ePublishing
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ
NATIONAL DOCUMENTATION CENTRE

ACAWA-GR Conference Proceedings

Τόμ. 1, Αρ. 1 (2024)

Συντηρητές σε Ψηφιακό Περιβάλλον

Η χρήση των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής για την αισθητική αποκατάσταση κεραμικών και γυάλινων αντικειμένων

Ε. Καρτάκη, G. Earl

doi: 10.12681/acawa-grcp.7200

https://epublishing.ekt.gr | **e-Εκδότης:** ΕΚΤ | **Πρόσβαση:** 20/01/2026 21:00:52

Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΥΑΛΙΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

Ε. Καρτάκη[1], G. Earl[1]
[1]King's College London, Strand, London WC2R 2LS, United Kingdom

Περίληψη

Η αισθητική αποκατάσταση αρχαιολογικών αντικειμένων αποσκοπεί στη βελτίωση της αναγνωσιμότητας της μορφής του αντικειμένου, σεβόμενη την αυθεντικότητα και την ιστορία του. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αισθητικής αποκατάστασης περιλαμβάνουν την αναδημιουργία χαμένων κομματιών με ελεύθερο χέρι ή μεθόδους χύτευσης και την επανασυναρμολόγησή τους. Σήμερα, τεχνολογικές μέθοδοι, όπως η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) μπορούν να συμπληρώσουν τις παραδοσιακές τεχνικές, προσφέροντας λύσεις σε προβλήματα αποκατάστασης και εξελίσσοντας την αισθητική αποκατάσταση στο σύνολό της. Αυτό το άρθρο περιλαμβάνει τα πρώτα στάδια της έρευνας που βρίσκεται σε εξέλιξη, σχετικά με τη χρήση της μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής για την αισθητική αποκατάσταση κεραμικών και γυάλινων αντικειμένων, αναλύοντας τις τεχνολογίες και τα υλικά που είναι διαθέσιμα σήμερα και παρουσιάζοντας τη μεθοδολογία που ακολουθείται για την εφαρμογή, δοκιμή και αξιολόγηση της μεθόδου και των υλικών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αισθητική αποκατάσταση είναι συνήθως το τελευταίο στάδιο εργασιών συντήρησης αρχαιολογικών αντικειμένων, ακολουθώντας τις διαδικασίες της στερέωσης και καθαρισμού. Η αισθητική αποκατάσταση αποσκοπεί στη βελτίωση της αναγνωσιμότητας της μορφής του αντικειμένου, σεβόμενη ταυτόχρονα την αυθεντικότητα και την ιστορία του. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αισθητικής αποκατάστασης περιλαμβάνουν την αναδημιουργία των χαμένων κομματιών με ελεύθερο χέρι ή με τη μέθοδο της χύτευσης. Το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις δεξιότητες του εκάστοτε συντηρητή.

Οι τεχνολογική εξελίξεις, όπως η μέθοδος της Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing - εφεξής ΠΚ), μπορούν να συμπληρώσουν τις παραδοσιακές τεχνικές, δίνοντας αποτελέσματα που μπορούν να είναι πιο αντικειμενικά, κυρίως όσον αφορά την επαναληψιμότητα. Μπορούν επίσης να δώσουν νέες λύσεις στην αποκατάσταση και επανασυναρμολόγηση των χαμένων κομματιών, βελτιώνοντας και αναβαθμίζοντας τις επεμβάσεις αισθητικής αποκατάστασης στο σύνολό τους.

2. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η μέθοδος της ΠΚ είναι σχεδόν 40 ετών, αν και οι τεχνολογίες της άρχισαν να γίνονται πιο ευρέως γνωστές απο τις αρχές της δεκαετίας του 2010. Η πρώτη τεχνολογία ΠΚ, δημιουργήθηκε από τον Charles "Chuck" W. Hull το 1983-84, και ονομάστηκε StereoLithography Apparatus (SLA). Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων ανά στρώματα. Η τρισδιάστατη μορφολογία των στρωμάτων δημιουργείται στους άξονες XZ, ενώ ταξινομούνται το ένα πάνω στο άλλο στον άξονα Y. Το μηχάνημα αποτελείται από ένα δοχείο με μία επιφάνεια εκτύπωσης εσωτερικά του και μία κεφαλή εκτύπωσης, η οποία εκπέμπει υπεριώδη φως. Το δοχείο γεμίζει με υγρή ρητίνη και η επιφάνεια εκτύπωσης βρίσκεται στην ψηλότερη θέση, αφήνοντας μόνο ένα λεπτό στρώμα ρητίνης στην επιφάνειά της. Το υπεριώδες φως πέφτει πάνω στην ρητίνη και την σταθεροποιεί, σχηματίζοντας το πρώτο στρώμα του αντικειμένου. Έπειτα η επιφάνεια εκτύπωσης χαμηλώνει ένα επίπεδο, η υγρή

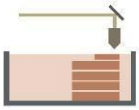
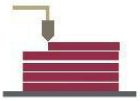
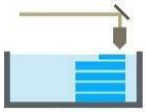
ρητίνη σκεπάζει το πρώτο στρώμα της ρητίνης που έχει σταθεροποιηθεί και το υπεριώδες φως πέφτει στο νέο στρώμα υγρής ρητίνης, σταθεροποιώντας την και σχηματίζοντας το δεύτερο στρώμα του αντικειμένου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να δημιουργηθούν όλα τα στρώματα του αντικειμένου και να ολοκληρωθεί η δημιουργία του [1-3].

