



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ  
ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ (DIE SINKING  
EDM) ΜΕΣΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ &  
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΛΑΖΑΡΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ**

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2018**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ  
ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ (DIE SINKING  
EDM) ΜΕΣΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ &  
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΛΑΖΑΡΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2018**

*Αφιερωμένη στη μνήμη του πατέρα μου*

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από το Εργαστήριο Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών». Στόχος της είναι η **«ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ (DIE SINKING EDM) ΜΕΣΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ»**. Η κατεργασία EDM αποτελεί μια από τις παλαιότερες μη συμβατικές θερμοηλεκτρικές κατεργασίες, με περισσότερα από 70 χρόνια εφαρμογής. Η βασική της αρχή είναι ότι εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται βυθισμένα σε διηλεκτρικό μέσο, και υπό κατάλληλες συνθήκες (διαφορά δυναμικού, απόσταση ηλεκτροδίων, παρουσία διηλεκτρικού μέσου) εκδηλώνεται σπινθήρας, δημιουργώντας μια στήλη πλάσματος. Οι εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται τοπικά οδηγούν σε τήξη ή/και εξάχνωση και απομάκρυνση του υλικού από τα ηλεκτρόδια, με τον κάθε σπινθήρα να διαρκεί ένα προκαθορισμένο χρόνο (από ορισμένα μsec έως κάποια msec). Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας εκδηλώνονται εκατομμύρια ηλεκτρικοί παλμοί που έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση υλικού από το τεμάχιο, δίχως την επιβολή κάποιας δύναμης όπως συμβαίνει στις κλασικές κατεργασίες αποβολής υλικού. Αν και η αρχή λειτουργίας είναι σχετικά απλή, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα καθιστώντας την μοντελοποίηση εξαιρετικά δύσκολη. Στην παρούσα εργασία θα γίνει προσπάθεια ανάπτυξης ενός αποτελεσματικού θερμικού μοντέλου μελέτης της κατεργασίας, και τα αποτελέσματά του θα αξιολογηθούν με βάση τα ανάλογα διεξαχθέντα πειράματα.

Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου, κ. Δημήτριο Μανωλάκο καθηγητή στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και κ. Άγγελο Μαρκόπουλο επίκουρο καθηγητή στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την εμπιστοσύνη και την αμέριστη στήριξη τους, η καθοδήγηση των οποίων υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επίσης εξαιρετικά χρήσιμη ήταν η βοήθεια του εργαστηρίου της κας Παναγιώτας Βασιλείου, καθηγήτρια στη σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η συνεισφορά τέλος του τεχνικού προσωπικού ήταν ιδιαίτερα σημαντική κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στην οικογένεια και τους φίλους μου, για την στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης είναι μια από τις παλαιότερες μη συμβατικές κατεργασίες, με βασικό της πλεονέκτημα την δυνατότητα κατεργασίας αγώγιμων υλικών ανεξάρτητα σκληρότητας, αντοχής ή άλλης μηχανικής ιδιότητας. Ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα για κατασκευή τεμαχίων πολύπλοκης γεωμετρίας, με μεγάλη διαστασιολογική ακρίβεια, και εξαιρετική ποιότητα επιφανείας. Η αποβολή υλικού οφείλεται σε διαδοχικούς σπινθήρες που εκδηλώνονται ανάμεσα σε ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται βυθισμένα σε διηλεκτρικό μέσο.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί αρχικά μια θεωρητική προσέγγιση της κατεργασίας, με αναφορά στα βασικά στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης, στις παραμέτρους που επηρεάζουν ένα τέτοιο σύστημα, και στα χαρακτηριστικά που ορίζουν την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα του. Στη συνέχεια, και έπειτα από την απαραίτητη βιβλιογραφική ανασκόπηση, θα γίνει μοντελοποίηση της κατεργασίας και οι ανάλογες προσομοιώσεις, με τα αποτελέσματα αυτών να συγκρίνονται με δεδομένα από πειράματα που έχουν προηγηθεί. Αναπτύσσεται θερμικό μοντέλο μεταβλητής γεωμετρίας και κινούμενου πλέγματος, και επιλύεται με χρήση υπολογιστικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων. **Βασικός στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου με την απαραίτητη ακρίβεια ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περαιτέρω κατανόηση και βελτιστοποίηση της κατεργασίας.**

## Abstract

Electrical Discharge Machining (EDM) is one of the earliest and most widely used non - conventional machining processes, with basic and major advantage the capability of machining any electrically conductive material, regardless of the material's hardness, strength and other mechanical properties. Additionally, EDM is capable of machining parts and components with complex geometries, with high level of maintaining dimensional accuracy and surface finish. EDM finds extensively usage in many important applications as die and mold, aerospace, automotive, and biomedical industries.

First chapters will cover some theoretical aspects of the die sinking EDM process with an overview in the working principles in basic components of a die – sinking EDM system, and a description of the operating parameters and machining characteristics. The next step after the necessary bibliographical review is the process modeling with the development of a thermal model using changing workpiece geometry and moving mesh. Experimental results will be compared with those from simulations run. **The main aim is the development of a realistic and accurate model for further understanding and optimization of the process.**

## Δομή Εργασίας

**Εισαγωγή:** Σύντομη και γενική αναφορά στις μη συμβατικές κατεργασίες, οι οποίες αποτελούν αναπτυσσόμενο και καίριο πεδίο στον τομέα των κατεργασιών.

**1. Ηλεκτροδιάβρωση (EDM):** Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια πρώτη «γνωριμία» με τη μη συμβατική κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης. Αναφέρονται οι βασικές αρχές – μηχανισμοί που διέπουν την κατεργασία και τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα «sinking EDM» (τεμάχιο, ηλεκτρόδιο, διηλεκτρικό μέσο, εργαλειομηχανή). Περιγράφονται οι ιδιαιτερότητες και οι απαιτήσεις του κάθε στοιχείου μαζί με τις υπάρχουσες τεχνολογικές επιλογές, και τα όποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτές έχουν.

**2. Παράμετροι Ελέγχου και Απόδοσης της Κατεργασίας:** Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο ορίζονται οι παράμετροι ελέγχου της κατεργασίας (διαφορά δυναμικού, ένταση ρεύματος, χρόνος και χαρακτηριστικά παλμού, διάκενο) και πώς αυτοί συνδέονται με την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα της (ρυθμός αποβολής υλικού (MRR), λόγος φθοράς εργαλείου (TWR), τραχύτητα επιφανείας). Είναι εξαιρετικά σημαντική η κατανόηση και μελέτη του πώς επηρεάζει η κάθε παράμετρος το τελικό αποτέλεσμα προκειμένου να είναι εφικτός ο αποδοτικός και αποτελεσματικός σχεδιασμός – προγραμματισμός της κατεργασίας.

**3. Ιονισμός και Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Υλικού:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια πιο θεωρητική προσέγγιση των μηχανισμών, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Περιγράφονται οι φυσικές διαδικασίες (ιονισμός, ανάπτυξη στήλης πλάσματος), που οδηγούν στην τελική απομάκρυνση του υλικού, και γίνεται προσπάθεια να δοθεί ένα θεωρητικό γνωστικό υπόβαθρό, το οποίο θα συνδέσει την πλήρως θεωρητική μελέτη των φαινομένων με αυτή της πιο «εφαρμοσμένης – πρακτικής» στα πλαίσια της κατεργασίας EDM.

**4. State of the Art:** Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση και ορίζεται με βάση την μέχρι τώρα έρευνα και τα αποτελέσματα της, το γενικό πλαίσιο, στο οποίο θα «κινηθεί» και η συγκεκριμένη ερευνητική προσπάθεια. Μέσα από την μελέτη αυτή εντοπίζονται δυσκολίες και «λεπτά σημεία», τα οποία χρήζουν προσοχής, ενώ ταυτόχρονα αξιοποιούνται συμπεράσματα και αποτελέσματα των ερευνητών που έχουν προηγηθεί. Διαπιστώνεται τέλος μια πληθώρα προσεγγίσεων με έντονη διακύμανση αποτελεσμάτων, ανάλογα με τις παραδοχές – απλοποιήσεις, που έχουν γίνει στην πειραματική και υπολογιστική μελέτη της κατεργασίας.

**5. Πειραματική Διαδικασία:** Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, που ακολουθήθηκε και παρατίθενται τα αποτελέσματα, που προέκυψαν. Επίσης, με βάση ορισμένα πειραματικά δεδομένα γίνονται κάποιοι βασικοί υπολογισμοί, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενο στάδιο της μελέτης – μοντελοποίησης. Τέλος, αξιολογούνται τα αποτελέσματα με βάση στοιχεία – δεδομένα της βιβλιογραφίας.

**6. Μοντελοποίηση και επίλυση με χρήση λογισμικού FEM:** Στο κεφάλαιο αυτό ορίζεται – περιγράφεται το θεωρητικό μοντέλο βάσει, του οποίου θα μελετηθεί η κατεργασία. Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός «μοντέλου μοναδιαίου σπινθήρα», με χρήση μεταβλητής γεωμετρίας τεμαχίου και κινούμενου πλέγματος προκειμένου να γίνει πρόβλεψη βασικών παραμέτρων της κατεργασίας. Αναφέρονται οι απαραίτητες απλοποιήσεις – προσεγγίσεις, που έχουν γίνει, ορίζονται οι οριακές συνθήκες και περιγράφεται η διαδικασία διακριτοποίησης, που ακολουθήθηκε.

**7. Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Αξιολόγηση τους:** Στην ενότητα αυτή γίνεται η παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με βάση το προαναφερθέν υπολογιστικό μοντέλο FEM. Τα δεδομένα, που χρησιμοποιούνται ως inputs είναι οι παράμετροι κατεργασίας των πειραμάτων, που διεξήχθησαν, αλλά και βιβλιογραφικά δεδομένα όπου είναι απαραίτητο. Γίνονται δύο «σειρές» προσομοιώσεων σύμφωνα με τις διαφορετικές προσεγγίσεις, που συναντώνται στη βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα αξιολογούνται – συγκρίνονται με αυτά των πειραμάτων.

**8. Μεταλλογραφία – Ποιότητα επιφανείας:** Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά της κατεργασμένης επιφάνειας (τοπογραφία, μικροδομή υποστρώματος, μικρο ρωγμές), στην ανάπτυξη μίας «ζώνης» από επαναστερεοποιημένο υλικό (WL) και μιας θερμικά επηρεασμένης περιοχής (HAZ). Αρχικά υπάρχει η απαιτούμενη βιβλιογραφική αναφορά, στη συνέχεια η αξιολόγηση και σχολιασμός των παρατηρήσεων από το μικροσκόπιο, ενώ τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από το υπολογιστικό μοντέλο FEM.

**9. Συμπεράσματα:** Μια σύντομη ανακεφαλαίωση της εργασίας και των συμπερασμάτων, που μπορούν να εξαχθούν από αυτή.



## Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Δομή Εργασίας .....	7
Ονοματολογία .....	11
Εισαγωγή .....	13
1. Ηλεκτροδιάβρωση (EDM).....	15
1.1 Βασικές Αρχές Ηλεκτροδιάβρωσης.....	16
1.2 Βασικά στοιχεία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης - βύθισης.....	17
1.2.1 Τεμάχιο (workpiece).....	18
1.2.2 Ηλεκτρόδιο (tool electrode).....	18
1.2.3 Διηλεκτρικό Μέσο (Dielectric fluid) .....	21
1.2.4 Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X – Y (X – Y positioning / machine bed) .....	23
1.2.5 Δοχείο Εργασίας (Work Tank) .....	23
1.2.6 Σερβομηχανισμός ελέγχου (Servo Control System).....	24
1.2.7 Μονάδα Παροχής Ισχύος – Γεννήτρια Παλμών (Power Supply Unit – Pulse Generator) .....	28
1.2.8 Σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού μέσου και έκπλυσης.....	30
2. Παράμετροι Ελέγχου και Απόδοσης της Κατεργασίας .....	32
2.1 Διαφορά δυναμικού.....	32
2.2 Ένταση ρεύματος.....	32
2.3 Χαρακτηριστικά παλμού – Κυματομορφή (Pulse Waveform) .....	34
2.4 Έλεγχος διακένου .....	41
2.5 Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR) .....	41
2.6 Λόγος φθοράς εργαλείου (TWR).....	42
2.7 Τραχύτητα επιφανείας.....	42
3. Ιονισμός και Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Υλικού.....	43
3.1 Ιονισμός.....	43
3.2 Πλάσμα.....	44
3.3 Απομάκρυνση Υλικού .....	52
4. State of the art.....	55
5. Πειραματική Διαδικασία .....	68
5.1 Εργαλειομηχανή .....	68

5.2 Τεμάχιο – Ηλεκτρόδιο .....	69
5.3 Πειραματική Διαδικασία – Μετρήσεις.....	69
6. Μοντελοποίηση και επίλυση με χρήση λογισμικού FEM.....	76
6.1 Πηγή θερμότητας .....	76
6.2 Τεμάχιο .....	82
6.3 Οριακές Συνθήκες .....	85
6.4 Πλέγμα.....	86
7. Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Αξιολόγησή τους.....	89
7.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	89
7.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με υπολογισμούς για $r_{p1}$ .....	91
7.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με υπολογισμούς για $r_{p2}$ .....	97
8. Χαρακτηρισμός Μικροδομών και Επιφανειών (χρήση οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας) .....	102
8.1 Τοπογραφία Επιφανείας .....	102
8.2 Μικροδομή Υποστρώματος (Subsurface Microstructure) .....	103
8.3 Μικρο – ρωγμές (Micro Cracks) .....	105
8.4 Μελέτη των δοκιμίων.....	107
9. Συμπεράσματα .....	118

## Ονοματολογία

$\bar{I}_p [A]$  → μέση ένταση ρεύματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας

$F_W [\%]$  → ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο

$F_a [\%]$  → ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από την άνοδο

$F_c [\%]$  → ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από την κάθοδο

$F_z \left[ \frac{mm}{sec} \right]$  ή  $\left[ \frac{\mu m}{sec} \right]$  → ταχύτητα πρόωσης του ηλεκτροδίου προς το τεμάχιο

$I_p [A]$  → μέγιστη ένταση ρεύματος κατά τη διάρκεια του παλμού

$L_g$  → χαρακτηριστικό μήκος συστήματος

$Q_V \left[ \frac{J}{m^3} \right]$  → παραγόμενη θερμότητα ανά μονάδα όγκου

$R_a [\mu m]$  → μέση τραχύτητα επιφανείας

$R_{max} [\mu m]$  → μέγιστη τραχύτητα επιφανείας

$T_b [K]$  → θερμοκρασία ζέσεως

$T_{melt.} [K]$  → θερμοκρασία τήξεως

$T_{off} [sec]$  ή  $[\mu sec]$  → χρόνος μεσοδιαστήματος

$T_{on} [sec]$  ή  $[\mu sec]$  → χρόνος παλμού

$U_i$  → ενέργεια ιονισμού

$V_p [V]$  → διαφορά δυναμικού κατά τη διάρκεια του παλμού

$V_c [V]$  = διαφορά δυναμικού στο πυκνωτή

$V_s [V]$  → διαφορά δυναμικού πηγής

$V_{th} [V]$  → δυναμικό αναφοράς σε servo – μηχανισμό

$W_{fin.} [gr]$  → βάρος τεμαχίου στο τέλος της κατεργασίας αντίστοιχα

$W_{st.} [gr]$  → βάρος τεμαχίου στην αρχή της κατεργασίας

$f_{eff.} [\%]$  → αποδοτικότητα κατεργασίας

$f_{wave}$  → συνάρτηση κυματομορφής της έντασης ρεύματος

$k_B$  → σταθερά Boltzman

$k_{EDM}$  → συντελεστής ελέγχου διακένου (*gap control factor*)

$n_e$  → πυκνότητα ηλεκτρονίων

$n_i \rightarrow$  πυκνότητες ιονισμένων σωματιδίων

$n_n \rightarrow$  πυκνότητες ουδέτερων σωματιδίων

$q_e \rightarrow$  στοιχειώδες φορτίο

$q_o \left[ \frac{W}{m^2} \right] \rightarrow$  ροή θερμότητα ανα μονάδα επιφάνειας

$r_p [m]$  ή  $[\mu m] \rightarrow$  ακτίνα πλάσματος

$t_m [min] \rightarrow$  χρόνος κατεργασίας

$t_p [sec]$  ή  $[\mu sec] \rightarrow$  χρόνος πλάσματος

$u_g \left[ \frac{m}{sec} \right] \rightarrow$  ταχύτητα θερμικής κίνησης

$u_{melt} [m/sec] \rightarrow$  ταχύτητα πλέγματος λόγω αφαίρεσης υλικού

$\hat{E} [J] \rightarrow$  μέση κινητική ενέργεια

$E_p [W] \rightarrow$  μέση ισχύς κατεργασίας

$N_D \rightarrow$  αριθμός των σωματιδίων

$T_{off} [sec] \rightarrow$  χρόνος μεσοδιαστήματος

$\epsilon_o \rightarrow$  διηλεκτρική σταθερά κενού

$\lambda_D \rightarrow$  μήκος Debye

$\tau_g \rightarrow$  μέσος χρόνος μεταξύ συγκρούσεων με ουδέτερα άτομα

$MRR \left[ \frac{mm^3}{min} \right] \rightarrow$  ρυθμός αποβολής υλικού

$TWR [\%] \rightarrow$  λόγος φθοράς εργαλείου

$a \left[ \frac{m^2}{sec} \right] \rightarrow$  συντελεστής θερμικής διάχυσης υλικού

$g \rightarrow$  στατιστικό βάρος που λαμβάνει υπ όψιν καταστάσεις εκφυλισμού

$k \left[ \frac{W}{m * K} \right] \rightarrow$  θερμική αγωγιμότητα υλικού

$t [sec] \rightarrow$  χρόνος

$T [K] \rightarrow$  θερμοκρασία

$\eta [\%] \rightarrow$  duty ratio

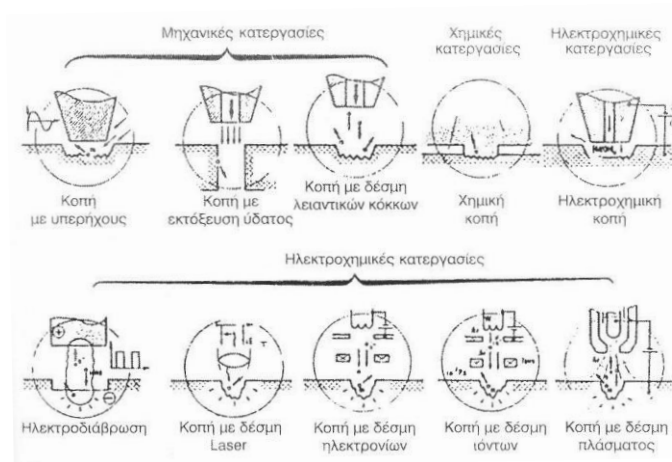
$\rho \left[ \frac{gr}{mm^3} \right] \rightarrow$  πυκνότητα υλικού τεμαχίου

## Εισαγωγή

Οι εξελίξεις – δυνατότητες στο πεδίο των υλικών και των κραμάτων «κινούνται» με ραγδαίους ρυθμούς δημιουργώντας υλικά με συνεχώς αυξανόμενη αντοχή σε μηχανικά φορτία (strength), σε θερμικά (heat resistance), σε φθορά (wear resistance) και σε σκληρότητα (hardness). Παράλληλα όμως ανακύπτουν δυσκολίες – προβλήματα στην κατεργασία των υλικών αυτών με τις συμβατικές μεθόδους και προκύπτει ανάγκη για έρευνα και ανάπτυξη νέων, «μη συμβατικών μεθόδων κατεργασίας», οι οποίες θα ανταποκρίνονται στις ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας – παραγωγής. Οι «μη συμβατικές κατεργασίες (ΜΣΚ)» ταξινομούνται – διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιούν, τους μηχανισμούς στους οποίους βασίζονται και το πεδίο εφαρμογής τους. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται μια τυπική ταξινόμηση των ΜΣΚ με βάση το μηχανισμό – το είδος της ενέργειας, που χρησιμοποιείται[1,2].

Πίνακας 1 Ταξινόμηση Μη Συμβατικών Κατεργασιών

	<p><b>ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κοπή με δέσμη ύδατος (WJM)</li> <li>• Κοπή με δέσμη λειαντικών κόκκων (AJM)</li> <li>• Κοπή με υπερήχους (USM)</li> <li>• Κοπή με επεξευρωμένα εκρηκτικά (CSC)</li> <li>• Κατεργασίες αποπεράτωσης</li> </ul>
	<p><b>ΘΕΡΜΙΚΕΣ &amp; ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)</li> <li>• Κοπή με δέσμη Laser (LBC)</li> <li>• Κοπή με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM)</li> <li>• Κοπή με δέσμη πλάσματος (PBM)</li> </ul>
	<p><b>ΧΗΜΙΚΕΣ &amp; ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ηλεκτροχημική κοπή (ECM)</li> <li>• Ηλεκτροχημική λείανση (ECG)</li> <li>• Χημική κοπή</li> </ul>



Εικόνα 1 Σχηματική απόδοση ορισμένων μη συμβατικών κατεργασιών

Ακολουθεί μια σύντομη σύγκριση των συμβατικών με τις μη συμβατικές κατεργασίες [3]

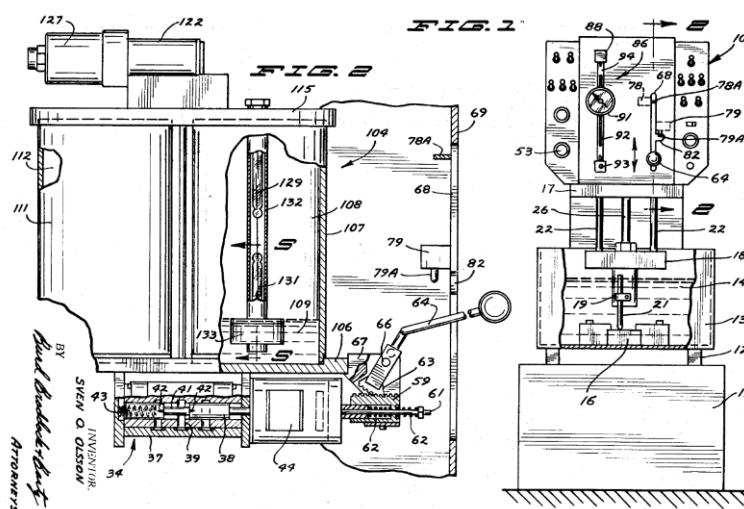
Πίνακας 2 Σύγκριση συμβατικών και μη συμβατικών κατεργασιών

ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ
Σχηματισμός ορατών μακροσκοπικά αποβλήτων.	Η απομάκρυνση υλικού συμβαίνει είτε με δημιουργία αποβλήτων είτε χωρίς. Για παράδειγμα στην κατεργασία AJM έχουμε σχηματισμό μικροσκοπικού μεγέθους αποβλήτων, σε αντίθεση με τη ECM που οι μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα σε ατομικό επίπεδο.
Υπαρξη ενός «κλασικού» εργαλείου (π.χ. εργαλείο κοπής).	Η κατεργασία μπορεί να μην απαιτεί κάποιο εργαλείο με την «κλασική» μορφή, αλλά να χρησιμοποιεί κάποιο εναλλακτικό μέσο όπως για παράδειγμα μια δέσμη laser.
Το εργαλείο που χρησιμοποιείται έχει, σε συνθήκες χρήσης, υψηλότερη σκληρότητα	Εφόσον σε αρκετές μη συμβατικές κατεργασίες δεν υπάρχει κάποιο «κλασικό» εργαλείο δεν υφίσταται και έννοια σκληρότητας (π.χ. για δέσμη laser)
Η αποβολή υλικού συμβαίνει λόγω εφαρμογής κάποια δύναμης κοπής, και ως εκ τούτου η ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι μηχανική	Σε αρκετές μη συμβατικές κατεργασίες η χρησιμοποιούμενη ενέργεια δεν είναι μηχανική. Για παράδειγμα σε ECM έχουμε ηλεκτροχημικούς μηχανισμούς. Βέβαια σε κατεργασίες όπως AJM και WJM έχουμε χρήση μηχανικής ενέργειας.
Υπάρχει άμεση επαφή εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου	Δεν είναι απαραίτητη κάποια άμεση επαφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου με το εργαλείο
Περιορισμένη διαστασιολογική ακρίβεια και χαμηλότερη ποιότητα επιφανείας	Υψηλή ακρίβεια και καλύτερη ποιότητα επιφανείας
Οικονομικά κατάλληλη και συμφέρουσα λύση για κάθε είδους υλικό	Δεν ενδείκνυται οικονομικά για κατεργασία οποιουδήποτε υλικού
Η διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι περιορισμένη λόγω φθοράς από την επαφή του με το τεμάχιο	Υπάρχει σαφώς μεγαλύτερος χρόνος ζωής των εργαλείων
Αυξημένος όγκος αποβλήτων – σπατάλη υλικού (waste material)	Χαμηλότερη ποσότητα αποβλήτων
Αυξημένος θόρυβος – ηχορύπανση	Χαμηλά επίπεδα θορύβου
Χαμηλότερο κόστος εξοπλισμού	Υψηλό κόστος εξοπλισμού – επένδυσης
Εύκολη οργάνωση παραγωγής	Πολυπλοκότερη οργάνωση παραγωγής
Χειρισμός από εργατικό δυναμικό χαμηλότερης ειδίκευσης	Απαιτείται εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό
Κυρίως χειροκίνητες ή ημι – αυτοματοποιημένες εργαλειομηχανές	Πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες
Δεν χρησιμοποιούνται συνήθως για κατασκευή πρωτοτύπων	Ιδανικές κατεργασίες για αποτελεσματική και αποδοτική κατασκευή πρωτοτύπων

## 1. Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης (Electrical Discharge Machining) αποτελεί μια από τις παλαιότερες και πλέον διαδεδομένες μη συμβατικές κατεργασίες (εφαρμόζεται ήδη περισσότερα από 70 χρόνια). Το κύριο πλεονέκτημά της είναι η δυνατότητα κατεργασίας αγώγιμων υλικών, ανεξάρτητα από σκληρότητα αντοχή ή άλλες μηχανικές ιδιότητες. Ταυτόχρονα με κατεργασία EDM δίνεται η δυνατότητα για κατασκευή τεμαχίων – εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας, με υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια και ικανοποιητική ποιότητα επιφανείας. Η σύγχρονη βιομηχανία αξιοποιεί τις δυνατότητες του EDM στην κατασκευή καλουπιών και πρωτοτύπων, στην αεροδιαστημική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στο πεδίο της μικρο ηλεκτρονικής και στην βιοϊατρική. Οι δύο βασικές «παραλλαγές – τύποι» του EDM είναι η ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης (die sinking EDM), και η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM), ενώ η ηλεκτροδιάβρωση φρεζαρίσματος (milling EDM) γίνεται όλο και πιο δημοφιλής, λόγω της δυνατότητας κατεργασίας τρισδιάστατων γεωμετριών (three dimensional shapes).

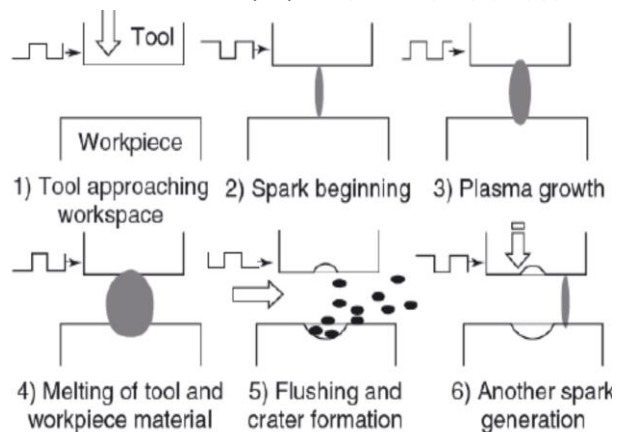
Σε μία σύντομη ιστορική αναδρομή, εάν θα θέλαμε να εντοπίσουμε τις «επιστημονικές ρίζες» του EDM θα φτάναμε στο 1700 όταν ο Benjamin Franklin αναφέρθηκε στο φαινόμενο της διάβρωσης μετάλλου, λόγω ύπαρξης σπινθήρα (metal erosion by electrical sparks). Αργότερα το 1770 ο Joseph Priestly ανακάλυψε τη διαβρωτική επίδραση της ηλεκτρικής εκκένωσης (electrical discharge). Η ηλεκτροδιάβρωση καθιερώθηκε από τους Dr. B.R. Lazarenko και Dr. N.I. Lazarenko τη δεκαετία του 1940 ως κατεργασία αποβολής υλικού μέσω ελεγχόμενων διαδοχικών ηλεκτρικών εκκενώσεων [5, 9]. Η μελέτη τους επεκτάθηκε και στην κατασκευή ενός απλού servo – μηχανισμού (servo controller) προκειμένου το διάκενο ανάμεσα στο εργαλείο και στο κατεργαζόμενο τεμάχιο να παραμένει σταθερό και να καθίσταται αποδοτικότερη και αποτελεσματικότερη. Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος εφαρμόστηκε τη δεκαετία του 1970, καθώς απαιτούσε ισχυρότερες γεννήτριες, νέα υλικά για ηλεκτρόδια, και καλύτερου σχεδιασμού εργαλειομηχανές με ακριβέστερο και «ευφυέστερο» έλεγχο [4, 5].



Εικόνα 2 Σχέδιο από πατέντα του 1971 του Sven Olof Olson με τίτλο:  
"ELECTRODE FEED CONTROL FOR EDM MACHINE"

## 1.1 Βασικές Αρχές Ηλεκτροδιάβρωσης

Οι βασικές αρχές λειτουργίας είναι ίδιες τόσο για την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, όσο και την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, με τις όποιες διαφορές υπάρχουν να αναφέρονται σε «θέματα» διάταξης και παραμέτρων κατεργασίας. Στην κατεργασία του EDM, υλικό ηλεκτρικά αγώγιμο απομακρύνεται (από το τεμάχιο) με τη βοήθεια «σύντομων» και επαναλαμβανόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων παρουσία διηλεκτρικού υγρού μέσου (Εικόνα 3). Κατά τη διαδικασία της ηλεκτροδιάβρωσης εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο, με ύπαρξη καθορισμένου διακένου ανάμεσά τους. Καθώς το ηλεκτρόδιο πλησιάζει το τεμάχιο παρουσία του διηλεκτρικού μέσου, το οποίο συνήθως είναι απιονισμένο νερό ή κάποιο έλαιο και το οποίο λειτουργεί ως μονωτής και ψυκτικό, δημιουργείται μια «στήλη» έντονης ηλεκτρομαγνητικής ροής (column of intense electromagnetic flux). Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει τη μέγιστη ισχύ, με πυκνότητα ενέργειας από  $10^{11} - 10^{14} \text{ W/m}^2$ , στο σημείο που ελαχιστοποιείται η απόσταση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο [5]. Υπό την επίδραση του έντονου ηλεκτρικού πεδίου «σπάει» διηλεκτρική σταθερά του μέσου, που παρεμβάλλεται και δημιουργείται ηλεκτρικός σπινθήρας (single spark to be discharge). Ο σπινθήρας αυτός «εμφανίζεται» στο μικρό διάκενο ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και τεμάχιο (αναφέρεται και ως διάκενο σπινθήρα – spark gap,) αναπτύσσει θερμοκρασίες  $6000 - 12000 \text{ }^\circ\text{C}$  ανάλογα με τις συνθήκες ψύξης, και έχει ως αποτέλεσμα την εξάχνωση και τήξη υλικού, και το σχηματισμό ενός «κρατήρα» [5, 10]. Η θερμότητα, που διοχετεύεται μέσω του σπινθήρα προκαλεί «κατάρρευση» της ηλεκτρομαγνητικής ροής και κατά συνέπεια και του ίδιου του σπινθήρα, με το σύστημα να επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Το διηλεκτρικό μέσο ψύχει την περιοχή και παρασύρει το υλικό που έχει τηχθεί από το τεμάχιο. Ο «κύκλος» αυτός επαναλαμβάνεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας πολλές φορές. Η ένταση του ρεύματος υπολογίζεται από τη διαφορά δυναμικού, που εφαρμόζεται και την αντίσταση του συστήματος, ενώ προσδιορίζει την ενέργεια του σπινθήρα και κατ' επέκταση και το μέγεθος του διακένου. Ο χρόνος κατά τον οποίο έχουμε σπινθήρα (ηλεκτρικό ρεύμα), ονομάζεται διάρκεια παλμού (pulse duration)  $T_{on}$ , ο χρόνος δίχως σπινθήρα – μεσοδιάστημα (pulse interval)  $T_{off}$  και χρησιμεύει στην αποκατάσταση συνθηκών στο διάκενο, ώστε να μπορεί επαναληφθεί ο προαναφερθείς «κύκλος» (σχηματισμός εκ νέου σπινθήρα). Το υλικό, που έχει αποβληθεί λόγω του σπινθήρα, στερεοποιείται σε μικροσκοπικά σφαιρίδια, τα οποία διασπείρονται στο διηλεκτρικό μέσο μέσω του οποίου και απομακρύνονται. Ο όγκος υλικού, που τυπικά απομακρύνεται σε κάθε ηλεκτρική εκκένωση είναι της τάξης των  $10^{-6} - 10^{-4} \text{ mm}^3$  με την διαστασιολογική ακρίβεια που επιτυγχάνεται να είναι σε υψηλά επίπεδα.



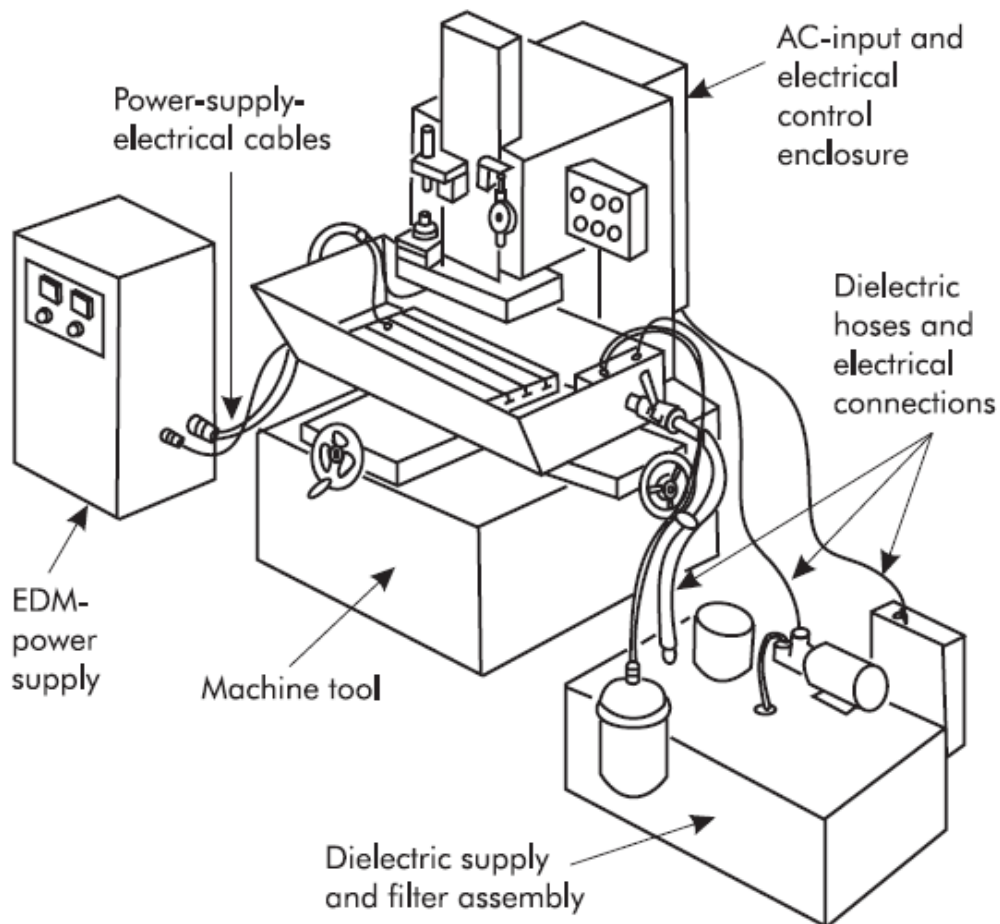
Εικόνα 3 Γραφική απεικόνιση των αρχών λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης [5]



## 1.2 Βασικά στοιχεία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης - βύθισης

Τα βασικά στοιχεία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης (sinking EDM) είναι (Εικόνα 4) [5,6]

- το προς κατεργασία τεμάχιο (workpiece)
- το ηλεκτρόδιο (electrode)
- το διηλεκτρικό μέσο (dielectric)
- ο μηχανισμός κίνησης στους άξονες X – Y (X – Y positioning / machine bed)
- ο servo μηχανισμός ελέγχου (servo controller)
- η γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών (pulse generator)
- το δοχείο – δεξαμενή εργασίας (work tank)
- δεξαμενή αποθήκευσης διηλεκτρικού μέσου (dielectric reservoir)
- αντλία και φίλτρα διηλεκτρικού μέσου (dielectric pump and filter)



Εικόνα 4 Βασικά μέρη μιας διάταξης sinking EDM [6]

### 1.2.1 Τεμάχιο (workpiece)

Η ηλεκτροδιάβρωση δίνει τη δυνατότητα κατεργασίας οποιουδήποτε ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού, ανεξάρτητα της σκληρότητας, της αντοχής και των υπολοίπων μηχανικών ιδιοτήτων του. Άρα, βασική απαίτηση είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του. Ταυτόχρονα όμως, λόγω της θερμοηλεκτρικής φύσεως της κατεργασίας, οι θερμικές ιδιότητες του υλικού επηρεάζουν σημαντικά την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα της κατεργασίας. Οι παράμετροι λοιπόν του υλικού που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι [5, 11]:

- Υλικό τεμαχίου – χημική σύνθεση (ιδιότητες)
  - Πυκνότητα [ $\text{kgm}^{-3}$ ]
  - Θερμοκρασία τήξης [K]
  - Θερμοκρασία βρασμού [K]
  - Θερμική αγωγιμότητα [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
  - Θερμοχωρητικότητα [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
  - Συντελεστής θερμικής διαστολής [ $\text{K}^{-1}$ ]
  - Θερμότητα σχηματισμού (Heat of formation) [ $\text{kJmol}^{-1}$ ]
  - Ηλεκτρική αντίσταση [ $\Omega\text{m}$ ]
  - Σκληρότητα
  - Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) [GPa]
- Διαστάσεις τεμαχίου

### 1.2.2 Ηλεκτρόδιο (tool electrode)

Το ηλεκτρόδιο αποτελεί σημαντική παράμετρο της κατεργασίας. Κατά τη διάρκεια της ηλεκτροδιάβρωσης έχουμε ταυτόχρονη απομάκρυνση υλικού τόσο από το τεμάχιο όσο και το ηλεκτρόδιο. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη επιλογής υλικών ηλεκτροδίου με υψηλή αντοχή στη φθορά, διαφορετικά υπάρχει πιθανότητα – κίνδυνος να καθίσταται η κατεργασία εξαιρετικά δαπανηρή και ασύμφορη. Έχουν εκπονηθεί αρκετές μελέτες σχετικά με τα κριτήρια επιλογής κατάλληλου υλικού ηλεκτροδίου και τα κριτήρια, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι [5]:

- Υλικό και τύπος τεμαχίου
- Ρυθμός αποβολής υλικού
- Αντίσταση – αντοχή σε φθορά
- Επιθυμητή ποιότητα επιφανείας
- Κόστος κατεργασίας
- Κόστος πρώτων υλών
- Ηλεκτρικές ιδιότητες (ηλεκτρική αντίσταση και αγωγιμότητα)
- Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία τήξης, βρασμού, θερμοχωρητικότητα, θερμική αγωγιμότητα)

Οι απαιτήσεις από ένα υλικό ηλεκτροδίου είναι:

- Υψηλό σημείο τήξης
- Υψηλή κατεργασιμότητα
- Χαμηλό κόστος

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες υλικών, που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης: τα μέταλλα και τα ηλεκτρόδια από γραφίτη. Τα ηλεκτρόδια από γραφίτη έχουν σχετικά χαμηλότερο ρυθμό φθοράς (wear rate) και χρησιμοποιούνται για κατεργασίες ξεχονδρίσματος σε αντίθεση με τα μεταλλικά ηλεκτρόδια, τα οποία αν και παρουσιάζουν υψηλή φθορά, διαθέτουν ιδιότητες, που τα καθιστούν κατάλληλα για κατεργασίες φινιρίσματος.

Τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι [6]:

- Ορείχαλκος (brass): διαθέτει ικανοποιητική αντοχή σε φθορά για κατεργασία χάλυβα, αλλά αυξημένους ρυθμούς φθοράς σε κατεργασίες καρβιδίων βολφραμίου (tungsten carbide). Επίσης, δεν συνιστάται η χρήση του με διατάξεις RC παροχή ισχύος.
- Χαλκός (copper): χρησιμοποιείται είτε ως «καθαρός» χαλκός είτε ως κράμα τελλουρίου – χαλκού. Ο χαλκός παρουσιάζει δυσκολίες στην κατεργασία του με λειαντικούς τροχούς (grinding), αλλά έχει χαρακτηριστικά ιδανικά για κατεργασίες «μηδενικής φθοράς» (no wear – machining).
- Χαλκός – Βολφράμιο: υλικό που έχει προκύψει από πυροσυσσωμάτωση και συναντάται σε συνήθεις αναλογίες 70% βολφράμιο και 30% χαλκός. Έχει υψηλή αντοχή σε φθορά, χρησιμοποιείται συνήθως για κατεργασίες καρβιδίων του βολφραμίου, αλλά είναι μειονέκτημα η δυσκολία κατεργασίας του.
- Ψευδάργυρος (zinc): κράματα ψευδαργύρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά ηλεκτροδίων, παρουσιάζουν όμως υψηλή φθορά.
- Γραφίτης (graphite): είναι διαθέσιμος σε διαφορετικές πυκνότητες, οι οποίες εξαρτώνται από την κοκκομετρία της κόνης από την οποία παράγεται, και η οποία κυμαίνεται από 100 μm έως και 1 μm. Διαθέτει υψηλή αντοχή σε φθορά και υψηλή κατεργασιμότητα, η σκόνη όμως γραφίτη που «δημιουργείται» κατά την κατεργασία του πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν. Ο γραφίτης δεν τήκεται αλλά εξαχνώνεται (sublimes) με τη θερμοκρασία εξάχνωσης να είναι «κοντά» στη θερμοκρασία τήξης των καρβιδίων του βολφραμίου και ως εκ τούτου δεν συνιστάται η χρήση του για κατεργασία του συγκεκριμένου υλικού. Γραφίτης με λεπτή κοκκομετρία, συνιστάται για κατεργασίες αποπεράτωσης και ακριβείας (fine detailed machining), ενώ ανεξάρτητα κοκκομετρίας χρησιμοποιείται σε κατεργασίες μηδενικής φθοράς. Τέλος, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του σε διατάξεις με RC παροχή ισχύος.
- Χαλκός – Γραφίτης: πρόκειται για λεπτής κοκκομετρίας γραφίτη διαποτισμένο (infiltrated) με χαλκό. Συνεχίζει ως υλικό να διαθέτει τα χαρακτηριστικά του «απλού – καθαρού» γραφίτη με επιπλέον την ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού.

Στον Πίνακα 3 γίνεται μια σύντομη σύγκριση ανάμεσα στα μεταλλικά και τα ηλεκτρόδια γραφίτη [5].

**Πίνακας 3 Σύγκριση μεταλλικών ηλεκτροδίων και ηλεκτροδίων γραφίτη**

ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΓΡΑΦΙΤΗ
Χαμηλό κόστος	Υψηλό κόστος
Υψηλή αντοχή	Υψηλή αντοχή
Υψηλή ασφάλεια κατά τη κατεργασία (high degree of machining safety)	Χαμηλότερη ασφάλεια τη κατεργασίας (lower degree of machining safety)
Δεν απαιτείται έμπειρος χειριστής	Χρειάζεται πεπειραμένο χειριστή)
Σχετικά καθαρές επιφάνειες – φινίρισμα	Παραμένουσα σκόνη μετά τη κατεργασία
Μικρές δυνατότητες λείανσης (lower grinding index)	Υψηλή κατεργασιμότητα (good machinability)
Χαμηλότερες ταχύτητες κατεργασίας και ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)	Υψηλές ταχύτητες κατεργασίας και ρυθμός αποβολής (MRR)
Υψηλός σχετικά ρυθμός φθοράς	Εξαιρετική αντοχή σε φθορά

Στον Πίνακα 4 παρατίθενται ορισμένες προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίες για κάποια «τυπικά» υλικά [5].

**Πίνακας 4 Προτεινόμενες συνθήκες κατεργασίας για "τυπικά" υλικά**

ΤΕΜΑΧΙΟ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ	ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΞΕΧΟΝΔΡΙΣΜΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ
Χάλυβας	Γραφίτης	Positive	Χαμηλή	Μεσαία / Υψηλή
Αλουμίνιο	Cu/CuW	Positive	Χαμηλή	Μεσαία / Υψηλή
Χαλκός	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Τιτάνιο	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Καρβίδια	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή
Κράμα χαλκού – βολφραμίου	Cu/CuW	Negative	Υψηλή	Υψηλή

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται η επίδραση του υλικού του ηλεκτροδίου στο αποτέλεσμα – αποδοτικότητα της κατεργασίας [5].

**Πίνακας 5 Αποδοτικότητα – αποτελεσματικότητα κατεργασίας για διαφορετικά υλικά ηλεκτροδίων**

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ EDM	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΓΡΑΦΙΤΗ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΧΑΛΚΟΥ (Cu)	ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΧΑΛΚΟΥ - ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ (CuW)
ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ(MRR)	Υψηλός	Μεσαίος	Χαμηλός
ΛΟΓΟΣ ΦΘΟΡΑΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ (RWR)	Μεσαίος	Υψηλός	Χαμηλός
Τραχύτητα (R <sub>a</sub> ) (ποιότητα επιφανείας)	Υψηλή τραχύτητα με κακή ποιότητα επιφανείας	Χαμηλή τραχύτητα με βέλτιστη ποιότητα επιφανείας	Μέση τραχύτητα

### 1.2.3 Διηλεκτρικό Μέσο (Dielectric fluid)

Με δεδομένο ότι στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης τόσο το τεμάχιο όσο και το ηλεκτρόδιο είναι ηλεκτρικά αγώγιμα, κατά την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού με απουσία του διηλεκτρικού μέσου (υγρού), θα δημιουργούνται «ανεξέλεγκτοι» σπινθήρες. Το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί ως μονωτής με τη διηλεκτρική σταθερά του να «σπάει» (σημείο ιονισμού) και να δημιουργεί ελεγχόμενους σπινθήρες, οι οποίοι και έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση υλικού από το τεμάχιο. Το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο βρίσκονται πλήρως βυθισμένα στο διηλεκτρικό υγρό, το οποίο εκτός από μονωτής λειτουργεί και ως ψυκτικό μέσο, και βοηθά στην αποτελεσματική απομάκρυνση των υπολειμμάτων – κατακρημνισμάτων (debris) της κατεργασίας. Τα πλέον συχνά χρησιμοποιούμενα διηλεκτρικά μέσα είναι προϊόντα πετρελαίου (hydrocarbon fluids) ή απιονισμένο νερό [5].

**Προϊόντα πετρελαίου:** Είναι υλικά άμεσα διαθέσιμα προς χρήση και δημιουργούν ένα ελεγχόμενο περιβάλλον γύρω από το σημείο του σπινθήρα. Τα συγκεκριμένα έλαια διατηρούν τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους κατά τη διάρκεια εκδήλωσης του σπινθήρα, με την εκλυόμενη από το σπινθήρα θερμότητα να διασπά το διηλεκτρικό μέσο σε υδρογόνο άνθρακα και αλλά υποπροϊόντα, ενώ ταυτόχρονα δεν επηρεάζονται από την παρουσία υπολειμμάτων – κατακρημνισμάτων. Η ηλεκτρική αυτή «σταθερότητα», που παρουσιάζουν τα καθιστά ιδανική επιλογή για την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης.

**Απιονισμένο νερό:** Το απιονισμένο νερό καθώς παρασύρει σωματίδια της κατεργασίας καθίσταται αγώγιμο με τις διηλεκτρικές του ιδιότητες να μεταβάλλονται. Η αλλαγή αυτή επηρεάζει και το σημείο ιονισμού, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει την αξιοπιστία, αποτελεσματικότητα και σταθερότητα της κατεργασίας. Παρότι φαίνεται πως δεν αποτελεί σωστή επιλογή ως διηλεκτρικό μέσο, χρησιμοποιείται συνήθως στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, όπου το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο δεν βρίσκονται βυθισμένα στο μέσο, αλλά έχουμε το διηλεκτρικό υγρό με υψηλή ταχύτητα να περιβάλλει το σημείο του σπινθήρα και έπειτα να επιστρέφει στη μονάδα συλλογής για καθαρισμό. Έτσι, το απιονισμένο νερό απλά διέρχεται από την περιοχή του σπινθήρα και οι ιδιότητές του παραμένουν σε επιτρεπτά όρια.

Οι βασικές «λειτουργίες» του διηλεκτρικού μέσου είναι:

- **Να λειτουργεί ως μονωτής** ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο, εμποδίζοντας τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος, έως ότου υπάρξει ικανή διαφορά δυναμικού, ώστε να «σπάσει» η διηλεκτρική σταθερά (σημείο ιονισμού) και από μονωτής να γίνει αγωγός. Στο σημείο αυτό εκδηλώνεται και ο σπινθήρας.
- **Λειτουργεί ως μέσο ψύξης ηλεκτροδίου και τεμαχίου.** Ο σπινθήρας (ροή ηλεκτρικού ρεύματος) δημιουργεί ροή θερμότητας στην περιοχή ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο. Καθώς το διηλεκτρικό μέσο περιβάλλει την περιοχή του σπινθήρα συμβάλλει στην απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας. Παρ' όλα αυτά, οι υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται στο «μέτωπο» του σπινθήρα, συνεχίζουν να επηρεάζουν τις επιφάνειες του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η ψύξη του διηλεκτρικού μέσου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

- **Ψύξη των αποβλήτων της κατεργασίας.** Κατά τη εκδήλωση κάθε σπινθήρα το υλικό του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου θερμαίνεται έως τη θερμοκρασία εξάχνωσης, δημιουργώντας ένα «σύννεφο» στο διάκενο εκδήλωσης του σπινθήρα (sparking gap area). Η θερμότητα από το «σύννεφο» αυτό μεταφέρεται στο διηλεκτρικό μέσο, με αποτέλεσμα την ψύξη και στερεοποίηση των ατμών. Η διαδικασία ψύξης ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια και συνεχίζει προς τα μέσα, δημιουργώντας έτσι σφαιρίδια με κούφιο κέντρο – πυρήνα (EDM chips).
- **Απομάκρυνση αποβλήτων.** Τα απόβλητα της κατεργασίας πρέπει να απομακρύνονται από την περιοχή του σπινθήρα, ιδανικά με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο παράγονται. Κατ’ αυτόν το τρόπο διατηρείται μια σταθερή πυκνότητα αποβλήτων στην περιοχή του διάκενου καθιστώντας την λειτουργία του servo μηχανισμού πιο σταθερή. Έχουν μελετηθεί διάφορες μέθοδοι για την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των αποβλήτων με βασική αρχή όλων το διηλεκτρικό μέσο να διέρχεται – ρέει μέσω του διάκενου παρασύροντας τα απόβλητα. Το διηλεκτρικό μέσο στη συνέχεια συλλέγεται και φιλτράρεται, ώστε να απομακρυνθούν από αυτό απόβλητα και άλλα προϊόντα της κατεργασίας διατηρώντας, έτσι, τις ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου σταθερές.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό διηλεκτρικού μέσου είναι το ιξώδες του, καθώς όσο χαμηλότερο είναι, τόσο πιο «εύκολα» ρέει το ρευστό στο διάκενο ηλεκτροδίου – τεμαχίου. Μικρότερα διάκενα και άρα χαμηλότερης έντασης ρεύμα, όπως επίσης και υψηλότερες συχνότητες, χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες αποπεράτωσης για να επιτύχουμε υψηλής ποιότητας επιφάνεια. Το χαμηλό ιξώδες σε διηλεκτρικό μέσο από προϊόντα πετρελαίου, πιθανόν «ακολουθείται» από χαμηλό σημείο ιονισμού, ιδιότητα που πρέπει να λαμβάνεται υπ’ όψιν στο σχεδιασμό της κατεργασίας.

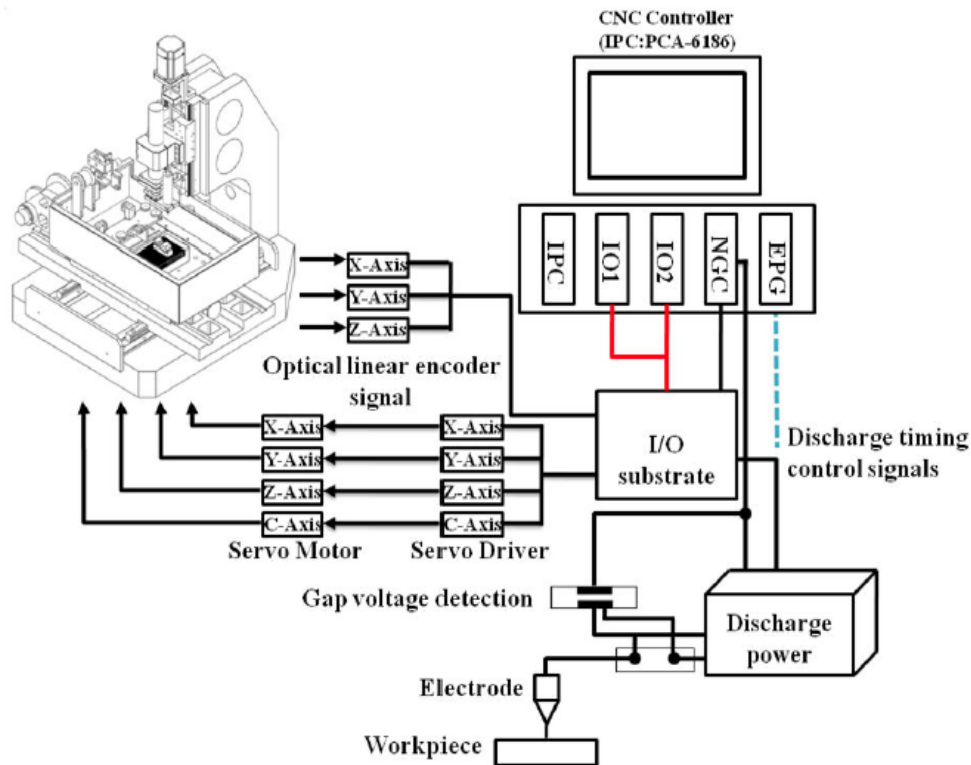
Κατά τη κατεργασία παράγονται επίσης αέρια προϊόντα, που προέρχονται από το διηλεκτρικό μέσο κυρίως. Η αποτελεσματική απομάκρυνση αυτών είναι σημαντική κατά το σχεδιασμό της κατεργασίας, καθώς άπτεται της ασφάλειας των εργαζομένων, αλλά και της σωστής και προβλεπόμενης λειτουργίας του μηχανολογικού εξοπλισμού [6].

**Πίνακας 6 Σύγκριση ελαίου και αφιονισμένου νερού ως διηλεκτρικό μέσο στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης**

Έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο	Αφιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό μέσο
Δεν προκαλείται ζημιά λόγω ηλεκτρόλυσης	Υπάρχει ηλεκτρόλυση, με τις επακόλουθες φθορές που αυτή μπορεί να προκαλέσει
Πιο σκληρές και άρα πιο εύθραυστες επιφάνειες στο κατεργασμένο τεμάχιο	Οι επιφάνειες μετά τη κατεργασία είναι λιγότερο σκληρές και εύθραυστες
Περιορισμένη ταχύτητα κοπής	Υψηλότερες ταχύτητες κοπής
Καλύτερη ποιότητα επιφανείας	Πιο τραχείες επιφάνειες
Συνήθως χρησιμοποιείται το ηλεκτρόδιο ως θετικός πόλος με χρήση ελαίου ως διηλεκτρικό μέσο	Συνήθως χρησιμοποιείται το ηλεκτρόδιο ως αρνητικός πόλος με χρήση νερού ως διηλεκτρικό μέσο
Χαμηλότερη φθορά ηλεκτροδίου	Έντονη φθορά ηλεκτροδίου
Χαμηλότερο λειτουργικό κόστος	Υψηλότερο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης

### 1.2.4 Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X – Y (X – Y positioning / machine bed)

Στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης η δυνατότητα κίνησης του ηλεκτροδίου ή / και του τεμαχίου κατά τους άξονες X – Y είναι απαραίτητη για την «αποτύπωση» πολύπλοκων γεωμετριών. Αναλόγως του τύπου της εργαλειομηχανής μπορούμε να έχουμε είτε κίνηση της «τράπεζας» και άρα του τεμαχίου, είτε κίνηση ολόκληρης της servo κεφαλής (η δεύτερη περίπτωση συναντάται κυρίως σε σύγχρονες CNC εργαλειομηχανές). Η ακρίβεια κίνησης είναι μείζονος σημασίας και συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή – δυνατή διαστασιολογική ακρίβεια του κατεργασμένου τεμαχίου. Τέλος πρέπει να υπάρχει λειτουργικός μηχανισμός πρόσδεσης και στήριξης του τεμαχίου [5].



Εικόνα 5 Γραφική απεικόνιση του μηχανισμού κίνησης σε μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης [5]

### 1.2.5 Δοχείο Εργασίας (Work Tank)

Το δοχείο εργασίας εξασφαλίζει ότι το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο βρίσκονται εντός του λουτρού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ότι το διηλεκτρικό μέσο ανανεώνεται συνεχώς, ότι υπάρχει και διατηρείται η επιθυμητή στάθμη στο υγρό και η θερμοκρασία δεν ξεπερνά ένα ανώτατο όριο. Διακόπτης στάθμης εξασφαλίζει ότι το σύστημα δεν θα τεθεί σε λειτουργία πριν την καθορισμένη στάθμη, και διακόπτης υπερχειλίσσης προστατεύει από υπερβολικά υψηλή στάθμη υγρού. Επίσης, θερμοστάτης διακόπτει την λειτουργία σε περίπτωση που η θερμοκρασία υπερβεί προκαθορισμένη ανώτατη τιμή. Τέλος, τα δοχεία εργασίας είναι συνήθως κατασκευασμένα από μεταλλικά ελάσματα, διαθέτουν μια μπροστινή θύρα πρόσβασης είτε αρθρωτή είτε αφαιρούμενη για ευκολότερη τοποθέτηση και έλεγχο του τεμαχίου.

### 1.2.6 Σερβομηχανισμός ελέγχου (Servo Control System)

Ο servo μηχανισμός ελέγχου είναι μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρος της κατεργασίας. Αποτελεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα, το οποίο διατηρεί το κατάλληλο διάκενο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο, ώστε να υπάρχει σταθερότητα και αποδοτικότητα κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, να προστατεύεται η προς κατεργασία επιφάνεια, αλλά και να επιτυγχάνεται διαστασιολογική ακρίβεια. Στόχος είναι ο σχεδιασμός, ώστε να λειτουργεί αποτελεσματικά για μεγάλο εύρος μεγέθους ηλεκτροδίων από μερικά μικρά έως αρκετά εκατοστά. Οι απαιτήσεις από το servo – μηχανισμό είναι:

- Το ηλεκτρόδιο να μην έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο
- Το ηλεκτρόδιο να «προωθείται» ή να «αποσύρεται» σε σχέση με το τεμάχιο ώστε να διατηρείται «σταθερή» η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο.

Το σύστημα «προώθησης – απόσυρσης» που χρησιμοποιείται για την κίνηση της servo κεφαλής, μπορεί να είναι είτε ένα ηλεκτρικό μοτέρ, είτε μια υδραυλική μονάδα. Η επιλογή εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το βάρος των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθούν. Υδραυλικά συστήματα επιλέγονται συνήθως σε μεγάλες εργαλειομηχανές με βαριά ηλεκτρόδια, ενώ στις μικρότερες συναντώνται κυρίως ηλεκτρικά μοτέρ, με το διαχωρισμό αυτό να είναι ενδεικτικός και όχι απαγορευτικός.

