



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών

Τομέας Μηχανικής

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πυέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (*Digital Image Correlation – D.I.C.*)

Μέρος Α: Πειραματικά πρωτόκολλα και επεξεργασία δεδομένων



**ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ
ΚΑΡΑΝΙΚΑ ΜΑΡΙΝΑ**

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ Σ.Κ. Κουρκουλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΣΤΕΟ-ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΤΑΓΜΑΤΩΝ ΠΥΕΛΟΥ
ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ «ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ
ΕΙΚΟΝΩΝ» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Μέρος Α: Πειραματικά πρωτόκολλα και επεξεργασία δεδομένων

Διπλωματική εργασία στην επιστημονική περιοχή της Εμβιομηχανικής

Γεωργίου Δήμητρα
Καρανίκα Μαρίνα

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Σ.Κ. Κουρκουλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2016

Επιβλέπων καθηγητής

Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Καθηγητής,
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Καθηγητής,
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.
(επιβλέπων καθηγητής)

Βασίλειος Κεφαλάς, Επίκουρος Καθηγητής,
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.

Δέσποινα Ν. Περρέα, Καθηγήτρια,
Ιατρική Σχολή Αθηνών, Ε.Κ.Π.Α.

Στις οικογένειές μας

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο: «Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πυέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation), εκπονήθηκε στον Τομέα Μηχανικής της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου από τον Νοέμβριο του 2014 έως και τον Απρίλιο του 2016 υπό την καθοδήγηση του επιβλέποντα Καθηγητή, Σταύρου Κουρκουλή.

Για την πολύτιμη βοήθεια που έχουμε δεχθεί κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα, τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. Σταύρο Κουρκουλή για τις επιστημονικές του παρατηρήσεις και την καθοδήγηση που μας προσέφερε τους τελευταίους μήνες των προπτυχιακών μας σπουδών. Κυρίως όμως, θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε για τα προηγούμενα έτη, καθώς, με τον ιδιαίτερο τρόπο διδασκαλίας του, ξεχωρίσαμε και αγαπήσαμε τα μαθήματα της Μηχανικής και ο ίδιος μας ενέπνευσε να ασχοληθούμε με την επιστήμη της Εμβιομηχανικής.

Χρυστάμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Πολιτικό Μηχανικό και διδάκτορα του Τομέα Μηχανικής Πάσιου Ερμιόνη η οποία όχι μόνο μας παρείχε αμέριστη υποστήριξη και ενθάρρυνση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας αλλά και για την ανεκτίμητη συμβολή της σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Θα θέλαμε, επίσης να ευχαριστήσουμε θερμά τους γιατρούς κ. Σπύρο Δαρμανή και κ. Αριστείδη Παπαδογούλα τόσο για την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν όσο και για την άρτια συνεργασία μας και τις πολύτιμες συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια της περάτωσης της εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας και τους φίλους μας που μας στήριξαν με όλη τους την καρδιά ψυχολογικά και ηθικά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	13
Περίληψη	15
Abstract	17
Κεφάλαιο 1: Βασικές αρχές της Εμβιομηχανικής - Ο οστίτης ιστός	19
1.1 Εμβιομηχανική.....	21
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	21
1.3 Τα οστά.....	23
1.3.1 Βιολογία, δομή και χημική σύσταση των οστών.....	24
1.4 Εμβιομηχανική των οστών.....	28
1.4.1 Μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού.....	28
1.4.2 Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων λόγω ηλικίας και σωματικής δραστηριότητας.....	33
Κεφάλαιο 2: Στοιχεία ανατομίας:	
Η πύελος και τα πυελικά κατάγματα	35
2.1 Η πύελος.....	37
2.1.1 Ανατομία του πυελικού δακτυλίου.....	37
2.1.2 Η δομή της οστέινης πυέλου.....	42
2.1.3 Οι λειτουργίες της πυέλου.....	43
2.1.4 Μηχανική και παθολογία.....	44
2.1.5 Ανάλυση των δυνάμεων στην πύελο κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων.....	46
2.2 Κάταγμα και Επούλωση.....	47
2.2.1 Πυελικά κατάγματα.....	48
2.2.1.1 Ταξινόμηση πυελικών καταγμάτων.....	49
2.2.1.2 Ταξινόμηση κοτυλαίων καταγμάτων.....	51
2.3 Οστεοσυνθέσεις και υλικά οστεοσύνθεσης.....	54

Κεφάλαιο 3: Το πρόβλημα - Ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας	59
3.1 Το πρόβλημα.....	61
3.2 Διεθνής έρευνα.....	61
Κεφάλαιο 4: Η τεχνική «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation)	75
4.1 Εισαγωγή.....	77
4.2 Σύντομη ανασκόπηση της ανάπτυξης της τεχνικής D.I.C.	78
4.3 Αρχές της φωτογραμμετρίας.....	79
4.3.1 Η πρώτη φωτογραφική μηχανή – Pinhole κάμερα.....	79
4.3.2 Στερεοσκοπία.....	82
4.3.3 Η μέθοδος της παράλλαξης σε πολύπλοκα συστήματα.....	85
4.4 Ψηφιακή απεικόνιση - Ψηφιακή CCD κάμερα.....	87
4.5 Η τεχνική D.I.C.	89
4.5.1 Η θεωρία των παραμορφώσεων.....	89
4.5.2 Η τεχνική D.I.C. στις δύο διαστάσεις.....	90
4.5.2.1 Παραδοχές για την εφαρμογή της τεχνικής 2D-D.I.C. .	90
4.5.2.2 Σχέδιο στιγμάτων.....	91
4.5.2.3 Προσδιορισμός σημείων και υποπεριοχών.....	92
4.5.2.4 Αλγόριθμοι συσχέτισης.....	94
4.5.3 Η τεχνική της Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων στις τρεις διαστάσεις: 3D-D.I.C.	99
4.5.3.1 Βαθμονόμηση του συστήματος.....	99
4.5.3.2 Μετρήσεις στις τρεις διαστάσεις.....	101

Κεφάλαιο 5: Πειραματική διαδικασία και πρωτογενή δεδομένα.....	103
5.1 Εισαγωγή.....	105
5.2 Δοκίμια και τρόποι οστεοσύνθεσης.....	106
5.3 Πειραματικός εξοπλισμός.....	108
5.4 Προετοιμασία των δοκιμίων και πειραματική διάταξη.....	110
5.5 Επεξεργασία πρωτογενών αποτελεσμάτων.....	116
5.5.1 Πρωτογενή δεδομένα γέφυρας.....	116
5.5.2 Πρωτογενή δεδομένα D.I.C.	117
5.4 Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων (ψηφιακών εικόνων) από το σύστημα D.I.C.	120
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα.....	125
6.1 Πίνακες αποτελεσμάτων.....	127
6.2 Συμπεράσματα.....	181
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	183
Βιβλιογραφία.....	185
Α. Επιστημονικά άρθρα.....	187
Β. Βιβλία και επιστημονικές σημειώσεις.....	190
Γ. Ιστότοποι.....	191

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πυέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)» αποτελεί μια μελέτη του πεδίου της Εμβιομηχανικής. Πρόκειται, δηλαδή, για την πειραματική αξιολόγηση διάφορων τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγματικών πυέλων, ως προς την αποτελεσματικότητά τους, με κριτήριο το σχετικό άνοιγμα των κατεαγόντων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η τεχνική «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων».

Αναλυτικά η δομή της εργασίας φαίνεται παρακάτω. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην έννοια της Εμβιομηχανικής, αναφορά σε σημαντικά στοιχεία της ανατομίας και της φυσιολογίας των ανθρωπίνων οστών καθώς επίσης παρουσιάζονται και οι μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στοιχεία της ανατομίας της πυέλου και οι λειτουργίες της και εν συνεχεία, γίνεται μνεία και στους τύπους των καταγμάτων που εμφανίζει καθώς και στις τεχνικές οστεοσύνθεσης που χρησιμοποιούνται ευρέως για την αντιμετώπισή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο σκοπός της εργασίας. Στη συνέχεια, γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των σημαντικότερων εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί και αφορούν στην αξιολόγηση τεχνικών οστεοσύνθεσης που αφορούν σε διάφορα πυελικά κατάγματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή της τεχνικής D.I.C. ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της τόσο στις δύο όσο και στις τρεις διαστάσεις.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το πειραματικό πρωτόκολλο. Ξεκινώντας από την παρουσίαση του πειραματικού εξοπλισμού και των δοκιμών, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και ο τρόπος εξαγωγής και συλλογής πρωτογενών δεδομένων.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συγκριτικοί πίνακες και επιχειρείται η εξαγωγή συμπερασμάτων ενώ δίδονται επίσης και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Περίληψη

Τα πυελικά κατάγματα θεωρούνται εκ των πλέον σοβαρών και απασχολούν ιδιαίτερα την κοινότητα των ορθοπεδικών ιατρών διότι συνδέονται πέραν των άλλων και με υψηλή θνησιμότητα. Οι τεχνικές οστεοσύνθεσης εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία και δεν υπάρχει σχετική προτυποποίηση. Από τη σκοπιά της Εμβιομηχανικής η πειραματική αξιολόγηση των τεχνικών οστεοσύνθεσης εμφανίζεται δυσχερής κυρίως λόγω της εξαιρετικά περίπλοκης γεωμετρίας της πυέλου, των ασαφών συνοριακών συνθηκών και των δυσκολιών στη μέτρηση των σχετικών μετατοπίσεων.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται μια πρώτη απόπειρα αντιμετώπισης του τελευταίου προβλήματος με την εφαρμογή της πειραματικής τεχνικής της Συσχέτισης Ψηφιακής Εικόνας (Digital Image Correlation, D.I.C.). Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ένα πειραματικό πρωτόκολλο το οποίο υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών (τμήμα Εμβιομηχανικής) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε συνεργασία με ορθοπεδικούς ιατρούς του 401 Γενικού Στρατιωτικού Νοσοκομείου Αθηνών οι οποίοι ειδικεύονται στα πυελικά κατάγματα. Το πειραματικό πρωτόκολλο περιλαμβάνει σειρά από 19 πειράματα με καταγματικές πτωματικές ημιπύελους. Το κάταγμα, το οποίο είχε δημιουργηθεί με τεχνητό τρόπο, ήταν κάταγμα τύπου «Γ». Οι ημιπύελοι είχαν υποβληθεί σε οστεοσύνθεση με πέντε διαφορετικές τεχνικές οι οποίες αποτελούνται από συνδυασμούς απλών και κλειδούμενων πλακών και κοχλιών.

Τα πειράματα εκτελέστηκαν στο ηλεκτρομηχανικό πλαίσιο φόρτισης *MTS Insight 10kN*. Η παρακολούθηση των σχετικών μετατοπίσεων των κατεαγόμενων έγινε από το σύστημα 3D-D.I.C. της *Limess*. Τα πειράματα έγιναν υπό “οιονεί στατικές” συνθήκες με έλεγχο της μετατόπισης. Η φόρτιση ασκείται στην κατάλληλα πακτωμένη ημιπύελο μέσω μεταλλικού εμφυτεύματος (προσομοιώματος της κεφαλής μηριαίου οστού) έτσι ώστε το σύστημα να προσομοιώνει τη φόρτιση της πυέλου στην όρθια στάση. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το φορτίο και τα τρισδιάστατα πεδία μετατοπίσεων μετρήθηκαν και καταγράφηκαν συναρτήσει του χρόνου.

Ο στόχος του πρωτοκόλλου ήταν αρχικώς η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής D.I.C. όταν αυτή εφαρμόζεται για τον υπολογισμό τρισδιάστατων πεδίων μετατοπίσεων κατά τη μελέτη δοκιμίων περίπλοκης γεωμετρίας. Εν συνεχεία, έγινε απόπειρα άντλησης δεδομένων τα οποία θα επέτρεπαν την ταξινόμηση των τεχνικών οστεοσύνθεσης ανάλογα με την

αποτελεσματικότητά τους, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο το σχετικό άνοιγμα μεταξύ των κατεαγόντων.

Τα αρχικά αποτελέσματα της μελέτης αποδεικνύουν ότι η τεχνική 3D-D.I.C. πλεονεκτεί των κλασικών τεχνικών καταγραφής μετατοπίσεων, αφενός μεν διότι επιτρέπει την εκ των υστέρων επιλογή των σημείων μέτρησης (και μάλιστα χωρίς περιορισμό ως προς τον αριθμό) του ανοίγματος του κατάγματος (Fracture Opening Distance, FOD), με εξαιρετική ακρίβεια, αφετέρου δε διότι παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης, πέραν του FOD, και της σχετικής ολίσθησης μεταξύ των κατεαγόντων (επίσης με ακρίβεια) δεδομένου ότι επιτρέπει την απομόνωση τόσο της στερεάς μετακίνησης όσο και της στερεάς στροφής.

Abstract

Pelvic fractures are classified among the most dangerous ones since they are related to high mortality. The respective osteosynthesis techniques are not standardized and a great variety of approaches can be found in literature. From the biomechanical point of view the experimental assessment of these techniques is a challenging task due to the extremely complex geometry of the pelvis, the difficulties in reproducing the actual boundary and loading conditions and also the difficulties in measuring the relative displacements.

In the present diploma thesis, an attempt is described to address the above problem by applying the Digital Image Correlation (D.I.C.) technique. In this direction an experimental protocol was designed and took place in the Laboratory of Testing and Materials (Biomechanical Department) of the Mechanical Faculty of the National Technical University of Athens (N.T.U.A.) in collaboration with orthopaedics doctors from the 401st general military hospital, who are specialized in pelvic fractures. This protocol included nineteen tests with cadaveric semi-pelvises. The semi-pelvises were artificially fractured. The fractures simulated the most dangerous ones, usually denoted as T-type fracture. Five different osteosynthesis techniques were used to fixate the fractured pelvises consisting of various combinations of simple and locking plates and free fixation screws.

The tests were implemented with the aid of an *MTS Insight* electro-mechanical loading frame. A 3D-D.I.C. system by *Limess* was used to measure the relative displacements of the three parts of the fixated pelvis. The experiments were implemented under quasi-static loading conditions and displacement-control mode. The fixated semi pelvis was properly constrained using a proper clamp with three degrees of freedom permitting proper orientation of the loading axis that simulated loading for upright standing position. The load was transferred to the pelvis with the aid of a metallic implant which simulates the femoral head. During the test the load and the respective 3D-displacement fields were measured and recorded as functions of time.

The target of the protocol was two-folded: Assess the efficiency of D.I.C. in measuring three dimensional displacement fields for complicated geometries and on the other hand to classify the osteosynthesis techniques considered according to their efficiency, using as criterion the behavior of the gap across the various fracture lines.

Preliminary results indicate that 3D-D.I.C. is advantageous against classical techniques since it allows “post-mortem” choice of critical points (without limit as to their number) for the estimation of the opening of the fracture (Fracture Opening Distance, F.O.D.), with very high accuracy. Moreover it enables measurement of the relative sliding between the three parts of the fractured pelvis as it allows isolation of rigid body displacement and rotation.

Κεφάλαιο 1
Βασικές αρχές της Εμβιομηχανικής –
Ο οστίτης ιστός



1.1 Εμβιομηχανική

Η Εμβιομηχανική (Biomechanics) ορίζεται ως η επιστήμη δια της οποίας εφαρμόζοντας αρχές και μεθόδους της Μηχανικής, της Φυσικής, της Χημείας, των Μαθηματικών καθώς και της τεχνολογίας στη Βιολογία και την Ιατρική, οι επιστήμονες προσπαθούν να ερμηνεύσουν αλλά και να βελτιώσουν, ποιοτικά και ποσοτικά, τη συμπεριφορά των έμβιων οργανισμών.

Το ερευνητικό πεδίο της Εμβιομηχανικής περιλαμβάνει τη μηχανική των βιολογικών συστημάτων, το σχεδιασμό και την ανάπτυξη οργάνων μετρήσεως, τη βιοϊατρική απεικόνιση ανθρωπίνων οργάνων με μοντέλα, το σχεδιασμό τεχνητών αρθρώσεων, τη συμπεριφορά του τεχνητού νεφρού, τη συμπεριφορά της τεχνητής καρδιάς, την ανάλυση της βάδισης, τη συμβατότητα των βιοϋλικών κλπ. Επίσης, στο αντικείμενο της Εμβιομηχανικής ανήκει και η κατασκευή μικροσκοπικών συστημάτων, με σύνθετη λειτουργικότητα, για τον έλεγχο της λειτουργίας των ανθρωπίνων οργάνων [Γ1].

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η Εμβιομηχανική είναι ίσως ο παλαιότερος τομέας της βιοϊατρικής τεχνολογίας με αναφορές που φτάνουν ως την αρχαία Ελλάδα. Η λέξη «Εμβιομηχανική» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970 για να περιγράψει κάθε εφαρμογή της επιστήμης του μηχανικού στη Βιολογία και την Ιατρική.

Ακόμα και σήμερα, ο πατέρας της Εμβιομηχανικής θεωρείται ότι είναι ο Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.). Στο έργο του, «Περί ζώων κινήσεως» περιγράφει την κίνηση των ζώων και αντιμετωπίζει τα σώματα σαν μηχανικά συστήματα. Ως πρώτες απλές μελέτες Εμβιομηχανικής μπορούν να θεωρηθούν η μελέτη των δυνάμεων που ασκούνται στα άκρα, η αεροδυναμική της πτήσης των πτηνών και η υδροδυναμική της κίνησης των ψαριών.

Την εποχή της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, ο Γαληνός (131-201μ.Χ.) συνέβαλε με τα έργα του «Περί της λειτουργίας των τμημάτων» (εννοώντας αυτά του ανθρώπινου σώματος) και «Περί της κινήσεως των μυών» στην

πρόοδο της Εμβιομηχανικής και της ιατρικής επιστήμης γενικότερα και κατέστη σημείο αναφοράς για τα επόμενα 1400 χρόνια.

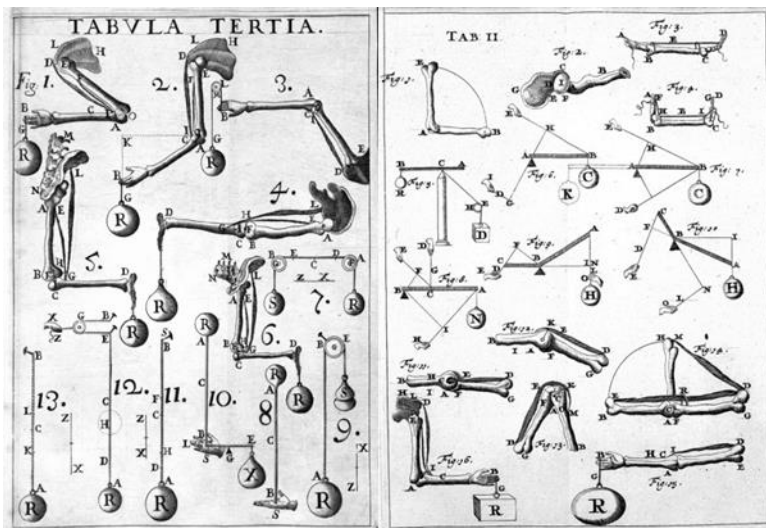
Κατά την Αναγέννηση, έγινε η πρώτη επιστημονική προσέγγιση της μηχανικής των σωμάτων των έμβιων οργανισμών από τον Leonardo da Vinci (1452-1519). Μελέτησε σε βάθος την ανατομία τους και έβγαλε πρώιμα συμπεράσματα για τη μετάδοση των δυνάμεων από τους μύες αλλά και για τη λειτουργία των αρθρώσεων. Μια άλλη μεγάλη προσωπικότητα της Αναγέννησης, ο Galileo Galilei (1564-1642), μελέτησε λεπτομερώς την αντοχή και τη δομή των οστών. Ο Galilei πρωτοπόρησε υποθέτοντας ότι τα οστά δεν είναι συμπαγή αλλά έχουν πόρους ώστε να εξασφαλίζουν τη μέγιστη αντοχή με το ελάχιστο βάρος. Την ίδια εποχή ο Andreas Vesalius καινοτόμησε με τη δημοσίευση του βιβλίου του: «Περί της δομής του ανθρώπινου σώματος» το οποίο παρουσίαζε πρωτοποριακή εικονογράφηση και απόψεις. Ο Ιταλός μαθηματικός και αστρονόμος Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), σε συνεργασία με τον ιατρό Malphigi, έδωσε μεγάλη ώθηση στην Εμβιομηχανική και θεμελίωσε την Ιατροφυσική προσέγγιση της Ιατρικής υποστηρίζοντας ότι η Φυσική και η Χημεία είναι τα κλειδιά για την κατανόηση της δομής και της λειτουργίας του σώματος. Το σημαντικότερο έργο του είναι το «De Motu Animalium» (*Εικόνα 1.1*).

Μέχρι τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, τον οποίο ο Benno Nigg ονόμασε «αιώνα της βάδισης», η βασική εξέλιξη στην Εμβιομηχανική γίνεται στον τομέα της κινησιολογίας. Η εισαγωγή κινηματογραφικών τεχνικών στη μελέτη της κίνησης ώθησαν τους Christian Wilhelm Braune (1831-1892) και Otto Fischer (1861-1917) να μελετήσουν την ανθρώπινη βάδιση. Την ίδια περίοδο, άνθησε η επιστήμη της Μηχανικής των Υλικών σε Γερμανία και Γαλλία. Υπό το πρίσμα νέων θεωρητικών προσεγγίσεων, όπως της έννοιας των κύριων τάσεων από τον Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) και υπό τις επιταγές της βιομηχανικής επανάστασης, Γερμανοί και Γάλλοι μηχανικοί αναπτύσσουν τα θεωρητικά τους εργαλεία. Αυτό οδήγησε στην αναγέννηση της Εμβιομηχανικής των οστών χάρις στη συμβολή των Karl Culmann (1821-1881) και Hermann von Meyer (1801-1869).

Επηρεασμένος από τις μελέτες των Culmann και Meyer, ο Tullius Wolff διατύπωσε το 1892 τον κλασικό και ομώνυμο νόμο σύμφωνα με τον οποίο: «Κάθε αλλαγή στη μορφή και λειτουργία ή μόνο στη λειτουργία ενός οστού

έχει σαν επακόλουθο την πρόκληση συγκεκριμένων αλλαγών στην εσωτερική δομή και αρχιτεκτονική του, καθώς και αλλαγών στην εξωτερική του μορφή».

Μετά τον 19^ο αιώνα τα εργαλεία που είχαν στα χέρια τους οι επιστήμονες για τη μελέτη των σωμάτων αυξήθηκαν ραγδαία. Έτσι, και η Εμβιομηχανική γνώρισε μεγάλη άνθηση και ανάπτυξη και εξελίχθηκε σε μια σύγχρονη επιστήμη [B1].



Εικόνα 1.1: Αποσπάσματα από τους υπολογισμούς του Alfonso Borelli [B2],[Γ2].

1.3 Τα οστά

Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί έχουν έναν τρόπο προκειμένου να υποστηρίξουν και να προστατεύσουν τα μέρη του σώματός τους. Τα θαλάσσια ασπόνδυλα όπως οι τσούχτρες στηρίζονται στην ισορροπία της εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης του νερού για την υποστήριξή τους. Τα έντομα, οι αστακοί και άλλα σχετικά μικρά πλάσματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν έναν εξωτερικό σκελετό ή εξωσκελετό για υποστήριξη και για να προστατεύσουν το εσωτερικό τους περιεχόμενο. Εμβιομηχανικώς, ο εξωσκελετός δεν μπορεί να λειτουργήσει για μεγαλύτερα ζώα γιατί τα ίδια και τα όργανά τους

είναι πολύ βαριά. Τα μεγαλύτερα ζώα που ζουν στη στεριά είναι εφοδιασμένα με το γνωστό ενδοσκελετό (ή εσωτερικό σκελετό) για υποστήριξη. Ο σκελετός στον άνθρωπο παρέχει υποστήριξη για το σώμα, ενεργεί ως άκαμπτο σύστημα μοχλών που μεταφέρει δύναμη από τους μύες και παρέχει προστασία για τα ζωτικά όργανα (π.χ. το κρανίο για τον εγκέφαλο και ο θωρακικός κλωβός για την καρδιά και τα όργανα του θώρακα).

Στη συνέχεια ακολουθεί σύντομη περιγραφή των δομικών και υποστηρικτικών λειτουργιών των οστών και συνοψίζονται πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες του οστού ως δομικό υλικό [B3].

1.3.1 Βιολογία, δομή και χημική σύσταση των οστών

Οι μηχανικές ιδιότητες του οστού καθορίζονται πρώτιστα από τα δομικά συστατικά του. Το οστό περιέχει δύο κύρια δομικά συστατικά: κολλαγόνο και υδροξυαπατίτη (HA). Το κολλαγόνο είναι ένα οργανικό υλικό που βρίσκεται στο συνδετικό ιστό όλου του σώματος. Τα οργανικά μέρη του οστού αποτελούν περίπου το 40% του ξηρού του βάρους και αποτελούνται από 90% περίπου κολλαγόνο. Το κολλαγόνο στο οστό είναι κυρίως τύπου I. Άλλοι τύποι κολλαγόνου απαντώνται σε άλλους συνδετικούς ιστούς, παραδείγματος χάρη οι τύποι II, IX και X είναι γνωστοί ως συγκεκριμένα κολλαγόνα χόνδρου επειδή φαίνεται να βρίσκονται μόνο στο χόνδρο.

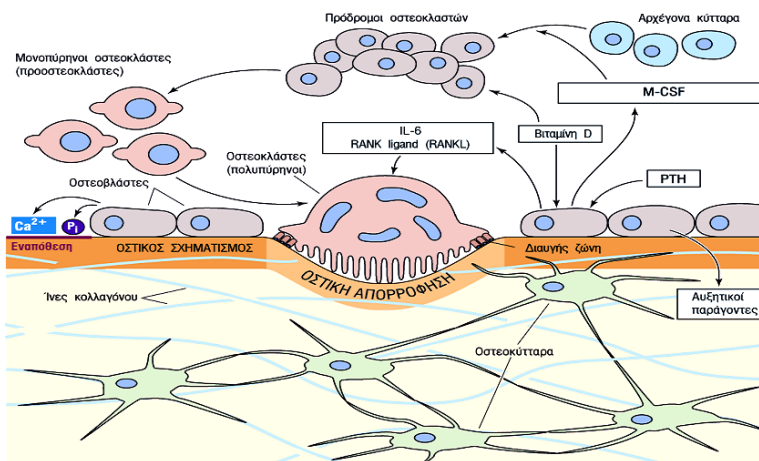
Τα ανόργανα ή ορυκτά συστατικά αποτελούν περίπου το 60% του ξηρού βάρους του οστού. Το κύριο ανόργανο συστατικό είναι ο υδραξυαπατίτης, ο οποίος είναι άλας φωσφορικού ασβεστίου. Οι κρύσταλλοι του HA βρίσκονται κυρίως μεταξύ των ινών του κολλαγόνου. Ο καθαρός HA αποτελεί ένα κεραμικό υλικό και μπορεί να βρεθεί με μορφή κρυστάλλων ως μετάλλευμα. Επειδή ο HA είναι κεραμικός, το οστό αναμένεται να έχει ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του κεραμικού. Τα κεραμικά είναι γενικά ψαθυρά και εμφανίζουν μικρή μόνο ανηγμένη παραμόρφωση πριν σπάσουν. Τα κεραμικά και τα οστά είναι επίσης σχετικά ισχυρά στη θλίψη αλλά αδύνατα σε εφελκυσμό.

Η δομή του ανθρώπινου οστού αλλάζει με την ηλικία. Τα οστά στα παιδιά είναι διαφορετικά από τα οστά στους ενήλικους. Το ανώριμο οστό αποτελείται από άωρο ιστό, του οποίου οι χόνδρινες ίνες λίγο πολύ διανέμονται τυχαία (όπως και στο δέρμα) με αποτέλεσμα να μπορεί να φέρει κάποια φορ-

τία σε όλες τις κατευθύνσεις (δηλ. δεν υπάρχει προτιμώμενη κατεύθυνση) ωστόσο δεν είναι τόσο ισχυρό όσο το ώριμο οστό. Το άωρο οστό των παιδιών είναι επίσης πιο εύκαμπτο από το ενήλικο οστό, πιθανώς για να παρέχει την απαραίτητη ανθεκτικότητα για τις πτώσεις της παιδικής ηλικίας.

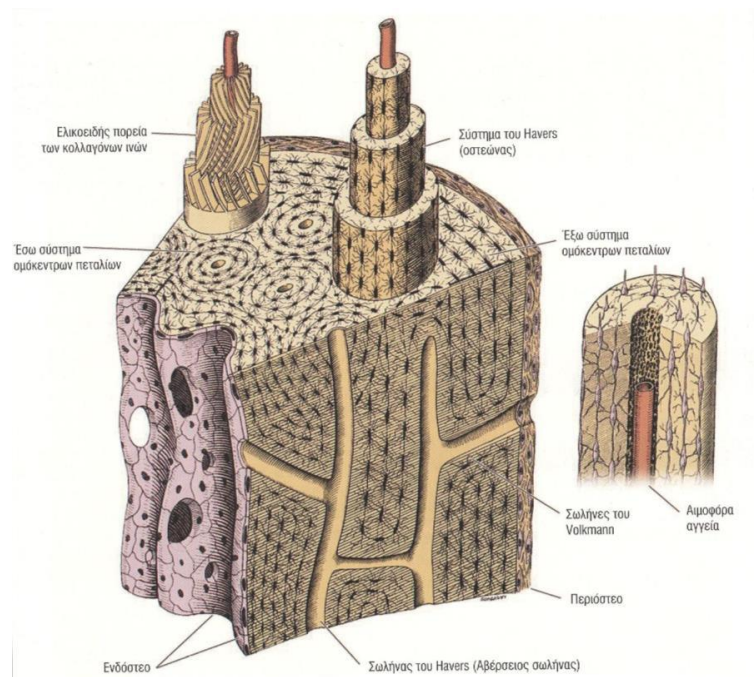
Καθώς το οστό ωριμάζει, τα κύτταρά του, αποκαλούμενα οστεοκλάστες, «σκάβουν» ουσιαστικά σήραγγες στο οστό. Άλλα κύτταρα, αποκαλούμενα οστεοβλάστες, εναποθέτουν στις σήραγγες κολλαγόνο τύπου I, το οποίο έπειτα «μεταλλοποιείται» με ΗΑ. Η «μεταλλοποίηση» μπορεί να ελεγχθεί από τα οστεοκύτταρα τα οποία είναι «παλαιότεροι» οστεοβλάστες που έχουν παγιδευτεί στη μήτρα του κολλαγόνου. Τα οστεοκύτταρα παίζουν ρόλο στον έλεγχο του εξωκυττάριου ασβεστίου και φωσφόρου (Εικόνα 1.2).

Το αποτέλεσμα της δραστηριότητας όλων των οστεοκλαστών, οστεοβλαστών και οστεοκυττάρων είναι μία σειρά αυλών, των *αβέρσειων* σωλήνων, οι οποίοι είναι ευθυγραμμισμένοι με τις στοιβάδες του οστού (πετάλια) και είναι προσανατολισμένοι προς την κύρια κατεύθυνση που φέρει το βάρος του οστού (π.χ. κατά μήκος του επιμήκη άξονα του μηριαίου οστού). Οι αβέρσειοι σωλήνες, που είναι γνωστοί επίσης ως οστεώνες, αντιπροσωπεύουν τις δομικές μονάδες του οστού. Οι κοίλοι οστεώνες είναι επίσης δίοδοι για τα αιμοφόρα αγγεία και τα νεύρα του οστού. Άλλες δίοδοι, που τείνουν να είναι κάθετες στους αβέρσειους σωλήνες, αποκαλούνται κανάλια *Volkmann* και επιτρέπουν στα αιμοφόρα αγγεία να συνδέονται διαμέσου του οστού και να διαμορφώνουν ένα δίκτυο σε όλο το οστό (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας οστεοποίησης [Γ3].

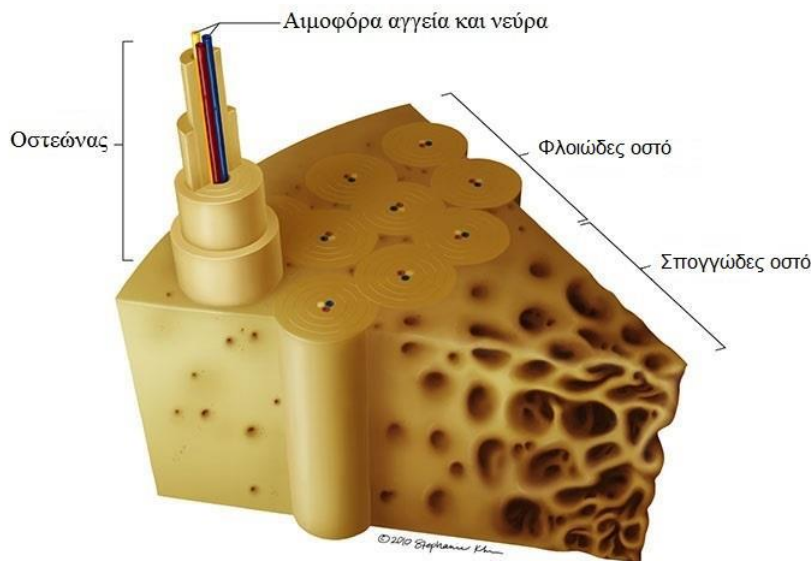
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Εικόνα 1.3: Η δομική μονάδα του οστού: ο οστεώνας [B4].

Η πρώτη ομάδα οστεώνων που αναπτύσσεται στο ώριμο οστό καλείται πρωτογενής οστεώνας. Καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του ανθρώπου, εντούτοις, οι οστεοκλάστες, οι οστεοβλάστες και τα οστεοκύτταρα παραμένουν ενεργά και οι νέοι αβέρσειοι σωλήνες διαμορφώνονται συνεχώς. Οι νέοι οστεώνες διαμορφώνονται πάνω από τους παλαιούς και καλούνται δευτερογενείς οστεώνες. Οι αβέρσειοι σωλήνες σχηματίζονται από τους δευτερογενείς οστεώνες.

Μόλις το άωρο οστό αντικατασταθεί από το σύστημα των οστεώνων, το οστό θεωρείται ώριμο. Υπάρχουν δύο αρχικοί τύποι ώριμων ανθρώπινων οστών: το φλοιώδες οστό και το σπογγώδες οστό (Εικόνα 1.4). Το φλοιώδες οστό (επίσης γνωστό ως συμπαγές οστό) είναι σκληρό, πυκνό οστό. Το σπογγώδες οστό (επίσης γνωστό ως δικτυωτό ή δοκιδωτό οστό) δεν είναι τόσο πυκνό όσο το φλοιώδες αλλά είναι γεμάτο κενά. Το φλοιώδες οστό βρίσκεται, για παράδειγμα, στο μέσο του άξονα του μηριαίου οστού και το σπογγώδες οστό βρίσκεται στο εσωτερικό της κεφαλής του μηριαίου.



Εικόνα 1.4: Το φλοιώδες οστό, το σπογγώδες οστό και η μετάβαση από το ένα στο άλλο [Γ4].

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, ο Wolff παρατήρησε ότι το οστό (ειδικά το σπογγώδες) είναι προσανατολισμένο έτσι ώστε να αντιστέκεται στις κύριες τάσεις στις οποίες υποβάλλεται. Ο Wolff διαπίστωσε ότι: «η μορφή του οστού καθορίζεται μόνο από τη στατική φόρτιση». Σήμερα, είναι ξεκάθαρο ότι η δυναμική φόρτιση του οστού παίζει βασικό (αν όχι το βασικότερο) ρόλο στη δομή των οστών. Έτσι, ο Nigg και Grimston προτείνουν, παραφράζοντας το νόμο του Wolff, ότι: «οι φυσικοί νόμοι αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την κατασκευή και ανακατασκευή του οστού». Μια λιγότερο επίσημη, αν και ίσως πιο κομψή και ακριβής απόδοση του νόμου του Wolff είναι η εξής: «Το σχήμα έπεται της λειτουργίας» [B3].

Τέλος, τα οστά, στα σημεία όπου συνδέονται και τρίβονται το ένα με το άλλο (αρθρώσεις), είναι καλυμμένα με αρθρικό χόνδρο ο οποίος επιτρέπει την κίνηση με πολύ χαμηλή τριβή.

1.4 Εμβιομηχανική των οστών

Οι μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού ποικίλουν τόσο ανάλογα με τον τύπο του οστού (π.χ. σπογγώδες έναντι φλοιώδους) όσο και με τη θέση του οστού (π.χ. πλευρά έναντι μηριαίου). Λόγω της ευρείας ποικιλίας των ιδιοτήτων δεν υπάρχει καμία «σταθερή τιμή» παραδείγματος χάρη για την αντοχή ή το μέτρο ελαστικότητας του οστού. Κατά συνέπεια, η ανάλυση και η εξέταση της μηχανικής των οστών προϋποθέτει την έρευνα των μοναδικών ιδιοτήτων των συγκεκριμένων οστών που είναι υπό διερεύνηση. Γνωρίζοντας μερικές από τις θεμελιώδεις ιδιότητες του οστού, εντούτοις, είναι δυνατό να προβλεφθεί η γενική συμπεριφορά, δεδομένου ότι γίνεται εστίαση στη δομική λειτουργία του οστού [B3].

1.4.1 Μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού

Υπό μία γενική έννοια, οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες ενός συγκεκριμένου οστού μπορούν να προβλεφθούν με προσεκτική εξέταση της λειτουργίας του οστού. Παραδείγματος χάρη, το μηριαίο οστό φέρει όλο το βάρος του σώματος σε κάθε βήμα που κάνει το άτομο όταν βαδίζει. Έτσι το οστό αυτό πρέπει να είναι δύσκαμπτο (υψηλό μέτρο *Young*) έτσι ώστε σε κάθε βήμα να μην συμπιέζεται σαν ελατήριο. Επιπρόσθετα πρέπει να είναι ισχυρό στη θλίψη ως προς την κατεύθυνση του επιμήκη άξονα. Το οστό αυτό θα ήταν ένα αναποτελεσματικό δομικό μέλος εάν σε κάθε βήμα της βάδισης τα πόδια κόνταναν ένα ή δύο εκατοστά. Το οστό θα ήταν επίσης αναποτελεσματικό εάν υφίστατο κάταγμα ή συντριβή λόγω θλίψης όταν επιβαλλόταν σε αυτό μεγαλύτερη φόρτιση συγκριτικά με αυτή που το καταπονεί στη φυσιολογική βάδιση (π.χ. στο τρέξιμο ή το άλμα).

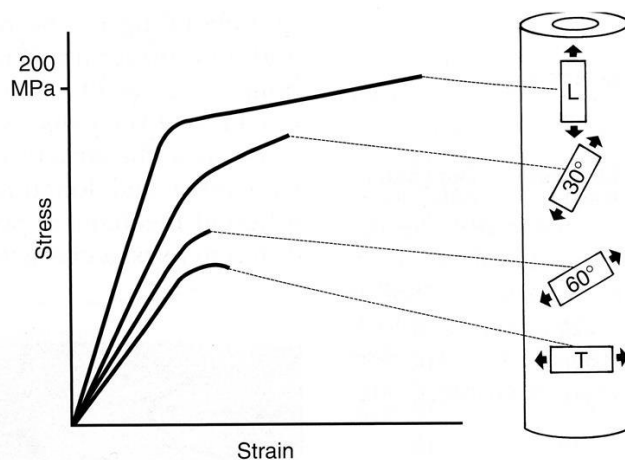
Στην περίπτωση του μηριαίου οστού, το φορτίο (βάρος) εφαρμόζεται στην κεφαλή του δηλ. μακριά από τον άξονά του (έκκεντρα) με αποτέλεσμα να ασκούνται τελικά (εκτός από τα θλιπτικά φορτία που προαναφέρθηκαν) καμπτικά και στρεπτικά φορτία. Επομένως, το μηριαίο οστό πρέπει να μπορεί να αντέχει και εφελκυστικά φορτία δεδομένου ότι η κάμψη δημιουργεί και εφελκυστικές τάσεις. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με τις αρχές της μηχανικής, οι φορτίσεις στο οστό καθορίζονται από την επαλληλία (προσθήκη) των

φορτίων θλίψης και κάμψης. Κάτω από ιδιαίτερα έντονους όρους φόρτισης (π.χ., ένα ατύχημα στο σκι), οι εφελκυστικές δυνάμεις σε ένα οστό μπορεί να είναι σημαντικές και μπορεί πράγματι να οδηγήσουν σε κάταγμα. Ανάλογα με τον τύπο του ατυχήματος, αν δημιουργηθούν δυνάμεις στρέψης μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε σοβαρά κατάγματα. Κατά συνέπεια, το οστό πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει συμπιεστικά, εφελκυστικά και στρεπτικά φορτία.

- **Ανισοτροπία**

Πολλά συνηθισμένα δομικά υλικά, όπως ο χάλυβας, είναι ισοτροπικά υλικά και μπορούν να περιγραφούν με μια μοναδική τιμή του μέτρου του *Young*. Αντίθετα με τα υλικά αυτά, το οστό είναι ένα ανισότροπο υλικό δηλ. έχει διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές διευθύνσεις (Εικόνα 1.5). Το μέτρο του *Young* στην αξονική διεύθυνση του μηριαίου οστού, παραδείγματος χάρη, διαφέρει από το μέτρο του *Young* στην εγκάρσια διεύθυνση (από έξω προς τα έσω).

Υπάρχουν ωστόσο ανισότροπα υλικά των οποίων τα χαρακτηριστικά σε όλες τις διευθύνσεις ενός εγκαρσίου επιπέδου είναι παρεμφερή. Τα υλικά αυτά ονομάζονται εγκαρσίως ισότροπα (ή ορθότροπα). Το οστό μπορεί κάλλιστα να θεωρηθεί ως ένα τέτοιο υλικό.



Εικόνα 1.5: Μηριαίο φλοιώδες οστό υπό εφελκυσμό: η διαμήκης διεύθυνση είναι ισχυρότερη, στιβαρότερη αλλά και ολκιμότερη [B4].

Δύο μόνο σταθερές, το μέτρο ελαστικότητας *Young*, E , και ο λόγος *Poisson*, ν , είναι αρκετές για να περιγράψουν ένα ισότροπο υλικό. Αντίθετα, απαιτούνται 21 σταθερές για να περιγράψουν επαρκώς ένα ανισότροπο υλικό. Ένα ορθότροπο υλικό είναι απλούστερο και γι' αυτό απαιτούνται 9 σταθερές. Για ένα εγκάρσιως ορθότροπο υλικό όπως το οστό, απαιτούνται 5 σταθερές. Οι σταθερές μπορούν να προσδιοριστούν μόνο με την προσεκτική διεξαγωγή κατάλληλων πειραμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του οστού γίνεται αντιληπτό ότι τέτοια πειράματα είναι αρκετά δύσκολα, επομένως για την πλήρη περιγραφή της απόκρισης του οστού στη φόρτιση (δηλαδή, ο ακριβής καθορισμός της σχέσης μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης στο οστό) απαιτείται μια σύνθετη αντιμετώπιση του προβλήματος.

- **Ελαστικές σταθερές του οστού**

Δεδομένου ότι το οστό μπορεί να θεωρηθεί είτε ορθότροπο είτε εγκάρσιως ισοτροπικό, πρέπει να καθορίσουμε περισσότερες από τις δύο σταθερές (το μέτρο του *Young* και το λόγο του *Poisson*). Υπό μία στοιχειώδη έννοια, το μέτρο του *Young* είναι απαραίτητο για κάθε μία από τις τρεις βασικές κατευθύνσεις: κατά μήκος του επιμήκη άξονα, στην ακτινική διεύθυνση και στην περιμετρική διεύθυνση. Το μέτρο του *Young* κατά μήκος του επιμήκη άξονα ενός φλοιώδους οστού ανθρώπου κυμαίνεται από 17 έως 27 *GPa* και στις περιμετρικές ή ακτινικές διευθύνσεις, κυμαίνεται από περίπου 7 έως 20 *GPa*. Επομένως, η στιβαρότητα στον εγκάρσιο άξονα είναι κατά προσέγγιση ίση με τη μισή της στιβαρότητας στον επιμήκη άξονα. Για να γίνουν πιο κατανοητές οι τιμές αυτές, υπενθυμίζεται ότι το μέτρο του *Young* (α) του χάλυβα είναι περίπου 200 *GPa*, (β) του κράματος τιτανίου (που χρησιμοποιείται στις τεχνητές αρθρώσεις) περίπου 115 *GPa*, (γ) του αργιλίου περίπου 70 *GPa* και (δ) του τσιμέντου περίπου 2 *GPa*. Οι τιμές του λόγου *Poisson* είναι πολύ δυσκολότερο να προσδιοριστούν και δεν αναφέρονται εδώ.

