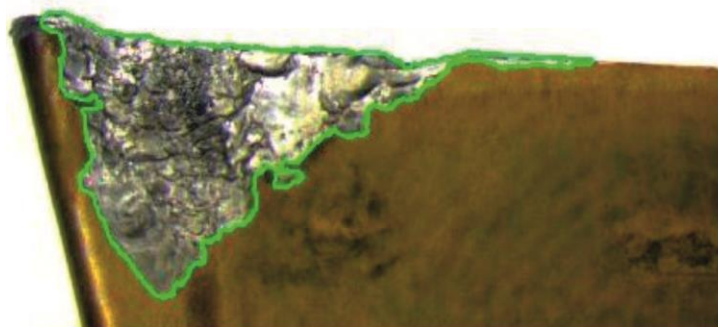




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

**ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ
ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΘΟΡΑΣ
ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ
ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ Ψ.Ε.Ε.**



ΛΥΡΩΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΜΙΧΑΛΗΣ ΖΕΡΒΑΚΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΧΑΝΙΑ 2014

Στην οικογένειά μου



Μετά το πέρας της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

- Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Μιχάλη Ζερβάκη για την επίβλεψη, τη διαρκή υποστήριξη, τις γόνιμες παρατηρήσεις και την πολύτιμη καθοδήγησή του.
- Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για την επίβλεψη, τις οξυδερκείς συμβουλές, τη συνεχή στήριξη και την πολύπλευρη βοήθειά του.
- Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη για τη συνεισφορά του, ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής, στην αξιολόγηση της εργασίας.
- Τον Υποψήφιο Διδάκτορα Δημήτρη Βακόνδιο, τη Δρ. Μηχ. Μηχανικό Μαρία Παππά και τη Διπλ. Μηχ. Μηχανικό Χαρά Ευσταθίου για την προθυμία, την υπομονή και την αμέριστη συμβολή τους στη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. Εισαγωγή	1
1.1 Περί φθοράς	1
1.2 Διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων	5
1.3 Αντικείμενο και στόχοι της διατριβής	7
2. Επίπεδο Γνώσεων στη Σχετική Βιβλιογραφία	8
2.1 Έμμεσες μέθοδοι ελέγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων	8
2.1.1 Τόρνευση	8
2.1.2 Φραιζάρισμα προσώπου	13
2.1.3 Διάτρηση	16
2.1.4 Γενικές παρατηρήσεις – Συμπεράσματα	18
2.2 Άμεσες μέθοδοι ελέγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων	19
2.2.1 Σημαντικότερες διεθνείς ερευνητικές εργασίες, βασισμένες στην Ψ.Ε.Ε	21
3. Αλγόριθμοι Τμηματοποίησης Εικόνας	27
3.1 Η διαδικασία της Μέσης Μετατόπισης (Mean-Shift)	30
3.1.1 Υπολογισμός της κλίσης της πυκνότητας	31
3.1.2 Επαρκής συνθήκη για σύγκλιση	33
3.1.3 Ανίχνευση κορυφών	33
3.1.4 Η ιδιότητα της ομαλής τροχιάς	34
3.2 Τα αυτο-οργανούμενα δίκτυα Kohonen (Kohonen SOM)	35
3.3 Η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu	40
3.4 Ο μετασχηματισμός Hough	42
3.5 Ο αλγόριθμος k-means	46
3.6 Ανάλυση παλινδρόμησης	48
3.6.1 Απλή γραμμική παλινδρόμηση	49
3.6.2 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων	50
4. Προτεινόμενη Μεθοδολογία Ανάλυσης Φθοράς	53
4.1 Σύστημα φωτισμού	55
4.2 Προεπεξεργασία	56
4.3 Ομαδοποίηση με χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift	57
4.4 Αναγνώριση περιοχής φθοράς	60
4.5 Μέτρηση μέγιστου πλάτους της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας	61
4.6 Ταξινόμηση υποπεριοχών φθοράς με χρήση των Kohonen SOM	64
5. Επιβεβαίωση Συστήματος	68
5.1 Πειραματικά αποτελέσματα	55

6.	Υπερφασματική Απεικόνιση	77
6.1	Το σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS	79
6.2	Πειραματική διαδικασία	80
6.3	Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα	83
7.	Αποτελέσματα	87
7.1	Επιλογή της κατάλληλης γειτονιάς αναζήτησης	89
7.2	Επιλογή του κατάλληλου πλήθους πλησιέστερων γειτόνων	89
7.3	Επιλογή βέλτιστου συνδυασμού γειτονιάς αναζήτησης και πλήθους πλησιέστερων γειτόνων	83
7.4	Επιλογή κατάλληλου πυρήνα	91
7.5	Ταξινόμηση υποπεριοχών φθοράς με Kohonen SOM	92
7.6	Επίδραση του προσθετικού θορύβου στο σύστημα	95
7.7	Συγκεντρωτικές μετρικές αξιολόγησης	97
8.	Συμπεράσματα - Μελλοντικές Κατευθύνσεις	99
8.1	Συμπεράσματα	99
8.2	Μελλοντικές κατευθύνσεις	101
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κατεργασίες κοπής αποτελούν την κλασσική μέθοδο παραγωγής προϊόντων, κυρίως από μεταλλικά υλικά. Ορισμένες από τις πιο σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την διαδικασία κοπής, σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα παραγωγής, αφορούν την κατάσταση των κοπτικών εργαλείων. Η δημιουργία και η ανάπτυξη της φθοράς συνεπάγεται την αλλοίωση των διαστατικών χαρακτηριστικών των κοπτικών εργαλείων, η οποία επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της επιφάνειας και τις διαστάσεις των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Με τη ραγδαία ανάπτυξη των ευφύων συστημάτων παραγωγής υψηλής ακρίβειας, το σφοδρό ανταγωνισμό ανάμεσα στις κατασκευάστριες εταιρείες και το ευρύ άνοιγμα των αγορών, ισχυροποιήθηκε η ανάγκη για αύξηση της παραγωγικότητας με παράλληλη μείωση του κόστους παραγωγής. Συνεπώς, η παρακολούθηση και η αξιολόγηση των επιπέδων της φθοράς των κοπτικών εργαλείων καθίσταται διεργασία ζωτικής σημασίας για τον προσαρμοστικό έλεγχο, αλλά και τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών κοπής της εκάστοτε κατεργασίας.

Η έρευνα που υλοποιείται στην παρούσα εργασία, παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας κοπτικών εργαλείων, βασισμένο σε μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Το σύστημα αποτελείται από ένα μεγάλο εύρος μεγέθυνσης στερεομικροσκόπιο, με ενσωματωμένη CCD κάμερα υψηλής ανάλυσης και την υπολογιστική μονάδα, στην οποία λαμβάνει χώρα η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, μέσω ενός λογισμικού, που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον MATLAB. Οι μέθοδοι της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό, έχουν ως στόχο την απομόνωση και την ακριβή μέτρηση της περιοχής φθοράς, με έναν αυτοματοποιημένο τρόπο. Τελικά, προκύπτει ένα ενιαίο μορφολογικό στοιχείο, που σκιαγραφεί πλήρως την περιοχή της φθοράς, από το οποίο μπορούν να εξαχθούν και να υπολογιστούν το μέγιστο πλάτος και το εμβαδόν της φθοράς, αλλά και να επιτευχθεί ένας διαχωρισμός μεταξύ των διαφορετικών υποπεριοχών που εμφανίζονται εντός της ζώνης φθοράς. Λόγω της ύπαρξης ανακλάσεων και θορύβου στη ληφθείσα εικόνα, βάση του προτεινόμενου συστήματος αποτελεί ο αλγόριθμος Mean-Shift, μια μη-παραμετρική τεχνική για την ανάλυση πολυδιάστατων χώρων χαρακτηριστικών. Πειράματα σε ένα 5-αξονικό κέντρο κατεργασίας επιβεβαιώνουν την αποδοτικότητα και την ευρωστία του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Επιπροσθέτως, γίνεται μια προσπάθεια εντοπισμού της περιοχής της φθοράς, μέσω υπερφασματικής απεικόνισης. Ο συνδυασμός της υπερφασματικής απεικόνισης μαζί με την εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων ταξινόμησης υπερφασματικών δεδομένων, μπορεί να προσφέρει μια νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνική ανίχνευσης, χαρτογράφησης και μέτρησης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Πιο αναλυτικά, η χρήση της υπερφασματικής κάμερας MuSIS, που χρησιμοποιήθηκε για μια σειρά πειραμάτων, δίνει τη δυνατότητα λήψης φασμάτων από όλες τις περιοχές του κοπτικού εργαλείου (άφθαρτες, φθαρμένες και άλλες με ενδιάμεσα στάδια εξέλιξης της φθοράς) και από 30 φασματικές μπάντες. Συνεπώς, το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μελέτη της φασματικής πληροφορίας κάθε σημείου, καθώς και ο εντοπισμός χαρακτηριστικών του κοπτικού εργαλείου, που δε φαίνονται στο ορατό φάσμα του φωτός.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας, Μηχανουργικές Κατεργασίες

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ανάλυση Φθοράς, Mean-Shift, Kohonen SOM, Φραιζάρισμα

1. Εισαγωγή

1.1 Περί φθοράς

Η φθορά αποτελεί σημαντικό παράγοντα υποβάθμισης εξαρτημάτων και στοιχείων μηχανών με σοβαρές συνέπειες στη λειτουργία μιας εγκατάστασης. Υπερβολική φθορά οδηγεί σε αναγκαστική διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης, με σκοπό την επισκευή ή την αντικατάσταση του εξοπλισμού που έχει φθαρεί, με τις αντίστοιχες οικονομικές συνέπειες. Πληθώρα περιπτώσεων φθοράς παρατηρείται στις διάφορες κατεργασίες διαμόρφωσης μεταξύ των κατεργαζόμενων τεμαχίων και των εργαλείων διαμόρφωσης (έμβολα, μήτρες, κύλινδροι έλασης κ.λπ.). Φθορά, επίσης, παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευών και μηχανών στις οποίες υπάρχουν συνεργαζόμενα μέρη, όπως έδρανα ολίσθησης/κύλισης, οδοντωτοί τροχοί, τροχαλίες με ταινίες ή αλυσίδες, έμβολα και χιτώνια σε κυλίνδρους μηχανών εσωτερικής καύσης, έκκεντρα και ωστήρια εκκέντρων, αλλά και σε περιπτώσεις όπως αυτές των υδραυλικών εγκαταστάσεων και σωληνώσεων που μεταφέρουν ρευστά, στερεά ή μείγματα ρευστών/στερεών. Η φθορά, πέρα από φαινόμενο μείζονος τεχνολογικής σημασίας, αποτελεί και αντικείμενο ενδιαφέροντος της επιστήμης της ιατρικής, κυρίως στην περίπτωση της εκφύλισης των αρθρώσεων.

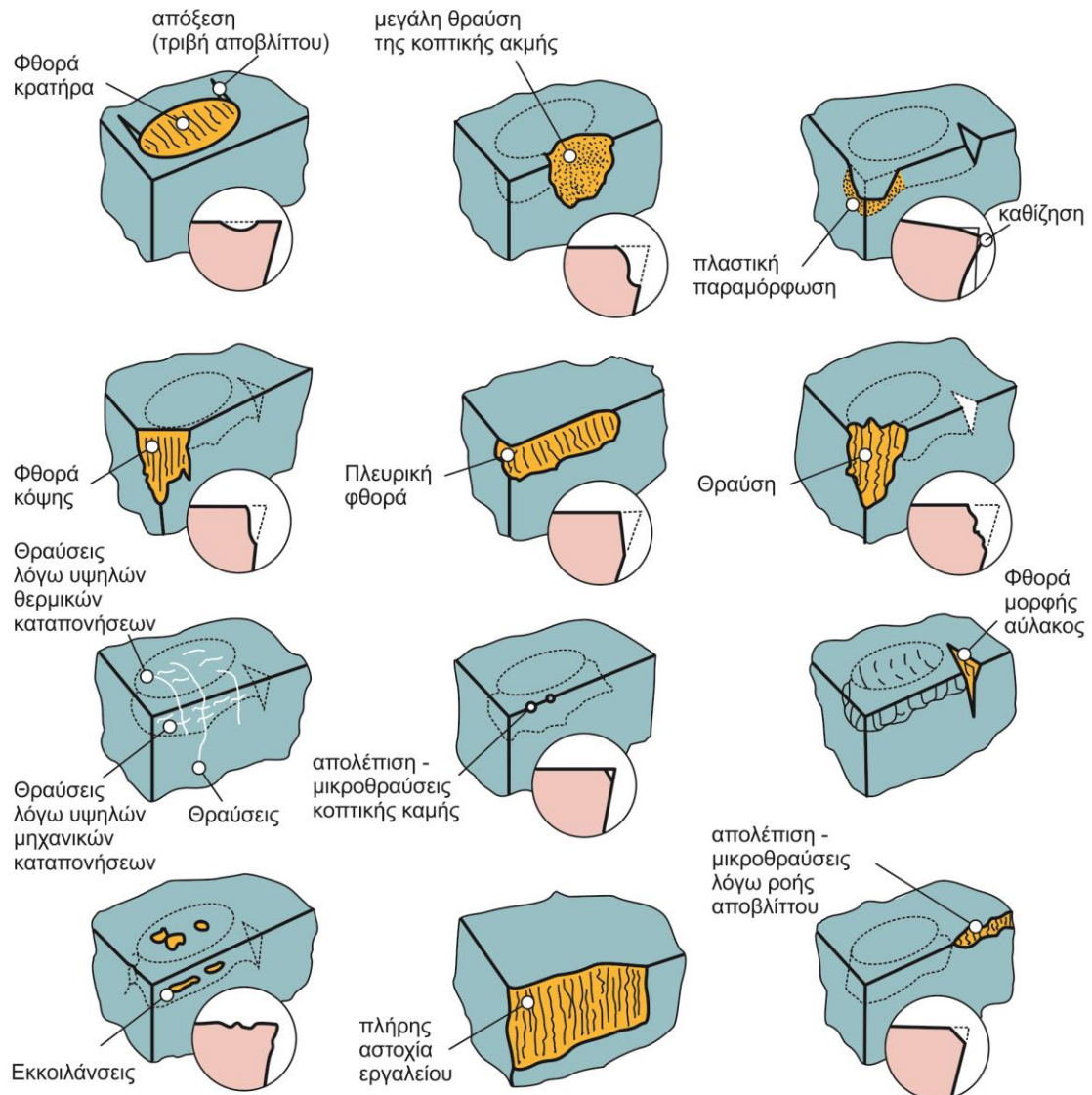
Η φθορά ορίζεται ως η διεργασία προοδευτικής απομάκρυνσης υλικού μεταξύ δύο σωμάτων, τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση. Η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση, μπορεί να είναι μηχανικής, χημικής είτε μεικτής φύσεως. Η δημιουργία και ανάπτυξη της φθοράς, συνεπάγεται την αλλοίωση των διαστατικών χαρακτηριστικών του εργαλείου, με αποτέλεσμα την αποτυχία εκπλήρωσης της αποστολής του (αστοχία). Κύριο κριτήριο, με βάση το οποίο καθορίζεται η αστοχία ή μη ενός κοπτικού εργαλείου, αποτελεί το μέγεθος της φθοράς. Σε περίπτωση που το συγκεκριμένο μέγεθος αυξηθεί τόσο ώστε να χαθεί η διαστατική ακρίβεια, το κοπτικό εργαλείο θεωρείται άστοχο, παρόλο που εξακολουθεί να διατηρεί τη δυνατότητα αφαιρέσεως υλικού.

Στις επιφάνειες ενός κοπτικού εργαλείου είναι εφικτό να παρουσιαστεί [56]:

- Ανάπτυξη φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου, η οποία ονομάζεται φθορά ελεύθερης επιφάνειας. Εμφανίζεται η λεγόμενη «ζώνη φθοράς» που χαρακτηρίζεται από το ομοιόμορφο και το μέγιστο πλάτος της (VB και VB_{max} αντίστοιχα). Οφείλεται στην ολίσθηση/τριβή του εργαλείου επάνω στο τεμάχιο και συνδέεται με μηχανισμούς συγκόλλησης και διάβρωσης/τριβής, που ενισχύονται από τις μεγάλες θερμοκρασίες της κοπής. Η φθορά ελεύθερης επιφάνειας προκαλεί σταδιακή μείωση του βάθους κοπής. Συνήθως, η διάρκεια ζωής του εργαλείου αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο όριο μέσης φθοράς ελεύθερης επιφάνειας.
- Ανάπτυξη φθοράς στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου, που εξ' αιτίας της μορφής της ονομάζεται φθορά κρατήρα. Χαρακτηρίζεται από το λόγο βάθους (KT) προς την απόσταση του βαθύτερου σημείου του από την άκρη της αιχμής του εργαλείου (KM). Σε αυτή την περιοχή αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως και οι μηχανικές τάσεις κατά την κοπή. Μέγιστη φθορά κρατήρα παρατηρείται μάλιστα στο σημείο όπου η θερμοκρασία κατά την κοπή είναι μέγιστη. Ο μηχανισμός φθοράς είναι διαφορετικός από αυτήν της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας, σε περιβάλλον υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών (υψηλών ταχυτήτων κοπής) και σχετίζεται με τη διάχυση ατόμων. Ο κρατήρας δεν επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια της κοπής, όσο την αντοχή της κοπτικής ακμής με ενδεχόμενο αποτέλεσμα τη θραύση του κοπτικού εργαλείου.
- Απολέπιση στην περιοχή της κόψης και στην επιφάνεια αποβλίττου λόγω σχηματισμού ψευδόκοψης και δημιουργίας συγκολλητών δεσμών.
- Μικροθραύσεις, ρωγμές ή παραμορφώσεις που αποδίδονται σε μηχανικά και

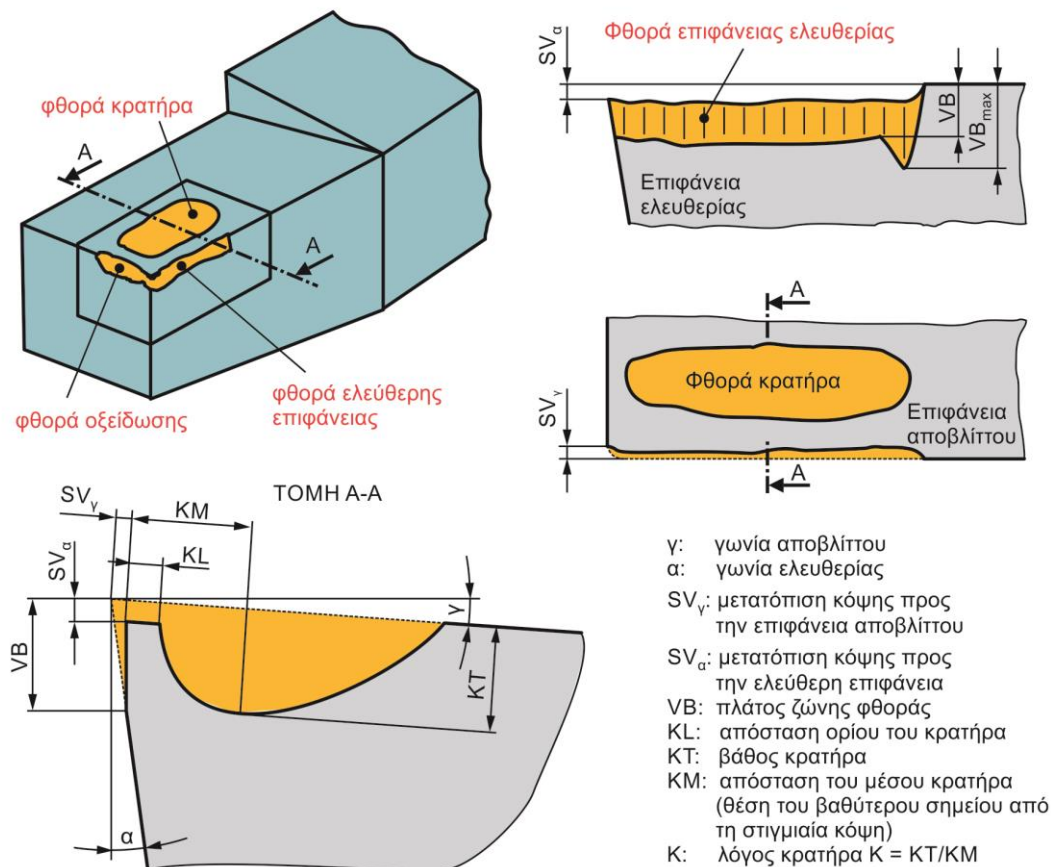
θερμικά αίτια.

- Θραύση της ακμής του κοπτικού εργαλείου που αποδίδεται σε επιβολή κρουστικών φορτίων.



Σχήμα 1.1 : Είδη φθοράς κοπτικών εργαλείων

Τα δύο πρώτα είδη φθοράς δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν και αποτελούν αύξουσα συνάρτηση του χρόνου κοπής. Συμπερασματικά, λοιπόν, το κοπτικό εργαλείο καταστρέφεται λόγω της προοδευτικής φθοράς στην ελεύθερη επιφάνειά του και στην επιφάνεια αποβλίπτου. Στο Σχήμα 1.2, παρουσιάζονται οι δύο αυτές μορφές φθοράς των κοπτικών εργαλείων, καθώς και τα μεγέθη με τα οποία αυτές μετρούνται.



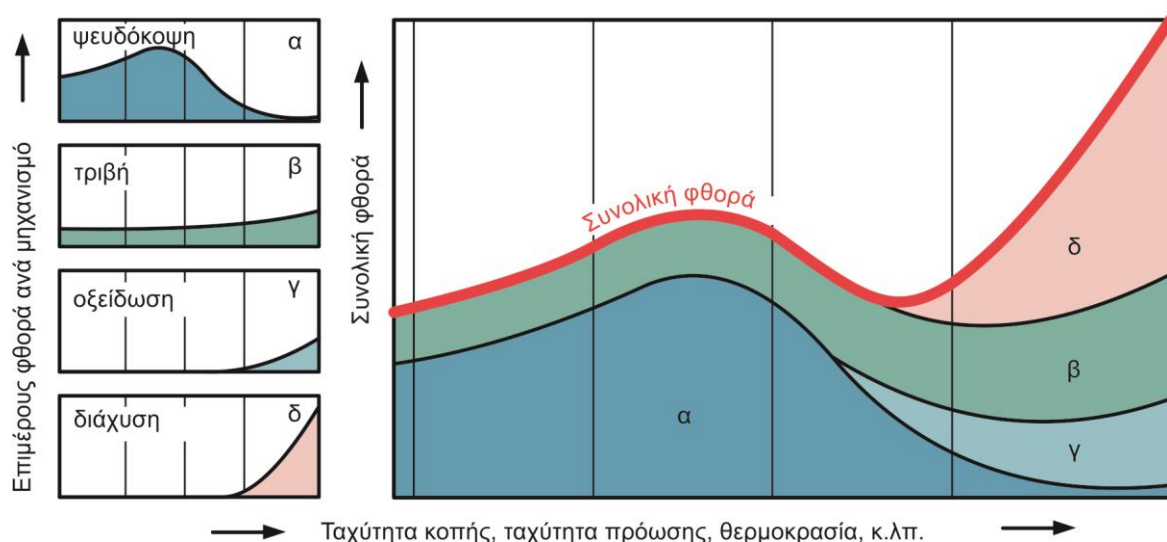
Σχήμα 1.2: Φθορά ελεύθερης επιφάνειας, φθορά κρατήρα και μεγέθη με τα οποία αυτές μετρούνται

Οι μηχανισμοί βάσει των οποίων εξελίσσεται η φθορά στα κοπτικά εργαλεία είναι αποτέλεσμα ορισμένων διακριτών και κατά βάση ανεξάρτητων μεταξύ τους φαινομένων :

- **Σχηματισμός και λύση συγκολλητών δεσμών.** Οι δεσμοί αυτοί δημιουργούνται λόγω της τριβής μεταξύ αποβλίπτου και εργαλείου ή εργαλείου και τεμαχίου. Ο διαρκής σχηματισμός και η καταστροφή των δεσμών αυτών κατά την διάρκεια της κοπής, έχει σαν συνέπεια την απόσπαση μικρών τεμαχίων από το εργαλείο προς το απόβλιπτο ή το τεμάχιο αντίστοιχα.
- **Απόξεση.** Σκληρά τεμαχίδια του αποβλίπτου κινούμενα και συγχρόνως πιεζόμενα πάνω στην επιφάνεια αποβλίπτου του κοπτικού εργαλείου, την φθείρουν συνεχώς, εκτελώντας κοπή σε μικρή κλίμακα. Τα τεμαχίδια αυτά μπορεί να προέρχονται και από μικρά κομμάτια της ψευδόκοψης και η αυξημένη αντοχή και σκληρότητά τους οφείλεται σε επάλληλες παραμορφώσεις και καθιζήσεις του υλικού τους.
- **Διάχυση στερεάς κατάστασης.** Άτομα από το υλικό του κοπτικού εργαλείου, διαχέονται προς το απόβλιπτο ή το τεμάχιο, λόγω της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών για διάχυση που προσφέρουν οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η μεταλλική επαφή του εργαλείου με το απόβλιπτο ή το τεμάχιο. Το αποτέλεσμα της συναλλαγής αυτής είναι η μεταβολή της κρυσταλλικής δομής του κοπτικού εργαλείου, που οδηγεί στην προϊούσα φθορά του.
- **Ηλεκτροχημική φθορά.** Εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια επαφής ανόμοιων υλικών αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη, που επιτείνει το φαινόμενο της διάχυσης του άνθρακα.

- **Διάβρωση.** Σε διαβρωτικό περιβάλλον σχηματίζονται οξείδια στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου, τα οποία απομακρύνονται εύκολα με την τριβή. Επιπλέον, τα πρόσθετα υψηλής πίεσης (EP) των υγρών κοπής σχηματίζουν μη μεταλλικές ενώσεις με το υλικό του κοπτικού εργαλείου, με στόχο τη δημιουργία μη μεταλλικού στρώματος, που εμποδίζει την εκτενή ανάπτυξη συγκολλητών δεσμών.
- **Οξείδωση.** Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά την κοπή, το οξυγόνο γίνεται χημικά πιο ενεργό και ευνοείται η οξείδωση του κοπτικού εργαλείου. Η οξείδωση εκδηλώνεται σε όλες τις επιφάνειες του κοπτικού εργαλείου με τη μορφή στρώματος συνθέτων οξειδίων του βολφραμίου (W), του κοβαλτίου (Co) και του σιδήρου (Fe). Το βάθος οξείδωσης αυξάνεται με τον χρόνο κοπής και σε βεβαρημένες συνθήκες κοπής μπορεί να προκληθεί ακόμα και θραύση της κόπης. Ο μηχανισμός οξείδωσης παρουσιάζεται πιο έντονος στα σκληρομέταλλα που περιέχουν WC (κατηγορίας K).
- **Κόπωση** του επιφανειακού υλικού του κοπτικού εργαλείου. Συναντάται ο ισχυρισμός ότι ισχυρή κυκλική φόρτιση προκαλεί κόπωση στο επιφανειακό υλικό του κοπτικού εργαλείου, συνεπώς δημιουργούνται εκκοιλάνσεις.

Συνολικά, η φθορά που αναπτύσσεται στα κοπτικά εργαλεία είναι συνήθως προϊόν και των τριών προαναφερομένων μηχανισμών. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την κοπή, στην ενεργοποίηση των διάφορων μηχανισμών φθοράς.



Σχήμα 1.3: Επίδραση ταχύτητας κοπής, ταχύτητας πρόωσης και θερμοκρασίας στην ενεργοποίηση των διάφορων μηχανισμών φθοράς

Έτσι, ενώ σε χαμηλές ταχύτητες κοπής και προώσεις, άρα και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, η φθορά ακολουθεί κυρίως τους μηχανισμούς της απόξεσης (μέσω της ύπαρξης της ψευδόκοπης) και της φθοράς λόγω σχηματισμού και λύσης συγκολλητών δεσμών (μέσω της τριβής εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου), όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής και η πρόωση, άρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες, η φθορά ακολουθεί κυρίως τον μηχανισμό της διάχυσης στερεάς κατάστασης ενώ παρουσιάζεται και οξείδωση του κοπτικού εργαλείου. Σε υψηλές θερμοκρασίες η φθορά που οφείλεται σε απόξεση είναι ελάχιστη λόγω της ελάττωσης του φαινομένου της ψευδόκοπης στις ταχύτητες αυτές.

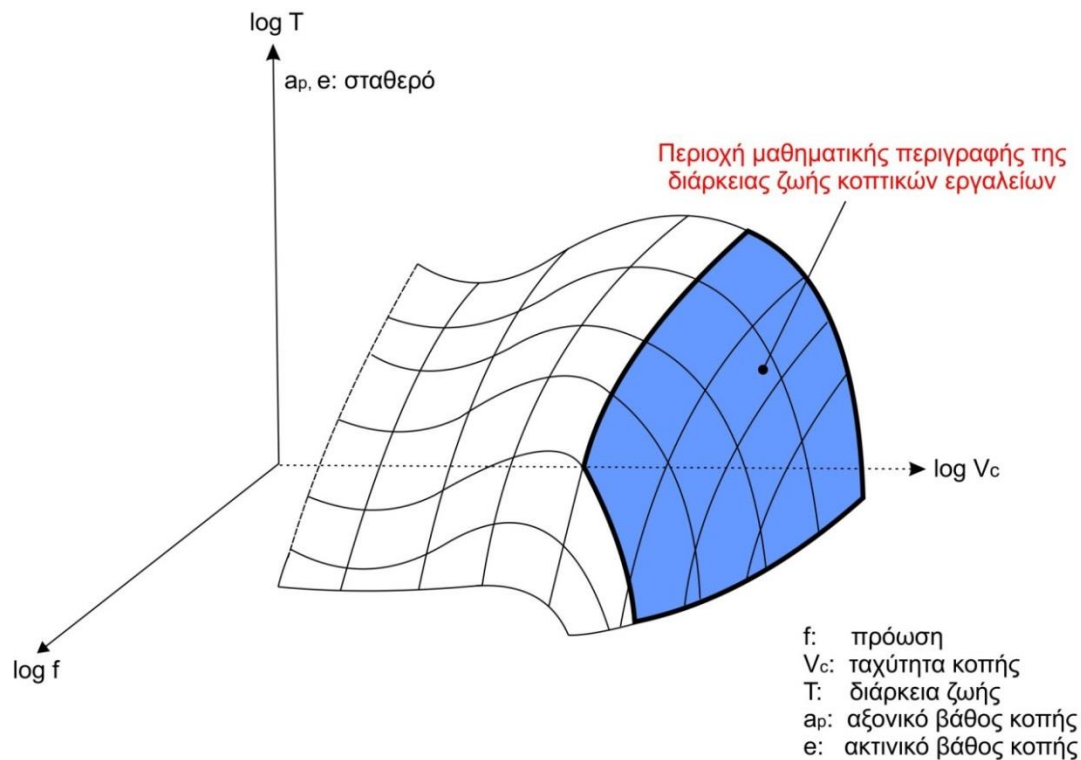
1.2 Διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων

Η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου είναι η εκμεταλλεύσιμη ζωή του, εκπεφρασμένη σε μονάδες χρόνου ή όγκου αφαιρούμενου υλικού ή θεωρητικού μήκους αποβλήτου από τη στιγμή που το νεοτροχισμένο εργαλείο θα αρχίσει να εργάζεται έως το σημείο λειτουργίας, το οποίο καθορίζεται από συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας. Σαν κριτήριο για τη διάρκεια ζωής, συνήθως επιλέγεται το μέγιστο πλάτος της ζώνης φθοράς (VB_{max}) στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.

Η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, εξαρτάται από ένα ευρύ φάσμα παραγόντων, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω:

- Είδος της κατεργασίας κοπής
- Κοπτικό εργαλείο
 - Υλικό του κοπτικού εργαλείου και φυσικές ιδιότητές του
 - Επικάλυψη του κοπτικού και είδος αυτής
 - Γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου
- Κατεργαζόμενο υλικό (σύσταση και ιδιότητές του)
- Τρόπος πρόσδεσης του κοπτικού εργαλείου
- Τρόπος πρόσδεσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου
- Συνθήκες κοπής (ταχύτητα, πρόωση, βάθος κοπής)
- Δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εργαλειομηχανή-εργαλείο-τεμάχιο

Συνήθως εξετάζεται η επιρροή στη διάρκεια ζωής μόνο των συνθηκών κοπής, θεωρώντας ότι όλοι οι άλλοι παράγοντες παραμένουν σταθεροί. Αυτή παρίσταται σε ένα τρισδιάστατο λογαριθμικό διάγραμμα στο Σχήμα 1.4, υπό τη μορφή χωρικής επιφάνειας, στο οποίο το αξονικό βάθος κοπής a_p , καθώς και το ακτινικό βάθος κοπής e , διατηρούνται σταθερά. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται σε έντονο πλαίσιο η κατ' εξοχήν εκμεταλλεύσιμη περιοχή που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία και στην οποία εμφανίζεται η οικονομικά βέλτιστη ταχύτητα. Η περιοχή αυτή μπορεί να προσεγγιστεί με ένα επίπεδο στο λογαριθμικό καρτεσιανό σύστημα του σχήματος και έτσι η διάρκεια ζωής T να εκφραστεί με σχετικά απλοϊκό τρόπο, σε συνάρτηση $T = f(V_c, f)$. Η εύρεση της σχέσης αυτής αποτελούσε και αποτελεί ακόμη αντικείμενο έρευνας. Αναζητείται δηλαδή ένα μαθηματικό πρότυπο που να προσομοιώνει κατά τον δυνατόν την πραγματική σχέση μεταξύ διάρκειας ζωής κοπτικού εργαλείου-συνθηκών κοπής. Για το σκοπό αυτόν έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορα πρότυπα προσομοίωσης με τη μορφή παραμετρικών εξισώσεων (εκθετικές, πολυωνυμικές, κ.ά.), στις οποίες υπεισέρχεται ένας αριθμός σταθερών συντελεστών. Ο υπολογισμός των συντελεστών με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων, αποτελεί την ουσία κάθε ερευνητικής εργασίας που σκοπό έχει να προσδιορίσει τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας για ένα συγκεκριμένο ζεύγος κοπτικού εργαλείου-κατεργαζόμενου τεμαχίου, διότι για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να είναι καταρχήν γνωστή η ακριβής συμπεριφορά της φθοράς.



Σχήμα 1.4 : Η διάρκεια ζωής T ως συνάρτηση της ταχύτητας κοπής V_c και της πρόωσης f για σταθερό ακτινικό και αξονικό βάθος κοπής, e και a_p αντίστοιχα

Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής, έχουν άμεση επίδραση στο μέγεθος της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου με σχέση ευθέως ανάλογη. Όταν αυξάνονται τα μεγέθη αυτά και οι συνθήκες κατεργασίας γίνονται πιο δυσμενείς, αφαιρείται δηλαδή όγκος υλικού με υψηλό ρυθμό, η φθορά του εργαλείου αυξάνεται. Η φθορά με τη σειρά της, έχει άμεση σχέση με τη διάρκεια ζωής T του κοπτικού εργαλείου διότι αποτελεί το κριτήριο με το οποίο αποφασίζεται τότε αυτό έχει συμπληρώσει το χρόνο ζωής του και χρειάζεται αντικατάσταση.

$$VB = g(V_c, f, e) \quad (1.1)$$

$$T = \sigma(VB) \quad (1.2)$$

Οι δύο παραπάνω σχέσεις, δίνουν την εξαιρετικά σημαντική για τις κατεργασίες σχέση:

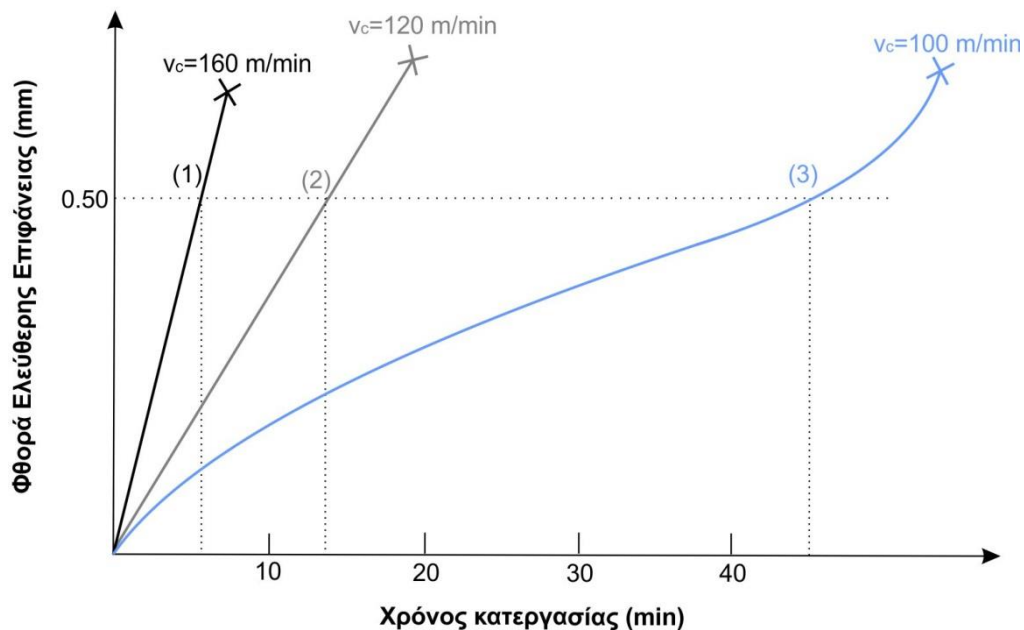
$$T = f(V_c, f, e) \quad (1.3)$$

Μια πρώτη προσέγγιση της σχέσης, έγινε από τον F.W. Taylor, με εξίσωση εκθετικής μορφής με ανεξάρτητες μεταβλητές τις V_c , f , e , εξαρτημένη τη διάρκεια ζωής T και σταθερές τις n , m , k , C .

$$V_c \cdot T^n \cdot f^{n/m} \cdot e^{n/k} = C \quad (1.4)$$

Πειραματικά αποτελέσματα απέδειξαν ότι η σειρά προτεραιότητας της επιρροής στο χρόνο ζωής από τις ανεξάρτητες μεταβλητές είναι η εξής:

$$V_c > f > e. \quad (1.5)$$



Σχήμα 1.5: Επίδραση της αύξησης της ταχύτητας κοπής στη φθορά ελεύθερης επιφάνειας

1.3 Αντικείμενο και στόχοι της διατριβής

Οι κατεργασίες κοπής αποτελούν την κλασσική μέθοδο παραγωγής προϊόντων, κυρίως από μεταλλικά υλικά. Ορισμένες από τις πιο σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την διαδικασία κοπής, σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα παραγωγής, αφορούν την κατάσταση των κοπτικών εργαλείων. Η δημιουργία και η ανάπτυξη της φθοράς συνεπάγεται την αλλοίωση των διαστατικών χαρακτηριστικών των κοπτικών εργαλείων, η οποία επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της επιφάνειας και τις διαστάσεις των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Με τη ραγδαία ανάπτυξη των ευφυών συστημάτων παραγωγής υψηλής ακρίβειας, το σφοδρό ανταγωνισμό ανάμεσα στις κατασκευάστριες εταιρείες και το ευρύ άνοιγμα των αγορών, ισχυροποιήθηκε η ανάγκη για αύξηση της παραγωγικότητας με παράλληλη μείωση του κόστους παραγωγής. Συνεπώς, η παρακολούθηση και η αξιολόγηση των επιπέδων της φθοράς των κοπτικών εργαλείων καθίσταται διεργασία ζωτικής σημασίας για τον προσαρμοστικό έλεγχο, αλλά και τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών κοπής της εκάστοτε κατεργασίας.

Η υλοποίηση ενός συστήματος άμεσης μέτρησης της φθοράς, με τη βοήθεια μεθόδων της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Τα συστήματα άμεσης μέτρησης της φθοράς αποτελούν φθηνές και ευέλικτες λύσεις στην παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, δεν έρχονται σε επαφή με τα κοπτικά εργαλεία, παρέχουν εξαιρετική ακρίβεια στη μέτρηση και μπορούν υπό συνθήκες να λειτουργούν και να ελέγχονται εξ' αποστάσεως. Επιπροσθέτως, οι εικόνες που λαμβάνονται από CCD κάμερες, είναι λιγότερο ευαίσθητες στο θόρυβο του βιομηχανικού περιβάλλοντος, συγκριτικά με τους αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται στις έμμεσες μεθόδους. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί για τη χρήση ενός συστήματος μηχανικής όρασης στην παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, οι οποίοι έγκεινται κυρίως στη χρήση ενός ισχυρού αλγόριθμου ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας για την απομάκρυνση του ανεπιθύμητου θορύβου από την επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και την ακριβή κατάτμηση της εικόνας φθοράς, με σκοπό το διαχωρισμό της ζώνης φθοράς, από την υπόλοιπη περιοχή του κοπτικού. Η παρούσα

διατριβή στοχεύει στην ικανοποίηση ακριβώς αυτών των περιορισμών/απαιτήσεων. Στοχεύει δηλαδή, στη δημιουργία ενός αυτοματοποιημένου συστήματος, με εξαιρετική ανοχή στην ύπαρξη ανακλάσεων και θορύβου των εικόνων εισόδου, για την επιτυχημένη απομόνωση και την ακριβή άμεση μέτρηση της περιοχής φθοράς, αλλά και την ταξινόμηση των διαφορετικών υποπεριοχών που εμφανίζονται εντός της ζώνης φθοράς.

Το Κεφάλαιο 2 εμπεριέχει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση της υπάρχουσας έρευνας στο πεδίο της παρακολούθησης και μέτρησης των επιπέδων της φθοράς κοπτικών εργαλείων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι επικρατούσες τεχνολογίες και οι σημαντικότερες διεθνείς ερευνητικές εργασίες για την παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, τόσο με έμμεσες, όσο και με άμεσες μεθόδους. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται λεπτομερώς οι αλγόριθμοι, που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος. Στο Κεφάλαιο 4, αναλύεται κάθε βαθμίδα του συστήματος και εξηγείται περαιτέρω η φιλοσοφία του και οι λόγοι για τους οποίους επελέγησαν οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι. Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα πειράματα που υλοποιήθηκαν σε 5-αξονικό κέντρο κατεργασιών, για την επιβεβαίωση του συστήματος. Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα πειράματα που υλοποιήθηκαν με χρήση ενός υπερφασματικού συστήματος απεικόνισης και αναλύονται οι λόγοι, για τους οποίους η συγκεκριμένη τεχνική εμφανίζεται πολλά υποσχόμενη, όσον αφορά τη μελέτη της φθοράς. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 και 8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές κατευθύνσεις της διατριβής.

2. Επίπεδο Γνώσεων στη Σχετική Βιβλιογραφία

Μετά από πολλές ερευνητικές προσπάθειες, πληθώρα μεθόδων ελέγχου έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις μεθόδων ελέγχου: οι άμεσες και οι έμμεσες. Οι πρώτες μετρούν τη φθορά άμεσα, όπως αυτή αναπτύσσεται, βασισμένες στην οπτική επιθεώρηση ή στην όραση με τη χρήση υπολογιστών (computer vision). Στις έμμεσες μεθόδους, η μέτρηση της φθοράς δε γίνεται απευθείας, αλλά μέσω μεγεθών που αποτελούν συνάρτησή της. Τέτοια μεγέθη είναι :

- Οι μηχανικές δονήσεις του κοπτικού εργαλείου
- Το ρεύμα του κινητήρα περιστροφής
- Η θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου
- Οι ακουστικές εκπομπές κ.α.

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεθόδων, ανάλογα με το σκοπό που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της κατάστασης του κοπτικού εργαλείου. Μερικές από τις τεχνικές είναι αποτελεσματικότερες για την ανίχνευση μιας ξαφνικής αστοχίας, ενώ άλλες είναι καταλληλότερες για τον έλεγχο της σταδιακής φθοράς. Από την άποψη αυτή, υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη διακριτοποίηση στην καταλληλότητα των διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης σημάτων.

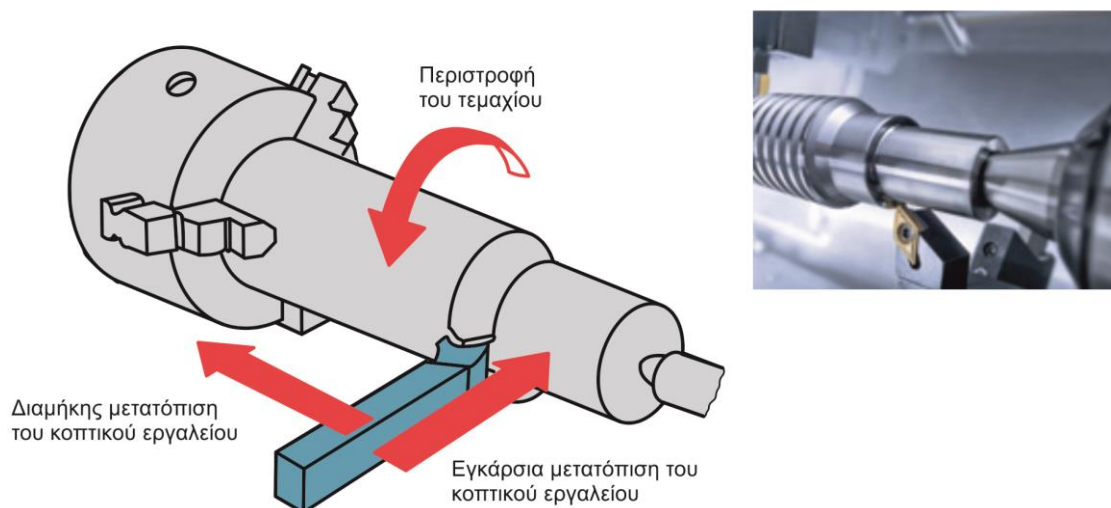
2.1 Έμμεσες μέθοδοι ελέγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων

Παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι επικρατούσες έμμεσες τεχνολογίες για την παρακολούθηση της φθοράς σε τρεις κύριες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού: στην τórνευση, το φραιζάρισμα προσώπου και τη διάτρηση.

2.1.1 Τórνευση

Οι κατεργασίες τórνευσης, συχνά χρησιμοποιούνται ως βάση για την έρευνα της παρακολούθησης μη συμβατικών κατεργασιών κοπής. Κατά την τórνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον

σφικτήρα του τórνου. Με τον τρόπο αυτό, συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκους μετακίνησης και έτσι αφαιρείται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η διαδικασία της τórνευσης, είναι από τις πιο απλές περιπτώσεις μηχανουργικής κατεργασίας. Κατά την ορθογωνική κοπή, η ακμή του κοπτικού εργαλείου είναι προσανατολισμένη κάθετα προς τη διεύθυνση κοπής, αλλά παράλληλα προς το τεμάχιο, ενώ κατά την πλάγια κοπή, η κύρια κόψη είναι προσανατολισμένη σε κλίση ως προς το τεμάχιο. Τα κοπτικά στις διεργασίες αυτές δεν περιστρέφονται. Ως αποτέλεσμα της απλοϊκής φύσης της, η τórνευση, αποτελεί αντικείμενο σημαντικής μελέτης.

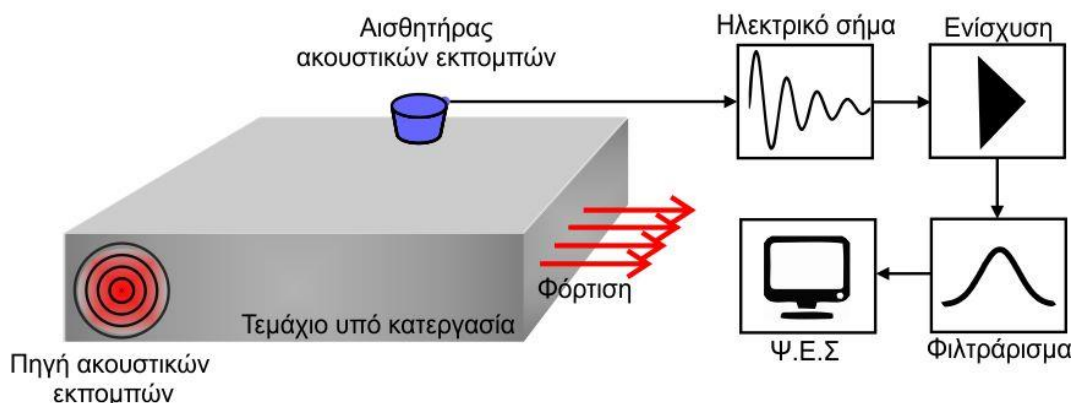


Σχήμα 2.1 : Κινηματική τórνευσης

Μια από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους ανίχνευσης φθοράς και θραύσης, κατά την τórνευση, είναι η χρήση των δυνάμεων κοπής. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι μετρήσεις αυτές γίνονται με τη χρήση δυναμομέτρων [2-5], ενώ σε άλλες προσδιορίζονται οι δυνάμεις κοπής μέσω παραμέτρων της ατράκτου, συμπεριλαμβανομένου, του ρεύματος και της ταχύτητας [6, 7]. Όσον αφορά του αισθητήρες ταχύτητας, συνήθως χρησιμοποιούνται ταχύμετρα ή ταχογεννήτριες. Ταχύμετρα κατασκευάζονται με στάτη μόνιμων μαγνητών και δρομέα, που περιστρέφεται στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Έτσι επάγεται στα τυλίγματα του οπλισμού του δρομέα τάση, η οποία με τη βοήθεια και του συλλέκτη δίδεται στην έξοδο ως συνεχές ρεύμα ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής. Στην τάση εξόδου πάντοτε υπάρχει θόρυβος εναλλασσόμενης τάσης, πλάτους έως 5% της τιμής της συνεχούς και θεμελιώδους συχνότητας που σχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης του ρεύματος της ατράκτου για τον προσδιορισμό των δυνάμεων κοπής, είναι ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μια αποδοτική εποπτεία της κατάστασης του κοπτικού εργαλείου, κατά την επιτάχυνση του άξονα της ατράκτου. Μόνο κάτω από σταθερές συνθήκες θα μπορούσε να ληφθούν αξιόπιστες αποφάσεις. Παρά το γεγονός αυτό, έχει βρεθεί ότι το ρεύμα της ατράκτου είναι επαρκές για να προγραμματίσει ένα γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος θα εκπαιδεύει ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, για την εποπτεία των επιπέδων της φθοράς των κοπτικών. Ωστόσο, η ακρίβεια του συγκεκριμένου συστήματος δεν είναι τόσο υψηλή, όσο άλλων συστημάτων που χρησιμοποιούν τριαξονική μέτρηση της δύναμης, με τη χρήση ενός δυναμόμετρου [7].

Μια άλλη κοινή παράμετρος, που μετράται κατά την τórνευση είναι η ακουστική εκπομπή (ΑΕ). Η ακουστική εκπομπή περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση των ελαστικών κυμάτων, που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί να είναι τοπική μετατόπιση

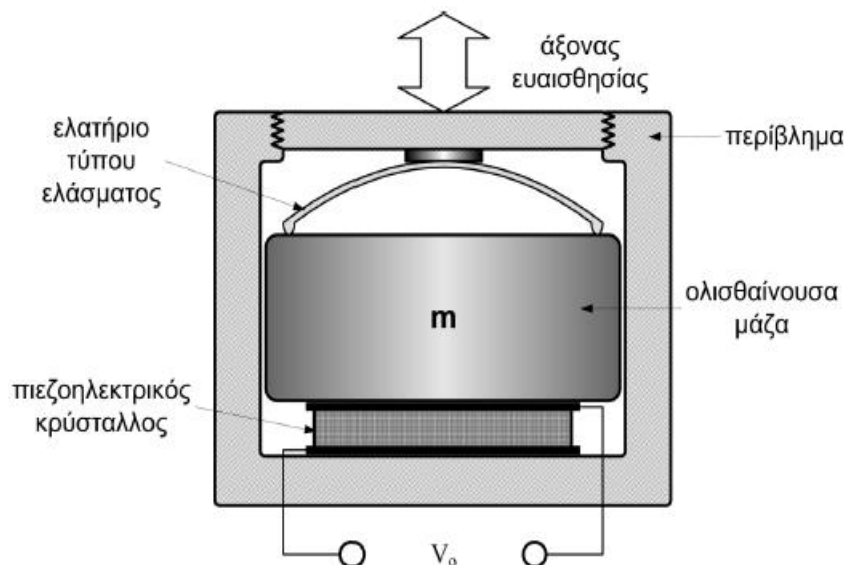
που συνοδεύει την πλαστική παραμόρφωση ή η έναρξη και διάδοση της αστοχίας στο υλικό. Η χρήση των ακουστικών εκπομπών, ως μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου βασίζεται στη μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα με τη χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, που διεγείρονται σε συχνότητες από 25 ως 1200 kHz. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια του υπό εξέταση τεμαχίου, ενώ στο σημείο επαφής τους με το τεμάχιο τοποθετείται συνήθως κάποιο παχύρρευστο υγρό. Το ηλεκτρικό σήμα κάθε αισθητήρα ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία, από κατάλληλο ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Η κατεργασία της τόννευσης λειτουργεί ως πηγή ακουστικών εκπομπών και η παρακολούθηση των σημάτων τους από μια περιοχή πολύ κοντά στην κατεργασία, μπορεί να αποδώσει χρήσιμες πληροφορίες που συσχετίζονται με τη φθορά των κοπτικών ακμών. Οι ακουστικές εκπομπές συνήθως συλλέγονται με χρήση ιδιαίτερα κατευθυντικών μικροφώνων, όμως και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι ικανοί να ανιχνεύουν και να μεταδίδουν ακουστικά κύματα, που ταξιδεύουν πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου [8-10]. Δυστυχώς, υπάρχουν ελάχιστα μικρόφωνα, αρκετά ισχυρά για να λειτουργούν σε ένα πραγματικό μηχανουργικό περιβάλλον, οπότε η επιλογή τέτοιων αισθητήρων είναι περιορισμένη [4]. Αν τα μικρόφωνα είναι ανεπαρκώς κατευθυντικά, μπορούν συχνά να συλλάβουν θόρυβο από το περιβάλλον, ο οποίος μειώνει το λόγο του σήματος προς το θόρυβο (SNR) των μετρούμενων δεδομένων. Για να αποφευχθεί αυτό, το μικρόφωνο πρέπει να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην περιοχή κοπής. Ωστόσο και η τοποθέτηση αυτή μπορεί να προσθέσει θόρυβο, λόγω της δημιουργίας αποβλήτων και της παρεμβολής του ψυκτικού υγρού. Επειδή είναι δύσκολο να διαχωριστεί ο θόρυβος του υποβάθρου από το θόρυβο της φθοράς/θραύσης όταν χρησιμοποιείται ατόφια η τιμή της ακουστικής εκπομπής, γίνεται χρήση της RMS τιμής. Χρήση της RMS τιμής των ακουστικών εκπομπών αναφέρθηκε στο [5] για την ανίχνευση φθοράς κατά τη διάρκεια κατεργασιών τόννευσης. Το συμπέρασμα ήταν ότι το επίπεδο των RMS τιμών των ακουστικών εκπομπών σχετιζόταν με την περιοχή φθοράς του εργαλείου. Οι RMS τιμές των σημάτων των ακουστικών εκπομπών δίνουν καλύτερα αποτελέσματα απ' ό,τι η χρήση δυνάμεων στην ανίχνευση φθοράς, αλλά και θραύσης. Ωστόσο, η ακριβής σχέση μεταξύ των δύο φαινομένων ακόμα δεν έχει προσδιοριστεί πλήρως.



Σχήμα 2.2 : Τυπική διάταξη μέτρησης ακουστικών εκπομπών

Οι δονήσεις είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μετρητική μέθοδος στα συστήματα παρακολούθησης λειτουργικών παραμέτρων των μηχανουργικών κατεργασιών και παρέχουν αρκετές πληροφορίες για την κατάσταση των κοπτικών εργαλείων. Βέβαια, δεν είναι τόσο δημοφιλής μέθοδος για την παρακολούθηση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων κατά τη διάτρηση, λόγω του ισχυρού θορύβου που παράγεται κατά την κατεργασία. Οι σύγχρονοι αισθητήρες δονήσεων μετατρέπουν το αποτέλεσμα της ταλάντωσης σε ανάλογο ηλεκτρικό μέγεθος (ρεύμα ή τάση), το οποίο οδηγείται σε κάποια διάταξη για περαιτέρω επεξεργασία. Σε ένα σήμα οι βασικές μηχανικές ποσότητες που

αντιπροσωπεύουν τις δονήσεις είναι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση, με την τελευταία να αποτελεί την πιο συχνά μετρούμενη ποσότητα. Οι μετρήσεις των δονήσεων χρησιμοποιούνται περισσότερο, από τη στιγμή που η εγκατάσταση των επιταχυνσιόμετρων έγινε ευκολότερη κοντά στην περιστρεφόμενη άτρακτο, χωρίς να είναι αναγκαίες μετατροπές στα μηχανικά της μέρη. Οι παραγόμενες δονήσεις σχετίζονται με την ύπαρξη φθοράς, διότι αν σε ένα δυναμικό σύστημα οι δυνάμεις κοπής αυξηθούν, τότε και η δυναμική αντίδραση θα αυξηθεί. Βέβαια, υπάρχουν αδυναμίες της συγκεκριμένης μεθόδου μέτρησης, όπως η συσχέτιση των παραγόμενων δονήσεων με το υλικό του τεμαχίου, τις συνθήκες κοπής, καθώς και τη δομή της εργαλειομηχανής. Ένας απ' τους πιο διαδομένους τύπους επιταχυνσιόμετρο για τη μέτρηση δονήσεων είναι το πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο, το οποίο αποτελείται από μια ολισθαίνουσα μάζα συνδεδεμένη με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, τοποθετημένη σε περίβλημα. Οι επιμεταλλωμένες επιφάνειες του κρυστάλλου είναι σε επαφή με ηλεκτρικό κύκλωμα (ενισχυτής φορτίου), το οποίο παράγει τάση εξόδου από το φορτίο που αναπτύσσεται στον κρύσταλλο λόγω της μηχανικής τάσης που αναπτύσσεται σε αυτόν. Αυτό συμβαίνει λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, κατά το οποίο η παραμόρφωση ενός κρυστάλλου, λόγω άσκησης μηχανικής πίεσης σε αυτόν, προκαλεί τάση στα άκρα του κρυστάλλου ανάλογη της παραμόρφωσης. Στα πλεονεκτήματα της χρήσης των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιόμετρων καταγράφεται η μεγάλη τάση εξόδου τους, το μεγάλο εύρος της περιοχής συχνοτήτων λειτουργίας τους (μέχρι μερικές δεκάδες kHz), η μικρή ευαισθησία τους (μέχρι 100mV/g), η καλή ακρίβειά τους (της τάξης του 1% της πλήρους κλίμακας) και η μεγάλη φυσική συχνότητα ω_n , που τους καθιστά κατάλληλους για μετρήσεις επιταχύνσεων που περιέχουν υψηλές αρμονικές [55]. Η πρωτογενής εκτίμηση φθοράς των κοπτικών εργαλείων, μέσω των σημάτων των παραγόμενων δονήσεων κατά την κατεργασία, προκύπτει από την αξιοποίηση των στατιστικών παραμέτρων στο πεδίο του χρόνου. Η πιο βασική τεχνική ανάλυσης των δονήσεων μετασχηματίζει το σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, με χρήση του ταχέος μετασχηματισμού Fourier, προκειμένου να ανιχνευθούν οι ασυνήθιστες αλλαγές στις συχνότητες της δόνησης, πιθανόν λόγω φθοράς ή αποβλίττων.



