

Μελέτη της απορρόφησης δέσμης laser συναρτήσεως της τραχύτητας της επιφανείας με χρήση Perlin noise

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών



Διπλωματική Εργασία
Ηλίας Γεωργακόπουλος-Σοάρες

Επιβλέπων
Αναπληρωτής Καθηγητής Άγγελος Π. Μαρκόπουλος

Αθήνα, Ιούλιος 2022

On the study of the laser absorption coefficient by rough surfaces using Perlin noise

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



Diploma Thesis

Ilias Georgakopoulos-Soares

Supervisor

Associate Professor Angelos Markopoulos

Athens, July 2022

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη θεωρητική ανάλυση της απορρόφησης δέσμης λέιζερ από μία επιφάνεια δεδομένης τραχύτητας και την προσομοίωση του φαινομένου χρησιμοποιώντας θόρυβο τύπου Perlin για τη δημιουργία της επιφάνειας και Ray Tracing για την προσομοίωση της δέσμης λέιζερ. Στο κεφάλαιο ένα γίνεται αναφορά στις συμβατικές και μη συμβατικές κατεργασίες και παρουσιάζονται συνοπτικά διάφορα είδη μη συμβατικών κατεργασιών. Στο κεφάλαιο δύο αναλύονται περαιτέρω οι αρχές λειτουργίας των λέιζερ, η τεχνολογία λειτουργίας τους, καθώς και η εφαρμογή τους σε διάφορες κατεργασίες. Επίσης παρουσιάζεται η απαραίτητη βιβλιογραφική ανασκόπηση και συγκεκριμένα οι αριθμητικές και οι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση κατεργασιών με λέιζερ. Το κεφάλαιο τρία πραγματεύεται τη μοντελοποίηση επιφανειών και την εισαγωγή διαφόρων τύπων θορύβου ενώ επικεντρώνεται στο θόρυβο τύπου Perlin. Το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά δημιουργήθηκαν τυχαίες επιφάνειες συγκεκριμένης τραχύτητας με βάση τον θόρυβο Perlin και στη συνέχεια υπολογίστηκε η απορρόφηση λέιζερ από αυτές τις επιφάνειες. Βασικά συμπεράσματα είναι η άμεση εξάρτηση της απορρόφησης συναρτήσει της επιφάνειας και της γωνίας πρόσπτωσης.

Abstract

The thesis is centered on the analysis of the absorption of a laser beam from a surface, with Perlin noise being used to simulate the surface roughness. Chapter one is an introduction to traditional and non-traditional machining techniques. Chapter two focuses on laser technology and their use across machining methods. In this chapter, there is an emphasis on recent literature and studies that have achieved an improved and more realistic modeling of laser absorption by a surface. Chapter three introduces the different types of noise including fractal and Perlin noise, discusses their advantages and limitations and focuses in particular on the specifics of Perlin noise. Chapter four contains the detailed methods used in this thesis and also the results obtained from following the provided methodology. Surface roughness was successfully modeled using Perlin noise and the surfaces that were simulated with Perlin noise were used to model the absorption of a laser beam from a surface. The surface absorption was found to be directly proportional to the surface roughness and another significant factor was the angle at which the laser beam hit the surface with right angles resulting in the highest absorption. The results obtained from negative (-60°) and positive ($+60^\circ$) angles were highly symmetric indicating that Perlin noise is suitable and does not produce technical artifacts. The last chapter contains the conclusions reached in this thesis and also discusses future work and directions.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία έλαβε μέρος στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Σημαντική συμβολή στην εκπόνηση της εργασίας αυτής είχε ο υποψήφιος διδάκτωρ του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, Μάνος Παπάζογλου.

Θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στους γονείς μου, Ιωάννη και Άννα Μαρία!

1. Εισαγωγή

Οι κατεργασίες επιτρέπουν την διαμόρφωση και την μορφοποίηση ενός υλικού, την απόδοση συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε αυτό ή την μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού ώστε να δημιουργηθεί ένα τεμάχιο με επιθυμητά χαρακτηριστικά. Η κατεργασιμότητα ενός υλικού είναι η ευκολία με την οποία το υλικό αυτό μπορεί να υποστεί μία ή περισσότερες κατεργασίες και εξαρτάται από τις διάφορες ιδιότητες του υλικού όπως μηχανικές, θερμοφυσικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες.

Συγκεκριμένα είδη κατεργασιών συχνά υπερτερούν άλλων αναλόγως των ιδιοτήτων των υλικών καθώς και των τελικών αποτελεσμάτων που επιθυμούνται να επιτευχθούν. Έτσι τα είδη των κατεργασιών που χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση ενός τεμαχίου συνήθως εξαρτώνται από το τελικό προϊόν, τις ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού και την επιθυμητή ποιότητα. Συχνά το κατεργάσιμο προϊόν χρησιμοποιείται μετά το πέρας της κατεργασίας του για παραγωγή άλλων προϊόντων.

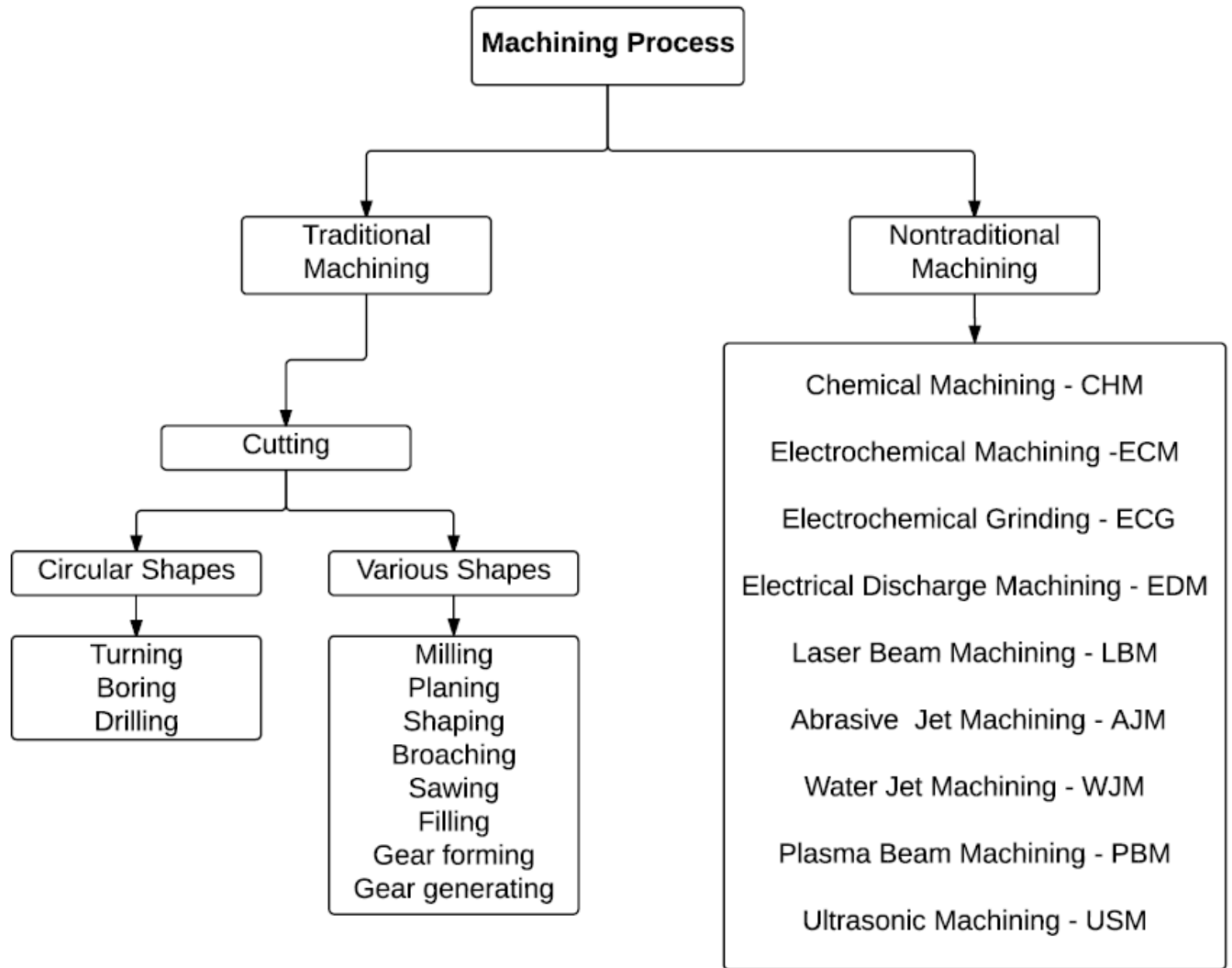
Σχεδιαστικές παράμετροι μιας κατεργασίας πρέπει να είναι η επίτευξη συγκεκριμένων προδιαγραφών, ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κατά το δυνατόν και σε συνδυασμό με επίτευξη προσδοκώμενης ποιότητας προϊόντος, η μείωση των ρύπων και υψηλός βαθμός παραγωγικότητας. Αστοχίες στα παραπάνω μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλά κόστη, χαμηλή ποιότητα, ανάγκη επανάληψης της κατεργασίας και χαμηλή παραγωγικότητα.

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια για την κατηγοριοποίηση των κατεργασιών. Παραδείγματος χάριν, οι κατεργασίες μπορούν να διαχωριστούν σε:

- Αρχέγονες κατεργασίες
- Κατεργασίες διαμόρφωσης
- Κατεργασίες αποβολής υλικού
- Επιφανειακές κατεργασίες
- Κατεργασίες σύνδεσης
- Κατεργασίες προσθήκης υλικού

Ως προς το είδος της ενέργειας και τεχνολογίας που χρησιμοποιείται (**Εικόνα 1.1**), μπορούν να ομαδοποιηθούν σε:

- Συμβατικές κατεργασίες
- Μη συμβατικές κατεργασίες



Εικόνα 1.1: Κατηγοριοποίηση κατεργασιών (Nukman et al. 2017). Διαχωρισμός κατεργασιών σε συμβατικές και μη συμβατικές κατεργασίες, ενώ αυτές κατηγοριοποιούνται περαιτέρω ανάλογα με το είδος ενέργειας και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία

1.1 Συμβατικές Κατεργασίες

Οι συμβατικές κατεργασίες παρουσιάστηκαν ως επί το πλείστον πριν από τις μη συμβατικές, με ορισμένες εξαιρέσεις. Τυπικά είδη κατεργασιών που χρησιμοποιούν συμβατικά εργαλεία είναι η τόννευση, το φρεζάρισμα, η λείανση και η διάτρηση, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί για αιώνες για την επεξεργασία αντικειμένων.

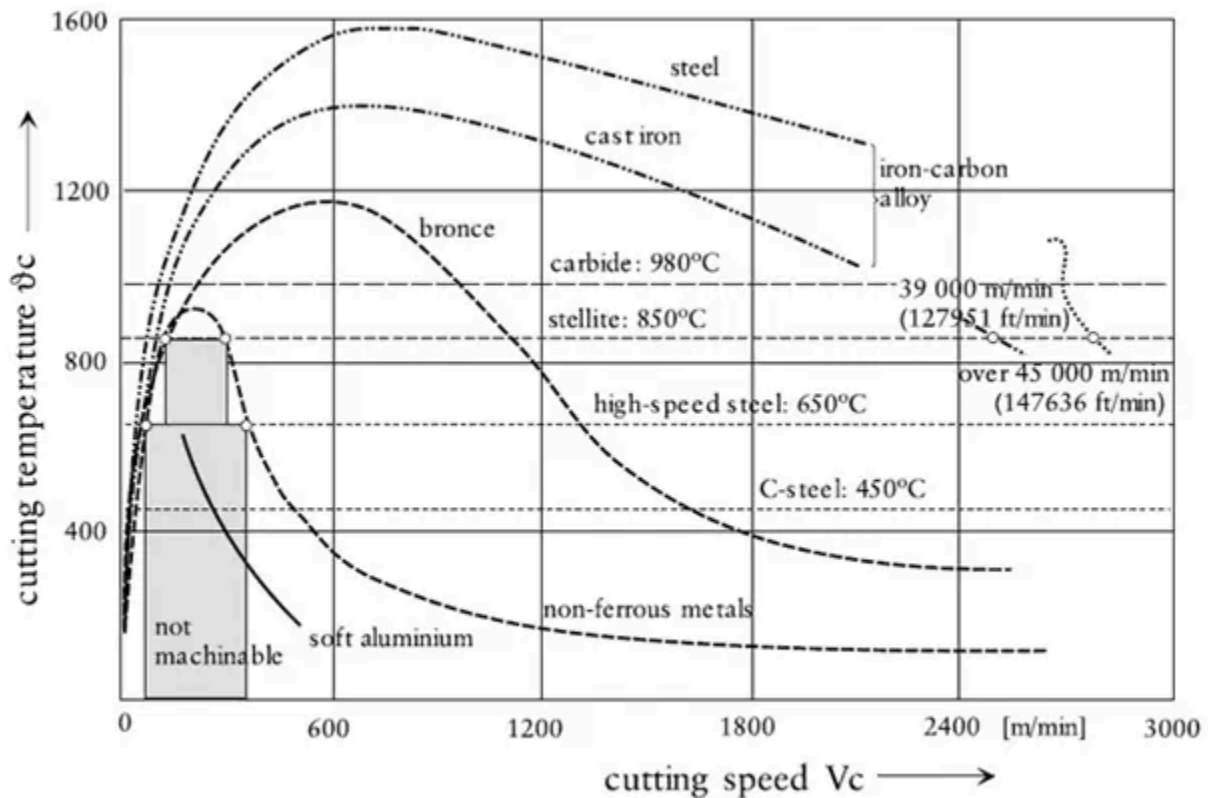
Τα τεράστια τεχνολογικά και επιστημονικά άλματα αυξάνουν τα είδη των υπαρχόντων κατεργασιών και των δυνατοτήτων κατεργασίας υλικών, ενώ έχουν επίσης προσαρμόσει τα κλασικά είδη κατεργασιών σε βιομηχανικά πρότυπα. Επίσης επιτρέπουν τη δυνατότητα μαζικής κατεργασίας χιλιάδων τεμαχίων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις από εξειδικευμένο προσωπικό και ρομπότ και την επίτευξη ποιοτικών προδιαγραφών και τυποποίηση των τελικών προϊόντων.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στη χρήση συμβατικών κατεργασιών. Δείγματα κατεργασιών εμφανίζονται μεταξύ 5,000-4,000 π.Χ. και βασίζονται κυρίως σε ξύλο, κεραμικά υλικά, πέτρα και μέταλλο, υλικά τα οποία ήταν διαθέσιμα στο περιβάλλον. Είδη στην αρχαία Μεσοποταμία και την αρχαία Αίγυπτο εμφανίζονται απεικονίσεις χειριστών τόννου για την διαμόρφωση αντικειμένων.

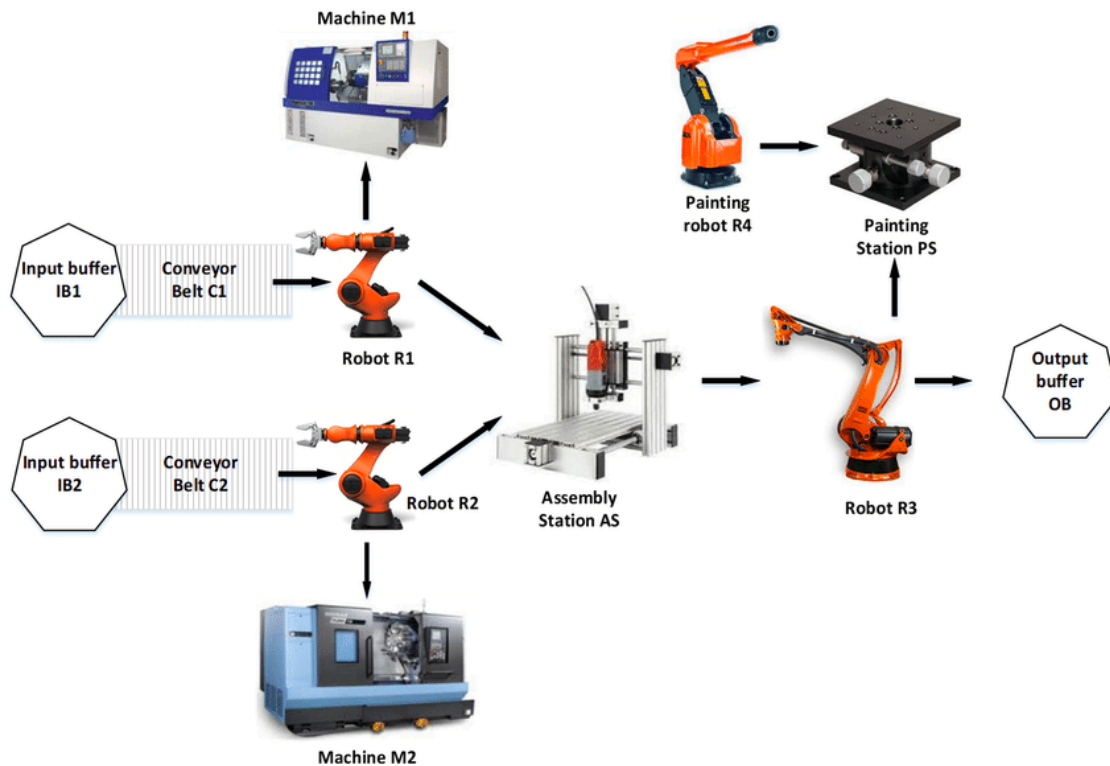
Κατά τον 14^ο και 15^ο αιώνα εμφανίζονται κατεργασίες τόννου στην κεντρική Ευρώπη, με περιορισμένες χρήσεις όπως για την δημιουργία ρολογιών. Οι εργαλειομηχανές παρουσιάστηκαν στις αρχές της βιομηχανικής επανάστασης και γνώρισαν τεράστια άνθηση κατά την διάρκεια της βιομηχανικής επανάστασης στην Αγγλία τον 18ο και 19ο αιώνα. Ένα από τα κεντρικά πρόσωπα υπήρξε ο John Wilkinson, ο οποίος κατασκεύασε ένα οριζόντιο δράπανο. Στα μέσα του 20ου αιώνα John Pearson καινοτόμησε στη δημιουργία αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών, οι οποίες είναι πλέον καθολικά χρησιμοποιούμενες.

Σε σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις πολλές κατεργασίες εκτελούνται από εργαλειομηχανές όπως είναι ο τόννος, το δράπανο και η φρέζα, ενώ οι κατεργασίες υψηλής ταχύτητας (high speed machining) είναι μια προηγμένη τεχνική κατεργασίας υψηλής παραγωγικότητας, που επιτυγχάνουν βελτιωμένη ποιότητα και οικονομία. Αυτό οφείλεται στην παρατήρηση ότι σε αυξημένη ταχύτητα κοπής μετά από ένα σημείο η περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπή μείωνε την θερμοκρασία στο σημείο κοπής (**Εικόνα 1.2**). Αρχικά κατεργασίες υψηλής ταχύτητας αξιοποιήθηκαν από την βιομηχανία διαστήματος όμως πλέον αξιοποιούνται παγκοσμίως.

Πλέον, η χρήση ολοκληρωμένων συστημάτων παραγωγής που βασίζονται σε ηλεκτρονικό σχεδιασμό και ευέλικτα συστήματα παραγωγής (Εικόνα 1.3), επιτρέπουν την παραγωγή προϊόντων από τον σχεδιασμό τους έως το τελικό επιθυμητό προϊόν. Συχνά τέτοια συστήματα περιέχουν αυτόματες μεταφορικές διατάξεις, βιομηχανικά ρομπότ και αποθηκευτικούς χώρους και συστήματα ελέγχου, τα οποία αρμονικά συνεργάζονται.



Εικόνα 1.2: Γραφική απεικόνιση της θερμοκρασίας κοπής σε σχέση με την ταχύτητα κοπής για διαφορετικά υλικά (Dudzinski, Molinari, and Schulz 2002). Η αύξηση της ταχύτητα κοπής μετά από ένα σημείο μειώνει την θερμοκρασία στο σημείο κοπής. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε στη δημιουργία κατεργασιών υψηλής ταχύτητας (high speed machining).



Εικόνα 1.3: Απεικόνιση ενός Ευέλικτου Συστήματος Παραγωγής (Flexible Manufacturing System) (Davidrajuh, Skolud, and Krenczyk 2018). Τα Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής αποτελούνται από ηλεκτρονικό σχεδιασμό και προγραμματισμό για την οργάνωση και διεκπεραίωση της παραγωγής, αυτόματες μεταφορικές διατάξεις που επιτρέπουν την μεταφορά των τεμαχίων, αποθηκευτικούς χώρους, βιομηχανικά ρομπότ όπως αυτά που απεικονίζονται με πορτοκαλί στο γράφημα και διατάξεις ποιοτικού ελέγχου και ανίχνευσης αστοχιών.

Οι κατεργασίες με εργαλειομηχανές μπορούν να καταταχθούν με διάφορους τρόπους όπως:

- i) με βάση το είδος της κατεργασίας που πραγματοποιείται
- ii) με βάση το είδος της πρωτεύουσας κίνησης
- iii) ως προς την ακρίβεια της κατεργασίας, η οποία μπορεί να είναι χαμηλή ή υψηλή
- iv) ως προς τον βαθμό εξειδίκευσης ή τον βαθμό αυτοματισμού της κατεργασίας
- v) ως προς χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής π.χ. το βάρος της

Ο αριθμητικός έλεγχος είναι μέθοδος αυτομάτου ελέγχου που χρησιμοποιεί αλγορίθμους για την λειτουργία εργαλείων. Μέσω των εργαλειομηχανών οι κατεργασίες μπορούν να προγραμματιστούν, με αποτέλεσμα την αυτοματοποίηση τους μέσω Computer Numerical Control (CNC) και την τυποποίηση του προϊόντος ή τον χειρισμό τους από εξειδικευμένο χρήστη. Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται μπορούν να ενταχθούν στις εξής κατηγορίες: μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή και συνθετικά υλικά.

Σήμερα, ίσως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των εργαλειομηχανών είναι η ταχύτητα κατεργασίας του τεμαχίου σε μονάδες βιομηχανικής παραγωγής ενώ άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η αύξηση της παραγωγικότητας, η αυτοματοποίηση, η μείωση του νεκρού χρόνου και η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης της κατεργασίας.

Βιομηχανικά ρομπότ χρησιμοποιούνται για διαδικασίες που συνήθως είναι επικίνδυνες για τους ανθρώπους ενώ οι τομείς λειτουργίας τους συνεχώς αυξάνονται. Επίσης αξιοποιούνται για την επίτευξη παραγωγής συγκεκριμένης ποιότητας.

Παρόλα αυτά τα συμβατικά εργαλεία για κατεργασίες παρουσιάζουν διάφορα μειονεκτήματα. Μεταξύ αυτών είναι η φθορά τους, όπως παραδείγματος χάριν στα κοπτικά εργαλεία λόγω της επαφής τους με το προς κατεργασία τεμάχιο, που συνεπάγεται συχνή αντικατάστασή τους και αύξηση του κόστους, η μειωμένη γεωμετρική και διαστασιολογική ακρίβεια που οδηγεί σε μειωμένη ποιότητα, καθώς και περιορισμοί στην τροποποίηση των παραμέτρων λειτουργίας τους που σημαίνει μικρότερη ευελιξία.

Κατά την διάρκεια συμβατικών κατεργασιών δημιουργούνται σχηματισμοί μακροσκοπικών αποβλήτων που οδηγούν σε χαμηλότερη ποιότητα προϊόντος, ενώ αυξημένος είναι και ο συνολικός όγκος αποβλήτων οδηγώντας σε σπατάλες.

Επίσης συνυφασμένο με τα παραπάνω είναι το αυξημένο κόστος συντήρησης μιας εργαλειομηχανής. Πιο πρόσφατα έχουν παρουσιαστεί άλλα είδη κατεργασιών που βασίζονται σε επιστημονικά επιτεύγματα του προηγούμενου αιώνα και σε ραγδαίες τεχνολογικές καινοτομίες όπως οι κατεργασίες με λέιζερ, κατεργασίες πλάσματος, ηλεκτροχημικές κατεργασίες, οι διάφορες μορφές νανοκατεργασίας υλικών και πιο πρόσφατα η τρισδιάστατη εκτύπωση μεταλλικών αντικειμένων (3D Printers).

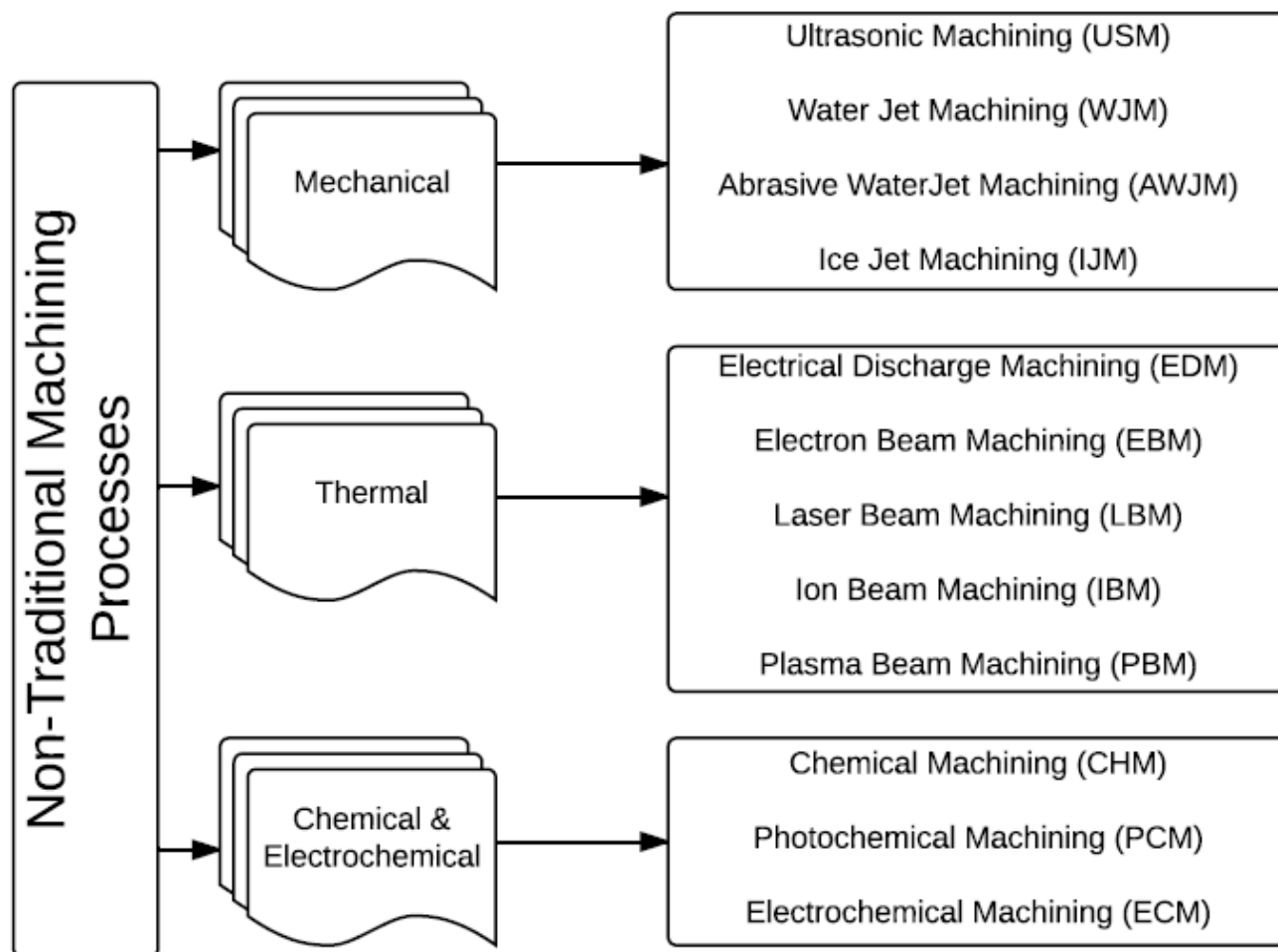
1.2 Μη συμβατικές κατεργασίες

Καθώς τα ραγδαία επιστημονικά και τεχνολογικά άλματα οδηγούν σε υλικά με όλο και πιο αυξημένη αντοχή σε μηχανικά και θερμικά φορτία, οι συμβατικές μέθοδοι συχνά δεν ενδείκνυνται για την επεξεργασία τους. Κατά συνέπεια, υπάρχει μια μεγάλη ανάγκη για ανάπτυξη νέων μορφών κατεργασιών, οι οποίες να μπορούν να ανταπεξέλθουν καλύτερα στην κατεργασία καινούριων υλικών. Σημαντικές έρευνες έχουν επιτρέψει την δημιουργία καινοτόμων τεχνολογιών κατεργασίας που συνολικά ονομάζονται μη συμβατικές κατεργασίες.

