



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

**Πειραματική μελέτη και βελτιστοποίηση κατεργασίας διάνοιξης
αυλακιών μέσω υδροκοπής με δέσμη λειαντικών κόκκων**

Experimental study and optimization of slot processing by abrasive
waterjet machining

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Νινιού - Πέππα Χρήστου

Επιβλέπων : Άγγελος Μαρκόπουλος (Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Α. Μαρκόπουλο που μου πρότεινε να καταπιαστώ με το συγκεκριμένο θέμα, αλλά και για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία να την εκπονήσω στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Κάρκαλο για όλες τις σημαντικές ενδείξεις κατά την διάρκεια της συγγραφής και την συνολική βοήθεια που μου παρείχε όποτε την χρειάστηκα. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα αδέλφια μου, τους γονείς μου και όλους τους δικούς μου ανθρώπους για την συνεχή στήριξη τους όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υδροκοπή με χρήση λειαντικών κόκκων αποτελεί μια επαναστατική μέθοδο κοπτικής κατεργασίας με πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι των παραδοσιακών κατεργασιών κοπής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας της λειαντικής υδροκοπής σε τεμάχιο χάλυβα. Αρχικά γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση και σημειώνονται συμπεράσματα σχετικά με το θέμα στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία. Έπειτα γίνεται ο προσδιορισμός των παραμέτρων κατεργασίας και ο σχεδιασμός του πειράματος. Έγιναν 27 κοπές στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας, για τον σχεδιασμό του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi, ενώ ως παράμετροι κατεργασίας λήφθηκαν η παροχή του λειαντικού υλικού, η απόσταση του στομίου εκτόξευσης της κοπτικής δέσμης, η πίεση και η ταχύτητα πρόωσης της κοπτικής κεφαλής. Στην συνέχεια, λήφθηκαν φωτογραφίες μετά απο παρατήρηση του τεμαχίου με κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό και μέσω ειδικού λογισμικού μετρήθηκαν ψηφιακά τα πλάτη και τα βάθη των κοπών. Τέλος, αναλύθηκε η επίδραση των παραμέτρων στα βάθη και πλάτη των αυλακιών και τέθηκαν κριτήρια βελτιστοποίησης της κατεργασίας βάση της διαστατικής ακρίβειας που απαιτείται σε μια κατεργασία κοπής. Για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε χρήση τριών μεθόδων παρέχοντας μια ολιστική προσέγγιση του ζητήματος. Έτσι, προσδιορίστηκε ο βέλτιστος συνδυασμός των τιμών των παραμέτρων ανάλογα με το κριτήριο που εξετάστηκε κάθε φορά.

ABSTRACT

Abrasive water jet machining consists a revolutionary cutting machining process, due to the advantages it has over similar conventional cutting processes. In this diploma thesis, the effect of process parameters is being investigated in slot processing of steel specimen by AWJM. After a bibliographic research on similar experimental abrasive water jet machining publications, the process parameters and the design of experiment method was developed. Taguchi's method of design of experiments was used to select input process parameters by varying water pressure, traverse speed, abrasive mass flow rate and standoff distance. Later on, photos of the slots were taken using suitable experimental equipment and the depth of cut and kerf width were measured with the use of special software. Finally, the results were analysed and suitable criteria were considered in order to optimise the process. For the optimisation procedure, three methods were used in order to obtain a spherical point of view since different approaching methods were performed. In that way, the optimum combination of the process parameters values was concluded according to the demands of each criteria considered.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΚΟΠΗΣ	8
1.1. Γενικά στοιχεία για την υδροκοπή	8
1.1.1. Εισαγωγή	8
1.1.2. Ιστορικά	8
1.1.3. Εφαρμογές της υδροκοπής	9
1.1.4. Βασικά στοιχεία υδροκοπής	10
1.1.5. Διάταξη Εργαλειομηχανής Υδροκοπής	11
1.1.6. Δομή ακροφυσίου υδροκοπής	12
1.1.7. Ο κύκλος νερού στην υδροκοπή	14
1.1.8. Παράμετροι κατεργασίας AWJM	17
1.1.9. Πλεονεκτήματα υδροκοπής	21
1.2. Μηχανική της υδροκοπής	23
1.2.1. Ενεργειακός ισολογισμός	23
1.2.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη υδροκοπής	26
1.2.3. Μικρο - μηχανισμός αφαίρεσης υλικού	27
1.2.3.1. Γενικά	27
1.2.3.2. Ρυθμός αποβολής υλικού	28
1.2.4. Μηχανισμός διάβρωσης για όλκιμα υλικά	28
1.2.4.1. Μοντέλο μικροκοπής για όλκιμα υλικά	28
1.2.4.2. Μοντέλα παραμόρφωσης για όλκιμα υλικά	29
1.2.5. Μηχανισμός διάβρωσης για ψαθυρά υλικά	30
1.2.6. Σχέσεις ρυθμού διάβρωσης	31
1.3. Ελαττώματα	33
1.3.1. Ποιότητα κοπής	33
1.3.2. Σχηματισμός κλίσης αυλακιών (kerf taper formation)	34
1.3.2. Το φαινόμενο προσκόλλησης σωματιδίων - (particles contamination)	35
1.3.3. Σχηματισμός ραβδώσεων	37
1.3.4. Φθορά στομίου εκτόξευσης	39
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	41
2.1. Περιγραφή πειραμάτων	41
2.2. Ανάλυση βιβλιογραφικών πηγών	41

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	68
3.1 Περιγραφή του πειράματος	68
3.2. Συνθήκες πειράματος	68
3.3. Πειραματική διάταξη	71
3.4. Μέτρηση βάθους - πλάτους	72
3.5. Σχεδιασμός μελέτης του πειράματος	77
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	80
4.1. Πίνακας αποτελεσμάτων	80
4.2. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων	81
4.2.1. Ανάλυση βάθους	82
4.2.2. Ανάλυση πλάτους	84
4.3. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων	86
4.4. Η μέθοδος Grey Relational Analysis - GRA	88
4.4.1. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων μέσω GRA	89
4.4.1.1. Κριτήριο Μεγιστοποίησης βάθους - Ελαχιστοποίησης πλάτους	89
4.4.1.2. Κριτήριο επιθυμητής τιμής βάθους - Ελαχιστοποίησης χρόνου	93
4.4.1.3. Κριτήριο Μεγιστοποίησης βάθους - Ελαχιστοποίησης πλάτους - Ελαχιστοποίησης χρόνου	97
4.5. Η μέθοδος Principal Component Analysis - PCA	99
4.5.1. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων μέσω υβριδικής PCA - GRA	100
4.5.1.1. Κριτήριο Μεγιστοποίησης βάθους - Ελαχιστοποίησης πλάτους	101
4.5.1.2. Κριτήριο Μεγιστοποίησης βάθους - Ελαχιστοποίησης πλάτους - Ελαχιστοποίησης χρόνου	105
4.6. Η μέθοδος Fuzzy logic (Ασαφής λογική)	110
4.6.1. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων μέσω υβριδικής μεθόδου Fuzzy logic - GRA	111
4.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης	120
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	123

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΚΟΠΗΣ

1.1. Γενικά στοιχεία για την υδροκοπή

1.1.1. Εισαγωγή

Η υδροκοπή είναι η τεχνολογία κοπής που έρχεται από το μέλλον. Συγκαταλέγεται στις μη συμβατικές κατεργασίες υψηλής ακρίβειας. Εύκολα ξεχωρίζει από τις άλλες μεθόδους κοπής, λόγω της μεγάλης ευρύτητας εφαρμογών και του οικολογικού, μη ρυπογόνου τρόπου λειτουργίας. Η κατεργασία με υδροκοπή είναι μία διαδικασία με πολλές μοναδικές ικανότητες και πλεονεκτήματα. Στην τεχνολογία αυτή δημιουργείται μια στενή δέσμη νερού πολύ υψηλής πίεσης που προσβάλλει το προς κοπή υλικό, το οποίο και κόβει. Κανένα επιβλαβές αέριο ή υγρό δε χρησιμοποιείται, έτσι δεν δημιουργούνται επικίνδυνοι ατμοί και υλικά, ενώ η θερμότητα και οι μηχανικές πιέσεις δεν επηρεάζουν την επιφάνεια κοπής όπως συμβαίνει στις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Είναι πραγματικά μια ευπροσάρμοστη, παραγωγική και κρύα τέμνουσα διαδικασία κοπής που μπορεί να πραγματοποιήσει λεπτομερείς κοπές σε ένα ευρύτατο φάσμα υλικών και εφαρμογών.

1.1.2. Ιστορικά

Η ιδέα αξιοποίησης δέσμης ύδατος για κοπή δεν είναι κάτι νέο καθώς ήδη από τα μέσα του 19ου αιώνα αξιοποιούνταν στην εξόρυξη μεταλλευμάτων στα ορυχεία (hydraulic mining). Στην συνέχεια οι πρώτες πατέντες για κοπή μαλακών υλικών όπως χαρτί με την μέθοδο της υδροκοπής έγιναν το 1930. Ενώ η τεχνολογία της υδροκοπής άρχισε να εξελίσσεται συστηματικά με τον τρόπο που την γνωρίζουμε και σήμερα από τα τέλη του 1960 από τον Dr. Norman Franz, έναν δασονόμο που αναζητούσε τρόπους για την κοπή κορμών δέντρων. Έτσι χρησιμοποίησε αντλία για την παροχή νερού εξαιρετικά υψηλής πίεσης (Ultra High Pressure - UHP) μετατρέποντας την ενέργεια του νερού σε υπερηχητική κοπτική δέσμη που εκτοξεύεται μέσω ακροφυσίου μικρής διατομής. Το 1980 ο Dr. Hashish είχε την ιδέα να προστεθούν λειαντικά σωματίδια στην δέσμη ύδατος δημιουργώντας έτσι αποξεστική δέσμη με δυνατότητα κοπής βιομηχανικών υλικών όπως σκυρόδεμα, χάλυβας και γυαλί. Το 1983 υιοθετήθηκε πλέον ευρέως η χρήση της αποξεστικής υδροκοπής και δημιουργήθηκε το πρώτο σύστημα υδροκοπής σε εμπορική κλίμακα για κοπή γυαλιών στην αυτοκινητιστική βιομηχανία [1].

1.1.3. Εφαρμογές της υδροκοπής

Συνήθη πεδία χρήσης της τεχνολογίας της υδροκοπής αποτελούν χώροι της βιομηχανίας και της βιοτεχνίας, που ενσωματώνουν συστήματα κοπής υψηλής απόδοσης για καλύτερη ποιότητα κοπής σε όλες τις προδιαγραφές. Όπως φαίνεται παρακάτω υπάρχει μια ποικιλία βιομηχανικών εφαρμογών και εφαρμογών ειδικών υλικών στις οποίες γίνεται τέλεια χρήση της τεχνολογίας κοπής μέσω ρεύματος ύδατος σε υψηλή πίεση:

- Αεροδιαστημική βιομηχανία και αυτοκινητοβιομηχανία. Άτρακτοι αεροσκαφών από τιτάνιο, στοιχεία κινητήρων, προφυλακτήρες, επένδυση, φάιμπεργκλας, Panel μόνωσης, ηχομόνωση, πίνακες οργάνων κ.τ.λ.
- Ηλεκτρονική τεχνολογία, προϊόντα αφρώδους υλικού και τρόφιμα. Πίνακες κυκλωμάτων, απογύμνωση καλωδίων, συσκευασία σε αφρώδες υλικό, φυτικές φέτες, επεξεργασία κρέατος κλπ.
- Φάιμπεργκλας και στεγανοποιήσεις. Μόνωση, σκάφη, στεγανοποιήσεις από μέταλλο, χαλκό, τεφλόν κλπ.
- Μέταλλα, σπάνια και μη καθιερωμένα υλικά. Μέταλλα (αλουμίνιο, ανοξείδωτο ατσάλι κλπ.), κεραμικά, λάστιχα, πλαστικά, ιατρικά, κερί, Plexiglas, etalbon, κλπ.
- Καλλιτεχνικές εργασίες από πέτρα, γυαλί, μέταλλο και κλωστοϋφαντουργία. Ένθετα δαπέδων, πλακίδια δαπέδων, πέτρα, υφάσματα, υφάσματα με επαναλαμβανόμενα σχέδια-πολλές στρώσεις με τη μία, προϊόντα υγιεινής κλπ.
- Μονώσεις και μονωτικά. Εφαρμογές για την παραγωγή γυαλιού και πετροβάμβακα ως εναλλακτική τεχνολογία κοπής.
- Διακόσμηση οικιακών και επαγγελματικών χώρων. Όλοι οι επαγγελματίες του χώρου (διακοσμητές, αρχιτέκτονες, πολιτικοί μηχανικοί, επιγραφοποιοί κλπ.) ή ιδιώτες μπορούν να πραγματοποιήσουν κάθε τους απαίτηση δημιουργώντας μοναδικά και πρωτότυπα διακοσμητικά στοιχεία.
- Βιομηχανίες ξύλου. Ξύλο, κόντρα πλακέ, κλπ.
- Βιομηχανίες γυαλιού. Κρύσταλλα, γυαλί, άθραυστα κρύσταλλα, Plexiglas [49].

1.1.4. Βασικά στοιχεία υδροκοπής

Στην υδροκοπή χρησιμοποιείται μια δέσμη νερού υψηλής πίεσης, η οποία λειτουργεί ως κοπτικό εργαλείο. Όταν πρόκειται για μαλακά υλικά, όπως το ξύλο ή ελαστομερή υλικά, χρησιμοποιείται μόνο νερό. Αντίθετα, όταν πρόκειται για σκληρότερα υλικά, όπως ο χάλυβας, το τιτάνιο ή σύνθετα υλικά, τότε χρησιμοποιούνται και πρόσθετα αποξεστικά σωματίδια ως εναιώρημα στο νερό και αναφερόμαστε στην κατεργασία ως αποξεστική ή λειαντική υδροκοπή (Abrasive Water Jet Machining - AWJM). Η υδροκοπή είναι η προτιμότερη μέθοδος, όταν δεν είναι επιθυμητή η μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται με άλλες μεθόδους.

Χρησιμοποιείται σε προηγμένα σύνθετα υλικά με οργανικές, μεταλλικές και κεραμικές μήτρες για εργασίες όπως κοπή, λείανση και διάτρηση. Η αρχή είναι η παραγωγή ενός λεπτού φιλμ νερού με πολύ υψηλές πιέσεις και υψηλές ταχύτητες και, κατά την κρούση, το υλικό αφαιρείται με εντοπισμένη διάτρηση. Συνεπώς η τεχνική της υδροκοπής βασίζεται στη χρήση νερού υπερβολικά υψηλών πιέσεων (UHP - Ultra Hydro Pressure) ως τέμνον εργαλείο. Το νερό συμπιέζεται σε κατάλληλη μονάδα αντλιάς ενίσχυσης και στην συνέχεια εξέρχεται των σωληνώσεων εντός των οποίων κυκλοφορεί, μέσω ενός πολύ μικρού ακροφυσίου με την πολύ υψηλή στατική πίεση που αναφέρθηκε παραπάνω. Κατά την έξοδο του νερού από το ακροφύσιο η πολύ υψηλή αυτή στατική πίεση μετατρέπεται σε δυναμική (πίεση ταχύτητας).

Χρησιμοποιούνται πιέσεις μέχρι 400 MPa και οι διάμετροι της δέσμης νερού είναι στην περιοχή 0.08-0.5 mm. Με καθαρό νερό μπορούν να κοπούν ελασματοποιημένα αραμιδικά-εποξικά ή υαλοεποξικά μέχρι πάχους 6.35 mm, ενώ για το γραφίτη-εποξικό το ανώτερο όριο είναι περίπου 0.15 mm. Η απόδοση βελτιώνεται σημαντικά όταν προστίθενται λειαντικά σωματίδια και έχουμε αποξεστική υδροκοπή. Σε αυτή την περίπτωση, μπορούν να κοπούν ελασματοποιημένα εποξειδικά γραφίτη έως πάχους 10 mm και για πάχος 3.17 mm μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταχύτητα κοπής 1m/min που είναι σχεδόν τετραπλάσια από εκείνη των παραδοσιακών μεθόδων [2].

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της υδροκοπής περιλαμβάνουν τις υψηλές ταχύτητες κοπής, την απουσία ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας με λέιζερ και την απομάκρυνση της σκόνης. Το πλάτος κοπής κυμαίνεται μεταξύ 0.5-2.5 mm και μπορούν να διατηρηθούν ανοχές των 0.4 mm, τα οποία είναι επαρκή τόσο για τις μηχανικές όσο και για τις κολλητικές ενώσεις. Το σύστημα είναι πολύ ευέλικτο και μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί [2].

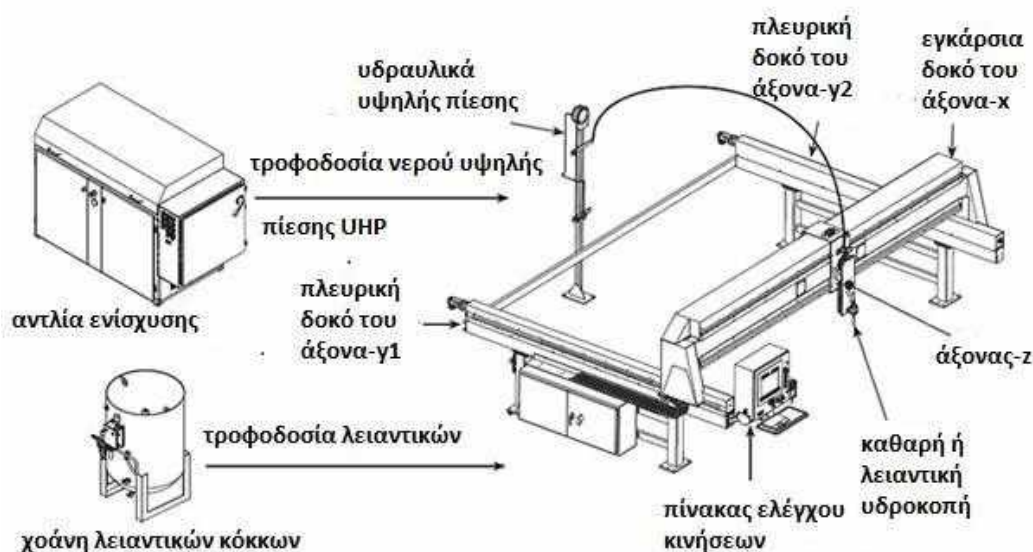
1.1.5. Διάταξη Εργαλειομηχανής Υδροκοπής

Στην υδροκοπή υπάρχουν πολλές διαφορετικές εργαλειομηχανές που διαχωρίζονται ανάλογα με τον εξοπλισμό κινήσεως. Η βασική δομή μιας εργαλειομηχανής φαίνεται στην εικόνα 1.1. Τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν μια εργαλειομηχανή υδροκοπής είναι:

- Μία αντλία υψηλής πίεσης που δέχεται νερό στην πίεση του δικτύου και την καταθλίβει σε μεγάλη πίεση.
- Ένα δοχείο με λειαντικούς κόκκους για την τροφοδοσία τους στην κεφαλή κοπής.
- Μία κεφαλή με ακροφύσιο με μικρή σπή.
- Ένα τραπέζι όπου δένεται το προς κοπή υλικό και «εξουδετερώνει» την ενέργεια της δέσμης μετά την κοπή.

Το τραπέζι έχει να κάνει διπλή δουλειά. Από τη μία να συγκρατήσει το κομμάτι (δεν ασκούνται μεγάλες δυνάμεις όπως στις συμβατικές κοπές, άρα δεν απαιτείται βαρύς εξοπλισμός συγκράτησης) και από την άλλη να διασκορπίζει την υψηλή κινητική ενέργεια της δέσμης επαναφέροντας το νερό στην αρχική χαμηλή πίεση. Αυτή είναι η βασική δουλειά του τραπέζιού. Εκτός αυτής όμως ένα λειτουργικό τραπέζι πρέπει :

- Να εξουδετερώνει όσο γίνεται το δημιουργούμενο θόρυβο.
- Να διαθέτει πρόβλεψη αυτοκαθαρισμού για να μην διακόπτεται η παραγωγική διαδικασία για την απομάκρυνση των αποβλήτων της κοπής.
- Να διευκολύνει τη συγκέντρωση και την απόρριψη των αποβλήτων, και
- Να αντέχει στο ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον λόγω της συνεχούς παρουσίας νερού, αλλά και της έμμεσης προσβολής από την ίδια τη δέσμη κοπής [50].



Εικόνα 1.1. Εργαλειομηχανή υδροκοπής [50].

1.1.6. Δομή ακροφυσίου υδροκοπής

Στην περίπτωση της αποξεστικής υδροκοπής η διαφοροποίηση της διάταξης έγκειται στην μορφολογία του ακροφυσίου και στην ύπαρξη συστήματος παροχής λειαντικών σωματιδίων.

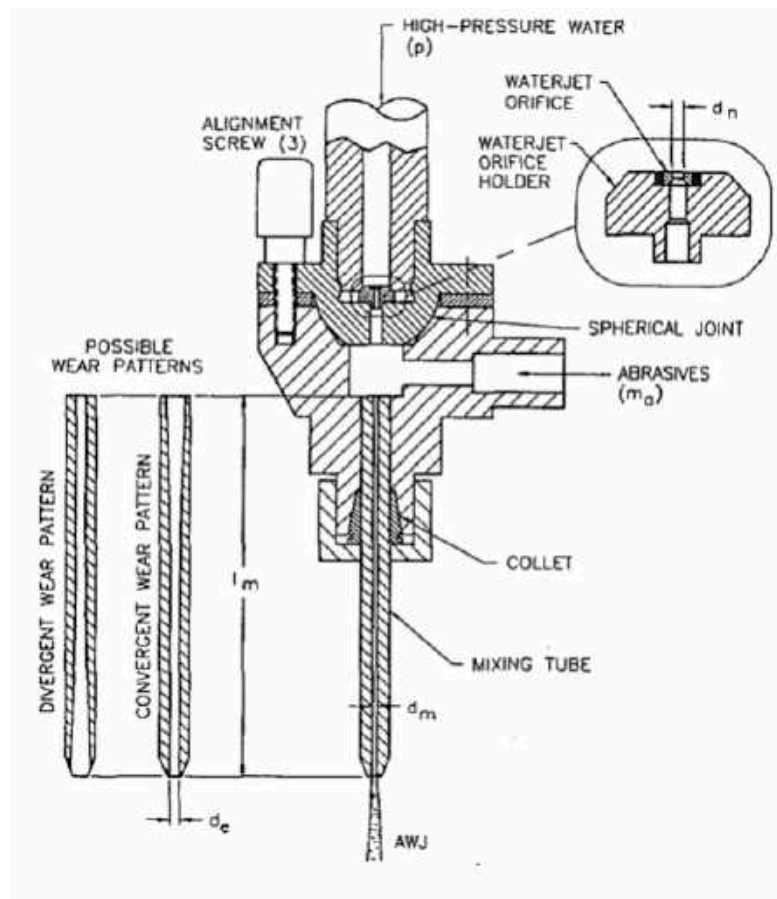


Εικόνα 1.2. Σύγκριση ακροφυσίων συμβατικής και αποξεστικής υδροκοπής [3].

Η μετατροπή της υψηλής πίεσης σε υπερηχητική κοπτική δέσμη επιτυγχάνεται στο ακροφύσιο κατασκευασμένο από πολύτιμους λίθους (waterjet orifice). Επικρατέστερα υλικά είναι το διαμάντι, το ρουμπίνι και το ζαφείρι ανάλογα με το είδος του τεμαχίου προς κατεργασία, το πάχος του αλλά και την κοστολογική επιβάρυνση της κατεργασίας [4]. Το ζαφείρι είναι το πιο κοινό υλικό, δημιουργεί δέσμη αρκετά καλής ποιότητας και σε συνδυασμό με την καλή ποιότητα παροχόμενου νερού έχει διάρκεια ζωής 50-100 ώρες για καθαρή υδροκοπή ενώ μειώνεται στο μισό όταν προστίθενται λειαντικά σωματίδια. Το ρουμπίνι ταιριάζει περισσότερο στην λειαντική υδροκοπή και το κόστος του είναι σχεδόν ίδιο με το ζαφείρι ενώ η διάρκεια ζωής του είναι 80-150 ώρες. Το διαμάντι έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής 800-2.000 ώρες αλλά είναι 10 με 20 φορές πιο ακριβό. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε 24ωρες διεργασίες ενώ σε αντίθεση με τους άλλους τύπους ακροφυσίων, μπορεί μερικές φορές να καθαριστεί υπερηχητικά και να επαναχρησιμοποιηθεί.

Στην συνέχεια, η δέσμη ύδατος ενισχύεται με το εκάστοτε λειαντικό υλικό και προσδίδει ενέργεια και ορμή στα σωματίδια του δημιουργώντας την αποξεστική κοπτική δέσμη. Η διαδικασία ανάμειξης νερού και λειαντικού συμβαίνει στον σωλήνα ανάμειξης. Συνήθως ο λόγος του μήκους

του σωλήνα προς την διάμετρο του είναι 3, ενώ η διάμετρος του είναι 3 φορές μεγαλύτερη από το ακροφύσιο της δέσμης του νερού (waterjet orifice). Τυπικά μήκη κυμαίνονται από 50 - 125 mm και διαμέτροι από 0.5 - 1.3 mm [5]. Η ταχύτητα της δέσμης νερού πλησιάζει τα 900 m/s ενώ τα σωματίδια μπορεί να αποκτήσουν το 80% αυτής της ταχύτητας δημιουργώντας έτσι ένα ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον για τον σωλήνα ανάμειξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία 2 ειδών αστοχίας στον σωλήνα ανάμειξης. Οι δύο μορφές αστοχίας που διαμορφώνουν την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα ανάμειξης σε αποκλίνουσα ή συγκλίνουσα μορφή, παρουσιάζονται στην εικόνα 1.3. Η αποκλίνουσα μορφή παρουσιάζεται όταν το λειαντικό μέσο είναι πολύ σκληρότερο από το υλικό του σωλήνα ανάμειξης ενώ η συγκλίνουσα μορφή παρουσιάζεται στην αντίστροφη περίπτωση. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει την αποτελεσματική μετάδοση της ορμής στα σωματίδια, μεταβάλλοντας έτσι την αποτελεσματικότητα την κοπτικής δέσμης συνολικά [6].

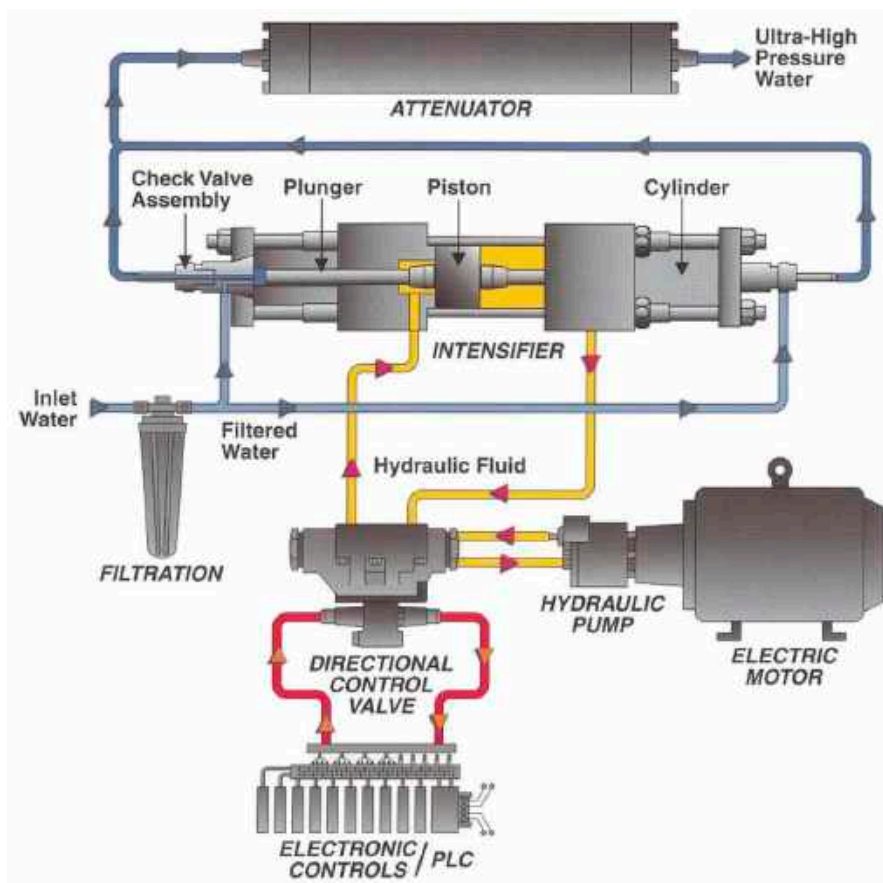


Εικόνα 1.3. Δομή και φθορά ακροφυσίου [6].

Πίνακας 1.1. Υλικό κατασκευής σωλήνων ανάμειξης [7].

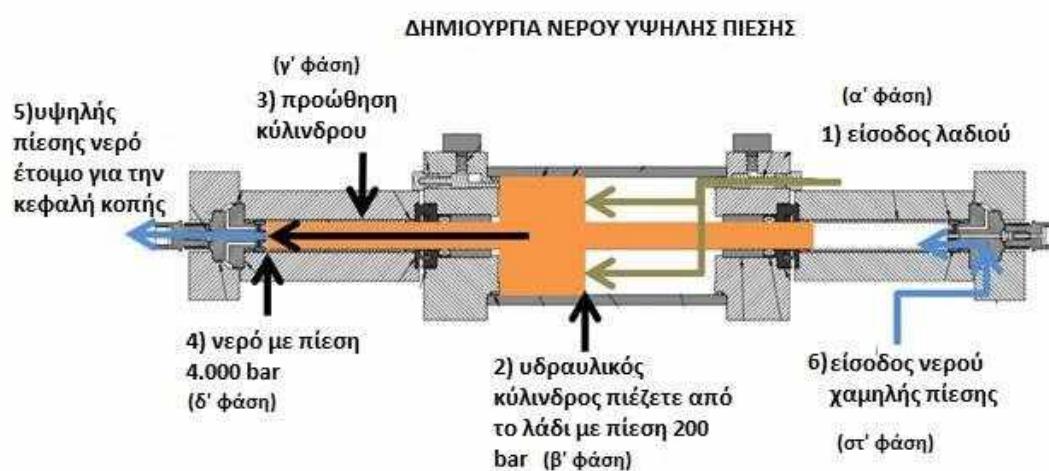
Σωλήνας ανάμειξης	Διάρκεια ζωής
καρβίδιο του βολφραμίου	4-6 ώρες
Συνθετικό καρβίδιο χαμηλού κόστους	35-60 ώρες
Συνθετικό καρβίδιο μέσης διάρκειας ζωής	80-90 ώρες
Συνθετικό καρβίδιο ανώτερης ποιότητας	100-150 ώρες

1.1.7. Ο κύκλος νερού στην υδροκοπή



Εικόνα 1.4. Κύκλος νερού στην υδροκοπή [8].

Η εργαλειομηχανή παράγει και ελέγχει νερό σε πολύ υψηλές πιέσεις κοντά στα 400 MPa ενώ σύγχρονες μηχανές δημιουργούν κοπές χρησιμοποιώντας έως και 600 MPa [9]. Για την δημιουργία τόσο υψηλών πιέσεων χρησιμοποιούνται ειδικές αντλίες ενίσχυσης. Η αρχή λειτουργίας των αντλιών τέτοιου είδους στηρίζεται στην εκμετάλλευση υδραυλικού κύκλωματος για την ανύψωση πίεσης στο κύκλωμα νερού. Το υδραυλικό κύκλωμα, αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα, την υδραυλική αντλία, την δεξαμενή λαδιού, την πολλαπλή και το έμβολο όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5. Ένα ηλεκτρικό μοτέρ κινεί την υδραυλική αντλία, που τραβά το λάδι από τη δεξαμενή και το συμπιέζει στα 20 MPa. Το υπό πίεση λάδι διοχετεύεται στην πολλαπλή διανομής όπου οι βαλβίδες του συλλέκτη αποστέλλουν το υπό πίεση υδραυλικό λάδι στη μία ή στην άλλη πλευρά του εμβόλου (α - φάση). Το εισερχόμενο λάδι πιέζει το έμβολο (β - φάση) της εμβολοφόρου παλινδρομικής αντλίας, με πίεση 20 MPa, στην απέναντι πλευρά. Το προωθούμενο έμβολο συμπίεσης του νερού (γ - φάση) ανεβάζει την πίεση του νερού στα 400 MPa (δ - φάση) δηλαδή 20X την πίεση του λαδιού, η ανύψωση αυτή εξαρτάται από τον λόγο των διαμέτρων των 2 εμβόλων. Ο ενισχυτής είναι ουσιαστικά μία παλινδρομική αντλία με το έμβολο να παλινδρομεί δεξιά - αριστερά, παρέχοντας υψηλής πίεσης νερό από τη μία πλευρά σε κάθε παλινδρόμηση του εμβόλου. Κατά την διάρκεια της συμπίεσης του νερού από τη μία πλευρά, χαμηλής πίεσης νερό γεμίζει την άλλη πλευρά του ενισχυτή (στ - φάση). Το υδραυλικό λάδι, της πλευράς που συμπίεσε το νερό, εξέρχεται από τον θάλαμο με το άνοιγμα της κατάλληλης βαλβίδας και στη συνέχεια ψύχεται κατά την διάρκεια της επιστροφής του στην δεξαμενή συγκέντρωσης ώστε να συμμετάσχει στον επόμενο κύκλο λειτουργίας του ενισχυτή.

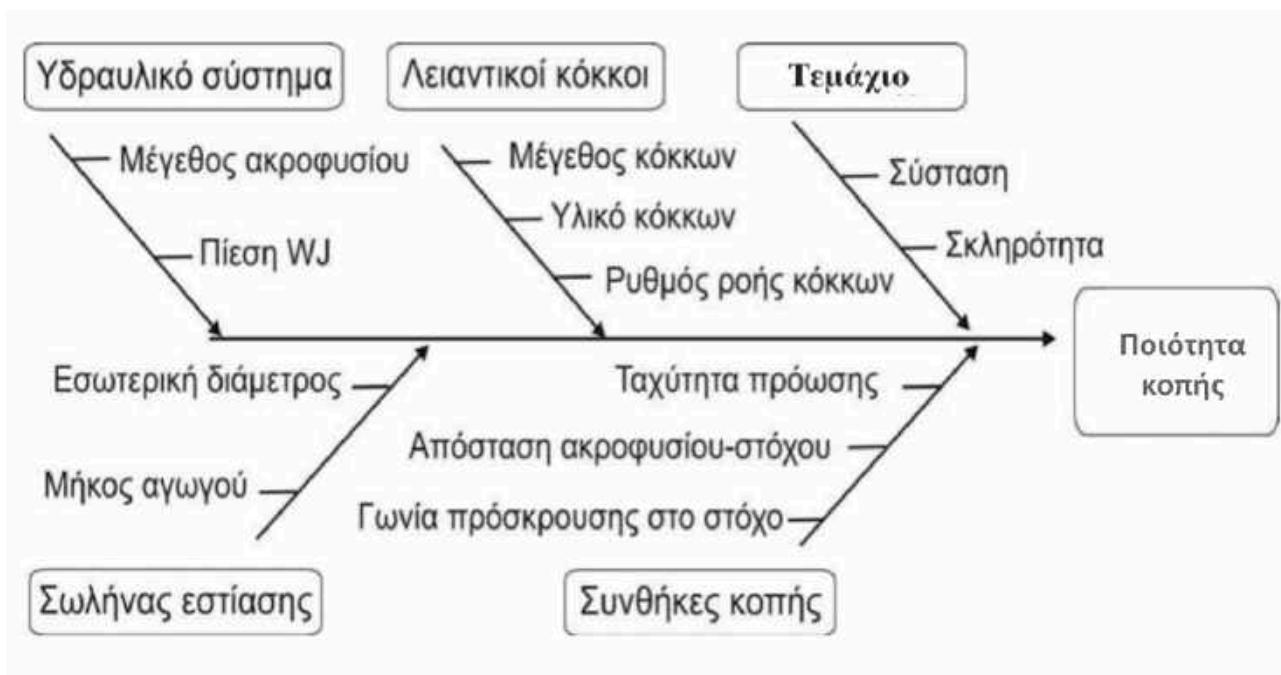


Εικόνα 1.5. Το κύκλωμα νερού στην αντλία ενίσχυσης - ροή νερού υψηλής πίεσης [10].

Στην συνέχεια το νερό οδηγείται μέσω των υδραυλικών σωληνώσεων στον σταθεροποιητή. Ο σταθεροποιητής πίεσης είναι ένα σύστημα ρύθμισης - σταθεροποίησης της πίεσης σε επίπεδα χαμηλότερα της πίεσης εισόδου, εξασφαλίζει ότι το νερό οδηγείται προς την κεφαλή κοπής συνεχώς και με σταθερή πίεση. Χωρίς το σταθεροποιητή το νερό θα είχε μεταβλητή πίεση αφήνοντας σημάδια στο υλικό που κόβεται.

Οι μονάδες υδροκοπής είναι σχεδιασμένες για μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ επίσης έχουν σχεδιαστεί ώστε πιθανές αστοχίες να γίνονται με ασφάλεια. Τα συστήματα υδροκοπής αποτυγχάνουν σταδιακά και όχι στιγμιαία, καθώς οι συνδέσεις και τα σφραγισμένα μέρη αρχίζουν σιγά-σιγά να εμφανίζουν διαρροές μέσα από ειδικά σχεδιασμένες οπές. Συνίσταται περιοδικός έλεγχος συντήρησης ενώ υπάρχουν αισθητήρες τερματισμού στη μονάδα άντλησης για την προστασία από την φθορά της αντλίας. Η αντιμετώπιση προβλημάτων ενός ενισχυτή είναι αρκετά απλή, καθώς η διαρροή ζεστού νερού δηλώνει απώλεια υψηλής πίεσης ενώ διαρροή κρύου νερού υποδεικνύει απώλεια χαμηλής πίεσης. Μόλις η αντλία υψηλής πίεσης έχει δημιουργήσει την πίεση του νερού, το νερό μεταφέρεται στην κοπτική κεφαλή. Εκτός από την μεταφορά του νερού υψηλής πίεσης τα υδραυλικά παρέχουν ελεύθερη κυκλοφορία στην κοπτική κεφαλή. Ο πιο κοινός τύπος της υψηλής πίεσης υδραυλικών είναι ειδικός σωλήνας από ανοξείδωτο χάλυβα. Η διαδικασία παραγωγής υψηλής πίεσης είναι μεγάλης σημασίας καθώς η πίεση αποτελεί βασική παράμετρο κατεργασίας τεμαχίου επηρεάζοντας συνολικά την κοπή καθώς καθορίζει την μέγιστη επιτρεπόμενη παροχή και την μέγιστη διάμετρο ακροφυσίου. (waterjet orifice) [9].

1.1.8. Παράμετροι κατεργασίας AWJM



Εικόνα 1.6. Δενδροειδής ανάλυση παραμέτρων AWJM [51].

Το τελικό αποτέλεσμα μιας κατεργασίας σε υδροκοπή κρίνεται συνολικά από την ποιότητα της κοπής. Η ποιότητα είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων που εξαρτώνται τόσο από τον κατασκευαστικό σχεδιασμό της εργαλειομηχανής όσο και από τις συνθήκες κατεργασίας που επιλέγονται για την κατεργασία τεμαχίων. Οι βασικές παράμετροι είναι η πίεση που παράγεται από το υδραυλικό σύστημα, το λειαντικό υλικό, οι ιδιότητες του τεμαχίου και οι συνθήκες κατεργασίας όσων αφορά την ταχύτητα πρόωσης και την απόσταση της κοπτικής κεφαλής από το τεμάχιο.

Ο τρόπος επίδρασης των παραμέτρων κατεργασίας φαίνεται παρακάτω:

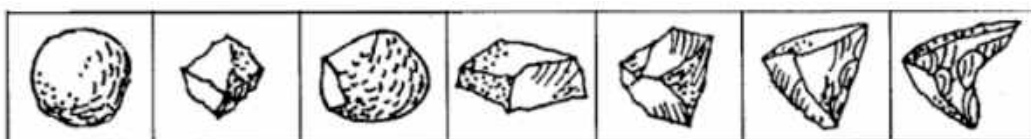
- Πίεση: Η πίεση αποτελεί βασική παράμετρο στην κατεργασία γιατί καθορίζει την κινητική ενέργεια της κοπτικής δέσμης, έχοντας αναλογική σχέση με το τελικό βάθος κοπής της κατεργασίας και τον ρυθμό αποβολής υλικού. Όσο μεγαλύτερη πίεση έχει η δέσμη, τόσο βαθύτερη κοπή επιτυγχάνεται συνεπώς και περισσότερη αποβολή υλικού.
- Ταχύτητα πρόωσης: Η ταχύτητα πρόωσης δρα καταλυτικά στην ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Καθορίζει τον χρόνο έκθεσης του τεμαχίου στην κοπτική δέσμη καθώς μικρές τιμές ταχύτητας πρόωσης επιτρέπουν μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων του λειαντικού υλικού να προσκρούσουν την επιφάνεια. Παράλληλα συντελεί σημαντικά στον ρυθμό αποβολής υλικού

αφού αυτός υπολογίζεται ως η ογκομετρική διαφορά του τεμαχίου πριν και μετά την κατεργασία προς τον χρόνο κοπής, που καθορίζεται από την ταχύτητα.

Material	Thickness (mm)						
	0.79	1.60	3.18	6.36	12.7	19.1	50.8
Ceramic matrix composites							
SiC fibre in SiC		1.1	0.6	0.45			
ZrO ₂ -MgO			0.8	0.7			
Al ₂ O ₃ /CoCrAl _y (80%/20%)			0.95	0.65			
Al ₂ O ₃ /CoCrAl _y (60%/40%)			0.95	0.65			
Al ₂ O ₃ /SiC (7.5%) (SiC abrasives)			2.7	1.4			
SiC/TiB ₂ (15%)			0.29	0.15			
Metal matrix composites							
Mg/B ₄ C (15%)	70	30	15	10		4	
Al/SiC (15%)	70		17	10	5		
Al/SiC (25%)				9.5	5		
Al/mullite (5%)	75	35	20	12	7.5	5	2.5
Al/Al ₂ O ₃ (15%)	65	28	15	8	4		
Organic matrix composites							
Carbon/carbon composites	42	32	22	13	7.5	4	0.85
Epoxy/glass composites	105	95	76	42	17	12	5
Graphite/epoxy composites	74	63	52	40	15	10	4.2

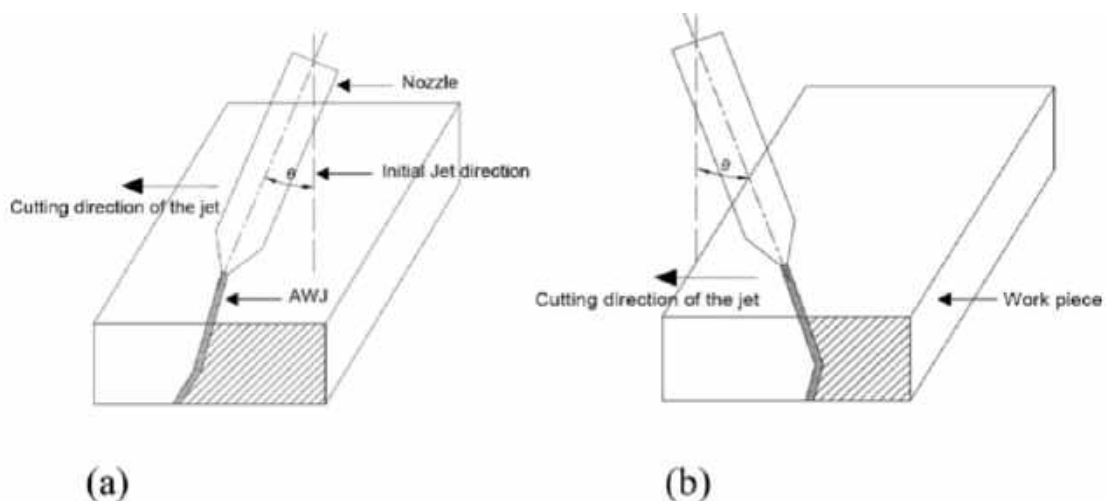
Εικόνα 1.7. Ταχύτητες κοπής για διαφορετικά πάχη σύνθετων υλικών [2].

- Λειαντικό: Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται ως λειαντικά σε κατεργασία αποξεστικής υδροκοπής είναι ο γρανάτης που αποτελεί φυσικό υλικό ή τεχνητά όπως καρβίδιο του πυριτίου και αλουμίνα. Τυπική μορφή κόκκων γρανάτη φαίνεται στην εικόνα 1.8. Το σχήμα, το μέγεθος και η σκληρότητα του λειαντικού υλικού έχει σημαντική επιρροή στον μηχανισμό αφαίρεσης υλικού κατά την κοπή. Γενικά όσο σκληρότερο είναι το υλικό του τεμαχίου, τόσο σκληρότερα λειαντικά πρέπει να χρησιμοποιούνται. Αυξάνοντας το μέγεθος των κόκκων μειώνεται το βάθος διεύθυνσης της κοπτικής δέσμης και ο ρυθμός αποβολής υλικού καθώς η συχνότητα πρόσκρουσης στην επιφάνεια του τεμαχίου φθίνει. Το μέγεθος των αποξεστικών σωματιδίων καθορίζεται από το mesh size (#) που δίνει μια συσχέτιση της μέσης διαμέτρου του κόκκου. Τα σωματίδια δεν πρέπει να ξεπερνάνε σε μέγεθος το μισό της διαφοράς των διαμέτρων του ακροφυσίου από πολύτιμους λίθους και του σωλήνα ανάμειξης [5].



Εικόνα 1.8. Τυπικά σχήματα σωματιδίων γρανάτη [52].

- Παροχή αποξεστικού υλικού: Η παροχή του αποξεστικού σε συνδυασμό με την πίεση της δέσμης νερού επιδρά στον ρυθμό αφαίρεσης υλικού. Η βέλτιστη παροχή συμβάλλει στην καλύτερη επίδοση της κοπής και στην καλή ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Τυπικές τιμές παροχής λειαντικού υλικού κυμαίνονται στο 10 - 15 % της παροχής του νερού [5].
- Απόσταση στομίου εκτόξευσης: Ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στο τεμάχιο και το στόμιο εκτόξευσης της κοπτικής δέσμης. Η απόσταση κυμαίνεται σε λίγα χιλιοστά και έχει μεγάλη επίδραση στο προφίλ κλίσης της κοπής.
- Γωνία πρόσκρουσης της δέσμης: Η γωνία αυτή σχετίζεται με την κλίση της κοπτικής κεφαλής ως προς την επιφάνεια κατεργασίας του τεμαχίου. Κάθε αλλαγή αυτής της γωνίας επηρεάζει τον τρόπο διάβρωσης του τεμαχίου. Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι κοπής ανάλογα με την γωνία πρόσκρουσης όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 1.9. Μεταβάλλοντας την γωνία κατάλληλα πετυχαίνεται μικρότερη κλίση στο αυλάκι, λιγότερες ραβδώσεις στην επιφάνεια κατεργασίας και η αποτελεσματική κοπή μαλακών και εύθραυστων υλικών.

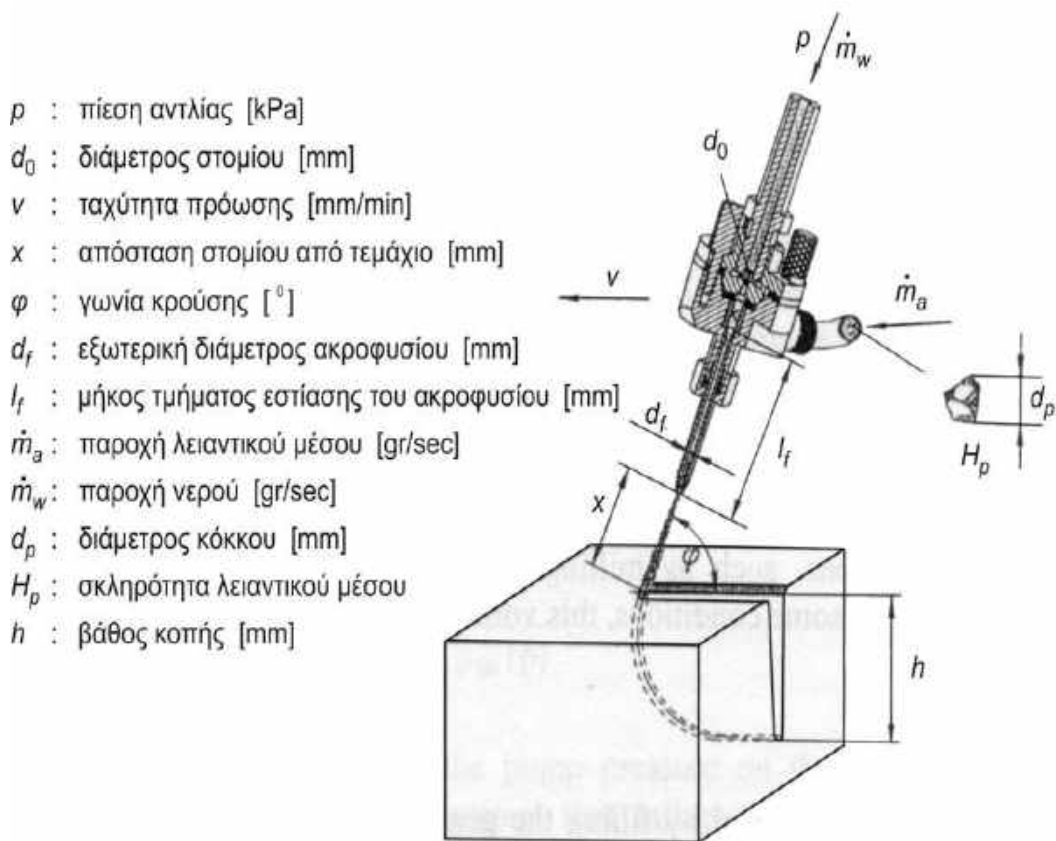


Εικόνα 1.9. (α) κατεύθυνση προς τα εμπρός
(β) κατεύθυνση αντίρροπη στην ταχύτητα πρόωσης [11].

