

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΜΕ LASER ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΠΟΥ ΥΠΕΒΛΗΘΗ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΡΙΚΗ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ
ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ**

ΥΠΟ ΤΟΝ
ΕΥΑΓΓΕΛΟ ΝΙΚΟΛΙΔΑΚΗ

ΧΑΝΙΑ, ΜΑΙΟΣ 2021

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΜΕ LASER ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για
την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος

ΥΠΟ ΤΟΝ

Ευάγγελο Νικολιδάκη

Χανιά, Μάιος 2021



TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

SCHOOL OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT

FINITE ELEMENT METHOD SIMULATION OF LASER ENGRAVING

Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree
of Doctor of Philosophy

by

Evangelos Nikolidakis

Chania, May 2021

Copyright © υπό Ευάγγελο Νικολιδάκη

Χανιά 2021

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα και μόνο. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτήν τη διατριβή εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



**Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση**

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





Π Ρ Α Κ Τ Ι Κ Ο ΤΗΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

του **Ευάγγελου Νικολιδάκη**
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Η εξεταστική επιτροπή που διορίστηκε σύμφωνα με τις κείμενες διατάξεις και την απόφαση της Γενικής Συνέλευσης της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης στη συνεδρίαση 9^η Σ.Τ./13/4/2021 για την κρίση της διδακτορικής διατριβής του Ευάγγελου Νικολιδάκη, συνήλθε σε συνεδρίαση σήμερα την Τρίτη 15/06/2021 και παρακολούθησε την υποστήριξη της διατριβής με τίτλο:

«Προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με Laser με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων»

Αγγλικός τίτλος: “ Finite Element Method Simulation of Laser Engraving ”

Μετά την ανάπτυξη της διατριβής, τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, έκαναν ερωτήσεις στον υποψήφιο κ Ευάγγελο Νικολιδάκη, τόσο γενικού περιεχομένου, όσο και σχετικές με το θέμα της διατριβής.

Στη συνέχεια, αποχώρησε ο υποψήφιος και ακολούθησε συζήτηση της επιτροπής.

Η επιτροπή, μετά από ψηφοφορία, έκρινε ότι η διατριβή του Ευάγγελου Νικολιδάκη, είναι πρωτότυπη και αποτελεί ουσιαστική συμβολή στην επιστήμη, προτείνει δε προς τη Γενική Συνέλευση με ειδική σύνθεση της Σχολής, ομόφωνα να του απονεμίσει τον τίτλο του Διδάκτορος.

Η ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Αριστομένης Αντωνιάδης
2. Νικόλαος Μπιλάλης
3. Γεώργιος Σταυρουλάκης
4. Κωνσταντίνος Δαβίδ
5. Γκαμπριέλ Μανσούρ
6. Παναγιώτης Κυράτσης
7. Άγγελος Μαρκόπουλος

ΥΠΟΓΡΑΦΗ

Digitally signed by Aristomenis
Antoniadis
Date: 2021.06.15 14:06:24 +03'00'
Adobe Acrobat Reader version:
2021.005.20048

Nikolaos Bilalis

Digitally signed by Nikolaos Bilalis
Date: 2021.06.15 14:13:02 +03'00'

**Georgios
Stavroulakis**

Digitally signed by Georgios
Stavroulakis
Date: 2021.06.15 14:18:03 +03'00'

Konstantinos David

Digitally signed by Konstantinos
David
Date: 2021.06.16 13:40:56 +03'00'

Gabriel Mansour

Digitally signed by Gabriel
Mansour
Date: 2021.06.16 10:23:40
+03'00'

PANAGIOTIS KYRATSIS

PANAGIOTIS KYRATSIS
15.06.2021 14:34

**ANGELOS
MARKOPOULOS**

Digitally signed by ANGELOS
MARKOPOULOS
Date: 2021.06.16 13:59:04 +03'00'

Στους πολίτες του κόσμου

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Σύντομο βιογραφικό σημείωμα.....	ii
Περίληψη	iii
Abstract	iv
Λίστα μεταβλητών	v
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο της διατριβής	1
1.2 Στόχοι της διατριβής	2
1.3 Δομή της διατριβής.....	3
2 Στάθμη γνώσεων.....	6
2.1 Κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων	6
2.2 Προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	12
2.3 Διεθνής έρευνα στην κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser	15
2.3.1 Μελέτη πρακτικών εφαρμογών της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser	15
2.3.2 Πειραματική διερεύνηση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων	19
2.3.3 Μοντελοποίηση και προσομοίωση μηχανισμού αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων και άνω	30
2.3.4 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων.....	33
2.3.5 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων	39
2.3.6 Σχηματισμός κλίσης στις περιφερειακές συνοριακές επιφάνειες των τοιχωμάτων της χαραγμένης γεωμετρίας	42
2.4 Συνεισφορές της διατριβής.....	47
3 3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων για τον προσδιορισμό του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού	50
3.1 Γενική περιγραφή.....	50
3.2 Δομή προσομοιωτικού μοντέλου	51
3.3 Βασικά μεγέθη και παράμετροι της κατεργασίας κατά τη μοντελοποίηση.....	54
3.4 Μοντελοποίηση	58
3.4.1 Χάρτης σάρωσης	58
3.4.2 Εισερχόμενη δέσμη, προσπίπτουσα και απορρόφηση	61
3.4.3 Αφαίρεση υλικού και μετακίνηση πλέγματος	72
3.4.4 Γεωμετρία και διακριτοποίηση.....	76
3.4.5 Αρχικές και συνοριακές συνθήκες	78

3.4.6	Μετάδοση θερμότητας, αγωγή και αλλαγή φάσης.....	79
3.5	Επίλυση	81
3.6	Προσομοιώσεις	88
3.7	Πειραματική επιβεβαίωση.....	90
3.7.1	Εξοπλισμός και υλικά	90
3.7.2	Πειραματική διαδικασία	94
3.7.3	Διαδικασία σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.....	98
3.8	Αποτελέσματα.....	100
3.9	Περιορισμοί.....	109
4	Ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και των διαστατικών αποκλίσεων της χαραγμένης γεωμετρίας	112
4.1	Γενική περιγραφή.....	112
4.2	Μοντελοποίηση	114
4.2.1	Χάρτης σάρωσης	114
4.2.2	Σύγκλιση δέσμης	116
4.2.3	Γεωμετρία, διακριτοποίηση, αρχικές και συνοριακές συνθήκες, συνθήκη τερματισμού	120
4.3	Προσομοιώσεις	122
4.4	Πειραματική επιβεβαίωση.....	125
4.4.1	Πειραματική διαδικασία	125
4.4.2	Διαδικασία σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.....	129
4.5	Αποτελέσματα.....	131
5	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	135
6	Βιβλιογραφία	138

Ευχαριστίες

Από μικρό παιδί είχα τρεις μεγάλες αγάπες που ξεχώριζαν. Με διακατείχε το πάθος για την ενασχόληση σε πρακτικό και θεωρητικό επίπεδο με την επιστήμη της μηχανολογίας, η έμφυτη ανάγκη για τη μελέτη των πάντων από τη σκοπιά της φιλοσοφίας και η βαθύρριζη αγάπη για έναν τόπο, τα Χανιά της Κρήτης, που έτυχε να μεγαλώσω ως πολίτης του κόσμου. Η εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής απετέλεσε ένα σχεδόν εξιδανικευμένο πάντρεμα όλων των παραπάνω. Έτσι, υπήρξε μια ιδιαίτερα ευχάριστη και ενδιαφέρουσα διαδικασία παρά τις τεχνικές δυσκολίες που εμφανίστηκαν και τις αντιξοότητες της εποχής εξαιτίας της πανδημίας της νόσου του κορονοϊού.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Αριστομένη Αντωνιάδη που μου έδωσε την ευκαιρία να γίνω μέλος του Εργαστηρίου Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3). Ο κ. Αντωνιάδης στάθηκε δίπλα μου παρέχοντας συμβουλές καθοριστικής σημασίας από την πολύχρονη πείρα του στον κόσμο της επιστήμης. Αξίζει πολλά συγχαρητήρια καθώς σήκωσε μόνος του το φορτίο για τη δημιουργία και την απρόσκοπτη λειτουργία του εργαστηρίου m3. Πρόκειται για ένα εργαστήριο που είναι πάντα ανοιχτό προς όλους τους φοιτητές και στο οποίο γίνεται σύζευξη μεταξύ θεωρίας και πράξης προάγοντας ταυτόχρονα τις υψηλές αξίες και ιδανικά.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Νικόλαο Μπιλάλη και κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Ευχαριστώ πάρα πολύ την κ. Αναστασία Κατσαμάκη για την καθοδήγησή της επί παντός επιστητού. Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για το χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγηση της διατριβής και τις παρατηρήσεις τους για βελτίωση της ποιότητάς της.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου m3 για τις ευχάριστες στιγμές που περάσαμε μαζί κάνοντας πειραματικές δοκιμές ακόμα και νυχθημερόν πάνω στον τórνο, την φραιζα και τη Laser. Ευχαριστώ την κ. Χαρά Ευσταθίου, τον κ. Αντώνη Χριστοδουλόπουλο και τον κ. Μισέλ Μανσούρ που με υποδέχτηκαν στο εργαστήριο με καλή διάθεση και καφέ. Ευχαριστώ τους νεότερους, την κ. Ιωάννα Πατεράκη και τον κ. Άγγελο Μαρινάκη για το φιλικό κλίμα συνεργατικότητας που αναπτύξαμε. Ευχαριστώ επίσης την κ. Μέγκαν Ασένοβα, τον κ. Χασάν Τσαμπάζ και τον κ. Ιωάννη Χορευτάκη για τη βοήθεια που παρείχαν στην εκτέλεση πειραμάτων.

Τέλος, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την οικονομική στήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Σύντομο βιογραφικό σημείωμα

Ο Νικολιδάκης Ευάγγελος γεννήθηκε στα Χανιά το 1993. Το 2016 έλαβε το πτυχίο Μηχανολόγου Μηχανικού από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με βαθμό πτυχίου 9.06 (Άριστα). Εν συνεχεία υπηρέτησε τη θητεία του στον Ελληνικό Στρατό. Μετά την απόλυσή του το έτος 2017 εισήχθη στο Πρόγραμμα των Διδακτορικών Σπουδών της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Έκτοτε έχει εργαστεί ως εργαστηριακός συνεργάτης για το μάθημα «Μηχανολογικό Σχέδιο». Επιπλέον, ως ελεύθερος επαγγελματίας εργάστηκε με συμβάσεις μίσθωσης έργου σε ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα όπως: «Καινοτόμος λέβητας υψηλής απόδοσης με χρήση έξυπνων επιφανειών μεταφοράς θερμότητας» και «Ανάπτυξη Ψυχαγωγικού Λογισμικού Εκπαίδευσης Ψηφιακής Καθοδήγησης Εργαλειομηχανών».

Κεφάλαια βιβλίων:

- Nikolidakis, E., Antoniadis, A., 2021, "Experimental investigation of process parameters effect on laser engraving process quality," Experiments and simulations in advanced manufacturing, Springer, pp 117-169

Δημοσιευμένες εργασίες σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με κριτές:

- Nikolidakis, E., Vosniakos, G.-C., 2017, "A novel tool clamping system for cnc press brakes," Proceedings in Manufacturing Systems, **12**(2), pp. 59-64
- Nikolidakis, E., Choreftakis, I., Antoniadis, A., 2018, "Experimental Investigation of Stainless Steel SAE304 Laser Engraving Cutting Conditions," Machines, **6**(3), pp. 40
- Nikolidakis, E., Antoniadis, A., 2019, "FEM modeling simulation of laser engraving," Int J Adv Manuf Technol., **105**, pp. 3489-3498
- Nikolidakis, E., Antoniadis, A., 2020, "Modeling and simulation of the nanosecond pulsed laser engraving process," MATEC Web Conf., **318**, No. 01044

Επαναδημοσίευση: Proc. of the 7th International Conference on Manufacturing and Materials Engineering - ICMMEN20, Thessaloniki, Greece, 2-3 July 2020

Ανακοινώσεις σε Διεθνή Συνέδρια με κριτές:

- Nikolidakis, E., Vosniakos, G.-C., 2017, "A novel tool clamping system for CNC press brakes," International Conference on Manufacturing Systems 2017 (ICMaS2017), 9-10 November, Bucharest, Romania

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός πειραματικά επιβεβαιωμένου μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος είναι η πρόβλεψη της τελικής γεωμετρίας χάραξης και η βελτιστοποίηση της κατεργασίας μελετώντας την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στην ποιότητα του κατεργασμένου τεμαχίου και την παραγωγικότητα της διαδικασίας.

Χρησιμοποιήθηκε ένα γενικευμένο μοντέλο μετάδοσης θερμότητας στο οποίο η προσπίπτουσα δέσμη Laser που είναι υπεύθυνη για την αφαίρεση του υλικού, μοντελοποιήθηκε ως μια πηγή με κατανομή Gauss λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές από την κλίση αλλά και τη σύγκλησή της. Ο χάρτης σάρωσης που εμπεριέχει τις θέσεις στις οποίες πρόκειται να σταλούν οι παλμοί της δέσμης δημιουργήθηκε σύμφωνα με την μονοκατευθυντική διασταυρούμενη στρατηγική σάρωσης. Μοντελοποιήθηκε η παλμική συμπεριφορά της δέσμης λόγω της τεχνικής μεταγόμενου Q για τον ορισμό της πυκνότητας ισχύος συναρτήσει του χρόνου. Μοντελοποιήθηκε ο μηχανισμός απορρόφησης της δέσμης λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες λόγω της ανακλαστικότητας του υλικού, τις απώλειες λόγω της θωράκισης της δέσμης κατά τη διέλευσή της από το πλούμιο πλάσματος ατμών μετάλλου και τη ροή θερμότητας που επιστρέφει στο τεμάχιο λόγω της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το πλάσμα. Ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια τεχνική μετακίνησης πλέγματος για τον προσδιορισμό των αλλαγών της γεωμετρίας που προκαλούνται από την ατμοποίηση του υλικού.

Προσομοιώσεις χαράξεων πραγματοποιήθηκαν για υλικά όπως ανοξείδωτος χάλυβας SAE304, χάλυβας κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, ορείχαλκος C26000 και κράμα αλουμινίου Al7075-T6 για διάφορους συνδυασμούς των βασικών συνθηκών κατεργασίας: μέση ισχύς, ταχύτητα δέσμης και συχνότητα επανάληψης παλμών. Από τις προσομοιώσεις προβλέφθηκε η γεωμετρία χάραξης με τον ίδιο τρόπο όπως αυτή θα σχηματιζόταν εάν η κατεργασία πραγματοποιείτο στην πράξη, σε πραγματικές συνθήκες σε ένα κέντρο κατεργασιών Laser χάραξης. Επιπλέον, για κάθε περίπτωση, υπολογίστηκαν οι τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού και του ρυθμού αποβολής υλικού. Επιπλέον έγινε μια εκτίμηση των ατελειών που εμφανίζονται στη γεωμετρία χάραξης λόγω λοξοποίησης (kerf), όπως η κλίση που εμφανίζεται στα πλευρικά τοιχώματα υπολογίζοντας τις τιμές της γωνίας κλίσης των τοιχωμάτων αυτών καθώς και του άνω πλάτους χάραξης και του κάτω πλάτους χάραξης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μελετήθηκαν διεξοδικά και εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στο τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας χάραξης.

Για την επιβεβαίωση του προσομοιωτικού μοντέλου ένας μεγάλος αριθμός από πειραματικές χαράξεις πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών από τις προσομοιώσεις. Οι χαράξεις υλοποιήθηκαν με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser χάραξης DMG MORI LASERTEC 40 και μετρήθηκαν με τη χρήση του τρισδιάστατου οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την ορθή λειτουργία και την υψηλή ακρίβεια του προσομοιωτικού μοντέλου.

Abstract

In the present thesis an experimentally confirmed finite element method (FEM) simulation model for nanosecond pulsed laser engraving process is developed. The main purpose of the simulation model is the prediction of the final engraving geometry and the optimization of the process by studying the effect of the process parameters on machining quality and productivity.

A general heat transfer model was adopted where the incident laser beam causing the material ablation was modeled using a gaussian heat source. The effect of the laser beam inclination and convergence were taken into account. The laser map containing the positions of the laser beam pulses to be sent was generated according to the unidirectional cross hatching strategy. The Q-switching mechanism was modeled to define the intensity of the laser beam over the time. The laser beam absorption was modeled considering the losses due to the material reflectivity and the plasma shielding by the interaction of the incident laser beam and the generated metal vapour plasma plume. The ablation mechanism was modeled using a moving mesh method to define the geometry shape changes caused by the evaporative removal of material.

Laser engraving simulation tests were performed for materials such as stainless steel SAE304, pressure vessel steel P355GH, yellow brass C26000, aluminium Al7075-T6 for various combinations of basic process parameters: average power, scanning speed, repetition rate. From the simulations the engraving geometry was predicted in the same way as it would be formed if the process was performed in practice in real conditions in a laser machining center. In addition, removed material layer thickness and material removal rate values were predicted for each case. Furthermore, the imperfections-defects that appear in the engraved geometry due to kerf formation were predicted such as the slope that appears on the side walls by calculating the values of kerf taper angle, top kerf width and bottom kerf width. The simulations results were examined and conclusions were drawn about the effect of the process parameters on the laser engraving process outcome.

To validate the simulation model laser engraving experiments were performed for the purpose of comparing the experimental with the simulation results. The experiments were conducted using the DMG MORI LASERTEC 40 nanosecond pulsed Q-switched 1064nm laser engraving machine and measured using the Bruker Contour GT-K 3D optical profilometer. The experimental results positively validated the simulation model.

Λίστα μεταβλητών

A_i	: Απόλυτη ακρίβεια
BD_{offset}	: Μετακίνηση-offset προς τα μέσα στη θέση του συνόρου της χάραξης [μm]
BKW	: Κάτω πλάτος χάραξης από προσομοίωση [μm]
BKW'	: Κάτω πλάτος χάραξης από πειράματα [μm]
BKW_{dg}	: Κάτω πλάτος χάραξης από παραμορφωμένη γεωμετρία των FEM [μm]
b_{pocket}	: Πλάτος πλευράς εσοχής [μm]
C_p	: Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση [$\text{J}/(\text{kg K})$]
$C_{p,ph1}$: Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση φάσης 1 [$\text{J}/(\text{kg K})$]
$C_{p,ph2}$: Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση φάσης 2 [$\text{J}/(\text{kg K})$]
d	: Κάθετη απόσταση σημείου ενδιαφέροντος από άξονα της δέσμης [μm]
D_p	: Βάθος εσοχής [μm]
D_{spot}	: Διάμετρος δέσμης στο σημείο εστίασης [μm]
d_u	: Κοινή απόσταση μεταξύ των θέσεων γειτονικών παλμών [μm]
D_z	: Πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού από προσομοιώσεις [μm]
D'_z	: Πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού από πειράματα [μm]
D_{zn}	: Συνολικό βάθος χάραξης από προσομοιώσεις [μm]
D'_{zn}	: Συνολικό βάθος χάραξης από πειράματα [μm]
E	: Ενέργεια παλμού [mJ]
e	: Διάνυσμα διεύθυνσης του άξονα της δέσμης
ED	: Βάθος χάραξης από προσομοίωση [μm]
ED'	: Βάθος χάραξης από πειράματα [μm]
ED_{dg}	: Βάθος χάραξης από παραμορφωμένη γεωμετρία των FEM [μm]
E_i	: Εκτιμώμενο τοπικό σφάλμα επιλύτη
E_{nom}	: Ονομαστική ενέργεια παλμού [mJ]
err_k	: Εκτιμώμενο σφάλμα
ES	: Δείκτης ποιότητα πλέγματος equiangular skewness
f	: Εστιακή απόσταση [mm]
F_p	: Σημείο εστίασης της δέσμης
F_{rep}	: Συχνότητα επανάληψης παλμών [kHz]
h	: Σταθερά Planck [J s]
H	: Ύψος αρχικού τεμαχίου [μm]
H^*	: Ενθαλπία [J]
H_d	: Απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών [μm]
H_{ph1}	: Ενθαλπία φάσης 1 [J]
H_{ph2}	: Ενθαλπία φάσης 2 [J]
H_{vap}	: Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης [kJ/kg]
$h\nu$: Ενέργεια φωτονίου [eV]
h_α	: Ιδεατός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]
i	: Βαθμός ελευθερίας
I_H	: Δυναμικό ιονισμού του υδρογόνου [eV]
I_{in}	: Πυκνότητα ενέργειας της εισερχόμενης δέσμης [W/m^2]
I_{inc}	: Πυκνότητα ενέργειας της προσπίπτουσας δέσμης στο τεμάχιο [W/m^2]
I_p	: Ένταση της ακτινοβολίας μέλανος σώματος από πλάσμα [W/m^2]
K	: Θερμική αγωγιμότητα [$\text{W}/(\text{m K})$]

k	: Σταθερά Μπόλτζμαν [J/K]
k _{coef}	: Συντελεστής εξάλειψης
K _{ph1}	: Θερμική αγωγιμότητα φάσης 1 [W/(m K)]
K _{ph2}	: Θερμική αγωγιμότητα φάσης 2 [W/(m K)]
KT	: Γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων από προσομοίωση [deg]
KT'	: Γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων από πειράματα [deg]
KT _{cor}	: Γωνία διόρθωσης λόγω σύγκλισης της δέσμης [deg]
KT _{dg}	: Γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων από παραμορφωμένη γεωμετρία των FEM [deg]
L	: Μήκος αρχικού τεμαχίου [μm]
L _H	: Λανθάνουσα θερμότητα [kJ/kg]
Im	: Πολλαπλασιαστής Lagrange
L _{pl}	: Απόσταση ισοθερμοκρασιακού ορίου πλάσματος από επιφάνεια [μm]
M	: Δείκτης περιοχών μηδενικής έντασης στην κατεύθυνση του άξονα X για εγκάρσιο τρόπο ταλάντωσης TEM
M ²	: Ποιότητα προσπίπτουσας δέσμης
M _{abl}	: Πυκνότητα ροής μάζας [kg/s]
MAE	: Μέσο απόλυτο σφάλμα
ME	: Μέσο σφάλμα
M _{field}	: Αριθμός των πεδίων
MRR	: Ρυθμός αποβολής υλικού [mm ³ /s]
M _{source} ²	: Ποιότητα παραγόμενης δέσμης στην πηγή
n'	: Επίπεδα σάρωσης πειραμάτων
N	: Δείκτης περιοχών μηδενικής έντασης στην κατεύθυνση του άξονα Y για εγκάρσιο τρόπο ταλάντωσης TEM
n	: Επίπεδα σάρωσης προσομοιώσεων
n _{coef}	: Δείκτης διάθλασης
N _e	: Πυκνότητα ηλεκτρονίων [cm ⁻³]
N _i	: Πυκνότητα ιόντων [cm ⁻³]
N _{ie}	: Πυκνότητα αθροιστικά για τα άτομα και ιόντα [cm ⁻³]
N _j	: Βαθμοί ελευθερίας στο πεδίο j
n _{layer}	: Αύξων αριθμός του επιπέδου σάρωσης
n _{pulse}	: Αύξων αριθμός παλμού
n _{pulses,x}	: Αριθμός των παλμών κατά τη διεύθυνση του άξονα X
n _{pulses,y}	: Αριθμός των παλμών κατά τη διεύθυνση του άξονα Y
n _{track}	: Αύξων αριθμός της ευθύγραμμης τροχιάς παλμών
n _v	: Μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο σημείο ενδιαφέροντος x
O	: Αρχικό σημείο εκκίνησης της δέσμης
O _{syst}	: Σημείο που υποδηλώνει την αρχή του συστήματος συντεταγμένων
P _{avg}	: Μέση ισχύς δέσμης Laser [W]
P _{avg,nom}	: Ονομαστική μέση ισχύς [W]
P _{def}	: Διάνυσμα θέσης σημείου παραμορφωμένου πλέγματος με συντεταγμένες (x1,y1)
P _{peak}	: Μέγιστη ισχύς παλμού [kW]
P _{peak,nom}	: Ονομαστική μέγιστη ισχύς παλμού [kW]
P _{pulse}	: Ισχύς του παλμού [kW]
P _{undef}	: Διάνυσμα θέσης σημείου απαραμόρφωτου πλέγματος με συντεταγμένες (X1,Y1)

q_{abl}	: Ροή θερμότητας που εξέρχεται από σύστημα λόγω αφαίρεσης υλικού [W/m^2]
q_{abs}	: Πυκνότητα ενέργειας απορροφούμενη από το υλικό [W/m^2]
q_{plasma}	: Θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το πλάσμα [W/m^2]
q_{rad}	: Ένταση ενός ακτινοβολίας που διαχέεται στο περιβάλλον [W/m^2]
R	: Συντελεστής ανακλαστικότητας
R_a	: Μέση τραχύτητα [μm]
R_{liquid}	: Συντελεστής ανακλαστικότητας για την υγρή φάση
R_p	: Συντελεστής ανακλαστικότητας για ακτινοβολία πλάσματος
$R_{shielding}$: Συντελεστής απωλειών της δέσμης λόγω θωράκισης από πλούμιο πλάσματος ατμών μετάλλου
R_{solid}	: Συντελεστής ανακλαστικότητας για τη στερεά φάση
R_{spot}	: Ακτίνα δέσμης στο σημείο εστίασης [μm]
R_{tol}	: Σχετική ακρίβεια
R_z	: Μέσο ύψος από κορυφή σε κοιλάδα
t	: Χρόνος [s]
T	: Θερμοκρασία [K]
T_0	: Αρχική θερμοκρασία τεμαχίου [K]
T_{amb}	: Θερμοκρασία περιβάλλοντος [K]
T_d	: Απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών [μm]
TEM	: Εγκάρσιος τρόπος ταλάντωσης
TKW	: Άνω πλάτος χάραξης από προσομοίωση [μm]
TKW'	: Άνω πλάτος χάραξης από πειράματα [μm]
TKW _{dg}	: Άνω πλάτος χάραξης από παραμορφωμένη γεωμετρία των FEM [μm]
t_{layer}	: Χρονική διάρκεια για την πλήρη σάρωση ενός επιπέδου σάρωσης [s]
T_{melt}	: Θερμοκρασία τήξης [K]
tol	: Ακρίβεια
T_p	: Θερμοκρασία ιόντων και ηλεκτρονίων πλάσματος [K]
T_{pc}	: Θερμοκρασία αλλαγής φάσης [K]
t_{period}	: Χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών [μs]
t_{pulse}	: Διάρκεια παλμού [ns]
t_{track}	: Χρονική διάρκεια για πλήρη σάρωση μιας ευθύγραμμης τροχιάς παλμών [s]
T_{vap}	: Θερμοκρασία βρασμού [K]
u	: Μεταβλητή για μετατόπιση κόμβου πλέγματος κατά X
U	: Μητρώο ενός λύσης
V	: Ταχύτητα δέσμης Laser [mm/s]
v	: Μεταβλητή για μετατόπιση κόμβου πλέγματος κατά Y
v_{abl}	: Ταχύτητα αφαίρεσης υλικού [m/s]
v_{beam}	: Συχνότητα της ακτινοβολίας [Hz]
W	: Πλάτος αρχικού τεμαχίου [μm]
W_{def}	: Ενέργεια παραμόρφωσης πλέγματος
w	: Μεταβλητή για μετατόπιση κόμβου πλέγματος κατά Z
w_0	: Ακτίνα δέσμης στη θέση με το μικρότερο μέγεθος
x	: Σημείο ενδιαφέροντος πάνω στην ακτινοβολούμενη επιφάνεια
x_{focus}	: Συντεταγμένη στον άξονα X του σημείου εστίασης της δέσμης [μm]
y_{focus}	: Συντεταγμένη στον άξονα Y του σημείου εστίασης της δέσμης [μm]
$Y_{interest}$: Θέση εγκάρσιου επιπέδου τομής X-Z

Z_{focus}	: Συντεταγμένη στον άξονα Z του σημείου εστίασης της δέσμης [μm]
α_{pocket}	: Μήκος πλευράς εσοχής [μm]
A	: Μητρώο-πίνακας
α	: Γωνία άξονα της δέσμης με κατακόρυφο άξονα [deg]
α_{bor}	: Γωνία άξονα της δέσμης με κατακόρυφο άξονα στη θέση του συνόρου [deg]
α_{IB}	: Συντελεστής ανάστροφης ακτινοβολίας πέδησης
α_{Mie}	: Συντελεστής για απορρόφηση Mie
α_{Pi}	: Συντελεστής για φωτο-ιονισμό
α_{pl}	: Συντελεστής απορρόφησης της δέσμης στο πλάσμα
β	: Διάνυσμα στήλης
$\Delta T_{1/2}$: Θερμοκρασιακό διάστημα μετάβασης για αλλαγή φάσης [K]
ε	: Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας
ε_1	: Ευθεία γραμμή παλινδρόμησης για επιφάνεια τεμαχίου
E_1^*	: Τυπική ενέργεια ιονισμού [eV]
ε_2	: Ευθεία γραμμή παλινδρόμησης για πυθμένα χάραξης
ε_3	: Ευθεία γραμμή παλινδρόμησης για αριστερό πλευρικό τοίχωμα
ε_4	: Ευθεία γραμμή παλινδρόμησης για δεξί πλευρικό τοίχωμα
Z	: Μέσος αριθμός του φορτίου ιόντων
θ	: Γωνία εισόδου της δέσμης στο φακό [deg]
θ^*	: Συνάρτηση εξομάλυνσης
θ_0	: Ημιγωνία κώνου σύγκλισης πραγματικής δέσμης που φτάνει στο τεμάχιο [deg]
θ_1	: Δείκτης φάσης 1
θ_2	: Δείκτης φάσης 2
θ_{ideal}	: Ελάχιστη ημιγωνία του κώνου σύγκλισης μιας ιδανικής δέσμης κατανομής Gauss [deg]
θ_{max}	: Μέγιστη γωνιά στην κορυφή που σχηματίζεται μεταξύ των δύο πλευρών ενός στοιχείου πλέγματος [deg]
θ_{min}	: Ελάχιστη γωνιά στην κορυφή που σχηματίζεται μεταξύ των δύο πλευρών ενός στοιχείου πλέγματος [deg]
θ_{ε}	: Γωνιά στην κορυφή που σχηματίζεται μεταξύ των δύο πλευρών ενός ιδανικού στοιχείου πλέγματος [deg]
I_1	: Πρώτη αναλλοίωτη του ισοχωρικού μέρους του δεξιού τανυστή παραμόρφωσης κατά Cauchy-Green
κ	: Επανάληψη του επιλύτη
κ_b	: Ιδεατό μέτρο συμπίεσεως
λ	: Μήκος κύματος δέσμης Laser [μm]
μ	: Ιδεατό μέτρο διάτμησης
ρ	: Πυκνότητα [kg/m^3]
ρ_{ph1}	: Πυκνότητα φάσης 1 [kg/m^3]
ρ_{ph2}	: Πυκνότητα φάσης 2 [kg/m^3]
σ	: Σταθερά Στέφαν [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$]
χ	: Διάνυσμα στήλης

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διατριβής

Η χάραξη με Laser (laser engraving) είναι μια μηχανουργική κατεργασία που χρησιμοποιείται στις τεχνολογίες παραγωγής σε μικροκλίμακα και εφαρμόζεται σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες κατασκευής προϊόντων υψηλής τεχνολογίας. Σημαντικές πρακτικές εφαρμογές στη βιομηχανία αποτελούν η κατασκευή καλουπιών υψηλών απαιτήσεων για την παραγωγή σύνθετων τεμαχίων με εφαρμογές στην ιατρική βιομηχανία και στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρονικών καθώς και η εγχάραξη τρισδιάστατων διαμορφώσεων και λογοτύπων σε επιφάνειες καλουπιών έγχυσης αλλά και ένθετων πλακιδίων κοπτικών εργαλείων. Άλλα σύγχρονα παραδείγματα που ενισχύουν την αξία της κατεργασίας αυτής αποτελούν τα προϊόντα της βιοϊατρικής επιστήμης και τεχνολογίας. Μικρο-διαμορφώσεις χαραγμένες με Laser απαιτούνται σε ιατρικά εμφυτεύματα, αγγειακά στεντς (stents), συσκευές μεταφοράς φαρμάκων καθώς και στη μηχανική των ιστών (tissue engineering), όπου χρησιμοποιούνται ικριώματα με ελεγχόμενο μέγεθος πόρων για το σχηματισμό νέων ιστών οι οποίοι θα εμφυτευθούν σε ασθενείς ως υποκατάστατα μοσχευμάτων.

Μέσω της κατεργασίας αυτής επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια στις πραγματοποιούμενες χαραξείς σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους, διότι δεν χρησιμοποιεί κοπτικό εργαλείο αλλά το υλικό αφαιρείται κυρίως μέσω της ατμοποίησης του, εξαιτίας της ισχυρής ενεργειακής προσβολής. Έτσι, απαραίτητη κρίνεται η μελέτη των κατάλληλων κάθε φορά συνθηκών κατεργασίας προκειμένου η ποιότητα των κατεργασμένων επιφανειών να είναι η επιθυμητή, να αποφεύγεται η δημιουργία ανεπιθύμητων ελαττωμάτων όπως η κλίση (kerf) στα χείλη των διαμορφώσεων και τέλος να μεγιστοποιείται η παραγωγικότητα της κατεργασίας.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται η μελέτη της επίδρασης των διαφόρων συνθηκών κατεργασίας της χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων στο τελικό αποτέλεσμα της χάραξης ευρέως χρησιμοποιούμενων μηχανολογικών υλικών με στόχο τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας. Τέτοιες συνθήκες, εκτός των ιδιοτήτων του κατεργαζόμενου υλικού, είναι η μέση ισχύς του Laser, η ταχύτητα της δέσμης, η συχνότητα επανάληψης των παλμών, το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού, κ.λπ.. Για να επιτευχθεί η διερεύνηση αυτή θα δημιουργηθεί ένα μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας αυτής με πεπερασμένα στοιχεία, ενώ ταυτόχρονα μεγάλη σειρά πειραμάτων στο κέντρο κατεργασιών DMG MORI LASERTEC 40 που διαθέτει το Εργαστήριο Μικροκοπής & Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης, θα επιβεβαιώσει το δημιουργημένο μοντέλο. Επισημαίνεται ότι μέχρι σήμερα δεν υπάρχει διεθνώς κάποιο άλλο επιβεβαιωμένο μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας αυτής. Αυτήν ακριβώς την ανάγκη θα προσπαθήσει να ερευνήσει και να καλύψει η παρούσα διδακτορική διατριβή, προσφέροντας τελικά ένα πειραματικά επιβεβαιωμένο προσομοιωτικό μοντέλο της κατεργασίας με το οποίο θα είναι εφικτή η ανά περίπτωση βέλτιστη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας.

Προβλήματα που παρουσιάζονται στην κατεργασία αυτή και αποτελούν τα ερευνητικά ζητούμενα της παρούσας διατριβής αφορούν:

- την ποιότητα της κατεργασμένης γεωμετρίας,
- την επίτευξη της ακρίβειας των διαστάσεων που έχουν προεπιλεγεί,
- την επίτευξη της μορφής των διαμορφώσεων που έχουν μελετηθεί,
- την αποφυγή ανεπιθύμητης κλίσης στα χείλη των διαμορφώσεων (kerf),
- τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας της κατεργασίας.

Στις μηχανολογικές εφαρμογές η επίδραση των παραπάνω αναφερομένων προβλημάτων είναι σημαντική, μια και οι επιθυμητές γεωμετρίες μελετώνται με ιδιαίτερα σφιχτές ανοχές διαστατικής ακρίβειας και ακρίβειας μορφής. Σκοπός της εργασίας είναι η διεξοδική μελέτη της κατεργασίας χάραξης, η διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας, η πρόβλεψη της τελικής γεωμετρίας της χάραξης, όπως αυτή θα πρόκυπτε εάν η κατεργασία υλοποιούνταν στην πράξη. Επιπρόσθετα, κύριος στόχος η πρόβλεψη ορισμένων μεγεθών όπως το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού τα οποία προαπαιτούνται από τους χειριστές ενός κέντρου κατεργασιών για την παραμετροποίηση του και η πρόβλεψη των ατελειών-ελαττωμάτων που προκύπτουν κατά τη χάραξη. Με τη βοήθεια του προαναφερόμενου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων θα δοθεί η δυνατότητα προεκτίμησης των κατάλληλων συνθηκών ανάλογα το επιθυμητό κριτήριο (παραγωγικότητα κατεργασίας, ποιότητα χάραξης, ανοχές διαστάσεων και μορφής, περιορισμός κλίσης στα πλευρικά τοιχώματα, κ.λπ.).

Ιδιαίτερη σπουδαιότητα αποδίδεται στην προτεινόμενη έρευνα λόγω της χαμηλής διείσδυσης της συγκεκριμένης κατεργασίας στην Ελληνική Βιομηχανία. Η κατεργασία αυτή μπορεί να δώσει λύση σε ποικιλία προβλημάτων σε μεγάλη γκάμα κατασκευαστών ή άλλων Βιομηχανιών. Η σπουδαιότητα λοιπόν, εκτός της πρωτοτυπίας της έρευνας, εστιάζεται και στη διείσδυση της τεχνολογίας αυτής στην Ελλάδα.

1.2 Στόχοι της διατριβής

Στόχος που οδήγησε στην υλοποίηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η ανάπτυξη ενός νέου, καινοτόμου, πρακτικού, υψηλής ακρίβειας και πειραματικά επιβεβαιωμένου μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων το οποίο θα είναι σε θέση να προβλέψει θεμελιώδη μεγέθη που σχετίζονται με τη γεωμετρία της χάραξης. Προς αυτόν το σκοπό τέθηκε να αναπτυχθούν δύο συγγενικά προσομοιωτικά μοντέλα τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους, κυρίως ως προς το χρόνο επίλυσης και το είδος των αποτελεσμάτων που δίνουν στο χρήστη.

Το πρώτο προσομοιωτικό μοντέλο είναι ένα 3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος για το μοντέλο αυτό ήταν να δέχεται ως είσοδο όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που σχετίζονται με την κατεργασία όπως αυτή θα υλοποιούνταν υποθετικά σε ένα πραγματικό κέντρο κατεργασιών Laser και να προβλέπει ποια θα είναι η 3D γεωμετρία της χάραξης καθώς και ορισμένες παραμέτρους που σχετίζονται με αυτήν, όπως το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού. Πιο αναλυτικά, το προσομοιωτικό μοντέλο θα δέχεται ως είσοδο δεδομένα που αφορούν τις συνθήκες του περιβάλλοντος, το υλικό, τις διαστάσεις του αρχικού τεμαχίου, τα χαρακτηριστικά του υποθετικού κέντρου κατεργασιών Laser του οποίου η λειτουργία προσομοιώνεται. Επίσης θα δέχεται τον τρόπο με τον οποίο υλοποιείται η χάραξη, τις συνθήκες κατεργασίας και φυσικά τις ζητούμενες ιδανικές διαστάσεις της γεωμετρίας προς χάραξη. Έχοντας πραγματοποιηθεί η σχετική μοντελοποίηση όλων των φαινομένων και μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία θα επιλύεται το μοντέλο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού COMSOL.

Από το λογισμικό επίλυσης των πεπερασμένων στοιχείων θα εξάγεται η 3D γεωμετρία χάραξης όπως αυτή θα χαράζονταν και στην πράξη εάν πραγματοποιούνταν η κατεργασία με όμοιο τρόπο σε ένα κέντρο κατεργασιών Laser. Βασική επιδίωξη γι' αυτό το 3D μοντέλο προσομοίωσης είναι και ο υπολογισμός του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού, δηλαδή το μέσο πάχος του υλικού που αφαιρείται κατά τη σάρωση ενός επιπέδου πάνω στο τεμάχιο με παλμούς δέσμης Laser. Η πρόβλεψη της τιμής του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού

συναρτήσει όλων των παραμέτρων που ορίζουν την κατεργασία αποτελεί εξαιρετικά σημαντικό επίτευγμα. Αυτό διότι για την πραγματοποίηση μιας χάραξης σε ένα κέντρο κατεργασιών Laser η τιμή αυτή προαπαιτείται και πρέπει να είναι γνωστή έτσι ώστε το λογισμικό του κέντρου κατεργασιών να υπολογίσει πόσα επίπεδα σάρωσης χρειάζεται να πραγματοποιηθούν για να επιτευχθεί το ζητούμενο τελικό βάθος χάραξης. Επιπλέον, με τη χρήση του προσομοιωτικού μοντέλου αυτού στόχος είναι να μελετηθεί η επίδραση των συνθηκών κατεργασίας, όπως η μέση ισχύς, η ταχύτητα της δέσμης και η συχνότητα επανάληψης των παλμών στο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού και στον ρυθμό αποβολής υλικού της κατεργασίας για διάφορα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά. Έτσι, θα επιδιωχθεί η βελτιστοποίηση της κατεργασίας υπό τη σκοπιά της αύξησης της παραγωγικότητας επιλέγοντας τις βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί πειραματικά η ορθή λειτουργία του 3D μοντέλου προσομοίωσης θα πραγματοποιηθούν πειράματα χάραξης με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser χάραξης DMG MORI LASERTEC 40 τα οποία θα μετρηθούν με τη χρήση του 3D οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K και θα γίνει αντιπαραβολή των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτών από τις προσομοιώσεις.

Το δεύτερο προσομοιωτικό μοντέλο είναι ένα ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων για τον προσδιορισμό της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και διαστατικών αποκλίσεων χαραγμένης γεωμετρίας λόγω λοξοποίησης (kerf). Το ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης είναι μια παραλλαγή του πρώτου. Η ανάπτυξή του έχει ως στόχο την πρόβλεψη των ατελειών στη χαραγμένη γεωμετρία, όπως η εμφάνιση μιας γωνίας κλίσης στα πλευρικά τοιχώματα της χάραξης έναντι των ιδανικά επιδιωκόμενων κατακόρυφων τοιχωμάτων και την πρόβλεψη των διαστατικών αποκλίσεων λόγω της μεταβολής του άνω πλάτους χάραξης και του κάτω πλάτους χάραξης σε σχέση με την ονομαστική ή ιδανικά επιδιωκόμενη διάσταση της χαραγμένης γεωμετρίας. Το ψευδο-3D μοντέλο υλοποιείται πραγματοποιώντας μια 2D προσομοίωση για μια θέση ενός εγκάρσιου επίπεδου τομής της γεωμετρίας που χαράζεται.

Ο λόγος που επιλέχθηκε μια 2D επίλυση είναι η επιδίωξη για δυνατότητα πραγματοποίησης προσομοιώσεων χαράξεων για γεωμετρίες μεγαλύτερων διαστάσεων σε σχέση με το 3D μοντέλο που αναπτύχθηκε πρότερα με ταυτόχρονη σημαντική μείωση στο χρόνο επίλυσης. Πραγματοποιώντας την ανάλογη μοντελοποίηση για την κατεργασία και επιλύοντας το μοντέλο με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL θα προβλέπεται γεωμετρία που θα είχε η χάραξη σε ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής συμπεριλαμβάνοντας τις ατέλειες λόγω λοξοποίησης. Έτσι, έπειτα από την εκτέλεση μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων θα είναι εφικτός ο προσδιορισμός της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας όπως η μέση ισχύς, η ταχύτητα της δέσμης και η συχνότητα επανάληψης των παλμών αλλά και των διαστάσεων της γεωμετρίας προς χάραξη, όπως το βάθος χάραξης στη σχηματιζόμενη γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων, το άνω πλάτος και το κάτω πλάτος χάραξης. Ακόμα, αναλύοντας τα αποτελέσματα αυτά θα είναι εφικτή η βελτιστοποίηση των επιλεγόμενων συνθηκών κατεργασίας, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση των ατελειών και την αύξηση της διαστατικής ακρίβειας. Τέλος, το μοντέλο αυτό θα επιβεβαιωθεί πειραματικά συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις με τα πειραματικά αποτελέσματα από αντίστοιχες χαράξεις που θα πραγματοποιηθούν.

1.3 Δομή της διατριβής

Το κεφάλαιο 2 είναι αυτό της στάθμης των γνώσεων. Στο κεφάλαιο αυτό βρίσκεται συγκεντρωμένη όλη η πληροφορία και η γνώση που σχετίζεται με το αντικείμενο της διατριβής που προϋπάρχει είτε από βιβλία, είτε από δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά είτε από παρουσιάσεις σε συνέδρια. Αρχικά γίνεται μια γενική αναφορά σχετικά με την κατεργασία

χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων και τις εφαρμογές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση συναφών προβλημάτων. Έπειτα παρουσιάζονται οι κυριότερες δημοσιεύσεις σε διεθνές επίπεδο που σχετίζονται με την έρευνα για την κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser οι οποίες ταξινομούνται σε πέντε βασικές κατηγορίες. Πρώτα παρουσιάστηκαν αυτές που μελετούν πρακτικές εφαρμογές και έπειτα αυτές που μελετούν την πειραματική διερεύνηση της κατεργασίας. Μετά παρουσιάστηκαν αυτές που ασχολούνται με τη μοντελοποίηση και προσομοίωση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού και στη συνέχεια αυτές που ασχολούνται με την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία του μηχανισμού αυτού. Ακολούθως, παρουσιάστηκαν οι δημοσιεύσεις αυτές που μελετούν την περίπτωση της προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων και τέλος αυτές που ερευνούν το σχηματισμό κλίσης στις περιφερειακές συνοριακές επιφάνειες της χαραγμένης γεωμετρίας.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο τρόπος ανάπτυξης του 3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων για τον προσδιορισμό του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού. Σε πρώτη φάση γίνεται μια γενική περιγραφή του μοντέλου και παρουσιάζεται η βασική δομή του. Μετά πραγματοποιείται μια παρουσίαση των βασικών μερών και εξαρτημάτων που απαρτίζουν ένα κέντρο κατεργασιών Laser χάραξης, έτσι ώστε να οριστούν οι παράμετροι που θα ληφθούν υπόψη στη μοντελοποίηση. Έπειτα παρουσιάζεται η μοντελοποίηση για το χάρτη σάρωσης, την εισερχόμενη και προσπίπτουσα δέσμη, την απορρόφηση, την αφαίρεση υλικού, την τεχνική μετακίνησης πλέγματος, τη μετάδοση θερμότητας, την αλλαγή φάσης ενώ ορίστηκαν οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σχετικά με τις μεθόδους και τεχνικές επίλυσης που εφαρμόστηκαν μέσω του γενικής χρήσεως λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL. Μετά παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος και η διαδικασία με την οποία υλοποιείται εξ ολοκλήρου μια προσομοίωση. Έχοντας ολοκληρώσει το κομμάτι της μοντελοποίησης και της επίλυσης ακολούθησε η παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την πειραματική επιβεβαίωση του προσομοιωτικού μοντέλου. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την περίπτωση χαραξιών τετραγωνικών εσοχών σε διάφορα υλικά με διαφορετικούς συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας. Γίνεται στη συνέχεια αντιπαραβολή των τιμών του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού που προέκυψε με τις αντίστοιχες τιμές από τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων προέκυψαν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού καθώς και στο ρυθμό αποβολής υλικού.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάπτυξη του ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και των διαστατικών αποκλίσεων της χαραγμένης γεωμετρίας λόγω εμφάνισης του *kerf*. Γίνεται αρχικά μια γενική περιγραφή του προσομοιωτικού μοντέλου και στη συνέχεια ακολουθεί η μοντελοποίηση. Παρουσιάζεται εκ νέου η δημιουργία του χάρτη σάρωσης, η μοντελοποίηση της επίδρασης της σύγκλισης της δέσμης στον σχηματισμό της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και ο ορισμός εκ νέου των αρχικών και συνοριακών συνθηκών. Έπειτα παρουσιάζεται η αναλυτική πορεία που ακολουθείται για την υλοποίηση μιας προσομοίωσης. Στην συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που εφαρμόστηκε για τη διενέργεια πειραμάτων χάραξης με στόχο την πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον προσδιορισμό των ατελειών της χάραξης και των διαστατικών αποκλίσεων λόγω λοξοποίησης για πολλαπλούς συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας και βάθους χάραξης. Γίνεται αντιπαραβολή των τιμών της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων, του άνω πλάτους χάραξης και του κάτω πλάτους χάραξης

που προβλέφθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που μετρήθηκαν στις πειραματικές χαράξεις. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων διαπιστώνεται ποια είναι η επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στον σχηματισμό των διαστατικών αποκλίσεων της γεωμετρίας χάραξης και αναζητούνται οι βέλτιστες τιμές αυτών για τη βελτίωση της ακρίβειας της κατεργασίας.

Στο κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται μια σύνοψη των πεπραγμένων στην παρούσα διδακτορική διατριβή και παρουσιάζονται ορισμένες ιδέες για περαιτέρω εξέλιξη των προσομοιωτικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν καθώς και ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.


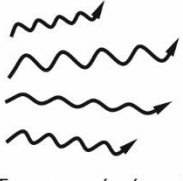
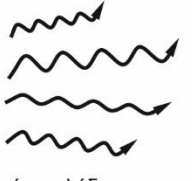

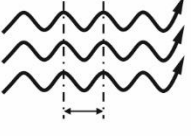
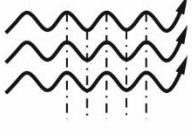
2 Στάθμη γνώσεων

2.1 Κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων

Οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser ανήκουν στη μεγάλη οικογένεια των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού. Υποκατηγορία αυτών των κατεργασιών αποτελεί η κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων. Η κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser βρίσκει πληθώρα εφαρμογών στη βιομηχανία (χάραξη καλουπιών, διαμόρφωση κοπτικών εργαλείων, κατασκευή μικρο-καναλιών λίπανσης, παραγωγή ιατρικών εργαλείων, κ.λπ.) καθώς επιτρέπει τη χάραξη μικρών και περίπλοκων γεωμετριών με υψηλή ακρίβεια σε μεγάλη ποικιλία υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά, γυαλί, πλαστικά και σύνθετα υλικά.

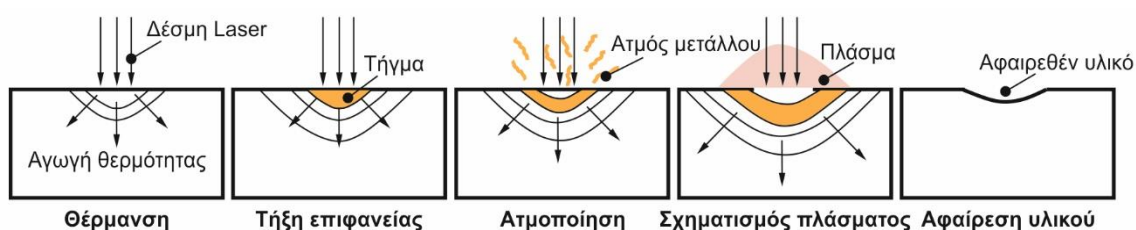
Ο όρος Laser προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation που μεταφράζεται στα Ελληνικά ως ενίσχυση φωτός μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας. Η πρώτη θεμελίωση της θεωρίας των Laser πραγματοποιήθηκε από τον Einstein το 1917 ο οποίος έδωσε την ιδέα και απέδειξε τη δυνατότητα της εξαναγκασμένης εκπομπής (stimulated emission). Ως Laser ονομάζουμε την παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από μια διάταξη που είναι αποτέλεσμα εξαναγκασμένης εκπομπής φωτονίων σε ένα ενεργό μέσο (αέριο, υγρό ή στερεό) το οποίο διεγείρεται, είτε οπτικά με φωτόνια, είτε ηλεκτρικά με ηλεκτρόνια. Διαφέρει από το συνηθισμένο φως άλλων φωτεινών πηγών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 διότι χαρακτηρίζεται από ορισμένες μοναδικές ιδιότητες όπως:

- Μονοχρωματικότητα (monochromatic) καθώς τα φωτόνια της δέσμης έχουν όλα την ίδια ενέργεια, συχνότητα και μήκος κύματος.
- Κατευθυντικότητα (directionality) καθώς έχουν όλα τα φωτόνια την ίδια διεύθυνση που σημαίνει ότι τα κύματα κινούνται όλα μαζί σε ευθεία γραμμή χωρίς να υπάρχει διασπορά.
- Συμφωνία φάσης (coherence) καθώς τα φωτόνια της δέσμης έχουν όλα την ίδια φάση που σημαίνει ότι οι κορυφές και οι κοιλάδες όλων των κυμάτων είναι σε συμφωνία.
- Υψηλή ένταση (high intensity) καθώς η δέσμη συγκεντρώνει υψηλή ισχύ σε μικρή επιφάνεια.

	Κατευθυντικότητα	Μονοχρωματικότητα	Συμφωνία φάσης
Συνηθισμένο φως	 <p>Λάμπα</p> <p>Φωτόνια προς κάθε κατεύθυνση</p>	 <p>Πολλά διαφορετικά μήκη κύματος</p>	 <p>Ασυμφωνία κοιλάδων και κορυφών</p>
Δέσμη Laser	 <p>Πηγή Laser</p> <p>Φωτόνια προς μια κατεύθυνση</p>	 <p>Ίδια μήκη κύματος</p>	 <p>Κορυφές και κοιλάδες σε συμφωνία</p>

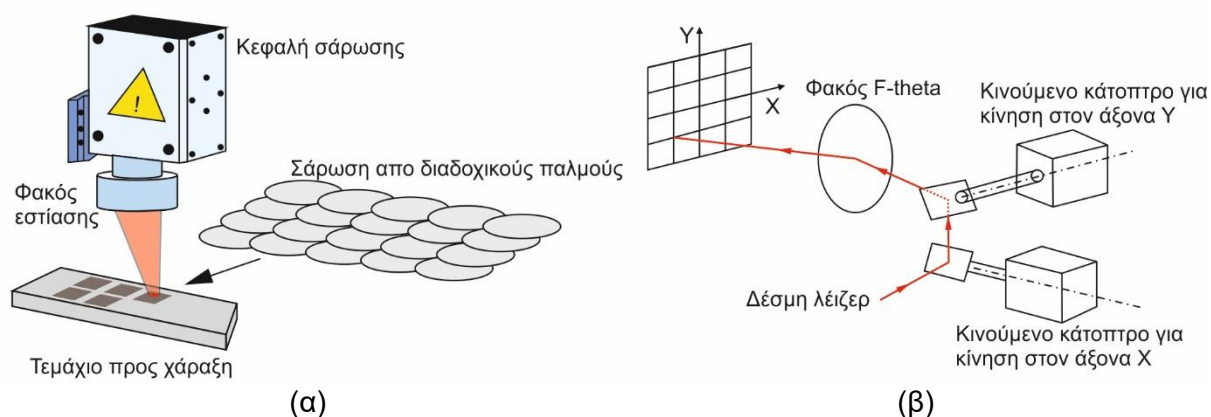
Σχήμα 2.1: Βασικά χαρακτηριστικά των Laser

Στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser μέσω μιας εργαλειομηχανής CNC παράγεται μια δέσμη Laser η οποία εστιάζεται και κατευθύνεται κατάλληλα προς το τεμάχιο που πρόκειται να χαραχτεί. Η αφαίρεση υλικού επιτυγχάνεται μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της δέσμης Laser και του υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου (στόχου). Όταν η δέσμη αλληλοεπιδρά με το υλικό του στόχου, τα ηλεκτρόνια του υλικού διεγείρονται από τα φωτόνια της δέσμης Laser [1]. Ως εκ τούτου το υποσύστημα των ηλεκτρονίων θερμαίνεται φτάνοντας σε μια υψηλή θερμοκρασία και η απορροφούμενη ενέργεια μεταφέρεται στο πλέγμα των ατόμων. Η απορροφούμενη ενέργεια του παλμού αυξάνει τη θερμοκρασία στο υλικό προκαλώντας σταδιακά το λιώσιμο του. Καθώς ο παλμός συνεχίζει να παρέχει ενέργεια το θερμαίνει μέχρις ότου φτάσει στην θερμοκρασία βρασμού κατά την οποία τα άτομα έχουν αποκτήσει αρκετή ενέργεια για τη μετατροπή σε αέρια φάση του τήγματος [2]. Μεταφέρεται δηλαδή η ενέργεια των φωτονίων της δέσμης στο υλικό-στόχο με τη μορφή θερμότητας και το υλικό αφαιρείται άμεσα κυρίως μέσω της ατμοποίησης του. Τα παραπάνω φαινόμενα παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα 2.2 [3].



Σχήμα 2.2: Βασικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης Laser με το υλικό

Όσο αναφορά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser, το υλικό σε αυτή την κατεργασία αφαιρείται μέσω περασμάτων της δέσμης Laser σε πολλαπλά επίπεδα (layers). Στο κάθε επίπεδο που σαρώνεται δημιουργούνται αλληλεπικαλυπτόμενοι κρατήρες σε συγκεκριμένη διάταξη προερχόμενοι από τους παλμούς της δέσμης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 (α) [4]. Έτσι, αφαιρώντας σε κάθε επίπεδο ένα στρώμα υλικού με συγκεκριμένο πάχος και σχήμα με την πραγματοποίηση σταδιακά περασμάτων σε πολλαπλά επίπεδα σχηματίζεται η προς χάραξη γεωμετρία. Οι κινήσεις της δέσμης για τη σάρωση του τεμαχίου πραγματοποιούνται μέσω ηλεκτρονικά ελεγχόμενων CNC (Computerized Numerical Control) κέντρων κατεργασιών Laser. Οι εργαλειομηχανές αυτές δέχονται ως είσοδο προγράμματα που έχουν δημιουργηθεί με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού CAM (Computer Aided Manufacturing) και περιλαμβάνουν όλες τις κινήσεις της δέσμης καθώς και τις παραμέτρους που απαιτούνται για τη χάραξη. Για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων κατά την κατεργασία και ταυτόχρονα διατήρηση υψηλής ακρίβειας στην πλειονότητα των περιπτώσεων, το τεμάχιο παραμένει ακίνητο στο τραπέζι της εργαλειομηχανής και μετακινείται η δέσμη Laser με τη χρήση κατάλληλου συστήματος διεύθυνσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 (β) [5,6]. Το τραπέζι μαζί με το τεμάχιο μετακινούνται μόνο σε περιπτώσεις που το μέγεθος του τεμαχίου υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος για τη μετακίνηση της δέσμης. Το τελικό αποτέλεσμα κατά τη χάραξη με παλμούς δέσμης Laser επηρεάζεται άμεσα από παραμέτρους που αφορούν τα χαρακτηριστικά της δέσμης όπως η ένταση, η διάμετρος κατά την εστίαση, η ποιότητα και η ταχύτητα της δέσμης καθώς επίσης η χρονική διάρκεια, η συχνότητα των παλμών κ.λπ.. Ακόμα, καθώς πρόκειται για μια κατεργασία στην οποία πραγματοποιείται αφαίρεση υλικού σε πολλαπλά επίπεδα, καθοριστικό μέγεθος για το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού.



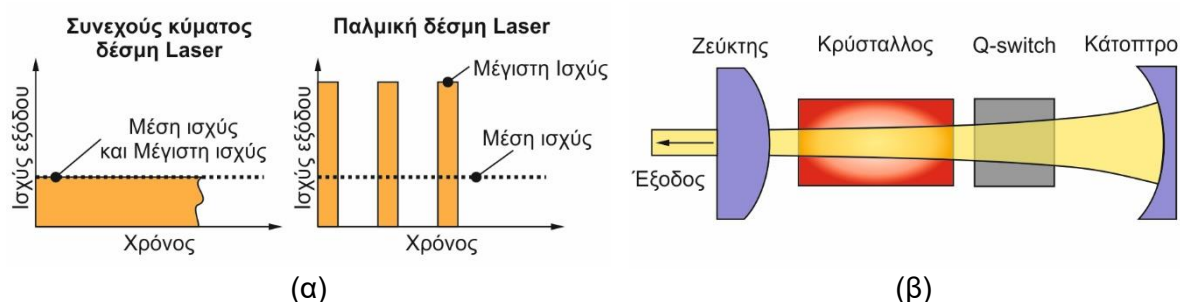
Σχήμα 2.3: (α) Σχηματική απεικόνιση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser (β) Τυπικό σύστημα διεύθυνσης της δέσμης αποτελούμενο από δύο κινητά κάτοπτρα ανάκλασης και οπτικό φακό F-theta

Συγκριτικά με τις συμβατικές κατεργασίες οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα που έχουν να κάνουν με τη φύση της κατεργασίας. Αρχικά, βασικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα πολύ μεγάλης εστίασης της δέσμης σε διαμέτρους της τάξεως μερικών μικρομέτρων. Έτσι, παρέχεται μια πηγή θερμότητας μεγάλης εντάσεως εστιασμένη σε μια πολύ μικρή περιοχή με αποτέλεσμα να καθίσταται εφικτή η χάραξη μικρο-διαμορφώσεων χωρίς να επηρεάζονται σημαντικά οι γύρω περιοχές. Περιορίζεται δηλαδή σημαντικά η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat affected zone) και περιορίζονται οι παραμορφώσεις κατά την κατεργασία. Επιπλέον, λόγω της απουσίας άμεσης επαφής εργαλείου-τεμαχίου δεν εμφανίζονται προβλήματα που κυριαρχούν στις συμβατικές κατεργασίες όπως η φθορά και η θραύση των κοπτικών εργαλείων, οι αυτοδιεγειρόμενες ταλαντώσεις (chattering) και οι παραμορφώσεις της εργαλειομηχανής. Ακόμα, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα να κατευθυνθεί η δέσμη με τη χρήση συστημάτων διεύθυνσης της δέσμης από καθρέπτες, έτσι ώστε να γίνεται εφικτή η κατεργασία σε περιοχές που κανονικά δεν θα ήταν προσβάσιμες με συμβατικά εργαλεία. Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η περιορισμένη ρύπανση του περιβάλλοντος λόγω της μη χρήσης υγρών κοπής τα οποία επιβαρύνουν το φυσικό περιβάλλον μετά τη χρήση και απομάκρυνσή τους. Βέβαια οι κατεργασίες αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser εμφανίζουν και ορισμένα μειονεκτήματα που τις καθιστούν λιγότερο κατάλληλες για κάποιες εφαρμογές. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η μη καταλληλότητα τους για κατεργασία μετάλλων με υψηλή ανακλαστικότητα σε δέσμες Laser. Ακόμα, μειονέκτημα αποτελεί η χαμηλή τους απόδοση και παραγωγικότητα σε σχέση με τις συμβατικές κατεργασίες. Επίσης, ο εξοπλισμός που απαιτείται για την κατεργασία (κέντρο κατεργασιών Laser) έχει υψηλό κόστος κτήσης και κατά τη λειτουργία του χαρακτηρίζεται από υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

Από τους διάφορους τύπους Laser που υπάρχουν διαθέσιμα, στις κατεργασίες με χρήση δέσμης Laser έχουν επικρατήσει τα Laser διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και τα Laser νεοδυμίου υπτρίου-αλουμινίου-γρανάτη (**N**eodymium **D**oped **Y**ttrium **A**luminum **G**arnet) Nd:YAG. Τα Laser CO₂ έχουν μήκος κύματος στα 10.6μm, υψηλή μέση ισχύ, υψηλή απόδοση και καλή ποιότητα ακτίνας καθιστώντας τα κατάλληλα κυρίως για κατεργασίες κοπής ελασμάτων με υψηλές ταχύτητες. Τα Nd:YAG Laser με μήκος κύματος στα 1064nm έχουν μικρότερη ισχύ αλλά όταν χρησιμοποιούνται ως παλμικά Laser (pulsed mode) με παλμούς διάρκειας της τάξεως των νανοδευτερολέπτων τότε επιτυγχάνουν υψηλή μέγιστη ισχύ (peak power) που τα καθιστά κατάλληλα για κατεργασία είτε για μικρά είτε για μεγάλα βάθη κατεργασίας [7,8]. Λόγω του μικρότερου μήκους κύματος τα Nd:YAG Laser έχουν μικρότερη ανακλαστικότητα για ορισμένα μέταλλα όπως ο σίδηρος και το αλουμίνιο σε σχέση με τα Laser CO₂ και έτσι

μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κατεργασία μετάλλων με υψηλή ανακλαστικότητα που θα ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθεί με τα Laser CO₂ [9]. Παρ' όλα αυτά, λόγω του ότι τα Nd:YAG Laser έχουν εισέλθει σχετικά πρόσφατα στον βιομηχανικό κλάδο και το κόστος κτήσης τους είναι υψηλότερο δεν είναι τόσο ευρέως διαδεδομένα σε σχέση με τα Laser CO₂.

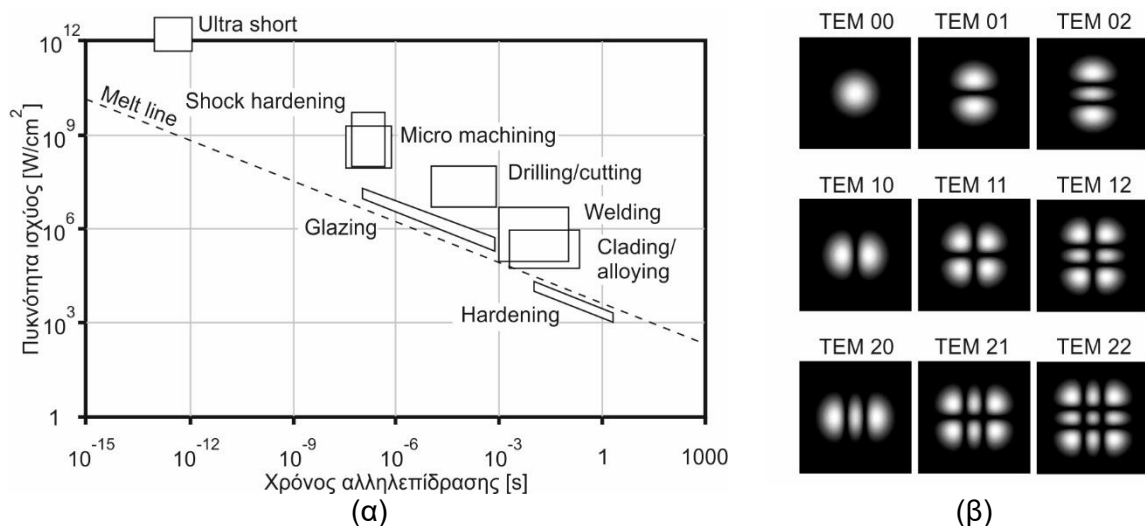
Τα Laser ανάλογα με τον τύπο της εξαγόμενης δέσμης διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: τα Laser συνεχούς κύματος (continuous wave CW) και τα παλμικά Laser (pulsed). Στα Laser συνεχούς κύματος η εξαγόμενη ισχύς της δέσμης είναι σταθερή στο χρόνο και αυτά βρίσκουν εφαρμογές σε κατεργασίες όπως συγκόλληση και κοπή μετάλλων. Τα παλμικά Laser παράγουν μια σειρά από παλμούς υψηλής μέγιστης ισχύος (peak power) με συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (pulse duration) και συχνότητα επανάληψης (pulse repetition rate). Ένα παλμικό Laser παράγει παλμούς με μέγιστη ισχύ (peak power) πολύ υψηλότερη από τη μέση ισχύ (average power) της δέσμης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 (α) διότι η ενέργεια συγκεντρώνεται κατά τη διάρκεια που δεν στέλνεται παλμός και απελευθερώνεται συγκεντρωμένη στη συνέχεια [10]. Η ευελιξία που παρέχουν τα παλμικά Laser λόγω του ότι με αυτά μπορούν να πραγματοποιηθούν πληθώρα συνδυασμοί από συνθήκες κατεργασίας αναφορικά με το είδος των παλμών, τα καθιστά καταλληλότερα για κατεργασίες όπως η χάραξη και η διάτρηση με δέσμη Laser. Συνηθέστερη μέθοδος για την παραγωγή παλμών διάρκειας της τάξεως των νανοδευτερολέπτων είναι το Q-switching. Το σύστημα Q-switch λειτουργεί σαν ένα διάφραγμα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 (β) το οποίο όταν είναι κλειστό (ελαχιστοποίηση Q παράγοντα) αυξάνει τις απώλειες της κοιλότητας και εμποδίζει την αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας εφόσον το Laser δεν λειτουργεί σαν ταλαντωτής επειδή παρεμποδίζεται η διάδοση της ακτινοβολίας μεταξύ των κατόπτρων. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται σημαντικά η αναστροφή του πληθυσμού (κατάσταση στην οποία το μεγαλύτερο ποσοστό των ατόμων ενός συστήματος είναι σε διεγερμένη στάθμη) όταν είναι κλειστό το διάφραγμα [11]. Όταν το διάφραγμα ανοίξει (μεγιστοποίηση Q παράγοντα) όλη η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στο ενεργό μέσο με τη μορφή αναστροφής πληθυσμού απελευθερώνεται σε ένα μόνο παλμό.



Σχήμα 2.4: (α) Συγκριτική παρουσίαση της μέγιστης ισχύος (peak power) και της μέσης ισχύος (average power) για Laser συνεχούς κύματος (continuous wave) και παλμικό Laser (pulsed)
(β) Διάταξη Q-switching

Η πυκνότητα ισχύος της δέσμης ή αλλιώς ένταση στο σημείο εστίασης (power density, intensity, irradiance) προσδιορίζεται ως συνάρτηση της ισχύος της δέσμης, της διαμέτρου και της συνάρτησης κατανομής και αποτελεί καθοριστικό μέγεθος για την κατεργασία. Για τις δέσμες με ομοιόμορφη κατανομή της ισχύος (top hat beam profile) υπολογίζεται διαιρώντας την ισχύ της δέσμης με το εμβαδόν της επιφάνειας της δέσμης στο σημείο εστίασης. Για δέσμες με διαφορετική κατανομή ορίζεται μια σχετική πυκνότητα ισχύος καθώς, για παράδειγμα σε δέσμη με κατανομή Gauss (gaussian beam profile) που είναι και η συνηθέστερη η πυκνότητα ισχύος στον οπτικό άξονα είναι αισθητά μεγαλύτερη και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από

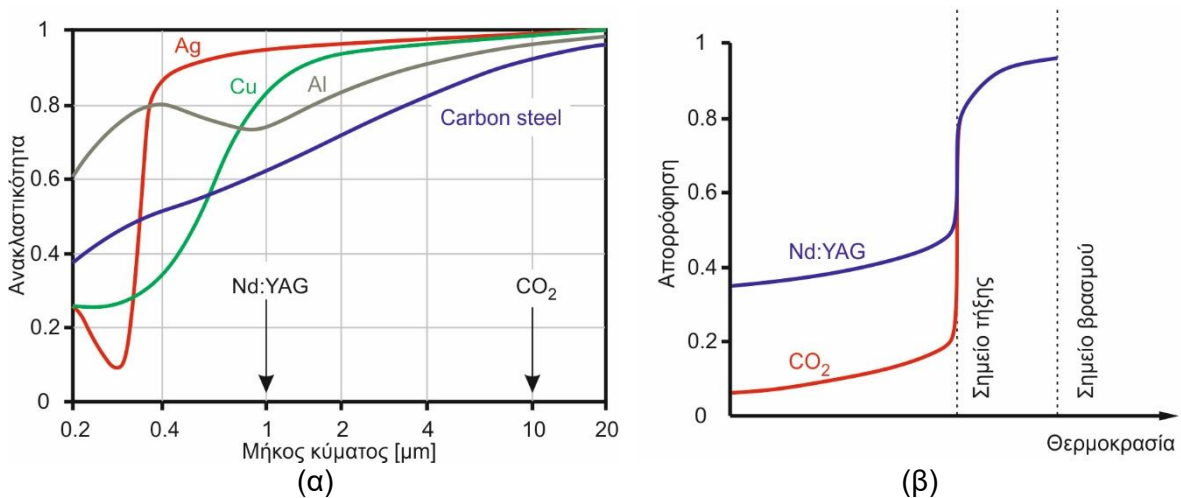
αυτόν. Όπως έδειξαν ο Meijer και άλλοι με βάση την πυκνότητα ισχύος που διαθέτει η δέσμη Laser καθώς επίσης και τη χρονική διάρκεια του παλμού μπορεί να γίνει μια κατηγοριοποίηση σχετικά με το είδος της κατεργασίας (σκληρυνση, συγκόλληση, διάτρηση, κοπή, χάραξη) για την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5 (α) [12]. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5 (α) για την κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser απαιτείται δέσμη Laser με ελάχιστη πυκνότητα ισχύος 10^8 W/cm^2 και παλμούς με διάρκεια της τάξεως των νανοδευτερολέπτων. Η κατανομή της έντασης της δέσμης ή προφίλ της δέσμης (beam shape-profile) διαφέρει ανάλογα με τον σχεδιασμό του συντονιστή (resonator) που γίνεται η δημιουργία της δέσμης Laser. Για την κατηγοριοποίησή τους έχουν προκύψει ορισμένες χωρικές κατανομές της έντασης (beam modes), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5 (β) που αντιστοιχούν σε ερμητιανά πολυώνυμα διαφόρων τάξεων και ονομάζονται εγκάρσιοι τρόποι ταλάντωσης (Transverse Electromagnetic Modes) και συμβολίζονται ως **TEM_{MN}** που οι δείκτες **M,N** δηλώνουν το πλήθος των περιοχών μηδενικής έντασης στις κατευθύνσεις των αξόνων X και Y αντίστοιχα [13]. Για τις κατεργασίες με δέσμη Laser η πλέον συναντώμενη μορφή από δέσμες περιγράφεται από μια συνάρτηση Gauss και έτσι ονομάζονται γκαουσιανές δέσμες (Gaussian beam) και συμβολίζονται με **TEM₀₀**.



Σχήμα 2.5: (α) Πυκνότητα ισχύος και χρόνος αλληλεπίδρασης του Laser που απαιτείται για κάθε κατεργασία
(β) Απλοποιημένη παρουσίαση των εγκάρσιων τρόπων ταλάντωσης **TEM**

Κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ δέσμης Laser και υλικού ένα σημαντικό ποσό από την προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται από το υλικό και σταδιακά αναπτύσσεται ένα θερμοκρασιακό πεδίο στο τεμάχιο ενώ η υπόλοιπη ακτινοβολία ανακλάται. Όταν η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού η απορρόφηση εμφανίζεται σε ένα πολύ λεπτό επιφανειακό στρώμα (skin depth) το οποίο είναι της τάξεως των $0.01 \mu\text{m}$ για παράδειγμα σε CO_2 Laser σε μέταλλα και στη συνέχεια η θερμότητα μεταφέρεται στο εσωτερικό του τεμαχίου μέσω αγωγής. Η ανακλαστικότητα εξαρτάται, τόσο από το υλικό, όσο και από το μήκος κύματος του Laser. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6 (α) τα μέταλλα έχουν την τάση να εμφανίζουν μικρότερη ανακλαστικότητα στο μήκος κύματος 1064 nm που αντιστοιχεί στα Nd:YAG Laser σε σχέση με το $10.6 \mu\text{m}$ των CO_2 Laser για θερμοκρασίες μικρότερες από τη θερμοκρασία τήξης [14]. Επίσης, η ανακλαστικότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας για δεδομένο μήκος κύματος. Μόλις το υλικό λιώσει και περάσει στην υγρή φάση τότε η απορροφητικότητα σημειώνει ραγδαία αύξηση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6 (β), και γίνεται σχεδόν ανεξάρτητη από το μήκος κύματος. Η ανακλαστικότητα ενός υλικού εξαρτάται και από την ποιότητα της επιφάνειας του (τραχύτητα) ή αν έχει εφαρμοστεί κάποια επιφανειακή κατεργασία όπως

ανοδίωση, αμμοβολή ή επικάλυψη. Όμως, αυτές οι μεταβολές στην ανακλαστικότητα του υλικού λόγω επιφανειακής επηρεάζουν μόνο τα πρώιμα στάδια της κατεργασίας μέχρις ότου να πραγματοποιηθεί η αρχική τήξη του υλικού.

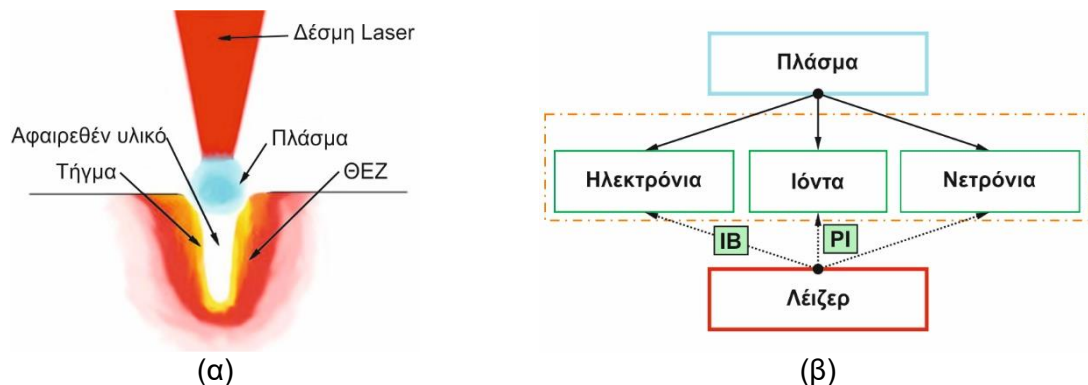


Σχήμα 2.6: (α) Συσχετισμός μεταξύ μήκους κύματος του Laser και της ανακλαστικότητας σε μεταλλικές επιφάνειες από διάφορα υλικά
(β) Μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης της δέσμης μιας τυπικής μεταλλικής επιφάνειας για αύξηση της θερμοκρασίας

Όταν η ένταση η ένταση της δέσμης που απορροφάται από το υλικό-στόχο είναι αρκετά υψηλή τότε λαμβάνει χώρα ο μηχανισμός της ατμοποίησης, δηλαδή το ακτινολογούμενο υλικό μεταβαίνει στη αέρια φάση. Ως αποτέλεσμα αυτού, πάνω από την επιφάνεια του τεμαχίου σχηματίζεται ένα πυκνό πλούμιο από ατμό μετάλλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 (α). Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών εμφανίζεται ιονισμός στα άτομα του πλουμίου με απόρροια τη δημιουργία πλάσματος [15]. Ο βαθμός στον οποίο το σχηματιζόμενο πλάσμα επηρεάζει την κατεργασία εξαρτάται από την αλληλεπίδραση του με τη δέσμη Laser. Καθώς η δέσμη Laser είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα η διάδοση της εντός του πλάσματος επηρεάζεται άμεσα από την ιδιοταλάντωση του πλάσματος υπό την έννοια των ταλαντώσεων των ηλεκτρονίων ή των ιόντων από τα οποία αποτελείται (εφόσον αναφερόμαστε σε μέταλλα εξετάζεται η ταλάντωση των ηλεκτρονίων καθώς τα ιόντα λόγω του μεγάλου βάρους τους εμφανίζουν μικρότερες συχνότητες στην ταλάντωση). Εφόσον η συχνότητα της ιδιοταλάντωσης του πλάσματος που δημιουργείται κατά την κατεργασία μετάλλων είναι στην πλειονότητα των περιπτώσεων σημαντικά χαμηλότερη από τη συχνότητα των χρησιμοποιούμενων Laser τότε η δέσμη Laser διαδίδεται μέσα από το πλάσμα.

Κατά την αλληλεπίδραση πλάσματος-δέσμης Laser ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας της δέσμης απορροφάται και εναποτίθεται στο πλάσμα. Η απορρόφηση αυτή της ενέργειας περιγράφεται από δύο βασικούς μηχανισμούς: τον αντίστροφο μηχανισμό πέδησης (inverse bremsstrahlung IB) και τον φωτοϊονισμό (photoionization PI), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 (β). Ο αντίστροφος μηχανισμός πέδησης περιγράφει την ακόλουθη διαδικασία: όταν ένα ηλεκτρόνιο έλκεται και προσκολλάται-προστίθεται σε κάποιο ιόν, τότε λόγω της επιβράδυνσης χάνεται κινητική ενέργεια και απορροφάται το αντίστοιχο ποσό ενέργειας από ένα φωτόνιο της δέσμης [16,17]. Όταν η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιηθεί κατ' επανάληψη λόγω της μετατροπής μεγάλου ποσού ενέργειας σε θερμότητα αυξάνεται η θερμοκρασία του πλάσματος. Κατά τον φωτοϊονισμό σχηματίζονται ιόντα πραγματοποιώντας απευθείας διέγερση του ηλεκτρονίου από το πεδίο ακτινοβολίας του Laser με την απορρόφηση ενός ή περισσότερων φωτονίων με αρκετή συνολική ενέργεια ώστε να αποσπάσει ένα ηλεκτρόνιο

από το ατομικό σύστημα [18]. Σύμφωνα με τους παραπάνω μηχανισμούς η ένταση της δέσμης Laser που τελικά προσπίπτει στο υλικό του τεμαχίου μετά τη διέλευση από το πλάσμα πλουμίου είναι σημαντικά ελαττωμένη. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως θωράκιση από το πλάσμα της ακτινοβολίας της δέσμης Laser (plasma shielding) [19].



Σχήμα 2.7: (α) Σχηματισμός πλάσματος κατά την κατεργασία αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser
(β) Σχηματική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πλάσματος και δέσμης Laser

2.2 Προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Από τη στιγμή που έγινε η έλευση του ηλεκτρονικού υπολογιστή στο χώρο των επιστημών έχει σημειωθεί μια μεγάλη επανάσταση στον τομέα της μαθηματικής μοντελοποίησης και της αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων. Με αυτό τον τρόπο έχει καταστεί εφικτή η διενέργεια εξαιρετικά εξελιγμένων, στοχευμένων και υψηλής ακρίβειας αναλύσεων για κάθε είδους προβλήματα που απασχολούν τους Μηχανικούς για τα οποία στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν γενικευμένες και προσεγγιστικές μέθοδοι. Για προβλήματα που αφορούσαν απλές γεωμετρίες και απλές συνοριακές συνθήκες, για δεκαετίες ολοκληρές υπολογίζονταν οι ακριβείς λύσεις των προβλημάτων. Όμως, καθώς τα περισσότερα πρακτικά προβλήματα των μηχανικών εμπεριέχουν περίπλοκες γεωμετρίες και συνοριακές συνθήκες, η αναζήτηση των ακριβών λύσεων δεν είναι εφικτή. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι το κόστος ενός προϊόντος και η ανταγωνιστικότητά του επηρεάζονται άμεσα από τις δοκιμές που έγιναν σε πρωτότυπα. Έτσι, οι παραπάνω ανάγκες οδήγησαν στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων για τη λήψη προσεγγιστικών λύσεων για πρακτικά πραγματικά προβλήματα που αφορούν τους Μηχανικούς.

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (finite element analysis FEA) αποτελεί ένα είδος προσομοίωσης οποιονδήποτε δοσμένων φυσικών φαινομένων ή μηχανισμών χρησιμοποιώντας τεχνικές αριθμητικής ανάλυσης ή υπολογιστικών μαθηματικών που περιγράφονται ως μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (finite element method FEM). Η χρήση της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τους Μηχανικούς καθώς έχει αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων λογισμικών προσομοίωσης (simulation software) για πληθώρα εφαρμογών σε τομείς όπως η αεροναυπηγική, η επιστήμη των Πολιτικών Μηχανικών, η ανάπτυξη ιατρικών εργαλείων, η αυτοκινητοβιομηχανία και η μελέτη των μηχανουργικών κατεργασιών. Ο λόγος που συντελεί στην υιοθέτηση και επιλογή των Μηχανικών να χρησιμοποιούν λογισμικά προσομοίωσης που υλοποιούν ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, οφείλεται στο ότι παρέχουν τη δυνατότητα για εύκολη, γρήγορη και οικονομική βελτιστοποίηση των προϊόντων κατά τον σχεδιασμό τους πραγματοποιώντας εικονικές δοκιμές-προσομοιώσεις. Έτσι μειώνεται η απαίτηση για

κατασκευή φυσικών πρωτοτύπων και για πραγματοποίηση πειραμάτων. Επιπλέον, καθιστούν εύκολη τη μελέτη της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων που λαμβάνονται υπόψη στη σχεδίαση στο τελικό αποτέλεσμα, εξασφαλίζοντας έτσι τη δυνατότητα για στοχευμένες βελτιώσεις στον σχεδιασμό ενός προϊόντος.

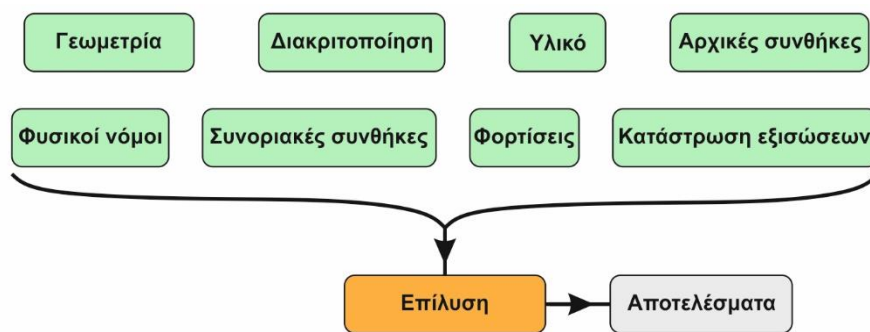
Για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων ο βασικός μηχανισμός αφαίρεσης του υλικού στηρίζεται στην πρόσδοση θερμότητας από τη δέσμη Laser στο τεμάχιο, έτσι ώστε το υλικό να απομακρυνθεί κυρίως με τη μορφή ατμού. Έτσι, απαιτείται να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να αναλυθούν και να προσομοιωθούν τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας. Οι αριθμητικές μέθοδοι που έχουν δοκιμαστεί για την ανάλυση των προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας είναι πολυάριθμοι. Μερικές από τις μεθόδους αυτές αναπτύχθηκαν πριν ακόμα και από την ανακάλυψη του ηλεκτρονικού υπολογιστή κι έτσι πλέον δεν χρησιμοποιούνται. Η μέθοδος η οποία είναι η δημοφιλέστερη και επιτυχής έπειτα την έλευση των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method FEM).

Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το εξεταζόμενο τεμάχιο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος από απλές μη αλληλεπικαλυπτόμενες περιοχές που ονομάζονται στοιχεία (elements) τα οποία έχουν διαφορετικό μέγεθος το καθένα εφόσον είναι απαραίτητο. Οι συνοριακές επιφάνειες των στοιχείων μπορούν ακόμα να είναι και καμπύλες σε ορισμένες περιπτώσεις. Η τιμή της μεταβλητής που καθορίζει το εξεταζόμενο πεδίο σε οποιαδήποτε διαφορική εξίσωση που διέπει ένα υπό μελέτη φαινόμενο και καλείται να επιλυθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δύναται να ποικίλει ακόμα και εντός ενός στοιχείου, σύμφωνα με την επιλογή κάποιας συνάρτησης παρεμβολής. Αυτό επιτρέπει την υιοθέτηση ενός μεγάλου βαθμού ευελιξίας στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθώς αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας μπορούν να επιτευχθούν, είτε με τη χρήση μικρού αριθμού στοιχείων αλλά υψηλότερης τάξης (βελτιωμένα στοιχεία με περισσότερους κόμβους), είτε μεγάλου αριθμού στοιχείων χαμηλής τάξης. Εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί την αριθμητική μέθοδο που συναντάται συνηθέστερα για την ανάλυση περίπλοκων τύπων προβλημάτων μετάδοσης θερμότητας με υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια.