Οι μη συμβατικές κατεργασίες αναφέρονται γενικά σε μεθόδους κατεργασίας, αφαίρεσης ή προσθήκης υλικών με χρήση ηλεκτρικής, ηλεκτρομαγνητικής, χημικής, ακουστικής, ηλεκτροχημικής ή θερμικής ενέργειας ή μέσω ακτινοβολίας. Δηλαδή, οι συμβατικές κατεργασίες χρησιμοποιούν συνήθως μηχανική ενέργεια, ενώ οι μη συμβατικές κατεργασίες χρησιμοποιούν και άλλες μορφές ενέργειας.

Οι μη συμβατικές κατεργασίες ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες (όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1.4**):

- Μηχανικές κατεργασίες
- Θερμικές και θερμοηλεκτρικές κατεργασίες
- Χημικές και ηλεκτροχημικές κατεργασίες



Εικόνα 1.4: Κατηγοριοποίηση μη συμβατικών κατεργασιών με βάση την μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν (Nukman et al. 2017). Ομαδοποίηση των μη συμβατικών κατεργασιών σε μηχανικές κατεργασίες, θερμικές και θερμοηλεκτρικές κατεργασίες και χημικές και ηλεκτροχημικές κατεργασίες.

Μη συμβατικές **μηχανικές κατεργασίες** είναι η κοπή με δέσμη ύδατος, η κοπή με δέσμη λειαντικών κόκκων (AJM) (Olsen 2000), η κοπή με επενδεδυμένα εκρηκτικά και κατεργασίες αποπεράτωσης (**Εικόνα 1.5**). Για παράδειγμα, η κατεργασία με υπερήχους είναι μη συμβατική κατεργασία αφαίρεσης, κατά την οποία αφαιρείται υλικό από μία επιφάνεια μέσω δονήσεων υψηλής συχνότητας ενός εργαλείου στην επιφάνεια του υλικού (**Εικόνα 1.5**) (Thoe et al. 1996) και αξιοποιείται συνήθως σε ψαθυρά υλικά και σε υλικά με υψηλή σκληρότητα. Σε κατεργασίες κοπής με δέσμη ύδατος υψηλής πίεσης, η δέσμη νερού αξιοποιείται για την κοπή ενός υλικού (**Εικόνα 1.5**).

Παράδειγμα μη συμβατικών **θερμικών και θερμοηλεκτρικών κατεργασιών** είναι η ηλεκτροδιάβρωση (EDM), η οποία είναι μια από τις παλαιότερες μη συμβατικές κατεργασίες και βασίζεται στην ελεγχόμενης αφαίρεσης και απομάκρυνση μετάλλου μέσω

ηλεκτρικής διάβρωσης σπινθήρα, ανεξάρτητα από την σκληρότητα και την αντοχή του κατεργαζόμενου υλικού (Jahan 2015).

Η ηλεκτροδιάβρωση εφαρμόζεται συχνά για κατεργασία αγωγίμων υλικών και αξιοποιείται στην αεροδιαστημική βιομηχανία και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Άλλα παραδείγματα αποτελούν η κοπή με δέσμη Laser (LBC), η κοπή με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM) και η κοπή με δέσμη πλάσματος (PBM) (**Εικόνα 1.5**). Η κατεργασία με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM) είναι μια κατεργασία όπου τα ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας συγκεντρώνονται σε μια στενή δέσμη που κατευθύνεται προς το τεμάχιο εργασίας, παράγοντας θερμότητα με αποτέλεσμα την εξάτμιση του υλικού, ενώ χρησιμοποιείται για κοπή ή διάτρηση (**Εικόνα 1.5**).

Μη συμβατικές **χημικές και ηλεκτροχημικές κατεργασίες** είναι η ηλεκτροχημική κοπή (ECM), η ηλεκτροχημική λείανση (ECG), η χημική κοπή και η ηλεκτροχημική εκκένωση. Για παράδειγμα η μηχανική κατεργασία ηλεκτροχημικής εκκένωσης (ECDM) χρησιμοποιείται για την κατεργασία ηλεκτρικά αγωγίμων και μη αγωγίμων υλικών (**Εικόνα 1.5**).

Μία επιπλέον ταχύτατα αναπτυσσόμενη κατηγορία μη συμβατικών κατεργασιών είναι οι 3D εκτυπωτές, που βασίζονται στην εναπόθεση υλικού με πολλαπλά πλεονεκτήματα όπως την ελαχιστοποίηση απωλειών υλικού, την μη χρήση καλουπιών και εξειδικευμένων εργαλείων και τη δυνατότητα ελευθερίας σχεδιασμού μεταξύ άλλων (Ngo et al. 2018). Οι 3D εκτυπωτές δομούν από κάτω προς τα πάνω ένα αντικείμενο με εναπόθεση επιπλέον στρωμάτων υλικών. Επίσης υπάρχει κοινότητα προγραμματιστών που δημιουργούν, τροποποιούν και μοιράζονται προγράμματα που επιτρέπουν την δημιουργία καινούριων προϊόντων και καινοτομιών.

Οι μη συμβατικές κατεργασίες έχουν πολλαπλά πλεονεκτήματα και επιλέγονται σε πιο δυσχερείς συνθήκες όπως:

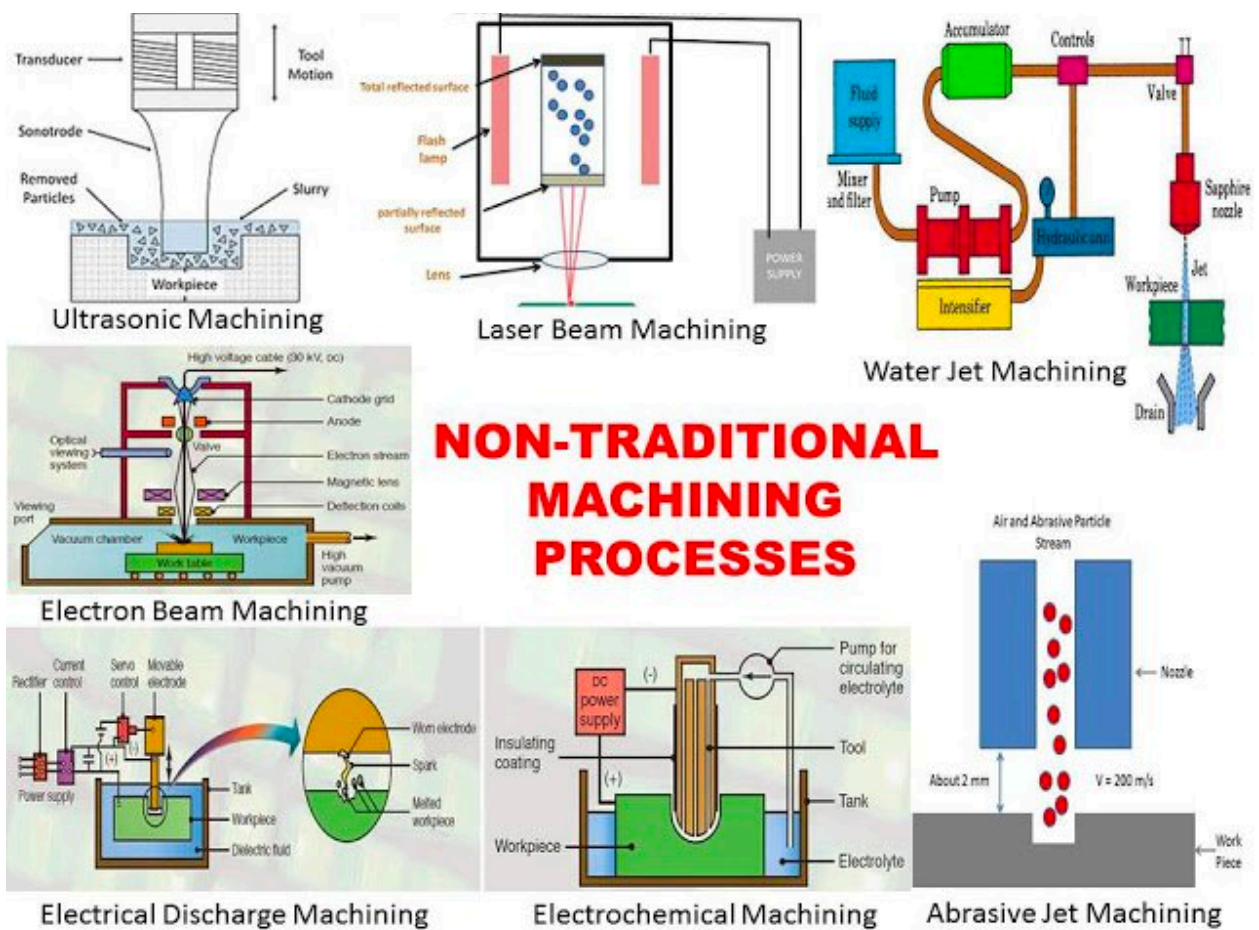
- i) σε υλικά με μεγάλη σκληρότητα
- ii) σε φαθυρά υλικά
- iii) όταν χρειάζεται εξαιρετικά δύσκολη γεωμετρία στη κατεργασία
- iv) όταν απαιτείται καλύτερη επιφανειακή ποιότητα και μικρότερη τραχύτητα
- v) όταν απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια
- vi) όταν η αύξηση της θερμοκρασίας και οι επιφανειακές τάσεις είναι ανεπιθύμητες.
- vii) όταν απαιτείται μείωση της ποσότητας των αποβλήτων και αυξημένη απόδοση

- viii) όταν απαιτείται ελαχιστοποίηση του θορύβου
- ix) όταν δεν συνίσταται επαφή εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου
- x) όταν ο χρόνος ζωής του εργαλείου είναι βασικός παράγοντας

Ορισμένα μειονεκτήματα των μη συμβατικών κατεργασιών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι:

- i) Ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού
- ii) Οικονομικά συμφέρουσα μόνο για συγκεκριμένα υλικά
- iii) Πολύπλοκη οργάνωση παραγωγής
- iv) Υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης
- v) Ο βαθμός ακρίβειας ορισμένων μη συμβατικών κατεργασιών συχνά δεν είναι απαραίτητος
- vi) Συχνά η τεχνολογία είναι ακόμα αναπτυσσόμενη
- vii) Υψηλό κόστος επιδιόρθωσης

Μία υποκατηγορία κατεργασιών είναι οι επιφανειακές κατεργασίες οι οποίες συχνά διαχωρίζονται σε θερμικές, θερμοχημικές και μηχανικές ή με βάση το στόχο τους σε κατεργασίες τροποποίησης επιφάνειας και κατεργασίες απόθεσης υλικού. Βασικό είδος θερμικής κατεργασίας με στόχο την τροποποίηση της επιφάνειας ενός τεμαχίου ή και την αφαίρεση υλικού είναι οι κατεργασίες με λέιζερ.



NON-TRADITIONAL MACHINING PROCESSES

Εικόνα 1.5: Διάφορα είδη μη συμβατικών κατεργασιών. Απεικόνιση κατεργασίας με υπέρηχους (ultrasonic machining), με ακτίνα λέιζερ (laser beam machining), κατεργασία με δέσμη ύδατος (water jet machining), μηχανική κατεργασία δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam machining), κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης (electrical discharge machining), ηλεκτροχημική κατεργασία (electrochemical machining) και μηχανική κατεργασία με λειαντικό πίδακα (abrasive jet machining).

Πηγή: <https://www.machinemfg.com/non-traditional-machining/>

2. Κατεργασίες με λέιζερ

Η κατεργασίες με λέιζερ βασίζονται στη χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για την επίτευξη υψηλής ενεργειακής πυκνότητας σε μικρό εστιακό σημείο, ώστε να διαμορφώσει ή να λιώσει ή να εξατμίσει υλικό, και είναι το είδος κατεργασίας το οποίο πραγματεύεται αυτή η διπλωματική εργασία.

Ορισμένες ερευνητικές μελέτες στοχεύουν στη βελτίωση της απορρόφησης ακτινοβολίας από διάφορα υλικά καθώς και ερευνούν τις παραμέτρους που επηρεάζουν την απορροφητικότητα. Επίσης σημαντική είναι η μοντελοποίηση κατεργασιών με λέιζερ καθώς με μικρότερο κόστος και ταχύτερα μπορούν να ελεγχθούν σειρά παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα, ταχύτητα ή την ακρίβεια της κατεργασίας

Τα τελευταία χρόνια η χρήση λέιζερ για βιομηχανική κατεργασία υλικών έχει αυξηθεί σημαντικά ενώ καινοτομίες όπως τα παλμικά λέιζερ υψηλής συχνότητας (ultra-short laser) έχουν συμβάλει σε αυτή τη τάση. Πλέον τα λέιζερ χρησιμοποιούνται σε διάφορα είδη κατεργασιών, ενώ με συνεχείς καινοτομίες στον τομέα ο αριθμός των εφαρμογών συνεχώς αυξάνεται.

Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά των κατεργασιών με λέιζερ είναι η μικρότερη σπατάλη υλικών, η μεγάλη προσαρμοστικότητά τους και η λεπτομέρεια κατά την κατεργασία. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική και στα διαστημικά αεροσκάφη, ενώ συνεχώς αυξάνεται η εφαρμογή τους και σε άλλους βιομηχανικούς τομείς.

Επίσης στη παγκόσμια βιομηχανία τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ταχεία ανάπτυξη της αγοράς λέιζερ, ενώ τα έσοδα από πωλήσεις λέιζερ τα τελευταία τέσσερα χρόνια αυξήθηκαν κατά περίπου 50% (Shin et al. 2020), δείχνοντας την όλο και αυξανόμενη χρήση τους σε πολλαπλούς τομείς.

2.1 Αρχές λειτουργίας λέιζερ

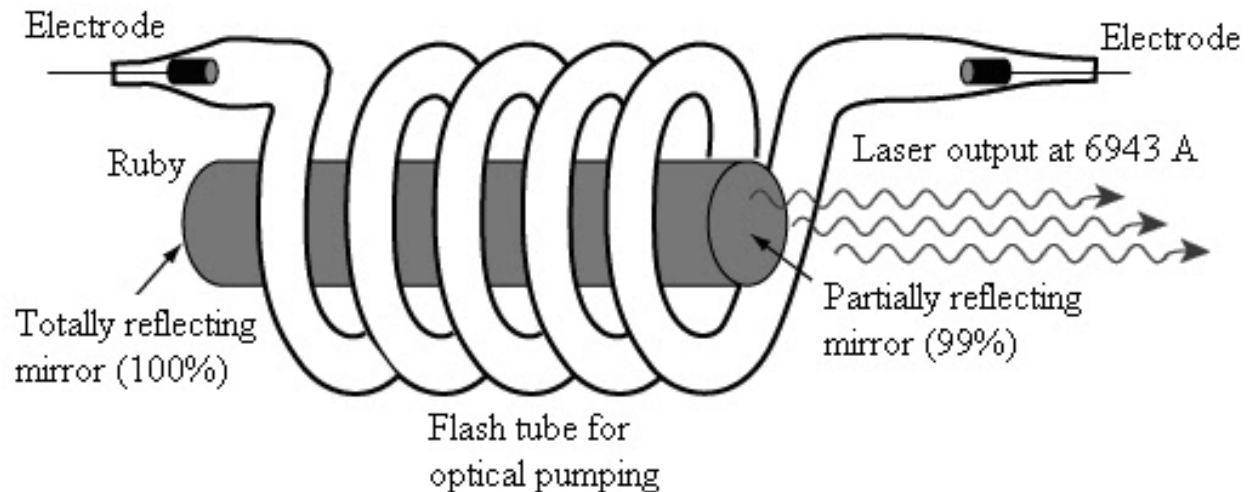
Ως λέιζερ ορίζεται μία πηγή εστιασμένης μονοχρωματικής ή σχεδόν μονοχρωματικής, συμφασικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο υπεριώδες, ορατό, ή υπέρυθρο φάσμα. Ο όρος laser παραπέμπει σε Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ενώ στα ελληνικά ο αντίστοιχος όρος είναι Ενίσχυση Φωτός Μέσω Εξαναγκασμένης Εκπομπής Ακτινοβολίας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ακτίνα λέιζερ μπορεί να θεωρηθεί μονοχρωματική, παραταύτα αυτό δεν είναι εφικτό και είναι μια προσέγγιση καθώς η μονοχρωματική ακτίνα λέιζερ αντιπροσωπεύει ένα σύνολο από μήκη κύματος που μπορούν να διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Τα λέιζερ μπορούν να χωριστούν σε συνεχή και παλμικά. Επίσης οι αντίστοιχες συσκευές για μήκη κύματος άνω των 500μm ονομάζονται maser.

Η αρχή των λέιζερ βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων. Τα βασικά τμήματα ενός λέιζερ καθώς και ο τρόπος λειτουργίας του παρουσιάζονται στην εικόνα 2.1 το οποίο είναι σχεδιάγραμμα λειτουργίας ενός λέιζερ.

Τα βασικά τμήματα του λέιζερ είναι:

- το ενεργό υλικό του λέιζερ
- η ενέργεια άντλησης που προσφέρεται
- ένα κάτοπτρο υψηλής ανακλαστικότητας
- ένα κάτοπτρο μερικής ανακλαστικότητας
- η δέσμη λέιζερ



Εικόνα 2.1: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας λέιζερ, όπου παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του καθώς και ο τρόπος λειτουργίας του. Το εσωτερικό ενός λέιζερ αποτελείται από έναν σωλήνα κυλινδρικού σχεδιασμού, ενός μέσου που μπορεί να ενεργοποιηθεί καθώς απορροφάται ενέργεια και διεγείρονται τα σωματίδια του. Ο τρόπος με τον οποίο ενεργοποιείται το λέιζερ εξαρτάται από το είδος του ενεργού υλικού που χρησιμοποιείται. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, ο κυλινδρικός σωλήνας περιβάλλεται από ένα σωλήνα φλας και έχει ένα κάτοπτρο ανακλαστικότητας 100% στο ένα άκρο έτσι ώστε να διατηρεί τα φωτόνια μέσα στον σωλήνα. Το άλλο άκρο του σωλήνα, το άκρο που εκπέμπει στην πραγματικότητα τη μονοχρωματική δέσμη, καλύπτεται με έναν ημι-ανακλαστικό καθρέφτη, σε αυτή τη περίπτωση κατά το γράφημα ανακλαστικότητας 99% ο οποίος είναι η διάταξη εξόδου του λέιζερ. Αυτός ο καθρέφτης επιτρέπει στα φωτόνια να ταξιδεύουν μέσα από αυτό εάν κινούνται προς τη σωστή κατεύθυνση, αλλά αντανακλά τα φωτόνια αν κινούνται προς λάθος κατεύθυνση δημιουργώντας συσσώρευση ενέργειας κατ' αυτόν τον τρόπο προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση.

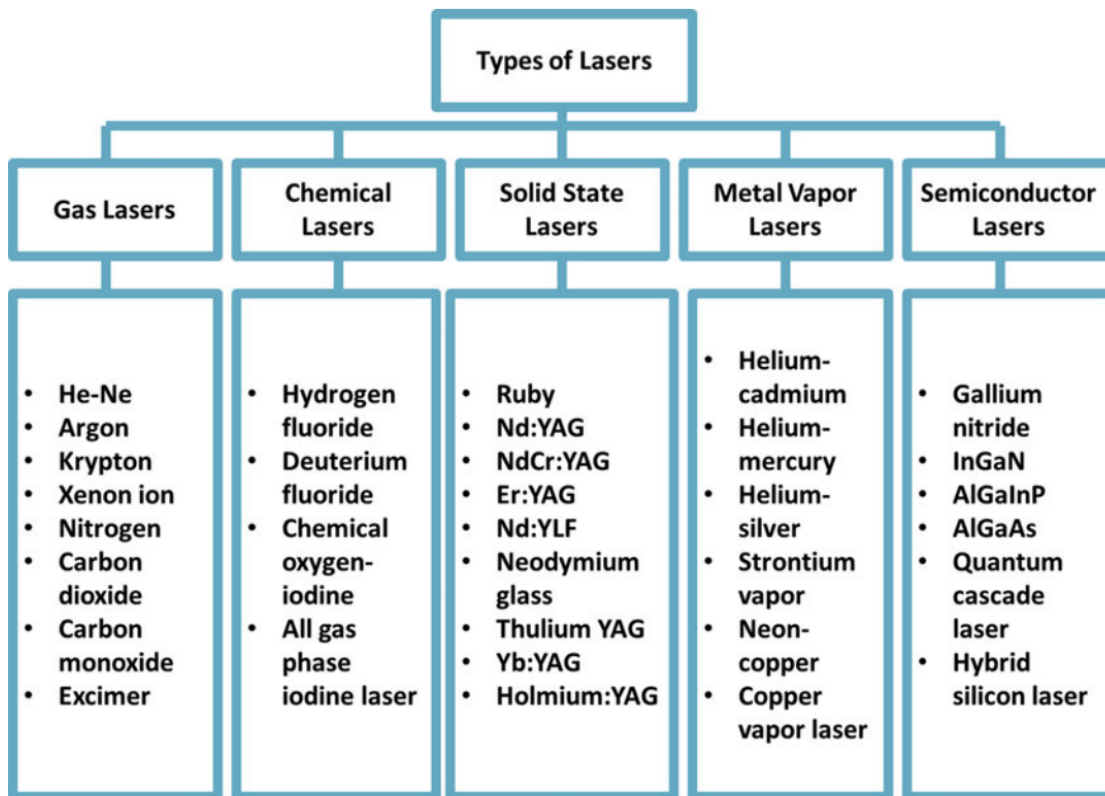
Πηγή γραφήματος: <http://www.indiastudychannel.com/attachments/Resources/>

Συχνά τα είδη λέιζερ ομαδοποιούνται (**Εικόνα 2.2**) με βάση το ενεργό υλικό τους σε:

- Αέρια χρωστικά Λέιζερ (Gas Lasers)
 - Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε:
 - Ηλεκτρικά
 - Χημικών αντιδράσεων

- Λέιζερ στερεάς κατάστασης (Solid-state Lasers)

- Το ενεργό μέσο είναι βασισμένο σε κρύσταλλο ή ράβδο από γυαλί
- Λείζερ Ημιαγωγών (Semiconductor)
 - Βασίζεται σε χρήση διόδου, η οποία ενεργοποιείται με ηλεκτρικό ρεύμα
- Dye Lasers
 - Το ενεργό μέσο είναι βασισμένο σε οργανικές βαφές αναμειγμένες με διαλυτικό χρώματος



Εικόνα 2.2: Διαφορετικά είδη λέιζερ, μεταξύ των οποίων αέρια χρωστικά λέιζερ (Gas Lasers), λέιζερ στερεάς κατάστασης (Solid-state Lasers), λέιζερ ημιαγωγών (Semiconductor).

Οι θεωρητικές βάσεις για τη δημιουργία των λέιζερ οφείλονται στον Άλμπερτ Αϊνστάιν, ο οποίος ανακάλυψε το φαινόμενο της εξαναγκασμένης ροής, το οποίο είναι απαραίτητο

για τη λειτουργία του μέσου ενίσχυσης (ενεργό υλικό). Το πρώτο λέιζερ δημιουργήθηκε το 1960 στα εργαστήρια του Hughes Aircraft Corporation στην Καλιφόρνια το οποίο ονομάστηκε RYBE Laser.

Η σημασία της δημιουργίας λέιζερ ήταν εξ αρχής σαφής με πολλές και σημαντικές ερευνητικές μελέτες την ίδια δεκαετία, που οδήγησε στην απονομή του βραβείου Νόμπελ φυσικής το 1969 στους C.H.Townes, A.M.Prokhorov και N.Basov. Έκτοτε τα λέιζερ έχουν βρει πάρα πολλές εφαρμογές στην καθημερινότητα όπως τα barcode scanners στα σουπερμάρκετ, τα CD player και οι εκτυπωτές λέιζερ, σε στρατιωτική τεχνολογία όπως υπερσύγχρονα όπλα, ενώ εξαιρετικά σημαντικές είναι και οι εφαρμογές των λέιζερ στον τομέα της υγείας όπως σε χειρουργικές επεμβάσεις ακρίβειας.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το Λέιζερ μυωπίας, το οποίο τα τελευταία χρόνια αξιοποιείται όλο και περισσότερο για την διόρθωση της όρασης, ενώ και στην κοσμητική ιατρική αξιοποιείται για την αντιμετώπιση της τριχοφυΐας. Τέλος, πρόσφατα λέιζερ έχουν αξιοποιηθεί και για την δημιουργία ολογραμμάτων ενώ στο μέλλον είναι πολύ πιθανό να αυξηθούν τέτοιου είδους εφαρμογές.

