

# ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΟΙΝΟΧΩΣ ΤΗΣ ΠΡΩΙΜΗΣ ΕΠΟΧΗΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ Η/Υ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

**Κ.-Δ. Μπουζάκης<sup>1</sup>, Δ. Παντερμαλής<sup>2</sup>, Κ. Ευσταθίου<sup>1</sup>, Εμ. Βαρύτης<sup>1</sup>,  
Ι. Μαυρουδής<sup>2</sup>, Γ. Παραδεισιάδης<sup>3</sup>**

1. Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
2. Αρχαιολογικό Εργαστήριο Δίου, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
3. Τμήμα Τεχνολογίας Οχημάτων, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Δύο κεραμικές κανάτες της εποχής του σιδήρου οι οποίες βρέθηκαν κατά την διάρκεια ανασκαφών στο Δίον της Ελλάδας, ερευνηθήκαν με τη βοήθεια βιομηχανικού αξονικού τομογράφου υποστηριζόμενου από Η/Υ και συσκευή laser τρισδιάστατης σάρωσης. Η ανάλυση της στερεάς γεωμετρίας των αντικειμένων που προέκυψε από αυτές τις τεχνικές αποκάλυψε σημαντικές πληροφορίες οι οποίες διευκρινίζουν τις μεθόδους κατασκευής τους. Μια προσομοίωση της στερεάς γεωμετρίας των κανατών, η οποία αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχηματισμού της βάσης, βασισμένη στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθώς επίσης και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί συνέβαλαν στην εξήγηση της παραμόρφωσης της.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** αρχαία αγγειοπλαστική, αξονική τομογραφία (CT), laser 3D σάρωσης, προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων

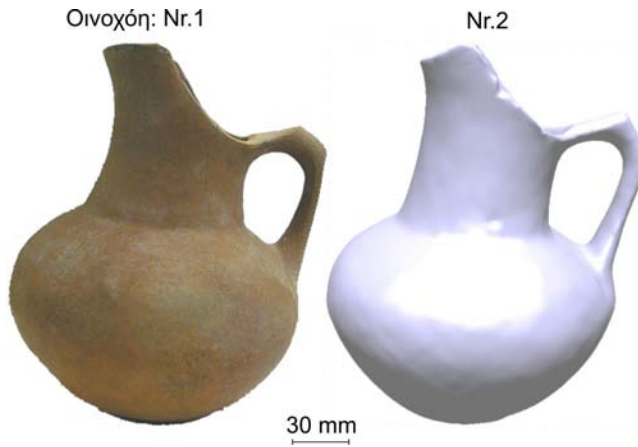
## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κεραμικές οινόχες Nr.1 και Nr.2 που εμφανίζονται στο σχήμα 1 βρέθηκαν από τον καθ. Δ. Παντερμαλή ως προσφορές σε αρχαίους τάφους το 1980 κατά τη διάρκεια ανασκαφών, περίπου τέσσερα χιλιόμετρα δυτικά του Δίου, μια από τις σημαντικότερες αρχαιολογικές περιοχές της Ελλάδας. Και οι δύο κανάτες έχουν παρόμοια γεωμετρία με σχεδόν σφαιρικό σώμα και ένα πλατύ κομμένο λαιμό, χαρακτηριστικό των κεραμικών δοχείων της πρόωρης εποχής του σιδήρου στη Μακεδονία (1.000 - 700 Β.Χ.) /1,2/.

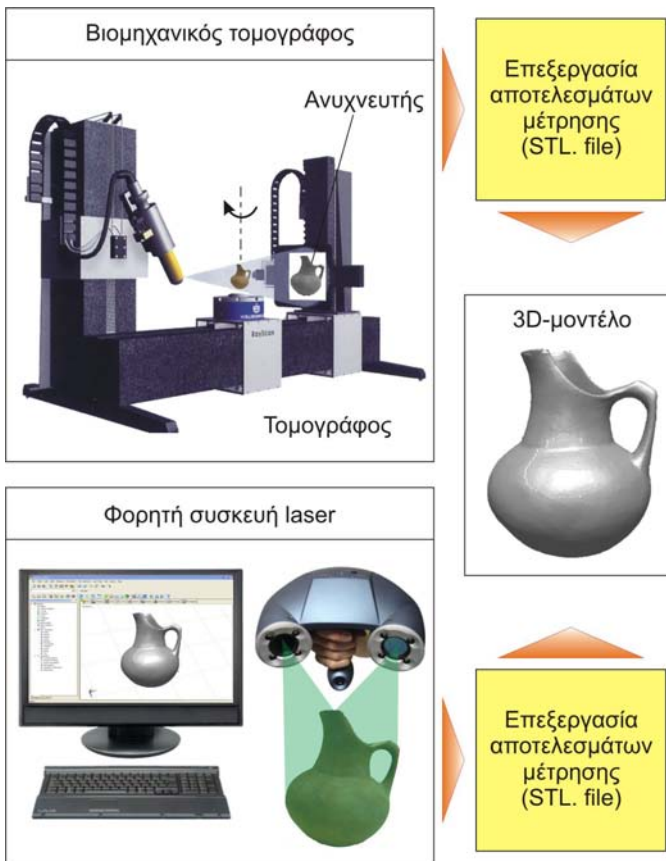
Η γεωμετρία της οινόχης Nr.1 καταγράφηκε με τη βοήθεια αξονικών τομογραφιών σε βιομηχανικό αξονικό τομογράφο, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε καταστροφή του πρωτοτύπου, και για να ερευνηθούν εσωτερικές μη ορατές λεπτομέρειες της γεωμετρίας της. Τα δεδομένα της μέτρησης που προέκυψαν από τον τομογράφο υποβλήθησαν σε περαιτέρω επεξεργασία για την περιγραφή της γεωμετρίας των οινόχων και για την δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου για την επεξήγηση των παραμορφώσεων που σχηματίστηκαν στο σώμα τους κατά την διάρκεια της μορφοποίησης του πυλού, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η αξονική τομογραφία είναι μια νέα καινοτομική μέθοδος, που χρησιμοποιείται σήμερα σε πολλές βιομηχανικές, ιατρικές και άλλες εφαρμογές. Υπερτερεί σε σχέση με τις άλλες μεθόδους σάρωσης, όπως με laser ή τρισδιάστατη μετρητική μηχανή στο γεγονός ότι έχει την δυνατότητα καταγραφής τόσο της εξωτερικής όσο και της εσωτερικής γεωμετρίας του αντικειμένου. Ένας βιομηχανικός τομογράφος καθοδηγούμενος από Η/Υ καθώς και η αρχή λειτουργία του παρουσιάζεται παραστατικά στο σχήμα 2.





**Σχήμα 1:** Οινοχές με κομμένο λαιμό της πρώιμης εποχής του σιδήρου.



**Σχήμα 2:** Καταγραφή της γεωμετρίας των αντικειμένων με βιομηχανικό αξονικό τομογράφο και συσκευή laser τρισδιάστατης σάρωσης.

Τα κύρια μέρη του αξονικού τομογράφου είναι η πηγή ακτινοβολίας, οι οποία παράγει ακτινοβολία Roentgen και ο ανιχνευτής. Το αντικείμενο που πρόκειται να υποβληθεί σε τομογραφία τοποθετείται ανάμεσα στα κύρια μέρη του τομογράφου και καταγράφονται διαδοχικές τομές του, σε μικρό σχετικά χρόνο, περιστρέφοντας το αντικείμενο. Η μέθοδος βασίζεται στη μέτρηση της εξασθένησης της Χ ακτινοβολίας, καθώς αυτή διέρχεται μέσα από τη μάζα του αντικειμένου, σε διάφορες κατευθύνσεις. Αφού πραγματοποιηθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός τομογραφιών, διεξάγεται ανάλυση των δεδομένων με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, με σκοπό την αναδόμηση των εξωτερικών και των εσωτερικών επιφανειών του αντικειμένου. Το αποτέλεσμα της αναδόμησης είναι ένας πίνακας, όπου περιέχει ογκομετρικά στοιχεία (voxels), τα οποία περιγράφουν με ακρίβεια κάθε εξωτερική ή εσωτερική λεπτομέρεια του αντικειμένου. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να σχεδιαστεί η τρισδιάστατη μορφή του αντικειμένου από οποιαδήποτε οπτική γωνία, καθώς και να γίνει μερική, ή ολική τομή σε οποιοδήποτε σημείο της γεωμετρίας του. Στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε βιομηχανικός τομογράφος ισχύς 250 KVA και ακρίβεια διακριτοποίησης της τάξης των 10 μm.