Οι απαρχές της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία θεωρείται ότι χρονολογούνται στον 16^ο αιώνα και θεμελιώθηκαν από τον διάσημο Μαθηματικό Euler. Η τεχνική αυτή συγκεκριμενοποιήθηκε επίσημα από τον Schellbach το 1851 όταν διακριτοποίησε μια επιφάνεια σε τριγωνικά στοιχεία και έγραψε την έκφραση των πεπερασμένων διαφορών για τη συνολική διακριτοποιημένη περιοχή, με στόχο να υπολογίσει την ελάχιστη επιφάνεια των συνόρων που περικλείεται από μια δοσμένη κλειστή καμπύλη στο χώρο (Plateau problem). Ως ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία FEA ορίζεται η εφαρμογή των αριθμητικών τεχνικών που κρύβονται πίσω από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEM για την πραγματοποίηση μιας προσομοίωσης. Στην πιο απλή της μορφή, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος προσέγγισης της λύσης για ένα περίπλοκο πρόβλημα με βάση την οποία υποδιαιρείται το αναφερόμενο τεμάχιο σε πολυάριθμα μικρότερα στοιχεία (finite elements) των οποίων η συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί με σχετικά απλές εξισώσεις. Εφόσον πρόκειται για αριθμητική μέθοδο προσέγγισης είναι δεδομένο ότι η λύση συνοδεύεται με κάποιο επίπεδο σφάλματος και γι' αυτό το λόγο προτιμάται ως μέθοδος όταν οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα είναι αρκετά περίπλοκες για να επιλυθούν με τον κλασσικό τρόπο. Γίνεται φανερό λοιπόν ότι η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία FEA και τα υποκείμενα μαθηματικά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων FEM λειτουργούν μαζί σε ένα ενιαίο λογισμικό προσομοίωσης και

χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός μηχανισμού ή προϊόντος που εξετάζεται.

Για την υλοποίηση μιας προσομοίωσης βασισμένη στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση ενός λογισμικού FEM ακολουθούνται τα βήματα που αναφέρονται συνοπτικά στη συνέχεια και παρουσιάζονται στο [σχήμα 2.8](#). Αρχικά πρέπει να έχει σχεδιαστεί η υπό μελέτη γεωμετρία και να γίνει η κατάλληλη διακριτοποίησή της έτσι ώστε να χωριστεί σε μια σειρά από σημεία-κόμβους. Για τον σχεδιασμό περίπλοκων γεωμετριών αλλά και την κατασκευή του πλέγματος χρησιμοποιούνται συνήθως λογισμικά CAD (computer-aided design software) διότι αυτά είναι σε θέση να υποδιαιρέσουν ακόμα και περίπλοκες 3D γεωμετρίες σε στοιχεία καθορισμένου τύπου και διάστασης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πλεγματοποίησης. Η επιλογή του σωστού πλέγματος είναι καθοριστικής σημασίας εργασία. Ένα αραιό πλέγμα οδηγεί σε μικρότερης ακρίβειας αποτελέσματα αλλά ένα περισσότερο πυκνό πλέγμα αποτελούμενο από μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και χρόνο για την επίλυση του μοντέλου. Προς αυτό το σκοπό σε αρκετές περιπτώσεις επιλέγεται να χρησιμοποιείται πλέγμα με μεταβαλλόμενο μέγεθος στοιχείων, δηλαδή τοποθετείται ένα αραιό πλέγμα σε θέσεις χαμηλού ενδιαφέροντος και γίνεται τοπική πύκνωση του πλέγματος σε περιοχές που έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη συμπεριφορά του εξεταζόμενου συστήματος.



Σχήμα 2.8: Βασικά βήματα για την υλοποίηση μιας προσομοίωσης βασισμένη στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Στη συνέχεια δίνονται ως είσοδο στο λογισμικό FEM πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού, τις συνοριακές συνθήκες και τις φορτίσεις που επιδρούν. Κατά τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος η ακριβής γνώση των ιδιοτήτων του υλικού είναι καθοριστική για το αποτέλεσμα. Αρκετά λογισμικά FEM είναι εφοδιασμένα με βιβλιοθήκες για πληθώρα υλικών στις οποίες προσδιορίζονται με ακρίβεια οι βασικότερες φυσικές ιδιότητες των υλικών οι οποίες εισάγονται αυτόματα στο μοντέλο. Για να κατανοηθούν πλήρως και να ποσοτικοποιηθούν τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν μαθηματικά. Έτσι, για τα στοιχεία του πλέγματος προσδιορίζονται ορισμένες συναρτήσεις προσέγγισης που περιγράφουν την συμπεριφορά τους ως συνάρτηση των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών. Πρόκειται συνήθως για μερικές διαφορικές εξισώσεις (partial differential equations PDEs) οι οποίες περιγράφουν, είτε τους αντίστοιχους νόμους της φυσικής για το εκάστοτε φυσικό φαινόμενο, είτε συμπεριφορές κάποιων φαινομένων που ορίζονται από νόμους των επιστημών, όπως η Μηχανική. Η επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων απαιτείται για να προσδιοριστεί το αποτέλεσμα της επίδρασης των διαφόρων φορτίσεων στην υπό μελέτη γεωμετρία.

Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις σε συνδυασμό με τις αρχικές συνθήκες και τις συνοριακές συνθήκες για όλα τα στοιχεία συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα εξισώσεων που

περιγράφει το μοντέλο που προσομοιώνεται και χρήζουν επίλυσης. Για την επίλυση αυτού του συστήματος εξισώσεων με τη χρήση υπολογιστή έχουν αναπτυχθεί ορισμένες τεχνικές αριθμητικής επίλυσης τις τελευταίες δεκαετίες που ορίζονται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα λογισμικά FEM είναι εφοδιασμένα με τους κατάλληλους αριθμητικούς επιλύτες για την επίλυση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων. Οι υπολογισμοί για την επίλυση εκτελούνται για κάθε στοιχείο και για κάθε κόμβο του πλέγματος και έπειτα συνδυάζονται για τη σύνθεση του τελικού αποτελέσματος για ολόκληρο το τεμάχιο.

Τονίζεται ότι η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία δίνει μόνο μια προσεγγιστική λύση στο πρόβλημα καθώς αποτελεί μια αριθμητική προσέγγιση για τη λήψη της πραγματικής τιμής των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Δηλαδή η λύση εξ ορισμού εμφανίζει ορισμένο σφάλμα που οφείλεται από την αριθμητική μέθοδο της επίλυσης, το οποίο βέβαια έρχεται να προστεθεί στα σφάλματα που προκύπτουν από την προσπάθεια για μαθηματική προσέγγιση των φαινομένων κατά τη μοντελοποίηση. Γι' αυτό το λόγο ένα μοντέλο προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία απαιτείται συχνά να επιβεβαιώνεται για την ορθότητα της λειτουργίας του και την ακρίβειά του με την πραγματοποίηση σχετικών πειραμάτων και την αντιπαράβολή αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι κυριότεροι παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλα σφάλματα για μια προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως οι εξής:

- Εξαρχής λανθασμένη αντιμετώπιση της ανάλυσης του προβλήματος λόγω ανεπαρκών βασικών γνώσεων.
- Λανθασμένη πλεγματοποίηση του τεμαχίου λόγω μη τήρησης των σχετικών κανόνων.
- Χρήση ακατάλληλων εξισώσεων προσέγγισης των φυσικών φαινομένων για τα στοιχεία του πλέγματος.
- Ανεπαρκής ή λανθασμένη δήλωση των ιδιοτήτων του υλικού.
- Αγνόηση ή λανθασμένη υπόθεση των φορτίσεων.
- Μη χρήση κατάλληλων αρχικών και συνοριακών συνθηκών.

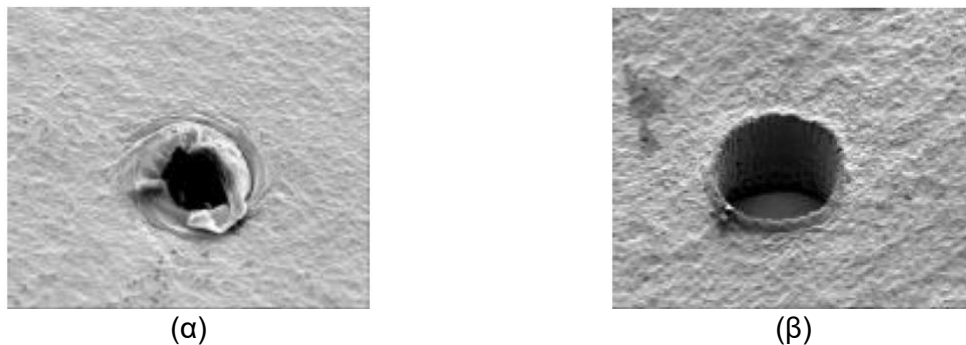
2.3 Διεθνής έρευνα στην κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser

2.3.1 Μελέτη πρακτικών εφαρμογών της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser

Ο Gower [20] παρουσίασε ορισμένες εφαρμογές των παλμικών Laser για την μικρο-κατεργασία υλικών στη βιομηχανία. Αρχικά παρουσιάστηκε η χρήση των παλμικών Laser για διάνοιξη οπών. Η δυνατότητα για διάνοιξη οπών διαμέτρου της τάξεως του μικρομέτρου ($1\mu\text{m}$) με υψηλή ακρίβεια, μεγάλη ταχύτητα και ευελιξία επέτρεψε στην μικρο-κατεργασία με Laser να γίνει αποδεκτή από πολλές βιομηχανίες που κατασκευάζουν προϊόντα υψηλής τεχνολογίας, όπως ολοκληρωμένα κυκλώματα, σκληρούς δίσκους, οθόνες, περιφερειακά υπολογιστών και συσκευές τηλεπικοινωνιών.

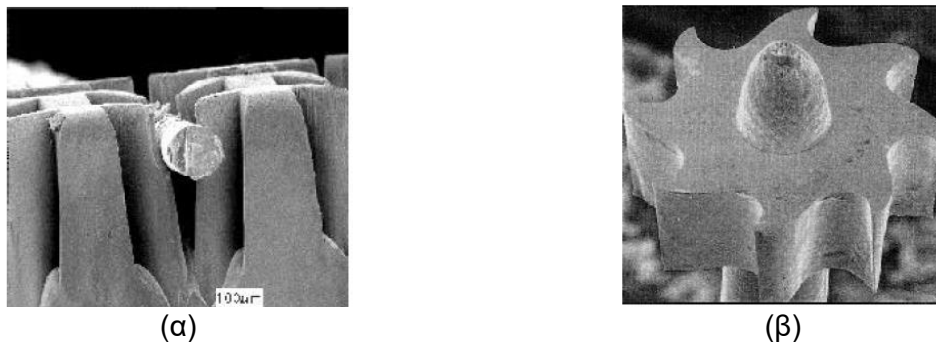
Η πρώτη εφαρμογή που αναπτύχθηκε είναι η διάνοιξη τυφλών οπών σε πλακέτες ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Από τις αρχές του 1980 έγιναν οι πρώτες δοκιμές για διάνοιξη οπών μέσω παλμικών Laser Nd:YAG και CO₂ και σταδιακά η μέθοδος αυτή κυριάρχησε σε όλες τις γραμμές παραγωγής. Μέσω των παλμικών Laser Κρυπτού-Φθορίου KrF μπορούν να γίνουν οπές διαμέτρου κάτω από $100\mu\text{m}$ σε πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (PCB) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9 (β) παρέχοντας απλά ένα αρχείο π.χ. AutoCAD στην μηχανή CNC Laser με τις θέσεις και τις διαστάσεις των οπών με ταχύτητες που φτάνουν τις 200 οπές/sec και κόστος περίπου στα 0.6¢ ανά 1000 οπές. Έτσι, τα τρυπάνια καρβιδίου βολφραμίου που είναι ακριβά, σπάνε τακτικά και φθείρονται γρήγορα, λόγω του ότι έχουν κόστος διάτρησης

που φτάνει αρκετά \$ ανά 1000 οπές, αντικαταστάθηκαν σχεδόν καθολικά με τη χρήση των Laser.



Σχήμα 2.9: Οπές διαμέτρου 100μm σε φύλλο πάχους 75μm πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας με (α) ελικοειδές τρυπάνι (β) Laser Κρυπτού-Φθορίου KrF

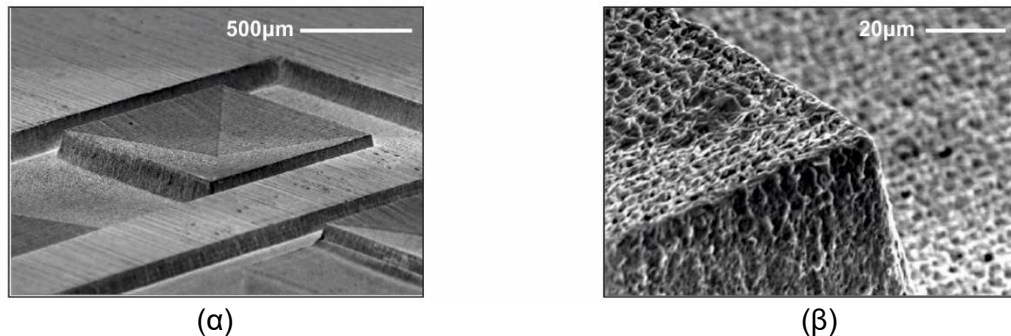
Δεύτερη εφαρμογή που αναπτύχθηκε είναι η χάραξη των οπών και καναλιών έγχυσης μελανιού στις κεφαλές εκτυπωτών λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε ακρίβεια. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ένας σύγχρονος εκτυπωτής HP Desk Jet 800C με ανάλυση 600 dots-per-inch (dpi) απαιτεί ακροφύσια με διάμετρο οπής 28μm και βάθος 300μm. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η εφαρμογή των παλμικών Laser για τη χάραξη μικρο-διαμορφώσεων σε συσκευές με εφαρμογές στη βιοϊατρική όπως οι αισθητήρες για την ανάλυση των αερίων του αρτηριακού αίματος. Έπειτα παρουσιάστηκε η εφαρμογή των Laser για τη χάραξη των λεπτών μεμβρανών πυριτίου που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ. Τέλος παρουσιάστηκαν ορισμένες μελλοντικές τάσεις για τη μικρο-κατεργασία με Laser όπως είναι η κατασκευή εξαρτημάτων και δομών για μικρο-ηλεκτρο-μηχανικά συστήματα (micro-electro-mechanical systems MEMS) ή τεχνολογίες μικρο-συστημάτων (microsystems technologies MST), όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.10 \(α\)](#) και [\(β\)](#).



Σχήμα 2.10: Εξαρτήματα μικρο-ηλεκτο-μηχανικών συστημάτων MEMS (α) Σύστημα συγκράτησης ίνας 100μm από μικροκατεργασία Laser Κρυπτού-Φθορίου KrF (β) Ρότορας ενδοαγγειακής μικροτουρμπίνας από νικέλιο διαμέτρου 470μm και ύψους 130μm από μικροκατεργασία Laser Αργού-Φθορίου ArF

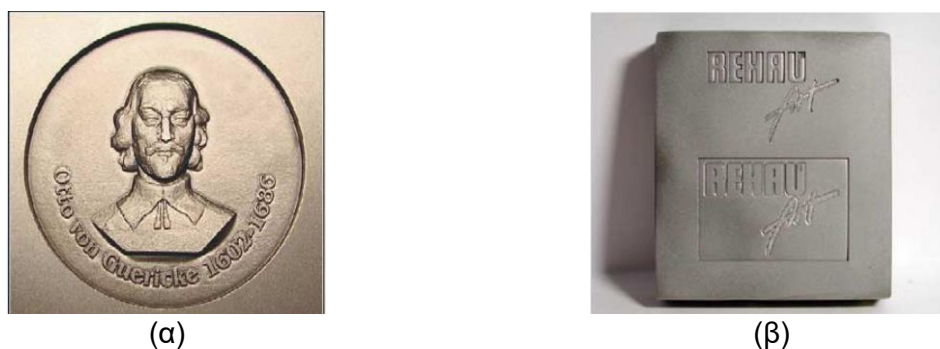
Ο Heyl και άλλοι [21] κατασκεύασαν μια μηχανή χάραξης με δέσμη Laser υψηλής ακριβείας και μελέτησαν τη χάραξη ορισμένων υλικών για κοπτικά εργαλεία όπως, σκληρομέταλλα και κεραμικά με υπεριώδης δέσμη Laser UV 355nm ως προς την ποιότητα επιφάνειας κάνοντας πειραματικές δοκιμές, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.11 \(α\)](#) και [\(β\)](#). Αναφορικά με τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού έδειξαν ότι αυξάνεται γραμμικά με την ένταση των παλμών μέχρις ότου πραγματοποιηθεί ο σχηματισμός πλάσματος. Για την ποιότητα επιφάνειας έδειξαν ότι χαμηλή πυκνότητα ενέργειας οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα με τη μικρότερη μέση τραχύτητα που

επετεύχθη να είναι $R_a=0.16\mu\text{m}$ και το μέγιστο μέσο ύψος από κορυφή σε κοιλάδα $R_z=0.7\mu\text{m}$. Το γενικό συμπέρασμα που κατέληξαν είναι ότι η κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser οδηγεί σε ανάλογες επιφάνειες για κατασκευή εργαλείων σε μικρο-κλίμακα με μεγαλύτερη ταχύτητα και περισσότερη γεωμετρική ευελιξία σε σχέση με την κατεργασία ηλεκτροδιάβρωσης.



Σχήμα 2.11: Εικόνες από SEM χαράξεων βάθους $130\mu\text{m}$ σε καρβίδια βολφραμίου σε μεταλλική μήτρα κοβαλτίου WC/Co (α) Κλίμακα: $500\mu\text{m}$ (β) Κλίμακα: $20\mu\text{m}$

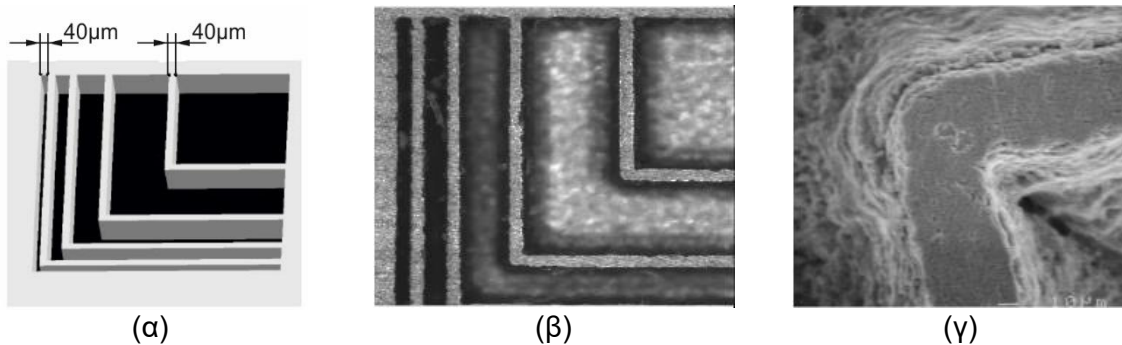
Ο Kaldos και άλλοι [22] μελέτησαν τη δυνατότητα εφαρμογής της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser για την κατασκευή καλουπιών και διαμορφωτικών μητρών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12 (α) και (β). Καθότι η κατεργασία χαρακτηρίζεται από υψηλή ευελιξία σχετικά με τις μορφές των χαράξεων που δύναται να χαραχτούν, καθώς επίσης και τη δυνατότητα που παρέχει για κατεργασία δύσκολα κατεργάσιμων υλικών, όπως κεραμικά, καρβίδια και σκληρά ατσάλια με υψηλή παραγωγικότητα και υψηλή ποιότητα επιφάνειας, την καθιστά κατάλληλη για κατεργασία καλουπιών. Προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της παραδοσιακής μεθόδου κατασκευής με ηλεκτροδιάβρωση (EDM) καθώς μειώνει το χρόνο κατασκευής του καλουπιού που με τη σειρά του ελαττώνει το κόστος παραγωγής παρέχοντας ταυτόχρονα αντάξια ποιότητα. Οι ερευνητές εξέτασαν τη δυνατότητα εφαρμογής συνδυασμού της μεθόδου φραιζαρίσματος με υψηλές ταχύτητες (high speed milling HSM) για ξεχόνδρισμα με την κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser για φινίρισμα. Τέλος, εξέτασαν την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας για διάφορα μεταλλικά και μη υλικά στον ρυθμό αφαίρεσης υλικού και στην ποιότητα επιφάνειας με στόχο τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας.



Σχήμα 2.12: Χαραγμένες μήτρες (α) υλικό 40CrMnMo7, χρόνος κατεργασίας 12h, διάσταση $\Phi 30\text{mm}$ (β) υλικό X38CrMoV5-1, χρόνος κατεργασίας 3h 55min, διάσταση $36 \times 24\text{mm}$

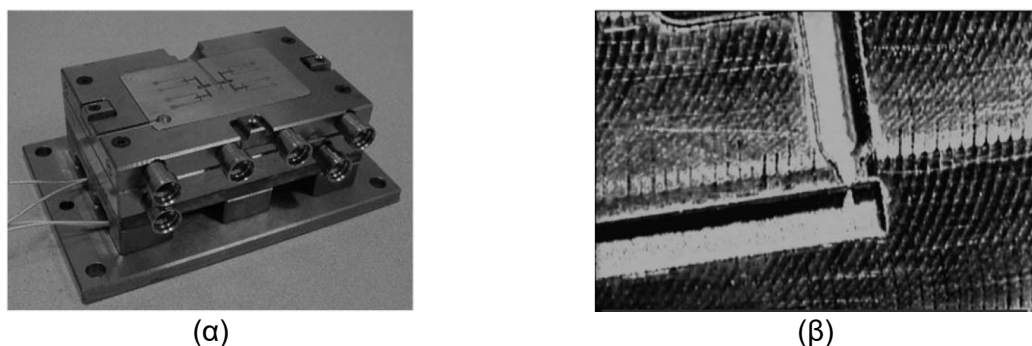
Ο Pham και άλλοι [23] εξέτασαν τις δυνατότητες της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser όσον αφορά την κατασκευή εργαλείων σε μικρο-κλίμακα. Τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας που εξετάστηκαν αφορούν την ποιότητα επιφάνειας, την αναλογία διαστάσεων, τη διαστατική ακρίβεια και το ελάχιστο μέγεθος κατασκευάσιμου τεμαχίου. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση

της διάρκειας των παλμών στην τραχύτητα και στην αναπτυσσόμενη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Έδειξαν ότι η κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser παρέχει ικανοποιητική τραχύτητα επιφάνειας για κατασκευή εργαλείων σε μικρο-κλίμακα με την ελάχιστη μέση τραχύτητα να είναι $R_a=0.962\mu\text{m}$. Έδειξαν επίσης ότι μπορούν να κατασκευαστούν τεμάχια με λόγο διαστάσεων 2.5 με τη διαστατική ακρίβεια να επηρεάζεται άμεσα από την αλληλεπίδραση μεταξύ της ακτίνας Laser και του υλικού. Η κατασκευή λεπτών τοιχωμάτων (thin walls) της τάξεως των $40\mu\text{m}$ είναι εφικτή με ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα να παρουσιάζεται στο [σχήμα 2.13](#), ενώ τα μικρότερα αυλάκια που μπορούν να χαραχτούν είναι της τάξεως των $120\mu\text{m}$. Παλμοί με μικρότερη διάρκεια μπορούν να επιτύχουν καλύτερη ποιότητα επιφάνειας και αυξημένη ακρίβεια στις διαστάσεις.



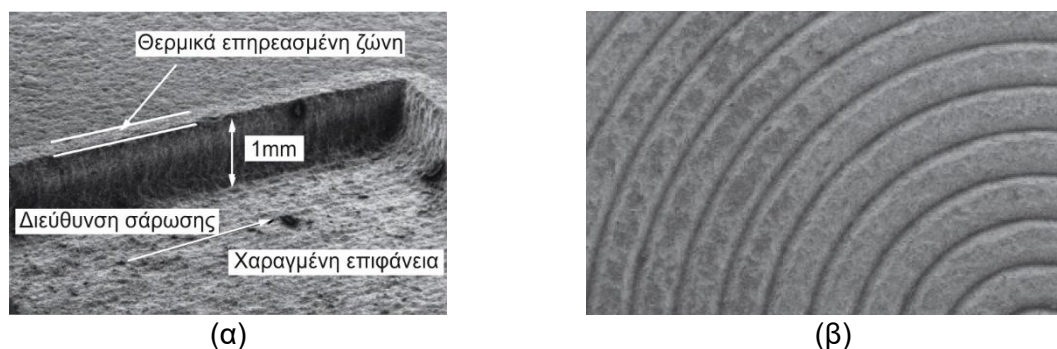
Σχήμα 2.13: Λεπτά τοιχώματα (thin walls) (α) Μοντέλο CAD (β) Κάτοψη κατεργασμένου τεμαχίου (γ) Λεπτομέρεια

Ο Vasco και άλλοι [24] διερεύνησαν την καταλληλότητα της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser για την κατασκευή καλουπιών. Εξέτασαν ορισμένα από τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας όπως: η εμφάνιση κλίσης στα τοιχώματα αντί των ιδανικά επιθυμητών κατακόρυφων και η συγκόλληση επαναστεροποιημένων σωματιδίων στην επιφάνεια. Επίσης, μελέτησαν τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα στην τελική γεωμετρία λόγω των αποκλίσεων μεταξύ του θεωρητικού όγκου του υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί με βάση το δοθέν αρχείο STL και του όγκου όπως έχει προκύψει από προηγούμενη κατεργασία στο τεμάχιο. Κατασκευάστηκαν δύο καλούπια, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.14 \(α\)](#), από κράμα αλουμινίου 7050 με τη χρήση της μηχανής Foba G900 τα οποία δοκιμάστηκαν για διάφορες συνθήκες έγχυσης. Κατέληξαν στο ότι η κατεργασία είναι κατάλληλη για την κατασκευή μικρών καλουπιών έγχυσης αλλά θα πρέπει να δοθούν κατάλληλες οδηγίες σχετικά με τον σχεδιασμό του καλουπιού και την υλοποίηση της κατεργασίας.



Σχήμα 2.14: Καλούπι έγχυσης (α) Συναρμολογημένο καλούπι (β) Κατεργασμένη πύλη μέσω της οποίας το λιωμένο υλικό εισέρχεται στην κοιλότητα

Ο Lahoz και άλλοι [25] εξέτασαν τη δυνατότητα βαθείας χάραξης με δέσμη Laser σε κεραμικά πλακάκια και πλακάκια πορσελάνης με στόχο τη χάραξη κυρίως διακοσμητικών σχεδίων στην επιφάνειά τους, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.15. Για τις χαράξεις διενεργήθηκαν πειράματα με τη χρήση βιομηχανικού παλμικού Nd:YAG Laser των 1064nm (Baasels, Rofin-Baasel Lasertech, Starnberg, Germany). Μετρήθηκαν οι αλλαγές που προκαλούνται στη δομή και στη μικροδομή του πλακακιού λόγω της ακτινοβολήσης από τη δέσμη Laser πραγματοποιώντας ακτινογραφίες με ακτίνες Χ (X-ray diffraction, XRD) και σάρωση της επιφάνειας με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (scanning electron microscope, SEM). Τα πειράματα έδειξαν ότι ο ρυθμός αποβολής υλικού λόγω της ατμοποίησης εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των περασμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Στα κεραμικά πλακάκια, παρόλο που λόγω του μεγάλου όγκου επικαθίσεων λιωμένου υλικού η απόδοση της κατεργασίας ήταν περισσότερο μειωμένη καθώς ο αριθμός των περασμάτων αυξανόταν, η κατεργασία πραγματοποιήθηκε με επιτυχία. Όμως, στα πλακάκια πορσελάνης, λόγω του μεγάλου θερμικού σοκ που πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με την ανομοιομορφία που εμφανίζει ο συντελεστής θερμικής διαστολής, προκλήθηκε σε ορισμένες περιπτώσεις θράση της πορσελάνης.

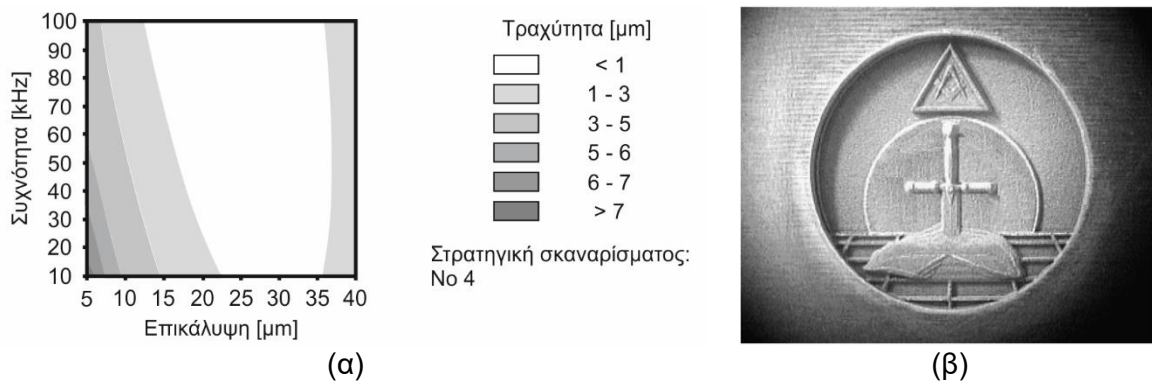


Σχήμα 2.15: Απεικόνιση χαράξεων από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) (α) Κοιλότητα σε κεραμικό πλακάκι (β) Ομόκεντρες κυκλικές χαράξεις σε πλακάκι πορσελάνης

2.3.2 Πειραματική διερεύνηση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων

Ο Campanelli και άλλοι [26] αναζήτησαν τις συνθήκες κατεργασίας που δίνουν την καλύτερη ποιότητα επιφάνειας για τη χάραξη με δέσμη λέζιερ σε κράμα αλουμινίου μαγνησίου. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε μια Nd:YVO₄ 1064nm εργαλειομηχανή Laser (Trumark VMc5 από την Trumpf) μέσης ισχύος 30W. Οι συνθήκες κατεργασίας που μελετήθηκαν είναι: η ισχύς του Laser, η συχνότητα των παλμών, η επικάλυψη των παλμών, η διάρκεια του παλμού, η ταχύτητα της δέσμης και η στρατηγική σάρωσης. Για τον προσδιορισμό της επίδρασής τους στο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού και στην τραχύτητα ακολουθήθηκε η μέθοδος σχεδιασμού πειραμάτων (DoE). Τα συμπεράσματα που οδηγήθηκαν είναι ότι μια γρήγορη και αποδοτική κατεργασία πραγματοποιείται με την ελάχιστη επικάλυψη παλμών που ισούται με 5μm και τη συχνότητα παλμών 30kHz ώστε να επιτευχθεί το μέγιστο δυνατό πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού ίσο με 17.9μm. Η τραχύτητα επιφάνειας αποδείχθηκε αντικρουόμενο μέγεθος με το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού. Για την ελαχιστοποίηση της τραχύτητας απαιτείται, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16 (α), μια μεγάλη τιμή για την επικάλυψη των παλμών περί τα 20μm, η μέγιστη συχνότητα των παλμών στα 100kHz και στρατηγική σάρωσης στην οποία η γωνία διεύθυνσης των γραμμών των παλμών από επίπεδο σε επίπεδο σάρωσης αυξάνεται κατά 45 μοίρες. Για την μεγιστοποίηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού απαιτείται μια τιμή για την επικάλυψη των παλμών περί τα 5μm

και συχνότητα των παλμών στα 30kHz. Με τις τελευταίες συνθήκες κατεργασίας πραγματοποιήσαν μια δοκιμαστική χάραξη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16 (β).



Σχήμα 2.16: (α) Διάγραμμα απεικόνισης της τραχύτητας συναρτήσει της επικάλυψης και της συχνότητας των παλμών (β) Δοκιμαστική χάραξη

Ο Karazi και άλλοι [27] ανέπτυξαν τέσσερα πειραματικά μοντέλα για την πρόβλεψη των διαστάσεων των χαραγμένων μικρο-καναλιών (πλάτος και βάθος) σε γυαλί από Laser διοξειδίου του άνθρακα CO₂. Πρώτα αναπτύχθηκε ένα μοντέλο σχεδιασμού πειραμάτων (DoE) το οποίο εξέταζε την επίδραση τριών συνθηκών της κατεργασίας (ισχύς, συχνότητα των παλμών και ταχύτητα της δέσμης) πραγματοποιώντας έτσι ένα σετ από 27 πειράματα. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν 3 μοντέλα (A,B,C) τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN) πρόσθιας τροφοδοσίας (feedforward) ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος (backpropagation) με τη χρήση του λογισμικού LabVIEW. Η διαφοροποίηση μεταξύ τους έχει να κάνει με διαφορές στον αριθμό και τον τρόπο επιλογής των δεδομένων εκμάθησης του μοντέλου. Στο μοντέλο A χρησιμοποιήθηκαν 24 τυχαία πειράματα για την εκμάθηση του αλγορίθμου αφήνοντας 3 πειράματα για δοκιμές. Στο μοντέλο B χρησιμοποιήθηκαν 8 ακριανά σημεία από τον πειραματικό χώρο και 7 τυχαία επιλεγμένα για την εκμάθηση αφήνοντας 12 πειράματα για δοκιμές. Στο μοντέλο C 15 τυχαία πειράματα χρησιμοποιήθηκαν για την εκμάθηση και έμειναν 12 πειράματα για τις δοκιμές. Από τη σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα από τα τέσσερα μοντέλα το μοντέλο B έδωσε το ελάχιστο μέσο σφάλμα σε ποσοστό, ενώ το μοντέλο A έδωσε το ελάχιστο μέγιστο απόλυτο σφάλμα σε ποσοστό. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN) μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια τις διαστάσεις χαραγμένων μικρο-καναλιών από δέσμη Laser.

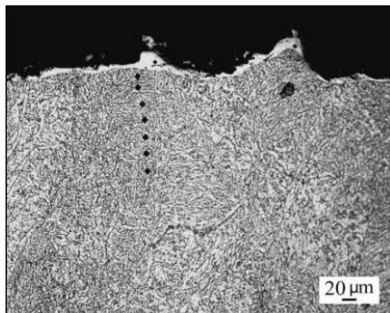
Ο Orazi και άλλοι [28] ανέπτυξαν ένα πειραματικό μοντέλο για τη συσχέτιση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού με τις συνθήκες της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser σε διάφορα υλικά χρησιμοποιώντας τη στατιστική τεχνική μοντελοποίησης της παλινδρόμησης (regression analysis). Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ένα Yb ytterbium 1060nm fibre Laser ισχύος 20W της εταιρείας IPG με υλικό κατεργασίας το κράμα αλουμινίου Al7075-T6. Για να γίνει η συσχέτιση στο μοντέλο παλινδρόμησης μεταξύ της εξαρτώμενης μεταβλητής που είναι ρυθμός αποβολής υλικού MRR(μm/layer) με τις ανεξάρτητες μεταβλητές (ένταση της δέσμης, η συχνότητα των παλμών και ταχύτητα της δέσμης) και να προσδιοριστούν οι παράμετροι συσχέτισης πραγματοποιήθηκε ένας σχεδιασμός πειραμάτων (DoE) με 27 πειράματα (τρία επίπεδα για κάθε παράμετρο) τα οποία επαναλαμβάνονται τρεις φορές αυξάνοντας τον συνολικό αριθμό πειραμάτων στα 81. Για να καθοριστεί η ολική συνεισφορά της κάθε παραμέτρου συσχέτισης πραγματοποιήθηκε ανάλυση διασποράς (ANOVA). Μια πρακτική εφαρμογή του μοντέλου παρουσιάστηκε για χάραξη χάλυβα χαμηλού άνθρακα AISI 1040 και έγινε σύγκριση μεταξύ του υπολογιζόμενου ρυθμού αποβολής υλικού για ορισμένα σετ συνθηκών με τον αντίστοιχο που προκύπτει από τα πειράματα, όπως φαίνεται στον πίνακα

2.1. Όπως υποδηλώθηκε, το ίδιο μοντέλο με ορισμένες τροποποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της τραχύτητας.

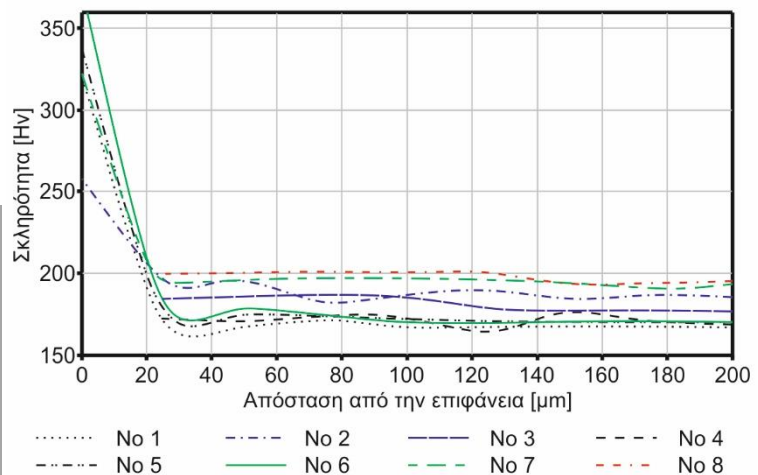
Συνθήκες κατεργασίας			Ρυθμός αποβολής [μm/layer]		Σφάλμα %
Ένταση (%)	Συχνότητα [kHz]	Ταχύτητα [mm/s]	Μοντέλο	Πείραμα	
65	45	550	3.053	3.291	7.2
55	35	450	3.050	3.134	2.6
68	32	420	4.231	4.357	7.7

Πίνακας 2.1 Σύγκριση ανάμεσα σε προβλεφθείσες και πειραματικές τιμές του ρυθμού αποβολής υλικού συναρτήσει των τιμών της έντασης, της συχνότητας και της ταχύτητας

Ο Agalianos και άλλοι [29] διερεύνησαν την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στην παραγόμενη ποιότητα επιφάνειας κατά τη χάραξη με δέσμη Laser. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε πλάκα κράματος αλουμινίου ALAI7075-T6 με τη χρήση της εργαλειομηχανής DMG LASERTEC 40. Η κατεργαζόμενη γεωμετρία ήταν κυλινδρικής μορφής με διάμετρο 12mm και βάθος 200μm. Οι εξεταζόμενες συνθήκες ήταν η συχνότητα των παλμών (20, 30, 40, 50kHz), η ταχύτητα της δέσμης (200-1000mm/s) και το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού (2, 4, 6, 8μm). Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η τραχύτητα επηρεάζεται άμεσα από τη συχνότητα των παλμών και τη ταχύτητα της δέσμης ενώ δεν επηρεάζεται έντονα από την τιμή του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού. Η καλύτερη ποιότητα επιφάνειας επιτεύχθηκε για συχνότητα 20kHz, ταχύτητα μεταξύ 600-700mm/s και πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού στα 4 και 6μm, με τραχύτητα που το μέγιστο μέσο ύψος από κορυφή σε κοιλάδα R_z ήταν περίπου στα 8μm.



No	Συνθήκες κατεργασίας		
	P_{avg} [W]	V [mm/s]	F_{rep} [kHz]
1	18	200	20
2	18	200	40
3	18	800	20
4	18	800	40
5	30	200	20
6	30	200	40
7	30	800	20
8	30	800	40

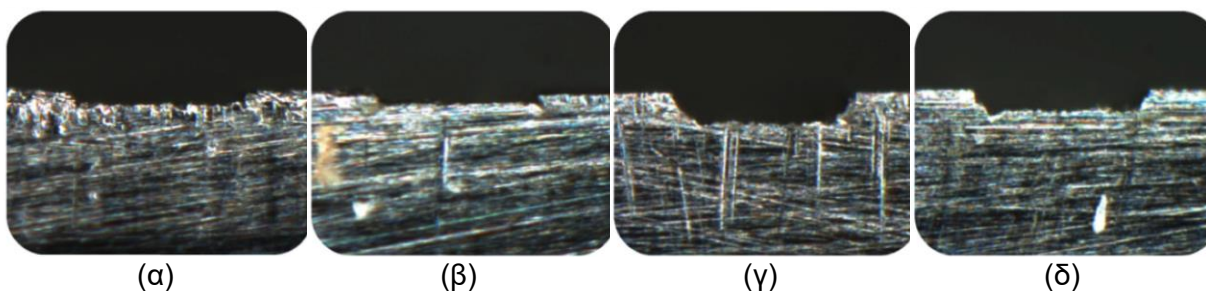


Σχήμα 2.17: Μέτρηση σκληρότητας συναρτήσει του βάθους

Η Kasman και ο Saklakoglu [30] μελέτησαν τη γεωμετρία των σχηματιζόμενων κρατήρων, το σχηματιζόμενο στρώμα επαναστερεοποιημένου υλικού και τη μεταβολή της σκληρότητας του υλικού συναρτήσει των παραμέτρων κατεργασίας (ισχύς, συχνότητα, ταχύτητα) κατά τη

χάραξη εργαλειοχάλυβα AISI H13 με δέσμη Laser Yb ytterbium 1064nm fibre ισχύος 30W. Για τη μελέτη της μορφής των κρατήρων χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM). Για τις μικρο-σκληρομετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα μικρο-σκληρόμετρο τύπου Vickers (HVM-2 Shimadzu) φορτίου 10g για χρονική διάρκεια 10s. Όσον αφορά τις διαστάσεις των σχηματιζόμενων κρατήρων από τους παλμούς του Laser προέκυψε ότι: αύξηση της ισχύος οδηγεί σε αύξηση του βάθους του κρατήρα, αύξηση στη συχνότητα οδηγεί σε αύξηση και του βάθους και του πλάτους και αύξηση στην ταχύτητα οδηγεί σε μειωμένο βάθος. Διαπιστώθηκε επίσης ότι μείωση της ισχύος, αύξηση της ταχύτητας και αύξηση της συχνότητας οδηγούν σε μείωση του πάχους του στρώματος επαναστερεοποιημένου υλικού. Αναφορικά με τη σκληρότητα, οι μετρήσεις έδειξαν ότι η σκληρότητα στην επιφάνεια του επαναστερεοποιημένου υλικού είναι σχεδόν η διπλάσια από αυτήν του ακατέργαστου υλικού όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.17](#). Η σκληρότητα του υλικού συναρτίζεται του βάθους για την περιοχή κάτω από το επαναστερεοποιημένο στρώμα παραμένει σταθερή και ίση με αυτήν του ακατέργαστου υλικού.

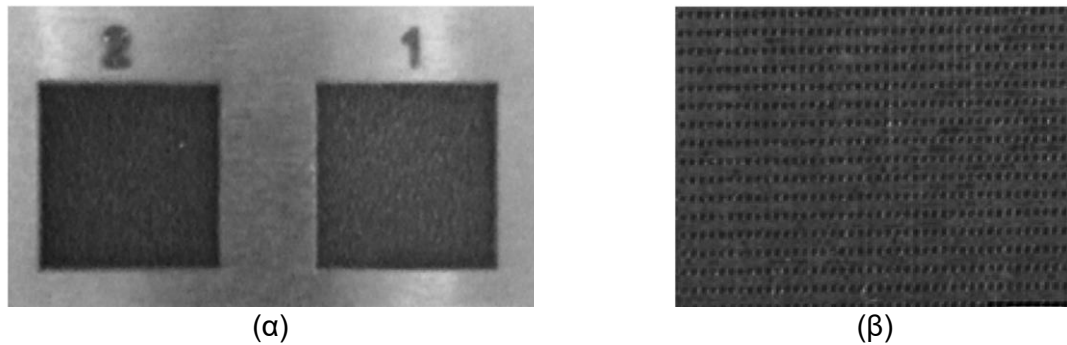
Ο Teixidor και άλλοι [31] διερεύνησαν την επίδραση των συνθηκών της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser στην παραγόμενη γεωμετρία και την ποιότητα επιφάνειας. Πραγματοποίησαν ένα σετ από 54 μικρο-κανάλια με θεωρητικό πλάτος 200μm και βάθος 50μm σε εργαλειοχάλυβα AISI H13 που χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή καλουπιών με τη μηχανή Deckel Maho Lasertec 40 (Nd:YAG 1064nm, 100W power, 0.03mm spot diameter). Σε κάθε κανάλι η τραχύτητα Ra μετρήθηκε σε 5 θέσεις με τη χρήση τραχύμετρου Mitutoyo SV2000 με μήκος αποκοπής 0.8mm, σύμφωνα με το πρότυπο ISO/DIS 4287/1E. Επίσης μετρήθηκε το πλάτος και το βάθος σε 3 εγκάρσιες τομές σε κάθε κανάλι και πραγματοποιώντας 5 μετρήσεις σε κάθε μια με τη χρήση στερεομικροσκοπίου ZEISS SteREO Discovery V12. Στόχος ήταν η βελτιστοποίηση της κατεργασίας ως προς την τραχύτητα και τη διαστατική ακρίβεια αναφορικά με τις ακόλουθες συνθήκες κατεργασίας: ταχύτητα δέσμης, συχνότητα παλμών και ένταση παλμών. Για τον σκοπό αυτόν παρουσιάστηκε μια πολυκριτηριακή μέθοδος ανάλυσης αποφάσεων (multiple criteria decision analysis MCDM) η οποία επιλύθηκε χρήση ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization PSO). Οι ερευνητές συμπέραναν ότι παρ' όλο που εμφανίζονται κάποιες μικρές αποκλίσεις στη μορφή και τις διαστάσεις των χαραγμένων μικρο-καναλιών σε σχέση με τα θεωρητικά, οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από τις συνθήκες κατεργασίας, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.18](#), το αποτέλεσμα δείχνει ότι η κατεργασία είναι κατάλληλη για την παραγωγή μικρο-γεωμετριών.



Σχήμα 2.18: Γεωμετρία χαραγμένου μικρο-καναλιού σε 200X zoom με συνθήκες κατεργασίας (α) ταχύτητα 275mm/s, συχνότητα 35kHz, ένταση 35% (β) 325mm/s, 35kHz, 40% (γ) 225mm/s, 35kHz, 45% (δ) 300mm/s, 40kHz, 45%

Ο Kasman [32] ασχολήθηκε με τη μελέτη της κατεργασιμότητας σκληρομετάλλων προερχόμενων από κονιομεταλλουργία (powder metallurgy). Πραγματοποίησε πειράματα σε δοκίμιο προερχόμενο από κόνη χάλυβα κονιομεταλλουργίας με βασική κραματοποίηση το Βανάδιο (10%), όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.19](#), για να μελετηθεί η επίδραση των βασικών

συνθηκών κατεργασίας (ταχύτητα δέσμης, συχνότητα, ισχύς) στην παραγόμενη τραχύτητα επιφάνειας R_a και το βάθος χάραξης.



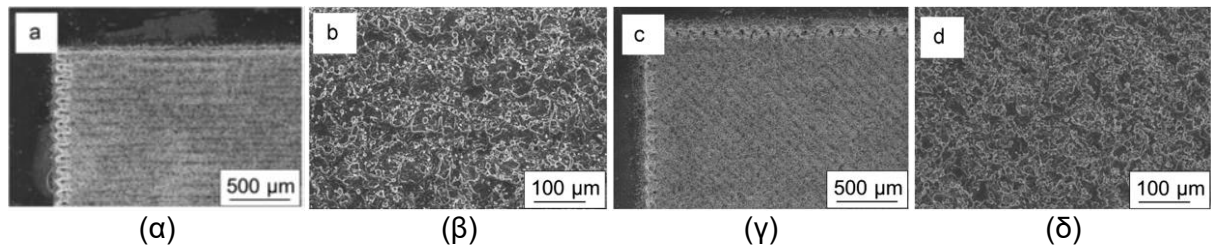
Σχήμα 2.19: Απεικόνιση χαράξεων (α) Πείραμα 1: 200mm/s, 20kHz, 25W, Πείραμα 2: 200mm/s, 30kHz, 37.5W (β) Λεπτομέρεια στην οποία φαίνεται η διεύθυνση των χαράξεων

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μια εργαλειομηχανή Laser Yb: Fibre στα 1064nm με ισχύ 50W. Για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας εφαρμόστηκε η μέθοδος Taguchi και πραγματοποιήθηκε ανάλυση διασποράς (ANOVA) για την αξιολόγηση του κατά πόσον είναι στατιστικά σημαντική η κάθε παράμετρος στην απόδοση της κατεργασίας. Από την ανάλυση προέκυψε ότι για την ελαχιστοποίηση της τραχύτητας R_a απαιτείται μεγάλη τιμή για την ταχύτητα της δέσμης και μικρή ισχύς, ενώ για τη μεγιστοποίηση του βάθους χάραξης απαιτείται μικρή τιμή για την ταχύτητα. Η βέλτιστη τιμή για την τραχύτητα εμφανίζεται για ταχύτητα 800mm/s, συχνότητα 30kHz και ισχύ 25W. Η βέλτιστη τιμή για το βάθος χάραξης εμφανίζεται για ταχύτητα 200mm/s, συχνότητα 30kHz και ισχύ 50W. Από την ανάλυση ANOVA βρέθηκε ότι η επίδραση της ταχύτητας στην τραχύτητα είναι 83.84% και στο βάθος 76.69%. Η συνεισφορά της συχνότητας δεν είναι τόσο σημαντική καθώς υπολογίστηκε 3.47% στην τραχύτητα και 0.56% στο βάθος.

Ο Campanelli και άλλοι [33] πραγματοποίησαν βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια (multi-objective optimization) της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας της κατεργασίας με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διατηρηθεί ταυτόχρονα μια καλή ποιότητα επιφάνειας. Πραγματοποίησαν ένα σετ από 24 πειράματα στα οποία χαραχτήκαν εσοχές τετραγωνικής μορφής διαστάσεων 15x15mm με σταθερό αριθμό 25 περασμάτων (layers) πάνω σε πλάκα κράματος αλουμινίου 5754 πάχους 3mm με τη χρήση Nd:YAG 1064nm παλμικού Laser νανοδευτερολέπτων ισχύος 20W και δέσμης διαμέτρου 70μm. Οι συνθήκες κατεργασίας που εξετάστηκαν ήταν τρεις: η ταχύτητα της δέσμης (4 επίπεδα: 400, 800, 1200, 1600mm/s), η συχνότητα των παλμών (3 επίπεδα: 25, 30, 40kHz) και η στρατηγική σάρωσης (παράλληλες χαράξεις, τυχαίες χαράξεις).

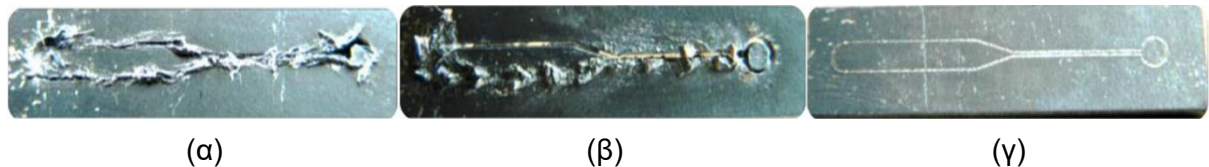
Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια εφαρμόστηκε μια μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης (response surface methodology RSM) έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των συνθηκών κατεργασίας και να επιτευχθεί μεγιστοποίηση του ρυθμού αφαίρεσης υλικού (mm^3/min) και του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού και να ελαχιστοποιηθεί η μέση τραχύτητα R_a . Κατέληξαν στο ότι η μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας είναι αντικρουόμενος όρος με την βελτιστοποίηση της ποιότητας επιφάνειας και έτσι προσδιόρισαν μια περιοχή-εύρος συνθηκών (efficiency zone) που ικανοποιούν αποτελεσματικά και τις δύο επιδιώξεις. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η στρατηγική χάραξης με παράλληλες χαράξεις μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.20 (γ) και (δ), οδηγεί σε αύξηση του εύρους των συνθηκών που ικανοποιούν τις παραπάνω επιδιώξεις. Τέλος, συμπέραναν ότι η τραχύτητα επιφάνειας

συνδέεται άμεσα με το βαθμό επικάλυψης των παλμών με τη μικρότερη τραχύτητα στα $R_a=2.6\mu\text{m}$ να εμφανίζεται για βαθμό επικάλυψης μεταξύ 40 και 60%.



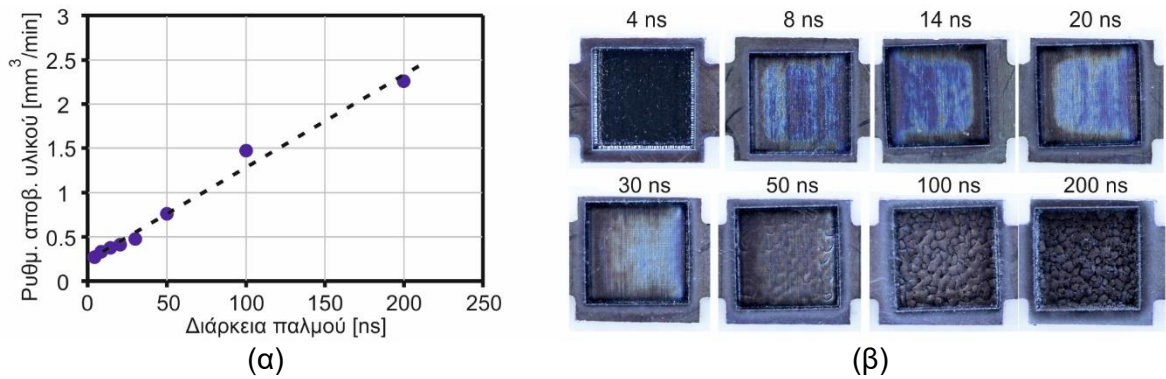
Σχήμα 2.20: Εικόνα από SEM με τη μορφολογία της χαραγμένης επιφάνειας για συνθήκες κατεργασίας 20W, 1600mm/s, 40kHz για διάφορες στρατηγικές σάρωσης (α) Παράλληλες χαράξεις (β) Λεπτομέρεια στην επιφάνεια με παράλληλες χαράξεις (γ) Τυχαίες διευθύνσεις χαράξεων (δ) Λεπτομέρεια στην επιφάνεια με τυχαίες διευθύνσεις χαράξεων

Ο Behera και άλλοι [34] εξέτασαν κατά πόσον είναι εφικτή η χάραξη μικρο-καναλιών σε χάλυβα AISI 1040 χρησιμοποιώντας μια μηχανή Laser κοπής LVD Orion 3015 διοξειδίου του άνθρακα CO₂ ισχύος 2.5kW και μήκους κύματος 10.6μm. Πραγματοποιήθηκε μια σειρά από χαράξεις για την πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών (ισχύς, ταχύτητα, συχνότητα) στη μορφή της γεωμετρίας κατά τη χάραξη μικρο-καναλιών. Για την αξιολόγηση των πειραμάτων μετρήθηκαν το πλάτος των μικρο-καναλιών με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου και SEM καθώς και η τραχύτητα. Όπως διαπιστώθηκε, για την πραγματοποίηση χαράξεων μικρο-καναλιών με τη χρήση μηχανής Laser κοπής CO₂ με ανεκτές τιμές στην τραχύτητα, θα πρέπει, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.21, να εφαρμοστεί δέσμη Laser μικρής ισχύος, με μεσαία ταχύτητα και υψηλή συχνότητα παλμών.



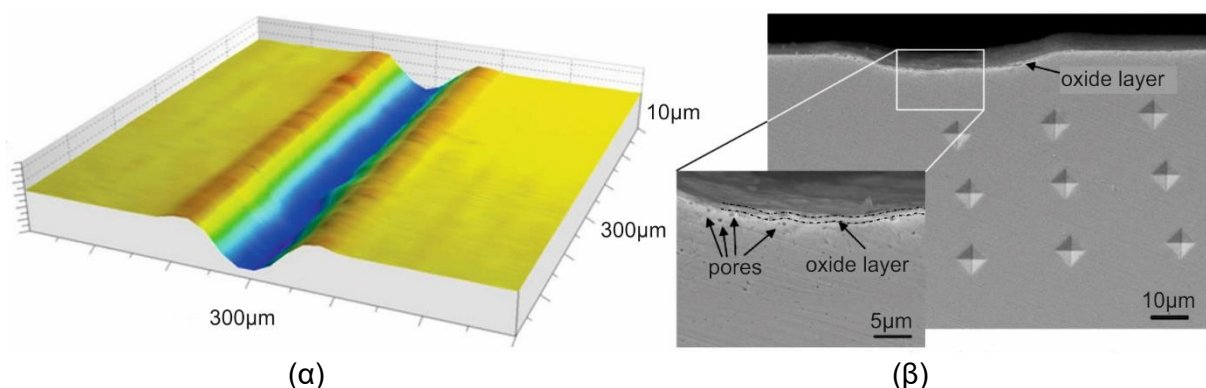
Σχήμα 2.21: Χαραγμένες γεωμετρίες (α) Τεμάχιο με πιτσιλίσματα υλικού από συνθήκες: συχνότητα 2kHz, πίεση αερίου 20bar, ισχύς 1kW, ταχύτητα 5000mm/s (β) Τεμάχιο με διαμπερή κοψίματα από συνθήκες: 1kHz, 30bar, 1kW, 500mm/s (γ) Αποδεκτό τεμάχιο από συνθήκες: 0.4kHz, 15bar, 1kW, 10000mm/s

Ο Mannimen και άλλοι [35] διερεύνησαν την επίδραση της χρονικής διάρκειας των παλμών κατά τη χάραξη με δέσμη Laser ανοξειδωτου χάλυβα SAE304. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ένα παλμικό Laser Ytterbium fibre με ισχύ 20W της IPG. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα χάραξης για παλμούς με χρονική διάρκεια από 4 μέχρι 200ns και μετρήθηκαν ο ρυθμός αποβολής υλικού (mm^3/min), η ποιότητα της επιφάνειας και οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού αυξάνεται για παλμούς μεγάλης διάρκειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22 (α). Όμως οι παλμοί με μεγάλη διάρκεια οδηγούν σε μεγάλη υποβάθμιση της ποιότητας της επιφάνειας και αυξάνουν τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κατεργασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22 (β). Επιπλέον, έγινε αντιληπτό ότι για παλμούς με διάρκεια από 50ns και πάνω, στο επαναστερεοποιημένο στρώμα υλικού της επιφάνειας εμφανίστηκαν ρηγματώσεις και πόροι. Έτσι, οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι για να είναι ταυτόχρονα αποδοτική και ποιοτική η κατεργασία χάραξης, θα πρέπει να εφαρμόζονται παλμοί με μεγάλη διάρκεια για το ξεχόνδρισμα του υλικού και με μικρή διάρκεια για το φινίρισμα.



Σχήμα 2.22: Επίδραση της χρονικής διάρκειας των παλμών (α) στο ρυθμό αποβολής υλικού (β) στην ποιότητα επιφάνειας

Ο Mladenovič και άλλοι [36] πραγματοποίησαν βελτιστοποίηση της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser με στόχο την ποιοτική χάραξη παραστάσεων σε τυπογραφικές πλάκες από ανοξείδωτο χάλυβα AISI304 που χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση με τη μέθοδο της βαθυτυπίας. Για το σκοπό αυτόν ακολούθησαν σχεδιασμό πειραμάτων (DoE) με βάση έναν ορθογώνιο πίνακα L_{27} της μεθόδου Taguchi με τρία επίπεδα για κάθε παράμετρο που μελετήθηκε: συχνότητα παλμών (50, 100, 150kHz), ταχύτητα δέσμης (5, 15, 30mm/s), ισχύς (10, 12, 15W), εστίαση της δέσμης (0, 1, 2mm). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της fibre-laser μηχανής GRAVOGRAPH 300FL στα 1064nm, ισχύος 30W, με διάμετρο δέσμης 30μm και διάρκεια παλμού από 90 έως 120ns. Οι χαράξεις είχαν τη μορφή αυλακιών και μετρήθηκαν με τη χρήση προφιλόμετρου (Taylor Hobson Form Talysurf Series 2), οπτικού μικροσκοπίου (Zeiss Axio CSM 700) και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM Jeol JSM-7600F) το εμβαδόν της εγκάρσιας τομής του αυλακιού, το βάθος και το πλάτος. Στο σχήμα 2.23 (α) και (β) παρουσιάζονται η 3D τοπογραφία και μια εγκάρσια τομή ενός αυλακιού από το προφιλόμετρο και το SEM αντίστοιχα. Εφαρμόστηκε μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης (RSM) και ανάλυση διασποράς (ANOVA) για να βρεθεί η επίδραση της κάθε παραμέτρου στα αποτελέσματα. Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι μείωση της ταχύτητας της δέσμης προκαλεί αύξηση στο εμβαδόν της εγκάρσιας τομής του αυλακιού, του βάθους και του πλάτους. Με την αύξηση της ισχύος το πλάτος του αυλακιού αυξάνεται. Η επίδραση της συχνότητας στο εύρος που ελέγχθηκε (50-150kHz) είναι σχεδόν αμελητέα. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της εστίασης της δέσμης στη διεύθυνση του βάθους στο εύρος των 2mm δεν επηρεάζει τη χάραξη.

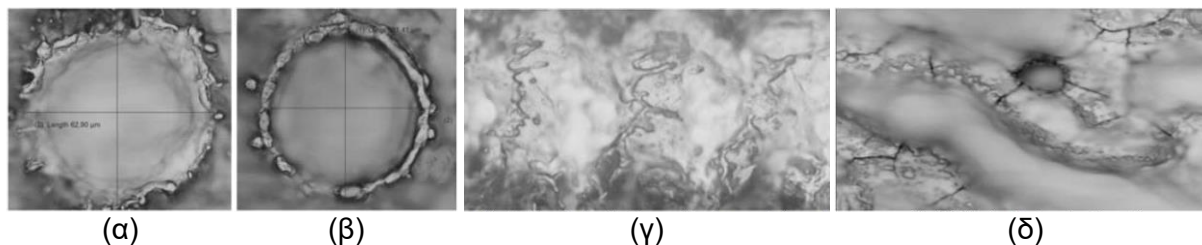


Σχήμα 2.23: Χαράξεις αυλακιών (α) 3D τοπογραφία από προφιλόμετρο (β) Εγκάρσια τομή από SEM

Η Anita Pritam [37] διερεύνησε πειραματικά την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας κατά τη βαθεία χάραξη με δέσμη Laser του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 1045. Πραγματοποίησε ένα σετ

από 108 πειράματα με τη χρήση ενός ytterbium-doped fibre Laser στα 1064nm ισχύος 30W και διαμέτρου δέσμης 100μm για διάφορες τιμές των συνθηκών κατεργασίας: ταχύτητα δέσμης (200, 400, 600, 800mm/s), συχνότητα παλμών (25, 35, 45, 55kHz), ισχείς (12, 18, 24, 30) και απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών (10, 20, 30, 40μm). Με τη χρήση προφιλόμετρου στυλίσκου (Mitutoyo SJ 301) μετρήθηκαν η μέση τραχύτητα R_a και το συνολικό βάθος χάραξης. Προέκυψε ότι αύξηση της ισχύος οδηγεί σε αύξηση της τραχύτητας και του βάθους. Επίσης, αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μείωση της τραχύτητας και του βάθους. Η συχνότητα φάνηκε ότι έχει σχεδόν αμελητέα συνεισφορά. Για την απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών παρατηρήθηκε ότι, αυξάνοντας την μέχρι την τιμή των 30μm, παρατηρείται μείωση στην τραχύτητα ενώ από εκεί και μετά παρατηρείται μια ελαφριά αύξηση της τραχύτητας.

Ο Kochergin και άλλοι [38] πραγματοποίησαν μια σειρά από πειράματα χάραξης με δέσμη Laser με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας (ενέργεια παλμού, συχνότητα παλμών, ταχύτητα δέσμης) στη σχηματιζόμενη μικρο-γεωμετρία της κατεργασμένης επιφάνειας. Κατά την πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκαν χαράξεις 4x6mm σε επίπεδες πλάκες βιομηχανικού τιτανίου (βαθμού BT1-0 κατά τα Ρωσικά πρότυπα) και ανοξείδωτου χάλυβα 12X18H10T για διάφορες τιμές των συνθηκών κατεργασίας με τη χρήση μιας μηχανής fibre laser της IPG ισχύος 50W, διάμετρο δέσμης 50μm και απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών κατά τις χαράξεις 45μm (επικάλυψη μεταξύ ευθύγραμμων τροχιών παλμών 10%). Η τοπογραφία της επιφάνειας μετρήθηκε με τη χρήση οπτικού (Olympus BX51) και ηλεκτρονικού (Phenom G22 pro) μικροσκοπίου και πραγματοποιήθηκε μέτρηση της τραχύτητας με προφιλόμετρο (TR200). Αρχικά μελέτησαν την μικρο-γεωμετρία της κοιλότητας που δημιουργείται από το υλικό που έχει αφαιρεθεί από τη δέσμη Laser για τα δύο υλικά όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24 (α) και (β).



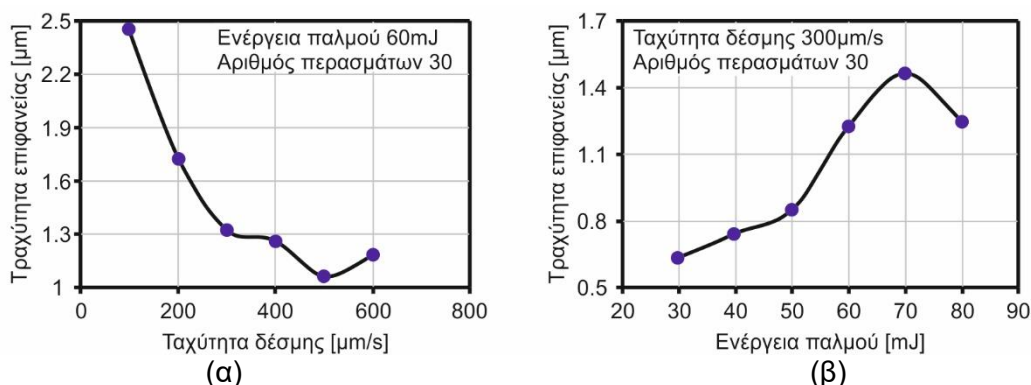
Σχήμα 2.24: (α) Δακτύλιος επαναστεροποιημένου υλικού για ανοξείδωτο χάλυβα 12X18H10T και (β) τιτάνιο BT1-0 (γ) Πιτσιλίσματα με τη μορφή πίδακα για τη χάραξη του ανοξείδωτου χάλυβα με ισχύ 50W, συχνότητα 80kHz και ταχύτητα δέσμης 5000mm/s (δ) Ρωγμές κατά τη χάραξη τιτανίου BT1-0 με δέσμη διαμέτρου 25μm, ισχύος 15W, συχνότητα παλμών 80kHz, ταχύτητας 700mm/s και διάρκεια παλμών 100ns

Οι ερευνητές έδειξαν ότι στην κοιλότητα σε απόσταση από το κέντρο περίπου ίση με αυτή που αντιστοιχεί στην ακτίνα της δέσμης, σχηματίζεται ένας διακριτός δακτύλιος από μικρο-σταγονίδια τηγμένου και στη συνέχεια επαναστεροποιημένου υλικού που έχουν σφαιρική μορφή. Ο δακτύλιος που σχηματίστηκε στο τιτάνιο είναι πιο έντονος και αποτελείται από σωματίδια με μέσο μέγεθος 3.2μm ενώ ο δακτύλιος στον ανοξείδωτο χάλυβα είναι ασθενέστερος και μοιάζει σαν έχει απλωθεί προς την γύρω επιφάνεια με μέσο μέγεθος σωματιδίων στα 2μm. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι με την αύξηση της ισχύος της δέσμης αυξάνεται ο αριθμός των σταγονιδίων επαναστεροποιημένου υλικού, αλλά ταυτόχρονα μειώνεται το μέσο μέγεθός τους. Επίσης, εκτός από τα σωματίδια σφαιρικής μορφής, σε ορισμένες περιπτώσεις, εμφανίζονται και πιτσιλίσματα που έχουν τη μορφή πίδακα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24 (γ), με το ύψος τους να κυμαίνεται από 0.5 μέχρι 3 μm. Ακόμα, έγινε

αντιληπτό ότι στις περιπτώσεις χάραξης που υπάρχει μεγάλη επικάλυψη μεταξύ των παλμών εμφανίζονται ρωγμές στην κατεργασμένη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο [Σχήμα 2.24 \(δ\)](#), πλάτους από 0.5 έως 0.1μm και βάθους από 5 έως 10μm. Οι ρωγμές αυτές οφείλονται στο ότι λόγω της μεγάλης επικάλυψης πραγματοποιείται επαναλαμβανόμενη ταχεία θέρμανση και ψύξη του επιφανειακού στρώματος του υλικού, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη θερμικών τάσεων που υπερβαίνουν την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού. Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις που προέκυψαν για τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη χάραξη με δέσμη Laser αποτέλεσαν βάση για τη δημιουργία ενός φυσικού μοντέλου που δίνει στοιχεία σχετικά με τα χαρακτηριστικά της χάραξης.

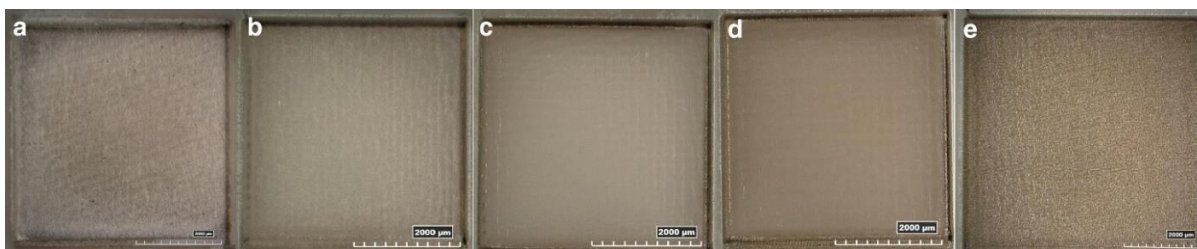
Ο Behera και άλλοι [39] πραγματοποίησαν μια πειραματική διερεύνηση της χάραξης μικρο-καναλιών με δέσμη Laser σε ανοξειδωτο χάλυβα SAE304. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε εργαλειομηχανή Nd:YAG Q-switched (Litron LPY 7864-10G) μήκους κύματος στα 532nm με διάρκεια παλμού 10ns, διάμετρο δέσμης 100μm και συχνότητα παλμών σταθερή στα 10Hz. Εξετάστηκαν διάφορες τιμές των συνθηκών κατεργασίας (ενέργεια παλμών 30-80mJ, ταχύτητα δέσμης 100-600μm/s, και αριθμός περασμάτων 10-60) και μετρήθηκαν με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου, 3D προφιλόμετρου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM, το πλάτος, το βάθος και η τραχύτητα των χαραγμένων μικρο-καναλιών. Όσον αφορά την επίδραση της ταχύτητας έδειξαν ότι το πλάτος των μικρο-καναλιών μειώνεται αρχικά με την αύξηση της ταχύτητας από τα 100 μέχρι τα 400μm/s και στη συνέχεια αυξάνεται μέχρι την ταχύτητα των 600 μm/s ενώ το βάθος των καναλιών μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της ταχύτητας.

Η τραχύτητα επιφάνειας, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.25 \(α\)](#), μειώνεται για αύξηση της ταχύτητας από τα 100 μέχρι τα 500μm/s και έπειτα παρουσιάζει μια μικρή αύξηση για την ταχύτητα των 600 μm/s. Σχετικά με την επίδραση της ενέργειας των παλμών μετρήθηκε ότι το πλάτος των καναλιών αυξάνεται για αύξηση της ενέργειας από τα 30mJ στα 50mJ, ενώ έπειτα εμφανίζεται μείωση μέχρι και για την ενέργεια των 80mJ. Το πλάτος των καναλιών αρχικά αυξάνεται για αύξηση της ενέργειας από τα 30mJ στα 40mJ ενώ έπειτα μειώνεται για αύξηση της ενέργειας έως τα 80mJ. Η τραχύτητα επιφάνειας, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.25 \(β\)](#), αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας από τα 30mJ στα 70mJ, ενώ έπειτα μέχρι την τιμή των 80mJ εμφανίζει μια μικρή μείωση. Από την μελέτη των εικόνων που λήφθηκαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM διαπιστώθηκε ότι στην επιφάνεια των χαραγμένων μικρο-αυλακιών υπάρχουν υπολείμματα από επαναστερεοποιημένο υλικό και ότι στο επιφανειακό κατεργασμένο στρώμα έχουν εμφανιστεί πόροι.



Σχήμα 2.25: Μέτρηση της μέσης τραχύτητας R_a χαραγμένης επιφάνειας με 30 περάσματα συναρτήσει (α) της ταχύτητας δέσμης για ενέργεια παλμών 60mJ (β) της ενέργειας παλμών για ταχύτητα δέσμης 300μm/s

Ο Guarino και άλλοι [40] πραγματοποίησαν μια πειραματική και στατιστική διερεύνηση της χάραξης με δέσμη Laser ζirkονίας (ZrO_2) σταθεροποιημένη με ύττρια (yttria stabilized zirconia YSZ). Η ζirkονία σταθεροποιημένη με ύττρια βρίσκει τα τελευταία χρόνια εφαρμογές στην οδοντοτεχνία για την κατασκευή στεφάνων (θηκών) ζirkονίου και στη βιομηχανία καθώς χρησιμοποιείται, είτε ως πυρίμαχο υλικό, είτε ως επίστρωση για την προστασία από τη θερμική καταπόνηση καθώς και ως στερεός ηλεκτρολύτης για κυψελίδες καυσίμου (solid oxide fuel cell SOFC). Σε πρώτη φάση πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές, όπως αυτές που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.26, για να διαπιστώσουν ποιες παράμετροι από το σύνολο των παραμέτρων (ταχύτητα δέσμης, ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών) έχουν σημαντική επίδραση στην κατεργασία. Για το πειραματικό μέρος χαράχτηκαν εσοχές $3 \times 3 \text{ mm}^2$ σε μπλόκ ζirkονίας με τη χρήση ενός Laser Q-switched pulsed Yb:YAG fiber laser (YLP-RA30-1-50-20-20 by IPG) ισχύος 30W, διαμέτρου δέσμης $80 \mu\text{m}$ και διάρκειας παλμού 50ns.



Σχήμα 2.26: Επίδραση της ταχύτητας της δέσμης στην ποιότητα της επιφάνειας των κατεργασμένων τεμαχίων για αριθμό περασμάτων ίσο με 10, απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών ίση με $40 \mu\text{m}$, στρατηγική σάρωσης CROSS και ταχύτητα δέσμης ίση με 200, 400, 500, 600, 1000 mm/s αντίστοιχα για κάθε εικονιζόμενη εσοχή

Σε δεύτερη φάση ακολούθησαν ένα σχεδιασμό πειραμάτων (DoE) 12 πειραμάτων που μελετήθηκε η επίδραση των ακόλουθων συνθηκών κατεργασίας: ταχύτητα δέσμης (350, 450, 550 mm/s), απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών ($40, 60 \mu\text{m}$) και αριθμός περασμάτων (10, 20) στο βάθος της χάραξης, στο ρυθμό αποβολής υλικού και στην ποιότητα επιφάνειας. Για το χαρακτηρισμό της ποιότητας επιφάνειας μετρήθηκαν η μέση τραχύτητα R_a , το μέσο μήκος παρατυπιών R_{sm} , η ασυμμετρία R_{sk} και η κύρτωση R_{ku} με τη χρήση 3D προφίλόμετρου (Talysurf CLI 2000 from Taylor Hobson) με βάση το πρότυπο ISO 4287:1997. Για τη μέτρηση του βάθους χάραξης χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μικροσκόπιο (KH-8700 by Hirox) και η αξιολόγηση της επιφάνειας έγινε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM Leo SUPRA 35 by ZEISS). Ακόμα, πραγματοποίησαν ανάλυση διασποράς (ANOVA) στα αποτελέσματα για να διαπιστώσουν ποιες συνθήκες επηρεάζουν και πως την κατεργασία. Συμπεράναν ότι για βιομηχανικές εφαρμογές που στόχος είναι ο μεγάλος ρυθμός αποβολής υλικού κατά την κατεργασία και μικρή τραχύτητα για την παραγωγή επιφανειών με μικρή τριβή και μεγάλη αντοχή στη φθορά, συστήνεται μικρή ταχύτητα δέσμης, χαμηλός αριθμός περασμάτων και μεγάλη απόσταση μεταξύ των ευθυγράμμων τροχιών των παλμών. Αντίθετα, για εφαρμογές στην οδοντιατρική που χρειάζεται μεγάλος ρυθμός αποβολής υλικού και μεγάλη τραχύτητα ούτως ώστε να υπάρχει μια ισχυρή συγκόλληση ανάμεσα στη στεφάνη (θήκη) από ζirkονία και στο δόντι-στήριγμα, συστήνεται μεγάλη ταχύτητα δέσμης, μεγάλος αριθμός περασμάτων και μικρή απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών.

Ο Sugar και άλλοι [41] διερεύνησαν πειραματικά τη χάραξη κρατερώματος (μπρούντζου) αλουμινίου με δέσμη Laser. Πραγματοποίησαν μια σειρά από πειράματα με τη χρήση του κέντρου κατεργασίας Laser Lasertec 80 Shape που πρόκειται για ένα ytterbium-doped fibre laser στα 1064 nm με ισχύ 100W, διάρκεια παλμού 120ns και συχνότητα παλμών 80kHz σε

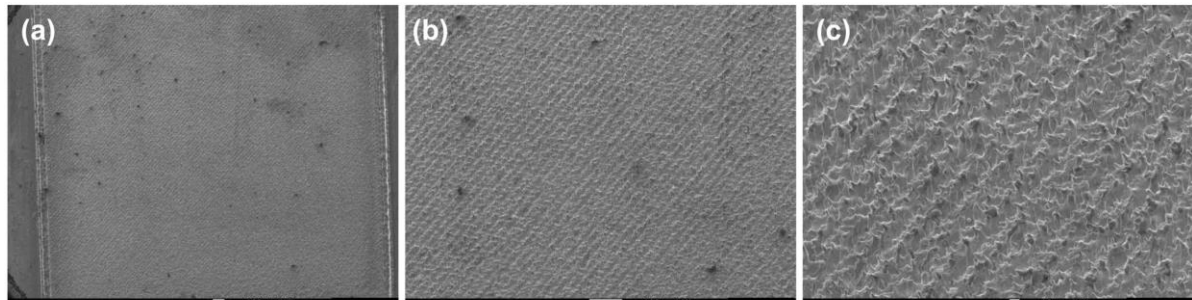
κρατέρωμα αλουμινίου (AMPCO 25®) με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας (πυκνότητα ισχύος, ταχύτητα δέσμης, απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών) στην μορφολογία και την τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Οι χαράξεις είχαν τετραγωνική μορφή με μήκος πλευράς 5mm. Μετρήθηκε η τραχύτητα τους με τη χρήση προφιλόμετρου στυλίσκου (Zeiss Surfcom 5000) και μελετήθηκε η μορφολογία τους με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM. Συμπέραναν ότι υψηλή ένταση των παλμών σε συνδυασμό με μικρή ταχύτητα δέσμης Laser οδηγούν σε κακής ποιότητας επιφάνεια. Η απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών έχει ελάχιστη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Τα αποτελέσματα χάραξης με την καλύτερη ποιότητα επιφάνειας επιτεύχθηκαν για συνθήκες: πυκνότητα ισχύος $1.27 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, ταχύτητα δέσμης 1600mm/s και απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών 20μm.

Ο Srdjan Jovic [42] παρουσίασε ένα πειραματικό μοντέλο πρόβλεψης για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών κατεργασίας βασισμένο σε τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης (computational intelligence techniques). Πραγματοποιήθηκε ένα σετ πειραμάτων χάραξης με δέσμη Laser Nd:YAG στα 1064nm σε σύνθετο υλικό αποτελούμενο από αλουμίνιο και καρβίδιο του πυριτίου (Al-SiC) χρησιμοποιώντας άζωτο ως αέριο κοπής. Εφαρμόστηκε ένα προσαρμοστικό νευρωνικό συγκεχυμένο συμπερασματολογικό σύστημα (adaptive neuro fuzzy inference system ANFIS) για την εκτίμηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας (παροχή αερίου κοπής, εστίαση, συχνότητα παλμών, ένταση ρεύματος) στο αποτέλεσμα της χάραξης που σχετίζεται με τρεις παραμέτρους: βάθος χάραξης, πλάτος χάραξης και αντίθεση (contrast) της κατεργασμένης ζώνης. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η εστίαση της δέσμης έχει τη μεγαλύτερη επίδραση από όλες τις συνθήκες κατεργασίας στο τελικό αποτέλεσμα της χάραξης. Επιπλέον, διαπίστωσε ότι η ακρίβεια του ANFIS για την πρόβλεψη των παραμέτρων κατεργασίας είναι αποδεκτή και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρακτικές εφαρμογές.

Ο Ahmed και άλλοι [43] ασχολήθηκαν με τη διερεύνηση της κατεργασίας χάραξης κράματος τιτανίου με δέσμη Laser. Πραγματοποίησαν χαράξεις σε σχήμα ορθογωνικού αυλακιού μήκους 5mm, πλάτους 3mm και βάθους 12μm σε δοκίμια κράματος τιτανίου Ti-6Al-4V αρχικής τραχύτητας $R_a=6.38\mu\text{m}$ με τη χρήση της εργαλειομηχανής DMG Mori Sieki Lasertec 40. Πρόκειται για μια μηχανή Q-switched Nd:YAG pulsed Laser στα 1064nm με διάμετρο δέσμης 20μm και διάρκεια παλμού 10μs. Σκοπός τους ήταν η μελέτη της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας (ένταση δέσμης Laser: 75, 80, 85%, συχνότητα παλμών: 10, 15, 20kHz, ταχύτητα δέσμης: 200, 300, 400mm/s, πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού: 1, 2, 3μm/layer, απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών: 8, 10, 12μm) στον ρυθμό αποβολής υλικού και στην τραχύτητα επιφάνειας R_a . Ο βαθμός σημαντικότητας της κάθε μιας συνθήκης κατεργασίας εξετάστηκε πραγματοποιώντας ανάλυση διασποράς (ANOVA). Έπειτα παρουσίασαν και ανέπτυξαν μαθηματικά μοντέλα για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων αναφορικά με τον ρυθμό αποβολής υλικού και την τραχύτητα συναρτήσει των συνθηκών κατεργασίας. Με την αξιοποίηση του παραπάνω μοντέλου πραγματοποίησαν βελτιστοποίηση της κατεργασίας.

Με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM μελέτησαν την μικροδομή των στρωμάτων υλικού κάτω από την κατεργασμένη επιφάνεια. Σχετικά με την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αύξηση στην ένταση της δέσμης Laser οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού και της τραχύτητας. Αντίθετα, αύξηση στις τιμές όλων των υπόλοιπων συνθηκών κατεργασίας οδηγεί σε μείωση του ρυθμού αποβολής υλικού και της τραχύτητας. Επιπλέον διαπίστωσαν ότι τα μαθηματικά μοντέλα πρόβλεψης που παρουσιάστηκαν μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στην χάραξη εξοικονομώντας έτσι χρόνο και μειώνοντας το κόστος της

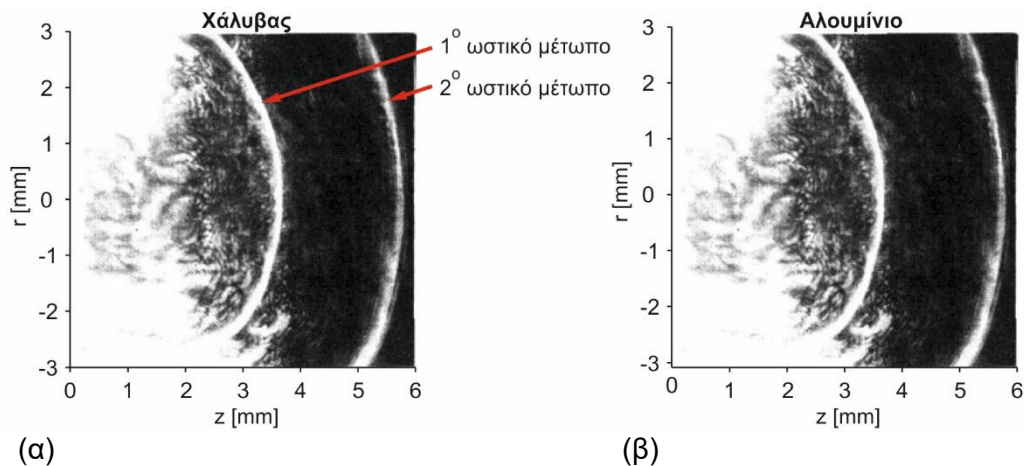
κατεργασίας. Από τη βελτιστοποίηση βρέθηκε ότι η ελάχιστη τραχύτητα είναι $R_a=0.965\mu\text{m}$ με κατεργασμένη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.27, για συνθήκες κατεργασίας: ένταση δέσμης Laser 75%, συχνότητα παλμών 10.33kHz, ταχύτητα δέσμης 250mm/s, πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού 1.11 $\mu\text{m}/\text{layer}$ και απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών 12 μm . Ακόμα, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του SEM προέκυψε ότι δεν παρατηρούνται αλλαγές στην μικροδομή του υλικού κάτω από την κατεργασμένη με Laser επιφάνεια καθώς παρουσιάζει ακριβώς την ίδια μικροδομή με το αρχικό τεμάχιο.



Σχήμα 2.27: Απεικόνιση της κατεργασμένης επιφάνειας από SEM για τις συνθήκες κατεργασίας με την ελάχιστη τραχύτητα $R_a=0.965\mu\text{m}$ με ζουμ x35, x100, x300 αντιστοίχως για κάθε μια από τις εικόνες

2.3.3 Μοντελοποίηση και προσομοίωση μηχανισμού αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων και άνω

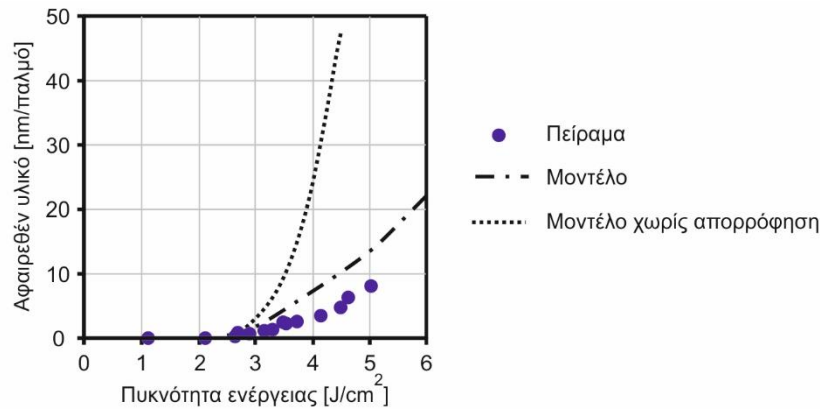
Ο Aden και άλλοι [44] μοντελοποίησαν τη διεργασία της ατμοποίησης του υλικού μεταλλικών επιφανειών με τη χρήση δέσμης Laser. Το μοντέλο που ανέπτυξαν περιγράφει το μετασχηματισμό της αέριας φάσης και την εξάπλωση του ατμού μετάλλου έναντι του αέρα του περιβάλλοντος συναρτήσει της έντασης της δέσμης Laser και των ιδιοτήτων του υλικού. Ο ατμός μετάλλου που παράγεται κατά την ατμοποίηση καθώς εξαπλώνεται συμπιέζει τον αέρα του περιβάλλοντος δημιουργώντας ένα ωστικό μέτωπο (shock front). Έδειξαν ότι υπάρχει μια ελάχιστη τιμή της έντασης της δέσμης Laser για την οποία η διεργασία της ατμοποίησης και οι ιδιότητες του ατμού, μέχρι το ωστικό μέτωπο διαχωρισμού ατμού-αέρα περιβάλλοντος, δεν επηρεάζονται από την περαιτέρω εξάπλωση του μετώπου, ούτε από την πίεση του αέρα του περιβάλλοντος που το περιβάλλει. Η κρίσιμη αυτή τιμή της έντασης εξαρτάται από το κατεργαζόμενο υλικό (η κρίσιμη ένταση για το χάλυβα βρέθηκε μικρότερη από αυτήν για το αλουμίνιο) και από τις παραμέτρους που ορίζουν την κατεργασία (αυξάνοντας τη διάμετρο της δέσμης αυξάνεται και η κρίσιμη ένταση). Ακόμα διαπίστωσαν ότι, όταν η ένταση της δέσμης υπερβεί αυτή την κρίσιμη τιμή, η ροή του υλικού που έχει ατμοποιηθεί μπορεί να προσδιοριστεί συναρτήσει των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του τεμαχίου και της έντασης της δέσμης. Τέλος, με το μοντέλο που ανέπτυξαν καθίσταται εφικτός ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ατμού μετάλλου που είναι χρήσιμα για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ατμού μετάλλου και δέσμης Laser. Για τον έλεγχο της ορθότητας του μοντέλου που παρουσιάστηκε πραγματοποιήθηκαν πειράματα με δέσμη Laser Nd:YAG στα 1064nm που παράγει παλμούς διάρκειας 100 μs και ενέργειας 1.6J σε τεμάχια από χάλυβα και αλουμίνιο. Η θέση του ωστικού μετώπου καταγράφηκε με τη λήψη στροβοσκοπικών φωτογραφιών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28 και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη που προκύπτει με βάση το μοντέλο.



