

Interreg



Με τη συγχρηματοδότηση
της ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ

Ελλάδα – Κύπρος

MOSAIC



ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 3.3:

Λογισμικά CAD/CAM.

+30 2310 469 626

www.interreg.gr

www.greece-cyprus.eu

@Interreg_GRCY

@interreg_grcy

ΠΕ.3**Λογισμικά CAD/CAM****Π3.3**

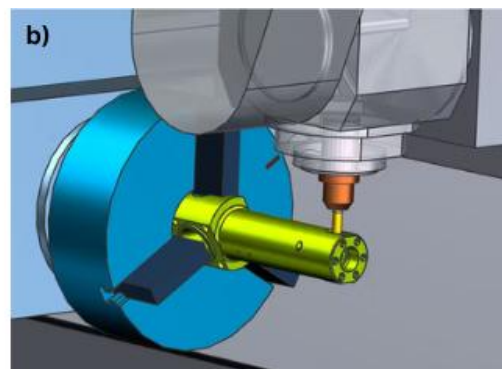
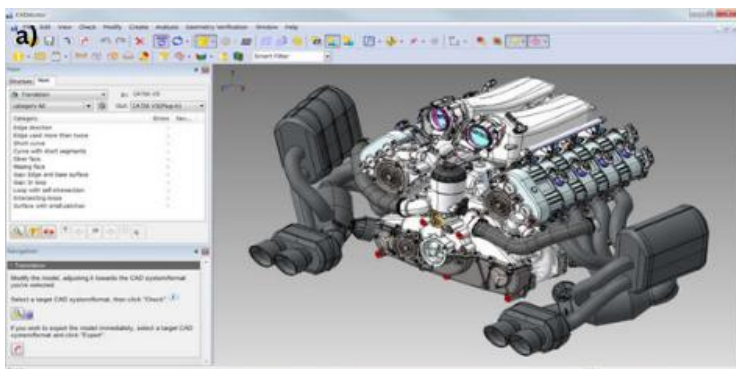
Χαρακτηριστικά, δυνατότητες και επιδόσεις των λογισμικών CAD/CAM, που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και την καθοδήγηση της κατεργασίας μετάλλου, εστιάζοντας στη συμβατότητα τους με τις ανάγκες του έργου Mosaic.

3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το CAD (Σχεδίαση με τη Βοήθεια Υπολογιστή) αναφέρεται στη χρήση λογισμικού υπολογιστών για τη δημιουργία, τροποποίηση, ανάλυση και βελτιστοποίηση ενός σχεδιαστικού μοντέλου. Αποτελεί ένα κρίσιμο εργαλείο για μηχανικούς και σχεδιαστές, καθώς επιτρέπει την ακριβή αναπαράσταση γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός εξαρτήματος ή συστήματος. Μέσω CAD, είναι δυνατή η γρήγορη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων (3D), καθώς και η παραγωγή τεχνικών σχεδίων, προσομοιώσεων και εργονομικών ελέγχων [1].

Η χρήση του CAD έχει μεταμορφώσει την παραδοσιακή διαδικασία σχεδιασμού, προσφέροντας αυξημένη ακρίβεια, μικρότερο χρόνο ανάπτυξης προϊόντος και ευκολία στην τροποποίηση σχεδίων. Επιπλέον, επιτρέπει τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών τομέων μιας επιχείρησης ή μεταξύ ομάδων σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς τα αρχεία μπορούν να ανταλλαχθούν ψηφιακά. Δημοφιλή λογισμικά CAD περιλαμβάνουν τα AutoCAD, SolidWorks, CATIA και Siemens NX [2]. Το CAM (Κατεργασία με τη Βοήθεια Υπολογιστή) είναι η χρήση λογισμικού για τον αυτοματισμό των διαδικασιών παραγωγής, συνήθως με τη χρήση εργαλειομηχανών CNC (Computer Numerical Control). Το CAM χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των σχεδίων CAD σε οδηγίες κίνησης και κατεργασίας για τα μηχανήματα παραγωγής. Μέσω αυτής της τεχνολογίας, επιτυγχάνεται αυξημένη ακρίβεια, μείωση του κόστους παραγωγής και ελαχιστοποίηση ανθρώπινων σφαλμάτων [3].

Η αλληλεπίδραση CAD/CAM επιτρέπει τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου ψηφιακού κύκλου ζωής του προϊόντος, από τον σχεδιασμό μέχρι την τελική παραγωγή. Επιπλέον, σύγχρονα CAM συστήματα υποστηρίζουν προηγμένες λειτουργίες, όπως προσομοίωση κατεργασιών, επιλογή εργαλείων και βελτιστοποίηση χρόνου κατεργασίας, γεγονός που οδηγεί σε βελτιωμένη παραγωγικότητα [4]. Η υιοθέτηση των συστημάτων CAD και CAM, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 3.1, έχει φέρει επανάσταση στη βιομηχανική σχεδίαση και παραγωγή, καθιστώντας δυνατή την ταχύτερη και ακριβέστερη ανάπτυξη και κατασκευή προϊόντων. Η ενοποίηση των δύο τεχνολογιών υποστηρίζει την τάση προς την Ψηφιακή Κατασκευή (Digital Manufacturing) και τη Βιομηχανία 4.0, δημιουργώντας ένα πλαίσιο όπου ολόκληρη η αλυσίδα αξίας λειτουργεί βάσει ψηφιακών δεδομένων.



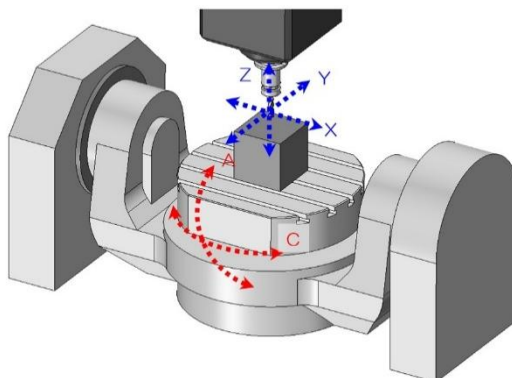
Σχήμα 3.1: α) Παράδειγμα εφαρμογής λογισμικού CAD και β) χρήσης λογισμικού CAM για εργαλειοδρομία

Τα συστήματα CAD/CAM έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην κατεργασία μετάλλων, ειδικά σε περιβάλλοντα υψηλής ακρίβειας και πολυπλοκότητας, όπως η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η παραγωγή ιατρικών εμφυτευμάτων. Μέσω αυτών των τεχνολογιών, η μεταφορά των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός μεταλλικού εξαρτήματος από τον σχεδιασμό στην κατεργασία γίνεται με ακρίβεια εκατοστού του χιλιοστού, επιτρέποντας την παραγωγή σύνθετων επιφανειών, εσωτερικών κοιλοτήτων και μη συμβατικών καμπυλών [5]. Προς παράδειγμα είναι το καλούπι που δημιουργήθηκε στο [σχήμα 3.2](#).



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα κατασκευής καλουπιού με χρήση πενταξονικής φραιζας [6]

Η σύνδεση με εργαλειομηχανές CNC, όπως τόνους, φραιζα 3, 4 ή 5 αξόνων, επιτρέπει την αυτοματοποιημένη κατεργασία μετάλλων με μεγάλη ευελιξία. Επιπλέον, σύγχρονα CAM συστήματα περιλαμβάνουν υποστήριξη για εξελιγμένες τεχνικές όπως HSM (High Speed Machining), EDM (Electrical Discharge Machining), καθώς και additive-subtractive processes (υβριδικές τεχνικές), κάνοντάς τα κατάλληλα για κατεργασία υψηλής απόδοσης σε υλικά όπως τιτάνιο, ανοξείδωτο χάλυβα και Inconel [7]. Στο [σχήμα 3.3](#) φαίνονται οι άξονες κατεργασίας μιας πενταξονικής φραιζας.



Σχήμα 3.3: Άξονες κατεργασίας πενταξονικής φραιζας

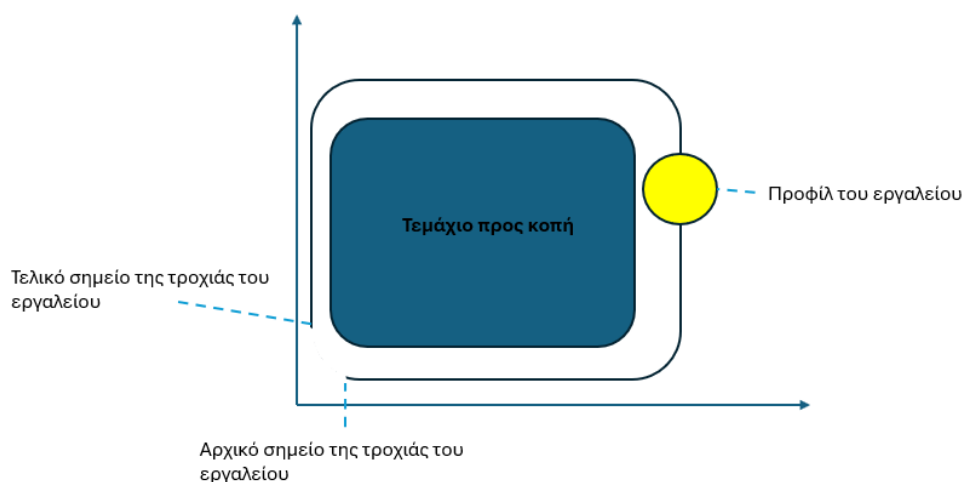
3.3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ CAD/CAM

Η ιστορία των τεχνολογιών CAD (Computer-Aided Design) και CAM (Computer-Aided Manufacturing) είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη της πληροφορικής, των ψηφιακών συστημάτων και της βιομηχανικής αυτοματοποίησης. Οι απαρχές του CAD μπορούν να εντοπιστούν στη δεκαετία του 1950, όταν το Εργαστήριο Lincoln του MIT και άλλοι ερευνητικοί φορείς στις Ηνωμένες Πολιτείες πειραματίζονταν με τρόπους χρήσης υπολογιστών για τη σχεδίαση τεχνικών σχεδίων. Ένα από τα πρώτα καταγεγραμμένα έργα ήταν το "Sketchpad" του Ivan Sutherland (1963), το οποίο θεωρείται το πρώτο διαδραστικό γραφικό σύστημα και ο πρόδρομος όλων των σύγχρονων CAD προγραμμάτων [8]. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης CAD και CAM για την αφαίρεση υλικού και δημιουργίας ενός γραναζιού.