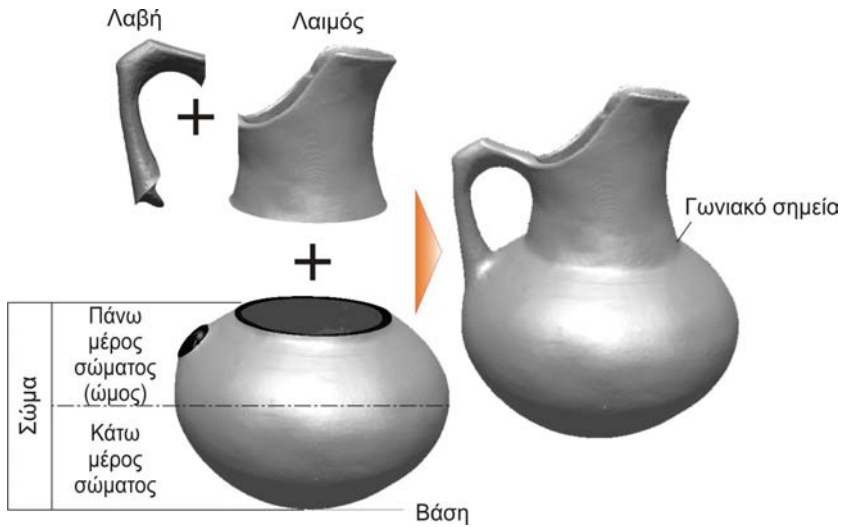
Η εξωτερική γεωμετρία της οινόχους Nr.2 καταγράφηκε με την βοήθεια μετρήσεων με laser χωρίς επαφή με το πρωτότυπο. Ο σαρωτής laser που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο κάτω μέρος του σχήματος 2. Το αντικείμενο σαρώνεται από δύο ακτίνες laser και τα δεδομένα της γεωμετρίας του καταγράφονται και εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή. Μέσω μιας πλήρους περιστροφής του αντικειμένου με το χέρι, και με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού η πλήρης εξωτερική γεωμετρία της κανάτας Nr.2 καθορίζεται σε επίπεδο ακρίβειας 90 μm.

Μέσω των παραπάνω μετρήσεων και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι δυνατών να αναπαραχθεί η γεωμετρία των αντικειμένων σε ηλεκτρονική μορφή. Στην περίπτωση της οινόχους Nr.1 μοντελοποιήθηκε η συνολική της γεωμετρία (εξωτερική και εσωτερική), ενώ στην περίπτωση της οινόχους Nr.2 αποκτήθηκε μόνο η εξωτερική γεωμετρία της.

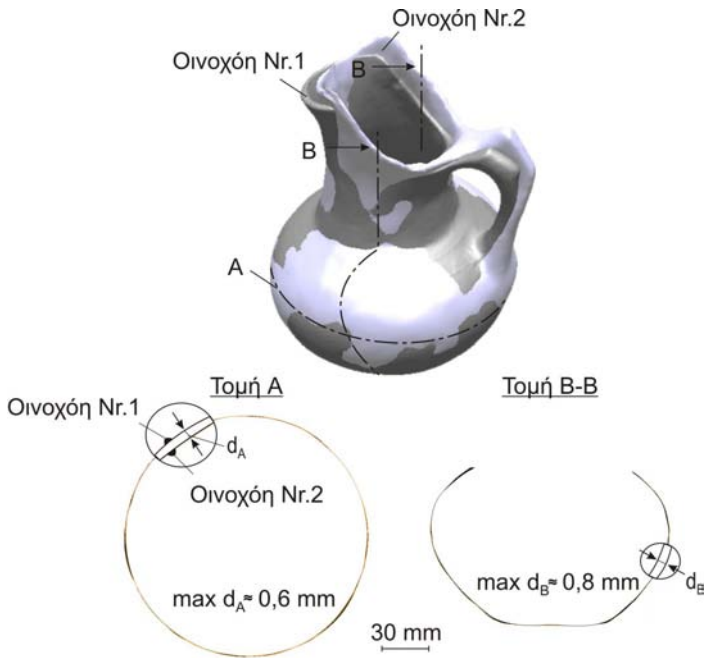
## 2. Κατασκευή της κανάτας

Η παραγωγή αγγείων είναι μια προσθετική διαδικασία στην οποία, τα διαδοχικά βήματα καταγράφονται στο τελικό αντικείμενο /3/. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διερεύνησης που περιγράφονται παρακάτω, η κατασκευή και των δύο κεραμικών οινόχων άρχισε με τη πλάση του πυλού διαμορφώνοντας τα ευδιάκριτα συστατικά της οινόχους, δηλαδή το σώμα, το λαιμό και τη λαβή. Στη συνέχεια με την ένωση των επιμέρους μεμονωμένων αυτών κομματιών πυλού ολοκληρώνεται ο σχηματισμός της γεωμετρίας της οινόχους, όπως σχηματικά διευκρινίζεται στο σχήμα 3. Ο λαιμός αποκόπηκε μερικώς για το σχηματισμό της τελικής λοξής μορφής του.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η εξωτερική γεωμετρία του σώματος και των δύο ερευνημένων κανατών είναι σχεδόν ίδια, όπως φαίνεται στο σχήμα 4. Τα αντίστοιχα γεωμετρικά στοιχεία ελήφθησαν μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων της αξονικής τομογραφίας και των μετρήσεων με τρισδιάστατο σαρωτή, οι οποίες εφαρμόστηκαν για να μετρήσουν τις οινόχους Nr.1 και 2 αντίστοιχα. Τα γεωμετρικά δεδομένα των δύο οινόχων συγκρίθηκαν προκειμένου να ανιχνευθούν σχετικές διαστατικές αποκλίσεις στη μορφή τους. Μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των δύο οινόχων μπορούν να παρατηρηθούν την περιοχή του λαιμού και της λαβής, ενώ στην περιοχή του σώματος και οι δύο οινόχους παρουσιάζουν σχεδόν ίδια γεωμετρία. Αυτό επιβεβαιώνεται από την εγκάρσια τομή Α και την κατακόρυφη τομή ΒΒ που παρουσιάζεται στο σχήμα 4. Η μέγιστη απόκλιση στην εγκάρσια τομή είναι περίπου 0,6 mm ενώ στην κατακόρυφη τομή είναι μικρότερη από 0,8 mm. Λαμβάνοντας υπόψη ότι είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί μια τέτοια γεωμετρική σύγκλιση κατά την διαμόρφωση του περιγράμματος των δύο σωμάτων και στην οριζόντια καθώς και στη κάθετη κατεύθυνση με το χέρι, ακόμη και στη περίπτωση χρησιμοποίησης αγγειοπλαστικού τροχού, μπορεί να υποστηριχθεί, ότι για τη διαμόρφωση των πήλινων σωμάτων, πιθανώς χρησιμοποιήθηκε μια κοίλη σφαιρική φόρμα. Περαιτέρω στοιχεία, που ενισχύουν αυτήν την θεώρηση, θα παρουσιαστούν στα παρακάτω κεφάλαια.