Για τη δημιουργία του τρισδιάστατου αντικειμένου σε στρώματα χρησιμοποιείται ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο και η χρήση CAD λογισμικού. Το λογισμικό "τεμαχίζει" το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο και το αποθηκεύει σε μορφή αρχείου STL. Το αρχείο STL δημιουργήθηκε από τον Hull και πήρε το όνομά του από τη συντομογραφία της λέξης StereoLithography. Είναι μία μορφή αρχείου που βοηθάει το μηχάνημα της ΠΚ να αναγνωρίσει το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο και να το δημιουργήσει ανά στρώματα [4-5].

2.1 Τεχνικές και τεχνολογίες

Σήμερα υπάρχουν διαθέσιμες διάφορες τεχνολογίες ΠΚ, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα κατασκευής, την ανάλυση, την ποιότητα, το κόστος, τον όγκο κατασκευής, το φινίρισμα της επιφάνειας και την αντοχή που έχει το αντικείμενο. Για την κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών σε τεχνικές, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization, ISO) / Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials, ASTM) χρησιμοποιεί τις πιο κρίσιμες θεμελιώδεις ιδιότητες, π.χ. ταχύτητα κατασκευής και ανάλυση, για να ταξινομήσει τις τεχνολογίες σε επτά κατηγορίες τεχνικών: (1) Binder Jetting, (2) Powder Bed Fusion, (3) Directed Energy Deposition, (4) Material Extrusion, (5) Material Jetting, (6) Sheet Lamination και (7) Vat Photopolymerization. Η κάθε τεχνική χρησιμοποιεί διαφορετική μέσο συνδετικού παράγοντα και τύπο πρώτης ύλης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 [6-9].

Πίνακας 1: *Τεχνικές και τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής*

Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής							
Τεχνικές	**Binder Jetting**	**Powder Bed Fusion**	**Directed Energy Deposition**	**Material Extrusion**	**Material Jetting**	**Sheet Lamination**	**Vat Photopolymerization**
Σχηματική διαδικασία							
Τεχνολογίες	Three-dimensional printing (3DP)	Selective Laser Sintering (SLS)	Laser Metal Deposition (LMD)	Fused Deposition Modelling (FDM)	Inkjet Printing (IJP)	Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)	Stereolithography Apparatus (SLA)
		Selective Laser Melting (SLM)	Laser Engineered Net Shaping (LENS)		Multi-Jet Modelling (MJM)	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Digital Light Processing (DLP)
		Electron Beam Melting (EBM)	Directed Light Fabrication (DLF)		Thermojet		Continuous Digital Light Processing (CDLP)
Λεπτομέρεια εκτύπωσης	Πολύ καλή Πάχος επιπέδου: 0,035-0,4 mm Ακρίβεια διαστάσεων: 0,05 mm	Χαμηλή Πάχος επιπέδου: 0,1-0,15mm (SLS) 0,02-0,05mm (SLM) Ακρίβεια διαστάσεων: 0,3mm (SLS) 0,1mm (SLM)	Καλή Πάχος επιπέδου: 0,01-0,05 mm Ακρίβεια διαστάσεων: 0,1mm	Χαμηλή Πάχος επιπέδου: 0,05-0,4 mm Ακρίβεια διαστάσεων: 0,2 mm	Πολύ Καλή Πάχος επιπέδου: 0,016-0,032 mm Ακρίβεια διαστάσεων: 0,05 mm	Χαμηλή	Εξαιρετική Πάχος επιπέδου: 0,001-0,1 mm Ακρίβεια διαστάσεων: 0,01 mm

2.2 Υλικά

Όταν η μέθοδος της ΠΚ δημιουργήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του ‘80, το βασικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν τα πολυμερή. Από τότε, και με την εξέλιξη της τεχνολογίας, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα υλικά, τα οποία κατατάσσονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τις χημικές τους ιδιότητες: (i) πολυμερή, (ii) κεραμικά (όπου συμπεριλαμβάνονται και τα γυαλιά), (iii) μέταλλα και (iv) σύνθετα υλικά, τα οποία είναι συνδυασμοί υλικών των προηγούμενων κατηγοριών [5,10].

