



MTL
NTUA

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των
Κατεργασιών

Ηλεκτροδιάβρωση σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ανθρακονήματα

Διπλωματική Εργασία
Διονύσιος Στ. Τζάνος mc17631

Επίβλεψη: Δρ. Δημήτριος Ε. Μανωλάκος,
Καθηγητής ΕΜΠ

Πειραιάς, Φεβρουάριος 2024



MTL
NTUA

National Technical University of
Athens
School of Mechanical Engineering
Section of Machining Technology

Electro-Discharge Machining in Carbon Fiber Reinforced Plastic composites' samples

Diploma Thesis

Dionysios St. Tzanos mc17631

Supervision: Dr. Dimitrios E. Manolakos,
Professor at NTUA

Piraeus, February 2024

Υπεύθυνη Δήλωση για λογοκλοπή και κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με αυτούς τους κανονισμούς, δεν έχω προβεί σε ουδεμία ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Όνοματεπώνυμο: Διονύσιος Στ. Τζάνος

Ευχαριστίες

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε και τη συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα ακόμη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους δικούς μου ανθρώπους και τα αγαπημένα μου πρόσωπα για τη συνολική στήριξη, βοήθεια και υπομονή που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	5
Περίληψη	8
Abstract.....	9
Κεφάλαιο 1 – Βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με την Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)	10
1.1 Ορισμός Ηλεκτροδιάβρωσης.....	10
1.2 Ιστορική αναδρομή για την ηλεκτροδιάβρωση	11
1.3 Μηχανισμός και Λειτουργία Ηλεκτροδιάβρωσης	12
1.4 Κύρια χαρακτηριστικά της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης – βύθισης	13
1.4.1 Τεμάχιο (TE) προς κατεργασία.....	15
1.4.2 Ηλεκτρόδιο	15
1.4.3 Διηλεκτρικό Μέσο.....	18
1.4.4 Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X - Y	19
1.4.5 Δεξαμενή εργασίας.....	20
1.4.6 Σερβομηχανισμός ελέγχου	20
1.4.7 Μονάδα παροχής ισχύος ή Γεννήτρια παλμών	24
1.4.8 Σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού μέσου και έκπλυσης	26
1.5 Παράμετροι επιρροής της EDM & Χαρακτηριστικοί δείκτες απόδοσης	28
1.5.1 Παράμετροι επιρροής της κατεργασίας.....	28
1.5.2 Χαρακτηριστικοί δείκτες απόδοσης της κατεργασίας	32
1.6 Εφαρμογές ηλεκτροδιάβρωσης.....	33
Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ανθρακονημάτων.....	34
2.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά.....	34
2.2 Ορισμός συνθέτων υλικών	35
2.3 Σύνθετα Υλικά ρητινικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες.....	36
2.4 Ίνες Άνθρακα.....	37
2.4.1 Τρόπος παραγωγής ανθρακονημάτων	38
2.4.2 Μηχανικές ιδιότητες ανθρακονημάτων	39
2.4.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες ανθρακονημάτων	40
2.5 Τα ανθρακονήματα στην ηλεκτροδιάβρωση	41
Κεφάλαιο 3 – Πειραματικό Μέρος	42
3.1 Πειραματική Διάταξη.....	42
3.2 Δοκίμια & Ηλεκτρόδιο	44
3.3 Σχεδιασμός πειράματος (DOE)	45

3.4 Περιγραφή της ακολουθίας πειραμάτων	46
3.5 Αρχικές Μετρήσεις (Initial Data)	55
Κεφάλαιο 4 – Υπολογιστικό Μέρος & Αποτελέσματα.....	59
4.1 Τρόπος αξιοποίησης των αρχικών μετρήσεων και επεξεργασμένα δεδομένα	59
4.2 Παραμετρικό ημι – εμπειρικό μοντέλο δύο μεταβλητών	70
4.2.1 Ημι-εμπειρική σχέση για το ρυθμό αποβολής υλικού <i>MRR</i>	71
4.2.2 Ημι-εμπειρική σχέση για το μέσο ύψος τραχύτητας <i>Ra</i>	75
4.2.3 Ημι-εμπειρική σχέση για το μέγιστο ύψος τραχύτητας <i>Rt</i>	79
Κεφάλαιο 5 – Μικρογραφική μελέτη κατεργασμένων δοκιμίων	83
5.1 Μορφολογία επεξεργασμένης επιφάνειας	83
5.2 Μικροδομή Υποστρώματος	85
5.3 Παρατήρηση CFRP δοκιμίων κάτω από το μικροσκόπιο	86
5.3.1 Εικόνες μικροσκοπίου από την 1 ^η σειρά δοκιμίων	86
5.3.2 Εικόνες μικροσκοπίου από την 2 ^η σειρά δοκιμίων	88
5.3.3 Φωτογραφίες από την εστίαση του φακού στις ίνες	89
5.3.4 Εικόνες σχετικά με την τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας	91
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα & Περαιτέρω Βήματα	92
6.1 Συμπεράσματα	92
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	94
Κατάλογος Πινάκων	97
Λίστα Διαγραμμάτων	98
Βιβλιογραφία	99

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνιστά μια εμπειρισταωμένη μελέτη περίπτωσης στην κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης σε δοκίμια συνθέτου υλικού ενισχυμένα με ανθρακονήματα. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν οκτώ δοκιμές με δύο διαφορετικά σενάρια συνθηκών κατεργασίας εξετάζοντας συγχρόνως και τέσσερις διαφορετικές γωνίες κοπής. Μετά από κατάλληλο σχεδιασμό πειράματος και εκτέλεση αυτού, αποφανθήκαμε για τον χαρακτηρισμό και την κατεργασιμότητα αυτών των εξόχως σκληρών υλικών μέσω κατάλληλης ποιοτικής και ποσοτικής ανάλυσης.

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμο να δοθεί εκτενές θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τη μη συμβατική κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης, ξεκινώντας από τον ορισμό της και τη λειτουργία της. Μετέπειτα, έγινε λεπτομερής αναφορά στον μηχανισμό αποβολής υλικού μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων, όπου και δεν υφίσταται επαφή μεταξύ εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου. Περιγράφονται λεπτομερώς όλα τα συστήματα που απαρτίζουν μια τυπική μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης – βύθισης και δίδονται τα μεγέθη που επηρεάζουν την κατεργασία αλλά και οι δείκτες απόδοσης αυτής. Εστιάζουμε στις φυσικές, μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των ανθρακονημάτων αλλά και στην συμπεριφορά τους κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης.

Περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία, που αποτελεί την καρδιά της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, αφού πρώτα καταρτιστεί λεπτομερώς ο σχεδιασμός του πειράματος (DOE) και δηλωθούν όλα τα μεγέθη που μετρούνται και είναι πολύτιμα στη συνέχεια. Παρατίθεται πλούσιο εποπτικό υλικό από όλες τις επιμέρους φάσεις των πειραμάτων και δίδονται οι αρχικές μετρήσεις σε έναν ενιαίο πίνακα.

Μέσω κατάλληλου χειρισμού των πρωταρχικών δεδομένων, καταφέραμε να αντιληφθούμε τον τρόπο με τον οποίο οι συνθήκες κοπής επηρεάζουν τις παραμέτρους επίδοσης της κατεργασίας. Έτσι, εξήχθησαν κατάλληλες ποιοτικές αναλογικές σχέσεις μεταξύ τους συναρτήσει και της γωνίας κοπής των δοκιμίων, πάντα για το ίδιο ακριβώς υλικό. Ακόμα, παρουσιάζονται χρήσιμα διαγράμματα που οπτικοποιούν τα αποτελέσματα. Προχωρώντας παρακάτω, κτίζεται ένα διπαραμετρικό μοντέλο έξι εκθετικών συναρτήσεων που επιχειρεί να προβλέψει τις τιμές του ρυθμού αποβολής υλικού, της μέσης τραχύτητας και του μεγίστου ύψους της τραχύτητας. Τούτο πραγματοποιείται με ικανοποιητική ακρίβεια, καθώς παρατηρούνται μέσες τιμές σφαλμάτων που κυμαίνονται εντός ενός εύρους από 10% έως 24%.

Τέλος, μελετώνται μεταλλογραφικά και τα οκτώ κατεργασμένα δοκίμια, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Σημειώνονται στοχευμένες παρατηρήσεις όσον αφορά τη μικροδομή του υλικού, τις ατέλειες, τη διαστρωμάτωση τους, την αποκόλληση των ινών και συνολικά την ποιότητα επιφανείας.

Abstract

The current diploma thesis constitutes a comprehensive case study regarding electro – discharge machining in carbon fiber reinforced composites' specimens. More specifically, eight tests were conducted by examining two different cutting conditions' scenarios and four different cutting angles at the same time. After the proper design of experiment and its execution, we asserted for the characterization and the machinability of this extremely hard material through a suitable qualitative and quantitative analysis.

Firstly, an extensive theoretical background as for electro – discharge machining, is considered appropriate to be given, beginning with its definition and its function. Afterwards, a thorough reference is made to the material removal mechanism through electrical discharges, where no contact is existed between the machined workpiece and the working tool. All the systems which comprise a typical die – sinking EDM machine are described in detail and both all the quantities, which affect the process, and the performance indices are given as well. We zero in on the physical, mechanical and electrical carbon fibers' properties and on their behavior during electro – discharge machining.

The experimental process is the heart of this dissertation and therefore it is described analytically. Before that, the design of experiment (DOE) has been drawn up and all the valuable measured figures are defined too. An enriched photographic gallery regarding the individual experimental stages and the raw data are cited as well.

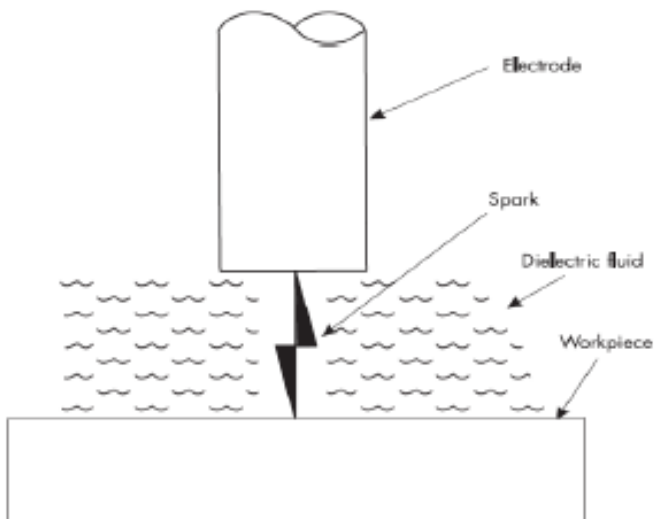
We managed to realize the way that cutting conditions influence the performance indices through the proper transformation of the raw data. Consequently, the suitable qualitative relations among them are extracted with respect to the cutting angle, referred to the same material always. In addition, useful graphs are presented that visualize the results. Going further, a two-parameters model is built which includes six exponential functions in order to predict the values of material removal rate, mean roughness and maximum height of roughness. This computational work is carried out with sufficient accuracy, as mean values of errors are observed fluctuating in a range from 10% to 24%.

Finally, the eight processed samples are studied metallographically with the aid of an electronic microscope. Targeted observations are noted as for the material's microstructure, the defects, the composites' stratification, the fibers' delamination and the overall surface quality.

Κεφάλαιο 1 – Βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με την Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)

1.1 Ορισμός Ηλεκτροδιάβρωσης

Η ηλεκτροδιάβρωση ή κατεργασία μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων αποτελεί μία από τις πιο προσφιλείς μη συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Αξιοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε θερμική και με τη δεύτερη μορφή ενέργειας διενεργείται η «κοπή» του υλικού [1]. Πιο συγκεκριμένα, η ηλεκτροδιάβρωση είναι η κατεργασία στην οποία χρησιμοποιούνται ελεγχόμενοι σπινθήρες ανάμεσα σε ένα τεμάχιο εργασίας (TE) και ένα ηλεκτρόδιο, ενώ είναι παρόν και το κατάλληλο διηλεκτρικό ρευστό. Εποπτικά δίνεται στο παρακάτω σχήμα η κύρια διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης, που συγκροτείται από το ηλεκτρόδιο, το σπινθήρα, το διηλεκτρικό ρευστό και το τεμάχιο προς κατεργασία [2, 5].



Εικόνα 1: Απλοποιημένη διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης [5]

Το μελετώμενο είδος κατεργασίας ανήκει στην μεγάλη κατηγορία των μη συμβατικών κατεργασιών διότι το τεμάχιο (TE) δεν έρχεται σε φυσική επαφή με το εργαλείο (EP). Δεν αξιοποιείται η μηχανική ενέργεια και δεν υφίστανται δυνάμεις εξαιτίας της επαφής, αλλά από απόσταση [3]. Η ηλεκτροδιάβρωση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο μεγάλες οικογένειες:

- ο Ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης – βύθισης (Die - Sinking EDM)
- ο Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (Wire EDM) [4].

1.2 Ιστορική αναδρομή για την ηλεκτροδιάβρωση

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης χρονολογείται από το έτος 1700, όταν τότε ο Benjamin Franklin ανάφερε το φαινόμενο της διάβρωσης μεταλλικών υλικών από ηλεκτρικούς σπινθήρες. 70 χρόνια αργότερα, το 1770 ο Άγγλος Joseph Priestly ανακάλυψε τη διαβρωτική επίδραση εξαιτίας των ηλεκτρικών εκκενώσεων. Ωστόσο, χρειάστηκαν πάνω από 100 χρόνια ώστε η ανακάλυψη αυτή να μεταφραστεί σε ουσιαστική και χρηστική αξία, ώστε να αξιοποιηθούν πρακτικά αυτά τα ευρήματα.

Το 1943 οι Ρώσοι επιστήμονες Lazarenko ανέπτυξαν μια διαδικασία διάβρωσης με ηλεκτρική εκκένωση σε διηλεκτρικό ρευστό ανάμεσα σε δύο αγωγούς, την οποία ονόμασαν Spark Erosion και είναι σήμερα γνωστή ως κατεργασία αφαίρεσης υλικού με ηλεκτρική εκκένωση. Ανέπτυξαν το κύκλωμα Lazarenko, που είναι γνωστό πλέον ως κύκλωμα RC και αξιοποιήθηκε στα πρώτα βήματα της EDM [6]. Η χρησιμοποιούμενη γεννήτρια ήταν κύκλωμα αντιστάσεως – πυκνωτή (RC) και η προαναφερόμενη διαδικασία αποτέλεσε ένα από τα πρότυπα συστήματα EDM παγκοσμίως. Αυτά τα συστήματα επιστρατεύονται σε περιπτώσεις που απαιτείται πολύ καλή ποιότητα επιφανείας και υψηλή διαστατική ακρίβεια.

Από την άλλη πλευρά, και οι Η.Π.Α. είχαν σημειώσει αξιόλογες προσπάθειες στο ίδιο χρονικό διάστημα χάριν στους επιστήμονες Harold Stark, Harding και Jack Beaver. Σημείωσαν τις ωφέλειες από την κατεργασία υλικών με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα μέσω της αξιοποίησης σπινθήρων.

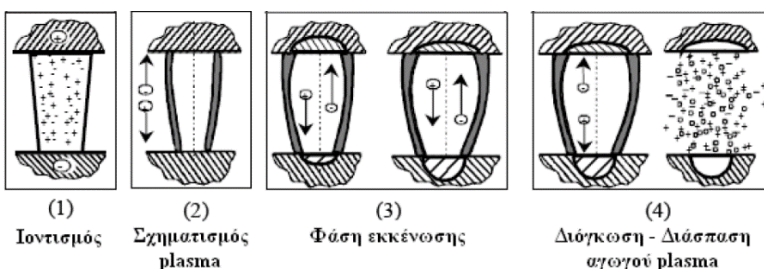
Έπειτα, η τεχνολογία της συγκεκριμένης κατεργασίας εξελίχθηκε ραγδαία και συνιστά αναπόσπαστο μέρος πολλών εφαρμογών (π.χ. κατασκευή καλουπιών και πρωτοτύπων ή εργαλείων). Η ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης – βύθισης είναι προγενέστερη της αντίστοιχης του σύρματος καθώς η πρώτη επινοήθηκε την δεκαετία του 1940 ενώ η δεύτερη την ομολογή του 1970 [1].

1.3 Μηχανισμός και Λειτουργία Ηλεκτροδιάβρωσης

Η αποβολή του υλικού κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης στηρίζεται στο γεγονός ότι η ενέργεια αλλάζει μορφή από ηλεκτρική σε θερμική μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ δύο ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών διαφορετικής πολικότητας. Συγχρόνως, ενυπάρχει και το διηλεκτρικό ρευστό, που κυκλοφορεί στο διάκενο κατεργασίας υπό πίεση και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα της ηλεκτροδιάβρωσης.

Για να εκκινήσει η κοπή είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού ΔV μεταξύ του τεμαχίου (TE) προς κατεργασία και του ηλεκτρικά αγώγιμου ηλεκτροδίου με ένα πολύ μικρό διάκενο κατεργασίας της τάξεως των μm . Όσο το ηλεκτρόδιο πλησιάζει το τεμάχιο, παρουσία του διηλεκτρικού μέσου, το οποίο μπορεί να παρέχει μονωτικό και ψυκτικό ρόλο, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου συνεχώς αυξάνεται, όπου γίνεται μέγιστη όταν η απόσταση τεμαχίου – ηλεκτροδίου γίνει η ελάχιστη δυνατή. Εξαιτίας της στήλης έντονης ηλεκτρομαγνητικής ροής, η διηλεκτρική σταθερά του ρευστού σπάει και σχηματίζεται ηλεκτρικός σπινθήρας. Αυτός ο ηλεκτρικός σπινθήρας, ανάμεσα στο τεμάχιο και το ηλεκτρόδιο, είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών από $6000\text{ }^\circ C$ έως $12000\text{ }^\circ C$ με συνέπεια την τήξη και τελικά την εξάχνωση του υλικού τόσο από το ηλεκτρόδιο όσο και από το τεμάχιο εργασίας. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένας κρατήρας και στα δύο μέρη. Η εκλυόμενη θερμότητα, εξαιτίας του σπινθήρα, επιφέρει την καταστροφή του ίδιου του σπινθήρα και έτσι το σύστημα επιστρέφει στην πρότερα κατάσταση. Ένα τμήμα του υλικού, που έχει τηχθεί, ψύχεται και απομακρύνεται μέσω του διηλεκτρικού ρευστού, ενώ το υπόλοιπο μέρος επαναστεροποιείται στην κατεργασμένη επιφάνεια. Η περιοχή όπου εκδηλώνεται ο κάθε σπινθήρας είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα το διηλεκτρικό υγρό να ψύχει γρήγορα το εξάχνωμένο υλικό, το ηλεκτρόδιο και τις επιφάνειες των τεμαχίων προς επεξεργασία. Η διαδικασία, που μόλις περιγράφηκε, επαναλαμβάνεται διαρκώς κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης έως ότου αφαιρεθεί η επιθυμητή ποσότητα υλικού από το τεμάχιο.

Η ένταση του ρεύματος υπολογίζεται από την εφαρμοσμένη διαφορά δυναμικού και την αντίσταση του συστήματος. Παράλληλα, καθορίζει την ενέργεια του σπινθήρα όπως και το διάκενο κατεργασίας. Το απαιτούμενο χρονικό διάστημα για την δημιουργία του σπινθήρα ονομάζεται διάρκεια παλμού και συμβολίζεται με T_{on} ενώ το αντίστοιχο χωρίς σπινθήρα αποκαλείται μεσοδιάστημα T_{off} και αφορά στην αποκατάσταση του συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η επανάληψη της διαδικασίας. Το υλικό, που αφαιρείται εξαιτίας της επενέργειας του σπινθήρα, στερεοποιείται σε μικροσκοπικές σφαίρες, οι οποίες κινούνται άτακτα στο διηλεκτρικό ρευστό και με τη συνδρομή αυτού τελικώς αποβάλλονται [1]. Στην παρακάτω εικόνα, δίνεται και μια εποπτική άποψη του μηχανισμού αποβολής υλικού κατά την ηλεκτροδιάβρωση.



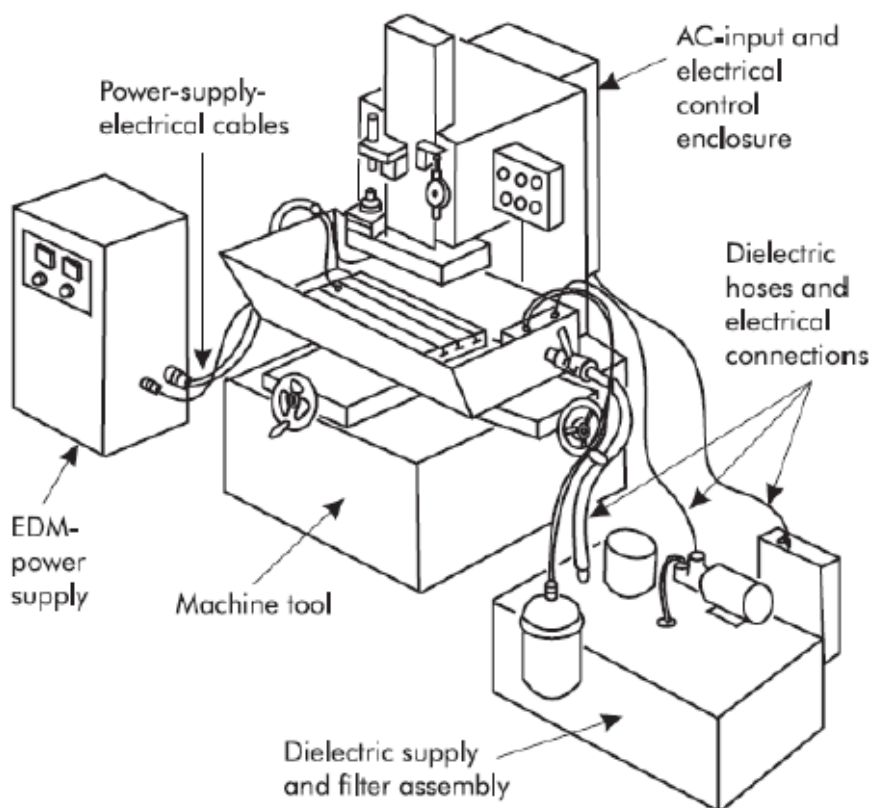
Εικόνα 2: Γραφική αναπαράσταση της λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης [7]

1.4 Κύρια χαρακτηριστικά της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης – βύθισης

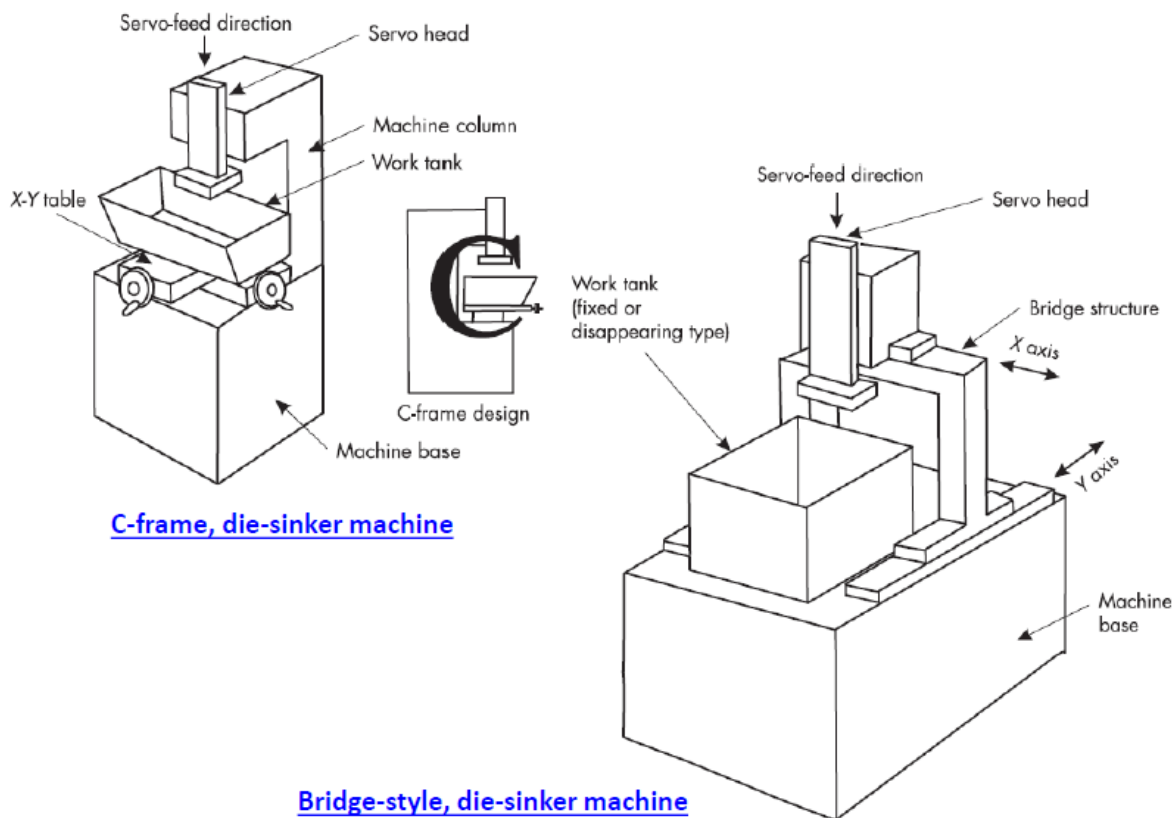
Σε κάθε σχεδιασμό (design) εργαλειομηχανής, ειδικά όταν αφορά σε μη συμβατική κατεργασία, είναι απαραίτητο να προκαθορίζονται οι τρόποι κίνησης του εργαλείου (EP) προς το τεμάχιο (TE), η σχετική κίνηση αυτών, η παροχή ισχύος και η εύρυθμη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων που είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένα και συντελούν όλα μαζί στην αφαίρεση του υλικού. Τα βασικά στοιχεία μιας διάταξης ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης – βύθισης βρίσκονται στην παρακάτω λίστα [1, 5]:

1. Το τεμάχιο προς κατεργασία (workpiece)
2. Το ηλεκτρόδιο (electrode)
3. Το διηλεκτρικό μέσο (dielectric) ▪ ο μηχανισμός κίνησης στους άξονες X – Y (X – Y positioning/machine bed) ▪ ο servo μηχανισμός ελέγχου (servo controller)
4. Η γεννήτρια ηλεκτρικών παλμών (pulse generator)
5. Το δοχείο–δεξαμενή εργασίας (work tank)
6. Η δεξαμενή αποθήκευσης διηλεκτρικού μέσου (dielectric reservoir)
7. Η αντλία και τα φίλτρα διηλεκτρικού μέσου (dielectric pump and filter)

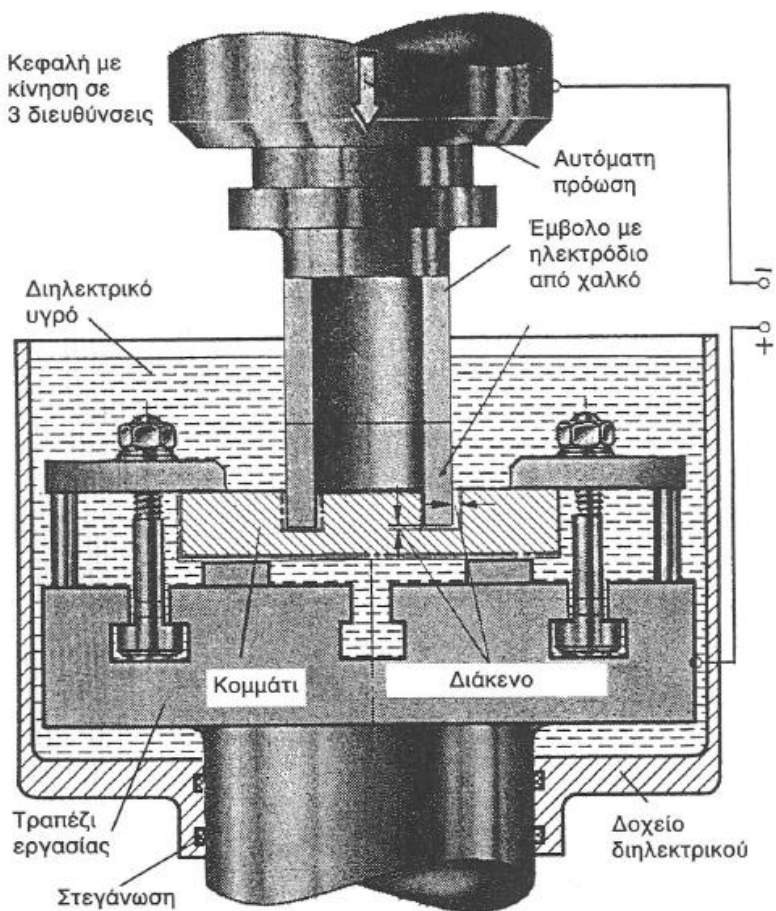
Στις παρακάτω εικόνες, παρέχεται μια άποψη του συγκροτήματος ηλεκτροδιάβρωσης όπως και δύο διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης (C – frame και Bridge - style). Τέλος, δίνεται και το μηχανολογικό σχέδιο μιας τυπικής εργαλειομηχανής EDM βύθισης σε πρόοψη σε τομή [7].



Εικόνα 3: Άποψη του συγκροτήματος ηλεκτροδιάβρωσης [7]



Εικόνα 4: Δύο διαφορετικές διατάξεις EDM βύθισης [7]



Εικόνα 5: Μηχανολογικό σχέδιο εργαλειομηχανής EDM βύθισης ή αποτύπωσης

1.4.1 Τεμάχιο (TE) προς κατεργασία

Η ηλεκτροδιάβρωση έχει επινοηθεί με σκοπό να κατεργάζεται οποιοδήποτε υλικό, με την προϋπόθεση αυτό να είναι ηλεκτρικά αγωγίμο, ανεξαρτήτως από την αντοχή, την σκληρότητα και από τις διάφορες μηχανικές ιδιότητες του. Λαμβάνονται, ωστόσο, σοβαρά υπόψιν οι θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού του τεμαχίου, εξαιτίας του γεγονότος ότι η κατεργασία εγγενώς στηρίζεται στην μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική. Επομένως, όλες αυτές οι ποσότητες είναι σημαντικές και επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα της αφαίρεσης του υλικού και στην αποδοτικότητα της κατεργασίας [1]. Ο παρακάτω πίνακας συλλέγει τις ιδιότητες που επηρεάζουν περισσότερο και πρέπει να προσμετρώνται όσον αφορά το τεμάχιο της κατεργασίας:

Παράμετροι σχετικά με το τεμάχιο (TE) προς κατεργασία	
Υλικό (Επιμέρους Ιδιότητες)	Διαστάσεις (Αυτές καθ' αυτές)
1. Πυκνότητα	
2. Θερμοκρασία Τήξεως	
3. Θερμοκρασία Βρασμού	
4. Θερμική Αγωγιμότητα	
5. Θερμοχωρητικότητα	
6. Συντελεστής Θερμικής Διαστολής	
7. Θερμότητα Σχηματισμού	
8. Ηλεκτρική Αντίσταση	
9. Σκληρότητα	
10. Μέτρο Ελαστικότητας	

Πίνακας 1: Ιδιότητες του τεμαχίου που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της EDM

1.4.2 Ηλεκτρόδιο

Το ηλεκτρόδιο συνιστά πολύτιμο εταίρο της κοπής. Και αυτό γιατί ενόσω εξελίσσεται η κατεργασία πραγματοποιείται αποβολή υλικού και από το τεμάχιο αλλά και από το ηλεκτρόδιο. Το δεύτερο προσβάλλεται από το βομβαρδισμό ηλεκτρονίων ή θετικών ιόντων, τα οποία προσκρούουν στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου απελευθερώνοντας θερμότητα. Το υψηλό ποσό θερμότητας δύναται να εξαχνώσει το ηλεκτρόδιο και ένα μικρό μέρος του να αποβληθεί μέσω του σπινθήρα. Επομένως, για να μην συντελείται σπατάλη και αλόγιστη χρήση ηλεκτροδίων, χρειάζεται το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα να χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή στη φθορά. Σύμφωνα με διάφορες επιστημονικές εργασίες τα κριτήρια εκλογής του υλικού του ηλεκτροδίου μπορούν να συνοψισθούν στην παρακάτω λίστα [1]:

Κριτήρια Επιλογής Ηλεκτροδίων
1. Υλικό & Τύπος τεμαχίου
2. Ρυθμός αποβολής υλικού
3. Αντίσταση-αντοχή σε φθορά
4. Επιθυμητή ποιότητα επιφανείας
5. Κόστος κατεργασίας
6. Κόστος πρώτων υλών
7. Ηλεκτρικές ιδιότητες (ηλεκτρική αντίσταση και αγωγιμότητα)
8. Θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία τήξης, βρασμού, θερμική αγωγιμότητα, θερμοχωρητικότητα)

Πίνακας 2: Κριτήρια εκλογής ηλεκτροδίων στην EDM

Με όμοιο τρόπο, αφού επιλέξουμε το κατάλληλο ηλεκτρόδιο για την επιθυμητή εφαρμογή, απαιτούμε να πληροί τις παρακάτω απαιτήσεις για μια υψηλής αποδόσεως κατεργασία [5, 8]:

Απαιτήσεις από το υλικό του ηλεκτροδίου

- Υψηλό σημείο τήξης
- Υψηλή κατεργασιμότητα
- Χαμηλό κόστος
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Δομική ακεραιότητα
- Μηχανικές ιδιότητες

Πίνακας 3: Απαιτήσεις από το υλικό ηλεκτροδίων στην EDM

Υφίστανται δύο βασικές κατηγορίες υλικών από τα οποία κατασκευάζονται τα ηλεκτρόδια για την μελετώμενη κατεργασία EDM:

- Μεταλλικά ηλεκτρόδια
- Ηλεκτρόδια από γραφίτη

Τα μεταλλικά ηλεκτρόδια εμφανίζουν υψηλή φθορά, όμως παρέχουν ιδιότητες τέτοιες ώστε να αξιοποιούνται σε διαδικασίες φινιρίσματος. Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρόδια από γραφίτη διαθέτουν χαμηλότερο ρυθμό φθοράς και χρησιμεύουν σε κατεργασίες εκχόνδρισης.

Τα υλικά, που αξιοποιούνται ευρέως και έχουν διαδοθεί στην τεχνολογία της EDM, μπορούν να βρεθούν στον παρακάτω επεξηγηματικό πίνακα [8, 9]:

Υλικό Ηλεκτροδίου	Χρήσεις και χαρακτηριστικά
Ορείχαλκος	<ul style="list-style-type: none"> - Ικανοποιητική αντοχή σε φθορά για κατεργασία χάλυβα - Αυξημένοι ρυθμοί φθοράς σε κατεργασίες καρβιδίων βολφραμίου) - Δεν συνιστάται η χρήση του με διατάξεις RC παροχής ισχύος.
Χαλκός	<ul style="list-style-type: none"> - Χρήση είτε ως «καθαρός» χαλκός είτε ως κράμα τελλουρίου – χαλκού - Δυσκολίες στην κατεργασία του με λειαντικούς τροχούς - Χαρακτηριστικά ιδανικά για κατεργασίες «μηδενικής φθοράς»
Χαλκός – Βολφράμιο	<ul style="list-style-type: none"> - Έχει προκύψει από πυροσυσσωμάτωση και συναντάται σε συνήθεις αναλογίες 70% βολφράμιο και 30% χαλκός - Υψηλή αντοχή σε φθορά - Συνήθης χρήση για κατεργασίες καρβιδίων του βολφραμίου - Μειονέκτημα η δυσκολία κατεργασίας του.
Ψευδάργυρος	<ul style="list-style-type: none"> - Χρήση κραμάτων ψευδαργύρου - Υψηλή φθορά

Γραφίτης	<ul style="list-style-type: none"> - Διαφορετικές πυκνότητες, οι οποίες εξαρτώνται από την κοκκομετρία της κόνης - Υψηλή αντοχή σε φθορά και υψηλή κατεργασιμότητα - Χρησιμοποιείται σε κατεργασίες μηδενικής φθοράς - Να αποφεύγεται η χρήση του σε διατάξεις με RC παροχής ισχύος. - Λεπτής κοκκομετρίας γραφίτης διαποτισμένος (infiltrated) με χαλκό - Χαρακτηριστικά του «απλού-καθαρού» γραφίτη + ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού.
Χαλκός – Γραφίτης	

Πίνακας 4: Υλικά ηλεκτροδίων EDM και χαρακτηριστικά τους

Στους επόμενους πίνακες, που ακολουθούν, παρατίθενται σχηματοποιημένα και άμεσα αρχικά η σύγκριση των μεταλλικών ηλεκτροδίων με εκείνα του γραφίτη, στη συνέχεια προτείνονται κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας για κοινώς χρησιμοποιούμενα υλικά στην ηλεκτροδιάβρωση [10, 11].

Μεταλλικά Ηλεκτρόδια	Ηλεκτρόδια Γραφίτη
Χαμηλό κόστος	Υψηλό κόστος
Υψηλή αντοχή	Υψηλή αντοχή
Υψηλή ασφάλεια κατά την κατεργασία	Χαμηλή ασφάλεια κατά την κατεργασία
Δεν απαιτείται έμπειρος χειριστής	Χρειάζεται πεπειραμένο χειριστή
Σχετικά καθαρές επιφάνειες –φινίρισμα	Παραμένουσα σκόνη μετά την κατεργασία
Μικρές δυνατότητες λείανσης	Υψηλή κατεργασιμότητα
Χαμηλότερες ταχύτητες κατεργασίας & Χαμηλός ρυθμός αποβολής υλικού (MRR)	Υψηλές ταχύτητες κατεργασίας & Υψηλός ρυθμός αποβολής υλικού(MRR)
Σχετικά υψηλός ρυθμός φθοράς	Εξαιρετική αντοχή σε φθορά

Πίνακας 5: Πινακοποιημένη σύγκριση ηλεκτροδίων ανάλογα με το υλικό

Τεμάχιο	Ηλεκτρόδιο	Πολικότητα	Συχνότητα για ξεχόνδρισμα	Συχνότητα για φινίρισμα
Χάλυβας	Γραφίτης	Θετική	Χαμηλή	Μεσαία / Υψηλή
Αλουμίνιο	Cu/CuW	Θετική	Χαμηλή	Μεσαία / Υψηλή
Χαλκός	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλή	Υψηλή
Τιτάνιο	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλή	Υψηλή
Καρβίδια	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλή	Υψηλή
Κράμα Cu – W	Cu/CuW	Αρνητική	Υψηλή	Υψηλή

Πίνακας 6: Συνθήκες κατεργασίας για τυπικά υλικά στην EDM

1.4.3 Διηλεκτρικό Μέσο

Τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το τεμάχιο προς κατεργασία είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού. Επομένως κατά την εφαρμογή τάσης (διαφοράς δυναμικού) θα σχηματίζονταν ανεξέλεγκτοι σπινθήρες χωρίς την ταυτόχρονη παρουσία ενός διηλεκτρικού ρευστού. Αρχικά, το διηλεκτρικό μέσο λειτουργεί ως μονωτής έως ότου το ηλεκτρικό πεδίο είναι τόσο μεγάλο οπότε και σπάει η διηλεκτρική του σταθερά. Τότε, επιτρέπεται η δημιουργία ελεγχόμενου σπινθήρα και το διηλεκτρικό ρευστό γίνεται αγωγός του ηλεκτρισμού. Αυτό το σημείο καλείται σημείο ιονισμού και τότε ξεκινά πρακτικά η αποβολή του υλικού από το τεμάχιο εργασίας. Το διηλεκτρικό μέσο λαμβάνει και ρόλο ψύξης συνδράμοντας στην έκπλυση των θραυσμάτων από την κατεργασμένη ζώνη. Η κατάλληλη επιλογή του διηλεκτρικού συνιστά ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας αποτύπωσης – βύθισης EDM και η εκλογή αυτού γίνεται με βάση τη χημική σύνθεση, τη διηλεκτρική σταθερά, το ιξώδες και τον παρεχόμενο ρυθμό ψύξης [1]. Τα πιο συνήθη διηλεκτρικά ρευστά, εν προκειμένω, είναι τα προϊόντα πετρελαίου όπως επίσης και το απιονισμένο νερό, τα οποία θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους της παρούσας υποενότητας.

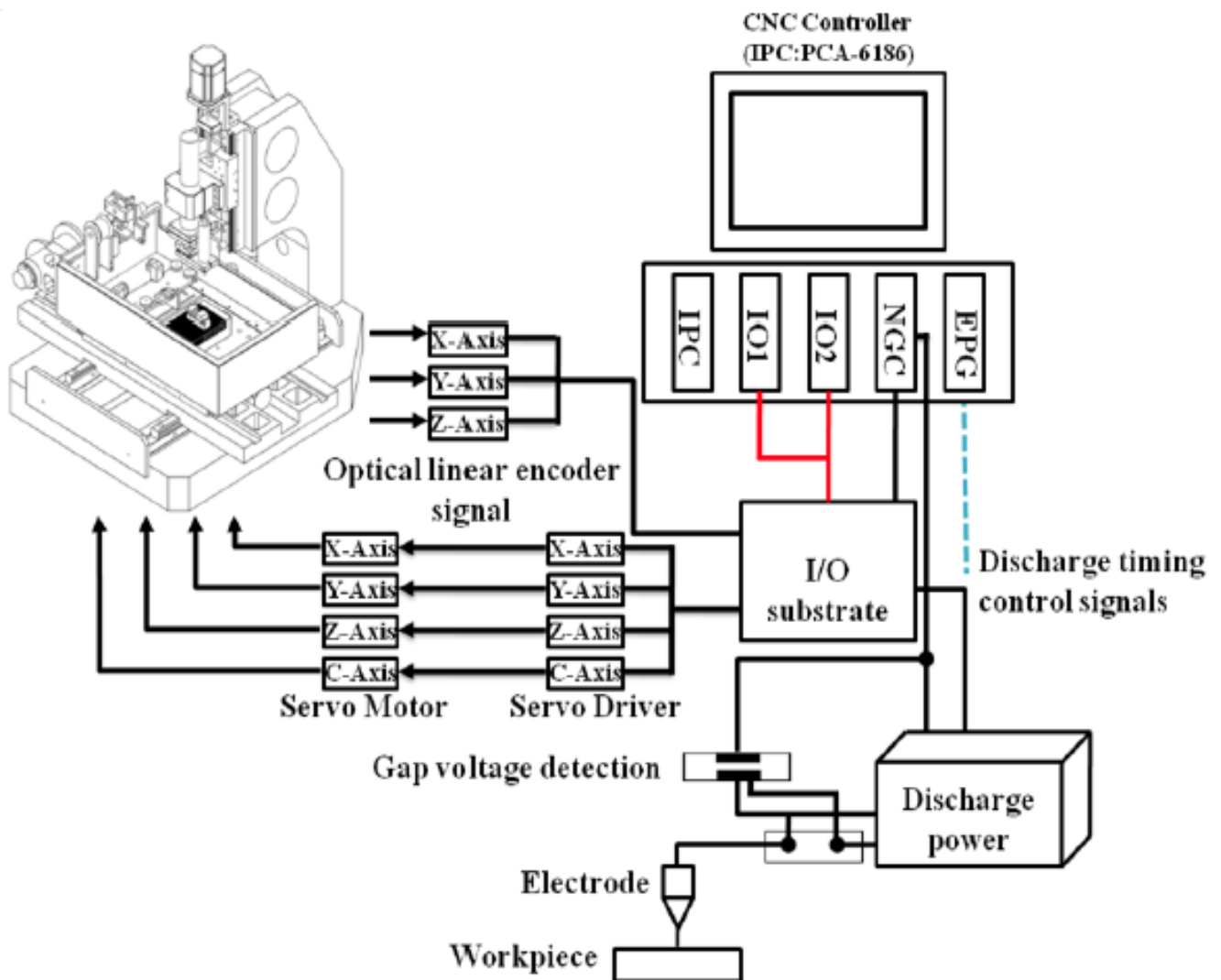
Τα προϊόντα πετρελαίου διατίθενται άμεσα προς αξιοποίηση και σχηματίζουν ένα ελέγξιμο περιβάλλον γύρω από το σημείο του σπινθήρα. Αυτά τα έλαια διατηρούν τις διηλεκτρικές τους ιδιότητες ενόσω εκδηλώνεται ο σπινθήρας. Η θερμότητα που απελευθερώνεται διασπά το διηλεκτρικό μέσο σε υδρογόνο, άνθρακα και υπόλοιπα υποπροϊόντα, ενώ συγχρόνως δεν υπάρχει κάποια επίδραση από την παρουσία κατακρημνισμάτων. Εξαιτίας της ηλεκτρικής σταθερότητας μπορούν να θεωρηθούν ιδεατή λύση ως διηλεκτρικό μέσο για την κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης die sinking EDM.

Το απιονισμένο νερό γίνεται αγωγός του ηλεκτρισμού κατά τη διάρκεια που παρασύρει τα σωματίδια της ηλεκτροδιάβρωσης. Συγχρόνως, οι διηλεκτρικές του ιδιότητες μεταβάλλονται. Με τη σειρά τους, το σημείο ιονισμού αλλάζει διαφοροποιώντας την αποδοτικότητα και τη σταθερότητα του συστήματος και της κατεργασίας. Συναντάται πιο συχνά στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM) κατά την οποία οι εταίροι της κοπής (τεμάχιο & ηλεκτρόδιο) δεν τοποθετούνται μέσα στο διηλεκτρικό ρευστό, αλλά το τελευταίο βρίσκεται γύρω από την περιοχή του σπινθήρα και με υψηλή ταχύτητα γυρίζω πίσω για κάθαρση. Με αυτόν τον τρόπο τελικώς οι ιδιότητες τους δεν μεταβάλλονται ραγδαία και δεν υπερβαίνουν απαγορευτικές τιμές.