Σχήμα 2.3 : Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο

Μια άλλη ενδιαφέρουσα προσέγγιση παρουσιάζεται στο [2], όπου ερευνάται η ανακλαστικότητα των αποβλίττων που παράγονται κατά την τόννευση, για τον προσδιορισμό της φθοράς στην περιοχή της κόπης. Η διακύμανση των τιμών της ανάκλασης, είναι ανάλογη της μεταβολής του χρώματος της επιφάνειας του αποβλίττου.

Το χρώμα της επιφάνειας του αποβλήτου αλλάζει από το αρχικό χρώμα του τεμαχίου (ασημί) σε μπλε, σκούρο μπλε ή καφέ-κόκκινο, ανάλογα με το χρόνο της κατεργασίας. Μελετώντας το μήκος κύματος των διαφόρων χρωμάτων, φαίνεται ότι το καφέ-κόκκινο χρώμα έχει υψηλότερη τιμή συντελεστή ανάκλασης, συγκριτικά με το μπλε. Το τελικό χρώμα και η ανάκλαση της επιφάνειας των παραγόμενων αποβλήτων, μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας, η οποία σχετίζεται με το μέγεθος της τριβής κατά την διάρκεια της κοπής, συνεπώς και με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Οι συγκεκριμένες παράμετροι σε συνδυασμό με τις δυνάμεις κοπής, χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου (ANN). Ένα μείζον πρόβλημα με τη συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ότι οι μετρήσεις ανάκλασης πρέπει να γίνουν offline, πράγμα που σημαίνει ότι η συγκεκριμένη μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες κοπής.

Η θερμοκρασία είναι ένα φυσικό μέγεθος που παρέχει πληροφορίες, σχετικά με τη κατάσταση του κοπτικού εργαλείου. Κάθε σώμα ευρισκόμενο σε μια θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός εκπέμπει συνεχώς θερμική ακτινοβολία προς κάθε κατεύθυνση, η οποία μεταδίδεται στο χώρο υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Η ολική ενέργεια που ακτινοβολείται από τη μονάδα επιφανειακής περιοχής του υλικού είναι ευθέως ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του, με βάση το νόμο των Stefan-Boltzmann, ενώ η επιφανειακή θερμοκρασία σχετίζεται με το μέγιστο μήκος κύματος της εκπεμφθείσας ενέργειας μέσω του νόμου εκτοπίσματος του Wien.

$$R_T = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.1)$$

όπου, R_T η εκπεμπόμενη ενέργεια (W/m^2), ε ο συντελεστής εκπομπής του υλικού, σ η σταθερά Stefan – Boltzmann και T η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος (K).

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (2.2)$$

όπου, λ_{\max} το μήκος κύματος της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας (μm), b η σταθερά εκτοπίσματος Wien ($2.897 \mu m/K$) και T η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος (K). Τα κοπτικά εργαλεία λειτουργούν με αποδοτικό τρόπο σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών και υπερβολικές μεταβολές της θερμοκρασίας έχουν σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση των διαστατικών χαρακτηριστικών τους. Στα περισσότερα συστήματα οι επιφανειακές θερμοκρασίες των κοπτικών εργαλείων ακτινοβολούν στην υπέρυθρη περιοχή ($0,8 \mu m$ έως $100 \mu m$). Η θερμογραφία ή υπέρυθρη φωτογράφιση είναι η διαδικασία εκείνη, η οποία μετατρέπει την υπέρυθρη (IR) ακτινοβολία σε ορατή, ικανή για ερμηνεία. Με τη θερμογραφία δεν μετράται απευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας, αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας. Έτσι, οι υποεπιφανειακές ανωμαλίες στο υλικό δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία, προκαλούμενες από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις ζώνες που υπάρχουν ατέλειες. Η μέτρηση πραγματοποιείται χωρίς επαφή στο κοπτικό εργαλείο και αποτυπώνει την κατανομή της θερμοκρασίας της επιφάνειάς του σε πραγματικό χρόνο, με τη βοήθεια μιας υπέρυθρης κάμερας, συνδεδεμένη με έναν υπέρυθρο ανιχνευτή. Για την αποφυγή της μετατροπής της ενέργειας των φωτονίων σε ηλεκτρική γίνεται ευρεία χρήση ημιαγωγών. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι ανιχνευτές είναι οι ανιχνευτές φωτονίων, στους οποίους η δημιουργία ή η μεταφορά των ηλεκτρονίων συνδέεται άμεσα με την απορρόφηση φωτονίων. Ο πολύ μικρός χρόνος απόκρισης (της τάξης των μsec) και η μεγάλη ευαισθησία τους αποτελούν τα κύρια πλεονεκτήματά τους. Πριν φτάσει στον ανιχνευτή, η υπέρυθρη ακτινοβολία περνά μέσα από ειδικά σχεδιασμένους φακούς. Τα υλικά των φακών πρέπει να έχουν υψηλή διαπερατότητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται υλικά όπως το γερμάνιο και το πυρίτιο. Η υπέρυθρη θερμογραφία απαιτεί ανάλυση των δεδομένων απεικόνισης για την εποπτεία της φθοράς, όμως η

διαδικασία αυτή απλοποιείται, λόγω της διαθεσιμότητας λογισμικών μηχανικής όρασης. Γενικά, οι τεχνολογίες αισθητηρίων, αποτελούν τον μεγαλύτερο όγκο των διαθέσιμων μεθόδων, που εφαρμόζονται για την παρακολούθηση της φθοράς των κοπτικών κατά την κατεργασία της τórνευσης. Για τον προσδιορισμό των επιπέδων της φθοράς των κοπτικών εργαλείων, γίνεται συχνά οπτικός έλεγχος [7, 16]. Ωστόσο, αυτό δε μπορεί να συμβεί σε πραγματικό χρόνο. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι καμιά άλλη έρευνα, σε άλλου είδους κατεργασίας, δεν εξετάζει την ανάκλαση των αποβλήτων ως πηγή πληροφοριών για τη φθορά. Επιπροσθέτως, η χρήση υπερηχητικών εκπομπών καθίσταται σπάνια, πέρα από την κατεργασία της τórνευσης. Η χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στην τórνευση είναι στραμμένη προς την ανίχνευση της θραύσης [3, 4]. Η ικανότητά τους να ανιχνεύουν τη θραύση, με ακρίβεια της τάξεως του 90%, είναι εντυπωσιακή, ωστόσο η απαίτηση για την εκτεταμένη εκπαίδευσή τους, τα καθιστά ως μια λύση λιγότερο ελκυστική.

Η τórνευση είναι από τις πιο σταθερές κατεργασίες κοπής, σε αντίθεση με τη διάτρηση, η οποία έχει συχνές περιόδους επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και τις κατεργασίες φραιζαρίσματος, που έχουν από τη φύση τους μια περιοδική σειρά διακεκομμένων κοπών. Για τους λόγους αυτούς, ορισμένες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην τórνευση δεν είναι κατάλληλες για άλλου τύπου κατεργασίες.

2.1.2 Φραιζάρισμα προσώπου

Ο συγκεκριμένος τύπος κατεργασίας περιλαμβάνει τη χρήση πολυοδοντωτών, περιστρεφόμενων κοπτικών για την απομάκρυνση υλικού από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Χρησιμοποιείται για μεγάλης κλίμακας αφαίρεση υλικού, αν και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για το φινιρίσμα περιοχών, όπως συμβαίνει συχνά σε εφαρμογές κατεργασιών υψηλής ταχύτητας. Κατεργασία παρόμοια με την τórνευση, αφού χρησιμοποιούνται κυρίως κοπτικά εργαλεία με ίσια άκρα, σε αντίθεση με εκείνα που χρησιμοποιούνται κατά τη διάτρηση. Σε αντίθεση με τα κοπτικά εργαλεία της τórνευσης, αυτά του φραιζαρίσματος προσώπου, έχουν πολλαπλές κοπτικές ακμές. Ένα τυπικό προφίλ κοπτικού εργαλείου φραιζαρίσματος προσώπου, φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 :Τυπικό προφίλ κοπτικού εργαλείου φραιζαρίσματος προσώπου, με 5 κοπτικές ακμές

Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ τórνευσης και φραιζαρίσματος προσώπου, αποτελεί το γεγονός ότι οι δυνάμεις και οι ροπές στο φραιζάρισμα είναι περιοδικές. Αυτό οφείλεται

τόσο στη γεωμετρία των κοπτικών εργαλείων, όσο και στη φύση της κατεργασίας. Κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής κάθε δόντι εισέρχεται στο τεμάχιο, κινείται μέσα σε αυτό και εξέρχεται. Κάθε μια από τις φάσεις αυτές, θα επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο παράγονται τα σήματα από την εργαλειομηχανή. Υπήρξε σημαντικό ενδιαφέρον για την παρακολούθηση και τη μελέτη του φραιζαρίσματος προσώπου και ένα ευρύ φάσμα μεθόδων παρακολούθησης των συνθηκών της κατεργασίας αυτής έχουν προταθεί στα [8-10, 17, 18]. Η μέτρηση των δυνάμεων κοπής αποτελεί μια αρκετά συνηθισμένη μέθοδο παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων στο φραιζάρισμα προσώπου. Τα σήματα δυνάμεων συλλέγονται συνήθως με δυναμόμετρα, που τοποθετούνται στην τράπεζα. Η μεγάλη ακμή (peak), που εμφανίζεται στις δυνάμεις κατά την είσοδο και την έξοδο του κάθε δοντιού στο τεμάχιο, αποτελεί το μείζον πρόβλημα της συγκεκριμένης μεθόδου. Τα σήματα αυτά συχνά οδηγούν σε ψευδείς συναγεργμούς, καθώς οι τιμές τους μπορεί να υπερβούν τα όρια που επιλέγονται για να σηματοδοτήσουν τη θραύση. Αντί να χρησιμοποιείται η στιγμιαία ένδειξη από το δυναμόμετρο και έχοντας τον εγγενή κίνδυνο των πολλαπλών ψευδών συναγεργμών, υπολογίζεται ο μέσος όρος της δύναμης σε μια περίοδο δοντιού στο [18, 41]. Με τη χρήση δυναμομέτρων για την ακριβή μέτρηση των δυνάμεων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, υπολογίζεται μια μέση προκύπτουσα δύναμη ως εξής :

$$F_{av} = \sqrt{F_{ax}^2 + F_{ay}^2} \quad (2.3)$$

, όπου, F_{ax} και F_{ay} είναι ο μέσος όρος των δυνάμεων στις κατευθύνσεις x και y σε μία περίοδο δοντιών. Με τη χρήση τη συνισταμένης δύναμης μπορεί να ανιχνευθεί η θραύση του εργαλείου και να διαχωριστεί από τους ψευδείς συναγεργμούς.

Η χρήση των ακουστικών εκπομπών έχει ερευνηθεί εκτενώς στο φραιζάρισμα προσώπου και αποτελεί μια αρκετά διαδεδομένη μέθοδο, δεδομένου ότι δύναται να ανιχνεύσει γρήγορα τη θραύση. Η συχνότητα του σήματος των ακουστικών εκπομπών αυξάνεται, με την αύξηση των επιπέδων της φθοράς και της θραύσης. Για τη λήψη των ακουστικών εκπομπών προτιμάται η χρήση ακουστικών αισθητήρων, συνδεδεμένων στο τεμάχιο ή σε δομές των εργαλειομηχανών, αντί της χρήσης μικροφώνων. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης, τη μεγαλύτερη αντοχή και την ευκολία προσαρμογής και χρήσης των αισθητήρων αυτών. Στις περιπτώσεις των [17, 20], τα σήματα ακουστικών εκπομπών συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας ένα εμπορικά διαθέσιμο αισθητήριο ακουστικών εκπομπών, που συναρμολογείται προς την πλευρά του δυναμόμετρου. Από το σήμα που συλλέγεται, υπολογίζεται η λοξότητα, η κύρτωση, η RMS τιμή και μέση τιμή του. Καθώς η φθορά αυξάνεται, η ενέργεια που υπάρχει στο σήμα παρουσιάζει επίσης αυξανόμενη τάση. Όπως αποδείχθηκε, οι πληροφορίες που παρέχονται από τον αισθητήρα ακουστικών εκπομπών είναι ανεπαρκείς για να δώσουν με απόλυτη ακρίβεια τη μέτρηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου [17, 21, 22]. Αν τα σήματα ακουστικών εκπομπών χρησιμοποιούνται ως μέρος ενός συστήματος παρακολούθησης των επιπέδων της φθοράς, το σύστημα θα χρειαστεί να εξοπλιστεί με κάποια μέθοδο διαχωρισμού του θορύβου και των ψευδών σημάτων από τα πραγματικά σήματα θραύσεως/φθοράς.

Ένας νέος τύπος αισθητήρα ακουστικής εκπομπής/δόνησης, ο οποίος αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε στο [23], χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα για τον έλεγχο φθοράς κατά την κατεργασία του φραιζαρίσματος προσώπου. Αυτός ο αισθητήρας αποτελείται από ένα στρώμα αλουμινίου 0.5 μm , πάνω από ένα στρώμα 2 μm πιεζοηλεκτρικού υλικού. Αυτός ο αισθητήρας είναι ακουστικά συνδεδεμένος με την κάτω πλευρά ενός ένθετου κοπτικού βολφραμίου-καρβιδίου. Το αισθητήριο είναι σε θέση να ανιχνεύει τόσο τις μετατοπίσεις των πλακιδίων όσο και τις ακουστικές εκπομπές της κατεργασίας. Οι δύο αυτές μετρήσεις φιλτραρίστηκαν χρησιμοποιώντας ένα 100 kHz υψηλοπερατό φίλτρο και ένα ζωνοπερατό φίλτρο 1-20 kHz για να επιθεωρήσει τη μετατόπιση και τα σήματα ακουστικών εκπομπών. Τα δύο αυτά σήματα χρησιμοποιούνται σαν είσοδοι σε δύο ξεχωριστούς συγκριτές τάσης

και τα τελικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με μια πύλη AND.

Η δόνηση είναι μια άλλη παράμετρος που αποτέλεσε το επίκεντρο ιδιαίτερης έρευνας [17, 8, 10, 24, 25, 26]. Στην έρευνα πραγματοποιείται στο [26], εξετάζεται ο ρόλος των δονήσεων και η σχέση τους με τη φθορά των κοπτικών εργαλείων χρησιμοποιώντας ένα επιταχυνσιόμετρο τοποθετημένο επί του ενθέτου ενός κοπτικού εργαλείου φραιζαρίσματος προσώπου. Κατά το φραιζάρισμα διάφορες διακριτές ζώνες υψηλής ενέργειας παρατηρούνται στο πεδίο της συχνότητας. Αυτές σχετίζονται με το υποσύστημα του τραπέζιου-τεμαχίου, το υποσύστημα ατράκτου-κοπτικού εργαλείου, και το ίδιο το εργαλείο. Διαπιστώθηκε επίσης, ότι υπάρχουν ορισμένες ζώνες συχνοτήτων που είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και μπορούν να αγνοηθούν.

Ένας αισθητήρας μετατόπισης/δόνησης αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε στο [8]. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας δομήθηκε από ένα στρώμα PVDF (φθοριούχο πολυβινυλιδένιο) 28 μm σε πάχος, τοποθετημένο σε μια θήκη, πίσω από μια ροδέλα. Κατά την κατεργασία, παράγεται ένα σήμα ανάλογο της σχετικής κίνησης μεταξύ της ροδέλας και του κοπτικού εργαλείου. Τα σήματα ανακτώνται από το σύστημα με έναν οπτικό πομπό, ο οποίος στέλνει το διαμορφωμένο στη συχνότητα σήμα σε έναν δέκτη, που είναι τοποθετημένος στο κέντρο του άξονα της ατράκτου. Έχει αποδειχθεί ότι η σχεδίαση και η δοκιμή μη-εμπορικά διαθέσιμων αισθητήρων, αποτελεί μια εξαιρετικά χρήσιμη μέθοδο για τον προσδιορισμό της φθοράς και της θραύσης. Συχνά οι αισθητήρες αυτοί, τοποθετούνται πάνω στο κοπτικό εργαλείο και βασίζονται στην πιεζοηλεκτρική τεχνολογία [8, 10]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση πλεονεκτεί, επειδή οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι φθηνοί και δε μεταβάλλουν σημαντικά τη δομή της εργαλειομηχανής.

Μια άλλη μέθοδος για τον προσδιορισμό της κατάστασης του εργαλείου, είναι ο υπολογισμός δύο δεικτών, του δείκτη θραύσης και του δείκτη φθοράς, οι οποίοι υπολογίζονται ως εξής:

$$\text{δείκτης θραύσης} = \frac{\text{RMS (έξοδος φίλτρου)}}{\text{RMS (δεδομένα εισόδου)}} \quad (2.4)$$

$$\text{δείκτης φθοράς} = \frac{\sqrt{\text{διακύμανση}}}{\text{βάθος κοπής} \cdot \frac{\text{rpm}}{660}} \quad (2.5)$$

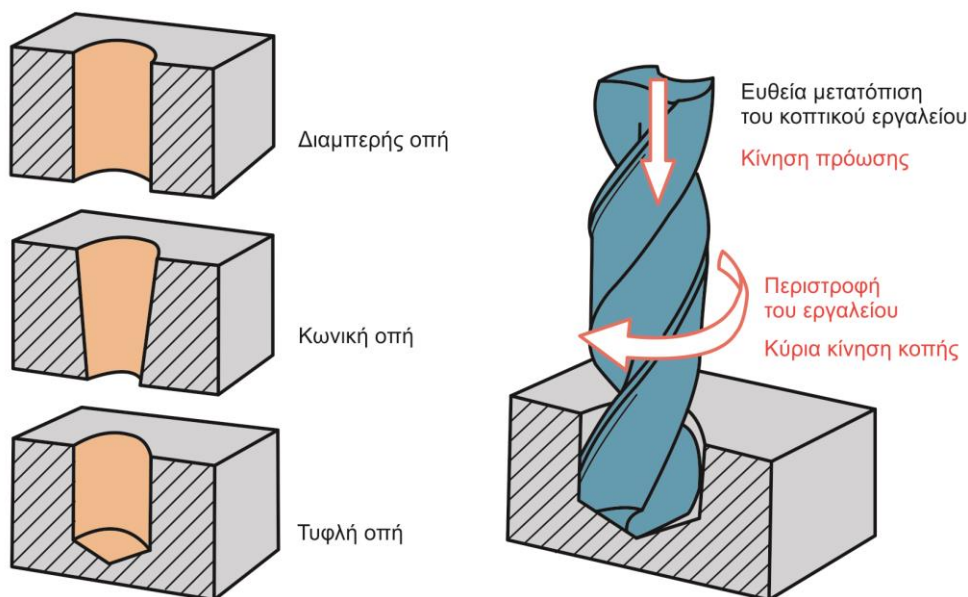
Όσο αφορά το δείκτη φθοράς, η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με το βάθος της κοπής και την ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού. Η χρήση των αδιάστατων δεικτών θραύσης και φθοράς αποδείχθηκε αρκετά επιτυχημένη. Σε περιπτώσεις θραύσης, η αναλογία ποικίλει μεταξύ 0.4 και 0.83 για υγιή και φθαρμένα κοπτικά εργαλεία, αντίστοιχα. Ο δείκτης της φθοράς του εργαλείου, είναι ανεξάρτητος με την πρόωση, το βάθος κοπής και την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται στο [17, 21, 22] σε συνδυασμό με τα συστήματα πολλών αισθητήρων για τον προσδιορισμό της φθοράς του εργαλείου. Στην ίδια έρευνα διαπιστώθηκε ότι η τυπική απόκλιση των σημάτων δόνησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο συσχέτισης με τη φθορά στο [17, 21, 22]. Δύο τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν στο [27], για να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες κοπής στο φραιζάρισμα. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί όγδοης τάξης αυτοπαλινδρόμηση (AR) για τον εντοπισμό φθοράς σε τραχιά και μη κοπτικά εργαλεία. Στο [25], αποδείχτηκε ότι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι πολύ αποτελεσματικά όταν τροφοδοτούνται με δεδομένα δυνάμεων. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα συνδυάζονται με προσαρμοστικά δίκτυα συντονισμού στο [28] για να μειωθεί η εξάρτησή τους από ειδική εκπαίδευση, βελτιώνοντας έτσι, την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης προσέγγισης. Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται επίσης, για την παρακολούθηση της φθοράς κοπτικού εργαλείου

στο [29] και βρέθηκε ότι μπορεί να πετύχει ακρίβεια της τάξης του 91%.

2.1.3 Διάτρηση

Η δημιουργία οπών με διάτρηση αποτελεί μια από τις παλαιότερες και ευρύτερα χρησιμοποιημένες μηχανουργικές κατεργασίες. Η κατεργασία της διάτρησης διαφέρει σημαντικά από την τόννευση και το φραιζάρισμα προσώπου. Η κύρια διαφορά είναι ότι η διάτρηση αποτελεί μια πολύπλοκη τρισδιάστατη κατεργασία αφαίρεσης υλικού, σε αντίθεση με τις σχετικά απλές περιπτώσεις της ορθογωνικής και λοξής κοπής. Τα κονδύλια έχουν πολύ διαφορετική γεωμετρία από τα κοπτικά εργαλεία τόννευσης και φραιζαρίσματος. Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη διάτρηση έχουν δύο κοπτικές ακμές, ενώ εκτελούν ταυτόχρονα δύο κινήσεις. Η κύρια κίνηση της κοπής είναι η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις όπως στο boring, υπάρχει δυνατότητα να περιστρέφεται και το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η ταχύτητα κοπής, που εξαρτάται από τον αριθμό στροφών του εργαλείου, εκφράζεται σε [m/min] και λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της στην περιφέρεια του τρυπανιού, ενώ μειώνεται προς το κέντρο του. Η δεύτερη κίνηση του κοπτικού εργαλείου είναι η ευθεία μετακίνηση του προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η κίνηση αυτή καθορίζεται ως η πρόωση του εργαλείου και ελέγχει το πάχος του παραγόμενου αποβλίττου, άρα και τις αντίστοιχες αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Όσο μεγαλύτερη είναι η πρόωση, τόσο μεγαλύτερο είναι και το πάχος του αποβλίττου και αντίστοιχα και οι δυνάμεις κοπής. Οι κατεργασίες διάτρησης απαιτούν την πλήρη βύθιση του εργαλείου, αντί να λειτουργούν με την επιφάνεια ή την περιφέρειά τους, όπως στην περίπτωση του φραιζαρίσματος προσώπου. Επιπλέον, η ροή των αποβλίττων δημιουργεί σημαντική τριβή μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου. Αυτές οι δυνάμεις τριβής μπορούν να αλλάξουν σημαντικά τη δυναμική του συστήματος και μπορούν να προκαλέσουν θραύση στο κοπτικό εργαλείο. Έχει προσδιοριστεί ότι κονδύλια με διάμετρο μικρότερη των 3 mm έχουν την τάση να αστοχούν λόγω θραύσης, ενώ κονδύλια μεγαλύτερης διαμέτρου αστοχούν λόγω των μεγάλων επιπέδων φθοράς [30].



Σχήμα 2.5 : Κινηματική της διάτρησης και είδη οπών

Εργασίες που έγιναν στο [31] περιλαμβάνουν τη συλλογή των σημάτων ακουστικών εκπομπών κατά τη διάρκεια κατεργασιών διάτρησης. Διαπιστώθηκε ότι καθώς αυξάνεται η

φθορά, η ενέργεια του σήματος ακουστικής εκπομπής αυξάνεται κι αυτή. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν διάφορες πηγές ακουστικών εκπομπών (προσκόλληση αποβλίπτων, θραύση) και ότι είναι δύσκολο να καθοριστεί αποτελεσματικά σε ποιές ειδικές φάσεις της διάτρησης παράγεται η μεγαλύτερη φθορά.

Όπως και στην περίπτωση της τórνευσης, εργασία για την παρακολούθηση των δυνάμεων κοπής έχει γίνει και στην περίπτωση της διάτρησης. Όπως συμβαίνει με τις λοιπές κατεργασίες, οι δυνάμεις σε ένα εργαλείο διάτρησης αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου της κατεργασίας και οι κοπτικές ακμές του αμβλύνονται. Είναι σύνηθες να μετράται μόνο η αξονική συνιστώσα της δύναμης για την εποπτεία των συνθηκών κοπής στη διάτρηση [32], αν και έχει πραγματοποιηθεί έρευνα για τη χρήση όλων των δυνάμεων της διάτρησης ταυτόχρονα [33].

Οι πιο συχνά παρακολουθούμενες μεταβλητές κατά την κατεργασία της διάτρησης είναι η ροπή, η πρόωση και η ταχύτητα της κοπής. Η πρακτική της μέτρησης των δυνάμεων κοπής είναι κοινή σε όλους τους τύπους της κατεργασίας, αλλά η χρήση της ροπής είναι μοναδική για την περίπτωση της διάτρησης. Η μέτρηση της ροπής βασίζεται στην παραμόρφωση λόγω στρέψης που υφίσταται η επιφάνεια ενός κυλινδρικού άξονα από ελαστικό υλικό, όταν εφαρμόζεται ροπή σε αυτό τον άξονα. Κατά την εφαρμογή ροπής στον άξονα, προκαλείται συστροφή και επομένως η επιφάνειά του κοπτικού εργαλείου παραμορφώνεται. Η γωνία συστροφής του κυλινδρικού άξονα είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης ροπής και του μήκους του άξονα. Η εποπτεία της ροπής είναι γενικά μία δαπανηρή διαδικασία και λόγω του γεγονότος αυτού σε πληθώρα περιπτώσεων μετράται αντί αυτής το ρεύμα της ατράκτου [34-36].

Η ανάλυση των δονήσεων εφαρμόζεται κατά την κατεργασία της διάτρησης στα [30, 38-40]. Αποδείχτηκε ότι αύξηση της φθοράς κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία οδηγεί σε αύξηση της συχνότητας των δονήσεων, ιδίως στην κατεύθυνση της πρόωσης [30]. Για εργαλεία που τείνουν να αστοχήσουν, τα πλάτη των δονήσεων τείνουν να αυξάνονται ραγδαία. Ο έλεγχος μέσω των δονήσεων παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες. Οι δονήσεις είναι λιγότερο ευαίσθητες σε εξωτερικές διαταραχές απ' ό,τι τα σήματα ακουστικών εκπομπών και έτσι αποτελούν μια πιο ισχυρή μέθοδο ελέγχου για χρήση σε πραγματικά μηχανουργικά περιβάλλοντα [41]. Όπως αναλύθηκε στο [34], συγκριτικά με τα σήματα ακουστικών εκπομπών, οι μηχανικές δονήσεις είναι πιο αποτελεσματικές στον προσδιορισμό της φθοράς/θραύσης. Σε δοκιμές με κονδύλια μικρής διαμέτρου (της τάξης των 1-3 mm), σήματα δόνησης περασμένα από ζωνοπερατά φίλτρα, βρέθηκαν να είναι πιο κατάλληλα τόσο για ανίχνευση φθοράς όσο και για ανίχνευση θραύσης, από τις μετρήσεις των δυνάμεων. Έτσι, γίνεται εμφανές ότι τα σήματα των δονήσεων είναι αρκετά αποτελεσματικά για τον προσδιορισμό της φθοράς, αλλά συχνά απαιτούν κάποια προχωρημένη μέθοδο επεξεργασίας ή συνδυαστική χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Η RMS τιμή οποιουδήποτε σήματος που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, μπορεί να μην είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την επίβλεψη των επιπέδων φθοράς ή τον εντοπισμό θραύσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η RMS τιμή περιέχει συνδυασμό ενέργειας από το καθαρό σήμα και από το θόρυβο. Στην περίπτωση των δονήσεων και της παρακολούθησης σημάτων ακουστικών/υπερηχητικών εκπομπών, η συνιστώσα του θορύβου μπορεί να είναι σημαντική. Συγκρινόμενη με άλλες στατιστικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της αριθμητικής μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης, της κύρτωσης, της λοξότητας, διαπιστώθηκε ότι η RMS τιμή δεν δίνει καλύτερα αποτελέσματα, αλλά πάντα βρισκόταν μεταξύ των κορυφαίων τεσσάρων [34]. Αυτό το εύρημα σε συνδυασμό με την απλότητα του υπολογισμού της, διευκρινίζει γιατί η RMS τιμή των συλλεγόμενων σημάτων εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως, κατά την κατεργασία της διάτρησης.

Διάφοροι τύποι αυτό-οργανωμένων δικτύων και παράλληλων τεχνητών νευρωνικών δικτύων, έχουν αρκετά καλές προοπτικές για την παρακολούθηση των επιπέδων της φθοράς, κατά την κατεργασία της διάτρησης. Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για να προσαρμόσει τα κατώφλια της αναγνώρισης προτύπων στο [44]. Ένα αυτό-οργανωμένο νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται για τη διάγνωση της φθοράς, χρησιμοποιώντας τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier για την εξαγωγή χαρακτηριστικών τόσο σε σήματα δύναμης όσο και σε σήματα ροπής στο [45]. Ένας άλλος τύπος νευρωνικού δικτύου, ονομαζόμενος περιορισμένης ενέργειας Coulomb, χρησιμοποιείται για να κατηγοριοποιήσει τα σήματα σε πραγματικό χρόνο [46]. Χρησιμοποιείται για αναγνώριση προτύπων και μπορεί να δημιουργήσει νέες κλάσεις, όταν αντιμετωπίζει ένα πρότυπο για το οποίο δεν έχει εκπαιδευτεί. Αυτή η δυνατότητα προσαρμογής είναι πολλά υποσχόμενη και δίδει ακρίβεια της τάξης του 90%.

2.1.4 Γενικές παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

Με βάση τις πληροφορίες που παρουσιάστηκαν, είναι δυνατό να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα σχετικά με τις μεθόδους παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, σε διάφορες μηχανουργικές κατεργασίες. Μια εμφανής γενική τάση είναι να επωφεληθούν τα συστήματα από την τεχνολογία νέων αισθητήρων. Η βιβλιογραφία που μελετήθηκε, έδειξε ότι οι διαθέσιμοι εμπορικοί αισθητήρες, είναι κατάλληλοι για την εξαγωγή σημαντικής πληροφορίας σχετικά με τη δυναμική μιας κατεργασίας. Δυνάμεις, ροπές, δονήσεις, σήματα ακουστικών και υπερηχητικών εκπομπών μπορούν να αποκτηθούν και αναλυθούν τόσο offline όσο και online. Έτσι, οι πόροι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα με προηγμένες μεθόδους στατιστικής επεξεργασίας και επεξεργασίας σήματος πάνω στα δεδομένα που έχουν ήδη συλλεχθεί. Η χρήση της δύναμης της ατράκτου προσελκύει περίπου την ίδια ποσότητα ενδιαφέροντος σε κάθε τομέα, αν και υπάρχει λιγότερο ενδιαφέρον σε αυτήν την προσέγγιση από τη χρήση δυνάμεων κοπής ή δονήσεων. Η χρήση όμως, του ρεύματος, συνεπώς της ισχύος και της ροπής, δίνουν περισσότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα όπως φαίνεται στα [47,48].

Από τη βιβλιογραφία, έγινε εμφανές ότι η έρευνα που ασχολείται με την τεχνητή νοημοσύνη, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τα συστήματα ασαφούς λογικής, εφαρμόζεται με επιτυχία για όλους τους τύπους των κατεργασιών. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα παρέχουν μια εξαιρετική μαθησιακή ικανότητα για ένα σύστημα και ως εκ τούτου, φαίνεται ότι προσφέρουν αρκετές δυνατότητες για διαδεδομένη χρήση. Τα κύρια μειονεκτήματα των τεχνικών αυτών, συμπεριλαμβάνουν την ευαισθησία σε πολλές παραμέτρους της κοπής και το γεγονός ότι τα περισσότερα από αυτά απαιτούν σημαντική εκπαίδευση για να χρησιμοποιηθούν σωστά. Η εκπαίδευση ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί να γίνουν αρκετές δοκιμαστικές κοπές και για το λόγο αυτό είναι βιώσιμα μόνο σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

Είναι σαφές, ότι όσο πιο ακριβό και περίπλοκο είναι ένα σύστημα, τόσο λιγότερες είναι οι πιθανότητες να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Έτσι, είναι σημαντικό να εξισορροπηθεί η ανάγκη για αποτελεσματική εποπτεία με την ανάγκη για πρακτικά συστήματα, βασισμένα σε φθηνούς, απλούς και αποδοτικούς αισθητήρες και μεθοδολογίες. Η ευκολία της εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης και αναβάθμισης του συστήματος αποτελούν παράγοντες υψίστης σημασίας για την επιτυχία του συστήματος. Αυτοί είναι οι λεγόμενοι περιορισμοί της «βιομηχανικής βιωσιμότητας», περιορισμοί που πρέπει να τηρούνται για να αναπτυχθεί ένα σύστημα σε μεγάλη κλίμακα. Γενικά, το απλούστερο σύστημα, είναι το λιγότερο πιθανό να αποτύχει. Η αξιοπιστία είναι το πιο σημαντικό κριτήριο για ένα τέτοιο σύστημα.

2.2 Άμεσες μέθοδοι ελέγχου φθοράς κοπτικών εργαλείων

Οι άμεσες μέθοδοι μετρούν τη φθορά άμεσα, όπως αυτή αναπτύσσεται, βασισμένες στην οπτική επιθεώρηση ή στην όραση με τη χρήση υπολογιστών (computer vision). Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται μια λεπτομερής αναφορά στα συστήματα παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, τα οποία βασίζονται στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Τα εν λόγω συστήματα αποτελούν φθηνές και ευέλικτες λύσεις στην παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, δεν έρχονται σε επαφή με τα εργαλεία και μπορούν να λειτουργούν και να ελέγχονται εξ' αποστάσεως, κάτι που τα καθιστά αναπόσπαστα τμήματα μη επανδρωμένων συστημάτων παραγωγής. Επιπροσθέτως, οι εικόνες που λαμβάνονται από CCD κάμερες, είναι λιγότερο ευαίσθητες στο θόρυβο του βιομηχανικού περιβάλλοντος, συγκριτικά με τους αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται στις έμμεσες μεθόδους. Ωστόσο υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί για τη χρήση ενός συστήματος μηχανικής όρασης στην παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων κατά τις κατεργασίες κοπής, οι οποίοι έγκεινται στη χρήση ενός κατάλληλου συστήματος φωτισμού και ενός ισχυρού αλγόριθμου ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας για την απομάκρυνση του ανεπιθύμητου θορύβου από την επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και τον ακριβή προσδιορισμό των περιοχών ενδιαφέροντος.

Γενικότερα, ένα σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, αποτελείται από τις βαθμίδες της προεπεξεργασίας, της κατάτμησης, της ανίχνευσης ακμών και της επεξεργασίας της εικόνας, μέσω μαθηματικών-μορφολογικών τελεστών [76]. Η προεπεξεργασία της εικόνας, αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη βελτίωση της οπτικής εμφάνισης μιας εικόνας και την τροποποίησή της με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αποτελεσματικότερη η παραπέρα ανάλυσή της. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του θορύβου, της θάμπωσης (blurring), τη βελτιστοποίηση της αντίθεσης και άλλων χωρικών χαρακτηριστικών των εικόνων. Στο βήμα αυτό, συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνικές φιλτραρίσματος και τεχνικές αύξησης της αντίθεσης της εικόνας. Οι τεχνικές φιλτραρίσματος χωρίζονται σε τεχνικές στο πεδίο του χώρου (spatial domain) και σε τεχνικές στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain). Διακρίνονται επίσης και ως γραμμικές ή μη γραμμικές τεχνικές φιλτραρίσματος. Στο χωρικό επίπεδο μια συνήθης, μη γραμμική τεχνική για την εξομάλυνση της εικόνας αποτελεί η χρήση του median φίλτρου. Το συγκεκριμένο φίλτρο έχει την επιθυμητή ιδιότητα να μην επηρεάζει τις βηματικές συναρτήσεις, καθώς και τις συναρτήσεις κλιμάκωσης. Αντίθετα, επιφέρει εξομάλυνση σε συναρτήσεις όπως ο απλός και ο τριγωνικός παλμός. Φυσικά, το αποτέλεσμα χρήσης του, εξαρτάται από το μέγεθος του παραθύρου που χρησιμοποιείται και τη μορφή της γειτονιάς. Τα χαμηλοπερατά φίλτρα Gauss, χρησιμοποιούνται κατά κόρον, για φιλτράρισμα στο πεδίο της συχνότητας. Συνήθως, οι υψηλές συχνότητες στο φάσμα μιας εικόνας συνεισφέρουν στις λεπτομέρειες και στο διαχωρισμό των ακμών των αντικειμένων, αλλά σχετίζονται και με το θόρυβο, ενώ οι χαμηλές αντιπροσωπεύουν μεγάλες περιοχές αντικειμένων. Έτσι, παράλληλα με την απομάκρυνση του θορύβου, οι ακμές των αντικειμένων γίνονται πιο θολές. Σε αντίθεση με τα χαμηλοπερατά, τα υψηλοπερατά φίλτρα, χρησιμοποιούνται για την όξυνση (sharpening) της εικόνας. Για τη συγκεκριμένη διεργασία, χρησιμοποιείται ευρύτατα το Laplacian, ένα υψηλοπερατό φίλτρο 2^{ας} τάξεως, το οποίο τονίζει τα σημεία γρήγορης μεταβολής της φωτεινότητας. Εξαιτίας του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού, η αξιοπιστία του φίλτρου περιορίζεται όταν εφαρμόζεται σε εικόνες, οι οποίες έχουν αλλοιωθεί από θόρυβο. Για το λόγο αυτό, το Laplacian εφαρμόζεται συχνά σε εικόνες, που έχουν πρώτα εξομαλυνθεί με ανάλογο φίλτρο, όπως για παράδειγμα το Gaussian [83]. Εικόνες χαμηλής αντίθεσης μπορούν να προκύψουν είτε από ανεπαρκή φωτισμό, είτε λόγω της μικρής δυναμικής περιοχής του οπτικού αισθητήρα, είτε και λόγω λανθασμένης ρύθμισης των παραμέτρων λήψης των εικόνων, όπως για παράδειγμα η λανθασμένη ρύθμιση του διαφράγματος κατά τη διάρκεια της φωτογράφισης. Η γενική τεχνική της αύξησης της αντίθεσης σε μια ψηφιακή εικόνα έχει ως στόχο την αύξηση της δυναμικής περιοχής των φωτεινότητων ενδιαφέροντος. Υπάρχουν αρκετές συναρτήσεις μετασχηματισμού, οι οποίες αυξάνουν την αντίθεση σε προκαθορισμένες περιοχές φωτεινότητων. Η εξισορρόπηση

ιστογράμματος αποτελεί μια τέτοια τεχνική. Μετασχηματίζει τις γκρι φωτεινότητες μια εικόνας, έτσι ώστε να κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλη την κλίμακα φωτεινότητων, αυξάνοντας έτσι την απόσταση μεταξύ τους. Η εικόνα που προκύπτει με το συγκεκριμένο μετασχηματισμό είναι αυξημένης αντίθεσης συγκριτικά με την αρχική. Στις μεθόδους παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων κατά τις κατεργασίες κοπής, η προεπεξεργασία αποτελεί ζωτικής σημασίας διεργασία για την επεξεργασία της ληφθείσας εικόνας, διότι είναι πιθανόν να υπάρχει αρκετός θόρυβος πάνω στα κοπτικά εργαλεία λόγω αντανάκλασεων, σκόνης, υγρών κοπής, προσκολλημένων αποβλίπτων κ.α.

Μετά την προεπεξεργασία, ακολουθούν οι διαδικασίες της κατάτμησης της εικόνας και της ανίχνευσης των ακμών, μιας και ο προσδιορισμός των περιοχών ή των αντικειμένων που περιέχει μια εικόνα αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την παραπέρα επεξεργασία, ανάλυση ή αναγνώριση. Συνήθως για την ανάπτυξη και την επιλογή μιας τεχνικής κατάτμησης χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες της ασυνέχειας (discontinuity) και ομοιότητας (similarity). Με τον έλεγχο της ασυνέχειας εξετάζεται η απότομη μεταβολή στις τιμές των εικονοστοιχείων. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να προσδιοριστούν απομονωμένα σημεία, καμπύλες και ακμές. Ο έλεγχος της ομοιότητας ως προς ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά οδηγεί σε τεχνικές τμηματοποίησης, όπως η κατωφλίωση (thresholding) και η ανάπτυξη περιοχών (region growing). Γενικά, για την τμηματοποίηση μιας εικόνας φθοράς, χρησιμοποιούνται τεχνικές κατωφλίωσης και πολυκατωφλίωσης, για να διαχωριστεί η ζώνη φθοράς από την άφθαρτη περιοχή του κοπτικού εργαλείου και από το φόντο. Η πιο συνηθισμένη τεχνική κατωφλίωσης, σε εικόνες φθοράς, είναι η μέθοδος του Otsu. Το κριτήριο, το οποίο χρησιμοποιείται στη μέθοδο του Otsu για τον προσδιορισμό του βέλτιστου κατωφλίου είναι η μεγιστοποίηση της διαχωριστικότητας, μεταξύ των σκοτεινών και των φωτεινών περιοχών. Με άλλα λόγια, το βέλτιστο κατώφλι μεγιστοποιεί τη διακύμανση μεταξύ των επιπέδων γκρι των δύο τελικών κλάσεων και ελαχιστοποιεί τη διακύμανση μεταξύ των επιπέδων της ίδιας κλάσης [79,82].

Η ανίχνευση των ακμών είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, διότι με τις ακμές μπορούν να περιγραφούν, να προσδιοριστούν και να αναγνωριστούν αντικείμενα που περιέχονται σε ψηφιακές εικόνες. Ως ακμή μπορεί να θεωρηθεί μια καμπύλη, στις δύο πλευρές της οποίας υπάρχουν σημαντικές διαφορές που αφορούν τις εντάσεις φωτεινότητας ή ακόμα ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά χώρου. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να αφορούν την πυκνότητα της εικόνας, την υφή και κυρίως τις αλλαγές στην κατανομή των επιπέδων του γκρι. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει ακόμα κάποιο γενικό μαθηματικό μοντέλο που να καθορίζει επακριβώς τις ακμές. Διαφορετικές προσεγγίσεις καταλήγουν σε διαφορετικές ανιχνεύσεις των ακμών. Κάθε εφαρμογή μπορεί να απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένης τεχνικής ανίχνευσης ακμών. Οι τελεστές Roberts, Sobel και Prewitt είναι μερικοί από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους ανιχνευτές ακμών πρώτης τάξεως, για τον αυτόματο εντοπισμό της ζώνης φθοράς σε κοπτικά εργαλεία. Ο αλγόριθμος εξαγωγής ακμών του Canny, προτάθηκε το 1986 από τον J.F.Canny και θεωρείται από τους πιο ισχυρούς αλγορίθμους ανίχνευσης ακμών, λόγω της ικανότητάς του να ανιχνεύει τις ακμές όταν αυτές πραγματικά υπάρχουν και στη σωστή χωρικά θέση [81]. Ο αλγόριθμος φιλτράρει αρχικά την εικόνα εισόδου, με ένα Gaussian φίλτρο μηδενικής μέσης τιμής και καθορισμένης τυπικής απόκλισης σ . Το φιλτράρισμα γίνεται σε δύο βήματα, πρώτα ως προς τον άξονα x και κατόπιν ως προς τον άξονα y . Μετά την απομάκρυνση του θορύβου, υπολογίζεται η κλίση της φωτεινότητας με χρήση масκών Sobel. Κατά το τρίτο βήμα του αλγορίθμου, εφαρμόζεται μια κατωφλίωση στην κλίση της φωτεινότητας, για να δοθεί έμφαση στις μέγιστες τιμές της πρώτης παραγώγου της εικόνας, που αντιστοιχούν στις ακμές (καταστολή μη-μεγίστων τιμών). Τέλος, εφαρμόζεται η κατωφλίωση υστέρησης και προκύπτει μια εικόνα από συνεχείς και λεπτές ακμές. Η μέθοδος του Canny, λοιπόν, αποτελεί ίσως την πιο ισχυρή και ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανίχνευσης ακμών, γι' αυτό και προτιμάται από τους απλούς ανιχνευτές ακμών πρώτης τάξεως. Όμως έχει ορισμένες μεταβλητές που πρέπει να ορισθούν, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση: το μέγεθος του παραθύρου του Gaussian

φίλτρου, η τυπική απόκλιση και τα κατώφλια T_1 και T_2 για την κατωφλίωση υστέρησης.

Το επόμενο κατά σειρά βήμα έγκειται στην επεξεργασία της εικόνας, που λαμβάνεται μετά την κατάτμηση ή μετά την ανίχνευση ακμών, μέσω μαθηματικών μορφολογικών τελεστών. Η μαθηματική μορφολογία αναφέρεται στη μελέτη της γεωμετρίας, της τοπολογίας και της μορφής των αντικειμένων. Αφορά συγκεκριμένες πράξεις, όπου μια εικόνα αλληλεπιδρά με ένα δομικό στοιχείο και μετατρέπεται σε μια απλοποιημένη και λειτουργική μορφή, διατηρώντας τα βασικά χαρακτηριστικά της μορφής της. Στοχεύει, κυρίως στη βελτίωση της δομής των αντικειμένων (φιλτράρισμα θορύβου, απλοποίηση των αντικειμένων, λείανση/όξυνση των περιγραμμάτων) και στην ποσοτική περιγραφή των αντικειμένων (χαρακτηριστικά εμβαδού, περιμέτρου). Τα μονοδιάστατα μορφολογικά φίλτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο είδος μορφολογίας έχουν την ίδια συμπεριφορά με τα φίλτρα μέγιστης ή ελάχιστης τιμής. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούν επιπλέον ένα σήμα-συνάρτηση, μεγέθους όσο και το μέγεθος της γειτονιάς που παρατηρείται. Το σήμα αυτό καλείται δομικό στοιχείο (structuring element). Το δομικό στοιχείο μπορεί να είναι ένας οποιοσδήποτε πίνακας, μικρότερων διαστάσεων από την αρχική εικόνα, ο οποίος περιλαμβάνει μηδενικά και άσσους, τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα γεωμετρικό σχήμα. Οι περισσότερες μορφολογικές πράξεις μπορούν να οριστούν χρησιμοποιώντας τις δύο βασικές μορφολογικές πράξεις, οι οποίες είναι η διάβρωση (erosion) και η διαστολή (dilation). Τελικά, μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας προκύπτει ένα ενιαίο μορφολογικό στοιχείο, που σκιαγραφεί πλήρως την περιοχή ενδιαφέροντος και από το οποίο μπορούν να εξαχθούν και να υπολογιστούν τα επιθυμητά μεγέθη [82].

2.2.1 Σημαντικότερες διεθνείς ευρενητικές εργασίες, βασισμένες στην Ψ.Ε.Ε.

Μια από τις πιο πρώιμες προσπάθειες αυτοματοποιημένης άμεσης μέτρησης της φθοράς κοπτικών εργαλείων έγινε από τους Jeon και Kim [58], οι οποίοι πρότειναν μια in-situ οπτοηλεκτρονική μέθοδο. Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο, μια δέσμη laser He-Ne προσέκρουε στην επιφάνεια του υπό εξέταση κοπτικού εργαλείου, συνεπώς υπήρχε αντανάκλαση φωτός μόνο από τη ζώνη φθοράς. Με τον τρόπο αυτό, μόνο η συγκεκριμένη περιοχή γίνονταν ορατή από τη Vidicon κάμερα. Στη συνέχεια, αφού ψηφιοποιήθηκε η ληφθείσα εικόνα, επεξεργάστηκε μέσω μιας σειράς τεχνικών (καθολική κατωφλίωση, αφαίρεση του θορύβου μέσω εξισορρόπησης ιστογράμματος, εντοπισμός του περιγράμματος της φθοράς, εξομάλυνση του περιγράμματος) με σκοπό την απομόνωση και τη μέτρηση της ζώνης φθοράς.

Ο Kurada και ο Bradley [59] χρησιμοποίησαν δύο οδηγούς οπτικών ινών για να πετύχουν ικανοποιητική αντίθεση μεταξύ της φθαρμένης και της άφθαρτης περιοχής του κοπτικού εργαλείου και έλαβαν τις εικόνες φθοράς μέσω μιας CCD κάμερας. Αφού απομάκρυναν το θόρυβο λόγω κατοπτρικών ανακλάσεων, με χρήση ενός 5×5 median φίλτρου, εφάρμοσαν τόσο τελεστές ανίχνευσης ακμών, όσο και τελεστές υψής για την κατάτμηση της εικόνας. Οι πρώτοι (Sobel/Frei-Chen) παρήγαγαν αποτελέσματα με φτωχή διακριτοποίηση, μεταξύ της ζώνης φθοράς και της άφθαρτης περιοχής του κοπτικού εργαλείου. Όσο αφορά τους δεύτερους, έδωσαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα και ιδιαίτερα ο τελεστής της διακύμανσης (variance). Στη συνέχεια, δυαδικοποίησαν την εικόνα με χρήση καθολικού κατωφλίου, περιέγραψαν το όριο της περιοχής της φθοράς, μέσω τεχνικών επεξεργασίας της δυαδικής εικόνας και εξήγαγαν τις μετρήσεις από το ενιαίο τελικό μορφολογικό στοιχείο. Η χρήση των τελεστών υψής έδωσε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα κατάτμησης από προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες, οι οποίες εφήρμοζαν αποκλειστικά τεχνικές καθολικής κατωφλίωσης και οι εξαγόμενες μέσω πειραμάτων παράμετροι περιέγραψαν ικανοποιητικά το ρυθμό εξέλιξης του φαινομένου της φθοράς.

Ο Weis [60] έλαβε εικόνες φθοράς από ένθετα πλακίδια τόννευσης, χωρίς να τα

αποδεσμεύσει από την εργαλειομηχανή. Με τη βοήθεια ενός υπέρυθρου φίλτρου, η περιοχή της φθοράς έγινε περισσότερη ευδιάκριτη και η περιοχή του φόντου πιο θολή. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν τεχνικές επεξεργασίας δυαδικών εικόνων και μορφολογικοί τελεστές για την απομόνωση και τη μέτρηση της περιοχής της φθοράς. Τα αποτελέσματα της μεθόδου επιβεβαιώθηκαν μέσω μετρήσεων, με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου. Στη συγκεκριμένη έρευνα, δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στο σύστημα φωτισμού για την on-line λήψη της εικόνας φθοράς, απ' ό,τι στις μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Ο Sortino [61] ανέπτυξε ένα λογισμικό μέτρησης της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας (WEARMON), χρησιμοποιώντας μια νέα μέθοδο ανίχνευσης ακμών από μια έγχρωμη εικόνα. Αφού ανιχνεύθηκε η πάνω και η κάτω γειτονιά κάθε pixel, υπολογίστηκε η μεσαία τιμή και η τυπική κάθε γειτονιάς, για κάθε θεμελιώδες χρώμα (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε μια στατιστική σύγκριση ανάμεσα στις γειτονιές κάθε pixel και για κάθε θεμελιώδες χρώμα υπολογίστηκε ένας δείκτης (D_{edge}^c). Οι τρεις δείκτες αθροίστηκαν, ώστε να προκύψει ο ολικός δείκτης (D_{edge}). Όσο μεγαλύτερη ήταν η τιμή του ολικού δείκτη, τόσο μεγαλύτερη ήταν η πιθανότητα ύπαρξης ακμής, στο συγκεκριμένο pixel. Σε αντίθεση με τις συνήθεις τεχνικές ανίχνευσης ακμών (Sobel, Prewitt, κ.α.), η συγκεκριμένη μέθοδος δεν εντόπιζε ως ακμές, μικρές, μεμονωμένες, φωτεινές κηλίδες, γεγονός εξαιρετικά σημαντικό, διότι η ζώνη φθοράς του κοπτικού εργαλείου παρουσίαζε μεγάλη ετερογένεια ως προς το φωτισμό. Με το WEARMON, μετρήθηκε η φθορά σε περισσότερα από 150 κοπτικά εργαλεία τόννευσης και φραιζαρίσματος προσώπου. Το συγκεκριμένο λογισμικό θεωρήθηκε αρκετά αξιόπιστο, αφού τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιβεβαιώθηκαν με χρήση οπτικού μικροσκοπίου. Όμως, λόγω του πακτωμένου πλάτους των εικονοστοιχείων (10 μm), η ακρίβεια της μέτρησης μειώνονταν σε μεγάλο βαθμό όταν η ζώνη φθοράς ήταν αρκετά λεπτή και ως εκ τούτου, η διακύμανση του σφάλματος μέτρησης στις συγκεκριμένες περιπτώσεις ήταν αρκετά υψηλή.

Ο Wang και οι συνεργάτες [62] του ανέπτυξαν ένα αυτοματοποιημένο σύστημα για τη λήψη και την επεξεργασία διαδοχικών εικόνων κινουμένων ένθετων πλακιδίων κατά την κατεργασία του φραιζαρίσματος, με χρήση μιας τεχνικής συσχέτισης διαδοχικών ζευγών εικόνων. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος εξαρτιόταν ισχυρά από μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου και δεν ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για μέτρηση της φθοράς σε κοπτικά πλακίδια καρβιδίων με επικάλυψη, λόγω της αλληλεπίδρασης του υλικού της επικάλυψης με το φως. Για να υπερνικήσουν τον περιορισμό του κατωφλίου, ανέπτυξαν μια διαφορετική μέθοδο, βασισμένη στην αμεταβλητότητα των ροπών, για την ακριβή επιλογή του κάτω τμήματος της ζώνης φθοράς, με μέγιστο σφάλμα 15 mm και ελάχιστο 3 mm, συγκριτικά με τη μέτρηση που λαμβάνονταν από το μικροσκόπιο.

Οι Fadare και Oni [63] έλαβαν εικόνες φθοράς μη επικαλυπτόμενων πλακιδίων καρβιδίου τόννευσης σε ένα σκοτεινό θάλαμο, με τη βοήθεια δύο φωτεινών πηγών πυρακτώσεως. Στη συνέχεια, έκαναν χρήση του φίλτρου Wiener για τη μείωση της θόλωσης των αρχικών εικόνων και σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο εξαγωγής ακμών του Canny, διαχώρισαν την περιοχή φθοράς από την υπόλοιπη περιοχή του κοπτικού εργαλείου. Τέλος, αφού εξήγαγαν δέκα περιγραφείς της φθοράς (μήκος, πλάτος, εμβαδόν, προσανατολισμός κ.α.), διαπίστωσαν ότι ένας γενικός δείκτης φθοράς του εργαλείου (tool wear index), ο οποίος συσχέτιζε τέσσερις από τους περιγραφείς, αποτέλεσε μια πολύ αξιόπιστη ένδειξη των εκάστοτε επιπέδων της φθοράς. Η μέγιστη απόλυτη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων του συστήματος και των ανάλογων μετρήσεων με τη βοήθεια του μικροσκοπίου ήταν της τάξεως του 3%. Ωστόσο, καλύτερες συνθήκες φωτισμού, όπως για παράδειγμα η χρήση ενός δακτυλίου LED, αποτελούσαν απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Ο Sahabi και ο Ratnam [64] δημιούργησαν ένα online σύστημα για τη μέτρηση της φθοράς της κοπτικής ακμής πλακιδίων τόννευσης. Χρησιμοποίησαν ένα median αλλά και

ένα Wiener φίλτρο για την απομάκρυνση του θορύβου της ληφθείσας εικόνας, μορφολογικούς τελεστές για την περαιτέρω βελτίωσή της και τη μέθοδο κατωφλίωσης του Otsu, για τον διαχωρισμό του κοπτικού εργαλείου από την υπόλοιπη περιοχή της εικόνας. Αφού εντόπισαν το προφίλ της κοπτικής ακμής του φθαρμένου κοπτικού εργαλείου, το αφαίρεσαν απ' το προφίλ της κοπτικής ακμής του υγιούς εργαλείου στο πολικό σύστημα συντεταγμένων και υπολόγισαν το πλάτος της φθοράς της κοπτικής ακμής. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν κατόρθωσε να ποσοτικοποιήσει το πλάτος της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμετρικές πληροφορίες της κοπτικής ακμής σε συνδυασμό με την τραχύτητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου, ώστε να καθίσταται δυνατή η μέτρηση της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας, σε μια ζώνη πλησίον της κοπτικής ακμής. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των μετρήσεων που λήφθηκαν μέσω του προφίλ της κοπτικής ακμής του εργαλείου και των αναλόγων που λήφθηκαν με τη βοήθεια του μικροσκοπίου ήταν 7.7%, ενώ το μέσο σφάλμα μεταξύ των μετρήσεων που λήφθηκαν μέσω του προφίλ της τραχύτητας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και των αναλόγων που λήφθηκαν με τη βοήθεια του μικροσκοπίου ήταν 5.5%. Ωστόσο, η προτεινόμενη μέθοδος δεν μπόρεσε να εφαρμοστεί σε κατεργασίες υψηλής ακρίβειας με χαμηλή πρόωση.