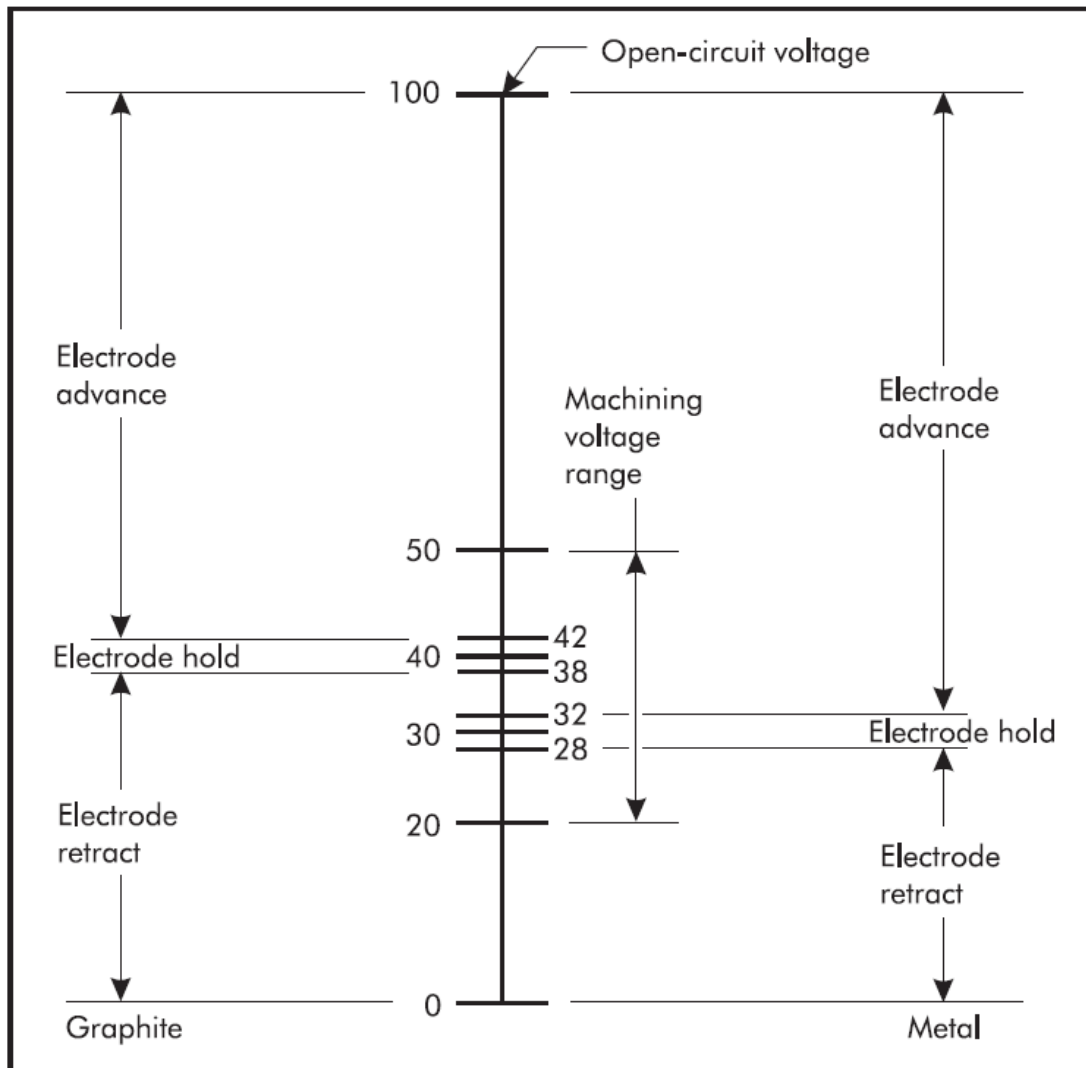
Στην ηλεκτροδιάβρωση ο servo μηχανισμός ελέγχου «χρησιμοποιεί» για τη λειτουργία του τις ηλεκτρικές ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου. Το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί ως μονωτής έως ότου το σύστημα ηλεκτροδίου τεμαχίου έχει την κατάλληλη σχέση διαφοράς δυναμικού – διακένου και πλέον βρεθεί στο σημείο ιονισμού με το διηλεκτρικό μέσο να λειτουργεί πλέον ως αγωγός. Η «διαφορά δυναμικού ανοικτού κυκλώματος» (open circuit voltage) «πέφτει» σε «διαφορά δυναμικού σπινθήρα» (sparking voltage), η οποία βρίσκεται στην περιοχή των 20 – 50 VDC. Ο servo μηχανισμός ελέγχου ρυθμίζεται με βάση ένα «δυναμικό αναφοράς» (reference voltage), το οποίο βρίσκεται στο προαναφερθέν εύρος τιμών. Η απόκλιση ανάμεσα στο «δυναμικό αναφοράς» και το «πραγματικό δυναμικό κατεργασίας» χρησιμοποιείται, ώστε το σύστημα servo μηχανισμού – ηλεκτροδίου να απομακρυνθεί, να πλησιάσει ή να παραμείνει σταθερό σε σχέση με το τεμάχιο. Στην πραγματικότητα και για πρακτικούς λόγους, το «δυναμικό αναφοράς» έχει ένα «στενό» εύρος τιμών, που όμως εντός των συγκεκριμένων ορίων η κατεργασία παραμένει σταθερή. Ο σχεδιασμός του servo μηχανισμού μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

- Το σύστημα προωθεί το ηλεκτρόδιο προς το τεμάχιο όταν το «δυναμικό λειτουργίας» είναι υψηλότερο του προκαθορισμένου άνω ορίου αναφοράς.
- Το σύστημα παραμένει σταθερό για «δυναμικά λειτουργίας» εντός του εύρους αναφοράς.
- Το σύστημα απομακρύνει το ηλεκτρόδιο από το τεμάχιο για «δυναμικά λειτουργίας» χαμηλότερα του κατώτατου ορίου αναφοράς.

Οι κατασκευαστές συνηθίζουν να ορίζουν ως «δυναμικό αναφοράς» ( $V_{th}$ ) για μεταλλικό ηλεκτρόδια τα 30 VDC, ενώ για ηλεκτρόδια από γραφίτη ορίζεται στα 40 VDC (Εικόνα 6),



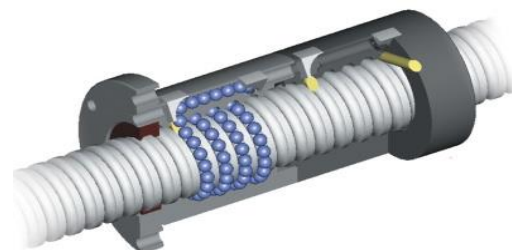
καθώς η χρήση σε ηλεκτρόδια γραφίτη «δυναμικό αναφοράς» 30 VDC προκαλεί μια ανεπιθύμητη κατάσταση λειτουργίας γνωστή ως “DC arcing”.



Εικόνα 6 Τυπικά εύρη τιμών "δυναμικού αναφοράς" για μεταλλικό ηλεκτρόδιο και ηλεκτρόδιο γραφίτη [6]

Η κίνηση του ηλεκτροδίου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να γίνει είτε μέσω ενός ηλεκτρικού μοτέρ, είτε μέσω υδραυλικού συστήματος. Και στις δύο περιπτώσεις, τα συστήματα είναι σχετικά απλά με, στόχο την «μετατροπή» ενός ψηφιακού σήματος σε προκαθορισμένη κίνηση, όταν αυτή είναι απαραίτητη.

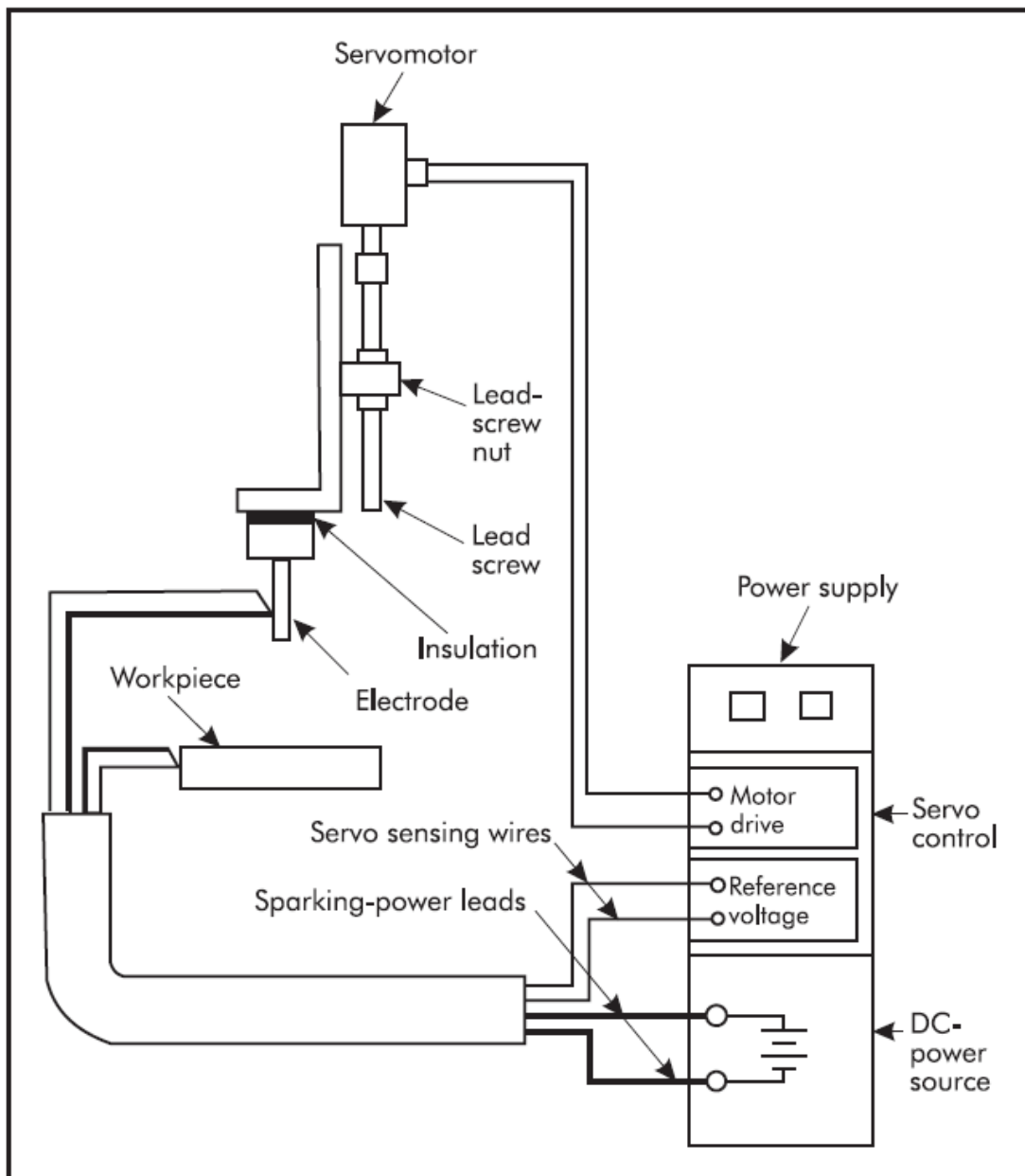
**Ηλεκτρικό μοτέρ:** Βρίσκεται σε άμεση σύζευξη με «κοχλία ακριβείας» (precision lead screw), ενώ το περικόχλιο είναι προσαρμοσμένο στον κινούμενο άξονα της μηχανής (machine axis of movement) (Εικόνα 8). Είναι εξαιρετικά σημαντικό να υπάρχει μηδενική «χάρη – παλινδρόμηση» (κατά το δυνατόν) συνολικά στο σύστημα, από τον κινητήρα έως και τον



Εικόνα 7 Pre-loaded ball screw

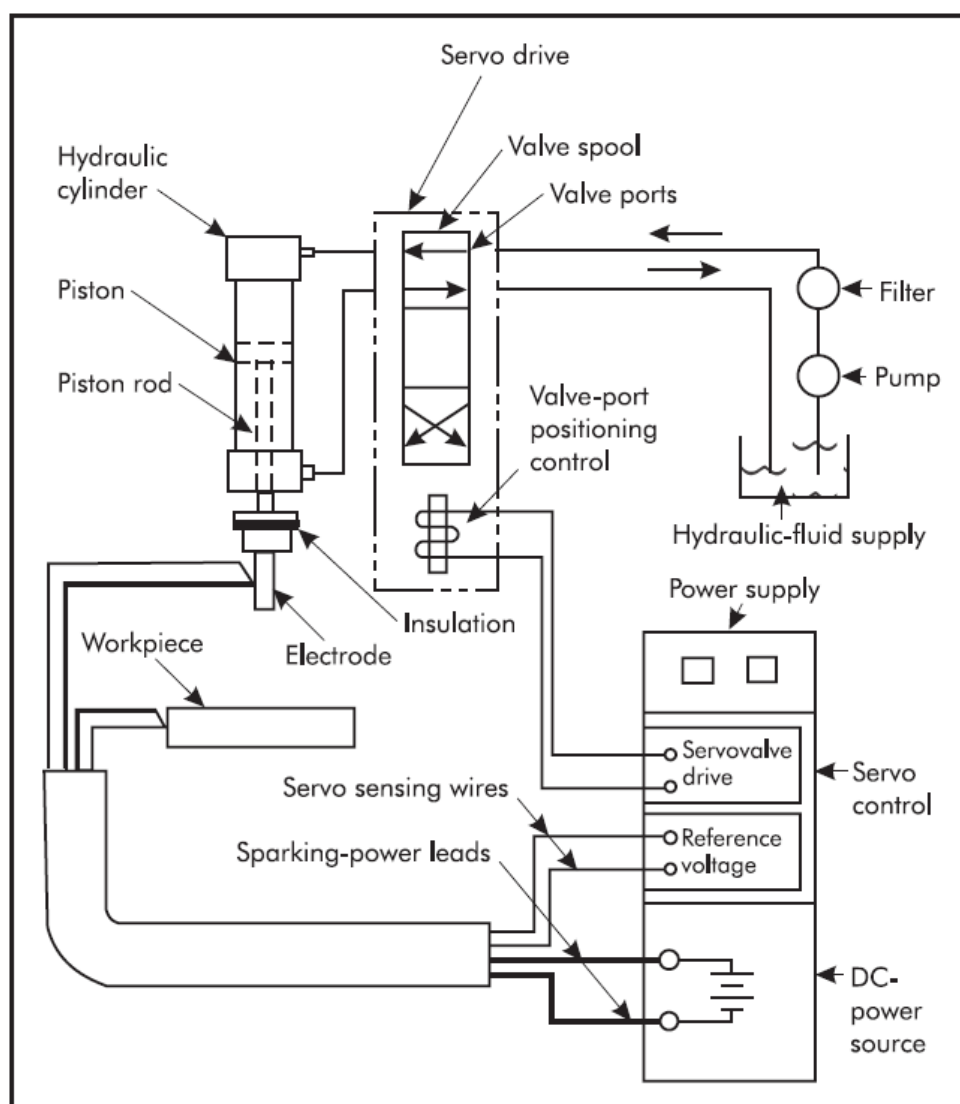
κινούμενο άξονα στον οποίο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο. Έτσι, με κάθε κίνηση του

μοτέρ θα υπάρχει η ανάλογη και προβλεπόμενη κίνηση στον άξονα και το ηλεκτρόδιο, με αποφυγή οποιασδήποτε ανεπιθύμητης αστάθειας κατά τη λειτουργία. Σε αρκετά συστήματα servo μηχανισμού με ηλεκτρικό κινητήρα χρησιμοποιούνται κοχλίες με σφαιρικά έδρανα κύλισης σε προένταση (pre-loaded ball screw) (Εικόνα 7) για την μεταφορά της κίνησης από το μοτέρ στον άξονα. Τέτοια συστήματα έχουν το πλεονέκτημα της ιδιαίτερα χαμηλής τριβής επιτρέποντας την ελεύθερη περιστροφική κίνηση δίχως ανάπτυξη επιπλέον φορτίου κατά την εκκίνηση. Ελαχιστοποιείται κατ' αυτόν τον τρόπο η πιθανότητα κάποιας «αναπήδησης» του ηλεκτροδίου, καθώς ο κινητήρας, σε διαφορετική περίπτωση, θα χρειαζόταν να υπερνικήσει τη στατική τριβή, αναπτύσσοντας επιπλέον φορτίο. Η προένταση τέλος χρησιμοποιείται για «μηδενισμό» της «χάρης – παλινδρόμησης» του συστήματος.



Εικόνα 8 Γραφική απεικόνιση ενός servo μηχανισμού με μοτερ [6]

**Υδραυλικό σύστημα:** Ο υδραυλικός servo μηχανισμός (Εικόνα 9) είναι εξ ορισμού «απαλλαγμένος» από «χάρη – παλινδρόμηση». Όταν ασκείται πίεση από το ρευστό στην μία πλευρά του υδραυλικού εμβόλου, ρευστό εισέρχεται από αυτή τη πλευρά στον κύλινδρο και εξέρχεται από την άλλη, με το έμβολο, μαζί με το βάκτρο να πραγματοποιούν την ανάλογη κίνηση. Όταν δεν υπάρχει ούτε είσοδος, ούτε έξοδος ρευστού από το κύλινδρο το σύστημα παραμένει σταθερό (ηλεκτρόδιο ακίνητο). Η ροή του ρευστού προς και από τον κύλινδρο, ελέγχεται με servo βαλβίδες, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχονται ηλεκτρονικά από τη μονάδα του servo μηχανισμού. Το σύστημα πρέπει να παραμένει στατικό, εκτός των περιπτώσεων, που του «δίνεται η εντολή» να κινηθεί. Στα περισσότερα servo υδραυλικά συστήματα υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των βαλβίδων για να διατηρούν στατικό το σύστημα και συνήθως αναφέρεται ως «μηδενική θέση» (null position). Είναι εξαιρετικά σημαντική η περίπτωση, που το υδραυλικό ρευστό αλλάζει θερμοκρασία, καθώς μπορεί να προκληθεί κίνηση του εμβόλου ανεξάρτητη από τη λειτουργία των βαλβίδων, αλλά λόγω αλλαγής των ιδιοτήτων του ρευστού. Αυτό ονομάζεται «drift» και λαμβάνεται υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό των συστημάτων από τους κατασκευαστές [6].



Εικόνα 9 Γραφική απεικόνιση ενός υδραυλικού servo μηχανισμού [6]

### 1.2.7 Μονάδα Παροχής Ισχύος – Γεννήτρια Παλμών (Power Supply Unit – Pulse Generator)

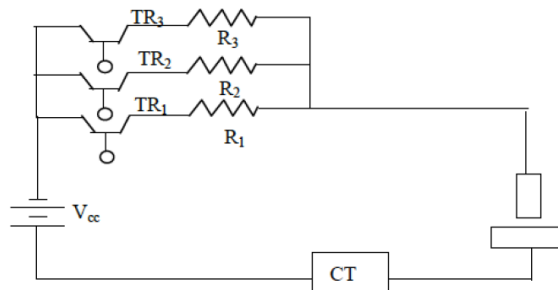
Η μονάδα παροχής ισχύος αποτελεί ένα από τα κύρια δομικά στοιχεία μιας μηχανής EDM. Τα βασικά μέρη που την αποτελούν είναι:

- Πηγή συνεχούς ρεύματος (DC Power source)
- Servo μηχανισμός (Servo control)
- Διανομέας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC electric power distribution)
- Μονάδα προστασίας ηλεκτρικού τόξου συνεχούς ρεύματος (DC arc protection unit)

Οι γεννήτριες παλμών χωρίζονται συνήθως σε δύο βασικούς τύπους:

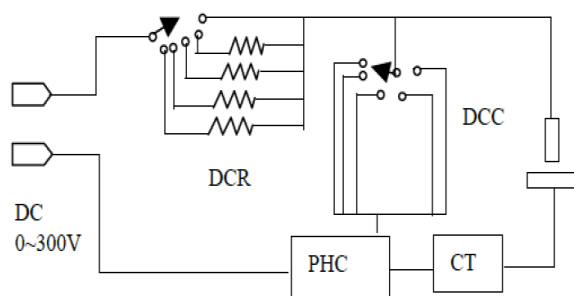
- Με χρήση τρανζίστορ ή ηλεκτρονικών διακοπών
- Αντίστασης – Πυκνωτή (Resistor – Capacitor RC)

Οι γεννήτριες με χρήση τρανζίστορ (Εικόνα 10) διαθέτουν τρανζίστορ (TR), αντιστάσεις για το περιορισμό της έντασης ρεύματος (R), και μετασχηματιστή ρεύματος (CT). Οι αντιστάσεις και τα τρανζίστορ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10, βρίσκονται σε παράλληλη σύνδεση ανάμεσα στην μονάδα παροχής ισχύος συνεχούς ρεύματος και στο διάκενο παραγωγής σπινθήρων. Η ένταση ρεύματος κατά την δημιουργία σπινθήρα αυξάνεται ανάλογα με το πόσα τρανζίστορ είναι «αναμμένα» (switched on) ταυτόχρονα. Ο μηχανισμός ON/OFF (που πρακτικά δημιουργεί τους ηλεκτρικούς παλμούς στην επιθυμητή συχνότητα) ελέγχεται από τρανζίστορ πεδίου (Field Effect Transistor). Ο τύπος αυτού παλμογεννήτριας είναι ο πλέον διαδεδομένος για εργαλειομηχανές συμβατικής ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της διάρκειας και συχνότητας των παλμών μέσω των ηλεκτρονικών διακοπών ON/OFF, ενώ ταυτόχρονα έχουν τη δυνατότητα παροχής - δημιουργίας υψηλής ενέργειας σπινθήρων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αυξημένος ρυθμός αποβολής υλικού κατά τη κατεργασία.



Εικόνα 10 Διαγραμματική παρουσίαση γεννήτριας παλμών με χρήση τρανζίστορ [5]

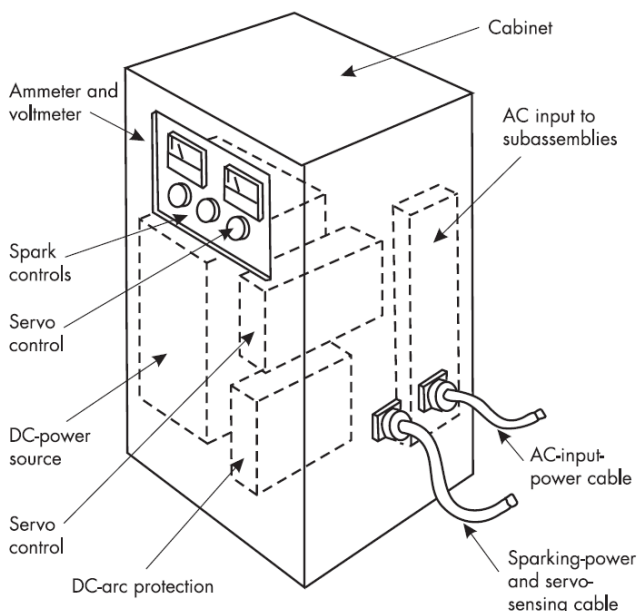
Τα βασικά στοιχεία μιας παλμογεννήτριας αντιστάσεων – πυκνωτών (Εικόνα 11) είναι: οι αντιστάσεις ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης (discharge control resistors), οι πυκνωτές ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης (discharge control capacitors), το κύκλωμα ελέγχου μέγιστης έντασης (peak hold circuit), και ο μετασχηματιστής ρεύματος (CT). Η διάρκεια παλμών σε τέτοιου τύπου γεννήτριες ορίζεται από την



Εικόνα 11 Διαγραμματική παρουσίαση γεννήτριας παλμών με αντιστάσεων – πυκνωτών [5]

χωρητικότητα των πυκνωτών και την αυτεπαγωγή των καλωδίων σύνδεσης του πυκνωτή με το τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο. Η συχνότητα παλμών εξαρτάται από το χρόνο φόρτισης, ο οποίος ελέγχεται μέσω της «αντίστασης R» που επιλέγεται να χρησιμοποιείται κάθε φορά στο κύκλωμα. Η «αντίσταση R» δεν πρέπει να έχει πολύ χαμηλές τιμές, καθώς υπάρχει περίπτωση δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου αντί ηλεκτρικής εκκένωσης. Για την «αντίσταση R» υπάρχει μια επιθυμητή «κρίσιμη» τιμή για την οποία αποτρέπονται τέτοια φαινόμενα. Η ενέργεια εκκένωσης ορίζεται από τον πυκνωτή που χρησιμοποιείται, αλλά και από «διάσπαρτους πυκνωτές» (stray capacitance), που δημιουργούνται στη διάταξη συγκράτησης του ηλεκτροδίου, στην τράπεζα εργασίας και ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο. Οι παλμογεννήτριες τέτοιου τύπου ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά έχουν περιορισμούς στην μέγιστη ενέργεια εκκένωσης, την οποία μπορούν να παράγουν, περιορίζοντας έτσι και το ρυθμό αποβολής υλικού. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατεργασίες micro – EDM λόγω της δυνατότητας να παράγουν σπινθήρες πολύ χαμηλής ενέργειας.

Η μονάδα παροχής ισχύος συνήθως περιλαμβάνει βολτόμετρο και αμπερόμετρο για τη μέτρηση των αντίστοιχων μεγεθών (διαφορά δυναμικού και ένταση ρεύματος) στο διάκενο ηλεκτροδίου – τεμαχίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Συνήθως υπάρχει και ένδειξη σταθερότητας και αποδοτικότητας της κατεργασίας (servo system stability and efficiency), ώστε μέσω άμεσης εποπτείας, να είναι ευκολότερη η επιλογή συνθηκών που θα μεγιστοποιούν αυτές τις παραμέτρους.



**Εικόνα 12 Βασικά στοιχεία που απαρτίζουν μια τυπική μονάδα ισχύος [6]**

Εκτός των κατασκευαστικών παραμέτρων της μονάδος ισχύος, οι οποίες κατά κύριο λόγο απασχολούν και είναι στο πεδίο ευθύνης του κατασκευαστή, η τοποθέτησή της στον χώρο λειτουργίας είναι σημαντική παράμετρος. Η ανάγκη για ψύξη της μονάδας ισχύος συνήθως καλύπτεται με χρήση του περιβάλλοντος αέρα με την ταυτόχρονη όμως ανάγκη για εγκατάσταση φίλτρων, τα οποία θα την προστατεύουν από αιωρούμενα σωματίδια με διαβρωτικά, ηλεκτρικά αγωγίμα, και ελαιώδη χαρακτηριστικά, και τα οποία προκαλούν φθορές και καταστροφή της εργαλειομηχανής [6].

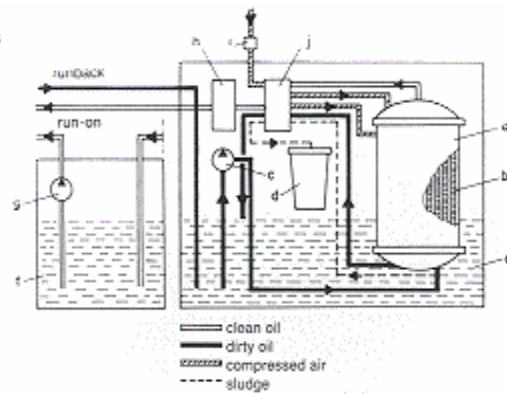
### 1.2.8 Σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού μέσου και έκπλυσης

Το σύστημα κυκλοφορίας και έκπλυσης στόχο έχει την τροφοδοσία της «ζώνης κατεργασίας» (machining zone) με «φρέσκο – καθαρό» διηλεκτρικό μέσο, και την απομάκρυνση από αυτήν των προϊόντων κατεργασίας (έκπλυση). Τα κύρια μέρη του συστήματος είναι (Εικόνα 13):

- Δεξαμενή του διηλεκτρικού μέσου (tank / reservoir)
- Αντλία
- Φίλτρα
- Εγκατάσταση από σωληνώσεις και ακροφύσια

Η αντλία χρησιμοποιείται για την παροχή του διηλεκτρικού μέσου στο δοχείο εργασίας, ενώ τα φίλτρα συγκρατούν τα κατακρημνίσματα – απόβλητα της κατεργασίας καθαρίζοντάς το και εξασφαλίζοντας ότι γίνεται χρήση σταθερής ποιότητας διηλεκτρικού μέσου. Όσο «καλύτερες» συνθήκες απόπλυσης επικρατούν τόσο μικρότερα «νεκρά χρονικά μεσοδιαστήματα» ( $T_{off}$ ) χρειάζονται και άρα καθίσταται η κατεργασία πιο αποδοτική. Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος κυκλοφορίας και απόπλυσης είναι:

Diagram of a filter system for dielectrics working according to the edge filter principle  
a filter container,  
b filter rods,  
c filter pump,  
d sludge tank,  
f clean oil tank,  
g machine pump,  
h oil air cooler,  
i water trap and reducing valve for compressed air,  
j central valve with single-lever operation



Εικόνα 13 Διάγραμμα τυπικού συστήματος κυκλοφορίας - απόπλυσης

- Να παροχετεύει το διηλεκτρικό μέσο στο διάκενο εκδήλωσης σπινθήρα προκειμένου να απομακρυνθούν αέρια και στερεά κατακρημνίσματα - απόβλητα.
- Να διοχετεύει με «φρέσκο – καθαρό» διηλεκτρικό μέσο την περιοχή κοπής.
- Να διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία του διηλεκτρικού μέσου πολύ χαμηλότερα από το σημείο εξάχνωσης – ανάφλεξης (flash point).
- Να λειτουργεί ως σύστημα ψύξης ηλεκτροδίου – τεμαχίου.

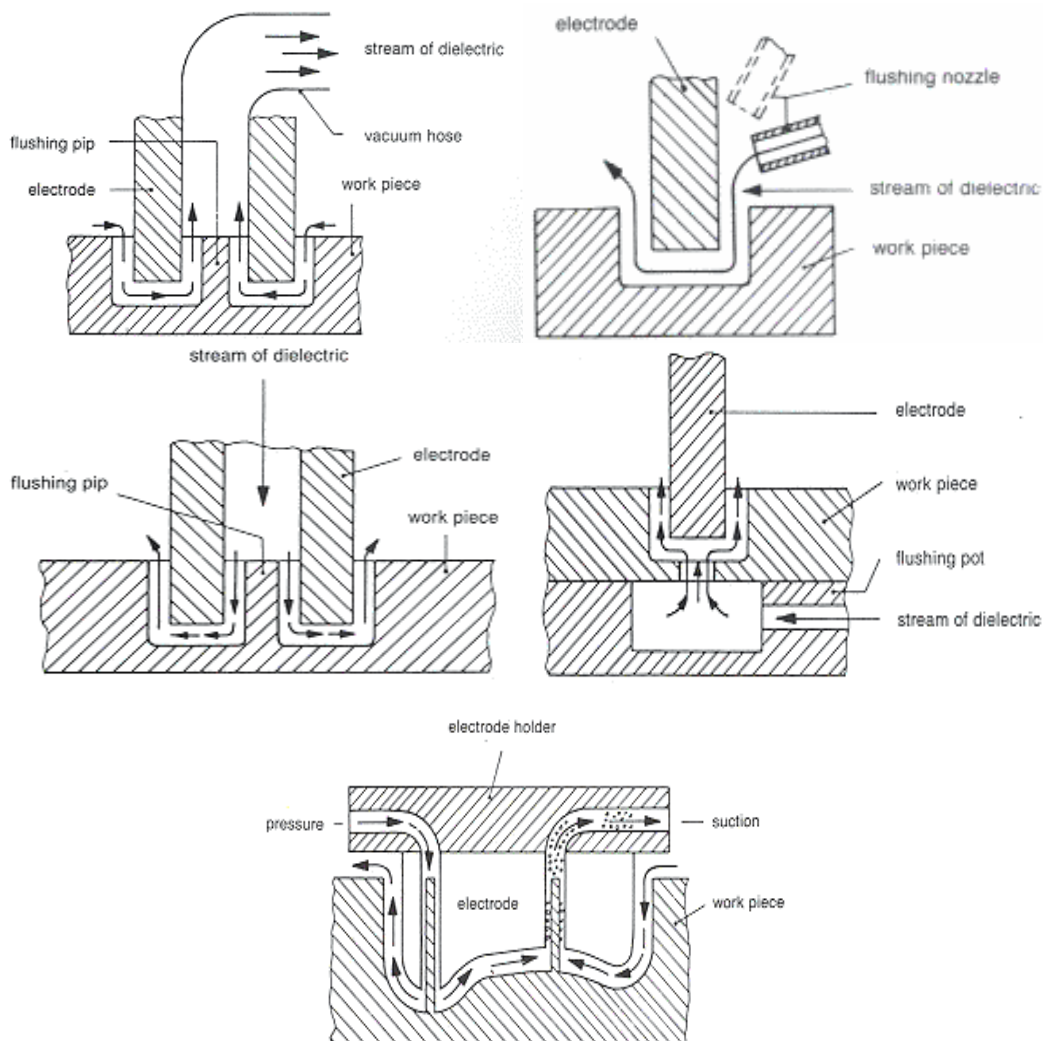
Συνήθως κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το τεμάχιο παραμένουν βυθισμένα στο διηλεκτρικό μέσο με την απόπλυση να συμβαίνει – υποβοηθείται από την κίνηση του ηλεκτροδίου. Η κίνηση του ηλεκτροδίου δημιουργεί στροβιλισμούς του ρευστού στο διάκενο ηλεκτροδίου – τεμαχίου και έτσι διευκολύνεται η απομάκρυνση των προϊόντων της κατεργασίας. Σε σύγχρονες εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι – μέθοδοι απόπλυσης (Εικόνα 14), οι οποίες και επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες – ιδιαιτερότητες της εκάστοτε κατεργασίας. Οι τύποι αυτοί είναι:

- Απόπλυση με πίεση ή μέσω ψεκασμού (Pressure flushing / Injection flushing)
- Απόπλυση μέσω αναρρόφησης (Suction flushing)
- Απόπλυση με δέσμη jet ή πλάγια απόπλυση (Jet or side flushing)

Η πίεση του ρευστού είναι σημαντικός παράγοντας της διαδικασίας. Σε πολύ χαμηλές πιέσεις είναι δύσκολη η απομάκρυνση στερεών και αέριων προϊόντων της κατεργασίας, ενώ υψηλές πιέσεις επιταχύνουν την φθορά του ηλεκτροδίου και δημιουργούν ανεπιθύμητους στροβιλισμούς. Επίσης, επηρεάζεται και η ποιότητα επιφανείας ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πίεση. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζεται ενδεικτικά πως επηρεάζει η πίεση απόπλυσης παραμέτρους της κατεργασίας [5, 6].

Πίνακας 7 Μεταβολή παραμέτρων κατεργασίας συναρτήσει της πίεσης απόπλυσης

Παράμετρος της κατεργασίας	Μεταβολή συναρτήσει της πίεσης
Ρυθμός Αποβολής Υλικού (MRR)	Μειώνεται ελαφρώς με αύξηση της πίεσης
Σχετική Φθορά Ηλεκτροδίου (RWR)	Αρχικά μειώνεται και μετά αυξάνεται καθώς αυξάνεται η πίεση. Υπάρχει ένα επιθυμητό βέλτιστο ελάχιστο για κάθε κατεργασία.
Τραχύτητα Επιφανείας ( $R_a$ )	Τείνει αρχικά να μειωθεί και στη συνέχεια αυξάνεται με αύξηση της πίεσης έκπλυσης.



Εικόνα 14 Μέθοδοι απόπλυσης α) Με αναρρόφηση β) Με δέσμη jet γ) Με πίεση και παροχή του ρευστού μέσω του ηλεκτροδίου δ) Με πίεση και παροχή του ρευστού μέσω του τεμαχίου ε) Συνδυασμός μεθόδων

## 2. Παράμετροι Ελέγχου και Απόδοσης της Κατεργασίας

Αρχικά ένα θεμελιώδες μέγεθος που ορίζει την κατεργασία είναι η ενέργεια ανά παλμό, η οποία και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_P = V_P * I_P * T_{on} * \frac{1}{T_{on} + T_{off}} = V_P * I_P * \eta$$

$$V_P = H \text{ διαφορά δυναμικού σε κάθε παλμό [V]}$$

$$I_P = H \text{ ένταση ρεύματος σε κάθε παλμό [A]}$$

$$T_{on} = O \text{ χρόνος εκδήλωσης σπινθήρα [sec]}$$

$$T_{off} = O \text{ χρόνος ανάμεσα σε δύο σπινθήρες [sec]}$$

$$\eta = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \text{duty ratio}$$

Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν και καθορίζουν τη κατεργασία.

### 2.1 Διαφορά δυναμικού

Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Υψηλότερες τιμές δίνουν τη δυνατότητα για μεγαλύτερο διάκενο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο, γεγονός που διευκολύνει την έκπλυση και απομάκρυνση των αποβλήτων καθιστώντας τη κατεργασία πιο σταθερή και αυξάνοντας τον ρυθμό αποβολής υλικού (MRR). Ταυτόχρονα όμως έχει ως αποτέλεσμα κατεργασμένες επιφάνειες υψηλότερης τραχύτητας (root surface roughness) και μεγαλύτερη φθορά ηλεκτροδίου.

### 2.2 Ένταση ρεύματος

Η ένταση ρεύματος κατά τη διάρκεια του παλμού. Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει ο διαχωρισμός ανάμεσα σε μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος (peak current) και στη μέση τιμή. Η μέγιστη τιμή ρεύματος είναι «υπεύθυνη» για τον ιονισμό του διηλεκτρικού μέσου και τη δημιουργία της στήλης πλάσματος. Όσο υψηλότερη τιμή έχει, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται ανά παλμό, με αποτέλεσμα υψηλότερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού (MRR), αλλά επιφάνεια με χαμηλότερη ποιότητα τραχύτητα.

Καθώς το «σύνολο του ρεύματος» της κατεργασίας διέρχεται από το αμπερόμετρο η ένδειξη στο αμπερόμετρο αποτελεί το μέσο όρο έντασης (αμπέρ) του ρεύματος κατεργασίας και όχι τη μέγιστη τιμή. Στον υπολογισμό «συμμετέχουν» οι χρόνοι  $T_{on}$  και  $T_{off}$  με τη μέση τιμή να υπολογίζεται ως:

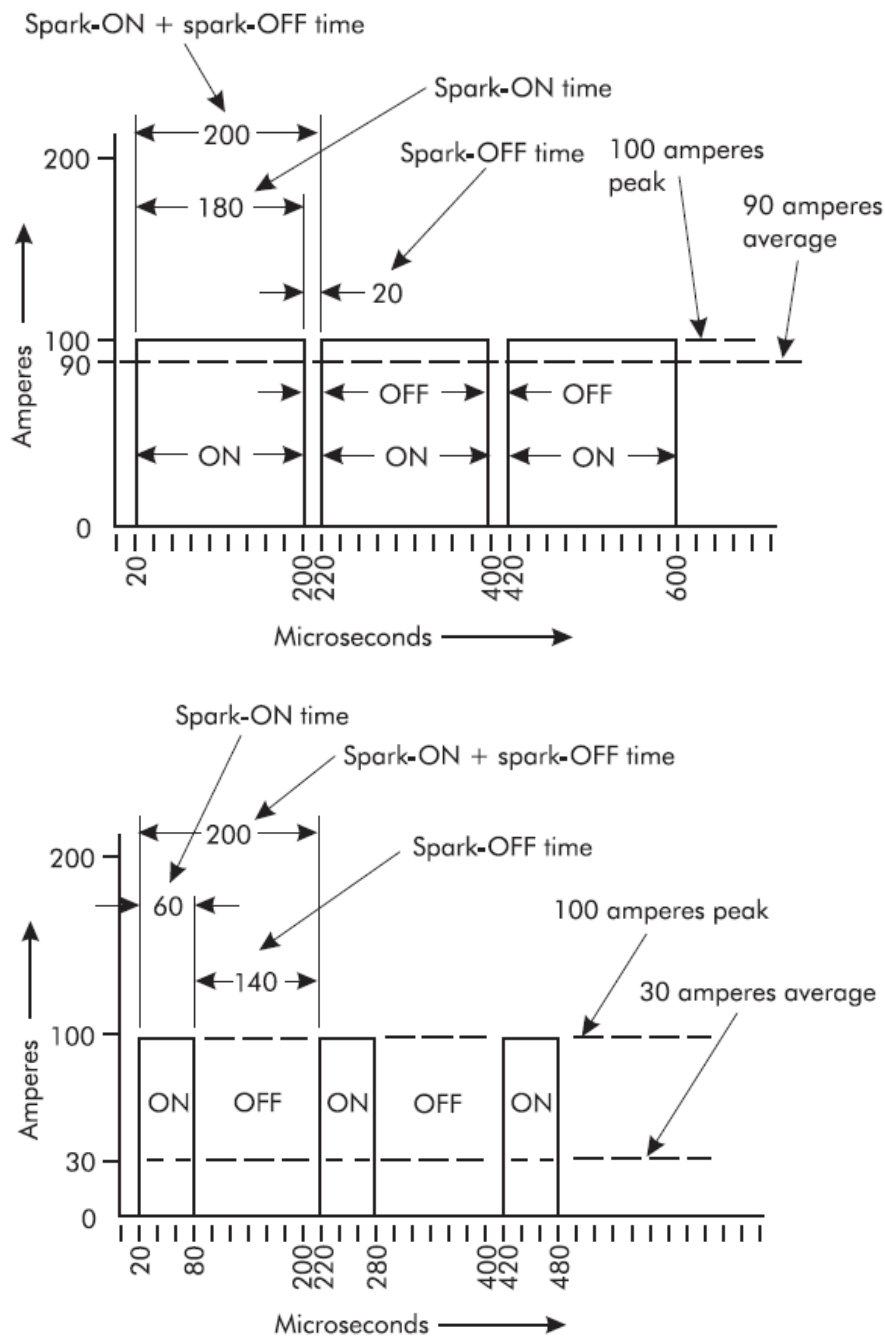
$$\bar{I}_P = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} * \int_0^{T_{on}+T_{off}} I(t)dt$$



Για ορθογωνικό παλμό (θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια) η μέση ένταση ρεύματος υπολογίζεται από τον τύπο [5]:

$$\bar{I}_p = I_p * \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = I_p * \eta [A]$$

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της μέσης έντασης ρεύματος για έναν «σύντομο» (short) και έναν εκτεταμένο (long) κύκλο εργασίας (duty cycle) [6].



Εικόνα 15 α) Υπολογισμός μέσης έντασης ρεύματος για short duty cycle β) υπολογισμός μέσης έντασης ρεύματος για long duty cycle [6]

### 2.3 Χαρακτηριστικά παλμού – Κυματομορφή (Pulse Waveform)

Η **διάρκεια ενός παλμού ( $T_{on}$ )** ορίζεται ως ο χρόνος κατά τον οποίο υπάρχει ροή ρεύματος ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο και κατ' επέκταση το χρονικό διάστημα κατά το οποίο παρατηρείται αποβολή υλικού. Είναι προφανές ότι ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR) σχετίζεται με τρόπο άμεσο και σχεδόν αναλογικό με τη διάρκεια του παλμού, καθώς ουσιαστικά είναι ο αποτελεσματικός – αποδοτικός χρόνος κατεργασίας. Οι μεγαλύτερης διάρκειας παλμοί έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερης ποιότητας κατεργαζόμενη επιφάνεια, καθώς οι κρατήρες που σχηματίζονται είναι βαθύτεροι και με μεγάλη διάμετρο. Για χαμηλή τραχύτητα συνιστάται η χρήση «σύντομων» παλμών (shorter). Τέλος, η χρονική διάρκεια των παλμών συνδέεται, εκτός από την ταχύτητα της κατεργασίας και την τραχύτητα επιφανείας και με τη σταθερότητα που έχει η κατεργασία. Οι συνηθισμένοι χρόνοι σε συμβατικές κατεργασίες EDM είναι της τάξης των msec.

Το **μεσοδιάστημα (pulse interval –  $T_{off}$ )** είναι ο χρόνος ανάμεσα στην εκδήλωση δύο παλμών. Κατά τη διάρκειά του δεν υπάρχει ροή ρεύματος, ούτε εκδήλωση σπινθήρα. Παρ' όλα αυτά είναι εξαιρετικής σημασίας, καθώς είναι ο χρόνος κατά τον οποίο γίνεται η απομάκρυνση των αποβλήτων – προϊόντων από τη ζώνη κατεργασίας. Η σωστή επιλογή του μεσοδιαστήματος αποτελεί βελτιστοποίηση ανάμεσα στη σταθερότητα και στην ταχύτητα της κατεργασίας (αύξηση του μεσοδιαστήματος κάνει την κατεργασία πιο αργή, αλλά ταυτόχρονα βοηθάει στην αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των αποβλήτων καθιστώντας τη πιο σταθερή). Τυπικές τιμές είναι της τάξης των msec.

Όπως έχει προαναφερθεί ως **duty ratio** ορίζεται το πηλίκο της διάρκειας ενός παλμού ( $T_{on}$ ) προς το άθροισμα της διάρκειας ενός παλμού και της διάρκειας του μεσοδιαστήματος ( $T_{on}+T_{off}$ ). Πρακτικά δείχνει το ποσοστό του χρόνου που έχουμε ροή ρεύματος και, άρα, απομάκρυνση υλικού και συνδέεται προφανώς με το MRR.

**Κυματομορφή:** οι κυματομορφές της διαφοράς δυναμικού και της έντασης του ρεύματος κατά την κατεργασία παρουσιάζουν ουσιαστικά της ροή ενέργειας προς το τεμάχιο και είναι καίριας σημασίας για την κατανόηση και περιγραφή της κατεργασίας. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να τονίσουμε ότι η προσέγγιση μας περιέχει κάποιες αναγκαίες απλοποιήσεις, αλλά παρ' όλα αυτά είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα και δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ρεαλιστική και αποτελεσματική μελέτη της κατεργασίας.

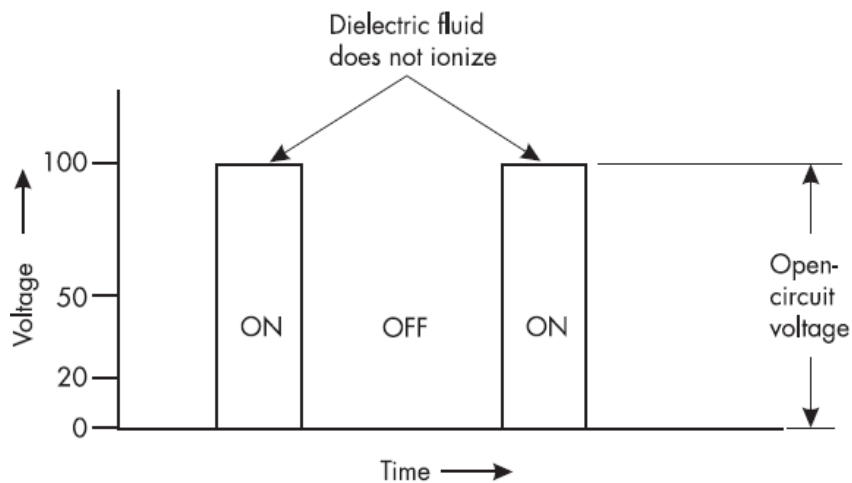
Αρχικά, αναφερόμενοι στην διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο διακρίνουμε τις εξής δύο περιπτώσεις: ενώ το κύκλωμα ισχύος «παρέχει» την απαραίτητη ισχύ κατά τη διάρκεια ενός παλμού ( $T_{on}$ ) για να εκδηλωθεί σπινθήρας, είτε θα υπάρξει ο σπινθήρας με ταυτόχρονη ροή ρεύματος, είτε δεν φτάσει το διηλεκτρικό μέσο σε σημείο ιονισμού και δεν θα εκδηλωθεί σπινθήρας.

Στην πρώτη περίπτωση η διαφορά δυναμικού, που αναπτύσσεται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού ( $T_{on}$ ), καθώς δεν έχουμε εκδήλωση σπινθήρα και ροή ρεύματος. Ονομάζεται διαφορά δυναμικού ανοικτού κυκλώματος (open circuit voltage) μηδενίζεται κατά τον  $T_{off}$  και έχει τυπική τιμή 100[V], η οποία καθορίζεται από το κατασκευαστή. Φαινόμενα μη εκδήλωσης σπινθήρα υπάρχουν

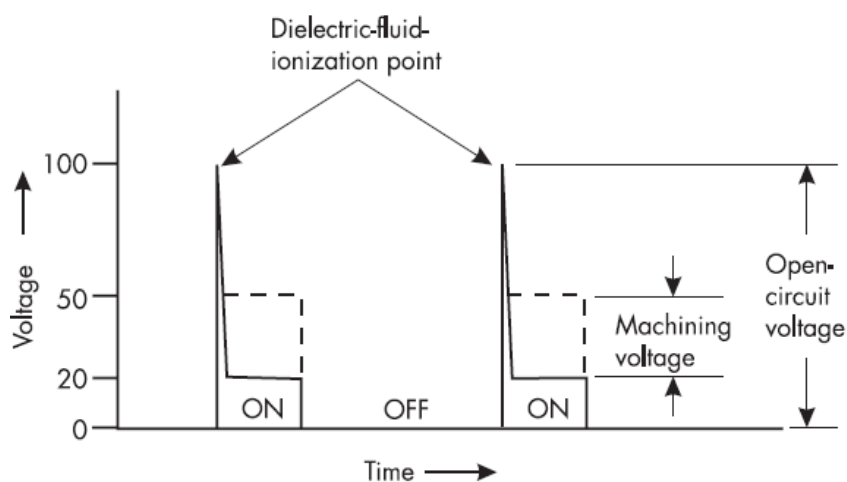
όταν το διάκενο ανάμεσα στο τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο είναι μεγαλύτερο από το προβλεπόμενο (ικανό για εκδήλωση σπινθήρα).

Στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει εκδήλωση σπινθήρα και ροή ρεύματος ανάμεσα στο τεμάχιο και στο ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια του παλμού ( $T_{on}$ ). Καθώς υπάρχει ροή ρεύματος η διαφορά δυναμικού, σχεδόν ακαριαία, μειώνεται από την τάση ανοικτού κυκλώματος  $\approx 100[V]$  σε τάση κατεργασίας (machining voltage), η οποία κυμαίνεται ανάμεσα σε 20 και 50[V], με την ακριβή τιμή να καθορίζεται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού μέσου κατά τον ιονισμό του. Συνήθως, και υπό φυσιολογικές συνθήκες, ο σπινθήρας και κατά συνέπεια και η μείωση της τάσης εκδηλώνεται στην αρχή του  $T_{on}$ .

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται τυπικές κυματομορφές διαφοράς δυναμικού για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις.



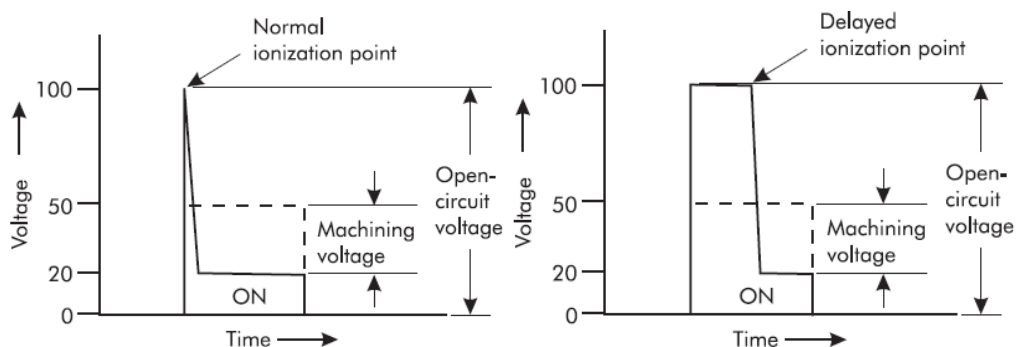
A. Sparking-gap voltage *without* dielectric-fluid ionization



B. Sparking-gap voltage *with* dielectric-fluid ionization

Εικόνα 16 Η διαφορά δυναμικού στο διάκενο για την περίπτωση  
α) μη εκδήλωσης σπινθήρα b) εκδήλωσης σπινθήρα [6]

Υπάρχει επίσης το ενδεχόμενο να μην εκδηλωθεί σπινθήρας στην αρχή του παλμού, αλλά κάποια στιγμή κατά τη διάρκειά του. Αυτό χαρακτηρίζεται ως ιονισμός με χρονική καθυστέρηση (delayed dielectric fluid ionization) και φυσικά μεταβάλλει τη κυματομορφή της διαφοράς δυναμικού. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται μια τυπική μορφή ορθογώνιου παλμού και μια με καθυστέρηση ιονισμού.

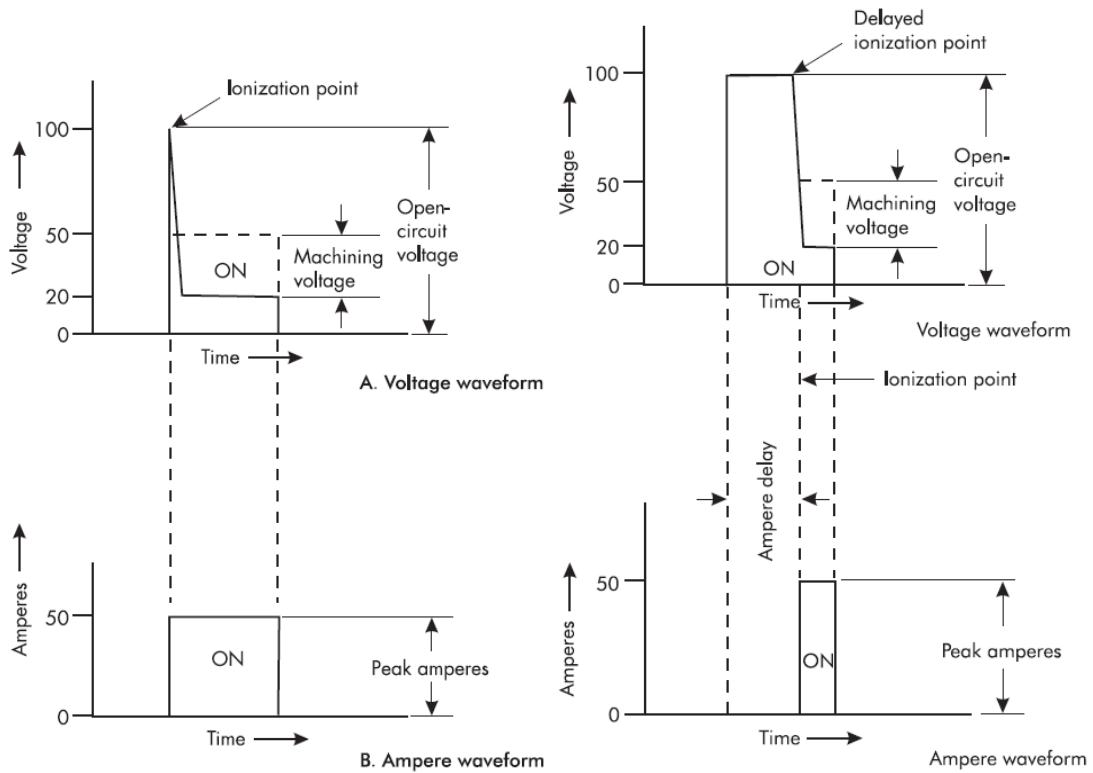


Εικόνα 17 Σύγκριση ανάμεσα α) σε "φυσιολογικό" παλμό και β) σε παλμό με καθυστέρηση ιονισμού

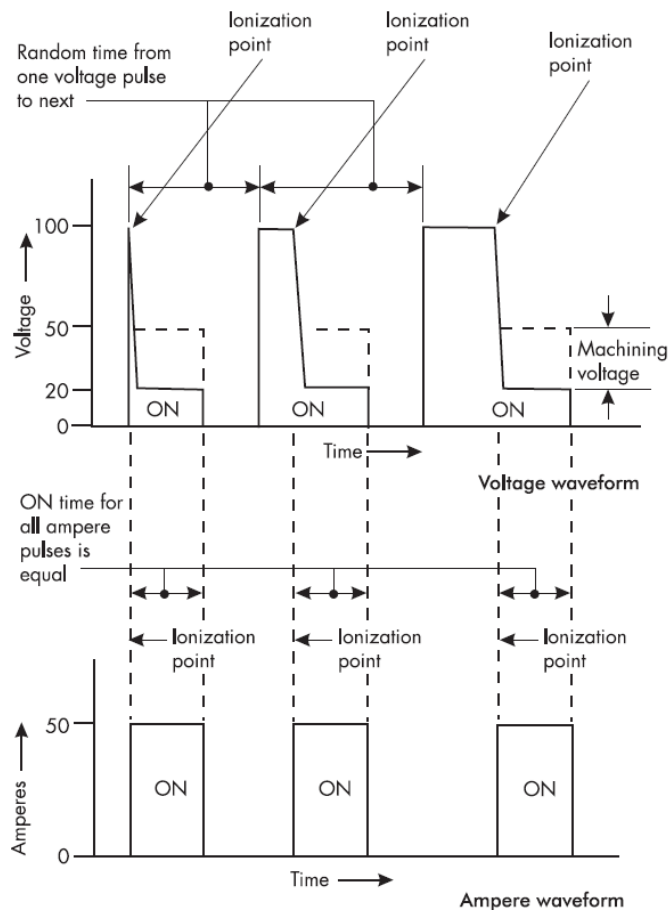
Η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο τεμάχιο συνδέεται άμεσα με τη ροή ρεύματος, που εμφανίζεται όταν υπάρξει ιονισμός του διηλεκτρικού μέσου. Η ανάλυση και των δύο μεγεθών (διαφορά δυναμικού και ένταση ρεύματος), καθώς και ο τρόπος που συνδέονται είναι απαραίτητη για την σωστή και ολοκληρωμένη κατανόηση της κατεργασίας. Όπως έχει προαναφερθεί, ο μηχανισμός είναι:

- Εφαρμογή διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο (διαφορά δυναμικού ανοικτού κυκλώματος  $\approx 100[V]$  τυπική τιμή).
- Ιονισμός διηλεκτρικού μέσου και πτώση δυναμικού σε δυναμικό κατεργασίας (διαφορά δυναμικού κατεργασίας με τυπικές τιμές από 20 – 50[V]).
- Εμφάνιση ροής ηλεκτρονίων – ρεύμα, η ένταση του οποίου εξαρτάται από τις ρυθμίσεις της εργαλειομηχανής και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου κατά τον ιονισμό του.
- Μηδενισμός διαφοράς δυναμικού και ρεύματος κατά το μεσοδιάστημα.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον ο ιονισμός μπορεί να συμβεί όχι απαραίτητα στην αρχή του παλμού, αλλά σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκειά του (καθυστέρηση ιονισμού), ακολούθως και το ρεύμα «αποκτά» ανάλογη κυματομορφή. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται η σύγκριση ανάμεσα σε ένα σύστημα (διαφορά δυναμικού – ένταση ρεύματος) με και χωρίς καθυστέρηση ιονισμού. Συνέπεια της καθυστέρησης ιονισμού είναι ο «καθαρός» χρόνος εμφάνισης ηλεκτρικού ρεύματος να μειώνεται, όπως φαίνεται άλλωστε και στην Εικόνα 18, με αποτέλεσμα να μειώνεται αντίστοιχα και η ποσότητα υλικού που απομακρύνεται από το συγκεκριμένο παλμό. Σύγχρονες εργαλειομηχανές έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρικούς παλμούς με σταθερό χρόνο ηλεκτρικής εκκένωσης (sparks with equal ON time). Πλεονέκτημα τέτοιων κυματομορφών είναι η απομάκρυνση σταθερού όγκου υλικού σε κάθε παλμό – σπινθήρα και η εξασφάλιση της ομοιομορφίας στην ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται τυπική κυματομορφή για σταθερή διάρκεια σπινθήρα.



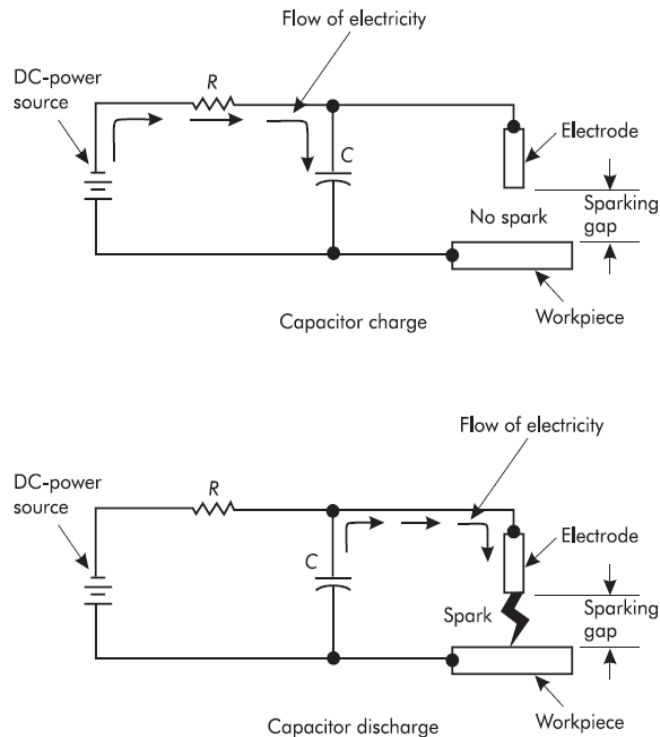
Εικόνα 18 Σύγκριση των κυματομορφών δυναμικού - ρεύματος για περίπτωση α) ιονισμού στην αρχή του παλμού β) ιονισμού με χρονική καθυστέρηση [6]



Εικόνα 19 Κυματομορφή με σταθερό χρόνο  $T_{on}$  εκδήλωσης σπινθήρα [6]

Οι παραπάνω κυματομορφές αναφέρονται σε κυκλώματα με χρήση ηλεκτρονικών (electronic switch on/off), εξ' ου και οι «ορθογώνιοι» παλμοί. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθούμε στα κυκλώματα R/C και στους παλμούς που αυτά έχουν (κάνοντας φυσικά τις απαραίτητες απλουστεύσεις στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας).