**Σχήμα 3:** Δομικά μέρη των εξεταζόμενων οινοχόων.

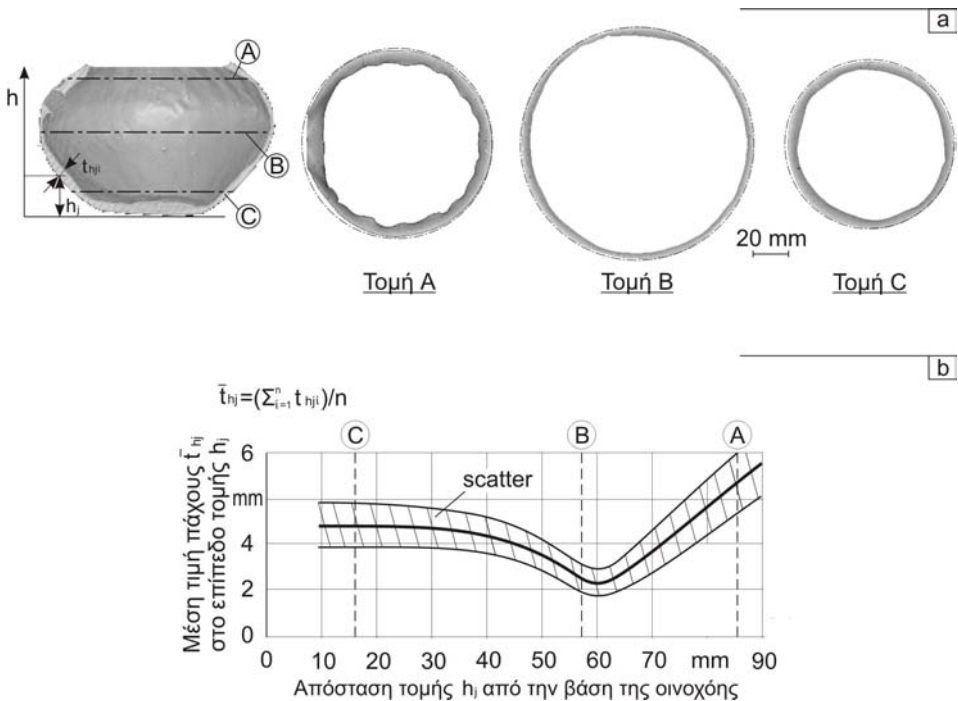


**Σχήμα 4:** Γεωμετρικές σύγκλισεις και αποκλίσεις μεταξύ των δύο εξεταζόμενων οινοχόων.

## 2.1 Διαμόρφωση του σώματος

Οι εγκάρσιες (οριζόντιες) τομές στο τμήμα του σώματος της οινοχόης Nr.1 που εικονίζονται στο [σχήμα 5α](#) και οι οποίες προέκυψαν από τις αξονικές τομογραφίες παρουσιάζουν την εξωτερική μορφή και το πάχος του τοιχώματος της. Οι τομές Α, Β και Γ αντιπροσωπεύουν, η Α το οριζό-

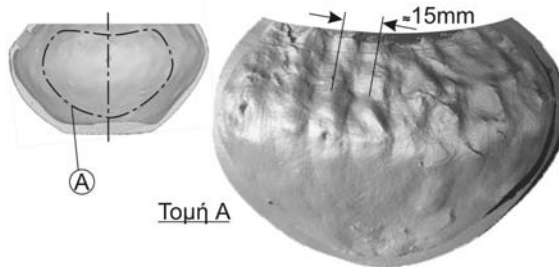
ντιο περίγραμμα της οιοχόης στην περιοχή κοντά στον λαιμό, η Β το περίγραμμα ελαφρώς κάτω από τη μέγιστη διάμετρο και η Γ το περίγραμμα πλησίον της βάσης. Λόγω της μορφής της βάσης απέκτησαν μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος ώστε να ενισχυθεί η αντοχή τους, όπως παραδείγματος χάριν η περιοχή κοντά στη τομή Α, όπου ο λαιμός και η χειρολαβή συνδέεται στην επάνω περιοχή του σώματος (ώμος). Τα τοιχώματα σε αυτήν την περιοχή πρέπει να είναι αρκετά ισχυρά έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος θραύσης της οιοχόης κατά το στάδιο της ξήρανσης, κατά το οποίο μπορεί να προκληθούν πιέσεις. Η διασπορά του πάχους του τοιχώματος σε όλα τα οριζόντια επίπεδα της οιοχόης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5b, είναι σημαντική μεγάλη. Μολονότι η εξωτερική μορφή όλων των οριζόντιων τομών του σώματος της οιοχόης συγκλίνει αρκετά πολύ σε κυκλικό περιγράμματα, η εσωτερική γεωμετρία αυτών παρεκκλίνει σημαντικά από την περιφέρεια κύκλων λόγω των διακυμάνσεων του πάχους του τοιχώματος. Αυτό αποτελεί σημαντική ένδειξη ότι κανένας τροχός δεν χρησιμοποιήθηκε για να διαμορφώσει του πηλού, αλλά ο τεχνίτης πίεσε τον πηλό σε μια κοίλη σφαιρική φόρμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί.



**Σχήμα 5:** a: Εξωτερική μορφή και πάχη του τοιχώματος στο σώμα της οιοχόης Nr.1.  
 b: Διασπορά μέσης τιμής πάχους τοιχώματος σε σχέση με την απόσταση από τη βάση της οιοχόης.

Μια διαμήκης τομή στο σώμα της οιοχόης παρουσιάζεται στο σχήμα 6. Τα αποτυπώματα τα οποία είναι ορατά στην εσωτερική επιφάνεια του ώμου του σώματος στην τομή Α έχουν περίπου 15 χιλ. πλάτος, το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο εύρος ανθρώπινων δάχτυλων. Κατά συνέπεια, είναι λογικό να υποθεθεί ότι ο τεχνίτης διαμόρφωσε τον ώμο της κανάτας ανυψώνοντας και πιέζοντας σταθερά τον πηλό με τα δάχτυλά του σε μια έτοιμη φόρμα, για να τοποθετήσει τον πηλό στην εσωτερική κοίλη επιφάνειά του. Αυτή η φόρμα θα μπορούσε να είναι ένα κομμάτι από μια σπασμένη κανάτα. Ο τεχνίτης δεν λείανε την εσωτερική επιφάνεια του ώμου του σώματος, πιθανότατα, επειδή αυτή η επιφάνεια θα ήταν αόρατη στο χρήστη της κανάτας μετά από την ένωση του λαιμού. Η κάτω εσωτερική επιφάνεια του σώματος είναι λιγότερο τραχιά έναντι

της ανώτερης, εντούτοις αποτυπώματα μεγαλύτερων διαστάσεων ανιχνεύθηκαν εκεί επίσης, τα οποία οδηγούν στις αποκλίσεις του πάχους του τοιχώματος που παρουσιάζονται στο σχήμα 5b. Επιπλέον, δεν ανιχνεύθηκε κανένα ίχνος στην εσωτερική επιφάνεια του σώματος που να οδηγεί στο συμπέρασμα ότι χρησιμοποιήθηκε τροχός κατά την μορφοποίηση του.



