

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Η χρήση σύνθετων υγρών στην τριβολογία με  
σκοπό τη μείωση της τριβής μεταξύ επιφανειών:**

**Η περίπτωση των ιοντικών υγρών**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Δρ. ΤΣΩΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ (Α.Υ)**

**ΠΑΤΡΑ 2019**

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

Ιωάννης Πετρόπουλος

.....

Υπογραφή

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	v
ABSTRACT .....	vi
<b>1.1 ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ :</b> .....	1
1.1.1 Ορισμός των λιπαντικών .....	1
1.1.2 Τα είδη των λιπαντικών.....	2
1.1.3 Χαρακτηριστικά και επιθυμητές ιδιότητες των λιπαντικών.....	5
<b>1.2 ΙΟΝΤΙΚΑ ΥΓΡΑ:</b> .....	8
<b>1.2.1 Ορισμός των ιοντικών υγρών</b> .....	8
<b>1.2.2 Ιστορική αναδρομή – Βιβλιογραφική επισκόπηση</b> .....	11
<b>1.2.3 Κατηγοριοποίηση των ιοντικών υγρών</b> .....	13
<b>1.2.4 Ιδιότητες ιοντικών υγρών που δημιουργούν προοπτικές για τη χρήση ως λιπαντικά</b> .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ .....	18
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	18
2.1 Σύντομη αναφορά στις πειραματικές τεχνικές .....	19
2.1.1 Μέθοδοι τριβομετρησης.....	19
2.1.2 Μεθοδοι παρατηρησης των δειγματος .....	31
2.2 Αναδρομή στην ιστορία της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης.....	34
2.3 Αρχή Λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.....	35
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης σε σχέση με άλλες μεθόδους.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ.....	49
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	49
Προετοιμασία δειγμάτων.....	50
Τριβή λόγω ολίσθησης.....	50
Εικονα (35) WilsonMicrohardnessTester.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ .....	55

ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	55
4.1.1 Ιδιότητες λίπανσης μεταξύ χάλυβα- αλουμινίου.....	56
4.1.2 Συστημα χάλυβα- ορείχαλκου.....	59
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	63

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη σύγχρονη εποχή οι άνθρωποι χρησιμοποιούν, ένα τεράστιο αριθμό από μηχανές σε κάθε τομέα της δραστηριότητάς τους. Αποτελούν κομμάτι της καθημερινότητάς μας καθώς διευκολύνουν τη ζωή μας, είτε κάνοντας τις βαριές χειρονακτικές εργασίες πολύ πιο εύκολες, είτε βοηθώντας μας να εκμηδενίσουμε τις αποστάσεις χάρη στη δυνατότητα να μεταφέρουν ανθρώπους και αγαθά. Η ιστορία των μηχανών ξεκινά από την αρχαιότητα όπου παρουσιάζονται αρκετές σπουδαίες εφαρμογές όπως π.χ. ο κοχλίας του Αρχιμήδη και οι νερόμυλοι που χρησιμοποιούσαν για να αλέσουν τα διάφορα σιτηρά. Όσο το ανθρώπινο είδος εξελίσσεται παρατηρούμε και μια συνεχή ανάγκη για εξέλιξη και βελτίωση των μηχανών που χρησιμοποιούμε, με αποτέλεσμα έως και τη σύγχρονη εποχή να δημιουργούμε συνεχώς νέες πιο αποδοτικές και πιο πολύπλοκες. Οι μηχανές αποτελούνται από ένα συνδυασμό διαφόρων μερών τα όποια βρίσκονται σε συναρμογή μεταξύ τους με σκοπό να μετατρέπουν την προσφερόμενη ενέργεια σε μηχανικό έργο. Το γεγονός ότι αποτελούνται από πολλά μέρη σε συναρμογή, έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε απώλειες ενέργειας λόγω τριβής των μερών αυτών, κάνοντας τις μηχανές λιγότερο αποδοτικές. Αυτό δημιούργησε την ανάγκη για ανακάλυψη τρόπων μείωσης της επίδρασης των δυνάμεων τριβής μεταξύ των μερών της μηχανής και συνεπώς της αύξησης του μηχανικού έργου που θα παράγει η μηχανή με την ίδια προσφερόμενη ενέργεια. Έτσι ξεκινά η ενασχόληση του ανθρώπου με τα λιπαντικά.

Τα λιπαντικά είναι χημικές ουσίες ή μίγματα χημικών ουσιών που συναντώνται σε στερεά ή πιο συχνά υγρή κατάσταση και εκτελούν ένα διπλό ρολό στη λειτουργία των μηχανών. Αρχικά ο κύριος ρόλος τους είναι να μειώσουν τις επιφανειακές δυνάμεις τριβής έτσι ώστε να μειωθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι απώλειες ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Ο δευτερεύον ρόλος των λιπαντικών είναι να απομακρύνουν τη θερμότητα που παράγεται έτσι ώστε να ψύχονται τα μεταλλικά μέρη της μηχανής και να αποφεύγονται πιθανές παραμορφώσεις τους. Τέλος, τα λιπαντικά έχουν άλλο ένα επίσης σημαντικό ρόλο ο οποίος είναι η απομάκρυνση των ακαθαρσιών, οι οποίες εμφανίζονται ανάμεσα στα μηχανικά μέρη που αποτελούν τη μηχανή λόγω της φυσιολογικής φθοράς τους που επέρχεται με τη χρόνια λειτουργία της μηχανής. Αυτό γίνεται εφικτό καθώς οι διαφορες ακαθαρσίες παγιδεύονται στη μάζα του λιπαντικού

το οποίο στη συνέχεια περνά από το σύστημα φιλτραρίσματος όπου και παγιδεύονται οι ακαθαρσίες στο φίλτρο.

Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως τα λιπαντικά αποτελούν από τα σημαντικότερα μέρη των μηχανών καθώς εξασφαλίζουν τη σωστή και αποδοτική λειτουργία των μηχανών. Επιπρόσθετα, χωρίς την παρουσία τους οι μηχανές θα είχαν μικρή απόδοση και μικρή διάρκεια ζωής σε ώρες λειτουργίας λόγω των ανεπανόρθωτων φθορών που θα προκαλούσαν οι δυνάμεις τριβής στα διάφορα μέρη τους. Συνεπώς, η συνεχή ανάγκη για εξέλιξη των μηχανών οδηγεί σε ανάγκη για εξέλιξη και των λιπαντικών οδηγώντας μας σε μια συνεχή αναζήτηση λιπαντικών τα οποία θα έχουν καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε ώρες ώστε να μην απαιτείται συχνή αλλαγή τους αλλά συγχρόνως απαιτείται να είναι ουσίες φιλικές προς το περιβάλλον.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία των λιπαντικών είναι μια συνεχώς εξελισσόμενη επιστημονικά περιοχή. Η εξέλιξη των μηχανών στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στις εφαρμογές των λιπαντικών. Η αύξηση των κύκλων συντήρησης (χρονικά), η συνεχής ανάγκη για μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και η σταθερή τάση για μείωση της τριβής μεταξύ των μηχανικών μερών αποτελούν τις σημαντικές προκλήσεις σήμερα για την ανάπτυξη νέων βελτιωμένων πολυλειτουργικών λιπαντικών. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν ιοντικά υγρά με βάση το ιμιδαζόλιο (C1CnImNTf2, n=1-12) ως εναλλακτικά υγρά για χρήση σε λιπαντικά μέσα. Μελετήθηκε η επίδραση της πλευρικής αλυσίδας του κατιόντος του ιμιδαζολίου στις τριβολογικές του ιδιότητες πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες (αλουμίνιο, ατσάλι). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των τριβολογικών ιδιοτήτων ήταν αυτή της σφαίρας πάνω σε δίσκο (sphere on a disk) και πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της καθ. Δρ. Ε. Παυλάτου στο τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ από την υποψήφια διδάκτορα Ε. Ρωσολύμου. Οι μεταλλικές επιφάνειες εξετάστηκαν πριν και μετά από τις τριβολογικές μετρήσεις με μικροσκοπία SEM από τον Δρ. Β. Δρακόπουλο ΕΛΕ Α στο

ΙΤΕ\ΙΕΧΜΗ.. Όλες οι επιφάνειες είχαν υποστεί στύλβωση με συγκεκριμένο πρωτόκολλο.

## ABSTRACT

Lubricant technology is a constantly evolving scientific area. The evolution of the engines is largely based on the applications of lubricants. Increasing maintenance cycles, the continuing need to reduce greenhouse gas emissions and the steady tendency to reduce friction between mechanical parts are today the major challenges for the development of new, improved, multifunctional lubricants. In this diploma thesis, imidazole-based ionic liquids ( $C_{1n}ImNTf_2$ ,  $n = 1-12$ ) will be used as alternative liquids for use as lubricants. The influence of the side chain of the imidazole cation on its tribological properties on metal surfaces (aluminum, steel) will be studied. The method to be used to study the tribological properties will be that of the sphere on a disk. The metal surfaces will be examined before and after the tripartite measurements by SEM microscopy. All surfaces will have been polished with a specific protocol.

---

# Κεφάλαιο 1

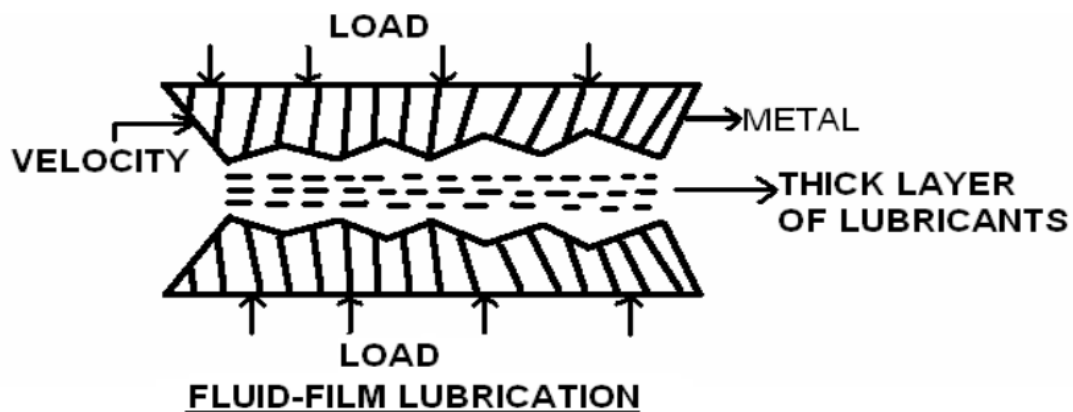
## Εισαγωγή



## 1.1 ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ :

### 1.1.1 Ορισμός των λιπαντικών

Λιπαντικό είναι μια ουσία η οποία μπορεί να είναι είτε στερεά, υγρή ή αέρια και έχει την ιδιότητα να παρεμβάλλεται με τη μορφή λεπτού φιλμ μεταξύ δυο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή και υπάρχει κίνηση μεταξύ τους ώστε να μειωθεί η τριβή. [28]



**Εικόνα (1)** Σχηματική απεικόνιση του λιπαντικού μεταξύ δύο επιφανειών

[ <https://www.picswe.com/pics/thin-film-lubricant-4d.html> ]

Μπορεί επίσης να αποβάλλει τη θερμότητα που παράγεται από την τριβή των επιφανειών αυτών και να λειτουργεί και ως μέσο μεταφοράς των ακαθαρσιών που λόγω της μακροχρόνιας χρήσης της μηχανής θα παραχθούν από την επίδραση δυνάμεων τριβής μεταξύ των επιφανειών των επιμέρους εξαρτημάτων που αποτελούν τη μηχανή.

### 1.1.2 Τα είδη των λιπαντικών

Μπορούμε να διαχωρίσουμε τα λιπαντικά σε κατηγορίες αρχικά βάση της κατάστασης που βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ( υγρή ή στερεά ή αέρια) αλλά και τη φύση της ουσίας ή τη χρήση της.

A. Στερεά λιπαντικά :

- i) ανόργανα στερεά , όπως είναι ο γραφίτης.



Εικόνα (2) Γραφίτης σε μορφή σκονης

[ <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/china-manufacturer-natural-flake-graphite-powder-60682941054.html> ]

- ii) χημικές ενώσεις , όπως το PTFE ( τεφλόν με την εμπορική του ονομασία)



**Εικόνα (3)** PTFE ή τεφλόν σε μορφή σκονης

[ <https://www.indiamart.com/proddetail/ptfe-powder-18891808848.html> ]

και οι δυο αυτές κατηγορίες συναντώνται κυρίως σε μίγματα γράσου.

#### B. Υγρά λιπαντικά :

- i) Βιοκλιματικά, πρόκειται για έλαια που προέρχονται από επεξεργασία βιομάζας όπως είναι το ελαιόλαδο, το ηλιέλαιο, το καστορέλαιο και η λανολίνη, τα οποία είναι εστέρες γλυκεριδίων που παράγονται από φυτά και ζώα. Πολλά φυτικά λάδια υδρολύονται συχνά για να δώσουν τα οξέα που στη συνέχεια συνδυάζονται επιλεκτικά για να σχηματίσουν ειδικούς συνθετικούς εστέρες. Η λανολίνη είναι ένα φυσικό υδροαπωθητικό, που παράγεται από λίπος προβάτου και είναι μια εναλλακτική λύση στα πιο συνηθισμένα λιπαντικά με βάση τα πετροχημικά. Αυτό το λιπαντικό λειτουργεί επίσης πολύ καλά στην καταπολέμηση της διάβρωσης, της σκουριάς, των αλάτων και των οξέων. Διαχρονικά έχουν χρησιμοποιηθεί

και άλλα ειδή λιπαντικών από ζώα και φυτά όπως είναι το λάδι φάλαινας ως προσθετικό για λάδια που χρησιμοποιούνται σε κιβώτια ταχυτήτων. [28]

ii) Έλαια βάσης, πρόκειται για μια ευρέα κατηγορία ελαίων που προκύπτουν από κλασματική απόσταξη του αργού πετρελαίου. Τα ελαία βάσης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την σύστασή τους, οι οποίες είναι: [28]

1. Παραφινικά
2. Ναφθενικά
3. Αρωματικά

iii) Συνθετικά έλαια, πρόκειται για μια κατηγορία χημικών που παράγονται με τη βοήθεια χημικών αντιδράσεων. Τα συνθετικά έλαια χωρίζονται σε επτά κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

1. Πολυάλφα ολεφίνες (PAO)
2. Συνθετικοί εστέρες
3. Πολυαλκυλενογλυκόλες (PAG)
4. Φωσφορικοί εστέρες
5. Αλκυλιωμένα ναφθαλένια (AN)
6. Πυριτικοί εστέρες
7. Ιοντικά υγρά

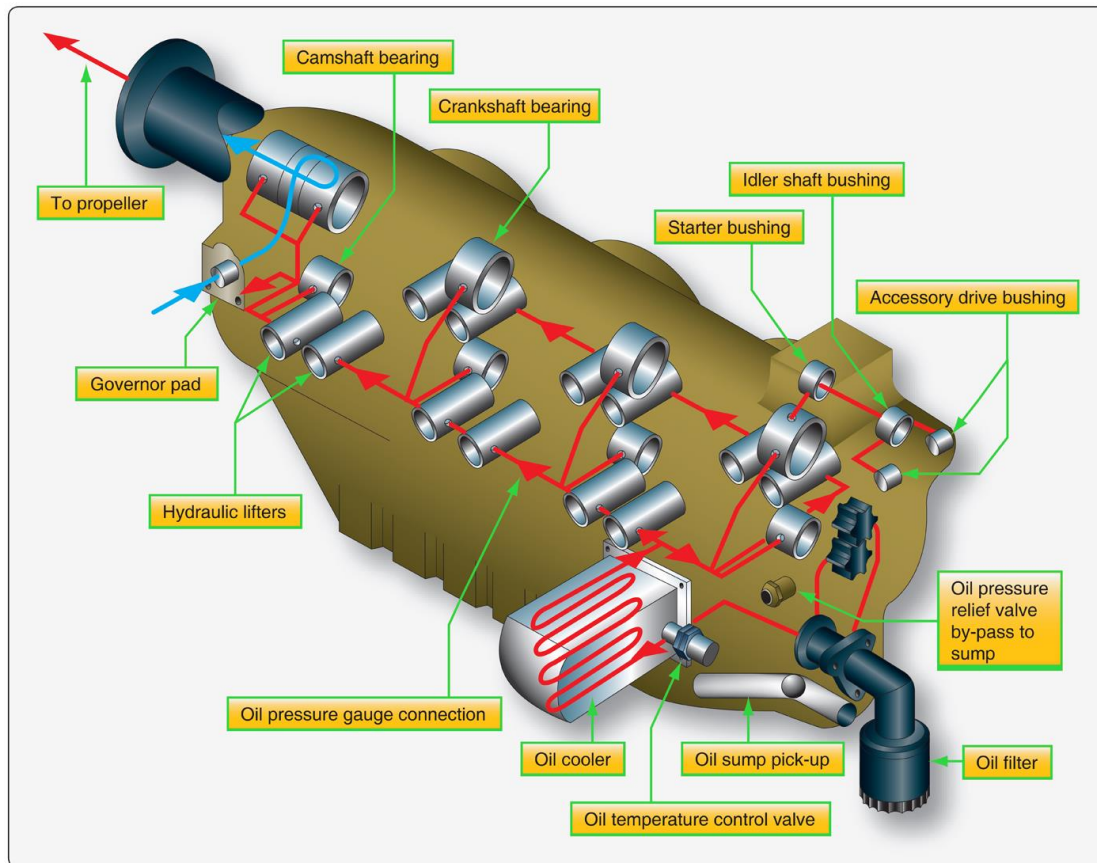
Σε αυτή την πτυχιακή εργασία από τις παραπάνω κατηγορίες, θα ασχοληθούμε με τη χρήση των ιοντικών υγρών ως λιπαντικά.

### 1.1.3 Χαρακτηριστικά και επιθυμητές ιδιότητες των λιπαντικών

Ένα λιπαντικό όπως αναφέραμε και παραπάνω θα πρέπει να μειώνει την τριβή όμως αυτό δε φτάνει από μόνο του, καθώς θα πρέπει να συνδυαστούν ένα πλήθος ιδιοτήτων ώστε να επιτελέσει σωστά το ρόλο του. Οι κυριότερες είναι:

- θα πρέπει να μειώνει την τριβή. Τα λιπαντικά παρεμβάλλονται μεταξύ των επιφανειών των μηχανικών μερών με αποτέλεσμα καθώς παρατηρείται μικρότερη δύναμη τριβής μεταξύ της επιφάνειας και του λιπαντικού, σε σχέση με συστήματα όπου έχουμε τριβή επιφανειών ,να μειώνεται η τριβή. Επίσης, τα λιπαντικά περιέχουν πρόσθετα όπως για παράδειγμα τους τροποποιητές τριβής τα οποία λειτουργούν σε περιπτώσεις που πιθανώς η υδροδυναμική λίπανση δεν αρκεί. [28]

- Να διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας. Τα αέρια και τα υγρά λιπαντικά μπορούν να μεταφέρουν θερμότητα. Όμως, τα υγρά λιπαντικά είναι πολύ πιο αποτελεσματικά λόγω της υψηλής τους ειδικής θερμοχωρητικότητας. Συνήθως το υγρό λιπαντικό κυκλοφορεί συνεχώς από και προς ένα πιο ψυχρό μέρος του συστήματος, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν λιπαντικά για να θερμάνουν καθώς και για να ψύξουν όταν απαιτείται σε μια ορισμένη θερμοκρασία (π.χ. Στους κινητήρες , το λιπαντικό συμβάλει στην ψύξη του κινητήρα καθώς όταν αυτό εξέλθει από τον κινητήρα περνά από το ψυγείο λαδιού και ξανάμπάνει στον κινητήρα με σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία). [28]

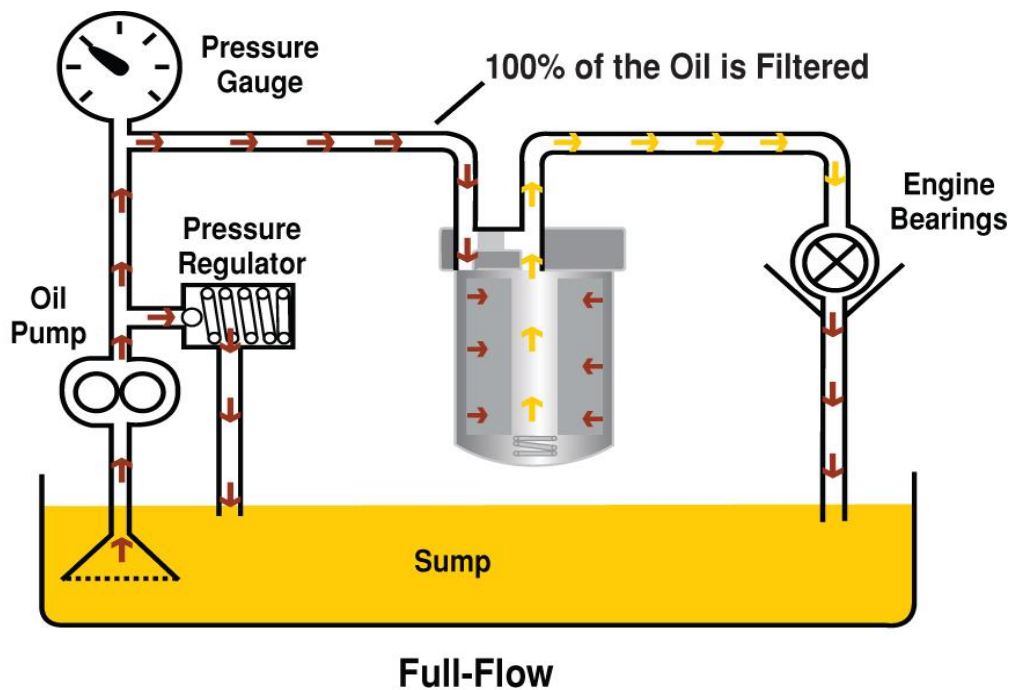


**Εικόνα (4)** Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε το σύστημα ψύξης λιπαντικού σεκινητήρα αεροσκάφους .