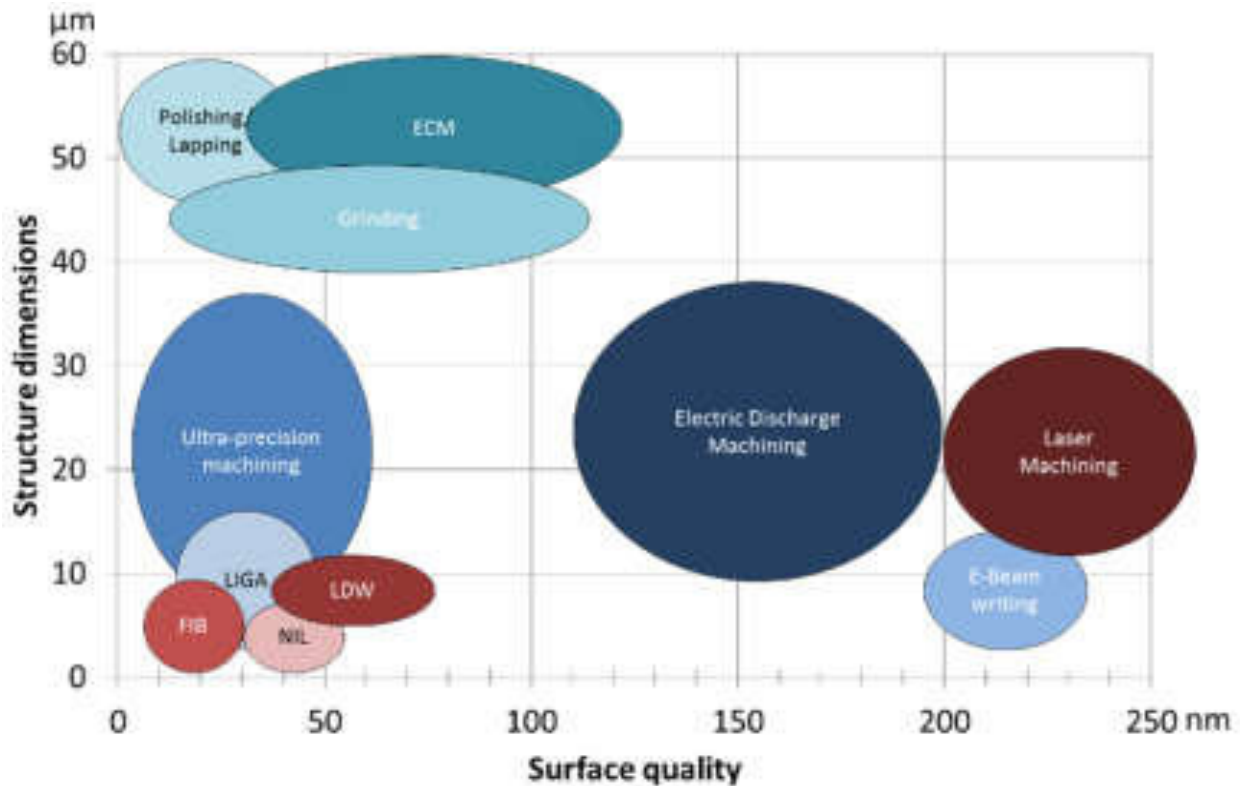
2.2 Εφαρμογές των λέιζερ σε κατεργασίες

Κατεργασία με λέιζερ είναι μία μικρο ή νάνο κατεργασία που έχει στόχο την επεξεργασία ενός υλικού ή της επιφάνειάς του, χρησιμοποιώντας μία ή περισσότερες δέσμες λέιζερ. Σε αντίθεση με άλλα είδη κατεργασιών έχει σχετικά μεγάλη ακρίβεια αλλά και αυξημένο κόστος και ορισμένους περιορισμούς (**Εικόνα 2.3**). Κατά τη κατεργασία με δέσμη λέιζερ στοχεύεται στο υλικό μεγάλη ποσότητα εστιασμένης ενέργειας.

Σε μεταλλική επιφάνεια, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από το λέιζερ ανταλλάζει ενέργεια με τα ηλεκτρόνια της επιφάνειας, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να διεγείρονται και να έχουν αυξημένη ενέργεια ενώ αυξάνεται και το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς χάνει ενέργεια. Επίσης, βασικά πλεονεκτήματα των λέιζερ σε σχέση με τις συμβατικές κατεργασίες είναι πως δεν υπάρχει μηχανική επαφή με το τεμάχιο καθώς και ο μικρός χρόνος που απαιτείται για την κατεργασία.

Αναμφίβολα, τα λέιζερ έχουν όλο και πιο σημαντικό ρόλους σε πολλαπλούς βιομηχανικούς τομείς (Lee et al. 2017) και έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών σε διάφορων τύπων επεξεργασίας υλικών (Shin et al. 2020) όπως:

- Στην κατασκευή μέσω προσθήκης υλικού (additive manufacturing),
- Σε κατεργασίες με υποβοήθηση λέιζερ (laser-assisted machining)
- Σε μικροκατεργασίες με λέιζερ (laser micromachining),
- Σε μηχανική διαμόρφωση με χρήση λέιζερ (laser forming)
- Στην επεξεργασία επιφανειών (laser surface texturing)
- Σε συγκολλήσεις (laser welding),
- Σε σφυρηλάτηση με χρήση δέσμης λέιζερ (laser shock peening)



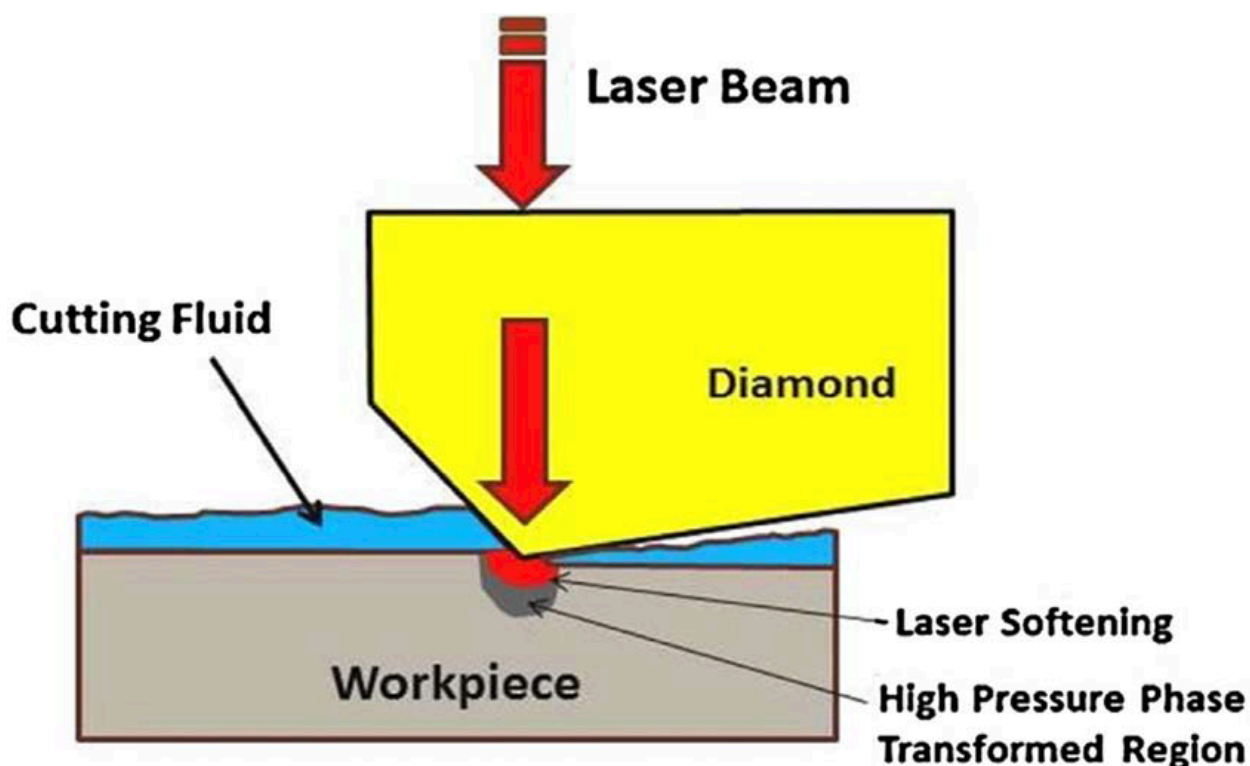
Εικόνα 2.3: Δομικές διαστάσεις και επιτεύξιμη ποιότητα επιφάνειας οπτικών ένθετα καλουπιών (optical mold inserts) (Roeder, Guenther, and Zimmermann 2019). Παρουσιάζονται και συγκρίνονται διάφορα είδη κατεργασιών.

Καθώς απορροφάται η θερμική ενέργεια η επιφάνεια του τεμαχίου τήκεται ή εξατμίζεται και μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα. Κατά την απορρόφηση των ακτίνων από την προσπίπτουσα επιφάνεια η απορρόφηση εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (π.χ. είδος υλικού, χαρακτηριστικά επιφάνειας) όσο και τα χαρακτηριστικά του λέιζερ (π.χ. μήκος κύματος, γωνία πρόσπτωσης, πόλωση).

Επίσης υλικά κατάλληλα για κατεργασία με λέιζερ είναι συνήθως αυτά που παρουσιάζουν υψηλό βαθμό ευθραυστότητας και σκληρότητας γιατί σε αντίθεση με τις συμβατικές κατεργασίες δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου και δεν υπάρχει κίνδυνος μηχανικής καταστροφής του υλικού.

Για τους παραπάνω λόγους τα λέιζερ αξιοποιούνται σε μια σειρά από κατεργασίες όπως διάτρηση, κοπή, κραματοποίηση μετάλλων, στίλβωμα, αυλάκωση και συγκόλληση μεταξύ άλλων. Συχνά συνδυάζονται οι κατεργασίες με λέιζερ με συμβατικά εργαλεία όπως η τórνευση με τη βοήθεια λέιζερ, κατά την οποία μπορεί το λέιζερ να θερμάνει και να μαλακώσει την επιφάνεια μειώνοντας την ψαθυρότητα του υλικού, που στην συνέχεια

τορνεύεται. Κατά συνέπεια σε τέτοιες συνδυαστικές κατεργασίες, μειώνεται η φθορά των κοπτικών εργαλείων και καθίστανται οικονομικά συμφέρουσες.



Εικόνα 2.4: Κατεργασίες με υποβοήθεια από Λείζερ (Laser Assisted Machining). Χρήση λέιζερ ως πηγή θέρμανσης για κατεργασία κοπής με κρύσταλλο, κατά την οποία η αύξηση της θερμοκρασίας με το λέιζερ υποβοηθάει την κατεργασία με συμβατικό εργαλείο (Shin et al. 2020).

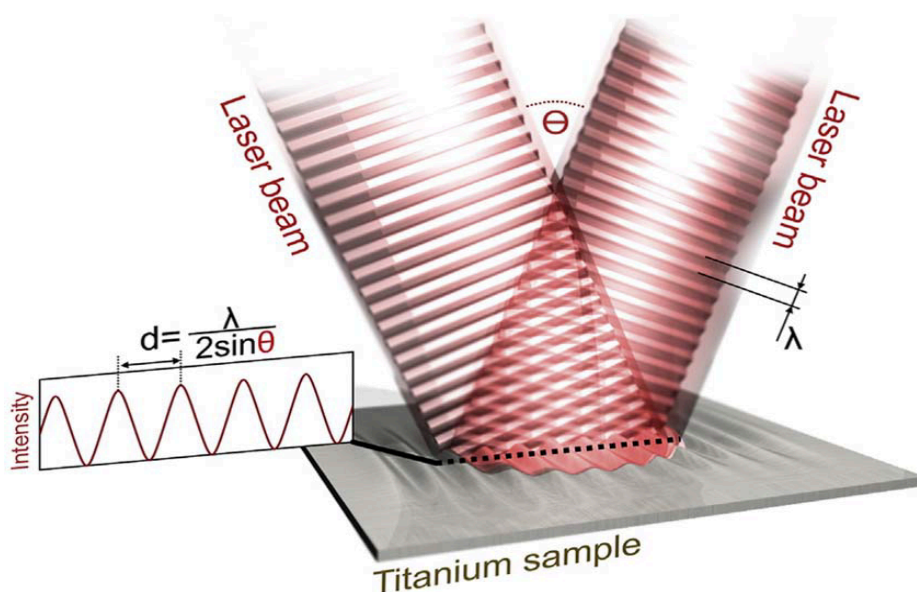
Πολλαπλές μελέτες εδώ και δεκαετίες έχουν δείξει ότι αύξηση της θερμοκρασίας ενός υλικού οδηγεί σε μείωση της διατμητικής του αντοχής, μειώνοντας τη σκληρότητά του (Astakhov and Outeiro 2019; Pentland, Wennberg, and Mehl 1961). Διάφορες κατεργασίες έχουν επιτευχθεί που να χρησιμοποιούν αυτήν την ιδιότητα, όπως η θέρμανση με επαγωγή και η χρήση ηλεκτρικών αντιστάσεων, όμως αυτές οι μέθοδοι έχουν το βασικό μειονέκτημα ότι δεν εστιάζουν την θέρμανση και κατά συνέπεια την θερμοκρασία σε συγκεκριμένη περιοχή του υλικού σε αντίθεση με το λέιζερ (Shin 2010). Η χρήση λέιζερ σε συνδυασμό με συμβατικά εργαλεία κοπής επιτρέπει την θέρμανση του τεμαχίου και την διευκόλυνση της κατεργασίας (**Εικόνα 2.4**) και για αυτό συχνά εφαρμόζεται (Shin et al. 2020).

Επίσης η ανάγκη διαστασολογικής και γεωμετρικής ακρίβειας έχει οδηγήσει στην ευρεία χρησιμοποίηση λέιζερ σε εφαρμογές φρεζαρίσματος, μικροφρεζαρίσματος (Jeon and

Pfefferkorn 2005), διάτρησης (Ito et al. 2017), λείανσης (Tian and Shin 2007) και κοπής (Feng et al. 2019). Τέτοιες εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί για πάρα πολλά υλικά μεταξύ των οποίων το ανοξείδωτο ατσάλι (Dandekar and Shin 2009), κράματα τιτανίου (Hedberg, Shin, and Xu 2015), κράματα νικελίου (Anderson, Patwa, and Shin 2006), γυαλί (Park, Wei, and Jin 2018), ημιαγωγοί (Ravindra 2011) και κεραμικά υλικά (Dong and Shin 2017).

Άλλη εφαρμογή σε κατεργασίες είναι η επεξεργασία επιφάνειας με λέιζερ όπου χρησιμοποιούνται ένα ή περισσότερα λέιζερ για τη δημιουργία περιοδικών μικροδομών στην επιφάνεια ενός υλικού. Συχνά χρησιμοποιούνται λέιζερ παλμών (pulse laser) για τέτοιου είδους κατεργασίες και μία από τις πιο συχνές δομές που δημιουργούνται ονομάζεται 'surface ripples' ή κυματισμοί επιφάνειας (Birnbbaum 1965) (**Εικόνα 2.5**), που συχνά αναφέρονται και ως laser-induced periodic surface structures (LIPSS).

Πρέπει να τονιστεί ότι κατά την επιφανειακή κατεργασία με λέιζερ η μορφολογία της επιφάνειας δεν είναι το μόνο χαρακτηριστικό ενός υλικού που αλλάζει, ενώ συχνά προσδίδονται καινούριες ιδιότητες και χαρακτηριστικά στην επιφάνεια, που μπορεί να περιλαμβάνουν διαφορετικές οπτικές, μηχανικές ή και χημικές ιδιότητες.



Εικόνα 2.5: Επεξεργασία επιφάνειας δείγματος τιτανίου με λέιζερ όπου χρησιμοποιούνται δύο ακτίνες λέιζερ από διαφορετική πηγή με διαφορετική γωνία πρόσπτωσης για τη δημιουργία περιοδικών μικροδομών (Shin et al. 2020). Η παλμική ακτινοβολία επιτρέπει οδηγεί στις γεωμετρικές μικροδομές καθώς τα ηλεκτροκτομαγνητικά κύματα είτε συμψηφίζονται είτε αλληλοαναιρούνται. Αντίστοιχες μικροδομές μπορούν να δημιουργηθούν από μία πηγή λέιζερ η οποία εναλλάσει διαφορετικές θέσεις (Shin et al. 2020).

Για παράδειγμα, σε μία πρόσφατη έρευνα, επιστήμονες κατάφεραν σημαντική βελτίωση θερμικής εκπομπής (thermal emission) (100%) για ένα κράμα NiTi μέσω της χρήσης παλμικού λέιζερ με παλμό femtosecond (fs) λόγω των διαφορετικών μικροδομών που δημιουργήθηκαν στην επιφάνεια (Yang et al. 2012).

Σε μία άλλη έρευνα, δημιουργήθηκαν επιφάνειες υπερδιαβροχής (superwetting) χρησιμοποιώντας fs λέιζερ για πυρίτιο και ανθρώπινο σμάλτο και ιστούς οδοντίνης (Vorobyev and Guo 2010, 2013). Τα τελευταία χρόνια πολλές ακόμη βιοϊατρικές εφαρμογές έχουν δημιουργηθεί όπως στην ενίσχυση της βιοσυμβατότητας μεταξύ κυττάρων και της επιφάνειας εμφυτεύματος ή μεταξύ κοκκάλων και εμφυτευμάτων (Batal, Sammons, and Dimov 2019; Cunha et al. 2015).

Οι κατεργασίες με λέιζερ έχουν σαφή πλεονεκτήματα στην ποιότητα του προϊόντος, την αποτελεσματικότητα ακόμα και σε δυσκατέργαστα υλικά και την ευελιξία ως προς την λεπτομέρεια της γεωμετρίας. Για παράδειγμα κατεργασία κοπής με λέιζερ μπορεί να εφαρμοστεί σε σχεδόν όλα τα υλικά, ιδιαίτερα σε υλικά όπου οι συμβατικές μέθοδοι κοπής συχνά αποτυγχάνουν.

Εκτός αυτών τα λέιζερ έχουν σχετικά χαμηλό κόστος συντήρησης λόγω του χαμηλού ποσοστού φθοράς, διότι δεν υπάρχει φυσική επαφή μεταξύ του εργαλείου και των υλικών του τεμαχίου εργασίας. Παρότι το αρχικό κόστος αγοράς λέιζερ παραμένει σχετικά υψηλό, η τάση είναι το κόστος αυτός συνεχώς να μειώνεται λόγω καινοτομιών στον τομέα παραγωγής των λέιζερ. Έτσι, αναμένεται να συνεχίσουν να αυξάνονται οι εφαρμογές τους σε πάρα πολλών τύπων κατεργασιών.

2.3 Πειραματικές μέθοδοι για προσδιορισμό της απορρόφησης ακτινοβολίας από μία επιφάνεια

Καθώς οι ακτίνες προσπίπτουν στην επιφάνεια προς επεξεργασία, η θερμοκρασία της αυξάνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υλικού όπως ο συντελεστής απορρόφησης του και γι' αυτό το λόγο το είδος του υλικού και οι ιδιότητες του είναι βασικοί παράγοντες κατά την κατεργασία.

Ο υπολογισμός της απορρόφησης ακτινοβολίας από ένα τεμάχιο υπολογίζεται από τις εξισώσεις Φρέσνελ (Fresnel Formulas) (Hipp, Mahrle, and Beyer 2019). Με αυτές τις εξισώσεις υπολογίζεται η συμπεριφορά μιας ακτίνας φωτός όταν αυτή αλλάζει μέσο διάδοσης και επηρεάζεται από τη γωνία πρόσπτωσης και τον δείκτη διάθλασης (reflective index). Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι αντίστοιχες εξισώσεις.

Δηλαδή ο νόμος της αντανάκλασης είναι:

$$\theta_i = \theta_r \quad (\text{Εξίσωση 2.1})$$

Όπου γωνία πρόσπτωσης είναι θ_i και η γωνία ανάκλασης είναι θ_r .

Ενώ ο νόμος του Snell (**Εικόνα 2.6**) είναι:

$$n_1 * \sin\theta_i = n_2 * \sin\theta_t \quad (\text{Εξίσωση 2.2})$$

Όπου οι διαφορετικοί δείκτες διάθλασης είναι n_1 και n_2 , η γωνία πρόσπτωσης είναι θ_i και η γωνία διάθλασης θ_t .

Και ο δείκτης ανάκλασης (n) είναι:

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{Εξίσωση 2.3})$$

Όπου c , η ταχύτητα του φωτός στο κενό και v η ταχύτητα του φωτός στο μέσο.

Η ανάκλαση για το s-πολωμένο φως είναι:

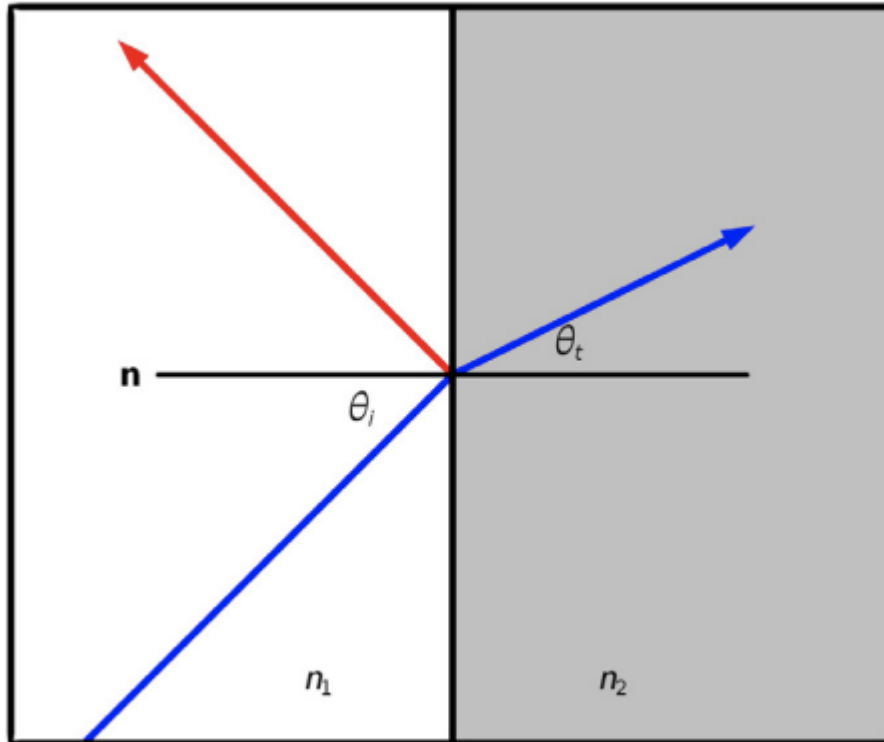
$$R_s = \left| \frac{Z_2 * \cos\theta_i - Z_1 * \cos\theta_t}{Z_2 * \cos\theta_i + Z_1 * \cos\theta_t} \right|^2 \quad (\text{Εξίσωση 2.4})$$

Η ανάκλαση για το p-πολωμένο φως είναι:

$$R_z = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \right|^2$$

(Εξίσωση 2.5)

Στις οποίες σχέσεις Z_1 και Z_2 είναι οι αντιστάσεις των μέσων 1 και 2.

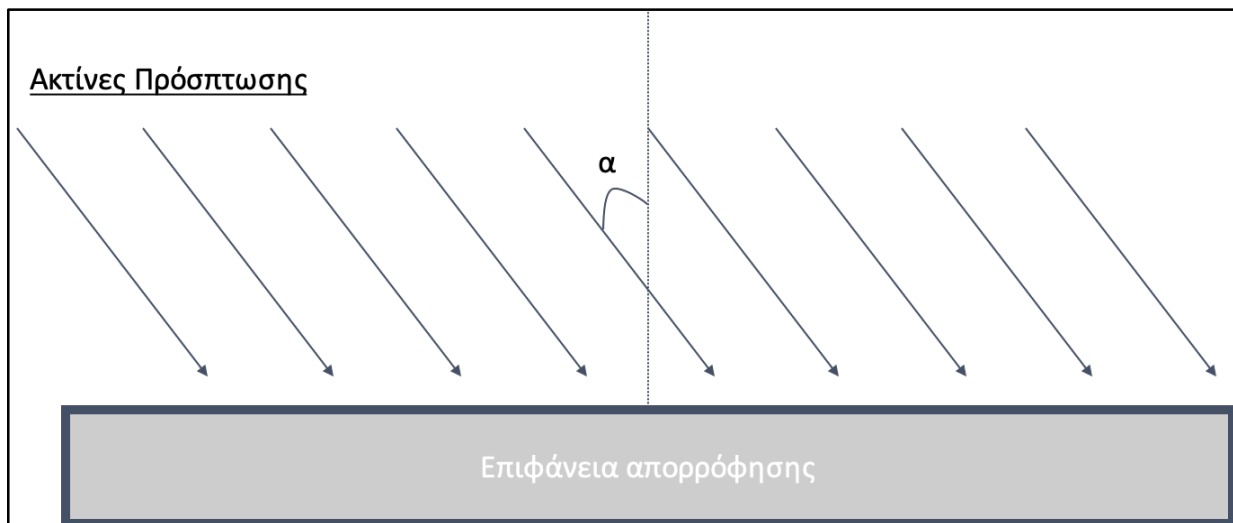


Εικόνα 2.6: Διάθλαση προσπίπτουσας ακτίνας με μπλε χρώμα σε ένα όριο (n). Μια δεύτερη ανακλώμενη ακτίνα με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται (*Comsol Multiphysics: Quick Start and Quick Reference : Version 3.4 2007*).

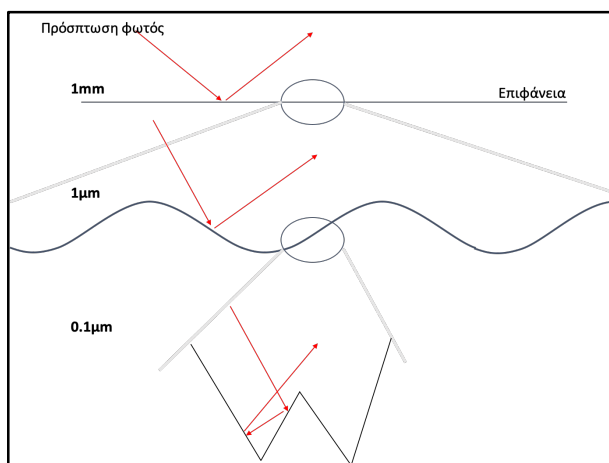
Το φως που προσπίπτει σε μία μεταλλική επιφάνεια μπορεί να ανακλαστεί, να μεταδοθεί ή να απορροφηθεί. Η απορροφητικότητα ενός υλικού ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ της απορροφούμενης και της προσπίπτουσας ενέργειας. Η μορφολογία και η τραχύτητα μιας επιφάνειας επηρεάζουν άμεσα την απορρόφηση ακτινοβολίας από αυτή (**Εικόνα 2.7a-c**).

Οι μεταλλικές επιφάνειες απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από ένα λέιζερ (Indhu et al. 2018). Αυξημένη τραχύτητα μιας επιφάνειας συνήθως συνεπάγεται και αύξηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας και θερμότητας (Auinger et al. 2014). Αυτό συμβαίνει καθώς η τραχύτητα της επιφάνειας δημιουργεί διασκόρπιση (scattering) της προσπίπτουσας ακτίνας (**Εικόνα 2.7b-c**) εν αντιθέσει με λείες επιφάνειες που έχουν μικρότερη τραχύτητα και απορροφούν λιγότερη ακτινοβολία (Bergström 2008) (**Εικόνα 2.7b-c**).

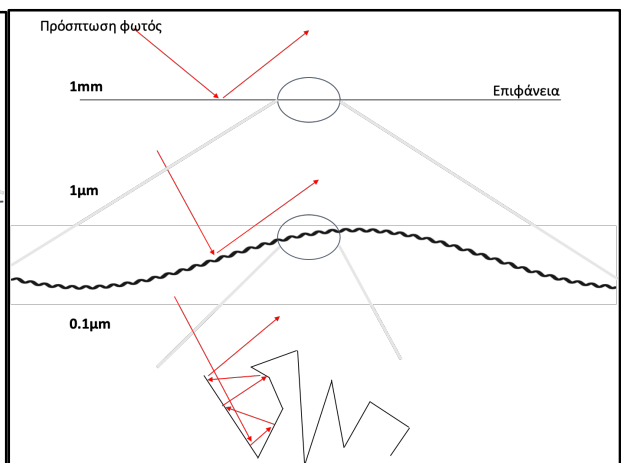
A



B



C



Εικόνα 2.7: Φαινόμενα διασκόρπισης της ακτινοβολίας καθώς προσπίπτει σε επιφάνεια με μικρή ή μεγάλη τραχύτητα. A. Γωνία πρόσπτωσης ακτίνας (α) σε επιφάνεια. Τα διαγράμματα B-C παρουσιάζουν την πρόσπτωση ακτίνας σε δύο επιφάνειες όπως αυτές παρατηρούνται σε μεγεθύνσεις 1mm, 1 μ m και 0.1 μ m. **B.** Απορρόφηση ακτινοβολίας από επιφάνεια με μικρή τραχύτητα έχει ως συνέπεια λιγότερες ανακλάσεις, **C.** Απορρόφηση ακτινοβολίας από επιφάνεια με μεγάλη τραχύτητα έχει ως συνέπεια περισσότερες ανακλάσεις.