2.2.1 Πολυμερή

Τα πολυμερή υλικά ήταν τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με τη χρήση της μεθόδου ΠΚ, και θεωρούνται τα πιο διαδεδομένα υλικά μέχρι και σήμερα. Στην αγορά υπάρχει μεγάλη ποικιλία πολυμερών με διάφορα χαρακτηριστικά, έτοιμα για χρήση με την ΠΚ και με χαμηλό κόστος. Τα πολυμερή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα. Τα θερμοπλαστικά είναι υλικά τα οποία μπορούν λιώσουν και να ψυχθούν πολλές φορές και αναπαράγουν ιδιότητες άλλων φυσικών υλικών. Διαχωρίζονται σε κρυσταλλικά και άμορφα θερμοπλαστικά πολυμερή. Τα κρυσταλλικά (π.χ. PLA και PP) έχουν πολύ οργανωμένα μόρια στη σύστασή τους και γίνονται υγρά σε ακριβή θερμοκρασία, είναι πιο ανθεκτικά στη θερμότητα, δεν παραμορφώνονται εύκολα και παράγουν γερά μοντέλα. Τα άμορφα δομημένα θερμοπλαστικά πολυμερή (π.χ. ABS και HiPS) δεν έχουν συγκεκριμένη θερμοκρασία τήξης και δίνουν πιο ευέλικτα τρισδιάστατα μοντέλα [11-12].

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή (π.χ. σιλικόνη, πολυεστέρες), σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά πολυμερή, παραμένουν στην ίδια στερεή κατάσταση αφ ότου σταθεροποιηθούν, και μπορούν να αλλάξουν σχήμα με τη βοήθεια χημικής αντίδρασης ή εάν η θερμοκρασία είναι τόσο υψηλή που διαβρώσει το αντικείμενο [13-16].

2.2.2 Κεραμικά

Τα κεραμικά υλικά άρχισαν να χρησιμοποιούνται ως υλικό ΠΚ στις αρχές της δεκαετίας του ‘90. Η σύνθεσή τους δεν αποτελείται από πηλό, αλλά από ένα μείγμα σκόνης με πρόσθετα και μερικές φορές συνδετικά, με προσαρμοσμένες ιδιότητες για την κάλυψη των αναγκών των τεχνικών εφαρμογών. Κάποιες από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες τους είναι η μηχανική αντοχή και σκληρότητα, η θερμική και χημική σταθερότητα, η οπτική, ηλεκτρική και μαγνητική απόδοση, το μέγεθος των σωματιδίων, η ρευστότητα, η τραχύτητα και η διαβρεξιμότητα. Ωστόσο, το αποτέλεσμα της τρισδιάστατης κατασκευής εξαρτάται και από την επιλεχθείσα τεχνική, μιας και όλες οι τεχνικές δεν δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα [10,17-18].

2.2.3 Μέταλλα

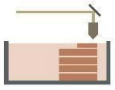
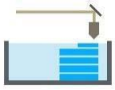
Τα μεταλλικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην ΠΚ στις αρχές της δεκαετίας του ‘90, από την εταιρεία EOS, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία SLS. Παράγοντες όπως η καλύτερη μηχανική αντοχή, η αντοχή στη θερμότητα και οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα πολυμερή, έχουν επηρεάσει θετικά την ανάπτυξη της ΠΚ μεταλλικών αντικειμένων. Τα μέταλλα τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα είναι αλουμίνιο, χαλκός, χρωμίτης, κοβάλτιο, χρυσός, ιρίδιο, σίδηρος, μαγνήσιο, νικέλιο, νιόβιο, πλατίνα, πυρίμαχο μέταλλο, ασήμι, χάλυβας, κασσίτερος, τιτάνιο, ψευδάργυρος και ζιρκόνιο [4, 19-23].

2.2.4 Σύνθετα υλικά

Στα μέσα της δεκαετίας του ‘90 ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται τα σύνθετα υλικά στην ΠΚ, τα οποία αποτελούνται από τον συνδυασμό των προηγούμενων τριών κατηγοριών. Σκοπός τους είναι να παρέχουν περισσότερες ιδιότητες και πιο βελτιωμένες δυνατότητες από τα

μεμονωμένα υλικά. Για το λόγο αυτό, τα σύνθετα υλικά δημιουργούνται λαμβάνοντας υπόψη τον σκοπό της προοριζόμενης χρήσης τους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ψηφιακά και τα έξυπνα υλικά. Τα ψηφιακά υλικά αποτελούνται από πολυμερή τα οποία προσαρμόζουν τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. χρώμα, υφή, τοπική σκληρότητα) και μπορούν να μιμηθούν φωτορεαλιστικές λεπτομέρειες και χαρακτηριστικά φυσικών υλικών. Τα υλικά αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί στην μηχανολογία και την ιατρική. Τα έξυπνα υλικά, ή αλλιώς 4D υλικά, είναι εκείνα τα οποία μπορούν να αλλάζουν την αρχική γεωμετρία τ√ου τρισδιάστατου αντικειμένου κατά τη διάρκεια του χρόνου, μεταβάλλοντας εξωτερικά ερεθίσματα, όπως υγρασία, θερμοκρασία, φώς, αέρα και μαγνητική ενέργεια. Η μεταβολή στη γεωμετρία τους περιλαμβάνει δίπλωση, λύγισμα, περιστροφή, συρρίκνωση ή διαστολή [24-27].