Ο Kim και οι συνεργάτες [65], χρησιμοποίησαν μια CCD κάμερα σε συνδυασμό με ένα σύστημα φωτισμού οδηγούμενο από οπτικές ίνες για να φωτογραφίσουν την πλευρική επιφάνεια ενός τετράφτερου κονδυλίου. Διενεργήθηκαν αρκετά πειράματα για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών φωτισμού και βάση αυτών κατασκευάστηκε μια διάταξη, με σκοπό τη λήψη της ευκρινών εικόνων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος ήταν περισσότερο προσανατολισμένη ως προς το οπτικό σύστημα, απ' ότι στις μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Ο Kerr και οι συνεργάτες του [66] μέτρησαν άμεσα το μέγιστο πλάτος της φθοράς, με τη βοήθεια λογισμικού ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (ImagePro Plus) και συσχέτισαν τη συμπεριφορά της σε σταθερές συνθήκες κοπής, με συγκεκριμένες παραμέτρους της εικόνας, τόσο κατά την κατεργασία της τórνευσης, όσο και κατά την κατεργασία του φραιζαρίσματος. Αρχικά, χρησιμοποίησαν μη γραμμικούς τελεστές, όπως η διακύμανση (variance), οι οποίοι φάνηκαν αρκετά επιτυχημένοι ως προς το διαχωρισμό της ζώνης φθοράς από την υπόλοιπη εικόνα. Ακολούθησε η κατωφλίωση της συγκεκριμένης εικόνας και καταμετρήθηκαν τα στοιχεία που είχαν τιμή μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή του κατωφλίου T, με σκοπό να υπάρξει μια ένδειξη του μεγέθους της φθοράς. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιβεβαίωσε τα αποτελέσματα της εργασίας των Kurada και Bradley, όμως ήταν ευαίσθητη σε αλλαγές των συνθηκών φωτισμού, καθώς και σε θόρυβο που πιθανόν να ευρίσκονταν στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου (σκόνη, προσκολλημένα απόβλητα, κ.α.). Στη συνέχεια, μελέτησαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά από τον πίνακα συνεμφάνισης, όμως η τεχνική αυτή δεν είχε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά δε σχετίζονταν άμεσα με τη φθορά, χωρίς να διαχωριστεί πρώτα η ζώνη φθοράς από την υπόλοιπη εικόνα. Μόνο η αδράνεια και η εντροπία έδωσαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα, αλλά σε συγκεκριμένη μόνο κατεύθυνση αναζήτησης του πίνακα συνεμφάνισης. Κατόπιν, υπολογίστηκαν διάφορες παράμετροι μέσω FFT ανάλυσης, μέθοδος η οποία έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς είναι ανεξάρτητη του φωτισμού και της μετατόπισης. Τέλος, υλοποιήθηκε μια μελέτη των fractal ιδιοτήτων των εικόνων φθοράς, η οποία υπέδειξε την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ της διάστασης των fractal, της ανισοτροπικής επιφάνειας και των επιπέδων της φθοράς. Ειδικότερα, κατά την κατεργασία του φραιζαρίσματος, η διάσταση των fractal παρουσίασε μια σχεδόν γραμμική σχέση με τη φθορά.

Ο Stemmer και οι συνεργάτες του [67] εφάρμοσαν ένα νευρωνικό δίκτυο για την ταξινόμηση της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας και της θραύσης του κοπτικού εργαλείου, με σφάλμα της τάξεως του 4%, χρησιμοποιώντας μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Παρατήρησαν, μέσω του συστήματος μηχανικής όρασης, ότι η

φθορά της πλευρικής επιφάνειας παρουσίαζε οξύτερη και φωτεινότερη υφή, συγκριτικά με τη θραύση. Με βάση τη συγκεκριμένη παρατήρηση, ταξινόμησαν τα είδη της φθοράς και μέτρησαν άμεσα το εμβαδόν, το μέσο και το μέγιστο πλάτος της. Όσον αφορά τις μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, χρησιμοποίησαν τον ανιχνευτή ακμών Canny, γραμμική παρεμβολή, τεχνικές επεξεργασίας δυαδικών εικόνων και τον αλγόριθμο ενεργών περιγραμμάτων. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν υλοποιήθηκε ταξινόμηση περισσοτέρων μορφών φθοράς, όπως για παράδειγμα η φθορά της κοπτικής ακμής ή η φθορά κρατήρα.

Ο Alegre και οι συνεργάτες [68] του υπολόγισαν το μέσο και το μέγιστο πλάτος της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας, βασιζόμενοι στην υπογραφή του περιγράμματος της δυαδικής εικόνας. Ως υπογραφή του περιγράμματος ορίζεται ένα διάνυσμα, το οποίο περιέχει τις αποστάσεις των σημείων του περιγράμματος από το κέντρο της δομής που περιγράφει τη ζώνη φθοράς. Μετά την επιλογή 40 και 100 στοιχείων περιγράμματος, τα επίπεδα της φθοράς ταξινομήθηκαν σε χαμηλά και υψηλά, αρχικά με τη μέθοδο του k-Nearest Neighbor (k-NN) και στη συνέχεια με ένα MLP (Multi-Layer Perceptron) νευρωνικό δίκτυο. Η χρήση του MLP δικτύου, κατέληξε σε καλύτερη ταξινόμηση, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο το μέσο πλάτος της φθοράς και υπογραφή περιγράμματος με 40 δείγματα. Ωστόσο, η ταξινόμηση θεωρήθηκε φτωχή, διότι υλοποιήθηκε με βάση δύο κλάσεις.

Οι Liang και Chiu [70] εισήγαγαν μια νέα μέτρηση της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας σε κονδύλια με πολλαπλά στρώματα επικάλυψης. Αφού ανίχνευσαν τις ισχυρές ακμές της περιοχής της φθοράς με τη βοήθεια γεωμετρικών ροπών εφάρμοσαν μια τεχνική εξομάλυνσης, η οποία έκανε χρήση των καμπυλών B-Spline. Στη συνέχεια, χρησιμοποίησαν ένα Gaussian φίλτρο για την εξομάλυνση της καμπύλης και μια στατιστική διαδικασία επιλογής του κατάλληλου κατωφλίου για την αποτελεσματική εξαγωγή της ζώνης φθοράς, ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια το μέγιστο πλάτος της.

Ο Otieno και οι συνεργάτες του [71] εντόπισαν τη φθορά της ελεύθερης επιφάνειας δίπτερων κονδυλίων, διαμέτρου 0.25, 0.625 και 1 mm, με χρήση μεθόδων της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και πιο συγκεκριμένα με φιλτράρισμα και κατωφλίωση, μέσω του τελεστή XOR. Στη συγκεκριμένη εργασία δε διεξήχθη ανίχνευση ακμών, ποσοτικοποίηση των επιπέδων της φθοράς ή ταξινόμηση του τύπου της φθοράς.

Ο Inoue και οι συνεργάτες του [72] έκαναν μια γενικευμένη προσέγγιση ανίχνευσης φθοράς σε ραβδόμορφα κοπτικά εργαλεία, μέσω τελεστών ανίχνευσης ακμών (Prewitt) και εξήγαγαν παραμέτρους της εικόνας, αφού υλοποίησαν ένα διακριτό μετασχηματισμό Fourier. Ωστόσο, πολλές ατέλειες των εργαλείων, δε μπορούσαν να ανιχνευτούν από το συγκεκριμένο σύστημα μέτρησης.

Ο Duan και οι συνεργάτες του [74], εφάρμοσαν μια τεχνική βασισμένη στη μέθοδο των level-set, για την ακριβή τμηματοποίηση εικόνων από εργαλεία μικροδιάτρησης, αλλά και μια τεχνική καθολικής κατωφλίωσης. Στη συνέχεια, συγχώνευσαν τα αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών, με σκοπό τον ακριβή εντοπισμό της περιοχής της φθοράς. Ωστόσο, πρότειναν μια μελλοντική επέκταση της μεθόδου για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου, ο οποίος ήταν αρκετά μεγάλος.

Το 2013 στο Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Οργάνωσης Παραγωγής (WZL) του Πανεπιστημίου του Aachen, ο Schmitt και οι συνεργάτες [75] του ανέπτυξαν και προσάρμοσαν στο κέντρο κατεργασίας μια μονάδα φωτισμού, μέσω της οποίας εξαλείφονται οι διαταραχές από πιθανές ανακλάσεις και σκιάσεις στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Ο πλήρης φωτισμός χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο εξαγωγής ακμών του Canny και με μια γραμμική παρεμβολή για τη λεπτομερή ανίχνευση του ορίου της κοπτικής ακμής, ενώ ο πλευρικός φωτισμός χρησιμοποιήθηκε για

έναν πρώιμο διαχωρισμό της ζώνης φθοράς από την υπόλοιπη περιοχή του κοπτικού εργαλείου. Αφού χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της εξισορρόπησης ιστογράμματος για την αύξηση της φωτεινότητας της ζώνης φθοράς στη ληφθείσα εικόνα, ακολούθησε η δυαδικοποίησή της με χρήση καθολικού κατωφλίου και η εφαρμογή μορφολογικών τελεστών για τον περιορισμό του θορύβου της δυαδικής εικόνας. Προκειμένου να επιτευχθεί μια αξιόπιστη επτοπεία των επιπέδων της φθοράς των κοπτικών εργαλείων, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος των ενεργών περιγραμμάτων, για την ακριβή εξαγωγή της περιοχής της φθοράς. Ως ενεργά περιγράμματα θεωρούνται οι παραμετρικές καμπύλες που κινούνται στο επίπεδο της εικόνας, με τέτοιον τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται ένα ενεργειακό συναρτησιακό. Έτσι, με τη βοήθεια ενός λογισμικού με γραφική διεπαφή χρήσης, το οποίο έκανε χρήση των παραπάνω μεθόδων, μετρήθηκε με εξαιρετική ακρίβεια το εμβαδόν, το μέσο και το μέγιστο πλάτος της φθοράς. Παράλληλα, υλοποιήθηκε και ταξινόμηση του τύπου της φθοράς του εκάστοτε κοπτικού εργαλείου, με τη βοήθεια ενός νευρωνικού δικτύου 14 εισόδων (στατιστικά δεδομένα της εικόνας εισόδου και δεδομένα ακμών) και 2 εξόδων (φθορά ελεύθερης επιφάνειας, θραύση). Η ακρίβεια της συγκεκριμένης μεθόδου επαληθεύθηκε με πειράματα φθοράς που διεξήχθησαν σε κοπτικά εργαλεία διαφορετικών γεωμετριών και διαφορετικών υλικού κατασκευής.

Ερευνητής	Φωτισμός	Μέθοδος	Κατεργασία	Παρατηρήσεις
Jeon Kim	He-Ne πηγή laser	Κατωφλίωση, εξισορρόπηση ιστογράμματος, τεχνικές επεξεργασίας δυαδικής εικόνας	Γενικευμένη μέθοδος για ένθετα πλακίδια	Online. Ευαισθησία σε θόρυβο.
Galante Piacentini Ruisi	Διάχυτος φωτισμός	Κατωφλίωση	Τόρνευση	Offline
Oguamana Raafat Taboun	Οπτικές ίνες, λαμπτήρας πυρακτώσεως	Τριπλή κατωφλίωση, μετασχηματισμός Hough, αλγόριθμος ανίχνευσης περιγράμματος Παυλίδη	Τόρνευση	Offline. Μέθοδος ισχυρά εξαρτώμενη από 4 κατώφλια.
Weis	Φωτοδίοδος, φίλτρο υπερύθρου	Μορφολογική διαστολή, κατωφλίωση	Φραιζάρισμα	Δεν αξιολογήθηκε η ακρίβεια της μεθόδου
Kurada Bradley	Οπτικές ίνες	Τελεστές ανίχνευσης ακμών, τελεστές υψής, κατωφλίωση, μορφολογικοί τελεστές	Τόρνευση	Offline
Tauno Lembit	Πηγή μπλε φωτός	Median φίλτρο, τελεστής Roberts, κατωφλίωση	Τόρνευση, φραιζάρισμα	Offline, σφάλμα μέτρησης 8%
Pfeifer Weigers	Δακτύλιος LED	Σύγκριση διαφορετικά φωτισμένων εικόνων για τον εντοπισμό των πραγματικών ακμών	Τόρνευση, φραιζάρισμα	Online
Sortino	-	Median φίλτρο, στατιστική μέθοδος ανίχνευσης ακμών	Γενικευμένη μέθοδος για ένθετα πλακίδια	Offline
Wang Hong Wong	Δέσμη laser, οπτικές ίνες	Median φίλτρο, τελεστής Sobel, μετασχηματισμός Hough, αμεταβλητότητα ροπών	Φραιζάρισμα	Online, μέγιστο σφάλμα μέτρησης 15μm
Sahabi Ratnam	Οπίσθιος φωτισμός	Wiener φίλτρο, κατωφλίωση, αφαίρεση υγιούς και φθαρμένου προφίλ στο πολικό σύστημα συντεταγμένων	Γενικευμένη μέθοδος για ένθετα πλακίδια	Σφάλμα μέτρησης 7% (μέσω κοπτικής ακμής) και 5% (μέσω τραχύτητας). Δύσκολη η εφαρμογή της μεθόδου σε κατεργασίες με χαμηλή πρόωση

Fadare Oni	2 πηγές πυρακτώσεως σε γωνία 45° αναφορικά με το υπό εξέταση δείγμα	Wiener φίλτρο, Canny, συσχετισμός περιγραφένων φθοράς	Γενικευμένη μέθοδος για ένθετα πλακίδια	Μεγάλη ευαισθησία στη διακύμανση του φωτισμού
Kerr Pengilley Garwood	Λευκό φως από φθορίζοντα δακτύλιο, οπτικές ίνες	Χειροκίνητη μέτρηση φθοράς, τελεστές υψής, ανάλυση ιστογράμματος, ανάλυση FFT, fractal	Τόρνευση, διάτρηση	Μη αυτόματη μέτρηση της φθοράς
Stemmer Pavim Adur Deschamps Schmitt Hermes	Δακτύλιος φωτισμού	Canny, γραμμική παρεμβολή, τεχνικές επεξεργασίας δυναμικής εικόνας, μέθοδος ενεργών περιγραμμάτων	Φραιζάρισμα	Ταξινόμηση τύπου φθοράς. Σφάλμα ταξινόμησης της τάξης του 4%. Η μέθοδος δεν εφαρμόστηκε σε πληθώρα κοπτικών εργαλείων
Alegre Rodriguez Barreiro Ruiz	Ρυθμιζόμενη DC πηγή φωτός	Canny, υπογραφή περιγράμματος, k-NN, MPLNN	Γενικευμένη μέθοδος για ένθετα πλακίδια	Σφάλμα ταξινόμησης της τάξης του 5%. Ταξινόμηση επιπέδων φθοράς μόνο σε υψηλά και χαμηλά.
Liang Chiou	Κυκλικός οπίσθιος φωτισμός	Ανίχνευση ακμών με τη βοήθεια γεωμετρικών ροπών, εξομάλυνση με χρήση B-Splines, Gaussian φίλτρο, κατωφλίωση, μορφολογικοί τελεστές	Διάτρηση	Δεν αξιολογήθηκε η ακρίβεια της μεθόδου
Schmitt Cai Pavim	Δακτύλιος LED	Τελεστής Canny, γραμμική παρεμβολή, εξισορρόπηση ιστογράμματος, κατωφλίωση, μορφολογικοί τελεστές, αλγόριθμος ενεργών περιγραμμάτων, νευρωνικό δίκτυο	Φραιζάρισμα	Μεγάλη ακρίβεια μέτρησης, σφάλμα ταξινόμησης της τάξης του 4%. Υλοποιήθηκε ταξινόμηση του τύπου της φθοράς με βάση τα στατιστικά δεδομένα και τα δεδομένα ακμών. Ανάγκη για ταξινόμηση σε περισσότερες κλάσεις

Πίνακας 2.1: Σύνοψη σημαντικότερων διεθνών ερευνητικών εργασιών άμεσης παρακολούθησης της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, οι οποίες βασίζονται στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.

Όπως γίνεται εμφανές από τον Πίνακα 2.1, ο κυριότερος όγκος των μεθόδων που έχουν εφαρμοστεί μέχρι τώρα για την κατάτμηση εικόνων φθοράς στηρίζεται σε τεχνικές καθολικής κατωφλίωσης ή πολυκατωφλίωσης και σε χρήση τελεστών ανίχνευσης ακμών/υψής. Οι συγκεκριμένες τεχνικές στηρίζονται σε μια a priori γνώση του αριθμού των τελικών κλάσεων (clusters) και εκμεταλλεύονται μόνο ένα μέρος της πληροφορίας του πεδίου της εικόνας, καθώς χρησιμοποιούν ως δεδομένο για την ανάλυση, συνήθως μόνο την τιμή της φωτεινότητας των εικονοστοιχείων. Συνεπώς, δεν είναι ικανές να χειριστούν την πολυπλοκότητα ενός πολυδιάστατου χώρου χαρακτηριστικών και συχνά, λόγω της ύπαρξης ανακλάσεων και θορύβου στη ληφθείσα εικόνα, αποτυγχάνουν να δώσουν μια εξαιρετικά ικανοποιητική κατάτμηση. Λόγω των συγκεκριμένων μειονεκτημάτων των παραπάνω τεχνικών κατάτμησης, βάση της παρούσας εργασίας αποτελεί ο αλγόριθμος Mean-Shift, μια μη-παραμετρική τεχνική για την ανάλυση πολυδιάστατων χώρων χαρακτηριστικών, τα πλεονεκτήματά της οποίας αναφέρονται λεπτομερώς στα κεφάλαια που ακολουθούν.

3. Αλγόριθμοι Τμηματοποίησης Εικόνας

Ως κατάτμηση ή τμηματοποίηση, ορίζεται η διαδικασία διαχωρισμού μιας εικόνας σε κατάλληλες περιοχές, με βάση ένα δεδομένο κριτήριο [82]. Για την κατάτμηση των εικόνων έχει αναπτυχθεί πληθώρα τεχνικών, δεν υπάρχει όμως γενική μέθοδος και σταθερές προδιαγραφές, που να καθορίζουν την ποιότητα και την αποτελεσματικότητα των τεχνικών αυτών. Ανάλογα με την εφαρμογή πρέπει να επιλέγεται και η κατάλληλη τεχνική τμηματοποίησης. Ο Haralick και ο Shapiro πρότειναν ότι για να είναι αποδοτική μια μέθοδος τμηματοποίησης πρέπει:

- Οι περιοχές που διαχωρίζει να είναι ομοιόμορφες και ομογενείς σε σχέση με κάποιο χαρακτηριστικό, όπως για παράδειγμα τα επίπεδα του γκρι.
- Το εσωτερικό των περιοχών πρέπει να είναι ομογενές, χωρίς για παράδειγμα πολλές μικρές οπές.
- Οι γειτονικές περιοχές πρέπει να έχουν σαφέστατα διαφορετικές τιμές για το χαρακτηριστικό με βάση το οποίο έγινε ο διαχωρισμός.
- Τα όρια των περιοχών πρέπει να είναι ομαλά και ακριβή.

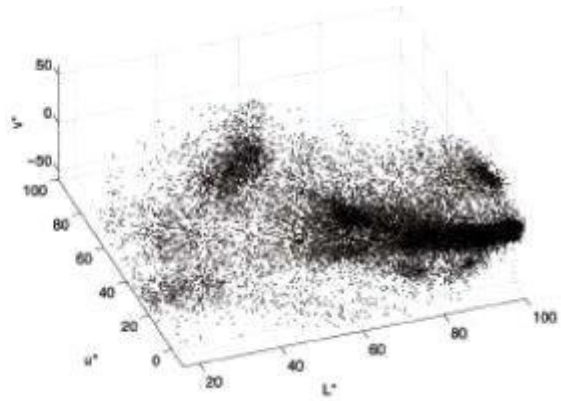
Η ανάλυση που βασίζεται στο χώρο χαρακτηριστικών της εικόνας (feature space) μπορεί να επιτύχει τους στόχους που τέθηκαν παραπάνω. Ο χώρος χαρακτηριστικών είναι μια σχεδίαση της εισόδου, η οποία λαμβάνεται μέσα από την επεξεργασία των δεδομένων σε μικρά υποσύνολα κάθε φορά. Για κάθε υποσύνολο λαμβάνεται μια παραμετρική αναπαράσταση του χαρακτηριστικού ενδιαφέροντος και το αποτέλεσμα απεικονίζεται ως ένα σημείο στον πολυδιάστατο παραμετρικό χώρο. Με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας ολόκληρης της εισόδου, τα σημαντικά χαρακτηριστικά της εικόνας αντιστοιχούν στις πυκνότερες περιοχές του χώρου των χαρακτηριστικών.

Η ανάλυση του χώρου των χαρακτηριστικών εξαρτάται ισχυρά από την εκάστοτε εφαρμογή. Παρόλο που υπάρχει μια πληθώρα δημοσιευμένων τεχνικών ομαδοποίησης (clustering techniques), οι περισσότερες από αυτές δεν επαρκούν για την ανάλυση χώρων χαρακτηριστικών που αντλούνται από πραγματικά δεδομένα. Μέθοδοι, οι οποίες στηρίζονται σε μια *a priori* γνώση του αριθμού των κλάσεων (clusters), συμπεριλαμβανομένων και αυτών που χρησιμοποιούν βελτιστοποίηση ενός γενικού κριτηρίου για να βρουν αυτόν τον αριθμό, καθώς και μέθοδοι, οι οποίες υποθέτουν το ίδιο σχήμα (συνήθως ελλειπτικό) για όλες τις κλάσεις του χώρου, δεν είναι ικανές να χειριστούν την πολυπλοκότητα ενός πραγματικού χώρου χαρακτηριστικών. Στις διεργασίες ανάλυσης μιας εικόνας, τα δεδομένα προς ανάλυση προέρχονται από το πεδίο της εικόνας, δηλαδή τα διανύσματα των χαρακτηριστικών ικανοποιούν επιπλέον χωρικούς περιορισμούς. Για να θεωρηθεί εύρωστη και δυναμική (robust), η ανάλυση του χώρου των χαρακτηριστικών πρέπει να εκμεταλλεύεται πλήρως την πληροφορία του πεδίου της εικόνας. Αρχικά πρέπει να εξαχθούν όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά και μόνο μετά το συγκεκριμένο βήμα προσδιορίζονται οι κλάσεις που περιέχουν τις περιπτώσεις των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών.

Σημαντικά χαρακτηριστικά αντιστοιχούν σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας και για να προσδιοριστούν οι συγκεκριμένες περιοχές πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα παράθυρο αναζήτησης. Ο αριθμός των παραμέτρων που προσδιορίζουν το σχήμα και το μέγεθος του παραθύρου πρέπει να είναι ελάχιστος κι έτσι, όποτε είναι δυνατόν, ο χώρος χαρακτηριστικών πρέπει να είναι ισότροπος. Ένας χώρος είναι ισότροπος αν η απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία είναι ανεξάρτητη της θέσης του ζεύγους των σημείων.



(α)



(β)

Σχήμα 3.1: (α) Μια εικόνα στον $L^*u^*v^*$ χρωματικό χώρο και (β) ο αντίστοιχος χρωματικός χώρος με 110400 σημεία πληροφορίας

Αυθαίρετα δομημένοι χώροι χαρακτηριστικών μπορούν να αναλυθούν μόνο με μη-παραμετρικές μεθόδους μιας και αυτές δε χρησιμοποιούν υποθέσεις. Αναρίθμητες μη-παραμετρικές μέθοδοι ομαδοποίησης περιγράφονται στη βιβλιογραφία και μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κλάσεις: την ιεραρχική ομαδοποίηση και τον υπολογισμό της πυκνότητας. Οι τεχνικές ιεραρχικής ομαδοποίησης είτε συναθροίζουν, είτε διαχωρίζουν τα δεδομένα που βασίζονται σε κάποιο μέτρο προσέγγισης. Οι ιεραρχικές μέθοδοι τείνουν να είναι υπολογιστικά ακριβείς και ο ορισμός σημαντικού κριτηρίου διακοπής (stopping criterion) για τη συγχώνευση ή διαίρεση των δεδομένων δεν είναι ακριβής. Η λογική πίσω από τη μη-παραμετρική προσέγγιση ομαδοποίησης, που βασίζεται στον υπολογισμό πυκνότητας, είναι ότι ο χώρος χαρακτηριστικών μπορεί να θεωρηθεί ως η εμπειρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (p.d.f.) της παραμέτρου που αναπαρίσταται. Έτσι, οι πυκνές περιοχές στο χώρο των χαρακτηριστικών αντιστοιχούν σε τοπικά μέγιστα της p.d.f., δηλαδή στις κορυφές της άγνωστης πυκνότητας. Μόλις καθοριστεί το σημείο της κορυφής, η κλάση που σχετίζεται με αυτό απεικονίζεται βασισμένη στην τοπική δομή του χώρου των χαρακτηριστικών.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας πιθανότητας, υπάρχουν διάφορες μη-παραμετρικές τεχνικές: το πολυδιάστατο ιστόγραμμα, η μέθοδος του «κοντινότερου γείτονα» (nearest neighbor) και ο υπολογισμός με τη χρήση συναρτήσεων πυρήνα. Για χώρους χαρακτηριστικών μεγάλων διαστάσεων, τα πολυδιάστατα ιστογράμματα είναι λιγότερο χρήσιμα λόγω του εκθετικά αυξανόμενου αριθμού των κουτιών (bins) ανάλογα με τη διάσταση του χώρου. Η μέθοδος του κοντινότερου γείτονα είναι επιρρεπής στον τοπικό θόρυβο, γεγονός που καθιστά την ακριβή ανίχνευση των κορυφών δύσκολη. Για μικρά και μεσαία μεγέθη δεδομένων, ο υπολογισμός με τη χρήση συναρτήσεων πυρήνα είναι μια καλή και πρακτική επιλογή: είναι απλή, και για συναρτήσεις πυρήνα που ικανοποιούν κάποιες συνθήκες, ο υπολογισμός είναι ασυμπτωτικά ακριβής και σταθερός ως προς την έννοια του ελαχίστου τετραγώνου και ομοιόμορφα κατανεμημένος ως προς την πιθανότητα.

Η προσέγγιση για την ανίχνευση των κορυφών και την ομαδοποίηση, που προτείνεται στην παρούσα εργασία, βασίζεται στον αλγόριθμο Mean-Shift. Η ιστορία του αλγορίθμου ξεκινάει από τη δημοσίευση των Fukunaga και Hostetler το 1975. Η εν λόγω δημοσίευση δεν έτυχε της προσοχής της επιστημονικής κοινότητας έως το 1995, όταν ο Cheng επανέφερε τον προβληματισμό, γενικεύοντας και κάποια από τα αποτελέσματα όσον αφορά στους πυρήνες των παραθύρων Parzen. Η μεγάλη ώθηση στον αλγόριθμο δόθηκε από τις δημοσιεύσεις του D. Comaniciu [80], όπου ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε προβλήματα μηχανικής όρασης και κυρίως στην κατάτμηση εικόνας και εξομάλυνση με

διατήρηση των ασυνεχειών.

Έστω ένα σύνολο ανεξάρτητων και όμοια κατανεμημένων (i.i.d) παρατηρήσεων στον d -διάστατο χώρο. Το σύνολο αυτό είναι ένα τυχαίο δείγμα από μια άγνωστη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας f , για την οποία δε γίνεται καμία υπόθεση όσον αφορά τη δομή της, πέραν της ομαλότητάς της. Σε ανάλογες περιπτώσεις, η εκτίμηση της f αντιμετωπίζεται με μη-παραμετρικές μεθόδους, όπως οι μέθοδοι των παραθύρων Parzen. Ένα βασικό μειονέκτημα των μη-παραμετρικών μεθόδων εκτίμησης είναι η εκθετική ως προς τη διάσταση του χώρου, πολυπλοκότητα. Ένα δεύτερο είναι η αραιότητα των παρατηρήσεων για μια στιβαρή εκτίμηση της f . Τα παραπάνω προβλήματα είναι γνωστά ως «κατάρα της διάστασης» (curse of dimensionality). Σε πολλές εφαρμογές, ωστόσο, δε δίνεται βάρος τόσο στην εκτίμηση της f , όσο για τον υπολογισμό ορισμένων χαρακτηριστικών της. Στην παρούσα διατριβή, τα χαρακτηριστικά αυτά είναι οι τρόποι (modes) της f , δηλαδή τα σημεία στα οποία η f παρουσιάζει μέγιστο. Ο αλγόριθμος της μετατόπισης του μέσου απαντά σε αυτό ακριβώς το πρόβλημα. Επιτυγχάνει να εντοπίσει τα μέγιστα της f , χωρίς την απόπειρα εκτίμησης της ίδιας της f . Επιπλέον δεν υπολογίζει μόνο τα μέγιστα της f , αλλά οριοθετεί και τις περιοχές στον d -διάστατο χώρο, σύμφωνα με τον τρόπο από τον οποίο κάθε σημείο του χώρου έλκεται. Δημιουργεί, δηλαδή, μια περιοχή αυθαίρετου σχήματος γύρω από τον κάθε τρόπο, η οποία αποτελείται από το σύνολο των σημείων εκείνων τα οποία έλκονται από τον συγκεκριμένο τρόπο. Έτσι, πέραν της εκτίμησης των τρόπων, παρέχει και μια φυσική ομαδοποίηση των παρατηρήσεων σε ομάδες αγνώστου εκ των προτέρων αριθμού, όπου κάθε ομάδα ορίζεται ως η δεξαμενή έλξης του κάθε τρόπου. Συν τοις άλλοις, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρουσιάζει εξαιρετική ευρωστία στην ύπαρξη θορύβου στα δεδομένα εισόδου.

Για τους παραπάνω λόγους, ο αλγόριθμος Mean-Shift, ο οποίος αποτελεί μια μη-παραμετρική τεχνική για την ανάλυση πολυδιάστατων χώρων χαρακτηριστικών, χρησιμοποιήθηκε ως βάση του προτεινόμενου συστήματος. Ο χώρος χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου προβλήματος, επιλέχθηκε να αποτελείται από τις τρεις χρωματικές συνιστώσες του κάθε εικονοστοιχείου (R,G,B), αλλά και τη χωρική πληροφορία του (συνιστώσες x,y), ώστε να παρέχεται αρκετά ικανοποιητική πληροφορία από το πεδίο της εικόνας. Αφού ταξινομηθούν σε κλάσεις όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας με χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift, οι μέθοδοι της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια (Otsu, μαθηματικοί μορφολογικοί τελεστές, μετασχηματισμός Hough, κ.λπ.), έχουν ως στόχο την απομόνωση και τη μέτρηση της περιοχής της φθοράς, με έναν αυτοματοποιημένο τρόπο. Η ταξινόμηση των περιοχών, εντός της ζώνης φθοράς, οι οποίες έχουν προκύψει από διαφορετικά γενεσιουργά αίτια, αποτελεί έναν επιπλέον στόχο της παρούσας εργασίας. Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Mean-Shift στην εικόνα εισόδου, προκύπτουν πολλές εκατοντάδες κλάσεις, οι οποίες χρειάζεται να κβαντιστούν, ώστε να γίνουν ευδιάκριτες οι λίγες διαφορετικές υποπεριοχές, εντός της ζώνης φθοράς. Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη για μια περαιτέρω οργάνωση του χώρου δεδομένων. Έτσι, τα διανύσματα που λαμβάνονται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Mean-Shift, εισάγονται σε ένα δίκτυο Kohonen. Το συγκεκριμένο δίκτυο αυτό-οργανώνεται, ώστε διαφορετικές γειτονιές να είναι οι νικήτριες, όταν στην είσοδο παρουσιάζονται πρότυπα από διαφορετικές κλάσεις. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται διαφορετικές γειτονιές νευρώνων σε ένα τοπολογικό χάρτη, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις εισόδων. Επίσης, η τοπολογική οργάνωση των νευρώνων, παρουσιάζει το πόσο μοιάζουν οι διαφορετικές αυτές υποπεριοχές. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία λεπτομερής ανάλυση των κύριων αλγορίθμων του προτεινόμενου συστήματος ανάλυσης της φθοράς.

3.1 Η διαδικασία της Μέσης Μετατόπισης (Mean-Shift)

Έστω ένα σύνολο n παρατηρήσεων x_i , $i=1, \dots, n$, στον d -διάστατο χώρο χαρακτηριστικών \mathbb{R}^d , το οποίο θεωρείται ως τυχαίο δείγμα μιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας f . Η μη παραμετρική εκτίμηση \hat{f} της f , μέσω παραθύρων Parzen ορίζεται ως εξής:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_H(x-x_i) \quad (3.1)$$

, όπου $K_H(x) = |H|^{-1/2} K(H^{-1/2}x)$ ο πυρήνας της μεθόδου και H ένας συμμετρικός, θετικά ορισμένος $d \times d$ πίνακας. Η συνάρτηση $K(x)$ θα πρέπει να ικανοποιεί τους παρακάτω περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^d} K(x) dx &= 1 & \lim_{\|x\| \rightarrow \infty} \|x\|^d K(x) &= 0 \\ \int_{\mathbb{R}^d} x K(x) dx &= 0 & \int_{\mathbb{R}^d} x x^T K(x) dx &= c_k I \end{aligned} \quad (3.2)$$

Χρησιμοποιώντας ένα πλήρως παραμετροποιημένο H , αυξάνεται η πολυπλοκότητα της εκτίμησης και στην πράξη ο πίνακας H επιλέγεται είτε ως διαγώνιος πίνακας ($H = \text{diag}[h_1^2, \dots, h_d^2]$), είτε ανάλογος του ταυτοτικού πίνακα I ($H = h^2 I$). Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται στο συγκεκριμένο βήμα της ανάλυσης, είναι να θεωρούνται ακτινικά συμμετρικοί οι πυρήνες που χρησιμοποιούνται. Η συγκεκριμένη ομάδα πυρήνων ικανοποιεί τη σχέση:

$$K(x) = c_{k,d} k(\|x\|^2) \quad (3.3)$$

,όπου $c_{k,d}$ τέτοιο ώστε $\int_{\mathbb{R}^d} K(x) dx = 1$, ενώ η συνάρτηση $k(x)$, για $x \geq 0$ ορίζεται ως το προφίλ του πυρήνα. Το σαφές πλεονέκτημα της επιλογής αυτής είναι ότι το εύρος του πυρήνα h (παράμετρος «ομαλοποίησης») αποτελεί τη μόνη ρυθμιζόμενη παράμετρο στη διαδικασία της εκτίμησης. Ένας δημοφιλής πυρήνας είναι ο κανονικός ή Gaussian πυρήνας:

$$K_N(x) = (2\pi)^{d/2} \exp(-\frac{1}{2} \|x\|^2) \quad (3.4)$$

με προφίλ το ακόλουθο

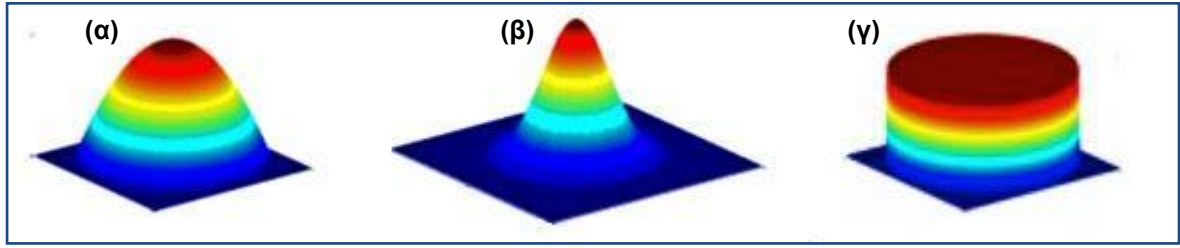
$$k(x) = \exp(-\frac{1}{2} x) \quad (3.5)$$

Ένας επίσης ευρέως χρησιμοποιούμενος πυρήνας είναι ο πυρήνας Epanechnikov:

$$K_E(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} c_d^{-1} (d+2) (1-\|x\|^2) & \text{για } \|x\| < 1 \\ 0 & \text{για } \|x\| \geq 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

με αντίστοιχο προφίλ το ακόλουθο:

$$k_E(x) = \begin{cases} 1-x & \text{για } \|x\| < 1 \\ 0 & \text{για } \|x\| \geq 1 \end{cases} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.2: (α) Epanechnikov, (β) Gaussian και (γ) ομοιόμορφος πυρήνας.

Εφαρμόζοντας ένα σταθερό εύρος πυρήνα h , στη σχέση ο εκτιμητής εκφράζεται πλέον ως:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (3.8)$$

3.1.1 Υπολογισμός της κλίσης της πυκνότητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο αλγόριθμος της μετατόπισης του μέσου δεν προβαίνει σε εκτίμηση της f , αλλά επιχειρεί τον εντοπισμό των τοπικών μεγίστων της. Δεδομένου ότι για τα σημεία αυτά θα ισχύει $\nabla f=0$, αντιστοιχίζεται ο υπολογισμός της κλίσης της πυκνότητας στην κλίση του υπολογισμού της πυκνότητας:

$$\hat{\nabla} f_{h,K}(x) \equiv \hat{\nabla} f_{h,K}(x) = \frac{2c_{k,d}}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} (x-x_i) k'\left(\left\|\frac{x-x_i}{h_i}\right\|^2\right) \quad (3.9)$$

Πρωτίστως, θεωρείται η συνάρτηση $g(x)=-k'(x)$, υποθέτοντας ότι η παράγωγος του προφίλ της συνάρτησης πυρήνα ορίζεται, εκτός ίσως από ένα πεπερασμένο σύνολο σημείων. Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση $g(x)$ ως προφίλ, η συνάρτηση πυρήνα $G(x)$ ορίζεται ως $G(x) = c_{g,d} g(\|x\|^2)$ όπου $c_{g,d}$ είναι η αντίστοιχη σταθερά κανονικοποίησης. Ο αρχικός πυρήνας $K(x)$ καλείται και «σκιά» του πυρήνα $G(x)$. Για παράδειγμα, ο πυρήνας του Epanechnikov είναι η σκιά του ομοιόμορφου πυρήνα, ενώ χρίζει ιδιαίτερης μνείας το γεγονός ότι η κανονική συνάρτηση πυρήνα και η «σκιά» της έχουν την ίδια έκφραση.

Κάνοντας χρήση της $g(x)$, η (3.9) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\hat{\nabla} f_{h,K}(x) = \frac{2c_{k,d}}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} (x_i-x) g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h_i}\right\|^2\right) = \frac{2c_{k,d}}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h_i}\right\|^2\right) \right] \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h_i}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h_i}\right\|^2\right)} - x \right] \quad (3.10)$$

, όπου $\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h_i}\right\|^2\right)$ θετικός αριθμός.

Και οι δύο όροι της παραπάνω έκφρασης παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον. Ο πρώτος είναι ανάλογος του υπολογισμού της πυκνότητας στο σημείο x χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση πυρήνα G .

$$\hat{f}_{h,G}(x) = \frac{c_{k,d}}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^d} g\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right) \quad (3.11)$$

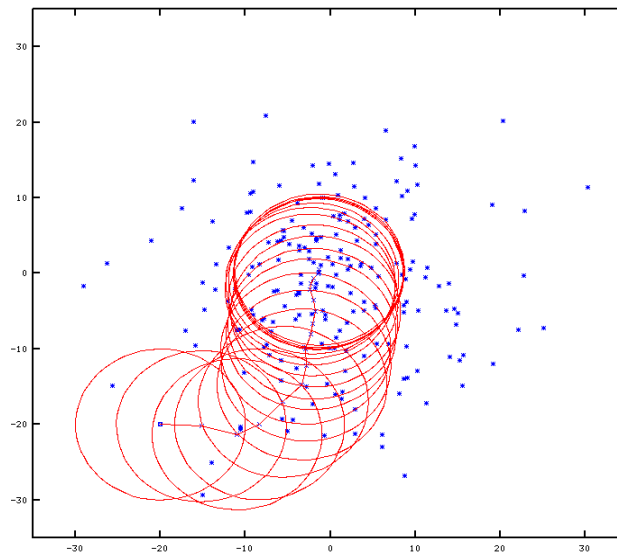
Ο δεύτερος όρος καλείται μετατόπιση του μέσου. Ο όρος αυτός αποτελεί τη διαφορά μεταξύ του μέσου όρου των σημείων με βάρος $g\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)$ για το x_i και του x , δηλαδή του κέντρου της συνάρτησης του πυρήνα. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.10) και (3.11) η έκφραση για τη μετατόπιση του μέσου, μετασχηματίζεται ως εξής:

$$m_{h,G}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} x_i g\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} g\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)} - x \quad (3.12)$$

Η παραπάνω σχέση φανερώνει ότι η κατεύθυνση της μετατόπισης του μέσου δίδεται από την κλίση της f στο x , δηλαδή την κατεύθυνση της μέγιστης αύξησης της πυκνότητας. Επιπροσθέτως, ο παρονομαστής κανονικοποιεί την μετατόπιση, με τέτοιο τρόπο ώστε σε σημεία με χαμηλή πυκνότητα (υπολογισμένης με τον πυρήνα G) το μέτρο της μετατόπισης να είναι μεγάλο και αντίστροφα.

$$\hat{\nabla} f_{h,K}(x) = \hat{f}_{h,G}(x) \frac{2c_{k,d}}{c_{g,d}} m_{h,G}(x) \quad (3.13)$$

Αφότου το διάνυσμα Mean-Shift είναι ανάλογο του υπολογισμού της τοπικής κλίσης, μπορεί να ορίσει μια διαδρομή, η οποία οδηγεί σε ένα στάσιμο σημείο της υπολογιζόμενης πυκνότητας. Οι κορυφές της πυκνότητας αποτελούν τέτοια στάσιμα σημεία. Η διαδικασία Mean-Shift είναι εγγυημένο ότι θα συγκλίνει σε ένα κοντινό σημείο, όπου ο υπολογισμός της (3.12) έχει μηδενική κλίση, όπως θα δειχθεί στην επόμενη ενότητα. Η παρουσία της κανονικοποίησης στον υπολογισμό της πυκνότητας είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό. Οι περιοχές με τιμές χαμηλής πυκνότητας δεν προκαλούν κανένα ενδιαφέρον στην ανάλυση του χώρου των χαρακτηριστικών και σε τέτοιες περιοχές τα βήματα του Mean-Shift είναι μεγάλα. Ομοίως, κοντά σε τοπικά μέγιστα τα βήματα είναι μικρά και η ανάλυση πιο ακριβής.



Σχήμα 3.3: Διαδικασία Mean-Shift, μια προσαρμοστική μέθοδος αναρρίχησης της κλίσης

3.1.2 Επαρκής συνθήκη για σύγκλιση

Ο Comaniciu και ο Meer απέδειξαν ότι αν η συνάρτηση προφίλ είναι κυρτή και μονοτονικά φθίνουσα, η ακολουθία $\{y_j\}$ (για $j=1,2,\dots$) θα συγκλίνει σε ένα στάσιμο σημείο. Ως αποτέλεσμα, το διάνυσμα Mean-Shift, το οποίο μπορεί να γραφεί και ως $m(y)=y_{j+1}-y_j$, θα συγκλίνει στο 0, δηλαδή η κλίση της πυκνότητας θα είναι μηδενική στο στάσιμο σημείο. Με τον τρόπο αυτό, δύναται να εντοπιστεί εύκολα μια κορυφή του χώρου των χαρακτηριστικών, ελέγχοντας αν η αντίστοιχη τιμή πυκνότητας είναι ένα τοπικό μέγιστο. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια πιο γενική διατύπωση της ιδιότητας που σημειώθηκε πρώτα από τους Fukunaga και Hostetler και κατόπιν σχολιάστηκε από τον Cheng .

$$y_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} x_i g\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} g\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)} \quad j=1,2,\dots \quad (3.14)$$

Στην (3.14), με $\{y_j\}$ σημειώνεται η ακολουθία των διαδοχικών θέσεων του πυρήνα G , όπου y_{j+1} είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος στο y_j που υπολογίζεται με τη χρήση της συνάρτησης πυρήνα G και y_1 είναι το κέντρο της αρχικής θέσης της συνάρτησης πυρήνα. Η αντίστοιχη ακολουθία των υπολογισμών της πυκνότητας με τη χρήση των συναρτήσεων πυρήνα K , δίνεται από τη σχέση:

$$\widehat{f_{h,K}}(j) = \hat{f}_{h,K}(y_j) \quad j=1,2,\dots \quad (3.15)$$

Όπως φαίνεται από το Θεώρημα 1 και αποδεικνύεται στο [80], μια συνάρτηση πυρήνα K που ικανοποιεί κάποιες συνθήκες αρκεί για τη σύγκλιση των ακολουθιών $\{y_j\}$ και $\{\widehat{f_{h,K}}(j)\}$.

Θεώρημα 1

Αν η συνάρτηση πυρήνα K έχει ένα κυρτό και μονοτονικά φθίνον προφίλ, οι ακολουθίες $\{y_j\}$ και $\{\widehat{f_{h,K}}(j)\}$ συγκλίνουν και η $\widehat{f_{h,K}}(j)$ είναι μονοτονικά αύξουσα.

Ωστόσο, όταν η κίνηση εκτελείται προς την κατεύθυνση της τοπικής κλίσης, η σύγκλιση επιτυγχάνεται μόνο για απειροελάχιστα βήματα. Το μέγεθος του βήματος ενός αλγορίθμου που βασίζεται στην κλίση είναι πολύ σημαντικό για τη συνολική επίδοση. Αν το μέγεθος του βήματος είναι πολύ μεγάλο, ο αλγόριθμος θα αποκλίνει, ενώ αν το μέγεθος του βήματος είναι πολύ μικρό, ο ρυθμός σύγκλισης μπορεί να είναι πολύ αργός. Η εγγυημένη σύγκλιση οφείλεται στην προσαρμοστικότητα του μεγέθους του διανύσματος Mean-Shift, το οποίο επίσης εξαιρεί την ανάγκη για πρόσθετες διαδικασίες επιλογής των κατάλληλων μεγεθών βημάτων. Αυτό είναι ένα μείζον πλεονέκτημα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους που βασίζονται στις κλίσεις. Για διακριτά δεδομένα, ο αριθμός των βημάτων για σύγκλιση εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη συνάρτηση πυρήνα. Όταν G είναι η συνάρτηση πυρήνα ομοιόμορφης κατανομής, η σύγκλιση επιτυγχάνεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό βημάτων από τη στιγμή που ο αριθμός των θέσεων που δημιουργούν διακεκριμένες μέσες τιμές είναι πεπερασμένος. Ωστόσο, όταν η συνάρτηση πυρήνα G επιβάλλει μια επιβάρυνση (weighting) στα σημεία δεδομένων (ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο της), η διαδικασία Mean-Shift συγκλίνει στο άπειρο. Ένας πρακτικός τρόπος για να αποφευχθεί αυτό είναι να θέσουμε ένα κατώτατο όριο για το μέγεθος του Mean-Shift διανύσματος.

3.1.3 Ανίχνευση κορυφών

Υποθέτοντας ότι τα σημεία y_c και $\widehat{f_{h,K}}^c = \hat{f}_{h,K}(y_c)$ είναι τα σημεία σύγκλισης της ακολουθίας $\{y_j\}$ και $\{\widehat{f_{h,K}}(j)\}$ αντίστοιχα, οι συνέπειες που απορρέουν από το Θεώρημα 1 είναι οι

παρακάτω:

- Το διάνυσμα Mean-Shift συγκλίνει στο μηδέν. Πράγματι, από τις σχέσεις (3.12) και (3.14) το j -οστό διάνυσμα Mean-Shift είναι το $m_{h,G}(y_j) = y_{j+1} - y_j$ και στο όριο y_c ισούται με $m_{h,G}(y_c) = y_c - y_c = 0$. Με άλλα λόγια, η κλίση του υπολογισμού της πυκνότητας στο σημείο y_c είναι μηδενική, συνεπώς το y_c είναι ένα στάσιμο σημείο της $\{\widehat{f_{h,K}}\}$.
- Αφότου η $\{\widehat{f_{h,K}}(j)\}$ είναι μονοτονικά αύξουσα, οι επαναλήψεις του Mean-Shift ικανοποιούν τις συνθήκες που απαιτούνται από το Θεώρημα «Κατάληψης» (Capture Theorem), το οποίο δηλώνει ότι οι τροχιές τέτοιων μεθόδων κλίσης «έλκονται» από τοπικά μέγιστα, αν είναι μοναδικά στάσιμα σημεία μέσα σε μια μικρή γειτονιά. Το σύνολο όλων των σημείων που συγκλίνουν στην ίδια κορυφή (mode) ορίζουν μια «λεκάνη έλξης» (basin of attraction) της συγκεκριμένης κορυφής.

Οι θεωρητικές αυτές παρατηρήσεις συνιστούν έναν πρακτικό αλγόριθμο για ανίχνευση κορυφών, κατά τον οποίο εκτελείται η διαδικασία Mean-Shift για να βρεθούν τα στάσιμα σημεία της $\{\widehat{f_{h,K}}\}$ και στη συνέχεια περιορίζονται τα σημεία αυτά, με το να κρατηθούν μόνο «Κατάληψης», ως μοναδικά στάσιμα σημεία μέσα σε μια μικρή ανοιχτή σφαίρα.

3.1.4 Η ιδιότητα της ομαλής τροχιάς

Η διαδικασία Mean-Shift που χρησιμοποιεί μια κανονική συνάρτηση πυρήνα έχει μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα. Η διαδρομή της προς την κορυφή ακολουθεί μια ομαλή τροχιά, με τη γωνία ανάμεσα σε δυο διαδοχικά διανύσματα Mean-Shift να είναι πάντα μικρότερη από 90° . Χρησιμοποιώντας την κανονική συνάρτηση πυρήνα το j -οστό διάνυσμα Mean-Shift δίνεται από τη σχέση: Το ακόλουθο θεώρημα διατηρείται αληθές για όλα τα $j=1,2,\dots$, σύμφωνα με την απόδειξη που δίδεται στο [80].

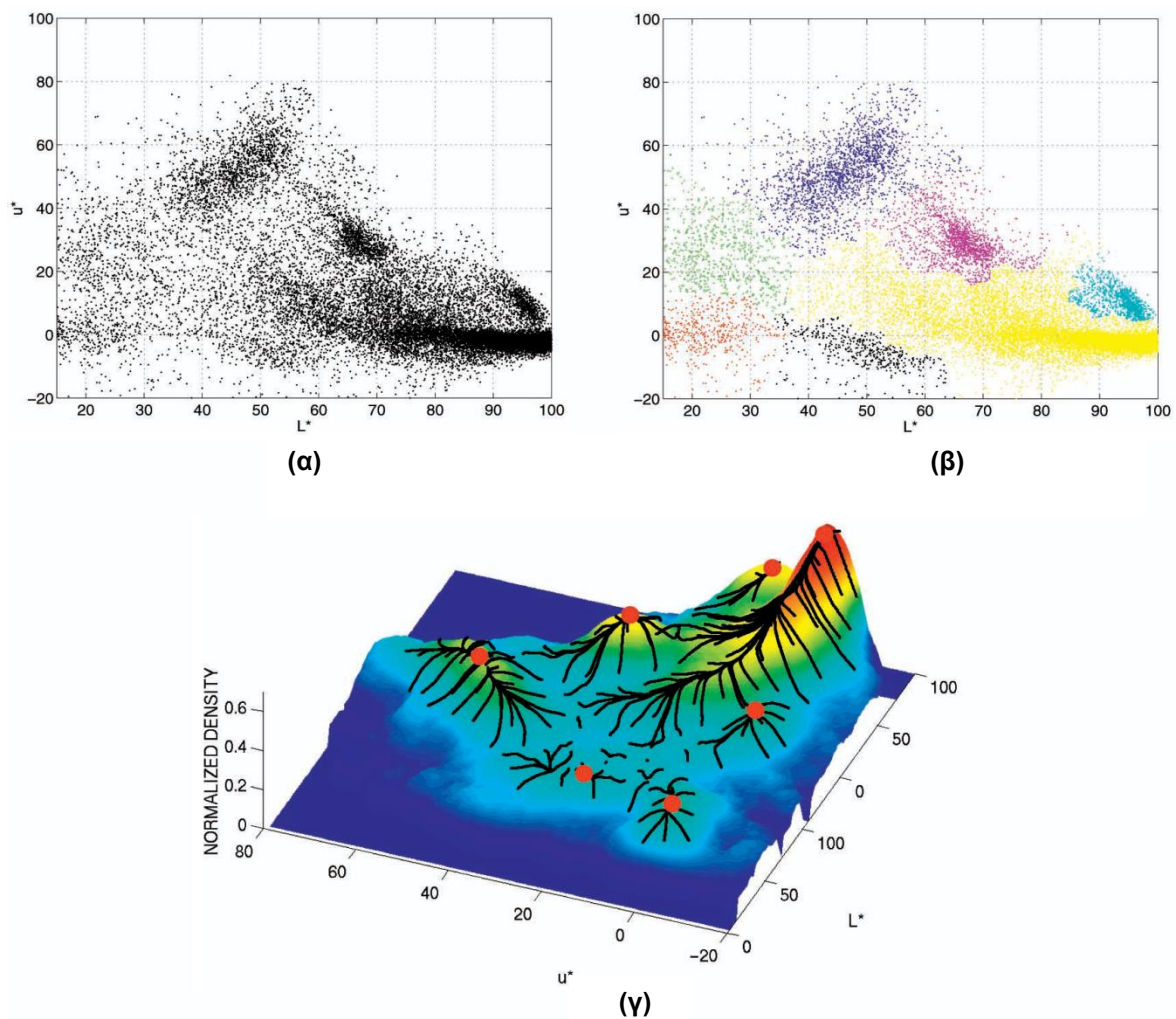
$$m_{h,N}(y_j) = y_{j+1} - y_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} x_i \exp\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^{d+2}} \exp\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)} - y_j \quad (3.16)$$

Θεώρημα 2

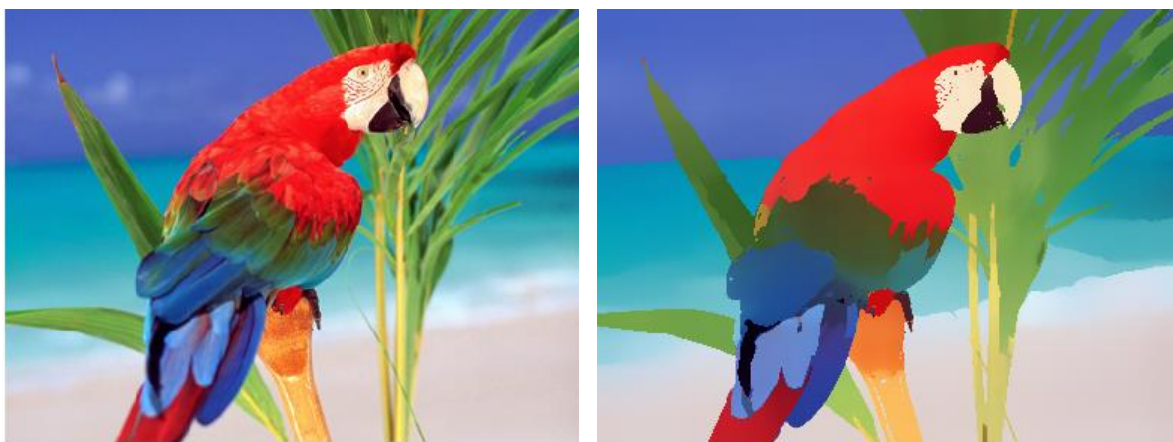
Το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα σε δύο διαδοχικά διανύσματα είναι αυστηρά θετικό όταν χρησιμοποιείται η κανονική συνάρτηση πυρήνα, δηλαδή:

$$\frac{m_{h,N}(y_j)^T m_{h,N}(y_{j+1})}{\|m_{h,N}(y_j)\| \|m_{h,N}(y_{j+1})\|} > 0 \quad (3.17)$$

Ως συνέπεια του Θεωρήματος 2, η κανονική συνάρτηση πυρήνα φαίνεται να είναι η ιδανικότερη για τη διαδικασία Mean-Shift. Η ομαλή τροχιά της διαδικασίας Mean-Shift έρχεται σε αντίθεση με τη συνήθη μέθοδο «απότομης ανόδου» (εκτίμηση της τοπικής κλίσης, η οποία ακολουθείται από γραμμική μεγιστοποίηση), της οποίας ο ρυθμός σύγκλισης σε επιφάνειες με βαθιές και στενές κοιλάδες είναι μικρός.



Σχήμα 3.4: (α) Δισδιάστατος χρωματικός χώρος με 110400 σημεία πληροφορίας, ο οποίος αντιπροσωπεύει τις δύο πρώτες συνιστώσες της L^*u^*v εικόνας του Σχήματος 3.1(α), (β) Ομαδοποίηση του χώρου δεδομένων με τον αλγόριθμο Mean-Shift, (γ) Τροχιές της διαδικασίας Mean-Shift, πάνω στην εκτίμηση της πυκνότητας πιθανότητας, με χρήση του πυρήνα Epanechnikov

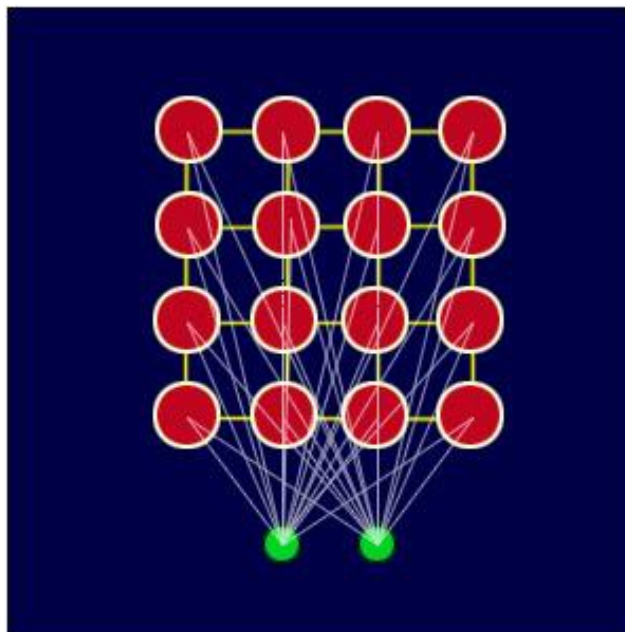


Σχήμα 3.5: Παράδειγμα κατάτμησης με χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift

3.2 Τα αυτο-οργανούμενα δίκτυα Kohonen (Kohonen SOM)

Το δίκτυο SOM του Kohonen [84] είναι ένα Νευρωνικό Δίκτυο το οποίο αυτό-οργανώνεται με τρόπο που είναι επηρεασμένος από την τοπογραφική οργάνωση του εγκεφάλου. Ο εγκέφαλος παρουσιάζει αυστηρή τοπολογική οργάνωση, γεγονός εξαιρετικά σημαντικό για τη λειτουργία του. Οι νευρώνες του εγκεφάλου, οι οποίοι διεγείρονται από παρόμοια ή γειτονικά εξωτερικά ερεθίσματα βρίσκονται κοντά ο ένας με τον άλλον και έτσι δημιουργούνται περιοχές νευρικών κυττάρων, που ονομάζονται χάρτες. Οι διατάξεις των αισθητήρων νευρώνων και ανάλογα με την αίσθηση στην οποία αντιστοιχούν καλούνται ακουστοπτικοί χάρτες για την ακοή, ρετινοτοπτικοί χάρτες για την όραση κ.λ.π.

