

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ

Ψηφιοποίηση μετρικών χαρακτηριστικών

*Σύγκριση μεταξύ φωτογραμμετρικής μοντελοποίησης, ψηφιοποιητή
Microscribe καθώς και παχύμετρου σε σύγχρονο σκελετικό υλικό*

Γκανιάτσου Ελισσάβετ

Ιούνιος 2018

Επιβλέπουσα: Παπαγεωργοπούλου Χριστίνα

Συνεπιβλέποντες: Μπερτσάτος Ανδρέας, Χοβαλοπούλου Μαρία-Ελένη

Εξεταστική επιτροπή: Λυριντζής Ιωάννης, Παπαγεωργοπούλου Χριστίνα,
Φακορέλλης Γεώργιος

Περίληψη

Ο ραγδαία εξελισσόμενος ρυθμός της τεχνολογίας έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή νέων μεθόδων μέτρησης στον επιστημονικό κλάδο της κρανιομετρίας. Μια από τις νεότερες μεθόδους ψηφιοποίησης στο ερευνητικό πεδίο της κρανιομετρίας είναι η φωτογραμμετρία. Η φωτογραμμετρία βασίζεται στον τριγωνομετρικό υπολογισμό σημείων, ο οποίος βασίζεται στην φωτογραφική αποτύπωση ενός αντικειμένου με στόχο την τριδιάστατη αναπαράσταση του.

Η παρούσα εργασία διερευνά την αξιοπιστία της φωτογραμμετρικής μοντελοποίησης των οστών. Στο πλαίσιο αυτής ψηφιοποιήθηκαν με την μέθοδο της φωτογραμμετρίας 20 κρανία, γνωστού φύλου και ηλικίας, για τον προσδιορισμό της ακρίβειας και της ορθότητας της ψηφιακής αποτύπωσης. Για τον υπολογισμό της ακρίβειας ελήφθησαν μετρήσεις χειροκίνητες, χρησιμοποιώντας παχύμετρο με ρολόι, μάρκας Mitutoyo 150mm με ορθότητα $\pm 0,03\text{mm}$ και βαθμονόμηση 0,02mm, και ψηφιακές, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα MeshLab. Ακολούθως, υπολογίστηκε το απόλυτο σφάλμα της μέτρησης ανάμεσα στις ψηφιακές και χειροκίνητες μετρήσεις και βάσει της κατανομής του εκτιμήθηκε η ακρίβεια των μετρήσεων των δύο μεθόδων. Επιπλέον, για την εκτίμηση της ορθότητας των μετρήσεων, στα κρανία αυτά υπολογίστηκαν 7 γωνίες και 13 αποστάσεις, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων μεθόδων μέτρησης (παχύμετρο, Microscribe) από προηγούμενες έρευνες στο ίδιο δείγμα. Υπολογίστηκε το απόλυτο και σχετικό τεχνικό σφάλμα της μέτρησης για τα τρία ζεύγη μεθόδων μέτρησης, εκ των οποίων το σχετικό τεχνικό σφάλμα συγκρίθηκε στατιστικά χρησιμοποιώντας στατιστική ανάλυση διακύμανσης επαναλαμβανόμενων μετρήσεων (repeated measures ANOVA). Η ανάλυση δεδομένων έγινε με τη γλώσσα προγραμματισμού GNU Octave, ενώ η στατιστική επεξεργασία με το λογισμικό JASP.

Η ακρίβεια της φωτογραμμετρίας υπολογίστηκε στα 0,14mm ενώ η εκτίμηση της ορθότητας με βάση τα αποτελέσματα της συμπερασματικής στατιστικής, υπέδειξε την ασφαλή συνδυαστική εφαρμογή των μεθόδων. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των μετρήσεων όσον αφορά την ακρίβεια και της στατιστικής ανάλυσης του σχετικού τεχνικού σφάλματος ανάμεσα στις μεθόδους, υποστηρίζουν την αξιοπιστία της φωτογραμμετρίας ως αποτελεσματικής μεθόδου στην κρανιομετρική έρευνα και επιτρέπουν την χρήση των δεδομένων των μετρήσεων της για ανθρωπολογικές μελέτες καθώς και σε συνδυασμό με δεδομένα άλλων μεθόδων.

Abstract

Many new methods of measurement have been introduced in the scientific field of craniometry due to recent technological advancements. One of the latest and most innovating is the method of photogrammetry. This method of digitalization is based on the trigonometric calculation of features of the photographed subject in order to reconstruct it digitally.

The present study investigates the accuracy and precision of photogrammetric measurements on crania and whether these can be used in pooled sample surveys containing data from other measurement methods. In order to achieve that, 20 skulls, of known age and sex, were digitalized using the method of photogrammetry. For the calculation of precision, manual measurements were taken directly on the skull, using a dial caliper Mitutoyo 150mm with calculated accuracy of $\pm 0,03\text{mm}$ and calibration of $0,02\text{mm}$, while the digital measurements were taken using the program MeshLab. Subsequently, the deviation between digital and manual measurements was calculated as a measure of precision. For estimating accuracy 7 angles and 13 distances were measured on the photogrammetric 3D models. These results were compared with their respective results extracted from other methods of measurement (dial caliper, Microscribe), which were taken from previous work on the same sample. TEM was calculated based on the results of paired methods, while relative TEM was statistically compared using the statistical analysis of repeated measures ANOVA, in order to investigate the possibility of using photogrammetric data with data from different methods. TEM calculations were performed with GNU Octave programming language, while statistical inference was performed with JASP.

Photogrammetric precision was calculated $0,14\text{mm}$, whereas the results of inferential statistics on the accuracy showed no differences among the measurements of the three compared methods. The results of both precision and accuracy conclude that photogrammetry can be used efficiently in the craniometric survey, while the data of measurements can be used in anthropometric surveys in comparison with data extracted from other methods.

Ευχαριστίες

Το υλικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία προέρχεται από την σύγχρονη συλλογή σκελετικής αναφοράς του Τομέα Φυσιολογίας Ζώων και Ανθρώπου του τμήματος Βιολογίας του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το υλικό χρησιμοποιήθηκε μετά από έγγραφη άδεια, στο πλαίσιο διεκπεραίωσης της παρούσας εργασίας για ερευνητικούς και μόνο σκοπούς. Τα οστά φωτογραφήθηκαν στον χώρο του εργαστηρίου, όπου έλαβαν μέρος και οι μετρήσεις στα κρανία και τα τριδιάστατα μοντέλα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Συγκριτικής Φυσιολογίας Ζώων του Βιολογικού Τμήματος του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, κο Ευστράτιο Βαλάκο, για την παραχώρηση του χώρου και του υλικού καθώς και τους υπεύθυνους του εργαστηρίου Ανθρωπολογίας του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και συνεπιβλέποντες της παρούσας εργασίας, Μπερτσάτο Ανδρέα και Δρ Χοβαλοπούλου Μαρία-Ελένη, για την ουσιαστική συμβολή τους καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 1: Υλικά και Μέθοδοι.....	8
α) Φωτογραμμετρία.....	10
β) Συλλογή και ανάλυση δεδομένων.....	14
Κεφάλαιο 2: Αποτελέσματα.....	18
Κεφάλαιο 3: Συζήτηση.....	23
Συμπεράσματα.....	25
Βιβλιογραφία.....	26
Παράρτημα.....	29

Εισαγωγή

Η ανθρωπομετρία είναι η επιστήμη που αναφέρεται στη μέτρηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών του ανθρώπου. Οι μετρήσεις του ανθρώπινου σώματος χρησιμοποιούνται σε μελέτες, που αφορούν την ιατρική, την διατροφική αξιολόγηση, την ιατροδικαστική έρευνα και την αρχαιολογία μεταξύ άλλων (Ulijaszek et al., 1999).

Κλάδος της ανθρωπομετρίας είναι η κρανιομετρία, η οποία αφορά μετρήσεις του ανθρώπινου κρανίου. Οι μετρήσεις διακρίνονται σε ποιοτικές, οι οποίες μελετούν τα μη-μετρικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου κρανίου, και ποσοτικές, που υπολογίζουν τα μετρικά χαρακτηριστικά. Οι μετρήσεις των σημείων αυτών επιτρέπουν στους ερευνητές να ερευνήσουν τον φαινότυπο του κρανίου και το ποσοστό μεταβολής του (Gornic, 2011).

Όσον αφορά τις ποσοτικές μεθόδους μέτρησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται, μπορούν να διακριθούν σε άμεσες και έμμεσες. Οι άμεσες περιλαμβάνουν συμβατικά όργανα μέτρησης, όπως παχύμετρα, κεφαλόμετρα, μετροταινίες κτλ. Οι έμμεσες, περιλαμβάνουν επιτεύγματα της σημερινής τεχνολογίας που σχετίζονται με την ψηφιοποίηση.

Η ψηφιοποίηση στο χώρο της Φυσικής Ανθρωπολογίας είναι ένας κλάδος της τεχνολογίας, που αναπτύσσεται ακόμη και μας παρέχει πολλές δυνατότητες. Πιο αναλυτικά, η ψηφιοποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής ενός αντικειμένου σε μορφή που μπορεί να επεξεργαστεί από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σήμερα, γίνεται λόγος για αρκετές μεθόδους ψηφιοποίησης, που δημιουργούν αρκετά αξιόπιστες ψηφιακές αποτυπώσεις, όπως είναι η μέθοδος της φωτογραμμετρίας, το Microscribe, το laser scanner κ.α. Οι μέθοδοι αυτοί αφορούν τεχνικές που βασίζονται στην ψηφιακή ανακατασκευή της γεωμετρικής μορφολογίας (geometrics morphometrics) των υπό μελέτη οστών (Bigoni et al., 2009). Οι τεχνικές αυτές αποσκοπούν στην ποσοτικοποίηση του μεγέθους και του σχήματος των οστών με στόχο την αξιολόγηση των διαφορών της μεταβλητότητας στο σχήμα και στο μέγεθος (μορφή) ενώ, παράλληλα διατηρούν όλες τις γεωμετρικές πληροφορίες των πρωτότυπων δειγμάτων (Bigoni et al., 2009). Οι εφαρμογές τους στην φυσική ανθρωπολογία αφορούν μεταξύ άλλων, την εκτίμηση της ηλικίας θανάτου (Braga and Treil, 2007) και τον προσδιορισμό του φύλου (Franklin et al., 2006, 2007, Kimmerle et al., 2008, Oettle et al., 2005, Pretorius et al., 2006, , Steyn et al., 2004, Bigoni et al, 2009). Ευρέως

διαδεδομένη στον χώρο της κρανιομετρίας είναι η χρήση του CTscan (Batista et al, 2015) και του Microscribe (Bigoni et al, 2009).

Μια ανερχόμενη μέθοδος ψηφιοποίησης ως εργαλείο της ανθρωπομετρίας είναι η φωτογραμμετρία. Η φωτογραμμετρία βασίζεται στην φωτογραφική αποτύπωση του αντικειμένου, στην προκειμένη περίπτωση ενός οστού, από διαφορετικές γωνίες λήψης. Η βασική της αρχή στηρίζεται στον τριγωνομετρικό υπολογισμό κοινών σημείων (*features*) μεταξύ των φωτογραφιών με στόχο την τριδιάστατη αναπαράσταση του αντικειμένου που αποτυπώνεται στις φωτογραφίες. Η συλλογή των φωτογραφιών αποσκοπεί στη συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με τη μορφολογία του αντικειμένου, ώστε μέσω κατάλληλης επεξεργασίας, η οποία επιτυγχάνεται με κατάλληλο λογισμικό σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό αντίγραφο του πρωτότυπου αντικειμένου.