Πίνακας 2: *Υλικά Προσθετικής Κατασκευής ανά τεχνική.*

Υλικά Προσθετικής Κατασκευής								
Τεχνικές		**Binder Jetting**	**Powder Bed Fusion**	**Directed Energy Deposition**	**Material Extrusion**	**Material Jetting**	**Sheet Lamination**	**Vat Photopolymer-ization**
Σχηματική διαδικασία								
Υλικά	**Κεραμικό**	✓				✓		✓
	Γυαλί	✓						
	Μέταλλο	✓	✓	✓		✓	✓	
	Πολυμερή	✓	✓		✓	✓		✓
	Χαρτί						✓	
Τύπος υλικού		Σκόνη	Σκόνη	Σκόνη	Στερεό	Υγρό	Στερεό	Υγρό

3. Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

Τα τελευταία 10 χρόνια η μέθοδος ΠΚ έχει εφαρμοστεί σε περιπτώσεις αισθητικής αποκατάστασης αντικειμένων Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Ένα από τα πρώτα παραδείγματα είναι από το Εθνικό Μουσείο Σλοβενίας, όπου συντηρητές χρησιμοποίησαν την ΠΚ για να αποκαταστήσουν τη βάση μιας κεραμικής φρουτιέρας [28]. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί επίσης για την κατασκευή συμπληρωματικών κομματιών σε κεραμικό άγαλμα [29], πρόταση υβριδικής επανασυναρμολόγησης κεραμικών δοχείων [30], ως παράδειγμα αποκατάστασης χαμηλού κόστους σε πέτρινα αγάλματα [31], για την αποκατάσταση διακοσμητικού μοτίβου ξύλινης καρέκλας [32], για την χαμηλού κόστους αποκατάσταση κεραμικών δοχείων [33] και την αποκατάσταση μαρμάρινου αγάλματος [34]. Τα υλικά ΠΚ που χρησιμοποιήθηκαν είναι κεραμικές σκόνες [28-29], πολυμερή [30-33], και σύνθετο υλικό σκόνης μαρμάρου και πολυμερούς [34].

Το 2018 ερευνητές από το Πανεπιστήμιο της Φλόριντα δημοσίευσαν τη μελέτη τους σχετικά με τη σταθερότητα και ασφάλεια θερμοπλαστικών πολυμερών υλικών [35]. Ωστόσο, καμία μελέτη δεν έχει γίνει για κεραμικά και γυάλινα, σύνθετα ή μη, υλικά ΠΚ, ως προς την καταλληλόλητα τους για τη χρήση τους στη συντήρηση αρχαιοτήτων και έργων τέχνης. Αυτό είναι ένα από τα ερωτήματα της έρευνας που παρουσιάζεται σε αυτό το άρθρο.

3.1 Η μεθοδολογία της έρευνας

Για να απαντηθεί το συγκεκριμένο ερώτημα έγινε αρχικά βιβλιογραφική ανασκόπηση σε δύο τομείς: στον τομέα της συντήρησης και στον τομέα της ΠΚ. Στον τομέα της συντήρηση έγινε

ανάλυση των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής, των φθορών που τα αντικείμενα μπορεί να υποστούν και των παραδοσιακών επεμβάσεων συντήρησης κεραμικών και γυάλινων αντικειμένων, με έμφαση στο στάδιο της αισθητικής αποκατάστασης. Επιπλέον έγινε αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται από τους συντηρητές για να αξιολογήσουν τα υλικά αποκατάστασης πριν την εφαρμογή τους, καθώς και στις ψηφιακές μεθόδους καταγραφής αισθητικής αποκατάστασης των κεραμικών και γυάλινων αντικειμένων. Στον τομέα της ΠΚ έγινε ανάλυση των τεχνολογιών και των υλικών ΠΚ που είναι σήμερα διαθέσιμα, των τρόπων αναπαραγωγής των ιδιοτήτων των αντικειμένων, ενώ μελετήθηκαν παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου στον τομέα της Πολιτιστικής Κληρονομιάς, με ιδιαίτερη έμφαση την αισθητική αποκατάσταση. Την βιβλιογραφική ανασκόπηση ακολούθησε πρακτική εφαρμογή της μεθόδου ΠΚ για την δημιουργία χαμένων τμημάτων από κεραμικά και γυάλινα αντικείμενα, και η αισθητική αποκατάσταση των αυθεντικών αντικειμένων με τη χρήση των νέων κομματιών. Στόχος της πρακτικής εφαρμογής είναι η εύρεση κατάλληλων υλικών Προσθετικής Κατασκευής για την αισθητική αποκατάσταση κεραμικών και γυάλινων αντικειμένων, και η αξιολόγηση της συνολικής διαδικασίας της αισθητικής αποκατάστασης με τη χρήση της μεθόδου ΠΚ ως προς το αισθητικό αποτέλεσμα, τον χρόνο και το κόστος εφαρμογής, και άλλων επιπτώσεων στη διατήρηση αντικειμένων.