Σχήμα 3.4: Κατεργασία αφαίρεση υλικού με χρήση CNC φραιζας

Παράλληλα, στο πεδίο της κατασκευής, οι πρώτες προσπάθειες αυτοματοποίησης των εργαλειομηχανών με χρήση ψηφιακών εντολών οδήγησαν στη δημιουργία των NC (Numerical Control) και στη συνέχεια CNC (Computer Numerical Control) τεχνολογιών. Το λογισμικό APT (Automatically Programmed Tool), που αναπτύχθηκε επίσης στο MIT, αποτέλεσε το πρώτο πρότυπο για τη δημιουργία κατεργασιών μέσω υπολογιστή και θεωρείται θεμέλιο λίθο για τα CAM συστήματα [9]. Στο σχήμα 3.5 δίνεται ως παράδειγμα η τροχιά ενός κοπτικού με APT για την αφαίρεση υλικού ενός τεμαχίου.



Σχήμα 3.5: Ένδειξη του APT [9]

Η εμπορική διάδοση των CAD/CAM ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970, όταν η αυξημένη υπολογιστική ισχύς και η διαθεσιμότητα γραφικών διεπαφών επέτρεψαν τη δημιουργία εμπορικών εφαρμογών. Ενδεικτικά, το λογισμικό CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) αναπτύχθηκε το 1977 από τη Dassault Aviation για τις ανάγκες της αεροναυπηγικής βιομηχανίας [3]. Το AutoCAD [10], το οποίο κυκλοφόρησε το 1982 από την Autodesk, αποτέλεσε την πρώτη προσιτή εμπορική εφαρμογή CAD για προσωπικούς υπολογιστές και συνέβαλε στην ευρεία διάδοση της τεχνολογίας στον κατασκευαστικό και αρχιτεκτονικό τομέα.

Στη δεκαετία του 1980 και του 1990, τα λογισμικά εξελίχθηκαν ραγδαία και ενσωμάτωσαν προηγμένες λειτουργίες τρισδιάστατης σχεδίασης, προσομοιώσεων και κατεργασιών πολλαπλών αξόνων. Το Unigraphics (πρόγονος του Siemens NX) και το Pro/ENGINEER (πρόγονος του Creo) πρωτοστάτησαν στον παραμετρικό σχεδιασμό και την ολοκληρωμένη ροή εργασιών CAD/CAM. Η δυνατότητα συγχώνευσης του σχεδιασμού και της κατεργασίας σε μία ενιαία ψηφιακή πλατφόρμα δημιούργησε νέα πρότυπα στην παραγωγική διαδικασία, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος κατασκευής προϊόντων [11].

Με την έλευση της Βιομηχανίας 4.0, τα συστήματα CAD/CAM απέκτησαν ακόμη μεγαλύτερη σημασία ως μέρος του ευρύτερου ψηφιακού οικοσυστήματος. Σήμερα, τα λογισμικά αυτά λειτουργούν ως κόμβοι που συνδέουν τον σχεδιασμό, την προσομοίωση (CAE – Computer Aided Engineering), την κατεργασία (CAM), την παραγωγή και τη διαχείριση δεδομένων προϊόντων (PLM). Επιπλέον, η ενσωμάτωσή τους με τεχνολογίες όπως τα Digital Twins, το IoT και η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει τη δημιουργία πλήρως ψηφιακών γραμμών παραγωγής και την ανάπτυξη προϊόντων με δυνατότητα προγνωστικής βελτιστοποίησης [12]. Στο σχήμα 3.6 απεικονίζονται διάφοροι τομείς που συνολικά δημιουργούν την ιδέα της Βιομηχανίας 4.0.



Σχήμα 3.6: Βιομηχανία 4.0 που χαρακτηρίζεται από τον ψηφιακό μετασχηματισμό της παραγωγής μέσω τεχνολογιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη, η ανάλυση δεδομένων και η αυτοματοποίηση με έξυπνα συστήματα [13]

Η πορεία του Siemens NX, για παράδειγμα, αναδεικνύει την ωρίμανση αυτών των τεχνολογιών. Ξεκινώντας ως Unigraphics στη δεκαετία του 1970 και μετεξελισσόμενο σε NX μετά την εξαγορά από τη Siemens, το λογισμικό αυτό συνδυάζει ισχυρές δυνατότητες CAD, CAM και CAE [14], προσφέροντας λύσεις για προηγμένη παραγωγή σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ιατρική τεχνολογία και η μικροκατεργασία [15].

Η εξέλιξη των CAD/CAM έχει ήδη επηρεάσει καθοριστικά την εκπαίδευση, την έρευνα και τη βιομηχανική παραγωγή. Τα πανεπιστήμια και τα ερευνητικά εργαστήρια ενσωματώνουν πλέον στα προγράμματά τους εκπαιδευτικές εφαρμογές CAD/CAM, προσφέροντας στους φοιτητές εμπειρία σε περιβάλλοντα βιομηχανικού επιπέδου. Ταυτόχρονα, ο αυξανόμενος αριθμός έργων με αντικείμενο την ψηφιακή πολιτιστική κληρονομιά, όπως το έργο Mosaic, επωφελείται από την αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών για την τεκμηρίωση, ανακατασκευή και αναπαραγωγή πολιτιστικών αντικειμένων.

3.3.3 CAD/CAM ΣΕ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ – ΨΗΦΙΔΩΤΑ

Οι σύγχρονες τεχνολογίες CAD/CAM έχουν καταστεί απαραίτητο εργαλείο για την ψηφιοποίηση και την αναπαραγωγή αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Μέσω αυτού, σχεδιάζονται τρισδιάστατα μοντέλα περίπλοκων ανάγλυφων και στη συνέχεια παράγονται κατ' ακρίβεια CNC καλούπια ή αντίγραφα. Για παράδειγμα, σε μελέτη ανακατασκευής ενός 17ου-αιώνα ξυλόγλυπτου θρησκευτικού θυρεού, η χρήση CNC φραιζαρίσματος έδωσε πιστά αντίγραφα των στύλων του πρωτοτύπου [16]. Με παρόμοιο τρόπο, μάλιστα, αναπαράγονται και ένθετα ψηφιδωτά σχέδια· π.χ. ψηφιακό CAD μοντέλο ενός μοτίβου ψηφιδωτού επιτρέπει την παραγωγή CNC μαστρών ή την κοπή ψηφιδών με εξαιρετική λεπτομέρεια. Σύγχρονοι αλγόριθμοι CAM επιτρέπουν έτσι να λαμβάνονται σύνθετα γεωμετρικά μοτίβα με υψηλή πιστότητα στην επιφάνεια (π.χ. ψηφιδωτά δάπεδα ή τοιχία), με ακρίβεια μεγαλύτερη από τις χειρονακτικές μεθόδους.

Η επεξεργασία επιφανειών υψηλής ποιότητας απαιτεί ειδικές CAM τεχνικές. Συγκεκριμένα, η υψηλής ταχύτητας κατεργασία (HSM) χρησιμοποιεί πολύ υψηλές ταχύτητες ατράκτου και μικρά βάθη κοπής, επιτυγχάνοντας εξαιρετική ποιότητα φινιρίσματος. Παράλληλα, σύγχρονα CAM πακέτα βελτιστοποιούν τις διαδρομές εργαλείου, ώστε να εξοικονομούν χρόνο και να διατηρούν σταθερό φορτίο κοπής. Έτσι, με τη χρήση βελτιστοποιημένων τροχαίων κοπτικού εργαλείου (toolpaths) μειώθηκε σε εφαρμογές CNC ο χρόνος κατεργασίας. Σε μία περίπτωση, μέσω του συνδυασμού *horizontal roughing* και *parallel finishing*, επιτεύχθηκε παραγωγή μαστρου κεραμικών κοσμημάτων με περίπλοκα ανάγλυφα μοτίβα Batik σε ελάχιστο χρόνο [17]. Συνολικά, η επεξεργασία HSM καθιστά δυνατή την απομάκρυνση μεγάλου όγκου υλικού με πολύ μικρές δυνάμεις κοπής, ενώ οι αλγόριθμοι CAM ελέγχουν τη διατήρηση ομοιόμορφης επαφής του εργαλείου σε όλη την επιφάνεια.

Για αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα λογισμικά CAD/CAM. Πολλά πακέτα παρέχουν ενσωματωμένες δυνατότητες τεσσάρων έως πέντε αξόνων και HSM. Παραδείγματος χάρη, ερευνητικές ομάδες έχουν αξιοποιήσει το Rhinoceros 4.0 (με πρόσθετα ArtCAM ή ZBrush) για τον σχεδιασμό καλλιτεχνικών 3D relief [17]. Το CATIA με το module *Surface Machining* χρησιμοποιήθηκε ώστε να παραχθεί ο κώδικας NC για την κατεργασία μοντέλων όπως την ξυλόγλυπτη μουσική λύρα. Αναφορικά με την πρόσφατη βιομηχανική πρακτική, το Autodesk Fusion 360 (με ενσωματωμένο CAM/HSM) έχει χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό CNC φραιζαρίσματος σε κατασκευές πολιτιστικών έργων [16], όπως αυτό που φαίνεται στο [σχήμα 3.7](#). Ομοίως, εμπορικές λύσεις όπως οι Siemens NX CAM, SolidWorks CAM και Mastercam προσφέρουν ολοκληρωμένες ροές CAD/CAM με υποστήριξη multi-axis και εργαλειοστασίων για σύνθετες διαμορφώσεις καλούπιων. Στο στάδιο προσομοίωσης, όλα τα παραπάνω λογισμικά επιτρέπουν τον έλεγχο της διαδρομής εργαλείου και της πρόσκρουσης, διασφαλίζοντας ότι οι ψηφιακές επιφάνειες θα μεταφραστούν σε πιστές φυσικές αναπαραγωγές.