Σχήμα 2.28: Στροβοσκοπική φωτογράφιση δύο ωστικών μετώπων που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές 4μs (εσωτερικό τόξο) και 8μs (εξωτερικό τόξο) κατά την ατμοποίηση με δέσμη Laser (α) χάλυβα και (β) αλουμινίου

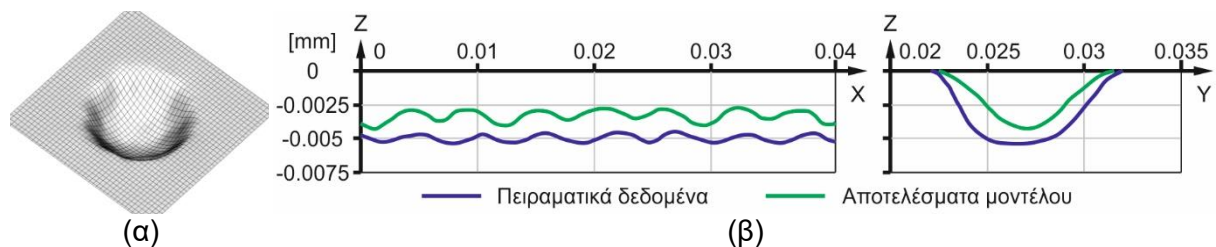
Ο Lunney και άλλοι [45] ανέπτυξαν ένα απλό αριθμητικό μοντέλο για την περιγραφή των βασικών φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη θέρμανση και την ατμοποίηση με Laser μετάλλων. Το μοντέλο που ανέπτυξαν λαμβάνει υπόψη τη μείωση στην ενέργεια της δέσμης που απορροφάται από το υλικό λόγω ανακλάσεων της δέσμης. Μελέτησαν τα φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά τη θέρμανση και την ατμοποίηση του μετάλλου. Έδειξαν ότι, το πλούμιο ατμού μετάλλου πάνω από την επιφάνεια που προσπίπτει η δέσμη, απορροφά ένα τμήμα από την ενέργεια της προκαλώντας την περαιτέρω θέρμανση, τον ιονισμό του και τον σχηματισμό πλάσματος σχετικά υψηλής πυκνότητας και χαμηλής θερμοκρασίας. Κατά τη μοντελοποίηση, θεώρησαν ότι το σχηματιζόμενο πλούμιο πλάσματος ατμού μετάλλου εκπέμπει κι αυτό ακτινοβολία, που ακτινοβολεί με τη σειρά της το υλικό και ένα μέρος της οποίας απορροφάται από αυτό. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ενέργειας της δέσμης που απορροφάται από το πλάσμα και το πάχος του υλικού που αφαιρείται ανά παλμό για την περίπτωση ακτινοβολήσης χαλύβδινου τεμαχίου με παλμούς Excimer Laser στα 248nm και χρονικής διάρκειας 26ns. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά και προέκυψε ότι η θεώρηση της απορρόφησης της ενέργειας της δέσμης στο πλούμιο έχει καθοριστικό ρόλο στη μοντελοποίηση, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.29](#). Εάν το γεγονός αυτό δεν ληφθεί υπόψη τότε το υπολογιζόμενο πάχος υλικού που αφαιρείται ανά παλμό προκύπτει πολύ μεγαλύτερο από το πραγματικό.

Ο Bulgakov και η Bulgakova [46] παρουσίασαν ένα μοντέλο που καθιστά εφικτή την εκτίμηση του ποσού της ακτινοβολίας της δέσμης που απορροφάται στο πλούμιο πλάσματος ατμού μετάλλου κατά την αφαίρεση υλικού με παλμούς δέσμης Laser μέσης έντασης και διάρκειας νανοδευτερολέπτων. Το κύριο χαρακτηριστικό του μοντέλου αυτού είναι ότι μπορεί να υπολογιστεί το ενεργειακό ισοζύγιο κατά την απορρόφηση τμήματος της ενέργειας της δέσμης από το πλάσμα λαμβάνοντας υπόψη τη μη ισοθερμοκρασιακή φύση της θέρμανσης του πλάσματος. Για τον σκοπό αυτό θεώρησαν ότι το οπτικό πάχος (optical thickness) του πλουμίου είναι εξαρτώμενο από τον χρόνο και αυξάνεται κατά τη διάρκεια της απορρόφησης της ενέργειας της δέσμης με τη θέρμανση του πλουμίου. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του βάθους του υλικού που αφαιρείται και της μάζας του κατά τη διάρκεια ενός παλμού. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser Q-switched Nd:YAG στα 1.06μm με διάρκεια παλμού 13ns, μέγιστη ενέργεια 55mJ και διάφορες τιμές για τη διάμετρο δέσμης από 0.5-1mm σε συνθήκες κενού σε πολυκρυσταλλικό γραφίτη και τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αριθμητικά.



Σχήμα 2.29: Αριθμητικές και μετρούμενες τιμές για το πάχος υλικού που αφαιρείται συναρτήσει της πυκνότητας ενέργειας της δέσμης. Οι αριθμητικές τιμές παρουσιάζονται για τις περιπτώσεις που, είτε λαμβάνεται είτε όχι, η απορρόφηση της δέσμης στο πλούμιο πλάσματος ατμού.

Ο Onischenko και άλλοι [47] παρουσίασαν μια ποσοτική ερευνητική μέθοδο για την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser. Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε μια φαινομενολογική προσέγγιση και είναι επαρκής για τη δημιουργία της τροχιάς του εργαλείου-δέσμης Laser για τη χάραξη πρακτικών 3D γεωμετριών. Για την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης από μια σειρά παλμών σε προκαθορισμένη θέση, πραγματοποιήθηκε πρώτα μελέτη της γεωμετρίας που έχει ο κρατήρας προερχόμενος από ένα παλμό Laser. Δηλαδή πραγματοποιήθηκαν πειράματα για διάφορες συνθήκες κατεργασίας κατά τα οποία ένας παλμός δέσμης Laser άφηνε το αποτύπωμά του στην επιφάνεια. Έτσι προέκυψε για κάθε σετ συνθηκών η γεωμετρία του κρατήρα που σχηματίζεται αντιστοίχως παρεμβάλλοντας ένα πλέγμα στη μετρούμενη επιφάνεια από προφίλομετρηση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.30 (α).



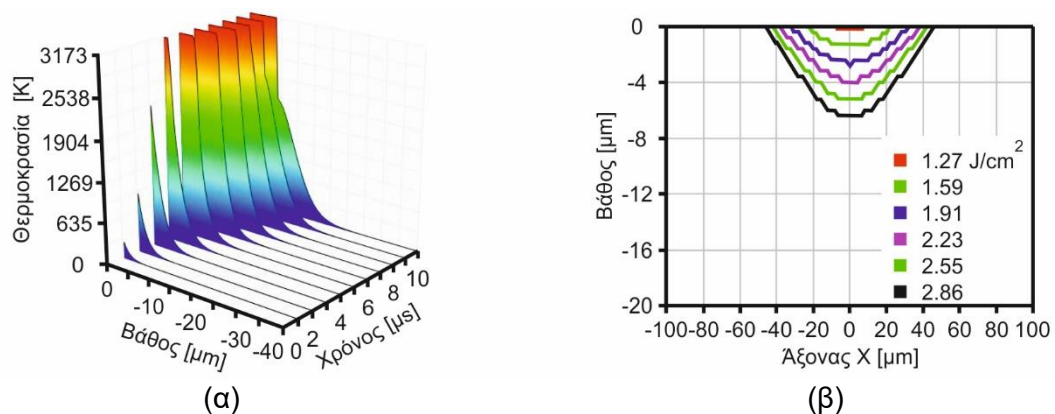
Σχήμα 2.30: (α) Γεωμετρία από προφίλομετρηση ενός κρατήρα από παλμό δέσμης Laser και παρεμβολή πλέγματος (β) Εγκάρσιες τομές αυλακιού σχηματιζόμενο από ισαπέχοντες κρατήρες σε απόσταση 5μm μεταξύ τους για πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα του μοντέλου μη λαμβάνοντας τις θερμικές επιδράσεις

Οι παλμοί Laser παρήχθησαν με τη χρήση Nd:VO4 Laser στα 266nm με διάρκεια παλμού 30ns, διάμετρο δέσμης 10μm και ενέργεια παλμού 20μJ σε τεμάχια από υβριδικό υλικό ORMOCER 4 κατασκευασμένο με την τεχνική λύματος-πηκτής (sol-gel). Η γεωμετρία των κρατήρων μετρήθηκε με τη χρήση προφίλομετρου Zygo New View 200 και επίσης λήφθηκαν εικόνες από SEM για περαιτέρω ανάλυση. Η αρχή λειτουργίας του μοντέλου βασίστηκε στο ότι γνωρίζοντας τη γεωμετρία του κρατήρα ενός παλμού η τελική γεωμετρία χάραξης μοντελοποιήθηκε σαν επαλληλία-υπέρθεση της γεωμετρίας του υλικού που αφαιρείται από πολλαπλούς παλμούς. Έτσι, από τα δεδομένα της γεωμετρίας του κρατήρα ενός παλμού μπόρεσαν και προσομοίωσαν τη χάραξη αυλακιών αποτελούμενα από παλμούς σε σταθερές αποστάσεις πάνω σε ευθεία γραμμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.30 (β). Ακόμα, κάνοντας

επαλληλία-υπέρθυση της γεωμετρίας που προέκυψε για το ένα αυλάκι, σε πολλά αυλάκια παράλληλα μεταξύ τους, επεδίωξαν να προσομοιώσουν τη χάραξη εσοχής.

2.3.4 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων

Ο Dobrev και άλλοι [48] ανέπτυξαν ένα 2D θεωρητικό μοντέλο για τη διερεύνηση του σχηματισμού του κρατήρα σε μέταλλο από παλμό δέσμης Laser. Στο μοντέλο λαμβάνεται υπόψη η απορρόφηση της δέσμης Laser που έχει κατανομή Gauss και η μετάδοση θερμότητας εφαρμόζοντας τη γενική μορφή της 2D διαφορικής εξίσωσης της αγωγιμότητας για τη θέρμανση του υλικού. Μοντελοποιήθηκε η ατμοποίηση του υλικού θεωρώντας και τις αντίστοιχες μεταβολές στη θερμότητα λόγω αλλαγών φάσεων.

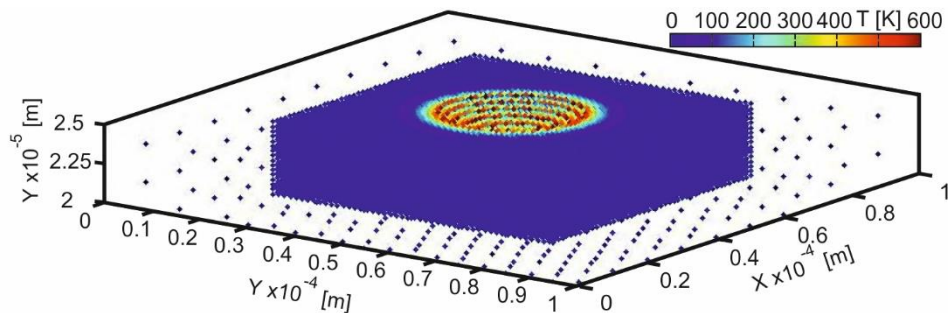


Σχήμα 2.31: (α) Θερμοκρασιακή κατανομή στη διεύθυνση του βάθους του κρατήρα για πυκνότητα ισχύος 2.86 J/cm^2 (β) Βάθη κρατήρα από προσομοιώσεις για διάφορες τιμές της πυκνότητας ισχύος

Για την μοντελοποίηση της αφαίρεσης του υλικού έγινε η θεώρηση ότι, όταν ένα κελί δεχτεί την απαραίτητη πυκνότητα ενέργειας για να ατμοποιηθεί, τότε η θερμοκρασία του τίθεται ίση με τη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Για τους μετέπειτα υπολογισμούς, το κελί αγνοείται ούτως ώστε να μην επηρεάζει θερμικά τα γειτονικά κελιά και να μην εμποδίζει την απορρόφηση της ενέργειας από τα κελιά του επόμενου επιπέδου. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.31 (α) σχετικά με τη θερμοκρασιακή κατανομή στο υλικό κατά τη διάρκεια του παλμού, καθώς επίσης και για την επίδραση της έντασης της δέσμης στη γεωμετρία του σχηματιζόμενου κρατήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.31 (β). Για την αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν πειράματα με τη χρήση Nd:YAG Laser (FOBA F 94S) στα 1064nm σε τεμάχια ανοξειδωτου χάλυβα 316 και συγκρίθηκαν οι αριθμητικές τιμές των βαθών των σχηματιζόμενων κρατήρων με τις αντίστοιχες πειραματικές.

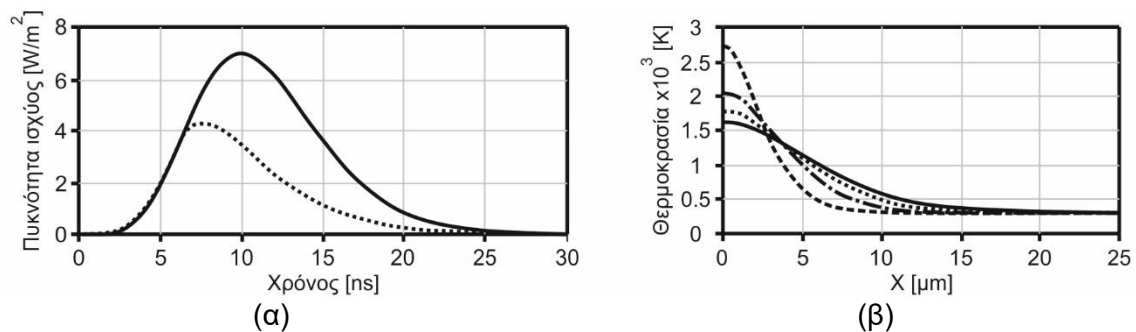
Ο Hurtony [49] πραγματοποίησε μια γενική ανασκόπηση στην ευρεία ποικιλία και στις διαθέσιμες επιλογές που υπάρχουν για τη μοντελοποίηση των μηχανισμών αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser. Πραγματοποίησε μια εκτενή ανάλυση για τα χαρακτηριστικά που θα έπρεπε να είχε ο ιδανικός προσομοιωτής και με βάση αυτά σύνθεσε και παρουσίασε ένα εναλλακτικό μοντέλο προσομοίωσης το οποίο χαρακτηρίζεται από απλότητα, ούτως ώστε να μπορέσει να προσαρτηθεί στα κέντρα κατεργασιών χάραξης με χρήση Laser. Κατά τη μοντελοποίηση, αρχικά χωρίστηκε ο προς μελέτη όγκος του τεμαχίου σε κελιά με βάση την μέθοδο TCM (thermal cell method), εφαρμόζοντας ένα ανομοιογενή χωρισμό (adaptive mesh) για εξοικονόμηση χρόνου κατά την επίλυση. Σύμφωνα με αυτήν, το κάθε κελί χαρακτηρίζεται μόνο από ένα κόμβο που βρίσκεται στο κέντρο μάζας και ολόκληρη η γεωμετρία αποθηκεύεται σε ένα πίνακα γειτνίασης. Έπειτα, προσδιορίστηκε η κατανομή της πυκνότητας ενέργειας (fluence

distribution) που έχει η δέσμη στην επιφάνεια του τεμαχίου, υιοθετώντας μια κατανομή Gauss για τα Nd:YAG Laser. Ως κριτήριο για τον εντοπισμό του υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί ορίστηκε μια κρίσιμη θερμοκρασία η οποία προσδιορίστηκε πειραματικά. Μετά το πέρας κάθε παλμού υπολογίζεται η θερμοκρασιακή κατανομή στον όγκο του τεμαχίου σύμφωνα με τη μέθοδο TCM με τη χρήση του λογισμικού Matlab. Όλα τα κελιά των οποίων η θερμοκρασία έχει υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία θεωρείται ότι έχουν αφαιρεθεί, ορίζοντας με τον τρόπο αυτό την τελική γεωμετρία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.32.



Σχήμα 2.32: Προφίλ κρατήρα που έχει σχηματιστεί από το υλικό που έχει αφαιρεθεί από ένα παλμό δέσμης Laser

Ο Aghaei και άλλοι [50] παρουσίασαν ένα μονοδιάστατο 1D θερμικό μοντέλο για την προσομοίωση της αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser σε χαλκό Cu, σε περιβάλλον με αέριο ήλιο He πιέσεως 1atm. Οι εξισώσεις που εξετάστηκαν και επιλύθηκαν αφορούν τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή στο τεμάχιο και τη δυναμική των αερίων στο πλούμιο ατμού-μετάλλου. Πραγματοποιήθηκε σύζευξη των εξισώσεων αυτών μέσω των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας μεταξύ του ακτινοβολούμενου υλικού-στόχου (target material), του λεπτού στρώματος ατμού πάνω από την επιφάνεια (Knudsen or evaporation layer) και του πλούμιου. Ο σχηματισμός πλάσματος διερευνήθηκε με τη χρήση των εξισώσεων Saha–Egger.



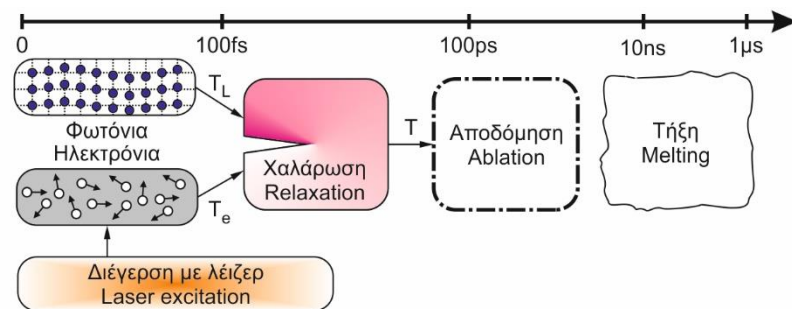
Σχήμα 2.33: (α) Πυκνότητα ισχύος αρχικού παλμού Laser (συνεχής γραμμή) και παλμού μετά τη διέλευση από το πλάσμα (διακεκομμένη γραμμή) συναρτήσει του χρόνου (β) Θερμοκρασιακή κατανομή του υλικού ως συνάρτηση της απόστασης από την επιφάνεια του τεμαχίου για τις χρονικές στιγμές 50ns (γραμμή με παύλες), 100ns (γραμμή με παύλες-τελείες), 150ns (γραμμή με τελείες) και 200ns (συνεχής γραμμή)

Το φαινόμενο της θωράκισης από το πλάσμα της ακτινοβολίας (plasma shielding) λόγω της απορρόφησης τμήματος της ακτινοβολίας από το πλάσμα λήφθηκε υπόψη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.33, (α) μέσω του αντίστροφου μηχανισμού πέδησης (inverse bremsstrahlung) και του φωτοϊονισμού (photoionization). Η ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung radiation) και μέλανος σώματος (blackbody radiation) διερευνήθηκαν. Από το μοντέλο εξήχθησαν πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασιακή κατανομή του σώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.33 (β), την

πίεση και την θερμοκρασία του πλουμίου, τις πυκνότητες του χαλκού και του ηλίου στο πλούμιο, την ακτινοβολία πέδης και μέλανος σώματος.

Ο Shalahim και άλλοι [51] παρουσίασαν ένα μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία για τη μελέτη της αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser. Για τη μοντελοποίηση ορίστηκε τεμάχιο διαστάσεων $1 \times 0.5 \times 1 \text{ mm}$ από ακρυλικό πλαστικό (acrylic sheet) και ο παλμός της δέσμης Laser μοντελοποιήθηκε ως σημειακή πηγή τοποθετημένη σε κόμβο του πλέγματος. Προσομοιώθηκε η περίπτωση που στέλνονται παλμοί κινούμενοι σε ευθεία τροχιά. Η πλεγματοποίηση του τεμαχίου έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε οι κόμβοι που θα τοποθετηθούν οι σημειακές πηγές (παλμοί) να απέχουν μεταξύ τους απόσταση σύμφωνη με την απόσταση μεταξύ των παλμών που ορίζεται από την ταχύτητα της δέσμης και τη συχνότητα των παλμών κατά την κατεργασία. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διάφορες παραλλαγές. Αρχικά εξετάστηκε η περίπτωση που δεν υπάρχει συναγωγή μεταξύ του τεμαχίου και περιβάλλοντος. Στη συνέχεια θεωρήθηκε ότι υπάρχει συναγωγή, είτε με τον αέρα του περιβάλλοντος, είτε με κάποιο αέριο για ψύξη. Τέλος έγιναν δοκιμές για διάφορες τιμές της ταχύτητας και της ισχύος της δέσμης Laser. Από τις προσομοιώσεις, ως έξοδος δόθηκε κάθε φορά η κατανομή θερμοκρασίας στο τεμάχιο συναρτήσει του χρόνου.

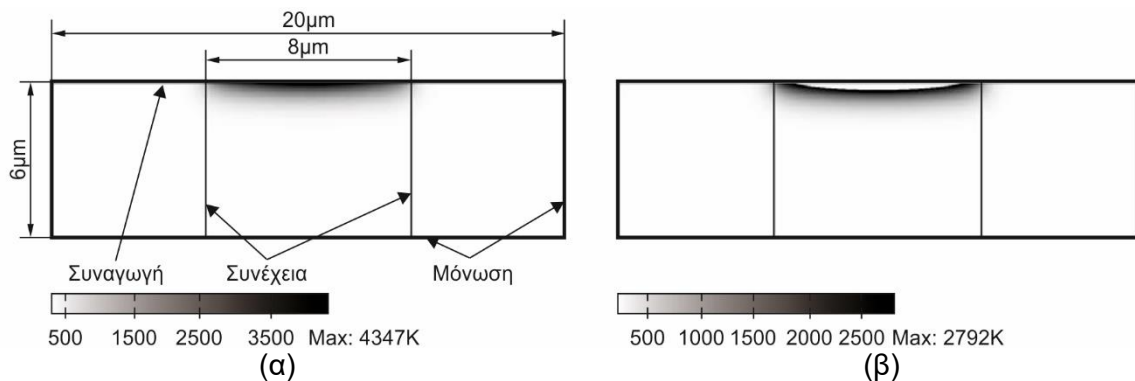
Ο Steffen Sonntag [52] παρουσίασε μια μέθοδο για προσομοίωση με τη χρήση υπολογιστή του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού με δέσμη Laser σε μεταλλικά υλικά. Για να μοντελοποιηθούν οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και σε διαφορετική χρονική κλίμακα, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.34](#), εφαρμόστηκε συνδυασμός των μεθόδων μοριακής δυναμικής (molecular dynamics) και πεπερασμένων διαφορών (finite differences). Η μέθοδος μοριακής δυναμικής χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των διεργασιών σε ατομική κλίμακα, όπως το λιώσιμο και η ατμοποίηση του υλικού ενώ η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση της γενικευμένης εξίσωσης αγωγής για την απορρόφηση της δέσμης και τη θέρμανση του τεμαχίου. Όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.34](#), για ένα τυπικό μεταλλικό υλικό μετά την απορρόφηση του παλμού τα ηλεκτρόνια αποδιεγείρονται ταχύτατα ($< 500 \text{ fs}$). Τυπικός χρόνος χαλάρωσης των ηλεκτρονίων-πλέγματος είναι τα 5ps και σε αυτή τη στιγμή μπορεί να θεωρηθεί ότι το σύστημα έχει μια ενιαία θερμοκρασία. Η διεργασία αποδόμησης του υλικού (ablation) και η τήξη του ξεκινούν σε χρόνο πάνω από 10 φορές μεγαλύτερο. Με τη χρήση της μεθόδου πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε κράματα αλουμινίου για παλμούς με διάφορες τιμές για την ένταση και τη διάρκεια, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2.34: Χρονικές κλίμακες και διεργασίες που λήφθηκαν υπόψη για το μοντέλο αφαίρεσης υλικού με παλμό δέσμης Laser.

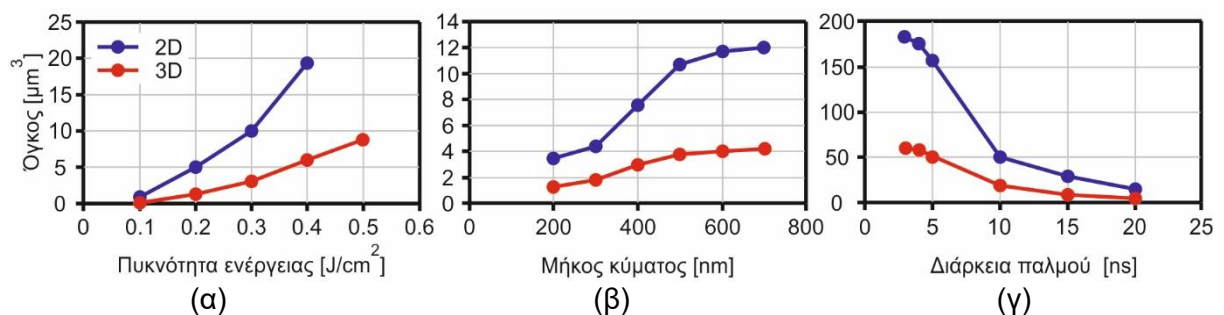
Ο Lim και ο Yoo [53] ασχολήθηκαν με την προσομοίωση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser στα πεδία των νανοδευτερολέπτων, χρησιμοποιώντας το εμπορικό υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων COMSOL. Ανέπτυξαν ένα απλό 2D μοντέλο για την προσομοίωση ενός παλμού στο οποίο επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων

στοιχείων το πρόβλημα της μετάδοσης θερμότητας μέσω αγωγής, θεωρώντας τη δέσμη Laser ως μια πηγή κατανομής Gauss που θερμαίνει το υλικό. Λήφθηκαν υπόψη οι απώλειες ενέργειας λόγω ανακλαστικότητας του υλικού και οι ενεργειακές μεταβολές λόγω αλλαγής φάσεων. Έχοντας υπολογίσει τη θερμοκρασιακή κατανομή στο πέρας του παλμού, για τη μοντελοποίηση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού έγινε η θεώρηση ότι, όσων στοιχείων η θερμοκρασία υπερβαίνει τη θερμοκρασία βρασμού, τότε αυτά θα πρέπει να αφαιρεθούν, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.35. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με τη χρήση Nd:YAG Laser στα 266nm και 532nm σε δοκίμια αλουμινίου, χαλκού, σιδήρου και μόλυβδου και συγκρίθηκε ο βαθμός απόδοσης της αφαίρεσης υλικού (ablation efficiency) με τις τιμές από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις.



Σχήμα 2.35: Θερμοκρασιακή κατανομή από προσομοίωση για τεμάχιο χαλκού (α) μετά το πέρας του παλμού (β) μετά την αφαίρεση των στοιχείων που έχουν υπερβεί τη θερμοκρασία βρασμού 2792K

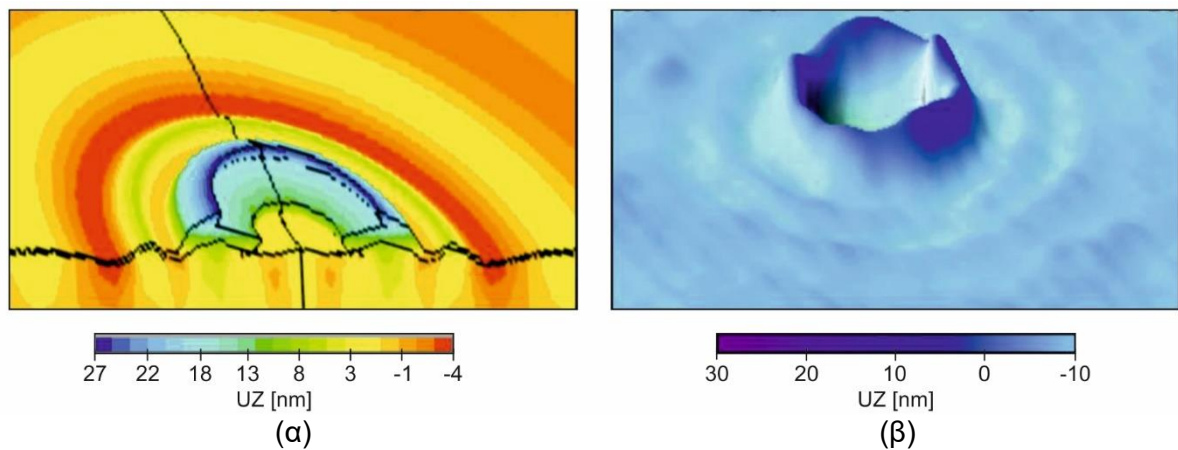
Ο Lee και ο Yoo [54] παρουσίασαν ένα μοντέλο για την προσομοίωση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser στα πεδία των νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη γενική θεωρία της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή που η δέσμη Laser θεωρήθηκε ως μια ακίνητη θερμική πηγή στην επιφάνεια του τεμαχίου με κατανομή Gauss, λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή απορρόφησης στο υλικό. Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εμπορικού πακέτου DEFORM σε συνδυασμό με κάποιες υπορουτίνες σε FORTRAN. Για την προσομοίωση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού λόγω των διαρκών αλλαγών φάσεων που συμβαίνουν στο σύνορο, έγινε η παραδοχή ότι όποιου στοιχείου η θερμοκρασία υπερβεί τη θερμοκρασία βρασμού, τότε αυτό το υλικό που αντιστοιχεί θεωρείται ότι έχει μετατραπεί σε αέριο.



Σχήμα 2.36: Σύγκριση της επίδρασης (α) της πυκνότητας ενέργειας (β) του μήκους κύματος (γ) της διάρκειας παλμού στον όγκο υλικού που αφαιρείται ανά παλμό από το 2D και το 3D μοντέλο προσομοίωσης

Το ίδιο μοντέλο διαμορφώθηκε έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί και δισδιάστατη 2D και τρισδιάστατη 3D επίλυσή του με πεπερασμένα στοιχεία. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διάφορες τιμές των συνθηκών κατεργασίας θεωρώντας τεμάχιο από πυρίτιο (Si) και δέσμη Laser διαμέτρου $3\mu\text{m}$. Έτσι, μελετήθηκε για την περίπτωση ενός και μόνο παλμού η επίδραση της πυκνότητας ενέργειας της δέσμης, του μήκους κύματος και η διάρκεια του παλμού στον όγκο του υλικού που αφαιρείται, τόσο για την δισδιάστατη 2D, όσο και την τρισδιάστατη 3D επίλυση, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.36](#). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με προϋπάρχοντα πειραματικά δεδομένα και διαπιστώθηκε ότι εμφανίζουν ίδια τάση μεταξύ τους. Όμως, όπως παρατηρείται στο [σχήμα 2.36](#), τα αποτελέσματα από τη 2D και τη 3D επίλυση εμφανίζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Τέλος, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση αναφορικά με τις συνθήκες κατεργασίας με τη χρήση πειραματικού σχεδιασμού (design of experiments DoE) και εφαρμογή της μεθοδολογίας επιφανειών απόκρισης (response surface methodology RSM).

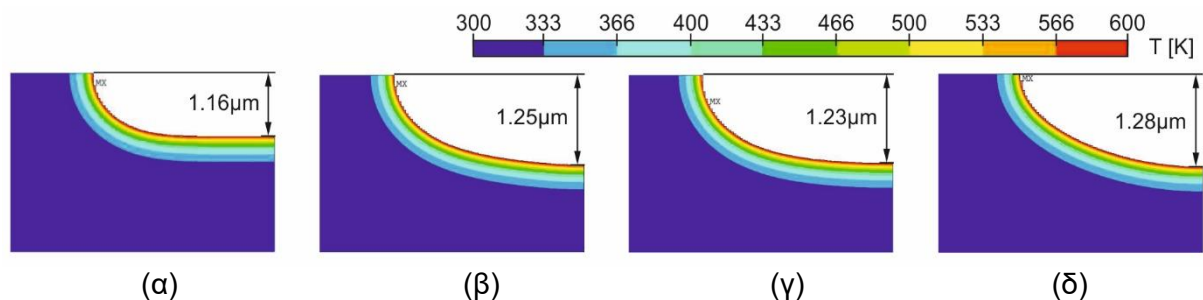
Ο Kaselouris και άλλοι [55] ανέπτυξαν ένα 3D μοντέλο βασισμένο στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση του εμπορικού πακέτου ANSYS για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός παλμού δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με λεπτά μεταλλικά υμένια (thin metallic films). Αναπτύχθηκε ένα συζευγμένο θερμικό-μηχανικό μοντέλο, δυναμικά μεταβαλλόμενο στο χρόνο, το οποίο υπολογίζει τις αλλαγές φάσεις του μέσου ως συνάρτηση των ιδιοτήτων του υλικού και των χαρακτηριστικών του παλμού της δέσμης Laser. Η αφαίρεση του υλικού προσομοιώνεται από την τεχνική «killing» των στοιχείων που υπερβαίνουν τη θερμοκρασία βρασμού τα οποία απενεργοποιούνται μέσω του πολλαπλασιασμού της ακαμψίας-στιβαρότητας (stiffness) με ένα σημαντικό συντελεστή μείωσης. Το μοντέλο αυτό δίνει ως έξοδο πληροφορίες σχετικά με τις μετατοπίσεις, τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, τις ταχύτητες και τις τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό σε κάθε χρονικό βήμα της επίλυσης. Για την επιβεβαίωση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για την περίπτωση λεπτού υμενίου από χρυσό (Au) με παλμό δέσμης Laser διαμέτρου $23\mu\text{m}$ της οποίας τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.37](#).



Σχήμα 2.37: Παραμόρφωση υλικού σε nm για την περίπτωση παλμού με πυκνότητα ενέργειας $2.9\text{J}/\text{cm}^2$ για χρόνο 25ns (α) Γεωμετρία από προσομοίωση FEM (β) Γεωμετρία από πειράματα

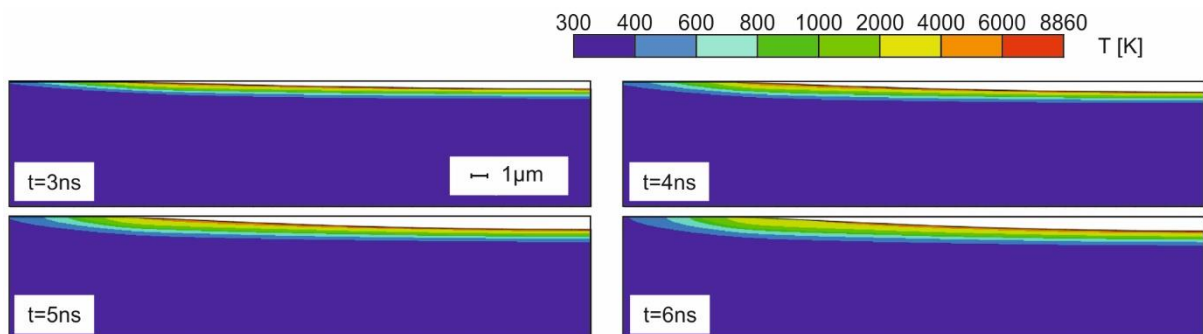
Ο Swaraj και άλλοι [56] ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την προσομοίωση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού από παλμό δέσμης Laser με τη χρήση του εμπορικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Κατά τη μοντελοποίηση θεωρήθηκε δέσμη Laser με διάφορες μορφές κατανομών (top-hat, exponential, gaussian, triangular, parabolic) και για τον προσδιορισμό της θερμοκρασιακής κατανομής επιλύθηκε η 2D εξίσωση μεταφοράς

θερμότητας με αγωγή. Η αλλαγή φάσης του υλικού λήφθηκε υπόψη συνυπολογίζοντας τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης, ενώ οι απώλειες ενέργειας λόγω συναγωγής θεωρήθηκαν αμελητέες. Για τη μοντελοποίηση της αφαίρεσης υλικού θεωρήθηκε ότι τα στοιχεία των οποίων η θερμοκρασία σε κάποιο χρονικό βήμα έχει υπερβεί την θερμοκρασία τήξης (melting temperature) του υλικού, πρέπει να αφαιρεθούν, χρησιμοποιώντας την τεχνική διαγραφής των στοιχείων (element death technique) που προσφέρει το ANSYS. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για την περίπτωση ενός και μόνο παλμού διάρκειας 20ns σε πλεξιγκλάς (PMMA). Σε πρώτη φάση έγιναν δοκιμές θεωρώντας κατανομή top-hat και μελετήθηκαν τα βάθη του σχηματιζόμενου κρατήρα για διάφορες τιμές της πυκνότητας ενέργειας από 1J/cm^2 μέχρι 2.5J/cm^2 . Έπειτα, έγιναν προσομοιώσεις για πυκνότητα ενέργειας ίση με 1J/cm^2 για διάφορες μορφές των κατανομών της δέσμης (flat, gaussian, parabolic, exponential) και μελετήθηκε η επίδραση τους στο βάθος του κρατήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.38.



Σχήμα 2.38: Μορφή και βάθος κρατήρα από προσομοιώσεις παλμού δέσμης Laser για πυκνότητα ενέργειας ίση με 1J/cm^2 με κατανομή (α) Flat (β) Gaussian (γ) Parabolic (δ) Exponential

Ο Wang και άλλοι [57] παρουσίασαν ένα 2D μοντέλο με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού για ένα παλμό δέσμης Laser χρησιμοποιώντας το εμπορικό πακέτο ABAQUS. Κατά την επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία το μοντέλο υπολογίζει διαρκώς τη γεωμετρία του τεμαχίου που προκύπτει από το υλικό που αφαιρείται πραγματοποιώντας σύζευξη μεταξύ δύο σχημάτων. Ενός σχήματος που υπολογίζει τη θερμότητα που προσδίδεται στο σύστημα από τη δέσμη (DFLUX subroutine) και ενός σχήματος που υπολογίζει τις αλλαγές στη γεωμετρία λόγω της απομάκρυνσης του υλικού που ατμοποιείται (UMESHMOTION subroutine) μαζί με την επίλυση του προβλήματος της μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής.

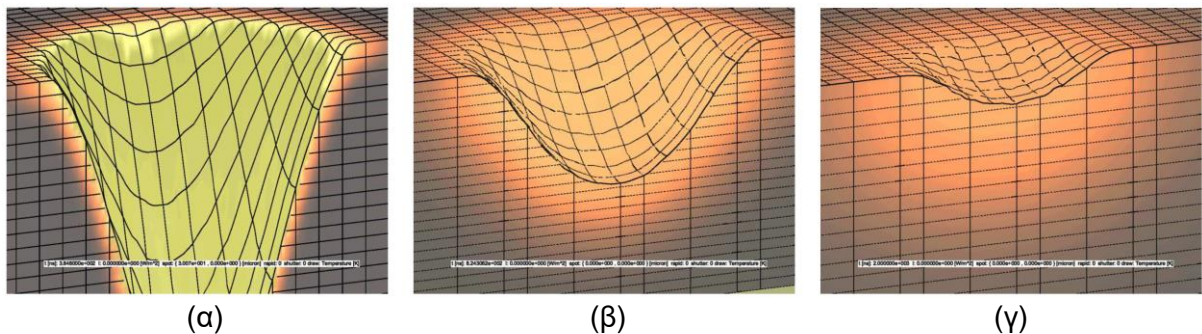


Σχήμα 2.39: Θερμοκρασιακή κατανομή στο τεμάχιο αλουμινίου υπό την επίδραση παλμού δέσμης Laser στα 266nm με διάρκεια 6ns και πυκνότητα ενέργειας 22.68J/cm^2

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για την περίπτωση παλμού από Nd:YAG Laser στα 266 και 193nm με διάρκεια 6ns θεωρώντας τεμάχιο από αλουμίνιο, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.39](#). Το βάθος του υλικού που αφαιρέθηκε (ablation depth) από τον παλμό για διάφορες τιμές της πυκνότητας ενέργειας, όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις, συγκρίθηκε με το αντίστοιχο από πειραματικά δεδομένα.

2.3.5 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων

Ο Tanι και άλλοι [58] ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη ενός αριθμητικού προσομοιωτή για τη κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων που θα μπορεί να προβλέπει το αποτέλεσμα της κατεργασίας για διάφορα υλικά και συνθήκες κατεργασίας. Κατά τη μοντελοποίηση λήφθηκαν υπόψη τα πιο βασικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία τα οποία είναι: η απορρόφηση της ενέργειας της δέσμης στην επιφάνεια του τεμαχίου, η μεταφορά της ενέργειας στο μέσο, οι αλλαγές φάσεων που συμβαίνουν στο υλικό, η δημιουργία ενός πλάσματος-πλουμίου και η αλληλεπίδραση του με τη δέσμη.

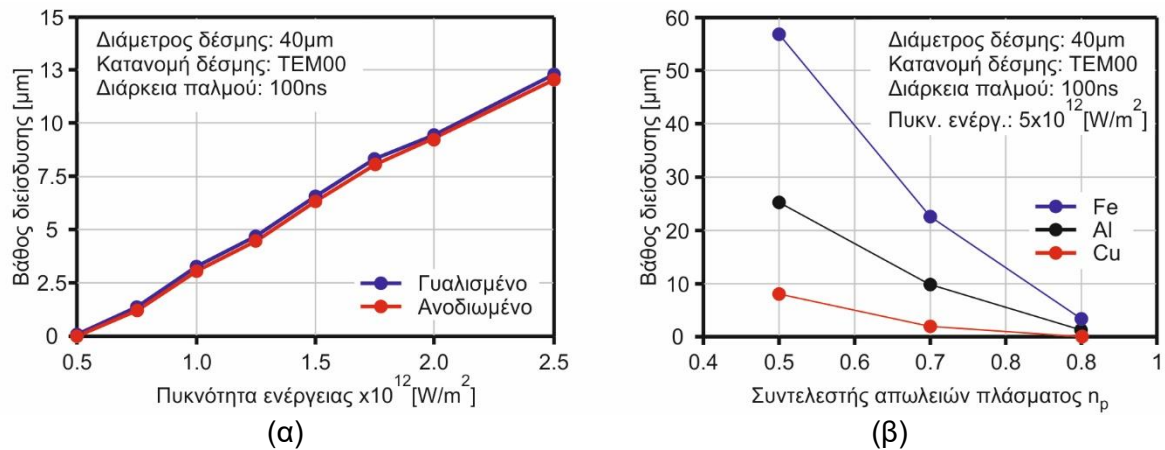


Σχήμα 2.40: Γραφική απεικόνιση μιας τομής του τεμαχίου από την προσομοίωση για τον σχηματιζόμενο κρατήρα ενός παλμού δέσμης Laser για τα διάφορα υλικά: (α) κράμα Fe-C (β) αλουμίνιο και (γ) χαλκό

Για τον υπολογισμό της διαμόρφωσης του θερμοκρασιακού πεδίου στο υλικό επιλύθηκε η εξίσωση της θερμότητας που προέρχεται από το νόμο του Fourier χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method FDM). Η ταχύτητα με βάση την οποία διαμορφώνεται η επιφάνεια από την αφαίρεση του υλικού προσδιορίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση των Hertz-Knudsen. Για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας στο περιβάλλον λόγω του σχηματιζόμενου πλάσματος, ορίστηκε ένας εμπειρικός συντελεστής απωλειών ο οποίος προσδιορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνεται βαθμονόμηση του αριθμητικού μοντέλου.

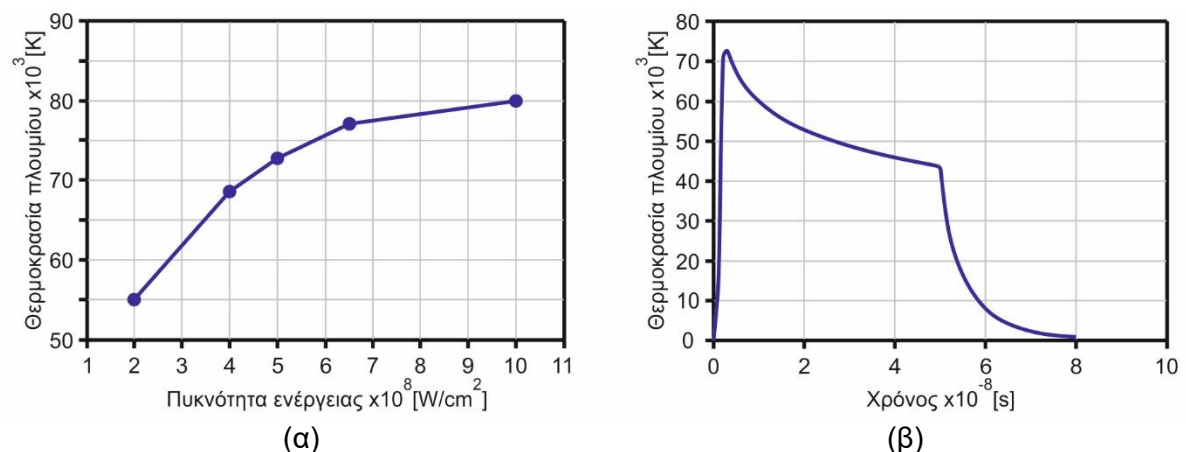
Αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τη μεμονωμένη περίπτωση που δημιουργείται ένας και μοναδικός παλμός από δέσμη Laser Nd:YAG στα 1.064μm με διάμετρο δέσμης 40μm, πυκνότητα ενέργειας $5 \cdot 10^{12} \text{W/m}^2$ και διάρκεια παλμού 100ns σε τρία διαφορετικά υλικά: κράμα Fe-C, χαλκό και αλουμίνιο. Οι προσομοιώσεις αυτές διενεργήθηκαν με στόχο να μελετηθεί η επίδραση του υλικού, της ποιότητας επιφάνειας του τεμαχίου και των συντελεστών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του μηχανισμού του σχηματιζόμενου πλάσματος-πλουμίου στην κατεργασία. Έδειξαν ότι, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.40](#), η επίδραση του υλικού στον σχηματισμό του κρατήρα από ένα παλμό είναι αισθητή: ο κρατήρας για την περίπτωση του ανθρακούχου χάλυβα έχει βάθος 57μm, για το αλουμίνιο 25μm και τον χαλκό μόνο 8μm. Επιπλέον συμπέραναν ότι η ποιότητα επιφάνειας του αρχικού δοκιμίου (γυαλισμένο-ανοδιωμένο) δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.41 \(α\)](#), ενώ η επίδραση του εμπειρικού

συντελεστή απωλειών λόγω πλάσματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.41 (β). Τέλος, το μοντέλο που παρουσιάστηκε επεκτάθηκε έτσι ώστε να μπορέσουν να προσομοιωθούν ευθύγραμμες κινήσεις της δέσμης που προσδιορίζονται από τη σύνταξη κατάλληλου κώδικα. Για τη γραφική απεικόνιση του αποτελέσματος χρησιμοποιήθηκε το γραφικό περιβάλλον OpenGL (open graphics library).



Σχήμα 2.41: (α) Επίδραση της ποιότητας επιφάνειας για διάφορες τιμές της πυκνότητας ενέργειας στο βάθος του σχηματιζόμενου κρατήρα στο αλουμίνιο (β) Επίδραση του εμπειρικού συντελεστή απωλειών λόγω πλάσματος στο βάθος του σχηματιζόμενου κρατήρα

Ως συνέχεια της προηγούμενης τους εργασίας ο Tani και άλλοι [59] εστίασαν περισσότερο στην περίπτωση της προσομοίωσης χάραξης με δέσμη Laser σε τεμάχιο χαλκού. Πραγματοποίησαν προσομοιώσεις ανάλογες με την προηγούμενη εργασία χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο. Αυτή τη φορά εστίασαν στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο πλάσμα πλούμιου με στόχο το συσχετισμό τους με την πυκνότητα ενέργειας της δέσμης. Για τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε δέσμη Laser με διάμετρο 4.5 μm και παλμών διάρκειας 50 ns.



Σχήμα 2.42: (α) Επίδραση της πυκνότητας ενέργειας της δέσμης στη θερμοκρασία του πλάσματος (β) Θερμοκρασία πλάσματος συναρτήσεως του χρόνου για πυκνότητα ενέργειας 6×10^{12} W/m²

Υπολόγισαν τις μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο πλούμιο συναρτήσεως της πυκνότητας ενέργειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.42 (α) για τιμές από 2×10^{12} W/m² μέχρι 8×10^{12} W/m². Ακόμα υπολόγισαν την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στο πλούμιο συναρτήσεως

του χρόνου για πυκνότητα ενέργειας $6 \cdot 10^{12} \text{W/m}^2$, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.42 (β) με τη μέγιστη θερμοκρασία να καταγράφεται στα 70000K κατά την εκκίνηση σχηματισμού του πλούμιου. Ακόμα, διερεύνησαν την επίδραση του εμπειρικού συντελεστή απωλειών στο πλούμιο καθώς και ενός συντελεστή που προσδιορίζει την ακτίνα (μέγεθος) του σχηματιζόμενου πλούμιου στο αποτέλεσμα της κατεργασίας.

Ο Karbasi [60] ανέπτυξε ένα προσομοιωτικό μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία για την προσομοίωση της χάραξης από μια ευθεία τροχιά παλμών δέσμης Laser με τη χρήση του εμπορικού πακέτου COMSOL. Κατά τη μοντελοποίηση θεωρήθηκαν παλμοί δέσμης με κατανομή Hermit-Gaussian **TEM₀₁** mode, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.43 (α). Η ροή θερμότητας από τη δέσμη προς το τεμάχιο προσδιορίστηκε με βάση τον συντελεστή απορρόφησης ο οποίος εξαρτάται από το μήκος κύματος της δέσμης, τη θερμοκρασία και την ποιότητα επιφάνειας του υλικού. Από την επίλυση της εξίσωσης της θερμότητας σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίστηκε η κατανομή της θερμοκρασίας στο τεμάχιο. Για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας χάραξης επιλέχθηκε μια τεχνική μετακίνησης πλέγματος.

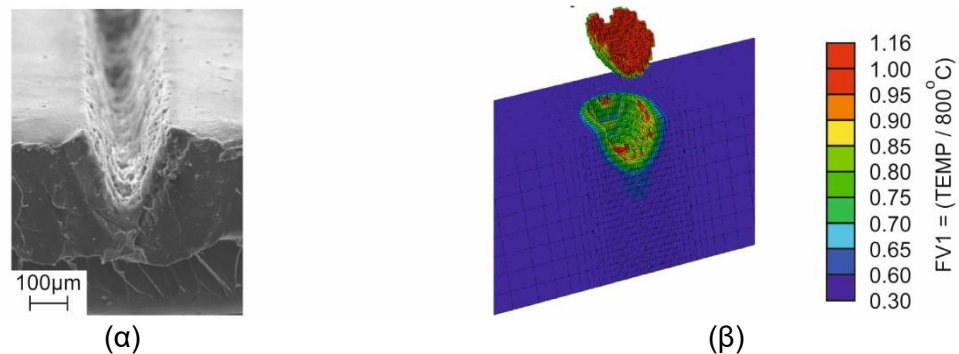


Σχήμα 2.43: (α) Hermit-Gaussian **TEM₀₁** mode (β) Σχηματιζόμενο αυλάκι από ευθύγραμμη τροχιά παλμών δέσμης Laser

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τη χάραξη μιας ευθείας τροχιάς παλμών μήκους 40mm θεωρώντας δέσμη Laser στα 1064nm, ισχύος 73W, διαμέτρου 0.1mm, ταχύτητας 50mm/s με διάφορες τιμές για τη συχνότητα των παλμών σε τεμάχιο διαστάσεων 50x50x11mm από χάλυβα, αλουμίνιο και χαλκό. Ως αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις δόθηκαν το πλάτος και το βάθος του σχηματιζόμενου αυλακιού που υπολογίστηκαν από την τελική 3D γεωμετρία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.43 (β). Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων διενεργήθηκαν πειράματα χάραξης και φάνηκε ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έρχονται σε συμφωνία με τα πειραματικά.

Ο Ghoochani και άλλοι [61] βασιζόμενοι στην ιδέα για τη μοντελοποίηση της παλμικής συμπεριφοράς των Laser για την κατεργασία χάραξης σε μέταλλα που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η οποία είχε εκδοθεί πρότινος από τους Nikolidakis και Antoniadis [62] [63], πραγματοποίησαν μια πειραματική διερεύνηση και ανέπτυξαν ένα αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης για τη χάραξη μικρο-καναλιών από από μια ευθεία γραμμή παλμών δέσμης Laser CO₂ TEA σε πολυμερές πολυαιθεροσουλφώνης (poly-ether sulfone PES polymer). Ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία για το οποίο μοντελοποιήθηκε κατάλληλα η συμπεριφορά της δέσμης CO₂ TEA Laser για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασής της με το πολυμερές PES χρησιμοποιώντας μια πηγή με κατανομή CIN (cylindrical-involution-normal CIN heat source). Χαράχτηκαν πειραματικά αλλά και προσομοιώθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Abaqus μικρο-κανάλια από παλμούς δέσμης Laser, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.44 (α) και (β) εστιασμένη σε διάμετρο περί τα 200μm κινούμενη σε ευθεία γραμμή με ταχύτητες σε εύρος 23-45μm/s και πυκνότητα ενέργειας 16-

50J/cm² για τα οποία προέκυψαν πλάτη με εύρος 142-342μm και βάθη με εύρος 85-440μm (διαφορετικές διαστάσεις προέκυψαν ανάλογα με τις επιβαλλόμενες συνθήκες κατεργασίας).



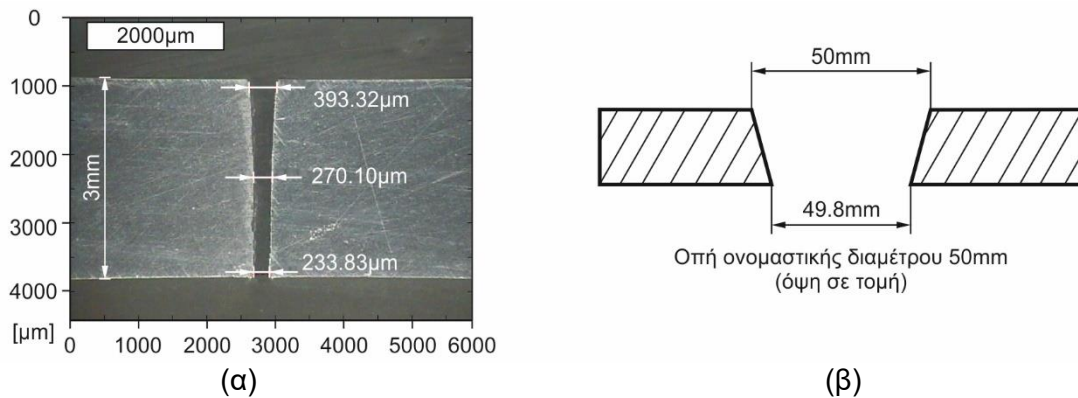
Σχήμα 2.44 (α) Εικόνα από SEM μικρο-καναλιού χαραγμένο με ταχύτητα 16μm/s και πυκνότητα ενέργειας 16J/cm² (β) Σχηματική αναπαράσταση της αφαίρεσης των στοιχείων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της σάρωσης με παλμούς για τα οποία ισχύει ότι $FV1 > 1$, δηλαδή η θερμοκρασία των κόμβων έχει υπερβεί τη θερμοκρασία αυτοεπιταχυνόμενης διάσπασης (thermal decomposition termination temperature) του πολυμερούς PES

2.3.6 Σχηματισμός κλίσης στις περιφερειακές συνοριακές επιφάνειες των τοιχωμάτων της χαραγμένης γεωμετρίας

Ερευνητικές εργασίες που να έχουν ασχοληθεί με την αριθμητική προσομοίωση και μελέτη των ατελειών που εμφανίζονται κατά τη χάραξη με παλμούς δέσμης Laser στην τελική γεωμετρία, όπως η εμφάνιση κλίσης στα πλευρικά τοιχώματα (kerf taper angle formation) έναντι των ιδανικά επιδιωκόμενων κατακόρυφων τοιχωμάτων δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή. Ωστόσο υπάρχουν κάποιοι ελάχιστοι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με την πειραματική μελέτη και μόνο της εμφάνισης αντίστοιχων και παρόμοιων φαινομένων στην κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser και αρκετοί για τη συγγενή κατεργασία κοπής με χρήση Laser.

Ο Rocorni και άλλοι [64] μελέτησαν ένα μεγάλο αριθμό από βιομηχανικά δείγματα που προέκυψαν από κοπή με δέσμη Laser με στόχο να παρουσιάσουν την τεχνολογία αιχμής στην κατεργασία αυτή και την αναζήτηση και την αξιολόγηση των μετρούμενων μεγεθών που έχουν κυρίαρχο ρόλο στην ποιότητα του τελικού αποτελέσματος. Οι κοπές πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση μηχανών Laser κοπής CO₂ και Fibre σε δοκίμια από ανθρακούχο χάλυβα, ανοξείδωτο χάλυβα, αλουμίνιο και κράματα χαλκού.

Πρώτο μέγεθος που μελετήθηκε είναι η κλίση που εμφανίζεται στις επιφάνειες που προκύπτουν από την κοπή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.45 (α). Δηλαδή οι επιφάνειες που προκύπτουν δεν είναι ιδανικά κατακόρυφες καθώς το διάκενο που δημιουργείται από την κοπή έχει συνήθως μεγαλύτερο πλάτος στο άνω μέρος από ότι στο κάτω. Όμως, επειδή στις μηχανολογικές εφαρμογές η κλίση της πλευράς δεν μπορεί εύκολα να αξιοποιηθεί, έγιναν μετρήσεις για το άνω πλάτος και κάτω πλάτος του διακένου προκειμένου να υπολογιστούν οι ανοχές του τελικού τεμαχίου, όπως για παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 2.45 (β). Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται οι ανοχές μιας οπής ονομαστικής διαμέτρου 50mm ως η διαφορά μεταξύ της άνω και κάτω διαμέτρου. Άλλες παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat affected zone), το χείλος από επαναστερεοποιημένο υλικό στην ακμή της απόληξης της κοπής (dross) και η τραχύτητα που εμφανίζεται στις κατεργασμένες επιφάνειες κατά την κοπή.

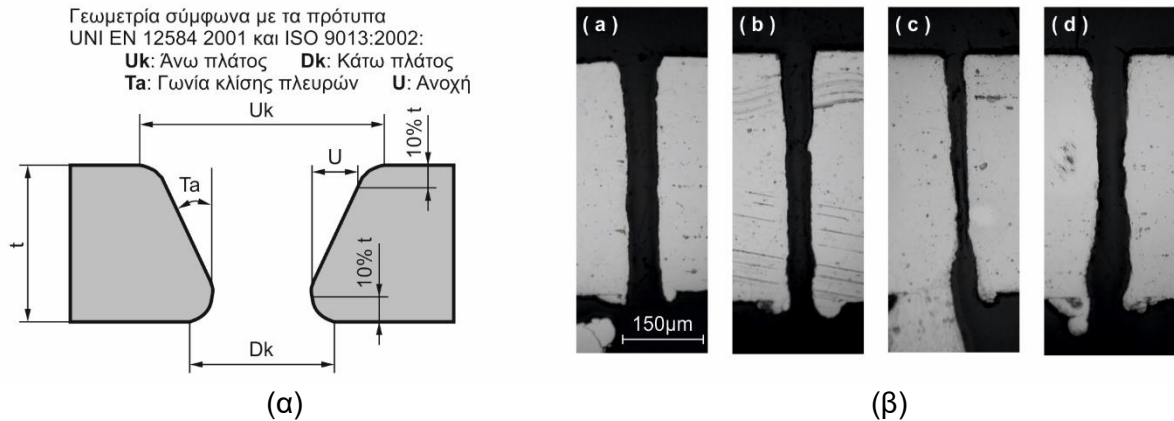


Σχήμα 2.45: (α) Τυπική εγκάρσια τομή φύλλου αλουμινίου 3mm από κοπή με δέσμη Laser CO₂ που γίνεται εμφανές ότι οι επιφάνειες που προέκυψαν δεν είναι κατακόρυφες αλλά εμφανίζουν ορισμένη κλίση (β) Τυπική οπή με ονομαστική διάμετρο 50mm για την οποία προκύπτει απόκλιση μεταξύ άνω και κάτω διαμέτρου στα 200μm

Ο Madic και άλλοι [65] ανέπτυξαν ένα μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN) ανάστροφης μετάδοσης σφάλματος (backpropagation) για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κοπής (ισχύς δέσμης, ταχύτητα, πίεση αερίου, εστίαση) στην κλίση των επιφανειών κοπής (kerf taper angle) κατά την κοπή ανοξείδωτου χάλυβα AISI304 με Laser CO₂ συνεχούς κύματος (CW) ισχύος 2.2kW στα 10.6μm της Vention. Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός πειραμάτων με βάση έναν ορθογώνιο πίνακα L₂₇ της μεθόδου Taguchi με τρία επίπεδα για κάθε παράμετρο που μελετήθηκε: ισχύς (1.6, 1.8, 2kW), ταχύτητα κοπής (2, 2.5, 3 m/min), πίεση αερίου (9, 10.5, 12bar), θέση εστίασης (-2.5, -1.5, -0.5mm). Έδειξαν ότι μικρή κλίση των επιφανειών κοπής μπορεί να επιτευχθεί, είτε με ταυτόχρονη χρήση υψηλής ισχύος και υψηλής ταχύτητας κοπής, είτε με τη χρήση χαμηλής ισχύος και χαμηλής ταχύτητας κοπής. Ακόμα, εφαρμόστηκε η μέθοδος Monte Carlo στο μοντέλο νευρωνικών δικτύων και προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες συνθήκες για την ελαχιστοποίηση της κλίσης των επιφανειών κοπής.

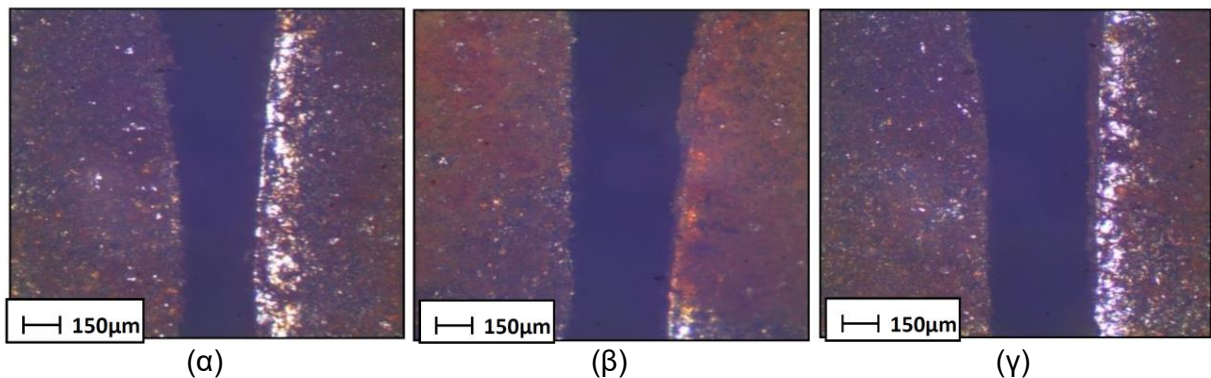
Ο Genna και άλλοι [66] ασχολήθηκαν με την πειραματική διερεύνηση της γεωμετρίας του ίχνους κοπής που προκύπτει κατά την μικρο-κοπή φύλλου κράματος NIMONIC C263 με πάχος 0.38mm χρησιμοποιώντας ένα παλμικό Fibre Laser στα 1090nm ισχύος 100W (SPI-RedPower SP100C). Εφήρμοσαν μια συστηματική προσέγγιση βασισμένη σε έναν σχεδιασμό πειραμάτων (DoE) με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των βασικών συνθηκών κατεργασίας (διάρκεια παλμού, μέση ισχύς δέσμης, πίεση αερίου, ταχύτητα κοπής) στη γεωμετρία της κοπής και επίσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση διασποράς (ANOVA).

Η γεωμετρία της κοπής μετρήθηκε με οπτικό μικροσκόπιο και εξετάστηκαν τα μεγέθη άνω πλάτος διάκενου, κάτω πλάτος διάκενου, ανοχές και κλίση των επιφανειών κοπής, όπως φαίνονται στο [σχήμα 2.46 \(α\)](#) με βάση τα πρότυπα UNI EN 12584 2001, ISO 9013:2002. Τα πειράματα έδειξαν ότι μπορούν να επιτευχθούν κοπές με πλάτος ίχνους κοπής μικρότερο από 100μm και γωνία κλίσης πλευρών ίχνους κοπής μικρότερη από 1.8° με μεγάλη επαναληψιμότητα. Ακόμα, συμπέραναν ότι η μέγιστη ταχύτητα κοπής που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται γραμμικά από την εφαρμοζόμενη μέση ισχύ. Το πλάτος του ίχνους κοπής επηρεάζεται περισσότερο από τη μέση ισχύ και την πίεση του αερίου. Όσον αφορά τη διάρκεια του παλμού, έδειξαν ότι για παλμούς μεγάλης διάρκειας σε συνδυασμό με μικρή ταχύτητα κοπής, η ποσότητα του τηγμένου υλικού αυξάνεται σημαντικά και η δράση του αερίου κοπής δεν επαρκεί για την αφαίρεσή του με αποτέλεσμα αυτό να επαναστεροποιείται στο ίχνος της κοπής μειώνοντας το πλάτος του, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.46 \(β\)](#).



Σχήμα 2.46: (α) Γεωμετρία ίχνους κοπής με βάση τα πρότυπα UNI EN 12584 2001, ISO 9013:2002 (β) Γεωμετρία ίχνους κοπής για μέση ισχύ 40W, πίεση αερίου 12bar με τις ακόλουθες τιμές για τη διάρκεια παλμού και την ποσοστιαία ταχύτητα α) 0.05ms, 60% β) 0.05ms, 80% γ) 0.40ms, 60% δ) 0.40ms, 80%

Ο Tahir και ο Rahim [67] διερεύνησαν την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας της κοπής με Laser CO₂ χάλυβα υπερυψηλής αντοχής (ultra high strength steel UHSS) 22MnB5 επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον τους στην ποιότητα της κοπής και στις μηχανικές ιδιότητες. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα κοπής με τη χρήση Laser κοπής CO₂ συνεχούς κύματος (CW) της Mitsubishi ισχύος 4kW σε φύλλο βορίουχου χάλυβα 22MnB5 πάχους 1.7mm για τις ακόλουθες τιμές των συνθηκών κατεργασίας: ισχύς (750, 1750, 2750W), ταχύτητα κοπής (1500, 2500, 3500mm/min) και πίεση αερίου (0.25, 0.50, 0.75MPa). Η ποιότητα της κοπής αξιολογήθηκε υπό τη σκοπιά της διαστατικής ακρίβειας μετρώντας το πλάτος του ίχνους κοπής στο άνω και κάτω μέρος (top, bottom kerf) καθώς και τη γωνία κλίσης των πλευρών του ίχνους κοπής (kerf taper) με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου MITUTOYO TM505. Η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων μελετήθηκε καταγράφοντας τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά την κοπή με τη χρήση θερμοστοιχείων τύπου-K και προσδιορίζοντας τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat affected zone HAZ) με τη χρήση μικροσκοπίου OLYMPUS STM6.

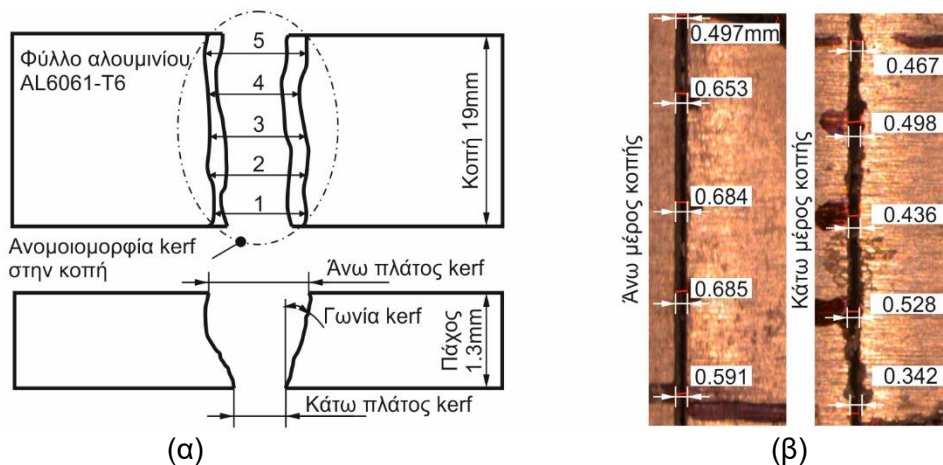


Σχήμα 2.47: Ίχνος κοπής για πίεση αερίου 0.50MPa με ισχύ και ταχύτητα κοπής (α) 750W, 1500mm/min (β) 1750W, 2500mm/min (γ) 2750W, 3500mm/min αντίστοιχα

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αύξηση της ισχύος οδηγεί σε ίχνος κοπής με μεγαλύτερο πλάτος αλλά μικρότερη γωνία κλίσης των πλευρών και μεγαλύτερη θερμικά επηρεασμένη ζώνη καθώς μεγάλο ποσό θερμότητας διεισδύει σε όλο το πάχος του υλικού. Με την αύξηση της ταχύτητας παρατηρήθηκε ίχνος με μικρότερο πλάτος, μεγαλύτερη γωνία κλίσης των πλευρών και μικρότερη θερμικά επηρεασμένη ζώνη καθώς υπάρχει μικρότερη συγκέντρωση θερμότητας

εφόσον μειώνεται ο χρόνος απορρόφησης της δέσμης. Στο [σχήμα 2.47](#) παρουσιάζεται το ίχνος κοπής που προκύπτει για ορισμένους συνδυασμούς συνθηκών κοπής. Η πίεση του αερίου βρέθηκε ότι δεν επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της κοπής, ενώ με αύξηση της πίεσης εμφανίζεται μια μικρή αύξηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης.

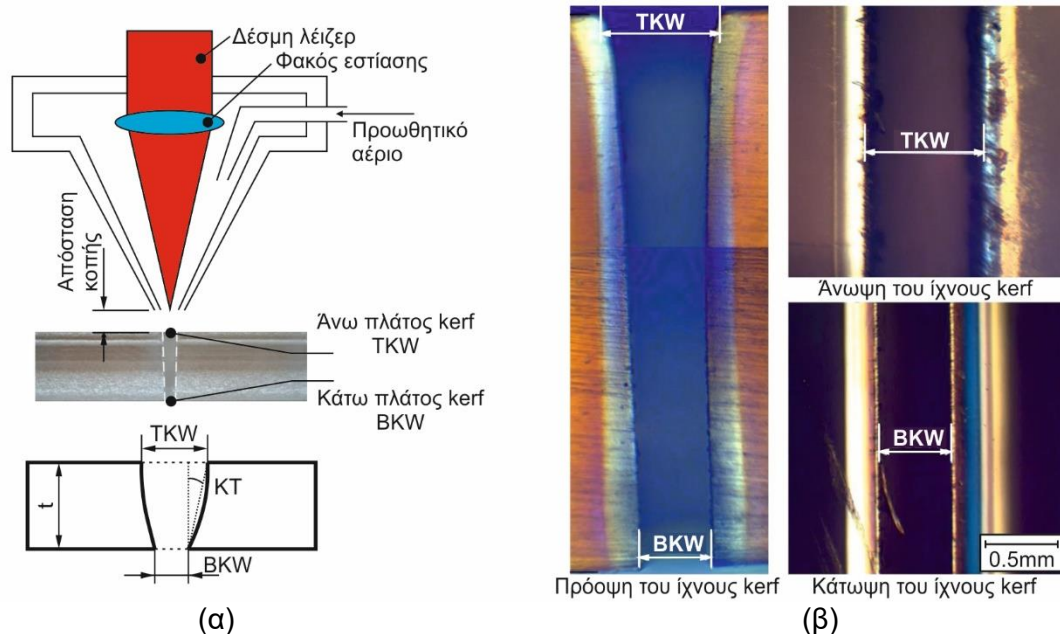
Η Joshi και ο Sharma [68] διερεύνησαν τη διαστατική ακρίβεια της γεωμετρίας του ίχνους κοπής και τις μεταβολές που εμφανίζονται τοπικά στο υλικό κατά την κοπή με Laser φύλλου κράματος αλουμινίου Al 6061-T6. Πειράματα κοπής πραγματοποιήθηκαν εφαρμόζοντας ένα πειραματικό σχεδιασμό Box-Behnken (box behnken design BBD) με τη χρήση παλμικού Nd:YAG Laser στα 1064nm με διάμετρο δέσμης στα 400μm κρατώντας σταθερή τη μέση ισχύ στα 250W για τις ακόλουθες τιμές των συνθηκών κατεργασίας: ένταση ρεύματος (240, 260, 280A), διάρκεια παλμών (4, 5, 6ms), συχνότητα παλμών (4, 7, 10Hz) και ταχύτητα της δέσμης (20, 40, 60mm/min). Μετρήθηκε σε πέντε θέσεις κατά μήκος της κοπής και λήφθηκε η μέση τιμή για το πλάτος του ίχνους της κοπής στο άνω μέρος και το κάτω μέρος (top, bottom kerf width), όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.48](#) από τα οποία υπολογίστηκε η γωνία κλίσης των πλευρών του ίχνους (kerf taper) με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου LEICA-S8APO. Επίσης, μετρήθηκε η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat affected zone HAZ) με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) JSM-6010LA. Έπειτα πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση της κατεργασίας χρησιμοποιώντας ένα υβριδικό σχήμα αποτελούμενο από την πολυκριτηριακή μέθοδο ανάλυσης (grey relational analysis GRA) και ένα σύστημα ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Από τη βελτιστοποίηση προέκυψε ότι οι βέλτιστες συνθήκες κοπής είναι: ένταση ρεύματος 260A, διάρκεια παλμών 4ms, συχνότητα παλμών 10Hz και ταχύτητα της δέσμης 20mm/min. Για την πειραματική επιβεβαίωση των βελτιστοποιημένων συνθηκών πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη κοπή από όπου υπολογίστηκαν γωνία κλίσης των πλευρών του ίχνους ίση με 4.30° και θερμικά επηρεασμένη ζώνη ίση με 187.85μm.



Σχήμα 2.48: (α) Σχηματική απεικόνιση της των μετρούμενων μεγεθών κατά την πειραματική διαδικασία (β) Πλάτος του ίχνους όπως μετρήθηκε στο άνω μέρος και στο κάτω μέρος.

Ο Elsheikh και άλλοι [69] πραγματοποίησαν μια πειραματική διερεύνηση της κοπής με Laser CO₂ φύλλων πλέξιγκλας (polymethyl methacrylate PMMA) και βελτιστοποίηση των συνθηκών κατεργασίας. Πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση παλμικού Laser CO₂ ισχύος 150W οργανωμένα σύμφωνα με έναν ορθογώνιο πίνακα L₁₈ της μεθόδου Taguchi για τη μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας κοπής (100, 200, 300mm/s), της πίεσης του αερίου κοπής (1, 3bar), της ισχύος της δέσμης (120, 135, 150W) και του πάχους του φύλλου (4, 6, 12mm) στα ακόλουθα μεγέθη: άνω πλάτος ίχνους κοπής (top kerf width TKW), κάτω πλάτος ίχνους κοπής (bottom kerf width BKW) και γωνία κλίσης των πλευρών του ίχνους (kerf taper KT), όπως

φαίνονται στο σχήμα 2.49 (α). Τα μεγέθη TKW και BKW μετρήθηκαν με τη χρήση πολωτικού μικροσκοπίου διερχόμενου φωτός, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.49 (β) όπου παρουσιάζεται ως παράδειγμα ότι μετρήθηκαν τα TKW, BKW, KT να είναι 0.780mm, 0.504mm, 1.979° αντίστοιχα για την περίπτωση κοπής με πίεση αερίου 1bar, πάχος φύλλου 4mm, ταχύτητα κοπής 300mm/min και ισχύ 150W.

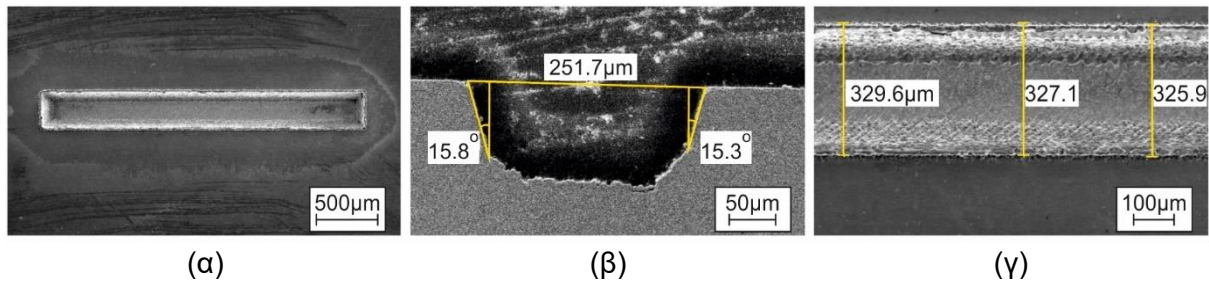


Σχήμα 2.49: (α) Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης και των μετρούμενων μεγεθών (β) Απεικόνιση του ίχνους κοπής από το μικροσκόπιο

Τα πειραματικά αποτελέσματα υπέστησαν στατιστική ανάλυση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης διασποράς (ANOVA). Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι το πάχος του φύλλου έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη γεωμετρία του ίχνους (kerf) και έδειξαν ότι αύξηση του πάχους οδηγεί σε μείωση των TKW, BKW και KT. Όλες οι άλλες παράμετροι χαρακτηρίζονται ως μεσαίας βαρύτητας. Αύξηση στην ταχύτητα κοπής οδηγεί σε μείωση των TKW, BKW και αύξηση της KT. Αύξηση της ισχύος οδηγεί σε μείωση των TKW, BKW, καθώς και αύξηση της KT μέχρις ότου φτάσει ένα κρίσιμο σημείο και μειώσει της στη συνέχεια. Αύξηση της πίεσης αερίου κοπής οδηγεί επίσης σε μείωση των TKW, BKW ενώ δεν παρουσιάζει εμφανή επίδραση στην KT. Ακόμα ανέπτυξαν μοντέλα παλινδρόμησης (regression models) για τη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας του ίχνους συναρτήσει των παραμέτρων που εξετάστηκαν. Στο μοντέλο παλινδρόμησης που αναπτύχθηκε εφήρμοσαν ένα γενετικό αλγόριθμο (genetic algorithm) για την ανεύρεση των βέλτιστων παραμέτρων που δίνουν την ελάχιστη γωνία κλίσης των πλευρών του ίχνους.

Ο Mohammed και άλλοι [70] πραγματοποίησαν μια πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας στην ποιότητα κατά τη χάραξη με παλμούς δέσμης Laser μικρο-καναλιών σε κράμα μνήμης σχήματος (shape memory alloy SMA) νικελίου-τιτανίου Ni-Ti. Τα πειράματα χάραξης υλοποιήθηκαν με τη χρήση της Nd:YAG Q-switched μηχανής LASERTECH 40 από την DMG/Sauer η οποία εκπέμπει παλμούς δέσμης Laser στα 1064nm με διάρκεια 10μs, μέγιστη ισχύ 10W και διάμετρο στο σημείο εστίασης 30μm. Χαραχτήκαν συνολικά 65 μικρο-κανάλια με ορθογωνική διατομή πλάτους 200μm και βάθους 100μm, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.50 (α) σε φύλλο κράματος Ni-Ti (50% κ.β. τιτάνιο και 50% κ.β. νικέλιο) με διαστάσεις 40x40x1mm. Εξετάστηκαν διάφορες τιμές των πέντε βασικών παραμέτρων που ορίζουν τις συνθήκες κατεργασίας: συχνότητα παλμών (25, 35, 40kHz), ταχύτητα δέσμης (200, 400, 600mm/s), πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού (1, 2, 3μm), απόσταση μεταξύ των

ευθύγραμμων τροχιών των παλμών (8, 10, 12 μm) και στρατηγική σάρωσης (τέσσερις στρατηγικές για διαφορετικές γωνίες μεταξύ των τροχιών). Πραγματοποιήθηκαν εγκάρσιες τομές στα χαραγμένα μικρο-κανάλια και μετρήθηκαν οι βασικές διαστάσεις τους με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου JEOL JSM-6610LV, όπως φαίνονται στο [σχήμα 2.50 \(β\)](#) και [\(γ\)](#) καθώς και η μικρο-σκληρότητα κατά Vickers με τη χρήση σκληρόμετρου Struers DuraScan. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ως αποκρίσεις εξόδου για την ανάλυση της χάραξης ήταν η απόκλιση του άνω πλάτους χάραξης (top width error TWE), η γωνία κλίσης των πλευρών (taper angle), το μήκος της ζώνης από υλικό που έχει πιτσιλιστεί (spatter) και ο ρυθμός αποβολής υλικού (material removal rate MRR).



Σχήμα 2.50: (α) Απεικόνιση του χαραγμένου μικρο-καναλιού από το SEM (β) Όψη σε τομή του χαραγμένου μικρο-καναλιού καθώς και των βασικών διαστάσεων όπως αυτές μετρήθηκαν (γ) Μέτρηση του μήκους της ζώνης από υλικό που έχει ξεχειλίζει προς τα έξω (Spatter)

Μελετήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση με πολλά κριτήρια (multi-objective optimization) για την ελαχιστοποίηση της γωνίας κλίσης των πλευρών και της ζώνης με υλικό που έχει ξεχειλίζει προς τα έξω και εξήχθησαν ορισμένα βασικά συμπεράσματα. Έδειξαν ότι γενικά οι ελάχιστες διαστατικές αποκλίσεις προέκυψαν για υψηλές τιμές της ταχύτητας και πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για στρατηγική σάρωσης με παράλληλες τροχιές για όλα τα επίπεδα. Μικρή γωνία κλίσης των πλευρών του ίχνους επιτυγχάνεται για μικρές τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού. Τα μικρο-κανάλια με την ελάχιστη ζώνη από υλικό που έχει ξεχειλίζει προς τα έξω προέκυψαν για χαμηλές τιμές της ταχύτητας σάρωσης και του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για στρατηγική σάρωσης με παράλληλες τροχιές για όλα τα επίπεδα. Ο μέγιστος ρυθμός αποβολής υλικού επιτυγχάνεται για υψηλές τιμές της ταχύτητας σάρωσης, του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού και της απόστασης μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών. Από τη βελτιστοποίηση με τη χρήση του αλγορίθμου MOGA-II υπολογίστηκαν οι ελάχιστες τιμές για τη γωνία κλίσης των πλευρών του ίχνους ίση με 12.5° και το μήκος της ζώνης από υλικό που έχει ξεχειλίζει προς τα έξω ίσο με 30.8 μm για συνθήκες κατεργασίας: συχνότητα παλμών 40kHz, ταχύτητα σάρωσης 400mm/s, πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού 1 μm , απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τροχιών των παλμών 8 μm και στρατηγική σάρωσης με γωνία των τροχιών του πρώτου επιπέδου 45° σε σχέση με τον διαμήκη άξονα των μικρο-καναλιών και έπειτα αύξηση της γωνίας κατά 90° ανά επίπεδο σάρωσης. Τέλος, από τις μετρήσεις της μικρο-σκληρότητας στις κατεργασμένες επιφάνειες με τη δέσμη Laser προέκυψε ότι δεν εμφανίζεται κάποια σημαντική μεταβολή στην μικρο-σκληρότητα του υλικού.

2.4 Συνεισφορές της διατριβής

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάστηκε δεν υπάρχει μέχρι τώρα κάποιο ολοκληρωμένο επιβεβαιωμένο προσομοιωτικό μοντέλο που να δύναται να προσομοιώσει την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων για τη χάραξη πραγματικών γεωμετριών με ρεαλιστικό τρόπο. Υπάρχει

μια μεγάλη μερίδα ερευνητών που ασχολείται με πειραματικές δοκιμές που αφορούν την κατεργασία για τη μελέτη των δυνατοτήτων της αναφορικά με τις πρακτικές εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επίσης, αρκετοί είναι αυτοί που ασχολούνται με την πειραματική διερεύνηση των επιδράσεων των συνθηκών κατεργασίας στο τελικό αποτέλεσμα με στόχο τη βελτιστοποίηση. Υπάρχει μια μικρή μερίδα ερευνητών που ασχολείται με τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση με διάφορες μεθόδους των φαινομένων που εμφανίζονται κατά την αλληλεπίδραση μιας δέσμης Laser με το υλικό και του μηχανισμού αφαίρεσης του.

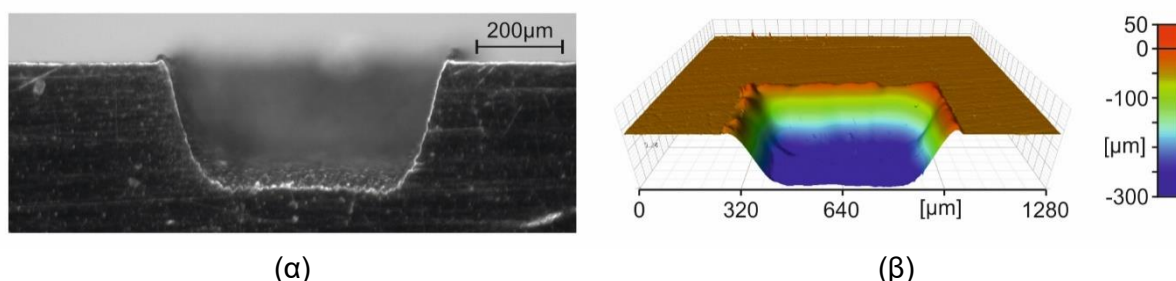
Οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser είναι ελάχιστοι και οι εργασίες τους, είτε παρουσιάζουν σημαντικές ελλείψεις είτε στερούνται πρακτικότητας, είτε δεν είναι πειραματικά επιβεβαιωμένες. Δηλαδή αναφέρονται κυρίως σε περιπτώσεις όπως η προσομοίωση του αποτυπώματος που προκύπτει από τους κρατήρες μιας σειράς παλμών σε ευθεία γραμμή και όχι τη χάραξη κάποιας 3D γεωμετρίας μεγάλων διαστάσεων με πρακτικές εφαρμογές. Επίσης, αμελούν την ύπαρξη φαινομένων και μηχανισμών που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του κέντρου κατεργασιών και τα χαρακτηριστικά των Laser, όπως η δημιουργία του χάρτη σάρωσης και η σύγκλιση της δέσμης. Επιπλέον, όσοι έχουν ασχοληθεί με προσομοιώσεις τα αποτελέσματα που εξάγουν είναι περισσότερο θεωρητικής φύσεως, δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις ατέλειες και τις διαστατικές αποκλίσεις που εμφανίζει η χαραγμένη γεωμετρία και γενικότερα δεν έχουν κάποια πρακτική χρησιμότητα. Τέλος, τα αποτελέσματα που εξάγονται δεν συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί η ορθότητα της μοντελοποίησης αλλά και των εξαγόμενων συμπερασμάτων.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θα παρουσιαστεί η ανάπτυξη ενός νέου και καινοτόμου ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων. Βασικός στόχος του προσομοιωτικού μοντέλου είναι: να θεμελιωθεί με τη σωστή θεωρητική βάση έτσι ώστε να είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο και υπόδειγμα για τους επιστήμονες και η πρακτικότητα έτσι ώστε τα αποτελέσματα να δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τους μηχανικούς, τους κατασκευαστές και τους χειριστές των κέντρων κατεργασιών Laser. Το προσομοιωτικό μοντέλο που θα παρουσιαστεί θα βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο προσομοιωτικό μοντέλο θα δίνονται ως είσοδοι πληροφορίες σχετικά με το κατεργαζόμενο αρχικό τεμάχιο, το περιβάλλον, το κέντρο κατεργασιών του οποίου η λειτουργία προσομοιώνεται, τις συνθήκες κατεργασίας και τη ζητούμενη γεωμετρία προς χάραξη. Στο μοντέλο αυτό θα ληφθούν υπόψη όλοι οι σχετικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων και θα μοντελοποιηθούν με κατάλληλο τρόπο ώστε να είναι συμβατοί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, στη φάση της προ-επεξεργασίας θα ορίζεται η γεωμετρία του τεμαχίου που θα εξεταστεί, θα πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του τεμαχίου χρησιμοποιώντας πλέγμα με κατάλληλα στοιχεία σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, θα ορίζονται οι θερμοφυσικές ιδιότητες που προκύπτουν σύμφωνα με το υλικό και θα καθορίζονται οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες για το τεμάχιο. Επιπλέον, θα δημιουργείται ο χάρτης σάρωσης που περιέχει τις θέσεις στις οποίες θα σταλούν παλμοί δέσμης Laser καθώς και την ένταση της δέσμης Laser σε κάθε φάση της κατεργασίας. Έπειτα, θα μοντελοποιηθεί η δέσμη Laser που εισάγεται στο σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα ενεργειακά χαρακτηριστικά της (ένταση, κατανομή κ.λπ.) όσο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως η σύγκλιση. Θα μοντελοποιηθούν όλα τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την πορεία της μέχρι τη θέση πρόσπτωσης στο τεμάχιο, η αλληλεπίδρασή της με το υλικό του τεμαχίου και τελικά η απορρόφησή της. Τέλος, θα μοντελοποιηθεί ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας, οι αλλαγές φάσης στις οποίες υπόκειται το υλικό και η αφαίρεσή

του με τη μορφή ατμού από το σύστημα αναφοράς χρησιμοποιώντας κάποια τεχνική μετακίνησης πλέγματος.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου θα αφορούν κυρίως την 3D γεωμετρία της χάραξης. Για κάθε ενδιάμεση χρονικά φάση της κατεργασίας από την επίλυση του προσομοιωτικού μοντέλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων θα υπολογίζεται στους κόμβους του πλέγματος η τιμή της θερμοκρασίας και οι μετατοπίσεις των κόμβων από τους οποίους συντίθεται η χαραγμένη γεωμετρία. Γνωρίζοντας τη χαραγμένη γεωμετρία και τον αριθμό των επιπέδων σάρωσης θα υπολογίζεται το τελικό βάθος της χάραξης καθώς και το μέσο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού ανά επίπεδο σάρωσης. Η γεωμετρία της χάραξης θα υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να προβλέπονται και ορισμένες ατέλειες και διαστατικές αποκλίσεις που προκύπτουν από την εμφάνιση του *kerf*, δηλαδή τον σχηματισμό ορισμένης κλίσης στις περιφερειακές συνοριακές επιφάνειες της χάραξης, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.51](#). Οι διαστατικές αποκλίσεις θα υπολογίζονται προβλέποντας τις τιμές της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων, του άνω πλάτους χάραξης και του κάτω πλάτους χάραξης.