Το δίκτυο SOM εκπαιδεύεται χωρίς επίβλεψη, δηλαδή δεν υπάρχουν στόχοι και η διάταξή του είναι ένα μονοδιάστατο ή δισδιάστατο πλέγμα από νευρώνες. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει ένα δισδιάστατο πλέγμα νευρώνων που χρησιμοποιείται ως διακριτός χάρτης.



Σχήμα 3.5: Δισδιάστατο πλέγμα νευρώνων

Μετά την εκπαίδευση το σύνολο των διανυσμάτων του χώρου εισόδου απεικονίζεται σε ένα διακριτό αριθμό κλάσεων. Τις παραγόμενες κλάσεις πρέπει να χαρακτηρίζουν δύο ιδιότητες:

- Τα διανύσματα που ανήκουν στην ίδια κλάση θεωρούνται όμοια με βάση κάποια κριτήρια.
- Οι γειτονικές κλάσεις ορίζονται από διανύσματα που βρίσκονται κοντά στο χώρο των δεδομένων.

Με βάση τα παραπάνω δύο κριτήρια, οι παραγόμενες κλάσεις μπορούν να θεωρηθούν ως η περίληψη του χώρου των δεδομένων, με τα οποία έγινε η εκπαίδευση. Η εύρεση των κύριων κλάσεων στο χώρο εισόδου ισοδυναμεί με την εύρεση των κύριων χαρακτηριστικών αυτού. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στους αλγόριθμους ταξινόμησης είναι η επιλογή του βέλτιστου αριθμού των διακριτών κλάσεων απεικόνισης. Το πρόβλημα αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι συνήθως κάθε κλάση αποτελείται από μεγάλο αριθμό διαφορετικών διανυσμάτων που μπορούν να περιγραφούν από περισσότερες δευτερεύουσες κλάσεις.

Κάθε νευρώνας στο πλέγμα είναι πλήρως συνδεδεμένος με όλους τους πηγαίους κόμβους εισόδου. Το συγκεκριμένο δίκτυο έχει δομή πρόσθιας τροφοδότησης με ένα υπολογιστικό επίπεδο, το οποίο αποτελείται από νευρώνες διατεταγμένους σε γραμμές και στήλες. Η θέση του κάθε νευρώνα στο δίκτυο είναι πολύ σημαντική, διότι η τοπογραφική οργάνωση χρησιμοποιεί την έννοια της γειτονιάς, ως ένα σύνολο νευρώνων που βρίσκονται σε διπλανές θέσεις στο πλέγμα.

Το δίκτυο SOM είναι ένα ανταγωνιστικό δίκτυο, καθώς οι νευρώνες ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιός ταιριάζει καλύτερο στο διάνυσμα εισόδου. Ο νευρώνας που ταιριάζει καλύτερα είναι αυτός, του οποίου το διάνυσμα βαρών w είναι πιο όμοιο συγκριτικά με την είσοδο x και καλείται νευρώνας-νικητής για το συγκεκριμένο πρότυπο. Στόχος του δικτύου SOM είναι η ομαδοποίηση όμοιων προτύπων εισόδου δηλαδή. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται διαφορετικές γειτονιές νευρώνων στο χάρτη, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις εισόδων.

Για κάθε πρότυπο εισόδου x εκπαιδεύεται ο νευρώνας-νικητής και η γειτονιά του έτσι ώστε να ταιριάζουν ακόμα περισσότερο στο x . Σκοπός του βήματος αυτού είναι να υπάρξουν αυξημένες πιθανότητες να νικήσει ξανά ο ίδιος νευρώνας ή κάποιος από τη γειτονιά του, αν στο μέλλον εμφανιστεί ξανά το συγκεκριμένο πρότυπο ή κάποιο παρεμφερές. Η γειτονιά ενός νευρώνα -νικητή εκπαιδεύεται και αυτή, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι καμιά άλλη κλάση δε θα βρίσκει νικητές στη γειτονιά του νευρώνα-νικητή. Συνεπώς, το δίκτυο αυτό-οργανώνεται, ώστε διαφορετικές γειτονιές να είναι οι νικήτριες, όταν στην είσοδο παρουσιάζονται πρότυπα από διαφορετικές κλάσεις.

Το διάνυσμα βαρών κάθε νευρώνα του δικτύου έχει ίδια διάσταση με το χώρο εισόδου. Για να οριστεί με σαφήνεια ο νευρώνας-νικητής για ένα συγκεκριμένο πρότυπο εισόδου $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, χρησιμοποιείται ως κριτήριο η Ευκλείδεια απόσταση του x από το διάνυσμα βαρών του νευρώνα $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$, $d = ||w - x||$. Με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο ανταγωνίζονται όλοι οι νευρώνες του δικτύου και ο νικητής είναι εκείνος ο νευρώνας, ο οποίος έχει τη μικρότερη απόσταση από το πρότυπο x , δηλαδή ο νευρώνας i^* για τον οποίο ισχύει $d_i^* = \min ||w_i - x||$.

Τα πρότυπα $x(1), x(2), \dots, x(n)$ παρουσιάζονται με τη σειρά στο δίκτυο και όταν τελειώσουν επαναλαμβάνονται από την αρχή με κυκλικό τρόπο. Μια πλήρης επανάληψη όλων των προτύπων λέγεται εποχή (epoch). Για ένα συγκεκριμένο πρότυπο εισόδου $x(k)$ μόνο ο νικητής νευρώνας i^* και η γειτονιά του $\Gamma(i^*)$ εκπαιδεύονται έτσι ώστε να μοιάσουν ακόμα περισσότερο στο πρότυπο $x(k)$. Ο κανόνας εκπαίδευσης σύμφωνα με τον οποίο τα συναπτικά βάρη των νευρώνων αυτών εκπαιδεύονται είναι:

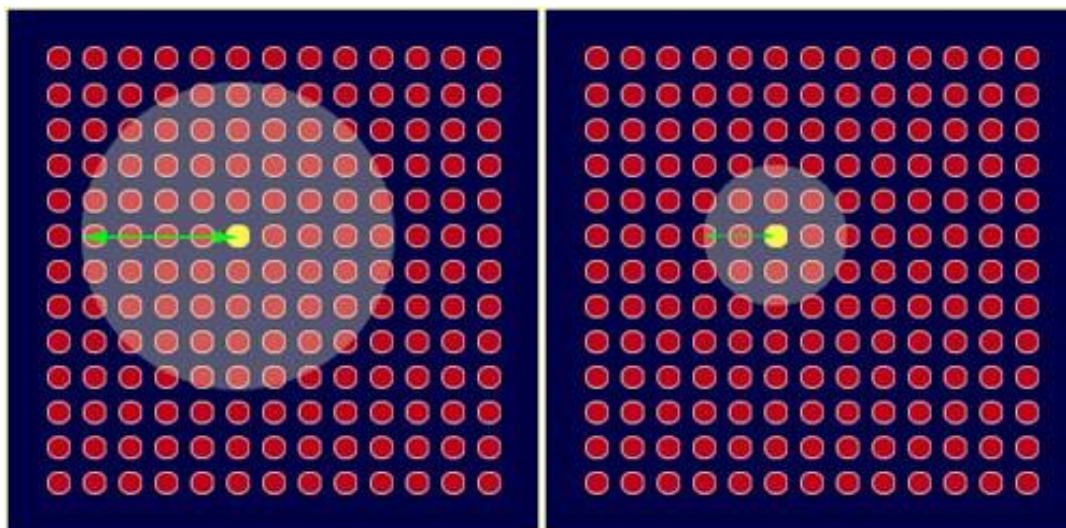
$$w_i(k+1) = w_i(k) + a(k)[x(k) - w_i(k)] \quad (3.18)$$

, ενώ τα βάρη όλων των άλλων νευρώνων δεν αλλάζουν. Για το επόμενο πρότυπο $x(k+1)$ κάποιος άλλος νευρώνας θα είναι ο νικητής, άρα κάποια άλλη γειτονιά θα εκπαιδευτεί με το πρότυπο αυτό. Η εκπαίδευση του δικτύου ξεκινάει από μια αρχική τυχαία κατάσταση, όπου τα συναπτικά βάρη όλων των νευρώνων είναι τυχαίοι αριθμοί. Αποτέλεσμα του παραπάνω κανόνα εκπαίδευσης είναι η μετακίνηση του διανύσματος συναπτικών βαρών w_i του νικητή νευρώνα i προς το διάνυσμα εισόδου x . Μετά από επαναλαμβανόμενες παρουσιάσεις των δεδομένων εκπαίδευσης, τα διανύσματα συναπτικών βαρών τείνουν να ακολουθούν την κατανομή των διανυσμάτων εισόδου, λόγω της ενημέρωσης που πραγματοποιείται στη γειτονιά. Συνεπώς, η εκπαίδευση καταλήγει σε τοπολογική οργάνωση των νευρώνων, υπό την έννοια ότι οι νευρώνες που είναι γειτονικοί στο πλέγμα τείνουν να έχουν παρόμοια διανύσματα συναπτικών βαρών.

Η διαδικασία προσαρμογής των συναπτικών βαρών του δικτύου περνάει μέσα από δύο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση οι νευρώνες ταξινομούνται σε γειτονιές, δηλαδή

αποφασίζεται ποιος νευρώνας ανήκει σε ποια γειτονιά και τακτοποιούνται οι γειτονιές χωροταξικά στο δίκτυο. Στη δεύτερη φάση, οι νευρώνες συγκλίνουν στις τελικές τους τιμές μέσα στις γειτονιές. Δύο εμπειρικοί κανόνες εφαρμόζονται ο ένας στο ρυθμό εκπαίδευσης και ο άλλος στο εύρος της γειτονιάς των νευρώνων. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς:

- Ο ρυθμός εκπαίδευσης, που είναι κοινός για όλο το νευρωνικό δίκτυο, μειώνεται μονότονα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Όταν ο ρυθμός εκπαίδευσης έχει μεγάλη τιμή τα διανύσματα των συντελεστών βάρους των νευρώνων, που εκφράζουν τα κέντρα των παραγόμενων κλάσεων, προσεγγίζουν με μεγάλη ταχύτητα τα διανύσματα εισόδου με αποτέλεσμα να υπάρχει ο κίνδυνος ταλαντώσεων. Όταν ο ρυθμός εκπαίδευσης έχει μικρή τιμή τα διανύσματα των συντελεστών βάρους των νευρώνων σταθεροποιούνται, οπότε διευκολύνεται η σύγκλιση, αλλά υπάρχει ο κίνδυνος μη μετάβασης στη βέλτιστη λύση (τοπικό ελάχιστο στο σφάλμα κβαντισμού). Η μετάβαση από μεγάλη σε μικρή τιμή εξαλείφει τα παραπάνω προβλήματα
- Το εύρος της γειτονιάς κάθε νευρώνα μειώνεται μονότονα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Ο πιο απλός τρόπος είναι η γραμμική μείωση. Μια τυπική αρχική τιμή για την ακτίνα της γειτονιάς είναι περίπου τα δύο τρίτα του μήκους της μεγαλύτερης πλευράς του πλέγματος που σχηματίζουν οι νευρώνες και η μετάβαση στο μηδέν μέσα σε περίπου 100-150 εποχές.

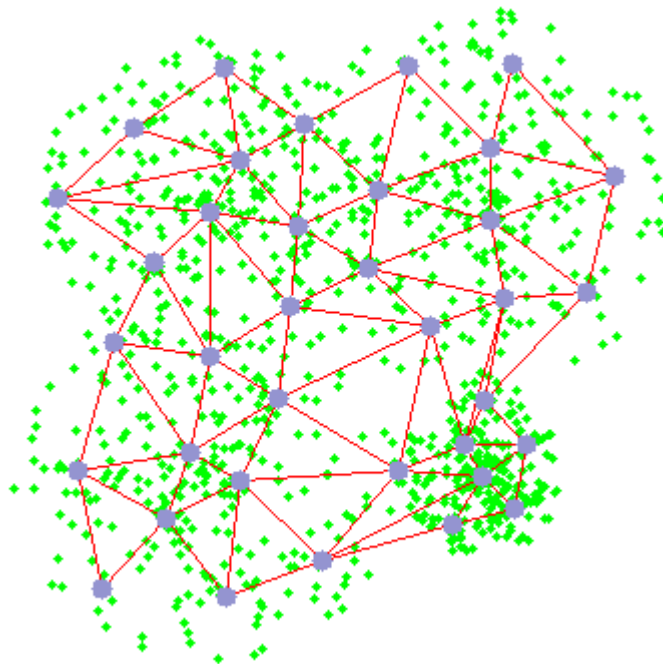


Σχήμα 3.6: Μείωση του εύρους της γειτονιάς κάθε νευρώνα, κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης

Η εκπαίδευση σταματά όταν δεν παρατηρούνται πλέον ευδιάκριτες αλλαγές στο χάρτη χαρακτηριστικών. Επιπλέον, η εκπαίδευσή του μπορεί να γίνεται συνεχώς, ώστε το δίκτυο να έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται και σε νέες αλλαγές, που μπορεί να παρουσιάζονται σε συνεχή χρόνο. Η φιλοσοφία του δικτύου SOM έγκειται στο γεγονός ότι όμοιες εισόδους αντιστοιχούν σε γειτονικούς νευρώνες στο πλέγμα και με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται μια εξαιρετικά ισχυρή ομαδοποίηση προτύπων. Επιτυγχάνεται λοιπόν, μια αντιστοίχιση των εισόδων στην έξοδο και για το λόγο αυτό λέμε ότι επιτελεί μια αυτό-οργανούμενη απεικόνιση χαρακτηριστικών. Δημιουργείται ένας σημασιολογικός χάρτης, που παρέχει μια εξαιρετικά ισχυρή ομαδοποίηση δεδομένων, στον οποίο παρόμοια δείγματα χαρτογραφούνται κοντά.

Συνοψίζοντας, τα βήματα εκπαίδευσης του νευρωνικού ταξινομητή Kohonen SOFM, είναι τα εξής :

1. Ορισμός του επιθυμητού αριθμού κλάσεων, της τοπολογίας των νευρώνων και του τρόπου υπολογισμού της γειτονιάς κάθε νευρώνα.
2. Αρχικοποίηση των διανυσμάτων των συντελεστών βάρους όλων των νευρώνων με διανύσματα που επιλέγονται τυχαία από το χώρο εισόδου .
3. Επιλογή ενός τυχαίου διανύσματος από το χώρο εισόδου και εύρεση του νευρώνα νικητή.
4. Εύρεση του συνόλου των νευρώνων που ανήκουν στη γειτονιά του νευρώνα νικητή.
5. Υπολογισμός του ρυθμού εκπαίδευσης.
6. Αναπροσαρμογή των συντελεστών βάρους του νευρώνα νικητή σύμφωνα με την (3.18).
7. Αναπροσαρμογή των συντελεστών βάρους των νευρώνων που ανήκουν στη γειτονιά του νευρώνα νικητή.
8. Έλεγχος για το αν έχουν εισαχθεί λ συνεχόμενα διανύσματα από το χώρο εισόδου. Σε αυτή την περίπτωση έχει ολοκληρωθεί μια εποχή .
9. Έλεγχος για το αν οι συντελεστές βάρους όλων των νευρώνων έχουν μεταβληθεί σημαντικά σε σχέση με την προηγούμενη εποχή. Αν η μέγιστη διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων συντελεστών, μεταξύ των διανυσμάτων βάρους από εποχή σε εποχή είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, τότε η εκπαίδευση σταματάει θεωρώντας τη σύγκλιση των συντελεστών βάρους των συνάψεων.
10. Έλεγχος για το αν ο αριθμός των εποχών που έχουν περάσει είναι μεγαλύτερος από μια μέγιστη προκαθορισμένη τιμή. Στην περίπτωση αυτή σταματάει η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, θεωρώντας ότι ο αριθμός των εποχών που έχει περάσει είναι αρκετός για την επίτευξη της σύγκλισης. Στην αντίθετη περίπτωση, γίνεται μετάβαση στο βήμα 3.



Σχήμα 3.7: Προσέγγιση χώρου χαρακτηριστικών με πλέγμα νευρώνων 6x6

3.3 Η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu

Η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu [77], προτάθηκε το 1979 και αποτελεί ακόμα και σήμερα μία από τις καλύτερες τεχνικές καθολικής κατωφλίωσης, μιας grayscale εικόνας. Η ιδέα του αλγορίθμου είναι σχετικά απλή: Καλά διαχωρισμένες ομάδες θα διαφέρουν στα επίπεδα της φωτεινότητας. Σε στατιστικούς όρους, αυτό μεταφράζεται σε ελαχιστοποίηση της διακύμανσης μεταξύ των επιπέδων γκρι της ίδιας ομάδας (ενδοδιακύμανση – within class variance), ένα μέτρο το οποίο προσδιορίζει κατά πόσο μια ομάδα είναι συμπαγής και τη μεγιστοποίηση της διακύμανσης των επιπέδων του γκρι διαφορετικών ομάδων. Το τελευταίο μέτρο μαρτυράει κατά πόσο δύο ή και περισσότερες ομάδες είναι καλά διαχωρισμένες.

Έστω L οι στάθμες κβάντισης μιας grayscale εικόνας και n_i ο αριθμός των εικονοστοιχείων του επιπέδου i . Ο συνολικός αριθμός εικονοστοιχείων της εικόνας είναι $n=n_1+n_2+n_3+...+n_L$. Το ιστογράμμο της εικόνας κανονικοποιείται και θεωρείται ως συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας p_i , με τις ακόλουθες ιδιότητες:

$$p_i = \frac{n_i}{n}, \quad p_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (3.19)$$

Η αναμενόμενη τιμή των επιπέδων της φωτεινότητας της εικόνας είναι:

$$\mu_L = \mu(L) = \sum_{i=1}^n i p_i \quad (3.20)$$

Αν χωριστεί η εικόνα σε δύο κλάσεις C_0, C_1 , χρησιμοποιώντας ένα σταθερό κατώφλι στην τιμή k , τότε τα επίπεδα φωτεινότητας των εικονοστοιχείων που ανήκουν στην κλάση C_0 αποτελούν το σύνολο $[1,2,...,k]$, ενώ αντίστοιχα τα επίπεδα φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της κλάσης C_1 αποτελούν το σύνολο $[k+1,k+2,...,L]$. Οι πιθανότητες κάποιο εικονοστοιχείο να ανήκει ή όχι σε μία από τις δύο κλάσεις δίδονται από τις σχέσεις:

$$\omega_0 = P(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \quad (3.21)$$

$$\omega_1 = P(C_1) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k) \quad (3.22)$$

Για κάθε μία κλάση η αναμενόμενη τιμή δίδεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\mu_0 = \left(\sum_{i=1}^k i p_i \right) / \omega_0 = \mu(k) / \omega(k) \quad (3.22)$$

$$\mu_1 = \left(\sum_{i=k+1}^L i p_i \right) / \omega_1 = (\mu_L - \mu(k)) / (1 - \omega(k)) \quad (3.23)$$

, όπου $\omega(k)$ και $\mu(k)$ οι μηδενικού και πρώτου βαθμού αθροιστικές ροπές του ιστογράμματος έως το k επίπεδο, αντίστοιχα.

Για κάθε k μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$\begin{cases} \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 = \mu_L \\ \omega_0 + \omega_1 = 1 \end{cases} \quad (3.24)$$

Επίσης, οι μεταβλητότητες προκύπτουν από τις δευτέρου βαθμού αθροιστικές ροπές:

$$\sigma_0^2 = \left(\sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 p_i \right) / \omega_0 \quad (3.25)$$

$$\sigma_1^2 = \left(\sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 p_i \right) / \omega_1 \quad (3.26)$$

Για να αποτιμηθεί το κατώφλι που επιλέγει η μέθοδος του Otsu, ορίζεται η ενδοδιακύμανση σ_w^2 και η διακύμανση των επιπέδων της φωτεινότητας των δύο κλάσεων σ_B^2 , ως εξής:

$$\sigma_w^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (3.27)$$

$$\sigma_B^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu_L)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_L)^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (3.28)$$

Τέλος, η συνολική διακύμανση μεταξύ των επιπέδων της φωτεινότητας εκφράζεται ως:

$$\sigma_L^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_L)^2 p_i \quad (3.29)$$

Ο Otsu καθόρισε τα παρακάτω μέτρα διαχωρισιμότητας των δύο κλάσεων, τα οποία πρέπει να μεγιστοποιηθούν από το βέλτιστο κατώφλι k:

$$\lambda(k) = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_w^2}, \quad \delta(k) = \frac{\sigma_L^2}{\sigma_w^2}, \quad \eta(k) = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_L^2} \quad (3.30)$$

Σημειώνεται ότι οι συναρτήσεις $\lambda(k)$, $\delta(k)$ και $\eta(k)$, δεν είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Για παράδειγμα ισχύει ότι $\delta(k) = \lambda(k) + 1$ και $\eta(k) = \lambda(k) / (\lambda(k) + 1)$, διότι πάντοτε ισχύει η ακόλουθη βασική σχέση:

$$\sigma_w^2 + \sigma_B^2 = \sigma_L^2 \quad (3.31)$$

Παρατηρείται ότι τα σ_B^2 και σ_w^2 είναι συναρτήσεις του k, ενώ το σ_L^2 όχι. Ακόμα, καθίσταται εμφανές ότι, σε αντίθεση με το σ_L^2 , για τον υπολογισμό του σ_w^2 απαιτείται ο υπολογισμός δευτέρου βαθμού στατιστικών ποσοτήτων (σ_0, σ_1). Για τους λόγους αυτούς, επιλέγεται η συνάρτηση $\eta(k)$ ως η συνάρτηση κριτηρίου που πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Η βέλτιστη τιμή κατωφλίου k^* , η οποία μεγιστοποιεί τη διακύμανση μεταξύ των επιπέδων της φωτεινότητας των δύο κλάσεων και ελαχιστοποιεί τη διακύμανση μεταξύ των επιπέδων της ίδιας κλάσης, επιλέγεται από την ακόλουθη επαναληπτική διαδικασία:

$$k^* = \max_{2 \leq k \leq L} (\sigma_B^2(k)) \quad (3.32)$$

, όπου το σ_B^2 υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη από τη σχέση:

$$\sigma_B^2(k) = \frac{[\mu_L \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \quad (3.33)$$

Έτσι, ξεκινώντας από το αρχικό επίπεδο φωτεινότητας της εικόνας ($k=1$) και καταλήγοντας στο επίπεδο L , υπολογίζεται η σ_B^2 συναρτήσει του κατωφλίου. Τέλος, επιλέγεται το κατώφλι k^* , για το οποίο η σ_B^2 είναι μέγιστη.



Σχήμα 3.8: Παράδειγμα κατωφλίωσης με τη μέθοδο του Otsu

3.4 Ο μετασχηματισμός Hough

Ο μετασχηματισμός Hough, προτάθηκε από τον Paul Hough το 1962 και αποτελεί μια τεχνική προσδιορισμού γραμμών και γενικά παραμετρικά εκπεφρασμένων καμπυλών. Αναπτύχθηκε στα πλαίσια της κατασκευής μιας ηλεκτρονικής συσκευής για την ανίχνευση της κίνησης σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Ήταν μια από τις πρώτες προσπάθειες για την αυτοματοποίηση της οπτικής διαδικασίας που μέχρι τότε, απαιτούσε πολλές ανθρωποώρες εργαστηριακών μετρήσεων.

Το βασικό χαρακτηριστικό του προσδιορισμού της θέσης ευθειών με το μετασχηματισμό Hough είναι η σχέση σημείου-ευθείας. Ένα σημείο P μπορεί να οριστεί είτε από ένα ζεύγος συντεταγμένων, είτε ως το σημείο τομής ενός συνόλου ευθειών που διέρχονται από αυτό. Η βασική ιδέα του μετασχηματισμού γίνεται φανερή εάν οριστεί ένα σύνολο συνευθειακών σημείων P_i . Από όλες τις ευθείες του χώρου υπάρχει μόνο μία που θα διέρχεται από όλα τα σημεία. Η δυαδικότητα σημείου-ευθείας ισχύει όμως και αντιστρόφως. Όπως ένα σημείο μπορεί να προσδιοριστεί ως σημείο τομής ενός συνόλου ευθειών, έτσι και μία ευθεία μπορεί να προσδιοριστεί από ένα σύνολο σημείων.

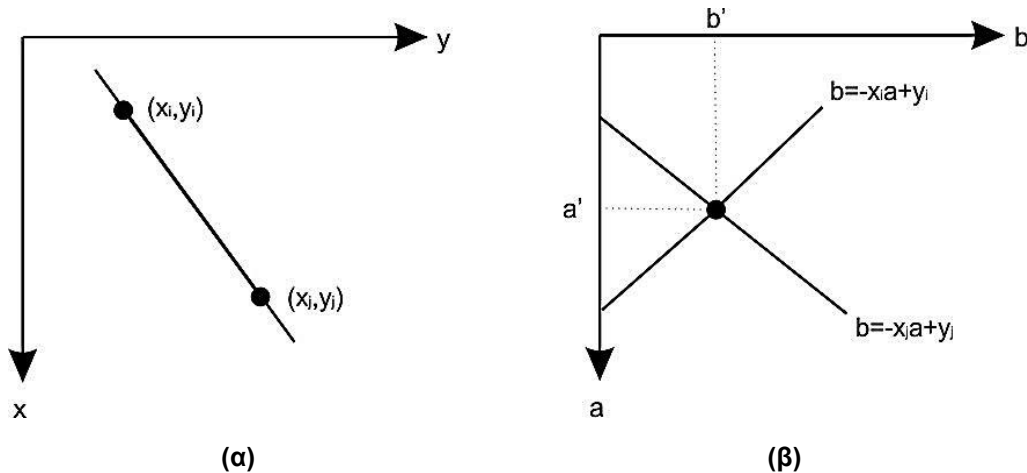
Έστω ένα σημείο $P(x_i, y_i)$, στο καρτεσιανό επίπεδο, τότε η παραμετρική εξίσωση της ευθείας είναι:

$$y_i = ax_i + b \quad (3.19)$$

Όλες οι ευθείες που διέρχονται από το σημείο $P(x_i, y_i)$ για διαφορετικά a και b ικανοποιούν την παραπάνω εξίσωση. Εάν στη συνέχεια η (3.19) γραφεί ως ακολούθως:

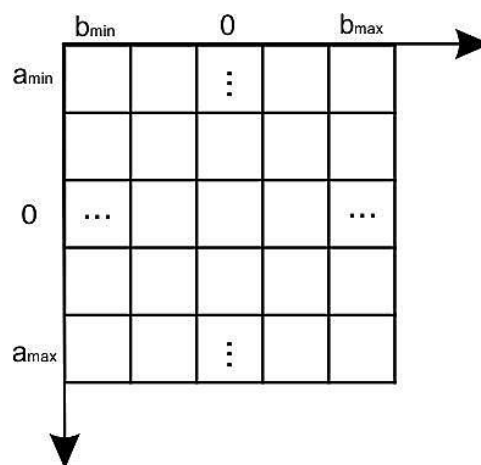
$$b = -ax_i + y_i \quad (3.20)$$

και θεωρηθεί το επίπεδο $[a-b]$ (γνωστό και ως παραμετρικός χώρος), τότε το σημείο αντιστοιχίζεται σε ευθεία. Επιπλέον, εάν θεωρηθεί ένα δεύτερο σημείο (x_j, y_j) , τότε και αυτό αντιστοιχίζεται σε ευθεία, η οποία τέμνει την προηγούμενη στο σημείο (a', b') . Στην πραγματικότητα όλα τα σημεία της ευθείας στο $[x-y]$ επίπεδο αντιστοιχίζονται σε ευθείες στον παραμετρικό χώρο, οι οποίες τέμνονται στο σημείο (a', b') .



Σχήμα 3.8: (α) Το $[x-y]$ επίπεδο και (β) το $[a-b]$ επίπεδο.

Ο αλγόριθμος υλοποίησης του μετασχηματισμού περιλαμβάνει την διαίρεση του παραμετρικού χώρου σε κελιά μήτρας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, όπου (a_{max}, a_{min}) και (b_{max}, b_{min}) είναι οι αναμενόμενες τιμές της κλίσης της ευθείας και του σημείου τομής των ευθειών. Το κελί με συντεταγμένες (i, j) και τιμή $A(i, j)$ αντιστοιχεί στο παράθυρο μήτρας του παραμετρικού χώρου (a_j, b_i) . Αρχικά, όλα τα κελιά της μήτρας έχουν τιμή 0. Στη συνέχεια, για κάθε σημείο (x_k, y_k) της αρχικής εικόνας, τίθεται η παράμετρος a ίση με τις επιτρεπόμενες τιμές του άξονα a και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές b λύνοντας την εξίσωση: $b = -ax_k + y_k$.

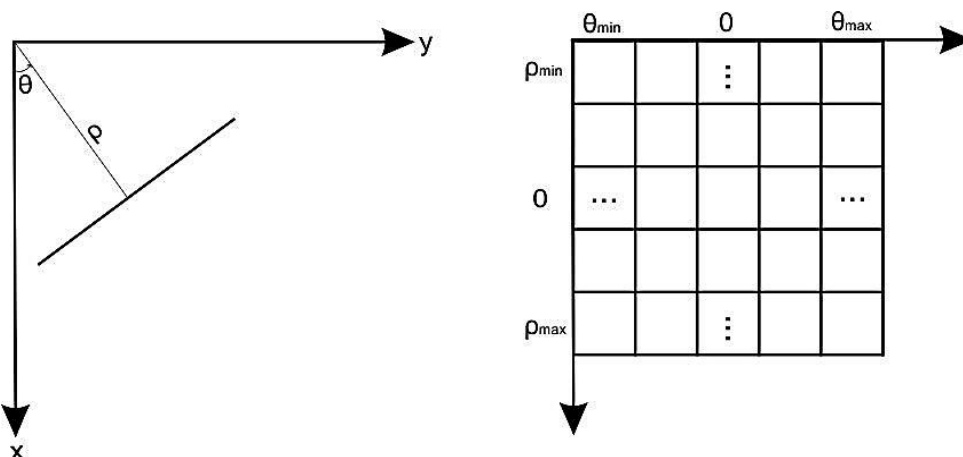


Σχήμα 3.9: Διαίρεση του παραμετρικού χώρου για χρήση στο μετασχηματισμό Hough.

Οι τιμές b που υπολογίζονται, στρογγυλοποιούνται προς την κοντινότερη επιτρεπόμενη τιμή στον b -άξονα. Στη συνέχεια, για κάθε τιμή a_p , η οποία οδηγεί σε λύση b_p , η τιμή της ανάλογης θέσης στη μήτρα A αυξάνεται κατά ένα: $A(p,q) = A(p,q) + 1$. Ο αριθμός των διαιρέσεων στο $[a-b]$ επίπεδο καθορίζει τον αριθμό των συνευθειακών σημείων.

Στην (3.20) τα όρια των τιμών (a,b) είναι μη πεπερασμένα, έτσι οι ευθείες του καρτεσιανού επιπέδου, που είναι παράλληλες στον άξονα y απαιτούν άπειρα ζεύγη τιμών (a,b) ώστε να προσδιοριστούν στο επίπεδο $[a-b]$. Ένας τρόπος για την υπέρβαση του συγκεκριμένου προβλήματος, είναι να γίνει χρήση της προσέγγισης των Duda και Hart, οι οποίοι αντικατέστησαν το επίπεδο $[a-b]$, με το επίπεδο $[ρ-θ]$. Στην περίπτωση αυτή η (3.20), μετασχηματίζεται ως εξής:

$$ρ = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3.21)$$

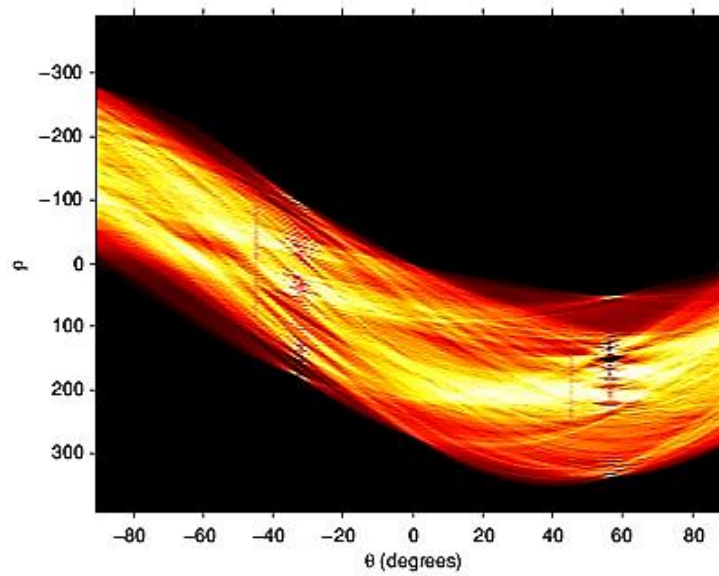


Σχήμα 3.10: Επίπεδα $[x-y]$ και $[ρ-θ]$

Σε αντίθεση, με την κατασκευή ευθύγραμμων τμημάτων στον $[a-b]$ παραμετρικό χώρο, στο χώρο $[ρ-θ]$ δημιουργούνται ημιτονοειδείς καμπύλες. Q σημεία, που βρίσκονται πάνω στην ευθεία $x \cos \theta_i + y \sin \theta_i = \rho_i$, παράγουν Q ημιτονοειδείς καμπύλες, οι οποίες τέμνονται στα σημεία (ρ_i, θ_i) του παραμετρικού χώρου. Αυξάνοντας τη γωνία θ και επιλύοντας για το αντίστοιχο ρ , λαμβάνονται Q σημεία της μήτρας $A(i,j)$, τα οποία συσχετίζονται με τα κελιά (ρ_i, θ_i) .

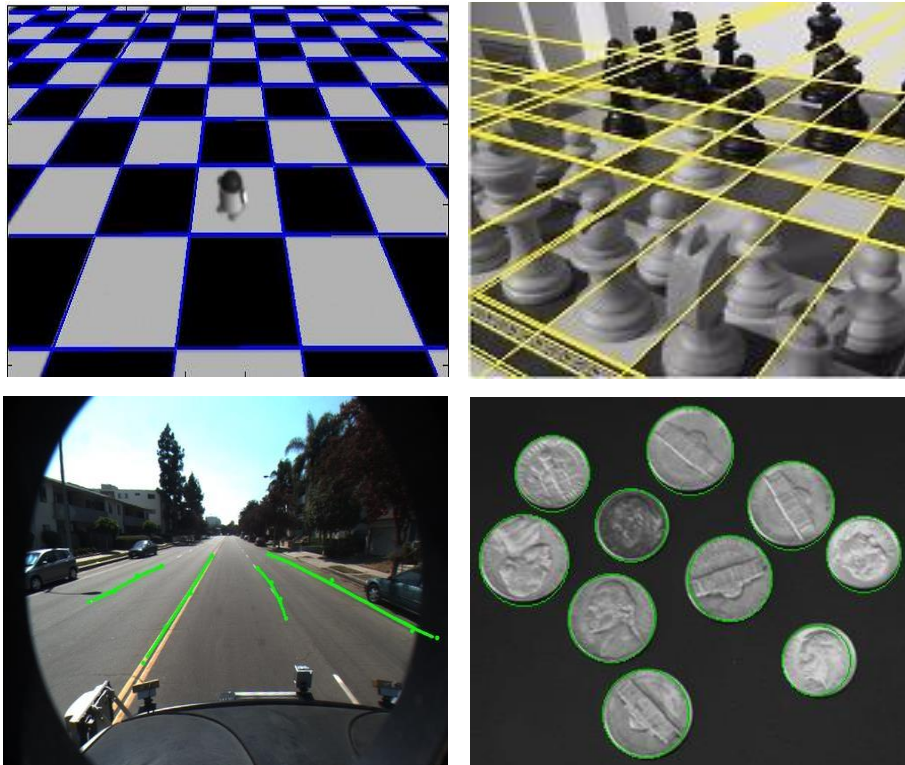
Οι Duda και Hart προσαρμοσαν το μετασχηματισμό Hough και έδωσαν μια μέθοδο υλοποίησης του για δυαδικές εικόνες [78]. Σύμφωνα με τη μέθοδό τους, κάθε μαύρο εικονοστοιχείο της εικόνας μετασχηματίζεται σε μια ημιτονοειδή καμπύλη στο επίπεδο $[ρ-θ]$. Το επίπεδο αυτό υλοποιείται με έναν πίνακα διαστάσεων συνήθως $[m \times n]$, ο οποίος ονομάζεται πίνακας Hough. Έτσι, κάθε σημείο της ημιτονοειδούς καμπύλης «γεμίζει» την κοντινότερη προς αυτό θέση του πίνακα Hough. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας, ο πίνακας θα αντιπροσωπεύει το μετασχηματισμό Hough της δυαδικής εικόνας. Δηλαδή μια ευθεία, θα αντιστοιχεί σε εκείνο το σημείο του πίνακα με τη μεγαλύτερη τιμή. Οι διαστάσεις του πίνακα Hough δεν εξαρτώνται απόλυτα από τις διαστάσεις της αρχικής εικόνας. Κύριο ρόλο διαδραματίζει η επιθυμητή ακρίβεια των ρ και θ . Αν χρειάζεται μεγαλύτερη ακρίβεια, τότε πρέπει να αυξηθούν οι τιμές των m και n . Όμως, υπάρχουν και περιπτώσεις που χρησιμοποιείται πίνακας Hough, μικρότερων διαστάσεων από την αρχική εικόνα. Για παράδειγμα σε μια εικόνα κειμένου η χρήση πίνακα συσσώρευσης μικρών διαστάσεων, έχει ως αποτέλεσμα το μετασχηματισμό μίας γραμμής κειμένου σε ένα μόνον σημείο, με συνέπεια τον προσδιορισμό της θέσης της γραμμής. Σημειώνεται επίσης, ότι η επακριβής αντιστροφή του μετασχηματισμού Hough δεν αποτελεί μια εύκολη υπόθεση. Γενικά, γίνεται δεκτό ότι η αντιστροφή του μετασχηματισμού Hough αντιστοιχεί στην επίλυση ενός

πολύ μεγάλων διαστάσεων συστήματος γραμμικών εξισώσεων.



Σχήμα 3.11: Φάσμα του μετασχηματισμού Hough

Η ιδέα του μετασχηματισμού Hough είναι εύκολα γενικεύσιμη για την ανίχνευση και άλλων αναλυτικών καμπυλών. Με κατάλληλη δε τροποποίηση, είναι δυνατή η αναγνώριση και μη αναλυτικών καμπυλών.



Σχήμα 3.12: Εντοπισμός παραμετρικών καμπυλών, με χρήση του μετασχηματισμού Hough

3.5 Ο αλγόριθμος k-means

Ο διαμεριστικός αλγόριθμος k-means αποτελεί έναν από τους πιο απλούς και δημοφιλέστερους αλγορίθμους ομαδοποίησης, που ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των τεχνικών μάθησης χωρίς επίβλεψη. Ο αλγόριθμος αυτός είναι δημοφιλής εξαιτίας της απλότητας της υλοποίησής του και της γραμμικής πολυπλοκότητάς του. ($O(n)$). Η διαδικασία της ομαδοποίησης ενός συνόλου δεδομένων με βάση τον k-means καθίσταται αρκετή απλή, αρκεί να είναι εκ των προτέρων καθορισμένος ο αριθμός k των κλάσεων, που θα προκύψουν. Η κύρια ιδέα είναι να προσδιοριστούν αρχικά k κεντροειδή (centroids), ένα για κάθε κλάση. Τα αρχικά κεντροειδή, οφείλουν να επιλεγούν με ιδιαίτερη προσοχή, διότι διαφορετικές αρχικοποιήσεις, οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα ομαδοποίησης. Συχνά θεωρείται καλύτερη η επιλογή εκείνων των κεντροειδών, τα οποία απέχουν μεταξύ τους, όσο περισσότερο δύναται. Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή κάθε στοιχείου από το σύνολο δεδομένων και η συσχέτισή του με το κοντινότερο σε αυτό κεντροειδές. Όταν γίνει αυτό για όλα τα στοιχεία του συνόλου δεδομένων, έχει προκύψει μια πρώιμη ομαδοποίηση. Στη συνέχεια, απαιτείται να υπολογιστούν ξανά k νέα κεντροειδή, τα οποία θα αποτελούν το κέντρο βάρους για κάθε ομάδα, που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα. Αφού οριστούν τα k νέα κεντροειδή, ακολουθεί και πάλι η ίδια διαδικασία ανάθεσης καθενός από τα στοιχεία του συνόλου δεδομένων στο κοντινότερο με αυτό, νέο πλέον κεντροειδές. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται μια επανάληψη της ίδιας διαδικασίας. Αποτέλεσμα της επανάληψης αυτής είναι ότι σε κάθε βήμα τα κεντροειδή αλλάζουν θέση και τα στοιχεία ανατίθενται στην κατάλληλη κλάση, κάθε φορά με βάση το κοντινότερο κεντροειδές. Όταν σε κάποια επανάληψη δε σημειωθούν αντιμεταθέσεις στοιχείων, τότε τερματίζει η εκτέλεση του αλγορίθμου. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η ομαδοποίηση του συνόλου των δεδομένων σε k ομάδες. Ο αλγόριθμος στοχεύει να ελαχιστοποιήσει μια αντικειμενική συνάρτηση, τη λεγόμενη συνάρτηση τετραγωνικού σφάλματος που ορίζεται ως εξής :

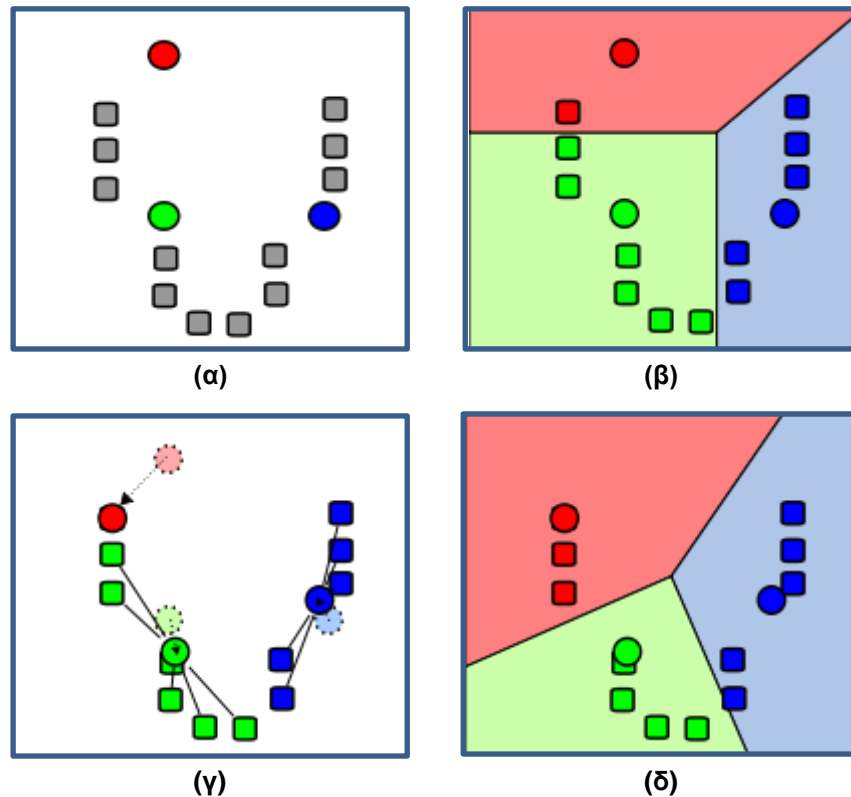
$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (3.22)$$

Όπου $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$ είναι ένα μέτρο απόστασης, που χρησιμοποιείται για να μετρά την απόσταση κάθε στοιχείου x_i από το κεντροειδές c_j της κάθε κλάσης και n το σύνολο των στοιχείων του συνόλου δεδομένων. Αν και μπορεί να αποδειχθεί ότι ο αλγόριθμος τερματίζει πάντα, αξίζει να τονιστεί ότι δεν καταφέρνει πάντα να βρίσκει τη βέλτιστη λύση.

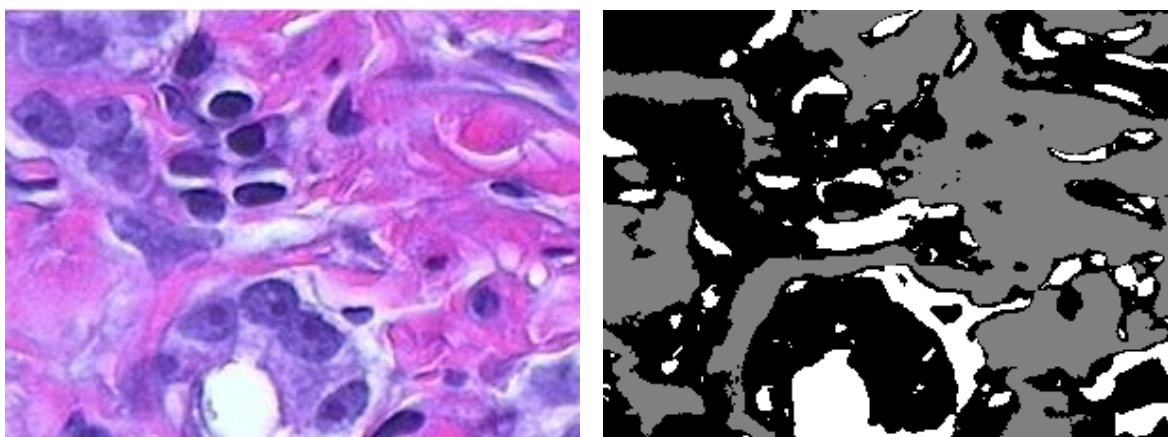
Ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται τα αρχικά κεντροειδή δεν είναι σαφώς καθορισμένος. Ένας αρκετά δημοφιλής τρόπος επιλογής των αρχικών κεντροειδών είναι να επιλεγθούν με τυχαίο τρόπο. Τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης εξαρτώνται από τα αρχικά κέντρα και συχνά προκύπτει μη βέλτιστη λύση, λόγω της κακής αρχικοποίησης. Είναι σύνηθες κάποια κλάση να μείνει χωρίς μέλη και έτσι να μην ανανεωθεί κάποιο κεντροειδές. Πρόκειται για το γνωστό πρόβλημα των απόμακρων στοιχείων (outliers), που πολλές φορές δε συμπεριλαμβάνονται στη διαδικασία. Για το λόγο αυτό, συνίσταται να γίνουν πολλές δοκιμές εκτέλεσης με διαφορετικά αρχικά κεντροειδή κάθε φορά.

Τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης εξαρτώνται και από το μέτρο της απόστασης που χρησιμοποιείται. Πολλές φορές χρειάζεται να γίνει κανονικοποίηση των στοιχείων του συνόλου δεδομένων προκειμένου να εφαρμοστεί κάποιο μέτρο απόστασης. Έτσι, για παράδειγμα, όταν ο αλγόριθμος εκτελεί ομαδοποίηση, με βάση την Ευκλείδεια απόσταση, προϋποθέτει ότι τα δεδομένα των κλάσεων έχουν όλα σφαιρικό σχηματισμό. Διάφορες έρευνες έχουν καταφέρει να επεκτείνουν τον αλγόριθμο k-means, ώστε να μπορεί να αποδώσει όχι μόνο σε δεδομένα με σφαιρικό σχηματισμό, αλλά και σε δεδομένα με ελλειπτικό σχηματισμό. Μία ακόμη αδυναμία του αλγορίθμου, είναι ότι δυσκολεύεται να αναγνωρίσει ομάδες με διαφορετικό σχηματισμό και μέγεθος. Το πρόβλημα εντείνεται κυρίως σε πολύ μεγάλα σύνολα δεδομένων.

Η τελική ομαδοποίηση εξαρτάται ισχυρά και από την τιμή k των επιθυμητών κλάσεων, η οποία αποτελεί στοιχείο εισόδου για τον αλγόριθμο. Παρόλο που έχει προταθεί πληθώρα τρόπων εκτίμησης του k , το εν λόγω πρόβλημα δεν έχει επιλυθεί σαφώς, καθώς ο αλγόριθμος δεν καταφέρνει να βρει το «βέλτιστο» αριθμό κλάσεων από μόνος του.



Σχήμα 3.13: Κεντρική ιδέα του αλγορίθμου k -means. (α) Δημιουργία k τυχαίων κεντροειδών, (β) Συσχέτιση κάθε στοιχείου του δείγματος με το κοντινότερο σε αυτό κεντροειδές, (γ) Αναπροσαρμογή κεντροειδών, (δ) Αναπροσαρμογή κλάσεων με βάση τα νέα κεντροειδή



Σχήμα 3.14: Κατάτμηση RGB εικόνας, σε τρεις κλάσεις με χρήση του αλγορίθμου k -means

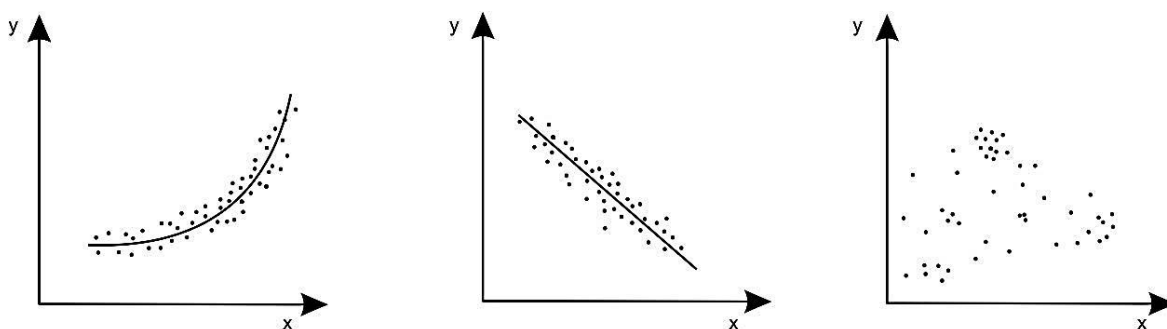
3.6 Ανάλυση παλινδρόμησης

Με την ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) εξετάζεται η σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών με σκοπό την πρόβλεψη των τιμών της μιας, μέσω των τιμών της άλλης (ή των άλλων). Σε κάθε πρόβλημα παλινδρόμησης διακρίνονται δύο είδη μεταβλητών: οι ανεξάρτητες ή ελεγχόμενες ή επεξηγηματικές (independent/predictor/explanatory variables) και οι εξαρτημένες ή μεταβλητές απόκρισης (dependent/response variables). Σε πειραματικές έρευνες, ανεξάρτητη μεταβλητή X είναι εκείνη την οποία μπορεί να ελεγχθεί, δηλαδή, να καθοριστούν οι τιμές της. Εξαρτημένη μεταβλητή Y είναι εκείνη, στην οποία αντανακλάται το αποτέλεσμα των μεταβολών στις ανεξάρτητες μεταβλητές. Σε μη πειραματικές έρευνες (δειγματοληψίες) η διάκριση μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών δεν είναι πάντοτε σαφής γιατί καμία μεταβλητή δεν είναι ελεγχόμενη, αλλά όλες είναι τυχαίες.

Αν δύο μεταβλητές X , Y συνδέονται με μια σχέση της μορφής $Y=f(X)$, μέσω της οποίας για κάθε τιμή X μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς η τιμή της Y , δηλαδή αν οι τιμές της Y δεν υπόκεινται σε σφάλματα, τότε οι δύο μεταβλητές συνδέονται με τη συναρτησιακή-προσδιοριστική (deterministic) σχέση $Y=f(X)$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα σημεία του διαγράμματος διασποράς βρίσκονται όλα πάνω στην καμπύλη που έχει εξίσωση $Y=f(x)$ και όσες φορές και αν επαναληφθεί το πείραμα, θέτοντας το X στο ίδιο επίπεδο $X=x_i$, θα λαμβάνεται πάντα η ίδια τιμή για το Y .

Οι μη προσδιοριστικές σχέσεις μεταξύ μεταβλητών ονομάζονται στοχαστικές-στατιστικές (stochastic, probabilistic) σχέσεις. Στην περίπτωση αυτή, αν το πείραμα επαναληφθεί αρκετές φορές θέτοντας το X στο ίδιο επίπεδο $X = x_i$, τότε στην τιμή x_i της X δεν αντιστοιχεί μία μόνο τιμή y_i της Y , αλλά ένα πλήθος διαφορετικών τιμών της Y .

Σε μία στοχαστική σχέση το διάγραμμα διασποράς είναι ένα νέφος σημείων το οποίο πολλές φορές καθορίζει μια ιδεατή γραμμή, που δίνει μια πρώτη εικόνα της σχέσης που συνδέει της δύο μεταβλητές. Η σχέση μάλιστα μεταξύ των δύο μεταβλητών είναι περισσότερο ισχυρή, όσο πιο κοντά στην ιδεατή γραμμή βρίσκονται τα σημεία του διαγράμματος διασποράς. Στο πρώτο από τα παρακάτω σχήματα, απεικονίζεται το διάγραμμα διασποράς μιας ισχυρής σχέσης, στην οποία όταν αυξάνουν οι τιμές της X , αυξάνουν γενικά και οι τιμές της Y , ενώ στο δεύτερο απεικονίζεται μια λιγότερο ισχυρή σχέση, στην οποία όταν αυξάνουν οι τιμές της X , ελαττώνονται γενικά και οι τιμές της Y . Τέλος, στην περίπτωση του τρίτου σχήματος, δε φαίνεται να υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ των X και Y .



Σχήμα 3.15: Διαγράμματα διασποράς δύο τυχαίων μεταβλητών

Γενικά, δύο μεταβλητές που συνδέονται είτε με συναρτησιακή-προσδιοριστική σχέση είτε με στοχαστική σχέση λέγονται «εξαρτημένες». Αν υπάρχει εξάρτηση μεταξύ δύο μεταβλητών, τότε μπορούμε τη μια από αυτές να τη χαρακτηρίσουμε ως «αιτία» και την

άλλη ως «αποτέλεσμα». Αυτό όμως, μόνο στην περίπτωση που η εξάρτηση οφείλεται σε σχέση αιτιότητας των δύο μεταβλητών και όχι σε μια απλή συμμεταβολή, η οποία μπορεί να οφείλεται σε εξάρτηση των δύο μεταβλητών από μια τρίτη μεταβλητή.

Για να περιγραφεί η στοχαστική εξάρτηση δύο μεταβλητών X και Y , γίνεται μια προσπάθεια εύρεσης μιας σχέσης μεταξύ των X και Y , η οποία δε θα δίνει την ακριβή, αλλά την προσεγγιστική εικόνα της εξάρτησης των X και Y και τα σημεία του διαγράμματος διασποράς των X και Y δε θα βρίσκονται πάνω, αλλά γύρω από μια καμπύλη. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως για την περιγραφή της στοχαστικής εξάρτησης δύο μεταβλητών είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

3.6.1 Απλή γραμμική παλινδρόμηση

Αν το διάγραμμα διασποράς δύο μεταβλητών X και Y έχει μορφή επιμήκους κεκλιμένης έλλειψης ή πεπλατυσμένου J , η σχέση των X και Y είναι κατά προσέγγιση γραμμική. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει η απλούστερη μορφή παλινδρόμησης, η απλή γραμμική παλινδρόμηση, όπου υπάρχει μόνο μια ανεξάρτητη μεταβλητή X και η εξαρτημένη μεταβλητή Y μπορεί να προσεγγισθεί ικανοποιητικά, από μια γραμμική συνάρτηση του X .

Η γραμμική σχέση $Y = \alpha + \beta X$ δε μπορεί ασφαλώς, να περιγράψει τη γραμμική στοχαστική εξάρτηση των μεταβλητών X και Y . Επιπλέον, συμβαίνει να παρατηρούνται και σφάλματα μέτρησης των τιμών της Y (λόγω οργάνων ή ελλιπούς πληροφόρησης). Έτσι, για $X = x_1$, το αντίστοιχο Y είναι μια τυχαία μεταβλητή Y_1 , που ακολουθεί κάποια κατανομή. Ομοίως, για $X = x_2$ θα έχουμε κάποια άλλη κατανομή Y_2 κ.ό.κ.

Επομένως, στην εξίσωση $Y = \alpha + \beta X$ πρέπει να προστεθεί ένας ακόμη όρος (ε), ο οποίος για δεδομένη τιμή της X , περιγράφει τη διαφορά της παρατηρούμενης από τη θεωρητική τιμή ($\alpha + \beta X$) της Y . Προκύπτει επομένως, το στοχαστικό μοντέλο:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \quad (3.23)$$

Για το απλό γραμμικό μοντέλο, για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών και εφικτότητας της λύσης του προβλήματος, κάνουμε τις ακόλουθες υποθέσεις-παραδοχές:

- **Γραμμικότητα (Linearity)**
Η κατανομή της Y έχει για τα διάφορα επίπεδα x_i , με $i = 1, 2, \dots, n$ της X , μέση τιμή $E(Y|X=x_i) = \alpha + \beta x_i$ ή $E(Y|X) = \alpha + \beta X$, όπου α και β παράμετροι που εκτιμώνται από το δείγμα (x_i, y_i) , με $i = 1, 2, \dots, n$. Δηλαδή, οι μέσες τιμές της Y , για τα διάφορα επίπεδα της X , είναι γραμμικές συναρτήσεις της X (βρίσκονται δηλαδή σε ευθεία γραμμή). Σημειώνεται ότι στο μοντέλο $Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$, τυχαίες μεταβλητές είναι μόνο οι Y και ε .
- **Ομοσκεδαστικότητα (Homoscedasticity)**
Οι κατανομές της Y έχουν ίδια διασπορά για όλα τα επίπεδα της X , δηλαδή $\text{var}(Y|X=x_i) = \sigma^2$.
- **Ανεξαρτησία (Independence)**
Οι τιμές της Y που αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα της X είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.
- **Κανονικότητα (Normality)**
Η κατανομή της Y , για όλα τα επίπεδα της X είναι κανονική.

Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις για την τυχαία μεταβλητή Y , για την τυχαία μεταβλητή

$\varepsilon = Y - (\alpha + \beta X)$, δηλαδή για τα σφάλματα (residuals) δεχόμαστε ότι:

- $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$
- Οι τιμές της ε που αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα της X είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες.

Οι συγκεκριμένες παραδοχές αποτελούν την αναγκαία μαθηματική βάση για την εφαρμογή μεθόδων της στατιστικής συμπερασματολογίας (π.χ. έλεγχοι υποθέσεων, διαστήματα εμπιστοσύνης). Επομένως, ο έλεγχος αυτών των παραδοχών είναι αναγκαίος προκειμένου να αποφευχθούν λανθασμένες διαδικασίες εξαγωγής συμπερασμάτων για τον πληθυσμό.

Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζεται στη συνέχεια μια εκτίμηση της ευθείας $\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X$. Η εκτίμηση της πληθυσμιακής ευθείας παλινδρόμησης ονομάζεται ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.

3.6.2 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων

Η πρώτη αναφορά με ολοκληρωμένη ανάπτυξη της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων εμφανίστηκε το 1805 σε μια εργασία του Γάλλου μαθηματικού Legendre, (1752-1833) και αμέσως μετά από τον Gauss, (1777-1855) στην αστρονομική του πραγματεία "Theoria Motus".

Θεωρούμε n ζεύγη παρατηρήσεων (x_i, y_i) με $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Αναζητείται μια προσέγγιση της μορφής $y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i$, όπου τα ε_i παριστάνουν τις αποκλίσεις της πραγματικής τιμής y από την προσαρμοσμένη τιμή $\alpha + \beta \cdot x_i$.

$$\varepsilon_i = y_i - (\alpha + \beta x_i) \quad (3.24)$$

Είναι φανερό, ότι η εκλογή (εκτίμηση) των α και β θα πρέπει να γίνει έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ποσότητες ε_i . Για το σκοπό αυτό, αναζητούνται οι τιμές των α και β για τις οποίες ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των ε_i .

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \quad (3.25)$$

Η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος $\sum \varepsilon_i$ δεν αποτελεί ασφαλές κριτήριο επιλογής, διότι κάποια αρνητικά ε_i θα αναιρούν αντίστοιχες θετικές ποσότητες του αθροίσματος.

Παραγωγίζοντας την (3.25) ως προς α και β και εξισώνοντας με μηδέν, λαμβάνονται οι ακόλουθες δύο κανονικές εξισώσεις:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i = n \cdot \alpha + \beta \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n x_i + \beta \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{cases} \quad (3.26)$$

Λύνοντας το σύστημα των κανονικών εξισώσεων, λαμβάνονται οι εξισώσεις:

$$\hat{\beta} = \left[n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \right] / \left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \quad (3.27)$$

$$= \left[\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \right] / \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right] = s_{xy} / s_x^2$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} \quad (3.28)$$

Η εκτίμηση ελαχίστων τετράγωνων $\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X$ της ευθείας παλινδρόμησης από το δείγμα των n ζευγών παρατηρήσεων υπολογίζεται ως :

$$\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} + \hat{\beta} \cdot X = \bar{y} + \hat{\beta}(X - \bar{x}) = \bar{y} + \frac{s_{xy}}{s_x^2} (X - \bar{x}) \quad (3.29)$$

Προφανώς, η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων διέρχεται από το σημείο (\bar{x}, \bar{y}) . Επισημαίνεται ότι πρέπει να γίνεται διάκριση μεταξύ της παρατηρούμενης τιμής του Y και της \hat{Y} που εκτιμάται. Η παρατηρούμενη τιμή y_i είναι η πραγματική τιμή της Y , ενώ η τιμή \hat{y}_i της \hat{Y} , είναι εκτίμηση της μέσης τιμής $E(Y|X) = x_i$.

Από την προφανή σχέση $y_i - \bar{y} = (y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y})$, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί αλγεβρικά:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.30)$$

Το άθροισμα $SSTO = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ λέγεται ολικό άθροισμα τετραγώνων (total sum of squares) ή ολική μεταβλητότητα (total variation) των y_i και όπως φαίνεται από τη σχέση (3.8) αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Στο άθροισμα τετραγώνων παλινδρόμησης (regression sum of squares) $SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ και στο άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (error sum of squares) ή υπόλοιπο μεταβλητότητας (residual variation) $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$.

$$SSTO = SSR + SSE \quad (3.31)$$

Το ολικό άθροισμα τετραγώνων (SSTO) μετράει τη συνολική μεταβλητότητα των παρατηρήσεων y_i , δηλαδή εκφράζει την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του Y , όταν δε χρησιμοποιείται το X . Το άθροισμα τετραγώνων παλινδρόμησης (SSR) εκφράζει το μέρος της μεταβλητότητας, που μπορεί να οφείλεται στο X και το άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων ($SSE = SSTO - SSR$) εκφράζει την υπόλοιπη μεταβλητότητα που δεν εξηγείται από την παλινδρόμηση.

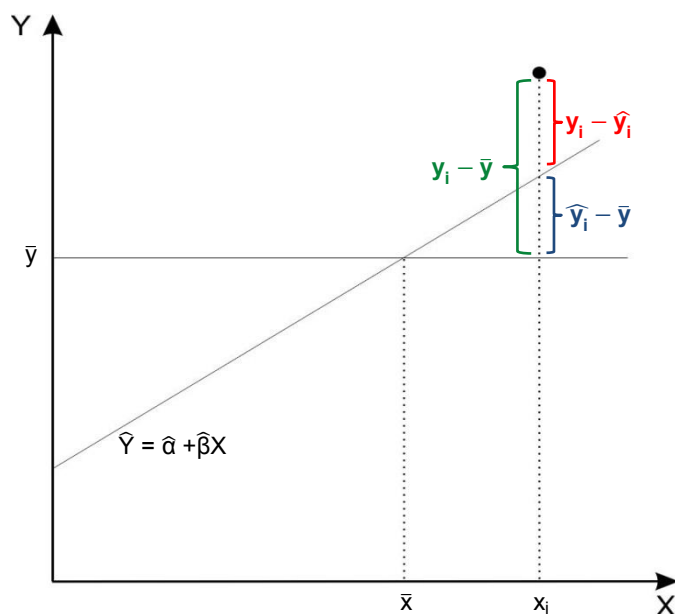
Ο λόγος

$$r^2 = SSR / SSTO = 1 - (SSE / SSTO) = 1 - \left[\left(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right) \right] \quad (3.32)$$

εκφράζει το ποσοστό της συνολικής μεταβλητότητας των y_i , που απορροφάται από την

παλινδρόμηση, ονομάζεται συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination) και λαμβάνει τιμές στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$.

Όταν όλα τα σημεία $[M_1(x_1, y_1), M_2(x_2, y_2), \dots, M_n(x_n, y_n)]$, βρίσκονται πάνω στην ευθεία ελαχίστων τετραγώνων θα ισχύει $y_i = \hat{y}_i$, συνεπώς $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0$, άρα ο συντελεστής προσδιορισμού θα ισούται με μονάδα. Όταν η κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων είναι μηδέν ($\hat{\beta} = 0$), τότε και ο συντελεστής προσδιορισμού θα ισούται με μηδέν. Στις διάφορες πρακτικές εφαρμογές η τιμή του r^2 βρίσκεται μεταξύ 0 και 1 και όσο πλησιέστερα βρίσκεται προς τη μονάδα, τόσο καλύτερη είναι η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων ως εκτίμηση της ευθείας παλινδρόμησης.



Σχήμα 3.16: Ολικό άθροισμα τετραγώνων, άθροισμα τετραγώνων παλινδρόμησης και άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων

Η μέση απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμώμενης τιμής της μεταβλητής ονομάζεται τυπικό σφάλμα της εκτίμησης (standard error of the estimate), συμβολίζεται με s και δίνεται από τον τύπο

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} = \sqrt{\frac{SSE}{n-2}} \quad (3.33)$$

Είναι φανερό, ότι το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης, είναι ένα μέτρο της διασποράς των (x_i, y_i) γύρω από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων $\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x_i$ (το s^2 είναι μια εκτίμηση της διασποράς των σφαλμάτων). Επομένως, έχει ιδιότητες ανάλογες με αυτές της τυπικής απόκλισης. Έτσι, αν δημιουργηθούν δύο ευθείες παράλληλες προς την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων και σε κατακόρυφες προς αυτήν αποστάσεις s , $2s$, $3s$, τότε για μεγάλα n (μεγαλύτερα του 30), μεταξύ των δύο αυτών ευθειών θα βρίσκεται περίπου το 68%, το 95% και το 99,7% των σημείων του διαγράμματος διασποράς αντίστοιχα.

4. Προτεινόμενη Μεθοδολογία Ανάλυσης Φθοράς

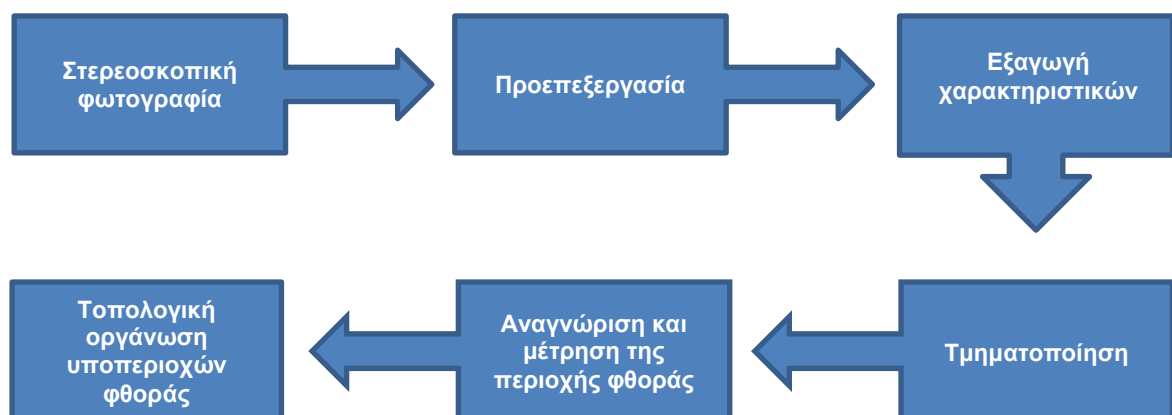
Η έρευνα που υλοποιείται στην παρούσα εργασία, παρουσιάζει ένα σύστημα μέτρησης της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας κοπτικών εργαλείων, βασισμένο σε μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Το σύστημα αποτελείται από ένα στερεομικροσκόπιο και μία υπολογιστική μονάδα, στην οποία λαμβάνει χώρα η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Το μοντέλο του στερεομικροσκοπίου που χρησιμοποιήθηκε είναι το M125 της εταιρείας Leica, ένα πλήρως αποχρωματικό στερεομικροσκόπιο μεγάλου εύρους μεγέθυνσης (0.8x - 10x, 12.5:1) με ενσωματωμένη CCD κάμερα υψηλής ανάλυσης (592 × 1944 με μέγεθος εικονοστοιχείου 2.78 μm × 2.78 μm). Η κεφαλή της κάμερας κβαντίζει την πληροφορία εικόνας που λαμβάνει από το CCD κύκλωμα με 12 bit και φροντίζει για την παραγωγή εξαιρετικής ποιότητας εικόνων υψηλής ανάλυσης με φυσική αναπαράσταση των χρωμάτων. Ευκρινείς εικόνες είναι δυνατόν να ληφθούν και κάτω από χαμηλό φωτισμό. Ο παρεμβαλλόμενος θερμικός θόρυβος μειώνεται αποτελεσματικά με τη διαδικασία της ενεργής ψύξης, που εκτελεί η κάμερα μέσω ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου Peltier.



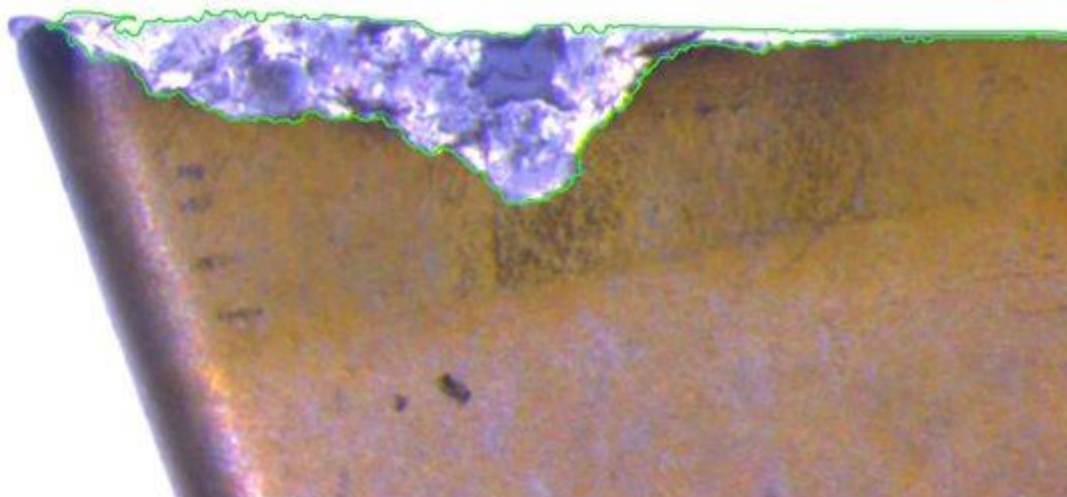
Σχήμα 4.1 : Το στερεομικροσκόπιο Leica M125

Οι μέθοδοι της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιούνται, έχουν ως στόχο την απομόνωση και τη μέτρηση της περιοχής φθοράς με έναν αυτοματοποιημένο τρόπο. Τελικά, προκύπτει ένα ενιαίο μορφολογικό στοιχείο, που σκιαγραφεί πλήρως την περιοχή της φθοράς, από το οποίο μπορούν να εξαχθούν και να υπολογιστούν το μέγιστο πλάτος και το εμβαδόν της φθοράς, αλλά και να επιτευχθεί ένας διαχωρισμός μεταξύ των διαφορετικών περιοχών που υπάρχουν στη ζώνη φθοράς. Πιο αναλυτικά, αφού ληφθεί η φωτογραφία, κάτω από κατάλληλο φωτισμό, ο οποίος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του δακτυλίου LED του στερεομικροσκοπίου, ακολουθεί το στάδιο της προεπεξεργασίας. Η συγκεκριμένη βαθμίδα στοχεύει στην απομάκρυνση του φόντου της ληφθείσας εικόνας, ώστε να διασφαλιστεί ότι δε θα συμμετάσχουν στη διαδικασία της κατάτμησης τα εικονοστοιχεία του φόντου. Σε αντίθεση περίπτωση, ο αλγόριθμος κατάτμησης θα οδηγήσει σε μια εντελώς εσφαλμένη ομαδοποίηση. Κατόπιν, δημιουργείται ο χώρος

χαρακτηριστικών, ο οποίος αποτελείται από τις τρεις χρωματικές συνιστώσες του κάθε εικονοστοιχείου (R,G,B), αλλά και τη χωρική πληροφορία του (συνιστώσες x,y), ώστε να παρέχεται αρκετά ικανοποιητική πληροφορία από το πεδίο της εικόνας. Έτσι, δημιουργείται ένα σύνολο ανεξαρτήτων και όμοια κατανεμημένων παρατηρήσεων στον 5-διάστατο χώρο, που ανήκει σε μια άγνωστη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας f , για την οποία δε γίνεται καμία υπόθεση όσον αφορά τη δομή της, πέραν της ομαλότητάς της. Η τμηματοποίηση της ληφθείσας εικόνας αποτελεί το επόμενο βήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Στη συγκεκριμένη βαθμίδα του συστήματος, γίνεται χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift, ο οποίος προβαίνει σε μία εκτίμηση μόνο των μεγίστων και όχι ολόκληρης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας f , γεγονός που συνεπάγεται με τεράστιο κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο, καθώς η εκτίμηση των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας πολυδιάστατων δεδομένων αποτελεί μια δαπανηρή υπολογιστικά διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ταχύτητα μια Gaussian μοντελοποίηση του χώρου των κλάσεων και αποκτάται μια άρτια τμηματοποίηση της ληφθείσας εικόνας. Μετά την ταξινόμηση όλων των εικονοστοιχείων της εικόνας σε κλάσεις, ακολουθεί το στάδιο εντοπισμού της ζώνης φθοράς. Με οπτική εποπτεία των κατατετμημένων εικόνων, παρατηρείται ότι η υγιής περιοχή του κοπτικού εργαλείου, αποτελεί την πολυπληθέστερη κλάση. Συνεπώς, η κλάση αυτή αφαιρείται και απομένει ως ωφέλιμη πληροφορία η περιοχή της φθοράς, μαζί με κάποιο ανεπιθύμητο θόρυβο. Στη συνέχεια γίνεται χρήση της κατωφλίωσης του Otsu, ώστε να δυαδικοποιηθεί η παραπάνω εικόνα και κατόπιν το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης ενέργειας επεξεργάζεται περαιτέρω, μέσω μαθηματικών μορφολογικών τελεστών, με σκοπό το φιλτράρισμα του ανεπιθύμητου θορύβου και τη λείανση/όξυνση των περιγραμμάτων της περιοχής ενδιαφέροντος. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής, η περιοχή με το μεγαλύτερο εμβαδόν, αντιστοιχεί στην περιοχή της φθοράς. Από το ενιαίο αυτό μορφολογικό στοιχείο, υπολογίζεται το μέγιστο πλάτος και το εμβαδόν της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας. Το τελευταίο βήμα του αλγορίθμου αφορά την ταξινόμηση των διαφορετικών περιοχών, εντός της ζώνης φθοράς. Συνεπώς, τα διανύσματα που λαμβάνονται μετά την εφαρμογή του Mean-Shift και τα οποία ανήκουν στην περιοχή της φθοράς εισάγονται σε ένα δίκτυο Kohonen. Το συγκεκριμένο δίκτυο αυτό-οργανώνεται, με σκοπό να δημιουργηθούν διαφορετικές γειτονίες νευρώνων στο χάρτη, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις εισόδων. Έτσι, για κάθε εικόνα, οι λίγες περιοχές εντός της ζώνης φθοράς, που με οπτική εποπτεία φαίνεται να έχουν προκύψει από διαφορετικό αίτιο, οργανώνονται τοπολογικά, μέσω του δικτύου Kohonen.



Σχήμα 4.2 : Γενικό διάγραμμα ροής του προτεινόμενου συστήματος



Σχήμα 4.3 : Σκιαγράφιση της περιοχής της φθοράς

4.1 Σύστημα φωτισμού

Οι μονάδες φωτισμού αποτελούν ένα ιδιαίτερα κρίσιμο στοιχείο για τη «σωστή» λήψη μιας εικόνας. Για το λόγο αυτό, αρκετές ερευνητικές προσπάθειες πάνω στην παρακολούθηση της κατάστασης των κοπτικών εργαλείων, δίνουν μεγάλη έμφαση στο φωτισμό του υπό εξέταση κοπτικού. Οι Jeon και Kim χρησιμοποίησαν μια παράλληλη προς το κοπτικό εργαλείο, δέσμη laser He-Ne, με σκοπό να υπάρξει αντανάκλαση φωτός μόνο από τη ζώνη φθοράς του κοπτικού εργαλείου και μόνο η συγκεκριμένη περιοχή να γίνεται ορατή μέσω της κάμερας. Οι Kurada και Bradley, χρησιμοποίησαν δύο οδηγούς οπτικών ινών για να πετύχουν ικανοποιητική αντίθεση μεταξύ της φθαρμένης και της άφθαρτης περιοχής του κοπτικού εργαλείου. Ο Pfeifer και ο Weigers χρησιμοποίησαν έναν δακτύλιο από LED, προσαρμοσμένο στην κάμερα, για τη λήψη κατάλληλων εικόνων φθοράς από διαφορετικές γωνίες λήψης. Ο Kim και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν οπτικές ίνες για να φωτίσουν την πλευρική επιφάνεια ενός τετράφτερου κονδυλίου. Παρατήρησαν επίσης, ότι η βέλτιστη, για την εφαρμογή τους, μέτρηση της φθοράς μπορεί να επιτευχθεί και με φωτισμό υψηλής ισχύος (60 W). Ο Kerr και οι συνεργάτες του, χρησιμοποίησαν λευκό φως από ένα φθορίζοντα δακτύλιο, καθώς και μια συστάδα οπτικών ινών για την ελαχιστοποίηση των κατοπτρικών ανακλάσεων στην επιφάνεια των κοπτικών εργαλείων. Αντίθετα, ο Lee χρησιμοποίησε μια πηγή μπλε φωτός, τοποθετημένη σε γωνία 45° αναφορικά με το υπό εξέταση δείγμα. Ο Tsai προσπάθησε να αποκτήσει μια ομοιογενώς φωτισμένη εικόνα, μέσω μιας φθορίζουσας πηγής φωτισμού, τοποθετημένη σε γωνία 10° , αναφορικά με την επιφάνεια του δείγματος. Η κάμερα ήταν επίσης τοποθετημένη σε γωνία περίπου 10° σε σχέση με την επιφάνεια του δείγματος, με σκοπό να ληφθεί η εικόνα στην κατεύθυνση του φωτός. Η συγκεκριμένη διάταξη όμως, ήταν ωφέλιμη μόνο για επίπεδα δείγματα.

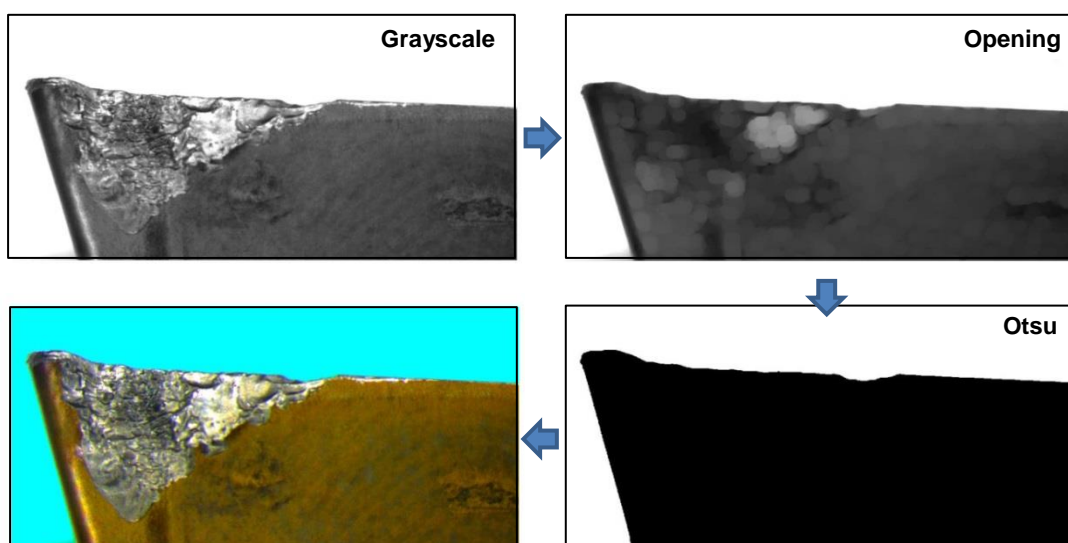
Στην παρούσα εργασία, για να επιτευχθεί μια καλύτερη αντίθεση μεταξύ της περιοχής φθοράς και της άφθαρτης επιφάνειας του κοπτικού εργαλείου, χρησιμοποιείται ο δακτύλιος φωτισμού του στερεομικροσκοπίου. Ο δακτύλιος, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος περιμετρικά του αντικειμενικού φακού αποτελείται από 40 πολύ ισχυρά LED ψυχρού φωτισμού, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα διαφορετικών συνδυασμών του φωτισμού τους, με σκοπό τη δημιουργία διαφορετικών συνθηκών φωτισμού στο κοπτικό εργαλείο (κάθετος, πλευρικός φωτισμός κ.α.). Στη συγκεκριμένη εργασία, έγινε χρήση του πλήρους κάθετου φωτισμού.



Σχήμα 4.4: Δακτύλιος φωτισμού του στερεοσκοπίου Leica M125

4.2 Προεπεξεργασία

Η προεπεξεργασία της εικόνας, έγκειται στην απομάκρυνση του φόντου, ώστε να διασφαλιστεί ότι δε θα συμμετάσχουν στη διαδικασία της κατάτμησης τα εικονοστοιχεία του φόντου. Σε περίπτωση παράλειψης του συγκεκριμένου βήματος, ο αλγόριθμος Mean-Shift θα οδηγήσει σε μια εντελώς εσφαλμένη ομαδοποίηση. Αφού η ληφθείσα εικόνα μετατραπεί σε grayscale, εφαρμόζεται ένα μορφολογικό άνοιγμα (δυαδική διάβρωση ακολουθούμενη από δυαδική διαστολή) με μορφολογικό στοιχείο έναν κύκλο ακτίνας 10 pixel. Στη συνέχεια, το αποτέλεσμα του μορφολογικού ανοίγματος μετατρέπεται σε μία δυαδική εικόνα μέσω της κατωφλίωσης του Otsu. Με τον τρόπο αυτό, διαχωρίζεται η περιοχή του φόντου, από την περιοχή του κοπτικού εργαλείου και αποθηκεύονται σε ένα πίνακα μόνο τα εικονοστοιχεία της περιοχής του κοπτικού.



Σχήμα 4.5: Διαδικασία αφαίρεσης του φόντου από τη ληφθείσα εικόνα

4.3 Τμηματοποίηση με χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift

Η τμηματοποίηση της ληφθείσας εικόνας αποτελεί το επόμενο βήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Αρχικά, ορίστηκε ο χώρος χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου προβλήματος, ο οποίος αποτελείται από τις τρεις χρωματικές συνιστώσες του κάθε εικονοστοιχείου (R,G,B), αλλά και τη χωρική πληροφορία του (συνιστώσες x,y), ώστε να παρέχεται αρκετά ικανοποιητική πληροφορία από το πεδίο της ληφθείσας εικόνας. Έτσι, δημιουργείται ένα σύνολο ανεξαρτήτων και όμοια κατανεμημένων παρατηρήσεων στον 5-διάστατο χώρο, που ανήκει σε μια άγνωστη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας f , για την οποία δε γίνεται καμία υπόθεση όσον αφορά τη δομή της, πέραν της ομαλότητάς της. Σύμφωνα με τη θεωρία των παραθύρων Parzen η συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας, μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της σχέσης:

$$\hat{f}_K(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^5} k \left(\left\| \frac{(x-x_i)}{h} \right\|^2 \right) \quad (4.1)$$

, όπου 5 η διάσταση του χώρου δεδομένων, x το διάνυσμα χαρακτηριστικών της κατηγορίας που θέλουμε να εκτιμήσουμε την pdf, n τα γειτονικά pixel που λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση της pdf, x_i το διάνυσμα χαρακτηριστικών ενός pixel που ανήκει στη γειτονιά του x , h το μέγεθος του παραθύρου και k ο πυρήνας που χρησιμοποιείται κατά την εκτίμηση. Στη συγκεκριμένη βαθμίδα του συστήματος, γίνεται χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift, ο οποίος προβαίνει σε μία εκτίμηση μόνο των μεγίστων και όχι ολόκληρης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, γεγονός που συνεπάγεται με τεράστιο κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο. Πέραν όμως της εκτίμησης των μεγίστων, παρέχει και μια φυσική ομαδοποίηση των παρατηρήσεων σε ομάδες αγνώστου εκ των προτέρων αριθμού, όπου κάθε ομάδα ορίζεται ως η δεξαμενή έλξης του κάθε τρόπου.

Ξεκινώντας από ένα σημείο $x^{(j)}$ στο χώρο των χαρακτηριστικών, το διάνυσμα Mean-Shift κινείται προς κάποιο σημείο $x^{(j+1)}$, το οποίο βρίσκεται σε περιοχή υψηλότερης πυκνότητας από το $x^{(j)}$, υπολογίζοντας επαναληπτικά για $j=1,2,..$ τη σχέση :

$$m_{h,G}(x_j) = x^{(j+1)} - x^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h^7} x_i g \left(\left\| \frac{(x-x_i)}{h} \right\|^2 \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h^7} g \left(\left\| \frac{(x-x_i)}{h} \right\|^2 \right)} - x^{(j)} \quad (4.2)$$

μέχρι η διαφορά $x^{(j+1)} - x^{(j)}$ να τείνει στο μηδέν. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται τα στάσιμα σημεία για κάθε pixel. Σημειώνεται, ότι για τον υπολογισμό του διανύσματος Mean-Shift έγινε χρήση του Gaussian πυρήνα, ενώ ως γειτονιά αναζητήσης επιλέχθηκε η γειτονιά $[16*16]$ pixel. Εκτενέστερη συζήτηση για την επιλογή των παραμέτρων του αλγορίθμου Mean-Shift γίνεται στο Κεφάλαιο 7.

Όπως αναφέρεται στο [80], η επιλογή μιας σταθερής τιμής h , μπορεί να θεωρηθεί ακατάλληλη σε αρκετές περιπτώσεις. Σε περιοχές όπου η πυκνότητα είναι μικρή, όπως συμβαίνει συχνά σε περιπτώσεις χώρων υψηλών διαστάσεων, μια σταθερή τιμή h θα μπορούσε να οδηγήσει σε υπερκατάτμηση της εικόνας. Επιπροσθέτως, η ίδια σταθερή τιμή εύρους θα μπορούσε να θεωρηθεί αρκετά μεγάλη για τις περιοχές υψηλής πυκνότητας, οδηγώντας σε μια ανεπιθύμητη συγχώνευση διαφορετικών περιοχών ενδιαφέροντος.

Η υλοποίηση του αλγορίθμου Mean-Shift με χρήση προσαρμοστικού αντί σταθερού εύρους, ονομάζεται adaptive Mean-Shift και είναι η βάση του προτεινόμενου αλγορίθμου της παρούσας εργασίας. Ο αλγόριθμος Mean-Shift είναι ευαίσθητος στην επιλογή του πλάτους του παραθύρου h . Μικρή τιμή του h συνεπάγεται σε θορυβώδη εκτίμηση (πολλές

τελικές κλάσεις), ενώ μεγάλη τιμή του h οδηγεί σε μία “out of focus” εκτίμηση, (συγχώνευση κρίσιμων κλάσεων, λίγες τελικές κλάσεις). Σε χώρους χαρακτηριστικών υψηλών διαστάσεων έχει αποδειχθεί ότι παράγει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τον Mean-Shift σταθερού εύρους. Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για να καθορίσουν το προσαρμοστικό μέγεθος παραθύρου για τον adaptive Mean-Shift. Ωστόσο, το μέγεθος του παραθύρου μπορεί απλά να οριστεί ως η απόσταση h_i μεταξύ του x_i και του k -οστού πλησιέστερου γείτονά του :

$$h_i = \|x_i - x_{i,k}\| \quad (4.3)$$

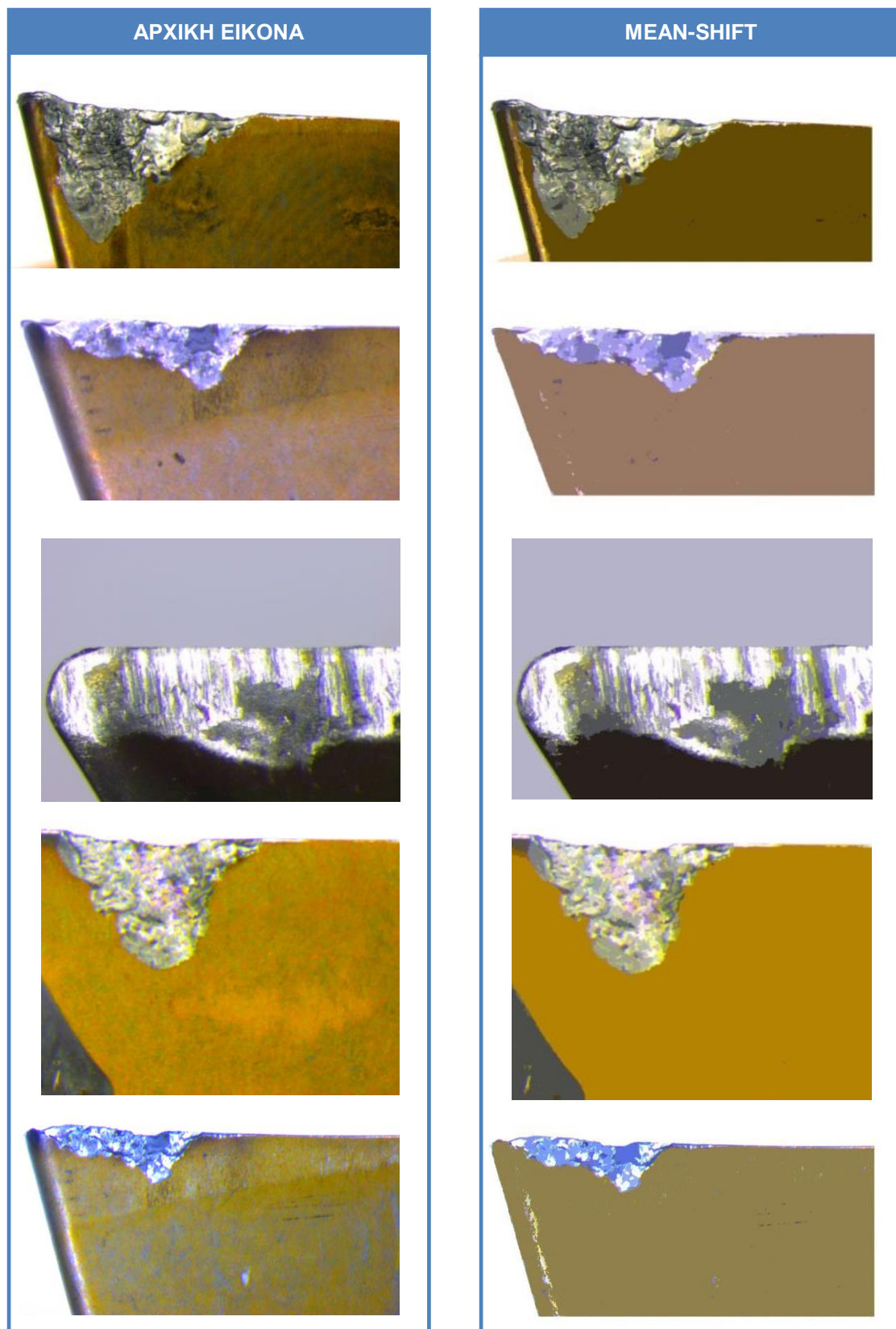
Οι γείτονες των x_i ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά με βάση την απόσταση από το x_i και ο αριθμός των γειτόνων πρέπει να επιλεγεί αρκετά μεγάλος, ώστε να διασφαλιστεί ότι υπάρχει αύξηση στην πυκνότητα. Στην παρούσα εργασία το k επιλέχθηκε ίσο με 200. Εφαρμόζοντας, λοιπόν, Gaussian πυρήνα και προσαρμοστικό μέγεθος παραθύρου η (4.2) μετασχηματίζεται ως εξής :

$$m_{h,G}(x_j) = x^{(j+1)} - x^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^7} x_i \exp\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^7} \exp\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right)} - x^{(j)} \quad (4.4)$$

Αφού γίνει η εύρεση των τοπικών μεγίστων, υλοποιούνται αναζητήσεις σε μικρές γειτονιές με στόχο την εύρεση των μεγίστων αυτών των στάσιμων σημείων (τρόποι). Η συγκεκριμένη μεταβλητή, έχει τεράστια επιρροή στα αποτελέσματα της μεθόδου, αφού επηρεάζει το πλήθος των παραγομένων τρόπων. Πολύ μικρή γειτονιά, οδηγεί στην παραγωγή τεράστιου πλήθους τρόπων, ενώ πολύ μεγάλη γειτονιά οδηγεί σε κάποιες δεκάδες τρόπους. Και στις δύο περιπτώσεις η διαδικασία οδηγεί σε λανθασμένη κατάτμηση, καθώς στην πρώτη περίπτωση η διαδικασία Mean-Shift δε θα έχει σημαντική επιρροή στην κατάτμηση, ενώ στη δεύτερη η παραγωγή λίγων τρόπων οδηγεί στη συγχώνευση ομάδων. Στη συγκεκριμένη εργασία η γειτονιά επιλέχθηκε [5*5]. Το επόμενο βήμα έγκειται στην κατηγοριοποίηση όλων των pixel με βάση τους υπολογισθέντες τρόπους. Για την κατηγοριοποίηση των pixel, χρησιμοποιήθηκε η Ευκλείδεια απόσταση. Έτσι, υλοποιείται μια μετάβαση από δεκάδες χιλιάδες pixel σε μερικές εκατοντάδες ομάδες.



Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Mean-Shift

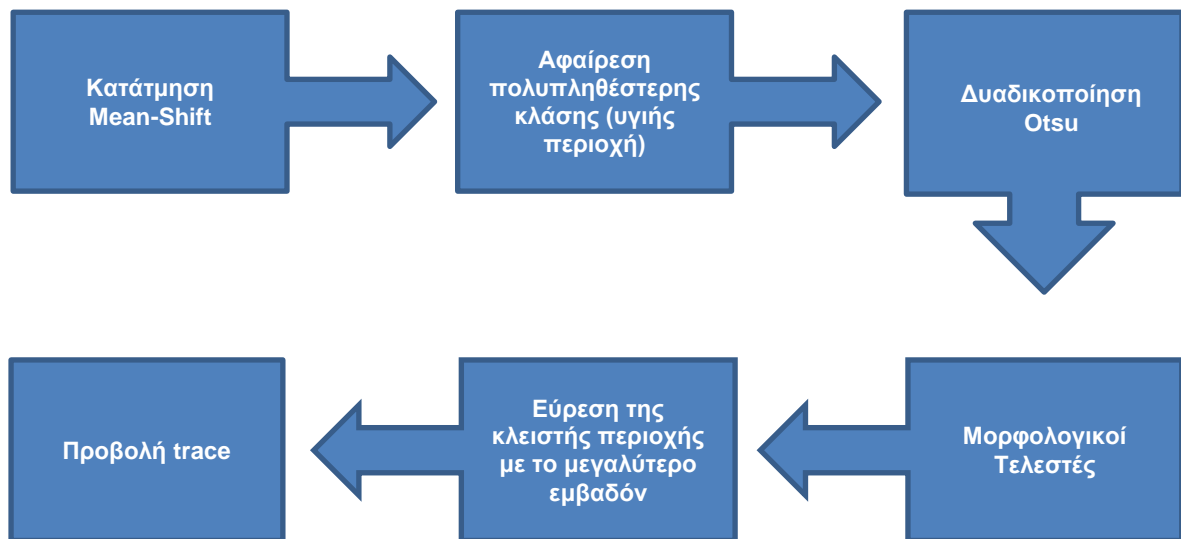


Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου Mean-Shift σε διάφορες εικόνες κοπτικών εργαλείων

Τέλος, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης του αλγορίθμου Mean-Shift :

- Η εύρεση των τοπικών μεγίστων μιας άγνωστης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, με εκτίμηση μόνο του gradient και όχι ολόκληρης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, συνεπάγεται με τεράστιο κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο, καθώς η εκτίμηση των pdf πολυδιάστατων δεδομένων αποτελεί μια δαπανηρή υπολογιστικά διαδικασία.
- Δεν απαιτείται a priori γνώση του αριθμού των τελικών κλάσεων.
- Δε γίνεται κάποια υπόθεση για το σχήμα (π.χ. ελλειπτικό) των κλάσεων.
- Ο αριθμός των κλάσεων είναι ίσος με τον αριθμό των modes.
- Ευρωστία (robustness) του αλγορίθμου στις ακραίες τιμές (outliers).

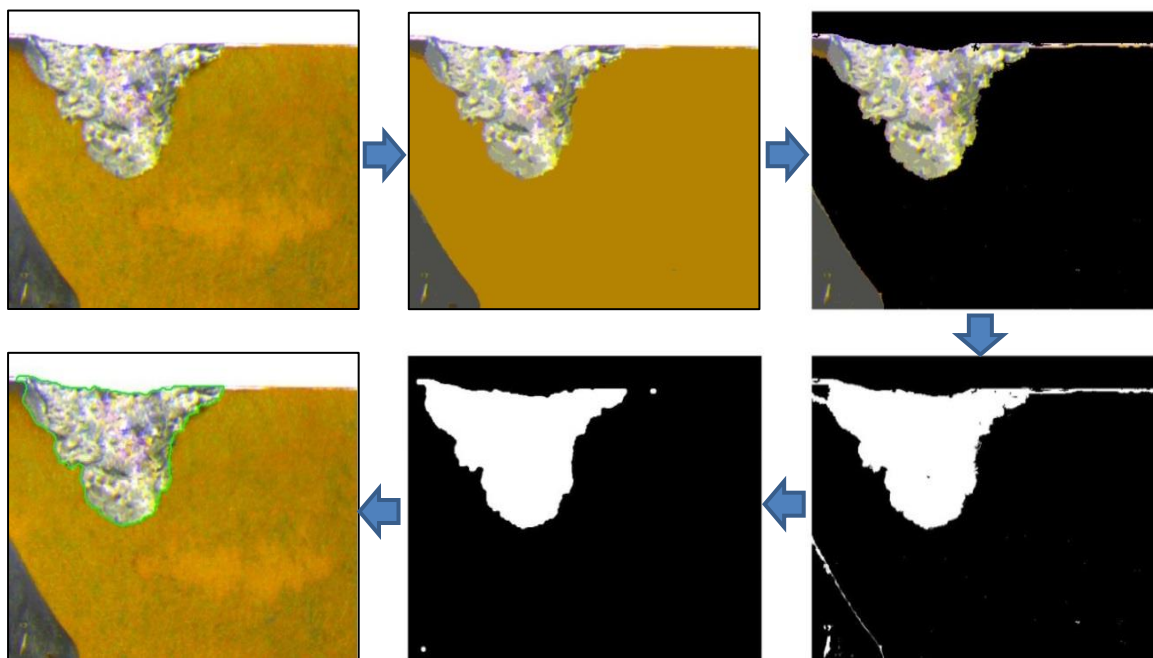
4.4 Αναγνώριση περιοχής φθοράς



Σχήμα 4.8: Εσωτερικές βαθμίδες της διαδικασίας αναγνώρισης της περιοχής της φθοράς

Το επόμενο βήμα του αλγορίθμου έγκειται στην αναγνώριση της περιοχής της φθοράς. Αφού ταξινομηθούν σε κλάσεις, όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας με χρήση του αλγορίθμου Mean-Shift, εντοπίζεται και αφαιρείται η πολυπληθέστερη κλάση, δηλαδή η κλάση που αντιστοιχεί στην υγιή περιοχή του κοπτικού εργαλείου. Με τον τρόπο αυτό, απομένει ως ωφέλιμη πληροφορία η περιοχή της φθοράς μαζί με κάποιο ανεπιθύμητο θόρυβο. Στη συνέχεια γίνεται χρήση της μεθόδου του Otsu με σκοπό την δυαδικοποίηση της παραπάνω εικόνας. Το κριτήριο, το οποίο χρησιμοποιείται στη μέθοδο του Otsu για τον προσδιορισμό του βέλτιστου κατωφλίου είναι η μεγιστοποίηση της διαχωριστικότητας, μεταξύ των σκοτεινών και των φωτεινών περιοχών. Με άλλα λόγια, το βέλτιστο κατώφλι μεγιστοποιεί τη διακύμανση μεταξύ των επιπέδων γκρι των δύο τελικών κλάσεων και ελαχιστοποιεί τη διακύμανση μεταξύ των επιπέδων της ίδιας κλάσης. Το επόμενο κατά σειρά βήμα έγκειται στην επεξεργασία της εικόνας, που λαμβάνεται, μέσω μαθηματικών μορφολογικών τελεστών. Η μαθηματική μορφολογία αναφέρεται στη μελέτη της γεωμετρίας, της τοπολογίας και της μορφής των αντικειμένων. Αφορά συγκεκριμένες πράξεις, όπου μια εικόνα αλληλεπιδρά με ένα δομικό στοιχείο και μετατρέπεται σε μια απλοποιημένη και λειτουργική μορφή, διατηρώντας τα βασικά χαρακτηριστικά της μορφής της. Στοχεύει, κυρίως στη βελτίωση της δομής των αντικειμένων (φιλτράρισμα θορύβου, απλοποίηση των αντικειμένων, λείανση/όξυνση των περιγραμμάτων) και στην ποσοτική περιγραφή των αντικειμένων (χαρακτηριστικά εμβαδού, περιμέτρου). Εδώ,

χρησιμοποιήθηκε ως μορφολογικό στοιχείο ένας κύκλος διαμέτρου 3 pixel, με τον οποίο υλοποιήθηκαν 3 διαδοχικά μορφολογικά ανοίγματα, ακολουθούμενα από 3 διαδοχικά μορφολογικά κλεισίματα. Μετά τη συγκεκριμένη διαδικασία, η περιοχή με το μεγαλύτερο εμβαδόν, αντιστοιχεί στην περιοχή της φθοράς. Τελικά, προκύπτει ένα ενιαίο μορφολογικό στοιχείο, που σκιαγραφεί πλήρως την περιοχή της φθοράς, από το οποίο μπορούν να εξαχθούν και να υπολογιστούν το μέγιστο πλάτος και το εμβαδόν της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας. Τέλος, το «ίχνος» (trace) της περιοχής αυτής, προβάλλεται πάνω στην αρχική εικόνα.



Σχήμα 4.9 : Παράδειγμα αναγνώρισης της περιοχής της φθοράς

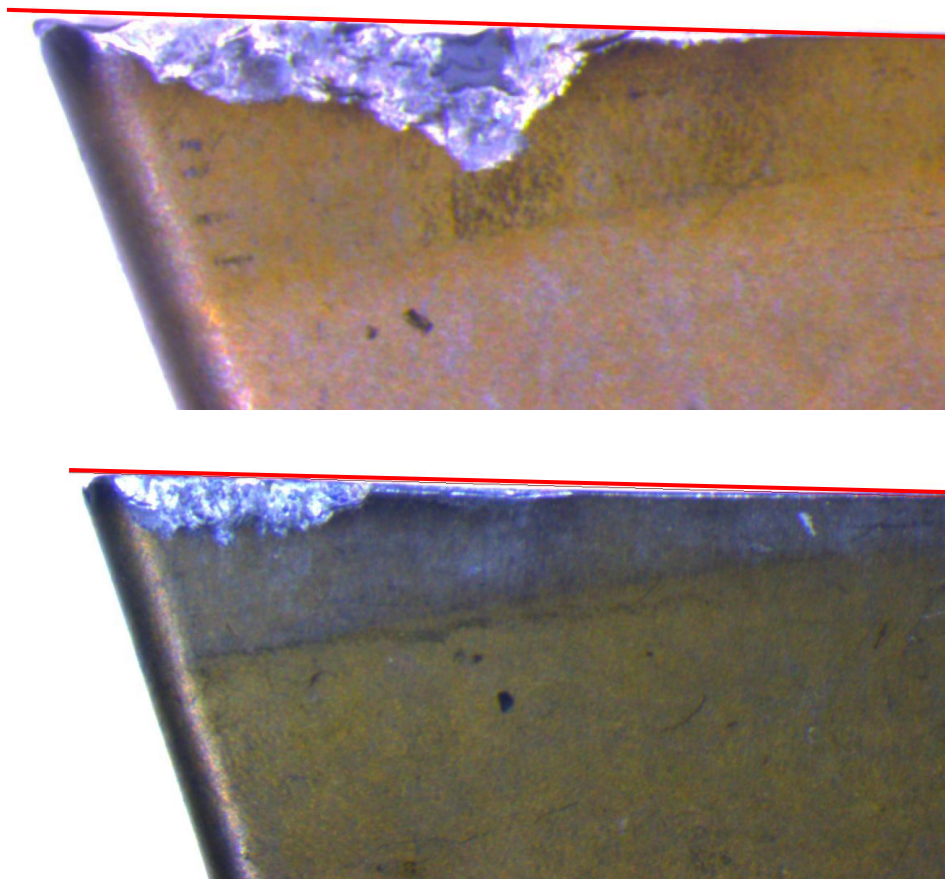
4.5 Μέτρηση μέγιστου πλάτους της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας

Πριν τη μέτρηση του μέγιστου πλάτους της φθοράς είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της γραμμής αναφοράς, μέσω των σημείων του μετώπου του κοπτικού εργαλείου. Για την εύρεση των σημείων του μετώπου του κοπτικού εργαλείου, εφαρμόζεται στην εικόνα εισόδου ο αλγόριθμος εξαγωγής ακμών του Canny. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προτάθηκε το 1986 από τον John F. Canny [81] και θεωρείται από τις πιο ισχυρές τεχνικές εξαγωγής ακμών. Ο αλγόριθμος του Canny, δεν είναι μια απλή τεχνική για τη βέλτιστη εξαγωγή ακμών. Στην πραγματικότητα είναι μια βέλτιστη τεχνική ανίχνευσης και δημιουργίας ακμών. Τα κριτήρια στα οποία βασίζεται η ανάπτυξή της είναι τα ακόλουθα:

- **Σωστή ανίχνευση.** Να ανιχνεύονται με μεγάλη πιθανότητα ακμές όταν αυτές πραγματικά υπάρχουν, αλλά και να μην αναγνωρίζονται ως σημεία ακμών, σημεία που δεν ανήκουν σε ακμές.
- **Εντοπισμός θέσης.** Οι ακμές που ανιχνεύονται να είναι στη σωστή χωρική θέση, πολύ κοντά προς τις πραγματικές ακμές.
- **Μοναδική απόκριση σε κάθε ακμή.** Το κριτήριο αυτό απαιτεί τον αποκλεισμό της πιθανότητας μία πραγματική ακμή να δώσει περισσότερες από μία ακμές ως απόκριση. Αν και το κριτήριο αυτό ουσιαστικά υπερκαλύπτεται από το πρώτο, περιλαμβάνεται χωριστά καθώς η μαθηματική περιγραφή του πρώτου κριτηρίου δεν αποκλείει αυτή την περίπτωση.

Κατόπιν, για κάθε στήλη της εικόνας που λήφθηκε μετά την εφαρμογή της μεθόδου του Canny, επιλέγεται το πρώτο εικονοστοιχείο και σχηματίζεται ένα σύνολο σημείων (x_i, y_i) , το οποίο οριοθετεί το μέτωπο του κοπτικού εργαλείου.

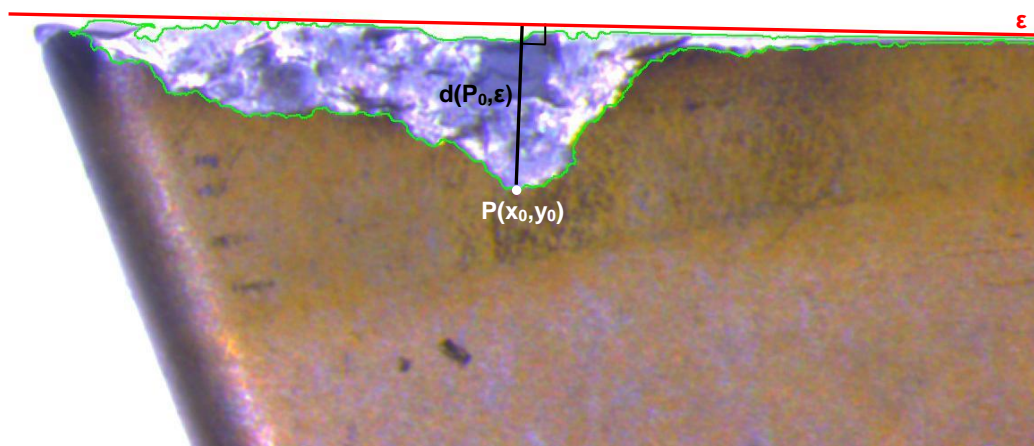
Τέλος, στο σύνολο των σημείων (x_i, y_i) , εφαρμόζεται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων και υπολογίζεται η εκτίμηση $\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot X$ της ευθείας παλινδρόμησης.



Σχήμα 4.10 : Γραμμές αναφοράς κοπτικών εργαλείων

Αφού έχει απομονωθεί η περιοχή της φθοράς υπολογίζεται, για κάθε εικονοστοιχείο του ορίου της, η απόστασή του, από τη γραμμή αναφοράς. Το μέγιστο πλάτος της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας ορίζεται ως η μεγαλύτερη απόσταση της περιοχής της φθοράς από τη γραμμή αναφοράς. Η απόσταση ενός σημείου $P_0(x_0, y_0)$, από μία ευθεία $\varepsilon: \alpha x + \beta y + \gamma = 0$, υπολογίζεται από τον τύπο:

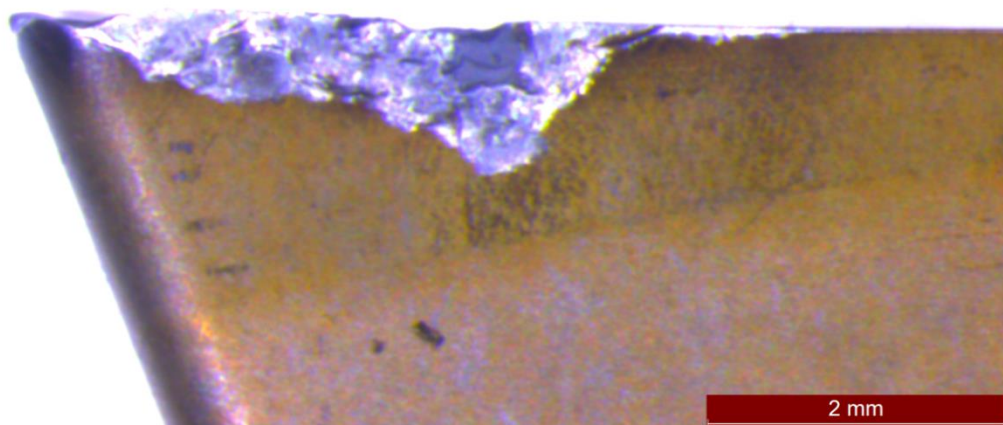
$$d(P_0, \varepsilon) = \frac{|\alpha x_0 + \beta y_0 + \gamma|}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (3.12)$$



Σχήμα 4.11 : Μέγιστο πλάτος της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας

Το Leica M125 έχει τη δυνατότητα να προβάλλει πάνω στη φωτογραφία, μια ένδειξη κλίμακας. Η γραμμή αυτή μπορεί εύκολα να εντοπιστεί με τον μετασχηματισμό Hough για ευθείες και κατόπιν να υπολογιστεί το μήκος της, σε pixel. Πακτώνοντας την ένδειξη της κλίμακας (π.χ. στα 2 mm) και υπολογίζοντας κάθε φορά το μήκος της ένδειξης σε pixel, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το μέγιστο πλάτος της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας, στη μονάδα της κλίμακας της φωτογραφίας (mm).

$$VB_{\max} \text{ (mm)} = \frac{\text{ένδειξη κλίμακας (mm)} \cdot VB_{\max} \text{ (pixel)}}{\text{μήκος ένδειξης κλίμακας (pixel)}} \quad (3.13)$$



Σχήμα 4.12 : Ένδειξη κλίμακας πάνω στη φωτογραφία του στερεομικροσκοπίου



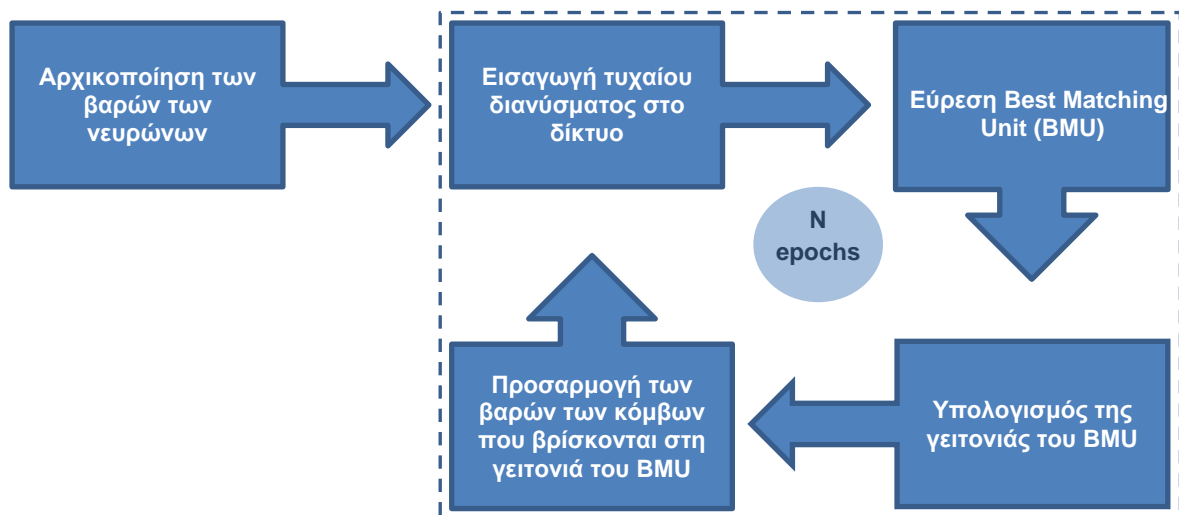
Σχήμα 4.13 : Εσωτερικές βαθμίδες της διαδικασίας μέτρησης της φθοράς

Τέλος, σημειώνεται ότι πέραν της μέτρησης του μέγιστου πλάτους της φθοράς, υπολογίζεται και το εμβαδόν αυτής, ως το γινόμενο του πλήθους των εικονοστοιχείων, που ανήκουν στην περιοχή της φθοράς με το εμβαδόν του εικονοστοιχείου της εικόνας.