Σε πραγματικές εφαρμογές πολιτιστικών έργων καταγράφονται πολλά παραδείγματα. Σε πρόσφατη μελέτη από την Ινδονησία, σχεδιάστηκαν ψηφιακά κεραμικά κοσμήματα με παραδοσιακά μοτίβα Batik [17]. Οι ερευνητές δημιούργησαν 3D CAD ανάγλυφα με ArtCAM, ενώ στη φάση CAM χρησιμοποίησαν το Autodesk PowerMill για να παράξουν τον NC κώδικα που τροφοδότησε CNC φραίζα. Το αποτέλεσμα ήταν πολύ λεπτομερές και ακριβές ανάγλυφο επιφάνεια στα καλούπια, με σημαντική εξοικονόμηση χρόνου (περίπου 11 ώρες λιγότερης επεξεργασίας). Αντίστοιχα, στην Ευρώπη ερευνητές μελέτησαν την αναπαραγωγή ξύλινων στύλων ενός 17ου-αιώνα ξυλόγλυπτου ταμπερνάκου (ελληνικό-ιταλικό πολιτιστικό κειμήλιο). Σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε ξύλο πεύκου (όπως το πρωτότυπο) και χρησιμοποιήθηκε CNC δρομολογητής πέντε αξόνων για τη φραιζαρίσή τους. Η CNC κατασκευή επιβεβαίωσε ότι παράγει ανθεκτικά και ακριβή αντίγραφα επίπλων/διακοσμητικών στοιχείων (παρά το υψηλό κόστος και απόβλητα σε σχέση με την 3D εκτύπωση). Σε άλλη έρευνα, παραδοσιακά κεντητά μοτίβα μεταφέρθηκαν σε ξύλινες επιφάνειες

επίπλων μέσω CAM: χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό VCarvePro για CNC χάραξη (engraving και carving) και αναλύθηκε η ποιότητα της κατεργασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως διαφορετικοί τρόποι κατεργασίας (π.χ. *engrave* vs *V-Carve*) [18] επηρεάζουν την ακρίβεια του τελικού σχεδίου.

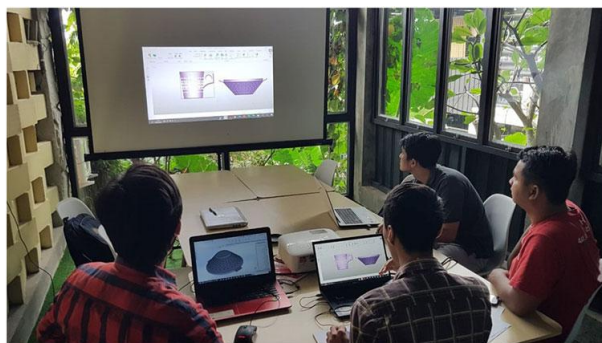


Σχήμα 3.7: Ο ξύλινος ναός της πολιτιστικής έρευνας [16]

Σε κάθε περίπτωση, ο σχεδιασμός CAD οδηγεί στην παραγωγή υψηλής ακρίβειας καλουπιών. Με την κατασκευή ψηφιακών μοντέλων των αυθεντικών έργων (π.χ. μέσω 3D σάρωσης), μπορούν να παραχθούν καλούπια που αναπαράγουν πιστά τις λεπτομέρειες [19]. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί ευρέως στην αναπαραγωγή αρχιτεκτονικών στοιχείων και γλυπτών: ένα λεγόμενο «retopography» δημιουργεί τρισδιάστατο μοντέλο μέσω λείζερ και παράγει ακριβή καλούπια από αυτό. Με αναλογικό τρόπο, σε ψηφιδωτά δάπεδα ή τοιχογραφίες ολόκληρα, καλαίσθητα τμήματα μπορούν να χαραχθούν CNC ή να χυτευτούν από ψηφιακές μήτρες. Για παράδειγμα, CNC μηχανές μπορούν να χαράξουν μικρά κανάλια ή εσοχές σε πλάκες μαρμάρου, ώστε να τοποθετηθούν ψηφίδες απόλυτα ευθυγραμμισμένες. Έτσι, οι απαιτητικές γεωμετρικές συνθέσεις των ψηφιδωτών επιφανειών αναπαράγονται ψηφιακά με μεγάλη ακρίβεια, ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα που θα είχαν χειροποίητες διαδικασίες.

Ο Dartora και οι συνεργάτες του [20] ανέλυσαν τη διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής κεραμικών με τη βοήθεια χρήσης CAD/CAM. Η υποβοηθούμενη από υπολογιστή κατασκευή κεραμικών χωρίζεται σε δύο βασικά στάδια: το στάδιο της προεπεξεργασίας και το στάδιο της μετα-επεξεργασίας. Στο στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνονται διεργασίες όπως η επεξεργασία πρώτων υλών, η παρασκευή των ημικατεργασμένων προϊόντων (π.χ. μορφοποίηση των τεμαχίων) και η σύντηξη. Σε αυτό το στάδιο, η χρήση λογισμικών CAD επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της σύστασης και της δομής των κεραμικών υλικών. Για παράδειγμα, με βάση τα δεδομένα των πρώτων υλών και τις απαιτήσεις για τη σύσταση, μπορεί να γίνει αυτόματος υπολογισμός της βέλτιστης σύνθεσης και του τρόπου παρασκευής του τεμαχίου. Το στάδιο της μετα-επεξεργασίας περιλαμβάνει διαδικασίες όπως η τελική διαμόρφωση, η κατεργασία και η επιφανειακή επεξεργασία. Σε αυτό το στάδιο, η τεχνολογία υποστηρίζει την υλοποίηση των σχεδίων μέσω CAM λογισμικών, αυτοματοποιώντας τη διαμόρφωση και επεξεργασία των κεραμικών σύμφωνα με τις προδιαγραφές

του σχεδίου. Η χρήση CAD/CAM στα κεραμικά συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της απόδοσης και της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων, ενώ παράλληλα μειώνει το κόστος παραγωγής. Με την πρόοδο και τη συνεχή εξάπλωση των ψηφιακών τεχνολογιών, η εφαρμογή τους στον τομέα της κατασκευής κεραμικών αναμένεται να επεκταθεί ακόμη περισσότερο στο μέλλον. Στο σχήμα 3.8 φαίνονται οι μηχανικοί σε μια συνάντηση για την εύρεση του βέλτιστου τρόπου απεικόνισης των μωσαϊκών σε διάφορες επιφάνειες.



Σχήμα 3.8: Μια ομάδα μηχανικών που ερευνούν τρόπο για την απεικόνιση των μωσαϊκών [20] σε διάφορες επιφάνειες

Ο Almeida και οι συνεργάτες του [21] πραγματοποίησαν τρισδιάστατη μοντελοποίηση κεραμικών υλικών όπως αυτό του σχήματος 3.9. Καθώς τα λογισμικά CAD προσφέρουν πληθώρα εργαλείων και μεθόδων σχεδίασης, τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν και να τροποποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη, επιτρέπουν την ταχεία και ακριβή δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων κεραμικών. Κατά τη διαδικασία CAD μοντελοποίησης, είναι δυνατό να οριστούν εκ των προτέρων κρίσιμες παραμετρικές ιδιότητες των κεραμικών, όπως η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η σκληρότητα κ.ά., οι οποίες στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναφορές και περιορισμοί στη φάση της κατασκευής και κατεργασίας. Μέσω λογισμικών προσομοίωσης, η απόκριση και η συμπεριφορά των κεραμικών μπορούν να αναλυθούν και να προσομοιωθούν, με στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της παραγωγικής διαδικασίας. Τα εικονικά μοντέλα CAD επιτρέπουν την προσομοίωση της αντίδρασης και των παραμορφώσεων των κεραμικών σε διαφορετικές θερμοκρασίες, πιέσεις και χρονικές διάρκειες, καθώς και των μηχανικών τους ιδιοτήτων υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.



Σχήμα 3.9: Το τεμάχιο που σάρωσαν ο Almeida και οι συνεργάτες του [21]

Οι Skorulska και συνεργάτες [4] διαπίστωσαν ότι παράγοντες όπως το μέγεθος, η κατανομή και η μορφολογία των κεραμικών σωματιδίων μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση και το φάσμα εφαρμογών των κεραμικών υλικών κατά την κατεργασία μικτών κεραμικών με τεχνολογίες CAD/CAM. Επομένως, κατά την επεξεργασία κεραμικών με τη βοήθεια υπολογιστών, είναι σημαντικό να επιλέγεται ο κατάλληλος εξοπλισμός λείανσης και το κατάλληλο λογισμικό, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε περίπτωσης. Παράλληλα, απαιτούνται πειράματα και διαδικασίες βελτιστοποίησης για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος κατεργασίας. Τα υλικά που είναι κατάλληλα για τέτοιου είδους τεχνολογίες δοκιμάζονται, αξιολογούνται και βελτιώνονται συνεχώς. Ένα δείγμα αυτών φαίνεται στο σχήμα 3.10. Η συγκεκριμένη έρευνα, εστιάζει στον υπολογιστικά υποβοηθούμενο σχεδιασμό συμμετρικών περιστρεφόμενων κεραμικών προϊόντων, όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος B-spline στο πλαίσιο των NURBS (Non-uniform rational basis spline) για την κατασκευή καμπυλών, οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν στη μοντελοποίηση του κεραμικού αντικειμένου. Επιπλέον, μελετήθηκε ο σχεδιασμός B-spline επιφανειών για μη-περιστρεφόμενα σώματα, και επιτεύχθηκε η τρισδιάστατη μοντελοποίηση κεραμικών προϊόντων μέσα από τη σωστή χρήση σημείων, γραμμών και επιφανειών, την συναρμολόγηση των επιφανειακών σωμάτων, την προοπτική απεικόνιση και την αφαίρεση κρυφών στοιχείων. Μετά τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, είναι δυνατόν να γίνουν κοπές και διαστασιολογήσεις των επιμέρους τμημάτων, ώστε να σχεδιαστεί το καλούπι του κεραμικού προϊόντος με βάση το πάχος των περιοχών του μοντέλου, τα χαρακτηριστικά του πηλού και τις ιδιότητες απορρόφησης νερού του υλικού τύπου Shiyin.