Σε ένα κύκλωμα R/C η αντίσταση "R" ουσιαστικά «δυσκολεύει» τη ροή ρεύματος από την πηγή συνεχούς ρεύματος προς τον πυκνωτή, ενώ ο πυκνωτής "C" «αποθηκεύει» το ρεύμα που φτάνει σε αυτόν μέσω της αντίστασης. Όταν ολοκληρωθεί η φόρτιση του πυκνωτή, ακολουθεί η εκφόρτισή του μέσω του συστήματος ηλεκτροδίου – διάκενου – τεμαχίου με την εκδήλωση σπινθήρα. Το σημείο εκδήλωσης του σπινθήρα εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου. Ο χρόνος του παλμού  $T_{on}$  είναι ο χρόνος εκφόρτισης του πυκνωτή, ενώ το μεσοδιάστημα  $T_{off}$  είναι ο χρόνο φόρτισής του. Οι χρόνοι αυτοί ( $T_{on}$  και  $T_{off}$ ) μεταβάλλονται με την επιλογή αντίστασης R[Ohm] και χωρητικότητα πυκνωτή C[F]. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται διαγραμματικά στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20 Διαγραμματική παρουσίαση της λειτουργίας ενός κυκλώματος R/C [6]

Η σταθερά χρόνου ενός κυκλώματος R/C ορίζεται ως:

$$\tau[sec] = R[Ohm] * C[F]$$

Κατά τη φόρτιση η διαφορά δυναμικού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$V_c = V_s * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

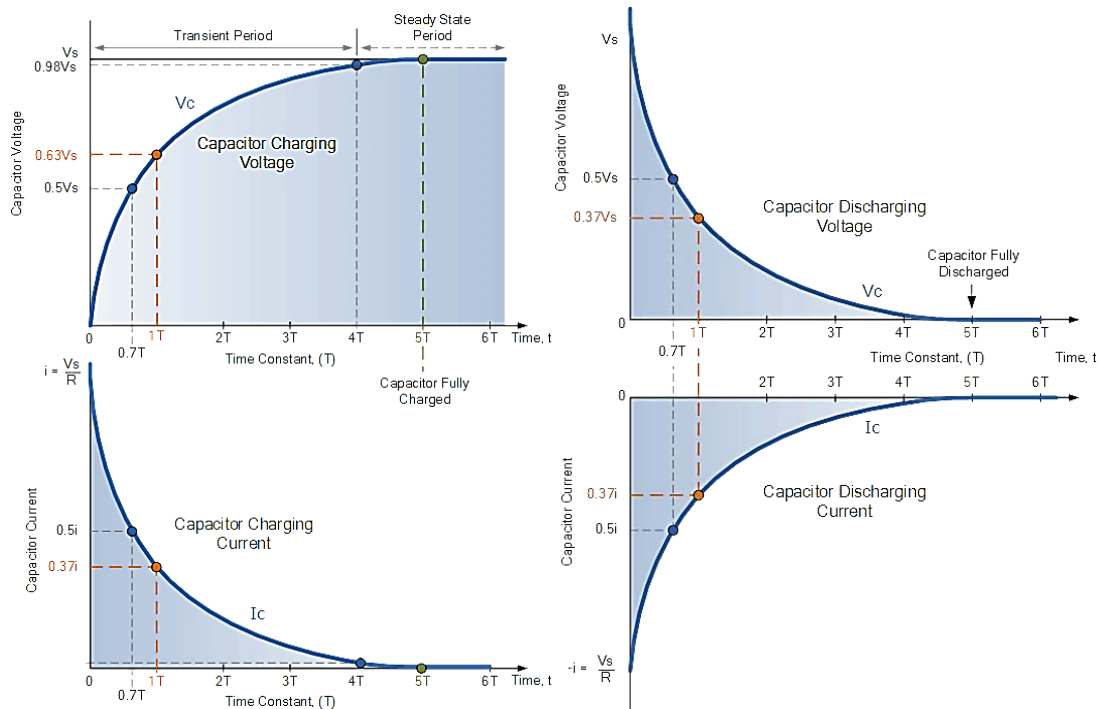
$$V_c = \text{διαφορά δυναμικού στο πυκνωτή [V]}, \quad V_s = \text{διαφορά δυναμικού πηγής [V]} \\ t = \text{χρόνος [sec]}, \quad \tau = \text{σταθερά χρόνου [sec]}$$

Κατά τη εκφόρτιση η διαφορά δυναμικού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$V_c = V_s * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

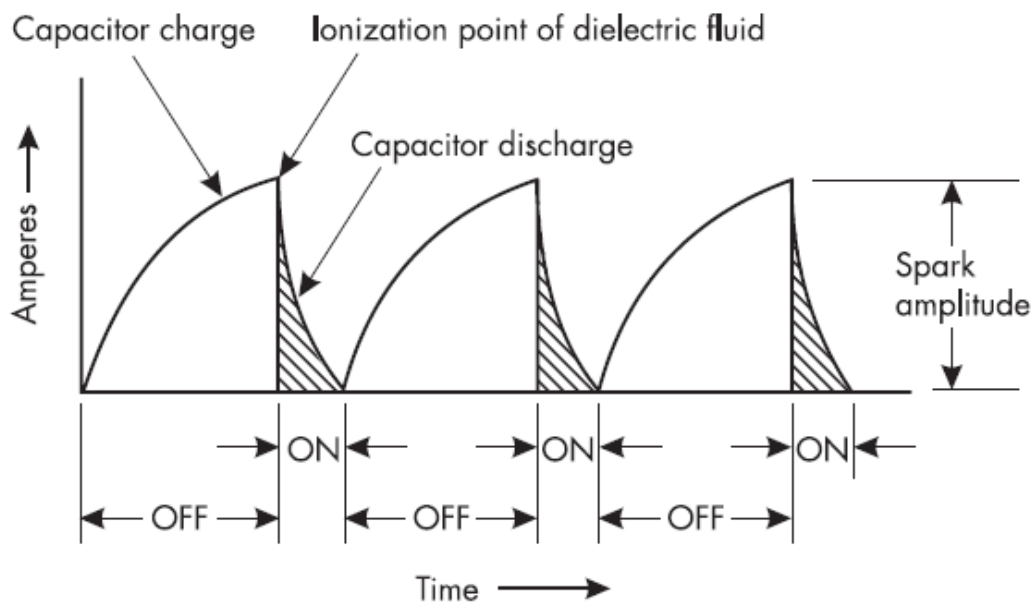
$$V_c = \text{διαφορά δυναμικού στο πυκνωτή [V]}, \quad V_s = \text{διαφορά δυναμικού πηγής [V]} \\ t = \text{χρόνος [sec]}, \quad \tau = \text{σταθερά χρόνου [sec]}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν τα διαγράμματα διαφοράς δυναμικού στο πυκνωτή και έντασης ρεύματος, κατά την φάση φόρτισης και εκφόρτισης (Εικόνα 21).



Εικόνα 21 Διαγράμματα διαφοράς δυναμικού και έντασης ρεύματος για τη φάση της α) φόρτισης του πυκνωτή β) εκφόρτισης του πυκνωτή

Άμεσο συμπέρασμα – αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η κυματομορφή του παλμού σε περίπτωση που η εργαλειομηχανή EDM έχει κύκλωμα R/C να διαφοροποιείται (σε σχέση με την ορθογώνια των electronic switch on /off) και να έχει τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 22.

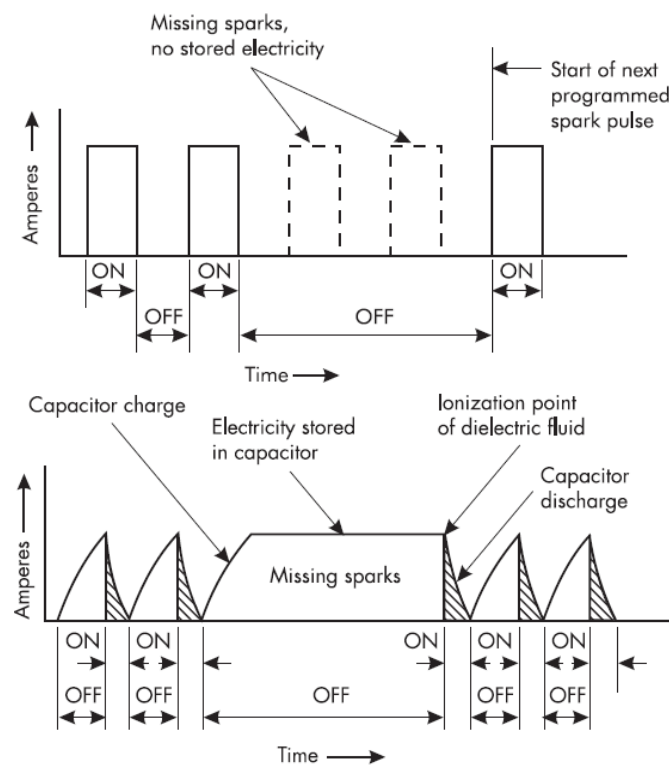


Εικόνα 22 Κυματομορφή με παροχή ισχύος από κύκλωμα R/C [6]

Εκτός από την προφανή διαφορά στη μορφή της κυματομορφής του παλμού ανάμεσα σε κύκλωμα switch on/off και R/C, υπάρχουν μερικά ακόμα βασικά σημεία – διαφορές που χρήζουν αναφοράς.

Τα κυκλώματα switch on/off σε σχέση με τα R/C είναι πιο αποδοτικά για τις περισσότερες EDM εφαρμογές. Επίσης, τα R/C κυκλώματα έχουν συνήθως ένα ανώτατο όριο έντασης ρεύματος περίπου 15[A]. Για το λόγο αυτό, και σε συνδυασμό με το ότι χρησιμοποιούνται κυρίως με μεταλλικά ηλεκτρόδια, R/C κυκλώματα επιλέγονται σε κατεργασίες χαμηλότερης ενέργειας (έντασης ρεύματος), που σκοπό έχουν την πολύ καλή ποιότητα επιφανείας (χαμηλή τραχύτητα) και την υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια.

Επίσης, μια ακόμα σημαντική διαφορά είναι η περίπτωση ενός παλμού που δεν οδηγεί σε σπινθήρα (έχει προαναφερθεί ως ενδεχόμενο). Σε κυκλώματα switch on/off η διαφορά δυναμικού στο χρονικό διάστημα  $T_{off}$ , ανεξάρτητα με το αν υπήρξε εκδήλωση σπινθήρα ή όχι, μηδενίζεται, και παίρνει πάλι την αναμενόμενη τιμή κατά το χρονικό διάστημα  $T_{on}$ . Αντίθετα, σε κυκλώματα R/C σε περίπτωση που δεν έχουμε εκδήλωση σπινθήρα, ο πυκνωτής παραμένει φορτισμένος, μέχρι την επόμενη φορά που θα υπάρξει σπινθήρας, και θα αρχίσει ένας νέος κύκλος φόρτισης εκφόρτισης του. Η ενέργεια εκφόρτισης δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του «χαμένου παλμού» και ως εκ τούτου δεν υπάρχει κάποια «επίπτωση» στην ποιότητα επιφανείας. Η μόνη άμεση συνέπεια των «χαμένων παλμών» (και στα switch on/off κυκλωμάτων και στα R/C), είναι η μείωση του βαθμού απόδοσης της κατεργασίας. Στην Εικόνα 23 φαίνεται η διαφορά ανάμεσα σε κύκλωμα switch on/off και R/C σε περίπτωση «χαμένων παλμών» στη κυματομορφή της έντασης ρεύματος [5, 6].



Εικόνα 23 Σύγκριση κυκλώματος α) switch on/off και β) R/C στην περίπτωση μη εκδήλωσης σπινθήρα [6]



## 2.4 Έλεγχος διακένου

Αν και οι παράμετροι ελέγχου διακένου δεν θεωρούνται «βασικές παράμετροι» ελέγχου της κατεργασίας EDM βύθισης, παίζουν σημαντικό ρόλο στη σταθερότητα και αποτελεσματικότητα αυτής. Έχουμε αναφερθεί στον έλεγχο διακένου (servo μηχανισμός), αλλά προς χάριν πληρότητας θα παραθέσουμε βασικούς ορισμούς – πληροφορίες.

Βασικός στόχος του ακριβούς ελέγχου διακένου είναι η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση) του ρυθμού αποβολής υλικού (MRR) και η εξασφάλιση υψηλής ποιότητας κατεργασμένη επιφάνεια. Σε περίπτωση μικρότερου διακένου από το προβλεπόμενο, αυξάνεται το ποσοστό των παλμών που δεν εκδηλώνουν κανονικό σπινθήρα, αλλά φαινόμενα ηλεκτρικού τόξου καθιστώντας, έτσι, την κατεργασία ασταθή. Ταυτόχρονα, καθώς συνεχίζει να αφαιρείται υλικό από το ηλεκτρόδιο, ενώ μειώνεται ο MRR, αυξάνεται ο λόγος φθοράς εργαλείου (TWR). Σε περιπτώσεις μεγαλύτερου από το προβλεπόμενο διακένου, αυξάνεται το ποσοστό των παλμών που δεν οδηγούν σε σπινθήρα και, έτσι, μειώνεται και εδώ ο MRR. Η βασική εξίσωση ελέγχου της πρόωσης του ηλεκτροδίου είναι [5]:

$$F_z = k_{EDM} * \text{sgn}[V_{gap} - V_{th}]$$

$$F_z = \text{ταχύτητα πρόωσης του ηλεκτροδίου προς το τεμάχιο} \left[ \frac{mm}{sec} \right] \text{ ή } \left[ \frac{\mu m}{sec} \right]$$

$$k_{EDM} = \text{gap control factor}$$

## 2.5 Ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)

Ορίζεται ως ο όγκος υλικού που απομακρύνεται σε καθορισμένο χρόνο αναφοράς. Συνήθως εκφράζεται σε μονάδες [mm<sup>3</sup>/min] και υπολογίζεται έμμεσα από τη διαφορά βάρους του τεμαχίου πριν και μετά την κατεργασία. Αποτελεί δείκτη της ταχύτητας κατεργασίας και επηρεάζεται από την ένταση του ρεύματος, το χρόνο παλμού και μεσοδιαστήματος, τον «duty cycle», και τις ιδιότητες του υλικού προς κατεργασία. Ένας απλός τύπος υπολογισμού είναι:

$$MRR \left[ \frac{mm^3}{min} \right] = \frac{W_{st.}[gr] - W_{fin.}[gr]}{\rho \left[ \frac{gr}{mm^3} \right] * t_m[min]}$$

$$W_{st.}, W_{fin.} = \text{βάρους τεμαχίου στην αρχή και το τέλος κατεργασίας αντίστοιχα [gr]}$$

$$\rho = \text{πυκνότητα υλικού τεμαχίου} \left[ \frac{gr}{mm^3} \right]$$

$$t_m = \text{χρόνος κατεργασίας [min]}$$

## 2.6 Λόγος φθοράς εργαλείου (TWR)

Στη βιβλιογραφία ο λόγος φθοράς εργαλείου (TWR) συναντάται και ως λόγος φθοράς ηλεκτροδίου (EWR) ή σχετική φθορά ηλεκτροδίου (REW). Δεν υπάρχει κάποια διαφορά και είναι ουσιαστικά ο λόγος του όγκου υλικού, που απομακρύνθηκε από το ηλεκτρόδιο προς τον όγκο υλικού που απομακρύνθηκε από το τεμάχιο εκφραζόμενος σε ποσοστό επί τοις εκατό [%]. Υπάρχουν περιπτώσεις που η φθορά του ηλεκτροδίου στην «μπροστινή επιφάνεια» ή στις γωνίες, μετράτε ανεξάρτητα σε [mm] ή [ $\mu\text{m}$ ]. Παρ' όλα αυτά ο λόγος φθοράς του ηλεκτροδίου (TWR) συνεχίζει να αποτελεί την ακριβέστερη μέθοδο μέτρησης – έκφρασης της φθοράς του ηλεκτροδίου κατά τη κατεργασία. Όπως είναι λογικό και αναμενόμενο, η φθορά του ηλεκτροδίου πρέπει να είναι σαφώς χαμηλότερη από αυτή του τεμαχίου. Χαμηλές τιμές TWR εκφράζουν σταθερότερες, αποδοτικότερες και οικονομικότερες κατεργασίες. Ο λόγος φθοράς εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες κατεργασίας (ένταση ρεύματος, δυναμικό διακένου, χρόνος παλμού), από τις ιδιότητες των υλικών (ηλεκτροδίου και τεμαχίου), αλλά και την πολικότητα που χρησιμοποιείται [5].

## 2.7 Τραχύτητα επιφανείας

Η τραχύτητα επιφανείας αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της κατεργασίας EDM βύθισης. Στις περισσότερες των περιπτώσεων αρχικά υπάρχει κατεργασία ξεχονδρίσματος, και ακολουθεί φινιρίσμα του τελικού προϊόντος. Η τραχύτητα επιφανείας εκφράζεται συνήθως από τη «μέση τραχύτητα επιφανείας»  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ], ενώ χρησιμοποιείται συχνά και η μέγιστη τραχύτητα  $R_{\text{max}}$  [ $\mu\text{m}$ ]. Στη βιβλιογραφία για να περιγραφεί η ποιότητα της επιφάνειας με πιο γενικό και ολοκληρωμένο τρόπο αναφέρεται ο όρος «ακεραιότητα επιφάνειας» (surface integrity) και περιλαμβάνει τοπογραφία της επιφάνειας, τα χαρακτηριστικά των σχηματισμένων λόγω κατεργασίας κρατήρων, το «πάχος του αναδομημένου στρώματος» (recast layer thickness), ελαττώματα επιφανείας και τραχύτητα. Η τραχύτητα εξαρτάται από το δυναμικό διακένου, την ένταση ρεύματος, και το χρόνο παλμού. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι καθώς αυξάνεται η ενέργεια του σπινθήρα – εκφόρτισης (discharge energy), οι κρατήρες που σχηματίζονται είναι «πιο χονδροειδείς» (coarser) και κατά συνέπεια αυξάνεται και η τραχύτητα. Ομοίως και το «πάχος του αναδομημένου στρώματος» εξαρτάται από τις τιμές των αντιστάσεων “R” και των πυκνωτών “C” σε R/C τύπου εργαλειομηχανές, τις μέγιστες τιμές ρεύματος (peak current) για κυκλώματα switch on/off, και το χρόνο των παλμών. Τέλος η τραχύτητα εξαρτάται και από παράγοντες μη «ηλεκτρικής και ενεργειακής φύσης» όπως η πίεση του διηλεκτρικού ρευστού και το υλικό του ηλεκτροδίου [5].

Πίνακας 8 Βασικές παράμετροι κατεργασίας και η επίδραση τους

Παράμετροι κατεργασίας	Για αύξηση MRR [ $\text{mm}^3\text{min}$ ]	Για χαμηλότερο RWR[%]	Για χαμηλότερη $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Πολικότητα	Αρνητική	Αρνητική	Αρνητική
Δυναμικό ανοικτού κυκλώματος	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
Μέγιστη τιμή ρεύματος	Υψηλή	Μέση	Χαμηλή
Χρόνος παλμού	Υψηλός / Μέσος	Χαμηλός	Χαμηλός
Χρόνος μεσοδιαστήματος	Χαμηλός	Μέσος	Μέσος
Duty cycle	Υψηλός	Χαμηλός	Χαμηλός
Συχνότητα παλμού	Υψηλή	Μέση / Χαμηλή	Χαμηλή
Πίεση διηλεκτρικού ρευστού	Υψηλή	Μέση	Μέση

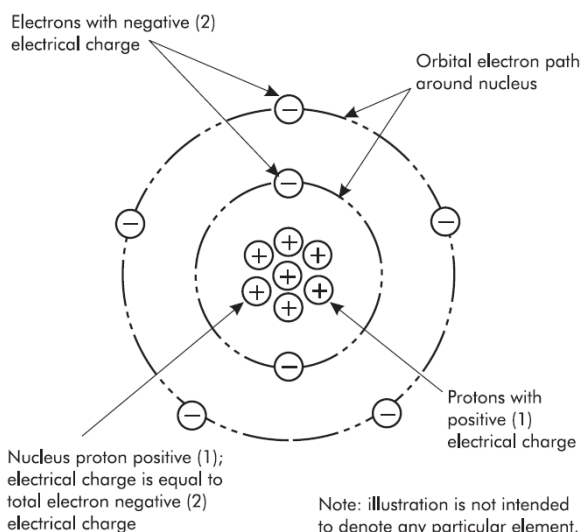
### 3. Ιονισμός και Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Υλικού

Όπως έχει προαναφερθεί, ο μηχανισμός της ηλεκτροδιάβρωσης αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια

- Εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου, ανάμεσα στα οποία υπάρχει διηλεκτρικό μέσο.
- Το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί αρχικά ως μονωτής μην επιτρέποντας την ροή ρεύματος. Η διηλεκτρική αντοχή σε ένα τυπικό διηλεκτρικό έλαιο είναι  $\approx 170$  [V/mm].
- Υπό συγκεκριμένες συνθήκες (απόσταση ηλεκτροδίου – τεμαχίου) το διηλεκτρικό μέσο **ιονίζεται** και από μονωτής γίνεται αγωγός. Η τάση από «τάση ανοικτού κυκλώματος» πέφτει σε «τάση κατεργασίας» και υπάρχει εκδήλωση σπινθήρα, που ουσιαστικά είναι ροή ρεύματος. Η ροή αυτή συνεχίζεται κατά τη διάρκεια του παλμού ( $T_{on}$ ), και διακόπτεται κατά το μεσοδιάστημα ( $T_{off}$ ), όταν το διηλεκτρικό μέσο αποκτά ξανά ιδιότητες μονωτή.
- Ο παραπάνω «κύκλος» επαναλαμβάνεται για κάθε σπινθήρα που εκδηλώνεται [6].

#### 3.1 Ιονισμός

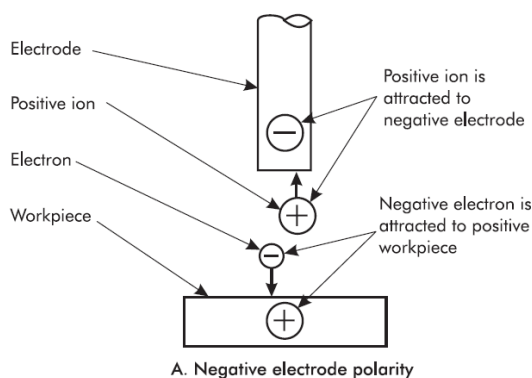
Η πρώτη ερμηνεία του φαινομένου του ιονισμού εκπορεύεται από την περιγραφή και κατανόηση (έστω και σε απλουστευμένη μορφή) της δομής του ατόμου (Εικόνα 24). Ένα άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από αυτόν. Ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια, με τα πρωτόνια να έχουν θετικό φορτίο και τα νετρόνια να είναι ηλεκτρικά ουδέτερα (χωρίς φορτίο). Για το λόγο αυτό τα νετρόνια «παραλείπονται» από την προσέγγισή μας, καθώς δεν «παίζουν» κάποιο ρόλο στην αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων και πρωτονίων. Τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο, και καθώς ο αριθμός τους ισούται με τον αριθμό πρωτονίων, ένα άτομο στη «θεμελιώδη» του κατάσταση είναι ηλεκτρικά ουδέτερο.



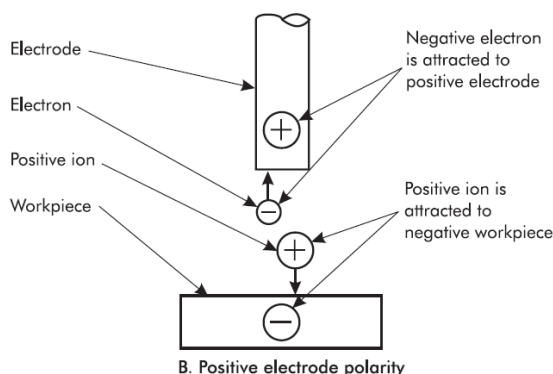
Εικόνα 24 Γραφική απεικόνιση απλοποιημένης δομής ενός ατόμου σε ηλεκτρικά ουδέτερη κατάσταση

Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, είναι δυνατόν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια να «εκτοπισθούν» από τη/τις τροχιές τους (dislodged electron). Τα ηλεκτρόνια αυτά καλούνται «ελεύθερα ηλεκτρόνια», και το άτομο από το οποίο «έφυγαν», καθώς πλέον δεν έχει ίσο αριθμό πρωτονίων – ηλεκτρονίων, παύει να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και ονομάζεται «θετικό ιόν». Όπως είναι γνωστό, σωματίδια με θετικό ή αρνητικό φορτίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (ετερώνυμα έλκονται – ομώνυμα απωθούνται). Στην Εικόνα 25 φαίνεται η αλληλεπίδραση θετικών ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων με ηλεκτρικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και τεμάχιο. Στην κατεργασία EDM το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο (μέσω

κατάλληλης συνδεσμολογίας) αποκτούν θετική ή αρνητική πολικότητα. Όταν το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικά φορτισμένο «έλκει» τα θετικά ιόντα και αντίστοιχα το τεμάχιο (το οποίο είναι θετικά φορτισμένο) έλκει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Το αντίθετο συμβαίνει όταν το ηλεκτρόδιο έχει φορτιστεί θετικά.



A. Negative electrode polarity



B. Positive electrode polarity

Εικόνα 25 Κίνηση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων για α) ηλεκτρόδιο με αρνητικό φορτίο και τεμάχιο με θετικό β) ηλεκτρόδιο με θετικό φορτίο και τεμάχιο με αρνητικό [6]

Όταν στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο δεν εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού, τα άτομα του διηλεκτρικού μέσου που βρίσκεται ανάμεσα τους, παραμένουν στη θεμελιώδη ουδέτερη κατάσταση. Όταν η πηγή δυναμικού (DC power source voltage) συνδεθεί με το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο, τα άτομα του διηλεκτρικού μέσου επηρεάζονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται και τις αντίστοιχες δυνάμεις που αναπτύσσονται. Δεν

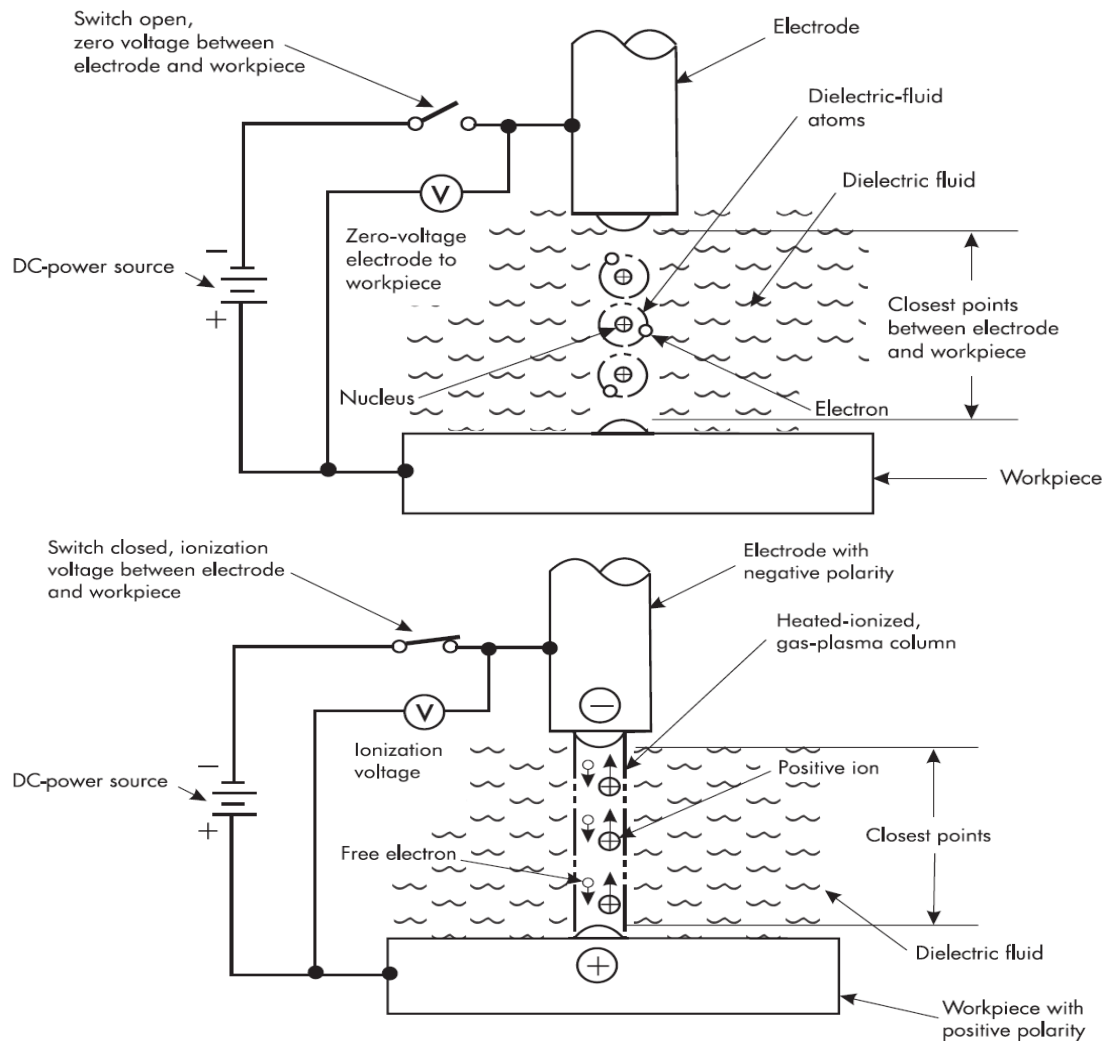
υπάρχει κάποια φυσική μεταβολή στο διηλεκτρικό μέσο έως ότου η διαφορά δυναμικού ηλεκτροδίου – τεμαχίου και η μεταξύ τους απόσταση να πάρουν τη τιμή της διηλεκτρικής του αντοχής. Στο σημείο αυτό συμβαίνει ο ιονισμός και πλέον υπάρχει ροή ρεύματος μέσω της ιονισμένης στήλης διηλεκτρικού ρευστού που δημιουργείται (Εικόνα 26). Αφού λάβει χώρα ο ιονισμός, το διηλεκτρικό μέσο αρχίζει να θερμαίνεται λόγω της ροής ρεύματος και από την υγρή φάση στην οποία βρισκόταν μεταβαίνει στην αέρια, η οποία ορίζεται ως **πλάσμα**. Ένα από τα χαρακτηριστικά του πλάσματος είναι ότι ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι περίπου ίσος με τον αριθμό των θετικών ιόντων. Υπό τις προαναφερθείσες συνθήκες τα ηλεκτρόνια διέρχονται «ανενόχλητα» μέσω της στήλης πλάσματος υπό τη μορφή σπινθήρα [6].

### 3.2 Πλάσμα

Τον όρο «πλάσμα» χρησιμοποίησε πρώτος ο Langmuir το 1923 για να περιγράψει κατάσταση αερίων, που εμφανίζονταν σε πειράματα ηλεκτρικών εκκενώσεων. Παρ' ότι ο πρώτος αυτός ορισμός σχετιζόταν άμεσα με ιονισμένα αέρια, πρέπει να τονιστεί πως κάθε ιονισμένο αέριο δεν είναι πλάσμα. Σήμερα το πλάσμα χαρακτηρίζεται ως η τέταρτη μορφή ύλης, δίπλα στη στερεά, υγρή και αέρια, και ορίζεται ποιοτικά ως: ένα αέριο που περιέχει φορτισμένα αλλά και ουδέτερα σωματίδια και που παρουσιάζει ιδιότητες συλλογικής συμπεριφοράς και «αμφιουδετερότητας» (quasynutrality).

Ο παραπάνω ορισμός δεν περιορίζει το πλάσμα ούτε στα εντελώς ιονισμένα αέρια, ούτε όμως στα σχεδόν ουδέτερα συστήματα. Στα συνηθισμένα αέρια, επειδή τα άτομα που τα αποτελούν είναι ουδέτερα, δεν υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και στο βαθμό που

η δύναμη της βαρύτητας είναι αμελητέα, η κίνηση των σωματιδίων είναι αποτέλεσμα μόνο



Εικόνα 26 Γραφική απεικόνιση  
 α) του διηλεκτρικού μέσου προτού σημειωθεί ιονισμός  
 β) αφού σημειωθεί ιονισμός [6]

των μεταξύ τους συγκρούσεων. Αντίθετα στο πλάσμα η κίνηση των σωματιδίων δημιουργεί ηλεκτρικά πεδία και ρεύματα, τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα πεδία αυτά επιδρούν στην κίνηση των σωματιδίων που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από αυτά. Συγκεκριμένα, το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ δυο φορτισμένων σωματιδίων ελαττώνεται ανάλογα με το  $1/r^2$ , ενώ το φορτίο από μια πυκνότητα πλάσματος αυξάνει ανάλογα με το  $r^3$  και καθ' αυτόν τον τρόπο «κομμάτια πλάσματος» μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις. Στο πλάσμα οι μεγάλης εμβέλειας δυνάμεις Coulomb είναι αυτές, που κυρίως προσδιορίζουν την κίνηση των σωματιδίων, σε αντίθεση με τα συνηθισμένα αέρια, που τα άτομα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω δυνάμεων μικρής εμβέλειας.

Για ποσοτικό ορισμό χρησιμοποιείται το «μήκος Debye  $\lambda_D$ », μια από τις βασικότερες παραμέτρους της φυσικής πλάσματος, που ορίζει την εμβέλεια των δυνάμεων Coulomb μέσα στο πλάσμα. Εδώ τα συλλογικά φαινόμενα κυριαρχούν σε σύγκριση με τη συμπεριφορά ενός σωματιδίου. Αυτό συμβαίνει όταν η ενέργεια που χρειάζεται ένα

φορτισμένο σωματίδιο με φορτίο «q<sub>i</sub>» για να διανύσει τη μισή απόσταση μεταξύ δύο τοπικών φορτίων με δυναμικό «φ» είναι μεγαλύτερη από τη μέση ενέργεια της θερμικής κίνησης του σωματιδίου. Κατ' επέκταση ένα αέριο μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλάσμα όταν οι διαστάσεις του "L<sub>g</sub>" είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από το μήκος Debye (L<sub>g</sub> >> λ<sub>D</sub>).

Λέγεται ότι το 99% της ύλης στο σύμπαν βρίσκεται σε μορφή πλάσματος και μόνο το 1% μοιάζει με τη κατάσταση ύλης της γης. Είναι γνωστό από την αστροφυσική ότι τα περισσότερα συστήματα στο σύμπαν (άστρα, μεσοαστρική ύλη κ.τ.λ.) βρίσκονται σε κατάσταση ηλεκτρισμένων αερίων με τα άτομα να είναι χωρισμένα σε θετικά φορτισμένα ιόντα και ηλεκτρόνια. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στα ανώτερα στρώματα (στην ιονόσφαιρα για παράδειγμα) με τη πυκνότητα των ιονισμένων σωματιδίων να γίνεται πολύ χαμηλότερη στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιράς (κάτω από 100km). Στη γη οι κυριότερες φυσικές μορφές πλάσματος είναι ο κεραυνός και το Σέλας. Υπάρχουν όμως μια σειρά από τεχνολογικές διατάξεις, από σωλήνες φθορισμού μέχρι πειραματικούς αντιδραστήρες σύντηξης, οι οποίες χρησιμοποιούν ύλη σε μορφή πλάσματος.

Τα ελάχιστα παραδείγματα πλάσματος στη γη οφείλονται στην πυκνότητα των σωματιδίων και τις θερμοκρασίες που επικρατούν. Αυτό μπορεί εύκολα να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας προσεγγιστικά την εξίσωση Saha η οποία εκφράζει τον ιονισμό σε ένα αέριο που βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx \frac{A * T^{3/2}}{n_i} * e^{-\frac{U_i}{k_B * T}}$$

$$A = g * \left( \frac{m * k}{2 * \pi * h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = \text{σταθερά}$$

*g* στατιστικό βάρος που λαμβάνει υπ όψιν καταστάσεις εκφυλισμού

*n<sub>n</sub>, n<sub>i</sub>* = πυκνότητες ουδέτερων και ιονισμένων σωματιδίων αντίστοιχα

*T* = θερμοκρασία, *k<sub>B</sub>* = σταθερά Boltzman, *U<sub>i</sub>* = ενέργεια ιονισμού

Χρησιμοποιώντας τη παραπάνω σχέση για την ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία δωματίου

$$T = 300[K], \quad U_i = 14.5[eV], \quad k = 1.38 * 10^{-16} \left[ \frac{erg}{K} \right],$$

$$A = 2.4 * 10^{15} [(K^{-0.5} * cm)^3]$$

προκύπτει ο εξαιρετικά χαμηλός βαθμός ιονισμού:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 10^{-122}$$

Με αύξηση της θερμοκρασίας ο βαθμός ιονισμού αλλάζει δραστικά και όταν το γινόμενο *k\*T* γίνει ίδιας τάξης μεγέθους με την ενέργεια ιονισμού *U<sub>i</sub>* το αέριο μεταβαίνει σε κατάσταση πλάσματος, και γίνεται «ολικά ιονισμένο» όταν *n<sub>i</sub>* > *n<sub>n</sub>*.

Παράλληλα με τον προαναφερθέντα ορισμό, η σύνθεση πλάσματος μπορεί να περιγραφεί και με το λόγο της πυκνότητας ηλεκτρονίων προς τη πυκνότητα ουδέτερων ατόμων:  $r = \frac{n_e}{n_n}$ , ο οποίος ονομάζεται βαθμός ιονισμού. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό για  $r < 10^{-2}$  το πλάσμα είναι ελαφρώς ιονισμένο. Εναλλακτική σχέση που χρησιμοποιείται είναι:

$$r = \frac{n_e}{n_n + \sum_i n_i}$$

με το  $r$  να παίρνει τιμές: για ολικό ιονισμό  $r=1$ , και μερικό ιονισμό  $r < 1$ .

Τα σωματίδια που συνθέτουν το πλάσμα, όταν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία, έχουν όλες τις δυνατές ταχύτητες. Για τη περιγραφή της θερμικής κίνησης χρειάζονται οι κατανομές ταχύτητας των διαφορετικών ειδών σωματιδίων (ηλεκτρόνια, ιόντα, ουδέτερα σωματίδια), και επομένως οι αντίστοιχες θερμοκρασίες του  $T_a$ . Αν η θερμοκρασία πλάσματος είναι  $T \approx T_a$ , τότε το πλάσμα είναι ισοθερμικό. Σε αυτή τη περίπτωση η κατανομή ταχυτήτων είναι γνωστή ως κατανομή Maxwell και στη μονοδιάστατη μορφή της ορίζεται ως:

$$f(u) = A * \exp\left(-\frac{1}{2} * \frac{m * u^2}{k_B * T}\right)$$

$$A = n * \sqrt{\frac{m}{2 * \pi * k_B * T}} \rightarrow \text{σταθερά κανονικοποίησης}$$

και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(u) du = 1, \quad \hat{f} = \frac{f}{n}$$

$f(u)du \rightarrow$  αριθμός σωματιδίων ανά μονάδα όγκου με ταχύτητες  $u$  και  $u + du$

$$\frac{1}{2} * m * u^2 = \frac{p^2}{2 * m} \rightarrow \text{κινητική ενέργεια}$$

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) du \rightarrow \text{πυκνότητα ή αριθμός σωματιδίων ανά μονάδα όγκου}$$

Συνήθως το πλάσμα βρίσκεται σε μερική θερμοδυναμική ισορροπία (μη ισοθερμικό πλάσμα) οπότε για κάθε συνιστώσα του υπάρχει και μια διαφορετική θερμοκρασία  $T_a$  και άρα κατανομή  $f_a(u_a)$  γύρω από τη ταχύτητα  $u_a$ . Στην περίπτωση αυτή η κατανομή Maxwell σε μια διάσταση γράφεται:

$$f_a(u_a) = \frac{n_a}{\sqrt{2 * \pi * k_B * T}} * \exp\left(-\frac{1}{2} * \frac{m_a * u_a^2}{k_B * T_a}\right)$$

Η μέση κινητική ενέργεια μιας συνιστώσας σωματιδίων σε μια διάσταση υπολογίζεται:

$$\hat{E} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} * m * u^2 * f(u) du}{\int_{-\infty}^{\infty} f(u) du}$$

Ορίζοντας ως ταχύτητα θερμικής κίνησης  $u_g$ :

$$u_g = \sqrt{\frac{2 * k_B * T}{m}}$$

προκύπτει η ισότητα:

$$\hat{E} = \frac{1}{4} * m * u_g^2 = \frac{1}{2} * k_B * T$$

δηλαδή η μέση κινητική ενέργεια σε μια διάσταση είναι  $\frac{1}{2} * k_B * T$ . Καθώς η κινητική ενέργεια είναι  $\frac{1}{2} * k_B * T$ , για κάθε διάσταση (βαθμό ελευθερίας) αποδεικνύεται εύκολα χρησιμοποιώντας την κατανομή Maxwell για τρεις διαστάσεις ότι:

$$\hat{E} = \frac{3}{2} * k_B * T$$

με τη παραπάνω εξίσωση εκφράζει την άμεση εξάρτηση της ενέργειας από τη θερμοκρασία.

Η μη ισοθερμική κατάσταση στο πλάσμα οφείλεται στο διαφορετικό αριθμό συγκρούσεων μεταξύ των διαφόρων σωματιδίων (για παράδειγμα ο αριθμός συγκρούσεων μεταξύ ηλεκτρονίων ή μεταξύ ιόντων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο μεταξύ ηλεκτρονίων – ιόντων). Τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα έχουν διαφορετικές κατανομές Maxwell και διαφορετικές θερμοκρασίες  $T_e$  και  $T_i$  αντίστοιχα. Έτσι, το πλάσμα δεν παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας για πολύ και χρόνο, και παρότι κάθε «κομμάτι» χωριστά μπορεί να βρίσκεται σε θερμική ισορροπία  $T_i, T_e$  κ.τ.λ., δεν ισχύει  $T=T_i=T_e$ . Η «φυσική» του πλάσματος είναι ακόμα πιο πολύπλοκη υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$ , καθώς λόγω της δύναμης Lorentz οι δυνάμεις που δρουν στα σωματίδια εξαρτώνται από τη σχετική κίνηση αυτών σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο.

Πρέπει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι, ο ορισμός της θερμοκρασίας πλάσματος που δόθηκε παραπάνω σε σχέση με την συνάρτηση κατανομής Maxwell, ισχύει κυρίως για υψηλές θερμοκρασίες που δεν υπάρχει εκφυλισμός Fermi από την απαγορευτική αρχή του Pauli. Για σωματίο με ημιακέραιο σπίν, ο εκφυλισμός Fermi είναι σημαντικός όταν η ενέργεια Fermi  $\epsilon_f$  είναι μεγαλύτερη από την θερμική ενέργεια ( $\epsilon_f > k_B * T$ ). Η ανισότητα αυτή ικανοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πυκνότητες. Σε τέτοιου είδους «εκφυλισμένο» πλάσμα ισχύει η «κατανομή Fermi», ενώ η «έννοια» της θερμοκρασίας ως μετρητής ενέργειας δεν έχει νόημα και χρησιμοποιείται η ενέργεια Fermi  $\epsilon_f$  [7].

Μια χαρακτηριστική και εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα του πλάσματος είναι ότι έχει τη δυνατότητα να απομονώνει ένα ηλεκτρικό δυναμικό που επιδρά πάνω σε αυτό, σχηματίζοντας γύρω του ένα νέφος φορτίου. Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται στο



πλάσμα, (για παράδειγμα δύο ηλεκτρόδια συνδεδεμένα σε μια μπαταρία), τα φορτισμένα σωματίδια θα δράσουν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να μειώσουν την επίδραση του πεδίου. Τα ελαφρύτερα και πιο ευκίνητα ηλεκτρόνια θα αποκριθούν ταχύτερα με σκοπό να ελαττώσουν το ηλεκτρικό πεδίο. Εάν σε ένα πλάσμα υπήρχε περίσσεια θετικών ή αρνητικών φορτίων, αυτή η περίσσεια θα δημιουργούσε ένα ηλεκτρικό πεδίο και τα ηλεκτρόνια θα κινούνταν με σκοπό να αναιρέσουν το φορτίο. Η απόκριση των φορτισμένων σωματιδίων με σκοπό να μειώσουν την επίδραση τοπικών ηλεκτρικών πεδίων ονομάζεται θωράκιση Debye (Debye shielding) και αυτή η θωράκιση είναι που προσδίδει στο πλάσμα το χαρακτηριστικό της ψευδο – ουδετερότητας. Αν υποθέσουμε ότι ένα ηλεκτρικό δυναμικό εφαρμόζεται μεταξύ δύο επιφανειών, οι οποίες βυθίζονται στο πλάσμα, τότε οι επιφάνειες θα προσελκύσουν ισόποσα φορτισμένα σωματίδια αντίθετων φορτίων. Η συγκέντρωση αυτή των φορτισμένων σωματιδίων πλησίον των δύο επιφανειών θα θωρακίσει τις φορτισμένες επιφάνειες από την κύρια μάζα του πλάσματος, η οποία παραμένει ουδέτερη. Επομένως το ηλεκτρικό πεδίο θα αναπτυχθεί κυρίως κοντά στις επιφάνειες και σε μια απόσταση  $\lambda_D$  η οποία ονομάζεται μήκος Debye και ορίζεται από τη σχέση [8]:

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 * k_B * T_e}{n_e * q_e^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$\epsilon_0 \rightarrow$  διηλεκτρική σταθερά κενού,  $q_e \rightarrow$  στοιχειώδες φορτίο,  
 $n_e \rightarrow$  πυκνότητα ηλεκτρονίων

ενώ για δυναμικό ηλεκτροδίου  $\varphi_0$  το δυναμικό  $\varphi$  που δρα στο πλάσμα σε απόσταση  $x$  είναι:

$$\varphi = \varphi_0 * e^{-\frac{x}{\lambda_D}}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις είναι φανερό ότι το μήκος θωράκισης ελαττώνεται με αύξηση της πυκνότητας, καθώς σε κάθε στρώμα πλάσματος υπάρχουν τώρα περισσότερα ηλεκτρόνια και αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της θερμικής κίνησης των ηλεκτρονίων (χωρίς θερμική κίνηση θα υπήρχε μηδενικό πάχος στρώματος). Θα πρέπει να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι οι παραπάνω σχέσεις προκύπτουν από μια απλουστευτική προσέγγιση του φαινομένου και με βάση την υπόθεση ότι η μάζα των ηλεκτρονίων είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή των ιόντων ( $m_i \gg m_e$ ). Σε μια πιο πλήρη ανάλυση θα είχαμε δύο μήκη Debye (ηλεκτρονίων και ιόντων) υπολογιζόμενα από τη σχέση:

$$\frac{1}{\lambda_D^2} = \frac{1}{\lambda_{D_e}^2} + \frac{1}{\lambda_{D_i}^2} = 4 * \pi * n * \left[ e^{\left( \frac{1}{k_B * T_e} + \frac{1}{k_B * T_i} \right)} \right]^2$$

Με το μήκος Debye να προσδιορίζει την εμβέλεια των ηλεκτροστατικών δυνάμεων στο πλάσμα, μπορούμε να ορίσουμε και την έννοια της ψευδο – ουδετερότητας. Αν οι διαστάσεις  $L_g$  του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος  $\lambda_D$  τότε τα φορτία με διαφορετικό πρόσημο έλκονται μεταξύ τους και τείνουν να δημιουργήσουν μια κατάσταση ουδετερότητας. Το ίδιο ισχύει και με την παρεμβολή ενός εξωτερικού φορτίου ή δυναμικού, το οποίο θωρακίζεται σε απόσταση  $\lambda_D$  αφήνοντας το υπόλοιπο πλάσμα ανεπηρέαστο.

Όταν μια μεταλλική επιφάνεια έρθει σε επαφή με το πλάσμα τα ηλεκτρόνια, τα οποία έχουν αρκετά μεγαλύτερες θερμικές ταχύτητες από τα ιόντα φτάνουν σε αυτή πολύ ταχύτερα αφήνοντας το πλάσμα με ένα θετικό φορτίο γειτονικά της επιφάνειας. Ένα ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο επιβραδύνει τα ηλεκτρόνια και επιταχύνει τα ιόντα αναπτύσσεται πλησίον της επιφάνειας και ως εκ τούτου η επιφάνεια αποκτά ένα αρνητικό δυναμικό σε σχέση με το πλάσμα. Με άλλα λόγια έχει αποκτήσει μια αρνητική αυτοπόλωση συγκριτικά με το πλάσμα. Το πλάσμα, επομένως, βρίσκεται πάντοτε σε θετικό δυναμικό σε σχέση με οποιαδήποτε επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με αυτό. Εξαιτίας της θωράκισης Debye το δυναμικό, που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφάνειας και της κύριας μάζας του πλάσματος περιορίζεται σε ένα λεπτό στρώμα με πάχος ίσο με πολλά μήκη Debye. Αυτό το στρώμα με θετικό φορτίο χώρου, το οποίο εμφανίζεται γύρω από όλες τις επιφάνειες σε επαφή με το πλάσμα ονομάζεται περίβλημα του πλάσματος (plasma sheath) [7, 8].

Καθώς η έννοια της θωράκισης έχει νόημα μόνο όταν υπάρχει ικανός αριθμός σωματιδίων σε μια σφαίρα Debye, υπολογίζεται ο αριθμός των σωματιδίων  $N_D$  από τη σχέση:

$$N_D = n * \frac{4 * \pi}{3} * \lambda_D^3$$

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, οι τρεις συνθήκες για να θεωρηθεί ένα ιονισμένο αέριο πλάσμα είναι:

$$\lambda_D \ll L_g, \quad N_D \gg 1, \quad \omega * \tau_g > 1$$

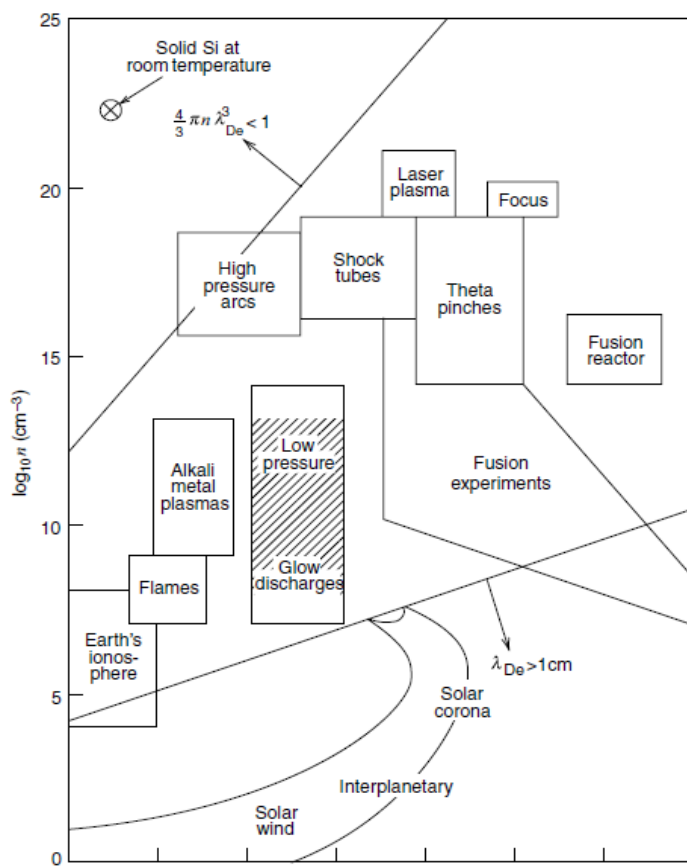
$\omega \rightarrow$  συχνότητα ταλαντώσεων

$\tau_g \rightarrow$  μέσος χρόνος μεταξύ συγκρούσεων με ουδέτερα άτομα

Το πλάσμα μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση τις δύο κύριες παραμέτρους του:

- την ενέργεια  $k*T$
- τη πυκνότητα  $n$ .

Στις διάφορες εφαρμογές οι παράμετροι αυτές έχουν ένα μεγάλο εύρος τιμών με την πυκνότητα να κυμαίνεται από  $1 - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , και την ενέργεια από  $10^{-1} - 10^6 \text{ eV}$ . Οι εφαρμογές της φυσικής πλάσματος ταξινομούνται σε χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας. Στην Εικόνα



Εικόνα 27 Ταξινόμηση μορφών πλάσματος με βάση τη πυκνότητα και τη θερμοκρασία τους [8]

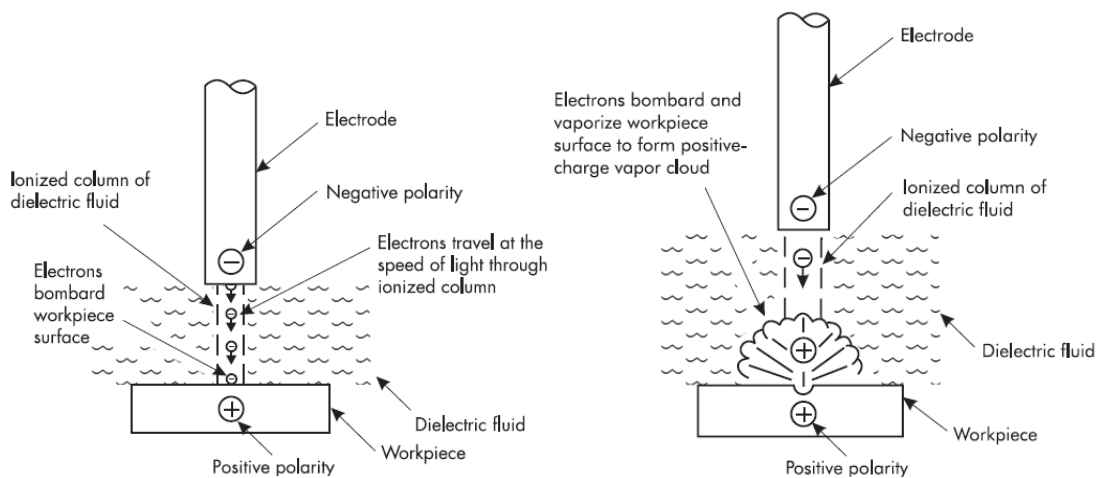
27 γίνεται μια ταξινόμηση των μορφών πλάσματος με βάση τη θερμοκρασία και τη πυκνότητα του [7, 8].

### 3.3 Απομάκρυνση Υλικού

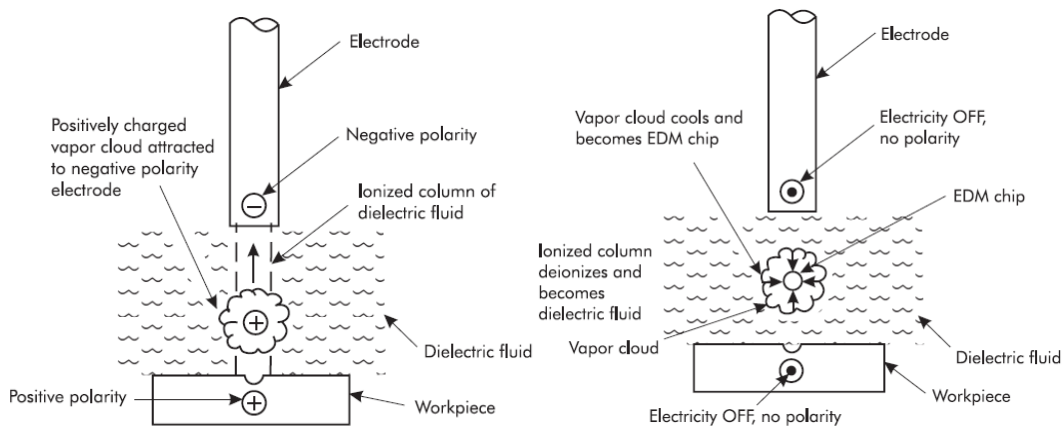
Στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης η απομάκρυνση υλικού γίνεται με χρήση θερμικής ενέργειας. Οι θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται στον σπινθήρα είναι αρκετά υψηλές ώστε να προκαλέσουν εξαχνωση του υλικού. Η απαραίτητη θερμική ενέργεια προέρχεται από τη ροή ρεύματος ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και τεμάχιο (σπινθήρας). Όπως είναι γνωστό, η μονάδα μέτρησης της έντασης ρεύματος είναι τα Ampere, με αύξηση των οποίων αυξάνεται η ενέργεια κατεργασίας και η ποσότητα υλικού που απομακρύνεται.

Ως «Ampere» ορίζεται η ροή από συγκεκριμένο σημείο  $6.25 \cdot 10^{18}$  ηλεκτρονίων σε ένα δευτερόλεπτο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι καθώς η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρικού σπινθήρα είναι ίδιας τάξης μεγέθους με τη ταχύτητα του φωτός (299274km/sec) και το διάκενο ηλεκτροδίου – τεμαχίου είναι της τάξης των χιλιοστών (0.025 – 0.1 mm), η εκδήλωση του ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να θεωρηθεί ως ακαριαία. Τα ηλεκτρόνια κινούνται δια μέσω του ιονισμένου διηλεκτρικού μέσου από το ηλεκτρόδιο που είναι αρνητικά φορτισμένο προς το τεμάχιο το οποίο είναι θετικά φορτισμένο (στην περίπτωση, που έχουμε αρνητική πόλωση του ηλεκτροδίου).

Κατά τη διάρκεια κάθε παλμού εκατομμύρια ηλεκτρόνια «ταξιδεύουν» με τη προαναφερθείσα εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα δια μέσω της ιονισμένης στήλης, και «βομβαρδίζουν» τελικά την επιφάνεια του τεμαχίου, που λειτουργεί ως «εμπόδιο» στην πορεία τους. Τα ηλεκτρόνια αυτά «εναποθέτουν» την ενέργειά τους υπό μορφή θερμότητας στην επιφάνεια του τεμαχίου, με το υλικό να εξαχνώνεται και να δημιουργεί τοπικά «νέφος» (Εικόνα 28). Καθώς το τεμάχιο (στη συγκεκριμένη περίπτωση) είναι θετικά φορτισμένο, και το «νέφος» του εξαχνωμένου υλικού είναι και αυτό θετικά φορτισμένο και έλκεται από το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Καθώς το «νέφος» κινείται προς το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο το σύστημα μεταβαίνει σε χρόνο μεσοδιαστήματος ( $T_{off}$ ), και πλέον δεν υπάρχει κάποια ελκτική δύναμη από το ηλεκτρόδιο προς το νέφος. Ταυτόχρονα με τη διακοπή της ροής ρεύματος (δεν υπάρχει σπινθήρας) το διηλεκτρικό μέσο επανέρχεται στη αρχική του κατάσταση (deionize) και το «νέφος» ψύχεται (από το διηλεκτρικό μέσο) δημιουργώντας τα απόβλητα της κατεργασίας (Εικόνα 29).

