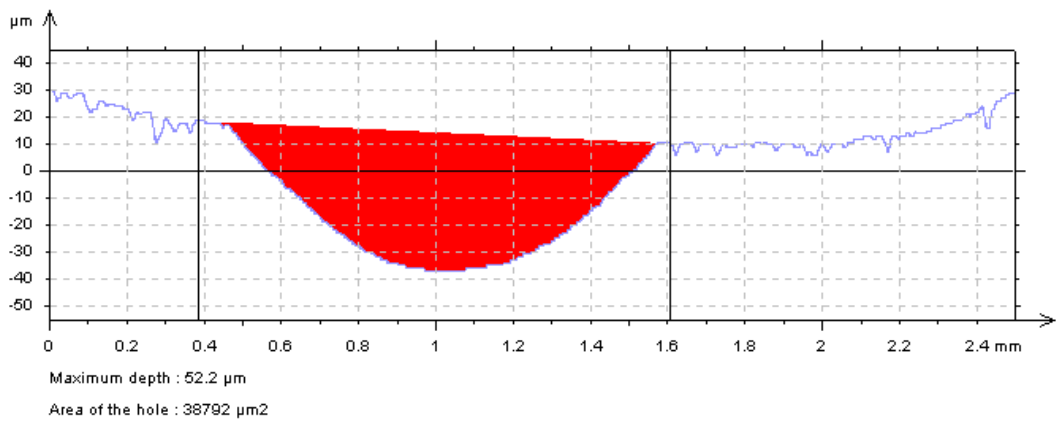
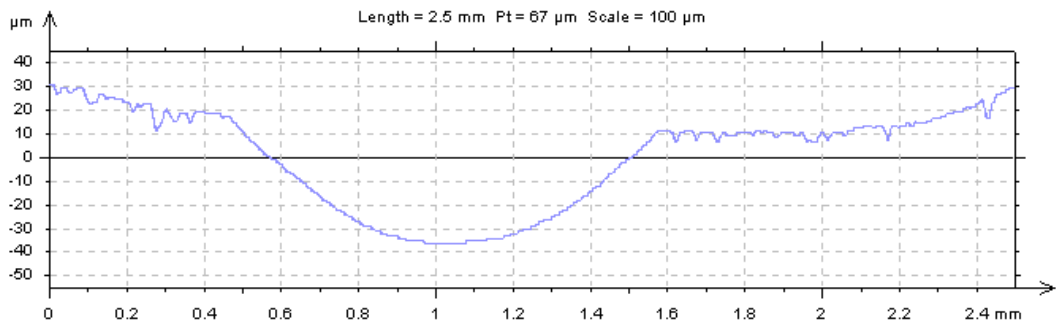
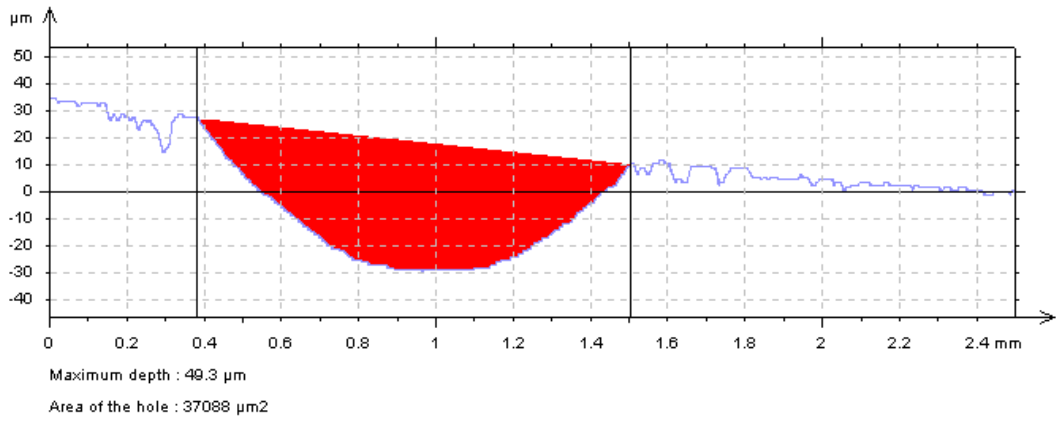
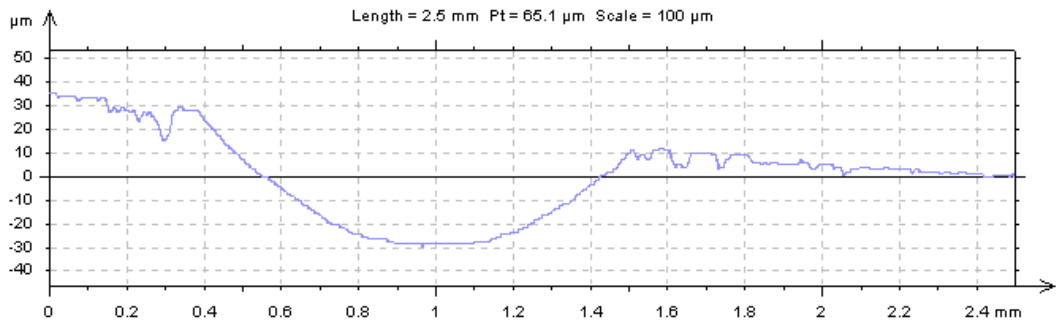


Για το SG090 σε ονομαστική ακτίνα 8mm κάθετης δύναμης 5N:

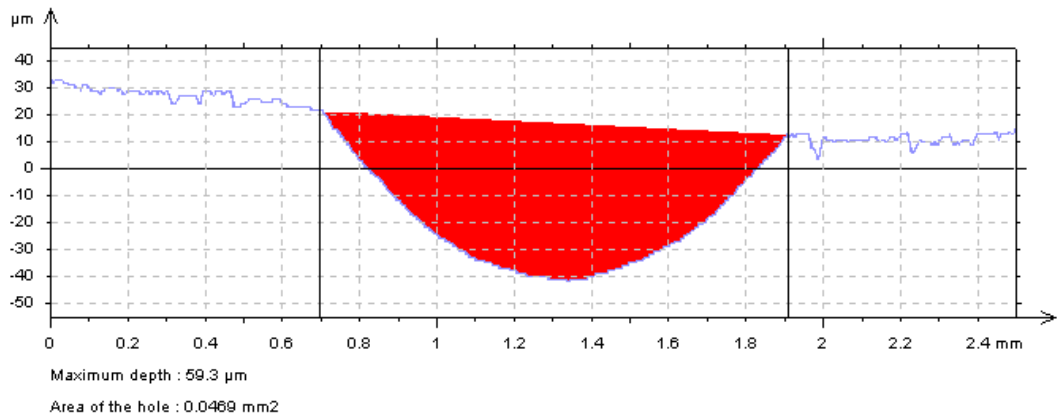
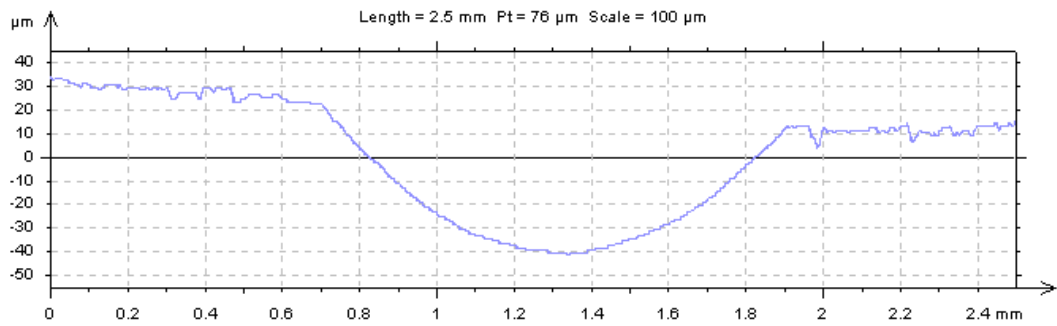
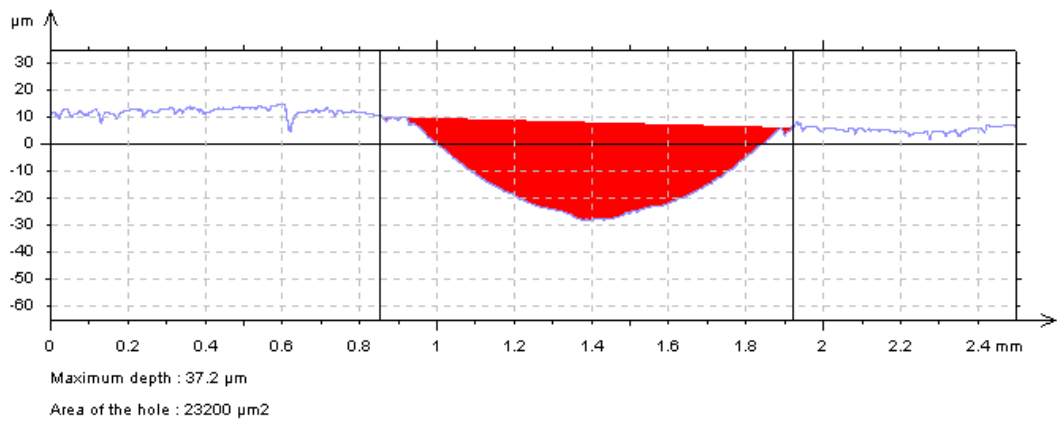
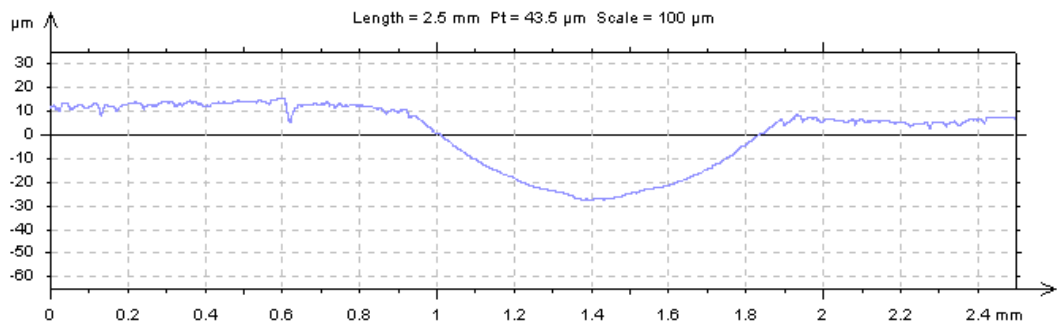