Σχήμα 3.10: Παράδειγμα κεραμικών υλικών της έρευνας [4]

Ο Li και οι συνεργάτες του [22] πραγματοποίησαν συστηματική ανασκόπηση της χρήσης τρισδιάστατων τεχνολογιών στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς με επίκεντρο τους ιστορικούς κήπους. Η μελέτη τους εντοπίζει κρίσιμες τεχνολογικές μεθόδους όπως mobile laser scanning, UAV-based φωτογραμμετρία και επεξεργασία point cloud για την τεκμηρίωση αρχιτεκτονικών, φυτικών και τοπογραφικών στοιχείων. Παρά το εστιασμένο πεδίο εφαρμογής (κήποι), τα ευρήματα έχουν υψηλή μεταφερισιμότητα και στις εφαρμογές αναπαραγωγής επιφανειών ψηφιδωτών. Οι συγγραφείς τονίζουν τη σημασία των 4D documentation συστημάτων για τη σύλληψη χρονικά μεταβαλλόμενων φαινομένων όπως η φθορά των επιφανειών, κάτι που μπορεί να εφαρμοστεί και στην αποτύπωση φθαρμένων ψηφιδωτών πριν την αναπαλαίωση. Επιπλέον, προτείνουν την ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης (AI) για την αυτόματη εξαγωγή γεωμετρικών μοτίβων από πολύπλοκες επιφάνειες, κάτι που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μωσαϊκά με επαναλαμβανόμενα μοτίβα (π.χ. μενταγιόν, φυτικά διακοσμητικά, γεωμετρικά σύνολα).

Ο Wang και οι συνεργάτες του [23] παρουσίασαν εννοιολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση εμπειριών Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality) στον πολιτιστικό τομέα, εστιάζοντας σε μουσειακά περιβάλλοντα όπως αυτό του Guilin Museum στην Κίνα. Η μελέτη επισημαίνει ότι οι VR εφαρμογές συχνά πάσχουν από χαμηλό επίπεδο εμπύθισης και διεπαφής χρήστη, παρά την τεχνική αρτιότητα των μοντέλων. Σε αυτό το πλαίσιο, τα CAD μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εικονική απεικόνιση αρχιτεκτονικών ή αντικειμενικών πολιτιστικών στοιχείων (π.χ. ταβάνια, αναγλύφους, εσωτερικούς τοίχους με διακόσμηση) θα πρέπει να ακολουθούν σχεδιαστικά πρωτόκολλα που ενισχύουν την αίσθηση του ρεαλισμού όχι μόνο γεωμετρικά, αλλά και υφής, υλικών, φωτισμού. Η μελέτη επίσης εισηγείται την αλληλεπίδραση με το κοινό ως ανατροφοδότηση στο αρχικό CAD μοντέλο, πριν αυτό περάσει στο στάδιο CAM ή CNC, έτσι ώστε το πολιτιστικό αποτέλεσμα να έχει όχι μόνο ιστορική ακρίβεια, αλλά και κοινωνική απήχηση.

Η Yezhova και οι συνεργάτες της [24], μέσα από συστηματική ανασκόπηση 148 άρθρων, χαρτογράφησαν την εξέλιξη των διαδικτυακών μουσείων και τον ρόλο της ψηφιακής σχεδίασης σε αυτά. Η εργασία τους προσδιορίζει πέντε βασικά κέντρα έρευνας: συμπεριφορά επισκεπτών, προσβασιμότητα, αυθεντικότητα, τεχνολογική υιοθέτηση και εμπύθιση. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η χρήση CAD/CAM σε τέτοια περιβάλλοντα μπορεί να επιταχύνει την παραγωγή ψηφιακών εκθέσεων που συνδυάζουν μορφές, λειτουργίες και αισθητική. Για παράδειγμα, ένα ψηφιακό μοντέλο ψηφιδωτού, σχεδιασμένο μέσω CAD και προσομοιωμένο μέσω CAM, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία animation σε online περιβάλλοντα που απεικονίζουν την παραγωγική διαδικασία — προσφέροντας στον επισκέπτη εμπύθιση τόσο στην ιστορική γνώση όσο και στη σύγχρονη τεχνολογία.

Ο Guadayo Chrisly και οι συνεργάτες του [25] μέσω μιας καλλιτεχνικά προσανατολισμένης προσέγγισης (speculative design), εξερεύνησε τη δυνατότητα ανακατασκευής χαμένων αρχιτεκτονικών στοιχείων πολιτιστικής σημασίας, συγκεκριμένα του "Cinematografo de Lumière" στις Φιλιππίνες. Ο συγγραφέας χρησιμοποίησε spatial layouts, τρισδιάστατες ψηφιακές απεικονίσεις (renders) και φυσικά μακέτα για να επανασχεδιάσει έναν κινηματογράφο που δεν διασώζεται αρχιτεκτονικά. Αν και η εργασία του δεν εντάσσεται σε αυστηρά CAM περιβάλλον, ο τρόπος με τον οποίο το CAD χρησιμοποιείται ως "ψηφιακή αρχαιολογία" για να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ τεκμηρίωσης και παραγωγής είναι εξαιρετικά συναφής με την αναπαραγωγή χαμένων ψηφιδωτών. Η μεθοδολογία του αναδεικνύει την αξία της δημιουργικής σύνθεσης δεδομένων, ιστορικών, καλλιτεχνικών και τεχνικών, στο πλαίσιο της πολιτιστικής ανασύνθεσης.

Συνολικά, οι παραπάνω εφαρμογές επιβεβαιώνουν ότι η ενσωμάτωση CAD/CAM στο σχεδιασμό και στην κατασκευή καλουπιών εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια επιφάνειας και σημαντική επιτάχυνση της παραγωγής. Οι συνδυασμοί πολυάξονας CNC κέντρων, ατράκτου υψηλής ταχύτητας και έξυπνων στρατηγικών κοπής οδηγούν σε εξαιρετικά φινιρίσματα που μπορούν να προσομοιώσουν λεπτομερώς ανάγλυφα και ψηφιδωτά μοτίβα. Τέλος, τα εργαλεία προσομοίωσης CAM (π.χ. ενσωματωμένα σε Siemens NX ή Mastercam) διευκολύνουν τον έλεγχο της διαδικασίας πριν την τελική κατεργασία, εξαλείφοντας σφάλματα και βελτιώνοντας την αξιοπιστία.

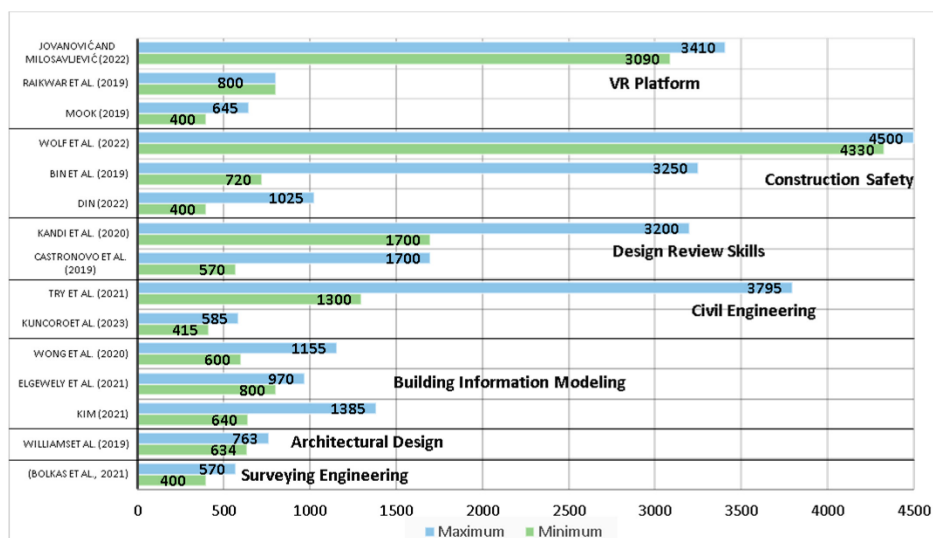
Στο μέλλον, η πρόοδος στον συνδυασμό τεχνολογιών CAD/CAM με τεχνητή νοημοσύνη (π.χ. αυτοματοποιημένος σχεδιασμός μοτίβων), επταυξημένη πραγματικότητα (AR) και εξελιγμένους αισθητήρες θα ενισχύσει ακόμα περισσότερο τις δυνατότητες παραγωγής περίπλοκων καλουπιών. Νέες μέθοδοι όπως το *adaptive machining* και οι έξυπνοι αλγόριθμοι κοπής υπόσχονται μείωση χρόνου και κόστους, διατηρώντας όμως ακέραια τη λεπτομέρεια. Με τον τρόπο αυτό, τα CAD/CAM συστήματα σφραγίζουν τη σύνδεση μεταξύ παράδοσης και τεχνολογίας, καθιστώντας εφικτή την αξιόπιστη αναπαραγωγή ακόμα και των πιο απαιτητικών επιφανειών της πολιτιστικής κληρονομιάς.

3.3.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η εξέλιξη των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης έχει ήδη αρχίσει να διαμορφώνει τη νέα γενιά CAD/CAM συστημάτων (ICAD 2.0), τα οποία μετασχηματίζουν τον παραδοσιακό, χειρωνακτικό σχεδιασμό σε μια περισσότερο εξελικτική και «ενοιολογική» διαδικασία σχεδιασμού (intensional design) [26]. Επιπλέον, η έρευνα για τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα (LLMs) δείχνει ότι μπορούν να υποστηρίξουν αυτοματοποίηση στη δημιουργία CAD μέσω περιγραφών σε φυσική γλώσσα, όταν συνδυάζονται με εργαλεία όπως το FreeCAD [27]. Πέρα από αυτά, πρόσφατη ανασκόπηση της Machine Learning στον χώρο του CAD/CAM αναδεικνύει τη γενετική σχεδίαση (generative design), μοντέλα explainable AI, τεχνολογίες edge AI αλλά και μεταφορά γνώσης (transfer learning) ως μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις με μεγάλα περιθώρια εφαρμογής στον βιομηχανικό σχεδιασμό.

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας (AR/VR) στον χώρο του CAD/CAM ανοίγει νέους δρόμους για την αλληλεπίδραση με τον σχεδιασμό σε πραγματικό χρόνο, ειδικά σε περιπτώσεις εκπαιδευτικής ή πολιτιστικής αναπαραγωγής. Π.χ. η μελέτη για το ψηφιακό μοντέλο σε πολιτιστική κληρονομιά υποστηρίζει ότι τα VR/AR περιβάλλοντα βασισμένα σε πολιτιστικά BIM (HBIM) βελτιώνουν την αίσθηση “immersion” και διαδραστικότητας με τα αντικείμενα (interactive virtual objects) [28]. Παράλληλα, άλλες μελέτες δείχνουν ότι η AR μπορεί πλέον να υποστηρίξει τον χρήστη κατά την εκσκαφή ή τη μέτρηση in situ - μια πρωτοποριακή εφαρμογή σε αρχαιολογικά πεδία.