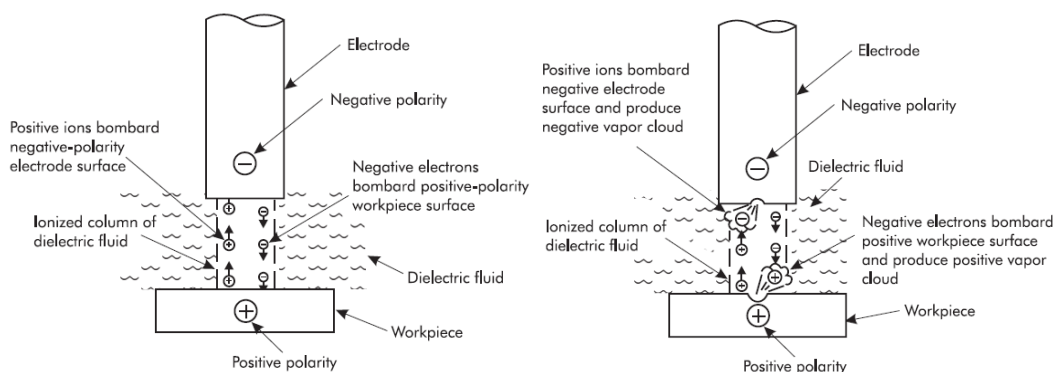


Εικόνα 28 α) Ροή ηλεκτρονίων προς το τεμάχιο β) βομβαρδισμός επιφάνειας τεμαχίου από ηλεκτρόνια και σχηματισμός "νέφους" εξαχνωμένου υλικού [6]

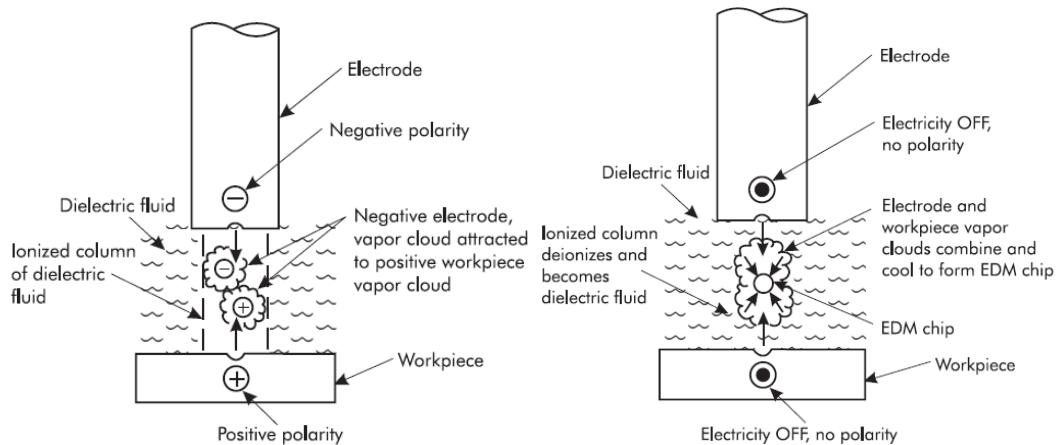


Εικόνα 29 α) κίνηση νέφους προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο από το οποίο έλκεται β) κατάρρευση στήλης πλάσματος και ψύξη νέφους [6]

Στην πραγματικότητα η διαδικασία απομάκρυνσης υλικού είναι πιο πολύπλοκη. Κατά τη διάρκεια ενός παλμού τα ηλεκτρόνια κινούνται προς τον θετικά φορτισμένο πόλο, ενώ τα άτομα από τα οποία προήλθαν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ως θετικά ιόντα που έχουν καταστεί πλέον, κινούνται προς τον αρνητικό πόλο. Όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο αρνητικής πολικότητας, τα ηλεκτρόνια «βομβαρδίζουν» την επιφάνεια του τεμαχίου ενώ τα ιόντα την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, σχηματίζοντας έτσι ταυτόχρονα δύο «νέφη» εξαχνωμένου υλικού (ένα από το ηλεκτρόδιο και ένα από το τεμάχιο) (Εικόνα 30). Καθώς η μάζα των θετικών ιόντων (πυρήνες και εναπομείναντα ηλεκτρόνια) είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή των ηλεκτρονίων, τα ιόντα επιταχύνουν πιο «αργά» συγκριτικά με τα ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα πολύ λιγότερα ιόντα (σε σχέση με τα ηλεκτρόνια) να «βομβαρδίζουν» την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Αυτός είναι και ο λόγος που βασική πηγή ενέργειας για την αποβολή υλικού στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης θεωρούνται τα ηλεκτρόνια. Τα δύο «νέφη» από εξαχνωμένα υλικά, που έχουν σχηματιστεί έχουν αντίθετα φορτία και έλκονται μεταξύ τους. Όταν η στήλη πλάσματος καταρρεύσει τα νέφη αυτά που προηγουμένως έχουν «συγχωνευτεί» ψύχονται δημιουργώντας απόβλητα κατεργασίας, που περιέχουν υλικό και από το τεμάχιο αλλά και από το ηλεκτρόδιο. Τα απόβλητα είναι κούφια σφαιρίδια, μορφή γεωμετρίας, που σχηματίζεται από νέφος υλικού όταν ψύχεται (Εικόνα 31).

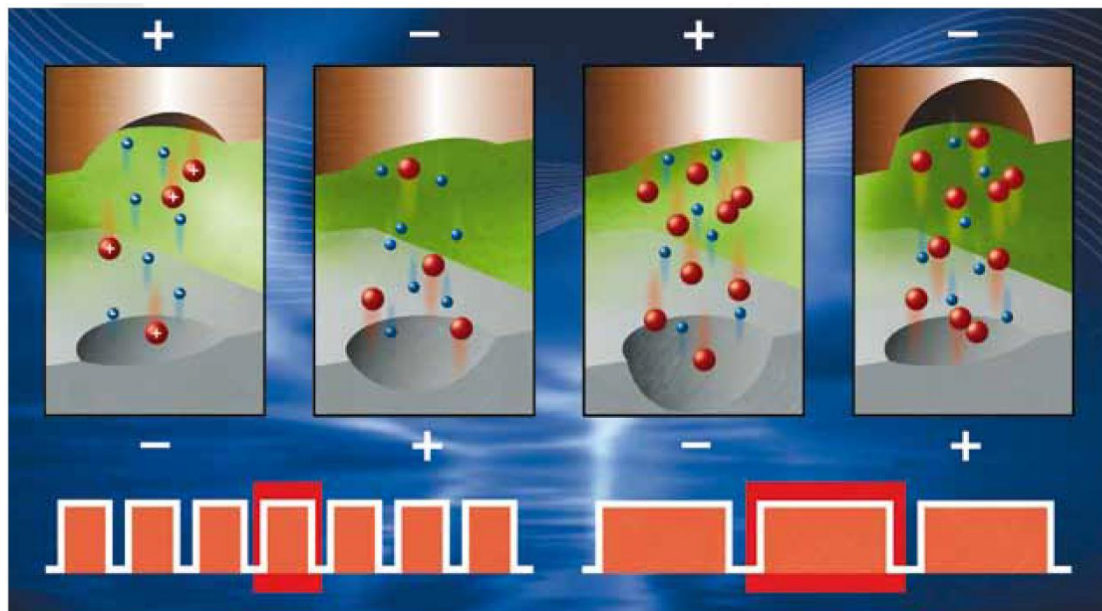


Εικόνα 30 α) Ροή ηλεκτρονίων προς το τεμάχιο και θετικών ιόντων προς το ηλεκτρόδιο  
 β) βομβαρδισμός επιφανείας τεμαχίου από ηλεκτρόνια και σχηματισμός "νέφους" εξαχνωμένου υλικού, και αντίστοιχα της επιφάνειας ηλεκτροδίου από θετικά ιόντα [6]



Εικόνα 31 α) τα δύο "νέφη" αντίθετης πολικότητας που έχουν σχηματιστεί «έλκονται» μεταξύ τους και "συγχωνεύονται" β) όταν η στήλη πλάσματος καταρρέει δημιουργούνται τα απόβλητα της κατεργασίας τα οποία περιέχουν υλικό και από το τεμάχιο και από το ηλεκτρόδιο [6]

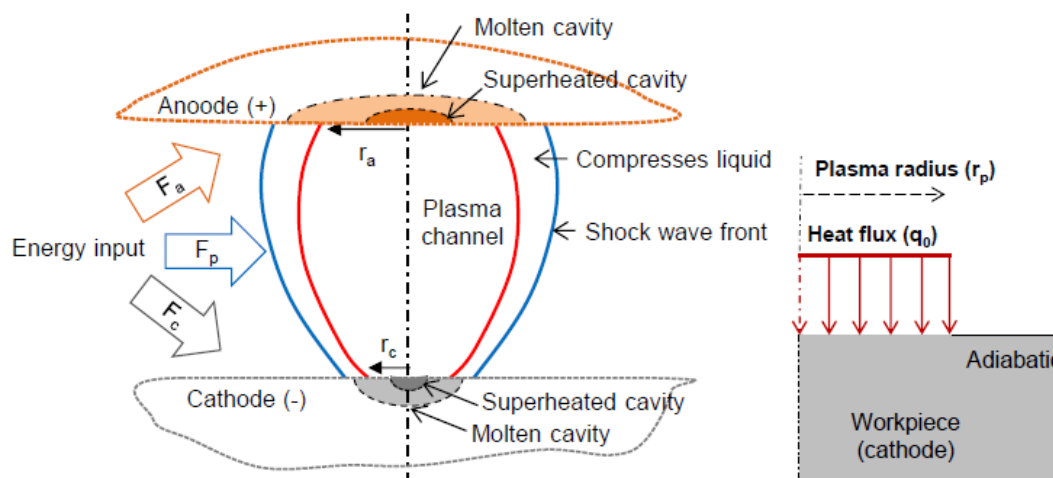
Η χρήση ηλεκτροδίου θετικής πολικότητας έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τη φθορά του και καθιστά την κατεργασία πιο σταθερή για συγκεκριμένα υλικά ηλεκτροδίου και τεμαχίου, αλλά μειώνει το ρυθμό αποβολής υλικού σε σχέση με χρήση ηλεκτροδίου αρνητικής πολικότητας [6].



Εικόνα 32 Γραφική απεικόνιση διαφορετικής πολικότητας για διαφορετικούς χρόνους παλμού

## 4. State of the art

Η μοντελοποίηση της κατεργασίας EDM αποτελεί μια «πολύπλοκη» και δύσκολη διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει πολλαπλά φυσικά φαινόμενα (multi physics), τα οποία μάλιστα λαμβάνουν χώρα και εξελίσσονται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα (multi time scales). Στην μελέτη ενός παλμού συμμετέχουν στερεή, υγρή, αέρια και πλάσμα καταστάσεις της ύλης, εντοπισμένες σε επιφάνειες μερικών εκατοντάδων μικρομέτρων και σε χρόνους από msec έως και nano – sec. Η πλήρης ανάλυση και μελέτη (και ανάλογα με την «σκοπιά» της εργασίας) περιλαμβάνει θερμοδυναμική πλάσματος, φυσικοχημεία, μαγνητο – υδροδυναμική (magneto – hydrodynamics) και ρευστομηχανική, με τη προσπάθεια μοντελοποίησης και προσομοίωσης να απαιτεί ορισμένες απλοποιήσεις και παραδοχές.



Εικόνα 33 Γραφική απεικόνιση - σύγκριση ενός θερμοφυσικού μοντέλου για σπινθήρα και το αντίστοιχο θερμικό μοντέλο υπολογισμού θερμοκρασιακού προφίλ στο τεμάχιο [5]

Στην κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην μοντελοποίηση του σχηματισμού κρατήρων, καθώς μέσω αυτών μπορούν να υπολογιστούν εν συνεχεία τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κατεργασίας (MRR, TWR, ποιότητα επιφανείας). Στην «προσπάθεια» αυτή, αρχικό βήμα αποτέλεσε η μελέτη της φυσικής του πλάσματος, καθώς αποτελεί την πηγή θερμότητας.

Η «ηλεκτρική εκκένωση» και ο σχηματισμός πλάσματος (discharge plasma), έχει τρεις διακριτές φάσεις: έναυση / ανάφλεξη (ignition), διάδοση (propagation) και κατάρρευση (extinction). Η φάση της ανάφλεξης είναι η πιο ενδιαφέρουσα για τη μελέτη και τον ορισμό του διάκενου, του χρόνου καθυστέρησης (delay time), και την ανάπτυξη και εξέλιξη των διηλεκτρικών μέσων. Η φάση της έναυσης σε αέριο μέσο, κυρίως για διάκενα μεγαλύτερα του ενός χιλιοστού και σε συνδυασμό με τα φυσικά φαινόμενα που τη «συνοδεύουν», έχει μελετηθεί διεξοδικά, με βάση την ευρέως αποδεκτή “theory of streamers” [5, 13, 14, 15]. Ο μηχανισμός έναυσης σε υγρό διηλεκτρικό μέσο αμφισβητείται [5, 16]. Ο μηχανισμός μελετήθηκε από τον Schoenbach et al. για μικρο – διάκενα με υγρό διηλεκτρικό μέσο [5, 17]. Ο χρόνος λίγο πριν την ανάφλεξη (pre ignition stage) στην κατεργασία EDM μελετήθηκε από τον Schulze et al. με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας [5, 18, 19]. Η ύπαρξη αποβλήτων στο διάκενο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μήκους του, με τη διαδικασία

να είναι στοχαστική [5, 20]. Ο ρόλος των αποβλήτων και της σχηματιζόμενης «φουσαλίδας» (gas bubble), μελετήθηκε περαιτέρω από τον Schumacher [5, 21]. Οι Gatto et al. μέσω των πειραμάτων τους απέδειξαν τη λειτουργία των αποβλήτων ως «γέφυρες» κατά τη διάτρηση μικρών οπών και την επίδρασή τους στην έναυση του σπινθήρα [5, 22]. Ανάλογες παρατηρήσεις – μελέτες έχουν γίνει και από άλλους ερευνητές. Για την καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία του φαινομένου, ο Hollenstein πραγματοποίησε προσομοιώσεις. Αποδείχθηκε ότι μπορεί να γίνει προσομοίωση του πλάσματος με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (όπως το PrismSpectra) και με δεδομένα την πυκνότητα και την θερμοκρασία των ηλεκτρονίων, την ατομική σύσταση και το μέγεθος – ακτίνα του πλάσματος [5].

Όπως έχει προαναφερθεί, για τη μοντελοποίηση του κρατήρα που σχηματίζεται κατά την εκδήλωση του σπινθήρα είναι απαραίτητες οι οριακές συνθήκες, δηλαδή η ακτίνα του πλάσματος (το πλάσμα αποτελεί τη πηγή θερμότητας), η ροή θερμότητας προς το υλικό και η κατανομή της, αλλά και συγκεκριμένες θερμοκρασίες – θερμοκρασιακά προφίλ. Εκτός όμως από την άμεση μελέτη του πλάσματος, το φαινόμενο μπορεί να προσεγγιστεί και «αντίστροφα», ξεκινώντας από την ανάλυση των κρατήρων που σχηματίζει και μέσω αυτών να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του πλάσματος.

Τα πρώτα θεωρητικά μοντέλα για σπινθήρες σε μεγάλου μήκους διάκενα, αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1950 από τον Dvarkina και αργότερα βελτιώθηκαν από τον Braginskii. Ο Dvarkina χρησιμοποίησε «ακαριαία» ενεργειακή έκλυση (instantaneous energy release), η οποία σχημάτισε κυλινδρική περιοχή με ασυνέχεια πίεσης, στα όρια της οποίας υπήρχε κρουστικό κύμα. Ο Braginskii, χρησιμοποίησε θερμή εκπτυσσόμενη στήλη (hot expanding channel), η οποία λειτουργεί ως έμβολο που συμπιέζει το αέριο καθώς αυτή κινείται, και στα όρια της οποίας, λόγω του κύματος κρούσης, σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα στο οποίο υπάρχει ιονισμός [5, 23]. Ο Skvortsov et al. χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές και οπτικές μετρήσεις, μελέτησε πειραματικά την ανάπτυξη στήλης πλάσματος σε υγρό μέσο [5, 24]. Ο Robinson χρησιμοποίησε πεπερασμένες διαφορές για να προσεγγίσει το φαινόμενο [5, 25]. Ο Zahn et al. πρότειναν ένα θεωρητικό υδροδυναμικό μοντέλο διάδοσης κρουστικού κύματος, χρησιμοποιώντας οριακές συνθήκες Rankine – Hugoniot, προκειμένου να ερμηνεύσουν το κυλινδρικό εκπτυσσόμενο μέτωπο κύματος, που προέρχεται από τη στήλη πλάσματος [5, 26].

Οι παραπάνω μελέτες διενεργήθηκαν για υψηλές διαφορές δυναμικού, εντάσεις ρεύματος και διάκενα. Για χαμηλότερες τιμές ρεύματος, δυναμικού και διακένου όπως στην κατεργασία του EDM, ο Eubank et al. πρότειναν μεταβλητής μάζας μοντέλο διαστολής για το πλάσμα. Από πειράματα σε νερό ως διηλεκτρικό μέσο προσδιόρισαν την ακτίνα πλάσματος ως [5, 27]:

$$r_p = 0.788 * t^{\frac{3}{4}}$$

$$r_p = \text{ακτίνα πλάσματος } [\mu\text{m}], \quad t = \text{χρόνος } [\mu\text{sec}]$$

Οι Pandey και Jilani υπέθεσαν ότι η διεύρυνση της στήλης πλάσματος περιορίζεται από μια ελάχιστη επιφανειακή θερμοκρασία που υπάρχει στο εσωτερικό της, τέτοια ώστε η εξάχνωση υλικού να είναι συνεχής καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού [5, 28]. Σε



παρατηρήσεις του από πειράματα ο Utsumi, για σπινθήρες υπό κενό, προσδιόρισε τη θερμοκρασία της καθόδου σχεδόν σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία ζέσεως (boiling temperature)  $T_b$  του υλικού της καθόδου [5, 29]. Οι Pandey και Jilani χρησιμοποιώντας τη παραπάνω παραδοχή (ότι η θερμοκρασία της καθόδου στην κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης παραμένει σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία ζέσεως του υλικού) κατέληξαν στη σχέση [5, 28]:

$$T_b = \frac{Q * r}{k * \sqrt{\pi}} * \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{4 * \alpha * t}{r^2}} \right)$$

$$Q = \text{πυκνότητα ισχύος} \left[ \frac{W}{m^2} \right], \quad r = \text{ακτίνα} [m], \quad t = \text{χρόνος} [sec],$$

$$k = \text{θερμική αγωγιμότητα υλικού} \left[ \frac{W}{m * K} \right],$$

$$a = \text{συντελεστής θερμικής διάχυσης υλικού} \left[ \frac{m^2}{sec} \right]$$

Με αντικατάσταση της πυκνότητας ισχύος  $Q[W/m^2]$  από την ισχύ εκφόρτισης  $E[W]$ , εισάγοντας την έννοια του ποσοστού απορρόφησης από το τεμάχιο  $F_c[\%]$  (θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια), και με  $t_p$  σε  $\mu sec$ , η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$T_b = \frac{E * F_c}{k * r_p * \pi^{3/2}} * \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{4 * a * t_p * 10^{-6}}{r_p^2}} \right)$$

$$r_p = \text{ακτίνα πλάσματος} [m], \quad t_p = \text{χρόνος παλμού} [\mu sec]$$

Μια από τις πρώτες συστηματικές πειραματικές προσπάθειες με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας για τη μελέτη της διαστολής στη στήλη πλάσματος κατά την ηλεκτροδιάβρωση έγινε από τους Descoeudres et al.. Απέδειξαν ότι η περιοχή εκπομπής ορατής ακτινοβολίας, με τη περιοχή ιονισμού του υδρογόνου συμπίπτουν [5, 30]. Οι Kojima et al., χρησιμοποιώντας και αυτοί κάμερες υψηλής ταχύτητας ( $10^6$  fps) και φασματοσκόπιο, προσδιόρισαν τη διάμετρο πλάσματος σε αέριο περιβάλλον και στη συνέχεια τη συσχέτισαν με αυτή σε διηλεκτρικό έλαιο [5, 31].

Μια ακόμα εμπειρική σχέση υπολογισμού της ακτίνας πλάσματος είναι:

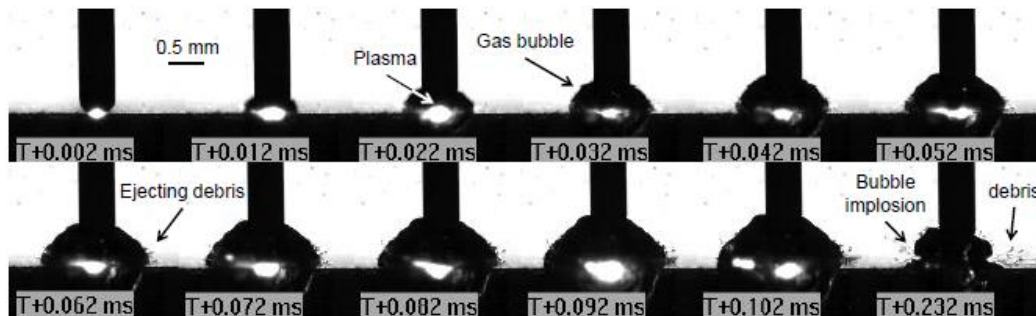
$$r_p = 0.85 * 10^{-3} * t^{0.35} * i_e^{0.48}$$

$$r_p = \text{ακτίνα πλάσματος} [m], \quad t_p = \text{χρόνος παλμού} [sec],$$

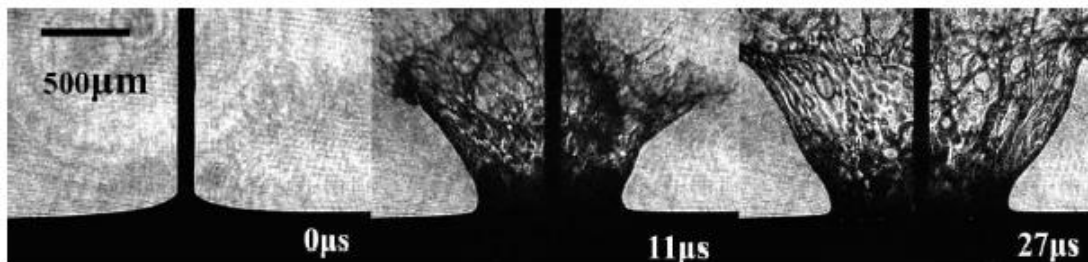
$$i_e = \text{ένταση ρεύματος} [A]$$

Με χρήση διάφανων μονοκρυσταλλων ηλεκτροδίων από SiC και Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, και αντίστροφη προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας (inverse heat conduction simulation), οι Kitamura και Kuniieda κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η διάμετρος πλάσματος είναι μεγαλύτερη από

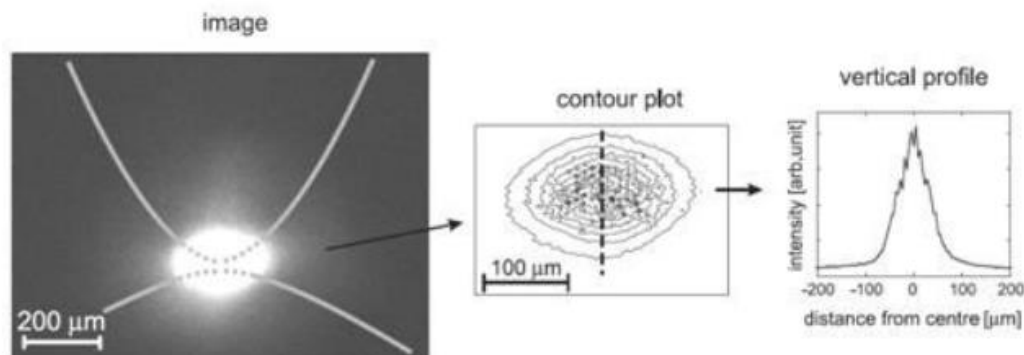
αυτήν της πηγής θερμότητας [5, 32]. Σε μελέτη του Maradia et al. με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας εξετάστηκε ο σχηματισμός της «φουσαλίδας» και η διαστολή της στήλης πλάσματος για διαφορετικά υλικά ηλεκτροδίων και διαφορετικές εντάσεις ρεύματος [Εικόνα 34]. Τελικά κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα υλικά των ηλεκτροδίων επηρεάζουν το φαινόμενο [5, 33]. Μια μέθοδο που συνδυάζει την ταχεία και επαναλαμβανόμενη λήψη εικόνων (high repetition rate imaging) και τη χρήση βραχέων παλμών laser ως πηγή φωτισμού ανέπτυξε ο Tanabe et al. [Εικόνα 35] [5, 34]. Σε μελέτη του ο Descoeudres et al. καταλήγουν ότι, η ένταση φωτός είναι υψηλότερη στο «κέντρο» του σπινθήρα, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται και στα διαγράμματα στην Εικόνα 36 [5, 30]



Εικόνα 34 Εικόνες από τα πειράματα των Maradia et al. 200000 fps, 20A ένταση ρεύματος, 100μsec χρόνος παλμού, έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο, και ηλεκτρόδια από γραφίτη ως άνοδο και χάλυβα ως κάθοδο. [5]



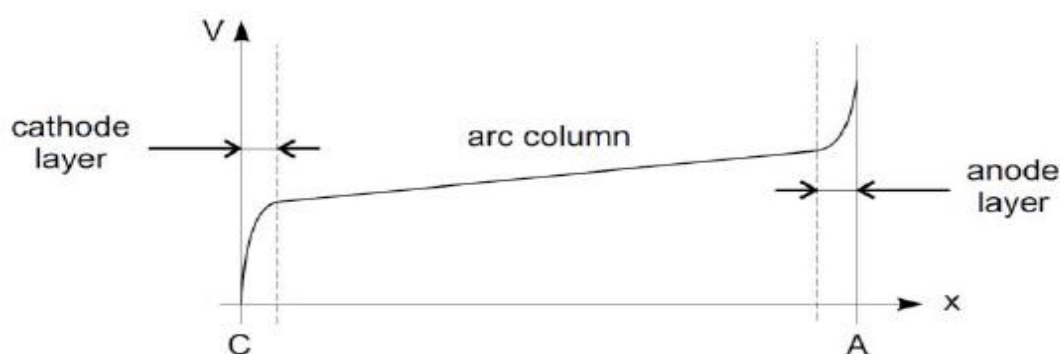
Εικόνα 35 Εικόνα από τα πειράματα του Tanabe et al. για αρνητικής πολικότητας ηλεκτρόδιο, και έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο. [5]



Εικόνα 36 Εικόνα από τα πειράματα του Descoeudres et al. με α) την φωτογραφία από το πλάσμα (24A ένταση ρεύματος, 100μsec χρόνος παλμού, έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο) β) ισοψές διάγραμμα, γ) διάγραμμα έντασης φωτός ως προς τη διάμετρο της στήλης πλάσματος [5]

Με τη χωρική ανάλυση του εκπεμπόμενου από τη στήλη πλάσματος φωτός (spatially resolved light emission spectroscopy of plasma) απέδειξαν ότι η πυκνότητα ηλεκτρονίων είναι ελαφρώς υψηλότερη στο κέντρο του σπινθήρα με δεδομένο ότι η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων παραμένει σχεδόν σταθερή. Οι Kitamura και Kunieda απέδειξαν ότι η ροή θερμότητας δεν είναι ομοιόμορφη στο πλάσμα, καθώς η χαμηλότερη θερμοκρασία στη περιφέρεια του (circumferential area in plasma) έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερου βαθμού ιονισμό [5, 32]. Με δεδομένο αυτό για την προσομοίωση του σχηματισμού κρατήρων χρησιμοποιούνται ομοιόμορφες ή κανονικές (Gaussian) κατανομές θερμότητας.

Η κατανομή θερμότητας στο διάκενο αποτελεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο και υπάρχουν ελάχιστα θεωρητικά μοντέλα που να προσδιορίζουν το ποσοστό θερμότητας το οποίο απορροφάται από την άνοδο και τη κάθοδο με περιθώρια για νέα επιστημονική έρευνα [5, 35, 36, 37]. Κατά την ηλεκτρική εκτόνωση, τα ηλεκτρόνια «μιαάζουν» σαν να «πέφτουν» από το πλάσμα στην άνοδο εξαιτίας του υψηλότερου δυναμικού της, ενώ ταυτόχρονα η άνοδος πρέπει να «αναπτύξει» έναν αποδοτικό μηχανισμό εκπομπής ηλεκτρονίων από το μέταλλο προς το πλάσμα. Η εκπομπή θεωρείται κυρίως θερμιονική (mainly thermionic field emission). Το δυναμικό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 37, μεταβάλλεται κοντά στα ηλεκτρόδια δημιουργώντας ουσιαστικά ζώνες – στρώματα (layers).



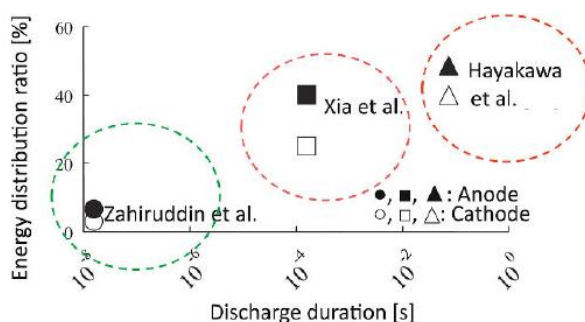
Εικόνα 37 Γραφική απεικόνιση του προφίλ δυναμικού

Η ηλεκτρική εκκένωση «αυτοοργανώνεται» κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργεί μια ισχυρή εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο, η οποία (κάθοδος) θερμαίνεται από τα ιόντα που την «βομβαρδίζουν». Τα ιόντα αυτά προέρχονται από τη ζώνη ιονισμού της καθόδου, και προκαλούν τήξη και εξάχνωση του υλικού, θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων, και σε ορισμένες περιπτώσεις “thermal runaway”. Τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από την κάθοδο είναι «καίριας σημασίας» καθώς αυτά είναι που προκαλούν τον υψηλού βαθμού ιονισμό στην ζώνη ιονισμού (τη ζώνη απ’ όπου προέρχονται τα ιόντα που θερμαίνουν την κάθοδο). Αυτή η «συζευγμένη παραγωγή» ηλεκτρονίων – ιόντων (coupled ion – electron production) αποτελεί το μηχανισμό διατήρησης του σπινθήρα. Το ισοζύγιο ενέργειας της καθόδου περιλαμβάνει: την ενέργεια των ιόντων που τη βομβαρδίζουν, τη θερμότητα λόγω του φαινομένου Joule, τη θερμότητα από βομβαρδισμό ατόμων και ηλεκτρονίων (σε μικρό βαθμό), την «επανασύνδεση» ιόντων και την ακτινοβολία από το πλάσμα. Η ενέργεια «καταναλώνεται» κυρίως στην εκπομπή ηλεκτρονίων και στη θέρμανση με αγωγή του ηλεκτροδίου με ένα μικρό μόνο μέρος της σε εξάχνωση, ακτινοβολία και εκπομπή σταγονιδίων (droplet emission).

Ανάλογα πολύπλοκοι είναι και οι μηχανισμοί που δρουν στην άνοδο με το ρεύμα να διαχέεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με της καθόδου. Η ενέργεια που φτάνει στην άνοδο οφείλεται στη ροή ηλεκτρονίων και την «επανασύνδεση» τους με τα ιόντα της ανόδου. Το μεταλλικό της υλικό που εξαχνώνεται μπορεί να ιονιστεί λόγω του δυναμικού που επικρατεί τοπικά. Στη στήλη πλάσματος, τέλος, το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας καταναλώνεται από το φαινόμενο Joule σε θέρμανση μέσω αγωγής και σε ακτινοβολία.

Η πολυπλοκότητα, που επικρατεί στο ενεργειακό ισοζύγιο ανόδου και καθόδου κατά τη διάρκεια της ηλεκτρικής εκκένωσης, οδήγησαν στην ανάγκη πειραματικού προσδιορισμού του ποσοστού ενέργειας που απορροφάται από κάθε ηλεκτρόδιο κατά τη κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης. Τα πειράματα και οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν μετρήσεις θερμοκρασίας σε άνοδο και κάθοδο, μελέτη των κρατήρων που σχηματίζονται, και «αντίστροφη θερμική προσομοίωση» προκειμένου να προσδιοριστεί η πηγή θερμότητας.

Οι König et al. και Xia et al. μετρώντας την θερμοκρασία των ηλεκτροδίων και του διηλεκτρικού μέσου προσδιόρισαν την κατανομή θερμότητας. Κατέληξαν ότι το ποσοστό ενέργειας, που απορροφάται από την άνοδο είναι πάντα υψηλότερο από αυτό της καθόδου, με τα ποσοστά να κυμαίνονται από 40 – 48% για την άνοδο και 25 – 34% για την κάθοδο, τόσο σε περίπτωση μεμονωμένου σπινθήρα (single spark), όσο και πολλαπλών (multi spark) [5, 38, 39]. Με παρόμοια προσέγγιση, χρησιμοποιώντας υψηλής ανάλυσης και απόκρισης μετρητικές διατάξεις θερμοκρασίας, και με «αντίστροφη προσομοίωση», ο Revaz et al. υπολόγισαν ότι το ποσοστό θερμότητας που απορροφάται από το τεμάχιο είναι 10% για μεμονωμένο σπινθήρα και 15% σε περίπτωση πολλαπλών [5, 40, 41]. Ο Perez et al. παρουσίασαν ένα μοντέλο για την κατανομή ενέργειας, το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν παραμέτρους όπως κατανομή ιόντων και ηλεκτρονίων και πυκνότητα ρεύματος [5, 42]. Ο Singh με μετρήσεις θερμοκρασίας και προσομοιώσεις, προσδιόρισε το ρόλο που έχουν η ένταση ρεύματος, ο χρόνος παλμού, τα υλικά των ηλεκτροδίων και η πολικότητα, στην κατανομή ενέργειας, συμπεραίνοντας ότι το ποσοστό που απορροφάται από την κάθοδο είναι χρονικά εξαρτώμενο και κυμαίνεται από 6 – 26.8% [5, 43]. Ο Zhang et al. πραγματοποίησαν πειράματα και μεταλλογραφική μελέτη των σχηματιζόμενων κρατήρων προκειμένου να προσδιορίσουν την κατανομή ενέργειας [5, 44]. Ο Maradia et al. τέλος κατέληξαν ότι η κατανομή ενέργειας εξαρτάται μεταξύ άλλων και από τις θερμικές ιδιότητες των ηλεκτροδίων [5, 33]. Στην Εικόνα 38 φαίνεται ότι για «βραχείς» παλμούς το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας απορροφάται από το πλάσμα και το διηλεκτρικό μέσο, ενώ για μεγαλύτερης διάρκειας παλμούς, το πλάσμα καθίσταται αυτοσυντηρούμενο (self – sustain) με τη περισσότερη ενέργεια να απορροφάται από την άνοδο και τη κάθοδο.



Εικόνα 38 Κατανομή ενέργειας σε άνοδο και κάθοδο συναρτήσει του χρόνου παλμού [5]

Αφού προσδιοριστούν οι οριακές συνθήκες (ακτίνα, ένταση και κατανομή πηγής θερμότητας), υπολογίζεται το θερμοκρασιακό προφίλ στην άνοδο και τη κάθοδο βάσει της θεωρίας μετάδοσης θερμότητας. Οι προσομοιώσεις δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης της ζώνης τήξης στα ηλεκτρόδια. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην πραγματικότητα έχουμε σχηματισμό κρατήρων μικρότερων από αυτούς των υπολογισμών καθώς μέρος του υλικού επαναστερεοποιείται, με το φαινόμενο να ονομάζεται – ορίζεται ως “plasma flushing efficiency” (PFE).

Η κατανομή θερμότητας στο ηλεκτρόδιο λόγω επίδρασης πηγής θερμότητας (πλάσμα), υπολογίζεται από τη θεωρία μετάδοσης θερμότητας και το νόμο Fourier:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{a} * \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T = \text{θερμοκρασία}, \quad x, y, z = \text{καρτεσιανές συντεταγμένες}$$

με την αναλυτική λύση της διαφορικής έχει δοθεί από τους Carslaw και Jaeger [45]. Μια συνηθισμένη και συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι με η χρήση «πεπερασμένων στοιχείων» (Finite Element Method – FEM). Στην περίπτωση αυτή η αγωγή θερμότητας περιγράφεται ως:

$$\rho * C_p * \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \rho * C_p * \bar{u} * \nabla T = \nabla * (k * \nabla T) + Q_V$$

με οριακές συνθήκες:

$$-\bar{n} * (k * \nabla T) = q_o \rightarrow \text{για πηγή θερμότητας}$$

$$-\bar{n} * (k * \nabla T) = 0 \rightarrow \text{χωρίς πηγή θερμότητας με αδιαβατικά τοιχώματα}$$

$$u = \text{διάνυσμα ταχύτητας}, \quad n = \text{κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα},$$

$$Q_V = \text{παραγόμενη θερμότητα ανά μονάδα όγκου} \left[ \frac{J}{m^3} \right],$$

$$q_o = \text{ροή θερμότητα ανα μονάδα επιφάνειας} \left[ \frac{W}{m^2} \right].$$

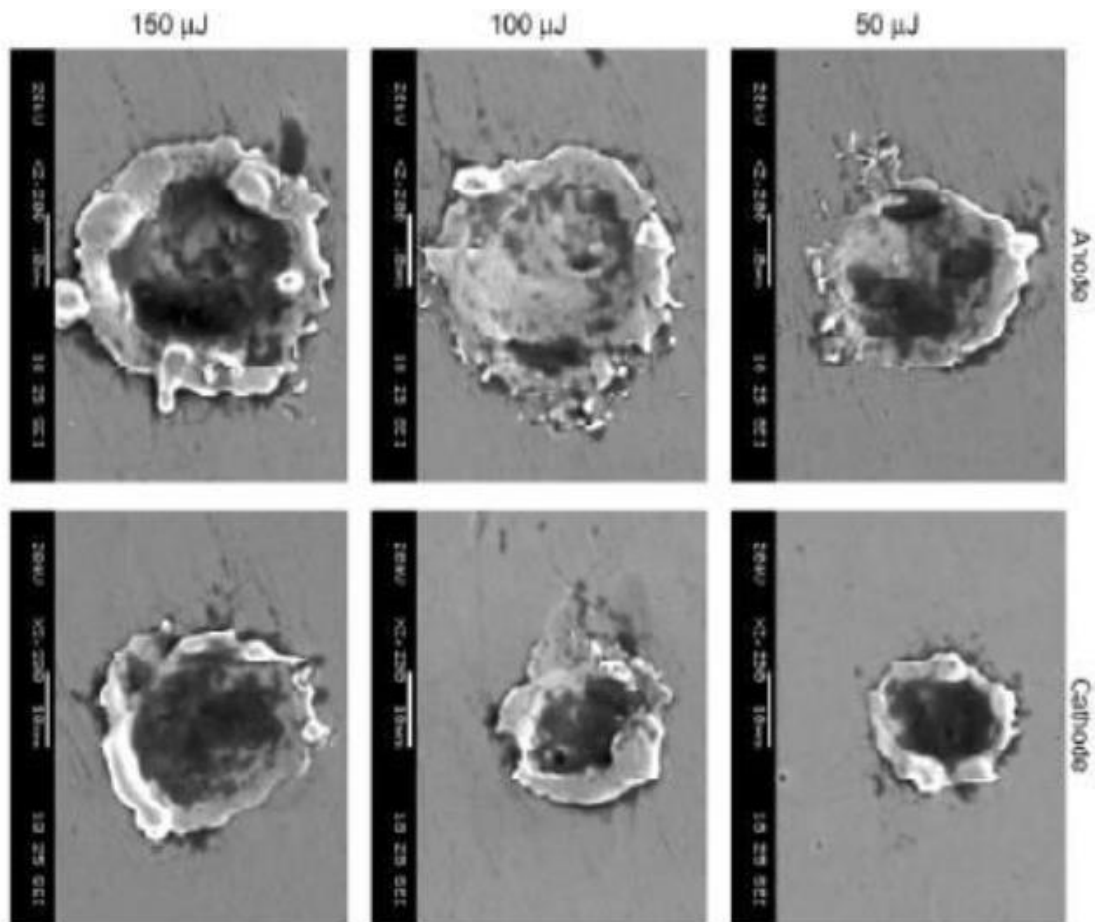
Το πρώτο ολοκληρωμένο φυσικομαθηματικό μοντέλο για το ρυθμό απομάκρυνσης υλικού από τα ηλεκτρόδια παρουσιάστηκε από τον van Dijck, ο οποίος βασίστηκε στις θεωρίες των Zolotykh και Zingerman. Μία χρονικά μεταβαλλόμενη, κυκλική, πηγή θερμότητας χρησιμοποιήθηκε με ποσοστά απορρόφησης ενέργειας από την άνοδο και κάθοδο  $F_a = F_c = 50\%$ . Στη συγκεκριμένη μελέτη οι ιδιότητες του υλικού θεωρήθηκαν σταθερές (και όχι συναρτήσε της θερμοκρασίας), οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης και εξάτμισης παραλήφθηκαν, ενώ οι θερμότητες λόγω φαινομένου Joule και ακτινοβολίας αποδείχθηκαν αμελητέες σε σχέση με την θερμότητα που προέρχεται από το πλάσμα [5, 46, 47, 48, 49]. Ο Yeο et al. συνέκριναν τα πέντε πιο ολοκληρωμένα μοντέλα των Snoeys, Van Dijck, Beck, Jilani, DiBitonto και κατέληξαν ότι τα αποτελέσματα από το μοντέλο του DiBitonto πλησιάζουν περισσότερο τις πειραματικές μετρήσεις, ειδικά για ενέργειες μεγαλύτερες από 1.2 mJ ανά παλμό [5, 50]. Ο DiBitonto et al. χρησιμοποίησαν σημειακή πηγή, με το ποσοστό

ενέργειας που απορροφάται από την κάθοδο να ορίζεται στο 0.183. χρησιμοποιήθηκαν θερμικά μεταβαλλόμενες ιδιότητες υλικών, ενώ οι λανθάνουσες θερμότητες πασαλείφθηκαν ως πολύ μικρό ποσοστό (<2%) [5, 50, 51]. Ο Patel et al. έκανε προσομοιώσεις με χρήση πηγής θερμότητας κανονικής κατανομής, χρονικά μεταβαλλόμενης ακτίνας, και  $F_a=0.08$  [5, 52].

Παρατηρούμε ότι κατά τη μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται διαφορετικές οριακές συνθήκες από τον κάθε ερευνητή – ερευνητική ομάδα. Συνοψίζοντας λοιπόν έχουμε:

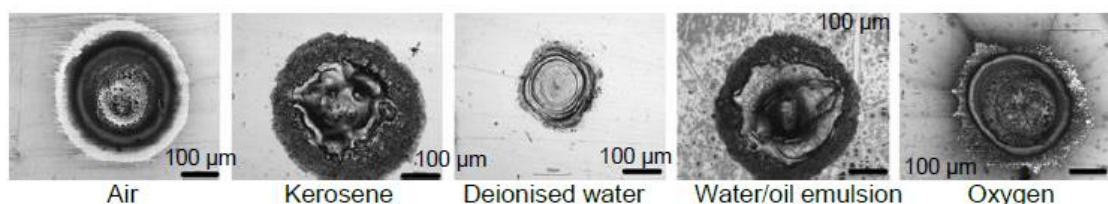
- **Αγωγή θερμότητας:**
  - Αναλυτικές λύσεις,
  - Πεπερασμένα στοιχεία (FEM)
  - Πεπερασμένες διαφορές (Finite Difference Method – FDM)
- **Πηγή θερμότητας:**
  - Σημειακή πηγή
  - Δισκοειδής πηγή σταθερής ακτίνας
  - Δισκοειδής πηγή με ακτίνα χρονικά εξαρτώμενη
  - Η ακτίνα της πηγής να ορίζεται βάσει πειραματικών μετρήσεων
  - Η ακτίνα της πηγής να ορίζεται βάσει της σταθερής θερμοκρασίας τήξης
- **Ένταση πηγής θερμότητας:**
  - Ενέργεια παλμού
  - Θερμοκρασία πλάσματος
  - Σταθερά ποσοστά απορρόφησης από τα ηλεκτρόδια
  - Χρονικά μεταβαλλόμενα ποσοστά απορρόφησης από τα ηλεκτρόδια
- **Κατανομή πηγής θερμότητας**
  - Ομοιόμορφη κατανομή
  - Κανονική Gaussian κατανομή
- **Ιδιότητες Υλικών**
  - Τιμές ως μέσος όρος
  - Θερμοκρασιακά μεταβαλλόμενες
  - Λαμβάνονται υπ' όψιν λανθάνουσες θερμότητες

Έχει αποδειχθεί ότι για χρόνο παλμού μεγαλύτερο από 20  $\mu\text{s}$  οι σχηματιζόμενοι κρατήρες στην άνοδο είναι μικρότεροι σε σχέση με τις καθόδους. Γι' αυτό το λόγο, στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης, και ειδικά σε περιπτώσεις ξεχονδρίσματος όπου έχουμε εργαλειομηχανές με τρανζίστορ τύπου παροχή ισχύος και μεγάλους χρόνους παλμού, το ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως άνοδος και το τεμάχιο ως κάθοδος. Σε μεγάλους χρόνους παλμού πιστεύεται ότι το ηλεκτρόδιο ανόδου προστατεύεται λόγω του σχηματισμού «προστατευτικού στρώματος άνθρακα» (protective carbon layer generation). Στην περίπτωση κατεργασίας micro EDM η απομάκρυνση υλικού από το ηλεκτρόδιο είναι μεγαλύτερη σε σχέση με του τεμαχίου (Εικόνα 39) [5, 53]. Μια επικρατούσα υπόθεση, η οποία δεν έχει αποδειχθεί θεωρητικά, είναι ότι τα ηλεκτρόνια λόγω μικρότερης μάζας έχουν «ταχύτερη πρόσπτωση» στην άνοδο, (faster electron impingement) σε σχέση με τα ιόντα μεγαλύτερης μάζας στην κάθοδο.



Εικόνα 39 Σχηματιζόμενοι κρατήρες ανόδου και καθόδου για κατεργασία micro – EDM και διαφορετικές ενέργειες παλμού. Είναι εμφανές ότι οι κρατήρες ανόδου έχουν μεγαλύτερο μέγεθος καθώς πρόκειται για κατεργασία micro - EDM. [5]

Οι Zahiruddin και Kunieda στην έρευνά τους, σύγκριναν την αποδοτικότητα (PFE) μεταξύ κατεργασιών macro – EDM και micro – EDM, με το ποσοστό απορρόφησης θερμότητας για micro – EDM να προκύπτει 10% σε σύγκριση με το 34% που προτείνεται από τον Xia et al. για macro – EDM [5, 54, 39]. Αποδείχθηκε ότι υψηλότερη πυκνότητα ενέργεια σε κατεργασία micro – EDM, έχει και υψηλότερο βαθμό PFE. Οι Dhanik και Joshi παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για ενέργειες μικρότερες των 100 μJ, και κυκλώματα παροχής ισχύος με χρήση πυκνωτών [5, 55]. Οι Singh και Ghosh πρότειναν τη θεωρία ότι, για πολύ βραχείς παλμούς οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι πιο σημαντικές στους μηχανισμούς απομάκρυνσης υλικού, σε σχέση με τη θερμική τήξη του υλικού [5, 56].



Εικόνα 40 Σχηματιζόμενοι κρατήρες για διαφορετικά διηλεκτρικά μέσα [5]

Μετά τον προσδιορισμό μέσω προσομοίωσης της περιοχής που τήκεται πρέπει να προσδιοριστεί και η ποσότητα τηγμένου υλικού, που τελικά απομακρύνεται από την περιοχή του σπινθήρα. Οι δυνάμεις που απαιτούνται για την απομάκρυνση του υλικού υπολογίστηκαν από τον Van Dijk θεωρώντας ηλεκτροστατικές, ηλεκτρομαγνητικές, υδραυλικές, και αεροδυναμικές δυνάμεις να επιδρούν σε τηγμένο υλικό [5, 46]. Προτάθηκε ότι κατά τα αρχικά στάδια της ηλεκτρικής εκκένωσης το υλικό απομακρύνεται λόγω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται εξαιτίας του ρεύματος υψηλής πυκνότητας και του «βρασμού» του υπέρθερμου μετάλλου, λόγω της έντονης πτώσης πίεσης που παρατηρείται. Κατά το τέλος της ηλεκτρικής εκκένωσης παρατηρείται μια δεύτερη πτώση πίεσης, η οποία οδηγεί σε περεταίρω απομάκρυνση υλικού. Αποτελέσματα προσομοίωσης συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα τόσο για μεμονωμένο σπινθήρα όσο και για πολλαπλό με το PFE να προσδιορίζεται από 1 – 10%. Οι Van Dijk και DiBitonto θεώρησαν – υπέθεσαν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό απομάκρυνσης υλικού συμβαίνει λόγω βρασμού του υπέρθερμου μετάλλου στο τέλος του σπινθήρα, καθώς σε προηγούμενο χρόνο εμποδίζεται από τη φυσαλίδα που έχει σχηματιστεί. Οι Hockenberry και Williams πρότειναν ότι μετά το τέλος της ηλεκτρικής εκκένωσης και καθώς η φυσαλίδα που έχει σχηματιστεί καταρρέει «θρυμματισμένη» (fragmented) προσκρούει στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου προκαλώντας την απομάκρυνση του υλικού [5, 57]. Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού αποβολής υλικού, οι Samela Nordlund και Timko et al. χρησιμοποίησαν τη μέθοδο “particle – in – cell” (PIC), για προσομοίωση της αλληλεπίδρασης σπινθήρα – υλικού κατά τον «βομβαρδισμό» του από ιόντα [5, 58, 59]. Φάνηκε ότι η έντονη ροή από ιόντα δημιουργεί στην επιφάνεια «ζημία» υπό μορφή κρατήρα (craterlike damage) και διασκορπίζει συστοιχίες ατόμων (sputtering large atom clusters). Οι σχηματιζόμενοι κρατήρες έχουν πολύπλοκη γεωμετρία, η οποία εξηγείται λόγω της έντονα ανομοιόμορφης θέρμανσης του υλικού. Ο Yang et al. χρησιμοποίησαν προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής για να μελετήσουν το σχηματισμό κρατήρων σε κατεργασία micro – EDM [5, 60, 61]. Οι παραπάνω μέθοδοι, αν και περιορίζονται χωρικά και χρονικά από την πεπερασμένη υπολογιστική ισχύ, δίνουν τη δυνατότητα καλύτερης κατανόηση των φαινομένων και των μηχανισμών κατά τον σχηματισμό κρατήρων.

Είναι γενική υπόθεση ότι για χαμηλότερης πυκνότητας ισχύ, το υλικό απομακρύνεται λόγω εξάχνωσης, ενώ σε υψηλότερη πυκνότητα ο σχηματισμός φυσαλίδας παίζει το βασικότερο ρόλο στην απομάκρυνση του υλικού. Ο Witz et al. ερμήνευσαν το σχηματισμό «στεφάνης» γύρω από τον κρατήρα σύμφωνα με το φαινόμενο Marangoni [5, 62]. Ο Tao et al. προσομοίωσαν ρεαλιστικές γεωμετρίες κρατήρων με τη μέθοδο “volume fraction”, χρησιμοποιώντας στους υπολογισμούς τηγμένο και στέρεο υλικό [5, 63].

Εκτός από τη θεωρητική και υπολογιστική προσέγγιση, ταυτόχρονα έχει χρησιμοποιηθεί μια πληθώρα πειραματικών τεχνικών για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών αποβολής υλικού. Χρησιμοποιούνται κάμερες υψηλής ταχύτητας, ανάλυση ακτίνων Χ, ανάλυση και μελέτη των σχηματιζόμενων κρατήρων, μετρήσεις των δυνάμεων που αναπτύσσονται κτλ. Σε μελέτες με ανάλυση ακτίνων Χ έχει αποδειχθεί ότι το 85% της απομάκρυνσης υλικού συμβαίνει κατά τη διάρκεια του παλμού με τη ποσότητα υλικού που απομακρύνεται ανά παλμό να είναι σχεδόν ίδια για αέρα και για υγρό διηλεκτρικό μέσο, όταν η διάρκεια παλμού ξεπερνά τα 100μsec. Ο Takezawa et al. αναφέρουν ότι για υλικά με χαμηλό σημείο τήξης (47 °C) η απομάκρυνση υλικού παρατηρείται μετά το τέλος της

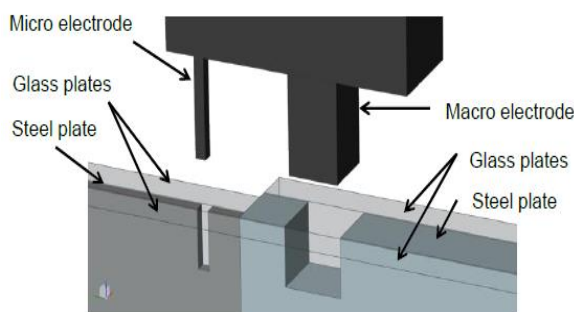


ηλεκτρικής εκκένωσης [5, 64]. Οι Hayakawa et al. και ο Maradia et al. μελέτησαν το πως συνδέεται ο σχηματισμός φυσαλίδας με το μηχανισμό αποβολής υλικού καταλήγοντας ότι το υλικό απομακρύνεται αρχικά κατά τη διαστολή της σχηματιζόμενης φυσαλίδας, και στο τέλος της ηλεκτρικής εκκένωσης [5, 65, 66]. Ο Mesyats παρατήρησε μικρο – εκρήξεις στην κάθοδο λόγω αλληλεπίδρασης του υλικού με το πλάσμα, ενώ ο Akematsu et al. εντόπισαν φαινόμενα σπηλαιώση, τόσο σε αέριο όσο και σε υγρό διηλεκτρικό μέσο [5, 67, 68]. Ο Zhang et al. μελέτησαν την επίδραση των διαφορετικών διηλεκτρικών μέσων (αέριων και υγρών) για μοναδιαίο παλμό, καταλήγοντας ότι το διάλυμα ελαίου – νερού λόγω υψηλότερης πίεσης που δημιουργεί στην επιφάνεια της εκκένωσης, προκαλεί τη μεγαλύτερη απομάκρυνση υλικού (Εικόνα 40). Ο Yoshida et al. κατέληξαν σε ανάλογα συμπεράσματα [5, 69, 70].

Η ανάλυση ενός μοναδιαίου σπινθήρα, απαιτεί περεταίρω ανάλυση για μοντελοποίηση της κατεργασίας, καθώς παράγοντες όπως η δυναμική της σχηματιζόμενης φυσαλίδας, οι συνθήκες απόπλυσης, και τα σωματίδια αποβλήτων επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Στην σύγχρονη ηλεκτροδιάβρωση βύθισης χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια πολύπλοκης γεωμετρίας, και διακεκομμένη απόπλυση (jump cycle), με αποτέλεσμα περιοδική απομάκρυνση φυσαλίδων και αποβλήτων. Σε τυπικές μελέτες του die – sinking EDM προσομοιώνεται μόνο η διάβρωση της καθόδου για κατεργασίες ξεχονδρίσματος. Οι Hockenberry και Williams με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας, ανέλυσαν το σχηματισμό φυσαλίδων, ενώ οι Wang et al. και Kitamura et al. χρησιμοποιώντας διαφανή υλικά (PMMA και SiC) παρατήρησαν τα φαινόμενα διακένου (σχηματισμός φυσαλίδων και κίνηση αποβλήτων) κατά τη διάρκεια πολλαπλών ηλεκτρικών εκκενώσεων [5, 57, 71, 72]. Ο Kitamura et al. κατέληξαν ότι η πιθανότητα να προκύψει σπινθήρας ανά μονάδα επιφάνειας, είναι υψηλότερη στη διεπιφάνεια υγρού και φυσαλίδας, σε σχέση με αυτή στο υγρό ή στο εσωτερικό της φυσαλίδας. Επίσης, παρατήρησαν ότι η εκδήλωση σπινθήρα μέσω των σωματιδίων από απόβλητα που συγκεντρώνονται στη διεπιφάνεια προερχόμενα από προηγούμενους σπινθήρες έχει τη μέγιστη πιθανότητα [5, 73]. Ο Hayakawa et al. μελέτησαν τις συνθήκες που επικρατούν στην διεπιφάνεια υγρού – αερίου, καθώς μετά από συγκεκριμένο χρόνο διάβρωσης, η φυσαλίδα που έχει σχηματιστεί καταλαμβάνει τον περισσότερο χώρο της κοιλότητας. Κατέληξαν ότι ο ρυθμός αποβολής υλικού σχεδόν μηδενίζεται όταν το υγρό έχει αντικατασταθεί πλήρως από αέρια. Επίσης μελέτησαν με τον τρόπο που διασκορπίζονται τα σωματίδια αποβλήτων από το σημείο του σπινθήρα και με χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας συσχέτισαν την αποβολή υλικού με τον μηχανισμό διαστολής της φυσαλίδας [5, 74, 75]. Ο Zhang et al. προσέγγισαν την δυναμική της φυσαλίδας μέσω αριθμητικών μεθόδων, ενώ ο Pontelandolfo et al. χρησιμοποίησαν CFD και PIV (particle image velocimetry) για τη μελέτη της ροής κατά τη φάση της απόπλυσης, καταλήγοντας ότι η παρουσία φυσαλίδων διευκολύνει την απομάκρυνση των αποβλήτων από το διάκενο [5, 76, 77]. Ανάλογες αναλύσεις έκαναν και ο Liao et al. και οι Wang και Han. Φάνηκε από τις μελέτες ότι η παρουσία φυσαλίδων και η συσσώρευση αποβλήτων στην περιοχή εκδήλωσης σπινθήρων, επηρεάζει τόσο το σημείο εκκένωσης, όσο και τα φαινόμενα διακένου. Η συσσώρευση αποβλήτων στην διεπιφάνεια φυσαλίδας – υγρού μειώνει την «αντοχή» του διηλεκτρικού μέσου, οδηγεί όμως στην αύξηση πιθανότητας να εκδηλωθεί σπινθήρας στην συγκεκριμένη περιοχή, που με τη σειρά της αυξάνει το μήκος διακένου, αύξηση του οποίου μειώνει τη διάμετρο πλάσματος [5, 78, 79, 80].

Η προσομοίωση και κατανόηση των μηχανισμών αποτελεί ενδιαφέρον και χρήσιμο μέρος της έρευνας με τον τελικό στόχο όμως να παραμένει ο υπολογισμός του ρυθμού αποβολής υλικού σε κατεργασίες πολλαπλών σπινθήρων. Μια συστηματική σύγκριση του όγκου κρατήρα από μεμονωμένο σπινθήρα, και του μέσου όγκου από πολλαπλούς σπινθήρες έγινε από τους Maradia et al.. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για χάλυβα 1.2343, με ένταση ρεύματος κατεργασίας 20A, και υποθέτοντας PFE=100%. Προέκυψε ότι για μοναδιαίο σπινθήρα με ηλεκτρόδιο γραφίτη είναι  $F_c=45\%$ , ενώ με ηλεκτρόδιο χαλκού  $F_c=20\%$ . Προτάθηκε όμως ότι το επαναστεροποιημένο υλικό και το υλικό της «στεφάνης» πρέπει να απομακρυνθούν από επόμενους σχηματιζόμενους κρατήρες. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο «πραγματικός όγκος κρατήρα»  $V_e$  (effective crater volume) είναι η διαφορά ανάμεσα στον όγκο του κρατήρα λόγω διάβρωσης  $V_-$  και στον όγκο του επαναστεροποιημένου υλικού της στεφάνης  $V_+$ . Σύμφωνα με αυτή τη προσέγγιση προέκυψε για ηλεκτρόδιο γραφίτη  $F_c=20\%$  και για ηλεκτρόδιο χαλκού  $F_c=13\%$ . Για προσομοίωση του «μέσου όγκου»  $V_m$  σε περιπτώσεις πολλαπλών παλμών και με πειραματικά δεδομένα από χιλιάδες μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς και τις προσομοιώσεις για ηλεκτρόδιο γραφίτη  $F_c$  από 8 – 15% και για ηλεκτρόδιο χαλκού από 10 – 25%. Αξίζει να σημειωθεί το μεγάλο εύρος τιμών για το  $F_c$ , παρά τις σταθερές συνθήκες πειράματος. Μια σημαντική επίσης παρατήρηση είναι ότι ο ρυθμός αποβολής υλικού μειώνεται σημαντικά για ηλεκτρόδια μικρο – κλίμακας ( $<1\text{mm}^2$ ), σε σχέση με αυτόν για ηλεκτρόδια μακρο – κλίμακας ( $>10\text{mm}^2$ ). Το φαινόμενο ονομάζεται «φαινόμενο κλίμακας σε κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης» (scaling effect in EDM), και για να κατανοηθεί μελετήθηκε η επίδραση της επιφάνειας προβολής του ηλεκτροδίου, του βάθους διάβρωσης, και των ιδιοτήτων του υλικού, στο ρυθμό αποβολής υλικού [5, 81].