3.2 Αντικείμενα μελέτης

Τα αντικείμενα που επιλέχθηκαν για την πρακτική εφαρμογή προέρχονται από τις συλλογές του Βρετανικού Μουσείου, στο Λονδίνο του Ηνωμένου Βασιλείου. Επιθυμητό ήταν να χρησιμοποιηθούν αντικείμενα από διάφορες γεωγραφικές περιοχές και χρονικές περιόδους, καλύπτοντας έτσι μεγαλύτερο φάσμα υλικών κατασκευής και μεθόδων. Τελικώς επιλέχθηκαν τρία κεραμικά αντικείμενα από την Ελληνική και Ρωμαϊκή συλλογή (Εικόνα 1), δύο κεραμικά αντικείμενα από την Ασιατική συλλογή και ένα γυάλινο αντικείμενο από την Ισλαμική συλλογή (Εικόνα 2).

Όλα τα αντικείμενα ψηφιοποιήθηκαν με τη χρήση της φωτογραμμετρίας. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εργαστήριο συντήρησης, λόγο της εύκολης πρόσβασης στον απαραίτητο εξοπλισμό. Παρόλα αυτά, σε κάποια από τα αντικείμενα λόγο των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των επιφανειών τους (διαφάνεια, γυαλιστερό μαύρο, γυαλιστερό λευκό) δεν ήταν εύκολο να εφαρμοστεί η μέθοδος της φωτογραμμετρίας με επιτυχία και να δημιουργηθούν άρτια τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα.

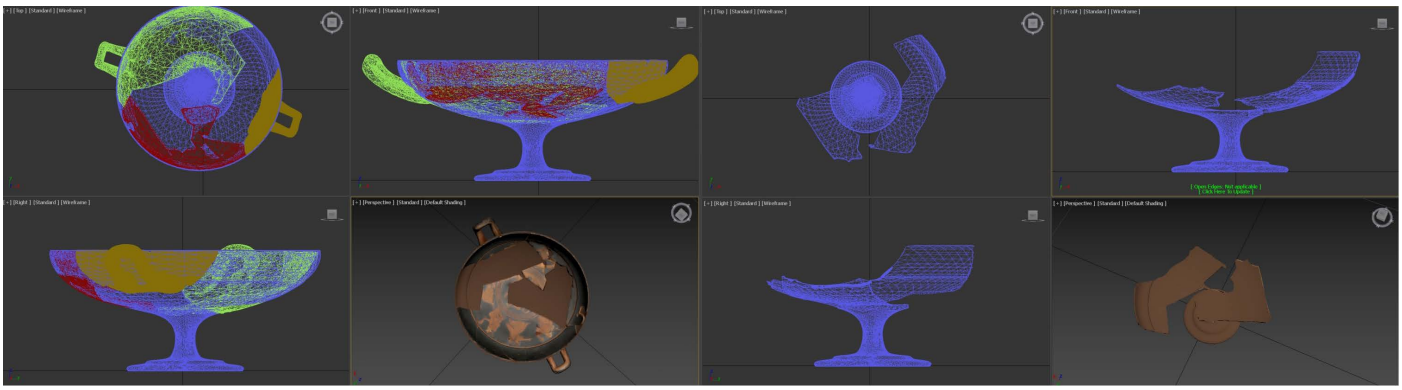
Εικόνα 1: *Τα αντικείμενα από την Ελληνική Και Ρωμαϊκή συλλογή. Από αριστερά προς τα δεξιά: τρία θραύσματα Αττικού Κύλικα, Οινοχόη και Κρατήρας. (© Ε. Καρτάκη, με την ευγενική άδεια του Βρετανικού Μουσείου)*

Εικόνα 2: *Τα αντικείμενα από την Ασιατική και την Ισλαμική συλλογή. Από αριστερά προς δεξιά: Φιγούρα ανθρωπόμορφου τέρατος, Πιατάκι και γυάλινο Δοχείο. (© Ε. Καρτάκη, με την ευγενική άδεια του Βρετανικού Μουσείου)*

Επόμενο βήμα ήταν η ψηφιακή αποκατάσταση των αντικειμένων. Σκοπός της ψηφιακής αποκατάστασης ήταν η αναδημιουργία των χαμένων κομματιών των αντικειμένων σε ψηφιακή μορφή και η αποθήκευσή τους σε αρχεία STL, ώστε να μπορούν χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία φυσικών κομματιών με τη μέθοδο της ΠΚ. Η εκάστοτε ψηφιακή αποκατάσταση έγινε βάσει υποδείξεων των επιμελητών των συλλογών του Μουσείου, έπειτα από συνέντευξη μαζί τους. Οι τεχνικές ψηφιακής αισθητικής αποκατάστασης που ακολουθήθηκαν, βασίστηκαν

