



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΧΑΡΑΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**



**ΓΑΤΣΙΟΥ  
ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ-ΓΕΩΡΓΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**



Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την βοήθειά του όποτε την χρειάστηκα, την εμπιστοσύνη και την υπομονή που έδειξε προς το πρόσωπό μου!

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν και με ανέχτηκαν, τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στα Χανιά!

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ.....	6
2.1 Εισαγωγή στο Laser .....	6
2.1.1 Ιστορικές αναφορές για το Laser .....	6
2.1.2 Φυσική του Laser.....	7
2.1.3 Ιδιότητες των Laser.....	8
2.1.4 Τύποι Laser.....	9
2.2 Κατεργασία με χρήση Laser.....	12
2.2.1 Κατηγορίες χάραξης .....	13
2.2.2 Είδη laser που χρησιμοποιούνται για χάραξη .....	13
2.2.3 Κατεργαζόμενα υλικά.....	14
2.2.4 Εφαρμογές χάραξης με laser .....	15
3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	17
3.1 Κέντρο κατεργασίας DMG MORI LASERTEC 40.....	17
3.2 Οπτικό προφιλόμετρο Bruker 3D Contour GT-K .....	19
3.3 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν .....	21
3.3.1 STAVAX ESR .....	21
3.3.2 ORVAR Supreme .....	22
4. ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΣΗΣ ΟΠΤΙΚΟΥ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟΥ .....	24
4.1 Εκκίνηση του προφιλόμετρου 3D Contour GT-K.....	24
4.2 Τοποθέτηση τεμαχίου και αρχικές ρυθμίσεις προφιλόμετρου .....	25
4.3 Measurement Parameters.....	27
4.3.1 Ορισμός παραμέτρων για τη μέθοδο σάρωσης VSI/VXI.....	27
4.3.2 Ορισμός παραμέτρων για τη μέθοδο σάρωσης PSI .....	31
4.4 Διαδικασία εστίασης και αφαίρεσης κλίσης της τράπεζας .....	33
4.5 Εξαγωγή, ανάλυση και ρύθμιση δεδομένων.....	35
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	40
5.1 Σχεδιασμός πειραμάτων .....	40
5.2 Εκτέλεση χάραξης .....	43
5.2.1 LpsWin.....	44
5.2.2 L4D Viewer.....	45
5.2.3 LaserSoft 3D .....	46
5.3 Πραγματοποίηση μετρήσεων με τη χρήση του προφιλόμετρου .....	49
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	51
6.1 Αποτελέσματα και σύγκριση διαμορφώσεων βάθους 10μm .....	51

6.2	Αποτελέσματα και σύγκριση διαμορφώσεων βάθους 20μm .....	53
6.3	Συμπεράσματα.....	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		56

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα χάραξης με laser με τη χρήση του κέντρου κατεργασίας DMG MORI LASERTEC 40 που βρίσκεται στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης. Χαραχθήκαν διαμορφώσεις δύο διαφορετικών βαθών, 10 $\mu$ m και 20 $\mu$ m, σε δύο διαφορετικά υλικά. Μέσω του οπτικού προφιλόμετρου Bruker 3D Contour GT-K που διαθέτει το εργαστήριο, μελετήθηκαν οι κατεργασμένες επιφάνειες με σκοπό να προσδιοριστούν αρχικά τα χαρακτηριστικά αυτών και στη συνέχεια η επίδραση της κατεργασίας στο υλικό και στην διάβρωσή του. Επιπλέον, σκοπός της εργασίας είναι να αποτελέσει αναλυτικό οδηγό για την χρήση του οπτικού προφιλόμετρου Bruker 3D Contour GT-K.

Το **Κεφάλαιο 1** αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο στόχος της εργασίας και επιπλέον γίνεται μια μικρή αναφορά στη δομή που ακολουθείται.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνονται αναφορές σχετικά με την ιστορία της τεχνολογίας του laser. Επιπλέον παρουσιάζονται πληροφορίες που αφορούν τη φυσική, τις βασικές αρχές λειτουργίας, τις ιδιότητες καθώς και τους διαφορετικούς τύπους laser που υπάρχουν. Αναφορά γίνεται επίσης και στις κατεργασίες, στα υλικά και στις εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί το laser.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων της εργασίας. Έγινε περιγραφή των χαρακτηριστικών του κέντρου κατεργασίας DMG MORI LASERTEC 40 και του οπτικού προφιλόμετρου Bruker 3D Contour GT-K, καθώς έγινε και μια αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και στις ιδιότητές τους.

Το **Κεφάλαιο 4** αποτελεί τον οδηγό χρήσης του προφιλόμετρου 3D Contour GT-K του εργαστηρίου. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα και οι ρυθμίσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να μπορέσουν να γίνουν σωστά οι μετρήσεις στο προφιλόμετρο.

Το **Κεφάλαιο 5** περιλαμβάνει όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας. Αναλύονται δηλαδή όλα τα βήματα που οδήγησαν στην υλοποίηση και ανάλυση των πειραμάτων. Γίνεται αναφορά σε όλα τα προγράμματα και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων (σχεδιασμός, κατεργασία και μετρήσεις).

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία.

## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή στο Laser

Ο όρος LASER είναι ένα ακρωνύμιο, το οποίο προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» και στα ελληνικά αποδίδεται ως «ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας». Τα τελευταία χρόνια, ο όρος αυτός χρησιμοποιείται τόσο για την ενισχυμένη ακτίνα φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, όσο και για τις συσκευές που παράγουν τη συγκεκριμένη ακτινοβολία. Μια ενισχυμένη ακτίνα φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας, δηλαδή μια ακτίνα laser, αποτελεί μια στενή δέσμη φωτός η οποία σχηματίζεται από μονοχρωματική ακτινοβολία, χωρίς διαφορά φάσης, η οποία διαδίδεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι και αυτά που διαχωρίζουν μια ακτίνα laser από το συμβατικό φως.

#### 2.1.1 Ιστορικές αναφορές για το Laser

Οι πρώτες ιδέες, οι οποίες βοήθησαν να τεθούν τα θεμέλια για αυτό που τελικά θα γινόταν η τεχνολογία laser, είχαν προταθεί από τον Albert Einstein. Το 1917, δημοσιεύοντας μια έρευνά του με τίτλο «Η κβαντική θεωρία της ακτινοβολίας», περιέγραψε λεπτομερώς τη θεωρία του σχετικά με την έννοια που ονομάζεται «Εξαναγκασμένη Εκπομπή».

Παρόλο που ο Einstein έθεσε τις βάσεις για την τεχνολογία laser, δεν συνέβαλε τόσο στην ανάπτυξη αυτής, καθώς η πρακτική υλοποίηση της θεωρίας διήρκεσε αρκετές δεκαετίες. Υπήρξαν όμως άλλοι επιστήμονες οι οποίοι εργάστηκαν για να αποδείξουν τη θεωρία του Einstein και να συνεχίσουν αυτό που εκείνος ξεκίνησε. Ένας από αυτούς τους επιστήμονες ήταν ο Rudolf W. Ladenburg, ο οποίος στα τέλη της δεκαετίας του 1920 κατάφερε να επιβεβαιώσει την αρχική θεωρία του Einstein.

Τις πρώτες δεκαετίες, η τεχνολογία laser παρέμενε μια θεωρία την οποία οι επιστήμονες προσπαθούσαν να υλοποιήσουν. Το 1953 όμως, ο Charles H. Townes κατασκεύασε τον πρώτο ενισχυτή ακτινοβολίας μικροκυμάτων MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), του οποίου η λειτουργία στηριζόταν στις βασικές θεωρητικές αρχές που διέπουν και τη λειτουργία του laser.

Το πρώτο laser κατασκευάστηκε στα ερευνητικά εργαστήρια Hughes στο Malibu της California από τον Αμερικανό φυσικό Theodore H. Maiman και τέθηκε σε λειτουργία στις 16 Μαΐου του 1960. Χαρακτηριστικό αυτής της συσκευής είναι ότι ως ενεργό μέσο χρησιμοποιούσε ένα συνθετικό κρύσταλλο ρουμπινιού, με αποτέλεσμα να παράγεται μια κόκκινη δέσμη με μήκος κύματος 694,3nm. Μετά τη δημιουργία του laser ρουμπινιού, ακολούθησαν πολλά άλλα laser. Το 1960, εφευρέθηκε από τον φυσικό Ali Javan το laser αερίου. Το 1962, δημιουργήθηκε από τον εφευρέτη Robert N. Hall το πρώτο laser ημιαγωγών. Και το 1964, εφευρέθηκε το πρώτο laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από τον ηλεκτρολόγο μηχανικό C. Kumar N. Patel, το οποίο κυριάρχησε λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής αποδοτικότητας σε σχέση με το laser ρουμπινιού.

Η τεχνολογία των laser, έχει εξελιχθεί σημαντικά από τότε και έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Έχουν προκύψει διάφοροι τύποι laser με διαφορετικά χαρακτηριστικά και μήκη κύματος. Οι τομείς στους οποίους χρησιμοποιούνται οι διάφοροι τύποι laser ποικίλουν. Η ιατρική, η επεξεργασία υλικών, η επιστήμη και η έρευνα είναι μερικοί τομείς στους οποίους υπάρχουν διαφορετικές εφαρμογές και χρήσεις των laser. Με την

πάροδο του χρόνου, η τεχνολογία των laser συνεχίζει να αναπτύσσεται, να εξελίσσεται και να αποκτά ολοένα και περισσότερες εφαρμογές.

### 2.1.2 Φυσική του Laser

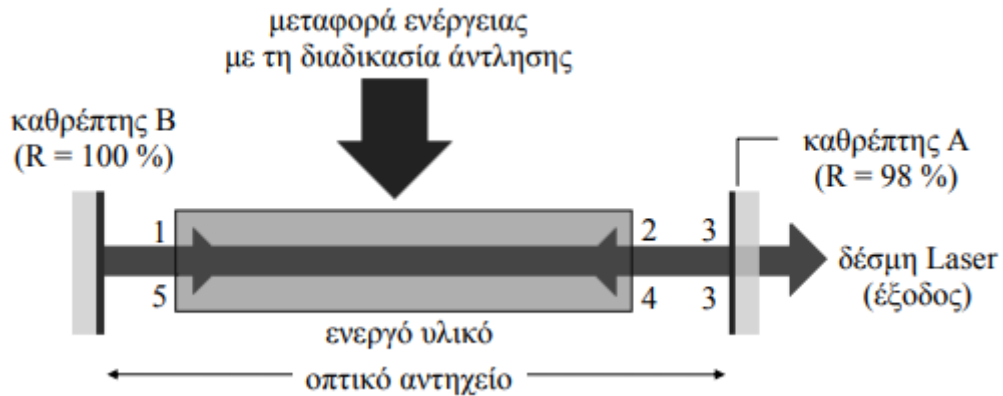
Σημαντικό είναι να γίνει και μια αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας ενός laser. Τα τρία βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα laser είναι το ενεργό μέσο, ο μηχανισμός διέγερσης(ή άντλησης) ενέργειας και το οπτικό αντηχείο(ή οπτική κοιλότητα). Πιο αναλυτικά:

- Το **ενεργό υλικό** αποτελείται από μία, δύο ή τρεις ομάδες ατόμων, μορίων ή ιόντων, τουλάχιστον μια από τις οποίες μπορεί να διεγερθεί και να οδηγηθεί σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών. Αναστροφή πληθυσμών συμβαίνει όταν το πλήθος (ανά μονάδα όγκου) των διεγερμένων ατόμων/μορίων/ιόντων που βρίσκονται σε ένα υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο είναι μεγαλύτερο από το πλήθος εκείνων που βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο. Αυτό συμβαίνει με την επιλεκτική απορρόφηση της ενέργειας που διεγείρει τα ηλεκτρόνια της ουσίας σε ανώτερες στάθμες, αφήνοντας «κενή» την χαμηλότερή τους. Μέσω αυτής της διαδικασίας αποδίδεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία(HMA) με εξαναγκασμένη εκπομπή και κατ' επέκταση η εκπομπή laser. Το ενεργό υλικό μπορεί να είναι είτε σε υγρή, είτε σε στερεή είτε σε αέρια κατάσταση και αντίστοιχα οι πηγές laser ονομάζονται laser υγρής κατάστασης, που είναι κυρίως laser χρωστικών ουσιών, laser στερεής κατάστασης, που χωρίζονται σε μονωτών και ημιαγωγών και σε laser αέριας κατάστασης. Καθένα από τα ενεργά αυτά υλικά εκπέμπει το δικό του χαρακτηριστικό μήκος κύματος, ανάλογα με τις ενεργειακές διαφορές των επιτρεπόμενων επιπέδων του.
- Η ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη της αναστροφής πληθυσμών στο ενεργό υλικό παρέχεται από τον **μηχανισμό διέγερσης (ή άντλησης)**, ο οποίος είναι υπεύθυνος και για τη δημιουργία της εξαναγκασμένης εκπομπής.
- Το **οπτικό αντηχείο(ή οπτική κοιλότητα)** υποστηρίζει τον μηχανισμό ανάδρασης και περιλαμβάνει το ενεργό υλικό, το οποίο τοποθετείται μεταξύ δύο κατόπτρων. Το ένα κάτοπτρο είναι πολύ υψηλής ανακλαστικότητας (πλήρως ανακλαστικό,  $R \sim 100\%$ ), σε αντίθεση με το άλλο που είναι μερικώς ανακλαστικό ( $R \sim 90-99\%$ ) και από το οποίο εξέρχεται η χρήσιμη ακτινοβολία. Τα ποσοστά αυτά μπορεί να αλλάζουν, καθώς εξαρτώνται τόσο από τον τύπο του laser όσο και από το είδος της οπτικής κοιλότητας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.1, μεταξύ των 2 κατόπτρων (Α και Β), βρίσκεται το ενεργό υλικό. Μια οπτική ακτινοβολία, η οποία διαπερνά το ενεργό υλικό και διαδίδεται από το σημείο 1 στο σημείο 2, εξέρχεται από αυτό κατά πολύ ενισχυμένη. Αυτό συμβαίνει λόγω της ικανότητας του ενεργού υλικού να διοχετεύει την ενέργεια που δέχεται από την διαδικασία άντλησης στο πεδίο της ακτινοβολίας που δημιουργείται. Με την έξοδο της από το ενεργό υλικό, η ακτινοβολία διαδίδεται από το σημείο 2 στο σημείο 3, επάνω δηλαδή στο κάτοπτρο Α, ο οποίος είναι κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε όταν πέφτει επάνω του μια ακτινοβολία μόνο ένα μικρό κλάσμα αυτής να μπορεί να τον διαπεράσει. Αυτό το κλάσμα της ακτινοβολίας που διαπερνά το κάτοπτρο αποτελεί τη χρήσιμη ακτινοβολία εξόδου του laser. Η υπόλοιπη ακτινοβολία που παραμένει, ανακλάται και διαδίδεται από το σημείο 3 στο σημείο 4. Με αυτόν τον τρόπο, η ακτινοβολία ενισχύεται ξανά, καθώς διαπερνά το ενεργό υλικό (από το σημείο 4 στο 5), και προσπίπτει επάνω στο κάτοπτρο Β. Το



κάτοπτρο αυτό είναι κατασκευασμένο με ανακλαστικότητα 100% με σκοπό ολόκληρη η ακτινοβολία που πέφτει επάνω του να ανακλάται ακολουθώντας ξανά την ίδια διαδρομή.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα αναπαράστασης Laser

### 2.1.3 Ιδιότητες των Laser

Οι ακτίνες laser έχουν χαρακτηριστικές ιδιότητες οι οποίες τις διαχωρίζουν από το συμβατικό φως. Οι ιδιότητες αυτές είναι η μονοχρωματικότητα, η συμφωνία, η κατευθυντικότητα και η λαμπρότητα. Αναλυτικότερα :

- Η **μονοχρωματικότητα** είναι η ιδιότητα που καθιστά το laser το μοναδικό φως που μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα το απόλυτα μονοχρωματικό φως. Αυτή η ιδιότητα οφείλεται σε δύο γεγονότα. Πρώτον, στο γεγονός ότι ενίσχυση μπορεί να υποστεί μόνο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που έχει την κατάλληλη συχνότητα ( $\nu_0$ ). Και δεύτερον, λόγω του συστήματος των δύο κατόπτρων, σχηματίζεται μια κοιλότητα συντονισμού στην οποία μπορεί να υπάρξει ταλάντωση μόνο στις συχνότητες συντονισμού της κοιλότητας αυτής. Με τον συνδυασμό αυτών των δύο, το εύρος της συχνότητας  $\nu_0$  φιλτράρεται από το φάσμα των ιδιοσυχνοτήτων της κοιλότητας, έχοντας ως αποτέλεσμα η φασματική γραμμή εκπομπής laser να είναι πολύ πιο στενή από αυτή της αυθόρμητης εκπομπής. Διαφορετικά, το μήκος κύματος φωτός των laser περιορίζεται και κυμαίνεται σε μία πολύ μικρή περιοχή του φάσματος.
- Η **συμφωνία**, δεύτερη ιδιότητα των ακτίνων laser, διακρίνεται σε δύο έννοιες, τη χωρική συμφωνία και τη χρονική .
  - Χωρική συμφωνία παρατηρείται όταν όλα τα σημεία που βρίσκονται στο ίδιο μέτωπο κύματος (ίδια απόσταση από τη φωτεινή πηγή) έχουν την ίδια φάση, όταν δηλαδή όλα τα κύματα έχουν το ίδιο πλάτος σε κάθε χρονική στιγμή. Η χωρική συμφωνία στο φως ενός λαμπτήρα πυράκτωσης διατηρείται για λίγα εκατοστά του μέτρου από την πηγή του, σε αντίθεση με τις ακτίνες laser που η χωρική συμφωνία μπορεί να διατηρηθεί αποστάσεις πολλών μέτρων.
  - Χρονική συμφωνία ορίζεται η συμφωνία κατά την οποία η αλληλουχία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων της ακτινοβολίας laser είναι τακτική.
- Η **κατευθυντικότητα** είναι η ιδιότητα η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι η ενίσχυση του φωτός πραγματοποιείται μέσα στην κοιλότητα του laser. Κατά μήκος της διεύθυνσης της κοιλότητας διαδίδονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία είναι και τα μόνα που μπορούν να υπάρξουν, να ενισχυθούν και να

εξέλθουν τελικά από την κοιλότητα. Η εξερχόμενη αυτή δέσμη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχει πορεία συγκεκριμένης κατεύθυνσης, η οποία στη συνέχεια διαχέεται κατά μία γωνία απόκλισης πολύ μικρότερη από άλλες αντίστοιχες. Όσο πιο μικρή είναι η γωνία απόκλισης, τόσο πιο μεγάλη είναι η κατευθυντικότητα της δέσμης. Οι ακτίνες της εξερχόμενης δέσμης, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους με αποτέλεσμα η εξερχόμενη δέσμη να εκπέμπεται σε μεγάλη απόσταση χωρίς απώλειες της ισχύος της. Η κατευθυντικότητα μίας δέσμης laser καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο και την ποιότητα των κατόπτρων της κοιλότητας, καθώς επίσης και από τον τρόπο άντλησης του laser.

- Η **λαμπρότητα** είναι ίσως η πιο σημαντική ιδιότητα της δέσμης laser και σχετίζεται άμεσα με την κατευθυντικότητά της. Όλη η φωτεινή ενέργεια που εκπέμπει το laser, κατανέμεται στην εγκάρσια τομή της δέσμης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις μεγάλες τιμές της συνολικής έντασης της ακτινοβολίας. Επομένως, μια δέσμη laser έχει μεγαλύτερη λαμπρότητα από οποιαδήποτε άλλη πηγή φωτός.

#### 2.1.4 Τύποι Laser

Τα συστήματα laser μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την κατάσταση του ενεργού μέσου, τον τρόπο λειτουργίας των laser, το μήκος κύματος της δέσμης που εκπέμπεται και τη ζημιά που μπορεί να προκληθεί από τη δέσμη laser στο μάτι ή/και στο δέρμα. Τα κριτήρια, σύμφωνα με τα οποία χωρίζονται σε κατηγορίες τα συστήματα laser, είναι τα εξής :

##### **Το ενεργό υλικό:**

- **Laser στερεάς κατάστασης (solid state laser):** Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για τα laser που έχουν ως ενεργό μέσο είτε ένα μονωτικό κρύσταλλο, είτε γυαλί. Ως ενεργά συστατικά στα laser στερεάς κατάστασης, χρησιμοποιούνται ιόντα πρόσμιξης. Τα πιο συνηθισμένα ιόντα είναι το  $\text{Cr}^{3+}$  (μεταπτωσητικό μεταλλικό ιόν) και τα  $\text{Nd}^{3+}$  ή  $\text{Ho}^{3+}$  (ιόντα σπάνιων γαιών).
- **Laser αερίων (Gas Laser):** Ως ενεργό μέσο στα laser αερίων χρησιμοποιούνται είτε ένα είτε μείγμα αερίων μέσα σε σωλήνα. Μια υποκατηγορία των laser αερίων είναι το :
  - **Laser διεγερμένων διμερών (excimer laser) :** Τα laser Excimer είναι μοριακά laser αερίου που μπορούν να παράγουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην περιοχή μήκους κύματος υπεριώδους και εμπλέκουν μεταπτώσεις μεταξύ διαφορετικών ηλεκτρονικών καταστάσεων. Η λέξη «excimer» περιγράφει το ενεργό μέσο του laser και προκύπτει από την συνένωση των λέξεων **excited** (διεγερμένο) και **dimer** (διμερές).
- **Laser οργανικών χρωστικών ή υγρών (Dye Laser):** Τα laser οργανικών χρωστικών (dye lasers) είναι τα μοναδικά το ενεργό υλικό των οποίων είναι σε υγρή κατάσταση. Το ενεργό τους υλικό αποτελείται από οργανικά μόρια χρωστικών (dyes), διαλυμένα σε οργανικούς διαλύτες (μεθυλική αλκοόλη, αιθυλική αλκοόλη ή νερό). Με την κατάλληλη επιλογή της χρωστικής και της συγκέντρωσης αυτής, επιτυγχάνεται παραγωγή δέσμης laser σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος, μέσα και γύρω από το ορατό φάσμα.