**Σχήμα 6:** Ίχνη ανθρώπινων δαχτύλων, στην εσωτερική επιφάνεια της οινοχόης Nr.1.

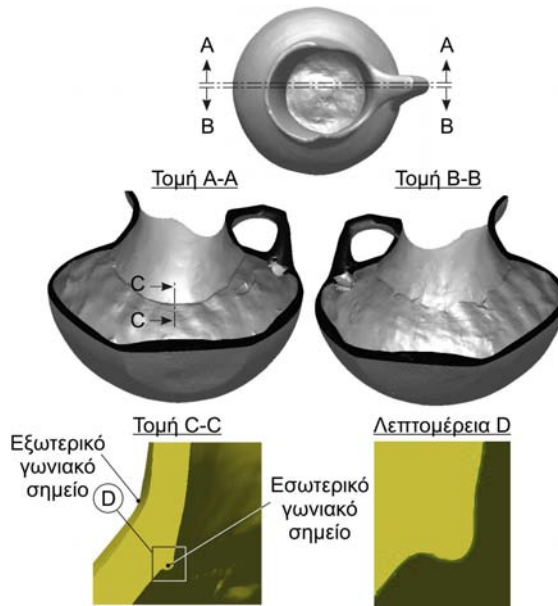
Ολοκληρώνοντας, μπορεί να υποθεθεί ότι ο τεχνίτης είχε σχηματίσει ένα φύλλο πηλού με ελαφρά χτυπήματα ή με κυλίνδρωση του πάνω σε έναν λεπτό δίσκο. Το φύλλο αυτό του πηλού στη συνέχεια το πίεσε σταθερά σε μια κοίλη σχεδόν σφαιρική φόρμα, την οποία δημιούργησε ίσως από ένα σπασμένο σώμα οινοχόης. Η οινοχόη αυτή κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας αγγειοπλαστικό τροχό ώστε να επιτευχθεί η σχεδόν κυκλική μορφή. Ο τεχνίτης πιθανώς να χρησιμοποίησε μια σκόνη για να αποτρέψει την κόλληση του πηλού πάνω στη φόρμα /3/. Κατ' αυτό τον τρόπο αφ' ενός τα εξωτερικά περιγράμματα των τομών Α, Β και Γ που παρουσιάζονται στο σχήμα 5, δεν παρεκκλίνουν πολύ από κύκλο και αφ' ετέρου λόγω της πίεσης του υλικού πάνω στην φόρμα, δεν επιτεύχθηκε ούτε ομοιόμορφο πάχος τοιχώματος ούτε και πλήρης κυκλικά περιγράμματα, όπως αποκαλύπτονται στις οριζόντιες τομές. Επιπλέον η χαμηλή τραχύτητα της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος της οινοχόης επιτεύχθηκε με την χρήση ενός εργαλείου λείανσης, κατά τη διάρκεια μιας πρόσθετης διαδικασίας αποπεράτωσης, πιθανώς μετά από την ξήρανση του αργίλου.

## 2.2 Διαμόρφωση του λαιμού

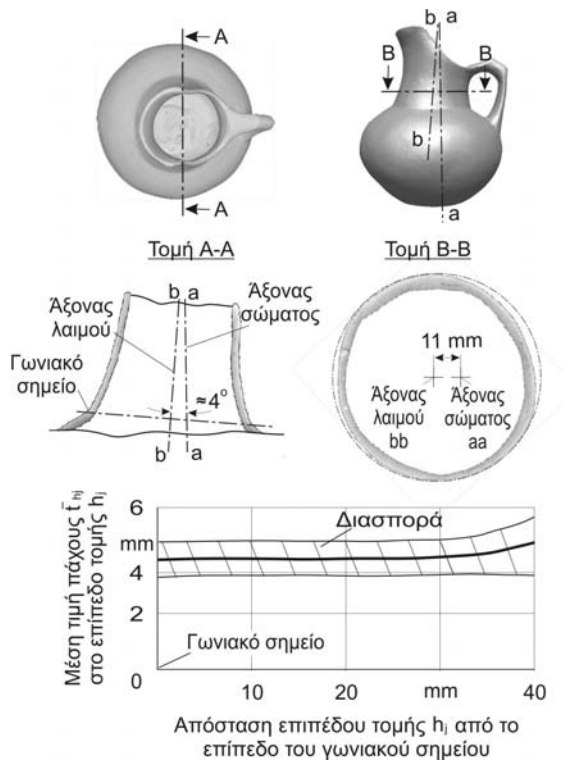
Ο λαιμός της οινοχόης σχηματίστηκε ξεχωριστά. Αυτό είναι εμφανές από την εγκάρσια τομή που φαίνεται στο σχήμα 7, όπου η μετάβαση μεταξύ της ομαλής εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού και της τραχύτερης εσωτερικής επιφάνειας του ώμου του σώματος (εσωτερικό γωνιακό σημείο) είναι σαφώς ορατή.

Έτσι μετά από την διαμόρφωση του λαιμού, ο τεχνίτης θα ένωνε τα δύο μέρη μαζί, με τη συμπίεση του πηλού στην χαμηλότερη περιοχή του λαιμού με την ακριανή περιοχή του ώμου του σώματος της οινοχόης, δημιουργώντας κατά συνέπεια ένα ενιαίο κομμάτι. Εξετάζοντας προσεκτικά την εσωτερική επιφάνεια της οινοχόης στην περιοχή της ένωσης του λαιμού και του σώματος, όπως είναι διακριτό στην τομή ΑΑ του σχήματος 7, είναι εμφανείς μικρές υπερχειλίσεις του υλικού που δημιουργήθηκαν προφανώς κατά το στάδιο της ένωσης και κάποιας ενδεχομένως τελικής ενέργειας λείανσης της εσωτερικής επιφάνειας του λαιμού.

Μια διαμήκης και μια οριζόντια τομή στην περιοχή του λαιμού παρουσιάζονται στο σχήμα 8. Επιπλέον παρουσιάζεται ο άξονας συμμετρίας bb του λαιμού. Η πλάγια θέση του άξονα bb σε σχέση με τον άξονα aa του σώματος της οινοχόης είναι σαφώς ορατή. Η αντίστοιχη γωνία κλίσης μεταξύ του άξονα aa και του bb μπορεί να παρατηρηθεί και στην τομή Α-Α η οποία ανέρχεται περίπου σε τέσσερις μοίρες. Η μετατόπιση του άξονα συμμετρίας του λαιμού του αντίστοιχου άξονα του σώματος της οινοχόης ανέρχεται περίπου στα 11 mm όπως φαίνεται στην τομή Β-Β. Η διακύμανση του πάχους του τοιχώματος του λαιμού μπορεί να φανεί επίσης στη τομή Β-Β. Η σχεδόν ελλειπτική μορφή του εξωτερικού περιγράμματος των τομών του λαιμού αποκλίνει



**Σχήμα 7:** Υπερχείλιση υλικού μεταξύ του σώματος και του λαιμού της οινοχόης Nr.1.



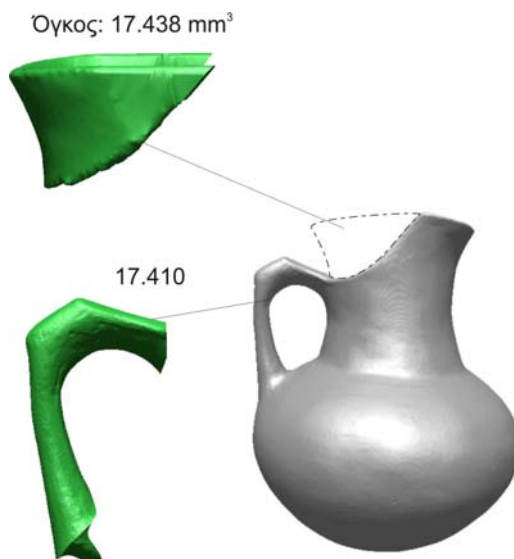
**Σχήμα 8:** Γεωμετρία του λαιμού της οινοχόης Nr.1 και η θέση του στο σώμα της.



σημαντικά από το κυκλικό περίγραμμα και μπορεί να υποθεθεί ότι πιθανώς να δημιουργήθηκε κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης του λαιμού ή κατά τη διάρκεια της ξήρανσης του πηλού. Η διακύμανση του πάχους του τοιχώματος στο λαιμό της οινόχους στα μεμονωμένα οριζόντια επίπεδα εμφανίζεται στο διάγραμμα στο κάτω μέρος του σχήματος 8. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα αποτελέσματα μπορεί κανείς να ισχυρισθεί ότι και για την διαμόρφωση του λαιμού δεν χρησιμοποιήθηκε κανένας τροχός και ότι συνδέθηκε με το χέρι επάνω στο σώμα της οινόχους.