Οι ελαστικές σταθερές του σπογγώδους οστού παρουσιάζουν μια ενδιαφέρουσα πρόκληση. Οι γενικές ή χονδρικές ιδιότητες ενός τμήματος του σπογγώδους οστού εξαρτώνται από τη δομή, τη διεύθυνση και την πυκνότητα των συστατικών δοκίδων. Μια μεμονωμένη δοκίδα (ή δοκός του οστού) μπορεί πραγματικά να έχει ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του φλοιώδους οστού. Εντούτοις, όταν πολλές μικρές δοκίδες οστού συνδέονται σε ένα δί-

κτυο όπως το σπογγώδες οστό, οι ιδιότητες προφανώς αλλάζουν. Οι πειραματικές μελέτες υποδεικνύουν σχέσεις, παραδείγματος χάρη, μεταξύ του μέτρου συμπίεσης και της πυκνότητας του υλικού. Ο Hayes δίνει μια σχέση για το μέτρο συμπίεσης του Young σε σπογγώδες οστό (K) ως:

$$K = 2,915\rho^3,$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα. Η έρευνα για τις ελαστικές σταθερές τόσο του φλοιώδους όσο και του σπογγώδους οστού συνεχίζεται [B3].

- **Αντοχή**

Η μέγιστη αντοχή του οστού ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο δοκιμής που χρησιμοποιείται και από τον τύπο του οστού. Η αντοχή σε εφελκυσμό του φλοιώδους οστού στη διαμήκη κατεύθυνση ισούται περίπου με $100-150$ MPa ή και περισσότερο. Η αντοχή του σε θλίψη στην επιμήκη διεύθυνση είναι μεγαλύτερη από την αντοχή σε εφελκυσμό και είναι ίση περίπου με $130-230$ MPa ή και περισσότερο. Για λόγους σύγκρισης, αναφέρεται ότι η μέγιστη αντοχή ενός τυποποιημένου δομικού χάλυβα είναι περίπου 400 MPa, ενός κράματος τιτανίου είναι 900 MPa και του υλικού πλήρωσης των οστών είναι περίπου $25-40$ MPa.

- **Συντελεστής έντασης των τάσεων ή αντοχή παρουσία ρωγμής**

Η δυσθραυστότητα (fracture toughness) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας ενός υλικού να αντισταθεί στην ανάπτυξη των ρωγμών εάν μια ρωγμή έχει ήδη ξεκινήσει. Οι αναφερόμενες τιμές της δυσθραυστότητας ποικίλουν (ανάλογα με τη μελέτη, τη θέση του οστού, τις μεθόδους κ.τ.λ.) από περίπου $3,3$ έως $6,4$ MPa·m^{1/2}. Είναι δύσκολο, επομένως, να οριστεί μια μοναδική τιμή δυσθραυστότητας στο οστό και η δυσθραυστότητα δεν έχει μετρηθεί για πολλές θέσεις των οστών. Το σχετικό μέγεθος ($3-6$ MPa·m^{1/2}) της δυσθραυστότητας του οστού συγκρινόμενο με αυτήν άλλων υλικών παρέχει μια χρήσιμη διάσταση. Η δυσθραυστότητα του οστού είναι συγκρίσιμη, παραδείγματος χάρη, με αυτή του plexiglas με δυσθραυστότητα περίπου $1,5$ MPa·m^{1/2}, ή ενός κεραμικού όπως η αλουμίνα με δυσθραυστότητα $2,7-4,8$ MPa·m^{1/2}. Η δυσθραυστότητα του οστού είναι χαμηλή έναντι του κράματος αλουμινίου

(20-30 MPa·m^{1/2}), του χάλυβα (70-140 MPa·m^{1/2}), ή του κράματος τιτανίου (70-110 MPa·m^{1/2}). Το φλοιώδες οστό έχει σχετικά χαμηλή δυσθραυστότητα επειδή είναι εύθραυστο και δεν απορροφά εύκολα την ενέργεια τάσης με πλαστική παραμόρφωση. Κατά συνέπεια, η δυσθραυστότητα του οστού είναι σύμφωνη με αυτήν των μη βιολογικών κεραμικών.

- **Επιβαλλόμενος ρυθμός παραμόρφωσης**

Οι μηχανικές ιδιότητες του οστού δεν εξαρτώνται μόνο από την κατεύθυνση, αλλά και από το ρυθμό παραμόρφωσης (ή διαφορετικά το πόσο γρήγορα το οστό υπόκειται σε φόρτιση), δηλαδή το οστό είναι ιξωδοελαστικό. Γενικά, τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η αντοχή των οστών αυξάνονται με το ρυθμό φόρτισης. Παραδείγματος χάρη, μοντέλα βασισμένα σε πειραματικά αποτελέσματα προβλέπουν ότι το διαμήκες μέτρο ελαστικότητας του οστού μπορεί να ποικίλει τουλάχιστον κατά 15% λόγω των διαφορών στο ρυθμό παραμόρφωσης που συναντώνται στις καθημερινές δραστηριότητες. Η εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων από το ρυθμό παραμόρφωσης μπορεί να είναι ένας από τους προστατευτικούς μηχανισμούς του σώματος. Το οστό είναι σε θέση να αντέξει μεγαλύτερες τάσεις κατά τη διάρκεια της τραυματικής, γρήγορης φόρτισης, όταν χρειαστεί. Όπως έχει αναφερθεί, το οστό έχει δύο βασικά δομικά υλικά: κρυστάλλους κολλαγόνου και ΗΑ. Το κολλαγόνο προσδίδει στο οστό τη ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Η ιξωδοελαστική ιδιότητα των οστών επιτρέπει στα οστά να αντέχουν μεγαλύτερα φορτία όταν αυτά εφαρμόζονται με μεγάλη ταχύτητα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν όρια σε αυτήν την προστατευτική ιδιότητα και όταν τα φορτία ξεπεράσουν την αντοχή του οστού, το οστό θραύεται.

Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ανταποκρίνεται ένα οστό σε διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης βοηθά στην εξήγηση του είδους του κατάγματος στο οποίο υπόκειται ένα άτομο. Κατάγματα που προκύπτουν από πολύ υψηλής ταχύτητας κρούσεις, όπως από μία σφαίρα πυροβόλου όπλου, χαρακτηρίζονται από αρκετά θραύσματα του οστού. Κατάγματα που προκύπτουν από μικρότερης ταχύτητας φορτίσεις, όπως οι πτώσεις, συνήθως χαρακτηρίζονται από δύο ή τρία θραύσματα.

- **Η απόκριση των οστών σε μηχανικές φορτίσεις και ο ρόλος της γεωμετρίας**

Η μηχανική απόκριση των υλικών υπό φόρτιση εξαρτάται και από τη γεωμετρία τους. Παραδείγματος χάρη, η διατομή μιας δοκού ελέγχει το πόσο εκτρέπεται η δοκός υπό κάποιο εγκάρσιο φορτίο. Η δομική γεωμετρία του οστού, όμοια, συμβάλλει στη μηχανική του απόκριση.

1.4.2 Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων λόγω ηλικίας και σωματικής δραστηριότητας

Τόσο η γεωμετρία των οστών όσο και οι θεμελιώδεις μηχανικές ιδιότητες του οστού φαίνεται να αλλάζουν με την ηλικία. Σε μελέτες [B3], αρκετές από τις μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίστηκαν μειώθηκαν με την ηλικία. Παραδείγματος χάρη, το μέτρο Young φαίνεται να μειώνεται κατά περίπου 2,3% για κάθε 10 έτη μετά από την ηλικία των 35 ετών, αρχίζοντας με μία τιμή 15,2 GPa. Η αντίσταση του οστού στο κάταγμα, όπως μετριέται από την δυσθραυστότητα, μειώθηκε με την ηλικία σε ένα ποσοστό περίπου 4% ανά 10 έτη (από 6,4 MPa·m^{1/2}) και η αντοχή σε κάμψη μειώθηκε περίπου κατά 3,7% ανά 10 έτη (από 170 GPa). Αυτές οι μειώσεις στις ιδιότητες μπορεί να οφείλονται σε αλλαγές των ανόργανων συστατικών του οστού ή ίσως σε αλλαγές της δομής του οστού. Απαιτούνται πρόσθετες μελέτες για την πλήρη κατανόηση των αλλαγών των μηχανικών ιδιοτήτων του οστού με την ηλικία.

Η δραστηριότητα μεταφράζεται ως αυξανόμενη φόρτιση στο οστό. Όταν το οστό υφίσταται φόρτιση, το οστό τείνει να ενισχύεται. Γίνεται πυκνότερο με τη χρήση. Όταν οι δραστηριότητες μειώνονται και τα φορτία στο οστό μειώνονται, το οστό χάνει τη μάζα μέσω της ανακατασκευής. Η οστεοπόρωση είναι μια ασθένεια πιο συνηθισμένη στους ηλικιωμένους ανθρώπους. Πρόκειται για μία χρόνια πάθηση του μεταβολισμού των οστών κατά την οποία παρατηρείται σταδιακή μείωση της πυκνότητας και ποιότητάς τους, που προκαλείται από αποτυχία των οστεοβλαστών να εναποθέσουν νέο οστό στα κενά που δημιουργούν οι οστεοκλάστες. Με την εξέλιξη της ασθένειας, τα οστά γίνονται πιο ψαθυρά και χάνουν μέρος της μάζας τους. Στην οστεοπόρωση φαίνεται πιθανόν να παίζουν ρόλο και οι ορμόνες, όπως συμβαίνει παραδείγματος χάρη, στην περίπτωση των γυναικών μετά την εμμηνόπαυση.

Κεφάλαιο 2
Στοιχεία ανατομίας:
Η πύελος και τα πυελικά κατάγματα

2.1 Η πύελος

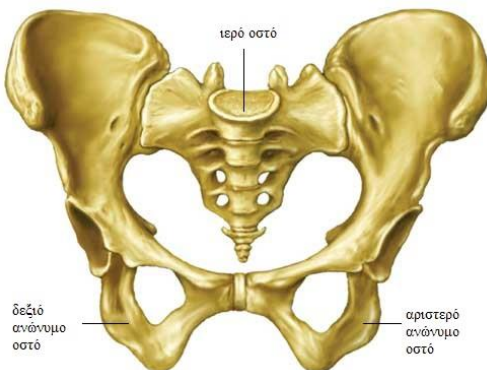
Η πύελος ή λεκάνη (Εικόνα 2.1) είναι η σταθερή οστέινη δομή στη βάση της σπονδυλικής στήλης, η οποία την στηρίζει, και συνδέεται με τα κάτω άκρα. Πρόκειται για ένα οστό πλατύ, διφυές και μειωμένης συμμετρίας (ένα επίπεδο συμμετρίας). Αρθρώνεται πίσω με το ιερό οστό, εμπρός με το ετεροπλάγιο πυελικό οστό και προς τα έξω με το μηριαίο οστό.



Εικόνα 2.1: Η πύελος στη βάση της σπονδυλικής στήλης [Γ6].

2.1.1 Ανατομία του πυελικού δακτύλιου

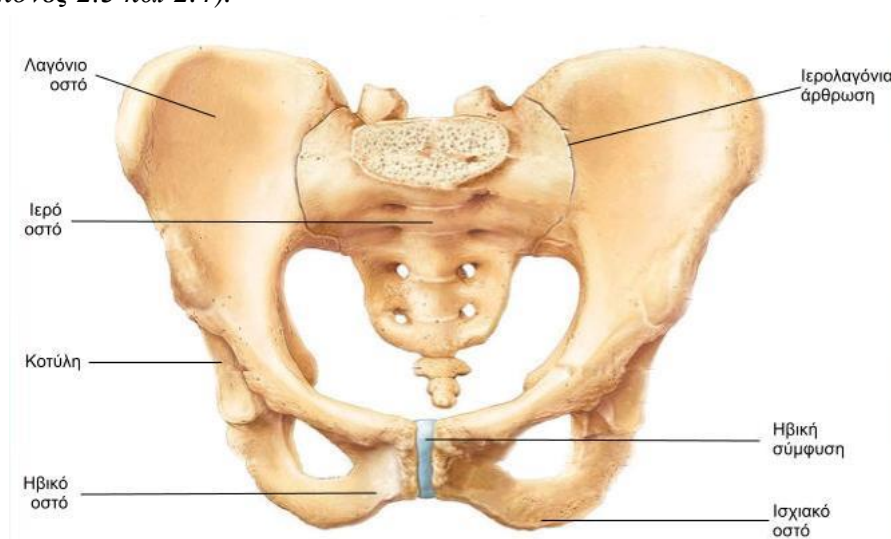
Ο οστικός πυελικός δακτύλιος αποτελείται από τα δύο ανώνυμα οστά (ημιπέλοι) και το ιερό οστό, που συγκρατούνται μαζί από ένα πολύπλοκο δίκτυο συνδέσμων (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Ο οστικός πυελικός δακτύλιος [Γ8].

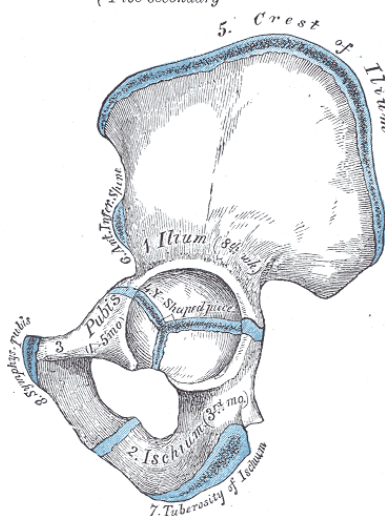
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

Κάθε ανώνυμο οστό αποτελείται από 3 μέρη: το λαγόνιο, το ισχιακό και το ηβικό, που συν-οστεώνονται στην κοτύλη, κατά την σκελετική ωρίμανση (Εικόνες 2.3 και 2.4).



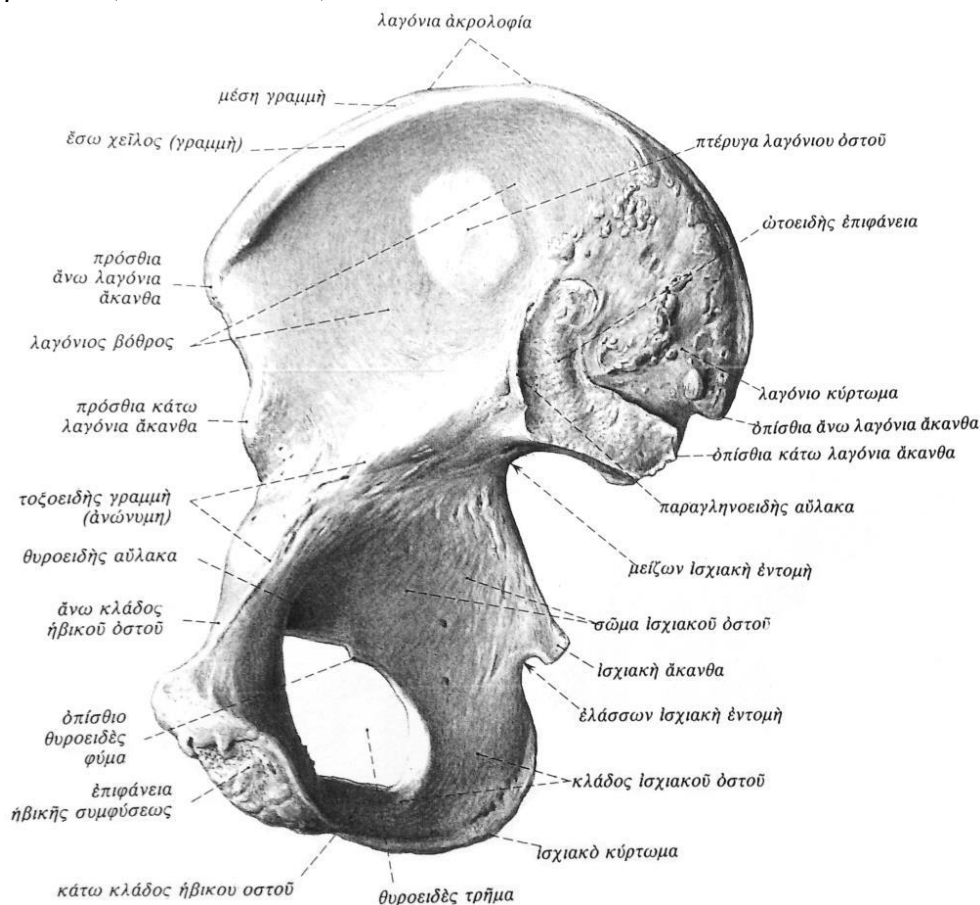
Εικόνα 2.3: Ο πεελικός δακτύλιος. Άποψη από εμπρός [Γ5].

By eight centers { Three primary (Ilium, Ischium, and Pubis)
Five secondary



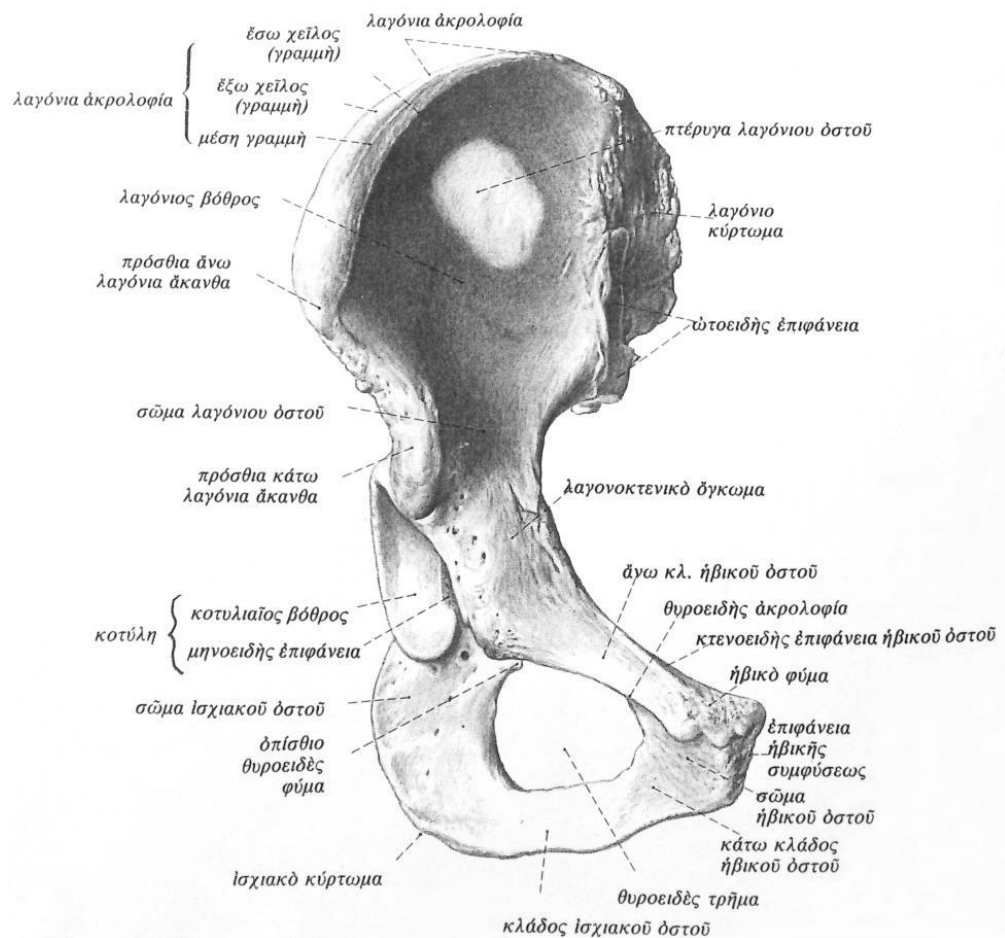
Εικόνα 2.4: Η ημιπέλος ως αποτέλεσμα της συνοστεώσεως του λαγονίου, του ισχιακού και του ηβικού οστού [B6].

Η πρόσθια κολώνα ή λαγονοηβική κολώνα περιλαμβάνει το πρόσθιο τοίχωμα της κοτύλης, το πρόσθιο λαγόνιο και τον άνω ηβικό κλάδο. Η οπίσθια κολώνα ή λαγονοϊσχιακή κολώνα περιλαμβάνει το οπίσθιο τοίχωμα της κοτύλης και εκτείνεται από το οπισθοκατώτερο λαγόνιο στη μεγάλη ισχιακή εντομή, έως το ισχιακό κύρτωμα. Χαρακτηριστικά σημεία της πρόσθιας κολώνας είναι η άνω πρόσθια άκανθα, η κάτω πρόσθια άκανθα, η λαγονοηβική γραμμή, το λαγονοηβικό όγκωμα (λαγονοκτενικό) και το ηβικό φύμα. Τα χαρακτηριστικά σημεία της οπίσθιας κολώνας είναι η μείζονα ισχιακή εντομή, η ελάσσονα ισχιακή εντομή, η ισχιακή άκανθα και το ισχιακό κύρτωμα. Λεπτομερώς τα κύρια ανατομικά στοιχεία των ανωνύμων οστών φαίνονται παρακάτω (Εικόνες 2.5-2.7).



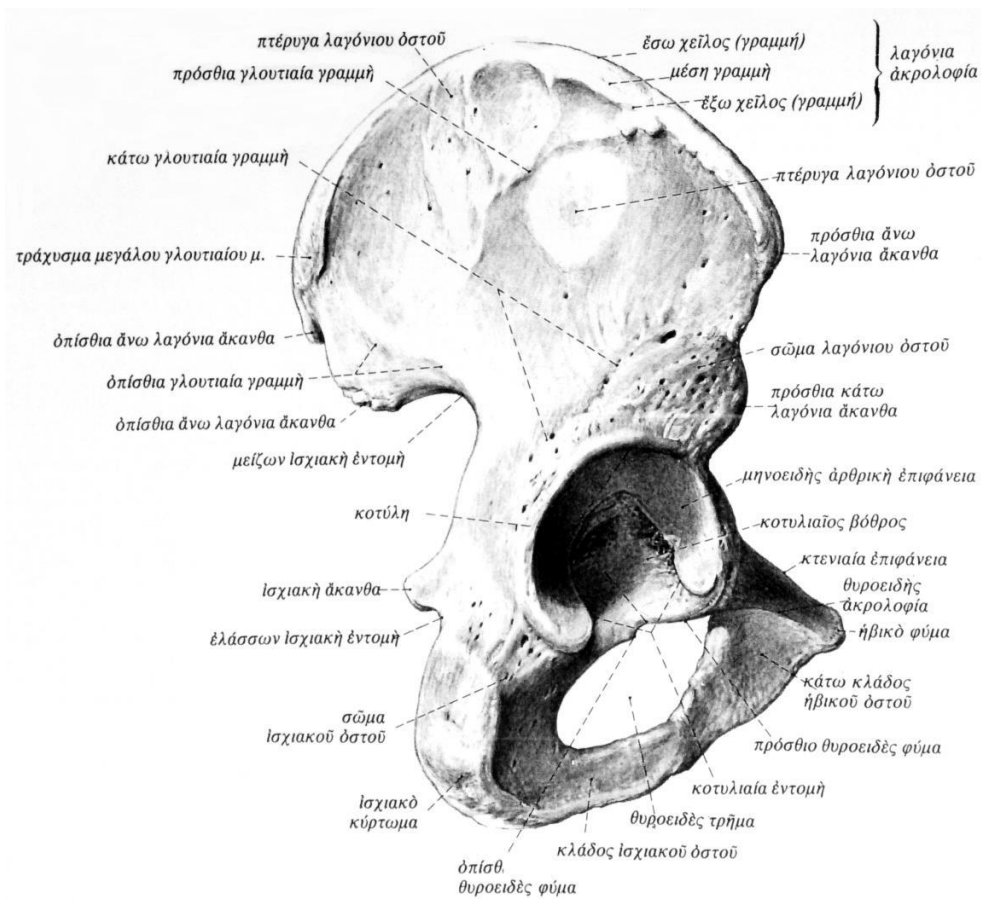
Εικόνα 2.5: Δεξιό ανώνυμο οστό. Αποψη από επάνω και πίσω [B5].

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Εικόνα 2.6: Δεξιό ανώνυμο οστό. Αποψη από εμπρός [B5].

Κάθε ανώνυμο οστό αρθρώνεται με το ιερό οπισθίως, με τις ιερολαγόνιες αρθρώσεις. Αυτές καλύπτονται από αρθρικό χόνδρο (υαλώδη) στην ιερή επιφάνεια και από ινόχονδρο στη λαγόνιο επιφάνεια. Όλη η σταθερότητα των ιερολαγόνιων απορρέει από το σύμπλεγμα των μεσοστέων, οπίσθιων ιερολαγόνιων και πρόσθιων ιερολαγόνιων συνδέσμων (Εικόνα 2.8). Ο πρόσθιος πυελικός δακτύλιος ενώνεται με χόνδρο στην ηβική σύμφυση και συγκρατείται από ένα ινοσυνδεσμικό καλυπτήριο σύμπλεγμα. Δύο επιπρόσθετοι σύνδεσμοι (ιεροϊσχιακοί), ο ιερακάνθιος και ο ιεροϊσχιακός, προσφέρουν πρόσθετη σταθερότητα στον πυελικό δακτύλιο.



Εικόνα 2.7: Δεξιό ανώνυμο οστό. Άποψη από έξω [B5].

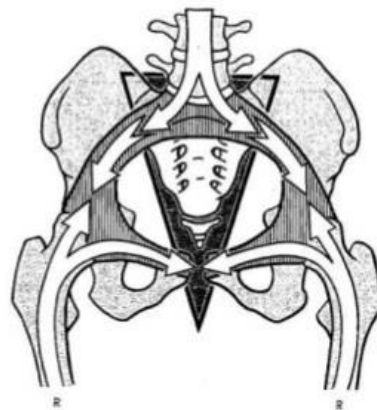


Εικόνα 2.8: Πρόσθιοι και οπίσθιοι ιερολαγόνιοι σύνδεσμοι αντίστοιχα [B7].

2.1.2 Η δομή της οστέινης πύελου

Ως σύνολο η οστέινη πύελος μεταβιβάζει τις δυνάμεις από την σπονδυλική στήλη στα κάτω άκρα. Το βάρος το οποίο υποστηρίζεται από τον πέμπτο οσφυϊκό σπόνδυλο (O5) κατανέμεται εξίσου κατά μήκος των ιερών πτερυγίων και διαμέσου των ισχιακών κυρτωμάτων προς την κοτύλη (δυναμικές γραμμές). Ένα μέρος της αντίδρασης του εδάφους στο βάρος του σώματος μεταδίδεται στην κοτύλη από τον αυχένα της κεφαλής του μηριαίου οστού. Το υπόλοιπο μεταδίδεται κατά μήκος του οριζόντιου κλάδου του ηβικού οστού και αντισταθμίζεται στην ηβική σύμφυση από μια ισοδύναμη δύναμη από την άλλη πλευρά.

Οι δυναμικές γραμμές σχηματίζουν έναν πλήρη δακτύλιο κατά μήκος της εισόδου της ελάσσονος πύελου (Εικόνα 2.9). Υπάρχει ένα πολύπλοκο σύστημα οστέινων δοκίδων μέσα στα οστά της πύελου που ανταποκρίνονται στις δυναμικές γραμμές.



Εικόνα 2.9: Οι δυναμικές γραμμές που αναπτύσσονται στην ελάσσονα πύελο [Γ16].

Καθώς το ιερό οστό είναι ευρύτερο στο άνω μέρος του (συγκριτικά με το κάτω) μπορεί να θεωρηθεί σαν μια σφήνα η οποία εφαρμόζει κατακόρυφα ανάμεσα στα δύο ανώνυμα οστά και συγκρατείται σε αυτά μέσω συνδέσμων. Όσο πιο μεγάλο είναι το βάρος του σώματος, το οποίο δέχεται το ιερό οστό, τόσο ενισχύεται η εφαρμογή μεταξύ του ιερού και των ανώνυμων οστών. Γι' αυτό τον λόγο θεωρείται ως ένα αυτό-κλειδούμενο σύστημα.

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, οπισθίως τα λαγόνια οστά αρθρώνονται με το ιερό οστό μέσω της ιερολαγόνιας άρθρωσης. Με άλλα λόγια, κάθε ανώνυμο οστό μπορεί να θεωρηθεί ως ο μοχλοβραχίονας με το υπομόχλιό του να βρίσκεται στην ιερολαγόνια άρθρωση. Η άρθρωση αυτή αποτελεί την ισχυρότερη και πιο πολύπλοκη άρθρωση του ανθρώπινου σώματος η οποία διαθέτει πολύ μεγάλη σταθερότητα έναντι της κίνησης, πράγμα απαραίτητο για την βάδιση και την όρθια στήριξη. Προσθίως, τα δύο ανώνυμα οστά και συγκεκριμένα τα δύο ηβικά οστά, συνδέονται μεταξύ τους μέσω της ηβικής σύμφυσης. Στην ηβική σύμφυση δρουν δύο δυνάμεις, οι οποίες εξουδετερώνουν τις δυνάμεις που δημιουργούνται από τους ισχυρούς ιερολαγόνιους συνδέσμους. Πρόκειται για μια σύνδεση που αν και πολύ σταθερή, παρέχει μία ελάχιστη κινητικότητα μεταξύ των εκατέρωθεν ηβικών οστών (Εικόνα 2.9).

Η πλήρης αλληλεξάρτηση των διαφόρων στοιχείων της εισόδου της ελάσσοнос πυέλου είναι φανερή, καθώς οποιαδήποτε βλάβη σε οποιοδήποτε επίπεδο επηρεάζει τη δομή σαν σύνολο και ελαττώνει τη μηχανική της αντίσταση.

2.1.3 Οι λειτουργίες της πυέλου

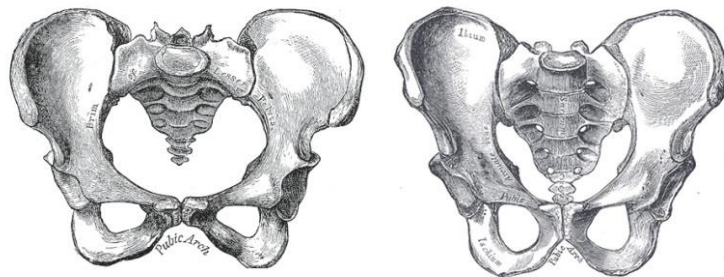
Ο κυριότερος ρόλος της πυέλου, όπως έχει αναφερθεί, είναι να μεταφέρει τα φορτία ανάμεσα στα κάτω άκρα και στον κορμό. Ταυτόχρονα, παρέχει στο σώμα την απαραίτητη στήριξη τόσο κατά την όρθια στάση όσο και κατά τη διάρκεια πολύπλοκων κινήσεων (βάδιση, τρέξιμο κ.ά.). Για τους λόγους αυτούς τα ανώνυμα οστά διαθέτουν πολύ στιβαρές αρθρώσεις.

Μία άλλη σημαντική λειτουργία της πυέλου είναι η παροχή ασφαλείας σε σημαντικά και ευαίσθητα όργανα. Στο εσωτερικό της περικλείονται το παχύ και το λεπτό έντερο, η ουροδόχος κύστη, η ουρήθρα και τα έσω γεννητικά όργανα, όλα τους προφυλαγμένα από εξωτερικά χτυπήματα.

Να σημειωθεί, τέλος, πως στο γυναικείο σώμα η πύελος επιτελεί ακόμη έναν σπουδαίο ρόλο καθώς αποτελεί τον οστέινο σωλήνα από όπου διέρχεται το έμβρυο κατά τον τοκετό. Έτσι, το σχήμα και οι διαστάσεις της γυναικείας πυέλου διαφοροποιούνται από αυτά της ανδρικής.

Ενδεικτικά αναφέρεται η διαφορά στο σχήμα της εισόδου της ελάσσοнос πυέλου, η ύπαρξη διαφορών στο πλάτος και στο βάθος της μείζονος ισχιακής

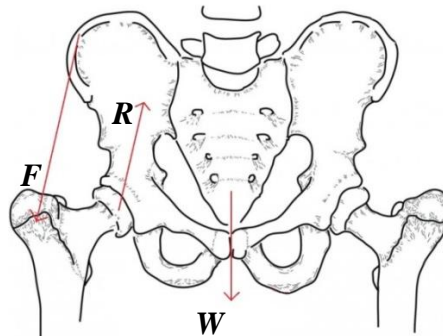
εντομής και στην καμπυλότητα του ηβικού τόξου ανάμεσα στις ανδρικές και στις γυναικείες πύελους. Η πύελος των γυναικών, τέλος, επιδεικνύει μια μεγαλύτερη μετωπιαία διάμετρο και μια μεγαλύτερη οπίσθια κλίση του ιερού οστού (Εικόνα 2.10) [A1].



Εικόνα 2.10: Ο διμορφισμός του πυελικού οστού στα δύο φύλα, γυναικείο και αντρικό αντίστοιχα [B6].

2.1.4 Μηχανική και παθολογία

Η πυελική ζώνη αποτελεί ουσιώδες στοιχείο για την ισορροπία του ανθρώπινου σώματος: είναι το σημείο διασταύρωσης των αξονικών δυνάμεων του υπερκείμενου βάρους του ανθρώπινου σώματος (W) και των ασύμμετρων αντιδράσεων που προέρχονται από το έδαφος (R , F), μέσω των 2 μηριαίων κεφαλών. Το κέντρο βάρους του ανθρώπινου σώματος, άλλωστε, βρίσκεται μέσα στην πύελο, γεγονός που προσδίδει σε αυτή την περιοχή κυρίαρχο ρόλο σε σχέση με το σύνολο του σκελετού (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11: Κατανομή των δυνάμεων στο πυελικό οστό.

Από μηχανικής άποψης, το πυελικό οστό βρίσκεται στο κέντρο του οσφυο-πυελο-μηριαίου συμπλέγματος. Συνεπώς, εξυπηρετείται από ένα σύνθετο μυϊκό σύστημα. Οι σημαντικότεροι μύες της πύελου είναι ο έσω θυροειδής μυς, ο οποίος καλύπτει τα πλάγια της, ο απιοειδής μυς, ο λαγονοψοϊτής, ο πυραμιδοειδής, ο μέσος γλουτιαίος και φυσικά το περίνεο, ένα σύνολο μυών που σχηματίζει το έδαφος της λεκάνης μεταξύ των κάτω άκρων. Ο ψοϊτής αποτελεί ειδική περίπτωση: παρ' όλο που απεικονίζεται μεταξύ των μυών αυτής της περιοχής, ουσιαστικά διέρχεται από αυτή και δεν προσφύεται στο πυελικό οστό (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12: Το βασικό μυϊκό σύστημα του πυελικού οστού στην πρόσθια όψη [Γ7].

Από τη σκοπιά της μηχανικής, η ακαμψία της πυελικής ζώνης σχετίζεται με την παρουσία τριών αρθρώσεων (τις δύο ιερολαγόνιες και την ηβική σύμφυση), που είναι και ζώνες απορρόφησης της κινητικότητας των ασύμμετρων δυνάμεων που ασκούνται στο πυελικό συγκρότημα. Αυτές οι δυνάμεις θα μπορούσαν υπό συνθήκες να αποσταθεροποιήσουν έναν ομοιογενή πυελικό δακτύλιο (κατάγματα κόπωσης).

Επίσης, η κατ' ισχίον άρθρωση, στην κοτύλη (σφαιροειδής), της οποίας η καλή προσαρμογή δίνει προτεραιότητα στη σταθερότητα κατά την κίνηση, είναι η μεγαλύτερη άρθρωση του σώματος (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13: Η κατ' ισχίον άρθρωση [Γ10].

Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του, το πυελικό οστό είναι ισχυρό και καλά προστατευμένο. Οι παθολογικές καταστάσεις που μπορεί να προκύψουν είναι κυρίως δύο τύπων: αυτές που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα του ισχίου και επομένως με τη φθορά της άρθρωσης και αυτές που σχετίζονται με την εκτενή τραυματολογία των καταγμάτων της πυέλου.

2.1.5 Ανάλυση των δυνάμεων στην πύελο κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων

Μία ακριβής ανάλυση των φορτίων στην πύελο απαιτεί μια πιο σύνθετη ανάλυση από αυτήν που παρουσιάζεται εδώ. Η παρούσα παράγραφος περιορίζεται στη μελέτη της βασικής των εξισώσεων στατικής ισορροπίας για να ποσοτικοποιηθούν τα φορτία στην οσφυοϊερή ένωση και στην ιερολαγόνια άρθρωση. Εκτιμήσεις των συμπιεστικών φορτίων στην οσφυοϊερή ένωση φτάνουν τα $5.500N$ ($560,64kg$), με κατ' εκτίμηση διατμητικές δυνάμεις έως και $1.200N$ ($122,47kg$). Η φυσιολογική βάδιση προκαλεί επίσης φορτία στην οσφυοϊερή ένωση που ανέρχονται έως και πάνω από δύο φορές το βάρος του σώματος. Δυνάμεις μεγαλύτερες από τέσσερις φορές του βάρους του σώματος αναφέρονται στην ιερολαγόνια άρθρωση κατά τη διάρκεια της βάδισης. Φορτία ισχυρής πρόσκρουσης, όπως εκείνα που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια αυτοκινητιστικών ατυχημάτων, μπορούν να δημιουργήσουν πυελικά κατάγματα καθώς επίσης και εξάρθρηματα των αρθρώσεων της πυέλου. Η πύελος υφίσταται επίσης κατάγματα κόπωσης.

2.2 Κάταγμα και Επούλωση

Ως κάταγμα ορίζεται η λύση της συνέχειας του οστού που επέρχεται μετά από άσκηση βίας. Το οστό χάνει την μηχανική ιδιότητα της στηρίξεως.

Όταν ένα οστό υποστεί κάταγμα, ο ανθρώπινος οργανισμός ξεκινάει μία αλληλουχία «δράσεων» προκειμένου να θεραπεύσει το τραύμα. Το πρώτο βήμα μοιάζει με εκείνο της απόκρισης στη φλεγμονή: το οστό αιμορραγεί στο κάταγμα και πιθανά στους περιβάλλοντες ιστούς και σχηματίζεται ένα πήγμα αίματος. Σε περίπου 2 εβδομάδες αρχίζει να σχηματίζεται ένας πόρος. Ο πόρος είναι ο προάγγελος του ασβεστομένου οστού. Όταν ο πόρος ασβεστοποιηθεί, μετατρέπεται σε άωρο οστό, που μοιάζει με το άωρο οστό των παιδιών. Το άωρο οστό υφίσταται ανακατασκευή, δηλαδή, οι οστεοκλάστες δημιουργούν κενά και οι οστεοβλάστες εναποθέτουν κολλαγόνο προκειμένου να πληρώσουν τα κενά αυτά και να δημιουργήσουν ένα αβερσειανό σύστημα από ώριμο οστό (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Διαδικασία επούλωσης του οστού [Γ11].

Η ανακατασκευή του οστού διαρκεί πολύ καιρό αφού το οστό έχει θεραπευτεί. Τελικά, το οστό μετασχηματίζει τον εαυτό του στο φυσιολογικό του σχήμα (π.χ. ένας κοίλος κύλινδρος για την κνήμη ή το μηριαίο οστό) και ο χώρος ανάμεσα στο οστό γεμίζει ξανά με μυελό των οστών. Το άωρο οστό του πόρου δεν είναι τόσο δυνατό όσο το ώριμο οστό, αλλά είναι περισσότερο εύκαμπτο και πιο ιστροπικό από το ώριμο οστό. Αυτός φαίνεται να είναι ο μηχανισμός που διαθέτει το σώμα και ο οποίος επιτρέπει τη θεραπεία του

οστού και μειώνει την πιθανότητα βλάβης του νέου οστού. Σχεδόν όλα τα δεδομένα για την αντοχή του πόρου κατά τη διάρκεια της επούλωσης του οστού προέρχονται από μοντέλα ζώων και είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων ενός επουλωμένου ανθρώπινου οστού. Γνωρίζουμε, ποιοτικά ότι η αντοχή του πόρου αυξάνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά. Παρ' όλα αυτά οι ελαστικές σταθερές και η αντοχή σε θλίψη/εφελκυσμό δεν είναι γνωστές.

2.2.1 Πυελικά κατάγματα

Η πύελος είναι μία πολύστρωτη κατασκευή όπου το εξωτερικό, λεπτό στρώμα φλοιώδους οστού μεταφέρει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου αφήνοντας το εσωτερικό, σπογγώδες στρώμα σχετικά αφόρτιστο. Με αυτό τον τρόπο, παρά τον μεγάλο της όγκο, καταφέρνει να παραμένει ελαφριά και παράλληλα να αναλαμβάνει με επιτυχία πολύ μεγάλα φορτία. Παρά την αποτελεσματικότητα της κατασκευής της, ωστόσο, η πύελος είναι δυνατό να υποστεί πολύ σοβαρή βλάβη (κάταγμα) εάν το μέγεθος των φορτίων που καλείται να μεταφέρει περάσει το όριο αντοχής της, ή εάν η διεύθυνση των φορτίων αυτών πάψει να είναι η συνήθης.

Τα κατάγματα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την αιτία πρόκλησής τους, τη συνύπαρξη ή μη βλάβης των παρακείμενων μαλακών μορίων και του υπερκειμένου δέρματος, τη μορφολογία τους κ.λπ. Ως εκ τούτου, ένα κάταγμα μπορεί να είναι τραυματικό ή παθολογικό (εάν προέκυψε μετά από άσκηση βίας ή μετά απ' την εξασθένηση του οστού), ανοικτό ή κλειστό (εάν συνοδεύεται από λύση της συνέχειας του δέρματος ή όχι), τέλειο ή ατελές (εάν η λύση αφορά όλο το πάχος του οστού ή κάποιο μέρος του).

Τα περισσότερα πυελικά κατάγματα εμφανίζονται από αυτοκινητιστικά ατυχήματα, συνήθως από πλευρικές συγκρούσεις, τα οποία συνοδεύονται και από υψηλή θνητότητα. Όσον αφορά στα κατάγματα από πτώση, αυτά είναι συνηθέστερα σε ηλικιωμένους ανθρώπους καθώς σε μεγάλες ηλικίες η πύελος έχει χάσει μέρος της ελαστικότητας και της αντοχής της (λόγω της οστεοπόρωσης) και άρα είναι πιο ευπαθής.

Οι πλευρικές προσκρούσεις φορτίζουν την πύελο μέσω της κοτύλης από την έξω πλευρά του μηρού, καθώς τυπικά υφίσταται κτύπημα ο μείζων τρο-

χαντήρας. Η περιοχή του τελικού πυελικού κατάγματος εξαρτάται από την ταχύτητα της πρόσκρουσης καθώς και από το μέγεθος της δύναμης που εφαρμόζεται. Η σημασία της ταχύτητας πρόσκρουσης είναι σύμφωνη με τις μηχανικές ιδιότητες των οστών που περιγράφονται στην παράγραφο 2.1.5, το οποίο αναφέρει ότι η δύναμη και η ελαστικότητα του οστού εξαρτώνται από το ρυθμό φόρτισής του.

Αν και τα οξέα πυελικά κατάγματα είναι τα πιο συνήθη πυελικά κατάγματα, μπορούν επίσης να συμβούν κατάγματα κόπωσης της πύελου. Η οστική πυκνότητα, το επίπεδο φυσικής κατάστασης και η έμμηνος ρήση δεν φαίνεται να είναι σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν στην πρόκληση τέτοια πυελικά κατάγματα. Τα πυελικά κατάγματα κόπωσης εμφανίζονται πολύ συχνά στο στενότερο τμήμα του ηβικού κλάδου και μπορεί να εμφανίζονται ως αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενων φορτίσεων από τους προσαγωγούς μύες κατά τη διάρκεια του κύκλου βιάδισης.

2.2.1.1 Ταξινόμηση πυελικών καταγμάτων

Τα πυελικά κατάγματα είναι ιδιαίτερα περίπλοκα. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ταξινόμηση προκειμένου να καταστεί εφικτή η μελέτη και η αντιμετώπισή τους.

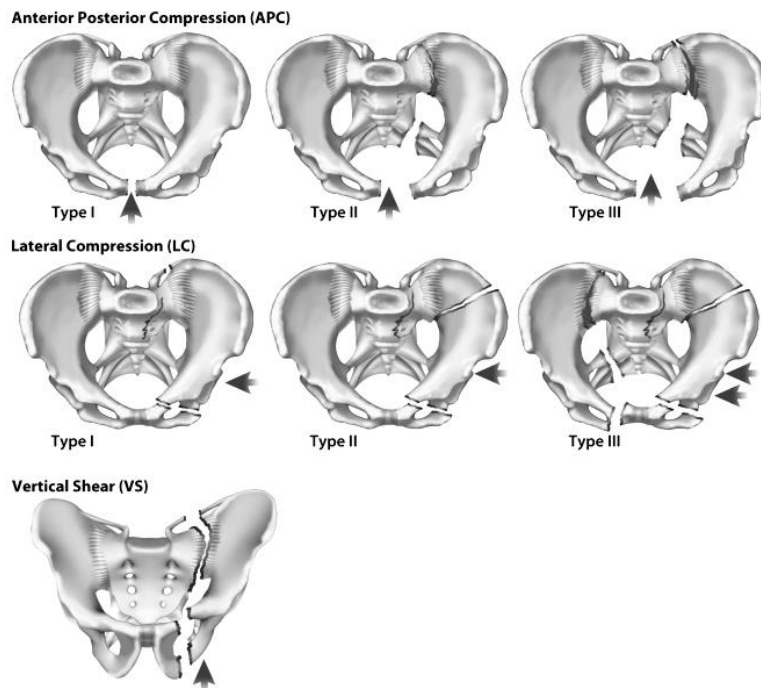
Δύο από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ταξινομήσεις είναι η ταξινόμηση κατά Tile και η κατά Young-Burgess. Η ταξινόμηση κατά Young-Burgess βασίζεται στην κατεύθυνση της βίας που προκαλεί το κάταγμα.