4.6 Ταξινόμηση υποπεριοχών φθοράς με χρήση των Kohonen SOM

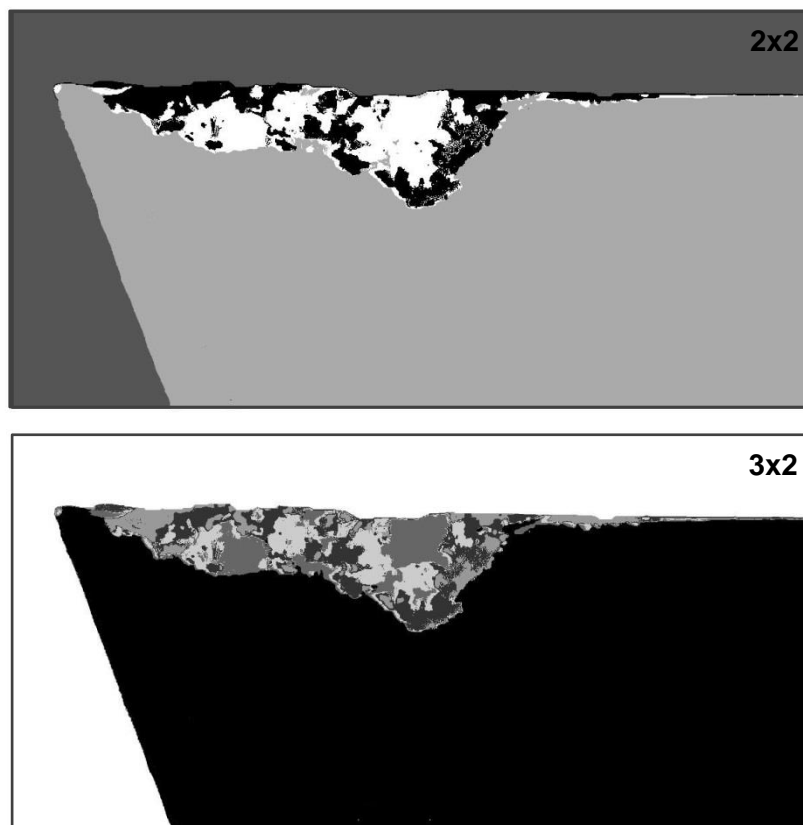
Οι μηχανισμοί βάσει των οποίων εξελίσσεται η φθορά στα κοπτικά εργαλεία είναι αποτέλεσμα ορισμένων διακριτών και κατά βάση ανεξάρτητων μεταξύ τους φαινομένων, όπως για παράδειγμα η απόξεση, η ηλεκτροχημική φθορά, ο σχηματισμός και η λύση συγκολλητών δεσμών κλπ. Συνεπώς, μέσα στη ζώνη φθοράς, παρουσιάζονται διαφορετικές ευδιάκριτες περιοχές, οι οποίες έχουν προκύψει από διαφορετικά αίτια. Το επόμενο κατά σειρά βήμα του αλγορίθμου έγκειται στην ταξινόμηση των διαφορετικών περιοχών, εντός της ζώνης φθοράς. Συνεπώς, τα διανύσματα που λαμβάνονται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Mean-Shift και που ανήκουν στη ζώνη φθοράς, εισάγονται σε ένα δίκτυο Kohonen.

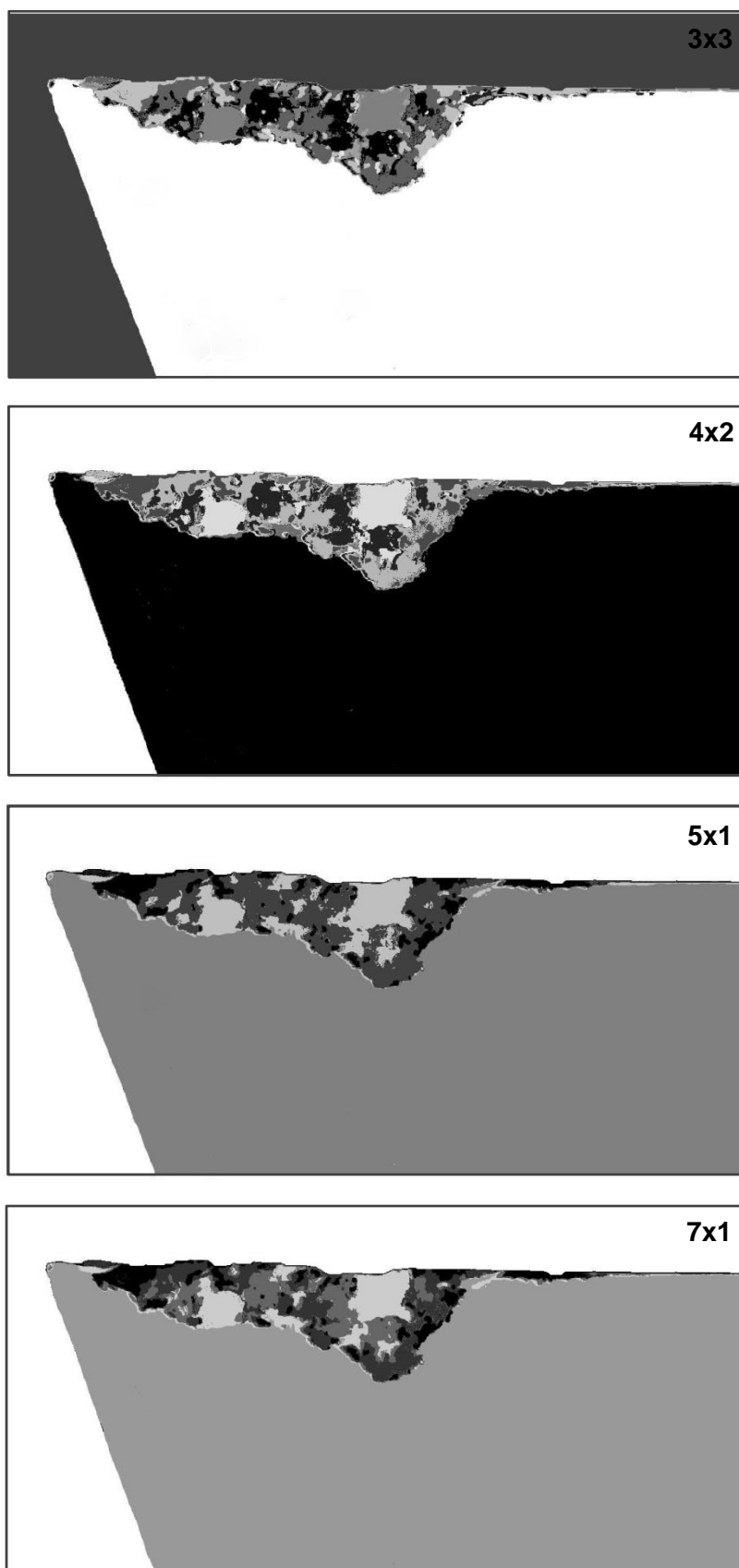
Σε μαθηματικό επίπεδο, το δίκτυο Kohonen εκφράζεται ως ένας χάρτης αυτο-οργάνωσης (self-organizing map), που αντιπροσωπεύει ένα ενός επιπέδου feed-forward δίκτυο, όπου οι έξοδοι οργανώνονται σε ένα χαμηλότερου επιπέδου πλέγμα. Στόχος του δικτύου SOM είναι η ομαδοποίηση όμοιων προτύπων εισόδου δηλαδή. Κάθε είσοδος συνδέεται με όλους τους νευρώνες εξόδου. Προσαρτημένος σε κάθε νευρώνα εξόδου, υπάρχει ένας πίνακας βαρών που έχει τις ίδιες διαστάσεις με τα διανύσματα εισόδου. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ο αριθμός των διαστάσεων εισόδου είναι συνήθως μεγαλύτερος από τις διαστάσεις του πλέγματος εξόδου. Το γεγονός αυτό αποτελεί τον κύριο λόγο που χρησιμοποιούνται τα συγκεκριμένα δίκτυα, για μείωση των διαστάσεων ενός προβλήματος. Το δίκτυο SOM είναι ένα ανταγωνιστικό δίκτυο, καθώς οι νευρώνες ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιος ταιριάζει καλύτερο στο διάνυσμα εισόδου. Ο νευρώνας που ταιριάζει καλύτερα είναι αυτός, του οποίου το διάνυσμα βαρών w είναι πιο όμοιο συγκριτικά με την είσοδο x και καλείται νευρώνας-νικητής για το συγκεκριμένο πρότυπο. Για κάθε πρότυπο εισόδου x εκπαιδεύεται ο νευρώνας-νικητής και η γειτονιά του έτσι ώστε να ταιριάζουν ακόμα περισσότερο στο x . Σκοπός του βήματος αυτού είναι να υπάρξουν αυξημένες πιθανότητες να νικήσει ξανά ο ίδιος νευρώνας ή κάποιος από τη γειτονιά του, αν στο μέλλον εμφανιστεί ξανά το συγκεκριμένο πρότυπο ή κάποιο παρεμφερές. Συνεπώς, το δίκτυο αυτό-οργανώνεται, ώστε διαφορετικές γειτονιές να είναι οι νικήτριες, όταν στην είσοδο παρουσιάζονται πρότυπα από διαφορετικές κλάσεις.



Σχήμα 4.14: Διαδικασία εκπαίδευσης του αυτο-οργανούμενου δικτύου Kohonen

Κάθε SOM είναι μοναδικό και βρίσκει διαφορετικές συσχετίσεις μεταξύ των διανυσμάτων του δείγματος. Συνεπώς, δημιουργήθηκαν αρκετοί τοπολογικοί χάρτες για να επιλεγεί ο πιο χρήσιμος με οπτική παρατήρηση. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ο χάρτης που απέδωσε περισσότερο ήταν ένα δισδιάστατο πλέγμα εξαγωνικής τοπολογίας 3x2 νευρώνων. Τα διανύσματα των συντελεστών βάρους όλων των νευρώνων αρχικοποιήθηκαν με διανύσματα που επιλέχθηκαν τυχαία από το χώρο εισόδου, ο ρυθμός μάθησης ορίστηκε στην τιμή 0.5, το αρχικό μέγεθος γειτονιάς στα 4 pixels και ο αριθμός των εποχών εκπαίδευσης τέθηκε ίσος με 200.

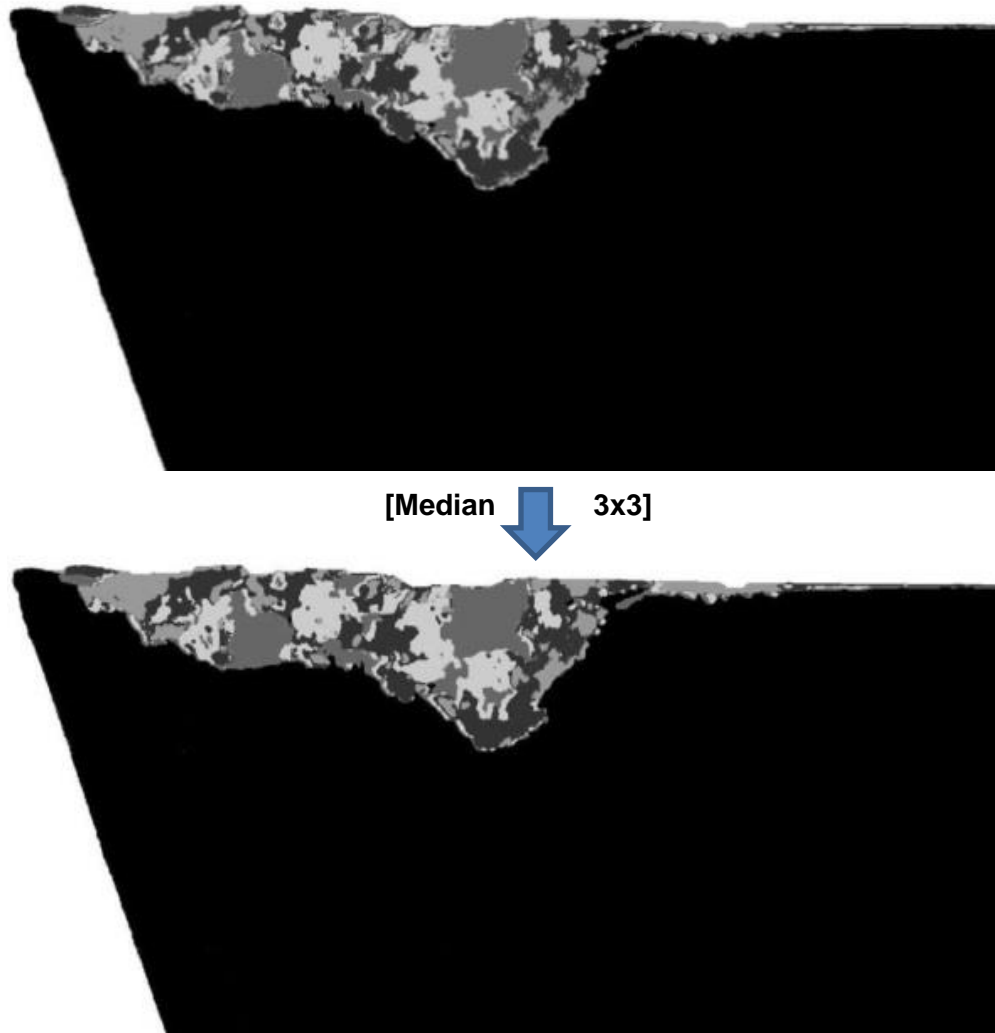




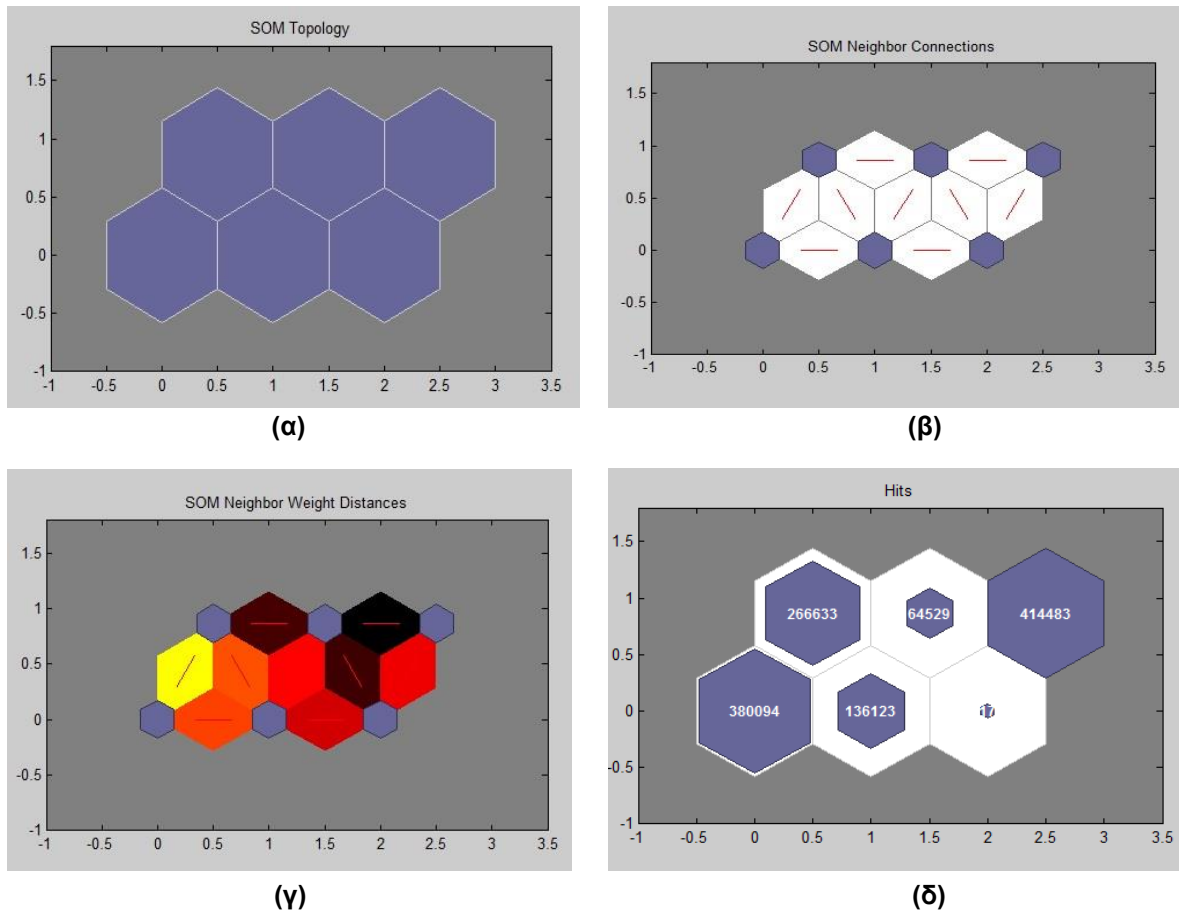
Σχήμα 4.15 : Δημιουργία διαφορετικών τοπολογικών χαρτών, με σκοπό να επιλεγεί ο πιο χρήσιμος με οπτική παρατήρηση

Λόγω της ύπαρξης θορύβου, στο αποτέλεσμα της ταξινόμησης με το δίκτυο Kohonen, εφαρμόζεται ένα median 3x3 φίλτρο, για την απαλοιφή αυτού. Το median φίλτρο εξαλείφει περιοχές με πάρα πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές τιμές φωτεινότητας, σχεδιάζοντας ένα παραθύρο γύρω από κάθε ρίxel και αντικαθιστώντας το ρίxel αυτό με τη μεσαία τιμή του παραθύρου. Τα ρίxel που ανήκουν σε παλμικό θόρυβο έχουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις φωτεινότητας συγκριτικά με τα γειτονικά ρίxel και έτσι το median φίλτρο είναι ιδανικό για την αφαίρεση αυτού του τύπου θορύβου.

Συνεπώς, το δίκτυο Kohonen SOM καταλήγει σε μια τοπολογική οργάνωση των εικονοστοιχείων τη φθοράς, ταξινομώντας τις διαφορετικές υποπεριοχές, εντός της ζώνης φθοράς και ταυτόχρονα παρέχει και μια ένδειξη για το πόσο μοιάζουν μεταξύ τους, οι εν λόγω περιοχές.



Σχήμα 4.16: Χρήση median φίλτρου για την εξάλειψη του θορύβου στο αποτέλεσμα του Kohonen SOM



Σχήμα 4.17: (α) Τοπολογία Kohonen SOM, (β) Διασυνδέσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων, (γ) Τοπολογικός χάρτης, στον οποίο παρουσιάζονται οι αποστάσεις μεταξύ των διαφορετικών κλάσεων, (δ) Πλήθος εικονοστοιχείων που ανατέθηκαν σε κάθε κλάση

Ο αλγόριθμος Mean-Shift οδηγεί σε μια Gaussian μοντελοποίηση του πολυδιάστατου χώρου των δεδομένων, ενώ το αυτο-οργανούμενο δίκτυο Kohonen σε μια τοπολογική οργάνωση του χώρου δεδομένων. Ο Mean-Shift προτιμήθηκε για την κατάτμηση των εικόνων φθοράς, λόγω του ότι διαχειρίζεται εξαιρετικά πολυδιάστατους χώρους δεδομένων, με τεράστιο κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο, προβαίνοντας σε μια ισχυρή ομαδοποίηση των δεδομένων εισόδου, χωρίς να απαιτεί κάποια *a priori* γνώση του αριθμού και του σχήματος των κλάσεων. Συν τοις άλλοις, εμφανίζει εξαιρετική ευρωστία στις ακραίες τιμές (outliers) και στην ύπαρξη θορύβου των δεδομένων εισόδου. Τα διανύσματα που λαμβάνονται μετά την κατάτμηση και που ανήκουν στην περιοχή της φθοράς, εισάγονται σε ένα δίκτυο Kohonen. Το δίκτυο αυτό-οργανώνεται, ώστε διαφορετικές γειτονιές νευρώνων να είναι οι νικήτριες, όταν στην είσοδο παρουσιάζονται πρότυπα από διαφορετικές κλάσεις. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια ταχύτατη απεικόνιση διανυσμάτων μεγάλης διάστασης, σε ένα διακριτό πλέγμα νευρώνων δύο διαστάσεων. Επίσης, η τοπολογική οργάνωση των νευρώνων, παρέχει ένα μέτρο ομοιότητας των διαφορετικών κλάσεων. Συνεπώς, ο πρωτότυπος συνδυασμός των δύο αλγορίθμων, παρέχει μια εξαιρετική κατάτμηση των εικόνων φθοράς, μαζί με μια ισχυρή ομαδοποίηση των υποπεριοχών της φθοράς, που συνοδεύεται και από ένα μέτρο ομοιότητάς τους.

5. Επιβεβαίωση συστήματος

Για την επιβεβαίωση του συστήματος που αναπτύχθηκε, διεξήχθησαν δύο πειράματα περιφερικού φραιζαρίσματος, για την εκτέλεση των οποίων χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που εικονίζεται στο Σχήμα 5.1 και περιλαμβάνει το 5-αξονικό (3+2) κέντρο κατεργασιών DMG-DMU 50eco και τη συσκευή προρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115 eco.



Σχήμα 5.1: (α) Κέντρο κατεργασιών DMG-DMU 50eco και (β) συσκευή προρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115 eco.

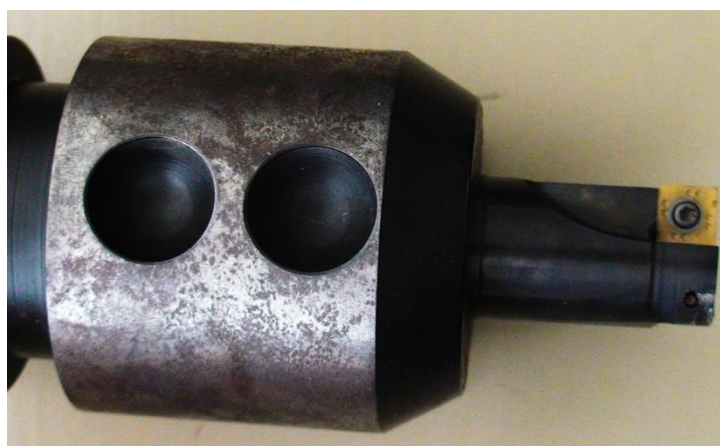
Το κέντρο κατεργασιών DMU 50eco διαθέτει άτρακτο 8000 rpm με ισχύ 13 KW και ροπή 83 Nm, ενώ είναι κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο για μέγιστη στιβαρότητα. Η εργαλειομηχανή καθοδηγείται από τον ελεγκτή Sinumerik 810D της SIEMENS. Για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών των κοπτικών εργαλείων, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή προρύθμισης εργαλείων Microset Uno 115eco. Η συσκευή διαθέτει ανιχνευτή ακμών για γρήγορο εντοπισμό της κοπτικής ακμής, γραμμικούς άξονες, πνευματική σύσφιξη των αξόνων για μέγιστη ακρίβεια, ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσω CMOS ψηφιακής κάμερας με τηλεσκοπικούς φακούς.

Με φραιζάρισμα κατεργάζονται τεμάχια από διάφορα υλικά όπως χάλυβας, χυτοσίδηρος, συνθετικά υλικά κ.λπ., με επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες, εσοχές, ακόμα και οδοντωτοί τροχοί. Τα τεμάχια, συνήθως εκχονδρίζονται ή αποπερατώνονται, ενώ, όταν απαιτούνται άριστες επιφάνειες, σαν τελική κατεργασία χρησιμοποιείται η λείανση. Στο φραιζάρισμα τα απόβλιττα απομακρύνονται από ένα περιστρεφόμενο κοπτικό εργαλείο, το οποίο διαθέτει πολλαπλές κοπτικές ακμές διατεταγμένες κυκλικά. Για να μπορεί να εισέρχεται το κοπτικό εργαλείο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, οι κοπτικές ακμές έχουν τη μορφή σφήνας. Κατά τη διάρκεια της κοπής, οι κοπτικές ακμές εισέρχονται και εξέρχονται η καθεμία από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, μέσα σε ένα μικρό μέρος της πλήρους περιστροφής του εργαλείου. Ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα του κοπτικού εργαλείου ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια, το φραιζάρισμα διακρίνεται σε περιφερικό ή μετωπικό. Στο περιφερικό φραιζάρισμα ο άξονας του εργαλείου είναι παράλληλος με την κατεργαζόμενη επιφάνεια και το κοπτικό εργαλείο διαθέτει περιφερειακά διατεταγμένες κοπτικές ακμές. Τα προκύπτοντα απόβλιττα έχουν στη συγκεκριμένη περίπτωση σφηνοειδές σχήμα. Η επιφάνεια του κοπτικού που καταπονείται περισσότερο, κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία, είναι η επιφάνεια ελευθερίας, για το λόγο αυτό μετράται και η φθορά στη συγκεκριμένη επιφάνεια. Η φθορά που εμφανίζεται οφείλεται στην ολίσθηση/τριβή του εργαλείου επάνω στο τεμάχιο και συνδέεται με μηχανισμούς συγκόλλησης και

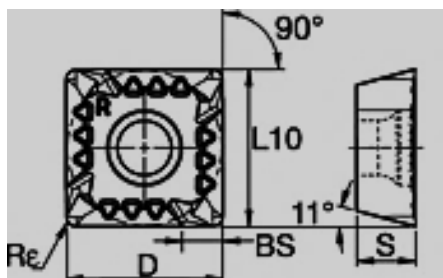
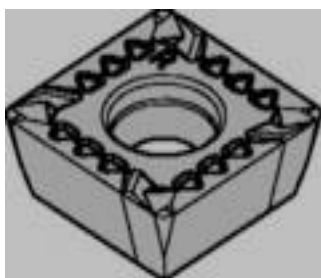
διάβρωσης/τριβής, που ενισχύονται από τις μεγάλες θερμοκρασίες της κοπής.

Τα πειράματα υλοποιήθηκαν για σταθερή ταχύτητα κοπής (220 m/min) , σταθερό ακτινικό και αξονικό βάθος (0.3 και 0.5 mm αντίστοιχα) και για δύο διαφορετικές προώσεις (1 και 1.2 mm/rev αντίστοιχα), πάνω σε τεμάχιο κατεργασίας από χάλυβα επιβελτίωσης άριστης ποιότητας Ck60, διαστάσεων [158x80] mm. Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν καρβίδια KC735M, με δύο στρώματα επικάλυψης TiN και AlTiN, της εταιρείας Kennametal. Η υψηλή απόδοση των συγκεκριμένων κοπτικών εργαλείων και η εξαιρετική τους ανθεκτικότητα σε θερμικές μεταβολές, τα καθιστά κατάλληλα για κοπές χάλυβα, ανοξείδωτου χάλυβα, κ.λπ., με ή χωρίς χρήση ψυκτικού υγρού. Στα συγκεκριμένα πειράματα δεν προτιμήθηκε η χρήση ψυκτικού υγρού, ώστε να είναι δυσμενέστερες οι συνθήκες κοπής.

Η προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας, περιλαμβάνει το δέσιμο του κατεργαζόμενου τεμαχίου, πάνω στην τράπεζα της εργαλειομηχανής με τη βοήθεια των απαραίτητων ιδιοσυσκευών. Στη συνέχεια, το τεμάχιο ευθυγραμμίστηκε με τη βοήθεια του μετρητικού, που διαθέτει το κέντρο κατεργασίας και καθορίστηκε το μηδενικό σημείο του τριαξονικού συστήματος συντεταγμένων πάνω στην τράπεζα. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο, πριν υποστεί την τελική κατεργασία κοπής, εκχονδρίστηκε, ώστε να προκύψει η αναγκαία επιπεδότητα, η οποία απαιτείται για να υπάρχει το ίδιο βάθος κοπής σε όλη την επιφάνεια του τεμαχίου. Στη συνέχεια, έλαβε χώρα η κύρια κατεργασία κοπής, η οποία διακόπτονταν σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές, με σκοπό να φωτογραφηθεί το κοπτικό εργαλείο και να μετρηθεί το μέγιστο πλάτος της φθοράς ελεύθερης επιφάνειας με τη βοήθεια του στερεομικροσκοπίου Leica M125. Για την επιβεβαίωση του συστήματος, οι τιμές του μέγιστου πλάτους της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας που λήφθηκαν με χρήση του προτεινόμενου συστήματος, συγκρίθηκαν με τις τιμές που λήφθηκαν με χρήση του λογισμικού του στερεομικροσκοπίου.



Σχήμα 5.2: Κοπτικό εργαλείο και εργαλείο συγκράτησης



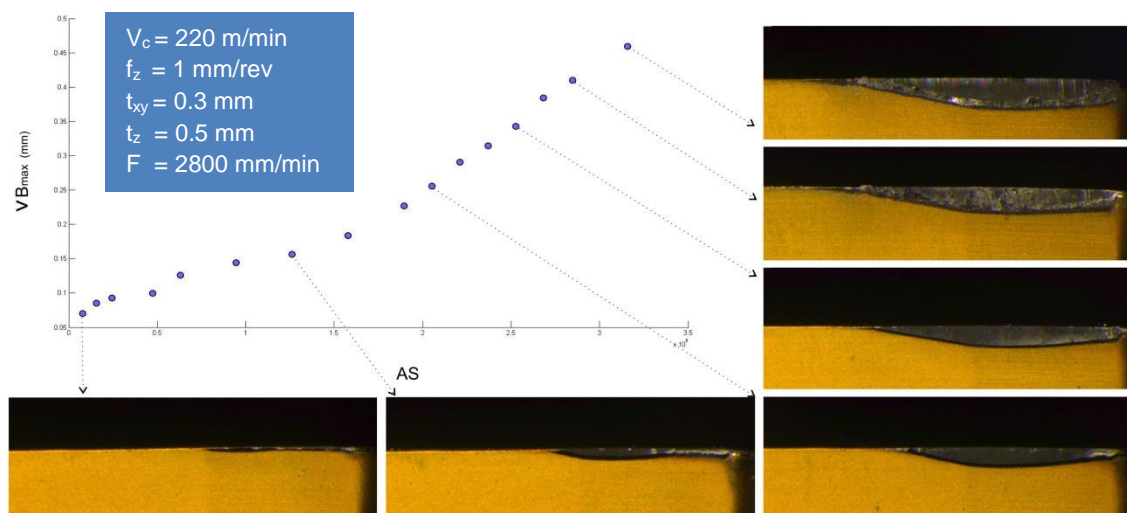
L10 (mm)	10
BS (mm)	2.7
S (mm)	3.97
D (mm)	10
Rε (mm)	0.4

Σχήμα 5.3: Γεωμετρία κοπτικού εργαλείου

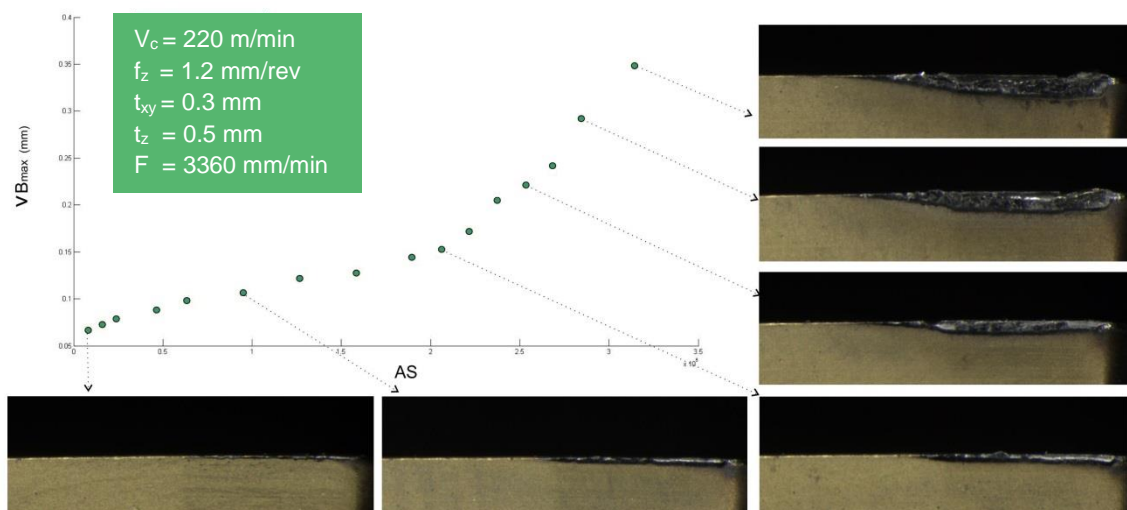
Παράμετροι	Πείραμα 1	Πείραμα 2
Ταχύτητα Κοπής V_c (m/min)	220	220
Πρόωση f_z (mm/rev)	1	1.2
Ακτινικό βάθος κοπής t_{xy} (mm)	0.3	0.3
Αξονικό βάθος κοπής t_z (mm)	0.5	0.5
Πρόωση ανά λεπτό F (mm/min)	2800	3360

Πίνακας 5.1: Παράμετροι πειραμάτων

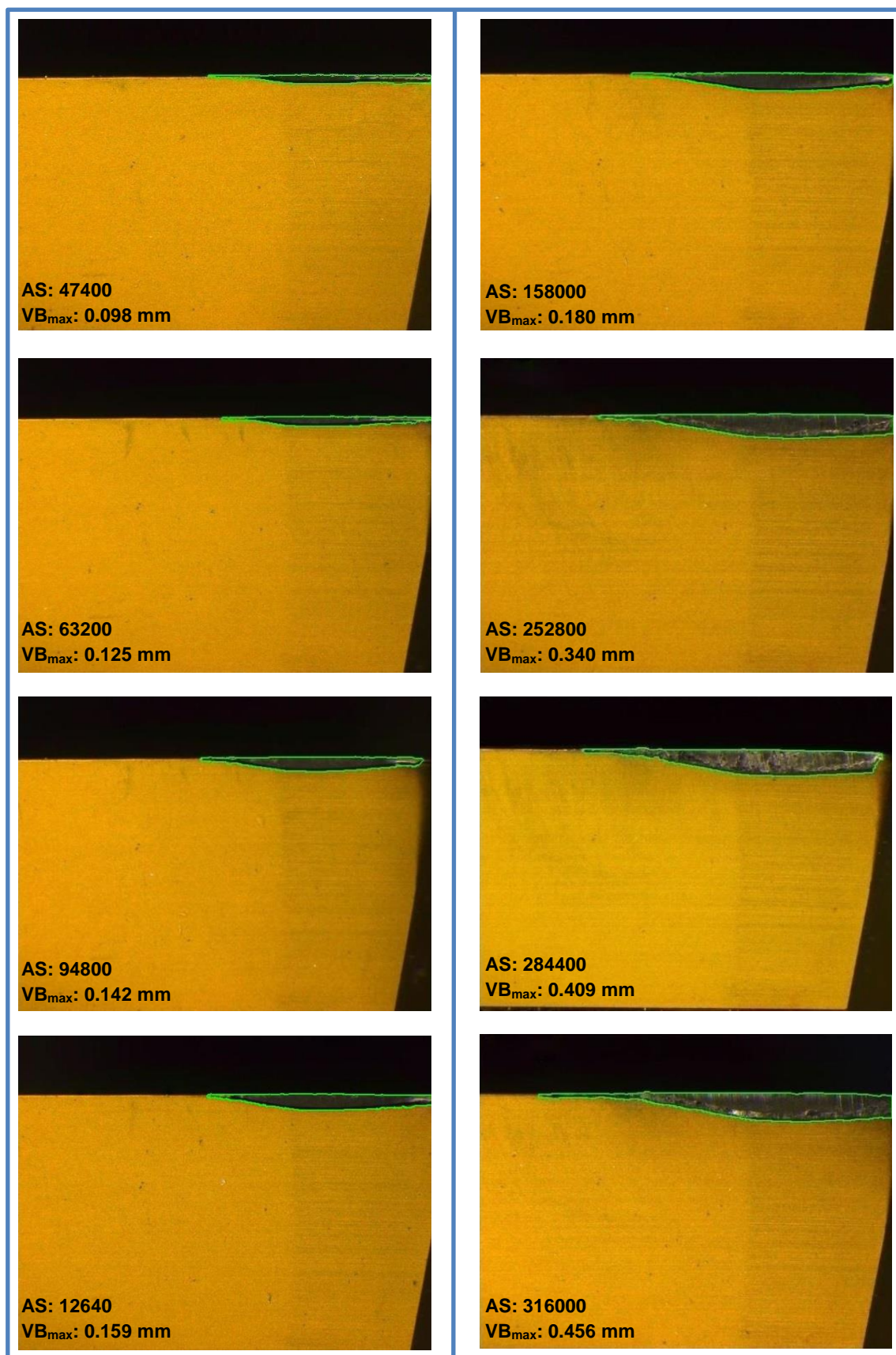
5.1 Πειραματικά αποτελέσματα



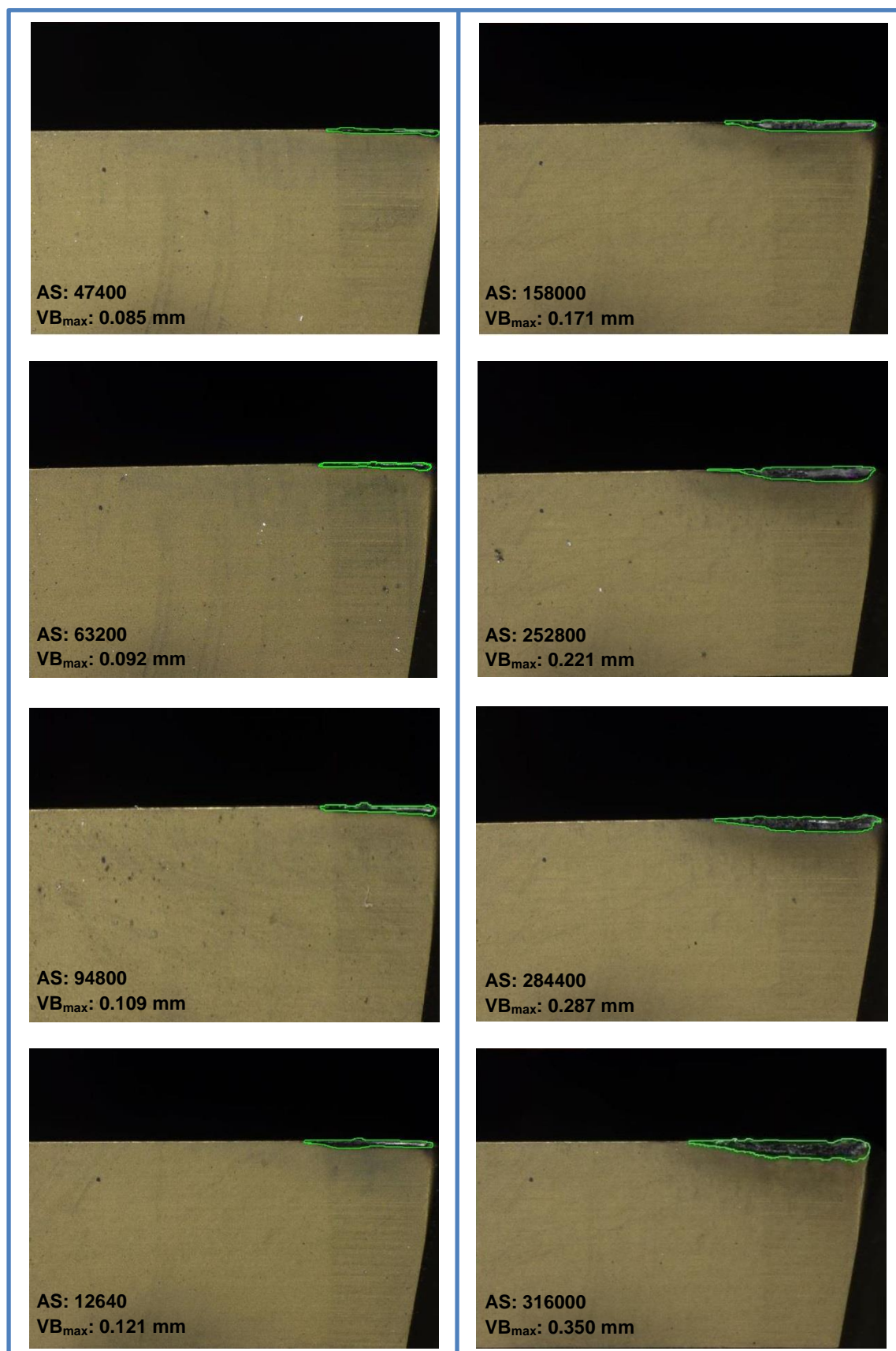
Σχήμα 5.4: Δημιουργία καμπύλης φθοράς, μέσω των μετρήσεων του στερεομικροσκοπίου, για το Πείραμα 1



Σχήμα 5.5: Δημιουργία καμπύλης φθοράς, μέσω των μετρήσεων του στερεομικροσκοπίου, για το Πείραμα 2



Σχήμα 5.6: Εντοπισμός περιοχής φθοράς και μέτρηση του μέγιστου πλάτους της, μέσω του προτεινόμενου συστήματος, για τα κύρια στάδια εξέλιξης του φαινομένου κατά το Πείραμα 1



Σχήμα 5.7: Εντοπισμός περιοχής φθοράς και μέτρηση του μέγιστου πλάτους της, μέσω του προτεινόμενου συστήματος, για τα κύρια στάδια εξέλιξης του φαινομένου κατά το Πείραμα 2

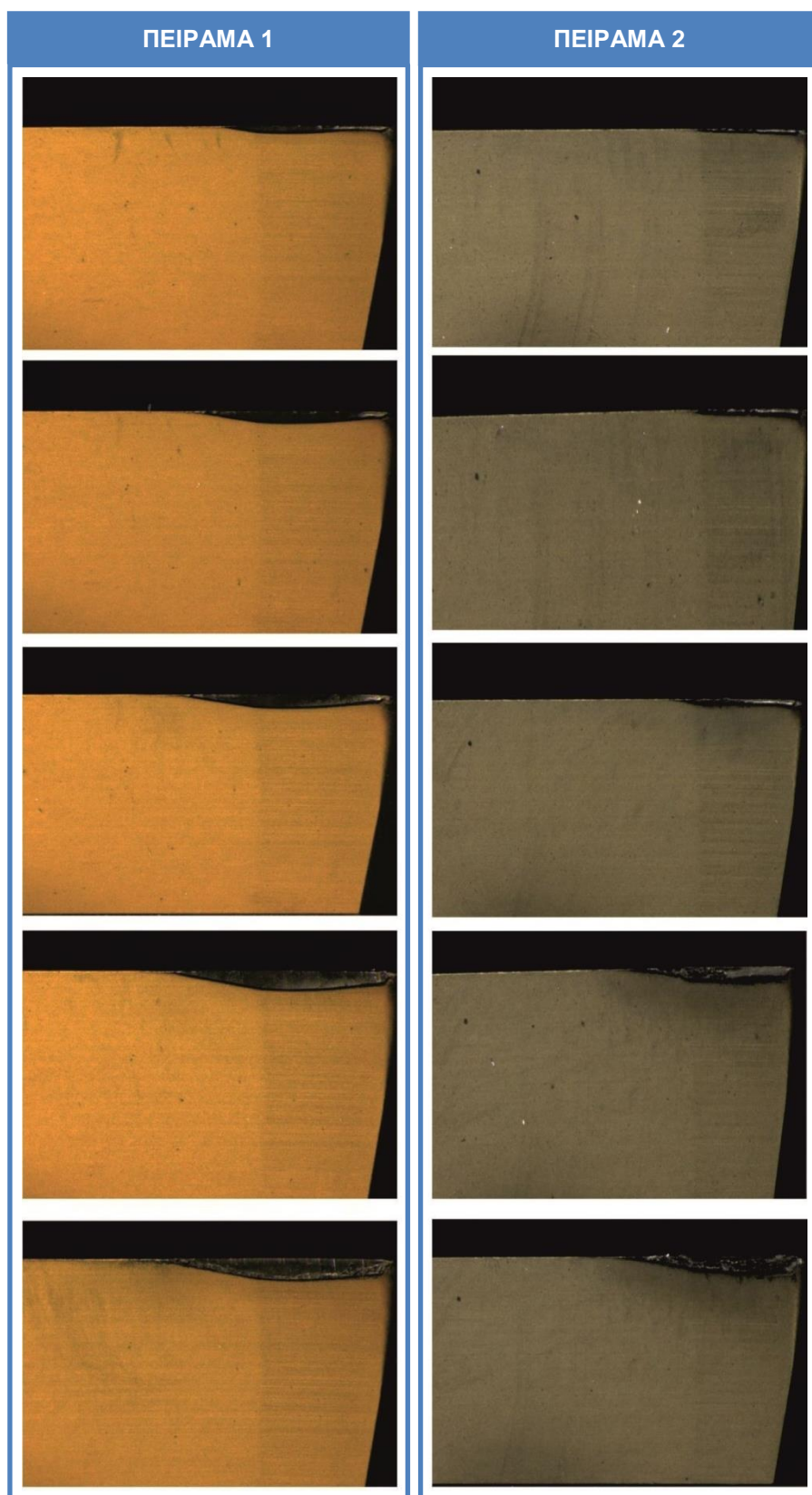
Αριθμός Κοπών (AS)	VB _{max} (mm) [Στερεομικροσκόπιο]	VB _{max} (mm) [Σύστημα]
7900	0.070	0.058
15800	0.085	0.074
23700	0.092	0.102
47400	0.099	0.111
63200	0.125	0.131
94800	0.144	0.139
126400	0.157	0.148
158000	0.183	0.177
189600	0.227	0.218
205400	0.256	0.251
221200	0.291	0.298
237000	0.314	0.309
252800	0.342	0.345
268600	0.384	0.388
284400	0.410	0.409
316000	0.458	0.456

Πίνακας 5.2: Σύγκριση τιμών του μέγιστου πλάτους φθοράς, για το Πείραμα 1

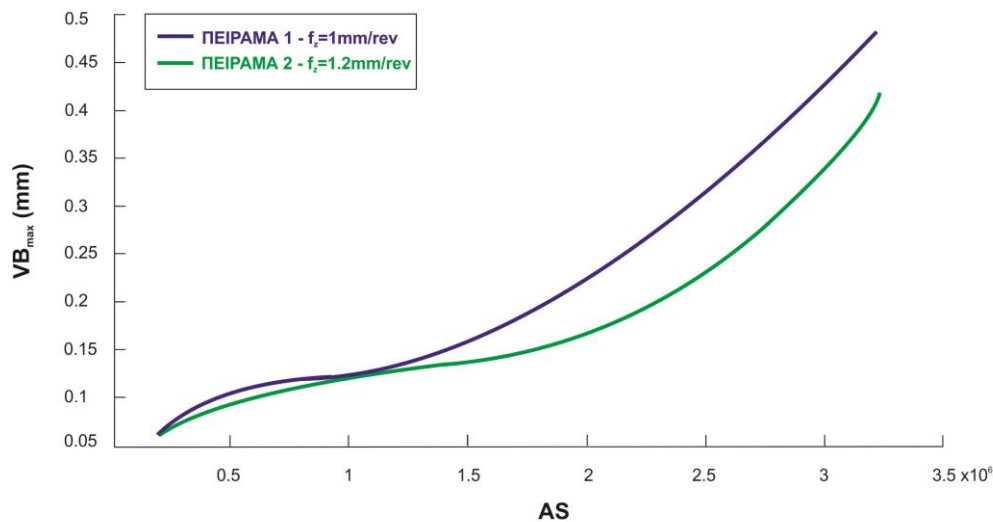
Αριθμός Κοπών (AS)	VB _{max} (mm) [Στερεομικροσκόπιο]	VB _{max} (mm) [Σύστημα]
7900	0.067	0.053
15800	0.072	0.061
23700	0.079	0.066
47400	0.086	0.078
63200	0.098	0.089
94800	0.104	0.114
126400	0.125	0.121
158000	0.128	0.136
189600	0.144	0.151
205400	0.148	0.154
221200	0.172	0.164
237000	0.207	0.213
252800	0.224	0.229
268600	0.236	0.240
284400	0.292	0.295
316000	0.348	0.347

Πίνακας 5.3: Σύγκριση τιμών του μέγιστου πλάτους φθοράς, για το Πείραμα 2

Οι τιμές του μέγιστου πλάτους της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας, που λήφθηκαν με χρήση του προτεινόμενου συστήματος, συγκρίθηκαν με τις τιμές που λήφθηκαν μέσω του λογισμικού του στερεομικροσκοπίου Leica M125. Όπως προκύπτει από τους παραπάνω πίνακες, το μέγιστο σφάλμα μέτρησης είναι της τάξης του 0.014 mm, ενώ το μέσο σφάλμα είναι 0.0075 mm, γεγονός που φανερώνει την ευρωστία και την αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου, αναφορικά με τη μέτρηση του μέγιστου πλάτους της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας.

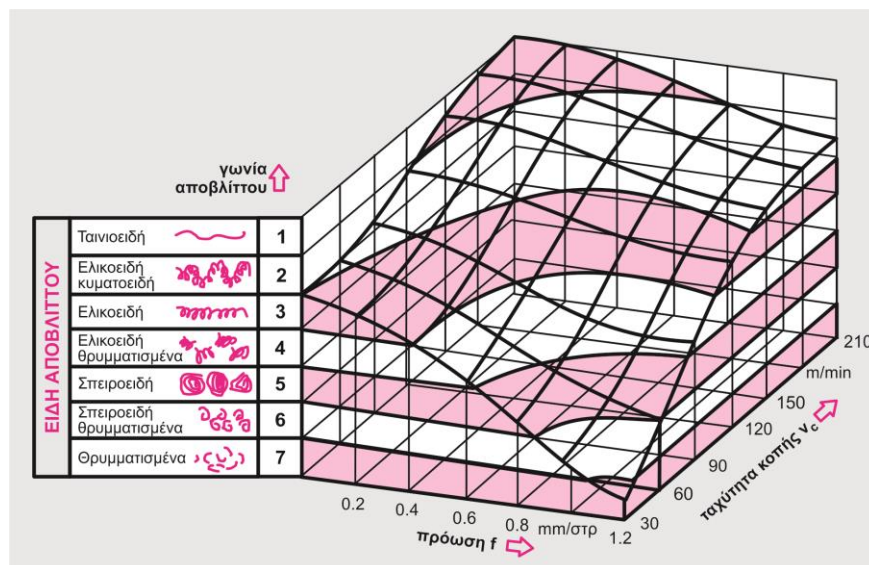


Σχήμα 5.8: Στάδια εξέλιξης της φθοράς, σε αντίστοιχες χρονικές στιγμές, για τα δύο πειράματα



Σχήμα 5.9: Καμπύλες φθοράς των δύο πειραμάτων

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.8 και το Σχήμα 5.9 η αύξηση της πρόωσης είχε σαν συνέπεια τη μείωση του μέγιστου πλάτους της φθοράς, στο Πείραμα 2. Αυτό οφείλεται στο ότι η ελάττωση της πρόωσης οδηγεί σε μη επιθυμητά θρυμματισμένα απόβλιντα, τα οποία έχουν δυσμενή επίπτωση στη φθορά του εργαλείου. Γενικά, η γωνία αποβλίττου επιδρά σημαντικά στο σχηματισμό του αποβλίττου, αφενός γιατί καθορίζει την κατεύθυνση που αυτό ακολουθεί κατά το σχηματισμό του και αφετέρου, γιατί το μέγεθός της είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απαιτούμενη πλαστική παραμόρφωση που πρέπει να υποστεί το κατεργαζόμενο υλικό. Έτσι, αύξηση της γωνίας αποβλίττου έχει ως επακόλουθο τη μείωση της απαιτούμενης πλαστικής παραμόρφωσης, άρα ομαλότερες συνθήκες σχηματισμού του αποβλίττου. Από το Σχήμα 5.10 γίνεται εμφανές ότι για σταθερή ταχύτητα κοπής, όπως στη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων, μια μεγαλύτερη πρόωση έχει σαν συνέπεια την παραγωγή των επιθυμητών ελικοειδών συνεχών αποβλιντων, η οποία οδηγεί σε μια πιο ομαλή κοπή και κατ' επέκταση σε μικρότερη φθορά.



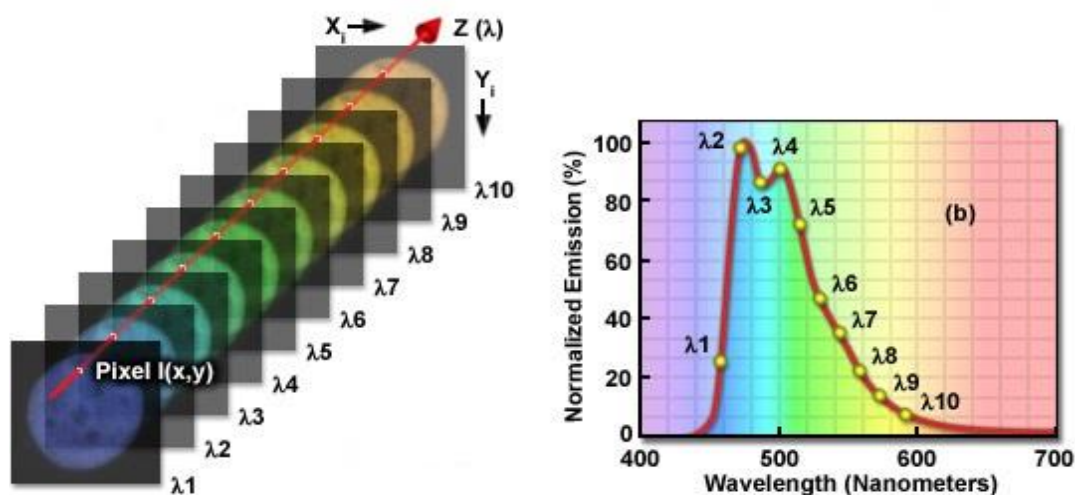
Σχήμα 5.10: Συσχέτιση της γωνίας αποβλίττου με την πρόωση και την ταχύτητα κοπής

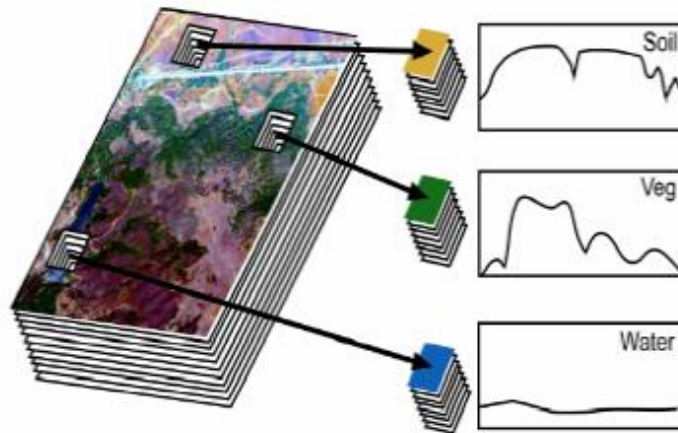
6. Υπερφασματική Απεικόνιση

Η φασματική απεικόνιση (spectral imaging) αποτελεί την εφαρμογή της φασματοσκοπίας ανάκλασης για κάθε pixel μίας εικόνας. Η φασματοσκοπία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάδειξη ιδιαίτερων φασματικών χαρακτηριστικών, τα οποία οφείλονται στους χημικούς δεσμούς των στερεών, υγρών ή αερίων σωμάτων. Η ανίχνευση των υλικών, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φασματική κάλυψη, τη φασματική ανάλυση, το βαθμό του θορύβου των φασματομέτρων, τη συγκέντρωση του υλικού και την ισχύ των χαρακτηριστικών απορρόφησης αυτού του υλικού στη μετρούμενη περιοχή μήκους κύματος.

Η υπερφασματική απεικόνιση (hyperspectral imaging) ήταν η πιο επαναστατική πρόοδος στον τομέα της τηλεπισκόπησης και αρχικά αναπτύχθηκε με σκοπό την ανίχνευση και την ταυτοποίηση βλάστησης, ορυκτών πόρων και θαλάσσιου φυσικού περιβάλλοντος. Ένα υπερφασματικό απεικονιστικό σύστημα συλλέγει και επεξεργάζεται την πληροφορία από ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Η υπάρχουσα τεχνολογία συστημάτων υπερφασματικής απεικόνισης συνίσταται ουσιαστικά σε ειδικά φίλτρα, τα οποία συζευγνύονται οπτικά με απεικονιστικούς ανιχνευτές, οι οποίοι καταγράφουν τις διερχόμενες από το φίλτρο στενές φασματικές εικόνες. Τα εν λόγω φίλτρα έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν τη φασματική περιοχή στην οποία είναι διαπερατά, κάτω από την επίδραση μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, αντί της χωρικής σάρωσης, η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη φασματική σάρωση, η οποία επιτρέπει την παρατήρηση σε πραγματικό χρόνο και την καταγραφή στενών φασματικών εικόνων με τη δυνατότητα άμεσης επιλογής του μήκους κύματος απεικόνισης. Ακόμη, παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης διαδοχικών εικόνων κατά μήκος του φάσματος, με αρκετά μεγάλη ταχύτητα και δυνητικά ο μετέπειτα υπολογισμός των φασμάτων σε διάφορα χωρικά σημεία από τις καταχωρημένες εικόνες. Τα υπερφασματικά δεδομένα είναι πολύ μεγάλα σύνολα δεδομένων που απαιτούν νέες μεθόδους επεξεργασίας και συλλέγονται και αναπαριστώνται με τη μορφή ενός κύβου (spectral cube), με χωρική πληροφορία στην x και y διάσταση και φασματική στη z .





Σχήμα 6.1: Υπερφασματική απεικόνιση : Φασματικός κύβος και φάσμα ανάκλασης για κάθε εικονοστοιχείο

Τα φασματόμετρα απεικόνισης ή υπερφασματικοί αισθητήρες, είναι τηλεσκοπικά αισθητήρια όργανα τα οποία συνδυάζουν τη χωρική απεικόνιση ενός αισθητήρα απεικόνισης με τις αναλυτικές ικανότητες ενός φασματόμετρου. Μπορούν να έχουν ως και εκατοντάδες, πολύ στενές φασματικές ζώνες, με φασματική ανάλυση της τάξης των 10 nm ή και μικρότερη. Τα φασματόμετρα απεικόνισης παράγουν ένα πλήρες, συνεχές φάσμα για κάθε pixel της εικόνας. Το αποτέλεσμα αυτής της υψηλής φασματικής ανάλυσης των φασματομέτρων απεικόνισης είναι η δυνατότητα της ταυτοποίησης υλικών, ενώ με τους ευρείας ζώνης πολυφασματικούς αισθητήρες μπορούσαμε απλά να κάνουμε διακρίσεις μεταξύ των υλικών.