Μία από τις πρώτες μελέτες που ερεύνησε πειραματικά το πως η τραχύτητα μιας επιφάνειας επηρεάζει την απορρόφησή της σε μέταλλα ήταν αυτή των Bennet et al. (Bennett et al. 1968) ενώ από τότε έχουν γίνει μεγάλα άλματα στην κατανόηση του πως η τραχύτητα και η θερμοκρασία επηρεάζουν την απορρόφηση (J.-T. Wang et al. 2000)

καθώς και τη μοντελοποίηση αυτού του φαινομένου. Σε αυτή την έρευνα, μετρήθηκε η θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια που κατεργάζονταν το λέιζερ και δημιουργήθηκαν μοντέλα για τη μελέτη της απορρόφησης ακτινοβολίας από αυτή. Έτσι οι ερευνητές έδειξαν ότι αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται και αύξηση της απορρόφησης της επιφάνειας μέχρι ένα όριο από το οποίο και ύστερα το ποσοστό απορρόφησης μειώνεται (J.-T. Wang et al. 2000). Επίσης το ποσοστό απορρόφησης αρχίζει να μειώνεται κοντά στο σημείο τήξης του υλικού (J.-T. Wang et al. 2000).

Σε μια άλλη έρευνα, επιστήμονες ερεύνησαν την αντανάκλαση και την σκέδαση του φωτός από ακτινοβολία σε επιφάνειες με διαφορετική τραχύτητα δειγμάτων κράματος με βάση σίδηρο (Fe, 1 wt-% Cr). Τα συμπεράσματα ήταν ότι ο αριθμός ανακλάσεων εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας και δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο μέσω του οποίου έδειξαν ότι μικρές αλλαγές στην τραχύτητα μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλες διαφορές της ενέργειας που εισέρχεται σε ένα μεταλλικό δείγμα (Auinger et al. 2014).

Στρώματα οξειδίων (oxide layer) και επιφανειακοί ρύποι (surface pollutant) επίσης επηρεάζουν την απορρόφηση ακτινοβολίας (Bergström 2008) και συχνά μοντελοποιούνται (Bergström 2008). Σε μια πρόσφατη δημοσίευση ερευνήθηκε πως η τραχύτητα μιας επιφάνειας καθώς και στρώμα οξειδίου Cr_2O_3 που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια από ανοξειδωτο ασάλι (AISI 304) επηρεάζει το ποσοστό απορρόφησης της ακτινοβολίας (Mustafa et al. 2019). Η αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας και του πάχους του στρώματος Cr_2O_3 οδήγησε σε σημαντική αύξηση της απορροφητικότητας των δειγμάτων και συγκεκριμένα από $R_a = 0,04$ μm έως $R_a = 1,9$ μm χωρίς επίστρωση και με απόθεση έως 6 μm , η απορροφητικότητα στο λέιζερ μήκος κύματος 1064 nm αυξήθηκε, αντίστοιχα, κατά 2,3 φορές.

Έρευνες έχουν δείξει ότι ο συντελεστής απορρόφησης μιας επιφάνειας επηρεάζει σημαντικά τις κατεργασίες με λέιζερ, ενώ η εναποθέτηση γραφίτη σε επιφάνεια αυξάνει τον συντελεστή απορρόφησης της (Abazari et al. 2017). Για να φτάσουν σε αυτό το συμπέρασμα οι ερευνητές μοντελοποίησαν μηχανική κατεργασία κράματος νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου (inconel 718) με υποβοήθηση λέιζερ (Laser-assisted machining) (**Εικόνα 2.3**) και κατασκεύασαν ένα θερμικό μοντέλο για την μεταφορά θερμότητας. Καθώς αύξησαν την θερμοκρασία κατά την κατεργασία αφαίρεσης υλικού από θερμοκρασία δωματίου στους 620 °C, διαπίστωσαν μια μείωση 25% στην ειδική ενέργεια κοπής, βελτίωση περίπου 2-3 φορές στην τραχύτητα της επιφάνειας και μια αύξηση 200-300% στη διάρκεια ζωής του κεραμικού εργαλείου (Abazari et al. 2017). Από αυτήν την έρευνα είναι σαφές ότι η κατεργασία κοπής ή χάραξης υποβοηθούμενη από λέιζερ έχει τεράστια πλεονεκτήματα.

Πειραματικά η απορρόφηση ακτινοβολίας μετριέται με δύο τρόπους, ο πρώτος είναι με μεθόδους θερμιδομετρίας οι οποίες μετράνε άμεσα την απορροφητικότητα ή με ραδιομετρικές μεθόδους που μετράνε την απορροφητικότητα έμμεσα μέσω ανάκλασης και εκπομπής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Bergström 2008). Εκ των δύο αναφερθέντων μεθόδων η πρώτη επιτυγχάνει μεγαλύτερη ακρίβεια και προτιμάται συνήθως (Rubenchik et al. 2014). Οι πειραματικές μέθοδοι για την μελέτη ακτινοβολίας είναι σαφώς σημαντικές και για τις υπολογιστικές, καθώς επιτρέπουν τον έλεγχο των μοντέλων καθώς και την επαλήθευση ή απόρριψή τους.

2.4 Αριθμητικές και υπολογιστικές μέθοδοι προσδιορισμού της διαδρομής ακτινοβολίας

Η μέθοδος ανίχνευσης ακτίνων φωτός (light ray tracing method) είναι ένα σύνολο από αλγοριθμικές και αριθμητικές μεθόδους που επιτρέπουν τον υπολογισμό της διαδρομής μιας ακτίνας στο χώρο και την αλληλεπίδραση της ακτίνας με τα διάφορα σώματα που συναντάει στο χώρο.

Πιο συγκεκριμένα με σύγχρονα υπολογιστικά προγράμματα όπως το Comsol, αυτή η μέθοδος αξιοποιείται για να υπολογιστούν τα επίπεδα απορρόφησης, ανάκλασης και διάθλασης σε διάφορα μηχανολογικά προβλήματα. Κατά συνέπεια η μέθοδος ανίχνευσης ακτίνων φωτός μπορεί να εφαρμοστεί για την προσομοίωση της απορρόφησης ακτινοβολίας από μία επιφάνεια μελετώντας το πως η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζει το ποσοστό απορρόφησης από αυτήν.

Επίσης η μέθοδος ανίχνευσης ακτίνων φωτός έχει σημαντικές υπολογιστικές απαιτήσεις κατά την εφαρμογή της. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως και αυτή η μέθοδος έχει περιορισμούς, ίσως ο βασικότερος είναι ότι θεωρεί πως το φως διαδίδεται σε ευθεία γραμμή το οποίο παύει να ισχύει σε κλίμακες αντικειμένων αντίστοιχες ή μικρότερες του μήκους κύματος του φωτός.

Άρα σε περιπτώσεις αναλύσεων σε επίπεδο μικροκλίμακας η μέθοδος ανίχνευσης ακτίνων φωτός δεν εξηγεί επακριβώς τα φαινόμενα (Niu, Zhu, and Lv 2019). Έτσι οι Niu *et al.* ερεύνησαν την απορροφητικότητα τριών ειδών επιφανειών με διαφορετικές μορφολογίες επιφάνειας (τυχαία μορφολογία, μορφολογία σχημάτων V και ημιτονοειδή μορφολογία) χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και θεωρία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και έδειξαν ότι τα μοντέλα που παρήχθησαν είχαν πάρα πολύ καλή συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας. Συγκεκριμένα στα μοντέλα αυτά οι διάφορες παράμετροι της επιφάνειας καθώς και οι παράμετροι της ακτίνας λέιζερ όπως η γωνία πρόσπτωσης και το μήκος κύματος καθόρισαν την επιτυχία του μοντέλου σε σχέση με την πειραματική επαλήθευση (Niu, Zhu, and Lv 2019).

Στην έρευνα των Bergström *et al.*, οι κορυφές σε τραχιές επιφάνειες που απορροφούν ακτινοβολία μοντελοποιήθηκαν ως γκαουσιανές κατανομές και οι ερευνητές έδειξαν ότι τόσο το ύψος των κορυφών όσο και η κλίση τους επηρέασαν σημαντικά την απορρόφηση (Bergström 2008). Πάραυτα η συγκεκριμένη μελέτη έχει ως περιορισμό ότι δεν αντιπροσωπεύει επαρκώς την τραχύτητα σε μια επιφάνεια καθώς στη πραγματικότητα υπάρχει τυχαιότητα και τα σχήματα των κορυφών δεν αποτελούν μια τέλεια κατανομή. Μία άλλη πιο πρόσφατη έρευνα χρησιμοποίησε μοντέλα στα οποία οι κορυφές παρουσιάστηκαν μέσω μαθηματικών μοντέλων βασισμένων σε φράκταλ, και με αυτόν

τον τρόπο πέτυχαν καλύτερη προσομοίωση της απορρόφησης της ακτινοβολίας (H. Wang et al. 2018).

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας έχει μεγάλη σημασία σε διάφορους τομείς. Γι'αυτό το λόγο η τραχύτητα των επιφανειών και η πρόσπτωση των ακτίνων σε αυτές είναι παράγοντες και αντικείμενα μελέτης επιστημόνων τόσο σε βασικές επιστήμες όσο και εφαρμοσμένες τεχνολογίες.

Μεταξύ των πολλών εφαρμογών είναι τα φωτοβολταϊκά και τα φωτοευαίσθητα πεδία ανιχνευτή (light-sensitive detector fields), τομείς που έχουν γνωρίσει άνθιση τα τελευταία χρόνια, και για τα οποία βελτιστοποίηση των τεχνολογιών θα είχε τεράστια σημασία για την καθημερινότητα των ανθρώπων. Για παράδειγμα, σε μια πρόσφατη έρευνα η τραχύτητα της επιφάνειας σε φωτοβολταϊκά ερευνήθηκε και βρέθηκε ότι αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας συνεπάγεται σημαντική μείωση της απορρόφησης και κατά συνέπεια της παραγόμενης ενέργειας (Richter et al. 2015).

3. Χρήση θορύβου για την ρεαλιστική μοντελοποίηση επιφανειών

Η στοχαστικότητα κατά την μοντελοποίηση επιτρέπει να ληφθούν υπόψη ανομοιογένειες και εξωτερικοί παράγοντες που συνήθως επηρεάζουν ένα σύστημα και οι οποίοι οδηγούν σε μη ντετερμινιστικές λύσεις. Έτσι, η στοχαστικότητα έχει άμεση σημασία κατά την εκτίμηση σχεδιαστικών παραμέτρων, για την πρόβλεψη της απόκρισης ενός συστήματος και τον υπολογισμό της ακρίβειας του μοντέλου.

3.1 Δημιουργία θορύβου για την μοντελοποίηση επιφανειών.

Κατά την πρόσκρουση μιας ακτίνας φωτός σε μια επιφάνεια η ανίχνευση της πορείας της καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της, όπως η τραχύτητά της, προσμίξεις υλικών ή επιφανειακοί ρύποι, τα οποία παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Η μοντελοποίηση επιφανειών σε κατεργασίες με λέιζερ είναι αντικείμενο συνεχούς έρευνας με σημαντικές εφαρμογές. Ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές κατά τη μοντελοποίηση επιφανειών είναι η σωστή μοντελοποίηση της τραχύτητας των επιφανειών ώστε να αντικατοπτρίζουν κατά τον καλύτερο τρόπο την πραγματικότητα.

Όπως προαναφέρθηκε, διάφορες μέθοδοι μοντελοποίησης επιφανειών έχουν δοκιμαστεί με εφαρμογή κανονικών κατανομών για την προσομοίωση της τραχύτητας, οι οποίες όμως αγνοούν σημαντικές λεπτομέρειες των επιφανειών όπως μικροσκοπικά επίπεδα τραχύτητας. Επίσης έχουν προταθεί μέθοδοι βασισμένες στη δημιουργία διαφόρων ειδών θορύβου για την μοντελοποίηση, με ίσως πιο σημαντικό το θόρυβο βασισμένο σε φράκταλ που παρουσιάστηκε σε πρόσφατη μελέτη.

Η χρήση θορύβου με επίπεδα διακυμάνσεων κατά τη προσομοίωση μιας επιφάνειας επιτρέπει τη δημιουργία μιας εικόνας με ρεαλισμό και λεπτομέρεια, χαρακτηριστικά τα οποία είναι απαραίτητα σε ερευνητικό επίπεδο, καθώς ποτέ δεν συναντώνται απόλυτα ομοιόμορφες επιφάνειες. Έτσι το είδος του θορύβου που χρησιμοποιείται καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την ευστοχία του μοντέλου προσομοίωσης και επιτρέπει βελτιστοποίηση της μελέτης κατεργασιών με λέιζερ.

Απλά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν τυχαίο θόρυβο, δεν επιτρέπουν ομαλές διακυμάνσεις στη τραχύτητα της επιφάνειας, και όπως και τα μοντέλα που θεωρούν την επιφάνεια λεία αποτυγχάνουν. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μοντελοποίηση μιας λείας

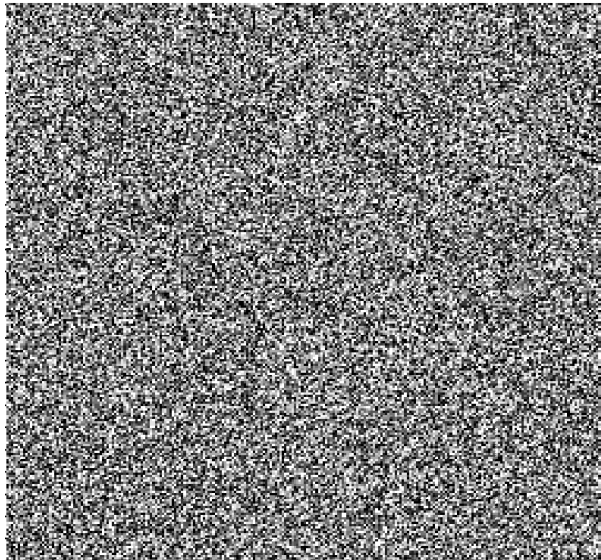
επιφάνειας ή μιας επιφάνειας με τεράστιες, άτακτες και απότομες διακυμάνσεις δεν αντικατοπτρίζουν σωστά την πραγματικότητα. Εν αντιθέσει μοντέλα θορύβου στα οποία η προηγούμενη θέση επηρεάζει την επόμενη επιτυγχάνουν σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα (J.-S. Li et al. 2017).

Στη παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται περιεκτικά τα διάφορα είδη θορύβου, όπως ο τυχαίος θόρυβος, θόρυβος τύπου Φράκταλ, ο θόρυβος τύπου Worley καθώς και ο θόρυβος τύπου Perlin. Εξ αυτών έχει δοκιμαστεί η χρήση τυχαίου θορύβου και θορύβου τύπου Φράκταλ σε προηγούμενες μελέτες. Παρόλα αυτά έως σήμερα δεν έχουν ελεγχθεί μοντέλα που να χρησιμοποιούν θόρυβο Perlin για τη μοντελοποίηση επιφανειών, το οποίο αποτελεί το θέμα της παρούσας εργασίας.

3.2 Τυχαίος θόρυβος (Random noise)

Οι διάφορες μέθοδοι τυχαίου θορύβου χρησιμοποιούν ψευδοτυχαίους αλγορίθμους για τη δημιουργία του. Μία υποκατηγορία του τυχαίου θορύβου είναι ο θόρυβος τιμών (value noise) στην οποία χρησιμοποιείται grid για τον υπολογισμό του θορύβου σε κάθε pixel. Το βασικότερο μειονέκτημα αυτού του τύπου θορύβου είναι ότι οι διακυμάνσεις είναι πολύ έντονες και δεν αντιπροσωπεύουν επαρκώς την τραχύτητα σε επιφάνειες (**Εικόνα 3.1**).

Άλλη μορφή τυχαίου θορύβου είναι ο Γκαουσιανός θόρυβος (Gaussian noise) κατά τον οποίο οι τιμές του θορύβου ακολουθούν κανονική κατανομή. Κατά τη χρήση του Γκαουσιανού θορύβου αξιοποιείται η αναλογία σήματος προς θόρυβο (Signal-to-noise ratio).



Εικόνα 3.1: Παραδείγματα δημιουργίας θορύβου με θόρυβο τύπου τυχαίος θόρυβος. Είδη θορύβων μοντελοποιήθηκαν σε Python 3.6.

Συγκεκριμένα επιφάνειες δημιουργημένες με τυχαίο θόρυβο δεν δημιουργούν ομαλές, συνεχείς καμπύλες, αντιθέτως παρουσιάζουν ξαφνικά άλματα ή αιχμηρές άκρες που δεν είναι καθόλου ρεαλιστικά.

Για αυτόν τον λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικοί τύποι θορύβου που δημιουργούν επιφάνειες που αναπαριστούν καλύτερα την πραγματικότητα. Αυτοί είναι βασισμένοι στη χρήση κλιμακωτού θορύβου (gradient noise), που έχει ως συνέπεια “κοντινά” σημεία να έχουν μικρότερες διαφορές στις τιμές θορύβου που παρουσιάζουν. Η σημασία του

κλιμακωτού θορύβου, μπορεί να παρουσιαστεί με ένα απλό παράδειγμα. Η γραφική απεικόνιση ενός θαλάσσιου κύματος με ρεαλισμό προϋποθέτει τα διπλανά σημεία να έχουν ελάχιστες διαφορές στις τιμές θορύβων τους και χρησιμοποιώντας τυχαίο θόρυβο, αυτό δε μπορεί να επιτευχθεί. Η χρήση κλιμακωτού θορύβου επιλύει αυτό το πρόβλημα.

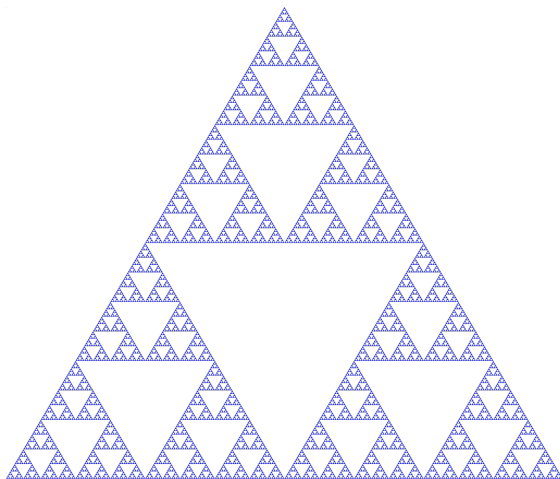
3.3 Θόρυβος φράκταλ (Fractal Noise)

Τα φράκταλ αναφέρονται σε γεωμετρικά σχήματα τα οποία επαναλαμβάνονται σε άπειρο βαθμό μεγέθυνσης και ορίστηκαν πρώτα από τον μαθηματικό Μάντελμπροτ τη δεκαετία του 70 (Mandelbrot 1977) (**Εικόνα 3.2-3.3**). Το όνομά τους έχει ρίζα στην λατινική λέξη 'fractus' η οποία σημαίνει 'σπασμένος'. Στη φύση φαινόμενα φράκταλ εντοπίζονται σε διάφορα πεδία όπως στη γεωμετρία ορισμένων άνθων, στα φύλλα ενός πεύκου, στις νιφάδες του χιονιού και τις διακλαδώσεις των αιμοφόρων αγγείων μεταξύ άλλων.

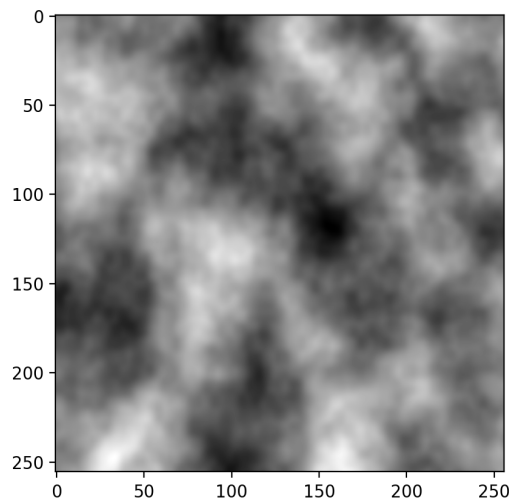
Αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση έχουν χρησιμοποιηθεί για την μαθηματική παρουσίαση των φράκταλ (**Εικόνα 3.2**). Η μοντελοποίηση των φράκταλ έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς ένας απ' τους οποίους είναι και η γραφική απεικόνιση σχημάτων στον κινηματογράφο και σε ψηφιακά παιχνίδια.

Η σημασία του θορύβου φράκταλ έγκειται η δυνατότητα που προσφέρει να αυξηθεί η λεπτομέρεια της ανάλυσης επαναλαμβάνοντας το γεωμετρικό σχήμα σε διαφορετικές κλίμακες μεγέθους. Η διακύμανση των τιμών συνήθως καθορίζεται μεταξύ συγκεκριμένων ορίων. Όσες περισσότερες κλίμακες χρησιμοποιούνται τόσο αυξάνεται η ανάλυση κατά τη προσομοίωση, οι οποίες συχνά ονομάζονται οκτάβες. Συνήθως, για κάθε οκτάβα η συχνότητα αυξάνεται και το πλάτος μειώνεται και κατά συνέπεια κάθε επόμενη οκτάβα επηρεάζει λιγότερο το σχήμα της επιφάνειας από την προηγούμενη.

A

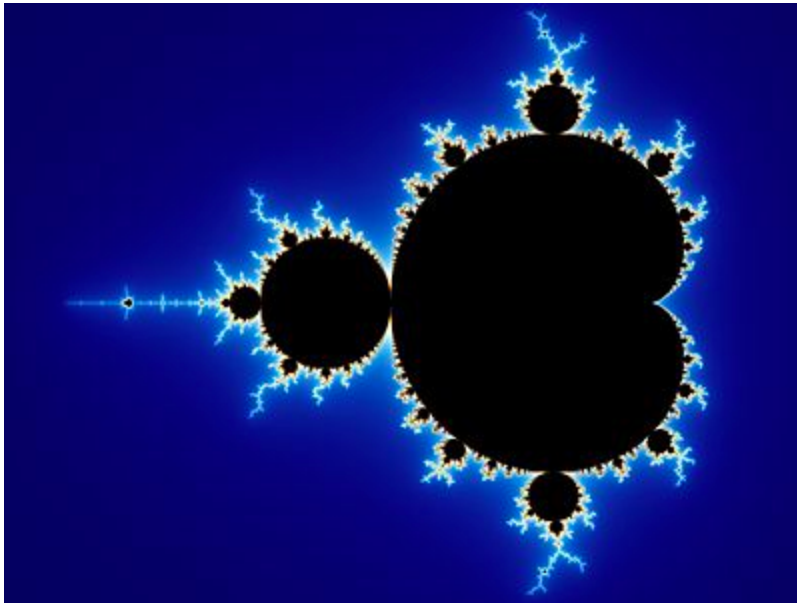


B



Εικόνα 3.2: Παραδείγματα δημιουργίας θορύβου με Φράκταλ. **A.** Φράκταλ τρίγωνα τύπου Sierpiński **B.** Δημιουργία θορύβου με θόρυβο τύπου φράκταλ. Είδη θορύβων μοντελοποιήθηκαν σε Python 3.6.

Σε μία πρόσφατη έρευνα που αφορούσε διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώσεις των διόδων εκπομπής φωτός λεπτής μεμβράνης (thin-film light-emitting diodes) με φράκταλ για να δείξουν πως αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας συνεπάγεται και τεράστια μείωση της μετάδοσης (transmittance) (J.-S. Li et al. 2017).

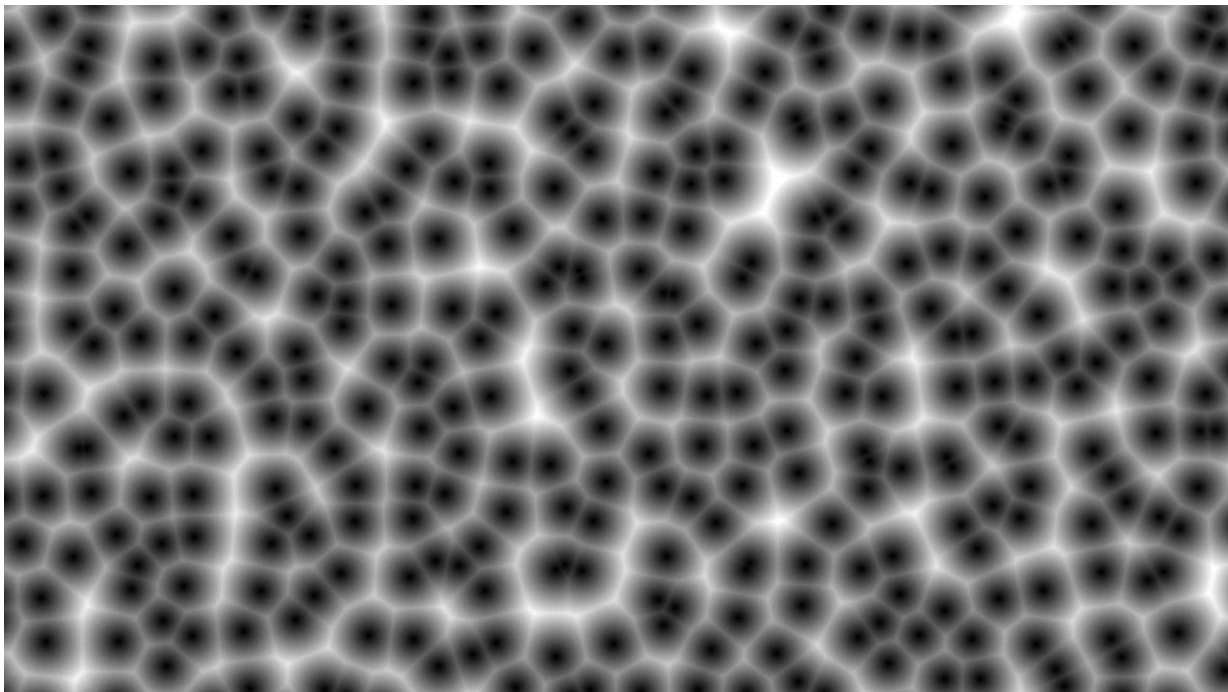


Εικόνα 3.3: The Mandelbrot Set. Μία από τις πιο διάσημες απεικονίσεις σχηματισμών Φράκταλ.

3.3 Worley Noise

Ο θόρυβος Worley γνωστός και ως κυτταρικός θόρυβος παρουσιάστηκε από τον Steven Worley το 1996 (Worley 1996). Ο όρος κυτταρικός θόρυβος οφείλεται στην ομοιότητα των παραγόμενων γραφημάτων με κυτταρικό ιστό, ενώ τα αποτελέσματα μοιάζουν με αυτά που παράγονται από κύτταρα Voronoi.