Σχήμα 2.51: (α) Εμφάνιση κλίσης στα πλευρικά τοιχώματα κατά τη χάραξη τετραγωνικής εσοχής μήκους πλευράς 600μm και βάθους 300μm με το κέντρο κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40 (β) Μέτρηση διαστατικών αποκλίσεων από την 3D γεωμετρία της εσοχής με τη χρήση οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K

Με τη χρήση του προσομοιωτικού μοντέλου που θα αναπτυχθεί θα πραγματοποιηθεί μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων λαμβάνοντας πληθώρα συνδυασμών περιπτώσεων για ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά, συνθήκες κατεργασίας και γεωμετρίες χάραξης. Με τη χρήση των αποτελεσμάτων θα δημιουργηθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα και νομογραφήματα τα οποία θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους χειριστές των κέντρων κατεργασιών Laser χάραξης. Επιπλέον, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων θα προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στο τελικό αποτέλεσμα. Τέλος, θα επιδιωχθεί να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση της κατεργασίας, αναζητώντας τις παραμέτρους που αυξάνουν την παραγωγικότητα και την ακρίβεια της κατεργασίας.

Προκειμένου να εξακριβωθεί και να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία και η ακρίβεια του προσομοιωτικού μοντέλου, θα πραγματοποιηθεί ικανοποιητικός αριθμός πειραματικών χαραξεών με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser χάραξης DMG MORI LASERTEC 40. Έτσι, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και θα προκύψουν τα ανάλογα συμπεράσματα σχετικά με τις αποκλίσεις και τα σφάλματα των προβλέψεων του προσομοιωτικού μοντέλου.

3 3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων για τον προσδιορισμό του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού

3.1 Γενική περιγραφή

Η βασική αρχή λειτουργίας της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων βασίζεται στο ότι, μέσω των παλμών της δέσμης, ένα μεγάλο υψηλά συγκεντρωμένο θερμικό φορτίο προσδίδεται τοπικά στο υλικό του τεμαχίου που πρέπει να αφαιρεθεί. Το θερμικό φορτίο που δέχεται τοπικά το υλικό, οδηγεί αρχικά στο λιώσιμο του και στη συνέχεια στη μετάβασή του στην αέρια φάση και την απομάκρυνσή του με τη μορφή ατμού μετάλλου (laser ablation). Για τη χάραξη μιας συγκεκριμένης επιθυμητής γεωμετρίας η δέσμη Laser σαρώνει την επιφάνεια του τεμαχίου με καθορισμένο τρόπο σε πολλαπλά επίπεδα, στέλνοντας παλμούς σε προκαθορισμένες θέσεις για καθένα από αυτά. Έτσι, για κάθε ένα επίπεδο σάρωσης από την επαλληλία των κρατήρων από το υλικό που έχει αφαιρεθεί από τους παλμούς της δέσμης, αφαιρείται ένα στρώμα υλικού το οποίο έχει ένα συγκεκριμένο πάχος και συγκεκριμένη μορφή. Πραγματοποιώντας πολλαπλά επίπεδα σάρωσης και αφαιρώντας ένα στρώμα υλικού με καθορισμένη γεωμετρία για το καθένα επίπεδο είναι εφικτό να χαραχτεί μια 3D γεωμετρία στο τεμάχιο. Ο τρόπος με τον οποίο αφαιρείται το υλικό κατά την κατεργασία και κατά συνέπεια η ποιότητα του τελικού αποτελέσματος επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά του κέντρου κατεργασιών και της παραγόμενης δέσμης Laser, τα χαρακτηριστικά του υλικού, το περιβάλλον που υλοποιείται η κατεργασία, τις συνθήκες κατεργασίας καθώς και τη γεωμετρία της χάραξης. Έτσι, εμφανίζεται η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός εργαλείου προσομοίωσης το οποίο, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα απαραίτητα στοιχεία της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser, θα προβλέπει ορισμένα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το τελικό αποτέλεσμα.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο αναπτύχθηκε ένα 3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Με τη χρήση αυτού του προσομοιωτικού μοντέλου καθίσταται εφικτή η πρόβλεψη της τελικής τρισδιάστατης γεωμετρίας χάραξης, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του υλικού, τα χαρακτηριστικά του κέντρου κατεργασιών, τις συνθήκες κατεργασίας, την αλληλεπίδραση μεταξύ των παλμών δέσμης Laser και του υλικού στόχου, τις αλλαγές φάσης του ακτινοβολούμενου υλικού, το μηχανισμό αφαίρεσης του υλικού, το σχηματισμό πλουμίου από το πλάσμα ατμών μετάλλου που θωρακίζει τη δέσμη κατά τη διέλευση της από αυτό, κ.λπ.. Βασική επιδίωξη που οδήγησε στην ανάπτυξη του μοντέλου ήταν η πρόβλεψη με υψηλή ακρίβεια του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού που υφίσταται κατά την κατεργασία χάραξης, δηλαδή του μέσου πάχους του υλικού που αφαιρείται κατά τη σάρωση ενός επιπέδου του υλικού με παλμούς δέσμης Laser.

Η πρόβλεψη του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού αποτελεί σημαντική πρόκληση καθώς το κέντρο κατεργασιών Laser πρέπει να λάβει την τιμή του ως είσοδο από τον χειριστή ή προγραμματιστή, έτσι ώστε το λογισμικό του να υπολογίσει πόσα επίπεδα σάρωσης πρέπει να πραγματοποιηθούν για να επιτευχθεί το ζητούμενο τελικό βάθος της χάραξης. Εφόσον δεν υπάρχει κάποιο μοντέλο προσομοίωσης για το σκοπό αυτόν, το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού προσδιορίζεται πειραματικά, σύμφωνα με μια καθορισμένη πειραματική διαδικασία από τον κατασκευαστή του κέντρου κατεργασιών. Όμως αυτή η πειραματική διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα εφόσον πρέπει να πραγματοποιηθεί ξεχωριστά κάθε φορά ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας και το υλικό που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, απαιτείται να υπάρχει διαθέσιμο ένα τεμάχιο από το υλικό του τεμαχίου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να

πραγματοποιηθούν τα πειράματα και θα αχρηστευθεί, το οποίο σε αρκετές περιπτώσεις δεν υπάρχει διαθέσιμο.

Με το 3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας όπως η μέση ισχύς, η ταχύτητα της δέσμης και η συχνότητα επανάληψης των παλμών κατά τη χάραξη σε ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο χάλυβας κατασκευής δοχείων πίεσης, ο ορείχαλκος και το αλουμίνιο. Για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν υπολογίστηκε το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού και δημιουργήθηκαν τα ανάλογα διαγράμματα τα οποία μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο, είτε για τους προγραμματιστές, είτε για τους χειριστές των κέντρων κατεργασιών Laser για την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών κατεργασίας, ανάλογα με την εφαρμογή.

3.2 Δομή προσομοιωτικού μοντέλου

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζεται η βασική δομή που διέπει το μοντέλο προσομοίωσης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, (Finite Element Method, FEM) της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων. Αρχικά περιγράφονται οι είσοδοι (inputs) που δίνονται στο προσομοιωτικό μοντέλο και αφορούν όλες τις σχετικές παραμέτρους που επιδρούν στην κατεργασία χάραξης. Στη συνέχεια ακολουθεί η προ-επεξεργασία (pre-processing) κατά την οποία αναλύονται και μοντελοποιούνται τα φαινόμενα και οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία με κατάλληλο τρόπο ώστε να προσαρτηθούν στο προσομοιωτικό μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία. Έπειτα πραγματοποιείται η αριθμητική επίλυση (processing) της προσομοίωσης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (post-processing). Καθένα από τα βασικά τμήματα του προσομοιωτικού μοντέλου καθώς και τα επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1.

Είσοδοι (Inputs)

Στο μοντέλο προσομοίωσης σε πρώτη φάση δίνονται ως είσοδοι ορισμένες πληροφορίες και δεδομένα που είναι απαραίτητες για την υλοποίηση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser. Τα δεδομένα εισόδου αφορούν το αρχικό τεμάχιο καθώς και το περιβάλλον στο οποίο είναι τοποθετημένο, τη γεωμετρία που πρόκειται να χαραχτεί, τα χαρακτηριστικά του CNC κέντρου κατεργασιών Laser με τη χρήση του οποίου θα πραγματοποιηθεί η χάραξη και τέλος τις συνθήκες κατεργασίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Οι βασικότερες είσοδοι του μοντέλου προσομοίωσης αφορούν:

- **Αρχικό τεμάχιο:** Σχετικά με το αρχικό τεμάχιο οι είσοδοι αφορούν, τόσο τη γεωμετρία του, όσο και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Όσον αφορά τη γεωμετρία του αρχικού τεμαχίου, αυτή σχεδιάζεται με τις προβλεπόμενες διαστάσεις κάνοντας χρήση λογισμικού τεχνικής σχεδίασης CAD. Όσον αφορά το υλικό, δίνονται ως είσοδος όλες οι θερμοφυσικές του ιδιότητες που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης της δέσμης Laser με το υλικό του τεμαχίου, την επίλυση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας καθώς και την ανάλυση επιμέρους φαινομένων που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία.
- **Περιβάλλον:** Δίνονται ως είσοδος όλα τα απαραίτητα μεγέθη που χρειάζονται κατά τη μοντελοποίηση για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης της δέσμης Laser και του τεμαχίου με το περιβάλλον όπως η θερμοκρασία, το αέριο και η πίεσή του.

- **Χάραξη:** Δίνονται ως είσοδος οι βασικές διαστάσεις της απλοποιημένης γεωμετρίας που πρόκειται να χαραχτεί καθώς και η θέση που θα τοποθετηθεί η προς χάραξη γεωμετρία πάνω στο αρχικό τεμάχιο.
- **CNC κέντρο κατεργασιών Laser:** Δίνονται ως είσοδος τα χαρακτηριστικά του CNC κέντρου κατεργασιών Laser, όπως αυτά προδιαγράφονται από τον κατασκευαστή. Αυτά αφορούν τα χαρακτηριστικά των δημιουργούμενων παλμών δέσμης Laser από την πηγή, τον τρόπο μετακίνησης-διεύθυνσης της δέσμης από την κεφαλή σάρωσης, τα χαρακτηριστικά που αποκτά η δέσμη μετά την εστίασή της από τον φακό F-theta και τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνεται ο χάρτης σάρωσης από το λογισμικό CAM του κέντρου κατεργασιών.
- **Συνθήκες κατεργασίας:** Δίνονται ως είσοδο όλες οι συνθήκες κατεργασίας και οι σχετικές παράμετροι που αφορούν τον τρόπο με τον οποίο επιλέγει ο χρήστης να υλοποιήσει τη χάραξη ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό, την εφαρμογή και την επιδιωκόμενη παραγωγικότητα, ποιότητα και ακρίβεια της χάραξης.



Σχήμα 3.1: Βασική δομή του μοντέλου προσομοίωσης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων

Προ-επεξεργασία (Pre-processing)

Για την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος και του γεγονότος ότι λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα πολλά φαινόμενα διαφορετικής φύσεως, η διαδικασία της προ-επεξεργασίας υλοποιήθηκε σε επιμέρους αποστολές. Για καθένα από τα επιμέρους προβλήματα που προέκυψαν μελετήθηκαν οι φυσικοί μηχανισμοί που εξελίσσονται κατά την κατεργασία, εντοπίστηκαν οι επιδράσεις τους και πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίησή τους με τη χρήση κατάλληλων εξισώσεων ώστε να ενταχθούν στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Επιπλέον, ορίστηκε η γεωμετρία του αρχικού προς χάραξη τεμαχίου, πραγματοποιήθηκε η πλεγματοποίησή του και ορίστηκαν οι αλληλεπιδράσεις του με το περιβάλλον. Τα βασικά επιμέρους προβλήματα που εξετάστηκαν είναι τα ακόλουθα:

- **Γεωμετρία:** Περιλαμβάνει, είτε την απευθείας εισαγωγή, είτε τη σχεδίαση της γεωμετρίας του προς μελέτη αρχικού τεμαχίου.
- **Υλικό:** Στο υπό μελέτη τεμάχιο ορίζεται το υλικό και όλες οι ιδιότητές του που σχετίζονται με την κατεργασία με δέσμη Laser.
- **Συνοριακές, αρχικές συνθήκες:** Περιλαμβάνει τον ορισμό της αρχικής κατάστασης του τεμαχίου καθώς και των αλληλεπιδράσεών του με το περιβάλλον, καθορίζοντας τις κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες.
- **Διακριτοποίηση:** Είναι διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος (mesh generation) του αρχικού τεμαχίου από ένα σύνολο στοιχείων (elements) που συνδέονται σε συνοριακούς κόμβους (nodes) και θα χρησιμοποιηθεί κατά την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis, FEA). Ανάλογα με το είδος της προσομοίωσης που μελετάται, τη γεωμετρία του αρχικού τεμαχίου και την ακρίβεια στους υπολογισμούς, επιλέγεται το είδος των στοιχείων, ο αριθμός τους και η διάταξή τους κατά την πλεγματοποίηση.
- **Χάρτης σάρωσης:** Με βάση τις συνθήκες κατεργασίας που έχουν επιλεγεί από τον χρήστη καθώς και τη στρατηγική σάρωσης, δημιουργείται ο χάρτης σάρωσης που περιλαμβάνει όλες τις θέσεις ανά επίπεδο σάρωσης στις οποίες στέλνονται οι παλμοί της δέσμης Laser.
- **Εισερχόμενη δέσμη Laser:** Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του CNC κέντρου κατεργασιών Laser χάραξης πραγματοποιείται η μοντελοποίηση της εισερχόμενης δέσμης Laser στο υπό μελέτη σύστημα, της οποίας τα χαρακτηριστικά διαμορφώνονται για την κάθε περίπτωση με βάση τις εκάστοτε συνθήκες κατεργασίας.
- **Προσπίπτουσα δέσμη Laser:** Η δέσμη Laser πριν από την πρόσπτωσή της στο τεμάχιο υπόκειται σε σημαντικές μεταβολές εξαιτίας της εμφάνισης ορισμένων ιδιαίτερων φαινομένων, όπως για παράδειγμα η θωράκιση της δέσμης από την αλληλεπίδραση της με το αναπτυσσόμενο πλούμιο πλάσματος ατμού του υλικού. Συνεπώς, μοντελοποιούνται τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα και υπολογίζονται εκ νέου τα χαρακτηριστικά της δέσμης που τελικά προσπίπτει στο υλικό του τεμαχίου.
- **Απορρόφηση δέσμης Laser:** Καθώς η δέσμη Laser προσπίπτει στο τεμάχιο μοντελοποιείται η αλληλεπίδρασή της με το υλικό λαμβάνοντας υπόψη τον μηχανισμό απορρόφησης της ακτινοβολίας και ότι μόνο ένα τμήμα της έντασης απορροφάται ενώ το υπόλοιπο χάνεται με τη μορφή απωλειών.
- **Μετάδοση θερμότητας:** Μοντελοποιούνται με τη χρήση κατάλληλων εξισώσεων τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Υπολογίζεται το θερμοκρασιακό πεδίο που αναπτύσσεται λόγω μεταφοράς θερμότητας με αγωγή στο τεμάχιο, θεωρώντας την εισερχόμενη ροή θερμότητας από τη δέσμη και τις απώλειες προς το περιβάλλον.
- **Αλλαγή φάσης:** Μοντελοποιούνται οι αλλαγές που εμφανίζονται στις ιδιότητες του υλικού λόγω των αλλαγών φάσεως.
- **Αφαίρεση υλικού:** Στο ενεργειακό ισοζύγιο του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας συνυπολογίζεται και η ροή θερμότητας που αφαιρείται από το σύστημα εξαιτίας της απομάκρυνσης του υλικού που αφαιρείται κατά την κατεργασία.
- **Μετακίνηση πλέγματος:** Με βάση τη ροή θερμότητας του υλικού που αφαιρείται και με τη χρήση κατάλληλων κριτηρίων μετακινείται το πλέγμα του τεμαχίου οδηγώντας σε μια μεταβαλλόμενη γεωμετρία του τεμαχίου που προσομοιώνει την κατεργασία χάραξης.

Επίλυση (Processing)

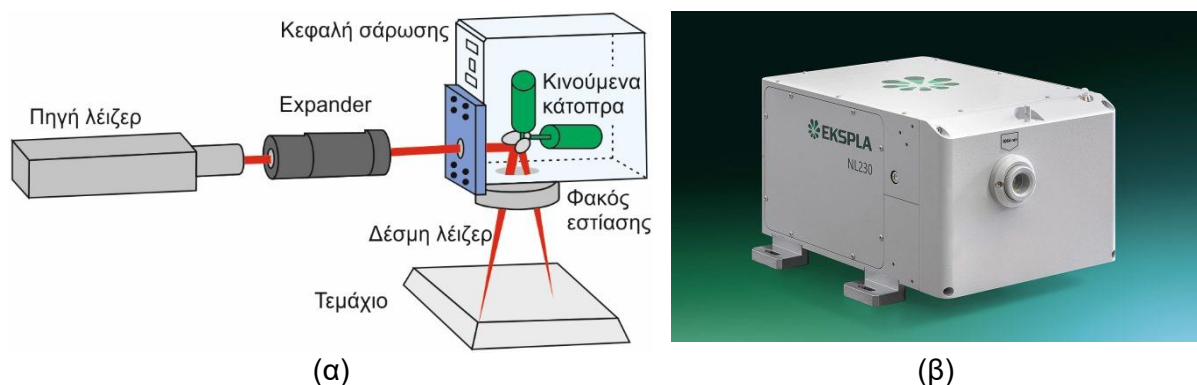
Αφορά την κατάστρωση και επίλυση του συστήματος των εξισώσεων για τον υπολογισμό του αναπτυσσόμενου θερμοκρασιακού πεδίου, των μετατοπίσεων των κόμβων και της μεταβολής της γεωμετρίας του τεμαχίου σε κάθε φάση της προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης.

Αποτελέσματα (Post-processing)

Εφόσον η επίλυση του προβλήματος έχει ολοκληρωθεί, ακολουθεί η παρουσίαση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη θερμοκρασία και τις μετατοπίσεις των κόμβων στο πεδίο του χρόνου κατά την εξέλιξη της κατεργασίας χάραξης. Από τις μετατοπίσεις των κόμβων προκύπτει σε όλα τα ενδιαμέσως χρονικά στάδια η χαραγμένη γεωμετρία. Επιπλέον, από την τελική χαραγμένη γεωμετρία υπολογίζονται ορισμένα χρήσιμα μετρήσιμα μεγέθη όπως το βάθος χάραξης, το άνω πλάτος χάραξης, το κάτω πλάτος χάραξης, η γωνία κλίσης των πλευρών και το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού.

3.3 Βασικά μεγέθη και παράμετροι της κατεργασίας κατά τη μοντελοποίηση

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα βασικά μεγέθη και οι παράμετροι κατεργασίας που θα ληφθούν υπόψη στη συνέχεια κατά τη μοντελοποίηση. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση της κατεργασίας αρχικά πρέπει να παρουσιαστεί τι συμβαίνει και τι υπάρχει μέσα σε ένα κέντρο κατεργασιών Laser χάραξης. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα κέντρο κατεργασιών Laser χάραξης παρουσιάζονται στο [σχήμα 3.2 \(α\)](#) και είναι η πηγή του Laser (laser source), ο expander, η κεφαλή σάρωσης (scanning head) και ο φακός εστίασης της δέσμης (F-theta lens).



Σχήμα 3.2: (α) Βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα κέντρο κατεργασιών Laser χάραξης (β) Τυπικό παράδειγμα πηγής Laser: πηγή NL230 από την EKSPLA που παράγει παλμούς διάρκειας 2-4ns δέσμης Nd:YAG Laser με μήκος κύματος 1064nm

Η πηγή του Laser (laser source) αποτελεί το τμήμα του κέντρου κατεργασιών Laser που αναλαμβάνει τη δημιουργία των παλμών δέσμης Laser. Ένα τυπικό παράδειγμα πηγής παρουσιάζεται στο [σχήμα 3.2 \(β\)](#) η οποία είναι η NL230 της EKSPLA που παράγει παλμούς δέσμης Nd:YAG Laser μεταγόμενου Q διάρκειας νανοδευτερολέπτων. Υπάρχουν πολλές διαφοροποιήσεις σχετικά με τον τρόπο που παράγεται η ακτίνα από την πηγή ανάλογα με την κατασκευάστρια εταιρεία, το είδος και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Σημασία όμως για τη μοντελοποίηση δεν έχει ο τρόπος που δημιουργούνται οι παλμοί της δέσμης Laser αλλά τα χαρακτηριστικά τους τα οποία προδιαγράφονται συνήθως από τον κατασκευαστή. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά μιας πηγής δέσμης Laser, ορισμένα από τα οποία θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μοντελοποίηση, είναι τα ακόλουθα:

- **Τύπος Laser (Laser type):** αποτελεί τον τύπο του Laser και ορίζεται με βάση το είδος του ενεργού μέσου από το οποίο παράγεται η ακτίνα Laser.
- **Μήκος κύματος (Wavelength), $\lambda[\mu\text{m}]$:** το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτίνας Laser.
- **Μέση ισχύς (Average power), $P_{\text{avg}}[\text{W}]$:** η σταθερή μέση ισχύς που θα είχε το Laser εάν δεν ήταν παλμικό αλλά ήταν συνεχούς κύματος.
- **Μέγιστη ισχύς παλμού (Pulse peak power), $P_{\text{peak}}[\text{kW}]$:** η μέγιστη ισχύς που εκπέμπεται στιγμιαία κατά τον παλμό.
- **Ενέργεια παλμού (Pulse energy), $E[\text{mJ}]$:** η ενέργεια που εκπέμπεται από τη δέσμη σε χρόνο μιας περιόδου, δηλαδή από την έναρξη ενός παλμού μέχρι την έναρξη του αμέσως επόμενου.
- **Συχνότητα επανάληψης παλμών (Pulse repetition rate), $F_{\text{rep}}[\text{kHz}]$:** η συχνότητα με την οποία εκπέμπονται παλμοί από την πηγή.
- **Διάρκεια παλμού (Pulse duration-width), $t_{\text{pulse}}[\text{ns}]$:** η χρονική διάρκεια ενός παλμού.
- **Ποιότητα παραγόμενης δέσμης (Generated beam quality), M_{source}^2 :** προσδιορίζει την ποιότητα της παραγόμενης δέσμης στην πηγή υπό την έννοια του πόσο καλά μπορεί να εστιαστεί.

Εφόσον η δέσμη Laser έχει παραχθεί από την πηγή, στη συνέχεια παραλαμβάνεται από τον expander και έπειτα από την κεφαλή σάρωσης (scanning head). Στο σχήμα 3.3 (α) παρουσιάζονται ορισμένοι κλασσικοί τύποι από expanders της εταιρείας Sintec και στο σχήμα 3.3 (β) παρουσιάζεται μια τυπική κεφαλή σάρωσης της εταιρείας SCANLAB. Η τοποθέτηση του expander είναι προαιρετική και ο βασικός του ρόλος είναι να αλλάξει τη διάμετρο της δέσμης κατά τη διέλευσή της από το εσωτερικό του ώστε να αποκτήσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά η δέσμη πριν από τη διέλευση της από τον φακό εστίασης. Η κεφαλή σάρωσης (scanning head) αναλαμβάνει να κατευθύνει κατάλληλα τη δέσμη στους άξονες X,Y του επιπέδου σάρωσης, με βάση τις εντολές που δέχεται από τον υπολογιστή-ελεγκτή (controller) του CNC κέντρου κατεργασιών. Καθώς η δέσμη Laser εισέρχεται στο εσωτερικό της κεφαλής σάρωσης, αυτή ανακλάται διαδοχικά από τα δύο κάτοπτρα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4 (α), τα οποία δύναται να περιστραφούν με υψηλές ταχύτητες από ηλεκτρικούς κινητήρες που λαμβάνουν σήματα από μια κάρτα ψηφιοαναλογικής μετατροπής (D/A card).



(α)



(β)

Σχήμα 3.3: (α) Expanders δέσμης Laser από την Sintec (β) Κεφαλής σάρωσης basiCube 10 από την SCANLAB και η αντίστοιχη κάρτα ψηφιοαναλογικής μετατροπής

Πάνω στην κεφαλή σάρωσης είναι προσαρτημένος και ο F-theta φακός εστίασης της δέσμης (F-theta lens), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4 (β). Η χρήση των φακών F-theta έναντι των κλασσικών σφαιρικών φακών (spherical lens) παρέχει τη δυνατότητα για εστίαση της δέσμης σε επίπεδες επιφάνειες, όπως αυτές που εξετάζονται, διατηρώντας σταθερή τη διάμετρο της δέσμης στο σημείο εστίασης σε ολόκληρο το εύρος του επιπέδου σάρωσης. Επιπλέον,

διευκολύνουν τον υπολογισμό της ακριβούς θέσης του σημείου που προσπίπτει η εστιασμένη δέσμη κατά την κίνησή της στο επίπεδο, χωρίς να απαιτούνται περίπλοκοι υπολογιστικοί αλγόριθμοι καθώς μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει της γωνίας εισόδου της δέσμης θ στον φακό, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.5](#): Η απόσταση του σημείου εστίασης της δέσμης στην επίπεδη επιφάνεια από τον άξονα συμμετρίας του φακού ισούται με το γινόμενο της γωνίας εισόδου της δέσμης θ (deflection angle) με την εστιακή απόσταση f (effective focal length).



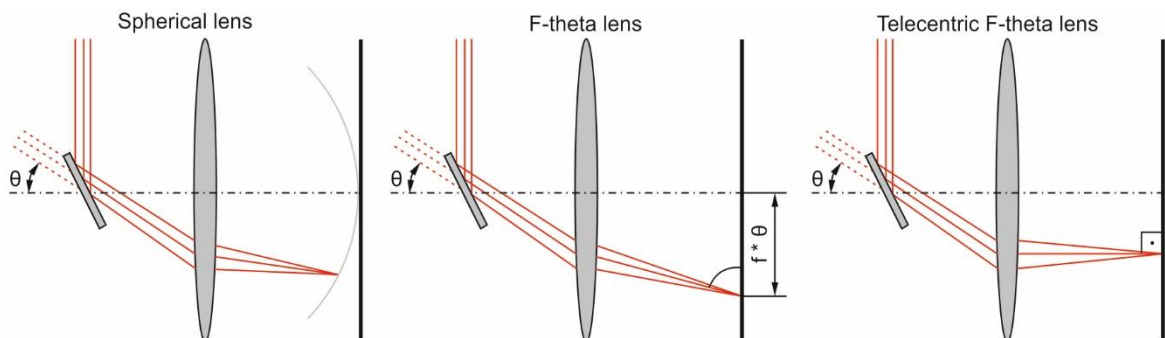
(α)



(β)

Σχήμα 3.4: (α) Κινούμενα κάτοπτρα στο εσωτερικό της κεφαλής σάρωσης (β) Κεφαλή σάρωσης basiCube 10 από τη SCANLAB μαζί με φακό εστίασης F-theta

Εκτός των κλασικών φακών F-theta συχνά συναντάται στις βιομηχανικές εφαρμογές και μια παραλλαγή αυτών που ονομάζονται τηλεκεντρικοί F-theta φακοί εστίασης (telecentric F-theta lens). Οι τηλεκεντρικοί F-theta φακοί εστίασης χρησιμοποιούν ένα πολύπλοκο σύστημα από οπτικά στοιχεία για να διασφαλίσουν ότι, ανεξάρτητα με τη γωνία εισόδου της δέσμης θ από την κεφαλή σάρωσης στον φακό εστίασης, η δέσμη κατά την έξοδό της από τον φακό θα είναι πάντα παράλληλη στον άξονα συμμετρίας του φακού και κατά συνέπεια θα είναι πάντα κάθετη στην επίπεδη επιφάνεια που σαρώνεται, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.5](#). Οι τηλεκεντρικοί F-theta φακοί εστίασης δίνουν τη δυνατότητα να επιτευχθούν μικρότερες διαμέτροι κατά την εστίαση της δέσμης εξασφαλίζοντας την μη παραμόρφωση της δέσμης και τη διατήρηση υψηλής κυκλικότητας σε όλο το εύρος της σάρωσης.



Σχήμα 3.5: Διαφοροποίηση μεταξύ των σφαιρικών, F-theta και τηλεκεντρικών F-theta φακών εστίασης

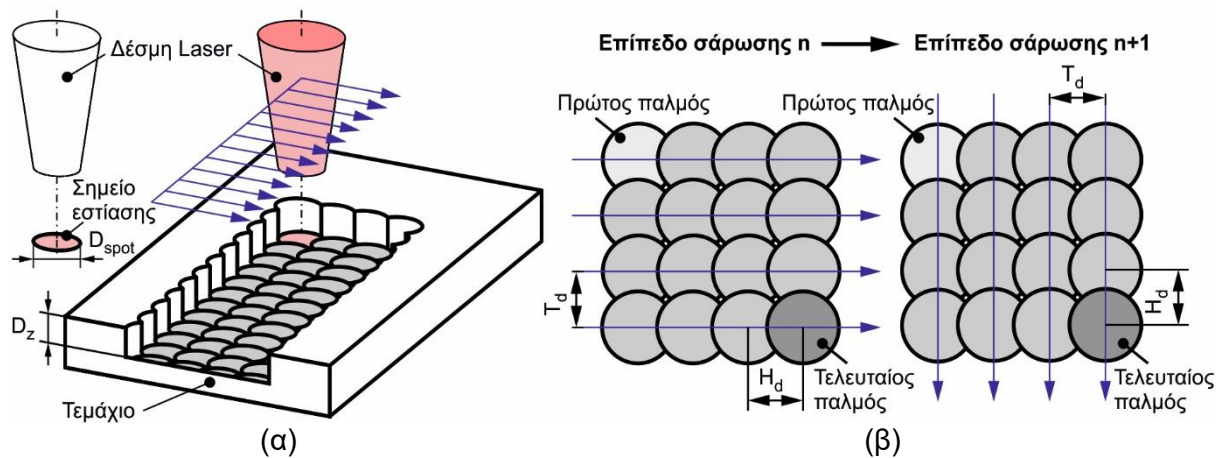
Η κεφαλή σάρωσης, σε συνδυασμό με τον αντίστοιχο φακό εστίασης, είναι σε θέση να κατευθύνει κατάλληλα τη δέσμη Laser στην επιφάνεια του τεμαχίου κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser εξασφαλίζοντας υψηλή ταχύτητα σάρωσης (scanning speed) και διατηρώντας μεγάλη ακρίβεια στην τοποθέτηση για ένα περιορισμένο εύρος εργασίας (scan field). Τα βασικά χαρακτηριστικά που προδιαγράφονται από τον κατασκευαστή της κεφαλής σάρωσης και του φακού F-theta ως σύνολο που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση είναι τα ακόλουθα:

- **Μήκος κύματος (Wavelength), $\lambda[\mu\text{m}]$:** το μήκος κύματος της διερχόμενης ακτίνας Laser.
- **Ταχύτητα δέσμης (Scanning speed), $V[\text{mm/s}]$:** η γραμμική ταχύτητα της δέσμης στο επίπεδο εστίασης κατά τη χάραξη.
- **Εστιακή απόσταση (Focal length), $f[\text{mm}]$:** η εστιακή απόσταση του φακού.
- **Διάμετρος δέσμης στο σημείο εστίασης (Spot diameter), $D_{\text{spot}}[\mu\text{m}]$:** η διάμετρος της δέσμης στο σημείο εστίασης μετρημένη με βάση τη μέθοδο $1/e^2$ ή την FWHM, δηλαδή μετρημένη μεταξύ δυο αντιδιαμετρικών σημείων στη θέση με ένταση $1/e^2 = 13.5\%$ ή τη μισή ένταση 50% αντίστοιχα της μέγιστης τιμής της έντασης.
- **Ποιότητα προσπίπτουσας δέσμης (Incident beam quality), M^2 :** προσδιορίζει την ποιότητα της προσπίπτουσας δέσμης στο τεμάχιο έπεται από τη διέλευσή της από την κεφαλή σάρωσης και τους φακούς εστίασης.

Εφόσον έχουν παρουσιαστεί τα βασικά τμήματα τα οποία συμβάλουν στη δημιουργία, τη διαμόρφωση και στην κατεύθυνση της δέσμης Laser και έχουν οριστεί τα βασικά χαρακτηριστικά τους που θα ληφθούν υπόψη στη μοντελοποίηση, στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ο τρόπος και η μεθοδολογία υλοποίησης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser. Κατά την κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser σε ένα CNC κέντρο κατεργασιών Laser η προς χάραξη γεωμετρία δίνεται ως είσοδος μέσω αρχείου που έχει φτιαχτεί με λογισμικό CAD. Το αρχείο με τη γεωμετρία προς χάραξη παραλαμβάνεται από το λογισμικό CAM, το οποίο αναλαμβάνει την παραγωγή των πληροφοριών που απαιτούνται για τον έλεγχο του CNC κέντρου κατεργασιών. Αναλαμβάνει δηλαδή τον χειρισμό της πηγής Laser έτσι ώστε να παράγονται παλμοί με τον επιθυμητό τρόπο και το χειρισμό της κεφαλής σάρωσης έτσι ώστε να κατευθύνει κατάλληλα τη δέσμη Laser με βάση την προδιαγεγραμμένη τροχιά. Η κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser υλοποιείται σε πολλαπλά επίπεδα στη διεύθυνση του βάθους. Δηλαδή το πρόγραμμα CAM υλοποιεί μια κατάτμηση της προς χάραξη γεωμετρίας σε πολλαπλά επίπεδα με βάση κάποιο καθορισμένο βάθος. Καθένα από τα επίπεδα αυτά σαρώνεται διαδοχικά από τη δέσμη Laser κινούμενη από την κεφαλή σάρωσης σε ευθείες τροχιές ισαπέχουσες μεταξύ τους. Επειδή η δέσμη Laser δεν είναι συνεχούς κύματος αλλά είναι παλμική, παράγονται από την πηγή Laser παλμοί υψηλής εντάσεως με μια καθορισμένη συχνότητα.

Πιο αναλυτικά, σε κάθε επίπεδο σάρωσης (layer) **n** υπάρχει μια δέσμη Laser που κινείται με μια σταθερή ταχύτητα **V** σε ευθείες ισαπέχουσες τροχιές στέλνοντας παλμούς με σταθερή συχνότητα **F_{rep}**, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6 (α). Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών (track distance) **T_d** ορίζεται αυθαίρετα κατά την κατεργασία, ανάλογα με τις απαιτήσεις και η επίδραση της στο τελικό αποτέλεσμα έχει διερευνηθεί πειραματικά από αρκετούς ερευνητές, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών (hatching distance) **H_d** ορίζεται από τον συνδυασμό της ταχύτητας της δέσμης **V** και της συχνότητας των παλμών **F_{rep}**. Οι θέσεις στις οποίες στέλνονται οι παλμοί ανά επίπεδο συνθέτουν το χάρτη σάρωσης (laser map). Κατά την πλήρη σάρωση ενός επιπέδου από την επαλληλία των κρατήρων που έχουν προκύψει από το αφαιρεθέν υλικό εκ των παλμών προκύπτει η αφαίρεση ενός στρώματος υλικού με μέσο πάχος **D_z**. Καθένα από τα επίπεδα σάρωσης διαθέτει ένα συγκεκριμένο μοτίβο σάρωσης για τις τροχιές των παλμών το οποίο ενδέχεται να διαφοροποιείται σε σχέση με τα υπόλοιπα. Η συσχέτιση μεταξύ του μοτίβου χάραξης των διαδοχικών επιπέδων ονομάζεται στρατηγική σάρωσης (scanning strategy). Για παράδειγμα, στο σχήμα 3.6 (β) παρουσιάζεται η μονοκατευθυντική διασταυρούμενη (unidirectional cross-hatching) στρατηγική σάρωσης κατά την οποία οι τροχιές σάρωσης ενός επιπέδου έχουν όλες την ίδια φορά και είναι κάθετες με αυτές του αμέσως επόμενου. Η επιλογή της στρατηγικής σάρωσης έχει σημαντική επίδραση

στην ποιότητα και στην παραγωγικότητα της κατεργασίας, όπως έχει φανεί σε πειραματικές ερευνητικές εργασίες που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο και γίνεται με βάση τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

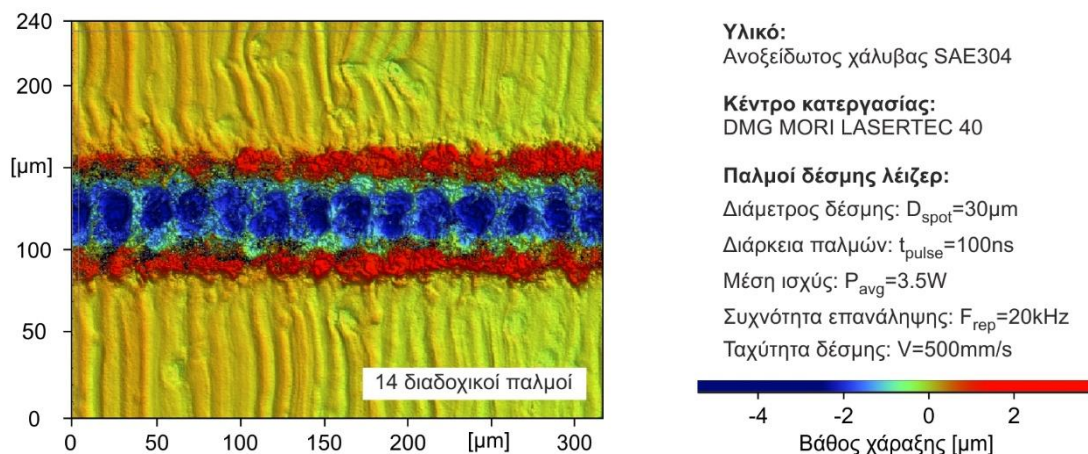


Σχήμα 3.6: (α) Σχηματική απεικόνιση της σάρωσης του πρώτου επιπέδου $n=1$ (β) Χάρτης σάρωσης για τη μονοκατευθυντική διασταυρούμενη στρατηγική σάρωσης

3.4 Μοντελοποίηση

3.4.1 Χάρτης σάρωσης

Κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, το κέντρο κατεργασιών Laser σαρώνει την επιφάνεια του τεμαχίου με παλμούς πάνω σε ευθύγραμμες τροχιές (laser tracks), όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3.7.



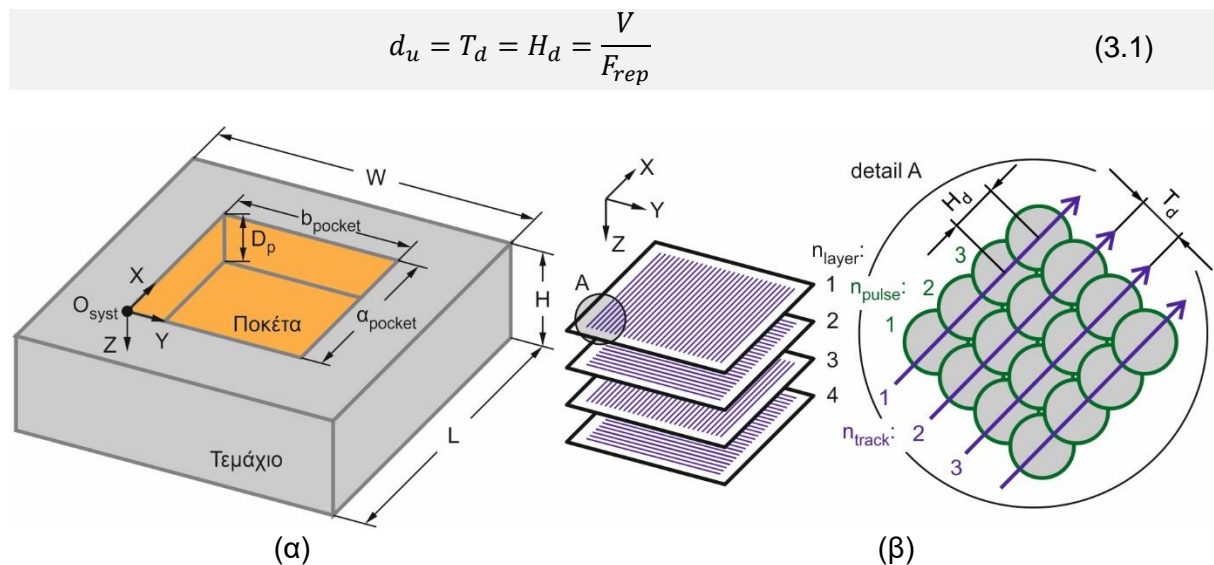
Σχήμα 3.7 Διαδοχικοί παλμοί μιας ευθύγραμμης τροχιάς χαραγμένη σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών DMG MORI LASERTEC 40

Οι τροχιές αυτές είναι παράλληλες και ισαπέχουσες μεταξύ τους και σε πολλαπλά επίπεδα (layers). Η διάταξη των ευθύγραμμων τροχιών μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων καθορίζεται από τη στρατηγική σάρωσης (scanning strategy). Οι θέσεις στις οποίες στέλνονται οι παλμοί για τη χάραξη του τεμαχίου συνθέτουν τον χάρτη σάρωσης (laser map).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται η δημιουργία του χάρτη σάρωσης για την περίπτωση της χάραξης μιας ορθογωνικής εσοχής $a_{pocket} \times b_{pocket}$ με n

επίπεδα σάρωσης σε ένα αρχικό τεμάχιο διαστάσεων $L \times W \times H$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8 (α). Με όμοια λογική και αντίστοιχο τρόπο, κάνοντας μικρές τροποποιήσεις, δύναται να δημιουργηθεί ο χάρτης για τη χάραξη οποιασδήποτε γεωμετρίας. Η στρατηγική σάρωσης που επιλέγεται να εξεταστεί είναι η μονοκατευθυντική διασταυρούμενη (unidirectional cross-hatching), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8 (β) καθώς εξασφαλίζει στην πλειονότητα των περιπτώσεων καλύτερη ποιότητα επιφάνειας σε σχέση με τις υπόλοιπες διαδεδομένες στρατηγικές σάρωσης [71].

Για την εξασφάλιση ομοιομορφίας στην τοποθέτηση των παλμών στον χάρτη σάρωσης επιλέγεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών (track distance) T_d να ισούται με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών (hatching distance) H_d που υπολογίζεται από την εξίσωση (3.1) η οποία είναι μια κλασσική επιλογή που υιοθετείται σε μεγάλο βαθμό στις κατεργασίες χάραξης με παλμούς δέσμης Laser. Να σημειωθεί ότι η τιμή της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών θα μπορούσε να επιλεγεί αυθαίρετα και να λάβει οποιαδήποτε τιμή χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργία του προσωμοιωτικού μοντέλου.



Σχήμα 3.8: (α) Τεμάχιο και ορθογωνική εσοχή προς χάραξη (β) Μονοκατευθυντική διασταυρούμενη στρατηγική σάρωσης (unidirectional cross-hatching strategy) που επιλέχθηκε για το προσωμοιωτικό μοντέλο

Ο χάρτης σάρωσης κατά τη μοντελοποίηση παράγεται με όμοιο τρόπο όπως παράγεται από τα κέντρα κατεργασιών Laser χάραξης. Τοποθετείται η προς χάραξη ορθογωνική εσοχή στην επιθυμητή θέση πάνω στο τεμάχιο και ορίζεται το σημείο O_{syst} που είναι η αρχή του συστήματος συντεταγμένων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8. Ο χάρτης σάρωσης εμπεριέχει το σύνολο από τις θέσεις για κάθε χρονική στιγμή της κατεργασίας που τοποθετείται κάθε φορά η δέσμη για να σταλεί παλμός. Για την παραγωγή του χάρτη σάρωσης αρκεί δηλαδή η γνώση του σημείου (x_{focus}, y_{focus}) που τοποθετείται η δέσμη Laser στην επιφάνεια του τεμαχίου, ώστε να σταλεί ο παλμός για κάθε χρονική στιγμή t της κατεργασίας. Για τον υπολογισμό του σημείου εστίασης της δέσμης (x_{focus}, y_{focus}) συναρτήσει του χρόνου t ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Θέλοντας να χαραχτεί μια ορθογωνική εσοχή διαστάσεων $a_{pocket} \times b_{pocket}$ και γνωρίζοντας ότι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών ισούται με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών και είναι d_u , τότε κατά την πλήρη σάρωση

οποιοδήποτε επιπέδου σάρωσης ο αριθμός των παλμών κατά τη διεύθυνση του άξονα X $n_{pulses,x}$ και ο αριθμός των παλμών κατά τη διεύθυνση του άξονα Y $n_{pulses,y}$ υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.2) και (3.3) αντίστοιχα.

$$n_{pulses,x} = floor\left(\frac{a_{pocket}}{d_u}\right) + 1 \quad (3.2)$$

$$n_{pulses,y} = floor\left(\frac{b_{pocket}}{d_u}\right) + 1 \quad (3.3)$$

όπου floor είναι η συνάρτηση που λαμβάνει ως είσοδο έναν πραγματικό αριθμό και επιστρέφει τον μεγαλύτερο ακέραιο που είναι μικρότερος ή ίσος με τον αριθμό αυτόν. Εξασφαλίζεται έτσι ότι ο τελευταίος παλμός μιας τροχιάς παλμών δεν θα τοποθετηθεί σε καμία περίπτωση εκτός του ορίου της προς χάραξη εσοχής.

Η πηγή του Laser παράγει παλμούς με συχνότητα επανάληψης F_{rep} . Η χρονική διάρκεια που μεσολαβεί από την έναρξη ενός παλμού μέχρι την έναρξη του αμέσως επόμενου ισούται με την αντίστοιχη περίοδο t_{period} και υπολογίζεται ως εξής:

$$t_{period} = \frac{1}{F_{rep}} \quad (3.4)$$

Γνωρίζοντας την χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών t_{period} καθώς και τους παλμούς που απαιτούνται για να σαρωθεί πλήρως ένα επίπεδο σάρωσης, υπολογίζονται η χρονική διάρκεια για την πλήρη σάρωση ενός επιπέδου σάρωσης t_{layer} καθώς και ο αύξων αριθμός n_{layer} του επιπέδου που σαρώνεται τη χρονική στιγμή t ως εξής:

$$t_{layer} = n_{pulses,x} n_{pulses,y} t_{period} \quad (3.5)$$

$$n_{layer} = floor\left(\frac{t}{t_{layer}}\right) + 1 \quad (3.6)$$

Σύμφωνα με τη μονοκατευθυντική διασταυρούμενη στρατηγική σάρωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8 (β), όταν ο αύξων αριθμός n_{layer} του επιπέδου είναι περιττός αριθμός τότε οι ευθύγραμμες τροχιές παλμών είναι παράλληλες στη διεύθυνση του άξονα X, ενώ όταν είναι άρτιος τότε είναι παράλληλες στη διεύθυνση του άξονα Y. Η χρονική διάρκεια για την πλήρη σάρωση μιας ευθύγραμμης τροχιάς παλμών t_{track} του επιπέδου σάρωσης n_{layer} καθώς και ο αύξων αριθμός n_{track} της ευθύγραμμης τροχιάς παλμών που σαρώνεται τη χρονική στιγμή t στο συγκεκριμένο επίπεδο σάρωσης, υπολογίζονται ως εξής:

$$t_{track} = \begin{cases} n_{pulses,x} t_{period}, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ n_{pulses,y} t_{period}, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$n_{track} = floor\left(\frac{t - (n_{layer} - 1)t_{layer}}{t_{track}}\right) + 1 \quad (3.8)$$

Ο αύξων αριθμός του παλμού n_{pulse} που στέλνεται τη χρονική στιγμή t πάνω στην ευθύγραμμη τροχιά παλμών n_{track} του επιπέδου σάρωσης n_{layer} υπολογίζεται ακολούθως:

$$n_{pulse} = floor\left(\frac{t - (n_{layer} - 1)t_{layer} - (n_{track} - 1)t_{track}}{t_{period}}\right) + 1 \quad (3.9)$$

Όλες οι παραπάνω παράμετροι υπολογίζονται για την εύρεση της θέσης (x_{focus} , y_{focus}) που στέλνεται ο παλμός της δέσμης Laser που μελετάται τη χρονική στιγμή t της κατεργασίας

χάραξης με παλμούς δέσμης Laser νανοδευτερολέπτων. Οι συντεταγμένες του σημείου εστίασης της δέσμης (x_{focus} , y_{focus}) στο εκάστοτε επίπεδο υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.10) και (3.11):

$$x_{focus} = \begin{cases} (n_{pulse} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ (n_{track} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$y_{focus} = \begin{cases} (n_{track} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ (n_{pulse} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases} \quad (3.11)$$

Η θέση (x_{focus} , y_{focus}) είναι η θέση πάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου στην οποία, όπως θα φανεί σε επόμενο κεφάλαιο, θα τοποθετηθεί η θερμική πηγή που προσομοιάζει την προσπίπτουσα δέσμη Laser. Πρέπει να σημειωθεί ότι έχει γίνει η παραδοχή ότι κατά τη διάρκεια του παλμού η θέση αυτή είναι στατική και δε μεταβάλλεται. Η παραδοχή αυτή έγινε χωρίς να επηρεάζει το αποτέλεσμα καθώς η μετατόπιση της δέσμης που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα των μερικών νανοδευτερολέπτων, που είναι η χρονική διάρκεια του παλμού με τη δέσμη να κινείται με ταχύτητα μερικών χιλιοστών ανά δευτερόλεπτο στο τεμάχιο είναι απειροστά μικρή. Για παράδειγμα για ένα παλμό διάρκειας $t_{pulse}=100\text{ns}$ με τη δέσμη να κινείται με ταχύτητα $V=100\text{mm/s}$ στο επίπεδο της χάραξης η μετατόπιση του σημείου εστίασης της δέσμης από τη χρονική στιγμή που προσφέρει ενέργεια ο παλμός έως τη στιγμή που σταματά είναι $0.01\mu\text{m}$, τιμή που θεωρείται αμελητέα σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις που μελετώνται. Όσον αφορά τη θέση κατά τη διεύθυνση του άξονα Z που θα τοποθετηθεί η θερμική πηγή δεν γίνεται κάποια ιδιαίτερη αναφορά, καθώς αυτή ταυτίζεται με το επίπεδο που η δέσμη θα συναντήσει του υλικό του τεμαχίου. Η δέσμη δηλαδή εστιάζεται στη διεύθυνση του άξονα Z κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στη θέση που βρίσκεται το σύνορο-επιφάνεια του υλικού του τεμαχίου αναλόγως με το υλικό που έχει αφαιρεθεί στη δεδομένη φάση της κατεργασίας.

3.4.2 Εισερχόμενη δέσμη, προσπίπτουσα και απορρόφηση

Κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, η πηγή του Laser παράγει παλμούς δέσμης Laser οι οποίοι έπειτα από τη διέλευση τους από την κεφαλή σάρωσης και τους φακούς εστίασης οδηγούνται στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η μοντελοποίηση της εισερχόμενης δέσμης Laser υποδιαιρείται σε δύο επιμέρους τμήματα: τη μοντελοποίηση της παλμικής συμπεριφοράς του Laser για τον υπολογισμό της ισχύος που έχει η δέσμη Laser συναρτήσει του χρόνου και την ανάπτυξη του θερμικού μοντέλου της δέσμης Laser για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

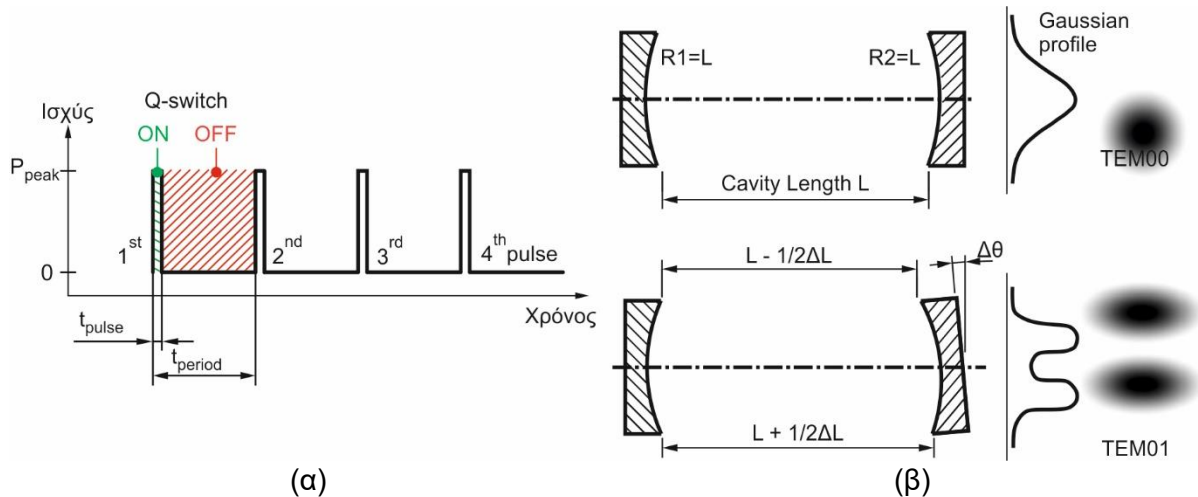
Η παλμική συμπεριφορά της δέσμης Laser που παράγεται από την πηγή του Laser εξασφαλίζεται μέσω της τεχνικής μεταγόμενου Q (Q-switching). Η τεχνική του μεταγόμενου Q χρησιμοποιείται για την παραγωγή παλμών με πολύ μεγάλες τιμές της μέγιστης ισχύος παλμού P_{peak} και με πολύ μικρή χρονική διάρκεια παλμών t_{pulse} της τάξεως των νανοδευτερολέπτων [72] μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης των απωλειών κοιλότητας (intracavity losses) και κατά συνέπεια του Q παράγοντα (Q factor) της κοιλότητας συντονισμού (laser resonator). Το σύστημα Q-switch συμπεριφέρεται σαν διακόπτης-διάφραγμα το οποίο όταν κλείνει επιτυγχάνονται σημαντικές απώλειες ενέργειας στον ταλαντωτή, διακόπτει τη δράση της ενίσχυσης της αυθόρμητης εκπομπής και δεν επιτρέπει την εκπομπή ακτινοβολίας. Για τη δημιουργία ενός παλμού δέσμης Laser, αρχικά οι απώλειες κοιλότητας αυξάνονται σημαντικά (ελαχιστοποίηση Q παράγοντα) κλείνοντας τον διακόπτη Q-switch, με αποτέλεσμα η ενέργεια που παρέχεται στο ενεργό μέσο από τη διέγερση να συσσωρεύεται αυξάνοντας την αναστροφή πληθυσμού σε τιμές μεγαλύτερες της τιμής του κατωφλίου, εφόσον δεν εκπέμπεται σε αυτή τη φάση δέσμη Laser. Μετά από ορισμένη χρονική διάρκεια, όταν η αναστροφή

πληθυσμού έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της, οι απώλειες κοιλότητας ξαφνικά ελαττώνονται (μεγιστοποίηση Q παράγοντα) με αποτέλεσμα όλη η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί με τη μορφή αναστροφής πληθυσμού στο ενεργό μέσο να μετατραπεί σχεδόν ακαριαία σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από την κοιλότητα συντονισμού. Με την πάροδο του χρόνου, εξαιτίας φαινομένων κορεσμού, η ελαττούμενη αναστροφή πληθυσμού κάποια στιγμή φτάνει κάτω από την τιμή του κατωφλίου και τερματίζεται η δράση του Laser.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, με τη χρήση του διακόπτη Q-switch στην πηγή του Laser κατά το άνοιγμά του παράγεται ένας παλμός δέσμης Laser η ισχύς του οποίου αυξάνεται σχεδόν ακαριαία μέχρις ότου φτάσει τη μέγιστη τιμή της και μετά από ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα αυτή μηδενίζεται πάλι σχεδόν ακαριαία [73]. Ανοίγοντας και κλείνοντας περιοδικά τον διακόπτη Q-switch είναι εφικτό να παραχθούν πολλαπλοί παλμοί δέσμης Laser, η ισχύς των οποίων επηρεάζεται άμεσα από τη συχνότητα με την οποία ανοίγει ή κλείνει ο διακόπτης Q-switch καθώς και τη χρονική διάρκεια που παραμένει κάθε φορά ανοιχτός [74]. Η τεχνική του μεταγόμενου Q (Q-switching) που παρουσιάστηκε παραπάνω μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια περιοδική βηματική συνάρτηση (periodic step function) [75]. Έγινε η θεώρηση ότι στέλνονται περιοδικά στο υπό μελέτη σύστημα παλμοί δέσμης Laser με περίοδο t_{period} που αντιστοιχεί στη συχνότητα επανάληψης F_{rep} με την οποία παράγονται οι παλμοί από την πηγή του Laser με ισχύ P_{peak} και διάρκεια t_{pulse} , όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.9 \(α\)](#). Η μέγιστη ισχύς παλμού (pulse peak power) P_{peak} υπολογίζεται στη περίπτωση αυτή συναρτήσει της μέσης ισχύος (average power) P_{avg} , της διάρκειας παλμών (pulse duration-width) t_{pulse} και της συχνότητας επανάληψης παλμών (pulse repetition rate) F_{rep} από την εξίσωση (3.12).

$$P_{\text{peak}} = \frac{P_{\text{avg}}}{t_{\text{pulse}} F_{\text{rep}}} \quad (3.12)$$

Όσον αφορά το θερμικό μοντέλο της εισερχόμενης δέσμης Laser, καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωσή του έχει το προφίλ της δέσμης Laser (Beam profile). Το προφίλ της δέσμης περιγράφει την κατανομή που έχει η ένταση σε μία εγκάρσια τομή της δέσμης. Οι δέσμες με κατανομή Gauss (gaussian beams) είναι οι απλούστερες και συχνά αποτελούν τον περισσότερο επιθυμητό τύπο δέσμης που παράγεται από μια πηγή Laser. Η κατανομή της έντασης που αντιπροσωπεύει μια δέσμη προκύπτει από τις συνοριακές συνθήκες της οπτικής κοιλότητας αντήχησης-συντονισμού στην οποία παράγεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του Laser [76]. Η καμπυλότητα των κατόπτρων της κοιλότητας συντονισμού και η αξονική μεταξύ τους απόσταση προσδιορίζουν το μέγεθος και τη θέση της περιοχής που εμφανίζεται η υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας ή ένταση στη δέσμη. Μια τυπική διάταξη για την παραγωγή Laser στερεάς κατάστασης ή αερίου αποτελείται από μια ομοεστιακή κοιλότητα (confocal cavity) που απαρτίζεται από δύο κάτοπτρα σε καθορισμένη απόσταση μεταξύ τους, με καθορισμένες καμπυλότητες και κατάλληλο προσανατολισμό ώστε το ένα κάτοπτρο να εστιάζει επακριβώς στο κάτοπτρο απέναντί του [77]. Σε αυτή την ιδανική περίπτωση τότε παράγεται μια δέσμη με κατανομή Gauss για το προφίλ της έντασης χωρίς να εμφανίζονται ανωμαλίες στο προφίλ της.



Σχήμα 3.9: (α) Μοντελοποίηση της τεχνικής του μεταγόμενου Q (Q-switching) με τη χρήση μιας περιοδικής βηματικής συνάρτησης (β) Ιδανική κοιλότητα αντήχησης (άνω) που παράγει δέσμη Laser με κατανομή Gauss **TEM₀₀** της έντασης και κοιλότητα αντήχησης με μια μικρή ατέλεια στον προσανατολισμό του κατόπτρου (κάτω) που παράγει δέσμη Laser με κατανομή **TEM₀₁**

Στην πράξη, αρκετές φορές εμφανίζονται ορισμένες ατέλειες στην κατασκευή της κοιλότητας αντήχησης, με τη συχνότερα εμφανιζόμενη να είναι η απόκλιση μεταξύ των απέναντι κατόπτρων της φαίνεται στο [σχήμα 3.9 \(β\)](#). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανωμαλίες στην κατανομή της έντασης της παραγόμενης δέσμης και τον υποβιβασμό της ποιότητάς της [78]. Έτσι, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των κοιλοτήτων αντήχησης έχει δημιουργηθεί μια κατηγοριοποίηση σχετικά με την κατανομή της έντασης που προκύπτει για τις παραγόμενες δέσμες Laser που ονομάζονται εγκάρσιοι τρόποι ταλάντωσης (transverse electromagnetic modes TEM). Η δέσμη Gauss συμβολιζόμενη ως **TEM₀₀** αποτελεί την χαμηλότερη βαθμίδα εγκάρσιου τρόπου ταλάντωσης και είναι αυτή που λαμβάνεται στην πλειονότητα των περιπτώσεων από τις κοιλότητες συντονισμού.

Για τη μοντελοποίηση της εισερχόμενης δέσμης στο σύστημα από το κέντρο κατεργασιών Laser έγινε η παραδοχή ότι η δέσμη Laser συμπεριφέρεται σαν μια δέσμη Gauss [79–82] που προσεγγίζει την επιφάνεια του υλικού του προς κατεργασία τεμαχίου με διάμετρο D_{spot} στο σημείο εστίασης. Η ένταση μιας δέσμης Laser με κατανομή Gauss είναι συμμετρική ως προς τον άξονα της δέσμης, παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της στο κέντρο και φθίνει καθώς αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο της δέσμης κάθετα στη διεύθυνση διάδοδής της. Η ένταση της δέσμης I_{in} σε μια θέση που ορίζεται από ένα σημείο x της επιφάνειας που προσπίπτει η δέσμη [83,84] προσδιορίζεται από την εξίσωση (3.13) :

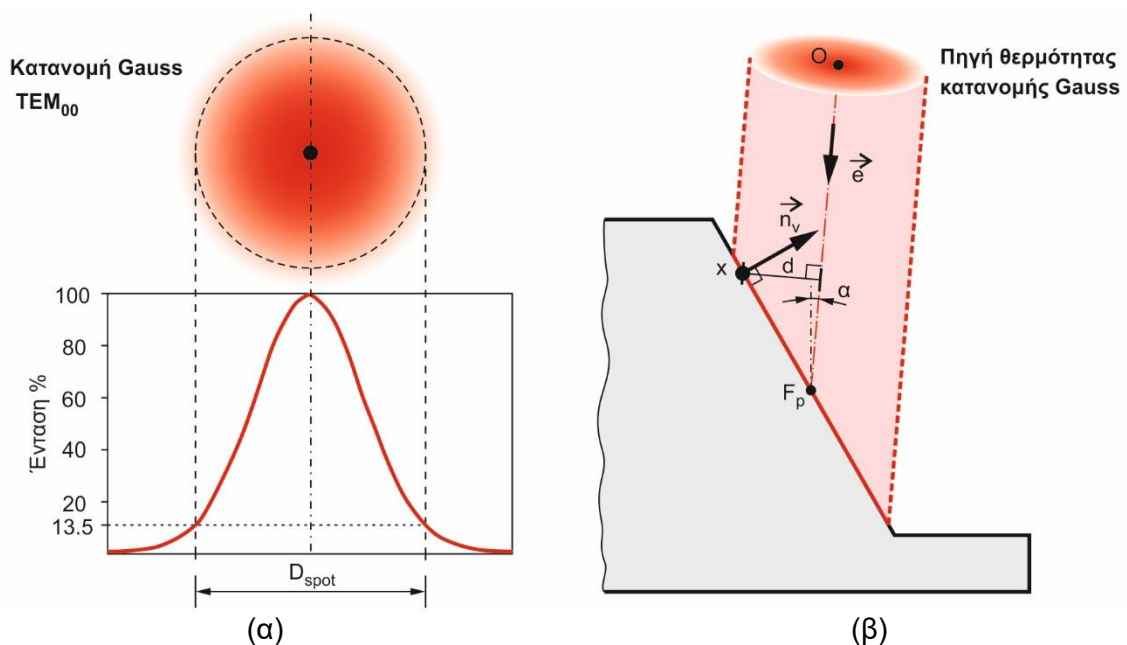
$$I_{in} = \frac{2P_{pulse}}{\pi R_{spot}^2} e^{-2\frac{d^2}{R_{spot}^2}} \quad (3.13)$$

όπου P_{pulse} είναι η ισχύς του παλμού της δέσμης Laser συναρτήσει του χρόνου, R_{spot} είναι η ακτίνα της δέσμης Laser μετρούμενη στη θέση που η ένταση έχει το $1/e^2=13.5\%$ της μέγιστης τιμής της, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.10 \(α\)](#) και d είναι η κάθετη απόσταση του σημείου ενδιαφέροντος $x(x,y,z)$ από τον άξονα της δέσμης Laser η οποία ξεκινά από ένα αρχικό σημείο **O** (beam origin point) και κατευθύνεται προς το σημείο εστίασης με συντεταγμένες $F_p(x_{focus}, y_{focus}, z_{focus})$.

Κατά την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία επειδή υιοθετείται μια τεχνική μετακίνησης του πλέγματος του τεμαχίου για τη μοντελοποίηση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού, η συνοριακή επιφάνεια στην οποία συναντά η δέσμη το υλικό του τεμαχίου δεν θα είναι κάθετη στον άξονα της δέσμης. Θεωρώντας \mathbf{e} το διάνυσμα που προσδιορίζει τη διεύθυνση του άξονα της δέσμης (διεύθυνση που ορίζεται από την ευθεία που διέρχεται το σημείο O και το σημείο $F_p(x_{focus}, y_{focus}, z_{focus})$), το διάνυσμα αυτό δεν απαιτείται να είναι κανονικοποιημένο) και \mathbf{n}_v το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στη θέση του σημείου $\mathbf{x}(x, y, z)$ της κεκλιμένης επιφάνειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10 (β) τότε η κάθετη απόσταση d μεταξύ σημείου \mathbf{x} και του άξονα της δέσμης υπολογίζεται από την εξίσωση (3.14). Για να υπολογιστεί η πυκνότητα ενέργειας που προσπίπτει σε κάθε θέση \mathbf{x} της υπό κλίση επιφάνειας I_{inc} διατηρώντας το ενεργειακό ισοζύγιο, γίνεται χρήση της εξίσωσης (3.15).

$$d = \frac{\|\vec{e} \times (\mathbf{x} - O)\|}{\|\vec{e}\|} \quad (3.14)$$

$$I_{inc} = I_{in} \frac{|\vec{e} \cdot \vec{n}_v|}{\|\vec{e}\|} \quad (3.15)$$

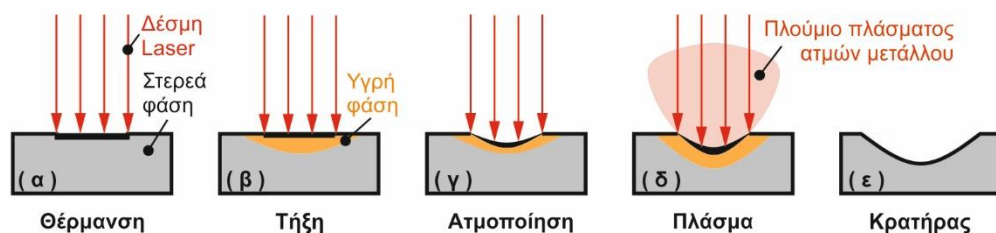


Σχήμα 3.10: (α) Προσδιορισμός διαμέτρου δέσμης με κατανομή Gauss D_{spot} στο σημείο εστίασης (β) Διάνυσμα που ορίζει τη διεύθυνση της δέσμης \mathbf{e} και μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια \mathbf{n}_v για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος που προσπίπτει σε μια θέση \mathbf{x} της κεκλιμένης επιφάνειας

Προηγουμένως παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση σχετικά με τη δέσμη Laser όπως αυτή παράγεται από το κέντρο κατεργασιών Laser και εισέρχεται στο προς μελέτη σύστημα. Στη συνέχεια θα μελετηθούν και θα μοντελοποιηθούν κατάλληλα για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, οι μεταβολές που υφίσταται η δέσμη μέχρι την πρόσπτωσή της στο τεμάχιο από τα διάφορα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτή απορροφάται από το υλικό του τεμαχίου. Προκειμένου να γίνουν κατανοητοί οι βασικοί μηχανισμοί που συντελούν στην αφαίρεση του υλικού από ένα παλμό Laser οι οποίοι θα αναλυθούν διεξοδικά στη συνέχεια, παρουσιάζεται αρχικά μια συνοπτική περιγραφή της εξέλιξης της κατεργασίας για ένα παλμό σύμφωνα με το σχήμα 3.11.

Έστω ότι ένα τεμάχιο έχει τοποθετηθεί στο κέντρο κατεργασιών, έχουν πραγματοποιηθεί οι κατάλληλες ρυθμίσεις στη μηχανή ώστε η δέσμη που πρόκειται να σταλεί να είναι εστιασμένη στην επιφάνεια του τεμαχίου, έχουν οριστεί οι συνθήκες κατεργασίας και είναι όλα έτοιμα για την έναρξη. Τότε η πηγή του Laser ξεκινά να παράγει μια δέσμη καθορισμένης ισχύος η οποία διέρχεται από την κεφαλή σάρωσης, τον φακό εστίασης και τελικά προσπίπτει στο τεμάχιο που βρίσκεται στην αρχική του θερμοκρασία. Καθώς η δέσμη προσπίπτει στο τεμάχιο, ένα μέρος της ισχύος απορροφάται προσφέροντας θερμική ενέργεια στο τεμάχιο, ενώ το υπόλοιπο επιστρέφει στο περιβάλλον με τη μορφή απωλειών. Καθώς εισέρχεται μια ροή θερμότητας στο υλικό του τεμαχίου η θερμοκρασία του αρχίζει να αυξάνεται τοπικά σταδιακά.

Κάποια στιγμή, λόγω της ιδιαίτερα υψηλής τιμής της έντασης της δέσμης, η θερμοκρασία του υλικού στην επιφάνεια υπερβαίνει τη θερμοκρασία τήξης του, το υλικό τήκεται και μεταβαίνει δηλαδή στην υγρή φάση. Καθώς συνεχίζεται να παρέχεται θερμότητα από τη δέσμη Laser, η θερμοκρασία του υλικού τοπικά φτάνει κάποια στιγμή τη θερμοκρασία βρασμού με αποτέλεσμα το υλικό να μετατραπεί σε ατμό και να απομακρυνθεί από το τεμάχιο. Ο ατμός μετάλλου που παράγεται πάνω από την επιφάνεια του τεμαχίου από την ατμοποίηση του υλικού εξαιτίας του ότι ακτινοβολείται από τη δέσμη Laser, συντελεί στην ανάπτυξη των κατάλληλων συνθηκών για τη δημιουργία πλάσματος. Το στρώμα από το πλάσμα που σχηματίζεται δημιουργεί με τη σειρά του απώλειες στη δέσμη Laser κατά τη διέλευσή της εντός του, ενώ με τη σειρά του και αυτό προσφέρει στο τεμάχιο ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολίας. Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου ο παλμός Laser φτάσει στο τέλος του και σταματήσει να παρέχει ενέργεια. Από το υλικό που έχει αφαιρεθεί με τη μορφή ατμού από το τεμάχιο κατά τη διάρκεια του παλμού, σχηματίζεται ο ανάλογος κρατήρας.

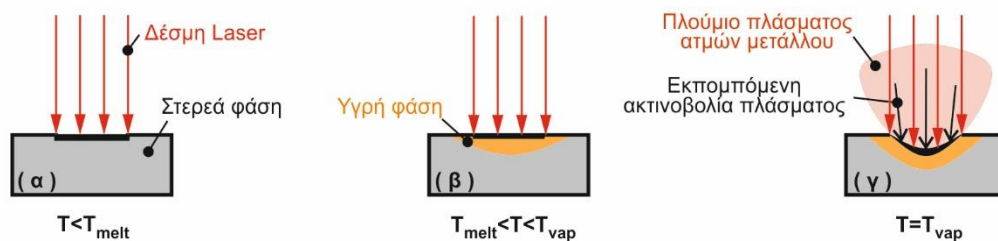


Σχήμα 3.11: Χρονική εξέλιξη της κατεργασίας χάραξης για ένα παλμό δέσμης Laser νανοδευτερολέπτων (α) θέρμανση (β) τήξη (γ) ατμοποίηση (δ) πλάσμα (ε) κρατήρας

Προκειμένου να αναπτυχθεί το θερμικό μοντέλο της απορρόφησης της προσπίπτουσας δέσμης Laser στο τεμάχιο και να αναλυθούν τα φαινόμενα που συνεισφέρουν στις επιμέρους φάσεις εξέλιξης της κατεργασίας, διαχωρίζονται τρεις περιπτώσεις, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.12](#) με κριτήριο την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στο υλικό που προσπίπτει η δέσμη. Στην πρώτη περίπτωση, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία είναι μικρότερη της θερμοκρασίας τήξης του υλικού. Στην δεύτερη περίπτωση, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία του υλικού έχει υπερβεί τη θερμοκρασία τήξης αλλά είναι μικρότερη της θερμοκρασίας βρασμού. Στην τρίτη περίπτωση, η θερμοκρασία του υλικού έχει φτάσει τη θερμοκρασία βρασμού. Κάθε μια από τις τρεις επιμέρους περιπτώσεις αναλύεται ξεχωριστά στη συνέχεια μια και εμφανίζουν διαφοροποιήσεις σχετικά με τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

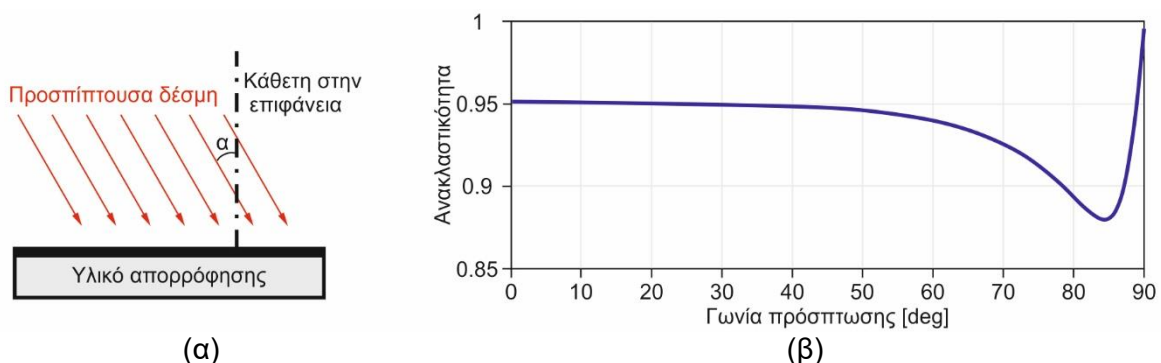
Στην πρώτη περίπτωση που παρουσιάζεται στο [σχήμα 3.12 \(α\)](#), η δέσμη Laser ακτινοβολεί το υλικό της επιφάνειάς του τεμαχίου του οποίου η θερμοκρασία είναι ακόμα μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης και συνεπώς το υλικό βρίσκεται σε στερεά κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή μόνο ένα μικρό μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από το υλικό του τεμαχίου ενώ το υπόλοιπο διαφεύγει στο περιβάλλον εξαιτίας των ανακλάσεων. Η ανακλαστικότητα του υλικού

στην προσπίπτουσα ακτινοβολία της δέσμης έχει καθοριστικό ρόλο για την κατεργασία. Πρόκειται για μια οπτική ιδιότητα του υλικού και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας [85], τη θερμοκρασία του υλικού [86], την κατάσταση της ύλης του υλικού (στερεά ή υγρή φάση) [87], την ποιότητα επιφάνειας [88] και τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης [89]. Όσον αφορά το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, ισχύει ότι φωτόνια με μικρά μήκη κύματος έχουν περισσότερη ενέργεια και απορροφώνται ευκολότερα από τα υλικά σε σχέση με αυτά με μεγαλύτερα μήκη κύματος. Συνεπώς, η ανακλαστικότητα των υλικών μειώνεται καθώς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας μικραίνει και αυξάνεται η απορροφητικότητα της. Η θερμοκρασία του υλικού επιδρά σημαντικά στην ανακλαστικότητα, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού μειώνεται σημαντικά η ανακλαστικότητά του στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ακόμα, καθώς η ανακλαστικότητα του υλικού είναι μια ιδιότητα που σχετίζεται άμεσα με τα επιφανειακά στρώματα του υλικού, αυτή επηρεάζεται άμεσα από την τραχύτητα επιφάνειας και από την τυχόν ύπαρξη επικαλύψεων ή οξειδίων [90]. Τέλος, η ανακλαστικότητα του υλικού μεταβάλλεται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης που σχηματίζει η δέσμη με την επιφάνεια που ακτινοβολεί.



Σχήμα 3.12: Ανάπτυξη θερμικού μοντέλου απορρόφησης της προσπίπτουσας δέσμης Laser: διαχωρισμός τριών περιπτώσεων με κριτήριο την θερμοκρασία του υλικού.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ανακλαστικότητας R μιας δέσμης Laser με γωνίας πρόσπτωσης α σε μια ιδανικά λεία και επίπεδη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13 (α) χρησιμοποιείται ο τύπος του Fresnel που παρουσιάζεται στην εξίσωση (3.16) [91] όπου n_{coef} ο δείκτης διάθλασης (refraction coefficient) και k_{coef} ο συντελεστής εξάλειψης (extinction coefficient) του υλικού. Με τον προσδιορισμό των οπτικών σταθερών n_{coef} και k_{coef} για τα διάφορα υλικά συναρτήσει του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, έχουν ασχοληθεί αρκετοί ερευνητές.

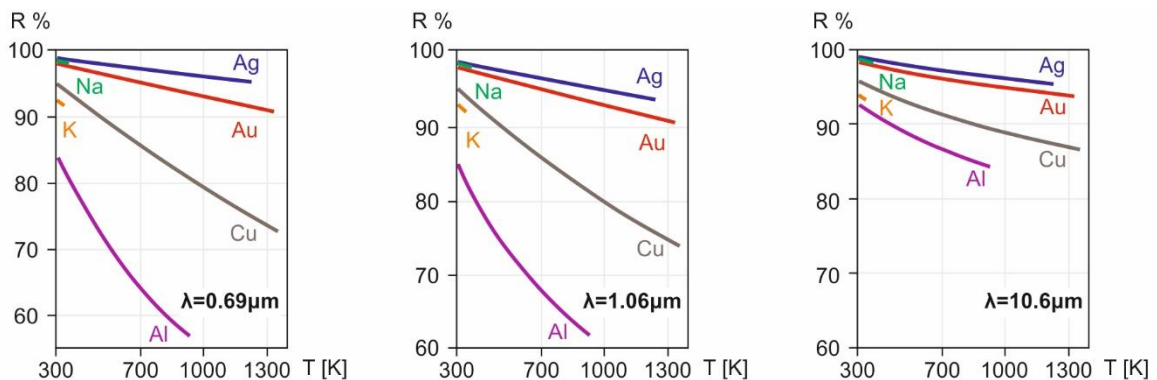


Σχήμα 3.13: (α) Σχηματική αναπαράσταση της πρόσπτωσης της δέσμης Laser σε ιδανικά επίπεδη και λεία επιφάνεια (β) Συντελεστής ανακλαστικότητας R συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης α για ακτινοβολία αλουμινίου με δέσμη Laser μήκους κύματος $1.064\mu\text{m}$ με βάση τις τιμές των οπτικών συντελεστών κατά Rakic [92].

Για παράδειγμα με βάση τη μελέτη του Rakic [92] για την ακτινοβολή αλουμινίου με δέσμη Laser μήκους κύματος $1.064\mu\text{m}$, προκύπτουν οπτικοί συντελεστές $n_{\text{coef}}=1.3763$, $k_{\text{coef}}=10.2450$ που τοποθετώντας τους στην εξίσωση (3.16) για τιμές της γωνίας πρόσπτωσης α από 0 μέχρι 90° προκύπτει ο συντελεστής ανακλαστικότητας R που φαίνεται στο σχήμα 3.13 (β). Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13 (β) ο συντελεστής ανακλαστικότητας επηρεάζεται ελάχιστα για σχετικά μικρές γωνίες πρόσπτωσης, όπως αυτές που εμφανίζονται κατά τη χάραξη με παλμούς δέσμης Laser επίπεδων επιφανειών.

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{(n_{\text{coef}} - \cos\alpha)^2 + k_{\text{coef}}^2}{(n_{\text{coef}} + \cos\alpha)^2 + k_{\text{coef}}^2} + \frac{(n_{\text{coef}} - (1/\cos\alpha))^2 + k_{\text{coef}}^2}{(n_{\text{coef}} + (1/\cos\alpha))^2 + k_{\text{coef}}^2} \right) \quad (3.16)$$

Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται ο συντελεστής ανακλαστικότητας (reflectance coefficient) διαφόρων υλικών, όπως νάτριο, κάλιο, άργυρος, χρυσός, χαλκός και αλουμίνιο υπό την επίδραση δεσμών Laser με μήκη κύματος $0.69\mu\text{m}$, $1.06\mu\text{m}$ και $10.6\mu\text{m}$ συναρτήσει της θερμοκρασίας, όπως μετρήθηκε από τον Kikuo Ujihara [93]. Παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις της ανακλαστικότητας της δέσμης είναι μεγάλες ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό, την θερμοκρασία του και το μήκος κύματος της δέσμης Laser. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη κάποια μελέτη ή ερευνητική εργασία στη βιβλιογραφία που να λαμβάνει υπόψη όλους τους παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση του συντελεστή ανακλαστικότητας κατά την ακτινοβολή του υλικού ενός πραγματικού τεμαχίου με μια δέσμη Laser. Συνεπώς, για την επιλογή του κατάλληλου συντελεστή, πρέπει να γίνεται αξιολόγηση σχετικά με το ποιοι παράγοντες έχουν την κυρίαρχη επίδραση και να αξιοποιούνται οι τιμές από την αντίστοιχη εργασία.



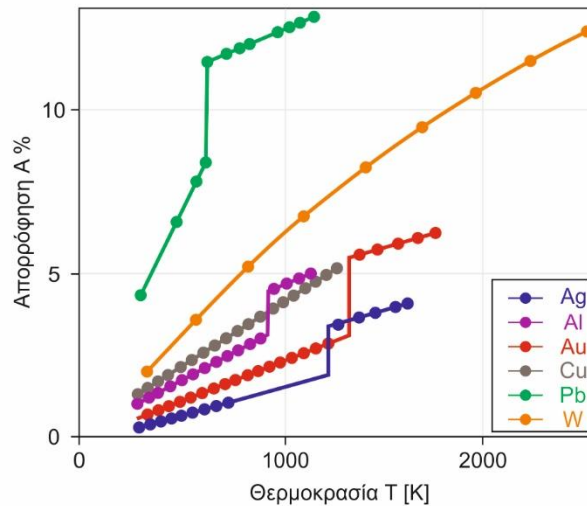
Σχήμα 3.14: Τιμές του συντελεστή ανακλαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορα υλικά (νάτριο, κάλιο, άργυρος, χρυσός, χαλκός, αλουμίνιο) σε στερεά φάση για Laser με μήκη κύματος $0.69\mu\text{m}$, $1.06\mu\text{m}$, $10.6\mu\text{m}$, όπως μετρήθηκαν από τον Kikuo Ujihara [93]

Για να συμπεριληφθούν οι απώλειες λόγω ανακλαστικότητας κατά τη μοντελοποίηση χρησιμοποιείται ο **συντελεστής ανακλαστικότητας**. Η πυκνότητα ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο q_{abs} για την περίπτωση που η θερμοκρασία του υλικού T είναι μικρότερη της θερμοκρασίας τήξης T_{melt} , υπολογίζεται συναρτήσει της έντασης της προσπίπτουσας δέσμης I_{inc} και του συντελεστή ανακλαστικότητας για τη στερεά φάση R_{solid} από την εξίσωση (3.17). Επισημαίνεται ότι για τη μοντελοποίηση της απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της δέσμης επιλέχθηκε ένα μοντέλο επιφανειακής πηγής, επειδή για παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων σε μέταλλα, το βάθος

απορρόφησης-διείσδυσης της ακτινοβολίας (absorption-penetration depth) είναι απειροστά μικρό σε σχέση με το βάθος που διαχέεται η θερμότητα εντός του υλικού (heat diffusion depth) αλλά και τις υπόλοιπες διαστάσεις των μεγεθών που μελετώνται (π.χ. διάμετρος δέσμης) στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία [45].

$$q_{abs} = I_{inc} (1 - R_{solid}), \quad T < T_{melt} \quad (3.17)$$

Στη δεύτερη περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12 (β), η θερμοκρασία του υλικού που ακτινοβολείται έχει υπερβεί τη θερμοκρασία τήξης αλλά δεν έχει φτάσει ακόμα τη θερμοκρασία βρασμού. Δηλαδή το υλικό βρίσκεται στην υγρή φάση και συνεχίζει να αυξάνεται η θερμοκρασία του λόγω της εισερχόμενης θερμικής ενέργειας από τη δέσμη Laser. Όταν το υλικό φτάσει στη θερμοκρασία τήξης και το μέταλλο υποστεί αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό, τότε συμβαίνει ένα σημαντικό άλμα στην πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας (conduction electrons) τα οποία είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της τελευταίας μη κατειλημμένης ζώνης του υλικού και είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά θερμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας απότομης αύξησης της απορροφητικότητας (αντίστοιχα μείωση της ανακλαστικότητας) του υλικού στη δέσμη Laser η οποία μπορεί να είναι της τάξης μέχρι και του 150-200% [94]. Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται ως παράδειγμα η μεταβολή του συντελεστή απορροφητικότητας (absorption coefficient) κατά την αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό για διάφορα μέταλλα όπως άργυρος, αλουμίνιο, χρυσός, χαλκός, μόλυβδος, βολφράμιο υπό την επίδραση Laser διοξειδίου του άνθρακα, όπως υπολογίστηκε από το αριθμητικό μοντέλο του Prokhorov και άλλων [95]. Με βάση τα παραπάνω, για την περίπτωση που η θερμοκρασία του υλικού είναι μεταξύ της θερμοκρασίας τήξης T_{melt} και της θερμοκρασίας βρασμού T_{vap} , η πυκνότητα ενέργειας που απορροφάται από το υλικό q_{abs} υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το συντελεστή ανακλαστικότητας για την υγρή φάση R_{liquid} από την εξίσωση (3.18).