[ <https://www.aircraftsystemstech.com/2018/10/reciprocating-engine-lubrication-systems.html> ]

- να έχει θερμική σταθερότητα και όσο το δυνατόν μικρότερη τάση ατμών έτσι ώστε να μη χάνεται ή αλλοιώνεται το λιπαντικό με τη θερμοκρασία καθώς οι περισσότερες εφαρμογές που απαιτούν χρήση λιπαντικού παρουσιάζουν υψηλές θερμοκρασίες.
- να είναι χημικά σταθερό ώστε να μεταβάλλεται όσο το δυνατό λιγότερο η σύστασή του με το πέρασμα του χρόνου.
- να αντέχει σε υψηλές πιέσεις καθώς υπάρχουν εφαρμογές που το απαιτούν όπως είναι οι κινητήρες εσωτερικής καύσης, όπου λειτουργεί σα φράγμα στεγανοποίησης για τα αέρια της καύσης.
- να μη διαβρώνει τα υλικά της μηχανής και των τμημάτων της.

- να μπορεί να απομακρύνει ακαθαρσίες, ( π.χ. ρινίσματα από χρόνια φθορά μερών της μηχανής ή κατάλοιπα καύσης ) από τη μηχανή. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς οι ακαθαρσίες ενσωματώνονται στη μάζα του λιπαντικού καθώς από διέρχεται μεταξύ των μηχανικών μερών της μηχανής. Οι ακαθαρσίες αυτές στη συνέχεια αφαιρούνται από το σύστημα φιλτραρίσματος του λιπαντικού της μηχανής και το έλαιο επιστρέφει καθαρό στη μηχανή. [28]



**Εικόνα (5)** Στη παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τη σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος φιλτραρίσματος ελαίου σε κινητήρα. Το έλαιο παραλαμβάνεται από την αντλία λαδιού του κινητήρα στη συνέχεια η πίεση του ρυθμίζεται με τη βοήθεια του ρυθμιστή πίεσης και στη συνέχεια διέρχεται από το φίλτρο όπου παγιδεύονται οι ακαθαρσίες και το έλαιο επιστρέφει καθαρό στον κινητήρα.

[ <http://www.baldwinfilter.com/ProductHighlights102011.html>]

- Θα πρέπει να αντέχει όσο το δυνατό περισσότερες ώρες χρήσης πριν απαιτηθεί αλλαγή ώστε να έχουμε μείωση του κόστους συντήρησης και προστασία του περιβάλλοντος, καθώς η διεύρυνση του χρόνου ζωής του λιπαντικού θα οδηγήσει σε πιο αργές αλλαγές και θα μειωθεί η ποσότητα των αποβλήτων τέτοιου είδους.
- Θα πρέπει επίσης να είναι όσο το δυνατό πιο φιλικό προς το περιβάλλον ή ακόμα και ανακυκλώσιμο, έτσι ώστε να περιοριστεί η μόλυνση που προκαλούν τα λιπαντικά στο περιβάλλον.

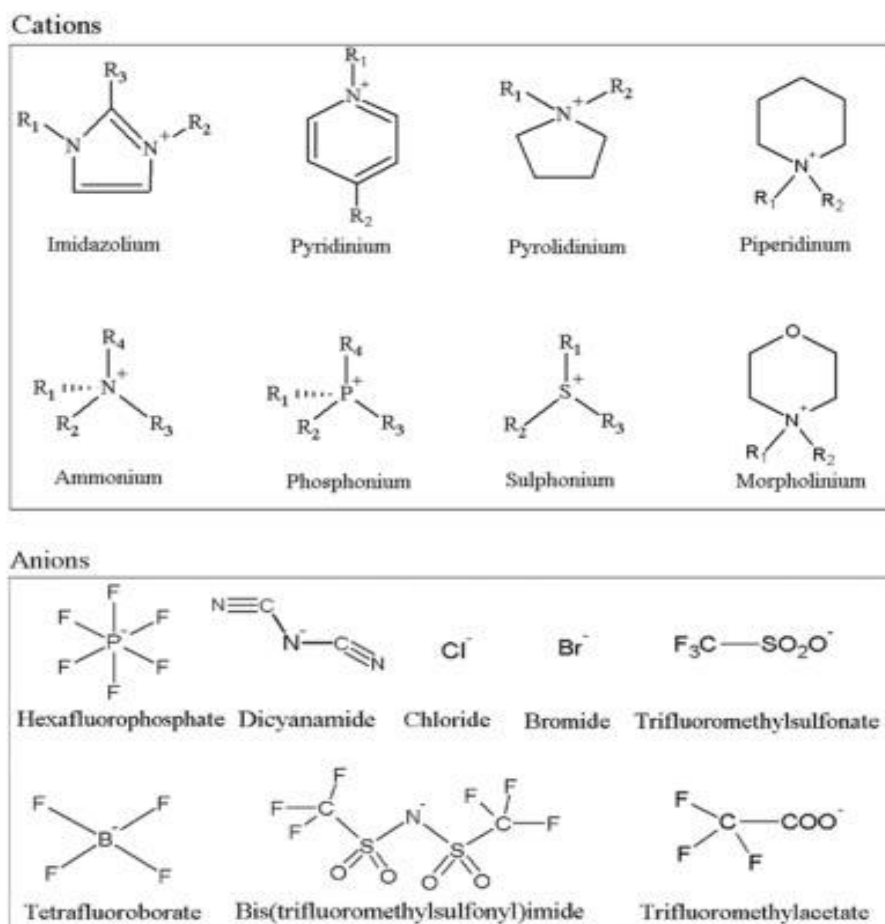
## **1.2 ΙΟΝΤΙΚΑ ΥΓΡΑ:**

### **1.2.1 Ορισμός των ιοντικών υγρών**

Τα ιοντικά υγρά είναι μια ειδική κατηγορία αλάτων τα όποια παραμένουν σε υγρή φάση ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (κάτω από τους 100 βαθμούς κελσίου ) [1], σε αντίθεση με τα τηγμένα άλατα τα όποια είναι σε υγρή φάση σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες (π.χ. το NaCl είναι υγρό σε θερμοκρασίες άνω των 801 °C). Χαρακτηρίζονται και ως «πράσινοι διαλύτες» μιας και μπορούν να αντικαταστήσουν τους οργανικούς πτητικούς διαλύτες σε πολλές αντιδράσεις καθώς σε αντίθεση με αυτούς, τα ιοντικά υγρά παρουσιάζουν αμελητέα τάση ατμών και συνεπώς δε χάνονται στο περιβάλλον. Επιπλέον, μπορούμε να τα αποσπάσουμε μετά το πέρας της αντίδρασης και να τα χρησιμοποιήσουμε ξανά. Τέλος, τα ιοντικά υγρά είναι θερμικά και χημικά σταθερές ενώσεις καθώς και μη αναφλέξιμες. Αυτό σημαίνει πως είναι ασφαλείς ενώσεις για τους χρήστες αλλά και ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες όπου οι κοινοί διαλύτες είτε θα αποτύγχαναν είτε θα αναφλέγονταν.



Τα ιοντικά υγρά αποτελούνται από ένα μεγάλο και ασύμμετρο οργανικό κατιόν και ένα ανιόν το οποίο μπορεί να είναι είτε οργανικό είτε ανόργανο. Τα πιο συνηθισμένα ανιόντα και κατιόντα που συναντώνται στα ιοντικά υγρά είναι τα παρακάτω :

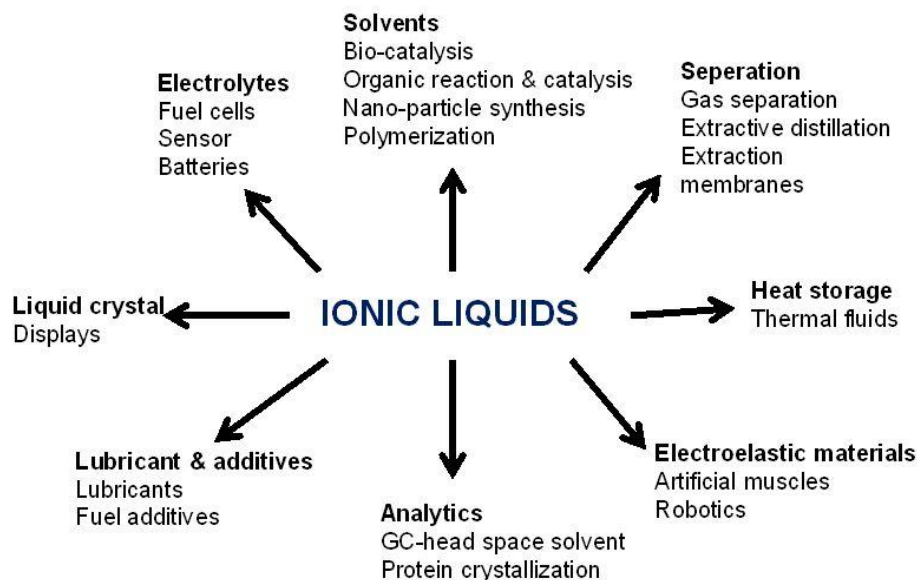


**Εικόνα (6)** Σχηματική απεικόνιση των ανιόντων και κατιόντων που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη σύνθεση ιοντικών υγρών.

[[https://www.researchgate.net/figure/Commonly-used-cations-and-anions-of-ionic-liquids\\_fig4\\_303405352](https://www.researchgate.net/figure/Commonly-used-cations-and-anions-of-ionic-liquids_fig4_303405352)]

Το γεγονός πως τα ιοντικά υγρά είναι σε υγρή κατάσταση σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία οφείλεται στην ασυμμετρία των ιόντων που το αποτελούν. Αυτό έχει ως συνέπεια να δημιουργείται κρυσταλλικό πλέγμα χαμηλής ενέργειας με συνέπεια να

χαμηλώνει πολύ το σημείο τήξης στα επίπεδα που αναφέραμε παραπάνω [4]. Τα ιοντικά υγρά είναι εύκολα διαμορφώσιμα ως προς τις ιδιότητες που επιθυμούμε να παρουσιάσουν καθώς έχει παρατηρηθεί πως οι φυσικές τους ιδιότητες, όπως είναι η πυκνότητα και το ιξώδες, εξαρτώνται από το είδος του κατιόντος ενώ οι χημικές ιδιότητες εξαρτώνται από το είδος του ανιόντος. Τα ιοντικά υγρά χαρακτηρίζονται από μεγάλη ποικιλία ενώσεων, καθώς μπορούμε κάθε φορά να φτιάξουμε ένα νέο ιοντικό υγρό επιλέγοντας συνδυασμούς ανιόντων και κατιόντων ανάλογα με τις ιδιότητες που θέλουμε να πετύχουμε. Επίσης λόγω του μεγάλου εύρους σε επιλογές ενώσεων που μας παρέχουν, τα ιοντικά υγρά κρίνονται κατάλληλα για χρήση σε πολλούς τομείς της καθημερινότητάς μας. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν ως μέσα ηλεκτροαπόθεσης σε μπαταρίες προκειμένου να αντικαταστήσουν τοξικές ενώσεις που χρησιμοποιούνταν ως τότε. Έπειτα όμως, διαπιστώθηκε πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλους τομείς όπως είναι για παράδειγμα η χρήση τους ως πράσινοι διαλύτες προκειμένου να αντικαταστήσουν τους τοξικούς πτητικούς διαλύτες που χρησιμοποιούνταν. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης και σε διεργασίες διύλισης πετρελαίου, αλλά και σε πολλές άλλες χρήσεις όπως ως λιπαντικά και πρόσθετα λιπαντικών, την όποια χρήση τους και θα μελετήσουμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Κάποιοι από τους τομείς στους οποίους συναντάμε χρήση ιοντικών υγρών αναφέρονται επιγραμματικά στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα (7)** Επιγραμματική αναφορά των χρήσεων των ιοντικών υγρών.

[<https://www.intechopen.com/books/ionic-liquids-new-aspects-for-the-future/a-comparative-study-of-piperidinium-and-imidazolium-based-ionic-liquids-thermal-spectroscopic-and-th>]

## 1.2.2 Ιστορική αναδρομή – Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η ιστορία των ιοντικών υγρών ξεκινά το 1914 όταν ο Paul Walden παρατήρησε τις ιδιότητες του νιτρικού αιθυλαμμωνίου, το οποίο προέκυψε από εξουδετέρωση αιθυλαμίνης με πυκνό νιτρικό οξύ [3]. Ωστόσο, δεν υπήρχε ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον για τα ιοντικά υγρά έως και την ανακάλυψη των δυαδικών ιοντικών υγρών που παρασκευάζονταν από ανάμιξη 1-3 διακυλιμιδαζολίου και μιγμάτων χλωριούχου αργίλιου [4]. Μετά την παραπάνω παρατήρηση άρχισε να εκδηλώνεται το επιστημονικό ενδιαφέρον για τα ιοντικά υγρά με αποτέλεσμα να επιλέγονται άνυδρα άλατα με σημεία τήξης κοντά στους 100 °C. Λόγω του περιορισμού του σημείου τήξης

περιοριζόταν σημαντικά το φαινόμενο της θερμόλυσης και στα διαλυμένα άλατα αλλά και στο διαλύτη. Με τον τρόπο αυτό κατάφεραν να είναι εφικτή η παρατήρηση και σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με το παρελθόν. Οι ίδιες πειραματικές συνθήκες εφαρμόστηκαν και στην έρευνα συμβατικών υδατικών και μη διαλυτών, που λειτουργούσαν βάση της οσμωτικής θεωρίας ‘‘Van’t Hoff’’ και τη θεωρία ηλεκτρικής διάστασης του Arrhenius [4]. Έπειτα παρατηρείται στασιμότητα χωρίς κάποια ενδιαφέρουσα πρόοδο και το 1943 επανεμφανίζονται σε ευρεσιτεχνία στην οποία αναφέρεται πως ότι τα αλογόνουχα άλατα αζωτούχων βάσεων όταν αναμιγνύονται με κυτταρίνη σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100 °C προκύπτουν διαλύματα με διαφορετικό ιξώδες. Τα διαλύματα που είχαν κυτταρίνη σε δραστική μορφή κρίθηκαν κατάλληλα για πραγματοποίηση αντιδράσεων αλευροποίησης και οστεοποίησης.

Η επομένη μελέτη, που αποτελεί σημείο κλειδί για την εξέλιξη των ιοντικών υγρών, εμφανίζεται στα μέσα του 19ου αιώνα όταν σε αντιδράσεις τύπου ‘‘Frieda-Crafts’’ παρατηρείται μια ουσία διακριτή η όποια βρίσκεται σε υγρή φάση και παίρνει την ονομασία «κόκκινο έλαιο». [30] Όπως διαπιστώθηκε πρόσφατα με τη βοήθεια φασματοσκοπίας, αυτό το «κόκκινο έλαιο» ήταν ένα άλας σε υγρή κατάσταση. Η επανάσταση όμως στον τομέα των ιοντικών υγρών έρχεται όταν η ερευνητική ομάδα Osteryoung κάνει μια έρευνα σχετικά με τη σύνθεση ιοντικών υγρών όπου ανακαλύπτεται πως το σύστημα που προέκυπτε από κάποιους από τους συνδυασμούς παρέμενε υγρό σε θερμοκρασία δωματίου, όμως το κατιόν καταναλωνόταν πολύ γρήγορα. Αργότερα, το 1984, έρχονται στο προσκήνιο τα ιοντικά υγρά με 1-3 διαλκιμιδαζολικά κατιόντα τα όποια αποδεικνύεται πως είναι χημικά πιο σταθερά σε αναγωγή σε βάθος χρόνου σε σχέση με τα ιοντικά υγρά που έχουν αλκυλοπιριδινικά κατιόντα. [30] Το επόμενο βήμα ήταν τα ιοντικά υγρά να γίνουν πιο αποδοτικά όμως διαπιστώθηκε πως ήταν προβληματικά στην εφαρμογή τους στη βιομηχανία καθώς η υγρασία τα αποδομούσε. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ήρθε το 1990 από τον Mike Zaworotko, [29] ο όποιος δημιούργησε μια εύκολη διαδικασία παραγωγής και χαρακτηρισμού δυαλκιλο-ιμιδαζολικών κατιόντων και ανιόντων τα όποια ήταν ανθεκτικά στο νερό. Τα νέα άλατα που προέκυπταν ήταν σταθερά και δεν υδρολύονταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το 2001, οι Ye et al. [6] ήταν οι πρώτοι που ερεύνησαν τη χρήση των ιοντικών υγρών ως λιπαντικών φθάνοντας σε εξαιρετικά ελπιδοφόρα για τη χρήση τους αποτελέσματα καθώς απέδειξαν πως η προσθήκη ιοντικών υγρών ως πρόσθετα σε λιπαντικό του εμπορίου μπορεί να επιμηκύνει τη ζωή του σε ώρες

λειτουργίας, καθώς και να μειώσει τους κύκλους συντήρησης και να βελτιώσει τη λειτουργία του λιπαντικού. Από τότε ο αριθμός των δημοσιευμένων δημοσιεύσεων για το θέμα αυξήθηκε σταθερά [5,6].

### 1.2.3 Κατηγοριοποίηση των ιοντικών υγρών

Τα ιοντικά υγρά χωρίζονται σε οκτώ κατηγορίες τέσσερις εκ των οποίων ανάλογα με το είδος του κατιόντος :

- Αλκυλαμμωνιακής βάσης ιοντικά υγρά
- Φωσφονικής βάσης ιοντικά υγρά
- Διαλκυμιδαζολικής βάσης ιοντικά υγρά
- N-αλκυλοπυριδινικής βάσης ιοντικά υγρά

Και τέσσερις ακόμα κατηγορίες που διαχωρίζονται από κάποια συγκεκριμένη ιδιότητα του ιοντικού υγρού και είναι οι εξής :

- Ιοντικά υγρά ειδικής αποστολής
- Πρωτικά ιοντικά υγρά
- Ιοντικά υγρά μεταλλικών ιόντων
- Ιοντικά υγρά μεταβλητής πολικότητας

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία θα χρησιμοποιηθούν ιοντικά υγρά με βάση το ιμιδαζολιο.

#### **1.2.4 Ιδιότητες ιοντικών υγρών που δημιουργούν προοπτικές για τη χρήση ως λιπαντικά**

Τα ιοντικά υγρά όπως εύλογα διαπιστώνουμε θεωρητικά προσφέρονται για τη χρήση τους ως λιπαντικά αλλά και ως πρόσθετα λιπαντικών. Πρώτη φορά εμφανίζονται ιοντικά υγρά με ενδιαφέρουσες λιπαντικές ιδιότητες το 2001 στην έρευνα των Ye et al. [6] οι οποίοι ήταν οι πρώτοι που διερεύνησαν τη χρήση των ιοντικών υγρών ως λιπαντικών και έκτοτε έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας καθώς παρατηρήθηκαν εξαιρετικές ιδιότητες αντιφθοράς και λίπανσης σε σύγκριση με τα κοινά έλαια που προϋπήρχαν.

Τα ιοντικά υγρά θεωρούνται ιδανικά για τη δημιουργία νέας τεχνολογίας λιπαντικών καθώς παρουσιάζουν τις παρακάτω ιδιότητες:

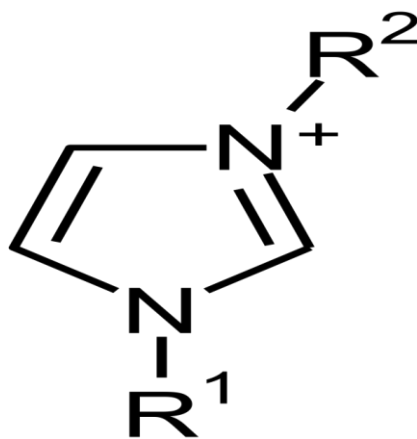
- μειωμένη απώλεια ενέργειας λόγω τριβής,
- εκτεταμένη διάρκεια ζωής και αύξηση του χρόνου λειτουργίας ως την συντήρηση της συσκευής λόγω της μείωσης της φθοράς,
- θερμική σταθερότητας που δίνει τη δυνατότητα για παραγωγή λιπαντικών που αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τα συνήθη λιπαντικά. Οι Minami et al. παρατήρησαν μια σειρά από ιοντικά υγρά ιμιδαζολίου και αμμωνίου να έχουν σημαντικά υψηλότερη σταθερότητα από ένα συμβατικό συνθετικό έλαιο στους 200 ° C [18].
- ασφαλέστερη μεταφορά και αποθήκευση λόγω μη ευφλεκτότητας,
- τα ιοντικά υγρά δεν εξατμίζονται όπως τα περισσότερα άλλα υγρά,
- τα ιοντικά υγρά μας παρέχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε το λιπαντικό με τις ιδιότητες που επιθυμούμε καθώς είναι πολύ μεγάλη η

ποικιλία των ανιόντων και των κατιόντων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Μια εκτίμηση είναι ότι υπάρχουν περισσότεροι από ένα εκατομμύριο συνδυασμοί που είναι διαθέσιμοι, το καθένα με τις δικές του μοναδικές ιδιότητες [17].