- Τεμάχιο: Στην κοπή με AWJM χρησιμοποιούνται τεμάχια οποιουδήποτε μεγέθους και σχήματος. Κατεργάζονται τεμάχια απο καρβίδιο του βολφραμίου, κράματα τιτανίου, κεραμικά, ανοξείδωτο χάλυβα, συνθετικά, κτλ. Ο ουσιαστικός τρόπος επίδρασης του τεμαχίου στο τελικό αποτέλεσμα της κοπής είναι η σκληρότητα του. Ο σχηματισμός επιφάνειας με ραβδώσεις είναι εντονότερος σε ένα σκληρότερο υλικό συγκριτικά με ένα μαλακό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο βαθύτερα εισέρχεται η δέσμη στο τεμάχιο, τα σωματίδια χάνουν την κινητική τους

ενέργεια με αποτέλεσμα να μειώνεται η κοπτική τους ικανότητα. Έτσι, ενώ η κοπτική κεφαλή συνεχίζει να κινείται με σταθερή ταχύτητα πρόωσης αυξάνεται η γωνία κοπής της δέσμης ακτινικά με το τεμάχιο. Στο σκληρότερο υλικό το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο γιατί τα σωματίδια του λειαντικού υλικού χάνουν γρηγορότερα την κινητική τους ενέργεια, συνεπώς είναι πιο εμφανής ο σχηματισμός των ραβδώσεων [11].

Όπως λοιπόν φάνηκε από τα παραπάνω, η βελτιστοποίηση της κατεργασίας της αποξεστικής υδροκοπής εξαρτάται από μεγάλο αριθμό παραμέτρων που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα, την οικονομία και την ποιότητα της διαδικασίας. Οι παράμετροι αυτοί, κατηγοριοποιούνται σχηματικά παρακάτω :



Εικόνα 1.10. Σχηματική παράσταση παραμέτρων AWJM [51].

1.1.9. Πλεονεκτήματα υδροκοπής

Η κατεργασία AWJ βρίσκει εφαρμογές σε μεγάλη ποικιλία μεταλλικών και μη υλικών, όπως ο χυτοσίδηρος, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός, το τιτάνιο και τα κράματά του, οι ενανθρακωμένοι χάλυβες, οι χάλυβες εργαλείων, τα κεραμικά υλικά, τα σύνθετα υλικά κ.λπ.. Οι υψηλές ταχύτητες κοπής και η δυνατότητα κατεργασίας σε πολλές κατευθύνσεις, παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων διαμορφώσεων, με προκαθορισμένες ανοχές, χωρίς τη δημιουργία θερμοκρασιακών τάσεων ούτε μηχανικής παραμόρφωσης στα κατεργαζόμενα τεμάχια. Η προσαρμοστικότητα της κατεργασίας αυτής, την καθιστά ικανή να επιτύχει διεργασίες ανάλογες αυτών των παραδοσιακών μεθόδων, όπως η διάτρηση, το φρεζάρισμα, η τόννευση, η σπειροτόμηση, ο καθαρισμός κ.λπ.. Συνέπεια των παραπάνω είναι η απόρροια σημαντικών πλεονεκτημάτων έναντι των ‘παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας’. Ενδεικτικά ακολουθούν κάποια εξ αυτών:

➤ Κόβει σχεδόν κάθε υλικό

Επειδή τα water jets κόβουν χρησιμοποιώντας νερό και λειαντικά, μπορούν να εφαρμοστούν σε μια μεγάλη ποικιλία υλικών. Ένα από τα λίγα υλικά που δεν μπορεί να κοπεί με έναν εκτοξευτή νερού είναι ένα απλό στρώμα γυαλιού, το οποίο λόγω της πίεσης, μόλις ξεκινήσει η κοπή του, θα σπάσει σε μικρά κομμάτια.

➤ Γρήγορη εγκατάσταση και προγραμματισμός

Με μηχανική κατεργασία water jet, ένα επίπεδο υλικό τοποθετείται πάνω σε ένα τραπέζι και μία κοπτική κεφαλή κινείται κατά μήκος του υλικού. Για όλα τα υλικά χρησιμοποιείται η ίδια κοπτική κεφαλή (η μόνη αλλαγή είναι η χρήση λειαντικών ή μη), έτσι δεν χρειάζονται οι αλλαγές στη μηχανή. Ακόμη, η κίνηση της κεφαλής κατεργασίας ελέγχεται από υπολογιστή, το οποίο απλοποιεί σημαντικά τον έλεγχο του μηχανήματος της υδροκοπής.

➤ Δεν παράγεται σχεδόν καθόλου θερμότητα

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι είναι μία κρύα μέθοδος κατεργασίας. Σαν αντίθετο της θερμικής κατεργασίας, όλα τα υλικά που κόβονται με υδροκοπή δεν αναπτύσσουν θερμικές τάσεις. Το υλικό δεν βιώνει σχεδόν καμία μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Έτσι, οι επιφάνειες κοπής δεν σκληραίνουν

αφού δεν βάνονται και δεν υπάρχουν καθόλου επικαθήμενα ρινίσματα λιωμένου υλικού.

➤ Φιλικό προς το περιβάλλον

Το νερό είναι ένα καθαρό, φυσικό μέσο και οι ποσότητες νερού που χρησιμοποιούνται στην υδροκοπή μπορούν θεωρητικά να φιλτραριστούν και να καθαριστούν πριν ανακυκλωθούν ή πριν απορριφθούν στο περιβάλλον, έτσι ώστε το περιβάλλον να μην επιβαρύνεται καθόλου με ρύπανση από υγρά αλλά και από στερεά απόβλητα.

➤ Ακρίβεια κοπής

➤ Μικρό πλάτος κοπής

➤ Χωρίς επιφανειακή σκλήρυνση

➤ Χωρίς καπνούς, αναθυμιάσεις και σκόνες

➤ Μπορεί να κατεργαστεί τα περισσότερα υλικά χωρίς προδιάτρηση οπής

➤ Δεν απαιτείται δευτερεύουσα επεξεργασία μετά την κύρια κατεργασία.

➤ Ευελιξία στη παραγωγή [12].

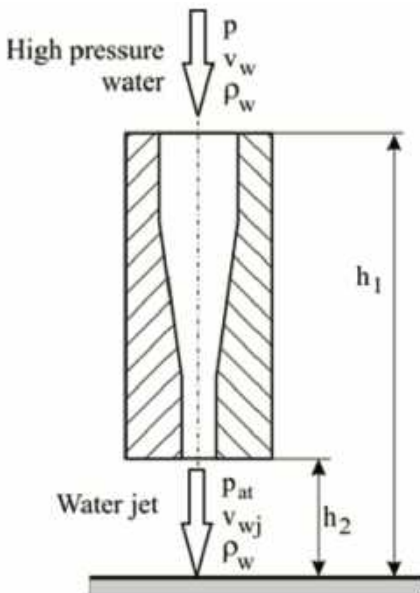
1.2. Μηχανική της υδροκοπής

1.2.1. Ενεργειακός ισολογισμός

Η εξίσωση του Bernoulli για την διατήρηση ενέργειας σε ιδανικό ρευστό δίνει:

$$p + \frac{\rho_w v_w^2}{2} + \rho_w g h = \text{const} \quad (1)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση πριν και μετά το ακροφύσιο του waterjet (orifice) θεωρώντας την υψομετρική διαφορά μερικών mm αμελητέα, την ταχύτητα εισόδου του νερού πολύ μικρότερη από την ταχύτητα εξόδου της δέσμης και την ατμοσφαιρική πίεση 1 bar πολύ μικρότερη από την πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου (~ 4000 bar), προκύπτει η ταχύτητα εξόδου της δέσμης.



$$p + \frac{\rho_w v_w^2}{2} + \rho_w g h_1 = p_{at} + \frac{\rho_w v_{wj}^2}{2} + \rho_w g h_2$$

$$p - p_{at} = \frac{1}{2} \rho_w (v_{wj}^2 - v_w^2) + \rho_w g (h_2 - h_1)$$

θεωρώντας $p_{at} \ll p$, $v_{wj} \gg v_w$, $h_1 \approx h_2$

προκύπτει
$$p = \frac{1}{2} \rho_w v_{wj}^2 \quad (2)$$

$$v_{wj} = \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (3)$$

Εικόνα 1.11. Εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli πριν και αμέσως μετά την διαμόρφωση υπερηχητικής δέσμης [13].

Λαμβάνοντας τον συντελεστή ταχύτητας - $C_v \sim (0.9 - 0.98)$ η σχέση (3) γίνεται:

$$v_{wj} = c_v \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (4)$$

Η παροχή όγκου του νερού δίνεται απο την σχέση:

$$q_w = A_{orifice} v_{wj} \quad (5)$$

Βάση της σχέσης (4) της ταχύτητας, προκύπτει:

όπου d_o η διάμετρος του orifice.

$$q_w = \frac{\pi}{4} d_o^2 c_v \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (6)$$

Η υδραυλική ισχύς:

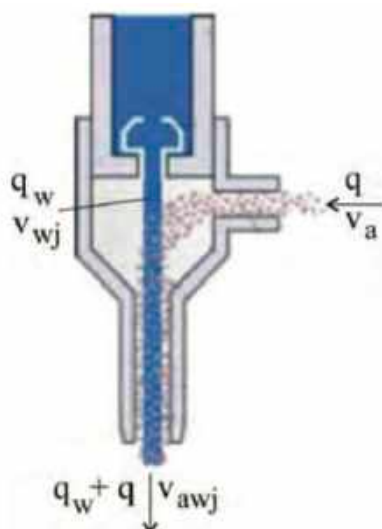
$$P_{wj} = q_w p$$

όπου p η υδραυλική πίεση

Με αντικατάσταση απο την σχέση παροχής όγκου (6) , προκύπτει:

$$P_{wj} = \frac{\pi}{4} d_o^2 c_v \sqrt{\frac{2p^3}{\rho_w}} \quad (7)$$

Καθώς η υπερηχητική δέσμη περνάει στον σωλήνα ανάμειξης, δημιουργείται υποπίεση και εισέρχονται τα αποξεστικά σωματίδια εντός του σωλήνα ανάμειξης. Κατά την ανάμειξη, ορμή και ενέργεια μεταφέρεται απο την δέσμη στους κόκκους και σταδιακά επιταχύνονται. Εφαρμόζοντας τον νόμο διατήρησης ορμής υπολογίζεται η ταχύτητα εξόδου της δέσμης. Η ταχύτητα του αποξεστικού όταν εισέρχεται στον θάλαμο ανάμειξης έχει πολυ χαμηλή τιμή οπότε η ορμή του αμελείται [13].



$$q_w v_{wj} + q v_a = (q_w + q) v_{awj}$$

$$v_{awj} = \frac{q_w}{q_w + q} v_{wj}$$

$$v_{awj} = \frac{v_{wj}}{1 + \frac{q}{q_w}} \quad (8)$$

Εικόνα 1.12. Διαδικασία ανάμειξης [13].

Κατά την διαδικασία ανάμειξης συμβαίνει απώλεια ορμής αφού τα σωματίδια συγκρούονται επανειλημμένα με την δέσμη νερού στο εσωτερικό τοίχωμα του στομίου συνεπώς διορθωμένη η έκφραση της ταχύτητας της αποξεστικής κοπτικής δέσμης που προκύπτει είναι:

$$v_{awj} = \eta \frac{v_{wj}}{1 + \frac{q}{q_w}} \quad (9)$$

όπου η - συντελεστής απώλειας ορμής με τιμές $\sim 0.65 - 0.85$ και όπου q η παροχή όγκου του αποξεστικού .

Η παροχή του αποξεστικού, καθορίζει τον αριθμό των σωματιδίων που προσκρούονται στο τεμάχιο τελικά, καθώς και την κινητική τους ενέργεια. Η έκφραση της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων είναι η ακόλουθη:

$$E_{awj} = \frac{1}{2} q v_{awj} = \frac{1}{2} q \eta^2 \frac{v_{wj}^2}{\left(1 + \frac{q}{q_{wj}}\right)^2} \quad (10)$$

Συνδυασμός της σχέσης (10) με την σχέση (4) για την ταχύτητα δίνει την απαραίτητη ενέργεια των αποξεστικών σωματιδίων για να ξεπεράσουν την οριακή τιμή ενέργειας φθοράς του κατεργαζόμενου τεμαχίου [13].

$$E_{awj} = \frac{1}{2} q \eta^2 c_v^2 \frac{2p}{\rho_v} \frac{q_{wj}^2}{(q_{wj} + q)^2} \quad (11)$$

1.2.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη υδροκοπής

- παροχή μάζας νερού

$$m_w = \rho_w q_w \quad (12)$$

- παροχή αποξεστικού

$$m_a = R m_w \quad (13)$$

- Διάμετρος ακροφυσίου waterjet (waterjet orifice)

$$d_o = \sqrt{\frac{q}{c_d \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}}}} \quad (14)$$

- Διάμετρος στομίου

$$2.5d_o \leq d_f \leq 3d_o \quad (15)$$

- Διάμετρος κοπτικής δέσμης

$$d_{awj} \approx 1.1d_f \quad (16)$$

- Πυκνότητα ισχύος

$$P_d = \frac{P_a}{\frac{\pi d_{awj}^2}{4}} \quad (17)$$

- Ταχύτητα πρόωσης

$$v_f = \left(\frac{f_a N_m p^{1.594} d_o^{1.374} m_a^{0.343}}{788 i h d_f^{0.618}} \right)^{1.15} \quad (18)$$

- Χρόνος κατεργασίας

$$t_m = \frac{L}{v_f} \quad (19)$$

- Κατανάλωση αποξεστικού

$$C_a = m_a t_m \quad (20)$$

- Κόστος κατεργασίας

$$C_m = c_h \cdot t_m \quad (21)$$

Όπου P_a η κινητική ενέργεια της αποξεστικής δέσμης, ρ_w πυκνότητα νερού, f_a - παράγοντας αποξεστικού, h - πάχος τεμαχίου, N_m - βαθμός κατεργασιμότητας, i - δείκτης ποιότητας, L -

μήκος κοπής, c_h - κόστος κατεργασίας ανά ώρα, R - φόρτιση μάζας λειαντικού (abrasive mass loading $R=0.12-0.17$), c_d - συντελεστής εκροών, [14, 9].

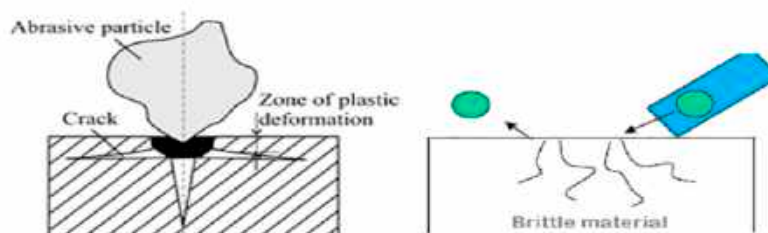
1.2.3. Μικρο - μηχανισμός αφαίρεσης υλικού

1.2.3.1. Γενικά

Η μηχανική της υδροκοπής, στηρίζεται στην μετάδοση ενέργειας και ορμής απο την δέσμη του νερού στους κόκκους του λειαντικού υλικού ώστε να δημιουργηθεί μια λειαντική δέσμη όπου με διάβρωση αφαιρεί υλικό απο το τεμάχιο που βρίσκεται υπό κατεργασία. Στην πραγματικότητα για την αφαίρεση υλικού συμβάλλουν δυο διαδικασίες που συμβαίνουν ταυτόχρονα. Αφ'ενός γίνεται αφαίρεση υλικού κατά την κρούση των κόκκων του λειαντικού υλικού με ψαθυρή θραύση αλλά παράλληλα, προκαλείται πλαστική παραμόρφωση και διείδυση της δέσμης στην μάζα του υλικού με εκτόπιση του. Ο βαθμός στον οποίο συμβάλλει ο κάθε μηχανισμός εξαρτάται απο παράγοντες όπως η κινητική ενέργεια των σωματιδίων, η γεωμετρία τους, οι μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου και οι συνθήκες περιβάλλοντος. Όσον αφορά το τεμάχιο και πως καθορίζει την επίδραση της σύγκρουσης των κόκκων, ξεχωρίζουμε δυο κατηγορίες, τα όλκιμα υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται απο την ικανότητα τους να παραμορφώνονται και τα ψαθυρά. Για τα όλκιμα υλικά οι δυο μηχανισμοί που ενεργούν είναι η μικροκοπή και η πλαστική παραμόρφωση ενώ για τα ψαθυρά υλικά, ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού αποτελείται απο την δημιουργία και διάδοση ρωγμών κατά την κρούση των λειαντικών σωματιδίων και την πλαστική παραμόρφωση που προκαλείται όπως φαίνεται στην εικόνα 1.14. [15].



Εικόνα 1.13. Επίδραση των λειαντικών σωματιδίων σε όλκιμο υλικό [15]



Εικόνα 1.14. Επίδραση των λειαντικών σωματιδίων σε ψαθυρό υλικό [15].

1.2.3.2. Ρυθμός αποβολής υλικού

Ο ρυθμός αποβολής υλικού (MRR) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \chi Z d^3 v^{3/2} \left(\frac{\rho}{12 H_w} \right)^{3/4} \quad (22)$$

όπου Z ο αριθμός των προσπιπτόντων λειαντικών κόκκων ανά μονάδα χρόνου, d η μέση διάμετρος κόκκου, v η ταχύτητα πρόσπτωσης, ρ η πυκνότητα κόκκων, H_w η σκληρότητα του υλικού τεμαχίου (ανάλογη προς το όριο διαρροής του), χ σταθερά [16].

1.2.4. Μηχανισμός διάβρωσης για όλκιμα υλικά

1.2.4.1. Μοντέλο μικροκοπής για όλκιμα υλικά

Ο Finnie μελέτησε την διαδικασία μικροκοπής στα όλκιμα υλικά, συσχετίζοντας την με την πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Έχοντας υπολογίσει κινηματικά την τροχιά ενός σωματιδίου κατέληξε στην σχέση αποβολής στοιχειώδους όγκου από το τεμάχιο κατά την πρόσκρουση ενός σωματιδίου. Ανάλογα με την γωνία πρόσκρουσης του αποξεστικού σωματιδίου στο τεμάχιο διατύπωσε τις ακόλουθες δυο σχέσεις:

$$V_s = \frac{m_p v^2}{\sigma \phi K} \left(\sin 2a - \frac{6}{k} \sin^2 a \right) \quad \tan a \leq \frac{K}{6} \quad (23)$$

$$V_s = \frac{m_p v^2}{\sigma \phi K} \left(\frac{K \cos^2 a}{6} \right) \quad \tan a \geq \frac{K}{6} \quad (24)$$

Όπου V_s ο όγκος του υλικού που αποβάλλει ένα σωματίδιο από το τεμάχιο, v η ταχύτητα και m_p η μάζα του σωματιδίου, σ το όριο διαρροής του υλικού του τεμαχίου, ϕ ο λόγος του βάθους επαφής προς το βάθος κοπής, K ο λόγος της κατακόρυφης προς την οριζόντια δύναμη και a η γωνία πρόσκρουσης του σωματιδίου. Τα K και ϕ λαμβάνονται συνήθως ως σταθερές με την τιμή 2 [17].

1.2.4.2. Μοντέλα παραμόρφωσης για όγκιμα υλικά

Ο Bitter θεώρησε δυο βασικούς τρόπους φθοράς όγκιμων υλικών, την μικροκοπή όπως και ο Finnie αλλά και την παραμόρφωση που προκαλείται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο απο την επαναλαμβανόμενη πρόσκρουση των αποξεστικών σωματιδίων. Η μια μορφή προκαλείται απο την επαναλαμβανόμενη παραμόρφωση λόγω συγκρούσεων και η άλλη απο την κοπτική δράση των ελεύθερα κινουμένων σωματιδίων. Έτσι, συνυπολογίζοντας και τους δυο τρόπους φθοράς μοντελοποίησε την διάβρωση ως την απορροφούμενη κινητική ενέργεια των αποξεστικών σωματιδίων απο το τεμάχιο. Οι δυο σχέσεις αποβολής όγκου που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες:

$$V_D = \frac{\frac{1}{2}m_p(v \sin a - v_{el})^2}{\epsilon_D} \quad (25)$$

$$V_{C1} = \frac{2m_p C (v \sin a - v_{el})^2}{\sqrt{v \sin a}} \left(v \cos a - \frac{C (v \sin a - v_{el})^2}{\sqrt{v \sin a}} \epsilon_C \right) \quad (26)$$

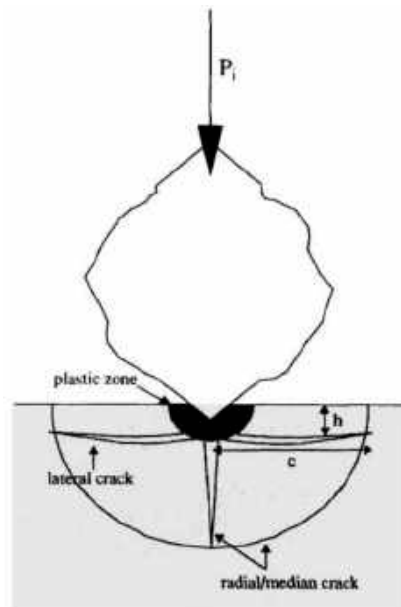
$$V_{C2} = \frac{\frac{1}{2}m_p \left(v^2 \cos^2 a - K_1 (v \sin a - v_{el})^{3/2} \right)}{\epsilon_C} \quad (27)$$

Όπου, V_D ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται λόγω παραμόρφωσης, V_{C1} και V_{C2} ο όγκος που αποβάλλεται απο το τεμάχιο απο την κοπτική δράση των αποξεστικών σωματιδίων, m_p η μάζα ενός σωματιδίου, v η ταχύτητα του, a η γωνία πρόσκρουσης, v_{el} η μέγιστη ταχύτητα του σωματιδίου για την οποία η σύγκρουση είναι πλήρως ελαστική, ϵ_D και ϵ_C οι παράγοντες παραμόρφωσης και κοπής, C και K_1 σταθερές. Εάν $a \leq a_0$ χρησιμοποιείται η πρώτη σχέση αντίθετα, η δεύτερη, όπου a_0 η γωνία πρόσκρουσης για την οποία η συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας γίνεται μηδέν όταν τα σωματίδια φύγουν απο το τεμάχιο. Καθώς και οι δυο μορφές φθοράς συμβαίνουν ταυτόχρονα κατά την κοπή, ο συνολικός όγκος που αποβάλλεται απο ενα σωματίδιο είναι [18, 19] :

$$V_t = V_D + V_{C1} \quad \text{ή} \quad V_t = V_D + V_{C2} \quad (28)$$

1.2.5. Μηχανισμός διάβρωσης για ψαθυρά υλικά

Στα ψαθυρά υλικά, όταν ένα σωματίδιο προσκρούει στην επιφάνεια του τεμαχίου, εφόσον η ενέργεια του είναι υψηλότερη από μια κρίσιμη τιμή, συμβαίνει τοπική πλαστική παραμόρφωση στο σημείο επαφής. Στην συνέχεια ρωγμές σχηματίζονται πλευρικά και ακτινικά από τον κρατήρα και αφαιρείται υλικό από το τεμάχιο με την μετάδοση των ρωγμών αυτών.



Εικόνα 1.15. Διάδοση μικρο - ρωγμών [20].

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένα πειραματικά μοντέλα που συμφωνούν για την διατύπωση της αποβολής όγκου του τεμαχίου ως συνάρτηση της ταχύτητας v , της διαμέτρου d_p , και της πυκνότητας ρ_p του σωματιδίου που προσπίπτει στην επιφάνεια του τεμαχίου, όπως και της δυσθραυστότητας K_C και σκληρότητας H του τεμαχίου.

$$V \propto v^{e1} d_p^{e2} \rho_p^{e3} K_C^{e4} H^{e5} \quad (29)$$

Researcher	Year	$V \propto$	Particle and Material Properties Exponents				
Evans et. al. [53]	1978		$v^{19/6}$	$d_p^{11/3}$	$\rho_p^{1/4}$	$K_c^{-4/3}$	$H^{1/4}$
Ruff and Wiederhorn [80]	1979		$v^{22/9}$	$d_p^{11/3}$	$\rho_p^{11/9}$	$K_c^{-4/3}$	$H^{1/9}$
Marshall et. al. [79]	1982		$V^{7/3}$	$d_p^{7/2}$	$\rho_p^{7/6}$	K_c^{-1}	$H^{17/12}$
Wiederhorn and Hokey [81]	1983		$V^{2.8}$	$d_p^{3.9}$	$\rho_p^{1.4}$	$K_c^{-1.9}$	$H^{-0.48}$

Εικόνα 1.16. Πίνακας βασικών μοντέλων διάβρωσης για πρόσκρουση ενός σωματιδίου σε ψαθυρό υλικό [20].

1.2.6. Σχέσεις ρυθμού διάβρωσης

Εάν οριστεί ο ρυθμός διάβρωσης ως ο λόγος της αποβαλλόμενης μάζας από το τεμάχιο προς την μάζα των αποξεστικών σωματιδίων που προσκρούουν στην επιφάνεια και αφαιρούν το υλικό, προκύπτουν οι δυο διατυπώσεις ανάλογα με το είδος του υλικού του τεμαχίου, όλκιμο ή ψαθυρό [20].

$$E_r = \frac{\text{ΜΑΖΑ ΥΛΙΚΟΥ ΠΟΥ ΑΦΑΙΡΕΙΤΑΙ}}{\text{ΜΑΖΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΚΡΟΥΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ}}$$

Ο Hutchings πρότεινε την ακόλουθη σχέση για τα όλκιμα υλικά [21]:

$$E_r = \frac{K_2 \rho_p^{1/2} v^3}{\epsilon_c^2 H^{3/2}} \quad (30)$$

όπου ρ_p είναι η πυκνότητα του σωματιδίου, v η ταχύτητα του, H η σκληρότητα του τεμαχίου, ρ η πυκνότητα του τεμαχίου, K_2 συντελεστής φθοράς (για μέταλλα 0.1 - .005), ϵ_c η κρίσιμη τιμή πλαστικής παραμόρφωσης για την οποία αφαιρείται υλικό.

Ενώ οι Zeng και Kim πρότειναν το ακόλουθο μοντέλο για την διάβρωση ψαθυρών κεραμικών υλικών [22]:

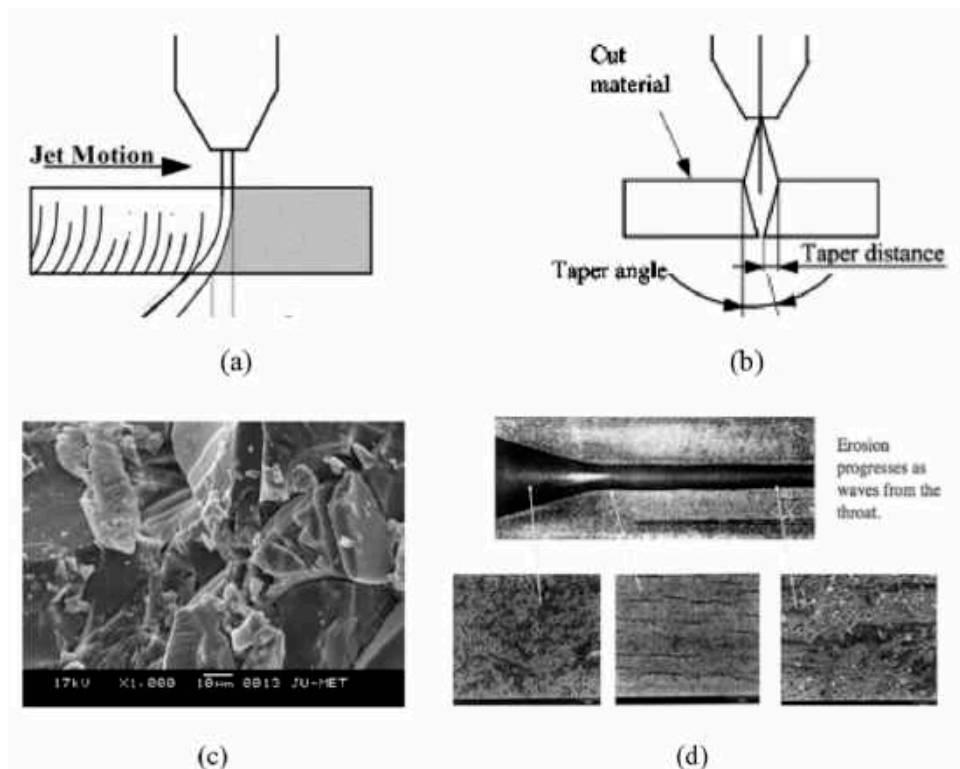
$$E_r = C \left[\frac{f_w \beta \alpha \rho m v^2 \sin^2 a}{3\gamma E} + \frac{\rho m v^2}{4\sigma} \left(\sin 2a - 4 \sin^2 a + 38.12 v \sin^3 a \sqrt{\frac{\rho_p}{\sigma}} \right) \right] \quad (31)$$

όπου, C συντελεστής αποτελεσματικότητας, f_w αναλογικός συντελεστής, β συνάρτηση του λόγου Poisson του υλικού του τεμαχίου, σ target material flow stress, ρ η πυκνότητα του υλικού του τεμαχίου, ρ_p η πυκνότητα του σωματιδίου, a η γωνία πρόσκρουσης του σωματιδίου, E το μέτρο ελαστικότητας του τεμαχίου, σ η τάση ροής του τεμαχίου και γ η ενέργεια θραύσης ανά χωρική μονάδα.

1.3. Ελαττώματα

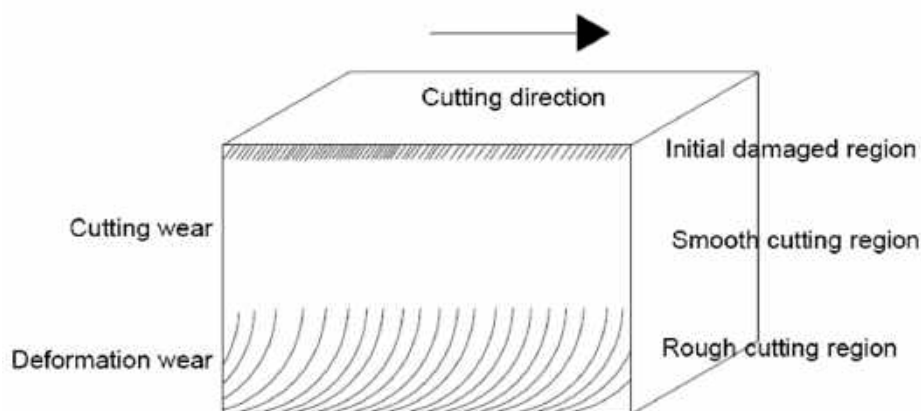
1.3.1. Ποιότητα κοπής

Η ποιότητα της κοπής διαφαίνεται από την τελική μορφή του τεμαχίου μετά την κατεργασία. Τυπικά ελαττώματα που προκύπτουν είναι ο σχηματισμός ραβδώσεων στην κατεργαζόμενη επιφάνεια κατά την κοπή, η διαμόρφωση αυλακίων με κλίση (kerf taper formation), η ‘μόλυνση’ του τεμαχίου από εναπομείνοντα αποξεστικά σωματίδια (abrasive particles contamination) και η πρόωρη φθορά του ακροφυσίου σε διαφορετικά σημεία. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα του τελικού αποτελέσματος, σκόπιμο είναι η επιλογή παραμέτρων κατεργασίας όπως επίσης και των σταθερών συνθηκών κατεργασίας (σχεδιασμός στομίου εκτόξευσης κλπ) κατά τον βέλτιστο τρόπο. Αυτό γίνεται με γνώμονα την καλύτερη απόκριση των παραμέτρων στην τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας, στα χαρακτηριστικά της κοπής όσον αφορά το πλάτος στην είσοδο και έξοδο της κοπτικής δέσμης για διαμπερές κοπές, την κλίση του αυλακιού της κοπής, το βάθος κοπής, την γεωμετρική ακρίβεια της κοπής και τον ρυθμό αποβολής υλικού.



Εικόνα 1.17. Τυπικά ελαττώματα (α) σχηματισμός ραβδώσεων
(β) kerf taper formation
(γ) abrasive particle contamination
(δ) φθορά ακροφυσίου [11].

Η κατεργαζόμενη επιφάνεια, χωρίζεται σε τρία επίπεδα όπως φαίνονται στη εικόνα 1.18 όσον αφορά την ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας και σε δυο βασικούς μηχανισμούς φθοράς. Το πρώτο επίπεδο, χαρακτηρίζεται απο υψηλή τραχύτητα και κακή ποιότητα επιφάνειας γεγονός που οφείλεται στην δραστική αλλαγή της κινητικής ενέργειας κατά την πρόσκρουση της δέσμης στην επιφάνεια. Γι αυτό στις πειραματικές διαδικασίες προκειμένου να ληφθούν έγκυρες τιμές για την απόκριση της τραχύτητας στην κατεργαζόμενη επιφάνεια, οι μέτρησεις λαμβάνονται καποια χιλιοστά κάτω απο την επιφάνεια του τεμαχίου, προς αποφυγή της αρχική επιφάνειας φθοράς. Μετά την αρχική επιφάνεια φθοράς ακολουθεί η ομαλή επιφάνεια κοπής και όσο η δέσμη προχωράει σε μεγαλύτερα βάθη κοπής η κινητική ενέργεια πέφτει με αποτέλεσμα οι λειαντικοί κόκκοι να χάνουν την κοπτική τους ικανότητα δημιουργώντας ραβδώσεις έντονης τραχύτητας στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Έτσι όσο βαθύτερα διεισδύει η κοπτική δέσμη, η αφαίρεση υλικού αλλάζει απο κοπή της επιφάνειας σε μηχανισμό παραμόρφωσης.



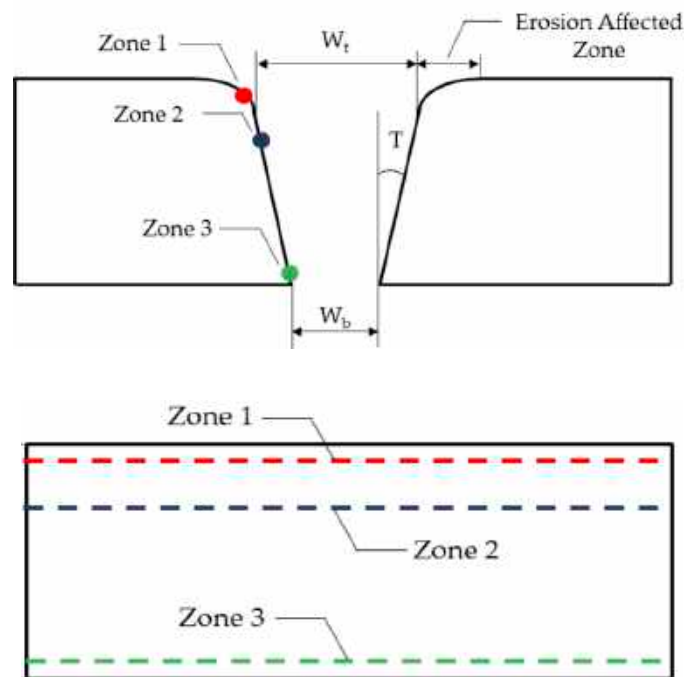
Εικόνα 1.18. Μορφή της κατεργαζόμενης επιφάνειας [11].

1.3.2. Σχηματισμός κλίσης αυλακιών (kerf taper formation)

Σύνηθες ελάττωμα κατά την κατεργασία τεμαχίων με AWJM είναι η κλίση που δημιουργείται στα τοιχώματα του αυλακιού που ανοίγει η κοπτική δέσμη με αποτέλεσμα τα διαφορετικά πλάτη στην είσοδο και έξοδο του τζετ. Το φαινόμενο δημιουργείται λόγω της σταδιακής πτώσης της κινητικής ενέργειας της δέσμης, και ζητούμενο είναι η επιλογή παραμέτρων κατεργασίας ώστε η κλίση αυτή να ελαχιστοποιείται. Αυξάνοντας την ταχύτητα πρόωσης της κοπτικής κεφαλής, το τεμάχιο είναι λιγότερη ώρα εκτεθειμένο στην κοπτική δέσμη συνεπώς λιγότερα αποξεστικά σωματίδια προσπίπτουν στην επιφάνεια του τεμαχίου δημιουργώντας πιο απότομο αυλάκι [23]. Όσο η απόσταση του ακροφυσίου μεγαλώνει η δέσμη χάνει την συνεκτικότητα της που οδηγεί σε αύξηση

της διαμέτρου της και της κλίσης T . Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην είσοδο του τζετ [24]. Αυξάνοντας την πίεση πάλι αυξάνεται η κλίση T εντονότερα όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του τεμαχίου [25]. Η έκφραση της κλίσης T φαίνεται στην σχέση (32) ως συνάρτηση του άνω πλάτους W_t , κάτω πλάτους W_b και πάχους του τεμαχίου t .

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{W_t - W_b}{2t} \right) \quad (32)$$



Εικόνα 1.19. Σχηματισμός επιφανειών με κλίση [26].

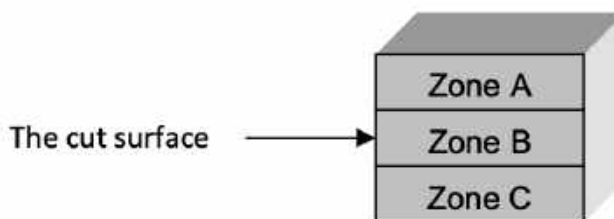
1.3.2. Το φαινόμενο προσκόλλησης σωματιδίων - (particles contamination)

Κατά την κρούση των σωματιδίων του λειαντικού υλικού συμβαίνει το φαινόμενο particles contamination όπου οι κόκκοι σπάνε σε μικρότερα κομμάτια ‘μολύνοντας’ το τεμάχιο αφού τμήμα τους αφομοιώνεται από το υλικό του τεμαχίου ως συσσωμάτωμα. Όσο μεγαλώνει το βάθος κοπής τόσο πέφτει η κινητική ενέργεια της δέσμης και μεγαλώνει η ‘μόλυνση’ των σωματιδίων. Πολλά πειράματα έχουν γίνει με σκοπό την ελαχιστοποίηση του φαινομένου, έχοντας ως μέτρο μόλυνσης της κατεργαζόμενης επιφάνειας των αριθμό των σωματιδίων που παραμένουν προσκολλημένα

πάνω της. Τρεις περιοχές ξεχωρίζουν για την ανάλυση του φαινομένου ανάλογα με το βάθος κοπής. Οι Khan και Ali έδειξαν ότι η μικρότερη ενσωμάτωση κόκκων παρατηρείται στην περιοχή μέσου βάθους κοπής ενώ στο βαθύτερο τμήμα της κοπής παρατηρείται ο μέγιστος αριθμός σωματιδίων [27]. Όσο η παροχή των αποξεστικών σωματιδίων αυξάνεται, τόσο αυξάνεται το φαινόμενο της μόλυνσης, αντίστοιχα επιδρά και η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης της κοπτικής κεφαλής, ενώ αύξηση της πίεσης προκαλεί μείωση του φαινομένου. Οι Chen et al. διεξήγαγαν πειράματα στρέφοντας την κοπτική κεφαλή κατά ορισμένες μοίρες κατά την διάρκεια πρόωσης της (oscillation technique). Έτσι το φαινόμενο particles contamination μειώνεται κατά 200 % συγκριτικά με την τυπική διάταξη κοπής με AWJM. Αυτό συμβαίνει καθώς η κοπτική δέσμη 'σκανάρει' την επιφάνεια κοπής απομακρύνοντας έτσι σωματίδια ελαφρώς ενσωματωμένα στο τεμάχιο [28]. Ο Patel χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική, έδειξε ότι το φαινόμενο μειώνεται έως και πέντε φορές σε τεμάχια από όλκιμα υλικά, ενώ μελέτες εστιάζουν ως τελείως εναλλακτική λύση την χρήση σωματιδίων πάγου (icejet) για αποξεστικό υλικό και πλήρη αποφυγή του φαινομένου [29].



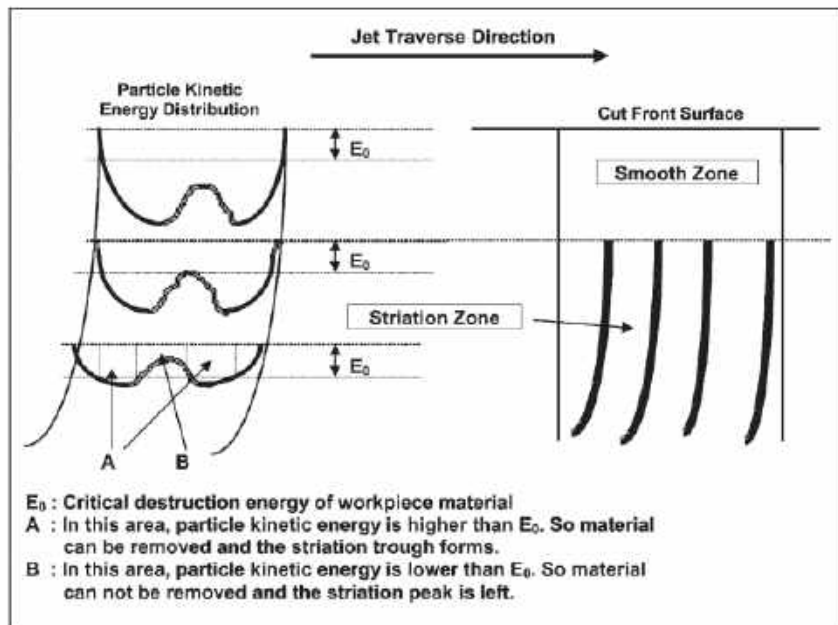
Εικόνα 1.20. Περιεκτικότητα σωματιδίων στις τρεις ζώνες μελέτης της κατεργαζόμενης επιφάνειας [27].



Εικόνα 1.21. Οι τρεις περιοχές ανάλυσης του φαινομένου [27].

1.3.3. Σχηματισμός ραβδώσεων

Ο σχηματισμός ραβδώσεων και επιφάνειας με κυματοειδή προφίλ είναι κάτι το εξαιρετικά σύνηθες μετά την κοπή τεμαχίων με AWJM. Δεν υπάρχει καθολική άποψη για την αιτία δημιουργίας του φαινομένου όμως φαίνεται να εντείνεται όσο ο λόγος της απαραίτητης ενέργειας φθοράς του τεμαχίου προς την παρεχόμενη ενέργεια κοπής της δέσμης φθίνει. Όσο βαθύτερα εισέρχεται η κοπτική δέσμη τόσο ελαττώνεται η ενέργεια της με αποτέλεσμα τον σχηματισμό δυο κύριων περιοχών κατεργαζόμενης επιφάνειας. Στην πρώτη περιοχή η μόνη 'ανωμαλία' είναι η αναμενόμενη επιφανειακή τραχύτητα ενώ στην δεύτερη κυρίαρχο ρόλο παίζει το φαινόμενο που προκαλεί τις ραβδώσεις [30]. Οι Chen et al. μελέτησαν ως κύριο παράγοντα για την δημιουργία του φαινομένου καταρχήν την διακύμανση της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων του λειαντικού υλικού που έχει κυματοειδή μορφή (εικόνα 1.23). Σε δεύτερη φάση, την αστάθεια που παρουσιάζεται στις παραμέτρους κατεργασίας, πίεση, παροχή λειαντικού και ταχύτητα πρόωσης, στην ταλάντωση του τεμαχίου και του ακροφυσίου, καθώς και στις δονήσεις της κοπτικής κεφαλής που οφείλονται στο σύστημα προώσεως. Έτσι όσο το βάθος κοπής μεγαλώνει τόσο τα σωματίδια χάνουν την κοπτική τους ικανότητα, καθώς όμως το προφίλ ενέργειας τους δεν είναι σταθερό αλλά μεταβαλλόμενο κυματοειδώς, δεν χάνουν την ενέργεια τους με τον ίδιο ρυθμό. Αυτός είναι ο βασικός μηχανισμός δημιουργίας των ραβδώσεων, αφού τα σωματίδια που χάνουν πρώτα την ικανότητα τους να κόψουν υλικό απο το τεμάχιο 'ακολουθούν' το μέτωπο δέσμης των σωματιδίων που ακόμα έχουν υψηλή ενέργεια. Μακροσκοπικά το φαινόμενο σκιαγραφείται με την γωνία δ (drag angle) εικόνα 1.24. η οποία εξαρτάται απο την ταχύτητα πρόωσης και τον κατακόρυφο ρυθμό εισχώρησης της δέσμης στο τεμάχιο, έτσι καθώς ο ρυθμός εισχώρησης φθίνει με το βάθος και η ταχύτητα πρόωσης παραμένει σταθερή δημιουργείται ο κυματοειδής σχηματισμός της επιφάνειας. Οι Fukunishi et al. έδειξαν αριθμητικά οτι εφόσον τα σωματίδια του λειαντικού υλικού εκτοξεύονται με την κοπτική δέσμη με ισοκατανομή της ενέργειας τους, το φαινόμενο δεν δημιουργείται [31]. Οι Siores et al. αλλάζοντας την γωνία πρόσπτωσης της δέσμης κατά την διάρκεια της κοπής (oscillation technique), με σταθερή ταχύτητα πρόωσης έδειξαν οτι η πρώτη περιοχή με ομαλή επιφάνεια αυξήθηκε κατά 30 % για κεραμικά υλικά και παραπάνω απο 40 % για μαλακό σίδηρο. Επιπλέον τόσο η γωνία δ (drag angle) όσο και η συχνότητα των ραβδώσεων στην κατεργαζόμενη επιφάνεια μειώθηκαν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός οτι ταλαντεύοντας την κοπτική κεφαλή κατά την διάρκεια της κοπής περιοδικά με σταθερή γωνιακή ταχύτητα η κοπτική δέσμη σαρώνει το αυλάκι κοπής δίνοντας την δυνατότητα στα σωματίδια να προσκρούσουν ομοιόμορφα όσον αφορά την κατανομή της κινητικής τους ενέργειας [32].



Εικόνα 1.22. Σχηματική περιγραφή δημιουργίας ραβδώσεων [30].

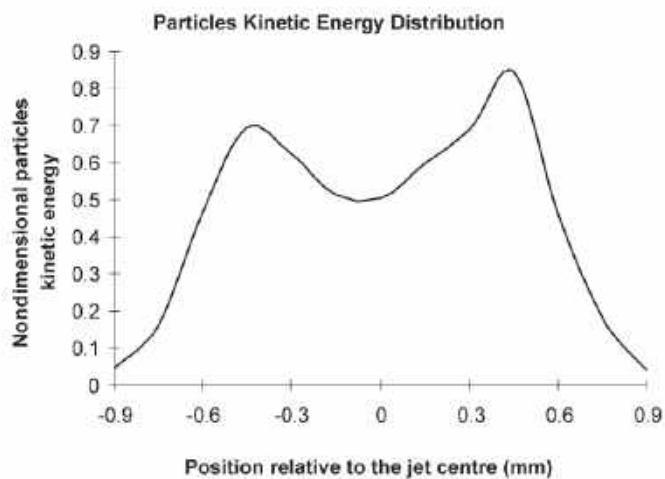
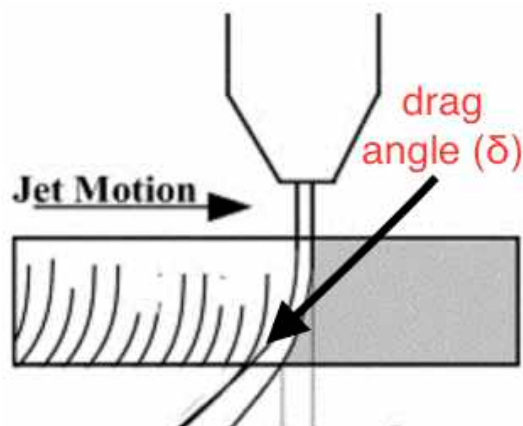


Fig. 5. Particle kinetic energy distribution across the jet section.

Εικόνα 1.23. Κατανομή κινητικής ενέργειας σωματιδίων στο προφίλ της δέσμης [30]



Εικόνα 1.24. Δημιουργία drag angle [11].