Οι φασματικές εικόνες κύβων είναι παρόμοιες με το σύνολο των εικόνων ενός αντικειμένου, δείγματος ή τοποθεσίας όπου κάθε εικόνα αποκτάται σε μια στενή φασματική ζώνη. Κάθε pixel στους κύβους εικόνων απεικονίζει το φάσμα σε εκείνο το σημείο. Διαφορετικά υλικά, έχουν διαφορετική μοριακή δομή, συνεπώς αλληλεπιδρούν διαφορετικά με το φως. Έτσι, είναι δυνατό να αποκτηθούν διαφορετικές φασματικές αποκρίσεις για διαφορετικά είδη υλικών. Τα φάσματα αυτά, αποτελούν τις φασματικές υπογραφές για γνωστά υλικά, όπως το νερό, η βλάστηση, κλπ.

Τα συστήματα υπερφασματικής απεικόνισης απαιτούν υψηλή χωρική και φασματική ανάλυση. Επίσης, μπορούμε να διακρίνουμε τον αριθμό των ζωνών από τις οποίες αποτελείται ένας κύβος. Λιγότερες ζώνες οδηγούν σε πολυφασματικά συστήματα που έχουν φίλτρα περιορισμένων ζωνών, με μεγαλύτερο εύρος φάσματος συγκριτικά με της υπερφασματικής απεικόνισης, προκαλώντας μικρότερη φασματική ανάλυση. Η υπερφασματική απεικόνιση χρησιμοποιεί στενό εύρος φάσματος, εξασφαλίζοντας υψηλή φασματική ανάλυση. Συγκεκριμένα, στα συστήματα πολυφασματικής απεικόνισης, οι απεικονιστικοί μονοχρωμάτορες είναι σχετικά απλές διατάξεις και επιτρέπουν την λήψη εικόνων σε δέκα ή λιγότερες διαφορετικές περιοχές του οπτικού φάσματος. Αντίθετα, στην περίπτωση της υπερφασματικής απεικόνισης οι μονοχρωμάτορες επιτρέπουν τη λήψη διαδοχικών εικόνων σε 30-100 διαφορετικές περιοχές του οπτικού φάσματος και η τεχνολογία τους είναι πολύ υψηλού επιπέδου.

6.1 Το σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS



Σχήμα 6.2: Υπερφασματικό σύστημα MuSIS

Τα πειράματα διενεργήθηκαν με χρήση ενός υπερφασματικού συστήματος απεικόνισης (MuSIS), βασισμένο σε έναν ολο-οπτικό μονοχρωμάτορα απεικόνισης. Η μετατόπιση των οπτικών στοιχείων των πιο πρόσφατων αποτελεσμάτων στο συντονισμό τους μήκους κύματος απεικόνισης εκτελείται με τη βοήθεια μηχανικών χειρισμών, που ελέγχονται από τον υπολογιστή μέσω ενός μικροελεγκτή. Το σύστημα είναι σε θέση να παράγει φασματικές εικόνες 5nm full width half maximum (FWHM), με βήμα ρύθμισης 3nm, στη φασματική ζώνη 360-1550 nm, περίπου 20 nm η κάθε μία. Ο φωτισμός πραγματοποιείται από 2 λάμπες αλογόνου 250 W. Ο συντονισμός του φασματικού εύρους ταιριάζει με το φασματικό εύρος της δυνατότητας απόκρισης (responsivity) του CCD, αλλά μπορεί να επεκταθεί και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, μέχρι τη μέση-υπέρυθρη περιοχή. Το παραγόμενο σήμα ανατροφοδότησης του μονοχρωμάτορα φέρει τις πληροφορίες για την κατάσταση του μεταβλητού φίλτρου, επιτρέποντας

κατά συνέπεια το συγχρονισμό του με τη διαδικασία σύλληψης της εικόνας. Ο μονοχρωμάτορας είναι συνδεδεμένος με μια ασπρόμαυρη CCD κάμερα βασισμένη στο πρωτόκολλο μετάδοσης δεδομένων 1394 της IEEE, το οποίο μπορεί να παράγει τις εικόνες σε ένα ποσοστό 15 frames/sec σε πλήρη ανάλυση και περισσότερων από 30 frames/sec σε ανάλυση VGA.

Ένα ειδικά ανεπτυγμένο λογισμικό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του συστήματος και του μονοχρωμάτορα, καθώς επίσης και για τη φασματική ανάλυση της εικόνας. Το σύστημα λειτουργεί σε δύο καταστάσεις, την κατάσταση της φασματοσκοπίας και την κατάσταση της φασματομετρίας. Η πρώτη επιτρέπει την τυχαία επιλογή και την απεικόνιση, σε πραγματικό χρόνο, των επιθυμητών φασματικών εικόνων, ενώ η κατάσταση της φασματομετρίας εκτελεί συγχρονισμένα τη φασματική σύλληψη και ανίχνευση της εικόνας και τελικά τον υπολογισμό ενός πλήρους φάσματος ανά εικονοστοιχείο. Ομοίως, και στις δύο περιπτώσεις, μια ειδική διαδικασία βαθμονόμησης εκτελείται πριν από αυτές τις διαδικασίες απεικόνισης, προκειμένου να αντισταθμιστεί η εξάρτηση μήκους κύματος της απόκρισης των ηλεκτροπτικών μέρων του συστήματος, όπως το CCD, ο φωτισμός, κτλ. Μια πλάκα Ba_2SO_4 με ενιαίο συντελεστή ανάκλασης στη φασματική ζώνη 400-1000 nm χρησιμοποιείται ως δείγμα βαθμονόμησης. Το δείγμα τοποθετείται στο οπτικό πεδίο του φακού και η γκρι τιμή του κεντρικού τομέα της εικόνας αναπαρίσταται σε πραγματικό χρόνο. Κατόπιν, ο μονοχρωμάτορας ανιχνεύει τη συνολική φασματική ζώνη και σε κάθε βήμα ρυθμίζεται το διάφραγμα και το gain της κάμερας, ώστε να επιτυγχάνεται τιμή λίγο κάτω από 255. Αυτό εξασφαλίζει ότι η δυναμική περιοχή του CCD αξιοποιείται πλήρως. Οι τιμές του διαφράγματος και του gain, που χρησιμοποιούνται για να λάβουν το γκρι επίπεδο 255, αποθηκεύονται σε κάθε μήκος κύματος, μαζί με την εικόνα του άσπρου δείγματος, αποτελώντας το σύνολο των στοιχείων βαθμονόμησης του συστήματος. Στο παρόν πείραμα η βαθμονόμηση έγινε με ένα γκρι στοιχείο, γιατί τα δείγματα ήταν αρκετά σκούρα.

Οι ρυθμίσεις αυτές καθορίζουν το επίπεδο ευαισθησίας του συστήματος, το οποίο

αυξάνεται όσο το μήκος κύματος απεικόνισης συντονίζεται σε μικρότερα ή μεγαλύτερα μήκη κύματος, από τη ζώνη μηκών κύματος στην οποία η μέγιστη ρυθμαπόδοση του φωτός και η αποδοτικότητα του συστήματος λαμβάνονται. Αυτό καθιστά την απόκριση του συστήματος σχεδόν ανεξάρτητη από το μήκος κύματος, εξασφαλίζοντας κατά συνέπεια φασματική απεικόνιση και φασματομετρία ανεξάρτητες από τη συσκευή. Οι αποθηκευμένες φασματικές εικόνες του άσπρου δείγματος χρησιμοποιούνται προκειμένου να διορθώσουν την ανωμαλία της φωτεινότητας της εικόνας, λόγω της ανομοιομορφής συνάρτησης μεταφοράς της οπτικής.

Με το τρέξιμο του τμήματος κώδικα για την κατάσταση της φασματομετρίας, που ακολουθεί τη διαδικασία βαθμονόμησης, το σύστημα εκτελεί συγχρονισμένα τη ρύθμιση του μήκους κύματος απεικόνισης της εικόνας και τη σύλληψη της εικόνας, ενώ αποθηκεύει την υπό εξέταση περιοχή. Σε κάθε βήμα, η ευαισθησία του συστήματος είναι αυτόματα ρυθμισμένη σύμφωνα με τις αποθηκευμένες τιμές του διαφράγματος και του gain. Από το σύνολο των φασματικών εικόνων, ένα φάσμα μπορεί να υπολογιστεί και να επιδειχθεί σε οποιοδήποτε επιλεγμένο από το χρήστη χωρικό σημείο της εικόνας. Τα φάσματα υπολογίζονται από τις γκρι τιμές της επιλεγμένης φασματικής στήλης pixel. Η χωρική ανάλυση του ανιχνευτή καθορίζει τον αριθμό φασμάτων που μπορούν να συλλεχθούν σε ένα κύκλο πειράματος. Με την περιγεγραμμένη διαμόρφωση, ένα εκατομμύριο φάσματα μπορούν να συλλεχθούν σε περίπου δύο λεπτά χρόνου ανίχνευσης. Το σύστημα ενσωματώνει επίσης μια γρήγορη διαδικασία αποταμίευσης σε μικρότερη ανάλυση.

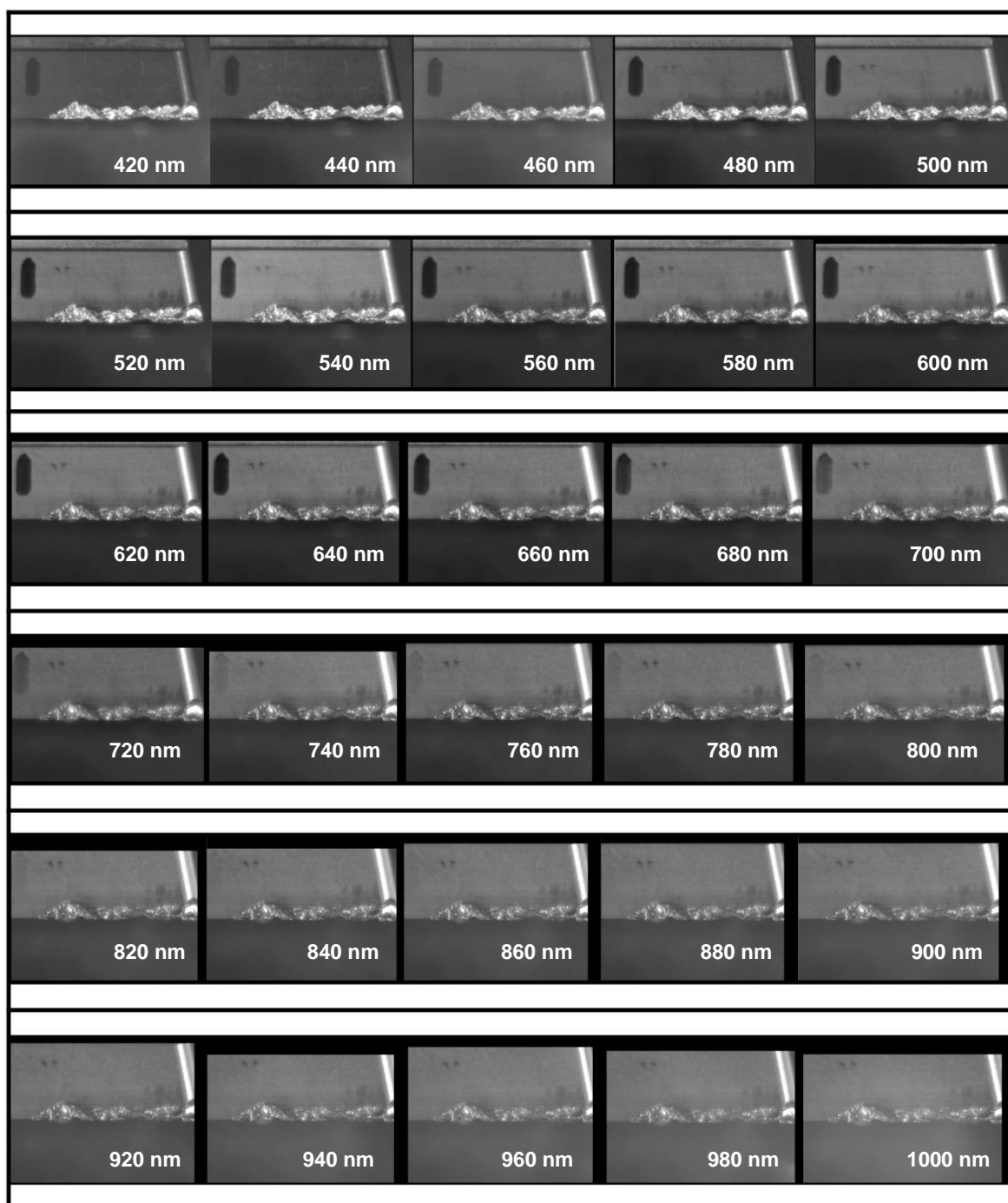
6.2 Πειραματική διαδικασία

Στο πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης (MuSIS), για τη μελέτη 5 δειγμάτων κοπτικών εργαλείων φραιζαρίσματος. Αρχικά, λήφθηκαν οι φασματικοί κύβοι των 5 διαφορετικών κοπτικών εργαλείων από 420–1000 nm, προκειμένου να γίνει φασματική απεικόνιση των διαφόρων περιοχών των κοπτικών, δηλαδή της άφθαρτης περιοχής, της περιοχής της φθοράς και των ενδιάμεσων καταστάσεων εξέλιξης της φθοράς. Η ανίχνευση και η χαρτογράφηση της περιοχής της φθοράς, μέσω των φασμάτων ανάκλασης των κοπτικών εργαλείων, όπως επίσης και η προσπάθεια ανίχνευσης της φθοράς στο πρώιμο στάδιο εμφάνισής της, αποτελούν τους απώτερους στόχους της συγκεκριμένης διαδικασίας.

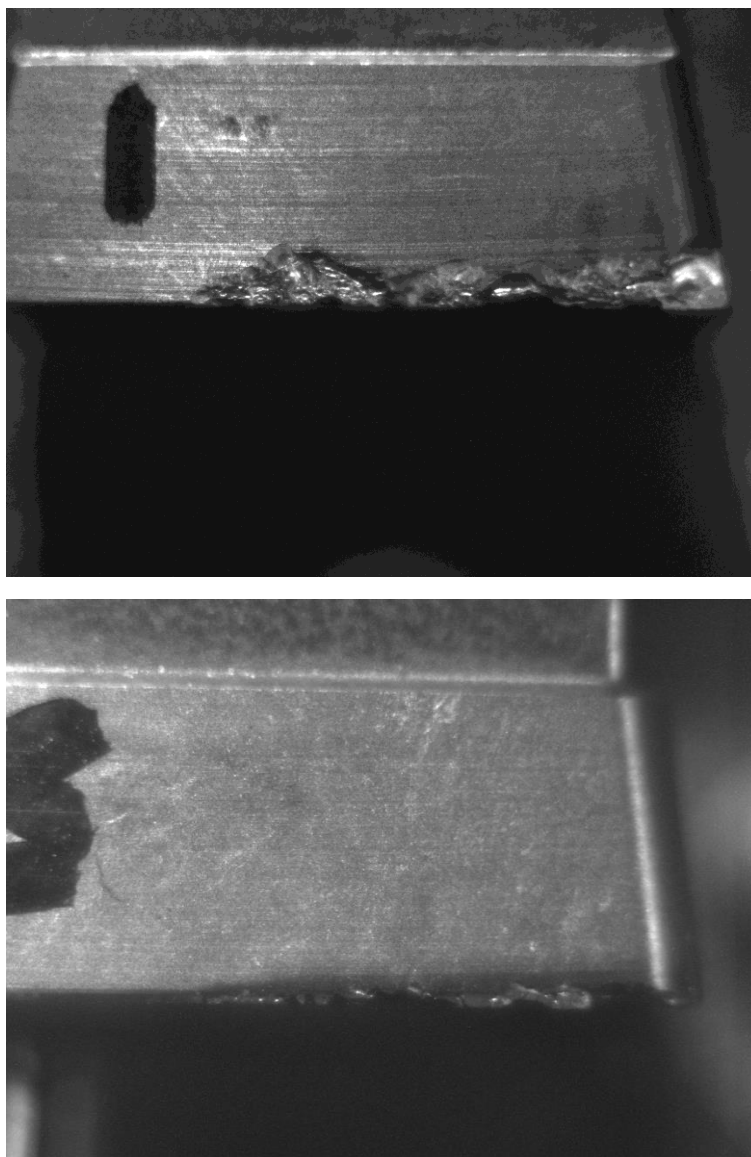
Η διαδικασία της απόκτησης μιας εικόνας σε ένα περιβάλλον τηλεπισκόπησης εμπεριέχει τη συμμετοχή διαφόρων παραγόντων, που συνεπάγονται θόρυβο, μη ευθυγράμμιση του φασματικού κύβου, κλπ. Έτσι, πριν τη χρήση του φασματικού κύβου στο περιβάλλον ανάλυσης πρέπει να περιοριστούν, να αφαιρεθούν ή να εμπλουτιστούν κάποιες όψεις των κύβων, με σκοπό την αφαίρεση των ατελειών που επιβάλλονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Συνεπώς, η προεπεξεργασία του φασματικού κύβου αποτελεί γεγονός ζωτικής σημασίας για τη συνέχεια της επεξεργασίας. Η πολυφασματική κάμερα του συστήματος MuSIS, εκτελεί image registration. Η ανάγκη αυτή δημιουργήθηκε από τη σχετική κίνηση ανάμεσα στο μηχανισμό μέτρησης και το στόχο, αλλά και στις οπτικές ιδιότητες των οπτικών εξαρτημάτων, που καταλήγουν σε λανθασμένη τοποθέτηση των εικόνων στη στοίβα του φασματικού κύβου. Ευθυγραμμίζοντας τις εικόνες του φασματικού κύβου, ευθυγραμμίζονται τα pixels, ώστε η επιλογή ενός pixel να καταλήγει στο ίδιο pixel, για κάθε εικόνα του φασματικού κύβου.

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο registered φασματικός κύβος που προέκυψε με χρήση της κάμερας MuSIS, για το πρώτο κοπτικό εργαλείο. Για κάθε κοπτικό, λήφθηκε επίσης μια μέτρηση στο κοντινό υπεριώδες. Από τον φασματικό κύβο γίνεται εμφανές, ότι στα σήματα από τα 420 μέχρι τα 500 nm υπάρχει μεγαλύτερη αντίθεση μεταξύ της περιοχής φθοράς και του υγιούς τμήματος του κοπτικού εργαλείου, συνεπώς θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για το διαχωρισμό της περιοχής φθοράς από την υπόλοιπη περιοχή του

κοπτικού εργαλείου. Επίσης, στα σήματα από τα 500 μέχρι τα 580 nm γίνονται ευδιάκριτες κάποιες σκούρες περιοχές γύρω από τη ζώνη φθοράς, οι οποίες δε γίνονται αντιληπτές στο ορατό φάσμα του φωτός και ίσως αποτελούν μια ένδειξη πρώιμης φθοράς ή κάποιου είδους ανθρακοποίησης.

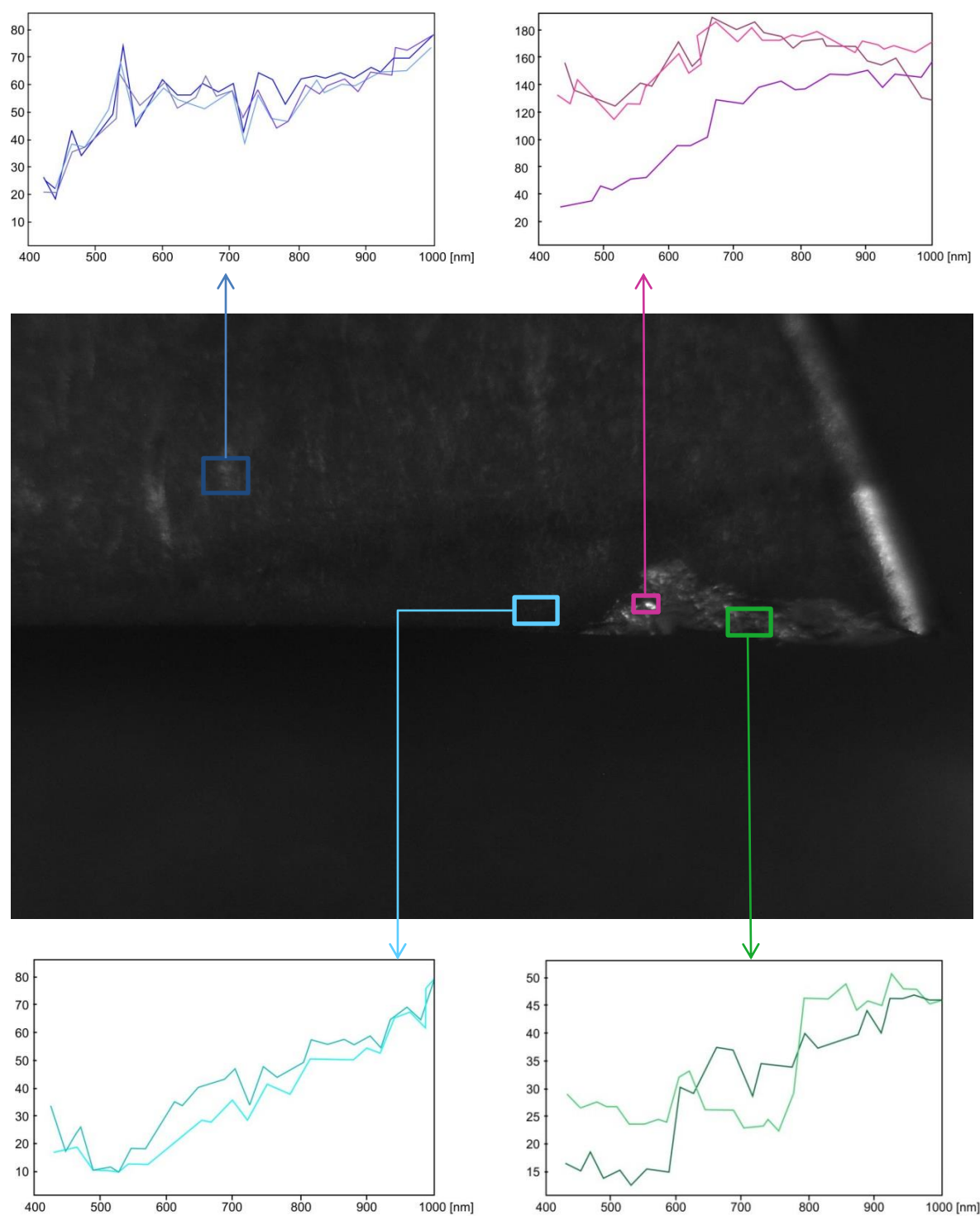


Σχήμα 6.3 : Φασματικός κύβος κοπτικού εργαλείου



Σχήμα 6.4 : Απεικόνιση κοπτικών εργαλείων στο κοντινό υπεριώδες

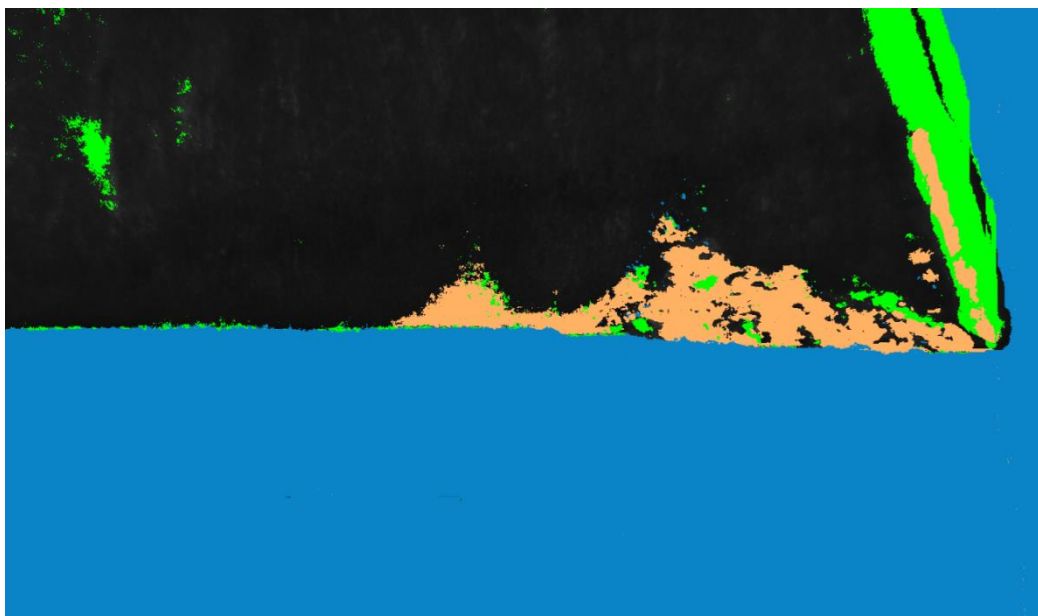
Στη συνέχεια, γίνεται μια μελέτη των φασματικών ιδιοτήτων των κοπτικών εργαλείων, προκειμένου να εντοπιστεί ένα διαγνωστικό κριτήριο, το οποίο θα βοηθήσει στην καλύτερη διακριτοποίηση μεταξύ της φθαρμένης και της άφθαρτης περιοχής του κοπτικού εργαλείου, όπως επίσης και των ενδιάμεσων σταδίων εξέλιξης της φθοράς. Έτσι, αποκτήθηκαν τα φάσματα ανάκλασης από διάφορα σημεία, που με οπτική παρατήρηση φαίνονται να κατατάσσονται στην άφθαρτη περιοχή του κοπτικού εργαλείου, κάποια άλλα που κατατάσσονται στη ζώνη φθοράς και άλλα που ίσως αποτελούν ένδειξη πρώιμης φθοράς. Μελλοντικός στόχος της ενέργειας αυτής είναι η ταξινόμηση των υπερφασματικών δεδομένων. Η ταξινόμηση είναι μία μέθοδος ταυτοποίησης και καταχώρησης κάθε εικονοστοιχείου του φασματικού κύβου σε μία συγκεκριμένη τάξη, σύμφωνα με κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών των εντάσεων, που αναπαρίστανται από τα φάσματα του εικονοστοιχείου αυτού. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να δημιουργηθεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα που ταξινομεί τα δεδομένα φθοράς.



Σχήμα 6.5 : Φάσματα διαφορετικών περιοχών του κοπτικού εργαλείου

6.3 Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

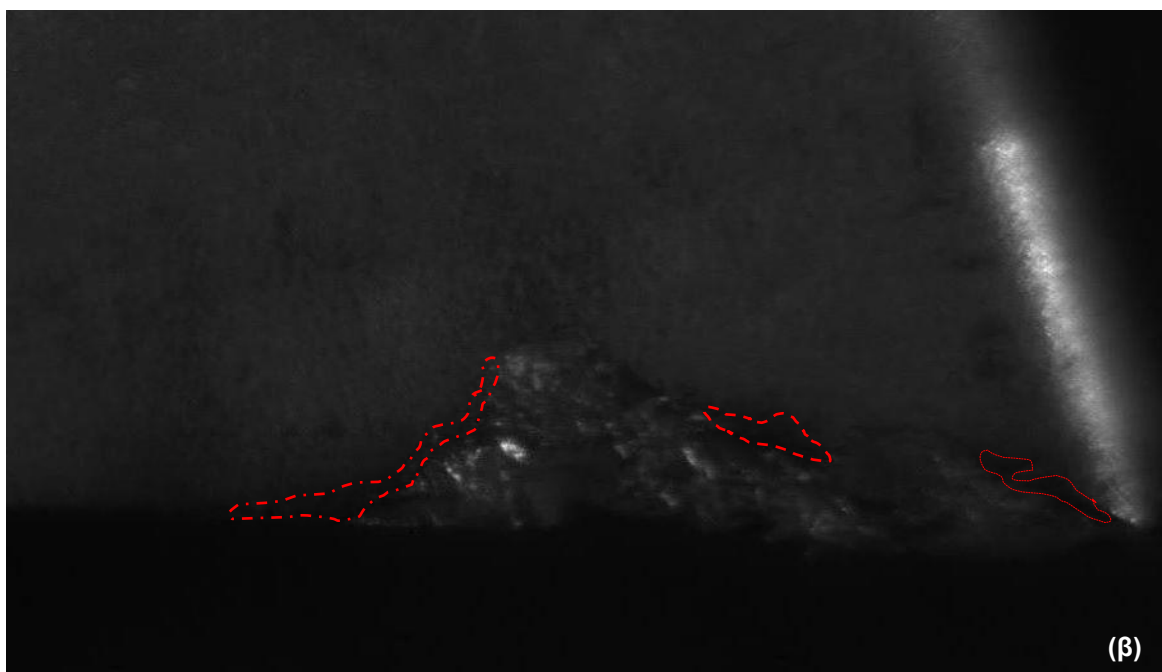
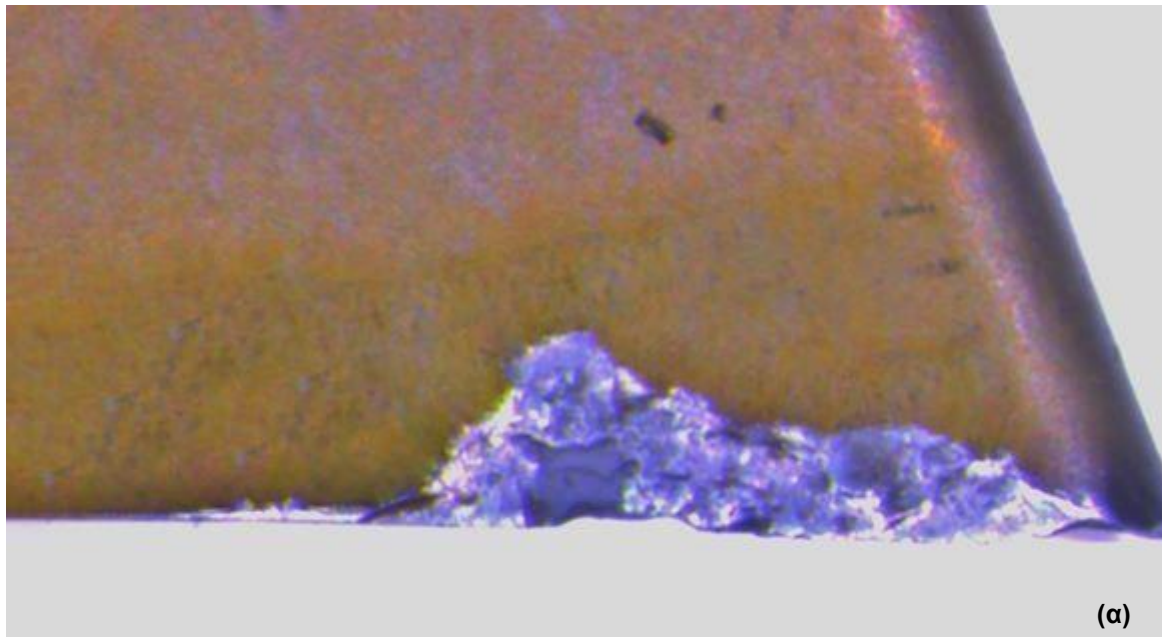
Ο συνδυασμός της υπερφασματικής απεικόνισης μαζί με την εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων ταξινόμησης υπερφασματικών δεδομένων, μπορεί να προσφέρει μια νέα τεχνική ανίχνευσης, χαρτογράφησης και μέτρησης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Πιο αναλυτικά, η χρήση της υπερφασματικής κάμερας MuSIS δίνει τη δυνατότητα λήψης φασμάτων από όλες τις περιοχές του κοπτικού εργαλείου (άφθαρτες, φθαρμένες και άλλες με ενδιάμεσα στάδια εξέλιξης της φθοράς) και από 30 φασματικές μπάντες (420-1000 nm). Συνεπώς, το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μελέτη της φασματικής πληροφορίας κάθε σημείου, καθώς και ο εντοπισμός χαρακτηριστικών του κοπτικού εργαλείου, που δεν φαίνονται στο ορατό φάσμα του φωτός. Η ταξινόμηση με αντικειμενικά κριτήρια των περιοχών φθοράς κάθε κοπτικού εργαλείου θα μπορούσε να αποτελέσει μια μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας. Απώτερο σκοπό της επέκτασης αυτής, αποτελεί η δημιουργία ενός ψευδοχρωματικού χάρτη, ο οποίος θα παρουσιάζει το βαθμό φθοράς κάθε περιοχής του κοπτικού εργαλείου, αντιστοιχίζοντας κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας μας με ένα χρώμα από το χρωματικό κώδικα RGB. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσαν να διαχωριστούν αποτελεσματικά οι διάφορες περιοχές των κοπτικών εργαλείων. Επιπροσθέτως, θα μπορούσε εύκολα να διαχωριστεί η πραγματική φθορά από την ψευδόκοψη, η οποία δημιουργείται από επάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου, που προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε χρίζει μεγαλύτερου αριθμού πειραμάτων και υλοποίηση αλγορίθμων ταξινόμησης υπερφασματικών δεδομένων, ώστε να ληφθούν αρκετές μετρήσεις και με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Ο παρακάτω ψευδοχρωματικός χάρτης δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του αλγορίθμου k-means. Ο αλγόριθμος k-means, υστερεί ως προς το αποτέλεσμα της ομαδοποίησης συγκριτικά με τον αλγόριθμο Mean-Shift, ωστόσο χρησιμοποιήθηκε λόγω της απλότητας της υλοποίησής του, αλλά και της ταχύτητάς του, με σκοπό μια γρήγορη-πρώιμη ταξινόμηση μεγάλου όγκου υπερφασματικών δεδομένων.



Σχήμα 6.6: Υποτυπώδης ψευδοχρωματικός χάρτης. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιοχές του κοπτικού εργαλείου

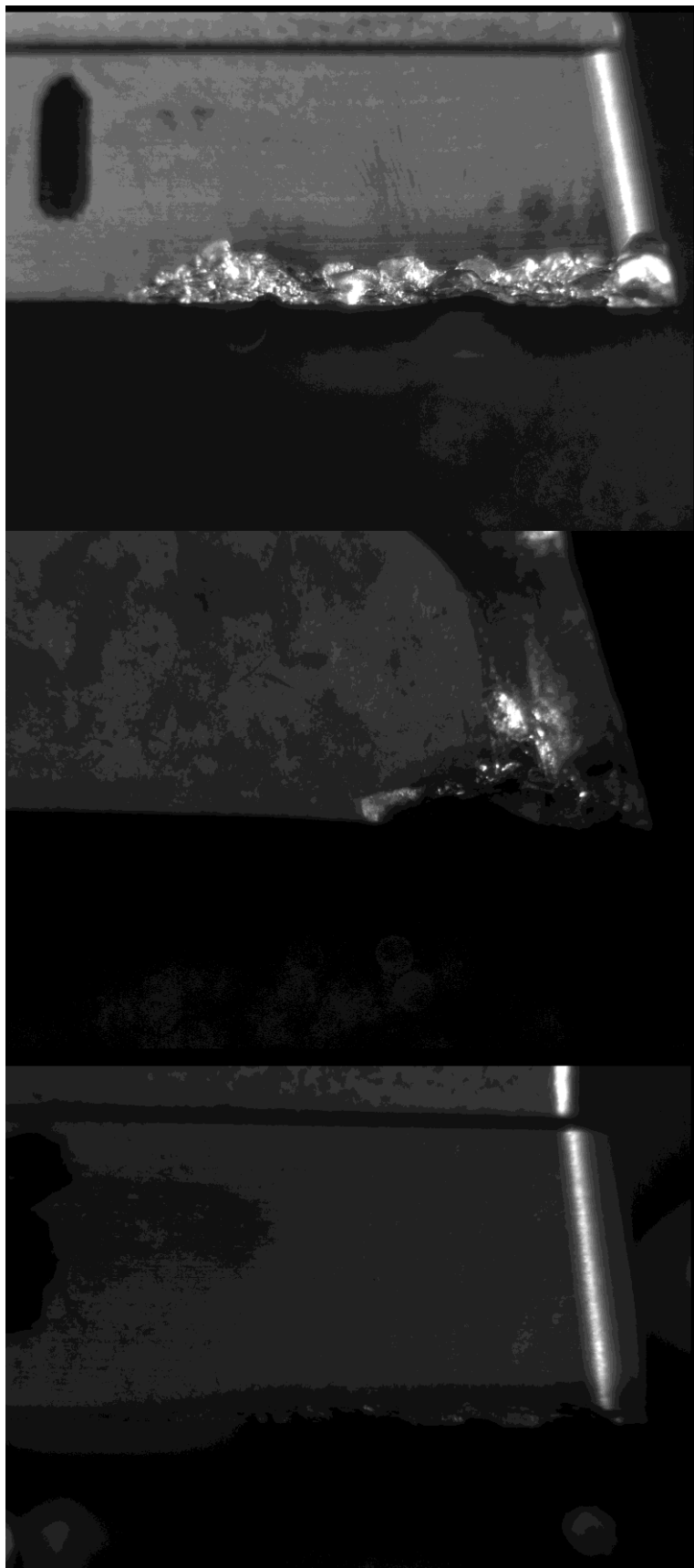
Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση, προκύπτει για κάποιες περιοχές, των οποίων το φάσμα παρουσιάζει μία απότομη πτώση περίπου στα 500 nm και στη συνέχεια μια αύξηση της τιμής της φωτεινότητας. Οι συγκεκριμένες περιοχές, δε γίνονται αντιληπτές στο ορατό φάσμα του φωτός και είναι περισσότερο ευδιάκριτες από τα 500 μέχρι τα 580 nm, με το καλύτερο σήμα να λαμβάνεται στα 540 nm. Οι σκούρες αυτές περιοχές, εμφανίζονται

συνήθως δίπλα στη ζώνη φθοράς και ίσως αποτελούν μια ένδειξη πρώιμης φθοράς. Με βάση το συγκεκριμένο σήμα στα 540 nm, πιθανόν να μπορεί να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται το φαινόμενο της φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 6.7: (α) RGB εικόνα κοπτικού εργαλείου, (β) Εικόνα στη φασματική μπάντα των 540 nm

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε χρίζει περισσότερης μελέτης και μεγαλύτερου αριθμού πειραμάτων, ώστε να επιβεβαιωθούν τα ευρήματα και να γίνει λόγος για περισσότερα αξιόπιστα και αντικειμενικά αποτελέσματα. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητο να μελετηθούν σε βάθος οι σκούρες, «κρυφές» περιοχές, ώστε να αποδειχθεί με βεβαιότητα ότι πρόκειται για ένδειξη πρώιμης φθοράς ή κάποιου είδους ανθρακοποίησης.



Σχήμα 6.8: Εικόνες κοπτικών εργαλείων στη φασματική μπάντα των 540 nm. Διακρίνονται οι σκούρες περιοχές γύρω από τη ζώνη φθοράς.

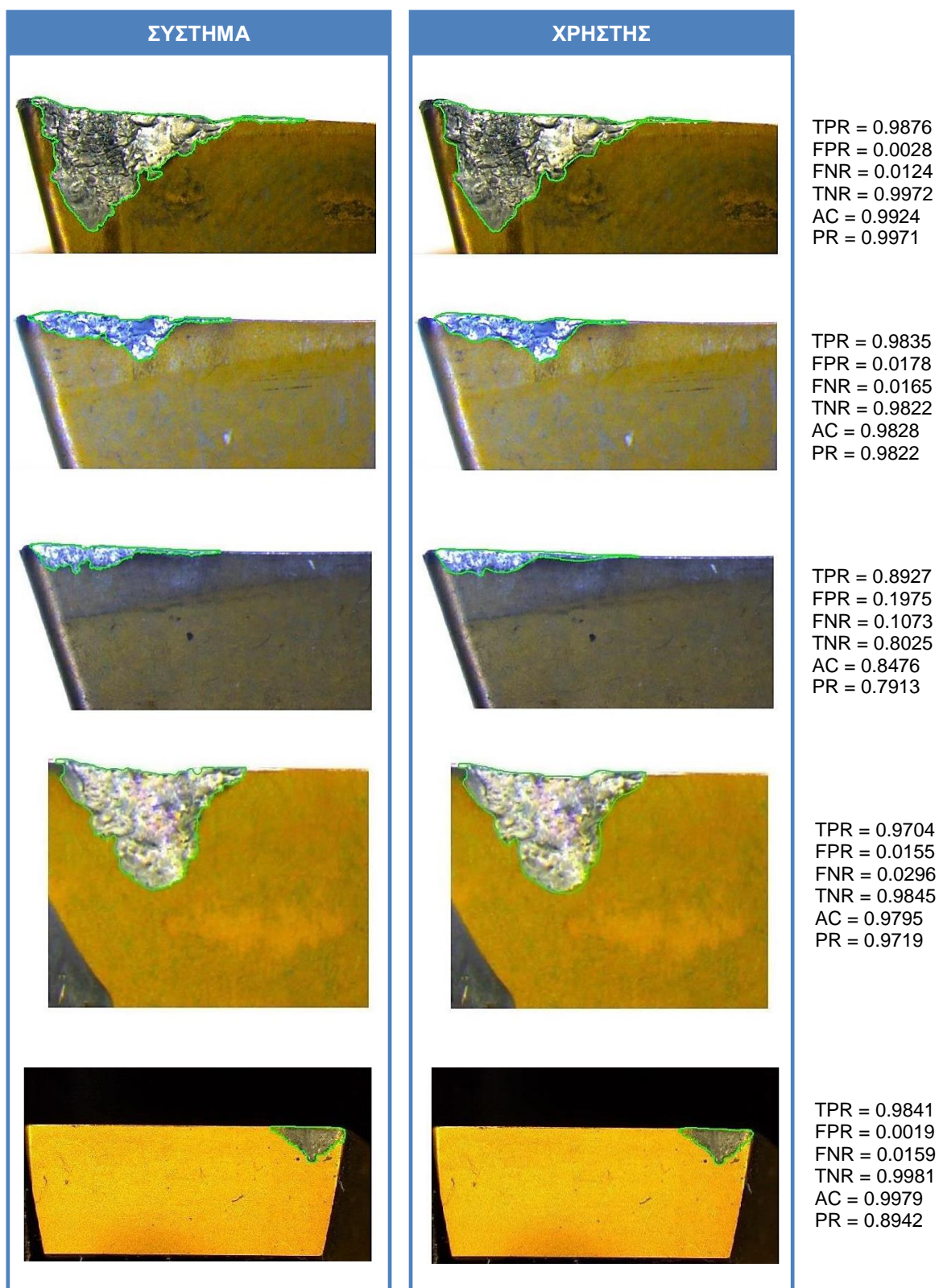
7. Αποτελέσματα

Στο Κεφάλαιο 5, οι τιμές του μέγιστου πλάτους της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας που λήφθηκαν με χρήση του προτεινόμενου συστήματος, συγκρίθηκαν με τις τιμές που λήφθηκαν με χρήση του λογισμικού του στερεομικροσκοπίου Leica M125. Όπως προαναφέρθηκε, το μέγιστο σφάλμα είναι της τάξεως του 0.014 mm, ενώ το μέσο σφάλμα 0.0075 mm. Για την περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου συστήματος, δημιουργήθηκε ένα λογισμικό με γραφική διεπαφή χρήστη, του οποίου ο χειριστής σχεδιάζει λεπτομερώς την περιοχή φθοράς, πάνω στην αρχική εικόνα. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής, συγκρίνεται με το αποτέλεσμα του προτεινόμενου αλγορίθμου, ώστε να υπάρξει ένα είδος επαλήθευσης της προτεινόμενης μεθόδου και ως προς την περιοχή της φθοράς. Οι τιμές που συγκρίνονται είναι οι τιμές των True Positive Rate, False Negative Rate, True Negative Rate, False Positive Rate, Precision και Accuracy.

Μέθοδος Χρήστης	Positive	Negative	<div><div>➤ $TPR = TP/(TP+FN)$</div><div>➤ $FPR = FP/(FP+TN)$</div><div>➤ $TNR = TN/(TN+FP)$</div><div>➤ $FNR = FN/(FN+TP)$</div><div>➤ $Accuracy = (TN+TP)/(TP+FN+FP+TN)$</div><div>➤ $Precision = TP/(TP+FP)$</div></div>
	Positive	Negative	
Positive	TP	FN	
Negative	FP	TN	

Σχήμα 7.1: Ορισμός μετρικών αξιολόγησης

- Ως **True Positive** (αληθώς θετική περίπτωση - TP) ορίζεται η περίπτωση που κάποιο pixel βρίσκεται στην περιοχή της φθοράς και ο αλγόριθμος το κατηγοριοποιεί σωστά στην περιοχή της φθοράς.
- Ως **False Negative** (ψευδώς αρνητική περίπτωση - FN) ορίζεται η περίπτωση που κάποιο pixel βρίσκεται στην περιοχή της φθοράς και ο αλγόριθμος το κατηγοριοποιεί λανθασμένα στην υγιή περιοχή του κοπτικού εργαλείου.
- Ως **False Positive** (ψευδώς θετική περίπτωση - FP) ορίζεται η περίπτωση που κάποιο pixel βρίσκεται στην υγιή περιοχή του κοπτικού εργαλείου και ο αλγόριθμος το κατηγοριοποιεί λανθασμένα στην περιοχή φθοράς.
- Ως **True Negative** (αληθώς αρνητική περίπτωση - TN) ορίζεται η περίπτωση που κάποιο pixel βρίσκεται στην υγιή περιοχή του κοπτικού εργαλείου και ο αλγόριθμος το κατηγοριοποιεί σωστά στην υγιή περιοχή.
- **True Positive rate** (TPR): Ποσοστό των αληθώς θετικών pixel.
- **False Positive rate** (FPR): Ποσοστό των ψευδώς θετικών pixel.
- **True Negative rate** (TNR): Ποσοστό των αληθώς αρνητικών pixel.
- **False Negative rate** (FNR): Ποσοστό των ψευδώς αρνητικών pixel.
- **Accuracy** (AC): Ποσοστό των συνολικών σωστών παρατηρήσεων.
- **Precision** (PR): Ποσοστό των pixel που κατηγοριοποιήθηκαν στην περιοχή της φθοράς και βρίσκονται πραγματικά στην περιοχή της φθοράς.



Σχήμα 7.2: Ενδεικτική σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου συστήματος, με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από ένα λογισμικό με γραφική διεπαφή χρήστη

Πέραν των συνολικών μετρικών αξιολόγησης του συστήματος, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορα πειράματα, μέσω της εκτέλεσης των οποίων αποφάνθηκε η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων του αλγορίθμου Mean - Shift. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται λόγος για τον τρόπο επιλογής της κατάλληλης γειτονιάς αναζήτησης, του κατάλληλου πλήθους των πλησιέστερων γειτόνων και του κατάλληλου πυρήνα. Τέλος, αποδεικνύεται η ευρωστία του αλγορίθμου τόσο για χαμηλά όσο και για υψηλά επίπεδα θορύβου.

7.1 Επιλογή της κατάλληλης γειτονιάς αναζήτησης

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για κάθε pixel μιας εικόνας εισόδου του αλγορίθμου, εκτιμάται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\hat{f}_K(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^d} k\left(\left\|\frac{(x-x_i)}{h_i}\right\|^2\right) \quad (7.1)$$

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η επίδραση της μεταβλητής των γειτονικών pixel (n) στα αποτελέσματα του αλγορίθμου Mean-Shift. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων, για τις μετρικές αξιολόγησης True Positive Rate και Accuracy, για 20 εικόνες κοπτικών εργαλείων, κατά την ανάλυση των οποίων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες γειτονιές αναζήτησης, Gaussian πυρήνας και το προσαρμοστικό μέγεθος παραθύρου ορίστηκε ως η απόσταση μεταξύ του x_i και του 200-οστού πλησιέστερου γείτονά του.

	[10*10]	[12*12]	[14*14]	[16*16]	[18*18]	[20*20]
TPR	0.9564	0.9535	0.9560	0.9587	0.9593	0.9576
Accuracy	0.9782	0.9771	0.9781	0.9835	0.9832	0.9758

Πίνακας 7.1: Μέσοι όροι των μετρήσεων για 20 εικόνες κοπτικών εργαλείων, κατά την ανάλυση των οποίων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες γειτονιές αναζήτησης, ο Gaussian πυρήνας και το προσαρμοστικό μέγεθος παραθύρου ορίστηκε ως η απόσταση μεταξύ του x_i και του 200-οστού πλησιέστερου γείτονά του

Θα ήταν αναμενόμενο το γεγονός, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γειτονιά, τόσο καλύτερα αποτελέσματα θα λαμβάνονται. Με τη βοήθεια του Πίνακα 7.1 μπορούμε να επισημάνουμε ότι το γεγονός αυτό δεν είναι απαραίτητα σωστό, διότι ακόμη και μικρότερες γειτονιές μπορούν να παράγουν εξίσου ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Συνεπώς, δεν παίζει ρόλο το πόσο μεγάλη γειτονιά επιλέγεται, αλλά το πόσο κατάλληλη είναι, ώστε να οδηγήσει στο βέλτιστο αποτέλεσμα. Επιλέχθηκε η γειτονιά [16*16], αφού όπως βλέπουμε οδηγεί σε ανάλογα αποτελέσματα με τη γειτονιά [18*18], όμως ο αλγόριθμος εκτελείται σαφώς ταχύτερα.

7.2 Επιλογή του κατάλληλου πλήθους πλησιέστερων γειτόνων

Όπως προαναφέρθηκε, η υλοποίηση του αλγορίθμου Mean-Shift με χρήση προσαρμοστικού αντί σταθερού εύρους, ονομάζεται adaptive Mean-Shift. Σε χώρους χαρακτηριστικών υψηλών διαστάσεων έχει αποδειχθεί ότι η εν λόγω τεχνική παράγει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τον Mean-Shift σταθερού εύρους. Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για να καθορίσουν το προσαρμοστικό μέγεθος παραθύρου για τον adaptive mean-shift, ωστόσο στην παρούσα εργασία το μέγεθος του παραθύρου ορίζεται ως η απόσταση h_i μεταξύ του x_i και του k -οστού πλησιέστερου γείτονά του :

$$h_i = \|x_i - x_{i,k}\| \quad (7.2)$$

Οι γείτονες των x_i ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά με βάση την απόσταση από το x_i και ο αριθμός των γειτόνων k επιλέγεται αρκετά μεγάλος, ώστε να διασφαλιστεί ότι υπάρχει αύξηση στην πυκνότητα. Στη συγκεκριμένη παράγραφο ερευνάται η επίδραση του k στα αποτελέσματα του αλγορίθμου Mean-Shift, μέσα σε ένα όριο των 400 pixel, το οποίο αντιστοιχεί σε μια γειτονιά 20×20 . Το ταβάνι της γειτονιάς αναζήτησης ορίστηκε $[20 \times 20]$, διότι για μεγαλύτερες γειτονιές ο αλγόριθμος δεν αποδίδει καλύτερα από τις γειτονιές που εξετάζονται στον Πίνακα 7.1. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε Gaussian πυρήνας και γειτονιά αναζήτησης $[16 \times 16]$. Με βάση τα αποτελέσματα η τιμή του k , η οποία δίδει τα καλύτερα αποτελέσματα είναι το 200. Παρατηρείται όμως, ότι οι διαφορές στις μετρήσεις είναι μικρές, συνεπώς διαφορετικά k , εντός μιας κατάλληλης γειτονιάς αναζήτησης, δεν έχουν αρκετά μεγάλη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα του αλγορίθμου.

	100	120	140	160	180	200	220
TPR	0.9541	0.9539	0.9568	0.9571	0.9573	0.9587	0.9576
Accuracy	0.9801	0.9792	0.9809	0.9814	0.9828	0.9835	0.9831

Πίνακας 7.2: Μέσοι όροι των μετρήσεων για 20 εικόνες κοπτικών εργαλείων, κατά την ανάλυση των οποίων, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές του πλήθους των πλησιέστερων γειτόνων, Gaussian πυρήνας και γειτονιά αναζήτησης $[16 \times 16]$

7.3 Επιλογή βέλτιστου συνδυασμού γειτονιάς αναζήτησης και πλήθους πλησιέστερων γειτόνων

Έχοντας μελετήσει αρκετές διαφορετικές τιμές για το μέγεθος της γειτονιάς αναζήτησης και το πλήθος των k πλησιέστερων γειτόνων, στη συγκεκριμένη παράγραφο μελετάται ο βέλτιστος συνδυασμός των δύο αυτών παραμέτρων. Συνεπώς, για το μέγεθος της γειτονιάς αναζήτησης επιλέχθηκαν οι τιμές $[14 \times 14]$, $[16 \times 16]$, $[18 \times 18]$, $[20 \times 20]$ και για την παράμετρο k οι τιμές 140, 160, 180, 200, 220. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρικών True Positive Rate και Accuracy, για τους παραπάνω συνδυασμούς τιμών, για 20 εικόνες κοπτικών εργαλείων.

TPR	140	160	180	200	220
[14*14]	0.9580	0.9578	0.9553	0.9560	0.9542
[16*16]	0.9568	0.9571	0.9573	0.9587	0.9576
[18*18]	0.9553	0.9519	0.9565	0.9593	0.9585
[20*20]	0.9577	0.9536	0.9559	0.9576	0.9553

Πίνακας 7.3: Μέσοι όροι του True Positive Rate, για 20 εικόνες κοπτικών εργαλείων, κατά την ανάλυση των οποίων, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί των τιμών του πλήθους των πλησιέστερων γειτόνων και της γειτονιάς αναζήτησης

Accuracy	140	160	180	200	220
[14*14]	0.9815	0.9757	0.9802	0.9798	0.9732
[16*16]	0.9809	0.9814	0.9828	0.9835	0.9812
[18*18]	0.9797	0.9776	0.9819	0.9832	0.9832
[20*20]	0.9746	0.9815	0.9795	0.9758	0.9766

Πίνακας 7.4: Μέσοι όροι του Accuracy, για 20 εικόνες κοπτικών εργαλείων, κατά την ανάλυση των οποίων, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί των τιμών του πλήθους των πλησιέστερων γειτόνων και της γειτονιάς αναζήτησης

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες, αρκετοί συνδυασμοί των τιμών του μεγέθους της γειτονιάς αναζήτησης και του πλήθους των k πλησιέστερων γειτόνων, μπορούν να γίνουν αποδεκτοί, χωρίς σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το τελικό αποτέλεσμα της κατάτμησης. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε ως βέλτιστος ο συνδυασμός των παραμέτρων $[16*16]$ με $k=200$, αφού αποτελεί το συνδυασμό, ο οποίος αποδίδει καλύτερα στο πλήθος των εικόνων που αναλύθηκαν και ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκτελείται σε αποδεκτά χρονικά όρια. Για κάθε πείραμα (16 εικόνες μεγέθους 640×480 pixel) ο αλγόριθμος εκτελείται σε 17.2 min κατά μέσο όρο.

7.4 Επιλογή κατάλληλου πυρήνα

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος υλοποιήθηκε με δύο πυρήνες, τον πυρήνα Epanechnikov και τον κανονικό πυρήνα. Υπενθυμίζεται, ότι κανονικός ή Gaussian πυρήνας είναι ο πυρήνας:

$$K_N(x) = (2\pi)^{d/2} \exp(-\frac{1}{2} \|x\|^2) \quad (7.3)$$

, ενώ ο πυρήνας Epanechnikov:

$$K_E(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} c_d^{-1} (d+2) (1 - \|x\|^2) & \text{για } \|x\| < 1 \\ 0 & \text{για } \|x\| \geq 1 \end{cases} \quad (7.4)$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων για 20 εικόνες κοπτικών εργαλείων, κατά την ανάλυση των οποίων χρησιμοποιήθηκαν οι πυρήνες Epanechnikov και Gaussian αντίστοιχα, καθώς και οι γειτονίες $[16*16]$ και το προσαρμοστικό μέγεθος παραθύρου ορίστηκε ως η απόσταση μεταξύ του x_i και του 200-οστού πλησιέστερου γείτονά του.

	Epanechnikov	Gaussian
TPR	0.9359	0.9587
Accuracy	0.9583	0.9835
Χρόνος Εκτέλεσης (sec)	53.28	70.05

Πίνακας 7.5: Σύγκριση πυρήνων Epanechnikov - Gaussian

Βάση των παραπάνω μετρήσεων, παρατηρούμε ότι ο Gaussian πυρήνας, δίδει καλύτερα αποτελέσματα από τον Epanechnikov. Όσο αφορά όμως το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου με χρήση του πυρήνα Epanechnikov είναι σαφώς μικρότερος από το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου, με χρήση του Gaussian πυρήνα. Για κάθε εικόνα μεγέθους 640×480 pixel ο αλγόριθμος με χρήση του πυρήνα Epanechnikov εκτελείται σε 53.28 sec κατά μέσο όρο, ενώ ο ίδιος αλγόριθμος με χρήση του Gaussian πυρήνα εκτελείται σε 70.05 sec κατά μέσο όρο.