Επιπρόσθετα, η υιοθέτηση τέτοιων τεχνολογιών AR/VR στην αρχιτεκτονική και μηχανική εκπαίδευση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απορρόφηση γνώσεων και την εμπλοκή των μελλοντικών μηχανικών. Ωστόσο, το κόστος παραμένει κεντρικό εμπόδιο, όπως φαίνεται και στο [σχήμα 3.11](#). Μια συστηματική μελέτη αναδεικνύει ότι, παρότι υπάρχουν λύσεις με περιορισμένο προϋπολογισμό, οι ακριβές πλατφόρμες AR/VR παραμένουν λιγότερο διαδεδομένες λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης και συντήρησης [29].



Σχήμα 3.11: Ανάλυση κόστους σύμφωνα από την έρευνα [29] για διάφορους τομείς

Παράλληλα στην τριτοβάθμια εκπαίδευση, η δημιουργία εξατομικευμένων συστημάτων μάθησης (Personalised AI Learning Systems – PALS) που υποστηρίζονται από τεχνητή νοημοσύνη (π.χ για εκμάθηση διαφορετικών CAD εργαλείων), δείχνει αποτελεσματικότητα στο να «μελλοντοποιήσει» (future-proof) την ικανότητα των φοιτητών να μαθαίνουν νέες τεχνολογικές πλατφόρμες προσαρμοσμένες στις τρέχουσες ανάγκες [30], [31], [32], [33].

Για το Mosaic, η ενσωμάτωση των νέων τάσεων CAD/CAM με τεχνολογίες AR/VR και AI δεν έχει μόνο κατασκευαστική αξία, δημιουργεί επίσης ένα ισχυρό ερευνητικό και εκπαιδευτικό οικοσύστημα. Οι φοιτητές και οι ερευνητές μπορούν να πειραματιστούν με εικονικά μοντέλα μωσαϊκών, να δοκιμάσουν διαφορετικές στρατηγικές CAM χωρίς υλικές απώλειες, και να αξιολογήσουν τα αποτελέσματα μέσα από αλληλεπιδραστικά περιβάλλοντα. Έτσι, το έργο Mosaic δεν περιορίζεται στη διατήρηση των μωσαϊκών αλλά μετατρέπεται σε πλατφόρμα εκπαίδευσης, καινοτομίας και διάχυσης γνώσης.

3.3.5 ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΡΧΕΙΩΝ

Η διαλειτουργικότητα αποτελεί κρίσιμο ζήτημα στα συστήματα CAD/CAM, καθώς τα γεωμετρικά δεδομένα πρέπει να ανταλλάσσονται με ακρίβεια μεταξύ διαφορετικών πλατφορμών και λογισμικών. Η ενοποίηση σχεδιασμού και καταργασίας προϋποθέτει τη χρήση κοινών προτύπων αρχείων, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες πληροφορίας και οι γεωμετρικές ανακρίβειες. Τα πιο διαδεδομένα πρότυπα περιλαμβάνουν το IGES (Initial Graphics Exchange Specification) και το STEP (Standard for the Exchange of Product Data), τα οποία επιτρέπουν την ανταλλαγή μοντέλων μεταξύ ετερογενών CAD συστημάτων, ενώ το STL (Stereolithography) χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης και ταχείας πρωτοτυποποίησης [34].

Παρά την ευρεία χρήση τους, τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν περιορισμούς. Το IGES, για παράδειγμα, συχνά οδηγεί σε απώλεια ακρίβειας στις ελεύθερες επιφάνειες λόγω αναπαράστασης με προσεγγιστικές καμπύλες. Αντίθετα, το STEP (ISO 10303) [35] παρέχει πιο ολοκληρωμένη αναπαράσταση προϊόντων, περιλαμβάνοντας όχι μόνο γεωμετρία αλλά και μεταδεδομένα σχετικά με ανοχές, υλικά και διαδικασίες παραγωγής, καθιστώντας το το πλέον αξιόπιστο πρότυπο για βιομηχανικές εφαρμογές. Σε μελέτες διαλειτουργικότητας έχει αποδειχθεί ότι τα αρχεία STEP διατηρούν υψηλότερη πιστότητα μοντέλων σε σχέση με το IGES, ειδικά για καμπύλες NURBS και επιφάνειες υψηλής πολυπλοκότητας [36].

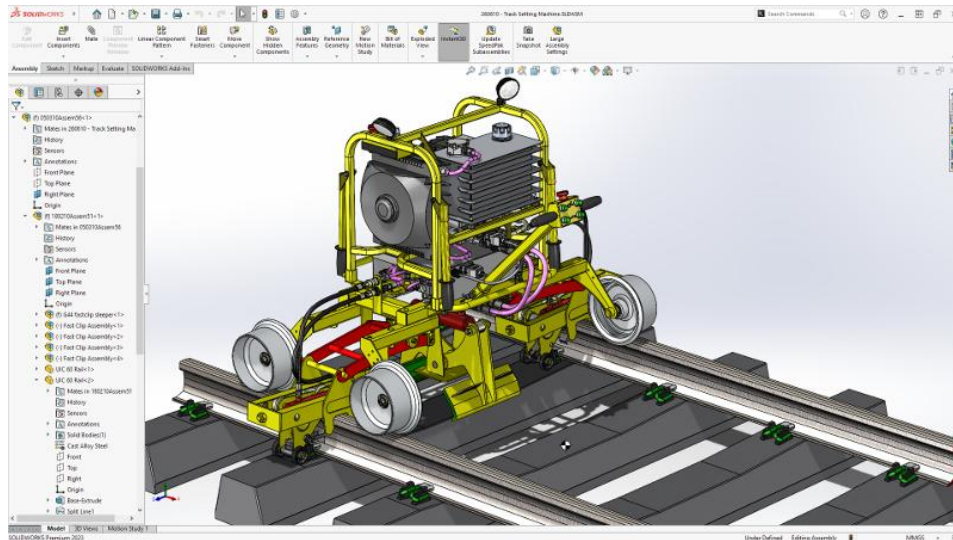
Η επιλογή της κατάλληλης μορφής εξαρτάται από την εφαρμογή: για ακριβείς καταργασίες CNC προτιμώνται αρχεία STEP λόγω γεωμετρικής πληρότητας, ενώ σε εφαρμογές προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing) [37] προτιμάται το STL λόγω απλότητας, παρά τον περιορισμό του στην περιγραφή επιφανειών με τρίγωνα. Πρόσφατες εξελίξεις εστιάζουν στη δημιουργία «έξυπνων» προτύπων αρχείων που ενσωματώνουν δεδομένα προσομοίωσης, ιδιότητες υλικών και πληροφορίες βιωσιμότητας, συνδέοντας έτσι τα CAD/CAM μοντέλα με το πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 και των Digital Twins [12].

3.3.6 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ CAD/CAM

Η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού CAD/CAM εξαρτάται από πολλαπλά κριτήρια που σχετίζονται τόσο με τις τεχνικές απαιτήσεις όσο και με την ευκολία ενσωμάτωσης σε υπάρχουσες παραγωγικές γραμμές. Στα σχήματα 3.12, 3.15, 3.16, 3.17 και 3.18 φαίνονται οι επιφάνειες εργασίας για τα λογισμικά που εξετάστηκαν στην συγκεκριμένη έρευνα. Παρακάτω παραθέτεται συγκριτική αξιολόγηση βασισμένη σε τέσσερα βασικά κριτήρια:

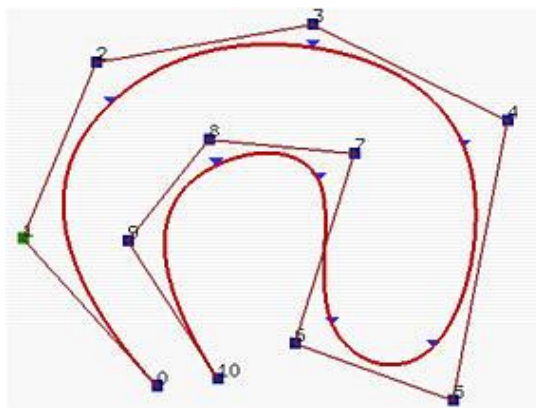
- **Ακρίβεια:** Η δυνατότητα του λογισμικού να δημιουργεί και να μεταφράζει γεωμετρικά δεδομένα σε εργαλειοδρόμια υψηλής ανάλυσης. Το Siemens NX και το CATIA ξεχωρίζουν λόγω της αεροναυπηγικής τους προέλευσης [38].
- **Ευχρηστία:** Αναφέρεται στην προσβασιμότητα του περιβάλλοντος χρήστη και στην ταχύτητα εκμάθησης. Το Fusion 360 υπερτερεί για μικρομεσαίες επιχειρήσεις και εκπαιδευτική χρήση, με σύγχρονο και εύχρηστο UI [39].

- Σύνθετοι σχεδιασμοί: Ικανότητα υποστήριξης σύνθετων γεωμετριών, παραμετρικοποίηση (parametrization) και εργαλείων ανάλυσης (όπως FEA/CFD). Το CATIA και το NX υπερτερούν, ειδικά σε σύνθετες κατασκευές [40].
- Προσαρμογή σε εργαλειομηχανές: Το Mastercam παραμένει από τα πιο αξιόπιστα εργαλεία CAM για 4+ άξονες CNC, προσφέροντας υψηλό επίπεδο προσαρμογής σε διαφορετικούς ελέγχους (Fanuc, Heidenhain, Siemens κ.λπ.) [41].