- **Χημικά Laser (chemical laser):** Στα χημικά laser, η αναστροφή των πληθυσμών παράγεται άμεσα μέσω μιας χημικής αντίδρασης (μεταξύ αερίων στοιχείων ή ενώσεων), την οποία περιλαμβάνει ο μηχανισμός άντλησης.
- **Laser Ημιαγωγών ή διοδικά (Semiconductor laser):** Το ενεργό τους υλικό είναι η περιοχή επαφής δύο στρωμάτων ημιαγώγιμου υλικού, δύο δηλαδή επί μέρους κρυσταλλικών σωμάτων, το ένα με έλλειμα και το άλλο με περίσσεια ηλεκτρονίων.
- **Laser Χρωματικών Κέντρων (colour center laser):** Διάφοροι τύποι χρωματικών κέντρων σε κρυστάλλους αλογονούχων αλκαλίων χρησιμοποιούνται ως βάση αποδοτικών, οπτικά αντλούμενων laser με μεγάλο φάσμα επιλεκτικότητας στο κοντινό υπέρυθρο. Σε μία κλίμακα αυξανόμενου μήκους κύματος, τα laser χρωματικών κέντρων αρχίζουν να εκπέμπουν εκεί που οργανικές χρωστικές σταματούν.
- **Laser Ελεύθερων Ηλεκτρονίων (free electron laser – FEL):** Ως μέσο εκπομπής laser χρησιμοποιείται μια σχετικιστική δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία κινείται ελεύθερα μέσα σε μια μαγνητική δομή. Έτσι προκύπτει και ο όρος 'ελεύθερο ηλεκτρόνιο'. Η εξαναγκασμένη ακτινοβολία προέρχεται από την αλληλεπίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της δέσμης laser με τα ηλεκτρόνια. Τα laser ελεύθερων ηλεκτρονίων έχουν το ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων από κάθε τύπο laser.

#### **Ο τρόπος λειτουργίας:**

- **Laser Συνεχούς Λειτουργίας (continuous wave laser – CW):** Τα laser συνεχούς λειτουργίας παράγουν ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) ακτινοβολία σταθερού πλάτους και συχνότητας, επομένως έχουν άπειρη διάρκεια, εξ ου και ο όρος 'συνεχής'.
- **Laser Μονού Παλμού (single pulsed laser):** Η διάρκεια παλμού στα laser μονού παλμού, είναι συνήθως από της εκατοντάδες microseconds έως μερικά milliseconds (μακρύς παλμός). Ο τρόπος λειτουργίας του αναφέρεται και ως κανονικός.
- **Laser Μετατροπής Q (single pulsed Q-switched):** Οι συγκεκριμένοι τύποι laser, με τη χρήση της τεχνικής της μετατροπής Q, επιτρέπουν τη δημιουργία παλμών laser μικρής χρονικής διάρκειας (από μερικά έως της δεκάδες ns) καθώς και μεγάλης ισχύος (από μερικά έως της δεκάδες MW). Για να πραγματοποιηθεί η τεχνική αυτή, με κάποιο τρόπο, εισάγεται μέσα στην κοιλότητα του laser ένα είδους κλείστρο. Όταν το κλείστρο είναι κλειστό, τότε η διαδικασία laser διακόπτεται και η τιμή της αναστροφής πληθυσμού μπορεί να πάρει πολύ μεγάλη τιμή. Όταν το κλείστρο ανοίξει, ξεκινά η διαδικασία laser και η αποθηκευμένη ενέργεια εκπέμπεται/απελευθερώνεται με τη μορφή της παλμού, μικρής χρονικής διάρκειας και μεγάλης έντασης. Η διαδικασία αυτή αφορά την αλλαγή του παράγοντα ποιότητας Q της κοιλότητας (από μια χαμηλή σε μια υψηλή τιμή), εξ ου και το όνομα της τεχνικής 'Μετατροπή Q'.
- **Παλμικά Laser (pulsed laser):** Τα παλμικά laser, λειτουργούν όπως τα laser μονού παλμού, με την επανάληψη της διαδικασίας να πραγματοποιείται είτε με σταθερό είτε με μεταβλητό ρυθμό. Επιπλέον, οι απώλειες της κοιλότητας και ο ρυθμός άντλησης, είναι χρονικά εξαρτώμενες.

- **Laser Εγκλειδωσης Ρυθμού (mode locked laser):** Η τεχνική της εγκλειδωσης ρυθμού αναφέρεται στην κατάσταση όπου οι ρυθμοί της κοιλότητας αναγκάζονται να ταλαντώνονται με συγκρίσιμα πλάτη και με εγκλειδωμένες φάσεις. Όταν οι φάσεις των ρυθμών αυτών συγχρονίζονται, τότε οι ρυθμοί συνδυάζονται μεταξύ της έχοντας ως αποτέλεσμα στενούς επαναλαμβανόμενους παλμούς. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η δημιουργία παλμών laser πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (από ένα κλάσμα έως της δεκάδες ps) και πολύ υψηλής μέγιστης ισχύος (μερικά GW).

#### ***Το μήκος κύματος:***

Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης δέσμης laser εξαρτάται από τη χημική σύσταση του ενεργού υλικού που χρησιμοποιείται. Με βάση λοιπόν τα διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται, οι τύποι laser που υπάρχουν είναι οι εξής:

- **Laser Υπέρυθρης Ακτινοβολίας (infrared laser):** Τα laser υπέρυθρης ακτινοβολίας εκπέμπουν σε περιοχή του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ονομάζεται υπέρυθρη ακτινοβολία. Το μήκος κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερο από αυτό του ορατού φωτός και κυμαίνεται από 700 nm έως μερικά mm. Αυτές οι τιμές μήκους κύματος βρίσκονται της το κόκκινο τμήμα του φάσματος, εξ ου και το όνομα της αντίστοιχης ακτινοβολίας *‘υπέρυθρη’* (υπό το ερυθρό χρώμα).
- **Laser Ορατής Ακτινοβολίας (visible laser):** Τα laser ορατής ακτινοβολίας εκπέμπουν σε περιοχή του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που είναι ορατή με το ανθρώπινο μάτι. Το μήκος κύματος της ορατής ακτινοβολίας κυμαίνεται από περίπου 400 nm έως 700 nm. Σε αυτό το φάσμα των τιμών μήκους κύματος υπάρχουν μεταβολές της χρωματικές αποχρώσεις, από της αποχρώσεις του μωβ (ιώδους), μπλε, γαλάζιου, πράσινου, κίτρινου, πορτοκαλί, έως και αποχρώσεις του κόκκινου χρώματος.
- **Laser Υπεριώδους Ακτινοβολίας (ultraviolet laser – UV laser):** Τα laser υπεριώδους ακτινοβολίας εκπέμπουν σε περιοχή του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ονομάζεται υπεριώδης ακτινοβολία. Το μήκος κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι μικρότερο από αυτό του ορατού φωτός και κυμαίνεται από 60 nm έως περίπου 380 nm.
- **Laser Ακτινών X (x-ray laser):** Τα laser ακτινών X είναι ισχυροί και εξελιγμένοι τύποι laser που εκπέμπουν ακτινοβολία X, ένα τμήμα του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που βρίσκεται μεταξύ των περιοχών της υπεριώδους και της ακτινοβολίας γ. Η ακτινοβολία X είναι υψηλής ενέργειας και το μήκος κύματός της κυμαίνεται από 10 nm έως 10 pm.

#### ***Η ζημιά που μπορεί να προκληθεί από τη δέσμη laser στο μάτι ή/και το δέρμα:***

- **Κλάση 1 (Class 1):** Η ακτινοβολία που εκπέμπουν τα laser αυτής της κατηγορίας δεν είναι επιβλαβής για τα μάτια ή το δέρμα καθώς είναι χαμηλής ισχύος. Το γεγονός αυτό τα καθιστά απολύτως ασφαλή, με αποτέλεσμα να εξαιρούνται από τα μέτρα ασφάλειας. Παρ’ όλα αυτά, η άσκοπη έκθεση στη δέσμη με γυμνό μάτι θα πρέπει να αποφεύγεται. Χαρακτηριστικά

παραδείγματα χρήσης laser κλάσης 1 είναι οι εκτυπωτές laser και τα CD/DVD players.

- **Κλάση 1M (Class 1M):** Όπως και στην προηγούμενη κατηγορία, τα laser κλάσης 1M, λειτουργώντας υπό κανονικές συνθήκες, δεν εκπέμπουν ακτινοβολία σε επίπεδα επιζήμια για το μάτι ή το δέρμα. Ωστόσο, απαγορεύεται η χρήση ισχυρών φακών ή οποιωνδήποτε άλλων οπτικών ειδών μεγέθυνσης.
- **Κλάση 2 (Class 2):** Τα laser αυτής της κατηγορίας δεν είναι επικίνδυνα, ωστόσο η εκτεταμένη έκθεση στη δέσμη του laser (για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από 0,25 sec) μπορεί να επιφέρει βλάβες στα μάτια. Όπως δηλαδή συμβαίνει και με τις συμβατικές πηγές φωτός. Στα laser κλάσης 2, δεν απαιτούνται ιδιαίτερες προφυλάξεις όσον αφορά την τυχαία έκθεση. Η άμεση επαφή της δέσμης με τα μάτια πρέπει να αποφεύγεται και αυτός είναι και ο λόγος που η χρήση αυτής της κατηγορίας laser απαιτεί προσοχή. Αυτού του είδους δέσμες χρησιμοποιούνται στους laser pointers.
- **Κλάση 2M (Class 2M):** Στα laser αυτής της κατηγορίας δεν επιτρέπεται η παρατεταμένη και άμεση οπτική επαφή, κυρίως με τη χρήση ισχυρών φακών ή οποιωνδήποτε άλλων οπτικών ειδών μεγέθυνσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συσκευής laser κλάσης 2M είναι οι αναγνώστες bar-code.
- **Κλάση 3R (Class 3R):** Η άμεση έκθεση των ματιών στη δέσμη laser αυτής της κατηγορίας μπορεί να είναι επιβλαβής. Ο συνδυασμός δέσμης laser κλάσης 3R με οπτικές διατάξεις μεγέθυνσης καθιστά τον κίνδυνο πολύ μεγαλύτερο.
- **Κλάση 3B (Class 3B):** Ακόμα και με στιγμιαία έκθεση σε δέσμη laser κλάσης 3B, μπορεί να προκληθεί σοβαρή βλάβη στο μάτι. Επιπλέον, η δέσμη αυτή μπορεί να επιφέρει ζημιά ακόμα και στο δέρμα.
- **Κλάση 4 (Class 4):** Τα laser που ανήκουν στην κλάση 4 είναι τα πιο επικίνδυνα. Η έκθεση σε δέσμη τους είναι επιβλαβής τόσο στα μάτια όσο και στο δέρμα. Ακόμα και έπεται από ανάκλαση ή και διάχυση της δέσμης, μπορούν να προκληθούν σοβαροί τραυματισμοί. Μια δέσμη laser κλάσης 4 μπορεί ακόμα να προκαλέσει την ανάφλεξη εύφλεκτων υλικών καθώς και τη δημιουργία επικίνδυνων αερίων. Λόγω όλων των κινδύνων που αναφέρθηκαν, για τα laser κλάσης 4, απαιτείται ειδική κατασκευή του χώρου και να τηρούνται αυστηρά όλα τα μέτρα ασφαλείας.

## 2.2 Κατεργασία με χρήση Laser

Οι κατεργασίες με τη χρήση δέσμης laser περιλαμβάνουν την αφαίρεση, τήξη ή μεταβολή των θερμικών χαρακτηριστικών ενός υλικού με την εστίαση μιας ενισχυμένης δέσμης μονοχρωματικού φωτός στο υλικό που είναι υπό επεξεργασία. Οι δύο βασικότεροι τύποι κατεργασίας με χρήση laser είναι η κοπή (laser cutting) και η χάραξη (laser engraving).

- **Κοπή με laser (Laser cutting):** Η κοπή με laser, είναι η διαδικασία κατά την οποία δέσμες laser χρησιμοποιούνται για την ακριβή και αποτελεσματική κοπή ενός υλικού. Κατά τη διάρκεια της κοπής με laser, μια ακτίνα laser είναι

εστιασμένη στο σημείο όπου πραγματοποιείται η κοπή, και στη συνέχεια το υλικό λιώνει, καίγεται, ατμοποιείται ή απομακρύνεται με το φύσημα αέρα. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι το υψηλής ποιότητας φινίρισμα της επιφάνειας κοπής.

- **Χάραξη με laser (Laser engraving):** Η χάραξη με laser, είναι η διαδικασία κατά την οποία δέσμες laser χρησιμοποιούνται για την χάραξη ενός αντικειμένου/υλικού. Πολλές φορές ο όρος laser engraving ταυτίζεται με τον όρο laser marking. Αυτό συμβαίνει διότι τα μηχανήματα για τη χάραξη με laser και για τη σήμανση με laser είναι τα ίδια. Ο όρος laser marking όμως, καλύπτει ένα ευρύτερο φάσμα τεχνικών επιφανειακής κατεργασίας, για αυτό και χρησιμοποιείται ως πιο γενικός όρος.

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης laser για την επεξεργασία υλικών, είναι το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία που να έρχονται σε επαφή με το υλικό και να φθείρονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τόσο το κόστος όσο και ο χρόνος που απαιτείται για την αντικατάσταση των κοπτικών αυτών εργαλείων να μηδενίζονται.

### 2.2.1 Κατηγορίες χάραξης

Η χάραξη με laser μπορεί χωριστεί σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη μέθοδο και το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται στο υλικό. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μερικοί από τους πιο συνηθισμένους τύπους χάραξης με laser:

- **Διανυσματική χάραξη (Vector engraving):** Η διανυσματική χάραξη μοιάζει με την κοπή με laser, με τη διαφορά ότι η δέσμη laser δεν διαπερνά το υλικό. Η δέσμη laser αυτής της κατηγορίας ακολουθεί τις γραμμές του σχεδίου και χαράσσει το υλικό. Η χάραξη αυτής της κατηγορίας είναι κατάλληλη για αντικείμενα μικρά σε μέγεθος και παρέχει καλύτερο αποτέλεσμα σε περιπτώσεις λεπτομερών κατεργασίας.
- **Χάραξη τύπου Raster (Raster engraving):** Ο τρόπος με τον οποίο κινείται το laser κατά τη χάραξη τύπου raster, μοιάζει με την κίνηση ενός εκτυπωτή, με τη διαφορά ότι με το laser αφαιρείται μέρος του υλικού. Για να επιτευχθεί λοιπόν το επιθυμητό αποτέλεσμα χάραξης, το laser κινείται αριστερά-δεξιά και εμπρός-πίσω, και προχωράει από πάνω προς τα κάτω στο υλικό. Η χάραξη τύπου raster είναι ακριβής και πολύ ελεγχόμενη, μπορεί όμως να είναι και αρκετά αργή σαν διαδικασία.

### 2.2.2 Είδη laser που χρησιμοποιούνται για χάραξη

Τα είδη laser που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τη χάραξη υλικών είναι τα εξής :

- Τα **CO<sub>2</sub> Laser** είναι ιδανικά για τη χάραξη μη μεταλλικών υλικών, όπως πλαστικό, δέρμα, ξύλο και καουτσούκ. Χρησιμοποιούνται τόσο για επιφανειακή όσο και για χάραξη σε βάθος.
- Τα **Nd:YAG Laser** χρησιμοποιούνται για τη χάραξη της επιφάνειας διαφόρων υλικών, κυρίως μεταλλικών αλλά και κάποιων μη μεταλλικών. Μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα παρουσιάζουν στη χάραξη των μεταλλικών υλικών, λόγω του μήκους κύματός τους, το οποίο δεν μπορούν να απορροφήσουν το ίδιο αποτελεσματικά τα μη μεταλλικά υλικά. Εκτός από τη χάραξη επιφανειών, τα

laser Nd:YAG μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάτρηση αλλά και για συγκόλληση.

- Τα **Fiber Laser** χρησιμοποιούνται κυρίως για χάραξη επιφανειών και είναι κατάλληλα για την κατεργασία μεταλλικών υλικών. Μη μεταλλικά υλικά δεν μπορούν να χαραχθούν με τα laser αυτού του είδους.

### 2.2.3 Κατεργαζόμενα υλικά

Η χάραξη με laser είναι μια τεχνική η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο εύρος υλικών. Ανάλογα με τον τύπο του laser και τις κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας, οι μηχανές laser μπορούν να χαραχθούν τα περισσότερα σύγχρονα υλικά.

#### Φυσικά υλικά

Μια από τις πρώτες χρήσεις της χάραξης με δέσμη laser, ήταν η δημιουργία εικόνων σε φυσικά υλικά, όπως το ξύλο. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην απανθράκωση του εκάστοτε υλικού, η οποία προκαλεί έντονη αντίθεση μεταξύ της κατεργασμένης και της μη κατεργασμένης επιφάνειας. Ανάλογα με τον τύπο laser που χρησιμοποιείται και το είδος του ξύλου που πρόκειται να χαραχθεί, ορίζεται και η κατάλληλη ισχύς του laser. Στα πιο σκληρά ξύλα, όπως στην καρυδιά, στο μαόνι και στο σφένδαμο, η χάραξη πραγματοποιείται πολύ αποτελεσματικά, σε αντίθεση με τα πιο μαλακά ξύλα στα οποία απαιτείται μεγάλη προσοχή, καθώς απαραίτητη είναι και η παροχή αέρα για την αποφυγή αναφλέξεων. Άλλα φυσικά υλικά τα οποία παρουσιάζουν εξίσου καλά αποτελέσματα χάραξης με δέσμη laser είναι τα χαρτόνια, τα κόντρα πλακέ, ορισμένες χημικές ενώσεις καουτσούκ(συνθετικά καουτσούκ) και τα δέρματα.

#### Πλαστικά

Τα πλαστικά σπάνια εμφανίζονται στην καθαρή τους μορφή. Με σκοπό να βελτιωθεί η αντοχή, η εμφάνιση ή/και οι λειτουργικές ιδιότητές τους γίνεται χρήση διάφορων πρόσθετων, όπως ενισχυτικά, χρωστικές ουσίες, αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία κ.ά.. Τα πρόσθετα αυτά επηρεάζουν το αποτέλεσμα της χάραξης, καθώς με τη χρήση laser μπορεί να προκληθούν χημικές τροποποιήσεις, τήξη ή εξαέρωση του υλικού. Η διαδικασία της χάραξης μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολύ καλά αποτελέσματα επιφάνειας στα πλαστικά, απαραίτητη όμως είναι η διεξαγωγή ενός πειράματος σε ένα μικρό δείγμα ώστε να προσδιοριστούν οι κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας και να αποφευχθεί η τήξη της επιφάνειας του υλικού. Κάποια πλαστικά, όπως το στυρένιο και τα περισσότερα θερμοπλαστικά, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, τείνουν να λιώνουν στις άκρες γύρω από το σημείο χάραξης και να αλλάζουν σχήμα. Άλλα πλαστικά χαράσσονται εύκολα όπως ο βακελίτης και ορισμένα σκληρά τεχνικά πλαστικά, και άλλα, όπως τα πλαστικά ουρεθάνης και σιλικόνης, στα οποία η χάραξη δεν είναι αποτελεσματική. Υπάρχουν όμως και τα πλαστικά με περιεκτικότητα σε χλώριο, όπως το βινύλιο και το PVC, τα οποία κατά τη χάραξη παράγουν διαβρωτικό αέριο χλώριο, απαραίτητη είναι λοιπόν η λήψη ειδικών μέτρων ασφαλείας. Σε πολλές περιπτώσεις, τη χάραξη με laser σε πλαστικά, ακολουθεί η βαφή της χαραγμένης επιφάνειας, ώστε να δημιουργηθεί μεγαλύτερη αντίθεση μεταξύ της χαραγμένης και της περιβάλλουσας επιφάνειας.

#### Μέταλλα

Το γεγονός ότι τα μέταλλα έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα στη θερμότητα και είναι και θερμικά αγωγιμα, καθιστά τη χάραξή τους πιο δύσκολη σε σύγκριση με άλλα υλικά. Πιο κατάλληλα για τη χάραξη μετάλλων θεωρούνται τα παλμικά και όχι τα συνεχούς κύματος laser, και αυτό οφείλεται στην θερμική αγωγιμότητα που παρουσιάζουν τα μέταλλα. Τα

laser που έχουν υψηλές τιμές μέγιστης ισχύος και μικρή διάρκεια παλμού, μπορούν να «απομακρύνουν» υλικό από μία μεταλλική επιφάνεια χάραξης χωρίς όμως η ενέργεια που παρέχεται να λιώνει και να χαλάει την επιφάνεια. Παλαιότερα τα μέταλλα θεωρούνταν τα χειρότερα υλικά στα οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί η χάραξη με laser. Αυτό όμως δεν ισχύει πια, καθώς τα laser που χρησιμοποιούνται εκπέμπουν σε μήκος κύματος μικρότερο από αυτό των laser που χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά (CO<sub>2</sub> laser). Με τη χρήση λοιπόν laser Yb:Fiber, Nd:YVO<sub>4</sub> ή Nd:YAG, τα μέταλλα πλέον χαράσσονται χωρίς δυσκολία, γεγονός που τα καθιστά τα καλύτερα υλικά για χάραξη με laser. Κάποια μέταλλα τα οποία προορίζονται για χάραξη με laser είναι επικαλυμμένα είτε με ένα σμάλτο, είτε με χρώμα είτε ακόμα και με κάποιο πλαστικό φύλλο. Οι επικαλύψεις αυτές μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της χάραξης, με την κατάλληλη επιλογή ισχύος όμως μπορούν να επιτευχθούν χαράξεις πολύ καλής ποιότητας.

### **Πέτρα και γυαλί**

Υλικά όπως η πέτρα και το γυαλί δεν λιώνουν ούτε εξαερώνονται εύκολα, γι' αυτό και η χάραξη με αμμοβολή και η κοπή με διαμάντια ή νερό είναι οι προτιμότερες τεχνικές. Παρ' όλα αυτά, τα laser χρησιμοποιούνται για τη χάραξη πέτρας και γυαλιού και με τις κατάλληλες συνθήκες κατεργασίας μπορούν να επιτευχθούν υψηλής ποιότητας αποτελέσματα. Σημαντικό είναι η επιφάνεια η οποία πρόκειται να χαραχθεί να είναι καθαρή, καθώς τυχόν ακαθαρσίες και λάδια μπορούν να επηρεάσουν τη χάραξη.

### **2.2.4 Εφαρμογές χάραξης με laser**

Τα τελευταία χρόνια η χάραξη με laser χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο και βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Η χρήση των laser αυξάνεται διαρκώς, καθώς τα αποτελέσματα που παρέχουν είναι πολύ υψηλότερης ποιότητας σε σύγκριση με τα αποτελέσματα οποιασδήποτε άλλης κατεργασίας χάραξης.

### **Χάραξη με laser σε Επιχειρήσεις και Εταιρείες**

Η χάραξη με laser χρησιμοποιείται από τις εταιρείες και τις επιχειρήσεις και έχει πολλές εφαρμογές. Η κυριότερη εφαρμογή της χάραξης με laser είναι η χάραξη σημαντικών πληροφοριών σε προϊόντα, όπως σειριακοί αριθμοί, barcode, QR code, λογότυπα ή πληροφορίες σχετικές με την παραγωγή των προϊόντων. Ωστόσο η χάραξη με laser είναι και ένας τρόπος για τις επιχειρήσεις να εξατομικεύσουν τα προϊόντα τους. Με τη χάραξη του λογότυπου στα προϊόντα τους, σε διαφημιστικά προϊόντα, σε εταιρικά δώρα ακόμα και σε βραβεία, οι εταιρείες δημιουργούν την ταυτότητά τους.