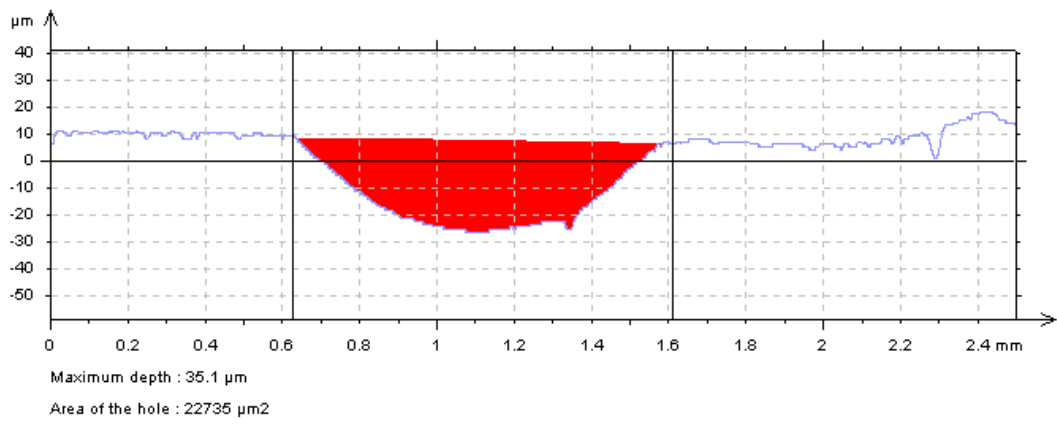
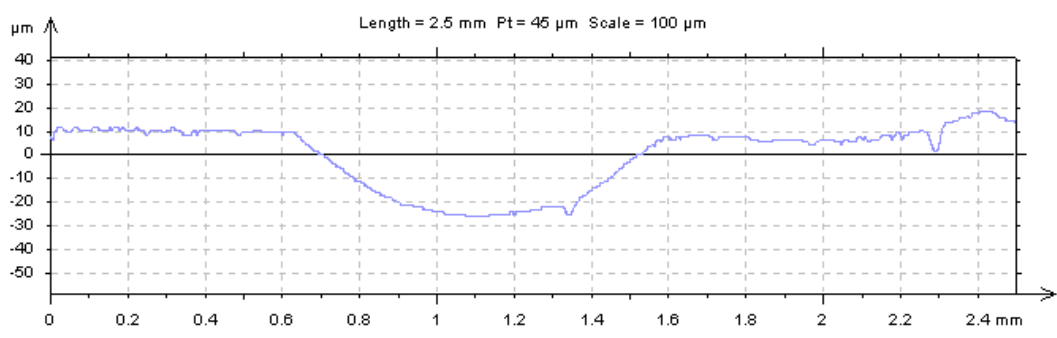
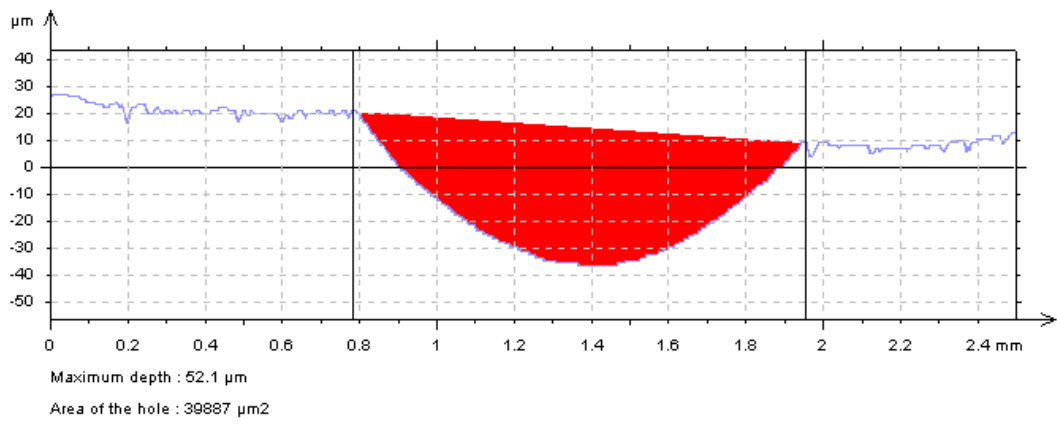
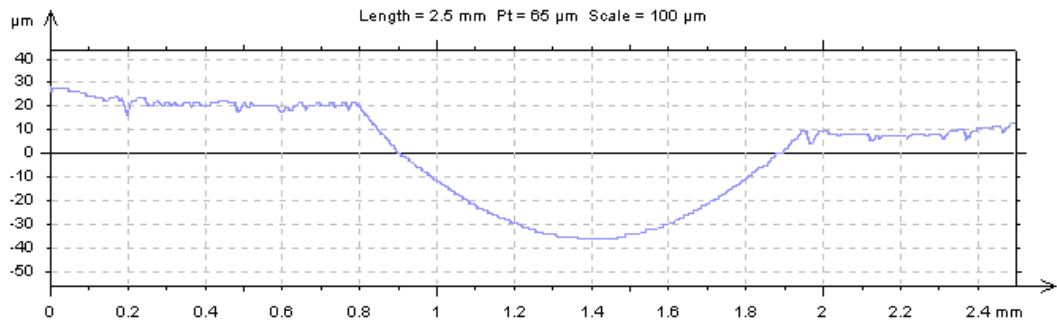


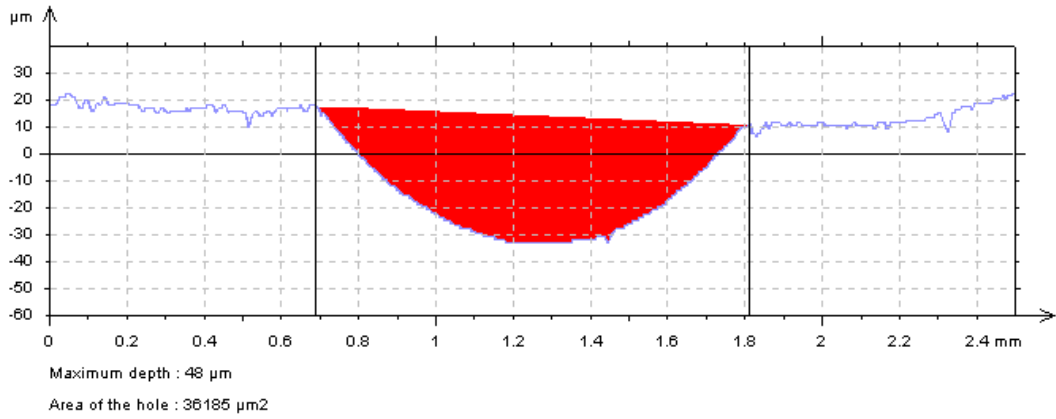
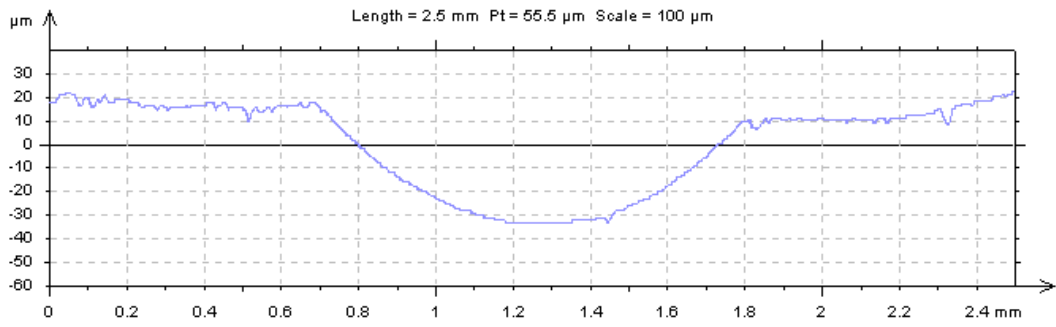