Σχήμα 3.15: Τιμές του συντελεστή απορροφητικότητας πριν και μετά την αλλαγή φάσης για ορισμένα μέταλλα (άργυρος, αλουμίνιο, χρυσός, χαλκός, μόλυβδος, βολφράμιο) υπό την επίδραση δέσμης Laser διοξειδίου του άνθρακα, όπως υπολογίστηκαν από το αριθμητικό μοντέλο του Prokhorov και άλλων [95]

$$q_{abs} = I_{inc} (1 - R_{liquid}), \quad T_{melt} < T < T_{vap} \quad (3.18)$$

Όταν η θερμοκρασία του υλικού φτάσει τοπικά στη θερμοκρασία βρασμού, τότε ο μηχανισμός αφαίρεσης υλικού (laser ablation) αρχίζει να λαμβάνει χώρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12 (γ). Το υλικό αρχίζει να ατμοποιείται, μετασχηματίζεται δηλαδή σε αέρια φάση και

απομακρύνεται από το προς μελέτη σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση το υλικό που απορροφά την ακτινοβολία της δέσμης βρίσκεται στην υγρή φάση και ταυτόχρονα υλοποιείται η αλλαγή φάσης του σε ένα πάρα πολύ λεπτό επιφανειακό στρώμα (Knudsen layer) το οποίο για μέταλλα είναι της τάξεως των 0.1μm [96]. Ο ατμός από το υλικό που έχει αφαιρεθεί σε πρώτη φάση σχηματίζει ένα στρώμα πάνω από την επιφάνεια του υλικού. Ο ατμός μετάλλου αλληλοεπιδρά όμως κι αυτός με τη σειρά του με την εισερχόμενη δέσμη Laser και απορροφά ένα μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στον ιονισμό του και στη δημιουργία πλάσματος υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πυκνότητας ηλεκτρονίων [97]. Το πλούμιο από το πλάσμα ατμών μετάλλου θωρακίζει τη δέσμη κατά τη διέλευση της από αυτό (plasma shielding), με αποτέλεσμα η ένταση της δέσμης που τελικά προσπίπτει στο τεμάχιο να είναι σημαντικά ελαττωμένη [98]. Το κατά πόσο η δέσμη θωρακίζεται και απορροφάται κατά τη διέλευσή της από το πλούμιο πλάσματος ατμών μετάλλου εξαρτάται από την πυκνότητα ιόντων-ηλεκτρονίων, τη θερμοκρασία καθώς και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας [99]. Επιπλέον, το πλάσμα που δημιουργείται πάνω από το τεμάχιο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία προσπίπτει με τη σειρά της πάνω στο τεμάχιο και του προσφέρει ένα ποσό θερμικής ακτινοβολίας.

Συνεπώς στην τρίτη περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12 (γ) όπου η θερμοκρασία του υλικού έχει φτάσει την θερμοκρασία βρασμού, για τον υπολογισμό της πυκνότητας ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες λόγω της θωράκισης της δέσμης κατά τη διέλευσή της από το πλούμιο πλάσματος ατμών μετάλλου, οι απώλειες λόγω της ανακλαστικότητας του υλικού που βρίσκεται στην υγρή φάση καθώς και η ροή θερμότητας που επιστρέφει στο τεμάχιο λόγω της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το πλάσμα. Η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης που απορροφάται από το υλικό q_{abs} στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται συναρτήσει της έντασης της προσπίπτουσας δέσμης I_{inc} από την εξίσωση (3.19), όπου ο όρος $(1-R_{liquid})$ αναφέρεται στις απώλειες λόγω ανακλαστικότητας της ακτινοβολίας, ο όρος $(1-R_{shielding})$ αναφέρεται στις απώλειες λόγω της διέλευσης της δέσμης από το πλούμιο πλάσματος ατμών μετάλλου και q_{plasma} είναι η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το πλάσμα προς το τεμάχιο.

$$q_{abs} = I_{inc} (1 - R_{liquid})(1 - R_{shielding}) + q_{plasma} , \quad T = T_{vap} \quad (3.19)$$

Θεωρώντας ότι πάνω από τη δέσμη σχηματίζεται ένα στρώμα πλάσματος υψηλής πυκνότητας ηλεκτρονίων με πάχος L_{pl} και α_{pl} είναι ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης της δέσμης στο πλάσμα, τότε ο συντελεστής απωλειών της δέσμης λόγω θωράκισης εκ του πλάσματος $R_{shielding}$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (3.20):

$$R_{shielding} = 1 - \exp(-\alpha_{pl} L_{pl}) \quad (3.20)$$

Η απορρόφηση τμήματος της έντασης της εισερχόμενης δέσμης από το πλάσμα είναι ισχυρή σε πολύ μικρή απόσταση από την επιφάνεια του υλικού όπου η πυκνότητα των σωματιδίων του πλουμίου πλάσματος ατμών μετάλλων είναι ιδιαίτερα υψηλή. Σε μεγάλες αποστάσεις από την επιφάνεια, το πλάσμα είναι σχεδόν διαπερατό στην εισερχόμενη ακτινοβολία επειδή η πυκνότητα του πλάσματος μειώνεται καθώς αυτό εξαπλώνεται. Για τη μοντελοποίηση γίνεται η θεώρηση ότι το πλάσμα έχει τη μορφή στρώματος σταθερού πάχους. Το πάχος αυτό L_{pl} θεωρείται ότι είναι ίσο με την απόσταση από την επιφάνεια του ισοθερμοκρασιακού ορίου του πλάσματος κατά τη διάδοσή του [99]. Οι τιμές του πάχους του στρώματος πλάσματος μέχρι το ισοθερμοκρασιακό όριο έχουν προσδιοριστεί πειραματικά σε ορισμένες εργασίες και έχει βρεθεί ότι για κατεργασίες μετάλλων με παλμούς δέσμης Laser υψηλής ισχύος λαμβάνει τιμές από 10 έως 100μm. Για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή απορρόφησης α_{pl} της

δέσμης στο πλάσμα αθροίζονται με βάση την εξίσωση (3.21) οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης για τους τρεις βασικούς μηχανισμούς που συμβάλουν στην απορρόφηση: ο συντελεστής **a_{IB}** για την ανάστροφη ακτινοβολία πέδησης (Inverse Bremsstrahlung IB), ο συντελεστής **a_{PI}** για τον φωτο-ιονισμό (Photoionization PI) και ο συντελεστής **a_{Mie}** για την απορρόφηση Mie (Mie absorption). Οι παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωσή του έχουν να κάνουν, τόσο με το είδος του πλουμίου πλάσματος ατμών μετάλλου, τη θερμοκρασία του, τη συγκέντρωσή του σε ουδέτερα και φορτισμένα σωματίδια, αλλά και με τα χαρακτηριστικά της δέσμης Laser όπως το μήκος κύματος της ακτινοβολίας [100].

$$a_{pl} = a_{IB} + a_{PI} + a_{Mie} \quad (3.21)$$

Ο μηχανισμός ανάστροφης ακτινοβολίας πέδησης (Inverse Bremsstrahlung IB) περιλαμβάνει την απορρόφηση φωτονίων από ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται μέσω του ηλεκτρικού πεδίου ενός ουδέτερου ατόμου ή ιόντος. Περιγράφει δηλαδή την αύξηση της κινητικής ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά την κρούση των φωτονίων της δέσμης με τα ουδέτερα άτομα ή ιόντα [101]. Όπως έχει προκύψει από πειράματα στη βιβλιογραφία, ο μηχανισμός ανάστροφης ακτινοβολίας πέδησης έχει σημαντική επίδραση για δέσμες Laser υπέρυθρης ακτινοβολίας (infrared radiation) με μεγάλα μήκη κύματος, διότι ο συντελεστής απορρόφησης για τη διαδικασία IB είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη συχνότητα της ακτινοβολίας. Σε χαμηλά μήκη κύματος, ο συντελεστής απορρόφησης για τη διαδικασία IB έχει σημαντική επίδραση μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες του πλάσματος, όταν η πυκνότητα αριθμού ηλεκτρονίων είναι υψηλή. Ο συντελεστής απορρόφησης που αναφέρεται στην ανάστροφη ακτινοβολίας πέδησης **a_{IB}** υπολογίζεται από την εξίσωση (3.22):

$$a_{IB} = 4.1 * 10^{-23} \frac{Z^2 N_i N_e}{T_p^{\frac{7}{2}}} \left(\frac{k T_p}{h v} \right)^3 \left(1 - \exp \left(- \frac{h v_{beam}}{k T_p} \right) \right) \quad (3.22)$$

όπου **Z** μέσος αριθμός του φορτίου ιόντων (average ion charge), **N_i** και **N_e** είναι οι πυκνότητες ιόντων και ηλεκτρονίων αντίστοιχα ανά cm³, **T_p** η θερμοκρασία ιόντων και ηλεκτρονίων σε βαθμούς Kelvin, **h** η σταθερά του Plank, **k** η σταθερά του Boltzmann και **v_{beam}** η συχνότητα της ακτινοβολίας της δέσμης Laser.

Ο φωτο-ιονισμός (photoionization PI) περιγράφει τον μηχανισμό κατά τον οποίο συμβαίνει απορρόφηση ενός φωτονίου σε ένα ουδέτερο άτομο το οποίο ιονίζεται. Ο συντελεστής απορρόφησης για τον φωτο-ιονισμό **a_{PI}** που υπολογίζεται από την εξίσωση (3.23) έχει κυρίαρχο ρόλο για δέσμες Laser με υψηλή ένταση διότι αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες πλάσματος και τα άτομα των ατμών μετάλλου γίνονται θερμικά διεγερμένα.

$$a_{PI} = \sigma_p N_{ie}, \sigma_p = 7.9 * 10^{-18} \left(\frac{E_1^*}{h v} \right)^3 \left(\frac{I_H}{E_1^*} \right)^{0.5} \quad (3.23)$$

όπου **N_{ie}** είναι η πυκνότητα που προκύπτει αθροιστικά για τα άτομα και ιόντα, **E₁^{*}** η τυπική ενέργεια ιονισμού (ionisation energy) για διεγερμένες καταστάσεις που μπορεί να συμβεί φωτο-ιονισμός, **h v** η ενέργεια του φωτονίου και **I_H** δυναμικό ιονισμού (ionization-potential) του υδρογόνου.

Ο μηχανισμός της απορρόφησης Mie αφορά την απορρόφηση της φωτεινής δέσμης από μικρά σωματίδια εντός του πλουμίου που έχουν διάμετρο της τάξεως των 10nm και παράγονται από τη συμπύκνωση του υπερκορεσμένου ατμού μετάλλου [102]. Όπως έχει προκύψει από

πειραματικές δοκιμές [103], ο μηχανισμός της απορρόφησης Mie έχει υπολογίσιμη επίδραση για χαμηλές τιμές της έντασης της δέσμης κατά την οποία οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες είναι μικρές και εμφανίζεται υψηλός ρυθμός συμπίκνωσης του υπερκορεσμένου ατμού μετάλλου. Ως εκ τούτου, για την περίπτωση της κατεργασίας που μελετάται, για την οποία η ένταση της δέσμης έχει μεγάλες τιμές, μπορεί να παραληφθεί.

Όσον αφορά την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το πλάσμα, οι κυρίαρχοι μηχανισμοί που εμφανίζονται και την περιγράφουν είναι δύο και διακρίνονται ανάλογα με το αν το σχηματιζόμενο πλάσμα είναι ψυχρό ή θερμό (cold or hot plasma). Από τα αρχικά στάδια εμφάνισης του πλουμίου πλάσματος ατμών μετάλλου που το πλάσμα συμπεριφέρεται σαν ψυχρό πλάσμα, αυτό εκπέμπει ακτινοβολία ως μέλαν σώμα (black body radiation), ακτινοβολία που υπολογίζεται με βάση το νόμο του Stefan-Boltzmann. Όμως, λόγω του ότι η επιφάνεια που καλύπτει το πλάσμα καθώς και η θερμοκρασία του είναι περιορισμένες η ισχύς της ακτινοβολίας που εκπέμπεται είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με την ισχύ της δέσμης [104]. Όταν υπάρχει αρκετή εισερχόμενη ενέργεια στο πλάσμα ώστε να ιονιστεί πλήρως και να μετατραπεί σε ένα θερμό πλάσμα, τότε συνεισφέρει στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία και η ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung radiation). Με βάση τη βιβλιογραφία κατά την αφαίρεση υλικού με δέσμη Laser όταν η πυκνότητα ισχύος της δέσμης είναι της τάξεως των GW/cm^2 , τότε το πλάσμα που παράγεται θεωρείται ως ψυχρό (θερμοκρασία των ηλεκτρονίων της τάξεως του eV, τιμές της πυκνότητας στο εύρος 10^{13} - 10^{18}cm^{-3}). Για πυκνότητα ισχύος με τιμές που υπερβαίνουν το $1 \text{ PW}/\text{cm}^2$ μπορεί να σχηματιστεί θερμό πλάσμα [105]. Καθώς οι τιμές της έντασης στην κατεργασία που μελετάται ανήκουν στην τάξη των GW/cm^2 , το πλάσμα είναι ψυχρό και συνεπώς μόνο η ακτινοβολία του μέλανος σώματος λαμβάνεται υπόψη. Από την ακτινοβολία που εκπέμπει το πλάσμα και προσπίπτει στο υλικό, μόνο ένα μέρος της έντασής της απορροφάται επειδή το υλικό χαρακτηρίζεται από μια ανακλαστικότητα έναντι της ακτινοβολίας του πλάσματος. Έτσι, η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το πλάσμα και επιστρέφει στο υλικό του τεμαχίου q_{plasma} δίνεται από την εξίσωση (3.24):

$$q_{\text{plasma}} = I_p(1 - R_p) \quad (3.24)$$

$$I_p = \sigma T_p^4 (1 - \exp(-\sigma_p N_{ie} L_{pl})) \quad (3.25)$$

όπου I_p η ένταση της ακτινοβολίας μέλανος σώματος που εκπέμπεται από το πλάσμα και δίνεται από την εξίσωση (3.25), R_p είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας για την ακτινοβολία του πλάσματος και σ η σταθερά Stefan.

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες	Τιμή
E_1^*	Τυπική ενέργεια ιονισμού	eV	1.24
$h\nu$	Ενέργεια φωτονίου	eV	1.165
I_H	Δυναμικό ιονισμού του υδρογόνου	eV	13.6
k	Σταθερά Boltzmann	J/K	$1,38 \times 10^{-23}$
L_{pl}	Απόσταση από επιφάνεια του ισοθερμοκρασιακού ορίου πλάσματος	μm	10-100
N_i	Πυκνότητα ιόντων	cm^{-3}	5×10^{18}
N_e	Πυκνότητα ηλεκτρονίων	cm^{-3}	5×10^{18}
R_p	Ανακλαστικότητα για ακτινοβολία πλάσματος	-	0.25
T_p	Θερμοκρασία ιόντων και ηλεκτρονίων	K	34800
Z	Μέσος αριθμός του φορτίου ιόντων	-	2
σ	Σταθερά Stefan	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	5.67×10^{-8}

Πίνακας 3.1: Τιμές για σταθερές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο προσομοίωσης

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές για τις σταθερές και ορισμένες παραμέτρους που θεωρούνται αμετάβλητες για τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο προσομοίωσης.

3.4.3 Αφαίρεση υλικού και μετακίνηση πλέγματος

Για τη μοντελοποίηση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού από παλμό δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων και τον υπολογισμό των μεταβολών που υφίσταται η γεωμετρία του τεμαχίου χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος μετακίνησης πλέγματος (moving mesh method), συνδυασμένη με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες που αφορούν την αφαίρεση του υλικού. Η μέθοδος μετακίνησης πλέγματος είναι μια χρήσιμη μέθοδος για τον προσδιορισμό των αλλαγών που υφίσταται η γεωμετρία (στην προκειμένη περίπτωση το πλέγμα) του τεμαχίου εξαιτίας διαφόρων φυσικών μηχανισμών [106]. Κατά την αλληλεπίδραση του παλμού δέσμης Laser με το υλικό του τεμαχίου κάποια χρονική στιγμή το υλικό φτάνει τη θερμοκρασία βρασμού, μετατρέπεται σε ατμό μετάλλου και απομακρύνεται από το προς μελέτη σύστημα ενδιαφέροντος. Στο μοντέλο λοιπόν πρέπει αφενός μεν να εισαχθεί μια θερμική συνοριακή συνθήκη που θα εξασφαλίζει ότι, παρά την εισερχόμενη ενέργεια από τη δέσμη Laser, το υλικό δεν μπορεί να υπερβεί τη θερμοκρασία βρασμού λόγω των απωλειών θερμότητας από την απομάκρυνση του υλικού (material ablation) και αφετέρου να αναπτυχθεί μια μέθοδος που να μοντελοποιεί τη μεταφορά-απομάκρυνση μάζας (mass transfer-removal) από το σύστημα.

Η θερμική συνοριακή συνθήκη χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την πυκνότητα ενέργειας που αφαιρείται από την επιφάνεια του υλικού, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η θερμοκρασία του υλικού δεν μπορεί να υπερβεί τη θερμοκρασία βρασμού παρά την υψηλή πυκνότητα ισχύος που εισέρχεται. Έτσι, τηρώντας το ενεργειακό ισοζύγιο, εισάγεται ο όρος της ροής θερμότητας λόγω απομάκρυνσης υλικού (ablative heat flux). Η ροή θερμότητας που εξέρχεται από το σύστημα λόγω της απομάκρυνσης του υλικού q_{abl} υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο μεταφοράς του Νεύτωνα στη θερμική μορφή του (heat-transfer version of Newton's law) από την εξίσωση (3.26):

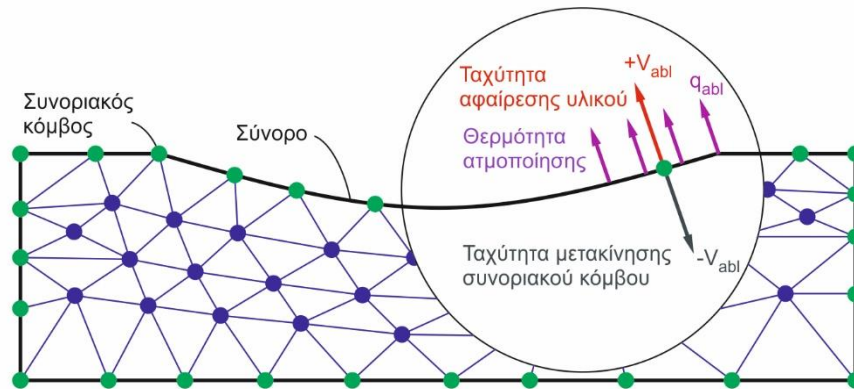
$$q_{abl} = h_a (T_{vap} - T) \quad (3.26)$$

$$h_a(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{vap} \\ 10^9(T - T_{vap}), & T \geq T_{vap} \end{cases} \quad (3.27)$$

όπου T_{vap} η θερμοκρασία βρασμού του υλικού, T η θερμοκρασία του υλικού στην εκάστοτε επανάληψη (iteration) του χρονικού βήματος (time step) της επίλυσης και h_a είναι ιδεατός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Ο ιδεατός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_a υπολογίζεται από την εξίσωση (3.27). Είναι εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία και ισούται με το μηδέν για θερμοκρασίες του υλικού μικρότερες από την θερμοκρασία βρασμού αφού τότε δεν εμφανίζεται αφαίρεση υλικού και συνεπώς δεν υπάρχει (μηδενίζεται) η σχετική ροή θερμότητας. Ο συντελεστής h_a αυξάνεται απότομα με μια πολύ απότομη κλίση όταν η θερμοκρασία του υλικού υπερβαίνει τη θερμοκρασία βρασμού με σκοπό να εξασφαλίσει ότι στις ενδιάμεσες επαναλήψεις της επίλυσης θα αφαιρεθεί όλη η απαιτούμενη θερμότητα έτσι ώστε η θερμοκρασία του υλικού να μην υπερβεί τη θερμοκρασία βρασμού. Η τιμή της κλίσης του συντελεστή h_a ορίζεται με μια σχετική ελευθερία έπειτα από δοκιμές. Μια πολύ μικρή τιμή της κλίσης θα προκαλεί εύκολα υπέρβαση της θερμοκρασίας βρασμού του υλικού κατά τις επαναλήψεις στην επίλυση. Αντίθετα, μια πολύ μεγάλη τιμή της κλίσης θα πλησιάζει τη θερμοκρασία του υλικού

περισσότερο στη θερμοκρασία βρασμού αλλά θα προκαλέσει αργή αριθμητική σύγκλιση κατά την επίλυση.



Σχήμα 3.16: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου αφαίρεσης υλικού

Όσον αφορά τη μεταφορά μάζας του υλικού που απομακρύνεται από την επιφάνεια, η πυκνότητα ροής της μάζας (mass flux) \mathbf{M}_{abl} υπολογίζεται συναρτήσει της ροής θερμότητας που εξέρχεται από το σύστημα λόγω της απομάκρυνσης του υλικού \mathbf{q}_{abl} και της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης (latent heat of vaporization) H_{vap} [107] από την εξίσωση (3.28). Γνωρίζοντας την πυκνότητα ροής της μάζας \mathbf{M}_{abl} καθώς και την πυκνότητα του υλικού ρ , η ταχύτητα αφαίρεσης υλικού (ablation velocity) \mathbf{v}_{abl} υπολογίζεται από την εξίσωση (3.29). Η ταχύτητα αφαίρεσης υλικού \mathbf{v}_{abl} που υπολογίζεται από την εξίσωση (3.29) έχει ίδιο μέτρο και αντίθετη φορά με την ταχύτητα μετακίνησης των συνοριακών επιφανειών της γεωμετρίας (boundary velocity) κατά την προσομοίωση της κατεργασίας αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16. Ομοίως, έχει ίδιο μέτρο και αντίθετη φορά με την ταχύτητα με την οποία μετακινούνται οι κόμβοι του περιγράμματος του πλέγματος (boundary nodes of mesh). Με αυτό τον τρόπο δηλαδή υπολογίζεται η μετατόπιση του κάθε κόμβου του περιγράμματος του πλέγματος του τεμαχίου για την εκάστοτε επανάληψη του χρονικού βήματος της επίλυσης.

$$M_{abl} = \frac{q_{abl}}{H_{vap}} \quad (3.28)$$

$$v_{abl} = \frac{M_{abl}}{\rho} \quad (3.29)$$

Για τον υπολογισμό της γεωμετρίας, σύμφωνα με τη μετακίνηση που επιβάλλεται στη συνοριακή επιφάνεια που αφαιρείται υλικό από την αλληλεπίδραση με την προσπίπτουσα δέσμη Laser, χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος μετακίνησης πλέγματος (moving mesh method) σε συνδυασμό με μια μέθοδο εξομάλυνσης πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων (mesh smoothing method). Μια μέθοδος μετακίνησης πλέγματος σε συνδυασμό με μια μέθοδο εξομάλυνσης προσδιορίζει το πως θα μετατοπιστούν οι εσωτερικοί κόμβοι του πλέγματος της γεωμετρίας σύμφωνα με τη μετατόπιση των κόμβων του περιγράμματος. Η μετατόπιση των κόμβων του περιγράμματος που επιβάλλεται, δύναται να προκύπτει ως συνάρτηση οποιονδήποτε παραγόντων, που στην περίπτωση που μελετάται είναι η μετατόπιση που προκύπτει από την ταχύτητα αφαίρεσης υλικού.

Η χρησιμότητα της μεθόδου έγκειται στο να αποφευχθεί η δημιουργία νέου πλέγματος (remeshing) για κάθε αναδιαμόρφωση των συνόρων αλλά αντ' αυτού να γίνεται αναδιάταξη των εσωτερικών κόμβων του πλέγματος ώστε να συμμορφώνονται με τα κινούμενα σύνορα.

Η κατασκευή νέου πλέγματος από την αρχή κάθε φορά είναι μια διαδικασία ασύμφορη από πλευράς κατανάλωσης υπολογιστικών πόρων. Θα ήταν ασύμφορο, όσον αφορά το χρόνο επίλυσης, να κατασκευάζεται πλέγμα εκ νέου σε εφαρμογές που απαιτείται συνεχόμενη (σε κάθε χρονικό βήμα της επίλυσης) μετακίνηση των ορίων της γεωμετρίας όπως στην κατεργασία αφαίρεσης υλικού με παλμούς δέσμης Laser. Αντίθετα, η μετακίνηση του πλέγματος είναι μια λύση γρήγορη, ευέλικτη και αποτελεσματική. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί αποδοτικές και αποτελεσματικές τεχνικές οι οποίες προσαρμόζουν κατάλληλα το υπάρχον πλέγμα στο νέο σύνορο της γεωμετρίας που προκύπτει σε κάθε περίπτωση.

Οι αλλαγές που υφίσταται πλέγμα το πλέγμα με βάση τη μετακίνηση του συνόρου ενδέχεται να υποβιβάσουν την ποιότητά του (mesh quality). Μπορεί να παραχθούν πάρα πολύ λεπτά ή παραμορφωμένα (thin or skewed) στοιχεία στο πλέγμα, που μειώνουν την ακρίβεια του αποτελέσματος της επίλυσης [108], μέχρι ακόμα και μη έγκυρα ή ανεστραμμένα (invalid or inverted) στοιχεία [109]. Προς αυτό το σκοπό έχουν αναπτυχθεί ορισμένες μέθοδοι εξομάλυνσης πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων (mesh smoothing method) οι οποίες έχουν στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του πλέγματος. Χαρακτηριστικό των μεθόδων εξομάλυνσης είναι ότι δεν επηρεάζουν τον αριθμό των στοιχείων αλλά βελτιώνουν την ποιότητα του πλέγματος επανατοποθετώντας τους κόμβους των εσωτερικών στοιχείων [110]. Διαδίδοντας τη μετατόπιση του κινητού ορίου στο εσωτερικό του πλέγματος, μπορεί να ελεγχθεί η κίνηση των εσωτερικών κόμβων έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ομαλή και ομοιόμορφη παραμόρφωση του πλέγματος οπουδήποτε. Αυτό μπορεί να γίνει επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις για τις μετατοπίσεις των κόμβων του πλέγματος που προβλέπει η εκάστοτε χρησιμοποιούμενη μέθοδος εξομάλυνσης (smoothing partial differential equations) χρησιμοποιώντας ως συνοριακές συνθήκες αυτές που επιβάλλουν τη μετακίνηση των συνόρων.

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος είναι η εξομάλυνση Laplace (Laplace smoothing) κατά την οποία οι θέσεις των κόμβων του πλέγματος επαναπροσδιορίζονται επαναληπτικά από τον αριθμητικό μέσο όρο των θέσεων των γειτονικών κόμβων. Θεωρώντας την εξομάλυνση Laplace σε ένα δυσδιάστατο πρόβλημα, τότε στο μοντέλο προστίθενται ως επιπλέον βαθμοί ελευθερίας οι θέσεις του παραμορφωμένου πλέγματος. Εάν θεωρήσουμε ότι (X_1, Y_1) οι συντεταγμένες σημείου απαραμόρφωτου πλέγματος με \mathbf{P}_{undef} , το διάνυσμα θέσης του ως προς το σύστημα αναφοράς και (x_1, y_1) οι συντεταγμένες του αντίστοιχου σημείου του παραμορφωμένου πλέγματος με \mathbf{p}_{def} το διάνυσμα θέσης του, τότε για την εξομάλυνση Laplace επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις (3.30), (3.31) [111]. Η εξομάλυνση Laplace είναι πιο συμφέρουσα επιλογή από τη σκοπιά της κατανάλωσης υπολογιστικών πόρων επειδή είναι γραμμική και για κάθε κόμβο επιλύεται μόνο μια εξίσωση για κάθε μια κατεύθυνση, χωρίς να είναι συζευγμένες όλες οι εξισώσεις μεταξύ τους. Όμως η μέθοδος αυτή δεν διαθέτει κάποιο περιορισμό ώστε να αποκλείει την αναστροφή (inversion) των στοιχείων κι έτσι καθίσταται κατάλληλη κυρίως για μικρές παραμορφώσεις γραμμικής μορφής.

$$\frac{\partial^2 x_1}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 x_1}{\partial Y_1^2} = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial^2 y_1}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 y_1}{\partial Y_1^2} = 0 \quad (3.31)$$

Λόγω του ότι οι μετατοπίσεις στο πλέγμα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της επίδρασης ενός παλμού δέσμης Laser ήταν μεγάλες, η εξομάλυνση Laplace δεν εξυπηρετούσε τις ανάγκες καθώς οδηγούσε σε ανεστραμμένα (inverted) στοιχεία (στοιχεία με αρνητικό όγκο). Έτσι, σε δεύτερη φάση χρησιμοποιήθηκε μια λίγο πιο απαιτητική υπολογιστική μέθοδος εξομάλυνσης, η Winslow. Για την εξομάλυνση Winslow επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις

(3.32), (3.33) που προκύπτουν από τις εξισώσεις της εξομάλυνσης Laplace εναλλάσσοντας τις εξαρτημένες με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Η εξομάλυνση Winslow προσφέρει το θετικό χαρακτηριστικό ότι οδηγεί σε ομαλά πλέγματα αποφεύγοντας της τοπικές αναδιπλώσεις (folded mesh) χωρίς αυτό βέβαια να σημαίνει ότι δεν οδηγεί στη δημιουργία στοιχείων χαμηλής ποιότητας [112].

$$\frac{\partial^2 X_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 X_1}{\partial y_1^2} = 0 \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial^2 Y_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 Y_1}{\partial y_1^2} = 0 \quad (3.33)$$

Καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις ούτε η εξομάλυνση Winslow δεν ήταν σε θέση να παράξει πλέγμα υψηλής ποιότητας ούτως ώστε να οδηγηθεί η επίλυση σε σύγκληση, εφαρμόστηκε η υπερελαστική εξομάλυνση (hyperelastic smoothing). Η υπερελαστική εξομάλυνση είναι εμπνευσμένη από τα υπερελαστικά υλικά τα οποία συμπεριφέρονται σύμφωνα με το ΝεοΧουκιανό μοντέλο (Neo-Hookean model). Έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της ενέργειας παραμόρφωσης του πλέγματος \mathbf{W}_{def} που δίνεται από την εξίσωση (3.34) [113] στην οποία μ είναι το ιδεατό μέτρο διάτμησης (shear modulus), κ_b είναι το ιδεατό μέτρο συμπίεσεως (bulk modulus), I_1 είναι η πρώτη αναλλοίωτη του ισχωρικού μέρους του δεξιού τανυστή παραμόρφωσης κατά Cauchy-Green (first invariant of the isochoric part of the right Cauchy-Green deformation tensor), με \mathbf{det} συμβολίζεται η ορίζουσα πίνακα και με \mathbf{tr} το ίχνος πίνακα. Η υπερελαστική εξομάλυνση αποτελεί την πιο ασύμφορη υπολογιστικά μέθοδο καθώς χαρακτηρίζεται από μη γραμμικότητα και αποτελείται από ένα συζευγμένο σύστημα εξισώσεων για όλες τις κατευθύνσεις. Παρ' όλα αυτά η υπερελαστική εξομάλυνση εξασφαλίζει σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους πολύ μεγάλες παραμορφώσεις του πλέγματος στα σύνορα, πριν εμφανιστούν ανεστραμμένα στοιχεία και οδηγεί γενικότερα σε στοιχεία καλύτερης ποιότητας.

$$W_{def} = \int_{\Omega} \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) + \frac{\kappa_b}{2} (J - 1)^2 dV \quad (3.34)$$

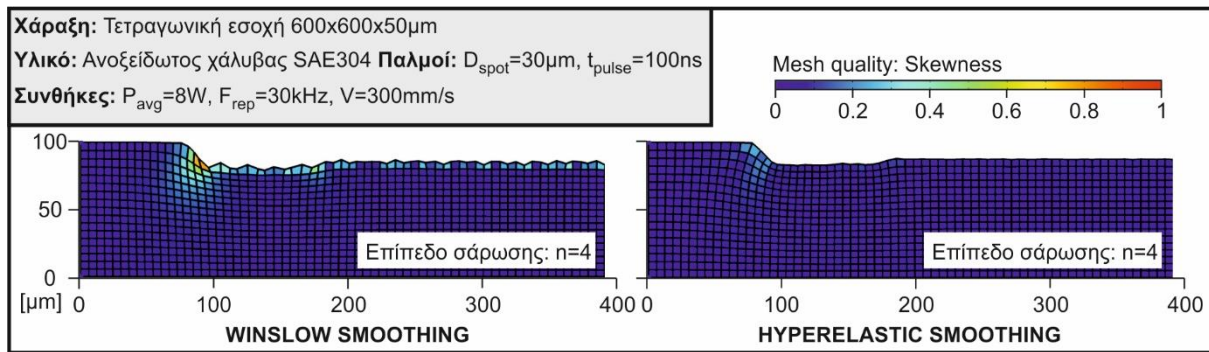
$$J = \det \left(\frac{\partial \vec{p}_{def}}{\partial \vec{p}_{undef}} \right) \quad (3.35)$$

$$I_1 = J^{-\frac{2}{3}} \text{tr} \left(\left(\frac{\partial \vec{p}_{def}}{\partial \vec{p}_{undef}} \right)^T \frac{\partial \vec{p}_{def}}{\partial \vec{p}_{undef}} \right) \quad (3.36)$$

Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζεται συγκριτικά το παραμορφωμένο πλέγμα που έχει προκύψει για μια ενδιάμεση φάση της προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser με την εξομάλυνση Winslow και την Hyperelastic, έχοντας ως δείκτη ποιότητας την παραμόρφωση των στοιχείων Equiangular Skewness. Ο δείκτης ποιότητας Skewness υποδεικνύει τη διαφορά μεταξύ του σχήματος του παραμορφωμένου στοιχείου και του ιδανικού σχήματος στοιχείου όμοιου όγκου. Ο δείκτης ποιότητας **ES** (equiangular skewness) λαμβάνει την τιμή 0 όταν το στοιχείο είναι ιδανικό (βέλτιστη τιμή) και την τιμή 1 για ένα πλήρως παραμορφωμένο στοιχείο (χειρότερη τιμή). Ο δείκτης ποιότητας **ES** υπολογίζεται από την εξίσωση (3.37) όπου θ_e είναι η γωνία στη κορυφή που σχηματίζεται μεταξύ των δύο πλευρών του ιδανικού στοιχείου (60° για τριγωνικά και 90° για τετραγωνικά στοιχεία), θ_{max} η μέγιστη γωνία στη κορυφή που σχηματίζεται μεταξύ των δύο πλευρών του στοιχείου και θ_{min} η

ελάχιστη. Όπως είναι φανερό στο σχήμα 3.17, η εξομάλυνση Winslow εξασφαλίζει μια μέγιστη τιμή για τον δείκτη ποιότητας Skewness ίση με 0.8, ενώ η εξομάλυνση Hyperelastic 0.25. Ο δείκτης ποιότητας Skewness έχει καθοριστική σημασία για την επίλυση (solving) καθώς όταν αυξηθεί υπερβολικά η τιμή του και φτάσει τιμές της τάξεως του 0.9 έχει παρατηρηθεί ότι δημιουργούνται προβλήματα σύγκλισης (convergence errors).

$$ES = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_{\varepsilon}}{180 - \theta_{\varepsilon}}, \frac{\theta_{\varepsilon} - \theta_{min}}{\theta_{\varepsilon}} \right] \quad (3.37)$$



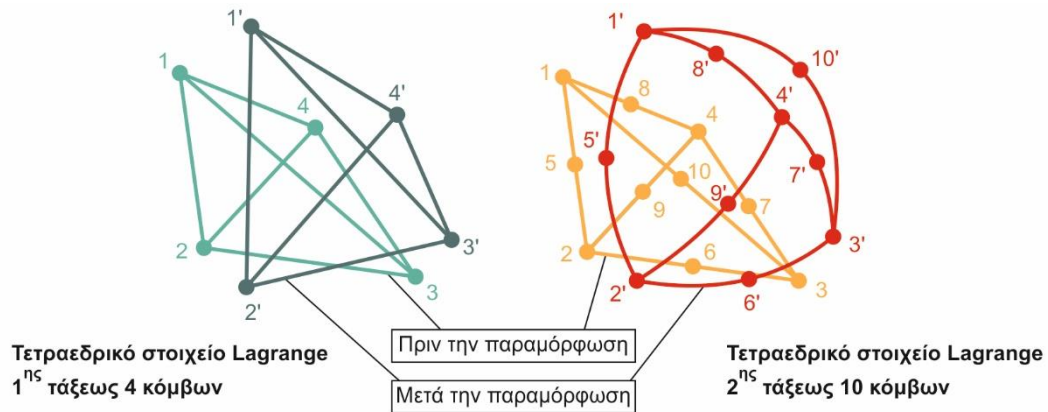
Σχήμα 3.17: Ποιότητα παραμορφωμένου πλέγματος τετραγωνικών στοιχείων με δείκτη την παραμόρφωση των στοιχείων Equiangular Skewness που προκύπτει χρησιμοποιώντας την εξομάλυνση Winslow και την Hyperelastic για μια ενδιάμεση φάση προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser τετραγωνικής εσοχής πλευράς 600μm και βάθους 50μm σε ανοξείδωτο χάλυβα με συνθήκες κατεργασίας: $P_{avg}=8W$, $F_{rep}=30kHz$, $V=300mm/s$

3.4.4 Γεωμετρία και διακριτοποίηση

Για το 3D μοντέλο προσομοίωσης του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού που προκύπτει κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων επιλέχθηκε ως αρχικό τεμάχιο ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων $L \times W \times H$. Το μήκος, το πλάτος και το ύψος του τεμαχίου προσδιορίζονται κάθε φορά ανάλογα με το μέγεθος της τετραγωνικής εσοχής που πρόκειται να χαραχτεί. Κατά τις προσομοιώσεις βασική επιδίωξη όσον αφορά το αρχικό τεμάχιο ήταν οι διαστάσεις του να είναι οι ελάχιστες δυνατές που να επιτρέπουν την προσομοίωση της χάραξης. Ο στόχος ήταν το τεμάχιο να έχει πλέγμα με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό στοιχείων ώστε να εξοικονομηθεί χρόνος κατά την επίλυση. Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι για χαράξεις μικρών εσοχών με διαστάσεις της τάξεως των 50-100μm, ένα αρχικό τεμάχιο με μήκος και πλάτος μεγαλύτερα κατά 1.5 φορές τη διάμετρο της δέσμης D_{spot} από το μήκος και πλάτος της εσοχής και ύψος 2 φορές μεγαλύτερο από το βάθος της εσοχής, είναι ένας λειτουργικός και αποδοτικός συνδυασμός. Ο συνδυασμός αυτός εξασφαλίζει τη σίγουρη επίλυση του προβλήματος χωρίς να εμφανιστούν παραμορφώσεις στις συνοριακές επιφάνειες του αρχικού τεμαχίου από την κατεργασία και ταυτόχρονα αποτελεί μια συμφέρουσα λύση από την άποψη της εξοικονόμησης του υπολογιστικού χρόνου επίλυσης.

Για την πλεγματοποίηση (meshing) του τεμαχίου χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά στοιχεία Lagrange 2^{ns} τάξεως 10 κόμβων (quadratic tetrahedral elements with 10 nodes). Ο λόγος που επιλέχθηκαν τετραεδρικά στοιχεία για το πλέγμα έγκειται στην απλότητά τους και στην ικανότητά τους να συνθέσουν πλέγμα για οποιοδήποτε τρισδιάστατο όγκο, ανεξάρτητα το σχήμα ή την τοπολογία του. Χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά στοιχεία Lagrange 2^{ns} τάξεως 10 κόμβων έναντι των απλούστερων τετραεδρικών στοιχείων 4 κόμβων, διότι τα πρώτα εξαιτίας

των επιπλέον κόμβων που προστίθενται στις έδρες του στοιχείου μπορούν να αναπαράγουν τις παραμορφώσεις με καμπύλη μορφή με περισσότερο ρεαλιστικό τρόπο, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.18. Ακόμα, στη πλειονότητα των περιπτώσεων μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας αρκετά μικρότερο αριθμό στοιχείων κατά την πλεγματοποίηση σε σχέση με τον αν χρησιμοποιούνταν στοιχεία 1^{ης} τάξης. Βέβαια, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ένα πλέγμα 2^{ης} τάξεως κατά την επίλυση απαιτεί αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος και περισσότερο χρόνο επίλυσης σε σχέση με ένα 1^{ης} τάξεως.



Σχήμα 3.18: Συγκριτική παρουσίαση τετραεδρικών στοιχείων Lagrange 1^{ης} και 2^{ης} τάξεως στην απαραμόρφωτη και στην παραμορφωμένη τους κατάσταση

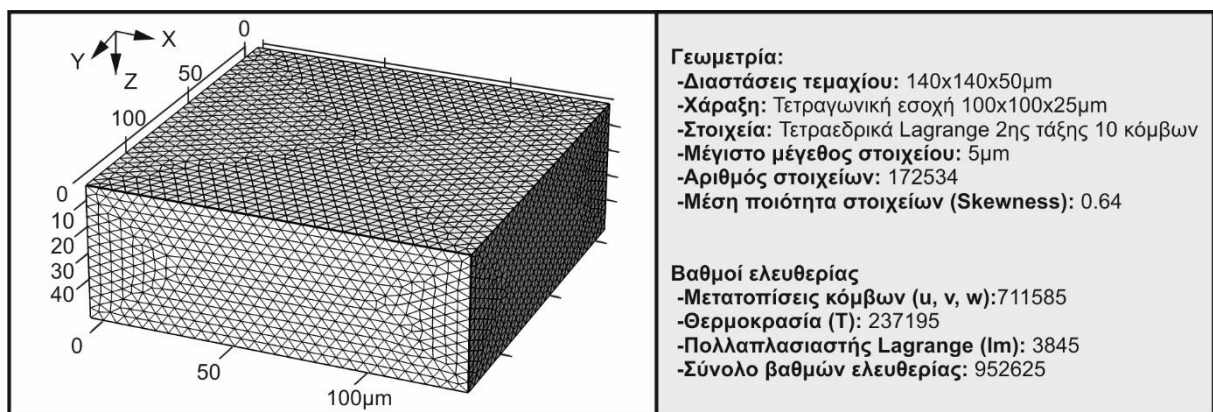
Για την πλεγματοποίηση το τεμαχίου επιλέχθηκαν στοιχεία με μέγιστο μέγεθος στοιχείου (maximum element size) στα 5μm και χρησιμοποιήθηκε συντελεστής πύκνωσης του πλέγματος στη διεύθυνση του βάθους-άξονα Z κλίμακος 1.5 (Z-direction scale). Για να εξασφαλιστεί ανεξαρτησία της λύσης από το πλέγμα, δηλαδή η λύση που έχει επιτευχθεί για ένα μέγεθος στοιχείων να μην μεταβάλλεται σημαντικά με την περεταίρω μείωση του μεγέθους των στοιχείων (πύκνωση πλέγματος), πραγματοποιήθηκε ανάλυση της ανεξαρτησίας πλέγματος από την οποία προέκυψε το παραπάνω μέγεθος στοιχείων. Η ανάλυση της ανεξαρτησίας πλέγματος εξασφαλίζει αφενός ότι το πλέγμα θα είναι τόσο πυκνό όσο χρειάζεται, έτσι ώστε η ακρίβεια της λύσης να μην επηρεάζεται από το πλέγμα και ταυτόχρονα να μην σπαταλάται υπολογιστική ισχύς για την επίλυση του προβλήματος για ένα άσκοπα μεγάλο αριθμό στοιχείων που θα αύξανε σημαντικά το χρόνο της επίλυσης. Η διαδικασία ελέγχου της ανεξαρτησίας του πλέγματος υλοποιήθηκε πραγματοποιώντας επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις, μειώνοντας συνεχώς το μέγιστο μέγεθος των στοιχείων ξεκινώντας με ένα αρχικό μέγεθος στοιχείων των 10μm και μειώνοντας το σε κάθε δοκιμή κατά 1μm. Διαπιστώθηκε ότι από τα 5μm και κάτω δεν παρατηρείτο σημαντική μεταβολή στο αποτέλεσμα των μετατοπίσεων των κόμβων επιφάνειας του υλικού κατά την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser.

Σχετικά με τους βαθμούς ελευθερίας που παρουσιάζονται στο πρόβλημα, ισχύει ότι ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας (degrees of freedom) προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των κόμβων του πλέγματος με τον αριθμό των εξαρτημένων μεταβλητών (dependent variables) που εμφανίζονται κατά την επίλυση όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.38), με την προϋπόθεση ότι κάθε εξαρτημένη μεταβλητή εμφανίζεται σε κάθε κόμβο του πλέγματος. Στην παρούσα μοντελοποίηση εμφανίζονται τριών ειδών εξαρτημένες μεταβλητές. Το πρώτο είδος αφορά την αφαίρεση του υλικού, δηλαδή τη μετακίνηση που υφίστανται οι κόμβοι του πλέγματος και συνεπώς υπάρχουν τρεις εξαρτημένες μεταβλητές u , v , w οι οποίες είναι οι μετατοπίσεις του κάθε κόμβου στο X-Y-Z χώρο. Το δεύτερο είδος αφορά

το θερμικό σκέλος της κατεργασίας και προσθέτει ως εξαρτημένη μεταβλητή την θερμοκρασία **T**. Το τρίτο είδος εξαρτημένης μεταβλητής που υπεισέρχεται είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange **lm** της κάθετης ταχύτητας στην επιφάνεια του πλέγματος (Lagrange multiplier of normal mesh velocity). Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την επιβολή περιορισμών στα σύνορα των πεπερασμένων στοιχείων είναι η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange. Ο περιορισμός που επιβάλλεται στην προκείμενη μοντελοποίηση αφορά την ταχύτητα μετακίνησης του πλέγματος που υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα αφαίρεσης του υλικού και επιβάλλεται ως κινηματική δέσμευση για τους κόμβους της άνω συνοριακής επιφάνειας του τεμαχίου η οποία ακτινοβολείται από τη δέσμη Laser.

$$(\#degrees\ of\ freedom) = (\#nodes) * (\#dependent\ variables) \quad (3.38)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.19 ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αρχικού τεμαχίου διαστάσεων 140x140x50μm το οποίο είναι το κατάλληλο για την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων μιας τετραγωνικής εσοχής διαστάσεων 100x100x25μm. Τα στοιχεία που απαρτίζουν το πλέγμα είναι τετραεδρικά στοιχεία Lagrange 2^{ης} τάξεως 10 κόμβων με μέγιστο μέγεθος στοιχείου στα 5μm. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε αυτόματα από το λογισμικό COMSOL αποτελείται από 172534 στοιχεία και χαρακτηρίζεται από μέσο δείκτη ποιότητας Equiangular Skewness με τιμή 0.64. Οι βαθμοί ελευθερίας που αντιστοιχούν στις μετατοπίσεις των κόμβων **u**, **v**, **w** είναι 711585, για τη θερμοκρασία **T** είναι 237195, για τον πολλαπλασιαστή Lagrange **lm** που αντιστοιχεί στους επιφανειακούς κόμβους της άνω επιφάνειας πρόσπτωσης 3845. Ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας υπολογίζεται 952625, αθροίζοντας όλους τους παραπάνω.



Σχήμα 3.19: Χαρακτηριστικό παράδειγμα πλεγματοποίησης αρχικού τεμαχίου

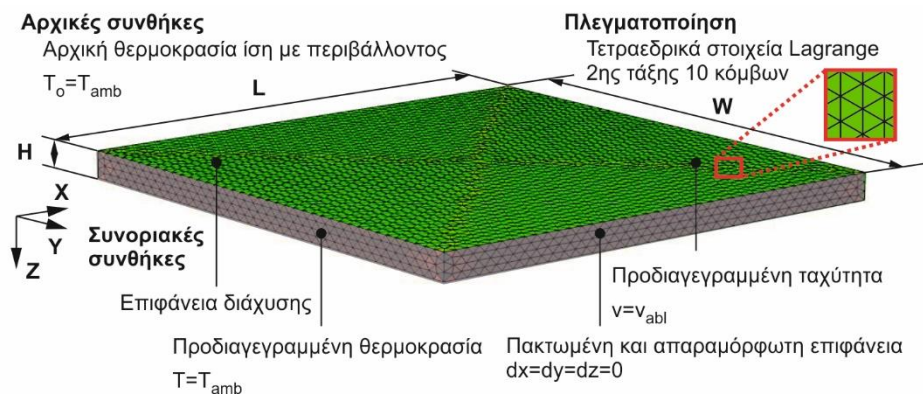
3.4.5 Αρχικές και συνοριακές συνθήκες

Όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες, τέθηκε ότι η αρχική θερμοκρασία του τεμαχίου **T₀** είναι ίση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος **T_{amb}** και ότι το αρχικό τεμάχιο είναι अपαραμόρφωτο. Σχετικά με τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών γίνεται διάκριση ανάμεσα στις συνοριακές συνθήκες που αφορούν το θερμικό μέρος της μοντελοποίησης (δηλαδή αυτό που αφορά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας **T** ως εξαρτημένης μεταβλητής) και τις συνοριακές συνθήκες που αφορούν τη μετακίνηση-προσαρμογή του πλέγματος (δηλαδή τον υπολογισμό των μετατοπίσεων **u**, **v**, **w** ως εξαρτημένων μεταβλητών).

Σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες που αφορούν το θερμικό μέρος της μοντελοποίησης, για όλες τις περιφερειακές συνοριακές επιφάνειες του τεμαχίου εκτός της άνω, υιοθετήθηκε μια

συνοριακή συνθήκη τύπου Dirichlet θεωρώντας ότι έχουν σταθερή θερμοκρασία και ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} . Η άνω επιφάνεια του τεμαχίου η οποία είναι η επιφάνεια στην οποία προσπίπτει η δέσμη Laser και συνεπώς πρόκειται να αναπτύξει υψηλές θερμοκρασίες, θεωρήθηκε ότι συμπεριφέρεται ως επιφάνεια διάχυσης (diffuse surface) για την οποία ισχύει ότι διαχέεται ακτινοβολία μόνο από την επιφάνεια προς το περιβάλλον (only surface to ambient radiation). Θεωρήθηκε ότι η ακτινοβολία έχει φορά προς τα πάνω και δεν μεταδίδεται ακτινοβολία στο εσωτερικό του τεμαχίου. Η ένταση της ακτινοβολίας που διαχέεται στο περιβάλλον q_{rad} δίνεται από την εξίσωση 3.39 στην οποία ϵ είναι συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας (emissivity), σ η σταθερά Stefan–Boltzmann και T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος [114].

$$q_{rad} = \epsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4) \quad (3.39)$$



Σχήμα 3.20: Αρχικές και συνοριακές συνθήκες για το θερμικό σκέλος της μοντελοποίησης και το σκέλος που αφορά τη μετακίνηση-προσαρμογή του πλέγματος

Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες που αφορούν τη μετακίνηση-προσαρμογή του πλέγματος, η άνω επιφάνεια του τεμαχίου που πρόκειται να μετατοπιστεί λόγω της αφαίρεσης υλικού θεωρήθηκε ως επιφάνεια υπό συνθήκη ελεύθερη προς παραμόρφωση (deformable surface) που ορίζεται από την ταχύτητα μετακίνησης του πλέγματος (prescribed mesh velocity) όπως έχει ήδη προαναφερθεί. Οι υπόλοιπες συνοριακές επιφάνειες του τεμαχίου θεωρήθηκαν πακτωμένες και απαραμόρφωτες (rigid fixed surface).

3.4.6 Μετάδοση θερμότητας, αγωγή και αλλαγή φάσης

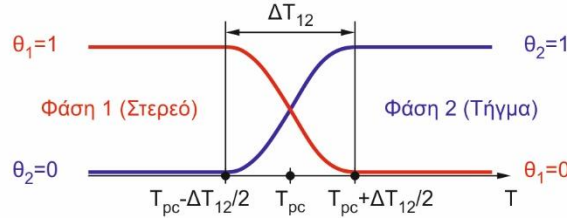
Για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας στο τεμάχιο με αγωγή (conduction) χρησιμοποιήθηκε η γενική τρισδιάστατη εξίσωση μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε καρτεσιανές συντεταγμένες, που προκύπτει το νόμο του Fourier που παρουσιάζεται στην εξίσωση (3.40) [115]:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = 0, \quad \vec{q} = -K(T)\nabla T \quad (3.40)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού, C_p η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση συναρτήσει της θερμοκρασίας και K η θερμική αγωγιμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Κατά την αλλαγή φάσης του στερεού υλικού, αντί για να προστεθεί η λανθάνουσα θερμότητα L_h στην εξίσωση για το ενεργειακό ισοζύγιο αμέσως μόλις το υλικό φτάσει στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του T_{pc} , γίνεται η θεώρηση ότι η μεταβολή πραγματοποιείται εντός ενός

περιορισμένου εύρους θερμοκρασιών $T_{pc} - \Delta T_{12}/2$ και $T_{pc} + \Delta T_{12}/2$, όπου το ΔT_{12} είναι το θερμοκρασιακό διάστημα μετάβασης. Μεταξύ αυτού του εύρους, η φάση του υλικού μοντελοποιείται θεωρώντας μια εξομαλυσμένη συνάρτηση (smoothed function) θ^* , που αναπαριστά τα κλάσματα που υπάρχουν από την κάθε φάση πριν από την ολική αλλαγή φάσης (δείκτης φάσης). Η συνάρτηση θ λαμβάνει την τιμή 1 για θερμοκρασία μικρότερη της $T_{pc} - \Delta T_{12}/2$ και την τιμή 0 για θερμοκρασία μεγαλύτερη της $T_{pc} + \Delta T_{12}/2$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21: Δείκτες φάσης, θερμοκρασία αλλαγής φάσης και διάστημα μετάβασης

Έτσι, η αλλαγή φάσης του στερεού έγινε πραγματοποιώντας την κατάλληλη τροποποίηση στη θερμοχωρητικότητα C_p του υλικού που εμφανίζεται στην εξίσωση (3.40) μεταφοράς θερμότητας σύμφωνα με την εξίσωση (3.41) στην οποία θ_1 και θ_2 είναι οι δείκτες φάσεων, $C_{p,ph1}$ και $C_{p,ph2}$ οι θερμοχωρητικότητες του υλικού πριν και μετά την αλλαγή φάσης και L_H η λανθάνουσα θερμότητα (διαφορά μεταξύ ενθαλπιών δύο φάσεων). Επιπλέον πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη μεταβολή στην ενθαλπία H^* και στη θερμική αγωγιμότητα K λόγω αλλαγής φάσης, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (3.42) και (3.43).

Για την πυκνότητα ρ του υλικού έγινε η παραδοχή ότι διατηρείται σταθερή, παρά την αλλαγή φάσης στο υλικό, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.44). Διότι όταν γίνεται αναφορά σε ένα συγκεκριμένο όγκο ελέγχου, η μάζα του υλικού υπολογίζεται συναρτήσει της πυκνότητας του τεμαχίου. Συνεπώς πρέπει να οριστεί μόνο μια πυκνότητα ώστε να μην υπάρχουν ασυνέχειες και να διατηρηθεί η τιμή της μάζας σταθερή σε ένα σταθερό όγκο ελέγχου του τεμαχίου, παρά την αλλαγή φάσης από στερεή σε υγρή φάση. Για να γίνει αισθητή η τάξη μεγέθους της μεταβολής που υφίσταται ένα μέταλλο στις θερμοφυσικές του ιδιότητες συναρτήσει της θερμοκρασίας και λόγω αλλαγής φάσης (τήξεως), στο σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι μεταβολές που υφίσταται η πυκνότητα, η θερμοχωρητικότητα, η θερμική αγωγιμότητα και η ενθαλπία για ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, σύμφωνα με το σχετικό εγχειρίδιο του Mills [116].

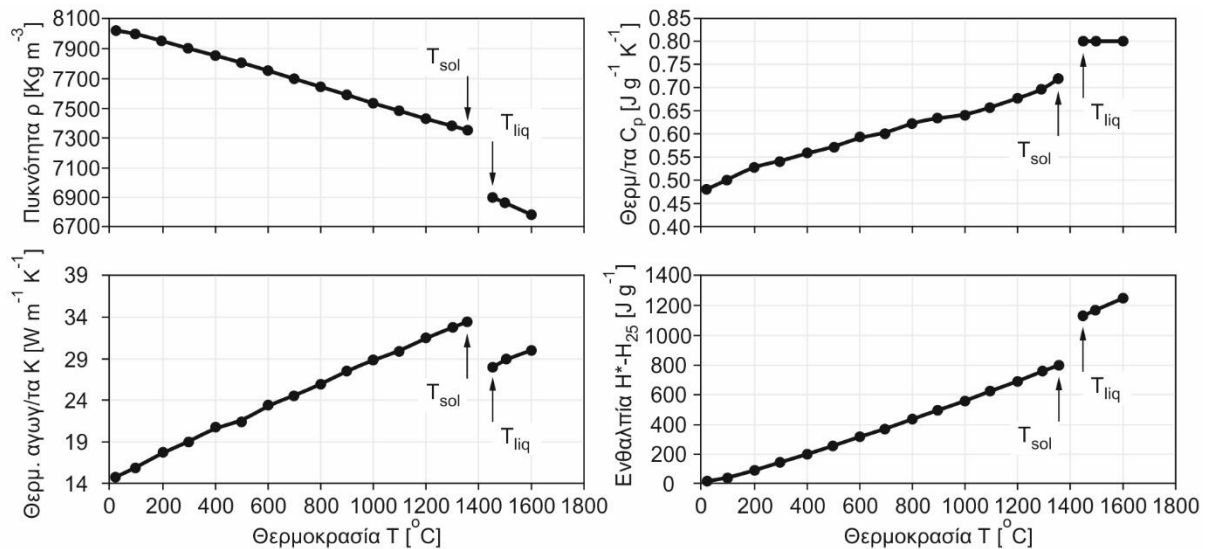
$$C_p = \theta_1 C_{p,ph1} + \theta_2 C_{p,ph2} + L_H \frac{d\theta^*}{dT} \quad (3.41)$$

$$H^* = \theta^* H_{ph1} + (1 - \theta^*) H_{ph2} \quad (3.42)$$

$$K = \theta_1 K_{ph1} + \theta_2 K_{ph2} \quad (3.43)$$

$$\rho = \rho_{ph1} = \rho_{ph2} \quad (3.44)$$

$$L_H = H_{ph2} - H_{ph1}, a_m = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2}, \theta_1 = \theta^*, \theta_2 = 1 - \theta^* \quad (3.45)$$



Σχήμα 3.22: Θερμοφυσικές ιδιότητες για ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 συναρτήσει της θερμοκρασίας λαμβάνοντας υπόψη και την αλλαγή φάσης λόγω τήξης, σύμφωνα με το σχετικό εγχειρίδιο του Mills [116]: (α) πυκνότητα (β) θερμοχωρητικότητα (γ) θερμική αγωγιμότητα (δ) ενθαλπία

3.5 Επίλυση

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν για την επίλυση του μοντέλου που παρουσιάστηκε, με τη χρήση ενός γενικής φύσεως λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, το COMSOL. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, είναι ένα χρονικά εξαρτώμενο (time-dependent) μοντέλο. Αυτό διότι ο όρος του χρόνου t εμφανίζεται στη γενική τρισδιάστατη εξίσωση (3.40) μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας που καλείται να επιλυθεί. Αυτό συμβαίνει επειδή παρουσιάζονται μεταβολές στο σύστημα συναρτήσεων του χρόνου, που σχετίζονται με τους δημιουργούμενους παλμούς Laser από την πηγή, με τη μετακίνηση της δέσμης Laser από την κεφαλή, σύμφωνα με το χάρτη σάρωσης και με τα φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης με το υλικό (μεταβολές στην ανακλαστικότητα, δημιουργία πλάσματος που θωρακίζει τη δέσμη, αλλαγές φάσεων του υλικού). Έτσι, κατά την ανάλυση του συστήματος με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, οι τεχνικές αριθμητικής ολοκλήρωσης που χρησιμοποιούνται γίνονται σε διακριτές χρονικές στιγμές. Σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης, γνωρίζοντας τα δεδομένα που δίνονται ως είσοδοι για την κατεργασία, ζητείται να υπολογιστούν οι χρονικά εξαρτημένες μεταβλητές που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Ανάλογα με την προσέγγιση που εφαρμόζεται κατά την αριθμητική ανάλυση-επίλυση για την απόκτηση μιας αριθμητικής προσέγγισης της λύσης των συνήθους ή μερικών διαφορικών εξισώσεων που απαιτείται για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις φυσικών φαινομένων διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων αριθμητικής ολοκλήρωσης: άμεσες (explicit) και οι έμμεσες (implicit). Σε μια άμεση (explicit) μέθοδο, η κατάσταση του εξεταζόμενου συστήματος σε μια επόμενη χρονική στιγμή $\mathbf{X}(t+\Delta t)$ υπολογίζεται από την κατάσταση στην τρέχουσα χρονική $\mathbf{X}(t)$, επιλύοντας μια εξίσωση της μορφής όπως αυτή που παρουσιάζεται στην εξίσωση (3.46), όπου Δt είναι το χρονικό βήμα (time step). Εν αντιθέσει, σε μια έμμεση (implicit), μέθοδο η κατάσταση του συστήματος υπολογίζεται επιλύοντας μια εξίσωση με μορφή όπως αυτή που παρουσιάζεται στη εξίσωση (3.47), που περιλαμβάνει ταυτόχρονα την κατάσταση, τόσο στην τρέχουσα χρονική στιγμή, όσο και την επόμενη. Βασικό πλεονέκτημα

των άμεσων μεθόδων (explicit) είναι ότι είναι απλούστερες και υπολογιστικά γρηγορότερες. Όμως απαιτούν πολύ μικρά χρονικά βήματα, αλλιώς δημιουργούν μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματική λύση και το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια. Οι έμμεσες μέθοδοι (implicit) είναι πιο δύσκολες στην εφαρμογή και αυξάνουν σημαντικά τον χρόνο της επίλυσης. Ωστόσο, σε προβλήματα που οι άμεσες μέθοδοι οδηγούνται σε μεγάλα σφάλματα, οι έμμεσες μέθοδοι μπορούν να τα επιλύσουν με μεγαλύτερη ταχύτητα, διατηρώντας υψηλή ακρίβεια λαμβάνοντας μεγάλα χρονικά βήματα [117]. Κατά συνέπεια, το εάν θα χρησιμοποιηθεί άμεση ή έμμεση μέθοδος εξαρτάται άμεσα από την εκάστοτε περίπτωση.

$$\text{Explicit: } X(t + \Delta t) = F(X(t)) \quad (3.46)$$

$$\text{Implicit: } G(X(t), X(t + \Delta t)) = 0 \quad (3.47)$$

Στο λογισμικό COMSOL υπάρχουν διαθέσιμες οι έμμεσες (implicit) μέθοδοι Backward Differentiation Formula BDF, Generalized alpha και η άμεση (explicit) μέθοδος Runge-Kutta. Η Backward Differentiation Formula BDF είναι από τις κλασσικότερες αριθμητικές μεθόδους για την ολοκλήρωση συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Χρησιμοποιεί τις σχέσεις backward differentiation τάξεως που κυμαίνεται από το 1 (οι σχέσεις της 1^{ης} τάξεως είναι γνωστές και ως backward Euler method) μέχρι το 5. Η μέθοδος BDF χρησιμοποιείται ευρέως πολλά χρόνια και είναι γνωστή για την υψηλή σταθερότητά της. Όμως, αυτή η μέθοδος έχει το μειονέκτημα ότι χαρακτηρίζεται από φαινόμενα απόσβεσης (damping effects), ειδικά στις χαμηλές τάξεις. Η μέθοδος αυτή αποσβένει τις υψηλές συχνότητες, που σημαίνει ότι ακόμα και αν αναμένεται λύση με έντονες κλίσεις-διακυμάνσεις, υπάρχει το ενδεχόμενο να προκύψει μια πάρα πολύ ομαλή λύση στο πεδίο του χρόνου λόγω της απόσβεσης στη μέθοδο backward Euler. Η μέθοδος Generalized alpha έχει παρόμοιες ιδιότητες με την BDF 2^{ης} τάξης αλλά εμπεριέχει μια επιπλέον παράμετρο που είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως παράμετρος alpha για τον έλεγχο του βαθμού της απόσβεσης στις υψηλές συχνότητες [118]. Συνεπώς έχει μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά είναι λιγότερο σταθερή μέθοδος. Η άμεση (explicit) μέθοδος Runge-Kutta είναι περισσότερο κατάλληλη για συστήματα που εμπεριέχουν μόνο συνήθεις διαφορικές εξισώσεις επειδή δεν είναι τόσο αποδοτική σε προβλήματα που εμπεριέχουν μερικές διαφορικές εξισώσεις. Για την περίπτωση της προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, σύμφωνα με την μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε παραπάνω, έπειτα από δοκιμές κρίθηκε κατάλληλη και εφαρμόστηκε η έμμεση (implicit) μέθοδος Backward Differentiation Formula (BDF) μαζί με την σχετική τεχνική μεταβλητού χρονικού βήματος (adaptive time stepping).

Για την επιλογή του χρονικού βήματος (time step), επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια τεχνική μεταβλητού βήματος (adaptive time stepping) που είναι εφικτό να υλοποιηθεί για τις παραπάνω μεθόδους αριθμητικής ολοκλήρωσης. Σε απλά εξαρτώμενα προβλήματα συνήθως επιλέγεται ένα σταθερό χρονικό βήμα σύμφωνα με τις απαιτήσεις της μεθόδου αριθμητικής ολοκλήρωσης που χρησιμοποιείται ώστε να εξασφαλιστεί η απαραίτητη σταθερότητα της μεθόδου και η επιθυμητή ακρίβεια. Όμως, για την επίλυση στο χρόνο προβλημάτων μεγάλης διάρκειας στα οποία, είτε συμβαίνουν διακριτά γεγονότα στο χρόνο, είτε όταν εμφανίζονται περιορισμοί στην επιλογή του χρονικού βήματος σε κάποια φάση της επίλυσης (όπως η απαίτηση για μεγαλύτερο χρονικό βήμα όταν εμφανίζονται μη γραμμικά προβλήματα) το να εφαρμοστεί ένα σταθερό χρονικό βήμα σε όλη τη διάρκεια της επίλυσης δεν είναι αποδοτική και αποτελεσματική επιλογή.

Για παράδειγμα, στην υπό μελέτη κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser, η χρονική διάρκεια του παλμού στην οποία λαμβάνουν χώρα όλα τα φαινόμενα που έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενα κεφάλαια είναι της τάξεως των 100ns, ενώ ο χρόνος που μεσολαβεί από την έναρξη του παλμού μέχρι την έναρξη του επομένου μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 100μs. Το

να επιλεγεί ένα αρχικό σταθερό βήμα ενέχει τον κίνδυνο είτε να είναι πάρα πολύ μεγάλο για τις δεδομένες απαιτήσεις της ακρίβειας (οδηγώντας ακόμα και στην αγνόηση ορισμένων σημαντικών φαινομένων στο πεδίο του χρόνου), είτε να είναι υπερβολικά μικρό, οδηγώντας σε άσκοπη σπατάλη υπολογιστικών πόρων και αύξηση του χρόνου επίλυσης. Έτσι, σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιείται κάποια τεχνική μεταβλητού χρονικού βήματος η οποία υπολογίζει το βέλτιστο μέγεθος του χρονικού βήματος κατά τη διάρκεια της ανάλυσης [119].

Στην τεχνική μεταβλητού βήματος (adaptive time stepping) που χρησιμοποιείται κατά την αριθμητική ολοκλήρωση, το χρονικό βήμα προσαρμόζεται κατάλληλα έτσι ώστε να ελέγχεται το σφάλμα της μεθόδου, να διατηρείται η σταθερότητα της μεθόδου και ταυτόχρονα να μειωθεί στο ελάχιστο το υπολογιστικό κόστος [120]. Ο αυτόματος υπολογισμός του χρονικού βήματος στηρίζεται στην εκτίμηση του σφάλματος αποκοπής (truncation error) που σχετίζεται με το χρησιμοποιούμενο σχήμα ολοκλήρωσης (το σφάλμα αποκοπής σχετίζεται με την παράλειψη-αποκοπή όρων της πλήρους μαθηματικής έκφρασης σε αλγοριθμικές διαδικασίες). Αν το σφάλμα αποκοπής είναι μικρότερο από την προδιαγεγραμμένη ακρίβεια (tolerance), τότε το μέγεθος του χρονικού βήματος αυξάνεται. Αν το σφάλμα αποκοπής είναι μεγαλύτερο, τότε το βήμα μειώνεται.

Η εκτίμηση κάθε φορά του σφάλματος αποκοπής με βάση το οποίο θα μεταβληθεί το βήμα γίνεται με τη χρήση ενός αλγόριθμου εκτίμησης (error estimation) για τη μέθοδο ολοκλήρωσης [121]. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην πλειονότητα των περιπτώσεων στο ότι για κάθε χρονικό βήμα προβλέπεται αρχικά μια πρώτη προσεγγιστική λύση, χρησιμοποιώντας συνήθως κάποια υπολογιστικά συμφέρουσα explicit μέθοδο. Αυτή η λύση που προβλέφθηκε δίνεται ως αρχική τιμή για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα και υπολογίζεται η ανάλογη διόρθωση κάνοντας επαναλήψεις, είτε με τον διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver), είτε με τον συζευγμένης επίλυσης (coupled solver) αλγόριθμο επίλυσης που χρησιμοποιείται. Η διαφορά μεταξύ της προσεγγιστικής λύσης που προβλέφθηκε αρχικά και της διορθωμένης λύσης είναι αυτή που ορίζεται ως σφάλμα αποκοπής, το οποίο συγκρίνεται με την επιθυμητή ακρίβεια και έτσι καθορίζεται η μεταβολή του χρονικού βήματος.

Η σχέση (3.48) αποτελεί το κριτήριο που εφαρμόστηκε κατά την επίλυση με το λογισμικό COMSOL για την αξιολόγηση του εάν ένα χρονικό βήμα κατά την ολοκλήρωση είναι αποδεκτό, σύμφωνα με την απόλυτη ακρίβεια (absolute tolerance) και τη σχετική ακρίβεια (relative tolerance) που έχουν οριστεί. Ένα χρονικό βήμα είναι αποδεκτό όταν ικανοποιείται η σχέση (3.48) όπου έστω \mathbf{U} το μητρώο της λύσης (solution vector) που αντιστοιχεί στη λύση του συγκεκριμένου χρονικού βήματος, \mathbf{E}_i είναι το εκτιμώμενο τοπικό απόλυτο σφάλμα του επιλύτη στο \mathbf{U} κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου βήματος, \mathbf{A}_i η απόλυτη ακρίβεια (absolute tolerance) για τον βαθμό ελευθερίας DOF i , \mathbf{R}_{tol} η σχετική ακρίβεια (relative tolerance), \mathbf{M}_{field} είναι ο αριθμός των πεδίων (fields) και \mathbf{N}_j το σύνολο των βαθμών ελευθερίας στο πεδίο j . Σε αυτό το κριτήριο στο COMSOL δίνεται η επιλογή η απόλυτη ακρίβεια να εκφραστεί ως ποσοστό (tolerance factor) της σχετικής ακρίβειας. Για το προσομοιωτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε το κριτήριο αυτό θέτοντας τη σχετική ακρίβεια ίση με 0.01 και θεωρώντας ότι η απόλυτη ακρίβεια ορίζεται από ένα συντελεστή (tolerance factor) με τιμή 0.1 ως προς τη σχετική ακρίβεια.

$$\left(\frac{1}{M_{field}} \sum_j \frac{1}{N_j} \sum_i \left(\frac{|E_i|}{A_i + R_{tol}|U_i|} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} < 1 \quad (3.48)$$

Σε αρκετές περιπτώσεις χρονικά εξαρτώμενων προβλημάτων τυχαίνει να απαιτηθεί σύμφωνα με τη μοντελοποίηση, να εισαχθεί στο σύστημα ακαριαία μια φόρτιση με τη μορφή παλμού. Τότε υπάρχει πιθανότητα το λογισμικό που διαχειρίζεται τον επιλύτη να την αγνοήσει, εκτός

και αν επιλύεται με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια το μοντέλο που συνεπάγεται και μικρά χρονικά βήματα. Μία παραγωγική λύση σε τέτοιες περιπτώσεις είναι, αντί να αυξηθεί η ακρίβεια της επίλυσης, να γίνει μια υπόδειξη στον επιλύτη των χρονικών στιγμών που συμβαίνουν σημαντικές μεταβολές των φορτίσεων στο μοντέλο-σύστημα. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε για την επίλυση χρησιμοποιώντας κάποιους δείκτες γεγονότων (events) στο λογισμικό COMSOL. Μέσω των events, μπορούν να εισαχθούν στο λογισμικό οι δεδομένες χρονικές στιγμές στις οποίες επέρχεται κάποια αλλαγή (explicit event) στα θερμικά φορτία του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο, όταν ενεργοποιείται ένα event, τότε αρχικοποιούνται εξ αρχής οι απαραίτητες μεταβλητές που σχετίζονταν με την προηγούμενη λύση, σύμφωνα με τις νέες φορτίσεις.

Στην εξεταζόμενη περίπτωση της προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser θεωρήθηκαν δύο περιοδικά events: ένα event που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή της έναρξης του παλμού της δέσμης Laser ($t=0$) και ένα που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή περάτωσης του παλμού ($t=t_{\text{pulse}}$). Και τα δυο events έγιναν περιοδικά, έτσι ώστε να επαναλαμβάνονται για όλους τους παλμούς που στέλνονται κατά την κατεργασία συνολικά, με περίοδο επανάληψης ίση με τη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί μεταξύ δύο παλμών t_{period} . Επιπλέον, μέσω των events, προσαρμόζονται κατάλληλα οι μεταβολές στα χρονικά βήματα έτσι ώστε το μέγεθος των χρονικών βημάτων πριν και μετά τη μεταβολή του θερμικού φορτίου να υπολογιστεί εκ νέου σύμφωνα με τις απαιτήσεις που έχουν οριστεί.

Για την επίλυση του μοντέλου το οποίο συντίθεται από τη σύζευξη πολλών φυσικών φαινομένων που αλληλεπιδρούν μεταξύ της (multiphysics model), υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις-αλγόριθμοι που μπορούν να υιοθετηθούν για την επίλυση του συστήματος των κατά πλειοψηφία μη γραμμικών εξισώσεων που περιγράφουν τη λύση: ο αλγόριθμος διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver) και ο αλγόριθμος συζευγμένης επίλυσης (coupled solver). Κατά τη διαδικασία επίλυσης, εφόσον έχουν καταστρωθεί οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο, πραγματοποιούνται επαναλήψεις (iterations) ούτως ώστε, επιλύοντας επαναλαμβανόμενα το σύστημα των εξισώσεων, να συγκλίνει σε κάποια λύση. Στην προσέγγιση συζευγμένης επίλυσης (coupled solver) σχηματίζεται ένα μεγάλο ενιαίο σύστημα εξισώσεων το οποίο επιλύεται για όλους τους αγνώστους (εξαρτημένες μεταβλητές) και περιλαμβάνει την απευθείας σύζευξη μεταξύ των αγνώστων σε κάθε μια επανάληψη. Εν αντιθέσει, στην προσέγγιση διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver) δεν επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων για όλους τους αγνώστους με τη μία, αλλά το πρόβλημα διασπάται σε πολλαπλά επιμέρους διαχωρισμένα βήματα (segregated steps). Κάθε ένα από τα διαχωρισμένα βήματα (διαχωρισμένα συστήματα εξισώσεων) συνήθως αναπαριστά και ένα φαινόμενο-μηχανισμό που μελετάται. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και ένα υπό μελέτη φαινόμενο μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους βήματα ή ακόμα και σε ένα βήμα να περιλαμβάνονται παραπάνω από ένα φαινόμενα. Αυτά τα διαχωρισμένα βήματα-συστήματα εξισώσεων είναι αρκετά μικρότερα σε σχέση με το ενιαίο σύστημα εξισώσεων που προκύπτει με βάση την προσέγγιση συζευγμένης επίλυσης. Τα διαχωρισμένα συστήματα εξισώσεων επιλύονται διαδοχικά σε κάθε επανάληψη και έτσι απαιτείται λιγότερη διαθέσιμη μνήμη (RAM memory) κατά την επίλυση.

Ανεξάρτητα με την προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, η λύση προσεγγίζεται πραγματοποιώντας επαναλήψεις. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος διαχωρισμένης επίλυσης ή ο αλγόριθμος συζευγμένης επίλυσης καλείται κατ' επανάληψη και σταδιακά συγκλίνει στην τελική λύση του μη γραμμικού προβλήματος. Επειδή ο αλγόριθμος συζευγμένης επίλυσης περιλαμβάνει τις εξισώσεις με τους αγνώστους συζευγμένους σε ένα ενιαίο σύστημα, παρουσιάζει συνήθως μεγαλύτερη ευστάθεια στη σύγκλιση και συγκλίνει σε λιγότερες επαναλήψεις. Όμως, επειδή η κάθε επανάληψη απαιτεί

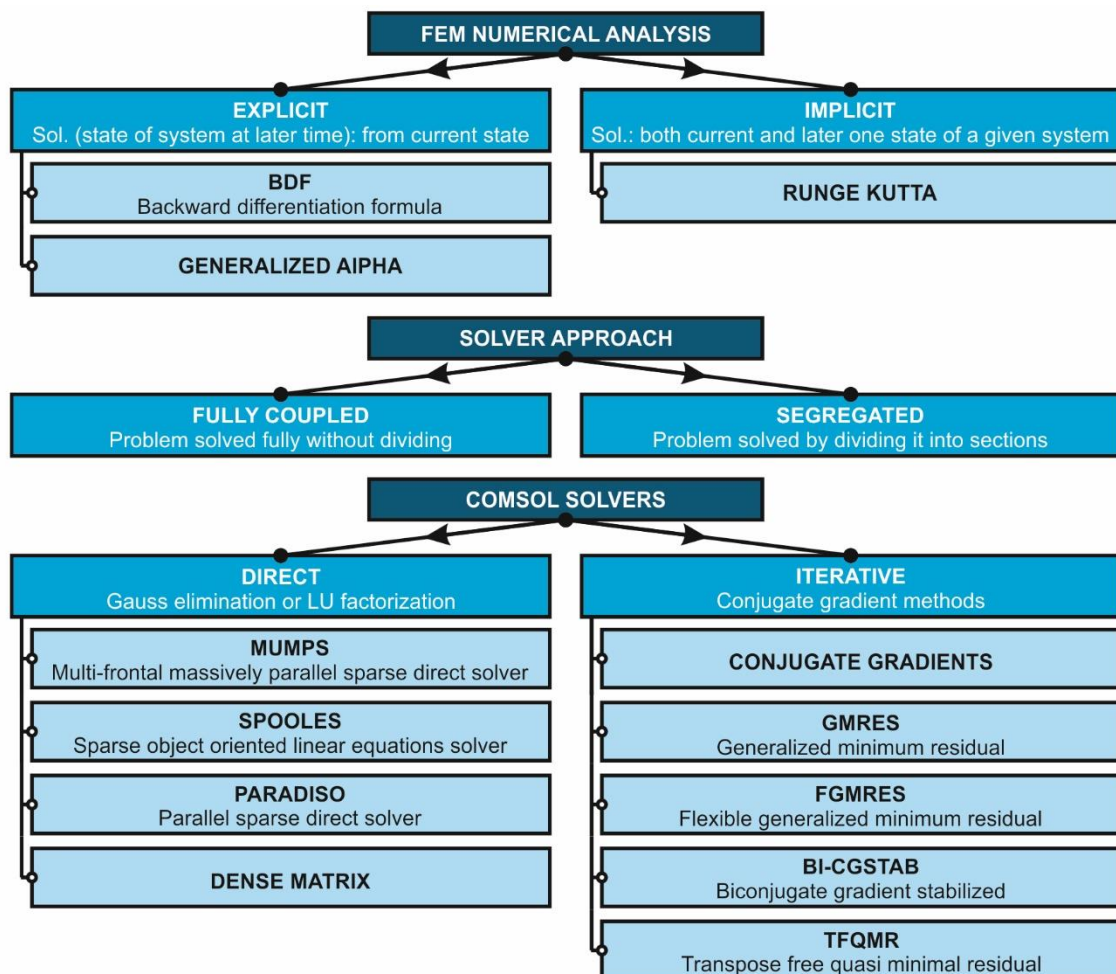
περισσότερη μνήμη και περισσότερο χρόνο για να υλοποιηθεί, η προσέγγιση διαχωρισμένης επίλυσης σε τελική ανάλυση είναι πιο ταχύτατη στην επίλυση.

Είτε με την προσέγγιση διαχωρισμένης επίλυσης, είτε με την προσέγγιση συζευγμένης επίλυσης, μέσα σε κάθε επανάληψη επιλύεται ένα γραμμικοποιημένο σύστημα εξισώσεων. Για την επίλυση των γραμμικοποιημένων συστημάτων εξισώσεων υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται: οι αλγόριθμοι άμεσης επίλυσης (direct solvers) και οι αλγόριθμοι επαναληπτικής επίλυσης (iterative solvers) [122,123]. Έστω ότι έχει δοθεί ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων που γράφεται στην μητρωϊκή μορφή $Ax=b$ το οποίο επιδέχεται επίλυση (η τάξη του μητρώου A είναι ίση με του επαυξημένου $[A/b]$). Με τους αλγόριθμους άμεσης επίλυσης το μητρώο A και επομένως οι άγνωστοι x υπολογίζονται απευθείας, ενώ με τους αλγόριθμους επαναληπτικής επίλυσης οι πραγματικές τιμές τους υπολογίζονται μέσω μιας σειράς διορθώσεων κάποιων αρχικών εκτιμήσεων. Οι αλγόριθμοι άμεσης επίλυσης έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι περισσότερο σταθεροί (robust) αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν περισσότερη μνήμη και είναι πιο αργοί στην επίλυση, με τον χρόνο επίλυσης να αυξάνεται πολύ απότομα με την αύξηση του μεγέθους του προβλήματος της επίλυσης. Οι αλγόριθμοι επαναληπτικής επίλυσης είναι λιγότερο σταθεροί αλλά απαιτούν λιγότερη μνήμη και είναι περισσότερο γρήγοροι, με τον χρόνο επίλυσης να αυξάνεται αρκετά ομαλά με την αύξηση του μεγέθους του προβλήματος.

Οι αλγόριθμοι άμεσης επίλυσης (direct solvers) οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στο λογισμικό COMSOL είναι οι ακόλουθοι: Parallel sparse direct solver PARDISO, Multifrontal massively parallel sparse direct solver MUMPS, sparse object-oriented linear equations solver SPOOLES και Dense Matrix Solver. Κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου αποτελεί κυρίως η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς καθώς και ο χρόνος επίλυσης, εφόσον όλοι οι αλγόριθμοι θα πρέπει να συγκλίνουν στο ίδιο αποτέλεσμα. Οι αλγόριθμοι MUMPS, PARDISO και SPOOLES έχουν όλοι τη δυνατότητα για παράλληλη επεξεργασία στον κεντρικό επεξεργαστή του υπολογιστή, εκμεταλλευόμενοι όλους τους διαθέσιμους πυρήνες. Ο PARDISO είναι ο ταχύτερος στις περισσότερες εφαρμογές. Ο SPOOLES είναι ο πιο αργός αλλά απαιτεί τη λιγότερη μνήμη. Όλοι οι άμεσοι επιλύτες γενικά απαιτούν τη δέσμευση μεγάλους τμήματος μνήμης RAM αλλά ο MUMPS και ο PARDISO έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν τη λύση και στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή (out-of-core). Ακόμα, ο MUMPS έχει το χαρακτηριστικό ότι υποστηρίζει τη λειτουργία και για συστοιχία υπολογιστών (cluster computing), επιτρέποντας έτσι τη δυνατότητα για διάθεση πολύ μεγαλύτερης μνήμης RAM από αυτή που μπορεί να είναι διαθέσιμη σε έναν τυπικό προσωπικό υπολογιστή.

Οι αλγόριθμοι επαναληπτικής επίλυσης (iterative solvers) που υπάρχουν διαθέσιμοι στο COMSOL για την επαναληπτική επίλυση γραμμικοποιημένων συστημάτων είναι αρκετοί περιλαμβάνοντας μια ποικιλία από προσεγγίσεις, αλλά όλοι είναι ουσιαστικά συγγενικοί αλγόριθμοι, είναι παρόμοιοι και βασίζονται στη μέθοδο συζυγών κλίσεων (conjugate gradient method). Οι κυριότερες τροποποιημένες προσεγγίσεις-μέθοδοι που έχουν προκύψει είναι η γενικευμένη μέθοδος ελαχίστων υπολοίπων GMRES (generalized minimal residual), η ευέλικτη γενικευμένη μέθοδος ελαχίστων υπολοίπων FGMRES (flexible generalized minimum residual), η ευσταθειοποιημένη μέθοδος δισυζυγών κλίσεων BiCGSTAB (biconjugate gradient stabilized) και η μέθοδος ημιελαχίστου υπολοίπου TFQMR (transpose-free quasi-minimal residual). Οι αλγόριθμοι επαναληπτικής επίλυσης προσεγγίζουν τη λύση σταδιακά σε αντίθεση με τους αλγόριθμους άμεσης επίλυσης που την προσεγγίζουν σε ένα μεγάλο υπολογιστικό βήμα. Έτσι, στους επαναληπτικούς αλγόριθμους κατά την επίλυση εμφανίζεται σε κάθε επανάληψη ένα σφάλμα σε σχέση με την τελική λύση, το οποίο συνεχώς μειώνεται με τον αυξανόμενο αριθμό των επαναλήψεων. Στα προβλήματα καλής κατάστασης (well-conditioned)

η σύγκλιση είναι μονότονη. Όμως σε προβλήματα κακής κατάστασης κάποιες φορές η σύγκλιση είναι δύσκολη και αρκετά αργή.

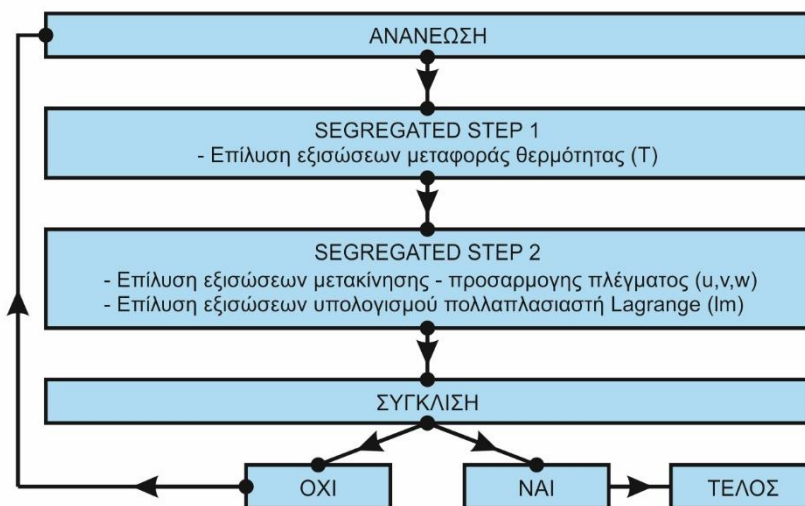


Σχήμα 3.23: Διάκριση της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τις μεθόδους αριθμητικής ολοκλήρωσης: άμεσες (explicit) και έμμεσες (implicit), διαχωρισμός προσεγγίσεων-αλγορίθμων επίλυσης σε διαχωρισμένης επίλυσης (segreated solver) και συζευγμένης επίλυσης (coupled solver) και είδη επιλυτών για την επίλυση των γραμμικοποιημένων συστημάτων εξισώσεων που υπάρχουν διαθέσιμοι στο COMSOL

Για την επίλυση του προσομοιωτικού μοντέλου χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση της διαχωρισμένης επίλυσης (segreated solver). Έτσι, το ενιαίο πρόβλημα της επίλυσης διασπάστηκε σε δύο επιμέρους διαχωρισμένα βήματα (segreated steps), όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.24](#). Το πρώτο βήμα Segreated Step 1 αφορούσε την επίλυση των εξισώσεων που αφορούν τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας για τον υπολογισμό της εξαρτημένης μεταβλητής της θερμοκρασίας T . Το δεύτερο βήμα Segreated Step 2 αφορούσε την επίλυση των εξισώσεων μετακίνησης-προσαρμογής του πλέγματος με βάση το υλικό που αφαιρείται από τη κατεργασία για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων u , v , w των κόμβων του παραμορφωμένου πλέγματος στον X-Y-Z χώρο. Επιπλέον, στο δεύτερο βήμα Segreated Step 2 πραγματοποιήθηκε και η επίλυση των εξισώσεων που αφορούν τη μέθοδο πολλαπλασιαστών Lagrange για την επιβολή περιορισμών στα σύνορα, δηλαδή τον υπολογισμό του πολλαπλασιαστή Lagrange λ_m της

κάθετης ταχύτητας στην επιφάνεια του υλικού που επιβάλλεται ως κινηματική δέσμευση στην άνω συνοριακή επιφάνεια.