Αυτό σημαίνει πως μπορούν να σχεδιαστούν ιοντικά υγρά έτσι ώστε να προσροφούν στην επιφάνεια, να αντιδρούν με την επιφάνεια ή να είναι αναμίξιμα σε ένα συγκεκριμένο βασικό έλαιο. Ωστόσο, λόγω αυτού του μεγάλου αριθμού συνδυασμών που είναι διαθέσιμοι για την παρασκευή ιοντικών υγρών, είναι εξαιρετικά ελπιδοφόρα η δυνατότητα για χρήση τόσο ως λιπαντικά όσο και ως πρόσθετα λιπαντικών καθώς κάθε αλλαγή ανιόντος κατιόντος δημιουργεί και ένα νέο ιοντικό υγρό. Έτσι, μπορούμε να κατασκευάσουμε ιοντικά λιπαντικά τα όποια θα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σε απαιτητικές συνθήκες όπως είναι μέρη όπου με τα λιπαντικά του εμπορίου παρατηρείται ελλιπής λίπανση. Για παράδειγμα, ένα σημαντικό πρόβλημα στους κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι το γεγονός πως έχουμε ελλιπή λίπανση των βαλβίδων αυτό θα μπορούσε να επιλυθεί με ένα ιοντικό λιπαντικό η πρόσθετο ιοντικό υγρό για τα υπάρχοντα λιπαντικά το οποίο θα μπορούσε να προσροφηθεί στη μεταλλική επιφάνεια της βαλβίδας βελτιώνοντας έτσι τις επιφανειακές τις τριβολογικές ιδιότητες, υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να προκαλέσουν υδρόλυση το λιπαντικού η εξάτμισή του ( π.χ. μέσα στον θάλαμο καύσης ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης η στέγνωση των ελατηρίων του έμβολου και του κυλίνδρου επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός λεπτού φιλμ λιπαντικού, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν εντός του κυλίνδρου, τα λιπαντικά του εμπορίου εξατμίζονται και καίγονται αυτό θα μπορούσε να βελτιωθεί με τη χρήση ιοντικών λιπαντικών καθώς πρόκειται για ενώσεις που δεν αναφλέγονται και επίσης έχουν πολύ χαμηλή πτητικότητα άρα δεν εξατμίζονται). Πολύ ελπιδοφόρα είναι επίσης και η χρήση των ιοντικών λιπαντικών ως μέσα λίπανσης μικροηλεκτρομηχανικών και νανοηλεκτρομηχανικών συστημάτων όπου τα ιοντικά υγρά λειτουργούν μέσω της τροποποίησης των επιφανιών στα νανοσωματίδια. Σημαντικό είναι να διερευνάται συστηματικά η απόδοσή τους για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, έτσι ώστε να μειώνεται ο αριθμός των μελλοντικών μεταλλαγών [19].

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε με την ομάδα ιοντικών υγρών με βάση το ιμιδαζόλιο. Τα ιοντικά υγρά αυτής της ομάδας είναι πολλά υποσχόμενα ως λιπαντικά έλαια. Η χρήση τους ξεκίνησε να μελετάται όταν για πρώτη φορά το 1982

από τους Wilkes et al. αναφέρθηκαν τα ιοντικά υγρά με βάση το κατιόν 1-η -αλκυλ-3-μεθυλιμιδαζολίου [20]. Το 1992, οι Wilkes και Zaworotko [21] ανέπτυξαν ένα ιοντικό υγρό σταθερό στον αέρα αλλά και νερό με βάση το τετραφθοροβορικό ανιόν. Αυτό το ιοντικό λιπαντικό λόγω της σταθεροτητάς του σε αέρα και νερό ήταν το πρώτο ιοντικό υγρό που χρησιμοποιήθηκε ως λιπαντικό. Το πεδίο της χρήσης ιοντικών υγρών ως μέσα λίπανσης άρχισε ουσιαστικά το 2001 από τους Liu et al [22], με τη μελέτη τους επάνω στο τετραφθοροβορικό αλκυλο-ιμιδαζολίου σε κεραμικές επαφές από χάλυβα / χάλυβα, χάλυβα / αλουμίνιο, χάλυβα / χαλκό, χάλυβα / SiO<sub>2</sub>, χάλυβα / Si (100), χάλυβα / σιάλιο και Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> / sialon. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής ήταν εξαιρετικά. Ύστερα από αυτή τη μελέτη έχουμε σταθερά αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση ιοντικών υγρών ως λιπαντικά πράγμα που αποτυπώνεται στο συνεχώς αυξανόμενο αριθμό δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά σχετικά με το θέμα. Οι καλές λιπαντικές επιδόσεις των ιοντικών υγρών θεωρήθηκε από τις πρώτες κιόλας ερευνητικές εργασίες που δημοσιεύτηκαν [22,23,24,25] πως οφείλονταν σε επιφανειακές αλληλεπιδράσεις και τις τριβοχημικές διεργασίες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στη διεπαφή μεταξύ του λιπαντικού και της επιφάνειας αλλά και στη προσρόφηση μορίων των ιοντικών υγρών που έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό επιφανειακών στρωμάτων που περιέχουν B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Τα βασικότερα αποτελέσματα που λαμβάνονται εξετάζονται από τον Minami [13]. Το 2009 δημοσιεύτηκε μια νέα έρευνα με θέμα τη συμπεριφορά ιοντικών υγρών με βάση το ιμιδαζόλιο [19],



**Εικόνα (8)** Σχηματική απεικόνιση του κατιόντος ιμιδαζολίου

[<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Imidazoliumion.svg>]



που παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον καθώς, μελετήθηκαν ενώσεις ιοντικών υγρών ιμιδαζολίου ως λιπαντικά κατά της φθοράς τιτανίου, διαπιστώνοντας πως μια μακρύτερη πλευρική αλυσίδα έδωσε καλύτερη προστασία κατά της φθοράς για το τιτάνιο. Σε θερμοκρασία δωματίου, παρατηρήθηκαν καλύτερες επιδόσεις με τη χρήση της χημικής ένωσης, χλωριούχο 1-μεθυλο-3-βενζυλοϊμιδαζολίου ([BzMIM] Cl), ενώ στους 100 °C, οι χαμηλότερες τιμές τριβής και φθοράς ελήφθησαν για το εξαφθοροφωσφορικό 1-εξυλο-3-μεθυλο-ιμιδαζόλιο [HMIM] PF 6. Και πάλι, τα αποτελέσματα της λίπανσης φαίνεται πως σχετίζονταν με τις τριβοχημικές διεργασίες στη διεπαφή μεταξύ του ιοντικού υγρού και του κράματος. Τα ιοντικά υγρά τετραφθοροβορικού ιμιδαζολίου αποσυντίθενται στο σημείο διεπαφής τους με το μέταλλο προκαλώντας σημαντική ρύθμιση της τριβής, μέσω του σχηματισμού μεταλλικών φθοριδίων, καρβιδίου του βορίου και οξειδίου του βορίου. Αντίθετα, κάτω από τις συνθήκες που μελετήθηκαν, το εξαφθοροφωσφορικό ιοντικό λιπαντικό σχηματίζει προσροφημένα στρώματα στην επιφάνεια του τιτανίου και ένα προστατευτικό στρώμα στην επαφή του με τον χάλυβα. Επίσης, μια σειρά από ιοντικά υγρά θερμοκρασίας δωματίου με φωσφονικές ομάδες στο κατιόν ιμιδαζολίου, παρασκευάστηκαν [27] και αξιολογήθηκαν ως πολλά υποσχόμενα λιπαντικά για την επαφή από αλουμίνιο σε χάλυβα.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

---

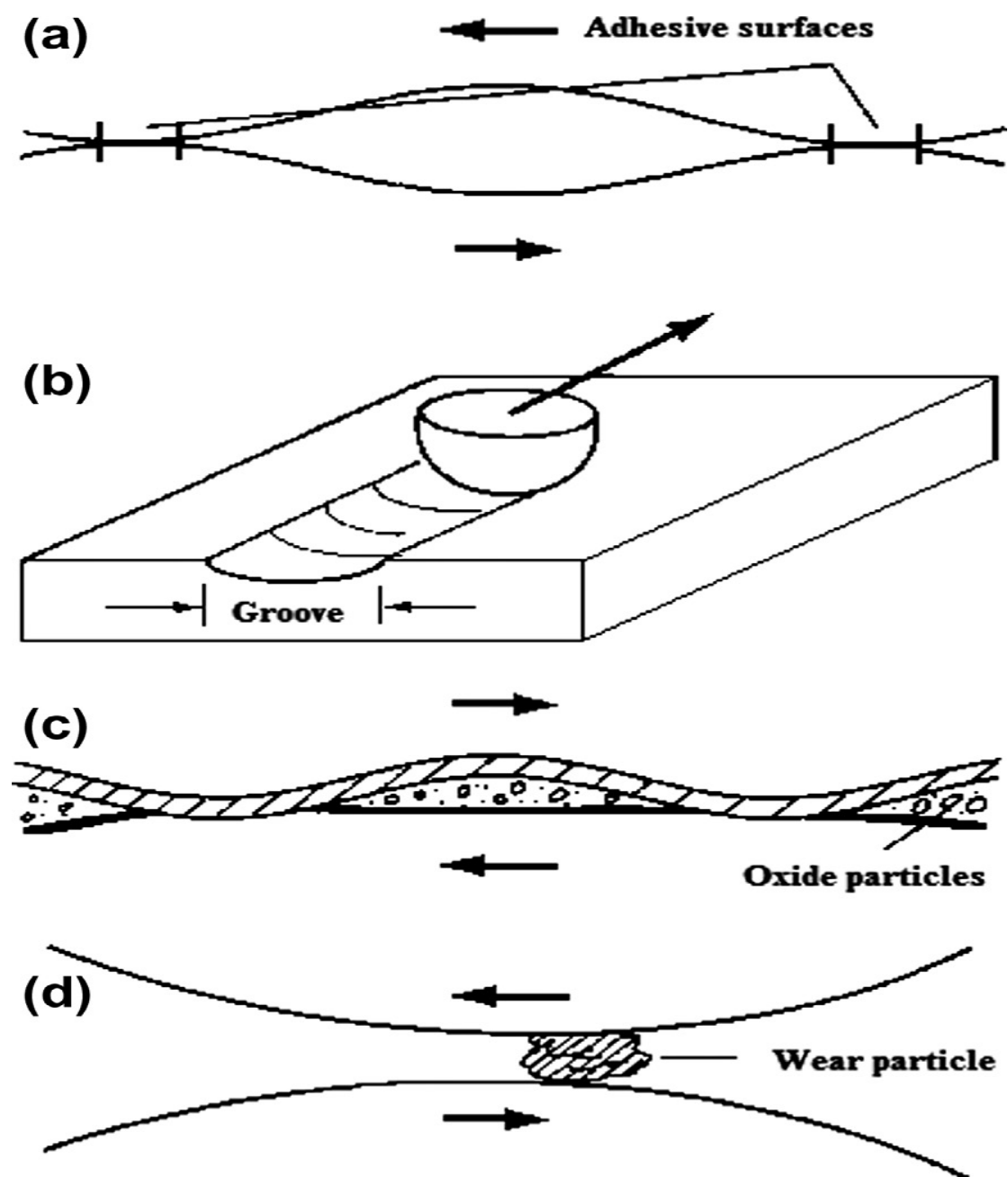
### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

---

## 2.1 Σύντομη αναφορά στις πειραματικές τεχνικές

### 2.1.1 Μέθοδοι τριβομετρησης

Για να μπορέσουμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα ενός λιπαντικού, στη περίπτωση μας τη χρήση των ιοντικών υγρών ως λιπαντικά, θα πρέπει να ελέγξουμε σε πειραματικό επίπεδο τα αποτελέσματα της χρήσης του ιοντικού υγρού σε μια τυποποιημένη πειραματική διάταξη τριβομέτρησης. Στις πειραματικές διατάξεις τριβομέτρησης έχουμε τα διαφορετικά μέρη της συσκευής τα όποια εξαρτώνται από τον τύπο της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιούμε (π.χ σε αυτή την πτυχιακή εργασία θα χρησιμοποιήσουμε μια διάταξη σφαίρας - δίσκου). Τα μέρη αυτά πριν αρχίσουμε το πείραμα έχουν υποστεί στίλβωση έτσι ώστε να έχουμε συγκεκριμένη ποιότητα επιφάνειας που καθορίζεται από το πειραματικό πρωτόκολλο. Έπειτα θέτουμε σε κίνηση μεταξύ τους τα μέρη της συσκευής για συγκεκριμένο χρόνο. Κατά την κίνηση των μερών έχουμε τριβή μεταξύ τους, με κύριους μηχανισμούς τριβής σε μικροσκοπικό επίπεδο είτε την τοπική στιγμιαία προσκόλληση των επιφανειών, είτε την εισχώρηση μικροσκοπικών εξογκωμάτων της μιας επιφάνειας εντός της άλλης, είτε λόγω παραμόρφωσης και θραύσης οξειδίων, είτε παρεμβολή μεταξύ των δύο επιφανειών σωματιδίων που αποκολληθήκαν κατά την κίνηση σε επαφή των δυο επιφανειών,

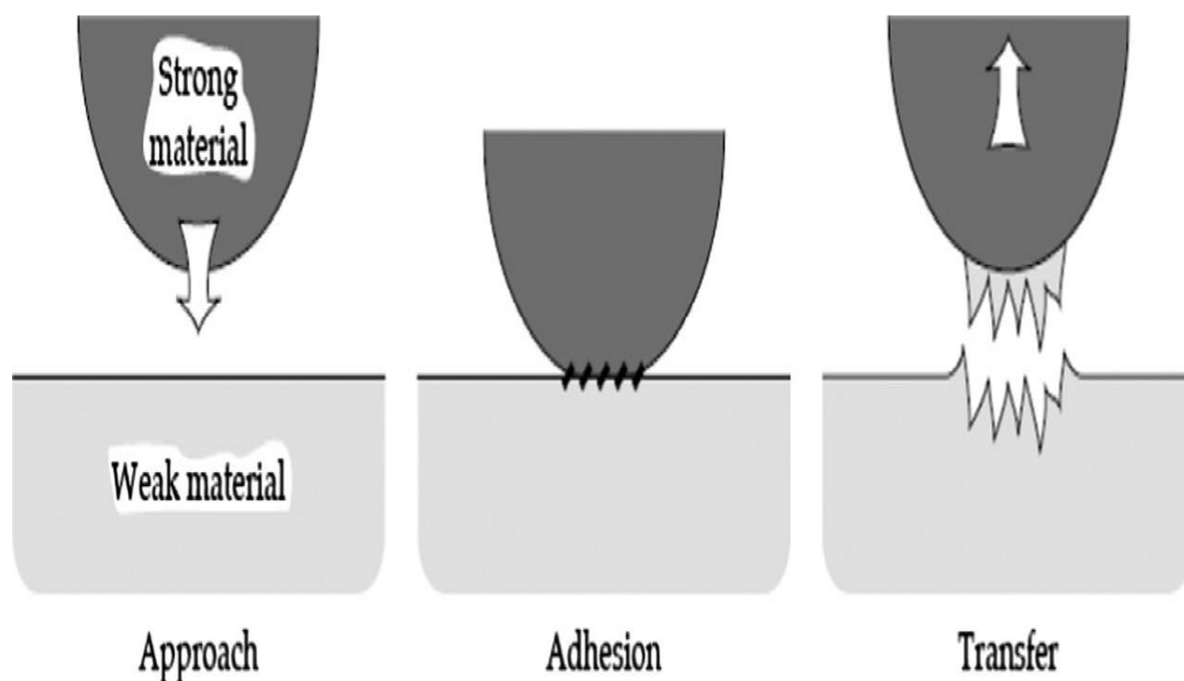


**Εικόνα (9)** Σχηματική απεικόνιση των μηχανισμών που προκαλούν τριβή:

- a) τοπική στιγμιαία προσκόλληση των επιφανειών
- b) εισχώρηση μικροσκοπικών εξογκωμάτων της μιας επιφάνειας εντός της άλλης
- c) παραμόρφωση και θραύση οξειδίων
- d) παρεμβολή μεταξύ των δυο επιφανειών σωματιδίων που αποκολληθήκαν

[<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913011618>]

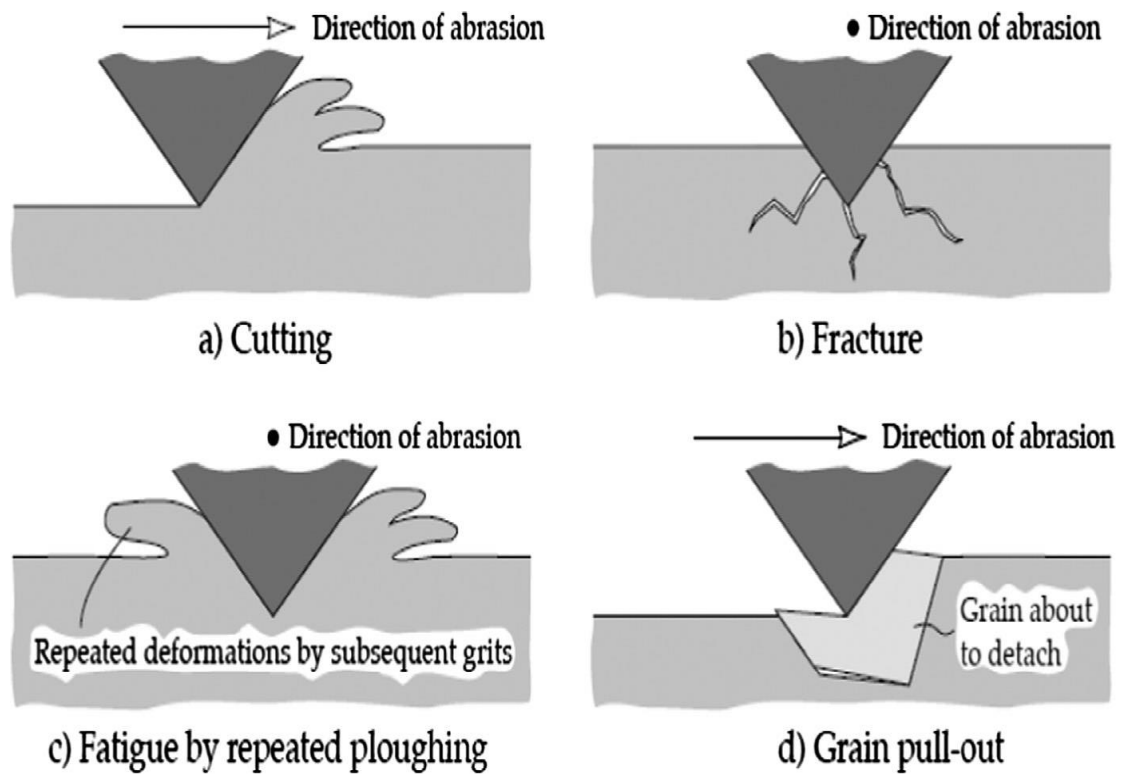
όλα τα παραπάνω δημιουργούν στην επιφάνεια των μερών της πειραματική συσκευής σημάδια όπως ρωγμές, πτυχώσεις, ασυνέχειες υλικού ή μικρά εξογκώματα, είτε λόγω αποκόλλησης υλικού από το ένα μέρος και προσκόλλησης στο άλλο,



**Εικόνα (10)** Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας προσκόλλησης υλικού από το ένα πιο ισχυρό υλικό σε ένα πιο αδύναμο όπου έχουμε την προσέγγιση των μερών στην προσκόλληση και στην συνέχεια την αποκόλληση μέρους του μαλακού υλικού που οδηγεί στη δημιουργία ασυνέχειας στην επιφάνεια.

[<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913011618>]

είτε λόγω αφαίρεσης υλικού που προκύπτει από μικροκοπές μερών της μιας επιφάνειας από την άλλη κατά την μεταξύ τους επαφή, ή από τοπική πλαστική παραμόρφωση της επιφάνειας, ή λόγω σχηματισμού ρωγμών στην επιφάνεια, ή τέλος λόγω της αποκόλλησης μικρών κόκκων υλικού.