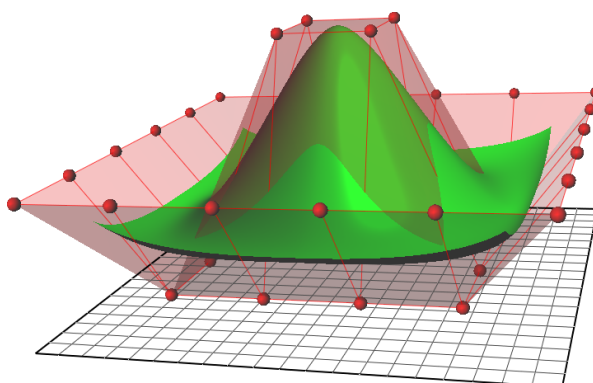


Σχήμα 3.12: Επιφάνεια επεξεργασίας του SolidWorks

Η χρήση καμπυλών spline αποτελεί θεμέλιο λίθο στον υπολογιστικά υποβοηθούμενο σχεδιασμό και στην υποβοηθούμενη κατασκευή, καθώς διευκολύνει την ακριβή αναπαράσταση πολύπλοκων γεωμετριών, ελεύθερων επιφανειών και οργανικών σχημάτων. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι καμπυλών είναι οι B-splines και οι NURBS, οι οποίες φαίνονται στο [σχήμα 3.13](#) και [σχήμα 3.14](#), που επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο της καμπυλότητας και της μορφολογίας των σχεδίων μέσω μεταβλητών σημείων ελέγχου και βαρών [42]. Οι NURBS υπερτερούν των απλών B-splines καθώς μπορούν να αναπαραστήσουν με ακρίβεια βασικά γεωμετρικά σχήματα όπως κύκλους και έλλειψης, κάτι που είναι κρίσιμο για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Διαφορετικά CAD/CAM λογισμικά κάνουν χρήση διαφορετικών τύπων ή υλοποιήσεων spline. Για παράδειγμα, λογισμικά όπως το Rhinoceros 3D και το NX Siemens βασίζονται πλήρως στις NURBS για τη δημιουργία και τροποποίηση μοντέλων υψηλής ακρίβειας, ενώ συστήματα όπως το SolidWorks και το CATIA υποστηρίζουν τόσο B-splines όσο και NURBS μέσω ισχυρών εργαλείων παραμετρικής μοντελοποίησης. Επιπλέον, το Fusion 360 συνδυάζει παραδοσιακές τεχνικές spline με T-splines, που χρησιμοποιούνται κυρίως για freeform και οργανικές μορφές. Η επιλογή του τύπου spline επηρεάζει άμεσα τη γεωμετρική ακρίβεια του μοντέλου, την υπολογιστική απόδοση, καθώς και την επιτυχία της μετάβασης από το στάδιο σχεδιασμού (CAD) στο στάδιο κατεργασίας (CAM). Κατά την εξαγωγή των γεωμετριών σε μορφές όπως STEP ή IGES, οι καμπύλες NURBS διατηρούν σε μεγαλύτερο βαθμό την ακρίβεια του αρχικού μοντέλου σε σχέση με άλλες μορφές αναπαράστασης [36]. Η χρήση των splines στα CAM λογισμικά επιτρέπει την παραγωγή ομαλών διαδρομών εργαλείων (toolpaths), οι οποίες μειώνουν τη φθορά των εργαλείων και βελτιώνουν την ποιότητα επιφάνειας του τελικού προϊόντος. Καθώς οι απαιτήσεις για σύνθετα και εργονομικά προϊόντα αυξάνονται, η γνώση των χαρακτηριστικών και των διαφορών μεταξύ των τύπων spline καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική για τον σύγχρονο μηχανικό σχεδίασης και παραγωγής.



Σχήμα 3.13: Παράδειγμα των B-Splines καμπυλών



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα NURB-Spline καμπύλης η οποία δημιουργήθηκε από ένα εύρος σημείων στο χώρο

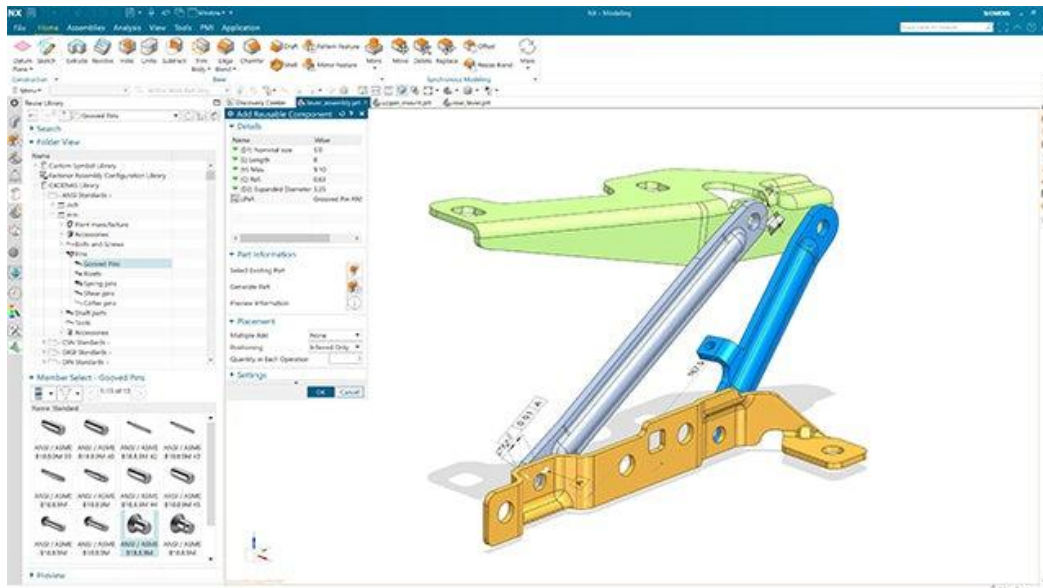
Λογισμικό	Ακρίβεια	Ευχρηστία	Σύνθετοι Σχεδιασμοί	Υποστήριξη εργαλειομηχανών
Siemens NX	5	3	5	5
SolidWorks +CAMWorks	4	4	4	4
Autodesk Fusion 360	4	5	4	4
CATIA	5	2	5	4
Mastercam	4	3	3	5

Πίνακας 3.1 Συγκριτικός πίνακας λογισμικών με βαθμολογία 0-πολύ χαμηλή απόδοση/περιορισμένη δυνατότητα, μέχρι 5-εξαιρετική απόδοση/κορυφαίο στον τομέα

Η βαθμολόγηση των CAD/CAM λογισμικών που παρουσιάστηκε στον συγκριτικό πίνακα προέκυψε μέσα από μια συνθετική, ποιοτική αξιολόγηση βασισμένη σε τέσσερις βασικούς πυλώνες:

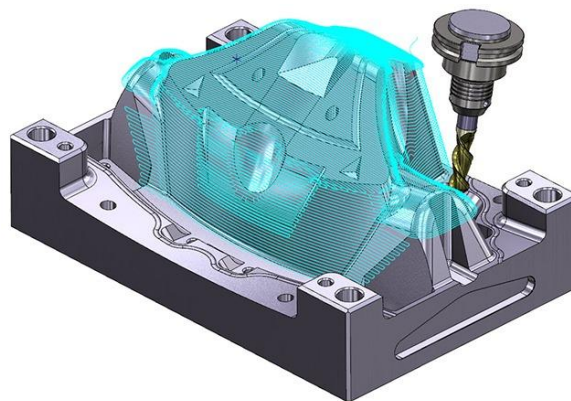
- την επιστημονική βιβλιογραφία,
- την εμπειρία της βιομηχανίας,
- τις αξιολογήσεις χρηστών
- και την εκπαιδευτική χρήση.

Δεν πρόκειται για απόλυτα ποσοτικά δεδομένα που προέρχονται από μετρήσεις ταχύτητας ή επεξεργαστικής ισχύος, αλλά για μία τεκμηριωμένη ανάλυση της πραγματικής απόδοσης, λειτουργικότητας και ευχρηστίας κάθε λογισμικού, όπως αυτές καταγράφονται στη βιβλιογραφία και στις επαγγελματικές πρακτικές.



Σχήμα 3.2: Επιφάνεια επεξεργασίας CAD του NX Siemens

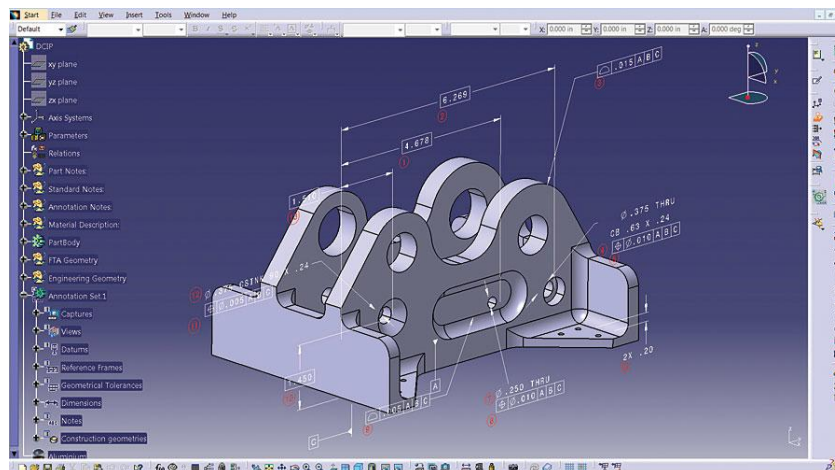
Αναφορικά με την ακρίβεια, αξιολογήθηκε η δυνατότητα του κάθε λογισμικού να μεταφράζει γεωμετρικά μοντέλα σε υψηλής πιστότητας εργαλειοδρόμια, με στόχο την παραγωγή εξαρτημάτων με πολύ χαμηλό σφάλμα (π.χ. ανοχές μικρότερες των $\pm 5\mu\text{m}$). Το Siemens NX και το CATIA υπερτερούν σε αυτό το πεδίο, καθώς χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανίες υψηλής ακρίβειας, όπως η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου τέτοια χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα.



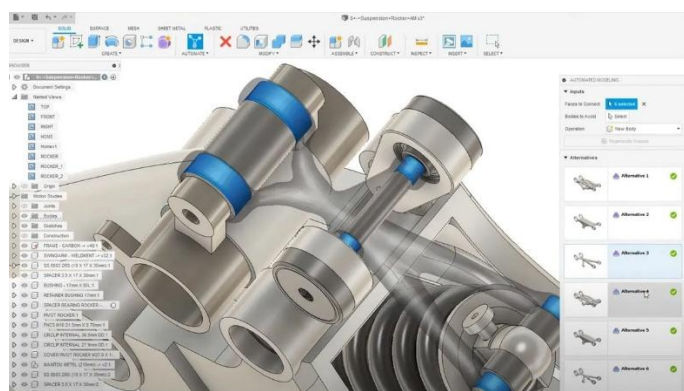
Σχήμα 3.3: Παράδειγμα προσομοίωσης CAM στο Mastercam

Στην κατηγορία της ευχρηστίας, εξετάστηκε η φιλικότητα του περιβάλλοντος εργασίας προς τον χρήστη, η διαθεσιμότητα οδηγιών (tutorials), καθώς και η ταχύτητα εκμάθησης από νέους μηχανικούς και φοιτητές. Το Autodesk Fusion 360 διακρίθηκε σε αυτόν τον τομέα, καθώς διαθέτει μοντέρνο γραφικό περιβάλλον, εκτενή τεκμηρίωση και ιδιαίτερα προσιτή καμπύλη μάθησης, καθιστώντας το ιδανικό για εκπαιδευτικά περιβάλλοντα και μικρές επιχειρήσεις.