Η δράση πλαγιο-πλάγιας βίας προκαλεί τα κατάγματα LC-I, LC-II και LC-III (Lateral-Compression mechanism), η προσθιο-οπίσθια βία προκαλεί τα κατάγματα AP-I, AP-II και AP-III (Anterior-Posterior mechanism) και η τελευταία κατηγορία καταγμάτων προκαλείται από κάθετη βία VS (Vertical-Shear).

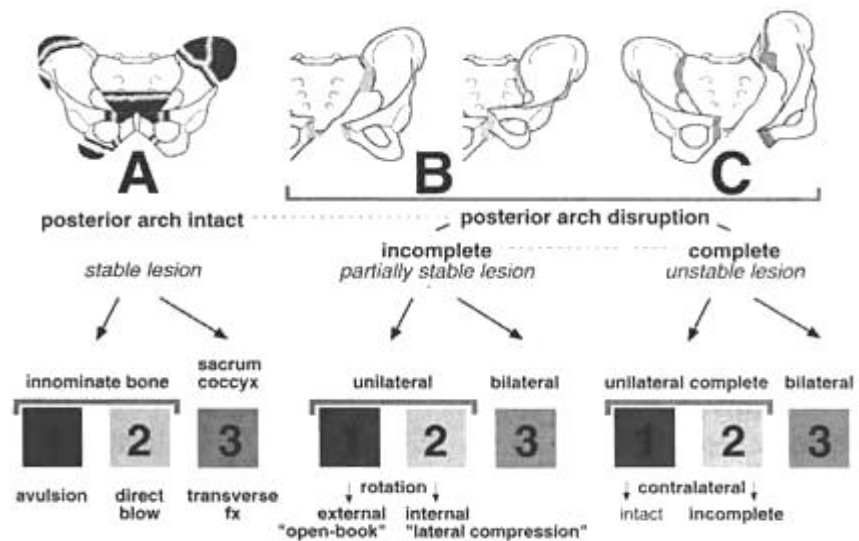
Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή, στα κατάγματα της κατηγορίας AP (II-III) και στα κατάγματα που προκαλούνται από κάθετη βία (VS) συμμετέχει και η ιερολαγόνιος άρθρωση και χαρακτηρίζονται ασταθή (Εικόνα 2.15).

Στην ταξινόμηση κατά Tile τα κατάγματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες: σταθερά και ασταθή. Τα δε ασταθή σε δύο υποομάδες (B και C) ανάλογα με το βαθμό της αστάθειάς τους (Εικόνα 2.16).

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



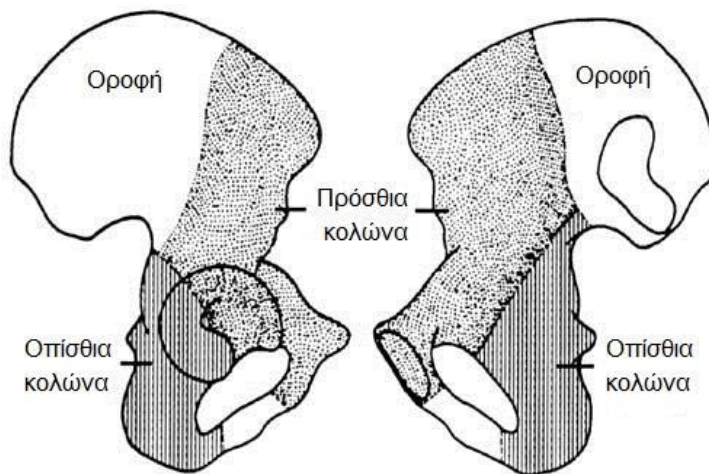
Εικόνα 2.15: Η ταξινόμηση των καταγμάτων της πύελου κατά Young-Burgess[A2].



Εικόνα 2.16: Η ταξινόμηση των καταγμάτων της πύελου κατά Tile [A3].

2.2.1.2 Ταξινόμηση κοτυλιαίων καταγμάτων

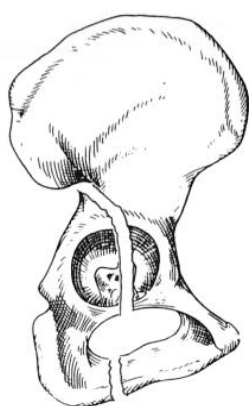
Τα κατάγματα της κοτύλης ανήκουν στα κατάγματα της πύελου. Πρόκειται για κατάγματα υψηλής ενέργειας. Προκαλούνται κυρίως από τροχαία ατυχήματα στους νέους, ενώ στους ηλικιωμένους από απλή πτώση στο έδαφος. Η μορφολογία του κατάγματος έχει σχέση με τη θέση του ποδιού κατά τη διάρκεια του ατυχήματος. Η θέση της μηριαίας κεφαλής μέσα στην κοτύλη έχει άμεση σχέση με τη μορφή του κατάγματος που θα προκαλέσει. Ένα μεγάλο ποσοστό ασθενών (πάνω από 50%) έχουν βλάβες και άλλων οργάνων, ενώ το 40% έχει κακώσεις και στα κάτω άκρα.



Εικόνα 2.17: Ο νοητός διαχωρισμός των μερών του ανωνύμου οστού για τη διευκόλυνση της μελέτης των καταγμάτων της κοτύλης [Γ9].

Για τα κατάγματα αυτά, λόγω της μεγάλης ποικιλομορφίας που εμφανίζουν, είναι απαραίτητη η ταξινόμησή τους. Η πρώτη ανατομική ταξινόμηση των κοτυλιαίων καταγμάτων, έγινε από τον *Judet R.* το 1960 και αργότερα αναθεωρήθηκε από τον *Letournel E.* η οποία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή, τα κατάγματα της κοτύλης κατατάσσονται σε 5 απλά (οπίσθιου τοιχώματος, οπίσθιας κολώνας, πρόσθιου τοιχώματος, πρόσθιας κολώνας και εγκάρσια κατάγματα) και 5 σύνθετα κατάγματα, τα οποία προκύπτουν από τον συνδυασμό των παραπάνω απλών καταγμάτων.

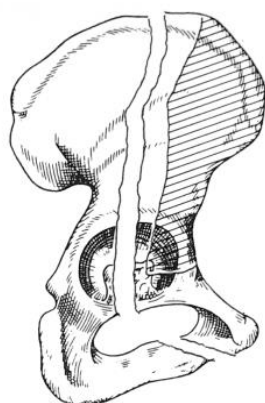
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Κάταγμα
οπίσθιας
κολώνας



Κάταγμα
οπίσθιου
τοιχώματος



Κάταγμα
πρόσθιας
κολώνας

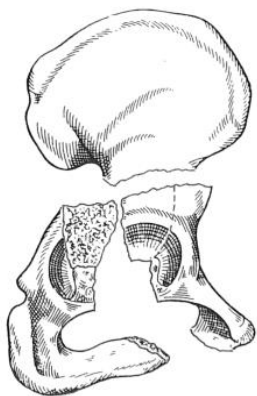


Κάταγμα
πρόσθιου
τοιχώματος



Εγκάρσιο
κάταγμα

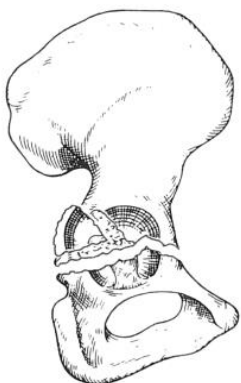
Εικόνα 2.18: Απλά κατάγματα. Ταξινόμηση κατά Judet – Letournel [B9].



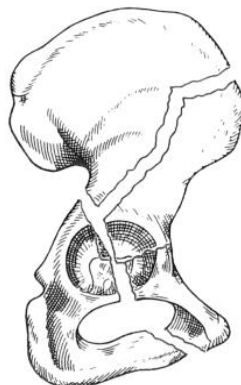
Κάταγμα
οπίσθιας
κολώνας,
οπίσθιου
τοιχώματος



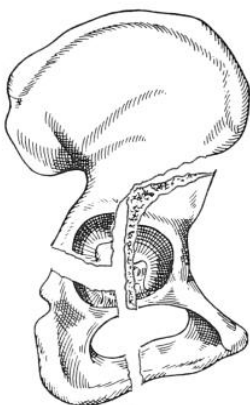
Κάταγμα
τύπου 'T'



Εγκάρσιο
κάταγμα με
οπίσθιου
τοιχώματος



Κάταγμα
άμφω
κολώνων



Κάταγμα προσθίου
τοιχώματος ή
κολώνας με οπίσθιο
ημιεγκάρσιο

Εικόνα 2.19: Συνδυασμένα κατάγματα. Ταξινόμηση κατά Judet – Letournel [B9].

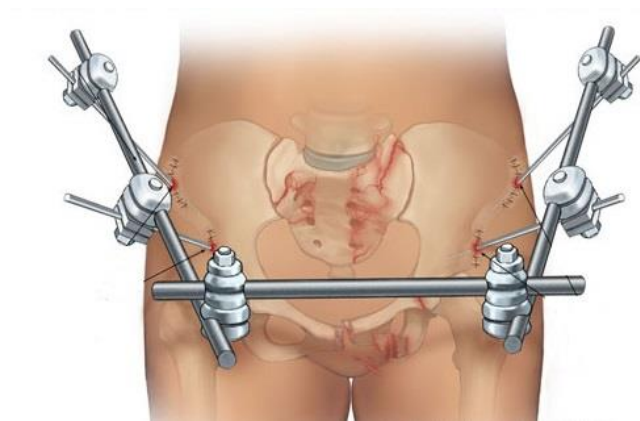
Στην παρούσα εργασία μελετάται το κάταγμα της κοτύλης τύπου «Γ». Τα κατάγματα αυτού του τύπου είναι εγκάρσια και συνήθως συνοδεύονται από κάθετη επέκταση στο θυροειδές τρήμα και τον κάτω ηβικό κλάδο.

2.3 Οστεοσυνθέσεις και υλικά οστεοσύνθεσης

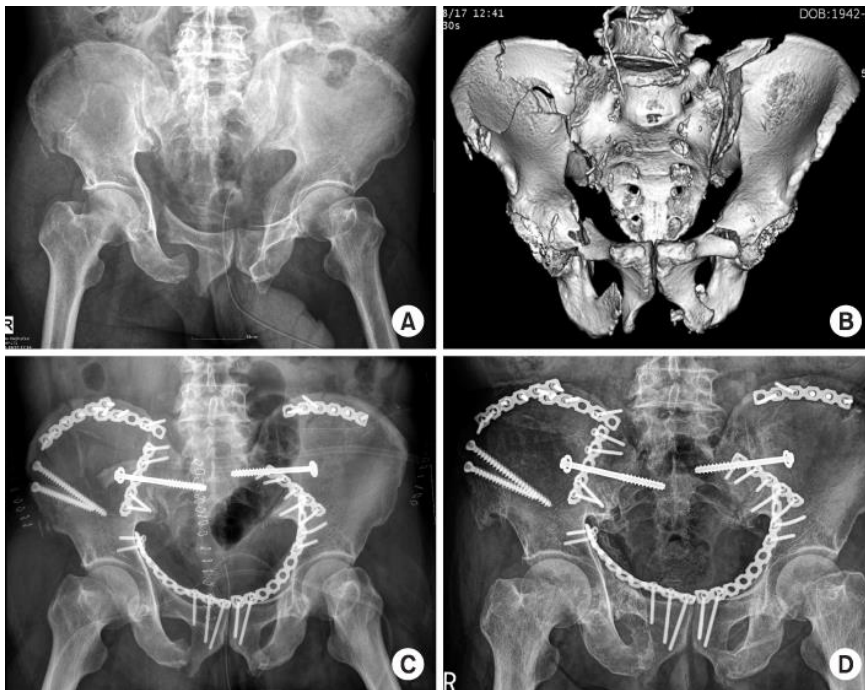
Οστεοσύνθεση ονομάζεται η χειρουργική μέθοδος ανοιχτής αποκατάστασης των παρεκτοπισθέντων κατεαγόντων στην ανατομική τους θέση με τη χρήση μεταλλικών ή απορροφήσιμων υλικών.

Μετά την ανάταξη του κατάγματος γίνεται συγκράτηση του άξονα του οστού με χρήση υλικών οστεοσύνθεσης. Η οστεοσύνθεση δύναται να είναι:

- *Εξωτερική (External Fixation)*. Με την μέθοδο αυτή συγκρατούνται τα κατεαγόντα περιφερειακά και κεντρικά του κατάγματος με ήλους διαδερμικούς (που τοποθετούνται χωρίς να αποκαλυφθεί το οστόν), ανατάσσεται το κάταγμα και συγκρατείται με την βοήθεια μεταλλικής ράβδου που τοποθετείται ανάμεσα στους ήλους (*Εικόνα 2.20*).
- *Εσωτερική (Internal Fixation)*. Αποκαλείται η τοποθέτηση των υλικών οστεοσύνθεσης (διακαταγματικές πλάκες και κοχλίες) στην επιφάνεια του οστού (*Εικόνα 2.21*). Η διαδικασία αυτή απαιτεί σημαντικό βαθμού διεγχειρητική προσπέλαση.



Εικόνα 2.20: Προσομοίωση εξωτερικής οστεοσύνθεσης σε πυελικό κάταγμα [Γ12].



Εικόνα 2.21: Όψεις καταγματικής πύελου πριν και μετά την εφαρμογή εσωτερικής οστεοσύνθεσης [A4].

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην εσωτερική οστεοσύνθεση μπορεί να είναι ειδικές μεταλλικές ανατομικές πλάκες (plates) με οπές δια των οποίων διέρχονται και οι βίδες (screws) (Εικόνες 2.22 και 2.23), οπότε η οστεοσύνθεση γίνεται με διακαταγματικές πλάκες (απλές ή αυτοκλειδούμενες) και κοχλίες (απλούς ή αυτοκλειδούμενους, αντίστοιχα). Εδώ σημειώνεται η διαφορά μεταξύ των απλών και των αυτοκλειδούμενων κοχλίων και πλακών (locking screws and plates) η οποία έγκειται στην παρουσία χαρακτηριστικού σπειρώματος στην οπή της πλάκας και στην κεφαλή της βίδας αντίστοιχα. Το χαρακτηριστικό αυτό εξασφαλίζει μεγαλύτερη σταθερότητα κατά την συγκράτηση των κατεαγόντων άκρων (Εικόνες 2.24 και 2.25).

Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται (και είναι βιολογικά ανεκτά από τον οργανισμό) είναι: Κράματα χρωμίου-κοβαλτίου, ανοξείδωτος χάλυβας, τιτάνιο και βιοαπορροφήσιμα υλικά.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

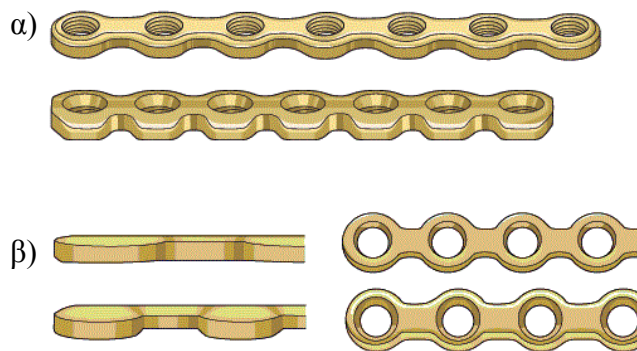


Εικόνα. 2.22: Συνήθεις βίδες που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση καταγμάτων [Γ13].

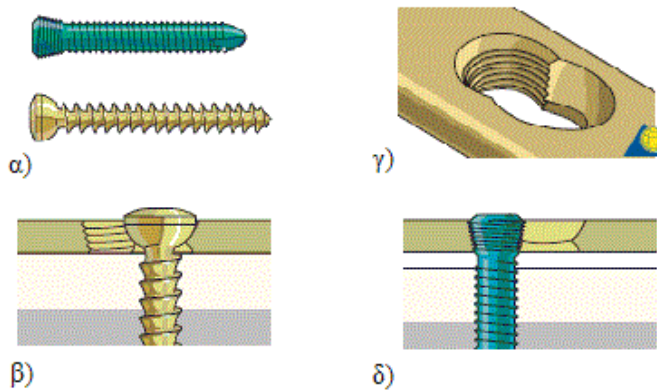


Εικόνα. 2.23: Συνήθεις πλάκες που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση καταγμάτων [Γ14].

Σκοπός σήμερα πλέον της ιδανικής οστεοσύνθεσης είναι η δυνατότητα άμεσης ενεργητικής κινητοποίησης των μυών και των αρθρώσεων της προσβεβλημένης περιοχής, της τέλει ανακατασκευής του αρχικού σχήματος του οστού και της άμεσης πώρωσης των καταγματικών άκρων χωρίς τον σχηματισμό δευτερογενούς πώρου.



Εικόνα 2.24: α) Πλάκες με το χαρακτηριστικό σπείρωμα (αυτοκλειδούμενες) και β) Απλές πλάκες [Γ15].



Εικόνα 2.25: α) Αυτοκλειδούμενος και απλός κοχλίας, β) Πλάκα με οπή διπλής δυνατότητας (τοποθέτηση απλού ή αυτοκλειδούμενου κοχλίου), γ) και δ) Η τοποθέτηση των κοχλιών στις αντίστοιχες θέσεις [Γ15].

Συγκεκριμένα, η αποκατάσταση των κοτυλαίων καταγμάτων, η οποία είναι και ένα από τα αντικείμενα που μελετώνται στην παρούσα εργασία, περιλαμβάνει συχνά τη χρήση τέτοιων μεθόδων προκειμένου να επιτευχθεί τέλεια ανάταξη και συγκράτηση των οστών. Η οστεοσύνθεση είναι πιθανό να απαιτεί την τοποθέτηση πλακών είτε στην πρόσθια και οπίσθια κολώνα είτε σε μία εκ των κολώνων σε συνδυασμό με την τοποθέτηση διακαταγματικών κοχλιών στην άλλη κολώνα. Μάλιστα, επειδή στην κοτύλη οι αρθρικές επιφάνειες είναι υπό συνεχείς φορτίσεις, η ανάταξη θα πρέπει να είναι τέλεια,

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

προκειμένου να προληφθεί η αυξημένη τριβή και άρα η καταστροφή της άρθρωσης λόγω βλάβης στον αρθρικό χόνδρο.

Πρόκειται για μία δύσκολη διαδικασία, τα αποτελέσματα της οποίας έχουν βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία 30 χρόνια. Κύριοι παράγοντες αυτής της βελτίωσης είναι οι εκτεταμένες έρευνες των *Letournel* και *Judet*, η συνεχής εξέλιξη της ακτινογραφικής ανάλυσης και φυσικά η συμβολή των υπολογιστικών μελετών [B8].

Κεφάλαιο 3
Το πρόβλημα -
Ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας



3.1 Το πρόβλημα

Τα πυελικά κατάγματα θεωρούνται εκ των πλέον σοβαρών και απασχολούν ιδιαίτερα την κοινότητα των ορθοπεδικών ιατρών διότι συνδέονται πέραν των άλλων και με υψηλή θνητότητα [A31]. Οι τεχνικές οστεοσύνθεσης εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία και δεν υπάρχει σχετική προτυποποίηση.

Τα κοτυλιαία κατάγματα στους ηλικιωμένους παρουσιάζουν αύξηση τα τελευταία χρόνια καθώς το προσδόκιμο ζωής (η μακροβιότητα) διαρκώς αυξάνεται. Η μειωμένη ικανότητα επούλωσης του κατάγματος εξαιτίας της οστεοπενίας, καθιστά την εύρεση του τρόπου αντιμετώπισης ενός τέτοιου κατάγματος μία πρόκληση για τους χειρουργούς. Εξαιτίας της οστεοπόρωσης και της εκφυλιστικής αρθρίτιδας οι υπάρχουσες θεραπείες, οι οποίες είναι σχεδιασμένες για νεότερους ασθενείς, δεν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά όταν εφαρμόζονται σε ηλικιωμένους. Η λανθασμένη επιλογή της θεραπείας μπορεί να επιφέρει σοβαρές επιπλοκές στην υγεία του ασθενούς, όπως μετατραυματική αρθρίτιδα, μόλυνση της πληγής, μη επίτευξη ένωσης ή έκτοπη οστεοποίηση.

Σε αντίθεση με τους νέους, τα πυελικά κατάγματα στους ηλικιωμένους προκαλούνται από χαμηλής έντασης τραυματισμούς. Αυτά τα κατάγματα είναι συνήθως πολλαπλά και προκαλούν ένα ευρύ φάσμα αστάθειας [A26]. Για αυτόν τον λόγο δεν συνηθίζεται να αντιμετωπίζονται συντηρητικά αλλά χειρουργικά, παραδείγματος χάριν, με ανοιχτή ανάταξη και εσωτερική οστεοσύνθεση. Σήμερα, έχουν δημιουργηθεί νέες μορφές οστεοσύνθεσης για να είναι συμβατές με την οστεοπενία και τις αξονικές δυνάμεις.

3.2 Διεθνής έρευνα

Τα κοτυλιαία κατάγματα στους ηλικιωμένους παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία ανάλογα με τον ασθενή και τα χαρακτηριστικά του κατάγματος. Η επιτυχία της θεραπείας εξαρτάται από την προσεχτική και την κατά περίπτωση επιλογή του τρόπου αντιμετώπισης του κατάγματος από έμπειρους ορθοπεδικούς γιατρούς.

Οι θεράποντες ιατροί καλούνται να εφαρμόσουν την ανάλογη θεραπεία: κλειστή θεραπεία, ανοιχτή ανάταξη και εσωτερική οστεοσύνθεση (open reduction internal fixation, ORIF) και άμεση ή σταδιακή ολική αρθροπλαστική ισχίου (total hip arthroplasty, THA). Η επιλογή της βέλτιστης θεραπείας εξαρτάται από το ιστορικό του ασθενή και τη φύση του κατάγματος [A30].

Μέχρι το 2030 εκτιμάται ότι το 17% του πληθυσμού θα είναι πάνω από 65 ετών [A19]. Οι ηλικιωμένοι είναι η μεγαλύτερη υποομάδα με κοτυλιαία κατάγματα. Τα περιστατικά στην ομάδα αυτή εκτιμάται ότι θα διπλασιαστούν μέσα στα επόμενα 20 χρόνια [A29]. Ο στόχος της θεραπείας είναι η πλήρης και άμεση ανάταξη του κατάγματος ώστε το σύστημα πυέλου κοτύλης να δύναται να λειτουργεί στα ίδια επίπεδα όπως και πριν τον τραυματισμό.

Τα κοτυλιαία κατάγματα συνδέονται με τραυματισμούς υψηλής ή χαμηλής ενέργειας. Αυτά που συνδέονται με χαμηλής ενέργειας υποδεικνύουν την παρουσία οστεοπόρωσης. Τα κατάγματα με μικρές ή καθόλου μετατοπίσεις των κατεαγόντων μπορούν να αντιμετωπιστούν μη χειρουργικά (συντηρητικά). Σύμφωνα με τους Spencer και Matta στο 30% των περιπτώσεων που μελετήθηκαν η συντηρητική αντιμετώπιση των καταγμάτων δεν είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα [A27], [A28].

Η ανοιχτή ανάταξη και η εσωτερική οστεοσύνθεση (ORIF) συνιστάται για την πλειονότητα των περιπτώσεων κοτυλιαίων καταγμάτων στους ηλικιωμένους [A5], [A6], [A7].

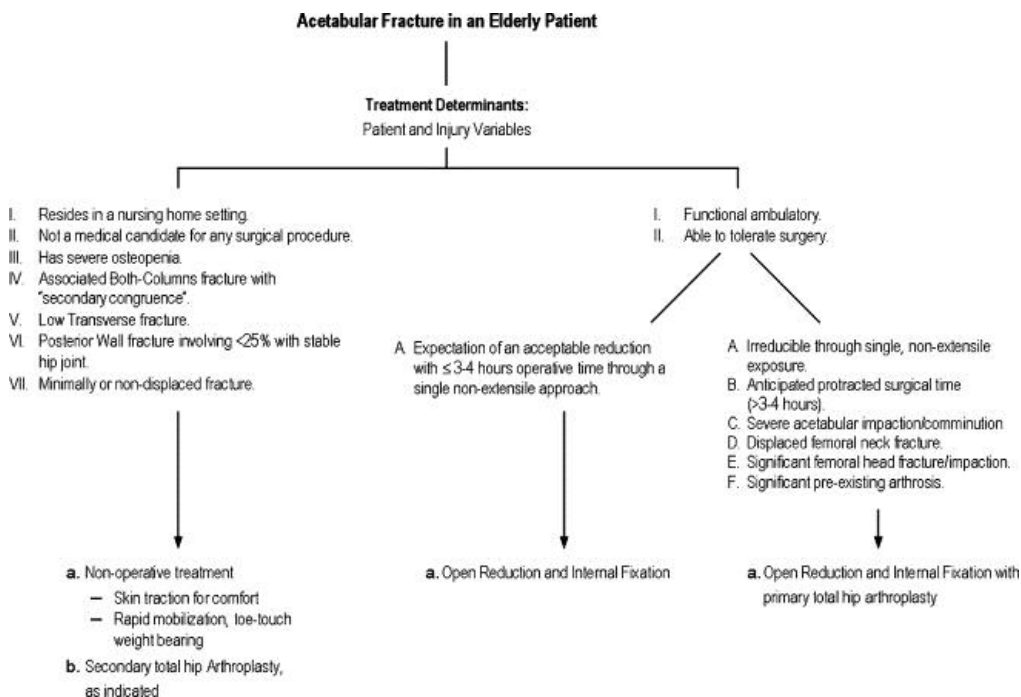
Σε όλες τις ηλικιακές ομάδες η ποιότητα της ανάταξης παίζει καθοριστικό ρόλο για την σωστή επούλωση του κατάγματος [A7]. Σύμφωνα με μια πρόσφατη μετα-ανάλυση [A8] (σύνολο 7 μελέτες, 685 ασθενείς), το 13,2% παρουσίασε μετατραυματική αρθρίτιδα στις περιπτώσεις όπου η ανάταξη ήταν ικανοποιητική ($\leq 2\text{ mm}$). Στην περίπτωση μη ικανοποιητικής ανάταξης, το ποσοστό άγγιξε το 43,5%.

Ο Matta [A9] ανέφερε ότι η αποτελεσματικότητα της ORIF για την αποκατάσταση απλών καταγμάτων φτάνει το 96% ενώ για σύνθετα κατάγματα το 64%. Τα αντίστοιχα ποσοστά σε μια έκθεση του Mears (424 ασθενείς) ανέρχονται σε 87% και 59% αντίστοιχα [A10].

Δύο ακόμη μελέτες των Helfet και Virkus [A11] επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα της ORIF. Σε περιπτώσεις κοτυλιαίων καταγμάτων όπου

συνοδεύονται και από επιπλοκές της κεφαλής του μηριαίου οστού συνίσταται και η ολική αρθροπλαστική ισχίου. Η ολική αρθροπλαστική μπορεί να εφαρμοστεί είτε άμεσα είτε σε δεύτερο χειρουργείο. Σύμφωνα με τους Letournel και Judet's [A12] και τον Matta [A9] η αποδοτικότητα της ORIF φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την ηλικία.

Ο αλγόριθμος που φαίνεται παρακάτω χρησιμοποιείται από τους ορθοπαιδικούς προκειμένου να βρουν την βέλτιστη αντιμετώπιση των πυελικών καταγμάτων στους ηλικιωμένους.



Εικόνα 3.1: Ο αλγόριθμος της θεραπείας πυελικών καταγμάτων στους ηλικιωμένους [A13].

Η αξιολόγηση των διάφορων τεχνικών εσωτερικής οστεοσύνθεσης (ORIF) έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια. Προς αυτήν την κατεύθυνση διεξάγονται μελέτες τόσο κλινικές, όσο και πειραματικές αλλά και *in silico*.

Μια κλινική έρευνα η οποία πραγματοποιήθηκε από τους Pohlenmann *et al.* το 1992 είχε ως σκοπό την τυποποίηση της αντιμετώπισης των πυελικών

καταγμάτων [A14]. Μελετήθηκαν 1566 περιπτώσεις πυελικών καταγμάτων. Ανάλογα με το κάταγμα εφαρμόστηκε εσωτερική ή εξωτερική οστεοσύνθεση. Παρατηρήθηκε πως για μερικώς ασταθή κατάγματα (Tile B) οποιαδήποτε οστεοσύνθεση εφαρμόστηκε στην πρόσθια κολώνα οδήγησε σε πλήρη ή μερική αποκατάσταση του κατάγματος. Όσον αφορά στα ασταθή κατάγματα (Tile C) η εφαρμογή εξωτερικής οστεοσύνθεσης δεν είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην περίπτωση της εσωτερικής οστεοσύνθεσης καλύτερος συνδυασμός είναι η χρήση πλακών και στις δύο κολώνες συγκριτικά με τη χρήση πλάκας μόνο στην οπίσθια κολώνα. Κρίθηκε ωστόσο αναγκαία η τυποποίηση της επιλογής της εσωτερικής οστεοσύνθεσης για κάθε τύπο κατάγματος.

Η πειραματική αξιολόγηση των τεχνικών εσωτερικής οστεοσύνθεσης είναι δύσκολη κυρίως λόγω της εξαιρετικά περίπλοκης γεωμετρίας της πυέλου, των ασαφών συνοριακών συνθηκών και των δυσκολιών στη μέτρηση των σχετικών μετατοπίσεων.

Το 1995 οι Simonian *et al.* αξιολόγησαν την σταθερότητα 3 διαφορετικών τρόπων εσωτερικής οστεοσύνθεσης για κάταγμα τύπου «T» [A15]. Συγκρίθηκαν οι εξής τρόποι: απλή πλάκα στην πρόσθια κολώνα, απλή πλάκα στην οπίσθια κολώνα και ο συνδυασμός αυτών των δύο. 24 πτωματικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση μέχρι τα 150N (8 για κάθε τρόπο οστεοσύνθεσης) με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνεται ο τρόπος φόρτισης της κοτύλης κατά τη διάρκεια των -χαμηλής έντασης- δραστηριοτήτων μετά το χειρουργείο. Στο τριπλό κάταγμα τοποθετήθηκαν 3 μετρητές παραμόρφωσης. Συγκρίνοντας τις μετατοπίσεις των καταγμάτων, παρατηρήθηκε ότι κάθε πλάκα συμβάλλει στην σταθερότητα του κατάγματος στην αντίστοιχη κολώνα, χωρίς να υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά.

Το 1998 οι Shazar *et al.* έκαναν μια πειραματική μελέτη για την αξιολόγηση τεχνικών οστεοσύνθεσης του εγκάρσιου κατάγματος άμφω κολώνων, στην περιοχή της κοτύλης [A16]. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 76 συνθετικές ημιπύελοι. Το πείραμα χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, οστεοσυντέθηκαν 40 ημιπύελοι με χρήση απλής πλάκας 10 οπών στην πρόσθια κολώνα. Ελέγχθηκε η επίδραση τεσσάρων συνδυασμών θέσης και αριθμού των κοχλιών που εφαρμόζονται στην πλάκα. Στο δεύτερο μέρος 36 ημιπύελοι οστεοσυντέθηκαν με έξι διαφορετικούς τρόπους οι οποίοι προκύ-

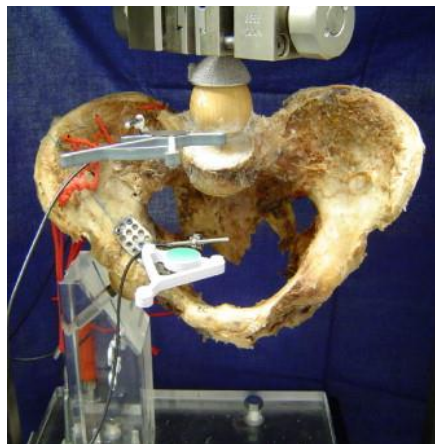
πτουν από το συνδυασμό πλακών και διακαταγματικών κοχλιών στην πρόσθια, οπίσθια ή και στις δύο κολώνες. Όλα τα δοκίμια φορτίστηκαν στην περιοχή της κοτύλης με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνεται η φόρτιση στην όρθια στάση. Για κάθε ένα από αυτά υπολογίστηκε η στιβαρότητα μέσω του διαγράμματος δύναμης-μετατόπισης. Στο πρώτο μέρος, δεν παρατηρήθηκε καμία στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των διαφορετικών συνδυασμών. Παρόλα αυτά, εμφανίστηκε μεγαλύτερη ακαμψία όταν τοποθετούνται δύο κοχλίες στα δύο άκρα της πλάκας. Στο δεύτερο μέρος όμως παρατηρήθηκε ότι η σταθεροποίηση και των δύο κολώνων προσφέρει, στατιστικά σημαντικά, μεγαλύτερη σταθερότητα, συγκριτικά με τη σταθεροποίηση μίας και μόνο κολώνας. Ο πιο σταθερός τρόπος από αυτούς είναι μία πλάκα στην οπίσθια κολώνα και ένας κοχλίας στην πρόσθια κολώνα. Η αύξηση του αριθμού των κοχλιών στην πλάκα δε διαφοροποιεί τα αποτελέσματα, οπότε κρίθηκε ότι επαρκούν δύο και μόνο.

Μια ακόμη εμβιομηχανική μελέτη έγινε από τους Culemann *et al.*, το 2009 με σκοπό την αξιολόγηση συμβατικών και πιο πρόσφατα ανεπτυγμένων τεχνικών οστεοσύνθεσης για τη σταθεροποίηση του τεχνητού συνδυασμένου κοτυλιαίου κατάγματος: κάταγμα στην πρόσθια κολώνα και οπίσθιο ημικάρσιο κάταγμα, το οποίο εμφανίζεται συχνά στους ηλικιωμένους [A17]. Μελετήθηκαν 6 διαφορετικοί τρόποι οστεοσύνθεσης για τη σταθεροποίηση του κατάγματος σε 6 συνθετικές και 4 πτωματικές ημιπύελους. Τα εμφυτεύματα οστεοσύνθεσης που χρησιμοποιήθηκαν χωρίστηκαν σε απλά ή συμβατικά (απλή πλάκα και Η-πλάκα και ασφαλιζόμενοι κοχλίες) και σε καινοτόμα εμφυτεύματα (κλειδούμενη πλάκα και πλάκα πολλαπλών οπών). Με συνδυασμό εφαρμογής των παραπάνω εμφυτευμάτων προέκυψαν οι διάφοροι τρόποι οστεοσύνθεσης:

1. Απλή πλάκα και 3 ασφαλιζόμενοι κοχλίες
2. Απλή πλάκα και 1 ασφαλιζόμενος κοχλίας
3. Απλή πλάκα και Η-πλάκα
4. Κλειδούμενη πλάκα και 3 ασφαλιζόμενοι κοχλίες
5. Κλειδούμενη πλάκα και 1 ασφαλιζόμενος κοχλίας
6. Πλάκα πολλαπλών οπών

Στο πειραματικό πρωτόκολλο, προσομοιώθηκε η φόρτιση σε μονόπεδη στάση. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης στην περιοχή της κοτύλης:

- Συνθετικές πύελοι: 3 κύκλοι πριν τη φόρτιση (400N) και 1 κύκλος φόρτισης (750N).
- Πτωματικές πύελοι: 3 κύκλοι πριν τη φόρτιση (200N) και 1 κύκλος φόρτισης (375N).

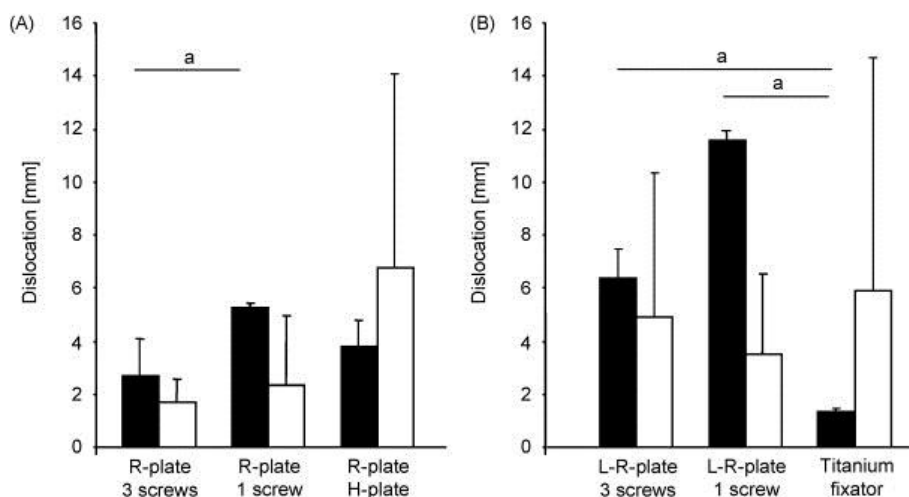


Εικόνα 3.2: Η πειραματική διάταξη.

Οι σχετικές μετατοπίσεις των κατεαγόντων μετρήθηκαν μέσω ενός συστήματος υπερήχων (μικρόφωνα υπερήχων), με δύο ανεξάρτητα ζεύγη αισθητήρων σε δύο σημεία. Τα δύο αυτά ζεύγη είχαν τοποθετηθεί στο κάταγμα της λαγόνιας ακρολοφίας και στο οπίσθιο ημιεγκάρσιο κάταγμα αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των διαφορετικών τρόπων οστεοσύνθεσης συγκρίθηκαν με τους στατιστικούς ελέγχους Scheffé posthoc και one-way ANOVA.

Στις συνθετικές πύελους, οι οποίες είχαν υποβληθεί στον 1^ο και 6^ο τρόπο οστεοσύνθεσης παρατηρήθηκε σημαντικά μικρότερη σχετική μετακίνηση μεταξύ των κατεαγόντων συγκριτικά με τον 2^ο, 4^ο και 5^ο τρόπο οστεοσύνθεσης. Καμιά στατιστικά σημαντική διαφορά δεν παρατηρήθηκε μεταξύ των τρόπων οστεοσύνθεσης στις πτωματικές πύελους, πιθανώς λόγω της ετερογενούς «ποιότητας» των οστών (Εικόνα 3.3).

Από την έρευνα αυτή προέκυψε πως η τοποθέτηση ασφαλιζόμενων μακρών κοχλιών συμβάλλει στη καλύτερη σταθεροποίηση του συγκεκριμένου κατάγματος.

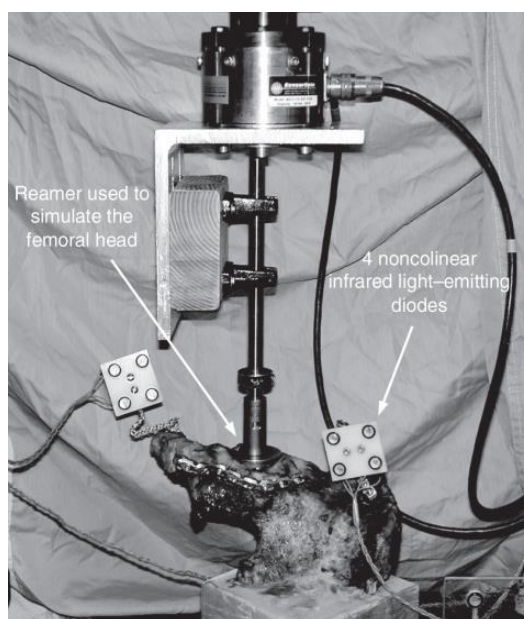


Εικόνα 3.3: Ιστογράμματα με το «άνοιγμα» των κατεαγόμενων για τις πρωματικές (μαύρο) και τις συνθετικές πύελους (λευκό).

Μια ακόμα μελέτη πραγματοποιήθηκε το 2009 από τους Ramin *et al.*, οι οποίοι εξέτασαν την πιθανότητα η τοποθέτηση μίας κλειδούμενης πλάκας να προσφέρει τον ίδιο βαθμό σταθερότητας με μία συμβατική μέθοδο, η οποία περιλαμβάνει την τοποθέτηση μιας απλής πλάκας και διακαταγματικών κοχλιών [A18]. Το κάταγμα που μελετήθηκε ήταν το εγκάρσιο κάταγμα άμφω κολώνων. Στη μελέτη αυτή δοκιμάστηκαν 5 πρωματικές πύελοι. Το ένα εκ των δύο ανώνυμων οστών οστεοσυντέθηκε με τη συμβατική μέθοδο και το άλλο με την υπό αξιολόγηση νέα μέθοδο. Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε 500 κύκλους θλιπτικής φόρτισης ενώ ακολούθησε η φόρτισή του μέχρι την αστοχία του. Για την καταγραφή της τρισδιάστατης κίνησης χρησιμοποιήθηκε ένα οπτοηλεκτρονικό σύστημα καμερών.

Από τη μελέτη αυτή προκύπτει πως η οστεοσύνθεση με κλειδούμενη πλάκα εξασφαλίζει την ίδια σταθερότητα με αυτήν της συμβατικής μεθόδου. Όταν δεν είναι δυνατή η εφαρμογή διακαταγματικών κοχλιών συνίσταται η χρήση κλειδούμενης πλάκας.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Εικόνα 3.4: Η πειραματική διάταξη.

Specimen	Opening after cyclical loading, mm		Stiffness, N/mm	
	Conventional plate	Locking plate	Conventional plate	Locking plate
1	0.1	0.3	1248	304
2	—	0.5	254	251
3	0.2	0.7	498	214
4	0.2	1.8	199	63
5	1.1	0.5	79	501
Mean	0.4	0.8	456	267
SD	0.5	0.6	468	159

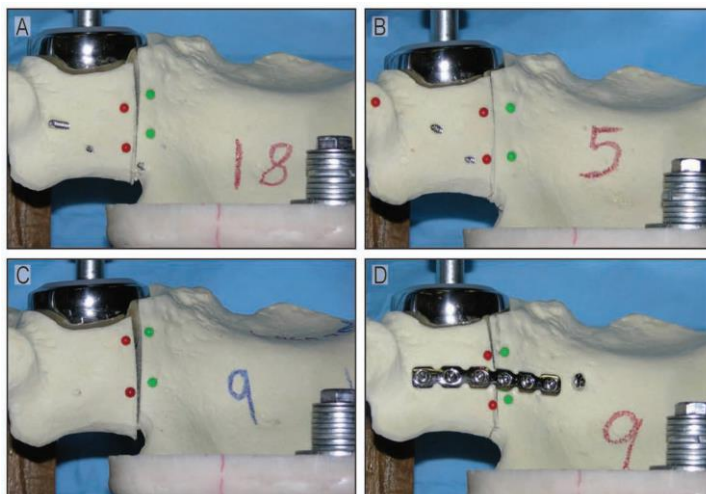
Εικόνα 3.5: Πίνακας με το «άνοιγμα» για τα πέντε δοκίμια.

Το 2010 οι Khajani *et al.* πραγματοποίησαν μια πειραματική μελέτη για την αξιολόγηση διαφορετικών τρόπων οστεοσύνθεσης του κοτυλαίου εγκάρσιου κατάγματος άμφω κολώνων [A20]. Υπέθεσαν ότι μπορεί να επι-

τευχθεί επαρκής σταθερότητα του κατάγματος μόνο με την τοποθέτηση μιας κλειδούμενης πλάκας και κοχλιών στην πρόσθια κολώνα και επιπλέον ότι η οστεοσύνθεση αυτή είναι εμβιομηχανικά εξίσου αποτελεσματική συγκριτικά με την οστεοσύνθεση και στις δύο κολώνες. Χρησιμοποιώντας μοντέλα συνθετικών πυέλων (ουρεθάνη), δημιούργησαν το κάταγμα άμφω κολώνων και το σταθεροποίησαν με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους οστεοσύνθεσης.

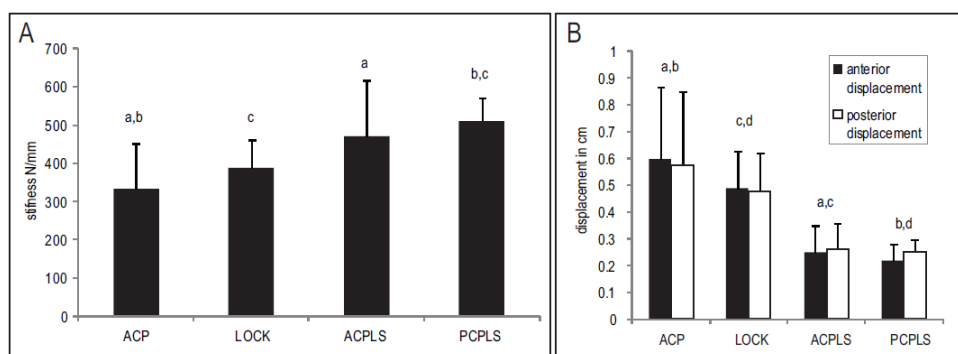
1. Απλή πλάκα στην πρόσθια κολώνα (ACP)
2. Κλειδούμενη πλάκα πρόσθια κολώνα (LOCK)
3. Απλή πλάκα στην πρόσθια κολώνα και διακαταγματικοί κοχλίες στην οπίσθια κολώνα (ACPLS)
4. Απλή πλάκα στην οπίσθια κολώνα και διακαταγματικοί κοχλίες στην πρόσθια κολώνα (PCPLS)

Τα δοκίμια φορτίστηκαν στην περιοχή της κοτύλης με ρυθμό $0,2 \text{ mm/sec}$ έως τα $2000N$ για τον προσδιορισμό της σχετικής μετατόπισης των κατεαγόμενων (άνοιγμα κατάγματος) και τον προσδιορισμό της ακαμψίας. Για τη μέτρηση μετατοπίσεων θεωρήθηκαν δύο ζεύγη σημείων στην οπίσθια κολώνα εκατέρωθεν του κατάγματος. Χρησιμοποιήθηκε οπτική μέθοδος με τη λήψη φωτογραφιών κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 3.6: Οι φωτογραφίες των δοκιμίων μετά το πέρας του πειράματος ($2000N$) για τους τέσσερις τρόπους οστεοσύνθεσης.