### **Χάραξη με laser στη Βιομηχανία της Μόδας**

Η χάραξη με laser χρησιμοποιείται αρκετά και στη βιομηχανία της μόδας, καθώς δίνεται η δυνατότητα να αποτυπωθούν περίπλοκα σχέδια και μοτίβα τόσο σε ρούχα όσο και σε αξεσουάρ. Η χάραξη με laser μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολλά υλικά, όπως δέρμα, τζιν ή ακόμα και μετάξι. Τέλος, η ακρίβεια χάραξης που παρέχουν τα laser δεν μπορεί να επιτευχθεί με καμία από τις παραδοσιακές τεχνικές.

### **Χάραξη με laser στην Βιομηχανία Αυτοκινήτων**

Η Βιομηχανία Αυτοκινήτων είναι ένας ακόμα τομέας στον οποίο η χάραξη με laser χρησιμοποιείται αρκετά. Με τη χρήση laser χαράσσονται σειριακοί αριθμοί, κωδικοί εξαρτημάτων και λογότυπα σε διάφορα μέρη του αυτοκινήτου, σε κινητήρες και ανταλλακτικά ή ακόμα και σε ταμπλό. Η υψηλή ακρίβεια με την οποία χαράσσουν τα laser διασφαλίζουν την συνέπεια και την ευκρίνεια των χαράξεων.



### **Χάραξη με laser στη Βιομηχανία της Ιατρικής**

Η χάραξη ιατρικών συσκευών, χειρουργικών εργαλείων και εμφυτευμάτων με σημαντικές πληροφορίες, κωδικούς εξαρτημάτων και ημερομηνίες λήξης, πραγματοποιούνται με τη χρήση laser. Το γεγονός ότι η χάραξη μπορεί να γίνει χωρίς επαφή, ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ζημιάς στις ιατρικές συσκευές και τα όργανα τα οποία κατασκευάζονται από ευαίσθητα υλικά.

### **Χάραξη με laser σε Κοσμήματα και Ρολόγια**

Η χάραξη σε κοσμήματα αποτελεί μία από τις πιο κοινές εφαρμογές της χάραξης με laser. Διάφορα σχέδια, μοτίβα, ονόματα, ημερομηνίες ή άλλα μηνύματα χαράσσονται στο εσωτερικό δαχτυλιδιών, στο πίσω μέρος ρολογιών ή ακόμα και σε μπρελόκ.

### 3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν η μηχανή laser και το μετρητικό όργανο που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αυτά είναι :

1. Το **κέντρο κατεργασίας DMG MORI LASERTEC 40**, με το οποίο πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία.
2. Το **οπτικό προφιλόμετρο 3D Contour GT-K**, με το έγινε η ανάλυση των πειραμάτων.

#### 3.1 Κέντρο κατεργασίας DMG MORI LASERTEC 40

Η εργαλειομηχανή Lasertec 40 (Σχήμα 3.1), είναι ένα κάθετο κέντρο κατεργασίας το οποίο διαθέτει τρεις γραμμικούς και δύο οπτικούς άξονες. Είναι παλμικό, Ytterbium fiber τύπου laser και έχει μέγιστη μέση ισχύ 20 Watt. Αποτελείται από μία πλήρους προστασίας καμπίνα, στη συρόμενη πόρτα της οποίας υπάρχει ενσωματωμένο παράθυρο ασφαλείας laser safety glass 1, και από ένα ψηφιακό κέντρο ελέγχου. Το ψηφιακό κέντρο ελέγχου της συγκεκριμένης εργαλειομηχανής απαρτίζεται από μια οθόνη TFT 15" (ιντσών) και ένα πληκτρολόγιο με ενσωματωμένο ποντίκι μέσω των οποίων γίνεται εισαγωγή δεδομένων στη μηχανή. Ο έλεγχος της μηχανής καθώς και της κατεργασίας γίνονται μέσω του ψηφιακού αυτού κέντρου ελέγχου. Πρόκειται λοιπόν για ένα αυτοματοποιημένο CNC κέντρο κατεργασίας με δυνατότητα καθοδήγησης μέσω των προγραμμάτων LpsWin, L4D Viewer και LaserSoft 3D.

Κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά της, είναι :

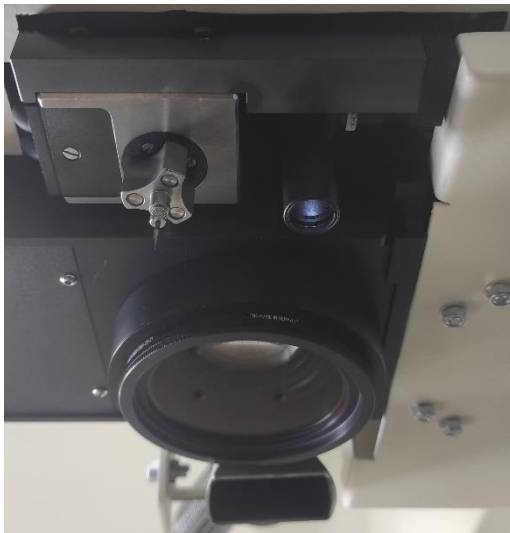
- Πλήρως προστατευμένη καμπίνα με παράθυρα ασφαλείας laser safety glass 1
- Οθόνη TFT 15"
- Κλιματιζόμενη καμπίνα
- Μνήμη με σκληρό δίσκο 40 GB
- Control με επεξεργαστή 32-bit
- Internet interface



Σχήμα 3.1: Κέντρο κατεργασίας LASERTEC 40

Στο εσωτερικό της καμπίνας, στον θάλαμο επεξεργασίας, υπάρχουν στο επάνω μέρος (Σχήμα 3.2.α):

- Ο **φακός** του laser, από τον οποίο βγαίνει το laser.
- Η **κάμερα καθοδήγησης** η οποία λειτουργεί και ως **φακός ρυθμιζόμενης φωτεινότητας**. Βοηθάει στην εστίαση του κατεργαζόμενου τεμαχίου και στη μεταβολή του φωτισμού του θαλάμου στο σημείο που δείχνει η κάμερα με σκοπό να έχει ο χειριστής της εργαλειομηχανής τη βέλτιστη εικόνα της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Το **ακροφύσιο της σκούπας**, η οποία μπαίνει σε λειτουργία όταν ξεκινάει η κατεργασία και ρουφάει τα μικρορινίσματα που δημιουργούνται από την ατμοποίηση του υλικού.
- Το **probe**, ένας κατακόρυφος αισθητήρας ο οποίος χρησιμοποιείται αφού γίνει ο μηδενισμός με την κάμερα καθοδήγησης.
- Τέλος, υπάρχει και η **τράπεζα** (Σχήμα 3.2.β), πάνω στην οποία τοποθετείται το τεμάχιο που πρόκειται να επεξεργαστεί το laser. Κάποια από τα χαρακτηριστικά της τράπεζας είναι τα εξής :
  - Διαστάσεις τράπεζας : 400 × 300 mm
  - Μέγιστο φορτίο : 50 Kg
  - Κίνηση τράπεζας στον άξονα X : 400 mm
  - Κίνηση τράπεζας στον άξονα Y : 300 mm
  - Κίνηση τράπεζας στον άξονα Z : 500 mm
  - Ταχύτητα κίνησης της τράπεζας :  $\approx 12 \text{ mm/min}$



(α) Επάνω μέρος



(β) Τράπεζα

Σχήμα 3.2: Εσωτερικό καμπίνας LASERTEC 40

Σύμφωνα με το manual της εργαλειομηχανής, τα χαρακτηριστικά της LASERTEC 40 είναι συγκεντρωμένα παρακάτω :

- Τύπος μετάδοσης της δέσμης : Παλμικός
- Τύπος ενεργού μέσου : Ytterbium Fiber
- Μέγιστη μέση ισχύς : 20 Watt

- Διάρκεια παλμού : 100 ns
- Μήκος κύματος : 1064 nm
- Ταχύτητα σάρωσης δέσμης laser : 50-1000 mm/s
- Συχνότητα εκπομπής laser : 4-50 kHz
- Διάμετρος δέσμης κατά την εστίαση : 30  $\mu$ m

### 3.2 Οπτικό προφιλόμετρο Bruker 3D Contour GT-K

Το προφιλόμετρο 3D Contour GT-K (Σχήμα 3.3) της εταιρείας Bruker, είναι μέρος του εξοπλισμού του εργαστηρίου Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης. Πρόκειται για ένα οπτικό μικροσκόπιο το οποίο παρέχει ποικιλία μετρήσεων σε δισδιάστατη (2D) και τρισδιάστατη (3D) κλίμακα, καθώς και απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης. Το λογισμικό μέσω του οποίου ο χρήστης ελέγχει και διαχειρίζεται το προφιλόμετρο, ονομάζεται “Vision64” και είναι εγκατεστημένο σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή του εργαστηρίου.

Το προφιλόμετρο 3D Contour GT-K είναι ένα όργανο μέτρησης, μέσω του οποίου μπορεί να γίνει καταγραφή της επιφανειακής τοπογραφίας, καθώς επίσης μπορεί να επιτευχθεί η μέτρηση του προφίλ μιας επιφάνειας προκειμένου να προσδιοριστεί η τραχύτητά της. Το Contour GT-K αποτελεί όργανο οπτικής καινοτομίας στη μετρολογία, τον χαρακτηρισμό και την απεικόνιση χωρίς επαφή. Συνολικά, το συγκεκριμένο οπτικό προφιλόμετρο είναι ένα ισχυρό και ευέλικτο μετρητικό όργανο το οποίο είναι κατάλληλο για τη μέτρηση της μορφολογίας μεγάλου εύρους επιφανειών, συμπεριλαμβανομένων επιφανειών με έντονη πολυπλοκότητα και ακανόνιστη μορφή.



Σχήμα 3.3: Οπτικό προφιλόμετρο 3D Contour GT-K

Η υψηλή ταχύτητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παρέχει το καθιστά πολύ χρήσιμο εργαλείο στην ποσοτική μετρολογία. Το 3D Contour GT-K απαρτίζεται από πληθώρα ρυθμίσεων και παραμέτρων μέτρησης, καθώς επίσης παρέχει και πρόσβαση σε μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη προγραμματισμένων φίλτρων. Διαθέτει πρωτοποριακή ανάλυση και ακρίβεια στον άξονα Z και σε συνδυασμό με την ενσωματωμένη αναγνώριση χαρακτηριστικών, παρέχει αποτελέσματα ανεξαρτήτως κλίμακας για εφαρμογές ελέγχου ποιότητας και σε ποικιλία βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται το προφιλόμετρο είναι τα εξής :

- Οι **φακοί**, οι οποίοι είναι διαφορετικής εστίασης ο καθένας, και λόγω αυτού επιτρέπονται οι μετρήσεις χαρακτηριστικών ανεξαρτήτου κλίμακας (τόσο μικροσκοπική όσο και μακροσκοπική)
- Η **τράπεζα**, πάνω στην οποία τοποθετείται η κατεργασμένη επιφάνεια με σκοπό να εκτελεστούν όλες οι σαρώσεις και οι μετρήσεις της επιφάνειας αυτής.
- Οι **μοχλοί** και οι **μανιβέλες**. Για την καλύτερη εστίαση των φακών στην κατεργασμένη επιφάνεια, και επομένως για τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα των μετρήσεων, η τράπεζα μετακινείται. Η μετακίνηση αυτή γίνεται με τη βοήθεια μοχλών και μανιβέλων. Το προφιλόμετρο 3D Contour GT-K διαθέτει (Σχήμα 3.4) συνολικά 3 μανιβέλες για τους άξονες X, Y και Z, 2 μοχλούς για τους άξονες X, Y και 2 μανιβέλες προσαρμογής της παραλληλότητας της τράπεζας. Πιο αναλυτικά οι κινήσεις που εκτελεί το καθένα είναι :
  1. Μανιβέλα ρύθμισης απόστασης φακού από την τράπεζα κατά τον άξονα Z. Η τράπεζα μετακινείται προς τα κάτω όταν η μανιβέλα στραφεί προς τα δεξιά.
  2. Μανιβέλα ευθυγράμμισης και προσαρμογής παραλληλότητας του τεμαχίου για τους άξονες Y και Z. Όταν η μανιβέλα στραφεί προς τα δεξιά, σηκώνεται το πίσω μέρος της τράπεζας.
  3. Μανιβέλα ευθυγράμμισης και προσαρμογής παραλληλότητας του τεμαχίου για τους άξονες X και Z. Όταν η μανιβέλα στραφεί δεξιόστροφα, η τράπεζα σηκώνεται από τα δεξιά.
  4. Μανιβέλα μετακίνησης της τράπεζας κατά τον άξονα X.
  5. Μανιβέλα μετακίνησης της τράπεζας κατά τον άξονα Y.
  6. Μοχλός ταχείας μετακίνησης της τράπεζας στον άξονα Y.
  7. Μοχλός ταχείας μετακίνησης της τράπεζας στον άξονα X.



ΟΣχήμα 3.4: Μανιβέλες και μοχλοί του 3D Contour GT-K

Κάποια χαρακτηριστικά του προφιλόμετρου 3D Contour GT-K είναι τα ακόλουθα :

- Μέγιστη περιοχή σάρωσης : 10 mm
- Κάθετη ανάλυση : < 0,01 nm

- RMS Επαναληψιμότητα (PSI) : 0,01 nm
- Ακρίβεια βήματος ύψους : 0,75%
- Μέγιστη σάρωση : 47μm (με την βασικό μονόχρωμο φακό)
- Ανακλαστικότητα δείγματος : 0,05% - 100%
- Μέγιστη κλίση δείγματος : Έως 40° για λείες επιφάνειες και έως 87° για τραχιές επιφάνειες
- Ύψος δείγματος : έως 100 mm
- Εστίαση στον άξονα Z : 100 mm με την επιλογή να γίνεται είτε μηχανικά είτε χειροκίνητα
- Επιφάνεια τοποθέτησης δείγματος/τεμαχίου στους άξονες XY : 150 mm είτε χειροκίνητα είτε μηχανικά
- Συνολικές διαστάσεις : 492 mm (πλάτος) × 534 mm (μήκος) × 754 mm (ύψος)
- Συνολικό βάρος : 60 kg

### 3.3 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Τα υλικά πάνω στα οποία πραγματοποιούνται τα πειράματα είναι ένα από τα βασικά πράγματα που πρέπει να γνωρίζει και να λαμβάνει υπόψιν του ο χειριστής της εργαλειομηχανής. Οι μηχανικές, φυσικές, χημικές και κατασκευαστικές ιδιότητες των υλικών σχετίζονται τόσο με την επιλογή του κατάλληλου υλικού, όσο και με την κατεργασία που θα υποστούν.

- Οι **μηχανικές** ιδιότητες καθορίζουν πως τα υλικά αντιδρούν σε μηχανικά φορτία και αν αυτά είναι κατάλληλα για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες χρησιμοποιούνται.
- Οι **φυσικές** ιδιότητες καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το υλικό τόσο σε κανονικές, όσο και σε ακραίες συνθήκες, και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον σχεδιασμό και τη χρήση του υλικού. Η πυκνότητα, η αγωγιμότητα, οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες είναι μερικές από τις φυσικές ιδιότητες που μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του υλικού.
- Οι **χημικές** ιδιότητες καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο αντιδρά το υλικό και αλλάζει η χημική του σύσταση υπό διάφορες συνθήκες. Η οξειδωση και η τοξικότητα είναι μερικά παραδείγματα χημικών ιδιοτήτων.
- Οι **κατασκευαστικές** ιδιότητες καθορίζουν την κατεργασιμότητα των υλικών. Επιπλέον, μπορεί να καθοριστεί και το κατάλληλο είδος κατεργασίας το οποίο θα εφαρμοστεί για την επίτευξη του επιθυμητού τελικού αποτελέσματος.

Τα 2 διαφορετικά είδη χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι:

- **STAVAX ESR** (ένα είδος ανοξειδωτου χάλυβα)
- **ORVAR Supreme** (ένα είδος χάλυβα)

#### 3.3.1 STAVAX ESR

Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται αυτό το είδος ανοξειδωτου χάλυβα είναι (Πίνακας 3.1) :

Σύσταση ανοξειδωτου χάλυβα STAVAX (%by weight)	
Συστατικό στοιχείο	Wt. %
<b>Fe</b>	84.32
<b>C</b>	0.38
<b>Si</b>	0.9
<b>Mn</b>	0.5
<b>Cr</b>	13.6

<b>V</b>	<b>0.3</b>
----------	------------

Πίνακας 3.1: Σύσταση του κράματος STAVAX ESR

Οι μηχανικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα STAVAX σε θερμοκρασία δωματίου ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ) είναι οι εξής :

- Σκληρότητα, Rockwell C (HRC) :  $\approx 50$
- Αντοχή στον εφελκυσμό,  $R_m$  ( $\text{N/mm}^2$ ) : 1780
- Αντοχή διαρροής,  $R_p$  ( $\text{N/mm}^2$ ) : 1360
- Επιμήκυνση σε θραύση,  $A_5$  (%) : 10
- Μείωση του εμβαδού,  $Z$  (%) : 45
- Αναλογία Poisson : 0.29
- Αντοχή στην κρούση (J) : 20

Οι φυσικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα STAVAX σε θερμοκρασία δωματίου ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ) είναι οι εξής :

- Πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ ) : 7800
- Μέτρο Ελαστικότητας ( $\text{N/mm}^2$ ) : 200000
- Θερμική αγωγιμότητα ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ ) : 16
- Ειδική θερμότητα ( $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$ ) : 460
- Σημείο τήξης ( $^{\circ}\text{C}$ ) : 1550-1620

### 3.3.2 ORVAR Supreme

Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται αυτό το είδος χάλυβα είναι (Πίνακας 3.2) :

Σύσταση χάλυβα ORVAR (%by weight)	
Συστατικό στοιχείο	Wt.%
<b>Fe</b>	90.71
<b>C</b>	0.39
<b>Si</b>	1.0
<b>Mn</b>	0.4
<b>Cr</b>	5.2
<b>V</b>	0.9
<b>Mo</b>	1.4

Πίνακας 3.2: Σύσταση του κράματος ORVAR Supreme

Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα ORVAR σε θερμοκρασία δωματίου ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ) είναι οι εξής :

- Σκληρότητα, Rockwell C (HRC) :  $\approx 50$
- Αντοχή στον εφελκυσμό,  $R_m$  ( $\text{N/mm}^2$ ) : 1600
- Αντοχή διαρροής,  $R_p$  ( $\text{N/mm}^2$ ) : 1400
- Επιμήκυνση σε θραύση,  $A_5$  (%) : 12
- Μείωση του εμβαδού,  $Z$  (%) : 50
- Αναλογία Poisson : 0.29
- Αντοχή στην κρούση (J) : 12

Οι φυσικές ιδιότητες του χάλυβα ORVAR σε θερμοκρασία δωματίου ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ) είναι οι εξής :

- Πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ ) : 7800
- Μέτρο Ελαστικότητας ( $\text{N/mm}^2$ ) : 210000
- Θερμική αγωγιμότητα ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ ) : 25
- Ειδική θερμότητα ( $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$ ) : 460
- Σημείο τήξης ( $^{\circ}\text{C}$ ) :  $\approx 1420$



## 4. ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΣΗΣ ΟΠΤΙΚΟΥ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟΥ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3.2) έγινε μια μικρή εισαγωγή στο προφιλόμετρο Contour GT-K, κυρίως για τα χαρακτηριστικά και τα μέρη από τα οποία αποτελείται. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αναλυτικά το οπτικό προφιλόμετρο, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται.

### 4.1 Εκκίνηση του προφιλόμετρου 3D Contour GT-K

Αρχικά ο χρήστης πρέπει να ανοίξει τον υπολογιστή στον οποίο είναι συνδεδεμένο το προφιλόμετρο, καθώς και τον μετατροπέα τάσης (Σχήμα 4.1), ο οποίος βρίσκεται δίπλα στην οθόνη του υπολογιστή. Ο μετατροπέας τάσης του προφιλόμετρου είναι υπεύθυνος για την μετατροπή της τάσης από AC σε DC και η χρήση του είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του προφιλόμετρου. Με το πάτημα του διακόπτη τύπου «on-off» στο “on”, ο μετατροπέας αρχίζει να λειτουργεί και ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει το προφιλόμετρο και το λογισμικό του.



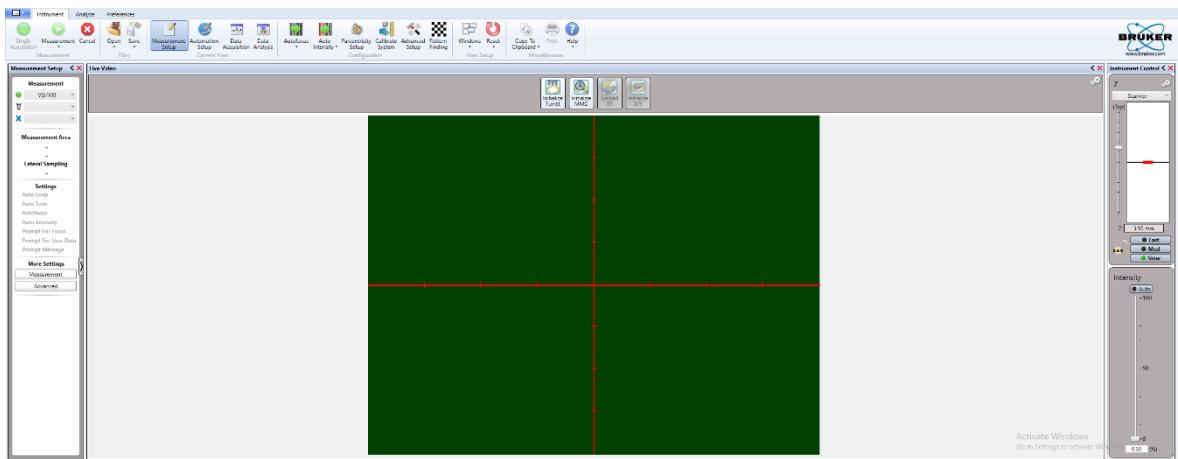
Σχήμα 4.1: Μετατροπέας τάσης του οπτικού προφιλόμετρου

Στη συνέχεια, ο χρήστης κάνει διπλό κλικ στο εικονίδιο του προγράμματος «Vision64» (Σχήμα 4.2) που βρίσκεται πάνω και αριστερά στην επιφάνεια εργασίας. Το Vision64 είναι ένα λογισμικό ανάλυσης και αναφοράς δεδομένων της Bruker, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το προφιλόμετρο και μέσω αυτού πραγματοποιούνται όλες οι ρυθμίσεις, οι σαρώσεις και οι μετρήσεις επιφανειών. Με το άνοιγμα του προγράμματος «Vision64» εμφανίζεται στην οθόνη ένα προειδοποιητικό μήνυμα το οποίο αφορά την απόσταση της τράπεζας από τον φακό, στο οποίο επιλέγεται η ένδειξη «Continue». Στην περίπτωση που εμφανιστούν κι άλλα προειδοποιητικά μηνύματα δε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και κάνοντας κλικ στην επιλογή «Ignore» να προχωρήσει το πρόγραμμα στην εκκίνησή του.