1.3.4. Φθορά στομίου εκτόξευσης

Το ακροφύσιο είναι το εξάρτημα με την μικρότερη διάρκεια ζωής και μεγαλύτερη σημασία αφού καθορίζει άμεσα την ακρίβεια, απόδοση και οικονομική επιβάρυνση της κατεργασίας. Συνεπώς η φθορά του ακροφυσίου οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας και δημιουργεί ανεπιθύμητες αλλαγές στην γεωμετρία του τεμαχίου. Προκειμένου να διαπιστωθεί η διάρκεια ζωής του εκάστοτε ακροφυσίου χρησιμοποιούνται δυο ειδών τεστ φθοράς. Το επιταχυνόμενο τεστ φθοράς, όπου χρησιμοποιούνται είτε στόμια εκτόξευσης απο μαλακά υλικά είτε σκληρά αποξεστικά σωματίδια όπως κορούνδιο ή καρβίδιο του πυριτίου επιταχύνοντας έτσι την διαδικασία φθοράς, ή το τυπικό τεστ φθοράς όπου παρακολουθείται η πορεία φθοράς και η διάρκεια ζωής στομίων σε κανονική χρήση με συνθήκες βιομηχανικής παραγωγής. Ο μηχανισμός φθοράς του ακροφυσίου περιγράφεται απο το διαβρωτικό και αποξεστικό περιβάλλον που προκαλούν τα λειαντικά σωματίδια κατά την επιτάχυνση τους εντός του σωλήνα ανάμειξης [33]. Έτσι ανάλογα με την σκληρότητα και την δυσθραυστότητα του υλικού του σωλήνα ανάμειξης παρατηρείται διαφορετική απόκριση στην φθορά του. Οι Ness και Zibbel έδειξαν οτι συγκριτικά μεταξύ σωληνών ανάμειξης απο καρβίδιο του βορίου, κράματος απο καρβίδιο του βολφραμίου και συνθετικό καρβίδιο, καλύτερη αντοχή συνολικά έχει το τελευταίο [34]. Οι Finnie και Bitter έδειξαν οτι η φθορά προέρχεται καταρχήν απο διάβρωση στα σημεία όπου η πρόσπτωση των σωματιδίων στο τοίχωμα του στομίου γίνεται σε σχετικά μεγάλες γωνίες (άνω των 20°) και στην απόξεση συνδυαστικά με διάβρωση για μικρές γωνίες. Στην εισαγωγή των αποξεστικών σωματιδίων ανάντη του σωλήνα ανάμειξης οι κόκκοι εισέρχονται σε διαφορετικές γωνίες και ταχύτητες με αποτέλεσμα να δημιουργείται έντονα διαβρωτικό περιβάλλον όντας έτσι πιο πιθανό να αστοχήσουν σκληρότερα, πιο ψαθυρά υλικά. Αντίθετα κατάντη του σωλήνα, προς την έξοδο του στομίου όπου η κοπτική δέσμη έχει γίνει πλέον πιο συνεκτική με το εναιώρημα των αποξεστικών σωματιδίων, η φθορά συμβαίνει λόγω τριβής και απόξεσης καθώς τα σωματίδια προσκρούουν με μικρότερη γωνία οπότε τα σκληρότερα υλικά ανταπεξέρχονται καλύτερα συγκριτικά με υλικά λιγότερο σκληρά αλλά πιο δύσθραυστα. Ο Harnish διεξήγαγε πειράματα χρησιμοποιώντας τεμάχια απο ίδια υλικά με τον σωλήνα ανάμειξης συσχετίζοντας την φθορά του ακροφυσίου με το βάθος κοπής της δέσμης στο τεμάχιο, βρήκε οτι το καρβίδιο του βολφραμίου αν και όχι το σκληρότερο υλικό έχει την μεγαλύτερη αντοχή στην φθορά. Παράλληλα, η βέλτιστη αντοχή σε φθορά πετυχαίνεται χρησιμοποιώντας σωλήνα ανάμειξης αποτελούμενο απο καρβίδιο του βολφραμίου στην είσοδο και διαμάντι στην έξοδο αξιοποιώντας έτσι τον απαραίτητο συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων αντιμετωπίζοντας εντοπισμένα τις αιτίες φθοράς [6]. Οι Unand και Katz μελέτησαν πως η επίδραση

λιπαντικού υλικού σε στόμιο απο πορώδες υλικό μπορεί να μειώσει την φθορά. Η παρουσία του λαδιού βοηθά στην μείωση των συγκρούσεων των αποξεστικών σωματιδίων στα τοιχώματα ενώ όσο μεγαλώνει το ιξώδες του λιπαντικού, μειώνεται ο ρυθμός φθοράς του ακροφυσίου [33].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

2.1. Περιγραφή πειραμάτων

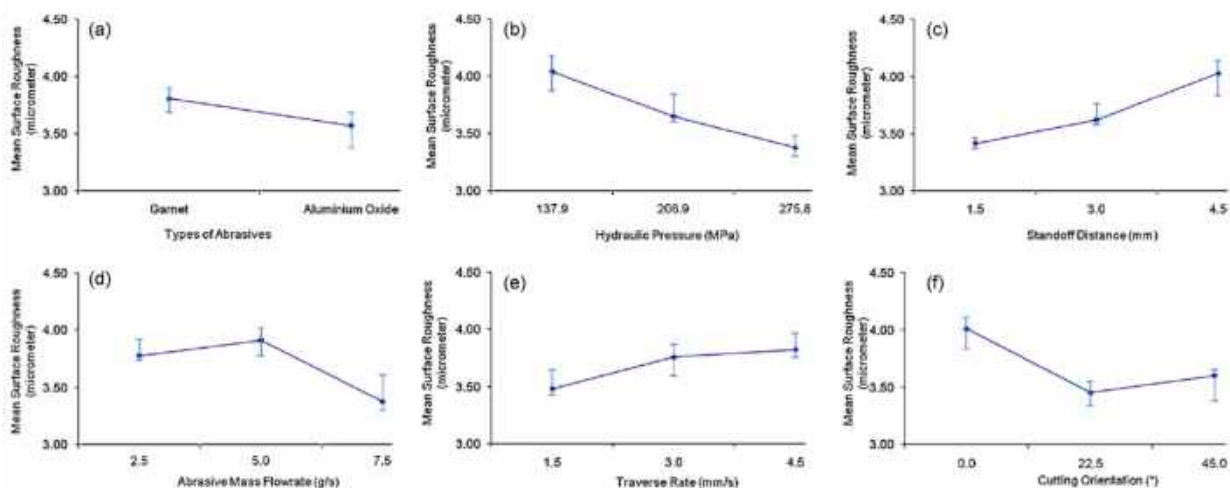
Στις μέρες μας έχει γίνει πληθώρα πειραμάτων κατεργασιών AWJM δίνοντας πλούσιο υλικό για εγκαθίδρυση σημαντικών εμπειρικών αποτελεσμάτων για τον βέλτιστο σχεδιασμό μελλοντικών συνθηκών όσον αφορά την απόκριση των παραμέτρων κατεργασίας. Μείζον ζήτημα για την διεξαγωγή πειράματος αποξεστικής υδροκοπής αποτελεί η ποιότητα της εκάστοτε κοπής. Η ποιότητα έγκεται σε πολλές παραμέτρους όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.1. με τις πλέον σημαντικές που εξετάζονται πειραματικά να είναι η απόκριση των συνθηκών κατεργασίας στην τραχύτητα της προκύπτουσας κατεργαζόμενης επιφάνειας (Ra), την κλίση του αυλακώματος κοπής, τον ρυθμό αποβολής υλικού αλλά και συνολικά την βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων κατεργασίας για το κατάλληλο βάθος αλλά και πλάτος κοπής. Κατά βάση, οι παράμετροι κατεργασίας που εξετάζονται στα πειράματα που ακολουθούν είναι : η ταχύτητα πρόωσης της κοπτικής κεφαλής (vf), η υδραυλική πίεση, η απόσταση του στομίου από το τεμαχίο και η παροχή λειαντικού υλικού οι οποίες είναι άμεσα μεταβλήτες ενώ σε δεύτερη φάση είναι το μέγεθος και το υλικό των σωματιδίων του λειαντικού που χρησιμοποιείται, τα χαρακτηριστικά του τεμαχίου, το μέγεθος και το υλικό του ακροφυσίου.

2.2. Ανάλυση βιβλιογραφικών πηγών

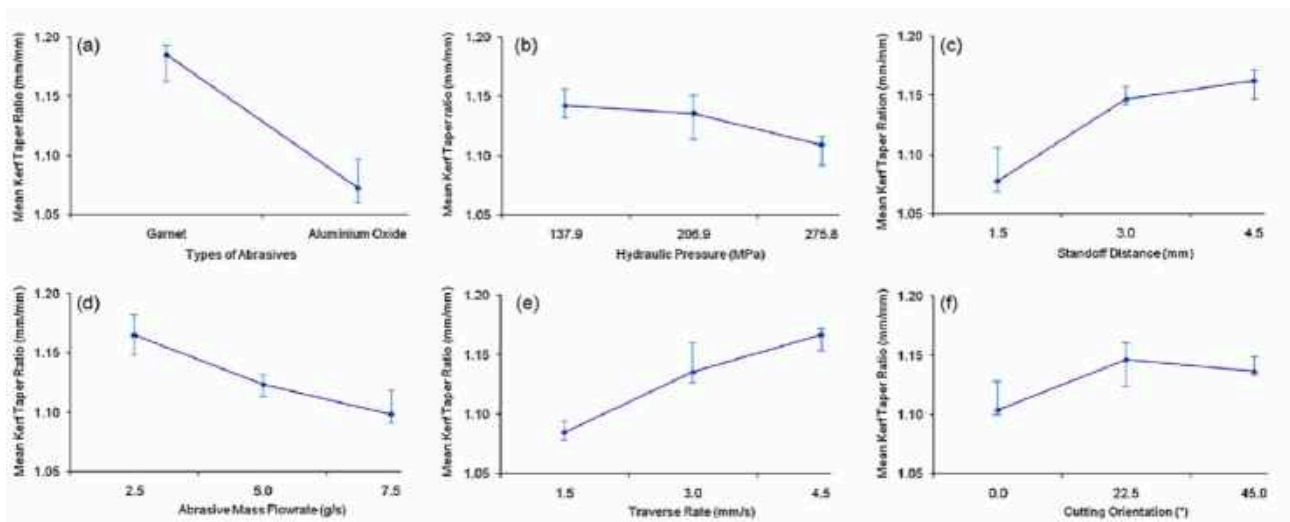
Οι M.A. Azmir και A.K. Ahsan [35] μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας AWJM στην τραχύτητα και στην κλίση των αυλακιών συνθετικού εποξικού/γυάλινου τεμαχίου διαστάσεων 150 mm x 150 mm με πάχος 5.4 mm. Η κλίση υπολογίστηκε εμμέσως, υπολογίζοντας τον λόγο της άνω τιμής πλάτους του αυλακιού προς την αντίστοιχη του κάτω πλάτους. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από εργαλειομηχανή υδροκοπής Excel-CNC, με μοντέλο αντλίας νερού Intergsold Rand με ονομαστική πίεση 345 MPa. Κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, το στόμιο της κοπτικής κεφαλής ελεγχόταν τακτικά για να αντικατασταθεί σε περίπτωση σημαντικής φθοράς. Έγιναν 18 πειράματα, κάθε φορά κοβόταν τμήμα του τεμαχίου σε τετραγωνική διατομή διαστάσεων 20 mm x 20 mm με κοπή πλήρους διεϊσδυσης, ενώ όλη η κατεργασία γινόταν μόνο με ένα πέρασμα της δέσμης. Κατά την διάρκεια του πειράματος η διάμετρος του ακροφυσίου της

δέσμης νερού, η γωνία πρόσκρουσης της δέσμης και η διάμετρος της δέσμης διατηρήθηκαν σταθερά στις ακόλουθες τιμές : 0.254 mm, 90°, 0.762 mm αντίστοιχα. Οι παράμετροι βάσης των οποίων εκτελέστηκε το πείραμα είναι η πίεση, ο τύπος του λειαντικού, η απόσταση του στομίου εκτόξευσης, η παροχή του αποξεστικού και η κατεύθυνση κοπής. Χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά λειαντικά, σωματίδια γρανάτη και σωματίδια κορουνδίου ίδιας όμως διαμέτρου κόκκου 0.177 mm (mesh size 80). Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του πειράματος, επιλέγοντας τις 6 παραπάνω παραμέτρους ως παράγοντες ελέγχου, τις 5 εκ των οποίων σε 3 επίπεδα και την μία σε 2 επίπεδα επιλέγοντας έτσι ορθογώνια συστοιχία τύπου L₁₈ (21 x 35) έπειτα με ανάλυση ANOVA καθορίστηκε η επίδραση τους στην τραχύτητα Ra και την κλίση T_R. Για τον υπολογισμό της τραχύτητας χρησιμοποιήθηκε η μετρητική συσκευή SURFPAK-514 όπου μετρήθηκε κατά μήκος του πάχους του δοκιμίου 0.5 mm από τις δυο επιφάνειες του τεμαχίου για την αποφυγή της επίδρασης που έχει η είσοδος και η έξοδος της δέσμης αντίστοιχα στο τεμάχιο. Για τον υπολογισμό του T_R χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μικροσκόπιο Motic σε συνδυασμό με την εφαρμογή Motic images 2000.

Τα αποτελέσματα του πειράματος εδείξαν ότι οι πλέον σημαντικές παράμετροι είναι η πίεση στην επίδραση της τραχύτητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας και ο τύπος του αποξεστικού υλικού όσον αφορά τον λόγο των πλάτων του αυλακιού αντίστοιχα καθώς εξαιτίας της σκληρότητας του το κορουνδίο ως αποξεστικό ανταποκρίνεται καλύτερα απο τον γρανάτη τόσο στην κλίση όσο και στην τραχύτητα. Ο τύπος του λειαντικού και η ταχύτητα πρόωσης δεν επηρεάζουν σημαντικά την τραχύτητα. Η απόσταση του ακροφυσίου, η κατεύθυνση κοπής και η παροχή του αποξεστικού επηρεάζουν με αντίστοιχο τρόπο την τραχύτητα. Για την κλίση η πίεση, η παροχή και η κατεύθυνση κοπής είναι ασήμαντες παράμετροι. Γενικά φάνηκε πως αυξάνοντας την κινητική ενέργεια της κατεργασίας συνολικά η κοπή φαίνεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ποιότητα και την ακρίβεια. Γραφικά τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω :



Εικόνα 2.1. Επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στην επιφανειακή τραχύτητα [35].



Εικόνα 2.2. Επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στο kerf taper ratio [35].

Οι Vishal Gupta et al. [36] διεξήγαγαν πειραματική κατεργασία με AWJM σε τεμάχιο από μάρμαρο τύπου Makrana διαστάσεων 80 mm x 80 mm x 15 mm προκειμένου να μελετήσουν την επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στην γωνία κλίσης των αυλακίων. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι η πίεση, η ταχύτητα πρόωσης και η παροχή του λειαντικού υλικού ενώ όλες οι κοπές έγιναν με πλήρη διείδυση της δέσμης σε μήκος αυλακιού 40 mm. Η σκληρότητα του τεμαχίου είναι 3-4 στην κλίμακα Mosh, έχει πυκνότητα 2.6 kg/m³, αντοχή σε θλίψη 1800-2100 kg/cm³, ενώ αποτελείται από 38-42% CaO, 20-25% SiO₂, 2-4% Al₂O₃, Na-Mg 1.5-2.5%, LOI 30-32%.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με εργαλειομηχανή OMAX 80160 η οποία περιέχει σύστημα τροφοδοσίας αποξεστικού υλικού με χοάνη βαρυντικού τύπου, πνευματικά ελεγχόμενη βαλβίδα, τραπέζι διαστάσεων 6170 mm x 3405 mm και ακροφύσιο για την εισαγωγή της δέσμης νερού στον σωλήνα ανάμειξης από διαμάντι σε συνδυασμό με στόμιο από καρβίδιο βολφραμίου για την δημιουργία της αποξεστικής δέσμης. Για να προσδιορισθούν τα πλάτη χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο SX 45. Η γωνία κλίσης θ υπολογίστηκε από την ακόλουθη σχέση: $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{wt - wb}{2t}\right)$ όπου wt το πλάτος του πάνω αυλακιού και wb το κάτω αντίστοιχα. Αρχικά έγιναν πειραματικά δοκιμές για να περιοριστεί το εύρος των τιμών των παραμέτρων με κριτήριο να υπάρχει κοπή πλήρους διείδυσης, έτσι προέκυψε ότι οι ελάχιστες τιμές πίεσης και παροχής είναι 200 MPa και 200 g/min αντίστοιχα ενώ η μέγιστη τιμή της ταχύτητας πρόωσης είναι 100 mm/min.

Για τον σχεδιασμό μελέτης του πειράματος έγινε χρήση της μεθόδου Taguchi, οι τρεις παράμετροι: πίεση, ταχύτητα πρόωσης και παροχή λειαντικού επιλέχθηκαν ως παράγοντες ελέγχου για την διεξαγωγή της μεθόδου σε 3 επίπεδα σε ορθογωνική συστοιχία L₉. Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε μέσω του λογισμικού MINITAB 16 και για να προσδιορισθεί η βαρύτητα των

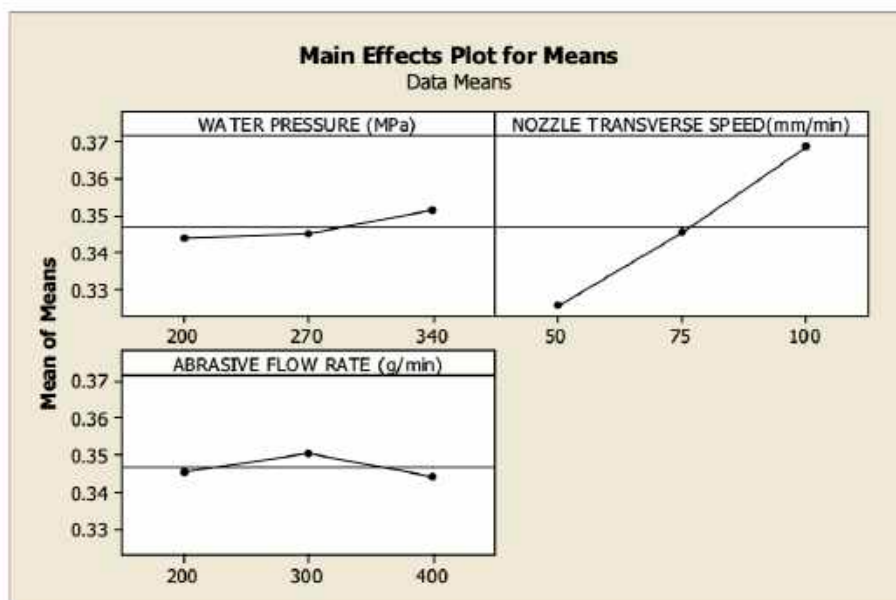
παραμέτρων στην επίδραση της κλίσης του αυλακιού έγινε ανάλυση με ANOVA (analysis of Variance). Ακολουθεί ο πίνακας που προκύπτει από τα αποτελέσματα και τις παραμέτρους βάσει του Taguchi, καθώς και γραφικά φαίνεται η επίδραση των παραμέτρων στην γωνία θ .

Experiment No.	Parameters			Kerf taper angle (degree)		
	Water pressure (MPa)	Nozzle transverse speed (mm/min)	Abrasive flow rate (g/min)	Trial		
				1	2	3
1	200	50	200	0.323	0.324	0.324
2	200	75	300	0.344	0.344	0.345
3	200	100	400	0.354	0.363	0.366
4	270	50	300	0.329	0.320	0.329
5	270	75	400	0.344	0.343	0.344
6	270	100	200	0.362	0.366	0.363
7	340	50	400	0.329	0.329	0.320
8	340	75	200	0.347	0.347	0.348
9	340	100	300	0.382	0.380	0.380

Εικόνα 2.3. Πίνακας Taguchi [36].

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
Water pressure (M Pa)	200	270	340
Nozzle Transverse speed (mm/min)	50	75	100
Abrasive flow rate (g/min)	200	300	400

Εικόνα 2.4. Επίπεδα των παραμέτρων κατεργασίας [36].



Εικόνα 2.5. Επίδραση παραμέτρων κατεργασίας στην γωνία κλίσης θ [36].

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η γωνία κλίσης αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης και της ταχύτητας πρόωσης ενώ για αύξηση παροχής αποξεστικού υλικού αρχικά αυξάνεται η θ και στην συνέχεια μειώνεται. Η ποσοστιαία συνεισφορά των παραμέτρων είναι η ακόλουθη : 92.505 % για την ταχύτητα πρόωσης, 3.584% για την πίεση του νερού και αμελητέο ποσοστό για την παροχή του αποξεστικού. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι για τα πειράματα που έγιναν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων είναι 50 mm/min, 200 MPa, 300 g/min για ελαχιστοποίηση της γωνίας κλίσης.

Οι D.K Shanmugam et al. [37] έκαναν πειραματική διερεύνηση για την ελαχιστοποίηση της γωνίας κλίσης των αυλακίων θ που δημιουργούνται από AWJM. Χρησιμοποιήθηκαν πλάκες από 87% αλουμίνα, διαστάσεων 150x100x12.7 mm με χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στον πίνακα:

Knoop hardness 1000 g, H_d (MPa)	10,400
Modulus of elasticity, E (MPa)	276,000
Flow stress, σ_f (MPa)	20,800
Fracture toughness, K_{Ic} (MPa m ^{1/2})	3.5
Compressive strength (MPa)	2480
Flexural strength (MPa)	336
Tensile strength (MPa)	221
Average crystal size (μ m)	1.6

Εικόνα 2.6. Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων Alumina ceramics [37].

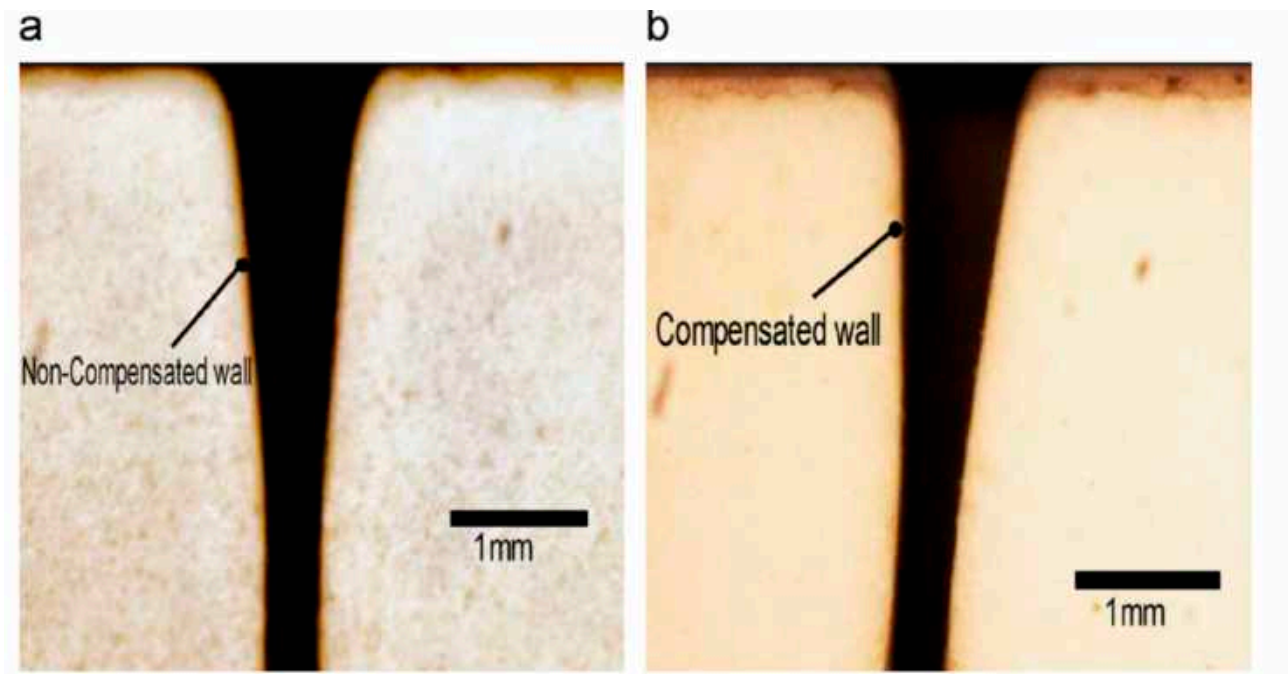
Το πείραμα διεξήχθη σε εργαλειομηχανή εφοδιασμένη με αντλία τύπου 5X-60, με μοντέλο τροφοδοσίας αποξεστικού M-263 και κοπτική κεφαλή Paser II. Η διάμετρος του ακροφυσίου της δέσμης του νερού είναι 0.254 mm από ζαφείρι, ο σωλήνας ανάμειξης είναι 76.2 mm με διάμετρο 0.762 mm. Χρησιμοποιήθηκαν κόκκοι γρανάτη (80 mesh size) ως λειαντικό με μέση διάμετρο 0.18 mm και πυκνότητα 4100 kg/m³. Συνολικά έγιναν 123 αυλάκια μήκους 20 mm και η γωνία κλίσης μετρήθηκε χρησιμοποιώντας την διάταξη Nikon shadowgraph με μεγέθυνση x10. Επιλέχθηκαν 5 παράμετροι κατεργασίας η πίεση, η ταχύτητα πρόωσης, η απόσταση, η παροχή του αποξεστικού και η γωνία κλίσης του στομίου α , σε επίπεδα όπως φαίνονται στην εικόνα 2.7. Η μελέτη του πειράματος διεξήχθη με υβριδικό σχεδιασμό (hybrid experimental design scheme). Στη συνέχεια με

Process variables	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6
Traverse speed (mm/s)	0.67	0.83	1	1.17	-	-
Standoff distance (mm)	2	3	4	5	-	-
Water pressure (MPa)	310	345	380	410	-	-
Abrasive mass flow rate (g/s)	7.6	8.3	9	-	-	-
Compensation angle (°)	0	1	2	3	4	5

Εικόνα 2.7. Πίνακας παραμέτρων και των επιπέδων τους [37].

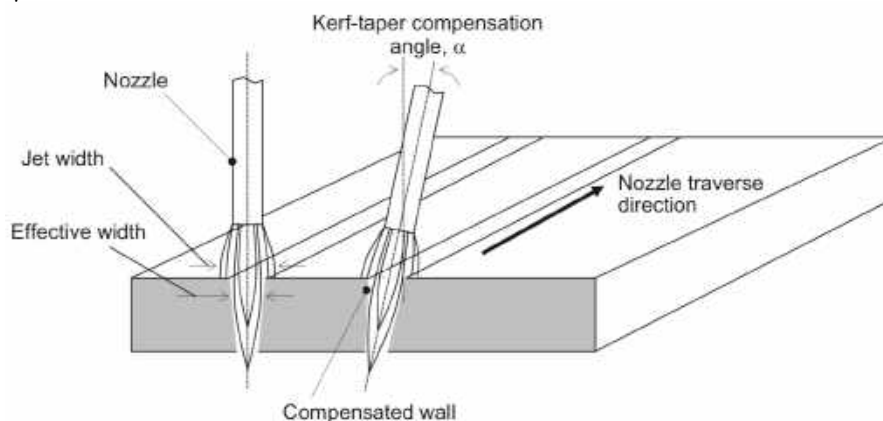
διαστατική ανάλυση δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης της γωνίας κλίσης και συγκρίθηκε με τα πειραματικά αποτελέσματα. Το μοντέλο προέβλεψε επαρκώς την γωνία κλίσης με μέση

απόκλιση 6.2% και τυπική απόκλιση 13.4% απο τα πειραματικά αποτελέσματα. Σημαντικό είναι οτι αλλάζοντας την γωνία α , αλλάζει και η επίδραση των παραμέτρων στα 2 τοιχώματα του αυλακιού, δηλαδή δεν έχουμε γωνία θ ίδιου μεγέθους στα 2 τοιχώματα όπως συμβαίνει για $\alpha = 0$, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8. Τα αποτελέσματα έδειξαν οτι η γωνία κλίσης των αυλακιών μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την κλίση της κοπτικής κεφαλής . Για $\alpha = 4.5^\circ$ η γωνία θ γίνεται οριακά μηδέν στο τοίχωμα βάση του οποίου έχει οριστεί η γωνία α (εικόνα 2.9) ενώ αντίθετα στο άλλο τοίχωμα η γωνία κλίσης γίνεται 9° . Αυξάνοντας την πίεση η γωνία κλίσης μειώνεται και στα δυο τοιχώματα αντίθετα αυξάνοντας την ταχύτητα πρόωσης αυξάνεται η κλίση και στα δυο τοιχώματα και το ίδιο συμβαίνει αυξάνοντας την απόσταση του στομίου, τέλος αυξάνοντας την παροχή αποξεστικού μειώνεται η γωνία κλίσης.



Εικόνα 2.8. Προφίλ των αυλακιών για $P = 380 \text{ MPa}$, $u = 0.83 \text{ mm/s}$, $S_d = 3 \text{ mm}$, $m_a = 7.6 \text{ g/s}$ [37]

- (a) χωρίς γωνία κλίσης κοπτικής κεφαλής ($\alpha = 0^\circ$)
- (b) με γωνία $\alpha = 5^\circ$



Εικόνα 2.9. Σύγκριση AWJ κοπής χωρίς με και χωρίς γωνία α [37].

Οι J. Jeykrishnan et al. [38] μελέτησαν πειραματικά την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της AWJM σε τεμάχιο κράμα νικελίου Inconel 625 ώστε να ελαχιστοποιείται η κλίση των αυλακιών. Η μέθοδος σχεδιασμού του πειράματος έγινε με την μέθοδο Taguchi, ενώ έγινε στατιστική ανάλυση ANOVA ώστε να φανεί η ποσοστιαία συνεισφορά της κάθε παραμέτρου.

Για την πειραματική διαδικασία, χρησιμοποιήθηκε Inconel 625 alloy, χημικής σύστασης 58% Ni, 20-23% Cr, 5% Fe, 8-10% Mo, 3.15-4.15 Nb, 0.1% C, 0.5% Mn, 0.5% Si, 0.4% Ti, σε διαστάσεις (100*100*12) mm καθώς συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως πτερύγια προπέλας σε σκάφη, σε υποθαλάσσιες καλωδιώσεις, συστήματα εξάτμισης κινητήρων κτλ. Το υλικό έχει πυκνότητα 8440 kg/m³ και σκληρότητα 175-240 BHN και οι παράμετροι που ελέγχθηκαν στο πείραμα ήταν η πίεση του νερού, η παροχή του αποξεστικού και η απόσταση του στομίου. Το πείραμα έγινε με επιλογή των 3 παραμέτρων ως παραγόντων ελέγχου σε 3 επίπεδα όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1 σε ορθογωνική συστοιχία L₉ βάση του Taguchi.

Parameters/Levels	Level 1	Level 2	Level 3
Water pressure (MPa)	300	330	360
Abrasive flow rate (g/s)	4	5	6
Stand-off distance (mm)	2	3	4

Πίνακας 2.1. Τα επίπεδα των παραμέτρων του πειράματος.

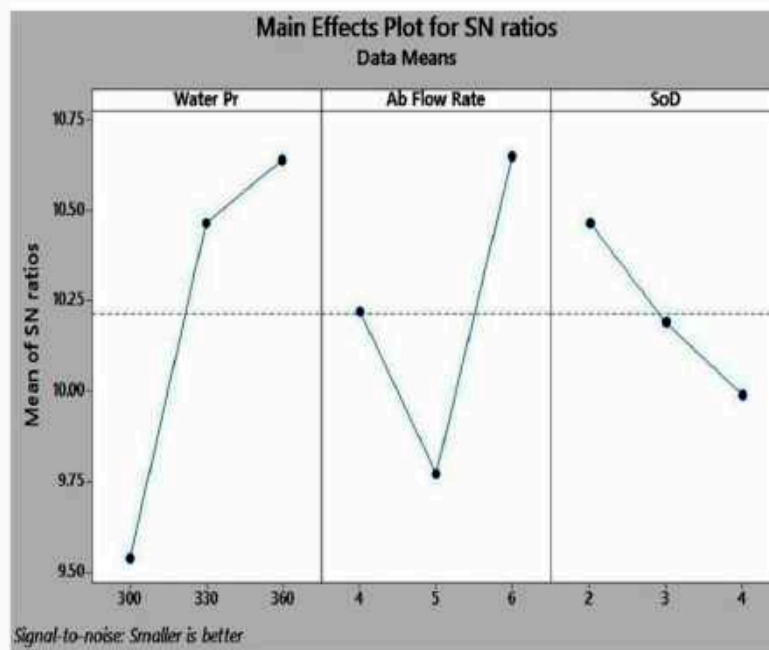
Το ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της γωνίας κλίσης, η κατεργασία πραγματοποιήθηκε σε CNC AWJM που χρησιμοποιεί μοντέλο αντλίας KMT για την εκτόξευση νερού με μέγιστη παροχή 130 l/hr και πίεση 3800 bar. Χρησιμοποιείται πεπιεσμένος αέρας για την άντληση του αποξεστικού υλικού (σωματίδια αλουμίνιας) στην περιοχή κατεργασίας μέσω του λειαντικού τροφοδότη και του θαλάμου ανάμειξης. Η διάμετρος του στομίου του ακροφυσίου είναι 0,25 mm. Εκτελώντας το πείραμα στο τεμάχιο με τις παραπάνω συνθήκες, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους κατεργασίας η απόκριση στην ελαχιστοποίηση της κλίσης των αυλακιών φαίνεται στην εικόνα 2.10.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πίεση του νερού έχει μεγαλύτερη επίδραση στη κλίση ακολουθούμενη από την παροχή του αποξεστικού υλικού και την απόσταση του στομίου. Η ποσοστιαία επίδραση των παραπάνω παραμέτρων είναι κατά αντιστοιχία 50.17%, 29.30%, 16.5%. Τέλος η μελέτη καταλήγει ότι η βέλτιστη επιλογή ρύθμισης των παραμέτρων ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κλίση των αυλακιών είναι η ακόλουθη 300 MPa πίεση νερού, 5 g/s παροχή abrasive και 4 mm απόσταση μεταξύ στομίου και τεμαχίου.

S. No	Input parameters			Kerf geometry		Output parameter	S/N ratio response
	Water pressure (MPa)	Abrasive flow rate (g/s)	Stand-off distance (mm)	Kerf top width (w_t)	Kerf bottom width (w_b)	Kerf taper angle (θ)	
1	300	4	2	0.82	0.67	0.358	8.92234
2	300	5	3	0.81	0.67	0.334	9.52507
3	300	6	4	0.79	0.66	0.310	10.1728
4	330	4	3	0.76	0.64	0.286	10.8727
5	330	5	4	0.78	0.63	0.358	8.92234
6	330	6	2	0.80	0.69	0.263	11.6009
7	360	4	4	0.77	0.65	0.286	10.8727
8	360	5	2	0.76	0.64	0.286	10.8727
9	360	6	3	0.78	0.65	0.310	10.1728

Εικόνα 2.10. Πίνακας πειραματικών τιμών [38].

J. Jeykrishnan et al. / Materials Today: Proceedings 16 (2019) 392–397



Εικόνα 2.11. Διάγραμμα S/N ratio για την γωνία κλίσης θ [38].

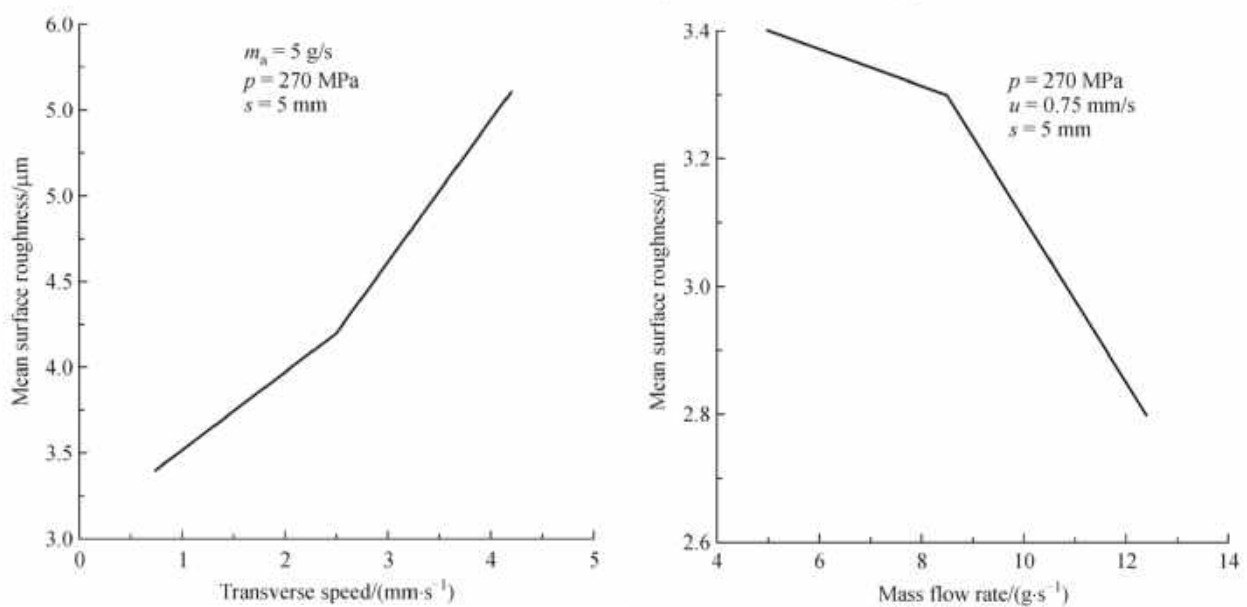
Οι M. Chithirai Pon Selvan et al. [39] μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στην επιφανειακή τραχύτητα (Ra) κόβοντας με AWJ Cutting τεμάχιο αλουμινίου. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν πλάκες αλουμινίου διαστάσεων 150 mm x 100 mm x 60 mm με μέτρο ελαστικότητας 70000 MPa. Η κατεργασία έγινε με εργαλειομηχανή απο την εταιρεία Water Jet Sweden εξοπλισμένη με αντλία υπερηψηλών πιέσεων (UHP pump) KMT με ονομαστική πίεση 400 MPa. Η εργαλειομηχανή είναι εξοπλισμένη με χοάνη τροφοδοσίας λειαντικού τύπου βαρυτικής τροφοδοσίας, λειαντικό σύστημα τροφοδοσίας, πνευματικά ελεγχόμενη βαλβίδα και τραπέζι διαστάσεων 3000 mm x 1500 mm. Στην παρούσα μελέτη ως παράμετροι της κατεργασίας επιλέχθηκαν η υδραυλική πίεση, η απόσταση του στομίου απο το τεμάχιο, η παροχή του αποξεστικού υλικού και ταχύτητα πρόωσης της κεφαλής. Για τον σχεδιασμό μελέτης του πειράματος επιλέχθηκε η μέθοδος του Taguchi, θέτοντας τις τέσσερις παραμέτρους ως παράγοντες ελέγχου σε τρία επίπεδα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.12, επιλέγοντας ως διάταξη ορθογώνια συστοιχία εννέα γραμμών (L_9 (3^4) orthogonal array table) που αντιστοιχούν στον αριθμό των πειραμάτων.

Parameters	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
Water pressure	MPa	270	335	400
Traverse speed	mm/s	4.2	2.5	0.75
Mass flow rate	g/s	5	8.7	12.4
Standoff distance	mm	1.8	3.4	5

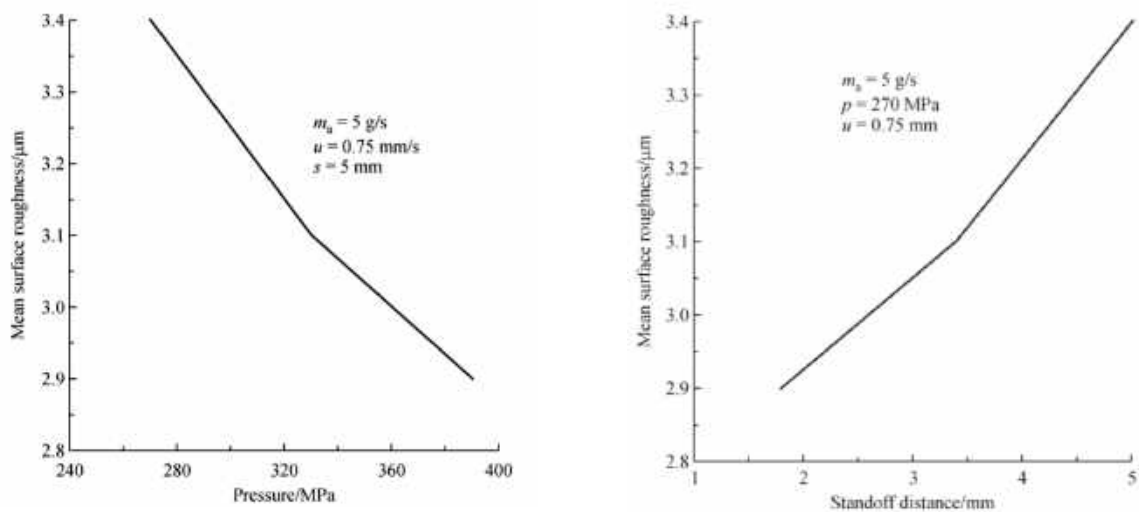
Εικόνα 2.12. Οι τιμές των παραμέτρων του πειράματος [39].

Οι παράμετροι που παρέμειναν αμετάβλητες κατά την διάρκεια του πειράματος είναι η διάμετρος του ακροφυσίου της εξαγωγής του νερού (0.35 mm), το μήκος του σωλήνα του στομίου (76,2 mm), η διάμετρος του στομίου εκτόξευσης του κοπτικής δέσμης (1.05 mm) και το αποξεστικό υλικό που είναι γρανάτης με πυκνότητα 4100 kg/m³ και μέση διάμετρο κόκκων 0.18 mm. Ο γρανάτης αποτελείται απο 36% FeO, 33% SiO₂, 20% Al₂O₃, 4% MgO, 3% TiO₂, 2% CaO και 2% MnO₂. Για να προσδιορισθεί η τραχύτητα μετά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ο αντίστοιχος εξοπλισμός (μοντέλο SURFPAK SV-514) μετρώντας την επιφανειακή τραχύτητα κατά μήκος της μέσης γραμμής, προσδιορισμένη απο το μέσο του βάθους κοπής της εκάστοτε κοπής. Κάθε μέτρηση έγινε τρεις φορές υπολογίζοντας τον αριθμητικό μέσο σαν τελικό αποτέλεσμα προς ελαχιστοποίηση της απόκλισης. Τα αποτελέσματα του πειράματος εδείξαν οτι γενικά η κατεργαζόμενη επιφάνεια είναι ομαλότερη στην είσοδο της δέσμης και τραχύτερη στην έξοδο, που οφείλεται στην πτώση της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων του αποξεστικού υλικού προκαλώντας επιδείνωση της κοπτικής τους ικανότητας.

Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε πως αυξάνοντας την πίεση του νερού η επιφάνεια γίνεται πιο λεία, αυτό διότι οι κόκκοι του λειαντικού όντας εύθραυστοι, σπάνε σε μικρότερους με αποτέλεσμα μια ομαλότερη επιφάνεια. Με την αύξηση της παροχής του αποξεστικού υλικού η τραχύτητα μειώνεται, αυξάνοντας την ταχύτητα πρόωσης η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται ενώ τέλος αυξάνοντας την απόστασης του στομίου, αυξάνεται η διατομή της δέσμης και κατ'επέκταση μειώνεται η κινητική του ενέργεια κατά την πρόσκρουση, συνεπώς η τραχύτητα αυξάνεται. Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα όπως προέκυψαν απο την παρούσα μελέτη.



Εικόνα 2.13. Διαγράμματα επίδρασης των παραμέτρων στην τραχύτητα [39].



Οι M.Sreenivasa Rao et al. [40] διεξήγαγαν πειράματα σε τεμάχιο απο μαλακό χάλυβα για να μελετήσουν την επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας AWJM: πίεση, ταχύτητα πρόωσης και απόσταση στομίου στην επιφανειακή τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας Ra. Ο μαλακός χάλυβας αποτελείται απο 0.16% C, 0.4% Si, 0.5-0.9% Mn, 0.04% S, 0.04% P με πυκνότητα 7850 kg/m³. Για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων, ο σχεδιασμός του πειράματος έγινε βάση της μεθόδου Taguchi και με εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης ANOVA έγινε ο καθορισμός ποσοστιαίας επίδρασης της κάθε παραμέτρου στην τραχύτητα. Χρησιμοποιήθηκε πίνακας ορθογωνικής συστοιχίας τύπου L₉ βάση του Taguchi, και τα αποτελέσματα έδειξαν οτι την μεγαλύτερη επίδραση έχει η πίεση και η ταχύτητα πρόωσης ενώ η απόσταση έχει μικρότερη επίδραση. Ο σχεδιασμός έγινε θεωρώντας τις 3 παραμέτρους ως παράγοντες ελέγχου σε 3 επίπεδα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.14, οι παράμετροι που παρέμειναν σταθερές κατά την διάρκεια της κατεργασίας φαίνονται στην εικόνα 2.15.

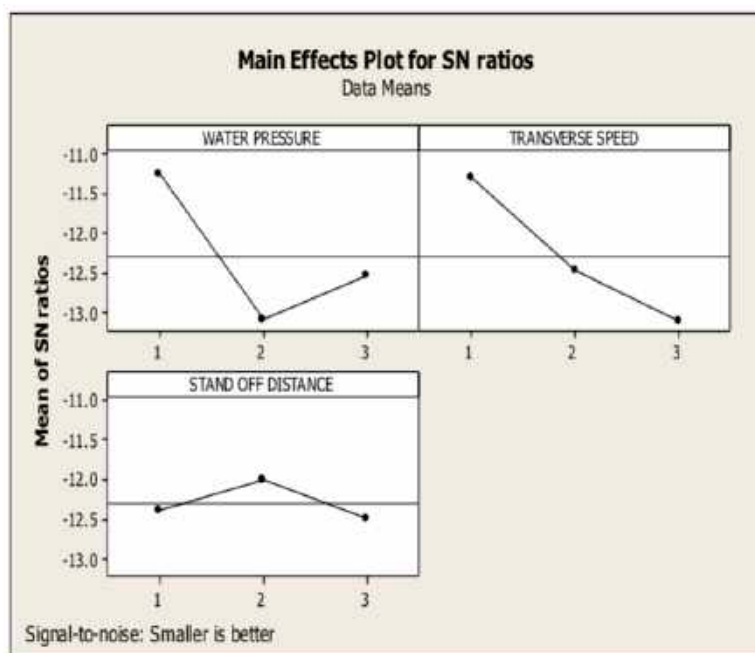
Control Parameters	Levels		
	Level 1 minimum	Level 2 Intermediate	Level 3 Maximum
Water Pressure(psi)	35000	45000	55000
Traverse speed (mm/min)	80	200	320
Stand of distance(mm)	1	2.5	4

Εικόνα 2.14. Τα επίπεδα των παραμέτρων κατεργασίας [40].

jet impact angle	90°
orifice diameter	0.35 mm
nozzle length	76.2 mm
nozzle diameter	1.05 mm
abrasive material	80 mesh garnet
average diameter of abrasive particles	0.18 mm
Garnet consists of chemically	36% FeO, 33% SiO ₂ , 20% Al ₂ O ₃ , 4%MgO, 3% TiO ₂ , 2% CaO and 2% MnO ₂ .

Εικόνα 2.15. Οι τιμές των σταθερών παραμέτρων [40].

Όλες οι κοπές έγιναν με ένα πέρασμα της δέσμης και η τραχύτητα μετρήθηκε με τραχύμετρο τύπου “Taylor Hobson”, στο μέσο του βάθους κοπής για κάθε κοπή ενώ η τιμή λήφθηκε 3 φορές και υπολογίστηκε ο αριθμητικός τους μέσος προς ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Ακολουθεί το S/N ratio διάγραμμα, με επιλογή διαμόρφωσης ‘Smaller the better’ καθώς το ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της τραχύτητας, που διαμορφώθηκε βάση του Taguchi:



Εικόνα 2.16. Επίδραση των παραμέτρων στο S/N ratio [40].

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η επιφανειακή τραχύτητα ελαχιστοποιείται για επιλογή των παραμέτρων της πίεσης και της ταχύτητας πρόωσης στο πρώτο επίπεδο τιμών τους και για απόσταση στομίου στο δεύτερο επίπεδο. Άρα προκύπτει ότι η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων είναι 3500 psi, 80 mm/min, 2.5 mm. Απο την ANOVA φάνηκε ότι μεγαλύτερη επίδραση στο αποτέλεσμα της κατεργασίας όσον αφορά το Ra έχει η πίεση σε ποσοστό 47.58%, ακολουθεί η ταχύτητα πρόωσης σε ποσοστό 45.52% ενώ η απόσταση του στομίου έχει ασήμαντη επίδραση 0.64%.

Οι Asif Iqbal et al. [41] μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας σε AWJ Cutting τεμαχίων κράματος αλουμινίου και κράματος χάλυβα, στην τραχύτητα (Ra), την ποσοστιαία αναλογία της επιφάνειας χωρίς ραβδώσεις (P_{cw}) και στο πλάτος της κοπής (W_{max}). Τα τεμάχια από κράμα χάλυβα είναι τύπου AISI 4340 και από κράμα αλουμινίου είναι τύπου Aluminium 2219 διαστάσεων 60 x 60 mm, ενώ το πάχος των πλακών που χρησιμοποιήθηκαν λαμβάνεται ως παράμετρος προς διερεύνηση μαζί με την πίεση, την ταχύτητα πρόωσης και την παροχή του αποξεστικού υλικού. Οι παράμετροι που διατηρήθηκαν σταθεροί κατά την κατεργασία είναι η επιλογή του λειαντικού (γρανάτης 80 mesh size), η απόσταση της κοπτικής κεφαλής 0.75 mm και η διάμετρος του στομίου του ακροφυσίου 1 mm. Η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου CNC Water Jet Cutting Machine μέγιστης πίεσης της δέσμης στα 4000 bar ενώ η τραχύτητα (Ra) μετρήθηκε με τραχύμετρο τύπου Mahr Perthometer M1. Για τον σχεδιασμό της μελέτης του πειράματος έγινε πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός (full-factorial design of DOE) επιλέγοντας ως

παράγοντες ελέγχου τις 4 παραμέτρους σε 2 επίπεδα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.17 κάνοντας 16 πειράματα για κάθε υλικό.