Ο θόρυβος Worley λειτουργεί τοποθετώντας σημεία τυχαία στο χώρο, δημιουργώντας μοτίβα που μοιάζουν με κυψέλες. (Ebert 2003). Πρώτα δημιουργείται δειγματοληψία τυχαίων σημείων στο χώρο. Στη συνέχεια για οποιοδήποτε σημείο του χώρου μετρίεται η απόσταση από το πλησιέστερο σημείο. Μπορούμε να υποδιαιρέσουμε τον χώρο σε κελιά, το καθένα με ένα μοναδικό σημείο προς έλεγχο. Επίσης, πρέπει να ελέγξουμε τις αποστάσεις από τα σημεία στα γειτονικά κελιά για να αποφευχθούν σφάλματα. Εφαρμογές του θορύβου Worley εμφανίζονται στη γραφική απεικόνιση της βροχής.



Εικόνα 3.4: Θόρυβος τύπου Worley ή αλλιώς κυτταρικός θόρυβος λόγω του σχήματος των παραγόμενων γραφημάτων με κύτταρα.

3.4 Θόρυβος Perlin (Perlin Noise)

Ο θόρυβος Perlin αναφέρεται σε μια μέθοδο που αναπτύχθηκε την δεκαετία του 80 από τον Κεν Περλίν (Perlin 1985) για τη δημιουργία θορύβου. Έναυσμα για τον Κεν Περλίν ήταν η απουσία ρεαλισμού στην απεικόνιση φυσικών φαινομένων στα γραφικά υπολογιστών.

Αρχικά, η μέθοδος αυτή αξιοποιήθηκε στον κινηματογράφο για την προσομοίωση τοπίων και άλλων χαρακτηριστικών με μεγαλύτερη αληθοφάνεια και για αυτή τη συνεισφορά του ο Κεν Περλίν βραβεύτηκε με το βραβείο Όσκαρ. Πάραυτα η μέθοδος έχει επεκταθεί πλέον σε πολλούς άλλους τομείς μεταξύ των οποίων βιντεοπαιχνίδια (Sims 1991), σε μοντελοποίηση στη μηχανική ρευστών (Bridson 2008) και μεθόδους μαγνητικής τομογραφίας (Ma et al. 2013).

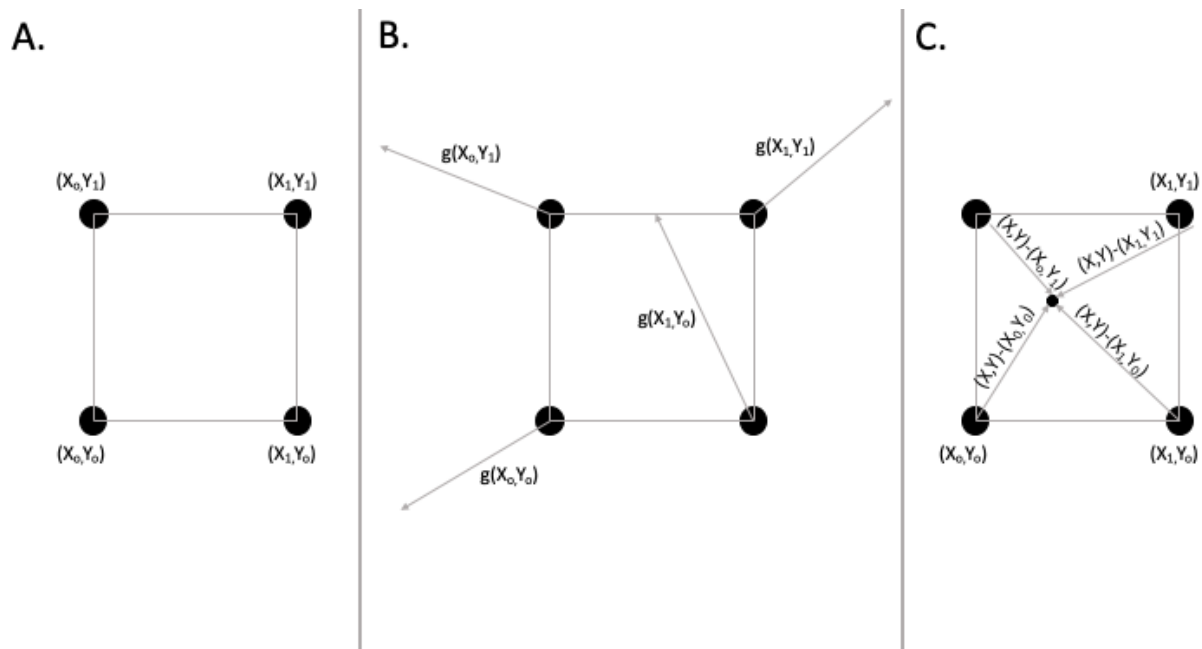
Η μαθηματική εξήγηση του θορύβου Perlin παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.5.

- Για τον θόρυβο Perlin αρχικά δημιουργείται ένα πλέγμα.
- Για κάθε στοιχείο του πλέγματος σε κάθε μία από τις τέσσερις γωνίες του τετραγώνου δημιουργείται ένα διάνυσμα με τυχαίο προσανατολισμό.
- Στο εικονιζόμενο τετράγωνο (**εικόνα 3.5A**), σε κάθε μία από τις κορυφές του δημιουργούμε ένα ψευδοτυχαίο διάνυσμα κλίσης. Το διάνυσμα κλίσης δημιουργεί μία θετική κατεύθυνση προς την κατεύθυνση που δείχνει και μια αρνητική κατεύθυνση που ορίζεται αντίθετα από την θετική (**εικόνα 3.5B**).
- Το επόμενο βήμα της διαδικασίας έγκειται στον υπολογισμό των τεσσάρων διανυσμάτων από το δεδομένο σημείο.
- Έπειτα υπολογίζουμε το εσωτερικό γινόμενο μεταξύ των διανυσμάτων κλίσης και απόστασης που μας δίνουν τις τελικές τιμές επιρροής.
- Έπειτα παρεμβάλλεται μεταξύ των 4 τιμών που υπολογίστηκαν (**διάγραμμα 3.5C**), με αποτέλεσμα να έχουμε ένα σταθμισμένο μέσο όρο μεταξύ των 4 σημείων του τετραγώνου.
- Αντίστοιχα υπολογίζεται ο θόρυβος Perlin και σε περισσότερες διαστάσεις.

Τέλος, για να γίνει ομαλή η μετάβαση μεταξύ των κλίσεων χρησιμοποιείται μια συνάρτηση fade, που ονομάζεται επίσης καμπύλη ευκολίας και η οποία παρουσιάζεται παρακάτω:

$$3t^2 - 2t^3$$

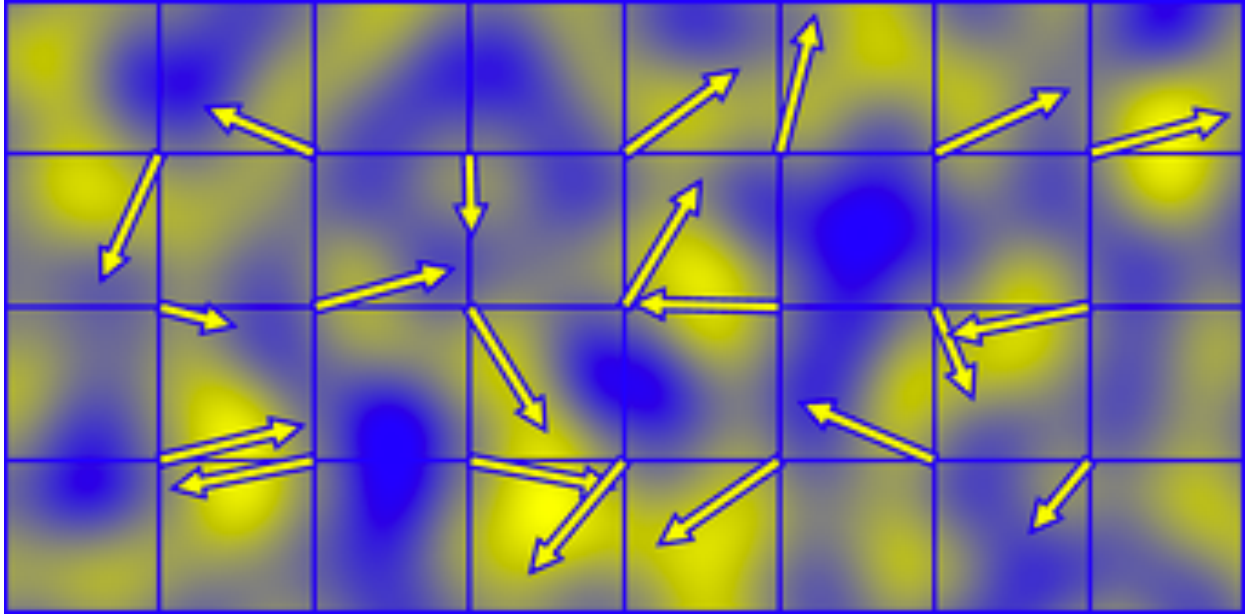
(Εξίσωση 3.1)



Εικόνα 3.5: Βήματα υπολογισμού θορύβου τύπου Perlin. Α. Ορίζεται τετράγωνο και σε κάθε μία από τις κορυφές του δημιουργούμε ένα ψευδοτυχαίο διάνυσμα κλίσης. **Β.** Το διάνυσμα κλίσης δημιουργεί μία θετική κατεύθυνση προς την κατεύθυνση που δείχνει και μια αρνητική κατεύθυνση που ορίζεται αντίθετα από την θετική. **Γ.** Παρεμβάλουμε μεταξύ των 4 τιμών που υπολογίστηκαν, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα σταθμισμένο μέσο όρο μεταξύ των 4 σημείων του τετραγώνου.

Η χρήση θορύβου τύπου Perlin έχει πολλά πλεονεκτήματα:

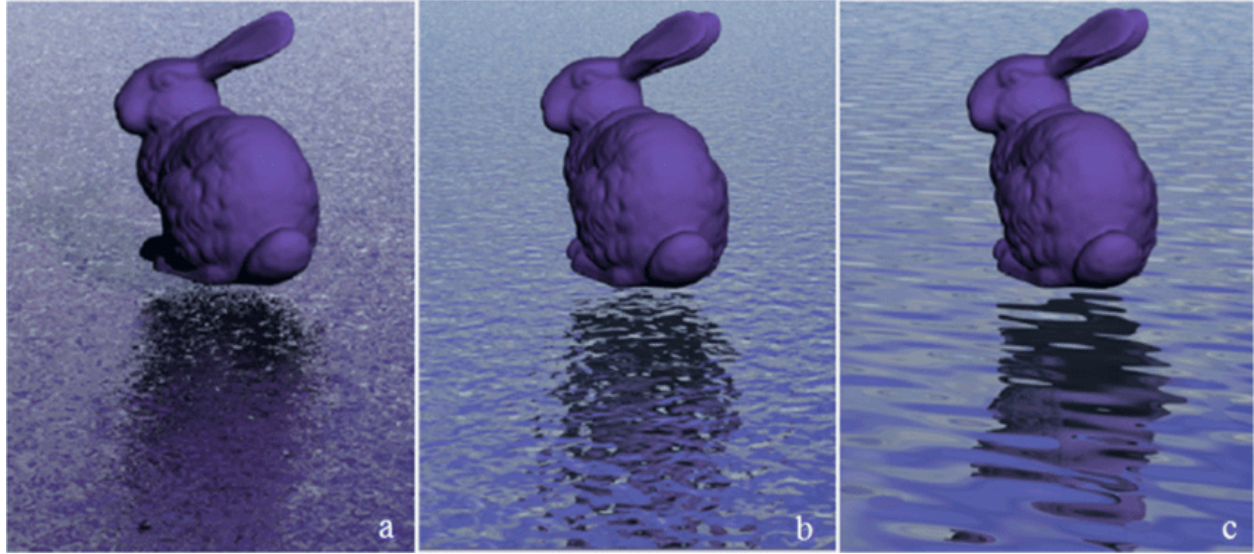
- Παράγει μια επαναλαμβανόμενη ψευδοτυχαία τιμή για κάθε θέση εισόδου
- Έχει γνωστό εύρος (συνήθως μεταξύ -1, και 1)
- Έχει χωρική συχνότητα περιορισμένης ζώνης (δηλαδή είναι ομαλή)
- Δεν δημιουργούνται εμφανή επαναλαμβανόμενα μοτίβα
- Η χωρική του συχνότητα είναι αμετάβλητη
- Είναι μη περιοδικός θόρυβος
- Καθορίζεται από μια σειρά παραμέτρων αυξάνοντας την ευελιξία



Εικόνα 3.6: Δημιουργία δισδιάστατου πλέγματος θορύβου Perlin, όπου κοντινές περιοχές έχουν παρόμοια επίπεδα θορύβου και απεικόνιση των διανυσμάτων κατεύθυνσης.

Επίσης είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το διάνυσμα κλίσης είναι ψευδοτυχαίο γιατί για οποιοδήποτε σύνολο ακεραίων που εισάγεται στην εξίσωση του διανύσματος κλίσης, θα βγαίνει πάντα το ίδιο αποτέλεσμα.

Επιπλέον, επαλληλία από οκτάβες χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η ρεαλιστικότητα του τελικού αποτελέσματος. Συγκεκριμένα, πολλαπλές συναρτήσεις θορύβου με διαφορετικές συχνότητες και πλάτη προστίθενται. Στο γράφημα 3.7 παρουσιάζεται προσομοίωση επιφάνειας με διαφορετικό αριθμό οκτάβων.



Εικόνα 3.7: Προσομοίωση επιφάνειας νερού με 16, 8 ή 4 οκτάβες. Το γράφημα πάρθηκε από την έρευνα των Li et al. (H. Li et al. 2018).

3.6 Simplex Noise

Μία διαφοροποίηση του θορύβου Perlin είναι η μέθοδος Simplex (Perlin 2002), την οποία δημιούργησε ο ίδιος ο Κεν Περλίν ως βελτιστοποίηση του θορύβου Perlin το 2001 (Olano et al. 2002).

Η βασική διαφοροποίηση έγκειται στο ότι η επιλογή της συνάρτησης παρεμβολής σε κάθε διάσταση στην αρχική παρουσίαση του θορύβου Perlin ήταν $3t^2 - 2t^3$, η οποία περιέχει μη μηδενικές τιμές στη δεύτερη παράγωγο της, $6t - 12t$, για $t=0$ και $t=1$. Αυτό μπορεί να προκαλέσει οπτικά σφάλματα όταν λαμβάνεται η παράγωγος του θορύβου με αποτέλεσμα αυτές οι ανωμαλίες να παράγουν ανεπιθύμητες υψηλότερες συχνότητες στη συνάρτηση θορύβου που προκύπτει (Perlin 2002).

Αυτό επιλύθηκε με χρήση μιας συνάρτησης πέμπτου βαθμού:

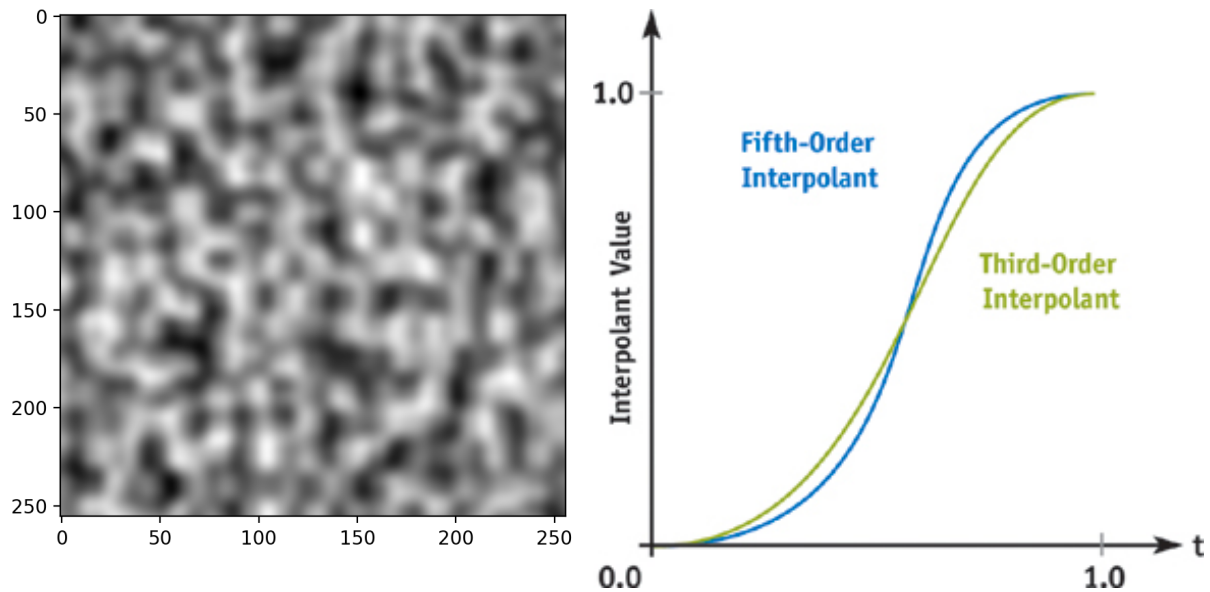
$$6t^5 - 15t^4 + 10t^3$$

(Εξίσωση 3.2)

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου Simplex σε σχέση με τον θόρυβο Πέρλιν είναι:

- ο μικρότερος αριθμός υπολογισμών που απαιτούνται
- το μικρότερο υπολογιστικό κόστος της
- η ευκολία χρήση της για πολυδιάστατα προβλήματα
- ότι σε αντίθεση με τον θόρυβο Perlin δεν παρουσιάζει τεχνουργήματα (directional artifacts) που προκύπτουν όταν αυξάνεται η συχνότητα του θορύβου Perlin
- η ευκολία με την οποία πολλαπλές οκτάβες μπορούν να προστεθούν

Για αυτό το λόγο σήμερα η μέθοδος Simplex έχει αντικαταστήσει σε πολλές εφαρμογές την μέθοδο Perlin, αν και οι δύο οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα (**Εικόνα 3.7**).



Εικόνα 3.7: Δημιουργία θορύβου με θόρυβο τύπου Perlin. Είδη θορύβων μοντελοποιήθηκαν σε Python 3.6. Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης 3ου βαθμού που αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία θορύβου Perlin και την συνάρτηση 5ου βαθμού. Η πράσινη καμπύλη είναι η παρεμβολή 3ου βαθμού, η οποία έχει ασυνέχειες δεύτερης τάξης σε $t = 0$ και $t = 1$. Η μπλε καμπύλη είναι η νέα παρεμβολή πέμπτης τάξης, η οποία δεν υποφέρει από ασυνέχειες δεύτερης τάξης σε $t = 0$ και $t = 1$. Πηγή <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems/part-i-natural-effects/>

4. Μεθοδολογία

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται με λεπτομέρεια τα βήματα και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την έρευνα σε αυτήν την διπλωματική εργασία, μεταξύ αυτών και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι εντολές που εισήχθησαν καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

4.1 Δημιουργία θορύβου

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για τη δημιουργία θορύβου επικεντρώθηκα στο Θόρυβο Perlin, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, και ο οποίος δεν έχει χρησιμοποιηθεί έως σήμερα για τον προσομοίωση της απορρόφησης ακτινοβολίας λέιζερ από μία μεταλλική επιφάνεια συγκεκριμένης τραχύτητας. Όπως έχει προειπωθεί παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και για αυτόν τον λόγο έχει χρησιμοποιηθεί σε ρεαλιστικές απεικονίσεις στον κινηματογράφο και θεωρήθηκε πιθανό να βελτιώσει και την μοντελοποίηση της πρόσπτωσης ακτινοβολίας λέιζερ σε επιφάνεια.

Ο θόρυβος Perlin υπολογίστηκε στο πακέτο Comsol (*Comsol Multiphysics: Quick Start and Quick Reference : Version 3.4 2007*).

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν ήταν:

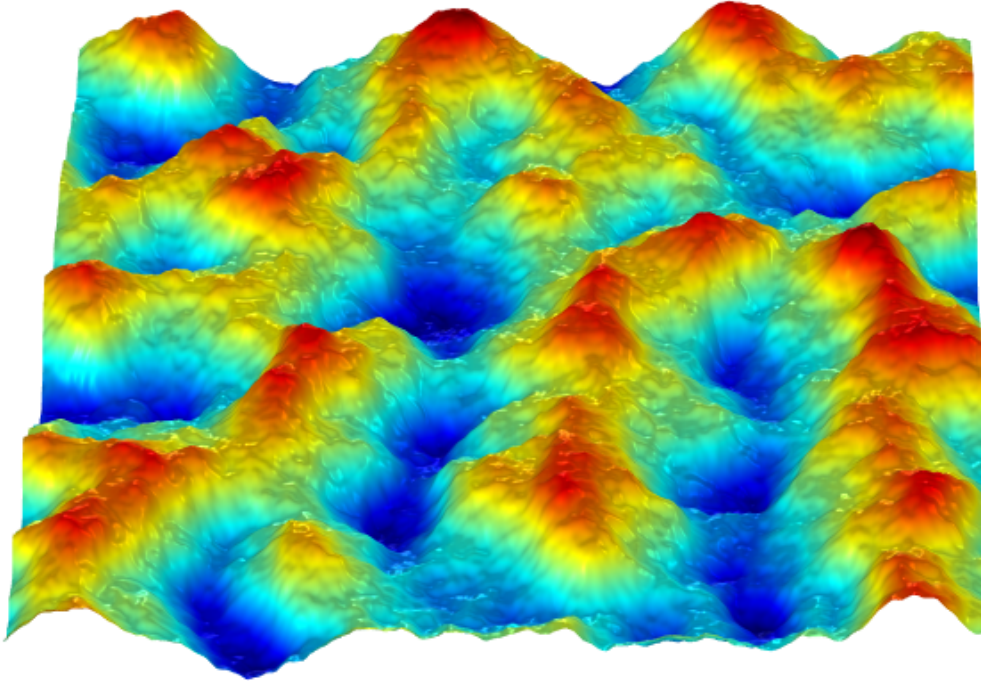
- Size: 6 (η κάθε πλευρά της επιφάνειας σε αδιαστατοποιημένες μονάδες)
- Octaves: 5
- O2: variable

Ενώ η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε ήταν:

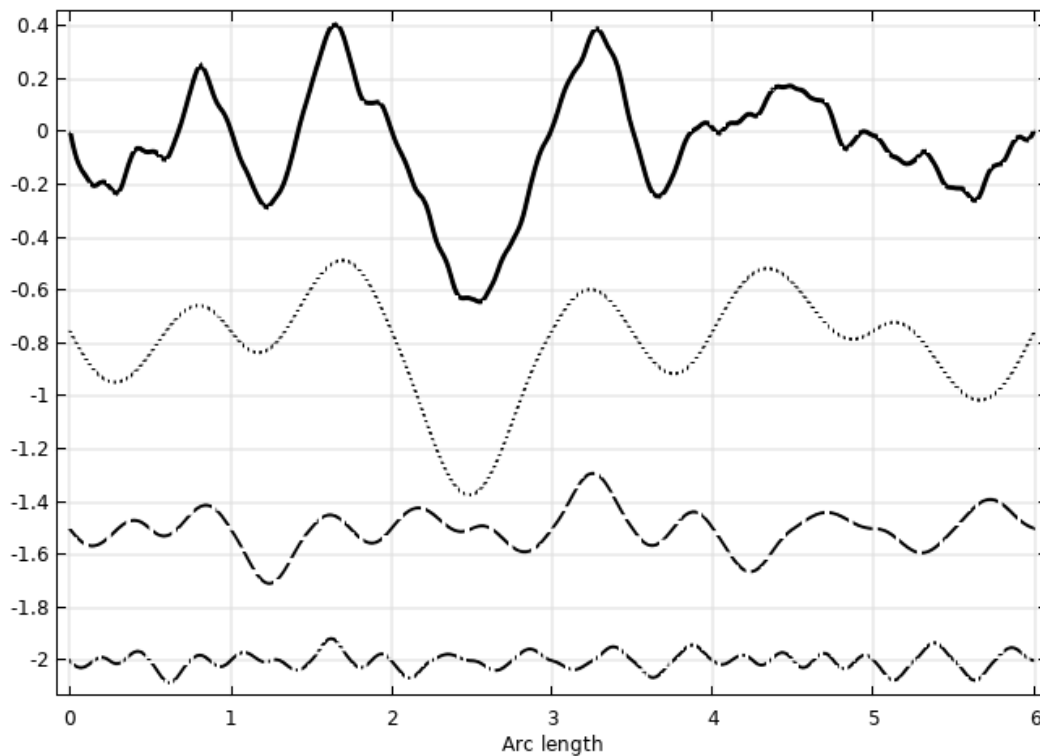
$$z=6*t^5 - 15*t^4 + 10*t^3 \quad , \text{ Όπου, } t>0 \text{ και } t<1 \quad \textbf{(Εξίσωση 4.1)}$$

Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η χρήση οκτάβων και η επαλληλία τους για την δημιουργία μιας επιφάνειας που έχει παραχθεί με θόρυβο Perlin με βάση τις παραπάνω παραμέτρους. Το ύψος της επιφάνειας είναι ανάλογο του χρώματος στην απεικόνιση.

Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζεται η χρήση οκτάβων και ο συμψηφισμός τους για την δημιουργία του θορύβου Perlin. Είναι φανερό πως η πρώτη οκτάβα δίνει μία πιο ομαλή προσέγγιση, ενώ κάθε επόμενη οκτάβα αυξάνει τα επίπεδα θορύβου.



Εικόνα 4.1: Παράδειγμα δημιουργίας θορύβου Perlin για την αναπαράσταση επιφάνειας. Το χρώμα αντιπροσωπεύει τα επίπεδα τραχύτητας με κόκκινο χρώμα να έχουν οι πιο τραχιές επιφάνειες και μπλε χρώμα οι λιγότερο τραχιές.



Εικόνα 4.2: Δημιουργία θορύβου τύπου Perlin. Κάθε κυματική συνάρτηση στο γράφημα αντιπροσωπεύει μια οκτάβα.

4.2 Δημιουργία επιφάνειας στο Comsol

Δημιουργήθηκε 3D επιφάνειας στο Comsol, επιλέγοντας τη χαρακτηριστική συνάρτηση interpolation και εισαγωγή των δεδομένων για κάθε επιφάνεια που έχει δημιουργηθεί με βάση το Perlin noise.

Φορτώθηκε το αρχείο με τον θόρυβο Perlin που δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές Geometry > Build Block με διαστάσεις 6x6x6 (mm).

Συγκεκριμένα, ορίστηκε η επιφάνεια μέσω των εντολών Geometry > Parametric Surface με τις επιπλέον παραμέτρους s1, s2:

First parameter:

- Name: s1
- Minimum: 0
- Maximum 6

Second parameter:

- Name: s2
- Minimum: 0
- Maximum 6

Expressions:

- x: s1
- y: s2
- z: surface_function(s1,s2)

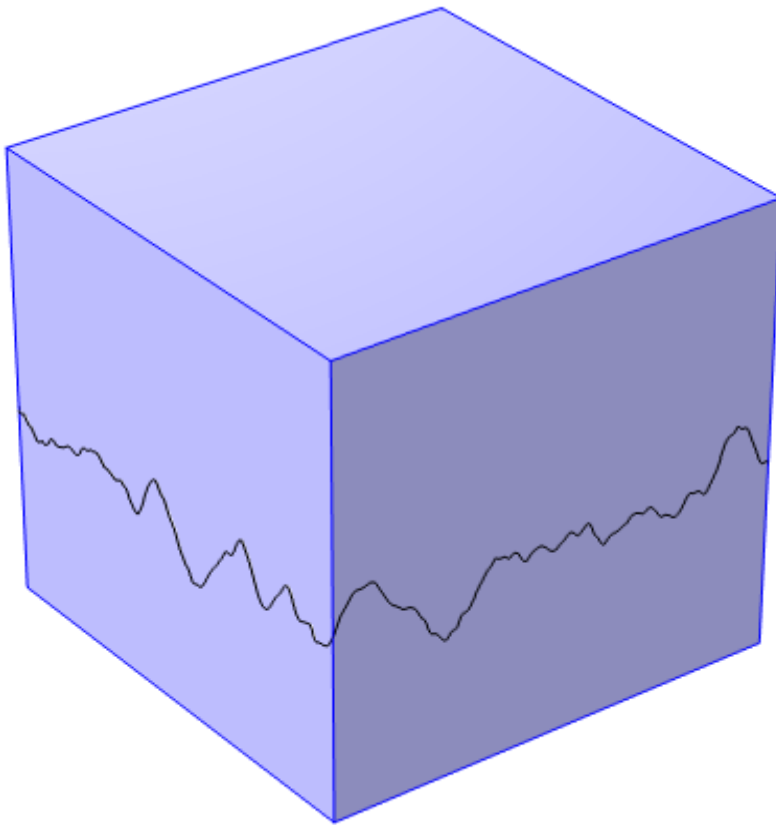
Position:

- x: 0
- y: 0
- z: 6

Relative tolerance: 1E-20

Maximum number of knots: 100

Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά δημιουργήθηκαν κύβοι της μορφής της εικόνας 4.3.