Κάθε μέθοδος μέτρησης, που χρησιμοποιείται στην κρανιομετρική έρευνα, αξιολογείται βάσει της αξιοπιστίας της όσον αφορά τα αποτελέσματα που προσφέρει. Αξιόπιστη θεωρείται μια μέθοδος, τα αποτελέσματα της οποίας είναι τόσο ακριβή όσο και ορθά. Η *ακρίβεια* (*precision*) της μέτρησης δείχνει πόσο στενά κατανομημένες είναι οι επαναλαμβανόμενες πειραματικές τιμές μιας συγκεκριμένης μέτρησης ως προς την μέση τιμή τους, με άλλα λόγια δείχνει πόσο καλή επαναληψιμότητα έχουν οι τιμές που προκύπτουν από μία μέτρηση. Η *ορθότητα* (*accuracy*), από την άλλη, αναφέρεται στο πόσο κοντά κατανομημένες είναι οι πειραματικές τιμές στην πραγματική τιμή του υπό μέτρηση μεγέθους (BIMP, 2012). Επίσης, κάθε μέθοδος, εκτός από τα ποσοστά ακρίβειας και ορθότητας της, χαρακτηρίζεται και από ένα ποσοστό σφάλματος. Ως σφάλμα, εννοούμε την πιθανολογούμενη απόκλιση της μέτρησής μας. Τα σφάλματα μπορεί να είναι τυχαία ή συστηματικά. Τυχαίο ονομάζεται ένα σφάλμα, το οποίο αφορά μια πειραματική αστοχία και μπορεί να αποκαλυφθεί επαναλαμβάνοντας την μέτρηση. Συστηματικό είναι το σφάλμα, το οποίο εμφανίζεται όσες φορές και αν επαναλάβουμε την ίδια μέτρηση (Taylor, 1999). Μελετώντας την κατανομή των σφαλμάτων μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα μιας μεθόδου.

Η παρούσα εργασία διερευνά την αξιοπιστία της φωτογραμμετρικής μοντελοποίησης των οστών ως ανθρωπομετρικό εργαλείο και κινείται γύρω από δύο άξονες. Ο πρώτος άξονας ερευνά την ακρίβεια της ψηφιακής τριδιάστατης μοντελοποίησης με τη χρήση της φωτογραμμετρίας. Ο δεύτερος άξονας επιχειρεί μία εκτίμηση της ορθότητας των μετρήσεων, που προκύπτουν από τα φωτογραμμετρικά μοντέλα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μέτρησης, οι οποίες τυγχάνουν μεγάλης εφαρμογής στο πλαίσιο της οστεομετρίας με αποδεδειγμένη αξιοπιστία (Chumlea, 1985, Stephen et

al., 2015). Η εκτίμηση αυτή βασίστηκε στην μέτρηση γραμμικών αποστάσεων και γωνιών σε ψηφιακά μοντέλα, τα οποία δημιουργήθηκαν μέσω φωτογραμμετρίας. Τα δεδομένα των μετρήσεων στα τριδιάστατα μοντέλα συγκρίνονται με δεδομένα μετρήσεων, οι οποίες έγιναν με παχύμετρο και μετρήσεων με ψηφιοποιητή Microscribe. Στην συνέχεια υπολογίζεται το σφάλμα των μετρήσεων και οι μέθοδοι συγκρίνονται στατιστικά μεταξύ τους. Η έρευνα αυτή, επιχειρεί να ποσοτικοποιήσει την αξιοπιστία της φωτογραμμετρίας ως αποτελεσματικής μεθόδου στην κρανιομετρική έρευνα και να προσδιορίσει κατά πόσο είναι ασφαλές να χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των μετρήσεων της φωτογραμμετρίας για ανθρωπολογικές μελέτες καθώς και σε συνδυασμό με δεδομένα άλλων μεθόδων. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με το υλικό και την μεθοδολογία, η οποία ακολουθήθηκε. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται τα στάδια της φωτογράφισης και της μετέπειτα επεξεργασίας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επίσης, περιγράφονται οι μετρήσεις, τις οποίες πραγματοποιήσαμε στα ψηφιακά μοντέλα των κρανίων, και ο υπολογισμός του σφάλματος. Ακολούθως, στο τρίτο κεφάλαιο, ακολουθεί κριτική ανασκόπηση των μεθόδων και των αποτελεσμάτων εν συγκρίσει με αντίστοιχες έρευνες που έχουν διεξαχθεί. Τέλος, στο παράρτημα περιλαμβάνονται τα δεδομένα των μετρήσεων ενώ παρατίθεται και η σχετική βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 1: Υλικά και Μέθοδοι

Υλικό για την παρούσα εργασία αποτέλεσαν 20 κρανία ενήλικων ατόμων, 10 αρσενικών και 10 θηλυκών, με ηλικιακό εύρος από 36 έως και 86 ετών. Το υλικό προέρχεται από την σύγχρονη συλλογή σκελετικής αναφοράς του Τομέα Φυσιολογίας Ζώων και Ανθρώπου του τμήματος Βιολογίας του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Τα 20 κρανία ψηφιοποιήθηκαν με την μέθοδο της φωτογραμμετρίας και ακολούθως ελήφθησαν μετρήσεις κρανιακών αποστάσεων και γωνιών.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επαναχρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα δύο προηγούμενων ερευνών, στις οποίες ελήφθησαν μετρήσεις με παχύμετρο και Microscribe από την ίδια σκελετική συλλογή. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις με παχύμετρο προέρχονται από έρευνα κρανιακού φυλετικού διμορφισμού σε 80 ψηφιοποιημένα αναφορικά σημεία κατά την οποία ελήφθησαν μετρήσεις χρησιμοποιώντας παχύμετρο με ρολόι, μάρκας Mitutoyo 150mm, ορθότητας $\pm 0,03\text{mm}$ και βαθμονόμησης $0,02\text{mm}$ (Bertsatos et al, 2018). Τα δεδομένα των χειροκίνητων μετρήσεων της προαναφερθείσας έρευνας παρουσιάζονται στο παράρτημα (Πίνακας Ι). Τα

δεδομένα των μετρήσεων με Microscribe προέρχονται από άλλη έρευνα, η οποία αποσκοπούσε στην αξιολόγηση και ποσοτικοποίηση της κρανιακής ασυμμετρίας και των φυλετικών διαφορών καθώς και της σχέσης ανάμεσα στην κυμαινόμενη ασυμμετρία και την ηλικία (Chovalorouli et al., 2016α, β). Στο πλαίσιο αυτής, ελήφθησαν 77 αναφορικά σημεία με τη χρήση ψηφιοποιητή Microscribe 3DX (Immersion Corp. San Jose, California) με εργοστασιακή ορθότητα $\pm 0,23\text{mm}$. Οι μετρήσεις που προέκυψαν από το Microscribe παρατίθενται επίσης στο παράρτημα (Πίνακα II) και ο υπολογισμός τους έγινε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού GNU Octave (Eaton et al., 2016) με βάση τις τριδιάστατες συντεταγμένες των αναφορικών σημείων που ψηφιοποιήθηκαν με το Microscribe. Τα συγκεκριμένα αναφορικά σημεία, που ελήφθησαν και στις δύο αυτές εργασίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 1 και επαναχρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για την μέτρηση των αποστάσεων και των γωνιών από τα ψηφιακά μοντέλα της φωτογραμμετρίας.

Πίνακας 1: Λίστα αναφορικών σημείων με περιγραφή

Landmark	Abb.	Περιγραφή
Bregma	b	Το σημείο ένωσης της στεφανιαίας και οβελιαίας ραφής
Glabella	g	Το πλέον εξέχον σημείο του μετωπιαίου οστού στη νοητή τοξοειδή γραμμή που διατρέχει το κρανίο κατά το οβελιαίο επίπεδο
Opisthocranium	op	Το πλέον εξέχον σημείο του ινιακού οστού
Coronale	co	Ένα από τα δύο περισσότερο απομακρυσμένα σημεία της στεφανιαίας ραφής
Ectoconchion	ek	Το σημείο ένωσης του πλευρικού ορίου της οφθαλμικής κόγχης και της γραμμής mf, που είναι παράλληλη με το ανώτερο όριο της οφθαλμικής κόγχης
Frontomale temporale	fmt	Το πλέον οπίσθιο και πλευρικό σημείο της μετωποζυγωματικής ραφής
Frontotemporale	ft	Το πλέον εμπρόσθιο σημείο της λεπιδοειδούς ραφής του μετωπιαίου οστού
Jugale	ju	Το σημείο ένωσης της μετωπιαίας και της ζυγωματικής απόφυσης στο ζυγωματικό οστό
Mastoidale	ms	Το πλέον εμπρόσθιο σημείο της μαστοειδούς απόφυσης
Maxillonasofrontale	mnf	Το σημείο ένωσης της μετωπορινικής, μετωπογναθικής και γναθορινικής ραφής
Ovale mediale	ovm	Το πλέον έκκεντρο σημείο στο όριο του ινιακού τρήματος
Sphenion	sphn	Το σημείο ένωσης της στεφανιαίας, μετωποσφηνοειδούς και βρεγματοσφηνοειδούς ραφής
Supraconchion	spa	Το σημείο ένωσης του ανώτερου σημείου του ορίου της οφθαλμικής κόγχης, το οποίο είναι κάθετο στην γραμμή mf-ek
Supramastoid crest-squamous suture intersection	scs	Η επιμήκυνση του ανώτερου ορίου της ρίζας του ζυγωματικού οστού
Zygotemporale superior	zts	Το ανώτερο σημείο της κροταφοζυγωματικής ραφής
Supra auricular	au	Το σημείο ένωσης της ανώτερης επιφάνειας του ζυγωματικού τόξου και του μέσου σημείου του του εξωτερικού ακουστικού πόρου

Μωβ: μονήρη σημεία (midline points), Μπλε: κατά ζεύγη (bilateral points)

α) Φωτογραμμετρία

Τα κρανία φωτογραφήθηκαν με ψηφιακή μηχανή DSLR Canon EOS 100D με ανάλυση 18 Μpixels και φακό σταθερής εστιακής απόστασης Canon EF 40mm f/2.8 STM. Τα κρανία φωτογραφήθηκαν σε δύο στάσεις με αντιδιαμετρικό προσανατολισμό: κατά την πρώτη το κρανίο τοποθετούνταν περίπου σε ανατομική θέση και κατά την δεύτερη το κρανίο τοποθετούνταν με τον κρανιακό θόλο προς τα κάτω, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



α) Τοποθέτηση κρανίου σε ανατομική θέση για περιμετρική φωτογράφιση στον αρχικό προσανατολισμό (*chunk 1*)

β) Τοποθέτηση κρανίου ανάποδα για περιμετρική φωτογράφιση με διαφορετικό προσανατολισμό (*chunk 2*)