Για την επίλυση των εξισώσεων του κάθε διαχωρισμένου βήματος επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι άμεσης επίλυσης (direct solvers). Τόσο για το πρώτο βήμα Segregated Step 1 όσο και για το δεύτερο βήμα Segregated Step 2 χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης με ονομασία PARDISO (parallel sparse direct solver). Ο PARDISO είναι ένας επιλύτης thread-safe, υψηλής απόδοσης, σταθερός, αποδοτικός ως προς τη μνήμη για την επίλυση μεγάλων και αραιών συμμετρικών και μη-συμμετρικών γραμμικών συστημάτων εξισώσεων σε πολυπύρηνους επεξεργαστές με αρχιτεκτονική μοιραζόμενης μνήμης (shared memory) και κατανεμημένης μνήμης (distributed memory). Βασίζεται στην επίλυση με τη μέθοδο παραγοντοποίησης ή διάσπασης LU (LU decomposition), χρησιμοποιώντας επιπρόσθετα την τεχνική της ολικής οδήγησης (complete pivoting) [124]. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα ως αλγόριθμος προδιάταξης (preordering algorithm) ο αλγόριθμος εμφωλιασμένης διαμέρισης (nested dissection multithreaded).



Σχήμα 3.24: Λογικό διάγραμμα διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver)

Για τα μη γραμμικά συστήματα εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newton-Raphson με ανανέωση της Ιακωβιανής σε κάθε επανάληψη (νέα Ιακωβιανή για όλες τις επαναληψεις-iterations). Ο προσδιορισμός του εάν ένα πρόβλημα είναι γραμμικό ή μη γραμμικό δεν είναι εύκολος. Ένας πρακτικός τρόπος για την αναγνώριση είναι ότι, εάν κάποιος συντελεστής ή κάποια ιδιότητα του υλικού εξαρτάται από κάποια εξαρτημένη μεταβλητή, τότε είναι μη γραμμικό. Ο Segregated επιλύτης επιλέχθηκε να λειτουργήσει θέτοντας ένα άνω όριο στις επαναλήψεις-καλέσματα του (maximum number of iterations). Επιπλέον ορίσθηκε ως κριτήριο τερματισμού (Termination criterion) να είναι η λύση (solution) σύμφωνα με την τεχνική τερματισμού (termination technique) που ορίζεται από την ακρίβεια (tolerance). Σε αυτή την περίπτωση η συνθήκη τερματισμού ορίζεται από τη σχέση (3.49), δηλαδή όταν το εκτιμώμενο σφάλμα err_k κατά την επανάληψη k του Segregated επιλύτη γίνει μικρότερο από την αντίστοιχη ακρίβεια tol , τότε ο Segregated επιλύτης τερματίζεται.

$$err_k < tol \quad (3.49)$$

3.6 Προσομοιώσεις

Χρησιμοποιώντας το 3D μοντέλο προσομοίωσης για την κατεργασία χάραξης που παρουσιάστηκε, πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων. Δοκιμάστηκαν πολλαπλοί συνδυασμοί συνθηκών κατεργασίας για διάφορα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά με σκοπό τον υπολογισμό του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις χάραξης τετραγωνικών εσοχών για τέσσερα διαφορετικά υλικά: ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, ορείχαλκο C26000 και κράμα αλουμινίου Al7075-T6. Για την προσομοίωση της χάραξης των εσοχών επιλέχθηκαν στο μοντέλο οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με το κέντρο κατεργασίας Laser έτσι ώστε να είναι σε συμφωνία με την εργαλειομηχανή DMG MORI LASERTEC 40. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να είναι εφικτή σε δεύτερο στάδιο η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, συγκρίνοντάς τα με αποτελέσματα από αντίστοιχα πειράματα χάραξης στη εργαλειομηχανή αυτή.

Το μήκος πλευράς μιας τετραγωνικής εσοχής για την κάθε περίπτωση συνδυασμού συνθηκών κατεργασίας υπολογίστηκε με κριτήριο να έχει σταθεροποιηθεί το βάθος χάραξης κατά την πορεία της δέσμης σε μια τροχιά. Δηλαδή, ο τελευταίος παλμός μιας ευθείας τροχιάς να βρίσκεται εκτός του πρώτου, προσθέτοντας ακόμα κάποιους επιπλέον παλμούς (5 στον αριθμό) έτσι ώστε να είναι ευδιάκριτη η επιφάνεια που αντιστοιχεί στον πυθμένα της εσοχής. Με αυτό τον τρόπο το μήκος πλευράς μιας τετραγωνικής εσοχής a_{pocket} υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση (3.50) και θεωρήθηκε τέτοιο ώστε, αφενός μεν να είναι εφικτή η μέτρηση του τελικού βάθους χάραξης της εσοχής και αφετέρου να μειωθεί το μέγεθος της γεωμετρίας της χάραξης στο ελάχιστο δυνατό για την ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης.

Συνθήκες κατεργασίας	Μονάδες	Επίπεδα			
		Ανοξείδωτο SAE304	Αλουμίνιο Al7075-T6	Χάλυβας P355GH	Ορείχαλκος C26000
Μέση ισχύς P_{avg}	W	8, 12, 16	8, 12	12	8, 12, 16
Ταχύτητα δέσμης V	mm/s	200, 300, 400, 500, 600, 700	200, 300, 400, 500	300, 400, 500, 600, 700	200, 300, 400, 500
Συχνότητα παλμών F_{rep}	kHz	20, 30, 40, 50	20, 30	20, 30, 40, 50	20, 30, 40

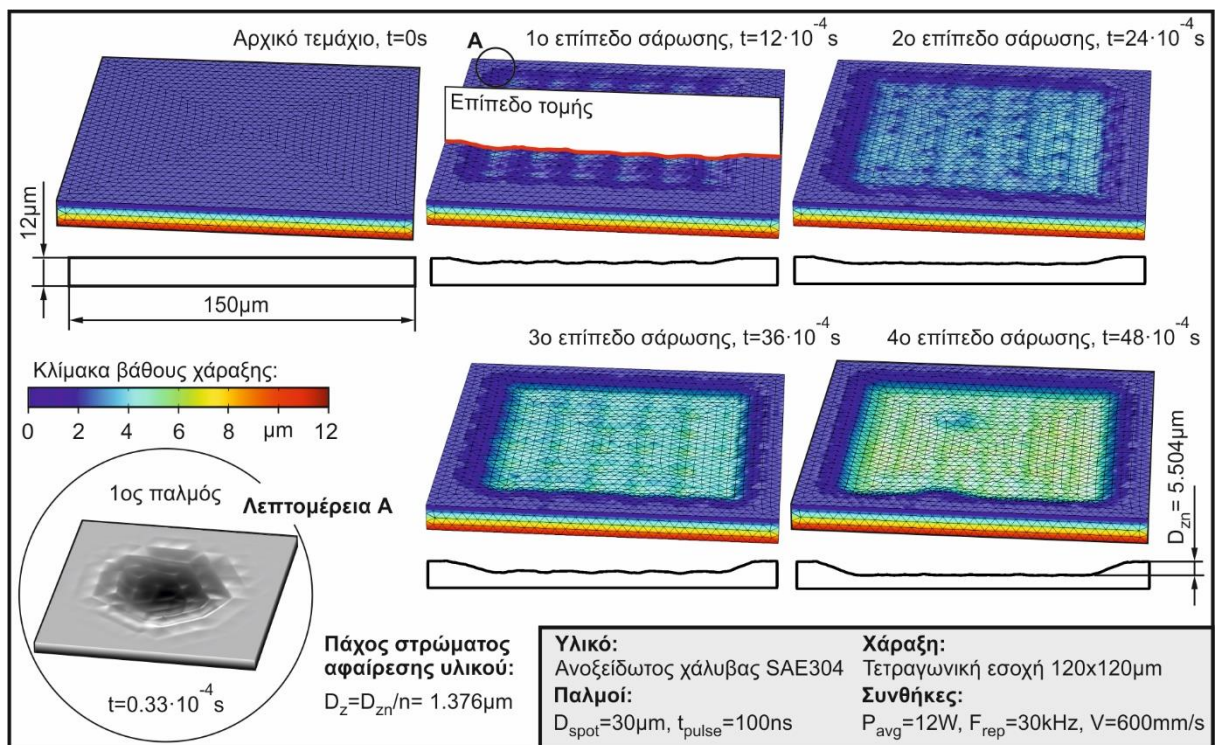
Πίνακας 3.2: Επίπεδα των συνθηκών κατεργασίας που εξετάστηκαν στις προσομοιώσεις με το 3D μοντέλο προσομοίωσης

Ο αριθμός των επιπέδων σάρωσης που πραγματοποιήθηκαν κατά τις προσομοιώσεις διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με $n=4$. Οι παράμετροι που ορίζουν τις συνθήκες κατεργασίας που προσομοιώθηκαν για τα διάφορα υλικά είναι: μέση ισχύς (average power) P_{avg} , ταχύτητα δέσμης (scanning speed) V , συχνότητα επανάληψης παλμών (repetition rate) F_{rep} . Τα επίπεδα που μελετήθηκαν για τις παραμέτρους των συνθηκών κατεργασίας παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2 και προέκυψαν έτσι ώστε να είναι σύμφωνα με αυτά που ορίζουν οι κατασκευαστές των κέντρων κατεργασιών Laser για την υλοποίηση της συγκεκριμένης κατεργασίας στα συγκεκριμένα υλικά.

$$a_{pocket} = \left[\left(\text{ceil} \left(\frac{D_{spot}}{d_u} \right) + 5 \right) - 1 \right] d_u, d_u = \frac{V}{F_{rep}} \quad (3.50)$$

Ο τρόπος που υλοποιείται μια προσομοίωση της κατεργασίας περιλαμβάνει αρχικά την είσοδο των παραμέτρων που αφορούν τις διαστάσεις της γεωμετρίας χάραξης (ορθογωνικής εσοχής),

το χρησιμοποιούμενο υλικό, τα χαρακτηριστικά του είδους της χάραξης και της δέσμης Laser σύμφωνα με το κέντρο κατεργασιών του οποίου η χρήση προσομοιώνεται καθώς και τις συνθηκών κατεργασίας. Στη συνέχεια, έχοντας εισαχθεί όλες οι απαραίτητες είσοδοι το προσομοιωτικό μοντέλο είναι πλήρως ορισμένο και ακολουθεί η επίλυσή του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης τα αποτελέσματα είναι έτοιμα για να ληφθούν ως έξοδοι από το χρήστη. Τα αποτελέσματα που εξάγονται από το 3D μοντέλο προσομοίωσης για την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, είναι η εκτιμώμενη τρισδιάστατη γεωμετρία της χάραξης για όλες τις ενδιαμέσες φάσεις συναρτήσει του χρόνου, με όμοιο ακριβώς τρόπο όπως αυτή θα προέκυπτε εάν η κατεργασία πραγματοποιούνταν στην πράξη σε ένα πραγματικό κέντρο κατεργασιών, σε πραγματικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό και τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας. Έχοντας την τελική 3D γεωμετρία χάραξης υπολογίζεται εύκολα το συνολικό βάθος της χάραξης D_{zn} ως η μέση τιμή του ύψους των σημείων στον πυθμένα της εσοχής. Από το βάθος αυτό διαιρώντας με τον αριθμό των επίπεδων σάρωσης n υπολογίζεται το μέσο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z κατά την κατεργασία.



Σχήμα 3.25: Προσομοίωση της χάραξης τετραγωνικής εσοχής χρησιμοποιώντας το αναπτυχθέν 3D μοντέλο προσομοίωσης για την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Στο σχήμα 3.25 παρουσιάζεται αναλυτικά μια περίπτωση προσομοίωσης χάραξης τετραγωνικής εσοχής διαστάσεων 120x120μm πραγματοποιώντας 4 επίπεδα σάρωσης σε τεμάχιο διαστάσεων 150x150x12μm από ανοξείδωτο χάλυβα SAE304. Η χάραξη πραγματοποιήθηκε θεωρώντας παραμέτρους σχετικά με το χρησιμοποιούμενο κέντρο κατεργασίας Laser χάραξης που αντιστοιχούν στη εργαλειομηχανή DMG MORI LASERTEC 40, δηλαδή παλμούς διάρκειας $t_{pulse}=100ns$ από δέσμη Laser με διάμετρο στο σημείο εστίασης $D_{spot}=30\mu m$ και επιλεγόμενη στρατηγική σάρωσης τη μονοκατευθυντική διασταυρούμενη (unidirectional cross hatching). Οι συνθήκες κατεργασίας που εξετάζονται είναι: μέση ισχύς (average power) $P_{avg}=12W$, ταχύτητα δέσμης (scanning speed) $V=600mm/s$

και συχνότητα επανάληψης παλμών (repetition rate) $F_{rep}=30\text{kHz}$. Στο σχήμα 3.25 παρουσιάζεται η εξέλιξη της κατεργασίας χάραξης παρέχοντας τα αντίστοιχα στιγμιότυπα που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές που ολοκληρώνεται το κάθε ένα επίπεδο σάρωσης. Η κατεργασία ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή $t=48\cdot 10^{-4}\text{s}$ που έχουν ολοκληρωθεί πλήρως $n=4$ επίπεδα σάρωσης και τότε το συνολικό βάθος χάραξης υπολογίζεται ίσο με $D_{zn}=5.504\mu\text{m}$ διαμορφώνοντας έτσι την τιμή του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού στα $D_z=1.376\mu\text{m}$.

3.7 Πειραματική επιβεβαίωση


3.7.1 Εξοπλισμός και υλικά

Για την πειραματική επιβεβαίωση του 3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων πραγματοποιήθηκε μια μεγάλη σειρά από πειράματα χάραξης σε διάφορα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για πολλαπλούς συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας. Οι χαράξεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser χάραξης DMG MORI LASERTEC 40 σε πλάκες από ανοξείδωτο χάλυβα, χάλυβα δοχείων πίεσης, ορείχαλκο, αλουμίνιο και μετρήθηκαν με τη χρήση του οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K. Η παράμετρος που μετρήθηκε και αποτέλεσε το μέγεθος για τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων της κατεργασίας χάραξης και των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για την πειραματική επιβεβαίωση του προσομοιωτικού μοντέλου είναι το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού. Στην συνέχεια ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή σχετικά με το κέντρο κατεργασιών Laser, τον μετρητικό εξοπλισμό και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Όλα τα πειράματα χάραξης στο σύνολο τους πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser χαράξεως LASERTEC 40 της εταιρίας DMG MORI. Πρόκειται για ένα κέντρο κατεργασιών που παράγει παλμούς δέσμης Laser μήκους κύματος στα $\lambda=1064\text{nm}$ και διάρκειας $t_{pulse}=100\text{ns}$ μέσω της τεχνικής μεταγόμενου Q (Q-switching). Το κέντρο κατεργασιών LASERTEC 40 παράγει παλμούς Laser με ονομαστική μέση ισχύ $P_{avg,nom}=20\text{W}$, ονομαστική μέγιστη ισχύ παλμού $P_{peak,nom}=10\text{kW}$ και ονομαστική ενέργεια παλμού $E_{nom}=1\text{mJ}$ με την συχνότητα επανάληψης παλμών να κυμαίνεται στο εύρος $F_{rep}=20\text{-}80\text{kHz}$. Είναι εξοπλισμένο με κεφαλή σάρωσης που διαθέτει φακό εστίασης F-Theta με εστιακή απόσταση $f=100\text{mm}$ με τον οποίο η δέσμη εστιάζεται κατάλληλα στο τεμάχιο έχοντας διάμετρο δέσμης στο σημείο εστίασης $D_{spot}=30\mu\text{m}$. Δύναται να κατευθύνει τη δέσμη Laser με ταχύτητες δέσμης που κυμαίνονται στο εύρος $V=50\text{-}1000\text{mm/sec}$. Διαθέτει τραπέζι κινούμενο σε τρεις άξονες με δυνατότητα μετατόπισης έως $400/300/500\text{mm}$ για τους άξονες X,Y,Z αντιστοίχως πάνω στο οποίο γίνεται πρόσδεση του τεμαχίου, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει τεμάχια με βάρος μέχρι τα 50kg . Το κέντρο κατεργασιών είναι εφοδιασμένο με δύο λογισμικά. Το λογισμικό LPSWin το οποίο έχει το ρόλο του CAM (Computer Aided Manufacturing) για την παραγωγή του χάρτη σάρωσης με τις τροχιές των παλμών της δέσμης και το λογισμικό LaserSoft 3D το οποίο είναι υπεύθυνο για τον χειρισμό και την καθοδήγηση του κέντρου κατεργασιών. Τα χαρακτηριστικά του κέντρου κατεργασιών LASERTEC 40 όπως προδιαγράφονται από τον κατασκευαστή παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.3.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη χάραξη μιας οποιαδήποτε γεωμετρίας με το κέντρο κατεργασιών Laser LASERTEC 40 υλοποιείται πραγματοποιώντας τα ακόλουθα βήματα: Με τη χρήση ενός λογισμικού τεχνικής σχεδίασης CAD (Computer-aided design) αρχικά σχεδιάζεται το 3D μοντέλο της γεωμετρίας που πρόκειται να χαραχτεί. Να σημειωθεί ότι το μοντέλο που πρέπει να σχεδιαστεί αναφέρεται στη γεωμετρία του υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί μέσω της κατεργασίας και όχι στο τελικό τεμάχιο. Η εργαλειομηχανή δέχεται ως

είσοδο αρχεία 3D όγκου της μορφής .stl (stereolithography) που προσδιορίζουν τον όγκο του προς αφαίρεση υλικού. Το αρχείο της μορφής .stl μεταφέρεται μέσω ενός usb-stick στον υπολογιστή-ελεγκτή (controller) της εργαλειομηχανής. Στη συνέχεια, με τη χρήση του λογισμικού LPSWin γίνεται επεξεργασία του αρχείου .stl για τη δημιουργία του χάρτη σάρωσης, δηλαδή τον προσδιορισμό όλων των ευθύγραμμων τροχιών που θα ακολουθήσει η παλμική δέσμη Laser σε πολλαπλά επίπεδα για τη σάρωση του προς αφαίρεση όγκου της γεωμετρίας για την αφαίρεση του υλικού.

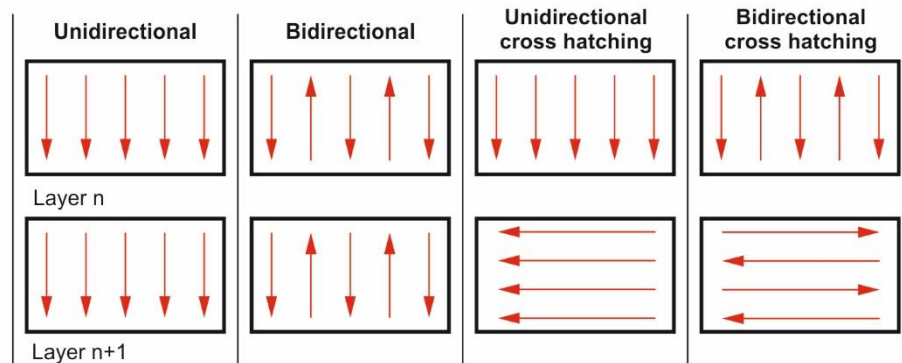
		Manufacturer	DMG MORI
		Model	LASERTEC 40
		Laser type	Q-switched
		Wavelength	1064nm
		Pulse width	100ns
		Spot diameter	30μm
		Focal length	100mm
		Average power (nom.)	20W
		Peak power (nom.)	10kW
		Pulse energy (nom.)	1mJ
		Pulse Repetition rate	20-80kHz
		Scanning Speed	50-1000mm/sec
		Max. load	50kg
		Acceleration	0.3g
Table size	400x300mm	Laser range	60x60mm
Rapid traverse	20m/min	Control software	LaserSoft 3D
Work area X/Y/Z	400/300/500mm		
CAM software	LPSWin		

Πίνακας 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του κέντρου κατεργασιών Laser χάραξης DMG MORI LASERTEC 40

Το λογισμικό LPSWin λειτουργεί σαν λογισμικό CAM (Computer-aided manufacturing) για το κέντρο κατεργασιών. Δέχεται ως είσοδο τη γεωμετρία του υλικού που χρειάζεται να αφαιρεθεί, καθώς και ορισμένες παραμέτρους που αφορούν την κατεργασία, όπως το σημείο μηδέν του τεμαχίου (workpiece zero point), το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού (removed material layer thickness), τη στρατηγική σάρωσης (scanning strategy) και την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών (track distance). Το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού αναφέρεται στο πάχος του υλικού που θα αφαιρεθεί κατά τη σάρωση ενός επιπέδου σύμφωνα με μια προκαθορισμένη στρατηγική σάρωσης και τις συνθήκες κατεργασίας (μέση ισχύς, ταχύτητα δέσμης και συχνότητα επανάληψης παλμών).

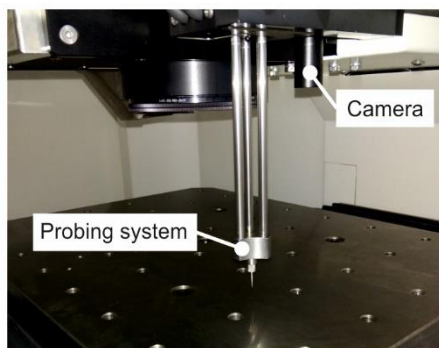
Για τις κατεργασίες χάραξης με παλμούς δέσμης Laser είναι απαραίτητη η εκ των προτέρων γνώση της εκάστοτε τιμής του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού έτσι ώστε το λογισμικό LPSWin να υπολογίσει τον συνολικό αριθμό των περασμάτων-επιπέδων σάρωσης (layers) που απαιτούνται για την επίτευξη του τελικού βάθους χάραξης. Οι βασικές στρατηγικές σάρωσης που παρέχονται από το κέντρο κατεργασιών Laser LASERTEC 40, όπως φαίνονται στο [σχήμα 3.26](#) είναι οι ακόλουθες: μονοκατευθυντική (unidirectional), η αμφικατευθυντική (bidirectional), η μονοκατευθυντική διασταυρούμενη (unidirectional cross hatching) και η αμφικατευθυντική διασταυρούμενη (bidirectional cross hatching). Εκτός από αυτές, υπάρχει και η δυνατότητα για περιστροφική σάρωση (rotary hatching) με βάση την οποία οι τροχιές παλμών ενός επιπέδου σάρωσης σχηματίζουν μια καθορισμένη γωνία σε σχέση με των προηγούμενων και των επόμενων. Από το λογισμικό LPSWin δίνεται ως έξοδος ένα αρχείο της μορφής .l4d το οποίο εμπεριέχει όλες τις κινήσεις που θα πραγματοποιήσει η δέσμη Laser για να σταλούν οι παλμοί στις προκαθορισμένες θέσεις καθώς και τις αντίστοιχες κινήσεις του

τραπέζιου στο οποίο εδράζεται το τεμάχιο για την υλοποίηση της χάραξης. Το αρχείο αυτό δίνεται ως είσοδο στο λογισμικό LaserSoft 3D.

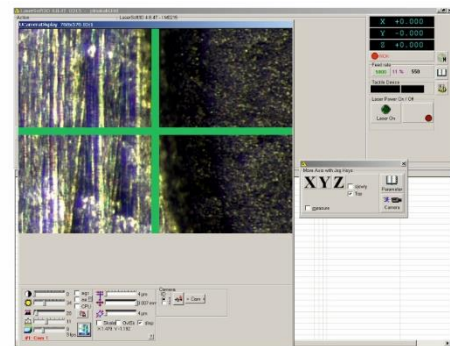


Σχήμα 3.26: Στρατηγικές σάρωσης του κέντρου κατεργασιών Laser LASERTEC 40

Το λογισμικό LaserSoft 3D είναι αυτό που αναλαμβάνει τον έλεγχο και την καθοδήγηση του κέντρου κατεργασιών LASERTEC 40. Οι υπόλοιπες συνθήκες κατεργασίας που δεν δόθηκαν στο λογισμικό LPSWin όπως η μέση ισχύς, η ταχύτητα της δέσμης και η συχνότητα επανάληψης των παλμών, εισάγονται στο λογισμικό LaserSoft 3D. Επιπλέον, μέσω του λογισμικού LaserSoft 3D, προσδιορίζεται η θέση στην οποία βρίσκεται το σημείο μηδέν (αρχή των αξόνων) πάνω στο τεμάχιο που έχει προσδεθεί στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Το σημείο μηδέν του τεμαχίου που βρίσκεται στη εργαλειομηχανή πρέπει να ταυτίζεται με τη θέση στην οποία έχει οριστεί το σημείο μηδέν μέσω του λογισμικού LPSWin, με βάση το οποίο δημιουργήθηκε ο χάρτης σάρωσης.



(α)




(β)

Σχήμα 3.27: (α) Κάμερα και μετρητικό σύστημα σημειακής μέτρησης με ακίδα επαφής του κέντρου κατεργασιών LASERTEC 40 (β) Προσδιορισμός σημείου $X=0$, $Y=0$ μέσω της κάμερας

Ο προσδιορισμός του σημείου μηδέν στο κέντρο κατεργασιών Laser υλοποιείται σε δύο φάσεις. Αρχικά, χρησιμοποιώντας μια κάμερα που διαθέτει η εργαλειομηχανή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27 (α), προσδιορίζεται η αρχή των αξόνων $X=0$ και $Y=0$ στο τεμάχιο. Μετακινώντας δηλαδή κατάλληλα το τραπέζι στο οποίο βρίσκεται το τεμάχιο και ταυτόχρονα παρατηρώντας την εικόνα από την κάμερα που εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27 (β), επιδιώκεται το κέντρο της εικόνας το οποίο υποδεικνύεται με ένα πράσινο σταυρό (σημείο $X=0$, $Y=0$) να ταυτιστεί με το σημείο μηδέν στην επιφάνεια του τεμαχίου. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του επιπέδου $Z=0$ στο τεμάχιο, ο οποίος γίνεται με τη χρήση κατάλληλου μετρητικού συστήματος σημειακής μέτρησης με ακίδα επαφής (touch probing system) υψηλής ακριβείας. Δηλαδή, με αυτοματοποιημένο τρόπο

μετακινείται το τραπέζι της εργαλειομηχανής ώστε ο στυλίσκος με την ακίδα να βρίσκεται ευθυγραμμισμένος στη θέση $X=0$, $Y=0$ που προσδιορίστηκε μέσω της κάμερας. Στη περίπτωση αυτή ο στυλίσκος μετακινείται κατακόρυφα προς τα κάτω μέχρι να συναντήσει την επιφάνεια του τεμαχίου. Στη θέση που η ακίδα του στυλίσκου συναντά το τεμάχιο ορίζεται αυτόματα στο λογισμικό του ελεγκτή της εργαλειομηχανής ότι βρίσκεται το επίπεδο $Z=0$.

Όσον αφορά το μετρητικό εξοπλισμό, όλα τα πειράματα χάραξης που πραγματοποιήθηκαν μετρήθηκαν με τη χρήση του 3D οπτικού μικροσκοπίου-προφιλόμετρου (3D optical microscope-profilometer) Contour GT-K της εταιρείας Bruker. Το οπτικό προφιλόμετρο είναι ένα μετρητικό όργανο για τη μέτρηση του προφίλ μιας 3D επιφάνειας. Σκοπός του είναι η ποσοτικοποίηση ορισμένων μεγεθών που σχετίζονται με τη γεωμετρία που εξετάζεται, όπως για παράδειγμα το βάθος και η κλίση των πλευρικών τοιχωμάτων για την περίπτωση των χαράξεων με παλμούς δέσμης Laser. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οπτικού προφιλόμετρου ContourGT-K, όπως προδιαγράφονται από τον κατασκευαστή, παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.4.

		Manufacturer	Bruker
		Model	Contour GT-K
		Type	3D Optical Microscope
		Max scan range	Up to 10mm
		Vertical resolution	<0.01nm
		RMS Repeatability	0.01nm
		Lateral Resolution	0.38μm min (Sparrow crit.) 0.13μm (with AcuityXR™) 0.01μm (with NanoLens)
		Step Height Accuracy	<0.75%
		Step Height Rep/ty	<0.1% 1 sigma repeatability
		Max. Scan Speed	47μm/sec
Z Scan Range	0.1nm to 10mm	Z Focusing	100mm
Sample Reflectivity	0.05% - 100%	Max. Sample Slope	Up to 40° (shiny), 87° (rough surfaces)
Sample Height	Up to 100mm	XY Sample Stage	150mm
Max. Sample Weight	4.5kg	Tip/Tilt Function	±6° manual in stage
Calibration	Via traceable step standards	Objectives	Parfocal: 2.5x,5x,10x,20x,50x LWD: 2x,5x,10x
Camera	monochrome: 640 x 480	System Software	Vision64 Operation and Analysis Software

Πίνακας 3.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά του οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K

Για τα πειράματα χάραξης χρησιμοποιήθηκαν πλάκες από ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, ορείχαλκο C26000 και κράμα αλουμινίου Al7075-T6 τα οποία φαίνονται στο σχήμα 3.28. Οι πλάκες έχουν πάχος 5mm και κόπηκαν είτε με υδραυλικό ψαλίδι είτε με υδροκοπή σε διαστάσεις κατά προσέγγιση στα 200x250mm. Στον πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι βασικότερες θερμοφυσικές ιδιότητες των μετάλλων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.



Σχήμα 3.28: Πλάκες από ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, ορείχαλκο C26000 και κράμα αλουμινίου Al7075-T6 που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα

Συμβ.	Περιγραφή	Ανοξείδωτος SAE304	Χάλυβας P355GH	Ορείχαλκος C26000	Αλουμίνιο Al7075-T6
C_p	Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση [J/(kg K)]	480	470	390	870
H_{vap}	Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης [kJ/kg]	6090	7443	4500	10530
K	Θερμική αγωγιμότητα [W/(m K)]	16	52	120	130
R_{melt}	Ανακλαστικότητα υγρής φάσης	0.57	0.62	0.84	0.80
R_{solid}	Ανακλαστικότητα στερεάς φάσης	0.69	0.91	0.95	0.94
T_{melt}	Θερμοκρασία τήξης [K]	1723	1733	1223	913
T_{vap}	Θερμοκρασία βρασμού [K]	3000	3140	2700	2600
ρ	Πυκνότητα [kg/m ³]	7850	7800	8600	2800

Πίνακας 3.5: Βασικότερες θερμοφυσικές ιδιότητες χρησιμοποιούμενων μετάλλων σύμφωνα με τη σχετική ελεύθερη βάση δεδομένων της εταιρείας Iron Boar Labs Ltd.

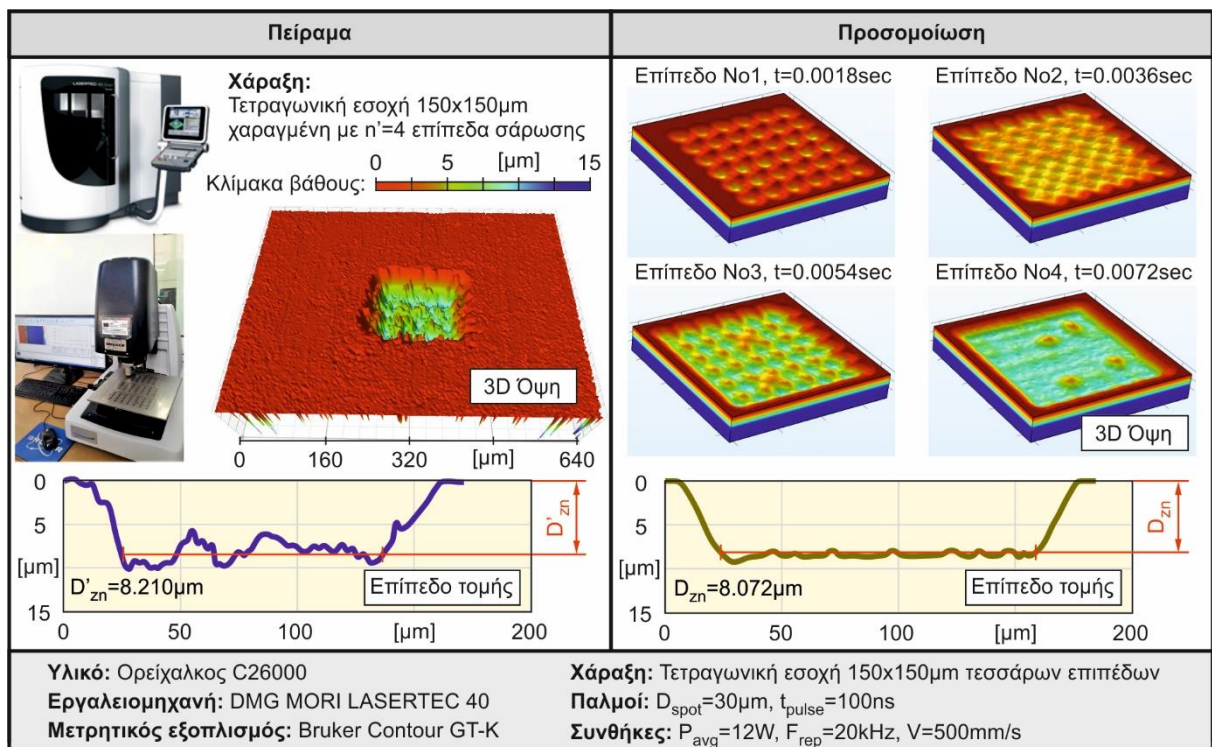
3.7.2 Πειραματική διαδικασία

Για την πειραματική επιβεβαίωση του 3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων πραγματοποιήθηκε μια μεγάλη σειρά από πειράματα χάραξης με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40 σε διάφορα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά, με τέτοιο τρόπο, ώστε οι πειραματικές χαράξεις να υλοποιηθούν με όμοια διαδικασία όπως τις χαράξεις που προσομοιώθηκαν αριθμητικά με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Προκειμένου να αποφασιστεί ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθούν τα πειράματα χάραξης ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν για την πειραματική επιβεβαίωση του προσομοιωτικού μοντέλου εξετάστηκαν δύο πιθανές εκδοχές: Η πρώτη εκδοχή αφορούσε την υλοποίηση πειραμάτων, χάραξης με ακριβώς ίδιο τρόπο όπως στις προσομοιώσεις. Η δεύτερη εκδοχή αφορούσε την υλοποίηση πειραμάτων χαράξεων με μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτές των προσομοιώσεων. Από τις δεύτερες θα μπορούσε εύκολα και με μεγάλη ακρίβεια να μετρηθεί το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού για την κάθε περίπτωση, το οποίο θα αποτελέσει την παράμετρο για τη σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Η πρώτη εκδοχή για την υλοποίηση των πειραμάτων χάραξης με στόχο την πειραματική επιβεβαίωση του προσομοιωτικού μοντέλου, ήταν η διενέργεια πειραμάτων χάραξης τα οποία να αφορούν την ίδια ακριβώς χάραξη με αυτή των προσομοιώσεων. Έτσι, δοκιμάστηκε να πραγματοποιηθεί ένα μεγάλο πλήθος από χαράξεις μιας τετραγωνικής εσοχής με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser LASERTEC 40 χρησιμοποιώντας τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας, την ίδια στρατηγική σάρωσης και το ίδιο υλικό με τις προσομοιώσεις. Οι

χαραγμένες πειραματικά τετραγωνικές εσοχές σε αυτή την πρώτη εκδοχή επιλέχθηκε να είναι ίδιων ακριβώς διαστάσεων με αυτές των προσομοιώσεων και να χαραχτούν με τον ίδιο αριθμό επιπέδων σάρωσης. Ένα παράδειγμα για την πειραματική διαδικασία που δοκιμάστηκε σύμφωνα με αυτή την πρώτη εκδοχή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.29.

Στο αριστερό μέρος στο σχήμα 3.29 παρουσιάζεται η περίπτωση της πειραματικής χάραξης με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών LASERTEC 40 μιας τετραγωνικής εσοχής διαστάσεων $150 \times 150 \mu\text{m}$ με συνολικό αριθμό επιπέδων σάρωσης $n'=4$ χρησιμοποιώντας την μονοκατευθυντική διασταυρούμενη (unidirectional cross hatching) στρατηγική σάρωσης σε πλάκα από ορείχαλκο C26000. Οι συνθήκες κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι: μέση ισχύς $P_{\text{avg}}=12\text{W}$, ταχύτητα της δέσμης $V=500\text{mm/s}$ και συχνότητα επανάληψης των παλμών $F_{\text{rep}}=20\text{kHz}$. Η χαραγμένη εσοχή μετρήθηκε με τη χρήση του 3D οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K. Έτσι, στο αριστερό μέρος στο σχήμα 3.29 δίνεται το 3D προφίλ επιφάνειας της χάραξης καθώς και το 2D προφίλ της επιφάνειας σε μια θέση τομής όπως αυτά μετρήθηκαν.



Σχήμα 3.29: Πρώτη εκδοχή πειραματικής διαδικασίας που εξετάστηκε για την πειραματική επιβεβαίωση του προσομοιωτικού μοντέλου

Στο δεξί μέρος του σχήματος 3.29 παρουσιάζεται η ίδια ακριβώς περίπτωση χάραξης, όπως αυτή προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας το 3D προσομοιωτικό μοντέλο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι παρουσιάζεται το πως εξελίσσεται η κατεργασία χάραξης με την πάροδο του χρόνου δίνοντας τέσσερα στιγμιότυπα που αντιστοιχούν στο πέρας της χάραξης κάθε επιπέδου σάρωσης, καθώς επίσης και το 2D προφίλ της επιφάνειας σε μια θέση τομής της τελικής χαραγμένης αριθμητικά εσοχής.

Έχοντας το 3D προφίλ της χαραγμένης εσοχής από την πειραματική δοκιμή χάραξης και από την αντίστοιχη προσομοίωση υπολογίζεται εύκολα και για τις δύο περιπτώσεις το συνολικό βάθος της χάραξης. Υπολογίζεται υπολογίζοντας τη διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής του ύψους των σημείων που αντιστοιχούν στην επιφάνεια του αρχικού τεμαχίου με τη μέση τιμή

του ύψους των σημείων που αντιστοιχούν στον πυθμένα της εσοχής. Έτσι, για το παράδειγμα χάραξης που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.29 προέκυψε το συνολικό βάθος χάραξης από την πειραματική δοκιμή να είναι $D'_{zn}=8.210\mu m$ και από την προσομοίωση να είναι $D_{zn}=8.072\mu m$.

Η πρώτη εκδοχή για την πειραματική διαδικασία που δοκιμάστηκε όπως παρουσιάστηκε παραπάνω είχε ορισμένες τεχνικές δυσκολίες που απετέλεσαν τροχοπέδη για την καθολική υιοθέτηση της. Οι δυσκολίες που εντοπίστηκαν αφορούν κυρίως τη μέτρηση της τετραγωνικής εσοχής με το οπτικό προφιλόμετρο Bruker Contour GT-K και οφείλονται κατά κύριο λόγο στις εξαιρετικά μικρές διαστάσεις της χαραγμένης εσοχής. Το πρώτο πρόβλημα που παρουσιάστηκε αφορά τις επικαθίσεις που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της θερμικής κατεργασίας που υφίσταται το υλικό μέσω της δέσμης Laser για την αφαίρεσή του. Το κέντρο κατεργασιών LASERTEC 40 είναι εφοδιασμένο με σύστημα αναρρόφησης σκόνης και απαγόμενων αερίων, δημιουργώντας μια υποπίεση με τη χρήση κάποιου ισχυρού ανεμιστήρα, έτσι ώστε οι επικαθίσεις που εμφανίζονται κατά την κατεργασία πάνω στο τεμάχιο να απομακρύνονται. Όμως, εξαιτίας του υπερβολικά μικρού μεγέθους της εσοχής, η ροή του αέρα αναρρόφησης δεν ήταν εφικτό να καθαρίσει τις επικαθίσεις στον πυθμένα της εσοχής. Για τον καθαρισμό των εσοχών δοκιμάστηκε η χρήση πεπιεσμένου αέρα αλλά και νερού δίχως όμως να είναι αποτελεσματικά. Έτσι, τυχόν επικαθίσεις που παρέμεναν στον πυθμένα της εσοχής επηρέαζαν σε κάποιες περιπτώσεις σημαντικά τη μέτρηση.

Άλλη μια τεχνική δυσκολία που παρουσιάστηκε αφορά την αρχή λειτουργίας του οπτικού προφιλόμετρο. Προκειμένου να ληφθεί μια σωστή μέτρηση με το οπτικό προφιλόμετρο πρέπει οι διαμορφώσεις που υπάρχουν στη μετρούμενη επιφάνεια να έχουν τέτοιες αναλογίες πλευρικών διαστάσεων και βάθους, έτσι ώστε το φως που εκπέμπει το προφιλόμετρο να μπορεί να εισέλθει και να ανακλαστεί προς τα πίσω επαρκώς ώστε να γίνει μια σωστή μέτρηση. Παρατηρήθηκε ότι σε εσοχές με μικρές διαστάσεις και μεγάλο βάθος το προφιλόμετρο δεν ήταν σε θέση να λάβει ακριβή μέτρηση επειδή ο αριθμός των σημείων που είχαν μικρή αβεβαιότητα και θεωρούνταν έγκυρα (τα έγκυρα σημεία μιας μέτρησης υπολογίζονται αυτόματα από το λογισμικό του προφιλόμετρο) ήταν πολύ περιορισμένος.

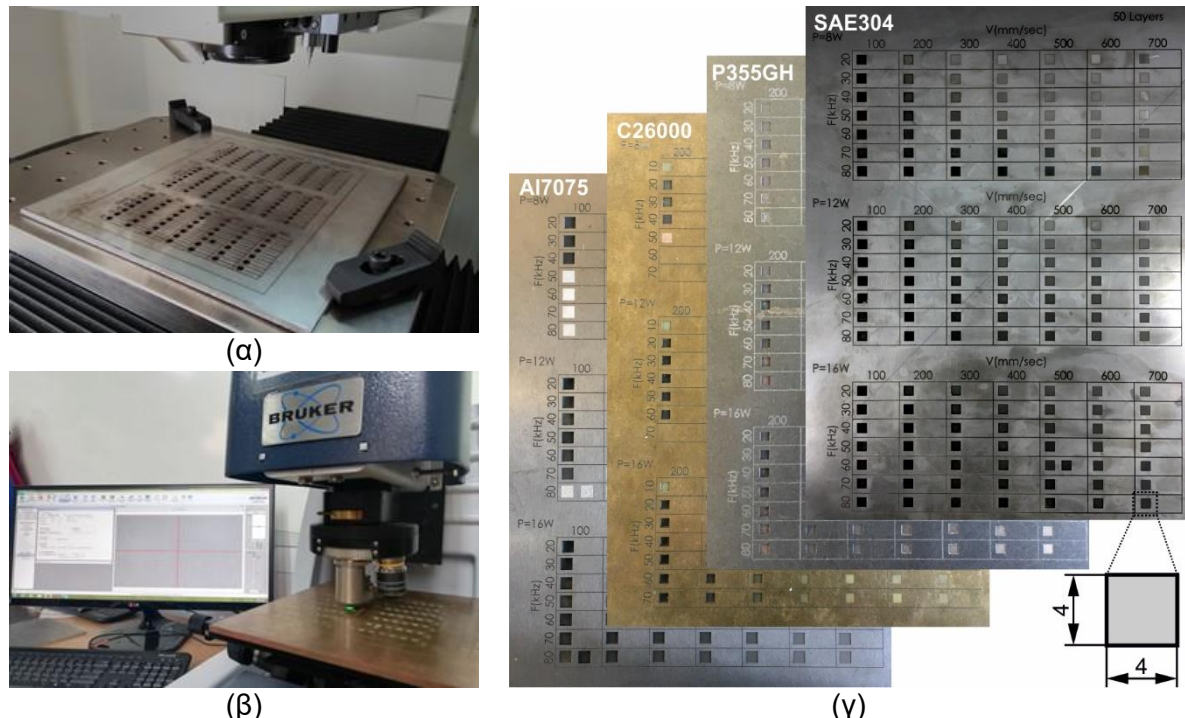
Η δεύτερη εκδοχή για την πειραματική διαδικασία που εξετάστηκε και υλοποιήθηκε τελικά για όλα τα πειράματα που αφορούν την πειραματική επιβεβαίωση του 3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, μοιάζει με την προηγούμενα αλλά υπάρχει μια διαφοροποίηση ως προς τις διαστάσεις και τον αριθμό των επιπέδων σάρωσης. Το μέγεθος των πλευρών μιας εσοχής που χαράσσεται ή ο συνολικός αριθμός των επιπέδων σάρωσης, δεν επηρεάζουν το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού που απομακρύνεται με κάθε σάρωση της επίπεδης επιφάνειας από τους παλμούς της δέσμης Laser. Δηλαδή, είτε εξετάζεται μια μεγάλη εσοχή, είτε μια μικρή, το μέσο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού θα είναι το ίδιο. Εφόσον λοιπόν η παράμετρος του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού είναι αυτή που θα αποτελέσει το κριτήριο για τη σύγκριση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε να υλοποιηθούν πειράματα χάραξης με εσοχές μεγαλύτερων διαστάσεων από ότι στις προσομοιώσεις για να περιοριστούν οι τεχνικές δυσκολίες στη μέτρηση που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επίσης, για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος στον υπολογισμό του μέσου πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού από το σφάλμα στη μέτρηση του συνολικού βάθους της εσοχής, επιλέχθηκε να γίνει στα πειράματα χάραξης μεγαλύτερος αριθμός επιπέδων σάρωσης από ότι στις προσομοιώσεις.

Με βάση τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων χάραξης με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.30 (α) με τρόπο όμοιο με αυτόν των προσομοιώσεων σε πλάκες πάχους 5mm και

διαστάσεων περίπου στα 200x250mm από ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, ορείχαλκο C26000 και κράμα αλουμινίου Al7075-T6. Χαράχτηκαν τετραγωνικές εσοχές διαστάσεων 4x4mm για διάφορους συνδυασμούς των συνθηκών κατεργασίας με συνολικό αριθμό επιπέδων σάρωσης $n'=50$ για το ανοξείδωτο ατσάλι SAE304, τον χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH και τον ορείχαλκο C26000 και $n'=30$ για το κράμα αλουμινίου Al7075-T6. Ο αριθμός των επιπέδων σάρωσης n για το κάθε υλικό επιλέχθηκε έτσι ώστε να είναι αρκετά μεγάλος για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα στο μετρούμενο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού αλλά ταυτόχρονα το συνολικό βάθος της χάραξης να είναι μικρότερο από το πάχος της πλάκας (να μην διαπεράσει την πλάκα η χάραξη).

Συνθήκες κατεργασίας	Μονάδες	Επίπεδα			
		Ανοξείδωτο SAE304	Αλουμίνιο Al7075-T6	Χάλυβας P355GH	Ορείχαλκος C26000
Μέση ισχύς P_{avg}	W	8, 12, 16	8, 12, 16	8, 12, 16	8, 12, 16
Ταχύτητα δέσμης V	mm/s	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800	200, 300, 400, 500, 600, 700, 800
Συχνότητα παλμών F_{rep}	kHz	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
Επίπεδα σάρωσης n		50	30	50	50

Πίνακας 3.6: Επίπεδα των συνθηκών κατεργασίας που εξετάστηκαν στα πειράματα



Σχήμα 3.30: (α) Χάραξη τετραγωνικών εσοχών σε πλάκα από ανοξείδωτο ατσάλι SAE304 στο κέντρο κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40 (β) Μέτρηση τετραγωνικών εσοχών στο 3D οπτικό προφιλόμετρο Bruker Contour GT-K (γ) Πλάκες με τις χαραγμένες τετραγωνικές εσοχές

Οι συνθήκες κατεργασίας που εξετάστηκαν στα πειράματα είναι: μέση ισχύς (average power) P_{avg} , ταχύτητα δέσμης (scanning speed) V , συχνότητα επανάληψης παλμών (repetition rate) F_{rep} . Για κάθε υλικό επιλέχθηκε να εξεταστούν 3 επίπεδα για τη μέση ισχύ, 7 επίπεδα για την ταχύτητα της δέσμης και 7 επίπεδα για τη συχνότητα επανάληψης των παλμών, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.6. Το εύρος των τιμών που εξετάστηκαν για κάθε μία από τις συνθήκες κατεργασίας ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό, επιλέχθηκε σύμφωνα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή του κέντρου κατεργασιών. Στο σχήμα 3.30 (γ) παρουσιάζονται οι κατεργασμένες πλάκες, όπως αυτές προέκυψαν έπειτα από τη χάραξη των τετραγωνικών εσοχών πάνω σε αυτές.

Κάθε μια από τις τετραγωνικές εσοχές μετρήθηκε με τη χρήση του 3D οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.30 (β). Δηλαδή, μέσω του οπτικού προφιλόμετρου σαρώθηκε η τρισδιάστατη γεωμετρία της κάθε εσοχής και αποκτήθηκε το αντίστοιχο νέφος σημείων που αντιστοιχούν στην επιφάνεια της χάραξης. Λόγω του περιορισμένου εύρους μέτρησης του οπτικού προφιλόμετρου με τον διαθέσιμο φακό (πεδίο σάρωσης 1.26x0.9mm), επιλέχθηκε να μετρηθεί μια περιοχή κοντά στο σύνορο της χαραγμένης εσοχής. Αυτό επιλέχθηκε ώστε να συμπεριληφθούν και να είναι ορατά στη μέτρηση και η πάνω επιφάνεια του τεμαχίου και ο πυθμένας της εσοχής ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός του συνολικού βάθους χάραξης. Από την ανάλυση των δεδομένων από τις μετρήσεις των εσοχών υπολογίστηκε για κάθε χαραγμένη εσοχή το συνολικό βάθος χάραξης D'_{zn} . Έπειτα, διαιρώντας το συνολικό βάθος χάραξης κάθε εσοχής D'_{zn} με τον αριθμό των επιπέδων σάρωσης n' , υπολογίστηκε για κάθε μία από αυτές το μέσο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D'_z . Το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού που προέκυψε για κάθε πειραματικά χαραγμένη εσοχή D'_z είναι αυτό που συγκρίνεται με το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού που προέκυψε από την αντίστοιχη προσομοίωση D_z για την επιβεβαίωση και την αξιολόγηση της ακρίβειας του προσομοιωτικού μοντέλου.

3.7.3 Διαδικασία σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

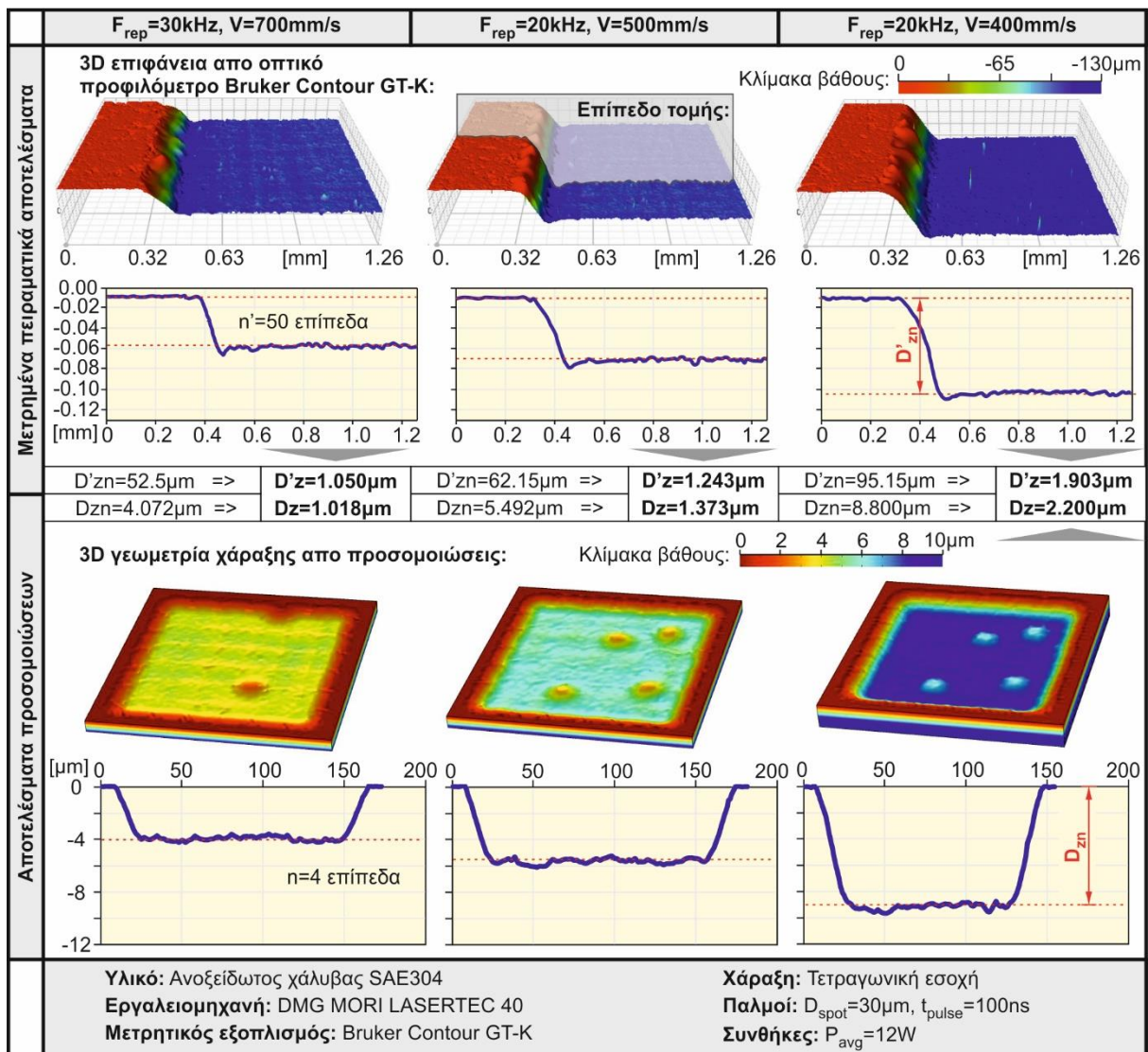
Στο σχήμα 3.31 παρουσιάζονται τόσο τα πειραματικά αποτελέσματα όσο και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τρεις τυχαίες διαφορετικές περιπτώσεις συνθηκών κατεργασίας κατά την χάραξη $F_{rep}[\text{kHz}] / V[\text{mm/s}]$: 30/700, 20/500, 20/400. Για τα πειράματα το υλικό χάραξης είναι ανοξείδωτος χάλυβας SAE304, στο οποίο χαραχτήκαν τετραγωνικές εσοχές διαστάσεων 4x4mm με συνολικό αριθμό επιπέδων σάρωσης $n'=50$ και χρησιμοποιήθηκε το κέντρο κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40 παράγοντας παλμούς δέσμης Laser διαμέτρου στο σημείο εστίασης $D_{spot}=30\mu\text{m}$, με χρονική διάρκεια $t_{pulse}=100\text{ns}$ και μέση ισχύ $P_{avg}=12\text{W}$.

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο οι αντίστοιχες παράμετροι για το υλικό και το κέντρο κατεργασιών, ενώ πραγματοποιήθηκαν οι χαράξεις των εσοχών για $n=4$ επίπεδα σάρωσης. Για τις πειραματικά χαραγμένες εσοχές και για τις εσοχές από τις προσομοιώσεις υπολογίστηκαν τα συνολικά τους βάθη χάραξης D'_{zn} και D_{zn} αντίστοιχα από τα οποία διαιρώντας με τον αριθμό επιπέδων σάρωσης n' και n προέκυψαν τα πάχη στρώματος αφαίρεσης υλικού D'_z και D_z .

Για την περίπτωση της χάραξης με συχνότητα επανάληψης παλμών $F_{rep}=30\text{kHz}$ και ταχύτητα δέσμης $V=700\text{mm/s}$ το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού από τη πειραματική δοκιμή προέκυψε $D'_z=1.050\mu\text{m}$, ενώ από την προσομοίωση προέκυψε $D_z=1.018\mu\text{m}$, διαμορφώνοντας έτσι το απόλυτο σφάλμα της προσομοίωσης ίσο με $E_t=0.032\mu\text{m}$. Για την περίπτωση της χάραξης με $F_{rep}=20\text{kHz}$ και $V=500\text{mm/s}$ προέκυψε $D'_z=1.243\mu\text{m}$ και

$D_z=1.373\mu\text{m}$ διαμορφώνοντας το απόλυτο σφάλμα της προσομοίωσης ίσο με $E_t=-0.13\mu\text{m}$. Για την περίπτωση της χάραξης με $F_{\text{rep}}=20\text{kHz}$ και $V=400\text{mm/s}$ προέκυψε $D'_z=1.903\mu\text{m}$ και $D_z=2.200\mu\text{m}$ διαμορφώνοντας έτσι το απόλυτο σφάλμα της προσομοίωσης ίσο με $E_t=-0.297\mu\text{m}$.

Παρατηρείται από τα αποτελέσματα ότι το απόλυτο σφάλμα του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού της προσομοίωσης σε σχέση με το πειραματικά μετρούμενο είναι σε όλες τις περιπτώσεις της τάξεως μερικών δέκατων του μικρομέτρου. Το σφάλμα αυτό είναι ιδιαίτερα χαμηλό αν αναλογιστεί κανείς ότι το κέντρο κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40 δέχεται στο λογισμικό LPSWin το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού για να υπολογίσει τον συνολικό αριθμό επιπέδων σάρωσης που πρέπει να πραγματοποιηθούν στην εκάστοτε χάραξη με ακρίβεια ενός δέκατου του μικρομέτρου. Το απόλυτο σφάλμα δηλαδή για τις παραπάνω περιπτώσεις πλησιάζει την ακρίβεια του λογισμικού του controller της μηχανής.



Σχήμα 3.31: Παρουσίαση τριών διαφορετικών περιπτώσεων χάραξης για τη σύγκριση ανάμεσα σε πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοιώσεων

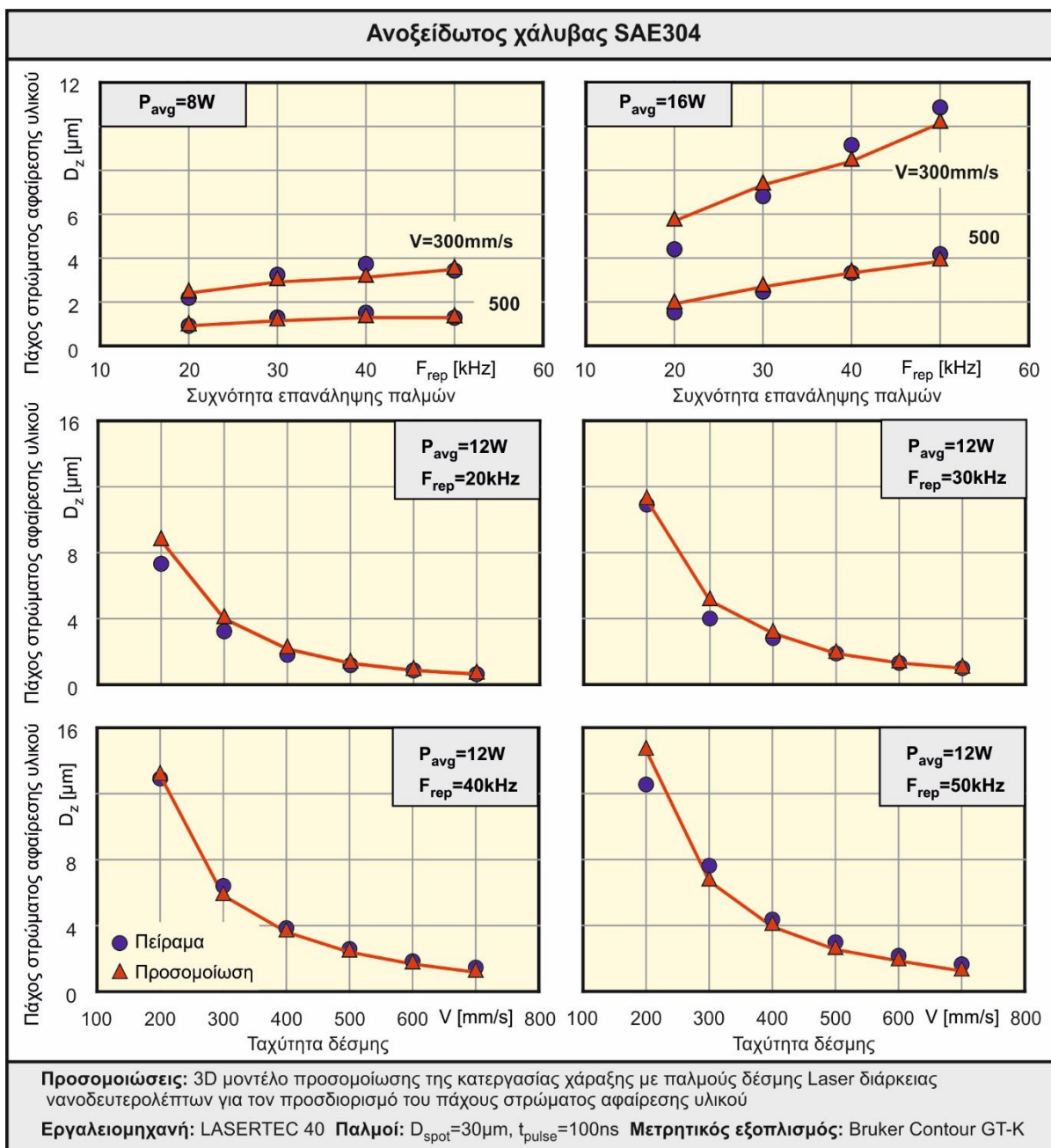
3.8 Αποτελέσματα

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι πίνακες με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού που προκύπτει κατά τη χάραξη με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, για διάφορα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά και ένα μεγάλο αριθμό από συνδυασμούς των συνθηκών κατεργασίας.

Στον πίνακα 3.7 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού από τις προσομοιώσεις D_z και του μετρούμενου από τα πειράματα D'_z που προκύπτουν κατά την κατεργασία ανοξείδωτου χάλυβα SAE304, σύμφωνα με την διαδικασία που παρουσιάστηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, για τους διάφορους συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας. Στο σχήμα 3.32 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν για το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού κατά την κατεργασία ανοξείδωτου χάλυβα SAE304 από τα πειράματα και τις προσομοιώσεις. Από τα διαγράμματα στο σχήμα 3.32 γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων πλησιάζουν πάρα πολύ τις πειραματικές μετρήσεις του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού και ταυτόχρονα εμφανίζουν την ίδια τάση ως προς την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η απόκλιση μεταξύ των τιμών του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού από τις προσομοιώσεις και τα πειράματα, υπολογίστηκαν οι τιμές του μέσου σφάλματος (mean error) **ME** και του μέσου απόλυτου σφάλματος (mean absolute error) **MAE** από την εξίσωση (3.51) και την εξίσωση (3.52) αντίστοιχα.

Ανοξείδωτος χάλυβας SAE304										
P _{avg} [W]	F _{rep} [kHz]	V [mm/s]	D _z [μm]	D'z [μm]	P _{avg} [W]	F _{rep} [kHz]	V [mm/s]	D _z [μm]	D'z [μm]	
8	20	300	2.386	2.251	12	40	200	13.016	12.858	
		500	0.851	0.909			300	5.771	6.319	
	30	300	2.966	3.202			400	3.582	3.768	
		500	1.134	1.254			500	2.345	2.504	
	40	300	3.101	3.720			600	1.621	1.755	
		500	1.276	1.479			700	1.128	1.379	
	50	300	3.457	3.365			50	200	14.586	12.488
		500	1.247	1.250				300	6.707	7.578
12	20	200	8.753	7.364		400		4.050	4.315	
		300	4.050	3.302		500		2.553	2.950	
		400	2.200	1.903		600		1.804	2.107	
		500	1.373	1.243		700		1.293	1.568	
		600	0.959	0.910		20		300	5.714	4.412
		700	0.716	0.701				500	1.983	1.552
	30	200	11.239	10.913		30	300	7.350	6.864	
		300	5.141	4.194			500	2.727	2.516	
400		3.134	2.919	40	300		8.401	9.130		
500		1.918	1.928		500		3.300	3.347		
600		1.376	1.384	50	300		10.119	10.856		
700		1.018	1.050		500		3.896	4.129		

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για ανοξείδωτο χάλυβα SAE304



Σχήμα 3.32: Εκτιμώμενες και μετρούμενες τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού κατά την κατεργασία ανοξείδωτου χάλυβα SAE304

Το μέσο σφάλμα χρησιμοποιείται ως δείκτης για τον υπολογισμό της ακρίβειας της εκτίμησης, δηλαδή εάν λάβει υψηλές θετικές ή αρνητικές τιμές, μπορεί να δείξει ότι υπάρχει συστηματικό σφάλμα στα αποτελέσματα του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού της προσομοίωσης. Το μέσο σφάλμα δίνει σημαντικές πληροφορίες, όμως θα πρέπει αυτές να ερμηνεύονται προσεκτικά διότι ενέχει ο κίνδυνος μεγάλα θετικά και μεγάλα αρνητικά σφάλματα να ακυρωθούν αναμεταξύ τους. Γι' αυτό το λόγο υπολογίζεται και το μέσο απόλυτο σφάλμα που χρησιμοποιείται επίσης ως δείκτης για τον υπολογισμό της ορθότητας και της ακρίβειας της εκτίμησης των προσομοιώσεων. Οι τιμές του μέσου σφάλματος και του μέσου απολύτου σφάλματος του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού που προβλέφθηκε για τον ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, προέκυψαν ίσες με **ME**=0.065μm και **MAE**=0.386μm. Η τιμή του μέσου σφάλματος είναι εξαιρετικά μικρή (μερικά εκατοστά του μικρομέτρου) που σε συνδυασμό με

την πάρα πολύ μικρή τιμή του μέσου απόλυτου σφάλματος (μερικά δέκατα του μικρομέτρου) αποδεικνύει ότι το αναπτυχθέν προσομοιωτικό μοντέλο ανταποκρίνεται άριστα και με υψηλή ακρίβεια στις ανάγκες για την προσομοίωση της κατεργασίας ανοξείδωτου χάλυβα SAE304.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_{z, i} - D'_{z, i}) \quad (3.51)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_{z, i} - D'_{z, i}| \quad (3.52)$$

Παρατηρώντας τα διαγράμματα στο σχήμα 3.32 μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα όσο αναφορά την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z κατά την κατεργασία με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων του ανοξείδωτου χάλυβα SAE304, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις. Όσον αφορά την επίδραση της μέσης ισχύος P_{avg} , παρατηρείται ότι αύξηση της μέσης ισχύος οδηγεί σε αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού, δηλαδή το D_z μεγιστοποιείται για τη μέγιστη εξεταζόμενη τιμή της μέσης ισχύος $P_{avg}=16W$. Όσο αναφορά την επίδραση της ταχύτητας της δέσμης V , παρατηρείται ότι μείωση της ταχύτητας της δέσμης οδηγεί σε αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού, δηλαδή το D_z μεγιστοποιείται για την ελάχιστη εξεταζόμενη τιμή της ταχύτητας της δέσμης $V=200mm/s$. Τέλος όσον αφορά την επίδραση της συχνότητας επανάληψης παλμών F_{rep} , παρατηρείται ότι, αύξηση της συχνότητας επανάληψης παλμών, οδηγεί σε αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού, δηλαδή το D_z μεγιστοποιείται για την μέγιστη εξεταζόμενη τιμή της συχνότητας επανάληψης παλμών $F_{rep}=50kHz$.

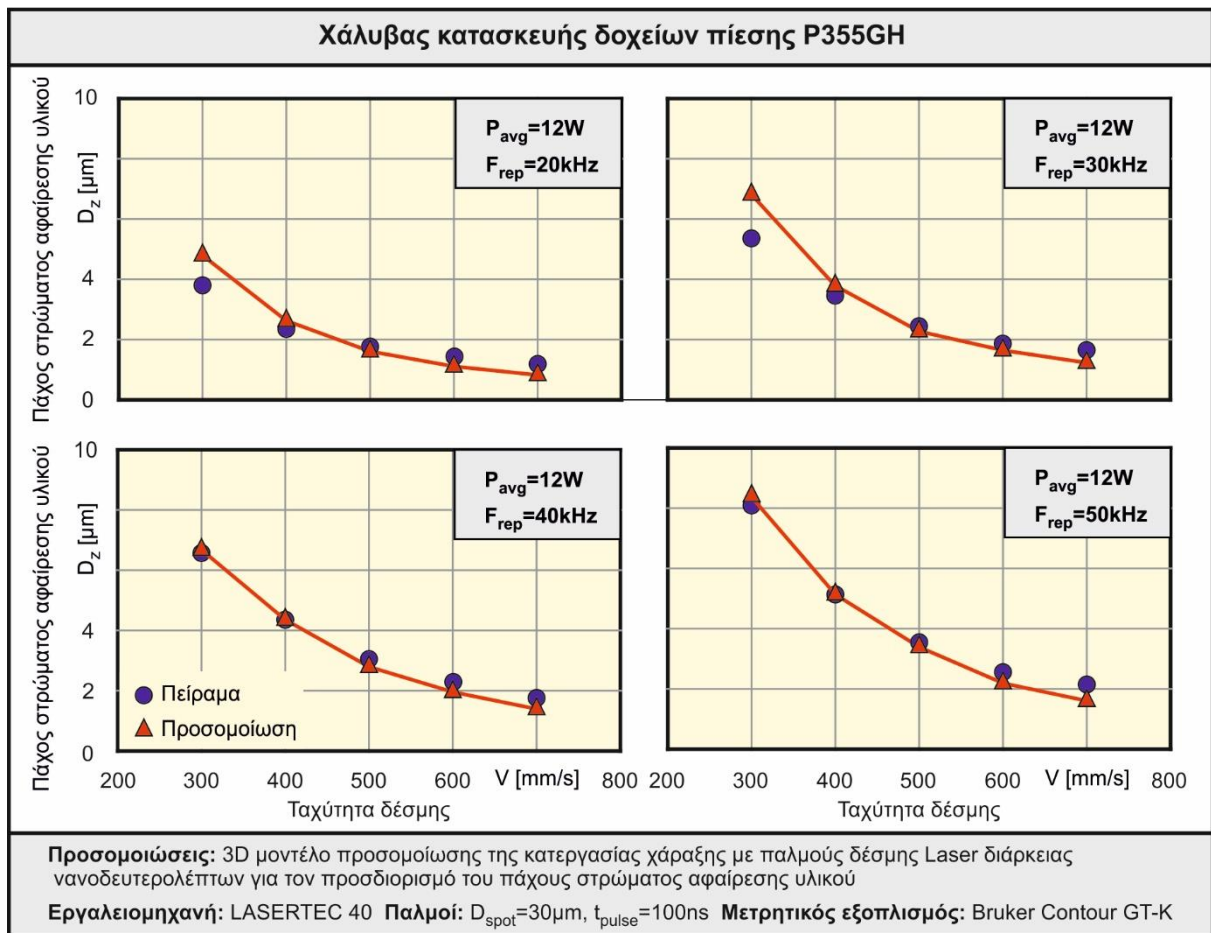
Επισημαίνεται ότι η επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, έρχεται σε συμφωνία και με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ανάμεσα στους διάφορους συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας που εξετάστηκαν για τον ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 το μέγιστο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού προβλέφθηκε από τις προσομοιώσεις ίσο με $D_z=14.586\mu m$ για $P_{avg}=12W$, $F_{rep}=50kHz$, $V=200mm/s$, ενώ το ελάχιστο ίσο με $D_z=0.716\mu m$ για $P_{avg}=12W$, $F_{rep}=20kHz$, $V=700mm/s$.

Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού από τις προσομοιώσεις D_z και του μετρούμενου από τα πειράματα D'_z που προκύπτουν κατά την κατεργασία χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH. Επιπλέον, στο σχήμα 3.33 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν για το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού κατά την κατεργασία χάλυβα δοχείων πίεσης P355GH από τα πειράματα και τις προσομοιώσεις. Παρατηρώντας τα διαγράμματα στο σχήμα 3.33 φαίνεται ότι η επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έρχεται σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον, προκύπτουν για το χάλυβα δοχείων πίεσης P355GH όμοια συμπεράσματα με αυτά του ανοξείδωτου χάλυβα, σχετικά με την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού. Αναλυτικότερα, αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z παρατηρείται με μείωση της ταχύτητας της δέσμης V και αύξηση της συχνότητας επανάληψης των παλμών F_{rep} . Ανάμεσα στους διάφορους συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας που εξετάστηκαν για τον χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, το μέγιστο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού προβλέφθηκε από τις προσομοιώσεις ίσο με $D_z=8.330\mu m$ για $P_{avg}=12W$, $F_{rep}=50kHz$, $V=300mm/s$, ενώ το ελάχιστο ίσο με $D_z=0.846\mu m$ για $P_{avg}=12W$, $F_{rep}=20kHz$, $V=700mm/s$. Για τις τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού που προβλέφθηκαν από τις προσομοιώσεις για τον χάλυβα δοχείων πίεσης P355GH, υπολογίστηκε το μέσο σφάλμα ίσο με $ME=0.002\mu m$

και το μέσο απόλυτο σφάλμα ίσο με **MAE=0.340μm**. Όμοια με πριν, η τιμή του μέσου σφάλματος που είναι μερικά χιλιοστά του μικρομέτρου θεωρείται εξαιρετικά μικρή και σε συνδυασμό με την πολύ μικρή τιμή του μέσου απολύτου σφάλματος που είναι μερικά δέκατα του μικρομέτρου αποδεικνύουν ότι το προσομοιωτικό μοντέλο ανταποκρίνεται με υψηλή ακρίβεια στις ανάγκες για προσομοίωση της κατεργασίας χάλυβα δοχείων πίεσης P355GH.

Χάλυβας κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH									
P _{avg} [W]	F _{rep} [kHz]	V [mm/s]	D _z [μm]	D' _z [μm]	P _{avg} [W]	F _{rep} [kHz]	V [mm/s]	D _z [μm]	D' _z [μm]
12	20	300	4.794	3.827	12	40	300	6.676	6.580
		400	2.617	2.362			400	4.330	4.319
		500	1.645	1.737			500	2.785	2.986
		600	1.147	1.430			600	1.935	2.252
		700	0.846	1.197			700	1.364	1.750
	30	300	6.794	5.330		50	300	8.330	8.059
		400	3.739	3.419			400	5.078	5.036
		500	2.249	2.377			500	3.387	3.540
		600	1.638	1.831			600	2.183	2.526
		700	1.198	1.605			700	1.604	2.130

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH

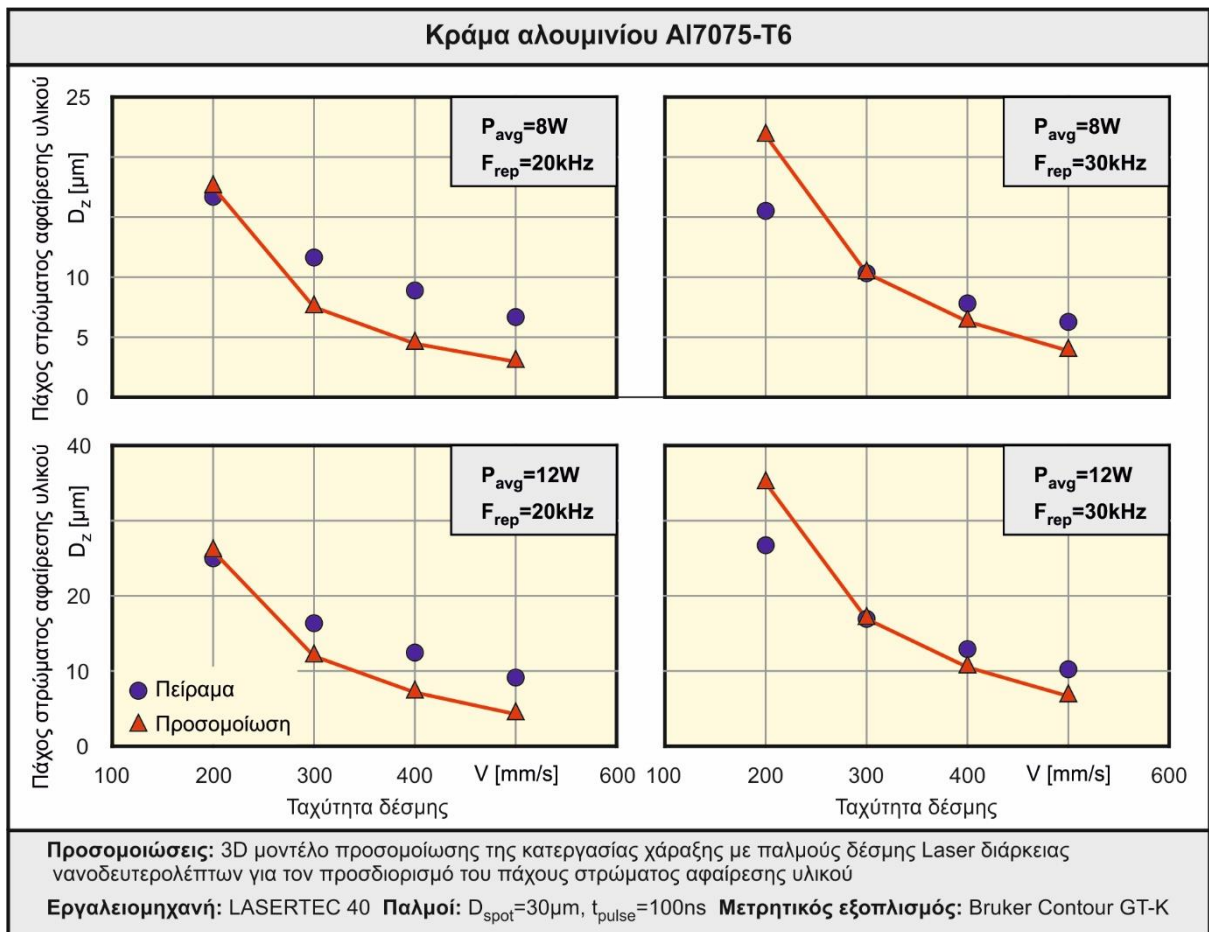


Σχήμα 3.33: Εκτιμώμενες και μετρούμενες τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για τον χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH

Στον πίνακα 3.9 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού από τις προσομοιώσεις D_z και του μετρούμενου από τα πειράματα D'_z που προκύπτουν κατά την κατεργασία κράματος αλουμινίου Al7075-T6. Επιπλέον, στο σχήμα 3.34 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν για το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού κατά την κατεργασία κράματος αλουμινίου Al7075-T6 από τα πειράματα και τις προσομοιώσεις.

Κράμα αλουμινίου Al7075-T6									
P_{avg} [W]	F_{rep} [kHz]	V [mm/s]	D_z [μ m]	D'_z [μ m]	P_{avg} [W]	F_{rep} [kHz]	V [mm/s]	D_z [μ m]	D'_z [μ m]
8	20	200	17.692	16.805	12	20	200	26.329	25.134
		300	7.538	11.677			300	12.125	16.688
		400	4.517	8.971			400	7.236	12.770
		500	3.013	6.695			500	4.433	9.593
	30	200	21.694	15.465		30	200	35.160	26.614
		300	10.236	10.087			300	16.660	16.702
		400	6.243	7.732			400	10.265	12.768
		500	3.939	6.288			500	6.565	9.966

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για κράμα αλουμινίου Al7075-T6



Σχήμα 3.34: Εκτιμώμενες τιμές από προσομοιώσεις και μετρούμενες τιμές από πειράματα του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για το κράμα αλουμινίου Al7075-T6

Από τα διαγράμματα στο σχήμα 3.34 παρατηρείται σχετικά την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καθώς και τα πειράματα ισχύει ότι: αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z εμφανίζεται για αύξηση της μέσης ισχύος P_{avg} και μείωση της ταχύτητας της δέσμης V . Σχετικά με τη συχνότητα επανάληψης των παλμών F_{rep} φαίνεται να μην μπορεί να βγει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνεται να υπάρχει μια ελάχιστη μικρή αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z με την αύξηση της συχνότητας επανάληψης των παλμών F_{rep} ενώ από τα πειράματα δεν φαίνεται να υπάρχει ξεκάθαρη εικόνα για την επίδρασή της.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για διάφορους συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας με τις τιμές τους να κυμαίνονται σε ένα εύρος, σύμφωνα με τις υποδείξεις των κατασκευαστών κέντρων κατεργασιών για κατεργασία κραμάτων αλουμινίου, το μέγιστο πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού προέκυψε ίσο με $D_z=35.160\mu m$ για $P_{avg}=12W$, $F_{rep}=30kHz$, $V=200mm/s$ ενώ το ελάχιστο ίσο με $D_z=3.013\mu m$ για $P_{avg}=8W$, $F_{rep}=20kHz$, $V=500mm/s$. Για τις τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού που προβλέφθηκαν από τις προσομοιώσεις για το κράμα αλουμινίου Al7075-T6 υπολογίστηκε το μέσο σφάλμα ίσο με $ME=-1.269\mu m$ και το μέσο απόλυτο σφάλμα ίσο με $MAE=3.395\mu m$. Η αρνητική τιμή της τάξεως του ενός μικρομέτρου που προέκυψε για το μέσο σφάλμα και των μερικών μικρομέτρων για το μέσο απόλυτο σφάλμα, υποδηλώνουν ότι για την περίπτωση του κράματος αλουμινίου Al7075-T6 το προσομοιωτικό μοντέλο έχει μια ελαφρά τάση να προβλέπει τις τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού με μια σχετικά μειωμένη ακρίβεια, καθώς υπολογίζονται ελάχιστα μικρότερες σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν πειραματικά.

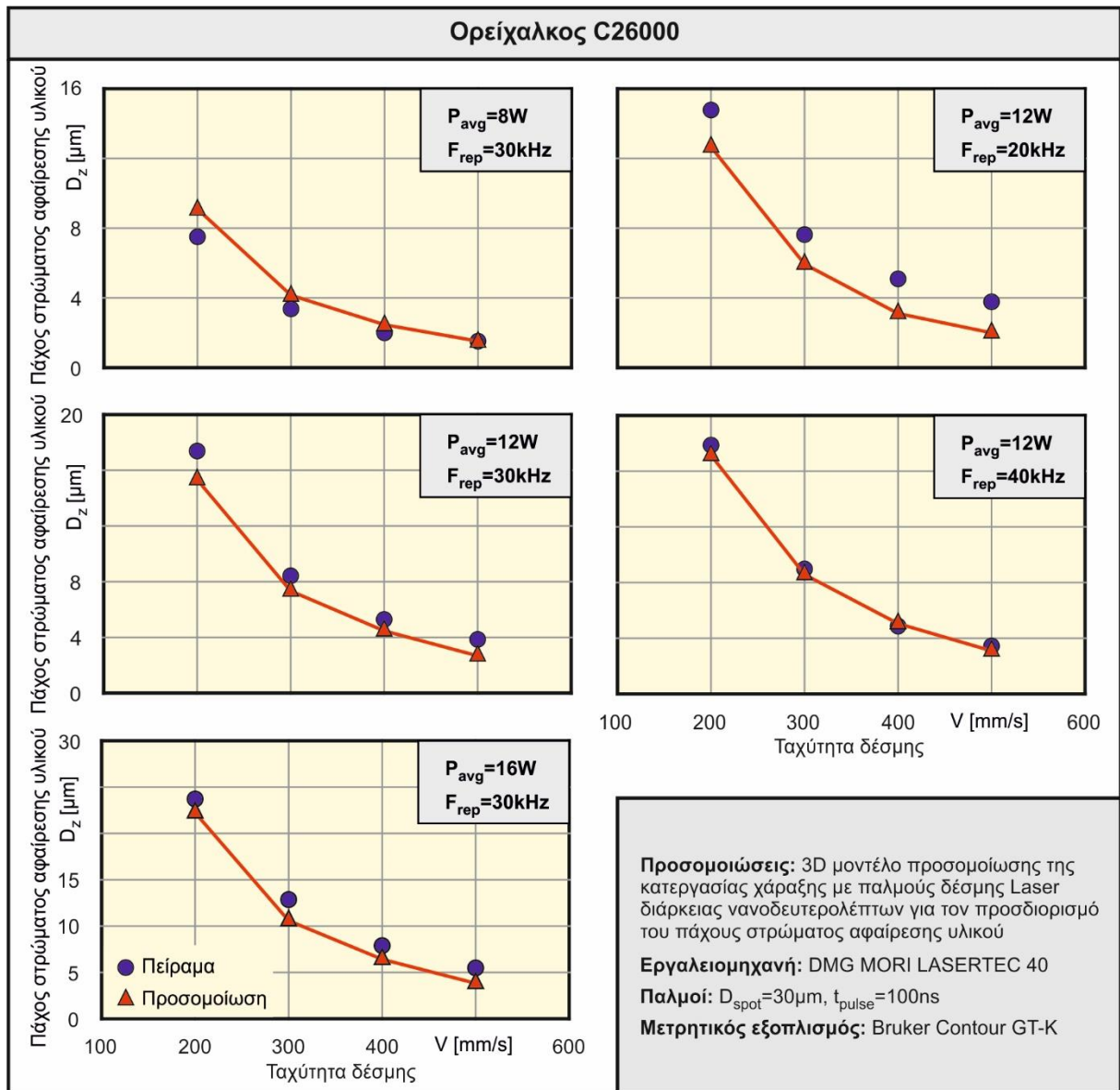
Στον πίνακα 3.10 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού από τις προσομοιώσεις D_z και του μετρούμενου από τα πειράματα D'_z που προκύπτουν κατά την κατεργασία του ορείχαλκου C26000 από τα πειράματα και τις προσομοιώσεις. Επιπλέον, στο σχήμα 3.35 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν για το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού κατά την κατεργασία ορείχαλκου C26000.

Ορείχαλκος C26000									
P_{avg} [W]	F_{rep} [kHz]	V [mm/s]	D_z [μm]	D'_z [μm]	P_{avg} [W]	F_{rep} [kHz]	V [mm/s]	D_z [μm]	D'_z [μm]
8	30	200	9.083	7.492	12	30	400	4.476	5.281
		300	4.147	3.354			500	2.713	3.896
		400	2.456	1.983		40	200	17.115	17.795
		500	1.530	1.527			300	8.574	8.967
12	20	200	12.653	14.765			400	5.001	4.876
		300	5.913	7.613			500	3.126	3.461
		400	3.095	5.087		16	200	22.351	23.741
		500	2.018	3.767			300	10.698	12.940
	30	200	15.345	17.368			400	6.584	8.040
		300	7.339	8.431			500	4.002	5.640

Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για ορείχαλκο C26000

Από τα διαγράμματα στο σχήμα 3.35 γίνεται αντιληπτό ότι οι προσομοιώσεις έρχονται σε συμφωνία με τα πειράματα και δείχνουν ότι αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z προκαλείται με αύξηση της μέσης ισχύος P_{avg} , μείωση της ταχύτητας της δέσμης V και αύξηση της συχνότητας επανάληψης των παλμών F_{rep} . Ανάμεσα στους διάφορους συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας που εξετάστηκαν για τον ορείχαλκο C26000, το μέγιστο

πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού προβλέφθηκε από τις προσομοιώσεις ίσο με $D_z=22.351\mu\text{m}$ για $P_{\text{avg}}=16\text{W}$, $F_{\text{rep}}=30\text{kHz}$, $V=200\text{mm/s}$, ενώ το ελάχιστο ίσο με $D_z=1.530\mu\text{m}$ για $P_{\text{avg}}=8\text{W}$, $F_{\text{rep}}=30\text{kHz}$, $V=500\text{mm/s}$.