Για τη μελέτη των διάφορων τεχνικών οστεοσύνθεσης πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος ANOVA. Όπως φαίνεται και στα ιστογράμματα (Εικόνα 3.7) οι τεχνικές οστεοσύνθεσης οι οποίες περιλαμβάνουν συγκράτηση και των δύο κολώνων προσφέρουν μεγαλύτερη ακαμψία συγκριτικά με τις τεχνικές που συγκρατούν μία κολώνα, χωρίς όμως στατιστική σημαντικότητα. Παρατηρήθηκε, επίσης χωρίς στατιστική σημαντικότητα, ότι η τεχνική οστεοσύνθεσης με μία κλειδούμενη πλάκα είναι πιο σταθερή σε σχέση με αυτή με απλή πλάκα.

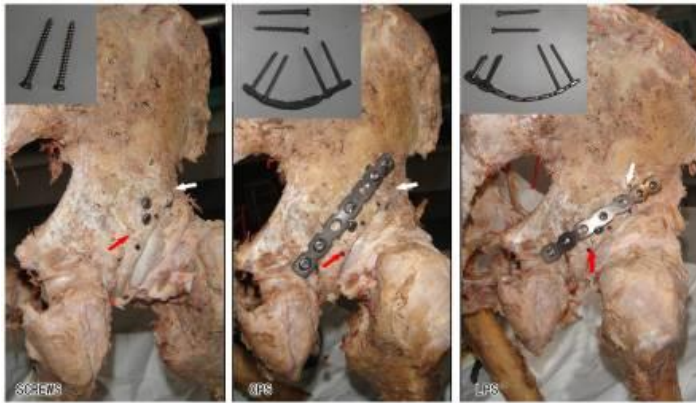


Εικόνα 3.7: Ιστογράμματα ακαμψίας και «ανοίγματος» για τους διαφορετικούς τρόπους οστεοσύνθεσης.

Το 2013 οι Yuntong *et al.* πραγματοποίησαν μια εργαστηριακή μελέτη με στόχο την αξιολόγηση τριών διαφορετικών τρόπων οστεοσύνθεσης για τη σταθεροποίηση του κοτυλιαίου κατάγματος στο οπίσθιο τοίχωμα [A21]. Οι τρεις εν λόγω τρόποι ήταν: τοποθέτηση απλών διακαταγματικών κοχλιών, απλής πλάκας με κοχλίες και κλειδούμενης πλάκας με κοχλίες.

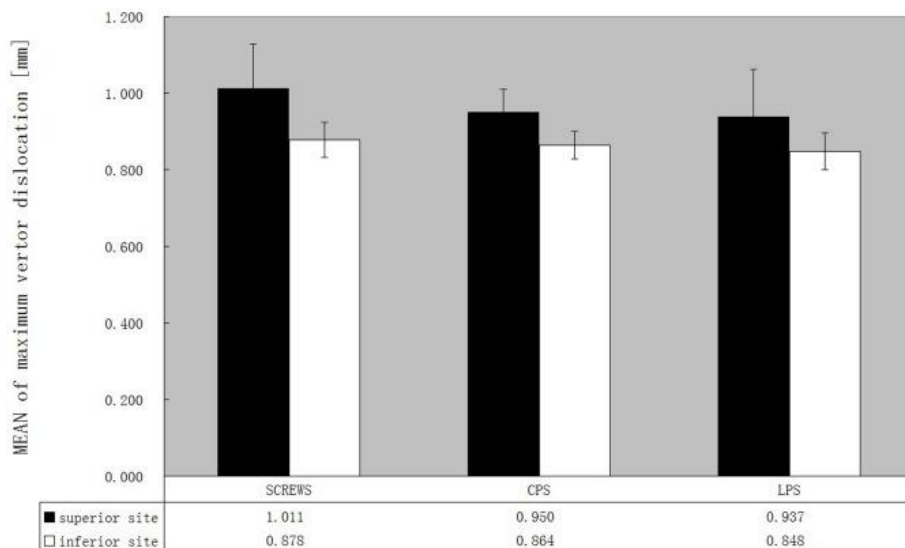
Τα δοκίμια ήταν 6 πτωματικές καταγματικές πύελοι (διατηρημένες σε φορμαλίνη). Το κάταγμα το οποίο έφεραν δημιουργήθηκε με τεχνητό τρόπο. Για κάθε τρόπο εξετάστηκαν δύο δοκίμια.

Οι πύελοι φορτίστηκαν αξονικά με έξι κύκλους φόρτισης (10 mm/min) μέχρι τα 1500N. Μετρήθηκε η σχετική μετατόπιση των κατεαγόντων σε δύο σημεία (Εικόνα 3.8) μέσω ενός συστήματος υπερήχων.



Εικόνα 3.8: Τα σημεία μέτρησης για τους τρεις τρόπους οστεοσύνθεσης.

Δεν παρατηρήθηκε καμιά στατιστικά σημαντική διαφορά στη σταθερότητα που προσφέρουν αυτοί οι τρόποι οστεοσύνθεσης. Παρατηρήθηκε επίσης ότι το άνοιγμα των κατεαγόντων είναι μικρότερο κοντά στο θυροειδές τρίμα. Κρίθηκε ότι όλες οι οστεοσυνθέσεις προσφέρουν επαρκή σταθερότητα. Δεδομένου ότι στα ανώτερα τμήματα της καταγματικής γραμμής το άνοιγμα αυξάνεται θεωρήθηκε επιθυμητή η ενίσχυση των τρόπων οστεοσύνθεσης για καλύτερη σταθερότητα.



Εικόνα 3.9: Ιστογράμματα με τη μέση τιμή του «ανοίγματος» για τα σημεία μέτρησης, μαύρο για το ανώτερο σημείο, λευκό για το κατώτερο.

Το 2015 οι Wang *et al.* συνέκριναν τέσσερις τρόπους εσωτερικής οστεοσύνθεσης για εγκάρσιο κοτυλιαίο κάταγμα [A22]. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 16 συνθετικές (ουρεθάνη) ημιπύελοι, οι οποίες χωρίστηκαν τυχαία σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με τον τρόπο που οστεοσυντέθηκαν. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν ήταν: απλή πλάκα στην κτενιαία επιφάνεια (ομάδα Α), κλειδούμενη πλάκα στην κτενιαία επιφάνεια (ομάδα Β), απλή πλάκα και trans-πλάκα (ομάδα Γ) και απλή πλάκα στην πρόσθια κολώνα και διακαταγματικοί κοχλίες (ομάδα Δ). Τα δοκίμια κάθε ομάδας φορτίστηκαν στην περιοχή της κοτύλης και για κάθε ένα από αυτά λήφθηκαν οι μετρήσεις για την ακαμψία, την οριζόντια και την κάθετη μετατόπιση των κατεαγόντων. Παρατηρήθηκε ότι η οριζόντια και η κάθετη μετατόπιση στην ομάδα Δ ήταν μικρότερες, γεγονός που υποδεικνύει μεγαλύτερη σταθερότητα.

Την ίδια χρονία οι Liu *et al.* πραγματοποίησαν σειρά πειραμάτων με 20 πτωματικές καταγματικές ημιπύελους (εγκάρσιο κάταγμα) για να ελέγξουν τη σταθερότητα διαφορετικών τεχνικών οστεοσύνθεσης [A23]. Οι πέντε τεχνικές που εφαρμόστηκαν στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν: κλειδούμενη πλάκα σε μία εκ των κολώνων (ομάδα Α: πλάκα στην πρόσθια κολώνα και ομάδα Β: πλάκα στην οπίσθια κολώνα), κλειδούμενη πλάκα και διακαταγματικό κοχλία (ομάδα Γ: πλάκα στην πρόσθια κολώνα και διακαταγματικός κοχλίας στην οπίσθια και ομάδα Δ: πλάκα στην οπίσθια κολώνα και διακαταγματικός κοχλίας στην πρόσθια) και διακαταγματικοί κοχλίες και στις δύο κολώνες (ομάδα Ε).

Τα δοκίμια φορτίστηκαν μέχρι τα 2500N και μετρήθηκε το άνοιγμα του κατάγματος. Στις δυο πρώτες ομάδες παρουσιάζονται, με στατιστική σημαντικότητα, μεγαλύτερες μετατοπίσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις ομάδες. Μεταξύ των ομάδων Α και Β, παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές μεγαλύτερες μετατοπίσεις στην ομάδα Β. Στις ομάδες Γ, Δ και Ε δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις στο άνοιγμα των καταγμάτων. Επομένως, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη σταθερότητα με τη χρήση των τεχνικών που εφαρμόζουν εμφυτεύματα και στις δύο κολώνες.

Εκτός από πειραματικές και κλινικές μελέτες που έχουν γίνει για την αξιολόγηση τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγματικών πύελων, οι ερευνητές έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους και σε μελέτες προσομοιωμάτων με τη

χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (in silico μελέτες). Μια τέτοια μελέτη είναι και αυτή που βασίζεται σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.).

Οι Shim *et al.* το 2010 ανέπτυξαν ένα μη γραμμικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της πυέλου και επικύρωσαν αυτό το μοντέλο με ένα πείραμα που πραγματοποίησαν με συνθετικές (κατασκευασμένες από ουρεθάνη) καταγματικές πυέλους [A24]. Η μακροσκοπική συμπεριφορά του κατάγματος καθώς και οι σχετικές μετατοπίσεις που προέκυψαν από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων ήταν σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρόλο που η επικύρωση του αριθμητικού προσομοιώματος δεν βασίστηκε σε πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές πτωματικών πυέλων, το μη γραμμικό μοντέλο Π.Σ. φαίνεται ότι μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη καλύτερων μοντέλων.

Το 2015 οι Yanping *et al.* πραγματοποίησαν μία μελέτη που στόχευε στην αξιολόγηση διάφορων τεχνικών οστεοσύνθεσης για το κατάγμα «Τ» με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων [A25]. Εξετάστηκαν τρεις τρόποι που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι, σύμφωνα με τα κλινικά δεδομένα. Ο πρώτος από αυτούς ήταν η τεχνική με δύο πλάκες-μία σε κάθε κολώνα, ο δεύτερος με μία πλάκα στην πρόσθια κολώνα και κοχλίες στην οπίσθια και ο τρίτος όμοια με μία πλάκα στην πρόσθια κολώνα και διακαταγματικούς κοχλίες. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ήταν η κατανομή των δυνάμεων και των τάσεων και τα επίπεδα ακαμψίας. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι και οι τρεις τρόποι οστεοσύνθεσης δύνανται να φέρουν αποτελεσματικά τα φορτία που ασκούνται στην πύελο. Η τρίτη μέθοδος ωστόσο προσφέρει τη μεγαλύτερη σταθερότητα για την αποκατάσταση του κατάγματος «Τ».

Κεφάλαιο 4
Η τεχνική «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων»
(Digital Image Correlation)

4.1 Εισαγωγή

Η σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης είναι θεμελιώδης και υψίστης σημασίας για την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, δηλαδή για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους.

Η ανηγμένη παραμόρφωση ορίζεται ως ο λόγος της αλλαγής του μήκους του δοκιμίου ως προς το αρχικό του μήκος, $\varepsilon = \Delta L / L_0$ (Εξίσωση 4.1). Για τον υπολογισμό της ανηγμένης παραμόρφωσης έχουν αναπτυχθεί διάφορες πειραματικές μέθοδοι, όπως clip και strain gauges, κ.λπ. Αυτές οι μέθοδοι μετρούν την αλλαγή των επιφανειακών χαρακτηριστικών σε μεμονωμένα σημεία.

Δεδομένου όμως ότι οι ανηγμένες παραμορφώσεις σχετίζονται με πολλές σημαντικές ιδιότητες και παραμέτρους των υλικών (π.χ. το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson κλπ) πολλές φορές απαιτείται η γνώση του συνολικού πεδίου των παραμορφώσεων, επομένως και του πεδίου των μετατοπίσεων, που αναπτύσσεται σε μια περιοχή ενδιαφέροντος του υπό μελέτη δοκιμίου, και όχι σε ένα μόνο σημείο του (ή σε ορισμένα).

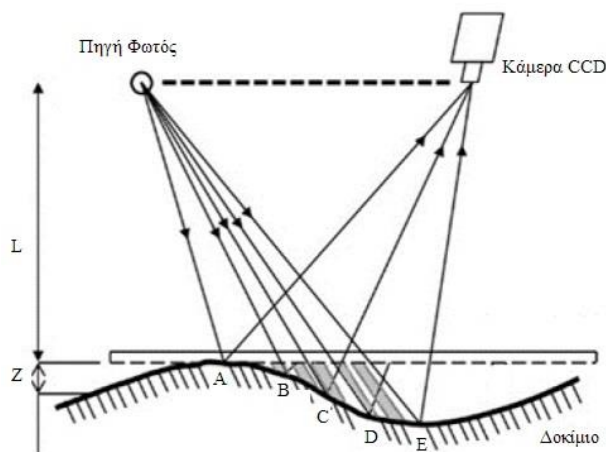
Λύση στο πρόβλημα αυτό δίνουν οι οπτικές μέθοδοι οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης ολόκληρης της επιφάνειας του δοκιμίου και επομένως μπορεί να μετρηθεί το πεδίο των παραμορφώσεων σε ολόκληρη την επιφάνεια. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι η ολογραφία και η συμβολομετρία.

Μια καινοτόμος τέτοια οπτική τεχνική είναι και η τεχνική της Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων (Digital Image Correlation) ή D.I.C. Η τεχνική αυτή είναι σχετικά απλή στην εφαρμογή και ακριβής στις μετρήσεις, η οποία έχει μέχρι σήμερα χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (π.χ. παρακολούθηση ρωγμής κ.λπ.).

Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί μία ανάλυση μαθηματικής συσχέτισης για να εξετάσει δεδομένα ψηφιακών εικόνων, οι οποίες λαμβάνονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ψηφιακές κάμερες λαμβάνουν διαδοχικά φωτογραφίες της επιφάνειας του υπό μελέτη δοκιμίου έτσι ώστε να εκτιμηθεί η αλλαγή στα επιφανειακά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καθώς δέχεται φορτία. Για την εφαρμογή της μεθόδου, απαιτείται η δημιουργία ενός τυχαίου κανάβου κουκκίδων (speckle pattern) στην επιφάνεια του δοκιμίου.

4.2 Σύντομη ανασκόπηση της ανάπτυξης της τεχνικής D.I.C.

Οι οπτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε πειραματικές διαδικασίες. Πριν την ανάπτυξη της μεθόδου της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων, ο προσδιορισμός των διαστάσεων και των παραμορφώσεων των αντικειμένων γινόταν με χρήση κυρίως της φωτογραμμετρίας. Το μειονέκτημα, όμως, της τεχνικής αυτής ήταν η αδυναμία της για ακριβείς μετρήσεις μικρής κλίμακας. Για τον λόγο αυτό, στον τομέα της πειραματικής μηχανικής εφαρμόζονταν συνήθως άλλες οπτικές μέθοδοι (Μέθοδος Moire, Συμβολομετρία κλπ). Η βασική ιδέα της λειτουργίας αυτών των μεθόδων είναι η δημιουργία κροσσών πάνω στο αντικείμενο, η παρατήρηση των οποίων καθιστά εφικτή τη μέτρηση της παραμόρφωσης (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Η μέθοδος Moire [Γ17].

Η φωτογραμμετρία ή αλλιώς η χρήση φωτογραφιών για να αποκτήσουμε πληροφορίες σε σχέση με το σχήμα ενός αντικειμένου χρονολογείται ακόμα από την εποχή που έζησε ο Leonardo da Vinci (1452-1519 μ.Χ.), ο οποίος χρησιμοποίησε την ιδέα της προοπτικής στους πίνακές του. Στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, η αεροφωτογραφία (αρχικά με τη χρήση αερόστατων) χρησιμοποιήθηκε σαν ένα ακριβές μέσο για τη χαρτογράφηση περιοχών [Γ17].

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας στις αρχές της δεκαετίας του 1980, είχε ως αποτέλεσμα την ευρεία χρήση των ψηφιακών καμερών και ως εκ τούτου τη δημιουργία ενός νέου κύματος ανάπτυξης της φωτογραμμετρίας.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούσαν αναλογικά συστήματα, πλέον χρησιμοποιούν κατ' εξοχήν ψηφιακές διαδικασίες. Ενώ η φωτογραμμετρία χρησιμοποιούσε εικόνες από δορυφόρο ή αεροφωτογραφίες, η ψηφιακή επανάσταση έφερε τις οπτικές μετρήσεις μέσα στο εργαστήριο αφού η ακρίβεια και η ευκολία στη χρήση είναι δεδομένες.

Τη δεκαετία του 1980, τα πρώτα πειράματα με τη χρήση της μεθόδου της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Καρολίνας για τον υπολογισμό των επιφανειακών μετατοπίσεων μιας επίπεδης επιφάνειας με τη χρήση ενός σχεδίου στιγμάτων (Sutton *et al.*, 1983). Προς το τέλος της δεκαετίας αυτής, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της στερεοσκοπίας για τη μέτρηση των επιφανειακών μετατοπίσεων στις τρεις διαστάσεις, μιας ανώμαλης επιφάνειας (Kahn-Jetter, *et al.*, 1990). Τη δεκαετία του 1990, η τεχνική D.I.C. εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο πλήθος ποικίλων εφαρμογών (π.χ. σε πειράματα ερπυσμού, κόπωσης καθώς και σε δοκιμές βιολογικών υλικών).

Σήμερα, η τεχνική D.I.C. εξελίχθηκε και μπορεί να εφαρμοστεί και για μετρήσεις μικρής κλίμακας, τάξεως *nano* και *micro*, με χρήση καμερών υψηλής ταχύτητας και ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Καθώς αυτή η τεχνική ικανοποιεί τις υψηλές απαιτήσεις για ακριβείς μετρήσεις, έχει μπει δυναμικά και στο χώρο της βιομηχανίας.

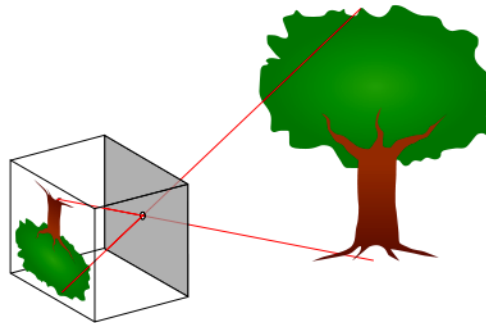
4.3 Αρχές της φωτογραμμετρίας

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας των ψηφιακών καμερών και των υπολογιστικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων, είναι απαραίτητη μια πρώτη ματιά στις βασικές αρχές των φωτογραμμετρικών τεχνικών.

4.3.1 Η πρώτη φωτογραφική μηχανή – Pinhole κάμερα

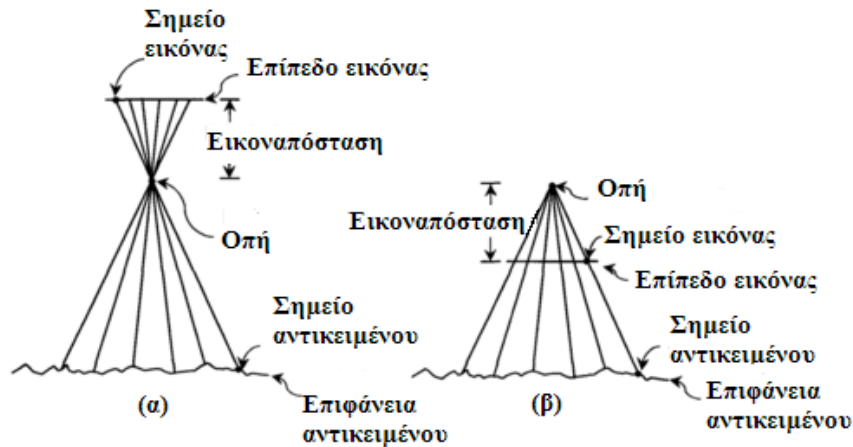
Οι πρώτες φωτογραφίες αποτελούν ουσιαστικά προβολές εικόνων πάνω σε κάποια επιφάνεια. Ως πρώτη φωτογραφική «μηχανή» μπορεί να θεωρηθεί ένα σκοτεινό κουτί ή pinhole κάμερα, η οποία στη μία άκρη της διαθέτει μια

γυαλιστερή επιφάνεια και στην απέναντι μια πολύ μικρή οπή. Σε μία τέτοια κατασκευή, οι ακτίνες του φωτός διαδίδονται μέσα από την οπή και σχηματίζουν πάνω στη γυαλιστερή επιφάνεια ένα είδωλο των αντικειμένων που βρίσκονται έξω από το κουτί (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Μοντέλο pinhole κάμερας [Γ18].

Στην πραγματικότητα, οι φωτογραφικές μηχανές χρειάζονται μία μεγαλύτερη οπή (διάφραγμα) και έναν διαθλαστικό φακό ώστε να μειωθεί ο χρόνος έκθεσης. Παρόλα αυτά, το μοντέλο της pinhole κάμερας δίνει το υπόβαθρο για την κατανόηση της προοπτικής προβολής. Κάθε ακτίνα που «βλέπει» η κάμερα περιγράφεται από τρία σημεία: το σημείο του αντικειμένου, την οπή και το σημείο πάνω στην εικόνα (Εικόνα 4.3α). Η εικοναπόσταση είναι η κάθετη απόσταση από το επίπεδο της εικόνας μέχρι το προοπτικό κέντρο (την οπή). Για τις μηχανές που εστιάζουν στο άπειρο, η εικοναπόσταση είναι ίση με την εστιακή απόσταση. Διαφορετικά, η εικοναπόσταση υπολογίζεται από τις εξισώσεις των φακών. Τα μαθηματικά που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την προοπτική γίνονται καλύτερα κατανοητά όταν το επίπεδο της εικόνας βρίσκεται μπροστά από το προοπτικό κέντρο (οπή) (Εικόνα 4.3β).

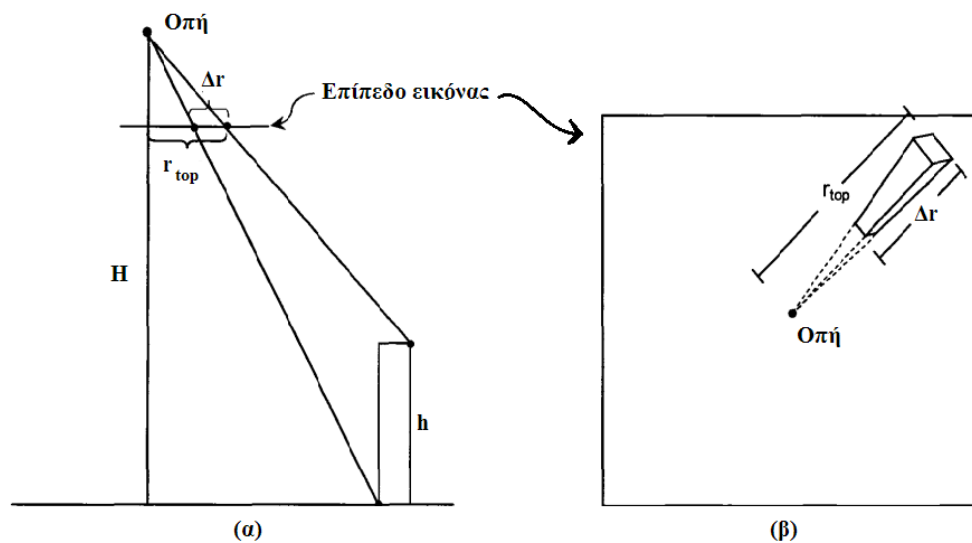


Εικόνα 4.3: Το επίπεδο της εικόνας **α)** πίσω και **β)** μπροστά από το προοπτικό κέντρο [Γ17].

Για τη δισδιάστατη αναπαράσταση ενός αντικειμένου πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια έχουν αναπτυχθεί διάφορες σχέσεις. Υπάρχει μία σχέση αναλογίας μεταξύ του μεγέθους του πραγματικού αντικειμένου (h) και αυτού της αναπαράστασής του πάνω στην επιφάνεια (Δr). Αυτή η αναλογία είναι ο λόγος του εστιακού μήκους (H) προς τη μέγιστη απόσταση του αντικειμένου από το προοπτικό κέντρο (r_{top}), όπως φαίνεται παρακάτω (Εξίσωση 4.2):

$$h = H \frac{\Delta r}{r_{top}} \quad \text{Εξίσωση 4.2}$$

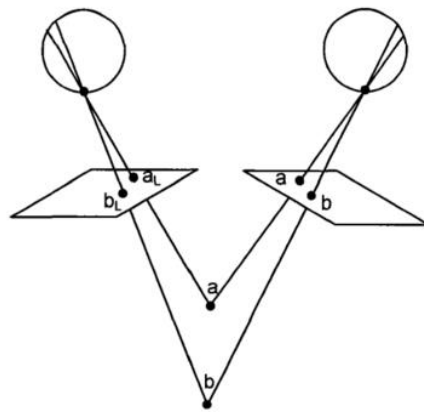
Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται η προβολή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου πάνω στο επίπεδο της εικόνας και εξηγείται η παραπάνω μαθηματική σχέση (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: α) Οι πραγματικές διαστάσεις του αντικειμένου και β) η απεικόνισή του πάνω στο επίπεδο της εικόνας [Γ17].

4.3.2 Στερεοσκοπία

Η στερεοσκοπία είναι μια τεχνική που δημιουργεί την ψευδαίσθηση του βάθους σε μία εικόνα. Στηρίζεται στο ότι η τρισδιάστατη φυσική όραση πραγματοποιείται διότι κάθε μάτι βλέπει το ίδιο αντικείμενο από σχετικά μικρή, αλλά διαφορετική οπτική γωνία, με αποτέλεσμα την ίδια στιγμή ο εγκέφαλος να προσλαμβάνει δύο ελαφρά διαφοροποιημένες εικόνες του ίδιου αντικειμένου (Εικόνα 4.5). Η διαφοροποίηση αυτή ονομάζεται παράλλαξη. Ο εγκέφαλος χρησιμοποιεί αυτές τις οπτικές πληροφορίες από τις διάφορες παράλλαξεις για να προσδιορίσει τη σχετική θέση των αντικειμένων μεταξύ τους και την απόσταση του αντικειμένου από τον παρατηρητή. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και ένα στερεοσκοπικό σύστημα καμερών.



Εικόνα 4.5: Ο τρόπος που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο οπτικό σύστημα την αίσθηση του βάθους.

Για να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο καθορίζεται η ακριβής θέση ενός σημείου στο χώρο, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές εικόνες του, εξετάζεται η διάταξη δύο παράλληλα τοποθετημένων καμερών οι οποίες εστιάζουν στην ίδια επιφάνεια. Η ιδέα της παράλλαξης χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες του σημείου στο χώρο. Η γεωμετρία περιγράφεται καλύτερα στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνες 4.6 και 4.7).

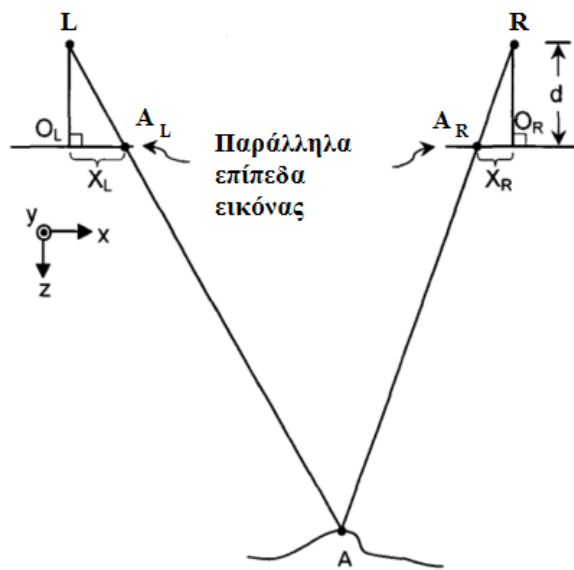
Το σημείο A πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου απεικονίζεται από τα σημεία A_L και A_R . Η απόσταση των σημείων A_L και A_R από τα σημεία O_L και O_R συμβολίζονται ως x_L και x_R , αντίστοιχα. Η παράλλαξη (p) υπολογίζεται, όπως φαίνεται στην εικόνα (Εικόνα 4.7), μεταφέροντας το σημείο της δεξιάς εικόνας στην αριστερή εικόνα, A_R^* . Από όμοια τρίγωνα, η συντεταγμένη z του αντικειμένου μπορεί να υπολογιστεί μέσω της παρακάτω σχέσης (Εξίσωση 4.3). Όμοια, οι συντεταγμένες x και y υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 4.4 και 4.5 (Kahn-Jetter *et al.*, 1990).

$$z_A = B \frac{d}{p} \quad \text{Εξίσωση 4.3}$$

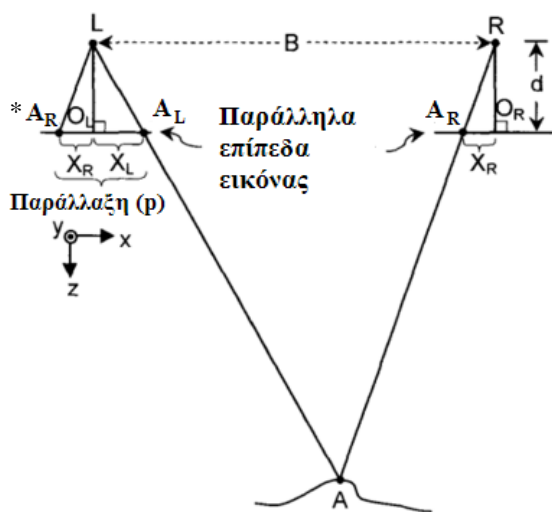
$$y_A = B \frac{y_R}{p} \quad \text{Εξίσωση 4.4}$$

$$x_A = B \frac{x_R + x_L}{2p} \quad \text{Εξίσωση 4.5}$$

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Εικόνα 4.6: Στερεοσκοπική διάταξη με δύο παράλληλα επίπεδα εικόνας [Γ17].

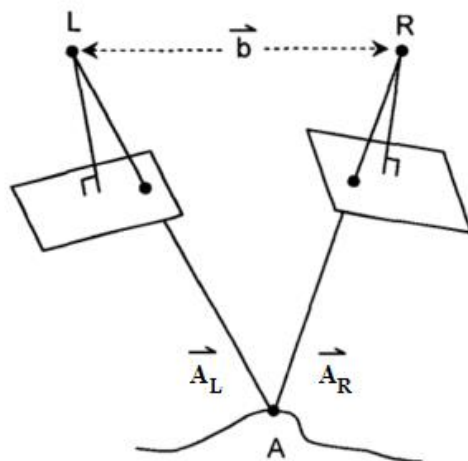


Εικόνα 4.7: Η μέθοδος της παράλλαξης μεταξύ δύο παράλληλων επιπέδων εικόνων [Γ17].

4.3.3 Η μέθοδος της παράλλαξης σε πολύπλοκα συστήματα

Η μέθοδος της παράλλαξης λειτουργεί καλύτερα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες διάταξης (οι κάμερες είναι παράλληλα τοποθετημένες με το επίπεδο του αντικειμένου) και με σφάλμα μικρότερο του $\pm 2\%$ στον υπολογισμό του λόγου z/d (από Εξίσωση 4.3), όταν οι κάμερες έχουν κλίση μέχρι και 5° (Kahn-Jetter *et al.*, 1990). Παρόλα αυτά, οι περισσότερες διατάξεις έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας (τρεις για τη θέση και τρεις για την περιστροφή), οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την πλήρη περιγραφή της σχετικής θέσης των δύο καμερών. Το γεγονός αυτό αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του μαθηματικού υποβάθρου.

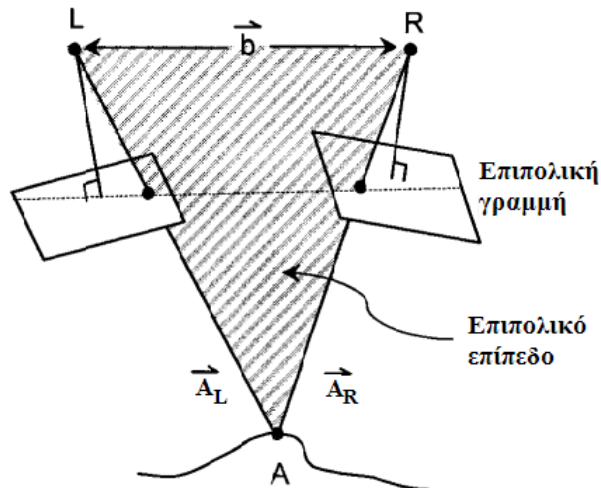
Το διάνυσμα που συνδέει τα σημεία προοπτικής (L και R) και οι ευθείες (ακτίνες) που δημιουργούνται από τα σημεία προοπτικής και από τα συζυγή τους, για την αριστερή και δεξιά κάμερα αντίστοιχα, δημιουργούν ένα τρίγωνο και ως εκ τούτου ένα επίπεδο (Εικόνα 4.8). Το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων ισούται με μηδέν, αφού είναι συνεπίπεδα. Αυτό καθιστά δυνατή την αναζήτηση διάφορων συζυγών σημείων, τέτοιων ώστε να ικανοποιούν την Εξίσωση 4.6.



Εικόνα 4.8: Το επίπεδο που δημιουργείται από το διάνυσμα που συνδέει τα σημεία προοπτικής \vec{b} και τις ευθείες που δημιουργούνται από τα σημεία προοπτικής και από τα συζυγή τους \vec{A}_L και \vec{A}_R [Γ17].

$$\vec{b} * (\vec{a}_L \times \vec{a}_R) = \begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ a_{Lx} & a_{Ly} & a_{Lz} \\ a_{Rx} & a_{Ry} & a_{Rz} \end{vmatrix} = 0 \quad \text{Εξίσωση 4.6}$$

Μια δυσκολία που συναντάται στην στερεοσκοπία είναι η συσχέτιση ενός σημείου και στις δύο εικόνες. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των διαφορετικών προσανατολισμών των δύο καμερών. Το επίπεδο που δημιουργεί το παραπάνω τρίγωνο ονομάζεται επιπολικό επίπεδο (Εικόνα 4.9). Αυτό το επίπεδο διχοτομεί κάθε επίπεδο εικόνας δημιουργώντας επιπολικές γραμμές στις εικόνες. Ένα σημείο στο διάστημα θα εμφανίζεται πάνω στην ίδια επιπολική γραμμή σε κάθε επίπεδο εικόνας. Αυτή είναι μία σημαντική τεχνική, η οποία περιορίζει την αναζήτηση του συζυγούς σημείου στην αντίστοιχη επιπολική γραμμή.

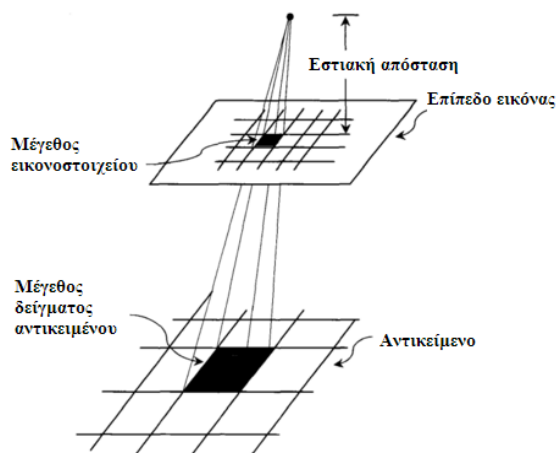


Εικόνα 4.9: Επιπολική γραμμή και επιπολικό επίπεδο σε μια στερεοσκοπική διάταξη [Γ17].

4.4 Ψηφιακή απεικόνιση - Ψηφιακή CCD κάμερα

Οι αρχές της φωτογραμμετρίας, όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως, έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή της λειτουργίας αναλογικών φωτογραφικών μέσων. Η ψηφιακή απεικόνιση χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές Μηχανικής επειδή δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων. Οι αρχές που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλογικές κάμερες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στις ψηφιακές. Οι μεγάλες ταχύτητες επεξεργασίας και τα υψηλής ποιότητας γραφικά έχουν καταστήσει τη ψηφιακή φωτογραμμετρία ένα από τα πιο αποτελεσματικά εργαλεία για τον υπολογισμό των διαστάσεων των αντικειμένων.

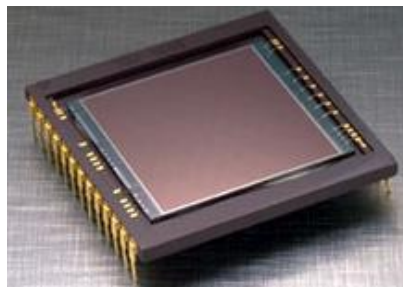
Μια ψηφιακή εικόνα $i(m,n)$ αναπτύσσεται σε ένα διακριτό χώρο δύο διαστάσεων (πάνω στο επίπεδο εικόνας) και παράγεται από την ψηφιοποίηση μιας αναλογικής εικόνας $i(x,y)$ που αναπτύσσεται σε ένα συνεχή χώρο με διαστάσεις x και y . Η συνεχής εικόνα διαιρείται σε N σειρές και M στήλες. Τα σημεία τομής των σειρών με τις στήλες είναι τα εικονοστοιχεία (*pixels*). Το μέγεθος του εικονοστοιχείου και η εστιακή απόσταση καθορίζουν το μέγεθος του δείγματος του αντικειμένου, που είναι ουσιαστικά η προβολή του μεγέθους του εικονοστοιχείου πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου (Εικόνα 4.10).



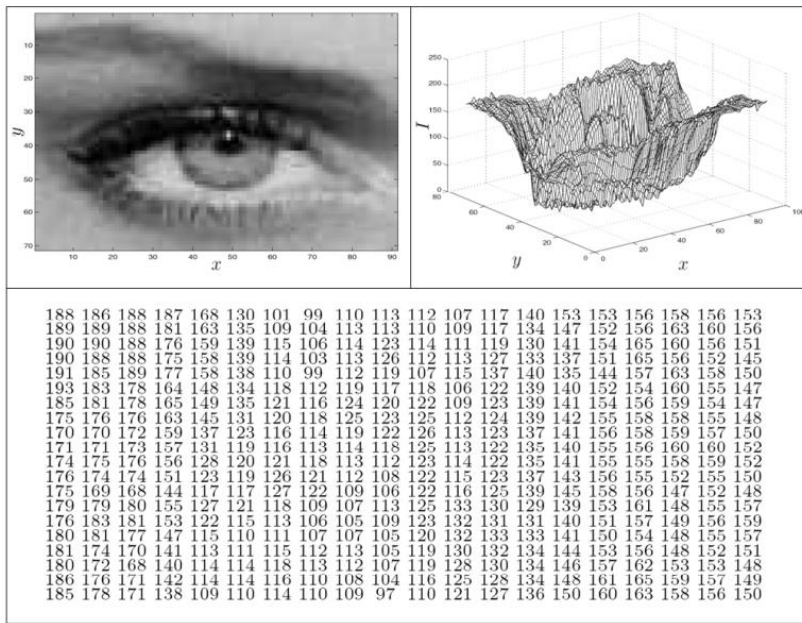
Εικόνα 4.10: Το μέγεθος του εικονοστοιχείου σε σχέση με το μέγεθος του δείγματος του αντικειμένου [Γ17].

Καθώς η εστιακή απόσταση μειώνεται ή το μέγεθος του εικονοστοιχείου αυξάνεται, η απόσταση του δείγματος του αντικειμένου αυξάνεται. Όσο η προβολή ενός εικονοστοιχείου καταλαμβάνει μεγαλύτερη επιφάνεια, τόσο μειώνεται η χωρική ανάλυση. Θεωρητικά, θα μπορούσε να επιτευχθεί μειώνοντας το μέγεθος του εικονοστοιχείου. Παρόλα αυτά, εξαιτίας των φαινομένων θορύβου, δεν είναι πάντα δυνατό. Όμοια, η εισαγωγή περισσότερων διαβαθμίσεων στην κλίμακα του γκρι, δεν θα συνεισέφερε στη βελτίωση της ανάλυσης της εικόνας (Mikhail *et al.*, 2001). Ωστόσο η εξέλιξη της τεχνολογίας επιτρέπει τη μείωση της επιρροής του θορύβου και τη χρήση άφθονων και μικρότερων εικονοστοιχείων.

Οι κάμερες ψηφιοποιούν το αναλογικό σήμα με τη χρήση ενός «μικρού» ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής Charge-Coupled Device (CCD) (Εικόνα 4.11), που μεταφράζεται ως «συσκευή (ή διάταξη) συζευγμένου φορτίου», είναι ένας καταχωρητής ολίσθησης, μια πολύ μικρή πλάκα πάνω στην οποία βρίσκονται διατεταγμένα έως και μερικά εκατομμύρια στοιχεία ενός ημιαγωγικού υλικού ευαίσθητου στο φως (συνήθως πυριτίου) και χρησιμεύει για τη λήψη ειδώλων (φωτογραφιών και βίντεο). Όταν ο ανιχνευτής εκτίθεται σε μια φωτεινή πηγή, σε καθένα απ' αυτά τα στοιχεία απελευθερώνονται ηλεκτρικά φορτία (ηλεκτρόνια) σε ευθεία αναλογία με τα φωτόνια που πέφτουν πάνω στο στοιχείο. Μετά την έκθεση στο φως ο αριθμός των συγκεντρωμένων ηλεκτρονίων στο κάθε στοιχείο καθορίζει τη φωτεινότητα του αντίστοιχου εικονοστοιχείου, η οποία προσδιορίζεται από μία τιμή της κλίμακας του γκρι με εύρος από 0 έως 255 (όπου η τιμή 0 αντιστοιχεί στο απόλυτο μαύρο και η τιμή 255 στο απόλυτο λευκό). Ένα παράδειγμα ψηφιοποιημένης εικόνας φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.11: Ο ανιχνευτής Charge-Coupled Device (CCD) [Γ19].



Εικόνα 4.12: Παράδειγμα ψηφιοποίησης μιας εικόνας [Γ20].

4.5 Η τεχνική D.I.C.

4.5.1 Η θεωρία των παραμορφώσεων

Η τεχνική της Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων χρησιμοποιεί τη θεωρία της Μηχανικής του Συνεχούς Μέσου για να προσδιορίσει την επιφανειακή και την χωρική μετατόπιση και παραμόρφωση ενός αντικειμένου. Με βάση αυτή τη θεωρία, οι παραμορφώσεις υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 4.7, όπου x, y, z είναι οι αρχικές συντεταγμένες και u, v, w οι αντίστοιχες μετατοπίσεις.

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \\ \epsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \\ \epsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \right\} \text{Εξισώσεις 4.7}$$

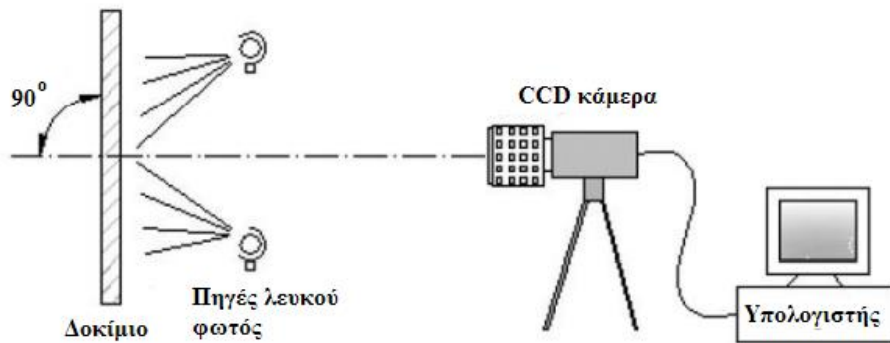
Αυτές οι εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων στη τεχνική συσχέτισης ψηφιακών εικόνων.

4.5.2 Η τεχνική D.I.C. στις δύο διαστάσεις

Η τεχνική της ψηφιακής συσχέτισης εικόνων στις δύο διαστάσεις (2D-D.I.C.) υπολογίζει το πεδίο των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε μια περιοχή του δοκιμίου η οποία εκτελεί κίνηση μόνο σε ένα επίπεδο. Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση μια κάμερας και ένα μοτίβο κουκκίδων που σχεδιάζεται στην επιφάνεια ενδιαφέροντος που προβάλλεται στο επίπεδο της εικόνας (είδωλο). Η κίνηση κάθε κουκκίδας συνδέεται άμεσα με την κίνηση της επιφάνειας του δοκιμίου και παρακολουθείται με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου συσχέτισης. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η μέτρηση των επιφανειακών μετατοπίσεων και στη συνέχεια ο υπολογισμός των επιφανειακών παραμορφώσεων. Η εκτεταμένη έρευνα γύρω από την τεχνική σε παγκόσμιο επίπεδο, την έχει καταστήσει ως μία ισχυρή, οπτική τεχνική πλήρους πεδίου που έχει αποδειχθεί ότι δίνει ικανοποιητικά ακριβείς μετρήσεις μετατόπισης και παραμόρφωσης σε μία επίπεδη επιφάνεια.