Level	Jet pressure P/bar	Cutting feed V_f $/(\text{mm}/\text{min})$	Abrasive mixing rate a_f $/(\text{g}/\text{min})$	Sheet thickness t/mm
1	3 000	15	120	20
2	3 500	30	240	40

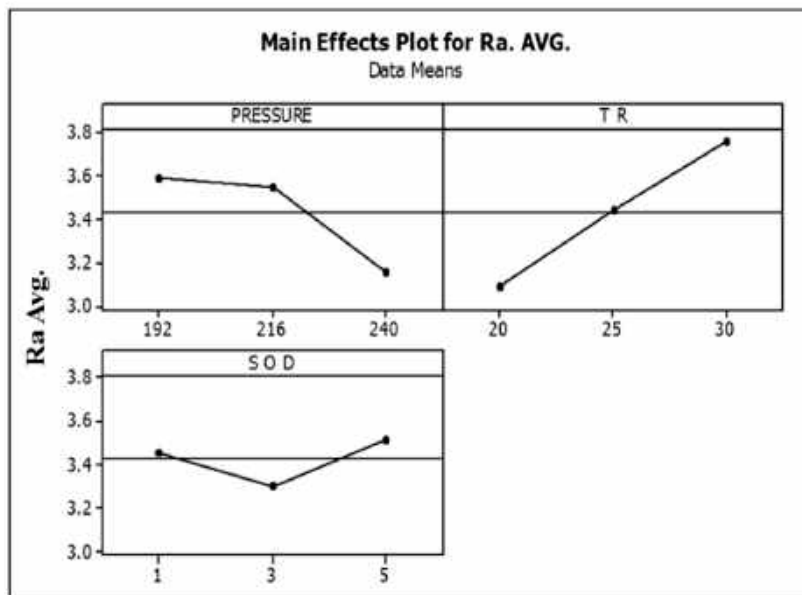
Εικόνα 2.17. Τα επίπεδα των παραμέτρων [41].

Στην συνέχεια τα πειραματικά δεδομένα αναλύθηκαν κάνοντας στατιστική ανάλυση ANOVA και έγινε αριθμητική βελτιστοποίηση μέσω της μεθόδου Derringer-Suich χρησιμοποιώντας το λογισμικό Design-Expert. Η ανάλυση έδειξε ότι μόνο η ταχύτητα πρόωσης επηρεάζει σημαντικά την τραχύτητα ενώ ο βέλτιστος συνδυασμός για ομαλότερη επιφάνεια είναι χαμηλές τιμές ταχύτητας πρόωσης και υψηλές τιμές παροχής. Για υψηλές πιέσεις η τραχύτητα είναι σχεδόν ίδια για τα δυο υλικά, για χαμηλές όμως πιέσεις, το φινίρισμα της κατεργαζόμενης επιφάνειας είναι ποιοτικά χειρότερο για το μαλακότερο υλικό (Al 2219) σε αντίθεση με το τεμάχιο από AISI 4340 που μένει ανεπηρέαστο από την μεταβολή της πίεσης. Αντίθετα αυξάνοντας την παροχή του αποξεστικού, η κατεργαζόμενη επιφάνεια για το τεμάχιο από Al 2219 βελτιώνεται σημαντικά ενώ για το σκληρότερο υλικό δεν υπάρχει διαφορά. Όσον αφορά το P_{cw} η επίδραση των παραμέτρων σε φθίνουσα σειρά είναι η ακόλουθη : πάχος της πλάκας, το υλικό, η ταχύτητα πρόωσης και η πίεση. Όσο το πάχος μεγαλώνει το βάθος της ζώνης παραμόρφωσης αυξάνεται και κατ'επέκταση η ποσοτική αναλογία της επιφάνειας χωρίς ραβδώσεις (P_{cw}) μειώνεται. Όσο η πίεση αυξάνεται αυξάνεται και η P_{cw} , αντίθετα μειώνοντας την ταχύτητα πρόωσης αυξάνεται η P_{cw} ενώ η επίδραση του υλικού του τεμαχίου είναι ασήμαντη σε υψηλές πιέσεις, σε χαμηλές όμως το σκληρότερο υλικό (AISI 4340) δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το μαλακότερο (Al 2219). Τέλος όσον αφορά την απόκριση του πλάτους της κοπής, την μεγαλύτερη επίδραση έχει το υλικό του τεμαχίου ακολουθούμενο από το πάχος του τεμαχίου, μετά η πίεση και τέλος η παροχή του αποξεστικού. Συνολικά, τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι υψηλή πίεση και χαμηλή ταχύτητα πρόωσης αυξάνουν την P_{cw} . Η επιφανειακή τραχύτητα μειώνεται αυξάνοντας την παροχή αποξεστικού και μειώνοντας την ταχύτητα πρόωσης, ενώ για μαλακά μέταλλα επιδρά και η πίεση. Τέλος το μέγιστο πλάτος κοπής μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας τόσο την πίεση όσο και την ταχύτητα πρόωσης, ενώ αποτελεί μεγαλύτερο πρόβλημα για παχύτερα τεμάχια και μαλακά μέταλλα.

Οι Punet Trivedi et al. [42] διεξήγαγαν πειραματική διαδικασία AWJM σε τεμάχιο από κράμα ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316L μελετώντας την επίδραση των παραμέτρων: πίεση, απόσταση στομίου και ταχύτητα πρόωσης στην τραχύτητα (Ra) της κατεργαζόμενης επιφάνειας χρησιμοποιώντας σωματίδια γρανάτη ως λειαντικό υλικό. Η πειραματική διαδικασία έγινε σύμφωνα με πλήρη παραγοντικό τρόπο σχεδίασης του πειράματος με τις παραμέτρους σε 3 επίπεδα, εκτελώντας 27 πειράματα συνολικά. Στην συνέχεια έγινε στατιστική ανάλυση ANOVA και αποτυπώθηκε γραφικά η μεταβολή της Ra με τις παραμέτρους. Επιλέχθηκε υλικό AISI 316L αρχικών διαστάσεων 1000 x 40 x 20 mm μάζας 6.4 kg και κάθε φορά κοβόταν τεμάχιο 40 x 10 x 20 mm. Το AISI 316L αποτελείται από 3% C, 16-18% Cr, 10-14% Ni, 1% Si, 2% Mn, 2-3% Mo, Other 2-3%, Fe balance, με πυκνότητα 8000 kg/mm³ και σκληρότητα 79 HRB, 57 HRC. Η επιφανειακή τραχύτητα μετρήθηκε μέσω τραχύμετρου τύπου Mitutoyo SJ-210, κατά μήκος του αυλακιού κοπής σε τρία σημεία κάθε φορά υπολογίζοντας τον αριθμητικό μέσο ως αποτέλεσμα, η διαδικασία περιλαμβάνει συνολικά εννέα μετρήσεις σε κάθε τεμάχιο από τα 27 (εικόνα 2.20). Η στατιστική ανάλυση ANOVA, έδειξε την ποσοστιαία συνεισφορά κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα καθώς και ποιες παράμετροι θεωρούνται στατιστικά ασήμαντες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι πρώτα η ταχύτητα πρόωσης με ποσοστό 48.96% επιδρά στην τραχύτητα ακολουθούμενη από την πίεση με ποσοστό συνεισφοράς 25.11% και τέλος την απόσταση του στομίου με ασήμαντη στατιστικά επίδραση 5.43%. Στην συνέχεια έγινε ανάλυση παλινδρόμησης μέσω του λογισμικού MINITAB 16 και σχεδιάστηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης βάσει της πειραματικής ανάλυσης. Έγινε τεστ επιβεβαίωσης του μοντέλου πρόβλεψης κάνοντας εκ νέου πείραμα και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση απόκλιση της τιμής της τραχύτητας για το μοντέλο πρόβλεψης είναι 6.55% από τα πειραματικά δεδομένα, που είναι ικανοποιητικό.

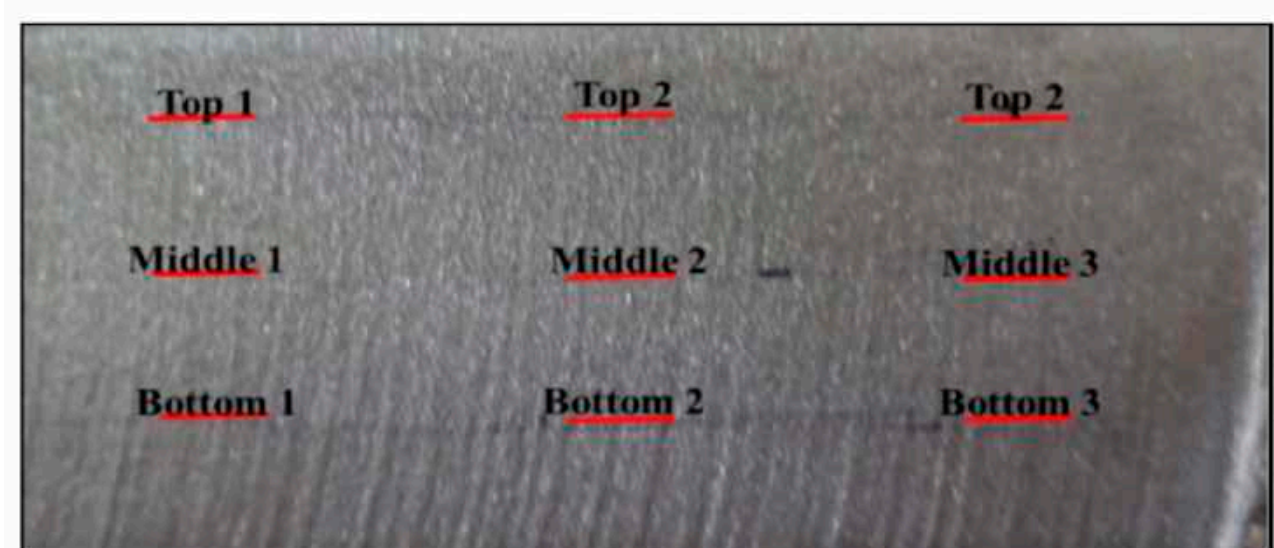
Parameters	Units	Level 1	Level 2	Level 3
A: pressure	MPa	192	216	240
B: traverse rate	mm/min	20	25	30
C: SOD	mm	1	3	5

Εικόνα 2.18. Πίνακας παραμέτρων κατεργασίας [42].



Εικόνα 2.19. Επίδραση των παραμέτρων στην επιφανειακή τραχύτητα [42].

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τιμή της τραχύτητας πέφτει καθώς η πίεση αυξάνεται, με ελάχιστη Ra για πίεση 240 MPa. Αυξάνοντας την ταχύτητα πρόωσης, η τραχύτητα αυξάνεται με μέγιστη τιμή για ταχύτητα πρόωσης 30 mm/min. Τέλος η επιφανειακή τραχύτητα για τιμές της απόστασης στομίου από 1 έως 3 mm μικραίνει και στο υπολειπόμενο διάστημα αυξάνεται.



Εικόνα 2.20. Θέσεις λήψης της τραχύτητας στο τεμάχιο [42].

Οι H. Hocheng και K.R. Chang [43], έκαναν μια σειρά πειραμάτων μέσω AWJM σε κεραμικά τεμάχια, βγάζοντας συμπεράσματα για την ποιότητα των κοπών ως προς τον ρυθμό αποβολής υλικού (MRR), την επιφανειακή τραχύτητα και τον σχηματισμό των αυλακιών. Τα τεμάχια είναι από αλουμίνια πάχους 0.65 mm και 1.35 mm και από νιτρίδιο του πυριτίου πάχους 5 mm και 10 mm. Με ιδιότητες όπως φαίνονται στον πίνακα:

	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄
Density	3.8 g/cc	3.26 g/cc
Strength	294 MPa	750 MPa
Young's modulus	3.2 × 10 ⁶ kg/cm ² (314 GPa)	3.1 × 10 ⁶ kg/cm ² (304 GPa)
Hardness	1430 (Vickers)	1500 (Vickers)
Fracture toughness	3.5 MN/m ^{3/2}	7.0 MN/m ^{3/2}

Εικόνα 2.21. Μηχανικές ιδιότητες Al₂O₃, Si₃N₄ [43].

Οι παράμετροι της κατεργασίας που διατηρήθηκαν σταθερές είναι η διάμετρος του ακροφυσίου της δέσμης νερού με τιμή 0.229 mm, η διάμετρος του σωλήνα ανάμειξης 0.762 mm, η απόσταση του στομίου από το τεμάχιο 2 mm ενώ χρησιμοποιήθηκε γρανάτης ως αποξεστικό υλικό σε 2 μεγέθη #80 και #100 mesh size αντίστοιχα. Η πίεση, η ταχύτητα πρόωσης και η παροχή του αποξεστικού ήταν οι μεταβλητές παράμετροι και εξετάστηκε ο τρόπος που επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας σε 3 διαφορετικά επίπεδα : 207, 259 και 310 MPa, 20, 60 και 150 mm/min, 100, 200 και 300 g/min αντίστοιχα για κάθε παράμετρο.

Οι μετρήσεις του πλάτους έγιναν με χρήση του Mitutoyo PJ311, ενώ η τραχύτητα μετρήθηκε με τραχύμετρο τύπου Mitutoyo 201 κατά μήκος των αυλακώσεων, παρατηρήθηκε ακόμα η φθορά στην επιφάνεια των τεμαχίων με οπτικό μικροσκόπιο. Η κατεργασία έγινε σε εργαλειομηχανή εφοδιασμένη με αντλία Flox 6XS-55 ονομαστικής πίεσης 380 MPa και παροχής 1.93 l/min.

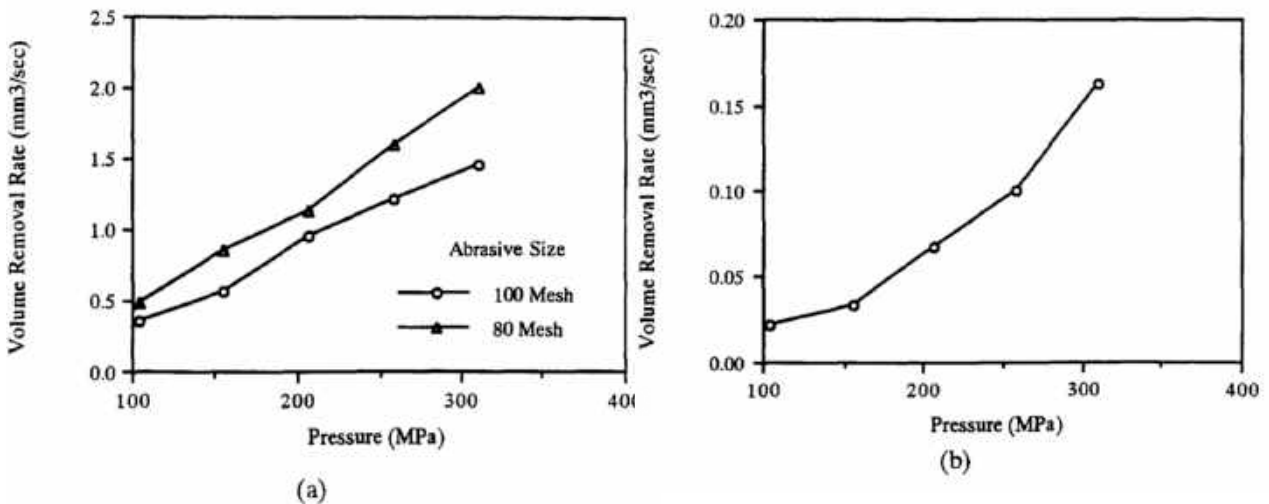
Μετρήθηκε πειραμάτικα η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων συνολικά στο αποτέλεσμα της κατεργασίας: στο πλάτος και την μορφή του αυλακιού, την κλίση του, την επιφανειακή τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας, τον ρυθμό αποβολής υλικού και την ικανότητα διαμπερούς κοπής. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Comprehensive results from the present study				
Cutting results	Cutting parameters			
	Pressure	Traverse speed	Abrasive flow rate	Abrasive size
	↑	↑	↑	↑
Kerf width	↑	↓	↑	↑
Taper ratio	↓	↑	×	↓
Surface roughness	×	↑	↓	↑
Material removal rate	↑	↑	↑	↑
Through-cut capability	↑	↓	↑	↑

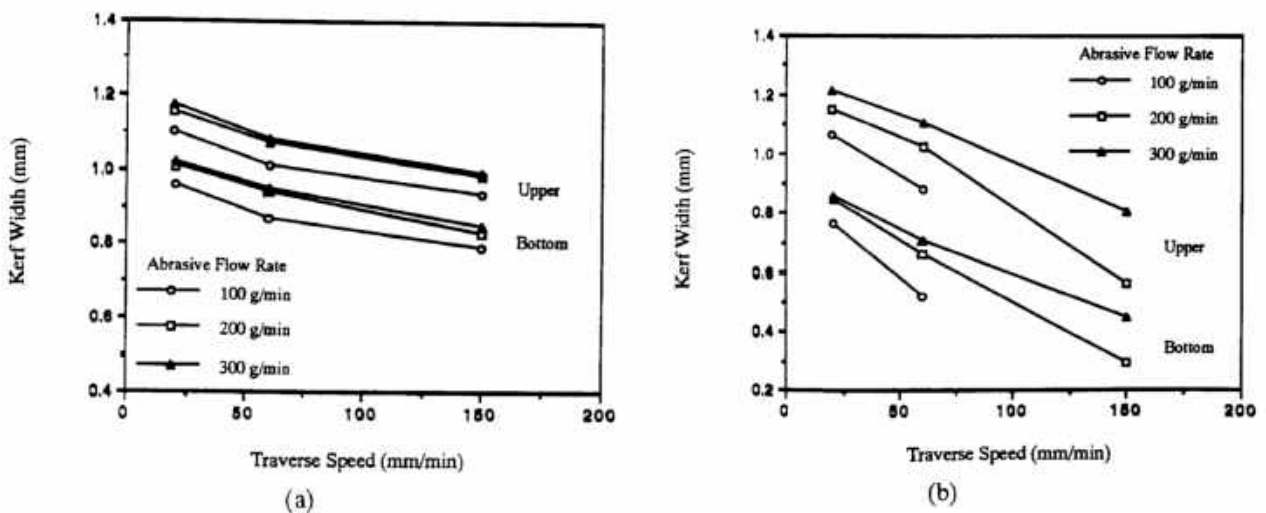
(↑) Increase; (↓) decrease; (×) not obvious.

Εικόνα 2.22. Συμπεράσματα του πειράματος [43].

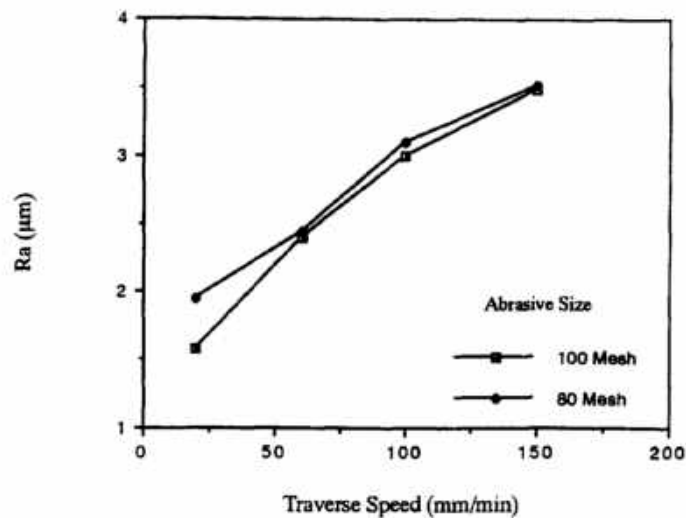
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι βασικούς παράγοντας στο MRR είναι η πίεση και αμέσως μετά η παροχή του αποξεστικού. Προκειμένου να γίνει κοπή με πλήρη διείσδυση της δέσμης χρειάζεται ένας κρίσιμος συνδυασμός των τριών παραμέτρων, γενικά για χαμηλές ταχύτητες πρόωσης και υψηλές πιέσεις δεν επιτυγχάνεται διαμπερής κοπή. Συνδυασμός υψηλής πίεσης με μέτρια ταχύτητα πρόωσης και κόκκους λειαντικού υλικού μικρότερης διαμέτρου παράγουν λεία επιφάνεια.



Εικόνα 2.23. Σχέση μεταξύ ογκομετρικού ρυθμού αποβολής υλικού και πίεσης: (a) Al_2O_3 , $ma = 100$ g/min, $vf = 150$ mm/min (b) Si_3N_4 , $ma = 100$ g/min, $vf = 20$ mm/min, 80 mesh size [43].



Εικόνα 2.24. Σχέση μεταξύ πλάτους και ταχύτητας πρόωσης με: πίεση 310 MPa, 100 mesh size, σε πάχη (a) 0.65 mm (b) 1.35 mm [43].



Εικόνα 2.25. Επίδραση μεγέθους κόκκων λειαντικού στην τραχύτητα για διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης, $P = 310 \text{ MPa}$, $ma = 300 \text{ g/min}$ για πάχος τεμαχίου 1.35 mm [43].

Οι S. S. Momin και S. A. Patil [44] διεξήγαγαν πειράματα με AWJM σε τεμάχια από χυτοσίδηρο με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και αυξημένη αντοχή σε φθορά. Μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στον ρυθμό αποβολής υλικού (MRR) και στην επιφανειακή τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας (Ra). Κατά την κατεργασία κόπηκαν τεμάχια διαστάσεων $15 \times 15 \times 200 \text{ mm}$ από Carbide Austempered Ductile Iron χημικής σύστασης C-1.79, Mn-0.54, Cr-2.30, Ni-0.51, Mo-0.014, S-0.013, P-0.016, Si-2.02, Al- 0.027, Cu-0.63, Mg-0.054, Ti-0.010. Ως παράμετροι κατεργασίας εξετάστηκαν η ταχύτητα πρόωσης, η απόσταση της κοπτικής κεφαλής και η παροχή του λειαντικού υλικού.

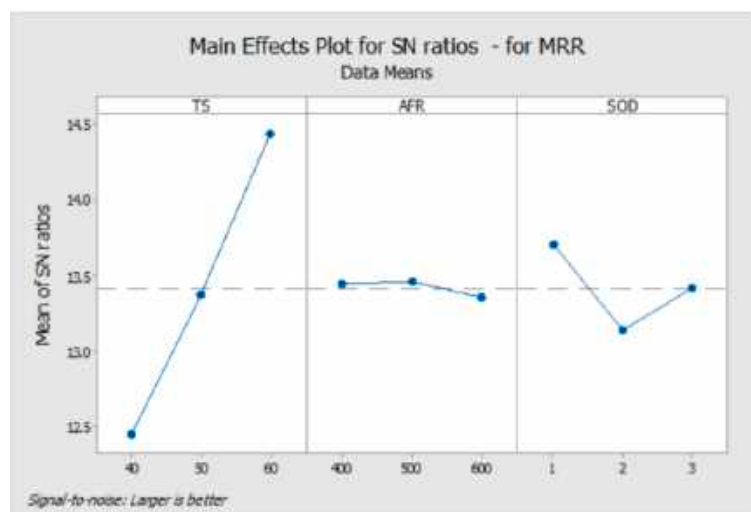
Η διάταξη AWJM αποτελείται από εργαλειομηχανή τύπου Water Jet Germany εξοπλισμένη με αντλία υπερυψηλής πίεσης τύπου KMT Jetline-50, ονομαστικής πίεσης 550000 psi και μέγιστης παροχής 3.81 l/min , το ακροφύσιο της δέσμης νερού είναι 0.35 mm και το ακροφύσιο εκτόξευσης της αποξεστικής δέσμης έχει διάμετρο 1.1 mm ενώ ως αποξεστικό χρησιμοποιήθηκε γρανάτης (80 mesh size). Για τον σχεδιασμό μελέτης του πειράματος έγινε εφαρμογή της μεθόδου Taguchi χρησιμοποιώντας διάταξη ορθογωνικής συστοιχίας L_9 με χρήση του λογισμικού 'MINITAB 17', επιλέγοντας ως παράγοντες ελέγχου την ταχύτητα πρόωσης, την παροχή και την απόσταση σε τρία επίπεδα όπως φαίνονται στην εικόνα 2.26. Για τον υπολογισμό του MRR ζυγίστηκε το τεμάχιο πριν και μετά την κατεργασία και στην συνέχεια υπολογίστηκε ως ο λόγος της διαφοράς αυτής προς τον χρόνο κοπής. Για τον υπολογισμό της τραχύτητας, χρησιμοποιήθηκε τραχύμετρο τύπου MARSURF-M-400 κάνοντας μετρήσεις 3 mm κάτω από την επιφάνεια του τεμαχίου. Για τα διαγράμματα S/N ratio χρησιμοποιήθηκε η αρχή 'the larger-the-better' όσον αφορά το MRR και 'the smaller-the-better' για την τραχύτητα προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές των

παραμέτρων για κάθε απόκριση αφού το ζητούμενο είναι μεγιστοποίηση του ρυθμού αποβολής υλικού και ελαχιστοποίηση της τραχύτητας στην κατεργασμένη επιφάνεια. Στην συνέχεια έγινε στατιστική ανάλυση ANOVA για να προσδιορισθεί η ποσοστιαία συνεισφορά της κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα.

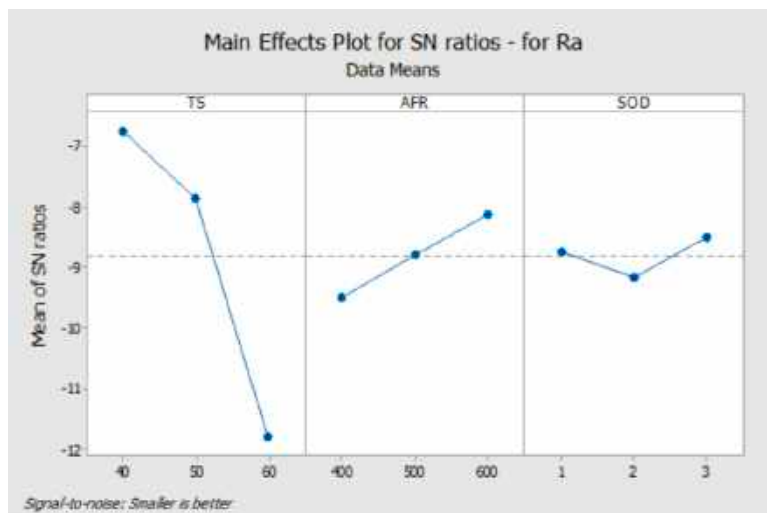
Sr. No.	Input Parameters		Levels		
	Title	Abbreviation	1	2	3
1	Traverse Speed (mm/min)	TS	40	50	60
2	Abrasive Flow Rate (gms/min)	AFR	400	500	600
3	Stand-off Distance (mm)	SOD	1	2	3

Εικόνα 2.26. Οι παράμετροι και τα επίπεδα τους [44].

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ταχύτητα πρόωσης με ποσοστό 89.26% έχει την μεγαλύτερη επίδραση στο MRR ακολουθούμενη από την απόσταση με ποσοστό 6.7% και την παροχή με 0.43%. Για την τραχύτητα, πάλι σημαντικότερη παράμετρος είναι η ταχύτητα πρόωσης με ποσοστό συμμετοχής 94.33%, μετά η παροχή με 4.9% και τέλος η απόσταση με 0.49%. Η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων για μεγιστοποίηση του MRR είναι: 60 mm/min, 500 gms/min, 1 mm. Ενώ η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων για ελαχιστοποίηση της Ra είναι : 40 mm/min, 600 gms/min, 1 mm.



Εικόνα 2.27. Διάγραμμα επίδρασης παραμέτρων στο S/N ratio για το MRR [44].



Εικόνα 2.28. Διάγραμμα επίδρασης παραμέτρων στο S/N ratio για το R_a [44].

Οι Deepak Doreswamy et al. [45] μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας AWJM, σε τεμάχιο από χάλυβα AISI D2, στο πλάτος του αυλακιού κοπής και στην επιφανειακή τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Ως παράμετροι κατεργασίας προς διερεύνηση λήφθηκαν η απόσταση της κοπτικής κεφαλής και η ταχύτητα πρόωσης. Το τεμάχιο από AISI D2 χάλυβα έχει χημική σύσταση όπως φαίνεται στον πίνακα, πυκνότητα $7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, σημείο τήξης τους 2590°F και μέση σκληρότητα 58 HRC.

Εικόνα 2.29. Χημική σύσταση τεμαχίου [45].

Material Composition	Fe	Cr	C	Mo	V	Co	Mn	Si	Ni	Cu	P	S
Wt. percentage	Base Metal	11.00 -13.00	1.40 -1.60	0.70 -1.20	1.10	1.00	0.60	0.60	0.30	0.25	0.03	0.03

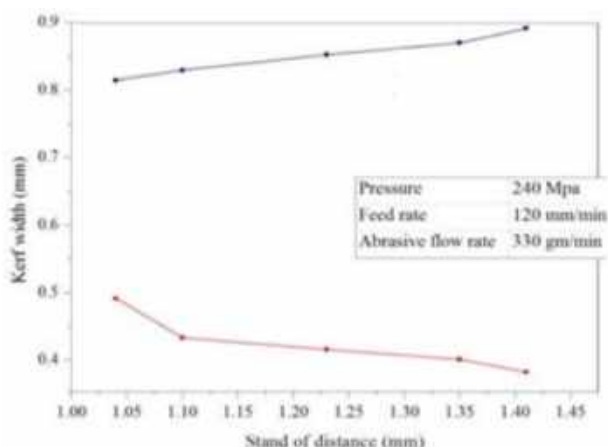
Οι τιμές των παραμέτρων κατεργασίας φαίνονται στην εικόνα 2.30, τα πειράματα γίνονται σε τεμάχια πάχους 8 mm μεταβάλλοντας την απόσταση και την ταχύτητα πρόωσης ξεχωριστά κάθε φορά ενώ η πίεση και η παροχή διατηρούνται σταθερές. Η κατεργασία έγινε κάνοντας η κοπτική κεφαλή ένα πέρασμα ανά κοπή για την εξέταση της επίδρασης της απόστασης και δυο περάσματα για την ταχύτητα πρόωσης από τα τεμάχια ενώ το πλάτος μετρήθηκε μέσω μικροσκοπίου και η τραχύτητα με τραχύμετρο τύπου Taylor and Hobson Surtronic. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυξάνοντας την απόσταση, αυξάνεται το πλάτος του αυλακιού στο πάνω τμήμα του τεμαχίου ενώ μειώνεται στο κάτω μέρος του τεμαχίου, στην εικόνα 2.31 παρατηρείται ότι για την ίδια αύξηση στην απόσταση, το πάνω κομμάτι του αυλακιού έχει αύξηση 18% ενώ το πλάτος στο κάτω μέρος του αυλακιού έχει μείωση 25%. Η τραχύτητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση του στομίου

αυτό συμβαίνει διότι η δέσμη την στιγμή της πρόσκρουσης με το τεμάχιο έχει λιγότερη κινητική ενέργεια με αποτέλεσμα τα σωματίδια του λειαντικού να μην μπορούν να διαβρώσουν αποτελεσματικά το τεμάχιο.

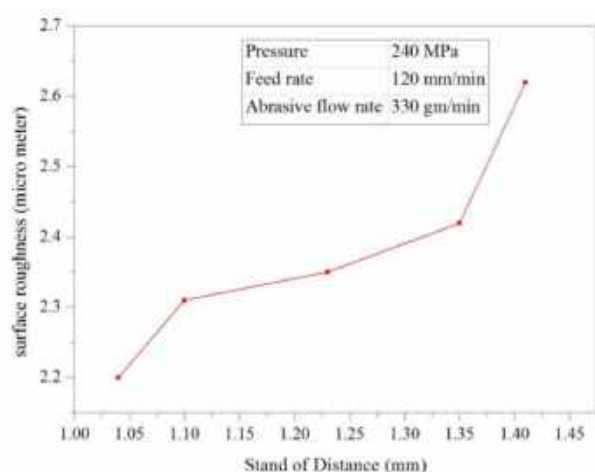
Process parameters	Settings
Pressure	240 MPa
Standoff distance	1 - 1.5 mm
Abrasive flow rate	330 gm/min
Feed rate	90 - 175 mm/min
Abrasive used	Garnet (80 mesh)
Nozzle diameter	0.76 mm (Make: Kennametal)

Εικόνα 2.30. Οι παράμετροι κατεργασίας και οι τιμές τους [45].

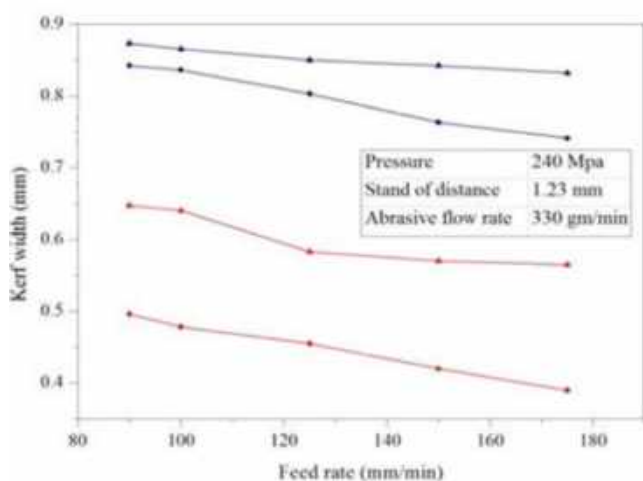
Όσον αφορά την ταχύτητα πρόωσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για ίδια τιμή της παραμέτρου τα πλάτη της κοπής που προέκυψαν με 2 περάσματα είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα που προκύπτουν για ένα πέρασμα. Αυξάνοντας την ταχύτητα τα πλάτη μειώνονται καθώς η δέσμη κοπής προσκρούει το τεμάχιο λιγότερη ώρα. Η εικόνα 2.34 δείχνει ότι αυξάνοντας την ταχύτητα, αυξάνεται και η τραχύτητα, ενώ όπως παρατηρείται από τις εικόνες 2.31 και 2.32, η τραχύτητα στα τεμάχια που έγινε διπλό πέρασμα της δέσμης είναι μικρότερη ενώ παράλληλα μειώνεται και η διαφορά των πλατών στα αυλάκια κατά 27%, μειώνοντας έτσι την κλίση του αυλακιού. Συνολικά προτείνεται κοπή με πολλαπλά περάσματα για παχύτερα τεμάχια.



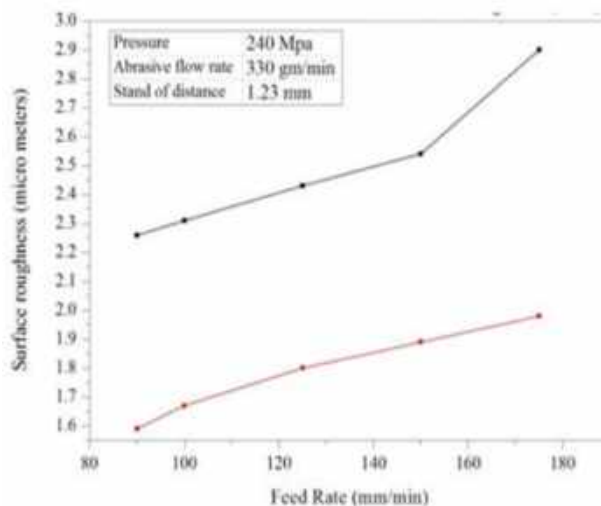
Εικόνα 2.31. Επίδραση της απόστασης στα πλάτη [45].



Εικόνα 2.32. Επίδραση της απόστασης στην επιφανειακή τραχύτητα [45].



Εικόνα 2.33. Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στα πλάτη - Με ένα και δυο περάσματα [45].



Εικόνα 2.34. Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στην επιφανειακή τραχύτητα - Με ένα και δυο περάσματα [45].

Οι B. Satyanarayana και G. Spikar [46], διεξήγαγαν μια σειρά πειραμάτων σε τεμάχιο από κράμα νικελίου Inconel 718 μέσω AWJM προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού (MRR) αλλά και το πλάτος των αυλακιών. Έγιναν συνολικά 27 πειράματα επιλέγοντας ως παραμέτρους κατεργασίας την παροχή του αποξεστικού, την πίεση και την απόσταση του στομίου από το τεμάχιο. Οι παράμετροι επιλέχθηκαν ως παράγοντες ελέγχου σε 3 επίπεδα σύμφωνα με την μέθοδο του Taguchi, όπως φαίνονται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2. Τα επίπεδα των παραμέτρων.

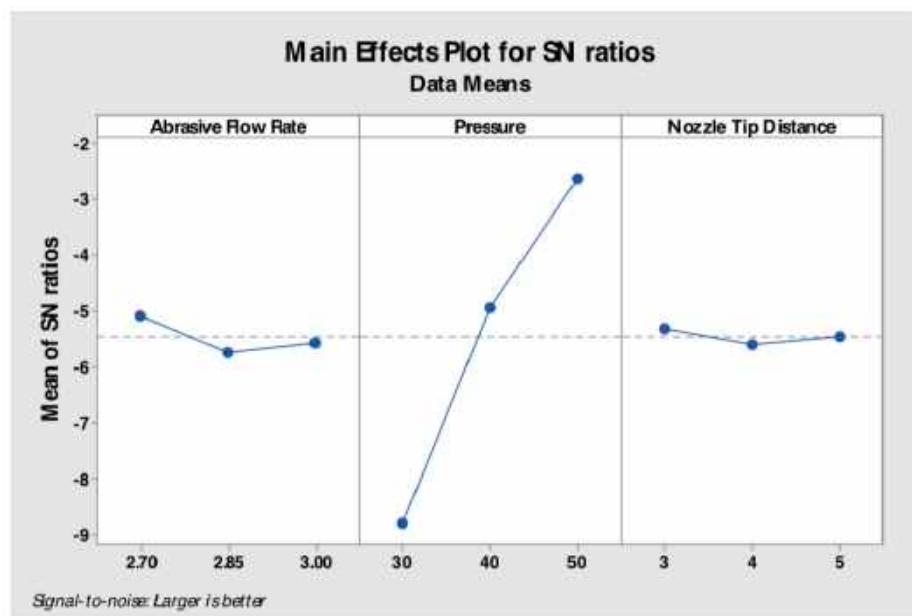
Parameters	Symbol	Level 1	Level 2	Level 3
Abrasive flow rate (lb/rate)	(A)	2.7	2.85	3
Pressure (kpsi)	(B)	30	40	50
Standoff distance (mm)	(C)	3	4	5

Βάση των παραπάνω τιμών και του ελάχιστου δυνατού αριθμού πειραμάτων προς διεξαγωγή, επιλέχθηκε πίνακας σε ορθογώνια συστοιχία L_{27} . Όλα τα πειράματα έγιναν με γωνία πρόσκρουσης της δέσμης 90 μοιρών ενώ ο ογκομετρικός ρυθμός αποβολής υλικού υπολογίστηκε ως ο λόγος της ογκομετρικής διαφοράς προς τον χρόνο κοπής. Τα τεμάχια μετρήθηκαν πριν και μετά την κατεργασία ενώ για τον υπολογισμό του πλάτους έγινε χρήση οπτικού μικροσκοπίου μεγέθυνσης $\times 10$ με ελάχιστη μετρητική ικανότητα 0.02 mm. Η κατεργασία έγινε με εργαλειομηχανή DWJ Flying Arm CNC εξοπλισμένη με αντλία τύπου KMT ονομαστική πίεσης 380 MPa και ονομαστική παροχή 2.3 l/min. Όλα τα πειράματα έγιναν με ένα πέραςμα της δέσμης από το τεμάχιο και

χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια γρανίτη ως αποξεστικό υλικό. Έπειτα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MINITAB 17 για την στατιστική ανάλυση (ANOVA) και για το πλοτάρισμα των διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα εδείξαν ότι οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων είναι: 20.41 g/sec παροχής αποξεστικού, 344.7 MPa πίεση και 3 mm απόσταση στομίου δίνοντας 1.54 mm πλάτος αυλακιού και 1053.2 mm³/min MRR αντίστοιχα. Επίσης από την στατιστική ανάλυση φάνηκε ότι μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα έχει η πίεση από τις υπόλοιπες δυο παράμετρους. Ακόμη σχεδιάστηκε μια σχέση πρόβλεψης για την εξακρίβωση των βέλτιστων αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε, τα αποτελέσματα της σχέσης πρόβλεψης συγκριτικά με το πειραματικό βάσει των 3 βέλτιστων τιμών φαίνονται στον πίνακα 2.3 συγκρίνοντας τις τιμές των λόγων S/N. Οι τιμές είναι εξαιρετικά κοντά πράγμα που επιβεβαιώνει ότι οι επιλεγμένες τιμές των παραμέτρων είναι οι βέλτιστες.

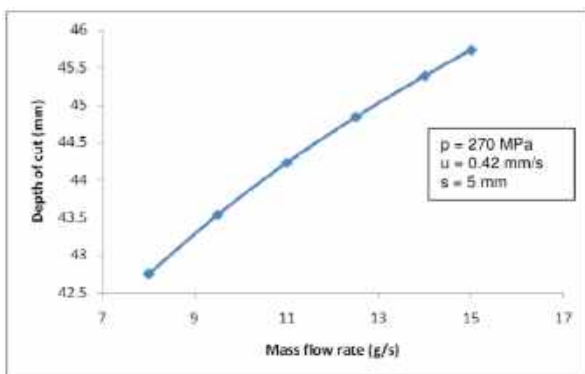
Πίνακας 2.3. Οι λόγοι S/N

$\eta_{\text{predicted}}$ (dB)	-1.298
$\eta_{\text{conformation}}$ (dB)	-1.362

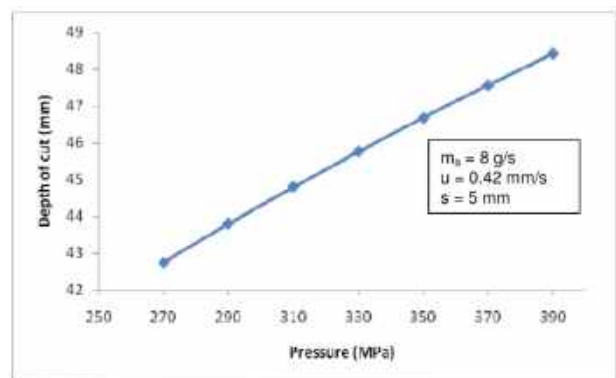


Εικόνα 2.35. Διάγραμμα επίδρασης παραμέτρων στο S/N ratio [46].

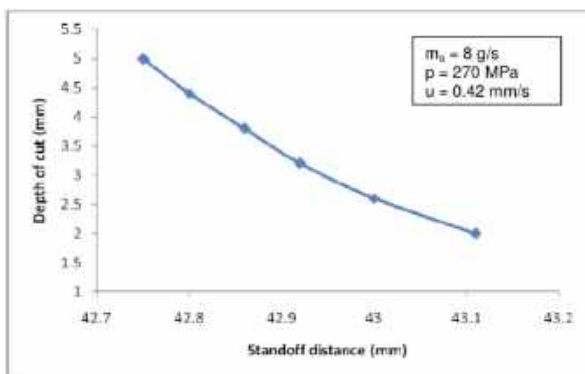
Οι Μ. Chithirai Pon Selvan et al. [47] διεξήγαγαν μια σειρά πειραμάτων μελετώντας την επίδραση των παραμέτρων της AWJM στο βάθος κοπής τεμαχίου απο ανοξείδωτο ατσάλι. Οι παράμετροι της κατεργασίας που μελετήθηκαν είναι η πίεση, η απόσταση του στομίου, η παροχή του λειαντικού υλικού και η ταχύτητα πρόωσης της κοπτικής κεφαλής. Για την κατεργασία χρησιμοποιήθηκαν πλάκες απο ανοξείδωτο ατσάλι πυκνότητας 8000 kg/m^3 και μέτρου ελαστικότητας 193000 MPa , διαστάσεων $150 \times 100 \times 60 \text{ mm}$. Η πειραματική διαδικασία έγινε στο ακόλουθο εύρος τιμών των παραμέτρων: η πίεση απο 270 MPa εως 400 MPa , η ταχύτητα πρόωσης απο 0.42 mm/s εως 2.5 mm/s , η απόσταση απο 1.75 mm εως 5 mm και η παροχή του αποξεστικού υλικού απο 8 g/s εως 15 g/s . Η εργαλειομηχανή είναι τύπου Water Jet Sweden εξοπλισμένη με αντλία υπερυψηλής πίεσης τύπου KMT ονομαστικής πίεσης 400 MPa ενώ χρησιμοποιήθηκαν κόκκοι γρανάτη ως αποξεστικό υλικό με μέση διάμετρο κόκκου 0.18 mm και πυκνότητα 4100 kg/m^3 . Επιπλέον των πειραματικών αποτελεσμάτων, έγινε ανάλυση παλινδρόμησης και σχεδιάστηκε μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης του βάθους κοπής δίνοντας αποτελέσματα με μέση απόκλιση 5% απο τα πειραματικά αποτελέσματα, καθιστώντας το έτσι έγκυρο μοντέλο. Η συσχέτιση των παραμέτρων με το βάθος κοπής φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα.



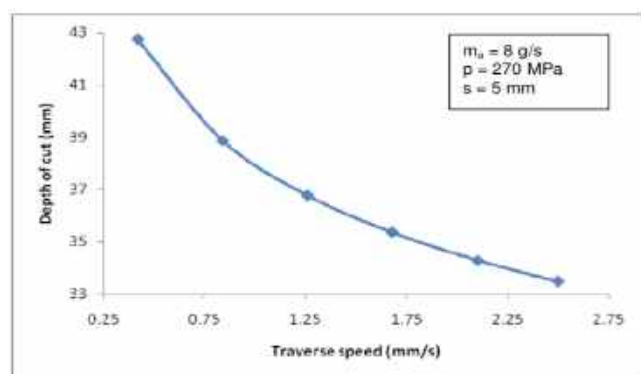
Εικόνα 2.36. Βάθος κοπής - Παροχή λειαντικού υλικού [47].



Εικόνα 2.37. Βάθος κοπής - Πίεση [47].



Εικόνα 2.38. Βάθος κοπής - Απόσταση κεφαλής [47].

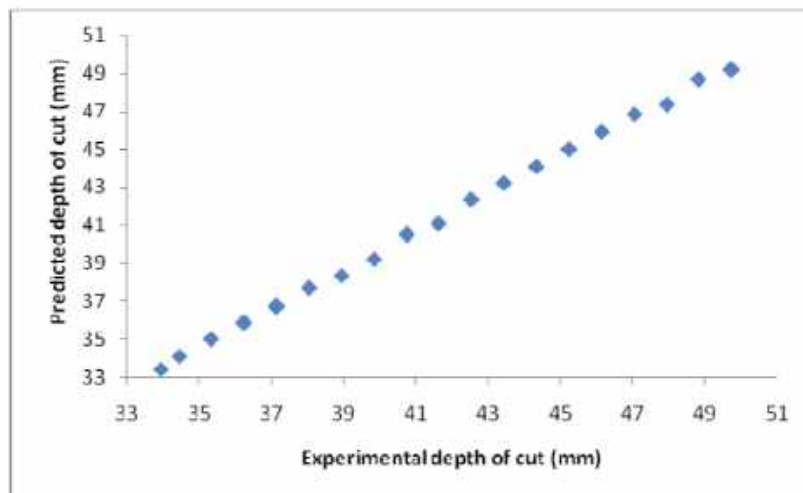


Εικόνα 2.39. Βάθος κοπής - Ταχύτητα πρόωσης [47].

Η μελέτη της επίδραση της κάθε παραμέτρου έγινε κάθε φορά διατηρώντας τις άλλες παραμέτρους σταθερές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυξάνοντας την πίεση αυξάνεται αντίστοιχα και το βάθος κοπής, αυξάνοντας την παροχή του αποξεστικού αυξάνεται εξίσου το βάθος κοπής, αντίθετα μειώνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης, τέλος αυξάνοντας την απόσταση του στομίου μειώνεται το βάθος κοπής αλλά σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με την ταχύτητα πρόωσης. Ακολουθεί το μοντέλο πρόβλεψης του βάθους κοπής και τα προβλεπόμενα βάθη κοπής συγκριτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα.

$$D_c = 13.14344 \times \frac{p^{0.339} m_a^{0.107} d_p^{1.795} \rho_p^{0.878}}{u^{0.137} s^{0.009} \rho_w d_j}$$

Εικόνα 2.40. Σχέση μοντέλου πρόβλεψης βάση της regression analysis [47].



Εικόνα 2.41. Σύγκριση πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών για το βάθος κοπής [47].

Οι R. Shibin et al. [48] μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων AWJM στο βάθος κοπής τεμαχίου κράματος αλουμινίου AA2014. Οι παράμετροι που ελέγχθηκαν είναι η πίεση, η παροχή αποξεστικού υλικού, η απόσταση του στομίου από το τεμάχιο και η ταχύτητα πρόωσης. Ο σχεδιασμός του πειράματος έγινε βάση του Taguchi σε ορθογώνια συστοιχία L₉ επιλέγοντας τις τέσσερις παραμέτρους ως παράγοντες ελέγχου σε τρία επίπεδα όπως φαίνεται στον πίνακα 2.4. Χρησιμοποιήθηκε καρβίδιο του πυριτίου ως αποξεστικό υλικό και μετά από κάθε κοπή μετρήθηκε το βάθος κοπής με μηχανική όραση, τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 2.42.