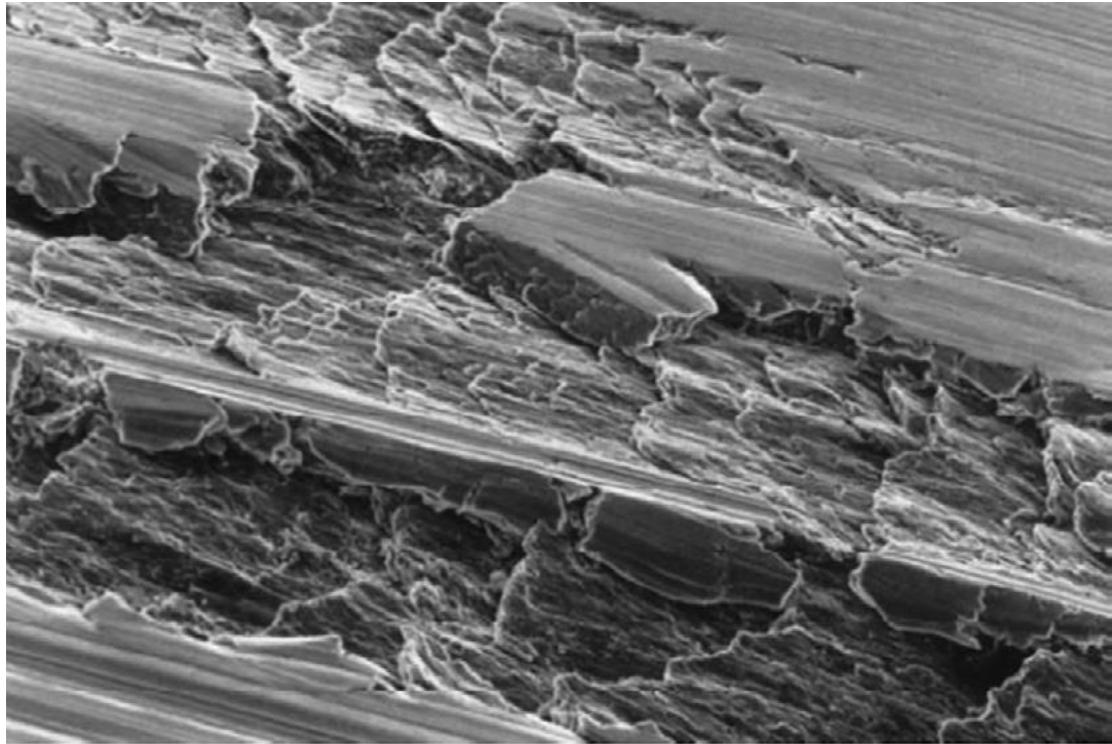


**Εικόνα (11)** Σχηματική απεικόνιση των μηχανισμών αφαίρεσης υλικού κατά την τριβή των επιφανειών

- a) κοπή υλικού
- b) σχηματισμός ρωγμών σε μικροσκοπικό επίπεδο
- c) πλαστική παραμόρφωση
- d) αποκόλληση κόκκου από το υλικό

[<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913011618>]

για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε αυτά τα σημάδια φθοράς στην επιφάνεια των μερών της πειραματικής συσκευής αφαιρούμε τα μέρη που ήταν σε επαφή και με τη βοήθεια της διάταξης παρατήρησης που έχουμε επιλέξει (π.χ στην περίπτωση μας την ηλεκτρονική μικροσκόπια σάρωσης ) παρατηρούμε το αποτέλεσμα της κίνησης μεταξύ των μερών της πειραματική συσκευής, δηλαδή την φθορά που έχουν υποστεί κατά τη διάρκεια του πειράματος.



100 • m



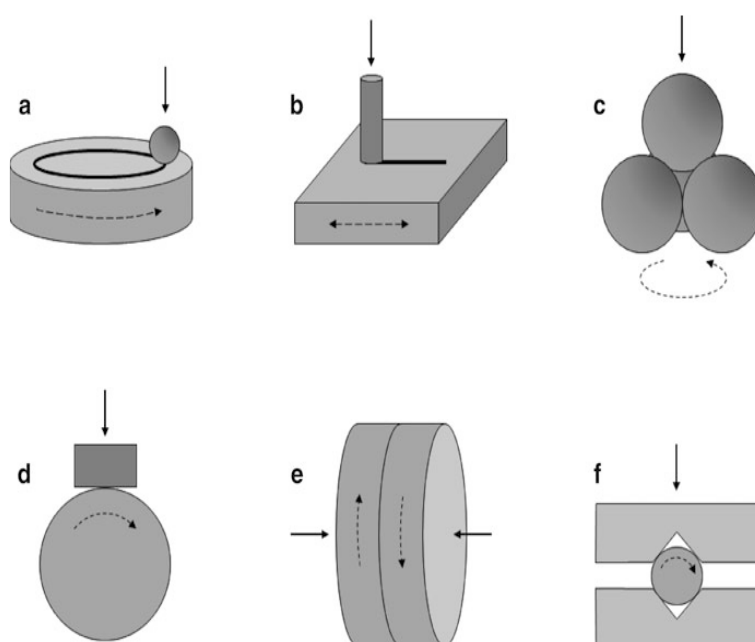
**Εικόνα (12)** Μικροσκοπική απεικόνιση επιφάνειας που έχει υποστεί φθορά λόγω τριβής παρατηρούμε πως έχουν σχηματιστεί ρωγμές και ασυνέχειες λόγω αφαίρεσης υλικού.

[<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913011618>]

Για να μπορέσουμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της χρήσης ιοντικών υγρών ως λιπαντικά σε μια διάταξη τριβομέτρησης, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια τεχνική σύγκρισης των αποτελεσμάτων του πειράματος χωρίς την παρουσία ιοντικού υγρού, σε σχέση με τα αποτελέσματα όταν έχουμε παρουσία ιοντικού υγρού. Σε περίπτωση που θέλουμε να συγκρίνουμε ένα ιοντικό υγρό σε σχέση με κάποια άλλο λιπαντικό θα πρέπει να πάρουμε αποτελέσματα με τη χρήση του επιθυμητού προς σύγκριση λιπαντικού και στη συνέχεια να τα συγκρίνουμε με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν με την πραγματοποίηση του πειράματος παρουσία ιοντικού υγρού.

Οι πειραματικές διατάξεις τριβομέτρησης ή τριβόμετρα είναι συνήθως μηχανισμοί σχεδιασμένοι για κάθε περίπτωση κίνησης (π.χ. παλινδρομική ολίσθηση). Για να λειτουργήσει σωστά ένα τριβόμετρο και να λάβουμε αξιόπιστα αποτελέσματα θα

πρέπει να επιλέξουμε προσεκτικά την πειραματική συσκευή ώστε να προσομοιάζει επαρκώς τις επιθυμητές συνθήκες (π.χ κίνησης, συσχετισμός επιφάνειας και φορτίου). Πάντα, ένα τριβόμετρο θα αποτελείται από δύο ή περισσότερα συνεργαζόμενα μέρη σε επαφή, όπου ένα είναι συνήθως στατικό και όλα τα υπόλοιπα είναι συρόμενα (π.χ στα τριβόμετρα ακίδας ή σφαίρας πάνω σε στρεφόμενο δίσκο το ακίνητο μέρος είναι η ακίδα ή η σφαίρα αντίστοιχα η οποία ουσιαστικά παρασύρεται λόγω της κίνησης του δίσκου και το στρεφόμενο μέρος ο δίσκος).



**Εικόνα (13)** Σχηματική απεικόνιση των τυπικών διατάξεων τριβομέτρησης :

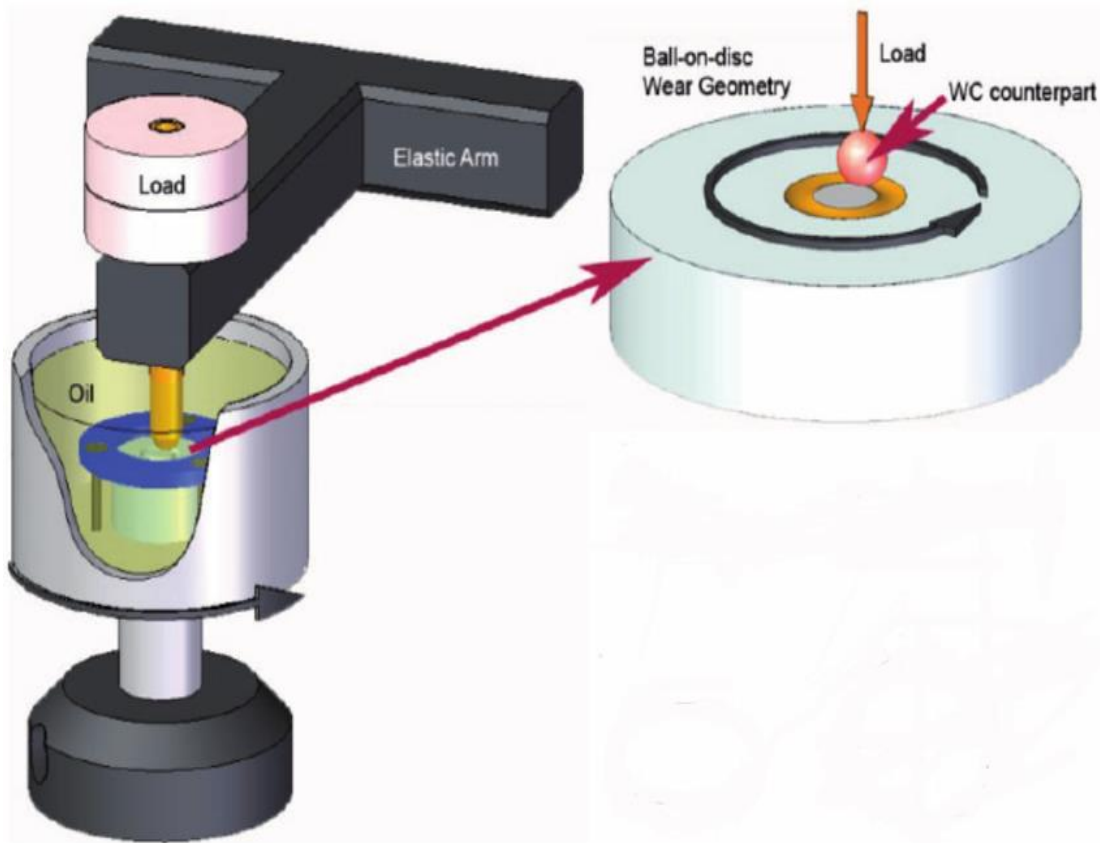
- a) σφαίρα σε δίσκο
- b) πείρος που παλινδρομεί σε επίπεδη επιφάνεια
- c) επαφή τεσσάρων σφαιρών
- d) μπλοκ επάνω σε κύλινδρο
- e) επίπεδη επιφάνεια πάνω σε επίπεδη επιφάνεια
- f) κύλινδρος που στρέφεται εντός δυο εγκοπών με σχήμα  $\nabla$  σε πλάκες

[<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913011618>]



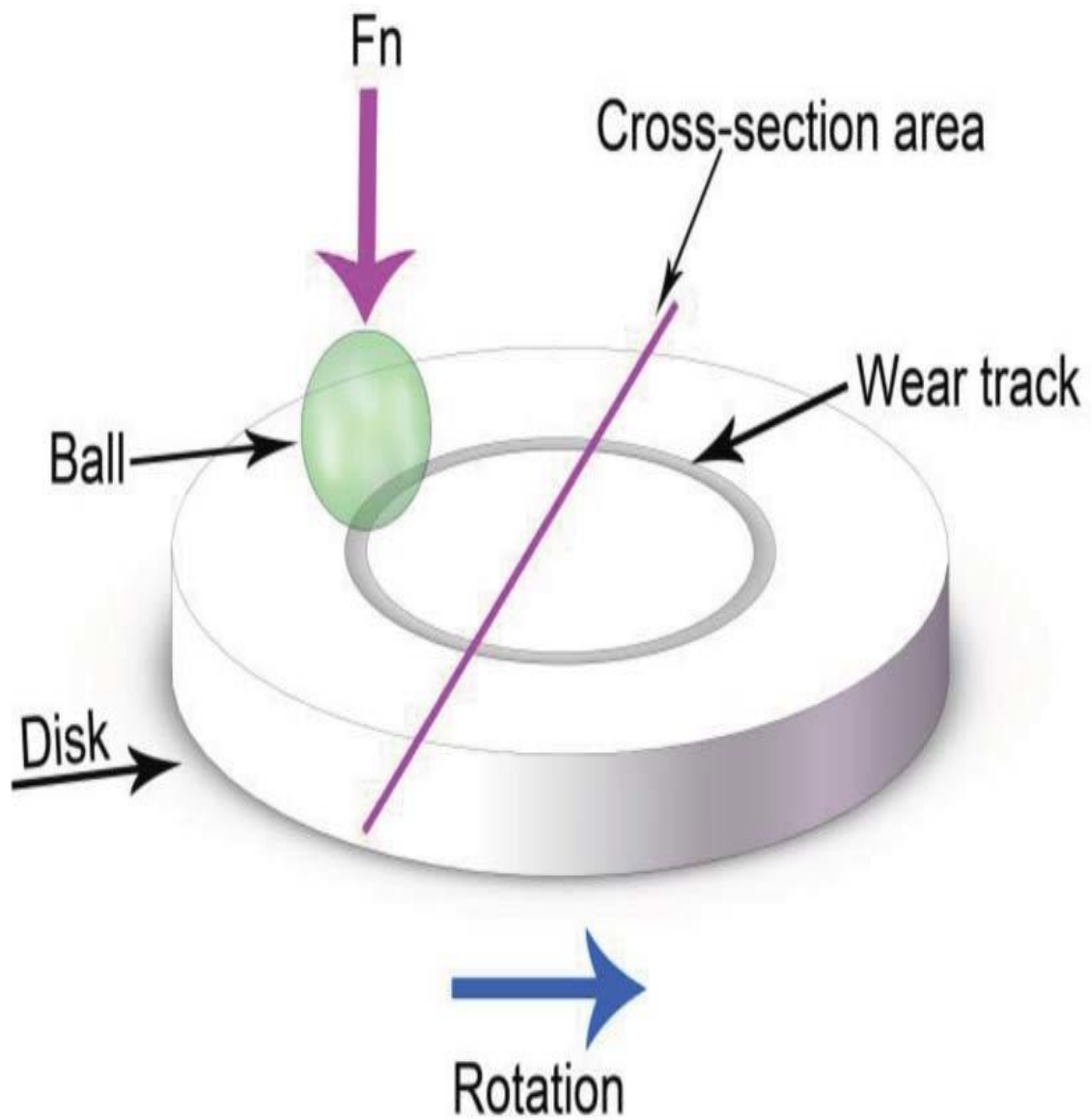
Το εφαρμοζόμενο φορτίο συνήθως προέρχεται είτε από νεκρά βάρη είτε από κάποια μορφή ενεργοποίησης φορτίου και τα δύο αυτά συστήματα έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, ένα σύστημα νεκρού βάρους θα παρέχει με ακρίβεια ένα συγκεκριμένο φορτίο χωρίς μετατόπιση, ενώ ένας ενεργοποιητής φορτίου μπορεί να χρησιμοποιεί βρόχους δύναμης-ανατροφοδότησης που επιτρέπει μια σταθερή εφαρμογή φορτίου ακόμα και όταν η αντίθεση είναι τραχιά ή έχει χαμηλή επιπεδότητα. Ένας ενεργοποιητής φορτίου χρησιμοποιείται πιο συχνά όταν χρησιμοποιούμε υψηλές ταχύτητες και μικρά πλάτη κίνησης, καθώς μπορεί να ελέγχει καλύτερα το φορτίο σε τέτοιους βραχείς και αναστρέψιμους κύκλους. [31]

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα ελέγξουμε, την αποτελεσματικότητα ιοντικών υγρών ιμιδαζολίου μέσω της χρήσης τριβόμετρου σφαίρας - δίσκου. Στην διάταξη τριβόμετρου σφαίρας – δίσκου έχουμε το δίσκο ο οποίος στρέφεται μέσω του μηχανισμού της συσκευής και τη σφαίρα η οποία δέχεται κάθετη φόρτιση μέσω του μηχανισμού συγκράτησης της ενώ σύγχρονως λόγω τριβής έχουμε κύλιση της σφαίρας. Λόγω της κύλισης της σφαίρας θα σχηματιστούν στην επιφάνεια του δίσκου σημάδια φθοράς τα όποια στη συνέχεια θα παρατηρήσουμε με τη βοήθεια της μεθόδου παρατήρησης που έχουμε επιλέξει.



**Εικόνα (14)** Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του τρίμετρου σφαίρας δίσκου

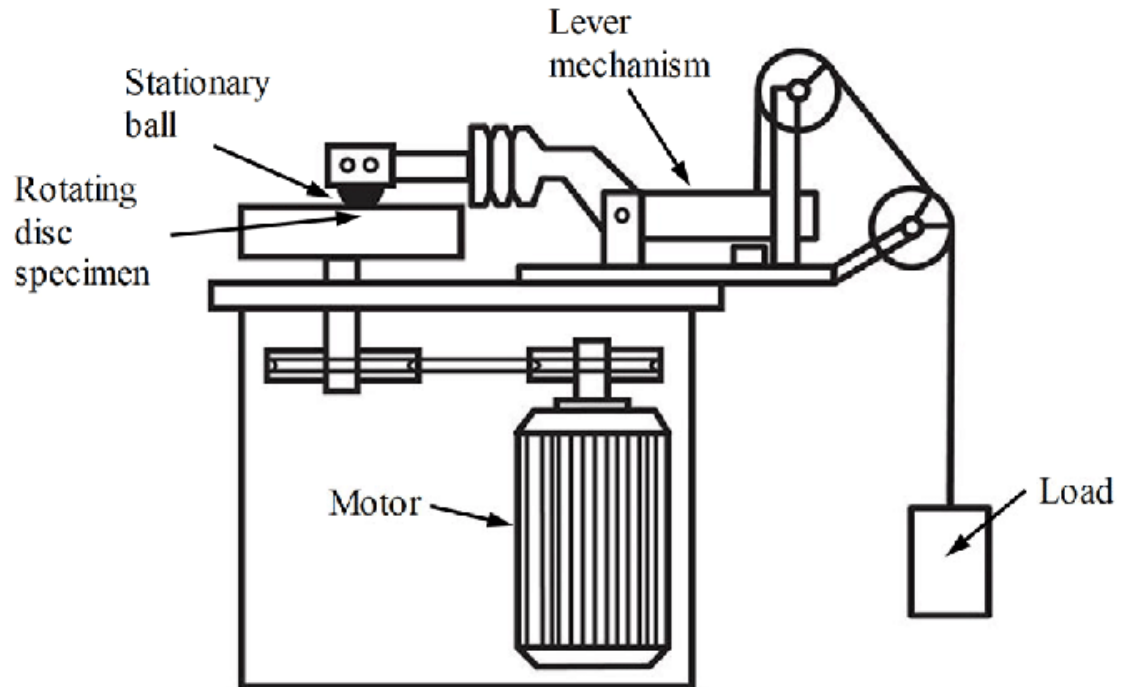
[[https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-wear-test-device-the-wear-geometry-and-the-disc-dimensions\\_fig1\\_282286068](https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-wear-test-device-the-wear-geometry-and-the-disc-dimensions_fig1_282286068)]



**Εικόνα (15)** Σχηματική απεικόνιση της δημιουργίας και της θέσης των γραμμών φθοράς επάνω στο δίσκο σε τρίμετρο σφαίρας δίσκου

[[https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-ball-on-disk-test\\_fig2\\_271585791](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-ball-on-disk-test_fig2_271585791)]

Οι διατάξεις τριβομέτρησης στρεφόμενου δίσκου-σφαίρας αποτελούνται από τα εξής μέρη :



**Εικόνα (16)** Σχηματική απεικόνιση τριβομέτρου σφαίρας πάνω σε στρεφόμενο δίσκο

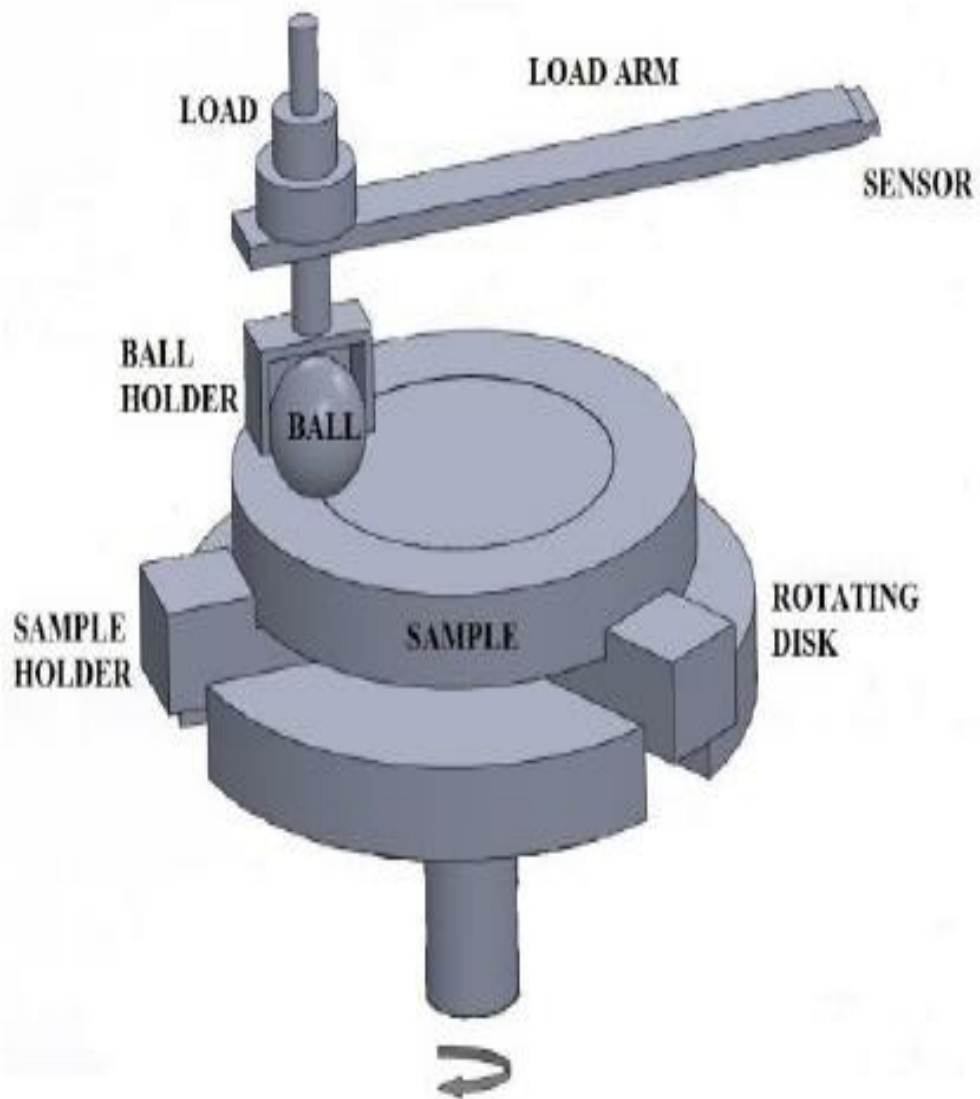
[[https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-ball-on-disc-tribometer\\_fig2\\_325399952](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-ball-on-disc-tribometer_fig2_325399952)]

1. Τη βάση τους που περιλαμβάνει και το μηχανισμό κίνησης του δίσκου καθώς και τον μηχανισμό συγκράτησής του. Ο δίσκος συγκρατείται στην εξωτερική του διάμετρο με τη βοήθεια αρπάγης που είναι προσαρμοσμένη στο μηχανισμό κίνησης .
2. Δεξαμενή λιπαντικού μέσα στην οποία θα τοποθετηθεί το ιοντικό υγρό και επίσης στρέφεται ο δίσκος. Η δεξαμενή λαδιού περιλαμβάνει ένδειξη στάθμης λαδιού ώστε να μπορούμε να σιγουρευτούμε πως ο δίσκος καλύπτεται από το

επιλεγμένο λιπαντικό και είναι προσαρμοσμένη με στεγανό τρόπο επάνω στη βάση.