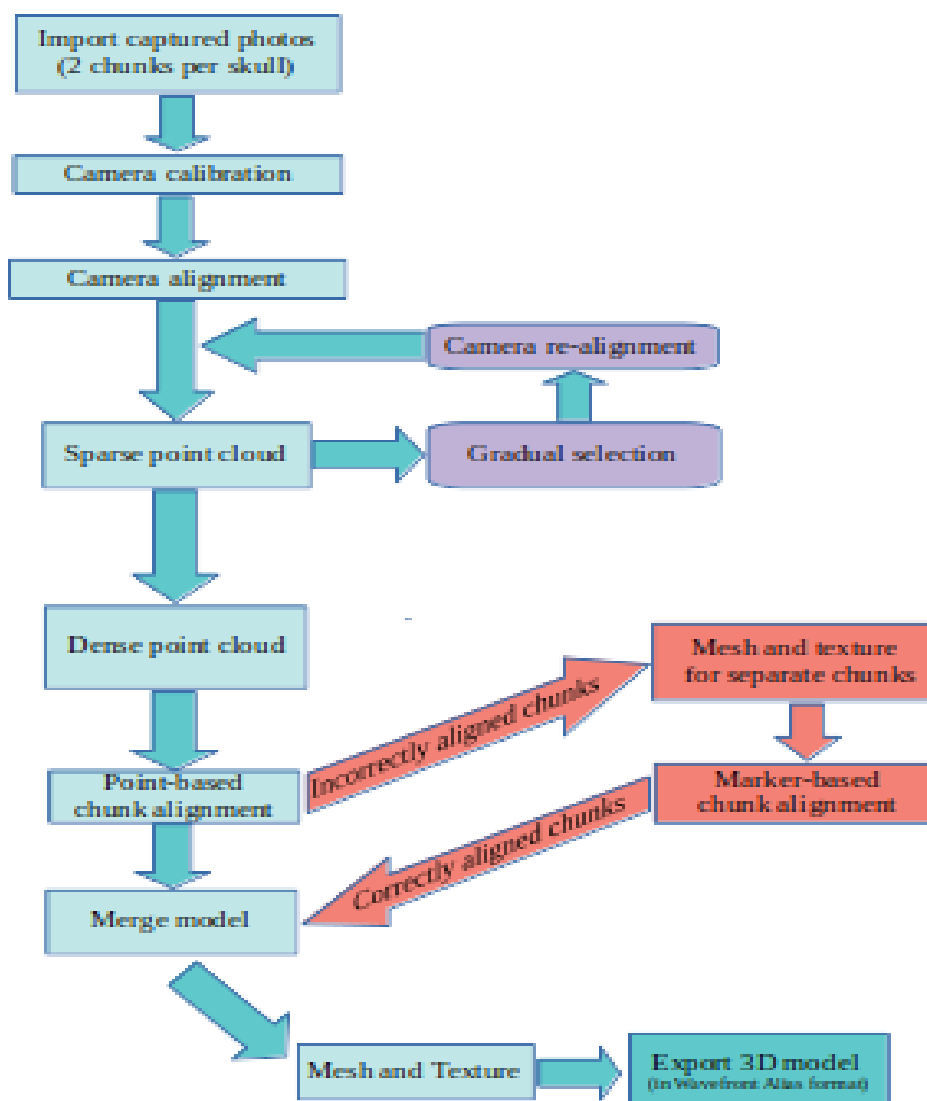
Εικόνα 1: Θέσεις κρανίων κατά την φωτογράφιση

Τα κρανία τοποθετούνταν σε επίπεδη βάση, ενώ όπου κρινόταν απαραίτητο χρησιμοποιούνταν στηρίγματα, ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του μοντέλου. Η κάμερα, με την βοήθεια μηχανικού βραχίονα σταθεροποιούταν σε διαφορετικές γωνίες λήψης. Συνολικά, ελήφθησαν 65-70 περιμετρικές φωτογραφίες κάθε κρανίου (στις 0°,20°,45°,80°) ανά προσανατολισμό και μία κάτοψη (90°).

Όλες οι φωτογραφίες ελήφθησαν σε ημιαυτόματη λειτουργία σταθερού διαφράγματος ρυθμισμένη στα 14 F/stops. Η τιμή του διαφράγματος ορίζει την ποσότητα φωτός που θα εισέλθει στην φωτογραφία, καθώς ελέγχει το «άνοιγμα» του φακού. Σε περιπτώσεις μεγάλου διαφράγματος, «μπαίνει» περισσότερο φως στην φωτογραφία και το βάθος του πεδίου μικραίνει με αποτέλεσμα το παρασκήνιο (background) να είναι αποεστιασμένο. Στο πλαίσιο της φωτογραμμετρίας, η ευκρίνεια του μοντέλου είναι καίριας σημασίας, καθώς όσο περισσότερο η φωτογραφία εστιάζει στο

αντικείμενο που θέλουμε να ψηφιοποιήσουμε, τόσο ελαττώνονται τα στοιχεία του παρασκηνίου και του περιβάλλοντα χώρου, τα οποία δεν μας ενδιαφέρει να ψηφιοποιήσουμε. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, το παρασκήνιο προτείνεται να είναι ουδέτερο. Τέλος, να σημειωθεί ότι όσο περισσότερο χρόνο ο φακός μένει ανοιχτός, τόσο πιο επιρρεπής και ευαίσθητος είναι στην κίνηση, με αποτέλεσμα τη λήψη μιας «κουνημένης» φωτογραφίας. Προς αποφυγήν τούτου, οι φωτογραφίες συλλέχθηκαν με την βοήθεια τηλεχειρισμού ώστε να μην «κουνηθεί» η κάμερα λόγω κραδασμών. Όλες αυτές οι παράμετροι, συντελούν στην μείωση του όγκου εργασίας κατά την φωτογραμμετρική επεξεργασία στον υπολογιστή, όπως αναλύεται πιο κάτω.

Η φωτογραφική επεξεργασία έγινε μέσω του προγράμματος Photoscan professional version 1.4 της Agisoft LLC. Τα βήματα που ακολουθήσαμε παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 2).

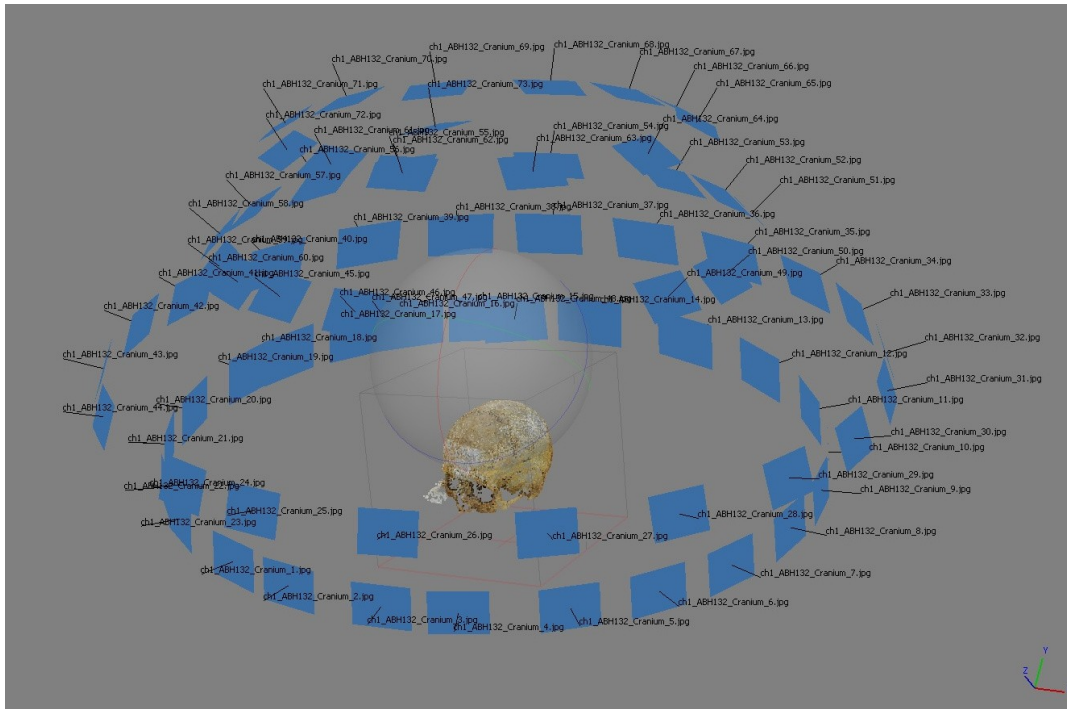


Εικόνα 2: Ροή φωτογραμμετρικής επεξεργασίας στο Photoscan

Σε πρώτο στάδιο, εισήχθησαν οι φωτογραφίες στο πρόγραμμα σε δύο διαφορετικά σύνολα φωτογραφιών (chunks), βάσει του προσανατολισμού τους (υπενθυμίζεται ότι κάθε κρανίο φωτογραφήθηκε σε δύο στάσεις συνεπώς εισάγαμε στο πρόγραμμα δύο chunk για κάθε κρανίο). Στο στάδιο αυτό, το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν «μάσκες» (masks), με τις οποίες καθίσταται δυνατό να αποκρυφτεί εντελώς το παρασκήνιο και ότι αυτό περιλαμβάνει, ώστε το πρόγραμμα να επικεντρωθεί μόνο στην ανάλυση του προς ψηφιοποίηση αντικειμένου. Καθώς όμως ο όγκος των φωτογραφιών ήταν αρκετά μεγάλος και κάτι τέτοιο θα ήταν υπερβολικά χρονοβόρο, το στήσιμο της φωτογράφισης έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε το παρασκήνιο να παραμένει αφενός μεν μειωμένης ευκρίνειας (λόγω σωστής διαχείρισης του βάθους πεδίου κατά την εστίαση στο αντικείμενο ενδιαφέροντος, δηλαδή το κρανίο) και αφετέρου, όσο το δυνατόν ουδέτερο.

Ύστερα από την εισαγωγή των συνόλων των φωτογραφιών, για κάθε σύνολο (chunk) ορίστηκαν οι συγκεκριμένες παράμετροι βαθμονόμησης της κάμερας που χρησιμοποιήθηκε (Focal length, Principal point coordinates, Affinity and Skew, Radial distortion coefficients, Tangential distortion coefficients). Στο σημείο αυτό, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια σειρά αλγορίθμων όπως ο SIFT, ώστε να ταυτοποιήσει τα κοινά σημεία μεταξύ των φωτογραφιών. Πιο συγκεκριμένα, ο SIFT είναι ένας αλγόριθμος, ο οποίος αναζητά κοινά σημεία ανάμεσα στις φωτογραφίες βασιζόμενος στην κλίμακα του χώρου. Ο SIFT σε κάθε φωτογραφία συγκρίνει κάθε εικονοστοιχείο (pixels) με τα εφαπτόμενά του, σε ανώτερα και κατώτερα επίπεδα. Στην περίπτωση που αναγνωρίσει ένα σημείο, τότε ταυτοποιεί την θέση και την κλίμακά του (Wu et al., 2013).

Έχοντας εντοπίσει τα σημεία, τα οποία θεωρεί ότι είναι κοινά στις φωτογραφίες, το πρόγραμμα προσπαθεί να εκτιμήσει την θέση της κάμερας από όπου λήφθηκε η εκάστοτε φωτογραφία. Στη συνέχεια, ευθυγραμμίζει τα σύνολα των φωτογραφιών βάσει της εκτίμησης της θέσης της κάμερας (camera alignment). Στο σημείο αυτό, η ακρίβεια (accuracy) ορίστηκε στο υψηλό επίπεδο, επιλογή που ορίζει το πόσο ακριβής θα είναι η εκτίμηση του προγράμματος σχετικά με την θέση της κάμερας. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται μια προεπισκόπηση της εκτίμησης των θέσεων της κάμερας.



Εικόνα 3: Προσανατολισμός και θέση σημείων φωτογραφικών λήψεων ενός chunk

Εφόσον το πρόγραμμα ευθυγραμμίζει τα σύνολα των φωτογραφιών βάσει των θέσεων της κάμερας δημιουργεί το **sparse point cloud**. Στο στάδιο αυτό, μέσω της επιλογής **gradual selection** δόθηκαν κριτήρια βάσει των οποίων αφαιρέθηκαν σημεία, τα οποία δεν είχαν σωστή τοποθέτηση. Από τα τέσσερα κριτήρια, που είναι διαθέσιμα από το συγκεκριμένο λογισμικό, ορίσαμε το reconstruction uncertainty μικρότερο ή ίσο του 8 και το projection accuracy σε τιμή μικρότερη ή ίση του 9. Μετά από τις επιλογές αυτές, το πρόγραμμα ευθυγραμμίζει πάλι τα chunks με βάση τα σημεία, τα οποία δεν απομακρύνθηκαν. Μετά την επαν-ευθυγράμμιση (**re-alignment**), δημιουργείται το sparse point cloud με βελτιωμένη ποιότητα ευθυγράμμισης των σημείων λήψης των φωτογραφιών.