Πίνακας 2.4. Οι παράμετροι και τα επίπεδα τους

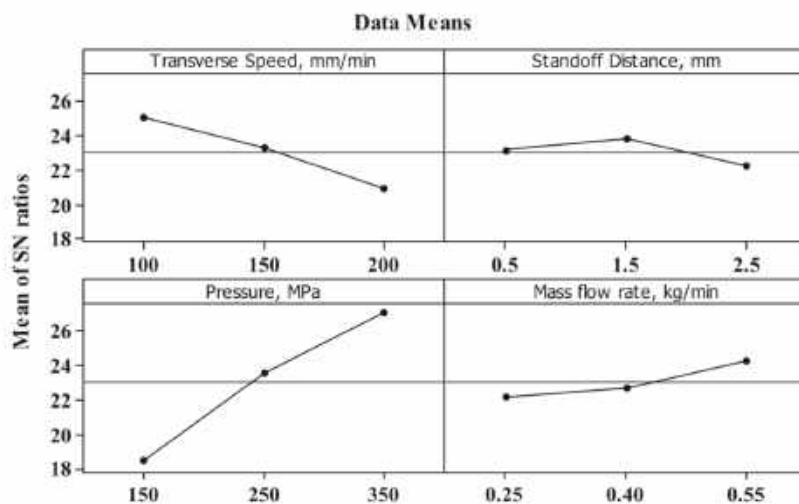
Control Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
Transverse speed (mm/min)	100	150	200
Standoff Distance (mm)	0.5	1.5	2.5
Pressure (MPa)	150	250	350
Mass flow rate (kg/min)	0.25	0.4	0.55

Με χρήση στατιστικής ανάλυσης ANOVA, καθορίστηκε η ποσοστιαία επίδραση των παραμέτρων στην κατεργασία με τα ακόλουθα αποτελέσματα : σημαντικότερη επίδραση έχει η πίεση με ποσοστό συνεισφοράς 70.16%, ακολουθεί η ταχύτητα πρόωσης με ποσοστό 20.91%, η παροχή λειαντικού με 7.48% και τέλος η απόσταση με ασήμαντη επίδραση και ποσοστό 1.46%. Το διάγραμμα S/N ratio δείχνει ότι η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων για μέγιστο βάθος κοπής είναι: 100 mm/min, 1.5 mm, 350 MPa και 0.55 kg/min, δίνοντας βάθος κοπής 31.07 mm. Στην συνέχεια σχεδιάστηκε ένα μοντέλο βάσει της ανάλυσης παλινδρόμησης για την πρόβλεψη του βάθους κοπής και επαληθεύθηκε η αξιοπιστία για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων δίνοντας απόκλιση μόνο 4.4% από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Experimental design with a depth of cut.

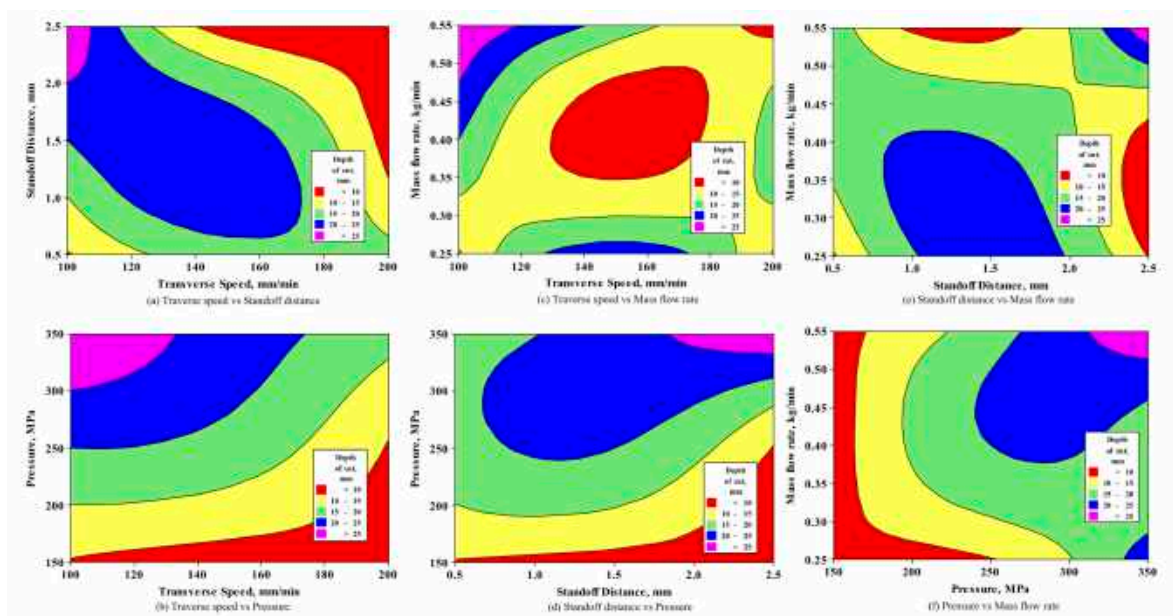
Transverse Speed (mm/min)	Standoff Distance (mm)	Pressure (MPa)	Mass flow rate (kg/min)	Depth of Cut (mm)
100	0.5	150	0.25	9.63
100	1.5	250	0.4	20.00
100	2.5	350	0.55	29.70
150	0.5	250	0.55	17.90
150	1.5	350	0.25	22.83
150	2.5	150	0.4	7.50
200	0.5	350	0.4	17.20
200	1.5	150	0.55	8.20
200	2.5	250	0.25	9.72

Εικόνα 2.42. Πειραματικά αποτελέσματα [48].



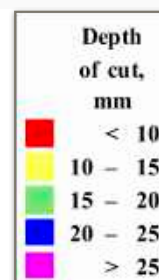
Signal-to-noise: Larger is better

Εικόνα 2.43 Επίδραση των παραμέτρων στο S/N ratio [48].



Εικόνα 2.44. Επίδραση των παραμέτρων στο βάθος κοπής.

- (a) ταχύτητα πρόωσης με απόσταση
- (b) ταχύτητα πρόωσης με πίεση
- (c) ταχύτητα πρόωσης με παροχή λειαντικού
- (d) απόσταση με πίεση
- (e) απόσταση στομίου με παροχή
- (f) πίεση με παροχή [48].



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

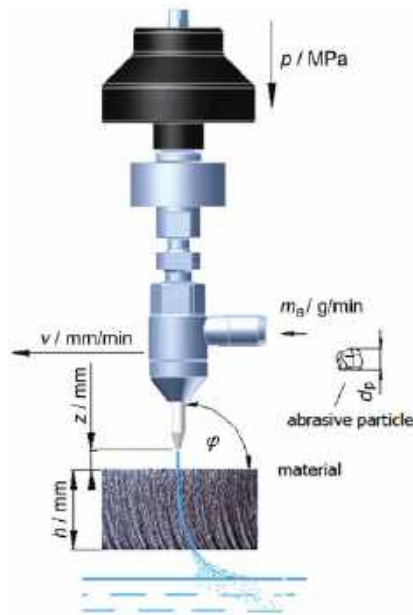
3.1 Περιγραφή του πειράματος

Το πείραμα διεξήχθη σε συνεργασία με το εργαστήριο του τομέα κατεργασιών του πανεπιστημίου της Κρακοβίας AGH UST. Πραγματοποιήθηκαν κοπές με χρήση AWJM σε δοκίμιο χάλυβα S355 υπό διαφορετικές πειραματικές συνθήκες. Ο σχεδιασμός του πειράματος έγινε βάση της μεθόδου Taguchi και στην συνέχεια διεξήχθησαν κοπές με 27 συνθήκες και αναλύθηκαν τα τελικά αποτελέσματα. Κάθε κοπή αντιστοιχεί στην διάνοιξη ενός αυλακιού στο τεμάχιο. Έγινε παρατήρηση των αυλακιών κοπής με στερεοσκόπιο και μικροσκόπιο και λήφθηκαν φωτογραφίες ώστε να μετρηθούν ψηφιακά τα βάθη και πλάτη κοπής. Στην συνέχεια κάνοντας στατιστική ανάλυση στα πειραματικά αποτελέσματα, αποτυπώθηκε ο τρόπος επίδρασης της κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα της κοπής. Σε πρώτη φάση ελέγχθηκε ο τρόπος επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας για κάθε κοπή στο βάθος αλλά και στο πλάτος του εκάστοτε αυλακιού αφού η γεωμετρία του αυλακιού είναι ιδιάζουσα σημασίας, τόσο γιατί είναι καθοριστικός παράγοντας για την διαστατική ακρίβεια και την συναρμογή του κατεργαζόμενου τεμαχίου όσο και γιατί απο αυτήν εξαρτάται ο όγκος του υλικού που αφαιρείται κατά την κοπή.

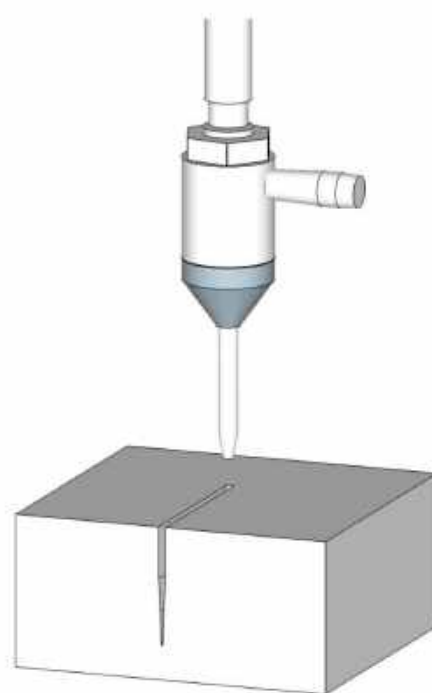
3.2. Συνθήκες πειράματος

Ως παράμετροι της κατεργασίας λήφθηκαν η παροχή κόκκων του λειαντικού υλικού [ma (g/s)], η απόσταση του στομίου εκτόξευσης της κοπτικής κεφαλής απο το τεμάχιο [h (mm)], η ταχύτητα πρόωσης της κοπτικής κεφαλής [vf (mm/min)] και η υδραυλική πίεση της κοπτικής δέσμης [P (MPa)]. Κάθε αυλάκι έχει μήκος 60 mm ενώ το πλάτος και το βάθος εξαρτώνται απο τις εκάστοτε παραμέτρους. Οι παράμετροι που διατηρούνται σταθερές κατά την διεξαγωγή του πειράματος είναι το ακροφύσιο της δέσμης νερού πριν την ανάμειξη με το λειαντικό υλικό 0,3 mm, η διάμετρος του στομίου εκτόξευσης της κοπτικής δέσμης 1 mm και η κλίση της κοπτικής κεφαλής ως προς το τεμάχιο που παρέμενει 90°, συνεπώς η δέσμη είναι πάντα κάθετη στο τεμάχιο κατά την διάρκεια των κοπών. Ως αποξεστικό υλικό χρησιμοποιήθηκαν κόκκοι γρανάτη 80 mesh size με πυκνότητα 4100 kg/m³, ο γρανάτης αποτελείται απο 36% FeO, 33% SiO₂, 20% Al₂O₃, 4% MgO, 3% TiO₂, 2%

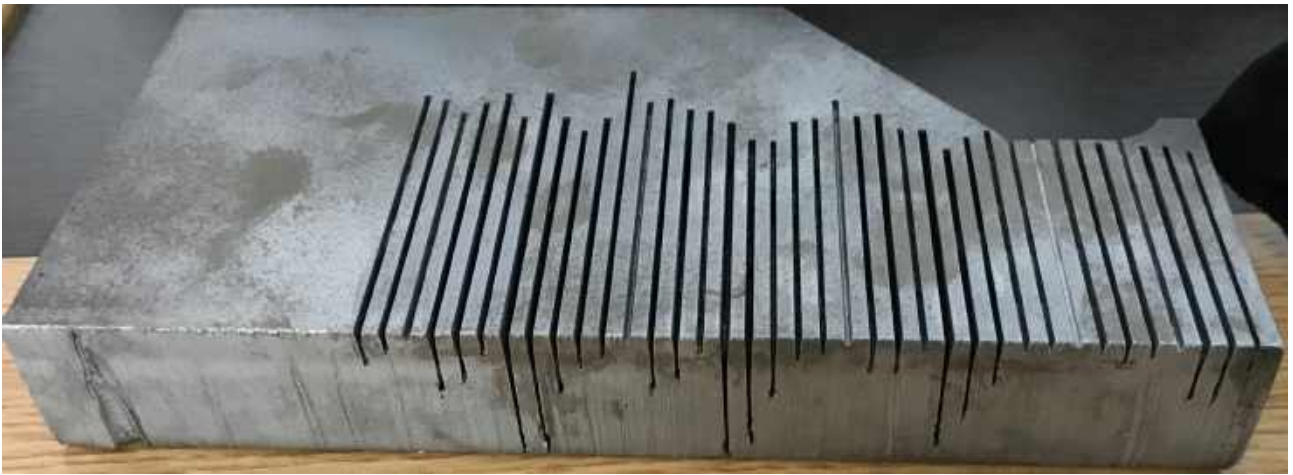
CaO και 2% MnO₂ . Το τεμάχιο είναι απο χάλυβα S355 με χημική σύσταση 0.2 C, 0.55 Si, 1.6 Mn, 0.03 P, 0.03 S, 0.012 N, 0.55 Cu, πυκνότητα 7850 kg/m³, αντοχή σε εφελκυσμό 550 MPa και όριο διαρροής 335 MPa. Κατά την διάρκεια της κατεργασίας του τεμαχίου, έγινε αρχικά μια δοκιμαστική κοπή στο τεμάχιο χωρίς να προσδιοριστούν οι παράμετροι και στην συνέχεια έγιναν 27 κοπές που μελετήθηκαν και βγήκαν συμπεράσματα. Παρακάτω παρατίθενται σχηματικά οι παράμετροι της κατεργασίας και ορισμένες εικόνες απο το τεμάχιο μετά την κατεργασία.



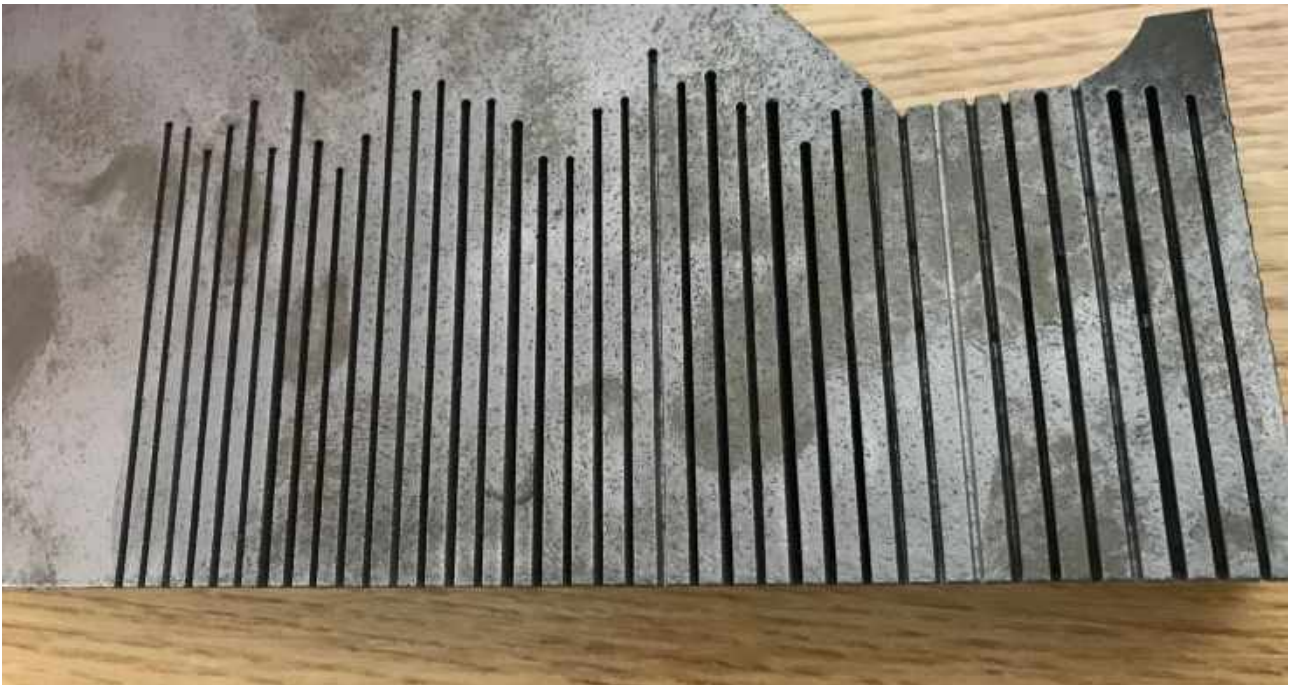
Εικόνα 3.1. Σχηματικά οι παράμετροι κατεργασίας [54].



Εικόνα 3.2. Τριδιάστατη αναπαράσταση διάνοιξης αυλακιού.



Εικόνα 3.3. Το τεμάχιο μετά την κατεργασία.



Εικόνα 3.4. Άνω όψη του τεμαχίου.



Εικόνα 3.5. Τα βάθη των κοπών.

3.3. Πειραματική διάταξη

Το πείραμα διεξήχθη σε εργαλειομηχανή υδροκοπής της εταιρείας H.G. RIDDER - Automatisierungs GmbH τύπου HWE -1520. Η μηχανή είναι εξοπλισμένη με χοάνη αποξεστικού υλικού βαρυτικού τύπου, σύστημα τροφοδοσίας αποξεστικού υλικού, πνευματικά ελεγχόμενη βαλβίδα και τραπέζι για την διεξαγωγή των κατεργασιών, διαστάσεων 1550 mm x 2050 mm.



Εικόνα 3.6. Η εργαλειομηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 3.7. Διαδικασία κοπής.

3.4. Μέτρηση βάθους - πλάτους

Για τον προσδιορισμό του βάθους και του πλάτους των αυλακιών έγινε χρήση οπτικού μικροσκοπίου και στερεοσκοπίου. Πρώτα έγινε λήψη φωτογραφιών μεγενθύνοντας κατάλληλα τα αυλάκια και στην συνέχεια έγινε ψηφιακή μέτρηση των ζητούμενων. Για την μέτρηση του βάθους χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο με μεγέθυνση 1.0x ενώ για την μέτρηση του πλάτους μικροσκόπιο με μεγέθυνση 5.0x. Οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό με τον ακόλουθο τρόπο, πρώτα λήφθηκε φωτογραφία μιας κλίμακας μέσω της μεγεθυντικής διάταξης και στην συνέχεια με χρήση του λογισμικού *Image J* μετρήθηκαν τα pixels της φωτογραφίας ώστε να λειτουργήσουν ως μέσο σύγκρισης για τον υπολογισμό του πλάτους και του βάθους για όλες τις φωτογραφίες που λήφθηκαν.

Για τον υπολογισμό του πλάτους λήφθηκαν φωτογραφίες σε τρία σημεία κατά μήκος του εκάστοτε αυλακιού και έγινε ψηφιακή μέτρηση σε τρία διαφορετικά ύψη ανά φωτογραφία, στην συνέχεια ο αριθμητικός μέσος των 9 συνολικά μετρήσεων ανά αυλάκι αποτέλεσε την οριστική πειραματική μέτρηση του πλάτους. Για το βάθος, η μέτρηση έγινε απευθείας από τις φωτογραφίες του βάθους μια φορά υπολογίζοντας την απόσταση από την επιφάνεια του τεμαχίου έως το βαθύτερο σημείο ανά αυλάκι, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.13. Ακολουθούν φωτογραφίες του εργαστηριακού εξοπλισμού και ενδεικτικές φωτογραφίες των αυλακιών όπως χρησιμοποιήθηκαν για την διαδικασία μέτρησης μέσω του λογισμικού *Image J*.



Εικόνα 3.8. Οπτικό μικροσκόπιο για λήψη φωτογραφιών του πλάτους των αυλακιών (Δυνατότητα μεγέθυνσης 5x - 200x).



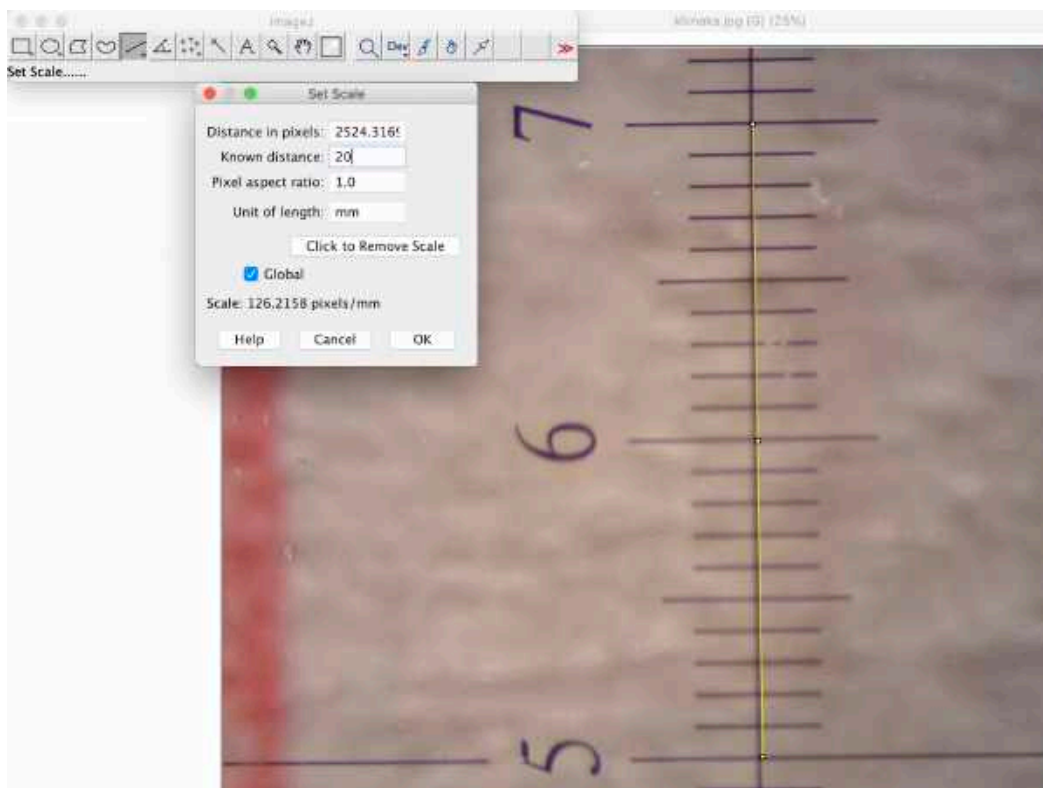
Εικόνα 3.9. Στερεοσκόπιο για λήψη φωτογραφιών του βάθους των αυλακιών.



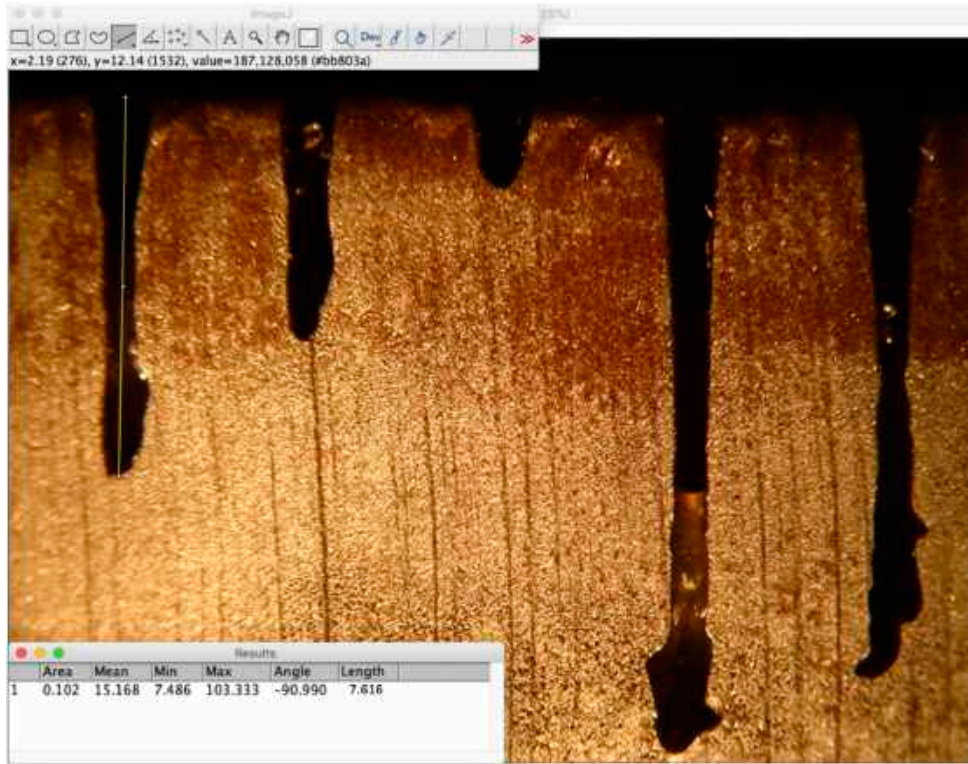
Εικόνα 3.10. Φωτογραφία βάθους κοπών 13 - 17.



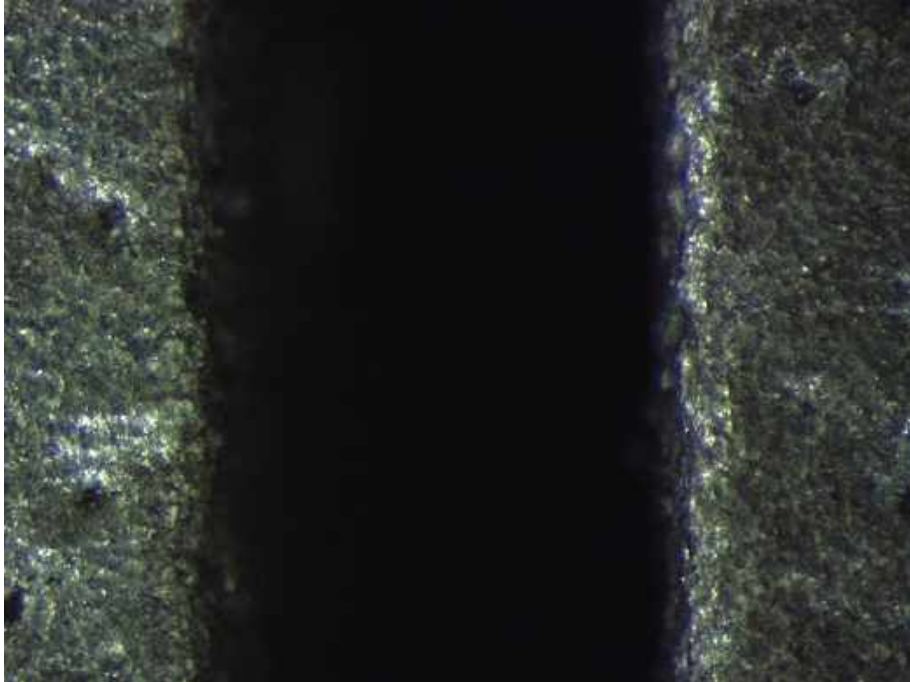
Εικόνα 3.11. Φωτογραφία βάρους κοπών 18 - 22.



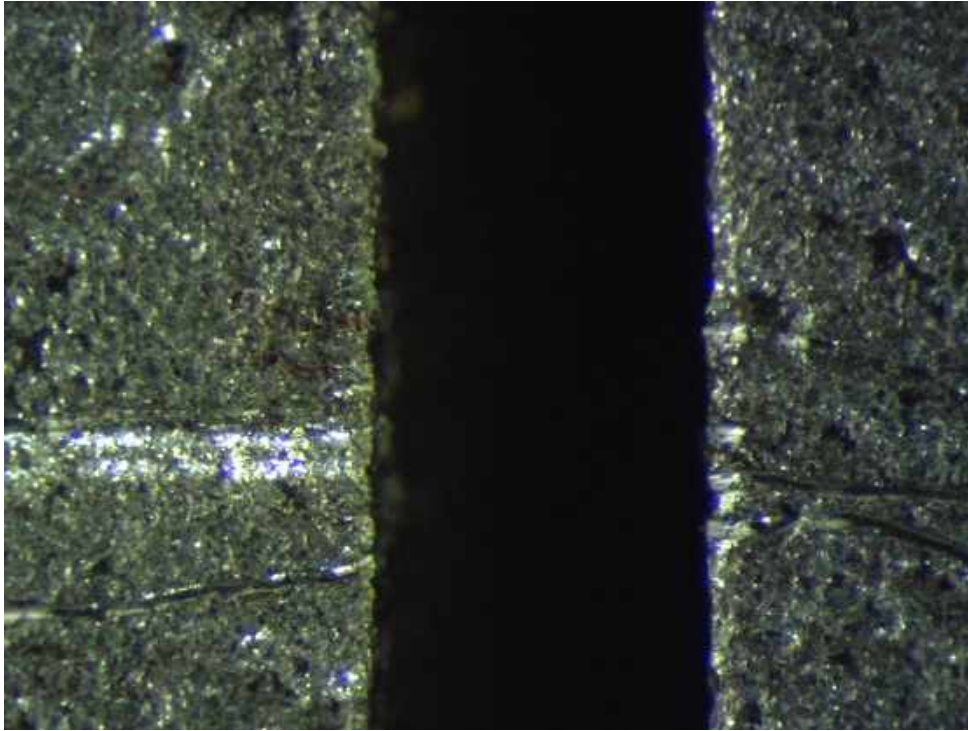
Εικόνα 3.12. Καθορισμός κλίμακας για τον υπολογισμό του βάρους.



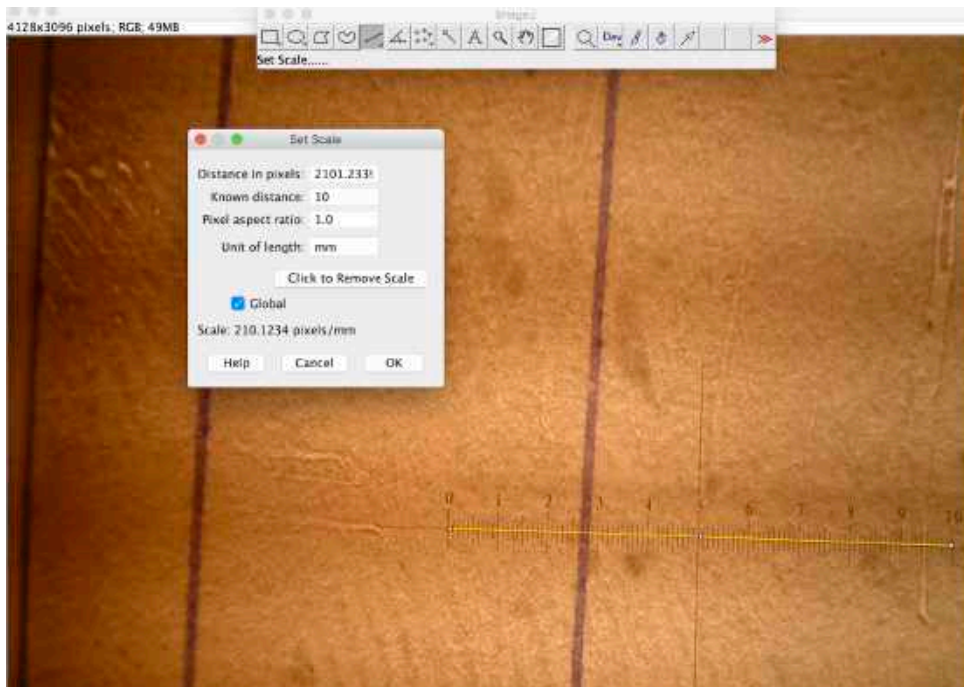
Εικόνα 3.13. Διαδικασία μέτρησης βάθους 27ης κοπής.



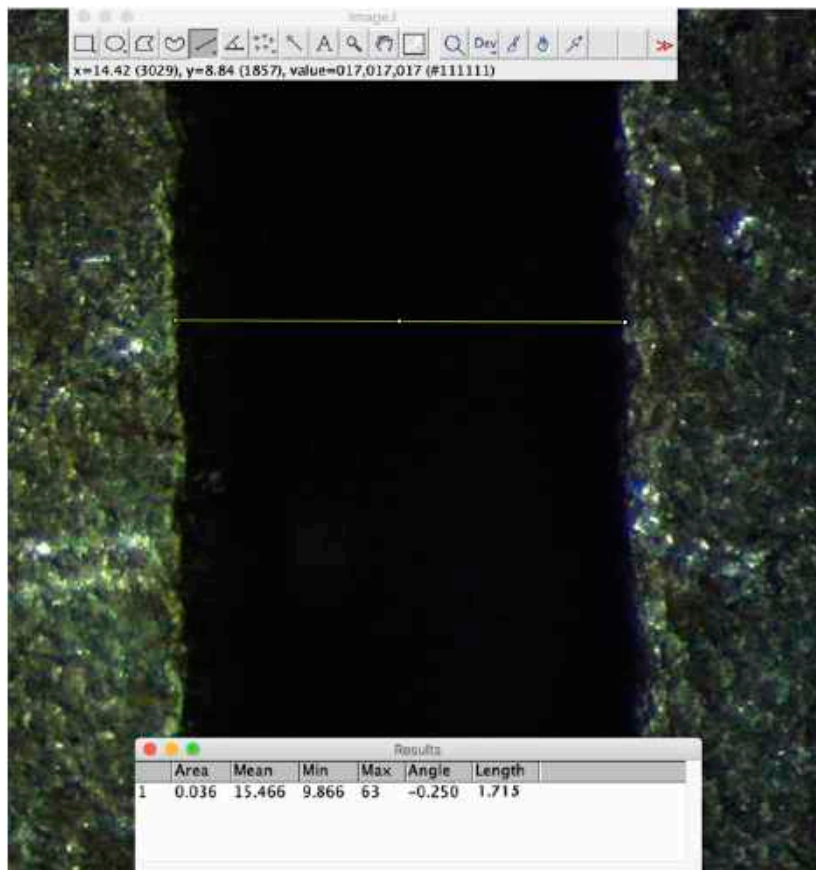
Εικόνα 3.14. 21η κοπή πλάτος = 1.448 mm, P = 400 MPa, h = 5 mm, ma = 8 g/s, vf = 100 mm/min



Εικόνα 3.15. 1η κοπή πλάτος = 1.18 mm, $P = 233$ MPa, $h = 1$ mm, $m_a = 2$ g/s, $v_f = 100$ mm/min.



Εικόνα 3.16. Καθορισμός κλίμακας υπολογισμού του πλάτους.



Εικόνα 3.17. Διαδικασία μέτρησης πλάτους 12ης κοπής.

3.5. Σχεδιασμός μελέτης του πειράματος

Γενικά η στοχαστική μοντελοποίηση ενός μεγέθους είναι αρκετά επίπονη και πολλές φορές πρακτικά ανεφάρμοστη αν δεν διατίθεται το κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα. Για τον λόγο αυτό η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το στατιστικό πακέτο MINITAB δίνοντας την δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων μέσω διαγραμμάτων.

Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό του πειράματος έγινε χρήση της μεθόδου Taguchi, ο Taguchi ανέπτυξε ένα ειδικό σχέδιο ορθογώνιων συστοιχιών για να μελετήσει όλο το χώρο παραμέτρων με ένα μικρό αριθμό πειραμάτων μόνο. Τα αποτελέσματα μετασχηματίζονται σε αναλογία σήματος προς θόρυβο (S/N). Ο λόγος S/N χρησιμοποιείται ως μέτρο χαρακτηριστικών ποιότητας που αποκλίνουν από ή πλησιάζουν τις επιθυμητές τιμές. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες χαρακτηριστικών ποιότητας στην ανάλυση της αναλογίας S/N: όσο χαμηλότερο τόσο το καλύτερο, όσο υψηλότερο τόσο το καλύτερο και το ονομαστικό το καλύτερο. Η συνάρτηση για τον υπολογισμό του λόγου S/N έχει ως εξής:

Όταν ζητάμε την μικρότερη τιμή:

$$\frac{S}{N}ratio(\eta) = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$$

Όταν ζητάμε την ονομαστική τιμή:

$$\frac{S}{N}ratio(\eta) = -10 \log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2}$$

Όταν ζητάμε την μεγαλύτερη τιμή:

$$\frac{S}{N}ratio(\eta) = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$$

Όπου y_i : η παρατηρηθείσα τιμή απόκρισης, n : ο αριθμός των αντιγράφων, μ : η μέση τιμή, σ : η διακύμανση

Ο Taguchi πρότεινε μία τυποποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης οποιωνδήποτε παραμέτρων διεργασίας.

Τα βήματα είναι:

- Προσδιορισμός του χαρακτηριστικού ποιότητας που πρέπει να βελτιστοποιηθεί.
- Προσδιορισμός των παραγόντων θορύβου και συνθηκών δοκιμής
- Προσδιορισμός των παραγόντων ελέγχου και των εναλλακτικών τους επιπέδων
- Σχεδιασμός του πειράματος και ορισμός της διαδικασίας ανάλυσης δεδομένων
- Διεξαγωγή του πειράματος
- Ανάλυση των δεδομένων και προσδιορισμός των βέλτιστων επιπέδων των παραγόντων ελέγχου
- Πρόβλεψη της απόδοσης σε αυτά τα επίπεδα [53].

Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό μητρώο L_9 του Taguchi, όσον αφορά το παρόν πείραμα προκύπτει ο εξής πίνακας των παραμέτρων κατεργασίας, όπου για κάθε τιμή πίεσης οι τιμές των τριών άλλων μεταβλητών (ταχύτητα πρόωσης, απόσταση στομίου και παροχή αποξεστικού υλικού) έχουν σχεδιαστεί με το ίδιο μητρώο L_9 κάθε φορά για τρεις παράγοντες ελέγχου σε τρία επίπεδα τιμών ο καθένας.

Πίνακας 3.1. Πίνακας Taguchi

A/A πειράματος	Ταχύτητα πρόωσης (mm/ min)	Παροχή αποξεστικού(g/ s)	Απόσταση στομίου (mm)	Πίεση (MPa)
1	100	2	1	233
2	100	5	3	233
3	100	8	5	233
4	300	2	3	233
5	300	5	5	233
6	300	8	1	233
7	500	2	5	233
8	500	5	1	233
9	500	8	3	233
10	100	2	1	317
11	100	5	3	317
12	100	8	5	317
13	300	2	3	317
14	300	5	5	317
15	300	8	1	317
16	500	2	5	317
17	500	5	1	317
18	500	8	3	317
19	100	2	1	400
20	100	5	3	400
21	100	8	5	400
22	300	2	3	400
23	300	5	5	400
24	300	8	1	400
25	500	2	5	400
26	500	5	1	400
27	500	8	3	400

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Πίνακας αποτελεσμάτων

Συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα των μετρήσεων για όλες τις διαφορετικές πειραματικές συνθήκες όπως προέκυψαν από τον σχεδιασμό του πειράματος βάση του μητρώου L₉ του Taguchi, φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Αποτελέσματα μετρήσεων βάθους - πλάτους.

A/A Κοπής	Βάθος κοπής (mm)	Πλάτος κοπής (mm)
1	2.447	1.180
2	10.734	1.417
3	18.589	1.748
4	2.793	1.259
5	7.539	1.463
6	8.129	1.353
7	0.87	1.369
8	4.144	1.149
9	5.249	1.270
10	14.561	1.306
11	25.931	1.495
12	30.000	1.715
13	3.709	1.291
14	10.102	1.558
15	13.220	1.306
16	1.894	1.369
17	5.407	1.164
18	7.379	1.353
19	13.733	1.274
20	28.609	1.495
21	30.700	1.448
22	5.090	1.385
23	11.562	1.589
24	13.377	1.306
25	3.946	1.432
26	4.854	1.227
27	7.616	1.432

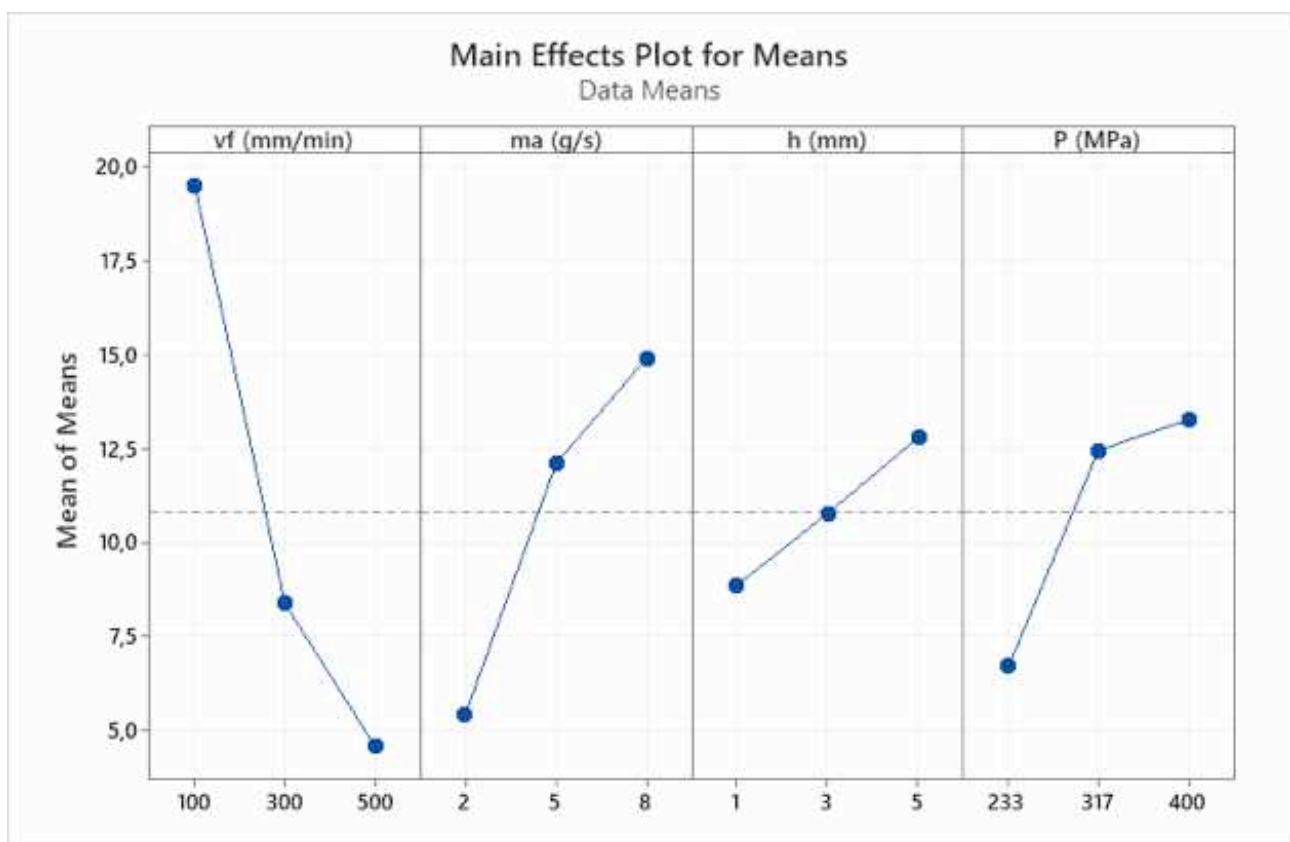
Παρατηρούμε ότι συνολικά για τις 27 διαφορετικές πειραματικές συνθήκες, η διακύμανση του πλάτους σε σχέση με τις τιμές των παραμέτρων είναι μικρή συγκριτικά με την αντίστοιχη διακύμανση των τιμών του βάθους των κοπών, κάτι που γίνεται αντιληπτό από τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές κάθε μεγέθους. Όσον αφορά το πλάτος, η μέγιστη τιμή είναι 1.748 mm για την 3η κοπή με πειραματικές συνθήκες κοπής 100 mm/min, 8 g/s, 5 mm και 233 MPa και η ελάχιστη τιμή είναι 1.149 mm για την 8η κοπή με πειραματικές συνθήκες κοπής 500 mm/min, 5 g/s, 1 mm και 233 MPa. Όσον αφορά το βάθος, η μέγιστη τιμή του είναι 30.7 mm για την 21η κοπή με πειραματικές συνθήκες κοπής 100 mm/min, 8 g/s, 5 mm και 400 MPa, ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 0.87 mm για την 7η κοπή με πειραματικές συνθήκες κοπής 500 mm/min, 2 g/s, 5 mm, 233 MPa.

4.2. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων

Για την αποτύπωση του τρόπου επίδρασης των παραμέτρων στα μεγέθη απόκρισης που ερευνούμε, δηλαδή στο πλάτος και το βάθος των αυλακιών, χρησιμοποιήθηκε το main effect plot από το στατιστικό πακέτο MINITAB 19. Το main effect plot είναι διάγραμμα που αποτυπώνει την μέση απόκριση του μετρούμενου μεγέθους για κάθε επίπεδο του παράγοντα ελέγχου που έχουμε ορίσει. Συγκεκριμένα έχουν οριστεί οι τέσσερις παράμετροι του πειράματος (πίεση, απόσταση, παροχή και ταχύτητα πρόωσης) ως παράγοντες ελέγχου σε τρία επίπεδα τιμών ο καθένας. Τα διαγράμματα αυτού του τύπου, χρησιμοποιούνται για να συγκρίνουμε την ισχύ της κάθε παραμέτρου στο μετρούμενο μέγεθος σχηματικά αφού όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της ευθείας που ενώνει τις μέσες τιμές απόκρισης του εκάστοτε μεγέθους ανά παράμετρο που ερευνάται τόσο μεγαλύτερη η σημασία επίδρασης της παραμέτρου. Τις τιμές αυτών των σημείων αποτυπώνουν οι πίνακες 4.2 και 4.4 για το βάθος και το πλάτος αντίστοιχα.

4.2.1. Ανάλυση βάθους

Στο διάγραμμα 4.1 φαίνεται η επίδραση των τριών επιπέδων τιμών των παραμέτρων στο τελικό αποτέλεσμα του βάθους. Σε αντίθεση με την επίδραση της ταχύτητας πρόωσης όπου αύξηση της συνεπάγεται μείωση του βάθους κοπής, οι υπόλοιπες τρεις παράμετροι όσο αυξάνονται, αυξάνεται αντίστοιχα και η τιμή του βάθους. Αυτό συμβαίνει διότι όσο η ταχύτητα πρόωσης μεγαλώνει τόσο λιγότερη ώρα παραμένει το τεμάχιο εκτεθειμένο στην κοπτική δέσμη κατ'επέκταση λιγότερα αποξεστικά σωματίδια προσκρούουν στην επιφάνεια του με αποτέλεσμα να μην διεισδύει σε βάθος η δέσμη. Αντίθετα, όσο αυξάνεται η παροχή μάζας του αποξεστικού, περισσότερα σωματίδια προστίθενται ως εναιώρημα με την δέσμη νερού διαμορφώνοντας δέσμη υψηλής κοπτικής ικανότητας αφού μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων προσκρούουν στην επιφάνεια του τεμαχίου. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται η υδραυλική πίεση, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια και ορμή προσδίδεται στα σωματίδια, έτσι αποκτούν μεγαλύτερη ταχύτητα και η κοπτική ικανότητα της αποξεστικής δέσμης βελτιώνεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βαθύτερη διείσδυση και περισσότερη αφαίρεση υλικού.



Διάγραμμα 4.1. Διάγραμμα επίδρασης παραμέτρων κατεργασίας στο βάθος των αυλακίων.

Response Table for Means

Level	vf (mm/min)	ma		
		(g/s)	h (mm)	P (MPa)
1	19,478	5,449	8,875	6,721
2	8,391	12,098	10,790	12,467
3	4,595	14,918	12,800	13,276
Delta	14,883	9,469	3,925	6,555
Rank	1	2	4	3

Πίνακας 4.2. Μέσες τιμές βάθους για κάθε επίπεδο τιμών των παραμέτρων.

Συγκεκριμένα, όσο η ταχύτητα πρόωσης αυξάνεται, παρατηρείται γραμμική πτώση στο βάθος με δύο διαφορετικούς ρυθμούς. Για τιμές ταχύτητας πρόωσης από 100 - 300 mm/min, ο ρυθμός μεταβολής του βάθους είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με τον ρυθμό μεταβολής για τιμές ταχύτητας πρόωσης από 300 - 500 mm/min. Για την παροχή του αποξεστικού, παρατηρούμε ελαφρώς μεγαλύτερη κλίση στο γράφημα για τις τιμές 2 - 5 g/s από την κλίση για τιμές παροχής 5 - 8 g/s, κατ'επέκταση, στο πρώτο τμήμα, ο ρυθμός αύξησης του βάθους είναι μεγαλύτερος. Όσον αφορά την απόσταση της κοπτικής κεφαλής από το τεμάχιο, παρατηρείται συνολικά μια σχεδόν αναλογική σχέση αύξησης της απόστασης και αύξησης του βάθους. Τέλος, αυξάνοντας την πίεση πάλι αυξάνεται το βάθος με ενδιαφέρον χαρακτηριστικό την εντονότερη αλλαγή κλίσης ανάμεσα στα επίπεδα τιμών της συγκριτικά με τα γραφήματα επίδρασης των άλλων παραμέτρων, αφού για τιμές πίεσης 233 - 317 MPa, παρατηρούμε σαφώς μεγαλύτερο ρυθμό μεταβολής του βάθους σε σχέση με τις τιμές πίεσης 317 - 400 MPa.