### 2.3 Διαμόρφωση της λαβής

Μια ενδιαφέρων παρατήρηση είναι ότι ο όγκος που λείπει από τον λαιμό, είναι ίσος με τον όγκο της λαβής. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 9 οι δύο όγκοι έχουν υπολογιστεί και έχουν μετρηθεί  $17.438 \text{ mm}^3$  και  $17.410 \text{ mm}^3$  αντίστοιχα. Επομένως είναι πιθανών ότι η λαβή έχει κατασκευαστεί από το υλικό που αφαιρέθηκε από την περιοχή του λαιμού. Προφανώς ο τεχνίτης έκοψε το κομμάτι από τον λαιμό της οινόχους με μια χορδή ή λεπίδα και έπειτα το διαμόρφωσε σε κύλινδρο. Στη συνέχεια μετά από κατάλληλη κάμψη και διαμόρφωση του πηλού ο τεχνίτης ένωσε τα δύο άκρα της λαβής με τον ώμο του σώματος και τον λαιμό της οινόχους.

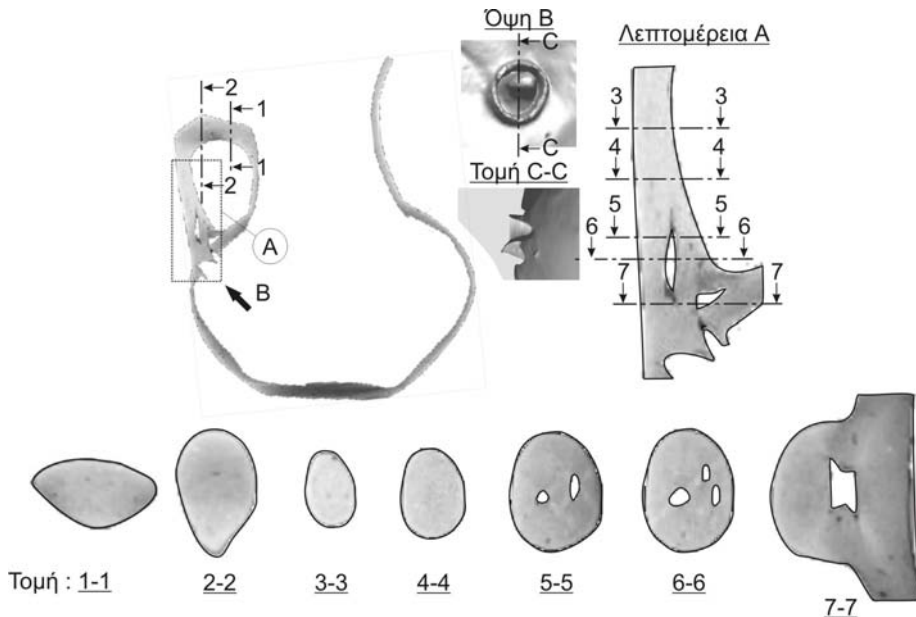


**Σχήμα 9:** Σύγκριση μεταξύ του όγκου του πηλού που αποκόπηκε από το λαιμό με τον όγκο της λαβής (οινόχου Nr.1).

Στις εγκάρσιες τομές από 1-1 μέχρι 4-4 και στην λεπτομέρεια A, όπως φαίνεται στο σχήμα 10, είναι φανερό ότι το υλικό στο πάνω μέρος της λαβής είναι ολοκληρωτικά συμπαγές.

Αυτό πιθανώς οφείλεται στην εύκολη πρόσβαση που έχει ο τεχνίτης στο επάνω μέρος της λαβής, που του επιτρέπει να ζυμώσει τον πηλό αρκετά ώστε να το κολλήσει άμοφα στον λαιμό της οινόχους. Ο αέρας που εσωκλείεται και εμφανίζεται στις εγκάρσιες τομές 5-5 και 6-6 στην κάτω περιοχή της λαβής πιθανώς εμφανίστηκε κατά την διάρκεια του κυλινδρίσματος του πηλού για την μορφοποίηση της λαβής και παρέμεινε, καθώς καμία περαιτέρω μορφοποίηση της λαβής δεν πραγματοποιήθηκε στην συνέχεια. Η οπή που ανοίχτηκε στο τοίχωμα του σώματος της οινόχους και το άκρο της λαβής που είναι κολλημένο πάνω στο σώμα αναγνωρίζονται εύκολα στην λεπτομέρεια B και στην τομή C-C. Ο αέρας που εσωκλείεται στην τομή 7-7 είναι προφανές ότι εμφανίστηκε καθώς ο τεχνίτης πίεσε υλικό από την λαβή πάνω στην εξωτερική επιφάνεια του σώματος που την περιβάλλει, κατά την διαδικασία της ένωσης της λαβής με το σώμα της οινόχους.





**Σχήμα 10:** Εγκάρσιες τομές κατά μήκος της λαβής της οινοχόης Nr.1.

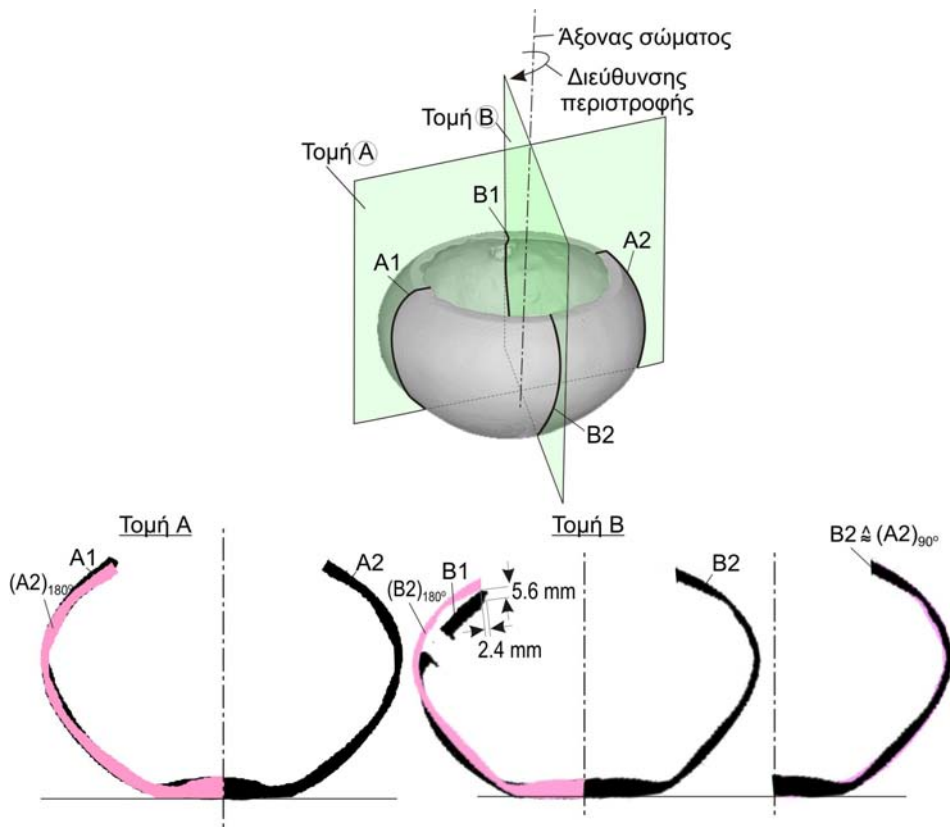
### 3 Παραμόρφωση του σώματος της κανάτας

Η μορφοποίηση του σώματος, του λαιμού και της λαβής της οινοχόης και η ένωση αυτών των κομματιών, θα πρέπει να δημιουργήσει ένα συμμετρικό αντικείμενο. Ωστόσο και οι δύο κανάτες που διερευνήθηκαν Nr.1 και 2 παρουσιάζουν μια ασυμμετρία, οι οποία γίνεται εύκολα αντιληπτή, υπό μορφή κλίσης προς την πλευρά της λαβής. Η λεπτομερής εξέταση της γεωμετρίας του πλαισίου έδειξε ότι αυτή η απόκλιση από τη κατάσταση πλήρους συμμετρίας του αντικειμένου οφείλεται εξ ολοκλήρου στην παραμόρφωση του σώματος της οινοχόης, όπως εξηγείται στο [σχήμα 11](#). Δύο τομές, η τομή Β που διέρχεται από την λαβή και η τομή Α κάθετη στην τομή Β παρουσιάζονται σε αυτό το σχήμα.