Είναι φανερό ότι στους υπολογισμούς πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν τόσο το ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο  $F_c$ , όσο και η αποτελεσματικότητα έκπλυσης PFE. Το ποσοστό  $F_c$  εξαρτάται κυρίως από το ισοζύγιο ενέργειας κατά την ηλεκτρική εκκένωση, το οποίο ισοζύγιο επηρεάζεται από τα υλικά ηλεκτροδίου – τεμαχίου. Το ισοζύγιο ενέργειας επηρεάζει επίσης τη διάμετρο της σχηματιζόμενης φυσαλίδας και κατ' επέκταση τις συνθήκες και την αποτελεσματικότητα απόπλυσης. Σε μελέτη του ο Zhang et al. απέδειξαν την εξάρτηση του PFE από το διηλεκτρικό μέσο [5, 76]. Για την καλύτερη κατανόηση και παρατήρηση των φαινομένων, οι Maradia et al. χρησιμοποίησαν κάμερες υψηλής ταχύτητας σε πειράματα ημireαλιστικής ηλεκτροδιάβρωσης (Εικόνα 41). Η μέθοδος αυτή είναι ακριβέστερη σε σχέση με τη χρήση διαφανών ηλεκτροδίων, τεχνική που έχει εφαρμοστεί από αρκετές ερευνητικές ομάδες. Η διαδικασία της ημireαλιστικής ηλεκτροδιάβρωσης λαμβάνει χώρα σε κλειστή κοιλότητα με την ροή του διηλεκτρικού μέσου και των φυσαλίδων να γίνεται υπό «συνθήκες περιορισμού» (dielectric fluid and gas bubble escape path is restricted), προσομοιάζοντας συνθήκες πραγματικής διάβρωσης. Ορισμένα βασικά συμπεράσματά στα οποία κατέληξαν είναι ότι: σπινθήρας μπορεί να εκδηλωθεί στο υγρό, στη φυσαλίδα αλλά



Εικόνα 41 Γραφική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης ημι - ρεαλιστικής ηλεκτροδιάβρωσης [5]

και στη διεπιφάνεια αυτών, ενώ οι φυσαλίδες στα μικρά διάκενα ενώνονται σχηματίζοντας μεγαλύτερες διευκολύνοντας έτσι την απομάκρυνσή τους καθώς αυξάνονται οι δυνάμεις άνωσης παράλληλα με τις πιέσεις που δημιουργούν οι υπόλοιπες φυσαλίδες και οι ηλεκτρικές εκκενώσεις τριγύρω τους. Επίσης, σε περιπτώσεις μικρο – ηλεκτροδίων, μια μοναδική φυσαλίδα μπορεί να διασταλεί αρκετά, ώστε να καταλάβει μόνη της τον συνολικό όγκο της διαβρωμένης κοιλότητας και στη συνέχεια να μην «καταρρεύσει», αλλά απλά να απομακρυνθεί από την περιοχή του σπινθήρα. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να εξηγήσει το χαμηλότερο μέσο όγκο κρατήρα σε περιπτώσεις πολλαπλών σπινθήρων, λόγω χαμηλότερου PFE [5, 81].

Οι Xia et al. και Natsu et al. διατύπωσαν την άποψη ότι, αν και το ποσοστό ενέργειας που απορροφά η άνοδος είναι υψηλό σε περιπτώσεις παλμών μεγάλης διάρκειας, σχηματίζεται ένα προστατευτικό στρώμα άνθρακα στην επιφάνειά της, το οποίο την προστατεύει από φθορά. Παρατηρήθηκε ότι ο λόγος φθοράς της ανόδου για μεμονωμένους σπινθήρες είναι υψηλότερος σε σχέση με αυτόν σε περιπτώσεις πολλαπλών σπινθήρων, όπου το προστατευτικό στρώμα έχει «προλάβει» να δημιουργηθεί σταδιακά. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο υψηλότερο σημείο τήξης του άνθρακα [6, 39, 8582]. Οι Mohri et al. μελέτησαν τη χρονική εξέλιξη της φθοράς της ανόδου σε ηλεκτρόδιο χαλκού για ρεύμα κατεργασίας 8A παρατηρώντας αυξημένη φθορά στις γωνίες του ηλεκτροδίου, στην αρχή της διάβρωσης και χαμηλότερη φθορά στη μετωπική επιφάνεια. Οι πλευρικές επιφάνειες δεν είχαν καλυφθεί από το «μαύρο» προστατευτικό στρώμα, όπως οι μετωπικές. Σε περαιτέρω έρευνα που πραγματοποίησαν, προσδιόρισαν μέσω περίθλασης ακτίνων X ότι το προστατευτικό στρώμα αποτελείται από «στροβιλοστρωματικό άνθρακα» (turbostratic carbon). Πρότειναν ως ερμηνεία ότι αποσπάται άνθρακας από το διηλεκτρικό έλαιο, ο οποίος συμπύσσεται (precipitated) με τα κατακρημνίσματα της κατεργασίας. Στοιχεία που προέρχονται από το τεμάχιο όπως, σίδηρος, νικέλιο, και χρώμιο υποβοηθούν το σχηματισμό του προστατευτικού στρώματος, καθώς έχουν καταλυτική δράση. Η αυξημένη φθορά στις γωνίες οφείλεται στην μεγάλη καμπυλότητα και στη δυσκολία να σχηματιστεί το στρώμα άνθρακα [5, 83, 84, 85]. Σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις των Mohri et al. και Murray et al. για ηλεκτρόδια χαλκού, οι Itoh και Klocke et al. παρατήρησαν αυξημένες επικαθήσεις στις γωνίες και τις ακμές σε ηλεκτρόδια γραφίτη [5, 86, 87]. Ο Maradia et al. ανέλυσαν με φασματοσκοπία micro – Raman το σχηματιζόμενο στρώμα άνθρακα σε ηλεκτρόδια γραφίτη για meso – macro EDM, καταλήγοντας ότι το στρώμα έχει δομή παρόμοια με διαμαντιού (Diamond Like Carbon – DLC). Προτάθηκε θερμικό μοντέλο για τη χαμηλότερη φθορά του ηλεκτροδίου, το οποίο περιλαμβάνει το σχηματισμό του προστατευτικού στρώματος άνθρακα. Σύμφωνα με αυτό, όταν η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξεως ή εξάχνωσης του υλικού, αλλά υψηλότερη από τη θερμοκρασία εξάτμισης του διηλεκτρικού μέσου, έχουμε χαμηλή θερμική φθορά ηλεκτροδίου και συμπύκνωση άνθρακα στην περιοχή. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του στρώματος DLC προστατεύει το ηλεκτρόδιο από θερμική φθορά [5, 87].

Τέλος, έχουν χρησιμοποιηθεί προσομοιώσεις για τη μελέτη της ποιότητας επιφανείας, των παραμενουσών τάσεων και της γεωμετρίας του τεμαχίου κατά το πέρας της κατεργασίας [5].

## 5. Πειραματική Διαδικασία

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας, και των διεξαχθέντων πειραμάτων είναι η διερεύνηση παραμέτρων και μελέτη της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης (die sinking EDM) για μια σειρά διαφορετικών συνθηκών, υψηλής σχετικά έντασης ρεύματος και μεγάλης διάρκειας παλμών, σε εργαλειοχάλυβα AISI O1.

### 5.1 Εργαλειομηχανή

Η μηχανή στην οποία διεξήχθησαν τα περάματα είναι η AGIETRON EMT 1.10. Η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες μονάδες (κύρια μηχανή, μονάδα παροχής διηλεκτρικού μέσου, μονάδα παροχής ισχύος) συνδεδεμένες μεταξύ τους με αγωγούς ρεύματος και διηλεκτρικού μέσου (Εικόνα 42). Οι συνθήκες κατεργασίας που επιλέχθηκαν να μεταβάλλονται στη σειρά πειραμάτων είναι: η ένταση ρεύματος, και η διάρκεια παλμού.

Η ένταση ρεύματος ελέγχεται έμμεσα μέσω «μονάδων ρεύματος 'J<sub>T</sub>'» από τους αντίστοιχους περιστροφικούς διακόπτες στη μονάδα ισχύος. Σε κάθε μονάδα ρεύματος, όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο χρήσης, αντιστοιχούν περίπου 3A ένταση ρεύματος. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί η **έντασης ρεύματος κατεργασίας  $I_p [A]$**  [89]. Παράλληλα υπάρχει συνδεδεμένο αμπερόμετρο με ένδειξη της **μέσης έντασης ρεύματος κατεργασίας** ("indicates average working currents"), η ένδειξη του οποίου θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του duty ratio «η». Υπάρχει επίσης ένδειξη αποδοτικότητας (efficiency), που ουσιαστικά εκφράζει το ποσοστό των παλμών που οδηγούν σε εκδήλωση σπινθήρα ("ratio of sparks to pulses supplied") [89].



Εικόνα 42 Εργαλειομηχανή AGIETRON EMT 1.10

Η εργαλειομηχανή κατά τη διάρκεια της κατεργασίας προκειμένου να διατηρήσει τη σταθερότητα και αποδοτικότητα λειτουργίας, σε τακτά χρονικά διαστήματα διακόπτει την παροχή παλμών, αποσύρει ελαφρά το ηλεκτρόδιο, ώστε να γίνει αποτελεσματική απόπλυση, και αφού επανέλθει η κεφαλή στην αρχική της θέση συνεχίζεται η κατεργασία. Το διάστημα αυτό δεν είναι «ενεργός χρόνος κατεργασίας», καθώς δεν υπάρχει παροχή ισχύος προς το τεμάχιο και πρέπει να διαχωρίζεται από το συνολικό χρόνο κατεργασίας.

Τέλος ως μέθοδο απόπλυσης χρησιμοποιείται δέσμη jet διηλεκτρικού μέσου χαμηλής πίεσης πλευρικά του τεμαχίου.

## 5.2 Τεμάχιο - Ηλεκτρόδιο

Ως τεμάχια κατεργασίας χρησιμοποιούνται ορθογώνια παραλληλεπίπεδα τεμάχια από εργαλειοχάλυβα AISI O1. Το ηλεκτρόδιο είναι χαλκός, ορθογώνιας γεωμετρίας, διαστάσεων 38 X 23 [mm] [Εικόνα 43]. Σε κάθε τεμάχιο πραγματοποιούνται τρία πειράματα σε διαδοχικές θέσεις, με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας και ονομαστικό βάθος κοπής



κατεργασίας από 0.5 – 1 [mm](Εικόνα 43).

Εικόνα 43 α) Ηλεκτρόδιο Κατεργασίας β) Κατεργασμένα Τεμάχια

## 5.3 Πειραματική Διαδικασία - Μετρήσεις

Κύριος στόχος είναι να υπολογιστεί ο ρυθμός αποβολής υλικού  $MRR[mm^3/min]$ , και στη συνέχεια να προσεγγιστεί η κατεργασία μέσω προσομοιώσεων με FEM. Τα μεγέθη που καταγράφονται και θα χρησιμοποιηθούν είναι:

- Διαφορά δυναμικού  $V_p[V]$
- Μονάδες ρεύματος
- Ένδειξη αμπερομέτρου  $\bar{I}_p[A]$
- Χρόνος Παλμού [ $\mu sec$ ]
- Αρχικό βάρος τεμαχίου  $W_{st.}[gr]$
- Βάρος τεμαχίου μετά τη κατεργασία  $W_{fin.}[gr]$
- Χρόνος κατεργασίας [min]
- Ενεργός χρόνος κατεργασίας  $t_m[min]$  (κατά τη διάρκεια της απόσυρσης της κεφαλής, προκειμένου να γίνει απόπλυση των αποβλήτων κατεργασίας, η ένδειξη στο αμπερόμετρο μηδενίζεται και, έτσι, μπορεί να μετρηθεί ο «ενεργός χρόνος κατεργασίας», ο οποίος διαφοροποιείται από το συνολικό χρόνο κατεργασίας).
- Ονομαστικό βάθος κοπής [mm] Αποδοτικότητα κατεργασίας  $f_{eff.}[\%]$
- Αρχικό βάρος ηλεκτροδίου  $W_{st.}^{electr.}[gr]$
- Βάρος ηλεκτροδίου μετά τη κατεργασία  $W_{fin.}^{electr.}[gr]$
- Τραχύτητα κατεργασμένης επιφάνειας  $R_a[\mu m]$  και  $R_t[\mu m]$ . Γίνονται μετρήσεις σε πέντε σημεία (για κάθε πείραμα) και υπολογίζεται ο μέσος όρος ως πιο αντιπροσωπευτικός.
- Κοπή σε κατάλληλο μέγεθος και εγκιβωτισμός δοκιμών σε εποξειδική ρητίνη.
- Λείανση και στη συνέχεια στίλβωση με αλουμινόπαστα.
- Καθαρισμός σε συσκευή υπερήχων.
- Προσβολή με Nital 10% για ένα λεπτό (Nital Etching).

- Μελέτη σε οπτικό μικροσκόπιο. Ελήφθησαν εικόνες σε μεγέθυνση x100, x200, x500 για κάθε δοκίμιο.

Ενδιάμεσα των πειραμάτων το ηλεκτρόδιο «καθαρίζεται» και απομακρύνονται οι επικαθήσεις.

Επιλέχθηκαν συνθήκες κατεργασίας: ένταση ρεύματος κατεργασίας  $I_p = 27 \div 12 [A]$  και χρόνος παλμού  $T_{on} = 100 \div 500 [\mu sec]$ . Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές συνθήκες και οι αντίστοιχες μετρήσεις.

Πίνακας 9 Πειραματικά Δεδομένα

#	ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ [V]	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΟΝΟΜ. J <sub>r</sub>	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ I <sub>p</sub> [A]	ΜΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ I <sub>p</sub> [A]	ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΛΜΟΥ T <sub>on</sub> [μsec]	ΟΝΟΜΑΣΤ. ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ [mm]	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ [min:sec]	ΟΦΕΛΙΜΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ t <sub>m</sub> [min:sec]	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ W <sub>st</sub> [gr]	ΒΑΡΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ W <sub>fin</sub> [gr]	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ W <sub>st</sub> <sup>electr.</sup> [gr]	ΒΑΡΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ W <sub>fin</sub> <sup>electr.</sup> [gr]	f <sub>eff</sub>
1	100	9	27	17.5	100	1	8.3	7.3	338	332.9	310.2	309.9	0.8
2	100	8	24	16	100	0.5	5	5	322.2	319.2	308.6	308.4	0.8
3	100	7	21	14	100	1	10.15	8.55	332.9	327.6	309.8	309.5	0.8
4	100	6	18	12	100	1	16.25	13.4	327.4	322.2	308.6	308.4	0.8
5	100	9	27	18	300	0.5	2.32	2.32	337.4	335.4	308.1	308.1	0.9
6	100	6	18	14	300	1	9	7.38	333.2	328.5	307.5	307.5	0.8
7	100	5	15	11	300	1	14	11.32	347.6	342.4	307.5	307.5	0.8
8	100	4	12	8.5	300	0.5	13.45	10.05	342.4	340.1	307.4	307.3	0.6
9	100	7	21	14.5	500	1	10	8.3	340.1	334.9	307.1	307.1	0.8
10	100	5	15	12.5	500	1	11.33	11.33	343.1	338	307	307	0.8
11	100	4	12	8.5	500	1	25.4	21.38	338	333	306.8	306.8	0.8
12	100	8	24	15	75	1	8.2	7.05	332.7	328.2	306.5	306.1	0.8

#	Μέγιστη Τιμή Τραχύτητας R <sub>a</sub> [μm]							Μέση Τιμή Τραχύτητας R <sub>a</sub> [μm]						
	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 4	Σημείο 5	Μέσος Όρος	Μέγιστο	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 4	Σημείο 5	Μέσος Όρος	Μέγιστο
1	55	61	55	69	55	59	69	9	8	8.2	9.8	8.2	8.64	9.8
2	60	65	74	63	82	68.8	82	7.8	10.4	7.6	9.2	10.2	9.04	10.4
3	62	75	59	62	72	66	75	9.6	9.2	9.6	8.8	9.8	9.4	9.8
4	62	69	70	52	57	62	70	8.6	9.2	9	9.6	9.8	9.24	9.8
5	66	67	74	68	74	69.8	74	10.4	10.8	13.4	10.8	10.4	11.16	13.4
6	76	84	81	74	72	77.4	84	11.8	13.6	11.8	10.4	10.8	11.68	13.6
7	64	76	80	56	64	68	80	10.4	10.6	10.8	9	9.4	10.04	10.8
8	54	51	54	52	71	56.4	71	7	7.4	6.6	9.2	9.2	7.88	9.2
9	73	83	70	50	60	67.2	83	9.6	11	10.8	8.6	9.2	9.84	11
10	60	53	74	58	75	64	75	7.8	7	10.2	8	9.4	8.48	10.2
11	52	33	40	62	56	48.6	62	8	6	8.2	8	7.4	7.52	8.2
12	73	77	54	57	48	61.8	77	10.2	9	8	8.2	8.4	8.76	10.2

Ο υπολογισμός του ρυθμού αποβολής υλικού MRR[mm<sup>3</sup>/min] γίνεται βάσει του τύπου:

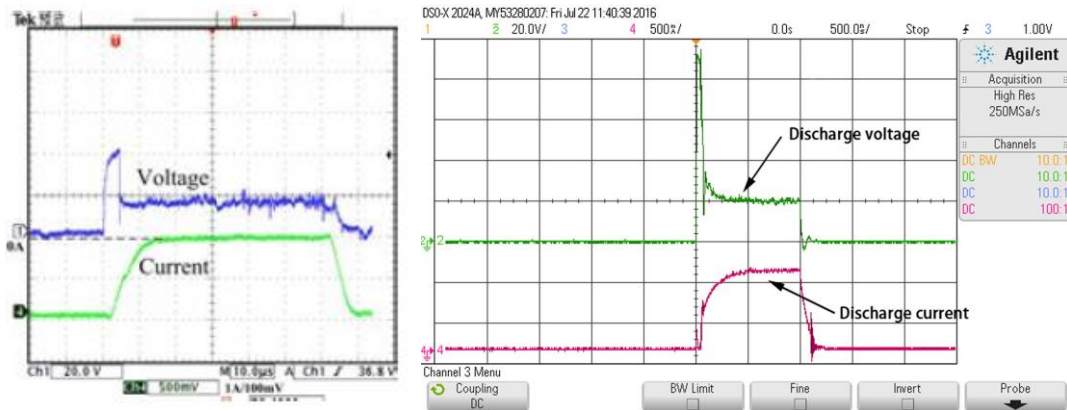
$$MRR_{exp} \left[ \frac{mm^3}{min} \right] = \frac{W_{st}.[gr] - W_{fin}.[gr]}{\rho \left[ \frac{gr}{mm^3} \right] * t_m [min]}$$

Ο προμηθευτής των δοκιμών ορίζει πυκνότητα του χάλυβα AISI O1:  $\rho = 0.0078 \left[ \frac{gr}{mm^3} \right]$

Προκειμένου να υπολογιστεί ο “duty factor” χρησιμοποιείται η σχέση:

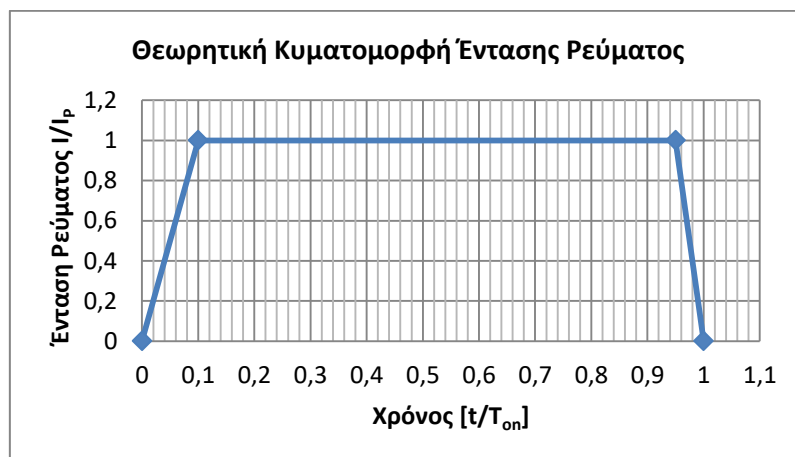
$$\bar{I}_P = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} * \int_0^{T_{on}+T_{off}} I(t)dt$$

Σε μελέτες που έχουν διεξαχθεί, και όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα, η κυματομορφή της έντασης ρεύματος για εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούν τρανζίστορ, έχει τραπεζοειδές σχήμα (Εικόνα 44) [90, 91].



Εικόνα 44 Μορφή κυματομορφής της έντασης ρεύματος για εργαλειομηχανές που χρησιμοποιούν τρανζίστορ [90, 91]

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε μια ασυμμετρία ανάμεσα στην «αρχή» και το «τέλος» του παλμού, ο οποίος όμως μπορεί να μοντελοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια ως τραπέζιο. Με βάση τα προαναφερθέντα, υποθέτουμε ότι η κυματομορφή της έντασης ρεύματος είναι τραπέζιο, με την αύξουσα περιοχή να ολοκληρώνεται στο 10% του χρόνου του παλμού  $T_{on}$ , ενώ η φθίνουσα να είναι το τελευταίο 5% του χρονικού διαστήματος (Διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1 Θεωρητική Κυματομορφή Έντασης Ρεύματος

Η σχέση υπολογισμού της μέσης έντασης ρεύματος  $\bar{I}_P$  μπορεί να γραφεί πλέον ως:

$$\bar{I}_P = \frac{I_P * \frac{T_{on} + 0.85 * T_{on}}{2}}{T_{on} + T_{off}} = I_P * \frac{1.85 * T_{on}}{2 * (T_{on} + T_{off})} = I_P * \eta * \frac{1.85}{2}$$

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς «duty factor "η"» προκύπτει:

$$\eta = \frac{2 * \bar{I}_P}{1.85 * I_P}$$

Η ονομαστική ισχύς της κατεργασίας ορίζεται ως:

$$P_{nom.}[W] = V_P[V] * I_P[A]$$

Ως μέση ισχύς κατεργασίας ορίζεται:

$$P_{av.}[W] = P_{nom.}[W] * \eta[\%] * f_{eff.}[\%]$$

Η ενέργεια τέλος ανά παλμό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_P[mJ] = V_P[V] * I_P[A] * T_{on}[\mu sec] * 10^3$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις και τα πειραματικά δεδομένα προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακας 10.

**Πίνακας 10 Αποτελέσματα Επεξεργασίας Πειραματικών Δεδομένων**

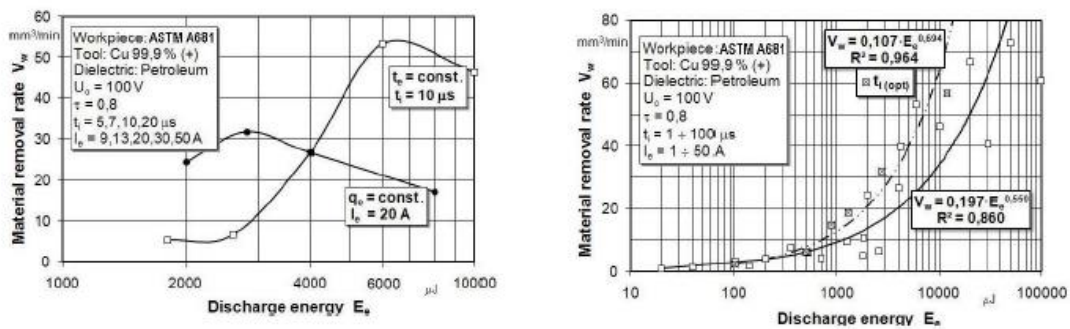
# ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	Duty Factor η	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ $P_{nom.}[W]$	ΜΕΣΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ $P_{av.}[W]$	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΠΑΛΜΟ $E_P[mJ]$	$MRR_{exp.}$ [ $mm^3/min$ ]
1	0.70	810	454.05	81	<b>87.18</b>
2	0.72	720	415.14	72	<b>76.92</b>
3	0.72	630	363.24	63	<b>76.20</b>
4	0.72	540	311.35	54	<b>48.78</b>
5	0.72	810	525.41	243	<b>101.21</b>
6	0.84	540	363.24	162	<b>78.94</b>
7	0.79	450	285.41	135	<b>57.80</b>
8	0.77	360	165.41	108	<b>29.24</b>
9	0.75	630	376.22	315	<b>78.43</b>
10	0.90	450	324.32	225	<b>56.61</b>
11	0.72	360	207.57	180	<b>29.63</b>
12	0.68	720	389.19	54	<b>81.45</b>

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακας 10 μπορούμε να σχεδιάσουμε και να αξιολογήσουμε διαγράμματα για το MRR συναρτήσει ορισμένων παραμέτρων της κατεργασίας. Η βιβλιογραφία και τα εγχειρίδια χρήσης της εργαλειομηχανής παρέχουν αντίστοιχα διαγράμματα προκειμένου να είναι εφικτός ο προγραμματισμός και σχεδιασμός της κατεργασίας.

Σε εργασία τους οι Marin Gostimirovic et al.[92] καταλήγουν ότι αυξανόμενης της ενέργειας ανά παλμό, με αύξηση της έντασης ρεύματος για σταθερό χρόνο παλμού, υπάρχει και αύξηση του MRR. Η αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού περιορίζεται όμως από την πυκνότητα ρεύματος [ $A/cm^2$ ] φτάνοντας σε μια μέγιστη οριακή τιμή. Περαιτέρω αύξηση της έντασης ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα μείωση του MRR. Επίσης, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι για συγκεκριμένη ενέργεια ανά παλμό υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του χρόνου παλμού για την οποία μεγιστοποιείται το MRR. Άρα, μπορούμε συμπερασματικά να

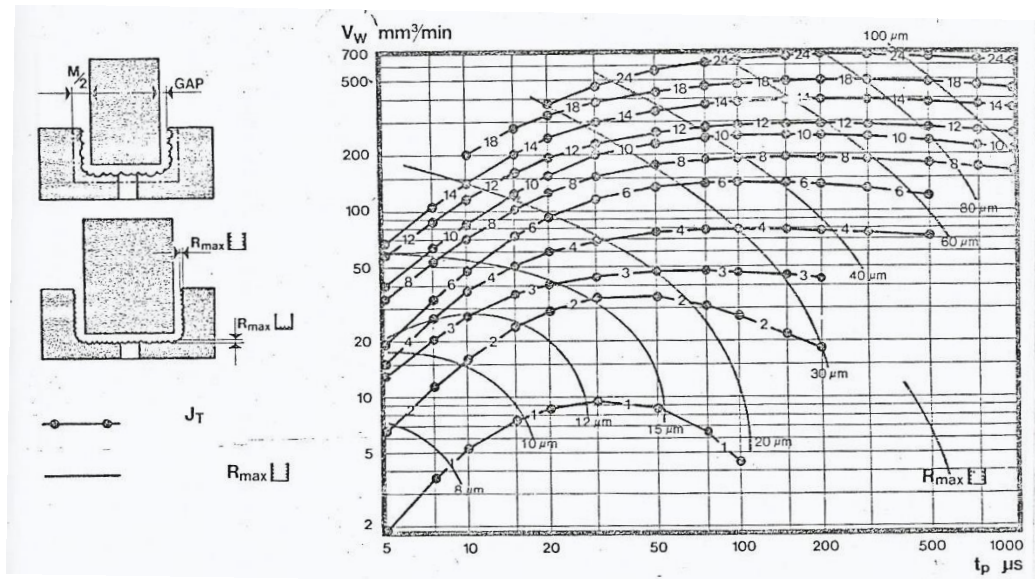


πούμε ότι γενικά υψηλότερη ενέργεια οδηγεί σε αυξημένο MRR. Υπάρχουν όμως περιορισμοί και βέλτιστοι συνδυασμοί ένταση ρεύματος και χρόνου παλμού προκειμένου η κατεργασία να έχει τη μέγιστη αποδοτικότητα και, άρα, το μέγιστο MRR. Οι περιορισμοί αυτοί προκύπτουν από τους φυσικούς μηχανισμούς της κατεργασίας. Υψηλή ένταση ρεύματος ή μεγάλος χρόνος παλμού προκαλούν υπερβολική συγκέντρωση αποβλήτων στο διάκενο τεμαχίου – ηλεκτροδίου, ενώ ταυτόχρονα η σχηματιζόμενη φυσαλίδα αποκτά «δυσανάλογα μεγάλο μέγεθος». Μέρος της ενέργειας πλέον καταναλώνεται στη «επανατήξη» υλικού που είχε απομακρυνθεί, ενώ μεγάλο ποσοστό ενέργειας διοχετεύεται σε «αέριο περιβάλλον» (larger portion of energy takes place in a gaseous environment). Οι παραπάνω μηχανισμοί επιδρούν στην αποδοτικότητα της κατεργασίας.



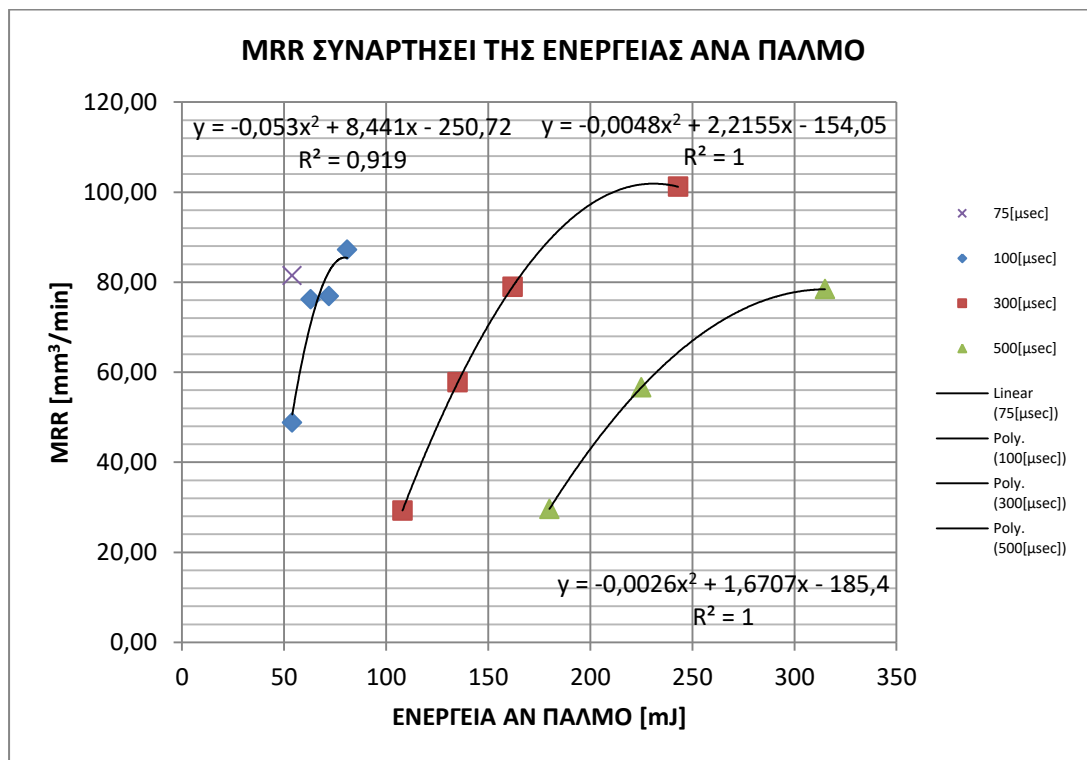
Εικόνα 45 α) Επίδραση των παραμέτρων της πηγής θερμότητας στον ρυθμό αποβολής υλικού, β) εξάρτηση του ρυθμού αποβολής υλικού από την ενέργεια εκκένωσης [92]

Σε ανάλογα συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε ανατρέχοντας και στο εγχειρίδιο χρήσης της μηχανής, όπου παρουσιάζονται διαγραμματικά οι αναμενόμενες τιμές MRR για διάφορες συνθήκες κατεργασίας (Εικόνα 46) [89]. Οι καμπύλες έχουν τυπική μορφή, που συναντάται στα περισσότερα εγχειρίδια σχετικά με την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης. Παρατηρείται μια μέγιστη τιμή MRR για συγκεκριμένο χρόνο παλμού με σταθερό ρεύμα κατεργασίας και στη συνέχεια υπάρχει μείωση του MRR, καθώς αυξάνεται ο χρόνος  $t_p$ . Φυσικά τα πειραματικά δεδομένα, που έχουμε αναμένουμε να διαφέρουν από τα θεωρητικά, καθώς αυτά έχουν προκύψει σε πρότυπες – ιδανικές συνθήκες κατεργασίας. Ποιοτικά όμως πρέπει να συμφωνούν.



Εικόνα 46 Διάγραμμα του MRR συναρτήσει της έντασης ρεύματος και του χρόνου παλμού από το εγχειρίδιο χρήσης της εργαλειομηχανής AGIE για τεμάχιο χάλυβα και ηλεκτρόδιο χαλκού [89]

Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 10 προκύπτουν τα διαγράμματα 2 έως 4:

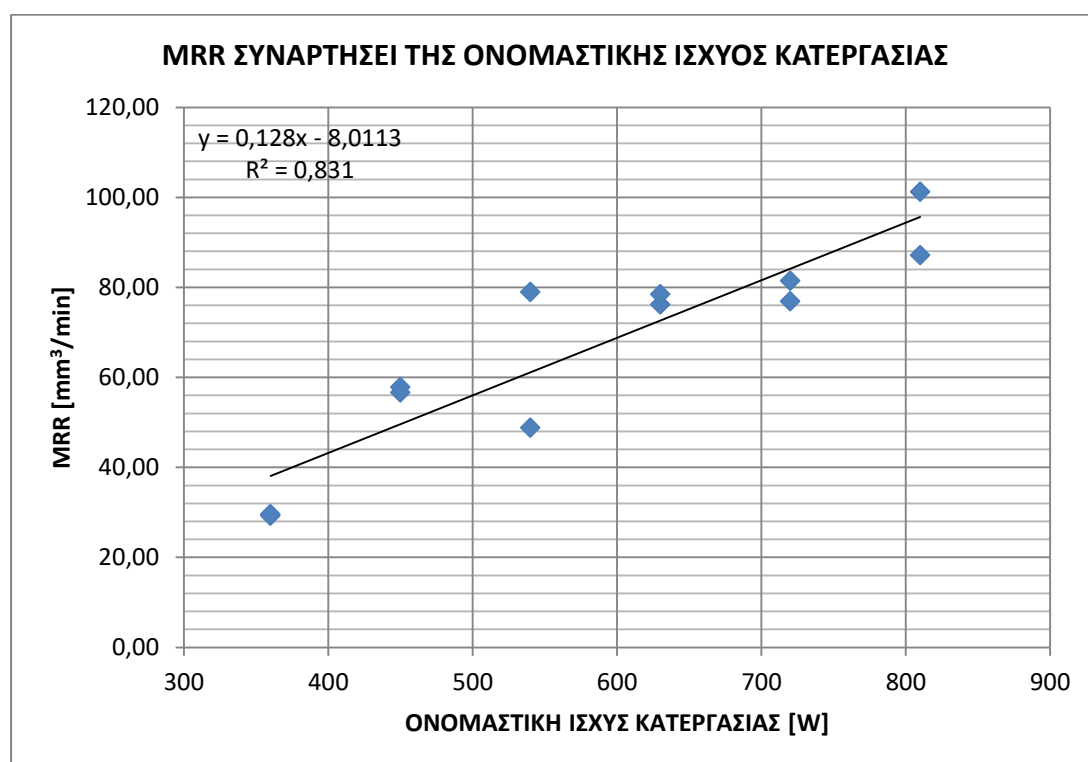


Διάγραμμα 2 MRR συναρτήσει της ενέργειας ανά παλμό

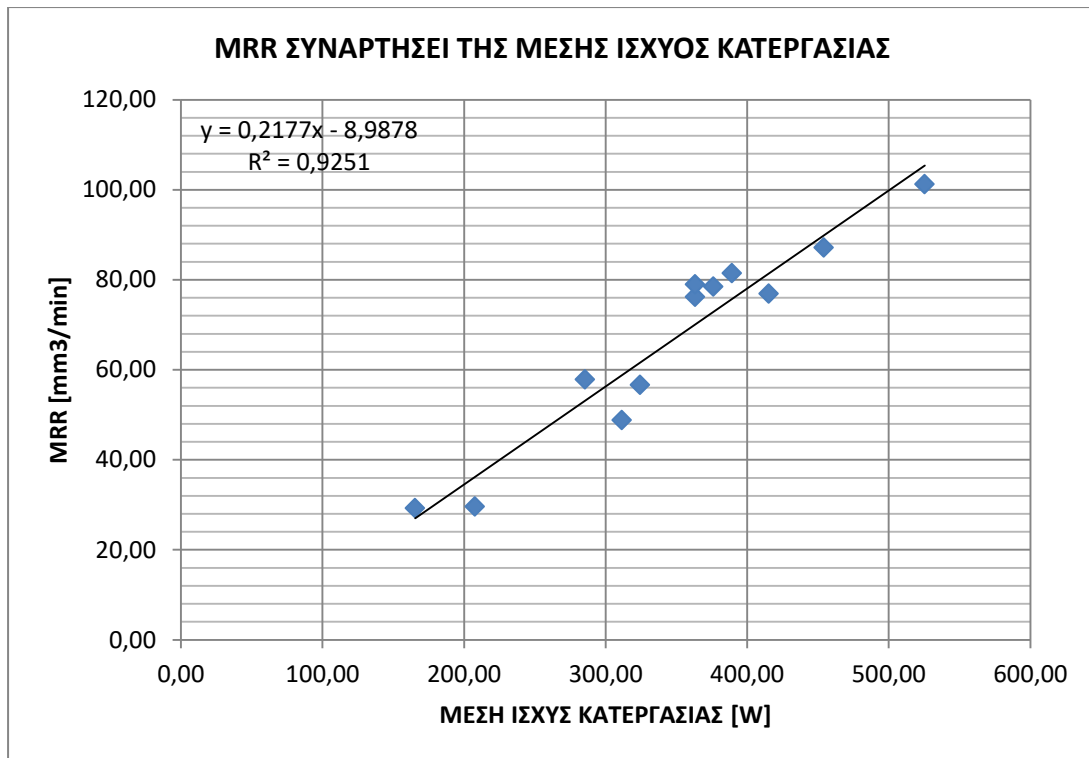
Στο Διάγραμμα 2 παρατηρούμε ότι με αύξηση της ενέργειας ανά παλμό, διατηρώντας το χρόνο παλμού  $T_{on}$  σταθερό και αυξάνοντας την ένταση ρεύματος κατεργασίας, ο ρυθμός αποβολής υλικού αυξάνεται έως μια τιμή, ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται η τάση προς μείωση. Επίσης, παρατηρείται το προαναφερθέν φαινόμενο, δηλαδή για ίδια ενέργεια ανά παλμό διαφοροποιείται το MRR λόγω του διαφορετικού χρόνου παλμού  $T_{on}$ . Η μορφή των

καμπυλών είναι η αναμενόμενη με τις τιμές του MRR να είναι χαμηλότερες από τις «ιδανικές» που αναγράφονται στο εγχειρίδιο χρήσης και που πιθανόν οφείλονται σε μη ιδανικές συνθήκες απόπλυσης, φυσικής φθοράς της εργαλειομηχανής λόγω χρήσης, και σε λοιπούς αστάθμητους παράγοντες.

Ενδιαφέρον, επίσης, παρουσιάζουν τα Διάγραμμα 3 και Διάγραμμα 4, στα οποία φαίνεται ο ρυθμός αποβολής υλικού συναρτήσει της ισχύος της κατεργασίας. Στο Διάγραμμα 3 βλέπουμε διαφορετικές τιμές MRR για την ίδια **ονομαστική ισχύ** κατεργασίας. Θεωρητικά μοιάζει ότι σε ίδιο χρόνο κατεργασίας και με ίδια κατανάλωση ενέργειας έχουμε χαμηλότερο ρυθμό αποβολής υλικού. Στην πραγματικότητα υπεισέρχονται παράγοντες σταθερότητας και αποδοτικότητας κατεργασίας (χρόνος  $T_{off}$  και συντελεστής αποδοτικότητας). Υπολογίζοντας **την μέση ισχύ της κατεργασίας**, που είναι ουσιαστικά η ονομαστική ισχύς πολλαπλασιασμένη με τον duty factor και το συντελεστή αποδοτικότητας  $f_{eff}$ , η συσχέτιση του MRR με τη μέση ισχύ γίνεται σχεδόν γραμμική, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4. **Θα μπορούσαμε λοιπόν συμπερασματικά να πούμε ότι στον υπολογισμό του MRR σημασία δεν έχει απλά η πρόσδοση ενέργειας στο τεμάχιο αλλά και η ικανότητα να διατηρείται ένας σταθερός μηχανισμός κατεργασίας, ο οποίος όπως άλλωστε έχει προαναφερθεί, θέτει ανώτατα όρια στο MRR που μπορεί να επιτευχθεί.**



Διάγραμμα 3 MRR συναρτήσει της ονομαστικής ισχύς κατεργασίας



Διάγραμμα 4 MRR συναρτήσεϊ της μέσης ισχύος κατεργασίας

## 6. Μοντελοποίηση και επίλυση με χρήση λογισμικού FEM.

Στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης λαμβάνουν χώρα εξαιρετικά πολύπλοκοι μηχανισμοί και στην προσπάθεια μοντελοποίησης της προκύπτει η ανάγκη για ορισμένες απλοποιήσεις – υποθέσεις προκειμένου να είναι εφικτή η συνέχεια της ανάλυσης. Στη συγκεκριμένη εργασία και βάσει της βιβλιογραφίας η μοντελοποίηση της κατεργασίας προσεγγίζεται ενεργειακά μέσω επίλυσης μοντέλου μετάδοσης θερμότητας, το οποίο όμως έχει «προσαρμοστεί» στις ιδιαιτερότητες του EDM. Καθώς η κατεργασία είναι σε μεγάλο βαθμό ένα «black box» για κάποιον εξωτερικό παρατηρητή, τα δεδομένα που χρειάζονται για ένα ρεαλιστικό, και κατά το δυνατόν ακριβές μοντέλο, υπολογίζονται έμμεσα και βάσει της βιβλιογραφίας.

### 6.1 Πηγή θερμότητας

Η «στήλη πλάσματος» που σχηματίζεται κατά την ηλεκτρική εκκένωση αποτελεί την πηγή θερμότητας προς το τεμάχιο. Αρχικά πρέπει να οριστούν τα χαρακτηριστικά της πηγής αυτής, δηλαδή ισχύς [W] ή εναλλακτικά πυκνότητα ισχύος [ $W/m^2$ ], μορφή και επιφάνεια επενέργειάς της.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως σωστή και πλέον ρεαλιστική προσέγγιση η πηγή θερμότητας να θεωρείται ως κανονική κατανομή. Θεωρούμε ότι η ακτίνα πλάσματος ισούται με τρεις τυπικές αποκλίσεις, δηλαδή  $r_p = 3 * \sigma$  και η εξίσωση πυκνότητα ισχύος κανονικής κατανομής γράφεται:

$$p(r) = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sigma}} * e^{-\frac{r^2}{2 * \sigma^2}} = \frac{3}{\sqrt{2 * \pi * r_p}} * e^{-4.5 * \frac{r^2}{r_p^2}}$$

Για  $r=0$  η πυκνότητα ισχύος παίρνει μέγιστη τιμή  $p(0) = Q_0$  και η παραπάνω σχέση γράφεται για την ισχύ που απορροφάται από το τεμάχιο  $Q_W$ :

$$Q_W(r) = Q_0 * e^{-4.5 * \frac{r^2}{r_p^2}}$$

Το σύνολο ισχύος, που απορροφάται από το τεμάχιο υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση και μπορεί να γραφτεί ως:

$$\begin{aligned} \oint Q_W(r) dA &= \int_0^{r_p} (Q_W(r) * 2 * \pi * r) dr = \int_0^{r_p} \left( Q_0 * e^{-4.5 * \frac{r^2}{r_p^2}} * 2 * \pi * r \right) dr = -\frac{\pi * r_p^2}{4.5} * Q_0 * e^{-4.5 * \frac{r^2}{r_p^2}} \Big|_0^{r_p} \\ &= \frac{\pi * r_p^2}{4.5} * Q_0 * (1 - e^{-4.5}) = \mathbf{0.2191 * \pi * Q_0 * r_p^2} \end{aligned}$$

Η συνολική ισχύς που απορροφάται από το τεμάχιο με βάση τις συνθήκες κατεργασίες υπολογίζεται ως:

$$V_P[V] * I_P[A] * F_W[\%], \quad F_W \rightarrow \text{ποσοστό που απορροφάται από το τεμάχιο}$$

Εξισώνοντας τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζουμε:

$$0.2191 * \pi * Q_0 * r_p^2 = V_P * I_P * F_W \rightarrow \mathbf{Q_0 = \frac{4.57 * V_P * I_P * F_W}{\pi * r_p^2}}$$

Η κατανομή πυκνότητας ισχύος γράφεται:

$$Q_W(r) = Q_0 * e^{-4.5 * \frac{r^2}{r_p^2}} = \mathbf{Q_W(r) = \frac{4.57 * V_P * I_P * F_W}{\pi * r_p^2} * e^{-4.5 * \frac{r^2}{r_p^2}}}$$

Και για καρτεσιανές συντεταγμένες μπορεί να γραφτεί ως:

$$\mathbf{Q_W(x, y) = \frac{4.57 * V_P * I_P * F_W}{\pi * r_p^2} * e^{-4.5 * \left( \frac{x^2}{r_p^2} + \frac{y^2}{r_p^2} \right)}}$$

*Η παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία για την μελέτη της κατεργασίας EDM. Χαρακτηριστική βιβλιογραφική αναφορά αποτελεί η εργασία του H.K. Kansal et al. [93].*

Όπως φαίνεται από την εξίσωση υπολογισμού της πυκνότητας ισχύος, για να υπολογιστεί και να οριστεί πλήρως η πηγή, πρέπει να ορισθούν τα μεγέθη της διαφοράς δυναμικού  $V_P[V]$ , της έντασης ρεύματος  $I_P[A]$ , το ποσοστό ισχύος που απορροφάται από το τεμάχιο  $F_W[\%]$ , και η ακτίνα πλάσματος  $r_p[\mu m]$  ή  $[m]$ .

Η **διαφορά δυναμικού κατεργασίας** ορίζεται από τον κατασκευαστή περίπου ίση με 30V και άρα  $V_p = 30[V]$

Η **ένταση ρεύματος κατεργασίας**, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο σημείο της εργασίας, υπολογίζεται με βάση τις μονάδες ρεύματος και τα αντίστοιχα τρανζίστορ που έχουν ενεργοποιηθεί. Επίσης, η κυματομορφή της έντασης ρεύματος είναι τραπεζοειδής, χρονικά εξαρτώμενη (Διάγραμμα 1). Άρα, υπολογίζεται με βάση το Διάγραμμα 1 και τις τιμές του Πίνακα 9 για τις τιμές  $I_p[A]$ , η ένταση ρεύματος κατεργασίας

$$I_p(t)[A] = I_p[A] * f_{wave}$$

$f_{wave} \rightarrow$  συνάρτηση κυματομορφής της έντασης ρεύματος

και έτσι πλέον η πυκνότητα ισχύος κατεργασίας ορίζεται ως:  $Q_w(r, t)$ .

Το **ποσοστό ισχύος** που απορροφάται από το τεμάχιο αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο μοντελοποίησης και αντικείμενο μελέτης και έρευνας. Η βιβλιογραφία δεν παρέχει μια μονοσήμαντη «απάντηση» για το «σωστό - ρεαλιστικό» ποσοστό. Αντίθετα μάλιστα διαφορετικές ερευνητικές ομάδες χρησιμοποιούν διαφορετικούς συντελεστές. Χαρακτηριστικά στον Πίνακα 11 αναφέρονται ορισμένες εργασίες και τα αντίστοιχα ποσοστά που οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ως ποσοστά απορρόφησης από την άνοδο και τη κάθοδο. Παρατηρούμε ότι υπάρχει εύρος τιμών που κυμαίνεται από 4 – 60%. Φυσικά στην εκάστοτε περίπτωση λαμβάνονται υπ' όψιν ιδιαιτερότητες, όπως τα υλικά ηλεκτροδίων, το αν μελετάται micro meso ή macro EDM, ο χρόνος παλμού, το διηλεκτρικό μέσο και άλλες παράμετροι της κατεργασίας. Παρ' όλα αυτά διακρίνουμε ένα μεγάλο εύρος τιμών. Σε πολλές εργασίες επιλέγεται το ποσοστό που προτείνουν οι DiBitonto et al. και είναι 18.3% [51].

**Πίνακας 11 Ποσοστά απορρόφησης από άνοδο και κάθοδο σε μοντέλα προσομοίωσης σχηματισμού κρατήρα από διαφορετικούς ερευνητές [5].**

Author	Concept	F <sub>c</sub> [%]	F <sub>a</sub> [%]
Van Dijck et al.	Thermo physical model with disc heat source	50	50
Pandey and Jilani	Constant cathode boiling temperature condition	50	50
DiBitonto et al.	Point heat source with photoelectric effect	18.3	--
Patel et al.	Disc heat source with photoelectric effect	--	8
Xia et al.	Temperature measurements: single – multi sparks	25 – 34	40 - 48
Revaz et al.	Temperature measurements: single – multi sparks	10 – 15	--
Zahiruddin and Kunieda	Micro EDM with small energy discharges Ton=70[ns]	--	10.37
Singh	Temperature measurements: multi sparks	6 – 27	--
Zhang et al.	Gaussian heat source, validated for single craters	44	--
Shabgard et al.	Gaussian heat source, plasma flushing efficiency	4 – 9	4 – 36
Zhang et al.	Metallographic analysis of craters to derive energy input	42 – 60	36 – 50
Maradia et al.	Expanding disc heat source, different electrode and workpiece materials, single spark analysis	15 – 45	28 – 36

Επίσης, στη βιβλιογραφία οι εργασίες διαφοροποιούνται ως προς το αν θεωρούν το ποσοστό απορρόφησης σταθερό ή εξαρτώμενο από τις συνθήκες κατεργασίας (ένταση ρεύματος  $I_p$  και χρόνος παλμού  $T_{on}$ ). Σε αρκετές των περιπτώσεων λαμβάνεται σταθερό με μελέτες όμως να έχουν αποδείξει ότι στην πραγματικότητα μεταβάλλεται, όπως είναι άλλωστε και πιο λογικό. Συνήθως ο υπολογισμός του ποσοστού γίνεται μέσω «reverse engineering» με ταύτιση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται ως πιο ρεαλιστικό να θεωρηθεί το ποσοστό απορρόφησης μεταβλητό και εξαρτώμενο από τις συνθήκες κατεργασίας. Άρα, προκύπτει συντελεστής  $F_W(I_p, T_{on})$ . Σε εργασίες τους οι Kan Wang et al. και Singh παρουσιάζουν μοντέλα υπολογισμού του ποσοστού ισχύος που απορροφάται από το τεμάχιο [93, 94]. Οι εργασίες του Kan Wang et al. αναφέρεται σε micro EDM, ενώ του Singh σε κατεργασία με χρήση ηλεκτροδίου χαλκού – βολφραμίου. Και στις δύο περιπτώσεις όμως καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το ο συντελεστής  $F_w$  υπολογίζεται από εξίσωση της μορφής:  $F_w = A * I_p^b * T_{on}^c$  με A, b, c συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες της κατεργασίας. Στην εργασία τους οι Kan Wang et al. ορίζουν ως  $F_w = 11.86 * I_p^{-0.5} * T_{on}^{0.41}$ , ενώ μέσω των διαγραμμάτων από την εργασία του Harminder Singh μπορεί να προκύψει μια ανάλογη σχέση. Εξίσωση τέτοιας μορφής θα χρησιμοποιηθεί και στη παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του ποσοστού ισχύος που απορροφάται από το τεμάχιο.

Στην εργασία τους οι Mohammadreza Shabgard et al. παρουσιάζουν μελέτη του «ποσοστού απόπλυσης» (PFE), συναρτήσε των συνθηκών κατεργασίας [95]. Επίσης, περιλαμβάνεται και εξίσωση συσχέτισης του ποσοστού ισχύος που απορροφάται από το τεμάχιο συναρτήσε της έντασης ρεύματος και του χρόνου παλμού. Στην προαναφερθείσα εργασία στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιούνται: ηλεκτρόδιο χαλκού, τεμάχια από εργαλειοχάλυβα AISI H13, διηλεκτρικό μέσο έλαιο (Oil Flux ELF2), ένταση ρεύματος από 8 έως 48 A, χρόνος παλμού από 12.8 έως 200  $\mu$ sec και διαφορά δυναμικού ανοικτού κυκλώματος 200 V, ενώ τέλος διαφορά δυναμικού κατεργασίας 70 V. Οι παραδοχές που λαμβάνονται υπ' όψιν είναι:

- Το μοντέλο αναφέρεται σε μοναδιαίο σπινθήρα
- Τα ηλεκτρόδια θεωρούνται ως ημι – άπειρα σώματα, καθώς ο όγκος που απομακρύνεται είναι τάξεις μεγέθους μικρότερος από το ηλεκτρόδιο.
- Καθώς η ακριβής θέση εκδήλωσης σπινθήρα είναι τυχαία, η επίδραση μιας μοναδιαίας εκκένωσης είναι χρήσιμη για την ανάπτυξη του θερμοκρασιακού προφίλ κατά τη διάρκεια κάθε παλμού. Συνεπώς, το θερμικό αποτέλεσμα διαδοχικών σπινθήρων αγνοείται και ο κάθε κρατήρας προσδιορίζεται ως μοναδιαίος προς απλοποίηση της διαδικασίας προσομοίωσης.
- Η ροή θερμότητας προς το ηλεκτρόδιο είναι ανεξάρτητη του προφίλ επιφανείας του ηλεκτροδίου.
- Η επίδραση του διακένου παραλείπεται.
- Οι αλλαγές φάσεων κατά τη διάρκεια της ανάλυσης παραλείπονται.
- Οι σχηματιζόμενοι κρατήρες στα ηλεκτρόδια εξαιτίας κάθε ηλεκτρικής εκκένωσης, θεωρείται ότι έχει κυκλική παραβολική γεωμετρία.

- Το επαναστερεοποιημένο υλικό σε κάθε κρατήρα μετά από κάθε σπινθήρα θεωρείται ομοιόμορφο.
- Η πηγή θερμότητας θεωρείται ότι έχει Gaussian κατανομή
- Η διάμετρος της στήλης πλάσματος και κατά συνέπεια και της πηγής θερμότητας προσδιορίζεται από τη σχέση  $r_p [\mu m] = 2.04 * I_p [A]^{0.43} * T_{on} [\mu sec]^{0.44}$
- Χρήση πακέτου πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/CAE.
- Χρήση θερμοκρασιακά εξαρτώμενων ιδιοτήτων για τα υλικά των ηλεκτροδίων

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, τα ποσοστά απορρόφησης από την άνοδο και τη κάθοδο υπολογίζονται βάσει των αποτελεσμάτων του πακέτου FEM, σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα (πάχος επαναστερεοποιημένου στρώματος “recast layer”) και με τη εμπειρική μέθοδο “try and error”.

Τελικά, οι ερευνητές καταλήγουν στην σχέση για το ποσοστό απορρόφησης από το τεμάχιο:

$$F_c = F_w = 5.5998 * I_p [A]^{-0.3401} * T_{on} [\mu sec]^{0.2989}$$

Η σχέση αυτή θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ποσοστού ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο προσαρμόζοντάς την όμως στις ανάγκες και τους στόχους της παρούσης εργασίας.

Είναι απαραίτητο στο σημείο αυτό να σημειωθούν ορισμένες διαφορές ανάμεσα στην προαναφερθείσα εργασία και στη συγκεκριμένη.

- Χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά τεμαχίων AISI H13 και AISI O1. Και τα δύο υλικά όμως είναι εργαλειοχάλυβες, και μπορούμε να υποθέσουμε θερμικές ιδιότητες συναφείς, με τα σφάλματα που προκύπτουν από τη μελέτη να είναι αποδεκτά.
- Διαφορετικές εργαλειομηχανές με τις ιδιαιτερότητες που η κάθε μια έχει.
- Διαφορετικό διηλεκτρικό μέσο.
- Διαφορά δυναμικού ανοικτού κυκλώματος και διαφορά δυναμικού κατεργασίας 200V και 70V αντίστοιχα, σε σχέση με τα 100V και 30V τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα της παρούσης εργασίας.
- Χρήση σταθερού πλέγματος σε σχέση με τη συγκεκριμένη εργασία στην οποία θα χρησιμοποιηθεί κινούμενο πλέγμα (θα γίνει σε επόμενη παράγραφο εκτενής αναφορά). Η διαφορά αυτή αποτελεί την ουσιαστικότερη, και την πιθανότερη να οδηγήσει σε κάποιο σφάλμα στη μοντελοποίηση, παρ’ όλα είναι αναγκαστική η χρήση κάποιου συντελεστή απορρόφησης και η παραπάνω σχέση εκτιμάται ως μια ικανοποιητική προσέγγιση.

Υπάρχουν σίγουρα και άλλες διαφορές, θα ήταν όμως άστοχο να αναφερθούν, καθώς ένας βασικός στόχος κάθε μοντέλου είναι να μην περιορίζεται στα στενά πλαίσια της μελέτης από την οποία προέκυψε, αλλά να έχει κατά το δυνατόν πιο καθολικό χαρακτήρα.



Το επόμενο τέλος μέγεθος που πρέπει προσδιοριστεί προκειμένου να οριστεί πλήρως η θερμική πηγή **είναι η ακτίνα του πλάσματος**. Η βιβλιογραφία και στο σημείο αυτό δεν είναι σαφής με μια μονοσήμαντη απάντηση. Τα φυσικοχημικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι πολύπλοκα, και ως αποτέλεσμα υπάρχουν ημιεμπειρικές μόνο σχέσεις, και προσεγγίσεις για τη διάμετρο της στήλης πλάσματος κατά την κατεργασία του EDM. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν και προτείνουν σχέσεις, άλλοτε απλούστερες και άλλοτε πιο πολύπλοκες, οι οποίες συσχετίζουν – υπολογίζουν την ακτίνα  $r_p$  βάσει των συνθηκών κατεργασίας. Ορισμένες χαρακτηριστικές σχέσεις είναι:

$$r_p = 0.788 * t^{\frac{3}{4}}$$

$$r_p = \text{ακτίνα πλάσματος } [\mu m], \quad t = \text{χρόνος } [\mu sec]$$

$$r_p = 0.85 * 10^{-3} * T_{on}^{0.35} * I_p^{0.48}$$

$$r_p = \text{ακτίνα πλάσματος } [m], \quad T_{on} = \text{χρόνος } [sec], \quad I_p = \text{ένταση ρεύματος } [A]$$

$$r_p = 2.04 * I_p^{0.43} * T_{on}^{0.44}$$

$$r_p = \text{ακτίνα πλάσματος } [\mu m], \quad T_{on} = \text{χρόνος } [\mu sec], \quad I_p = \text{ένταση ρεύματος } [A]$$

$$r_p = Z * P^m * t^n$$

$$P = \text{ισχύς εκκένωσης } [W], \quad t = \text{χρόνος}, \quad Z, m, n = \text{εμπειρικές σταθερές}$$

Οι Vishwakarma et al. αναφέρουν χαρακτηριστικά στην εργασία τους, αφού παραθέσουν την παραπάνω σχέση, ότι: “Δεν υπάρχει ρεαλιστικό και αξιόπιστο μοντέλο για να προσδιορίσει την ακτίνα του πλάσματος. Στην παρούσα ανάλυση θεωρείται  $120\mu m$ ”[96]. Χρησιμοποιώντας τις τρεις πρώτες σχέσεις υπολογισμού της ακτίνας προκύπτουν αποτελέσματα, τα οποία διαφέρουν έως και τάξη μεγέθους μεταξύ τους. Για παράδειγμα για συνθήκες κατεργασίας:

$$I_p = 27[A], \quad T_{on} = 100[\mu sec]$$

$$r_p = 0.788 * t^{\frac{3}{4}} = r_p = 0.788 * 100^{\frac{3}{4}} \approx 25[\mu m]$$

$$r_p = 0.85 * 10^{-3} * T_{on}^{0.35} * I_p^{0.48} = r_p = 0.85 * 10^{-3} * (10^{-4})^{0.35} * 27^{0.48} \approx 165[\mu m]$$

$$r_p = 2.04 * I_p^{0.43} * T_{on}^{0.44} = r_p = 2.04 * 27^{0.43} * 100^{0.44} \approx 64[\mu m]$$

Τέλος, κάποιοι ερευνητές θεωρούν την ακτίνα πλάσματος είτε σταθερή, είτε ότι αυξάνεται μέχρι ένα «κρίσιμο» χρονικό σημείο και έπειτα από αυτό παραμένει αμετάβλητη[96, 97]. Στην παρούσα εργασία, και με στόχο την αξιολόγηση πιθανών μοντέλων επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις:

$$r_p^A = 2.04 * I_p^{0.43} * T_{on}^{0.44}$$

$$r_p^A = \text{ακτίνα πλάσματος } [\mu m], \quad T_{on} = \text{χρόνος } [\mu sec], \quad I_p = \text{ένταση ρεύματος } [A]$$

$$r_p^B = 0.85 * 10^{-3} * T_{on}^{0.35} * I_p^{0.48}$$

$$r_p^B = \text{ακτίνα πλάσματος [m]}, \quad T_{on} = \text{χρόνος [sec]}, \quad I_p = \text{ένταση ρεύματος [A]}$$

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνοντας τον ορισμό της θερμικής ισχύος θα γίνει μια «σύζευξη» του ποσοστού απορρόφησης ενέργεια από το τεμάχιο  $F_w$  με τη σχέση υπολογισμού της ακτίνας τη στήλης πλάσματος  $r_p$ . Εφόσον η κάθε ερευνητική ομάδα χρησιμοποιεί διαφορετική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της ακτίνας είναι λογικό να επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό και οι μετέπειτα υπολογισμοί. Για τον λόγο αυτό και με στόχο την κατά το δυνατόν γενικότητα, θα υπολογιστεί το ποσοστό απορρόφησης συναρτήσει της έντασης ρεύματος κατεργασίας  $I_p$ , του χρόνου του παλμού  $T_{on}$ , και της ακτίνας πλάσματος  $r_p$ . Στην εργασία τους ο Mohammadreza Shabgard et al. χρησιμοποιούν τις σχέσεις [95]:

$$\left. \begin{aligned} F_w &= 5.5998 * I_p [A]^{-0.3401} * T_{on} [\mu sec]^{0.2989} \\ r_p [\mu m] &= 2.04 * I_p [A]^{0.43} * T_{on} [\mu sec]^{0.44} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\rightarrow F_w = 2.745 * I_p [A]^{-0.7701} * T_{on} [\mu sec]^{-0.1411} * r_p [\mu m]$$

Πλέον έχει οριστεί πλήρως η θερμική πηγή ως πυκνότητα ισχύος από τη σχέση:

$$Q_w(x, y) \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \frac{4.57 * V_p [V] * I_p [A] * F_w}{\pi * r_p [m]^2} * e^{-4.5 * \left( \frac{x[m]^2}{r_p[m]^2} + \frac{y[m]^2}{r_p[m]^2} \right)}$$

## 6.2 Τεμάχιο

Καθώς μελετάται και μοντελοποιείται ο μηχανισμός ενός μοναδιαίου παλμού, το τεμάχιο επιλέγεται ώστε τα όρια του να μην επηρεάζονται από τη θερμική πηγή και να μπορεί να θεωρηθεί ως ημι άπειρο. Επίσης, το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί κινούμενο πλέγμα και ως εκ τούτου καθίσταται καίριας σημασίας η επιλογή κατάλληλου πάχους τεμαχίου. Το κινούμενο πλέγμα, λόγω των παραμορφώσεων που καλείται να «παραλάβει», πρέπει να έχει το απαιτούμενο «περιθώριο», ώστε να μην υπάρξουν σημεία «μηδενισμού» στοιχείων, ή υπερβολικής παραμόρφωσης, την οποία το λογισμικό δεν μπορεί να διαχειριστεί. Οι διαστάσεις της επιφάνειας που δέχεται την πηγή θερμότητας επιλέγονται ανάλογες της ακτίνας πλάσματος, ενώ το πάχος του τεμαχίου επιλέχθηκε ανάλογα με τις εκάστοτε υπολογιστικές ανάγκες. Η προσομοίωση τέλος έγινε σε μοντέλο με χρήση επιπέδου συμμετρίας, για ορθότερη διαχείριση υπολογιστικής ισχύος και δυνατότητα ακριβέστερων αποτελεσμάτων με χρήση ανώτερης ποιότητας διακριτοποίηση.