Συνολικά, η παράμετρος με την μεγαλύτερη επίδραση στο βάθος είναι η ταχύτητα πρόωσης, αφού οι τιμές της κυμαίνονται σε μεγαλύτερο εύρος συγκριτικά με τις άλλες παραμέτρους, ακολουθεί η παροχή αποξεστικού υλικού, η πίεση και τέλος την μικρότερη επίδραση φαίνεται να έχει η απόσταση της κοπτικής κεφαλής.

Στην συνέχεια έγινε στατιστικό τεστ για να ελεγχθεί αν η εκάστοτε παράμετρος είναι σημαντική ή όχι στο τελικό αποτέλεσμα του βάθους. Αυτό φαίνεται στον πίνακα της ANOVA (Analysis of variance) που προκύπτει, από την τιμή p-value που έχει ο κάθε παράγοντας. Έτσι εάν η τιμή p-value είναι μικρότερη του 0.05, η παράμετρος που εξετάζεται είναι σημαντική και άρα επιδρά στο μέγεθος που μας ενδιαφέρει. Συνεπώς για το βάθος όπως φαίνεται στον πίνακα 4.3 στατιστικά ασήμαντη παράμετρος είναι η απόσταση με τιμή p-value = 0.053 ενώ εξίσου σημαντικές είναι οι παράγοντες ταχύτητας πρόωσης και παροχής και ακολουθεί η πίεση με τιμή p-value = 0.002. Επιπλέον από την στήλη του αθροίσματος τετραγώνων του εκάστοτε όρου (Adj SS), από τον

Analysis of Variance

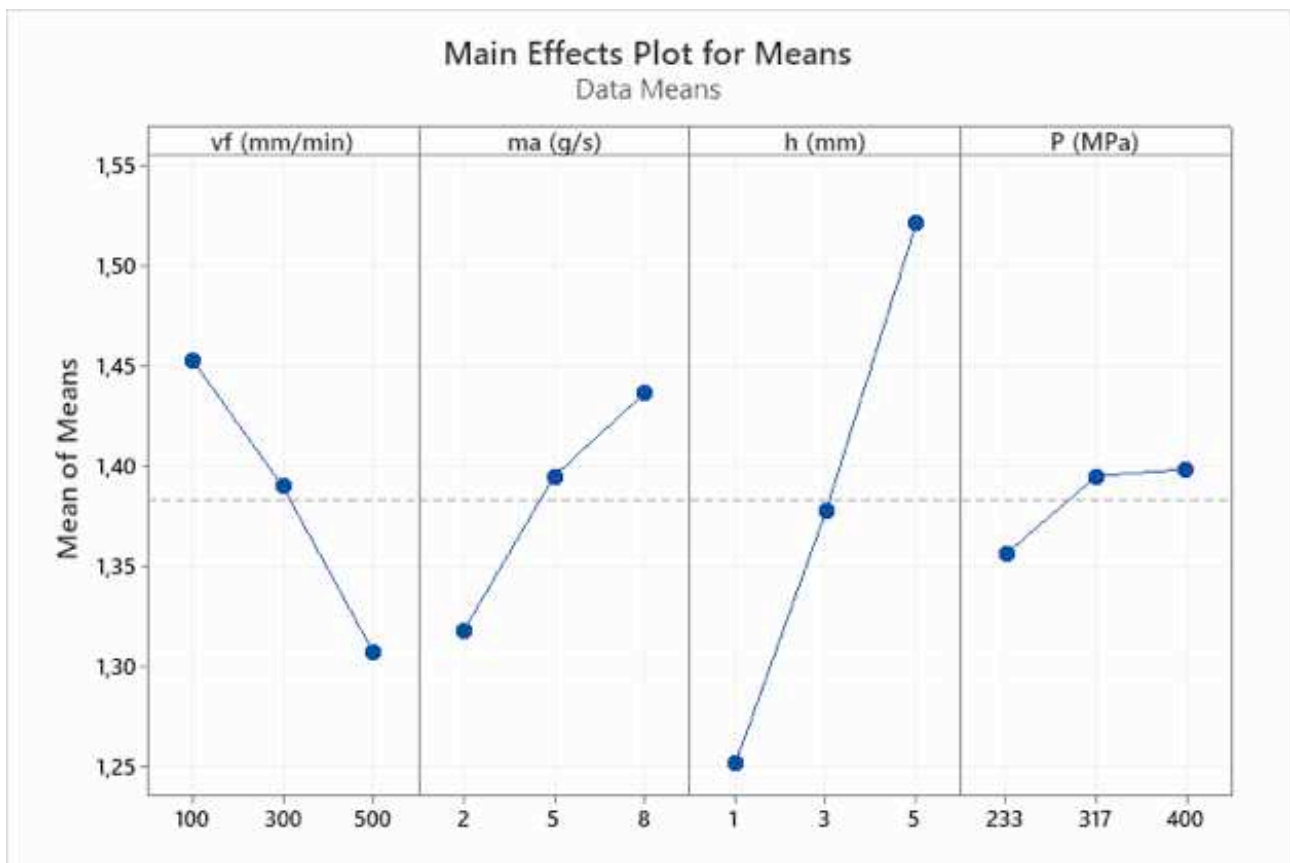
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	1663,49	415,87	25,06	0,000
vf	1	996,77	996,77	60,06	0,000
(mm/min)					
ma (g/s)	1	403,45	403,45	24,31	0,000
h (mm)	1	69,34	69,34	4,18	0,053
P (MPa)	1	193,94	193,94	11,69	0,002
Error	22	365,12	16,60		
Total	26	2028,61			

Πίνακας 4.3. ANOVA για το βάθος των αυλακιών.

πίνακα της ANOVA υπολογίζεται η ποσοστιαία συνεισφορά της κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα του βάθους. Έτσι μεγαλύτερη επίδραση έχει η ταχύτητα πρόωσης με ποσοστό 49.13%, ακολουθεί η παροχή αποξεστικού με ποσοστό 19.88%, η πίεση με 9.5% και τέλος η απόσταση του στομίου εκτόξευσης της κοπτικής δέσμης με ποσοστό 3.4%.

4.2.2. Ανάλυση πλάτους

Στο διάγραμμα 4.2 φαίνεται η επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στο πλάτος των αυλακιών. Αρχικά παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση πως μόνο για αύξηση της ταχύτητας πρόωσης έχουμε ελάττωση του πλάτους σε αντίθεση με τον τρόπο επίδρασης των υπολοίπων τριών παραμέτρων, όπου η αύξηση τους προκαλεί αντίστοιχη αύξηση του μετρούμενου μεγέθους. Έτσι αυξάνοντας την ταχύτητα πρόωσης τα πλάτη μειώνονται αφού η δέσμη προσκρούει στο τεμάχιο λιγότερη ώρα, με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο ρυθμός κοπής καθώς λιγότερα αποξεστικά σωματίδια προσκρούουν ανά μονάδα μήκους κοπής ανά μονάδα χρόνου. Επιπλέον μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης, σημαίνει λιγότερο 'overlapping' της διαδικασίας κοπής, δηλαδή η δέσμη κινείται ταχύτερα σε κάθε σημείο κοπής, έτσι αποφεύγεται το πέρασμα από το ίδιο σημείο για πολύ ώρα. Αντίθετα, όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ στομίου εκτόξευσης και επιφάνειας τεμαχίου, το πλάτος μεγαλώνει αφού η διάμετρος της κοπτικής δέσμης με αυτόν τον τρόπο μεγαλώνει με αποτέλεσμα να προσκρούει στο τεμάχιο, μέτωπο μεγαλύτερης επιφάνειας και συνεπώς να γίνεται αφαίρεση υλικού σε μεγαλύτερη έκταση. Αύξηση της παροχής αποξεστικού υλικού αυξάνει επίσης το πλάτος αφού αυξάνεται η κοπτική ικανότητα της δέσμης συνολικά και περισσότερα σωματίδια προσκρούουν στην επιφάνεια του τεμαχίου.



Διάγραμμα 4.2. Διάγραμμα επίδρασης παραμέτρων κατεργασίας στο πλάτος των αυλακίων.

Response Table for Means

	ma			
Level	vf (mm/min)	(g/s)	h (mm)	P (MPa)
1	1,453	1,318	1,252	1,356
2	1,390	1,395	1,377	1,395
3	1,307	1,437	1,521	1,399
Delta	0,146	0,118	0,270	0,042
Rank	2	3	1	4

Πίνακας 4.4. Μέσες τιμές πλάτους για κάθε επίπεδο τιμών των παραμέτρων.

Συγκεκριμένα για τιμές ταχύτητας πρόωσης απο 100 - 300 mm/min, ο ρυθμός μεταβολής του πλάτους είναι ελαφρώς μικρότερος απο τον ρυθμό μεταβολής για τιμές ταχύτητας απο 300 - 500 mm/min. Η απόσταση του στομίου εκτόξευσης φαίνεται να έχει σχέση γραμμική για όλο το εύρος των τιμών της 1 - 5 mm σε σχέση με την μεταβολή του πλάτους. Η παροχή του αποξεστικού υλικού για τις τιμές 5 - 8 g/s ελλατώνει ελαφρώς τον ρυθμό μεταβολής αύξησης του πλάτους, ενώ η πίεση για τις τιμές 233 - 317 MPa μεταβάλλει το πλάτος εντονότερα απο τον τρόπο που μεταβάλλεται για τιμές 317 - 400 MPa. Συνολικά, η παράμετρος με την μεγαλύτερη επίδραση στο πλάτος είναι η

απόσταση της κοπτικής κεφακής αφού οι τιμές της κυμαίνονται σε μεγαλύτερο εύρος συγκριτικά με τις άλλες παραμέτρους, ακολουθεί η ταχύτητα πρόωσης, η παροχή αποξεστικού υλικού και τέλος την μικρότερη επίδραση φαίνεται να έχει η πίεση.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	0,493927	0,123482	26,90	0,000
vf (mm/min)	1	0,095776	0,095776	20,87	0,000
ma (g/s)	1	0,063131	0,063131	13,75	0,001
h (mm)	1	0,326971	0,326971	71,23	0,000
P (MPa)	1	0,008049	0,008049	1,75	0,199
Error	22	0,100984	0,004590		
Total	26	0,594911			

Πίνακας 4.5. ANOVA για το πλάτος των αυλακιών.

Για το πλάτος η στατιστική ανάλυση ANOVA έδειξε ότι σημαντικότερος παράγοντας είναι η απόσταση στομίου και η ταχύτητα πρόωσης με τιμή p-value = 0.0, ακολουθεί η παροχή αποξεστικού με τιμή p-value = 0.001 και τέλος η πίεση με τιμή p-value = 0.199 θεωρείται στατιστικά ασήμαντη και συνεπώς δεν επιδρά στο τελικό αποτέλεσμα του πλάτους. Επιπλέον, την μεγαλύτερη ποσοστιαία συνεισφορά στο τελικό αποτέλεσμα του πλάτους συνολικά έχει η απόσταση της κοπτικής κεφαλής με ποσοστό 54.96%, ακολουθεί η ταχύτητα πρόωσης με ποσοστό 16.09%, η παροχή αποξεστικού με 10.61% και τέλος η πίεση με ποσοστό 1.35%.

4.3. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων

Στην συνέχεια, στα πλαίσια διερεύνησης της πειραματικής διαδικασίας, έγινε βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Προκειμένου να γίνει βελτιστοποίηση, θέτονται πρώτα τα επιθυμητά κριτήρια προς διερεύνηση και στην συνέχεια υλοποιούνται οι μέθοδοι βελτιστοποίησης. Έτσι όσον αφορά το παρόν πείραμα, επιδιώκεται η εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων κατεργασίας και κατ'επέκταση του βέλτιστου συνδυασμού τους συνολικά βάσει των ακόλουθων κριτηρίων:

- Ελαχιστοποίηση του πλάτους κοπής των αυλακιών, έτσι ώστε να γίνεται πιο ακριβής κοπή, με την βέλτιστη δυνατή εστιασμένη δέσμη
- Μεγιστοποίηση του βάθους κοπής ώστε να αξιοποιείται στο μέγιστο η ενέργεια της κοπτικής δέσμης αφαιρώντας με αυτόν τον τρόπο όσο τον δυνατόν περισσότερο υλικό.
- Ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας
- Επίτευξη επιθυμητού βάθους αυλακιού.

Έτσι, εξετάζονται διαφορετικά σενάρια συνδυάζοντας δυο ή τρία απο τα παραπάνω κριτήρια κάθε φορά. Για τον υπολογισμό του χρόνου κατεργασίας θεωρήθηκε ευθύγραμμη ομαλή κίνηση της κοπτικής κεφαλής με σταθερή κάθε φορά ταχύτητα πρόωσης και μήκος αυλακιού 60 mm. Έτσι εφόσον χρησιμοποιήθηκαν 3 ταχύτητες πρόωσης, 100, 300 και 500 mm/min, προκύπτουν οι ακόλουθοι χρόνοι κατεργασίας 7.2 s, 12 s και 36 s αντίστοιχα. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6. συνολικά για όλες τις κοπές.

Για την υλοποίηση των παραπάνω στόχων, χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέθοδοι βελτιστοποίησης όπως παρουσιάζονται στις ακόλουθες υποενότητες. Αρχικά έγινε προσέγγιση μέσω της μεθόδου GRA (Grey relational Analysis), καθώς αποτελεί ευρέως διαδεδομένη μέθοδο βελτιστοποίησης πειραματικών αποτελεσμάτων στην διεθνή βιβλιογραφία. Στην συνέχεια εφαρμόστηκαν δυο ακόμη μέθοδοι σε συμπλήρωση της GRA, έτσι προέκυψαν οι υβριδικές μέθοδοι Fuzzy Logic - GRA και GRA - PCA (Principal Component Analysis), δίνοντας επιπλέον στοιχεία προσεγγίζοντας τον τρόπο βελτιστοποίησης με διαφορετική μεθοδολογία και ακρίβεια, παρέχοντας έτσι επιπλέον δεδομένα για σύγκριση και σχολιασμό της έρευνας.

Πίνακας 4.6. Χρόνος Κατεργασίας

A/A Κοπής	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Χρόνος κατεργασίας (s)
1	100	36
2	100	36
3	100	36
4	300	12
5	300	12
6	300	12
7	500	7.2
8	500	7.2
9	500	7.2
10	100	36
11	100	36
12	100	36
13	300	12
14	300	12
15	300	12
16	500	7.2
17	500	7.2
18	500	7.2
19	100	36
20	100	36
21	100	36
22	300	12
23	300	12
24	300	12
25	500	7.2
26	500	7.2
27	500	7.2

4.4. Η μέθοδος Grey Relational Analysis - GRA

Η Grey Relational Analysis (GRA) αποτελεί μέθοδο που μετατρέπει πολλαπλές αποκρίσεις ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα σε μια μόνο τιμή, που εκφράζεται από τον δείκτη Grey Relational Grade (GRG), και κυμαίνεται στο εύρος 0-1, ιεραρχώντας έτσι τις τιμές των παραμέτρων. Η διαδικασία αρχίζει με την κανονικοποίηση (normalization) των τιμών των αποκρίσεων από 0 έως 1, έτσι ώστε όλα τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους ανεξαρτήτως μονάδας μέτρησης ή μεγέθους, η διαδικασία αυτή ονομάζεται 'grey relational generating'. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής GRC (Grey Relational Coefficient) για κάθε απόκριση ως δείκτης που εκφράζει την σχέση μεταξύ των κανονικοποιημένων τιμών απόκρισης και των ιδανικών τιμών. Τέλος ο δείκτης GRG υπολογίζεται δίνοντας ίση βαρύτητα σε κάθε GRC, ως ο μέσος όρος των επιμέρους συντελεστών GRC. Όσο κοντύτερα στο 1 είναι οι τιμές του GRG τόσο καλύτερη επίδοση έχει η αντίστοιχη συνθήκη που εκφράζει ο δείκτης.

Εάν υψηλότερη τιμή συνεπάγεται καλύτερη επίδοση τότε η κανονικοποίηση προκύπτει από την ακόλουθη σχέση ('larger-the-better'):

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \text{Min}\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\}}{\text{Max}\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\} - \text{Min}\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\}} \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (33)$$

Εάν χαμηλότερη τιμή υποδεικνύει καλύτερη επίδοση, τότε η κανονικοποίηση προκύπτει από την ακόλουθη σχέση ('smaller-the-better'):

$$x_{ij} = \frac{\text{Max}\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\} - y_{ij}}{\text{Max}\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\} - \text{Min}\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\}} \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (34)$$

Εάν η καλύτερη επίδοση καθορίζεται από την επιθυμητή τιμή ('closer-to-the-desired-value- y_j^* -the-better'), τότε η κανονικοποίηση προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$x_{ij} = 1 - \frac{|y_{ij} - y_j^*|}{\text{Max}\{\text{Max}\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\} - y_{ij}^*, y_{ij}^* - \text{Min}\{y_{ij}, i=1,2,\dots,m\}\}} \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (35)$$

Όπου, x_{ij} η κανονικοποιημένη τιμή υπολογισμένη για την y_{ij} παρατηρηθείσα πειραματική τιμή, i ο αύξων αριθμός του πειράματος για την j απόκριση που μελετάται και y_j^* η επιθυμητή τιμή.

Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο συντελεστής GRC για κάθε κανονικοποιημένη τιμή με την ακόλουθη σχέση:

$$\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \zeta \Delta_{\max}} \quad (36)$$

$$\text{όπου} \quad \Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}| \quad (37)$$

$$\Delta_{\min} = \text{Min}\{\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\} \quad (38)$$

$$\Delta_{\max} = \text{Max}\{\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\} \quad (39)$$

Το ζ στην παραπάνω σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή GRC είναι ο distinguishing coefficient και παίρνει την τιμή 0.5 και x_{0j} , η ιδανική κανονικοποιημένη τιμή που ισούται με 1. Τέλος το GRG λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma(x_{0j}, x_{ij}) \quad (40)$$

όπου n είναι ο αριθμός των αποκρίσεων που εξετάζονται προς βελτιστοποίηση [55,60].

4.4.1. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων μέσω GRA

4.4.1.1. Κριτήριο Μεγιστοποίησης βάθους - Ελαχιστοποίησης πλάτους

Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο θέτοντας τους ακόλουθους 2 στόχους: ελαχιστοποίηση πλάτους με παράλληλη μεγιστοποίηση του βάθους, προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες που παρουσιάζουν την διαδικασία GRA. Αρχικά προκειμένου να γίνει η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη συνθήκη κάθε φορά που εκφράζει το κριτήριο βάση του οποίου είναι επιθυμητή η βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων των αποκρίσεων. Έτσι, όσον αφορά το πλάτος των αυλακιών χρησιμοποιήθηκε η σχέση (34) με κριτήριο 'smaller the better' ενώ αντίθετα οι τιμές του βάθους κανονικοποιήθηκαν βάση της σχέσης (33) με κριτήριο 'larger the better', με

αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι δυο πρώτες στήλες του πίνακα 4.7. Στην συνέχεια, βάση των κανονικοποιημένων τιμών, χρησιμοποιώντας την σχέση (37), προκύπτουν οι διαφορές Δ_{ij} όπως φαίνονται στον πίνακα 4.7, καταδεικνύοντας την σχέση μεταξύ των ιδανικών τιμών και των πειραματικών δεδομένων.

Πίνακας 4.7. Κανονικοποίηση αποτελεσμάτων - Διαφορές Δ_{ij}

A/A Κοπής	Χι-βάθος	Χι-πλάτος	Δβάθος	Δπλάτος
1	0,053	0,948	0,947	0,052
2	0,331	0,553	0,669	0,447
3	0,594	0	0,406	1,000
4	0,065	0,816	0,935	0,184
5	0,224	0,476	0,776	0,524
6	0,243	0,659	0,757	0,341
7	0	0,633	1,000	0,367
8	0,110	1	0,890	0,000
9	0,147	0,798	0,853	0,202
10	0,459	0,738	0,541	0,262
11	0,840	0,422	0,160	0,578
12	0,977	0,055	0,023	0,945
13	0,095	0,763	0,905	0,237
14	0,310	0,317	0,690	0,683
15	0,414	0,738	0,586	0,262
16	0,034	0,633	0,966	0,367
17	0,152	0,975	0,848	0,025
18	0,218	0,659	0,782	0,341
19	0,431	0,791	0,569	0,209
20	0,930	0,422	0,070	0,578
21	1	0,501	0,000	0,499
22	0,142	0,606	0,858	0,394
23	0,358	0,265	0,642	0,735
24	0,419	0,738	0,581	0,262
25	0,103	0,528	0,897	0,472
26	0,134	0,870	0,866	0,130
27	0,226	0,528	0,774	0,472

Βάση των διαφορών Δ_{ij} , για $\Delta_{\min} = 0$, $\Delta_{\max} = 1$ και $\zeta = 0.5$, η σχέση (36) δίνει τους συντελεστές GRC. Για την εύρεση του δείκτη GRG όπου θα καθορίσει τελικά την ιεράρχηση των διαφορετικών πειραματικών συνθηκών βάσει των δύο κριτηρίων που έχουν τεθεί, λαμβάνεται ο μέσος όρος των δυο επιμέρους συντελεστών GRC. Τελικά προκύπτει ο πίνακας 4.8, στην τελευταία στήλη του πίνακα φαίνεται η ιεράρχηση των 27 συνθηκών βάσει της τιμής GRG, όπου όσο μεγαλύτερη η τιμή τόσο καλύτερα ανταποκρίνονται οι αντίστοιχες πειραματικές συνθήκες στην βάση των κριτηρίων. Από τον πίνακα 4.8 φαίνεται πως συνολικά στις απαιτήσεις των κριτηρίων που έχουν τεθεί ανταποκρίνεται καλύτερα η 21η κοπή καθώς έχει την υψηλότερη τιμή στον δείκτη GRG. Συνεπώς οι πειραματικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην 21η κοπή (ταχύτητα πρόωσης 100 mm/min, παροχή αποξεστικού υλικού 8 g/s, απόσταση στομίου εκτόξευσης 5 mm και πίεση 400 MPa) είναι ο βέλτιστος συνδυασμός για την επιθυμητή απόκριση ανάμεσα στις υπόλοιπες 27.

Πίνακας 4.8. Συντελεστές GRC - δείκτες GRG

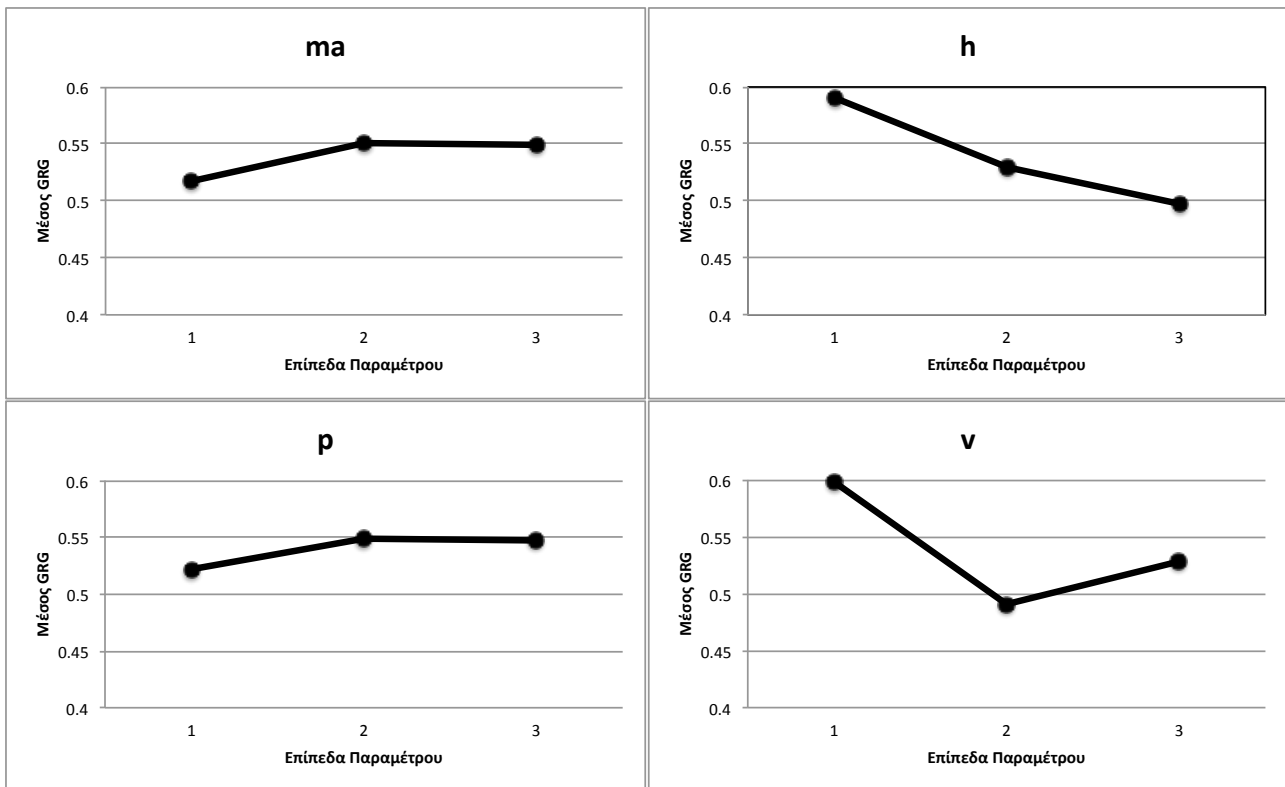
A/A Κοπής	GRC βάθος	GRC πλάτος	GRG	Rank
1	0,346	0,906	0,625864	6
2	0,428	0,528	0,47768	18
3	0,552	0,333	0,4426129	23
4	0,348	0,731	0,5398486	14
5	0,392	0,488	0,4399575	24
6	0,398	0,595	0,4963670	16
7	0,333	0,577	0,4549246	21
8	0,360	1,000	0,6798321	2
9	0,370	0,712	0,5408785	13
10	0,480	0,656	0,5681939	10
11	0,758	0,464	0,6108578	7
12	0,955	0,346	0,6506084	5
13	0,356	0,678	0,5171500	15
14	0,420	0,423	0,4213637	27
15	0,460	0,656	0,5582530	12
16	0,341	0,577	0,4588356	20
17	0,371	0,952	0,6616334	4
18	0,390	0,595	0,4924647	17
19	0,468	0,706	0,5866857	8
20	0,877	0,464	0,6705160	3
21	1,000	0,500	0,7502088	1
22	0,368	0,559	0,4636751	19
23	0,438	0,405	0,421506	26
24	0,463	0,656	0,5593741	11
25	0,358	0,514	0,4360592	25
26	0,366	0,793	0,5796532	9
27	0,393	0,514	0,4533447	22

Ο μέσος GRG που αντιστοιχεί σε κάθε επίπεδο τιμών των παραγόντων ελέγχου φαίνεται στον πίνακα 4.9. Υπολογίστηκε λαμβάνοντας τον μέσο όρο των δεικτών GRG που αντιστοιχούν στα τρία επίπεδα τιμών της κάθε παραμέτρου όπως προκύπτουν από τον πίνακα Taguchi βάση των τριών ορθογωνικών συστοιχιών L9 (πίνακας 3.1). Έτσι λχ. για το πρώτο επίπεδο τιμών του παράγοντα της πίεσης, είναι: $P_1 = (0.6258 + 0.4776 + 0.4426 + 0.5398 + 0.4399 + 0.4963 + 0.4549 + 0.6798 + 0.5408)/9 = 0.5219$, με όμοιο τρόπο υπολογίζονται όλοι οι μέσοι GRG.

Πίνακας 4.9. Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου

Επίπεδα	v	ma	h	p
1	0,59813681	0,516804151	0,590650789	0,521996543
2	0,490832911	0,551444898	0,529602109	0,5488179
3	0,52862516	0,549345832	0,497341983	0,546780438
Max - Min	0,107303898	0,034640747	0,093308806	0,026821356

Συνολικά, η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων βάση των κριτηρίων ελαχιστοποίησης πλάτους και μεγιστοποίησης του βάθους, σύμφωνα με την GRA προκύπτει επιλέγοντας τις μέγιστες τιμές ανά επίπεδο παραμέτρου από τον πίνακα 4.9. Έτσι η βέλτιστη επιλογή είναι η ακόλουθη: $v_1 - ma_2 - h_1 - p_2$. Δηλαδή ταχύτητα πρόωσης στο πρώτο επίπεδο τιμών της 100 mm/min, παροχή αποξεστικού υλικού στο δεύτερο επίπεδο τιμών της άρα 5 g/s, απόσταση του στομίου στο πρώτο επίπεδο τιμών άρα 1 mm και τέλος πίεση στο δεύτερο επίπεδο τιμών άρα 317 MPa. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του μέσου GRG για κάθε παράμετρο φαίνεται στην τελευταία γραμμή του πίνακα 4.9. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται για την ταχύτητα πρόωσης, αυτό δείχνει ότι η συγκεκριμένη παράμετρος έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις πολλαπλές αποκρίσεις που ερευνήθηκαν σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις. Ακολουθεί η απόσταση του στομίου εκτόξευσης, η παροχή αποξεστικού και τέλος η πίεση αφού έχει την μικρότερη διαφορά Max - Min. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο διάγραμμα 4.3 γραφικά.



Διάγραμμα 4.3. Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου

4.4.1.2. Κριτήριο επιθυμητής τιμής βάθους - Ελαχιστοποίησης χρόνου

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας την τρίτη συνθήκη που παρέχει η Grey Relational Analysis, ('closer-to-the-desired-value- Y_j^* -the-better') έγινε περαιτέρω διερεύνηση όσον αφορά συγκεκριμένα βάθη κοπής, ώστε να μελετηθούν οι κατάλληλες συνθήκες για την επίτευξη επιθυμητού βάθους εφόσον είναι κάτι που δεν γίνεται να υπολογιστεί εκ των προτέρων σε μια κατεργασία κοπής AWJ. Κατά αυτόν τον τρόπο επιλέχθηκαν 2 διαφορετικά βάθη: 8 mm και 20 mm αντίστοιχα. Έτσι έγινε η κανονικοποίηση των τιμών βάση της σχέσης (35) αυτή την φορά, και ακολουθήθηκε η διαδικασία όπως και με το σενάριο που διερευνήθηκε στην υποενότητα 4.4.1.1. Δηλαδή υπολογίστηκαν οι διαφορές Δ_{ij} των κανονικοποιημένων τιμών από τις ιδανικές τιμές και στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι συντελεστές GRC για τα 2 βάθη κατά αντιστοιχία. Παράλληλα απαιτήθηκε η εκπλήρωση ενός ακόμα κριτηρίου σε συνδυασμό με την επίτευξη επιθυμητού βάθους, η ελαχιστοποίηση του χρόνου. Συνεπώς ο τελικός δείκτης GRG για την κάθε περίπτωση του βάθους προέκυψε από τον μέσο όρο των συντελεστών GRC για το συγκεκριμένο βάθος όπως προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία με τον συντελεστή GRC για τον χρόνο όπως έχει ήδη υπολογιστεί στον πίνακα 4.8. Τα παραπάνω παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον ακόλουθο πίνακα 4.10.

Πίνακας 4.10. Δείκτες GRG για $y_j^* = 8$ και $y_j^* = 20$

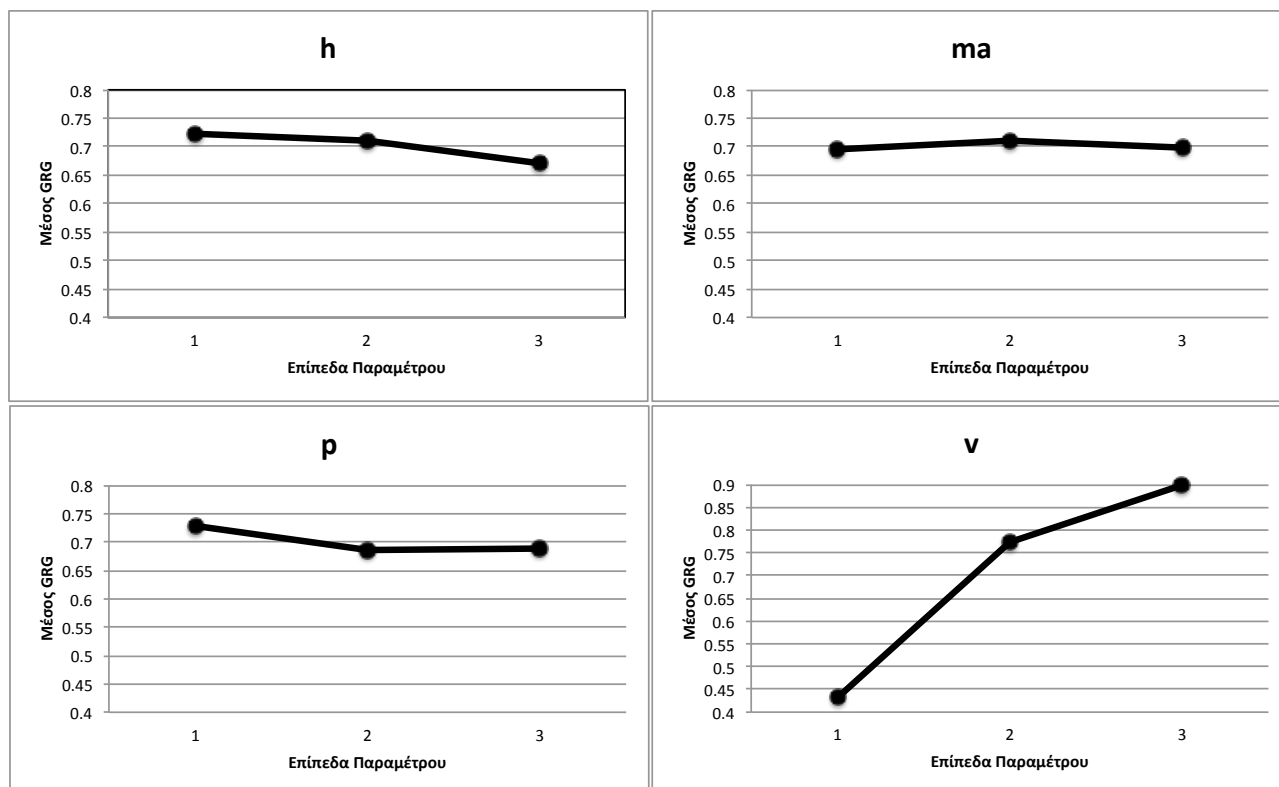
A/A κοπής	$y_j^* = 8$		$y_j^* = 20$	
	GRG	rank	GRG	rank
1	0,5062	20	0,3691	27
2	0,5742	19	0,4581	24
3	0,4283	23	0,6667	13
4	0,7217	16	0,5800	19
5	0,8609	9	0,6242	16
6	0,8750	7	0,6310	15
7	0,8105	11	0,6913	11
8	0,8774	6	0,7159	6
9	0,9070	4	0,7257	4
10	0,4871	22	0,5324	20
11	0,3627	24	0,5208	21
12	0,3388	26	0,4472	25
13	0,7420	15	0,5873	18
14	0,8017	12	0,6570	14
15	0,7214	17	0,7108	9
16	0,8288	10	0,6983	10
17	0,9116	3	0,7272	3
18	0,9795	2	0,7474	2
19	0,5026	21	0,5133	22
20	0,3463	25	0,4686	23
21	0,3352	27	0,4375	26
22	0,7775	13	0,5992	17
23	0,7599	14	0,6798	12
24	0,7181	18	0,7140	8
25	0,8726	8	0,7142	7
26	0,8959	5	0,7221	5
27	0,9891	1	0,7500	1

Απο τον πίνακα 4.10 παρατηρείται ότι όταν τεθεί ως επιθυμητή τιμή βάθους τα 8 mm, επιτυγχάνεται μέγιστη τιμή του δείκτη GRG για την 27η κοπή ίση με 0.9891. Αυτό σημαίνει ότι οι συγκεκριμένες συνθήκες αποτελούν τις βέλτιστες για το επιθυμητό αποτέλεσμα απο τον σχεδιασμό του πειράματος. Εφ' όσον η τιμή του Grey relational Grade είναι τόσο υψηλή, ενδεχομένως οι συνθήκες της συγκεκριμένης κοπής να αποτελούν συνολικά τις βέλτιστες απο όλους τους δυνατούς συνδυασμούς που μπορούν να προκύψουν. Αυτό θα διασταυρωθεί στην συνέχεια βρίσκοντας τους μέσους δείκτες GRG ανά επίπεδο παραμέτρου ώστε να βρεθεί συνολικά η

βέλτιστη επιλογή για την εκπλήρωση του συγκεκριμένου στόχου. Η διαδικασία ακολουθείται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως έγινε για το προηγούμενο σενάριο. Από τον πίνακα 4.10 παρατηρώντας τις δυο τελευταίες στήλες όπως προκύπτουν υπολογίζοντας τον δείκτη GRG για επιθυμητή τιμή βάθους 20 mm, παρατηρείται ότι ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων όπως έχει ήδη σχεδιαστεί το πείραμα προκύπτει απο την 27η κοπή επίσης, αφού εκεί ο δείκτης λαμβάνει την μέγιστη τιμή του. Συνεπώς για τις ακόλουθες τιμές των παραμέτρων: 500 mm/min, 8 g/s, 3 mm, 400 MPa και για τα 2 σενάρια επιθυμητής τιμής βάθους και ελαχιστοποίησης χρόνου έχουμε την βέλτιστη δυνατή απόκριση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται συνολικά η βέλτιστη επιλογή των τιμών των παραμέτρων για την επίτευξη των 2 στόχων.

Πίνακας 4.11. Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου για $y_j^* = 8$

Επίπεδα	v	ma	h	p
1	0,431263632	0,694334684	0,721723506	0,729033916
2	0,775344601	0,710072414	0,711092018	0,685938233
3	0,896953405	0,69915454	0,670746114	0,688589489



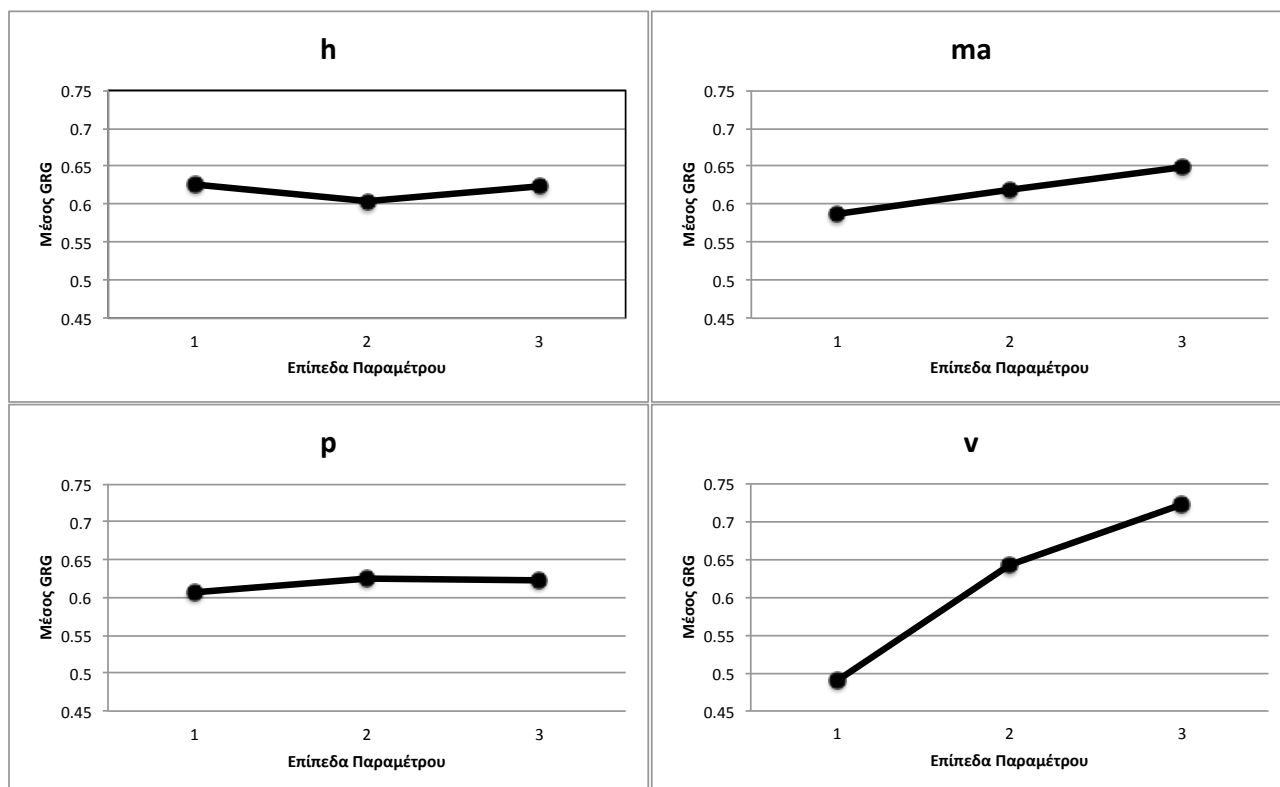
Διάγραμμα 4.4. Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου για $y_j^* = 8$

Για το σενάριο βελτιστοποίησης αποτελεσμάτων που περιλαμβάνει τα κριτήρια ελαχιστοποίησης χρόνου και επίτευξη βάθους 8 mm, απο τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι ο βέλτιστος συνδυασμός είναι h1-ma2-v3-p1. Παρατηρείται ότι πλην την πίεσης που είναι στο πρώτο επίπεδο τιμών της δηλαδή 317 MPa, τα βέλτιστα επίπεδα των υπολοίπων τριών παραμέτρων είναι ίδια με τις συνθήκες της 27ης κοπής, δηλαδή ταχύτητα πρόωσης 500 mm/min, παροχή αποξεστικού 8 g/s, απόσταση στομίου 3 mm, αναμενόμενο δεδομένου της πολύ υψηλής τιμή του δείκτη GRG για την 27η κοπή.

Στην συνέχεια ακολουθώντας την ίδια διαδικασία παίρνουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα για επιθυμητή τιμή βάθους τα 20 mm σε συνδυασμό με ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας.

Πίνακας 4.12. Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου για $y_j^* = 20$

Επίπεδα	v	ma	h	p
1	0,490415545	0,587237439	0,626201772	0,606876167
2	0,642592612	0,619307852	0,604135878	0,625374416
3	0,72134687	0,647809736	0,624017377	0,622104444



Διάγραμμα 4.5. Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου για $y_j^* = 20$

Απο τα διαγράμματα 4.5 προκύπτει ότι ο βέλτιστος συνδυασμός προκειμένου να επιτευχθεί βάθος αυλακιού 20 mm συνδυαστικά με τον ελάχιστο δυνατό χρόνο κατεργασίας είναι h1-ma3-p2-v3. Δηλαδή το κριτήριο εκπληρώνεται για τις ακόλουθες τιμές των παραμέτρων κατεργασίας: απόσταση στομίου 1 mm, παροχή αποξεστικού 5 g/s, πίεση 317 MPa και ταχύτητα πρόωσης 500 mm/min.

4.4.1.3. Κριτήριο Μεγιστοποίησης βάθους - Ελαχιστοποίησης πλάτους - Ελαχιστοποίησης χρόνου

Το τελευταίο σενάριο βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων που διερευνήθηκε με την μέθοδο GRA, γίνεται με βάση τα κριτήρια μεγιστοποίησης του βάθους, ελαχιστοποίησης του πλάτους των αυλακιών και παράλληλα ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με την υποενότητα 4.4.1.1. Έτσι από τον πίνακα 4.8, λαμβάνονται απευθείας οι συντελεστές GRC που έχουν προκύψει έπειτα από την κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων του βάθους και του πλάτους βάση των κριτηρίων που εξετάζονται (larger-is-better και smaller-is-better αντίστοιχα) και προστίθεται ο συντελεστής GRC για τον χρόνο όπως προέκυψε έπειτα από κανονικοποίηση των τιμών του βάσης του κριτηρίου smaller-the-better. Στην συνέχεια υπολογίζοντας τον μέσο όρο των τριών πλέον GRC προκύπτει ο δείκτης GRG όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.13

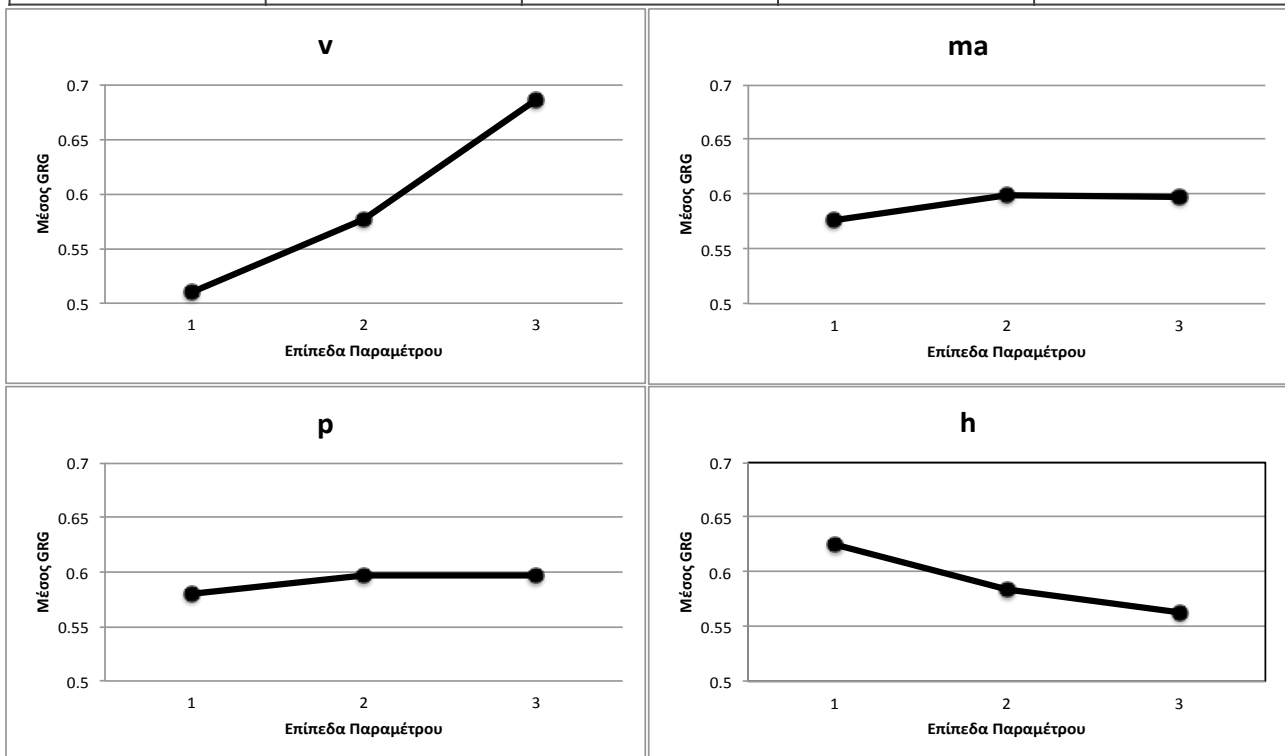
Πίνακας 4.13. Συντελεστές GRC και δείκτης GRG

A/A Κοπής	GRC βάθος	GRC πλάτος	GRC χρόνος	GRG	Rank
1	0,346	0,906	0,333	0,5284	22
2	0,428	0,528	0,333	0,4295	26
3	0,552	0,333	0,333	0,4061	27
4	0,348	0,731	0,75	0,6098	13
5	0,392	0,488	0,75	0,5433	19
6	0,398	0,595	0,75	0,5809	15
7	0,333	0,577	1	0,6366	7
8	0,360	1,000	1	0,7865	1
9	0,370	0,712	1	0,6939	4
10	0,480	0,656	0,333	0,4899	25
11	0,758	0,464	0,333	0,5183	23
12	0,955	0,346	0,333	0,5448	18
13	0,356	0,678	0,75	0,5947	14
14	0,420	0,423	0,75	0,5309	21
15	0,460	0,656	0,75	0,6221	11
16	0,341	0,577	1	0,6392	6
17	0,371	0,952	1	0,7744	2
18	0,390	0,595	1	0,6616	5
19	0,468	0,706	0,333	0,5022	24
20	0,877	0,464	0,333	0,5581	17
21	1,000	0,500	0,333	0,6112	12
22	0,368	0,559	0,75	0,5591	16
23	0,438	0,405	0,75	0,5310	20
24	0,463	0,656	0,75	0,6229	10
25	0,358	0,514	1	0,6240	9
26	0,366	0,793	1	0,7197	3
27	0,393	0,514	1	0,6355	8

Απο τον παραπάνω πίνακα φαίνεται οτι ο υψηλότερος δείκτης GRG λαμβάνεται απο την 8η συνθήκη. Οι πειραματικές συνθήκες λοιπόν της 8ης κοπής ανταποκρίνονται καλύτερα απο όλες τις άλλες σύμφωνα με τον σχεδιασμό του πειράματος όπως έχει προηγηθεί. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος δείκτης GRG ανά επίπεδο παραμέτρου προκειμένου να βρεθεί συνολικά ο βέλτιστος συνδυασμός των επιπέδων τιμών των παραμέτρων ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή απόκριση.

Πίνακας 4.14. μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρων

Επίπεδα	v	ma	h	p
1	0,5098	0,5760	0,6252	0,5794
2	0,5772	0,5991	0,5845	0,5973
3	0,6857	0,5977	0,5630	0,5960
Max - Min	0,1758	0,0230	0,0622	0,0178



Διάγραμμα 4.6. Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου.