Η αξιολόγηση στην ικανότητα για σύνθετους σχεδιασμούς βασίστηκε στην υποστήριξη για παραμετρικό σχεδιασμό, πολυεπίπεδα assemblies, advanced surfacing και δυνατότητες ενσωματωμένης ανάλυσης (π.χ. FEA ή CFD). Και πάλι, το CATIA και το Siemens NX κυριαρχούν, καθώς σχεδιάστηκαν ειδικά για πολυδιάστατους βιομηχανικούς σχεδιασμούς όπου η πολυπλοκότητα και η αλληλεπίδραση μεταξύ εξαρτημάτων είναι κρίσιμη.



Σχήμα 3.4: Παράδειγμα επεξεργασίας CAD του CATIA



Σχήμα 3.5: Παράδειγμα επεξεργασίας CAD με το Autodesk FUSION 360

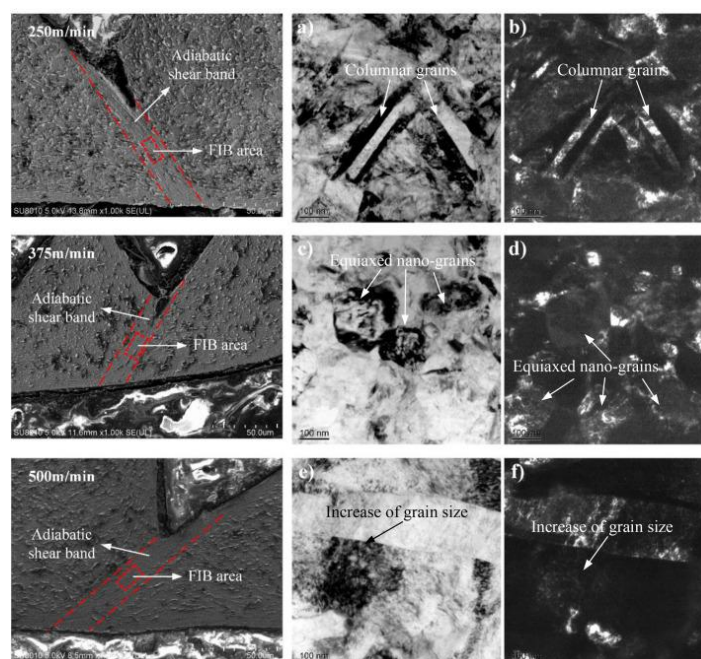
Τέλος, όσον αφορά τη συμβατότητα με εργαλειομηχανές, δόθηκε έμφαση στη δυνατότητα εξαγωγής G-code για τόρνους, φραιζες, καθώς και στη διαθεσιμότητα post-processors για διάφορους ελέγχους (Fanuc, Siemens, Heidenhain κ.ά.). Το Mastercam αξιολογήθηκε ως εξαιρετικό σε αυτό το πεδίο, καθώς αποτελεί ένα από τα παλαιότερα και πιο ώριμα CAM λογισμικά, με μεγάλη βάση υποστήριξης για εργαλειομηχανές διαφόρων τύπων και βαθμό προσαρμογής σε βιομηχανικά workflows. Η συνολική βαθμολογία, λοιπόν, αποτελεί μία ισορροπημένη και εμπειρικά τεκμηριωμένη αποτύπωση της λειτουργικότητας και απόδοσης κάθε λογισμικού, σύμφωνα με τις ανάγκες διαφορετικών εφαρμογών - από την εκπαιδευτική χρήση και το rapid prototyping, μέχρι τη βαριά βιομηχανική παραγωγή και τις κατεργασίες υψηλής ακρίβειας. Το Siemens NX αποτελεί μία από τις πλέον προηγμένες ολοκληρωμένες πλατφόρμες CAD/CAM/CAE στον κόσμο και ενδείκνυται ιδανικά για απαιτητικά ερευνητικά έργα, όπως το παρόν, που συνδυάζουν την αποτύπωση, τον σχεδιασμό και την κατεργασία αντικειμένων πολιτιστικής ή καλλιτεχνικής αξίας. Ειδικότερα, στο πλαίσιο της αντιγραφής και ανάδειξης ιστορικών ψηφιδωτών μέσω σύγχρονων τεχνολογιών, το Siemens NX προσφέρει πλήρη έλεγχο σε κάθε βήμα της διαδικασίας: από την ψηφιακή μοντελοποίηση μέχρι τη δημιουργία ακριβών εργαλειοδρόμων για CNC μηχανές.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του Siemens NX είναι η απόλυτα ενοποιημένη ροή εργασίας CAD-CAM, η οποία εξαλείφει τα σφάλματα μεταφοράς δεδομένων μεταξύ διαφορετικών λογισμικών. Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει πολύπλοκα τρισδιάστατα μοντέλα ψηφιδωτών και ταυτόχρονα να εφαρμόσει προσαρμοσμένα μονοπάτια κατεργασίας, ακόμα και για πολύπλοκες επιφάνειες ή μικροδομές. Η δυνατότητα reverse engineering μέσω εισαγωγής STL ή mesh μοντέλων δίνει τη δυνατότητα ψηφιακής ανακατασκευής υπαρχόντων έργων τέχνης ή αρχαιολογικών αντικειμένων με υψηλή πιστότητα. Επιπλέον, το CAM περιβάλλον του NX υποστηρίζει κατεργασίες υψηλής ακρίβειας (όπως μικροκοπή, χαρακτηριστική και λεπτομερή φραιζαρίσματα), οι οποίες είναι απαραίτητες για την αναπαραγωγή των περίπλοκων σχεδίων και επιφανειών που χαρακτηρίζουν τα ιστορικά ψηφιδωτά. Παράλληλα, διαθέτει εξελιγμένα εργαλεία προσομοίωσης (Machine Tool Simulation), επιτρέποντας την προεπισκόπηση της κατεργασίας και την αποφυγή λαθών στην πραγματική παραγωγή. Η υποστήριξη για πολυάξονες CNC μηχανές (3, 4 και 5 άξονες) το καθιστά εξαιρετικά ευέλικτο, ανεξαρτήτως των τεχνικών δυνατοτήτων του εργαστηρίου στο οποίο θα υπάρχει.

Συμπερασματικά, το Siemens NX συνδυάζει υψηλή ακρίβεια, ευελιξία, αξιοπιστία και τεχνική υπεροχή, καθιστώντας το, το πλέον κατάλληλο εργαλείο για την επιτυχία του συγκεκριμένου έργου. Η χρήση του ενισχύει όχι μόνο το τελικό αποτέλεσμα της κατεργασίας, αλλά και την ερευνητική και τεχνολογική εικόνα του φορέα, καθώς ευθυγραμμίζεται πλήρως με τις προδιαγραφές και τις τεχνολογικές απαιτήσεις ενός σύγχρονου Interreg προγράμματος.

3.3.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών CAD/CAM στην κατασκευή καλουπιών για ψηφιδωτά έργα πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως στο πλαίσιο του έργου Mosaic, αποδεικνύεται εξαιρετικά κατάλληλη και τεχνικά αποτελεσματική.



Σχήμα 3.6: Η μικροδομική εξέλιξη στις Ζώνες Θερμοπλαστικής Διάτμησης (ASBs) των οδοντωτών ρινισμάτων που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια κατεργασίας υψηλών ταχυτήτων κοπής (HSMC) του κράματος Ti6Al4V σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής. (α) Εικόνα φωτεινού πεδίου και (β) εικόνα σκοτεινού πεδίου για 250 m/min. (γ) Εικόνα φωτεινού πεδίου και (δ) εικόνα σκοτεινού πεδίου για 375 m/min. (ε) Εικόνα φωτεινού πεδίου και (στ) εικόνα σκοτεινού πεδίου για 500 m/min [43].

Μέσα από την εφαρμογή σύγχρονων στρατηγικών κατεργασίας, όπως η υψηλής ταχύτητας κατεργασία (HSM), όπως φαίνεται και στην έρευνα [43] από το σχήμα 3.15, οι πολυάξονες CNC επεξεργασίες και η βελτιστοποίηση διαδρομών εργαλείου, επιτυγχάνεται ακρίβεια, ταχύτητα και ποιότητα επιφάνειας που ξεπερνούν κατά πολύ τις παραδοσιακές τεχνικές χειροτεχνίας.

Η ψηφιακή αλυσίδα CAD/CAM επιτρέπει όχι μόνο τον αξιόπιστο σχεδιασμό καλουπιών αλλά και την πιστή αναπαραγωγή πολύπλοκων ανάγλυφων μοτίβων, στοιχείων κρίσιμων για την αυθεντικότητα των ψηφιδωτών. Επιπλέον, η χρήση βιομηχανικών προτύπων και λογισμικών με αποδεδειγμένη αξιοπιστία, όπως το Siemens NX, το Fusion 360 ή το Mastercam, εξασφαλίζει τη δυνατότητα επεκτασιμότητας και διαλειτουργικότητας με σύγχρονες εργαλειομηχανές. Σημαντικό είναι επίσης ότι η εν λόγω ροή εργασίας (σαρώσεις, μοντελοποίηση, επεξεργασία και κατασκευή) είναι επαναλήψιμη και τεχνικά επαληθεύσιμη, κάτι που ενισχύει τη βιωσιμότητα μακροχρόνιων πολιτιστικών έργων. Ειδικά σε εφαρμογές με πολύπλοκες επιφάνειες (όπως τα ψηφιδωτά), οι CAM διαδρομές με ελεγχόμενο φορτίο και συνεχείς τροχιές μειώνουν τη φθορά του εργαλείου και αυξάνουν την πιστότητα του τελικού προϊόντος [5]. Παρά τις τεχνικές προκλήσεις που ενδέχεται να παρουσιαστούν, όπως η επιλογή κατάλληλων στρατηγικών CAM για σύνθετες επιφάνειες ή η ανάγκη ρύθμισης ειδικών εργαλείων κοπής, τα οφέλη υπερτερούν κατά πολύ των δυσκολιών. Η μέθοδος προσφέρει ταχύτητα παραγωγής, ακρίβεια, μειωμένο σφάλμα συναρμολόγησης και προσαρμογή σε διαφορετικά υλικά. Στο πλαίσιο της διατήρησης και ανάδειξης της πολιτιστικής κληρονομιάς, η τεχνολογία CAD/CAM αναδεικνύεται όχι μόνο ως κατασκευαστικό εργαλείο, αλλά και ως γέφυρα μεταξύ παράδοσης και καινοτομίας. Με τη σωστή καθοδήγηση και επιλογή τεχνικών, ανοίγει τον δρόμο για ποιοτική, τεκμηριωμένη και αναπαραγώγιμη παραγωγή πολιτιστικών στοιχείων, διασφαλίζοντας τη βιωσιμότητα έργων όπως το Mosaic σε βάθος χρόνου.