Το υλικό τεμαχίου ορίζεται ως Tool Steel O1 με τις ιδιότητες να εισάγονται άμεσα από την βιβλιοθήκη υλικών του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων και τις ιδιότητες να είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενες. Οι τιμές, οι οποίες δόθηκαν αναλυτικά είναι η τιμή τήξης του υλικού, η θερμοχωρητικότητα  $C_p(T)$  και η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης του χάλυβα.

Ανατρέχοντας στην βιβλιογραφία βρίσκουμε θερμοκρασία τήξης  $T_{melt}^{AISI O1} \approx 1694 [K]$ .

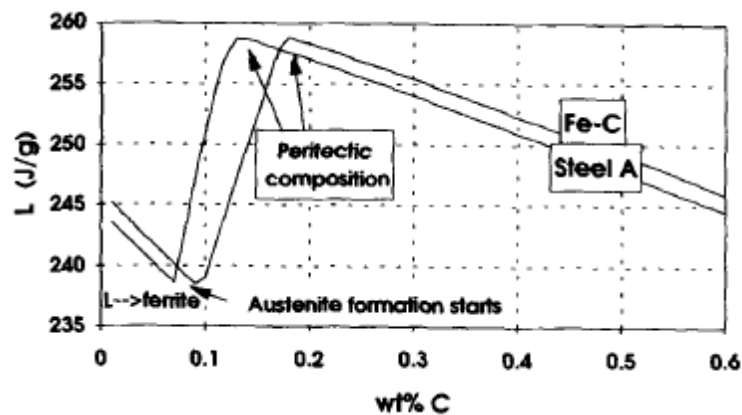
Ως **θερμότητα αλλαγής φάσης** (Latent Heat) θα ορισθεί  $Q_{LH} \approx 231 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ . Η τιμή αυτή προκύπτει από έναν απλό αναλογικό υπολογισμό (Εικόνα 47), και αντιστοιχεί σε χάλυβα με τυπικές τιμές κραμάτωση[98]:

$$C \rightarrow 1\%, \quad Mn \rightarrow 1\%, \quad P \rightarrow 0.02\%, \quad Si \rightarrow 0.3\%$$

Ο χάλυβας AISI O1 ο οποίος χρησιμοποιείται στα πειράματα έχει τιμές:

$$C \rightarrow 0.85 \div 1\%, \quad Mn \rightarrow 1 \div 1.4\%, \quad P \rightarrow 0.03\%, \quad Si \rightarrow 0.5\%$$

Άρα με σχετική ασφάλεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή της βιβλιογραφίας για την λανθάνουσα θερμότητα τήξης, καθώς οι τιμές κραμάτωσης είναι παραπλήσιες.



Εικόνα 47 Διάγραμμα λανθάνουσας θερμότητας συναρτήσει της περιεκτικότητας σε C [98]

Η **θερμοχωρητικότητα  $C_p(T)$**  του χάλυβα λαμβάνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [99]:

$$\text{για } 273[K] < T < 873[K]$$

$$C_p(T) \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] = 425 + 7.73 \cdot 10^{-1} \cdot (T - 273) - 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)^2 + 2.22 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 273)^3$$

$$\text{για } 873[K] < T < 1008[K]$$

$$C_p(T) \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] = 666 + \frac{13002}{(738 - T - 273)}$$

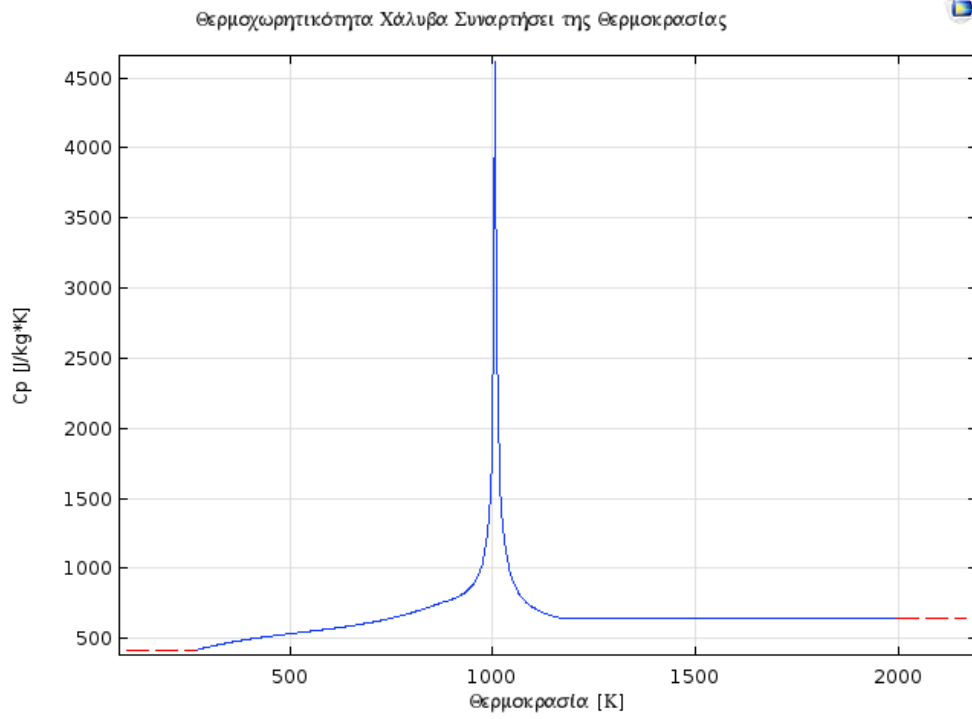
$$\text{για } 1008[K] < T < 1173[K]$$

$$C_p(T) \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] = 545 + \frac{17820}{T - 731 - 273}$$

$$\text{για } 1173[K] < T < 2000[K]$$

$$C_p(T) \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] = 650$$

Τελικά ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας έχει τη μορφή:



Εικόνα 48 Το διάγραμμα θερμοχωρητικότητας χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας από το πακέτο FEM

### 6.3 Οριακές Συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν στο τεμάχιο για την επίλυση του θερμικού μοντέλου είναι (Εικόνα 49):

- Η άνω επιφάνεια του τεμαχίου δέχεται την πηγή θερμότητας  $Q_w(x, y) [W/m^2]$ .
- Τα περιφερειακά όρια – πλευρές είναι θερμικά μονωμένα (Thermal Insulation)
- Επίπεδο συμμετρίας xz.
- Η άνω και κάτω επιφάνεια συναλλάσσει θερμότητα λόγω ακτινοβολίας. Έχει οριστεί θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{amb} = 293.15[K]$ , και ως συντελεστής Surface emissivity  $\varepsilon = 0.75$ .
- Η άνω επιφάνεια συναλλάσσει θερμότητα μέσω συναγωγής με το διηλεκτρικό μέσο. Η εξίσωση αγωγής θερμότητας μέσω συναγωγής ορίζεται ως:

$$q_{diel.} = h_{diel.} * (T_{ext} - T).$$

$$T_{ext} = 293.15[K]$$

$$h_{diel.} = 100000 [W/m^2K][100]$$

- Λανθάνουσα ενέργεια αλλαγής φάσης σε όλο τον όγκο του τεμαχίου.
- Αρχική θερμοκρασία τεμαχίου  $293.15[K]$
- Στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων η αλλαγή φάσης του χάλυβα ορίστηκε σε θερμοκρασιακό «παράθυρο»  $0.5 [K]$ , και συγκεκριμένα για:

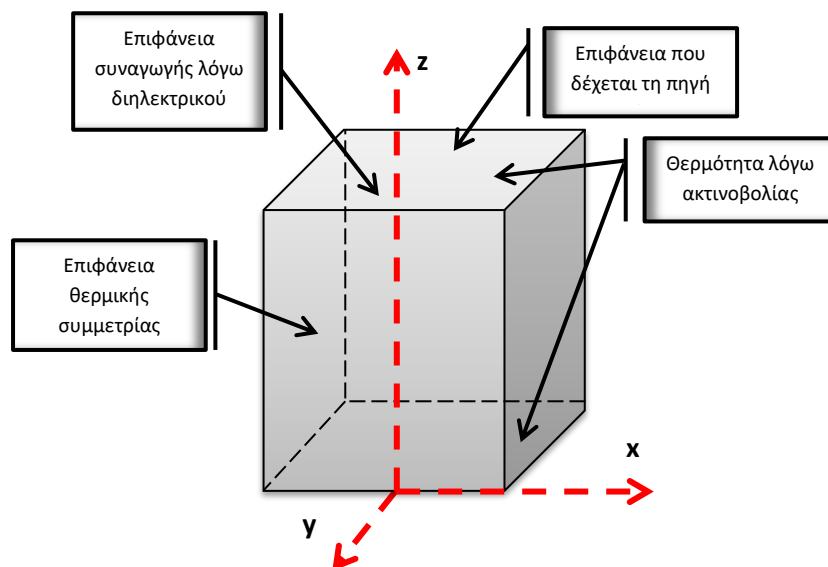
$$T_{melt.}^{AISI\ O1} [K] - 0.25 [K] < T [K] < T_{melt.}^{AISI\ O1} [K] + 0.25 [K]$$

Για υπολογιστικούς καθαρά λόγους, και προκειμένου να συμπεριλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου το σύνολο της λανθάνουσας θερμότητας τήξης, θεωρούμε στερεό υλικό για θερμοκρασίες  $T [K] < T_{melt.}^{AISI\ O1} [K] - 1 [K]$ .

Τέλος προς χάριν συντομίας ορίζουμε  $T'_{melt} [K] = T_{melt.}^{AISI\ O1} [K] - 1 [K] = 1693 [K]$

- Η πυκνότητα χάλυβα AISI O1 για υψηλές θερμοκρασίες  $T > 400^{\circ}C$  (κατά προσέγγιση):

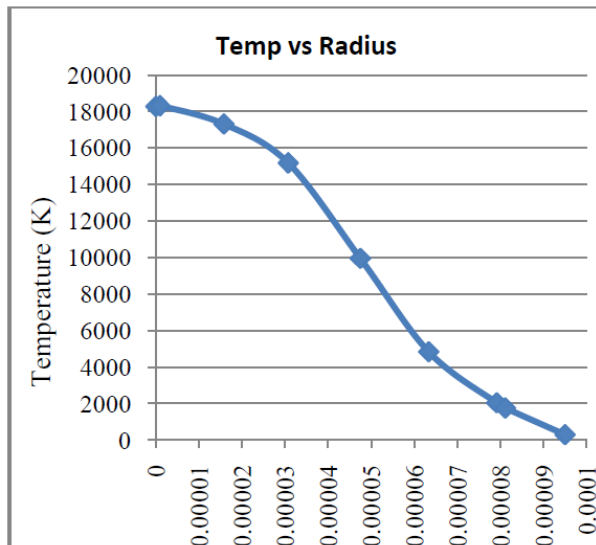
$$\rho_{T > T_{amb.}} = 0.0077 [gr/mm^3]$$



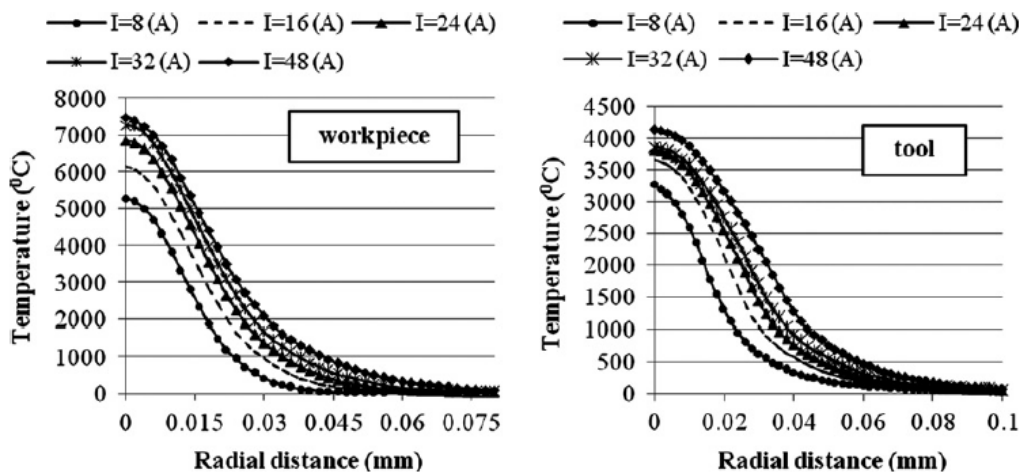
Εικόνα 49 Σχηματική παρουσίαση των οριακών συνθηκών του μοντέλου

## 6.4 Πλέγμα

Στη βιβλιογραφία, σε θερμικά μοντέλα ανάλυσης της κατεργασίας EDM, συχνά χρησιμοποιούνται σταθερά πλέγματα. Ως εκ τούτου η γεωμετρία του τεμαχίου παραμένει αναλλοίωτη κατά το χρόνο κατεργασίας. Ένα άμεσο αποτέλεσμα είναι το θερμοκρασιακό προφίλ που υπολογίζεται να περιλαμβάνει εξαιρετικά υψηλές τιμές, πολλαπλάσιες της θερμοκρασίας βρασμού του υλικού (Εικόνα 50, Εικόνα 51). Αυτό συμβαίνει καθώς υλικό που θα έπρεπε να έχει απομακρυνθεί μαζί με τη θερμότητα που έχει παραλάβει, παραμένει στο τεμάχιο και υπερθερμαίνεται από τη συνεχιζόμενη πρόσδοση θερμότητας. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες, εκτός του ότι είναι μη ρεαλιστικές, εισάγουν πολλαπλά σφάλματα, καθώς σε μοντέλα που χρησιμοποιούν θερμοκρασιακά εξαρτώμενες ιδιότητες υλικού, οι τιμές θερμοκρασίας για τις οποίες γίνονται οι υπολογισμοί έχουν μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα. Επίσης, είναι λογική υπόθεση ότι, καθώς η γεωμετρία του τεμαχίου αλλάζει χρονικά, το «θερμό μέτωπο» της στήλης πλάσματος δεν επιδρά πλέον στην αρχική επίπεδη επιφάνεια, αλλά σε μια κοιλότητα, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τη συσσώρευση και μετάδοση θερμότητας. Σίγουρα πάντως η θερμική πηγή καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού δεν «συναντά» μια επίπεδη επιφάνεια η οποία σταδιακά υπερθερμαίνεται. Σε μια προσπάθεια να παρουσιαστεί ένα πιο «ρεαλιστικό» μοντέλο γίνεται χρήση **κινούμενο πλέγματος** (Deformed Geometry).



Εικόνα 50 Διάγραμμα θερμοκρασιών τεμαχίου κατά τη κατεργασία EDM έπειτα από προσομοίωση με FEM [99]



Εικόνα 51 Διάγραμμα υπολογισμένων θερμοκρασιών ανόδου και καθόδου κατά τη κατεργασία EDM [95]

Η μέθοδος που θα παρουσιαστεί χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό γεωμετρίας, η οποία υφίσταται διάβρωση.

Καθώς το υλικό φτάνει σε θερμοκρασία τήξης και απομακρύνεται, ισχύει η υπόθεση – συνθήκη ότι η θερμοκρασία του δεν μπορεί να υπερβεί τη θερμοκρασία αυτή. Ταυτόχρονα σημειώνεται απώλεια μάζας από το τεμάχιο, η οποία καθορίζεται από την πυκνότητα του υλικού, και την θερμότητα τήξης του. Για τη μοντελοποίηση χρειάζεται μια θερμική οριακή συνθήκη και ένας «τρόπος» προσομοίωσης της απομάκρυνσης του υλικού.

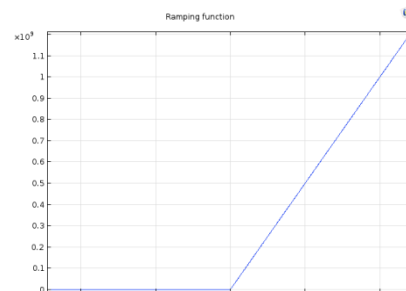
Η θερμική οριακή συνθήκη, που εισάγεται στο μοντέλο είναι ότι η ροή θερμότητας τήξης ορίζεται από τη σχέση:

$$Q_w^{melt} \left[ \frac{W}{m^2} \right] = h_{melt}(T) \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] * (T'_{melt}[K] - T[K])$$

με  $h_{melt}(T) \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$  ένας θερμοκρασιακά εξαρτώμενος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, για τον οποίο ισχύει:

- για  $T[K] < T'_{melt}[K] \rightarrow h_{melt}(T) = 0$
- για  $T[K] > T'_{melt}[K] \rightarrow h_{melt}(T)$  αυξάνεται γραμμικά

Χρησιμοποιώντας έντονη κλίση στη γραμμική περιοχή του συντελεστή διασφαλίζεται ότι η θερμοκρασία δεν θα υπερβεί (τουλάχιστον κατά πολύ) την θερμοκρασία τήξης. Περιορισμό και εδώ αποτελεί η υπολογιστική ισχύς. Στο μοντέλο μας ο συντελεστής  $h_{melt}(T)$  ορίζεται ως μια "ramping function" με αυθαίρετη κλίση, η οποία στην συγκεκριμένη εργασία ισούται με  $10^9$  (Διάγραμμα 5). Ισχύει λοιπόν:



Διάγραμμα 5 Ramping Function

$$h_{melt} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] = f^{ramp}(T - T'_{melt}[K])$$

Η ταχύτητα με την οποία διαβρώνεται το όριο του τεμαχίου δίνεται από τη σχέση:

$$u_{melt} [m/sec] = \frac{Q_w^{melt} \left[ \frac{W}{m^2} \right]}{\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * (c_p \left[ \frac{J}{kg * K} \right] * (T - T'_{melt}[K]) + Q_{LH} \left[ \frac{J}{kg} \right])}$$

με

$u_{melt} [m/sec] \rightarrow$  ταχύτητα πλέγματος λόγω αφαίρεσης υλικού

$c_p \left[ \frac{J}{kg * K} \right] * (T - T'_{melt}[K]) + Q_{LH} \left[ \frac{J}{kg} \right] \rightarrow$  η θερμότητα ανά μονάδα μάζας τηγμένου υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί για να "επιστρέψει" το υλικό σε στερεά φάση

Ως πλέγμα χρησιμοποιούνται τετραεδρικά στοιχεία (free tetrahedral). Η πυκνότητα επιλέγεται με κριτήριο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, ώστε να εξασφαλίζεται η **ανεξαρτησία πλέγματος**, αλλά και η λειτουργικότητα, καθώς υπάρχουν περιορισμοί υπολογιστικής ισχύος. Εφαρμόζεται πυκνότερο πλέγμα στην άνω επιφάνεια του τεμαχίου, η οποία και δέχεται τη πηγή θερμότητας, ενώ ελαφρώς αραιότερο στον υπόλοιπο όγκο του υλικού. Από το Διάγραμμα 6 παρατηρείται ότι υπάρχουν συνδυασμοί, οι οποίοι είναι πρακτικά ισοδύναμοι με τα αποτελέσματα υπολογισμών να διαφέρουν ελάχιστα. Επίσης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η ανεξαρτησία πλέγματος εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του πλέγματος στην άνω επιφάνεια του τεμαχίου, που δέχεται την πηγή της θερμότητας. Έχοντας πρακτικά για τους προαναφερθέντες συνδυασμούς εξασφαλίσει την ανεξαρτησία πλέγματος, η επιλογή γίνεται βάσει της ορθολογικής διαχείρισης του υπολογιστικού χρόνου.

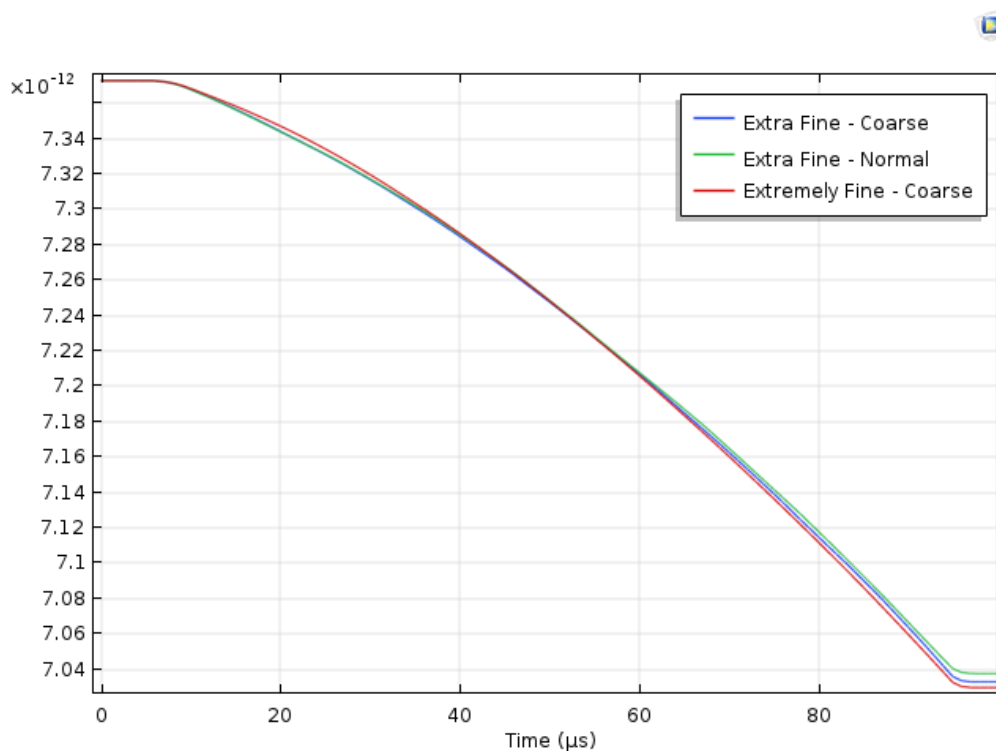
Οι υπολογιστικοί χρόνοι για τους συνδυασμούς του Διαγράμματος 6 είναι:

*Extra Fine – Coarse* → 50 min

*Extra Fine – Normal* → 80 min

*Extremely Fine – Coarse* → 195 min

Προφανώς επιλέγεται ως βασικός συνδυασμός πλέγματος για το μοντέλο **Extra Fine στην άνω επιφάνεια και Coarse στον όγκο του υλικού** με την πιθανότητα για κάποια προσαρμογή όπου και αν χρειαστεί.



Διάγραμμα 6 Υπολογισμοί για διαφορετικής ποιότητας πλέγμα της χρονικής μεταβολής του όγκου του τεμαχίου για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς πλέγματος



## 7. Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Αξιολόγησή τους

### 7.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Αρχικά ορίζεται το μέγεθος PFE (Plasma Flushing Efficiency), το οποίο, όπως έχει προαναφερθεί, εκφράζει το βαθμό επαναστερεοποίησης του υλικού, και πρακτικά υπολογίζεται από την απόκλιση του θεωρητικού MRR των υπολογισμών ( $MRR_{calc.}$ ) Σε σχέση με το πειραματικό ( $MRR_{exp.}$ ). Στην εργασία τους ο Mohammadreza Shabgard et al. ορίζουν το PFE ως  $PFE[\%] = 100 * \frac{V_{c_{calc}}}{V_{c_{exp}}}$  με  $V_{c_{calc}}$ ,  $V_{c_{exp}}$  ο όγκος του κρατήρα των υπολογισμών και του πειράματος αντίστοιχα [95]. Η παραπάνω σχέση μπορεί πολύ απλά να αναχθεί σε MRR, καθώς υπάρχει άμεση αναλογία μέσου όγκου κρατήρα και ρυθμού αποβολής υλικού, και να γραφεί τελικά ως:

$$PFE[\%] = 100 * \frac{MRR_{calc.} \left[ \frac{mm^3}{min} \right]}{MRR_{exp.} \left[ \frac{mm^3}{min} \right]}$$

$$MRR_{calc.} \left[ \frac{mm^3}{min} \right] = \frac{V_{c_{calc.}} [mm^3] * 60 \left[ \frac{sec}{min} \right] * \eta * f_{eff}}{T_{on} [sec]}$$

Οι τιμές για το  $V_{c_{calc}}$  προέρχονται απευθείας από το λογισμικό FEM, ενώ τα υπόλοιπα δεδομένα και συντελεστές από τους πίνακες που έχουν παρατεθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (Πίνακας 9, Πίνακας 10).

Ο Mohammadreza Shabgard et al. καταλήγουν σε μια θεωρητική σχέση υπολογισμού του PFE συναρτήσει του χρόνου παλμού και ένταση ρεύματος κατεργασίας [95]:

$$PFE_{theor.} = (1.49197137 - 1.34135686 * I_p^{-0.1673} * T_{on}^{-0.07034})$$

Όπως έχει προαναφερθεί θα γίνουν δύο «σειρές» προσομοιώσεων για ακτίνα πλάσματος  $r_{p1}$  και  $r_{p2}$ , με τα αποτελέσματα να φέρουν τον αντίστοιχο δείκτη. Επίσης αν και έγινε προσπάθεια για ενιαία διακριτοποίηση ορισμένες περιπτώσεις απαιτήσαν κάποια διαφοροποίηση. Τέλος κάποιες προσομοιώσεις έγιναν με δύο επίπεδα συμμετρίας, στο ένα τεταρτημόριο δηλαδή του τεμαχίου, χωρίς όμως να επηρεάζεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων. Τα inputs των προσομοιώσεων περιγράφονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 12, Πίνακας 13).

Πίνακας 12 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς

#	Διαφορά Δυναμικού $V_p[V]$	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ $I_p[A]$	ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΛΜΟΥ $T_{on}$ [ $\mu sec$ ]	ΑΚΤΙΝΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ $r_{p1}[m]$ ( $\times 10^{-6}$ )	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΑΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΤΕΜΑΧΙΟ $F_W^{r_{p1}}$	ΑΚΤΙΝΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ $r_{p2}[m]$ ( $\times 10^{-6}$ )	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΑΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΤΕΜΑΧΙΟ $F_W^{r_{p2}}$
1	30	27	100	64	0.072	165	0.1864
2	30	24	100	61	0.075	156	0.1929
3	30	21	100	57	0.079	146	0.2005
4	30	18	100	54	0.083	136	0.2097
5	30	27	300	104	0.100	242	0.2345
6	30	18	300	87	0.115	199	0.2638
7	30	15	300	80	0.123	182	0.2781
8	30	12	300	73	0.132	164	0.2967
9	30	21	500	116	0.127	256	0.2807
10	30	15	500	101	0.143	218	0.3095
11	30	12	500	91	0.154	196	0.3301
12	30	24	75	53	0.069	141	0.1817

Πίνακας 13 Παράμετροι μοντελοποίησης - υπολογισμών

#	ΑΚΤΙΝΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ $r_{p1}$				ΑΚΤΙΝΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ $r_{p2}$			
	ΥΨΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ [μm]	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΝΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΟΓΚΟ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ	ΥΨΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ [μm]	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΝΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΟΓΚΟ ΤΟΥ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ
1	400	Extra Fine	Coarse	1	400	Extra Fine	Coarse	1
2	400	Extra Fine	Coarse	1	400	Extra Fine	Coarse	1
3	400	Extra Fine	Coarse	1	400	Extra Fine	Coarse	1
4	400	Extra Fine	Normal	1	400	Extra Fine	Coarse	1
5	400	Extra Fine	Coarse	1	400	Extra Fine	Coarse	1
6	600	Extra Fine	Coarser	1	400	Extra Fine	Coarse	1
7	600	Extremely Fine	Coarse	2	400	Extra Fine	Coarse	1
8	600	Extra Fine	Coarse	2	400	Extra Fine	Coarse	1
9	600	Extremely Fine	Coarse	2	400	Extra Fine	Coarse	1
10	600	Extra Fine	Coarse	2	400	Extra Fine	Coarse	1
11	650	Extra Fine	Coarse	2	400	Extra Fine	Coarse	1
12	400	Extra Fine	Coarse	1	400	Extra Fine	Coarse	1

Ορισμένες άμεσες παρατηρήσεις, οι οποίες προκύπτουν καθαρά από την εφαρμογή των σχέσεων υπολογισμού των μεγεθών είναι η μεγάλη διαφορά της ακτίνας πλάσματος ανάλογα με τη σχέση με την οποία υπολογίζεται. Η μια τιμή είναι κατά μέσο όρο 237% υψηλότερη της άλλης. Η διαφορά αυτή, όπως είναι αναμενόμενο, μεταφέρεται και στο ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο. Μπορεί καθαρά εποπτικά και προσεγγιστικά να ειπωθεί ότι: στην πρώτη περίπτωση υπάρχει μια λιγότερο ισχυρή πηγή θερμότητας εστιασμένη σε μικρότερη επιφάνεια, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μια υψηλότερης ισχύος αλλά μεγαλύτερης διαμέτρου πηγή. Η διαφορά αυτή αναμένεται να επηρεάσει κατά βάση τη γεωμετρία του σχηματιζόμενου κρατήρα και όχι το αποτέλεσμα στον όγκο και το θεωρητικό MRR.

Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Συγκεκριμένα για κάθε προσομοίωση καταγράφεται ο όγκος του σχηματιζόμενου «κρατήρα» ( $V_{c,calc.}$ ), ο ρυθμός αποβολής υλικού που προκύπτει από τον συγκεκριμένο όγκο (MRR), και ο συντελεστής απόπλυσης (PFE).

Πίνακας 14 Αποτελέσματα Υπολογισμών

#	ΑΚΤΙΝΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ $r_{p1}$				ΑΚΤΙΝΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ $r_{p2}$				$PFE_{theor.}$
	$V_{c,calc.}^{r_{p1}}$ [ $mm^3$ ]	$MRR_{calc.}^{r_{p1}}$ [ $mm^3/min$ ]	$PFE^{r_{p1}}$	Απόκλιση PFE από το θεωρητικό	$V_{c,calc.}^{r_{p2}}$ [ $mm^3$ ]	$MRR_{calc.}^{r_{p2}}$ [ $mm^3/min$ ]	$PFE^{r_{p2}}$	Απόκλιση PFE από το θεωρητικό	
1	6.80E-04	229	0.38	-10%	7.84E-04	264	0.33	-22%	0.4235
2	6.47E-04	224	0.34	-15%	7.08E-04	245	0.31	-22%	0.4023
3	6.18E-04	214	0.36	-6%	6.72E-04	232	0.33	-13%	0.3776
4	5.80E-04	201	0.24	-30%	6.20E-04	214	0.23	-35%	0.3485
5	2.58E-03	335	0.30	-11%	2.78E-03	361	0.28	-17%	0.3377
6	2.15E-03	289	0.27	7%	2.29E-03	309	0.26	0%	0.2567
7	1.96E-03	249	0.23	6%	2.12E-03	269	0.22	-1%	0.2184
8	1.63E-03	150	0.20	15%	1.89E-03	174	0.17	-1%	0.17
9	4.29E-03	307	0.26	5%	4.48E-03	321	0.24	0%	0.2441
10	3.53E-03	305	0.19	8%	3.83E-03	331	0.17	-1%	0.1718
11	3.10E-03	215	0.14	13%	3.41E-03	236	0.13	3%	0.1216
12	4.74E-04	205	0.40	-6%	5.04E-04	218	0.37	-12%	0.4241
M.O	--	--	--	-2%	--	--	--	-10%	--

Για λόγους πληρότητας παρατίθεται η σχέση υπολογισμού της απόκλισης του PFE από το θεωρητικό PFE που υπολογίζεται με την αναλυτική σχέση της βιβλιογραφίας:

$$\text{Απόκλιση}[\%] = 100 * \frac{|PFE_{theor.} - PFE^{rpi}|}{PFE_{theor.}}$$

Είναι σημαντικό να επισημανθούν τα «σημεία» στα οποία υπάρχει περιθώριο –πιθανότητα σφάλματος, ώστε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων να γίνει υπό αυτό το πρίσμα και τα συμπεράσματα να είναι αντικειμενικά. Αρχικά οι τιμές της μέσης έντασης ρεύματος από το αμπερόμετρο ( $\bar{I}_p[A]$ ) και της αποδοτικότητας κατεργασίας ( $f_{eff}$ ) προέρχονται από οπτική ταυτόχρονα με τη κατεργασία παρακολούθηση των αντίστοιχων δεικτών στην εργαλειομηχανή. Δεν υπάρχει καταγραφή δεδομένων, ώστε να γίνει μια αναλυτικότερη επεξεργασία τους με αποτέλεσμα να είναι πιθανή κάποια απόκλιση (έστω και μικρή). Το ίδιο ισχύει και για τα δεδομένα του ενεργού χρόνου κατεργασίας  $t_m$ . Η μέτρηση του έγινε με παρακολούθηση των δεδομένων από το αμπερόμετρο καθώς κατά του «νεκρούς» ενδιάμεσους χρόνους η ένταση ρεύματος μηδενίζεται, παρόλα αυτά υπάρχει η πιθανότητα σφάλματος. Επίσης, η κυματομορφή της έντασης ρεύματος είναι ποιοτικά σωστή, λογική και βασισμένη σε βιβλιογραφικά δεδομένα, είναι αδύνατον όμως να υπολογιστεί με απόλυτη ακρίβεια η μορφή της. Τέλος υπάρχουν οι απρόβλεπτες ιδιαιτερότητες της κάθε εργαλειομηχανής και η πιθανότητα για προβλήματα κατά την κατεργασία, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει διαφοροποίηση τα υλικά μεταξύ τους. Όλα τα παραπάνω εισάγουν απρόβλεπτα σφάλματα, τα οποία λειτουργούν συσσωρευτικά. Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα θα πρέπει αρχικά να αξιολογούνται ποιοτικά, και στη συνέχεια, αφού επιβεβαιωθεί η ύπαρξη ισχυρών συσχετίσεων, να γίνεται αναφορά σε απόλυτες τιμές.

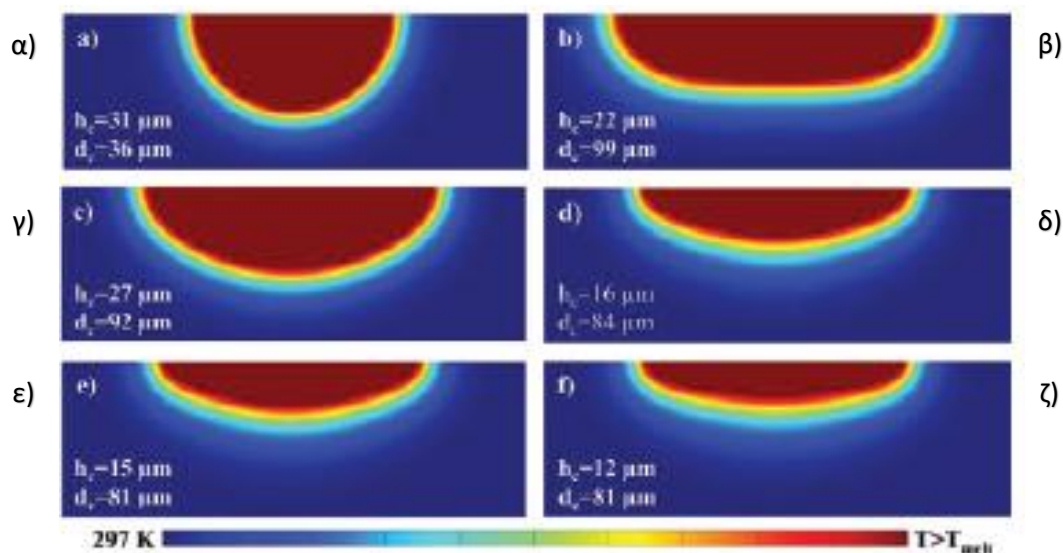
## 7.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με υπολογισμούς για $r_{p1}$

Μια πρώτη και σημαντική παρατήρηση είναι ότι η τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων είναι αναμενόμενη και σωστή, συμβατή με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας. Οι τιμές MRR, που προκύπτουν ελέγχονται με βάση τις τιμές PFE, οι οποίες έχουν μέση απόκλιση από τις θεωρητικές -2%. Το ποσοστό αυτό κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητικό δεδομένου ότι η όλη κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης διακρίνεται από τυχαιότητα και στοχαστικά μεγέθη χωρίς μονοσήμαντες τιμές. Επίσης παρατηρείται ότι, ενώ για όλες τις συνθήκες η μέγιστη απόκλιση είναι κατά απόλυτη τιμή 15%, στο πείραμα #4 το ποσοστό διπλασιάζεται στο -30%. Αυτό αποτελεί ένδειξη για πιθανό πρόβλημα στην κατεργασία, που οδήγησε σε χαμηλό MRR και έτσι διπλασίασε την απόκλιση του PFE που υπολογίστηκε. Βέβαια αυτό αποτελεί απλά μια υπόθεση, με εναλλακτική ερμηνεία την αδυναμία του μοντέλου να προβλέψει με ακρίβεια τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου συνδυασμού συνθηκών κατεργασίας (κρίνεται σχετικά απίθανη μια τόσο εστιασμένη και έντονη αδυναμία, παρόλα αυτά οφείλουμε να την αναφέρουμε στα πλαίσια μια ολοκληρωμένης μελέτης).

Η ορθότητα των αποτελεσμάτων οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο ότι πρόκειται ουσιαστικά για μια ενεργειακή προσέγγιση του φαινομένου. Έχοντας ως δεδομένα την ενέργεια που απορροφά το τεμάχιο, υπολογίζεται μέσω FEM και των σχέσεων που διέπουν τη μετάδοση θερμότητας σε στερεό σώμα ο όγκος υλικού που φτάνει σε θερμοκρασία τήξης και θεωρητικά απομακρύνεται. Δεν είναι όμως αρκετό αυτό για να θεωρηθεί μια μοντελοποίηση ικανοποιητική. Σημαντική παράμετρος είναι η γεωμετρία του «μέσου

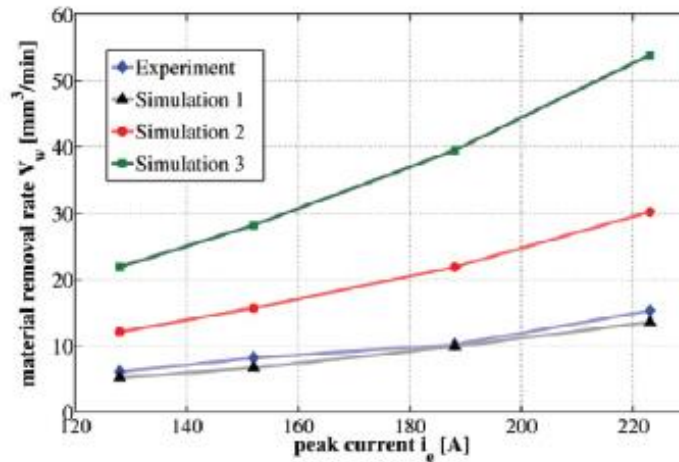
κρατήρα», ο οποίος και υπολογίζεται, και αν μπορεί ο χρήστης να εξάγει συμπεράσματα για την αναμενόμενη ποιότητα επιφάνειας του τεμαχίου μετά τη κατεργασία. Η γεωμετρία του «μέσου κρατήρα» συσχετίζεται λογικά με την τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας  $R_a[\mu\text{m}]$  και  $R_t[\mu\text{m}]$ .

Η βιβλιογραφία παρέχει δεδομένα σχετικά με την αναμενόμενη μορφή, που πρέπει να έχει ένας μοναδιαίος κρατήρας ηλεκτροδιάβρωσης με πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες. Ενδεικτικά στην εργασία του Weingartner et al. παρουσιάζουν συγκριτικά τα αποτελέσματα προσομοιώσεων και πως αυτά διαφοροποιούνται ανάλογα με τις οριακές συνθήκες και τις «απλοποιήσεις» που έχουν εφαρμοστεί [101]. Στη συγκεκριμένη εργασία συμπεραίνεται ότι ανάλογα με το «τύπο» της πηγής, που επιλέγεται, τις ιδιότητες του υλικού (όπως αυτές εισάγονται στο μοντέλο) και τις οριακές συνθήκες, μεταβάλλεται και το αποτέλεσμα – γεωμετρία της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 52 η εφαρμογή σημειακής πηγής ισχύος με σταθερές ιδιότητες υλικών (α) δίνει μια σχεδόν σφαιρική μορφή κρατήρα, γεγονός αναμενόμενο καθώς ανάλογο αποτέλεσμα έχει και η επίλυση αναλυτικής σχέσης για τέτοιου είδους θερμικό πρόβλημα. Όταν εφαρμόζεται ομοιόμορφη δισκοειδής θερμική πηγή ισχύος με σταθερές ιδιότητες υλικών (β) το αποτέλεσμα είναι ελλειπτική γεωμετρία. Στα επόμενα μοντέλα με χρήση: χρονικά μεταβαλλόμενης πηγής και σταθερές ιδιότητες υλικών (γ), χρονικά μεταβαλλόμενης πηγής και θερμικά μεταβαλλόμενες ιδιότητες υλικών (δ), χρονικά μεταβαλλόμενης πηγής, θερμικά μεταβαλλόμενες ιδιότητες υλικών, και λαμβάνεται υπ' όψιν η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού (ε), χρονικά μεταβαλλόμενης πηγής, θερμικά μεταβαλλόμενες ιδιότητες υλικών, και λαμβάνεται υπ' όψιν η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού και η θερμότητα ατμοποίησης (ζ), η γεωμετρία είναι και πάλι ελλειπτική με μεταβολή της αναλογίας των διαμέτρων. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι στα πλέον ακριβή μοντέλα (Εικόνα 53), και τα οποία βρίσκονται πιο «κοντά» στα πειραματικά δεδομένα, αναμένονται γεωμετρίες ελλειπτικές.

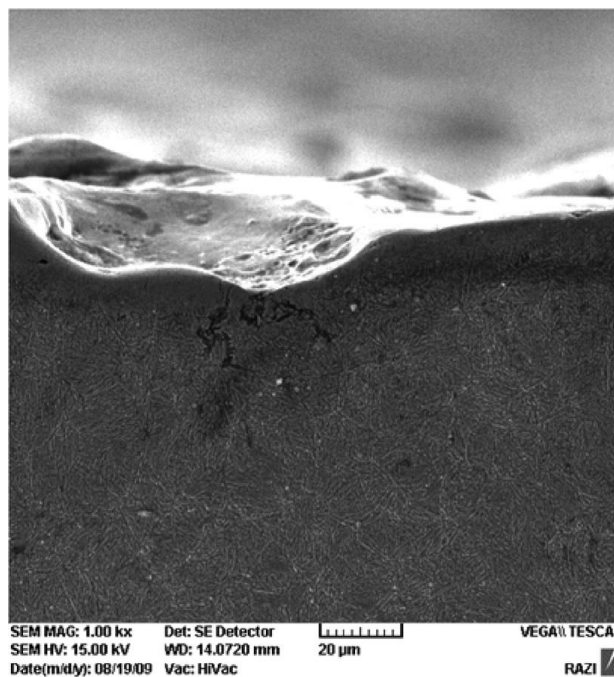


Εικόνα 52 Γεωμετρίες κρατήρων που προέρχονται από μοντέλα με διαφορετικές οριακές συνθήκες και διαφορετικό τρόπο υπολογισμού των ιδιοτήτων του υλικού α) point heat source, β) disc heat source, γ) time dependent heat source, δ) +temperature dependent material properties, ε) +latent heat of fusion, ζ) +latent heat of vaporization [101]

Ανάλογα αποτελέσματα και συμπεράσματα εξάγονται και από πειραματικές μελέτες με παρατηρήσεις σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) και όπως φαίνεται στην Εικόνα 54 οι κρατήρες έχουν μια ελλειψοειδή μορφή. Πρέπει να σημειωθεί βέβαια, (θα αναλυθεί σε επόμενο σημείο λεπτομερέστερα), πως η τελική τοπογραφία της επιφανείας είναι αποτέλεσμα επαλληλίας σπινθήρων – κρατήρων, και άρα δεν αναμένεται να έχει μια συμμετρική εξιδανικευμένη γεωμετρία όπως αυτή των προσομοιώσεων.



Εικόνα 53 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων για χάλυβα AISI 1010. Sim.1: temperature dependent material properties and latent heats. Sim. 2: temperature dependent material properties without latent heat, Sim. 3: constant material properties without latent heats [101]



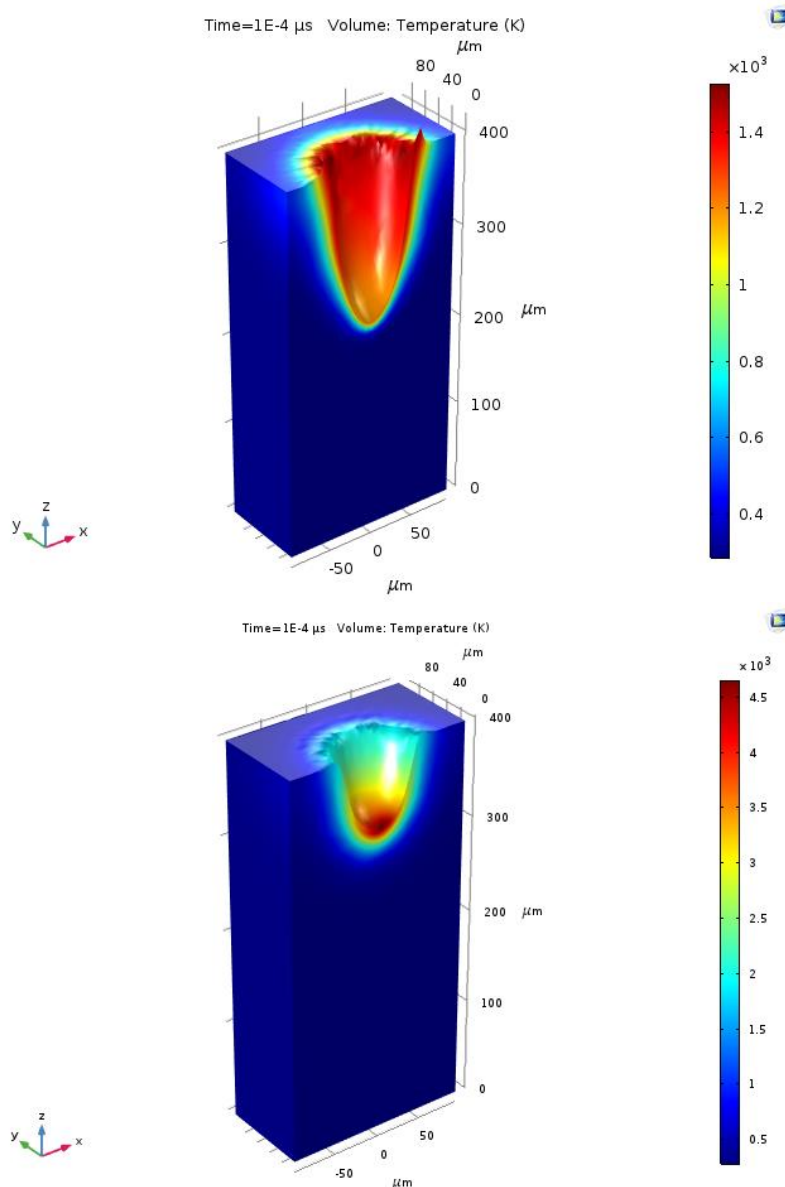
Εικόνα 54 Εικόνα από SEM τεμαχίου που έχει κατεργαστεί με EDM [95]

Συνεχίζοντας με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από τους υπολογισμούς με βάση ακτίνα πλάσματος  $r_{p1}$  θα εξεταστεί αν η γεωμετρία των σχηματιζόμενων κρατήρων είναι αναμενόμενη και αποδεκτή.

Έχει αναφερθεί σε προηγούμενο σημείο ο όρος «μέσος κρατήρας», χωρίς να δοθεί ο απαραίτητος ορισμός. Θα ορισθεί ως «**μέσος κρατήρας**» αυτός που έχει όγκο τέτοιο, ώστε να προκύπτει συντελεστής απόπλυσης υλικού PFE  $\approx 100\%$  αν αντικατασταθεί στις παραπάνω σχέσεις. Πρακτικά είναι μια «ενδιάμεση» γεωμετρία η οποία προκύπτει (όπως έχει προαναφερθεί αρκετές φορές), από υλικό που επαναστερεοποιήθηκε αντί να απομακρυνθεί. Στη μοντελοποίηση είναι δυνατόν μόνο προσεγγιστικά να απεικονιστεί, «σταματώντας» την απομάκρυνση υλικού την κατάλληλη χρονική στιγμή όταν ο κρατήρας που έχει σχηματιστεί φτάσει σε συγκεκριμένο όγκο. Από το σημείο εκείνο και έπειτα το πλέγμα παραμένει σταθερό (αμετάβλητη γεωμετρία) και το υλικό που συνεχίζει να δέχεται θερμότητα γίνεται υπέρθερμο. Στο μοντέλο η διαδικασία αυτή γίνεται με χρήση βηματικής συνάρτησης, η οποία την κατάλληλη χρονική στιγμή «μηδενίζει» την  $Q_w^{melt}$ , μέσω της οποίας αφενός υπολογίζεται η ταχύτητα μετατόπισης του πλέγματος, αφετέρου διατηρείται η θερμοκρασία στο θερμό μέτωπο του πλάσματος οριακά ίση με τη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Η συνάρτηση αδιαστασιοποιείται ως προς το χρόνο, ενώ το χρονικό σημείο μηδενισμού ορίζεται με βάση τα δεδομένα υπολογισμών που έχουν προηγηθεί. Η γεωμετρία και τα στοιχεία του «μέσου κρατήρα» θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την διατύπωση συμπερασμάτων.

Στην Εικόνα 55(α) παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης για την #1 ( $I_p=27[A]$  και  $T_{on}=100[\mu sec]$ ). Παρατηρείται ότι ο αρχικός κρατήρας έχει βάθος  $\approx 169\mu m$  και διάμετρο  $\approx 130\mu m$ . Η γεωμετρία αυτή **δεν είναι αποδεκτή**, καθώς δεν συνάδει με τη βιβλιογραφία και τις πειραματικές παρατηρήσεις (μεταλλογραφία). Το θεωρητικό βάθος κρατήρα είναι  $\approx 1.3$  φορές της θεωρητικής διαμέτρου, και σίγουρα δεν αποτελεί ελλειπτική γεωμετρία με τη διάμετρο μεγαλύτερη του βάθους. Παρατηρείται βέβαια ότι η μέγιστη θερμοκρασία παραμένει στους  $\approx 1694^\circ C$ , ένδειξη της σωστής μοντελοποίησης σύμφωνα με τις αρχικές παραδοχές. Στην Εικόνα 55(β) παρουσιάζονται ο «μέσος κρατήρας» για τις αντίστοιχες συνθήκες. Το βάθος έχει περιοριστεί σημαντικά και είναι πλέον  $\approx 78\mu m$ , ενώ η διάμετρος του κρατήρα είναι ελαφρώς μικρότερη  $\approx 100\mu m$ . Η μέγιστη θερμοκρασία, όπως άλλωστε αναμενόταν, έχει πλέον φτάσει  $>4500^\circ C$  και θεωρητικά εξελίσσονται φαινόμενα εξάχνωσης. Η γεωμετρία αυτή μοιάζει πιο ρεαλιστική από την προηγούμενη, παραμένει όμως αρκετά διαφορετική από την αναμενόμενη βάση της βιβλιογραφίας.

Το βασικό «πρόβλημα» των αποτελεσμάτων ακολουθώντας τη μοντελοποίηση με βάση τη διάμετρο πλάσματος  $r_{p1}$  (η οποία δίνει μικρές τιμές διαμέτρου πλάσματος), είναι το μεγάλο βάθος των κρατήρων που σχηματίζονται και ειδικά σε σχέση με τη διάμετρό τους. Πρακτικά υπάρχει μια έντονη συγκέντρωση θερμότητας σε περιορισμένη επιφάνεια, η οποία με τη χρήση κινούμενου πλέγματος και μεταβλητής γεωμετρίας εγκλωβίζεται σε μια κοιλότητα και στη συνέχεια «σκάβει» το τεμάχιο σε μεγάλο βάθος. Η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν μπορεί να θεωρηθεί αρκούντως ρεαλιστική για κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης, όπου η θερμική πηγή είναι στήλη πλάσματος, και η οποία (μπορούμε λογικά να υποθέσουμε) δεν έχει την δυνατότητα εστίασης άλλων μορφών ισχύος, όπως για παράδειγμα μιας δέσμης laser. Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το σύνολο των περιπτώσεων που μελετηθήκαν.

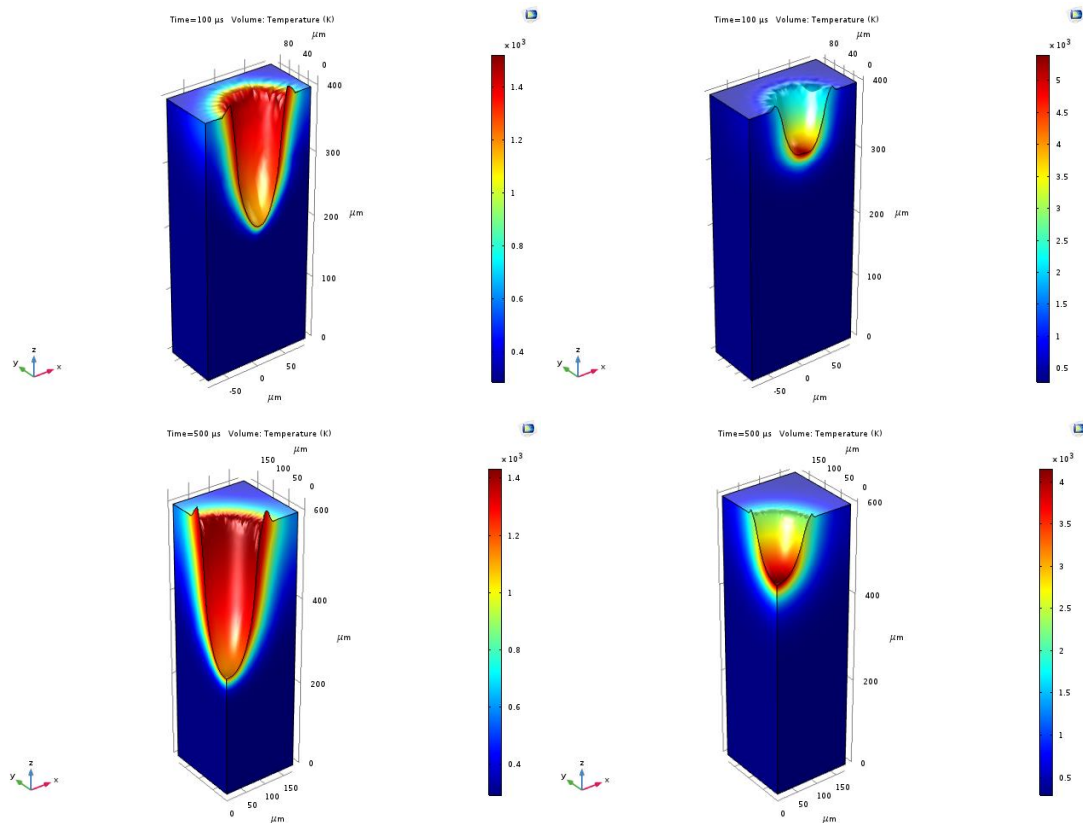


Εικόνα 55 Αποτέλεσμα προσομοίωσης για το α) μοναδιαίο σχηματιζόμενο κρατήρα #1 ( $I_p=27[A]$ ,  $T_{on}=100[\mu s]$ ) και β) τον αντίστοιχο «μέσο» σχηματιζόμενο κρατήρα» με χρήση της ακτίνας πλάσματος  $r_{p1}$

Πίνακας 15 Διάμετρος και βάθος κρατήρων (αρχικού και «μέσου») σύμφωνα με τις προσομοιώσεις για διάμετρο πλάσματος  $r_{p1}$

Υπολογισμοί για ακτίνα πλάσματος $r_{p1}$													
	#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Αρχικός Κρατήρας	Διάμετρος [μm]	130	96	88	90	154	130	124	116	184	152	148	154
	Βάθος [μm]	169	172	183	190	254	285	277	275	318	331	349	166
«Μέσος» Κρατήρας	Διάμετρος [μm]	100	90	82	76	142	128	110	100	152	140	122	82
	Βάθος [μm]	78	75	77	64	104	106	96	79	117	99	78	84

Το ότι η πηγή θερμότητας αντί να δημιουργεί την αναμενόμενη γεωμετρία ενός ελλειπτικού κρατήρα «σκάβει» το τεμάχιο, φτάνει σε ακραίες τιμές για μεγάλους χρόνους παλμού ( $T_{on}=500[\mu\text{sec}]$ ), όπου το βάθος κρατήρα υπολογίζεται  $>300[\mu\text{m}]$ . Στην Εικόνα 56 παρουσιάζεται ο κρατήρας για  $I_p=21[\text{A}]$  και  $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$  συγκριτικά με αυτόν για  $I_p=21[\text{A}]$  και  $T_{on}=500[\mu\text{sec}]$ . Φαίνεται σαφώς το μεγαλύτερο βάθος κρατήρα για την ίδια τιμή ρεύματος κατεργασίας, αλλά με διαφορετικό χρόνο παλμού (να σημειωθεί ότι το τεμάχιο στην Εικόνα 56a είναι ύψους  $400[\mu\text{m}]$ , ενώ το τεμάχιο στην Εικόνα 56b είναι  $600[\mu\text{m}]$ ).