Ακολούθως, δημιουργήθηκε το **dense point cloud** επιλέγοντας υψηλή ποιότητα ανάλυσης για κάθε chunk. Στο σημείο αυτό, το μοντέλο έχει περισσότερη λεπτομέρεια, οπότε απομακρύνθηκαν στοιχεία, τα οποία αντιστοιχούσαν στον περιβάλλοντα χώρο (artifacts), με αποτέλεσμα κάθε chunk εν τέλει να αποτελείται από 6-7εκ. σημεία. Αφού έγινε ο απαραίτητος καθαρισμός των dense point clouds σε κάθε chunk, στη συνέχεια το μοντέλο ευθυγραμμίστηκε με βάση τα κοινά σημεία (point based alignment) των φωτογραφιών και των δύο chunks και μέσω της επιλογής merge ενώθηκαν τα δύο chunks κάθε κρανίου σε ένα ενιαίο μοντέλο. Για τελευταία φορά, απομακρύνθηκαν στοιχεία του περιβάλλοντος χώρου (background), τα οποία μπορούσαν να διακριθούν με περισσότερη λεπτομέρεια και μέσω της επιλογής **build mesh** δημιουργήθηκε το

τριγωνικό πλέγμα για κάθε κρανίο. Κατά τη δημιουργία του τριγωνικού πλέγματος οι έδρες των τριγώνων (faces triangles) περιορίστηκαν στις 500.000, ενώ η δημιουργία υφής (texture) του τελικού μοντέλου ρυθμίστηκε στα 8192 pixels.

Σε περιπτώσεις όπου η αυτόματη ευθυγράμμιση των δύο chunks βάσει των σημείων (point-based chunk alignment) δεν ήταν επιτυχής, δημιουργήθηκε πλέγμα (mesh) και υφή (texture) για κάθε chunk ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό, ήταν δυνατό να διακριθούν με ακρίβεια και λεπτομέρεια σημεία στα μοντέλα και των δύο chunks, ώστε να τοποθετηθούν δείκτες (markers). Πιο συγκεκριμένα, τοποθετήσαμε τέσσερις δείκτες (markers) σε κάθε μοντέλο βάσει των οποίων ευθυγραμμίστηκαν τα δύο chunks (marker based alignment). Εφόσον, πλέον, τα chunks είχαν ευθυγραμμιστεί σωστά, απομακρύνθηκαν στοιχεία του περιβάλλοντα χώρου από το dense point cloud και στη συνέχεια ενώθηκαν (merge) τα chunks δημιουργώντας εκ νέου πλέγμα και υφή με τις ίδιες παραμέτρους. Τέλος, έγινε εξαγωγή των τελικών μοντέλων σε πρότυπο Alias/Wavefront OBJ file format.

β) Συλλογή και ανάλυση δεδομένων

Ο προσδιορισμός της ακρίβειας βασίστηκε σε 3 ψηφιακές (digital) και 3 χειροκίνητες (manual) μετρήσεις, οι οποίες ελήφθησαν σε κάθε κρανίο. Οι ψηφιακές μετρήσεις έγιναν μέσω του προγράμματος MeshLab και οι 3 χειροκίνητες χρησιμοποιώντας παχύμετρο με ρολόι, μάρκας Mitutoyo 150mm με ορθότητα $\pm 0,03\text{mm}$ και βαθμονόμηση $0,02\text{mm}$. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις δεν βασίστηκαν σε αναφορικά σημεία ή κρανιακές αποστάσεις βάσει πρωτοκόλλου αλλά, σε σημεία τα οποία μπορούσαν να διακριθούν με ακρίβεια τόσο το ψηφιακό μοντέλο όσο και στο πραγματικό κρανίο. Επίσης, οι μετρήσεις αυτές έγιναν μεταξύ απομακρυσμένων σημείων, όσο ήταν αυτό δυνατό, ώστε να περιοριστεί το σφάλμα της μέτρησης του παρατηρητή σε σχέση με την ακρίβεια του παχύμετρου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ψηφιακή και η αναλογική μέτρηση δεν αναφέρονταν στις ίδιες μονάδες, συνεπώς, έπρεπε να μετατραπούν οι ψηφιακές μετρήσεις σε χιλιοστά. Η μετατροπή έγινε πολλαπλασιάζοντας κάθε ψηφιακή μέτρηση με τον λόγο της κλίμακας (scaling factor), ο οποίος ορίζεται ως ο μέσος όρος του αθροίσματος των λόγων των μετρήσεων.

$$\text{Δηλαδή } Sf = \frac{\left(\frac{m_1}{d_1} + \frac{m_2}{d_2} + \frac{m_3}{d_3}\right)}{3}, \text{ όπου } m = \text{αναλογική μέτρηση και } d = \text{ψηφιακή.}$$

Έχοντας υπολογίσει τον λόγο της κλίμακας, οι μετατροπές των μετρήσεων υπολογίστηκαν ως εξής $d_1 \times sf$, $d_2 \times sf$, ...κ.ο.κ. Αναλυτικά, οι ψηφιακές και αναλογικές μετρήσεις, πριν και μετά την μετατροπή παρατίθενται στους Πίνακες III και IV του παραρτήματος. Η ακρίβεια εκτιμήθηκε ως το μεσοσταθμικό απόλυτο σφάλμα μεταξύ ψηφιακών και χειροκίνητων μετρήσεων.

Στην συνέχεια, για την εκτίμηση της ορθότητας υπολογίστηκε το **τεχνικό σφάλμα της μέτρησης (Technical Error of Measurement-TEM)** βάσει των μετρήσεων των αποστάσεων και των γωνιών μεταξύ των τριών μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, ελήφθησαν 7 γωνίες (angles) και 13 αποστάσεις (distances) στα τριδιάστατα μοντέλα μέσω του προγράμματος MeshLab. Οι γωνίες και οι αποστάσεις, που μετρήθηκαν, δίνουν τα πιο ασφαλή αποτελέσματα όσον αφορά τον προσδιορισμό του φύλου και παρουσιάζονται στους Πίνακες 1 και 2 (Bertsatos et al, 2018).

Πίνακας 2: Λίστα αναφορικών σημείων βάσει των οποίων ελήφθησαν οι γωνίες

#Angle	Landmark 1	Landmark 2	Landmark 3
A1	Glabella	Supra-Auricular left	Maxillonasofrontale left
A2	Mastoidale Right	Opisthocranion	Zygotemporal superior right
A3	Glabella	Asterion left	Maxillonasofrontale left
A4	Glabella	Maxillonasofrontale Right	Bregma
A5	Glabella	Maxillofrontale right	Bregma
A6	Ovale mediale left	Mastoidale right	Coronale right
A7	Glabella	Supramastoid crest– squamous suture intersection left	Maxillonasofrontale left

Πίνακας 3: Λίστα αναφορικών σημείων βάσει των οποίων ελήφθησαν οι αποστάσεις

#Distance	Landmark 1	Landmark 2
D1	Ovale mediale right	Mastoidale right
D2	Mastoidale left	Frontomalare temporale right
D3	Sphenion left	Mastoidale right
D4	Mastoidale left	Coronale right
D5	Mastoidale left	Jugale right
D6	Mastoidale left	Sphenion right
D7	Supraconchion left	Mastoidale right
D8	Frontotemporale left	Mastoidale right
D9	Ectoconchion left	Mastoidale right
D10	Zygotemporal superior left	Mastoidale right
D11	Jugale left	Mastoidale right
D12	Ovale mediale left	Mastoidale left
D13	Glabella	Mastoidale Right

Το τεχνικό σφάλμα της μέτρησης (Technical error measurement-TEM) ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του τετραγώνου του σφάλματος ως προς τον αριθμό των μετρήσεων και δίνεται από τον τύπο:

$$TEM = \sqrt{\frac{\sum D^2}{2N}} ,$$

όπου D είναι η διαφορά ανάμεσα στις μετρήσεις και N είναι ο αριθμός του υπό μέτρηση πληθυσμού.

Το TEM υπολογίζεται από την επαναλαμβανόμενη μέτρηση στο ίδιο αντικείμενο είτε από τον ίδιο (intra-observer) ή από περισσότερους ερευνητές (inter-observer) είτε μεταξύ διαφορετικών μεθόδων μέτρησης, όπως στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, και την εν συνεχεία εξαγωγή της διαφοράς μεταξύ των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων και την εφαρμογή της ανάλογης εξίσωσης.

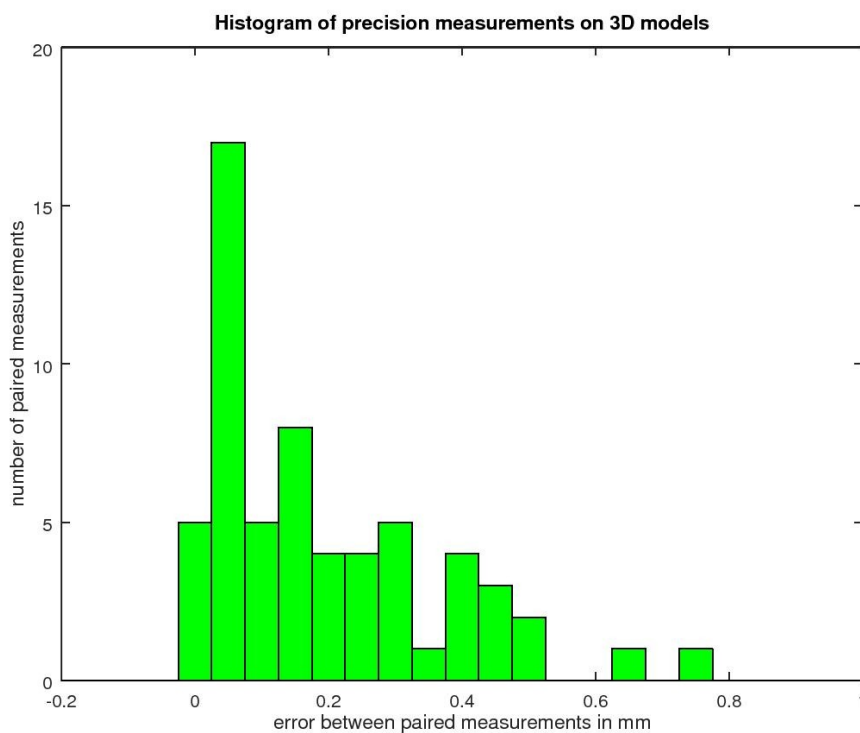
Αξίζει να σημειωθεί ότι, το μέγεθος του TEM είναι ανάλογο του μεγέθους της μέτρησης (Ulijasnek et al, 1999). Συνεπώς, για να συγκριθούν διαφορετικές μέθοδοι μεταξύ τους, πρέπει να υπολογισθεί το σχετικό TEM (Relative TEM), το οποίο είναι το πηλίκο του TEM προς τον μέσο όρο των μετρήσεων επί τις εκατό (Norton & Olds, 1996), όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\%TEM = \left(\frac{TEM}{mean} \right) \times 100$$