Επιλογή λογισμικού CAD/CAM: Σύμφωνα με την βαθμολόγηση της ενότητας 3.3.4 και της υψηλής ακρίβειας αλλά και φιλικότητας προς τους χρήστες που περιέχει το NX Siemens, προτιμάται σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα λογισμικά CAD/CAM για τις ανάγκες του συγκεκριμένου έργου.

3.3.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. L. Encarnacao, R. Lindner, and E. G. Schlechtendahl, *Computer aided design: fundamentals and system architectures*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] David H.. Myszka, *Machines and Mechanisms: Applied Kinematics Analysis*. Prentice Hall, 1999.
- [3] T. R. Kurfess, *Robotics and automation handbook*, vol. 414. CRC press Boca Raton, FL, 2005.
- [4] A. Skorulska, P. Piszko, Z. Rybak, M. Szymonowicz, and M. Dobrzyński, "Review on Polymer, Ceramic and Composite Materials for CAD/CAM Indirect Restorations in Dentistry—Application, Mechanical Characteristics and Comparison," *Materials*, vol. 14, no. 7, p. 1592, Mar. 2021, doi: 10.3390/ma14071592.
- [5] Y. Altintas and A. Ber, "Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design," *Appl Mech Rev*, vol. 54, no. 5, pp. B84–B84, 2001.
- [6] P. Collins, C. Cummings, W. Dittrich, P. Jones, and A. Sealey, "CNC Application and Design," *Worcester Polytech. Inst.*, 2011.
- [7] E. Budak, "Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 12–13, pp. 1478–1488, 2006.
- [8] I. E. Sutherland, "Sketch pad a man-machine graphical communication system," in *Proceedings of the SHARE design automation workshop on - DAC '64*, Not Known: ACM Press, 1964, p. 6.329-6.346. doi: 10.1145/800265.810742.
- [9] D. T. Ross, "Origins of the APT language for automatically programmed tools," in *History of programming languages*, R. L. Wexelblat, Ed., New York, NY, USA: ACM, 1978, pp. 279–338. doi: 10.1145/800025.1198374.
- [10] Autodesk, "AutoCAD History." [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/company/about-us/history>
- [11] D. M. Anderson, *Design for manufacturability & concurrent engineering: how to design for low cost, design in high quality, design for lean manufacture, and design quickly for fast production*. CIM press, 2004.
- [12] D. M. Botín-Sanabria, A.-S. Mihaita, R. E. Peimbert-García, M. A. Ramírez-Moreno, R. A. Ramírez-Mendoza, and J. de J. Lozoya-Santos, "Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 6, p. 1335, 2022.
- [13] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, Aug. 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [14] K. D. Forbus, "Intelligent computer-aided engineering," *AI Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 23–23, 1988.
- [15] Siemens Digital Industries, "NX History." [Online]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/history.html>
- [16] D. Fico, D. Rizzo, F. Montagna, and C. Esposito Corcione, "Fused Filament Fabrication and Computer Numerical Control Milling in Cultural Heritage Conservation," *Materials*, vol. 16, no. 8, p. 3038, Apr. 2023, doi: 10.3390/ma16083038.
- [17] B. Bawono, T. Yuniarto, C. E. P. Sanusi, S. Felasari, O. K. W. Widyanarka, and P. W. Anggoro, "Optimization of virtual design and machining time of the mold master ceramic jewelry products with Indonesian batik motifs," *Front. Mech. Eng.*, vol. 9, p. 1276063, Jan. 2024, doi: 10.3389/fmech.2023.1276063.
- [18] A. Lungu, A. Androne, L. Gurău, and C. Coşereanu, "Simulating traditional textile heritage motifs by applying CAD-CAM-CAE tool for furniture decoration," presented at the MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2021, p. 04012.
- [19] Pragostroj, "Production of moulds for casting historical architectural elements using retopography - laser scanning." [Online]. Available: <https://www.pragostroj.cz/en/2023/05/19/replication-of-original-architectural-elements/#:~:text=This%20digital%20model%20can%20then,looks%20just%20like%20the%20original>
- [20] N. R. Dartora *et al.*, "Mechanical behavior of endocrowns fabricated with different CAD-CAM ceramic systems," *J. Prosthet. Dent.*, vol. 125, no. 1, pp. 117–125, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.prosdent.2019.11.008.
- [21] I. G. de Almeida, D. B. Antunes, N. X. Braun, A. Restani, F. G. Straioto, and G. A. Galhano,

- “CAD/CAM system influence marginal fit of different ceramic types?,” *Indian J. Dent. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 127–129, 2019.
- [22] F. Li, C. Achille, G. P. M. Vassena, and F. Fassi, “The Application of Three Dimensional Digital Technologies in Historic Gardens and Related Cultural Heritage: A Scoping Review,” *Heritage*, vol. 8, no. 2, p. 46, Jan. 2025, doi: 10.3390/heritage8020046.
- [23] X. Wang, R. H. B. Wardi, and R. B. Ghazali, “Evaluation of Virtual Reality Cultural Heritage Experience at Guilin Museum, China: A Conceptual Paper,” *Malays. J. Soc. Sci. Humanit. MJSSH*, vol. 10, no. 1, p. e003111, Jan. 2025, doi: 10.47405/mjssh.v10i1.3111.
- [24] O. Yezhova, J. Zhao, and K. Pashkevych, “Exploring Design Aspects of Online Museums: From Cultural Heritage to Art, Science and Fashion,” *Preserv. Digit. Technol. Cult.*, vol. 54, no. 1, pp. 35–50, Apr. 2025, doi: 10.1515/pdte-2024-0044.
- [25] Guadayo Chrisly, “Cinematografo de Lumière: A Cultural Heritage and Speculative Design Approach to Reimagining the Lost Architecture of the Second Cinema House in the Philippines Explored Through Visual Communication Design in Spatial Layouts, 3D Visualization and Physical Maquette,” 2025.
- [26] Q. Zou, Y. Wu, Z. Liu, W. Xu, and S. Gao, “Intelligent CAD 2.0,” *Vis. Inform.*, vol. 8, no. 4, pp. 1–12, 2024.
- [27] S. Kumar, S. Kapoor, H. Vardhan, and Y. Zhao, “Generative AI for CAD Automation: Leveraging Large Language Models for 3D Modelling,” *ArXiv Prepr. ArXiv250800843*, 2025.
- [28] F. Banfi, “The Evolution of Interactivity, Immersion and Interoperability in HBIM: Digital Model Uses, VR and AR for Built Cultural Heritage,” *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 10, no. 10, p. 685, Oct. 2021, doi: 10.3390/ijgi10100685.
- [29] A. M. Farouk, H. Naganathan, R. A. Rahman, and J. Kim, “Exploring the Economic Viability of Virtual Reality in Architectural, Engineering, and Construction Education,” *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2655, Aug. 2024, doi: 10.3390/buildings14092655.
- [30] C. Liu, X. Liu, F. Wu, M. Xie, Y. Feng, and C. Hu, “Using Artificial Intelligence (Watson for Oncology) for Treatment Recommendations Amongst Chinese Patients with Lung Cancer: Feasibility Study,” *J. Med. Internet Res.*, vol. 20, no. 9, p. e11087, Sept. 2018, doi: 10.2196/11087.
- [31] P. Pando Cerra, H. Fernández Álvarez, B. Busto Parra, and S. Castaño Busón, “Boosting computer-aided design pedagogy using interactive self -**assessment** graphical tools,” *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 31, no. 1, pp. 26–46, Jan. 2023, doi: 10.1002/cae.22569.
- [32] N. Inie, J. Falk, and S. Tanimoto, “Designing Participatory AI: Creative Professionals’ Worries and Expectations about Generative AI,” in *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Hamburg Germany: ACM, Apr. 2023, pp. 1–8. doi: 10.1145/3544549.3585657.
- [33] O. Kravchenko and S. Green, “FUTURE PROOFING COMPUTER-AIDED DESIGN EDUCATION THROUGH AI-DRIVEN E-LEARNING,” presented at the DS 131: Proceedings of the International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE 2024), 2024, pp. 336–341.
- [34] M. Hallmann, S. Goetz, and B. Schleich, “Mapping of GD&T information and PMI between 3D product models in the STEP and STL format,” *Comput.-Aided Des.*, vol. 115, pp. 293–306, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.cad.2019.06.006.
- [35] M. J. Pratt, “Introduction to ISO 10303—the STEP standard for product data exchange,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 102–103, 2001.
- [36] S. Marjudi, M. M. Amran, K. A. Abdullah, S. Widyarto, N. A. Majid, and R. Sulaiman, “A Review and Comparison of IGES and STEP,” presented at the Proceedings Of World Academy Of Science, Engineering And Technology, 2010, pp. 1013–1017.
- [37] S. Chattopadhyay, S. D. Mahapatra, and N. K. Mandal, “Advancements and challenges in additive manufacturing: a comprehensive review,” *Eng. Res. Express*, vol. 6, no. 1, p. 012505, 2024.
- [38] Siemens Digital Industries, “Siemens NX Documentaions.” [Online]. Available: <https://community.sw.siemens.com/s/topic/0TO4O000000MiiIWAC/nx-cam>
- [39] Autodesk, “Fusion 360 Overview.” [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

- [40] Dassault Systems, “CATIA Whitepaper.”
- [41] Mastercam Capabilities, “CNC Software.” [Online]. Available: <https://www.mastercam.com>
- [42] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS book*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [43] H. Liu, J. Zhang, X. Xu, and W. Zhao, “Experimental study on fracture mechanism transformation in chip segmentation of Ti-6Al-4V alloys during high-speed machining,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 257, pp. 132–140, July 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.040.