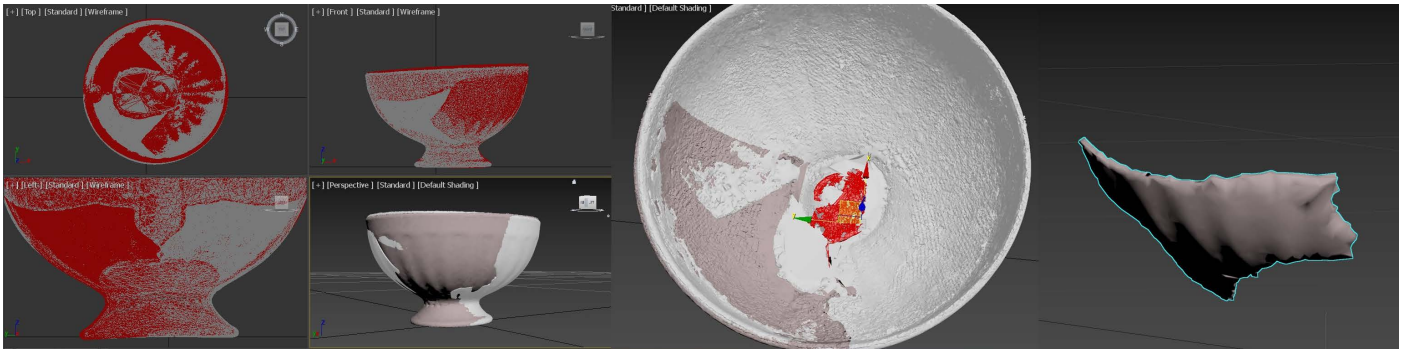
σε παραδείγματα άλλων ερευνητών και επιλέχθηκαν βάση των διαθέσιμων δεδομένων του εκάστοτε αντικειμένου. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Autodesk, AutoCAD, Autodesk 3ds Max και MeshLab.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση του Αττικού Κύλικα επιλέχθηκε η δημιουργία ενός νέου κύλικα στο Autodesk AutoCAD, βασισμένο σε διαθέσιμο αρχαιολογικό σχέδιο του απεικονίζει την τομή του. Έπειτα στο Autodesk 3ds Max, τοποθετήθηκαν τα τρία θραύσματα του Κύλικα πάνω στον νέο κύλικα, και με τη χρήση της εντολής Boolean αφαιρέθηκαν από τον νέο κύλικα, αφήνοντας το κομμάτι του κύλικα που απουσιάζει από το αυθεντικό αντικείμενο (Εικόνα 3). Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στο παράδειγμα των [33]. Στην περίπτωση της Φιγούρας ανθρωπόμορφου τέρατος, χρησιμοποιήθηκε στο MeshLab το ίδιο το αντικείμενο για τη δημιουργία του μπροστινού ποδιού, και ένα δεύτερο αντικείμενο, πανομοιότυπο με το αντικείμενο της μελέτης, για τα δύο πίσω πόδια, ακολουθώντας το παράδειγμα των [32] και [31] αντίστοιχα (Εικόνα 4). Το παράδειγμα του [31] ακολουθήθηκε και στην περίπτωση της Οινοχόης. Στην περίπτωση του γυάλινου Δοχείου, το αρχικό πλάνο ήταν να χρησιμοποιηθεί στο Autodesk 3ds Max το ίδιο το αντικείμενο και να αναδημιουργηθεί το χαμένο κομμάτι όπως στο παράδειγμα των [35]. Παρόλα αυτά, το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο δεν ήταν κατάλληλο για τη χρήση της εντολής Boolean, και το χαμένο κομμάτι αναδημιουργήθηκε αφαιρώντας με ελεύθερο χέρι τα υπόλοιπα μέρη του δοχείου, αφήνοντας εκείνο που εικάζεται ότι εφαρμόζει κατάλληλα στην οπή του (Εικόνα 5).



Εικόνα 3: *Αττικός Κύλικας. Τα τρία θραύσματα τοποθετήθηκαν πάνω στον νέο κύλικα και αφαιρέθηκαν, δημιουργώντας το κομμάτι του κύλικα που λείπει από το αυθεντικό κομμάτι.*

Εικόνα 4: *Φιγούρα ανθρωπόμορφου τέρατος και η δημιουργία των χαμένων ποδιών, χρησιμοποιώντας το αντικείμενο της μελέτης για το μπροστινό πόδι και ενός παρόμοιου για τα δύο πίσω πόδια.*



Εικόνα 5: *Γυάλινο Μπολ. Η δημιουργία του χαμένου κομματιού, χρησιμοποιώντας το αντικείμενο της μελέτης και αφαιρώντας με ελεύθερο χέρι τα μέρη του αντικειμένου που δεν χρειάζονται.*

3.3 Υλικά Προσθετική Κατασκευής

Για την εύρεση του κατάλληλου υλικού ΠΚ χρησιμοποιήθηκε το Oddy Test , το οποίο που χρησιμοποιούν οι συντηρητές για να αξιολογήσουν παραδοσιακά υλικά συντήρησης [37-39]. Χρησιμοποιώντας την διαδικτυακή βάση δεδομένων Sevnol.com, εντοπίστηκαν προμηθευτές κεραμικών και γυάλινων υλικών ΠΚ, από τους οποίους ζητήθηκε η συμβολή τους στην έρευνα αυτή, στέλνοντας δείγμα του υλικού τους. Η ίδια προσέγγιση έγινε σε Ινστιτούτα και Πανεπιστήμια του Ηνωμένου Βασιλείου που ασχολούνται με την ΠΚ, καθώς και στην ελληνική εταιρία THETIS Authentics Ltd, για τη συμβολή υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πιστών αντιγράφων αρχαιολογικών κεραμικών αγγείων. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσπάθειας αυτής.