Ακολούθως, για να διαπιστωθεί αν η ορθότητα κάθε μεθόδου μέτρησης είναι παρόμοια μεταξύ των μεθόδων και άρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα ή συμπληρωματικά μεταξύ τους, εφαρμόσαμε την στατιστική ανάλυση διακύμανσης επαναλαμβανόμενων μετρήσεων (repeated measures ANOVA) πάνω στα αποτελέσματα των σχετικών TEM για τις γωνίες και τις αποστάσεις που μελετήσαμε. Πιο συγκεκριμένα, η εξαρτημένη μεταβλητή είναι το σχετικό TEM των γωνιών ή των αποστάσεων, οι οποίες εξετάστηκαν χωριστά. Η ανεξάρτητη μεταβλητή έχει τρεις κατηγορίες, οι οποίες αντιστοιχούν στα τρία ζεύγη μεθόδων βάσει των οποίων υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα TEMs. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το δείγμα της ανάλυσης διακύμανσης επαναλαμβανόμενων μετρήσεων αποτελούν οι γωνίες και οι αποστάσεις για τις οποίες έχει υπολογισθεί το σχετικό TEM και εφόσον κάθε μέθοδος μέτρησης εφαρμόστηκε στο ίδιο σκελετικό δείγμα και στις ίδιες μετρήσεις (γωνίες ή αποστάσεις), η r.m. ANOVA είναι η ενδεδειγμένη ανάλυση συμπερασματικής στατιστικής για να μας φανερώσει αν οι τιμές των σχετικών TEM που υπολογίσαμε ανήκουν στον ίδιο “πληθυσμό μετρήσεων” ή όχι. Λέγοντας “πληθυσμό μετρήσεων” εννοούμε όλες τις μετρήσεις με όλες τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αν η r.m. ANOVA δεν δείξει στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των σχετικών TEM των τριών κατηγοριών, τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ορθότητα μεταξύ των μεθόδων δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά, το οποίο συνεπάγεται ότι η παράλληλη ή συμπληρωματική εφαρμογή τους σε αντίστοιχες μετρήσεις δεν πρόκειται να εισάγει συστηματικό σφάλμα στα εκάστοτε δεδομένα. Οι υπολογισμοί της στατιστικής ανάλυσης έγιναν με το λογισμικό ανοικτού κώδικα JASP 0.8.6.0 (JASP Team, 2018).

Κεφάλαιο 2: Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα, το οποίο παρουσιάζει την κατανομή συχνοτήτων του σφάλματος των μετρήσεων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ακρίβειας. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται το απόλυτο σφάλμα ανάμεσα στις συζευγμένες μετρήσεις μεταξύ των ψηφιακών (3D models) και των χειροκίνητων (παχύμετρο) μετρήσεων και στον κάθετο ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων, οι οποίες εμφανίζουν το συγκεκριμένο εύρος σφάλματος.



Εικόνα 4: Απόλυτο σφάλμα ανάμεσα σε συζευγμένες μετρήσεις σε συνάρτηση με τον αριθμό των μετρήσεων

Για να υπολογιστεί το αναμενόμενο σφάλμα των μετρήσεων, το οποίο είναι και αντιπροσωπευτικό της ακρίβειας των ψηφιακών μετρήσεων από τριδιάστατα ψηφιακά μοντέλα, συνήθως υπολογίζεται η μέση τιμή. Μελετώντας όμως το ιστόγραμμα, παρατηρείται ότι η κατανομή συχνοτήτων είναι θετικά ασύμμετρη ή λοξή προς τα δεξιά (right skewed) και ως εκ τούτου υπολογίστηκε η διάμεσος (median), η οποία είναι πιο αντιπροσωπευτική για το συγκεκριμένο δείγμα. Η διάμεσος (median) είναι η τιμή που χωρίζει την κατανομή σε δύο ίσα

τιμήματα, ενώ το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο (Q_1 , Q_3) αφορά το 25% και 75% του εύρους τιμών σε αύξουσα σειρά. Βάσει αυτών των τιμών μπορεί να υπολογισθεί το διατεταρτημοριακό εύρος (Inter Quartile Range) και στη συνέχεια να υπολογισθούν τα όρια των ακραίων τιμών (outliers), οι οποίες συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη. Πρακτικά, η τιμή της διαμέσου υπολογίστηκε στα 0,14mm. Το διατεταρτημοριακό εύρος είναι η διαφορά του τρίτου από το πρώτο τεταρτημόριο και δίνεται από τον τύπο:

$$IQR=Q_3-Q_1$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση $IQR= 0,291 - 0,063= 0,288\text{mm}$. Οι ακραίες τιμές της κατανομής υπολογίζονται βάσει του τύπου:

$$\text{outlier} < Q_1 - 1,5 \times IQR \text{ και } Q_3 + 1,5 \times IQR > \text{outlier}$$

Συνεπώς, οι τιμές που έχουν τιμή μικρότερη από -0,37mm και μεγαλύτερη των 0,72mm θεωρούνται ακραίες. Στο σύνολο των 60 ζευγών μετρήσεων μόλις 1 ζεύγος έδωσε αρκετά μεγάλο σφάλμα ώστε να θεωρείται ακραία τιμή. Το ποσοστό αυτό σε συνδυασμό με το ότι η μοναδική ακραία τιμή (~0.77mm) είναι πολύ κοντά στο όριο ακραίων τιμών υποδηλώνει ότι δεν υπήρξε κάποιο συστηματικό σφάλμα κατά τη διαδικασία των ψηφιακών και χειροκίνητων μετρήσεων.

Όσον αφορά τους υπολογισμούς των απόλυτων και σχετικών TEMs, τα αποτελέσματά μας παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4. Υπολογίζοντας τους μέσους όρους των απόλυτων TEM για τις γωνίες, μικρότερη απόκλιση φαίνεται να υπάρχει ανάμεσα σε μετρήσεις μοντέλων φωτογραμμετρίας και παχυμέτρου ($TEM_{3Dmodels-manual} = 1,19^\circ$), ενώ παρόμοια παρουσιάζεται η απόκλιση των TEM των δύο άλλων μεθόδων ($TEM_{microscribe-manual} = 1,25^\circ$ και $TEM_{3Dmodels-microscribe} = 1,24^\circ$). Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στους μέσους όρους των απόλυτων TEM για τις αποστάσεις με το TEM ανάμεσα σε μοντέλα φωτογραμμετρίας και μετρήσεις παχυμέτρου να είναι μικρότερο ($TEM_{3Dmodels-manual} = 1,5\text{mm}$) και οι άλλες δύο μέθοδοι να παρουσιάζουν πολύ μικρή απόκλιση ($TEM_{microscribe-manual} = 1,75\text{mm}$ και $TEM_{3Dmodels-microscribe} = 1,65\text{mm}$). Σχετικά με τον μέσο όρο των σχετικών TEM, οι γωνίες παρουσιάζουν σχεδόν ίδια απόκλιση ($\%TEM_{3Dmodels-manual} = 7\%$, $\%TEM_{microscribe-manual} = 7\%$ και $TEM_{3Dmodels-microscribe} = 6\%$) ενώ η απόκλιση σε όλα τα %TEM μεταξύ των μεθόδων για τις αποστάσεις είναι παρόμοια. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές στα σχετικά TEM μεταξύ των γωνιών. Για παράδειγμα η γωνία A3 έχει σχετικό σφάλμα περίπου 11.4%, το οποίο είναι πολύ υψηλό, ενώ η A6 γύρω στο 1.6%, το οποίο είναι ένα αποδεκτό σχετικό σφάλμα μέτρησης. Αυτό όμως έχει να κάνει με τις

ιδιαιτερότητες των εκάστοτε γωνιών ή και αποστάσεων που τίθενται υπό μέτρηση και όχι με τη μέθοδο μέτρησης, όπως υποδεικνύουν και τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης επαναλαμβανόμενων μετρήσεων που παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 4: Απόλυτο και σχετικό TEM μεταξύ μεθόδων για κάθε μεταβλητή

	TEM 3D Microscribe – manual	Relative TEM 3D Microscribe – manual	TEM 3D Models – manual	Relative TEM 3D Models – manual	TEM 3D Models – 3D Microscribe	Relative TEM 3D Models – 3D Microscribe
A1	1,106	0,191	0,962	0,172	0,653	0,116
A2	0,813	0,035	0,84	0,036	0,936	0,04
A3	0,633	0,132	0,517	0,11	0,479	0,101
A4	2,532	0,04	2,764	0,045	2,982	0,048
A5	2,185	0,032	1,421	0,021	2,207	0,032
A6	0,963	0,014	1,395	0,02	0,909	0,013
A7	0,572	0,104	0,468	0,086	0,555	0,102
D1	0,897	0,018	1,301	0,026	1,258	0,025
D2	1,151	0,008	1,015	0,007	1,432	0,01
D3	2,486	0,018	1,845	0,014	2,419	0,018
D4	3,513	0,023	3,056	0,02	1,976	0,013
D5	1,247	0,01	0,877	0,007	1,463	0,011
D6	2,179	0,016	1,587	0,012	1,284	0,009
D7	2,745	0,021	1,023	0,007	2,646	0,019
D8	1,321	0,009	0,864	0,006	1,337	0,009
D9	2,323	0,018	2,693	0,021	1,913	0,015
D10	1,283	0,01	1,259	0,01	1,736	0,014
D11	1,122	0,009	1,375	0,011	1,579	0,012
D12	0,69	0,014	0,747	0,015	1,034	0,021
D13	1,844	0,014	1,884	0,015	1,481	0,012

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης επαναλαμβανόμενων μετρήσεων που βασίζονται στο σχετικό TEM των γωνιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5, ενώ τα αντίστοιχα για τις αποστάσεις στον Πίνακα 6. Επιπλέον, δίνονται και οι τιμές του τεστ σφαιρικότητας (sphericity) το οποίο αποτελεί προϋπόθεση (assumption) των τιμών του εκάστοτε δείγματος για την συγκεκριμένη ανάλυση. Τα αποτελέσματα και για τις δύο κατηγορίες μετρήσεων δείχνουν ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα σχετικά TEM μεταξύ των συζευγμένων μετρήσεων των αντίστοιχων μεθόδων, ενώ σύμφωνα με τα αποτελέσματα των τεστ σφαιρικότητας δεν κρίθηκε απαραίτητη οποιαδήποτε διόρθωση των τιμών πριν την ανάλυση διακύμανσης επαναλαμβανόμενων μετρήσεων.