Συνοψίζοντας τις κύριες λειτουργίες και τους ρόλους του διηλεκτρικού ρευστού στην κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης, το μέσο αυτό δύναται να δημιουργεί διάκενο ορισμένης διηλεκτρικής σταθεράς, να ψύχει επαρκώς το ηλεκτρόδιο, το τεμάχιο όπως και τα απόβλητα της κατεργασίας και τέλος να απαγορεύει την πρόσβαση στα τελευταία στο διάκενο [12].

1.4.4 Μηχανισμός κίνησης στους άξονες X - Y

Για την επιτυχία πολύπλοκων γεωμετριών και υψηλής διαστασιολογικής ακρίβειας, είναι αναγκαία η επιτυχία κίνησης στο επίπεδο XY τόσο του ηλεκτροδίου όσο και του τεμαχίου εργασίας. Τούτο μπορεί να συμβεί ή με την κίνηση της τράπεζας, άρα και του τεμαχίου, ή με ένα σύστημα αυτόματης πρόωσης με σερβομηχανισμό που δίνει την κατακόρυφη κίνηση στην κεφαλή. Αναγκαία θεωρείται και η ακρίβεια στην κίνηση, καθώς συναρτάται άμεσα με την μορφολογική και διαστατική ακεραιότητα του τεμαχίου που έχει κατεργαστεί. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι το τεμάχιο πρέπει να υποστηρίζεται κατάλληλα, να ασφαρίζεται επαρκώς και να στηρίζεται με ορθολογικό τρόπο [5].



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού κίνησης σε μηχανή αποτύπωσης - βύθισης EDM [1]

1.4.5 Δεξαμενή εργασίας

Μέσα στη δεξαμενή εργασίας βρίσκεται το διηλεκτρικό ρευστό, μέσα στο οποίο βυθίζεται το τεμάχιο εργασίας. Συχνά, οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από λαμαρίνα με αφαιρούμενη ή αρθρωτή, μπροστινή πόρτα, για ευκολία στη ρύθμιση του τεμαχίου εργασίας. Εντός της δεξαμενής εργασίας ανανεώνεται το διηλεκτρικό ρευστό και λαμβάνεται μέριμνα ώστε να διατηρείται η προβλεπόμενη στάθμη του υγρού. Πλωτός διακόπτης είναι υπεύθυνος για το γεγονός ότι το σύστημα δεν ενεργοποιείται προτού φθάσει το ρευστό στην προκαθορισμένη στάθμη. Προβλέπεται και διακόπτης υπερχειλίσσης ο οποίος κλείνει όταν η στάθμη είναι υπερβολικά υψηλότερη από την κατάλληλη τιμή. Τέλος, ο θερμοστάτης είναι υπεύθυνος για διακοπή της λειτουργίας της διάταξης σε περίπτωση τιμής θερμοκρασίας πάνω από ένα ανώτατο όριο [5].

1.4.6 Σερβομηχανισμός ελέγχου

Ο σερβομηχανισμός ελέγχου συνιστά την καρδιά μιας εργαλειομηχανής που έχει κατασκευαστεί για την κατεργασία EDM. Πρόκειται για ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου, το οποίο είναι υπεύθυνο για την τήρηση του κατάλληλου διακένου ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο, με αποτέλεσμα την ευστάθεια του ενιαίου συστήματος, την αποτελεσματικότητα της κατεργασίας, την επιτυχία διαστατικής ακρίβειας και την προστασία της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Υποστηρίζει ηλεκτρόδια που είναι από μερικά μm έως αρκετά cm [1].

Ο σερβομηχανισμός είναι υπεύθυνος για την μη επαφή ηλεκτροδίου – τεμαχίου για κανένα λόγο. Ακόμη, χρειάζεται να αυτοματοποιείται η προώθηση και η απόσυρση του τεμαχίου με σκοπό τη διατήρηση μιας σταθερής τιμής διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στο τεμάχιο εργασίας και το ηλεκτρόδιο. Για να προωθείται και να αποσύρεται η κεφαλή, απαιτείται ηλεκτρική ή υδραυλική επενέργεια για την κατάλληλη κίνηση της. Επομένως, απαιτείται ένας ηλεκτρικός κινητήρας ή μια υδραυλική μονάδα με κριτήριο τον όγκο και τη μάζα των χρησιμοποιούμενων ηλεκτροδίων [5].

Χάριν στις ηλεκτρικές ιδιότητες του διηλεκτρικού μέσου, ο σερβομηχανισμός μπορεί να λειτουργεί εύρυθμα. Πιο συγκεκριμένα, το διηλεκτρικό ρευστό λειτουργεί ως μονωτής έως ότου η διαφορά δυναμικού και το διάκενο ανάμεσα στο τεμάχιο και στο ηλεκτρόδιο φτάσουν στο σημείο ιονισμού του διηλεκτρικού. Έπειτα, το διηλεκτρικό μέσο μεταβάλλει τις ηλεκτρικές του ιδιότητες και από μονωτής μετατρέπεται σε αγωγός του ηλεκτρισμού, επιφέροντας τη μείωση της διαφοράς δυναμικού από διαφορά δυναμικού ανοιχτοκυκλώματος σε διαφορά δυναμικού σπινθήρα, που βρίσκεται ενός του εύρους $20 - 50 VDC$. Ο μελετώμενος σερβομηχανισμός ρυθμίζεται σύμφωνα με ένα δυναμικό αναφοράς, το οποίο συγκαταλέγεται σε αυτήν την περιοχή τάσεων. Επομένως, το σύστημα αυτομάτου ελέγχου «διαβάζει» τη διαφορά μεταξύ του δυναμικού αναφοράς και του πραγματικού / μετρούμενου δυναμικού κατεργασίας και αποφασίζει αν το ηλεκτρόδιο χρειάζεται να βρεθεί πιο κοντά, να απομακρυνθεί ή να διατηρήσει τη θέση του σε σχέση με το τεμάχιο εργασίας [5].

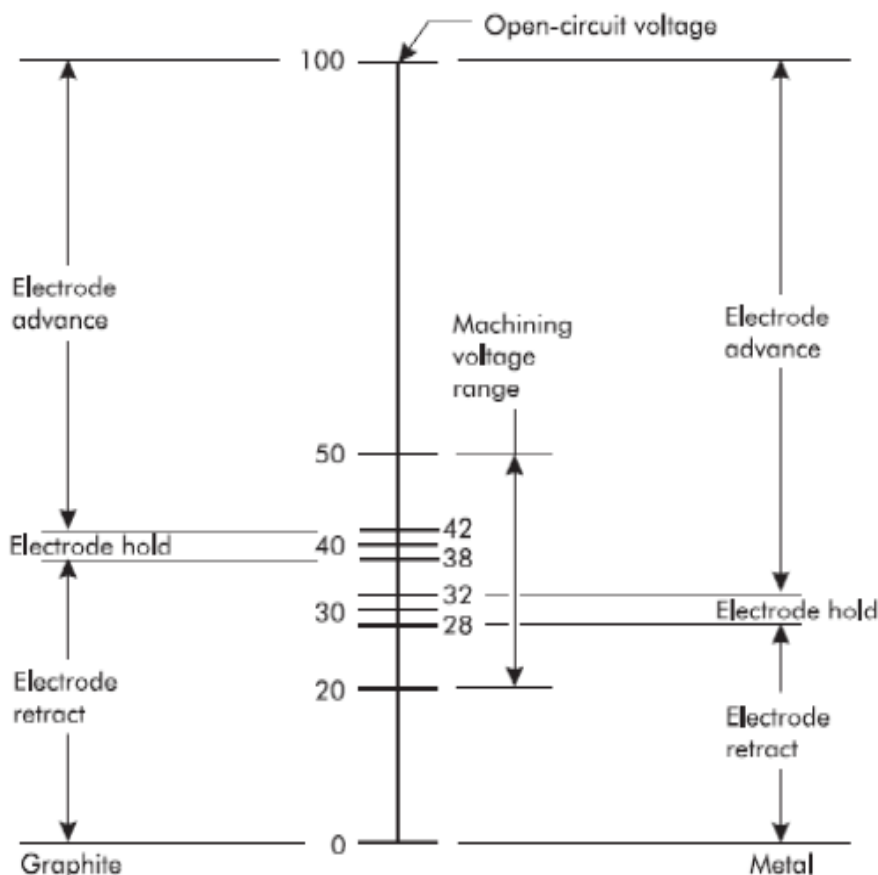
Ο σερβομηχανισμός ελέγχου, όπως και κάθε σύστημα ελέγχου είναι απαραίτητο να σχεδιάζεται με κάποιους απλούς κανόνες λογικής, ώστε να είναι εύληπτο για τον χειριστή της εκάστοτε εργαλειομηχανής EDM. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου τυπικού συστήματος μπορεί να βρεθεί στον παρακάτω πίνακα.

Σχεδιασμός (Design) Σερβομηχανισμού Ελέγχου

1. Το σύστημα μετατοπίζει το ηλεκτρόδιο προς το τεμάχιο εάν το δυναμικό λειτουργίας υπερβαίνει του καθορισμένου άνω ορίου αναφοράς
2. Το σύστημα παραμένει σταθερό (δεν κινείται) εάν το δυναμικό λειτουργίας βρίσκεται εντός της ζώνης αναφοράς.
3. Το σύστημα απομακρύνει το ηλεκτρόδιο από το τεμάχιο εάν το δυναμικό λειτουργίας είναι μικρότερο από το κατώτατο όριο αναφοράς που έχει προδιαγραφεί.

Πίνακας 7: Κανόνες λογικής για τη λειτουργία του σερβομηχανισμού ελέγχου

Το δυναμικό αναφοράς συμβολίζεται με V_{th} και διαφοροποιείται ανάλογα με το υλικό. Ισούται με 30 VDC (με ένα μικρό εύρος 28 – 32) στην περίπτωση μεταλλικών ηλεκτροδίων και στα 40 VDC (σε μια στενή περιοχή 38 – 42) για αντίστοιχα από γραφίτη. Όταν χρησιμοποιηθεί δυναμικό αναφοράς $V_{th} = 30$ VDC με ηλεκτρόδια γραφίτη, τότε η λειτουργία του συστήματος δεν είναι ευσταθής και επομένως μη επιθυμητή και αποκαλείται DC arcing. Η παρακάτω εικόνα οπτικοποιεί τα παραπάνω γραφόμενα σχετικά με τον τυπικό σχεδιασμό ενός σερβομηχανισμού ελέγχου μιας εργαλειομηχανής EDM.

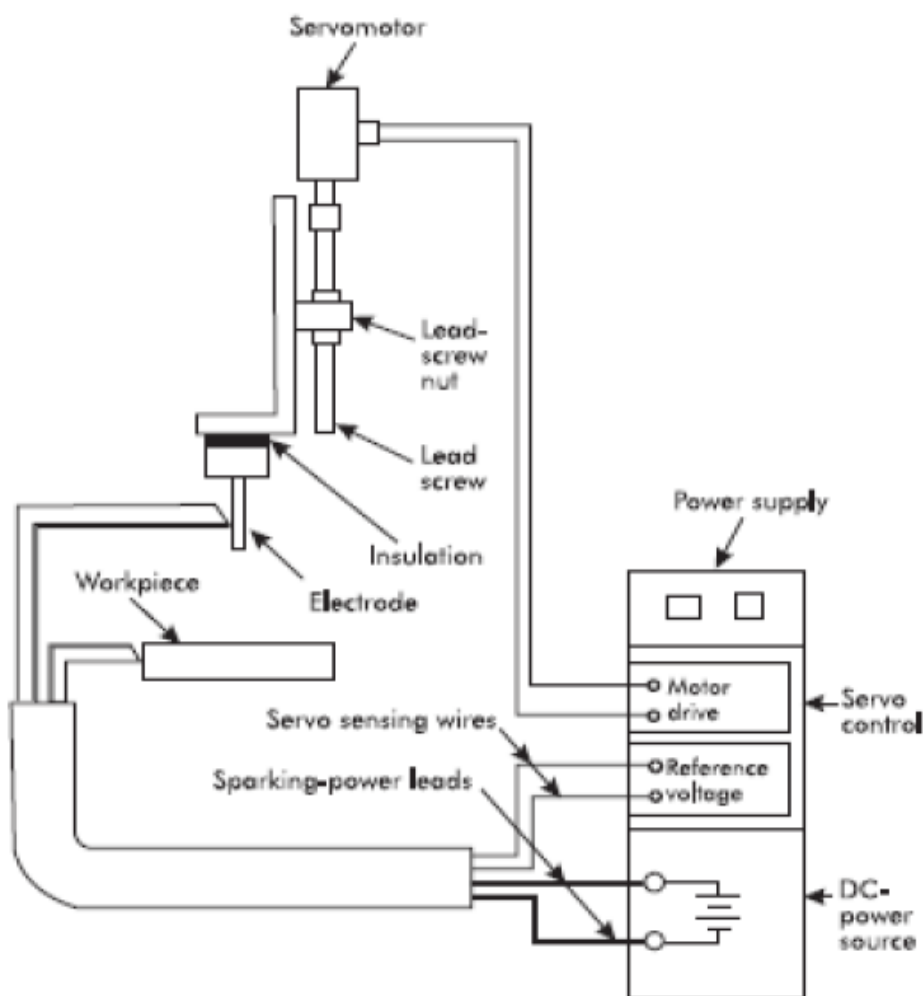


Εικόνα 7: Μονογραμμική απεικόνιση του σχεδιασμού ενός σερβομηχανισμού ελέγχου

Η κίνηση του ηλεκτροδίου συμβαίνει ή μέσω της συνδρομής ενός ηλεκτρικού κινητήρα, είτε μέσω υδραυλικού συστήματος. Όπως και αν έχει, τα συστήματα αυτά σκοπεύουν στην «μετατροπή» ενός ψηφιακού σήματος σε προκαθορισμένη κίνηση.

Στην πρώτη περίπτωση του ηλεκτρικού μοτέρ, το οποίο προτιμάται για μικρά και λιγότερο βαριά ηλεκτρόδια, εκείνο βρίσκεται σε άμεση σύζευξη με έναν κοχλία ακριβείας. Το περικόχλιο προσαρμόζεται στον κινούμενο άξονα της μηχανής. Απαιτείται μηδενική «χάρη-παλινδρόμηση» ιδανικά συνολικά στο σύστημα, από τον κινητήρα έως και τον κινούμενο άξονα στον οποίο είναι τοποθετημένο το ηλεκτρόδιο. Και αυτό γιατί σε περίπτωση παλινδρόμησης το σύστημα δεν θα μετατοπίζεται με ευστάθεια και δεν θα διαγράφεται η κίνηση που προβλέπεται στον άξονα και στο ηλεκτρόδιο με ανεπιθύμητες προεκτάσεις. Ακόμη σε αρκετά συστήματα σερβομηχανισμού με ηλεκτρικό κινητήρα αξιοποιούνται κοχλίες που εμπεριέχουν σφαιρικά έδρανα κύλισης σε προένταση για την μεταφορά της κίνησης από το μοτέρ στον άξονα. Έτσι επιτυγχάνεται ιδιαίτερα χαμηλή τριβή επιτρέποντας την ελεύθερη περιστροφική κίνηση δίχως ανάπτυξη επιπλέον φορτίου κατά την εκκίνηση.

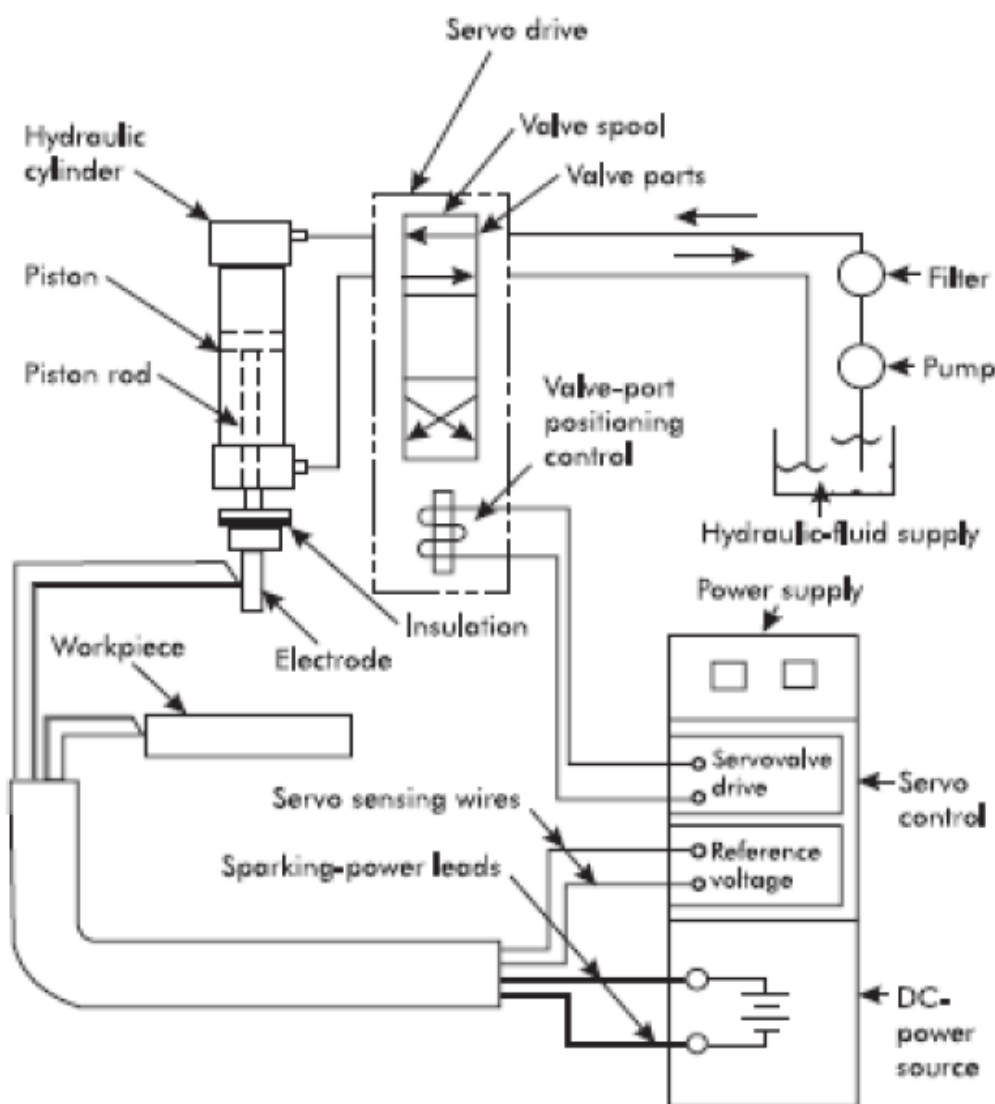
Επομένως, γίνεται ελάχιστη η πιθανότητα κάποιας αναπήδησης του ηλεκτροδίου, καθώς ο κινητήρας, σε διαφορετική περίπτωση, θα χρειαζόταν να υπερνικήσει τη στατική τριβή, αναπτύσσοντας επιπλέον φορτίο. Η προένταση είναι πολύτιμη, καθώς συμβάλλει στον «μηδενισμό» της «χάρης-παλινδρόμησης» του συστήματος [1].



Εικόνα 8: Απλοποιημένο γράφημα σερβομηχανισμού που οδηγείται από ηλεκτροκινητήρα

Στην δεύτερη περίπτωση της υδραυλικής μονάδας, ο σερβομηχανισμός αυτός είναι εγγενώς δίχως χάρη ή κάποιας μορφής παλινδρόμηση. Όταν ασκείται πίεση από το ρευστό στην μία πλευρά του υδραυλικού εμβόλου, ρευστό εισέρχεται από αυτή την 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 και το ηλεκτρόδιο είναι ακίνητο. Οι σερβοβαλβίδες είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο της ροής του ρευστού προς τον κύλινδρο. Αυτές υπόκεινται σε ηλεκτρονικό έλεγχο από την μονάδα αυτομάτου ελέγχου του περιγραφόμενου μηχανισμού. Το σύστημα πρέπει να είναι by default στατικό, εκτός από τις καταστάσεις που χρειάζεται να κινηθεί και λαμβάνει την αντίστοιχη οδηγία. Η στατική κατάσταση αποκαλείται «μηδενική θέση» (null position) σε υδραυλικά συστήματα με σερβομηχανισμό. Τέλος, λαμβάνεται μέριμνα και για την περίπτωση που το υδραυλικό μέσο αλλάξει θερμοκρασία και προκαλέσει μη επιθυμητή κίνηση του εμβόλου ανεξάρτητη από τη λειτουργία των βαλβίδων εξαιτίας της μεταβολής των φυσικών του ιδιοτήτων. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται «drift» και οι κατασκευαστές δίνουν βάση κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός σερβουδραυλικού συστήματος [5].

Στην παρακάτω εικόνα, δίνεται μια γραφική απεικόνιση ενός υδραυλικού συστήματος με αντίστοιχο σερβομηχανισμό.

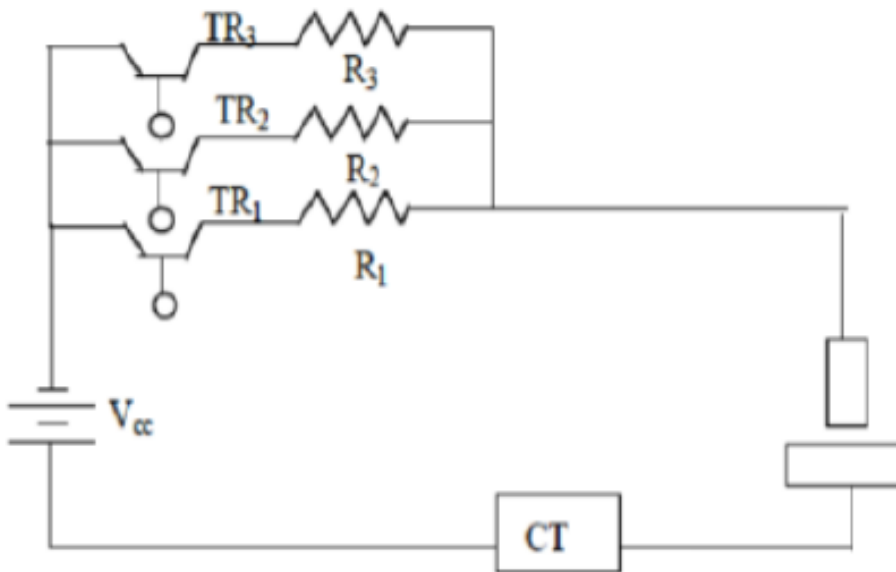


Εικόνα 9: Απλοποιημένο γράφημα σερβομηχανισμού που οδηγείται από υδραυλική μονάδα

1.4.7 Μονάδα παροχής ισχύος ή Γεννήτρια παλμών

Τα βασικά στοιχεία, από τα οποία απαρτίζεται μια μονάδα παροχής ισχύος είναι κατά σειρά μια πηγή συνεχούς ρεύματος DC, ο σερβομηχανισμός, ο διανομέας εναλλασσόμενου ρεύματος AC και η μονάδα προστασίας ηλεκτρικού τόξου συνεχούς ρεύματος. Υφίστανται δύο βασικές τεχνολογίες γεννητριών παλμών είτε με χρήση transistor ή ηλεκτρικών διακοπών είτε με τεχνολογία αντίστασης – πυκνωτή RC.

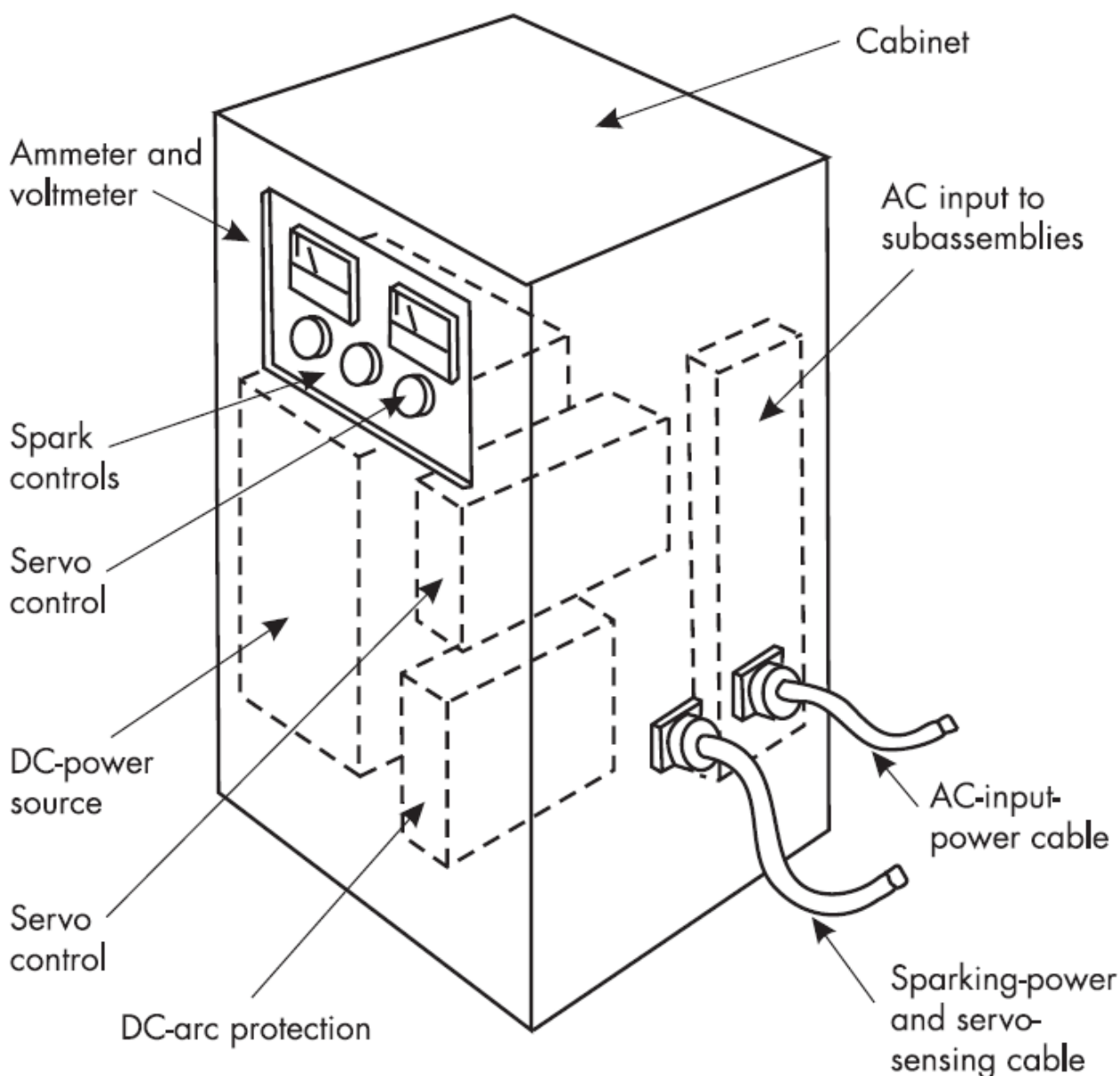
Οι γεννήτριες με χρήση τρανζίστορ διαθέτουν τρανζίστορ (TR), αντιστάσεις για το περιορισμό της έντασης ρεύματος (R), και μετασχηματιστή ρεύματος (CT). Οι αντιστάσεις και τα τρανζίστορ βρίσκονται σε σύνδεση εν παραλλήλω ανάμεσα στην μονάδα παροχής ισχύος συνεχούς ρεύματος και στο διάκενο παραγωγής σπινθήρων. Η ένταση ρεύματος κατά την δημιουργία σπινθήρα αυξάνεται ανάλογα με το πόσα τρανζίστορ είναι «αναμμένα» ταυτόχρονα. Ο μηχανισμός ON/OFF ελέγχεται από τρανζίστορ πεδίου. Αυτό το είδος παλμογεννήτριας είναι το πλέον διαδεδομένο για εργαλειομηχανές συμβατικής ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης. Θετικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της διάρκειας και συχνότητας των παλμών μέσω των ηλεκτρονικών διακοπών ON/OFF, ενώ ταυτόχρονα δύνανται να παρέχουν υψηλή ενέργεια σπινθήρων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αυξημένος ρυθμός αποβολής υλικού κατά τη κατεργασία.



Εικόνα 10: Ηλεκτρικό κύκλωμα γεννήτριας παλμών με τη χρήση transistor

Τα κύρια μέρη από τα οποία συγκροτείται μια παλμογεννήτρια αντιστάσεων–πυκνωτών είναι: οι αντιστάσεις ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης, οι πυκνωτές ελέγχου της ηλεκτρικής εκκένωσης, το κύκλωμα ελέγχου μέγιστης έντασης και ο μετασχηματιστής ρεύματος (CT). Η διάρκεια παλμών σε τέτοιου τύπου γεννήτριες ορίζεται από την 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 καθορίζεται από τον χρησιμοποιούμενο πυκνωτή, αλλά και από διάσπαρτους πυκνωτές που σχηματίζονται στη διάταξη που συγκρατεί το ηλεκτροδίο, στην τράπεζα εργασίας και μεταξύ τεμαχίου – ηλεκτροδίου. Η γεννήτρια παλμών τύπου αντιστάσεως – πυκνωτή ήταν η πρώτη τεχνολογία που αξιοποιήθηκε στην ηλεκτροδιάβρωση βύθισης. Ωστόσο, η παραγόμενη ενέργεια εκκένωσης είναι περιορισμένη. Επομένως, δεν μπορεί να αφαιρεθεί υλικό μεγάλου όγκου σε μικρό χρόνο με αυτήν την τεχνολογία και γι' αυτό το λόγο αξιοποιείται στις κατεργασίες μικρότερης κλίμακας εξαιτίας της δημιουργίας σπινθήρων πολύ μειωμένης ενέργειας [1].



Εικόνα 11: Γραφική αναπαράσταση μιας τυπικής μονάδας ισχύος

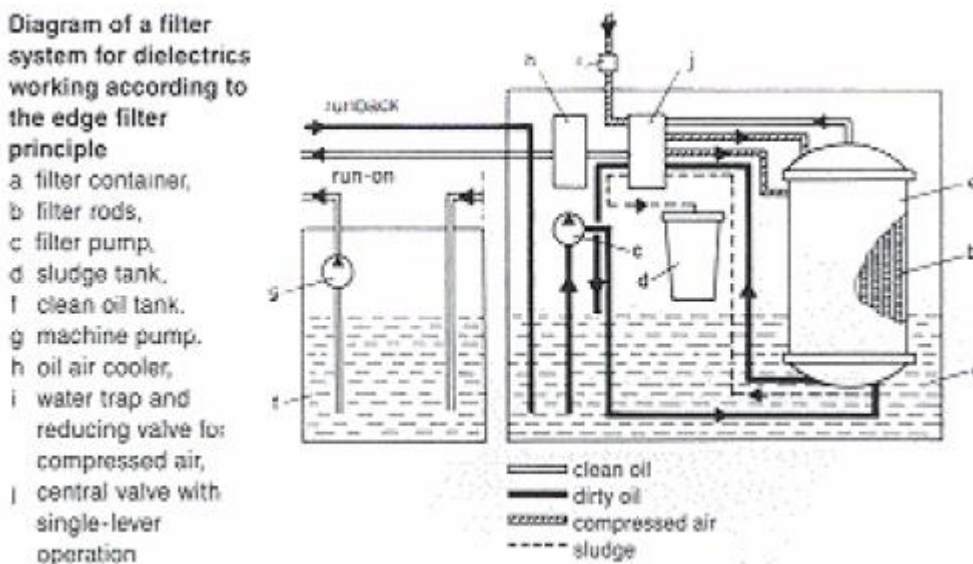
1.4.8 Σύστημα κυκλοφορίας διηλεκτρικού μέσου και έκπλυσης

Το σύστημα κυκλοφορίας και έκπλυσης σκοπεύει στην παροχή της «ζώνης κατεργασίας» με «φρέσκο – καθαρό» διηλεκτρικό μέσο, και την απομάκρυνση από αυτήν των προϊόντων κατεργασίας. Το δεύτερο φαινόμενο αποκαλείται έκπλυση. Τα βασικά στοιχεία της διάταξης καταγράφονται στην παρακάτω λίστα:

- ο Δεξαμενή του διηλεκτρικού μέσου
- ο Αντλία
- ο Φίλτρα
- ο Εγκατάσταση από σωληνώσεις και ακροφύσια

Η αντλία αξιοποιείται προς την παροχή του διηλεκτρικού μέσου στο δοχείο εργασίας, ενώ τα φίλτρα συγκρατούν τα κατακρημνίσματα της κατεργασίας καθαρίζοντάς το και εξασφαλίζοντας ότι γίνεται χρήση καλής ποιότητας διηλεκτρικού ρευστού. Όσο πιο ευνοϊκές συνθήκες απόπλυσης επικρατούν τόσο μικρότερα «νεκρά χρονικά μεσοδιαστήματα» (T_{off}) χρειάζονται και άρα συνεπώς τόσο πιο αποτελεσματική θεωρείται η κατεργασία. Οι κύριες λειτουργίες του συστήματος κυκλοφορίας και απόπλυσης βρίσκονται στα επόμενα σημεία [1]:

- ο Παροχέτευση του διηλεκτρικού ρευστού στο διάκενο εκδήλωσης σπινθήρα με σκοπό την αποβολή αερίων και λοιπών αποβλήτων.
- ο Διοχέτευση και ανανέωση του διηλεκτρικού μέσου στην περιοχή που συμβαίνει η αφαίρεση υλικού.
- ο Διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας του διηλεκτρικού μέσου πολύ πιο χαμηλά από τη θερμοκρασία εξάχνωσης ή ανάφλεξης.
- ο Ψύξη του συστήματος τεμαχίου – ηλεκτροδίου.

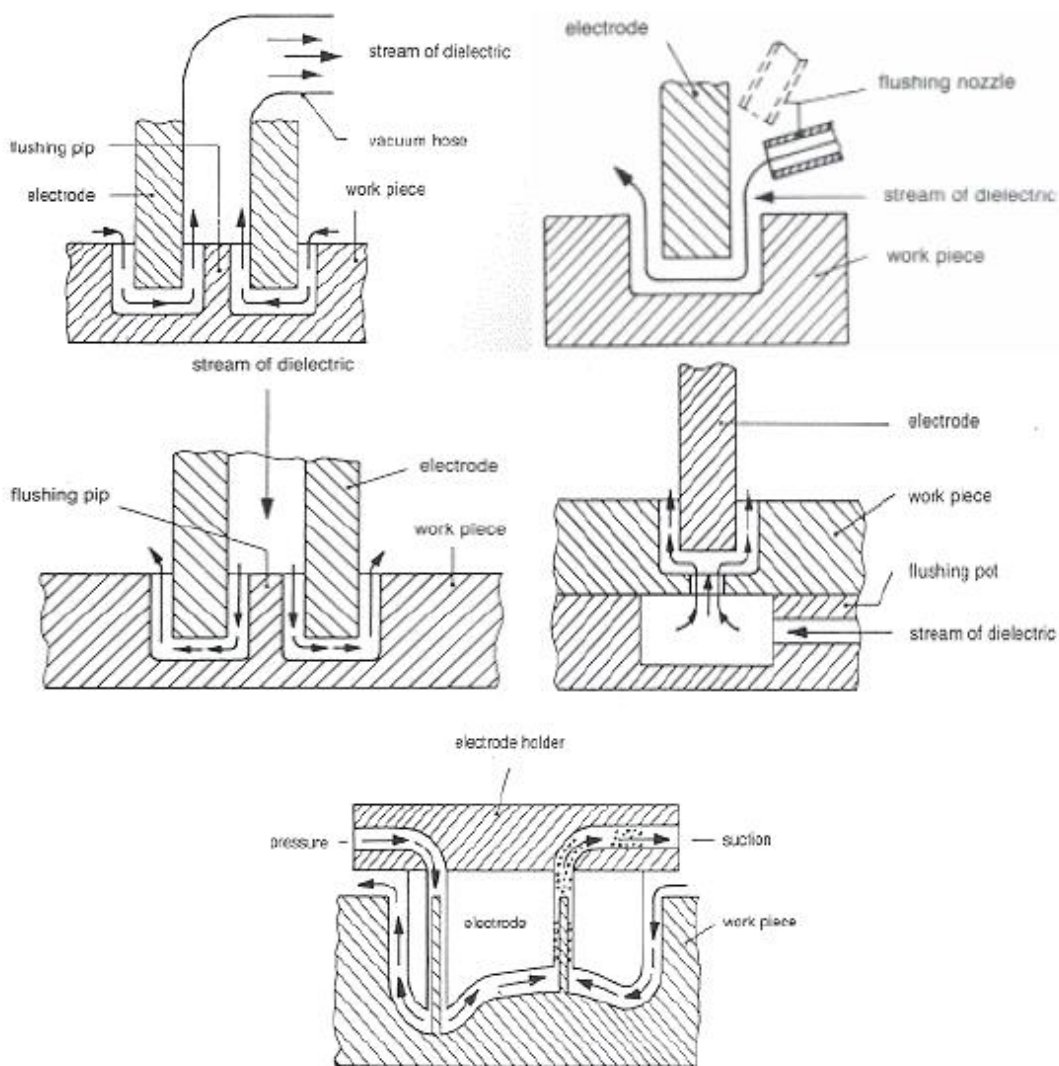


Εικόνα 12: Υδραυλικό κύκλωμα ενός συστήματος κυκλοφορίας – απόπλυσης

Τις περισσότερες φορές κατά την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το τεμάχιο βρίσκονται βυθισμένα στο διηλεκτρικό ρευστό. Η απόπλυση πραγματοποιείται μέσω της κίνησης του ηλεκτροδίου, η οποία προκαλεί στροβιλισμούς του ρευστού στο διάκενο ηλεκτροδίου – τεμαχίου και με αυτόν τον τρόπο ευνοείται η απομάκρυνση των μη ωφέλιμων προϊόντων της κατεργασίας. Σε σύγχρονες εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι – μέθοδοι απόπλυσης, οι οποίες και επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες – ιδιαιτερότητες της εκάστοτε κατεργασίας. Οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται στην παρακάτω λίστα [13]:

- 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 αποτελεί καθοριστική παράμετρο της κατεργασίας. Και αυτό γιατί σε πολύ χαμηλές πιέσεις δυσχεραίνεται η απομάκρυνση στερεών και αέριων προϊόντων της κατεργασίας, ενώ υψηλές πιέσεις ευνοούν την φθορά του ηλεκτροδίου περιορίζοντας τη διάρκεια ζωής του. Τέλος, επηρεάζεται και η ποιότητα επιφανείας ανάλογα με τη πίεση [1].



Εικόνα 13: Γράφημα τεχνολογιών 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

1.5 Παράμετροι επιρροής της EDM & Χαρακτηριστικοί δείκτες απόδοσης

1.5.1 Παράμετροι επιρροής της κατεργασίας

Η πιο σημαντική παράμετρος από όλες, που καθορίζει την κατεργασία, αποκαλείται ενέργεια ανά παλμό και μπορεί να προσδιοριστεί από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$E_p = V_p \cdot I_p \cdot \eta$$

όπου:

V_p [V]: διαφορά δυναμικού σε κάθε παλμό

I_p [A]: ένταση ρεύματος σε κάθε παλμό

$$\eta = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \text{ (Duty Ratio)}$$

με T_{on} [s]: χρόνος δημιουργίας σπινθήρα

T_{off} [s]: χρόνος μεταξύ δύο σπινθήρων

Στη συνέχεια, θα ορίσουμε αναλυτικά όλα αυτά τα μεγέθη που έχουμε αναφέρει σε αυτήν τη σελίδα της συγκεκριμένης υποενότητας.

Διαφορά δυναμικού V_p [V]

Ως διαφορά δυναμικού ορίζουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο άκρων, δηλαδή του τεμαχίου και του ηλεκτροδίου κατά την διάρκεια της ηλεκτροδιάβρωσης. Αυξημένες τιμές διαφοράς δυναμικού επιτρέπουν υψηλότερο διάκενο κατεργασίας, το οποίο με τη σειρά του συμβάλλει σε πιο ευνοϊκές συνθήκες έκπλυσης συνδράμοντας στην ευστάθεια της συνολικής διαδικασίας. Ο ρυθμός αποβολής υλικού, ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου και η τραχύτητα επιφανείας είναι ανάλογα ποσά σε σχέση με τη διαφορά δυναμικού. Επομένως, σε υψηλές τιμές διαφοράς δυναμικού είναι μεν πιο αποδοτική η κατεργασία, αλλά η επιφάνεια χαρακτηρίζεται από κακή ποιότητα και το ηλεκτρόδιο φθείρεται ταχύτατα [14].

Ένταση ρεύματος I_p [A]

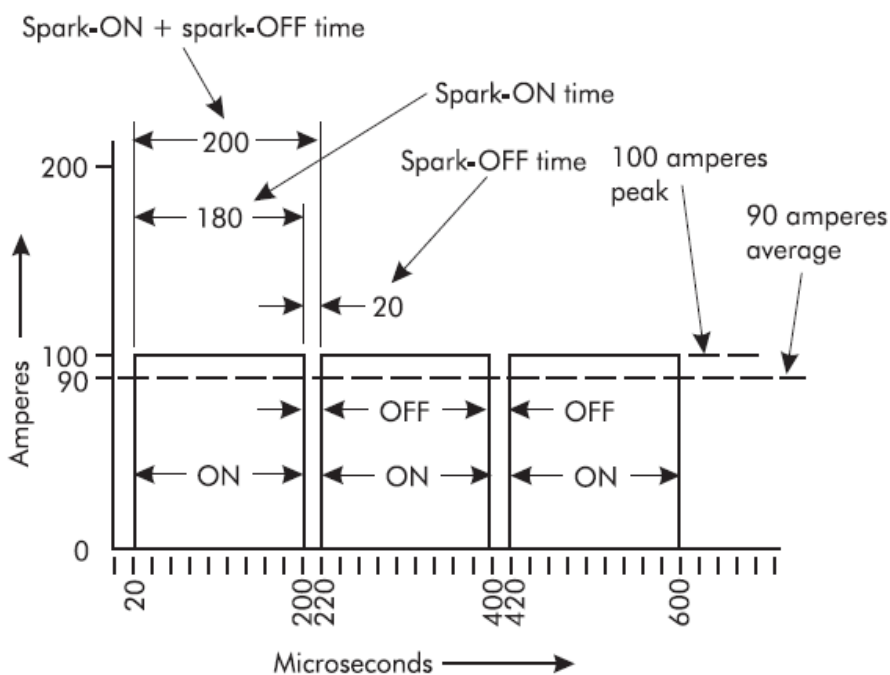
Η ένταση του ρεύματος κατά τη διάρκεια του παλμού συνιστά θεμελιώδη ποσότητα στην ηλεκτροδιάβρωση. Βέβαια υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ της μέγιστης τιμής του ρεύματος και της μέσης τιμής αυτού. Η μέγιστη τιμή ρεύματος ευθύνεται για τον ιονισμό του διηλεκτρικού μέσου και τη δημιουργία της στήλης πλάσματος. Όσο πιο μεγάλη τιμή έχει, τόσο υψηλότερο είναι το ποσό ενέργειας που απελευθερώνεται ανά παλμό. Συνεπώς, αποβάλλεται περισσότερος όγκος υλικού στη μονάδα του χρόνου, καθιστώντας την κατεργασία πιο αποδοτική αλλά με δυσμενέστερη ποιότητα επιφανείας [1, 15]. Εφόσον η συνολική ποσότητα ρεύματος της κατεργασίας διέρχεται από το αμπερόμετρο η ένδειξη στο αμπερόμετρο αποτελεί το μέσο όρο έντασης του ρεύματος κατεργασίας και όχι τη μέγιστη τιμή [5]. Στον υπολογισμό «συμμετέχουν» οι χρονικές στιγμές T_{on} και T_{off} με τη μέση τιμή να υπολογίζεται ως:

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

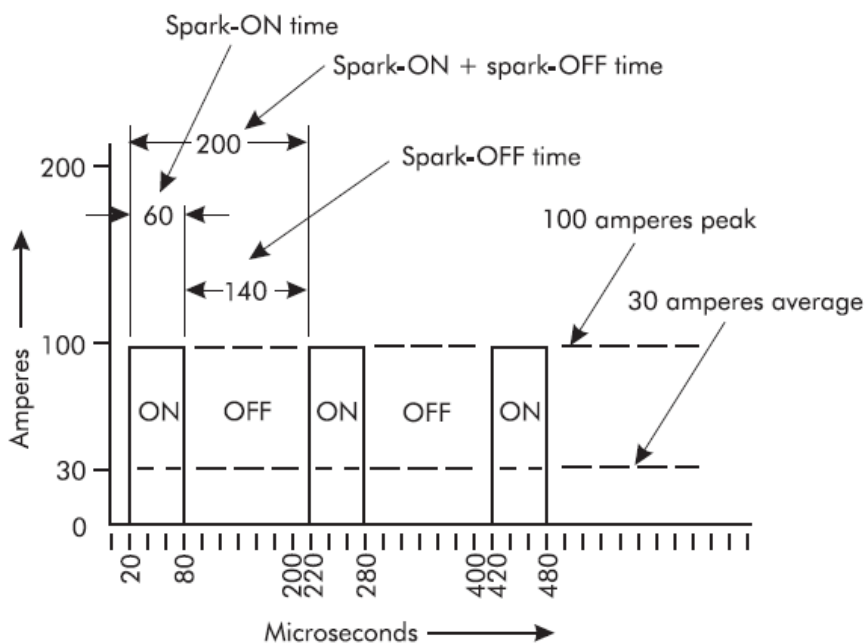
Για παράδειγμα, για έναν ορθογωνικό παλμό, η μέση ένταση του ρεύματος δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$\bar{I}_P = I_P \cdot \eta = I_P \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

Στις επόμενες εικόνες, για λόγους ουσίας και πληρότητας, δίνονται δύο παραδείγματα υπολογισμού της μέσης έντασης ρεύματος για ένα σύντομο και έναν εκτεταμένο κύκλο εργασίας [5]:



Εικόνα 14: Παράδειγμα υπολογισμού μέσης έντασης ρεύματος για σύντομο κύκλο εργασίας



Εικόνα 15: Παράδειγμα υπολογισμού μέσης έντασης ρεύματος για μεγάλο κύκλο εργασίας

Διάρκεια παλμού T_{on} [s]

Η διάρκεια παλμού καλείται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο υφίσταται ροή ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ τεμαχίου – ηλεκτροδίου και σε αυτόν τον χρόνο πραγματοποιείται η αφαίρεση του υλικού από το τεμάχιο εργασίας. Ο ρυθμός αποβολής υλικού συνδέεται με αναλογικό τρόπο με τη διάρκεια του παλμού, αφού είναι ο ωφέλιμος χρόνος κατεργασίας. Οι μεγαλύτερης διάρκειας παλμοί επιφέρουν μειωμένης ποιότητας κατεργαζόμενη επιφάνεια εξαιτίας των βαθιών κρατήρων που δημιουργούνται με μεγαλύτερη διάμετρο. Όσο πιο βραχείς οι παλμοί, τόσο πιο αποδοτικό το αποτέλεσμα από πλευράς επιθυμητής τραχύτητας. Συνήθεις χρόνοι σε κατεργασίες EDM είναι της τάξης των μs [1]. Μια μεγάλη διάρκεια παλμού θα επέφερε πιο παραγωγική κατεργασία από άποψη χρόνου. Συγχρόνως, όμως, θα προκαλούσε αστάθεια στη διάταξη και ενδεχομένως να έκανε το ηλεκτρόδιο πιο παχύ και δυσλειτουργικό εξαιτίας της ανεπιθύμητης επίστρωσης που θα δημιουργούνταν [14].