4.5.2.1 Παραδοχές για την εφαρμογή της τεχνικής 2D-D.I.C.

Η βασική προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται για την εφαρμογή της τεχνικής της ψηφιακής συσχέτισης εικόνων στις δύο διαστάσεις (2D-D.I.C.) είναι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η επίπεδη επιφάνεια του υπό μελέτη δοκιμίου να είναι παράλληλη με το επίπεδο της εικόνας. Επιπρόσθετα, γίνεται η παραδοχή ότι οι μετατοπίσεις εκτός επιπέδου είναι πολύ μικρές και επομένως έχουν αμελητέα επίδραση στις επιφανειακές μετατοπίσεις (Chu *et al.*, 1985). Στην *Εικόνα 4.13* που ακολουθεί, φαίνεται μία τυπική διάταξη του συστήματος 2D-D.I.C..

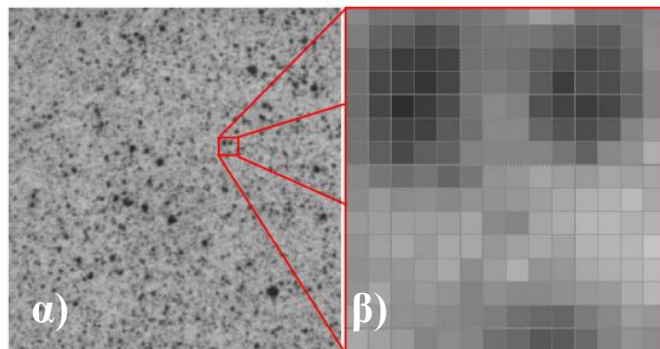


Εικόνα 4.13: Τυπική διάταξη συστήματος 2D-D.I.C [Γ21].

4.5.2.2 Σχέδιο στιγμάτων

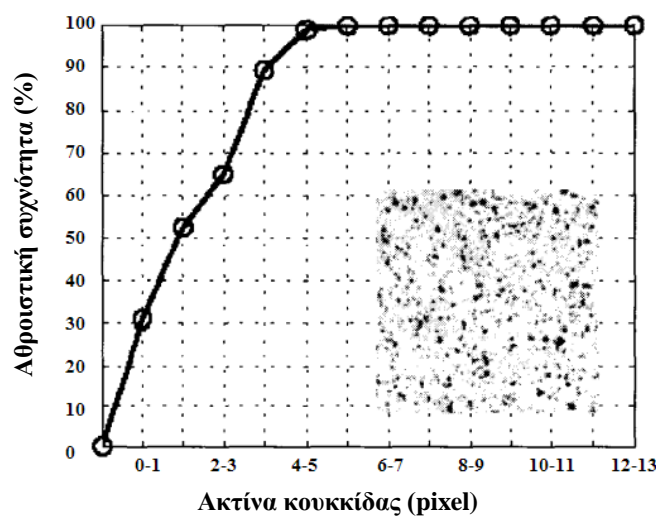
Όπως προαναφέρθηκε, η τεχνική D.I.C. απαιτεί το σχεδιασμό ενός μοτίβου κουκκίδων στην επιφάνεια του δοκιμίου (Εικόνα 4.14α) ώστε το λογισμικό που χρησιμοποιείται να αναγνωρίζει και να υπολογίζει τις επιφανειακές μετατοπίσεις με ακρίβεια.

Ο αλγόριθμος της συσχέτισης, παρακολουθεί την κίνηση ενός τετραγωνικού συνόλου από εικονοστοιχεία, το οποίο ονομάζεται υποπεριοχή (Εικόνα 4.14β). Τα στιγμάτα κάθε υποπεριοχής έχουν ένα χαρακτηριστικό σχέδιο το οποίο τις καθιστά μοναδικές. Ως εκ τούτου, το ιδανικό μέγεθος μιας υποπεριοχής είναι $(2M+1) \times (2M+1)$ εικονοστοιχεία.



Εικόνα 4.14:α) Ένα τυχαίο σχέδιο στιγμάτων και β) ένα τετραγωνικό σύνολο από εικονοστοιχεία (υποπεριοχή) [Γ22].

Οι κουκκίδες θεωρούνται καλές όταν το σχήμα τους είναι μη επαναλαμβανόμενο και όταν έχουν υψηλή αντίθεση συγκριτικά με την επιφάνεια πάνω στην οποία έχουν σχεδιαστεί. Δεδομένου ότι στη φυσική επιφάνεια ενός αντικειμένου δεν είναι πιθανό να εντοπιστεί ένα τέτοιο σχέδιο στιγμάτων, είναι απαραίτητη η δημιουργία του με τεχνητό τρόπο (Asundi, 2000). Η προσεκτική δημιουργία του σχεδίου στιγμάτων είναι απαραίτητη για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Είναι κοινώς αποδεκτό ότι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος δημιουργίας ενός σχεδίου στιγμάτων είναι με τη χρήση λευκής και μαύρης βαφής (spray). Παράδειγμα ενός αποτελεσματικού σχεδίου στιγμάτων φαίνεται στην *Εικόνα 4.15* (Lecompte *et al.*, 2007).



Εικόνα 4.15: Παράδειγμα ενός αποτελεσματικού σχεδίου στιγμάτων [Γ17].

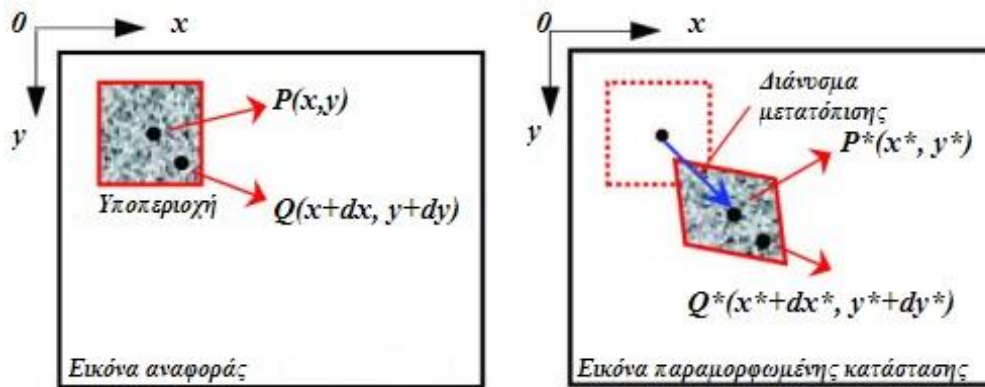
4.5.2.3 Προσδιορισμός σημείων και υποπεριοχών

Ο αλγόριθμος συσχέτισης παρακολουθεί ένα σημείο της επιφάνειας στην εικόνα αναφοράς P με σκοπό να εντοπίσει τη νέα του θέση P^* στην εικόνα της παραμορφωμένης κατάστασης. Κάθε σημείο P βρίσκεται στο κέντρο μιας υποπεριοχής, έχει συντεταγμένες x και y , $(P(x,y))$ και μία τιμή για την ένταση του γκρι $I(P(x,y))$. Η τιμή της έντασης του σημείου στην εικόνα αναφοράς ταυτίζεται με αυτήν στην παραμορφωμένη κατάσταση $I(P^*(x^*,y^*))$ (Εξισώσεις 4.8).

$$\begin{aligned}
 I(P) &= I(x, y), \\
 I^*(P^*) &= I(x^*, y^*) = I(x + u(P), y + v(P)) \\
 I(P) &= I^*(P^*)
 \end{aligned}
 \qquad \text{Εξισώσεις 4.8}$$

Ένα άλλο σημείο Q , το οποίο βρίσκεται σε μια διαφορετική απόσταση από το σημείο P και μέσα στην ίδια υποπεριοχή (Εικόνα 4.16), έχει συντεταγμένες $x+dx$ και $y+dy$ και μία τιμή για την ένταση του γκρι $I(Q)$ στην απαραμόρφωτη κατάσταση και $I(Q^*)$ στην παραμορφωμένη, όπως φαίνονται παρακάτω (Εξισώσεις 4.9).

$$\begin{aligned}
 I(Q) &= I(x + dx, y + dy), \\
 I^*(Q^*) &= I(x^* + dx^*, y^* + dy^*) = I(x + u(P) + dx^*, y + v(P) + dy^*) \\
 I(Q) &= I^*(Q^*)
 \end{aligned}
 \qquad \text{Εξισώσεις 4.9}$$



Εικόνα 4.16: Οι θέσεις των σημείων P, Q πριν και μετά τη παραμόρφωση [Γ17].

Οι αποστάσεις dx^* και dy^* συνδέονται με τα dx και dy σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις (Εξισώσεις 4.10).

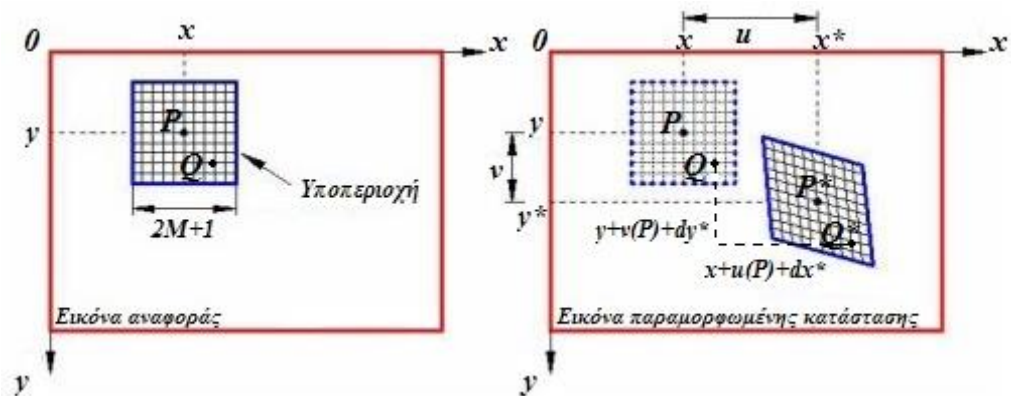
$$\begin{aligned}
 dx^* &= \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + dx \\
 dy^* &= \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy + dy
 \end{aligned}
 \qquad \text{Εξισώσεις 4.10}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$I^*(Q^*) = I\left(x + u(P) + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + dx, y + v(P) + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy + dy\right)$$

Εξίσωση 4.11

Αυτές οι εξισώσεις αποδεικνύουν πως αν είναι γνωστές οι μετατοπίσεις του σημείου P καθώς και η σχετική θέση του σημείου Q , τότε είναι δυνατό να προσδιοριστεί η νέα θέση του σημείου P^* . Με τον ίδιο τρόπο είναι δυνατό ο υπολογισμός της νέας θέσης των Q^* για κάθε Q που βρίσκεται μέσα στην υποπεριοχή (Εικόνα 4.17). Σε αυτήν την ιδέα στηρίζεται και ο αλγόριθμος συσχέτισης για την καταγραφή της κίνησης.

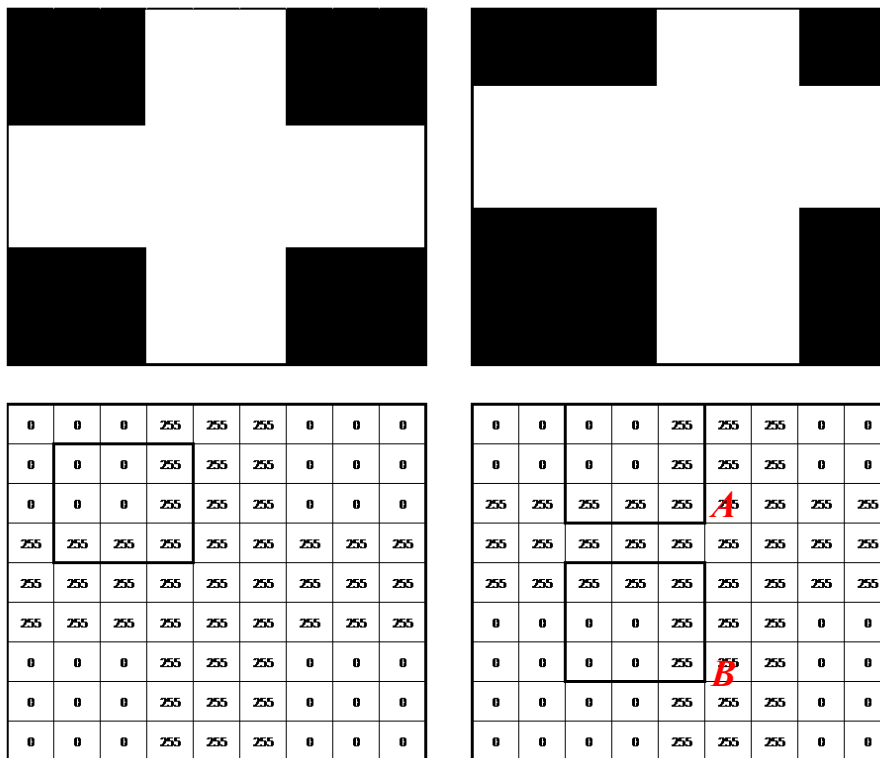


Εικόνα 4.17: Ο υπολογισμός των νέων θέσεων των σημείων P και Q [Γ17].

4.5.2.4 Αλγόριθμοι συσχέτισης

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τη συσχέτιση ψηφιακών εικόνων, καθένας με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του. Ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος κρίνεται με βάση την αξιοπιστία του για την ακρίβεια των μετρήσεων και την υπολογιστική ταχύτητα. Δύο προβλήματα, για παράδειγμα, στα οποία θα πρέπει να δίνει λύση ο αλγόριθμος, αφορούν στην παρεμβολή σε επίπεδο υπό-εικονοστοιχείου και στις αλλαγές του φωτισμού κατά τη διάρκεια ενός πειράματος. Παρακάτω, ακολουθεί μία επισκόπηση της ιδέας στην οποία βασίζεται ο αλγόριθμος.

Η εικόνα αναφοράς διαιρείται σε πολλές υποπεριοχές. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί το κεντρικό σημείο P (σημείο αναφοράς) κάθε μιας υποπεριοχής για να την εντοπίσει στην παραμορφωμένη κατάσταση. Όταν για κάθε τέτοια υποπεριοχή ταυτοποιείται η αντίστοιχη υποπεριοχή της παραμορφωμένης κατάστασης δημιουργείται το πλήρες πεδίο των μετατοπίσεων. Κάθε υποπεριοχή μπορεί να περιγραφεί από έναν χαρακτηριστικό πίνακα διαστάσεων $(2M+1) \times (2M+1)$ εικονοστοιχείων, οι τιμές του οποίου λαμβάνονται από τη διαβάθμιση στην κλίμακα του γκρι (0-255), όπως έχει ήδη αναφερθεί (Εικόνα 4.18).



Εικόνα 4.18: Χαρακτηριστικός πίνακας διαστάσεων $(2M+1) \times (2M+1)$ εικονοστοιχείων. Φαίνεται η νέα θέση της υποπεριοχής, θέση A [Γ17].

Ένα από τα πιο συχνά υιοθετούμενα κριτήρια για τη διαδικασία της συσχέτισης των υποπεριοχών είναι η Μέθοδος των Τετραγωνικών Διαφορών (Sum of Squared Differences ή SSD), όπως δίνεται στην Εξίσωση 4.12

$$C_{SSD}(x, y, u, v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [I(x+i, y+j) - I^*(x+u+i, y+v+j)]^2$$

Εξίσωση 4.12

Ο αλγόριθμος συγκρίνει τη διαβάθμιση του γκρι, εικονοστοιχείο προς εικονοστοιχείο, στην παραμορφωμένη κατάσταση. Η ελαχιστοποίηση της τιμής του συντελεστή C_{SSD} οδηγεί στη βέλτιστη συσχέτιση.

Μια πιο ισχυρή μορφή του παραπάνω κριτηρίου (SSD) δημοσιεύτηκε το 1985 από τον Chu. Ο συντελεστής συσχέτισης C δίνεται ως εξής:

$$C(x, y, u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}) = \frac{\int_{\Delta M^*} I(x, y) \cdot I^*(x+\xi, y+\eta) dA}{\sqrt{\int_{\Delta M} [I(x, y)]^2 dA \cdot \int_{\Delta M^*} [I^*(x+\xi, y+\eta)]^2 dA}}$$

Εξίσωση 4.13

όπου ΔM είναι η υποπεριοχή στην απαραμόρφωτη εικόνα και ΔM^* είναι η υπό εξέταση υποπεριοχή στην παραμορφωμένη κατάσταση. Οι μεταβλητές ξ και η δίνονται από τις εξισώσεις:

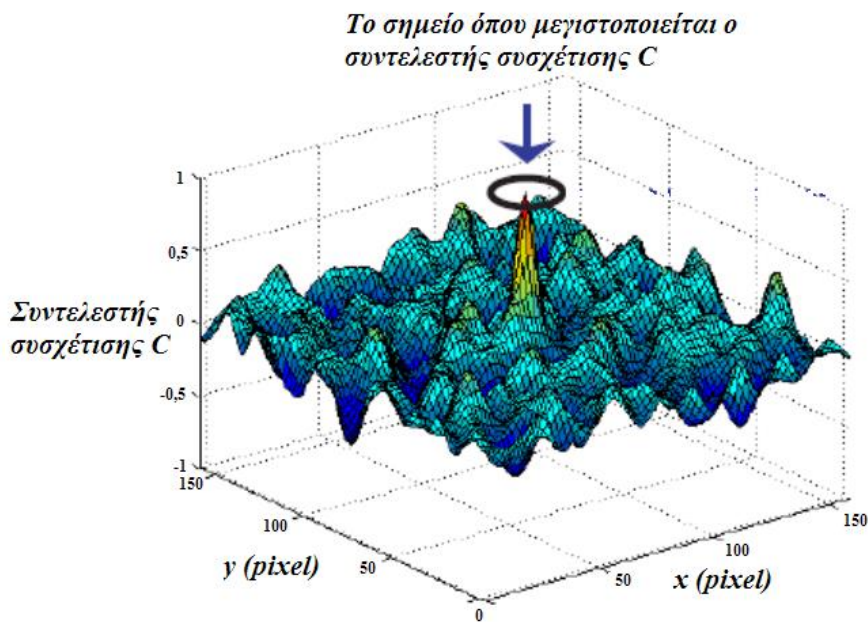
$$\xi = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y$$

Εξισώσεις 4.14

$$\eta = v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y$$

Οι τιμές των $u, v, \partial u/\partial x, \partial u/\partial y, \partial v/\partial x, \partial v/\partial y$ οι οποίες μεγιστοποιούν τον συντελεστή συσχέτισης καθορίζουν την παραμόρφωση της υποπεριοχής (Εικόνα 4.19).

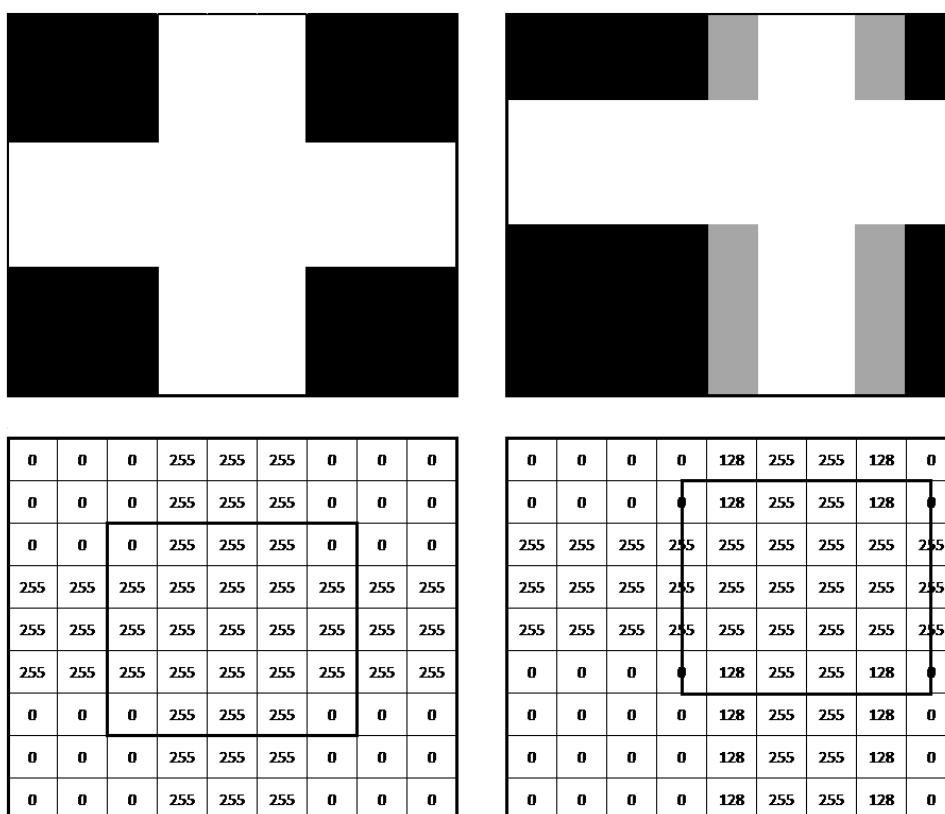
Με τη χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας, όλες οι παραπάνω μεταβλητές παίρνουν μια αρχική τιμή. Στη συνέχεια, μία ακόμα επαναληπτική διαδικασία εξετάζει όλες τις υποπεριοχές της εικόνας.



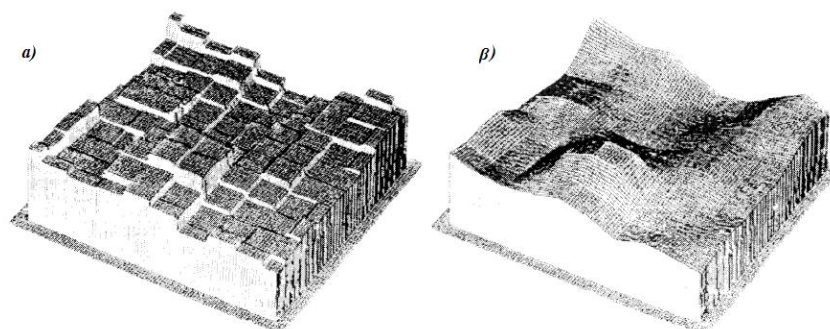
Εικόνα 4.19: Εύρεση του συντελεστή συσχέτισης σε κάθε σημείο της επιφάνειας της παραμορφωμένης εικόνας [Γ17].

Στην περίπτωση που η υποπεριοχή, στην παραμορφωμένη κατάσταση, δεν έχει μετακινηθεί κατά ακέραια τιμή εικονοστοιχείων (Εικόνα 4.20), χρησιμοποιείται παρεμβολή σε επίπεδο υπο-εικονοστοιχείου. Η μέθοδος της παρεμβολής είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία, δεδομένων των τιμών μιας συνάρτησης σε ορισμένα σημεία, προσεγγίζει την τιμή που έχει η συνάρτηση αυτή σε κάποιο άλλο σημείο μεταξύ των δεδομένων σημείων. Υπάρχουν πολλές εκδοχές της μεθόδου αυτής, όπως για παράδειγμα, η διγραμμική παρεμβολή, η δικυβική και η παρεμβολή γειτονικού σημείου. Παρακάτω, φαίνεται ένα παράδειγμα ψηφιοποιημένης εικόνας πριν και μετά την εφαρμογή της διγραμμικής παρεμβολής (Εικόνα 4.21α, β).

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



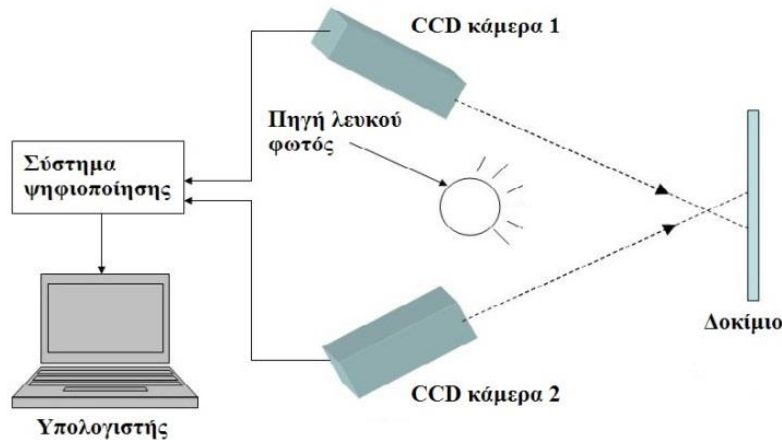
Εικόνα 4.20: Η νέα θέση της υποπεριοχής είναι 1 εικονοστοιχείο προς τα δεξιά και 1,5 εικονοστοιχεία προς τα πάνω σε σχέση με την αρχική [Γ17].



Εικόνα 4.21:α) Διακριτή κατανομή των διαβαθμίσεων του γκρι (σε επίπεδο εικονοστοιχείου) και β) συνεχής κατανομή μετά την εφαρμογή της μεθόδου της διγραμμικής παρεμβολής [Γ17].

4.5.3 Η τεχνική της Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων στις τρεις διαστάσεις: 3D-D.I.C.

Η τεχνική 3D-D.I.C. απαιτεί τη χρήση δύο καμερών και επιτρέπει τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων στο χώρο. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται είναι πιο σύνθετοι συγκριτικά με το 2D-D.I.C. και απαιτείται βαθμονόμηση των καμερών πριν από κάθε πείραμα. Χρησιμοποιεί τις βασικές αρχές της στερεο-φωτογραμμετρίας που περιγράφηκαν παραπάνω. Έχει, επίσης, τις ίδιες απαιτήσεις για δημιουργία ενός σχεδίου στιγμάτων και χρήση ενός κατάλληλου αλγόριθμου συσχέτισης. Μια τυπική διάταξη του συστήματος 3D-D.I.C. φαίνεται στην *Εικόνα 4.22*:



Εικόνα 4.22: Τυπική διάταξη συστήματος 3D-D.I.C. [Γ17].

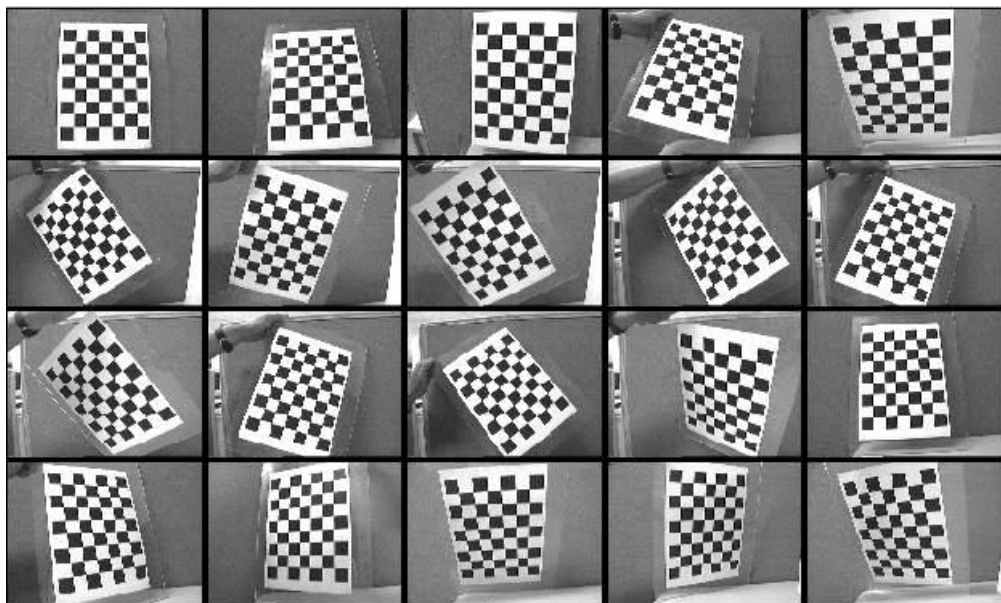
4.5.3.1 Βαθμονόμηση του συστήματος

Όπως έχει αναφερθεί, κατά τη λειτουργία μιας κάμερας, λαμβάνεται φως από το περιβάλλον και προβάλλεται πάνω σε ένα επίπεδο (επίπεδο προβολής). Η διαδικασία αυτή μειώνει τις διαστάσεις των δεδομένων από τρεις σε δύο. Η διαδικασία της βαθμονόμησης καθορίζει «ποιο» εισερχόμενο φως αντιστοιχίζεται σε κάθε σημείο της εικόνας εξόδου, και είναι μια διαδικασία απαραίτητη αν επιθυμείται η εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων από μία εικόνα. Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης των καμερών, υπολογίζεται ένα σύνολο

παραμέτρων. Οι παράμετροι της κάμερας χωρίζονται σε εσωτερικές και εξωτερικές. Οι εσωτερικές παράμετροι αναφέρονται σε κάποιο θεωρητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τις κάμερες, παραδείγματος χάριν, η εστιακή απόσταση και το μέγεθος του εικονοστοιχείου. Οι εξωτερικές παράμετροι καθορίζουν τη θέση και τον προσανατολισμό της κάμερας σε σχέση με το καθολικό σύστημα συντεταγμένων (3 συντεταγμένες θέσης και 3 γωνίες προσανατολισμού).

Για τη βαθμονόμηση μιας κάμερας χρειάζεται ένα σύνολο φωτογραφιών, μέσα στο οποίο μπορεί να ανιχνευθεί ένας αριθμός χαρακτηριστικών σημείων με γνωστή θέση στον τρισδιάστατο χώρο, σύμφωνα με τις αρχές της φωτογραμμετρίας. Συνήθως χρησιμοποιούνται μοντέλα δύο διαστάσεων, όπως άκαμπτες επίπεδες επιφάνειες, πάνω στις οποίες εμφανίζονται γεωμετρικά σχήματα γνωστών διαστάσεων (Calibration panels). Η βαθμονόμηση των καμερών γίνεται βάσει της παρατήρησης αυτών των χαρακτηριστικών σημείων από διαφορετικές οπτικές γωνίες (Εικόνα 4.23).

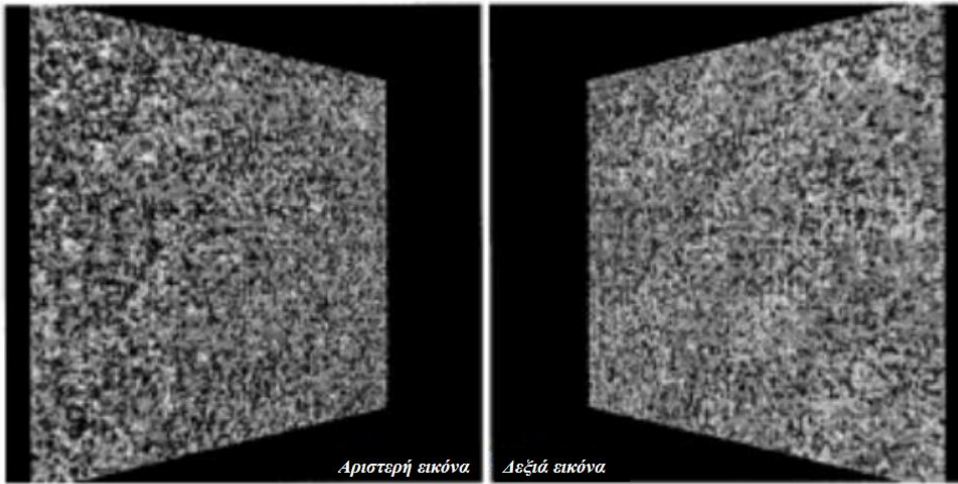
Ο συνδυασμός των ανιχνευμένων δισδιάστατων χαρακτηριστικών με τα τρισδιάστατα δεδομένα, επιτρέπει τον υπολογισμό των παραμέτρων της κάμερας.



Εικόνα 4.23: Φωτογράφιση των calibration panels υπό διαφορετικές γωνίες [Γ17].

4.5.3.2 Μετρήσεις στις τρεις διαστάσεις

Μετά τη διαδικασία της βαθμονόμησης των καμερών, το υπό μελέτη δοκίμιο τοποθετείται μέσα στο οπτικό πεδίο τους. Οι δύο εικόνες που λαμβάνονται από τις δύο κάμερες συσχετίζονται και με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται οι διαστάσεις του αντικειμένου καθώς και η θέση του στο χώρο (Εικόνα 4.24). Πριν την έναρξη του πειράματος, λαμβάνεται το πρώτο ζεύγος φωτογραφιών το οποίο αφορά στην αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το σύστημα λαμβάνει διαδοχικές φωτογραφίες, προκαθορισμένου βήματος, για να τις συσχετίσει με τις εικόνες αναφοράς και τέλος, με τον τρόπο αυτό, να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο πεδίο μετατοπίσεων.



Εικόνα 4.24: Όψεις της επιφάνειας του δείγματος από τις δύο ψηφιακές κάμερες [Γ17].

Κεφάλαιο 5
*Πειραματική διαδικασία και πρωτογενή
δεδομένα*

5.1 Εισαγωγή

Η ταξινόμηση των κοτυλιαίων καταγμάτων αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.1.2. Μια από τις κατηγορίες είναι τα κατάγματα τύπου «T» (πρόσθια κολώνα και οπίσθιο ημιεγκάρσιο) τα οποία συναντώνται συχνά στους ηλικιωμένους (καλούνται και κατάγματα των ηλικιωμένων).

Για την ανάταξη αυτής της κατηγορίας καταγμάτων χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι οστεοσύνθεσης. Η ορθοπεδική κοινότητα καλείται να βρει τον πιο σταθερό από αυτούς, που μεταφράζεται σαν τη μικρότερη παρεκτόπιση των κατεαγόντων κατά τη φόρτιση. Στην παρούσα εργασία μελετάται πειραματικά η απόκριση διάφορων τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγματικών ημιπύελων, κατά τη διάρκεια φόρτισης.

Για την υλοποίηση των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν 19 οστεοπορωτικές ημιπύελοι, στις οποίες είχε δημιουργηθεί τεχνητό κάταγμα τύπου «T» και εν συνεχεία είχαν υποβληθεί σε πέντε διαφορετικούς τρόπους οστεοσύνθεσης και ομαδοποιήθηκαν ανάλογα. Τα δοκίμια φορτίστηκαν στην περιοχή της κοτύλης με τρόπο που να προσομοιώνεται η φόρτισή τους στην όρθια στάση.

Τα πειράματα εκτελέστηκαν υπό “οιονεί στατικές” συνθήκες με έλεγχο της μετατόπισης. Για την παρατήρησή τους και για την καταγραφή των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε σύστημα 3-D D.I.C. καθώς και γέφυρα. Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν αφορούν στη συσχέτιση του φορτίου και της σχετικής μετακίνησης των κατεαγόντων. Συγκεκριμένα, τα πρωτογενή δεδομένα που λήφθηκαν είναι τα εξής:

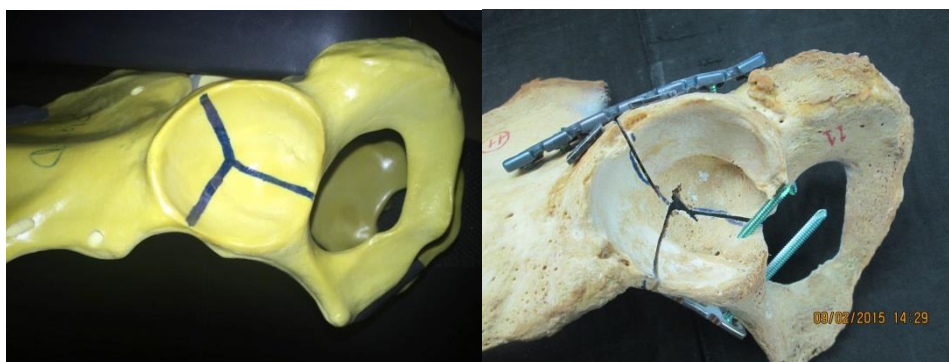
- Φορτίο
- Μετατόπιση της αρπάγης του πλαισίου φόρτισης
- Σχετική μετατόπιση των σημείων εφαρμογής δύο clip gauges και
- Ψηφιακές φωτογραφίες από το σύστημα 3-D D.I.C.

5.2 Δοκίμα και τρόποι οστεοσύνθεσης

Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής και Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Α.Υ./Ε.Μ.Π.). Το πειραματικό πρωτόκολλο περιελάμβανε 19 πτωματικές ημιπυέλους στις οποίες αρχικά δημιουργήθηκε με τεχνητό τρόπο (Εικόνα 5.1), κάταγμα τύπου «Τ» (ταξινόμηση κατά *Letournel*: κάταγμα στην πρόσθια κολώνα και οπίσθιο ημιεγκάρσιο κάταγμα) (Εικόνα 5.2α), και στη συνέχεια οστεο-συντέθηκαν με πέντε διαφορετικούς τρόπους. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα τυπικό δοκίμιο (Εικόνα 5.2β).



Εικόνα 5.1: Σχεδιασμός κατάγματος «Τ».



Εικόνα 5.2: Η όψη του κατάγματος «Τ» στην κοτύλη α) στο προσομοίωμα και β) σε ένα δοκίμιο.

Τα δοκίμια αριθμήθηκαν και ταξινομήθηκαν σε πέντε ομάδες, βάσει της τεχνικής οστεοσύνθεσής τους και μόνο, καθώς το φύλο και η πλευρά (δεξί ή αριστερό ανώνυμο οστό) δεν παρουσιάζουν σημαντική στατιστική συσχέτιση. Η εν λόγω ταξινόμηση παρουσιάζεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Ομάδα	A/A	Πρόσθια Κολώνα	Οπίσθια Κολώνα
i. 2 Πλάκες	3	Plate	Plate
	10	Plate	Plate
	11	Locking Plate	Locking Plate
	12	Plate	Plate
ii. Πλάκα και Κοχλίας	5	Plate	Screw
	6	Plate	Screw
	8	Plate	Screw
	9	Plate	Screw
iii. Κλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας	7	Locking Plate	Screw
	14	Locking Plate	Screw
	15	Locking Plate	Screw
iv. Κλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα	2	Plate	Locking Plate
	13	Plate	Locking Plate
	18	Plate	Locking Plate
	19	Plate	Locking Plate
v. Πλάκα (Stoppa [*]) και Πλάκα	1	Plate (Stoppa)	Locking Plate
	4	Plate (Stoppa)	Plate
	16	Plate (Stoppa)	Locking Plate
	17	Plate (Stoppa)	Plate

Πίνακας 5.1: Η ομαδοποίηση των δοκιμίων.

^{*} Η Stoppa αποτελεί διαφορετική χωροθέτηση της πλάκας στην πρόσθια κολώνα.

Τα υλικά οστεοσύνθεσης (Εικόνα 5.3) που χρησιμοποιήθηκαν, είναι:

- Κλασικές πλάκες και κοχλίες 3.5 mm (plates, screws)
- Κλειδούμενες πλάκες και κλειδούμενοι κοχλίες (locking plates, locking screws)



Εικόνα 5.3: Τα υλικά οστεοσύνθεσης που χρησιμοποιήθηκαν.

5.3 Πειραματικός εξοπλισμός

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός της μονάδας Εμβιομηχανικής του Ε.Α.Υ./Ε.Μ.Π.:

- Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή για την τεκμηρίωση των δοκιμών
- Διάταξη της πειραματικής τεχνικής της συσχέτισης ψηφιακής εικόνας 3D-D.I.C., της εταιρείας *Limess* (κάμερες και λογισμικό *Istra4d*)
- Ηλεκτρομηχανικό πλαίσιο φόρτισης, *MTS INSIGHT 10 kN*, το οποίο ελέγχεται από το λογισμικό *TestWorks 4*. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι ειδικά σχεδιασμένο για πειράματα Εμβιομηχανικής. Έχει την δυνατότητα ακριβούς καταγραφής του ασκούμενου φορτίου στο δοκίμιο

κάθε χρονική στιγμή μέσω κατάλληλης εξαιρετικά ευαίσθητης δυναμοκυψέλης (load cell) η οποία έχει ευαισθησία 0,01N.

- Δύο ηλεκτρονικοί υπολογιστές με τα αντίστοιχα λογισμικά: *Istra4D* και *Testworks 4*
- Πλάκες βαθμονόμησης (calibration panels) της εταιρείας *Dantec*
- Διάταξη στήριξης δοκιμίων (με ειδική μέγγενη με τρεις βαθμούς ελευθερίας και υλικά για την απορρόφηση των κραδασμών κατά την επιβολή φορτίου)
- Αλφάδι για την τεκμηρίωση της γωνίας των 45° (προσομοίωση όρθιας στάσης)
- Κατάλληλο κυπέλιο για την προσομοίωση του χόνδρου στην περιοχή της κοτύλης
- Προσομοίωμα κεφαλής μηριαίου οστού
- Δύο clip gauges (*Instron COD 122, 116*)
- Συσκευή καταγραφής δεδομένων (γέφυρα)
- Δύο πηγές λευκού φωτός
- Ηλεκτρονικό παχύμετρο

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και τα εξής αναλώσιμα:

- Λευκό και μαύρο matt spray
- Ισχυρή κόλλα για τη σταθεροποίηση των clip gauges

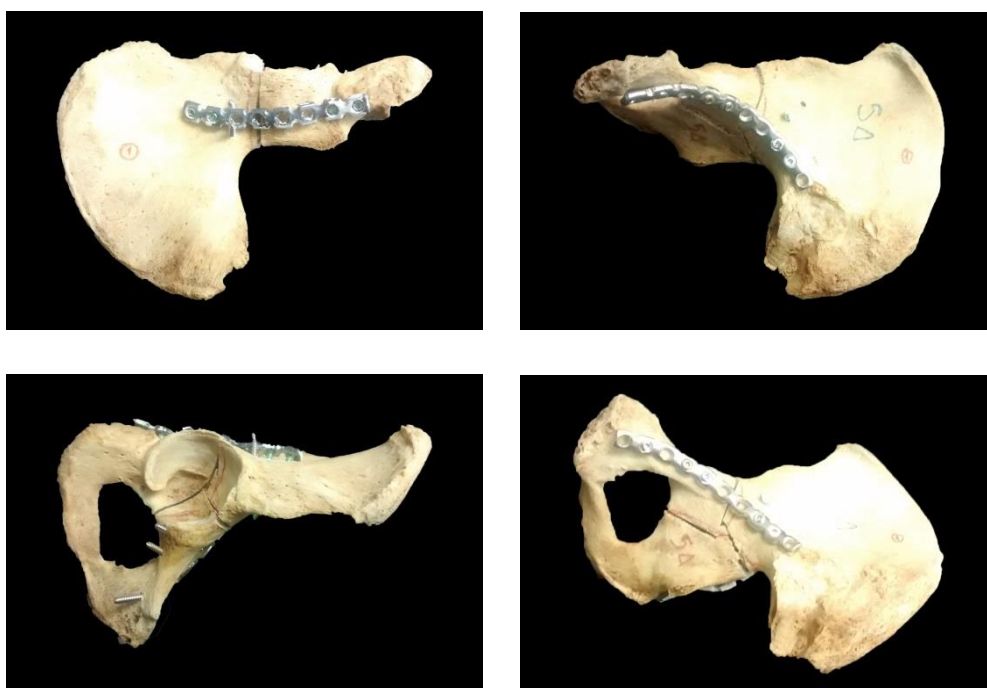
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος 3D-D.I.C. της *Limess*.

Εύρος του Πεδίου Μέτρησης:	10 mm ² - 100 m ²
Ακρίβεια των μετατοπίσεων:	0,01 pixel
Ακρίβεια των ανηγμένων παραμορφώσεων:	200 μstrains (=0,02%)

Πίνακας 5.2: Τεχνικές Προδιαγραφές του Συστήματος D.I.C. [Γ23].

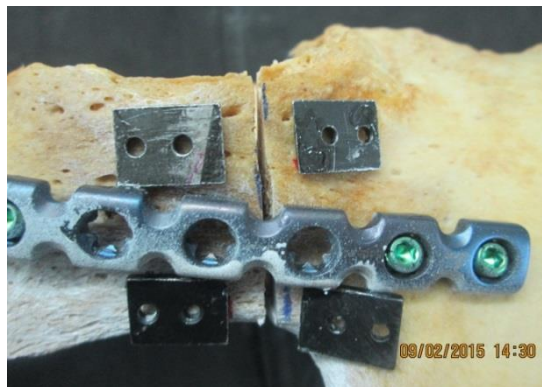
5.4 Προετοιμασία των δοκιμίων και πειραματική διάταξη

Η πειραματική διαδικασία ξεκινούσε με την τεκμηρίωση του κάθε δοκιμίου με τη λήψη τεσσάρων φωτογραφιών: της οπίσθιας και της πρόσθιας κολώνας, της κοτύλης και της επάνω και πίσω όψης, όπως αυτή φαίνεται από τις κάμερες (Εικόνες 5.4–5.7). Ακολουθούσε η σημείωση οποιασδήποτε αξιολόγησης ανατομικής παρατήρησης σε ειδικό φύλλο πειραματικών παρατηρήσεων.