Σύμφωνα με το μέγεθος της επίδρασης (η^2 , size effect) των δύο r. m. ANOVA, οι αποστάσεις φαίνεται να έχουν μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ των διαφόρων μεθόδων μέτρησης σε σύγκριση με τις γωνίες. Αυτό συνεπάγεται ότι ενώ μπορούμε ανεπιφύλακτα να χρησιμοποιήσουμε κοινό δείγμα δεδομένων αποστάσεων από διαφορετικές μεθόδους μέτρησης, στην αντίστοιχη περίπτωση γωνιών θα πρέπει να δοκιμάζεται κατά πόσο υπάρχουν διαφορές μεταξύ των εκάστοτε γωνιών, διότι ενδεχομένως κάποιες γωνίες να εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων. Παρ' όλα αυτά, οι μέθοδοι που συγκρίθηκαν στην παρούσα εργασία φαίνεται να έχουν κοινά επίπεδα σφάλματος σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Πίνακας 5: Αποτελέσματα repeated measures ANOVA μεταξύ σχετικών TEM γωνιών

Within Subjects Effects							
	Sphericity Correction	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	η^2
Between methods	None	6.678e -4	2	3.339e -4	1.240	0.324	0.171
Residual	None	0.003	12	2.693e -4			
Test of Sphericity							
	Mauchly's W	p					
Between methods	0.351	0.073					

Πίνακας 6: Αποτελέσματα repeated measures ANOVA μεταξύ σχετικών TEM αποστάσεων

Within Subjects Effects							
	Sphericity Correction	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	η^2
Between methods	None	1.482e -5	2	7.410e -6	0.570	0.573	0.045
Residual	None	3.118e -4	24	1.299e -5			
Test of Sphericity							
	Mauchly's W	p					
Between methods	0.996	0.977					

Κεφάλαιο 3: Συζήτηση

Το σφάλμα των μετρήσεων στην κρανιομετρική έρευνα επηρεάζει τα αποτελέσματα των εκάστοτε μελετών με διάφορους τρόπους και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Στην διεθνή βιβλιογραφία απαντούν έρευνες, οι οποίες στοχεύουν στην βελτιστοποίηση των τρόπων ανίχνευσης του, στην ανεύρεση νέων μεθόδων για την μείωσή του κτλ. (Kouchi et al., 1985, Page, 1976). Σε κάθε μέτρηση υπεισέρχεται ένα ποσοστό σφάλματος, το οποίο μπορεί να προκαλείται από τον χρήστη, την εκάστοτε μέθοδο που χρησιμοποιείται ή και το ίδιο το αντικείμενο. Όσον αφορά το σφάλμα, το οποίο οφείλεται στον χρήστη, μπορεί να παρατηρούνται αποκλίσεις ανάμεσα στις τιμές μεταξύ μετρήσεων που λαμβάνει ένας ερευνητής (intra-observer error) ή περισσότεροι (inter-observer error). Η εξέταση του intra και inter-observer error στο πλαίσιο μιας ερευνητικής διαδικασίας είναι καίριας σημασίας, καθώς μπορούν να εξάχθούν πληροφορίες για την ακεραιότητα των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, σφάλμα ενδεχομένως να υπεισέρχεται σε μια μέτρηση λόγω ελλιπούς εκπαίδευσης του χρήστη, ο οποίος σταθερά λαμβάνει λανθασμένες μετρήσεις. Απόκλιση σε μια μέτρηση μπορεί να οφείλεται, επίσης, και στην ίδια την μέθοδο που χρησιμοποιείται, ανάλογα με το πόσο εύχρηστη είναι για τον εκάστοτε ερευνητή και τι αξιοπιστία παρέχει για τα δεδομένα τα οποία λαμβάνει.

Τα αποτελέσματα της εργασίας υποδεικνύουν την αξιοπιστία της μεθόδου της φωτογραμμετρίας στην κρανιομετρική έρευνα, εφόσον η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει δεδομένα υψηλής ακρίβειας και ορθότητας. Η ακρίβεια των μετρήσεων υπολογίστηκε στα 0,14mm ενώ η εκτίμηση της ορθότητάς τους υπέδειξε την αντιστοιχία της φωτογραμμετρίας με άλλες μεθόδους μέτρησης. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι τα δεδομένα των μετρήσεων της φωτογραμμετρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αποτελεσματικότητα στο ερευνητικό πεδίο της κρανιομετρίας.

Η ακρίβεια, που υπολογίστηκε βάσει χειροκίνητων και ψηφιακών μετρήσεων, είναι της τάξης των δεκάτων του χιλιοστού, αποτέλεσμα που υποδεικνύει πολύ μικρή απόκλιση ανάμεσα στην παραδοσιακή και την ψηφιακή μέθοδο μέτρησης. Επιπλέον, η διαδικασία των ψηφιακών και χειροκίνητων μετρήσεων, που ακολουθήθηκε, είναι αρκετά αξιόπιστη, εφόσον, όπως φαίνεται και από την εγγύτητα της μοναδικής ακραίας τιμής της κατανομής στο άνω όριο των ακραίων τιμών, δεν υπήρξε συστηματικό σφάλμα κατά τη δειγματοληψία. Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των μετρήσεων και υποδεικνύει ότι η επακόλουθη συμπερασματολογία με βάση αυτά τα δεδομένα είναι ασφαλής.

Οι περισσότερες έρευνες, που αποσκοπούν στην σύγκριση της ακρίβειας ανάμεσα σε παραδοσιακές και ψηφιακές μεθόδους αποτύπωσης στον τομέα της οστεολογίας, χρησιμοποιούν το laser scanner. Για παράδειγμα, μια έρευνα της Albridge και συνεργατών υπολόγισε την ακρίβεια του laser scanner 3dMDface System με βάση μετρήσεις αναφορικών σημείων από τριδιάστατα ψηφιακά μοντέλα ενηλίκων και παιδιών. Η ακρίβεια της μεθόδου, που υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος της απόλυτης διαφοράς ανάμεσα σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις (mean precision) στην τοποθέτηση όλων των αναφορικών σημείων, ήταν μόλις 0,827mm (Albridge et al., 2005). Τα αποτελέσματα της ακρίβειας βασίστηκαν στην τοποθέτηση αναφορικών σημείων και πρέπει να ληφθεί υπόψιν, ότι η φύση των συγκεκριμένων μετρήσεων εμπεριέχει σφάλμα, το οποίο οφείλεται σε υποκειμενισμό του ερευνητή. Επίσης, η θέση κάποιων αναφορικών σημείων, ορισμένες φορές δυσχεραίνει την διαδικασία της ορθής τοποθέτησής τους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι ερευνητές απέδωσαν ποσοστό σφάλματος στην μορφολογία του κρανίου, συνεπώς μπορούμε να υποθέσουμε ότι ενδεχομένως η τοποθέτηση κάποιων αναφορικών σημείων δεν είναι αρκετά εύκολη, εάν χρησιμοποιήσουμε laser scanner. Άλλες έρευνες σχετικά με την ακρίβεια του laser scanner έχουν δημοσιευθεί με τα αποτελέσματα της ακρίβειας να κυμαίνονται στο εύρος του χιλιοστού, αν και στις περισσότερες έρευνες, η ακρίβεια του laser scanner είναι καλύτερη από αυτή που παρουσιάζουν μετρήσεις με παχύμετρο (Weinberg et al., 2004, Weinberg et al., 2006, Toneva et al., 2016, Toneva et al., 2017). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων ερευνών με τα αποτελέσματα της ακρίβειας της φωτογραμμετρίας, τα οποία υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία, διαπιστώνεται ότι η σωστή τοποθέτηση σημείων στα φωτογραμμετρικά μοντέλα παρουσιάζει πολύ καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με το laser scanner, κάτι το οποίο ως επί το πλείστον οφείλεται στην ύπαρξη υψηλής ποιότητας υφής στα μοντέλα που δημιουργούνται με φωτογραμμετρία.

Με βάση τον υπολογισμό των απόλυτων TEM για τις αποστάσεις, που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία, παρατηρούμε ότι μικρότερη απόκλιση παρουσιάζεται ανάμεσα σε μετρήσεις, που έγιναν σε μοντέλα φωτογραμμετρίας και μετρήσεις με παχύμετρο. Αυτό πιθανότατα επίσης οφείλεται στην ύπαρξη υφής στα τριδιάστατα μοντέλα, η οποία συμβάλλει στην ορθή τοποθέτηση των αναφορικών σημείων, καθώς και η δυνατότητα μεγέθυνσης και περιστροφής των μοντέλων για την τοποθέτησή τους, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει κατά την ψηφιοποίηση με Microscribe.

Όσον αφορά την εκτίμηση της ορθότητας, τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης υπέδειξαν ότι οι μέθοδοι δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Η ορθότητα μιας μέτρησης επιβεβαιώνεται από την σύγκριση των πειραματικών τιμών των μετρήσεων μιας μεθόδου με την

πραγματική τιμή του υπό μέτρηση μεγέθους (BIMP, 2012). Όσον αφορά τα κρανιακά κατάλοιπα, και το σκελετικό υλικό γενικότερα, δεν υπάρχει κάποια τιμή, η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική και βάση της οποίας μπορεί να ελεγχθεί η ορθότητα των μετρήσεων μεταξύ των μεθόδων. Η εναλλακτική λύση που υπάρχει, είναι η σύγκριση μετρήσεων διαφορετικών μεθόδων και η παρατήρηση της απόκλισης, την οποία παρουσιάζουν. Εφόσον η απόκλιση είναι μικρή, τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα, εφόσον οι μετρήσεις τους παρουσιάζουν παρόμοιο αποτέλεσμα. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας, συγκρίθηκε στατιστικά το σχετικό TEM διαφορετικών μεθόδων μέτρησης για τις γωνίες και τις αποστάσεις ξεχωριστά. Συγκρίνοντας με την βοήθεια της συμπερασματικής στατιστικής το τεχνικό σφάλμα των μετρήσεων των μεθόδων για κάθε απόσταση και κάθε γωνία, επί της ουσίας ερευνάται η απόκλιση του τεχνικού σφάλματος μεταξύ των μεθόδων. Η ύπαρξη στατιστικά σημαντικής διαφοράς μεταξύ των μεθόδων θα καθιστούσε προβληματική την συνδυαστική εφαρμογή τους, καθότι θα σύστηνε συστηματικό σφάλμα στα δεδομένα κοινού δείγματος (pooled sample).

Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη εργασία περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία της ψηφιοποίησης που ακολουθήθηκε, όχι μόνο για την κριτική ανασκόπησή της αλλά και για να μπορεί να αναπαραχθεί με αντίστοιχα ποιοτικά αποτελέσματα η διαδικασία της τριδιάστατης μοντελοποίησης με τη χρήση της φωτογραμμετρίας. Συνοψίζοντας, η φωτογραμμετρία αποτελεί μια καινοτόμο μέθοδο στην οστεομετρική έρευνα με την οποία μπορούμε να εξάγουμε αξιόπιστα μετρικά δεδομένα, ενώ συνδυάζει πολλά πλεονεκτήματα και ικανοποιητικά αποτελέσματα με σχετικά χαμηλό κόστος και εύκολη μεθοδολογία. Αποτελεί μια μέθοδο αρκετά προσιτή και οικονομική, εν συγκρίσει με τα αποτελέσματα που μπορεί να προσφέρει. Υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά λογισμικά με την βοήθεια των οποίων είναι δυνατή η ψηφιακή μοντελοποίηση οστών, καθώς και προγράμματα επεξεργασίας τριδιάστατων μοντέλων με τα οποία λαμβάνονται οι απαραίτητες μετρήσεις. Η ακρίβεια των φωτογραμμετρικών μοντέλων είναι σε αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο και όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα προγενέστερων ερευνών, καλύτερη από άλλες μεθόδους ψηφιοποίησης. Επιπλέον, η ορθότητα των μετρήσεων από μοντέλα φωτογραμμετρίας είναι σε αντίστοιχα επίπεδα με τις συγκρινόμενες μεθόδους, συμπεραίνοντας ότι τα μετρικά δεδομένα της φωτογραμμετρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με δεδομένα άλλων οστεομετρικών μεθόδων.