Μεσοδιάστημα T_{off} [s]

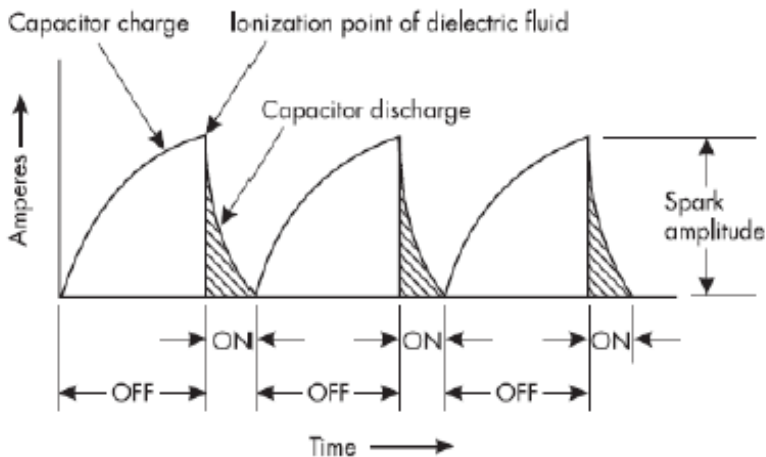
Πάντα, μεταξύ δύο παλμών, υπάρχει ένας κενός χρόνος ο οποίος στην προκειμένη ονομάζεται μεσοδιάστημα. Εντός αυτού του χρονικού διαστήματος δεν ρέει ηλεκτρικό ρεύμα στο σύστημα, ούτε δημιουργείται κάποιος σπινθήρας. Όμως το σύστημα απόπλυσης αξιοποιεί αυτόν τον φαινομενικά νεκρό χρόνο, όπου δεν συντελείται κοπή, για να αποβάλλει τα κατακρημνίσματα και τα ανεπιθύμητα προϊόντα της κατεργασίας. Η κατάλληλη εκλογή αυτού του μεγέθους επιτρέπει την βέλτιστη δυνατή κατεργασία ισορροπώντας ανάμεσα στην παραγωγικότητα (χρονική) της κατεργασίας και στην ευστάθεια του συστήματος. Τυπικές τιμές του μεσοδιαστήματος λαμβάνονται στην τάξη των μs [1].

Duty Ratio η

Ο δείκτης αυτός συνιστά τον λόγο της διάρκειας ενός παλμού προς το άθροισμα της διάρκειας ενός παλμού και της διάρκειας του μεσοδιαστήματος. Φανερώνει τον βαθμό του ενεργού και ωφέλιμου χρόνου και το ποσοστό αυτού που διακινείται ηλεκτρικό ρεύμα και αποβάλλεται υλικό από το τεμάχιο. Ιδεατή τιμή θεωρείται $\eta \rightarrow 1$ και όσο αυξάνεται το η , τόσο πιο αποτελεσματική θεωρείται η κατεργασία.

Κυματομορφή

Ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται η ενέργεια προς το τεμάχιο συμβαίνει με τη συνδρομή των κυματομορφών. Μια κυματομορφή μπορεί να λαμβάνει διάφορα είδη και εξαρτάται από τη γεννήτρια παλμών και την παροχή ισχύος. Επί παραδείγματι, σε ηλεκτρικά κυκλώματα που περιλαμβάνουν ηλεκτρονικούς διακόπτες παρέχονται ορθογωνικοί παλμοί, ενώ σε ένα κύκλωμα RC μια τυπική κυματομορφή δίνεται στην παρακάτω εικόνα [14].



Εικόνα 16: Τυπική κυματομορφή από γεννήτρια παλμών με κύκλωμα RC

Τα ηλεκτρικά κυκλώματα, που εμπεριέχουν ηλεκτρονικούς διακόπτες (τύπου ON/OFF) εμφανίζονται πιο αποδοτικά για πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών στην ηλεκτροδιάβρωση και αξιοποιούνται ευρέως και συχνότερα από τα κυκλώματα RC . Τα δεύτερα χαρακτηρίζονται από ένα ανώτατο όριο έντασης του ρεύματος $i_{max} = 15 A$ και συνδυάζονται με μεταλλικά ηλεκτρόδια. Δηλαδή, τα συγκεκριμένα κυκλώματα χρησιμεύουν για εφαρμογές χαμηλής ισχύος με προτεραιότητα στην υψηλή ποιότητα επιφανείας και στην διαστατική ακρίβεια [5].

Πολικότητα

Η πολικότητα χαρακτηρίζει αυτό καθ' εαυτό το ηλεκτρόδιο και φανερώνει την κατεύθυνση που διαθέτει το ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή αν είναι προς ή από το ηλεκτρόδιο. Η πολικότητα είναι είτε θετική είτε αρνητική. Για να εκλεγεί η πολικότητα λαμβάνεται υπόψιν πλήθος παραμέτρων όπως τα υλικά ηλεκτροδίου, τεμαχίου, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και η διάρκεια του παλμού. Συνήθως, αξιοποιείται η θετική πολικότητα του ηλεκτροδίου με σκοπό την ελάχιστη δυνατή φθορά του και την ευστάθεια της διαδικασίας, με αντιστάθμισμα τον ηπιότερο ρυθμό αποβολής υλικού σε σύγκριση με ένα πανομοιότυπο ηλεκτρόδιο αρνητικής πολικότητας [3, 14].

Έλεγχος διακένου

Ο έλεγχος διακένου κατεργασίας πραγματοποιείται με σκοπό τον περιορισμό ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως μη εκδήλωση κανονικών σπινθήρων ή ηλεκτρικό τόξο με αποτέλεσμα την αστάθεια. Ακόμη, ενδιαφερόμαστε και για την μεγιστοποίηση του όγκου του αποβαλλόμενου υλικού στην μονάδα του χρόνου, την μικρότερη δυνατή φθορά του εργαλείου όπως και για την εγγύηση μιας επιφάνειας με την ελάχιστη δυνατή τραχύτητα και την υψηλότερη δυνατή ποιότητα [1].

1.5.2 Χαρακτηριστικοί δείκτες απόδοσης της κατεργασίας

1. Ρυθμός αποβολής υλικού

Ο ρυθμός αποβολής υλικού συνιστά τον κατεξοχήν δείκτη στις συμβατικές και μη κατεργασίες και εκφράζει την ποσότητα του όγκου του αποβαλλόμενου υλικού από το τεμάχιο εργασίας κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος. Συμβολίζεται με MRR και έχει μονάδες [mm^3/min]. Προσδιορίζεται πειραματικά από τη διαφορά μάζας του τεμαχίου πριν και μετά το πέρας της κατεργασίας. Όσο πιο υψηλή τιμή λαμβάνει το MRR , τόσο πιο γρήγορα πραγματοποιείται η ηλεκτροδιάβρωση. Εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου, την ένταση του ρεύματος, τον χρόνο παλμού και του μεσοδιαστήματος [1]. Μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο [16]:

$$MRR = \frac{w_i - w_f}{\rho \Delta t}$$

όπου:

w_i : αρχική μάζα τεμαχίου

w_f : τελική μάζα τεμαχίου

ρ : πυκνότητα υλικού του τεμαχίου

Δt : χρονικό διάστημα κατεργασίας

2. Λόγος φθοράς εργαλείου

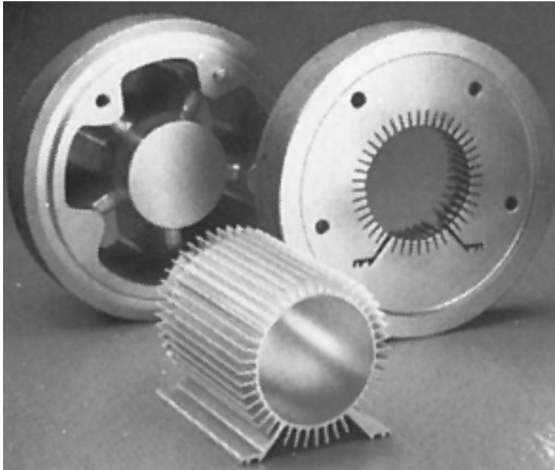
Ο λόγος φθοράς εργαλείου TWR ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας του υλικού που αποβάλλεται από το ηλεκτρόδιο προς το τεμάχιο και έχει μονάδα το επί τοις εκατό [%]. Σαφώς, η φθορά του ηλεκτροδίου – εργαλείου είναι αισθητά μικρότερη του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Όσο πιο μικρή η τιμή του TWR τόσο πιο οικονομικά προσοδοφόρα και ευσταθής είναι η κατεργασία. Αυτός ο δείκτης συνδέεται άμεσα με τον χρόνο παλμού, το είδος των υλικών των εταίρων της κοπής, την ένταση του ρεύματος και τη διαφορά δυναμικού όπως επίσης και από την πολικότητα [1].

3. Τραχύτητα επιφάνειας

Η τραχύτητα της επιφάνειας αποτελεί ένδειξη της ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας του τεμαχίου και ποσοτικοποιείται με τη βοήθεια του δείκτη της μέσης τραχύτητας επιφάνειας R_a [μm]. Βέβαια δεν είναι μόνον το ποσό της τραχύτητας, το οποίο επιθυμούμε να λαμβάνει την ελάχιστη δυνατή τιμή, αλλά και διάφοροι άλλοι όροι υπάρχουν για να εκφράσουν την ποιότητα της επιφάνειας όπως η επιφανειακή ακεραιότητα. Η τραχύτητα συναρτάται με το δυναμικό, τον χρόνο παλμού και την ένταση του ρεύματος. Αυξανόμενης της ενέργειας του σπινθήρα, δημιουργούνται μεγαλύτεροι και πιο χονδροί κρατήρες, που προσαυξάνουν την τραχύτητα. Η τραχύτητα όμως εξαρτάται και από άλλες ιδιότητες όπως την πίεση του διηλεκτρικού ρευστού που βρίσκεται εντός του δοχείου εργασίας αλλά και από το υλικό του ηλεκτροδίου [1].

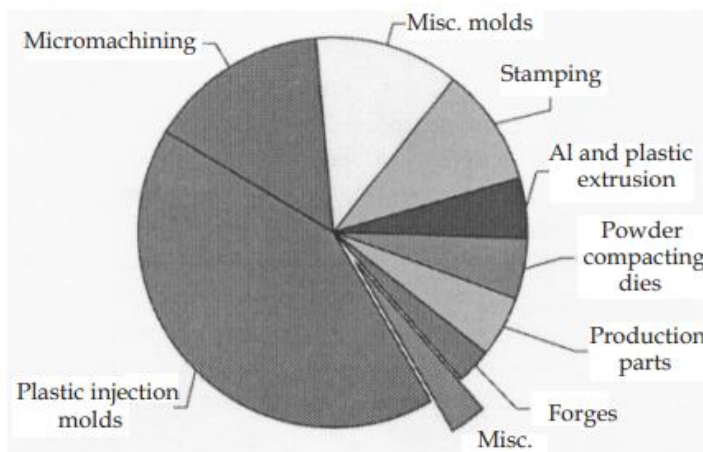
1.6 Εφαρμογές ηλεκτροδιάβρωσης

Η ηλεκτροδιάβρωση EDM βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην αεροναυτική, στην κατασκευή καλουπιών, στη χύτευση πίεσης για την κατασκευή κοιλοτήτων, μικρο-οπών μεγάλου βάθους, λεπτών εγκοπών, πτερυγώσεις στροβίλων και αντικείμενα πολύπλοκης γεωμετρίας [7].



Εικόνα 17: Παράδειγμα βιομηχανικής εφαρμογής στην ηλεκτροδιάβρωση [7]

Πιο συγκεκριμένα, η ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης – βύθισης (die sinking EDM) χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία περίπλοκων κοιλοτήτων και γι' αυτό είναι πολύ χρήσιμη προς την κατασκευή καλουπιών, κοιλοτήτων και πολλά είδη εργαλείων, ειδικότερα από σκληρά υλικά όπως τον εργαλειοχάλυβα. Ακόμη, προτιμάται για τη δημιουργία λοξών αποτιμήσεων σε γωνίες και για νεύρα (ribs) [17].



Εικόνα 18: Γράφημα πίτας που καταδεικνύει το εύρος και τη συχνότητα εφαρμογών της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης – βύθισης [18]

Από την άλλη πλευρά, η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος τυπικά χρησιμοποιείται μετά από το πέρας συμβατικών κατεργασιών για την κοπή πλακών πολύ μεγάλου πάχους που είναι κατασκευασμένες από πολύ σκληρά μέταλλα. Πρόκειται για μια προσφιλή διαδικασία για την παραγωγή ποντών, εργαλείων και κοιλοτήτων. Υποστηρίζει την κατασκευή κομματιών στην αεροδιαστημική και στο χώρο των μεταφορών όπως και κομμάτια με πολύ σφιχτές ανοχές, συσκευές που βρίσκουν χρήση στην ιατρική και στην οδοντιατρική. Τέλος, με αυτόν τον τρόπο, μορφοποιούνται και τεμάχια πολύ λεπτού πάχους που θα θραύονταν στην περίπτωση δοκιμής κάποιας συμβατικής κατεργασίας [17].

Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ανθρακονημάτων

2.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον για την εφαρμογή των σύνθετων υλικών σε μια πληθώρα κατασκευών καθώς συνδυάζουν χαμηλό βάρος και σημαντικές μηχανικές ιδιότητες. Τα υλικά, στις διάφορες μορφές τους, έκαναν αισθητή την εμφάνισή τους από τα αρχαία χρόνια βοηθώντας στην καθημερινότητα των ανθρώπων και είναι συνδεδεμένα με την εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να εξαχθεί εύκολα αν σκεφτούμε το χαρακτηρισμό των διαφόρων εποχών ανάλογα με το υλικό-σταθμό της συγκεκριμένης περιόδου (Λίθινη, Χάλκινη καθώς και εποχή του Σιδήρου).

Η επιστήμη των σύνθετων υλικών τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει μια σταθερή αλλά πολλά υποσχόμενη πορεία, όσον αφορά στην μελέτη και εξέλιξή τους. Είναι γνωστό το γεγονός ότι στην διαχρονική του πορεία ο άνθρωπος προσπάθησε να συνδυάσει τις γνώσεις του σε τεχνολογικό επίπεδο προκειμένου να δημιουργήσει οτιδήποτε θα τον βοηθούσε να καλύψει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος των αναγκών του. Για τον λόγο αυτό, νέα υλικά με αρκετά βελτιωμένες ιδιότητες κάνουν αισθητή την παρουσία τους, ήδη από αρχαιοτάτων χρόνων, και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην μετεξέλιξη του ανθρώπινου είδους τεχνολογικά.

Αναζητώντας ιστορικά την εξέλιξη των σύνθετων υλικών, στην ουσία είναι σαν να ρίχνουμε μια ματιά στην ταυτόχρονη ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Η ιστορική εξέλιξη των υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξέλιξη του ανθρώπου και την μετάβασή του από την προϊστορία στην ιστορία. Η ανάπτυξη νέων υλικών και η εξέλιξη υπαρχόντων είναι η βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η πρόοδος της ανθρωπότητας σε όλες τις διαστάσεις της, από την καθημερινότητά ,την υγεία ,την επιστήμη ακόμα και τις τέχνες. Σύνθετα υλικά λοιπόν έχουν εμφανή την χρήση τους όσον αφορά σε εφαρμογές όπως οι κατασκευές, η δημιουργία οπλικών συστημάτων, οι γραφικές ύλες και η ναυσιπλοΐα.

Η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 έτη με τα σύνθετα υλικά να καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές. Η υψηλή αντοχή, η αντοχή σε διάβρωση, το χαμηλό βάρος, η συμπεριφορά σε κόπωση, κρούση και διάδοση ρωγμών, η διαδικασία παραγωγής τους και το μικρό κόστος συντήρησής τους είναι κάποιοι από τους παράγοντες που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Βέβαια, όπως όλα τα υλικά, έτσι και αυτά παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα που αφορούν τον ερπυσμό, την αντίσταση σε μηχανική φθορά, την απόκριση υπό ορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος. Η αντιμετώπιση ορισμένων μειονεκτημάτων επιτυγχάνεται μέσω συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης για την παραγωγή νέων και καλύτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής [19].

2.2 Ορισμός συνθέτων υλικών

Ο όρος σύνθετο υλικό κατά τον Changxu Shi είναι ο ακόλουθος: "Τα σύνθετα υλικά είναι νέα υλικά, τα οποία προέρχονται από συνδυασμούς διαφορετικών τύπων υλικών, όπως τα οργανικά πολυμερή, ανόργανα μη μεταλλικά ή μεταλλικά και ούτω καθεξής, μέσω της τεχνολογίας ανάμιξης (compound technology). Το υλικό που προκύπτει όχι μόνο διατηρεί το κύριο χαρακτηριστικό των αρχικών συστατικών του, αλλά αποκτά και ιδιότητες που δεν παρουσιάζουν τα αρχικά συστατικά μέσω των συνδυασμένων επιδράσεων, με αποτέλεσμα την δημιουργία προϊόντων ανώτερων, τα οποία διαφέρουν σημαντικά από εκείνα που προκύπτουν από την απλή ανάμιξη γενικά υλικών μεταξύ τους." [20]

Ακόμη κατά τον Agarwal (1990) ως σύνθετο υλικό αποκαλείται "εκείνο που μακροσκοπικά αποτελείται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους" [21].

Το δομικό σύνθετο συνιστά ένα υλικό σύστημα που συγκροτείται από δύο ή περισσότερες φάσεις σε μακροσκοπική κλίμακα, των οποίων η μηχανική απόδοση και οι ιδιότητες έχουν σχεδιαστεί για να είναι ανώτερες από εκείνες των συστατικών υλικών, τα οποία ενεργούν ανεξάρτητα. Η μια από τις φάσεις είναι συνήθως ασυνεχής, πιο άκαμπτη και ισχυρότερη και ονομάζεται οπλισμός, ενώ η λιγότερο άκαμπτη και ασθενέστερη φάση είναι συνεχής και ονομάζεται μήτρα. Μερικές φορές λόγω χημικών αλληλεπιδράσεων ή άλλων επιδράσεων επεξεργασίας, μια επιπρόσθετη ξεχωριστή φάση που ονομάζεται μεσόφαση υπάρχει ανάμεσα στον οπλισμό και την μήτρα. Οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού εξαρτώνται από τις ιδιότητες των συστατικών του, τη γεωμετρία και την κατανομή των φάσεων του. Η κατανομή του οπλισμού καθορίζει την ομοιογένεια ή ομοιομορφία του συστήματος του υλικού. Όσο περισσότερο ανομοιομορφη είναι η κατανομή του οπλισμού, τόσο πιο ετερογενές είναι το υλικό και τόσο πιο υψηλότερη είναι η διασπορά των ιδιοτήτων και η πιθανότητα αστοχίας σε ασθενέστερες περιοχές. Η γεωμετρία και ο προσανατολισμός του οπλισμού επηρεάζουν την ανισοτροπία του συστήματος [22].

Είναι γενικά λογικό το γεγονός πως υπάρχουν αρκετές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα σύνθετα υλικά. Βέβαια, από όλες εκείνες τις κατηγορίες η πιο ευρέως διαδεδομένη είναι εκείνη των ινωδών σύνθετων υλικών, όπου η μήτρα ενισχύεται με ίνες. Σαν υλικά μήτρας συνήθως χρησιμοποιούνται μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή, με τα τελευταία να αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή. Οι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση είναι οι ίνες ύαλου, οι ίνες άνθρακα, οι ίνες αραμιδίου, οι κεραμικές ίνες και οι πολυμερικές ίνες.

2.3 Σύνθετα Υλικά ρητινικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες

Η κατηγοριοποίηση σύμφωνα με το υλικό της μήτρας δεν είναι τυχαία αν αναλογιστεί κανείς τον ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο της όσον αφορά στο σύνθετο υλικό. Βέβαια, έναν ακόμη λόγο αποτελεί το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το 30% με 40% του συνολικού όγκου του σύνθετου υλικού καταλαμβάνεται από την μήτρα. Ειδικότερα, η μήτρα μεταφέρει τα φορτία μέσω της διεπιφάνειας στο έγκλεισμα, το οποίο προστατεύει συγχρόνως από τους όποιους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι ενδέχεται να προκαλέσουν τριβή και διάβρωση. Έχει σημαντικό συνδετικό ρόλο, αφού αποτελεί συγκολλητική ουσία και φυσικά συνεισφέρει στις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Επιπλέον, συμβάλλει στην διατήρηση του σχήματος του σύνθετου υλικού, ευθυγραμμίζοντας τις ενισχύσεις [23]. Τέλος, από την επιλογή του τύπου της μήτρας που θα χρησιμοποιηθεί κρίνεται και ο βιομηχανικός εξοπλισμός που θα είναι απαραίτητος.

Οι μήτρες κατηγοριοποιούνται ως εξής με κριτήριο το υλικό:

- ο Οργανικές μήτρες
- ο Κεραμικές μήτρες
- ο Μεταλλικές μήτρες

* Ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο, καθώς στις οικοδομικές κατασκευές συχνά ενισχύεται με χάλυβα, ίνες αμιάντου, και ίνες γυαλιού. Η επιλογή του υλικού της μήτρας γίνεται με βάση τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του σύνθετου, με το γενικό κανόνα να υπαγορεύει οργανικές μήτρες στις χαμηλές θερμοκρασίες και κεραμικές μήτρες στις υψηλότερες.

Θα ασχοληθούμε μόνο με τις οργανικές μήτρες, καθώς αυτές χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα υλικά που εξετάστηκαν στην εργασία. Οι οργανικές μήτρες είναι πολύ πιο εύκολο να κατασκευαστούν από οποιαδήποτε άλλο είδος μήτρας. Αυτό οφείλεται κυρίως στις χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για την επεξεργασία τους.

Οι οργανικές μήτρες με την σειρά τους διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:

- ο Θερμοπλαστικές μήτρες
- ο Θερμοσκληρυνόμενες μήτρες
- ο Ελαστομερείς μήτρες

2.4 Ίνες Άνθρακα

Ο όρος ίνες άνθρακα αφορά στις ίνες που συνίστανται από άνθρακα C σε ποσοστό τουλάχιστον ίσο με 92 %. Οι ίνες μπορεί να είναι κοντές ή μακριές, ενώ η δομή τους μπορεί να είναι κρυσταλλική, εν μέρει κρυσταλλική ή τελείως άμορφη. Η κρυσταλλική τους μορφή, ακολουθεί την κρυσταλλική δομή του γραφίτη, ο οποίος αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων ο βαθμός ανισοτροπίας εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Το ποσοστό του γραφίτη σε μια ίνα μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 100 %. Όταν αυτό είναι υψηλό, τότε η ίνα ονομάζεται γραφίτική. Αυτή η εκδοχή, δηλαδή οι ίνες γραφίτη, είναι και η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων και ελαττωμένου βάρους σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμώνται στην περίπτωση που η θερμική διαστολή ενός υλικού είναι αναγκαίο να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.

Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και στους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Απότοκο του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής στη συγκεκριμένη διεύθυνση. Στη γραφίτική δομή τα άτομα του άνθρακα διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

Ο παρακάτω πίνακας δίνει στοιχεία για τις ίνες άνθρακα με κριτήριο το πόσα στάδια παραγωγής ακολουθήθηκαν έως την τελική μορφοποίησή τους.

Χαρακτηριστικό	Ίνες Υψηλής Αντοχής	Ίνες Υψηλού Μέτρου Ελαστικότητας
Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	180 – 230	350 – 420
Αντοχή σε εφελκυσμό [MPa]	2500 – 3400	1900 - 2300
% Περιεκτικότητα σε C	95 – 98	99
Πυκνότητα [g/cm ³]	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης °C	2000	2500

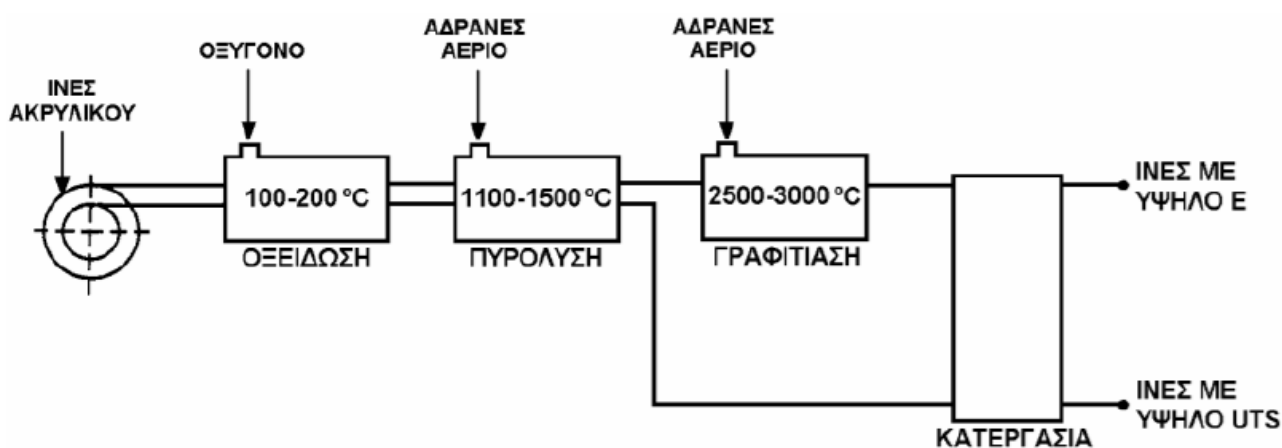
Πίνακας 8: Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες ανθρακονημάτων

2.4.1 Τρόπος παραγωγής ανθρακονημάτων

Η πρώτη ύλης παρασκευής των ινών άνθρακα είναι το πολυμερές πολυακρυλονιτρίλιο, το οποίο συμβολίζεται ως PAN. Με εξάρτηση τις συνθήκες παραγωγής τους, είναι δυνατό να επιτευχθεί είτε παραγωγή ινών υψηλής αντοχής είτε ινών υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Η παραγωγή ινών υψηλού μέτρου ελαστικότητας απαιτεί να έχουν προηγηθεί κάποια στάδια. Η πρώτη φάση ουσιαστικά συνιστά την οξείδωση των ινών στον αέρα σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (100 - 200°C), ενώ συγχρόνως εφαρμόζεται τάση με σκοπό την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς. Έπειτα, έρχεται η σειρά για την φάση της πυρόλυσης σε αναγωγικό ή ουδέτερο περιβάλλον σε πολύ υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με προηγούμενα (1100-1500°C). Συνεχίζοντας τη θέρμανση (2500 - 3000°C), συμβαίνει το φαινόμενο της γραφίτιωσης σε συνδυασμό με την ανακρυστάλλωση που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών.

Όταν ολοκληρωθεί η 3^η και τελική φάση, παράγονται οι ίνες άνθρακα, που διαθέτουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, ενώ για την παρασκευή ινών με υψηλή αντοχή χρειάζονται μόνο οι δύο πρώτες διεργασίες στάδια. Με κριτήριο το βαθμό γραφίτιωσης και το βαθμό ανισοτροπίας που εξαρτάται από τον τρόπο διεύθησης των ινών, καθορίζονται οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες των ινών.

Το επόμενο σχήμα οπτικοποιεί τη συνολική διαδικασία παραγωγής των ανθρακονημάτων σε στάδια και αναγράφονται και οι αναγκαίοι παράγοντες, που είναι αναγκαίοι σε κάθε βήμα.

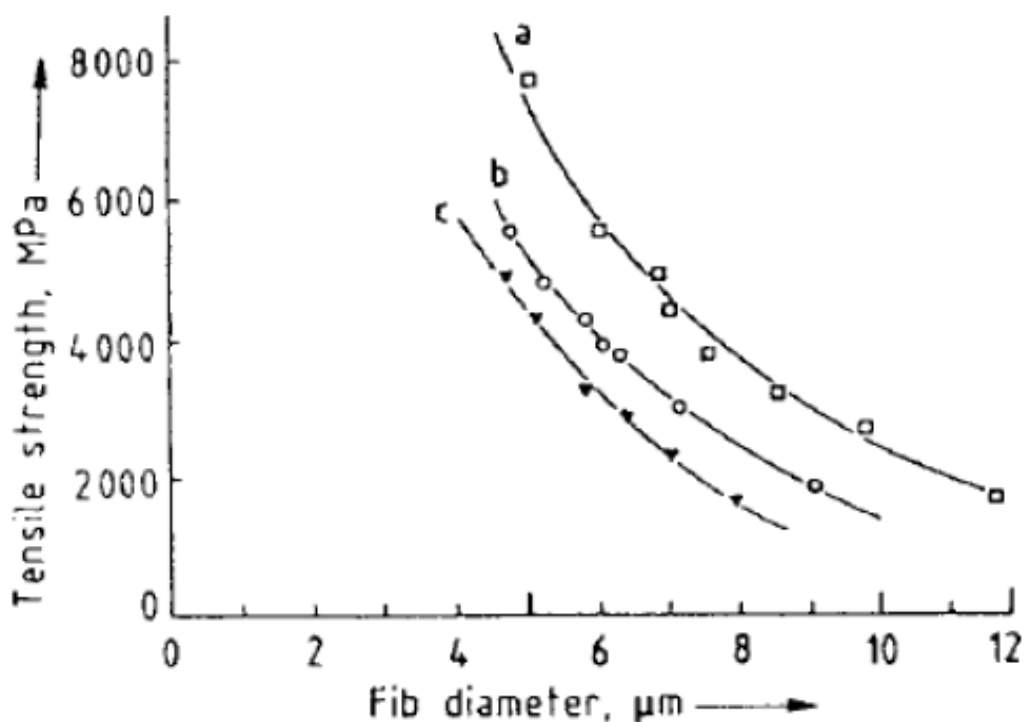


Εικόνα 19: Οπτικοποίηση τρόπου παραγωγής των ανθρακονημάτων

2.4.2 Μηχανικές ιδιότητες ανθρακονημάτων

Ως προς τις μηχανικές ιδιότητες, άμεσα αντιλαμβάνεται κανείς ότι το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό των ανθρακονημάτων παρουσιάζονται πολύ χαμηλότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη ενός κρυστάλλου γραφίτη. Το μέτρο ελαστικότητας των ινών, που χαρακτηρίζονται από υψηλό μέτρο ελαστικότητας φθάνει σχεδόν το μέτρο του κρυστάλλου γραφίτη. Εν αντιθέσει, στις ίνες με υψηλή αντοχή, όπως αναμένεται, θα είναι πολύ χαμηλότερο. Παράλληλα, η αντοχή σε εφελκυσμό των δύο κατηγοριών ινών είναι πολύ πιο περιορισμένο από του γραφίτη.

Σε οποιοδήποτε υλικό, η αντοχή εφελκυσμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τυχούσες κατασκευαστικές ατέλειες, είτε επιφανειακές είτε δυσμενέστερα αθέατες εσωτερικές. Αυτή η μηχανική ιδιότητα αυξάνεται όσο το μήκος και η διάμετρος της ίνας ελαττώνεται. Στο παρακάτω διάγραμμα διακρίνεται η εξάρτηση της αντοχής από την διάμετρο της ίνας, για τρεις τύπους ινών από PAN.

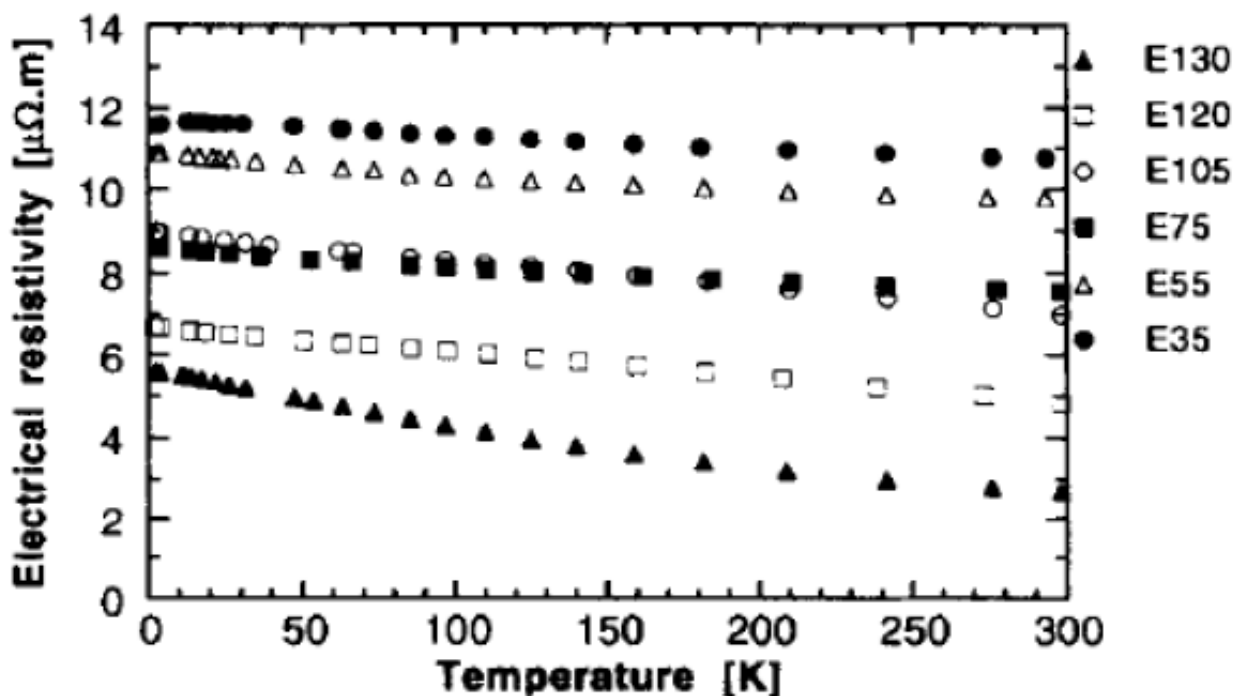


Διάγραμμα 1: Συνάρτηση της διαμέτρου της ίνας με την αντοχή σε εφελκυσμό

Η αντοχή σε θλίψη εμφανίζεται πολύ πιο ελαττωμένη συγκριτικά με το αντίστοιχο μέγεθος σε εφελκυσμό. Έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με το μέτρο ελαστικότητας. Ακόμη, ο λόγος της αντοχής θλίψης προς την αντοχή εφελκυσμού αποδεικνύεται πως είναι μικρότερος στις ίνες από γραφίτη σε σχέση με εκείνες από άνθρακα. Τυχούσα μείωση της αντοχής σε θλίψη φέρει αντίστοιχη μείωση και της αντοχής σε διάτμηση. Σχετικά με την αντοχή σε κάμψη, αυτή των ινών από PAN είναι αρκετά μεγάλη, σε αντίθεση με αυτή των ινών από πίσσα.

2.4.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες ανθρακονημάτων

Η ηλεκτρική αντίσταση σχεδόν για όλα τα είδη των ανθρακονημάτων ελαττώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Το παρακάτω διάγραμμα αποδεικνύει του λόγου το αληθές και αναδεικνύει αυτή τη συσχέτιση με πειραματικό τρόπο. Τούτο συμβαίνει εξαιτίας της αναλογικής σχέσης πυκνότητας – θερμοκρασίας, όπως πραγματοποιείται με το γραφίτη και τον άνθρακα. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της πυκνότητάς τους με αύξηση της θερμοκρασίας, όπως συμβαίνει και με τον άνθρακα και το γραφίτη. Επιπροσθέτως, για σταθερή θερμοκρασία σε μια δοσμένη θερμοκρασία, η αντίσταση μειώνεται όταν το μέτρο ελαστικότητας μεγεθύνεται.



Διάγραμμα 2: Τρόπος επιρροής ηλεκτρικής αντίστασης των ανθρακονημάτων από τη θερμοκρασία

Η πιο αποδοτική μέθοδος μείωσης της αντίστασης των ανθρακονημάτων είναι αυτή της παρεμβολής. Παρεμβολή λέγεται η διεργασία εισόδου ξένων ατόμων εντός των στρωμάτων άνθρακα. Οι παρεμβολείς δρουν είτε ως αποδέκτες, είτε ως δότες ηλεκτρονίων, «ντοπάροντας» έτσι τα ανθρακονήματα. Ο τρόπος αυτός συμβάλλει στην αύξηση της συγκέντρωσης του φορέα και κατά συνέπεια σε ελάττωση της ηλεκτρικής του αντίστασης. Η παρεμβολή μπορεί να συμβεί αποκλειστικά στις ίνες από γραφίτη και να καταλήξει σε πτώση της αντίστασης έως και 80%. Η αντίστοιχη αύξηση του βάρους των ινών μπορεί να φτάσει το 20 %. Ένας μη αμελητέος περιορισμός αυτής της τεχνικής ενδεχομένως εντοπίζεται στην πρόκληση φυσικών ατελειών στις ίνες, ώστε να υποβαθμίζουν σε σημαντικό βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες και την αντίσταση σε οξείδωση.

2.5 Τα ανθρακονήματα στην ηλεκτροδιάβρωση

Συνολικά, η ενισχυτική φάση των σύνθετων υλικών εξαιτίας της σκληρότητάς και της ψαθυρής φύσης τους, ενέχει μεγάλο βαθμό ευαισθησίας στις τεχνικές συμβατικών κατεργασιών και πιο συγκεκριμένα στις κατεργασίες αποβολής υλικού. Σημαντική πρόκληση αποτελεί η διάνοιξη διαμπερών αλλά και τυφλών οπών. Τα πιο συχνά απαντώμενα ελαττώματα που αναπτύσσονται συνίστανται σε αποκολλήσεις στρωμάτων, ρωγμές στη μήτρα και κατεστραμμένες ίνες που προεξέχουν, ενώ η διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι ελάχιστη.

Για όλους αυτούς τους λόγους εξετάζονται εκείνοι οι τρόποι κατεργασιμότητας των σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα με τη συνδρομή μη συμβατικών κατεργασιών. Η ηλεκτροδιάβρωση συνιστά μια κατεργασία αρκετά επαρκή για εφαρμογή σε εξόχως σκληρά υλικά που είναι δύσκολο να κοπούν (όπως θερμικά επεξεργασμένοι χάλυβες, καρβίδια σκληρομετάλλων και διάφορα κεραμικά), και μπορεί να αξιοποιηθεί σε σύνθετα υλικά με ενίσχυση ανθρακονημάτων. Εκτός από τη δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων γεωμετριών, κατά την ηλεκτροδιάβρωση αναπτύσσονται πολύ ασθενείς έως και μηδενικές δυνάμεις επαφής. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται εξαιρετική ακρίβεια και αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες παραμορφώσεις, οι παραμένουσες τάσεις και οι τυχόντες κραδασμοί.

Σύμφωνα με τα πορίσματα πολλών επιστημονικών εργασιών και αντίστοιχων πειραματικών προσπαθειών διαφαίνεται ότι η θετική πολικότητα εργαλείου αποδίδει καλύτερα από την αρνητική, όσον αφορά τη σχετική φθορά του εργαλείου και το ρυθμό αποβολής υλικού από το τεμάχιο με σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους κατεργασίας και πάντα στις ίδιες συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Τα ηλεκτρόδια από χαλκό επιτυγχάνουν μειωμένες και επιθυμητές τιμές τραχύτητας επιφανείας και σχετικής φθοράς εργαλείου εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα από γραφίτη. Γενική οδηγία κατά την κατεργασία τέτοιων σύνθετων υλικών είναι η αποφυγή χρήσης μεγάλων εντάσεων ρεύματος εξαιτίας του κινδύνου τήξης στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Εκτός από αυτό, μπορεί να διασταλούν θερμικά οι ίνες, να αποκολληθούν τα επιμέρους στρώματα του συνθέτου υλικού και στη δυσμενέστερη περίπτωση αποσύνδεση των ινών από τη μήτρα.

Κεφάλαιο 3 – Πειραματικό Μέρος

Η παρούσα πειραματική μελέτη αποσκοπεί στην διερεύνηση των παραμέτρων της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης, όπως η ένταση του ρεύματος και η χρονική διάρκεια του παλμού, στην ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας σε συνάρτηση με τη γωνία τοποθέτησης του δοκιμίου. Τα δοκίμια μετά την κατεργασία εξετάζονται διαστασιακά, μορφολογικά και μεταλλογραφικά. Είναι κατασκευασμένα από σύνθετο υλικό ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, δηλαδή πρόκειται για το υλικό με συμβολισμό CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic).

3.1 Πειραματική Διάταξη

Τα πειράματα, τα οποία ήταν απαραίτητα για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, διεξήχθησαν στην εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης που βρίσκεται στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Η εργαλειομηχανή είναι η AGIETRON EMT 1.10. της εταιρείας AGIEPULS. Συγκροτείται από τρεις επιμέρους μονάδες, ανεξάρτητες μηχανές, που συντελούν στην πραγματοποίηση της κοπής:

- Κύρια μηχανή
- Μονάδα παροχής ισχύος
- Μονάδα παροχής διηλεκτρικού μέσου

Τα τρία αυτά μέρη επικοινωνούν μεταξύ τους με αγωγούς ηλεκτρικού ρεύματος και αντίστοιχους διηλεκτρικού ρευστού. Η άτρακτος της μηχανής δύναται να μετακινηθεί στον κατακόρυφο άξονα Z και διαθέτει σύστημα αυτόματης πρόωσης με σκοπό τη διατήρηση σταθερού διακένου κατά την διάρκεια της αποβολής υλικού. Το δοκίμιο στερεώνεται στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, που μπορεί να μετακινηθεί στους άξονες X και Y. Σε όλα τα πειράματα διατηρείται σταθερή η ένταση του ρεύματος και η χρονική διάρκεια του παλμού, ενώ μεταβάλλεται μόνο η γωνία τοποθέτησης («κοπής»). Παρακάτω, παρουσιάζεται φωτογραφία από την πρόοψη της προαναφερθείσας εργαλειομηχανής:



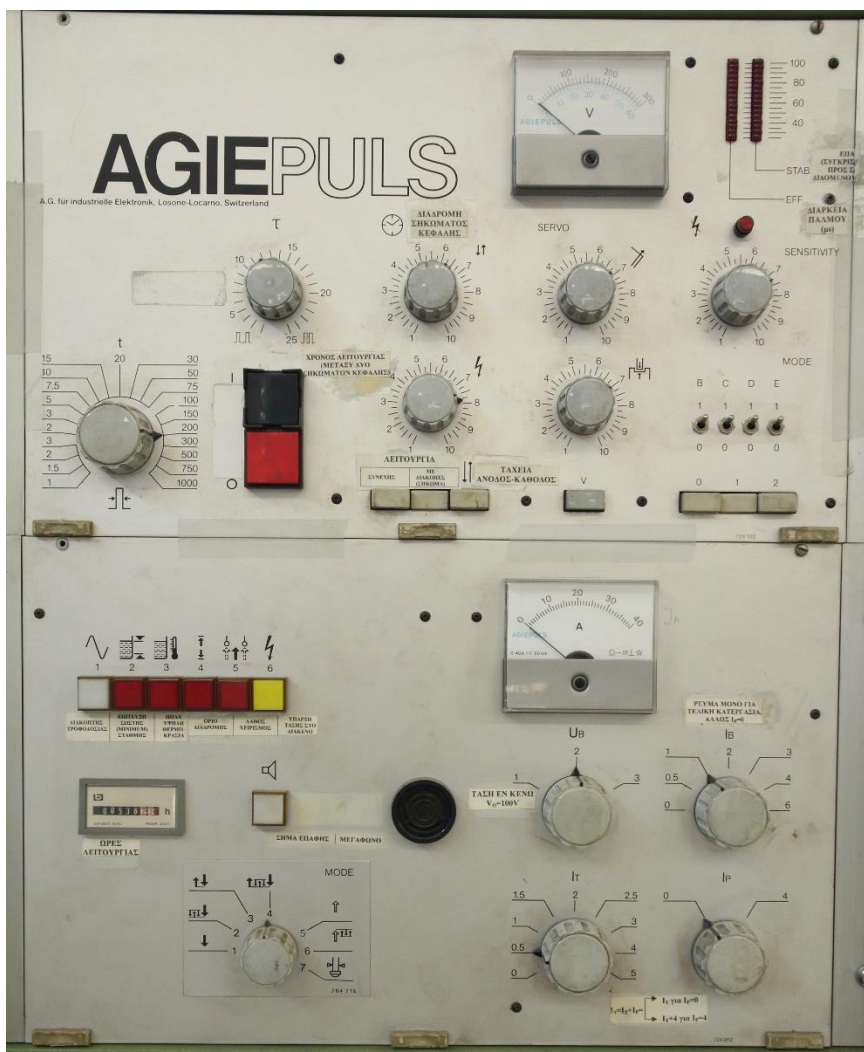
Εικόνα 20: Η εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης του εργαστηρίου

Η μονάδα παροχής ισχύος είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση των παραμέτρων κατεργασίας σχετικά με την ένταση του ρεύματος, τη χρονική διάρκεια του παλμού εκκένωσης, το μήκος διακένου, την τάση εν κενώ και τη διαρκή ή βηματική λειτουργία της εργαλειομηχανής. Το βάθος κοπής ελέγχεται από μια συσκευή που βρίσκεται αριστερά από την σερβοκεφαλή. Στην αναφερόμενη μονάδα η ένταση του ρεύματος μετράται με αμπερόμετρο. Όμως, η τιμή της έντασης προσδιορίζεται με έμμεσο τρόπο, καθώς οι ενδείξεις των διακοπών αντιστοιχούν σε μονάδες ρεύματος J_T και όχι σε Αμπέρ [A]. Σε κάθε μονάδα ρεύματος, όπως αναγράφεται στις οδηγίες χρήσης της εργαλειομηχανής, αντιστοιχούν περίπου 3A ένταση ρεύματος [24].