Απο τα παραπάνω φαίνεται πως η βέλτιστη επιλογή των τιμών των παραμέτρων προκύπτει απο τον ακόλουθο συνδυασμό v3-ma2-h1-p2. Συνεπώς για παροχή αποξεστικού υλικού ίση με 5 g/s, απόσταση στομίου της κοπτικής κεφαλής ίση με 1 mm, πίεση ίση με 317 MPa και ταχύτητα πρόωσης ίση με 500 mm/min. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του μέσου GRG για κάθε παράμετρο φαίνεται στην τελευταία γραμμή του πίνακα 4.14. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται για την ταχύτητα πρόωσης, αυτό δείχνει οτι η συγκεκριμένη παράμετρος έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις πολλαπλές αποκρίσεις που ερευνήθηκαν σε

σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις. Ακολουθεί η απόσταση του στομίου εκτόξευσης, η παροχή και τέλος η πίεση αφού έχει την μικρότερη διαφορά Max - Min.

4.5. Η μέθοδος Principal Component Analysis - PCA

Η μέθοδος PCA (Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών), αποτελεί μία γραμμική μέθοδο συμπίεσης δεδομένων η οποία συνίσταται από τον επαναπροσδιορισμό των συντεταγμένων ενός συνόλου δεδομένων σε ένα άλλο σύστημα συντεταγμένων το οποίο θα είναι καταλληλότερο στην επικείμενη ανάλυση δεδομένων. Αυτές οι νέες συντεταγμένες είναι το αποτέλεσμα ενός γραμμικού συνδυασμού προερχόμενου από τις αρχικές μεταβλητές και εκπροσωπούνται σε ορθογώνιο άξονα, ενώ τα επικείμενα σημεία διατηρούν μια φθίνουσα σειρά όσο αφορά στη τιμή της διακύμανσής τους. Για το λόγο αυτό, η πρώτη κύρια συνιστώσα (principal component) διατηρεί περισσότερες πληροφορίες δεδομένων σε σύγκριση με την δεύτερη η οποία δεν διατηρεί πληροφορίες οι οποίες έχουν εισέλθει ωρύτερα (στην πρώτη συνιστώσα) κοκ. Τα principal components δεν συσχετίζονται. Η συνολική ποσότητα των principal components είναι ίση με τη ποσότητα των αρχικών μεταβλητών και παρουσιάζει τις ίδιες πληροφορίες στατιστικής. Εντούτοις, η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει την μείωση του συνόλου των μεταβλητών, καθώς οι πρώτες συνιστώσες (principal components) διατηρούν περισσότερο από το 90% των στατιστικών δεδομένων από τα αρχικά δεδομένα.

Η διαδικασία εύρεσης των κύριων συνιστωσών περιγράφεται παρακάτω:

- Διαμόρφωση του πίνακα δεικτών απόδοσης

$$x_i(j), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & \dots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & \dots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \dots & \dots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (41)$$

όπου m ο αριθμός των πειραμάτων και n ο αριθμός των αποκρίσεων ποιότητας απόδοσης προς διερεύνηση.

- Υπολογισμός του πίνακα συνδιακύμανσης

$$R_{jl} = \left(\frac{\text{Cov}(x_i(j), x_i(l))}{\sigma_{x_i(j)} \sigma_{x_i(l)}} \right) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (42)$$

όπου $\text{Cov}(x_i(j), x_i(l))$ η συνδιακύμανση των ακολουθιών $x_i(j)$ και $x_i(l)$, $\sigma_{x_i}(j)$: η τυπική απόκλιση της $x_i(j)$ και $\sigma_{x_i}(l)$ η τυπική απόκλιση για την ακολουθία $x_i(l)$.

- Υπολογισμός των ιδιοδιανυσμάτων και ιδιοτιμών του πίνακα συνδιακύμανσης

Η εύρεση των ιδιοδιανυσμάτων και των ιδιοτιμών γίνεται απο την σχέση (43)

$$(R - \lambda_k I_m) V_{ik} = 0 \quad (43)$$

όπου λ_k οι ιδιοτιμές, $\sum_{k=1}^n \lambda_k = n$, $k = 1, 2, \dots, n$, $V_{ik} = [a_{k1} a_{k2} \dots a_{kn}]^T$: τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στην ιδιοτιμή λ_k

- Κύριες συνιστώσες (Principal component)

Οι μη συσχετισμένες κύριες συνιστώσες προκύπτουν τελικά απο την ακόλουθη σχέση:

$$Y_{mk} = \sum_{i=1}^n x_m(i) V_{ik} \quad (44)$$

όπου Y_{m1} ονομάζεται η πρώτη κύρια συνιστώσα, Y_{m2} η δεύτερη κ.ο.κ.

Οι κύριες συνιστώσες προκύπτουν σε φθίνουσα σειρά ανάλογα με την διακύμανση, συνήθως η συσσωρευμένη συνεισφορά των τριών πρώτων κυρίων συνιστωσών είναι στο 90%, συνεπώς κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό πληροφορίας των δεδομένων.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου PCA είναι οτι απλοποιεί σημαντικά την πολυπλοκότητα των πληροφοριών μετατρέποντας συσχετισμένες μεταβλητές σε λιγότερες μη συσχετισμένες και ανεξάρτητες κύριες συνιστώσες (principal components). Παράλληλα, διατηρείται όσον τον δυνατόν περισσότερη πληροφορία χρησιμοποιώντας γραμμική μέθοδο συμπίεσης των δεδομένων. Για αυτόν τον λόγο έχει αποτελέσει αναλυτικό εργαλείο για την βελτιστοποίηση συστημάτων με πολλαπλά χαρακτηριστικά απόδοσης [56,57].

4.5.1. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων μέσω υβριδικής PCA - GRA

Σε αυτό το σημείο εισαγάγεται η υβριδική μέθοδος βελτιστοποίησης PCA - GRA. Προκειμένου να υπολογιστεί αντικειμενικά η επίδραση της κάθε απόκρισης κατά την διαδικασία της grey relational analysis στον υπολογισμό του δείκτη GRG, η μέθοδος PCA εφαρμόζεται για να καθορίσει την βαρύτητα που αντιστοιχεί σε κάθε απόκριση που εξετάζεται. Με αυτόν τον τρόπο, η ιεράρχηση των πειραματικών δεδομένων στους στόχους που ορίζονται προκύπτει απο την ακόλουθη σχέση:

$$\Gamma(X_0, X_i) = \sum_{j=1}^n \beta_k \gamma(x_{0j}, x_{ij}) \quad (45)$$

Όπου η σχέση (45) εκφράζει τον δείκτη GRG και β_k οι συντελεστές βαρύτητας όπως προκύπτουν μέσω της PCA. Για την υλοποίηση των παραπάνω, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση R2020a του υπολογιστικού πακέτου MATLAB.

4.5.1.1. Κριτήριο Μεγιστοποίησης βάθους - Ελαχιστοποίησης πλάτους

Για να εφαρμοστεί το κριτήριο μεγιστοποίησης του βάθους με παράλληλη ελαχιστοποίηση του πλάτους, χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές GRC όπως προέκυψαν από την διαδικασία GRA στην υποενότητα 4.4.1.1. για κανονικοποιημένες τιμές των αποκρίσεων με κριτήριο smaller-the-better για το πλάτος και larger-the-better για το βάθος και παρατίθενται στον πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.15. Συντελεστές GRC

A/A Κοπής	GRC βάθος	GRC πλάτος
1	0,346	0,906
2	0,428	0,528
3	0,552	0,333
4	0,348	0,731
5	0,392	0,488
6	0,398	0,595
7	0,333	0,577
8	0,360	1,000
9	0,370	0,712
10	0,480	0,656
11	0,758	0,464
12	0,955	0,346
13	0,356	0,678
14	0,420	0,423
15	0,460	0,656
16	0,341	0,577
17	0,371	0,952
18	0,390	0,595
19	0,468	0,706
20	0,877	0,464
21	1,000	0,500
22	0,368	0,559
23	0,438	0,405
24	0,463	0,656
25	0,358	0,514
26	0,366	0,793
27	0,393	0,514

Οι συντελεστές GRC για το βάθος και το πλάτος στην παρούσα διερεύνηση λήφθηκαν ως δεδομένα για την διαμόρφωση του μητρώου της σχέσης (46), με $m=27$ διαφορετικούς συνδυασμούς πειραματικών συνθηκών και $n=2$ αποκρίσεις και εν συνεχεία για την εύρεση του πίνακα συνδιακύμανσης και των αντίστοιχων ιδιοτιμών από την σχέση (43) όπως φαίνονται στον πίνακα 4.16.

Πίνακας 4.16 Οι ιδιοτιμές και η διακύμανση για τις κύριες συνιστώσες

Principal Component	Eigenvalue	Explained Variation (%)
first	0.0490	74,83
second	0.0165	25,17

Τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε κάθε ιδιοτιμή φαίνονται στον πίνακα 4.17, όπου τα τετράγωνα των τιμών τους αντιπροσωπεύουν την συνεισφορά της αντίστοιχης απόκρισης στην κύρια συνιστώσα. Επιπλέον, η συνεισφορά της διακύμανσης για την πρώτη κύρια συνιστώσα (first principal component) έχει τιμή 74.83%, έτσι στην παρούσα διερεύνηση, τα τετράγωνα των ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν σε αυτή την κύρια συνιστώσα επιλέγονται ως οι συντελεστές βαρύτητας β_k στην σχέση (45). Έτσι οι τιμές που προκύπτουν για τα β_k είναι $\beta_{k1}=0.61011$ και $\beta_{k2}=0.38987$ όπως φαίνονται στον πίνακα 4.18.

Πίνακας 4.17. Τα ιδιοδιανύσματα για τις κύριες συνιστώσες

Performance Index	Eigenvectors	
	First principal component	Second principal compon
βάθος	0,7811	0,6244
πλάτος	-0,6244	0,7811

Πίνακας 4.18. Συνεισφορά αποκρίσεων στην πρώτη κύρια συνιστώσα

Performance Index	Contribution
βάθος	0,61011721
πλάτος	0,38987536

Βάση της σχέσης (45) και των δεδομένων του πίνακα 4.15. μέσω της GRA, προκύπτουν οι δείκτες GRG με συνυπολογισμένη πλέον την διαφορετική βαρύτητα της κάθε απόκρισης. Έτσι προκύπτει τελικά ο πίνακας 4.19. όπου κάθε στοιχείο του έχει προκύψει με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\Gamma(X_0, X_1) = 0.61 \times 0.346 + 0.3898 \times 0.906 = 0.5641$$

Πίνακας 4.19. Δείκτες GRG

A/A Κοπής	GRG	Rank
1	0,5641	7
2	0,4666	19
3	0,4667	18
4	0,4977	14
5	0,4293	23
6	0,4747	16
7	0,4281	24
8	0,6093	5
9	0,5031	13
10	0,5488	9
11	0,6432	4
12	0,7177	2
13	0,4816	15
14	0,4211	26
15	0,5367	11
16	0,4329	22
17	0,5976	6
18	0,4699	17
19	0,5605	8
20	0,7160	3
21	0,8052	1
22	0,4426	20
23	0,4251	25
24	0,5381	10
25	0,4189	27
26	0,5326	12
27	0,4399	21

Από τον πίνακα 4.19. παρατηρείται πως συνολικά στις απαιτήσεις των κριτηρίων που τέθηκαν ανταποκρίνεται καλύτερα η 21η κοπή καθώς έχει την υψηλότερη τιμή στον δείκτη GRG. Συνεπώς οι πειραματικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην 21η κοπή (ταχύτητα πρόωσης 100 mm/min, παροχή αποξεστικού υλικού 8 g/s, απόσταση στομίου εκτόξευσης 5 mm και πίεση 400 MPa) είναι ο βέλτιστος συνδυασμός για την επιθυμητή απόκριση ανάμεσα στις υπόλοιπες 27.

Στην συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος GRG που αντιστοιχεί σε κάθε επίπεδο τιμών των παραμέτρων όπως φαίνεται στον πίνακα 4.20. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι μέσες τιμές GRG υπολογίστηκαν βάση των επιπέδων τιμών των παραγόντων ελέγχου όπως ορίζονται από τον πίνακα Taguchi. Με αυτόν τον τρόπο συναθροίζονται οι δείκτες GRG στο εκάστοτε επίπεδο τιμών των παραμέτρων και

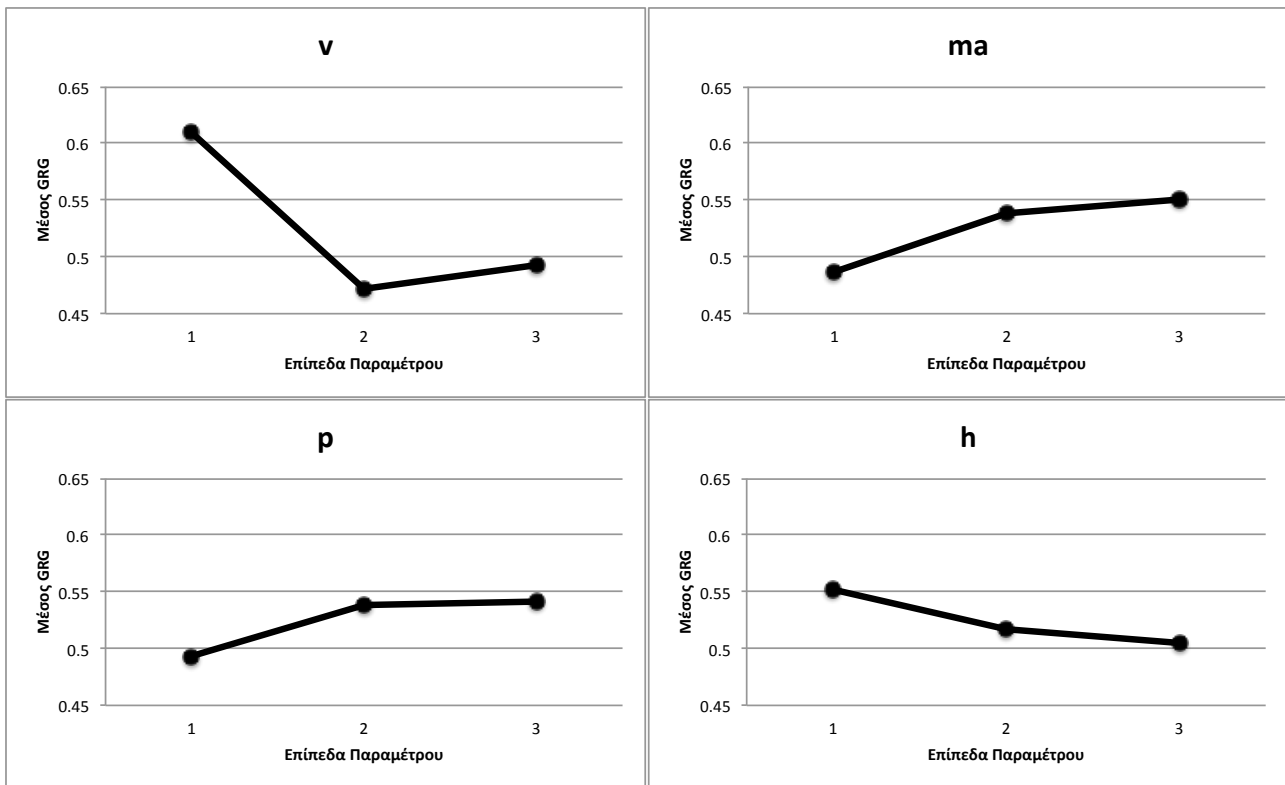
υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Έτσι οι δείκτες GRG που αντιστοιχούν στις γραμμές 1, 2, 3, 10, 11, 12, 19, 20, 21 αντιστοιχούν στο πρώτο επίπεδο τιμών της ταχύτητας πρόωσης, συνεπώς ο μέσος όρος τους είναι ο μέσος GRG για το πρώτο επίπεδο τιμών της συγκεκριμένης παραμέτρου. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν όλες οι τιμές του πίνακα 4.20.

$$v_1 = (0.5641 + 0.4666 + 0.4667 + 0.5488 + 0.6432 + 0.7177 + 0.5605 + 0.7160 + 0.8052) / 9 = 0.60987$$

Πίνακας 4.20. μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρων

Επίπεδα	v	ma	h	p
1	0,609876245	0,486142296	0,55137882	0,493300484
2	0,471877527	0,537876233	0,517862146	0,538840015
3	0,492489389	0,550224633	0,505002196	0,542102662
Max - Min	0,137998718	0,064082337	0,046376625	0,048802178

Απο τον παραπάνω πίνακα η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων βάση των κριτηρίων ελαχιστοποίησης πλάτους και μεγιστοποίησης του βάθους, σύμφωνα με την GRA προκύπτει επιλέγοντας τις μέγιστες τιμές ανά επίπεδο παραμέτρου. Έτσι η βέλτιστη επιλογή είναι η ακόλουθη: $v_1 - ma_3 - h_1 - p_3$. Δηλαδή ταχύτητα πρόωσης στο πρώτο επίπεδο τιμών της 100 mm/min, παροχή αποξεστικού υλικού στο τρίτο επίπεδο τιμών της 8 g/s, απόσταση του στομίου στο πρώτο επίπεδο τιμών 1 mm και τέλος πίεση στο τρίτο επίπεδο τιμών άρα 400 MPa. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του μέσου GRG για κάθε παράμετρο φαίνεται στην τελευταία γραμμή του πίνακα. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται για την ταχύτητα πρόωσης, αυτό δείχνει ότι η συγκεκριμένη παράμετρος έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις πολλαπλές αποκρίσεις που ερευνήθηκαν σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις. Ακολουθεί η παροχή του αποξεστικού, η πίεση και τέλος η απόσταση του στομίου εκτόξευσης αφού έχει την μικρότερη διαφορά Max - Min. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο διάγραμμα 4.7 γραφικά.



Διάγραμμα 4.7 Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου.

4.5.1.2. Κριτήριο Μεγιστοποίησης βάθους - Ελαχιστοποίησης πλάτους - Ελαχιστοποίησης χρόνου

Επιπλέον των κριτηρίων μεγιστοποίησης βάθους και ελαχιστοποίησης πλάτους, σε αυτήν την υποενότητα διερευνάται η βέλτιστη επιλογή τιμών των παραμέτρων αν τεθεί επίσης ως ζητούμενο η ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας. Κατά αυτόν τον τρόπο και σε αντιστοιχία με το πρώτο σενάριο που εξετάστηκε, λαμβάνονται οι συντελεστές GRC όπως προέκυψαν από την διαδικασία GRA για μεγιστοποίηση πλάτους, ελαχιστοποίηση βάθους και χρόνου κατεργασίας από την υποενότητα 4.4.1.3. Στην συνέχεια τα δεδομένα του πίνακα 4.21. αποτελούν το μητρώο της σχέσης (41) με $m=27$ και $n=3$ καθώς εξετάζονται 3 αποκρίσεις αυτή την φορά και αξιοποιούνται για την εύρεση των συντελεστών βαρύτητας β_k , της σχέσης (45), των αποκρίσεων μέσω της μεθόδου PCA.

Πίνακας 4.21. Συντελεστές GRC και δείκτες GRG

A/A Κοπής	GRC βάθος	GRC πλάτος	GRC χρόνος
1	0,346	0,906	0,333
2	0,428	0,528	0,333
3	0,552	0,333	0,333
4	0,348	0,731	0,75
5	0,392	0,488	0,75
6	0,398	0,595	0,75
7	0,333	0,577	1
8	0,360	1,000	1
9	0,370	0,712	1
10	0,480	0,656	0,333
11	0,758	0,464	0,333
12	0,955	0,346	0,333
13	0,356	0,678	0,75
14	0,420	0,423	0,75
15	0,460	0,656	0,75
16	0,341	0,577	1
17	0,371	0,952	1
18	0,390	0,595	1
19	0,468	0,706	0,333
20	0,877	0,464	0,333
21	1,000	0,500	0,333
22	0,368	0,559	0,75
23	0,438	0,405	0,75
24	0,463	0,656	0,75
25	0,358	0,514	1
26	0,366	0,793	1
27	0,393	0,514	1

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και στο προηγούμενο σενάριο, έγινε ο υπολογισμός της πρώτης, δεύτερης και τρίτης κύριας συνιστώσας και των αντιστοίχων ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων. Η συνεισφορά της διακύμανσης για την πρώτη κύρια συνιστώσα (first principal component) έχει τιμή 72.746%, έτσι στην παρούσα διερεύνηση, τα τετράγωνα των ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν σε αυτή την κύρια συνιστώσα επιλέγονται ως οι συντελεστές βαρύτητας β_k στην σχέση (45). Έτσι οι τιμές που προκύπτουν για τα β_k είναι β_{k1}=0.2386 και

$\beta_2=0.07851$ και $\beta_3=0.68277$ όπως φαίνονται στον πίνακα 4.24. αποτελώντας τους συντελεστές βαρύτητας για το βάθος, το πλάτος και τον χρόνο αντίστοιχα των GRC για τον τελικό υπολογισμό του δείκτη GRG.

Πίνακας 4.22. Οι ιδιοτιμές και η διακύμανση των κύριων συνιστωσών

principal component	Eigenvalue	Explained Variation (%)
first	0,1048	72,7466
second	0,026	18,067
third	0,0132	9,1768

Πίνακας 4.23. Τα ιδιοδιανύσματα για τις κύριες συνιστώσες

Performance Index	Eigenvectors		
	First principal component	Second principal compon	Third principal
βάθος	-0,4885	-0,3144	0,8139
πλάτος	0,2802	0,8269	0,4876
χρόνος	0,8263	-0,4662	0,3159

Πίνακας 4.24. Συνεισφορά των αποκρίσεων στην πρώτη κύρια συνιστώσα

Performance Index	Contribution
βάθος	0,23863225
πλάτος	0,07851204
χρόνος	0,68277169

Τελικά προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας ιεραρχώντας τις τιμές GRG που προέκυψαν για ελαχιστοποίηση του χρόνου και του πλάτους και μεγιστοποίηση του βάθους στα πλαίσια των 27 κοπών του πειράματος.

Πίνακας 4.25. Δείκτες GRG

A/A Κοπής	GRG	Rank
1	0,381	26
2	0,371	27
3	0,385	25
4	0,653	13
5	0,644	17
6	0,654	12
7	0,808	9
8	0,847	1
9	0,827	4
10	0,394	24
11	0,445	22
12	0,483	20
13	0,650	14
14	0,645	16
15	0,673	11
16	0,809	7
17	0,846	2
18	0,823	5
19	0,395	23
20	0,473	21
21	0,506	19
22	0,644	18
23	0,648	15
24	0,674	10
25	0,809	8
26	0,832	3
27	0,817	6

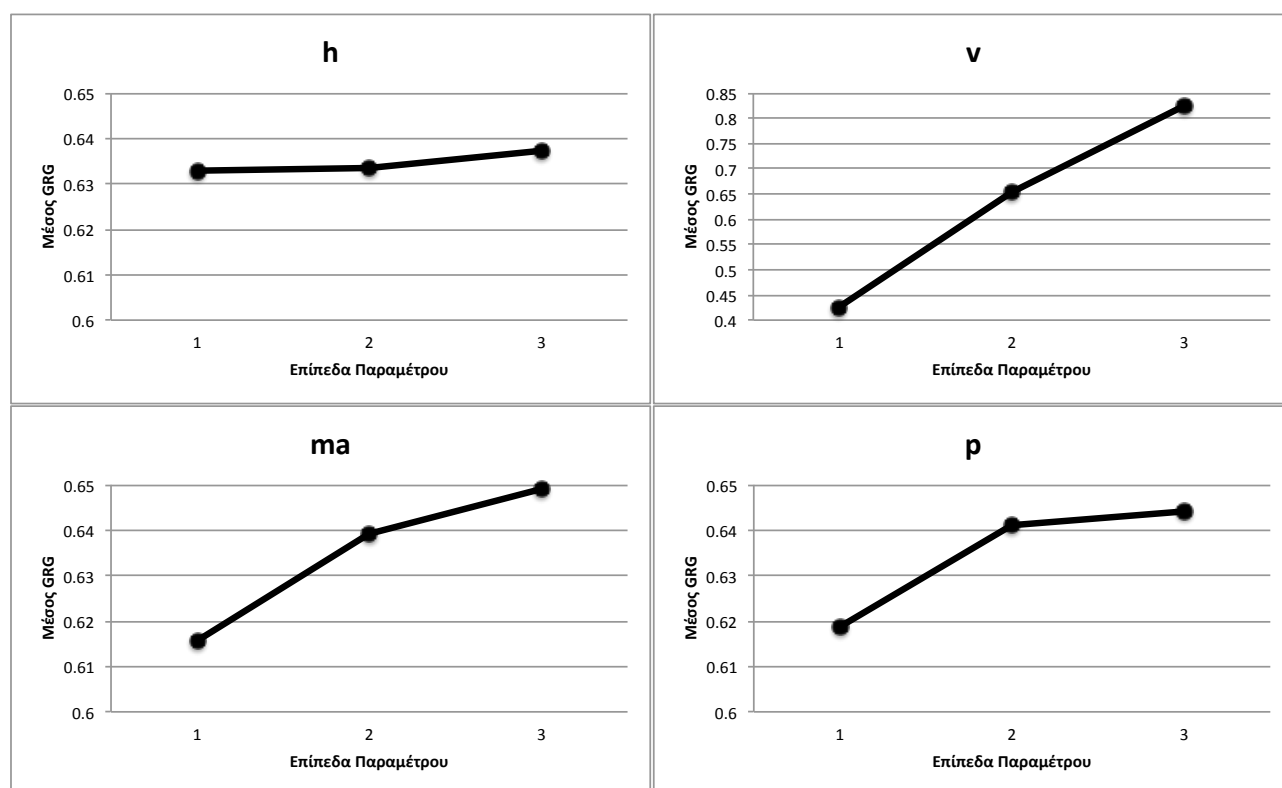
Απο τον πίνακα 4.25. φαίνεται πως συνολικά στις απαιτήσεις των κριτηρίων που έχουν τεθεί ανταποκρίνεται καλύτερα η 8η κοπή καθώς έχει την υψηλότερη τιμή στον δείκτη GRG. Συνεπώς οι πειραματικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην 8η κοπή (ταχύτητα πρόωσης 500 mm/min, παροχή αποξεστικού υλικού 5 g/s, απόσταση στομίου εκτόξευσης 1 mm και πίεση 233 MPa) είναι οι βέλτιστες για την επιθυμητή απόκριση ανάμεσα στις υπόλοιπες 27.

Για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού τιμών των παραμέτρων κατεργασίας, υπολογίζεται ο μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου και η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στην βέλτιστη τιμή της παραμέτρου.

Πίνακας 4.26. μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρων

Επίπεδα	v	ma	h	p
1	0,425824271	0,615759505	0,632920219	0,618835443
2	0,653965332	0,639172897	0,633574966	0,640950314
3	0,824153572	0,649010774	0,63744799	0,644157418
Max - Min	0,398329301	0,033251269	0,004527771	0,025321975

Η βέλτιστη επιλογή προκύπτει απο τον ακόλουθο συνδυασμό: v3-ma3-h3-p3. Δηλαδή όλες οι παράμετροι στο τρίτο επίπεδων τιμών τους, άρα ταχύτητα πρόωσης 500 mm/min, παροχή αποξεστικού 8 g/s, απόσταση του στομίου 5 mm και τέλος πίεση 400 MPa. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του μέσου GRG για κάθε παράμετρο φαίνεται στην τελευταία γραμμή του πίνακα. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται για την ταχύτητα πρόωσης, αυτό δείχνει οτι η συγκεκριμένη παράμετρος έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις πολλαπλές αποκρίσεις που ερευνήθηκαν σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις. Ακολουθεί η παροχή του αποξεστικού υλικού, η πίεση και τέλος η απόσταση του στομίου εκτόξευσης αφού έχει την μικρότερη διαφορά Max - Min. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο διάγραμμα 4.8 γραφικά.



Διάγραμμα 4.8. Μέσος GRG ανά επίπεδο παραμέτρου

4.6. Η μέθοδος Fuzzy logic (Ασαφής λογική)

Η Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic) είναι μια επέκταση της κλασικής παραδοσιακής δίτιμης λογικής, που προσθέτει έναν αποτελεσματικό μαθηματικό σκελετό, για την έκφραση γλωσσικών εννοιών και για την παράσταση γνώσεων και πληροφοριών σε περιβάλλον ασάφειας και αβεβαιότητας. Έτσι, παρέχει την ικανότητα μοντελοποίησης ιδιαίτερα πολύπλοκων προβλημάτων. Καθώς τα ασαφή συστήματα προσφέρουν γενικευμένες προσεγγίσεις και είναι κατάλληλα για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων προβλημάτων, έχουν την ικανότητα να προσεγγίζουν τη συμπεριφορά συστημάτων που διαθέτουν έναν αριθμό ελάχιστα γνωστών χαρακτηριστικών. Η ικανότητά τους να επεξηγούν τη συλλογιστική τους, προσφέρει έναν ιδανικό τρόπο αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων. Η ασαφής λογική είναι ένας μετρητής της συμβατότητας μιας έννοιας με τα στιγμιότυπα αυτής. Περιγράφει τα χαρακτηριστικά της έννοιας, στα οποία και δίνει διαβαθμιζόμενες τιμές, ενώ αποδίδει ετικέτες με συγκεκριμένο σημασιολογικό περιεχόμενο σε κομμάτια αυτών των τιμών. Πάνω σε αυτό το πλαίσιο λειτουργεί ένα fuzzy control system (ασαφές σύστημα ελέγχου), αναλύοντας αναλογικές μεταβλητές εισόδου ενός συστήματος σε λογικές μεταβλητές που λαμβάνουν συνεχείς τιμές στο διάστημα [0-1], σε αντίθεση με την κλασική λογική προσέγγιση που λειτουργεί σε διακριτές τιμές 0 ή 1. Με τον όρο της ασάφειας λοιπόν εκφράζονται τα ενδεχόμενα όχι ως “αληθή” ή “ψευδή” αλλά ως “μερικώς αληθή”.

Τα βασικά στοιχεία ενός ασαφούς συστήματος είναι :

- Ασαφοποίηση των δεδομένων εισόδου

Η διαδικασία μετατροπής των αρχικών αριθμητικών τιμών των μεταβλητών εισόδου του συστήματος σε λεκτικές μεταβλητές (linguistic variables - οι εκφράσεις των οποίων είναι ασαφείς αριθμοί δηλαδή ασαφή σύνολα (fuzzy subset) ορισμένα σε ένα διάστημα, τα οποία αναπαριστούν γλωσσικούς όρους όπως μικρό, μέσο, μεγάλο κ.λ.π.) με τη βοήθεια των συναρτήσεων συμμετοχής. Οι αριθμοί που αντιστοιχούν στις μεταβλητές, αντικαθίστανται από λεκτικούς όρους (terms) και δημιουργούνται συναρτήσεις συμμετοχής αντίστοιχα για κάθε κριτήριο.

- Ανάπτυξη των κανόνων (fuzzy rules)

Οι κανόνες συνδέουν την είσοδο με την έξοδο (τα αποτελέσματα). Συνδέουν ουσιαστικά τις λεκτικές μεταβλητές κάθε μεταβλητής - κριτηρίου με το υποσύνολο του λεκτικού συμβολισμού (χαμηλή ή υψηλή λχ.), αποδίδοντας τη βεβαιότητα καθορισμού του κανόνα.

- Επεξεργασία των κανόνων

Η επεξεργασία των κανόνων ή εξαγωγή συμπεράσματος (inference), αφορά στη διαδικασία εξαγωγής του αποτελέσματος μέσα από την υπάρχουσα γνώση όπως εκφράζεται στους κανόνες.

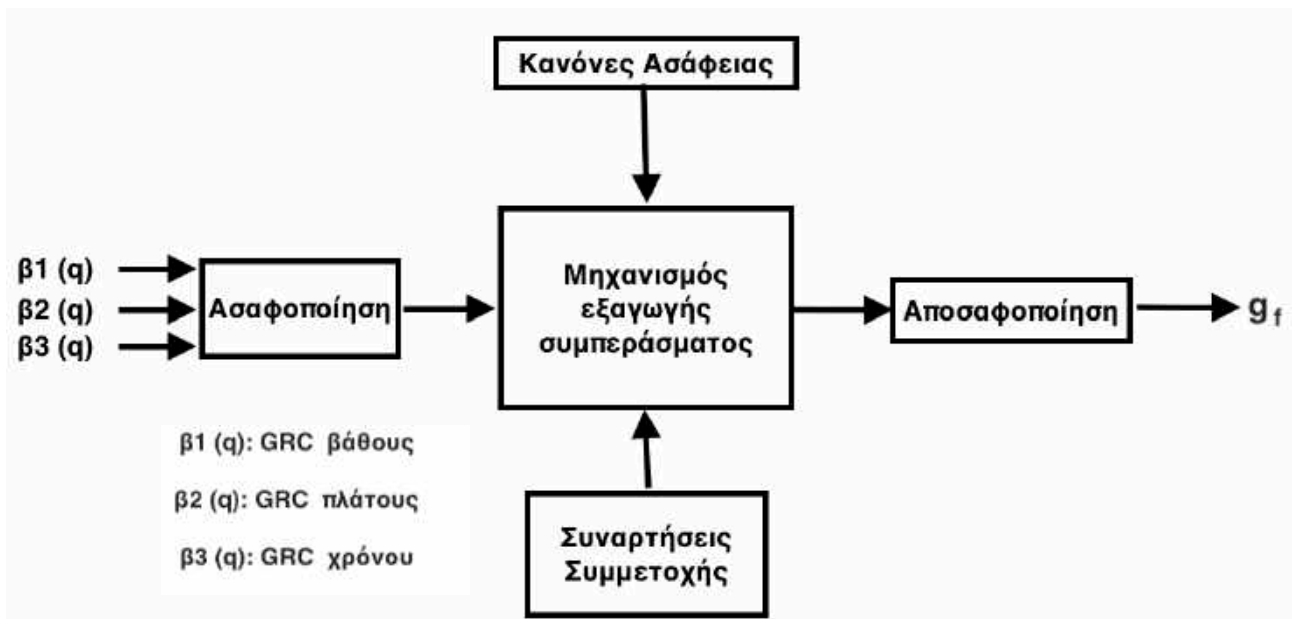
- Αποσαφoποίηση των αποτελεσμάτων

Είναι η διαδικασία μετατροπής του συνόλου των αποτελεσμάτων σε μια αριθμητική τιμή [58,59].

4.6.1. Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων μέσω υβριδικής μεθόδου Fuzzy logic - GRA

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η ασαφής λογική συνδυαστικά με την Grey relational analysis δημιουργώντας έτσι την υβριδική fuzzy logic - GRA, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα που εμπεριέχεται στην εύρεση των δεικτών GRG της απλής GRA. Έτσι στα πλαίσια της υβριδικής μεθόδου, δημιουργείται ένα fuzzy logic system, το οποίο λαμβάνει ως μεταβλητές εισόδου τους συντελεστές GRC που έχουν βρεθεί μέσω της GRA και δίνει στην έξοδο τον δείκτη GFRG (Grey Fuzzy Reasoning Grade). Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι ενώ στον υπολογισμό του δείκτη GRG μέσω της απλής μεθόδου GRA, λαμβάνεται ίδια βαρύτητα για τους συντελεστές GRC, σε αυτήν την περίπτωση, μέσω μαθηματικοποιημένων γλωσσικών δηλώσεων συνυπολογίζεται η βαρύτητα του κάθε συντελεστή GRC για την ανάδειξη τελικά του GFRG. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου για το σενάριο ελαχιστοποίησης πλάτους, ελαχιστοποίησης χρόνου κατεργασίας και μεγιστοποίησης βάθους των αυλακιών. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο Matlab R2020a.

Αρχικά γίνεται η ασαφoποίηση (fuzzification) των μεταβλητών εισόδου σε μεταβλητές fuzzy. Η μετατροπή γίνεται μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής (membership function). Οι συναρτήσεις συμμετοχής αποτελούν καμπύλες που περιγράφουν πως κάθε τιμή εισόδου απεικονίζεται σε τιμή συμμετοχής ανάμεσα στο 0 και το 1. Στην συνέχεια ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων (inference engine) αξιοποιώντας τους γλωσσικούς κανόνες (fuzzy rules) που έχουν οριστεί στο σύστημα δίνει την ασαφή απόκριση την οποία μετατρέπει ο αποσαφoποιητής (defuzzifier), στην ζητούμενη τιμή GFRG. Η διαδικασία περιγράφεται στο λογικό διάγραμμα της εικόνας 4.1.



Εικόνα 4.1. Δομή της συστήματος ασαφούς λογικής.

Στην παρούσα διερεύνηση έγινε επιλογή της τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής (triangular membership function) λόγω της ευκολίας και υπολογιστικής ακρίβειας που παρέχει. Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής καθορίζεται από τρεις παραμέτρους, ως εξής:

$$\mu_e(F) = \begin{cases} \frac{f - e_1}{e_2 - e_1} & e_1 \leq F \leq e_2 \\ 1 & F = e_2 \\ \frac{e_3 - f}{e_3 - e_2} & e_2 \leq F \leq e_3 \\ 0 & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (46)$$

Όπου τα e_1 και e_3 συμβολίζουν την βάση του τριγώνου και e_2 την κορυφή του.

Τα fuzzy rules διατυπώνονται στην μορφή Εάν - τότε (IF - Then) και αποτελούν την μαθηματική σύνδεση ανάμεσα στις τρεις εισόδους (συντελεστές GRC) με την μια έξοδο (μεταβλητή GFRG). Η διαμόρφωση των κανόνων ασάφειας γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Rule 1 : if β_1 is P1, β_2 is Q1 and β_3 is R1 then g is S1;

Rule 2 : if β_1 is P2, β_2 is Q2 and β_3 is R2 then g is S2;

Rule 3 : if β_1 is P3, β_2 is Q3 and β_3 is R3 then g is S3;

Rule 4 : if β_1 is P4, β_2 is Q4 and β_3 is R4 then g is S4;

⋮

Rule n : if β_1 is Pn, β_2 is Qn and β_3 is Rn then g is Sn

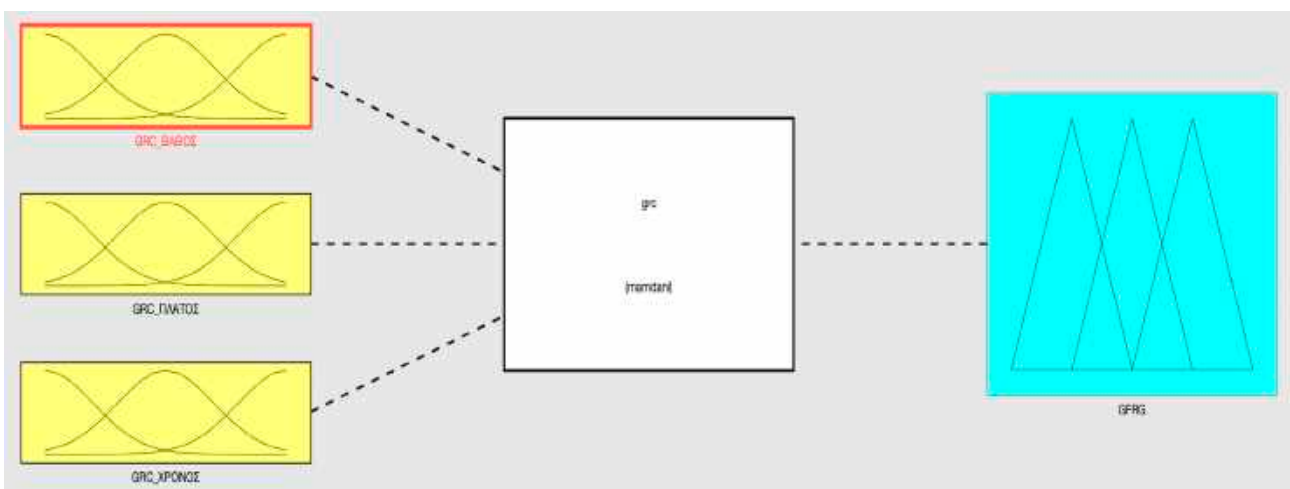
Όπου τα P1, Q1, R1, S1 είναι ασαφή σύνολα (fuzzy subsets) οριζόμενα απο τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής : μ_{A1} , μ_{Q1} , μ_{R1} , μ_{S1} . Εδώ επιλέγονται 3 fuzzy subset για την εκάστοτε μεταβλητή εισόδου, δηλαδή για κάθε GRC και 5 fuzzy subsets για την έξοδο πολλαπλών αποκρίσεων του συστήματος δηλαδή το GFRG όπως φαίνονται στον πίνακα 4.27. Συνολικά διατυπώνονται 27 fuzzy rules, ένα για κάθε συνδυασμό τριών GRC όπως φαίνεται στον πίνακα 4.28. Για τον τρόπο λειτουργίας του μηχανισμού εξαγωγής συμπεράσματος (Fuzzy Inference Engine) χρησιμοποιείται η μέθοδος Mamdani fuzzy inference, λαμβάνοντας τα fuzzy rules, τις συναρτήσεις συμμετοχής και τις μεταβλητές εισόδου εκτελώντας την ακόλουθη μαθηματική διαδικασία, επιστρέφει στην έξοδο τον δείκτη πολλαπλών αποκρίσεων g_f .

$$\mu_{S_0}(g) = \left((m_{P_1}(\beta_1) \wedge m_{Q_1}(\beta_2) \wedge m_{R_1}(\beta_3) \wedge m_{S_1}(g)) \wedge \vee \left(\times (m_{P_n}(\beta_1) \wedge m_{Q_n}(\beta_2) \wedge m_{R_n}(\beta_3)) \wedge m_{S_n}(g) \right) \right)$$

όπου \wedge ο ελάχιστος τελεστής \vee και ο μέγιστος. Τέλος συμβαίνει η αποσαφοποίηση (defuzzification) μέσω της κεντροειδής μεθόδου (centroid method) και η πολλαπλή απόκριση $\mu_{S_0}(g)$, μετατρέπεται στον καθαρό g_f με την ακόλουθη διαδικασία.

$$g_f = \frac{\sum g \mu_{S_0}(g)}{\sum \mu_{S_0}(g)} \quad (47)$$

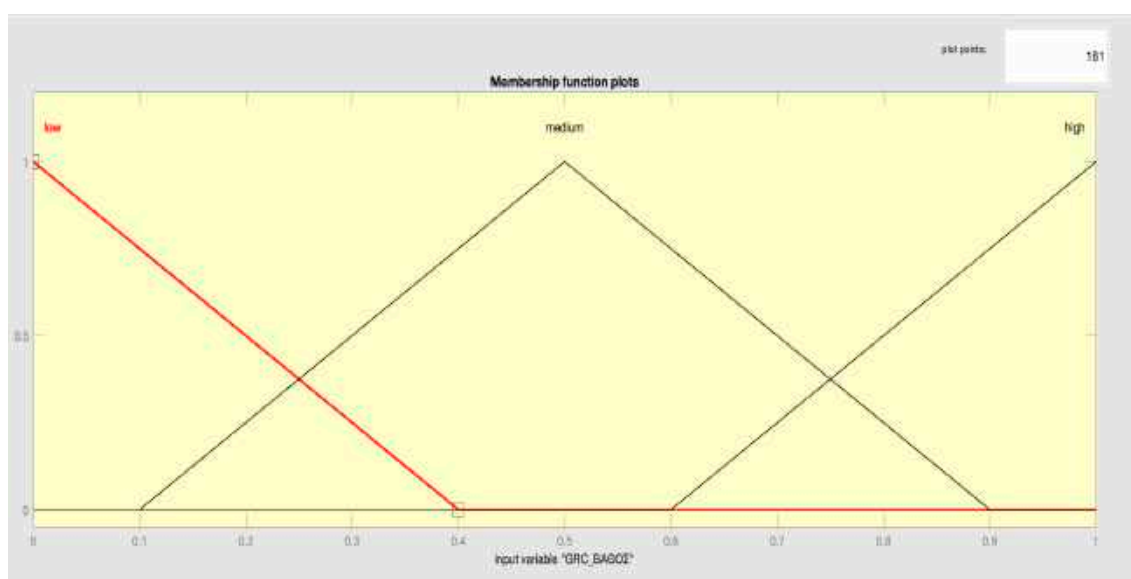
Τα παραπάνω υλοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του υπολογιστικού πακέτου MATLAB R2020a με την χρήση του Fuzzy Logic Toolbox, όπως παρουσιάζονται στην συνέχεια.



Εικόνα 4.2. Η δομή της μεθόδου Fuzzy Logic στο UI του MATLAB.

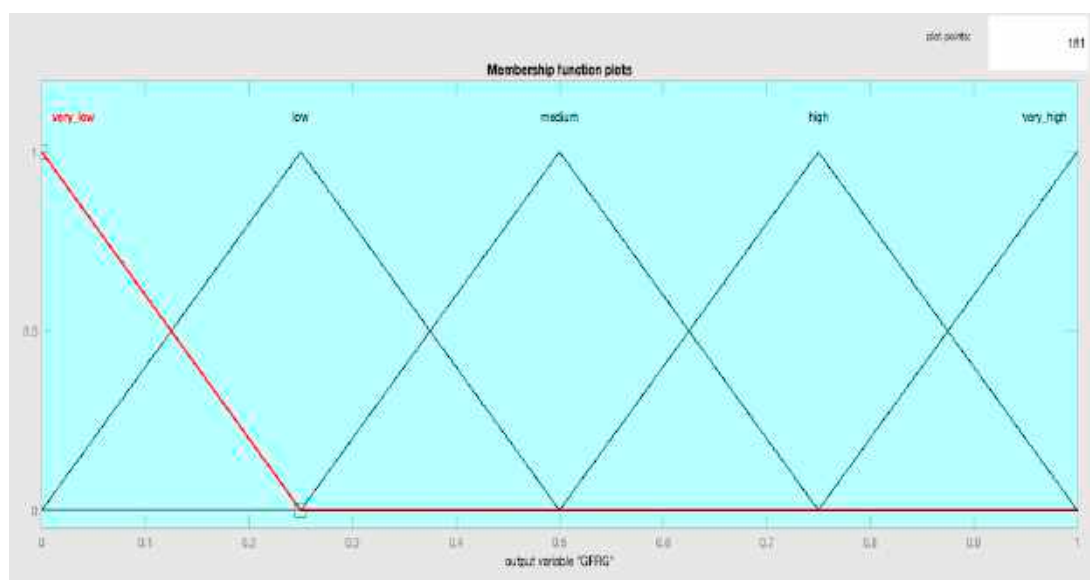
Πίνακας 4.27. Εύρος των fuzzy subset για τις μεταβλητές εισόδου και την έξοδο.

Συνάρτηση συμμετοχής	Μεταβλητή	Συνθήκη	Εύρος
Τριγωνική	Είσοδος	LOW	-0.4 εως 0.4
		MEDIUM	0.1 εως 0.9
		HIGH	0.6 εως 1.4
	Έξοδος	VERY LOW	-0.25 εως 0.25
		LOW	0 εως 0.5
		MEDIUM	0.25 εως 0.75
		HIGH	0.5 εως 1
		VERY HIGH	1 εως 1.5



Εικόνα 4.3. Διάγραμμα της συνάρτησης συμμετοχής για το GRC του βάθους.

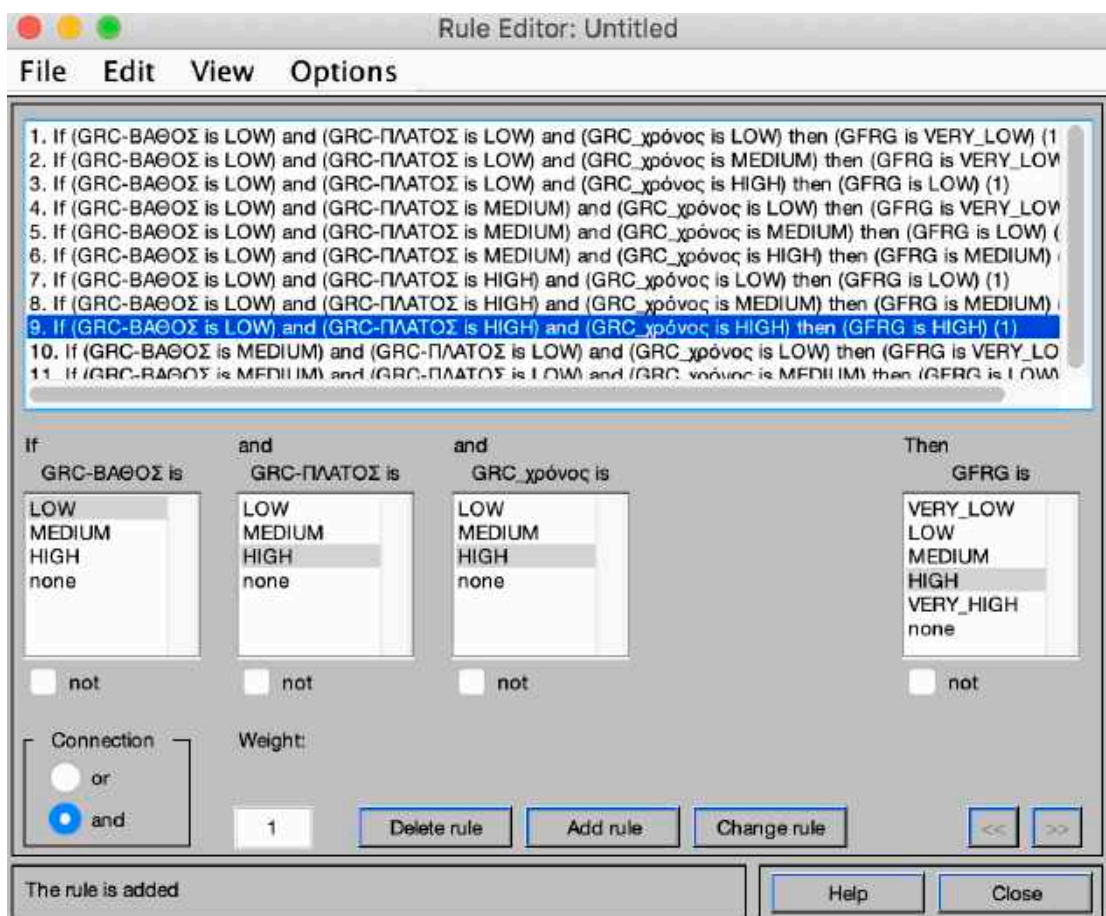
Όπου τα διαγράμματα των συναρτήσεων συμμετοχής για τους συντελεστές GRC του πλάτους και του χρόνου είναι πανομοιότυπα με το διάγραμμα για το GRC του βάθους της εικόνας 4.3.