Βιβλιογραφία

- Aldridge K, Boyadjiev SA, Capone GT, DeLeon VB, Richtsmeier JT. (2005). Precision and Error of Three-Dimensional Phenotypic Measures Acquired From 3dMD Photogrammetric Images. *Am J Med Genet* 138A:247-253.
- Batista, U. C., Joaquim, A. F., Fernades, Y. B., Mathias, R. N., Ghizoni, E., & Tedeschi, H. (2005). Computed evaluation of the normal craniocervical junction craniometry in 100 asymptomatic patients. *Neurosurgical Focus*, 38(4), E5. doi:10.3171/2015.1.focus1464
- Bertsatos A, Papageorgopoulou C, Valakos E, & Chovalopoulou M. (2018). Investigating the sex-related geometric variation of the human cranium. *International Journal of Legal Medicine*. doi:10.1007/s00414-018-1790-z
- Bigoni, L., Velemínská, J., & Brůžek, J. (2010). Three-dimensional geometric morphometric analysis of cranio-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *HOMO - Journal of Comparative Human Biology*, 61(1), 16-32. doi:10.1016/j.jchb.2009.09.004
- BIPM (2012) International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd edition, JCGM 200:1012
- Braga, J., Treil, J., (2007) Estimation of pediatric skeletal age using geometric morphometrics and three-dimensional cranial size changes. *Int. J. Legal Med.* 121, 439–443.
- Chovalopoulou M-E, Bertsatos A, Papageorgopoulou C (2016a) Age-related changes in the craniofacial region in a modern Greek population sample of known age and sex. *International Journal of Legal Medicine* 131(4): 1103–1111. doi:10.1007/s00414-016-1470-9
- Chovalopoulou M-E, Bertsatos A, Manolis SK (2016b) Landmark based sex discrimination on the crania of archaeological Greek populations. A comparative study based on the cranial sexual dimorphism of a modern Greek population. *Journal of Mediterranean archaeology and Archaeometry* 17(1):37–49. doi.org/10. 5281/zenodo.258084
- Chumlea, W. C. (1985). Accuracy and reliability of a new sliding caliper. *American Journal of Physical Anthropology*, 68(3), 425-427. doi:10.1002/ajpa.1330680314
- Eaton JW, Bateman D, Hausberg S, Wehbring R (2016) GNU Octave version 4.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations. URL <http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter/>
- Franklin, D., Oxnard, C. E., O'Higgins, P., & Dadour, I. (2006). Sexual Dimorphism in the Subadult Mandible: Quantification Using Geometric Morphometrics. *Journal of Forensic Sciences*, 52(1), 6-10. doi:10.1111/j.1556-4029.2006.00311.x

- Franklin, D., O'Higgins, P., Oxnard, C.E., Dadour, I., (2007) Sexual dimorphism and population variation in the adult mandible. Forensic applications of geometric morphometrics. *Forensic Sci. Med. Pathol.* 3, 15–22
- Gornick Charles, Matthew. (2011). Digital three-dimensional photogrammetry: accuracy and precision of facial measurements obtained from two commercially-available imaging systems.
- JASP Team. (2018). JASP (Version 0.8.6) [Computer software]. URL = <https://jasp-stats.org/>
- Kimmerle, E.H., Ross, A., Slice, D.E., (2008) Sexual dimorphism in America: geometric morphometric analysis of the craniofacial region. *J. Forensic Sci.* 53, 54–57.
- Kouchi, M., & Koizumi, K. (1985). An Analysis of Errors in Craniometry. *The Journal of Anthropological Society of Nippon*, 93(4), 409-424. doi:10.1537/ase1911.93.409
- Norton K & Olds T (editors) (1996) *Anthropometrica*. Sydney:University of New South Wales Press.
- Oettle A.C., Pretorius, E., Steyn, M (2005) Geometric morphometric analysis of mandibular ramus flexure. *Am. J. Phys. Anthropol.* 128, 623–629.
- Page J. W., 1976: A note on interobserver error in multivariate analysis of populations. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 44: 521-525.
- Pretorius, E., Steyn, M., Scholtz, Y., (2006) Investigation into the usability of geometric morphometric analysis in assessment of sexual dimorphism. *Am. J. Phys. Anthropol.* 129, 64–70.
- Steyn, M., Pretorius, E., Hutten, L., (2004) Geometric morphometric analysis of the greater sciatic notch in South Africans. *Homo* 54, 197–206.
- Stephen, A. J., Wegscheider, P. K., Nelson, A. ., & Dickey, J. . (2015). Quantifying the precision and accuracy of the MicroScribe G2X three-dimensional digitizer. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2(1), 28-33. doi:10.1016/j.daach.2015.03.002
- Taylor, John Robert (1999). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books: 3-99.
- Toneva D, Nikolova S, Georgiev I (2016) Reliability and Accuracy of Angular Measurements on Laser Scanning Created 3D Models of Dry Skulls. *Journal of Anthropology*, 2016, 1-6. doi:10.1155/2016/6218659
- Toneva D, Nikolova S, Georgiev I, Tchorbadjieff A (2017) Accuracy of Linear Craniometric Measurements Obtained from Laser Scanning Created 3D Models of Dry Skulls. *Advanced Computing in Industrial Mathematics*, 215-229. doi:10.1007/978-3-319-49544-6_18
- Ulijaszek SJ, Kerr DA. (1999). Anthropometric measurement error and the assessment of nutritional status. *Br J Nutr* 82:165-177.

- Weinberg SM, Scott NM, Neiswanger K, Brandon CA, Marazita ML. (2004) Digital three-dimensional photogrammetry: Evaluation of anthropometric precision and accuracy using a Genex 3D camera system. *Cleft Palate Craniofac J* 41(5):507–518.
- Weinberg SM, Naidoo S, Govier DP, Martin RA, Kane AA, Marazita ML. (2006). Anthropometric Precision and Accuracy of Digital Three-Dimensional Photogrammetry: Comparing Systems with One Another and with Direct Anthropometry. *J Craniofac Surg* 17:477-483.
- Wu, J., Cui, Z., Sheng, V. S., Zhao, P., Su, D., & Gong, S. (2013). A Comparative Study of SIFT and its Variants. *Measurement Science Review*, 13(3). doi:10.2478/msr-2013-0021

Παράρτημα

Πίνακας Ι: Χειροκίνητες μετρήσεις

Sample #	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13
WLH005	5,84	21,74	4,87	60,75	66,08	68,29	6,20	48,30	131,60	132,40	148,00	123,20	133,40	130,50	136,40	126,80	120,50	122,30	49,40	122,70
WLH007	6,39	23,98	4,90	49,01	59,19	70,17	5,61	46,50	134,40	130,00	146,10	123,40	133,40	134,40	138,30	128,20	120,00	121,00	49,90	124,00
WLH008	5,91	27,56	6,49	69,39	71,98	63,92	6,99	53,80	140,20	143,20	150,00	130,70	137,30	147,10	151,00	138,30	134,80	136,30	51,30	136,90
WLH010	2,86	24,34	4,05	69,80	73,94	66,53	4,79	51,60	134,00	127,60	147,10	121,40	130,50	134,40	140,20	128,20	121,80	123,10	51,90	126,60
WLH012	5,31	21,90	4,63	63,78	65,11	70,57	5,03	45,30	135,00	125,60	149,10	124,60	126,60	129,50	133,40	120,20	120,30	121,00	46,30	118,50
WLH013	6,15	23,03	5,22	58,74	67,89	68,23	6,08	53,20	136,40	131,50	154,00	129,70	130,50	140,00	145,10	134,30	132,80	133,10	50,70	129,00
WLH014	5,88	24,16	5,09	59,21	64,28	69,45	5,63	52,90	137,60	135,40	145,10	128,90	138,30	143,20	145,10	143,20	128,70	129,90	50,70	131,50
WLH016	0,88	24,38	2,97	73,35	73,32	66,24	4,56	52,70	138,40	139,30	152,40	130,60	136,50	144,00	148,00	136,30	133,50	135,00	52,00	136,60
WLH017	3,60	24,69	2,34	71,60	75,39	69,84	3,91	51,40	140,40	139,70	154,90	131,70	143,20	143,20	148,10	137,30	131,50	132,50	52,80	133,80
WLH018	5,94	20,96	4,65	61,28	62,99	69,76	5,43	44,50	136,60	131,50	148,10	130,20	132,40	132,40	138,30	126,60	126,30	126,80	48,10	122,00
WLH019	6,61	23,60	4,97	72,28	73,09	64,81	5,97	50,20	133,90	133,40	147,10	128,50	130,50	135,40	142,20	128,40	127,30	128,40	50,20	126,80
WLH027	4,03	19,10	4,39	68,67	69,29	74,72	5,37	46,80	140,90	128,50	149,10	134,40	139,30	129,50	134,90	125,90	124,90	125,50	50,10	118,80
WLH030	7,46	25,90	6,04	53,50	65,35	70,98	7,02	48,20	137,00	128,50	147,10	129,10	135,40	138,30	143,20	133,40	129,70	130,30	48,60	138,30
WLH031	6,51	21,04	4,94	64,53	73,92	70,31	5,93	50,20	133,50	127,60	145,10	126,40	129,50	130,50	135,40	124,70	122,10	123,00	51,50	122,10
WLH033	6,06	19,38	5,09	56,40	66,08	68,10	5,76	45,20	134,20	124,70	144,90	126,60	126,60	128,50	134,40	123,70	122,00	122,40	48,50	119,50
WLH034	7,56	22,16	5,75	50,29	63,31	68,46	6,53	46,60	131,80	124,70	143,20	122,20	130,50	129,50	133,40	122,70	116,80	118,50	49,10	119,40
WLH042	6,17	23,05	5,57	54,77	60,67	70,95	5,70	49,10	137,00	139,30	153,00	129,30	138,30	143,20	147,10	143,20	129,80	130,80	47,60	133,00
WLH043	5,18	24,96	4,40	73,02	74,70	65,12	4,69	56,60	142,60	143,20	163,80	132,40	139,30	145,10	154,30	134,40	132,60	134,30	57,00	134,50
WLH044	3,86	26,98	4,34	64,12	66,53	64,64	5,23	55,20	145,70	140,20	158,90	136,40	142,20	140,20	149,10	134,40	131,40	131,90	55,70	133,40
WLH045	5,61	26,40	4,24	66,67	71,85	64,65	4,53	57,60	139,10	149,10	153,00	130,80	145,10	143,20	150,00	139,30	139,20	138,90	53,00	131,90