Η διάρκεια παλμού T [μs] επιλέγεται ξανά μέσω ενός περιστροφικού διακόπτη. Ακόμη, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών ελέγχεται μέσω του περιστροφικού διακόπτη με ένδειξη "t", όπου τ ο παράγοντας σταθερότητας, το οποίο ως μέγεθος δεν έχει φυσική σημασία.

Ως τρόπος απόπλυσης από τυχούσες ακαθαρσίες, χρησιμοποιείται παράπλευρα του τεμαχίου δέσμη jet διηλεκτρικού ρευστού χαμηλής πίεσης. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο πληρώνεται η λεκάνη με διηλεκτρικό μέσο πριν την έναρξη της κατεργασίας.

Στη συνέχεια, παρατίθεται φωτογραφία από το ταμπλό ελέγχου που περιλαμβάνει τους περιστροφικούς διακόπτες στην μονάδα ισχύος της βιομηχανικής εργαλειομηχανής:



Εικόνα 21: Ταμπλό ελέγχου της εργαλειομηχανής για τη ρύθμιση των παραμέτρων κατεργασίας

3.2 Δοκίμια & Ηλεκτρόδιο

Ως τεμάχια προς κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης χρησιμοποιούνται 8 επίπεδες πλάκες σύνθετου υλικού, ενισχυμένου με ανθρακονήματα, όπως την παρακάτω που φαίνεται στην επισυναπτόμενη εικόνα.



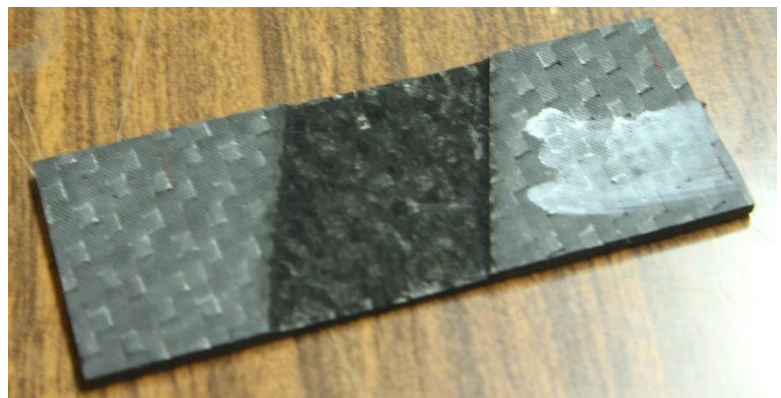
Εικόνα 22: Ενδεικτικό δοκίμιο πριν την κατεργασία

Οι ενισχυτικές ίνες στα πολύστρωτα δοκίμια με ίνες άνθρακα είναι σε μορφή υφάσματος πυκνής πλέξης και ισοσταθμισμένης διαμόρφωσης, οι οποίες στερεοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας εποξική ρητίνη διαφορετικές συμμετρικές διαστρωματικές ακολουθίες. Το ύφασμα είναι το Hexcel-Brochier carbon fabric G939D (ίνες άνθρακα HTA-3K σε πλέξη τύπου 4H satin) με πυκνότητα ανά μονάδα επιφάνειας ίση με 220 gr/m^2 . Η εποξική ρητίνη είναι η Rutarox LB20 ρητίνη με Rutadur SL Hardener. Η περιεκτικότητα ινών κατ' όγκον, V_f , όλων των CFRP δοκιμίων είναι 58,2 %. Η διαστρωματική ακολουθία που χρησιμοποιήθηκε είναι $[0^\circ]_{10}$ υποδηλώνοντας 10 στρώσεις ινών σε διαμήκη διεύθυνση.

Ως «εργαλείο κοπής» θεωρείται το ηλεκτρόδιο, το οποίο αποτελείται από ηλεκτρολυτικό χαλκό σε περιεκτικότητα 99,9 % και διαθέτει ορθογωνική γεωμετρία διαστάσεων $38 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$. Γι' αυτόν το λόγο, δημιουργεί στο τεμάχιο μια διαμόρφωση σαν σκαλοπάτι μετά το πέρας της κατεργασίας. Αντίστοιχες φωτογραφίες εμφανίζονται στη συνέχεια.



Εικόνα 24: Το ηλεκτρόδιο χαλκού



Εικόνα 23: Άποψη τεμαχίου μετά την κατεργασία

3.3 Σχεδιασμός πειράματος (DOE)

Κύριος σκοπός της παρούσας πειραματικής μελέτης είναι η διερεύνηση του βαθμού κατεργασιμότητας συνθέτων υλικών ενισχυμένων με ανθρακονήματα σε συνάρτηση με τη γωνία «κοπής». Η κατεργασιμότητα κατά την ηλεκτροδιάβρωση θα ποσοτικοποιηθεί μέσω του ρυθμού αποβολής υλικού $MRR \left[\frac{mm^3}{min} \right]$ και της τραχύτητας $R_i [\mu m]$. Αυτά τα δύο κριτήρια δύνανται να συμπιέσουν όλη την χρήσιμη πληροφορία και να μας επιτρέψουν να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Χρησιμοποιούνται αρχικά 4 δοκίμια ίδιας γεωμετρίας και χαρακτηριστικών υλικού, τα οποία κατεργάζονται με γωνία κοπής $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ και 90° αντίστοιχα. Για κάθε ένα από αυτά τα πειράματα προσδιορίζονται τα παρακάτω φυσικά μεγέθη και συμβαίνουν τα παρακάτω γεγονότα:

- ο Αρχική μάζα δοκιμίου $m_{initial} [g]$
- ο Πραγματοποίηση της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης
- ο Μάζα δοκιμίου μετά το πέρας της κατεργασίας $m_{final} [g]$
- ο Συνολικός χρόνος κατεργασίας $t_{EDM} [min]$
- ο Καταγραφή γωνίας κοπής / τοποθέτησης $\alpha [^\circ]$
- ο Προσδιορισμός του ονομαστικού βάθους κοπής $z [mm]$
- ο Τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας $R_a, R_q, R_t, R_y [\mu m]$
- ο Κοπή σε κατάλληλο μέγεθος και εγκιβωτισμός δοκιμίων σε εποξειδική ρητίνη
- ο Καθαρισμός των δοκιμίων, λείανση και στίλβωση τους
- ο Μεταλλογραφική μελέτη σε οπτικό μικροσκόπιο και λήψη αντίστοιχων εικόνων

Όσον αφορά τις συνθήκες κατεργασίας είναι σταθερές οι παράμετροι του υλικού, της έντασης του ρεύματος κατεργασίας I_p και της χρονικής διάρκειας του παλμού T_{on} όσο και της τάσης κατεργασίας U . Για τη προαναφερθείσα τριάδα μεγεθών, χρειάζεται να βρούμε τις ιδανικές τιμές για την αποφυγή ελαττωμάτων και ατελειών αλλά και την όσο πιο δυνατόν γρηγορότερη κοπή των δοκιμίων. Γι' αυτόν το λόγο, αρχικά επιλέχθηκε το ζεύγος τιμών $(I_p, T_{on}) = (0,5 A, 200 \mu s)$ και μετέπειτα $(I_p, T_{on}) = (1 A, 200 \mu s)$. Η δεύτερη δοκιμή οδήγησε σε σοβαρό ελάττωμα κατεργασίας, ονόματι ηλεκτρικό τόξο, και γι' αυτόν το λόγο αποφασίστηκε η σταθεροποίηση των παραμέτρων κατεργασίας ως εξής: $(I_p, T_{on}, U) = (0,5 A, 500 \mu s, 100 V)$.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η διενέργεια ενός extra set ολοκληρωμένης κοπής που αφορά σε άλλα 4 δοκίμια, τα οποία είναι κατασκευασμένα ακριβώς από το ίδιο υλικό με τα προηγούμενα. Συγχρόνως, ισχύει η κατάσταση κατά την οποία μεταβάλλουμε τη γωνία κοπής από 0° έως και 90° με βήμα 30° . Ωστόσο, για λόγους αντιπαραβολής και βέλτιστης μελέτης της κατεργασιμότητας επιλέχθηκε η τριάδα συνθηκών κοπής: $(I_p', T_{on}', U') = (0,5 A, 150 \mu s, 200 V)$.

3.4 Περιγραφή της ακολουθίας πειραμάτων

Αρχικά, ζυγίζονται όλα τα δοκίμια πριν την έναρξη της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης με ειδική ζυγαριά ακριβείας, που διαθέτει διακριτική ικανότητα 0,1 g. Η συγκεκριμένη βιομηχανική ζυγαριά έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Kern και παρακάτω φαίνεται μια φωτογραφία αυτής.



Εικόνα 25: Ζυγαριά στην οποία μετρήθηκε η μάζα των δοκιμίων

Η ουσία της ακολουθίας των πειραμάτων έγκειται στην πραγματοποίηση της ηλεκτροδιάβρωσης βύθισης EDM. Λαμβάνει χώρα στην εργαλειομηχανή του εργαστηρίου, η οποία αναλύθηκε εκτενώς στην ενότητα 3.1. Το τεμάχιο (TE) προς κατεργασία τοποθετείται πάνω στη βάση και συγκρατείται με κατάλληλες εδράσεις (βαρίδια). Η συγκράτηση του δοκιμίου κρίνεται απολύτως αναγκαία καθώς καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας ασκούνται υψηλές πιέσεις από το διηλεκτρικό ρευστό, που ενυπάρχει στη δεξαμενή. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ανεπιθύμητη μετατόπιση του από τη θέση κοπής. Επιπλέον, εισάγεται και το ηλεκτρόδιο στην προβλεπόμενη του θέση φροντίζοντας να έχει ασφαλιστεί κατάλληλα, καθώς εκείνο παίζει τον ρόλο του εργαλείου κοπής (EP). Μέσω των περιστροφικών διακοπών ορίζονται η ένταση του ρεύματος, η χρονική διάρκεια του παλμού, η τάση και όλες οι υπόλοιπες συνθήκες κατεργασίας. Παράλληλα, ορίζεται και μια τιμή – στόχος ως το επιθυμητό βάθος κοπής z_d [mm], το οποίο δεν σημαίνει αυτόματα πως θα επιτευχθεί η δοθείσα αφαίρεση υλικού. Στη συνέχεια, το ηλεκτρόδιο κινείται κατακόρυφα προς τα κάτω με χαμηλή πρόωση, έως ότου φθάσει στην κατάλληλη απόσταση από το τεμάχιο κατεργασίας. Επαφή μεταξύ τους δεν υφίσταται ως μη συμβατική κατεργασία. Το διηλεκτρικό μέσο αρχίζει και καλύπτει την δεξαμενή έτσι ώστε να φθάσει σε μια στάθμη άνω του τεμαχίου και το τελευταίο να βυθίζεται ολικά. Η αφαίρεση υλικού ξεκινά αφού ο χειριστής της εργαλειομηχανής πατήσει το κουμπί έναρξης και ολοκληρώνεται πατώντας το κουμπί περάτωσης STOP. Σε πολύ σκληρά υλικά, όπως τα σύνθετα, σχεδόν ποτέ δεν κόβεται το τεμάχιο στο ζητούμενο βάθος κοπής.

Σαφώς, κάθε δοκίμιο μετά το τέλος της ηλεκτροδιάβρωσης, καθαρίζεται από τυχούσες ακαθαρσίες και υπολείμματα και τοποθετείται στην βιομηχανική ζυγαριά για να βρεθεί η νέα μάζα του μετά την αφαίρεση υλικού.

Στην επόμενη σελίδα, ακολουθούν φωτογραφίες από την λειτουργία της εργαλειομηχανής.



Εικόνα 26: Τοποθέτηση του 1ου δοκιμίου με μηδενική γωνία τοποθέτησης και χρησιμοποίηση εδράσεων



Εικόνα 27: Πλήρωση της δεξαμενής με διηλεκτρικό ρευστό και κάλυψη του τεμαχίου

Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία της μέτρησης της τιμής τραχύτητας στις επιφάνειες των δοκιμών που έχουν υποστεί κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης. Αξιοποιείται η μετρητική συσκευή Surtronic3+ που κατασκευάζεται από την εταιρεία Taylor – Hobson. Αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι για την λήψη της κατάλληλης μέτρησης απαιτούνται πολλές δοκιμές. Και αυτό γιατί το τραχύμετρο είναι υπερβολικά ευαίσθητο και κατά τη διαδικασία της μέτρησης ενδεχομένως παρασύρονται κάποια δοκίμια που είχαν εξαιρετικά μικρή τιμή μάζας και δεν μπορούσαν εύκολα να ισοροπήσουν πάνω στη διάταξη.

Επισυνάπτονται εικόνες από την αντίστοιχη μετρητική διάταξη:



Εικόνα 28: Μετρητική συσκευή τραχύτητας



Εικόνα 29: Focus στην κατασκευαστική δομή του τραχυμέτρου

Εφόσον ολοκληρώνεται και η διαδικασία της τραχυμέτρησης, προχωρούμε και στο τελευταίο βήμα του πειραματικού μέρους που έγκειται στην μεταλλογραφική μελέτη των επεξεργασμένων επιφανειών με στόχο τη διερεύνηση της μικροδομής τους.

Προκειμένου κανείς να ανακαλύψει την τοπογραφία της κατεργασμένης επιφάνειας και την μικροσκοπική δομή της, χρειάζεται να προχωρήσει σε μια σειρά ενεργειών ώστε να προετοιμαστούν κατάλληλα τα δοκίμια.

Αρχικά, πραγματοποιείται κοπή των οκτώ δοκιμίων σε κατάλληλο μέγεθος μέσω του κοπτικού τροχού, ο οποίος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Struers που του έχει δώσει το όνομα Discotom-2.



Εικόνα 30: Κοπτικός τροχός του εργαστηρίου

Η κοπή των τεμαχίων σε ορισμένες διαστάσεις είναι αναγκαία ώστε να πραγματοποιηθεί ο εγκιβωτισμός τους σε κυάθια. Ο εγκιβωτισμός αυτός (mounting) είναι απαραίτητος για την πιο εύκολη διαχείριση των δοκιμίων. Ακόμη, ελαχιστοποιείται η πιθανότητα αυτοφθοράς του δοκιμίου, καθώς το κυάθιο δρα προστατευτικά. Προδιαγράφεται επιπλέον ότι το υλικό του εγκιβωτισμού είναι τέτοιο ώστε να μην επηρεάζει το τεμάχιο με κάποια ενδεχομένη χημική αντίδραση ούτε ως αποτέλεσμα παραμενουσών τάσεων.

Όπως προαναφέρθηκε, ως μέσο εγκιβωτισμού χρησιμοποιούμε 8 κυάθια, όσα ακριβώς και τα δείγματά μας, δηλαδή τα παρακάτω θερμοπλαστικά κύπελλα:



Εικόνα 31: Κυάθιο προετοιμασίας των δοκιμίων

Τα παραπάνω κυλινδράκια θα υποδεχτούν τα δοκίμια συνθέτων υλικών και το κατάλληλο υγρό μείγμα. Χρησιμοποιείται διάφανη εποξική ρητίνη διασφαλίζοντας μια αναλογία 25/3 μεταξύ του σκληρυντή (EpoFix Hardener) και της ίδια της ρητίνης (EpoFix Resin).



Εικόνα 32: Τα συστατικά του μείγματος ρητίνης που περιέχει το κυάθιο

Το μείγμα προετοιμάζεται με κατάλληλη ανάδευση σε ένα κοινό πλαστικό δοχείο έτσι ώστε να εγχυθεί εντός του μέσου εγκιβωτισμού. Με το που συμβεί αυτό, τα πειραματικά μας δοκίμια έχουν προστατευθεί κατάλληλα και έχει πραγματοποιηθεί το μισό μέρος της διαδικασίας. Λαμβάνουμε το παρακάτω στιγμιότυπο που απεικονίζει σε κάτοψη τον τρόπο με τον οποία έχουμε τελικώς χειριστεί τα δείγματα:



Εικόνα 33: Εγκιβωτισμένα δοκίμια πριν τη στερεοποίηση της ρητίνης

Το υγρό μείγμα ρητίνης αφήνεται εντός των δοκιμίων να στερεοποιηθεί και να σκληρυνθεί. Αυτή η διαδικασία απαιτεί 24 ώρες. Την επόμενη ημέρα, μπορεί να λάβει κανείς τα κυλινδρικά πλέον τεμάχια και να αφαιρέσει τα κυάθια, όπως φαίνονται στις επόμενες εικόνες:



Εικόνα 34: Εγκιβωτισμένα δοκίμια μετά την αφαίρεση των κυαθίων σε πρόοψη



Εικόνα 35: Εγκιβωτισμένα δοκίμια μετά την αφαίρεση των κυαθίων σε κάτοψη

Κάποια επιφανειακά στρώματα έχουν φθαρεί εξαιτίας της κοπής στον τροχό και χρειάζεται να αφαιρεθούν μέσω της διαδικασίας της λείανσης. Ακόμη, συμβάλλει στην βέλτιστη επιπεδοποίηση της επιφάνειας την οποία θα μελετήσει κανείς μέσω μικροσκοπίου.



Εικόνα 36: Ο λειαντικός τροχός του εργαστηρίου

Στο λειαντικό δίσκο DAP-V της εταιρείας Struers, ο οποίος περιλαμβάνει περιστρεφόμενο μέρος, όπου και τοποθετούνται τα δοκίμια, χρησιμοποιούνται λειαντικά χαρτιά διαφορετικής τραχύτητας. Χαρακτηρίζονται από τον αριθμό των κόκκων ανά τετραγωνική ίντσα ανθρακούχου πυριτίου. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια αξιοποιώντας κάθε φορά όλο και πιο λείο χαρτί και αναγράφεται στον παρακάτω πίνακα και εφαρμόζεται σε κάθε ένα από τα 8 τεμάχια:

Τραχύτητα λειαντικού χαρτιού [# κόκκων / $inch^2$]	Ταχύτητα περιστροφής δίσκου [RPM]	Διάρκεια λείανσης [λεπτά της ώρας]
P # 400	250	5
P # 800	250	5
P # 1000	250	5
P # 2000	250	5
P # 4000	400	5

Πίνακας 9: Πειραματικές συνθήκες των διαδοχικών λειάνσεων



Εικόνα 37: Τα λειαντικά χαρτιά διαφορετικού μεγέθους κόκκων

Συγκεντρωτικά, απαιτείται μία τελευταία διαδικασία για να πετύχει κανείς την καλύτερη δυνατή μικροσκοπική εξέταση των δοκιμίων. Η απαίτηση που τίθεται σε αυτές τις περιπτώσεις, έγκειται στην απόλυτη επιπεδότητα (flatness) της παρατηρούμενης επιφάνειας για αποφυγή οποιωνδήποτε τεχνικών σφαλμάτων. Μια ενδεχόμενη ανεπιθύμητη καμπύλωση δεν θα επιτρέψει στην εστίαση της τοπογραφίας του κατεργασμένου δοκιμίου.

Γι' αυτό, αξιοποιείται μια πρέσα επιπεδοποίησης (levelling press), η οποία ασκεί πίεση στο εγκιβωτισμένο τεμάχιο, το οποίο τοποθετείται πάνω σε κατάλληλη πλαστελίνη σε πλακίδιο. Πάνω από το δοκίμιο, βρίσκεται ένα μικρό κομμάτι χαρτιού προς την αποφυγή χαρακιών ή φθορών.

Μια τέτοια βιομηχανική πρέσα επισυνάπτεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 38: Πρέσα επιπεδοποίησης δοκιμίων

Έπειτα από όλα αυτά τα προκαταρκτικά στάδια του εγκιβωτισμού, της λείανσης και της επιπεδοποίησης, είμαστε έτοιμοι να εξετάσουμε τα δοκίμια με τη βοήθεια του μικροσκοπίου του εργαστηρίου. Στο οπτικό μικροσκόπιο παρατηρείται η κάθετη τομή της κατεργασμένης επιφάνειας όλων των δοκιμίων και μπορεί να συνειδητοποιήσει κανείς το αποτύπωμα που αφήνει τελικά η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης στα συγκεκριμένα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ανθρακονήματα.

Αξιοποιείται το μικροσκόπιο DMR που κατασκευάζεται από την εταιρεία Leica, το οποίο διαθέτει εγκατεστημένη κάμερα με όνομα DFK MKU130 της εταιρείας ImagingSource. Η ψηφιακή αυτή κάμερα υψηλής ανάλυσης συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να λαμβάνονται τα στιγμιότυπα της μικροδομής του υλικού σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 39: Το οπτικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου

Σαφώς και το μικροσκόπιο παρέχει διάφορες τάξεις μεγέθυνσης μέσω των εγκατεστημένων φακών του, οι οποίες είναι οι εξής: 5 x, 10 x, 20 x, 50 x, 100 x, 200 x και τέλος 500 x. Ανάλογα το βαθμό που επιθυμεί κανείς να εστιάσει στην ατέλεια της μορφοποιημένης επιφάνειας και το κατά πόσο λεπτομερές χρειάζεται να είναι το στιγμιότυπο, επιλέγει τον κατάλληλο φακό. Οι φωτογραφίες, που ελήφθησαν για τα οκτώ δοκίμια, και η αντίστοιχη ανάλυση, παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5 της εργασίας.

Σε αυτό το σημείο, ολοκληρώνεται το πειραματικό μέρος και ξεκινά η παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων και ο δημιουργικός τρόπος ποιοτικής και ποσοτικής τους χρήσης με στόχο τη μελέτη της κατεργασιμότητας των CFRP υλικών σε ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης – βύθισης (Die – Sinking EDM).

3.5 Αρχικές Μετρήσεις (Initial Data)

Στην παρούσα σελίδα της διπλωματικής εργασίας, θα παρουσιαστούν τα πρωταρχικά πειραματικά δεδομένα για όλα αυτά τα 8 δοκίμια που κόπηκαν μέσω της κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης. Συγκεντρώνεται όλη αυτή η χρήσιμη ποσοτική πληροφορία στον παρακάτω αναλυτικό πίνακα:

# CFRP Δοκιμίου	α [°]	I_p [A]	T_{on} [μ s]	U [V]	z [mm]	t_{EDM} [min]	$m_{initial}$ [g]	m_{final} [g]
1	0	0,5	500	100	0,82	240	4,721	4,244
2	30	0,5	500	100	0,84	260	4,588	4,125
3	60	0,5	500	100	0,83	250	4,723	4,246
4	90	0,5	500	100	0,84	258	4,586	4,123
5	0	0,5	150	200	0,80	205	4,266	3,970
6	30	0,5	150	200	0,80	200	4,889	4,397
7	60	0,5	150	200	0,80	211	4,270	3,694
8	90	0,5	150	200	0,80	245	4,724	3,814

Πίνακας 10: Πειραματικά δεδομένα για τα 8 δοκίμια

Σαφώς και ο χρόνος κατεργασίας t_{EDM} είναι ευθέως ανάλογος με το ονομαστικό βάθος κοπής z [mm]. Ακόμη, αυτό το χρονικό διάστημα δεν είναι ίδιο σε όλα τα δοκίμια ακόμη και αν το βάθος κοπής οριστεί κοινό, εξαιτίας μικρών διαφοροποιήσεων στην αρχική μάζα των δοκιμίων και στο γεγονός ότι το φαινόμενο δεν είναι στοχαστικό. Τέλος, τα δοκίμια διαθέτουν σχεδόν την ίδια μάζα προ της κατεργασίας κινούμενα σε μια ζώνη μέγιστης απόκλισης 0,5 g.

Δίδονται και τα γεωμετρικά δεδομένα κάθε δοκιμίου ξεχωριστά, όπως μετρούνται με ηλεκτρονικό παχύμετρο, με σκοπό τον προσδιορισμό του αρχικού όγκου του κάθε δοκιμίου.

#CFRP Δοκιμίου	Μήκος [mm]	Πλάτος [mm]	Πάχος [mm]	Όγκος [mm ³]
1	65,84	25	2	3292
2	63,17	25	2,13	3363
3	62	25	2,15	3332,5
4	61	25	2,15	3279
5	63	25	1,90	2992,5
6	62,43	25	2,07	3231
7	58,13	25	2,03	2950
8	63,42	25	1,95	3091,7

Πίνακας 11: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων προς κατεργασία

Ο υπολογισμός του όγκου για όλα τα τεμάχια κρίνεται πολύτιμος, καθώς χωρίς αυτόν δεν είναι δυνατός ο πειραματικός προσδιορισμός της πυκνότητας ρ [gr/mm³] του υλικού. Η γνώση αυτού του μεγέθους επιτρέπει να ξεκλειδωθούν όλες οι υπόλοιπες σχέσεις που αφορούν στην επεξεργασία των μετρήσεων, όπως θα αναδειχθεί στην επόμενη ενότητα της εργασίας.

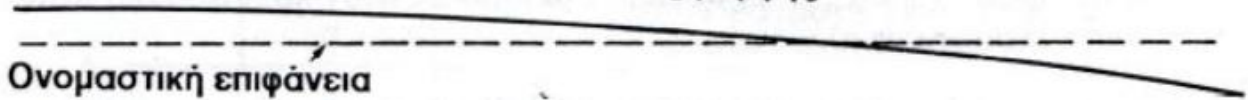


Εικόνα 40: Ηλεκτρονικό παχύμετρο για την ακριβή μέτρηση των διαστάσεων

Απομένουν να δοθούν και οι τιμές που αφορούν στις μετρήσεις της τραχύτητας των επεξεργασμένων επιφανειών των οκτώ κατεργασμένων δοκιμίων. Ωστόσο, αρχικά θα δοθούν κάποιες χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την ακεραιότητα επιφάνειας και ό,τι ονομάζει κανείς τραχύτητα επιφάνειας.

Η τραχύτητα επιφάνειας αποτελεί τον δείκτη ποιότητας μιας κατεργασμένης επιφάνειας, συνιστώντας τις αποκλίσεις τρίτης και ανωτέρας τάξεως. Με οποιοδήποτε τρόπο και αν επεξεργαστούμε μηχανικά ένα υλικό ποτέ δεν θα εμφανίσει εντελώς λεία επιφάνεια. Και αυτό γιατί κάθε κατεργαζόμενη επιφάνεια προκύπτει από την σχετική κίνηση της ακής του εργαλείου ως προς αυτό και της προσδίδει μερικά χαρακτηριστικά που δεν τα διέθετε προηγουμένως. Τούτο συμβαίνει ακόμα και στην περίπτωση της ηλεκτροδιάβρωσης που δεν υπάρχει φυσική επαφή «εργαλείου» - τεμαχίου, αλλά η αφαίρεση υλικού πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων και δημιουργίας σπινθήρων.

Αποκλίσεις πρώτης τάξεως ή αποκλίσεις μορφής



Ονομαστική επιφάνεια

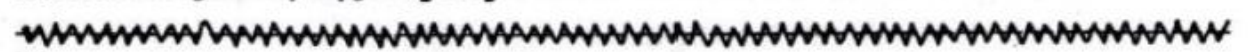
Αποκλίσεις δεύτερης τάξεως



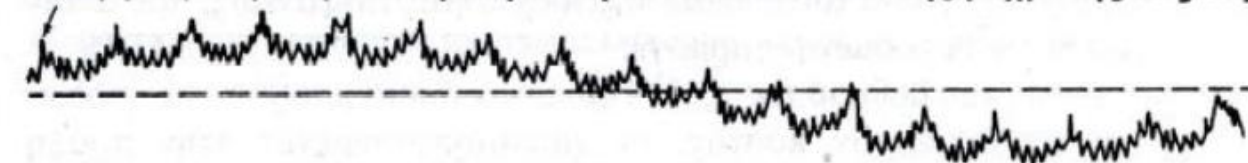
Αποκλίσεις τρίτης τάξεως



Αποκλίσεις τέταρτης τάξεως



Κατεργασμένη επιφάνεια (υπέρθεση των αποκλίσεων 1ης μέχρι 4ης τάξεως)



Διάγραμμα 3: Είδη αποκλίσεων μιας κατεργασμένης επιφάνειας

Κύριο μέγεθος ποσοτικοποίησης της τραχύτητας είναι το μέσο ύψος τραχύτητας R_a [μm], που ορίζεται από την αριθμητική μέση τιμή των αποκλίσεων όλων των σημείων του πραγματικού περιγράμματος από την κεντρική γραμμή, μέσα στο καθορισμένο δειγματοληπτικό μήκος [25]. Το χρησιμοποιούμενο τραχύμετρο δίνει τη συγκεκριμένη τιμή, υλοποιώντας εσωτερικά την παρακάτω συνάρτηση:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx$$

όπου: L το μήκος δειγματοληψίας πάνω στην μορφοποιούμενη επιφάνεια

z η υψομετρική απόκλιση από την Κεντρική Γραμμή που ισομοιράζει τα περιεχόμενα ανάμεσα στο πραγματικό περίγραμμα και στην κεντρική γραμμή

Όμως, υπάρχουν και άλλα 3 σημαντικά μεγέθη με τα οποία μπορεί να προσδιοριστεί η τραχύτητα σύμφωνα με το σύστημα Κεντρικής Γραμμής (M):

- ο Η τραχύτητα R_q , η οποία συνιστά την ρίζα του τετραγωνικού μέσου όρου των υψομετρικών αποκλίσεων από την κεντρική γραμμή και υπολογίζεται ως παρακάτω. Καλείται και τραχύτητα RMS (*Root Mean Square*).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z(x)^2 dx}$$

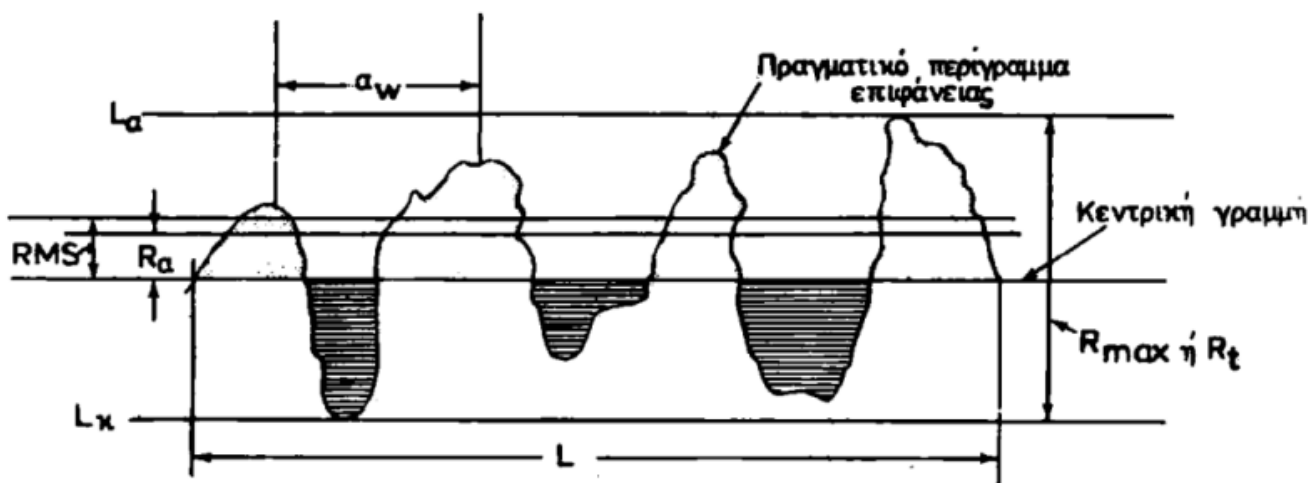
- ο Η τραχύτητα R_y , που αποτελεί την διαφορά μεταξύ του ανώτερου όρους και της κατώτερης κοιλάδας στο μετρούμενο περίγραμμα που δίνει το καταγραφικό του τραχυμέτρου. Ομοιάζει πολύ με το επόμενο μέγεθος και συχνά δύνανται οι μετρούμενες τιμές να συμπίπτουν:

$$R_y = \max(z(x)) - \min(z(x))$$

- ο Η τραχύτητα R_t , δηλαδή το μέγιστο ύψος τραχύτητας και ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης γραμμής αναφοράς στο πραγματικό περίγραμμα της επιφάνειας εντός του μήκους δειγματοληψίας. Αποτελεί το μέγεθος της τραχύτητας, που διαθέτει φυσική σημασία, μιας και το αντιλαμβάνεται κανείς οπτικά ή με την αφή [25].

$$R_t = \max(R_{y_i})$$

Τέλος, το παρακάτω γράφημα επιτρέπει την οπτικοποίηση όλων αυτών των συμβόλων και ποσοτήτων, όπως προαναφέρθηκαν:



Διάγραμμα 4: Χαρακτηριστικά σημεία της τραχύτητας επιφάνειας

Σε κάθε ένα από τα οκτώ δοκίμια λαμβάνονται 4 ισαπέχοντα σημεία πάνω στο δειγματοληπτικό μήκος της επεξεργασμένης επιφάνειας, με σκοπό τη μελέτη της διακύμανσης των τιμών της τραχύτητας. Για κάθε τιμή τραχύτητας λαμβάνονται 32 τιμές και καταγράφονται η μέση τιμή αυτών και η μέγιστη σε κάθε δοκίμιο. Οι εν λόγω πίνακες παρατίθενται παρακάτω:

# CFRP Δοκιμίου	Μέσο Ύψος Τραχύτητας R_a [μm]					
	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 4	Μέσος Όρος	Μέγιστο
1	2,92	2,96	1,76	1,98	2,405	2,96
2	2,02	2,24	3,38	3,12	2,69	3,38
3	3,66	4	2,36	2,94	3,24	4
4	4,86	3,8	3,8	3,94	4,1	4,86
5	2,7	2,24	2,74	2,04	2,43	2,74
6	2,96	3,58	2,82	3,14	3,125	3,58
7	3,2	3,08	3,2	3,48	3,24	3,48
8	3,32	3,36	2,64	3,66	3,245	3,66

Πίνακας 12: Τιμές της μέσης τραχύτητας R_a κατά μήκος των δοκιμίων

# CFRP Δοκιμίου	RMS Τραχύτητα R_q [μm]					
	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 4	Μέσος Όρος	Μέγιστο
1	3,66	3,8	2,44	2,96	3,215	3,8
2	2,64	2,82	5,6	3,84	3,725	5,6
3	4,5	5,12	3,14	4,16	4,23	5,12
4	6,44	4,96	4,78	4,94	5,28	6,44
5	3,5	3,12	3,84	2,82	3,32	3,84
6	3,64	4,6	3,8	3,98	4,005	4,6
7	4,02	4,18	3,98	4,32	4,125	4,32
8	4,2	4,38	3,34	4,72	4,16	4,72

Πίνακας 13: Τιμές της RMS τραχύτητας R_q κατά μήκος των δοκιμίων

# CFRP Δοκιμίου	Τραχύτητα R_y [μm]					
	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 4	Μέσος Όρος	Μέγιστο
1	18,6	26,2	10,6	17,9	18,325	26,2
2	17,1	15,6	33	16,4	20,525	33
3	21,8	24	17,8	30,6	23,55	30,6
4	29,8	24,5	18,9	24,7	24,475	29,8
5	18,3	14,8	21	14,3	17,1	21
6	14,3	24,1	25	19,7	20,775	25
7	19,6	23,6	21,8	21,3	21,575	23,6
8	22,8	22,7	18,9	28,6	23,25	28,6

Πίνακας 14: Τιμές της τραχύτητας R_y κατά μήκος των δοκιμίων

# CFRP Δοκιμίου	Μέγιστο Ύψος Τραχύτητας R_t [μm]					
	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 4	Μέσος Όρος	Μέγιστο
1	18,6	26,2	12,2	19	19	26,2
2	17,1	17,5	36,2	16,4	21,8	36,2
3	25,9	27,8	18,8	30,6	25,775	30,6
4	37,4	27,6	24,2	25,5	28,675	37,4
5	18,3	20,8	24,3	18,6	20,5	24,3
6	19,3	24,1	25	22,1	22,625	25
7	19,6	24,6	24,7	24,7	23,4	24,7
8	23,4	28,4	19,9	29,1	25,2	29,1

Πίνακας 15: Τιμές του μέγιστου ύψους τραχύτητας R_t κατά μήκος των δοκιμίων

Στην μετεπεξεργασία των δεδομένων της τραχύτητας, θα ασχοληθούμε με το προτυποποιημένο μέγεθος της R_a όπως και με το μέγιστο ύψος της R_t , μελετώντας τη διακύμανση της και εξάγοντας χρήσιμα πορίσματα για την ποιότητα επιφανείας.

Κεφάλαιο 4 – Υπολογιστικό Μέρος & Αποτελέσματα

4.1 Τρόπος αξιοποίησης των αρχικών μετρήσεων και επεξεργασμένα δεδομένα

Από τη φύση της, η κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης αποτελεί μια εξόχως σύνθετη διαδικασία με αντίστοιχους μηχανισμούς. Γι' αυτόν το λόγο, θεωρείται δύσκολο να μοντελοποιηθεί επαρκώς και με ικανοποιητική ακρίβεια. Μοιραία, πραγματοποιούνται κάποιες παραδοχές και απλοποιείται το φαινόμενο με σκοπό να μελετηθεί πιο άμεσα και αποτελεσματικά. Σε αυτήν την ενότητα, παρατίθεται ο τρόπος χειρισμού των αρχικών μετρήσεων (initial data), που θα μετατραπούν σε μετεπεξεργασμένα δεδομένα (processed data), μέσω συγκεκριμένου set εξισώσεων.

Το υπολογιστικό μέρος αφορά στην ανάλυση της κατεργασιμότητας του συγκεκριμένου υλικού μέσω της εξαγωγής κάποιων σημαντικών δεικτών, όπως του ρυθμού αποβολής υλικού MRR (Material Removal Rate) και της μέσης τραχύτητας R_a . Αυτά τα αποτελέσματα θα συναρτηθούν άμεσα και με τις συνθήκες της κοπής, δηλαδή το τρίπτυχο (I_p, T_{on}, U) .

Αρχικά, δίνεται ο πρώτος μαθηματικός τύπος, που έγκειται στον υπολογισμό του ρυθμού αποβολής υλικού MRR [mm^3/min].

$$MRR = \frac{m_{initial} - m_{final}}{\rho \cdot t_{EDM}}$$

Όλα τα μεγέθη είναι γνωστά στο δεξί μέλος της εξίσωσης, εκτός από το μέγεθος της πυκνότητας ρ [g/mm^3]. Επειδή δεν ορίζεται αυστηρά από τον προμηθευτή των δοκιμίων, θα προσδιοριστεί πειραματικά μέσω του ορισμού του και θα χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος για τα 8 διαθέσιμα δοκίμια. Ισχύει ότι:

$$\text{Πυκνότητα} = \frac{\text{Μάζα}}{\text{Όγκος}} \Rightarrow \rho = \frac{m_{initial}}{V_{initial}}$$

Δίνεται παρακάτω ο πίνακας που αφορά στον υπολογισμό της πυκνότητας για κάθε ένα από τα 8 τεμάχια:

#CFRP Δοκιμίου	$m_{initial}$ [g]	$V_{initial}$ [mm^3]	ρ [g/mm^3]
1	4,721	3292	0,001434083
2	4,588	3363	0,001364258
3	4,723	3332,5	0,001417254
4	4,586	3279	0,001398597
5	4,266	2992,5	0,001425564
6	4,889	3231	0,001513154
7	4,270	2950	0,001447458
8	4,724	3091,7	0,001527950

Πίνακας 16: Υπολογισμός πυκνότητας για όλα τα CFRP δοκίμια

Επομένως, η μέση πυκνότητα, που θα χρησιμοποιηθεί στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας, με 5 σημαντικά δεκαδικά ψηφία, προκύπτει να είναι $\rho = 0,00144$ [g/mm^3].

Ακόμη, ένα δεύτερο σημαντικό μέγεθος προς ανάλυση, αποτελεί η ενέργεια ανά παλμό E_p [mJ]. Συνιστά έναν δείκτη που συμπυκνώνει το τρίπτυχο των παραμέτρων κατεργασίας, δηλαδή την ένταση του ρεύματος, την τάση κατεργασίας και την χρονική διάρκεια του παλμού, σε μια και μόνο ποσότητα. Ορίζεται ως εξής:

$$E_p = I_p \cdot T_{on} \cdot U \cdot 10^{-3}$$

Και η ονομαστική ισχύς κατεργασίας P_{nom} [W] προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{nom} = I_p \cdot U$$

Σύμφωνα με όλες τις παραπάνω μαθηματικές σχέσεις και τις αντίστοιχες παρατηρήσεις, γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων και ακολουθεί ο πίνακας των αποτελεσμάτων για τις δυο ολοκληρωμένες κοπές και το σύνολο των οκτώ δοκιμιών:

#CFRP Δοκιμίου	P_{nom} [W]	E_p [mJ]	MRR [mm ³ /min]
1	50	25	1,3792
2	50	25	1,2358
3	50	25	1,3240
4	50	25	1,2453
5	100	15	1,0020
6	100	15	1,7071
7	100	15	1,8944
8	100	15	2,5775

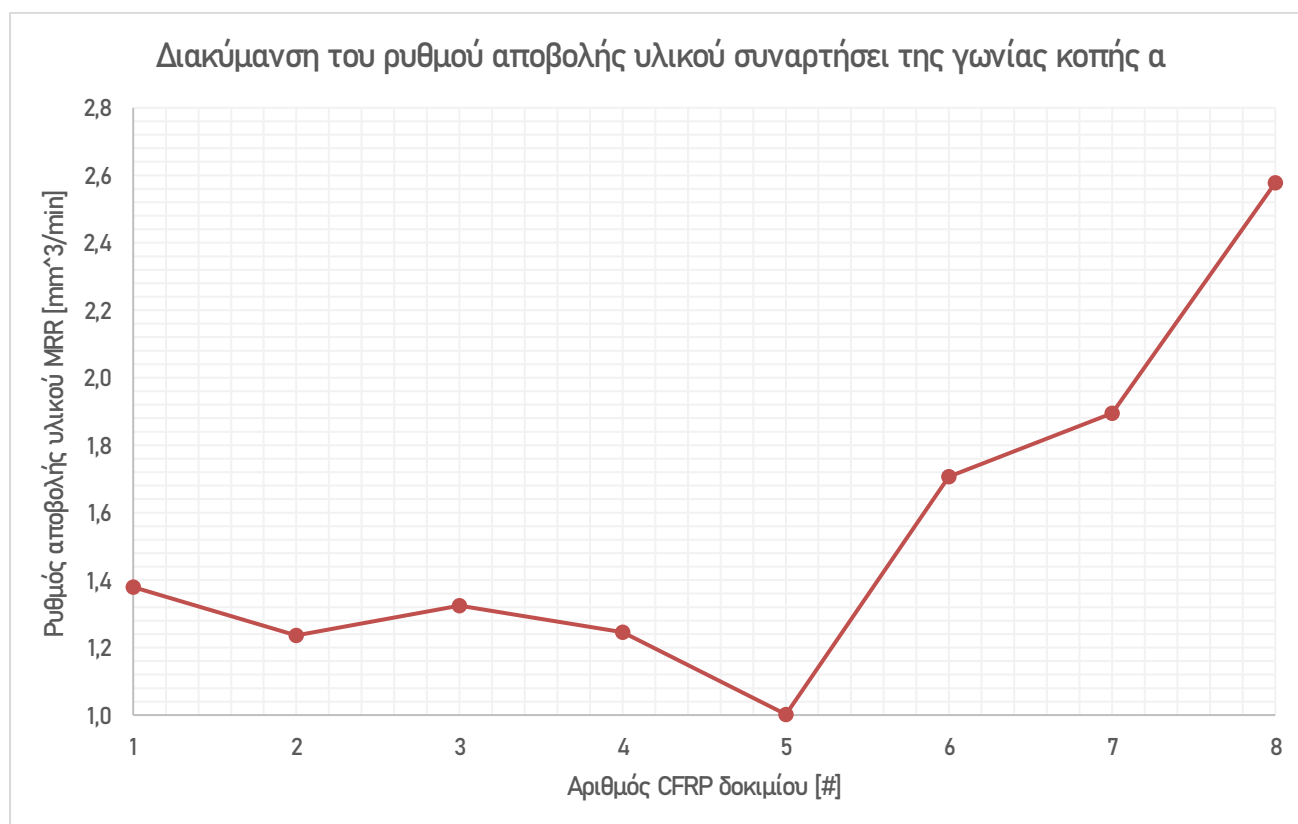
Πίνακας 17: Πίνακας αποτελεσμάτων επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων

Σε επόμενη ενότητα, παρουσιάζονται τα παρακάτω γραφήματα, τα οποία οπτικοποιούν με εύληπτο τρόπο τα επεξεργασμένα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο συσχετίζονται άμεσα οι χαρακτηριστικοί δείκτες απόδοσης της κατεργασίας μεταξύ τους και λαμβάνονται πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με τις συνθήκες κοπής αλλά και την επιρροή της γωνίας τοποθέτησης/κοπής α .