3. Διάταξη στήριξη της σφαίρας μέσω της οποίας γίνεται και η εφαρμογή φορτίου σε αυτή. Η διάταξη στήριξης της σφαίρας αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Τη μεταλλική ράβδο στήριξης του μηχανισμού η όποια στο δεξί άκρο της διαθέτει αισθητήρα φορτίου και στο άλλο άκρο της διαθέτει τη στήριξη του φορτίου καθώς και τον συγκρατή της σφαίρας .
- Το φορτίο, πρόκειται συνήθως για μεταλλικούς δίσκους γνωστού βάρους με οπή στο κέντρο τους που προσαρμόζονται σε ειδικό πείρο που υπάρχει στη μεταλλική ράβδο στήριξης.
- Ο συγκρατητής της σφαίρας είναι ένα εξάρτημα, το οποίο προσαρμόζεται στη μεταλλική ράβδο στήριξης και διαθέτει οπή στο κάτω μέρος εντός της οποίας τοποθετούμε τη σφαίρα. Οι διαστάσεις της οπής είναι τέτοιες ώστε να χωρά η σφαίρα στο εσωτερικό του.



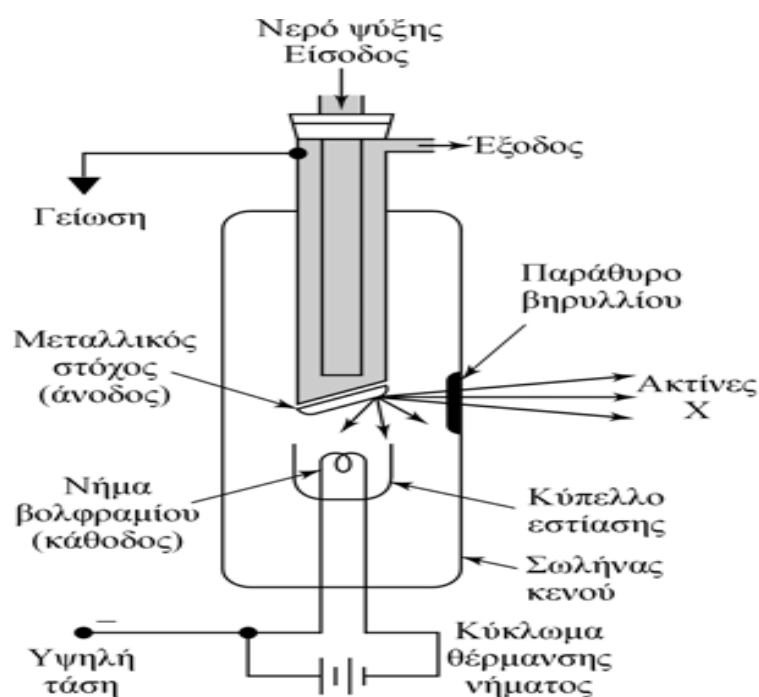
**Εικόνα (17)** Σχηματική απεικόνιση της διάταξης συγκράτησης της σφαίρας και της διάταξης συγκράτησης του δίσκου

[<https://jarrahotel.com/schematic-diagram-of-the-pin-on-disk-wear-test-machine-download.html>]

## 2.1.2 Μεθοδοι παρατηρησης των δειγματος

Για να μπορέσουμε να αναλύσουμε την αποτελεσματικότητα ενός λιπαντικού, στην περίπτωση μας των ιοντικών υγρών ως λιπαντικά θα πρέπει να αναλύσουμε το αποτέλεσμα της εφαρμογής τους στο σύστημα δηλαδή την φθορά της επιφάνειας. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν ένα πλήθος από μεθοδολογίες τις οποίες θα αναλύσουμε στη συνέχεια:

- i) φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων (XPS), είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος καθώς εκτός από την απεικόνιση της επιφάνειας, μας δείχνει και τη χημική κατάσταση των ατόμων αυτής.

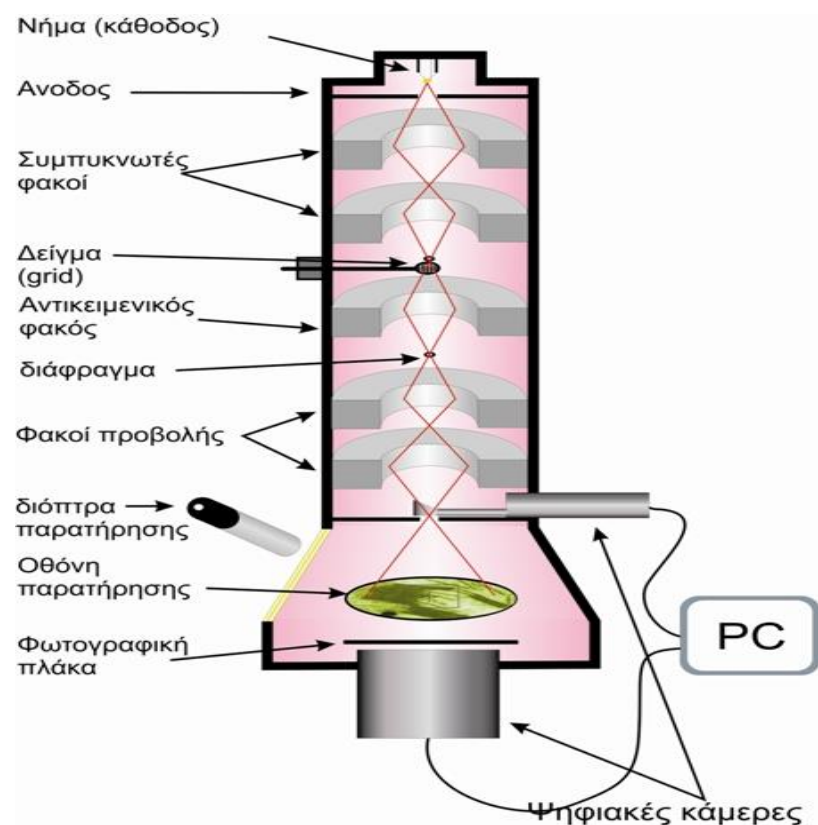


**Εικόνα (18)** Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιείται στην φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων.

[[https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/CHEM165/03-SAT\\_nondestructive.pdf](https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/CHEM165/03-SAT_nondestructive.pdf)]

ii) φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger (AES) [2] , έχει χρησιμοποιηθεί για να εντοπισθούν και να χαρτογραφηθούν οι ιδιαιτερότητες της επιφάνειας (π.χ. μικρές ατέλειες).

iii) Ηλεκτρονική μικροσκοπία μετάδοσης (TEM) [7,8,9],



**Εικόνα (19)** Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής συσκευής που χρησιμοποιούμε στη Ηλεκτρονική μικροσκοπία μετάδοσης

[<https://www.aua.gr/fasseas/electron%20microscopes.htm>]



- iv) Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM), χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ο τύπος φθοράς που θα εμφανιστεί από την κίνηση της σφαίρας πάνω στο δίσκο. Αυτή είναι και η μεθοδολογία την οποία χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία .

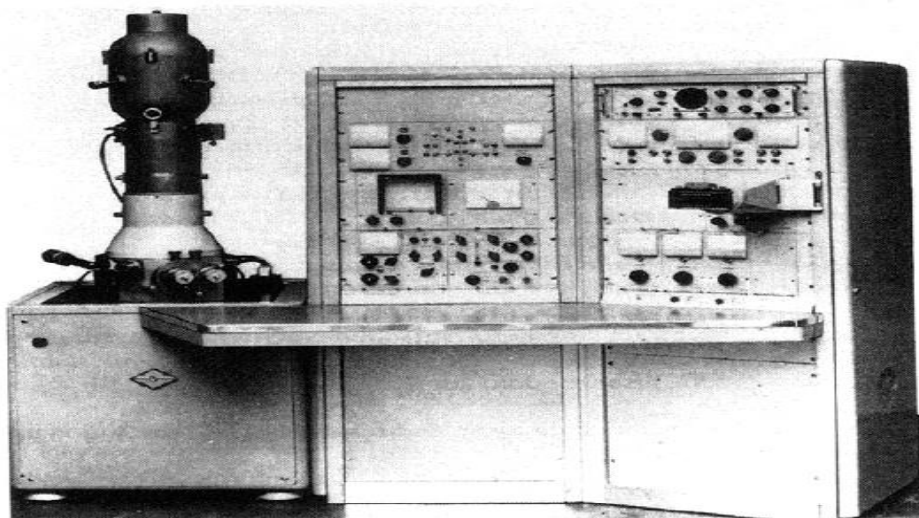


**Εικόνα (20)** Απεικόνιση της πειραματικής συσκευής ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης

[[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%BA%CF%8C%CF%80%CE%B9%CE%BF\\_%CF%83%CE%AC%CF%81%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%BA%CF%8C%CF%80%CE%B9%CE%BF_%CF%83%CE%AC%CF%81%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82)]

## 2.2 Αναδρομή στην ιστορία της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης

Η ιστορία του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης ξεκινά λίγο πριν το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο όταν ο Manfred von Ardenne δημοσίευσε τις θεωρητικές βάσεις [10] για τη δημιουργία του, ενώ σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά τις θεωρητικές βάσεις δημοσιεύτηκαν η περιγραφή της πρακτικής εκτέλεσης και κάποια πρόσθετα πειραματικά αποτελέσματα [11]. Η πρώτη σάρωση έγινε σε οριζόντιες και παράλληλες γραμμές σε μικρό ορθογώνιο πλέγμα διαπερνώντας ένα λεπτό στρώμα δοκιμίου με τη ταυτόχρονη κίνηση του φωτογραφικού φιλμ σε χρόνο είκοσι λεπτών. Οι πρώτες εικόνες ήταν σαφώς κατώτερης ποιότητας από αυτές που δημιουργούν τα σύγχρονα ηλεκτρονικά μικροσκοπία σάρωσης, αλλά παρόλα αυτά είχε ξεκινήσει μια λαμπρή ιστορία για αυτού του τύπου τα μικροσκοπία το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης ανατήχθηκε μετέπειτα από την ομάδα του Zworykin [12], και τις ερευνητικές ομάδες του Cambridge την δεκαετία του 1950 [13] [14] [15] [16] με επικεφαλή τον Charles Oatley. Αποτέλεσμα των παραπάνω εργασιών ήταν να δημιουργηθεί το πρώτο εμπορικό μοντέλο ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης γνωστό ως stereoscan.



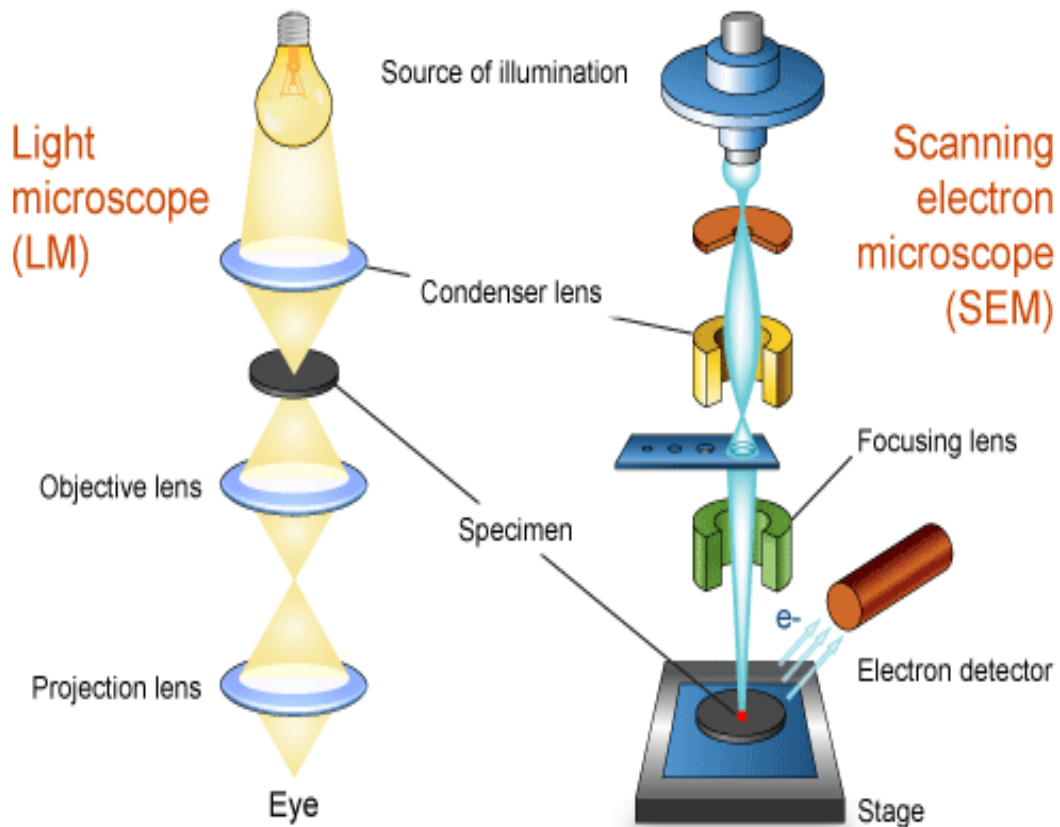
**Εικόνα (21)** Απεικονίζεται το πρώτο εμπορικό μοντέλο ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (stereoscan)

[[https://www.researchgate.net/figure/Cambridge-Instrument-Company-prototype-of-the-first-Stereoscan-SEM-1965-38-p32\\_fig6\\_243652622](https://www.researchgate.net/figure/Cambridge-Instrument-Company-prototype-of-the-first-Stereoscan-SEM-1965-38-p32_fig6_243652622)]

το 1965 το οποίο διατέθηκε στην αγορά από την εταιρία Cambridge scientific instruments company.

### 2.3 Αρχή Λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης

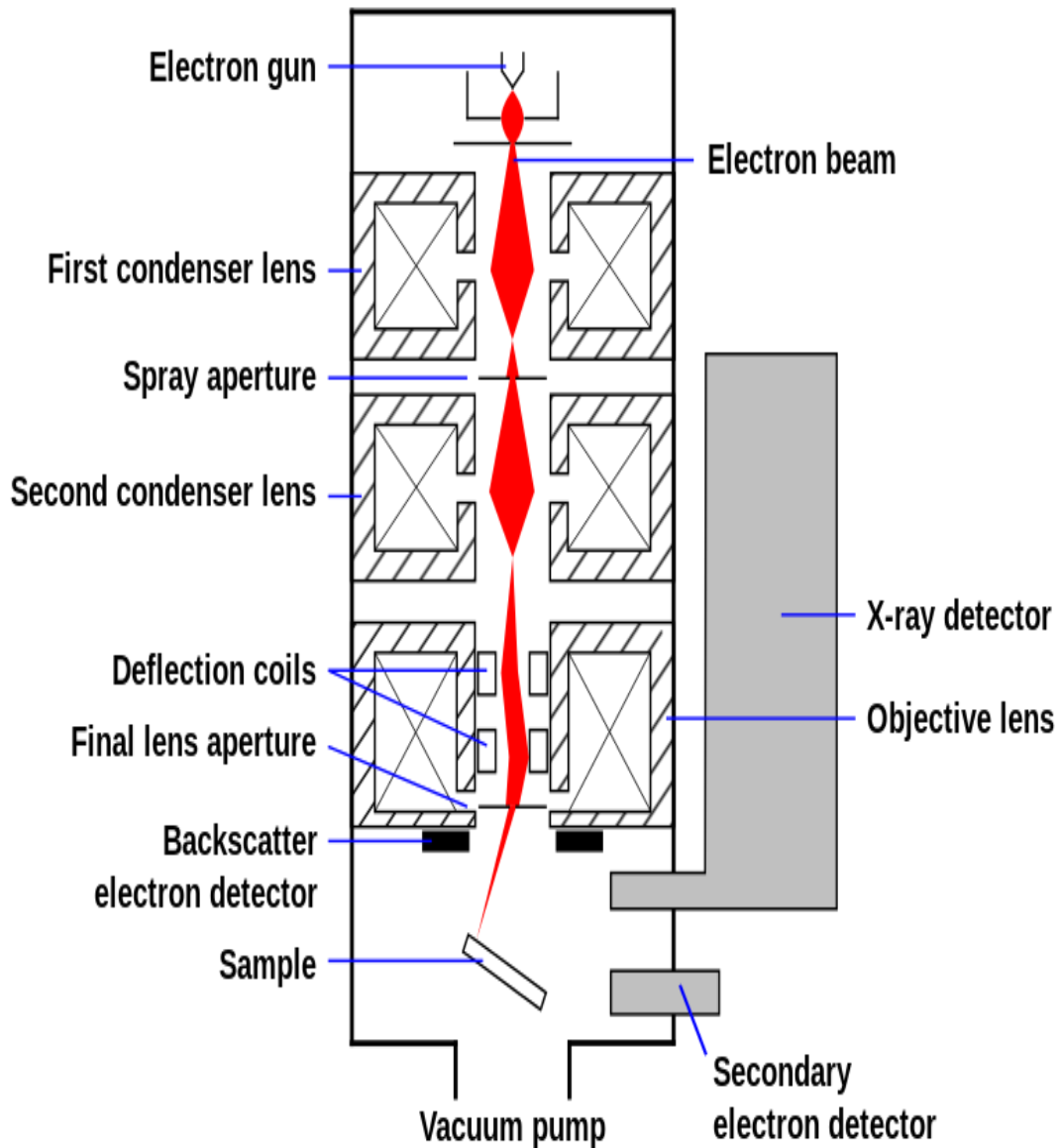
Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα από τα όργανα που χρησιμοποιούμε στην ηλεκτρονική μικροσκοπία ώστε να εξετάσουμε την επιφάνεια αντικειμένων με τη βοήθεια δέσμης ηλεκτρονίων. Όπως τα κοινά μικροσκόπια χρησιμοποιούν δέσμη φωτός και φακούς για τη δημιουργία του ειδώλου της επιφάνειας έτσι και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων και ηλεκτρομαγνητικούς φακούς για τη δημιουργία του ειδώλου της εξεταζόμενης επιφάνειας σε μια οθόνη.