Εικόνα 4.3: Δημιουργία κύβου προς μοντελοποίηση στο Comsol.

Έπειτα χρησιμοποιήθηκε η εντολή Partition Domains για την αφαίρεση του άνω τμήματος και την δημιουργία της επιφάνειας. Η συνάρτηση αυτή επιτρέπει την διαμέριση καμπύλων ή επιφανειών με διάφορους τρόπους.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η εντολή:
Partition Domains και επιλέχθηκε το συνολικό αντικείμενο (blk1)

Και έπειτα η εντολή:
Partition with Faces
Και επιλέχθηκε η γραμμή τομής.

Στο επόμενο βήμα επιλέχθηκαν Geometry > Delete Entries

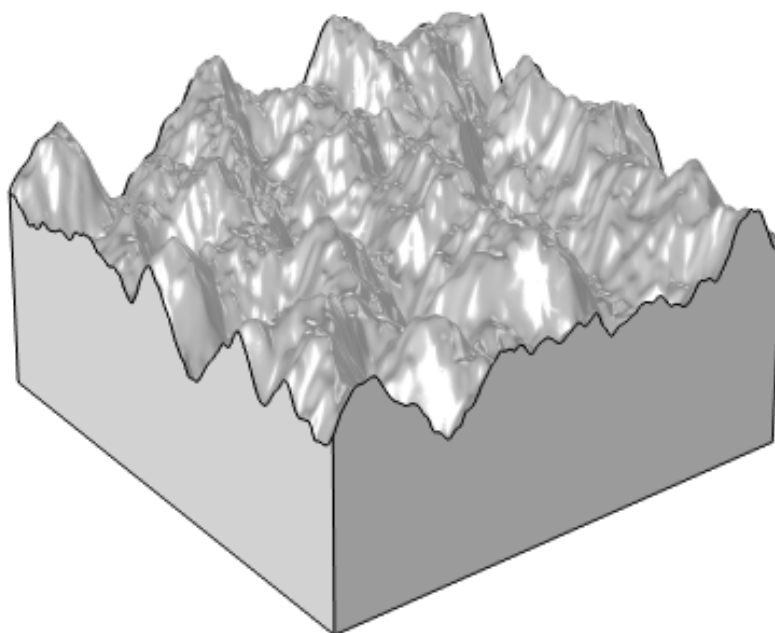
Και επιλέχθηκε:
Geometric entity level: Domain
Το οποίο μας οδήγησε στην επιφάνεια της εικόνας 4.4α.

επίσης, έγινε και Convert To Surface από Geometry > Conversions > Convert to Surface

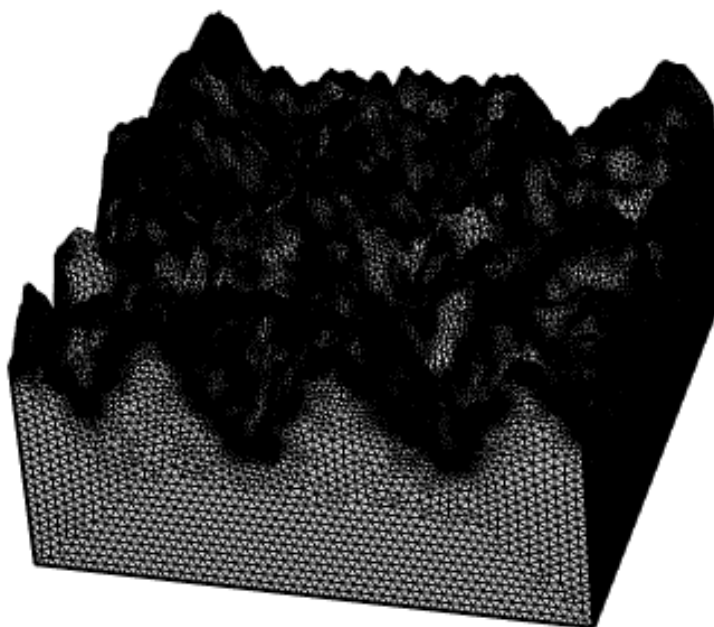
Για υψηλότερη ανάλυση και ακρίβεια κατά την μοντελοποίηση επιλέχθηκε Mesh > Element size > Extremely fine.

Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4β.

A



B



Εικόνα 4.4: Δημιουργία επιφάνειας προς μοντελοποίηση στο Comsol και χρήση πλέγματος υψηλής ακρίβειας κατά την μοντελοποίηση.

4.3 Υπολογισμός μέσης τραχύτητας Ra για κάθε επιφάνεια

Με βάση το θόρυβο Perlin δημιουργήθηκαν επιφάνειες με διαφορετική τραχύτητα και μοντελοποιήθηκε ο χαλκός (Πίνακας 2.1). Συνολικά δημιουργήθηκαν 20 διαφορετικές επιφάνειες οι οποίες έχουν τυχαία τραχύτητα. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής τραχύτητας και πολλαπλασιάστηκαν τα σημεία κάθε επιφάνειας με κατάλληλο συντελεστή ώστε να επιτευχθεί επιφάνεια επιθυμητής τραχύτητας μεταξύ 10 μ m έως 200 μ m.

Η επεξεργασία των πινάκων θορύβου καθώς και ο υπολογισμός της τραχύτητας των επιφανειών υπολογίστηκε στη Python.

Για να υπολογιστεί το Ra, υπολογίστηκε η μέση γραμμή, η οποία υπολογίζεται με την μέθοδο της διχοτόμησης.

Παρατίθενται τμήματα του κώδικα παρακάτω:

Δημιουργήθηκε ένα σύνολο για κάθε τιμή του x-άξονα για να μετρηθεί το Ra:

```
import numpy as np
set_All=set()
for k in DataL:
    set_All.add(round(float(k[0]),6))
```

Για κάθε τιμή του x-άξονα υπολογίστηκε το Ra.

Αρχικές τιμές:

```
ma=max(data);
mi=min(data);
data2=[v+abs(mi) for v in data];
ma2=max(data2);
k=1;
step=ma2/float((2**k));
Rz=step;
sum=0;
n=1;
```

Μέθοδος εύρεσης ελάχιστης τιμής του R_a :

```
average=[]
while n==1:
    sum=0;
    # For every position in x-axis there were 481 values
    for i in range(0,481):
        sum=sum+data2[i]-Rz;
        if sum > 0.0000000001:
            k=k+1;
            Rz=Rz+step;
            step=ma2/float((2**k));
        elif sum < -0.0000000001:
            k=k+1;
            Rz=Rz-step;
            step=ma2/float((2**k));
        else:
            n=0;

    sum=0;
    for i in range(0,481):
        sum=sum+abs(data2[i]-Rz);

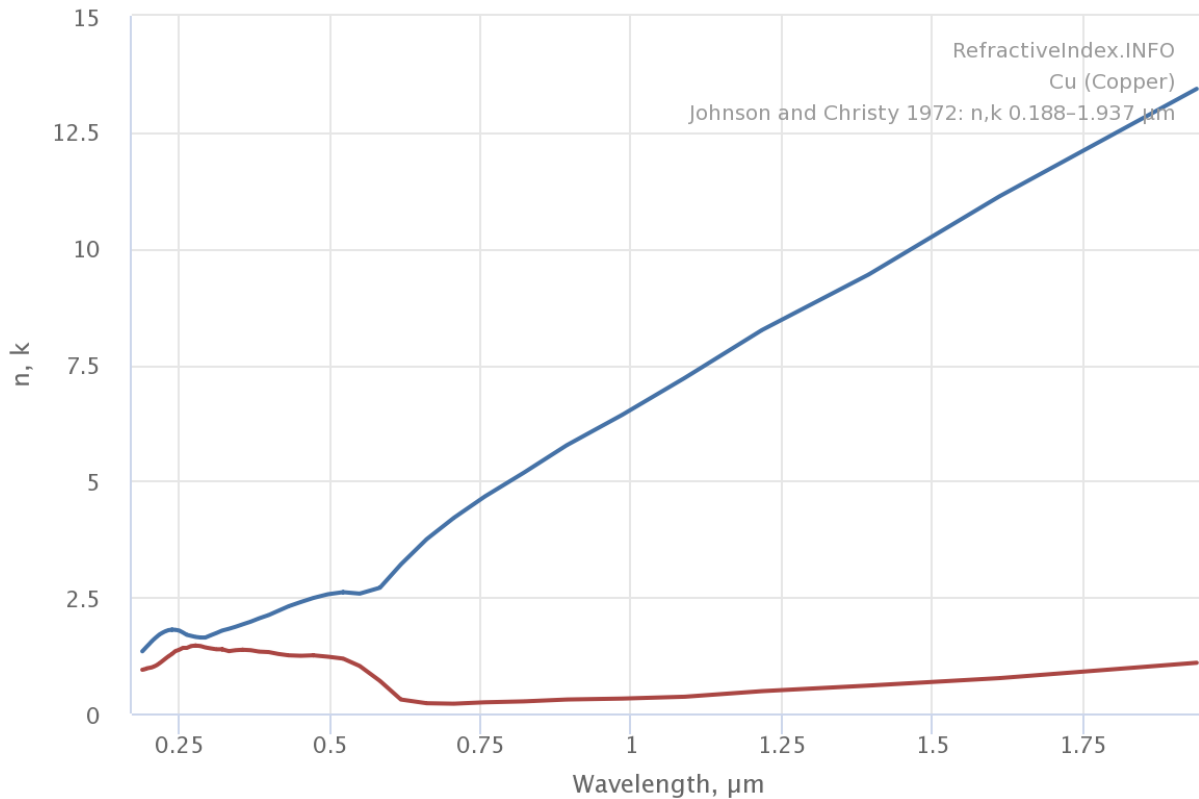
    Ra=sum/481.0
    average+=[Ra]
```

Η τελική τιμή R_a υπολογίστηκε ως:

```
# Average roughness
print(np.mean(average))
```

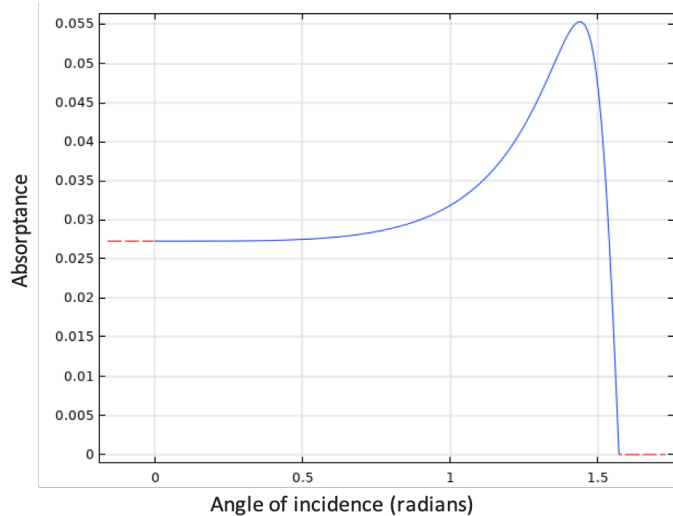
4.4 Μέθοδος ανίχνευσης ακτίνων φωτός

Αρχικά με βάση την βιβλιογραφία υπολογίστηκε ο δείκτης διάθλασης. Για τον χαλκό ο δείκτης διάθλασης υπολογίστηκε από (Johnson and Christy 1972) όπου Refractive index: $n = 1.1978$, Extinction coefficient: $k = 7.0488$. Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του δείκτη διάθλασης για το Αλουμίνιο συνάρτηση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας λέιζερ που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 4.5: Παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη διάθλασης για τον χαλκό συναρτήσει του μήκους κύματος.

Από το Refractive Index και με βάση τις εξισώσεις Fresnel υπολογίστηκε η απορρόφηση για μήκος κύματος $1,175\mu\text{m}$. Η γωνία πρόσπτωσης μετατράπηκε από μοίρες σε radians και ο πίνακας τιμών γωνιών πρόσπτωσης και απορρόφησης μεταφέρθηκαν στο COMSOL Multiphysics.

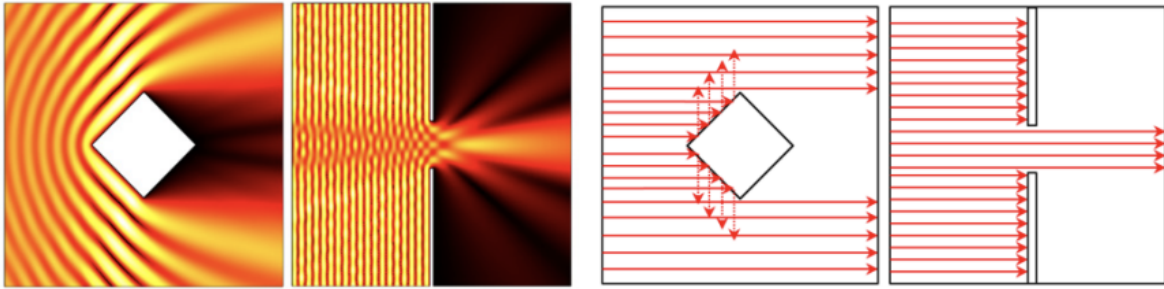


Εικόνα 4.6: Παράδειγμα διαγράμματος απορρόφησης σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης (rad) για χαλκό.

Το Ray Optics Module στο Comsol είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο για τη μοντελοποίηση της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω περιοχών στις οποίες το μήκος κύματος είναι πολύ μικρότερο από οποιαδήποτε γεωμετρική οντότητα. Το Ray Optics Module είναι λογισμικό στο COMSOL Multiphysics που επιτρέπει να μοντελοποιείται η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με μια προσέγγιση ανίχνευσης ακτίνων. Τα κύματα που διαδίδονται αντιμετωπίζονται ως ακτίνες που μπορούν να ανακληθούν, να διαθλαστούν ή να απορροφηθούν.

Αυτή η επεξεργασία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χρησιμοποιεί προσεγγίσεις που είναι κατάλληλες όταν η γεωμετρία είναι μεγάλη σε σύγκριση με το μήκος κύματος, όπως προαναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Δηλαδή λεπτομέρειες της γεωμετρίας της επιφάνειας που μοντελοποιείται είναι αρκετά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που ορίζεται.

Ο συνδυασμός του λογισμικού Ray Optics Module με άλλες συναρτήσεις του COMSOL επιτρέπει την ανίχνευση ακτίνων σε διαφορετικές κλίσεις, θερμοκρασίες και παραμορφωμένες γεωμετρίες, επιτρέποντας ανάλυση δομικής-θερμικής-οπτικής απόδοσης υψηλής πιστότητας σε ένα ενιαίο περιβάλλον προσομοίωσης.



Εικόνα 4.6: Απεικόνιση της μετάδοσης ακτινοβολίας που συναντάει είτε ένα εμπόδιο είτε μία οπή (Comsol Multiphysics: Quick Start and Quick Reference : Version 3.4 2007). Είναι εύκολα αντιληπτό ότι και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζονται τόσο σκοτεινές περιοχές όσο και φωτεινές περιοχές ανάλογα με τον αν περνάει η ακτινοβολία από το μέσο.

Η διάδοση των ακτίνων ελέγχεται από τον δείκτη διάθλασης του μέσου (refractive index) που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.1.

Οι ακτίνες μπορούν να απελευθερωθούν από επιφάνειες, μέσα σε τομείς ή καθορίζοντας ένα σύνολο από συντεταγμένες. Οι ακτίνες μπορούν να διαδοθούν μέσω ομοιογενών ή διαβαθμισμένων μέσων. Οι τροχιές των ανακλώμενων και διαθλασμένων ακτίνων υπολογίζονται στο όριο μεταξύ δύο διαφορετικών μέσων.

Για τη μέθοδο ανίχνευσης ακτίνων φως χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση Geometrical Optics (μέσω Optics > Ray Optics), επιλέχθηκε υλικό για μοντελοποίηση και έπειτα επιλέχθηκαν οι εξής παράμετροι:

- Geometric entity level: Domain
- Selection: Manual
- Geometrical optics > Mirror
- Mirror > Absorption coefficient

Το Mirror επιλέχθηκε καθώς η γωνία πρόσπτωσης θα ισούται με την γωνία ανάκλασης.

Επίσης, στο Geometrical optics επιλέχθηκε το Compute intensity and power.

Στο Ray properties επιλέχθηκαν οι παράμετροι:

- Vacuum wavelength: 1010 [nm]

Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε αυτό το μήκος κύματος είναι επειδή συνηθίζεται σε διάφορα λέιζερ που χρησιμοποιούνται για πειράματα.

Στην συνάρτηση Mirror ο συντελεστής απορρόφησης ορίστηκε με βάση το υλικό (**Εικόνα 4.6**). Για παράδειγμα για το αλουμίνιο ορίστηκε ως: $al(gor.mir1.thetai)$ από τον πίνακα όπως εξηγείται στην ενότητα 4.1. Όπου gor είναι geometrical optics, mir1 είναι mirror 1 και thetai είναι η γωνία πρόσπτωσης για την απορρόφηση (**Εικόνα 4-7, Εικόνα 4.8**).

Για να οριστεί η δέσμη λέιζερ χρησιμοποιήθηκαν: από geometrical optics > release from grid > hexapolar

Center location:

- 0.003(m) [X]
- 0.003(m) [Y]
- 0.005(m) [Z]

Cylinder axis direction:

- 0 [X]
- 0 [Y]
- -1 [Z]

Radius: 2mm

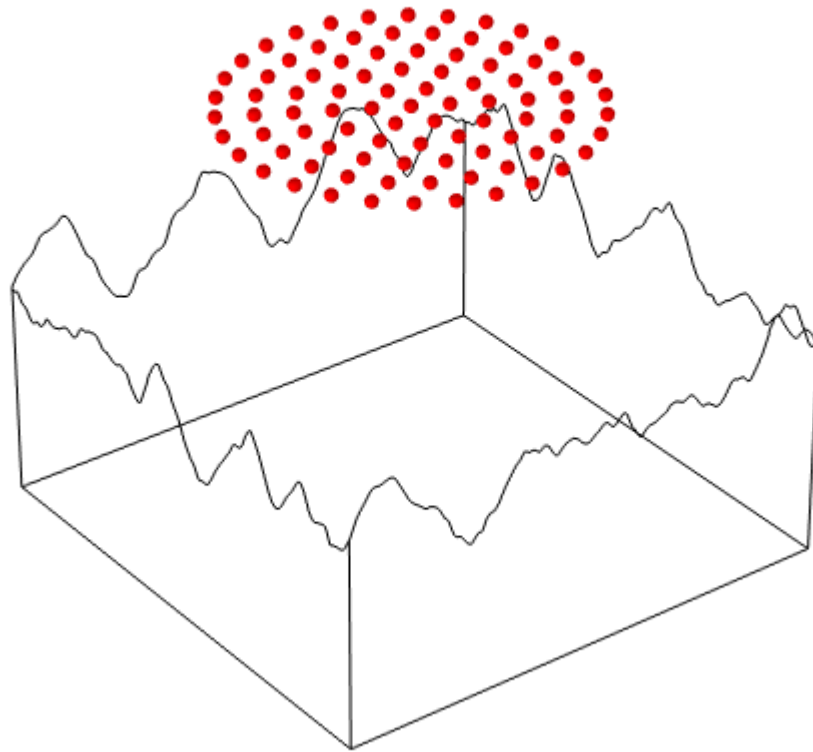
Number of radial positions: 5

Ray direction vector:

- 0
- 0
- -1

Initial Intensity: 1000[W/m²]

Total source power: 100[W]



Εικόνα 4.7: Δημιουργία δέσμης λέιζερ κάθετα προς την επιφάνεια.

Από Mirror επιλέχθηκε το “Deposited Ray Power” το οποίο υπολογίζει την ενέργεια που απορροφήθηκε μέσω της εξίσωσης:

$$Q = \frac{1}{A_j} \sum Q_j \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

Και επιλέχθηκε και από Mesh > Free Tetrahedral > Size

Geometric entity level: **Boundary**

Και element size: calibrate for > predefined: Extra fine

Επίσης επιλέχθηκαν οι εξής παράμετροι:

- Wavelength distribution of released rays: monochromatic
- Maximum number of secondary rays: 500
- Use geometry normals for ray-boundary interactions
- Optical dispersion model: Specify refractive index
- $n_{\text{ext}}=1$
- $k_{\text{ext}}=0$
- Compute optical path length
- Count reflections

Στην συνάρτηση Ray Tracing χρησιμοποιήθηκαν οι εξής παράμετροι:

- Time unit: ps
- Output times: range(0,0.01,1)
- Tolerance: physics controlled
- Stop condition: None

Η απορρόφηση ακτινοβολίας υπολογίστηκε στο Comsol από την επιλογή Derived Values και την επιλογή Surface Integration.

Για τον υπολογισμό της απορρόφησης της ακτινοβολίας για διαφορετικές γωνίες χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

Από την επιλογή Release from grid επιλέχθηκαν:
Ray direction vector: $-\cos(\text{BAng})$

- Από parameters επιλέχθηκε:
Name: ang
- Expression: 60[deg]

Έπειτα στο Release from Grid επιλέχθηκε:

Center location:

- X: $R \cdot \sin(\text{ang}) + 0.003[\text{m}]$
- Y: 0.003[m]
- Z: $R \cdot \cos(\text{ang}) + 0.004[\text{m}]$

Cylinder axis directions:

- $-\sin(\text{ang})$
- 0
- $-\cos(\text{ang})$

Radius:

- $R_c=1\text{mm}$
Number of Radial Positions $N_c: 10$

Ray direction vector:

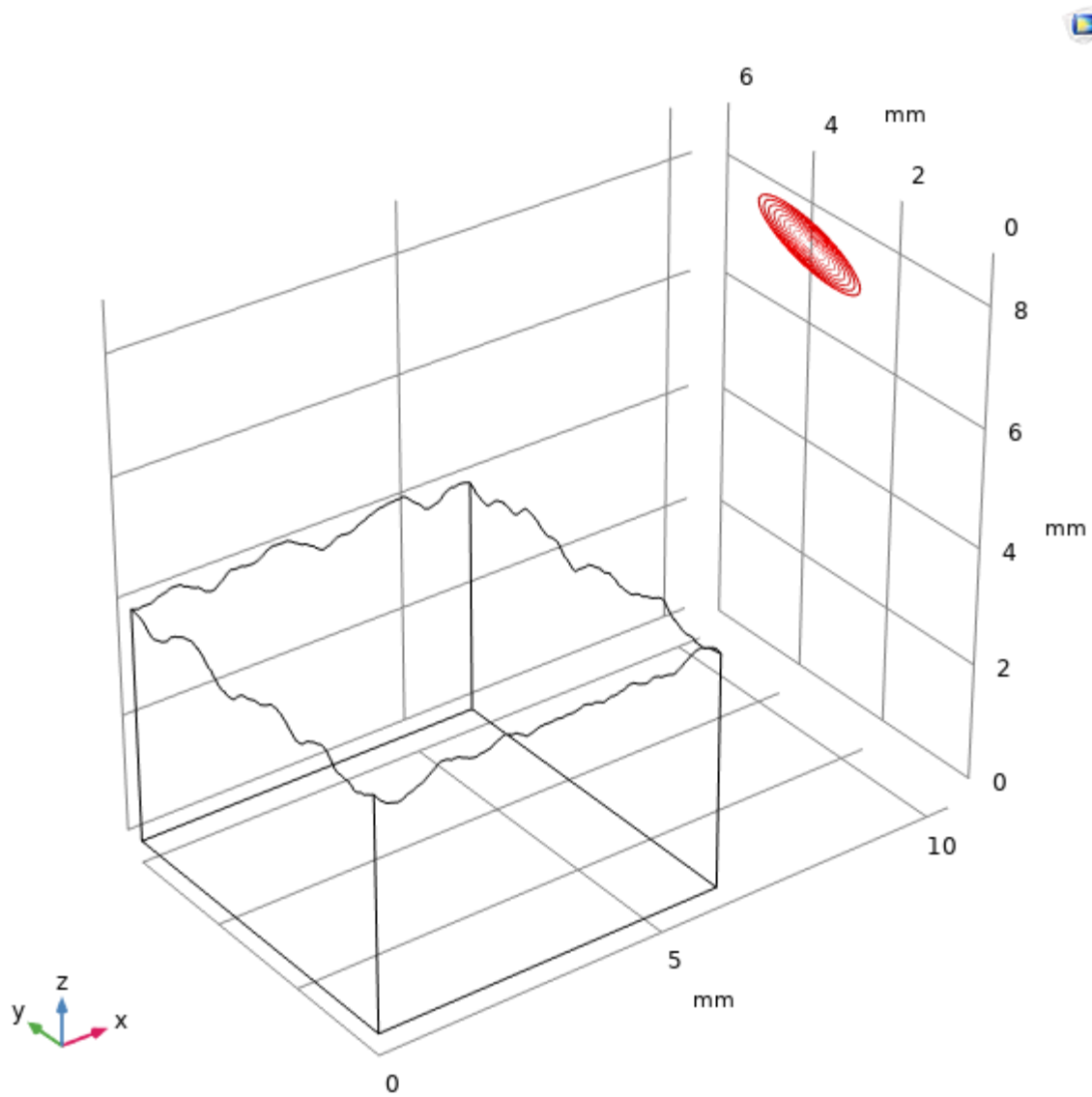
- $X = -\sin(\text{ang})$
- $Y = 0$
- $Z = -\cos(\text{ang})$

Initial intensity (I_0)= 1000W/m^2

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας υπολογίστηκε και ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης. Πιο συγκεκριμένα η γωνία πρόσπτωσης μετρήθηκε για τιμές από -60 μοίρες έως 60 μοίρες με βήμα 10 μοίρες.

Για κάθε μία από αυτές τις γωνίες η απορρόφηση μετρήθηκε όπως παρουσιάστηκε παραπάνω.

Συνοπτικά, η διαδικασία αυτή έγινε μέσω Ray Tracing > Study Extensions > Auxiliary sweep (check), Parameter name: ang και Parameter value list range($-60[\text{deg}], 10[\text{deg}], 60[\text{deg}]$).



Εικόνα 4.8: Δημιουργία δέσμης λέιζερ υπό γωνία στην επιφάνεια.