Η σύγκριση του δεξιού (A2) με το αριστερό (A1) μισό της τομής Α, όπως φαίνεται στη μέση του σχήματος, όπου το A2 είναι τοποθετημένο άνω του A1 και απεικονίζεται με ένα πιο εξασθενημένο τόνο του γκρι, δεν παρουσιάζει καμία ιδιαίτερη απόκλιση μεταξύ τους. Η ίδια είδους σύγκριση μεταξύ του μπροστινού (B2) και του οπίσθιου (B1) μισού της τομής Β, όπως φαίνεται στο κάτω αριστερό μέρος του σχήματος αποκαλύπτει μια σημαντική συμπίεση της περιοχής του ώμου του σώματος, η οποία στο εσωτερικό γωνιακό σημείο μετρήθηκε 5,6 χιλ. προς τα κάτω στην κατακόρυφη κατεύθυνση και προς τα δεξιά 2,4 χιλ. στην οριζόντια κατεύθυνση. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία ιδιαίτερη απόκλιση μεταξύ του τμήματος A2 της τομής Α και του τμήματος B2 της τομής Β, όπως φαίνεται και στο κάτω δεξιά μέρος του ίδιου σχήματος, είναι εμφανές ότι η παραμόρφωση του σώματος από την αρχική συμμετρική μορφή του αποτελείται μόνο από μια παραμόρφωση της περιοχής γύρω από τη σύνδεση της λαβής.

### 4 Επεξήγηση της παραμόρφωσης της κανάτας με την βοήθεια υπολογισμών FEM

Οι ενέργειες που ακολούθησε ο τεχνίτης από την στιγμή που ένωσε την λαβή με το σώμα ώστε να δώσει την τελική της μορφή είναι οι παρακάτω τρεις:

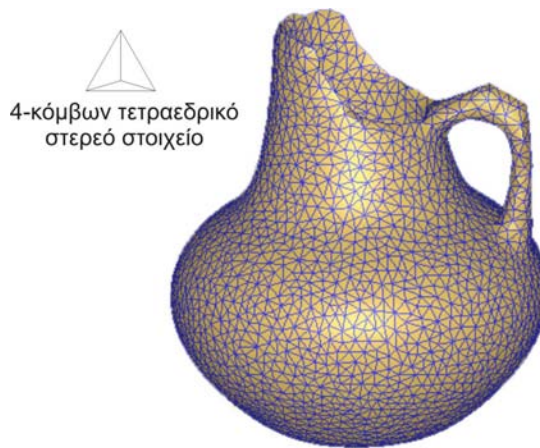


**Σχήμα 11:** Διερεύνηση της παραμόρφωσης του σώματος της οινόχους Nr.1.

- α. αποκοπή μέρος του λαιμού,
- β. διάνοιξη οπής στο σώμα και
- γ. ένωση της λαβής με το σώμα και τον λαιμό.

Για να διερευνηθεί εάν η παραμόρφωση που παρατηρήθηκε στο σώμα της οινόχους προκλήθηκε κατά τη διάρκεια αυτών των ενεργειών αυτές προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Η γεωμετρία της κανάτας μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πρόγραμμα SOLIDWORKS /4/. Η αρχική συμμετρική εκ περιστροφής εξωτερική μορφή του σώματος της κανάτας, πριν από τη διαμόρφωση της λαβής, δημιουργήθηκε με βάση τη γεωμετρία της κανάτας που προέκυψε από τον τομογράφο, χωρίς να συμπεριληφθεί καμία κλίση στον άξονα συμμετρίας της και υποτέθηκε ότι η βάση της κανάτας έχει συμμετρική μορφή. Με αυτές τις παραδοχές η αρχική μορφή του σώματος δημιουργήθηκε με συμμετρική περιστροφή του προφίλ B2 που φαίνεται στο σχήμα 11. Η διακριτοποίηση της κανάτας που παρουσιάζεται στο σχήμα 12 έγινε στο λογισμικό Deform /5/ και χρησιμοποιήθηκαν τετράεδρα στοιχεία 4 κόμβων. Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων παράχθηκε αυτόματα, ενώ με την πρόσθετη εφαρμογή που χαρακτηρίζεται από το πλέγμα-παράθυρο επιτεύχθηκε 6 φορές λεπτότερη διακριτοποίηση στην περιοχή της οπής του σώματος, όπου η λαβή συνδέεται με το σώμα και η παραμόρφωση αναμένεται να είναι πολύ υψηλή.



**Σχήμα 12:** FEM- διακριτοποίηση της γεωμετρίας της κανάτας.

Η μηχανική συμπεριφορά του υλικού – υγρού κεραμικού αργίλου – προσεγγίστηκε από το αναλυτικό πρότυπο που παρουσιάζεται για τον υγρό κεραμικό στην εργασία /6/. Σύμφωνα με την εργασία αυτήν ο υγρός άργιλος υπόκειται στο κανόνα σκληρότητας Herschel- Bulkley, ο οποίος για ένα ιστροπικό υλικό το οποίο υπόκειται στον αντίστοιχο κανόνα ροής και διαρροής κατά von Mises λαμβάνει τη μορφή:

$$\sigma_{fl} = \sigma_0 + k\dot{\phi}_{fl}^n, \quad (1)$$

όπου η τάση διαρροής  $\sigma_{fl}$  είναι η ισοδύναμη τάση κατά von Mises,  $\dot{\phi}_{fl}^n$  ο ισοδύναμος ρυθμός παραμόρφωσης,  $\sigma_0$  το όριο διαρροής,  $k$  σταθερά διαρροής και  $n$  εκθέτης διαρροής.

Με την αντικατάσταση των τιμών στις παραμέτρους  $\sigma_0 = 0.102$  MPa,  $k = 0.37$  Mpa s<sup>0.25</sup> and  $n = 0.25$  όπως προέκυψαν πειραματικά /6/ για ένα κοινό τύπο αργίλου στην Ελλάδα, η σχέση (1) γίνεται:

$$\sigma_{fl} = 0.102 + 0,37\dot{\phi}_{fl}^{0,25} \quad (2)$$

Η τριβή μεταξύ της αργιλόμαζας και του εργαλείου μορφοποίησης προσεγγίζεται από τον νόμο τριβής του Tresca:

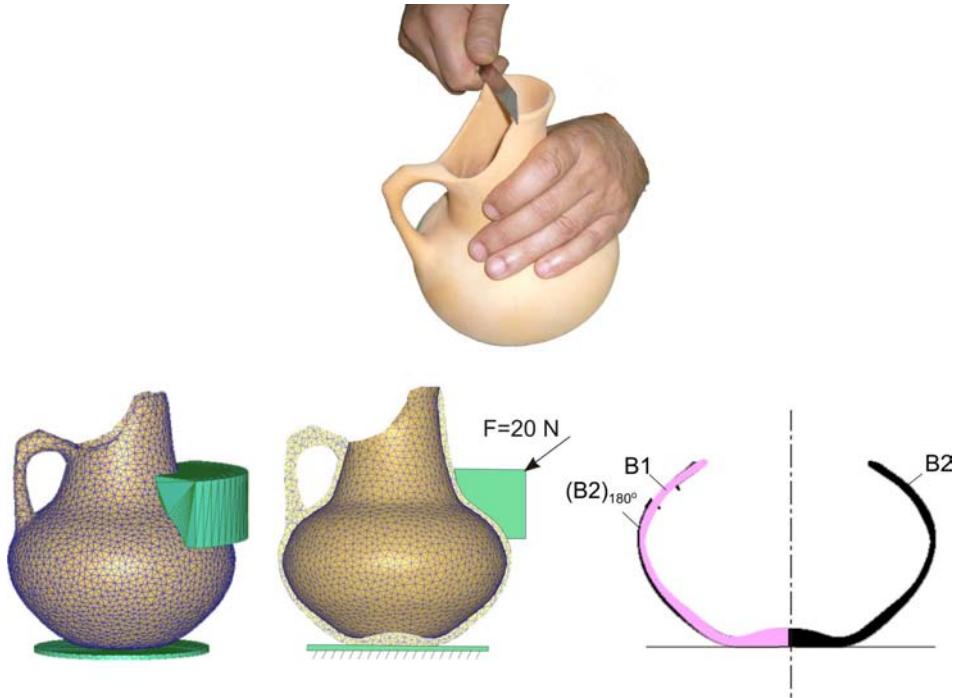
$$\tau_F = m \cdot \tau_{fl} \quad , \quad \tau_{fl} = \frac{\sigma_{fl}}{\sqrt{3}} \quad (3a, b)$$