- ο Διακύμανση του ρυθμού αποβολής υλικού ανάλογα με τη γωνία κοπής (α vs MRR)
- ο Τάση κατεργασίας συναρτήσει του ρυθμού αποβολής υλικού (U vs MRR)
- ο Χρονική διάρκεια του παλμού συναρτήσει του ρυθμού αποβολής υλικού (T_{on} vs MRR)
- ο Ρυθμός αποβολής υλικού συναρτήσει της ενέργειας ανά παλμό (E_p vs MRR)
- ο Ρυθμός αποβολής υλικού συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος (P_{nom} vs MRR)
- ο Διακύμανση της μέσης τραχύτητας ανάλογα με τη γωνία κοπής (α vs R_a)
- ο Μέσος όρος (ως πιο αντιπροσωπευτική τιμή) της τραχύτητας συναρτήσει της γωνίας κοπής (α vs Μέσος Όρος R_a)
- ο Μέση τραχύτητα συναρτήσει της ενέργειας ανά παλμό (E_p vs R_a)
- ο Ρυθμός αποβολής υλικού συναρτήσει της μέσης τραχύτητας (R_a vs MRR)

Επομένως, θα πραγματοποιηθεί μια προσπάθεια σύνδεσης των παραμέτρων κατεργασίας, δηλαδή του τριπύχου των συνθηκών κοπής (U, T_{on}, I_p) σε άμεση ή συνεπτυγμένη μορφή με τους χαρακτηριστικούς δείκτες απόδοσης όπως ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR . Ακόμη, για πληρέστερη ανάλυση μελετάται ο τρόπος επιρροής της ποιότητας επιφάνειας, μέσω της μέσης τραχύτητας, από τους υπόλοιπους προαναφερθέντες παράγοντες.

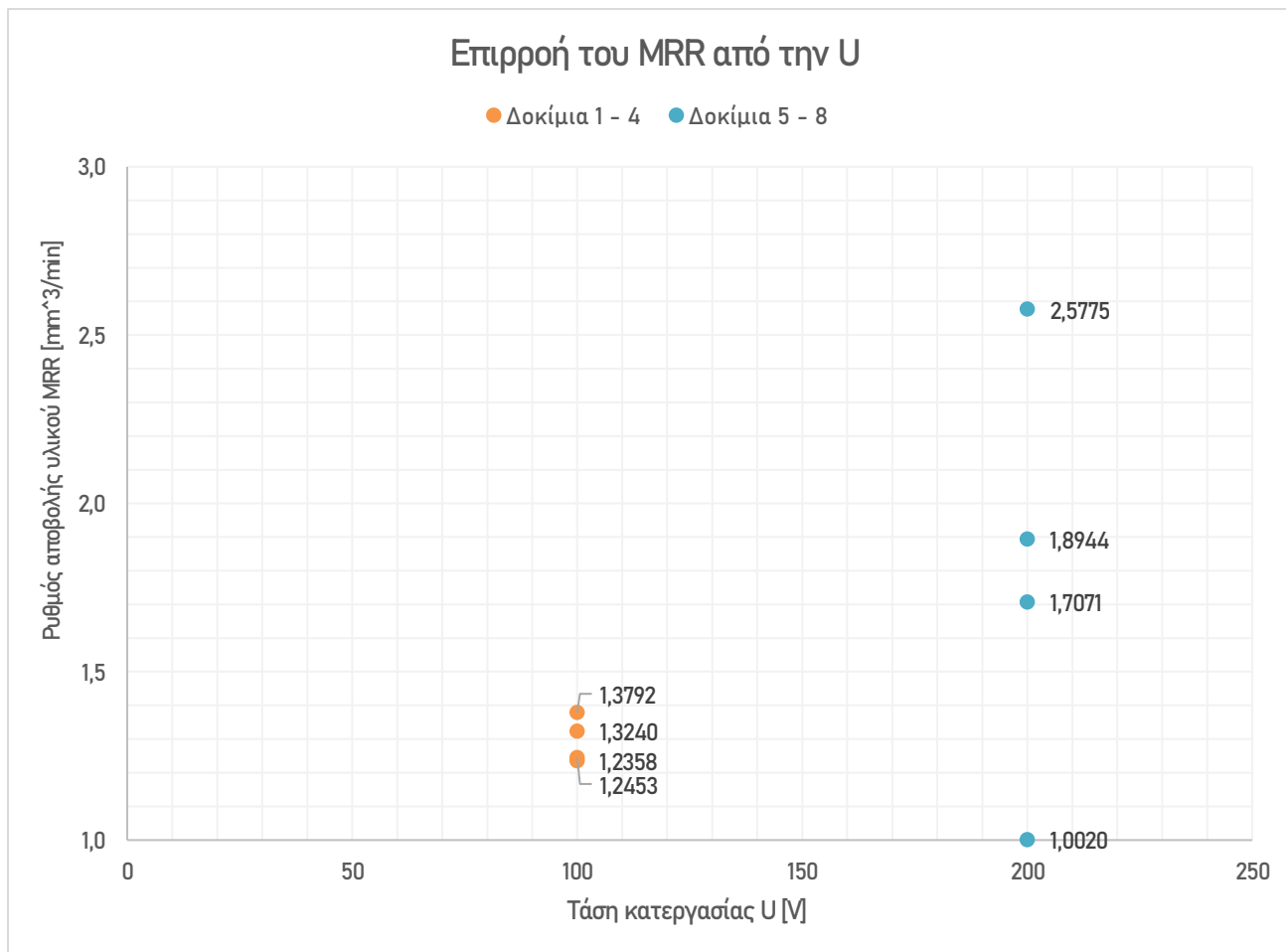
Αρχικά, παρουσιάζεται η κατανομή του ρυθμού αποβολής υλικού «κατά μήκος» των οκτώ δοκιμών που κατεργάστηκαν. Υπενθυμίζεται ότι το 1^ο και το 5^ο δοκίμιο κόπηκαν με γωνία $\alpha_1 = \alpha_5 = 0^\circ$, το 2^ο και το 6^ο με γωνία $\alpha_2 = \alpha_6 = 30^\circ$, το 3^ο και το 7^ο με γωνία $\alpha_3 = \alpha_7 = 60^\circ$ και τέλος το 4^ο και το 8^ο με γωνία $\alpha_4 = \alpha_8 = 90^\circ$.



Διάγραμμα 5: Κατανομή του MRR κατά μήκος των 8 δοκιμών

Παρατηρείται ότι τα πρώτα 4 δοκίμια διαθέτουν χαμηλότερο ρυθμό αποβολής υλικού σε σχέση με τα επόμενα 4 δοκίμια τους κατ' αντιστοιχία εξαιτίας της αλλαγής των συνθηκών κοπής με μόνη εξαίρεση το 5^ο δοκίμιο. Για τα πρώτα τέσσερα τεμάχια ισχύει ότι $(I_p, T_{on}, U) = (0,5 A, 500 \mu s, 100 V)$, ενώ για τα τελευταία τέσσερα ότι: $(I_p', T_{on}', U') = (0,5 A, 200 \mu s, 200 V)$. Ακόμη, φαίνεται πως ο ρυθμός αποβολής υλικού είναι χαμηλότερος για τις λοξές ή και τις κατακόρυφες τοποθετήσεις δοκιμών, δηλαδή για τις γωνίες κοπής $\alpha_2 = 30^\circ, \alpha_3 = 60^\circ, \alpha_4 = 90^\circ$, σε σχέση με την οριζόντια κοπή. Όμως, τούτο δεν επαληθεύεται για την 2^η ολοκληρωμένη κοπή, δηλαδή για τα δοκίμια 4 – 8. Αντιθέτως, συμβαίνει το ανάποδο, δηλαδή όσο η γωνία α αυξάνεται, μεγαθύνεται και ο ρυθμός αποβολής υλικού. Το μόνο μοτίβο που επικρατεί αφορά στις γωνίες 30° και 60° , όπου ισχύει ότι $MRR_{60^\circ} > MRR_{30^\circ}$ παρά την αλλαγή των συνθηκών κοπής. Ωστόσο, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποια ασφαλής συσχέτιση του ρυθμού αποβολής υλικού με τη γωνία τοποθέτησης/κοπής του δοκιμίου στην εργαλειομηχανή. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, ενδεχομένως απαιτούνται περισσότερα πειράματα με σταθερές συνθήκες κοπής.

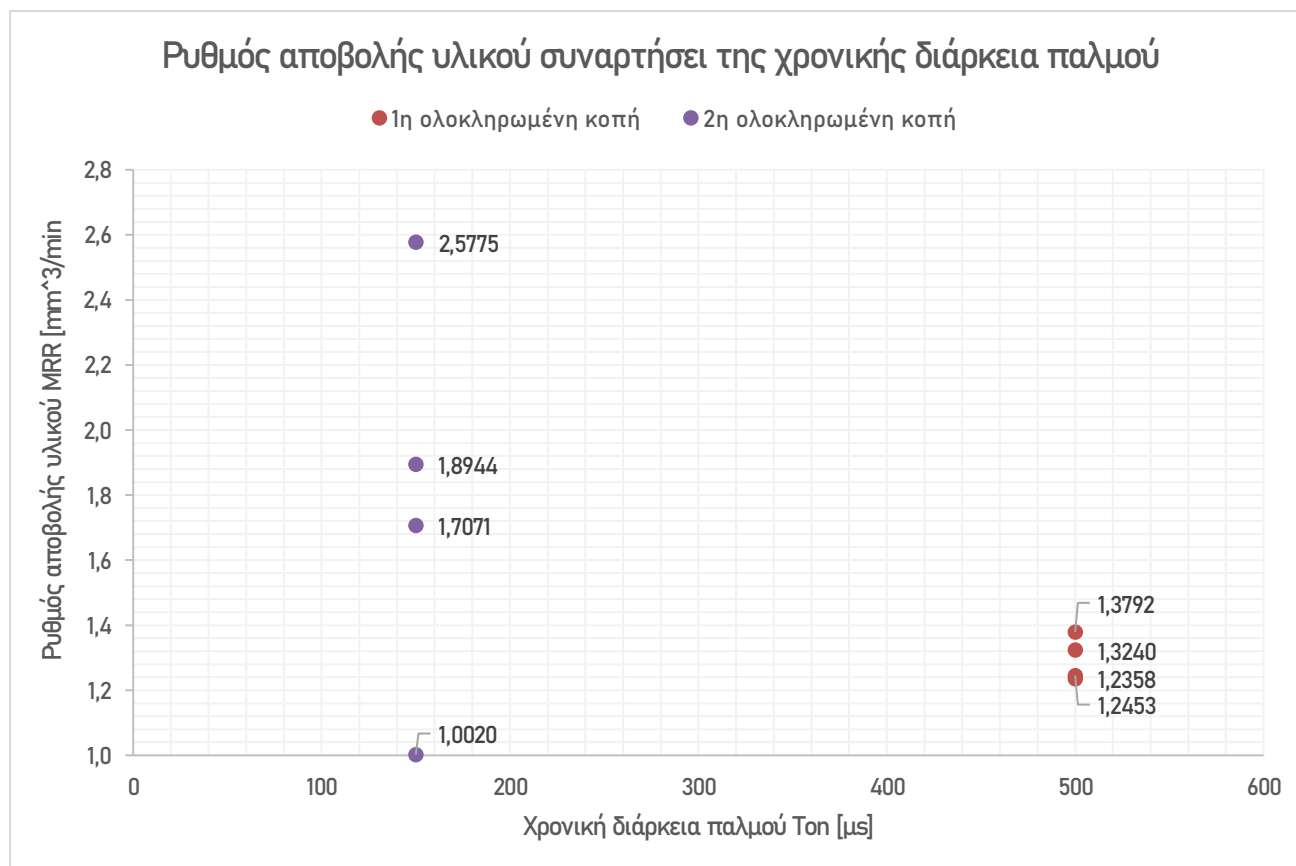
Στη συνέχεια, εμφανίζεται το διάγραμμα που συναρτά το ρυθμό αποβολής υλικού με την εφαρμοζόμενη τάση κατεργασίας:



Διάγραμμα 6: Ρυθμός αποβολής υλικού συναρτήσει της τάσης κατεργασίας

Σημειώνεται ότι για $U = 100 \text{ V}$, οι τιμές του ρυθμού αποβολής υλικού είναι αισθητά χαμηλότερες από $U' = 200 \text{ V}$, με εξαίρεση μόνο ένα δοκίμιο. Αυτό το γεγονός αναδεικνύει ότι αποβάλλεται υψηλότερος όγκος στην μονάδα του χρόνου και γι' αυτόν το λόγο η κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης είναι πιο αποδοτική σε σύγκριση με την πρώτη περίπτωση. Ακόμη, οι τιμές που αφορούν την 1^η ολοκληρωμένη κοπή περιορίζονται σε ένα στενό εύρος ζώνης $MRR_{int1} = 0,134 \text{ mm}^3/\text{min}$ υποδεικνύοντας την πιστότητα της κατεργασίας σε αυτήν τη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Εν αντιθέσει, για τα δοκίμια 5 έως και 8 το αντίστοιχο διάστημα διακύμανσης είναι πολύ υψηλότερο και πιο συγκεκριμένα $MRR_{int2} = 1,575 \text{ mm}^3/\text{min}$ φανερώνοντας ότι ενδεχομένως να μην είναι η κατάλληλη επιλογή ως τάση κατεργασίας τα 200 V δίνοντας ανόμοια αποτελέσματα σχετικά με την αποδοτικότητα της ηλεκτροδιάβρωσης.

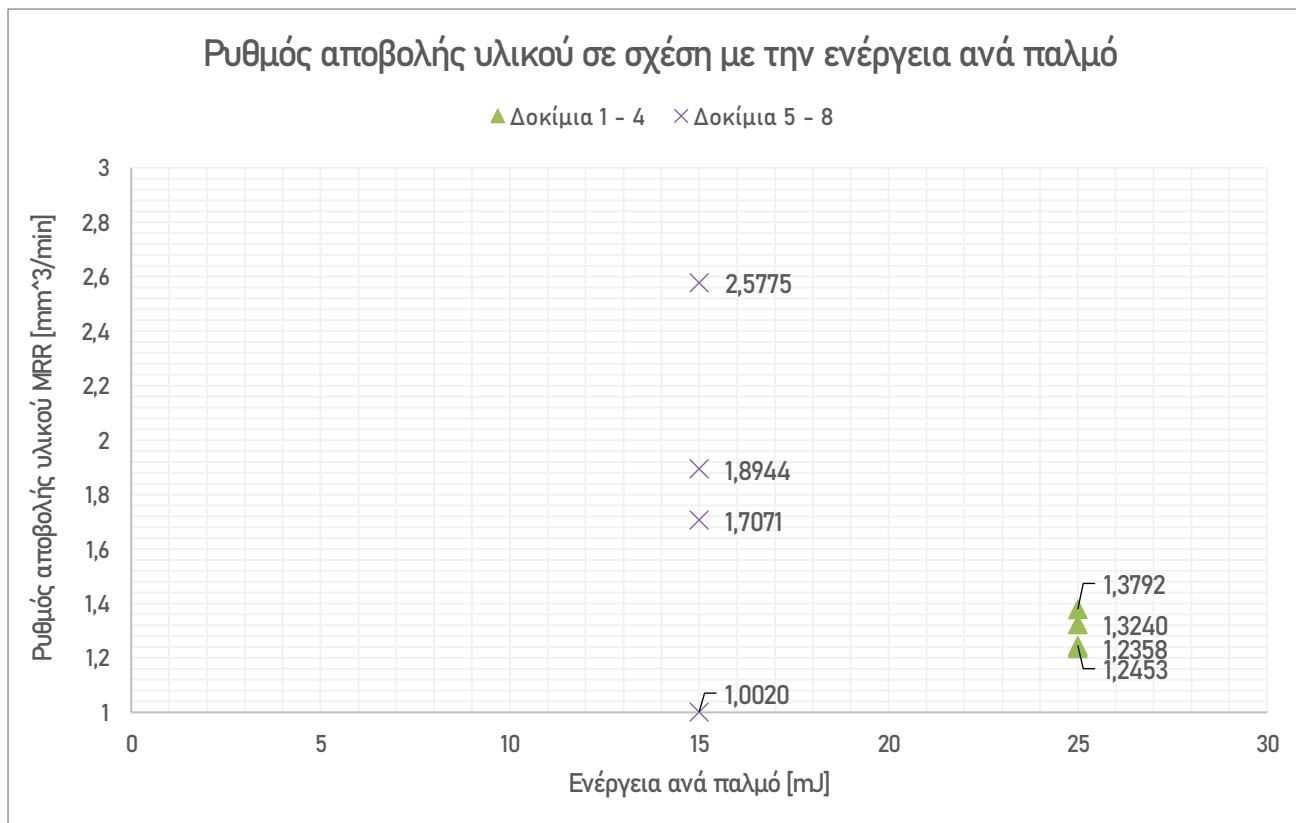
Στο επόμενο γράφημα, δίνεται ο τρόπος που εξαρτάται ο ρυθμός αποβολής υλικού από την χρονική διάρκεια του παλμού:



Διάγραμμα 7: Εξάρτηση του MRR από Ton

Παρατηρείται πως επικρατεί η εντελώς αντίθετη κατάσταση για την συνάρτηση του ρυθμού αποβολής υλικού από την χρονική διάρκεια του παλμού σε σύγκριση με εκείνη της τάσης κατεργασίας. Είναι σαν να βλέπει κανείς τον αντικατοπτρισμό του Διαγράμματος 4 στο Διάγραμμα 5. Δηλαδή με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού, οι τιμές του ρυθμού αποβολής υλικού συγκεντρώνονται μαζί σε μια μικρή ζώνη. Στον αντίποδα, όταν το T_{on} περιορίζεται στα $150 \mu s$ τότε το MRR διαθέτει πολύ μεγαλύτερη διασπορά και λαμβάνει υψηλότερες τιμές σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Επομένως, όταν το χρονικό διάστημα, στο οποίο ενυπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ δοκιμίου – ηλεκτροδίου, αυξάνεται δεν είναι απαραίτητο πως θα αυξάνεται με όμοιο τρόπο και ο ρυθμός αποβολής υλικού. Για την ακρίβεια, στην προκειμένη δεν επιβεβαιώνεται το θεωρητικό πόρισμα πως το MRR είναι ανάλογο του T_{on} και ως παριστάνει το τελευταίο τον ωφέλιμο χρόνο κατεργασίας.

Συνεχίζοντας με το ίδιο πλάνο, παρουσιάζεται το γράφημα της μεταβολής του ρυθμού αποβολής υλικού συναρτήσει της ενέργειας ανά παλμό.

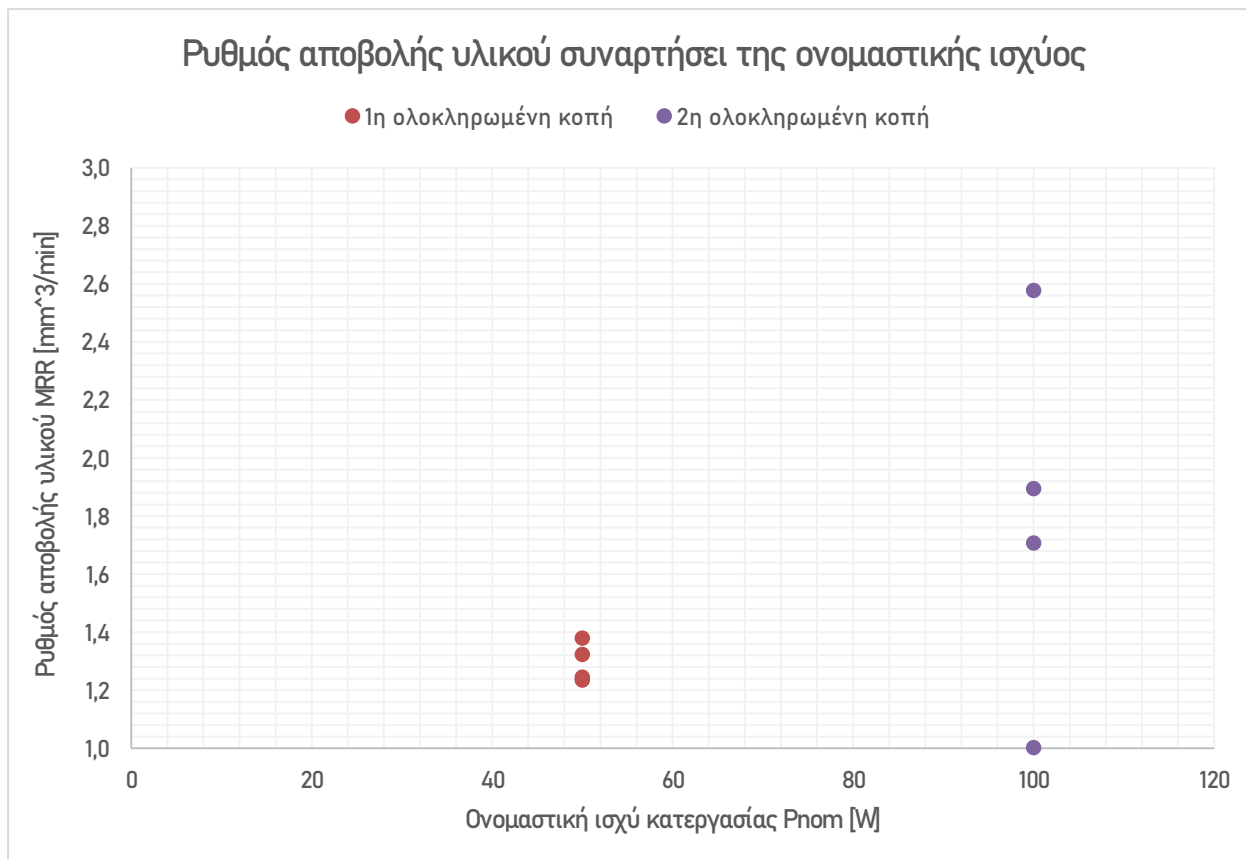


Διάγραμμα 8: MRR συναρτήσει της E_p

Γενικά, είναι γνωστό, και από το θεωρητικό μέρος της παρούσας εργασίας, πως ο ρυθμός αποβολής υλικού είναι ευθέως ανάλογος με την ενέργεια ανά παλμό όσο αυξάνεται η ένταση του ρεύματος και διατηρείται σταθερό το χρονικό διάστημα παλμού. Ωστόσο, το MRR δεν μεγαλώνει αιωνίως, αλλά υφίσταται ένα ολικό βέλτιστο, το οποίο δεν είναι δυνατό να υπερβούμε με οποιαδήποτε αύξηση του E_p . Τουναντίον, άκριτη αύξηση της ενέργειας ανά παλμό δύναται να οδηγήσει σε μείωση του ρυθμού αποβολής υλικού και τελικά μη αποδοτική κατεργασία.

Όμως, εδώ δεν εφαρμόζεται η συγκεκριμένη περίπτωση, αφού η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή, η χρονική διάρκεια παλμού μειώνεται και η τάση κατεργασίας αυξάνεται. Στην προκειμένη περίπτωση, σημειώνεται πως αν και αυξάνεται η ενέργεια παλμού έστω και για $\Delta E_p = 10 \text{ mJ}$, ο ρυθμός αποβολής υλικού περιορίζεται σημαντικά, εκτός μόνον από ένα δοκίμιο που παρατηρείται ελάχιστη αύξηση. Δυστυχώς, η ταυτόχρονη μεταβολή των συνθηκών κοπής, δηλαδή του T_{on} και του U δεν επιτρέπει την ανεξάρτητη μελέτη της συνάρτησης του ρυθμού αποβολής υλικού από την ενέργεια ανά παλμό. Παρ' όλα αυτά φαίνεται πως έχουμε ξεπεράσει την οριακή περίπτωση και βρισκόμαστε στην κατάσταση κατά την οποία επιπλέον αύξηση του E_p θα συνεπαγόταν άμεση μείωση του MRR .

Επιπλέον, στην παρούσα σελίδα, δίδεται το διάγραμμα με το οποίο διακυμαίνεται ο ρυθμός αποβολής υλικού σε συνάρτηση με την ονομαστική ισχύ κατεργασίας:

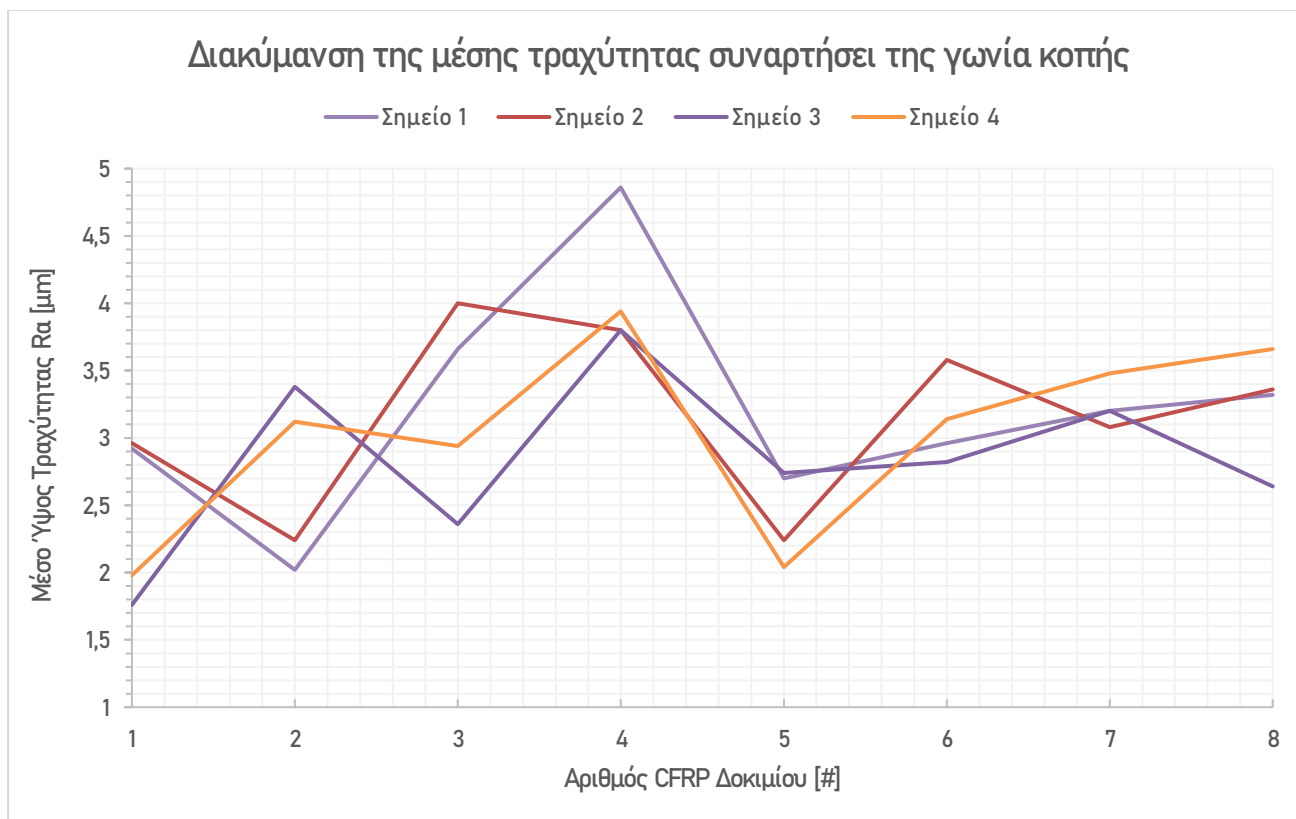


Διάγραμμα 9: MRR συναρτήσει της P_{nom}

Φαίνεται πως αν και μπορεί να προσδίδεται ονομαστικά η ίδια ισχύς κατεργασίας σε κάποια δοκίμια, να οδηγούμαστε σε διαφορετικές τιμές του ρυθμού αποβολής υλικού. Δηλαδή το φαινόμενο δεν είναι ντετερμινιστικό, δηλαδή πως ίδια ισχύς θα δώσει απαραίτητα ίδιο αποβαλλόμενο όγκο στην μονάδα του χρόνου. Από την άλλη πλευρά, τα πειραματικά μας δεδομένα δεν είναι επαρκή για την εξαγωγή ενός συμπεράσματος για την ασφαλή συσχέτιση $MRR - P_{nom}$, καθώς εξετάζονται μόνο δύο τιμές ισχύος. Ωστόσο, παρατηρείται για 3 από τα 4 δοκίμια πως όταν καταναλώνεται περισσότερη ισχύς τότε ο ρυθμός αποβολής υλικού αυξάνεται καθιστώντας την κατεργασία πιο αποδοτική. Όμως, αντίστοιχα και με την ενέργεια ανά παλμό, έτσι και στην ονομαστική ισχύ, τίθεται κάποιο threshold στην τιμή του MRR που είναι δυνατόν να φθάσει κανείς με τη συγκεκριμένη εργαλειομηχανή. Γι' αυτό το λόγο, δεν έχει σημασία μόνον η παροχή του κατάλληλου ποσού ισχύος αλλά και η επιτυχία της ευστάθειας του δυναμικού συστήματος εργαλειομηχανή – τεμάχιο – ηλεκτρόδιο. Για παράδειγμα, καλή πρακτική θεωρείται η αποφυγή υψηλής τιμής της έντασης του ρεύματος αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την ύπαρξη περιπτώσεων αποβλήτων στο διάκενο που σχηματίζεται μεταξύ δοκιμίου – ηλεκτροδίου.

Στη συνέχεια, ακολουθούν τα τελευταία τέσσερα διαγράμματα που εισάγουν όρους μέσης τραχύτητας στην παρούσα μελέτη.

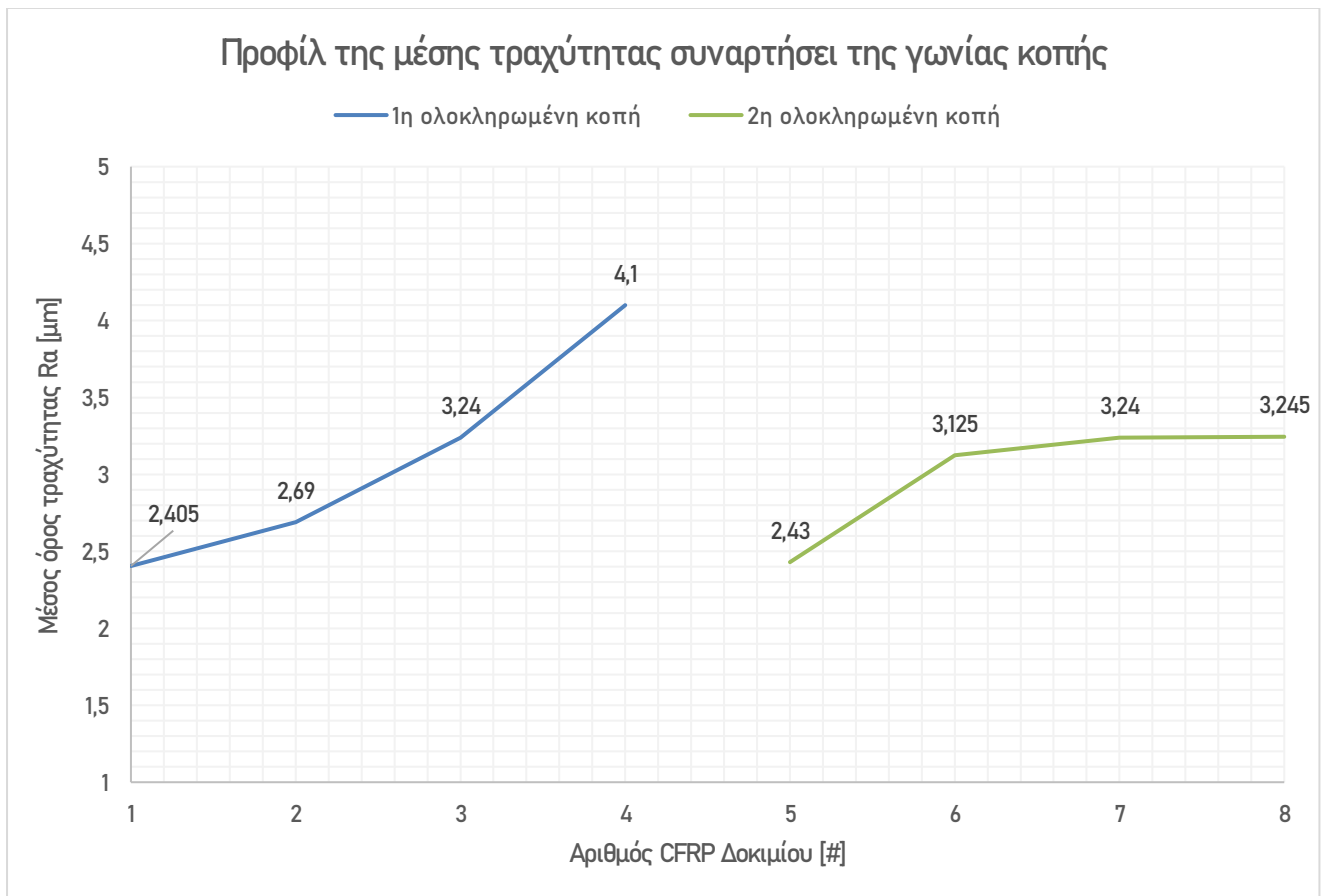
Αρχικά, παρουσιάζονται τα προφίλ της μέσης τραχύτητας κατά μήκος των δοκιμίων σε συνάρτηση με το σημείο που άγγιξε η ακίδα του τραχυμέτρου το δοκίμιο, σε μια προσπάθεια σύνδεση της με τη γωνία κοπής.



Διάγραμμα 10: Προφίλ του μέσου ύψους των τραχυτήτων κατά μήκος των δοκιμίων

Εκ πρώτης όψεως, οι τιμές της μέσης τραχύτητας κρίνονται εξαιρετικά χαμηλές και τούτο επιτεύχθηκε μέσω της χρήσης μιας ιδιότυπης μη συμβατικής κατεργασίας όπως η ηλεκτροδιάβρωση. Κυμαίνονται από $1,76 \mu m$ έως και $4,86 \mu m$ και συγκεντρώνονται σε μια στενή ζώνη εύρους $\Delta R_a = 3,1 \mu m$. Εστιάζοντας στα δοκίμια 5 έως και 8, δηλαδή στο μεταίχιμο της αλλαγής των συνθηκών κοπής και έπειτα, παρατηρεί κανείς ότι η κατανομή της μέσης τραχύτητας είναι πολύ πιο ομαλή και λιγότερο ακανόνιστη σε σχέση με τα δοκίμια 1 έως 4. Το πόρισμα αυτό είναι ιδιαίτερα έκδηλο στην ανοιχτή μωβ καμπύλη, που αφορά στο Σημείο 1, και συνεπάγεται ότι έχουμε μια πιο ακέραια κατεργασμένη επιφάνεια με υψηλότερη πιστότητα. Ακόμη, σημειώνεται πως στις λοξές και στις κατακόρυφες κοπές, δηλαδή για γωνίες 30° , 60° , 90° και αντίστοιχα δοκίμια 2,3,4 και 6,7,8 καταγράφονται υψηλότερες τιμές τραχύτητας σε σχέση με τα δοκίμια 1 και 5, όπου ισχύει ότι $\alpha_1 = \alpha_5 = 0^\circ$. Επομένως, συνάγεται ότι η αύξηση της γωνίας τοποθέτησης/κοπής α οδηγεί σε αισθητά χαμηλότερη ποιότητα επιφανείας ανεξαρτήτως από το τρίπτυχο των συνθηκών κατεργασίας. Μόνες εξαιρέσεις που δεν ακολουθούν το συγκεκριμένο κανόνα συνιστούν το δοκίμιο 2 στο 1° σημείο μέτρησης και το δοκίμιο 8 στο 3° σημείο μέτρησης.

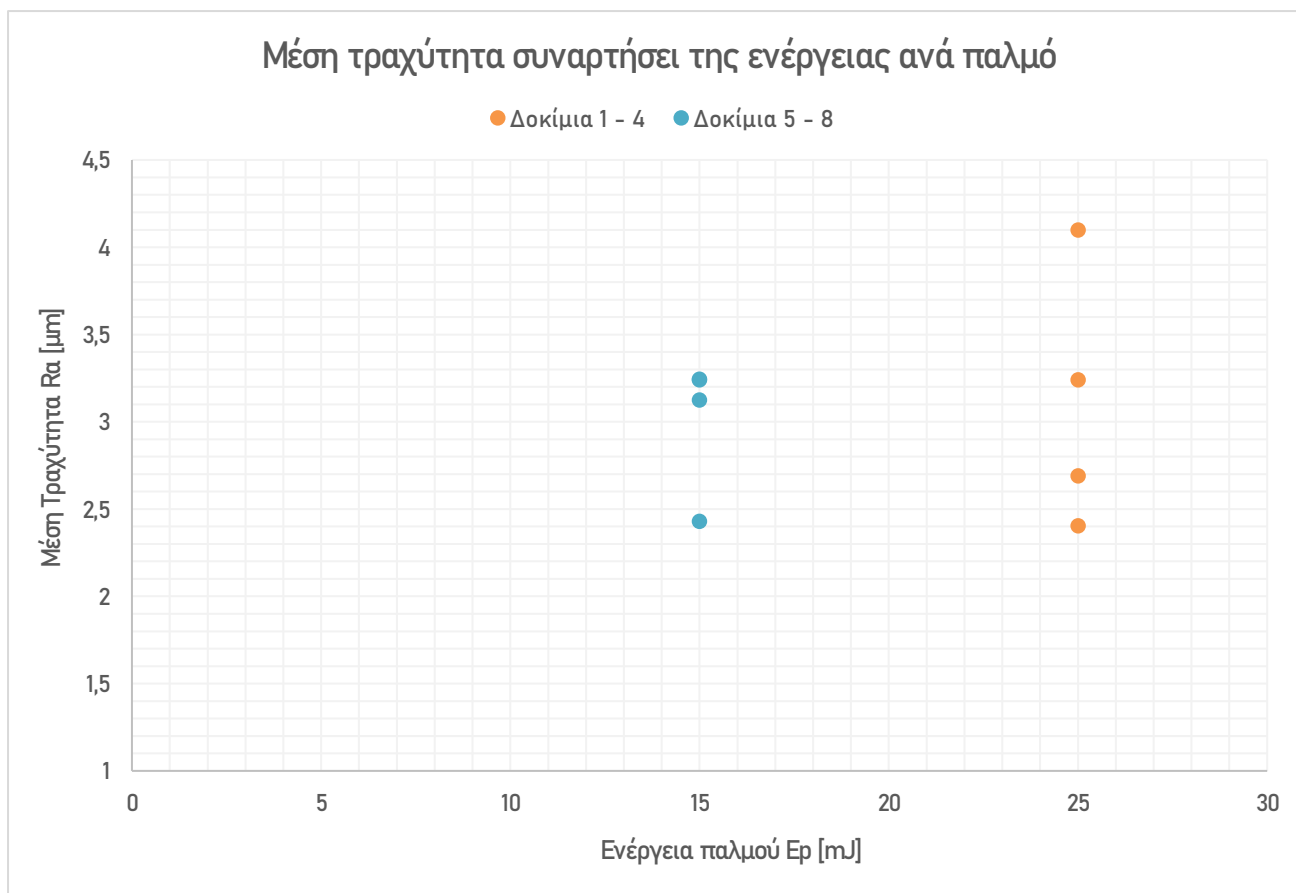
Έχει ευρεθεί ο μέσος όρος της τραχύτητας R_a κατά το μήκος δειγματοληψίας για κάθε ένα από τα οκτώ δοκίμια με σκοπό την πιο αντιπροσωπευτική και εύληπτη αναπαράσταση της κατανομής του μέσου ύψους της τραχύτητας.



Διάγραμμα 11: Κατανομή του μέσου όρου της τραχύτητας για τις δύο συνθήκες κοπής

Διευκρινίζεται ότι η μπλε καμπύλη αφορά στην μεταβολή της τραχύτητας για το πρώτο ζεύγος συνθηκών κατεργασίας $(I_p, T_{on}, U) = (0,5 A, 500 \mu s, 100 V)$ συναρτήσει των γωνιών κοπής $a_1 = 0^\circ, a_2 = 30^\circ, a_3 = 60^\circ, a_4 = 90^\circ$, ενώ η λαχανί καμπύλη για το δεύτερο ζεύγος $(I_p', T_{on}', U') = (0,5 A, 150 \mu s, 200 V)$ συναρτήσει των γωνιών κοπής $a_5 = 0^\circ, a_6 = 30^\circ, a_7 = 60^\circ, a_8 = 90^\circ$. Στο 1^ο σενάριο παρατηρείται αύξηση της τραχύτητας με εκθετικό ρυθμό, υποδηλώνοντας πως ο προσανατολισμός τοποθέτησης του δοκιμίου επηρεάζει σημαντικά και υποβαθμίζει άμεσα την ποιότητα επιφάνειας. Παράλληλα, στην 2^η ολοκληρωμένη κοπή διαφαίνεται πως η τιμή της τραχύτητας παρουσιάζει αύξηση αλλά με φθίνοντα ρυθμό, μιας και η λαχανί καμπύλη είναι κοίλη και όχι κυρτή όπως στην 1^η περίπτωση. Ειδικά από το 6^ο δοκίμιο και έπειτα η διακύμανση είναι σχεδόν αμελητέα και η τιμή της τραχύτητας σχεδόν σταθερή. Επομένως, δεν ενδιαφέρεται κανείς μόνον για την αριθμητική τιμή της τραχύτητας αλλά και για τον τρόπο κατανομής της. Συμπεραίνεται ότι οι συνθήκες κοπής που επιλέγονται για τα δοκίμια 5 – 8 είναι πιο κατάλληλες αποδίδοντας πιο ποιοτική κατεργασμένη επιφάνεια. Ενδεχομένως το ηλεκτρικό πεδίο ισοκατανέμεται πιο ομοιόμορφα στην περιοχή αποβολής υλικού, μετά την αύξηση της τάσης κατεργασίας U και τη μείωση της χρονικής διάρκειας του παλμού T_{on} . Τέλος, επιβεβαιώνεται και από τις δύο καμπύλες το ότι η γωνία κοπής α με την μέση τραχύτητα R_a συσυστοιούν ανάλογα ποσά, εφόσον ισχύει ότι $\alpha \uparrow \Rightarrow R_a \uparrow$.

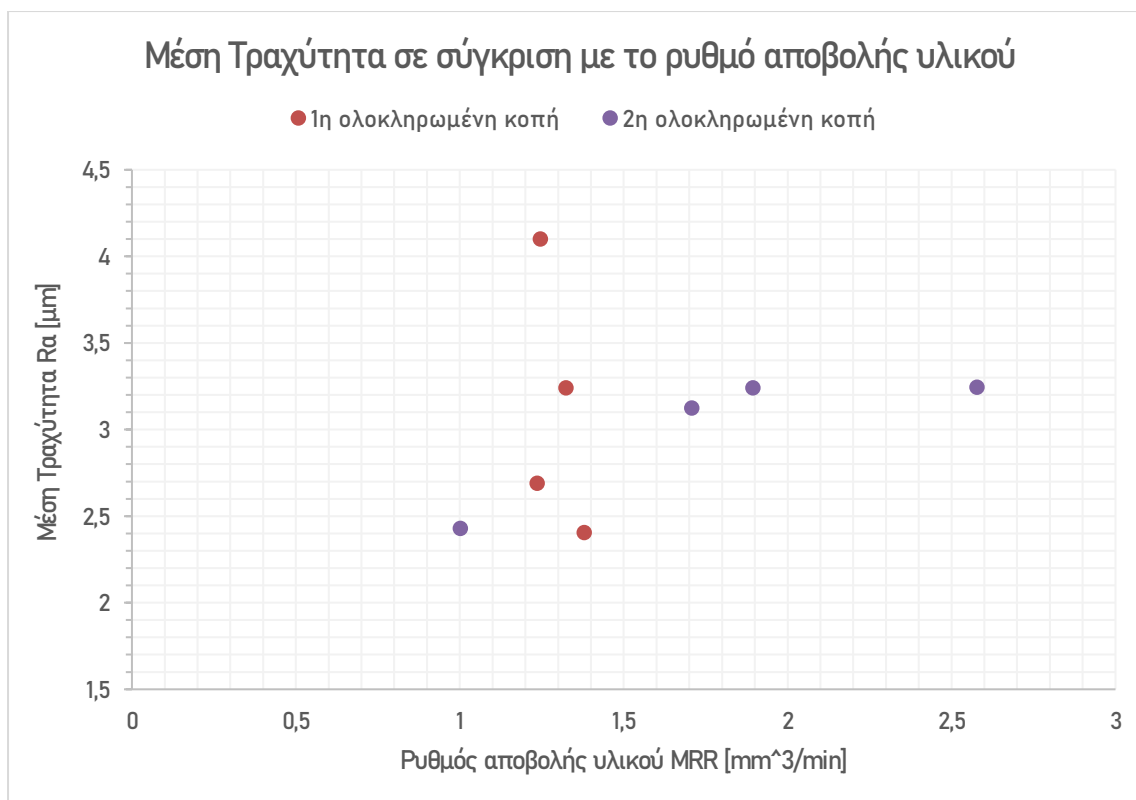
Δίδεται ο τρόπος εξάρτησης της μέσης τραχύτητας των κατεργασμένων επιφανειών από την ενέργεια ανά παλμό στο παρακάτω γράφημα σημείων:



Διάγραμμα 12: Μέσος όρος τραχύτητας δοκιμίων συναρτήσεως της ενέργειας παλμού

Με την πρόσδοση υψηλότερου ποσού ενέργειας ανά παλμό, παρατηρείται μια άτακτη διασπορά των τιμών της μέσης τραχύτητας στα δοκίμια 1 έως και 4. Δεν φαίνεται να ακολουθείται κάποιο μοτίβο, αλλά σίγουρα δεν μπορεί κανείς να εκτιμήσει το ποσό της τραχύτητας αν γνωρίζει την ενέργεια ανά παλμό. Για τα δοκίμια 5 έως και 8, μπορεί να πει κανείς ότι οι κουκίδες της τραχύτητας συγκεντρώνονται γύρω από την τιμή των $3,2 \mu m$ φανερώνοντας μια μεγαλύτερη συνέπεια στην ποιότητα επιφάνειας. Ωστόσο, είναι δύσκολο κανείς να δώσει μια συσχέτιση της ενέργειας παλμού με την μέση τραχύτητα, καθώς απαιτούνται περισσότερες δοκιμές και πειράματα με υψηλότερη ενέργεια παλμού. Για να εξασφαλιζόταν ένα τέτοιο πόρισμα θα έπρεπε να υφίστανται σαφής αναλογική ή αντιστρόφως ανάλογη σχέση των δύο παραγόντων, κάτι το οποίο δεν φαίνεται να συμβαίνει.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται και το τελευταίο γράφημα που αφορά στις έννοιες της τραχύτητας και συνδέει τον ρυθμό αποβολής υλικού MRR με τον μέσο όρο της τραχύτητας R_a στα 8 πειραματικά δεδομένα.