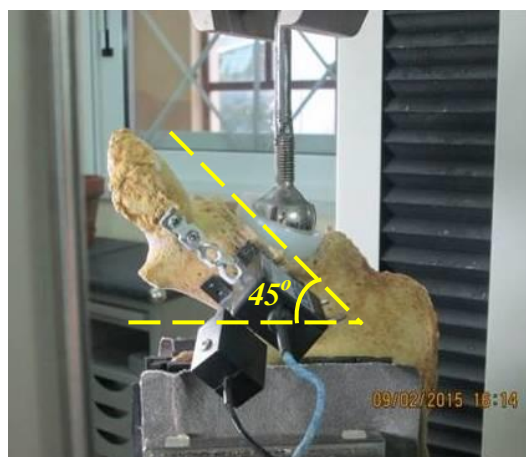
Εικόνες 5.4- 5.7: Οι όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.

Στη συνέχεια, ειδικά μεταλλικά μαχαιρίδια (knife edges) επικολλούνταν στην οπίσθια κολώνα εκατέρωθεν του εγκάρσιου κατάγματος, στα οποία προσαρμόζονται τα clip gauges. Η απόσταση μεταξύ των μαχαιριδίων κάθε ζεύγους ήταν ίση με 1 cm (Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8: Τα ειδικά μαχαιρίδια στην οπίσθια κολώνα

Κάθε δοκίμιο τοποθετούνταν στο πλαίσιο φόρτισης με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνεται η φόρτιση που δέχεται η κοτύλη σε όρθια στάση από το μηριαίο οστό (45 μοίρες) (Εικόνα 5.9). Η στήριξη του δοκιμίου γινόταν με τη βοήθεια μιας διάταξης στήριξης τριών βαθμών ελευθερίας. Για την απορρόφηση των κραδασμών και την ενίσχυση της στήριξης χρησιμοποιούνταν τα παρακάτω υλικά (σπόγγος κ.λπ.).

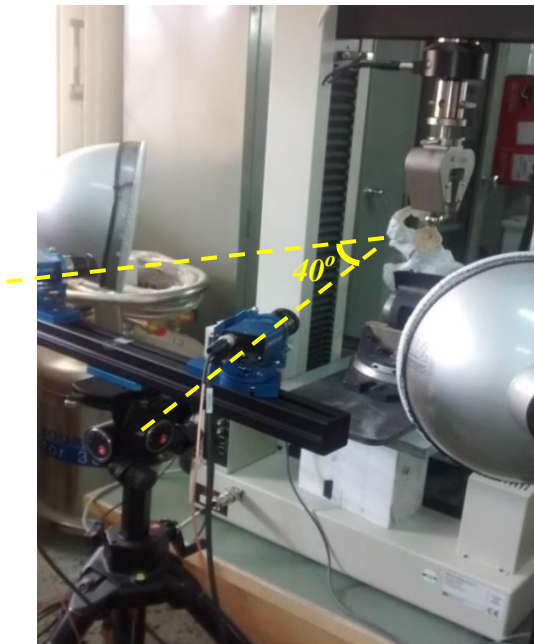


Εικόνα 5.9: Στήριξη του δοκιμίου στο πλαίσιο φόρτισης MTS INSIGHT.

Στη συνέχεια ακολουθούσε το στήσιμο του 3D-D.I.C.. Οι δύο κάμερες (ανάλυσης 1624x1234 pixels) τοποθετούνταν κατάλληλα πάνω σε τρίποδο, κεντρωμένο και οριζοντιωμένο. Οι κάμερες συνδεόταν μέσω καλωδίου με υ-

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

πολογιστή με ειδικό λογισμικό και η θέση τους ρυθμίζονταν έτσι ώστε η μεταξύ τους γωνία να είναι περίπου ίση με 40° , διότι κατ' αυτόν τον τρόπο βελτιστοποιείται η απόδοση του συστήματος (Εικόνα 5.10). Επιπλέον, η ποιότητα της εικόνας βελτιστοποιούνταν με τη ρύθμιση της εστιακής απόστασης και της φωτεινότητας της εικόνας. Τέλος, για τον επαρκή φωτισμό του δοκιμίου, χρησιμοποιούνταν δύο πηγές λευκού φωτός, ώστε να μην επηρεάζονται οι εικόνες που λαμβάνονται από τυχόν αλλαγές του εξωτερικού φωτισμού.

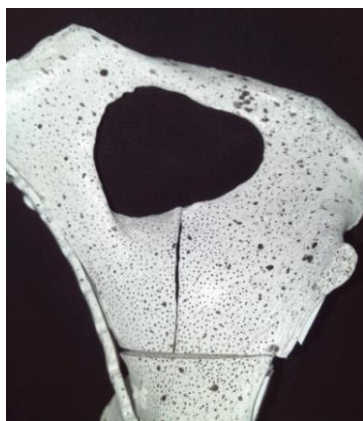


Εικόνα 5.10: Η διάταξη του συστήματος 3-D-D.I.C..

Ο προσδιορισμός του μεγέθους των κουκκίδων που έπρεπε να δημιουργηθούν στο δοκίμιο γινόταν βάσει των εξισώσεων 5.1, αφού αρχικά μετρούνταν οι διαστάσεις του οπτικού παραθύρου (μήκος l και ύψος h , σε mm). Οι τιμές των μεταβλητών a , b πρέπει να είναι περίπου ίσες.

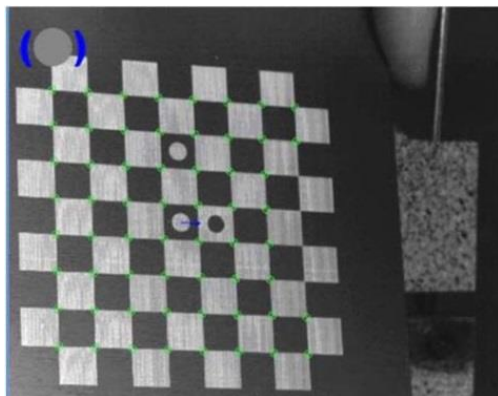
$$\begin{cases} a = \frac{3[\text{pixel}] \cdot l[\text{mm}]}{1624[\text{pixel}]} \\ b = \frac{3[\text{pixel}] \cdot h[\text{mm}]}{1234[\text{pixel}]} \end{cases} \quad \text{Εξισώσεις 5.1}$$

Στη συνέχεια το δοκίμιο απομακρυνόταν από το πλαίσιο φόρτισης και αρχικά βαφόταν με άσπρη μπογιά (με χρήση spray). Ακολουθούσε η δημιουργία του κατάλληλου μεγέθους κουκκίδων με τη βοήθεια μαύρης μπογιάς ώστε να υπάρχει μεγάλη αντίθεση ως προς το λευκό (Εικόνα 5.11).



Εικόνα 5.11: Το σχέδιο στιγμάτων στο δοκίμιο.

Για τη βαθμονόμηση των καμερών επιλεγόταν η κατάλληλη πλάκα βαθμονόμησης, Calibration Panel A1119x9_BMB, (Εικόνα 5.12), η οποία τοποθετούνταν σε τέτοια απόσταση από τις κάμερες όση είναι και η απόσταση μεταξύ των καμερών και του δοκιμίου. Η πλάκα φωτογραφιζόταν υπό διάφορες γωνίες με αποτέλεσμα να προκύπτει ο συντελεστής σφάλματος (residuum) από το λογισμικό, ο οποίος έπρεπε να λαμβάνει τιμή εντός συγκεκριμένου εύρους.



Εικόνα 5.12: Πλάκα βαθμονόμησης, Calibration Panel A1119x9_BMB.

Μετά την επανατοποθέτηση του δοκιμίου στην ίδια ακριβώς θέση και την πάκτωσή του, τοποθετούνταν ο τεχνητός χόνδρος (κατασκευασμένος από πολυαιθυλένιο) μέσα στην κοτύλη (Εικόνα 5.13). Το μηριαίο οστό προσομοιώθηκε με ένα ειδικό μεταλλικό στέλεχος το οποίο προσαρμοζόταν στην άνω αρπάγη του πλαισίου φόρτισης για την επιβολή της δύναμης. Τέλος, τοποθετούνταν τα clip gauges στις θέσεις όπου είχαν επικολληθεί τα μαχαιρίδια (Εικόνα 5.14).



Εικόνα 5.13: Η τοποθέτηση του τεχνητού χόνδρου μέσα στην κοτύλη.



Εικόνα 5.14: Η τοποθέτηση της κεφαλής του προσομοιώματος του μηριαίου οστού στον χόνδρο και η στήριξη των clip gauges.

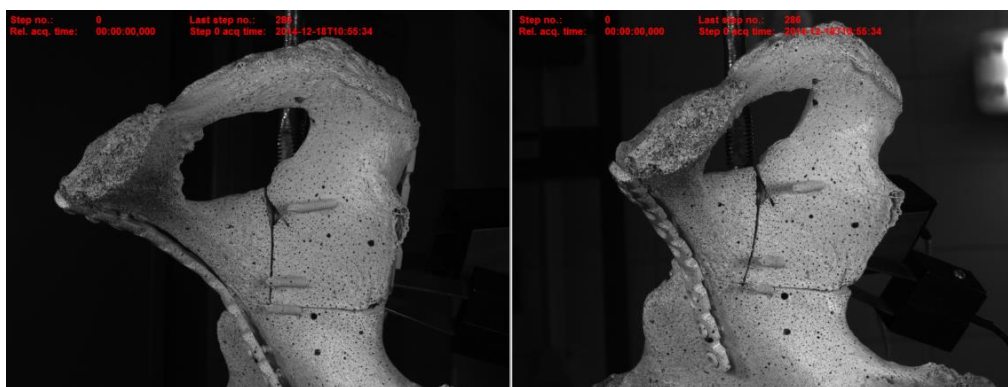
Όλες οι δοκιμές υλοποιήθηκαν με έλεγχο της επιβαλλόμενης μετατόπισης (displacement control) υπό οιονεί σταθερές συνθήκες (quasi-static). Ο ρυθμός επιβολής της μετατόπισης ήταν ίσος με $0,2 \text{ mm/min}$.

Η κατακόρυφη μετατόπιση της τραβέρσας της μηχανής καθώς και η επιβαλλόμενη δύναμη καταγραφόταν μέσω του λογισμικού *Testworks 4*.

Ταυτόχρονα, γίνονταν και όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις της γέφυρας για την ανά δευτερόλεπτο καταγραφή των παρακάτω μεγεθών κατά τη διάρκεια της φόρτισης:

- Channel 1: Δύναμη
- Channel 2: Μετατόπιση τραβέρσας μηχανής
- Channel 3: Clip gauge 1 [μm]
- Channel 4: Clip gauge 2 [μm]

Μέσω του προγράμματος *Istra4D* και σε συμφωνία με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, λαμβανόταν η πρώτη φωτογραφία - εικόνα αναφοράς (*Reference Step*) (Εικόνα 5.15) και ελεγχόταν ως προς τον αριθμό των σημείων που αναγνωρίζει το λογισμικό.



Εικόνα 5.15: Εικόνα αναφοράς από την αριστερή και δεξιά κάμερα.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού λήψης των φωτογραφιών, λαμβάνονταν υπόψη οι εξής παράγοντες (μεταβλητές):

- ο αριθμός των φωτογραφιών (*frames*) που είναι διαθέσιμες (ο οποίος καθορίζεται από το μέγεθος της προσωρινής μνήμης του λογισμικού) (~250-320 *frames*),
- ο ρυθμός επιβολής μετατόπισης ($0,2 \text{ mm/min}$) και
- η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (15 mm) αφού η λήξη του πειράματος είχε οριστεί να πραγματοποιείται μετά την κάλυψη 15 mm .

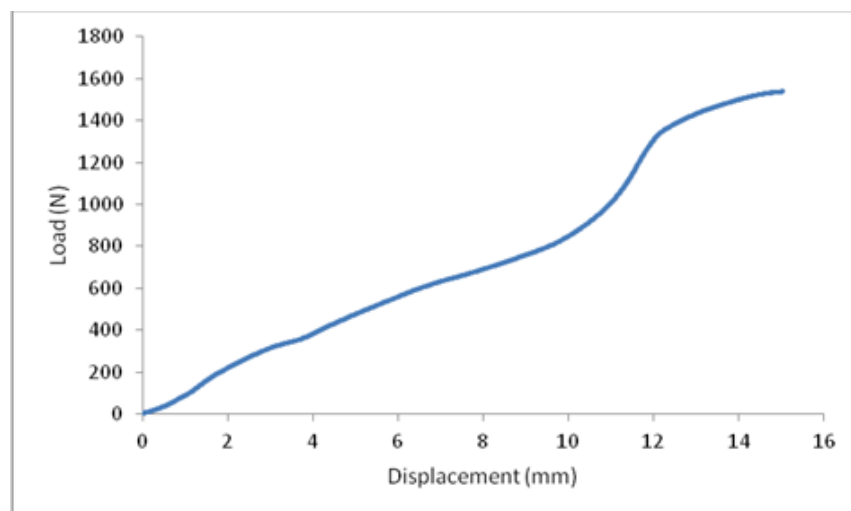
Δηλαδή απαιτούνταν περίπου 4.500 sec για την ολοκλήρωση κάθε πειράματος. Ο ρυθμός λήψης των φωτογραφιών προέκυπτε ίσος με 1 φωτογραφία ανά περίπου $14-20 \text{ sec}$.

5.5 Επεξεργασία πρωτογενών αποτελεσμάτων

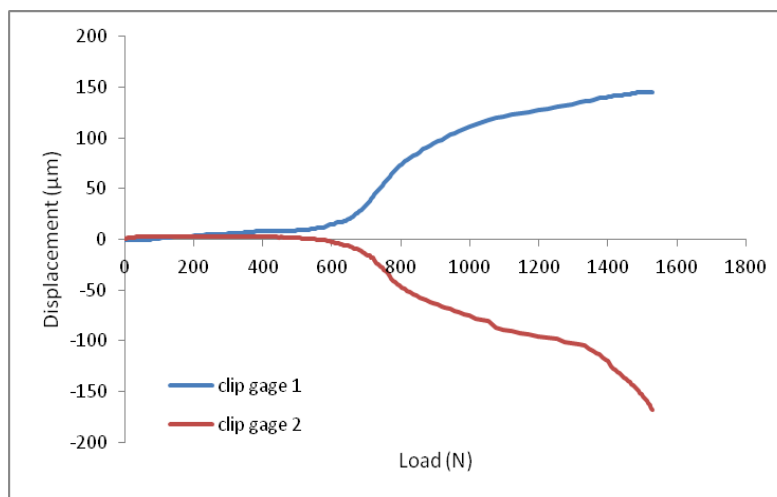
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω των λογισμικών *TestWorks4* και *Istra4D* της μηχανής και του 3D-D.I.C., αντίστοιχα και ακολούθησε η επεξεργασία τους για την εξαγωγή πρωτογενών δεδομένων.

5.5.1 Πρωτογενή δεδομένα γέφυρας

Μετά τη συγκέντρωση των μετρήσεων για τη δύναμη και τη μετατόπιση καθώς και για την αλλαγή απόστασης καθενός από τα clip gauges από τη γέφυρα, πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία τους με το πρόγραμμα *Excel*. Σκοπός ήταν να συσχετιστεί το φορτίο που ασκήθηκε αφενός με την κατακόρυφη επιβαλλόμενη μετατόπιση και αφετέρου με τη σχετική μετατόπιση των clip gauges. Στη συνέχεια, ακολούθησε η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων και η απεικόνισή τους σε γραφικές παραστάσεις. Παρουσιάζονται, παρακάτω, κάποιες ενδεικτικές γραφικές παραστάσεις. (Τα γραφήματα όλων των δοκιμίων παρουσιάζονται αναλυτικά στον δεύτερο τόμο.)



Εικόνα 5.16: Χαρακτηριστική γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



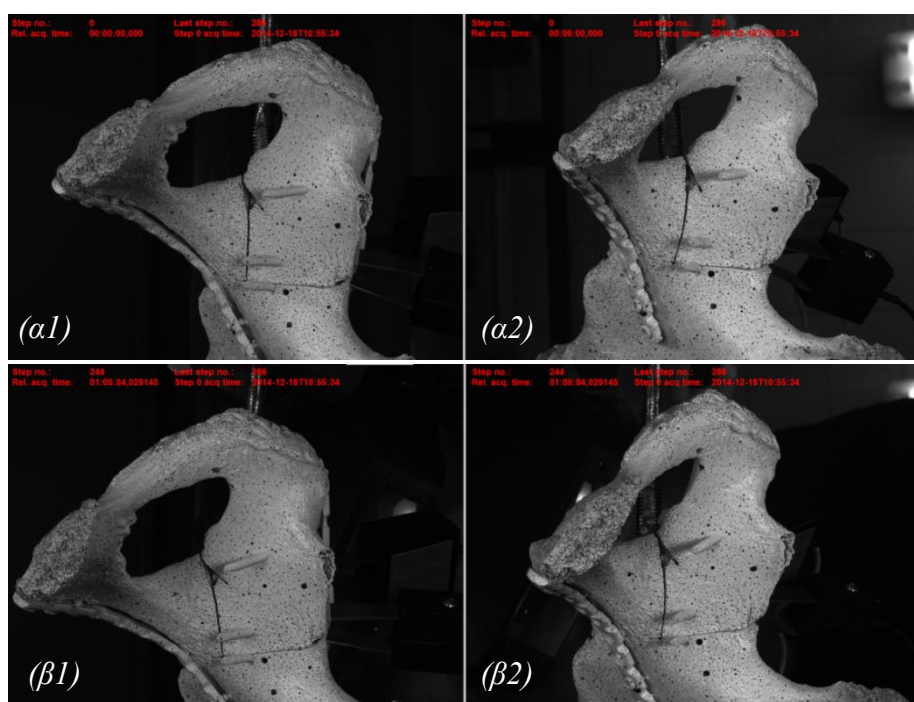
Εικόνα 5.17: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

5.5.2 Πρωτογενή δεδομένα D.I.C.

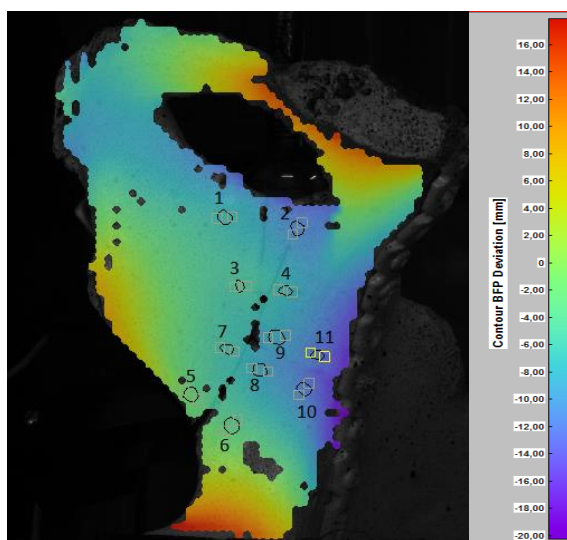
Μετά το πέρας του πειράματος αποθηκεύονταν οι φωτογραφίες και πραγματοποιούνταν η επεξεργασία τους στο πρόγραμμα *Istra4D*.

Στις *Εικόνες 5.18* φαίνονται τα ζεύγη φωτογραφιών πριν την έναρξη και μετά τη λήξη του πειράματος. Στο πρώτο ζεύγος φωτογραφιών (Reference Step), επιλεγόταν μία κουκίδα από το σχέδιο στιγμάτων η οποία συσχετιζόταν στις δύο αυτές φωτογραφίες. Το πρόγραμμα υπολόγιζε τον αριθμό των στιγμάτων που δύναται να συσχετίσει στις δύο φωτογραφίες και με βάση τη βαθμονόμηση που είχε προηγηθεί, δημιουργούταν μια χρωματοκλίμακα η οποία υποδεικνύει σε δισδιάστατη απεικόνιση τις θέσεις των στιγμάτων στο χώρο (*Εικόνα 5.19*).

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

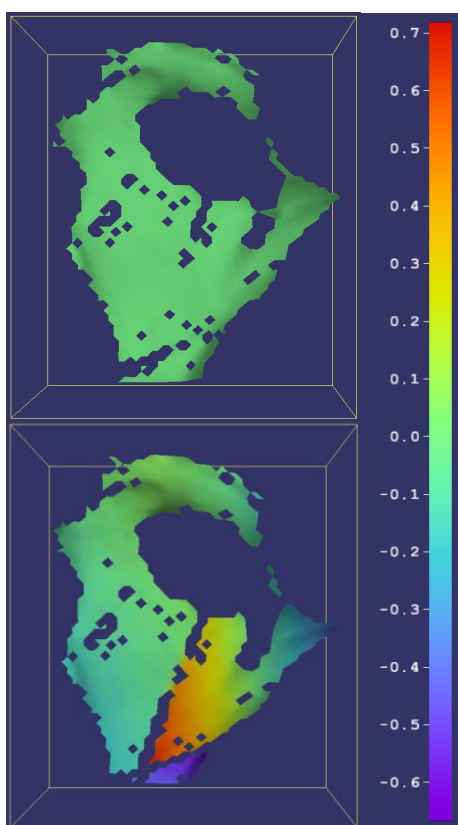


Εικόνα 5.18: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. α) πριν και β) μετά το τέλος της δοκιμής.

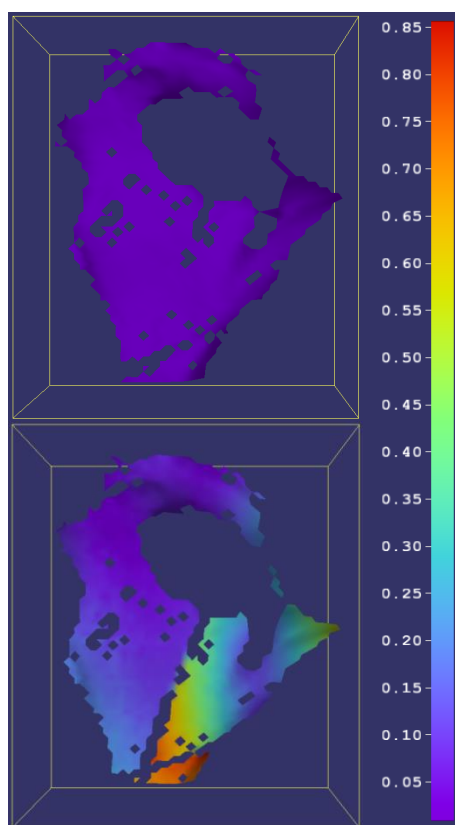


Εικόνα 5.19: Παράδειγμα χρωματοκλίμακας που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα υπολόγιζε τις θέσεις των στιγμάτων στο χώρο, για κάθε ζεύγος φωτογραφιών, καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος (~250-350 φωτογραφίες). Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονταν τα πεδία μετατοπίσεων για κάθε εικόνα σε σχέση με την εικόνα αναφοράς, για κάθε έναν από τους τρεις άξονες αλλά και συνολικά. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα πεδία μετατοπίσεων της τελικής φωτογραφίας σε σχέση με την αρχική (Εικόνες 5.20 έως 5.23).

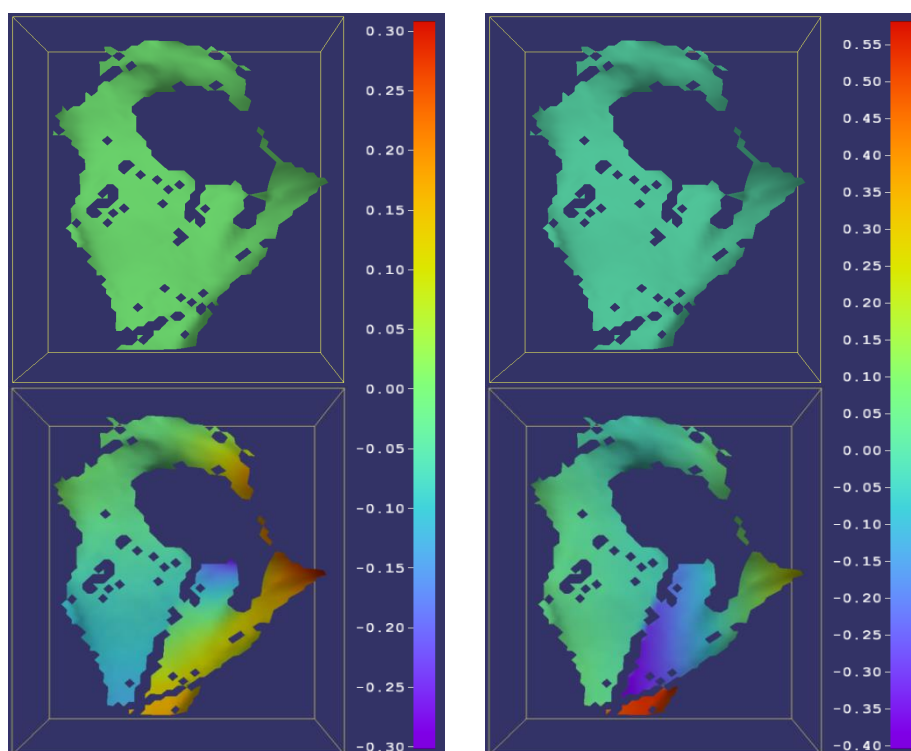


Εικόνα 5.20: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Εικόνα 5.21: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πυέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



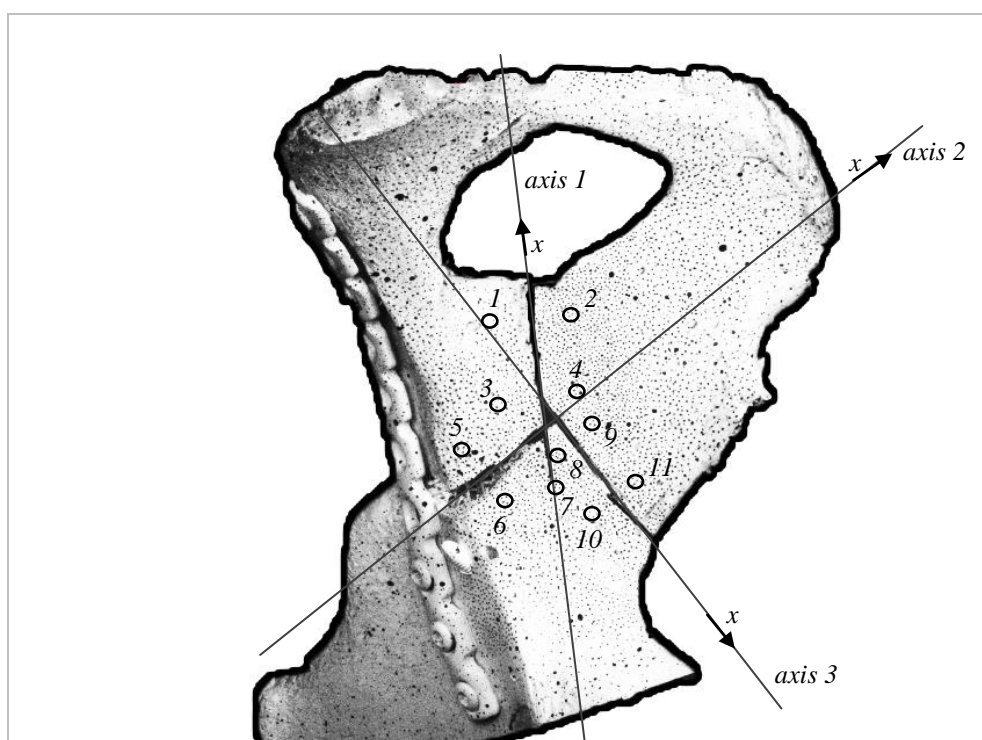
Εικόνα 5.22: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

Εικόνα 5.23: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

5.4 Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων (ψηφιακών εικόνων) από το σύστημα D.I.C.

Κατ' αντιστοιχία με τα πρωτογενή δεδομένα που λήφθηκαν από τη γέφυρα, σκοπός της επεξεργασίας των εικόνων είναι να γίνει συσχέτιση της σχετικής μετατόπισης των κατεαγόμενων της επάνω και πίσω όψης (που καταγράφει το σύστημα D.I.C.), σε σχέση με το φορτίο. Για τον λόγο αυτό ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Το κάταγμα «Γ» έχει χαρακτηριστικό σχήμα, στην από επάνω και πίσω όψη, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα (Εικόνα 5.24). Αποτελείται ουσιαστικά από τρία επιμέρους κατάγματα. Έτσι απαιτείται η μελέτη καθενός από αυτά ξεχωριστά. Υιοθετούνταν, λοιπόν, 3 διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων.



Εικόνα 5.24: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων και τις σχετικές θέσεις των μετρητών (σημεία).

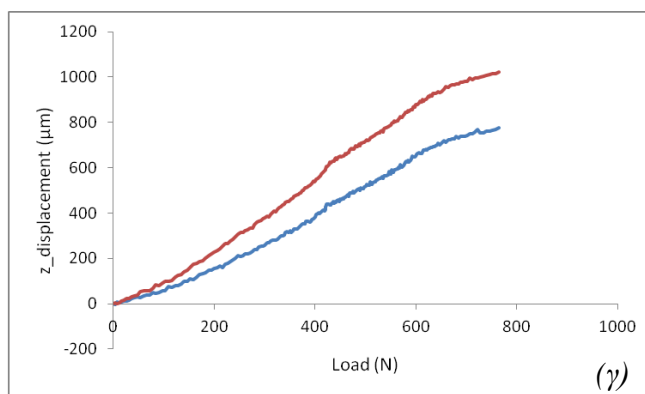
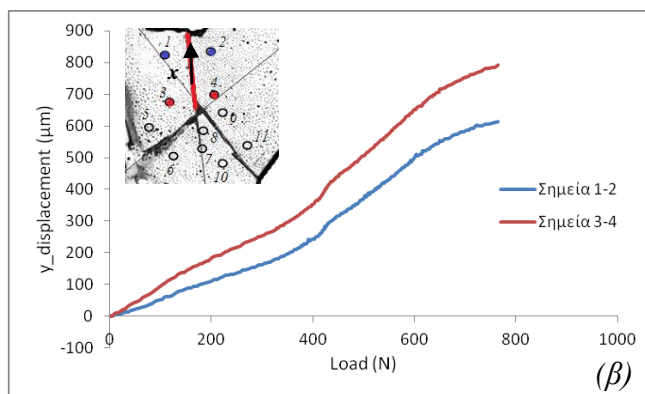
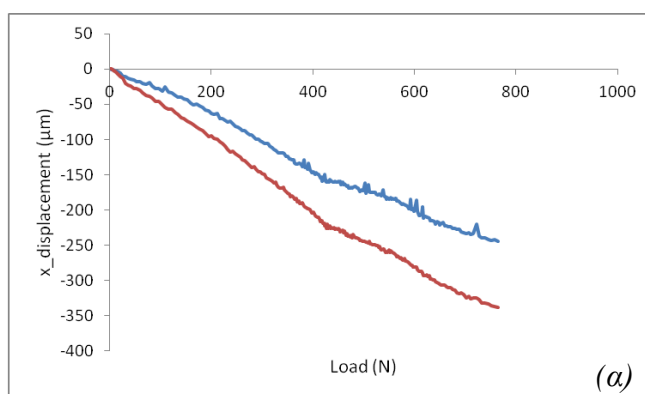
Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 3-7,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 8-9 και 10-11.

Για τον υπολογισμό της σχετικής μετατόπισης των κατεαγόντων, χάρη στην δυνατότητα που προσφέρει το σύστημα για την εκ των υστέρων επιλογή μετρητών και μάλιστα σε όλη την επιφάνεια, επιλέγονταν μικρές περιοχές εκατέρωθεν των κατεαγόντων σε απόσταση 1cm . Για τις περιοχές αυτές, συλλέγονταν οι απόλυτες μετατοπίσεις τους κατά τους άξονες x , y , z και υπολογιζόταν οι σχετικές μετατοπίσεις των ζευγών. Οι μετατοπίσεις αυτές συσχετιζόνταν, με τη χρήση του προγράμματος *Excel*, με τις τιμές του φορτίου που είχαν ληφθεί από τη γέφυρα. Από τα δεδομένα αυτά, προέκυψαν διαγράμματα που παρουσιάζουν τη σχέση δύναμης-μετατόπισης σε κάθε άξονα για κάθε κάταγμα. Παρακάτω φαίνονται παραδείγματα τέτοιων διαγραμμάτων.

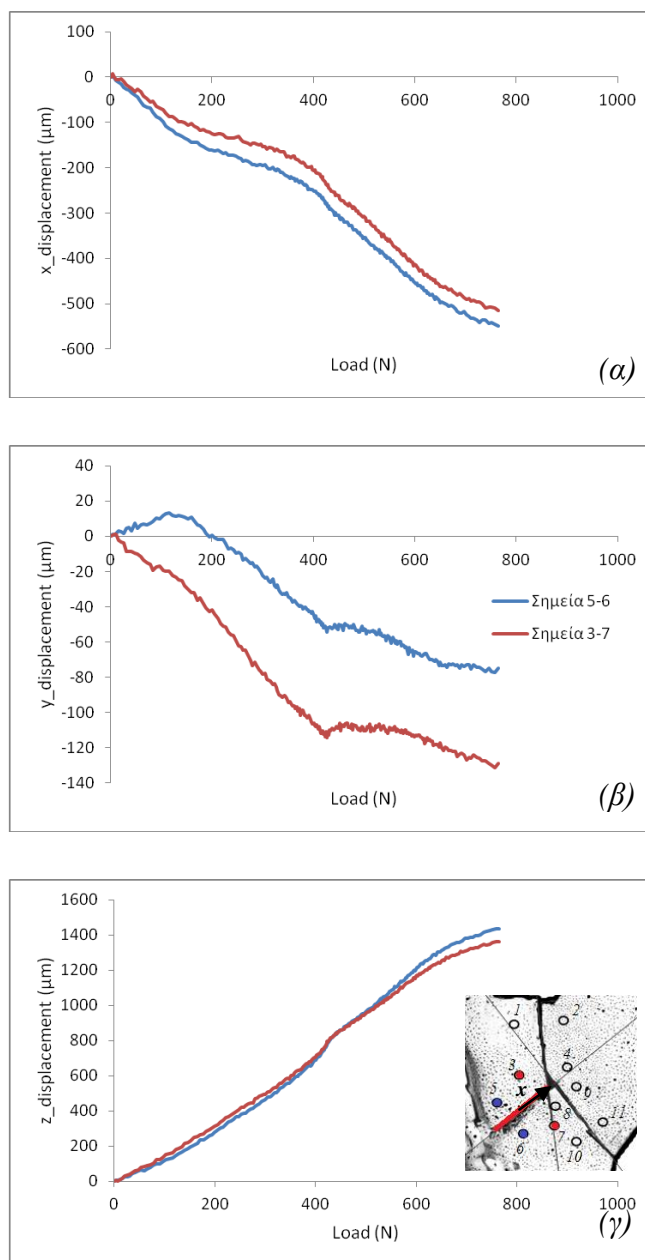
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

Κάταγμα 1



Εικόνα 5.25: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α)x, (β)y και (γ)z συναρτήσει του φορτίου

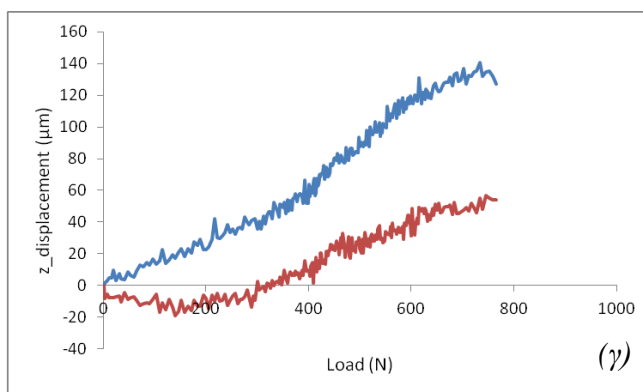
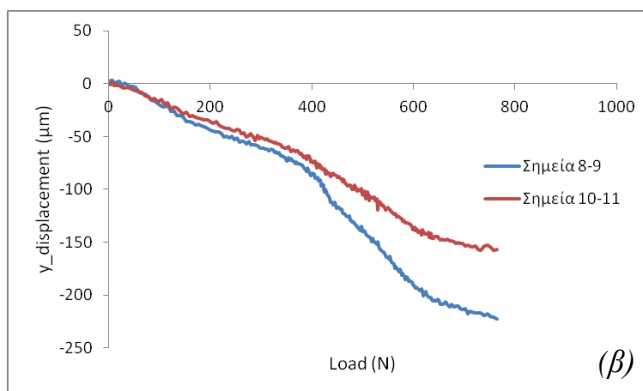
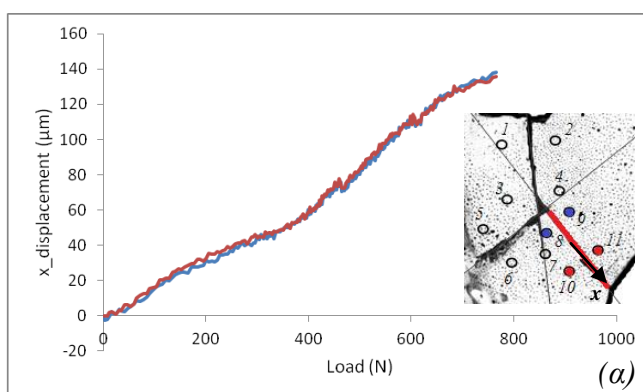
Κάταγμα 2



Εικόνα 5.26: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

Κάταγμα 3



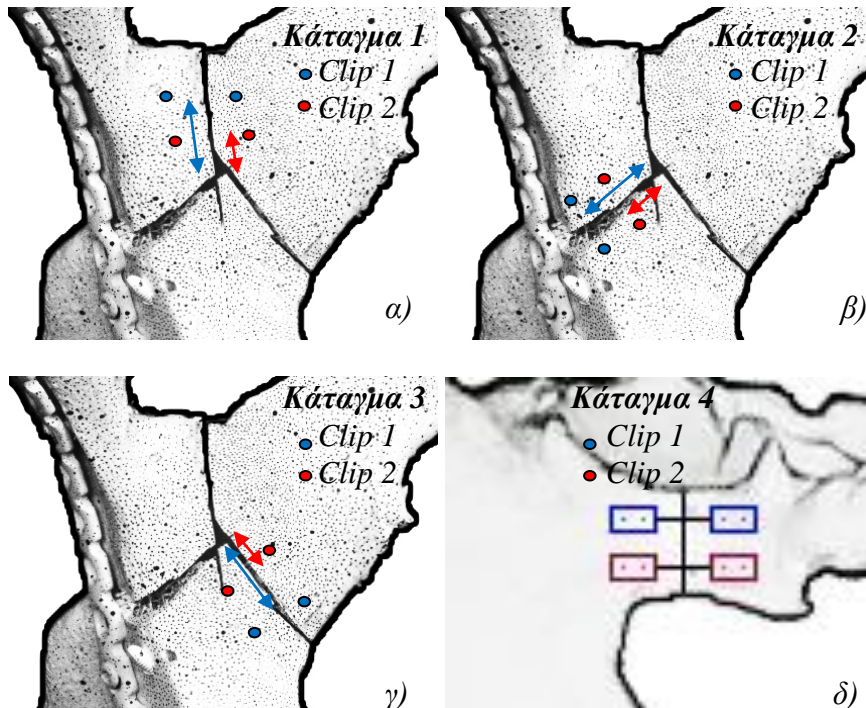
Εικόνα 5.27: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α)x, (β)y και (γ)z συναρτήσει του φορτίου.

Κεφάλαιο 6
Αποτελέσματα

6.1 Πίνακες αποτελεσμάτων

Μετά τη συλλογή των πρωτογενών δεδομένων ακολούθησε η συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων με τη δημιουργία πινάκων και ιστογραμμάτων.

Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, συλλέχθηκαν οι τιμές της σχετικής μετατόπισης των κατεαγόντων του εκάστοτε κατάγματος με κριτήριο το κοινό φορτίο και για διάφορες τιμές αυτού. Η σχετική μετατόπιση των κατεαγόντων υπολογίστηκε σε δύο σημεία (clip 1 και clip 2). Για τα κατάγματα 1,2 και 3 (όψη D.I.C.) το clip 1 αναφέρεται στις μικρές περιοχές που βρίσκονται εκατέρωθεν του κατάγματος και σε απόσταση $\sim 2\text{ cm}$ από το σημείο τομής των τριών καταγμάτων. Αντίστοιχα, το clip 2 αναφέρεται στις περιοχές που απέχουν $\sim 1\text{ cm}$ από το προαναφερθέν κέντρο. Κάταγμα 4 έχει χαρακτηριστεί το κάταγμα της οπίσθιας κολόνας.



Εικόνες 6.1: Η τοποθέτηση των μετρητών Clip 1 ($\sim 2\text{ cm}$) και Clip 2 ($\sim 1\text{ cm}$) από το κέντρο του κατάγματος για τα κατάγματα 1,2 και 3 και η σχετική θέση των μετρητών Clip 1, Clip 2 του κατάγματος 4.

Στους πίνακες 6.1 έως 6.7 παρουσιάζονται οι τιμές της σχετικής μετατόπισης των clip gauges για φορτία ίσα με 50N, 100N, 200N, 300N, 400N, 500N και 600N, αντίστοιχα.

Στα σχήματα 6.1 έως 6.7 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα για τις τιμές της σχετικής μετατόπισης των clip gauges για φορτία ίσα με 50N, 100N, 200N, 300N, 400N, 500N και 600N, αντίστοιχα, για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης και κάθε κάταγμα.

Η σχετική μετατόπιση των κατεαγόντων όπως κατεγράφη από τα clip gauges στο μέγιστο φορτίο κάθε δοκιμίου παρουσιάζεται στους πίνακες 6.8. Στη συνέχεια, στους πίνακες 6.9 έως 6.15 φαίνονται στατιστικά μεγέθη ειδικού ενδιαφέροντος (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, τυπική απόκλιση και εύρος) για τιμές του φορτίου ίσες με 50N, 100N, 200N, 300N, 400N, 500N και 600N.

Στη συνέχεια, στα σχήματα 6.8 έως 6.14 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της σχετικής μετατόπισης για τα clip 1, 2 (αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) για φορτία ίσα με 50N, 100N, 200N, 300N, 400N, 500N και 600N, αντίστοιχα, για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης και κάθε κάταγμα. Στα σχήματα 6.15 και 6.16 φαίνονται τα ιστογράμματα των μέγιστων και ελαχίστων σχετικών μετατοπίσεων, αντίστοιχα, για την ενδεικτική τιμή του φορτίου ίση με 300N. Στα σχήματα 6.17 και 6.18 φαίνονται τα ιστογράμματα των μέγιστων των ελαχίστων και τα μέγιστα των ελαχίστων σχετικών μετατοπίσεων, αντίστοιχα. Τέλος, στα σχήματα 6.19 έως 6.22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μέσων τιμών των σχετικών μετατοπίσεων ή «άνοιγμα» για κάθε κάταγμα και κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης αντίστοιχα.

Στα σχήματα 6.8 έως 6.22 για τον υπολογισμό των μέσων τιμών δε συμπεριλήφθηκαν τα παρακάτω δοκίμια: 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13 και 15, καθώς οι τιμές των σχετικών μετατοπίσεων θεωρήθηκαν ακραίες τιμές.