όπου  $\tau_F$  είναι η τριβή,  $\tau_{fl}$  τάση διαρροής σε διάτμηση για ένα υλικό που υπόκειται στο νόμο ορίου διαρροής του von Mises και  $m$  μια σταθερά τριβής, της οποίας η τιμή σύμφωνα με την ίδια εργασία /6/ υπολογίσθηκε  $m = 0.46$ .

#### 4.1 Προσομοίωση της κοπής υλικού από το λαιμό

Στην αναπαράσταση της κοπής του λαιμού που εικονίζεται στο [σχήμα 13](#) ο τεχνίτης πρέπει να κρατούσε την οινόχνη σε μια σταθερή θέση πιέζοντας την με το χέρι του πάνω στη βάση. Κατά συνέπεια το σώμα της κανάτας παραμορφώνεται από την πίεση του χεριού του τεχνίτη. Στο μοντέλο της προσομοίωσης που εξηγείται στο ίδιο σχήμα η ενέργεια του χεριού του τεχνίτη προσομοιώνεται από ένα στήριγμα 120° που ταιριάζει ακριβώς στην εξωτερική γεωμετρία της οινόχνης γύρω από τη περιοχή σύνδεσης του λαιμού με το σώμα. Η κοπή του λαιμού θα μπο-

ρούσε να προκαλέσει αμελητέες μόνο τοπικές παραμορφώσεις. Η δύναμη που θα μπορούσε πιθανώς να οδηγήσει σε μια παραμόρφωση στο σώμα είναι η αντίδραση του χεριού του τεχνίτη, η οποία υπολογίζεται περίπου σε 20 N. Τα αποτελέσματα των FEM-υπολογισμών παρουσιάζονται στο κάτω μέρος του ίδιου σχήματος. Σχεδόν καμία παραμόρφωση δεν εμφανίστηκε στο σώμα της οινόχης. Η σύγκριση μεταξύ του αριστερού και δεξιού μισού του προφίλ του σώματος δεν παρουσιάζει καμία ιδιαίτερη παραμόρφωση στο τοίχωμα της οινόχης. Ως εκ τούτου η παραμόρφωση στο σώμα της οινόχης δεν θα μπορούσε να αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια της κοπής του λαιμού από τον τεχνίτη.



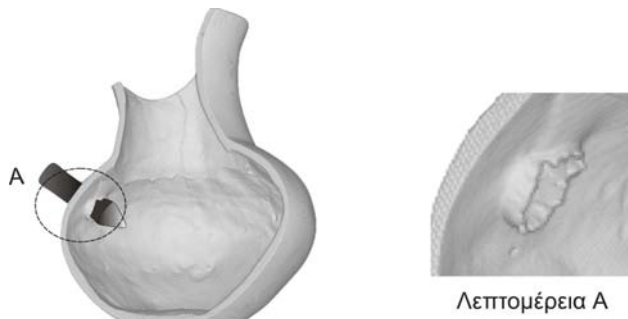
**Σχήμα 13:** FEM-προσομοίωση της ενέργειας του τεχνίτη κατά την αφαίρεση υλικού από το λαιμό, και απόκτηση της γεωμετρίας του αντικειμένου.

#### 4.2 Προσομοίωση διάνοιξης οπής στο σώμα της οινόχης

Στο **σχήμα 14** παρουσιάζεται ο πιθανότερος τρόπος με τον οποίο ο τεχνίτης χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο άνοιξε την οπή στον ώμο του σώματος της οινόχης. Η οπή καθώς και το παραμορφωμένο υλικό αργίλου παρουσιάζεται στο κάτω μέρος του σχήματος. Η διάνοιξη της οπής πραγματοποιήθηκε κάτω από την περιοχή της ένωσης του λαιμού με το σώμα για να αποφευχθεί τυχών ζημιά στην συμβολή τους.

Η διαδικασία διάνοιξης της οπής στην περιοχή του λαιμού της οινόχης, που παρουσιάζεται στο πάνω αριστερά μέρος του σχήματος 15, προσομοιώθηκε με την βοήθεια ενός FEM-μοντέλου και απεικονίζεται στο πάνω δεξιό μέρος του ίδιου σχήματος. Το αντικείμενο διάνοιξης θεωρείται ότι είναι ένας κυλινδρικός πείρος διαμέτρου 14mm (που αντιστοιχεί στη μετρημένη διάμετρο της οπής στο σώμα) που καταλήγει μέσω ενός κωνικού τμήματος 30 βαθμών σε μια σφαιρική ακίδα διαμέτρου 2 χιλ., που κινείται με μια χαμηλή ταχύτητα 10 mm/s κατά μήκος του άξονά του, ο οποίος είναι κάθετος στην επιφάνεια του ώμου της οινόχης.

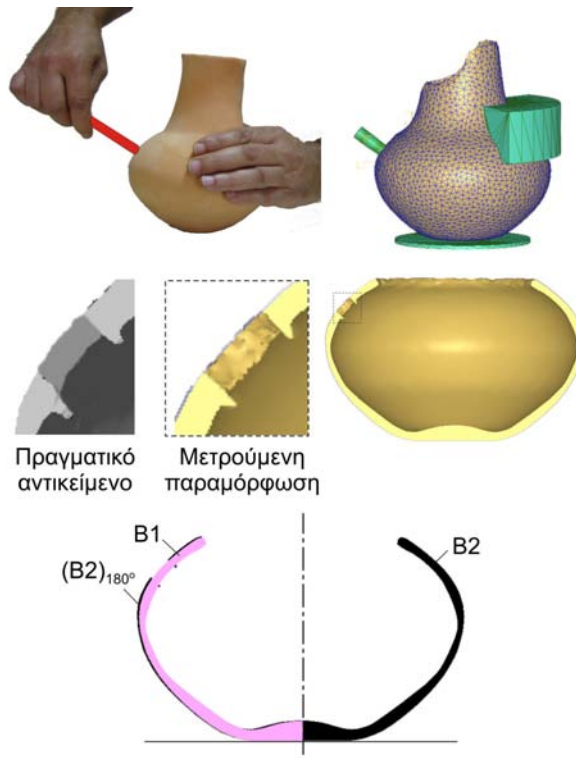
Το χέρι του τεχνίτη με το οποίο συγκρατεί την οινόχη προσομοιώθηκε ως ένα σταθερό στήριγμα 120° που ταιριάζει ακριβώς στην εξωτερική γεωμετρία της οινόχης γύρω από τη περιοχή