Πίνακας 3: *Αριθμός προμηθευτών και οργανισμών που προσεγγίστηκαν ώστε να συμβάλουν στην έρευνα με δείγματα υλικών, και τα αποτελέσματα της προσέγγισης.*

Συλλογή υλικών Προσθετικής Κατασκευής				
Οργανισμοί και προμηθευτές υλικών	**Επικοινωνία**	**Απάντησαν**	**Συμφώνησαν να συνεισφέρουν**	**Σύνολο υλικών**
Προμηθευτές κεραμικών υλικών	9	4	1	6
Προμηθευτές γυάλινων υλικών	34	1	1	2
Ινστιτούτα και πανεπιστήμια	7	5	3	9
Σύνολο	50	10	5	17

Το Oddy Test πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια συντήρησης του Μουσείου Φυσικής Ιστορίας στο Λονδίνο, Ηνωμένου Βασιλείου, από επαγγελματίες συντηρητές, οι οποίοι και αξιολόγησαν τα αποτελέσματα (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: *Αποτελέσματα από το Oddy test των υλικών Προσθετικής Κατασκευής.*

Οργανισμοί και προμηθευτές υλικών	**Σύνολο υλικών**	**Κατάλληλα υλικά για μακροπρόθεσμη χρήση**	**Κατάλληλα υλικά για βραχυπρόθεσμη χρήση**	**Ακατάλληλα**
Προμηθευτές κεραμικών υλικών	6	1	5	0
Προμηθευτές γυάλινων υλικών	2	0	1	1
Ινστιτούτα και πανεπιστήμια	9	1	7	1
Σύνολο	17	2	13	2

4. ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ

Έχοντας τα ψηφιακά αρχεία STL έτοιμα και γνωρίζοντας ποια υλικά ΠΚ θεωρούνται κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν στην αποκατάσταση κεραμικών και γυάλινων αντικειμένων, η έρευνα είναι έτοιμη να περάσει στο επόμενο στάδιο της αναδημιουργίας των χαμένων κομματιών με τη χρήση της ΠΚ. Όταν τα νέα κομμάτια είναι έτοιμα θα χρησιμοποιηθούν για να γίνει η τελική αισθητική αποκατάσταση των αντικειμένων. Έπειτα, θα πραγματοποιηθεί μία δεύτερη συνέντευξη με τους επιμελητές των συλλογών και τους συντηρητές του Βρετανικού Μουσείου, όπου θα συζητηθούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής και άλλες πιθανές μελλοντικές εφαρμογές. Στη συνέχεια θα γίνει μία ανάλυση κόστους οφέλους όπου θα περιλαμβάνει το αισθητικό αποτέλεσμα, τις ιδιότητες του υλικού, την ακρίβεια του εκτυπωμένου αντικειμένου, την οικονομική και χρονική δαπάνη. Τέλος θα γίνει μία συζήτηση εφ όλης της ύλης για την εφαρμογή της πρόσθετης κατασκευής ως πρακτική αισθητικής αποκατάστασης στη συντήρηση αρχαιοτήτων και έργων τέχνης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] C. Balletti et al., 3D printing: State of the art and future perspectives. Journal of Cultural Heritage, 2017, vol. 26, pp. 172–182

[2] R. Vaidyanathan, Additive manufacturing technologies for polymers and composites, in Amit Bandyopadhyay & Susmita Bose (eds.) Additive Manufacturing, 2016, Taylor & Francis Group

[3] I. Hager et al., 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? Procedia Engineering, 2016, vol. 151, pp 292–299

[4] A. Bandyopadhyay and S. Bose, Additive Manufacturing, 2016, New York: Taylor & Francis Group

[5] I. Gibson et al., Additive manufacturing technologies, 2015, Springer

[6] J.Y. Lee et al., Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. Applied Materials Today, 2017, vol. 7, pp 120–133

[7] N. Afshar-Mohajer et al., Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer, Building and Environment, 2015, vol. 93 pp. 293–301

[8] M. Hofmann, 3D Printing Gets a Boost and Opportunities with Polymer Materials, 2014, https://pubs.acs.org/sharingguidelines (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[9] ASTM F2792-12, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015), ASTM International, 2012, www.astm.org (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[10] H. Campos, 3D Printing Materials: 2018 Quick Guide – Beamler, 2018, https://www.beamler.com/3d-printing-materials/ (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[11] Filaments Directory, What is 3D printing filament made of?, 2018, https://www.filaments.directory/en/plastics (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[12] Crow Polymer Properties Database Elastomers, 2015, https://polymerdatabase.com/Elastomers/Elastomers.html (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[13] A.T. Marques, Fibrous materials reinforced composites production techniques, in R. Fangueiro (ed.) Fibrous and composite materials for civil engineering applications, 2011, Manchester, UK: Woodhead Publishing. p. 401