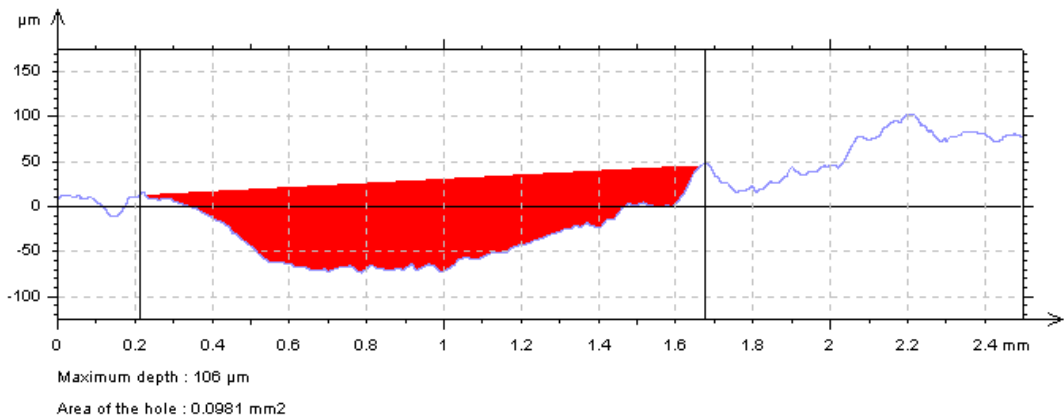
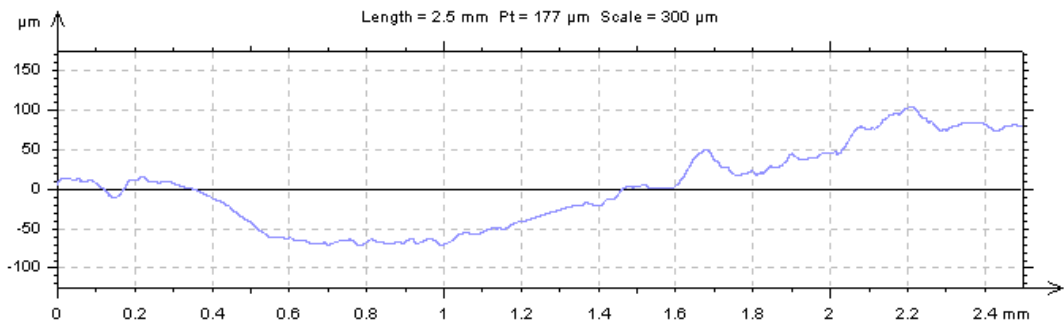
Για το SG090 σε ονομαστική ακτίνα 12mm κάθετης δύναμης 10N:

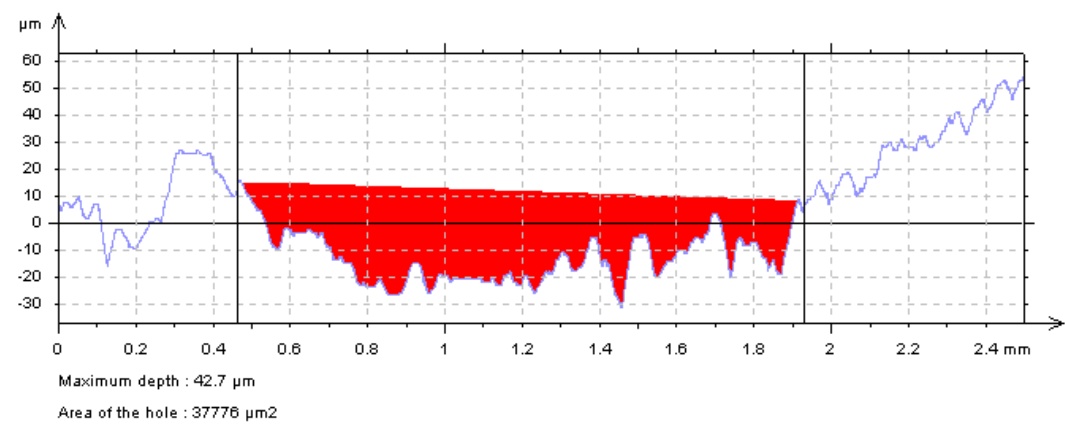
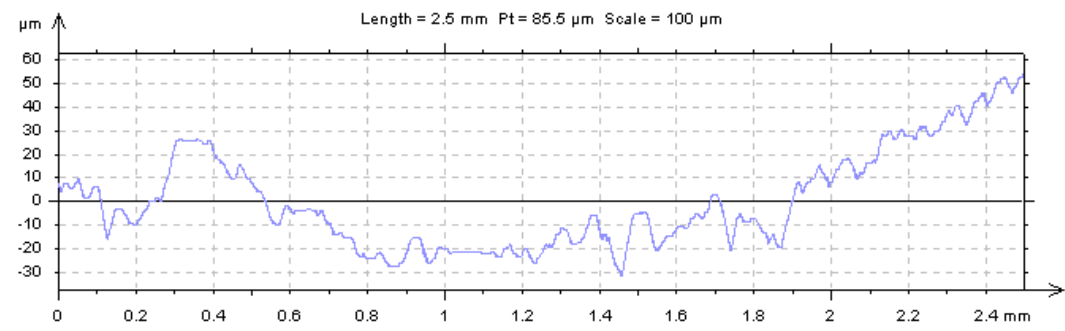
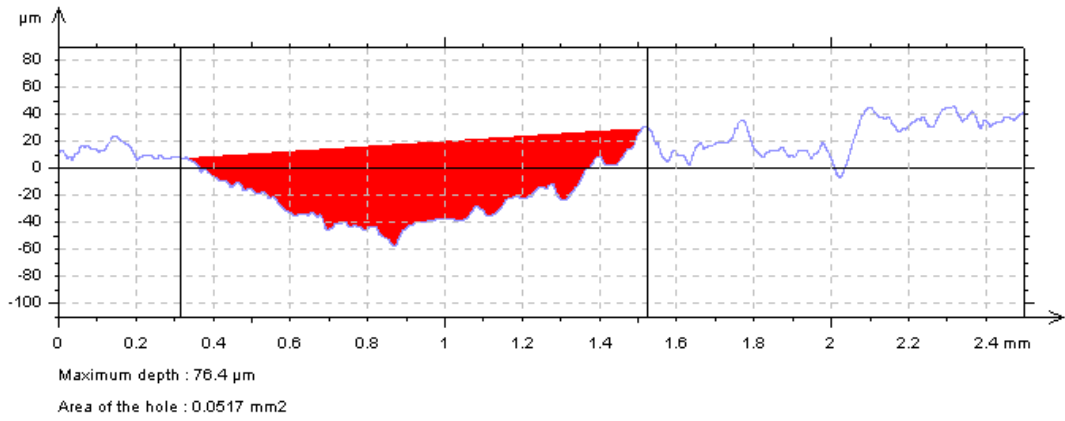
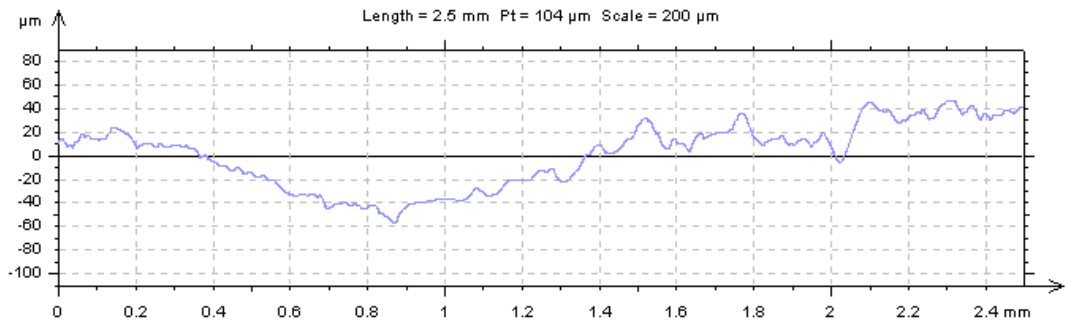