**Σχήμα 14:** Διάνοιξη της σπής στο σώμα.

του λαιμού το οποίο είναι τοποθετημένο συμμετρικά ως προς τον πείρο και σε ύψος 70 χιλ. στην κάθετη κατεύθυνση από τη βάση της οινοχόης. Στο FEM-μοντέλο ο πείρος και το στήριγμα θεωρήθηκαν άκαμπτα. Για να διευκολυνθεί η διάνοιξη της σπής εφαρμόσθηκε το ομαλοποιημένο κριτήριο θραύσης Cockcroft και Latham. Αυτό παρέχεται από το λογισμικό Deform, ως μια σταθερά συντελεστή ζημίας 0,105. Ο συντελεστής τριβής Tresca μεταξύ της παραμορφώσιμης επιφάνειας του αργίλου και της άκαμπτης επιφάνειας του στηρίγματος ορίστηκε ίση με 0,46.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο κάτω μέρος του σχήματος 15. Η το-

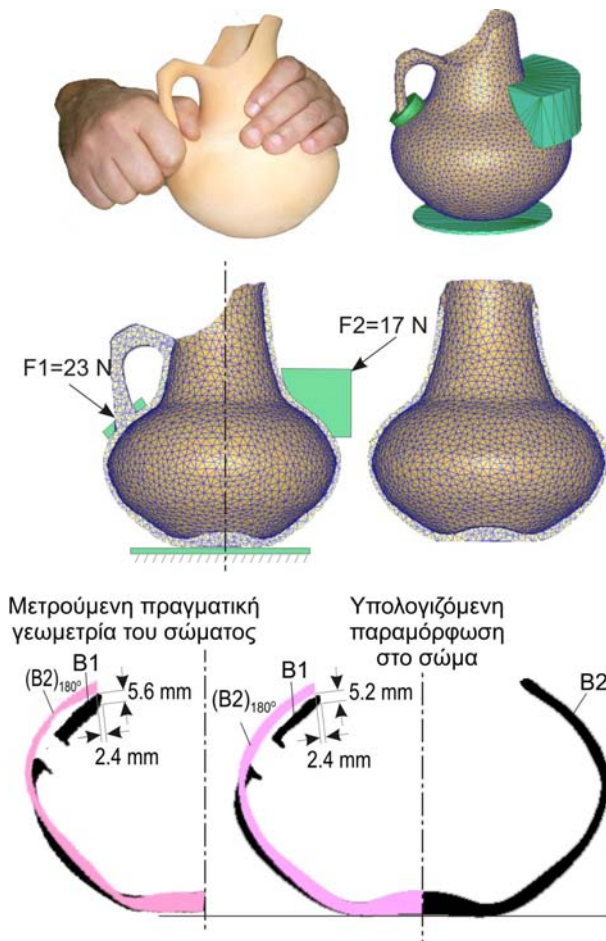


**Σχήμα 15:** FEM-προσομοίωση της διάνοιξης της σπής στο σώμα και ανάπτυξη της γεωμετρία του αντικειμένου.

μή B1 του παραμορφωμένου σώματος (κάτω μέρος του σχήματος) τοποθετήθηκε πάνω στην τομή (B2)<sub>180°</sub>. Από τη σύγκριση των δύο τομών δεν παρατηρήθηκε καμία απόκλιση στη μορφή τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι καμία ιδιαίτερη παραμόρφωση δεν δημιουργήθηκε στο σώμα ως αποτέλεσμα της διάνοιξης της οπής, εκτός από την υπερχειλίση του υλικού σε μια στενή ζώνη γύρω από την οπή στην εσωτερική επιφάνεια του ώμου του σώματος. Η σύγκριση της μορφής της υπερχειλίσης του αργίλου που προέκυψε από την προσομοίωση με αυτήν του πραγματικού αντικειμένου στον ίδιο σχήμα, φανερώνει το υψηλό επίπεδο ταύτισης των μορφών.

### 4.3 Προσομοίωση της ένωσης της λαβής με το σώμα

Στην αναπαράσταση της ενέργειας που παρουσιάζεται στο σχήμα 16, θεωρείται ότι ο τεχνίτης κρατά την κανάτα κάτω με το αριστερό χέρι του πιέζοντας την άκρη της λαβής πάνω στο σώμα με τα δάχτυλα του δεξιού χεριού του. Στην προσομοίωση FEM της ενέργειας αυτής χρησιμοποιήθηκε η ίδια συγκράτηση όπως στην παράγραφο 4.1 και 4.2 για να προσομοιώσει τη δράση του



**Σχήμα 16:** FEM-προσομοίωση της ένωσης της λαβής με το σώμα, προκαλώντας παραμόρφωση στο σώμα, και σύγκριση της παραμόρφωσης με αυτήν που μετρήθηκε στο σώμα της οινόχους Nr.1.

αριστερού χεριού, ενώ η πίεση στο σώμα από τα δάχτυλα του τεχνίτη γύρω από τη λαβή προσομοιώνεται από ένα δαχτυλίδι εξωτερικής διαμέτρου 30 χιλ. Στη FEM-μοντέλο ορίστηκαν οι δυνάμεις του αριστερού χεριού και των δάχτυλων του τεχνίτη γύρω από το λαβή ίση με 17 N και 23 N αντίστοιχα, οι οποίες οδηγούν σε παραμορφώσεις ίδιου μεγέθους στο σώμα της οινόχους, με τις μετρημένες τιμές (βλέπε κάτω μέρος του σχήματος 16). Η βάση και το υπόλοιπο του σώματος ουσιαστικά δεν έχουν υποστεί παραμόρφωση. Ως εκ τούτου η παραμόρφωση του σώματος της οινόχους αναπτύχθηκε στο στάδιο της ένωσης της λαβής με το σώμα της οινόχους, καθώς ο τεχνίτης πίεζε το υλικό γύρω από το άκρο της λαβής, ώστε να κλείσει την οπή και να ενισχύσει τη δύναμη της συμβολής τους.

## 5 Συμπεράσματα

Καινοτόμες τεχνολογίες όπως ο βιομηχανικός αξονικός τομογράφος υποστηριζόμενος από Η/Υ και ο τρισδιάστατος σαρωτής ακτινών λέιζερ επέτρεψαν την ακριβή καταγραφή της στερεάς γεωμετρίας των αρχαίων κεραμικών οινόχων της πρόωρης εποχής του σιδήρου. Τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν έδωσαν έμφαση στις ενέργειες και τις μεθόδους του τεχνίτη κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης του αργίλου και εξήγησαν τους λόγους που οδήγησαν στις παραμορφώσεις και τις ασυμμετρίες της κανάτας.

## Ευχαριστίες

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου “Archaeoscor” EUREKA, και υποστηρίχθηκε από Γενική Γραμματρία Έρευνας και Τεχνολογίας του Ελληνικού Υπουργείου Ανάπτυξης. Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον Καθ. Klein και το εργαστήριό του (Fachhochschule, Aalen, Γερμανία) για την βοήθεια τους για την μέτρηση της οινόχους Nr.1 με τον αξονικό τομογράφο καθώς επίσης και την εταιρία PV Engineering Co. (Αθήνα, Ελλάδα) για την μέτρηση της οινόχους Nr.2 με φορητή laser συσκευή τρισδιάστατης σάρωσης.

## 6 Βιβλιογραφία

1. Παντερμαλής Δ., Η ανακάλυψη, ADAM EDITIONS, 1999. Διον.
2. Hochstetter A., Prähistorische Archäologie in Südosteuropa Band 3 Text, Kastanas: Ausgrabungen in einem Siedlungshügel der bronze-und eisenzeit Makedoniens 1975-1979, Die handgemachte Keramikschichten 19 bis 1, Verlag Volker Spiess, Berlin 1984.
3. Rice P.M., Pottery analysis, The university of Chicago press. Ltd., London, 1977.
4. SolidWorks, 2006 Users' guide manual, SolidWorks Corporation, 2006
5. DEFORM-3D V5.0, Users' manual, 2004.
6. Bouzakis K.-D., Efstathiou K., Paradisiadis G., Tsouknidas A., Experimental and FEM-supported investigation of wet ceramic clay extrusion for the determination of stress distributions on the applied tools' surfaces, in press in Journal of the European Ceramic Society, 2007.