5. Αποτελέσματα

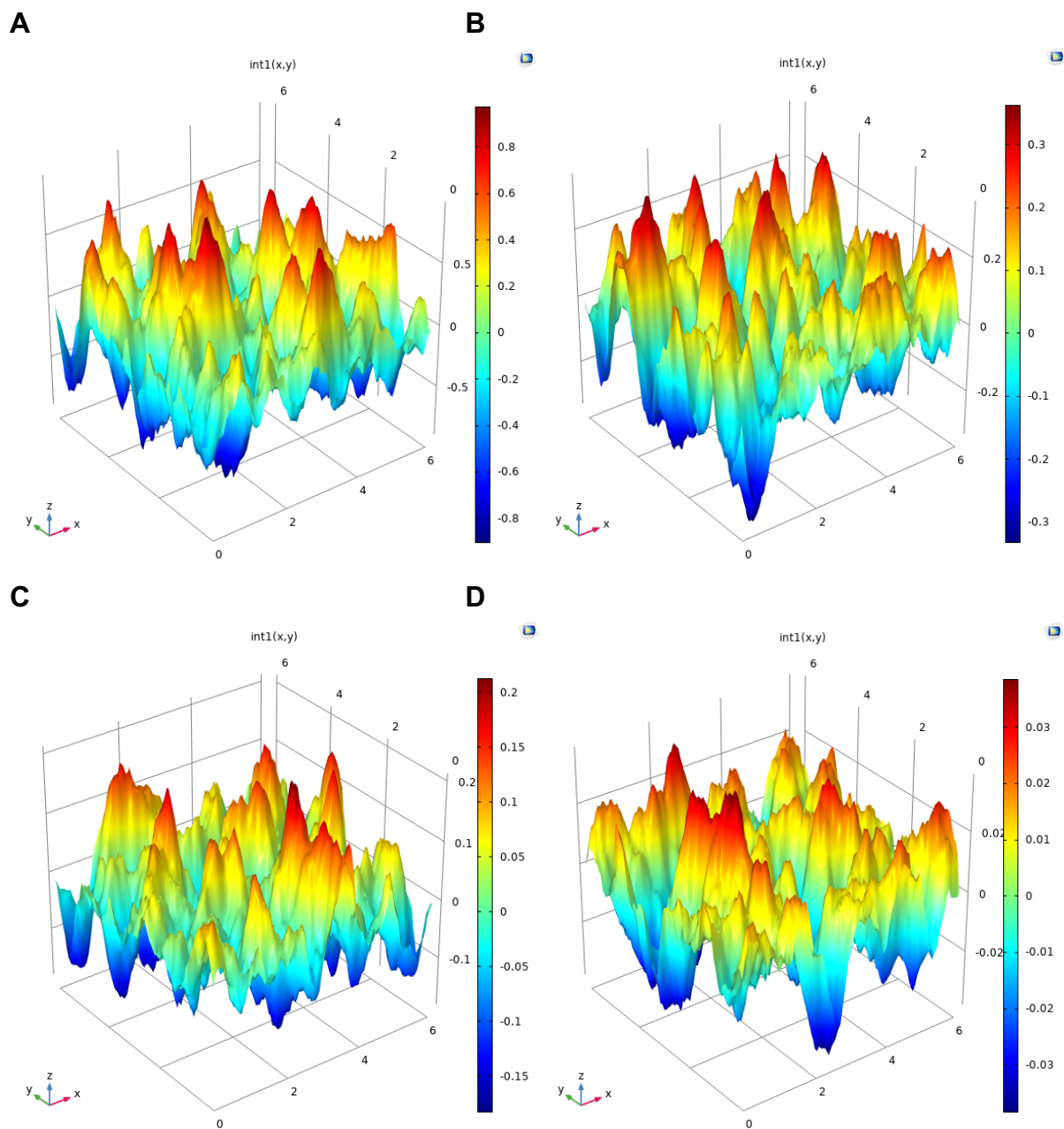
Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τυχαίες επιφάνειες με διαφορετικές τραχύτητες που δημιουργήθηκαν με θόρυβο τύπου Perlin. Επίσης ερευνήθηκε και παρουσιάστηκε η εξάρτηση της απορρόφησης συναρτήσει της επιφάνειας και της γωνίας πρόσπτωσης.

5.1 Ανάλυση της απορρόφησης ακτινοβολίας υπό διαφορετικές γωνίες

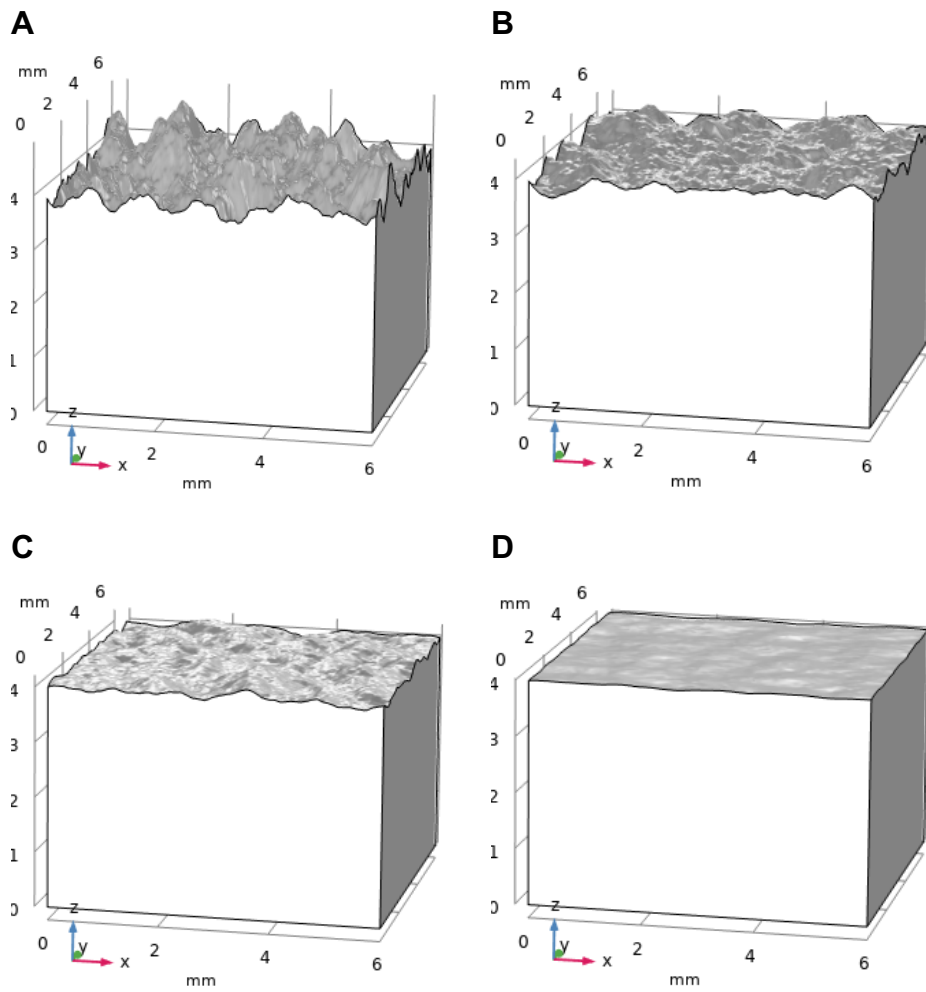
Αρχικά παρήχθησαν επιφάνειες με θόρυβο Perlin, με συντελεστές τραχύτητας μεταξύ 10 μm και 250 μm . Στις εικόνες 5.1-5.2 παρουσιάζονται τέσσερις από τις 20 επιφάνειες που δημιουργήθηκαν, με διαφορετικές τραχύτητες, στις οποίες μοντελοποιήθηκε η απορρόφηση της ακτινοβολίας.

Αφού δημιουργήθηκαν οι επιφάνειες έπειτα προσομοιώθηκε η απορρόφηση δέσμης λέιζερ από κάθε επιφάνεια για γωνία πρόσπτωσης κάθετη στην επιφάνεια. Επίσης ένα παράδειγμα της απορρόφησης ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου από μία επιφάνεια που προσομοιώθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3.

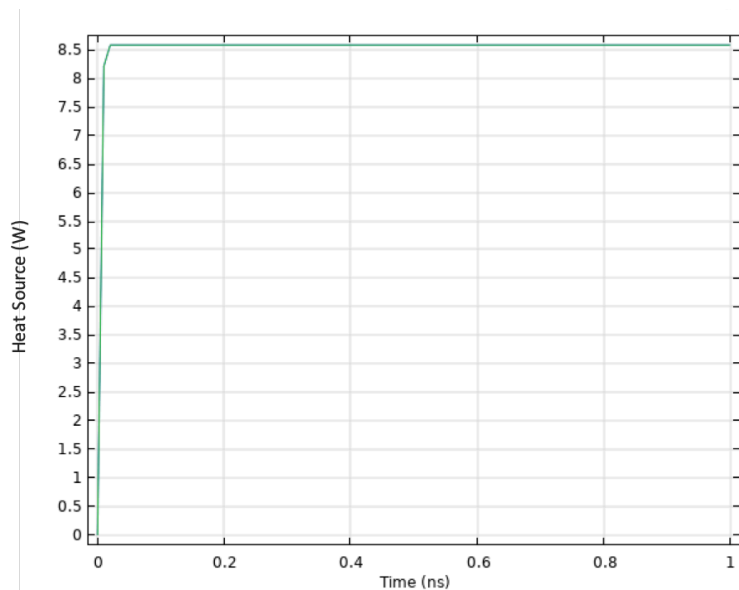
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον. Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε πως για κάθετες γωνίες πρόσπτωσης της ακτινοβολίας η απορρόφηση αυξήθηκε ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας, και επιφάνειες με μεγαλύτερο συντελεστή τραχύτητας απορρόφησαν μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αυτό είναι αποτέλεσμα των πολλαπλών σκεδάσεων της ακτινοβολίας, δηλαδή η δέσμη λέιζερ εγκλωβίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα στις μικροδομές της επιφάνειας. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα που παρατίθενται την Εικόνα 5.4, η απορρόφηση αυξάνεται, για συντελεστή τραχύτητας μεγαλύτερο των 100 μm .



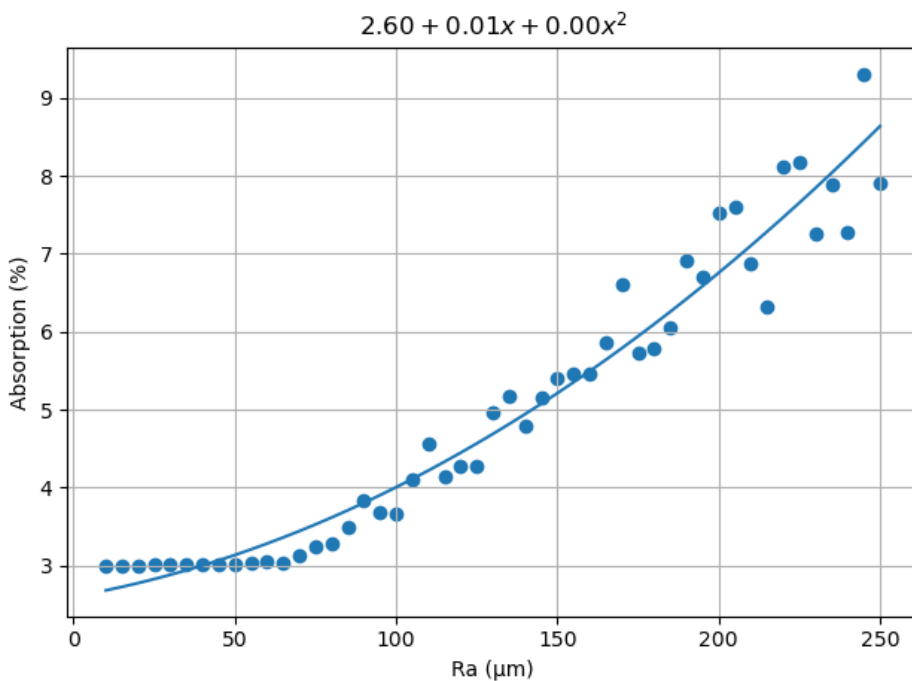
Εικόνα 5.1: Απεικόνιση τεσσάρων επιφανειών με διαφορετικούς συντελεστές τραχύτητας (R_a) κατασκευασμένες με θόρυβο τύπου Perlin. Οι επιφάνειες που παρουσιάζονται έχουν συντελεστές τραχύτητας **A. 250 μm , **B.** 100 μm , **C.** 50 μm και **D.** 10 μm .**



Εικόνα 5.2: Απεικόνιση τεσσάρων επιφανειών με διαφορετικούς συντελεστές τραχύτητας (R_a) κατασκευασμένες με θόρυβο τύπου Perlin. Οι επιφάνειες που παρουσιάζονται έχουν συντελεστές τραχύτητας **A. 250 μm , **B.** 100 μm , **C.** 50 μm και **D.** 10 μm .**



Εικόνα 5.3: Υπολογισμός απορρόφησης ακτινοβολίας από επιφάνεια σε διάστημα ενός nanosecond.



Εικόνα 5.4: Απορρόφηση ακτινοβολίας για διαφορετικά Ra, υπό γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας κάθετη στην επιφάνεια. Η απορρόφηση αυξάνεται μετά από τα 0.10mm ανάλογα με την αύξηση της τραχύτητας ενώ για χαμηλότερες τιμές αυξάνεται πολύ λιγότερο. Ένα πολυωνμικό μοντέλο δευτέρου βαθμού επίσης παρουσιάζεται.

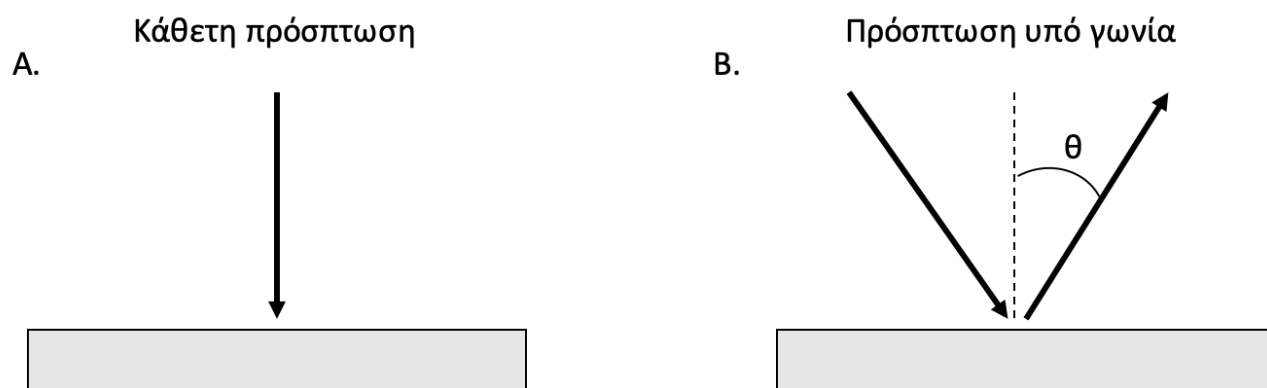
Πίνακας 5.1: Η τραχύτητα μιας επιφάνειας είναι ανάλογη της απορρόφησης ακτινοβολίας (Spearman correlation, p -value<e-50) για κάθετη πρόσπτωση της δέσμης λέιζερ.

Ra (mm)	Copper Absorption (%)
0.01	3.001152078
0.015	3.002439561
0.02	3.004316292
0.025	3.007602297
0.03	3.007831433
0.035	3.01188234
0.04	3.012443049
0.045	3.019364617
0.05	3.020368407
0.055	3.039513654
0.06	3.050367957
0.065	3.039873807
0.07	3.120002824
0.075	3.252055764
0.08	3.290555356
0.085	3.492064993
0.09	3.83901149
0.095	3.689258961
0.10	3.665341534
0.105	4.111107426
0.110	4.563803571
0.115	4.147984573
0.120	4.284655329
0.125	4.274037973
0.130	4.955206629
0.135	5.176021233
0.140	4.79544073
0.145	5.151357723
0.15	5.412368171
0.155	5.458294729
0.160	5.467532623
0.165	5.8690991
0.170	6.599637863
0.175	5.732214105
0.180	5.78605134
0.185	6.060052424
0.190	6.91904895
0.195	6.707692942
0.200	7.519771105
0.205	7.608922618
0.210	6.86547919
0.215	6.320592387
0.220	8.109342235
0.225	8.168561078
0.230	7.265828399
0.235	7.89078508
0.24	7.277750797
0.245	9.309065374
0.25	7.906180302

5.2 Ανάλυση της απορρόφησης ακτινοβολίας υπό διαφορετικές γωνίες

Στην παρακάτω ενότητα μελετήθηκε πως η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια επηρεάζει την απορρόφησή της για διαφορετικές τραχύτητες επιφάνειας (**Εικόνα 5.5**).

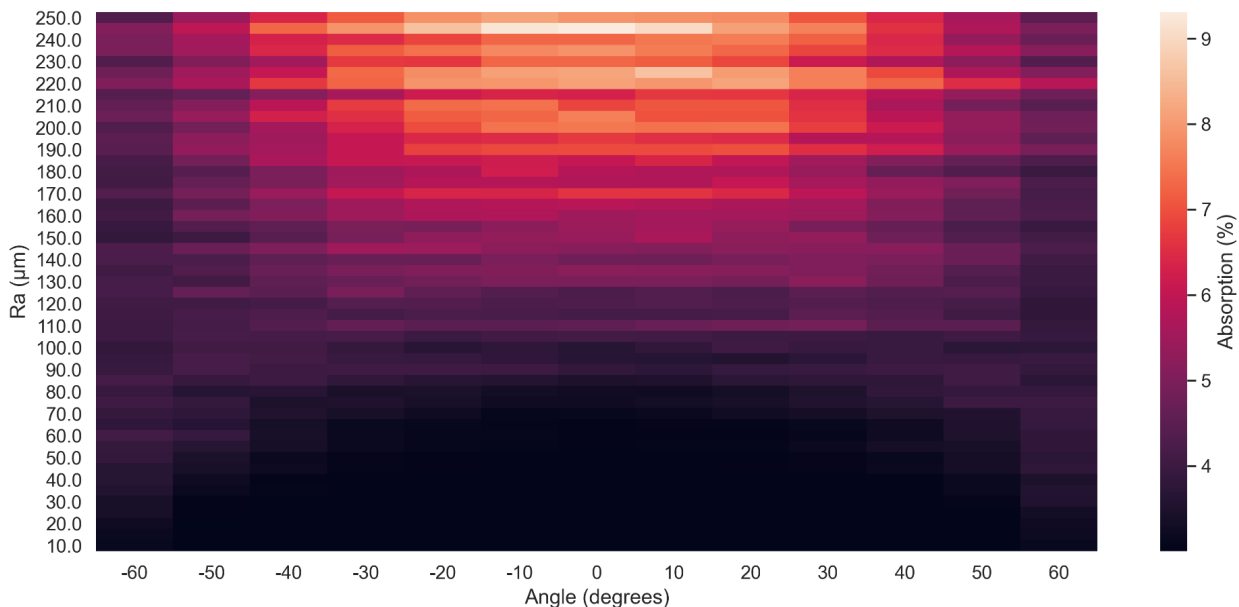
Για κάθε μία από αυτές τις επιφάνειες έγιναν προσομοιώσεις της απορρόφησης δέσμης λέιζερ για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης, ώστε να προσδιοριστεί πως ο συνδυασμός της γωνίας που χρησιμοποιείται και της τραχύτητας της επιφάνειας επηρεάζουν την απορρόφηση.



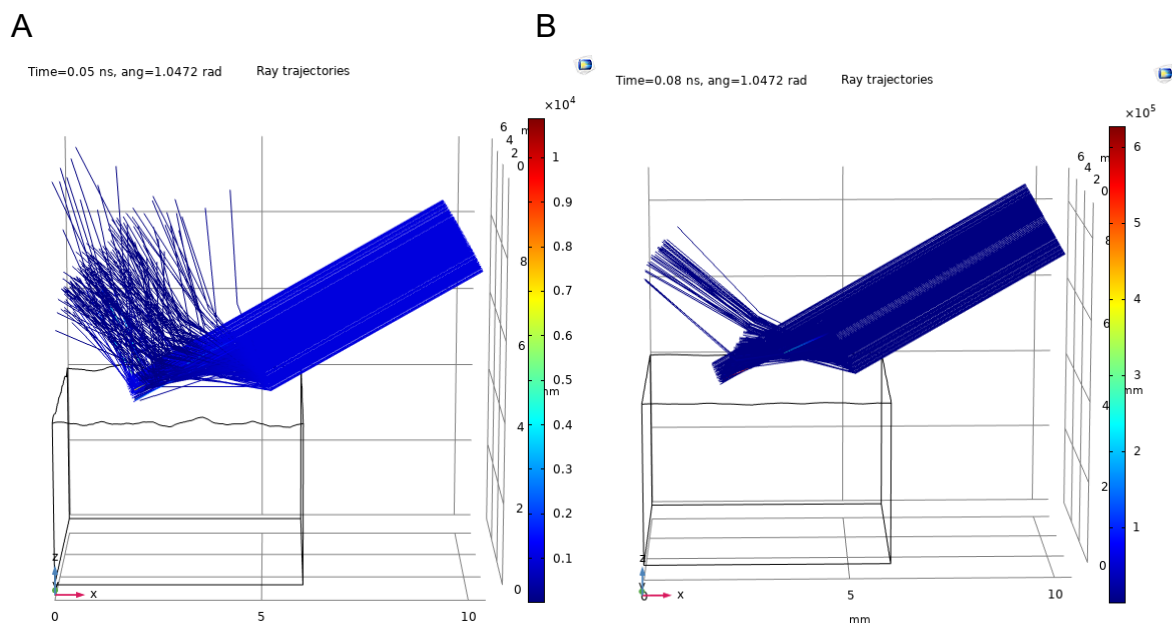
Εικόνα 5.5: Πρόσπτωση ακτινοβολίας A. κάθετα και B. υπό γωνία θ στην επιφάνεια που μελετάται. Η πρόσπτωση ακτινοβολίας υπό γωνία μελετήθηκε για γωνίες μεταξύ -60 και 60 μοίρες από τον κάθετο άξονα, ο οποίος παρουσιάζεται με διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα.

Παρατηρήθηκε πως η απορρόφηση ήταν μέγιστη για γωνίες γύρω από 0 μοίρες δηλαδή κάθετα στην επιφάνεια για μεγάλες τραχύτητες, ενώ για μικρές τραχύτητες η απορρόφηση ήταν μέγιστη για μεγάλες γωνίες (**Εικόνα 5.6-5.8**). Αυτή η διαφορά στην απορρόφηση μεταξύ μικρών και μεγάλων γωνιών εμφανίστηκε μεταξύ $100-150\mu\text{m}$ συντελεστή τραχύτητας (**Εικόνα 5.8**) καθώς για $150\mu\text{m}$ η μέγιστη απορρόφηση ήταν σε κάθετη ακτινοβολία, ενώ για $100\mu\text{m}$ η μέγιστη απορρόφηση παρατηρήθηκε υπό γωνία. Αυτό έγινε ακόμα πιο σαφές για μικρότερες τραχύτητες όπως είναι το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται για συντελεστή τραχύτητας $50\mu\text{m}$ ή και για συντελεστή τραχύτητας $10\mu\text{m}$ (**Εικόνα 5.8**),

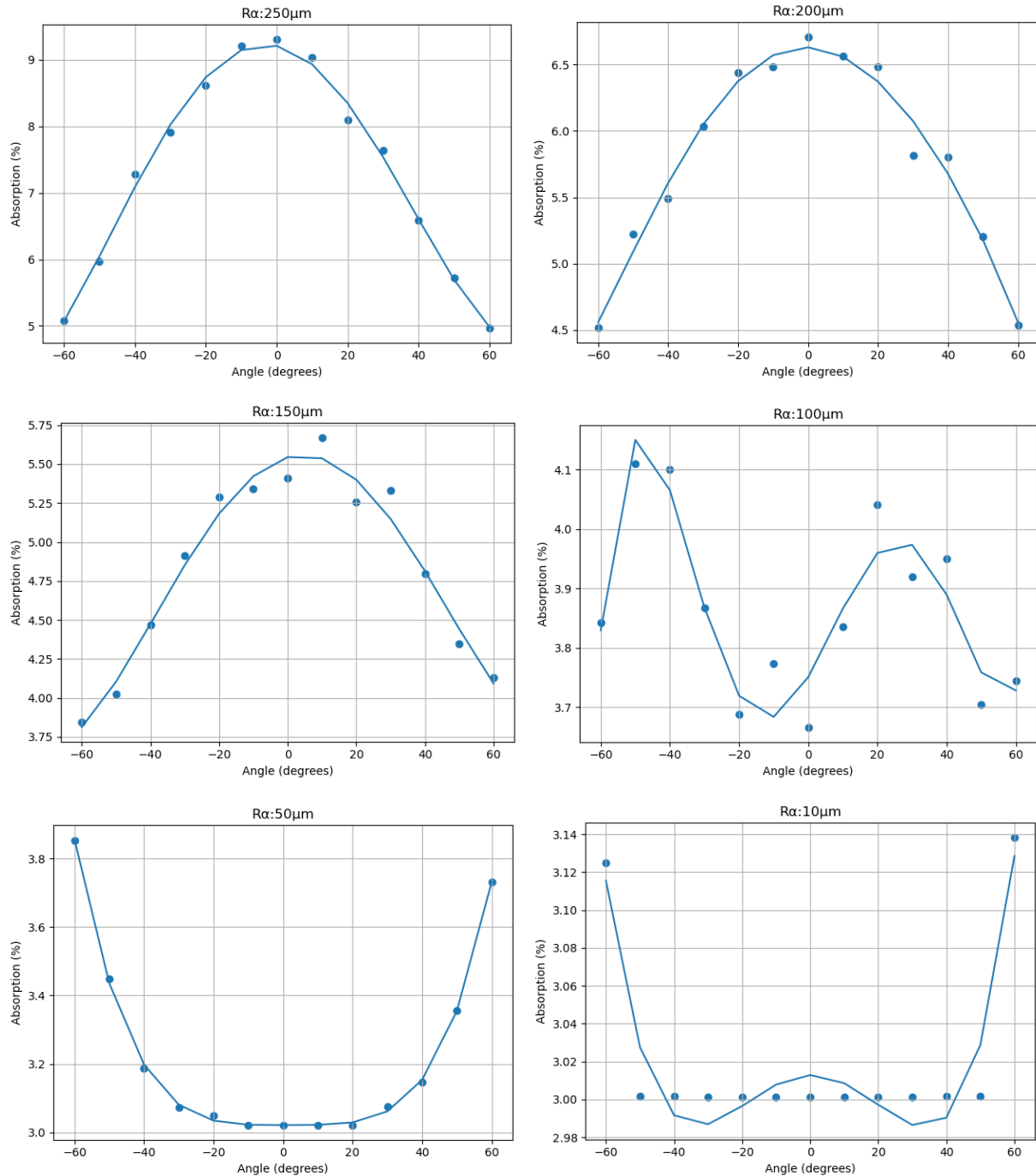
Επίσης τα αποτελέσματα ήταν συμμετρικά μεταξύ -60 και $+60$ μοιρών, δείχνοντας πως η μέθοδος θορύβου Perlin που αξιοποιήθηκε ήταν κατάλληλη για την προσομοίωση της επιφάνειας και δεν παρουσίασε τεχνικά ή μεθοδολογικά σφάλματα.



Εικόνα 5.6: Πρόσπτωση ακτίνας λέιζερ σε διαφορετικές γωνίες μεταξύ -60 και 60 μοίρες και για διαφορετικές επιφάνειες με τραχύτητες μεταξύ 0.01 και 0.25mm .