Εικόνα 4.4. Διάγραμμα της συνάρτησης συμμετοχής για την έξοδο GFRG.

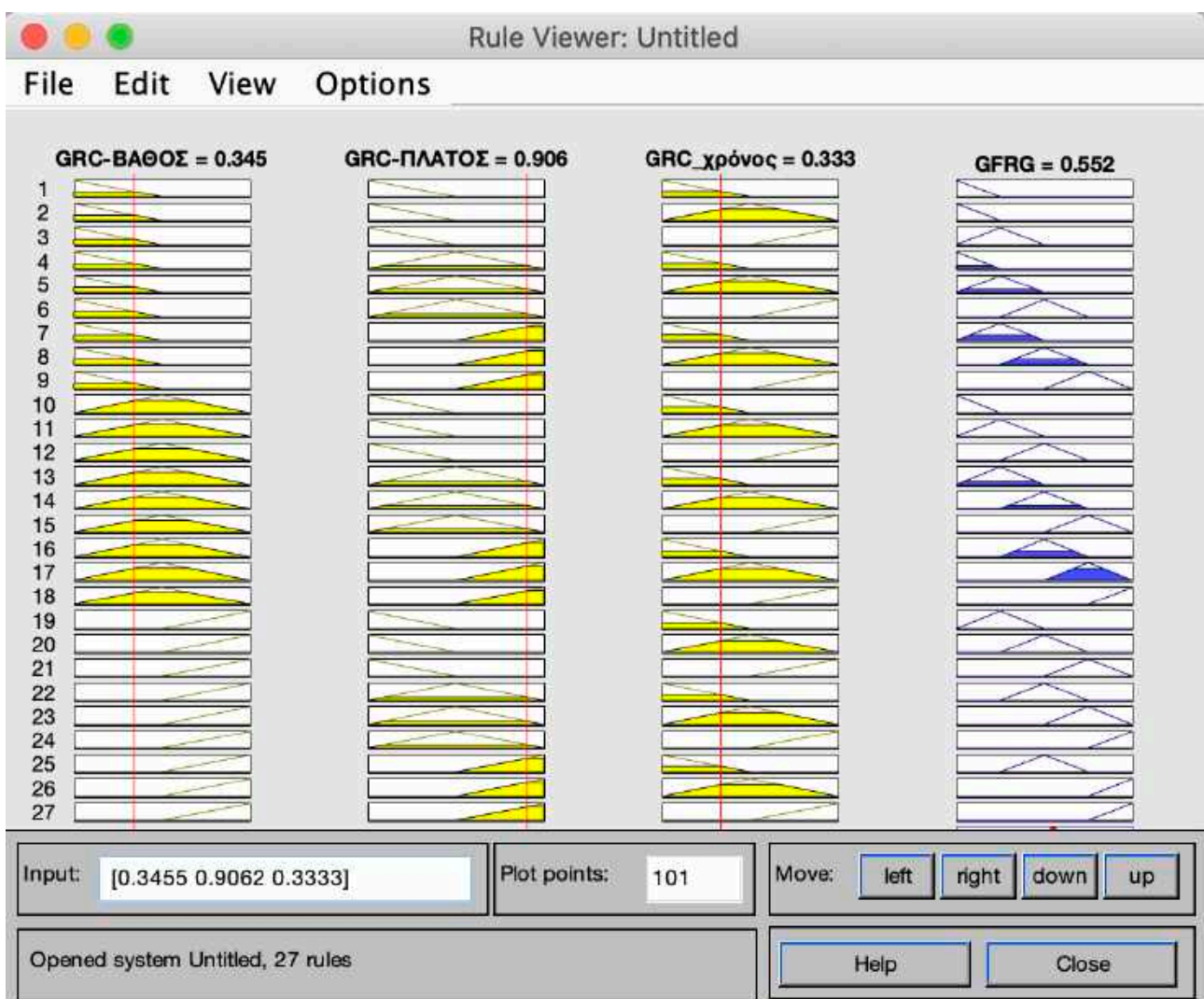
Πίνακας 4.28. Τα fuzzy rules που χρησιμοποιήθηκαν στο fuzzy logic system.

Rule No	Εαν GRC βάθος	και GRC πλάτος	και GRC χρόνος	Τότε GFRG είναι
Rule 1	LOW	LOW	LOW	VERY LOW
Rule 2	LOW	LOW	MEDIUM	VERY LOW
Rule 3	LOW	LOW	HIGH	LOW
Rule 4	LOW	MEDIUM	LOW	VERY LOW
Rule 5	LOW	MEDIUM	MEDIUM	LOW
Rule 6	LOW	MEDIUM	HIGH	MEDIUM
Rule 7	LOW	HIGH	LOW	LOW
Rule 8	LOW	HIGH	MEDIUM	MEDIUM
Rule 9	LOW	HIGH	HIGH	HIGH
Rule 10	MEDIUM	LOW	LOW	VERY LOW
Rule 11	MEDIUM	LOW	MEDIUM	LOW
Rule 12	MEDIUM	LOW	HIGH	MEDIUM
Rule 13	MEDIUM	MEDIUM	LOW	LOW
Rule 14	MEDIUM	MEDIUM	MEDIUM	MEDIUM
Rule 15	MEDIUM	MEDIUM	HIGH	HIGH
Rule 16	MEDIUM	HIGH	LOW	MEDIUM
Rule 17	MEDIUM	HIGH	MEDIUM	HIGH
Rule 18	MEDIUM	HIGH	HIGH	VERY HIGH
Rule 19	HIGH	LOW	LOW	LOW
Rule 20	HIGH	LOW	MEDIUM	MEDIUM
Rule 21	HIGH	LOW	HIGH	HIGH
Rule 22	HIGH	MEDIUM	LOW	MEDIUM
Rule 23	HIGH	MEDIUM	MEDIUM	HIGH
Rule 24	HIGH	MEDIUM	HIGH	VERY HIGH
Rule 25	HIGH	HIGH	LOW	MEDIUM
Rule 26	HIGH	HIGH	MEDIUM	VERY HIGH
Rule 27	HIGH	HIGH	HIGH	VERY HIGH

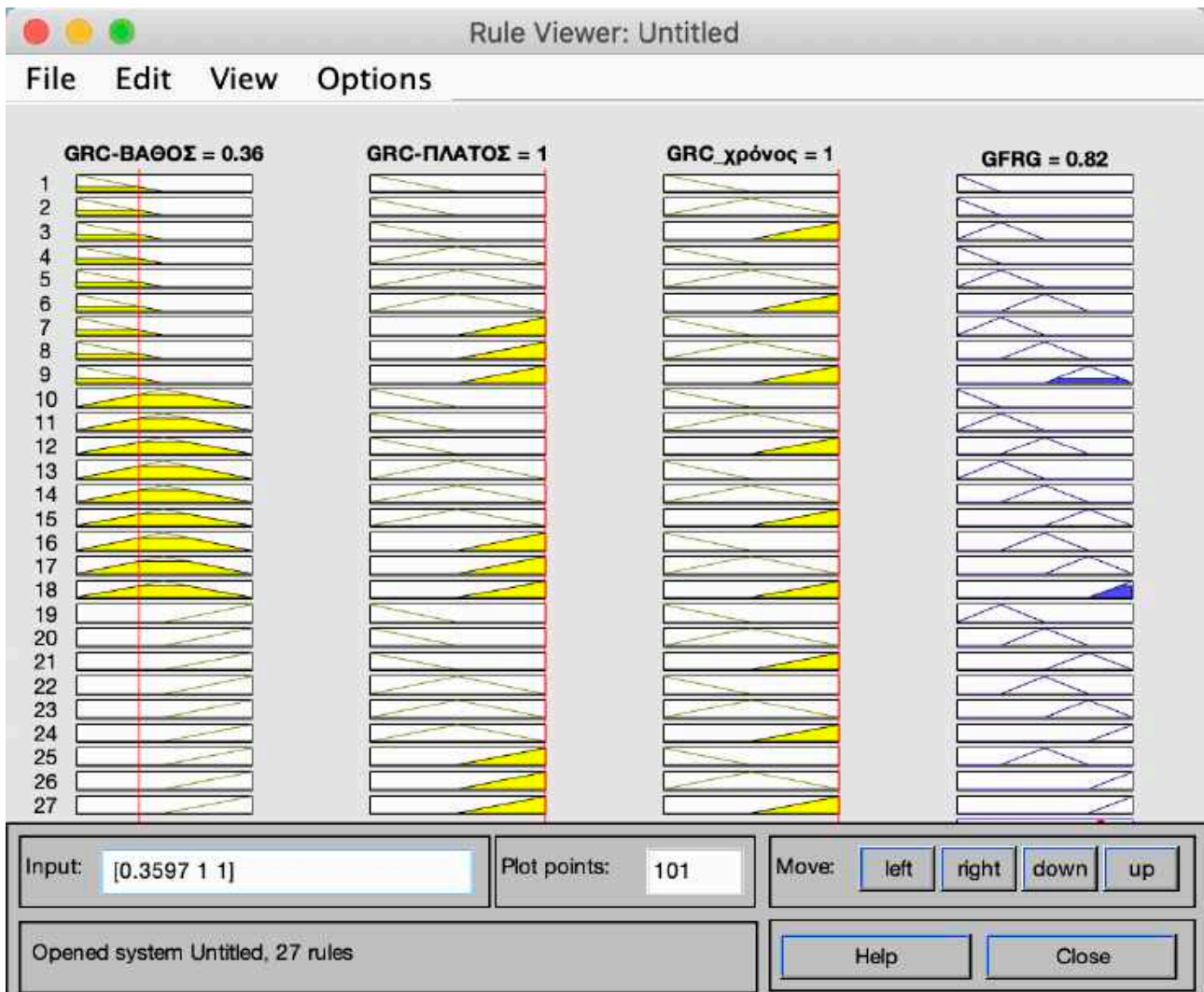


Εικόνα 4.5. Διαδικασία καταχώρησης fuzzy rules.

Οι εικόνες 4.6 και 4.7 αναπαριστούν γραφικά την απόκριση που υπολογίζεται για μεταβλητές εισόδου τα 3 GRC. Όπως φαίνεται στο rule viewer, κάθε μια από τις τρεις πρώτες στήλες αντιπροσωπεύει την τιμή του συντελεστή GRC όπως έχει υπολογιστεί αρχικά από την GRA και λειτουργεί ως μεταβλητή εισόδου στο fuzzy logic σύστημα που έχει δημιουργηθεί όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οι 27 γραμμές αντιπροσωπεύουν τους 27 γλωσσικούς κανόνες που τέθηκαν με ζητούμενο την μεγιστοποίηση GFRG. Σε κάθε τρίγωνο, το ύψος της γραμμοσκιασμένης περιοχής αντιπροσωπεύει την τιμή της συνάρτησης συμμετοχής για το συγκεκριμένο fuzzy set. Έτσι για το πρώτο πείραμα με μεταβλητές εισόδου GRC-βάθος = 0.3455, GRC-πλάτος = 0.9062, GRC-χρόνος = 0.3333, προκύπτει GFRG = 0.552. Ενώ η μέγιστη τιμή απόκρισης, προκύπτει για την 8η κοπή με μεταβλητές εισόδου GRC-βάθος = 0.3597, GRC-πλάτος = 1, GRC-χρόνος = 1 με GFRG = 0.82.



Εικόνα 4.6. Απόκριση για τους Συντελεστές GRC της 1ης κοπής.



Εικόνα 4.7. Απόκριση για τους συντελεστές GRC της 8ης κοπής.

Κατά αυτόν τον τρόπο, λαμβάνοντας τους συντελεστές GRC όπως έχουν προκύψει για κάθε πειραματική συνθήκη εξαρχής απο την μέθοδο GRA, προκύπτει ο πίνακας 4.29. με συγκεντρωμένους όλους τους δείκτες GFRG και την ιεράρχηση τους. Φαίνεται πως συνολικά στις απαιτήσεις των κριτηρίων που έχουν τεθεί ανταποκρίνεται καλύτερα η 8η κοπή καθώς έχει την υψηλότερη τιμή στον δείκτη GFRG. Συνεπώς οι πειραματικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην 8η κοπή (ταχύτητα πρόωσης 500 mm/min, παροχή αποξεστικού υλικού 5 g/s, απόσταση στομίου εκτόξευσης 1 mm και πίεση 233 MPa) είναι ο βέλτιστος συνδυασμός για την επιθυμητή απόκριση ανάμεσα στις υπόλοιπες 27. Επιπλέον, προκειμένου να βρεθεί συνολικά η βέλτιστη επιλογή των τιμών των παραμέτρων κατεργασίας, υπολογίστηκε, όπως και στα προηγούμενα, ο μέσος δείκτης που αντιπροσωπεύει τις πολλαπλές αποκρίσεις, εδώ είναι ο GFRG, ανά επίπεδο τιμών των παραμέτρων. Έτσι, προκύπτει ο πίνακας 4.30.

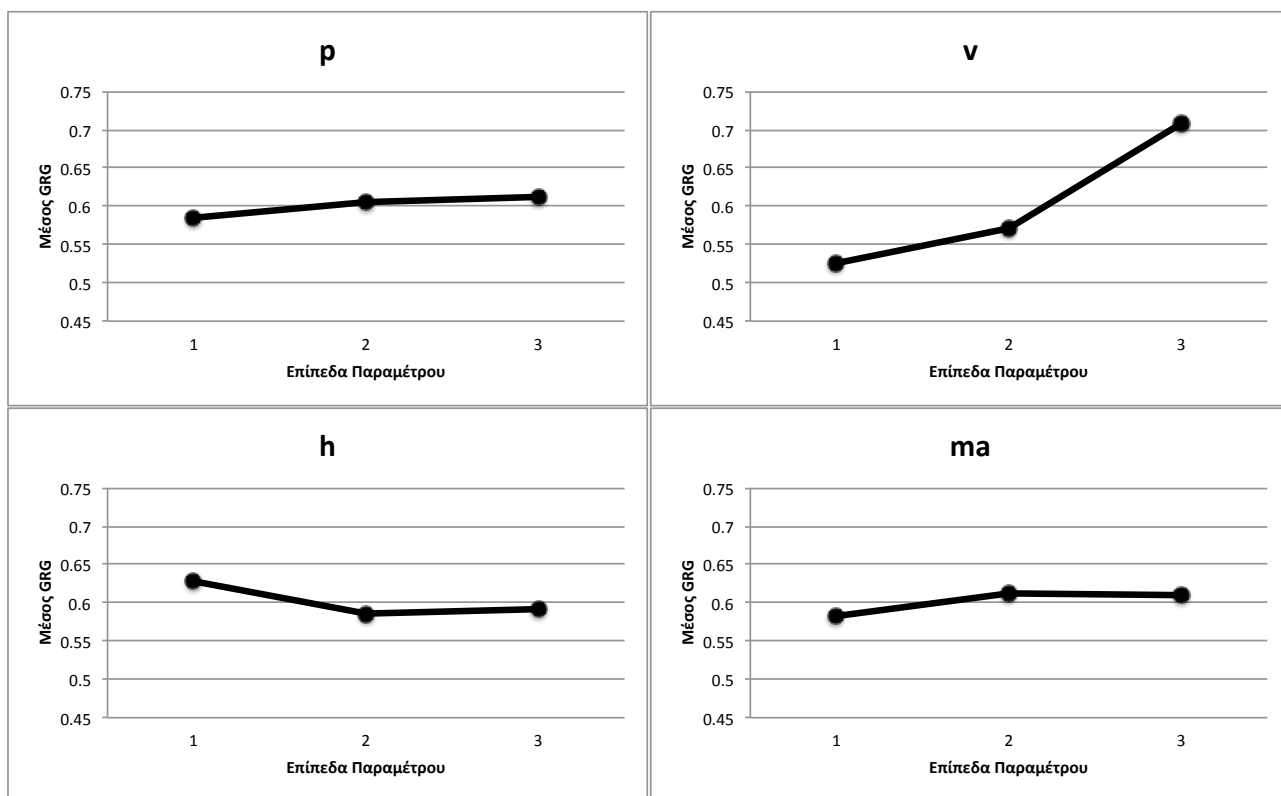
Πίνακας 4.29. Δείκτες GFRG

A/A Κοπής	GFRG	Rank
1	0,552	21
2	0,425	27
3	0,426	26
4	0,565	14
5	0,555	20
6	0,565	14
7	0,663	9
8	0,82	1
9	0,693	4
10	0,495	25
11	0,53	23
12	0,557	19
13	0,565	14
14	0,565	14
15	0,611	12
16	0,666	8
17	0,775	2
18	0,69	5
19	0,513	24
20	0,573	13
21	0,659	10
22	0,546	22
23	0,558	18
24	0,613	11
25	0,67	7
26	0,701	3
27	0,686	6

Πίνακας 4.30. μέσος GFRG ανά επίπεδο παραμέτρων

Επίπεδα	ν	$m\alpha$	h	ρ
1	0,525555556	0,581666667	0,627222222	0,584888889
2	0,571444444	0,611333333	0,585888889	0,606
3	0,707111111	0,611111111	0,591	0,613222222
Max - Min	0,181555556	0,029666667	0,041333333	0,028333333

Συνολικά, η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων βάση των κριτηρίων ελαχιστοποίησης χρόνου και πλάτους και μεγιστοποίησης του βάθους, σύμφωνα με την υβριδική fuzzy-GRA προκύπτει επιλέγοντας τις μέγιστες τιμές ανά επίπεδο παραμέτρου από τον πίνακα 4.30. Έτσι η βέλτιστη επιλογή είναι η ακόλουθη: $v_3 - ma_2 - h_1 - p_3$. Δηλαδή ταχύτητα πρόωσης στο τρίτο επίπεδο τιμών της 500 mm/min, παροχή αποξεστικού υλικού στο δεύτερο επίπεδο τιμών της άρα 5 g/s, απόσταση του στομίου στο πρώτο επίπεδο τιμών άρα 1 mm και τέλος πίεση στο τρίτο επίπεδο τιμών άρα 400 MPa. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του μέσου GFRG για κάθε παράμετρο φαίνεται στην τελευταία γραμμή του πίνακα 4.30. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται για την ταχύτητα πρόωσης, αυτό δείχνει ότι η συγκεκριμένη παράμετρος έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις πολλαπλές αποκρίσεις που ερευνήθηκαν σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις. Ακολουθεί η απόσταση του στομίου εκτόξευσης, η παροχή και τέλος η πίεση αφού έχει την μικρότερη διαφορά Max - Min. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο διάγραμμα 4.9 γραφικά.

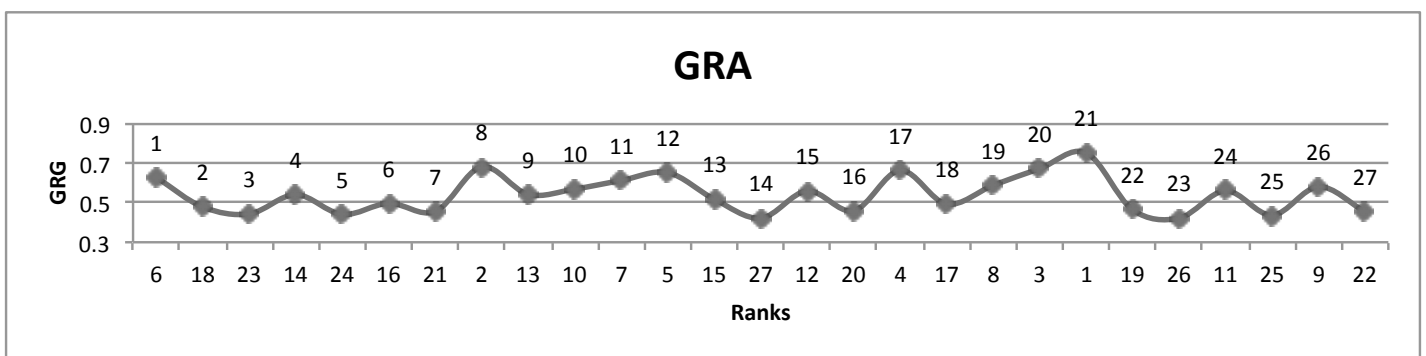


Διάγραμμα 4.9. Μέσος GFRG ανά επίπεδο παραμέτρου.

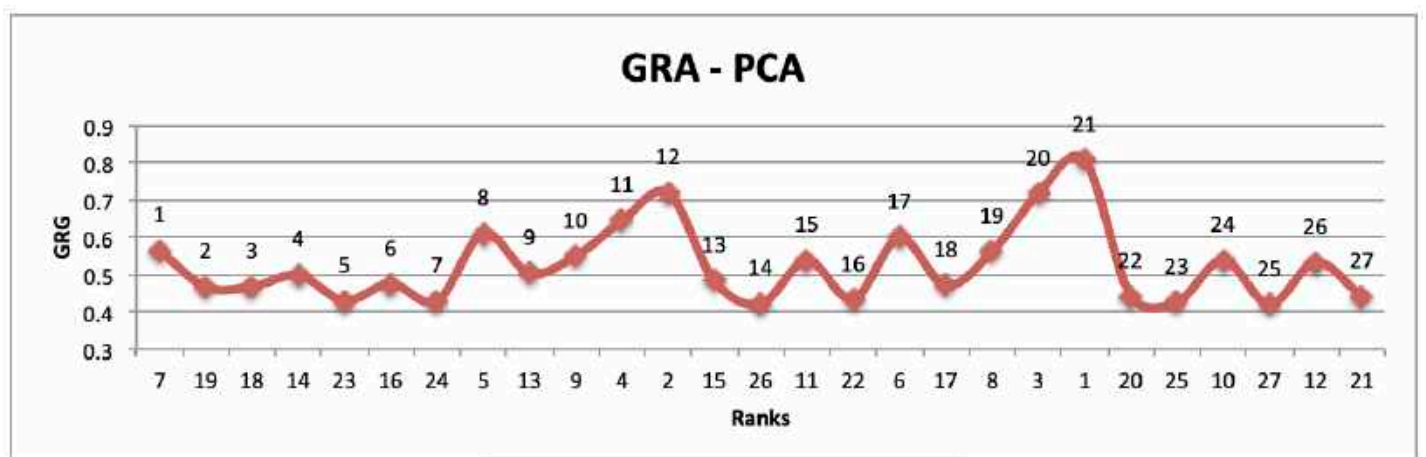
4.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μεθόδους βελτιστοποίησης όπως εφαρμόστηκαν στα πειραματικά δεδομένα, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Όσον αφορά το σενάριο 2 στόχων, ελαχιστοποίησης βάθους και μεγιστοποίησης πλάτους, τα αποτελέσματα για την βέλτιστη επιλογή σύμφωνα με την μέθοδο GRA και την υβριδική GRA - PCA ταυτίζονται αφού και στις δύο αναδεικνύεται η 21η κοπή ως η καλύτερη συνολικά από τις 27 κοπές του πειράματος. Επιπλέον, συνολικά από την ιεράρχηση των συντελεστών GRG όπως φαίνονται συγκριτικά στους δύο πίνακες που ακολουθούν για κάθε μέθοδο βελτιστοποίησης, παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις και τα αποτελέσματα εν γένει συμφωνούν.



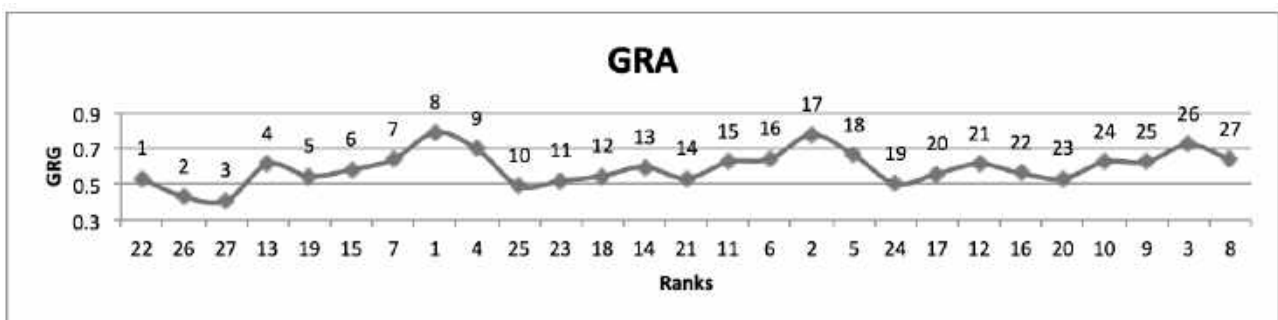
Διάγραμμα 4.10. Ιεράρχηση των δεικτών GRG, βάση της GRA.



Διάγραμμα 4.11. Ιεράρχηση των δεικτών GRG, βάση της υβριδικής GRA - PCA.

Όπου κάθε σημείο των καμπυλών αντιπροσωπεύει την εκάστοτε πειραματική συνθήκη.

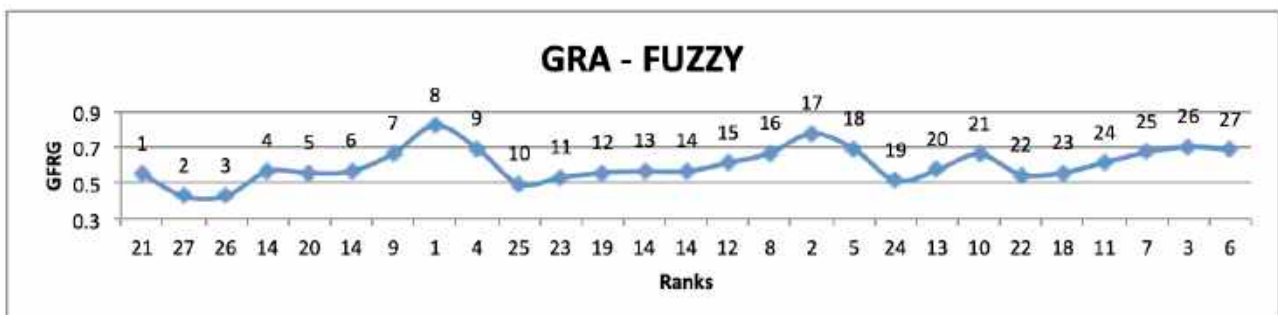
Όσον αφορά το σενάριο 3 στόχων, ελαχιστοποίησης πλάτους και χρόνου κατεργασίας και μεγιστοποίηση βάθους, όπου εξετάστηκε τόσο απο την απλή GRA, όσο και απο τις 2 υβριδικές μεθόδους, GRA - PCA και GRA - FUZZY και εδώ η βέλτιστη επιλογή ταυτίζεται. Απο την ιεράρχηση των τελικών δεικτών προκύπτει οτι η βέλτιστη επιλογή παραμέτρων απο το σύνολο των πειραματικών συνθηκών όπως έχουν προκύψει με τον ήδη υπάρχων σχεδιασμό του πειράματος, είναι η 8η κοπή. Επιπλέον και σε αυτή την περίπτωση δεν φαίνεται σημαντική διακύμανση της ιεράρχησης των συνθηκών βάση των κριτηρίων που έχουν τεθεί, όπως παρουσιάζεται στα ακόλουθα τρία διαγράμματα, ενώ οι 5 πρώτες τιμές ιεράρχησης ταυτίζονται πλήρως και για τις 3 μεθόδους..



Διάγραμμα 4.12. Ιεράρχηση των δεικτών GRG, βάση της GRA.



Διάγραμμα 4.13. Ιεράρχηση των δεικτών GRG, βάση της GRA - PCA.



Διάγραμμα 4.14. Ιεράρχηση των δεικτών GFRG

Επιπλέον, οι 3 μέθοδοι έδωσαν στοιχεία για την βέλτιστη επιλογή, ανά συνδυασμό κριτηρίων που εξετάστηκαν, συνολικά όλων των επιπέδων τιμών των παραμέτρων, πέραν των συνδυασμών που ορίστηκαν απο τις πειραματικές συνθήκες όπως προέκυψαν εξαρχής απο τον σχεδιασμό του πειράματος.

Έτσι όσον αφορά τους 2 στόχους, η απλή GRA, δίνει τον ακόλουθο συνδυασμό ως βέλτιστη επιλογή συνολικά: v1-ma2-h1-p2. Η βέλτιστη επιλογή μέσω της υβριδικής GRA - PCA, συμφωνεί στα επίπεδα τιμών της ταχύτητας και απόστασης αλλά όχι στην παροχή και στην πίεση, οπότε ο βέλτιστος συνδυασμός είναι ο ακόλουθος v1-ma3-h1-p3.

Όσον αφορά τους 3 στόχους, απο την απλή GRA προκύπτει ως βέλτιστος συνδυασμός η ακόλουθη επιλογή των τιμών των παραμέτρων, v3-ma2-h1-p2. Η βέλτιστη επιλογή μέσω της GRA - PCA, συμφωνεί μόνο στην ταχύτητα πρόωσης, ενώ οι υπόλοιπες 3 παράμετροι βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα τιμών απο την απλή GRA, έτσι ο βέλτιστος συνδυασμός είναι v3-ma3-h3-p3. Τέλος ο βέλτιστος συνδυασμός όπως προκύπτει απο την υβριδική GRA - Fuzzy, είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της GRA, πέραν του επιπέδου της πίεσης, δίνοντας τον ακόλουθο συνδυασμό των επιπέδων τιμών των παραμέτρων v3-ma2-h1-p3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υδροκοπή είναι η τεχνολογία κοπής που έρχεται από το μέλλον. Συγκαταλέγεται στις μη συμβατικές κατεργασίες υψηλής ακρίβειας και εύκολα ξεχωρίζει από τις άλλες μεθόδους κοπής παρέχοντας πληθώρα πλεονεκτημάτων. Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την πειραματική μελέτη και βελτιστοποίηση κατεργασίας διάνοιξης αυλακιών μέσω υδροκοπής με δέσμη λειαντικών κόκκων.

Αρχικά, παρατέθηκαν γενικά θεωρητικά στοιχεία για την αποξεστική υδροκοπή ως κατεργασία καθώς και το πλαίσιο που χαρακτηρίζει την ποιότητα της κατεργασίας συνολικά αλλά και τα τυπικά ελαττώματα που παρουσιάζονται σε τεμάχια που κατεργάζονται με την συγκεκριμένη τεχνολογία.

Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών σχετικών τόσο με την αποξεστική υδροκοπή τεμαχίων όσο επίσης και των μεθόδων βελτιστοποίησης των πειραματικών συνθηκών τους. Έτσι βγήκαν συμπεράσματα όσον αφορά την επιλογή των παραμέτρων και των επίπεδων τιμών αλλά και στις τυπικές μεθοδολογίες σχεδιασμού των πειραμάτων όπως προέκυψαν σε αντίστοιχες πειραματικές έρευνες.

Για τον σχεδιασμό του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi, χρησιμοποιώντας τις 4 παραμέτρους κατεργασίας: ταχύτητα πρόωσης, παροχή λειαντικού, πίεση και απόσταση στομίου εκτόξευσης ως παράγοντες ελέγχου σε τρία επίπεδα τιμών ο καθένας. Έτσι η πίεση πήρε τιμές 233, 317 και 400 MPa, η ταχύτητα 100, 300 και 500 mm/min, η παροχή 2, 5 και 8 g/s και η απόσταση 1, 3 και 5 mm αντίστοιχα. Η πειραματική διαδικασία διεξήχθη σε συνεργασία με το εργαστήριο του τομέα κατεργασιών του πανεπιστημίου της Κρακοβίας AGH UST. Πραγματοποιήθηκαν κοπές σε δοκίμιο χάλυβα S355 με 27 διαφορετικές πειραματικές συνθήκες. Στην συνέχεια παρατηρήθηκαν τα πλάτη και τα βάθη των αυλακιών κοπής με χρήση οπτικού μικροσκοπίου και στερεοσκοπίου αντίστοιχα και λήφθηκαν κατάλληλες φωτογραφίες ώστε να γίνει ψηφιακή μέτρηση με χρήση ειδικού λογισμικού και στην συνέχεια ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Έπειτα από στατιστική ανάλυση ANOVA των αποτελεσμάτων καταδείχθηκε η επίδραση που έχει η εκάστοτε παράμετρος κατεργασίας στο πλάτος και στο βάθος. Για το βάθος μεγαλύτερη συνεισφορά έχει η ταχύτητα πρόωσης με ποσοστό 49.13%, ακολουθεί η παροχή αποξεστικού με ποσοστό 19.88%, η πίεση με 9.5% και τέλος η απόσταση του στομίου εκτόξευσης της κοπτικής δέσμης με ποσοστό 3.4%. Για το πλάτος, την μεγαλύτερη ποσοστιαία συνεισφορά συνολικά έχει η απόσταση της κοπτικής κεφαλής με ποσοστό 54.96%, ακολουθεί η ταχύτητα πρόωσης με ποσοστό 16.09%, η παροχή αποξεστικού με 10.61% και τέλος η πίεση με ποσοστό 1.35%.

Στην συνέχεια τέθηκαν τα εξής κριτήρια βάση των οποίων έγινε η βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων: μεγιστοποίηση του βάθους ώστε να αξιοποιείται στο μέγιστο η κοπτική ικανότητα της δέσμης, ελαχιστοποίηση του πλάτους ώστε να πετυχαίνεται πιο ακριβής κοπή και

ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας, Επιπλέον, εφόσον στην κατεργασία υδροκοπής είναι σχεδόν αδύνατο να προβλεφθεί το βάθος της κοπής, μελετήθηκαν δυο επιπλέον σενάρια επίτευξης συγκριμένου βάθους. Επιλέχθηκαν 2 ενδεικτικά βάθη 8 και 20 mm ως ζητούμενα συνδυαστικά με την ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας.

Για την βελτιστοποίηση εφαρμόστηκε η Grey Relational Analysis (GRA), καθώς και δυο ακόμη υβριδικές μέθοδοι βασισμένες στην GRA, η GRA - Fuzzy και η GRA - PCA. Η GRA αποτελεί μέθοδο ιεράρχησης των πολλαπλών αποκρίσεων σε έναν δείκτη GRG που προκύπτει κανονικοποιώντας τις αποκρίσεις βάση των επιθυμητών κριτηρίων. Έτσι με την GRA εξετάστηκαν τα ακόλουθα 3 σενάρια: μεγιστοποίηση βάθους - ελαχιστοποίηση χρόνου, μεγιστοποίηση βάθους - ελαχιστοποίηση χρόνου - ελαχιστοποίηση πλάτους, επίτευξη επιθυμητού βάθους - ελαχιστοποίηση χρόνου. Η υβριδική GRA - PCA, εφαρμόστηκε προκειμένου να συνυπολογιστεί η επιμέρους βαρύτητα της κάθε απόκρισης στον τελικό δείκτη GRG, παρέχοντας έτσι πιο αντικειμενικά αποτελέσματα από την απλή GRA. Έτσι με την GRA - PCA εξετάστηκαν τα σενάρια μεγιστοποίηση βάθους - ελαχιστοποίηση πλάτους και μεγιστοποίηση βάθους - ελαχιστοποίηση χρόνου - ελαχιστοποίηση πλάτους. Τέλος η εφαρμόστηκε υβριδική GRA- Fuzzy, στα πλαίσια που εφαρμόστηκε και η GRA - PCA, ώστε να διασαφηνιστεί η αβεβαιότητα που εμπεριέχεται στον δείκτη GRG όπως προκύπτει από την απλή GRA. Η υβριδική αυτή μέθοδος, μέσω διατύπωσης μαθηματικοποιημένων γλωσσικών κανόνων και συναρτήσεων συμμετοχής συμπεριλαμβάνει την βαρύτητα της εκάστοτε απόκρισης στον τελικό δείκτη GFRG. Επιπλέον, η κάθε μέθοδος, ανέδειξε τον βέλτιστο συνδυασμό των τιμών των παραμέτρων συνολικά. Το ενδιαφέρον είναι ότι οι τρεις μέθοδοι βελτιστοποίησης δεν φαίνεται να έχουν εφαρμοστεί συνδυαστικά κατά αυτόν τον τρόπο στην βιβλιογραφία.

Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για τους 2 στόχους που τέθηκαν (max βάθος, min πλάτος) δίνουν ως βέλτιστη επιλογή, τις πειραματικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην 8η κοπή (500 mm/min, 5 g/s, 1 mm, 233 MPa). Αντίστοιχα συμβαίνει και στην εφαρμογή των τριών μεθόδων στους 3 στόχους που τέθηκαν (max βάθος, min πλάτος, min χρόνος) καθώς και οι 3 συμφωνούν ότι η βέλτιστη επιλογή πειραματικών συνθηκών αντιστοιχεί στην 21η κοπή σύμφωνα με τον σχεδιασμό του πειράματος (100 mm/min, 8 g/s, 5 m, 400 MPa).

Συνολικά, αν και η ιεράρχηση των συνθηκών κοπής ανά πείραμα εν γένει είναι όμοια για όλες σχεδόν τις μεθόδους, η βέλτιστη επιλογή των τιμών των παραμέτρων κατεργασίας συνολικά στα κριτήρια που τέθηκαν διαφοροποιείται ανάλογα με την μέθοδο βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε. Έτσι όσον αφορά το σενάριο των 2 στόχων, η GRA βγάζει τον ακόλουθο συνδυασμό ως βέλτιστο: v1-ma2-h1-p2 ενώ η GRA - PCA τον εξής: v1-ma3-h1-p3,

Όσον αφορά την επίτευξη των τριών στόχων οι βέλτιστοι συνδυασμοί είναι οι ακόλουθοι: GRA :v3-ma2-h1-p2, GRA - PCA: v3-ma3-h3-p3 και GRA - fuzzy: v3-ma2-h1-p3.

Τέλος, η GRA όπως εφαρμόστηκε για το σενάριο επιτεύξης επιθυμητής τιμής συνδυαστικά με την ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας δίνει ως βέλτιστο συνδυασμό τον ακόλουθο για βάθος 8 mm: v3-ma2-h1-p1 ενώ για επιθυμητή τιμή βάθους 20 mm: v3-ma3-h1-p2.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Liu, X., Liang, Z., Wen, G. and Yuan, X., 2019. Waterjet machining and research developments: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5-8), pp. 1337-1338.
- [2] Abrate, S. and Walton, D., 1992. Machining of composite materials. Part II: Non-traditional methods. *Composites Manufacturing*, 3(2), pp.85-94.
- [3] Xinology.com. 2020. *Water Jet Cutting Machine - Overview - Two Types Of Water Jet*. [online] Available at: <<http://www.xinology.com:888/Glass-Processing-Equipments-Supplies-Consumables/glass-cutting/water-jet-cutting/overview/two-types-of-water-jet.html>> [Accessed 12 May 2020].
- [4] Powell, M., 2020. 'Optimization of UHP waterjet cutting heads, the orifice', *2007 American WJTA Conference and Expo*, Houston, Texas, 19-21 August.
- [5] Hashish, M., 2009. 'Special AWJ Nozzles', *2009 American WJTA Conference and Expo*, Houston, Texas, 18-20 August.
- [6] Hashish, M., 1994. Observations of Wear of Abrasive-Waterjet Nozzle Materials. *Journal of Tribology*, 116(3), pp.439-444.
- [7] Rao, P., 2013. *Manufacturing Technology*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- [8] Kamashian, A., 2020. *Waterjet - Intensifier Vs Direct Drive Which Is Better?*. [online] Southernfabsales.com. Available at: <<https://www.southernfabsales.com/blog/waterjet-intensifier-vs-direct-drive-which-is-better>> [Accessed 15 May 2020].
- [9] R. Radovanović, M., 2017. Performances of Abrasive Water Jet Cutting with Hyper Pressure. *International Journal of Modeling and Optimization*, 7(5), pp.275-279.
- [10] WARDJet. 2020. *Waterjet University - Pumps*. [online] Available at: <<https://wardjet.com/waterjet/university/pumps>> [Accessed 15 May 2020].
- [11] Natarajan, Y., Murugesan, P., Mohan, M. and Liyakath Ali Khan, S., 2020. Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, pp.271-322.
- [12] Zeng, J. and Kim, T., 1996. An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting. *Wear*, 193(2), pp.207-217.
- [13] Jankovic, P., Igetic, T. and Nikodijevic, D., 2013. Process parameters effect on material removal mechanism and cut quality of abrasive water jet machining. *Theoretical and Applied Mechanics*, 40(2), pp.277-291.

- [14] Zeng, J. and Kim, T., 1993. 'Parameter prediction and cost analysis in abrasive waterjet cutting operations', *7th American WaterJet Conference*, St Louis, MO, USA, 28-31 August.
- [15] Saravanan, S., Vijayan, V., Suthahar, S., Balan, A., Sankar, S. and Ravichandran, M., 2020. A review on recent progresses in machining methods based on abrasive waterjet machining. *Materials Today: Proceedings*, 21, pp.116-122.
- [16] Momber A.W., Kovacevic R., 1998. *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. Springer, London.
- [17] Finnie, I., 1960. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 3(2), pp.87-103.
- [18] Bitter, J., 1963. A study of erosion phenomena part I. *Wear*, 6(1), pp.5-21.
- [19] Bitter, J., 1963. A study of erosion phenomena. *Wear*, 6(3), pp.169-190.
- [20] Moridi, A., Wang, J., Ali, Y., Mathew, P. and Li, X., 2010. A Study of Abrasive Jet Micro-Grooving of Quartz Crystals. *Key Engineering Materials*, 443, pp.645-651.
- [21] Hutchings, I., 1993. Mechanisms of wear in powder technology: A review. *Powder Technology*, 76(1), pp.3-13.
- [22] Zeng, J. and Kim, T., 1996. An erosion model for abrasive waterjet milling of polycrystalline ceramics. *Wear*, 199(2), pp.275-282.
- [23] Arola, D. and Ramulu, M., 1996. A Study of Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Machining of Graphite/Epoxy Composite. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 118(2), pp.256-265.
- [24] Shanmugam, D. and Masood, S., 2009. An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), pp. 3887-3893.
- [25] Orbanic, H. and Junkar, M., 2008. Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting. *Wear*, 265(5-6), pp.821-830.
- [26] Mayuet Ares, P., Girot Mata, F., Batista Ponce, M. and Salguero Gómez, J., 2019. Defect Analysis and Detection of Cutting Regions in CFRP Machining Using AWJM. *Materials*, 12(24), p. 4055.
- [27] Mohd Ali, A., Khan, A. and Ali, M., 2011. Effect of Process Parameters on Abrasive Contamination during Water Abrasive Jet Machining of Mild Steel. *Advanced Materials Research*, 264-265, pp.1015-1020.
- [28] Chen, F., Siores, E., Patel, K. and Momber, A., 2002. Minimising particle contamination at abrasive waterjet machined surfaces by a nozzle oscillation technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(13), pp.1385-1390.

- [29] Chen, F., Siores, E., 2001. Introduction of a new precision cryogenic icejet system for processing materials. Proceedings of 6th Int. Pacific Rim Conference on Water Jetting Technology, pp. 136–139.
- [30] Chen, F. and Siores, E., 2001. The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(10), pp. 1479-1486.
- [31] Fukunishi, Y., Kobayashi, R., Uchida, K., 1995. Numerical simulation of striation formation on water jet cutting surface. Proceedings of the 8th American Water Jet Conference, pp. 657–670.
- [32] Siores, E., Wong, W., Chen, L. and Wager, J., 1996. Enhancing Abrasive Waterjet Cutting of Ceramics by Head Oscillation Techniques. *CIRP Annals*, 45(1), pp.327-330.
- [33] Syazwani, H., Mebrahitom, G. and Azmir, A., 2016. A review on nozzle wear in abrasive water jet machining application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114, p. 012020.
- [34] Ness, E. and Zibbell, R., 1996. Abrasion and erosion of hard materials related to wear in the abrasive waterjet. *Wear*, 196(1-2), pp.120-125.
- [35] Azmir, M. and Ahsan, A., 2009. A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(20), pp.6168-6173.
- [36] Gupta, V., Pandey, P., Garg, M., Khanna, R. and Batra, N., 2014. Minimization of Kerf Taper Angle and Kerf Width Using Taguchi's Method in Abrasive Water Jet Machining of Marble. *Procedia Materials Science*, 6, pp.140-149.
- [37] Shanmugam, D., Wang, J. and Liu, H., 2008. Minimisation of kerf tapers in abrasive waterjet machining of alumina ceramics using a compensation technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(14), pp.1527-1534.
- [38] Jeykrishnan, J., Vijaya Ramnath, B., Sree Vignesh, S., Sridharan, P. and Saravanan, B., 2019. Optimization of Process Parameters in Abrasive Water Jet Machining/Cutting (AWJM) of Nickel Alloy using Traditional Analysis to Minimize Kerf Taper Angle. *Materials Today: Proceedings*, 16, pp.392-397.
- [39] Chithirai Pon Selvan, M., Mohana Sundara Raju, N. and Sachidananda, H., 2012. Effects of process parameters on surface roughness in abrasive waterjet cutting of aluminium. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 7(4), pp.439-444.
- [40] Rao, M., 2010. Parametric Optimization of Abrasive Waterjet Machining for Mild Steel: Taguchi Approach. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2(2), pp.28-30.
- [41] Iqbal, A., Dar, N. and Hussain, G., 2011. Optimization of abrasive water jet cutting of ductile materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 26(1), pp.88-92.

- [42] Trivedi, P., Dhanawade, A. and Kumar, S., 2015. An experimental investigation on cutting performance of abrasive water jet machining of austenite steel (AISI 316L). *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1(3-4), pp.263-274.
- [43] Hocheng, H. and Chang, K., 1994. Material removal analysis in abrasive waterjet cutting of ceramic plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 40(3-4), pp.287-304.
- [44] Momin, S. and Patil, S., 2018. Optimisation of Process Parameters of Abrasive Waterjet Machining Process for Carbide Austempered Ductile Iron [CADI]. *international journal of engineering research and technology (IKERT)*, 07(04), pp.1-7.
- [45] Deepak, D., 2014. Machining of D2 heat treated steel using abrasive water jet : the effect of standoff distance and feed rate on kerf width and surface roughness, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(08), pp.417-421.
- [46] Satyanarayana, B. and Srikar, G., 2014. Optimization of abrasive water jet machining process parameters using taguchi grey relational analysis (TGRA). *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 2(09), pp.82-87.
- [47] Chithirai Pon Selvan, M. and Mohana Sundara Raju, N., 2011. Assessment of process parameters in abrasive water jet cutting of stainless steel. *Journal of advances in Engineering and Technology*. 1(03), pp.34-40.
- [48] Shibin, R., Anandkrishnan, V., Sathish, S. and Mallemala Sujana, V., 2020. Investigation on the abrasive water jet machinability of AA2014 using SiC as abrasive. *Materials Today: Proceedings*, 21, pp.519-522.
- [49] Βασιλάκης, Ν., 2005. ‘Διερεύνηση της κοπής με πίδακα νερού υψηλής πίεσης ως προς τους κύριους παράγοντες κατεργασίας, με χρήση παραγοντικού σχεδιασμού και στατιστικής συμπεριματολογίας’, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- [50] Ιτσόπουλος, Σ., 2014. ‘Σύγχρονες μη συμβατικές εργαλειομηχανές κοπής. Τεχνολογία λειτουργίας και ελέγχου’, Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Καβάλα.
- [51] Δουκάκης, Η., 2016. ‘Υδροκοπή. Μια μέθοδος κοπής φιλική προς το περιβάλλον. Σύγκριση της με κοπή laser’, Πτυχιακή εργασία, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Κρήτης, Σούδα.
- [52] Hlavacek, P., Sitek, L. and Foldyna, J., 2020. Evaluation of erosion performance of abrasive particles in abrasive water jet cutting process. *MM Science Journal*, 2020(1), pp.3869-3872.
- [53] Vankanti, V. and Ganta, V., 2014. Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(1), pp.35-41.
- [54] Klichova, D. and Klich, J., 2016. Study of the Effect of Material Machinability on Quality of Surface Created by Abrasive Water Jet. *Procedia Engineering*, 149, pp.177-182.

- [55] Kuo, Y., Yang, T. and Huang, G., 2008. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), pp.80-93.
- [56] Siddiquee, A., Khan, Z. and Mallick, Z., 2009. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimisation design of the process parameters in in-feed centreless cylindrical grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(9-12), pp.983-992.
- [57] Lu, H., Chang, C., Hwang, N. and Chung, C., 2009. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), pp.3808-3817.
- [58] Θεοδώρου, Γ., 2010. *Εισαγωγή στην ασαφή λογική (Fuzzy logic)*, Τζιόλα
- [59] Χαλούλος, Κ., 2010. ‘ Έλεγχος Ισχύος Ασαφούς Λογικής σε Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα LMDS’, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [60] Panda, A., Sahoo, A. and Rout, A., 2016. Multi-attribute decision making parametric optimization and modeling in hard turning using ceramic insert through grey relational analysis: A case study. *Decision Science Letters*, pp.581-592.