Σχήμα 4.2: Εικονίδιο του προγράμματος Vision64

Τέλος, το πρόγραμμα ανοίγει και εμφανίζεται η αρχική οθόνη του λογισμικού «Vision64» (Σχήμα 4.3).



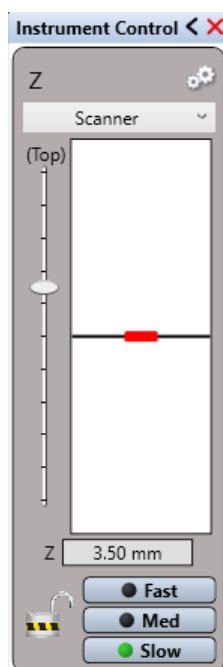
Σχήμα 4.3: Αρχική οθόνη του προγράμματος Vision64

## 4.2 Τοποθέτηση τεμαχίου και αρχικές ρυθμίσεις προφιλόμετρου

Αφού το πρόγραμμα έχει ανοίξει με επιτυχία, ο χρήστης θα πρέπει να τοποθετήσει το τεμάχιο του οποίου η επιφάνεια πρόκειται να αναλυθεί, στην τράπεζα του προφιλόμετρου.

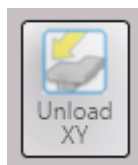
Ο χρήστης θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι οι φακοί απέχουν αρκετά από την τράπεζα, καθώς θέλουμε να αποφύγουμε τυχόν τραυματισμό τόσο των φακών όσο και του τεμαχίου. Στην περίπτωση που η απόσταση φακών-τράπεζας δεν είναι επαρκής, η κεφαλή θα πρέπει να ανυψωθεί, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους :

- Είτε μέσω του λογισμικού Vision64. Στο δεξί μέρος της οθόνης, στο παράθυρο «Z» του «Instrument Control» (Σχήμα 4.4), ο χρήστης μπορεί να μετακινήσει την κεφαλή με τους φακούς, έχοντας επιπλέον τη δυνατότητα να επιλέξει και με τι ταχύτητα θα πραγματοποιηθεί η μετακίνηση αυτή.
- Είτε χειροκίνητα. Σε αυτή την περίπτωση η απόσταση μεταξύ φακών και τράπεζας θα μεγαλώσει κατεβάζοντας την τράπεζα πιο χαμηλά. Με τη χρήση λοιπόν της μανιβέλας [1] του Σχήματος 3.4 και περιστρέφοντάς την προς τα δεξιά, η τράπεζα θα μετακινηθεί προς τα κάτω και η απόσταση φακών-τράπεζας θα μεγαλώσει.



Σχήμα 4.4: Instrument Control, παράθυρο “Z”

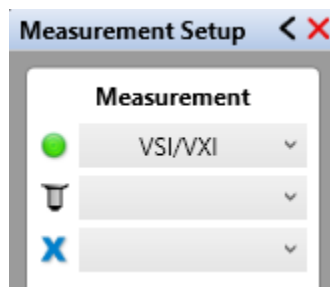
Προτού ο χρήστης τοποθετήσει το τεμάχιο στο προφیلόμετρο, θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι η τράπεζα έχει μετακινηθεί όσο το δυνατό πιο μπροστά. Αυτό επιτυγχάνεται με το πάτημα του κουμπιού «Unload XY» (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Unload XY

Αφού λοιπόν ο χρήστης βεβαιωθεί ότι η απόσταση των φακών από την τράπεζα είναι επαρκής και ότι η τράπεζα έχει μετακινηθεί μπροστά, μπορεί πλέον να πραγματοποιηθεί και η τοποθέτηση του τεμαχίου στην τράπεζα. Τέλος, χρησιμοποιώντας τις μανιβέλες [4] και [5] του Σχήματος 3.4, ο χρήστης θα μετακινήσει ξανά την τράπεζα ώστε το τεμάχιο να βρίσκεται κάτω από τον φακό.

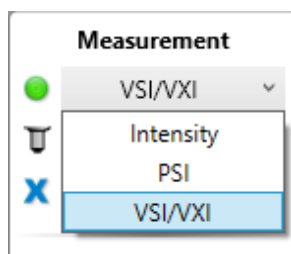
Το επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιηθούν οι ρυθμίσεις και να οριστούν κατάλληλα οι παράμετροι για τις μετρήσεις που θα ακολουθήσουν. Αρχικά, στο παράθυρο «Measurement Setup» (Σχήμα 4.6), το οποίο βρίσκεται αριστερά και πάνω στο περιβάλλον του προγράμματος, υπάρχουν τρεις ρυθμίσεις οι οποίες αφορούν τον φακό.



Σχήμα 4.6: Measurement Setup

Αναλυτικά :

Η πρώτη ρύθμιση αφορά στη μέθοδο σάρωσης/επεξεργασίας που θα χρησιμοποιηθεί. Σε αυτή τη ρύθμιση υπάρχουν τρεις επιλογές (Σχήμα 4.7) :



Σχήμα 4.7: Επιλογές ρύθμισης μεθόδου σάρωσης

- **VSI (Παρεμβολή με κάθετη σάρωση)** : Η παρεμβολή με κάθετη σάρωση είναι αρκετά αποτελεσματική για επιφάνειες οι οποίες είναι τραχιές. Η ακρίβεια της μεθόδου VSI (Vertical Scanning Interferometry) αποδίδει στην περιοχή των nm και το μέγιστο μήκος σάρωσης για τη μέθοδο αυτή είναι τα 10 mm.
- **PSI (Παρεμβολή μετατόπισης φάσης)** : Η παρεμβολή μετατόπισης φάσης είναι πολύ ακριβής μέθοδος και συνήθως επιλέγεται για τη μέτρηση λείων

επιφανειών (τραχύτητα μικρότερη από 30nm). Παρά την ακρίβειά της, η μέθοδος PSI (Phase Shifting Interferometry) δεν μπορεί να αποδώσει σωστό προφίλ στις κάθετες μετρήσεις (ανάλυσης nm) επιφανειών με μεγάλες αλλαγές ύψους.

- **VSI/VXI** : Αυτή η επιλογή είναι χρήσιμη και αποτελεσματική για σάρωσεις μεγάλου εύρους (>50μm) με ελάχιστο θόρυβο. Με τη μέθοδο VSI/VXI παίρνουμε πολύ πιο λεπτομερή αποτελέσματα συγκριτικά με μία μέτρηση με τη μέθοδο VSI.

Η δεύτερη ρύθμιση αφορά την επιλογή του φακού με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί η σάρωση. Ο φακός που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την επιφάνεια που πρόκειται να αναλυθεί. Η επιλογή του φακού στο πρόγραμμα θα πρέπει να αντιστοιχεί με τον φακό που έχει επιλέξει ο χρήστης χειροκίνητα πάνω στο προφιλόμετρο. Οι επιλογές φακών που είναι διαθέσιμες τόσο πάνω στο προφιλόμετρο όσο και στο πρόγραμμα είναι οι εξής :

- 5×
- 10×
- 20×

Τέλος, η τρίτη ρύθμιση στο παράθυρο «Measurement Setup» αφορά το οπτικό πεδίο , την περιοχή δηλαδή της επιφάνειας η οποία εξετάζεται κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Οι τρεις επιλογές που εμφανίζονται είναι οι ακόλουθες :

- 0.55×
- 1.0×
- 2.0×

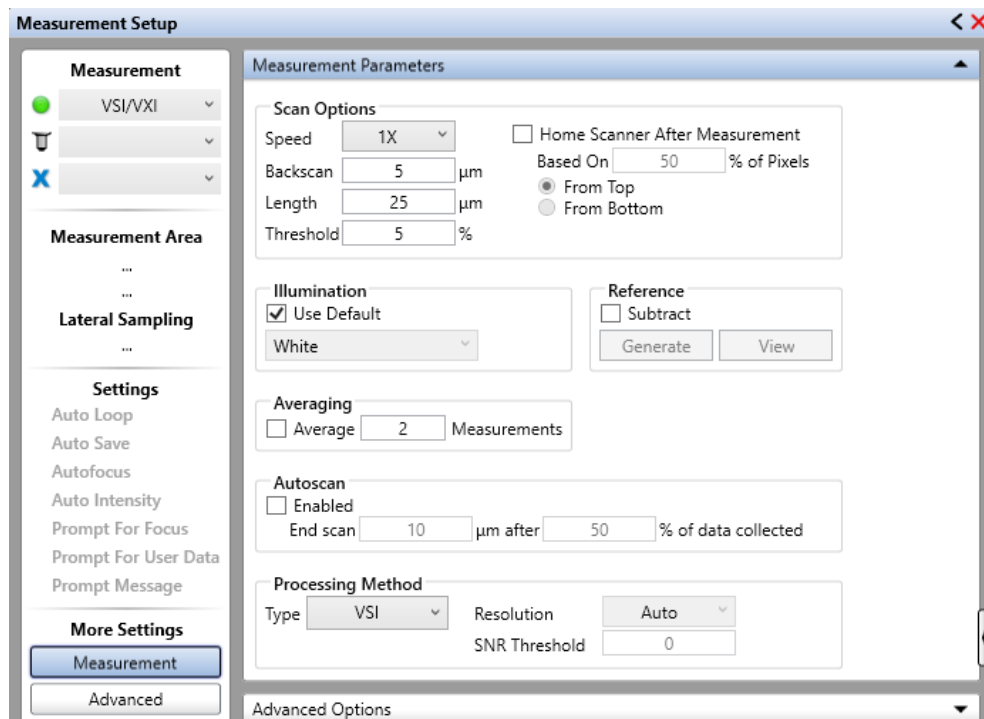
Αφού οριστούν λοιπόν οι αρχικές αυτές ρυθμίσεις στο παράθυρο «Measurement Setup», ο χρήστης θα πρέπει να πατήσει την επιλογή «Measurement» η οποία βρίσκεται κάτω από το παράθυρο που αναφέρθηκε προηγουμένως, και με αυτόν τον τρόπο θα ανοίξει μία καινούρια καρτέλα με το όνομα «Measurement Parameters».

### 4.3 Measurement Parameters

Στην καρτέλα «Measurement Parameters» ορίζονται όλες οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για τη σάρωση και κατ' επέκταση για τις μετρήσεις. Ανάλογα με τη μέθοδο σάρωσης που θα επιλέξει ο χειριστής, αλλάζουν και οι παράμετροι που θα πρέπει να ορίσει.

#### 4.3.1 Ορισμός παραμέτρων για τη μέθοδο σάρωσης VSI/VXI

Με την επιλογή της μεθόδου σάρωσης VSI/VXI, η καρτέλα «Measurement Parameters» έχει τη μορφή του Σχήματος 4.8.

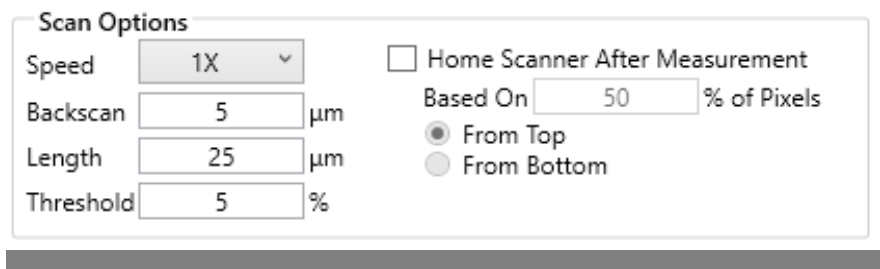


Σχήμα 4.8: Measurement Parameters VSI

Αρχικά στο πεδίο **Scan Options** (Σχήμα 4.9), οι τέσσερις (4) παράμετροι που πρέπει να οριστούν είναι οι εξής :

- **Speed** : Πρόκειται για την ταχύτητα με την οποία κινείται ο φακός κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Οι επιλογές που εμφανίζονται είναι 1x, 3x και 5x. Μεταξύ αυτών των επιλογών, εκείνη που προτείνεται συγκριτικά με τις υπόλοιπες είναι η 1x, καθώς είναι αρκετά γρήγορη για τις περισσότερες περιπτώσεις. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι όσο πιο γρήγορα κινείται ο φακός κατά τη σάρωση τόσο χαμηλότερη θα είναι τελικά η ανάλυση. Για παράδειγμα, για την ταχύτητα 3x, η ανάλυση που αποδίδεται είναι περίπου 3x χαμηλότερη.
- **Backscan [μm]**: Σε αυτή την παράμετρο ορίζεται το ύψος (στον άξονα Z) στο οποίο μετακινείται ο φακός πριν από κάθε σάρωση, η απόσταση δηλαδή από την επιφάνεια του δοκιμίου. Το **Backscan** προτείνεται να ρυθμίζεται σε τέτοιο ύψος ώστε να μπορεί να σαρώσει και τη μεγαλύτερη κορυφή.
- **Length [μm]**: Αυτή η παράμετρος, όπως και το “Backscan”, αφορά τον άξονα Z. Πρόκειται για το βάθος στο οποίο θα φτάσει ο φακός για να πραγματοποιήσει τη σάρωση. Η τιμή στην οποία ρυθμίζεται το **Length**, προτείνεται να είναι 10-20% πιο μεγάλη από το χαμηλότερο σημείο της (χαραγμένης) επιφάνειας του δοκιμίου.
- **Threshold [%]**: Αυτή η παράμετρος ορίζεται με μία ποσοστιαία τιμή και αφορά την ακρίβεια της σάρωσης. Υποδηλώνει τα εικονοστοιχεία (pixels) που θεωρούνται έγκυρα και αποδεκτά, ενώ εκείνα που θεωρούνται άκυρα, δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση. Η τιμή η οποία θα οριστεί δε θα πρέπει να είναι πολύ μικρή, καθώς θα ληφθούν υπόψη κακής ποιότητας δεδομένα, δεν θα πρέπει όμως να είναι ούτε πολύ αυξημένη γιατί σε αυτή την περίπτωση δε θα ληφθούν υπόψη καλής ποιότητας δεδομένα.

- **Home Scanner After Measurement** : Αυτή η παράμετρος αφορά την θέση στην οποία θα επιστρέψει ο σαρωτής μετά την πραγματοποίηση της σάρωσης, η οποία θα είναι διαφορετική από τη θέση από την οποία ξεκίνησε η σάρωση. Την παράμετρο αυτή, ο χειριστής την ενεργοποιεί κάνοντας κλικ στο κουτάκι αριστερά από το “Home Scanner After Measurement”. Αφού ο χειριστής επιλέξει αυτή την παράμετρο μπορεί, ακριβώς από κάτω, να προχωρήσει στη ρύθμιση αυτής ως εξής :
  - Στο πεδίο **Based On % of Pixels**, ο χειριστής εισάγει το ποσοστό των εικονοστοιχείων (pixels) που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να υπολογιστεί η θέση/ύψος στην οποία το σύστημα θα επιστρέψει τον σαρωτή. Για παράδειγμα, για το ποσοστό 50%, ο σαρωτής επιστρέφει στη θέση στην οποία μισά από τα pixel έχουν διαμορφωθεί πλήρως (έχουν φτάσει στη μέγιστη διαμόρφωσή τους). Για το ποσοστό 70%, ο σαρωτής επιστρέφει σε χαμηλότερη θέση, καθώς περισσότερα pixel έχουν φτάσει στη μέγιστη διαμόρφωσή τους.
  - Με τις επιλογές **From Top** ή **From Bottom** οι χειριστής επιλέγει την κατεύθυνση κατά την οποία το σύστημα επιστρέφει στη θέση των κροσσών σε σχέση με το πάνω ή το κάτω μέρος της προηγούμενης σάρωσης.



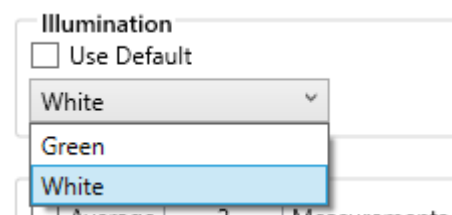
Σχήμα 4.9: Scan Options

Στο πεδίο **Illumination** (Σχήμα 4.10), επιλέγεται το είδος φωτισμού του φακού. Κάνοντας κλικ στο κουτάκι αριστερά από την ένδειξη “Use Default”, ο χειριστής μπορεί να επιλέξει τον φωτισμό που είναι πιο κατάλληλος, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον φακό που έχει επιλεγεί όσο και τη μέθοδο σάρωσης VSI. Οι επιλογές οι οποίες είναι διαθέσιμες και μεταξύ αυτών θα επιλέξει ο χειριστής είναι (Σχήμα 4.11) :

- **White**: Η επιλογή λευκού φωτός καλύπτει μεγάλο εύρος ζώνης ( $\approx 200\text{nm}$ ) και είναι κατάλληλη για τις περισσότερες μετρήσεις με μέθοδο σάρωσης VSI οι οποίες πραγματοποιούνται για ταχύτητες  $1\times$  και  $3\times$ .
- **Green**: Η επιλογή του πράσινου φωτός καλύπτει πολύ μικρότερο εύρος ζώνης συγκριτικά με το λευκό φως ( $\approx 25\text{nm}$ ). Η χρήση του πράσινου φωτός είναι ιδανική για τη μέτρηση επιφανειών που είναι πολύ τραχιές. Τέλος, το πράσινο φως προτείνεται να χρησιμοποιείται όταν πραγματοποιείται σάρωση VSI σε ταχύτητα  $5\times$  ή και μεγαλύτερη.

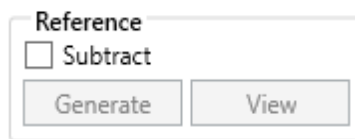


Σχήμα 4.10: Illumination



Σχήμα 4.11: Λίστα επιλογών του Illumination

Δίπλα στο πεδίο Illumination, βρίσκεται το πεδίο **Reference** (Σχήμα 4.12) και πρόκειται για τα σφάλματα που προκαλούνται από μικρές παρεκκλίσεις στα οπτικά μέσα του συστήματος. Τα σφάλματα αυτά έχουν οριστεί και ρυθμίζεται από το εργοστάσιο κατασκευής του μηχανήματος. Παρ' όλα αυτά, ο χειριστής μπορεί να επιλέξει να μην συμπεριληφθούν τα σφάλματα αυτά στις μετρήσεις του (κάνοντας κλικ στο κουτάκι "Subtract"), αν και δεν είναι πολύ χρήσιμο στη μέθοδο VSI. Σε καμία περίπτωση ο χειριστής δεν θα πρέπει να πατήσει τα κουμπιά "GENERATE" και "VIEW".



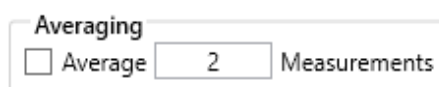
Reference

☐ Subtract

Generate View

Σχήμα 4.12: Reference

Στη συνέχεια, ακολουθεί το πεδίο **Averaging** (Σχήμα 4.13), όπου ο χειριστής μπορεί να ρυθμίσει το σύστημα να συνυπολογίζει, να βγάλει δηλαδή τον μέσο όρο, έναν αριθμό μετρήσεων και να βγάλει ένα τελικό αποτέλεσμα. Τον αριθμό των μετρήσεων που θα συνυπολογιστούν τον ορίζει ο χειριστής αριστερά από το "Measurements".

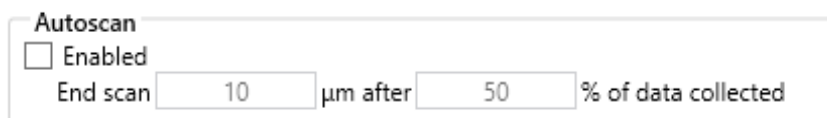


Averaging

☐ Average 2 Measurements

Σχήμα 4.13: Averaging

Έπειτα υπάρχει το πεδίο **Autoscan** (Σχήμα 4.14). Αν ο χειριστής θέλει να ενεργοποιήσει αυτή τη ρύθμιση, πρέπει να κάνει κλικ στο κουτάκι δίπλα από την επιλογή "Enable" και στη συνέχεια να ορίσει δύο τιμές, μία για το μήκος της σάρωσης και μία ποσοστιαία τιμή. Αυτή η ποσοστιαία τιμή αφορά το ποσοστό των δεδομένων που συλλέγονται, το ποσοστό δηλαδή του οπτικού πεδίου στο οποίο αρχίζουν να διαμορφώνονται οι κροσσοί κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Το μήκος της σάρωσης, η άλλη τιμή που πρέπει να ορίσει ο χειριστής, είναι το όριο της απόστασης την οποία θα διανύσει ο σαρωτής κατά τη διάρκεια μίας σάρωσης VSI μετά την εμφάνιση/διαμόρφωση κροσσών.



Autoscan

☐ Enabled

End scan 10 μm after 50 % of data collected

Σχήμα 4.14: Autoscan

Τελευταίο πεδίο το οποίο πρέπει να ρυθμίσει ο χειριστής για τη μέτρηση με μέθοδο VSI είναι το **Processing Method** (Σχήμα 4.15). Για αρχή, εδώ ο χειριστής θα πρέπει να επιλέξει τον τύπο ("Type") της μεθόδου επεξεργασίας, μεταξύ του VSI και VXI.

Η μέθοδος VXI είναι χρήσιμη για εύρος σάρωσης <50μm, με ελάχιστο επίπεδο θορύβου. Αν συγκρίνουμε τις 2 μεθόδους, η μέθοδος VXI δίνει πολύ καλύτερη λεπτομέρεια, έχει δηλαδή χαμηλότερο θόρυβο από μία κανονική μέτρηση VSI. Το κυριότερο μειονέκτημα του VXI είναι ότι καταναλώνει πολύ μεγάλο κομμάτι μνήμης, καθώς συλλέγει και καταγράφει κάθε "κάδρο" (frame) δεδομένων. Στις περιπτώσεις που το εύρος σάρωσης είναι >50μm, ο χειριστής θα πρέπει να επιλέξει τη μέθοδο VSI.