Εικόνα 56 Οι σχηματιζόμενοι κρατήρες (αρχικός και «μέσος») για συνθήκες κατεργασίας – προσομοίωση  
α)  $I_p=21[\text{A}]$  και  $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$  και β)  $I_p=21[\text{A}]$  και  $T_{on}=500[\mu\text{sec}]$

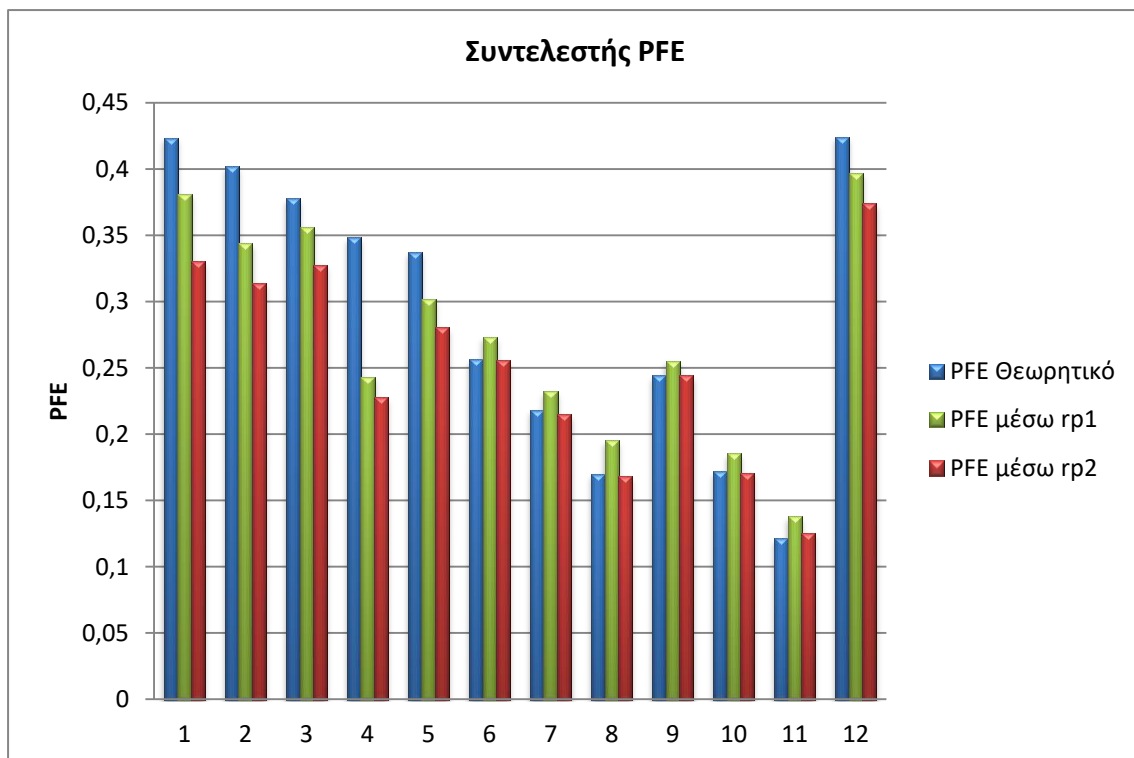
Μια τελευταία παρατήρηση που μπορεί να γίνει κλείνοντας είναι ότι όσο μικραίνει η διάμετρος του κρατήρα (ως αποτέλεσμα της μικρότερης ακτίνας στήλης πλάσματος), τόσο αυξάνεται το βάθος του για ίδιους χρόνους παλμού. Συμβαίνει το εκ πρώτης όψης οξύμωρο, με χαμηλότερη ισχύ να υπάρχει μεγαλύτερο βάθος κρατήρα (π.χ. ανάμεσα στις περιπτώσεις #2 και #3). Η εξήγηση είναι απλή, καθώς μικρότερη διάμετρος οδηγεί σε υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, η οποία και δημιουργεί τέτοιας μορφής γεωμετρίας.



### 7.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με υπολογισμούς για $r_{p2}$

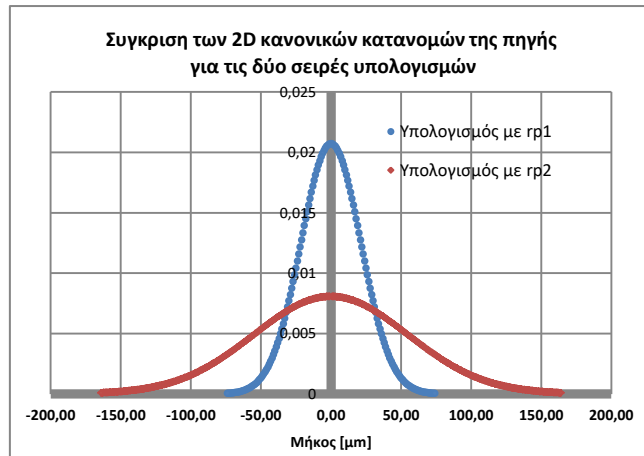
Αρχικά γίνεται μια εκτίμηση των αποτελεσμάτων του MRR και PFE (Πίνακας 14). Τα αποτελέσματα του MRR κρίνονται ρεαλιστικά – ικανοποιητικά καθώς συνάδουν με τη βιβλιογραφία, και κατ' επέκταση και το PFE. Η μέση απόκλιση από το θεωρητικό PFE σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων είναι -10%, με τις τιμές όμως για ορισμένες συνθήκες να αποκλίνουν έως και -22% ενώ για άλλες η απόκλιση να είναι έως και μηδενική. Συνεχίζει το πείραμα #4 να εμφανίζει τη μέγιστη τιμή απόκλισης -35%, ενισχύοντας την υπόθεση ότι υπήρξαν κάποιοι αστάθμητοι παράγοντες που επηρέασαν το πειραματικό MRR. Η σχετικά έντονη διακύμανση στις αποκλίσεις του PFE από το θεωρητικό πιθανόν οφείλεται στην αδυναμία του συγκεκριμένου θεωρητικού μοντέλου να έχει μια καθολική ισχύ και εφαρμογή. Η «αντιπροσωπευτική απόκλιση», αν θα μπορούσε να χαρακτηριστεί έτσι, δεν είναι ούτε κάποια  $>|20|\%$ , αλλά σίγουρα ούτε και η μηδενική. Οι θεωρητικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του ποσοστού θερμότητας, το οποίο απορροφάται από το τεμάχιο ( $F_w$ ), και το θεωρητικό PFE ( $PFE_{Theor.}$ ), έχουν προκύψει από «Reverse Engineering» και δεν αποτελούν αποτέλεσμα μελέτης μέσω αναλυτικών σχέσεων. Έτσι είναι λογικό να υπάρχει κάποια απόκλιση όταν εφαρμόζονται για συνθήκες εντελώς διαφορετικές από αυτές από τις οποίες προέκυψαν. Για να είναι εφικτή μεγαλύτερη σύγκλιση αποτελεσμάτων, είναι πιθανόν απαραίτητες σχέσεις πιο πολύπλοκες, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν ιδιότητες υλικών, χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού μέσου κ.τ.λ..

Οι παραπάνω παρατηρήσεις συνοψίζονται στο Διάγραμμα 7, όπου παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές του συντελεστή PFE ( $PFE_{Theor.}$ ,  $PFE^{rp1}$ ,  $PFE^{rp2}$ ).



Διάγραμμα 7 Συντελεστής PFE

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων συνεχίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σχηματιζόμενων από τις προσομοιώσεις κρατήρων. Στη σειρά αυτή υπολογισμών η πηγή θερμότητας έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά. Αν και από τους τύπους προκύπτει ποσοστό θερμότητας, που απορροφάται από το τεμάχιο υψηλότερο ( $F_W^{r_{p1}} < F_W^{r_{p2}}$ ), (Πίνακας 12), η πυκνότητα ισχύος  $Q_W(x, y) \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  παίρνει χαμηλότερες τιμές, καθώς η επιφάνεια στην οποία «απλώνεται» είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Ο συντελεστής  $F_W$  είναι ανάλογος της ακτίνας πλάσματος, ενώ η επιφάνεια ανάλογη του τετραγώνου της ακτίνας. Στο Διάγραμμα 8 φαίνεται για την #1 η δυσδιάστατη μορφή της πηγής για  $r_{p1}$  και  $r_{p2}$ , και γίνεται σαφές πως η μικρότερη ακτίνα πλάσματος «οδηγεί» σε εντονότερη και εστιασμένη πηγή ισχύος, ερμηνεύοντας ταυτόχρονα και τις «σκαμμένες» γεωμετρίες που παρατηρήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Μπορεί, ως λογική υπόθεση – συμπέρασμα να ειπωθεί



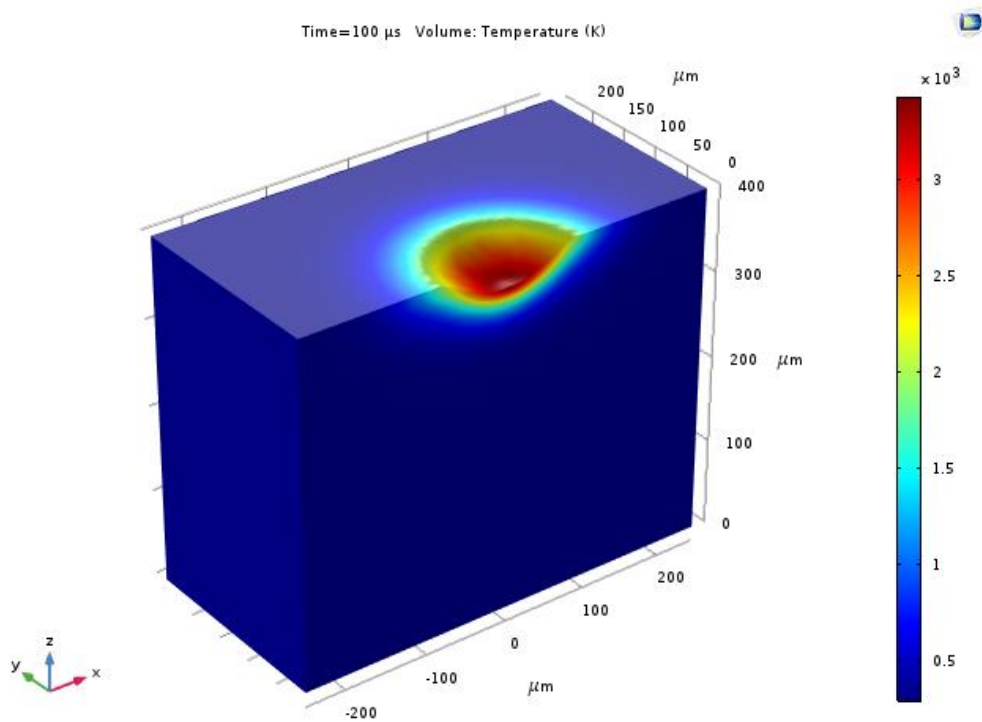
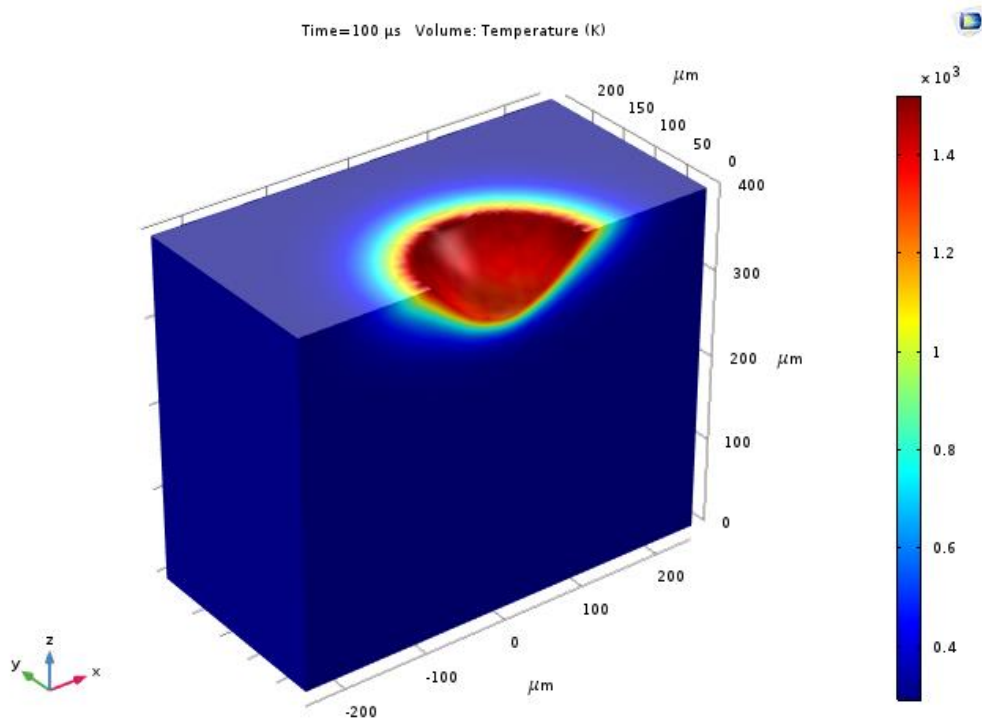
Διάγραμμα 8 Σύγκριση των 2D κατανομών της πηγής θερμότητας για την #1, υπολογισμένες βάσει του  $r_{p1}$  και του  $r_{p2}$

ότι από τη συγκεκριμένη σειρά προσομοιώσεων με  $r_{p2}$ , αναμένεται οι γεωμετρίες να είναι οι προβλεπόμενες από τη βιβλιογραφία, δηλαδή ελλειπτικοί κρατήρες σχετικά χαμηλού βάθους. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακας 16.

Πίνακας 16 Διάμετρος και βάθος κρατήρων (αρχικού και «μέσου») σύμφωνα με τις προσομοιώσεις για διάμετρο πλάσματος  $r_{p2}$

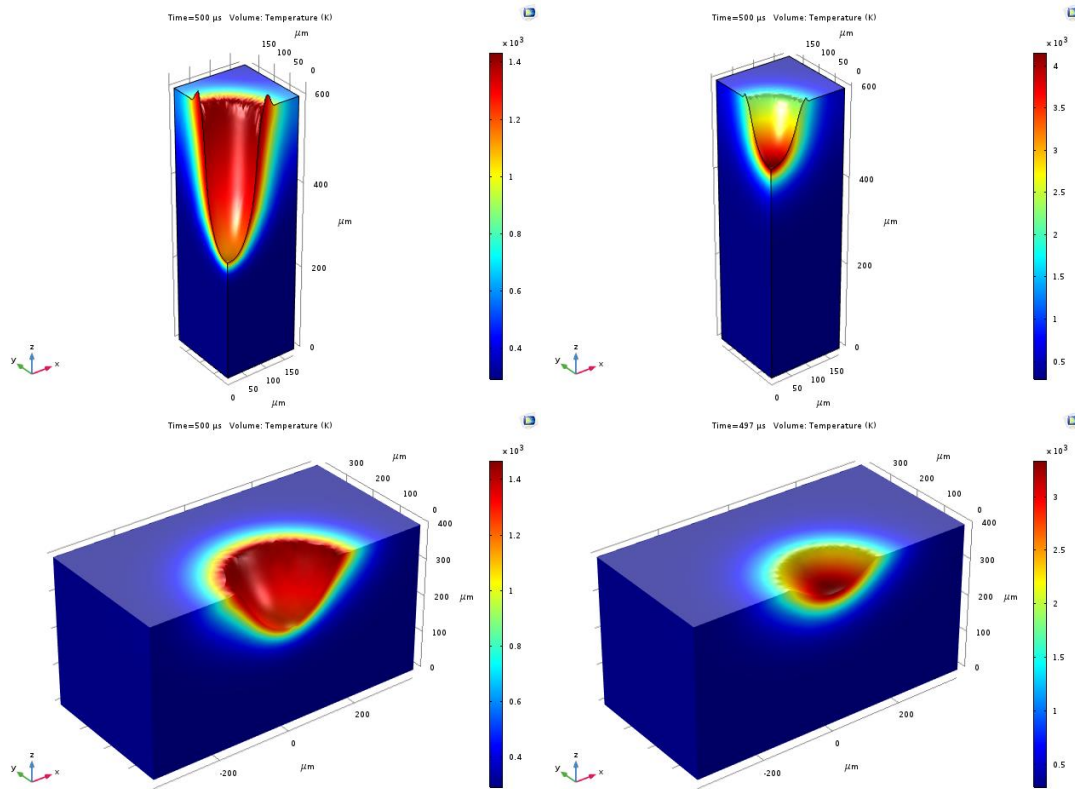
		Υπολογισμοί για ακτίνα πλάσματος $r_{p2}$												
		#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Αρχικός Κρατήρας	Διάμετρος [μm]		190	178	180	168	280	248	234	212	302	278	254	170
	Βάθος [μm]		62	61	65	66	103	113	119	124	140	151	157	54
«Μέσος» Κρατήρας	Διάμετρος [μm]		170	160	148	136	240	200	180	164	254	220	182	142
	Βάθος [μm]		28	27	29	21	40	42	39	34	50	44	36	28

Το βάθος των κρατήρων, τόσο των αρχικών, όσο και των «μέσων», παραμένει σε τιμές ρεαλιστικές, ακόμα και για τις προσομοιώσεις με υψηλούς χρόνους παλμού. Η διάμετρος του κρατήρα είναι πάντα μεγαλύτερη του βάθους (ακόμα και στους αρχικούς κρατήρες), ενώ στους «μέσους» κρατήρες το βάθος παραμένει σε προβλεπόμενες χαμηλές τιμές. Στην Εικόνα 57 παρουσιάζονται ο αρχικός και ο «μέσος» κρατήρας της #1 για  $I_p=21[A]$  και  $T_{on}=100[\mu sec]$ . Είναι προφανές ότι η πηγή θερμότητας, όπως υπολογίζεται σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων, δεν «σκάβει» το τεμάχιο, αλλά η ισχύς διαχέεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια δημιουργώντας μια αναμενόμενη ελλειπτική γεωμετρία.



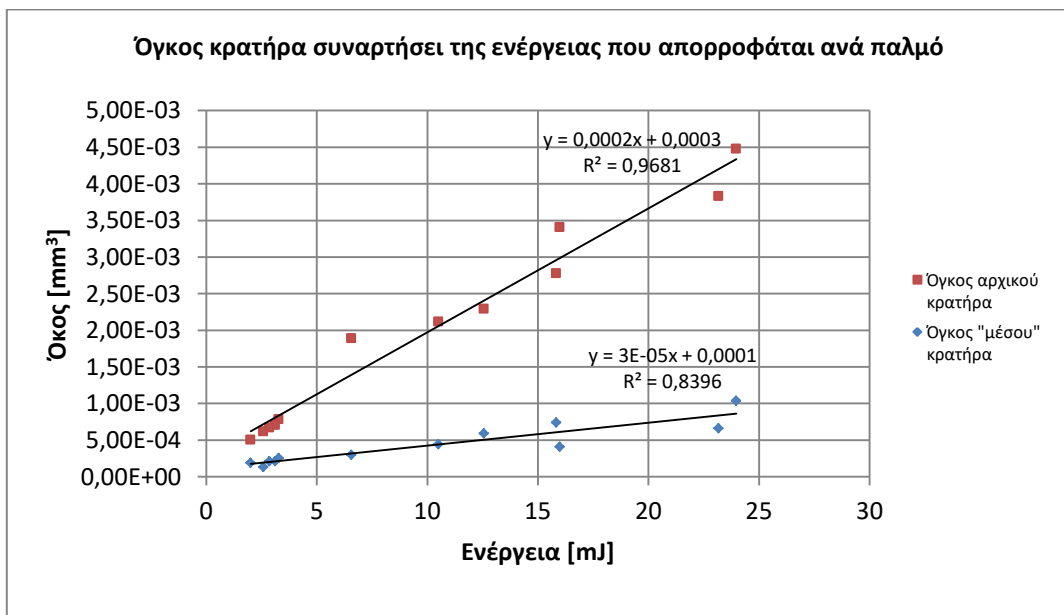
Εικόνα 57 Αποτέλεσμα προσομοίωσης για το α) μοναδιαίο σχηματιζόμενο κρατήρα #1 ( $I_p=27[\text{A}]$ ,  $T_{on}=100[\mu\text{s}]$ ) και β) τον αντίστοιχο «μέσο» σχηματιζόμενο κρατήρα» με χρήση της ακτίνας πλάσματος  $r_{p2}$

Στην Εικόνα 58 παρουσιάζονται ενδεικτικά – συγκριτικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τις ίδιες συνθήκες ( $I_p=21[\text{A}]$  και  $T_{on}=500[\mu\text{sec}]$ ) με τις δύο διαφορετικές τιμές ακτίνας πλάσματος ( $r_{p1}$ ,  $r_{p2}$ ).



Εικόνα 58 Οι σχηματιζόμενοι κρατήρες (αρχικός και «μέσος») για ίδιες συνθήκες κατεργασίας – προσομοίωσης α) με χρήση ακτίνα πλάσματος  $r_{p1}$  β) με χρήση ακτίνας πλάσματος  $r_{p2}$

Ένα σημαντικό τέλος διάγραμμα είναι αυτό του όγκου κρατήρα (αρχικού και μέσου) συναρτήσει της ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο ανά παλμό. Παρατηρείται ότι υπάρχει εξαιρετικά ισχυρή συσχέτιση, με σχεδόν γραμμική σχέση, τόσο για τον αρχικό όσο και το «μέσο» κρατήρα (Διάγραμμα 9).



Διάγραμμα 9 Όγκος αρχικού και "μέσου" κρατήρα συναρτήσει της ενέργειας που απορροφάται ανά παλμό

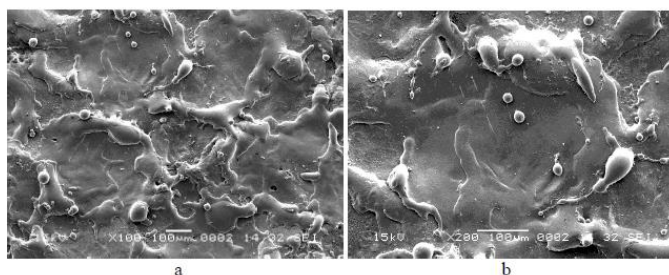
Ολοκληρώνοντας τη συγκεκριμένη ενότητα τα συμπεράσματα της μελέτης είναι:

- Η χρήση κινούμενου πλέγματος και μεταβλητή γεωμετρία τεμαχίου είναι μια σωστή επιλογή μελέτης της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης, καθώς προσομοιάζει με ρεαλιστικότερο τρόπο τα αποτελέσματα της κατεργασίας. Ως μοντέλο αποτελεί (στην ουσία του) έναν ισολογισμό ενέργειας και κατ' αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται μια ασφάλεια αποτελεσμάτων. Ταυτόχρονα όμως, προκειμένου να υπάρχει ακρίβεια και ρεαλιστικότητα, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στα inputs, καθώς είναι εξαιρετικά πιο ευαίσθητο, και αρκετά πιο πολύπλοκο από ένα μοντέλο σταθερής γεωμετρίας.
- Στις προσομοιώσεις, που διεξήχθησαν παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα σε απόλυτες τιμές είτε με χρήση της ακτίνας πλάσματος  $r_{p1}$ , είτε της  $r_{p2}$ , είναι συναφή, (ως ενεργειακός ισολογισμός δεν μπορεί να υπάρχει μεγάλη απόκλιση άλλωστε). Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στην γεωμετρία των αποτελεσμάτων.
- Με χρήση της ακτίνας πλάσματος  $r_{p1}$  (μικρή ακτίνα), θεωρείται μια πηγή ισχύος υψηλής πυκνότητας σε περιορισμένη επιφάνεια και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να «σκάβεται» το τεμάχιο, και οι κρατήρες που δημιουργούνται να μην έχουν την αναμενόμενη ελλειπτική γεωμετρία.
- Με χρήση της ακτίνας πλάσματος  $r_{p2}$  (μεγαλύτερη ακτίνα), αν και προκύπτει υψηλότερη ισχύς, κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια, και το αποτέλεσμα είναι ένας ελλειπτικός κρατήρας, με βάθος μικρότερο της διαμέτρου, σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές και πειραματικά δεδομένα.
- Έκτος από τον αρχικό κρατήρα, έγινε προσπάθεια να αποτυπωθεί και ο «μέσος» κρατήρας, αυτός δηλαδή που θα σχηματιζόταν θεωρητικά για 100% PFE. Η γεωμετρία του «μέσου» κρατήρα με χρήση της  $r_{p2}$ , κρίνεται ρεαλιστική και η προσομοίωση επιτυχημένη.
- Στην ανάλυση, που προηγήθηκε των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκαν θεωρητικές σχέσεις της βιβλιογραφίας, και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν πάλι με θεωρητικές τιμές που προέκυψαν από σχετικές εξισώσεις. Ως γενική παρατήρηση μπορεί να ειπωθεί ότι απαιτείται περαιτέρω μελέτη (πειραματική και υπολογιστική) προκειμένου τα μοντέλα – οι ημι εμπειρικές αυτές σχέσεις να αποκτήσουν καθολική ισχύ και μεγάλη ακρίβεια. Αποτελούν εξαιρετική βάση, που όμως με την αύξηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος και την δυνατότητα δημιουργίας εκτενών βάσεων δεδομένων, μπορούν να βελτιωθούν – εξελιχθούν. Ως συνέχεια αυτής της παρατήρησης, το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοιώνει σχεδόν με μηδενικό σφάλμα μια σειρά από συνθήκες κατεργασίες, ενώ το σφάλμα αυξάνεται για ορισμένες άλλες.

## 8. Χαρακτηρισμός Μικροδομών και Επιφανειών (χρήση οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας)

### 8.1 Τοπογραφία Επιφανείας

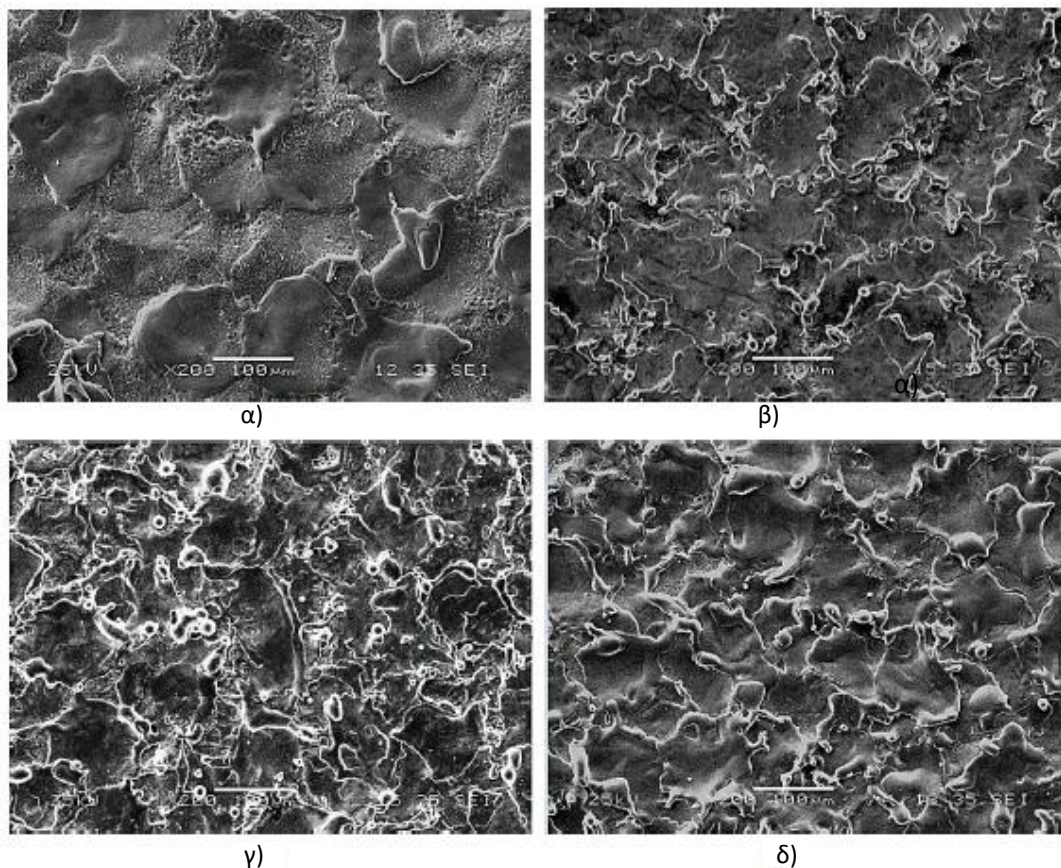
Οι επιφάνειες που έχουν υποστεί κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης είναι γενικά «θαμπές» (dull appearance), εξαιτίας τις «άτακτης» κατανομής των κρατήρων (arbitrary distribution). Στην επιφάνεια υπάρχουν «κορυφογραμμές» (ridges) οι οποίες σχηματίζονται από τη ροή τηγμένου υλικού, και σφαιρίδια – θύλακες (globules and rockmarks) σχηματιζόμενοι από εγκλωβισμένα αέρια που απελευθερώνονται από το τηγμένο υλικό, προτού αυτό στερεοποιηθεί απότομα (Εικόνα 59).



Εικόνα 59 Εικόνες επιφανείας κατεργασμένες με EDM χάλυβα DIN 1.2738 a) γενική εικόνα b) μεγεθυμένη [5]

Οι παράγοντες, που επηρεάζουν το μέγεθος των κρατήρων και κατ' επέκταση και τη μορφολογία της επιφάνειας είναι η διάρκεια του παλμού, η ένταση ρεύματος, οι θερμικές ιδιότητες του υλικού και η σύσταση του διηλεκτρικού μέσου. Ο όγκος του κρατήρα εξαρτάται από την ενέργεια ανά παλμό (επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (Διάγραμμα 9)), με τον χρόνο παλμού και την ένταση ρεύματος να έχουν διακριτές επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά του κρατήρα (βάθος και διάμετρο). Ως γενικός κανόνας μπορεί να ειπωθεί ότι ο χρόνος παλμού επιτρέπει στην στήλη πλάσματος να «επεκταθεί» σχηματίζοντας κρατήρες μεγάλης διαμέτρου, ενώ η ένταση ρεύματος επηρεάζει σημαντικά το βάθος του κρατήρα. Με αυτά υπ' όψιν μπορεί να αποκτηθεί μια «αίσθηση» για το πώς σχετίζεται η τραχύτητα επιφανείας με τις συνθήκες κατεργασίας, με το ακριβές πάντως σχήμα των κρατήρων να μην είναι συνήθως κυκλικό. Η απόκλιση αυτή εξαρτάται κυρίως από την ενέργεια του παλμού με παλμούς μικρότερους των 50[μJ] να διατηρούν κυκλικό σχήμα και να έχουν πιο «καλοσχηματισμένα» όρια.

Η «ποικιλία» σε τοπολογικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού διηλεκτρικού μέσου και υλικού ηλεκτροδίου, καθώς ανάλογα με τη «διαθεσιμότητα» σε άνθρακα κατά την κατεργασία, λαμβάνουν χώρα διαφορετικά φαινόμενα. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό μέσο και ηλεκτρόδιο χαλκού παρατηρούνται ελάχιστες και σπάνιες επικαθήσεις στα όρια των κρατήρων. Αντίθετα, όταν το υλικό του ηλεκτροδίου είναι γραφίτης παρατηρούνται τέτοιες επικαθήσεις, με το φαινόμενο να γίνεται εντονότερο όταν χρησιμοποιείται κάποιο έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο (Εικόνα 60). Οι εξαιρετικά έντονες μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας τοπικά κατά την κατεργασία είναι η αιτία για τις επιφανειακές ατέλειες (όπως για παράδειγμα ανάπτυξη ρωγμών), οι οποίες μειώνουν σημαντικά την αντοχή του υλικού σε κόπωση και διάβρωση. Είναι αντικείμενο έρευνας και βελτιστοποίησης συνθηκών κατεργασίας η δυνατότητα για επιφάνειες άνευ ρωγμών.



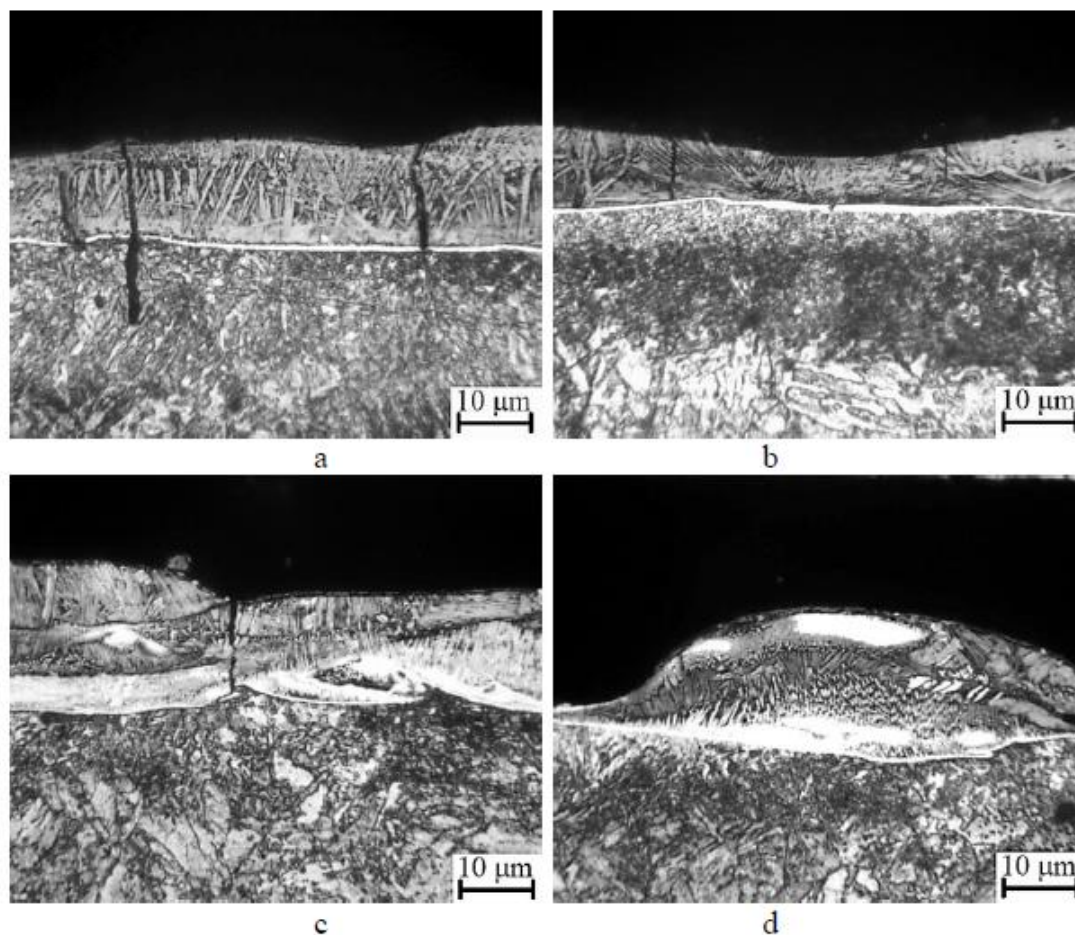
**Εικόνα 60** Επικαθήσεις επιφανείας σε χάλυβα DIN 1.2738 που έχει υποστεί κατεργασία EDM με διαφορετικούς συνδυασμούς υλικού ηλεκτροδίου - διηλεκτρικό μέσο  
 α) ηλεκτρόδιο χαλκού – απιονισμένο νερό β) ηλεκτρόδιο γραφίτη – απιονισμένο νερό  
 γ) ηλεκτρόδιο χαλκού – έλαιο δ) ηλεκτρόδιο γραφίτη – έλαιο [5]

Η διάρκεια παλμών, η ένταση ρεύματος, το υλικό του τεμαχίου και οι ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου, είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την πιθανότητα σχηματισμού ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η ταχεία στερεοποίηση του τηγμένου υλικού δημιουργεί ισχυρές τάσεις συστολής (contraction stress), σε ορισμένες περιπτώσεις υψηλότερες του ορίου θραύσης του υλικού. Η πιθανότητα για ρηγματώση αυξάνεται για τους μεγάλους χρόνους παλμών, οι οποίοι δημιουργούν μεγάλους κρατήρες και για χαμηλή ένταση ρεύματος, όπου το «στρώμα» τηγμένου και επαναστερεοποιημένου υλικού είναι πολύ λεπτό με αποτέλεσμα τη μεγάλη κλίση αναπτυσσόμενων τάσεων. Τέλος, η αλληλεπίδραση της κατεργαζόμενης επιφάνειας με το διηλεκτρικό μέσο και το υλικό του ηλεκτροδίου αποτελεί σημαντική παράμετρο στην δημιουργία ρωγμών.

## 8.2 Μικροδομή Υποστρώματος (Subsurface Microstructure)

Μελέτες σε διαφορετικές ποιότητες χάλυβα έχουν δείξει υψηλή αντοχή σε οξεία της «θερμικά επηρεασμένη ζώνης» (heat affected zone). Η περιοχή αυτή αλληλοεπιδρά έντονα με τα υλικά του ηλεκτροδίου και του διηλεκτρικού μέσου, και ως εκ τούτου, εντός της συγκεκριμένης ζώνης «συναντώνται» διάφορα κραματικά στοιχεία. Οι ερευνητές ορίζουν την δομή της ζώνης αυτής ως λεδεβουρίτη υπό-ευτηκτικού χυτοσιδήρου (ledeburite of hypo-eutectic white cast iron) ή ως πλήρης ωστενιτική επιφάνεια σε πλέγμα ωστενίτη-σεμεντίτη όταν γίνεται κατεργασία σε έλαιο (completely austenitic surface tracked by an austenitic – cementite matrix)[5, 102].

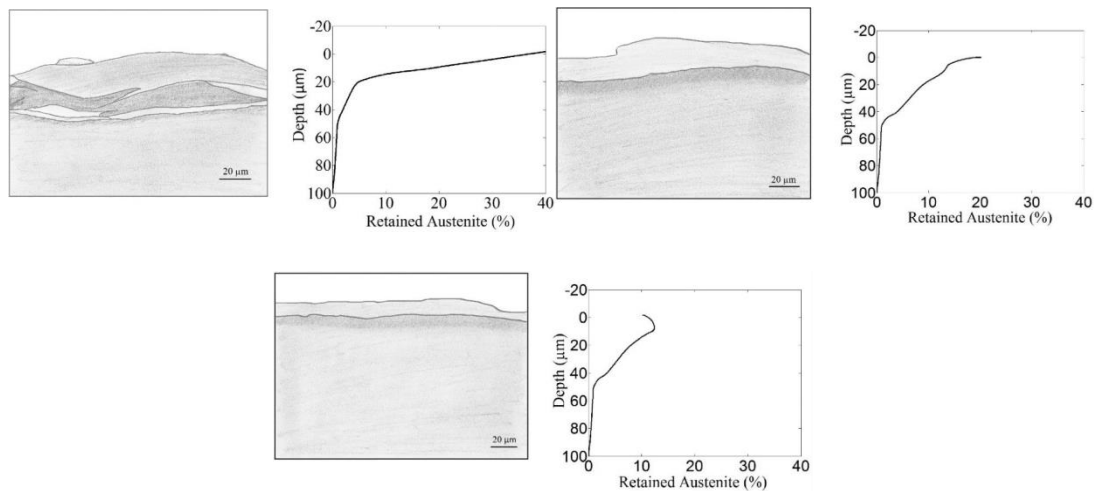
Η συγκέντρωση άνθρακα τοπικά στη συγκεκριμένη ζώνη μπορεί να αυξηθεί έως και εννέα φορές σε σχέση με το υπόλοιπο υλικό και είναι αποτέλεσμα της «μετακίνησης ατόμων άνθρακα» (carbon migration) από το διηλεκτρικό μέσο ή/και το ηλεκτρόδιο. Στην επαναστερεοποιημένη περιοχή συναντώνται διάφορες μικροδομές, οι οποίες παρατηρούνται με προσβολή από μη συμβατικά μεταλλογραφικά αντιδραστήρια (unconventional metallographic reagents) (Εικόνα 61).



**Εικόνα 61** Μικροδομές που παρατηρούνται στην επαναστερεοποιημένη ζώνη  
α) δενδριτικές δομές και ορισμένες ρωγμές β) βασαλτικοί - κωνοειδής κόκκοι  
γ) πολυστρωματικές δομές δ) αποτέλεσμα συνεχών θερμικών κύκλων [5]

Η συνήθης σύσταση της επαναστερεοποιημένης περιοχής είναι μαρτενσίτης, και διάφορα καρβίδια σε ωστενιτικό πλέγμα. Το ποσοστό μαρτενσίτη αυξάνεται με το ποσοστό καρβιδίων να μειώνεται συναρτήσει του βάθους. Το ενδότερο υπόστρωμα (innermost sub layer) είναι λεπτό και άμορφο (featureless), με την δυνατότητα να μετακινηθούν προς αυτό άτομα άνθρακα από το διηλεκτρικό μέσο να είναι περιορισμένη και ανεπαρκής για το σχηματισμό καρβιδίων. Έχει χαμηλότερο ποσό από παραμένοντα ωστενίτη (retained austenite), αρκετά ομοιόμορφο, με απουσία πολύπλοκων μορφών από καρβίδια σιδήρου. Η υψηλή συγκέντρωση του παραμένοντα ωστενίτη είναι ουσιώδης (>40%) όταν γίνεται κατεργασία με χρήση ελαίου ως διηλεκτρικού μέσου με τη συγκέντρωση να μειώνεται απότομα συναρτήσει του βάθους. Παράγων που επηρεάζει το ποσοστό του παραμένων ωστενίτη είναι και το υλικό του ηλεκτροδίου (Εικόνα 62).





**Εικόνα 62 Ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη συναρτήσει του βάθους για α) Ηλεκτρόδιο γραφίτη και διηλεκτρικό μέσο κυροζίνη β) Ηλεκτρόδιο γραφίτη και διηλεκτρικό μέσο απιονισμένο νερό γ) Ηλεκτρόδιο χαλκού και διηλεκτρικό μέσο απιονισμένο νερό [5]**

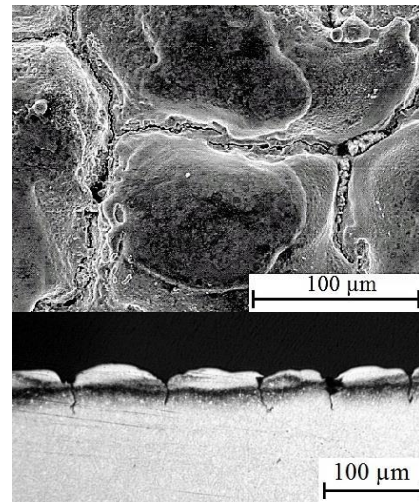
Η διαδικασία επαναστερεοποίησης του τηγμένου υλικού δεν είναι πάντως απλή, καθώς η άνω επιφάνεια ψύχεται λόγω συναγωγής, ενώ η κάτω λόγω αγωγής, δημιουργώντας έτσι έντονες θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις. Ανάλογες μελέτες μικροδομής έχουν γίνει και για μη σιδηρούχα υλικά.

### 8.3 Μικρο – ρωγμές (Micro Cracks)

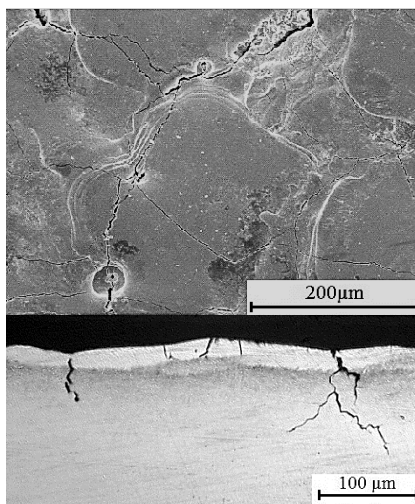
Η επαναστερεοποιημένη ζώνη αποτελείται από διάφορες μικροσκοπικές υπο – ζώνες ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας. Το τηγμένο υλικό κατά τη στερεοποίησή του συρρικνώνεται, συστέλλεται περισσότερο από το υπόλοιπο αναπτύσσοντας έτσι τοπικά τάσεις, οι οποίες όταν ξεπεράσουν το όριο αντοχής του υλικού εξελίσσονται σε ρωγμές. Μελέτες έχουν δείξει ότι αυξάνοντας την ενέργεια ανά παλμό αυξάνεται και η πιθανότητα να ανάπτυξης ρωγμών, χωρίς όμως να αποτελεί η συγκεκριμένη συσχέτιση ντετερμινιστικό και καθολικό κανόνα. Ρεύματα υψηλής έντασης, όπως έχει προαναφερθεί, σχηματίζουν βαθύτερους κρατήρες με παχύτερες επαναστερεοποιημένες περιοχές (re solidified segments) ως αποτέλεσμα της «εκτίναξης» (ejection) τηγμένου υλικού στα όρια των κρατήρων κατά το πέρας του παλμού. Στις περιοχές αυτές αναπτύσσονται ισχυρές «τάσεις μετασχηματισμού» (transformational stress). Αντίθετα, μεγάλης χρονικής διάρκειας παλμοί δημιουργούν μεγαλύτερους σε διάμετρο κρατήρες, μικρού βάθους, με το ρυθμό «εκτίναξης» υλικού στα όριά τους να είναι περιορισμένος. Το τηγμένο υλικό στο κέντρο του κρατήρα σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα, το οποίο ψύχεται, στερεοποιείται και συρρικνώνεται ταχύτατα και «γρηγορότερα» από το υπόλοιπο υλικό. Οι παραπάνω μηχανισμοί περιγράφουν συνοπτικά τα αίτια δημιουργίας ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια, τόσο για υψηλής έντασης ρεύματα, όσο και για μεγάλους χρόνους παλμού. Τέλος, υψηλή πιθανότητα ρηγμάτωσης έχουν υλικά με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Οι επιφανειακές ρωγμές συνήθως ξεκινούν από την επιφάνεια, «διατρέχουν» την επαναστερεοποιημένη περιοχή, και καταλήγουν στην άνω πλευρά της «θερμικά επηρεασμένης ζώνης». Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να διαπεράσουν και τα επόμενα στρώματα υλικού και να φτάσουν έως και το υλικό της βάσης. Παρατηρούνται επίσης

μικρορωγμές (miniature cracks) στα όρια των κρατήρων ή/και σε σφαιρικούς ή άμορφους σχηματισμούς από επικαθήσεις (spherical or formlessly shaped add-ons). Τέτοιες ρωγμές έχουν τυχαία επιφανειακή κατανομή και εξαιρετικά χαμηλό βάθος. Με βάση τα προαναφερθέντα μπορούν οι ρωγμές να διαχωριστούν σε επιφανειακές, σε αυτές με βάθος και σε μικρορωγμές (surface, penetrating, miniature). Οι ρωγμές με βάθος πολλαπλασιάζονται για κατεργασία υλικών που έχουν υποστεί προηγουμένως βαφή (pre quenched) σε απιονισμένο νερό ως διηλεκτρικό μέσο. Οι ρωγμές αυτές ακολουθούν τα όρια των κρατήρων, σχηματίζοντας κλειστούς βρόγχους (closed loops), διατηρώντας έτσι σχετικά σταθερά μεταξύ τους διαστήματα (Εικόνα 63). Ανάλογης μορφής ρωγμές μπορούν πάντως να παρατηρηθούν και κατεργασίες με έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο. Παράλληλα με τις παραπάνω ρωγμές υπάρχουν και ορισμένες ακτινικές (radial cracks), με



**Εικόνα 63 Ρωγμές από κατεργασία EDM με διηλεκτρικό μέσο απιονισμένο νερό [5]**



άνθρακα (elevated tensile stresses). Τέλος, η ύπαρξη ρωγμές με βάθος οφείλεται στο συγκεκριμένες ρωγμές, κατά πάσα πιθανότητα, σχηματίστηκαν κατά τα πρώτα στάδια στερεοποίησης του υλικού.

σχετικά περιορισμένο πλάτος ανοίγματος (width of openings) και συνήθως σταματούν στην διεπιφάνεια του επαναστερεοποιημένου υλικού και αυτού που έχει επηρεαστεί θερμικά (Εικόνα 64).

Η κατεργασία σε έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο και το υλικό του ηλεκτροδίου, όπως έχει διατυπωθεί και προηγουμένως, επηρεάζουν ιδιαίτερα τη μικροδομή της επαναστερεοποιημένης περιοχής και τις φάσεις που συναντώνται σε αυτή. Οι ρωγμές εσωτερικά της ζώνης είναι ένδειξη υψηλών εφελκυστικών τάσεων μετασχηματισμού, οι οποίες εξελίσσονται λόγω της παρουσίας

**Εικόνα 64 Ρωγμές από κατεργασία EDM με διηλεκτρικό μέσο κηροζίνη. Είναι εμφανείς τόσο οι ρωγμές με βάθος όσο και οι ακτινικές ανάμεσά τους [5]**

transformational εγκλεισμάτων σε ότι οι

Κλείνοντας μπορούμε να συνοψίσουμε ότι τα αίτια εμφάνισης των ρωγμών είναι οι πολύπλοκοι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στην ζώνη του επαναστερεοποιημένου υλικού πρωτίστως, αλλά και στη θερμικά επηρεασμένη περιοχή δευτερευόντως. Περιλαμβάνουν την ανάπτυξη τάσεων κυρίως λόγω: συρρίκνωσης του υλικού κατά της στερεοποίηση του, την ύπαρξη έντονης κλίσης θερμοκρασίας καθώς υπάρχει ταυτόχρονη ψύξη με αγωγή και συναγωγή, και τέλος λόγω στους μετασχηματισμούς φάσεων που εξελίσσονται με την παρουσία άνθρακα.

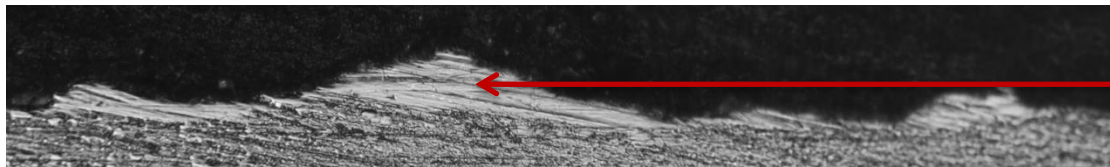
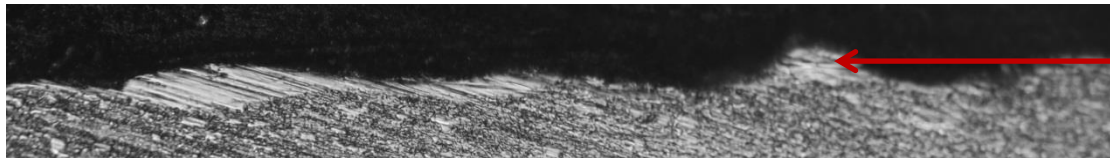
## 8.4 Μελέτη των δοκιμών

Επιλέχθηκαν να μελετηθούν τέσσερα αντιπροσωπευτικά δοκίμια ως προς την τοπογραφία επιφανείας και το σχηματισμό της ζώνης επαναστερεοποιημένου υλικού (White Layer). Οι επιλεχθείσες συνθήκες κατεργασίας είναι οι: #2 με  $I_p=24[A]$  και  $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$ , #5 με  $I_p=27[A]$  και  $T_{on}=300[\mu\text{sec}]$ , #11 με  $I_p=12[A]$  και  $T_{on}=500[\mu\text{sec}]$ , και η #12 με  $I_p=24[A]$  και  $T_{on}=75[\mu\text{sec}]$ . Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι:

Τα συμπεράσματα για τα δοκίμια είναι:

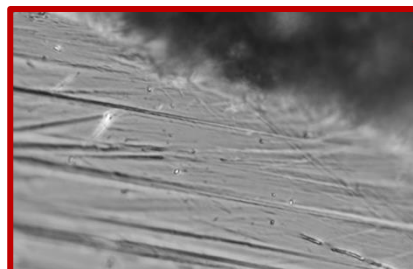
### #2 ( $I_p=24[A]$ και $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$ )

Παρατηρείται ένα λεπτό, ασυνεχές και ανομοιόμορφο WL. Σε ορισμένα σημεία δεν εμφανίζεται καθόλου, ενώ σε ορισμένα άλλα σχηματίζει «λοφίσκους». Δεν παρατηρείται έντονη ρηγμάτωση (σε ένα μόνο σημείο υπάρχει ένδειξη), ενώ υπάρχουν μερικές εσωτερικές μικρές κοιλότητες που οπτικά μοιάζουν με στίγματα (Εικόνα 65).

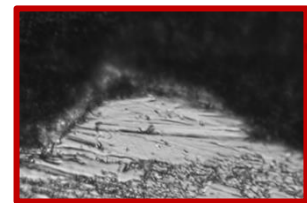


Εικόνα 65 Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο τομής κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας χάλυβα AISI O1 με  $I_p=24[A]$  και  $T_{on}=100[\mu\text{sec}]$  σε μεγέθυνση  $\times 100$

Λεπτό, ασυνεχές και ανομοιόμορφο WL



Μικροσκοπικές εσωτερικές κοιλότητες ( $\times 500$ )



Λοφίσκοι - σφαιρικές διαμορφώσεις ( $\times 200$ )

### #5 ( $I_p=27[A]$ και $T_{on}=300[\mu sec]$ )

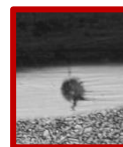
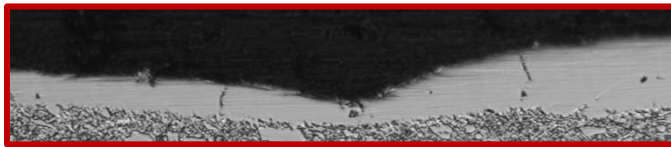
Παρατηρείται ένα πολύ πιο παχύ WL, σχεδόν συνεχές, που διατηρεί όμως την έντονη ανομοιογένεια του (Εικόνα 66). Δεν παρατηρούνται «λοφίσκοι» όπως στην #2, υπάρχουν όμως αρκετές ρωγμές που άλλοτε περιορίζονται σε μέρος του WL και άλλοτε φτάνουν έως το μητρικό μέταλλο (Εικόνα 67). Τέλος, συναντώνται λιγότερες εσωτερικές κοιλότητες, πολύ μεγαλύτερης όμως διαμέτρου.



ω



Εικόνα 66 65 Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο τομής κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας χάλυβα AISI O1 με  $I_p=27[A]$  και  $T_{on}=300[\mu sec]$  σε μεγέθυνση  $\times 100$



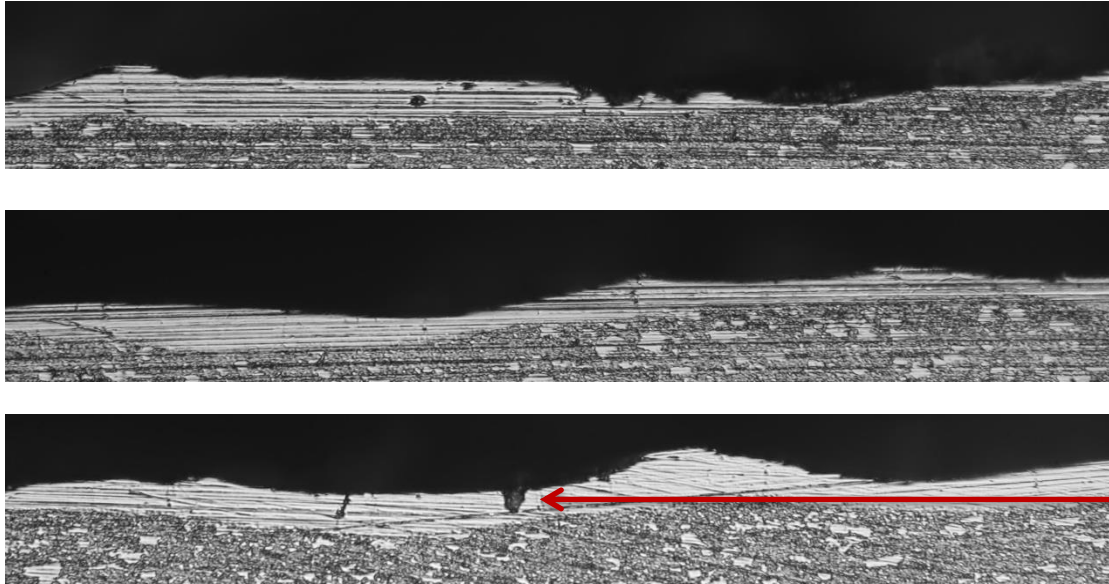
Εσωτερικές σχηματισμένες κοιλότητες (αριστερά  $\times 200$ , δεξιά  $\times 100$ )



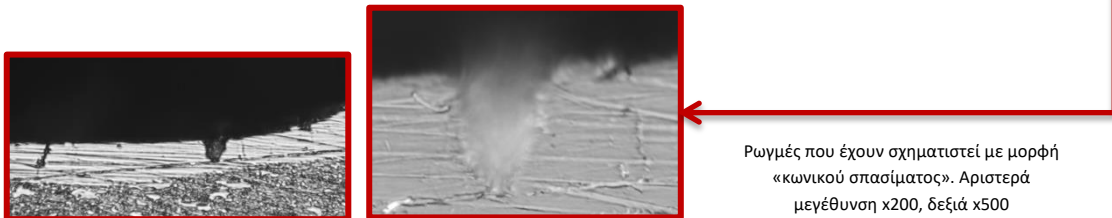
Εικόνα 67 Ρωγμές που σχηματίζονται στο WL με μεγέθυνση α)  $\times 500$  και β)  $\times 200$ . Διακρίνονται ρωγμές που διαπερνούν όλο το πάχος του WL και άλλες που περιορίζονται σε μέρος αυτού (συνθήκες κατεργασίας  $I_p=27[A]$  και  $T_{on}=300[\mu sec]$ )

**#11 ( $I_p=12[A]$  και  $T_{on}=500[\mu sec]$ )**

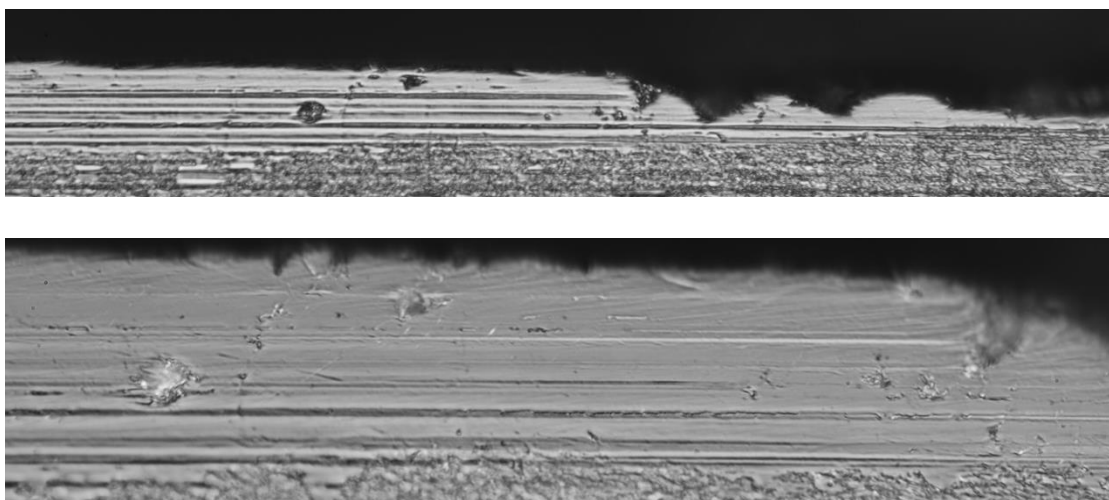
Παρατηρείται ένα σχεδόν συνεχές, σχετικά παχύ, και ομοιόμορφο WL (Εικόνα 68). Δεν υπάρχουν αρκετές σε αριθμό ρωγμές, με τις ασυνέχειες όμως να είναι πιο έντονες και να μοιάζουν ορισμένες με «κωνικά σπασίματα» από τα οποία έχει απομακρυνθεί και υλικό. Τέλος οι εσωτερικές κοιλότητες που σχηματίζονται είναι και αυτές λιγότερες σε αριθμό, αλλά μεγαλύτερης διαμέτρου (Εικόνα 69).