Διάγραμμα 13: Αντιπαραβολή της μέσης τραχύτητας με το ρυθμό αποβολής υλικού

Φαίνεται πως η διασπορά των ζευγών (MRR, R_a) είναι εντελώς τυχαία, ειδικά μιας και έχουν χρησιμοποιηθεί δύο διαφορετικές συνθήκες κατεργασίες, που απεικονίζονται με κόκκινο και μωβ χρώμα αντίστοιχα. Η επιθυμητή κατάσταση για όσο το δυνατόν πιο αποδοτική ηλεκτροδιάβρωση είναι η μεγιστοποίηση του MRR και συγχρόνως η ελαχιστοποίηση του R_a , δηλαδή το σημείο να βρίσκεται όσο πιο κάτω και δεξιά γίνεται. Διαφορετικά, θα μπορούσαμε να υιοθετήσουμε τον λόγο $\frac{R_a}{MRR}$ ο οποίος επιθυμούμε να λαμβάνει την ελάχιστη δυνατή τιμή.

#CFRP Δοκιμίου	$MRR [mm^3/min]$	$R_a [\mu m]$	R_a/MRR
1	1,3792	2,405	1,7437
2	1,2358	2,69	2,1768
3	1,3240	3,24	2,4470
4	1,2453	4,1	3,2923
5	1,0020	2,43	2,4252
6	1,7071	3,125	1,8306
7	1,8944	3,24	1,7103
8	2,5775	3,245	1,2590

Πίνακας 18: Πίνακας αποδοτικότητας της ηλεκτροδιάβρωσης των 8 δοκιμών

Με πράσινο χρώμα σημειώνονται οι ικανοποιητικές τιμές του παραπάνω δείκτη, όπου επιτυγχάνεται μια ισορροπία μεταξύ σχετικά υψηλού MRR και μειωμένης τραχύτητας. Με πορτοκαλί καταγράφονται τα δείγματα, για τα οποία δεν είναι επαρκώς χαμηλός ο λόγος $\frac{R_a}{MRR}$. Τέλος, με κόκκινο χρώμα εντοπίζεται το δοκίμιο που δεν είναι ικανοποιητικό σε καμία παράμετρο απόδοσης. Παρατηρείται πως 3/4 δοκίμια της 2ης σειράς σημειώνουν υψηλές επιδόσεις ενώ τούτο συμβαίνει μόλις για 1/4 δοκίμια της 1ης σειράς. Τέλος, το πιο κατεργάσιμο δοκίμιο είναι το 8ο λόγω και του υψηλότερου MRR και ως διαθέτει την 2η χειρότερη τραχύτητα, ενώ το χερίστο τεμάχιο είναι το 4ο με το 3ο χαμηλότερο MRR και την υψηλότερη R_a .

4.2 Παραμετρικό ημι – εμπειρικό μοντέλο δύο μεταβλητών

Κτίζεται ένα διπαραμετρικό μοντέλο περιγραφής της κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης για το χρησιμοποιούμενο υλικό CFRP με αυτήν τη πλέξη, το ποσοστό ινών και τη διαστρωματική ακολουθία. Αξιοποιούνται πλήρως τα δεδομένα των δύο εκ των τριών συνθηκών κοπής, δηλαδή της έντασης ρεύματος και της χρονικής διάρκειας του παλμού. Ως εξαρτημένες μεταβλητές, χρησιμοποιούμε τους δείκτες του ρυθμού αποβολής υλικού, της μέσης τραχύτητας και του μέγιστου ύψους αυτής.

Στόχος αποτελεί ο υπολογισμός των συντελεστών a, b, c, a', b', c' και a'', b'', c'' στις παρακάτω ημι-εμπειρικές σχέσεις:

$$\begin{cases} MRR = a \cdot I_p^b \cdot T_{on}^c \\ R_a = a' \cdot I_p^{b'} \cdot T_{on}^{c'} \\ R_t = a'' \cdot I_p^{b''} \cdot T_{on}^{c''} \end{cases}$$

Επομένως, χρειάζεται να λυθεί ένα πρόβλημα πολλαπλής μη γραμμικής παρεμβολής (multiple non – linear regression) και πιο συγκεκριμένα εκθετικής παρεμβολής της μορφής:

$$y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots \dots x_n^{a_n}$$

Όμως αυτό το πρόβλημα είναι εφικτό να μετατραπεί σε πρόβλημα γραμμικής παρεμβολής αν πάρουμε τον δεκαδικό λογάριθμο και στα δύο μέρη και μετατρέψουμε την εξίσωση στην παρακάτω μορφή:

$$\log y = \log a_0 + a_1 \log x_1 + a_2 \log x_2 + \dots + a_m \log x_m$$

Αντίστοιχα, με το κατάλληλο αλγεβρικό χειρισμό των σχέσεων στην αγκύλη, αποκτούμε εξισώσεις όπως στην παραπάνω μορφή, αξιοποιώντας και τις ιδιότητες των λογαρίθμων:

$$MRR = a \cdot I_p^b \cdot T_{on}^c \Rightarrow$$

$$\log(MRR) = \log(a \cdot I_p^b \cdot T_{on}^c) \Rightarrow$$

$$\log(MRR) = \log a + \log(I_p^b) + \log(T_{on}^c) \Rightarrow$$

$$\log(MRR) = \log a + b \log(I_p) + c \log(T_{on})$$

Όμοια και για τις εξισώσεις πρόβλεψης της τραχύτητας, προκύπτει ότι:

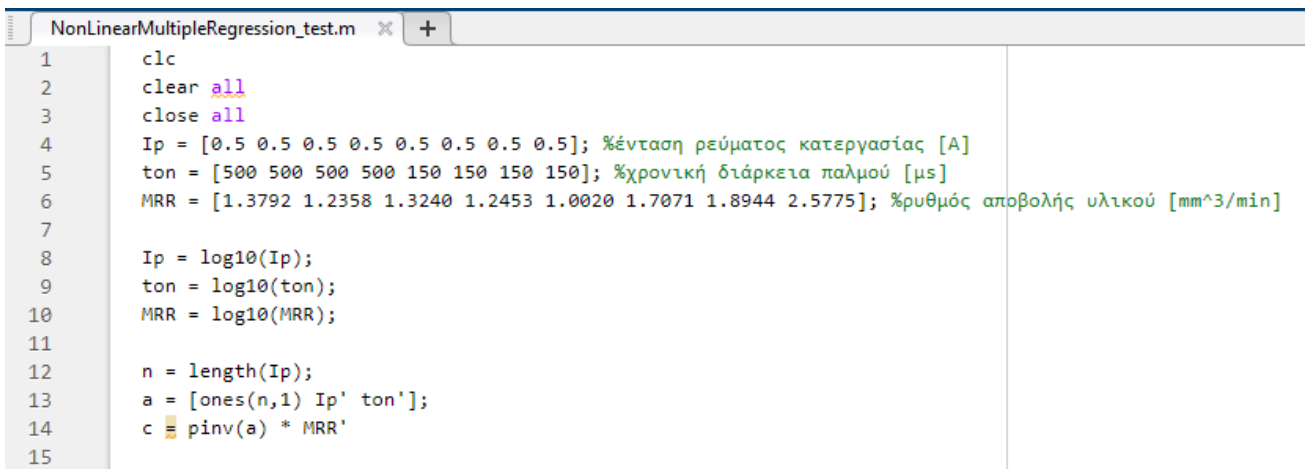
$$\log(R_a) = \log a' + b' \log(I_p) + c' \log(T_{on})$$

$$\log(R_t) = \log a'' + b'' \log(I_p) + c'' \log(T_{on})$$

Επομένως, τελικά το πρόβλημα ανάγεται στον υπολογισμό των $\log a, b, c, \log a', b', c'$ και $\log a'', b'', c''$. Η εύρεση αυτών των ημι-εμπειρικών τιμών πραγματοποιείται με το υπολογιστικό πακέτο MATLAB μέσω ενός μικρού κώδικα, ο οποίος παρουσιάζεται στην παρακάτω σελίδα για την περίπτωση του ρυθμού αποβολής υλικού:

4.2.1 Ημι-εμπειρική σχέση για το ρυθμό αποβολής υλικού MRR

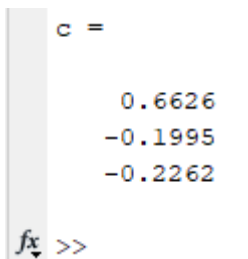
```
clc
clear all
Ip = [0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]; %ένταση ρεύματος κατεργασίας [A]
ton = [500 500 500 500 150 150 150 150]; %χρονική διάρκεια παλμού [μs]
MRR = [1.3792 1.2358 1.3240 1.2453 1.0020 1.7071 1.8944 2.5775]; %ρυθμός αποβολής υλικού [mm3/min]
Ip = log10(Ip);
ton = log10(ton);
MRR = log10(MRR);
n = length(Ip);
a = [ones(n,1) Ip' ton'];
c = pinv(a) * MRR'
```



```
NonLinearMultipleRegression_test.m x +
1   clc
2   clear all
3   close all
4   Ip = [0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]; %ένταση ρεύματος κατεργασίας [A]
5   ton = [500 500 500 500 150 150 150 150]; %χρονική διάρκεια παλμού [μs]
6   MRR = [1.3792 1.2358 1.3240 1.2453 1.0020 1.7071 1.8944 2.5775]; %ρυθμός αποβολής υλικού [mm3/min]
7
8   Ip = log10(Ip);
9   ton = log10(ton);
10  MRR = log10(MRR);
11
12  n = length(Ip);
13  a = [ones(n,1) Ip' ton'];
14  c = pinv(a) * MRR'
```

Εικόνα 41: Στιγμιότυπο του script από το υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB

Τρέχοντας τον παραπάνω κώδικα, μπορούμε να αποκτήσουμε τις τιμές των συντελεστών $\log a, b, c$



```
c =
    0.6626
   -0.1995
   -0.2262

fx >>
```

Εικόνα 42: Συντελεστές ημι - εμπειρικής σχέσης για τη γραμμική παρεμβολή

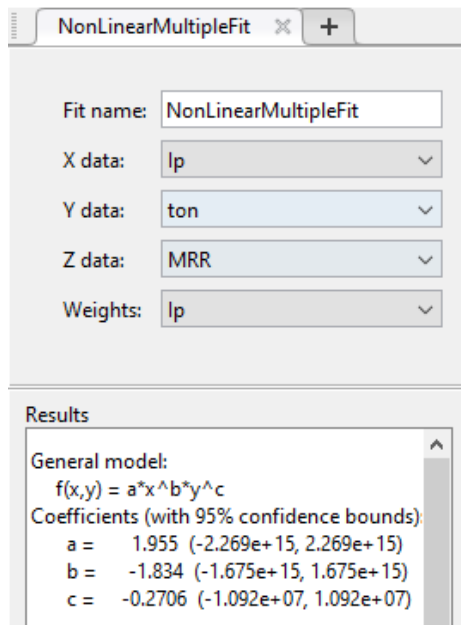
Επομένως, ισχύει ότι $\log a = 0,6626, b = -0,1995$ και $c = -0,2262$, δηλαδή το μοντέλο του λογαριθμικού ρυθμού αποβολής υλικού μπορεί να αναγραφεί ως εξής:

$$\log(MRR) = 0,6626 - 0,1995 \log(I_p) - 0,2262 \log(T_{on}) \Rightarrow$$

$$MRR_{fit_1} = 4,5983 \cdot I_p^{-0,1995} \cdot T_{on}^{-0,2262} \left[\frac{mm^3}{min} \right]$$

Παρατηρείται ότι οι τιμές των εκθετικών συντελεστών είναι παρόμοιες, γεγονός που σημαίνει ότι δεν φαίνεται να έχει κάποια παράμετρος κατεργασίας μεγαλύτερη σημασία από την άλλη, δηλαδή η ένταση του ρεύματος έναντι της χρονικής διάρκειας παλμού.

Αξιοποιώντας ένα από τα Apps του MATLAB και συγκεκριμένα το Curve Fitting Tool, δίνεται η δυνατότητα να φορτώσουμε τα αρχικά δεδομένα, δηλαδή τις τρεις οκτάδες των I_p, T_{on} και MRR στην κανονική τους μορφή (και όχι στην λογαριθμική) και να λάβουμε μια εκτίμηση για τους συντελεστές a, b, c της πολλαπλής εκθετικής παρεμβολής. Έτσι θα αποκτήσουμε δύο προβλεπτικές συναρτήσεις για τον ρυθμό αποβολής υλικού με δύο τρόπους.

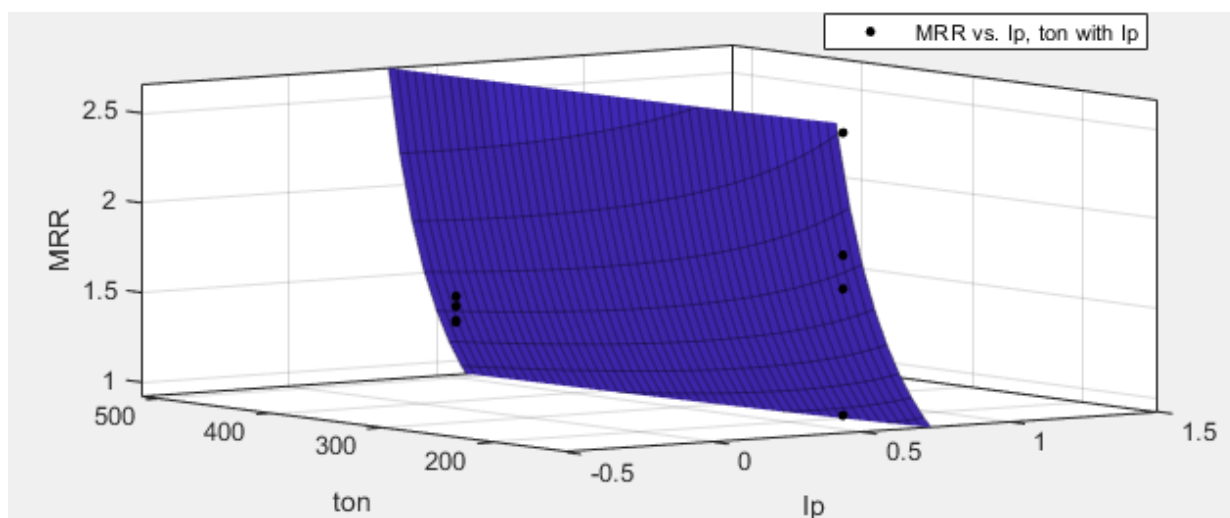


Εικόνα 43: Γραφικό περιβάλλον του Curve Fitting App

Επομένως, το 2^ο προβλεπτικό μοντέλο δίνεται στην παρακάτω συνάρτηση δύο μεταβλητών, όπου αυτήν τη φορά η τιμή του συντελεστή του I_p είναι σχεδόν 7 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του T_{on} , δεικνύοντας την μεγαλύτερη σημασία της έντασης του ρεύματος στον ρυθμό αποβολής υλικού:

$$MRR_{fit_2} = 1,955 \cdot I_p^{-1,834} \cdot T_{on}^{-0,2706} \left[\frac{mm^3}{min} \right]$$

Με μαύρες κουκίδες απεικονίζονται οι δεδομένες τιμές, ενώ η μπλε επιφάνεια αντικατοπτρίζει το διπαραμετρικό ημι – εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης του ρυθμού αποβολής υλικού:



Διάγραμμα 14: Γραφική παράσταση του 2ου προβλεπτικού μοντέλου για τον ρυθμό αποβολής υλικού

Σχηματίζεται συγκεντρωτικός πίνακας, ο οποίος περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

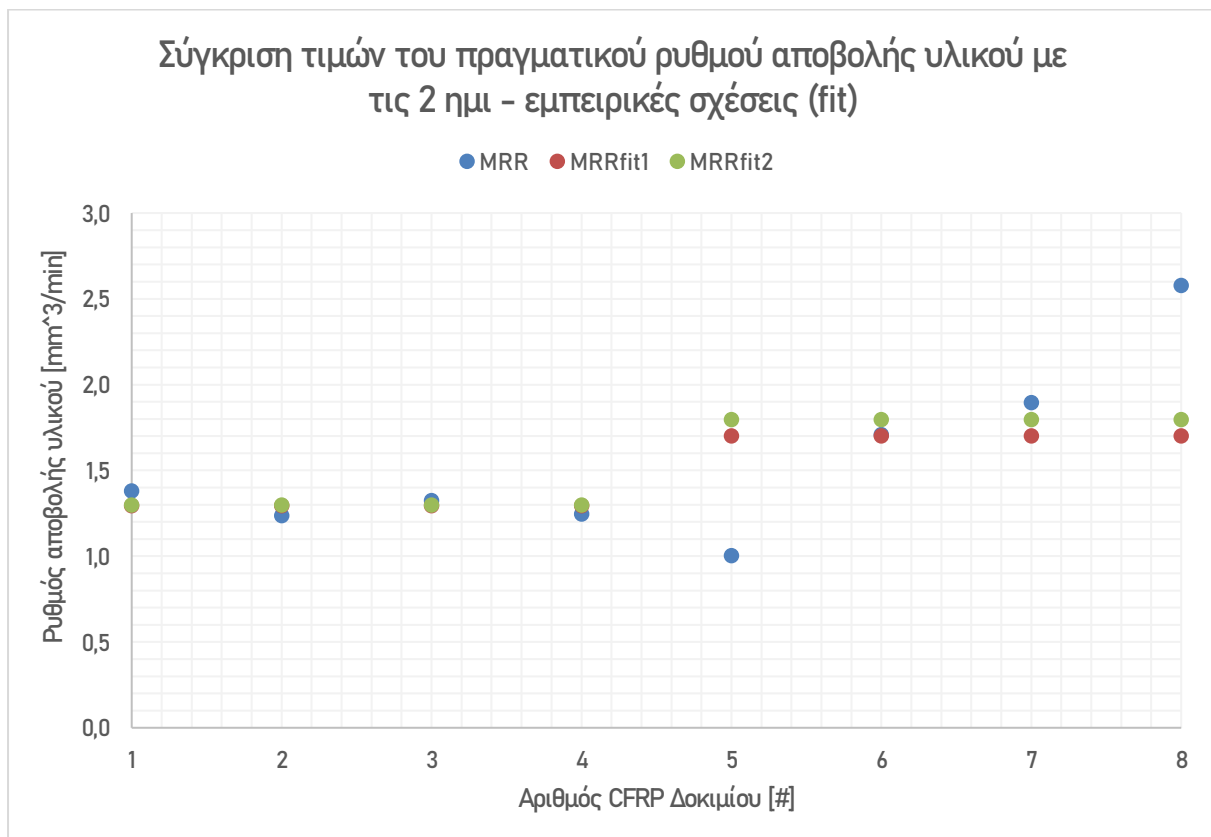
- Τα δεδομένα για τα οποία ζητείται δύο φορές να “ταιριάξουν” σε μια εκθετική συνάρτηση δύο μεταβλητών
- Οι τιμές των δύο προβλεπτικών μοντέλων για τον ρυθμό αποβολής υλικού (MRR_{fit_1} & MRR_{fit_2})
- Το σφάλμα μεταξύ του πραγματικού ρυθμού αποβολής υλικού MRR και των αντίστοιχων τιμών των συναρτήσεων, οριζόμενο ως εξής:

$$Error_i = \frac{MRR_{fit_i} - MRR}{MRR} \cdot 100 [\%] \text{ για } i = 1,2$$

# CFRP Δοκιμίου	I_p	T_{on}	MRR	MRR_{fit_1}	MRR_{fit_2}	$Error_1$ [%]	$Error_2$ [%]
1	0,5	500	1,3792	1,2946	1,2969	-6,1326	-5,9707
2	0,5	500	1,2358	1,2946	1,2969	4,7645	4,9452
3	0,5	500	1,3240	1,2946	1,2969	-2,2215	-2,0528
4	0,5	500	1,2453	1,2946	1,2969	3,9586	4,1380
5	0,5	150	1,0020	1,6999	1,7963	69,6520	79,2766
6	0,5	150	1,7071	1,6999	1,7963	-0,4224	5,2268
7	0,5	150	1,8944	1,6999	1,7963	-10,2660	-5,1753
8	0,5	150	2,5775	1,6999	1,7963	-34,0490	-30,3075

Πίνακας 19: Πλήρες προβλεπτικό μοντέλο για τον ρυθμό αποβολής υλικού και αντίστοιχες αποκλίσεις

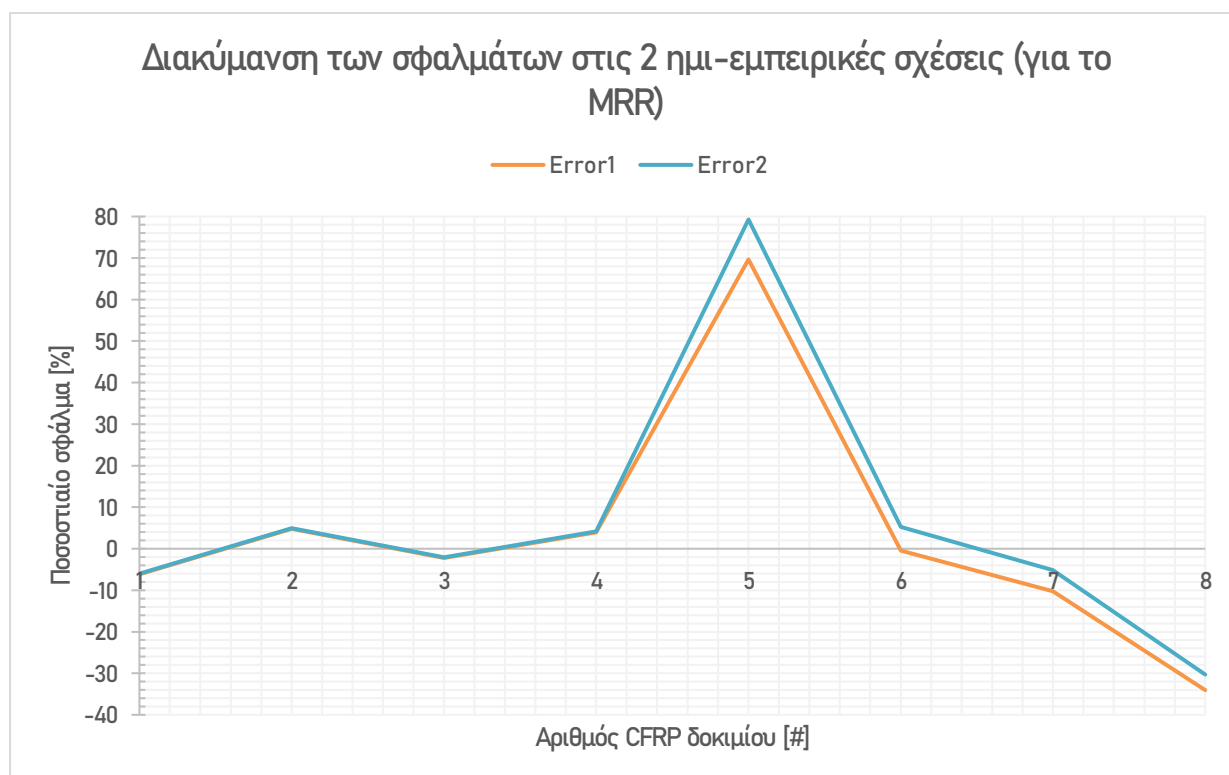
Δίνονται δύο χαρακτηριστικά γραφήματα αναφορικά με την ακρίβεια που παρέχουν οι δύο προβλεπτικές συναρτήσεις και τα σφάλματα που προκύπτουν για τον ρυθμό αποβολής υλικού MRR .



Διάγραμμα 15: Αντιπαραβολή του ρυθμού αποβολής υλικού και των δύο εκθετικών διπαμετρικών μοντέλων

Αξίζει να σημειωθεί πως σε όρους απόλυτων (αριθμητικών) τιμών και τα δύο μοντέλα επιτυγχάνουν να προβλέψουν με πολύ μικρές αποκλίσεις το ρυθμό αποβολής υλικού ανεξάρτητα από τη γωνία τοποθέτησης/κοπής α του δοκιμίου. Ωστόσο, στο 5^ο δοκίμιο, όπου μεταβάλλεται τόσο η χρονική διάρκεια του παλμού T_{on} από $500 \mu s$ σε $150 \mu s$ αλλά και η τάση κατεργασίας U από $100 V$ σε $200 V$, και τα δύο μοντέλα αποτυγχάνουν να εκτιμήσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τον ρυθμό αποβολής υλικού. Πιο συγκεκριμένα πέφτουν έξω πάνω από $0,65 \text{ mm}^3/\text{min}$, δηλαδή σε απαγορευτική τιμή. Παρ' όλα αυτά, στα υπόλοιπα 2 δοκίμια και οι δύο προβλεπτικές συναρτήσεις προσεγγίζουν αξιοπρεπώς την δοσμένη τιμή. Τέλος, η κατάσταση που επικρατεί στο 8^ο δοκίμιο είναι εντελώς όμοια με εκείνη του 5^{ου} δοκιμίου, αναδεικνύοντας τα πολύ υψηλά σφάλματα που προκύπτουν. Τούτο ενδεχομένως συμβαίνει λόγω του σχετικά υψηλού ρυθμού αποβολής υλικού $MRR_8 = 2,5775 \text{ mm}^3/\text{min}$ ενώ για τα υπόλοιπα τεμάχια ισχύει η ανισότητα: $1 < MRR_i < 1,9 \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right]$ για $i = 1$ έως 7.

Τα προαναφερθέντα σημεία επιβεβαιώνονται άμεσα και με τη διακύμανση των σφαλμάτων, δηλαδή του ποσοστιαίου λάθους μεταξύ της προβλεπόμενης και της αληθινής τιμής του ρυθμού αποβολής υλικού:



Διάγραμμα 16: Μεταβολή του ποσοστιαίου λάθους σε όλες τις περιπτώσεις πρόβλεψης του ρυθμού αποβολής υλικού

Στο παραπάνω γράφημα, παρατηρείται ότι για την 1^η ολοκληρωμένη κοπή (δηλαδή για τα δοκίμια 1 έως και 4) τα σφάλματα σχεδόν ταυτίζονται και είναι σταθερά κάτω από 8% ανεξάρτητα από τη γωνία κοπής, και για όποια συνάρτηση και από τις δύο αξιοποιηθεί. Στο σημείο αλλαγής των συνθηκών κοπής, στο 5^ο δοκίμιο πραγματοποιούνται λάθη της τάξεως του 70 – 80%. Τέλος, το 2^ο ημι – εμπειρικό μοντέλο εμφανίζει αισθητά χαμηλότερα σφάλματα για τα δοκίμια 7 και 8, ενώ για το δοκίμιο 6 δίνει ένα σφάλμα περίπου 5% την ώρα που το 1^ο μοντέλο προβλέπει ιδανικά την πραγματική τιμή. Για όλους αυτούς τους λόγους και σύμφωνα με τον ενιαίο πίνακα, το πιο αξιόπιστο μοντέλο πρόβλεψης είναι το 2^ο, δηλαδή το MRR_{fit_2} .

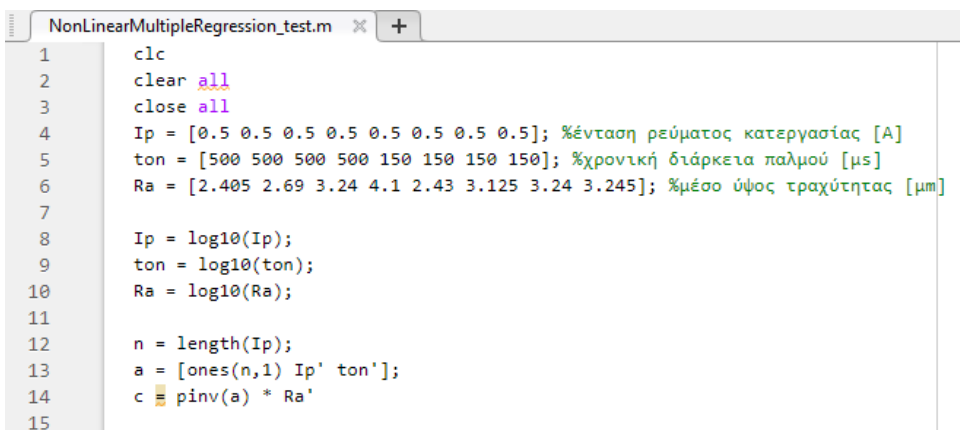
4.2.2 Ημι-εμπειρική σχέση για το μέσο ύψος τραχύτητας R_a

Εντελώς αντίστοιχα με τις συναρτήσεις περιγραφής του ρυθμού αποβολής υλικού, με τον ίδιο τρόπο εργάζεται κανείς και για το μέσο όρων των τιμών του μέσου ύψους της τραχύτητας R_a . Γίνονται κάποιες μικροαλλαγές στον κώδικα, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

```
clc
clear all
close all
Ip = [0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]; %ένταση ρεύματος κατεργασίας [A]
ton = [500 500 500 500 150 150 150 150]; %χρονική διάρκεια παλμού [μs]
Ra = [2.405 2.69 3.24 4.1 2.43 3.125 3.24 3.245]; %μέσο ύψος τραχύτητας [μm]

Ip = log10(Ip);
ton = log10(ton);
Ra = log10(Ra);

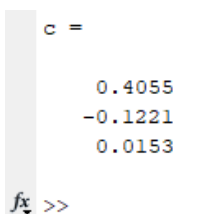
n = length(Ip);
a = [ones(n,1) Ip' ton'];
c = pinv(a) * Ra'
```



```
NonLinearMultipleRegression_test.m x +
1   clc
2   clear all
3   close all
4   Ip = [0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]; %ένταση ρεύματος κατεργασίας [A]
5   ton = [500 500 500 500 150 150 150 150]; %χρονική διάρκεια παλμού [μs]
6   Ra = [2.405 2.69 3.24 4.1 2.43 3.125 3.24 3.245]; %μέσο ύψος τραχύτητας [μm]
7
8   Ip = log10(Ip);
9   ton = log10(ton);
10  Ra = log10(Ra);
11
12  n = length(Ip);
13  a = [ones(n,1) Ip' ton'];
14  c = pinv(a) * Ra'
```

Εικόνα 44: Παραλλαγμένος κώδικας για το μέσο ύψος τραχύτητας R_a

Και οι συντελεστές της λογαριθμικής συνάρτησης που προκύπτουν από το πρόγραμμα:



```
c =
    0.4055
   -0.1221
    0.0153
fx >>
```

Εικόνα 45: Συντελεστές λογαριθμικής συνάρτησης μέσης τραχύτητας

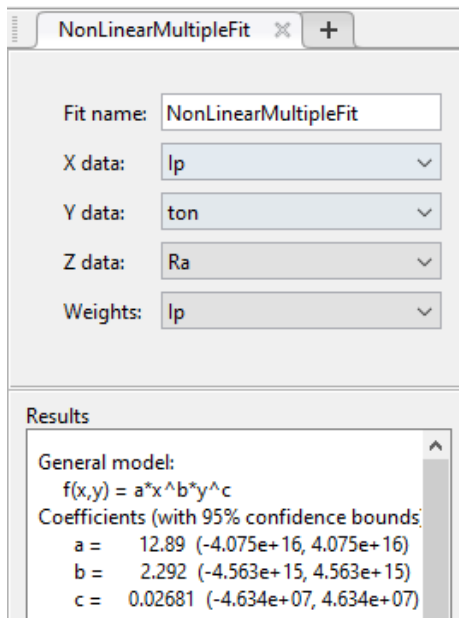
Δηλαδή ισχύει για την λογαριθμική σχέση ότι: $\log a' = 0,4055$, $b' = -0,1221$, $c' = 0,0153$

Επομένως, η πρώτη συνάρτηση εκτίμησης της μέσης τραχύτητας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\log(R_a) = 0,4055 - 0,1221\log(I_p) + 0,0153\log(T_{on}) \Rightarrow$$

$$R_{a_{fit_1}} = 2,5439 \cdot I_p^{-0,1221} \cdot T_{on}^{0,0153} [\mu m]$$

Έχοντας αποκτήσει την 1^η προβλεπτική σχέση για το μέσο ύψος τραχύτητας, μπορούμε να αξιοποιήσουμε το Curve Fitting App του MATLAB, έτσι ώστε απευθείας από το γραφικό περιβάλλον να εισάγουμε τα δεδομένα της έντασης ρεύματος, της χρονικής διάρκειας παλμού και της μέσης τραχύτητας. Με αυτόν τον τρόπο, θα λάβουμε απευθείας τους παράγοντες της 2^{ης} ημι – εμπειρικής σχέσης:

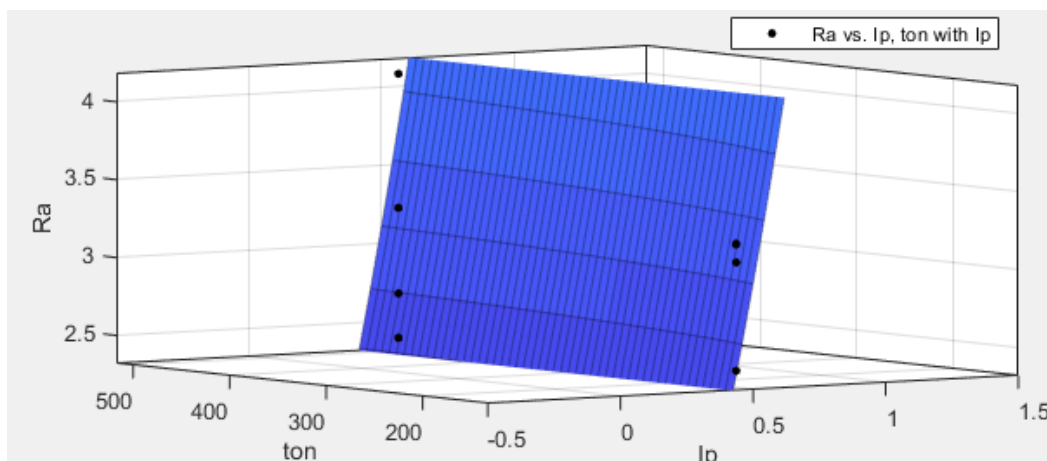


Εικόνα 46: Μενού εισαγωγής των μεταβλητών στο Curve Fitting App

Σύμφωνα με το άσπρο κουτάκι, που εμπεριέχει τους συντελεστές της 2^{ης} εκθετικής συνάρτησης, μπορούμε να δώσουμε την εν λόγω σχέση. Παρατηρεί κανείς ότι στην 1^η σχέση ο παράγοντας της έντασης του ρεύματος ήταν σχεδόν 8 φορές μεγαλύτερος από εκείνον της χρονικής διάρκειας παλμού, ενώ στην 2^η συνάρτηση είναι 85 φορές υψηλότερος. Με αυτόν τον τρόπο, αναδεικνύεται η βαρύνουσα σημασία του I_p στο βαθμό ποιότητας της κατεργασμένης επιφανείας.

$$Ra_{fit_2} = 12,89 \cdot I_p^{2,292} T_{on}^{0,02681} [\mu m]$$

Επίσης, παρουσιάζεται η επιφάνεια που σχηματίζει στο τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων η ανωτέρω συνάρτηση δύο μεταβλητών:



Διάγραμμα 17: Γράφημα της 2ης προβλεπτικής συνάρτησης της μέσης τραχύτητας

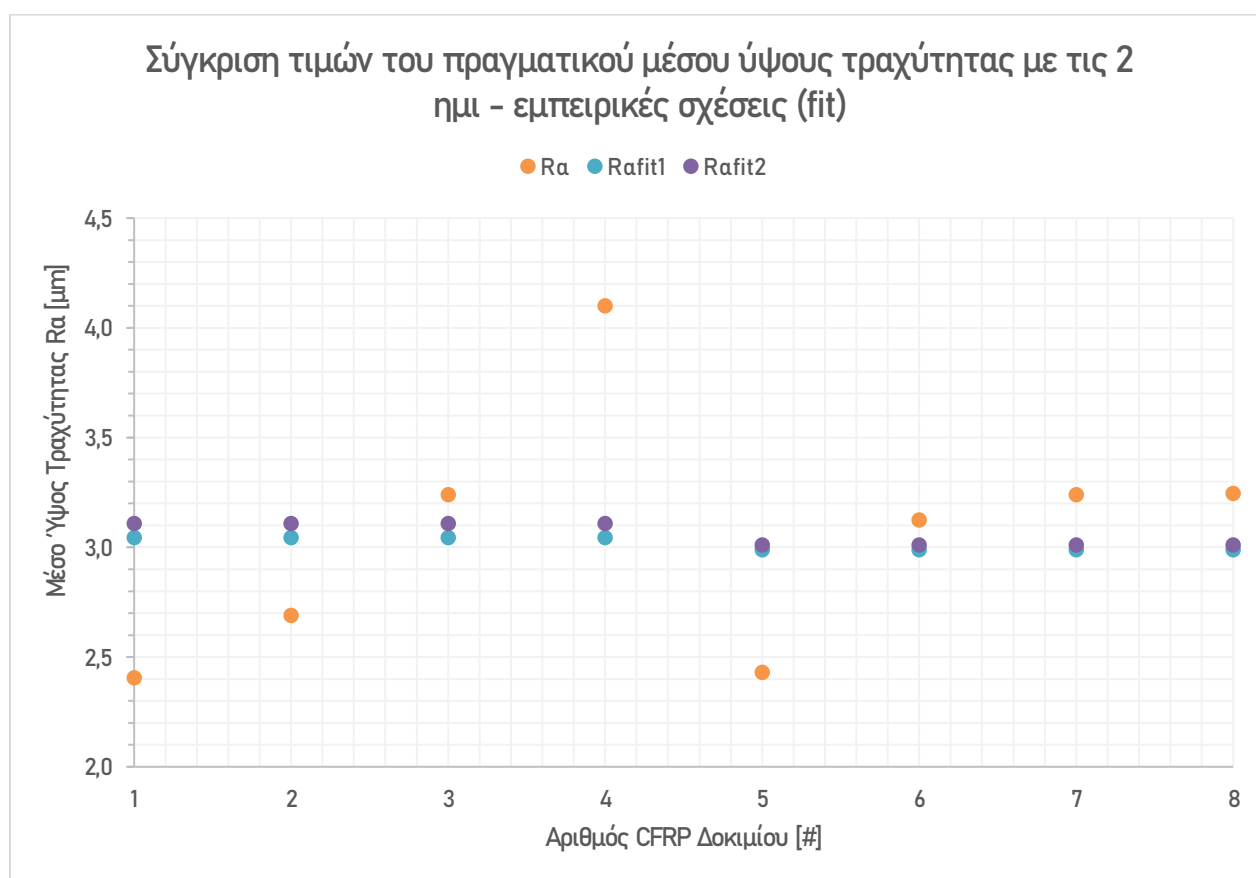
Κατασκευάζεται συμπεριληπτικός πίνακας με τα δεδομένα εισόδου, δηλαδή της έντασης του ρεύματος, της χρονικής διάρκειας του παλμού και της αληθινής τιμής του μέσου ύψους της τραχύτητας. Ακόμη, περιλαμβάνονται οι τιμές των σχέσεων πρόβλεψης της μέσης τραχύτητας, δηλαδή τα $R_{a\text{fit}_1}$ και $R_{a\text{fit}_2}$ όπως επίσης και το λάθος που πραγματοποιείται μεταξύ της πραγματικής τιμής του R_a και των ποσοτήτων από το διπαραμετρικό μοντέλο. Μαθηματικά, υπολογίζεται όπως και στην περίπτωση του ρυθμού αποβολής υλικού:

$$Error_i' = \frac{R_{a\text{fit}_i} - R_a}{R_a} \cdot 100 [\%] \text{ για } i = 1,2$$

# CFRP Δοκιμίου	I_p	T_{on}	R_a	$R_{a\text{fit}_1}$	$R_{a\text{fit}_2}$	$Error_1' [\%]$	$Error_2' [\%]$
1	0,5	500	2,405	3,0447	3,1092	26,6004	29,2815
2	0,5	500	2,69	3,0447	3,1092	13,1873	15,5844
3	0,5	500	3,24	3,0447	3,1092	-6,0266	-4,0364
4	0,5	500	4,1	3,0447	3,1092	-25,7381	-24,1653
5	0,5	150	2,43	2,9892	3,0105	23,0109	23,8873
6	0,5	150	3,125	2,9892	3,0105	-4,3467	-3,6652
7	0,5	150	3,24	2,9892	3,0105	-7,7418	-7,0845
8	0,5	150	3,245	2,9892	3,0105	-7,8840	-7,2277

Πίνακας 20: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την πρόβλεψη της μέσης τραχύτητας

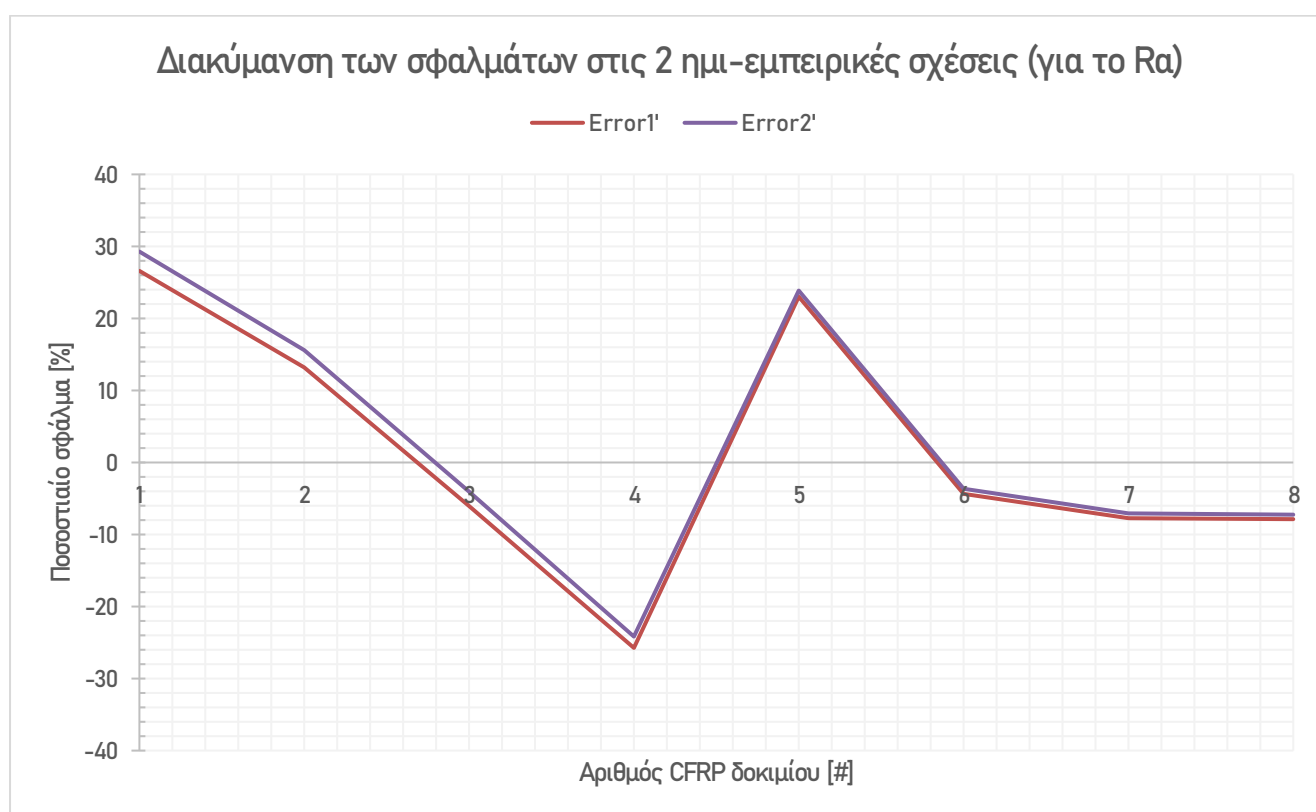
Στο παρακάτω γράφημα διασποράς, οπτικοποιούνται συγχρόνως οι τιμές της πραγματικής μέσης τραχύτητας και οι δύο προβλέψεις που γίνονται μέσω του μοντέλου των δύο συναρτήσεων για κάθε ένα από τα οκτώ δοκίμια.