Processing Method

Type VSI Resolution Auto

SNR Threshold 0

Σχήμα 4.15: Processing Method

Οι 2 παράμετροι στο δεξί μέρος του πεδίου μπορούν να οριστούν μόνο στην περίπτωση επιλογής της μέτρησης VSI. Αυτές οι 2 παράμετροι είναι :

- το “Resolution”, η ανάλυση δηλαδή της μέτρησης. Σε αυτή την παράμετρο ο χειριστής θα πρέπει να επιλέξει τον τύπο σάρωσης που θα πραγματοποιήσει το προφιλόμετρο. Η λίστα επιλογών που εμφανίζεται (Σχήμα 4.16) περιλαμβάνει τα εξής : Auto (αυτόματη), Standard (κανονική), High Fidelity (υψηλής πιστότητας/ακρίβειας) και High Speed (υψηλής ταχύτητας).
- και το “SNR Threshold” (Signal to Noise Ratio), που αφορά το επίπεδο “θορύβου” της σάρωσης.

Processing Method

Type VSI Resolution Auto

SNR Threshold

Auto

Standard

High Fidelity

High Speed

Advanced Options

Σχήμα 4.16: Λίστα επιλογών του Resolution

#### 4.3.2 Ορισμός παραμέτρων για τη μέθοδο σάρωσης PSI

Με την επιλογή της μεθόδου σάρωσης PSI, η καρτέλα «Measurement Parameters» έχει τη μορφή του Σχήματος 4.17.

Measurement Setup

Measurement

PSI

Measurement Area

Lateral Sampling

Settings

Auto Loop

Auto Save

Autofocus

Auto Intensity

Prompt For Focus

Prompt For User Data

Prompt Message

More Settings

Measurement

Advanced

Measurement Parameters

Modulation Threshold

5 %

Averaging

☐ Average 2 Measurements

Illumination

☒ Use Default

Green

Reference

☐ Subtract

Generate View

Vibration Detection

☐ On Threshold: 5 %

Check Intensity

☐ Reduce Saturation

Phase Unwrapping

☒ Standard

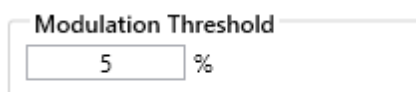
☐ Planar (only for very flat surfaces)

Advanced Options

Σχήμα 4.17: Measurement Parameters PSI

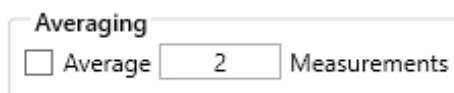


Η πρώτη παράμετρος την οποία θα πρέπει να ορίσει ο χρήστης, βρίσκεται στο πεδίο **Modulation Threshold** (Σχήμα 4.18). Πρόκειται για το ποσοστό μέσω του οποίου καθορίζετε η αποδεκτή αναλογία σήματος-θορύβου. Η αναλογία αυτή ορίζει το αν ένα εικονοστοιχείο (pixel) θεωρείται έγκυρο ή όχι. Στην ανάλυση λαμβάνονται υπόψη μόνο τα έγκυρα εικονοστοιχεία. Για να οριστεί σωστά αυτή η παράμετρος χρειάζεται λίγη προσοχή, καθώς αν μειωθεί ή αυξηθεί πολύ τα αποτελέσματα μπορεί να μην είναι σωστά.



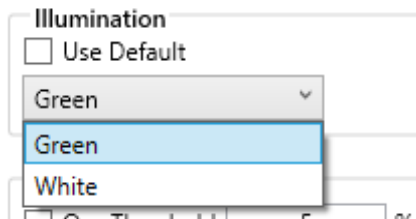
Σχήμα 4.18: Modulation Threshold

Το πεδίο δεξιά από το Modulation Threshold ονομάζεται **Averaging** (Σχήμα 4.19), και μέσω αυτού του πεδίου δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να ρυθμίσει το σύστημα να βγάλει ένα τελικό αποτέλεσμα συνυπολογίζοντας ένα πλήθος μετρήσεων. Το πλήθος αυτό το ορίζει ο χειριστής.



Σχήμα 4.19: Averaging

Ακολουθεί το πεδίο **Illumination** (Σχήμα 4.20) στο οποίο επιλέγεται το είδος φωτισμού του φακού. Στην περίπτωση σάρωσης με τη μέθοδο PSI, πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται το πράσινο φως (επιλογή “Green”).



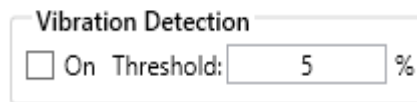
Σχήμα 4.20: Illumination

Στο πεδίο με το όνομα **Reference** ο χρήστης κάνει κλικ στο κουτάκι “Subtract”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.21, ώστε να αφαιρεθούν από την τελική μέτρηση τα σφάλματα των οπτικών του συστήματος που έχουν επιλεγεί. Ο χρήστης θα πρέπει να είναι προσεκτικός και να μην πατήσει τα κουμπιά “GENERATE” και “VIEW”.



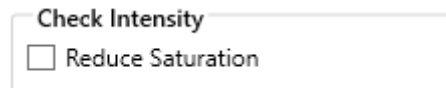
Σχήμα 4.21: Reference

Μια αρκετά σημαντική παράμετρος είναι η ανίχνευση δονήσεων ή κραδασμών, στο πεδίο **Vibration Detection** (Σχήμα 4.22). Αυτή η παράμετρος αναφέρεται στη δυνατότητα του προφιλόμετρου να ανιχνεύει και να αντιμετωπίζει δονήσεις και κραδασμούς κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Οι δονήσεις μπορεί να προκαλέσουν παραμορφώσεις στα δεδομένα της μέτρησης, επηρεάζοντας τα αποτελέσματα και την ακρίβειά τους. Ο χειριστής ορίζει το ποσοστιαίο όριο στο οποίο το σύστημα ανιχνεύει δονήσεις/κραδασμούς.



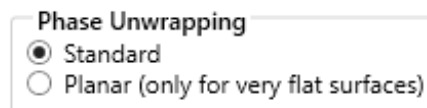
Σχήμα 4.22: Vibration Detection

Το πεδίο που ακολουθεί ονομάζεται **Check Intensity** (Σχήμα 4.23). Επιλέγοντας το “Reduce Saturation”, το σύστημα ρυθμίζεται να μειώνει το επίπεδο έντασης, όταν αυτό γίνεται πολύ υψηλό. Όταν η ένταση είναι σε πολύ υψηλό επίπεδο, η μέτρηση που πραγματοποιείται με PSI δεν μπορεί να είναι ακριβής.



Σχήμα 4.23: Check Intensity

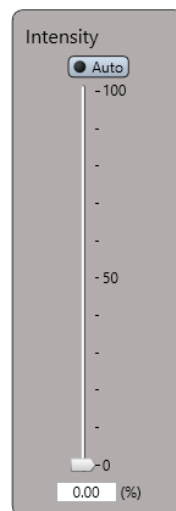
Το τελευταίο πεδίο που πρέπει να ορίσει ο χειριστής είναι το **Phase Unwrapping** (Σχήμα 4.24). Είναι και αυτή μία παράμετρος η οποία συστήνεται να ρυθμιστεί ώστε να μην υπάρχουν ασάφειες και προβλήματα στην ερμηνεία των δεδομένων. Για τις περισσότερες μετρήσεις προτείνεται να ορίζεται η επιλογή “Standard”, στις περιπτώσεις όμως όπου η επιφάνεια είναι πολύ επίπεδη και λεία ορίζεται η επιλογή “Planar”.



Σχήμα 4.24: Phase Unwrapping

#### 4.4 Διαδικασία εστίασης και αφαίρεσης κλίσης της τράπεζας

Αφού ο χρήστης επιλέξει τη μέθοδο σάρωσης που επιθυμεί και θεωρεί πιο κατάλληλη, και αφού ορίσει τις αντίστοιχες παραμέτρους, ακολουθεί η διαδικασία εστίασης της επιφάνειας. Αρχικά ο χειριστής θα κάνει κλικ στην επιλογή “Auto”, στο παράθυρο «Intensity» (Σχήμα 4.25), το οποίο βρίσκεται στο δεξί και κάτω μέρος στο περιβάλλον του προγράμματος. Σε αυτό το παράθυρο ρυθμίζεται η ένταση του φωτός που πέφτει στην επιφάνεια του τεμαχίου, μια ρύθμιση απαραίτητη για να διεξαχθεί σωστά η διαδικασία της εστίασης.



Σχήμα 4.25: Intensity

Στη συνέχεια, με τη χρήση της μανιβέλας [1] του Σχήματος 3.4 και προσέχοντας πάντα να μην χτυπηθούν οι φακοί, ο χρήστης θα πρέπει να μετακινήσει την τράπεζα μέχρι η επιφάνεια του τεμαχίου να βρίσκεται μερικά χιλιοστά μακριά από τον φακό. Όσο μετακινείται η τράπεζα ο χειριστής θα πρέπει παράλληλα να παρακολουθεί το κεντρικό παράθυρο του προγράμματος (Σχήμα 4.3), αλλά και το «Intensity». Αν παρατηρήσει είτε ότι τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας γίνονται πιο ξεκάθαρα (κεντρικό παράθυρο), είτε ότι η φωτεινότητα μειώνεται και φτάνει στο ελάχιστο (παράθυρο «Intensity»), σημαίνει ότι βρισκόμαστε πολύ κοντά στο σημείο εστίασης. Τότε ο χειριστής θα πρέπει με αργές κινήσεις να συνεχίσει να μετακινεί την τράπεζα, και κοιτώντας το κεντρικό παράθυρο ψάχνει να βρει το σημείο στο οποίο εμφανίζονται κροσσοί.

Στην περίπτωση που η ένδειξη στο παράθυρο «Intensity» αυξάνεται, σημαίνει ότι έχουμε ξεπεράσει το σημείο εστίασης και θα πρέπει να προσαρμοστεί ξανά η θέση της τράπεζας και κατ' επέκταση του τεμαχίου, μέχρι να εμφανιστούν κροσσοί σχετικά ομοιόμορφα σε όλη την οθόνη.

Αφού έχει βρεθεί πλέον το σημείο εστίασης, ο χειριστής μπορεί να απενεργοποιήσει τη φωτεινότητα επιλέγοντας ξανά το «Auto» και να μετακινήσει την τράπεζα στον Χ και Υ άξονα με σκοπό κάτω από το φακό να βρίσκεται το τμήμα της επιφάνειας το οποίο θέλει να εξετάσει. Αυτό μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους:

- είτε χειροκίνητα, με τις μανιβέλες [4] και [5] (Σχήμα 3.4)
- είτε μέσω του προγράμματος, κάνοντας διπλό κλικ στην κεντρική οθόνη του προγράμματος (Σχήμα 4.3)

Η τράπεζα ή το τεμάχιο που επιθυμεί ο χρήστης να μετρήσει, πιθανότατα να παρουσιάζει μια κλίση σε σχέση με την κεφαλή του προφιλόμετρου. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί σωστά η μέτρηση, θα πρέπει να αφαιρεθεί αυτή η κλίση, καθώς ανάλογα με τη μέθοδο σάρωσης θα πρέπει να ληφθεί και ο αντίστοιχος αριθμός κροσσών. Για τη μέθοδο σάρωσης VSI, οι κροσσοί που απαιτούνται είναι 0-15, ενώ για τη μέθοδο PSI απαιτούνται λιγότεροι από 5 κροσσοί.

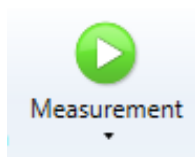
Η κλίση συνήθως είναι πιο ορατή σε υψηλότερη μεγέθυνση, επομένως αν ο φακός 20× δεν είναι ήδη επιλεγμένος, ο χρήστης θα πρέπει να τον επιλέξει τόσο από το «Measurement Setup» (Σχήμα 4.3), αλλά και χειροκίνητα πάνω στο προφιλόμετρο.

Η αφαίρεση της κλίσης αυτής μπορεί να πραγματοποιηθεί και χειροκίνητα. Με τη χρήση της μανιβέλας [3] του Σχήματος 3.4, γίνεται πρώτα ο παραλληλισμός της επιφάνειας ως προς τους άξονες Χ και Ζ. Αυτό συμβαίνει όταν οι κροσσοί συμβολής έχουν απλωθεί στην οθόνη και είναι παράλληλοι μόνο στον αντίστοιχο άξονα (άξονας Χ). Συνήθως οι κροσσοί είναι μαζεμένοι σε μια πλευρά της οθόνης. Ακολουθεί ο παραλληλισμός της επιφάνειας του τεμαχίου ως προς τους άξονες Υ και Ζ, ο οποίος πραγματοποιείται μέσω της μανιβέλας [2] του Σχήματος 3.4. Όταν πραγματοποιηθεί ο παραλληλισμός της επιφάνειας ως προς και τους δύο άξονες (Χ και Υ), οι κροσσοί συμβολής θα έχουν απλωθεί ομοιόμορφα σε όλη την οθόνη και η κατεύθυνσή τους θα είναι μόνο κάθετη και οριζόντια (ΔΕΝ θα υπάρχουν πλάγιες κατευθύνσεις).

Διαφορετικά, ένας γρήγορος τρόπος να επιτευχθεί η παραλληλότητα της τράπεζας είναι με τη χρήση ηλεκτρονικού αλφαδιού. Ο τρόπος αυτός ωστόσο εξασφαλίζει ότι η τράπεζα δεν παρουσιάζει κάποια κλίση, αν όμως το τεμάχιο που θα τοποθετηθεί πάνω της είναι στραβό, θα πρέπει να ακολουθήσουμε την διαδικασία που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Τέλος, αφού ο χρήστης έχει ρυθμίσει όλα τα παραπάνω, θα πρέπει να προσαρμόσει την φωτεινότητα στην επιφάνεια που πρόκειται να μετρηθεί. Στο παράθυρο «Intensity» (Σχήμα 4.25) είτε θα κάνει κλικ στην ένδειξη “Auto”, η οποία προσαρμόζει τη φωτεινότητα αυτόματα, είτε θα την προσαρμόσει χειροκίνητα μετακινώντας την μπάρα. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να έχουμε τη φωτεινότερη δυνατή εικόνα της επιφάνειας. Στην περίπτωση που εμφανίζονται κόκκινες περιοχές, σημαίνει ότι η ένταση της φωτεινότητας είναι υψηλή και ο χειριστής θα πρέπει να την χαμηλώσει μέχρι η κόκκινες περιοχές να είναι λευκές. Η αυτόματη προσαρμογή της φωτεινότητας (επιλογή “Auto”), ΔΕΝ θα πρέπει να είναι ενεργοποιημένη κατά τη διάρκεια της σάρωσης/μέτρησης.

Με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνονται όλες οι ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν και μπορεί πλέον να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της επιφάνειας. Με το πάτημα του εικονιδίου «Measurement» (Σχήμα 4.26), που βρίσκεται στο πάνω αριστερό μέρος της οθόνης (στη γραμμή εργαλείων), ξεκινάει η διαδικασία σάρωσης της επιφάνειας.

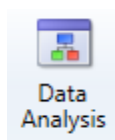


Σχήμα 4.26: Measurement

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της εστίασης και κυρίως κατά τη διάρκεια της μέτρησης, δεν θα πρέπει να υπάρχει καμία επαφή τόσο με το ίδιο το προφιλόμετρο αλλά ούτε και με τον πάγκο στον οποίο βρίσκεται. Το προφιλόμετρο είναι πολύ ευαίσθητο σε οποιοδήποτε είδος μεταβολής της σταθερής του κατάστασης, καθώς οι μετρήσεις που εκτελεί είναι της τάξεως των νανομέτρων. Έτσι ακόμα και ένα άγγιγμα στον πάγκο μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση στα αποτελέσματα της μέτρησης.

#### 4.5 Εξαγωγή, ανάλυση και ρύθμιση δεδομένων

Με την ολοκλήρωση της μέτρησης, στην οθόνη θα εμφανιστεί το παράθυρο ανάλυσης δεδομένων. Σε αυτό το παράθυρο, ο χρήστης μπορεί να μεταβεί ανά πάσα στιγμή κάνοντας κλικ στην επιλογή «Data Analysis» της γραμμής εργαλείων (Σχήμα 4.27).



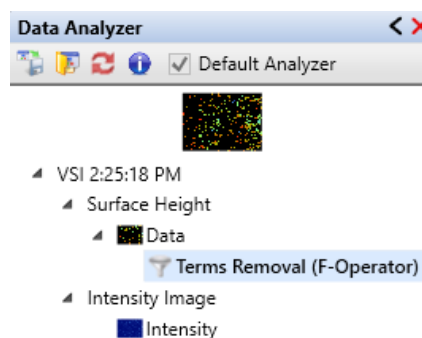
Σχήμα 4.27: Data Analysis

Στην αριστερή μεριά του παραθύρου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το είδος απεικόνισης της επιφάνειας που επιθυμεί (2D, 3D ή CD) (Σχήμα 4.28). Προεπιλεγμένη είναι η απεικόνιση δύο διαστάσεων (2D).



Σχήμα 4.28: Επιλογές απεικόνισης της επιφάνειας

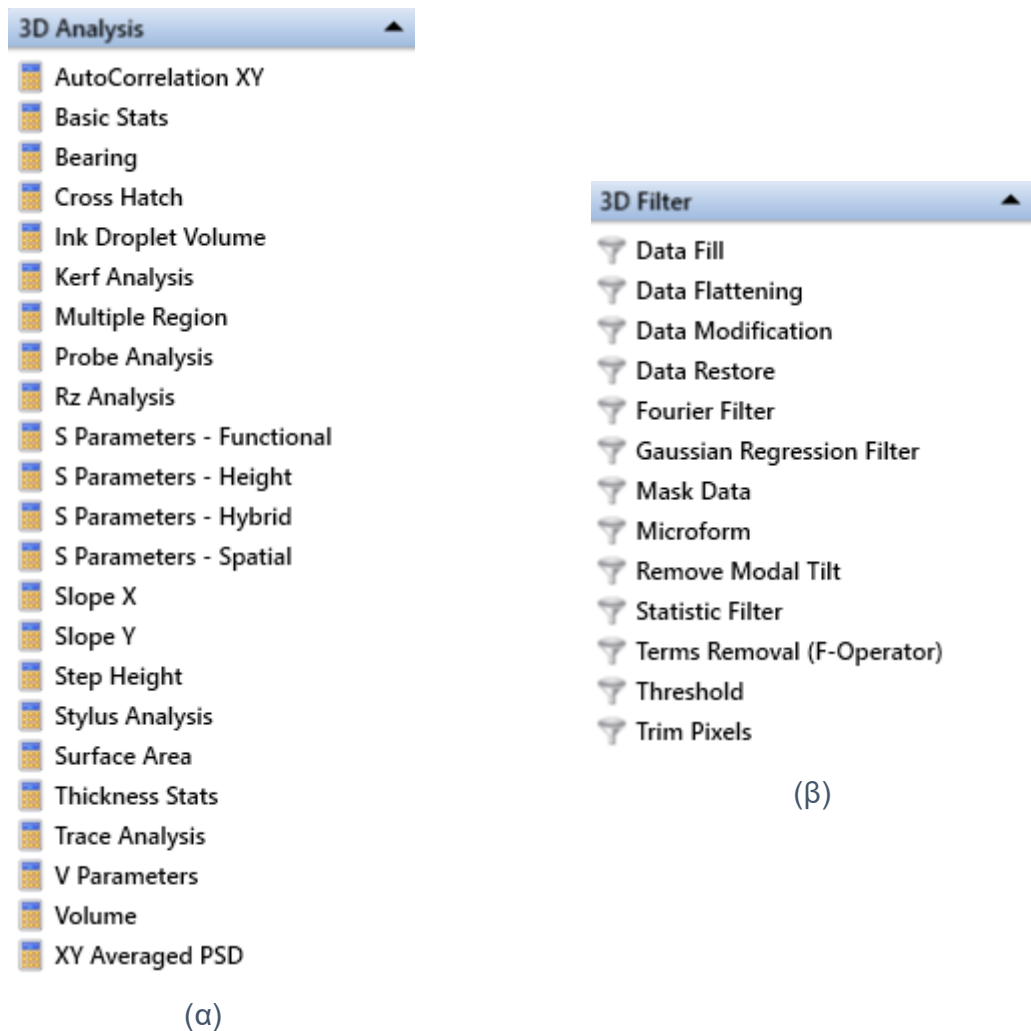
Στα δεξιά του «Data Analysis», υπάρχει ένα άλλο παράθυρο με το όνομα «Data Analyzer» (Σχήμα 4.29). Στο παράθυρο αυτό, φαίνονται όλα τα φίλτρα καθώς και οι επιλογές ανάλυσης που είναι εφαρμοσμένες.



Σχήμα 4.29: Data Analyzer

Πατώντας πάνω στην επιλογή “Data”, εμφανίζονται όλες οι διαθέσιμες επιλογές στο παράθυρο «Analysis Toolbox», το οποίο βρίσκεται ακριβώς κάτω από το «Data Analyzer». Αυτό το παράθυρο αποτελείται από δύο λίστες επιλογών, “3D Analysis” και “3D Filter” (Σχήμα 4.30). Από την πρώτη λίστα (Σχήμα 4.30.α), ο χρήστης επιλέγει το είδος ανάλυσης που επιθυμεί να εφαρμοστεί στα δεδομένα της σάρωσης. Για να επιλεγεί μια ανάλυση, ο χρήστης θα πρέπει να κάνει απλά κλικ πάνω της και η εφαρμογή της ανάλυσης αυτής πραγματοποιείται αυτόματα από το πρόγραμμα. Μια μικρή εξήγηση για το τι κάνει η κάθε ανάλυση, ο χρήστης θα πρέπει να ανατρέξει στη γραμμή εργαλείων, στην επιλογή “Help”.

Στη λίστα επιλογών “3D Filter” (Σχήμα 4.30.β), υπάρχουν μερικά φίλτρα τα οποία χρησιμοποιούνται πιο συχνά. Κάνοντας κλικ πάνω στο φίλτρο που επιθυμεί ο χειριστής, τότε αυτό θα προστεθεί στο παράθυρο «Data Analyzer» που αναφέρθηκε παραπάνω. Αν ο χειριστής κάνει δεξί κλικ στο όνομα του φίλτρου που βρίσκεται στο «Data Analyzer», θα έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί τις ρυθμίσεις του φίλτρου αυτού. Ο χειριστής θα πρέπει να είναι προσεκτικός όταν επιλέγει φίλτρα και είδη ανάλυσης, καθώς η σειρά με την οποία θα τα προσθέσει θα είναι και η σειρά με την οποία θα εφαρμοστούν και θα υπολογιστούν από το πρόγραμμα.



Σχήμα 4.30: Analysis Toolbox

Τέσσερα από τα φίλτρα χρησιμοποιούνται πιο συχνά από τα υπόλοιπα, γι' αυτό και θα γίνει μια μικρή ανάλυση για κάθε ένα από αυτά.