Πίνακας II: Δεδομένα μετρήσεων μέσω Microscribe

Sample #	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13
WLH005	6,283	21,582	4,688	63,079	67,695	68,021	5,871	48,893	133,558	133,463	150,396	123,168	134,069	129,894	136,106	126,752	121,035	122,156	49,599	123,103
WLH007	6,033	21,502	4,735	49,854	63,089	68,303	5,347	48,481	132,608	139,789	144,624	119,527	126,572	131,912	139,785	128,212	122,882	121,35	49,763	126,097
WLH008	6,07	26,924	5,212	70,647	77,138	63,24	5,807	53,78	139,469	146,669	149,119	130,421	136,866	144,207	155,653	142,701	139,417	139,847	49,249	136,981
WLH010	5,82	23,36	4,689	67,606	72,601	65,768	5,518	54,331	136,649	131,326	153,005	124,288	133,51	133,166	142,418	128,95	124,72	126,166	53,045	129,295
WLH012	6,339	21,022	5,18	63,643	66,032	73,078	5,792	42,473	136,042	123,005	149,485	127,028	133,14	120,414	133,239	119,779	118,166	117,928	46,858	118,961
WLH013	6,466	21,8	5,425	56,716	66,025	66,708	6,168	52,931	135,129	135,852	147,305	127,395	130,349	138,051	147,432	135,751	134,421	134,311	51,737	127,936
WLH014	5,25	24,792	4,594	66,768	67,981	68,61	5,273	53,113	138,78	137,409	150,901	129,762	140,86	139,264	146,273	135,169	130,639	131,534	51,865	132,507
WLH016	5,937	23,554	4,951	71,615	71,652	67,681	5,785	53,064	140,515	139,406	159,383	130,489	138,164	140,877	148,044	136,669	133,804	135,161	52,209	138,682
WLH017	5,281	23,298	4,366	73,255	77,596	71,083	5,212	52,008	143,681	141,363	157,597	134,812	145,961	138,144	146,543	133,629	132,329	133,142	53,525	134,206
WLH018	5,771	22,093	4,582	61,081	62,213	71,873	5,372	42,505	138,034	126,658	157,891	130,267	136,818	127,584	138,251	125,006	125,725	125,44	47,84	123,549
WLH019	7,564	24,899	5,986	70,091	69,861	65,331	6,975	50,644	134,057	133,156	150,047	126,951	131,349	133,121	139,977	129,903	126,917	128,012	50,772	127,308
WLH027	4,705	20,316	4,217	65,93	67,73	74,334	5,028	47,145	141,768	130,716	152,035	134,43	140,782	126,174	136,226	128,335	127,55	127,724	52,611	120,673
WLH030	7,105	25,476	6,072	54,665	66,585	70,231	6,676	48,142	137,153	133,214	144,782	129,137	131,527	133,001	142,792	131,854	128,247	129,62	48,869	128,276
WLH031	4,576	21,535	3,665	67,626	74,677	70,042	4,289	50,46	135,707	129,482	149,525	128,452	131,721	126,076	134,982	125,952	123,566	124,462	51,961	122,762
WLH033	7,071	21,993	5,605	52,774	65,251	69,08	6,409	46,906	134,077	124,248	146,848	127,085	128,37	125,862	134,561	125,088	122,659	123,305	47,87	121,382
WLH034	7,355	22,83	5,848	48,322	61,197	69,201	6,795	45,791	134,382	126,22	147,623	122,912	132,321	125,893	134,532	122,702	117,908	118,772	49,317	120,725
WLH042	6,104	23,88	5,553	55,387	60,936	72,405	5,895	49,84	136,406	140,552	151,93	127,849	137,853	138,511	147,091	133,397	130,264	131,323	46,621	133,494
WLH043	4,677	25,819	4,165	75,56	76,255	66,796	4,811	57,649	144,062	146,245	166,877	133,47	142,253	142,771	154,68	135,435	133,896	133,561	56,646	135,837
WLH044	3,52	27,082	3,171	75,465	76,277	65,803	3,809	56,291	147,15	145,081	165,52	138,957	145,439	136,63	150,97	135,272	131,827	133,105	56,699	133,533
WLH045	3,826	26,18	3,282	65,592	72,813	67,147	3,765	56,551	138,838	149,799	162,973	130,712	147,455	142,389	154,431	140,263	138,756	137,679	52,214	133,587

Όλες οι τιμές εμφανίζονται σε χιλιοστά, υπολογισμοί μέσω GNU Octave

Πίνακας III: Δεδομένα χειροκίνητων και ψηφιακών μετρήσεων και υπολογισμός κλίμακας (scale ratio)

Sample ID	Sex	Age	m_1	d_1	m_2	d_2	m_3	d_3	Scale Ratio
WLH005	♀	67	94,30	0,53324	97,20	0,55190	98,94	0,56006	176,540427
WLH007	♂	76	102,72	3,67356	102,68	3,66848	115,58	4,12889	27,981589
WLH008	♂	60	108,22	0,88080	118,84	0,96817	119,28	0,97106	122,815798
WLH010	♀	68	86,73	1,01335	91,88	1,07475	68,68	0,79796	85,715403
WLH012	♀	84	100,18	0,60322	123,32	0,74479	101,08	0,60908	165,869712
WLH013	♀	49	99,87	0,97826	104,22	1,01835	94,42	0,92222	102,271616
WLH014	♂	65	104,87	0,84264	117,14	0,93528	100,26	0,80396	124,802579
WLH016	♂	36	113,20	1,04236	109,10	1,00461	122,92	1,12785	108,728399
WLH017	♂	76	98,28	0,95279	105,42	1,02386	92,76	0,90065	103,035168
WLH018	♀	77	103,26	0,99007	98,02	0,94776	100,50	0,97336	103,656393
WLH019	♀	86	108,62	1,08829	103,84	1,03725	69,22	0,68638	100,255633
WLH027	♂	65	99,63	0,79413	100,08	0,79654	103,94	0,83712	125,088589
WLH030	♀	66	104,94	1,03150	107,94	1,06210	112,88	1,10975	101,693596
WLH031	♂	60	97,64	3,57184	93,12	3,37182	95,77	3,49067	27,463059
WLH033	♀	72	103,00	1,58702	87,14	1,33320	106,44	1,63436	65,129820
WLH034	♀	81	97,94	0,95845	117,26	1,14580	99,56	0,97549	102,195302
WLH042	♀	50	108,55	0,61430	120,26	0,68124	121,79	0,68797	176,755213
WLH043	♂	55	113,11	1,01484	118,94	1,07033	100,77	0,89982	111,523263
WLH044	♂	64	101,50	0,71897	119,84	0,84943	100,41	0,71138	141,135129
WLH045	♂	57	92,66	0,78009	103,55	0,87356	101,86	0,85535	118,801471

m_{1-3} : χειροκίνητες μετρήσεις σε χιλιοστά (mm)

d_{1-3} : ψηφιακές μετρήσεις (σε units)

Σημείωση: το Scale ratio δεν έχει μονάδες

♀ : Θηλυκά άτομα

♂ : Αρσενικά άτομα

Πίνακας IV: Μετατροπή ψηφιακών μετρήσεων σε χιλιοστά (mm)

Sample ID	Sex	Age	m ₁	d ₁	m ₂	d ₂	m ₃	d ₃	Scale Ratio
WLH005	2	67	94,30	94,13895	97,20	97,43231	98,94	98,87341	176,540427
WLH007	1	76	102,72	102,792	102,68	102,6499	115,58	115,5329	27,981589
WLH008	1	60	108,22	108,1755	118,84	118,9068	119,28	119,262	122,815798
WLH010	2	68	86,73	86,8597	91,88	92,12263	68,68	68,39772	85,715403
WLH012	2	84	100,18	100,0559	123,32	123,5373	101,08	101,0276	165,869712
WLH013	2	49	99,87	100,0485	104,22	104,1483	94,42	94,31662	102,271616
WLH014	1	65	104,87	105,163	117,14	116,7257	100,26	100,3365	124,802579
WLH016	1	36	113,20	113,3341	109,10	109,2296	122,92	122,6293	108,728399
WLH017	1	76	98,28	98,17088	105,42	105,4936	92,76	92,79842	103,035168
WLH018	2	77	103,26	102,6275	98,02	98,24097	100,50	100,8949	103,656393
WLH019	2	86	108,62	109,1072	103,84	103,9902	69,22	68,81336	100,255633
WLH027	1	65	99,63	99,33635	100,08	99,63744	103,94	104,7147	125,088589
WLH030	2	66	104,94	104,8969	107,94	108,0088	112,88	112,8545	101,693596
WLH031	1	60	97,64	98,09365	93,12	92,60049	95,77	95,86448	27,463059
WLH033	2	72	103,00	103,3623	87,14	86,83108	106,44	106,4456	65,129820
WLH034	2	81	97,94	97,94919	117,26	117,0954	99,56	99,6908	102,195302
WLH042	2	50	108,55	108,5804	120,26	120,4129	121,79	121,6016	176,755213
WLH043	1	55	113,11	113,1783	118,94	119,3667	100,77	100,3508	111,523263
WLH044	1	64	101,50	101,4723	119,84	119,8843	100,41	100,4003	141,135129
WLH045	1	57	92,66	92,67608	103,55	103,7802	101,86	101,617	118,80147

Όλες οι τιμές αναγράφονται σε χιλιοστά, ♀ : Θηλυκά άτομα, ♂ : Αρσενικά άτομα

Πίνακας V: Δεδομένα μετρήσεων από τα 3D μοντέλα κρανίων

Sample #	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13
WLH005	5,889	21,849	4,491	60,428	65,606	67,219	5,597	49,237	131,806	133,781	151,11	122,041	134,006	131,761	136,353	125,15	120,318	121,162	49,058	123,021
WLH007	6,576	25,185	5,249	43,347	61,406	68,333	5,874	49,378	134,658	NaN	146,741	123,499	NaN	135,928	139,97	128,296	NaN	123,296	50,116	126,207
WLH008	7,27	26,267	6,223	62,424	69,64	64,818	6,923	53,231	141,036	142,572	154,986	130,487	137,161	145,661	152,207	136,286	134,265	135,211	50,293	136,779
WLH010	4,598	22,692	3,877	67,03	73,433	65,491	4,449	53,396	135,782	130,94	153,076	122,613	132,5	137,73	142,916	129,079	123,519	125,215	51,136	127,189
WLH012	5,052	21,608	4,312	63,796	66,677	72,635	4,771	43,904	132,569	123,722	148,309	123,458	128,942	128,143	134,732	120,528	119,392	119,302	44,491	120,298
WLH013	6,809	22,007	5,798	56,193	64,575	69,623	6,573	52,977	136,54	134,065	152,729	128,971	131,638	140,164	145,905	133,667	133,139	132,9	51,338	129,154
WLH014	6,544	24,85	5,684	60,67	65,508	69,881	6,601	52,099	137,02	135,938	151,477	128,045	140,411	142,458	144,284	132,623	128,427	129,522	51,288	132,316
WLH016	5,324	23,859	4,636	71,497	74,077	67,242	5,397	52,182	141,57	138,37	157,161	131,251	137,755	143,85	147,329	135,893	132,268	133,043	52,39	136,878
WLH017	4,744	23,92	4,031	62,715	71,914	69,632	4,934	51,408	141,742	NaN	156,157	132,308	NaN	143,654	146,884	133,944	131,469	132,451	52,71	134,389
WLH018	5,631	NaN	4,579	59,926	62,497	71,473	5,407	44,815	136,083	135,207	153,537	129,131	136,297	134,028	140,192	125,705	126,802	126,791	47,408	123,3
WLH019	4,77	24,625	3,998	75,124	76,047	66,507	4,682	49,233	133,753	132,786	151,452	125,844	130,9	134,311	140,92	128,582	127,33	127,639	48,721	123,098
WLH027	4,583	18,637	4,043	64,255	67,285	74,451	4,948	45,258	137,948	128,542	150,009	131,581	136,951	127,669	133,922	123,895	123,345	123,867	49,635	118,681
WLH030	7,541	25,183	6,275	53,23	64,326	69,694	7,091	47,72	136,954	132,366	150,565	127,999	131,446	137,466	143,51	131,855	128,249	129,792	48,403	128,622
WLH031	5,451	21,507	4,362	66,425	75,795	70,264	5,02	50,185	134,231	128,227	148,26	126,815	130,62	129,57	135,766	124,38	122,514	123,793	50,259	121,804
WLH033	6,665	21,322	5,401	48,976	65,727	69,666	6,145	45,171	132,285	123,065	145,191	125,19	127,315	128,832	133,77	122,981	120,851	121,806	46,729	118,579
WLH034	6,937	21,774	5,56	49,433	63,72	69,599	6,521	46,038	131,719	126,8	146,032	121,373	130,407	129,807	134,215	121,885	116,679	118,169	48,619	120,183
WLH042	6,011	23,235	5,408	54,457	61,013	73,149	5,707	49,554	136,559	139,505	153,832	128,19	138,442	141,312	145,5	132,662	128,601	129,404	47,275	132,157
WLH043	4,151	24,261	3,726	76,055	75,187	67,782	4,373	55,132	142,037	143,07	165,232	131,556	145,132	143,01	152,79	132,18	131,221	132,123	55,682	133,201
WLH044	3,883	27,06	3,369	69,37	71,226	66,852	3,972	54,15	143,459	140,496	163,417	134,925	142,879	140,148	149,161	132,431	130,485	131,023	53,341	132,743
WLH045	3,769	22,934	3,298	67,307	70,412	70,645	3,69	50,916	139,699	141,283	164,542	130,371	145,953	140,913	149,051	133,8	132,569	132,23	51,947	127,562

Οι τιμές αναγράφονται σε χιλιοστά