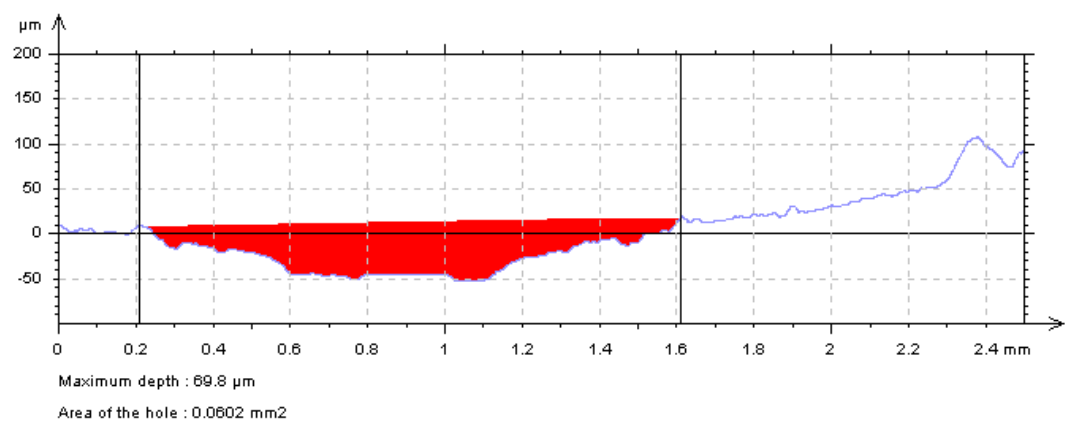
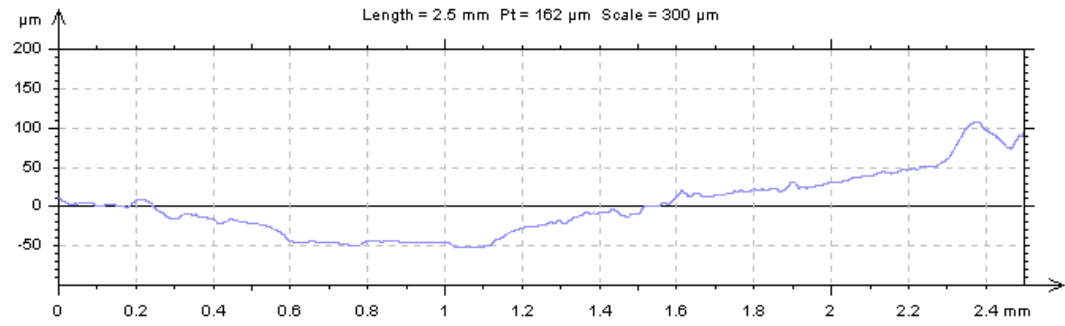
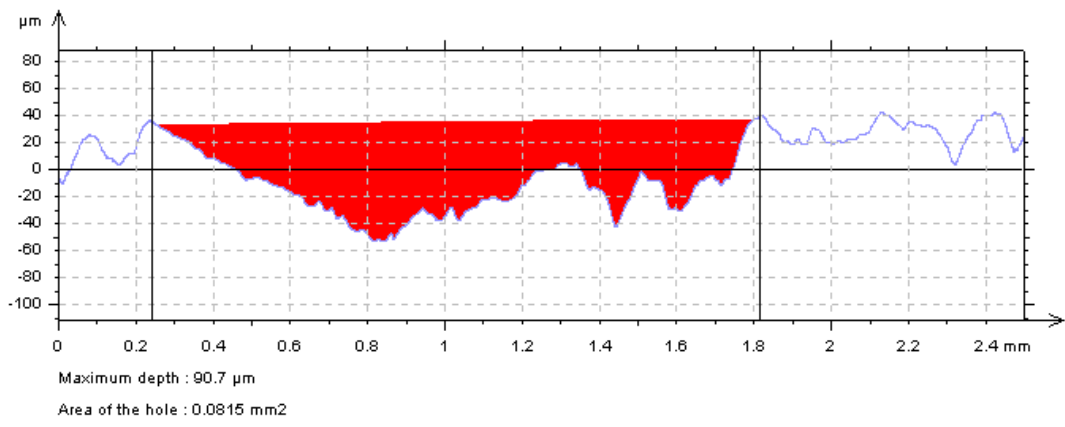
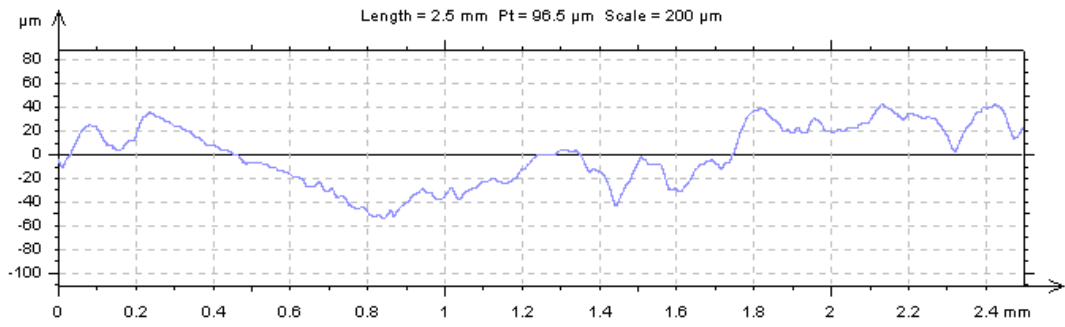