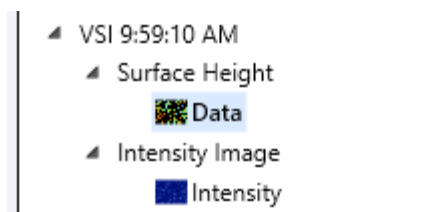
- **Data Fill (Συμπλήρωση Δεδομένων):** το φίλτρο αυτό συμπληρώνει τις περιοχές στις οποίες υπάρχουν κακής ποιότητας εικονοστοιχεία (pixel). Αντικαθιστά δηλαδή τα εικονοστοιχεία αυτά είτε με High Data (τιμή 50% υψηλότερη από το υψηλότερο σημείο του συνόλου δεδομένων), είτε με Low Data (τιμή 50% χαμηλότερη από το χαμηλότερο σημείο του συνόλου δεδομένων), είτε με μία τιμή την οποία ορίζει ο χρήστης.
- **Data Restore (Αποκατάσταση Δεδομένων):** αυτό το φίλτρο είναι παρόμοιο με το προηγούμενο, συμπληρώνει και αυτό περιοχές όπου τα pixel είναι κακής ποιότητας. Η διαφορά είναι ότι σε αυτό το φίλτρο η αντικατάσταση των εικονοστοιχείων γίνεται χρησιμοποιώντας δεδομένα ύψους που περιβάλλουν την περιοχή “κακής ποιότητας”. Επιπλέον, οι περιοχές που μπορεί να συμπληρώσει αυτό το φίλτρο είναι μικρότερες συγκριτικά με εκείνες του Data Fill.
- **Mask Data (Απόκρυψη Δεδομένων):** το φίλτρο αυτό αποκρύπτει και εξαιρεί από την ανάλυση περιοχές οι οποίες καθορίζονται από τον χρήστη. Η εφαρμογή του έχει αρκετές χρήσεις, όπως η εξαίρεση κάποιας “κακής περιοχής” από την επιφάνεια του τεμαχίου, η απομόνωση μιας περιοχής της επιφάνειας του

τεμαχίου η οποία θα χρησιμοποιηθεί για επαναλαμβανόμενες αναλύσεις ή η προβολή μόνο των δεδομένων που βρίσκονται εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών.

- **Analysis Mask:** επιτρέπει στον χρήστη να βλέπει και να αναλύει συγκεκριμένα τμήματα του συνόλου των δεδομένων.
  - **Detector Mask:** εμποδίζει την εμφάνιση στοιχείων pixel κατά τη διάρκεια της μέτρησης.
  - **Terms Mask:** η απόκρυψη ενός είδους ανάλυση που λειτουργεί σαν φίλτρο.
- **Terms removal (F-operator):** είναι το φίλτρο που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση κλίσεων και καμπυλοτήτων.
    - **Tilt Only (Plane Fit):** με τη ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται η αφαίρεση της γραμμικής κλίσης από τις μετρήσεις της επιφάνειας. Η ρύθμιση αυτού του φίλτρου εφαρμόζεται σχεδόν σε κάθε μέτρηση (λήψη καινούριων δεδομένων), καθώς τα δοκίμια θα έχουν συνήθως κάποια μικρή κλίση.
    - **Modal Tilt Only :** συγκρίνοντας κάθε σημείο με το γειτονικό του, υπολογίζεται η κλίση που συναντάται περισσότερο (αλλιώς η πιο κοινή) σε όλη τη μέτρηση. Ο υπολογισμός και η αφαίρεση της κλίσης πραγματοποιείται μέσω αυτής της ρύθμισης του φίλτρου και με αυτόν τον τρόπο μπορεί ο χειριστής να προσαρμόσει τα αποτελέσματα της μέτρησης.
    - **Mask :** για να εφαρμοστεί αυτή η ρύθμιση, ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει το κουτάκι που υπάρχει αριστερά από την επιλογή “Use Terms Mask”. Είναι αρκετά χρήσιμο φίλτρο στις περιπτώσεις που υπάρχουν μεγάλα “σκαλοπάτια” ή όταν ένα τμήμα της επιφάνειας είναι επίπεδο.

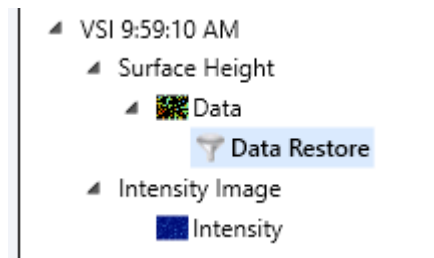
Συνήθως μετά από κάθε μέτρηση ακολουθείτε μια συγκεκριμένη διαδικασία προτού πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε ανάλυση και επεξεργασία στα δεδομένα. Η διαδικασία αυτή είναι η εξής :

Αρχικά, στην καρτέλα “Data Analyzer”, γίνεται διαγραφή όλων των επιλογών εκτός του “Surface Height” και του “Data” (Σχήμα 4.31) και στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των φίλτρων με την σειρά με την οποία θέλουμε να εφαρμοστούν.




Σχήμα 4.31: Data Analyzer μετά την

Το φίλτρο που επιλέγεται συνήθως από το “3D Filter”, είναι το “Data Restore” το οποίο εμφανίζεται κάτω από το “Data” σαν υποκατηγορία (Σχήμα 4.32). Κάνοντας δεξί κλικ πάνω στο “Data Restore” και επιλέγοντας το “Edit Settings”, ανοίγει ένα καινούριο παράθυρο μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις για αυτό το φίλτρο.



Σχήμα 4.32: Εισαγωγή του Data Restore στο Data Analyzer

Από τη λίστα “3D Analysis”, η επιλογή που εφαρμόζεται πιο συχνά είναι το “Basic Stats” (Σχήμα 4.33). Πρόκειται στην ουσία για ένα πίνακάκι στο οποίο υπάρχουν μαζεμένα τα αποτελέσματα της τραχυμέτρησης της επιφάνειας.

Analytical Results 		
Label	Value	Units
Average	-10.99	μm
Data Points	306913,984	
Percent Data Points	99.91	%
Ra	10.99	μm
Rp	-1.182	μm
Rq	11.19	μm
Rt	23.24	μm
Rv	-24.422	μm

Σχήμα 4.33: Basic Stats



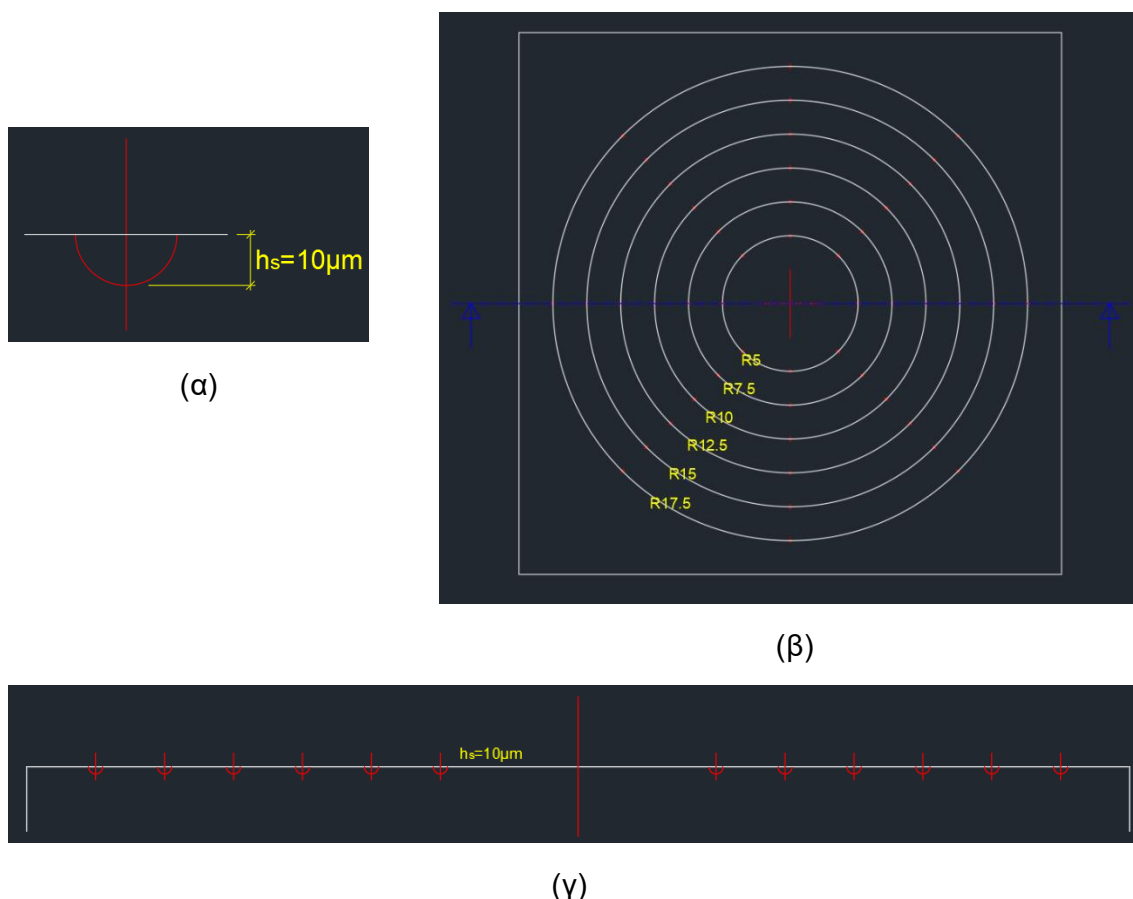
## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Ολόκληρη η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης.

### 5.1 Σχεδιασμός πειραμάτων

Το πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας ήταν η δημιουργία των σχεδίων τα οποία επρόκειτο να χαραχθούν στη συνέχεια. Για τον σχεδιασμό αυτό, έγινε χρήση ενός προγράμματος τρισδιάστατης σχεδίασης CAD. Στην συγκεκριμένη εργασία το σχεδιαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το SolidWorks.

Τα τελικά σχέδια τριών διαστάσεων δημιουργήθηκαν σύμφωνα με την καθοδήγηση που υπήρχε από το Πανεπιστήμιο Δυτικής Απικής. Συμπληρωματικά, υπήρξαν και σχέδια δύο διαστάσεων (τρεις όψεις), ώστε να είναι πιο κατανοητό ποια θα είναι η τελική μορφή των δοκιμίων. Στο Σχήμα 5.1.α, παρουσιάζεται η πλάγια όψη της διαμόρφωσης, η οποία βοηθάει στον προσδιορισμό της γεωμετρίας της διαμόρφωσης αυτής. Στα δύο επόμενα σχήματα (Σχήμα 5.1, β και γ), παρουσιάζεται η διάταξη των διαμορφώσεων αυτών, το μοτίβο δηλαδή κατά το οποίο θα τοποθετηθούν οι κυκλικές διατάξεις και θα διαμορφωθεί τελικά το σχέδιο το οποίο θα χαραχθεί στα δοκίμια.



Σχήμα 5.1: Σχέδια δύο διαστάσεων

Σύμφωνα με τα παραπάνω σχέδια λοιπόν, και χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks που αναφέρθηκε προηγουμένως, έγιναν τα τρισδιάστατα σχέδια. Στο Σχήμα 5.2.α παρουσιάζεται τρισδιάστατα μία μεμονωμένη διαμόρφωση, ενώ στα άλλα 2 σχήματα (Σχήμα 5.2, β και γ) φαίνεται το σύνολο των διαμορφώσεων, διατεταγμένες με τρόπο σύμφωνο με εκείνον που υποδεικνύεται από το Πανεπιστήμιο Δυτικής Απικής. Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν, 2 διαφορετικές διατάξεις των

διαμορφώσεων. Μία με 8 ακτίνες 6 διαμορφώσεων η κάθε μία, δηλαδή συνολικά 48 διαμορφώσεις (Σχήμα 5.2.β) και μία με 16 ακτίνες 6 διαμορφώσεων, 96 διαμορφώσεις στο σύνολο (Σχήμα 5.2.γ).



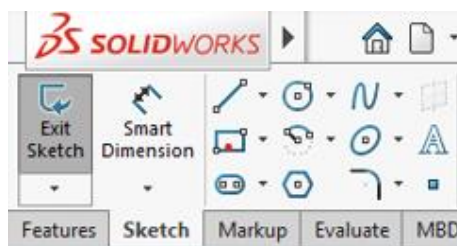
(α)



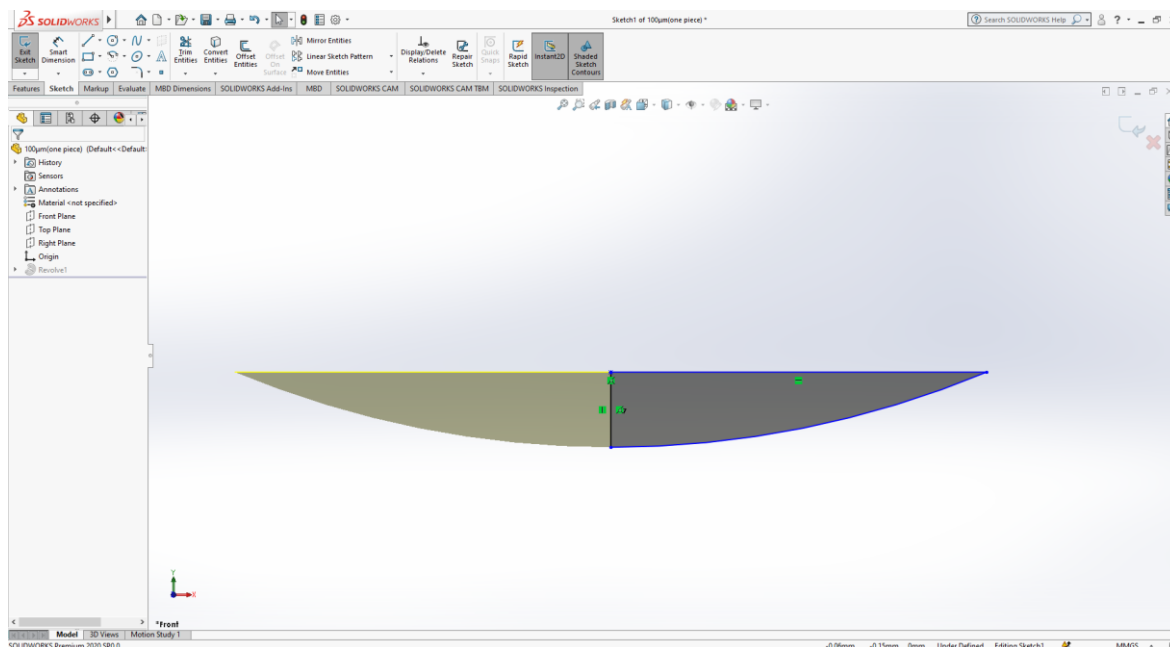
Σχήμα 5.2: Σχέδια τριών διαστάσεων από το SolidWorks

Η διαδικασία τρισδιάστατου σχεδιασμού πραγματοποιήθηκε 2 φορές, καθώς έχουν ζητηθεί δύο διαφορετικά μεγέθη διαμορφώσεων. Τα Σχήματα που έχουν παρατεθεί σε αυτό το κεφάλαιο αφορούν τις διαμορφώσεις με το μικρότερο μέγεθος, δηλαδή τις διαμορφώσεις με βάθος 10μm και επάνω κυκλική διατομή διαμέτρου 100μm. Αντίστοιχα, οι διαστάσεις των μεγαλύτερων διαμορφώσεων είναι 20μm βάθος και 200μm διάμετρο της επάνω κυκλικής διατομής. Η διάταξη των διαμορφώσεων και στις δύο περιπτώσεις μεγέθους είναι παρόμοια.

Ο σχεδιασμός ξεκίνησε δημιουργώντας την πλάγια διατομή της διαμόρφωσης. Στο περιβάλλον σχεδίασης SolidWorks, στο πάνω αριστερά μέρος της οθόνης επιλέγεται η καρτέλα Sketch (Σχήμα 5.3). Εκεί σχεδιάζεται το προφίλ της διαμόρφωσης όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4 παρακάτω.



Σχήμα 5.3: Καρτέλα Sketch



Σχήμα 5.4: Δημιουργία Sketch

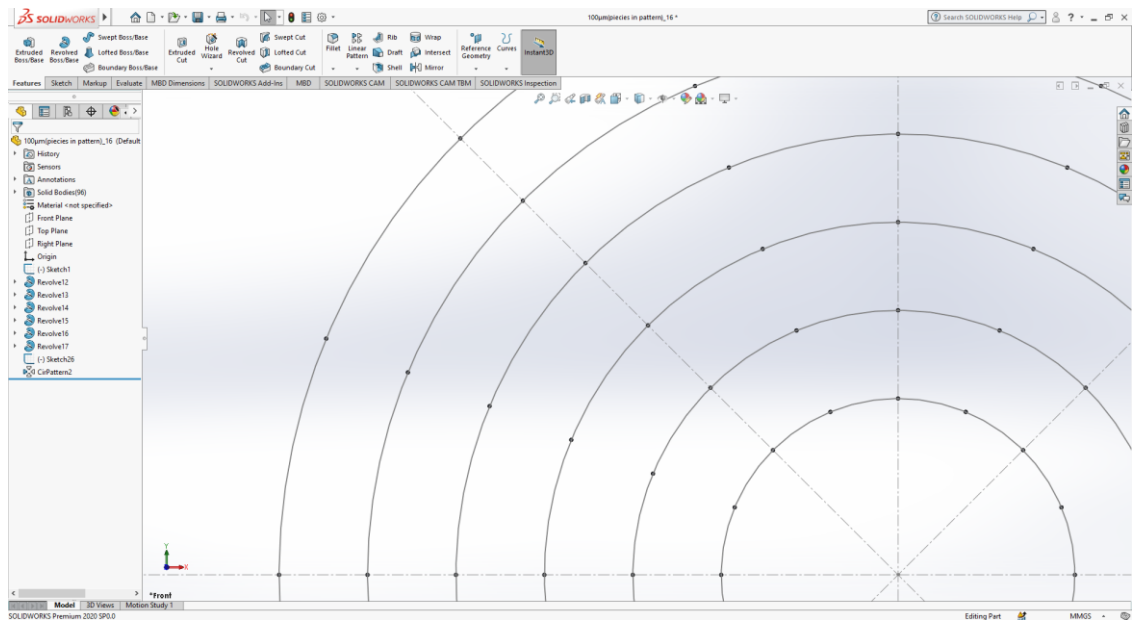
Αφού ολοκληρωθεί αυτό το βήμα, επιλέγεται το κουμπί “Exit Sketch” (Σχήμα 5.3) και από την καρτέλα Sketch το πρόγραμμα επιστρέφει στην αρχική οθόνη. Στη συνέχεια, από την καρτέλα Features της γραμμής εργαλείων, επιλέγεται η λειτουργία Revolved Boss/Base (Σχήμα 5.5) και ορίζοντας άξονα περιστροφής δημιουργείται μεμονωμένα η διαμόρφωση του Σχήματος 5.2.α.



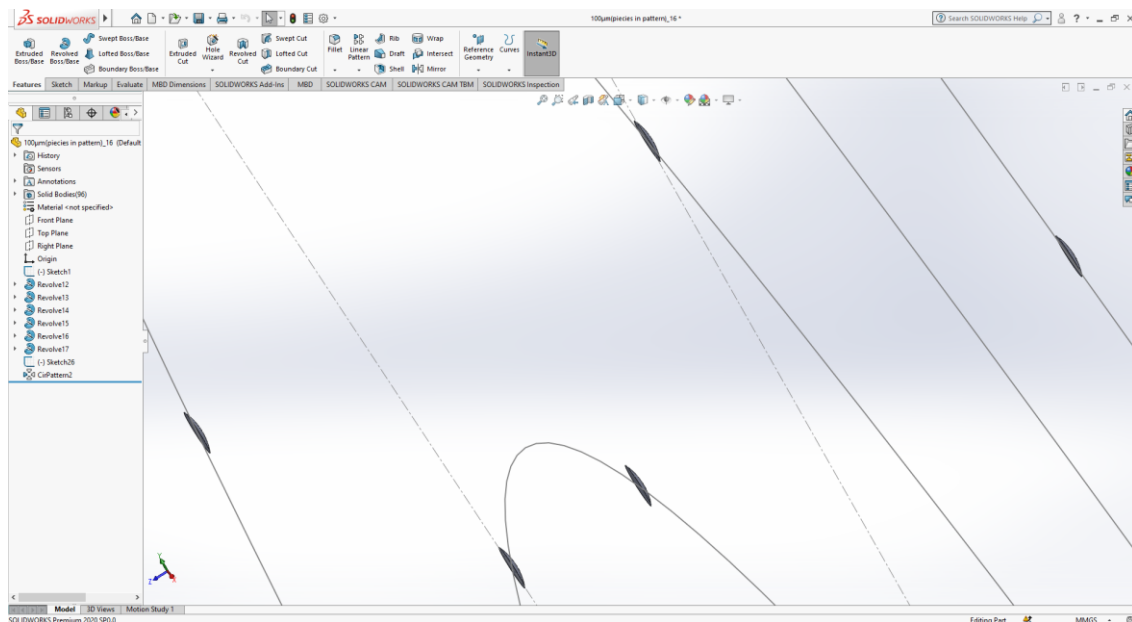
Σχήμα 5.5: Λειτουργία Revolve

Το επόμενο και τελευταίο βήμα για να ολοκληρωθεί το σχέδιο που στη συνέχεια χαράχθηκε, είναι να τοποθετηθούν οι διαμορφώσεις στη διάταξη που έχει υποδειχθεί. Αυτό θα πραγματοποιηθεί σε 2 στάδια, πρώτα θα δημιουργηθεί μια γραμμική διάταξη 6 διαμορφώσεων επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων τη λειτουργία **Linear Pattern**, και έπειτα θα δημιουργηθεί η τελική κυκλική διάταξη χρησιμοποιώντας τη λειτουργία **Circular Pattern**. Παρακάτω παρατίθεται μέρος του τελικού σχεδίου (πιο κοντινή εικόνα) από 2 διαφορετικές οπτικές γωνίες ώστε να είναι πιο κατανοητό (Σχήμα 5.6).

Αφού λοιπόν πραγματοποιήθηκε η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω και υπάρχουν ολοκληρωμένα πλέον τα τελικά σχέδια, έγινε αποθήκευση των αρχείων. Τα αρχεία επιλέχθηκε να αποθηκευτούν ως αρχεία τύπου .stl (συντομογραφία της λέξης StereoLithography ή τα αρχικά των λέξεων “Standard Triangle Language”). Τα αρχεία αυτού του τύπου μετατρέπουν το αντικείμενο σε πλέγμα τριγώνων, αναπαριστούν δηλαδή μόνο τη γεωμετρία της επιφάνεια του τρισδιάστατου αντικειμένου, χωρίς να περιλαμβάνεται το χρώμα, η υφή ή άλλα κοινά χαρακτηριστικά του αντικειμένου.