Εικόνα 68 Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο τομής κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας χάλυβα AISI O1 με  $I_p=12[A]$  και  $T_{on}=500[\mu sec]$  σε μεγέθυνση x100

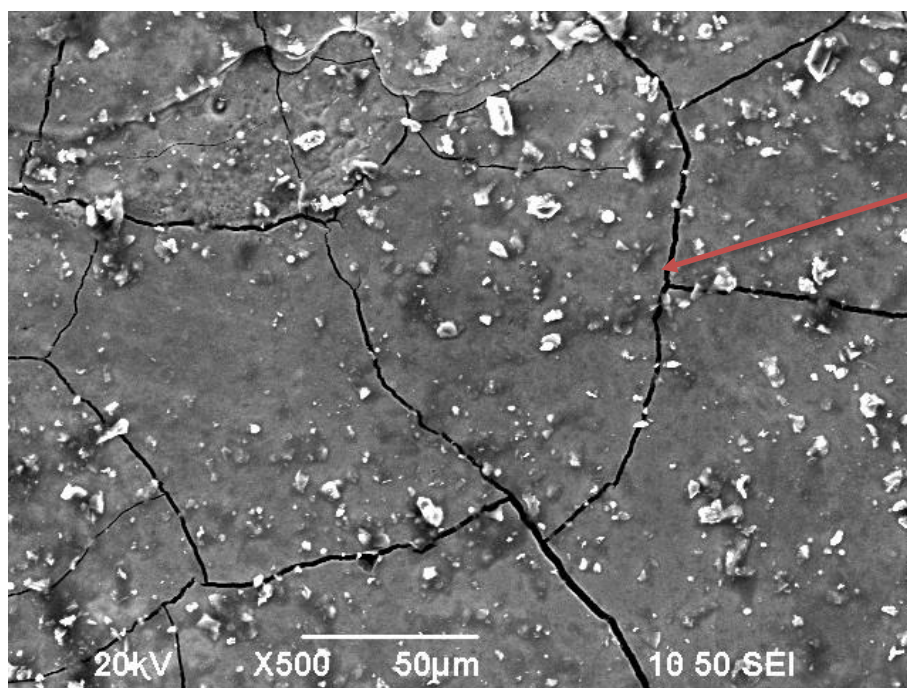


Ρωγμές που έχουν σχηματιστεί με μορφή «κωνικού σπασίματος». Αριστερά μεγέθυνση x200, δεξιά x500

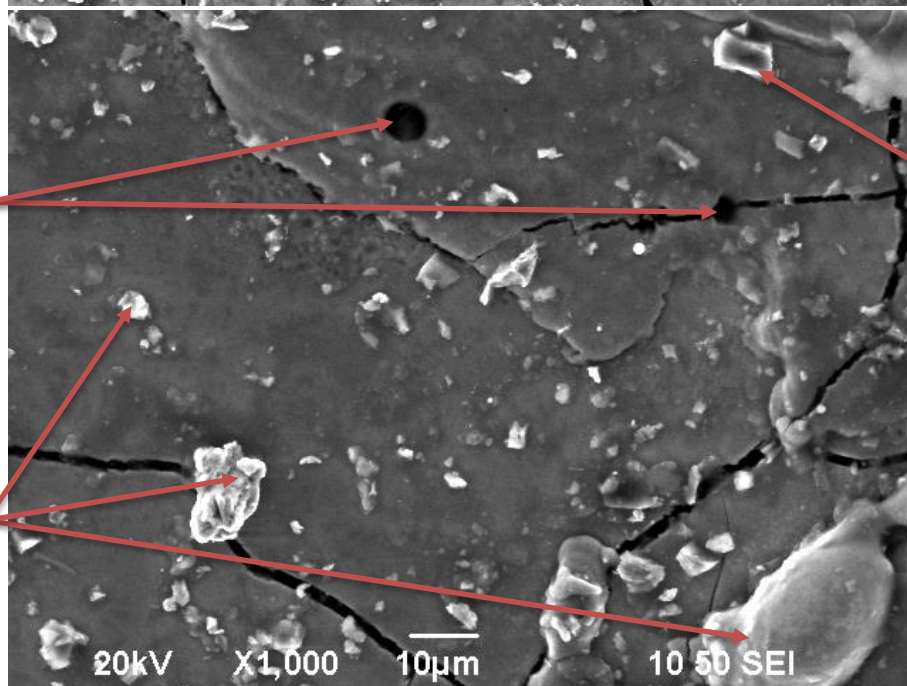


Εικόνα 69 Εσωτερικές κοιλότητες που σχηματίζονται με α) μεγέθυνση x200 και β) μεγέθυνση x500

Έγινε παρατήρηση επιφάνειας για το συγκεκριμένο δοκίμιο, καθώς έχει το πιο ομοιόμορφο WL σε SEM. Στην Εικόνα 70 φαίνονται τυπικά χαρακτηριστικά μιας τέτοιας επιφάνειας. Υπάρχει ένα «δίκτυο ρωγμών» ανάλογο με αυτό που συναντάται στη βιβλιογραφία για κατεργασία με έλαιο ως διηλεκτρικό μέσο, σχηματισμοί από επαναστερεοποιημένο υλικό διασκορπισμένοι στην επιφάνεια, και μικρές κοιλότητες οι οποίες σχηματίζονται από εγκλωβισμένα αέρια που απελευθερώνονται από το τηγμένο υλικό, προτού αυτό στερεοποιηθεί απότομα.



«Δίκτυο από ρωγμές» χαρακτηριστικού τύπου για κατεργασία με διηλεκτρικό μέσο έλαιο



Κοιλότητες που προέρχονται από εγκλωβισμένα αέρια τα οποία απελευθερώθηκαν από το τηγμένο μέταλλο προτού αυτό επαναστερεοποιηθεί

Σχηματισμός από άνθρακα και αλουμίνιο προερχόμενος λόγω εναπομείναντος αλουμίνιου στο διηλεκτρικό μέσο από κάποια προγενέστερη κατεργασία

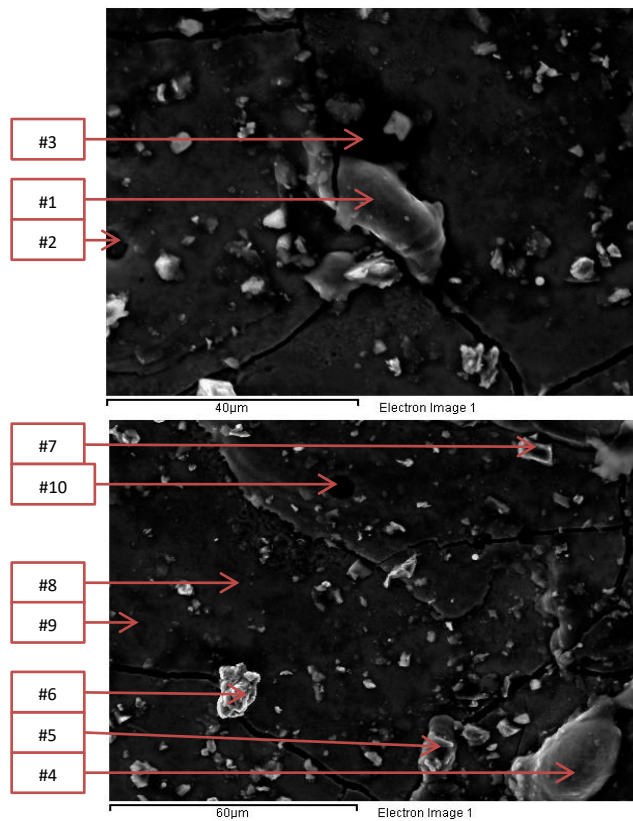
Σχηματισμοί από επαναστερεοποιημένο υλικό διάσπαρτοι στην κατεργασμένη επιφάνεια

Εικόνα 70 Επιφάνεια που έχει υποστεί κατεργασία EDM σε SEM (IP=12[A] και Ton=500[µsec]) α)x500, β)x1000

Έγινε επίσης στοιχειακή ανάλυση της επιφάνειας (Εικόνα 71), με τη χημική της σύσταση να διαταράσσεται έντονα σε σχέση με το μητρικό μέταλλο. Αρχικά υπάρχει εξαιρετικά αυξημένο ποσοστό άνθρακα που κυμαίνεται από 24 – 62%, αποτέλεσμα της τοπικά «υψηλής διαθεσιμότητας» σε άνθρακα λόγω του διηλεκτρικού μέσου (hydrocarbon oil). Η αλληλεπίδραση της επιφάνειας με το διηλεκτρικό μέσο φαίνεται επίσης από την ύπαρξη στοιχείων που δεν περιέχονται στην τυπική σύσταση του υλικού του τεμαχίου (χάλυβας AISI01), όπως το Al. Στο σημείο #7 μάλιστα εντοπίζεται σχηματισμός που αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από άνθρακα και αλουμίνιο και δικαιολογείται ως εναπομείναν υλικό στη διάταξη ηλεκτροδιάβρωσης από κάποια προηγούμενη κατεργασία. Η μετανάστευση στοιχείων από το ηλεκτρόδιο και το διηλεκτρικό μέσο στην επιφάνεια του τεμαχίου είναι φαινόμενο που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν είτε προκειμένου να αποκτήσει η επιφάνεια επιθυμητές ιδιότητες, είτε προς αποφυγή. Τα στοιχεία που έχουν τη «σταθερότερη» συγκέντρωση είναι το χρώμιο (Cr) και το βανάδιο (V). Τα δεδομένα της στοιχειακής ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 17.

**Πίνακας 17 Δεδομένα στοιχειακής ανάλυσης επιφάνειας τεμαχίου για  $I_p = [A]$  και  $T_{on} = [\mu sec]$**

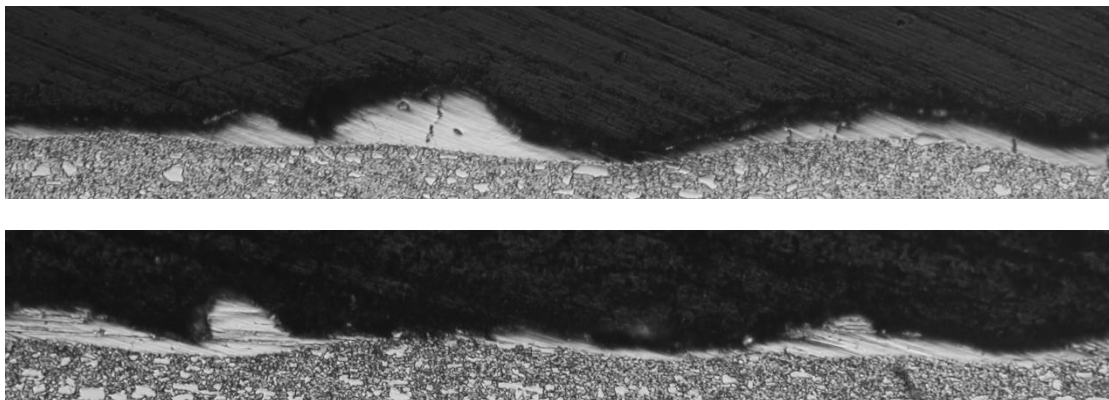
	Fe [%]	C [%]	Cr [%]	V [%]	Mn [%]	Al [%]	S [%]	Cl [%]	Ca [%]	Na [%]	Si [%]	Mo [%]
#1	49.21	43.01	7.26	0.53	--	--	--	--	--	--	--	--
#2	64.68	24.96	9.17	0.51	0.69	--	--	--	--	--	--	--
#3	23.54	62.11	3.84	0.22	--	0.2	0.32	0.34	0.16	--	--	--
#4	55.8	35.81	7.82	0.58	--	--	--	--	--	--	--	--
#5	30.23	61.57	4.43	--	--	1.81	--	--	--	0.54	0.52	0.91
#6	55.38	38.8	5.44	0.38	--	--	--	--	--	--	--	--
#7	1.92	47.83	--	--	--	50.25	--	--	--	--	--	--
#8	54.52	34.69	7.87	0.53	0.48	--	--	--	--	--	0.21	--
#9	63.53	26.65	9.21	0.61	--	--	--	--	--	--	--	--
#10	60.05	30.9	8.43	0.62	--	--	--	--	--	--	--	--



Εικόνα 71 Σημεία στα οποία έγινε στοιχειακή ανάλυση επιφανείας

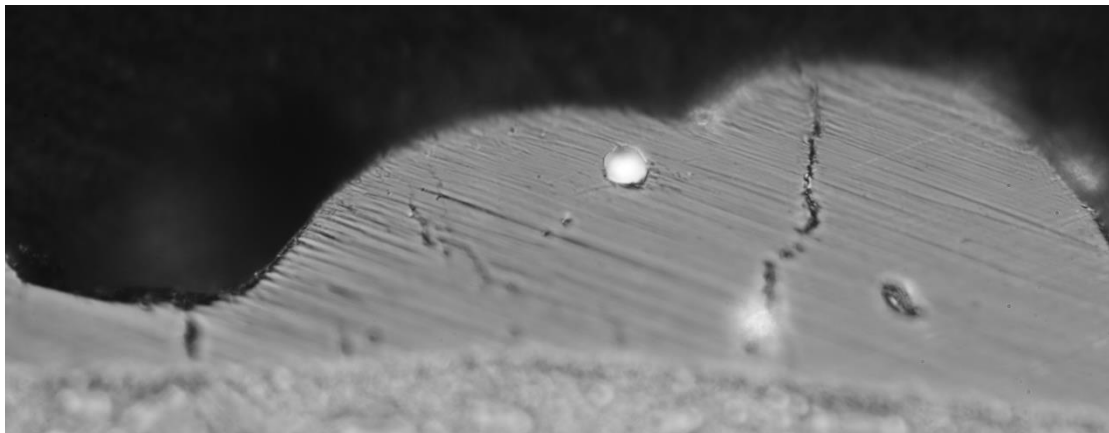
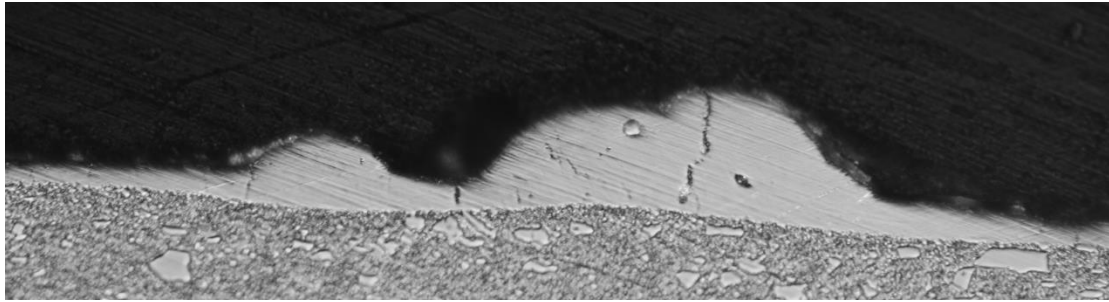
### #12 ( $I_p=24[A]$ και $T_{on}=75[\mu sec]$ )

Παρατηρείται ένα πολύ λεπτό, ασυνχές και εντελώς ανομοιόμορφο WL. Σε ορισμένες περιοχές μοιάζει περισσότερο με τυχαίες επικαθήσεις που σχηματίζουν «σφαιρικούς λοφίσκους», παρά ως μία ενιαία ζώνη (Εικόνα 72). Υπάρχουν επίσης τόσο επιφανειακές ρωγμές, οι οποίες εκτείνονται σε όλο το πλάτος του WL, όσο και ορισμένες μικρές εσωτερικές. Τέλος, έχουν σχηματιστεί λίγες εσωτερικές κοιλότητες (Εικόνα 73).



Εικόνα 72 Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο τομής κατεργασμένης σε EDM επιφάνειας χάλυβα AISI O1 με  $I_p=24[A]$  και  $T_{on}=75[\mu sec]$  σε μεγέθυνση x100





Εικόνα 73 Σφαιρικοί λοφίσκοι που έχουν δημιουργηθεί. Είναι εμφανείς οι ρωγμές τόσο οι επιφανειακές καθ' όλο το πλάτος του WL, όσο και εσωτερικές μικρότερες. Επίσης διακρίνονται οι εσωτερικές κοιλότητες.  
Μεγέθυνση α) x200, β) x500

Η επεξεργασία των εικόνων από το οπτικό μικροσκόπιο έγινε με χρήση προγράμματος «Plot Digitizer». Ελήφθησαν κατάλληλα σημεία και με βάση την δεδομένη κλίμακα του μικροσκοπίου υπολογίστηκαν: το μήκος του WL (ως ποσοστό του συνολικού μήκους), το μέσο πάχος του, καθώς και η μέγιστη τιμή. Ο Πίνακας 18 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα.

**Πίνακας 18 Χαρακτηριστικά WL με βάση τα στοιχεία από το οπτικό μικροσκόπιο**

#	2	5	11	12	M.O.
ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΛΥΨΗΣ	61%	90%	89%	76%	--
ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ WL [ $\mu\text{m}$ ]	17.46	21.6	24.33	15.33	--
ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ WL [ $\mu\text{m}$ ]	43	47	44	47	--
ΠΑΧΟΣ WL ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ FEM [ $\mu\text{m}$ ]	14.2	22	26.1	11.2	--
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	19%	-2%	-6%	27%	<b>9%</b>
ΠΑΧΟΣ HAZ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ FEM [ $\mu\text{m}$ ]	8.4	13	24	6.5	--

Η περιοχή αυτή (WL) στο θερμικό μοντέλο ορίζεται ως το υλικό, το οποίο βρέθηκε σε θερμοκρασία υψηλότερη του σημείου τήξης ( $T_m$ [K]) και χαμηλότερη του σημείου βρασμού ( $T_b$ [K]), ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) ως το υλικό που έχει θερμοκρασία υψηλότερης της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης ( $A_{c3}$ [K]) αλλά δεν έχει φτάσει τη θερμοκρασία τήξης ( $T_m$ [K]).

Ουσιαστικό νόημα έχει ο υπολογισμός και η απεικόνιση των προαναφερθέντων θερμικά επηρεασμένων περιοχών στο μοντέλο του «μέσου» κρατήρα, καθώς σε αυτό μόνο αναπτύσσονται θερμοκρασίες υψηλότερες της  $T_m$ . Η προσπάθεια υπολογισμού μέσω οριακών συνθηκών του αναμενόμενου πάχους WL και HAZ συναντά δύο δυσκολίες.

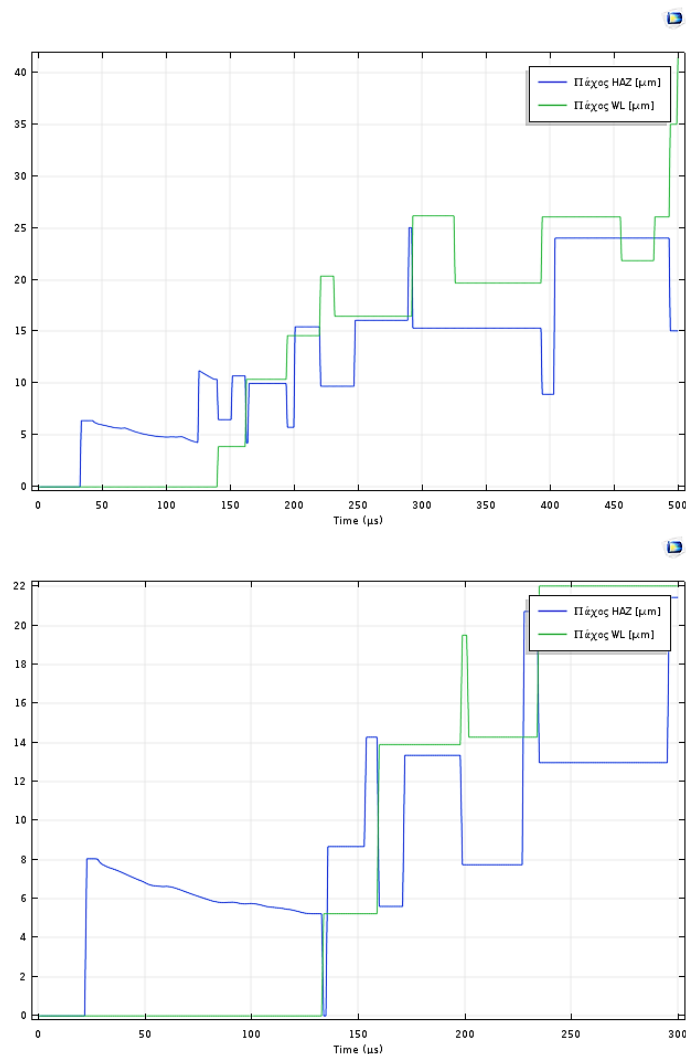
- Αρχικά, μπορεί να έχει οριστεί θεωρητικά ο «μέσος» κρατήρας, **στην πραγματικότητα όμως η διαδικασία είναι στοχαστική** και δεν ισχύει κάποια γραμμική επαλληλία. Οι σπινθήρες εκδηλώνονται σε τυχαία σημεία ακολουθώντας νόμους πιθανοτήτων με τις γεωμετρίες που σχηματίζονται να απέχουν από το να είναι οι «μέσοι» κρατήρες, με τα όποια χαρακτηριστικά αυτοί έχουν. Επίσης, τα φαινόμενα απόπλυσης και απομάκρυνσης του τηγμένου υλικού, από τα οποία και εξαρτάται ο σχηματισμού του WL είναι εξαιρετικά πολύπλοκα, με αδυναμία ακριβούς μοντελοποίησης.
- Ταυτόχρονα με την εγγενή δυσκολία της κατεργασίας, **το μοντέλο «εισάγει» και αυτό σφάλμα** καθώς υπολογίζει μια περιοχή θερμοκρασιών πολύ πάνω του σημείου βρασμού του υλικού. Προφανώς το υλικό σε τόσο υψηλή θερμοκρασία ( $>>3500$ [K]) αφ' ενός δεν βρίσκεται σε υγρή μορφή, με τους συντελεστές και τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας να διαφοροποιούνται, αφ' ετέρου είναι αμφίβολο αν και κατά πόσο το υπέρθερμό αέριο «εγκλωβίζεται» στον κρατήρα επηρεάζοντας θερμικά το υπόλοιπο υλικό.

Έτσι, η κάθε υπολογιστική προσπάθεια πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, σύγκριση με πειραματικά δεδομένα, αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και όχι απλά «τυφλή» καταγραφή τους.

Τα πάχη για WL και HAZ υπολογίζονται στο «κέντρο» του προβλεπόμενου «μέσου κρατήρα» ως το πλέον προστατευμένο σημείο, και αυτό που επηρεάζεται λιγότερο από την επαλληλία των παλμών, ενώ οι οριακές θερμικές συνθήκες είναι (Εικόνα 74) :

- για HAZ  $\rightarrow Ac_3 < T < T_m$  με  $Ac_3$  τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης  $\cong 800[K]$
- για WL  $\rightarrow T_m < T < T_b$  με  $T_b$  τη θερμοκρασία βρασμού  $\cong 3143[K]$

Ως «συνέχεια» και παράδειγμα της προηγούμενης αναφοράς σε αξιολόγηση αποτελεσμάτων παρατίθεται το διάγραμμα υπολογισμού του WL και HAZ για την #11 (Διάγραμμα 10a). Παρατηρείται στα τελευταία μsec ένας «εξακοντισμός» στο πάχος του WL, το οποίο σχεδόν διπλασιάζεται από τα  $\approx 26.1\mu\text{m}$  στα  $\approx 41\mu\text{m}$ . Παράλληλα οι πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ένα μέσο πάχος WL  $\approx 24\mu\text{m}$  «στηρίζοντας» έτσι την υπόθεση ότι η πλέον ρεαλιστική και σωστή τιμή για τον υπολογισμό του WL μέσω προσομοίωσης είναι τα  $26.1\mu\text{m}$  και όχι τα  $41\mu\text{m}$ . Ανάλογη περίπτωση και αυτή στο Διάγραμμα 10b όπου το πάχος της HAZ αυξάνεται σχεδόν «στιγμιαία» από τα  $\approx 8\mu\text{m}$  στα  $\approx 20\mu\text{m}$ , στη συνέχεια «επανέρχεται» στα  $\approx 13\mu\text{m}$  και «εξακοντίζεται» πάλι στα  $\approx 21\mu\text{m}$ . Η τιμή που θεωρήθηκε αντιπροσωπευτική για τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα  $13\mu\text{m}$ .



Διάγραμμα 10 Πάχος WL και HAZ συναρτήσεως του χρόνου α) #11, β) #5

Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω υπολογίστηκε το πάχος του WL και της HAZ με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 19). Παρατηρούμε ότι η μέση απόκλιση του πάχους WL υπολογισμένο με FEM σε σχέση με το πειραματικό είναι 9%.

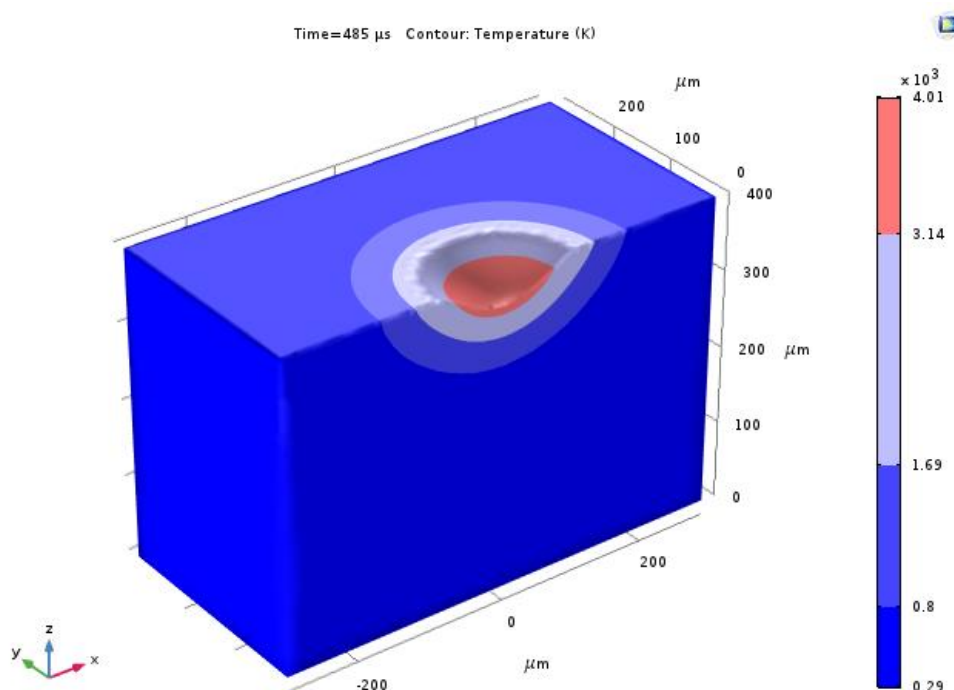
Πίνακας 19 Υπολογισμός πάχους WL και HAZ με χρήση υπολογιστικού πακέτου FEM

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ΠΑΧΟΣ HAZ [ $\mu\text{m}$ ]	8.1	8.4	8.6	11.9	13	14.5	15.6	18.7	18.9	20.5	24	6.5
ΠΑΧΟΣ WL [ $\mu\text{m}$ ]	14.3	14.2	13.7	14.8	22	18.8	19.4	20.4	24.5	24.8	26.1	11.2

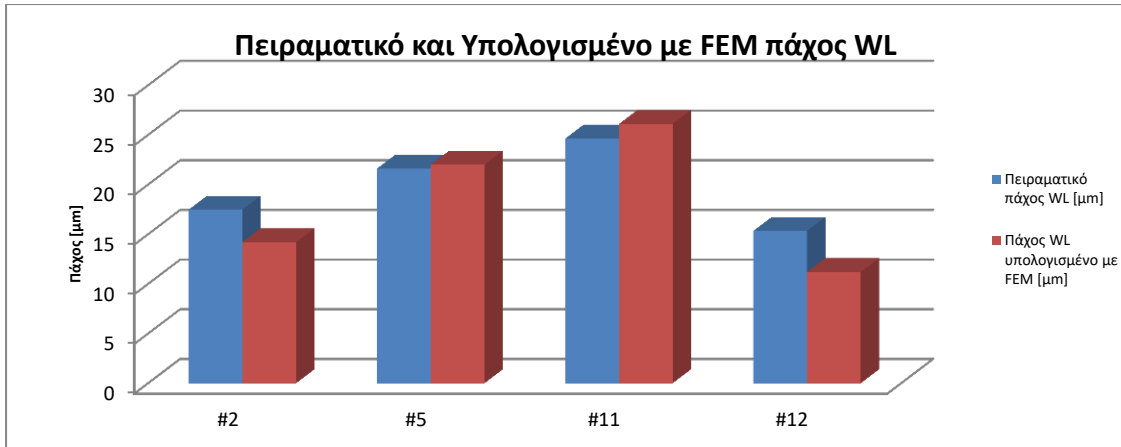
Σύμφωνα με τα στοιχεία μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Η βασική παράμετρος που επηρεάζει το πάχος, τόσο του WL όσο και της HAZ, είναι ο χρόνος παλμού, με την αύξηση όμως στο πάχος του WL συναρτήσει του χρόνου παλμού να είναι αρκετά πιο έντονη.
- Το πάχος του WL είναι αρκετά ανελαστικό με τη μεταβολή της έντασης ρεύματος, και ειδικά σε σχέση με το πάχος της HAZ που επηρεάζεται σαφώς περισσότερο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, επίσης, έχει το γεγονός ότι η HAZ αυξάνεται (έστω και λίγο) με μείωση της έντασης ρεύματος (άρα και τις ισχύος), ευνοείται δηλαδή ο σχηματισμός της από τις πιο τις ήπιες συνθήκες κατεργασίας. Αντίθετα, το πάχος του WL δεν παρουσιάζει μια σαφή τάση συναρτήσει της έντασης του ρεύματος κατεργασίας.

Κλείνοντας την εργασία, οι παραπάνω παρατηρήσεις – συμπεράσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

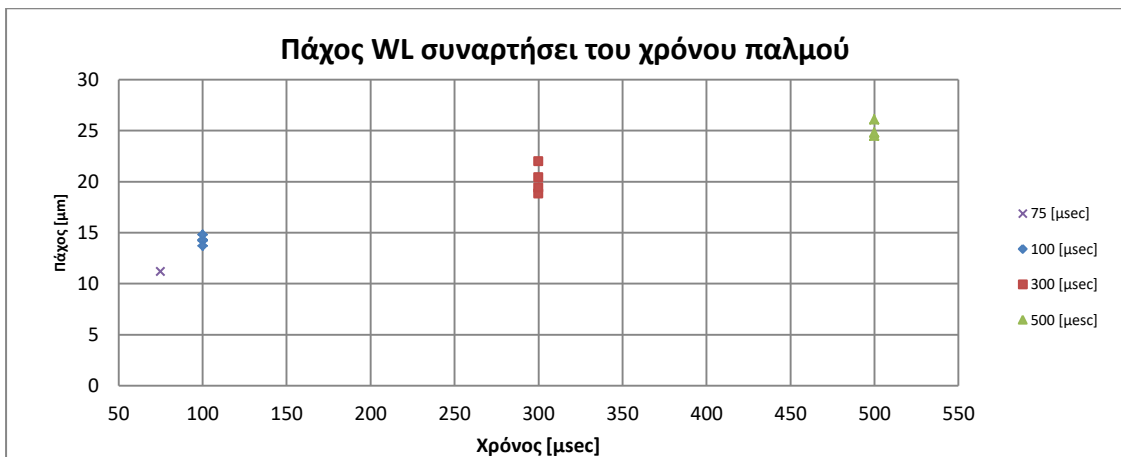


Εικόνα 74 Απεικόνιση στο τεμάχιο της: υπέρθερμης περιοχής ( $T > 3143[\text{K}]$ ), του WL ( $3143[\text{K}] > T > T_m$ ), και της HAZ ( $T_m > T > 800[\text{K}]$ ) για την #11 στο χρόνο που υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα πάχη ( $t = 485[\mu\text{sec}]$ )

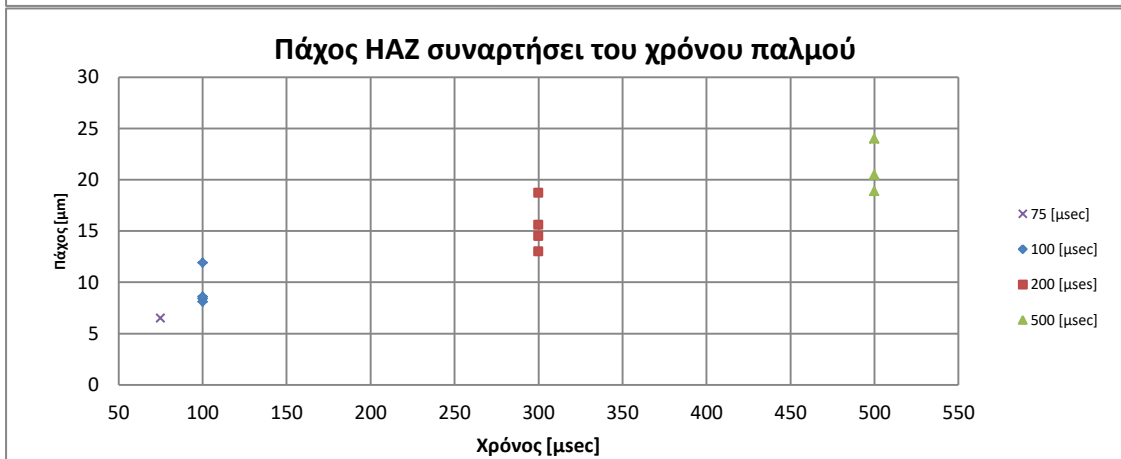


Διάγραμμα 11 Πειραματικό και Υπολογισμένο με FEM πάχος WL

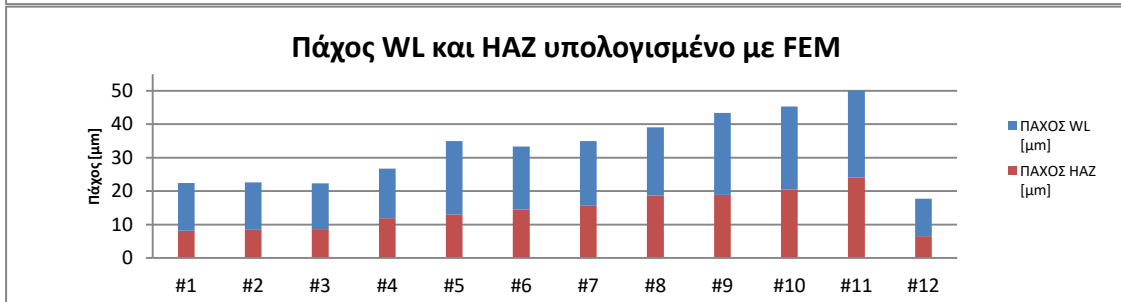
α)



β)



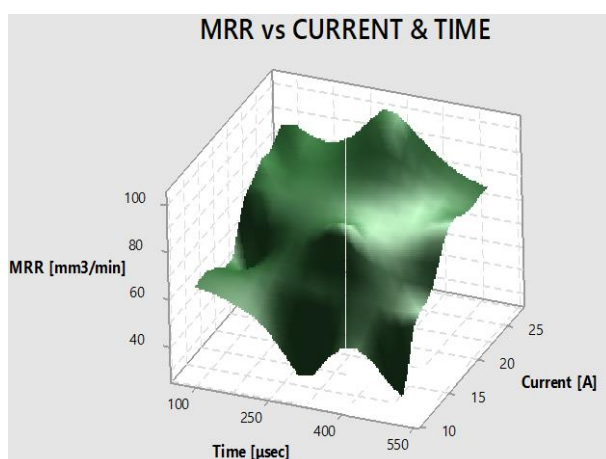
γ)



Διάγραμμα 12 Πάχος WL και HAZ υπολογισμένα με FEM α) Πάχος WL συναρτήσει του χρόνου παλμού β) Πάχος HAZ συναρτήσει του χρόνου παλμού γ) Αθροιστικό διάγραμμα πάχους WL+HAZ για κάθε περίπτωση

## 9. Συμπεράσματα

Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM), αν και εφαρμόζεται πολλές δεκαετίες και είναι μια από τις πρώτες μη συμβατικές κατεργασίες, με σχετικά απλή αρχή λειτουργίας, παραμένει μια πολυσύνθετη τεχνική, καθώς φαινόμενα στοχαστικής φύσεως λαμβάνουν χώρα, με τη μελέτη και μοντελοποίηση της να παραμένει ενεργό επιστημονικό και ερευνητικό πεδίο. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει ενιαίο και απόλυτα ακριβές πλαίσιο, αλλά αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις, ανάλογα με τις αναγκαίες απλοποιήσεις που έχουν γίνει από την κάθε ερευνητική ομάδα. Τα σημεία, στα οποία εστιάζουν συνήθως οι μελέτες είναι ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR), η φθορά του ηλεκτροδίου (TWR), η τοπογραφία – η ποιότητα επιφανείας και πως τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζονται από τις συνθήκες κατεργασίας και συγκεκριμένα από την ένταση ρεύματος κατεργασίας ( $I_p$ ), την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού ( $V_p$ ), το χρόνο του κάθε παλμού ( $T_{on}$ ), το duty factor ( $\eta$ ), και το υλικό τεμαχίου, ηλεκτροδίου και διηλεκτρικού μέσου. Στη παρούσα εργασία έγινε ανάπτυξη ενός θερμικού μοντέλου για μοναδιαίο σπινθήρα, υπολογίστηκε το θεωρητικό MRR και χαρακτηριστικά του σχηματιζόμενου κρατήρα, ενώ τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν με βάση πειραματικά δεδομένα. Στην πειραματική διαδικασία οι συνθήκες που επιλέχθηκαν να μεταβάλλονται είναι η ένταση ρεύματος  $I_p$ , και ο χρόνος παλμού  $T_{on}$ .



Διάγραμμα 13 MRR συναρτήσει της έντασης ρεύματος και του χρόνου παλμού κατεργασίας

Τα πειράματα έγιναν για εργαλειοχάλυβα AISI O1, με υλικό ηλεκτροδίου χαλκό και διηλεκτρικό μέσο έλαιο. Η ένταση ρεύματος κατεργασίας κυμάνθηκε από  $I_p=27$  έως 12 [A] και ο χρόνος παλμού  $T_{on}$  από 100 έως 500 [µsec]. Τα αποτελέσματα του MRR είναι τα αναμενόμενα με τον ρυθμό αποβολής υλικού να έχει άμεση εξάρτηση τόσο από την ένταση ρεύματος όσο και από το χρόνο παλμού (Διάγραμμα 13). Η σχέση αυτή αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 13 όπου

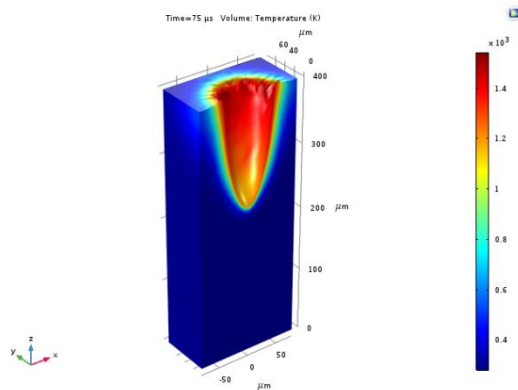
φαίνεται η γραμμική σχεδόν μεταβολή του MRR συναρτήσει της μέσης ισχύος της κατεργασίας ( $P_m \cdot \eta \cdot f_{eff}$ ). Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας έγινε και μέτρηση τραχύτητας της κατεργασμένης επιφάνειας, με υπολογισμό μέσης και μέγιστης τραχύτητας ( $R_a$  και  $R_t$  αντίστοιχα).

Στη συνέχεια, όπως προαναφέρθηκε, έπειτα από την απαραίτητη βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναπτύχθηκε θερμικό μοντέλο μοναδιαίου σπινθήρα, το οποίο επιλύθηκε με υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Στην προσπάθεια για πιο ρεαλιστικά και ακριβή αποτελέσματα οι βασικές παραδοχές – οριακές συνθήκες του μοντέλου είναι:

- **Επίλυση Αγωγής Θερμότητας:** Πεπερασμένα στοιχεία (FEM).
- **Πηγή Θερμότητας:** Η ακτίνα της πηγής να ορίζεται βάσει ημι εμπειρικών αναλυτικών σχέσεων  $r_{p1,2}(I_p, T_{on})$ , με τη χρήση δύο διαφορετικών σχέσεων προκειμένου να γίνει σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

- **Ένταση πηγής θερμότητας:** Ποσοστό απορρόφησης από το τεμάχιο βάσει αναλυτικών σχέσεων της βιβλιογραφίας και οι οποίες έχουν προκύψει από “reverse engineering”  $F_W(I_p, T_{on}, r_p)$ .
- **Κατανομή πηγής θερμότητας:** Κανονική 3DGaussian κατανομή
- **Ιδιότητες Υλικών:** Θερμοκρασιακά μεταβαλλόμενες, ενώ λαμβάνεται υπ’ όψιν και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού.
- **Γεωμετρία τεμαχίου:** Χρήση μεταβαλλόμενης γεωμετρίας τεμαχίου, κινούμενου πλέγματος και επίλυση είτε σε ένα είτε σε δύο επίπεδα συμμετρίας.

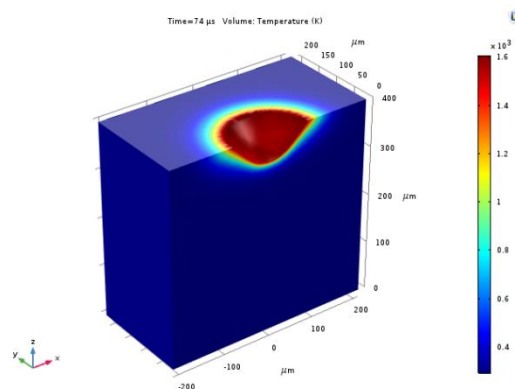
Από την επίλυση του θερμικού μοντέλου προέκυψε ο όγκος ενός θεωρητικά σχηματιζόμενου κρατήρα βάσει του οποίου και συναρτήσε της συχνότητας παλμών έγινε υπολογισμός του θεωρητικού MRR. Το θεωρητικό MRR συνδέεται με το πειραματικό μέσω ενός συντελεστή απόπλυσης PFE (Plasma Flushing Efficiency), ο οποίος υπολογίστηκε και συγκρίθηκε με θεωρητικό PFE από αναλυτική σχέση της βιβλιογραφίας  $PFE(I_p, T_{on})$ . Οι υπολογισμοί έγιναν για δύο τιμές ακτίνας πλάσματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως ως ενεργειακή προσέγγιση που ουσιαστικά είναι το θερμικό μοντέλο, σε αριθμητικές τιμές δεν διαφέρουν ιδιαίτερα με μέσο όρο απόκλισης (από τις θεωρητικές τιμές) -2% και -10% επιβεβαιώνοντας ταυτόχρονα την ικανότητα πρόβλεψης του MRR ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας (Διάγραμμα 7). Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στην υπολογιζόμενη γεωμετρία του θεωρητικά σχηματιζόμενου κρατήρα, η οποία στην περίπτωση χρήσης στους υπολογισμούς της ακτίνας  $r_{p1}$  είναι μη ρεαλιστική και αποδεκτή, σε αντίθεση με αυτή που προκύπτει από τη χρήση της ακτίνας  $r_{p2}$  (Εικόνα 75).



μοντέλου μπορεί επίσης να γίνει υπολογισμός θεωρητικών χαρακτηριστικών του κρατήρα, όπως το βάθος και η διάμετρος του.

Έγινε ενδεικτικά σε συγκεκριμένα δοκίμια παρατήρηση της κατεργασμένης επιφάνειας και της κάθετης τομής της σε οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM). Επιβεβαιώθηκε ο σχηματισμός περιοχής από επαναστεροποιημένο υλικό (White Layer),

και η ύπαρξη τυπικών σχηματισμών στην επιφάνεια (ρηγματώσεις/επικαθήσεις). Υπολογίστηκε, επίσης, μέσω οριακών συνθηκών θερμοκρασίας στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το προβλεπόμενο πάχος του WL και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ), με το πάχος του WL να συγκρίνεται με το πειραματικά προσδιορισθέν. Συμπεραίνεται ικανοποιητική δυνατότητα πρόβλεψης ενώ επιβεβαιώνεται η εξάρτηση του πάχους του WL κυρίως από το χρόνο παλμού  $T_{on}$  και δευτερεύοντος



**Εικόνα 75** Οι σχηματιζόμενοι κρατήρες για ίδιες συνθήκες κατεργασίας ( $I_p=24[A]$  &  $T_{on}=75[\mu\text{sec}]$ )  
 a) με χρήση ακτίνα πλάσματος  $r_{p1}$   
 b) με χρήση ακτίνας πλάσματος  $r_{p2}$

από την ένταση ρεύματος κατεργασίας  $I_p$ . Η στοιχειακή ανάλυση, τέλος, έδειξε την αναμενόμενη και ιδιαίτερα αυξημένη συγκέντρωση άνθρακα επιφανειακά, όπως και την «μετανάστευση» υλικών – στοιχείων από το διηλεκτρικό μέσο στην επιφάνεια του τεμαχίου.

**Κλείνοντας ένα γενικό συμπέρασμα μπορεί να είναι ότι η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης είναι αρκετά πολύπλοκη με τη μοντελοποίηση της ιδιαίτερα απαιτητική. Τα θερμικά μοντέλα είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στα δεδομένα εισόδου, και τα αποτελέσματά τους διαφέρουν ανάλογα με τις οριακές συνθήκες, που έχουν επιλεγεί. Παρ' όλα αυτά με τη σωστή, συστηματική και συντηρητική προσέγγιση μπορεί να υπάρξει ικανοποιητικής ακρίβειας μοντελοποίηση, η οποία θα βελτιώνεται δυναμικά καθώς μέσω έρευνας και πειράματος θα κατανοούνται επαρκέστερα τα φαινόμενα, οι σχέσεις – συσχετίσεις που χρησιμοποιούνται θα αποκτούν μεγαλύτερη ακρίβεια και «καθολικότερη» ισχύ, ενώ θα «χτίζεται» μια ακαδημαϊκή – ερευνητική – βιομηχανική βάση δεδομένων σχετικά με τη συγκεκριμένη μη συμβατική κατεργασία.**



## Βιβλιογραφία

1. H.S. Payal, B.L. Sethi, (2003), “Nonconventional Machining Process as Viable Alternatives for Production with Specific Reference to Electrical Discharge Machining”, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 62, pp 678 – 682.
2. <http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/nontraditionalmachining.htm>
3. <https://www.slideshare.net/umairbukhari3/conventional-machining-vs-non-conventional-machining>
4. Sushil Kumar Choudhary, R. S. Jadoun, (2014), “Current Advanced Research Development of Electric Discharge Machining (EDM): A Review, *International Journal of Research in Advent Technology*, Vol. 2, pp 273 – 297.
5. M. P. Jahan, (2015), *Electrical Discharge Machining*, Nova Science Publishers, New York.
6. Elman C. Jameson, (2001), *Electrical Discharge Machining*, SME, USA.
7. Γ. Ν. Θουρμούλόπουλος, (2009), *Εισαγωγή στη Φυσική Πλάσματος*, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
8. Παναγιώτης Δημητρακέλης, (2014), *Χημική Εναπόθεση Μικροκρυσταλλικού Υδρογονωμένου Πυριτίου με Πλάσμα υψηλής Πυκνότητας Ηλεκτρονίων*, Phd. Thesis, Πανεπιστήμιο Πατρών.
9. Lazarenko, (1943), *About the inversion of metal erosion and methods to fight ravage of contacts*, WEI Institute, Moscow.
10. Schumacher, (2004), “After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol 149, pp 376 – 381.
11. M. P. Jahan, (2009), *Micro EDM based Multi process Machining of Tungsten Carbide*, Phd. Thesis, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore.
12. Michael A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg, (2005), *Principles of Plasma Discharges and Material Processing*, Wiley, USA.
13. Meek, Craggs, (1978), *Electrical breakdown of gases*, Wiley, New York.
14. Raizer, (1991), *Gas discharge physics*, Springer – Verlag, Berlin.
15. Loeb, L.B. Meek, (1941), *The mechanism of the electric spark*, Stanford University Press.
16. Kolb, Joshi, Xiao, Schoenbach, (2008), “Steamers in water and other dielectric liquids”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41(23).
17. Schoenbach, Kolb, Xiao, Katsuki, Minamitani, Yoshi, (2008), “Electrical breakdown of water in microgaps”, *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 17.
18. Schulze, Lauter, Wollenberg, Storr, Rehbein, (2001), “Investigation of the pre-ignition stage in EDM”, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium for Electromachining*, pp 141 – 152.
19. Schulze, Wollenberg, Lauter, Storr, Rehbein, (2003), “Measurement equipment for investigation of the influence of viscosity of dielectric working fluids on spark erosion”, *Dielectrics and Electrical insulation*, IEEE Transactions, pp 985 – 993.
20. Kunieda, Takanobu, (1998), “Factors determine discharge location in EDM”, *International Journal of Electrical Machining*, Vol. 3, pp 53 – 58.

21. Schumacher, (1990), "About the role of debris in the gap during electrical discharge machining", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 39, pp 197 – 199.
22. Gatto, Bassoli, Denti, Juliano, (2013), "Bridges of debris, in the EDM process: Going beyond thermo electrical model", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 213, pp 349 – 360.
23. Braginskii, (1958), "Theory of the development of a spark channel", *Soviet Physics JETP – USSR*, Vol. 7, pp 1068 – 1074.
24. Skvortsov, Komelkov, Kuznetsov, (1961), "Expansion of a spark channel in a liquid", *Soviet Physics – Technical Physics*, Vol. 5, pp 1100 – 1112.
25. Robinson, (1973), "Finite difference simulation of an electrical discharge in water", *Journal of Applied Physics*, Vol. 44, pp 76 – 81.
26. Zahn, Forster, Kelley, Hebner Jr, (1982), "Hydrodynamic wave propagation after electrical breakdown", *Journal of Electrostatics*, Vol. 12, pp 535 – 546.
27. Eubank, Patel, Barrufet, Bozkurt, (1993), "Theoretical models of the electrical discharge machining process III. The variable mass, cylindrical plasma model", *Journal of Applied Physics*, Vol.73, pp 7900 – 7909.
28. Pandey, Jilani, (1986), "Plasma Channel Growth and the Re solidified Layer in EDM" *Precision Engineering*, Vol. 8, pp 104 – 110.
29. Utsumi, (1971), "Measurements of cathode spot temperature in vacuum arcs", *Applied Physics Letters*, Vol. 18, pp 218 – 220.
30. Descoeudres, Walder, Perez, (2005), "Time-resolved imaging and spatially-resolved spectroscopy of electrical discharge machining plasma", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 38.
31. Kojima, Natsu, Kunieda, (2008), "Spectroscopic measurement of arc plasma diameter in EDM", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 57, pp 203 – 207.
32. Kitamura, Kunieda, (2014), "Clarification of EDM gap phenomena using transparent electrodes", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 63, pp 213 – 216.
33. Maradia, Hollenstein, Wegener, (2015), "Temporal characteristics of the pulsed electric discharges in small gaps filled with hydrocarbon oil", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 48.
34. Tanabe, Kusano, Ito, (2008), "High-speed imaging system for observation of discharge phenomena, 28<sup>th</sup> International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, pp. 71260 – 71269.
35. Joshi, Pande, (2010), "Thermo – physical modeling of die – sinking EDM process", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 12, pp 45 – 56.
36. Benilov, (2008), "Understanding and modeling plasma – electrode interaction in high – pressure arc discharges: A review", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41.
37. Heberlein, Mentel, Pfender, (2010), "The anode region of electric arcs: A survey", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 43.
38. Konig, Wertheim, Zvirin, Roren, (1975), "Material removal and energy distribution in electrical discharge machining", *Annals of the CIRP*, Vol. 24, pp 95 – 100.
39. Xia, Kunieda, Nishiwaki, (1996), "Removal amount difference between anode and cathode in EDM process", *International Journal of Electrical Machining* 1, pp 45 – 52.

40. Revaz, Witz, Flukiger, (2005), "Properties of the plasma channel in liquid discharges inferred from cathode local temperature measurements", *Journal of Applied Physics*, Vol. 98.
41. Revaz, Flükiger, Carron, Rappaz, (2005), "A device for measurements of the temperature response to single discharges with high local resolution and fast response time", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 118, pp 238 – 243.
42. Perez, Rojas, Walder, Flükiger, (2004), "Theoretical modeling of energy balance in electro – erosion", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, pp 198 – 203.
43. Singh, (2012), "Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 55, pp 5053 – 5064.
44. Zhang, Liu, Shen, Li, Ji, Cai, (2014), "A novel method of determining energy distribution and plasma diameter of EDM", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, pp 425 – 432.
45. Carslaw, Jaeger, (1959), *Conduction of heat in solids*, Oxford: Clarendon Press.
46. Van Dijck, (1973), *Physico – mathematical analysis of the EDM process*, PhD Thesis, Katholieke University, Leuven, Netherlands.
47. Zolotykh, (1960), "The mechanism of electrical erosion of metals in liquid dielectric Media", *Soviet Physics - Technical Physics*, Vol. 4(12), pp 1370 – 1373.
48. Zolotykh, (1970), "Phänomenologische Theorie der Funkenerosiven Massbearbeitung", *International Symposium for Electromachining*, pp. 185-191.
49. Zingerman, (1959), "Regarding the problem of the volume of molten metal during electrical erosion", *Soviet Physics-Solid State*, Vol. 1(2), pp 255 – 260.
50. Yeo, Kurnia, Tan, (2008), "Critical assessment and numerical comparison of electro-thermal models in EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203(1–3), pp 241 – 251.
51. DiBitonto, Eubank, Patel, Barrufet, (1989), "Theoretical models of the electrical discharge machining process I: A simple cathode erosion model", *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, pp 4095 – 4103.
52. Patel, Barrufet, Eubank, Di Bitonto, (1989), "Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model", *Journal of Applied Physics*, Vol. 66(9), pp 4104 – 4111.
53. Xia, (1995) *Study on Factors Affecting Electrode Wear Ratio and Improvement of Machining Characteristics in EDM Process*, PhD Thesis, Tokyo University of Agriculture and Technology.
54. Zahiruddin, Kunieda, (2012), "Comparison of energy and removal efficiencies between micro and macro EDM", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 61(1), pp 187 – 190.
55. Dhanik, Joshi, (2005), "Modeling of a single resistance capacitance pulse discharge in micro – electro discharge machining", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 127, pp 759 – 767.
56. Singh, Ghosh, (1999), "A thermo – electric model of material removal during electric discharge machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 39, pp 669 – 682.

57. Hockenberry, Williams, (1967), "Dynamic Evolution of Events Accompanying the Low – Voltage Discharges Employed in EDM", *Industry and General Applications*, IEEE Transactions on IGA – 3, pp 302 – 309.
58. Samela, Nordlund, (2008), "Atomistic Simulation of the Transition from Atomistic to Macroscopic Cratering", *Physical Review Letters*, Vol. 101.
59. Timko, Djurabekova, Nordlund, Costelle, Matyash, Schneider, Toerklep, Arnau – Izquierdo, Descoeudres, Calatroni, Taborelli, Wuensch, (2010), "Mechanism of surface modification in the plasma – surface interaction in electrical arcs", *Physical Review B*, Vol. 81(18).
60. Yang, Guo, Chen, Kunieda, (2010), "Study on Influences of Material Micro – Structure in Micro – EDM by Molecular Dynamics Simulation", *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining*, pp 717 – 720.
61. Yang, Guo, Chen, Kunieda, (2011), "Molecular dynamics simulation of the material removal mechanism in micro – EDM", *Precision Engineering*, Vol. 35(1), pp 51 – 57.
62. Witz, Revaz, Flukiger, (2005), *Heat transfer and Marangoni effect in the electron discharge machining (EDM) process*, COMSOL Multiphysics User's conference, Paris.
63. Tao, Ni, Shih, (2012), "Modeling of the Anode Crater Formation in Electrical Discharge Machining", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 134.
64. Takezawa, Kokubo, Mohri, Horio, Yanagida, Saito, (2007), "A study on single discharge machining with low melting temperature alloy", *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining*, ISEM XV, pp 69 – 73.
65. Hayakawa, Sasaki, Itoigawa, Nakamura, (2013), "Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining", *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp 174 – 179.
66. Maradia, Knaak, Boos, Boccadoro, Stirnimann, Wegener, (2013), "EDM process analysis using high – speed imaging", *Proceedings of the 13th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, pp 39 – 42.
67. Mesyats, (1984), "Microexplosions on a cathode aroused by plasma – metal interaction", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 128-129, pp 618 – 621.
68. Akematsu, Kageyama, Mohri, Murayama, (2007), "Effect of Discharge Current on the Occurrence Time of Cavitations", *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining*, pp 105 – 109.
69. Zhang, Liu, Shen, Ji, Li, Zheng, (2014), "Investigation on the influence of the dielectrics on the material removal characteristics of EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp 1052 – 1061.
70. Yoshida, Hanaoka, Flynn, Mc Geough, (2011), "Observation of craters formed by single pulse discharge by stacking cross sectional shapes: comparison of craters in liquid and air", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp 1311 – 1318.
71. Wang, Han, Cheng, Zhao, (2012), "Debris and bubble movements during electrical discharge machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 58, pp 11 – 18.
72. Kitamura, Kunieda, Abe, (2013), "High –speed imaging of EDM gap phenomena using transparent electrodes", *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp 314 – 319.

73. Kitamura, Kunieda, (2015), "Observation of relationship between bubbles and discharge locations in EDM using transparent electrodes", *Precision Engineering*, Vol. 40, pp 26 – 32.
74. Hayakawa, Sudo, Omiya, Itoigawa, Nakamura, (2007), "Machining Properties of Electrical Discharge Machining at Gas – Liquid Interface", *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining*, pp. 87 – 91.
75. Hayakawa, Doke, Itoigawa, Nakamura, (2010), "Observation of Flying Debris Scattered from Discharge Point in EDM Process", *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining*, pp. 121 – 125.
76. Zhang, Liu, Ji, Zheng, Shen, Wang, (2013), "Transient dynamics simulation of the electrical discharge – generated bubble in sinking EDM", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, pp 1707 – 1715.
77. Pontelandolfo, Haas, Perez, (2013), "Particle hydrodynamics of the electrical discharge machining process Part 2: Die sinking process", *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp 47 – 52.
78. Liao, Wu, Liang, (2013), "Study of debris exclusion effect in linear motor equipped die – sinking EDM process", *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp 123 – 128.
79. Wang, Han, (2014), "Simulation model of debris and bubble movement in consecutive – pulse discharge of electrical discharge machining", *International Journal of Machining Tool & Manufacture*, Vol. 77, pp 56 – 65.
80. Schumacher, (2004), "After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, pp 376 – 381.
81. Maradia, Wegener, Boccadoro, Knaak, Stirnimann, (2013), "Investigation of the scaling effects in meso – micro EDM", *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers.
82. Natsu, Kunieda, Nishiwaki, (2004), "Study on influence of inter – electrode atmosphere on carbon adhesion and removal amount", *International Journal of Electrical Machining*, Vol. 9, pp 43 – 50.
83. Mohri, Suzuki, Saito, (1995), "Time dependence of electrode wear in EDM", *Proceedings of the 11th International Symposium for Electro Machining*, Lausanne Switzerland, pp. 447 – 454.
84. Mohri, Suzuki, Furuya, Saito, Kobayashi, (1995), "Electrode Wear Process in Electrical Discharge Machinings", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 44, pp 165 – 168.
85. Murray, Zdebski, Clare, (2012), "Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro – EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp 1537 – 1547.
86. Itoh, (1994), "Method and apparatus for sink – type electrical discharge machining with control of pyrographite buildup" *US Patents* 5,369,239.
87. Klocke, Schwade, Klink, Veselovac, (2013), "Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades", *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp 163 – 167.

88. Maradia, Boccadoro, Stirnimann, Kuster, Wegener, (2015), "Electrode wear protection mechanism in meso – micro EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 223, pp 22 – 33.
89. Operating Instructions AGIE
90. Kan Wang, Qinhe Zhang, Guang Zhu, Qingyu Liu, Yuhua Huang, Jianhua Zhang, (2017), "Research on the energy distribution of micro EDM by utilization of electro – thermal model", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 170.
91. Yinsheng Fana, Jicheng Baia, Qiang Lia, Chaojiang Lib, Yan Caoa, Zhengkai Lia, (2016), "Research on maintaining voltage of spark discharge in EDM", *CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining*, Vol. 42, pp 28 – 33.
92. Marin Gostimirovic, Pavel Kovac, Milenko Sekulic, Branko Skoric, (2012), "Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, pp 173 – 179.
93. H.K. Kansal, Sehijpal Singh, Pradeep Kumar, (2008), "Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 47, pp 1217 – 1237.
94. Harminder Singh, (2012), Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp 5053 – 5064.
95. Mohammadreza Shabgard, Reza Ahmadi, Mirsadegh Seyedzavvar, Samad Nadimi Bavi Oliaei, (2013), "Mathematical and numerical modeling of the effect of input – parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 65, pp 79 – 87.
96. U. K. Vishwakarma, A. Dvivedi, P. Kumar, (2012), "FEA Modeling of Material Removal Rate in Electrical Discharge Machining of Al6063/SiC Composites", *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 6.
97. J.F. Liu, Y.B. Guo, (2016), "Modeling of White Layer Formation in Electric Discharge Machining, (EDM) by Incorporating Massive Random Discharge Characteristics", *CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining*, Vol. 42, pp 697 – 702.
98. Jyrki Mettinen, Seppo Louhenkilpi, (1994), "Calculation of Thermophysical Properties of Carbon and Low Alloyed Steels for Modeling of Solidification Processes", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 25.
99. Jean – Marc Franssen, Paulo Vila Real, (2012), "Fire Design for Steels", *European Convention for Constructional Steelwork*, ECCS.
100. Rohit Rajendran, Dr. Vendan, (2014), "Study of Workpiece Thermal Profile in Electrical Discharge Machining Process", *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 3, pp 3498 – 3503.
101. Weingärtner, Kustera, Wegener, (2012), "Modeling and simulation of Electrical discharge machining", *1<sup>st</sup> CIRP Global Web Conference: Interdisciplinary Research in Production Engineering*, Vol. 2, pp 74 – 78.
102. Massarelli, Marchionni, (1977), "Morphology of spark-affected surface layers produced on pure iron and steels by electro discharge machining", *Metallurgical Technology*, Vol. 4, pp 100-105.