50N	I. 2 Πλάκες								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
3	-3,3	-4,0	-	-	-93,0	-96,8	-	-	
10	-0,7	-1,2	2,6	-	2,2	2,8	21,6	0,0	
11	3,5	11,6	6,4	-	-5,4	-2,7	4,8	1,6	
12	-2,6	-16,2	1,7	4,7	-2,6	-16,2	17,6	-12,8	

50N	II. Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
5	26,2	119,9	-158,2	-	-103,0	-58,6	32,8	14,4	
6	121,0	161,6	177,9	164,5	-11,0	-	240,8	162,4	
8	54,3	7,3	4,1	6,5	9,1	-	-29,6	-12,8	
9	-0,4	1,8	-18,5	-4,6	0,6	-	-0,8	-3,2	

50N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
7	-	-	-15,6	-8,4	-	-	-29,6	-24,8	
14	0,3	2,0	-2,0	0,7	2,9	1,8	0,0	-3,2	
15	235,2	720,5	589,1	944,6	-601,4	-	-261,6	329,6	

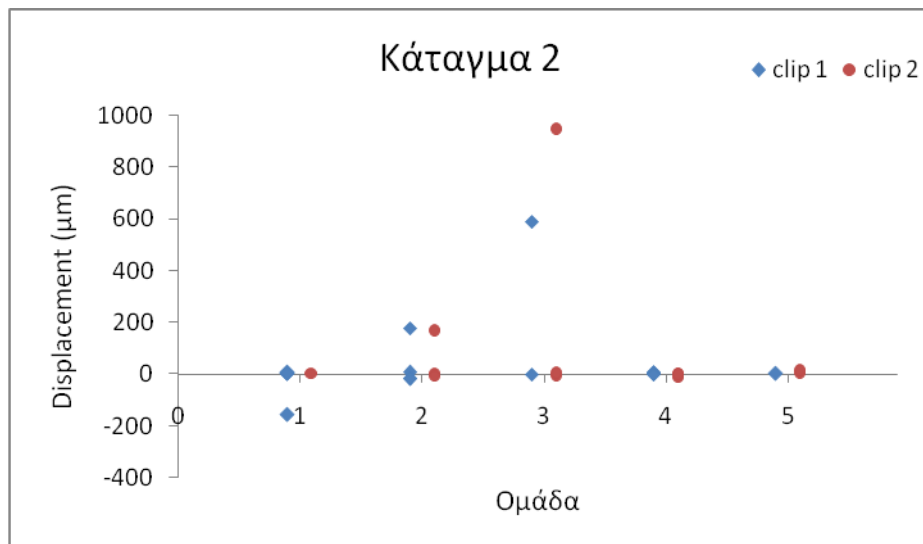
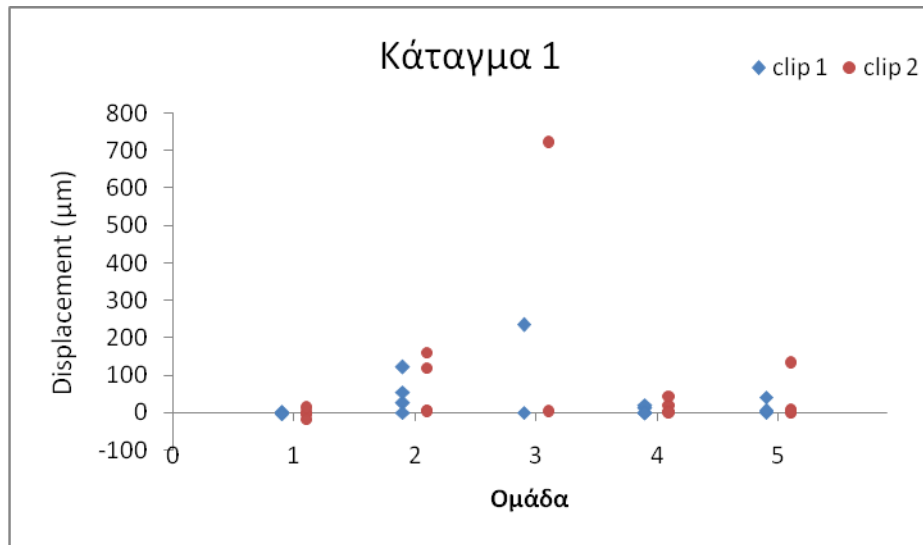
Πίνακες 6.1: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 50N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
50N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	2	11,9	21,3	-7,4	-	-12,3	0,7	8,0	8,8
	13	21,6	43,7	7,7	-9,4	-3,6	-6,7	19,2	-8,8
	18	0,6	3,6	2,4	3,6	1,5	0,3	6,4	6,4
	19	-1,9	-1,8	2,1	-3,7	0,0	-	5,6	3,2

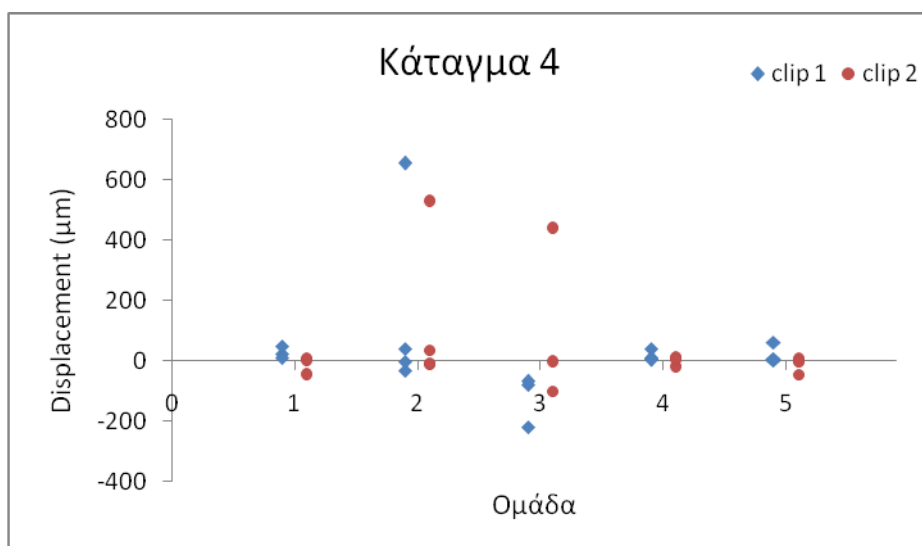
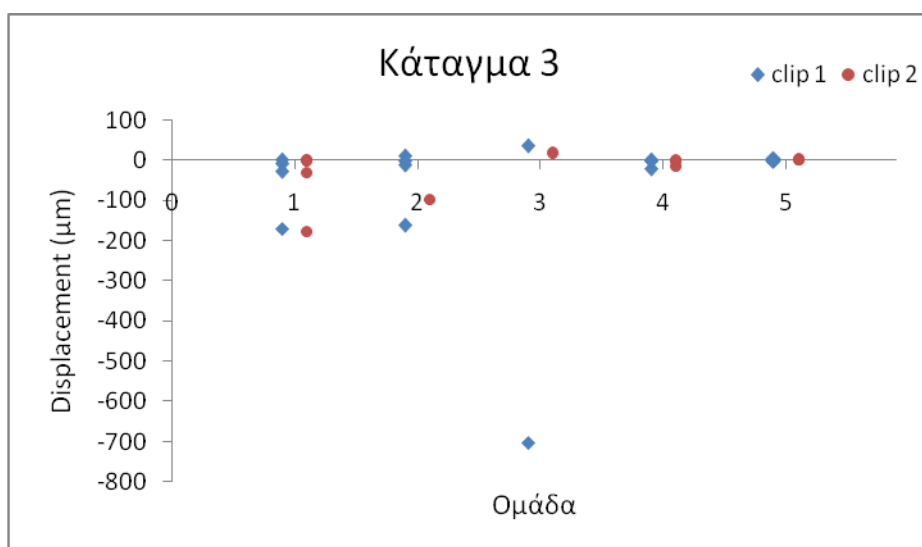
		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
50N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	1	3,4	1,1	-0,2	1,8	3,2	-	0,0	2,4
	4	40,6	132,0	1,2	10,9	-29,6	-	19,6	-17,4
	16	0,5	4,7	-	-	3,5	0,3	4,8	2,4
	17	5,4	2,3	-	-	0,3	2,2	4,8	-3,2

Πίνακες 6.1: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθεν πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 50N.



Σχήματα 6.1: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 50N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήματα 6.1: (συνέχεια) Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 50N.

100N	I. 2 Πλάκες								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
3	-4,1	-1,8	-	-	-171,1	-177,3	-	-	
10	-1,1	0,6	4,5	-	0,4	2,6	23,2	0,0	
11	8,9	18,6	6,3	-	-8,7	-3,3	9,6	3,2	
12	-28,6	-29,2	0,0	12,1	-28,6	-29,2	48,0	-47,2	

100N	II. Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
5	59,7	229,7	-217,3	-	-161,7	-96,2	40,8	36,0	
6	323,1	440,9	597,0	522,4	-12,0	-	654,4	527,2	
8	59,4	9,3	4,0	11,8	9,6	-	-31,2	-12,0	
9	-2,7	4,7	-14,8	-4,6	-1,9	-	-1,6	-8,0	

100N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
7	-	-	-120,7	-50,9	-	-	-79,2	-99,2	
14	-17,4	-32,8	9,9	-1,5	35,8	16,3	-68,0	-4,8	
15	261,6	794,1	700,8	1154,8	-702,3	-	-220,0	437,6	

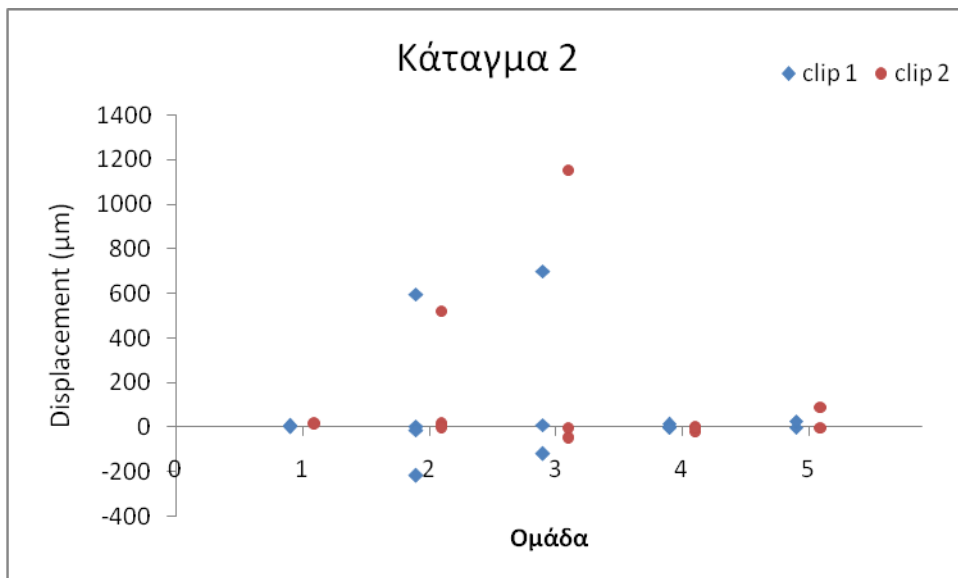
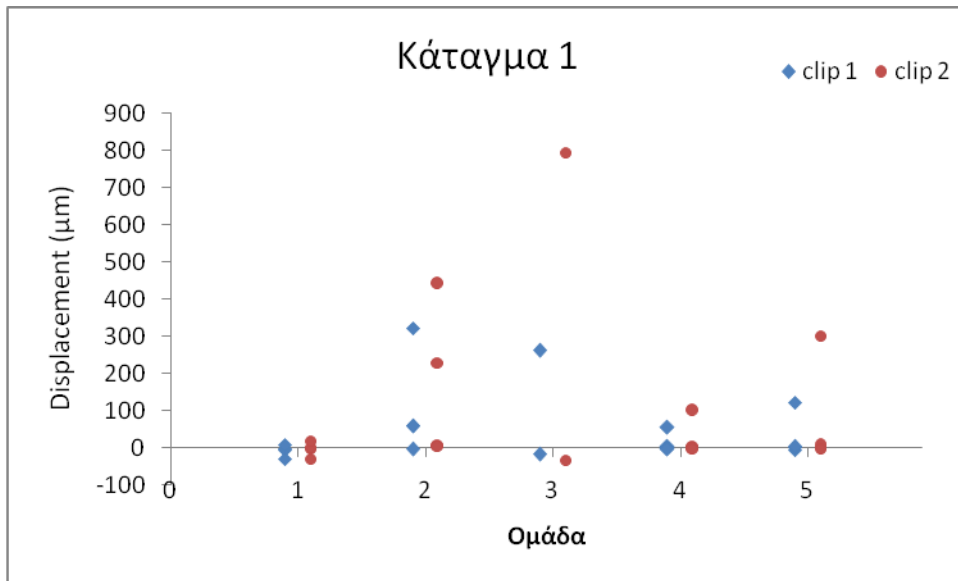
Πίνακες 6.2: Έκαστος των άνωθεν πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 100N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
100N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
		2	3,2	4,1	-2,3	-	-1,0	-1,2	3,2
	13	54,7	100,4	13,0	-18,0	-21,3	-14,8	40,8	-22,4
	18	2,2	1,6	1,7	4,4	0,5	0,9	8,0	7,2
	19	-3,3	-1,6	-2,2	-2,2	-0,8	-	5,6	3,2

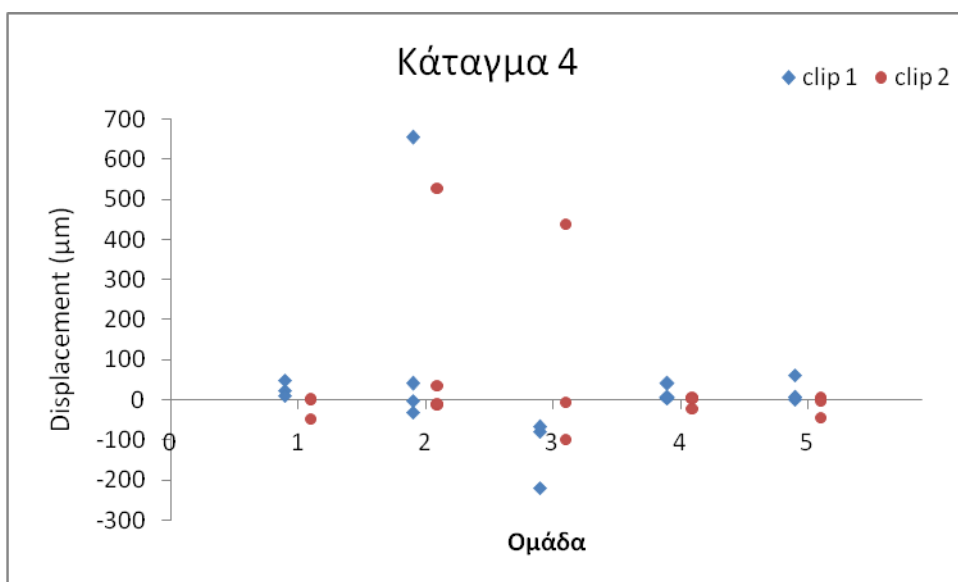
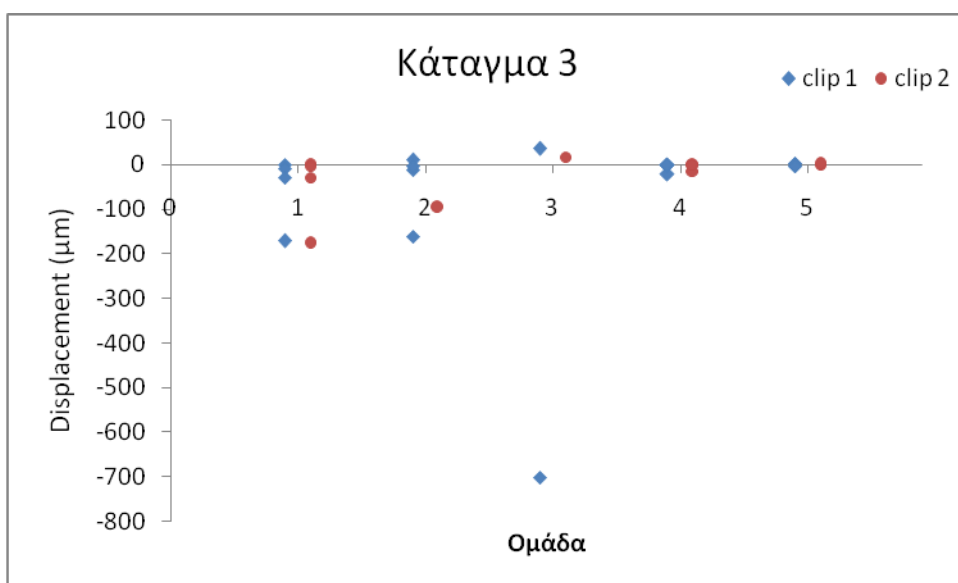
		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
100N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
		1	-5,8	1,9	-1,4	-2,1	2,1	-	1,2
	4	121,6	302,5	27,1	91,2	-3,0	-	62,4	-44,8
	16	1,9	7,4	-	-	3,2	-0,1	6,4	4,0
	17	4,2	-1,2	-	-	-2,4	1,1	5,6	-3,2

Πίνακες 6.2: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα ο-στεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 100N.



Σχήματα 6.2: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 100N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήματα 6.2: (συνέχεια) Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 100N.

200N	I. 2 Πλάκες								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
3	-4,3	-0,3	-	-	-275,9	-294,6	-	-	
10	0,6	1,8	2,7	-	3,5	-6,0	25,6	0,8	
11	18,0	34,0	3,0	-	-14,6	-10,3	23,2	-16,0	
12	-164,6	-95,9	-9,8	123,6	-164,6	-95,9	144,8	-189,6	

200N	II. Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
5	101,7	342,7	-259,2	-	-210,5	-128,7	49,6	65,6	
6	483,2	685,3	891,5	787,1	-88,4	-	899,2	708,0	
8	61,4	11,1	4,2	10,8	11,2	-	-35,2	-12,8	
9	-1,4	5,5	-19,3	-13,7	-6,3	-	-4,0	-16,0	

200N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
7	-	-	-290,1	-165,8	-	-	-244,0	-180,8	
14	-33,1	-76,3	35,4	12,4	92,5	44,7	-140,0	13,6	
15	271,2	819,1	738,2	1194,1	-736,6	-	-222,4	446,4	

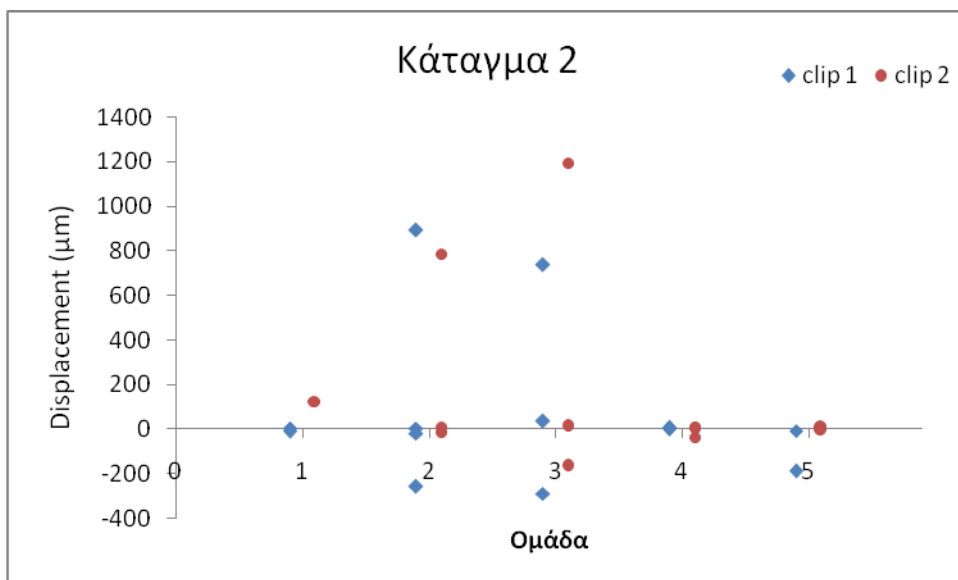
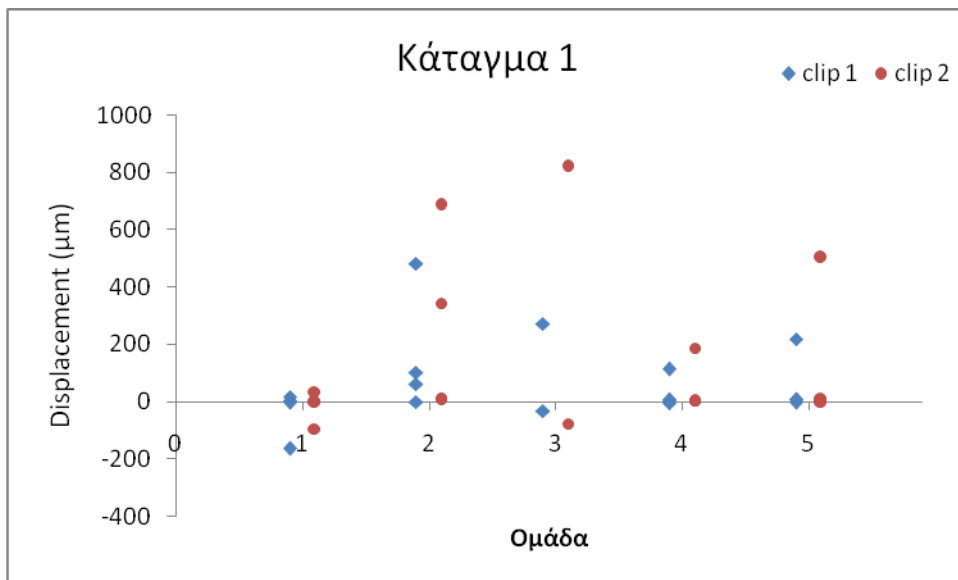
Πίνακες 6.3: Έκαστος των άνωθεν πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 200N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
200N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	2	4,8	4,3	1,0	-	-0,5	-0,4	-1,6	2,4
	13	113,1	185,6	5,9	-35,9	-44,0	-36,1	69,6	-48,0
	18	4,4	3,9	2,9	8,0	1,2	0,0	10,4	8,8
	19	-4,8	0,8	-0,5	-0,2	-1,8	-	4,8	3,2

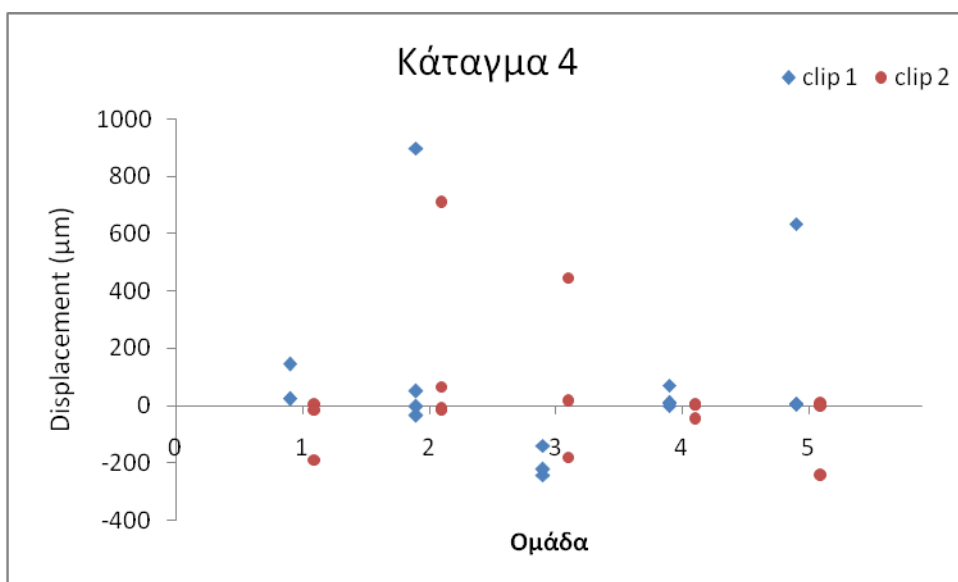
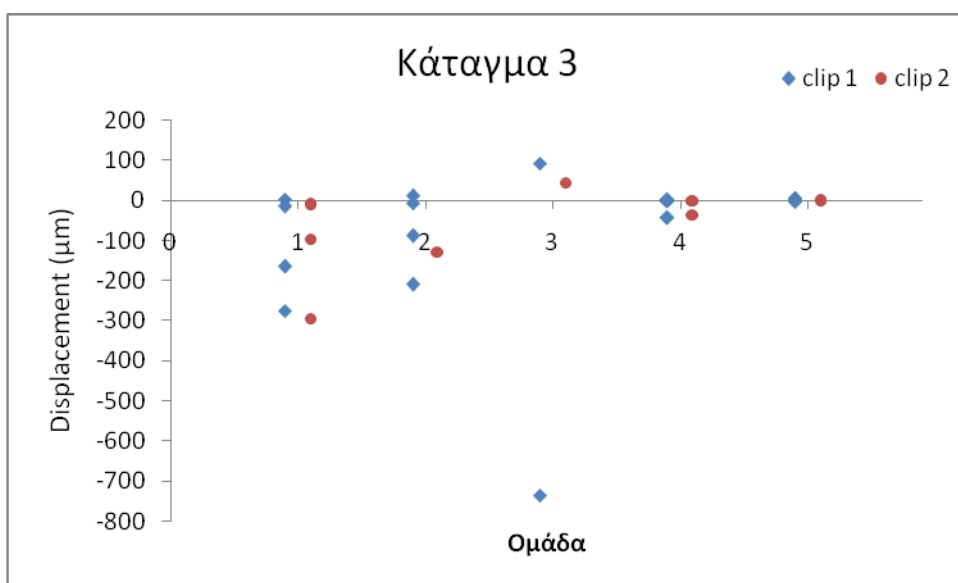
		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
200N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	1	-3,3	1,7	-8,6	5,9	4,3	-	4,0	2,4
	4	218,5	501,6	-188,2	-4,9	1,2	-	635,2	-244,8
	16	5,5	10,9	-	-	5,3	2,5	8,8	5,6
	17	6,3	-2,0	-	-	-4,6	-0,9	7,2	-3,2

Πίνακας 6.3: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 200N.



Σχήματα 6.3: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 200N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήματα 6.3: (συνέχεια) Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 200N.

300N	I. 2 Πλάκες								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
3	-3,0	1,4	-	-	-327,8	-358,4	-	-	
10	1,1	1,6	4,2	-	4,5	-0,6	29,6	1,6	
11	26,8	45,3	6,0	-	-14,7	-11,7	31,2	-18,4	
12	-265,6	-158,3	-129,4	114,0	-265,6	-158,3	236,8	-392,8	

300N	II. Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
5	117,8	402,4	-277,7	-	-229,5	-142,2	53,6	89,6	
6	548,6	790,6	993,1	896,8	-155,2	-	1019,2	748,8	
8	70,6	14,5	7,7	13,9	16,8	-	-46,4	-15,2	
9	0,1	8,4	-19,7	-18,1	-8,5	-	-4,0	-22,4	

300N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
7	-	-	-310,6	-170,9	-	-	-276,8	-191,2	
14	-23,5	-70,6	43,4	22,0	99,1	46,0	-138,4	32,8	
15	291,3	864,5	772,5	1225,2	-757,9	-	-260,8	442,4	

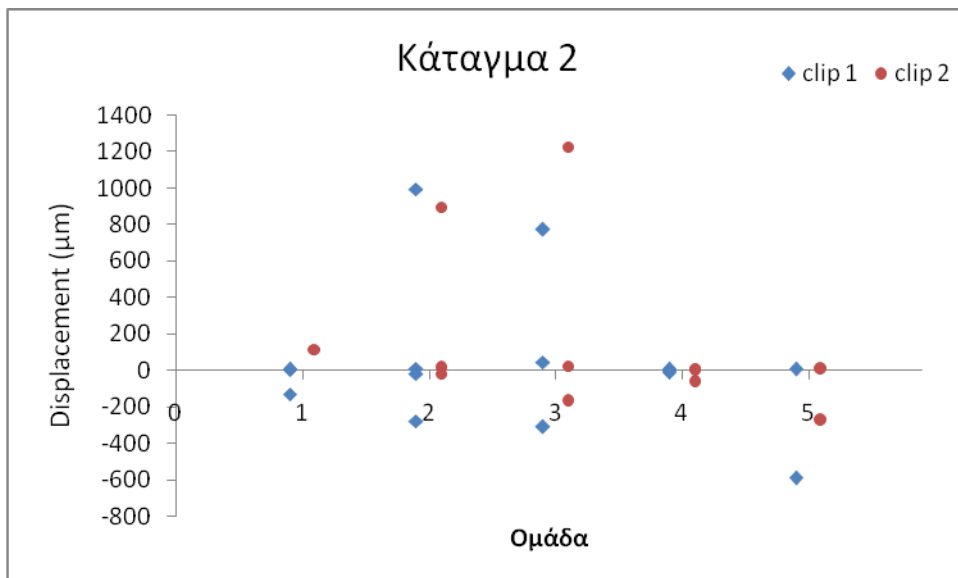
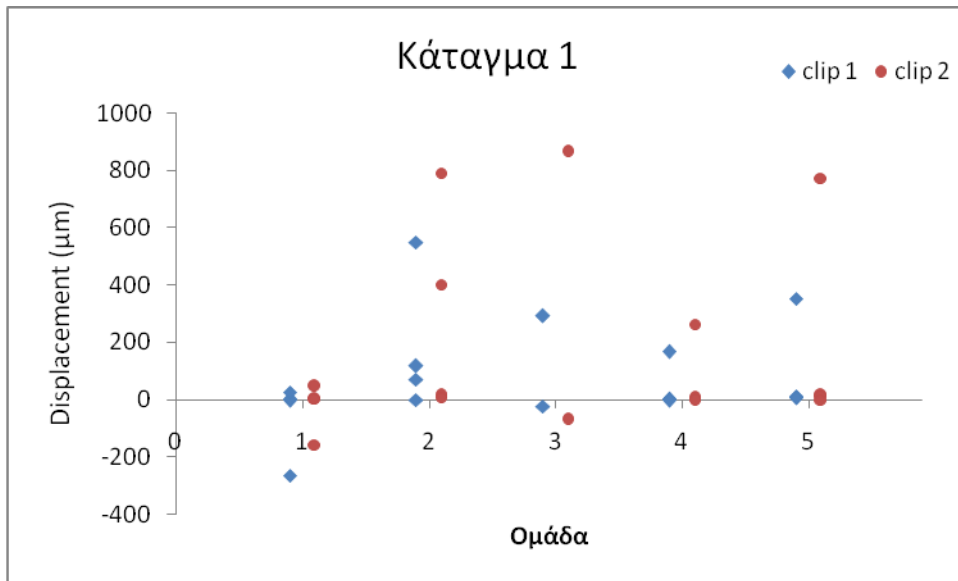
Πίνακες 6.4: Έκαστος των άνωθεν πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 300N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
300N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
		2	0,7	4,3	0,4	-	1,4	1,9	-6,4
	13	165,8	262,5	-9,5	-64,6	-60,9	-50,2	96,0	-85,6
	18	4,6	6,0	5,1	9,2	5,3	-0,7	11,2	9,6
	19	-4,1	-4,0	-2,8	-1,3	-1,8	-	4,0	3,2

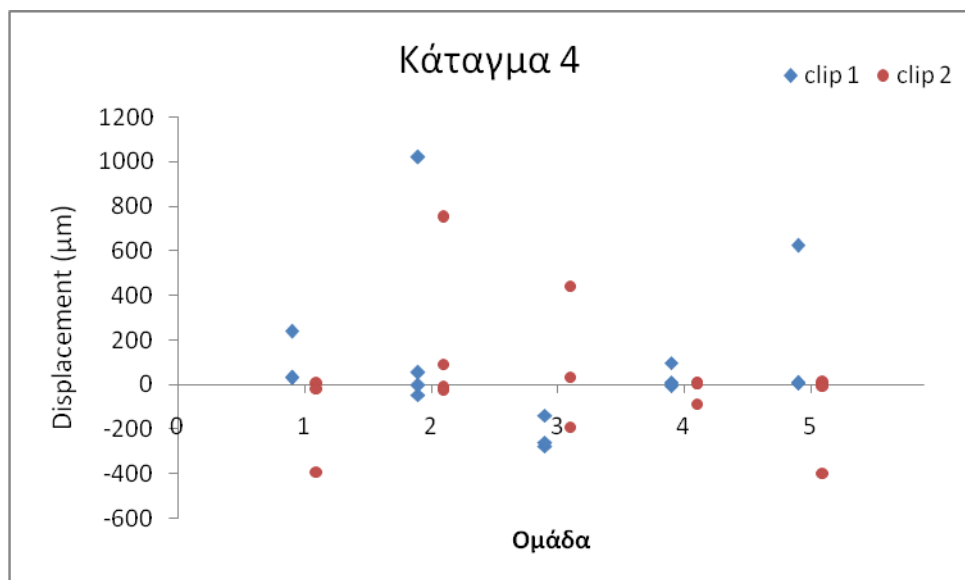
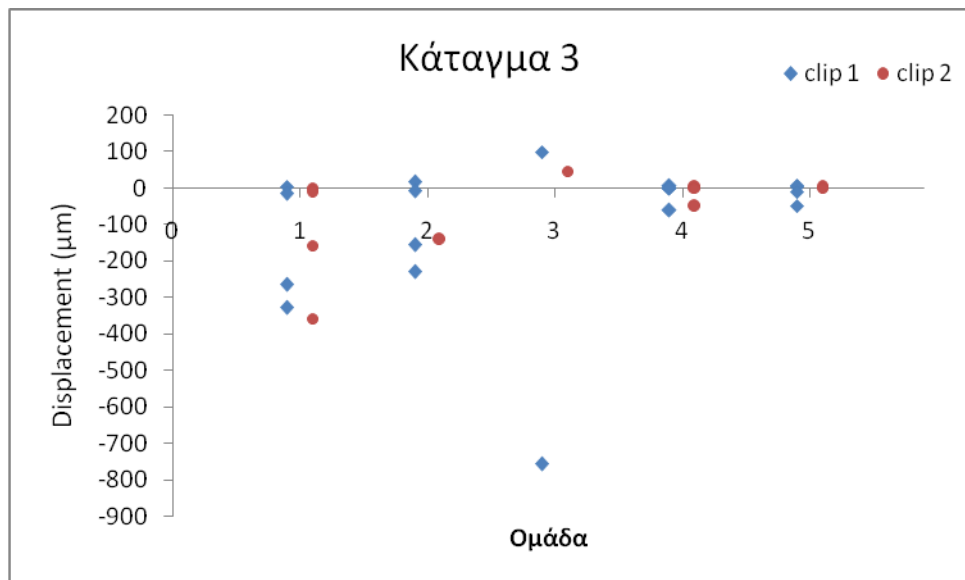
		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
300N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
		1	5,8	14,9	5,4	5,9	2,2	-	6,4
	4	352,9	771,7	-591,2	-274,9	-48,6	-	624,0	-399,2
	16	11,8	13,3	-	-	7,0	1,6	11,2	7,2
	17	9,0	-0,8	-	-	-10,2	-0,7	8,8	-5,6

Πίνακες 6.4: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 300N.



Σχήματα 6.4: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 300N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης κατάγματα πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήματα 6.4: (συνέχεια) Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 300N.

400N	I. 2 Πλάκες								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
3	-3,3	4,5	-	-	-339,6	-375,9	-	-	
10	6,1	6,9	4,4	-	6,1	7,5	32,0	2,4	
11	38,8	63,3	4,3	-	-11,7	-8,9	34,4	-16,8	
12	-410,7	-245,7	-413,6	6,0	-410,7	-245,7	418,4	-723,2	

400N	II. Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
5	126,4	442,5	-279,0	-	-238,3	-149,1	56,0	110,4	
6	583,1	840,3	1056,3	958,0	-178,4	-	1068,0	768,8	
8	83,7	18,3	4,4	17,1	19,6	-	-60,8	-20,0	
9	0,7	10,9	-23,8	-23,2	-12,1	-	-4,0	-28,8	

400N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
7	-	-	-324,5	-166,6	-	-	-254,4	-195,2	
14	-19,2	-62,7	55,6	29,2	101,7	47,1	-138,4	33,6	
15	299,0	908,5	784,4	1232,2	-784,8	-	-278,4	442,4	

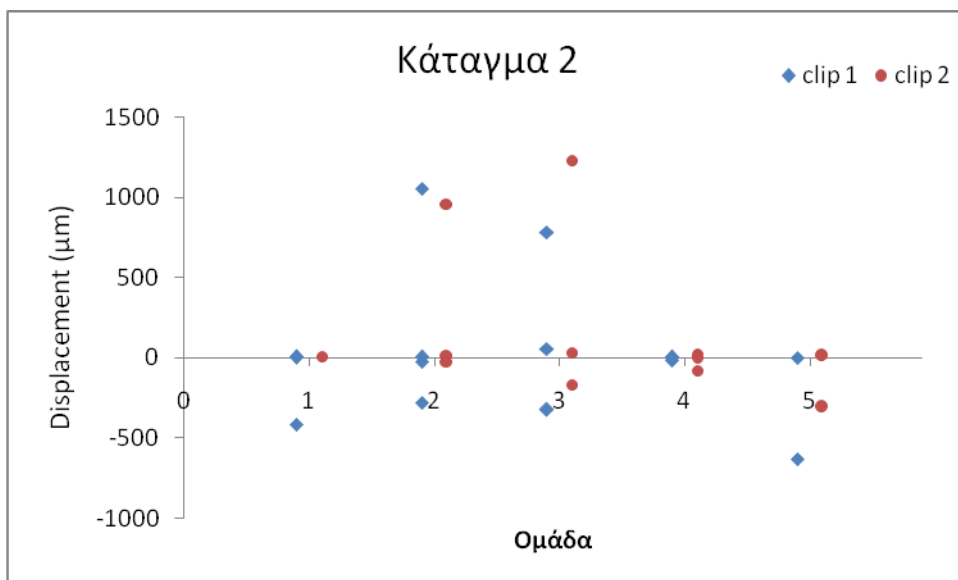
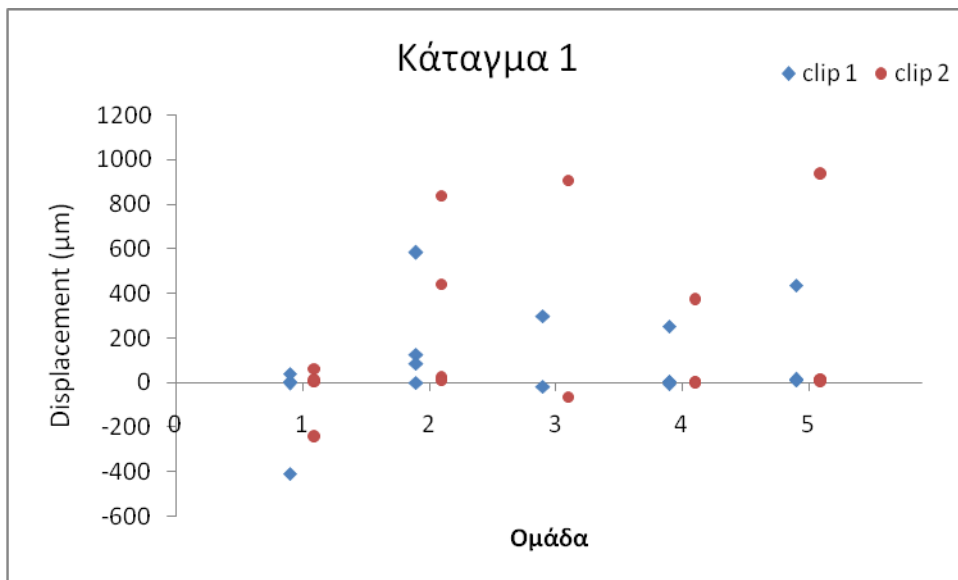
Πίνακες 6.5: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 400N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
400N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	2	3,9	2,7	-0,2	-	3,9	1,8	-10,4	0,0
	13	252,2	369,8	-18,1	-78,7	-84,3	-73,3	121,6	-170,4
	18	3,7	3,4	5,0	10,4	0,5	0,1	12,0	10,4
	19	-5,1	-2,0	-0,9	-3,5	-3,7	-	4,0	3,2

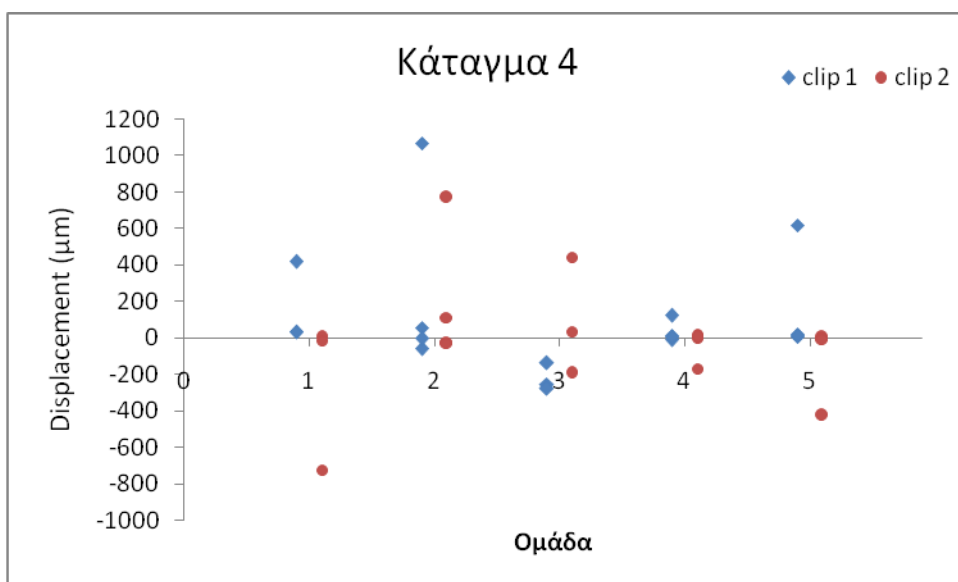
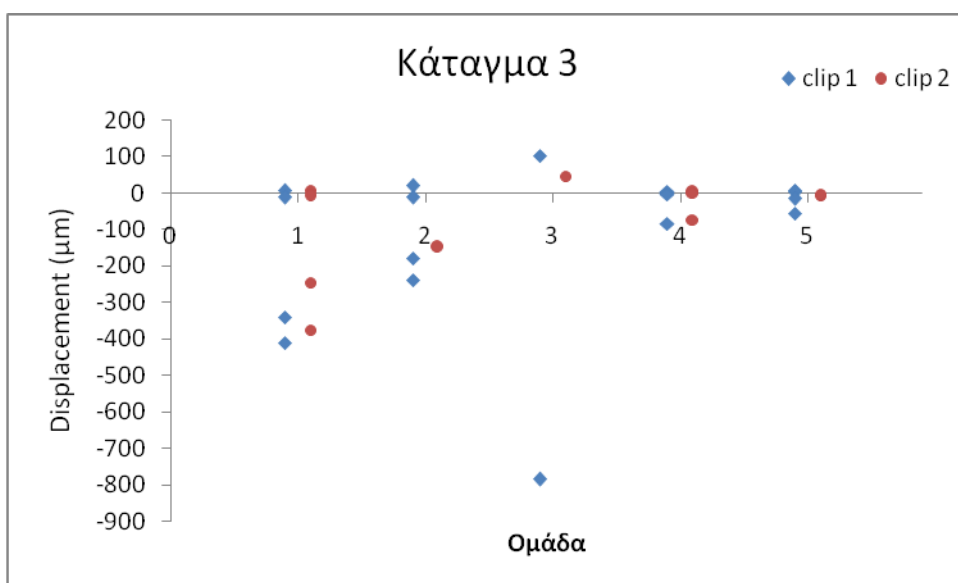
		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
400N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	1	9,2	7,7	-1,6	10,8	2,4	-	8,0	2,8
	4	437,5	934,7	-630,5	-309,1	-55,5	-	618,4	-426,4
	16	12,7	14,6	-	-	7,9	-6,6	20,8	-0,8
	17	11,8	2,4	-	-	-14,7	-3,3	11,2	-8,0

Πίνακες 6.5: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 400N.



Σχήματα 6.5: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 400N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήματα 6.5: (συνέχεια) Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 400N.