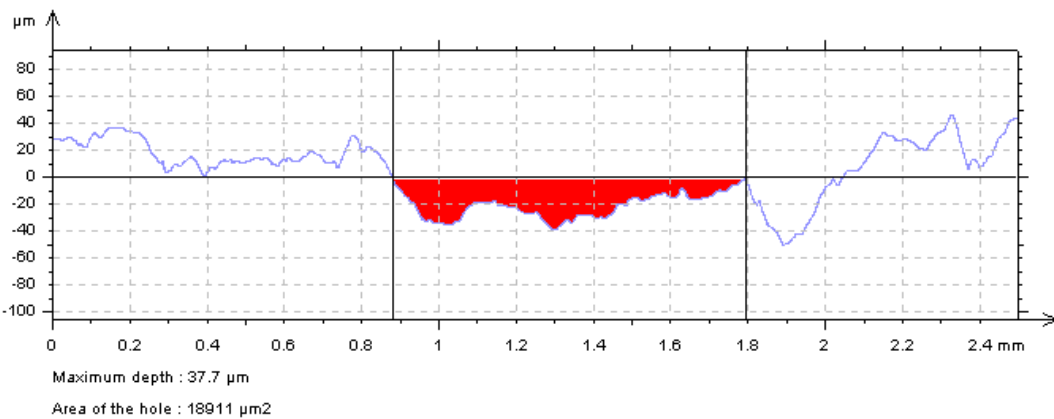
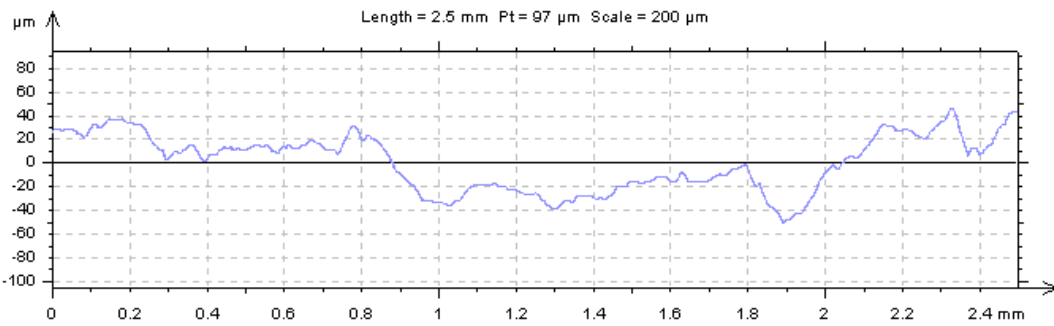
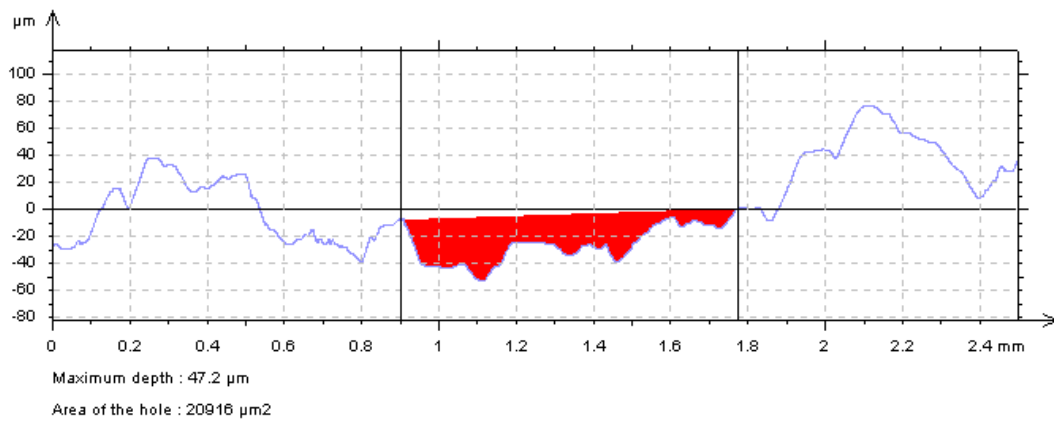
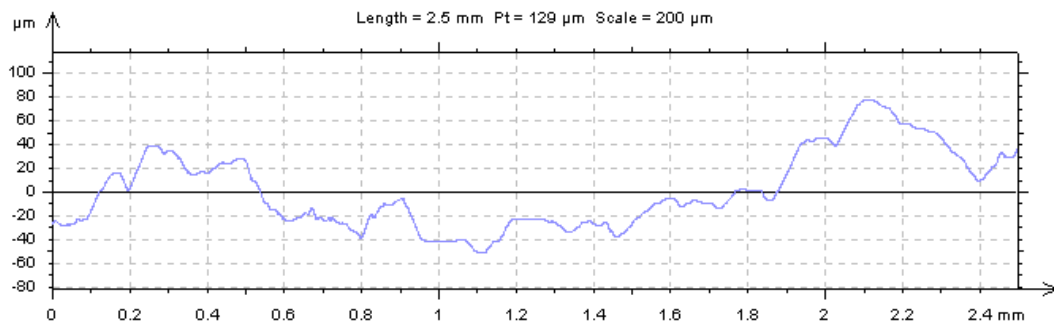
Για το SG105 σε ονομαστική ακτίνα 12mm κάθετης δύναμης 10N:



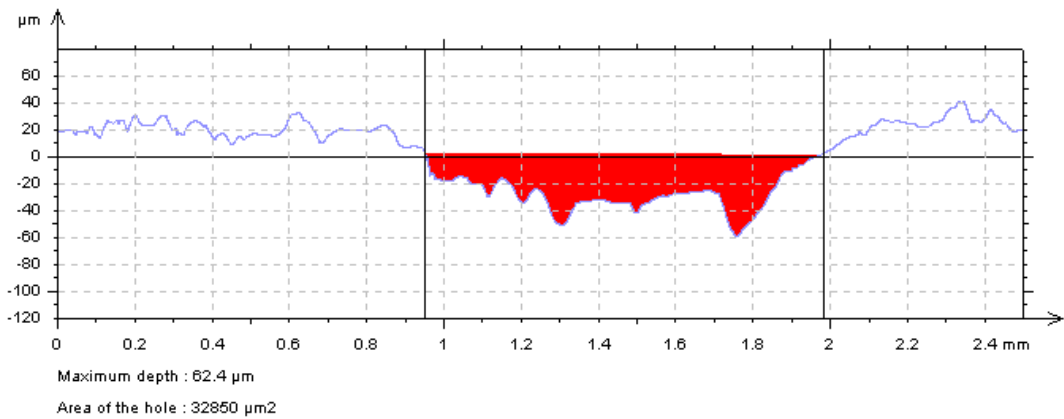
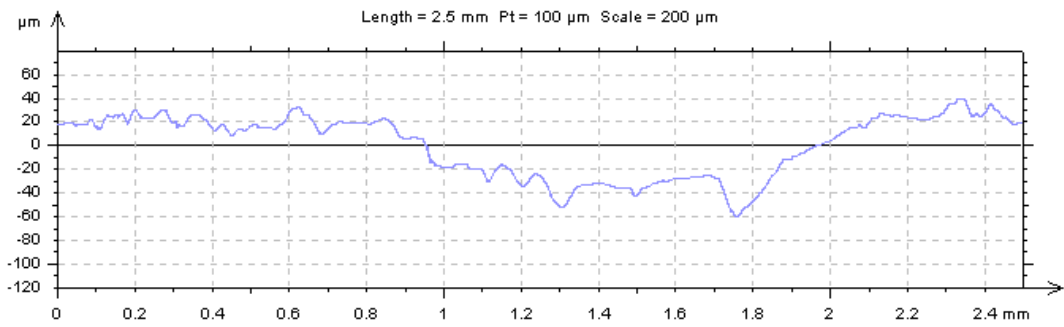
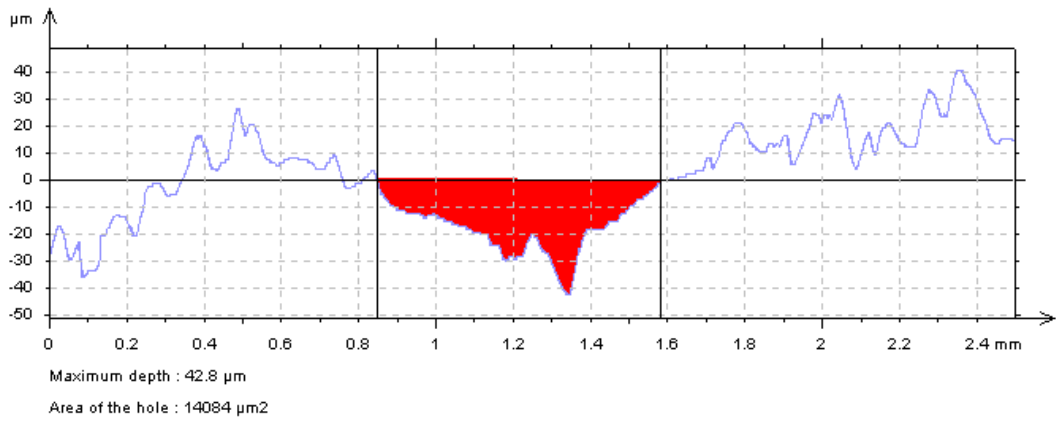
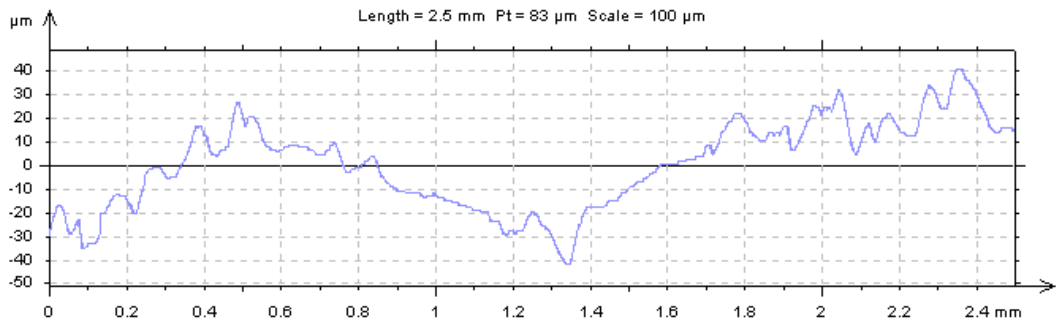