[14] J.P. Pascault, and R.J.J. Williams, Overview of thermosets: structure, properties and processing fo advanced applications', in Qipeng Guo (ed.) Thermosets structure, properties and applications, 2012, Woodhead Publishing Limited, Cambridge

[15] M.J. Mullins et al., Mechanical properties of thermosets, in Qipeng, Guo (ed.) Thermosets : structure, properties and applications, 2012, Woodhead Publishing, pp. 28–61

[16] Osborne Industries, The Difference Between Thermoplastic and Thermosetting Plastic, 2017, https://www.osborneindustries.com/news/the-difference-between-thermoplastic-and-thermosetting-plastic/ (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[17] L.C. Hwa et al., Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2017, vol 21 (6), 323–347

[18] A.N. Chen et al., Fabrication of porous fibrous alumina ceramics by direct coagulation casting combined with 3D printing, Ceramics International, 2018, vol. 44 (5), 4845–4852

[19] T.D. Ngo et al., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, Composites Part B: Engineering, 2018, vol. 143, pp. 172–196

[20] C. Buchanan and L. Gardner, Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges, Engineering Structures, 2019, vol. 180, pp. 332–348

[21] Sevnol.com, Sevnol/material search, http://senvol.com/material-search/ (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[22] T. Duda and L.V. Raghavan, 3D Metal Printing Technology, IFAC-PapersOnLine, 2016, vol. 49 (29), pp. 103–110

[23] D. Wang et al., Ultrafast laser-enabled 3D metal printing: A solution to fabricate arbitrary submicron metal structures, Precision Engineering, 2018, vol. 52, pp. 106–111

[24] Z.X. Khoo et al., 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing, Virtual and Physical Prototyping, 2015, vol. 10 (3), pp. 103–122

[25] A.Y. Lee et al., Two-Way 4D Printing: A Review on the Reversibility of 3D-Printed Shape Memory Materials, Engineering, 2017, vol. 3 (5), pp. 663–674

[26] F. Momeni et al., A review of 4D printing, Materials & Design. 2017, vol. 122, pp. 42–79

[27] E. Pei, 4D Printing-Dawn of an Emerging Technology Cycle, Assembly Automation: the international journal of assembly technology and management, 2014, vol. 34 (4), pp. 310–314

[28] K. Antlej et al., Restoration of a stemmed fruit bowl using 3D technologies, in Dunja Seiter-Šverko (ed.) Review of the National Center for Digitization. SEEDI Communications 14, Proceedings of the Sixth SEEDI Conference. Digitization of Cultural and Scientific Heritage, 2012 Belgrade: Faculty of Mathematics, pp. 141–146

[29] L. Arbace et al., Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue, Journal of Cultural Heritage, 2013, vol 14 (4), pp. 332–345

[30] A. Zoran, and L. Buechley, Hybrid Reassemblage: An Exploration of Craft, Digital Fabrication and Artifact Uniqueness, Leonardo, Journal of Arts, Sciences and Technology, 2013, vol. 46 (1), pp. 4–10

[31] G. Bigliardi, Stampa 3D e restauro scultoreo, 2014, http://www.3d-archeolab.it/2014/08/4-7-settembre-2014-s-martino-dallargine-mn-la-rivoluzione-dello-spazio/ (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[32] Z. Allen, The Conservation of Marie Antoinette's Chair, 2015, http://www.vam.ac.uk/blog/conservation-blog/the-conservation-of-marie-antoinettes-chair (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[33] F. Avella et al., Low cost system for visualization and exhibition of pottery finds in archeological museums, SCIRES-IT - SCIentific RESearch and Information Technology, 2015, vol. 5 (2), pp. 111–128

[34] 3D ArcheoLab, Restauro in stampa 3D della statua di Cornelio Nepote a Ostiglia (MN), 2017, https://www.3d-archeolab.it/portfolio-items/restauro-in-stampa-3d-della-statua-di-cornelio-nepote-ostiglia-mantova/ (τελευταία πρόσβαση 08/04/2024)

[35] N. Bharti and F. Durant, You're Printing, What? Where? The material stability and safety of 3D printing thermoplastic polymers for fused filament fabrication, American Institute for Conservation of Artistic and Historic Works Annual Meeting 2018, Houston, TX

[36] A.F. Abate et al., An Augmented Reality Mobile App for Museums: Virtual Restoration of a Plate of Glass, in Ioannides, M. et al. (eds) 7th International Conference, EuroMed 2018, Nicosia, Cyprus, October 29–November 3, 2018, Proceedings. Nicosia: Springer International, pp. 539–559.

[37] L. Robinet and D. Thickett, A New Methodology for Accelerated Corrosion Testing, Studies in Conservation, 2003, vol. 48 (4), pp. 263–268

[38] C.H. Stephens et al., Updating the Oddy Test: Comparison with Volatiles Identified Using Chromatographic Techniques, Studies in Conservation, 2018, vol. 63 (sup1), pp. 425–427

[39] H. Heine and A. Jeberien, Oddy Test Reloaded: Standardized Test Equipment and Evaluation Methods for Accelerated Corrosion Testing, Studies in Conservation, 2018, vol. 63 (sup1), pp. 362–365