**Εικόνα (22)** Σχηματική απεικόνιση της δομής ενός κοινού οπτικού μικροσκοπίου σε σύγκριση με ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

[[https://embryology.med.unsw.edu.au/embryology/index.php/Scanning\\_Electron\\_Microscopy](https://embryology.med.unsw.edu.au/embryology/index.php/Scanning_Electron_Microscopy)]

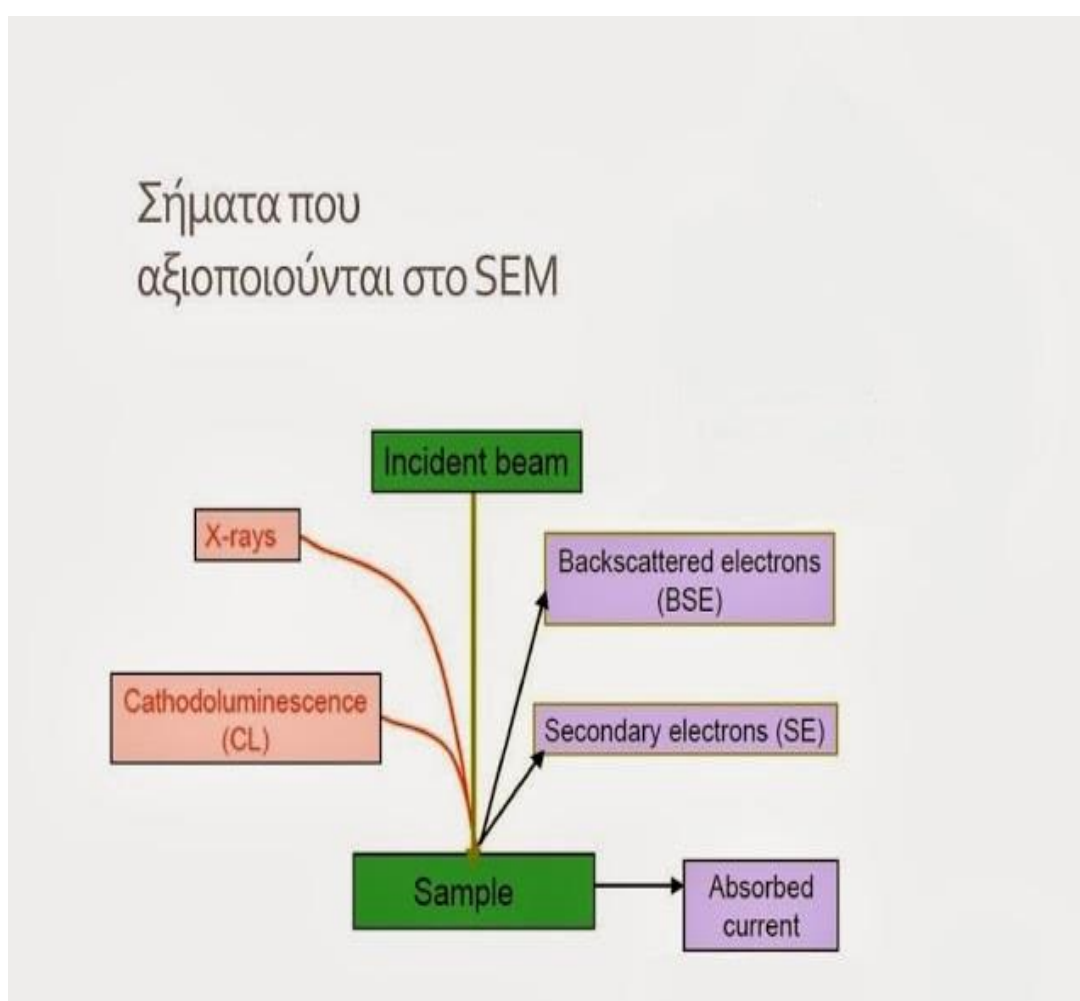
Για τη λειτουργία του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης απαιτείται το εξεταζόμενο δείγμα να βρίσκεται σε συνθήκες κενού σε αντίθεση με τα απλά μικροσκοπία. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται από δυο μέρη: από τη ηλεκτρονική οπτική κολόνα, μέσα στην οποία δημιουργείται η δέσμη ηλεκτρονίων και από το θάλαμο ανιχνευτών στον οποίο τοποθετούμε το δοκίμιο.



**Εικόνα (23)** Σχηματική απεικόνιση στις πειραματικής συσκευής ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης

[[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%BA%CF%8C%CF%80%CE%B9%CE%B\\_F\\_%CF%83%CE%AC%CF%81%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%BA%CF%8C%CF%80%CE%B9%CE%B_F_%CF%83%CE%AC%CF%81%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82)]

Η ηλεκτρονική οπτική κολόνα περιέχει το θάλαμο << electron gun >> όπου εκεί δημιουργείται δέσμη ηλεκτρονίων καθώς και ένα πλήθος ηλεκτρομαγνητικών φακών οι οποίοι εστιάζουν τη δέσμη ηλεκτρονίων σε ένα πολύ μικρό σημείο με πολύ μεγάλη συγκέντρωση ηλεκτρονίων. Στη συνέχεια, η εστιασμένη δέσμη προσπίπτει στην επιφάνεια του δοκιμίου όπου έχουμε τοποθετήσει στο εσωτερικό του θαλάμου και δημιουργεί εκπομπές ηλεκτρονίων ανάλογες των ιδιοτήτων της περιοχής του δοκιμίου στο οποίο προσπίπτει η δέσμη. Τα ανακλώμενα ηλεκτρόνια χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:



**Εικόνα (24)** Σχηματική απεικόνιση των εκπομπών που προκύπτουν μετά την πρόσπτωση της δέσμης ηλεκτρονίων

[<http://mikrokellari.blogspot.com/2013/10/sem.html>]

- οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια :

Πρόκειται για ηλεκτρόνια τα όποια μόλις προσπίπτουν στην επιφάνεια του δοκιμίου σκεδάζονται με αποτέλεσμα να χάνουν ενέργεια και στη συνέχεια εξέρχονται προς κάθε κατεύθυνση. Η ενέργεια των ηλεκτρονίων αυτών εξαρτάται από το πλήθος των σκεδασμών που θα υποστούν. Αυτός είναι και λόγος που συναντώνται σε διαφορετική ενεργειακή κατάσταση μεταξύ τους. Με κάθε ανελαστική σύγκρουση χάνουν ενέργεια λόγω φαινομένων όπως ο ιονισμός, η διέγερση, η μοριακή διάσπαση και η παράγωγη θερμότητας. Υπάρχουν και λίγα σχετικά ηλεκτρόνια που εξέρχονται με σχεδόν μηδενική απώλεια ενέργειας και είναι αυτά που δεν προλαβαίνουν να ταξιδεύσουν εντός της ύλης αλλά εξέρχονται με αντανάκλαση αμέσως, δηλαδή με ελαστικές συγκρούσεις. Τέλος, τα ηλεκτρόνια αυτά μπορεί να έχουν ενέργεια που κυμαίνεται από όση τους προσφέρθηκε αρχικά έως και μηδενική. Από την ενέργειά τους καταλαβαίνουμε το ποσό βαθειά έχουν εισχωρήσει στο υλικό: όσο μικρότερη ενέργεια έχουν τόσο πιο μεγάλο το βάθος εισχώρησης. Βάσει των παραπάνω, έχουμε τη δυνατότητα να επιλεγούμε τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια που μας ενδιαφέρουν περισσότερο. Εάν θέλουμε να επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας σε όσο μικρή δυνατόν περιοχή, τότε πρέπει ο αντίστοιχος ανιχνευτής οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων να είναι κατάλληλα σχεδιασμένος ώστε να επικεντρώνεται σε οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην επιθυμητή ενεργειακή στάθμη. Τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια καθώς προέρχονται από το βάθος του υλικού δε χρησιμεύουν στην απεικόνιση του ανάγλυφου του υλικού αλλά μας δίνουν πληροφορίες κυρίως για τη χημική του σύσταση.

- δευτερογενή ηλεκτρόνια

Πρόκειται για ηλεκτρόνια τα όποια απελευθερώνονται λόγω του ιονισμού που προκύπτει καθώς αλληλεπιδρούν τα ηλεκτρόνια της δέσμης που προσπίπτουν στο δοκίμιο με τα μόρια του υλικού. Η εικόνα που παίρνουμε από τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι μια εικόνα που παρουσιάζει το ανάγλυφο της επιφάνειας του δείγματος, καθώς οι προεξοχές απεικονίζονται ως πιο φωτεινά σημεία ενώ οι εσοχές ως πιο σκοτεινά σημεία.

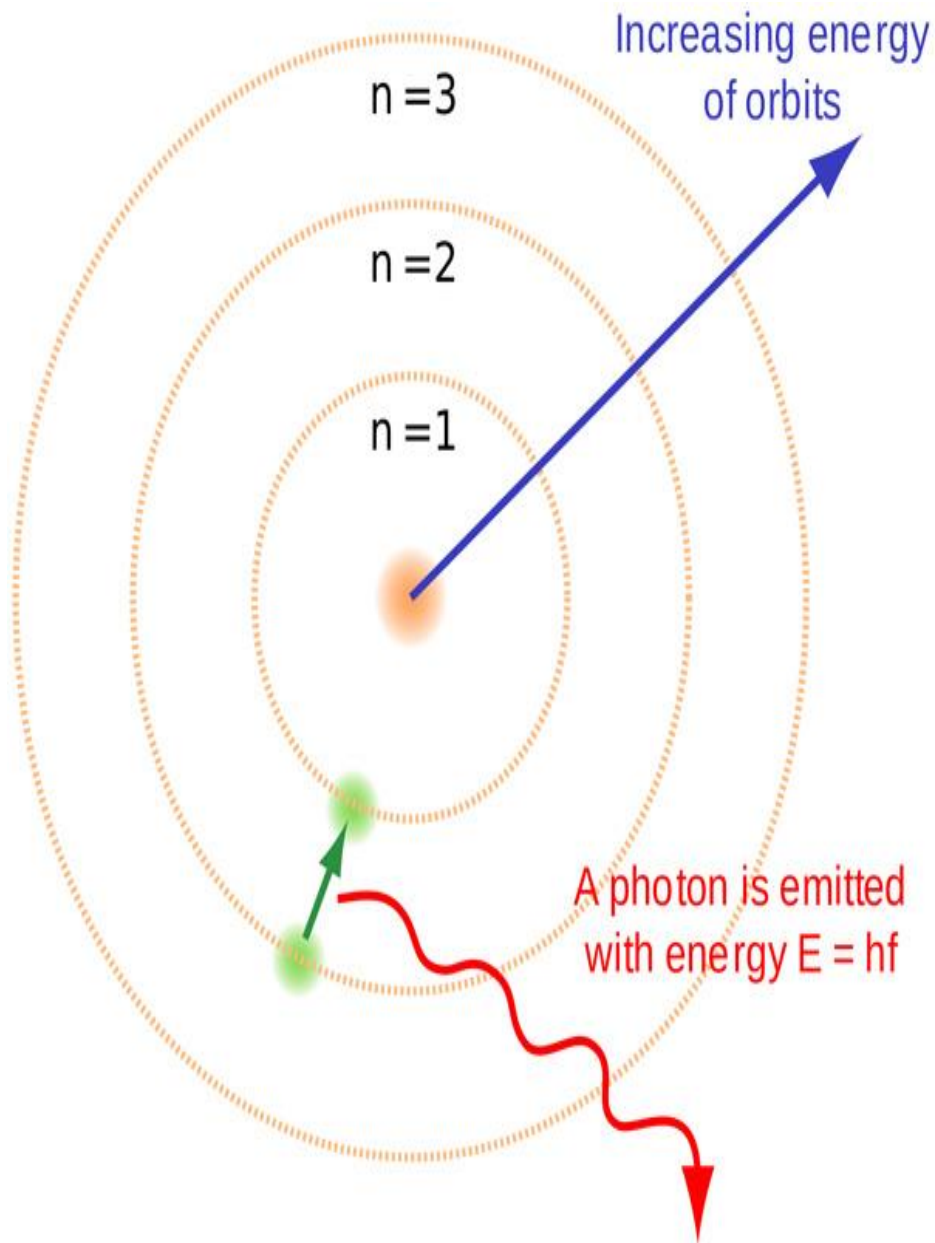
- ακτίνες  $\chi$  :

οι ακτίνες  $\chi$  προέρχονται από την αυτοδιέγερση των ατόμων του υλικού. Είναι γνωστό από την ατομική φυσική, ότι ηλεκτρόνια, που μεταπηδούν από υψηλά τροχιακά σε χαμηλά μικρότερης ενέργειας, εκπέμπουν ακτίνες X με ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας των αντίστοιχων τροχιακών. Έτσι, αυτές οι ακτίνες είναι χαρακτηριστικές των ατόμων από τα οποία προέρχονται, και με την ανίχνευσή τους μπορούμε να γνωρίζουμε την φύση των υλικών που σαρώνονται. Η πιο μικρή περιοχή που μπορούμε να διακρίνουμε είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων και των δευτερογενών ηλεκτρονίων, διότι οι ακτίνες X έχουν μεγάλη διαπερατότητα σε όλα τα υλικά και προέρχονται από ολόκληρο τον όγκο αλληλεπίδρασης της δέσμης με το συγκεκριμένο υλικό. Αυτός ο όγκος είναι πιο μεγάλος από τον αντίστοιχο όγκο παραγωγής των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων και δευτερογενών ηλεκτρονίων, αλλά παραμένει σχετικά μικρός πάλι στην περιοχή των μικρών.

- καθοδοφωτοβολία :

Πρόκειται για φωτόνια που εκπέμπονται ταυτόχρονα με τις υπόλοιπες εκπομπές, έχουν χαμηλή ενέργεια και αντιστοιχούν σε υπεριώδες, ορατό και υπέρυθρο μήκος κύματος. Αυτές οι εκπομπές προέρχονται από αποδιέγερση ατόμων καθώς τα άτομα που διέγερθηκαν κατά την πρόσπτωση της δέσμης ηλεκτρονίων αποβάλλουν ηλεκτρόνια από της υψηλότερα ενεργειακά τροχιακά τους ώστε να φτάσουν σε σταθερή κατάσταση. τα ηλεκτρόνια που αποβάλλονται εκπέμπονται με τη μορφή φωτονίων.

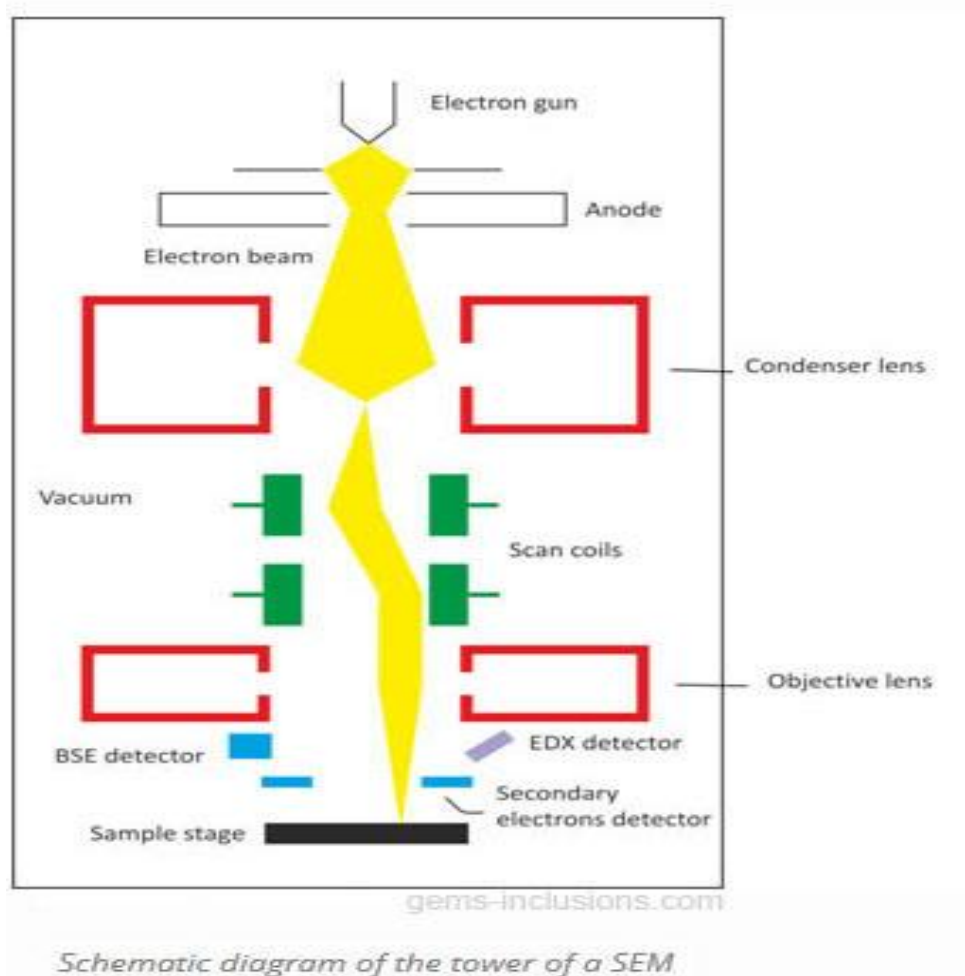




**Εικόνα (25)** Σχηματική απεικόνιση της αποδιέγερσης του ατόμου

[<https://fysikafysikh.wordpress.com/2015/02/11/%CF%84%CF%81%CE%AC%CF%80%CE%B5%CE%B6%CE%B1-%CE%B8%CE%B5%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%B3%CE%B5%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82-%CE%B2-%CE%BB%CF%85%CE%BA%CE%B5-23/>]

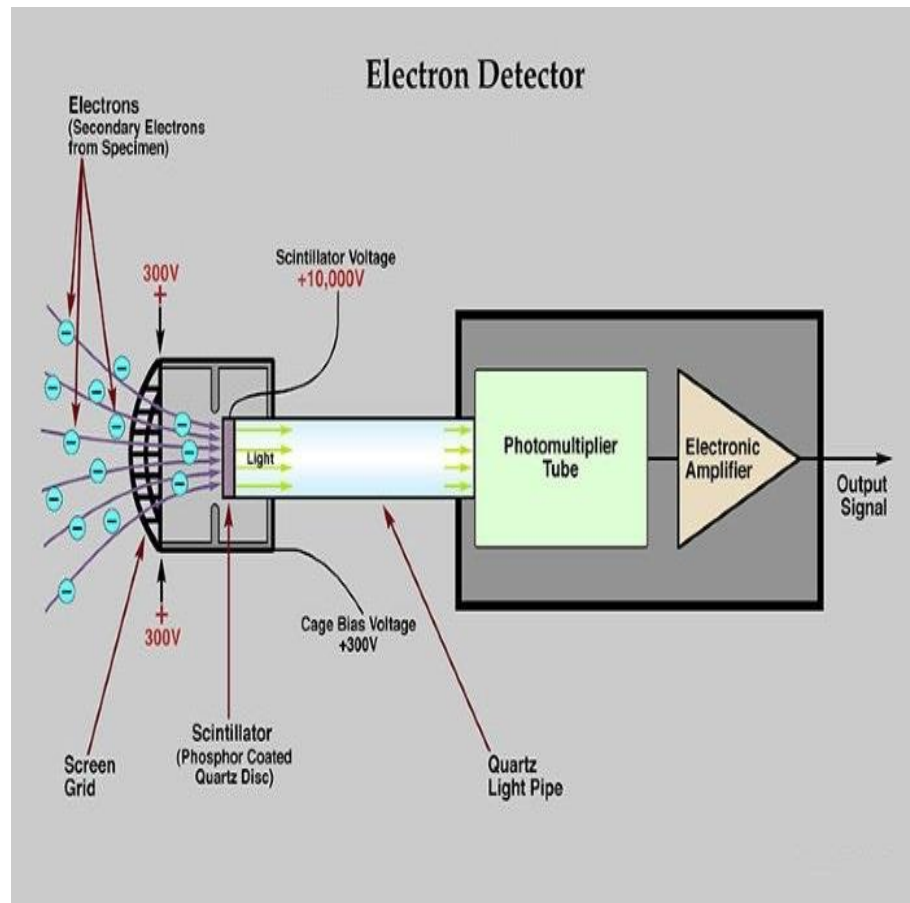
Για κάθε κατηγορία εκπομπών ηλεκτρονίων τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης διαθέτουν και τον ανάλογο αισθητήρα για να την εντοπίσουν. Στα ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης συναντώνται τρία είδη τέτοιων αισθητήρων οι όποιοι είναι οι εξής:



**Εικόνα (26)** Σχηματική απεικόνιση σάρωσης και ανίχνευσης εκπομπών από τους αισθητήρες της συσκευής.

[<https://www.gems-inclusions.com/inclusions-studies/analytical-methods/sem-eds-wds-analysis/>]

1. Ο αισθητήρας που εντοπίζει τα δευτερογενή ηλεκτρόνια (SEDetektor)



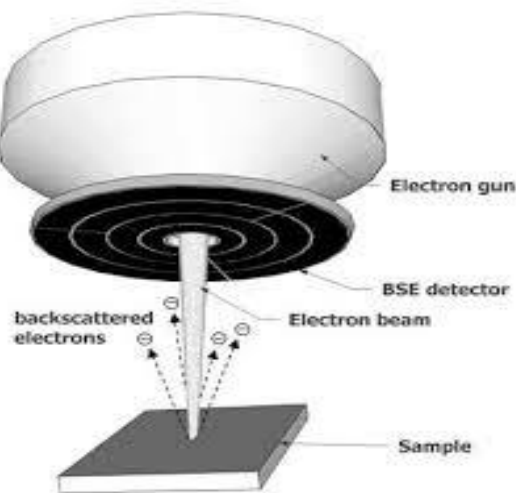
**Εικόνα (27)** Σχηματική απεικόνιση του Δευτερέων Ανιχνευτής Ηλεκτρονίων

[<http://www.scharfphoto.com/articles/detectors>]

Ο Δευτερεύων Ανιχνευτής Ηλεκτρονίων είναι το πρώτο λιθαράκι στον σχηματισμό της εικόνας του δείγματος μετά την πρόσπτωσης της ακτίνας ηλεκτρονίων σε αυτό. Αποτελείται από πέντε μέρη τα όποια είναι τα εξής :

- το πλέγμα οθόνης
- το σπινθηριστή
- το σωλήνα φώτος χαλαζία
- το φωτοπολλαπλασιαστή
- τον ηλεκτρονικό ενισχυτή

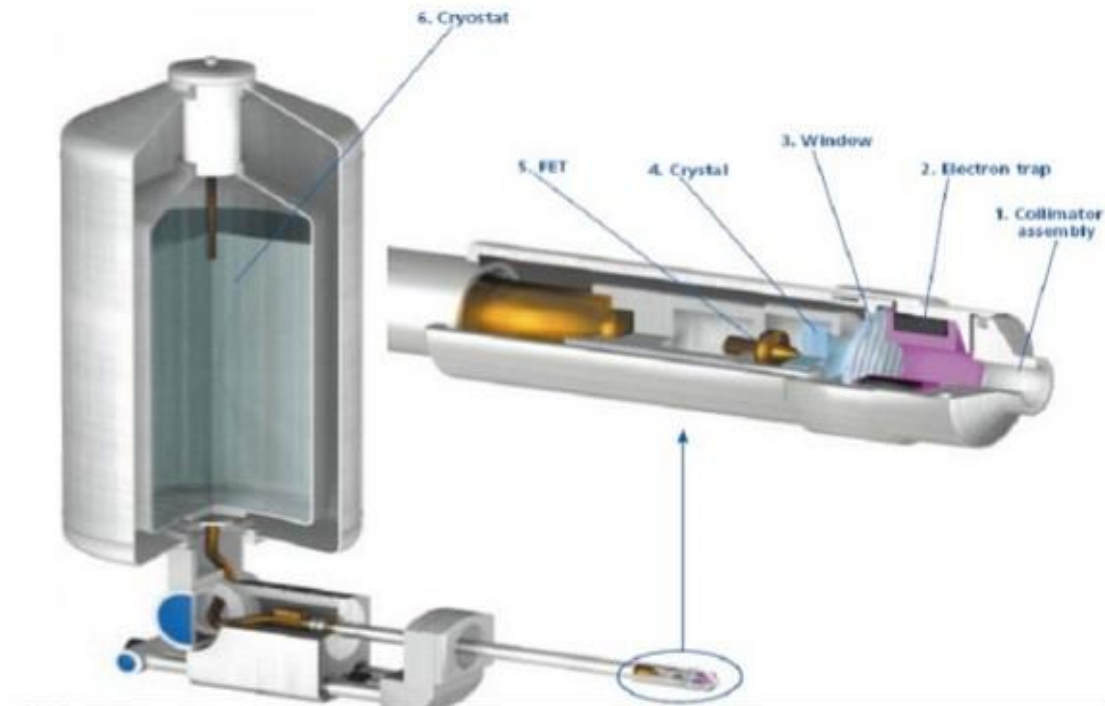
2. Ο αισθητήρας που εντοπίζει τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (BSEDetektor)



Εικόνα (28) Απεικόνιση του αισθητήρα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρονίων

[<https://www.digitalsurf.com/blog/using-a-four-quadrant-detector-in-3d-reconstruction/>]

3. Ο αισθητήρας που εντοπίζει τις ακτίνες  $\gamma$  (EDXdetektor)



**Εικόνα (29)** Σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα που εντοπίζει τις ακτίνες  $\gamma$

[<http://www.globalsino.com/EM/page4651.html>]

Η δέσμη σαρώνει ένα μικρό τετράγωνο της επιφάνειας του υλικού μεγέθους ελαχίστων χιλιοστών και στη συνέχεια το είδωλο της επιφάνειας του δοκιμίου προβάλλεται σε μια μεγάλη οθόνη και έτσι μπορούμε να επιτύχουμε τεράστια μεγέθυνση.