Εικόνα 5.7: Πρόσπτωση ακτίνας λέιζερ υπό γωνία σε επιφάνειες με συντελεστή τραχύτητας A. $50\mu\text{m}$ και B. $10\mu\text{m}$. Ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας ένα ποσοστό της ακτινοβολίας απορροφάται.



Εικόνα 5.8: Πρόσπτωση ακτίνας λέιζερ σε διαφορετικές γωνίες μεταξύ -60 και 60 μοίρες για επιφάνειες με τραχύτητες 250μm, 200μm, 150μm, 100μm, 50μm και 10μm. Για μεγάλες τραχύτητες η απορρόφηση ήταν μέγιστη για μικρές γωνίες ενώ για επιφάνειες με μικρότερες τραχύτητες η απορρόφηση ήταν μέγιστη για μεγάλες γωνίες.

Πίνακας 5.2: Τιμές πρόσπτωσης ακτίνας λέιζερ σε επιφάνειες με διαφορετικούς συντελεστές τραχύτητας για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.

Angle (radians)	250μm	245μm	240μm	235μm	230μm	225μm	220μm	215μm	210μm	205μm	200μm
-1.047197551	4.329355339	5.074184806	4.967049294	4.956386276	4.329206034	4.761885207	5.043025981	4.390457656	4.618998635	4.735535145	4.314973696
-0.872664626	5.43942352	5.971535629	5.56111401	5.523699438	5.066869488	5.496458586	5.644121728	4.631254003	5.096235601	5.373673233	4.855650926
-0.698131701	6.399117066	7.282609376	6.306272494	6.423325006	5.522042203	6.034795363	6.694007357	5.124499499	5.888124241	6.287068858	5.583736498
-0.523598776	7.131996481	7.911816735	6.487894758	7.165764382	6.700288269	7.336177462	7.249490405	5.595725644	6.735656334	6.565135142	6.339557665
-0.34906585	7.865633549	8.609755485	6.847893512	7.432588321	6.66902315	7.826287124	7.908892314	6.166208824	7.349420039	7.140774488	6.956835328
-0.174532925	8.145579733	9.206741099	7.278190399	7.74320577	7.269162183	8.098280312	7.930298478	6.363262694	7.427067857	7.269063496	7.453163319
0	7.906180302	9.309065374	7.277750797	7.89078508	7.265828399	8.168561078	8.109342235	6.320592387	6.86547919	7.608922618	7.519771105
0.174532925	7.85035987	9.037020717	7.533463089	7.562543886	7.177979224	8.620190262	7.956339215	6.691071297	7.068586165	7.040030021	7.424463028
0.34906585	7.787539074	8.101101983	7.599862403	7.30245165	6.890915228	8.037675736	8.174368645	6.656577662	7.072440124	7.022156658	7.452705379
0.523598776	7.084495384	7.635342226	7.190604881	6.858014437	6.150469111	7.616146938	7.62503852	6.380883107	6.538995795	6.60703288	6.759040737
0.698131701	6.421502611	6.587498322	6.407821581	6.477041486	5.749878983	6.902495987	7.264734722	5.860796505	5.673805106	5.900017285	6.139137684
0.872664626	5.608457155	5.725971673	5.346307799	5.808579981	5.200162904	5.69888502	6.501985168	5.361970363	4.863459325	5.329226483	5.319901663
1.047197551	4.520369148	4.966042914	4.719043427	5.163051597	4.375652793	5.088710135	5.857089797	4.778607254	4.441349961	4.797371703	4.835955096

Angle (radians)	195μm	190μm	185μm	180μm	175μm	170μm	165μm	160μm	155μm
-1.047197551	4.517496092	4.439629676	4.184290672	4.118523691	4.086221696	4.333272967	4.013643601	4.105776106	3.929391543
-0.872664626	5.224220478	5.297408935	4.872814781	4.42881114	4.646125813	4.884864226	4.527070107	4.887022689	4.3787802
-0.698131701	5.490709407	5.578329679	5.669205074	4.952703606	4.977420917	5.395627038	5.006005665	5.069522913	4.571967789
-0.523598776	6.035866892	6.077590313	6.067559049	5.495180012	5.518199857	6.079523365	5.497884846	5.502069305	4.977777644
-0.34906585	6.438577686	6.803372657	6.088560468	5.690150177	5.818765355	6.396490799	5.712386655	5.703810316	4.921583509
-0.174532925	6.481446786	6.917709167	6.197801638	6.214531691	5.787457071	6.371429569	5.824041907	5.729842915	5.225660409
0	6.707692942	6.91904895	6.060052424	5.78605134	5.732214105	6.599637863	5.8690991	5.467532623	5.458294729
0.174532925	6.562013206	6.92990403	6.352281759	5.757689837	5.740805971	6.612506896	5.77715825	5.582119254	5.547898302
0.34906585	6.485396895	6.995419748	6.006161059	5.756578943	6.033304699	6.430377537	5.652385103	5.542903389	5.367773665
0.523598776	5.814234312	6.542375545	5.538683335	5.39615192	5.610326652	5.911036223	5.549623944	5.468082426	4.945564
0.698131701	5.804057759	6.209818972	5.095552332	4.652133879	5.3142725	5.434148936	5.051243688	5.117080196	4.667411353
0.872664626	5.203575879	5.411000322	4.633460287	4.310102358	5.041739052	4.837375946	4.54016953	4.541007555	4.236856713
1.047197551	4.536766826	4.916206196	4.299860081	3.985788081	4.263169812	4.175710256	4.215594198	4.276836953	3.947600233

Angle (radians)	150μm	145μm	140μm	135μm	130μm	125μm	120μm	115μm	110μm	105μm	100μm
-1.047197551	3.84706359	4.274243446	4.236894612	4.08114369	4.162717812	4.160323381	4.065226884	4.051892269	4.01787256	3.988499418	3.842033135
-0.872664626	4.023807845	4.722697835	4.247968953	4.324810951	4.093704923	4.63632552	4.085166198	4.189159125	4.137884569	4.176967175	4.109568431
-0.698131701	4.466577048	4.997150203	4.543442041	4.698784876	4.550305158	4.48959756	4.140922062	4.2938514	4.377603009	4.135693151	4.100175268
-0.523598776	4.910916885	5.489718562	4.696695328	4.934201195	4.678209096	4.93866908	4.400953774	4.141231766	4.618586676	4.193947854	3.866865012
-0.34906585	5.289017788	5.458110085	4.695685779	5.025481122	4.836934657	4.576668814	4.370460154	4.244421306	4.50396646	3.984262864	3.687241332
-0.174532925	5.338951447	5.210161099	4.951183148	5.049490315	4.957126946	4.378455707	4.262074273	4.219900587	4.480655484	4.095654154	3.77300752
0	5.412368171	5.151357723	4.79544073	5.176021233	4.955206629	4.274037973	4.284655329	4.147984573	4.563803571	4.111107426	3.665341534
0.174532925	5.669517305	5.073183571	4.753221744	5.14764459	4.951942347	4.353241712	4.331996339	4.148233688	4.687540807	4.108749147	3.834980814
0.34906585	5.258975311	5.176094786	4.940825436	5.140641574	4.891975643	4.252708166	4.294929579	4.206079094	4.75988291	4.01138425	4.040755338
0.523598776	5.328339936	5.162206613	5.032401292	5.028773464	5.176880068	4.496788398	4.359066152	4.526471709	4.853418788	4.022253291	3.919618864
0.698131701	4.798422552	5.146714655	4.962915246	4.839768381	4.77272409	4.34285	4.288419673	4.364105669	4.480748744	3.937828849	3.949904477
0.872664626	4.344553765	4.715854378	4.719337973	4.385910801	4.271509244	4.421264227	4.160846745	4.064270671	4.49076448	4.0586476	3.704351529
1.047197551	4.132081019	4.239432523	4.081584451	3.970312297	3.976177869	3.922113972	3.803599525	3.805457033	3.887167727	3.895459389	3.744264156

Angle (radians)	95μm	90μm	85μm	80μm	75μm	70μm	65μm	60μm	55μm	50μm
- 1.047197 551	3.891388 531	3.940418 491	4.158901 386	3.917562 813	4.042323 582	3.886336 489	3.775549 272	4.134155 562	3.866965 416	3.852412 266
- 0.872664 626	4.201835 909	4.180020 67	3.926899 256	3.621233 782	3.865756 874	3.776153 11	3.620187 721	3.892185 637	3.647716 045	3.447538 568
- 0.698131 701	4.115859 759	4.033766 161	4.014258 628	3.690309 777	3.489019 915	3.566424 925	3.387536 09	3.416353 32	3.390001 192	3.187135 165
- 0.523598 776	3.939934 95	4.056278 973	3.834920 279	3.442151 834	3.525432 07	3.409287 434	3.194965 357	3.153069 33	3.195441 122	3.072571 94
- 0.349065 85	3.911094 19	4.039479 076	3.689824 038	3.468462 495	3.415248 652	3.256277 508	3.105196 945	3.085569 29	3.075101 143	3.048296 857
- 0.174532 925	3.809359 733	4.015740 291	3.599938 364	3.297337 74	3.251425 184	3.087209 535	3.065130 295	3.094132 224	3.050980 555	3.020952 301
0	3.689258 961	3.839011 49	3.492064 993	3.290555 356	3.252055 764	3.120002 824	3.039873 807	3.050367 957	3.039513 654	3.020368 407
0.174532 925	3.635236 68	3.747901 782	3.542876 763	3.260876 222	3.314453 941	3.167486 846	3.054006 114	3.047013 845	3.068877 161	3.020363 427
0.349065 85	3.586172	3.908101 953	3.714006 98	3.338371 905	3.417264 658	3.274018 225	3.074886 881	3.047469 651	3.069426 527	3.020197 023
0.523598 776	3.735319 555	3.960973 902	3.785348 799	3.510979 705	3.567021 204	3.365289 507	3.135095 697	3.096445 75	3.157877 998	3.075039 981
0.698131 701	3.957633 768	4.022727 466	3.781691 888	3.825289 883	3.661462 379	3.495687 816	3.261219 6	3.229718 713	3.361401 065	3.146973 271
0.872664 626	3.934762 816	4.062712 514	4.065909 193	3.880533 078	4.012068 599	3.563565 887	3.524055 794	3.511563 278	3.414446 942	3.355688 819
1.047197 551	3.961807 4	3.874596 303	3.721183 517	3.869155 379	4.017584 621	3.917287 102	3.905094 135	3.789790 348	3.805116 774	3.731630 129

Angle (radians)	45μm	40μm	35μm	30μm	25μm	20μm	15μm	10μm
- 1.04719755 1	3.64552785 2	3.64896726 1	3.57278590 3	3.40688117 9	3.40202072 5	3.26332704 9	3.16475880 5	3.12499210 8
- 0.87266462 6	3.41010500 3	3.23173435 1	3.15426301 7	3.04956988 4	3.03161750 6	3.00420198 8	3.00272725 1	3.00180457 2
- 0.69813170 1	3.21611073 5	3.04146155 4	3.06205689 6	3.00781925 3	3.00744764 4	3.00425061 6	3.00266959 9	3.00153376 5
- 0.52359877 6	3.05471041 2	3.03888919 9	3.01196234 9	3.00791898 9	3.00730515 9	3.00430927 1	3.00253568 1	3.00129517 5
- 0.34906585 3	3.04245843 3	3.01252415 5	3.01203404 2	3.00805550 2	3.00771760 7	3.00429985 5	3.00247831 7	3.00120257 5
- 0.17453292 5	3.01913836 2	3.01244831 4	3.01208572 9	3.00771630 1	3.00743885 9	3.00432296 2	3.00243174 2	3.00116973 3
0	3.01936461 7	3.01244304 9	3.01188234 3	3.00783143 3	3.00760229 7	3.00431629 2	3.00243956 1	3.00115207 8
0.17453292 5	3.01916209 6	3.01247927 7	3.01219745 9	3.00771868 8	3.00745307 6	3.00437358 7	3.00242321 9	3.00116802 6
0.34906585 9	3.02823943 9	3.01280836 1	3.01206179 2	3.00787085 6	3.00759473 8	3.00420754 1	3.00247809 9	3.00122678 1
0.52359877 6	3.06870259 4	3.02179518 4	3.01160247 6	3.00795833 6	3.00719325 5	3.00434370 2	3.00259368 9	3.00128847 6
0.69813170 1	3.18524298 3	3.02987431 7	3.01177631 4	3.00805331 7	3.00747855 5	3.00432559 6	3.00258841 2	3.00152265 1
0.87266462 6	3.35999220 8	3.16451876 4	3.16751604 6	3.05345282 1	3.02388653 4	3.01337511 9	3.00273587 6	3.00176100 8
1.04719755 1	3.77012925 7	3.48956075 8	3.58611688 2	3.54979814 1	3.30321499 1	3.24758668 9	3.20156638 5	3.13843182 4

6. Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία ερευνήθηκε η χρήση του θορύβου τύπου Perlin για την προσομοίωση της απορρόφησης ακτινοβολίας δέσμης laser από επιφάνειες με διαφορετικές τραχύτητες. Οι επιφάνειες δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας τον θόρυβο Perlin, ο οποίος παρουσιάζει πολλαπλά πλεονεκτήματα όπως η ομοιομορφία, ότι είναι μη περιοδικός θόρυβος και ότι δεν παρουσιάζει ξαφνικά άλματα, τα οποία δε θα ήταν ρεαλιστικά.

Για να προσομοιωθεί η τραχύτητα κάθε επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής Ra, ο αλγόριθμος υπολογισμού του οποίου γράφτηκε με κώδικα Python, και ο οποίος παρατίθεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης κατά την εργασία αυτή ο υπολογισμός της θεωρητικής απορρόφησης έγινε με χρήση των εξισώσεων Fresnel. Για τον υπολογισμό των πολλαπλών σκεδάσεων δέσμης laser έγινε χρήση της μεθόδου Ray tracing. Μέσω των προσομοιώσεων και της μοντελοποίησης εξήχθησαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα.

Παρατηρήθηκε ότι οι επιφάνειες που δημιουργήθηκαν με θόρυβο τύπου Perlin μπόρεσαν να προσομοιώσουν ρεαλιστικά διαφορετικές τραχύτητες επιφανειών χαλκού, οι οποίες στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για εκτίμηση του συντελεστή απορρόφησης. Διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό απορρόφησης της ακτινοβολίας επηρεάζεται σημαντικά από την τραχύτητα της επιφάνειας. Συγκεκριμένα, για τραχύτητες $Ra > 100\mu m$ το ποσοστό απορρόφησης φαίνεται να αυξάνεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει της τραχύτητας. **(Πίνακας 4.1).**

Σημαντικός παράγοντας για την απορρόφηση ακτινοβολίας είναι επίσης η γωνία πρόσπτωσης. Εδώ προσομοιώθηκε ένα φάσμα γωνιών πρόσπτωσης από -60 μοίρες έως 60 μοίρες. Για μικρές τραχύτητες η απορρόφηση ήταν μέγιστη για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης ενώ για μεγάλες τραχύτητες η κάθετη γωνία πρόσπτωσης είχε την μέγιστη απορρόφηση. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση ότι για χαμηλές τιμές του συντελεστή τραχύτητας Ra, η απορρόφηση παρουσιάζει μικρές ποσοστιαίες διαφορές ενώ όσο αυξάνεται το Ra τόσο αυξάνεται και η αβεβαιότητα σε σχέση με τη μέση γραμμή **(Εικόνα 5.8).**

Είναι σημαντικό πως η προσομοίωση σε αρνητικές και θετικές γωνίες παρουσιάζει συμμετρία **(Εικόνα 5.6, Εικόνα 5.8)**, γεγονός που υποδηλώνει την καταλληλότητα της μεθόδου Perlin noise για την προσομοίωση επιφανειών σε κατεργασίες με λέιζερ, καθώς δεν παρουσιάζονται τεχνικά προβλήματα όπως ασυμμετρία μεταξύ θετικών και αρνητικών γωνιών.

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα συμπεράναμε πως μπορεί να δημιουργηθεί μια αδιάστατη εξίσωση για κάθε υλικό που να επιτρέπει τον γρήγορο υπολογισμό της απορρόφησης συναρτήσει των οπτικών ιδιοτήτων του υλικού και της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας για κάθε τραχύτητα. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην δημιουργία μιας αδιάστατης εξίσωσης τέτοιου τύπου που να επιτρέπει σε ερευνητές να μοντελοποιήσουν το υλικό που τους ενδιαφέρει και στη γωνία πρόσπτωσης που επιθυμούν χωρίς να χρειάζεται να επαναλάβουν όλη την μεθοδολογία, διευκολύνοντας έτσι την ανάπτυξη πληρέστερων και ρεαλιστικότερων μοντέλων.

Βιβλιογραφία

- Abazari, Hamed Delfan, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi, Mohammad Hoseinpour Gollo, and Young Hoon Moon. 2017. "Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of SUS430/C11000/SUS430 Composites during the Laser-Forming Process." *Metals and Materials International*. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-7053-6>.
- Anderson, Mark, Rahul Patwa, and Yung C. Shin. 2006. "Laser-Assisted Machining of Inconel 718 with an Economic Analysis." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.11.005>.
- Astakhov, Viktor P., and Jose Outeiro. 2019. "Importance of Temperature in Metal Cutting and Its Proper Measurement/Modeling." *Materials Forming, Machining and Tribology*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03822-9_1.
- Auinger, M., P. Ebbinghaus, A. Blümich, and A. Erbe. 2014. "Effect of Surface Roughness on Optical Heating of Metals." *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*. <https://doi.org/10.2971/jeos.2014.14004>.
- Batal, Afif, Rachel Sammons, and Stefan Dimov. 2019. "Response of Saos-2 Osteoblast-like Cells to Laser Surface Texturing, Sandblasting and Hydroxyapatite Coating on CoCrMo Alloy Surfaces." *Materials Science & Engineering. C, Materials for Biological Applications* 98 (May): 1005–13.
- Bennett, H. E., J. M. Bennett, E. J. Ashley, and R. J. Motyka. 1968. "Verification of the Anomalous-Skin-Effect Theory for Silver in the Infrared." *Physical Review*. <https://doi.org/10.1103/physrev.165.755>.
- Bergström, David. 2008. *The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces*.
- Birnbaum, Milton. 1965. "Semiconductor Surface Damage Produced by Ruby Lasers." *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.1703071>.
- Bridson, Robert. 2008. *Fluid Simulation for Computer Graphics*. CRC Press.
- Comsol Multiphysics: Quick Start and Quick Reference : Version 3.4*. 2007.
- Cunha, Alexandre, Omar Farouk Zouani, Laurent Plawinski, Ana Maria Botelho do Rego, Amélia Almeida, Rui Vilar, and Marie-Christine Durrieu. 2015. "Human Mesenchymal Stem Cell Behavior on Femtosecond Laser-Textured Ti-6Al-4V Surfaces." *Nanomedicine* 10 (5): 725–39.
- Dandekar, Chinmaya R., and Yung C. Shin. 2009. "Laser-Assisted Machining of a Fiber Reinforced Metal Matrix Composite." *ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 2*. <https://doi.org/10.1115/msec2009-84013>.
- Davidrajuh, Reggie, Bozena Skolud, and Damian Krenczyk. 2018. "Performance Evaluation of Discrete Event Systems with GPenSIM." *Computers*. <https://doi.org/10.3390/computers7010008>.
- Dong, Xiangyang, and Yung C. Shin. 2017. "Improved Machinability of SiC/SiC Ceramic Matrix Composite via Laser-Assisted Micromachining." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9415-5>.
- Dudzinski, Daniel, Alain Molinari, and H. Schulz. 2002. *Metal Cutting and High Speed Machining*. Springer.
- Ebert, David S. 2003. *Texturing & Modeling: A Procedural Approach*. Morgan Kaufmann.
- Feng, Yixuan, Tsung-Pin Hung, Yu-Ting Lu, Yu-Fu Lin, Fu-Chuan Hsu, Chiu-Feng Lin, Ying-Cheng Lu, and Steven Y. Liang. 2019. "Residual Stress Prediction in Laser-Assisted Milling Considering Recrystallization Effects." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3207-z>.
- Hedberg, G. K., Y. C. Shin, and L. Xu. 2015. "Laser-Assisted Milling of Ti-6Al-4V with the Consideration of Surface Integrity." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6942-4>.
- Hipp, Dominik, Achim Mahrle, and Eckhard Beyer. 2019. "Beyond Fresnel: Absorption of Fibre

Laser Radiation on Rough Stainless Steel Surfaces.” *Journal of Physics D: Applied Physics*. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab2415>.

Indhu, R., V. Vivek, L. Sarathkumar, A. Bharatish, and S. Soundarapandian. 2018. “Overview of Laser Absorptivity Measurement Techniques for Material Processing.” *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. <https://doi.org/10.1007/s40516-018-0075-1>.

Ito, Yusuke, Toru Kizaki, Rin Shinomoto, Masateru Ueki, Naohiko Sugita, and Mamoru Mitsuishi. 2017. “High-Efficiency and Precision Cutting of Glass by Selective Laser-Assisted Milling.” *Precision Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.10.005>.

Jahan, M. P. 2015. *Electrical Discharge Machining (EDM): Types, Technologies and Applications*.

Jeon, Yongho, and Frank Pfefferkorn. 2005. “Effect of Laser Preheating the Workpiece on Micro-End Milling of Metals.” *Manufacturing Engineering and Materials Handling, Parts A and B*. <https://doi.org/10.1115/imece2005-80480>.

Johnson, P. B., and R. W. Christy. 1972. “Optical Constants of the Noble Metals.” *Physical Review B*. <https://doi.org/10.1103/physrevb.6.4370>.

Lee, Hyub, Chin Huat Joel Lim, Mun Ji Low, Nicholas Tham, Vadakke Matham Murukeshan, and Young-Jin Kim. 2017. “Lasers in Additive Manufacturing: A Review.” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0037-7>.

Li, Hua, Huamin Yang, Jianping Zhao, Chunyi Chen, and Fei Hao. 2018. “Simulation of Water Surface Using Current Consumer-Level Graphics Hardware.” *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6454-y>.

Li, Jia-Sheng, Yong Tang, Zong-Tao Li, Xin-Rui Ding, and Zhi Li. 2017. “Study on the Optical Performance of Thin-Film Light-Emitting Diodes Using Fractal Micro-Roughness Surface Model.” *Applied Surface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.041>.

Ma, Dan, Vikas Gulani, Nicole Seiberlich, Kecheng Liu, Jeffrey L. Sunshine, Jeffrey L. Duerk, and Mark A. Griswold. 2013. “Magnetic Resonance Fingerprinting.” *Nature* 495 (7440): 187–92.

Mandelbrot, Benoit B. 1977. *Fractals: Form, Chance, and Dimension*. W.H. Freeman.

Mustafa, H., M. Mezera, D. T. A. Matthews, and G. R. B. Römer. 2019. “Effect of Surface Roughness on the Ultrashort Pulsed Laser Ablation Fluence Threshold of Zinc and Steel.” *Applied Surface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.066>.

Ngo, Tuan D., Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T. Q. Nguyen, and David Hui. 2018. “Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges.” *Composites Part B: Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

Niu, Chunhui, Ting Zhu, and Yong Lv. 2019. “Influence of Surface Morphology on Absorptivity of Light-Absorbing Materials.” *International Journal of Photoenergy*. <https://doi.org/10.1155/2019/1476217>.

Nukman, Y., Awais Farooqi, Osama Al-Sultan, Abdul Rahman A. Alnasser, and M. S. H. Bhuiyan. 2017. “A Strategic Development of Green Manufacturing Index (GMI) Topology Concerning the Environmental Impacts.” *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.107>.

Olano, Marc, John Hart, Wolfgang Heidrich, and Michael McCool. 2002. *Real-Time Shading*. CRC Press.

Olsen, John H. 2000. *Introduction to Abrasive Jet Machining*.

Park, S. S., Y. Wei, and X. L. Jin. 2018. “Direct Laser Assisted Machining with a Sapphire Tool for Bulk Metallic Glass.” *CIRP Annals*. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.070>.

Pentland, W., J. L. Wennberg, and C. L. Mehl. 1961. “RESEARCH IN MACHINING HIGH STRENGTH MATERIALS AT ELEVATED TEMPERATURES.” *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207546108943071>.

Perlin, Ken. 1985. “An Image Synthesizer.” *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*.

<https://doi.org/10.1145/325165.325247>.

- . 2002. "Improving Noise." *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '02*. <https://doi.org/10.1145/566570.566636>.
- Ravindra, Deepak. 2011. *Ductile Mode Material Removal of Cermaic and Semiconductors*.
- Richter, Maxi, Pierre Saint-Cast, Tobias Dannenberg, Martin Zimmer, and Jochen Rentsch. 2015. "Impact of Rear Side Roughness on Optical and Electrical Properties of a High-Efficiency Solar Cell." *Energy Procedia* 77 (August): 832–39.
- Roeder, Marcel, Thomas Guenther, and André Zimmermann. 2019. "Review on Fabrication Technologies for Optical Mold Inserts." *Micromachines*. <https://doi.org/10.3390/mi10040233>.
- Rubenchik, Alexander M., Sheldon S. Q. Wu, V. Keith Kanz, Mary M. LeBlanc, W. Howard Lowdermilk, Mark D. Rotter, and Joel R. Stanley. 2014. "Temperature-Dependent 780-Nm Laser Absorption by Engineering Grade Aluminum, Titanium, and Steel Alloy Surfaces." *Optical Engineering*. <https://doi.org/10.1117/1.oe.53.12.122506>.
- Shin, Yung C. 2010. "Laser Assisted Machining: Its Potential and Future." *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. <https://doi.org/10.2351/1.5062073>.
- Shin, Yung C., Benxin Wu, Shuting Lei, Gary J. Cheng, and Y. Lawrence Yao. 2020. "Overview of Laser Applications in Manufacturing and Materials Processing in Recent Years." *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1115/1.4048397>.
- Sims, Karl. 1991. *Artificial Evolution for Computer Graphics*.
- Thoe, T. B., D. K. Aspinwall, M. L. H. Wise, and Rolls-Royce Ltd. 1996. *Review on Ultrasonic Machining*.
- Tian, Yinggang, and Yung C. Shin. 2007. "Thermal Modelling and Experimental Evaluation of Laser-Assisted Dressing of Superabrasive Grinding Wheels." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. <https://doi.org/10.1243/09544054jem713>.
- Vorobyev, A. Y., and Chunlei Guo. 2010. "Laser Turns Silicon Superwicking." *Optics Express* 18 (7): 6455–60.
2013. "Femtosecond Laser Surface Structuring Technique for Making Human Enamel and Dentin Surfaces Superwetting." *Applied Physics B*. <https://doi.org/10.1007/s00340-013-5482-6>.
- Wang, Hongze, Yosuke Kawahito, Ryouhei Yoshida, Yuya Nakashima, and Kunio Shiokawa. 2018. "A Model to Calculate the Laser Absorption Property of Actual Surface." *International Journal of Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.023>.
- Wang, Jin-Tang, Cheng-I Weng, Jee-Gong Chang, and Chi-Chuan Hwang. 2000. "The Influence of Temperature and Surface Conditions on Surface Absorptivity in Laser Surface Treatment." *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.372331>.
- Worley, Steven. 1996. "A Cellular Texture Basis Function." *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '96*. <https://doi.org/10.1145/237170.237267>.
- Yang, J., Y. Yang, B. Zhao, Y. Wang, and X. Zhu. 2012. "Femtosecond Laser-Induced Surface Structures to Significantly Improve the Thermal Emission of Light from Metals." *Applied Physics B*. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4834-3>.