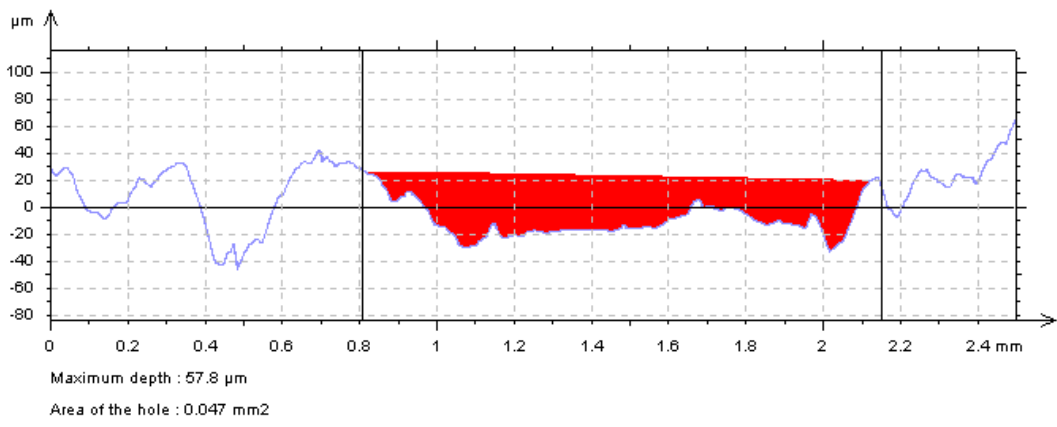
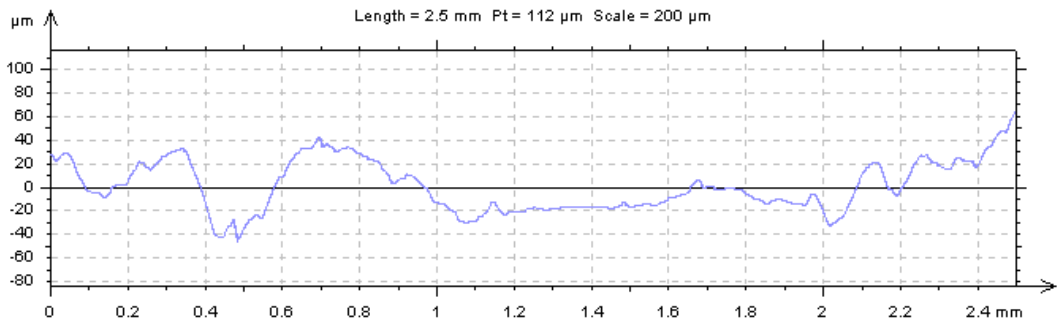


Για το SG106 σε ονομαστική ακτίνα 12mm κάθετης δύναμης 10N:









### 7.3 Πίνακες υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστών φθοράς λόγω τριβολογικής δοκιμής

Πίνακας 8: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG090 σε 4mm - 2N.

SG090_4mm-2N			
A (mm <sup>2</sup> )	M.O A (mm <sup>2</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	k (mm <sup>3</sup> /Nm)
0,0514	0,05028	1,263674	0,000631837
0,0452			
0,0586			
0,0479			
0,0483			

Πίνακας 9: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG090 σε 8mm - 5N.

SG090_8mm-5N				
A (μm <sup>2</sup> )	M.O A (μm <sup>2</sup> )	V (μm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	k (mm <sup>3</sup> /Nm)
34242,000	36994,800	1859561470	1,859561	0,000371912
39813,000				
35039,000				
37088,000				
38792,000				

Πίνακας 10: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG090 σε 12mm - 10N.

SG090_12mm-10N				
A (μm <sup>2</sup> )	M.O A (μm <sup>2</sup> )	V (μm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	k (mm <sup>3</sup> /Nm)
23200,00	33781,40	2547057554	2,547058	0,000254706
46900,00				
39887,00				
22735,00				
36185,00				

Πίνακας 11: Συνολική απώλεια όγκου SG090.

	V (mm <sup>3</sup> )
4mm-2N	1,263674
8mm-5N	1,859561
12mm-10N	2,547058
Συνολική απώλεια όγκου	5,670293

Πίνακας 12: Μέσος συντελεστής φθοράς SG090

$k_1$	0,000631837
$k_2$	0,000371912
$k_3$	0,000254706
average k	0,000419485

Πίνακας 13: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG105 σε 12mm - 10N.

SG105_12mm-10N			
A (mm <sup>2</sup> )	M.O A (mm <sup>2</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	k (mm <sup>3</sup> /Nm)
0,0981	0,0658552	4,9653651	0,000496537
0,0517			
0,037776			
0,0815			
0,0602			

Πίνακας 14: Πίνακας υπολογισμού απώλειας όγκου και συντελεστή φθοράς SG106 σε 12mm - 10N.

SG106_12mm-10N				
A (μm <sup>2</sup> )	M.O A (μm <sup>2</sup> )	V (μm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	k (mm <sup>3</sup> /Nm)
20916	20954,8	1579954698	1,579954698	0,000157995
18911				
14084				
32850				
18013				

Παράδειγμα υπολογισμού όγκου:

$$M.O.A = \frac{0,0981 + 0,0517 + 0,037776 + 0,0815 + 0,0602}{5} = 0,0658552 \text{ mm}^2 \quad (7 - 1)$$

$$V = 2 * \pi * r * M.O.A = 2 * \pi * 12 * 0,0658552 = 4,9653651 \text{ mm}^3 \quad (7 - 2)$$

$$k = \frac{V}{P * L} = \frac{4,9653651}{10 * 1000} = 0,000496537 \frac{\text{mm}^3}{\text{N} * \text{m}} \quad (7 - 3)$$