Η μεγέθυνση που μπορούμε να επιτύχουμε εξαρτάται από τη δυνατότητα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης να σαρώνει με επιτυχία μικρές περιοχές, δηλαδή όσο μικρότερη περιοχή μπορεί να σάρωση τόσο μεγαλύτερη μεγέθυνση μπορούμε να επιτύχουμε, τα σύγχρονα ηλεκτρονικά μικροσκοπία μπορούν να επιτύχουν ακόμα και μεγεθύνσεις της τάξης του ενός νανομέτρου. Μετά την πρόσπτωση της δέσμης στην επιφάνεια του δοκιμίου τα ηλεκτρόνια της δέσμης αλληλεπιδρούν με την επιφάνεια του δοκιμίου με αποτέλεσμα κάποια από αυτά να απορροφούνται και αλλά να ανακλώνται προς κάθε κατεύθυνση. Τα ανακλώμενα ηλεκτρόνια στη συνέχεια προσπίπτουν στους ανιχνευτές με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί η απεικόνιση του δοκιμίου.

#### 2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης σε σχέση με άλλες μεθόδους

Το βασικό πλεονέκτημα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης είναι πως μπορούμε να επιτύχουμε τεράστιες μεγεθύνσεις σε αντίθεση με τα μικροσκοπία φωτός.

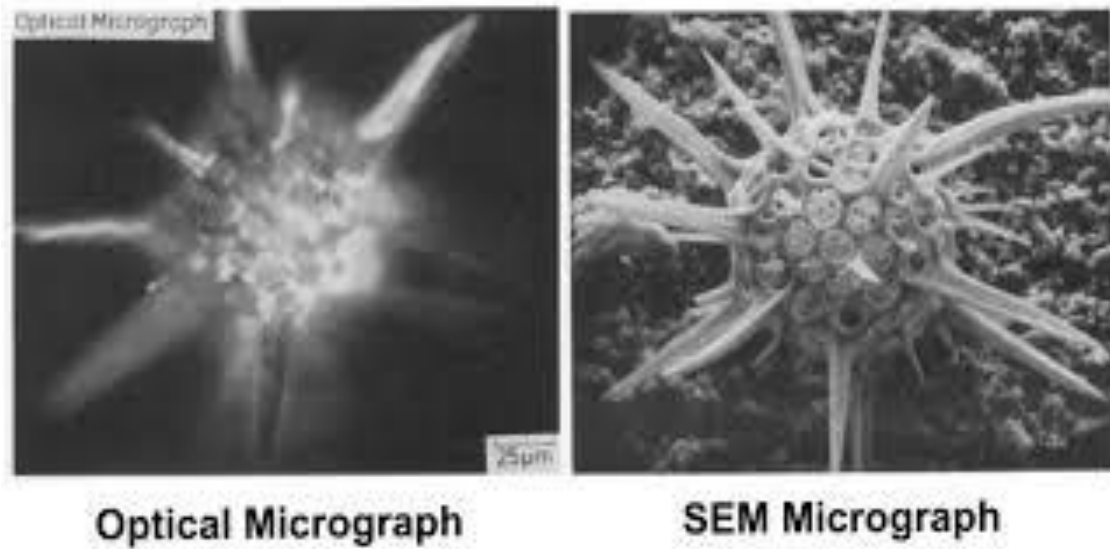
## Διακριτική ικανότητα (σύγκριση)



**Εικόνα (30)** Σχηματική απεικόνιση της διακριτικής ικανότητας κάθε συσκευής παρατήρησης

[<http://mikrokellari.blogspot.com/2013/10/blog-post.html>]

Επίσης με τα ηλεκτρονικά μικροσκοπία σάρωσης μπορούμε να ανιχνεύσουμε και εκπομπές οι οποίες δεν γίνετε να γίνουν ορατές με απλά μικροσκοπία όπως είναι οι ακτίνες  $\chi$ . Όπως κάθε μέθοδος εκτός από θετικά στοιχεία έχει και κάποια αρνητικά στοιχεία τα βασικότερα εκ των οποίων είναι πως το κόστος των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων σάρωσης είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό των κοινών μικροσκοπίων. Επίσης, δε γίνεται να εξετάσουμε δοκίμιο το οποίο δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος όπως είναι διάφορα μονωτικά υλικά και τέλος δεν είναι δυνατή η εξέταση υλικών τα οποία είναι σε υγρή κατάσταση ή δοκίμιων τα οποία θα μπορούσαν να υποστούν αποξήρανση ή να απελευθερώσουν αέρια. Τέλος, τα ηλεκτρονικά μικροσκοπία σάρωσης μειονεκτούν έναντι των κοινών μικροσκοπίων στο γένος πως απαιτούνται συνθήκες κενού για τη λειτουργία τους σε αντίθεση με τα κοινά μικροσκοπία.



**Εικόνα (31)** Σύγκριση της απεικόνισης με απλό μικροσκόπιο φωτός σε σχέση με την απεικόνιση με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης

[[http://ph277.edu.physics.uoc.gr/files/2017\\_VB\\_Electron\\_Microscopy\\_Lecture\\_11\\_Scanning\\_Electron\\_Microscopy.pdf](http://ph277.edu.physics.uoc.gr/files/2017_VB_Electron_Microscopy_Lecture_11_Scanning_Electron_Microscopy.pdf)]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

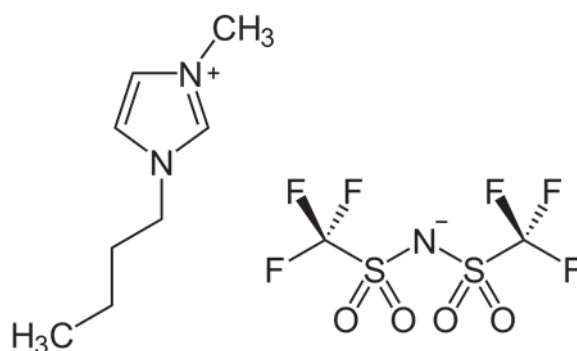
---

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

## Προετοιμασία δειγμάτων

Τα ιοντικά υγρά (καθαρότητας >98%) αγοράστηκαν από την εταιρεία IolitecGmbh. Ο καθαρισμός τους από ίχνη υγρασίας και αλογονούχων ενώσεων έγινε υπο κενό στους 60°C. Τα ιοντικά υγρά που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη ήταν τα C<sub>2</sub>C<sub>1</sub>ImNTf<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>C<sub>1</sub>ImNTf<sub>2</sub> και C<sub>8</sub>C<sub>1</sub>ImNTf<sub>2</sub> των οποίων χημική δομή παρουσιάζεται στο σχήμα 36.



**Εικόνα (34)** Η δομή του C<sub>4</sub>C<sub>1</sub>ImNTf<sub>2</sub>

Οι μεταλλικοί δίσκοι που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις του συντελεστή τριβής ήταν από κράμα αλουμινίου και χαλκού (φωσφορούχος ορείχαλκος).

## Τριβή λόγω ολίσθησης

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς σε τριβή λόγω ολίσθησης παρουσία λιπαντικού χρησιμοποιήθηκε τριβόμετρο τύπου ball-on-disc της εταιρείας CSEM. Η συσκευή αυτή έχει τη δυνατότητα επιβολής φορτίου από 1 έως 10N και περιστροφής του δίσκου από 1 έως 600 rpm. Αποτελείται από μία μπίλια (ανοξ. χάλυβας ή ρουμπινιού) στην οποία επιβάλλεται συγκεκριμένο σταθερό φορτίο και η οποία

ολισθαίνει διαγράφοντας κυκλική τροχιά πάνω σε δίσκο (*disk*), στον οποίο βρίσκεται το υπό εξέταση δοκίμιο και κινείται με καθορισμένη γραμμική ταχύτητα .



**Εικόνα (32)** Τριβόμετρο CSEM.



**Εικόνα (33)** Τριβόμετρο CSEM.

Ο προσδιορισμός του συντελεστή τριβής ολίσθησης (*friction coefficient, cof*) πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της συσκευής ball-on-disc CSEM. Οι συνθήκες εκτέλεσης των πειραματικών μετρήσεων διατηρήθηκαν σταθερές για όλα τα υπό εξέταση δοκίμια.

### **Πειραματικές συνθήκες παρασκευής, στις οποίες πραγματοποιήθηκε η μελέτη της αντίστασης σε τριβή λόγω ολίσθησης των αποθεμάτων**

<b>Τριβολογικές συνθήκες (Τριβή λόγω Ολίσθησης)</b>	
<b>Φορτίο</b>	<b>10N</b>
<b>Σφαίρα ακίδας</b>	<b>Stainless steel -100Cr6 (d = 6mm)</b>
<b>Κύκλοι ολίσθησης</b>	<b>10000 Laps</b>
<b>Γραμμική Ταχύτητα</b>	<b>0.1 m/s</b>
<b>Συνθήκες θερμοκρασίας</b>	<b>25 °C, και υγρασίας (42- 50%)</b>
<b>Λιπαντικό (ml)</b>	<b>Ιονικό Υγρό -1ml</b>

### **Προφίλομέτρηση Επιφάνειας Δοκιμίων**

Προφίλομέτρηση της επιφάνειας των δειγμάτων με χρήση ψηφιακού προφίλομέτρου τύπου ακίδας Hommel Werke T1000.

### **Μικροσκληρότητα μεταλλικής επιφάνειας**

Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Vickers, η οποία στηρίζεται στη δημιουργία τετραγωνικού αποτυπώματος πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου, με τη βοήθεια ενός «εισαγωγέα» από διαμάντι, σχήματος πυραμίδας με γωνία κορυφής  $\alpha=136^\circ$ . Η

χρησιμοποιούμενη διάταξη προσδιορισμού σκληρότητας των αποθεμάτων αποτελείται από ένα μικροσκληρόμετρο προσαρτημένο σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, το οποίο διαθέτει προσοφθάλμιο φακό μέτρησης με βαθμολογημένο τύμπανο, για τη μέτρηση της διαγωνίου του τετραγωνικού αποτυπώματος του διαμαντιού στην επιφάνεια των αποθεμάτων.



**Εικόνα(35) WilsonMicrohardnessTester**

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας των αποθεμάτων πραγματοποιήθηκε στο WilsonMicrohardnessTester υπό *φορτίο 25 g για 15sec* μετά από πειραματικές εκτιμήσεις.

	<b>Aluminium</b>	<b>Brass</b>
<b>Roughness Ra (μm)</b>	0.19±0.04	0.33±0.03
<b>Micro-hardness (HV)</b>	132.7±12.18	174.9±12.05

### **Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης**

Οι μετρήσεις της μορφολογίας της επιφάνειας του αλουμινίου και του ορείχαλκου έγιναν με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης ZeissSupra 35VP διακριτικής ικανότητας 1,7nm του εργαστηρίου μικροσκοπίας και περιθλασιομετρίας ακτίνων X του ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ. Το μικροσκόπιο αποτελείται από πηγή εκπομπής πεδίου με επιταχυνόμενη τάση μέχρι τα 30kV. Οι μικροφωτογραφίες των επιφανειών έγιναν με επιταχυνόμενη τάση ηλεκτρονίων στα 10kV μέσω ενός διαφράγματος 30μm και χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής δευτερογενών ηλεκτρονίων που είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό μέρος της οπτικής κολόνας του μικροσκοπίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

---

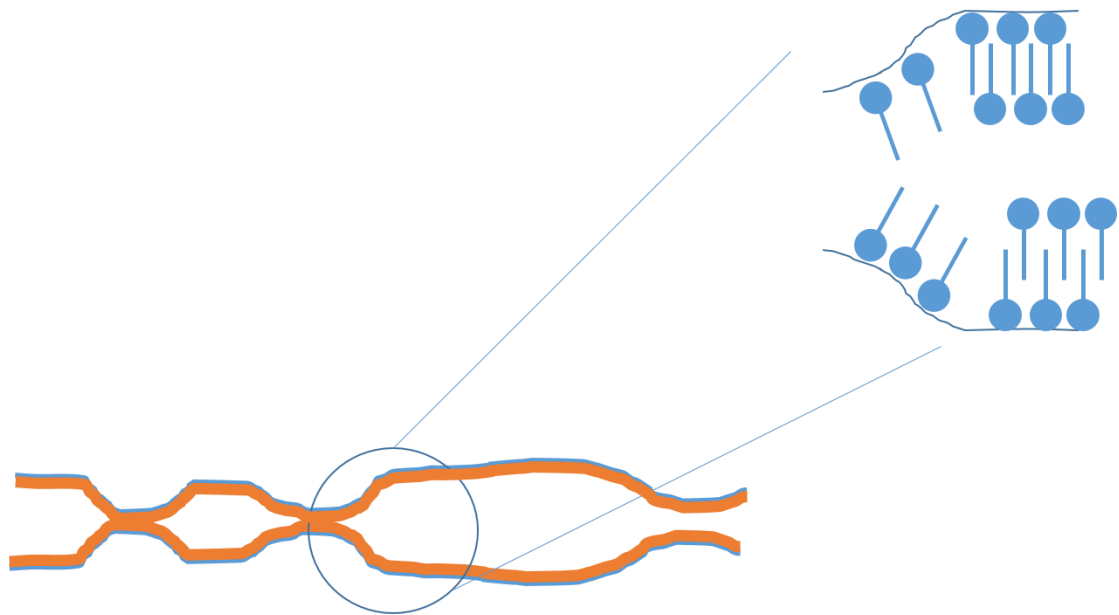
## ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

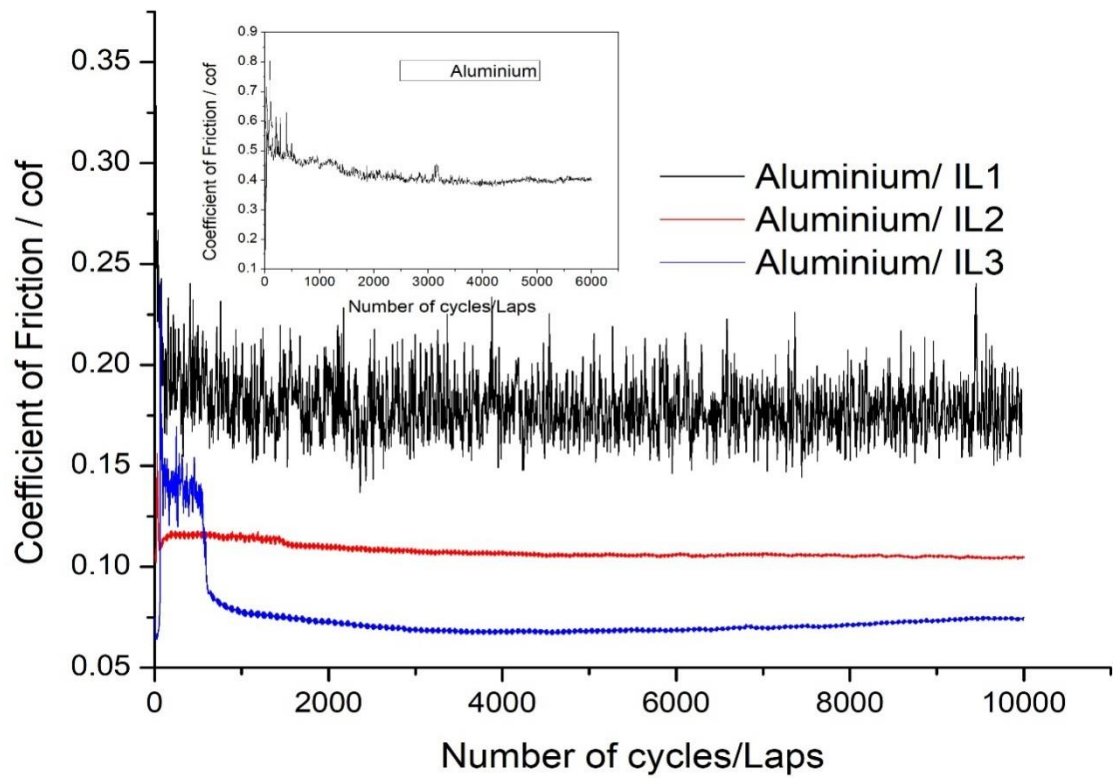
#### 4.1.1 Ιδιότητες λίπανσης μεταξύ χάλυβα- αλουμινίου

Στην εικόνα 37 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον συντελεστή τριβής μεταξύ χάλυβα και αλουμινίου τόσο παρουσία των ιοντικών υγρών όσο και χωρίς. Με τη χρήση του ιοντικού υγρού 1 ( $C_2C_1ImNTf_2$ ) παρατηρείται μια σημαντική μείωση του συντελεστή τριβής μεταξύ των δύο επιφανειών σε σχέση με την ξηρή κατάσταση. Με αύξηση της πλευρικής αλυσίδας του ιμιδαζολικού δακτυλίου (IL1-IL2-IL3) ο συντελεστής τριβής μειώνεται περαιτέρω. Παραπλήσια συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί κατά τη χρήση παραφινικών λιπαντικών καθώς και ιοντικών υγρών κατά τη μελέτη των συντελεστών τριβής γυαλιού-χάλυβα και χάλυβα-χάλυβα αντίστοιχα. Μια πιθανή εξήγηση για αυτή τη μείωση του συντελεστή τριβής είναι η δημιουργία ενός οριακού υμενίου (boundaryfilm) από το ιοντικό υγρό. Κατά τη δημιουργία αυτού του υμενίου οι πλευρικές αλυσίδες λόγω των αλληλεπιδράσεων τύπου VanderWaals μεταξύ τους, προσανατολίζονται κάθετα στις επιφάνειες δημιουργώντας ένα οριακό υμένιο (θεωρία Bowden-Tabor, εικόνα 36) τέτοιο ώστε να βελτιώσει σημαντικά τις τριβολογικές ιδιότητες όπως φαίνονται στην υδροδυναμική περιοχή της εικόνας 37. Ένας πρόσθετο λόγος της καλύτερης συμπεριφοράς του IL3 είναι και η αύξηση του ιξώδους σε σχέση με το IL1.