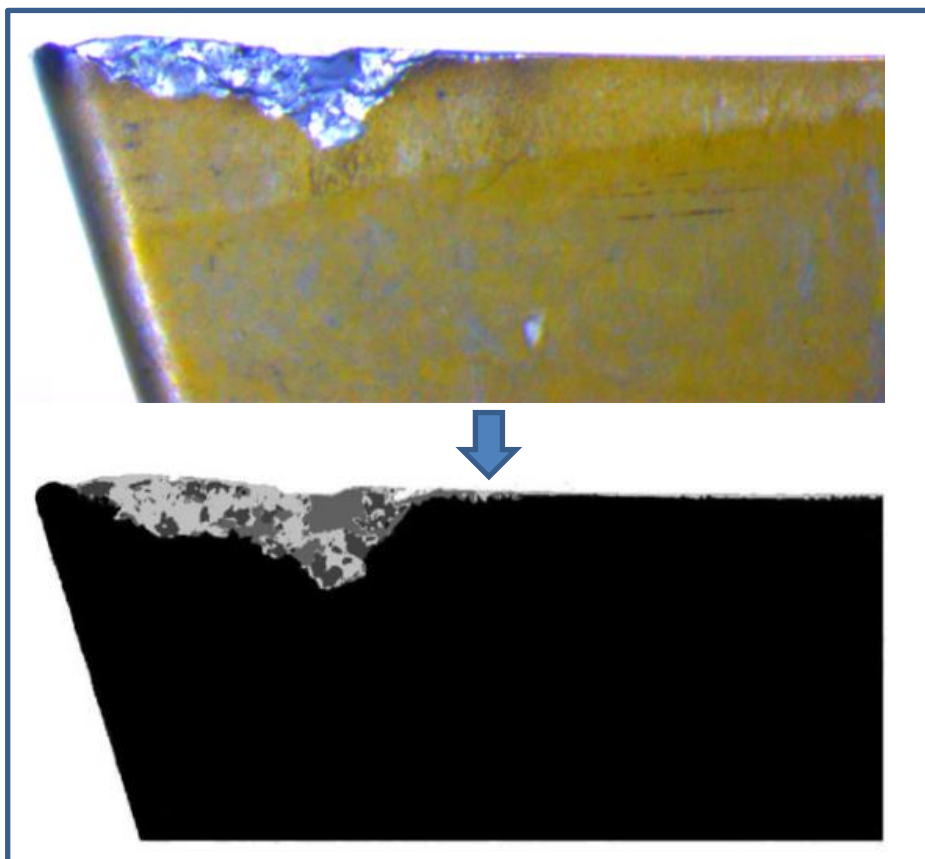
7. 5 Ταξινόμηση υποπεριοχών φθοράς με Kohonen SOM

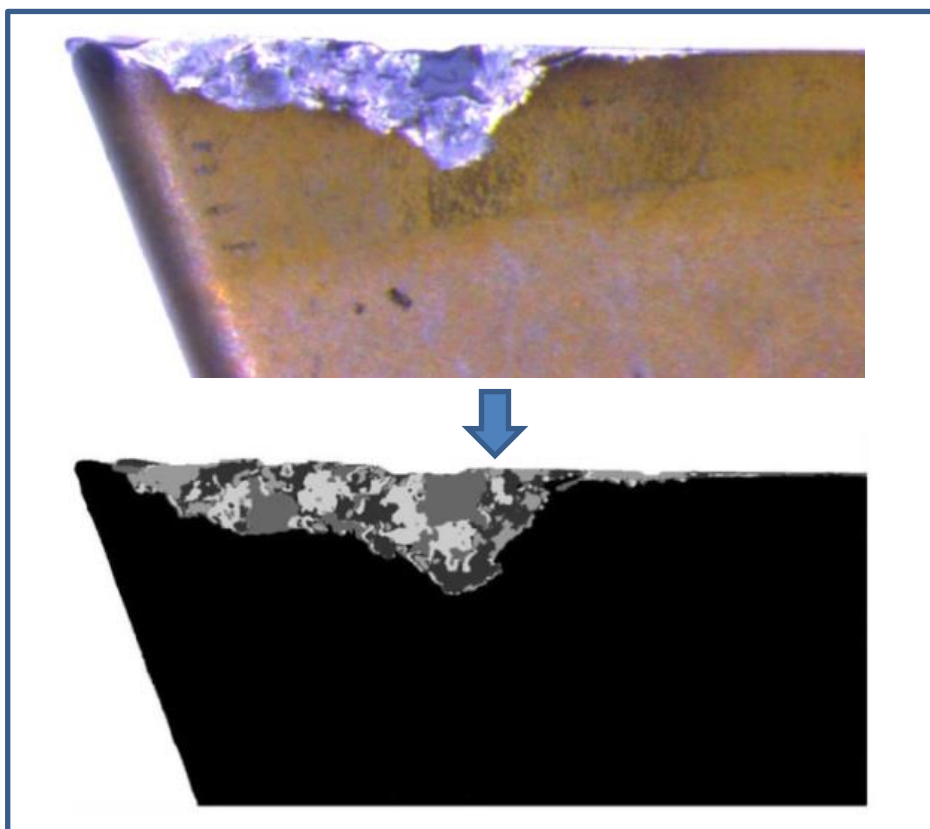
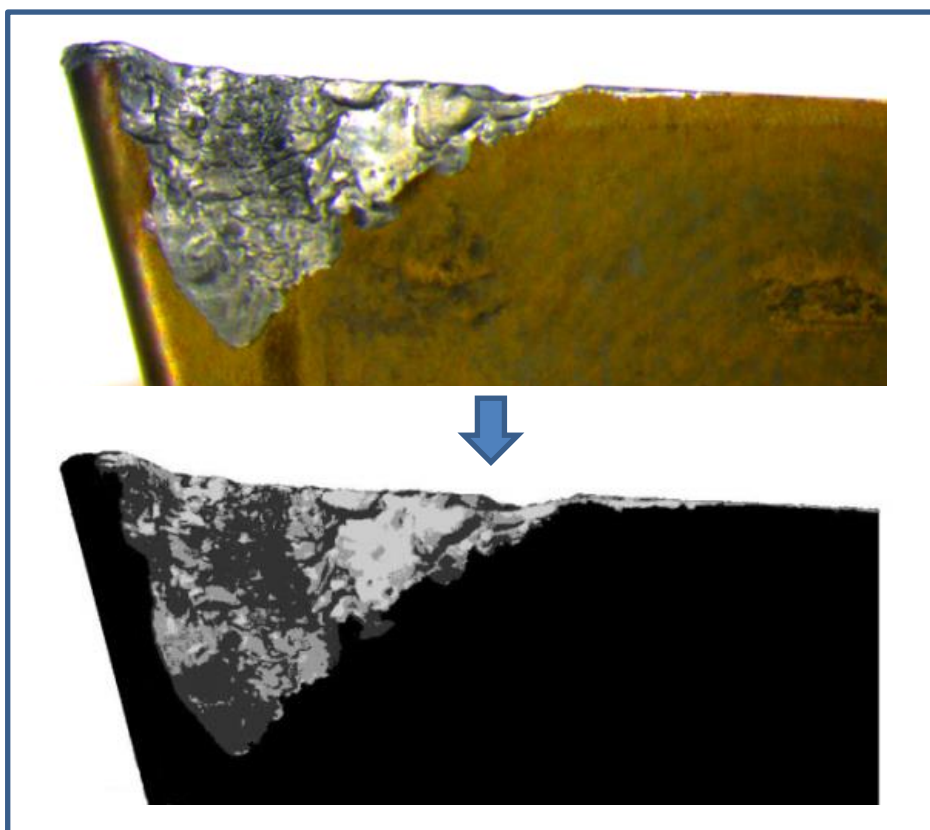
Εντός της περιοχής της φθοράς παρουσιάζονται διαφορετικές ευδιάκριτες περιοχές, οι οποίες έχουν προκύψει από διαφορετικά διακριτά και κατά βάση ανεξάρτητα μεταξύ τους φαινόμενα, όπως για παράδειγμα η απόξεση, η ηλεκτροχημική φθορά, ο σχηματισμός και η λύση συγκολλητών δεσμών κ.λπ. Η ταξινόμηση των διαφορετικών περιοχών, εντός της ζώνης φθοράς, υλοποιείται με την εισαγωγή των διανυσμάτων που λαμβάνονται μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Mean-Shift, σε ένα αυτο-οργανούμενο δίκτυο Kohonen. Το δίκτυο αυτό-οργανώνεται, ώστε διαφορετικές γειτονιές να είναι οι νικήτριες, όταν στην είσοδο παρουσιάζονται πρότυπα από διαφορετικές κλάσεις. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται διαφορετικές γειτονιές νευρώνων στο χάρτη, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις εισόδων. Έτσι, για κάθε εικόνα, οι περιοχές εντός της ζώνης φθοράς, που με οπτική εποπτεία φαίνεται να έχουν προκύψει από διαφορετικό αίτιο, ομαδοποιούνται ισχυρά μέσω του δικτύου Kohonen. Επίσης, η τοπολογική οργάνωση των νευρώνων, παρουσιάζει το πόσο μοιάζουν οι διαφορετικές υποπεριοχές εντός της ζώνης φθοράς.

Συνεπώς, μέσω των δικτύων Kohonen, επιτυγχάνεται :

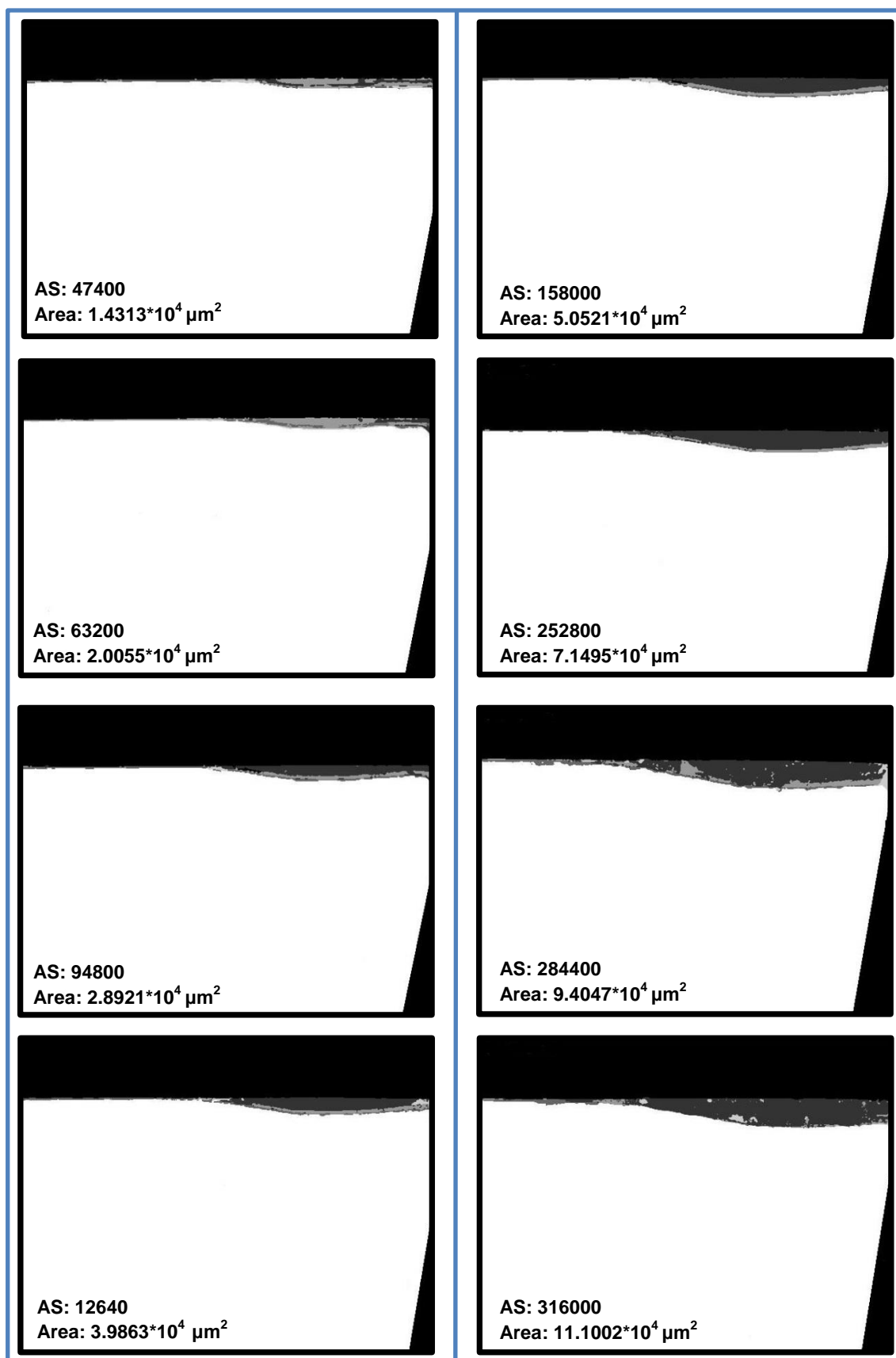
- Ταχύτατη απεικόνιση διανυσμάτων αυθαίρετης διάστασης σε ένα διακριτό πίνακα χαρακτηριστικών δύο διαστάσεων
- Τοπολογική οργάνωση των νευρώνων, υπό την έννοια ότι οι νευρώνες που είναι γειτονικοί στο πλέγμα τείνουν να έχουν παρόμοια διανύσματα συναπτικών βαρών
- Εξαιρετικά ισχυρή ομαδοποίηση των δεδομένων

Τέλος, τα διανύσματα χαρακτηριστικών όλων των εικόνων φθοράς, θα μπορούσαν να εισαχθούν σε ένα δίκτυο Kohonen, με σκοπό την περαιτέρω ταξινόμηση της φθοράς ως προς τις διαφορετικές συνθήκες κοπή. Για να επιτευχθεί, όμως, η συγκεκριμένη ταξινόμηση κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή επιπλέον πειραμάτων, ώστε να μελετηθεί περισσότερο η επίδραση των συνθηκών κοπής στον τρόπο εξέλιξης και σχηματισμού της φθοράς.





Σχήμα 7.3 : Ταξινόμηση των υποπεριοχών εντός της ζώνης φθοράς, για διάφορα κοπτικά εργαλεία



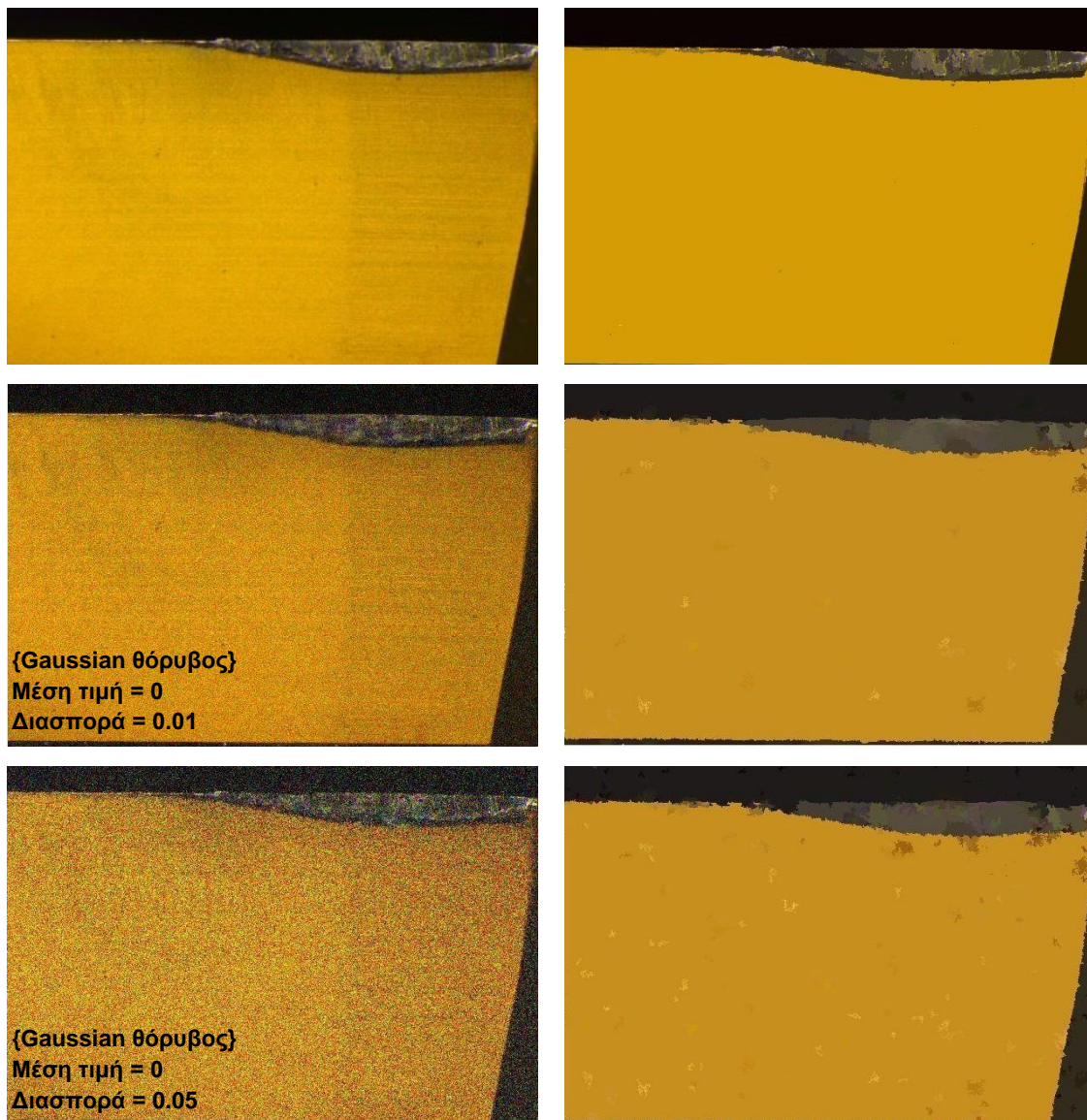
Σχήμα 7.4 :Ταξινόμηση των διαφορετικών περιοχών εντός της ζώνης φθοράς, για τα κύρια στάδια εξέλιξης του φαινομένου κατά το Πείραμα 1

7. 6 Επίδραση του προσθετικού θορύβου στο σύστημα

Στο συγκεκριμένο εδάφιο εξετάζεται η επίδραση του προσθετικού θορύβου στο προτεινόμενο σύστημα. Αφού προστέθηκε Gaussian θόρυβος αρχικά με μέση τιμή 0 και διασπορά 0.01 και στη συνέχεια με μέση τιμή 0 και διασπορά 0.05 σε 20 εικόνες φθοράς, υπολογίστηκε η μέση τιμή των μετρικών αξιολόγησης True Positive Rate και Accuracy και παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

	Χωρίς Θόρυβο	Gaussian Θόρυβος Variance = 0.01	Gaussian Θόρυβος Variance = 0.05
TPR	0.9587	0.9334	0.8776
Accuracy	0.9835	0.9472	0.8951

Πίνακας 7.6: Επίδραση προσθετικού θορύβου στην απόδοση του συστήματος

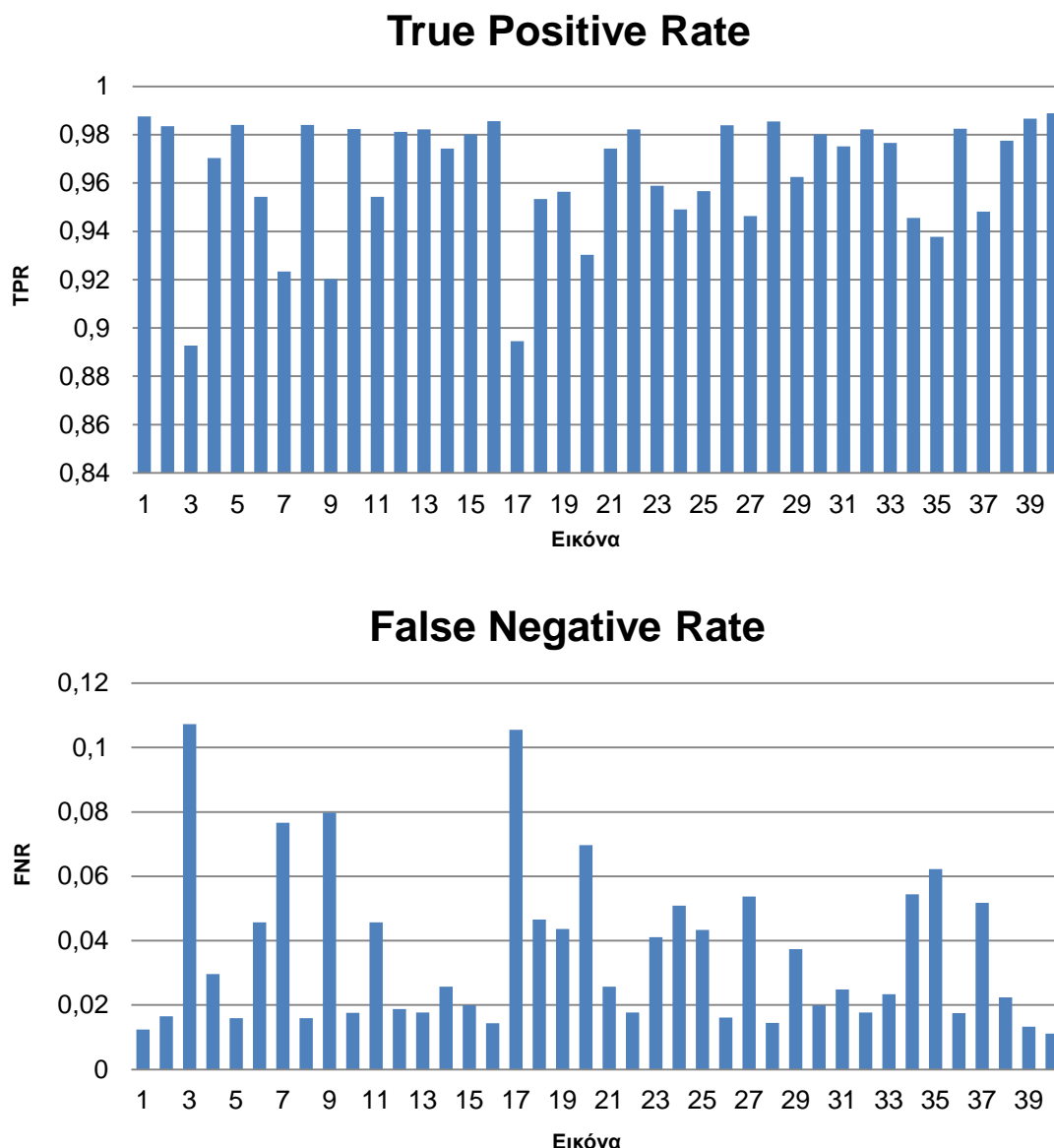


Σχήμα 7.5: Επίδραση προσθετικού θορύβου στο αποτέλεσμα του αλγορίθμου Mean-Shift

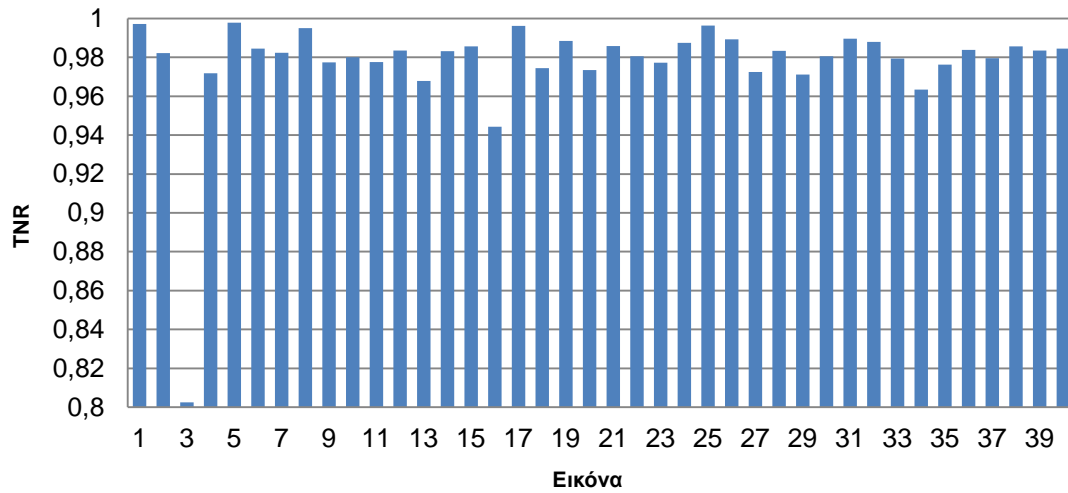
Από τον Πίνακα 7.6 και το Σχήμα 7.5, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος Mean-Shift, είναι εξαιρετικά αποδοτικός στα χαμηλά επίπεδα θορύβου (διασπορά=0.01). Όσο αφορά τα υψηλότερα επίπεδα προσθετικού θορύβου (διασπορά=0.05), η απόδοση του αλγορίθμου είναι αρκετά αξιόλογη, παρόλο που κάποιες φορές παρουσιάζεται το φαινόμενο της υποκατάτμησης ή της υπερκατάτμησης. Αποδεικνύεται, λοιπόν, η ευρωστία του αλγορίθμου Mean-Shift τόσο στα χαμηλά, όσο και στα υψηλά επίπεδα θορύβου.

7.7 Συγκεντρωτικές μετρικές αξιολόγησης

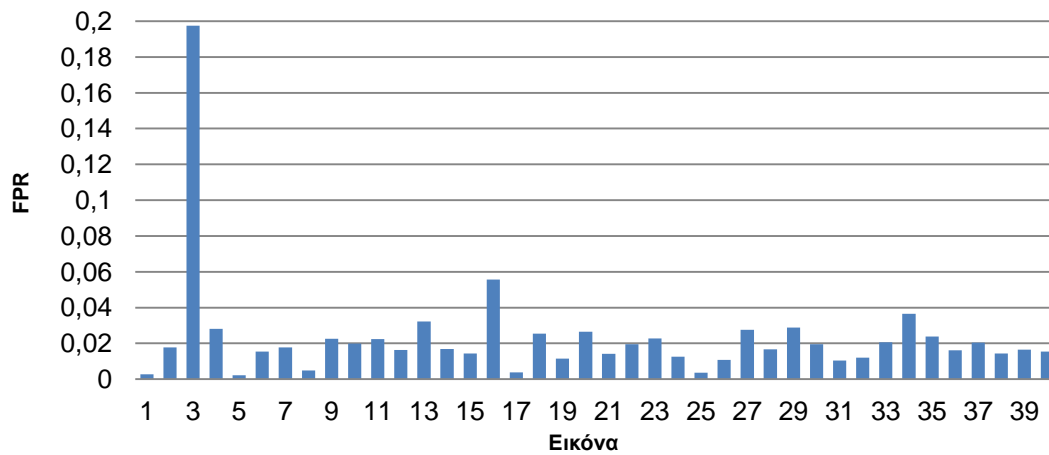
Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκτελέστηκε για ένα σύνολο 40 εικόνων και σε κάθε εκτέλεση μετρήθηκαν οι τιμές των True Positive Rate, False Negative Rate, True Negative Rate, False Positive Rate, Accuracy και Precision. Οι παραπάνω τιμές, κανονικοποιημένες στο διάστημα $[0,1]$, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί και αποδεικνύουν την ευρωστία και την αποδοτικότητα του αλγορίθμου.



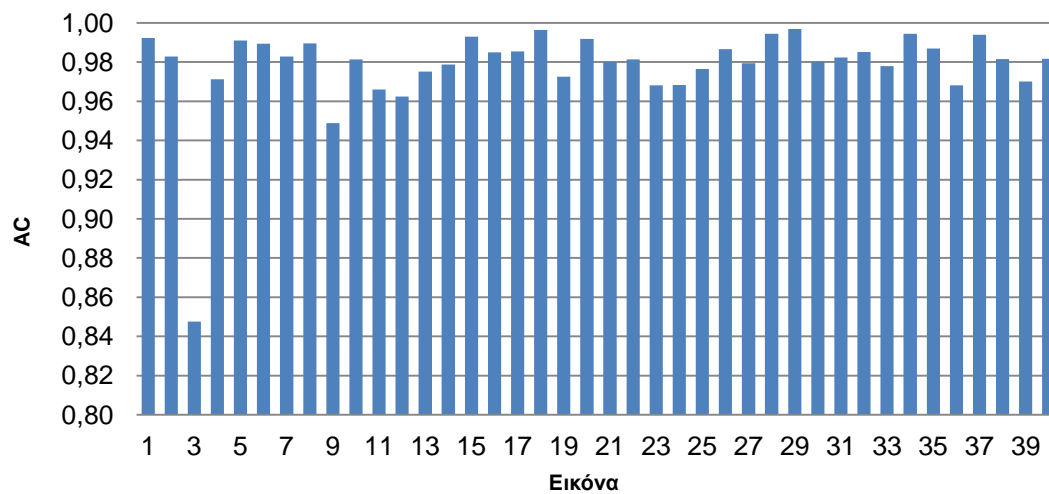
True Negative Rate

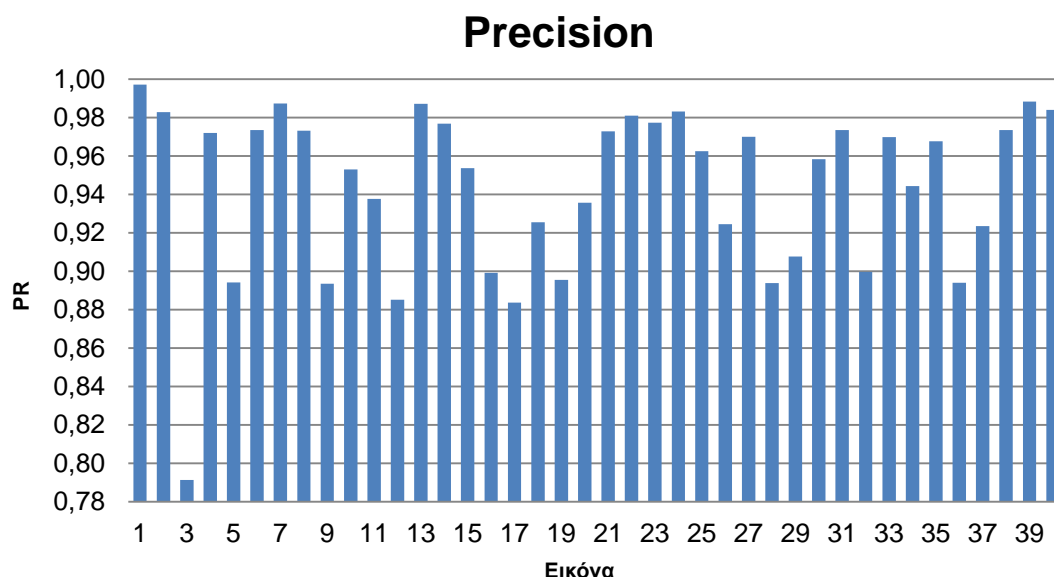


False Positive Rate



Accuracy





Σχήμα 7.6: Συγκεντρωτικές μετρικές αξιολόγησης του συστήματος

Εν κατακλείδι, υπολογίστηκε ο μέσος όρος κάθε μετρικής αξιολόγησης και με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η συνολική απόδοση του συστήματος.

TPR	FNR	TNR	FPR	Accuracy	Precision
0,9639	0,0360	0,9770	0,0229	0,9780	0,9436

Πίνακας 7.7: Συνολική απόδοση προτεινόμενου συστήματος

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 7.6 και τον Πίνακα 7.7 ο προτεινόμενος αλγόριθμος, οδηγεί σε μια εξαιρετικά επιτυχημένη κατάτμηση της περιοχής της φθοράς. Ο αλγόριθμος Mean-Shift, υπερτερεί συγκριτικά με τους αλγορίθμους που είχαν μέχρι πρότινος εφαρμοστεί για την τμηματοποίηση των εικόνων φθοράς, αφού αποτελεί μια μη-παραμετρική τεχνική, η οποία μπορεί να αναλύσει εξαιρετικά αποδοτικά πολυδιάστατους χώρους χαρακτηριστικών, με τεράστιο κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η ευρωστία του αλγορίθμου στην ύπαρξη ανακλάσεων και θορύβου στις εικόνες εισόδου.

8. Συμπεράσματα - Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η έρευνα που υλοποιείται στην παρούσα εργασία, παρουσιάζει ένα σύστημα μέτρησης της φθοράς της ελεύθερης επιφάνειας κοπτικών εργαλείων, βασισμένο σε μεθόδους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Το σύστημα αποτελείται από ένα μεγάλο εύρους μεγέθυνσης στερεομικροσκόπιο, με ενσωματωμένη CCD κάμερα υψηλής ανάλυσης και την υπολογιστική μονάδα, στην οποία λαμβάνει χώρα η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Οι μέθοδοι της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, που χρησιμοποιούνται, έχουν ως στόχο την απομόνωση και την ακριβή μέτρηση της περιοχής φθοράς, με έναν αυτοματοποιημένο τρόπο, αλλά και την ταξινόμηση των διαφορετικών υποπεριοχών που εμφανίζονται εντός της ζώνης φθοράς. Στόχοι, οι οποίοι επετεύχθησαν αρκετά ικανοποιητικά.

8.1 Συμπεράσματα

Ο αλγόριθμος Mean-Shift, ο οποίος δεν έχει χρησιμοποιηθεί ξανά για την κατάτμηση εικόνων φθοράς, αποτελεί τον πυρήνα του προτεινόμενου συστήματος. Για να περιγραφεί πλήρως κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας εισόδου, λαμβάνεται ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών, το οποίο αποτελείται από τις τρεις χρωματικές συνιστώσες του (R,G,B), αλλά και τη χωρική του πληροφορία (συνιστώσες x, y). Έτσι, δημιουργείται ένα σύνολο ανεξαρτήτων και όμοια κατανεμημένων παρατηρήσεων στον 5-διάστατο χώρο. Το σύνολο αυτό, ανήκει σε μια άγνωστη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας f , για την οποία δε γίνεται καμία υπόθεση όσον αφορά τη δομή της, πέραν της ομαλότητάς της. Σε ανάλογες περιπτώσεις, η εκτίμηση της f αντιμετωπίζεται με μη-παραμετρικές μεθόδους, όπως οι μέθοδοι των παραθύρων Parzen. Ένα βασικό μειονέκτημα των μη-παραμετρικών μεθόδων εκτίμησης είναι η εκθετική ως προς τη διάσταση του χώρου, πολυπλοκότητα. Ένα δεύτερο είναι η αραιότητα των παρατηρήσεων για μια στιβαρή εκτίμηση της f . Τα παραπάνω προβλήματα είναι γνωστά ως «κατάρτα της διάστασης» (curse of dimensionality). Ο αλγόριθμος Mean-Shift απαντά σε αυτό ακριβώς το πρόβλημα. Επιτυγχάνει να εντοπίσει τα μέγιστα μιας άγνωστης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, χωρίς την απόπειρα εκτίμησης της ίδιας της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Επιπροσθέτως, πέραν της εκτίμησης των μεγίστων, παρέχει και μια φυσική ομαδοποίηση των παρατηρήσεων σε ομάδες αγνώστου εκ των προτέρων αριθμού, όπου κάθε ομάδα ορίζεται ως η δεξαμενή έλξης του κάθε τρόπου. Συμπερασματικά, η εύρεση των τοπικών μεγίστων μιας άγνωστης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, με εκτίμηση μόνο των μεγίστων και όχι ολόκληρης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, συνεπάγεται με τεράστιο κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο, καθώς η εκτίμηση των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας πολυδιάστατων δεδομένων αποτελεί μια δαπανηρή υπολογιστικά διαδικασία.

Η ύπαρξη ανακλάσεων και θορύβου στις ληφθείσες εικόνες των κοπτικών εργαλείων, αποτελεί άλλο ένα καθοριστικό παράγοντα της επιλογής του αλγορίθμου Mean-Shift. Στο Κεφάλαιο 7, αποδεικνύεται η ευρωστία του αλγορίθμου τόσο στα χαμηλά, όσο και στα υψηλά επίπεδα προσθετικού θορύβου.

Συγκριτικά, με τις μεθόδους που μέχρι τώρα έχουν εφαρμοστεί για την κατάτμηση εικόνων φθοράς (καθολική κατωφλίωση/πολυκατωφλίωση, τελεστές ανίχνευσης ακμών/υφής, παραμετρικές μέθοδοι ομαδοποίησης) ο αλγόριθμος Mean-Shift υπερτερεί, καθώς :

- Διαχειρίζεται εξαιρετικά, μεγάλο όγκο πολυδιάστατων δεδομένων, με τεράστιο κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο.
- Προβαίνει σε εξαιρετικά ισχυρή ομαδοποίηση των δεδομένων εισόδου.
- Δεν απαιτεί *a priori* γνώση του αριθμού των τελικών κλάσεων.
- Δεν απαιτεί κάποια υπόθεση για το σχήμα (π.χ. ελλειπτικό) των κλάσεων.
- Εμφανίζει εξαιρετική ευρωστία (robustness) στις ακραίες τιμές (outliers).
- Εμφανίζει εξαιρετική ευρωστία στην ύπαρξη θορύβου στα δεδομένα εισόδου.

Όμως, ο αλγόριθμος Mean-Shift παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στην επιλογή του πλάτους του παραθύρου h . Μικρή τιμή του h συνεπάγεται θορυβώδη εκτίμηση (πολλές τελικές κλάσεις), ενώ μεγάλη τιμή του h οδηγεί σε μία εκτίμηση με λίγες τελικές κλάσεις, αφού έχει συγχωνευθεί πληθώρα κρίσιμων κλάσεων. Για το λόγο αυτό, η υλοποίηση του αλγορίθμου Mean-Shift, έγινε με χρήση προσαρμοστικού αντί σταθερού εύρους, αφού έχει αποδειχθεί ότι παράγει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τον Mean-Shift σταθερού εύρους σε χώρους χαρακτηριστικών υψηλών διαστάσεων.

Μέσω των πειραμάτων που διεξήχθησαν στο 5-αξονικό κέντρο κατεργασιών DMG-DMU 50eco, επιβεβαιώθηκε η αποδοτικότητα του προτεινόμενου συστήματος, όσον αφορά τη μέτρηση του μέγιστου πλάτους της φθοράς. Για την περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου συστήματος, δημιουργήθηκε ένα λογισμικό με γραφική διεπαφή χρήστη, του οποίου ο χειριστής σχεδιάζει λεπτομερώς την περιοχή φθοράς, πάνω στην αρχική εικόνα. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής, συγκρίνεται με το αποτέλεσμα του προτεινόμενου αλγορίθμου, ώστε να υπάρξει ένα είδος επαλήθευσης της μεθόδου και ως προς την περιοχή της φθοράς. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 7.6 και τον Πίνακα 7.7 ο προτεινόμενος αλγόριθμος, οδηγεί σε μια εξαιρετικά επιτυχημένη κατάτμηση της περιοχής της φθοράς.

Μέσα στη ζώνη φθοράς, παρουσιάζονται διαφορετικές ευδιάκριτες περιοχές, οι οποίες έχουν προκύψει από διαφορετικά διακριτά και κατά βάση ανεξάρτητα μεταξύ τους φαινόμενα, όπως για παράδειγμα η απόξεση, η ηλεκτροχημική φθορά, ο σχηματισμός και η λύση συγκολλητών δεσμών κλπ. Το επόμενο κατά σειρά βήμα του αλγορίθμου έγκειται στην ταξινόμηση των διαφορετικών περιοχών, εντός της ζώνης φθοράς. Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου Mean-Shift, στην εικόνα εισόδου, προκύπτουν πολλές εκατοντάδες κλάσεις, διότι ο Mean-Shift εκτελεί την ομαδοποίηση όχι μόνο ως προς τη χρωματική πληροφορία, αλλά και ως προς τη χωρική. Συνεπώς, τα διανύσματα που λαμβάνονται μετά την εφαρμογή του Mean-Shift, εισάγονται σε ένα δίκτυο Kohonen. Το συγκεκριμένο δίκτυο αυτό-οργανώνεται, ώστε διαφορετικές γειτονιές να είναι οι νικήτριες, όταν στην είσοδο παρουσιάζονται πρότυπα από διαφορετικές κλάσεις. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται διαφορετικές γειτονιές νευρώνων στο χάρτη, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις εισόδων. Έτσι, για κάθε εικόνα, οι λίγες περιοχές εντός της ζώνης φθοράς, που με οπτική εποπτεία φαίνεται να έχουν προκύψει από διαφορετικό αίτιο, ομαδοποιούνται ισχυρά μέσω του δικτύου Kohonen. Επίσης, η τοπολογική οργάνωση των νευρώνων, παρουσιάζει το πόσο μοιάζουν οι διαφορετικές υποπεριοχές εντός της ζώνης φθοράς. Συνεπώς, μέσω των δικτύων Kohonen, επιτυγχάνεται :

- Ταχύτατη απεικόνιση διανυσμάτων αυθαίρετης διάστασης σε ένα διακριτό πίνακα χαρακτηριστικών δύο διαστάσεων
- Τοπολογική οργάνωση των νευρώνων, υπό την έννοια ότι οι νευρώνες που είναι γειτονικοί στο πλέγμα τείνουν να έχουν παρόμοια διανύσματα συναπτικών βαρών
- Εξαιρετικά ισχυρή και ταχύτατη ομαδοποίηση των δεδομένων

Τέλος, μέσω των πειραμάτων που διεξήχθησαν με χρήση της υπερφασματικής κάμερας MuSiS, προέκυψε μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση, για κάποιες περιοχές των κοπτικών εργαλείων, των οποίων το φάσμα παρουσιάζει μία απότομη πτώση περίπου στα 500 nm και στη συνέχεια μια απότομη αύξηση της τιμής της φωτεινότητας. Οι συγκεκριμένες περιοχές, δε γίνονται αντιληπτές στο ορατό φάσμα του φωτός και είναι περισσότερο ευδιάκριτες από τα 500 μέχρι τα 580 nm, με το καλύτερο σήμα να λαμβάνεται στα 540 nm. Οι σκούρες αυτές περιοχές, εμφανίζονται συνήθως δίπλα στη ζώνη φθοράς και ίσως αποτελούν μια ένδειξη πρώιμης φθοράς.

8.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Στις μελλοντικές κατευθύνσεις της παρούσας εργασίας, θα μπορούσε να ενταχθεί η εισαγωγή των διανυσμάτων των χαρακτηριστικών όλων των εικόνων φθοράς, σε ένα δίκτυο Kohonen, με σκοπό την ταξινόμηση της φθοράς με βάση τις διαφορετικές συνθήκες κοπής. Για να επιτευχθεί όμως, η συγκεκριμένη ταξινόμηση κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή επιπλέον πειραμάτων, ώστε να μελετηθεί περισσότερο η επίδραση των συνθηκών κοπής στον τρόπο εξέλιξης και σχηματισμό της φθοράς. Γενικότερα, μεγαλύτερος αριθμός πειραμάτων και εφαρμογή επιπλέον μεθόδων ταξινόμησης θα λειτουργούσαν ευεργετικά για την περαιτέρω επιβεβαίωση του προτεινόμενου συστήματος.

Η επέκταση του συστήματος για τη μέτρηση της φθοράς και κατά τις κατεργασίες της τόννευσης και της διάτρησης, μαζί με τη δημιουργία ενιαίας διαδικτυακής πλατφόρμας, η οποία θα παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα να «ανεβάζουν» φωτογραφίες κοπτικών εργαλείων, με σκοπό την άμεση μέτρηση της φθοράς, αποτελεί μια επιπλέον μελλοντική πρόκληση.

Η χρήση της υπερφασματικής κάμερας MuSIS, που χρησιμοποιήθηκε για μια σειρά πειραμάτων, δίνει τη δυνατότητα λήψης φασμάτων από όλες τις περιοχές του κοπτικού εργαλείου (άφθαρτες, φθαρμένες και άλλες με ενδιάμεσα στάδια εξέλιξης της φθοράς) και από 30 φασματικές μπάντες (420-1000 nm). Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μελέτη της φασματικής πληροφορίας κάθε σημείου του κοπτικού εργαλείου, καθώς και ο εντοπισμός χαρακτηριστικών, που δε φαίνονται στο ορατό φάσμα του φωτός. Τα υπερφασματικά δεδομένα που λήφθηκαν, ταξινομήθηκαν με τη βοήθεια του αλγορίθμου k-means. Ο αλγόριθμος k-means χρησιμοποιήθηκε λόγω της απλότητας της υλοποίησής του, αλλά και της ταχύτητάς του, για μια πρώιμη και γρήγορη ταξινόμηση των υπερφασματικών δεδομένων, ωστόσο υστερεί ως προς το αποτέλεσμα της ομαδοποίησης των δεδομένων συγκριτικά με τον Mean-Shift. Συνεπώς, ο συνδυασμός της υπερφασματικής απεικόνισης μαζί με την εφαρμογή του αλγορίθμου Mean-Shift για την ομαδοποίηση των υπερφασματικών δεδομένων, μπορεί να προσφέρει μια νέα τεχνική ανίχνευσης, χαρτογράφησης και μέτρησης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Τέλος, κρίνεται απαραίτητο να μελετηθούν σε βάθος, μέσω μεγαλύτερου αριθμού πειραμάτων, οι σκούρες, «κρυφές» περιοχές, που εμφανίζονται στο σήμα των 540nm, ώστε να αποδειχθεί με βεβαιότητα για το αν πρόκειται για ένδειξη πρώιμης φθοράς ή κάποιου είδους ανθρακοποίησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Rehorn G.A., Jiang J., Orban E.P., "State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26: 693–710, 2005
2. Yeo S.H., Khoo L.P., Neo S.S., "Tool condition monitoring using reflectance of chip surface and neural network", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2000-11:507–514, 2000.
3. Zhang Y., Zhang Z., Han Z., "Detection of tool breakage in turning operations using neural networks.", *International Conference on Intelligent Manufacturing*, Wuhan, China, pp 463–468, 1995.
4. Rahman M., Zhou Q., Hong G.S., "Application of Kohonen neural network for tool condition monitoring.", *International Conference on Intelligent Manufacturing*, Wuhan, China, pp 422–429, 1995.
5. Lan M.S., Dornfeld D.A., "In-process tool fracture detection.", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106:111–118, 1984
6. Colgan J., Chin H., Danai K., Hayashi S.R., "On-line tool breakage detection in turning: a multi-sensor method.", *Journal of Engineering for Industry*, 116:117–122, 1994.
7. Szecsi T., "A DC motor based cutting tool condition monitoring system.", *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93:350–354, 1999.
8. Li C.J., Li S.Y., "A new sensor for real-time milling tool condition monitoring." *Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control*, 115:285–290, 1993.
9. Diei E.N., Dornfeld D.A., "Acoustic emission sensing of tool wear in face milling." *Transactions of ASME*, 109:234–240, 1987.
10. Ramalingam S., Frohrib D.A., "Real-time tool condition sensing with a new class of sensor-transducer system." *Proceedings of ASME Winter Annual Meeting*, pp 677–684, 1987.
11. Kannatey-Asibu E. Jr., Dornfeld D.A., "Quantitative relationships for acoustic emissions from orthogonal metal cutting.", *Trans ASME* 103:330-340, 1981.
12. Sim W.M., Dewes R.C., Aspinwal A.C., "A knowledge-based system for the selection of cutting tools and data for high speed machining of moulds/dies.", *Proceedings of the 33rd International Matador Conference*, pp 119–125, 2000.
13. Crouse M.S., Nowak R.D., Baraniuk R.G., "Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models." *IEEE Trans Signal Process*, 46(4):886–902, 1998.
14. Tarng Y.S., Lin C.Y., Nian C.Y., "An optimization approach for the fuzzy control of turning operations.", *2nd New Zealand International Two-Stream Conference on Artificial Neural Networks and Expert Systems*, Dunedin, New Zealand, pp 145–149, 1995.

15. Bikramjit P., Pratihari D.K., Mondal M.S., Joarder R., "Prediction of power requirement in turning using a GA-fuzzy approach.", *Soft Computing and Industry: Recent Applications*, pp 167–169, 2003.
16. Tiemao Z., Jianguo D., (1992) "Test and information processing of cutting tool wear". *Proceedings of the International Conference on Information Technology for Advanced Manufacturing Systems*, Nanjing, China, pp 563–568, 1992.
17. Fu P., Hope AD., King GA., "Intelligent Tool Condition Monitoring in Milling Operation.", *Systems Engineering Faculty Southampton Institute*, UK, 1998.
18. Altintas Y., Yellowley I., Tlustý J., "The detection of tool breakage in milling operations.", *Journal of Engineering in Industry*, 110:271–277, 1988.
19. Altintas Y., Yellowley I., "In-process detection of tool failure in milling.", *Journal of Engineering in Industry*, 111:149–157, 1989.
20. Srinivasa Pai P., Ramakrishna Rao P.K., "Acoustic emission analysis for tool wear monitoring in face milling.", *International Journal of Production Research*, 40(5):1081–1093, 2002.
21. Fu P., Hope A.D., King G.A., "On-line tool condition monitoring based on a neurofuzzy intelligent signal feature classification procedure.", *International Conference on Soft Computing and Information/ Intelligent Systems*, pp 183–199, 2001.
22. Fu P., Hope A.D., King G.A., "An intelligent pattern recognition algorithm and its applications in cutting tool condition monitoring process." *Proceedings of the BASYS '98–3rd IEEE/IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services*, pp 515–525, 1988.
23. Crouse M.S., Nowak R.D., Baraniuk R.G., "Wavelet-based statistical signal processing using hidden Markov models.", *IEEE Trans Signal Process* 46(4):886–902, 1998.
24. Luo G., Osypiw D., Irle M., "Tool wear monitoring by on-line vibration analysis with wavelet algorithm.", *3rd International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining*, pp 145–149, 2001.
25. Lin S.C., Lin R.J., "Tool wear monitoring in face milling using force signals." *Wear*, 198(1):136–142, 1996
26. Mehta N.K., Pandey P.C., Chakravarti G., "An investigation of tool wear and the vibration spectrum in milling.", *Wear*, 91:219–234, 1983.
27. Ko T., Cho D.W., "Adaptive optimization of face milling operations using neural networks.", *Journal of Manufacture Science and Engineering*, 120(2):443–451, 1998.
28. Ko T., Cho D.W., Jung M.Y., "On-line monitoring of tool breakage in face milling using a self-organized neural network.", *Journal of Manufacturing Systems*, 14(2):80–90, 1995.
29. Susanto V., Chen J.C., "Fuzzy logic based in-process tool-wear monitoring system in face milling operations.", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3:186–192, 2003.

30. El-Wardany T.I., Gao D., Elbestawi M.A., "Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis.", *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, 36(6):687–711, 1996.
31. Quadro A.L., Branco J.R.T., "Analysis of the acoustic emission during drilling test.", *Surface Coatings Technology*, 94–95:691–695, 1997.
32. Thangaraj A., Wright P.K., "Computer assisted prediction of drill failure using in-process measurements of thrust force.", *Journal of Engineering for Industry*, 110:192–200, 1998.
33. Braun S., Lenz E., Wu C.L., "Signature analysis applied to drilling.", *Journal of Mechanical Design*, 104:268–276, 1982.
34. Jantunen E., Jokinen, "Automated on-line diagnosis of cutting tool condition.", *International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing*, (3–4):273–287, 1996.
35. Subramanian K., Cook N.H., "Sensing of drill wear and prediction of drill life.", *Journal of Engineering in Industry*, 101:295–301, 1977.
36. Li X., "On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform.", *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, 39(1):157–164, 1999.
37. Tansel I.N., Mekdeci C., Rodriguez O., Urangun B., "Monitoring drill conditions with wavelet-based encoding and neural network.", *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 33(4):559–575, 1993.
38. Barker R.W., Kluthe R.A., Hinich M.J., "Monitoring rotating tool wear using higher-order spectral features.", *Journal of Engineering for Industry*, 115:23–29, 1993.
39. Liu T.I., Ko E.J., "On-line recognition of drill wear via artificial neural networks.", *Monitor Control of Manufacturing Process PED ASME*, 44:101–110, 1990.
40. Liu T.I., Wu S.M., "On-line detection of drill wear.", *Journal of Engineering for Industry*, 112:299–302, 1990.
41. Jantunen E., "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling.", *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, 42:997–1010, 2002.
42. Altintas Y., "Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics. Machine Tool Vibrations and CNC Design.", Cambridge University Press, New York, 2000.
43. Liu T.I., Anantharaman K.S., "Intelligent classification and measurement of drill wear.", *Journal of Engineering for Industry*, 116:392–397, 1994.
44. Li P.G., Wu S.M., "Monitoring drilling wear states by a fuzzy pattern recognition technique.", *Journal of Engineering for Industry*, 110(2):297–300, 1988.
45. Govekar E., Grabec I., "Self-organizing neural network application to drill wear classification.", *Journal of Engineering for Industry*, 103(62):233–238, 1994.
46. Tansel I.N., Rodriguez O., Mekdeci C., "Detection of tool breakage in microdrilling

application with RCE neural networks”, PED ASME 47(1):83–88, 1992.

47. Lee B., Tarng Y.S., “Application of the discrete wavelet transform to the monitoring of tool failure in end milling using the spindle motor current.”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15(4):238–243, 1999.
48. Du R., Liu Y., Xu Y., “Tool condition monitoring using transition fuzzy probability.”, 3rd International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining, pp 375–393, 2001.
49. Zou J., Chen J., Geng Z.M., “Application of wavelet packets algorithm to diesel engines’ vibroacoustic signature extraction.”, Journal of Automobile Engineering, 215(9):987–993, 2001.
50. Serrano E.P., Fabio M.A., “Application of the wavelet transform to acoustic emission signals processing.”, IEEE Trans Signal Processing, 44(5):1270–1275, 1996.
51. Kasashima N., Mori K., Herra Ruiz G., Tanaguchi N., “On-line failure detection in face milling using discrete wavelet transform.”, Ann CIRP 44(1):483–487, 1995.
52. Tansel I.N., Mekdeci C., Rodriguez O., Uragun B., “Monitoring drill conditions with wavelet-based encoding and neural network.”, International Journal of Machining Tools and Manufacture, 33(4):559–575, 1993.
53. Giardini C., Ceretti E., Maccarini G., “A neural network architecture for tool wear detection through digital camera observations.”, 4th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology, pp 137–145, 1996.
54. Huang P., Chen J.C., “Neural network-based tool breakage monitoring system for end milling operations.”, Journal of Industrial Technology, 16(2):2–7, 2000.
55. Καλαϊτζάκης Κ., Παρουσίαση Μαθήματος: «Ηλεκτρικές μετρήσεις και Αισθητήρες», 2012.
56. Αντωνιάδης Α., «Μηχανουργική Τεχνολογία Τόμος Β: Κατεργασίες Κοπής», Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
57. Μπάλας Κ., Διαλέξεις Μαθήματος: «Προχωρημένα θέματα και εφαρμογές ηλεκτρονικής απεικόνισης», 2013.
58. Jeon, J.U., Kim, S.W., “Optical flank wear monitoring of cutting tools by image processing”, Wear, 127(1988): 207-217, 1988.
59. Kurada, S., Bradley, C., “A Machine Vision System for Tool Wear Assessment”, Tribology International, 30:295-304, 1993
60. W. Weis., “Tool Wear Measurement on basis of optical sensors, vision systems and neuronal networks (application milling)”, WESCON’ 93, San Francisco, 1993.
61. Sortino, M., “Application of Statistical Filtering for Optical Detection of Tool Wear”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43:493- 497, 2003.
62. Wang, W., Wong, Y.S., Hong, G.S., “Flank Wear Measurement by Successive Image Analysis”, Computers and Industrial, 56:816-830, 2005.

63. Fadare, D.A., Oni, A.O., "Development and Application of a Machine Vision System for Measurement of Tool Wear", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4:42-49, 2009.
64. Sahabi, H.H., Ratnam, M.M., "On-line Monitoring of Tool Wear in Turning Operation in the Presence of Tool Misalignment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38:718-727, 2008.
65. Kim, J.H., Moon, D.K., Lee, D.W., Kim, J.S., Kang, M.C., Kim, K.H., "Tool Wear Measuring Technique on the Machine Using CCD and Exclusive jig", *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131:668-674, 2002.
66. Kerr, D., Pengilley, J., Garwood, R., "Assessment and Visualisation of Machine Tool Wear Using Computer Vision", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28:781-791, 2006.
67. Stemmer, M., Pavim, A., Adur, M., Deschamps, F., Schmitt, R., Hermes, R., "Machine Vision and Neural Networks Applied to Wear Classification on Cutting Tools", *Proceedings of the EOS Conference on Industrial Imaging and Machine Vision (Munich, Germany)*, 2005.
68. Alegre, E., Rodriguez, R.A., Barreiro, J., Ruiz, J., "Use of Contour Signatures and Classification Methods to Optimize the Tool Life in Metal Machining", *Estonian Journal of Engineering*, 15:3-12, 2009.
69. Liang, Y.T., Chiou, Y.C., "An effective Drilling Wear Measurement Based on Visual Inspection Technique", *Proceedings of the 2006 Joint Conference on Information Sciences (JCIS 2006)*, Kaohsiung, Taiwan, 2006
70. Otieno, A., Pedapati, C., Wan, X., Zhang, H., "Imaging and wear analysis of micro-tools using machine vision", *Indian Institute of Technology Kharagpur*, 2006.
71. Inoue, S., Konishi, M., Imai, J., "Surface Defect Inspection of a Cutting Tool by Image Processing with Neural Networks", *Memoirs of the Faculty of Engineering Okayama University*, 43:55-60, 2009.
72. Jackson, M.J., Robinson, G.M., Hyde, L.J., Rhodes, R., "Neural Image Processing of the Wear of Cutting Tools Coated with Thin Films", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 15:223-229, 2006.
73. Duan, G., Chen, Y.W., Sukegawa, T., "Automatic Optical Flank Wear Measurement of Microdrills Using Level Set for Cutting Plane Segmentation", *Machine Vision and Applications*, 21:667-676, 2010.
74. Schmitt, R., Cai, Y., Pavim, A., "Machine Vision System for Inspecting Flank Wear on Cutting Tools", *ACEE Int. J on Control System and Instrumentation*, vol 0.3, No. 01, 2013.
75. Dutta, S., Pal, S.K., Mukhopadhyay, S., Sen R., "Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013) 212-232, 2013.
76. Sonka, M., Hlavac, V., Boyle R., *Image Processing Analysis and Machine Vision*, 2nd

Edition, Brooks/Cole Publishing Company, 1999.

77. Otsu, N., "A threshold selection method from gray-level histograms", IEEE Trans. on System Man and Cybernetics, vol. 9, 62-66, 1979.
78. Duda, R.O., Hart, P.E., "Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures", Communications of the ACM, vol. 15, 11-15, 1972.
79. Gonzalez, R.G., Woods, R.E., Digital Image Processing – Second Edition, Addison-Wesley, 2002.
80. Comaniciu, D., Meer, P., "Mean-shift: A robust approach toward feature space analysis", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine. Intelligenc , vol. 24, 603-619, 2002.
81. Canny, J., "A computational approach to edge-detection", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.8, 679-698, 1986.
82. Παπαμάρκος, Ν., Ψηφιακή Επεξεργασία & Ανάλυση Εικόνας, Β. Γκιούρδας Εκδοτική, 2005.
83. Ritter, G.X., Wilson J.N., Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra, CRC Press, 1996.
84. Kohonen, T., "Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps", Biological Cybernetics, 43 (1): 59–69, 1982.