(α)



(β)

Σχήμα 5.6: Μέρος του τελικού σχεδίου στο περιβάλλον SolidWorks

## 5.2 Εκτέλεση χάραξης

Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η εκτέλεση της χάραξης, θα πρέπει να προηγηθεί μια διαδικασία προετοιμασίας και τροποποίησης του αρχείου .stl προτού περαστεί στη μηχανή για την τελική κατεργασία. Για τη διαδικασία αυτή, έγινε χρήση δύο διαφορετικών προγραμμάτων το LpsWin και το L4D Viewer. Η τελική κατεργασία και οι ρυθμίσεις της μηχανής έγιναν μέσω ενός τρίτου προγράμματος με το όνομα LaserSoft 3D. Και τα τρία αυτά προγράμματα είναι εγκατεστημένα στην εργαλειομηχανή Lasertec 40 (Σχήμα 3.1) του εργαστηρίου.

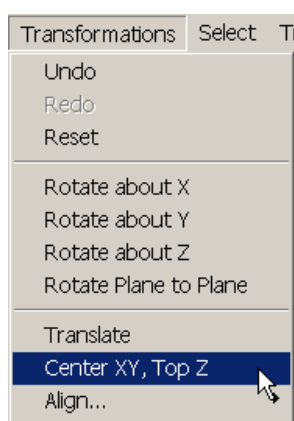
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει μικρή αναφορά στον τρόπο που πραγματοποιήθηκε η χάραξη, καθώς λεπτομερής ανάλυση ολόκληρης της διαδικασίας έχει σε προγενέστερες διπλωματικές εργασίες, με πιο πρόσφατη αυτή του

Κωνσταντίνου Τσακανέλη με τίτλο «Χάραξη με Laser μεταλλικών δοκιμών προσομοίωσης γεωλογικών δομών».

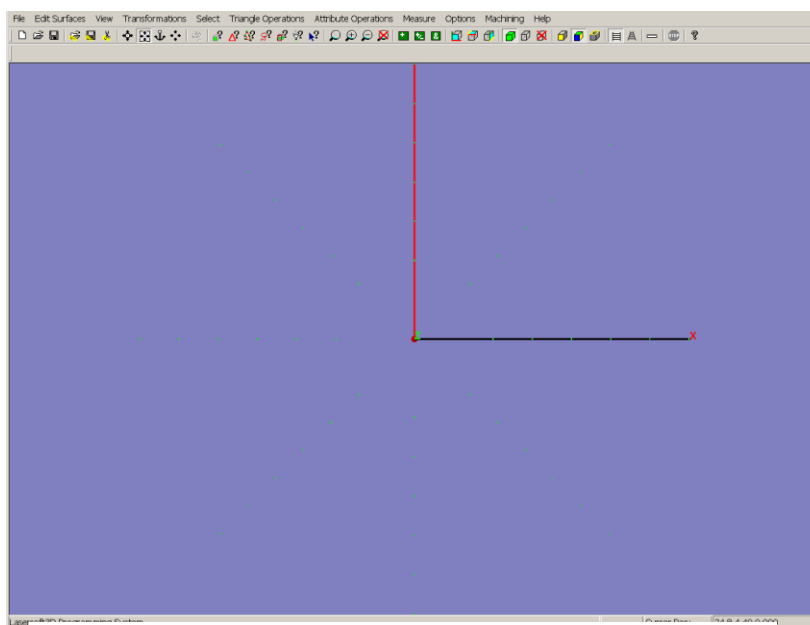
### 5.2.1 LpsWin

Η χρήση του προγράμματος LpsWin είναι απαραίτητη, καθώς μέσω αυτού δημιουργείται η στρωματοποίηση του αντικειμένου. Με το άνοιγμα του αρχείου .stl, το πρόγραμμα LpsWin δημιουργεί αυτόματα ένα αρχείο τύπου .trf, το οποίο εκτός από τη θέση των σημείων των τριγώνων αποθηκεύει και πληροφορίες που αφορούν τον τρόπο εκτέλεσης της κατεργασίας.

Αφού εισάχθηκε λοιπόν το αρχείο τύπου STL στο πρόγραμμα και επιβεβαιώθηκε ότι οι διαστάσεις του σχεδίου είναι αντίστοιχες με εκείνες που είχαν καθοριστεί αρχικά από το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks (Ctrl + F), επιλέχθηκε η εντολή “Center XY, Top Z” (Σχήμα 5.7), έτσι ώστε το κέντρο του σχεδίου να συμπίπτει με την αρχή των αξόνων X και Y και το ανώτατο σημείο του να είναι το σημείο μηδέν του άξονα Z (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.7: Επιλογή “Center XY, Top Z”



Σχήμα 5.8: Σημείο μηδέν πάνω στο σχέδιο

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των τριγώνων, αν δηλαδή υπήρχαν ίδια σημεία, ίδιοι γειτονικοί κόμβοι και άλλα όμοια τρίγωνα, και ακολούθησε η αφαίρεσή τους καθώς και η αφαίρεση των ελαττωματικών τριγώνων.

Έπειτα, ακολούθησε η σημαντικότερη διαδικασία και ο κυριότερος λόγος χρήσης του συγκεκριμένου προγράμματος, η ρύθμιση των παραμέτρων που καθορίζουν την κατεργασία της χάραξης. Από την καρτέλα “Options” της γραμμής εργαλείων λοιπόν, επιλέχθηκε η επιλογή “Caving Options” και στο παράθυρο που άνοιξε έγιναν οι απαραίτητες ρυθμίσεις (Σχήμα 5.9).

Σχήμα 5.9: Caving Options

Οι παράμετροι που ορίστηκαν ήταν:

Στο πεδίο **Slices**:

- Top Z [mm] : αυτή η παράμετρος ορίζει το σημείο από το οποίο ξεκινάει η χάραξη του πρώτου στρώματος.
- Bottom Z [mm] : ορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα πατώντας πάνω στο αγγλικό ερωτηματικό “?” και αφορά το τελευταίο στρώμα που προκύπτει από την στρωματοποίηση.
- Thickness [mm] : είναι η παράμετρος στην οποία καθορίζεται το πάχος του κάθε στρώματος που θα αφαιρεί το laser.

Στο πεδίο **Border Cutting**:

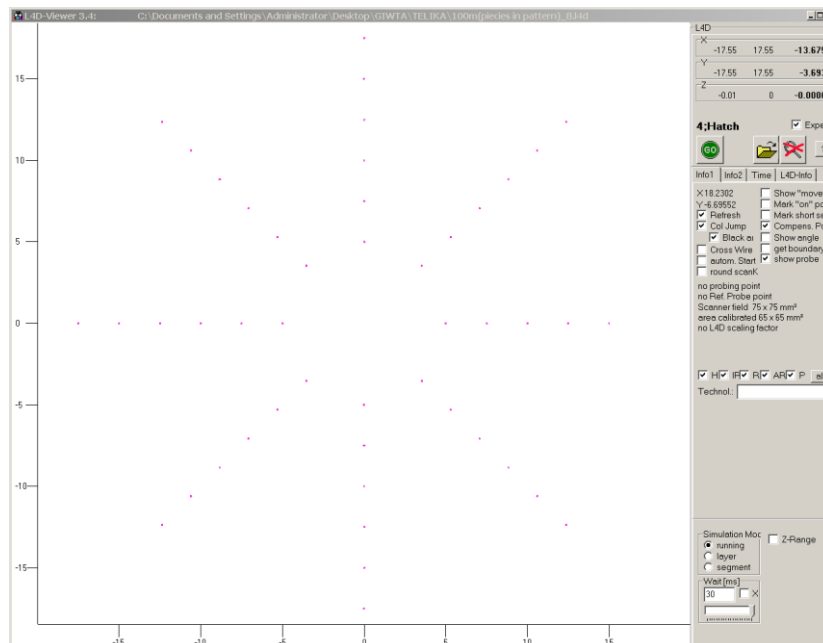
- Min. number : αφορά τον ελάχιστο αριθμό των boarder cuts και εισάγεται η ίδια τιμή με αυτή του “Max. number”.
- Max. Number : πατώντας το αγγλικό ερωτηματικό “?” εισάγεται αυτόματα η τιμή της παραμέτρου, η οποία αφορά τον μέγιστο αριθμό των boarder cuts.

Τέλος, επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων την καρτέλα “Machining” και στη συνέχεια την επιλογή “Start Programming”, δημιουργείται ένα αρχείο τύπου .l4d το οποίο αποθηκεύεται στον ίδιο φάκελο με τα αρχεία .stl και .trf.

### 5.2.2 L4D Viewer

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία προγραμματισμού της χάραξης και πριν χαραχθεί το δοκίμιο, πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση της χάραξης μέσω του προγράμματος L4D Viewer. Σε αυτό το βήμα γίνεται ο τελικός έλεγχος του τρισδιάστατου σχεδίου πριν από τη χάραξη. Ελέγχεται δηλαδή αν με βάση το σχέδιο και τον προγραμματισμό της χάραξης που προηγήθηκε προκύπτει κάποιο σφάλμα. Παράλληλα, μέσω του προγράμματος L4D Viewer γίνεται και ο υπολογισμός του θεωρητικού χρόνου χάραξης του δοκιμίου.

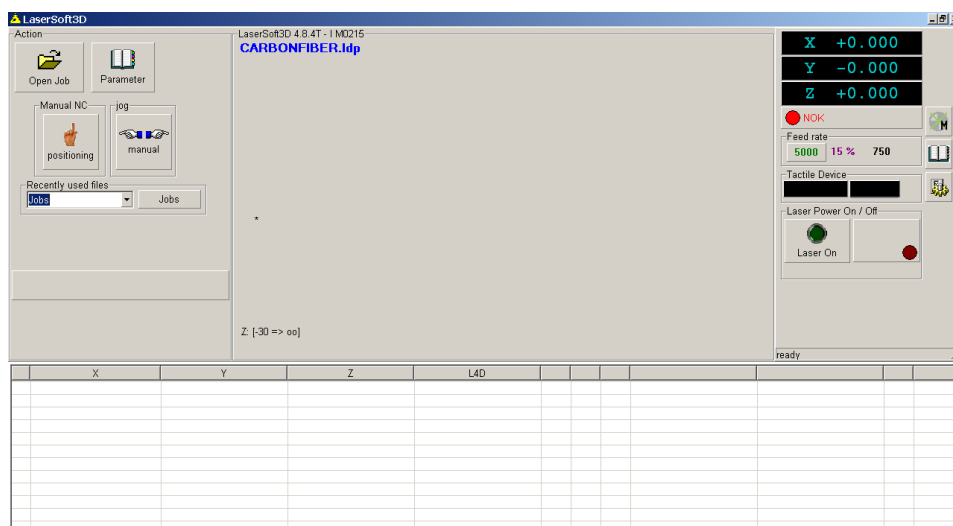
Από τη διαδικασία που πραγματοποιήθηκε προηγουμένως, έχουν προκύψει 2 καινούρια αρχεία, το .trf και το .l4d. Κάνοντας διπλό κλικ πάνω στο αρχείο .l4d, ανοίγει αυτόματα το πρόγραμμα L4D Viewer. Στο περιβάλλον του L4D Viewer, στη στήλη που βρίσκεται στο δεξί της οθόνης, υπάρχει ένα πράσινο κουμπί “GO”. Με την επιλογή αυτού του κουμπιού, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της χάραξης (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10: Αρχική οθόνη του προγράμματος L4D Viewer

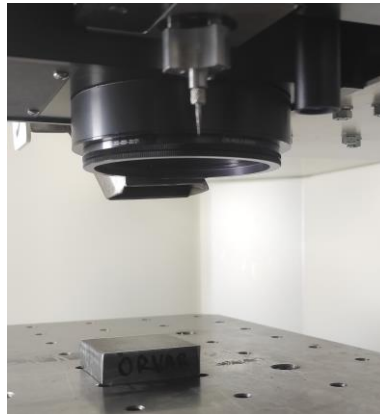
### 5.2.3 LaserSoft 3D

Αφού έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις και έχει ελεγχθεί ότι όλα είναι σωστά, γίνεται εκκίνηση του τρίτου και τελευταίου προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε ώστε να πραγματοποιηθεί τελικά η κατεργασία των δοκιμίων. Το πρόγραμμα αυτό είναι το LaserSoft 3D (Σχήμα 5.11), πρόκειται στην ουσία για το εκτελεστικό πρόγραμμα της χάραξης. Στο τελευταίο αυτό στάδιο πραγματοποιούνται τρεις βασικές διαδικασίες, αρχικά η διαδικασία ορισμού του σημείου μηδέν πάνω στο δοκίμιο, στη συνέχεια η διαδικασία ορισμού των απαραίτητων παραμέτρων που αφορούν τις συνθήκες κατεργασίας και τέλος η εκτέλεση της χάραξης.



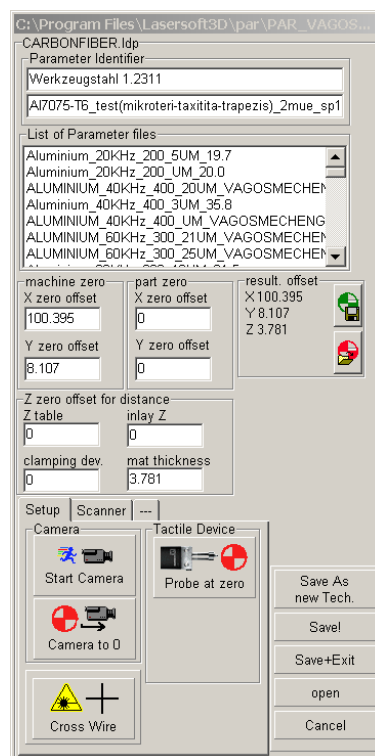
Σχήμα 5.11: Αρχική οθόνη του προγράμματος LaserSoft 3D

Προτού ξεκινήσει οποιαδήποτε διαδικασία μέσω του προγράμματος LaserSoft 3D, έγνε η τοποθέτηση του εκάστοτε δοκιμίου στην τράπεζα της εργαλειομηχανής, η οποία όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο βρίσκεται στο εσωτερικό της καμπίνας/θαλάμου επεξεργασίας (Σχήμα 5.12). Στην επιφάνεια του τεμαχίου έχει ήδη σημειωθεί το σημείο που θέλουμε να ορίσουμε ως σημείο μηδέν στη συνέχεια.



Σχήμα 5.12: Δοκίμιο στο εσωτερικό της μηχανής LASERTEC 40

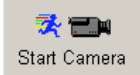
Η πρώτη διαδικασία που πραγματοποιήθηκε μετά την τοποθέτηση του τεμαχίου στη τράπεζα, ήταν ο ορισμός του σημείου μηδέν πάνω στο ίδιο το τεμάχιο. Ο ορισμός του σημείου μηδέν επιτυγχάνεται μέσω τη ψηφιακής κάμερα που διαθέτει η εργαλειομηχανή. Στην αρχική οθόνη του προγράμματος, στο πάνω αριστερά μέρος της, στο πεδίο “Action”, κάνοντας κλικ στην επιλογή “Parameter”, ανοίγει ένα νέο παράθυρο (Σχήμα 5.13).

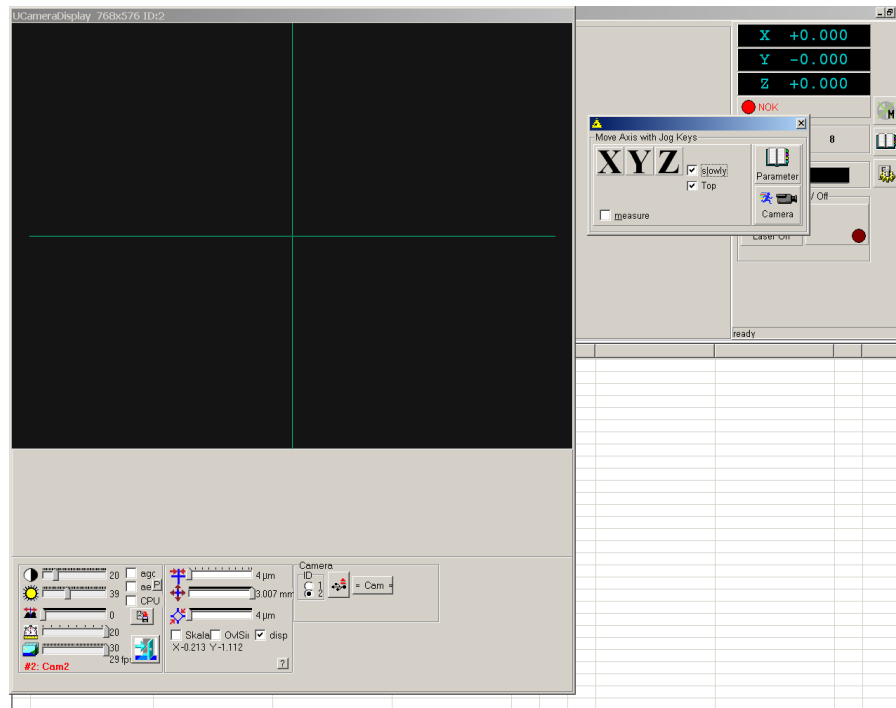


Σχήμα 5.13: Παράθυρο Parameters

Στο κάτω μέρος του παραθύρου αυτού, βρίσκεται ένα εικονίδιο με το όνομα “Start Camera”, ενώ στην αριστερή πλευρά του κέντρου κατεργασίας της μηχανής βρίσκεται το κουμπί ασφαλείας ή αλλιώς “confirmation key”. Κρατώντας πατημένο το κουμπί αυτό




και κάνοντας κλικ πάνω στο εικονίδιο  Start Camera, ενεργοποιείται η κάμερα της μηχανής και εμφανίζεται ένα καινούριο παράθυρο το οποίο αφορά τον χειρισμό της (Σχήμα 5.14). Εφόσον πραγματοποιήθηκαν τα παραπάνω, ρυθμίστηκε η απόσταση του φακού από την επιφάνεια του δοκιμίου με σκοπό να επιτευχθεί η σωστή εστίαση του φακού. Η απόσταση φακού – επιφάνειας ρυθμίζεται μετακινώντας την τράπεζα στον άξονα Z.



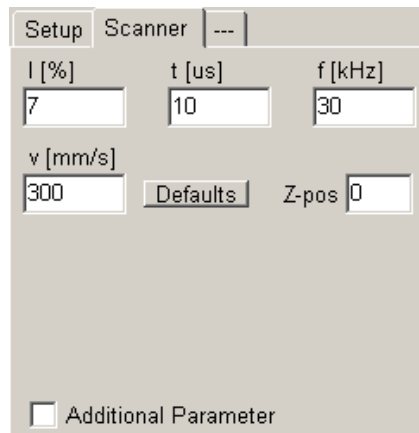
Σχήμα 5.14: Παράθυρο χειρισμού της κάμερας μηχανής

Όλες οι κινήσεις που έγιναν ήταν πολύ αργές και εκτελέστηκαν με τη χρήση των κουμπιών “+” και “-” που βρίσκονται στην επάνω πλευρά του κέντρου κατεργασίας, στο κάτω μέρος. Όταν πλέον η επιφάνεια του δοκιμίου εμφανίζεται ευκρινώς στην οθόνη, θεωρείται ότι έχει πραγματοποιηθεί σωστά η εστίαση. Στη συνέχεια, μετακινώντας την τράπεζα στους άξονες X και Y, εντοπίστηκε το σημείο που είχε προηγουμένως σημειωθεί στην επιφάνεια του δοκιμίου και ταυτίστηκε με τον σταυρό που υπάρχει στην οθόνη της κάμερας. Αποθηκεύοντας τις συντεταγμένες που προέκυψαν σε όλους τους άξονες, ολοκληρώθηκε η διαδικασία ορισμού του σημείου μηδέν. Ωστόσο, για μεγαλύτερη σιγουριά και ακρίβεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των συντεταγμένων και κατ’ επέκταση του σημείου μηδέν που ορίστηκε. Ο έλεγχος αυτός έγινε κρατώντας ξανά



πατημένο το confirmation key και επιλέγοντας το εικονίδιο  Probe at zero. Μέσω αυτής της διαδικασίας, κατεβαίνει το probe και ελέγχεται αν το σημείο στο οποίο καταλήγει ταυτίζεται με αυτό που αποθηκεύτηκε νωρίτερα. Επιπλέον, το probe μετράει ξανά και με μεγαλύτερη ακρίβεια την απόσταση φακού – δοκιμίου και μέσω της εντολής “Probing to Z” αποθηκεύεται η καινούρια και πιο ακριβής μέτρηση. Οι εντολές “Probe at Zero” και “Probing to Z” βρίσκονται επίσης στο παράθυρο “Parameter”.

Έπειτα, ακολούθησε η διαδικασία ορισμού των συνθηκών κατεργασίας. Πάλι στο παράθυρο “Parameter”, στο κάτω μέρος, επιλέγοντας την καρτέλα “Scanner” (Σχήμα 5.15) εμφανίστηκαν όλες οι παράμετροι που αφορούν την χάραξη. Πιο συγκεκριμένα οι συνθήκες που ορίστηκαν ήταν η ισχύς του laser I [στο 7%], η συχνότητα εκπομπής του laser f [στα 30kHz] και η ταχύτητα πρόωσης v [στα 300mm/s]. Η χρονική διάρκεια του παλμού t [us] είναι μια συνθήκη της οποίας η τιμή διατηρήθηκε ίδια με την πρότυπη, στα 10us.



Σχήμα 5.15: Ορισμός συνθηκών χάραξης

Έχοντας λοιπόν πραγματοποιηθεί οι δύο προηγούμενες διαδικασίες, ξεκίνησε η τελική προετοιμασία για τη χάραξη. Αρχικά έγινε εισαγωγή του αρχείου .l4d μέσω της επιλογής



του πεδίου "Action" της αρχικής οθόνης του προγράμματος. Με την εισαγωγή του αρχείου, εμφανίστηκε στην οθόνη ένα καινούριο παράθυρο στο οποίο υπήρχαν συνοπτικά όλες οι πληροφορίες για τη χάραξη. Αφού έγινε έλεγχος των πληροφοριών




αυτών και βεβαιωθήκαμε ότι όλα είναι σωστά, επιλέχθηκε το κουμπί και το πρόγραμμα επέστρεψε ξανά στην αρχική της οθόνη. Τέλος, κάνοντας κλικ πάνω στο



εικονίδιο έγινε η ενεργοποίηση του laser και με την επιλογή του εικονιδίου ξεκίνησε η χάραξη του δοκιμίου. Αφού η εργαλειομηχανή ολοκλήρωσε τη διαδικασία της



χάραξης, επιλέχθηκε το εικονίδιο  ώστε να απενεργοποιηθεί το laser.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες, έχουν γίνει 4 διαφορετικά σχέδια και 2 διαφορετικά υλικά, επομένως όλα όσα περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 5.2 εκτελέστηκαν συνολικά 8 φορές.