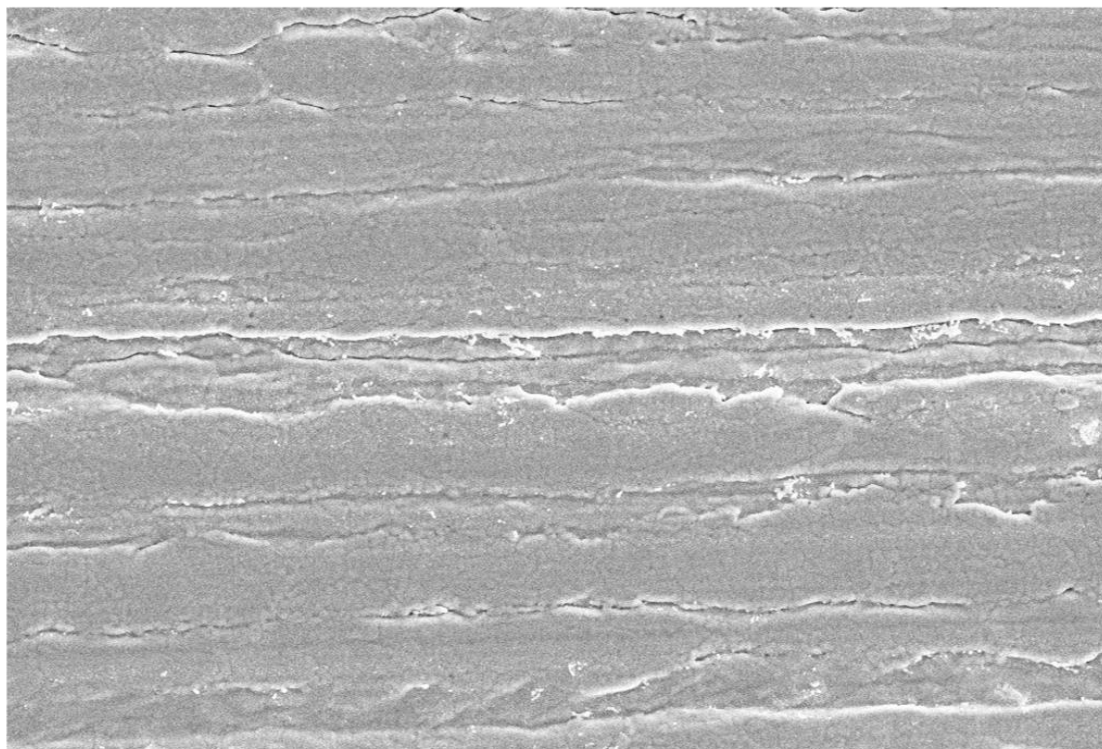


**Εικόνα(36)** Οριακό υμένιο κατά Bowden-Tabor

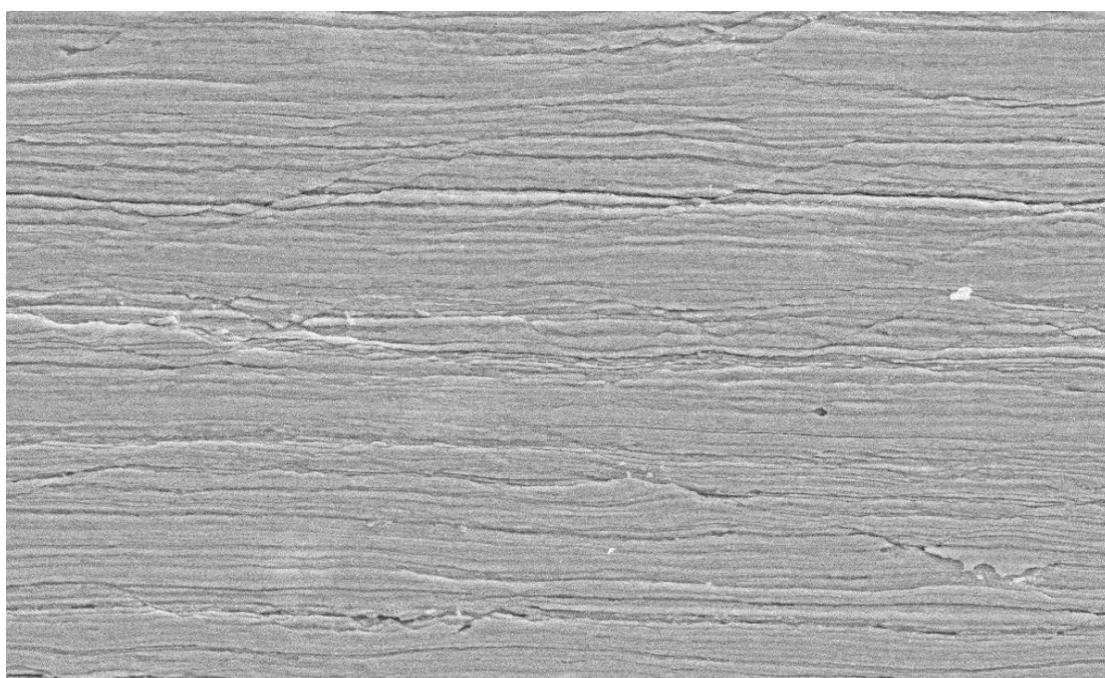


**Εικόνα (37)** Καμπύλες Stribeck για το σύστημα Χάλυβας-Αλουμίνιο παρουσία των τριών ιοντικών υγρών.

Στις εικόνες 38 και 39 απεικονίζονται οι επιφάνειες τριβής για τα IL1 και IL3. Φαίνεται ότι στην περίπτωση του IL3 η διάβρωση της επιφάνειας είναι μικρότερη.



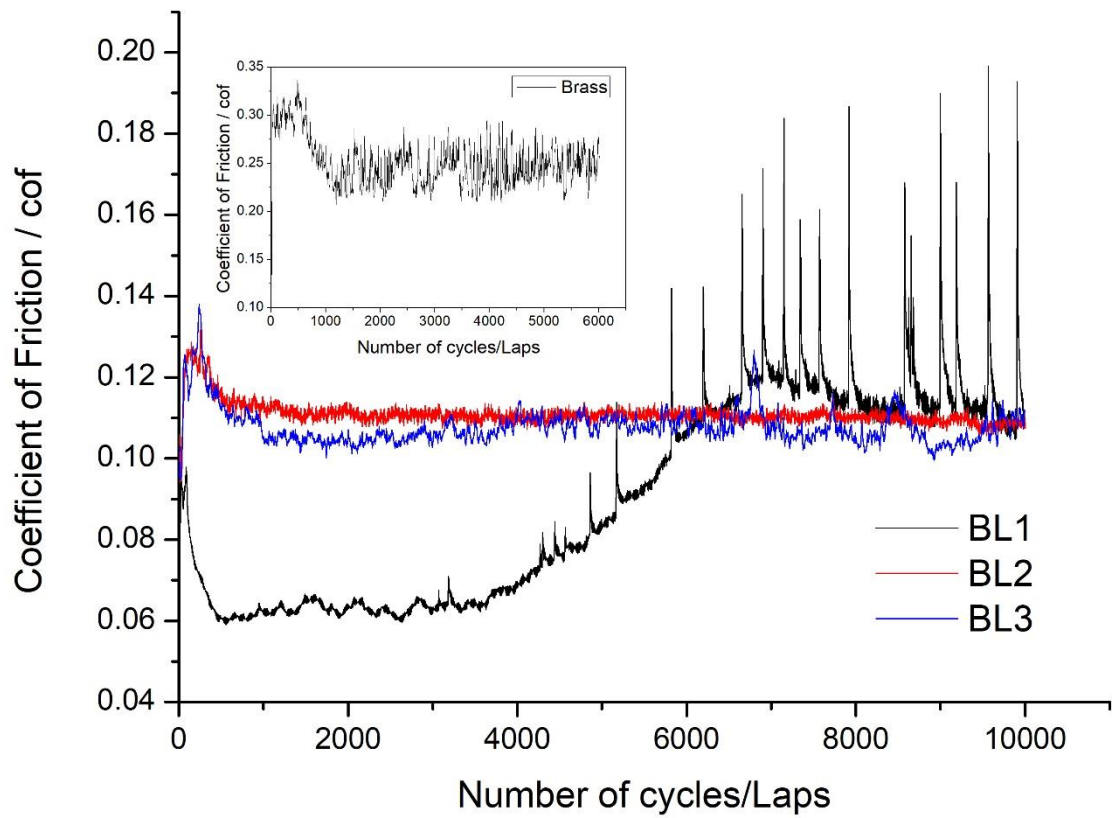
**Εικόνα (38)** Επιφάνεια τριβής IL1-A1



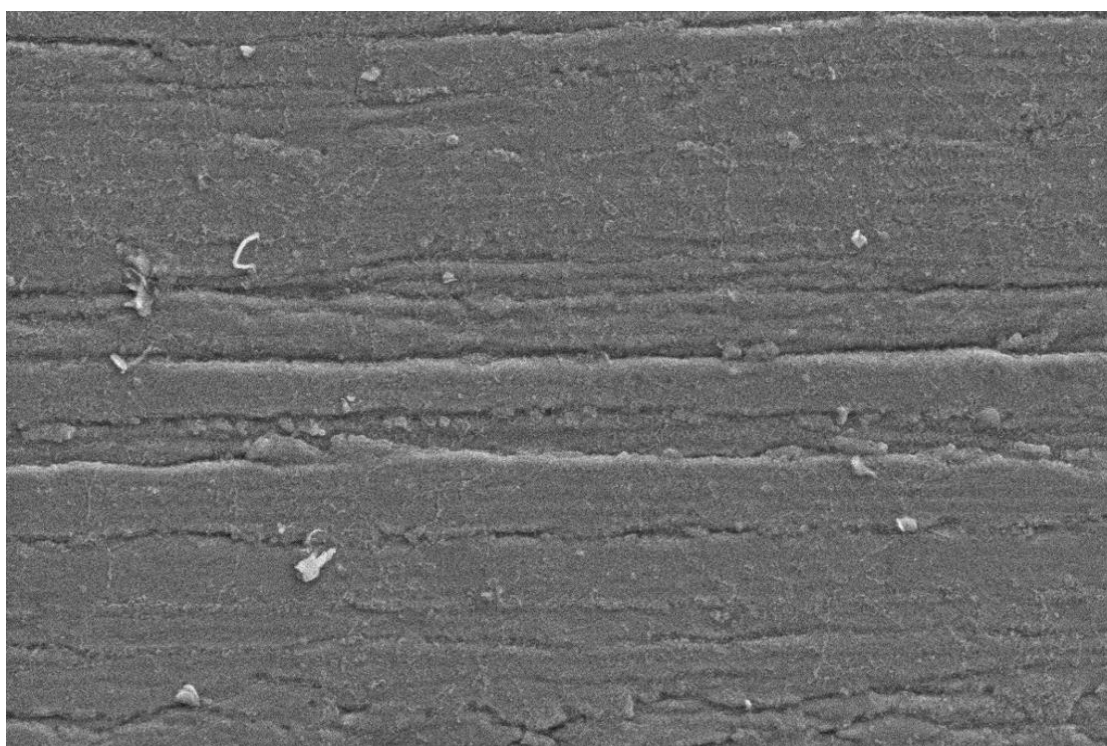
**Εικόνα (39)** Επιφάνεια τριβής IL3-A1

#### 4.1.2 Σύστημα χάλυβα- ορείχαλκου

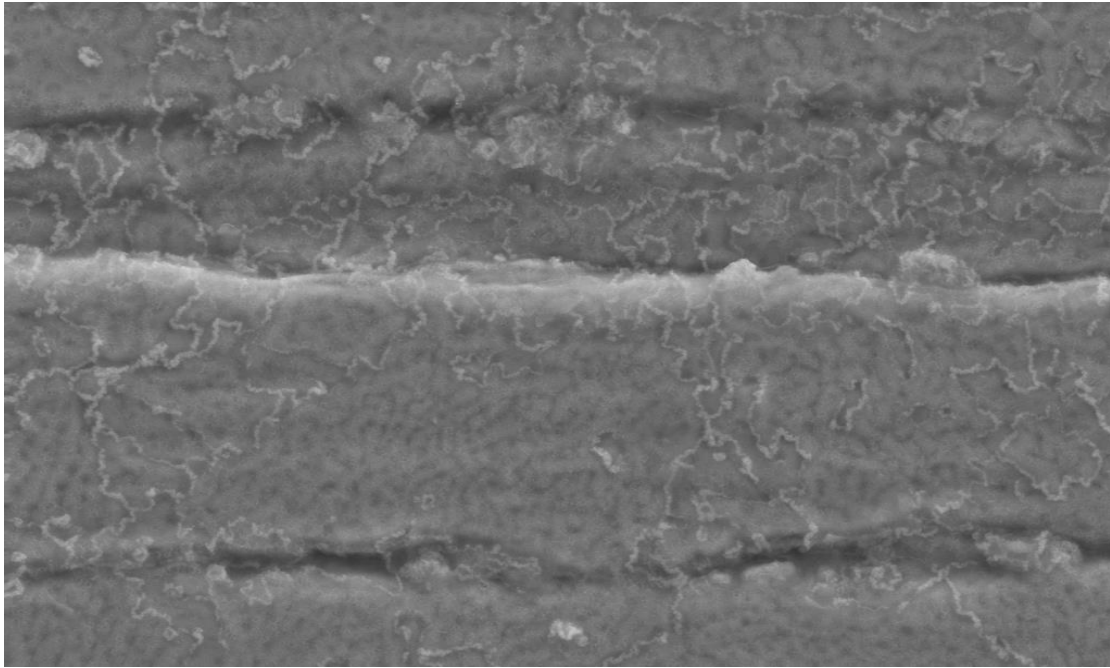
Στο σχήμα 43 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για τον συντελεστή τριβής του συστήματος χάλυβα-ορείχαλκου. Η συμπεριφορά του λιπαντικού μέσου είναι διαφορετική σε σημαντικό βαθμό σε σχέση με την περίπτωση του αλουμινίου. Εδώ το IL1 παρουσιάζει το χαμηλότερο συντελεστή τριβής αρχικά αλλά μετά τους 4000 κύκλους η τιμή αυτή αρχίζει να αυξάνεται. Για τα άλλα δύο ιοντικά υγρά οι τιμές είναι παραπλήσιες και μειώνονται με αύξηση της πλευρικής αλυσίδας του ιμιδαζολίου αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό από ότι παρατηρήθηκε στην περίπτωση του αλουμινίου. Η συμπεριφορά αυτή δεν είναι συνήθης και υποδεικνύει πιθανή αντίδραση με το ορειχάλκινο υπόστρωμα για το IL1. Αυτό υποστηρίζεται και από τις μικροφωτογραφίες SEM στις εικόνες 41 και 42 όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι έχει υπάρξει χημική αντίδραση μεταξύ του ιοντικού υγρού και της ορειχάλκινης επιφάνειας. Η χημική προσβολή αποδείχθηκε από τις εικόνες SEM που ελήφθησαν και παρουσιάζονται στο σχήμα 43



**Εικόνα (43)** Καμπύλες Stribeck για το σύστημα Χάλυβας-ορείχαλκος παρουσία των τριών ιοντικών υγρών.



**Εικόνα (41)** Επιφάνεια τριβής Π1-ορείχαλκου



**Εικόνα (42)** Μεγέθυνση τμήματος της επιφάνειας που απεικονίζεται στην εικόνα 41

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] R. D. Rogers, K. R. Seddon. USA : American Chemical Society, 2002. σ. 818 ed.
- [2] Weng, L.J. Liu, X.Q. Liang, Y.M. Xue, Q.J. Effect of tetraalkylphosphonium based ionic liquids as lubricants on the tribological performance of a steel-on-steel system. *Tribol. Lett.* 2007,26, 11–17.
- [3] C. Graenacher, Cellulose solutions, US Pat., 1943176, 1934.
- [4] Martyn J. Earle, Kenneth R. Seddon, “Ionic liquids. Green solvents for the future” , *Pure Appl. Chem*, vol 72, No 7, 2002, 1391, 1392
- [5] Bermúdez, M.D. Jiménez, A.E.; Sanes, J. Carrión, F.J. Ionic liquids as advanced lubricant fluids. *Molecules* 2009, 14, 2888–2908.
- [6] Ye, C. Liu, W. Chen, Y. Yu, L. Room-Temperature ionic liquids: A novel versatile lubricant. *Chem. Commun.* 2001, 21, 2244–2245.
- [7] Jiménez, A.E. Bermúdez, M.D. Ionic liquids as lubricants of titanium-steel contact. Part 3. Ti6Al4V lubricated with imidazolium ionic liquids with different alkyl chain lengths. *Tribol. Lett.* 2010, 40, 237–246.
- [8] Qu, J.; Bansal, D.G. Yu, B. Howe, J.Y. Luo, H. Dai, S. Li, H. Blau, P.J. Bunting, B.G. Mordukhovich, G. Smolenski, D.J. Antiwear performance and mechanism of an oil-miscible ionic liquid as a lubricant additive. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2012, 4, 997–1002.
- [9] Qu, J. Chi, M. Meyer, H.M., III; Blau, P.J. Dai, S. Luo, H. Nanostructure and composition of tribo-boundary films formed in ionic liquid lubrication. *Tribol. Lett.* 2011, 43, 205–211.
- [10] von Ardenne, Manfred (1938). «Das Elektronen-Rastermikroskop. Theoretische Grundlagen» . *Zeitschrift für Physik* 109 (9–10): 553–572

- [11] von Ardenne, Manfred (1938). «Das Elektronen-Rastermikroskop. Praktische Ausführung». *Zeitschrift für technische Physik* 19: 407–416.
- [12] Zworykin VA, Hillier J, Snyder RL (1942) A scanning electron microscope. *ASTM Bull* 117, 15-2
- [13] McMullan, D. (1953) An improved scanning electron microscope for opaque specimens. *Proc Inst Electr Engrs* 100, Part II, 245-259
- [14] Oatley CW, Nixon WC, Pease RFW (1965) Scanning electron microscopy. *Adv Electronics Electron Phys* 21, 181-247.
- [15] Wells OC (1957) The construction of a scanning electron microscope and its application to the study of fibres. PhD Dissertation, Cambridge University.
- [16] McMullan, D. (1995) Scanning electron microscopy 1928–1965. *Scanning* 17, 175–185.
- [17] Canter, N. Evaluating ionic liquids as potential lubricants. *Tribol. Lubr. Technol.* 2005, 61, 15–17.
- [18] Minami, I.; Kamimuram, H.; Mori, S. Thermo-Oxidative stability of ionic liquids as lubricating fluids. *J. Synth. Lubr.* 2007, 24, 135–147.
- [19] Qu, J.; Blau, P.J.; Dai, S.; Luo, H.; Meyer, H.M., III; Truhan, J.J. Tribological characteristics of aluminum alloys sliding against steel lubricated by ammonium and imidazolium ionic liquids. *Wear* 2009, 267, 1226–123.
- [20] Wilkes, JS. Leviski, JA; Wilson, PA; Hussey, CL τήξεις γλωροαλουμινικού διαλλυμιδαζολίου: μια νέα κατηγορία ιοντικών υγρών σε θερμοκρασία δωματίου για ηλεκτροχημεία, φασματοσκοπία και σύνθεση. *Inorg. Chem.* 1982 , 21 , 1263-1264.
- [21] Wilkes, JS. Zaworotko, MJ Αεριζόμενα και σταθερά σε νερό ιοντικά υγρά με βάση το 1-αιθυλ-3-μεθυλιμιδαζολίου. *Chem. Commun.* 1992 , 965-967.
- [22] Ye, CF; Liu, WM. Chen, YX; Yu, LG ιονικά υγρά θερμοκρασίας δωματίου: ένα νέο ευπροσάρμοστο λιπαντικό. *Chem. Commun.* 2001 , 2244-2245.



[23] Liu, WM. Ye, CF; Γκονγκ, QY. Wang, HZ; Wang, P. Τριβολογική απόδοση ιονικών υγρών σε θερμοκρασία δωματίου ως λιπαντικών. Tribol. Κάτοικος της Λατβίας. 2002 , 13 , 81-85.

[24] Liu, W .; Ye, C .; Chen, Y .; Ou, Z. ' Sun, DC Τριβολογική συμπεριφορά κεραμικών πλακών Sialon που ολισθαίνουν σε χάλυβα που λιπαίνεται από έλαια που περιέχουν φθόριο. Tribol. Int. 2002 , 35 , 503-509.

[25] Ye, CF; Liu, WM. Chen, YX; Ou, ZW Τριβωτική συμπεριφορά των κεραμικών Dy-sialon που ολισθαίνουν έναντι του Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> με λίπανση των ελαίων που περιέχουν φθόριο. Wear 2002 , 253 , 579-584.

[26] Minami, I. Ιοντικά υγρά στην τριβολογία. Molecules 2009 , 14 , 2286-2305.

[27] Mu, ZG. Wang, XX; Zhang, SX. Liang, YM; Bao, M .; Liu, WM Διερεύνηση της τριβολογικής συμπεριφοράς του κράματος Al-Si έναντι του χάλυβα που λιπαίνεται με ιονικά υγρά του τετραθοροβορικού 1-δαιθυλοφωσφονυλο-η-προπυλο-3-αλκυλιμιδαζολίου. J. Tribol.-Trans. ASME 2008 , 130 . Τέχνη. Αρ. 034501.

[28] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9B%CE%B9%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C>

[29] Wilkes J. S.; Zaworotko M. J. (1992). "Air and water stable 1-ethyl-3-methylimidazolium based ionic liquids". *Chemical Communications* (13): 965–967.

[30]

[http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/7040/doukaa\\_ionic.pdf?sequence=3](http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/7040/doukaa_ionic.pdf?sequence=3)

[31] <https://www.tribonet.org/tribometer/>