Διάγραμμα 18: Αντιπαραβολή του μέσου ύψους τραχύτητας με τις τιμές των δύο προβλεπτικών σχέσεων

Αρχικά, παρατηρείται πως και τα δύο μοντέλα προβλέπουν παραπλήσιες, σχεδόν ίδιες τιμές μέσου ύψους τραχύτητας ανεξαρτήτως δοκιμίου, περίπου στα $R_{a\text{fit}} = 3 \mu\text{m}$. Η μέγιστη απόκλιση τους φθάνει στο ποσό των $0,0645 \mu\text{m}$. Οι αποστάσεις από τις αληθινές τιμές είναι σχετικά υψηλές και ουδεμία σχέση έχουν με τις αντίστοιχες του ρυθμού αποβολής υλικού. Στην προκειμένη περίπτωση, οπτικά εστιάζει κανείς στο ότι το μοντέλο των 2 συναρτήσεων επιτυγχάνει επαρκείς προβλέψεις μόνο για τα δοκίμια 6, 7 και 8, ενώ στα υπόλοιπα εντοπίζονται σοβαρές αποκλίσεις. Αυτό ενδεχομένως συμβαίνει καθώς τα συγκεκριμένα τεμάχια εμφανίζουν παρόμοια τιμή μέσης τραχύτητας και αυτή η συνέπεια επιτρέπει στις συναρτήσεις να μπορούν να προσεγγίσουν πιο εύκολα αυτές τις ποσότητες. Αντιθέτως, στην 1^η σειρά δοκιμίων γίνονται μη ικανοποιητικές προβλέψεις, με εξαίρεση το 3^ο δοκίμιο που εμφανίζει ίδια τιμή τραχύτητας με το 7^ο, μάλλον εξαιτίας της ανεξέλεγκτης διασποράς. Ειδικότερα, στην μετάβαση από το 4^ο δοκίμιο στο 5^ο, όπου αλλάζουν και οι συνθήκες κοπής, όπως στο ρυθμό αποβολής υλικού, συμβαίνουν τα υψηλότερα σφάλματα.

Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει την κατανομή των σφαλμάτων μεταξύ της πραγματικής τιμής της μέσης τραχύτητας και των εκτιμήσεων του διπαραμετρικού μοντέλου:



Διάγραμμα 19: Μεταβολή του ποσοστιαίου λάθους πρόβλεψης της μέσης τραχύτητας

Παρατηρεί κανείς πως τα σφάλματα είναι αρκετά υψηλά της τάξεως του 15 – 25 % και για τις δύο σχέσεις εκτός από τα δοκίμια 3,6,7 και 8, όπου παρατηρούνται αποδεκτές τιμές από –4% έως και –8%. Η κόκκινη καμπύλη είναι διαρκώς κάτω από τη μωβ έως και το σημείο εναλλαγής των συνθηκών κατεργασίας, δηλαδή το δοκίμιο 5, όπου και οριακά μετά από αυτό αντιστρέφεται το σκηνικό. Αυτό το γεγονός υποδεικνύει πως η 1^η διπαραμετρική συνάρτηση $R_{a\text{fit}_1}$ ταιριάζει καλύτερα στις παραμέτρους κοπής των δοκιμίων 1 έως και 4, ενώ η 2^η προβλεπτική σχέση $R_{a\text{fit}_2}$ κρίνεται πιο κατάλληλη για την 2^η ολοκληρωμένη κοπή.

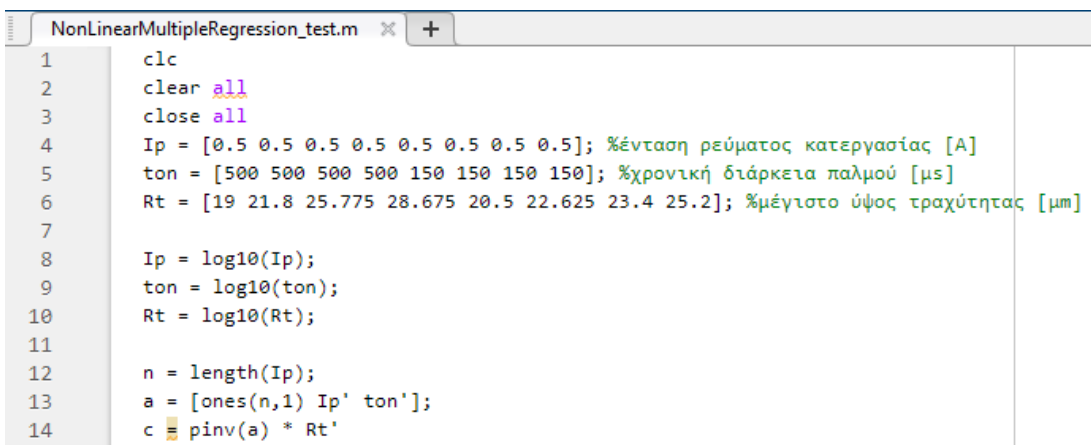
4.2.3 Ημι-εμπειρική σχέση για το μέγιστο ύψος τραχύτητας R_t

Όπως και στην εξαγωγή της 1^{ης} ημι-εμπειρικής συνάρτησης για το μέσο ύψος τραχύτητας, έτσι και για την R_t (μέσες τιμές) χρησιμοποιείται το ίδιο script με ελάχιστες διαφοροποιήσεις, όπως φαίνεται παρακάτω και στην επόμενη εικόνα:

```
clc
clear all
close all
Ip = [0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]; %ένταση ρεύματος κατεργασίας [A]
ton = [500 500 500 500 150 150 150 150]; %χρονική διάρκεια παλμού [μs]
Rt = [19 21.8 25.775 28.675 20.5 22.625 23.4 25.2]; %μέγιστο ύψος τραχύτητας [μm]

Ip = log10(Ip);
ton = log10(ton);
Rt = log10(Rt);

n = length(Ip);
a = [ones(n,1) Ip' ton'];
c = pinv(a) * Rt'
```



```
NonLinearMultipleRegression_test.m x +
1      clc
2      clear all
3      close all
4      Ip = [0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]; %ένταση ρεύματος κατεργασίας [A]
5      ton = [500 500 500 500 150 150 150 150]; %χρονική διάρκεια παλμού [μs]
6      Rt = [19 21.8 25.775 28.675 20.5 22.625 23.4 25.2]; %μέγιστο ύψος τραχύτητας [μm]
7
8      Ip = log10(Ip);
9      ton = log10(ton);
10     Rt = log10(Rt);
11
12     n = length(Ip);
13     a = [ones(n,1) Ip' ton'];
14     c = pinv(a) * Rt'
```

Εικόνα 47: Κώδικας που αφορά στο μέγιστο ύψος τραχύτητας R_t

Τρέχοντας το παραπάνω .m αρχείο, προκύπτουν οι συντελεστές της 1^{ης} ημι - εμπειρικής σχέσης για το R_t .

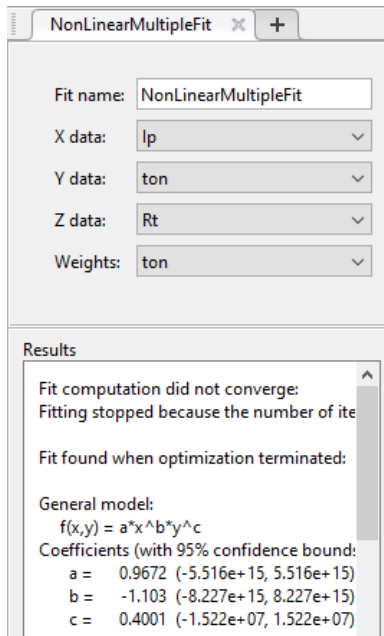
```
c =
    1.1996
   -0.3611
    0.0234
```

Εικόνα 48: Παράγοντες της 1ης προβλεπτικής συνάρτησης σε λογαριθμική μορφή

Επομένως, ισχύει ότι $\log a'' = 1,1996$, $b'' = -0,3611$, $c'' = 0,0234$ και η προβλεπτική συνάρτηση μπορεί να δοθεί όπως παρακάτω:

$$\log(R_t) = 1,1996 - 0,3611\log(I_p) + 0,0234\log(T_{on}) \Rightarrow$$
$$R_{t_{fit_1}} = 15,8343 \cdot I_p^{-0,3611} \cdot T_{on}^{0,0234} [\mu m]$$

Όπως και στο μοντέλο για τη μέση τραχύτητα R_a , έτσι και εδώ στην περίπτωση της R_t , για την εκτίμηση της διαδραματίζει πολύ μεγαλύτερο ρόλο η ένταση του ρεύματος εφόσον ισχύει για τους συντελεστές ότι $|b''| > 15c''$. Συνεχίζοντας με τη δεύτερη συνάρτηση αξιοποιείται το Curve Fitting App από το οποίο δίνονται τα αρχικά δεδομένα και λαμβάνει κανείς απευθείας τα αποτελέσματα για την 2^η εκθετική συνάρτηση δύο μεταβλητών:

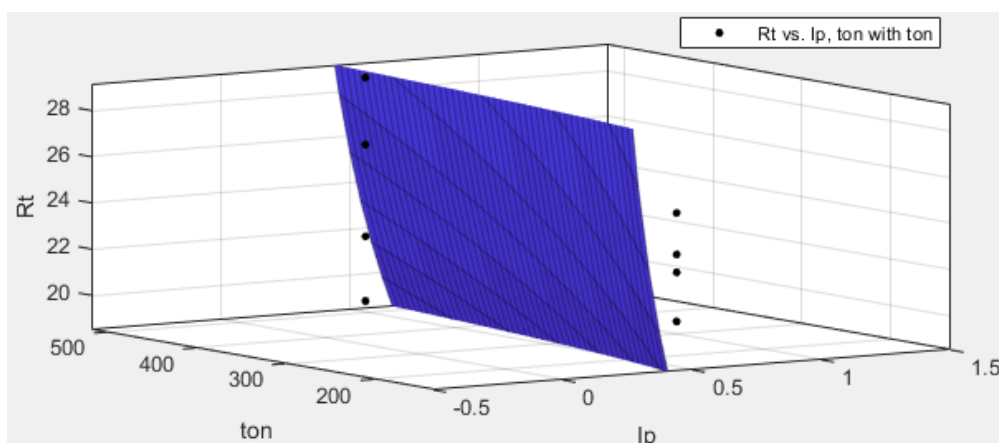


Εικόνα 49: Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα από το Curve Fitting App για τη R_t

Δυστυχώς, σημειώνεται ότι ο υπολογισμός των συντελεστών δεν μπορούσε να συγκλίνει σε κάποιες τιμές και τελικά διατηρούνται οι συντελεστές όταν αποφασίστηκε να τερματιστούν οι επαναλήψεις. Ο συντελεστής της έντασης του ρεύματος είναι λίγο πάνω από 2,5 φορές μεγαλύτερος σε σχέση με εκείνον της διάρκειας του παλμού (σε απόλυτη τιμή), υπονοώντας ξανά ότι το μέγιστο ύψος τραχύτητας R_t εξαρτάται περισσότερο από το I_p . Η 2^η προβλεπτική συνάρτηση δίδεται παρακάτω:

$$R_{t\text{fit}_2} = 0,9672 \cdot I_p^{-1,103} \cdot T_{on}^{0,4001} [\mu m]$$

Εμφανίζεται η 3D επιφάνεια που οπτικοποιεί την παραπάνω διπαραμετρική σχέση με μπλε χρώμα, ενώ με μαύρες κουκίδες απεικονίζονται οι οκτώ τριπλέτες (I_p, T_{on}, R_t) [A, μs, μm].



Διάγραμμα 20: 3D γράφημα της 2ης προβλεπτικής συνάρτησης για τη R_t

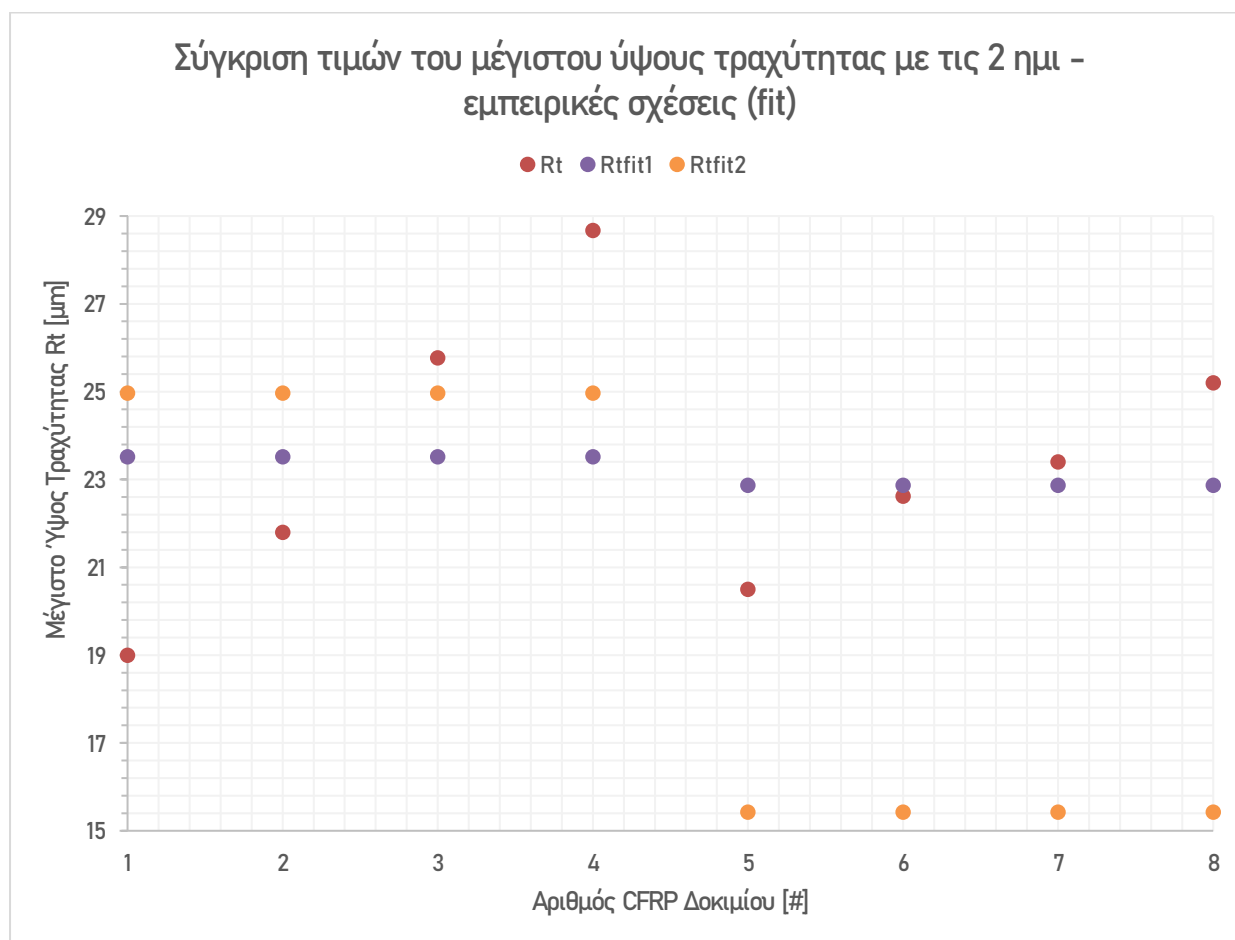
Δημιουργείται πίνακας που εμπεριέχει τις συνθήκες κατεργασίες και για τις δύο ολοκληρωμένες κοπές όπως και την πραγματική τιμή του μέγιστου ύψους της τραχύτητας. Συγχρόνως εισάγονται και οι ποσότητες που εκτιμήθηκαν από τις δύο ημι – εμπειρικές σχέσεις, δηλαδή τα $R_{t\,fit_1}$ και $R_{t\,fit_2}$. Υπολογίζονται τα σφάλματα που προκύπτουν ανάμεσα στην αληθινή τιμή R_t και τις προβλεπόμενες τιμές των συναρτήσεων και ορίζονται ως εξής:

$$Error_i'' = \frac{R_{t\,fit_i} - R_t}{R_t} \cdot 100 [\%] \text{ για } i = 1,2$$

# CFRP Δοκιμίου	I_p	T_{on}	R_t	$R_{t\,fit_1}$	$R_{t\,fit_2}$	$Error_1''$ [%]	$Error_2''$ [%]
1	0,5	500	19	23,5210	24,9695	23,7950	31,4185
2	0,5	500	21,8	23,5210	24,9695	7,8947	14,5391
3	0,5	500	25,775	23,5210	24,9695	-8,7447	-3,1250
4	0,5	500	28,675	23,5210	24,9695	-17,9737	-12,9223
5	0,5	150	20,5	22,8676	15,4243	11,5495	-24,7593
6	0,5	150	22,625	22,8676	15,4243	1,0724	-31,8261
7	0,5	150	23,4	22,8676	15,4243	-2,2750	-34,0840
8	0,5	150	25,2	22,8676	15,4243	-9,2554	-38,7923

Πίνακας 21: Ενιαίος πίνακας δεδομένων εισόδου και εξόδου για το μέγιστο ύψος τραχύτητας

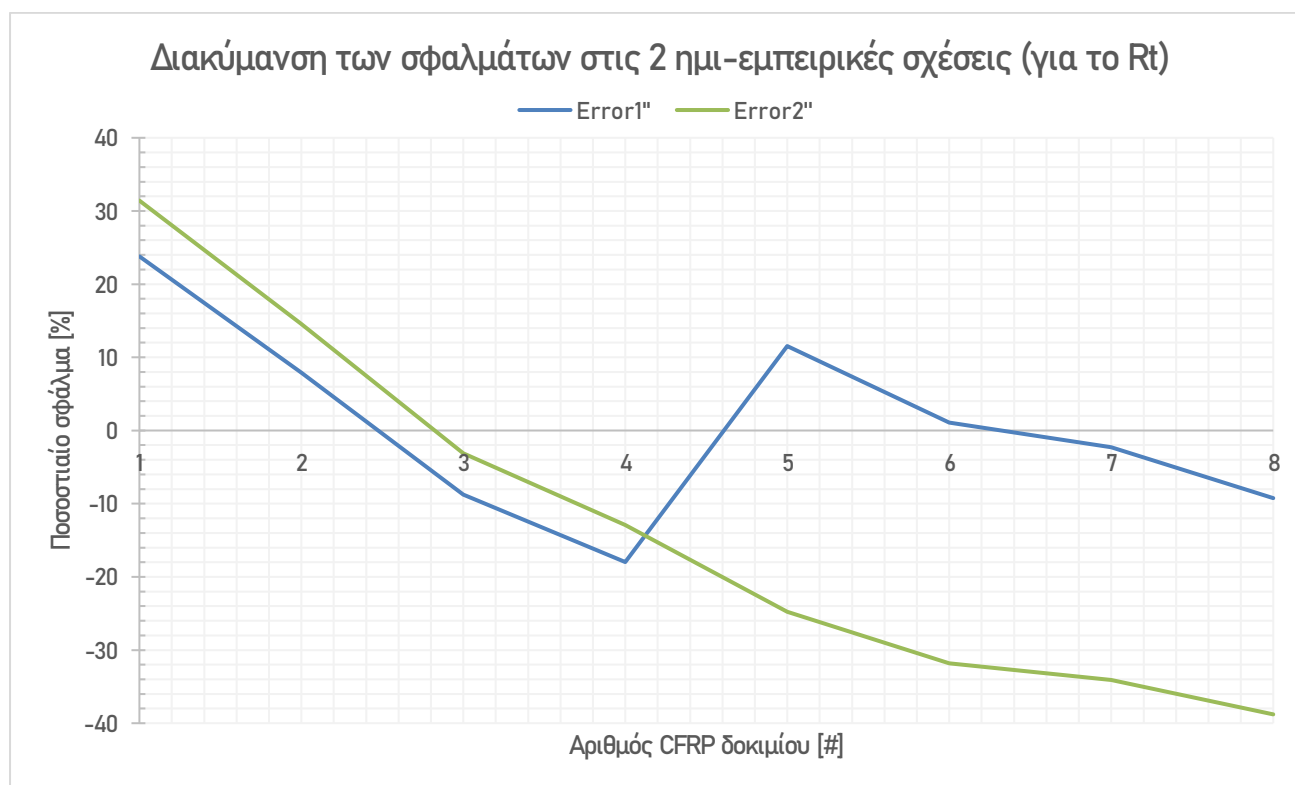
Εμφανίζεται το διάγραμμα αντιπαραβολής των τιμών του μέγιστου ύψους τραχύτητας με τις εκτιμήσεις που πραγματοποιούνται μέσω των δύο σχέσεων $R_{t\,fit_1}$ και $R_{t\,fit_2}$.



Διάγραμμα 21: Γράφημα διασποράς των τιμών του μέγιστου ύψους τραχύτητας και των αντίστοιχων 2 εκτιμήσεων

Εκ πρώτης όψεως, οι τιμές που προβλέπουν τα δύο μοντέλα για το μέγιστο ύψος τραχύτητας απέχουν σε υψηλό βαθμό από τις αληθινές τιμές, ειδικότερα για την περίπτωση της 2^{ης} ημι – εμπειρικής σχέσης. Ακριβώς, επειδή το 2^ο μοντέλο δεν συνέκλινε, δίνει ανεπαρκή αποτελέσματα και πιο συγκεκριμένα υποεκτιμά την τιμή του R_t σε 6 από τα 8 δοκίμια, παρέχοντας μια χαμηλότερη τιμή από την πραγματική. Αντιθέτως, η 1^η προβλεπτική διπαραμετρική συνάρτηση προσφέρει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, εφόσον προσεγγίζει εγγύτερα τις κόκκινες κουκίδες της R_t , με εξαιρέσεις το σημείο έναρξης και το σημείο εναλλαγής των συνθηκών κοπής, δηλαδή τα δοκίμια 4 και 5. Ακόμη, το σύνολο τιμών της $R_{t_{fit_1}}$ βρίσκεται εντός ενός πολύ στενού εύρους περίπου $0,65 \mu m$, δηλαδή είναι σαν το μοντέλο να δίνει σχεδόν την ίδια ποιότητα επιφανείας για όλα τα δοκίμια. Στην περίπτωση της $R_{t_{fit_2}}$ δίνεται σχετικά υψηλή εκτίμηση για την 1^η ολοκληρωμένη κοπή, αλλά σημαντικά μικρότερη τιμή για τα δοκίμια 5 έως και 8, μακριά από τα πειραματικά δεδομένα.

Τα γραφόμενα επαληθεύονται και από το διάγραμμα μεταβολής των σφαλμάτων του μοντέλου δύο μεταβλητών, όπως φαίνεται παρακάτω:



Διάγραμμα 22: Διακύμανση του ποσοστιαίου σφάλματος εκτίμησης του μεγίστου ύψους τραχύτητας

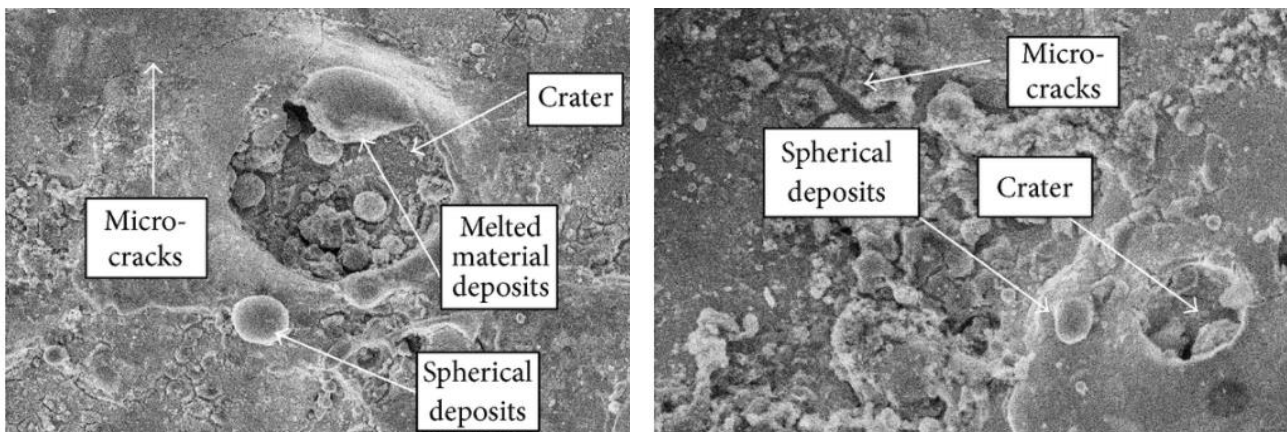
Επισημαίνεται ότι η κατανομή των 2 συναρτήσεων σφαλμάτων είναι ανόμοια, ενώ στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις του MRR και του R_a η μια καμπύλη ακολουθούσε την άλλη. Και αυτό γιατί το 2^ο προβλεπτικό μοντέλο δεν συγκλίνει σε συντελεστές. Η 1^η κατανομή παρουσιάζει την χαρακτηριστική μύτη στο δοκίμιο 5, όπου αλλάζουν οι συνθήκες κατεργασίας. Μόνο για τα δοκίμια 3 και 4, η 2^η ημι – εμπειρική σχέση εμφανίζει μικρότερα σφάλματα από την 1^η, ενώ στα υπόλοιπα τεμάχια απέχει παρασάγγας από την πραγματικότητα. Γι' αυτόν το λόγο, υιοθετείται το $R_{t_{fit_1}}$ ως συνάρτηση πρόβλεψης για το μέγιστο ύψος τραχύτητας, καθώς προκύπτουν σχετικά αποδεκτά σφάλματα και δεν υποεκτιμάται ή υπερεκτιμάται υπερβολικά ο βαθμός ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφανείας.

Κεφάλαιο 5 – Μικρογραφική μελέτη κατεργασμένων δοκιμών

5.1 Μορφολογία επεξεργασμένης επιφάνειας

Όσον αφορά τον χαρακτηρισμό της τοπογραφίας της κατεργασμένης επιφάνειας, μέσω ηλεκτροδιάβρωσης, θα αναφερθούν αρχικά κάποια βιβλιογραφικά στοιχεία, που κρίνονται πολύτιμα για τη συνέχεια της ανάλυσης. Μια τυπική επιφάνεια, που μπορεί να παρατηρήσει κανείς, μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, χαρακτηρίζεται από θαμπή εμφάνιση. Τούτο οφείλεται στην τυχαία και διασκορπισμένη κατανομή των συνεχών και επικαλυπτόμενων κρατήρων (craters). Οι κρατήρες προκαλούνται ως απόρροια των πολύ βραχέων ηλεκτρικών εκκενώσεων, όπως εξηγήθηκε στον μηχανισμό της ηλεκτροδιάβρωσης, οι οποίοι συμβαίνουν διαρκώς κατά την εξέλιξη της κοπής. Το μέγεθος των κρατήρων επηρεάζονται άμεσα από τις συνθήκες κατεργασίας, τις φυσικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού και του ηλεκτροδίου όπως και το είδος του διηλεκτρικού ρευστού. Πιο συγκεκριμένα, το βάθος και η διάμετρος ενός κρατήρα συναρτώνται αναλογικά με την ένταση του ρεύματος I_p και την χρονική διάρκεια του παλμού T_{on} . Αυξανόμενη της έντασης του ρεύματος το βάθος του κρατήρα μεγαλώνει αντίστοιχα και όταν ο χρόνος παλμού περιορίζεται τότε η στήλη πλάσματος διαδίδεται και επεκτείνεται όλο και λιγότερο με αποτέλεσμα τη δημιουργία κρατήρων μικρότερης διαμέτρου. Όταν αναφέρεται κανείς σε διάμετρο, κάνει λόγο για ισοδύναμη διάμετρο καθώς το σχήμα αυτών των κρατήρων σπανίως είναι κυκλικό [26].

Στις δύο φωτογραφίες, που ακολουθούν παρακάτω, δίνονται διάφορες ενδιαφέρουσες εικόνες που δεικνύουν τους κρατήρες, και όχι μόνο, μιας κατεργασμένης επιφάνειας με CNC ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης – βύθισης.

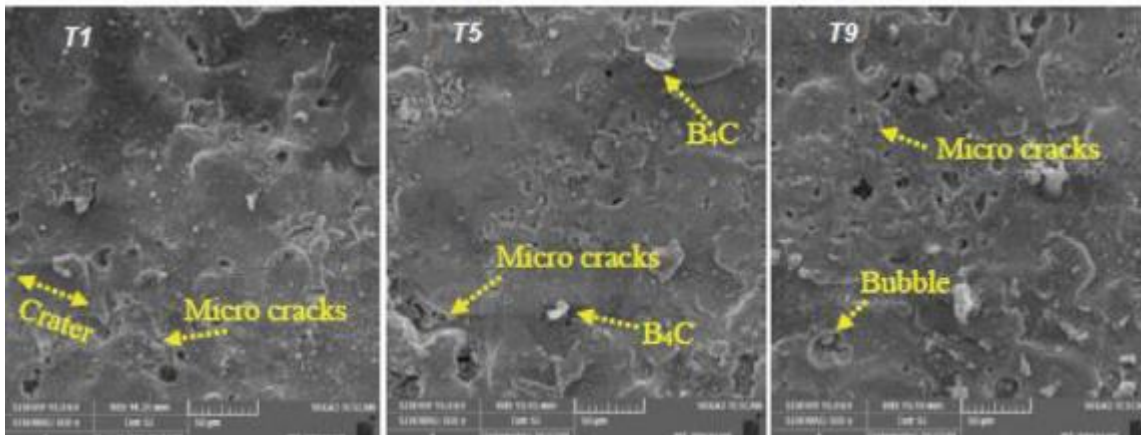


Εικόνα 50: Ανάδειξη κρατήρων και μικρορωγμών κατά την EDM αποτύπωσης - βύθισης σε υλικό χάλυβα EN 353 με ηλεκτρόδιο χαλκού [27]

Σαφώς και η μοναδική μεταλλογραφική ατέλεια κατά την ηλεκτροδιάβρωση δεν είναι μόνο οι κρατήρες. Παράλληλα υφίστανται κορυφογραμμές (ridges) εξαιτίας της ροής τηγμένου υλικού αλλά και σφαιρίδια – θύλακες (globules and rockmarks). Αυτά δημιουργούνται από υπολείμματα ή εγκλωβισμένα αέρια που προέρχονται από το τηγμένο υλικό πριν την στερεοποίησή του.

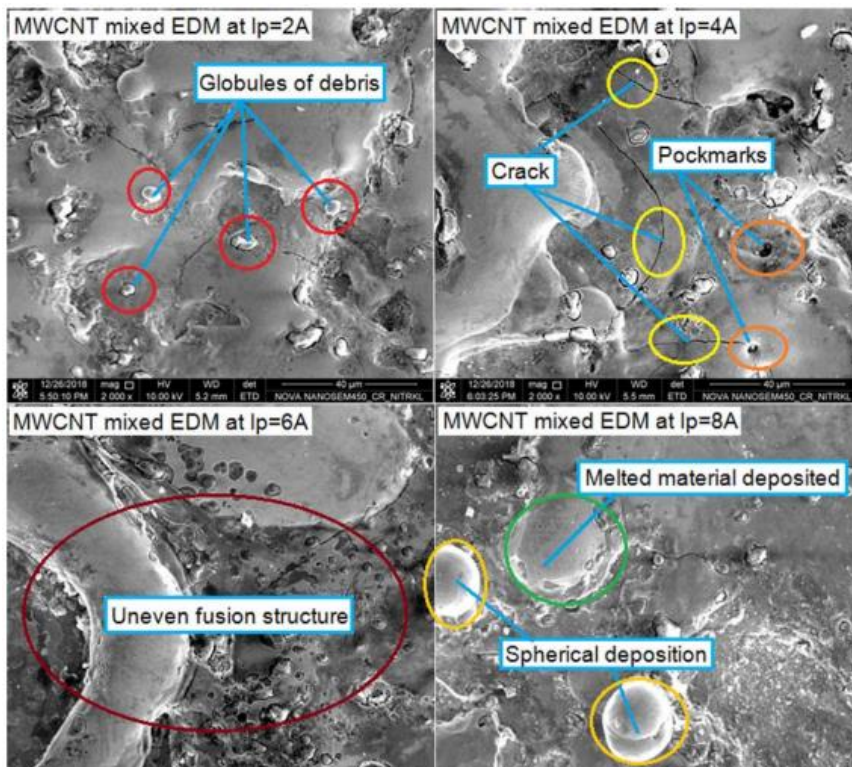
Τέλος, συνήθης είναι και η ανάπτυξη επιφανειακών ρωγμών (cracks), που συνιστούν σημαντικές ατέλειες εξαιτίας της τοπικής αύξησης της θερμοκρασίας ή και των εξαιρετικά υψηλών διαφορών πιέσεων σε τυχαία σημεία της κατεργασμένης επιφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίζεται η αντοχή του υλικού και υποβαθμίζονται οι μηχανικές του ιδιότητες. Η εμφάνιση και η διάδοση των αναφερόμενων ρωγμών ενισχύεται με την ταυτόχρονη παρουσία περιορισμένου ρεύματος κατεργασίας και υψηλού χρόνου παλμού [28].

Στις παρακάτω φωτογραφίες από μικροσκόπιο, παρουσιάζεται πληθώρα ατελειών όπως μικρορωγμών, κρατήρων και σφαιριδίων σε σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας με 4 % w/w B_4C ως κραματικό στοιχείο:



Εικόνα 51: Τοπογραφία επιφάνειας υλικού MMC κατεργασμένο με ηλεκτροδιάβρωση [29]

Στην επόμενη εικόνα παρατηρούνται κάποια δίκτυα ρωγμών, σφαιρικές επικαθίσεις, σφαιρίδια υπολειμμάτων και θύλακες στην επιφάνεια του υλικού Inconel 718.



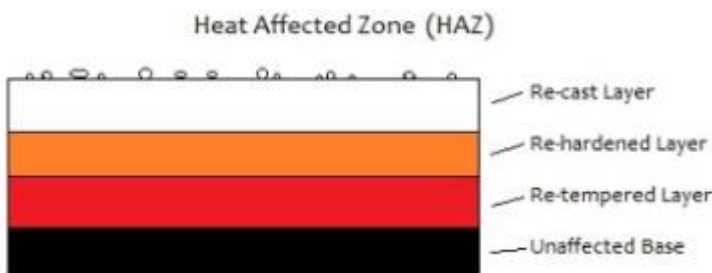
Εικόνα 52: Ατέλειες κατεργασμένης επιφάνειας Inconel 718 [30]

5.2 Μικροδομή Υποστρώματος

Εξαιτίας της θερμοηλεκτρικής φύσης της ηλεκτροδιάβρωσης, απελευθερώνεται θερμική ενέργεια που διαχέεται στο περιβάλλον αλλά και στο σύστημα τεμάχιο – ηλεκτρόδιο – διηλεκτρικό ρευστό. Στις επιφανειακές στρώσεις του δοκιμίου, παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές σχετικά με την κρυσταλλική δομή. Επομένως, ως θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) ορίζουμε το στρώμα του υλικού στο οποίο μεταβάλλονται οι ιδιότητές του εξαιτίας των πολύ υψηλών τιμών θερμοκρασίας. Η ΘΕΖ διακρίνεται σε πέντε ξεχωριστές υποπεριοχές, οι οποίες θα αναλυθούν στην παρούσα σελίδα.

Η πρώτη ζώνη αφορά στην περιοχή του τεμαχίου, η οποία αλληλεπιδρά με τους σπινθηρισμούς. Ακριβώς επειδή αναπτύσσονται υπέρμετρα υψηλές θερμοκρασίες πραγματοποιείται εξαχνωση ενός μέρους του κατεργαζόμενου υλικού. Πάνω από αυτήν τη βομβαρδισμένη ζώνη, υφίσταται μέρος των ατμών που συγκροτούνται από το τεμάχιο, το ηλεκτρόδιο και το διηλεκτρικό ρευστό. Μόλις ολοκληρωθεί ο σπινθηρισμός, το μέρος αυτό ψύχεται και στερεοποιείται πάνω στο τεμάχιο. Έτσι σχηματίζεται ένα σκληρό και ψαθυρό στρώμα που κατατίθεται εκ νέου στο τεμάχιο. Η δεύτερη υποπεριοχή της ΘΕΖ, ουσιαστικά, συνιστά προέκταση της 1^{ης} και συνίσταται από κυκλικές προεξοχές. Πρόκειται για μικρά μέρη ατμού που προσκολλώνται στην πρώτη ζώνη κατά τη διάρκεια της παύσης του σπινθήρα.

Στη συνέχεια, δίδεται ένα απλό εποπτικό σχήμα των 5 ζωνών της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ) στην ηλεκτροδιάβρωση:



Εικόνα 53: Σχηματική αναπαράσταση των layers της ΘΕΖ στην EDM

Στη συνέχεια, η 3^η ζώνη υφίσταται το αναδιατυπωμένο στρώμα υλικού, το οποίο είχε λιώσει αλλά δεν είχε εξαχνωθεί. Η περιοχή αυτή βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πρώτη ζώνη και πολλές φορές αποκαλείται και *white layer*. Η τέταρτη περιοχή μετασχηματίζεται κρυσταλλικά και μεταβάλλονται οι ιδιότητες του υλικού, αλλά δεν σημειώνεται θερμοκρασία που υπερβαίνει εκείνη στην οποία το υλικό τήκεται. Η τελευταία ζώνη αποτελεί τη βάση κάτω της οποίας δεν επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά του υλικού από τη θερμοκρασία και διαθέτει τις ίδιες ιδιότητες, όπως σημειώνονται και πριν την κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης [31].

5.3 Παρατήρηση CFRP δοκιμών κάτω από το μικροσκόπιο

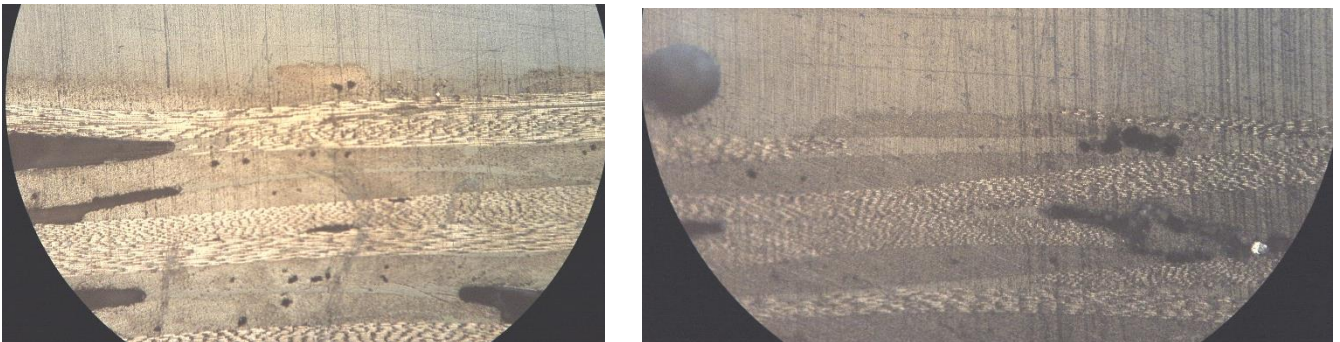
Σε αυτό το σημείο θα παρατεθούν διάφορες εικόνες των εγκιβωτισμένων δοκιμών CFRP που έχουν λειανθεί και επιπεδοποιηθεί κατάλληλα. Στόχος της ενότητας αυτής είναι να σχετιστούν οι ατέλειες, η ποιότητα επιφανείας και οι διαφοροποιήσεις στην αποβολή του υλικού συναρτήσει των συνθηκών κατεργασίας (I_p, T_{on}, U) αλλά και της γωνίας κοπής α . Αρχικά, θα παρουσιαστούν οι δύο σειρές δοκιμών ώστε να εξεταστεί η επίδραση της γωνίας α και μετέπειτα με σταθερή τη γωνία α θα παρατηρηθούν διαφορές μόνο ως προς τη χρονική διάρκεια παλμού και την τάση κατεργασίας, εφόσον η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή.

5.3.1 Εικόνες μικροσκοπίου από την 1^η σειρά δοκιμών

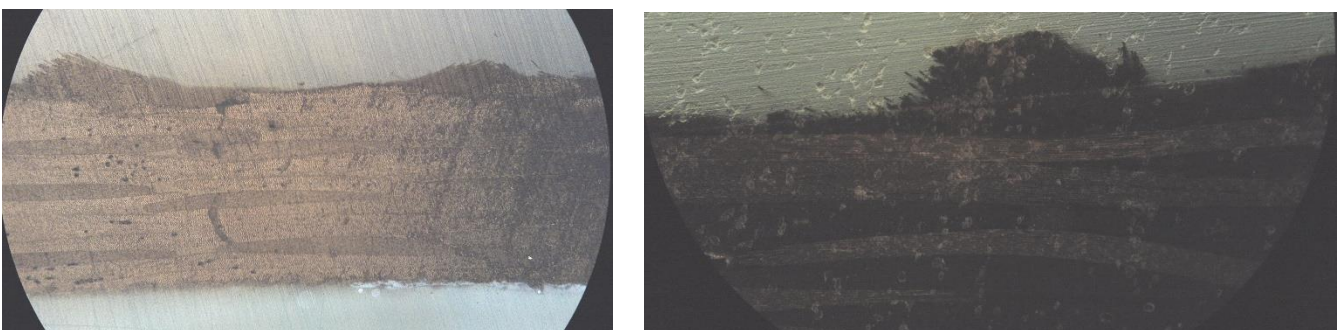
Συμβολίζουμε την 1^η σειρά δοκιμών, όπου $(I_p, T_{on}, U) = (0,5 A, 500 \mu s, 100 V)$, με το γράμμα A , η οποία εμπεριέχει τέσσερα ξεχωριστά δοκίμια: τα A_1, A_2, A_3 και A_4 με αντίστοιχες γωνίες κοπής $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 30^\circ, \alpha_3 = 60^\circ$ και $\alpha_4 = 90^\circ$. Λαμβάνονται εικόνες από το μικροσκόπιο ως εξής με την κατάλληλη μεγέθυνση:

- ο Γενική όψη 100 x
- ο Πλευρικό Τοίχωμα 100 x

Αρχικά, δίδεται η γενική όψη των δοκιμών για μεγέθυνση φακού ίση με 100 x.



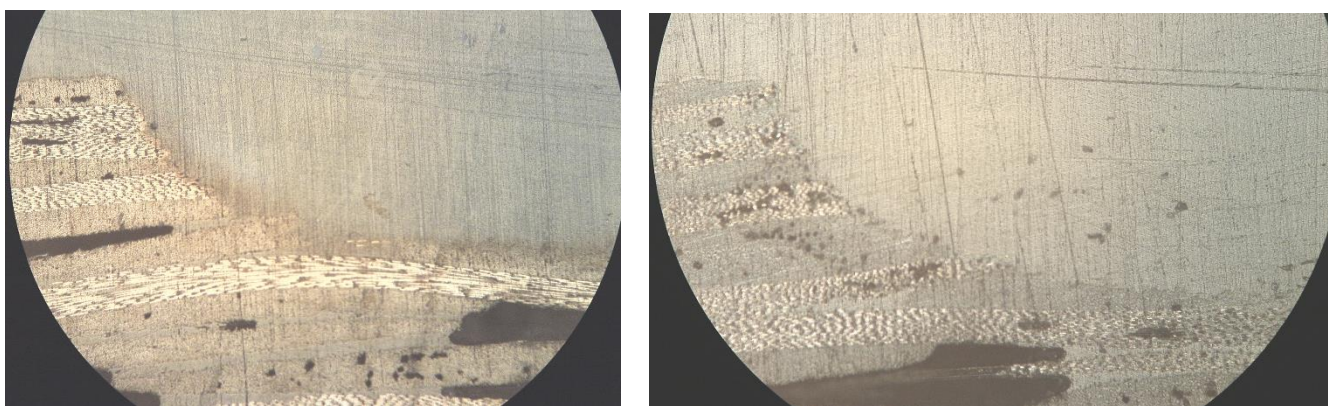
Εικόνα 54: Γενικές όψεις των δοκιμών A_1 και A_2 κάτω από το μικροσκόπιο με μεγέθυνση 100x



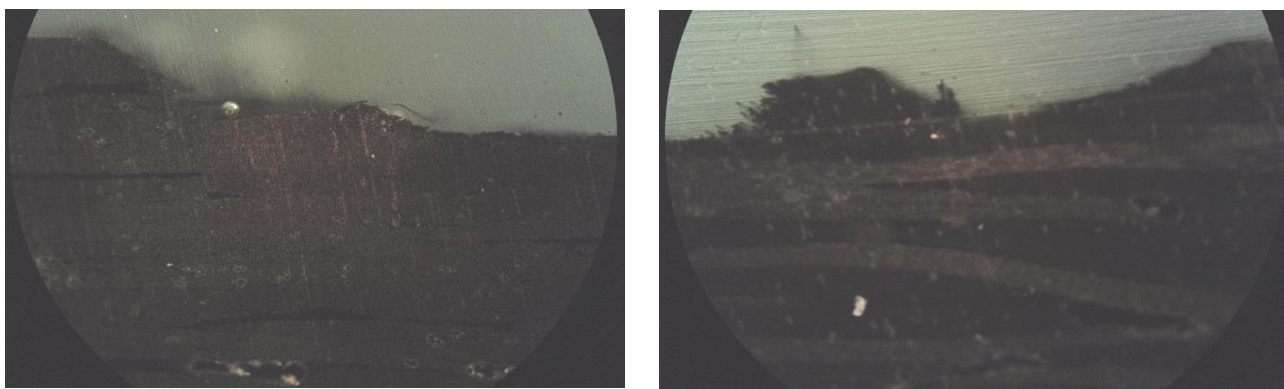
Εικόνα 55: Γενικές όψεις των δοκιμών A_3 και A_4 κάτω από το μικροσκόπιο για μεγέθυνση 100x

Στις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρούνται οι παράλληλες ίνες των ανθρακονημάτων εντός του μητρικού υλικού, δηλαδή της ρητίνης. Επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι οι εικόνες εμφανίζονται αρκετά θολές εξαιτίας της κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης. Διακρίνονται επίσης και κάποια μαύρα στίγματα – θύλακες. Παρατηρεί κανείς τον τρόπο με τον οποίο έχει αφαιρεθεί υλικό, αν κοιτάξει τον βαθμό προβολής της πάνω επιφάνειας των δοκιμίων. Βλέπει κανείς πως αυξανόμενη της γωνίας κοπής α ότι η συγκεκριμένη επιφάνεια είναι ολοένα και λιγότερο επίπεδη και επηρεάζεται περισσότερο θερμικά. Ενδεχομένως, αυτό να συνδέεται άμεσα και με το πόρισμα που εξήχθη στην ενότητα ανάλυση της τραχύτητας, στην οποία συνάγεται ότι η γωνία κοπής και η τραχύτητα αποτελούν ανάλογα ποσά. Όσο πιο μεγάλη τιμή λαμβάνει η γωνία κοπής α , τόσο πιο δυσμενή κατεργασμένη επιφάνεια λαμβάνει κανείς. Σαφώς και δεν έχει φυσική σημασία η έννοια του επαναστεροποιημένου υλικού, εφόσον η επιφάνεια που δέχεται τους σπινθηρισμούς καταστρέφεται ολοσχερώς.