### 5.3 Πραγματοποίηση μετρήσεων με τη χρήση του προφιλόμετρου

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας που περιεγράφηκε στις παραπάνω ενότητες, ολοκληρώθηκε και το κομμάτι επεξεργασίας των δοκιμίων, έχοντας πλέον τα τελικά χαραγμένα δοκίμια. Το επόμενο και τελευταίο βήμα ήταν να γίνουν οι μετρήσεις των χαραγμένων διαμορφώσεων των δοκιμίων. Αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προφιλόμετρου που βρίσκεται στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σε προηγούμενο κεφάλαιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 4, έχει δημιουργηθεί αναλυτικός οδηγός χρήσης του προφιλόμετρου. Σύμφωνα με αυτόν λοιπόν, πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες μετρήσεις.

Για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις αυτές, ορίστηκαν κατάλληλα όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις. Αρχικά, στο παράθυρο «Measurement Setup», επιλέχθηκε η μέθοδος σάρωσης VSI/VXI, ο φακός 10× και το οπτικό πεδίο 1.0×.

Στη συνέχεια, ακολουθώντας τη διαδικασία ορισμού παραμέτρων για τη συγκεκριμένη μέθοδο σάρωσης και για τα δύο διαφορετικά μεγέθη διαμορφώσεων που χαράχθηκαν, ορίστηκαν οι εξής ρυθμίσεις :

Ορισμός παραμέτρων της μεθόδου σάρωσης VSI/VXI		
Όνομα παραμέτρου	Διαμόρφωση βάθους 10μm	Διαμόρφωση βάθους 20μm
<b>Backscan</b> (μm)	10 μm	10μm
<b>Length</b> (μm)	15 μm	25 μm
<b>Threshold</b> (%)	1 %	1 %
<b>Illumination</b>	White	White

Πίνακας 3.1: Ορισμός παραμέτρων μεθόδου σάρωσης VSI/VXI

Ακολουθώντας στη συνέχεια και τις διαδικασίες εστίασης και αφαίρεσης της κλίσης της τράπεζας όπως έχει αναλυθεί στην ενότητα 4.4, ολοκληρώθηκε η προετοιμασία του προφιλόμετρου και πραγματοποιήθηκαν έπειτα οι μετρήσεις για όλα τα δοκίμια. Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων, ολοκληρώθηκε και η πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έχει αναφερθεί, στόχος της διπλωματικής αυτής είναι η μελέτη της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας στη διάβρωση δύο διαφορετικών υλικών. Για τον λόγο αυτό, όλες οι χαράξεις πραγματοποιήθηκαν ορίζοντας τις ίδιες τιμές στις συνθήκες κατεργασίας. Οι συνθήκες κατεργασίας που ορίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.15.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πειραματικής διαδικασίας. Για κάθε υλικό αλλά και μέγεθος διαμορφώσεων λήφθηκε υπόψη μία χαραγμένη διαμόρφωση, καθώς όλες οι διαμορφώσεις σε κάθε διάταξη ήταν όμοιες μεταξύ τους. Στην παρούσα διπλωματική δηλαδή, δεν δόθηκε βάση στη διάταξη αλλά στην ποιότητα των διαμορφώσεων για τα δύο διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Παρακάτω λοιπόν θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των διαμορφώσεων ίδιου μεγέθους για τα δύο διαφορετικά υλικά. Δηλαδή θα συγκριθεί η διαμόρφωση βάθους 10μm του υλικού ORVAR Supreme, με τη διαμόρφωση βάθους 10μm του υλικού STAVAX ESR. Αντίστοιχα θα πραγματοποιηθεί σύγκριση και για τις διαμορφώσεις βάθους 20μm.

Οι παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι συγκρίσεις, αφορούν κυρίως την τραχύτητα των χαραγμένων επιφανειών. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για κάθε παράμετρο τραχύτητας.

- **Μέση τιμή τραχύτητας,  $R_a$ :** είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των απόλυτων τιμών των αποστάσεων όλων των σημείων της επιφάνειας από την κεντρική γραμμή της περιοχής που μετρήθηκε. Από την τιμή της παραμέτρου αυτής δεν μπορούν να αντληθούν πολλές πληροφορίες όσον αφορά τη μορφή της επιφάνειας, καθώς μπορεί η ίδια ή σχεδόν ίδια τιμή να αντιστοιχεί σε πολλές διαφορετικές μορφές επιφανειών.
- **Μέγιστο ύψος κορυφής,  $R_p$ :** είναι η μέγιστη υψομετρική διαφορά του υψηλότερου σημείου (κορυφής) του προφίλ από την κεντρική γραμμή της περιοχής που μετρήθηκε. Η παράμετρος  $R_p$  είναι η ιδανική για να περιγράψει την τριβική ποιότητα της επιφάνειας, καθώς στην ουσία αποτυπώνει την απόσταση των υψηλότερων σημείων των ανωμαλιών από τη μέση στάθμη της επιφάνειας.
- **Μέση τετραγωνική ρίζα τραχύτητας,  $R_q$ :** πρόκειται για την ρίζα του μέσου τετραγωνικού όρου των υψών του προφίλ της επιφάνειας. Η παράμετρος αυτή δείχνει τη μέση τετραγωνική απόκλιση του προφίλ της επιφάνειας από την κεντρική γραμμή της περιοχής που μετρήθηκε.
- **Μέγιστο ύψος τραχύτητας,  $R_t$ :** είναι η απόσταση ανάμεσα στην υψηλότερη κορυφή και την βαθύτερη κοιλάδα της περιοχής που μετρήθηκε. Το μειονέκτημα της παραμέτρου αυτής είναι ότι η τιμή της μπορεί να επηρεαστεί πολύ εύκολα από οποιαδήποτε τυχαία ατέλεια μπορεί να υπάρχει στην επιφάνεια.
- **Μέγιστο βάθος κοιλάδας,  $R_v$ :** είναι η μέγιστη υψομετρική διαφορά του χαμηλότερου σημείου (κοιλάδας) του προφίλ από την κεντρική γραμμή της περιοχής που μετρήθηκε.

### 6.1 Αποτελέσματα και σύγκριση διαμορφώσεων βάθους 10μm

Πρώτα θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ των διαμορφώσεων βάθους 10μm. Συγκρίνοντας αρχικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων (Σχήμα 6.1), παρατηρείται ότι οι τιμές των παραμέτρων τραχύτητας είναι παρόμοιες μεταξύ τους. Αυτό υποδεικνύει ότι οι δύο διαμορφώσεις έχουν πολύ παρόμοια μορφή. Από τη μικρή διαφορά στην τιμή της παραμέτρου  $R_v$ , συμπεραίνεται ότι η διαμόρφωση βάθους 10μm στο υλικό STAVAX ESR παρουσιάζει ελαφρώς πιο βαθιές κοιλάδες από εκείνη στο υλικό ORVAR Supreme.

Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	-10.99	$\mu\text{m}$
Data Points	306913.984	
Percent Data Points	99.91	%
Ra	10.99	$\mu\text{m}$
Rp	-1.182	$\mu\text{m}$
Rq	11.19	$\mu\text{m}$
Rt	23.24	$\mu\text{m}$
Rv	-24.422	$\mu\text{m}$

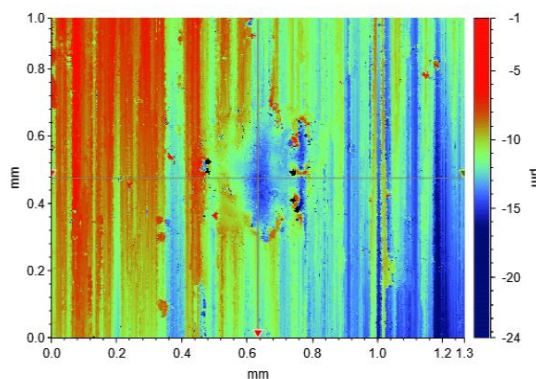
(α) ORVAR Supreme

Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	-10.637	$\mu\text{m}$
Data Points	307183.008	
Percent Data Points	100	%
Ra	10.637	$\mu\text{m}$
Rp	-1.036	$\mu\text{m}$
Rq	10.818	$\mu\text{m}$
Rt	23.528	$\mu\text{m}$
Rv	-24.564	$\mu\text{m}$

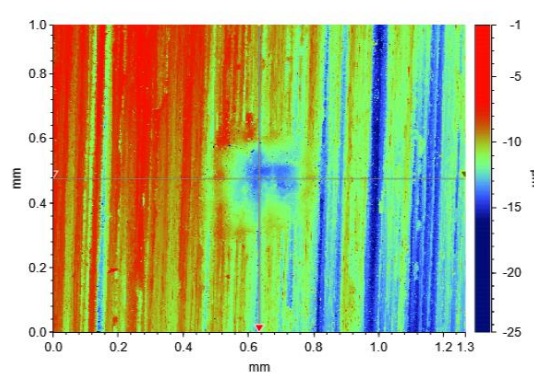
(β) STAVAX ESR

Σχήμα 6.1: Αποτελέσματα μετρήσεων για διαμορφώσεις βάθους 10 $\mu\text{m}$

Βάζοντας δίπλα δίπλα τις απεικονίσεις δύο διαστάσεων (Σχήμα 6.2) που προέκυψαν από το πρόγραμμα Vision64 του προφιλόμετρου, παρατηρείται ότι στο υλικό ORVAR Supreme η διαμόρφωση έχει χαραχθεί πιο αποτελεσματικά.



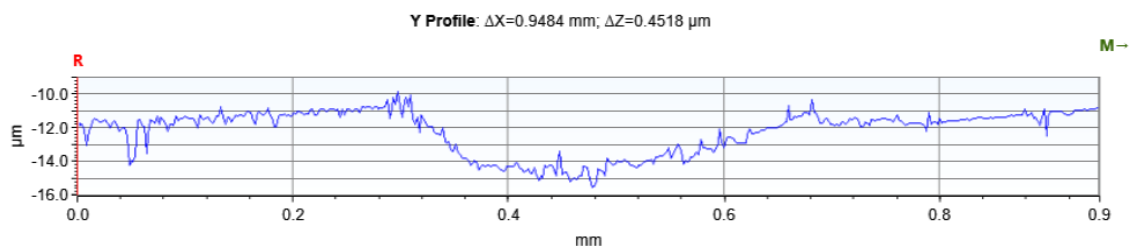
(α) ORVAR Supreme



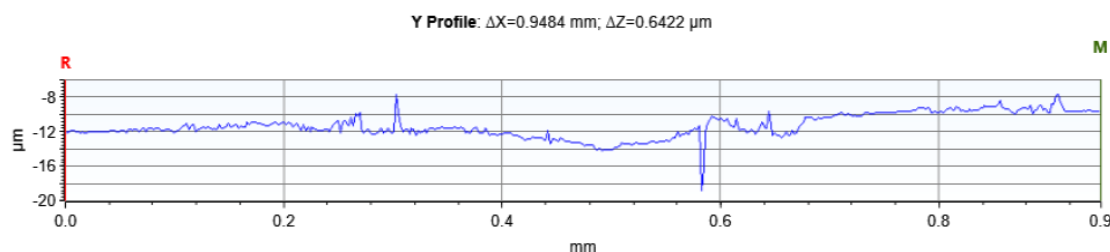
(β) STAVAX ESR

Σχήμα 6.2: Απεικόνιση δύο διαστάσεων

Επιπλέον, συγκρίνοντας και τα προφίλ των δύο διαμορφώσεων (Σχήμα 6.3 και 6.4), επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα που βγήκε από τις απεικονίσεις δύο διαστάσεων παραπάνω. Η χάραξη των διαμορφώσεων 10 $\mu\text{m}$  έχει πραγματοποιηθεί καλύτερα στο υλικό ORVAR Supreme. Και στα δύο προφίλ φαίνεται ότι υπάρχουν διακυμάνσεις στις επιφάνειες των υλικών. Η επιφάνεια του υλικού ORVAR έχει πιο πολλές κορυφές και κοιλάδες, ωστόσο η επιφάνεια του υλικού STAVAX μπορεί να φαίνεται πιο ομαλή όμως παρουσιάζει πιο έντονες και απότομες μεταβολές.



Σχήμα 6.3: Προφίλ διαμόρφωσης 10 $\mu\text{m}$  στο υλικό ORVAR Supreme



Σχήμα 6.4: Προφίλ διαμόρφωσης 10μm στο υλικό STAVAX ESR

Και στις δύο περιπτώσεις, η χάραξη που έχει γίνει έχει ατέλειες. Στην περίπτωση του υλικού ORVAR, έχει πραγματοποιηθεί ικανοποιητική αφαίρεση υλικού αλλά η ποιότητα της επιφάνειας που έχει χαραχθεί καθώς και η ομοιογένεια του βάθους χάραξης επιδέχονται βελτίωσης. Αντιθέτως, στην περίπτωση του υλικού STAVAX, η ποιότητα της χαραγμένης επιφάνειας είναι καλύτερη, όμως το υλικό που έχει αφαιρεθεί μέσω της χάραξης δεν είναι το επιθυμητό. Η συνθήκη χάραξης που πρέπει να ρυθμιστεί καλύτερα είναι η ισχύς του laser. Ορίζοντας μια υψηλότερη τιμή για αυτήν την παράμετρο, και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα θα ήταν πιο ακριβή.

## 6.2 Αποτελέσματα και σύγκριση διαμορφώσεων βάθους 20μm

Στην περίπτωση των διαμορφώσεων βάθους 20μm, ρίχνοντας μια πρώτη ματιά στα αποτελέσματα των μετρήσεων (Σχήμα 6.5), διαπιστώνεται ότι οι παράμετροι τραχύτητας είναι πανομοιότυπες, με τις τιμές του υλικού ORVAR να είναι ελαφρώς υψηλότερες. Από αυτής την παρατήρηση διαπιστώνεται ότι η επιφάνεια του συγκεκριμένου υλικού είναι συνολικά πιο τραχιά σε σύγκριση με την επιφάνεια του υλικού STAVAX.

Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	-12.277	μm
Data Points	306619.008	
Percent Data Points	99.82	%
Ra	12.277	μm
Rp	-1.186	μm
Rq	12.676	μm
Rt	33.39	μm
Rv	-34.576	μm

(α) ORVAR Supreme

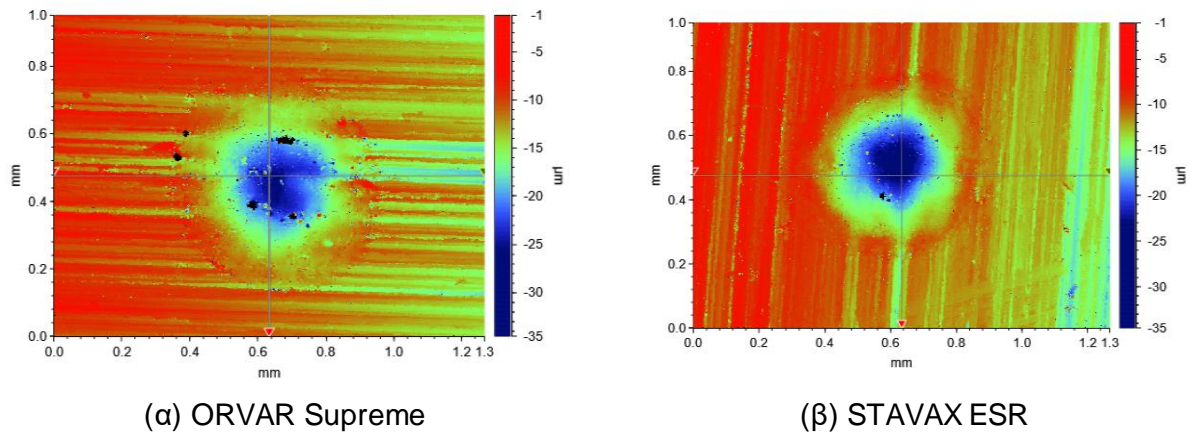
Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	-11.587	μm
Data Points	307120	
Percent Data Points	99.98	%
Ra	11.587	μm
Rp	-1.034	μm
Rq	11.954	μm
Rt	33.542	μm
Rv	-34.576	μm

(β) STAVAX ESR

Σχήμα 6.5: Αποτελέσματα μετρήσεων για διαμορφώσεις βάθους 20μm

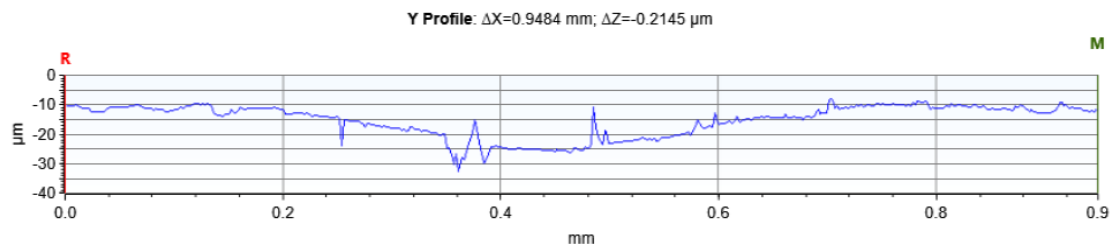
Παρατηρώντας τις απεικονίσεις δύο διαστάσεων (Σχήμα 6.6) είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα της χάραξης είναι πολύ πιο ποιοτικά. Μέσω των απεικονίσεων του προγράμματος του προφιλόμετρου, διακρίνεται ξεκάθαρα, και στις δύο περιπτώσεις, το σχήμα των διαμορφώσεων. Στην περίπτωση του υλικού STAVAX βέβαια, η χάραξη φαίνεται να έχει πραγματοποιηθεί πολύ ομοιόμορφα και με πολύ λίγες ατέλειες.



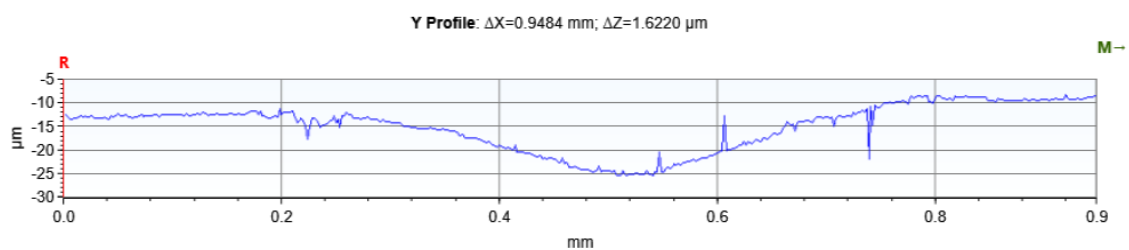


Σχήμα 6.6: Απεικόνιση δύο διαστάσεων

Τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τις παραπάνω συγκρίσεις, επιβεβαιώνονται τελικά και από τα προφίλ των διαμορφώσεων (Σχήμα 6.7 και 6.8). Και στα δύο προφίλ φαίνονται οι διαμορφώσεις που έχουν χαραχθεί, στην περίπτωση του υλικού STAVAX όμως παρατηρείται με μεγαλύτερη ευκολία και ευκρίνεια. Επιπλέον μέσω των προφίλ των διαμορφώσεων δικαιολογείται και το συμπέρασμα που βγάλαμε από τις παραμέτρους τραχύτητας. Η επιφάνεια του υλικού ORVAR φαίνεται να έχει περισσότερες διακυμάνσεις σε σύγκριση με το υλικό STAVAX του οποίου η επιφάνεια είναι πιο ομαλή.



Σχήμα 6.7: Προφίλ διαμόρφωσης 20μm στο υλικό ORVAR Supreme



Σχήμα 6.8: Προφίλ διαμόρφωσης 20μm στο υλικό STAVAX ESR

Σε αντίθεση με τις διαμορφώσεις βάθους 10μm, η χάραξη των διαμορφώσεων 20μm έχει πραγματοποιηθεί με πολύ λιγότερες ατέλειες. Και στα δύο υλικά έχει αφαιρεθεί ικανοποιητική ποσότητα υλικού κατά τη χάραξη. Οι διαφορές των διαμορφώσεων στα δύο υλικά αφορούν την ποιότητα της χαραγμένης επιφάνειας και την ομοιογένεια του βάθους χάραξης. Η διαμόρφωση του υλικού ORVAR επιδέχεται βελτίωση κυρίως στην ποιότητα της επιφάνειας που χαράχθηκε. Στην περίπτωση του υλικού STAVAX η χάραξη έχει γίνει πιο αποδοτικά, με ποιοτικά καλύτερη χαραγμένη επιφάνεια.

### 6.3 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων και την παράθεση των αποτελεσμάτων που πραγματοποιήθηκε προηγουμένως στο παρόν κεφάλαιο, προέκυψαν κάποια συμπεράσματα. Συνολικά τα συμπεράσματα αυτά είναι τα εξής:

- Οι συνθήκες κατεργασίας που επιλέχθηκαν κρίθηκαν πιο κατάλληλες και αποδοτικές στο μεγαλύτερο μέγεθος διαμορφώσεων, στις διαμορφώσεις βάθους 20μm και επάνω κυκλικής διατομής διαμέτρου 200μm.
- Η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζει τη διάβρωση των υλικών από την δέσμη laser, καθώς στην περίπτωση του υλικού ORVAR της διαμόρφωσης βάθους 10μm φαίνεται να έχει γίνει η αφαίρεση του υλικού πολύ πιο επιθετικά συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.
- Η ποιότητα του υλικού μπορεί να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα της χάραξης.

Οι συνθήκες χάραξης και η εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού τους αποτελούν τον πιο καθοριστικό παράγοντα για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Επηρεάζουν τόσο το βάθος χάραξης (ποσότητα υλικού που αφαιρείτε) όσο και την ποιότητα/ομοιομορφία της χάραξης.



- [1] S. Orazio, Αρχές των lasers, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 1986.
- [2] Κ. Στυλιανός, Φυσική των λέιζερ, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015.
- [3] K. Shimoda, «Introduction to laser physics,» New York, 1984.
- [4] Ν. Αφεντάκης, Σ. Μουσταϊζής και Ε. Σεργάκη, «Λέιζερ: Αρχές λειτουργίας και εφαρμογές,» Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 2008.
- [5] C. Tzampaz, *Experimental investigation of the influence of Laser engraving conditions on the produced roughness*, Chania, 2021.
- [6] A. Megkan, *Experimental investigation of the effect of laser engraving conditions on the geometry of the produced configuration (kerf).*, Chania, 2021.
- [7] I. Choreftakis, *Experimental determination of cutting effect on th depth of cut of Laser engraving process*, Chania, 2019.
- [8] Κ. Τσακανέλης, *Χάραξη με Laser μεταλλικών δοκιμίων προσομοίωσης γεολογικών δομών*, Χανιά, 2023.
- [9] Bruker Optical Profilometer SOP, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://rsc.aux.eng.ufl.edu/\\_files/documents/19.pdf](https://rsc.aux.eng.ufl.edu/_files/documents/19.pdf). [Πρόσβαση 2023].
- [10] Bruker Contour GT-K User Manual, 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/2042532/Bruker-Contour-Gt-K.html>.
- [11] Seiffert Industrial, «A brief look at the history of laser technology,» Seiffert Industrial, 2021.
- [12] inQuality, «Η σημασία της τραχύτητας στην μηχανοποίηση,» 2024.