Σχήμα 3.35: Εκτιμώμενες τιμές από προσομοιώσεις και μετρούμενες τιμές από πειράματα του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για τον ορείχαλκο C26000

Για τις τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού που προβλέφθηκαν από τις προσομοιώσεις για τον ορείχαλκο C26000, υπολογίστηκε το μέσο σφάλμα ίσο με $ME=-0.890\mu\text{m}$ και το μέσο απόλυτο σφάλμα ίσο με $MAE=1.189\mu\text{m}$. Επειδή οι τιμές του μέσου σφάλματος και του μέσου απόλυτου σφάλματος είναι της τάξης του ενός μικρομέτρου που θεωρούνται σχετικά μικρές υποδηλώνεται ότι το προσομοιωτικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της κατεργασίας του ορείχαλκου C26000 με μια ικανοποιητική ακρίβεια όπως αναφέρθηκε παραπάνω και για τα προηγούμενα υλικά.

Παρατηρώντας τη συμπεριφορά του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού συναρτήσει των συνθηκών κατεργασίας συνολικά για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν, γίνεται φανερό ότι όλα τα υλικά εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Δηλαδή, για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν η

αύξηση της μέσης ισχύος P_{avg} , η μείωση της ταχύτητας της δέσμης V και η αύξηση της συχνότητας επανάληψης των παλμών F_{rep} , έχουν ως απόρροια την αύξηση της τιμής του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού D_z που προκύπτει από τις προσομοιώσεις, η οποία βέβαια συμφωνεί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τα πειράματα. Προκειμένου να μελετηθούν οι λόγοι που τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλα τα υλικά εμφανίζουν κοινή συμπεριφορά ως προς την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας, απαιτείται να πραγματοποιηθεί μια αναδρομή στη θεωρία που διέπει την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων που παρουσιάστηκε σε προηγούμενα κεφάλαια και ιδιαίτερα στις εξισώσεις (3.53) και (3.54).

Όσον αφορά την επίδραση της μέσης ισχύος, από την εξίσωση (3.54) φαίνεται ότι αύξηση της μέσης ισχύος P_{avg} οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης ισχύος παλμού P_{peak} , η οποία είναι η ισχύς που έχει ένας παλμός της δέσμης όταν εξέρχεται από το κέντρο κατεργασιών και κατευθύνεται στο τεμαχίο. Η αύξηση της ισχύος του παλμού που δέχεται το τεμαχίο σημαίνει ότι το ακτινοβολούμενο υλικό του τεμαχίου δέχεται πρακτικά μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από τη δέσμη ανά μονάδα χρόνου, γεγονός που σημαίνει ότι για να διατηρηθεί το ενεργειακό ισοζύγιο όταν το υλικό έχει ήδη φτάσει στην θερμοκρασία ατμοποίησης του, αυξάνεται ταυτόχρονα και ο ρυθμός με τον οποίο ατμοποιείται το υλικό. Αυξάνεται δηλαδή η πυκνότητα ροής της μάζας του υλικού που απομακρύνεται και συνεπώς αυξάνεται και η ταχύτητα αφαίρεσης υλικού v_{abi} από την επιφάνεια του τεμαχίου. Έτσι, με την αύξηση της μέσης ισχύος της δέσμης Laser ο όγκος του υλικού που αφαιρείται από τον κάθε παλμό αυξάνεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας κρατήρας στο υλικό μεγαλύτερων διαστάσεων. Έπειτα από την επαλληλία πολλαπλών παλμών, το γεγονός αυτό οδηγεί τελικά και στην αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού.

Όσον αφορά την επίδραση της ταχύτητας της δέσμης, όπως φαίνεται από την εξίσωση (3.53), η μείωση της ταχύτητας της δέσμης V οδηγεί σε μείωση στην απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών T_d και στην απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών H_d οι οποίες είναι ίσες μεταξύ τους για τη συγκεκριμένη περίπτωση μονοκατευθυντικής διασταρούμενης στρατηγικής σάρωσης που επιλέχθηκε για τις χαράξεις. Έτσι, με τη μείωση της ταχύτητας της δέσμης δημιουργείται ένας περισσότερο πυκνός χάρτης από παλμούς δέσμης Laser ίδιων χαρακτηριστικών που σαρώνουν την επιφάνεια του τεμαχίου, με αποτέλεσμα από την επαλληλία του μεγαλύτερου αριθμού κρατήρων να αφαιρείται μεγαλύτερο πάχος υλικού ανά επίπεδο που σαρώνεται.

Όσον αφορά την επίδραση της συχνότητας επανάληψης των παλμών σύμφωνα με την σχέση (3.53) αύξηση της συχνότητας επανάληψης των παλμών F_{rep} οδηγεί σε μειωμένη απόσταση μεταξύ των παλμών T_d και H_d , δηλαδή ένα περισσότερο πυκνό χάρτη σάρωσης που συμβάλει στην αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού. Η συχνότητα επανάληψης παλμών εμφανίζεται και στη σχέση (3.54) όπου η αύξηση της συχνότητας επανάληψης των παλμών F_{rep} οδηγεί σε μείωση της μέγιστης ισχύος παλμού P_{peak} με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κρατήρες μικρότερου μεγέθους από τους παλμούς και κατά συνέπεια συμβάλει στη μείωση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού. Το γεγονός ότι η αύξηση της τιμής της συχνότητας επανάληψης των παλμών F_{rep} οδήγησε σε μια μικρή αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού σύμφωνα με τα αποτελέσματα, υποδεικνύει ότι η συνεισφορά στη αύξηση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού από την πύκνωση του χάρτη σάρωσης υπερνικά την απώλεια από το μειωμένο μέγεθος των κρατήρων. Βέβαια, λόγω του ότι συμβάλουν δύο αντικρουόμενα μεγέθη, η επίδραση της συχνότητας επανάληψης των παλμών στο πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού προκύπτει να είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτήν από τις υπόλοιπες παραμέτρους των συνθηκών κατεργασίας.

$$d_u = T_d = H_d = \frac{V}{F_{rep}} \quad (3.53)$$

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{t_{pulse} F_{rep}} \quad (3.54)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι η γνώση του μεγέθους του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού συναρτήσει των συνθηκών κατεργασίας δεν είναι αρκετό για να βγουν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας στην παραγωγικότητά της. Αυτό γιατί το πόσο μεγάλος είναι ο συνολικός χρόνος κατεργασίας για τη χάραξη μιας γεωμετρίας δεν εξαρτάται μόνο από το πόσο μεγάλο είναι το πάχος του υλικού που αφαιρείται ανά επίπεδο σάρωσης και τον αριθμό των επιπέδων σάρωσης, αλλά και από τον χρόνο που απαιτείται για την σάρωση κάθε επιπέδου. Για παράδειγμα, όταν σαρώνεται ένα επίπεδο χρησιμοποιώντας πολύ χαμηλή ταχύτητα δέσμης, τότε το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού θα είναι μεγάλο αλλά ταυτόχρονα ο χρόνος που θα απαιτηθεί για την ολική σάρωση του επιπέδου θα είναι ιδιαίτερα υψηλός.

Συνεπώς, για την αξιολόγηση της παραγωγικότητας χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί μια παράμετρος που λαμβάνει υπόψη και το πάχος και την ταχύτητα με την οποία αφαιρείται το υλικό. Αυτή η παράμετρος είναι ο ρυθμός αποβολής υλικού **MRR**. Ο ρυθμός αποβολής υλικού **MRR** κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser υπολογίζεται συναρτήσει της ταχύτητας της δέσμης **V**, της συχνότητας επανάληψης των παλμών **F_{rep}** και του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού **D_z** από την εξίσωση (3.55).

$$MRR \left[\frac{mm^3}{s} \right] = \frac{V \left[\frac{mm}{s} \right]^2 D_z [\mu m]}{F_{rep} [kHz]} 10^{-6} \quad (3.55)$$

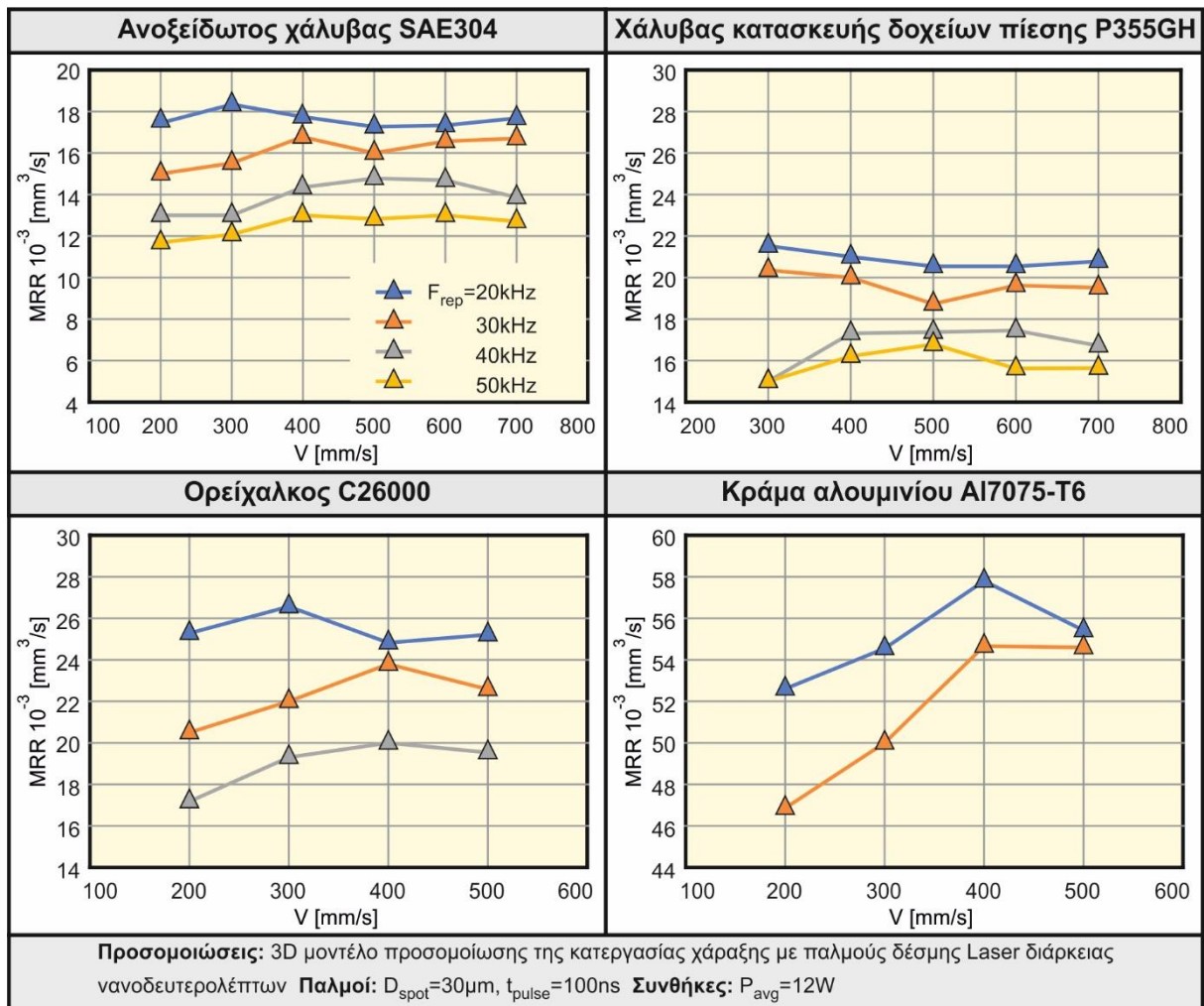
Στα διαγράμματα στο σχήμα 3.36 παρουσιάζονται οι τιμές του ρυθμού αποβολής υλικού **MRR** που υπολογίστηκαν με την εξίσωση (3.55) χρησιμοποιώντας τις τιμές του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού **D_z** που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για την περίπτωση των χαράξεων ανοξείδωτου χάλυβα SAE304, χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, ορείχαλκου C26000 και κράματος αλουμινίου Al7075-T6, για μέση ισχύ **P_{avg}=12W**.

Από τα διαγράμματα στο σχήμα 3.36 συμπεραίνεται ότι για όλα τα υλικά αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού **MRR** επιτυγχάνεται με μείωση της συχνότητας επανάληψης των παλμών **F_{rep}**. Υπενθυμίζεται ότι μείωση της συχνότητας επανάληψης των παλμών **F_{rep}** οδηγεί σε μείωση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού **D_z**. Αυτό σημαίνει ότι με μικρή συχνότητα επανάληψης παλμών **F_{rep}**, ενώ αφαιρείται σε κάθε επίπεδο σάρωσης υλικό μικρού πάχους **D_z**, η σάρωση υλοποιείται γρηγορότερα λόγω του ότι σαρώνεται σε συντομότερο χρονικό διάστημα εφόσον πραγματοποιείται μικρότερος αριθμός ευθύγραμμων τροχιών από παλμούς διότι αυξάνεται η απόσταση **T_d** μεταξύ τους.

Για τον ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, τον χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH και τον ορείχαλκο C26000, ο ρυθμός αποβολής υλικού μεγιστοποιείται με βάση τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.36 για τη μέση ισχύ **P_{avg}=12W** επιλέγοντας τον συνδυασμό **F_{rep}=20kHz**, **V=300mm/s** με τις τιμές του να είναι 0.0182mm³/s, 0.0216mm³/s και 0.0266mm³/s για κάθε υλικό από αυτά αντίστοιχα. Ελάχιστη διαφορετική συμπεριφορά εμφανίζεται για το κράμα αλουμινίου Al7075-T6 το οποίο εμφανίζει το μέγιστο ρυθμό αποβολής υλικού για ελαφρώς μεγαλύτερη ταχύτητα δέσμης **V=400mm/s** και όμοια με τα υπόλοιπα υλικά για

συχνότητα επανάληψης παλμών $F_{rep}=20\text{kHz}$ για τη μέση ισχύ $P_{avg}=12\text{W}$ και ισούται με $0.0579\text{mm}^3/\text{s}$.

Από τις μεγάλες διακυμάνσεις που εμφανίζονται στον ρυθμό αποβολής υλικού για τα διάφορα εξεταζόμενα υλικά, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, δεν είναι το ίδιο παραγωγική για όλα τα υλικά με την παραγωγικότητα να εμφανίζεται αρκετά μεγαλύτερη στα μη σιδηρούχα μέταλλα που μελετήθηκαν. Για την επίδραση της ταχύτητας της δέσμης V στον ρυθμό αποβολής υλικού δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο γενικό συμπέρασμα εφόσον η επίδραση της δεν είναι μονότονη. Για την επίδραση της μέσης ισχύος P_{avg} της δέσμης Laser δεν γίνεται κάποια ιδιαίτερη αναφορά εφόσον εξ ορισμού η αύξησή της οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού, αφού σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν αυξάνει το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού χωρίς να επεμβαίνει κάπως στη στρατηγική σάρωσης ή στον χρόνο που θα υλοποιηθεί η σάρωση.



Σχήμα 3.36: Ρυθμός αποβολής υλικού **MRR** που προκύπτει από τις προσομοιώσεις για τα εξεταζόμενα υλικά για την περίπτωση της μέσης ισχύος $P_{avg}=12\text{W}$

3.9 Περιορισμοί

Το 3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων δοκιμάστηκε σε ποικιλία συνδυασμών συνθηκών κατεργασίας για τα διάφορα εξεταζόμενα υλικά και τις

διάφορες χαράξεις. Έχει νόημα σε αυτό το σημείο να τεθούν οι περιορισμοί ή αλλιώς τα όρια σχετικά με τα χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων χάραξης που δύναται να εξυπηρετήσει το προσομοιωτικό μοντέλο, εξασφαλίζοντας την ορθή λειτουργία του και την ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Όπως προέκυψε από τις διάφορες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, το προσομοιωτικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαράξεις ορθογωνικών εσοχών με μέγιστο μήκος πλευράς της τάξεως των 150μm και μέγιστο βάθος της τάξεως των 50μm, με μέση ισχύ από 8 έως 16W, με συχνότητα επανάληψης παλμών από 20 έως 50kHz και με ταχύτητα της δέσμης από 200 έως 700mm/s, για υλικά όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο χάλυβας κατασκευής δοχείων πίεσης, ο ορείχαλκος και τα κράματα αλουμινίου, θεωρώντας ότι η δέσμη Laser έχει διάμετρο στο σημείο εστίασης 30μm και οι παλμοί έχουν διάρκεια 100ns. Το ότι το μοντέλο δοκιμάστηκε και επιβεβαιώθηκε πειραματικά για την ορθή λειτουργία του για τις παραπάνω περιπτώσεις χαράξεων δεν σημαίνει ότι δεν είναι σε θέση να εξυπηρετήσει και διαφορετικές περιπτώσεις. Επειδή το προσομοιωτικό μοντέλο έχει αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη όλα τα φυσικά φαινόμενα και οι μηχανισμοί που συμβαίνουν κατά την κατεργασία, θεωρητικά είναι σε θέση να προσομοιώσει οποιαδήποτε περίπτωση χάραξης διέπεται από τους νόμους που παρουσιάστηκαν αναλυτικά κατά τη μοντελοποίηση.

Ο περιορισμός που αναφέρθηκε σχετικά με το μέγεθος των χαράξεων σχετίζεται με τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ κατά την επίλυση του προσομοιωτικού μοντέλου. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται η χάραξη που παρουσιάστηκε στο σχήμα 3.25 στο κεφάλαιο 3.6, δηλαδή την 3D προσομοίωση χάραξης μιας ορθογωνικής εσοχής διαστάσεων 120x120x5.5μm σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 πραγματοποιώντας $n=4$ επίπεδα σάρωσης με συνθήκες κατεργασίας $P_{avg}=12W$, $F_{rep}=30kHz$, $V=600mm/s$ και παλμούς δέσμης Laser διαμέτρου $D_{spot}=30μm$ και διάρκειας $t_{pulse}=100ns$. Το αρχικό τεμάχιο ήταν διαστάσεων 150x150x12μm και χρησιμοποιώντας πλεγματοποίηση με τετραεδρικά στοιχεία Lagrange 2^{ης} τάξεως 10 κόμβων με μέγιστο μέγεθος στοιχείων 5μm προέκυψε πλέγμα αποτελούμενο από 48158 στοιχεία με το συνολικό αριθμό των βαθμών ελευθερίας κατά την επίλυση ίσο με 289113. Για την περίπτωση αυτή, ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου με τη χρήση του λογισμικού COMSOL ήταν στις 52h, 51min και 41s χρησιμοποιώντας ένα προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή με επεξεργαστή Intel® Core™ i7-8700 που διαθέτει 6 πυρήνες χρονισμένους στα 3.20GHz και μνήμη RAM 16GB DDR4-2666. Ο μεγάλος χρόνος επίλυσης οφείλεται, εκτός του μεγάλου αριθμού στοιχείων του πλέγματος και του μεγάλου αριθμού των βαθμών ελευθερίας, κυρίως στον υψηλό αριθμό παλμών που ισούται με 144 στη συγκεκριμένη περίπτωση (36 παλμοί ανά επίπεδο σάρωσης).

Όσο μεγαλώνει ο αριθμός των παλμών που προσομοιώνονται, τόσο αυξάνεται η συνολική διάρκεια του πεδίου του χρόνου που θα επιλυθεί, τόσο αυξάνεται ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων που θα παρθούν από τον επιλύτη και κατά συνέπεια τόσο αυξάνεται ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου. Το προσομοιωτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε θα μπορούσε χωρίς κανένα πρόβλημα να προσομοιώσει τη χάραξη για γεωμετρίες πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων χωρίς κανένα πρόβλημα αλλά είτε θα αυξανόταν σε μεγάλο βαθμό ο χρόνος επίλυσης, είτε θα απαιτείτο κάποιο υπολογιστικό σύστημα με πολλαπλούς επεξεργαστές και μεγαλύτερη μνήμη, είτε ακόμα καλύτερα κάποια συστοιχία (cluster) υπολογιστών με δυνατότητα για υλοποίηση παράλληλης επεξεργασίας.

Ο περιορισμός που αναφέρθηκε σχετικά με τις συνθήκες κατεργασίας δεν αποτελεί επί της ουσίας πρόβλημα, καθώς σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών κέντρων κατεργασιών Laser χάραξης, όπως η DMG MORI, το εύρος αυτό έρχεται σε συμφωνία με το διαθέσιμο εύρος λειτουργίας των μηχανών τους. Σύμφωνα με το τεχνικό εγχειρίδιο της εργαλειομηχανής

LASERTEC 40, το εύρος αυτό των συνθηκών κατεργασίας είναι σε θέση να εξυπηρετήσει τη χάραξη σχεδόν όλων των συμβατικών και μη υλικών όπως χάλυβες, κράματα αλουμινίου, κράματα χαλκού, τιτάνιο, σκληρομέταλλα, καρβίδια, κεραμικά, πυρίτιο, γραφίτη, κυβικό βοριονιτρίτη CBN, πολυκρυσταλλίνη PCD και άλλα. Εάν παρ' όλα αυτά υπάρχει η απαίτηση για προσομοίωση με συνθήκες κατεργασίας εκτός αυτού του εύρους αυτό είναι εφικτό αλλά με ορισμένες τροποποιήσεις που αφορούν κυρίως την διακριτοποίηση ή αλλιώς το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος. Εάν για παράδειγμα χρειάζεται να εξεταστεί κάποια περίπτωση με μικρότερη ταχύτητα δέσμης V ή μεγαλύτερη συχνότητα επανάληψης F_{rep} , τότε επειδή η απόσταση μεταξύ των παλμών $d_u = V / F_{rep}$ θα ελαττωθεί, θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί πλέγμα με μικρότερο μέγεθος στοιχείων έτσι ώστε να μπορεί να γίνει αισθητή η διαφοροποίηση στη δημιουργία του κρατήρα από την αφαίρεση του υλικού ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς παλμούς. Εάν χρειάζεται να εξεταστεί μια περίπτωση με μεγαλύτερη μέση ισχύ P_{avg} λόγω του ότι ο κρατήρας που θα δημιουργεί ένας παλμός θα έχει μεγαλύτερο βάθος, θα δημιουργούνται πιο απότομες παραμορφώσεις στο πλέγμα στη διεύθυνση του βάθους και κατά συνέπεια ενδεχομένως να χρειαστεί μια πιο πυκνή κατανομή του πλέγματος στη διεύθυνση αυτή.

4 Ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και των διαστατικών αποκλίσεων της χαραγμένης γεωμετρίας

4.1 Γενική περιγραφή

Το 3D μοντέλο που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια για την προσομοίωση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, είναι ένα ιδιαίτερα ακριβές και αποδοτικό μοντέλο για την προσομοίωση χαράξεων μικρών διαστάσεων. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, είναι σε θέση να εξάγει αποτελέσματα με τη χρήση ενός τυπικού προσωπικού υπολογιστή με την επίλυση να υλοποιείται σε εύλογο χρονικό διάστημα για τη χάραξη γεωμετριών, όπως ορθογωνικές εσοχές με μήκος πλευράς της τάξεως των 150μm και βάθος που προκύπτει από ένα μικρό αριθμό επιπέδων σάρωσης και δεν υπερβαίνει τα 50μm. Όμως η κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser παρ' ότι πρόκειται για μια μικροκατεργασία (laser micromachining) που σημαίνει ότι οι χαράξεις είναι στην κλίμακα των μικρομέτρων, αρκετές φορές στη βιομηχανία χρησιμοποιείται σε ορισμένες εφαρμογές και για τη χάραξη γεωμετριών με μεγαλύτερες διαστάσεις, όταν η χρήση της μεθόδου είναι αναγκαστική (λόγω ακρίβειας, κατεργαζόμενων υλικών, αδυναμία προσβασιμότητας συμβατικών κοπτικών εργαλείων κ.λπ.). Τροχοπέδη για τη χρήση ενός 3D μοντέλου προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία για τις κατεργασίες τεμαχίων μεγαλύτερων διαστάσεων αποτελεί η υπερβολικά υψηλή ανάγκη για υπολογιστικούς πόρους και συνάμα ο υπερβολικά μεγάλος χρόνος επίλυσης. Συνεπώς, ενώ τυπικά-θεωρητικά το 3D προσομοιωτικό μοντέλο που παρουσιάστηκε δύναται να προσομοιώσει την κατεργασία τεμαχίων μεγαλύτερων διαστάσεων, κάτι τέτοιο είναι μη παραγωγικό και ασύμφορο επειδή θα απαιτούσε τη χρήση κάποιου υπερυπολογιστή με μεγάλο αριθμό επεξεργαστών, πυρήνων και διαθέσιμης μνήμης, προκειμένου να επιλυθεί το μοντέλο με τα πεπερασμένα στοιχεία σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα.

Οι παραπάνω λόγοι συνετέλεσαν στην ανάπτυξη ενός ψευδο-3D προσομοιωτικού μοντέλου με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Το ψευδο-3D μοντέλο αυτό λαμβάνει όλη την απαραίτητη πληροφορία για την 3D φύση της κατεργασίας, από την οποία με την κατάλληλη μοντελοποίηση επιλύεται ένα 2D μοντέλο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της αφαίρεσης του υλικού από τους παλμούς της δέσμης Laser σε μια τυχαία θέση εγκάρσιας τομής της γεωμετρίας χάραξης. Σκοπός της ανάπτυξης του ψευδο-3D προσομοιωτικού μοντέλου είναι η μελέτη των διαστατικών αποκλίσεων που εμφανίζει η πραγματικά χαραγμένη γεωμετρία σε σχέση με την ιδανικά επιδιωκόμενη, σε γεωμετρίες με διαστάσεις της τάξεως του χιλιοστού. Με το ψευδο-3D μοντέλο εξετάστηκε η περίπτωση χάραξης μιας τετραγωνικής εσοχής πλευρών $a_{\text{pocket}} \times a_{\text{pocket}}$ και βάθους D_p η οποία προκύπτει από τη σάρωση του αρχικού τεμαχίου διαδοχικά σε n επίπεδα σάρωσης. Οι διαστατικές αποκλίσεις που μελετώνται αφορούν τη μεταβολή του άνω πλάτους χάραξης (top kerf width) **TKW** και του κάτω πλάτους χάραξης (bottom kerf width) **BKW** σε σχέση με την ονομαστική ή ιδανικά επιδιωκόμενη διάσταση της πλευράς της εσοχής, καθώς και την εμφάνιση γωνίας κλίσης (kerf taper angle) **KT** στα πλευρικά τοιχώματα της χάραξης έναντι των ιδανικά επιδιωκόμενων κατακόρυφων τοιχωμάτων.

Οι βασικές αρχές για τη μοντελοποίηση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο ψευδο-3D προσομοιωτικό μοντέλο, είναι κοινές με αυτές του 3D μοντέλου επειδή μελετάται ακριβώς η ίδια κατεργασία. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στο ψευδο-3D προσομοιώνεται

η εξέλιξη της κατεργασίας σε μια τυχαία θέση εγκάρσιας τομής, επιλύοντας ουσιαστικά ένα 2D μοντέλο στη θέση αυτή, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση της δέσμης Laser στον 3D χώρο, κάνοντας όλες τις απαραίτητες τροποποιήσεις στη μοντελοποίηση. Η ιδέα ότι δύναται να μοντελοποιηθεί η αφαίρεση υλικού από παλμούς διάρκειας νανοδευτερολέπτων σε ένα 2D εγκάρσιο επίπεδο τομής, προσεγγίστηκε μετά από ορισμένες παρατηρήσεις στο 3D μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Αρχικά διαπιστώθηκε ότι η αφαίρεση του υλικού σε ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής επηρεάζεται αυστηρά και μόνο από τους παλμούς για τους οποίους, τμήμα της ακτινοβολούμενης επιφάνειας από τη δέσμη (ορίζεται με βάση τη διάμετρο της δέσμης), βρίσκεται πάνω στο επίπεδο αυτό. Δηλαδή, παλμοί δέσμης Laser οι οποίοι τοποθετούνται σε θέσεις τέτοιες ώστε η ακτινοβολούμενη επιφάνεια που αντιστοιχεί στη διάμετρο της δέσμης να βρίσκεται εκτός του υπό μελέτη εγκάρσιου επιπέδου τομής έχουν, μηδενική συνεισφορά στην αφαίρεση του υλικού που εμφανίζεται στο επίπεδο αυτό. Αυτό συμβαίνει διότι οι παλμοί αυτοί δεν προσφέρουν τοπικά θερμική ενέργεια ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του υλικού και επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας στην περιφέρεια γύρω από τους παλμούς, λόγω αγωγής, δεν είναι αρκετή για την έναρξη της μετατροπής του υλικού σε αέρια φάση.

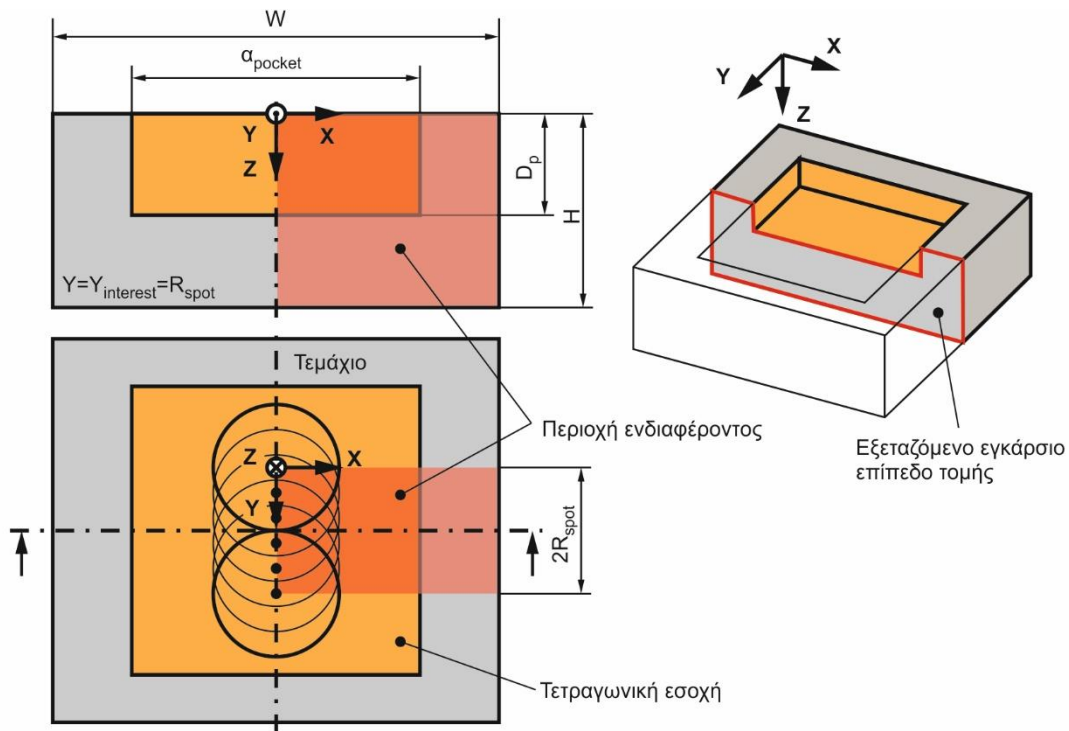
Επιπλέον, μια σημαντική παρατήρηση που έγινε είναι ότι ο κάθε παλμός κατά την έναρξή του βρίσκει το υλικό του τεμαχίου σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος που ισούται με την αρχική θερμοκρασία του τεμαχίου. Αυτό οφείλεται στην υπερβολικά μικρή διάρκεια του παλμού σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί μέχρι την έναρξη του επόμενου γειτονικού παλμού (διάρκεια παλμών της τάξεως των 100ns, περίοδος επανάληψης παλμών της τάξεως των 100μs). Επιπλέον παρέχεται μια πολύ μικρή ποσότητα ενέργειας ανά παλμό που είναι της τάξεως του 1mJ (είναι αρκετή για την αφαίρεση του υλικού εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας λόγω της μεγάλης εστίασης της δέσμης και της μικρής διάρκειας του παλμού). Έτσι στον χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από παλμό σε παλμό το τεμάχιο προλαβαίνει να επανέλθει στην αρχική του θερμοκρασία. Δηλαδή, οι παλμοί που έχουν σταλεί προγενέστερα των οποίων η θέση βρίσκεται μακριά από το υπό μελέτη εγκάρσιο επίπεδο τομής, δεν επηρεάζουν θερμικά το επίπεδο αυτό ως προς την αρχική θερμοκρασία που θα έχει το υλικό κατά την έναρξη της επίδρασης ενός παλμού πάνω σε αυτό.

Με βάση τα παραπάνω, οι αλλαγές που έγιναν στο ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης σε σχέση με το 3D όσον αφορά τη μοντελοποίηση εστιάζονται αρχικά στον ορισμό της 2D γεωμετρίας, τη διακριτοποίηση που επιλέχθηκε καθώς και τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν για την επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε εκ νέου ανάπτυξη του χάρτη σάρωσης ώστε να απομονωθούν κατά την προσομοίωση μόνο οι παλμοί που συμβάλουν στην αφαίρεση υλικού στο εγκάρσιο επίπεδο τομής που μελετάται. Ακόμα, μελετήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης Laser που στέλνεται από την κεφαλή σάρωσης προς το τεμάχιο, έτσι ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση της σύγκλισης της δέσμης στη σχηματιζόμενη γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων της χάραξης, καθώς και στη μεταβολή του άνω πλάτους χάραξης και κάτω πλάτους χάραξης της γεωμετρίας. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της προστίπτουσας δέσμης Laser, της απορρόφησης από το υλικό, την αφαίρεση του υλικού, τη μετακίνηση του πλέγματος, τη μετάδοση θερμότητας και την αλλαγή φάσης δεν πραγματοποιήθηκε κάποια αλλαγή στο ψευδο-3D μοντέλο.

4.2 Μοντελοποίηση

4.2.1 Χάρτης σάρωσης

Το ψευδο-3D μοντέλο αναφέρεται στην πραγματοποίηση μιας 2D προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων σε ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής X-Z στη θέση $Y=Y_{\text{interest}}$ μιας τετραγωνικής εσοχής πλευρών α_{pocket} x α_{pocket} και βάθους D_p , λαμβάνοντας υπόψη τη συμβολή των παλμών της δέσμης που τοποθετούνται σε προκαθορισμένες θέσεις στο επίπεδο X-Y που ορίζεται από την άνω επιφάνεια του αρχικού τεμαχίου. Συμβολή στον μηχανισμό αφαίρεσης υλικού στο εγκάρσιο επίπεδο τομής του τεμαχίου σε μια θέση $Y=Y_{\text{interest}}$ έχουν μόνο οι παλμοί οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε τέτοια απόσταση εκατέρωθεν του επιπέδου, έτσι ώστε η ακτινοβολούμενη επιφάνεια που ορίζεται με βάση τη διάμετρο της δέσμης να συναντά το επίπεδο αυτό. Συνεπώς, προκύπτει μια περιοχή ενδιαφέροντος (area of interest) που ορίζεται σε απόσταση $-R_{\text{spot}}$ πριν και $+R_{\text{spot}}$ μετά τη θέση $Y=Y_{\text{interest}}$ του επιπέδου τομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Επιπλέον, η χάραξη μιας τετραγωνικής εσοχής χαρακτηρίζεται από μια συμμετρία ως προς το κέντρο της εσοχής. Έτσι, επιλέχθηκε να αξιοποιηθεί αυτή η συμμετρία κατά την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για τη μείωση του χρόνου επίλυσης. Με τον τρόπο αυτό η περιοχή ενδιαφέροντος περιορίστηκε ώστε να πραγματοποιηθεί η επίλυση από το μέσον και δεξιότερα του εγκάρσιου επιπέδου τομής X-Z.



Σχήμα 4.1: Εγκάρσιο επίπεδο τομής στη θέση $Y=Y_{\text{interest}}$ και περιοχή ενδιαφέροντος μήκους $W/2$ και πλάτους $2R_{\text{spot}}$ που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη του ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων.

Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι αυτή που μελετάται και για την οποία δημιουργήθηκε ο χάρτης σάρωσης με τις θέσεις που στέλνονται οι παλμοί για την προσομοίωση. Η εφαρμογή αυτού του τεχνάσματος, ορίζοντας τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος, έχει καθοριστική σημασία για την αύξηση της παραγωγικότητας του ψευδο-3D μοντέλου, καθώς έτσι με τη

μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επιλύεται το μοντέλο θεωρώντας μόνο τους απολύτως απαραίτητους παλμούς που επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα. Έτσι, δεν πραγματοποιούνται άσκοποι και περιττοί υπολογισμοί κατά την επίλυση, περιορίζοντας σημαντικά με τον τρόπο αυτό τον χρόνο επίλυσης, μειώνοντας τις απαιτήσεις για υπολογιστικούς πόρους και συνάμα επιτρέποντας την πραγματοποίηση προσομοιώσεων χάραξης για τεμάχια μεγαλύτερων διαστάσεων με εύλογο χρόνο επίλυσης, χρησιμοποιώντας ένα τυπικό προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ο χάρτης σάρωσης που εμπεριέχει τις θέσεις $\mathbf{Fp}(x_{focus}, y_{focus}, z_{focus})$ που στέλνονται οι παλμοί της δέσμης Laser συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης δημιουργήθηκε για το ψευδο-3D μοντέλο με την ίδια λογική που δημιουργήθηκε για το 3D μοντέλο. Έτσι χρησιμοποιήθηκε η μονοκατευθυντική διασταυρούμενη (unidirectional cross-hatching) στρατηγική σάρωσης για τη σάρωση της περιοχής ενδιαφέροντος, δηλαδή μιας φανταστικής γεωμετρίας χάραξης ορθογωνικού σχήματος με μήκος $a_{pocket}/2$ (αξιοποίηση συμμετρίας ως προς το κέντρο της εσοχής) και πλάτος $2R_{spot}$. Συνεπώς, για τον υπολογισμό των συντεταγμένων του σημείου εστίασης της δέσμης x_{focus} , y_{focus} στο εκάστοτε επίπεδο σάρωσης εντός της περιοχής ενδιαφέροντος στο οποίο στέλνεται ο παλμός δέσμης Laser για κάποια χρονική στιγμή t της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις από (4.1) έως (4.10) οι οποίες είναι παρόμοιες σχέσεις με αυτές του 3D μοντέλου με ορισμένες διαφοροποιήσεις.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, στη διεύθυνση του άξονα Y, σαρώνεται η περιοχή ενδιαφέροντος με πλάτος $2R_{spot}$ και όχι ολόκληρη η γεωμετρία προς χάραξη. Επίσης, στη διεύθυνση του άξονα X, λόγω του ότι αξιοποιήθηκε η συμμετρία της εσοχής ως προς το κέντρο της σαρώνεται το μισό της μήκος $a_{pocket}/2$. Επιπλέον, όσον αφορά τον αριθμό των παλμών που τοποθετούνται για την κατά μήκος σάρωση στη διεύθυνση του άξονα X της εσοχής πλευράς a_{pocket} , προστέθηκε μια διόρθωση $2BD_{offset}$ η οποία αφορά τη δυνατότητα που υπάρχει στα κέντρα κατεργασιών Laser για να δοθεί ένα offset προς τα μέσα στη θέση του συνόρου (border displacement offset). Δηλαδή, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατεργασίας, μετακινείται προς τα μέσα κατά μήκος BD_{offset} η θέση που θα τοποθετηθεί ο πρώτος και ο τελευταίος παλμός μιας ευθύγραμμης τροχιάς παλμών, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τον συνολικό αριθμό των παλμών που στέλνονται στις ευθύγραμμες τροχιές του χάρτη σάρωσης. Ο λόγος που παρέχεται αυτή η δυνατότητα στα κέντρα κατεργασιών Laser χάραξης οφείλεται στην ανάγκη για μετατόπιση του συνόρου κατάλληλα, ανάλογα με την εφαρμογή, έτσι ώστε η απόκλιση που θα εμφανιστεί στο άνω και κάτω πλάτος χάραξης σε σχέση με την ονομαστική διάσταση να μην δημιουργήσει προβλήματα στο τελικό αποτέλεσμα.

$$n_{pulses,x} = floor\left(\frac{(a_{pocket} - 2 BD_{offset})/2}{d_u}\right) + 1 \quad (4.1)$$

$$n_{pulses,y} = ceil\left(\frac{2R_{spot}}{d_u}\right) + 1 \quad (4.2)$$

$$t_{period} = \frac{1}{F_{rep}} \quad (4.3)$$

$$t_{layer} = n_{pulses,x} n_{pulses,y} t_{period} \quad (4.4)$$

$$n_{layer} = floor\left(\frac{t}{t_{layer}}\right) + 1 \quad (4.5)$$

$$t_{track} = \begin{cases} n_{pulses,x} t_{period}, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ n_{pulses,y} t_{period}, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$n_{track} = \text{floor} \left((t - (n_{layer} - 1)t_{layer}) / t_{track} \right) + 1 \quad (4.7)$$

$$n_{pulse} = \text{floor} \left((t - (n_{layer} - 1)t_{layer} - (n_{track} - 1)t_{track}) / t_{period} \right) + 1 \quad (4.8)$$

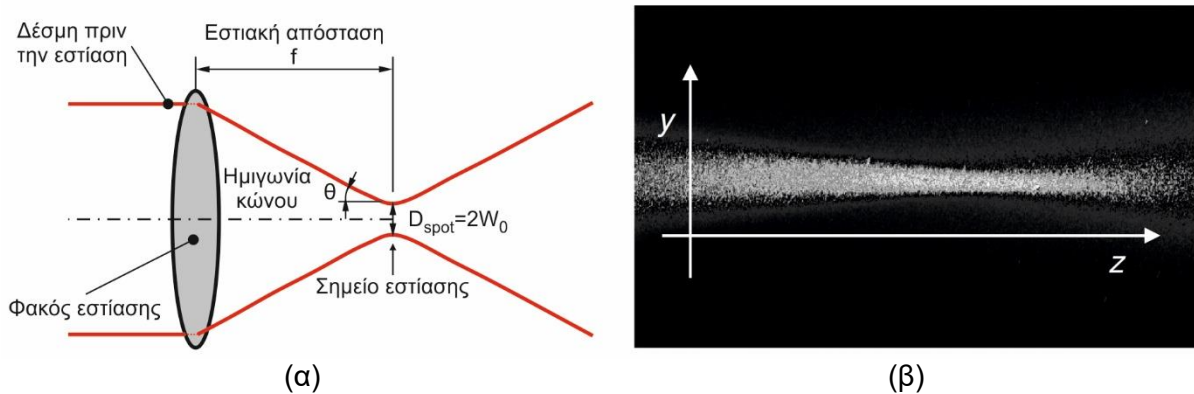
$$x_{focus} = \begin{cases} (n_{pulse} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ (n_{track} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$y_{focus} = \begin{cases} (n_{track} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ περιττός} \\ (n_{pulse} - 1)d_u, & n_{layer} \text{ άρτιος} \end{cases} \quad (4.10)$$

4.2.2 Σύγκλιση δέσμης

Οι δέσμες Laser εμφανίζουν ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως η δυνατότητα σύγκλισης σε πολύ μικρές διαμέτρους, η απομόνωση ενός μόνο μήκους κύματος της ακτινοβολίας και η διαθεσιμότητα μεγάλου εύρος σε επιβαλλόμενη ισχύ, που τις καθιστούν απαραίτητα εργαλεία για την κατεργασία μετάλλων τόσο σε βιομηχανικές όσο και ερευνητικές εφαρμογές. Οι δέσμες Laser που χρησιμοποιούνται για τις κατεργασίες έχοντας περάσει από τον φακό εστίασης (focusing lens) κατά την έξοδό τους από την κεφαλή σάρωσης, εμφανίζουν μια κωνική μορφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 (α), η οποία αρχικά συγκλίνει μέχρι η δέσμη να συναντήσει το επίπεδο εστίασης (focal plane) που συνήθως βρίσκεται στην επιφάνεια του τεμαχίου ενώ στη συνέχεια αποκλίνει. Η σύγκλιση της δέσμης (convergence) αναφέρεται στα χαρακτηριστικά που έχει η δέσμη από την έξοδό της από τον φακό εστίασης μέχρι το επίπεδο εστίασης, ενώ η απόκλιση (divergence) στα χαρακτηριστικά που λαμβάνει καθώς συνεχίζεται η διάδοσή της μετά από το επίπεδο εστίασης προς το μακρινό πεδίο (far field) [125,126].

Κατά τη διάδοση της εστιασμένης δέσμης υπάρχει μια θέση που η δέσμη εμφανίζει ελάχιστο μέγεθος (beam waist). Η θέση αυτή είναι εκείνη στην οποία αναφέρεται η διάμετρος της δέσμης (spot diameter) $D_{spot}=2W_0$ για τα κέντρα κατεργασιών Laser που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι, κατά τη διάδοση της δέσμης από το φακό εστίασης προς το επίπεδο εστίασης, η δέσμη συγκλίνει με μια ημιγωνία του κώνου σύγκλισης (convergence cone half-angle) και κατά τη διάδοσή της από το επίπεδο εστίασης προς το μακρινό πεδίο αποκλίνει με μια ημιγωνία κώνου απόκλισης (divergence cone half-angle). Τα χαρακτηριστικά της δέσμης κατά τη σύγκλιση και την απόκλιση είναι πανομοιότυπα και συνεπώς η ημιγωνία σύγκλισης ταυτίζεται με την ημιγωνία απόκλισης. Επειδή στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές περισσότερες αναφορές σχετικά με τη μελέτη των χαρακτηριστικών της δέσμης κατά την απόκλισή της, η ανάλυση που θα παρουσιαστεί παρακάτω αναφέρεται στην απόκλιση της δέσμης αλλά είναι ταυτόσημη και για τη σύγκλισή της.



Σχήμα 4.2: (α) Σχηματική αναπαράσταση της σύγκλισης της δέσμης (β) Απεικόνιση της εγκάρσιας σκέδασης του φωτός ενός παλμού Nd:YAG Q-Switched δέσμης Laser όπως απεικονίστηκε με τη χρήση CCD κάμερας

Με τον όρο γωνιακή απόκλιση της δέσμης ορίζεται το πόσο γρήγορα η δέσμη εξαπλώνεται (μεγαλώνει η διάμετρό της) κατά την διάδοσή της από το σημείο που εμφανίζει την ελάχιστη διάμετρό της προς το μακρινό πεδίο. Για την ποσοτικοποίηση της γωνιακής απόκλισης της δέσμης υπολογίζεται η ημιγωνία του κώνου απόκλισης (divergence cone half-angle) μετρούμενη σε μικροακτίνια (mrad) ή μοίρες (deg). Η ημιγωνία του κώνου απόκλισης προκύπτει μετρώντας τη μεταβολή που υφίσταται η διάμετρος της δέσμης σε σχέση με την απόσταση [127]. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, κατά τη διάδοση μιας δέσμης γίνεται η θεώρηση ότι χαρακτηρίζεται από ένα ιδανικό προφίλ έντασης κατανομής Gauss που αντιστοιχεί στον ιδανικό εγκάρσιο τρόπο ταλάντωσης **TEM₀₀**. Σε αυτή την περίπτωση, για μια ιδανική γκαουσιανή δέσμη επιτυγχάνεται η ελάχιστη ημιγωνία του κώνου απόκλισης θ_{ideal} και υπολογίζεται συναρτήσει του μήκους κύματος της ακτινοβολίας λ και της ελάχιστης διαμέτρου της δέσμης στο επίπεδο εστίασης $D_{spot}=2w_0$ από την εξίσωση (4.11). Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι σύμφωνα με την εξίσωση (4.11) για μια ιδανική δέσμη κατανομής Gauss προερχόμενη από μια πηγή Laser που εκπέμπει στα 1064nm με διάμετρο δέσμης κατά την εστίαση στα 30μm, υπολογίζεται ότι η ελάχιστη ημιγωνία του κώνου ισούται με $\theta_{ideal}=22.6\text{mrad}=1.29\text{deg}$.

$$\theta_{ideal} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (4.11)$$

Στην πλειοψηφία των εφαρμογών των Laser, όπως και στην περίπτωση των κατεργασιών με παλμούς δέσμης Laser, προκειμένου η δέσμη να λάβει τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την εφαρμογή είναι απαραίτητο να εστιαστεί, να γίνουν μεταβολές στην μορφή της και να κατευθυνθεί κατάλληλα πάνω στο προς κατεργασία τεμάχιο, χρησιμοποιώντας οπτικούς φακούς και άλλα σύνολα από εξαρτήματα, όπως αυτά που υπάρχουν στο εσωτερικό της κεφαλής σάρωσης (κινούμενα κάτοπτρα). Έτσι, στην πράξη, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της δέσμης Laser με το σύστημα διεύθυνσης της κεφαλής σάρωσης και τους φακούς εστίασης, η δέσμη που προσπίπτει τελικά στο τεμάχιο είναι υποβιβασμένης ποιότητας (beam quality) [128]. Για την ποσοτικοποίηση του υποβιβασμού της ποιότητας της δέσμης Laser που προσπίπτει στο τεμάχιο σε σχέση με την αντίστοιχη ιδανική δέσμη κατανομής Gauss, έχει οριστεί ο συντελεστής ποιότητας δέσμης (M-square beam quality factor) **M²**.

Ο συντελεστής ποιότητας δέσμης είναι αδιάστατο μέγεθος, χρησιμοποιείται ως δείκτης για την αξιολόγηση της ποιότητας μιας δέσμης Laser και συγκρίνει το κατά πόσον αποκλίνει μια δέσμη Laser σε σύγκριση με μια θεωρητικά ιδανική δέσμη κατανομής Gauss, ίδιου μήκους κύματος και μεγέθους. Για μια θεωρητικά ιδανική δέσμη κατανομής Gauss ο συντελεστής ποιότητας ισούται με τη μονάδα (**M²=1**), ενώ για δέσμες χαμηλότερης ποιότητας ο συντελεστής ποιότητας λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας (**M²>1**). Επιπλέον, ο συντελεστής ποιότητας δέσμης χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εξέλιξης της διαμέτρου της δέσμης κατά τη διάδοσή της και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ημιγωνίας του κώνου απόκλισης ή σύγκλισης μιας πραγματικής δέσμης. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 11146 η ημιγωνία του κώνου σύγκλισης ή απόκλισης μιας πραγματικής δέσμης θ_0 υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.12). Όπως φαίνεται από την εξίσωση (4.12), η ποιότητα της δέσμης έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της ημιγωνίας του κώνου σύγκλισης της δέσμης πάνω από το τεμάχιο καθώς είναι ανάλογη του συντελεστή ποιότητας της δέσμης **M²**.

$$\theta_0 = M^2 \theta_{ideal} = \frac{M^2 \lambda}{\pi w_0} \quad (4.12)$$

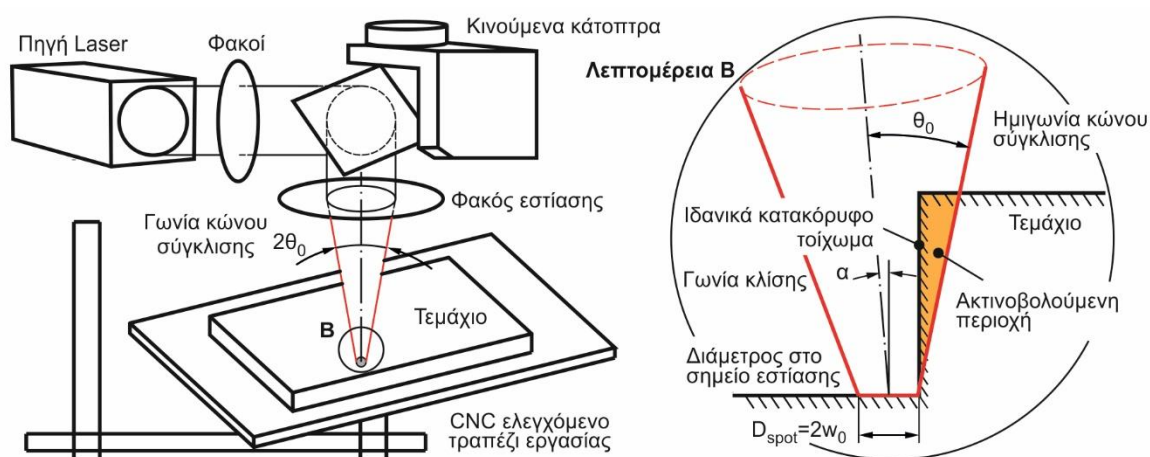
Ο προσδιορισμός του συντελεστή ποιότητας μιας δέσμης Laser M^2 γίνεται συνήθως πειραματικά και αποτελεί μια σχετικά δύσκολη διαδικασία που απαιτεί και τον κατάλληλο εξοπλισμό. Η ποιότητα της δέσμης που προσπίπτει στο προς κατεργασία τεμάχιο επηρεάζεται άμεσα από την απόδοση και την ποιότητα των οπτικών συστημάτων που διαδέχονται τη δέσμη σε ένα κέντρο κατεργασιών Laser από τη δημιουργία της στην πηγή Laser, μέχρι να φτάσει στο τεμάχιο. Γι' αυτό το λόγο οι κατασκευαστές κέντρων κατεργασιών αποφεύγουν να δώσουν την τιμή του συντελεστή ποιότητας της τελικής δέσμης Laser M^2 που προσπίπτει στο τεμάχιο ενώ κάποιες φορές παρέχουν την τιμή του συντελεστή ποιότητας για τη δέσμη κατά τη δημιουργία της στην πηγή. Η τιμή του συντελεστή ποιότητας για τη δέσμη στη πηγή διαφέρει σε πολύ μεγάλο βαθμό από αυτήν της δέσμης Laser στο τεμάχιο και δεν προσφέρει κάποια πληροφορία σχετικά με την εξέλιξη της κατεργασίας αφαίρεσης υλικού από τους παλμούς της δέσμης Laser.

Στο πρότυπο ISO 11146-1:2005 [129] προτείνεται μια αναλυτική μέθοδος για τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή ποιότητας M^2 υλοποιώντας μια σειρά από μετρήσεις της διαμέτρου της δέσμης Laser σε προκαθορισμένες θέσεις, με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παράγοντες που οδηγούν σε αύξηση των σφαλμάτων της μέτρησης [130]. Οι αναφορές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με την πειραματική μέτρηση του συντελεστή ποιότητας M^2 για κέντρα κατεργασιών που παράγουν παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, είναι περιορισμένες.

Ο Jorge και άλλοι [131] ανέπτυξαν μια μέθοδο για τη μέτρηση του συντελεστή ποιότητας M^2 σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια των κατεργασιών με τη χρήση παλμών δέσμης Laser η οποία μπορεί να εξασφαλίσει αντίστοιχη ακρίβεια με αυτήν που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 11146. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποίησαν ένα τυπικό βιομηχανικό Q-Switched Nd:YAG Laser της εταιρείας COHERENT που εκπέμπει στα 532nm με μέση ισχύ 2W, συχνότητα επανάληψης παλμών 446Hz και φακό εστίασης με εστιακή απόσταση 250mm. Η δέσμη Laser εστιάστηκε σε δοχείο με υγρό μέσο το οποίο επέτρεπε την ομοιογενή σκέδαση του φωτός. Η εγκάρσια σκέδαση του φωτός (transverse scattered light) κατά τη διάδοση της δέσμης Laser απεικονίστηκε χρησιμοποιώντας μια CCD κάμερα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 (β) και με κατάλληλη επεξεργασία της εικόνας υπολογίστηκαν οι τιμές για τη διάμετρο της δέσμης σε διάφορες θέσεις κατά το μήκος της διάδοσης. Σύμφωνα με τις μετρήσεις τους προέκυψε η μέση τιμή του συντελεστή ποιότητας της τελικής δέσμης να είναι ίση με $M^2=18.8\pm 1$.

Ο Bidin και ο Kee [132] πραγματοποίησαν μια πειραματική διερεύνηση για τον υπολογισμό του συντελεστή ποιότητας M^2 εφαρμόζοντας το πρότυπο ISO 11146 για ένα Nd:YAG Laser της εταιρείας LUMONIC που εκπέμπει στα 1064nm. Το Laser δοκιμάστηκε σε δύο διαφορετικές λειτουργίες: αρχικά στη λειτουργία free running παράγοντας παλμούς μακράς διάρκειας των 120 microsecond και στη συνέχεια στη λειτουργία Q-Switched παράγοντας παλμούς διάρκειας 10 nanosecond. Επιπλέον δοκιμάστηκαν δύο φακοί εστίασης με διαφορετική εστιακή απόσταση: ένας με 15cm και ένας με 20cm. Ο συντελεστής ποιότητας M^2 κατά τη λειτουργία free running υπολογίστηκε 7.68 και 7.38 για τους δύο φακούς αντίστοιχα. Για τη λειτουργία Q-Switched ο συντελεστής ποιότητας M^2 προέκυψε 25.62 και 19.48 για τους δύο φακούς αντίστοιχα. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι οι λόγοι που οδηγούν σε παλμούς δέσμης Laser πολύ χαμηλής ποιότητας κατά το Q-Switching οφείλονται στη δημιουργία γιγαντοπαλμών (giant pulse) υψηλής εντάσεως, μεγαλύτερων διαστάσεων στο κοντινό πεδίο (near field), μικρής διάρκειας με χαμηλή όμως μέση ισχύ λόγω των απωλειών του μηχανισμού Q-Switch.

Η κωνική μορφή που λαμβάνει η δέσμη στην περιοχή άνω από το επίπεδο της επιφάνειας του υλικού που είναι εστιασμένη, συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη κλίσης στα πλευρικά τοιχώματα της χάραξης (kerf formation) κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων. Κατά την κατεργασία για την αφαίρεση ενός επίπεδου στρώματος υλικού (layer) το κέντρο κατεργασιών Laser μετακινεί κατάλληλα το τραπέζι στη διεύθυνση του άξονα Z (κατακόρυφη διεύθυνση) στο οποίο είναι προσδεμένο το τεμάχιο, έτσι ώστε η δέσμη να είναι εστιασμένη στο επίπεδο της επιφάνειας του υλικού που πρόκειται να αφαιρεθεί. Με τη χρήση του συστήματος διεύθυνσης της δέσμης αποτελούμενο από κινούμενους καθρέπτες που υπάρχουν εντός της κεφαλής σάρωσης, η δέσμη μετακινείται διαρκώς ούτως ώστε κάθε φορά να βρίσκεται στην κατάλληλη χρονική στιγμή στη σωστή θέση σύμφωνα με το χάρτη σάρωσης για να σταλεί ο παλμός, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Στην περίπτωση που πρόκειται να σταλούν παλμοί σε μια θέση πάνω στο σύνορο της τετραγωνικής εσοχής, όπως φαίνεται στη Λεπτομέρεια B στο σχήμα 4.3 παρατηρείται το εξής: εξαιτίας της κωνικής μορφής της δέσμης ένα τμήμα από το υλικό του τεμαχίου προς τα έξω από το σύνορο και άνω του επιπέδου σάρωσης (εικονιζόμενο με πορτοκαλί στο σχήμα 4.3 Λεπτομέρεια B) ακτινοβολείται από τη δέσμη και συνεπώς σταδιακά αφαιρείται. Εάν ιδανικά η δέσμη δεν είχε κωνική μορφή αλλά είχε μια σταθερή διάμετρο (κυλινδρική μορφή) σε όλο το μήκος της διάδοσής της, τότε το υλικό ενός ιδανικά κατακόρυφου τοιχώματος δεν θα ακτινοβολούνταν από τη δέσμη, δεν θα αφαιρείτο και θα περιοριζόταν σημαντικά η κλίση των πλευρικών τοιχωμάτων.



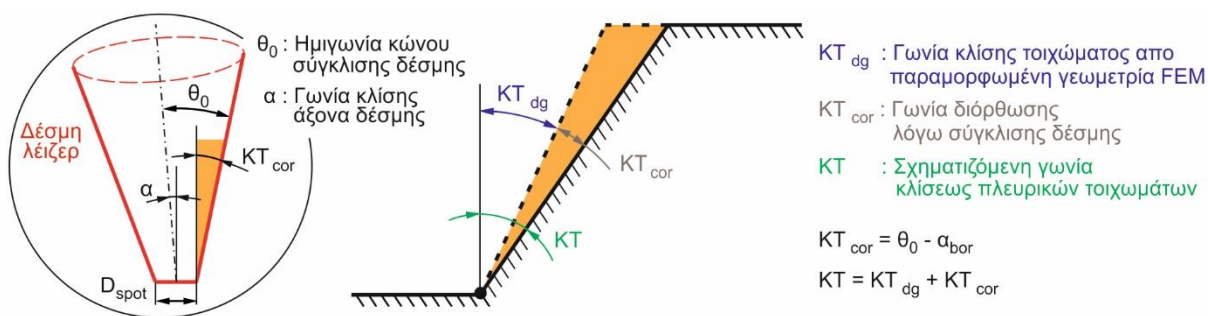
Σχήμα 4.3: Επίδραση του κώνου σύγκλισης της δέσμης στον σχηματισμό κλίσης στα πλευρικά τοιχώματα της χαραγμένης γεωμετρίας

Αξίζει να αναφερθεί, ότι όπως φαίνεται στη Λεπτομέρεια B, εξαιτίας της κλίσης που λαμβάνει η δέσμη κατά τη μετακίνηση της από το σύστημα διεύθυνσης της κεφαλής σάρωσης εμφανίζεται μια γωνία α μεταξύ του άξονα της δέσμης και του κατακόρυφου άξονα. Αυτή η γωνία έχει ληφθεί υπόψη, όπως παρουσιάστηκε στο σχετικό κεφάλαιο που αναφέρεται στη μοντελοποίηση της εισερχόμενης δέσμης. Η κλίση που εμφανίζει ο άξονας της δέσμης επιδρά θετικά στον περιορισμό της ακτινοβολήσης του υλικού έξω από το σύνορο και κατ' επέκταση στον περιορισμό της εμφάνισης κλίσης στα πλευρικά τοιχώματα. Όμως, η κλίση α που εμφανίζει η δέσμη είναι απειροστά μικρή σε σχέση με την ημιγωνία του κώνου σύγκλισης θ_0 . Αυτό συμβαίνει διότι οι γεωμετρίες που εξετάζονται έχουν διαστάσεις της τάξεως των μερικών μικρόμετρων (δεν υπερβαίνουν το χιλιοστό) εφόσον πρόκειται για μια μικρο-κατεργασία (laser micromachining) και η εστιακή απόσταση των φακών εστίασης F-Theta που υπάρχουν στο εμπόριο κυμαίνονται συνήθως από 100 έως 400mm. Για παράδειγμα, κατά την κατεργασία μιας τετραγωνικής εσοχής πλευράς 600μm με την κεφαλή σάρωσης τοποθετημένη στο κέντρο συμμετρίας της εσοχής, χρησιμοποιώντας ένα φακό F-Theta με εστιακή απόσταση 100mm,

όπως αυτόν που διαθέτει το κέντρο κατεργασιών DMG MORI LASERTEC 40, τότε η μέγιστη γωνία κλίσης α της δέσμης που εμφανίζεται στο σύνορο ισούται με $\alpha_{bor}=0.172\text{deg}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η γωνία που εμφανίζει ο κώνος σύγκλισης της δέσμης έχει καθοριστικό ρόλο στη σχηματιζόμενη κλίση των πλευρικών τοιχωμάτων κατά την κατεργασία έναντι των ιδανικά επιδιωκόμενων κατακόρυφων τοιχωμάτων. Για το σκοπό αυτόν λήφθηκε υπόψη στη μοντελοποίηση η γωνία του κώνου σύγκλισης της δέσμης. Η λογική που ακολουθήθηκε για τη θεώρηση της συνεισφοράς της ημιγωνία του κώνου σύγκλισης θ_0 βασίστηκε στο ότι, καθώς η δέσμη σε κάθε επίπεδο που σαρώνεται ακτινοβολεί σταδιακά ένα τμήμα του υλικού που βρίσκεται προς τα έξω από το σύνορο, το υλικό του πλευρικού τοιχώματος του συνόρου, όταν η δέσμη έχει φτάσει στο τελικό της βάθος, τείνει να αγκαλιάσει τη δέσμη. Το υλικό στο πλευρικό σύνορο τείνει να αγκαλιάσει τον κώνο της δέσμης εφόσον στα παραπάνω περάσματα όλο το υλικό στο σύνορο που συναντά τη δέσμη, λόγω της ακτινοβολήσεως που υφίσταται, αφαιρείται. Βέβαια, εκτός από την κλίση που τείνει να λάβει το υλικό από την κωνικότητα της δέσμης η τελική μορφή του συνόρου διαμορφώνεται ως επί το πλείστον από τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα από τη μεταφορά θερμότητας προς το υλικό που συνοδεύεται από την αφαίρεση υλικού με τη μορφή ατμού και τα συναφή φαινόμενα, όπως μοντελοποιήθηκαν κατάλληλα για την εφαρμογή στο μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία και παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 3.4.2 και 3.4.3.

Συνεπώς, στη γωνία των πλευρικών τοιχωμάτων που υπολογίζεται από την παραμορφωμένη γεωμετρία-πλέγμα του τεμαχίου KT_{dg} που προκύπτει από την αφαίρεση υλικού κατά την επίλυση του ψευδο-3D προσωμοιωτικού μοντέλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, θεωρώντας μια ιδανική δέσμη Laser σταθερής διαμέτρου κατά τη διεύθυνση της διάδοσής της, συνυπολογίστηκε μια διόρθωση στη γωνία αυτή για τον υπολογισμό της πραγματικής γωνίας κλίσης που εμφανίζουν τα πλευρικά τοιχώματα KT , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Η διόρθωση KT_{cor} που συνυπολογίστηκε στη γωνία KT_{dg} σχετίζεται με την κωνικότητα που εμφανίζει η εκάστοτε δέσμη Laser και ισούται με την τιμή θ_0 της ημιγωνίας του κώνου σύγκλισης μείον την τιμή της γωνίας κλίσης α_{bor} του άξονα της δέσμης ως προς τον κατακόρυφο άξονα στο σύνορο.



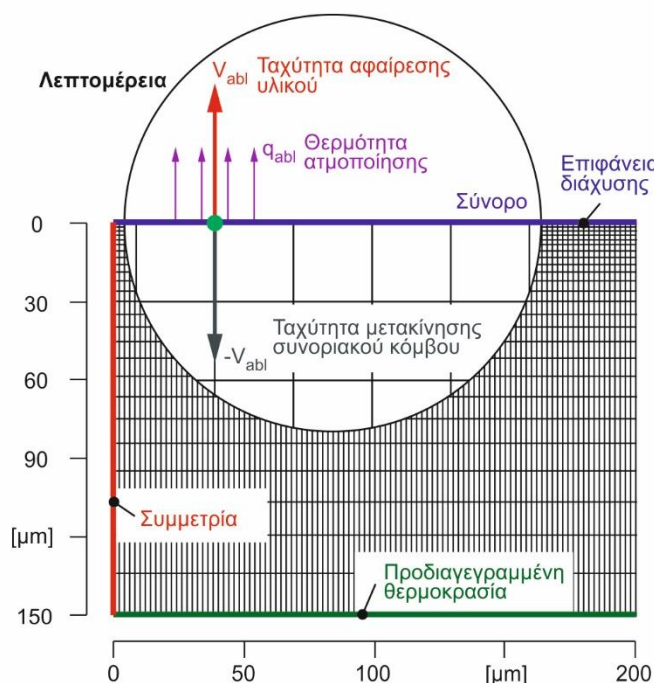
Σχήμα 4.4: Υπολογισμός πραγματικής γωνίας κλίσης πλευρικών τοιχωμάτων KT συνυπολογίζοντας την επίδραση του κώνου σύγκλισης της δέσμης Laser

4.2.3 Γεωμετρία, διακριτοποίηση, αρχικές και συνοριακές συνθήκες, συνθήκη τερματισμού

Για τη 2D προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων σε ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής της γεωμετρίας χρησιμοποιώντας το ψευδο-3D μοντέλο, χρησιμοποιήθηκε ως αρχικό τεμάχιο ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Το αρχικό τεμάχιο αυτό οφείλει να έχει τέτοιες διαστάσεις ώστε να επαρκούν για την προσομοίωση της αφαίρεσης του υλικού που θα προκύψει από τη χάραξη

του μισού μήκους $\alpha_{\text{pocket}}/2$ της εσοχής λόγω της αξιοποίησης της συμμετρίας και με βάθος D_p . Έπειτα από δοκιμές, διαπιστώθηκε ότι το αρχικό τεμάχιο πρέπει να έχει μήκος μεγαλύτερο από περίπου 1.5 φορές το μήκος της χάραξης (δηλαδή μήκος τεμαχίου μεγαλύτερο από $1.5\alpha_{\text{pocket}}/2$) και ύψος ίσο με 3 φορές το βάθος της χάραξης (δηλαδή ύψος τεμαχίου $3D_p$). Αυτό έτσι ώστε αφενός μεν το αρχικό τεμάχιο να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο ώστε να μειωθεί ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος και αφετέρου το αρχικό τεμάχιο να είναι αρκετά μεγάλο για να μην εμφανιστούν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις στο πλέγμα κατά τη μετακίνηση του με βάση την ταχύτητα αφαίρεσης του υλικού.

Για την πλεγματοποίηση του τεμαχίου χρησιμοποιήθηκε ένα πλέγμα αποτελούμενο από στοιχεία μορφής κανονικού τετραπλεύρου Lagrange 2ης τάξεως 8 κόμβων (quadratic quadrilateral elements with 8 nodes). Τα πλέγματα αποτελούμενα από τετράπλευρα αποτελούν το πιο διαδεδομένο είδος πλεγματοποίησης για τη δημιουργία δομημένων πλεγμάτων (structured meshes) και χρησιμοποιείται ευρέως κατά την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων λόγω του ότι χαρακτηρίζονται από απλότητα, ευελιξία και είναι ιδιαίτερα αποδοτικά για 2D προσομοιώσεις [133].



Σχήμα 4.5: Πλεγματοποίηση γεωμετρίας και συνοριακές συνθήκες

Στη διεύθυνση του άξονα Z επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μια κατανομή των στοιχείων τέτοια ώστε να υπάρχει υψηλότερη ανάλυση (μικρότερο μέγεθος στοιχείων) στις περιοχές που είναι μείζονος σημασίας για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία και απαιτείται υψηλότερη ακρίβεια [134]. Περιοχή που απαιτείται υψηλότερη ανάλυση είναι η άνω συνοριακή επιφάνεια του τεμαχίου η οποία ακτινοβολείται από τη δέσμη Laser και είναι αυτή στην οποία λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσεως του υλικού και η αφαίρεση του. Η κατανομή των στοιχείων στο πλέγμα που επιλέχθηκε βασίστηκε σε μια τεχνική γεωμετρικής αύξησης του μεγέθους των στοιχείων (geometric sequence growth formula) σύμφωνα με την οποία το μέγεθος του τετράπλευρου αυξάνεται εκθετικά (exponentially increasing element size) προς τη διεύθυνση του άξονα Z. Έτσι, ορίστηκε να τοποθετηθούν συνολικά 25 στοιχεία ως προς τη διεύθυνση του βάθους του τεμαχίου, θέτοντας μια αναλογία (element ratio) ίση με την τιμή 10 ως προς το ύψος μεταξύ

του τελευταίου στοιχείου στο κάτω σύνορο και του πρώτου στοιχείου στο άνω σύνορο για την κατανομή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.

Σχετικά με το μέγεθος των τετραπλεύρων στη διεύθυνση του άξονα X, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τετράπλευρα μεγέθους 2mm πραγματοποιώντας ανάλυση ανεξαρτησίας πλέγματος, έτσι ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος στοιχείων που εξασφαλίζει την επιθυμητή ακρίβεια, καταναλώνοντας τους ελάχιστους υπολογιστικούς πόρους. Ο λόγος που το μέγεθος των στοιχείων στη διεύθυνση του άξονα X είναι αρκετά μικρό, δημιουργώντας έτσι ένα πολύ πυκνό πλέγμα, οφείλεται στο ότι παρ' όλο που το μήκος του τεμαχίου που εξετάζεται πλησιάζει την τάξη του χιλιοστού, υπάρχουν μεγέθη που εμφανίζονται στη μοντελοποίηση με πολύ μικρότερες διαστάσεις σε αυτή τη διεύθυνση. Για παράδειγμα, η διάμετρος της δέσμης Laser **D_{spot}** του κέντρου κατεργασιών DMG MORI LASERTEC 40 είναι στα 30μm και η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών **H_d** κυμαίνεται συνήθως από 5 έως 20μm ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας.

Αναφορικά με τις αρχικές και τις συνοριακές συνθήκες, στην περίπτωση της 2D ανάλυσης για το ψευδο-3D μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν όμοιες αρχικές και συνοριακές συνθήκες με αυτές του 3D μοντέλου προσομοίωσης που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, με τη μόνη διαφοροποίηση να παρουσιάζεται στο αριστερό σύνορο του τεμαχίου. Στο σύνορο αυτό ορίστηκε συνοριακή συνθήκη που εξασφαλίζει τη συμμετρία η οποία επιβάλλει ότι δεν εμφανίζεται ροή θερμότητας διάμεσω του συνόρου (thermal insulation condition).

Το ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης, εφόσον ξεκινήσει και επιλύεται στο πεδίο του χρόνου προσομοιώνει τον τρόπο με τον οποίο αφαιρείται το υλικό και διαμορφώνεται η γεωμετρία της χάραξης στο υπό μελέτη εγκάρσιο επίπεδο τομής του τεμαχίου σαρώνοντας την άνω πλευρά του με παλμούς σε πολλαπλά επίπεδα. Καθώς με την πάροδο του χρόνου κατά την επίλυση το βάθος της χάραξης αυξάνεται, χρειάζεται να οριστεί μια συνθήκη τερματισμού για την προσομοίωση όταν το βάθος της χάραξης φτάσει το προαπαιτούμενο βάθος της ζητούμενης εσοχής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια συνθήκη τερματισμού (stop condition) η οποία σταματάει-ολοκληρώνει την επίλυση όταν το βάθος της χάραξης φτάσει την τιμή του βάθους της προς χάραξη εσοχής **D_p**. Ο υπολογισμός του βάθους της χάραξης κατά την επίλυση έγινε χρησιμοποιώντας κατάλληλο μετρητή για τη μετατόπιση στους συνοριακούς κόμβους τμήματος της άνω πλευράς του τεμαχίου.

4.3 Προσομοιώσεις

Με τη χρήση του ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, για τον προσδιορισμό της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και διαστατικών αποκλίσεων της χαραγμένης γεωμετρίας που αναπτύχθηκε, πραγματοποιήθηκε μια μεγάλη σειρά από προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν τη χάραξη τετραγωνικών εσοχών διαφόρων διαστάσεων σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, για διάφορες τιμές των συνθηκών κατεργασίας. Οι τετραγωνικές εσοχές των οποίων η χάραξη προσομοιώθηκε είχαν μήκος πλευράς **a_{pocket}**=0.6mm ενώ εξετάστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις για το βάθος **D_p**=0.05mm και 0.1mm.

Στο προσομοιωτικό μοντέλο θεωρήθηκαν οι κατάλληλες τιμές για τις διάφορες παραμέτρους έτσι ώστε να προσομοιώνεται η χάραξη όπως αυτή θα πραγματοποιούνταν στο κέντρο κατεργασιών Laser χάραξης DMG MORI LASERTEC 40, έτσι ώστε να είναι εφικτή η αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με αντίστοιχα πειραματικά που έχουν υλοποιηθεί σε αυτό. Έτσι, ορίστηκαν οι ακόλουθες παράμετροι που αφορούν τα χαρακτηριστικά του κέντρου κατεργασιών Laser: μήκος κύματος (wavelength) λ =1064nm,

διάρκεια παλμών (pulse duration-width) $t_{\text{pulse}}=100\text{ns}$, ποιότητα προσπίπτουσας δέσμης (incident beam quality) $M^2=19$, εστιακή απόσταση (focal length) $f=100\text{mm}$, διάμετρος δέσμης στο σημείο εστίασης (spot diameter) $D_{\text{spot}}=30\mu\text{m}$. Να σημειωθεί ότι για την τιμή του συντελεστή ποιότητας της προσπίπτουσας δέσμης δεν παρέχεται κάποια πληροφορία από τον κατασκευαστή της εργαλειομηχανής και η τιμή του επιλέχθηκε να είναι τέτοια ώστε να είναι σε συμφωνία με τις μετρήσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, όπως παρατέθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο για κέντρα κατεργασιών Laser χάραξης, είτε ίδιων, είτε παρόμοιων χαρακτηριστικών. Επιπλέον, ορίστηκε ότι υλοποιείται η μονοκατευθυντική διασταυρούμενη (unidirectional cross-hatching) στρατηγική σάρωσης, με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών (track distance) να ισούται με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών (hatching distance) και offset προς τα μέσα στη θέση του συνόρου (Border displacement offset) $BD_{\text{offset}}=20\mu\text{m}$.

Οι παράμετροι που ορίζουν τις συνθήκες κατεργασίας που εξετάστηκαν είναι η μέση ισχύς P_{avg} , η ταχύτητα της δέσμης V και η συχνότητα επανάληψης των παλμών F_{rep} . Τα εξεταζόμενα επίπεδα για όλες τις συνθήκες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 και είναι σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή του κέντρου κατεργασιών LASERTEC 40 για τη συγκεκριμένη κατεργασία σε ανοξείδωτο χάλυβα.

Συνθήκες κατεργασίας	Μονάδες	Επίπεδα
Μέση ισχύς P_{avg}	W	8, 12
Ταχύτητα δέσμης V	mm/s	200, 300, 400
Συχνότητα παλμών F_{rep}	kHz	20, 30, 40
Βάθος εσοχής D_p	mm	0.05, 0.1

Πίνακας 4.1 Επίπεδα των συνθηκών κατεργασίας που εξετάστηκαν στις προσομοιώσεις με το ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης για τη μελέτη της επίδρασής τους στις ατέλειες της χάραξης λόγω λοξοποίησης (kerf)

Η διαδικασία με την οποία υλοποιείται μια προσομοίωση στο ψεύδο-3D μοντέλο βασίζεται στα ακόλουθα βήματα. Αρχικά δίνονται ως είσοδο στο μοντέλο δεδομένα που αφορούν τις ιδιότητες του προς κατεργασία υλικού, τις διαστάσεις της τετραγωνικής εσοχής προς χάραξη, τα μεγέθη που σχετίζονται με το κέντρο κατεργασιών Laser του οποίου η λειτουργία προσομοιώνεται, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που ορίζουν τις συνθήκες κατεργασίας. Έπειτα, έχοντας λάβει τιμές για όλες τις απαραίτητες παραμέτρους, το προσομοιωτικό μοντέλο είναι πλήρως ορισμένο και επιλύεται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Από το προσομοιωτικό μοντέλο δίνεται ως έξοδο η δυσδιάστατη γεωμετρία της χάραξης σε ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής, όπως αυτή έχει προκύψει από την παραμόρφωση του πλέγματος του τεμαχίου σύμφωνα με τη μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε.

Για την παραμορφωμένη γεωμετρία που δίνεται ως έξοδο από την επίλυση του μοντέλου (deformed geometry) υπολογίζονται οι τιμές του άνω πλάτους χάραξης TKW_{dg} , του κάτω πλάτους χάραξης BKW_{dg} , της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων KT_{dg} και του βάθους της χάραξης ED_{dg} . Οι τιμές των παραμέτρων αυτών, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η σύγκλιση της δέσμης Laser που οδηγεί στο κωνικό της σχήμα κατά την πρόσπτωση στο τεμάχιο, απαιτείται να διορθωθούν κατάλληλα προκειμένου να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τελικές τιμές που δίνονται ως έξοδος. Για τον υπολογισμό της τιμής εξόδου της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων της τετραγωνικής εσοχής KT (ορίζεται ως η μέση γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των κεκλιμένων πλευρικών τοιχωμάτων της χαραγμένης εσοχής σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα) απαιτείται η πρόσθεση στην τιμή της γωνίας που έχει υπολογιστεί από την παραμορφωμένη γεωμετρία KT_{dg} μιας γωνίας KT_{cor} , όπως φαίνεται στην εξίσωση

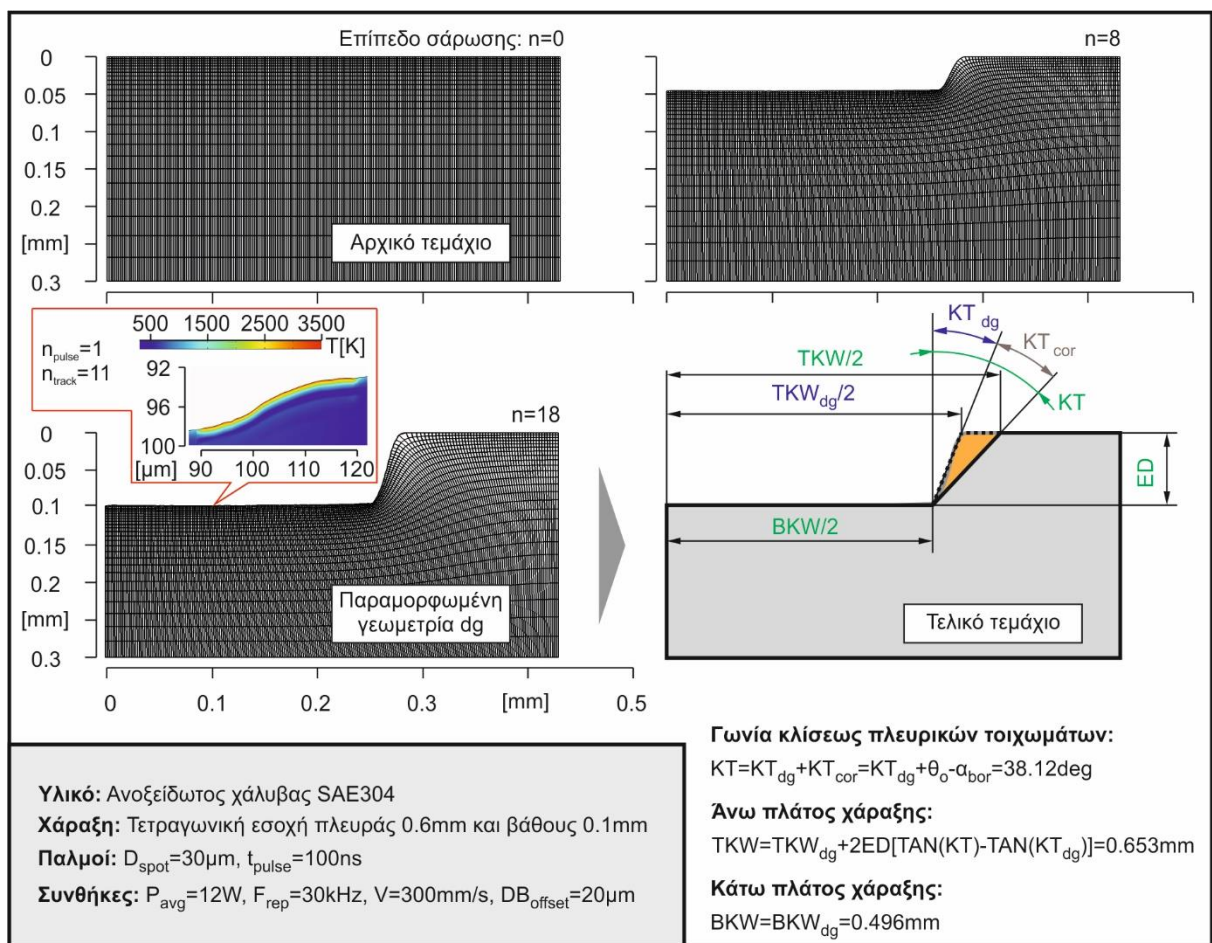
(4.13) που αφορά τη διόρθωση λόγω της σύγκλισης της δέσμης και η οποία ισούται με την ημιγωνία θ_0 του κώνου σύγκλισης μείον τη γωνία α κλίσης του άξονα της δέσμης ως προς το κατακόρυφο άξονα στο σύνορο. Ομοίως, για τον υπολογισμό της τιμής εξόδου του άνω πλάτους χάραξης **TKW** (ορίζεται ως το μέσο άνοιγμα που έχει η χαραγμένη εσοχή στο άνω μέρος της) απαιτείται η αντίστοιχη διόρθωση που υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.14). Οι τιμές εξόδου του κάτω πλάτους χάραξης **BKW** (ορίζεται ως το μέσο άνοιγμα που έχει η χαραγμένη εσοχή στον πυθμένα της) και του βάθους της χάραξης **ED** δεν χρειάζονται κάποια διόρθωση και παραμένουν ίσες με αυτές της παραμορφωμένης γεωμετρίας.

$$KT = KT_{dg} + KT_{cor} = KT_{dg} + \theta_0 - \alpha_{bor} \quad (4.13)$$

$$TKW = TKW_{dg} + 2ED[TAN(KT) - TAN(KT_{dg})] \quad (4.14)$$

$$BKW = BKW_{dg} \quad (4.15)$$

$$ED = ED_{dg} \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.6: Προσομοίωση χάραξης τετραγωνικής εσοχής με τη χρήση του ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης για τον προσδιορισμό της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και των διαστατικών αποκλίσεων της χαραγμένης γεωμετρίας λαμβάνοντας υπόψη τη σύγκλιση της δέσμης Laser

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται αναλυτικά η περίπτωση της προσομοίωσης της χάραξης μιας τετραγωνικής εσοχής με τη χρήση του ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, για τον προσδιορισμό της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και διαστατικών αποκλίσεων χαραγμένης γεωμετρίας. Η προσομοίωση που διενεργήθηκε αφορά τη χάραξη μιας τετραγωνικής εσοχής πλευράς

$\alpha_p=0.6\text{mm}$ και βάθους $D_p=0.1\text{mm}$ σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 με όμοιο τρόπο όπως θα πραγματοποιούνταν η χάραξη με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40. Οι τιμές των παραμέτρων που ορίζουν τις συνθήκες κατεργασίας είναι: μέση ισχύς $P_{avg}=12\text{W}$, ταχύτητα δέσμης $V=300\text{mm/s}$ και συχνότητα επανάληψης παλμών $F_{rep}=30\text{kHz}$. Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την παραμορφωμένη γεωμετρία (deformed geometry), όπως έχει προκύψει από την αφαίρεση του υλικού για μια ενδιάμεση φάση της επίλυσης του μοντέλου προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στην οποία έχουν πραγματοποιηθεί $n=8$ επίπεδα σάρωσης και για την τελική φάση. Επιπλέον, παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στο τεμάχιο υπό την επίδραση ενός τυχαίου παλμού της δέσμης Laser ($n=18$, $n_{pulse}=1$, $n_{track}=11$).

Στην τελική φάση της επίλυσης έχουν πραγματοποιηθεί $n=18$ επίπεδα σάρωσης και για την παραμορφωμένη γεωμετρία μετρώνται με τρόπο όμοιο με αυτόν για τα πειράματα χάραξης που αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο 4.4.1: το βάθος χάραξης $ED_{dg}=0.097\text{mm}$, το άνω πλάτος χάραξης $TKW_{dg}=0.544\text{mm}$, το κάτω πλάτος χάραξης $BKW_{dg}=0.496\text{mm}$ και η γωνία κλίσης του πλευρικού τοιχώματος $KT_{dg}=13.45\text{deg}$. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της σύγκλισης της δέσμης (συνεπάγεται την κωνική μορφή της κατά την πρόσπτωση στο τεμάχιο) στον σχηματισμό της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων με βάση τη μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε, απαιτείται διόρθωση στις τιμές των παραπάνω μεγεθών. Έτσι, σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.13) έως (4.16), οι τελικές τιμές εξόδου του προσομοιωτικού μοντέλου για τη μελέτη της λοξοποίησης (kerf) της χαραγμένης γεωμετρίας είναι: βάθος χάραξης $ED=0.097\text{mm}$, άνω πλάτος χάραξης $TKW=0.653\text{mm}$, κάτω πλάτος χάραξης $BKW=0.496\text{mm}$ και γωνία κλίσης του πλευρικού τοιχώματος $KT=38.12\text{deg}$.