Συνεχίζουμε με την παρουσίαση του πλευρικού τοιχώματος σε μεγέθυνση 100 x.



Εικόνα 56: Πλευρικά τοιχώματα των δοκιμίων A1 και A2 κάτω από το μικροσκόπιο με μεγέθυνση 100x



Εικόνα 57: Πλευρικά τοιχώματα των δοκιμίων A3 και A4 κάτω από το μικροσκόπιο με μεγέθυνση 100x

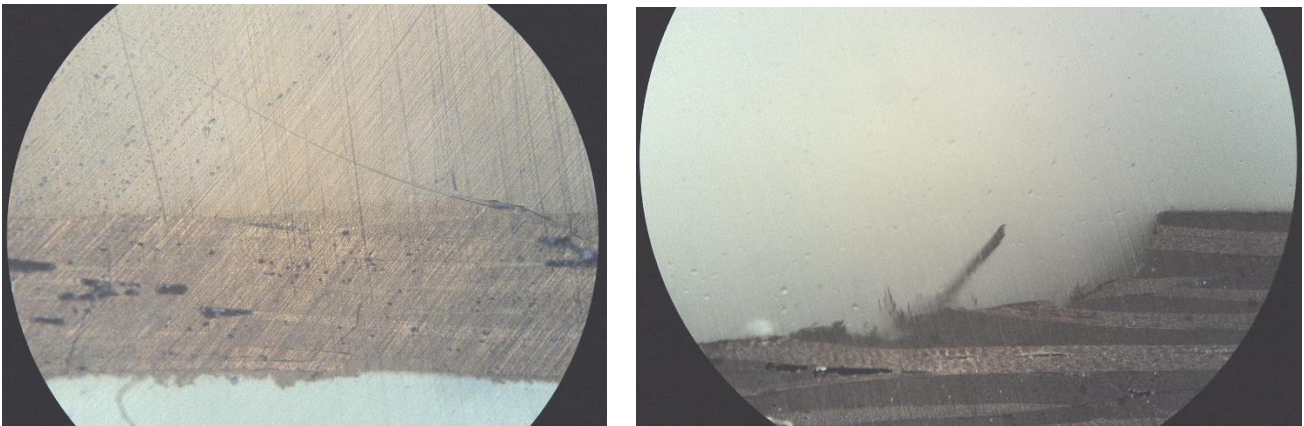
Όσον αφορά τις πλευρικές επιφάνειες, φαίνεται πως όσο μεγαλώνει η γωνία κοπής, περιορίζεται η καμπυλότητα και η αποβολή του υλικού πραγματοποιείται αρκετά πιο ανομοιόμορφα, ειδικά στις περιπτώσεις των 60° και των 90° . Επιπροσθέτως, από τις συγκεκριμένες λήψεις, σημειώνεται φθορά και στις εσωτερικές στρώσεις των ινών άνθρακα, η οποία είναι πιο έκδηλη αυξανόμενη της γωνίας α .

5.3.2 Εικόνες μικροσκοπίου από την 2^η σειρά δοκιμών

Συμβολίζουμε την 2^η σειρά δοκιμών, όπου $(I_p', T_{on}', U') = (0,5 A, 150 \mu s, 200 V)$, με το γράμμα B , που συνίσταται από τέσσερα τεμάχια: τα B_1, B_2, B_3 και B_4 με αντίστοιχες γωνίες κοπής $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 30^\circ, \alpha_3 = 60^\circ$ και $\alpha_4 = 90^\circ$. Δίνονται οι παρακάτω φωτογραφίες από το μικροσκόπιο με κατάλληλη μεγέθυνση:



Εικόνα 58: Εικόνες των δοκιμών B_1 και B_2 κάτω από το μικροσκόπιο σε μεγέθυνση 100x



Εικόνα 59: Εικόνες των δοκιμών B_3 και B_4 κάτω από το μικροσκόπιο σε μεγέθυνση 50x

Στη δεύτερη σειρά των δοκιμών, αυτό που πραγματικά αλλάζει είναι ο διπλασιασμός της τάσης κατεργασίας και η σημαντική πτώση της χρονικής διάρκειας παλμού. Επαληθεύεται εκ νέου το πόρισμα ότι όσο αυξάνεται η γωνία κοπής, η ποιότητα της τοπογραφίας της επιφάνειας υποβαθμίζεται όλο και περισσότερο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συνιστά το δοκίμιο B_3 , με γωνία κοπής 60° , στο οποίο εμφανίζονται διάσπαρτα μαύρα στίγματα, που μοιάζουν με θύλακες. Ακόμη, παρατηρούνται δύο σημαντικές επιφανειακές ρωγμές, που συνδέονται στο πάνω αριστερά τμήμα της εικόνας, αλλά και μια ίνα που έχει αποκολληθεί από την κάτω επιφάνεια. Και στο δοκίμιο B_4 είναι χαρακτηριστική η καμπυλότητα, η αδρότητα της επιφάνειας και η απελευθέρωση ενός τμήματος από τα στρώματα του υλικού εξαιτίας των πολύ υψηλών ποσών θερμότητας που διακινούνται κατά την κατεργασία. Ενδεχομένως, λόγω του διπλασιασμού της ισχύος κατεργασίας, σημειώνονται περισσότερες και πιο σημαντικές ατέλειες, ειδικότερα όταν η κοπή είναι λοξή ή κατακόρυφη.

5.3.3 Φωτογραφίες από την εστίαση του φακού στις ίνες

Για χάρη πληρότητας και για μια πιο συνολική παρουσίαση των φωτογραφιών που ελήφθησαν από το μικροσκόπιο, δίδονται εικόνες που εστιάζουν με μεγέθυνση 200 x στο τμήμα του υλικού, στο οποίο φαίνεται να έχουν αποκολληθεί ίνες ή και στρώματα ινών από τη μήτρα ρητίνης.

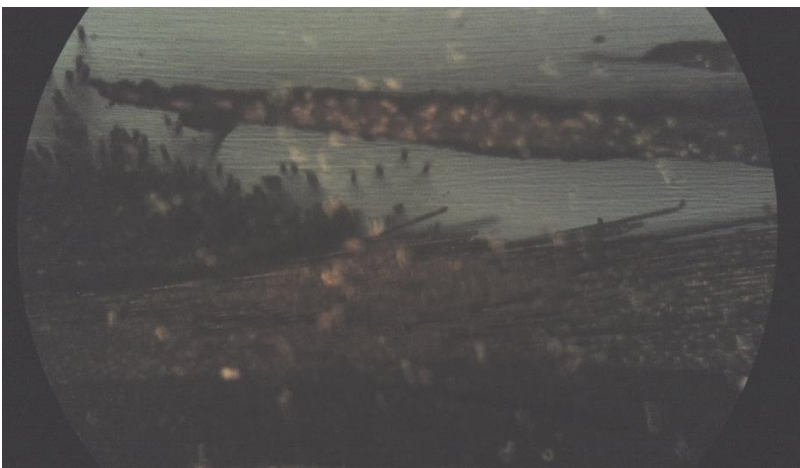
Δίδονται 3 χαρακτηριστικές φωτογραφίες από τα 4 πρώτα δοκίμια, που αποτυπώνουν το παραπάνω φαινόμενο σχετικά με την απομάκρυνση των ινών, αλλά και την καταστροφή εσωτερικών στρωμάτων των ινών, όπως φαίνεται στο δοκίμιο A₄.



Εικόνα 60: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο A₁ (Μεγέθυνση 200x)



Εικόνα 61: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο A₃ (Μεγέθυνση 200x)



Εικόνα 62: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο A₄ (Μεγέθυνση 200x)

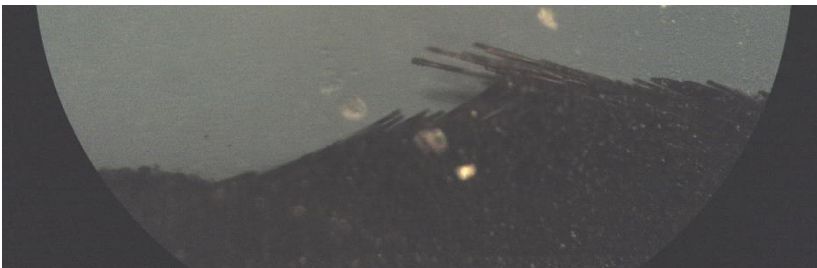
Συνεχίζουμε με την παρουσίαση αντίστοιχων περιπτώσεων, με ακόμα πιο δυσμενή συμπεριφορά και πιο θολή εμφάνιση, για τα δοκίμια 5 έως και 8, δηλαδή τα B_1, B_2, B_3 και B_4 .



Εικόνα 63: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο B_1 (Μεγέθυνση 200x)



Εικόνα 64: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο B_2 (Μεγέθυνση 200x)



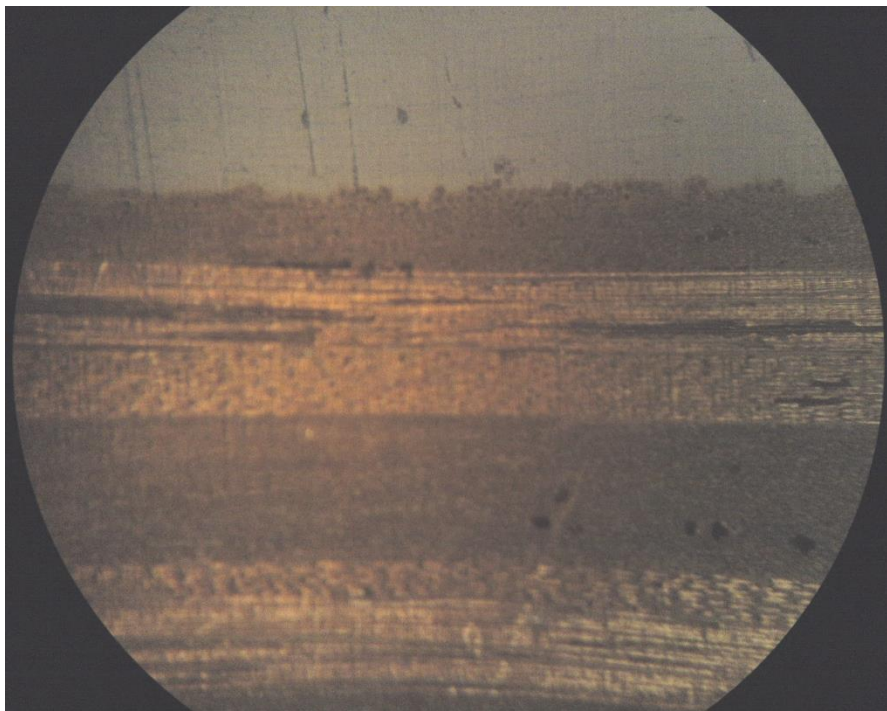
Εικόνα 65: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο B_3 (Μεγέθυνση 200x)



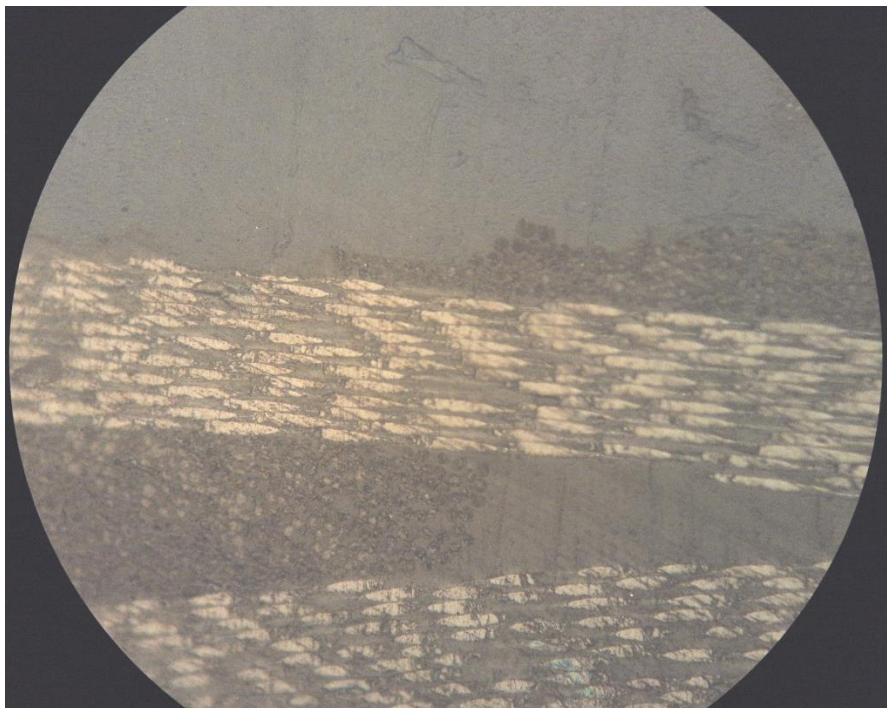
Εικόνα 66: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο B_4 (Μεγέθυνση 200x)

5.3.4 Εικόνες σχετικά με την τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας

Τέλος, παρατίθενται δύο φωτογραφίες που αφορούν στην διαστρωμάτωση των ινών και των στρώσεων του σύνθετου υλικού αλλά και στον βαθμό τραχύτητας και φθοράς της μορφοποιημένης επιφάνειας σε μεγέθυνση 200 x για το δοκίμιο A_1 και μεγέθυνση 500 x για το δοκίμιο A_2 .



Εικόνα 67: Εικόνα μικροσκοπίου για το δοκίμιο A_1 (200x)



Εικόνα 68: Εικόνα μικροσκοπίου για το δοκίμιο A_2 (500x)

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα & Περαιτέρω Βήματα

6.1 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την ενότητα, επιχειρούμε να συνοψίσουμε τα όλα τα χρήσιμα ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα που εξαγάγαμε από την πειραματική διερεύνηση των CFRP δοκιμών κατά την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης – βύθισης. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν στον χαρακτηρισμό του υλικού ως προς την κατεργασιμότητα του, τον τρόπο και τον βαθμό με τον οποίο οι συνθήκες κοπής επηρεάζουν τις πιο σημαντικές παραμέτρους κατεργασίας.

Αρχικά προσδιορίζεται ότι δεν μπορεί να δοθεί ασφαλές πόρισμα για τη συσχέτιση του ρυθμού αποβολής υλικού MRR με τη γωνία κοπής α . Το μόνον που παρατηρήθηκε, είναι πως ο ρυθμός αποβολής υλικού είναι υψηλότερος για τη γωνία $\alpha = 60^\circ$ σε σχέση με τον αντίστοιχο για τη γωνία $\alpha = 30^\circ$, ανεξάρτητα από τις συνθήκες κοπής. Ακόμη, η κατεργασία είναι πιο αποδοτική, εφόσον αφαιρείται περισσότερος όγκος υλικού στην μονάδα του χρόνου, όταν αυξάνεται η τάση της κατεργασίας U . Ωστόσο, οι τιμές του MRR διασπείρονται σε μεγάλο εύρος για $U = 200V$ σε σχέση με το αντίστοιχο αμελητέο των $100V$. Επομένως, μια ενδιάμεση τιμή, περίπου στα $150V$ να ήταν πιο κατάλληλη τεχνικά. Παράλληλα, φαίνεται πως το MRR είναι αντιστρόφως ανάλογο της χρονικής διάρκειας του παλμού T_{on} για τα επιλεγμένα μεγέθη. Επιπροσθέτως, για τις τιμές της ενέργειας παλμού, που προκύπτουν, φαίνεται πως βρισκόμαστε στην περιοχή κατά την οποία με αύξηση της E_p υποβαθμίζεται το MRR . Αντίστοιχα, με πρόσδοση περισσότερης ονομαστικής ισχύος, η κατεργασία καθίσταται όλο και πιο αποδοτική με εξαίρεση ένα και μόνο δοκίμιο.

Όσον αφορά την ποιότητα και την πιστότητα της επιφάνειας, αποφαινόμεστε ότι όσο πιο πολύ αυξάνεται η γωνία κοπής α (δηλαδή όσο πιο λοξή είναι η κοπή), τότε όλο και περισσότερο αναβαθμίζονται οι τιμές των 4 τραχυτήτων, οδηγώντας σε δυσμενέστερη ποιότητα επιφάνειας. Το τρίπτυχο των συνθηκών κατεργασίας, που έχουν αξιοποιηθεί στην δεύτερη περίπτωση $(I_p', T_{on}', U') = (0,5 A, 150 \mu s, 200 V)$ κρίνονται πιο κατάλληλες καθώς δίνουν πιο ομαλό προφίλ της τραχύτητας R_a σε σχέση με τις έντονες διαφοροποιήσεις του πρώτου σετ συνθηκών κοπής $(I_p, T_{on}, U) = (0,5 A, 500 \mu s, 100 V)$. Γενικά, χρειάζεται κανείς να έλθει σε ένα συμβιβασμό και να βρεθεί μια χρυσή τομή μεταξύ της τραχύτητας $R_a [\mu m]$, που είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση της, και του ρυθμού αποβολής υλικού $MRR [mm^3/min]$, που επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του. Εισάγοντας το δείκτη R_a/MRR , συνάγεται ότι η δεύτερη περίπτωση των συνθηκών κοπής είναι πιο κατάλληλη για να πετύχει την ελαχιστοποίηση του δείκτη, ανεξαρτήτως της γωνίας κοπής α .

Προχωρώντας στο υπολογιστικό μέρος, σημειώνεται ότι βρέθηκαν επιτυχώς συνολικά 6 εκθετικές συναρτήσεις συσχέτισης των 3 παραμέτρων επίδοσης της κοπής MRR, R_a, R_t με το τρίπτυχο των συνθηκών κατεργασίας (I_p, T_{on}, U) . Αξιοποιήθηκαν πλήρως και τα 8 δοκίμια, που βρίσκονταν στη διάθεσή μας, και παρέχονται στις περισσότερες περιπτώσεις ασφαλή μοντέλα, με αποδεκτά σφάλματα, για την πρόβλεψη της αποδοτικότητας της κατεργασίας. Για τις διπαραμετρικές σχέσεις του ρυθμού αποβολής υλικού παρατηρείται μέσο σφάλμα, σε απόλυτη τιμή, ίσο με 16,43% και 17,14% αντίστοιχα. Για τις συναρτήσεις της μέσης τραχύτητας προκύπτει ότι $|\overline{Error}'_1| = 14,32\%$ και $|\overline{Error}'_2| = 14,37\%$. Τέλος, για τα δύο μοντέλα του μέγιστου ύψους τραχύτητας παρατηρούνται το μικρότερο και το μέγιστο μέσο απόλυτο σφάλμα, δηλαδή ισχύει ότι $|\overline{Error}''_1| = 10,32\%$ και $|\overline{Error}''_2| = 23,93\%$.

Στην παρούσα σελίδα, αποτυπώνονται σχηματοποιημένα σε έναν ενιαίο και λεπτομερή πίνακα όλα τα χρηστικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας:

Συμπεριληπτικός ποιοτικός & ποσοτικός πίνακας της διπλωματικής εργασίας

A. Συμπεράσματα πειραματικής διερεύνησης

1. $MRR_{60^\circ} > MRR_{30^\circ}$ ανεξάρτητα από τη γωνία κοπής α
2. Αναλογική σχέση τάσης κατεργασίας – ρυθμού αποβολής υλικού
 $U \uparrow \Rightarrow MRR \uparrow$
3. Αντιστρόφως ανάλογη σχέση χρονικής διάρκειας παλμού – ρυθμού αποβολής υλικού
 $T_{on} \uparrow \Rightarrow MRR \downarrow$
4. Βρισκόμαστε στην περιοχή για την οποία ισχύει ότι: $E_p \uparrow \Rightarrow MRR \downarrow$
5. Αναλογική σχέση ισχύος κατεργασίας – ρυθμού αποβολής υλικού
 $P \uparrow \Rightarrow MRR \uparrow$
6. Όσο πιο λοξή η κοπή, τόσο περισσότερο δυσχεραίνεται η ποιότητα επιφανείας
 $\alpha \uparrow \Rightarrow R_\alpha \uparrow \Rightarrow \downarrow$ Ποιότητα Επιφανείας
7. Προφίλ τραχύτητας R_a
- Πρώτη περίπτωση $(I_p, T_{on}, U) = (0,5 A, 500 \mu s, 100 V) \Rightarrow$ Έντονη διασπορά τιμών
- Δεύτερη περίπτωση $(I_p', T_{on}', U') = (0,5 A, 150 \mu s, 200 V) \Rightarrow$ Πιο ομαλό προφίλ
8. Δεύτερη περίπτωση $(I_p', T_{on}', U') = (0,5 A, 150 \mu s, 200 V) \Rightarrow \downarrow \downarrow R_a/MRR \Rightarrow$ Πιο κατάλληλη επιλογή συνθηκών κοπής σε σχέση με την πρώτη περίπτωση

B. Συμπεράσματα υπολογιστικού μέρους

9. Ημι – εμπειρικές σχέσεις για το ρυθμό αποβολής υλικού MRR

$$MRR_{fit_1} = 4,5983 \cdot I_p^{-0,1995} \cdot T_{on}^{-0,2262} \left[\frac{mm^3}{min} \right] \mu\epsilon |\overline{Error}_1| = 16,43\%$$

$$MRR_{fit_2} = 1,955 \cdot I_p^{-1,834} \cdot T_{on}^{-0,2706} \left[\frac{mm^3}{min} \right] \mu\epsilon |\overline{Error}_2| = 17,14\%$$

10. Ημι – εμπειρικές σχέσεις για τη μέση τραχύτητα R_a

$$R_{a_{fit_1}} = 2,5439 \cdot I_p^{-0,1221} \cdot T_{on}^{0,0153} [\mu m] \mu\epsilon |\overline{Error}'_1| = 14,32\%$$

$$R_{a_{fit_2}} = 12,89 \cdot I_p^{2,292} \cdot T_{on}^{0,02681} [\mu m] \mu\epsilon |\overline{Error}'_2| = 14,37\%$$

11. Ημι – εμπειρικές σχέσεις για το μέγιστο ύψος τραχύτητας R_t

$$R_{t_{fit_1}} = 15,8343 \cdot I_p^{-0,3611} \cdot T_{on}^{0,0234} [\mu m] \mu\epsilon |\overline{Error}''_1| = 10,32\%$$

$$R_{t_{fit_2}} = 0,9672 \cdot I_p^{-1,103} \cdot T_{on}^{0,4001} [\mu m] \mu\epsilon |\overline{Error}''_2| = 23,93\%$$

Πίνακας 22: Συνολικός Πίνακας αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων της εργασίας

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για την ασφαλέστερη εξαγωγή πιο χρηστικών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων στην ηλεκτροδιάβρωση σύνθετων υλικών ενισχυμένα με ανθρακονήματα, προτείνονται τα παρακάτω σημεία προς διερεύνηση:

- Χρήση περισσότερων τριάδων, π.χ. πέντε (και όχι μόνο δύο) ως προς τις συνθήκες κατεργασίας (I_p, T_{on}, U) ώστε να προκύπτουν πιο αληθή αποτελέσματα στο υπολογιστικό μέρος με μικρότερα ή και αμελητέα σφάλματα. Παράλληλα, θα πρέπει να μεταβάλλεται μόνο μία εκ των τριών ποσοτήτων των συνθηκών κοπής και όχι δύο μεγέθη ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να πραγματοποιηθεί πιο εύκολα παραμετρική ανάλυση ως προς την επίδραση τους στις παραμέτρους επίδοσης της ηλεκτροδιάβρωσης MRR και R_a .
- Συλλογή κατάλληλων μετρήσεων για τον υπολογισμό του λόγου φθοράς εργαλείου TWR με σκοπό την ελαχιστοποίηση αυτού του μεγέθους ώστε να περιοριστεί το κόστος της κατεργασίας. Επιθυμητή είναι και οι σύνδεση με τις συνθήκες κοπής.
- Διερεύνηση του είδους της πολικότητας (θετική ή αρνητική) με το ίδιο ακριβώς τρίπτυχο της κοπής με στόχο την μεγιστοποίηση του ρυθμού αποβολής υλικού, την ελαχιστοποίηση της τραχύτητας και την ελαχιστοποίηση του λόγου φθοράς εργαλείου.
- Δυνατότητα μελέτης και επιμέρους παραμέτρων εισόδου της κατεργασίας, όπως το μεσοδιάστημα T_{off} και το duty ratio η
- Παρόμοια πειραματική μελέτη αλλά με διαφορετικές ιδιότητες του ίδιου συνθέτου υλικού όπως:
 - Αριθμός στρώσεων των ινών
 - Τρόπος πλέξης των ινών
 - Γωνία διαστρωμάτωσης των ινών
 - Ποσοστό ενισχυτικού υλικού, δηλαδή των ανθρακονημάτων, εντός της μήτρας
 - Γεωμετρία υλικού
- Αξιοποίηση και των υπόλοιπων ηλεκτροδίων που διατίθενται στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών αλλά με το ίδιο κατεργαζόμενο υλικό.
- Στον επόμενο σχεδιασμό πειράματος ή και αντίστοιχη διπλωματική εργασία απαιτείται η αξιοποίηση περισσότερων δειγμάτων (τουλάχιστον 15) ώστε να ευρεθούν πιο ακέραιες και ασφαλείς ημι-εμπειρικές σχέσεις για τη κατάστρωση εκθετικών σχέσεων προς την πρόβλεψη των παραμέτρων επίδοσης της κατεργασίας.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Απλοποιημένη διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης [5]	10
Εικόνα 2: Γραφική αναπαράσταση της λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης [7].....	12
Εικόνα 3: Άποψη του συγκροτήματος ηλεκτροδιάβρωσης [7]	13
Εικόνα 4: Δύο διαφορετικές διατάξεις EDM βύθισης [7]	14
Εικόνα 5: Μηχανολογικό σχέδιο εργαλειομηχανής EDM βύθισης ή αποτύπωσης	14
Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού κίνησης σε μηχανή αποτύπωσης - βύθισης EDM [1]	19
Εικόνα 7: Μονογραμμική απεικόνιση του σχεδιασμού ενός σερβομηχανισμού ελέγχου	21
Εικόνα 8: Απλοποιημένο γράφημα σερβομηχανισμού που οδηγείται από ηλεκτροκινητήρα	22
Εικόνα 9: Απλοποιημένο γράφημα σερβομηχανισμού που οδηγείται από υδραυλική μονάδα	23
Εικόνα 10: Ηλεκτρικό κύκλωμα γεννήτριας παλμών με τη χρήση transistor	24
Εικόνα 11: Γραφική αναπαράσταση μιας τυπικής μονάδας ισχύος.....	25
Εικόνα 12: Υδραυλικό κύκλωμα ενός συστήματος κυκλοφορίας – απόπλυσης.....	26
Εικόνα 13: Γράφημα τεχνολογιών 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.....	27
Εικόνα 14: Παράδειγμα υπολογισμού μέσης έντασης ρεύματος για σύντομο κύκλο εργασίας	29
Εικόνα 15: Παράδειγμα υπολογισμού μέσης έντασης ρεύματος για μεγάλο κύκλο εργασίας	29
Εικόνα 16: Τυπική κυματομορφή από γεννήτρια παλμών με κύκλωμα RC	31
Εικόνα 17: Παράδειγμα βιομηχανικής εφαρμογής στην ηλεκτροδιάβρωση [7]	33
Εικόνα 18: Γράφημα πίτας που καταδεικνύει το εύρος και τη συχνότητα εφαρμογών της ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης – βύθισης [18]	33
Εικόνα 19: Οπτικοποίηση τρόπου παραγωγής των ανθρακονημάτων	38
Εικόνα 20: Η εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης του εργαστηρίου.....	42
Εικόνα 21: Ταμπλό ελέγχου της εργαλειομηχανής για τη ρύθμιση των παραμέτρων κατεργασίας.....	43
Εικόνα 22: Ενδεικτικό δοκίμιο πριν την κατεργασία	44
Εικόνα 23: Άποψη τεμαχίου μετά την κατεργασία.....	44
Εικόνα 24: Το ηλεκτρόδιο χαλκού	44
Εικόνα 25: Ζυγαριά στην οποία μετρήθηκε η μάζα των δοκιμίων	46
Εικόνα 26: Τοποθέτηση του 1ου δοκιμίου με μηδενική γωνία τοποθέτησης και χρησιμοποίηση εδράσεων	47
Εικόνα 27: Πλήρωση της δεξαμενής με διηλεκτρικό ρευστό και κάλυψη του τεμαχίου	47
Εικόνα 28: Μετρητική συσκευή τραχύτητας.....	48
Εικόνα 29: Focus στην κατασκευαστική δομή του τραχυμέτρου	48
Εικόνα 30: Κοπτικός τροχός του εργαστηρίου.....	49
Εικόνα 31: Κυάθιο προετοιμασίας των δοκιμίων	50
Εικόνα 32: Τα συστατικά του μείγματος ρητίνης που περιέχει το κυάθιο.....	50
Εικόνα 33: Εγκιβωτισμένα δοκίμια πριν τη στερεοποίηση της ρητίνης	51
Εικόνα 34: Εγκιβωτισμένα δοκίμια μετά την αφαίρεση των κυαθίων σε πρόοψη.....	51
Εικόνα 35: Εγκιβωτισμένα δοκίμια μετά την αφαίρεση των κυαθίων σε κάτοψη	51

Εικόνα 36: Ο λειαντικός τροχός του εργαστηρίου	52
Εικόνα 37: Τα λειαντικά χαρτιά διαφορετικού μεγέθους κόκκων	52
Εικόνα 38: Πρέσα επιπεδοποίησης δοκιμίων.....	53
Εικόνα 39: Το οπτικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου	54
Εικόνα 40: Ηλεκτρονικό παχύμετρο για την ακριβή μέτρηση των διαστάσεων	55
Εικόνα 41: Στιγμιότυπο του script από το υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB	71
Εικόνα 42: Συντελεστές ημι - εμπειρικής σχέσης για τη γραμμική παρεμβολή.....	71
Εικόνα 43: Γραφικό περιβάλλον του Curve Fitting App	72
Εικόνα 44: Παραλλαγμένος κώδικας για το μέσο ύψος τραχύτητας Ra	75
Εικόνα 45: Συντελεστές λογαριθμικής συνάρτησης μέσης τραχύτητας.....	75
Εικόνα 46: Μενού εισαγωγής των μεταβλητών στο Curve Fitting App.....	76
Εικόνα 47: Κώδικας που αφορά στο μέγιστο ύψος τραχύτητας Rt.....	79
Εικόνα 48: Παράγοντες της 1ης προβλεπτικής συνάρτησης σε λογαριθμική μορφή	79
Εικόνα 49: Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα από το Curve Fitting App για τη Rt	80
Εικόνα 50: Ανάδειξη κρατήρων και μικρορωγμών κατά την EDM αποτύπωσης - βύθισης σε υλικό χάλυβα EN 353 με ηλεκτρόδιο χαλκού [26]	83
Εικόνα 51: Τοπογραφία επιφάνειας υλικού MMC κατεργασμένο με ηλεκτροδιάβρωση [27] ..	84
Εικόνα 52: Ατέλειες κατεργασμένης επιφάνειας Inconel 718 [28]	84
Εικόνα 53: Σχηματική αναπαράσταση των layers της ΘΕΖ στην EDM.....	85
Εικόνα 54: Γενικές όψεις των δοκιμίων A ₁ και A ₂ κάτω από το μικροσκόπιο με μεγέθυνση 100x	86
Εικόνα 55: Γενικές όψεις των δοκιμίων A ₃ και A ₄ κάτω από το μικροσκόπιο για μεγέθυνση 100x	86
Εικόνα 56: Πλευρικά τοιχώματα των δοκιμίων A ₁ και A ₂ κάτω από το μικροσκόπιο με μεγέθυνση 100x.....	87
Εικόνα 57: Πλευρικά τοιχώματα των δοκιμίων A ₃ και A ₄ κάτω από το μικροσκόπιο με μεγέθυνση 100x.....	87
Εικόνα 58: Εικόνες των δοκιμίων B ₁ και B ₂ κάτω από το μικροσκόπιο σε μεγέθυνση 100x.....	88
Εικόνα 59: Εικόνες των δοκιμίων B ₃ και B ₄ κάτω από το μικροσκόπιο σε μεγέθυνση 50x.....	88
Εικόνα 60: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο A ₁ (Μεγέθυνση 200x).....	89
Εικόνα 61: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο A ₃ (Μεγέθυνση 200x)	89
Εικόνα 62: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο A ₄ (Μεγέθυνση 200x)	89
Εικόνα 63: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο B ₁ (Μεγέθυνση 200x).....	90
Εικόνα 64: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο B ₂ (Μεγέθυνση 200x).....	90
Εικόνα 65: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο B ₃ (Μεγέθυνση 200x).....	90
Εικόνα 66: ZOOM IN στις ίνες για το δοκίμιο B ₄ (Μεγέθυνση 200x).....	90
Εικόνα 67: Εικόνα μικροσκοπίου για το δοκίμιο A ₁ (200x)	91
Εικόνα 68: Εικόνα μικροσκοπίου για το δοκίμιο A ₂ (500x)	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ιδιότητες του τεμαχίου που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της EDM	15
Πίνακας 2: Κριτήρια εκλογής ηλεκτροδίων στην EDM	15
Πίνακας 3: Απαιτήσεις από το υλικό ηλεκτροδίων στην EDM	16
Πίνακας 4: Υλικά ηλεκτροδίων EDM και χαρακτηριστικά τους	17
Πίνακας 5: Πινακοποιημένη σύγκριση ηλεκτροδίων ανάλογα με το υλικό	17
Πίνακας 6: Συνθήκες κατεργασίας για τυπικά υλικά στην EDM	17
Πίνακας 7: Κανόνες λογικής για τη λειτουργία του σερβομηχανισμού ελέγχου	21
Πίνακας 8: Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες ανθρακονημάτων	37
Πίνακας 9: Πειραματικές συνθήκες των διαδοχικών λειάνσεων	52
Πίνακας 10: Πειραματικά δεδομένα για τα 8 δοκίμια	55
Πίνακας 11: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων προς κατεργασία	55
Πίνακας 12: Τιμές της μέσης τραχύτητας R_a κατά μήκος των δοκιμίων	58
Πίνακας 13: Τιμές της RMS τραχύτητας R_q κατά μήκος των δοκιμίων	58
Πίνακας 14: Τιμές της τραχύτητας R_y κατά μήκος των δοκιμίων	58
Πίνακας 15: Τιμές του μέγιστου ύψους τραχύτητας R_t κατά μήκος των δοκιμίων	58
Πίνακας 16: Υπολογισμός πυκνότητας για όλα τα CFRP δοκίμια	59
Πίνακας 17: Πίνακας αποτελεσμάτων επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων	60
Πίνακας 18: Πίνακας αποδοτικότητας της ηλεκτροδιάβρωσης των 8 δοκιμίων	69
Πίνακας 19: Πλήρες προβλεπτικό μοντέλο για τον ρυθμό αποβολής υλικού και αντίστοιχες αποκλίσεις	73
Πίνακας 20: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την πρόβλεψη της μέσης τραχύτητας	77
Πίνακας 21: Ενιαίος πίνακας δεδομένων εισόδου και εξόδου για το μέγιστο ύψος τραχύτητας	81
Πίνακας 22: Συνολικός Πίνακας αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων της εργασίας	93

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Συνάρτηση της διαμέτρου της ίνας με την αντοχή σε εφελκυσμό.....	39
Διάγραμμα 2: Τρόπος επιρροής ηλεκτρικής αντίστασης των ανθρακονημάτων από τη θερμοκρασία	40
Διάγραμμα 3: Είδη αποκλίσεων μιας κατεργασμένης επιφάνειας	56
Διάγραμμα 4: Χαρακτηριστικά σημεία της τραχύτητας επιφάνειας	57
Διάγραμμα 5: Κατανομή του MRR κατά μήκος των 8 δοκιμίων	61
Διάγραμμα 6: Ρυθμός αποβολής υλικού συναρτήσει της τάσης κατεργασίας.....	62
Διάγραμμα 7: Εξάρτηση του MRR από Ton	63
Διάγραμμα 8: MRR συναρτήσει της E_p	64
Διάγραμμα 9: MRR συναρτήσει της P_{nom}	65
Διάγραμμα 10: Προφίλ του μέσου ύψους των τραχυτήτων κατά μήκος των δοκιμίων	66
Διάγραμμα 11: Κατανομή του μέσου όρου της τραχύτητας για τις δύο συνθήκες κοπής	67
Διάγραμμα 12: Μέσος όρος τραχύτητας δοκιμίων συναρτήσει της ενέργειας παλμού	68
Διάγραμμα 13: Αντιπαραβολή της μέσης τραχύτητας με το ρυθμό αποβολής υλικού	69
Διάγραμμα 14: Γραφική παράσταση του 2ου προβλεπτικού μοντέλου για τον ρυθμό αποβολής υλικού.....	72
Διάγραμμα 15: Αντιπαραβολή του ρυθμού αποβολής υλικού και των δύο εκθετικών διπαραμετρικών μοντέλων	73
Διάγραμμα 16: Μεταβολή του ποσοστιαίου λάθους σε όλες τις περιπτώσεις πρόβλεψης του ρυθμού αποβολής υλικού	74
Διάγραμμα 17: Γράφημα της 2ης προβλεπτικής συνάρτησης της μέσης τραχύτητας	76
Διάγραμμα 18: Αντιπαραβολή του μέσου ύψους τραχύτητας με τις τιμές των δύο προβλεπτικών σχέσεων	77
Διάγραμμα 19: Μεταβολή του ποσοστιαίου λάθους πρόβλεψης της μέσης τραχύτητας	78
Διάγραμμα 20: 3D γράφημα της 2ης προβλεπτικής συνάρτησης για τη R_t	80
Διάγραμμα 21: Γράφημα διασποράς των τιμών του μεγίστου ύψους τραχύτητας και των αντίστοιχων 2 εκτιμήσεων.....	81
Διάγραμμα 22: Διακύμανση του ποσοστιαίου σφάλματος εκτίμησης του μεγίστου ύψους τραχύτητας.....	82

Βιβλιογραφία

- [1] M. P. Jahan, „Die-sinking Electrical Discharge Machining”, in M. P. Jahan (ed.), *Electrical Discharge Machining (EDM): Types, Technologies and Applications*, Nova Science Publishers, New York, 2015, pp.1-17.
- [2] Sushil Kumar Choudhary, Dr. R.S Jadoun, „Current Advanced Research Development of Electric Discharge Machining (EDM): A Review”, *International Journal of Research in Advent Technology*, Vol. 2, No.3, 2014, pp. 273-297.
- [3] Jaber E. Abu Qudeiri, Ahmad Saleh, Aiman Ziout, Abdel-Hamid I. Mourad, Mustufa Haider Abidi, Ahmed Elkaseer, „Advanced Electric Discharge Machining of Stainless Steels: Assessment of the State of the Art, Gaps and Future Prospect”, *Materials*, Vol. 12, Issue 6, 2019, pp. 907-955.
- [4] B. Lauwers, J. Vleugels, O. Malek, K. Bran, K. Liu, „Electrical discharge machining of composites”, in H. Hocheng (ed.), *Machining technology for composite materials: Principles and practice*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 199.
- [5] Elman C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [6] Ho, K., H., and Newman, S., T.: State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, pp. 1287-1300, 2003.
- [7] Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, Σημειώσεις μαθήματος 8^{ου} εξαμήνου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ «Μη Συμβατικές Κατεργασίες», Ηλεκτροδιάβρωση, Electro – Discharge Machining (EDM)
- [8] Tiago Czelusniak, Camila Fernandes Higa, Ricardo Diego Torres, Carlos Augusto Henning Laurindo, José Mário Fernandes de Paiva Júnior, Armin, Lohrengel, Fred Lacerda Amorim, „Materials used for sinking EDM electrodes: a review”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, Issue 14, 2019.
- [9] Rahul Mahajan, Hare Krishna, Ankit Kumar Singh, Ranjan Kr Ghadai, „A Review on Copper and its alloys used as electrode in EDM”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 377, 2018.
- [10] E. B. Guitrau, *The EDM Handbook*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 1997.
- [11] S. H. Lee, X. P. Li, „Study of the effect of machining parameters of the machining characteristics in EDM of tungsten carbide”, *Journal of Material processing technology*, Vol. 115, 2001, pp. 344-355.
- [12] Δρ. Ν. Βαξεβανίδης, Μη συμβατικές κατεργασίες υψηλού περιβαλλοντικού οφελούς (Μέρος Ι): http://triblab.teipir.gr/edu/files/Mi_symbatikes_katergasies_1.pdf (last accessed on 09th February 2023)
- [13] M. M. Makenzi, B. W. Ikuu, „A review of flushing techniques used in electrical discharge machining”, *Proceedings of the 2012 Mechanical Engineering Conference on Sustainable Research and Innovation*, Vol. 4, May 2012.

- [14] Sanjeev Kumar, Rupinder Singh, T. P. Singh, B. L. Sethi, „Surface modification by electrical discharge machining: A review“, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 3675–3687.
- [15] K. H. Ho, S. T. Newman, „State of the art electrical discharge machining (EDM)“, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, 2003, pp. 1287–1300.
- [16] Shiba Narayan Sahu, Narayan Chandra Nayak, „Multi-criteria decision making with PCA in EDM of A2 tool steel“, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, Issue 9, 2018, pp. 18641-18648
- [17] Roman Ye, Rapid Prototyping & Rapid Manufacturing Expert, Sinkers EDM vs wire EDM: Main differences and applications, Available online: <https://www.3erp.com/blog/sinker-edm-vs-wire-edm-main-differences-and-applications/> (last accessed on 11th February 2023)
- [18] Peter, Fonda.; Zhigang, Wang.; Kazuo, Yamazaki. & Yuji, A. (2007). A fundamental study on Ti-6Al-4V's thermal and electrical properties and their relation to EDM productivity. *Journal of Materials Processing Technology*
- [19] S. P. R. Y. V. D. R. N Nasir Hussain, «Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading» *Science Direct*, τόμ. 173, pp. 1390-1398, 2017.
- [20] R.-M. Wang, S.-R. Zheng & Y.-P. Zheng, *Polymer matrix composites and technology*, 1st edn, Woodhead Publishing, China, 2011
- [21] Δ. Παντελής, *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά: Δομή-Ιδιότητες-Τεχνολογία-Εφαρμογές*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1996
- [22] I. M. Daniel & O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2nd edn, Oxford University Press, New York, 2006
- [23] M. W. Hyer, «*Stress Analysis of Fiber – Reinforced Composite Materials*», McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1998
- [24] AGIE. Operation Instructions AGIETRON EMT 1.10.
- [25] *Μηχανουργική Τεχνολογία – Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής των Μετάλλων Τόμος II-1*, Πέτρος Γ. Πετρόπουλος, Καθηγητής Α.Π.Θ., Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998
- [26] K.M. Tsai, P.J. Wang: Semi-empirical model of surface finish on electrical discharge machining, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 41(10):1455–1477, 2001.
- [27] Teepu Sultan, Anish Kumar & Rahul Dev Gupta, Material Removal Rate, Electrode Wear Rate, and Surface Roughness Evaluation in Die Sinking EDM with Hollow Tool through Response Surface Methodology, *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014
- [28] El-Hofy, Hassan. *Fundamentals of Machining Processes*. USA: CRC Press, 2019.
- [29] Suresh Gudipudi, Selvaraj Nagamuthu, Kanmani Subbu Subbian & Surya Prakasa Rao Chilakalapalli, A comprehensive investigation on machining of composites by EDM for microfeatures and surface integrity, *Journal of Micromanufacturing*, 2021

[30] Thrinadh Jadam, Santosh Kumar Sahu, Saurav Datta & Manoj Masanta, Powder-mixed electro-discharge machining performance of Inconel 718: effect of concentration of multi-walled carbon nanotube added to the dielectric media, Indian Academy of Sciences, 2020

[31] Jameson, Elman C. Electrical Discharge Machining. USA: SME, 2001.