4.4 Πειραματική επιβεβαίωση

4.4.1 Πειραματική διαδικασία

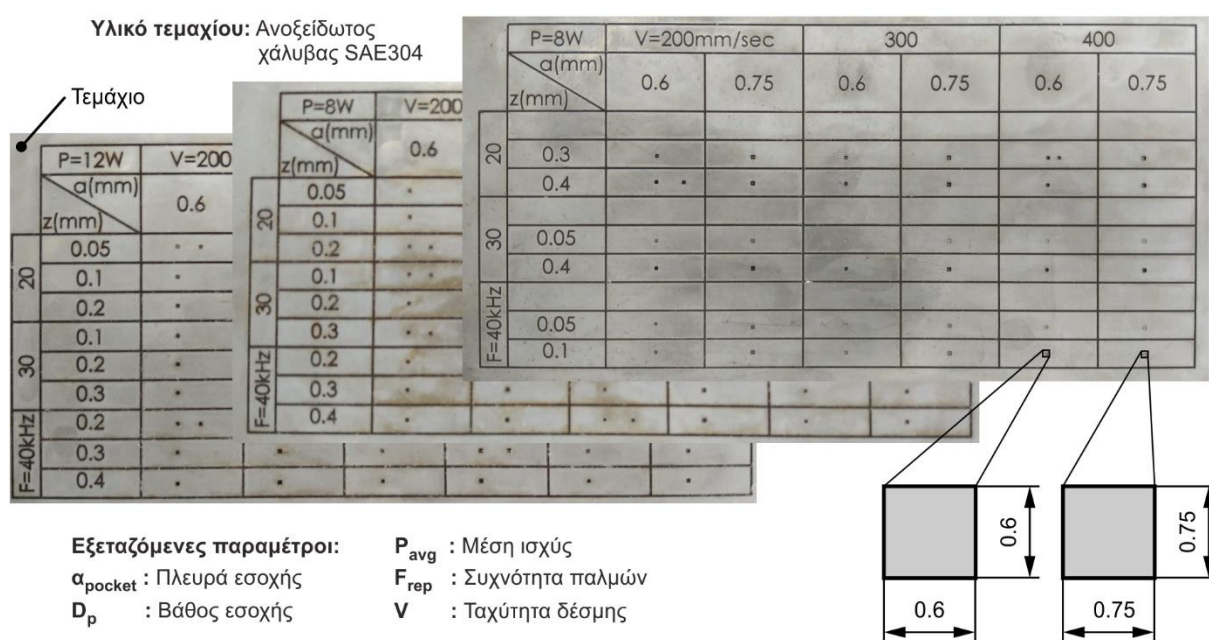
Προκειμένου να επιβεβαιωθεί πειραματικά το αναπτυχθέν ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης των ατελειών λόγω λοξοποίησης (kerf) της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, πραγματοποιήθηκε μεγάλη σειρά από πειράματα χάραξης για διαφορετικές τιμές των συνθηκών κατεργασίας και των παραμέτρων που σχετίζονται με τις διαστάσεις της γεωμετρίας προς χάραξη. Χαραχτήκαν τετραγωνικές εσοχές σε πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 πάχους 5mm με τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser χάραξης DMG MORI LASERTEC 40. Οι παράμετροι των οποίων η επίδραση εξετάστηκε διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις παραμέτρους που σχετίζονται με τις συνθήκες κατεργασίας, δηλαδή τον τρόπο που πραγματοποιείται η χάραξη με παλμούς δέσμης Laser και τις παραμέτρους που σχετίζονται με τη γεωμετρία χάραξης.

Συνθήκες κατεργασίας	Μονάδες	Επίπεδα
Μέση ισχύς P_{avg}	W	8, 12
Ταχύτητα δέσμης V	mm/s	200, 300, 400
Συχνότητα παλμών F_{rep}	kHz	20, 30, 40
Βάθος εσοχής D_p	mm	0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Πλευρά εσοχής α_{pocket}	mm	0.6, 0.75

Πίνακας 4.2: Επίπεδα των παραμέτρων που διερευνήθηκαν πειραματικά ως προς την επίδρασή τους στις ατέλειες της χάραξης λόγω kerf

Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις συνθήκες κατεργασίας που εξετάστηκαν είναι: μέση ισχύς (average Power) P_{avg} , ταχύτητα δέσμης (scanning Speed) V και η συχνότητα

επανάληψης παλμών (repetition Rate) F_{rep} . Οι παράμετροι που σχετίζονται με τη γεωμετρία χάραξης που εξετάστηκαν είναι: το μήκος πλευράς της τετραγωνικής εσοχής a_{pocket} και το βάθος χάραξης της τετραγωνικής εσοχής D_p . Τα επίπεδα για τις τιμές της κάθε παραμέτρου που διερευνήθηκαν πειραματικά παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2. Για τις χαράξεις η τιμή του offset προς τα μέσα στη θέση του συνόρου (border displacement offset) που επιλέχθηκε στο κέντρο κατεργασιών είναι $DB_{offset}=20\mu m$ (σύμφωνη τιμή με τις προτεινόμενες από το λογισμικό LPSWin). Τα επίπεδα για τις συνθήκες κατεργασίας επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή του κέντρου κατεργασιών DMG MORI LASERTEC 40 για την κατεργασία ανοξείδωτου χάλυβα. Σχετικά με τις εξεταζόμενες τιμές για τις διαστάσεις της τετραγωνικής εσοχής, το οπτικό προφίλομετρο Bruker Contour GT-K είναι εφοδιασμένο με φακό που διαθέτει ζουμ x5 ο οποίος επιτρέπει τη σάρωση μιας επιφάνειας διαστάσεων $1.26 \times 0.9 mm$. Έτσι, τα επίπεδα για το μήκος της πλευράς που εξετάστηκαν επιλέχθηκαν έτσι ώστε ολόκληρη η εσοχή να μπορεί να μετρηθεί με βάση το διαθέσιμο εύρος σάρωσης.

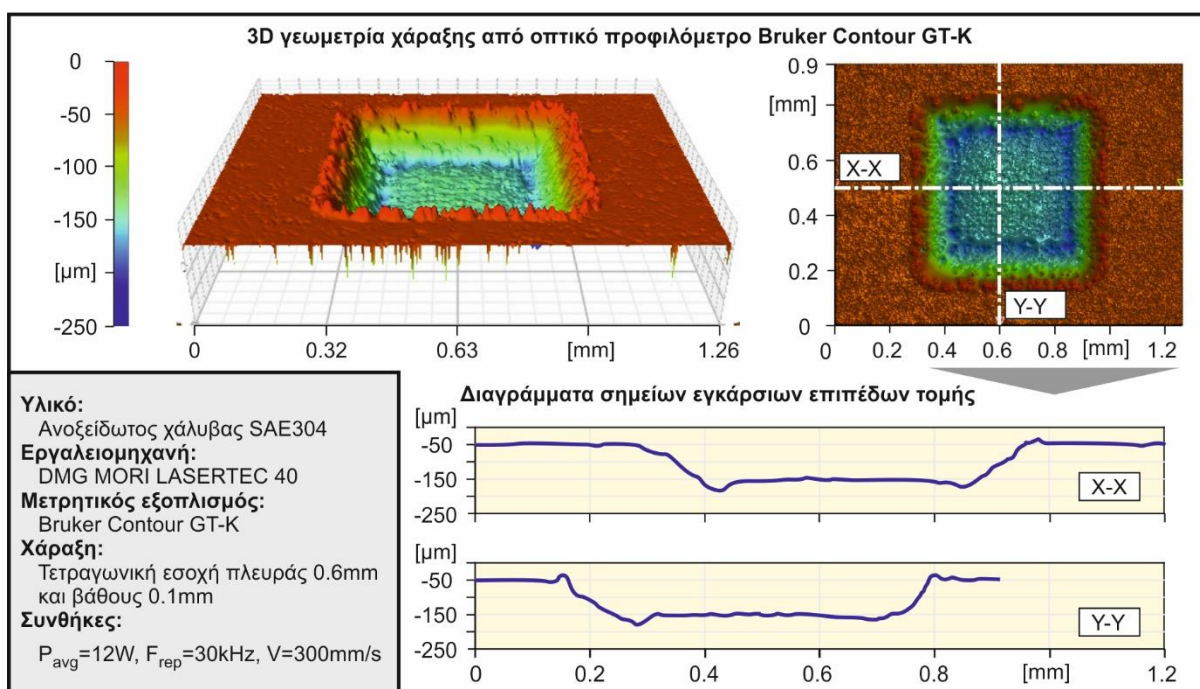


Σχήμα 4.7: Χαραγμένες τετραγωνικές εσοχές σε πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 για μελέτη των ατελειών χάραξης λόγω λοξοποίησης (kerf)

Για την υλοποίηση των χαράξεων ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με αυτή που παρουσιάστηκε στα κεφάλαια 3.7.1 και 3.7.2. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά σχεδιάστηκαν τα 3D μοντέλα της γεωμετρίας χάραξης των τετραγωνικών εσοχών με τη χρήση ενός λογισμικού τεχνικής σχεδίασης CAD. Η γεωμετρία του υλικού που χρειάζεται να αφαιρεθεί για την κάθε μια τετραγωνική εσοχή εξήχθη σε ένα αρχείο 3D όγκου της μορφής .stl το οποίο δόθηκε ως είσοδο στο λογισμικό LPSWin που παρέχεται από το κατασκευαστή του κέντρου κατεργασιών και έχει το ρόλο λογισμικού CAM. Στο λογισμικό LPSWin δόθηκαν ως είσοδοι για την κάθε μια εσοχή οι σχετικές παράμετροι με τη μονοκατευθυντική διασταυρούμενη (unidirectional cross-hatching) στρατηγική σάρωσης που χρησιμοποιείται και η τιμή του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για τον υπολογισμό του συνολικού αριθμού επιπέδων σάρωσης που θα πραγματοποιηθούν. Οι τιμές που δόθηκαν ως είσοδοι για το πάχος στρώματος αφαίρεσης υλικού D'_z είναι αυτές που προέκυψαν από τα πειράματα που διενεργήθηκαν και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.8 για τον ανοξείδωτο χάλυβα SAE304. Από το λογισμικό LPSWin εξήχθη ένα αρχείο της μορφής .l4d το οποίο εμπεριέχει το χάρτη σάρωσης με τις θέσεις που θα σταλούν οι παλμοί δέσμης Laser και δόθηκε ως είσοδο στο λογισμικό LaserSoft

3D. Στο λογισμικό LaserSoft 3D το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του κέντρου κατεργασιών Laser δόθηκαν οι τιμές των συνθηκών κατεργασίας και επίσης ορίστηκε το σημείο μηδέν του τεμαχίου. Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία για κάθε μια τετραγωνική εσοχή προς χάραξη ξεχωριστά, χαράχτηκαν οι τετραγωνικές εσοχές στην πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, όπως φαίνεται στο [σχήμα 4.7](#).

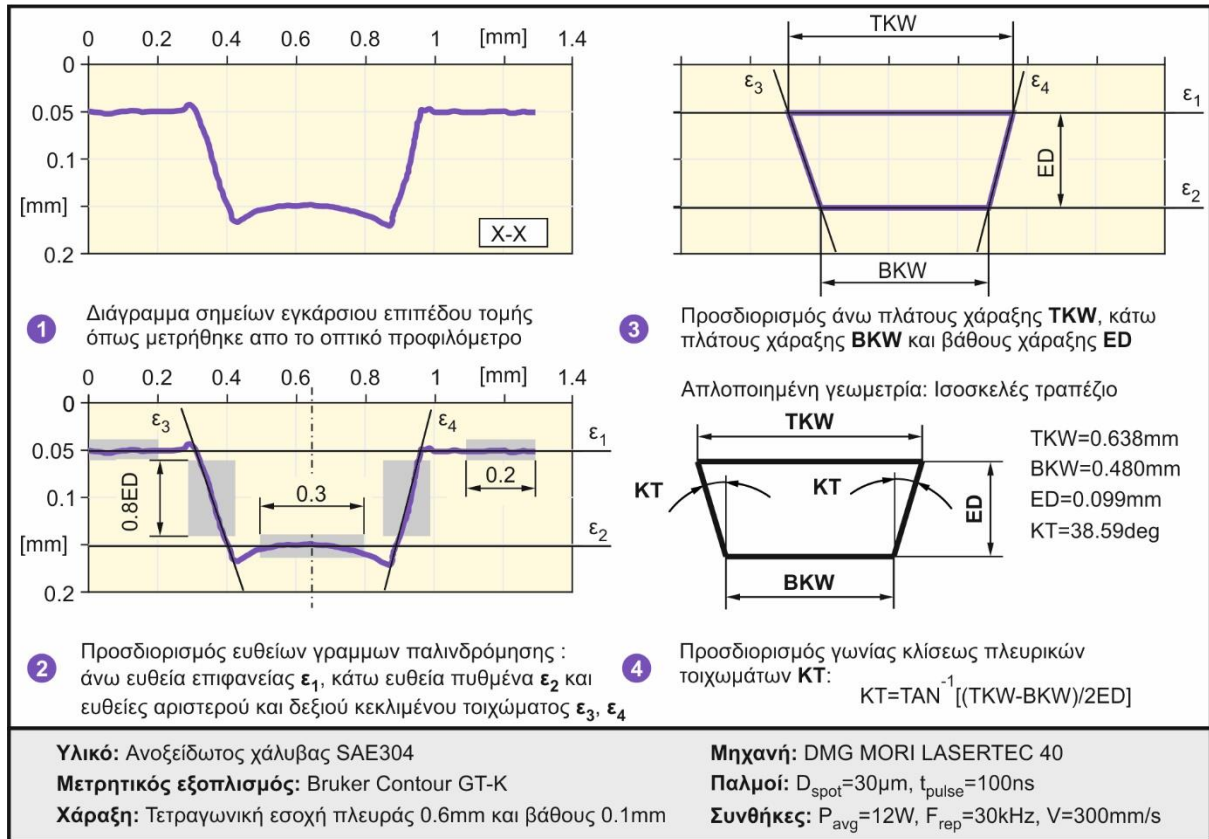
Εφόσον χαράχτηκαν όλες οι εσοχές παρατηρήθηκε ότι υπήρχαν στον πυθμένα τους συγκεντρωμένες επικαθήσεις από τη θερμική επεξεργασία με τη δέσμη Laser. Παρόλο που το κέντρο κατεργασιών Laser είναι εξοπλισμένο με σύστημα αναρρόφησης για την απομάκρυνση των επικαθήσεων, λόγω του μικρού μεγέθους των εσοχών ήταν αδύνατη η εξ' ολοκλήρου αναρρόφησή τους. Έτσι, οι χαραγμένες εσοχές καθαρίστηκαν διεξοδικά εμβαπτίζοντας τις αρχικά σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 15% κ.β. για σύντομο χρονικό διάστημα, οι οποίες έπειτα ξεπλύθηκαν με νερό και στεγνώθηκαν με πεπιεσμένο αέρα υψηλής πίεσης. Έπειτα ακολούθησε η μέτρηση όλων των χαραγμένων εσοχών με τη χρήση του οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K.



Σχήμα 4.8: 3D προφίλ χαραγμένης εσοχής και διαγράμματα από ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής στην διεύθυνση του άξονα X-X και ένα του Y-Y

Η 3D γεωμετρία κάθε εσοχής σαρώθηκε με το οπτικό προφιλόμετρο και λήφθηκε το 3D προφίλ της επιφάνειας της χάραξης. Έχοντας το 3D προφίλ της χαραγμένης εσοχής πάρθηκαν τρία εγκάρσια επίπεδα τομής στη διεύθυνση του άξονα X-X και τρία στη διεύθυνση του άξονα Y-Y. Έτσι, για κάθε ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής λήφθηκε το αντίστοιχο διάγραμμα με τα σημεία που ορίζουν τη γραμμή που προκύπτει από την τομή του εκάστοτε επιπέδου με την επιφάνεια της χάραξης. Στο [σχήμα 4.8](#) παρουσιάζονται το 3D προφίλ της επιφάνειας της χάραξης, όπως μετρήθηκε από το οπτικό προφιλόμετρο Bruker Contour GT-K, καθώς και τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής στη διεύθυνση του άξονα X-X και ένα του Y-Y για μια τετραγωνική εσοχή πλευράς $a_{pocket}=0.6mm$ και βάθους $D_p=0.1mm$ χαραγμένη από το κέντρο κατεργασιών DMG MORI LASERTEC 40 με συνθήκες κατεργασίας: $P_{avg}=12W$, $F_{rep}=30kHz$, $V=300mm/s$.

Τα δεδομένα που λήφθηκαν για κάθε ένα από τα εγκάρσια επίπεδα τομής, δηλαδή η γραμμή που προκύπτει από την τομή κάθε επιπέδου με το 3D προφίλ της επιφάνειας χάραξης, επεξεργάστηκαν κατάλληλα για να υπολογιστούν οι πειραματικές τιμές του άνω πλάτους χάραξης (top kerf width) **TKW'**, του κάτω πλάτους χάραξης (bottom kerf width) **BKW'**, της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων (kerf taper angle) **KT'** και του βάθους χάραξης **ED'** (engraving depth). Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα από τα εγκάρσια επίπεδα τομής παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9 που αφορά τη μέτρηση μιας τετραγωνικής εσοχής ονομαστικών διαστάσεων $\alpha_{\text{pocket}}=0.6\text{mm}$, $D_p=0.1\text{mm}$ χαραγμένη από το κέντρο κατεργασιών DMG MORI LASERTEC 40 με συνθήκες κατεργασίας $P_{\text{avg}}=12\text{W}$, $F_{\text{rep}}=30\text{kHz}$, $V=300\text{mm/s}$ σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304.



Σχήμα 4.9: Διαδικασία υπολογισμού του άνω πλάτους χάραξης **TKW**, του κάτω πλάτους χάραξης **BKW**, της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων **KT** και του βάθους χάραξης **ED**, για ένα εγκάρσιο επίπεδο τομής μιας πειραματικά χαραγμένης τετραγωνικής εσοχής.

Αρχικά υπολογίστηκε η οριζόντια ευθεία γραμμή παλινδρόμησης ϵ_1 (horizontal regression line or horizontal line of best fit) προκειμένου να εντοπιστεί η νοητή ευθεία με τέτοιο ύψος που αντιστοιχεί στην άνω επιφάνεια του τεμαχίου. Για τον υπολογισμό της ϵ_1 λήφθηκαν υπόψη το αριστερό και το δεξί άκρο του διαγράμματος που αντιστοιχούν στα σημεία της άνω επιφάνειας του αρχικού τεμαχίου. Θεωρήθηκε ότι τα σημεία που συμμετέχουν στην παλινδρόμηση καταλαμβάνουν ένα εύρος μήκους 0.2mm στον οριζόντιο άξονα από το σύνορο, όταν πρόκειται για διάγραμμα από τομή στη διεύθυνση του άξονα X-X και εύρος μήκους 0.07mm όταν πρόκειται για διάγραμμα από τομή στη διεύθυνση του άξονα Y-Y. Η διαφορά στο μήκος του εύρους των σημείων από το σύνορο και μέσα, που συμμετέχουν στην παλινδρόμηση ανάλογα με τον αν η εγκάρσια τομή είναι στη διεύθυνση του άξονα X-X ή του Y-Y οφείλεται στο ότι το εύρος που σαρώνει το προφιλόμετρο δεν είναι ίδιο και στις δύο κατευθύνσεις (1.26x0.9mm) με

αποτέλεσμα το μήκος του άκρου που αντιστοιχεί στα σημεία της επιφάνειας του τεμαχίου να είναι διαφορετικό σε κάθε διεύθυνση.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η οριζόντια ευθεία γραμμή παλινδρόμησης ε_2 η οποία έχει τέτοιο ύψος ώστε να αντιστοιχεί στον πυθμένα της χαραγμένης εσοχής. Για τον υπολογισμό της ε_2 λήφθηκαν υπόψη τα σημεία που βρίσκονται γύρω από το μέσον του διαγράμματος και καταλαμβάνουν ένα εύρος μήκους 0.3mm τα οποία αντιστοιχούν στα σημεία που βρίσκονται στον πυθμένα της εσοχής. Έχοντας την ευθεία ε_1 που αντιστοιχεί στην επιφάνεια και την ευθεία ε_2 που αντιστοιχεί στον πυθμένα υπολογίζεται εύκολα το βάθος της εσοχής το οποίο, εφόσον έχει υλοποιηθεί σωστά η χάραξη και η μέτρηση πρέπει να πλησιάζει σε αυτό που ζητήθηκε να χαραχθεί.

Προκειμένου να εντοπιστούν τα σημεία που αντιστοιχούν στα κεκλιμένα πλευρικά τοιχώματα, απομονώθηκαν τα σημεία που βρίσκονται μεταξύ των ευθειών ε_1 και ε_2 θεωρώντας ότι τα σημεία που βρίσκονται σε μια απόσταση ίση με 10% του θεωρητικού βάθους χάραξης από αυτές τις ευθείες δεν λαμβάνονται υπόψη. Με αυτό τον τρόπο αγνοούνται τυχόν εσφαλμένα ή μη επιθυμητά σημεία μέτρησης που εμφανίζονται π.χ. κοντά στην άνω επιφάνεια λόγω κάποιας ακαθαρσίας ή μικρο-πόρου στο αρχικό τεμάχιο. Έχοντας έτσι απομονώσει τα σημεία που αντιστοιχούν στα πλευρικά τοιχώματα, υπολογίζεται η ευθεία γραμμή παλινδρόμησης ε_3 για όσα σημεία βρίσκονται αριστερά του μέσου το διαγράμματος και η ευθεία γραμμή παλινδρόμησης ε_4 για όσα σημεία βρίσκονται δεξιά του μέσου το διαγράμματος. Οι ευθείες γραμμές ε_3 και ε_4 είναι αυτές που αντιστοιχούν στα κεκλιμένα πλευρικά τοιχώματα της χαραγμένης εσοχής.

$$KT' = \text{TAN}^{-1}\left(\frac{TKW' - BKW'}{2 ED'}\right) \quad (4.17)$$

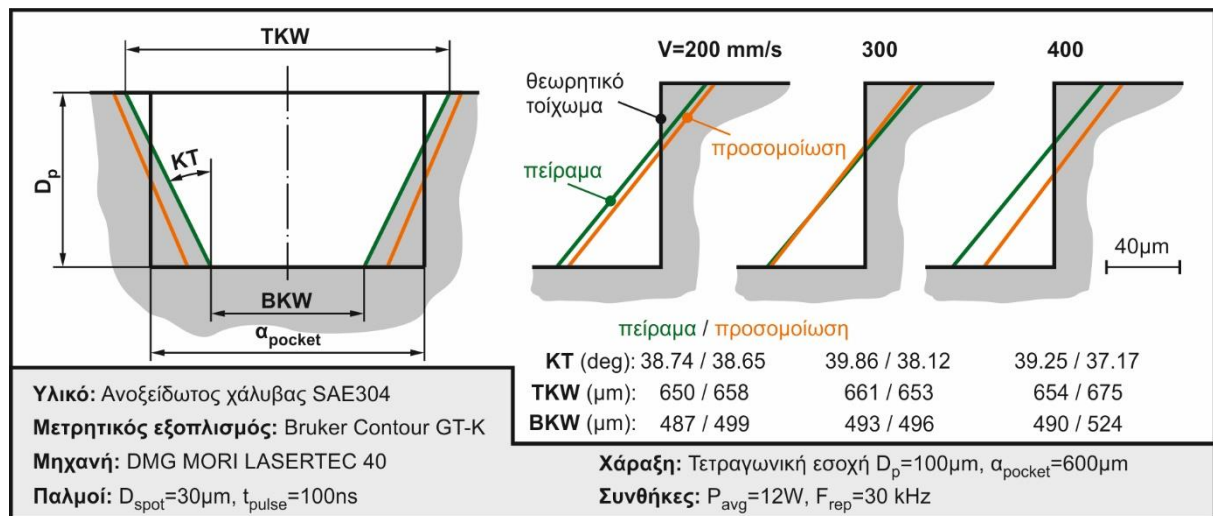
Από την τομή των ευθειών $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ προκύπτει ένα τραπέζιο. Υπολογίζοντας το μήκος της μεγάλης βάσης, το μήκος της μικρής βάσης και το ύψος του τραπεζίου, προκύπτουν οι τιμές του άνω πλάτους χάραξης $TKW'=0.638\text{mm}$, του κάτω πλάτους χάραξης $BKW'=0.480\text{mm}$ και του βάθους χάραξης $ED'=0.099\text{mm}$. Θεωρώντας ότι η απλοποιημένη χαραγμένη γεωμετρία είναι ένα ισοσκελές τραπέζιο, τότε η γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων υπολογίζεται $KT'=38.59^\circ$ από την εξίσωση (4.17). Όπως προαναφέρθηκε, για κάθε εσοχή λήφθηκαν τρία εγκάρσια επίπεδα τομής στη διεύθυνση του άξονα X-X και τρία στη διεύθυνση του άξονα Y-Y. Έτσι η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε χαραγμένη εσοχή έξι φορές, δηλαδή μια φορά για κάθε διάγραμμα. Υπολογίστηκαν έτσι το άνω πλάτος χάραξης, το κάτω πλάτος χάραξης και η γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων μιας εσοχής, λαμβάνοντας τη μέση τιμή αυτών των μεγεθών που προκύπτουν από τα έξι διαγράμματα των εγκάρσιων τομών.

4.4.2 Διαδικασία σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζονται συγκριτικά η θεωρητικά ζητούμενη, η πειραματικά μετρούμενη και η υπολογιζόμενη από τις προσομοιώσεις γεωμετρία χάραξης για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας. Οι χαράξεις που παρουσιάζονται αφορούν τη χάραξη μιας τετραγωνικής εσοχής με θεωρητικό μήκος πλευράς $\alpha_{\text{pocket}}=600\mu\text{m}$ και βάθος $D_p=100\mu\text{m}$ η οποία χαράζεται σε κέντρο κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40 χρησιμοποιώντας μονοκατευθυντική διασταυρούμενη στρατηγική σάρωσης, με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθύγραμμων τροχιών παλμών να ισούται με την

απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών και offset προς τα μέσα στη θέση του συνόρου $BD_{offset}=20\mu m$.

Σχετικά με τις συνθήκες κατεργασίας, εφαρμόζεται μέσης ισχύς $P_{avg}=12W$, συχνότητα επανάληψης παλμών $F_{rep}=30kHz$ και εξετάζονται τρία επίπεδα για την ταχύτητα της δέσμης $V=200,300,400mm/s$. Λόγω της εμφάνισης του φαινομένου του keif τα τοιχώματα στο σύνορο των χαράξεων δεν είναι στην πράξη κατακόρυφα όπως στη θεωρητικά ζητούμενη χάραξη, αλλά εμφανίζουν μια σημαντική κλίση. Η εξάρτηση της κλίσης αυτής από τις διάφορες παραμέτρους της κατεργασίας θα διερευνηθεί παρακάτω σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η κλίση που εμφανίζεται στα πλευρικά τοιχώματα επηρεάζει με τη σειρά της τις διαστάσεις της χαραγμένης εσοχής καθώς παρατηρείται μεταβολή στο άνοιγμα της εσοχής, τόσο στο άνω μέρος της, όσο και στον πυθμένα της.



Σχήμα 4.10: Γραφική αναπαράσταση της θεωρητικά ζητούμενης, της πειραματικά μετρούμενης και της υπολογιζόμενης από τις προσομοιώσεις γεωμετρίας χάραξης της τετραγωνικής εσοχής για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.10 και στις τρεις περιπτώσεις συνδυασμών συνθηκών κατεργασίας το άνω πλάτος της χαραγμένης εσοχής προκύπτει να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το θεωρητικό-ονομαστικό μήκος πλευράς της εσοχής. Το κάτω πλάτος στον πυθμένα της χαραγμένης εσοχής προκύπτει αρκετά μικρότερο σε σχέση με το θεωρητικό. Ως γενική παρατήρηση από το σχήμα 4.10 προκύπτει ότι το πλευρικό τοίχωμα που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις συμβαδίζει και σχεδόν ταυτίζεται με αυτό από τις προσομοιώσεις, εφόσον τα τοιχώματα παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια κλίση και σχεδόν όμοια τοποθέτηση και για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Για τη σύγκριση μεταξύ της γεωμετρίας που προκύπτει από τις πειραματικές χαράξεις και αυτής από τις προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του άνω πλάτους χάραξης, του κάτω πλάτους χάραξης και της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων για μια απλοποιημένη γεωμετρία που έχει τη μορφή ισοσκελούς τραπεζίου με ύψος ίσο με το θεωρητικό ύψος της χάραξης. Έτσι, για να είναι συγκρίσιμες οι τιμές της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων μεταξύ όλων των εσοχών από τους διάφορους συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας στην εξίσωση (4.17), χρησιμοποιήθηκε η θεωρητική τιμή του βάθους της εσοχής.

Για την πρώτη περίπτωση με ταχύτητα δέσμης $V=200\text{mm/s}$ η γωνία κλίσης του πλευρικού τοιχώματος προέκυψε $KT=38.65\text{deg}$ από την προσομοίωση και $KT'=38.74\text{deg}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει τη γωνία κλίσης 0.09deg μικρότερη από την πειραματικά μετρούμενη (σχετικό σφάλμα -0.2%). Το άνω πλάτος χάραξης προέκυψε $TKW=658\mu\text{m}$ από την προσομοίωση και $TKW'=650\mu\text{m}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει το άνω πλάτος χάραξης $8\mu\text{m}$ μεγαλύτερο από το πειραματικά μετρούμενο (σχετικό σφάλμα 1%). Το κάτω πλάτος χάραξης προέκυψε $BKW=499\mu\text{m}$ από την προσομοίωση και $BKW'=487\mu\text{m}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει το κάτω πλάτος χάραξης $12\mu\text{m}$ μεγαλύτερο από το πειραματικά μετρούμενο (σχετικό σφάλμα 2%).

Για τη δεύτερη περίπτωση με ταχύτητα δέσμης $V=300\text{mm/s}$ η γωνία κλίσης του πλευρικού τοιχώματος προέκυψε $KT=38.12\text{deg}$ από την προσομοίωση και $KT'=39.86\text{deg}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει τη γωνία κλίσης 1.74deg μικρότερη από την πειραματικά μετρούμενη (σχετικό σφάλμα -4%). Το άνω πλάτος χάραξης προέκυψε $TKW=653\mu\text{m}$ από την προσομοίωση και $TKW'=661\mu\text{m}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει το άνω πλάτος χάραξης $8\mu\text{m}$ μικρότερο από το πειραματικά μετρούμενο (σχετικό σφάλμα -1%). Το κάτω πλάτος χάραξης προέκυψε $BKW=496\mu\text{m}$ από την προσομοίωση και $BKW'=493\mu\text{m}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει το κάτω πλάτος χάραξης $3\mu\text{m}$ μεγαλύτερο από το πειραματικά μετρούμενο (σχετικό σφάλμα 1%).

Τέλος, για την τρίτη περίπτωση με ταχύτητα δέσμης $V=400\text{mm/s}$ η γωνία κλίσης του πλευρικού τοιχώματος προέκυψε $KT=37.17\text{deg}$ από την προσομοίωση και $KT'=39.25\text{deg}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει τη γωνία κλίσης 2.08deg μικρότερη από την πειραματικά μετρούμενη (σχετικό σφάλμα -5%). Το άνω πλάτος χάραξης προέκυψε $TKW=675\mu\text{m}$ από την προσομοίωση και $TKW'=654\mu\text{m}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει το άνω πλάτος χάραξης $21\mu\text{m}$ μεγαλύτερο από το πειραματικά μετρούμενο (σχετικό σφάλμα 3%). Το κάτω πλάτος χάραξης προέκυψε $BKW=524\mu\text{m}$ από την προσομοίωση και $BKW'=490\mu\text{m}$ από τα πειράματα, δηλαδή η προσομοίωση προβλέπει το άνω πλάτος χάραξης $34\mu\text{m}$ μεγαλύτερο από το πειραματικά μετρούμενο (σχετικό σφάλμα 7%).

Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στις παραπάνω περιπτώσεις μεταξύ των μετρούμενων τιμών και των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις θεωρούνται αρκετά μικρές εφόσον πρόκειται για αποτελέσματα από επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ενός ιδιαίτερα πολυσύνθετου μοντέλου για την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων.

4.5 Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων που αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και διαστατικών αποκλίσεων χαραγμένης γεωμετρίας και επιπλέον συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από πειράματα χάραξης. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων KT , του άνω πλάτους χάραξης TKW , του κάτω πλάτους χάραξης BKW που υπολογίστηκαν από τις προσομοιώσεις καθώς και οι αντίστοιχες τιμές KT' , TKW' , BKW' που μετρήθηκαν από τα πειράματα για την χάραξη τετραγωνικών εσοχών με μέγεθος πλευράς $a_{\text{pocket}}=600\mu\text{m}$ σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 με τη χρήση του κέντρου

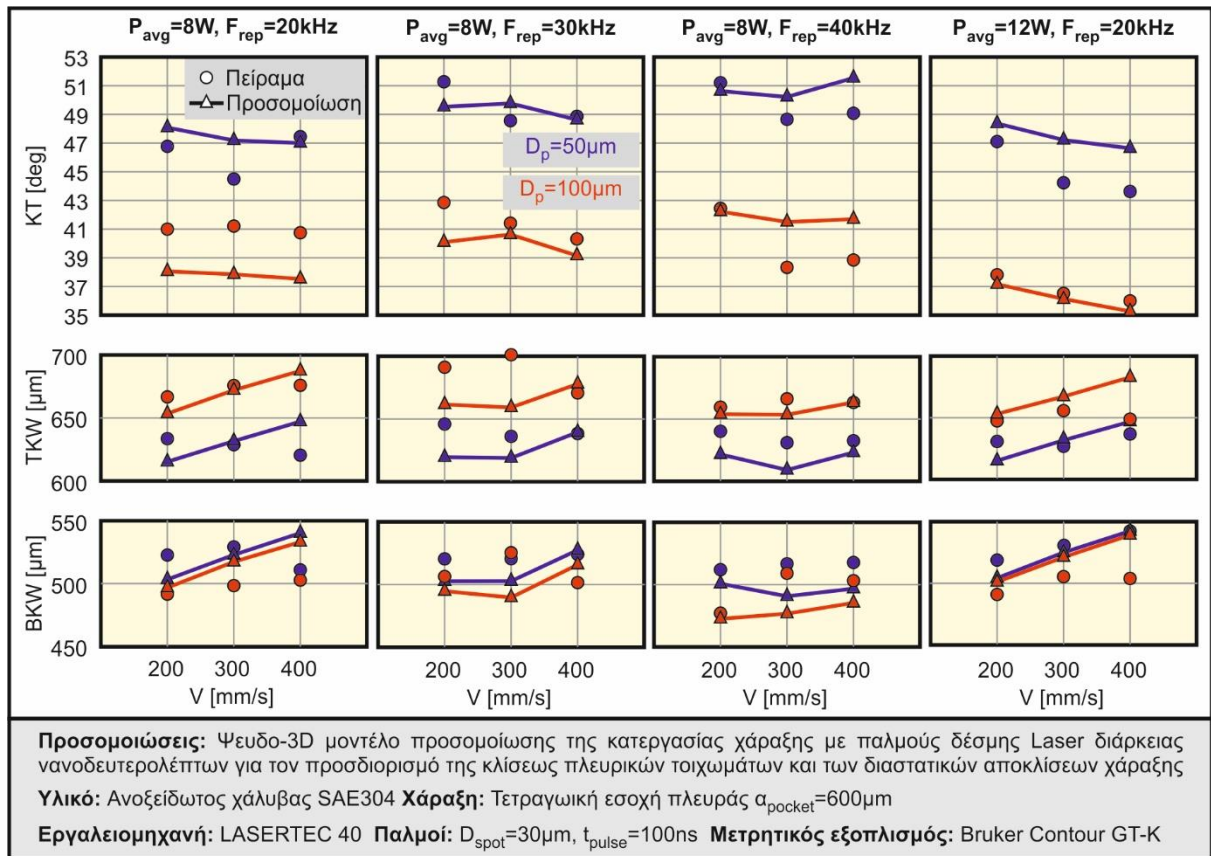
κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40 με τρόπο που παρουσιάστηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα αντίστοιχα πειράματα αφορούν δύο επίπεδα για το βάθος χάραξης $D_p=50,100\mu\text{m}$ ενώ για τις συνθήκες κατεργασίας εξετάστηκαν δύο επίπεδα για τη μέση ισχύ $P_{avg}=8,12\text{W}$, τρία επίπεδα για τη συχνότητα επανάληψης των παλμών $F_{rep}=20,30,40\text{kHz}$ και τρία επίπεδα για την ταχύτητα της δέσμης $V=200, 300, 400\text{mm/s}$. Επιπλέον, στο [σχήμα 4.11](#) παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα που απεικονίζουν τα αποτελέσματα των τιμών που προβλέφθηκαν από τις προσομοιώσεις και τις μετρούμενες πειραματικά τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών που αναγράφονται στον πίνακα 4.3.

P_{avg} [W]	F_{rep} [kHz]	V [mm/s]	D_p [μm]	KT [deg]	KT' [deg]	TKW [μm]	TKW' [μm]	BKW [μm]	BKW' [μm]
8	20	200	50	48.09	46.69	615	633	503	522
			100	37.99	40.98	653	666	497	491
		300	50	47.21	44.43	631	628	523	529
			100	37.75	41.13	672	675	517	498
		400	50	46.99	47.39	647	620	540	511
			100	37.42	40.69	687	675	534	502
	30	200	50	49.45	51.19	620	645	503	520
			100	39.98	42.77	662	691	494	505
		300	50	49.68	48.52	619	636	502	520
			100	40.50	41.28	659	701	489	524
		400	50	48.63	48.75	640	638	527	524
			100	39.09	40.17	678	671	516	500
	40	200	50	50.73	51.13	622	640	500	511
			100	42.19	42.30	653	659	472	476
		300	50	50.23	48.65	610	631	490	516
			100	41.50	38.25	654	666	477	508
		400	50	51.57	49.02	623	632	497	517
			100	41.63	38.83	663	663	485	501
12	20	200	50	48.38	47.13	616	630	503	518
			100	37.18	37.79	653	647	501	491
		300	50	47.25	44.22	632	627	524	529
			100	36.07	36.51	667	654	521	504
		400	50	46.71	43.65	647	636	541	541
			100	35.32	35.81	681	648	540	503
	30	200	100	38.65	38.74	658	650	499	487
		300	100	38.12	39.86	653	661	496	493
		400	100	37.17	39.25	675	654	524	490

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων και πειραμάτων για τη γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων, το άνω και το κάτω πλάτος χάραξης τετραγωνικών εσοχών πλευράς $600\mu\text{m}$ σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304

Παρατηρώντας τα διαγράμματα στο σχήμα 4.11 γίνεται φανερό ότι οι τιμές των μεγεθών που σχετίζονται με τη γεωμετρία της χάραξης, όπως αυτή διαμορφώνεται λόγω της εμφάνισης της λοξοποίησης (kerf), που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις έρχονται σε συμφωνία με αυτές που μετρήθηκαν πειραματικά. Προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια και η εγκυρότητα του προσομοιωτικού μοντέλου που αναπτύχθηκε υπολογίστηκαν οι τιμές του μέσου σφάλματος (mean error) **ME** και του μέσου απόλυτου σφάλματος (mean absolute error) **MAE** από την εξίσωση (3.51) και την εξίσωση (3.52) αντίστοιχα.

Όσον αφορά τις τιμές για τη γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων **KT** που προβλέφθηκαν από τις προσομοιώσεις, η τιμή του μέσου σφάλματος προέκυψε ίση με **ME**=0.01deg και του μέσου απόλυτου σφάλματος ίση με **MAE**=1.68deg. Για το άνω πλάτος χάραξης **TKW** προέκυψε μέσο σφάλμα **ME**=-3μm και μέσο απόλυτο σφάλμα **MAE**=14μm. Τέλος για το κάτω πλάτος χάραξης **BKW** προέκυψε μέσο σφάλμα **ME**=-1μm και μέσο απόλυτο σφάλμα **MAE**=17μm. Οι τιμές του μέσου σφάλματος για τα αποτελέσματα προσομοιώσεων είναι πολύ μικρές και υποδεικνύουν ότι το προσομοιωτικό μοντέλο έχει την τάση γενικά να προβλέπει τη γεωμετρία της χαραγμένης εσοχής με ελάχιστα μεγαλύτερη κλίση στα πλευρικά τοιχώματα και ελάχιστα μικρότερο άνω και κάτω άνοιγμα σε σχέση με την πραγματικά μετρούμενη. Οι τιμές του μέσου απόλυτου σφάλματος για τη γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων είναι της τάξεως της 1 μοίρας και για το άνω και κάτω άνοιγμα της εσοχής είναι της τάξεως των 15 μικρομέτρων που θεωρούνται ιδιαίτερα χαμηλά (σε σχέση με το ονομαστικό μήκος της πλευράς 600μm) και υποδηλώνουν ότι το ψευδο-3D μοντέλο προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων που αναπτύχθηκε, χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια.



Σχήμα 4.11: Τιμές της κλίσης πλευρικών τοιχωμάτων **KT**, του άνω πλάτους χάραξης **TKW** και κάτω πλάτους χάραξης **BKW** για χαραξείς τετραγωνικών εσοχών πλευράς 600μm με βάθος 50, 100μm που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και από τα πειράματα

Παρατηρώντας τις γραμμές τάσεων από τα διαγράμματα του σχήματος 4.11 για τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με το πώς επηρεάζεται ο σχηματισμός του kerf στη γεωμετρία χάραξης συναρτήσει των παραμέτρων που εξετάστηκαν. Η επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων στον σχηματισμό της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων **KT** προκύπτει από το άνω σύνολο διαγραμμάτων του σχήματος 4.11, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των

προσομοιώσεων για τις διάφορες περιπτώσεις. Μείωση της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων **KT** μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της ταχύτητας της δέσμης **V**, με μείωση της συχνότητας επανάληψης των παλμών **F_{rep}** και αύξηση της μέσης ισχύος **P_{avg}**. Επιπλέον, μειωμένη γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων **KT** εμφανίζεται για εσοχές με μεγαλύτερο βάθος **D_p**.

Η επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων στο άνω πλάτος χάραξης **TKW** προκύπτει από το μεσαίο σύνολο διαγραμμάτων του σχήματος 4.11. Μείωση στο άνω πλάτος χάραξης **TKW** υπάρχει όταν μειώνεται η ταχύτητα της δέσμης **V** και αυξάνεται η συχνότητα επανάληψης των παλμών **F_{rep}**. Η μέση ισχύς **P_{avg}** δεν παρουσιάζει σημαντική επίδραση στο άνω πλάτος χάραξης **TKW**. Οι εσοχές με μεγαλύτερο βάθος **D_p** εμφανίζουν αυξημένο άνω πλάτος χάραξης **TKW**.

Η επίδραση των εξεταζόμενων παραμέτρων στο κάτω πλάτος χάραξης **BKW** προκύπτει από το κάτω σύνολο διαγραμμάτων του σχήματος 4.11. Αύξηση στο κάτω πλάτος χάραξης **BKW** πραγματοποιείται με αύξηση στην ταχύτητα της δέσμης **V** και μείωση στη συχνότητα επανάληψης των παλμών **F_{rep}**. Η αύξηση στη μέση ισχύ **P_{avg}** προκαλεί μια ελάχιστη αύξηση του κάτω πλάτους χάραξης **BKW** που είναι σχεδόν αμελητέα. Οι εσοχές με μεγαλύτερο βάθος χάραξης **D_p** εμφανίζουν μικρότερο κάτω πλάτος χάραξης **BKW**.

Γνωρίζοντας τις επιδράσεις των συνθηκών κατεργασίας στη σχηματιζόμενη γεωμετρία χάραξης λόγω εμφάνισης της λοξοποίησης (kerf), αναζητούνται οι συνθήκες κατεργασίας που βελτιστοποιούν την κατεργασία χάραξης υπό την έννοια της ελαχιστοποίησης του kerf. Βασική επιδίωξη για τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser είναι να επιτευχθεί μια χαραγμένη γεωμετρία με διαστάσεις όσο το δυνατόν πλησιέστερες με αυτές της θεωρητικά ιδανικής ζητούμενης γεωμετρίας. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται, η θεωρητικά ιδανική εσοχή που ζητείται να χαραχτεί, είναι μια εσοχή με μηδενική κλίση στα πλευρικά τοιχώματα, δηλαδή θα είχε το άνω πλάτος χάραξης **TKW** ίσο με το κάτω πλάτος χάραξης **BKW** και ίσο με 600μm καθώς και γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων **KT** ίση με 0°.

Με βάση τα συμπεράσματα που προηγήθηκαν για την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας προκύπτει ότι βελτιστοποίηση υπό τη σκοπιά της μείωσης της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας υψηλή μέση ισχύ **P_{avg}**, υψηλή ταχύτητα δέσμης **V** και χαμηλή συχνότητα επανάληψης των παλμών **F_{rep}**. Συνεπώς, από τους διάφορους συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας που εξετάστηκαν, αυτός με μέση ισχύ **P_{avg}=12W**, ταχύτητα δέσμης **V=400mm/s** και συχνότητα επανάληψης παλμών **F_{rep}=20kHz**, είναι αυτός που δίνει τη βέλτιστη γεωμετρία ως προς τη μείωση της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων από τις προσομοιώσεις. Έτσι αντίστοιχα, για βάθος εσοχής **D_p=50μm** προκύπτουν **KT=46.71deg**, **TKW=647μm**, **BKW=541μm** και για βάθος **D_p=100μm** προκύπτουν **KT=35.32deg**, **TKW=681μm**, **BKW=540μm**.

Όπως είχε παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 3.8 για τον ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 ο ρυθμός αποβολής υλικού **MRR** αυξάνεται για αύξηση της μέσης ισχύος **P_{avg}** και μείωση της συχνότητας επανάληψης των παλμών **F_{rep}** ενώ η ταχύτητα της δέσμης **V** δεν προκαλεί κάποια ιδιαίτερη επίδραση. Κατά συνέπεια γίνεται φανερό ότι η αύξηση της μέσης ισχύος **P_{avg}** και η μείωση της συχνότητας επανάληψης των παλμών **F_{rep}** συμβάλουν ταυτόχρονα και στην αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού **MRR** και στην ελάττωση της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων **KT**. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση της παραγωγικότητας και βελτίωση της διαστατικής ακρίβειας της χάραξης.

5 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάστηκε η ανάπτυξη ενός πειραματικά επιβεβαιωμένου μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Πριν ξεκινήσει η ανάπτυξη του προσομοιωτικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε μια εκτενής βιβλιογραφική αναζήτηση σχετικά με την υπό μελέτη κατεργασία. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια αναλυτική περιγραφή σχετικά με τον τρόπο υλοποίησης και τους βασικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser και εντοπίστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της συγκριτικά με τις συμβατικές κατεργασίες. Έπειτα παρουσιάστηκαν οι διάφοροι τύποι Laser που χρησιμοποιούνται, τα χαρακτηριστικά τους και τέλος μελετήθηκαν τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης Laser με το ακτινοβολούμενο υλικό του τεμαχίου. Επίσης παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για εφαρμογές που αφορούν κυρίως κατεργασίες με μεταφορά θερμότητας.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν οι κυριότερες ερευνητικές εργασίες σε διεθνές επίπεδο που αφορούν την κατεργασία χάραξης με δέσμη Laser. Επειδή οι ερευνητικές εργασίες που αφορούν γενικότερα την κατεργασία χάραξης είναι πολυάριθμες, πραγματοποιήθηκε μια κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με το υπό μελέτη αντικείμενο. Πρώτα παρουσιάστηκαν οι ερευνητικές εργασίες που ασχολούνται με πρακτικές εφαρμογές της κατεργασίας χάραξης με δέσμη Laser. Στη συνέχεια οι εργασίες αυτές που ασχολούνται με την πειραματική διερεύνηση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, η οποία είναι και αυτή που εξετάζεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Ακολούθως, παρουσιάστηκαν οι εργασίες που ασχολούνται με τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού για την παραπάνω κατεργασία και κατόπιν αυτές που προσομοιώνουν τον μηχανισμό αυτόν με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον των παραπάνω παρουσιάστηκαν οι εργασίες που ασχολούνται εξολοκλήρου με την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων. Τέλος, παρουσιάστηκαν οι ερευνητικές εργασίες που μελετούν το σχηματισμό της κλίσης στις περιφερειακές συνοριακές επιφάνειες της χαραγμένης γεωμετρίας και των συναφών ατελειών λόγω της εμφάνισης του *kerf*.

Με την ολοκλήρωση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης ακολούθησε η ανάπτυξη του προσομοιωτικού μοντέλου. Σε πρώτη φάση, προκειμένου να εντοπιστούν τα βασικά μεγέθη και παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη μοντελοποίηση της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, πραγματοποιήθηκε μια παρουσίαση των σημαντικότερων μερών και εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται ένα κέντρο κατεργασιών Laser χάραξης και από τα χαρακτηριστικά των οποίων εξαρτάται ο τρόπος που υλοποιείται η κατεργασία. Κατόπιν ακολούθησε μια γενική περιγραφή της βασικής δομής που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του προσομοιωτικού μοντέλου. Το προσομοιωτικό μοντέλο αναπτύχθηκε εξετάζοντας ξεχωριστά δύο διαφορετικές παραλλαγές-εκδοχές. Η πρώτη εκδοχή αφορούσε την ανάπτυξη ενός 3D μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων το οποίο δίνει ως έξοδο την 3D γεωμετρία χάραξης και έχει ως βασικό στόχο την πρόβλεψη της τιμής του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού. Η δεύτερη εκδοχή αφορούσε την ανάπτυξη ενός αντίστοιχου ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης για τον προσδιορισμό της κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και διαστατικών αποκλίσεων της χαραγμένης γεωμετρίας λόγω των φαινομένων εμφάνισης του *kerf*.

Για την πρώτη εκδοχή του 3D μοντέλου προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε κατάλληλη μοντελοποίηση όλων των μηχανισμών της κατεργασίας και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του μοντέλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μοντελοποιήθηκε ο χάρτης σάρωσης που περιέχει τις θέσεις των παλμών της δέσμης Laser. Μοντελοποιήθηκε η εισερχόμενη δέσμη Laser αναφορικά με την ισχύ που θα έχει συναρτήσει του χρόνου κατά την κατεργασία σύμφωνα με την παλμική συμπεριφορά που επιβάλλεται από τον μηχανισμό του Q-switching, την κατανομή που παρουσιάζει η ένταση και την πυκνότητα της ενέργειας που προσπίπτει σε ένα σημείο της υπό κλίση επιφάνειας. Μοντελοποιήθηκε η μεταβολή που υφίσταται η δέσμη Laser έως ότου απορροφηθεί από το τεμάχιο, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα που αναπτύσσονται λόγω του σχηματισμού πλουμίου πλάσματος-ατμού μετάλλου και τις απώλειες λόγω ανακλαστικότητας. Μοντελοποιήθηκε ο μηχανισμός αφαίρεσης του υλικού και χρησιμοποιήθηκε μια τεχνική μετακίνησης πλέγματος για την ένταξή του στο μοντέλο με τα πεπερασμένα στοιχεία. Τέλος, βρέθηκαν οι κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες για το μοντέλο, έτσι ώστε να έρχονται σε συμφωνία με τις συνθήκες που επικρατούν κατά την πραγματική χάραξη. Εφόσον το μοντέλο ήταν πλήρως ορισμένο επιλέχθηκε ο τρόπος και οι μέθοδοι για την επίλυσή του κάνοντας χρήση του γενικής φύσεως λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL.

Χρησιμοποιώντας το 3D μοντέλο προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων για την περίπτωση της χάραξης τετραγωνικών εσοχών σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304, χάλυβα κατασκευής δοχείων πίεσης P355GH, ορείχαλκο C26000 και κράμα αλουμινίου Al7075-T6 για διαφορετικούς συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας. Από τις προσομοιώσεις αυτές προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση των συνθηκών κατεργασίας όπως η μέση ισχύς, η ταχύτητα δέσμης και η συχνότητα επανάληψης παλμών στη διαμόρφωση του πάχους στρώματος αφαίρεσης υλικού για την κάθε περίπτωση. Επιπλέον, υπολογίστηκε και ο ρυθμός αποβολής υλικού για κάθε περίπτωση και εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την παραγωγικότητα της κατεργασίας. Για την πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σημαντικός αριθμός χαράξεων όμοιων χαρακτηριστικών με τις προσομοιώσεις κάνοντας τη χρήση του κέντρου κατεργασιών Laser χάραξης DMG MORI LASERTEC 40 και μετρώντας τη γεωμετρία τους με τη χρήση 3D οπτικού προφιλόμετρου Bruker Contour GT-K. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήρθαν σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνοντας με αυτό τον τρόπο την ορθότητα και την ακρίβεια του προσομοιωτικού μοντέλου.

Η δεύτερη εκδοχή που εξετάστηκε ήταν η ανάπτυξη ενός ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης το οποίο είναι παραλλαγή του πρώτου κάνοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε να είναι εφικτή η 2D επίλυση του για να καθίσταται δυνατή η προσομοίωση της χάραξης μεγαλύτερων γεωμετριών μειώνοντας το χρόνο επίλυσης. Αναπτύχθηκε εκ νέου ο χάρτης σάρωσης με τις θέσεις των παλμών, έτσι ώστε να αφορά την τοποθέτηση των παλμών γύρω από μια περιορισμένη περιοχή ενδιαφέροντος γύρω από ένα 2D επίπεδο εγκάρσιας τομής της γεωμετρίας που εξετάζεται. Επιπλέον, αναφορικά με τη δέσμη Laser στη μοντελοποίηση λήφθηκε υπόψη η κωνική μορφή της κατά την πρόσπτωσή της στο τεμάχιο λόγω της σύγκλισης που προσδιορίζεται από τους αντίστοιχους νόμους της φυσικής των Laser. Τέλος, τροποποιήθηκαν οι συνοριακές συνθήκες έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στην 2D γεωμετρία του επιπέδου τομής που μελετάται.

Με τη χρήση του ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων για τη χάραξη τετραγωνικών εσοχών σε ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 για πολλαπλούς συνδυασμούς των συνθηκών κατεργασίας όπως μέση ισχύς, ταχύτητα δέσμης και συχνότητα επανάληψης παλμών και του βάθους χάραξης. Από τις προσομοιώσεις

υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά που θα είχε η γεωμετρία χάραξης προβλέποντας τις τιμές της γωνίας κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων, του βάθους, του άνω πλάτους χάραξης και του κάτω πλάτους χάραξης. Πραγματοποιώντας ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών κατεργασίας για τη βελτίωση της διαστατικής ακρίβειας της χάραξης. Για την πειραματική επιβεβαίωση του ψευδο-3D μοντέλου προσομοίωσης πραγματοποιήθηκαν εκ νέου χαράξεις τετραγωνικών εσοχών σε πλάκα από ανοξείδωτο χάλυβα SAE304 οι οποίες χαράχτηκαν επίσης με το κέντρο κατεργασιών Laser DMG MORI LASERTEC 40 και μετρήθηκαν με το 3D οπτικό προφιλόμετρο Bruker Contour GT-K. Η σωστή λειτουργία και η ακρίβεια στις προβλέψεις του προσομοιωτικού μοντέλου επιβεβαιώθηκε μια και τα πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκαν σε συμφωνία με αυτά των προσομοιώσεων.

Τα νέα και πιο σύγχρονα μοντέλα κέντρων κατεργασιών Laser χάραξης εκτός από τους τρεις βασικούς γραμμικούς άξονες μετακίνησης του τραπέζιου εργασίας στο οποίο εδράζεται το τεμάχιο, είναι εξοπλισμένα και με περιστροφικούς άξονες. Επιπλέον διαθέτουν περισσότερο εξελιγμένες κεφαλές σάρωσης και πιο ανεπτυγμένους ελεγκτές με πιο ευέλικτα λογισμικά έτσι ώστε να μπορούν να κατευθύνουν τη δέσμη Laser προς το τεμάχιο έχοντας την επιθυμητή διεύθυνση. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα η δέσμη Laser να μην είναι σχεδόν κάθετη στο επίπεδο της επιφάνειας του τεμαχίου, όπως συμβαίνει στα κέντρα κατεργασιών Laser με μετακίνηση του τραπέζιου στους τρεις βασικούς άξονες σαν αυτό που εξετάστηκε, αλλά να εξασφαλίζει τις επιθυμητές γωνίες πρόσπτωσης με μεγάλο διαθέσιμο εύρος.

Μια πρόταση για περαιτέρω έρευνα είναι η εξέλιξη του μοντέλου προσομοίωσης της κατεργασίας χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων που αναπτύχθηκε, έτσι ώστε να μπορεί να προβλέπει ποια θα πρέπει να είναι η βέλτιστη διεύθυνση της δέσμης κατά την πρόσπτωση στο τεμάχιο που χαράζεται, έτσι ώστε να περιοριστεί ο σχηματισμός της λοξοποίησης (kerf). Η βελτιστοποιημένη διεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης θα προβλέπεται σε όλες τις ενδιάμεσες φάσεις της κατεργασίας χάραξης συναρτήσει όλων των παραμέτρων που συμβάλουν στο σχηματισμό της λοξοποίησης (kerf), όπως είναι το υλικό του τεμαχίου, οι διαστάσεις της προς χάραξη γεωμετρίας, το βάθος χάραξης, οι συνθήκες κατεργασίας κ.λπ.. Με αυτό τον τρόπο, μέσω της κατάλληλης περιστροφής του τραπέζιου και της κατάλληλης ανακατεύθυνσης της δέσμης, θα μπορέσουν να χαραχτούν γεωμετρίες με μειωμένη γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων ή και ιδανικά με κατακόρυφα τοιχώματα.

Στο μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε για την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser διάρκειας νανοδευτερολέπτων, όπως φάνηκε δόθηκε έμφαση κυρίως στην πρόβλεψη μεγεθών που σχετίζονται κυρίως με τις διαστάσεις της γεωμετρίας χάραξης. Θα μπορούσε το μοντέλο αυτό σε μελλοντική εργασία να αναπτυχθεί περαιτέρω και να τροποποιηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να προβλέπει και χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ποιότητα της χάραξης, όπως η τραχύτητα επιφάνειας. Επίσης, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να πραγματοποιηθεί μια πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με στόχο την αναζήτηση του βέλτιστου συνδυασμού των συνθηκών κατεργασίας έτσι ώστε να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα πολλές και εν μέρει αντικρουόμενες απαιτήσεις κατά την κατεργασία χάραξης με παλμούς δέσμης Laser. Θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός από συνθήκες κατεργασίας όπως η μέση ισχύς, η συχνότητα επανάληψης των παλμών, η ταχύτητα της δέσμης και η διεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης Laser, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγικότητα της κατεργασίας, να αυξηθεί η ποιότητα επιφάνειας ελαττώνοντας την τραχύτητα της χάραξης, να μειωθεί η γωνία κλίσης των πλευρικών τοιχωμάτων και να αυξηθεί η διαστατική ακρίβεια, προσεγγίζοντας το άνω και κάτω πλάτος χάραξης όσο το δυνατόν περισσότερο στην ονομαστική διάσταση.

6 Βιβλιογραφία

- [1] Johander, P., Goenaga, I., Gomez, D., Moldovan, C., Nedelcu, O., Petkov, P., Kaufmann, U., Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Dorey, R., and Persson, K., 2006, "Design and Manufacturing of Micro Heaters for Gas Sensors," *4M 2006 - Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Elsevier, pp. 117–121.
- [2] Quintana, I., Etxarri, J., Sanz, C., and Aranzabe, A., 2008, "Laser Micro-Milling and Drilling Using Microsecond Pulses. Applications for Mould and Aeronautical Industry," *Proc. 3rd Int. Conf. Manuf. Eng.*
- [3] Nee, A. Y. C., 2015, *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer London, London.
- [4] Schnell, G., Duenow, U., and Seitz, H., 2020, "Effect of Laser Pulse Overlap and Scanning Line Overlap on Femtosecond Laser-Structured Ti6Al4V Surfaces," *Materials (Basel)*, **13**(4), p. 969.
- [5] Jofre, M., Anzolin, G., Steinlechner, F., Oliverio, N., Torres, J. P., Pruneri, V., and Mitchell, M. W., 2012, "Fast Beam Steering with Full Polarization Control Using a Galvanometric Optical Scanner and Polarization Controller," *Opt. Express*, **20**(11), p. 12247.
- [6] Dongyun, W., and Xinpiao, Y., 2014, "An Embedded Laser Marking Controller Based on ARM and FPGA Processors," *Sci. World J.*, **2014**, pp. 1–7.
- [7] Pantawane, M., Joshi, S., and Dahotre, N., 2018, "Laser Beam Machining of Aluminum and Aluminum Alloys," *Aluminum Science and Technology*, ASM International, pp. 519–541.
- [8] Dubey, A. K., and Yadava, V., 2008, "Laser Beam Machining—A Review," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **48**(6), pp. 609–628.
- [9] Ghany, K. A., Rafea, H. A., and Newishy, M., 2006, "Using a Nd:YAG Laser and Six Axes Robot to Cut Zinc-Coated Steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **28**(11–12), pp. 1111–1117.
- [10] 2014, *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier.
- [11] Holgado, W., Sola, Í. J., Jarque, E. C., Jarabo, S., and Roso, L., 2012, "Q-Switching in a Neodymium Laser," *Eur. J. Phys.*, **33**(2), pp. 265–278.
- [12] Meijer, J., Du, K., Gillner, A., Hoffmann, D., Kovalenko, V. S., Masuzawa, T., Ostendorf, A., Poprawe, R., and Schulz, W., 2002, "Laser Machining by Short and Ultrashort Pulses, State of the Art and New Opportunities in the Age of the Photons," *CIRP Ann.*, **51**(2), pp. 531–550.
- [13] Metel, A., Stebulyanin, M., Fedorov, S., and Okunkova, A., 2018, "Power Density Distribution for Laser Additive Manufacturing (SLM): Potential, Fundamentals and Advanced Applications," *Technologies*, **7**(1), p. 5.
- [14] Li, L., 2000, "The Advances and Characteristics of High-Power Diode Laser Materials Processing," *Opt. Lasers Eng.*, **34**(4–6), pp. 231–253.
- [15] Bäuerle, D., 2011, *Laser Processing and Chemistry*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [16] Firouzi Farrashbandi, N., Gholamzadeh, L., Eslami-Kalantari, M., Sharifian, M., and Sid, A., 2015, "Investigation of the Effect of Laser Pulse Length on the Inverse Bremsstrahlung Absorption in Laser-Fusion Plasma," *High Energy Density Phys.*, **16**, pp. 32–35.
- [17] Pfalzner, S., and Gibbon, P., 1998, "Direct Calculation of Inverse-Bremsstrahlung Absorption in Strongly Coupled, Nonlinearly Driven Laser Plasmas," *Phys. Rev. E*, **57**(4), pp. 4698–4705.
- [18] Radziemski, L. J., and Cremers, D. A., 1989, *Laser-Induced Plasmas and Applications*, M. Dekker.
- [19] ZHANG, D., LIU, D., LI, Z., HOU, S., YU, B., GUAN, L., TAN, X., and LI, L., 2006, "EFFECTS OF PLASMA SHIELDING ON PULSED LASER ABLATION," *Mod. Phys. Lett. B*, **20**(15), pp. 899–909.

-
- [20] Gower, M. C., 2000, "Industrial Applications of Laser Micromachining," *Opt. Express*, **7**(2), p. 56.
 - [21] Heyl, P., Olschewski, T., and Wijnaendts, R. W., 2001, "Manufacturing of 3D Structures for Micro-Tools Using Laser Ablation," *Microelectron. Eng.*, **57–58**, pp. 775–780.
 - [22] Kaldos, A., Pieper, H. J., Wolf, E., and Krause, M., 2004, "Laser Machining in Die Making—a Modern Rapid Tooling Process," *J. Mater. Process. Technol.*, **155–156**, pp. 1815–1820.
 - [23] Pham, D. T., Dimov, S. S., Petkov, P. V., and Dobrev, T., 2005, "Laser Milling for Micro Tooling," *Laser Metrology and Machine Performance VII - 7th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tool, CMM and Robotic Performance, LAMDAMAP 2005*.
 - [24] Vasco, J., Bártolo, P. J., Silva, B., and Galo, C., 2007, "Laser Micromachining for Mould Manufacturing: II. Manufacture and Testing of Mould Inserts," *Assem. Autom.*, **27**(3), pp. 231–239.
 - [25] Lahoz, R., de la Fuente, G. F., Pedra, J. M., and Carda, J. B., 2011, "Laser Engraving of Ceramic Tiles," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **8**(5), pp. 1208–1217.
 - [26] Campanelli, S. L., Ludovico, A. D., Bonserio, C., Cavalluzzi, P., and Cinquepalmi, M., 2007, "Experimental Analysis of the Laser Milling Process Parameters," *J. Mater. Process. Technol.*, **191**(1–3), pp. 220–223.
 - [27] Karazi, S. M., Issa, A., and Brabazon, D., 2009, "Comparison of ANN and DoE for the Prediction of Laser-Machined Micro-Channel Dimensions," *Opt. Lasers Eng.*, **47**(9), pp. 956–964.
 - [28] Orazi, L., Cuccolini, G., Fortunato, A., and Tani, G., 2010, "An Automated Procedure for Material Removal Rate Prediction in Laser Surface Micromanufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **46**(1–4), pp. 163–171.
 - [29] Agalianos, F., Patelis, S., Kyratsis, P., Maravelakis, E., Vasarmidis, E., and Antoniadis, A., 2011, "Industrial Applications of Laser Engraving : Influence of the Process Parameters on Machined Surface Quality," *Machine*.
 - [30] Kasman, Ş., and Saklakoğlu, I. E., 2013, "The Effect of Process Parameters on the Surface Form of Laser Engraved H13 Tool Steel," *Kov. Mater.*
 - [31] Teixidor, D., Ferrer, I., Ciurana, J., and Özel, T., 2013, "Optimization of Process Parameters for Pulsed Laser Milling of Micro-Channels on AISI H13 Tool Steel," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, **29**(1), pp. 209–218.
 - [32] Kasman, Ş., 2013, "Impact of Parameters on the Process Response: A Taguchi Orthogonal Analysis for Laser Engraving," *Measurement*, **46**(8), pp. 2577–2584.
 - [33] Campanelli, S. L., Casalino, G., and Contuzzi, N., 2013, "Multi-Objective Optimization of Laser Milling of 5754 Aluminum Alloy," *Opt. Laser Technol.*, **52**, pp. 48–56.
 - [34] Behera, R. R., Anisha, E., Ravi Sankar, M., and Dixit, U. S., 2014, "Experimental Investigations of CO2 Laser Micro Channel Engraving on Hardened AISI 1040 Alloy Steel," *J. Manuf. Technol. Res.*
 - [35] Manninen, M., Hirvimäki, M., Poutiainen, I., and Salminen, A., 2015, "Effect of Pulse Length on Engraving Efficiency in Nanosecond Pulsed Laser Engraving of Stainless Steel," *Metall. Mater. Trans. B*, **46**(5), pp. 2129–2136.
 - [36] Mladenovič, V., Panjan, P., Paskvale, S., Çalışkan, H., Poljanšek, N., and Čekada, M., 2016, "Investigation of the Laser Engraving of AISI 304 Stainless Steel Using a Response-Surface Methodology," *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, **23**(1).
 - [37] Pritam, A., 2016, "Experimental Investigation of Laser Deep Engraving Process for AISI 1045 Stainless Steel by Fibre Laser," **03**(8), pp. 1730–1734.
 - [38] Kochergin, S. A., Morgunov, Y. A., and Saushkin, B. P., 2016, "Surface Manufacturing Under Pulse Fiber Laser," *Procedia CIRP*, **42**, pp. 470–474.
 - [39] Behera, R. R., Sankar, M. R., Baruah, P. K., Sharma, A. K., and Khare, A., 2018, "Experimental Investigations of Nanosecond-Pulsed Nd:YAG Laser Beam Micromachining on 304 Stainless Steel," *J. Micromanufacturing*, **1**(1), pp. 62–75.
 - [40] Guarino, S., Ponticelli, G. S., Giannini, O., Genna, S., and Trovalusci, F., 2018, "Laser
-

-
- Milling of Yttria-Stabilized Zirconia by Using a Q-Switched Yb:YAG Fiber Laser: Experimental Analysis," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **94**(1–4), pp. 1373–1385.
- [41] Šugár, P., Šugárová, J., Frnčík, M., and Ludrovcová, B., 2018, "NANOSECOND YB FIBRE LASER MILLING OF ALLUMINIUM BRONZE: EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON THE SURFACE FINISH," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, **12**(3), pp. 10–15.
- [42] Jović, S., 2019, "Appraisal of Laser Engraving Module by Computational Intelligence Approach," *Optik (Stuttg.)*, **183**, pp. 766–774.
- [43] Ahmed, N., Ahmad, S., Anwar, S., Hussain, A., Razaqat, M., and Zaindin, M., 2019, "Machinability of Titanium Alloy through Laser Machining: Material Removal and Surface Roughness Analysis," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **105**(7–8), pp. 3303–3323.
- [44] Aden, M., Beyer, E., Herziger, G., and Kunze, H., 1992, "Laser-Induced Vaporization of a Metal Surface," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **25**(1), pp. 57–65.
- [45] Lunney, J. G., and Jordan, R., 1998, "Pulsed Laser Ablation of Metals," *Appl. Surf. Sci.*, **127–129**, pp. 941–946.
- [46] Bulgakov, A. V., and Bulgakova, N. M., 1999, "Thermal Model of Pulsed Laser Ablation under the Conditions of Formation and Heating of a Radiation-Absorbing Plasma," *Quantum Electron.*, **29**(5), pp. 433–437.
- [47] Onischenko, A. I., George, D. S., Holmes, A. S., and Otte, F., 2004, "Efficient Pocketing Simulation Model for Solid State Laser Micromachining and Its Application to a Sol-Gel Material," *Photon Processing in Microelectronics and Photonics III*, P.R. Herman, J. Fieret, A. Pique, T. Okada, F.G. Bachmann, W. Hoving, K. Washio, X. Xu, J.J. Dubowski, D.B. Geohegan, and F. Traeger, eds., p. 134.
- [48] Dobrev, T., Pham, D., and Dimovacturing, S., 2005, "A Simulation Model for Crater Formation in Laser Milling," *Multi-Material Micro Manuf.*, (January), pp. 155–159.
- [49] Hurtony, T., 2008, "Simulation and Modeling of Laser Ablation," *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, IEEE, pp. 452–457.
- [50] Aghaei, M., Mehrabian, S., and Tavassoli, S. H., 2008, "Simulation of Nanosecond Pulsed Laser Ablation of Copper Samples: A Focus on Laser Induced Plasma Radiation," *J. Appl. Phys.*, **104**(5), p. 053303.
- [51] Shalahim, N. S. M., Mon, T. T., Ismail, M. F., Rashid, M. F. F., and Rejab, M. R. M., 2010, "Finite Element Simulation of Laser-Micromachining," *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010, IMECS 2010*.
- [52] Sonntag, S., 2011, "Computer Simulations of Laser Ablation from Simple Metals to Complex Metallic Alloys," Thesis.
- [53] Lim, H. S., and Yoo, J., 2011, "FEM Based Simulation of the Pulsed Laser Ablation Process in Nanosecond Fields," *J. Mech. Sci. Technol.*, **25**(7), pp. 1811–1816.
- [54] Jaeyeol, L., and Jeonghoon, Y., 2013, "Optimization of the Nano-Second Pulsed Laser Ablation Process Using Finite Element Analysis," *Proc. World Congr. Struct. Multidiscip. Optim.*
- [55] Kaselouris, E., Nikolos, I. K., Orphanos, Y., Bakarezos, E., Vainos, N., Papadogiannis, N. A., Tatarakis, M., and Dimitriou, V., 2014, "3D Multiphysics Fem Modeling of Nanosecond Pulsed Laser Interaction with Metallic Films," *11th World Congress on Computational Mechanics, WCCM 2014, 5th European Conference on Computational Mechanics, ECCM 2014 and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECFD 2014*.
- [56] Swaraj, S., Negi, V., Ansari, A., and Garg, V., 2014, "Development and Modeling of Laser Micromachining Techniques," *Publication Description National Conference On Emerging Trends in Engineering And Technology*, Abu, Rajasthan, India.
- [57] Wang, Y., Shen, N., Befekadu, G. K., and Pasillao, C. L., 2017, "Modeling Pulsed Laser Ablation of Aluminum with Finite Element Analysis Considering Material Moving Front," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **113**, pp. 1246–1253.
- [58] Tani, G., Orazi, L., Fortunato, A., and Cuccolini, G., 2007, "Laser Milling Simulation System for Moulds Manufacturing," *High Energy/Average Power Lasers and Intense*
-

- Beam Applications*, S.J. Davis, M.C. Heaven, and J.T. Schriempf, eds., p. 64540R.
- [59] Tani, G., Orazi, L., and Fortunato, A., 2009, "Laser Micromilling Simulation for Copper Alloy Laser Micromilling Simulation for Copper Alloy," *Int. J. Nanomanuf.*, **4**(January), pp. 1–7.
 - [60] Karbasi, H., 2010, "COMSOL Assisted Simulation of Laser Engraving," *COMSOL Conference*, Boston.
 - [61] Esmaeilpour Ghoochani, D., Biglari, F. R., and Pazokian, H., 2021, "Numerical Simulation and Experimental Study of Pulsed CO₂ Laser-Induced Micro-Channels on Poly-Ether Sulfone (PES) Polymer," *Opt. Laser Technol.*, **139**(June 2020), p. 106879.
 - [62] Nikolidakis, E., and Antoniadis, A., 2019, "FEM Modeling Simulation of Laser Engraving," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **105**(7–8), pp. 3489–3498.
 - [63] Nikolidakis, E., and Antoniadis, A., 2020, "Modeling and Simulation of the Nanosecond Pulsed Laser Engraving Process," *MATEC Web Conf.*, **318**, p. 01044.
 - [64] Pocorni, J., Powell, J., Ilar, T., Schwarz, A., and Kaplan, A. F. H., 2013, "Measuring the State-of-the-Art in Laser Cut Quality," *Proc. 14th NOLAMP Conf.*, (August), pp. 101–108.
 - [65] Madić, M., Radovanović, M., and Gostimirović, M., 2015, "Ann Modeling of Kerf Transfer in Co₂ Laser Cutting and Optimization of Cutting Parameters Using Monte Carlo Method," *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, **6**(1), pp. 33–42.
 - [66] Genna, S., Leone, C., Palumbo, B., and Tagliaferri, F., 2015, "Statistical Approach to Fiber Laser Microcutting of NIMONIC® C263 Superalloy Sheet Used in Effusion Cooling System of Aero Engines," *Procedia CIRP*, **33**, pp. 520–525.
 - [67] Tahir, A. F. M., and Rahim, E. A., 2016, "A Study on the Laser Cutting Quality of Ultra-High Strength Steel," *J. Mech. Eng. Sci.*
 - [68] Joshi, P., and Sharma, A., 2018, "Simultaneous Optimization of Kerf Taper and Heat Affected Zone in Nd-YAG Laser Cutting of Al 6061-T6 Sheet Using Hybrid Approach of Grey Relational Analysis and Fuzzy Logic," *Precis. Eng.*, **54**, pp. 302–313.
 - [69] Elsheikh, A. H., Deng, W., and Showaib, E. A., 2020, "Improving Laser Cutting Quality of Polymethylmethacrylate Sheet: Experimental Investigation and Optimization," *J. Mater. Res. Technol.*, **9**(2), pp. 1325–1339.
 - [70] Mohammed, M. K., and Al-Ahmari, A., 2020, "Laser-Machining of Microchannels in NiTi-Based Shape-Memory Alloys: Experimental Analysis and Process Optimization," *Materials (Basel)*, **13**(13), p. 2945.
 - [71] Šugár, P., Necpal, M., and Šugárová, J., 2015, "Laser Beam Machining of Commercially Pure Titanium : Influence of Process Parameters on Surface Roughness," *Mater. Sci.*, pp. 256–262.
 - [72] Koechner, W., and Bass, M., 2003, "Q-Switching," pp. 279–307.
 - [73] Zhang, D., and Guan, L., 2014, "Laser Ablation," *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier, pp. 125–169.
 - [74] Paschotta, R., 2008, "Q Switching," *Encycl. Laser Phys. Technol.*
 - [75] Kim, M. J., and Zhang, J., 2001, "Finite Element Analysis of Evaporative Cutting with a Moving High Energy Pulsed Laser," *Appl. Math. Model.*, **25**(3), pp. 203–220.
 - [76] Alda, J., 2003, "Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation," *Encycl. Opt. Eng.*
 - [77] Scheps, R., 2002, *Introduction to Laser Diode-Pumped Solid State Lasers*, SPIE.
 - [78] Kasunic, K. J., 2016, *Laser Systems Engineering*, SPIE.
 - [79] Saifullah, A., Yusoff, N., and Hassan, M. A., 2015, "3D FEM Simulation to Predict the Heat Affected Zone during Laser Machining on Stainless Steel 304," *International Academy of Engineers (IA-E) April 24-25, 2015 Pattaya (Thailand)*, International Academy of Engineers.
 - [80] Chenhao, F., and Guo, Y. B., 2014, "3-Dimensional Finite Element Modeling of Selective Laser Melting Ti-6Al-4V Alloy," *25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, pp. 1129–1144.
 - [81] Savriama, G., and Semmar, N., 2016, "Numerical Simulation of Laser Processing Materials: An Engineering Approach," *Modeling and Simulation in Engineering*

-
- Sciences, InTech.
- [82] Maleki, A., Kavosh Tehrani, M., Saghafifar, H., and Moghtader Dindarlu, M. H., 2016, "Experimental Study of Electro-Optical Q -Switched Pulsed Nd:YAG Laser," *Chinese Phys. B*, **25**(3), p. 034206.
 - [83] Hirleman, E. D., and Stevenson, W. H., 1978, "Intensity Distribution Properties of a Gaussian Laser Beam Focus," *Appl. Opt.*, **17**(21), p. 3496.
 - [84] Galvez, E. J., 2006, "Gaussian Beams in the Optics Course," *Am. J. Phys.*, **74**(4), pp. 355–361.
 - [85] Quazi, M. M., Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., Yusof, F., Masjuki, H. H., and Arslan, A., 2016, "Laser-Based Surface Modifications of Aluminum and Its Alloys," *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, **41**(2), pp. 106–131.
 - [86] Eltawahni, H. A., Benyounis, K. Y., and Olabi, A. G., 2016, "High Power CO2 Laser Cutting for Advanced Materials – Review," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier.
 - [87] Xie, J., and Kar, A., 1999, "Laser Welding of Thin Sheet Steel with Surface Oxidation," *Weld. J. (Miami, Fla.)*.
 - [88] Lizunov, S. A., Zhukov, V. P., Bulgakov, A. V., and Bulgakova, N. M., 2019, "EFFECT OF THE DYNAMIC REFLECTIVITY ON LASER ENERGY ABSORPTION BY ZINC: NUMERICAL TWO-TEMPERATURE MODELING," *MM Sci. J.*, **2019**(05), pp. 3567–3572.
 - [89] Kaplan, A. F. H., 2012, "Absorptivity Modulation on Wavy Molten Steel Surfaces: The Influence of Laser Wavelength and Angle of Incidence," *Appl. Phys. Lett.*, **101**(15), p. 151605.
 - [90] Lisiecki, A., 2019, "Study of Optical Properties of Surface Layers Produced by Laser Surface Melting and Laser Surface Nitriding of Titanium Alloy," *Materials (Basel)*, **12**(19), p. 3112.
 - [91] Niu, C., Zhu, T., and Lv, Y., 2019, "Influence of Surface Morphology on Absorptivity of Light-Absorbing Materials," *Int. J. Photoenergy*, **2019**, pp. 1–9.
 - [92] Rakić, A. D., 1995, "Algorithm for the Determination of Intrinsic Optical Constants of Metal Films: Application to Aluminum," *Appl. Opt.*, **34**(22), p. 4755.
 - [93] Chan, P. W., Chan, Y. W., and Ng, H. S., 1977, "Reflectivity of Metals at High Temperatures Heated by Pulsed Laser," *Phys. Lett. A*, **61**(3), pp. 151–153.
 - [94] Bergström, D., Kaplan, A., and Powell, J., 2003, "Mathematical Modelling of Laser Absorption Mechanisms in Metals: A Review," *Present. M4PL16 Work. Igls, Austria*, January 20-24.
 - [95] Prokhorov, A. M., Konov, V. I., Ursu, I., and Mihăilescu, I. N., 2018, *Laser Heating of Metals*, CRC Press.
 - [96] Afanas'ev, Y., and Krokhin, O., 1967, "Vaporization of Matter Exposed to Laser Emission," *Sov. J. Exp. Theor. Phys.*
 - [97] Vadillo, J. M., Fernández Romero, J. M., Rodríguez, C., and Laserna, J. J., 1999, "Effect of Plasma Shielding on Laser Ablation Rate of Pure Metals at Reduced Pressure," *Surf. Interface Anal.*, **27**(11), pp. 1009–1015.
 - [98] Bulgakova, N. M., and Bulgakov, A. V., 2001, "Pulsed Laser Ablation of Solids: Transition from Normal Vaporization to Phase Explosion," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, **73**(2), pp. 199–208.
 - [99] Singh, R. K., Holland, O. W., and Narayan, J., 1990, "Theoretical Model for Deposition of Superconducting Thin Films Using Pulsed Laser Evaporation Technique," *J. Appl. Phys.*, **68**(1), pp. 233–247.
 - [100] Mościcki, T., Hoffman, J., and Szymański, Z., 2011, "Modelling of Plasma Formation during Nanosecond Laser Ablation," *Archives of Mechanics*.
 - [101] Fang, R., Zhang, D., Li, Z., Li, L., Tan, X., and Yang, F., 2007, "Laser-Target Interaction during High-Power Pulsed Laser Deposition of Superconducting Thin Films," *Phys. status solidi*, **204**(12), pp. 4241–4248.
 - [102] Rozman, R., Grabec, I., and Govekar, E., 2008, "Influence of Absorption Mechanisms on Laser-Induced Plasma Plume," *Appl. Surf. Sci.*, **254**(11), pp. 3295–3305.
-

-
- [103] Marla, D., Bhandarkar, U. V., and Joshi, S. S., 2011, "Critical Assessment of the Issues in the Modeling of Ablation and Plasma Expansion Processes in the Pulsed Laser Deposition of Metals," *J. Appl. Phys.*, **109**(2), p. 021101.
 - [104] Haught, A. F., 1966, "High-Temperature Plasmas Produced by Laser Beam Irradiation of Single Solid Particles," *Phys. Fluids*, **9**(10), p. 2047.
 - [105] Nica, P.-E., Irimiciuc, S. A., Agop, M., Gurlui, S., Ziskind, M., and Focsa, C., 2017, "Experimental and Theoretical Studies on the Dynamics of Transient Plasmas Generated by Laser Ablation in Various Temporal Regimes," *Laser Ablation - From Fundamentals to Applications*, InTech.
 - [106] Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J.-P., and Rodríguez-Ferran, A., 2004, "Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods," *Encyclopedia of Computational Mechanics*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
 - [107] Lorazo, P., Lewis, L. J., and Meunier, M., 2006, "Thermodynamic Pathways to Melting, Ablation, and Solidification in Absorbing Solids under Pulsed Laser Irradiation," *Phys. Rev. B*, **73**(13), p. 134108.
 - [108] Durand, R., Pantoja-Rosero, B. G., and Oliveira, V., 2019, "A General Mesh Smoothing Method for Finite Elements," *Finite Elem. Anal. Des.*, **158**, pp. 17–30.
 - [109] Liakopoulos P. I. K., and Giannakoglou, K. C., 2006, "Unstructured Remeshing Using An Efficient Smoothing Scheme," *European Conference on Computational Fluid Dynamics*, pp. 1–12.
 - [110] Vartziotis, D., Wipper, J., and Papadarakakis, M., 2013, "Improving Mesh Quality and Finite Element Solution Accuracy by GETMe Smoothing in Solving the Poisson Equation," *Finite Elem. Anal. Des.*, **66**, pp. 36–52.
 - [111] Falsafioon, M., Arabi, S., Camarero, R., and Guibault, F., 2014, "Comparison of Two Mesh Smoothing Techniques for Unstructured Grids," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, **22**(2), p. 022020.
 - [112] Knupp, P. M., 1999, "Winslow Smoothing on Two-Dimensional Unstructured Meshes," *Eng. Comput.*, **15**(3), pp. 263–268.
 - [113] Yeoh, O. H., 1993, "Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber," *Rubber Chem. Technol.*, **66**(5), pp. 754–771.
 - [114] Eck, R., Klep, M., and Schijndel, J., 2016, "Surface to Surface Radiation Benchmarks," *COMSOL Conference*, Munich, pp. 12–14.
 - [115] Wang, Y., and Pasiliao, C. L., 2018, "Modeling Ablation of Laminated Composites: A Novel Manual Mesh Moving Finite Element Analysis Procedure with ABAQUS," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **116**, pp. 306–313.
 - [116] Mills, K. C., 2002, *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*, Woodhead Publishing Limited.
 - [117] Gholampour, A. A., Ghassemieh, M., and Razavi, H., 2011, "A Time Stepping Method in Analysis of Nonlinear Structural Dynamics," *Appl. Comput. Mech.*
 - [118] Chung, J., and Hulbert, G. M., 1993, "A Time Integration Algorithm for Structural Dynamics With Improved Numerical Dissipation: The Generalized- α Method," *J. Appl. Mech.*, **60**(2), pp. 371–375.
 - [119] Mohan, R. V., and Tamma, K. K., 1994, "Finite Element/Finite Volume Approaches with Adaptive Time Stepping Strategies for Transient Thermal Problems," *Sadhana*, **19**(5), pp. 765–783.
 - [120] Söderlind, G., 2002, "Automatic Control and Adaptive Time-Stepping," *Numerical Algorithms*.
 - [121] Gander, M. J., and Halpern, L., 2013, "Techniques for Locally Adaptive Time Stepping Developed over the Last Two Decades," *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, pp. 377–385.
 - [122] Fox, L., 1965, *An Introduction to Numerical Linear Algebra*, Clarendon Press / Oxford University Press, Oxford, New York, NY.
 - [123] Varga, R. S., 2000, *Matrix Iterative Analysis*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
 - [124] Schenk, O., Gärtner, K., Fichtner, W., and Stricker, A., 2001, "PARDISO: A High-
-

-
- Performance Serial and Parallel Sparse Linear Solver in Semiconductor Device Simulation,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, **18**(1), pp. 69–78.
- [125] Belforte, D., and Levitt, M., eds., 1992, *The Industrial Laser Handbook*, Springer US, New York, NY.
- [126] Vasco, J. C., and Bártolo, P. J., 2007, “Processing Conditions of Laser Micro-Milling,” *Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining, ISEM 2007*, Pittsburgh, pp. 427–432.
- [127] See, B. A., 1997, “Measuring Laser Divergence,” *Opt. Laser Technol.*, **29**(2), pp. 109–110.
- [128] Cortés, R., Villagómez, R., Coello, V., and López, R., 2008, “Laser Beam Quality Factor (M2) Measured by Distorted Fresnel Zone Plates,” *Rev. Mex. Fis.*
- [129] ISO, 2005, “Iso 11146-1,” *Int. Stand.*
- [130] Petkov, P. V., 2014, “Factors Influencing Laser Material Removal Process in Micro Cavity Manufacturing,” **7**(2), pp. 973–984.
- [131] Jorge, K. C., Riva, R., Rodrigues, N. A. S., and Destro, M. G., 2009, “M² Beam Quality Measurement of a Single Pulse of the Nd : YAG Laser,” *Proceedings of the Fifth International WLT-Conference Lasers in Manufacturing*, Munich, pp. 1–4.
- [132] Bidin, N., and Kee, L. P., 2010, “Comparison of ND : YAG Laser Beam Quality between Free Running and Q-Switched Modes,” *J. Fiz. Malaysia*, **31**(1–4), pp. 15–20.
- [133] MING, P., and SHI, Z., 2002, “QUADRILATERAL MESH,” *Chinese Ann. Math.*, **23**(02), pp. 235–252.
- [134] Liu, Y., and Glass, G., 2013, “Effects of Mesh Density on Finite Element Analysis,” *SAE Technical Papers*.