500N	I. 2 Πλάκες								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
3	-2,3	-0,4	-	-	-334,4	-377,0	-	-	
10	8,6	6,9	5,7	-	11,1	5,4	32,0	1,6	
11	49,3	76,8	6,0	-	-8,5	-3,8	38,4	-16,0	
12	-523,5	-301,2	-625,8	-61,9	-523,5	-301,2	564,8	-952,0	

500N	II. Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
5	133,0	476,9	-278,1	-	-244,5	-156,2	56,8	132,0	
6	607,7	874,7	1108,7	1003,4	-188,7	-	1084,0	773,6	
8	98,4	22,7	12,3	21,3	19,4	-	-76,8	-24,8	
9	0,7	13,7	-21,9	-25,7	-10,3	-	-4,8	-36,0	

500N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας								
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
7	-	-	-318,6	-146,2	-	-	-239,2	-200,0	
14	-13,4	-56,1	55,6	29,2	100,3	46,0	-130,4	34,4	
15	320,9	957,8	58,5	30,2	-801,9	-	-283,2	438,4	

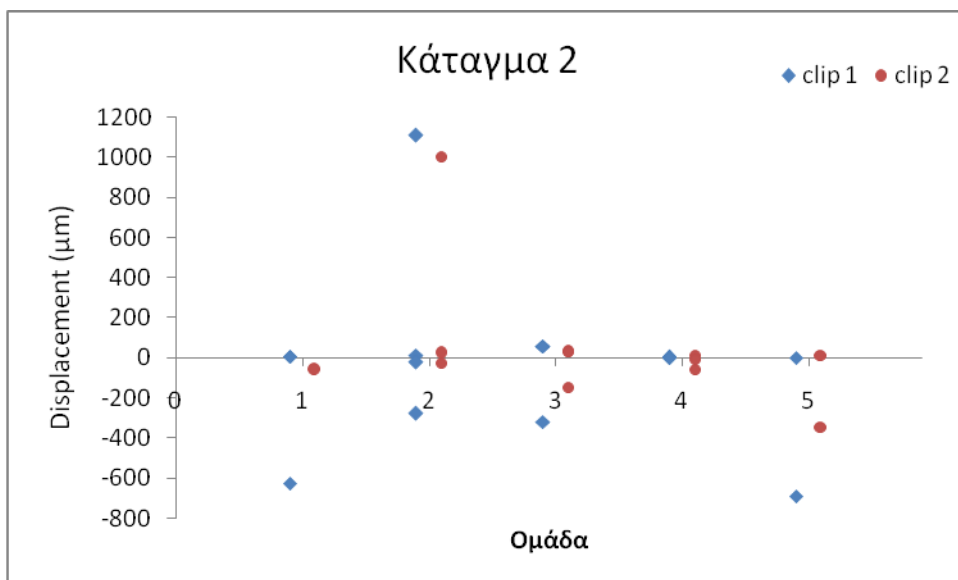
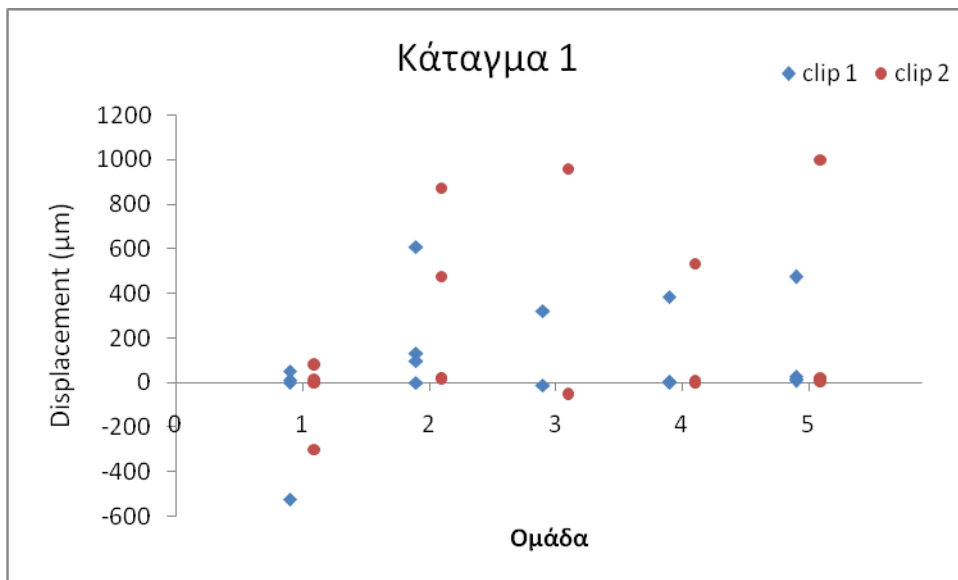
Πίνακες 6.6: Έκαστος των άνωθεν πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 500N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
500N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	2	5,1	2,1	2,6	-	7,6	4,4	-18,4	-0,8
13	385,8	534,1	0,5	-59,4	-138,8	-104,8	138,4	-244,8	
18	5,4	5,7	4,9	13,2	5,7	0,6	13,6	11,2	
19	-2,1	-3,0	-1,3	-5,3	-5,4	-	4,0	3,2	

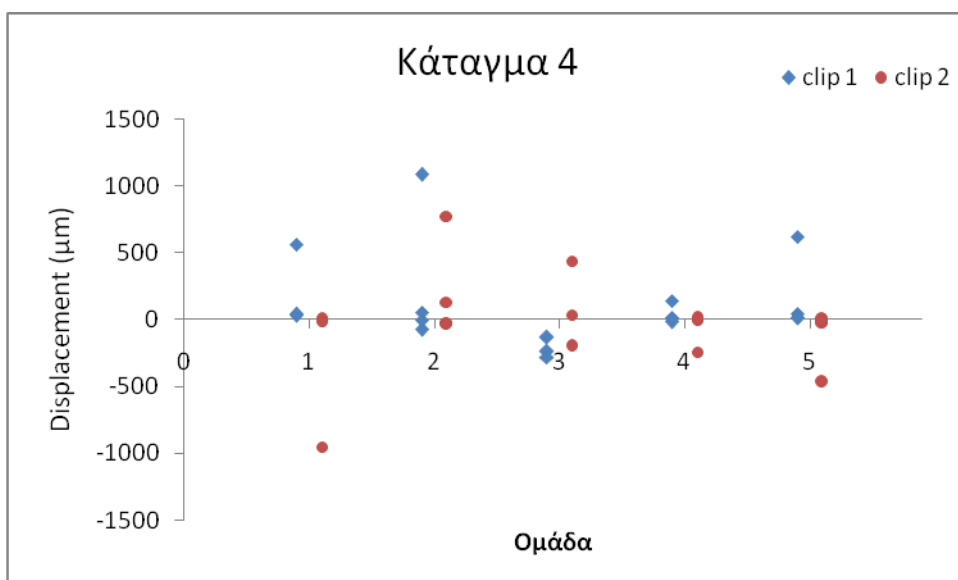
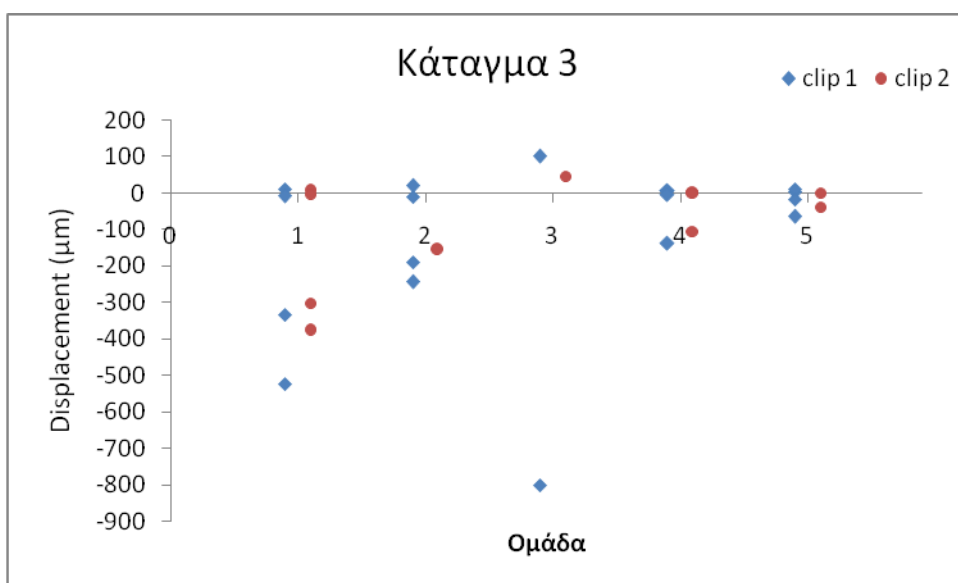
		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
500N	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	1	8,6	15,8	1,7	13,2	2,8	-	9,6	1,6
4	474,5	1000,9	-691,3	-347,6	-64,6	-	618,4	-468,8	
16	27,7	20,9	-	-	11,2	-38,8	45,6	-21,6	
17	14,1	5,0	-	-	-17,6	1,3	16,0	-9,6	

Πίνακες 6.6: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 500N.



Σχήματα 6.6: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 500N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήματα 6.6: (συνέχεια) Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 500N.

600N	I. 2 Πλάκες									
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
	3	-5,1	3,3	-	-	-343,9	-389,8	-	-	
	10	6,5	7,5	4,2	-	11,7	4,4	32,8	0,0	
	11	59,1	90,3	4,1	-	-13,0	-15,6	53,6	-30,4	
	12	-647,1	-362,3	-822,9	-100,0	-647,1	-362,3	749,6	-1200,8	

600N	II. Πλάκα και Κοχλίας									
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
	5	136,7	525,3	-266,8	-	-252,4	-170,1	58,4	164,8	
	6	617,4	893,7	1150,9	1038,6	-192,8	-	1076,8	775,2	
	8	120,4	35,2	17,2	24,2	23,1	-	-96,0	-31,2	
	9	0,5	15,6	-22,3	-32,8	-16,1	-	-4,8	-43,2	

600N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας									
	Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
	7	-	-	-300,4	-127,9	-	-	-249,6	-204,0	
	14	0,2	-43,9	58,1	32,9	99,8	40,8	-110,4	32,8	
	15	344,1	1004,5	853,2	1267,5	-839,6	-	-292,0	415,2	

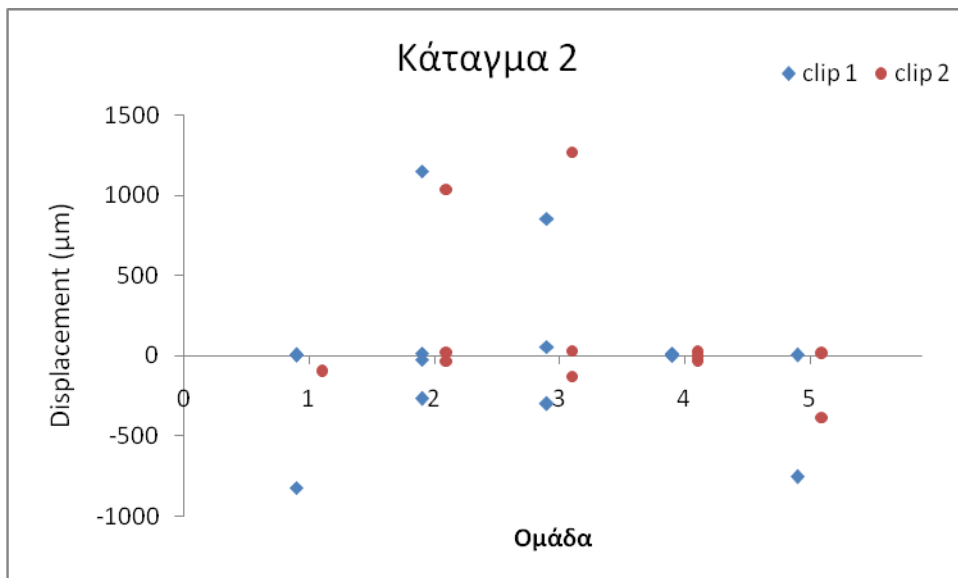
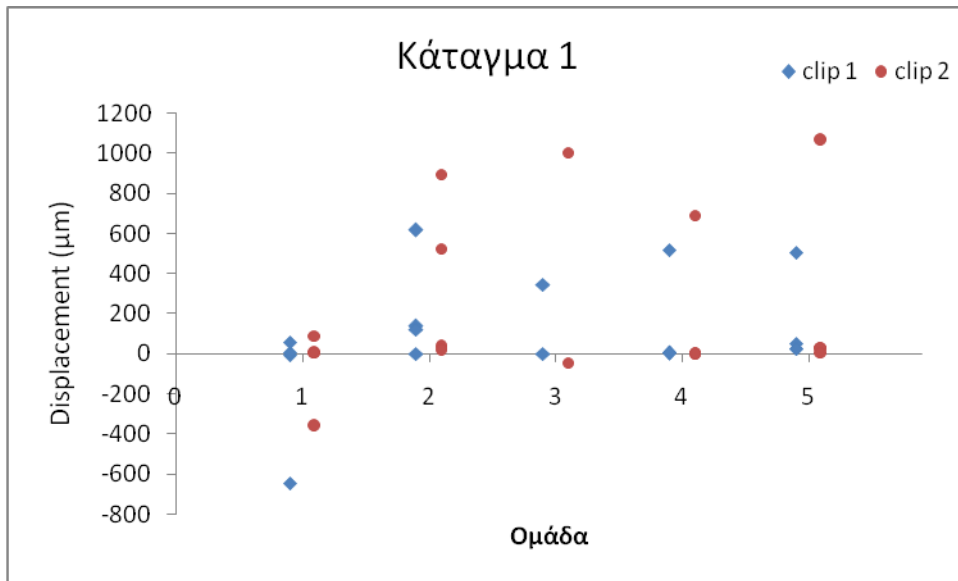
Πίνακες 6.7: Έκαστος των άνωθεν πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 600N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

600N		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα								
		Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
			clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
2	6,2	1,4	5,9	-	10,2	5,6	-24,0	-1,6		
13	519,1	690,8	17,7	-36,8	-188,7	-137,8	171,2	-206,4		
18	4,3	6,0	6,6	18,3	2,3	0,6	14,4	12,8		
19	4,0	-2,9	2,0	-2,7	-10,1	-	-3,2	9,6		

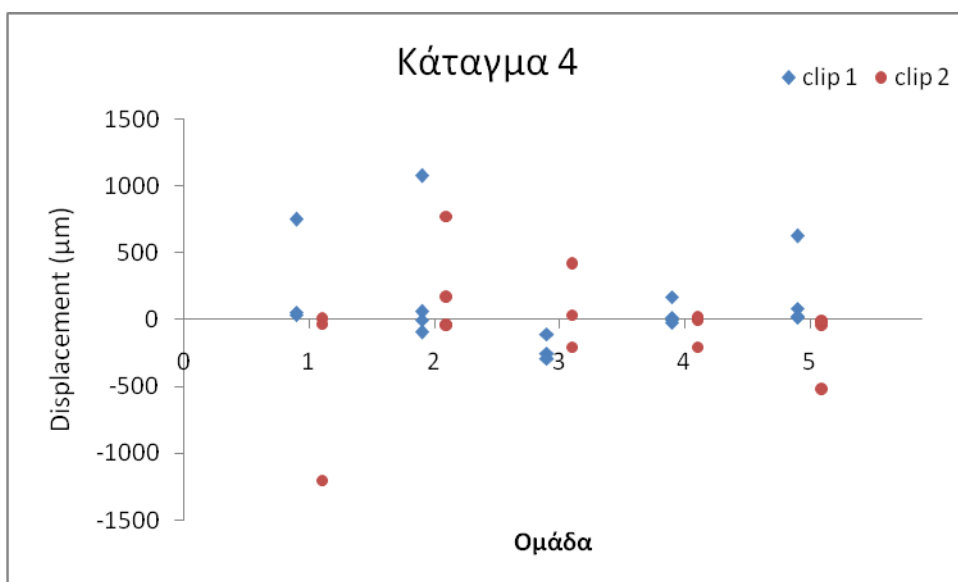
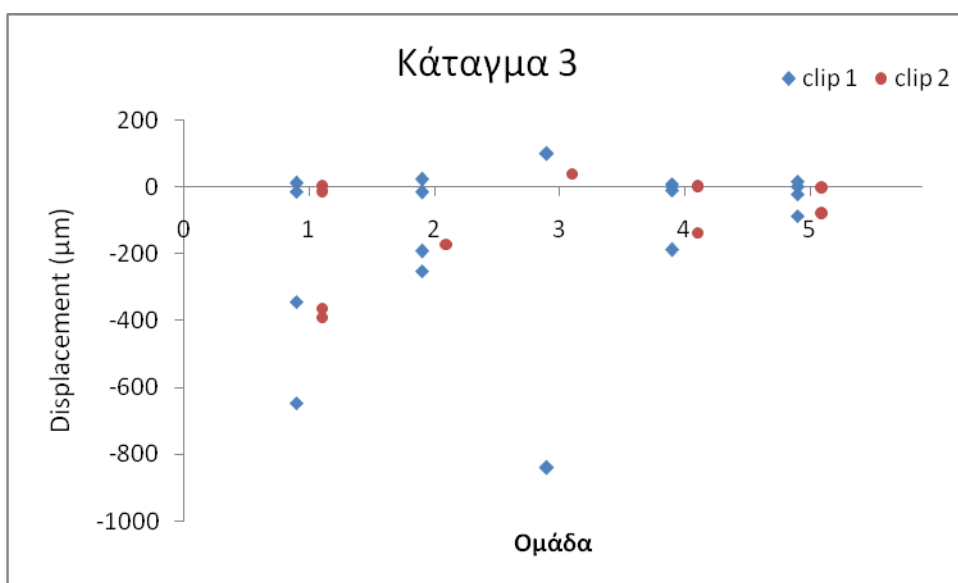
600N		V. Πλάκα (Storpa) και Πλάκα								
		Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
			clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
1	26,6	21,4	4,5	12,7	-0,7	-	15,2	-2,4		
4	504,3	1063,2	-756,7	-384,3	-85,7	-	624,8	-526,4		
16	51,9	30,2	-	-	17,8	-80,9	80,8	-48,0		
17	23,8	4,8	-	-	-20,8	-4,2	20,0	-12,0		

Πίνακες 6.7: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 600N.



Σχήματα 6.7: Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 600N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήματα 6.7: (συνέχεια) Ιστογράμματα που παρουσιάζουν τις σχετικές μετατοπίσεις των clips για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης, για κάθε κάταγμα (Κάταγμα 1, 2, 3 και 4) για τιμή του φορτίου ίση με 600N.

I. 2 Πλάκες									
Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Μέγιστο Φορτίο (N)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
3	1257,2	72,5	256,7	-	-	-768,8	-707,4	-	-
10	1069,7	16,7	17,2	1,4	-	23,8	10,0	37,6	-9,6
11	1984,5	-112,2	-215,2	-15,6	-	80,4	63,4	-58,4	-4,0
12	677,2	563,0	558,4	-884,0	-84,0	-725,2	-400,2	838,4	-1340,0

II. Πλάκα και Κοχλίας									
Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Μέγιστο Φορτίο (N)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
5	874,2	166,7	669,3	-192,9	-	-286,2	-241,1	54,4	248,8
6	882,2	676,1	970,2	1293,9	1157,5	-184,5	-	1068,8	807,2
8	1078,7	280,4	66,1	33,5	32,9	56,7	-	-216,8	-52,0
9	1553,4	3,9	30,4	-32,5	-68,8	-19,7	-	-5,6	-98,4

III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας									
Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Μέγιστο Φορτίο (N)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
7	590,2	-	-	-300,4	-127,9	-	-	-249,6	-204,0
14	799,5	17,4	-25,7	69,0	41,5	102,4	29,8	-61,6	39,2
15	667,9	370,8	1051,9	883,3	1266,1	-896,2	-	194,4	452,0

Πίνακες 6.8: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν στην τιμή του εκάστοτε μέγιστου φορτίου.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα									
Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Μέγιστο Φορτίο (N)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
2	649,6	2,8	20,2	8,0	-	11,1	5,7	-25,6	-1,6
13	765,3	644,2	846,1	43,5	-21,9	-220,9	-156,0	200,8	-314,4
18	1219,3	8,4	9,9	15,1	29,1	7,1	1,5	24,0	19,2
19	1932,1	74,7	-8,9	44,2	-25,7	-44,9	-	-78,4	55,2

V. Πλάκα (Storpa) και Πλάκα									
Αριθμός Δοκιμίου (A/A)	Μέγιστο Φορτίο (N)	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
1	1529,5	139,4	136,6	-92,0	43,4	-9,3	-	144,8	-168,0
4	1249,1	651,5	1393,7	- 1068,4	-539,6	-192,6	-	649,6	-800,8
16	2928,2	612,8	655,7	-	-	196,7	-136,1	291,2	-199,2
17	687,0	28,3	11,5	-	-	-29,6	-3,8	23,2	-15,2

Πίνακες 6.8: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθεν πινάκων αναφέρεται σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των clips που αντιστοιχούν στην τιμή του εκάστοτε μέγιστου φορτίου.

50N	I. 2 Πλάκες									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	3,5	11,6	6,4	4,7	2,2	2,8	21,6	1,6		
Ελάχιστη Τιμή	-3,3	-16,2	1,7	4,7	-93,0	-96,8	4,8	-12,8		
Μέση Τιμή	-0,8	-2,5	3,6	4,7	-24,7	-28,2	14,7	-3,7		
Τυπ. Απόκλιση	3,0	11,4	2,5	-	45,6	46,4	8,8	7,9		
Εύρος	6,7	27,8	4,7	0,0	95,2	99,6	16,8	14,4		

50N	II. Πλάκα και Κοχλίας									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	121,0	161,6	177,9	164,5	9,1	-58,6	240,8	162,4		
Ελάχιστη Τιμή	-0,4	1,8	-158,2	-4,6	-103,0	-58,6	-29,6	-12,8		
Μέση Τιμή	50,3	72,7	1,3	55,5	-26,1	-58,6	60,8	40,2		
Τυπ. Απόκλιση	52,2	80,5	137,9	94,6	51,9	-	122,7	82,2		
Εύρος	121,5	159,9	336,1	169,1	112,0	0,0	270,4	175,2		

Πίνακες 6.9: Έκαστος των άνωθεν πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, τυπική απόκλιση και εύρος) των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 50N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

50N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
	Μέγιστη Τιμή	235,2	720,5	589,1	944,6	2,9	1,8	0,0	329,6	
	Ελάχιστη Τιμή	0,3	2,0	-15,6	-8,4	-601,4	1,8	-261,6	-24,8	
	Μέση Τιμή	117,7	361,2	190,5	312,3	-299,3	1,8	-97,1	100,5	
	Τυπ. Απόκλιση	166,1	508,1	345,2	547,6	427,3	-	143,3	198,7	
	Εύρος	234,9	718,5	604,7	953,0	604,3	0,0	261,6	354,4	

50N	IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
	Μέγιστη Τιμή	21,6	43,7	7,7	3,6	1,5	0,7	19,2	8,8	
	Ελάχιστη Τιμή	-1,9	-1,8	-7,4	-9,4	-12,3	-6,7	5,6	-8,8	
	Μέση Τιμή	6,8	16,7	1,2	-3,2	-3,6	-1,9	9,8	2,4	
	Τυπ. Απόκλιση	12,9	20,5	6,3	6,5	6,2	4,2	6,3	7,8	
	Εύρος	23,5	45,5	15,1	12,9	13,8	7,4	13,6	17,6	

50N	V. Πλάκα (Storpa) και Πλάκα									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
	Μέγιστη Τιμή	40,6	132,0	1,2	10,9	3,5	2,2	19,6	2,4	
	Ελάχιστη Τιμή	0,5	1,1	-0,2	1,8	-29,6	0,3	0,0	-17,4	
	Μέση Τιμή	12,5	35,0	0,5	6,4	-5,6	1,3	7,3	-4,0	
	Τυπ. Απόκλιση	18,9	64,7	1,0	6,5	16,0	1,3	8,5	9,3	
	Εύρος	40,1	131,0	1,4	9,2	33,1	1,8	19,6	19,8	

Πίνακες 6.9: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 50N.

100N	I. 2 Πλάκες									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	8,9	18,6	6,3	12,1	0,4	2,6	48,0	3,2		
Ελάχιστη Τιμή	-28,6	-29,2	0,0	12,1	-171,1	-177,3	9,6	-47,2		
Μέση Τιμή	-6,2	-2,9	3,6	12,1	-52,0	-51,8	26,9	-14,7		
Τυπ. Απόκλιση	15,9	19,7	3,3	-	80,3	84,8	19,5	28,2		
Εύρος	37,5	47,8	6,4	0,0	171,5	179,9	38,4	50,4		

100N	II. Πλάκα και Κοιλίας									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	323,1	440,9	597,0	522,4	9,6	-96,2	654,4	527,2		
Ελάχιστη Τιμή	-2,7	4,7	-217,3	-4,6	-161,7	-96,2	-31,2	-12,0		
Μέση Τιμή	109,9	171,2	92,2	176,5	-41,5	-96,2	165,6	135,8		
Τυπ. Απόκλιση	145,1	208,2	351,1	299,7	80,6	-	327,2	261,8		
Εύρος	325,7	436,2	814,3	527,0	171,3	0,0	685,6	539,2		

Πίνακες 6.10: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, τυπική απόκλιση και εύρος) των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 100N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας							
100N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	261,6	794,1	700,8	1154,8	35,8	16,3	-68,0	437,6
	Ελάχιστη Τιμή	-17,4	-32,8	-120,7	-50,9	-702,3	16,3	-220,0	-99,2
	Μέση Τιμή	122,1	380,7	196,6	367,5	-333,2	16,3	-122,4	111,2
	Τυπ. Απόκλιση	197,2	584,7	441,5	682,3	521,9	-	84,7	286,6
	Εύρος	279,0	826,9	821,5	1205,7	738,1	0,0	152,0	536,8

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
100N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	54,7	100,4	13,0	4,4	0,5	0,9	40,8	7,2
	Ελάχιστη Τιμή	-3,3	-1,6	-2,3	-18,0	-21,3	-14,8	3,2	-22,4
	Μέση Τιμή	14,2	26,1	2,6	-5,3	-5,6	-5,0	14,4	-2,2
	Τυπ. Απόκλιση	27,2	49,6	7,2	11,5	10,4	8,5	17,7	13,6
	Εύρος	58,0	102,0	15,3	22,4	21,8	15,7	37,6	29,6

		V. Πλάκα (Storpa) και Πλάκα							
100N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	121,6	302,5	27,1	91,2	3,2	1,1	62,4	4,0
	Ελάχιστη Τιμή	-5,8	-1,2	-1,4	-2,1	-3,0	-0,1	1,2	-44,8
	Μέση Τιμή	30,5	77,7	12,9	44,5	0,0	0,5	18,9	-10,4
	Τυπ. Απόκλιση	60,9	149,9	20,2	66,0	3,1	0,9	29,1	23,1
	Εύρος	127,4	303,6	28,5	93,3	6,2	1,2	61,2	48,8

Πίνακες 6.10: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 100N.

200N	I. 2 Πλάκες									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	18,0	34,0	3,0	123,6	3,5	-6,0	144,8	0,8		
Ελάχιστη Τιμή	-164,6	-95,9	-9,8	123,6	-275,9	-294,6	23,2	-189,6		
Μέση Τιμή	-37,6	-15,1	-1,4	123,6	-112,9	-101,7	64,5	-68,3		
Τυπ. Απόκλιση	85,2	56,1	7,3	-	132,2	135,1	69,5	105,4		
Εύρος	182,6	130,0	12,8	0,0	279,4	288,5	121,6	190,4		

200N	II. Πλάκα και Κοιλίας									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	483,2	685,3	891,5	787,1	11,2	-128,7	899,2	708,0		
Ελάχιστη Τιμή	-1,4	5,5	-259,2	-13,7	-210,5	-128,7	-35,2	-16,0		
Μέση Τιμή	161,2	261,1	154,3	261,4	-73,5	-128,7	227,4	186,2		
Τυπ. Απόκλιση	218,8	323,8	505,7	455,4	101,1	-	449,2	349,9		
Εύρος	484,6	679,8	1150,7	800,8	221,7	0,0	934,4	724,0		

Πίνακες 6.11: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, τοπική απόκλιση και εύρος) των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 200N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

200N	III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας								
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	271,2	819,1	738,2	1194,1	92,5	44,7	-140,0	446,4
	Ελάχιστη Τιμή	-33,1	-76,3	-290,1	-165,8	-736,6	44,7	-244,0	-180,8
	Μέση Τιμή	119,0	371,4	161,2	346,9	-322,1	44,7	-202,1	93,1
	Τυπ. Απόκλιση	215,2	633,1	525,6	739,1	586,3	-	54,9	321,1
	Εύρος	304,3	895,4	1028,3	1359,9	829,1	0,0	104,0	627,2

200N	IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα								
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	113,1	185,6	5,9	8,0	1,2	0,0	69,6	8,8
	Ελάχιστη Τιμή	-4,8	0,8	-0,5	-35,9	-44,0	-36,1	-1,6	-48,0
	Μέση Τιμή	29,4	48,7	2,3	-9,4	-11,3	-12,2	20,8	-8,4
	Τυπ. Απόκλιση	56,0	91,3	2,7	23,3	21,9	20,8	32,9	26,6
	Εύρος	117,9	184,8	6,3	43,8	45,3	36,2	71,2	56,8

200N	V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα								
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	218,5	501,6	-8,6	5,9	5,3	2,5	635,2	5,6
	Ελάχιστη Τιμή	-3,3	-2,0	-188,2	-4,9	-4,6	-0,9	4,0	-244,8
	Μέση Τιμή	56,8	128,0	-98,4	0,5	1,6	0,8	163,8	-60,0
	Τυπ. Απόκλιση	107,9	249,1	127,0	7,6	4,5	2,4	314,3	123,3
	Εύρος	221,7	503,6	179,6	10,7	9,9	3,4	631,2	250,4

Πίνακες 6.11: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 200N.

300N	I. 2 Πλάκες									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	26,8	45,3	6,0	114,0	4,5	-0,6	236,8	1,6		
Ελάχιστη Τιμή	-265,6	-158,3	-129,4	114,0	-327,8	-358,4	29,6	-392,8		
Μέση Τιμή	-60,2	-27,5	-39,7	114,0	-150,9	-132,3	99,2	-136,5		
Τυπ. Απόκλιση	137,6	89,6	77,7	-	170,4	167,0	119,2	222,2		
Εύρος	292,5	203,6	135,4	0,0	332,3	357,8	207,2	394,4		

300N	II. Πλάκα και Κοχλίας									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	548,6	790,6	993,1	896,8	16,8	-142,2	1019,2	748,8		
Ελάχιστη Τιμή	0,1	8,4	-277,7	-18,1	-229,5	-142,2	-46,4	-22,4		
Μέση Τιμή	184,3	303,9	175,8	297,5	-94,1	-142,2	255,6	200,2		
Τυπ. Απόκλιση	247,7	373,1	559,8	519,2	117,9	-	510,7	369,3		
Εύρος	548,5	782,2	1270,8	914,9	246,4	0,0	1065,6	771,2		

Πίνακες 6.12: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, τοπική απόκλιση και εύρος) των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 300N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας							
300N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	291,3	864,5	772,5	1225,2	99,1	46,0	-138,4	442,4
	Ελάχιστη Τιμή	-23,5	-70,6	-310,6	-170,9	-757,9	46,0	-276,8	-191,2
	Μέση Τιμή	133,9	397,0	168,4	358,8	-329,4	46,0	-225,3	94,7
	Τυπ. Απόκλιση	222,6	661,2	552,3	756,5	606,0	-	75,7	321,3
	Εύρος	314,8	935,1	1083,1	1396,1	857,0	0,0	138,4	633,6

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
300N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	165,8	262,5	5,1	9,2	5,3	1,9	96,0	9,6
	Ελάχιστη Τιμή	-4,1	-4,0	-9,5	-64,6	-60,9	-50,2	-6,4	-85,6
	Μέση Τιμή	41,7	67,2	-1,7	-18,9	-14,0	-16,3	26,2	-17,8
	Τυπ. Απόκλιση	82,8	130,3	6,1	39,9	31,4	29,4	47,1	45,3
	Εύρος	169,9	266,5	14,6	73,8	66,2	52,1	102,4	95,2

		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
300N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	352,9	771,7	5,4	5,9	7,0	1,6	624,0	7,2
	Ελάχιστη Τιμή	5,8	-0,8	-591,2	-274,9	-48,6	-0,7	6,4	-399,2
	Μέση Τιμή	94,9	199,8	-292,9	-134,5	-12,4	0,5	162,6	-98,6
	Τυπ. Απόκλιση	172,0	381,3	421,8	198,6	25,2	1,6	307,6	200,5
	Εύρος	347,1	772,5	596,6	280,8	55,6	2,3	617,6	406,4

Πίνακες 6.12: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 300N.

400N	I. 2 Πλάκες									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	38,8	63,3	4,4	6,0	6,1	7,5	418,4	2,4		
Ελάχιστη Τιμή	-410,7	-245,7	-413,6	6,0	-410,7	-375,9	32,0	-723,2		
Μέση Τιμή	-92,3	-42,8	-135,0	6,0	-189,0	-155,8	161,6	-245,9		
Τυπ. Απόκλιση	213,0	138,0	241,3	-	217,0	186,9	222,4	413,5		
Εύρος	449,5	309,0	418,0	0,0	416,8	383,4	386,4	725,6		

400N	II. Πλάκα και Κοχλίας									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	583,1	840,3	1056,3	958,0	19,6	-149,1	1068,0	768,8		
Ελάχιστη Τιμή	0,7	10,9	-279,0	-23,2	-238,3	-149,1	-60,8	-28,8		
Μέση Τιμή	198,5	328,0	189,5	317,3	-102,3	-149,1	264,8	207,6		
Τυπ. Απόκλιση	261,7	396,7	591,8	555,2	125,5	-	537,6	379,5		
Εύρος	582,4	829,4	1335,3	981,2	257,9	0,0	1128,8	797,6		

Πίνακες 6.13: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, τοπική απόκλιση και εύρος) των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 400N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας							
400N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	299,0	908,5	784,4	1232,2	101,7	47,1	-138,4	442,4
	Ελάχιστη Τιμή	-19,2	-62,7	-324,5	-166,6	-784,8	47,1	-278,4	-195,2
	Μέση Τιμή	139,9	422,9	171,9	364,9	-341,5	47,1	-223,7	93,6
	Τυπ. Απόκλιση	225,0	686,8	563,5	757,5	626,9	-	74,9	323,0
	Εύρος	318,2	971,3	1108,9	1398,8	886,5	0,0	140,0	637,6

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
400N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	252,2	369,8	5,0	10,4	3,9	1,8	121,6	10,4
	Ελάχιστη Τιμή	-5,1	-2,0	-18,1	-78,7	-84,3	-73,3	-10,4	-170,4
	Μέση Τιμή	63,7	93,5	-3,5	-23,9	-20,9	-23,8	31,8	-39,2
	Τυπ. Απόκλιση	125,8	184,2	10,0	48,0	42,4	42,9	60,6	87,6
	Εύρος	257,4	371,8	23,1	89,2	88,2	75,1	132,0	180,8

		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
400N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	437,5	934,7	-1,6	10,8	7,9	-3,3	618,4	2,8
	Ελάχιστη Τιμή	9,2	2,4	-630,5	-309,1	-55,5	-6,6	8,0	-426,4
	Μέση Τιμή	117,8	239,9	-316,1	-149,1	-15,0	-4,9	164,6	-108,1
	Τυπ. Απόκλιση	213,1	463,3	444,7	226,2	28,7	2,3	302,6	212,2
	Εύρος	428,3	932,3	628,9	319,9	63,4	3,3	610,4	429,2

Πίνακες 6.13: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 400N.

500N	I. 2 Πλάκες									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	49,3	76,8	6,0	-61,9	11,1	5,4	564,8	1,6		
Ελάχιστη Τιμή	-523,5	-301,2	-625,8	-61,9	-523,5	-377,0	32,0	-952,0		
Μέση Τιμή	-117,0	-54,5	-204,7	-61,9	-213,8	-169,1	211,7	-322,1		
Τυπ. Απόκλιση	271,9	168,1	364,7	-	260,3	198,7	305,8	545,6		
Εύρος	572,9	378,0	631,8	0,0	534,6	382,4	532,8	953,6		

500N	II. Πλάκα και Κοχλίας									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	607,7	874,7	1108,7	1003,4	19,4	-156,2	1084,0	773,6		
Ελάχιστη Τιμή	0,7	13,7	-278,1	-25,7	-244,5	-156,2	-76,8	-36,0		
Μέση Τιμή	210,0	347,0	205,2	333,0	-106,0	-156,2	264,8	211,2		
Τυπ. Απόκλιση	271,0	412,9	616,1	581,1	130,3	-	548,9	382,7		
Εύρος	607,0	860,9	1386,8	1029,1	263,9	0,0	1160,8	809,6		

Πίνακες 6.14: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, τοπική απόκλιση και εύρος) των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 500N.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας							
		Μέτρα θέσης και διασποράς		Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3	
500N		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	320,9	957,8	58,5	30,2	100,3	46,0	-130,4	438,4
	Ελάχιστη Τιμή	-13,4	-56,1	-318,6	-146,2	-801,9	46,0	-283,2	-200,0
	Μέση Τιμή	153,8	450,8	-68,2	-28,9	-350,8	46,0	-217,6	90,9
	Τυπ. Απόκλιση	236,4	716,9	216,9	101,5	638,0	-	78,7	322,9
	Εύρος	334,3	1013,9	377,2	176,4	902,2	0,0	152,8	638,4

		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
		Μέτρα θέσης και διασποράς		Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3	
500N		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	385,8	534,1	4,9	13,2	7,6	4,4	138,4	11,2
	Ελάχιστη Τιμή	-2,1	-3,0	-1,3	-59,4	-138,8	-104,8	-18,4	-244,8
	Μέση Τιμή	98,6	134,7	1,7	-17,2	-32,7	-33,3	34,4	-57,8
	Τυπ. Απόκλιση	191,5	266,3	2,7	37,7	70,9	62,0	70,6	124,8
	Εύρος	387,9	537,2	6,2	72,7	146,4	109,2	156,8	256,0

		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
		Μέτρα θέσης και διασποράς		Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3	
500N		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	474,5	1000,9	1,7	13,2	11,2	1,3	618,4	1,6
	Ελάχιστη Τιμή	8,6	5,0	-691,3	-347,6	-64,6	-38,8	9,6	-468,8
	Μέση Τιμή	131,2	260,6	-344,8	-167,2	-17,0	-18,7	172,4	-124,6
	Τυπ. Απόκλιση	229,0	493,5	490,0	255,1	33,9	28,3	297,7	229,7
	Εύρος	465,9	995,9	692,9	360,8	75,8	40,1	608,8	470,4

Πίνακες 6.14: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 500N.

600N	I. 2 Πλάκες									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	59,1	90,3	4,2	-100,0	11,7	4,4	749,6	0,0		
Ελάχιστη Τιμή	-647,1	-362,3	-822,9	-100,0	-647,1	-389,8	32,8	-1200,8		
Μέση Τιμή	-146,7	-65,3	-271,5	-100,0	-248,1	-190,8	278,7	-410,4		
Τυπ. Απόκλιση	334,8	202,0	477,5	-	311,5	214,3	408,0	684,7		
Εύρος	706,2	452,6	827,2	0,0	658,8	394,1	716,8	1200,8		

600N	II. Πλάκα και Κοιλίας									
	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4		
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	
Μέγιστη Τιμή	617,4	893,7	1150,9	1038,6	23,1	-170,1	1076,8	775,2		
Ελάχιστη Τιμή	0,5	15,6	-266,8	-32,8	-252,4	-170,1	-96,0	-43,2		
Μέση Τιμή	218,7	367,4	219,7	343,3	-109,5	-170,1	258,6	216,4		
Τυπ. Απόκλιση	272,6	422,7	633,3	602,8	133,7	-	549,1	384,5		
Εύρος	617,0	878,1	1417,7	1071,5	275,5	0,0	1172,8	818,4		

Πίνακες 6.15: Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη (μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή, τοπική απόκλιση και εύρος) των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 600N.

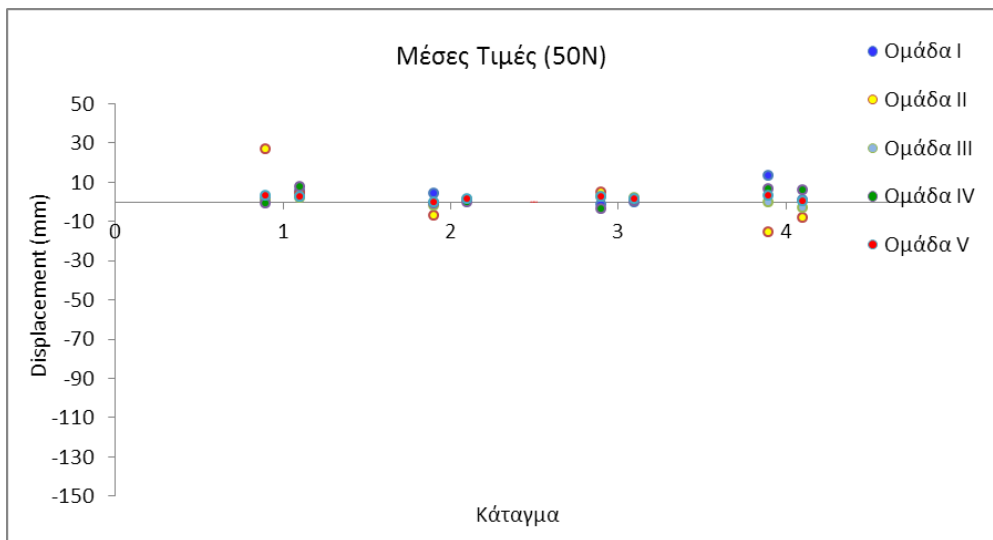
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

		III. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Κοχλίας							
600N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	344,1	1004,5	853,2	1267,5	99,8	40,8	-110,4	415,2
	Ελάχιστη Τιμή	0,2	-43,9	-300,4	-127,9	-839,6	40,8	-292,0	-204,0
	Μέση Τιμή	172,1	480,3	203,6	390,8	-369,9	40,8	-217,3	81,3
	Τυπ. Απόκλιση	243,1	741,3	590,4	763,5	664,3	-	95,0	312,4
	Εύρος	343,8	1048,4	1153,6	1395,4	939,4	0,0	181,6	619,2

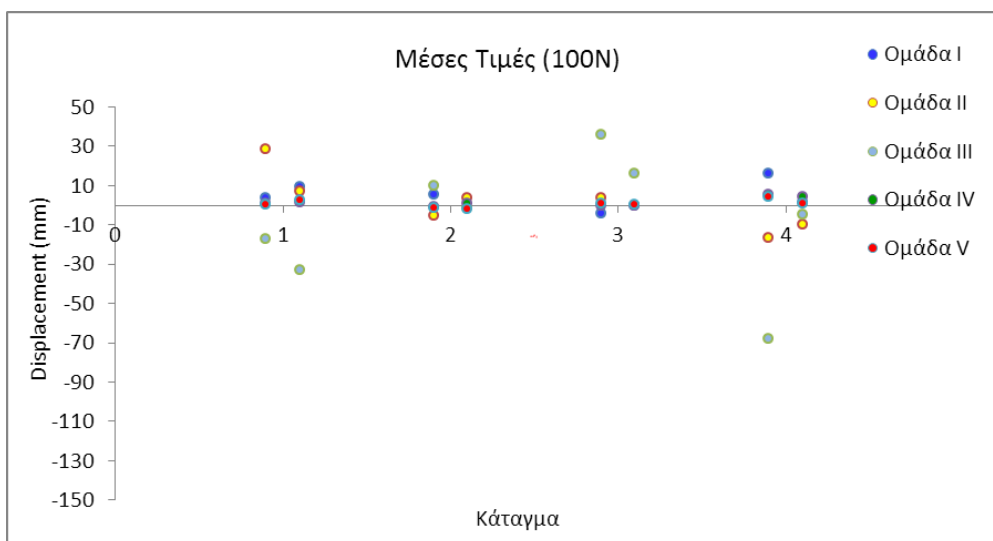
		IV. Αυτοκλειδούμενη Πλάκα και Πλάκα							
600N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	519,1	690,8	17,7	18,3	10,2	5,6	171,2	12,8
	Ελάχιστη Τιμή	4,0	-2,9	2,0	-36,8	-188,7	-137,8	-24,0	-206,4
	Μέση Τιμή	133,4	173,8	8,1	-7,1	-46,6	-43,9	39,6	-46,4
	Τυπ. Απόκλιση	257,2	344,7	6,7	27,8	95,1	81,3	89,1	106,8
	Εύρος	515,1	693,7	15,6	55,1	199,0	143,3	195,2	219,2

		V. Πλάκα (Stoppa) και Πλάκα							
600N	Μέτρα θέσης και διασποράς	Κάταγμα 1		Κάταγμα 2		Κάταγμα 3		Κάταγμα 4	
		clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)	clip1 (μm)	clip2 (μm)
	Μέγιστη Τιμή	504,3	1063,2	4,5	12,7	17,8	-4,2	624,8	-2,4
	Ελάχιστη Τιμή	23,8	4,8	-756,7	-384,3	-85,7	-80,9	15,2	-526,4
	Μέση Τιμή	151,6	279,9	-376,1	-185,8	-22,3	-42,5	185,2	-147,2
	Τυπ. Απόκλιση	235,4	522,3	538,3	280,7	45,1	54,2	294,6	253,6
	Εύρος	480,5	1058,5	761,2	397,0	103,5	76,7	609,6	524,0

Πίνακες 6.15: (συνέχεια) Έκαστος των άνωθι πινάκων αναφέρεται και σε μια ομάδα οστεοσύνθεσης. Φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη των σχετικών μετατοπίσεων των clips που αντιστοιχούν σε τιμή του φορτίου ίση με 600N.

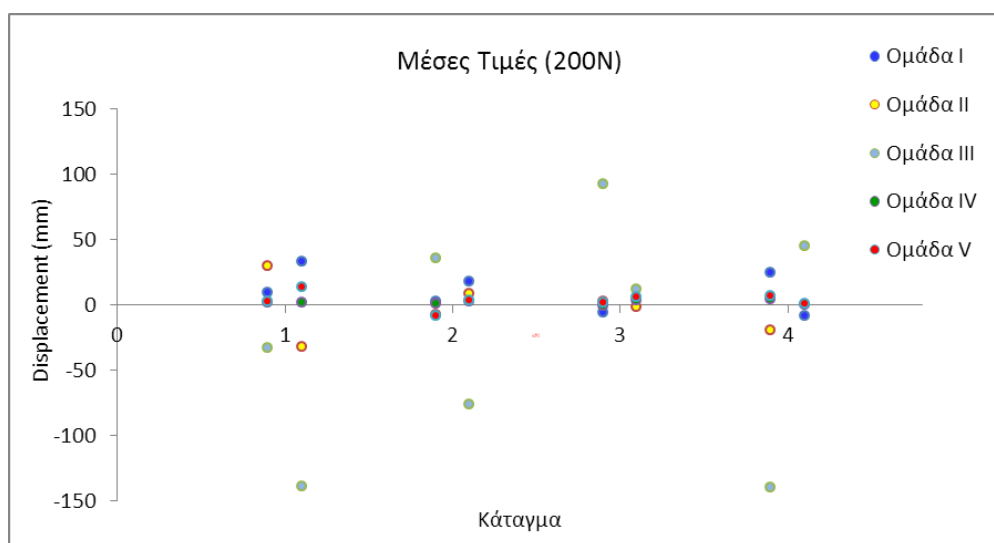


Σχήμα 6.8: Ιστόγραμμα που απεικονίζει για κάθε ομάδα (Ομάδα I έως V), για τα τέσσερα κατάγματα τη μέση τιμή της σχετικής μετατόπισης για τα clip 1, 2 (αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) για τιμή του φορτίου ίση με 50N.

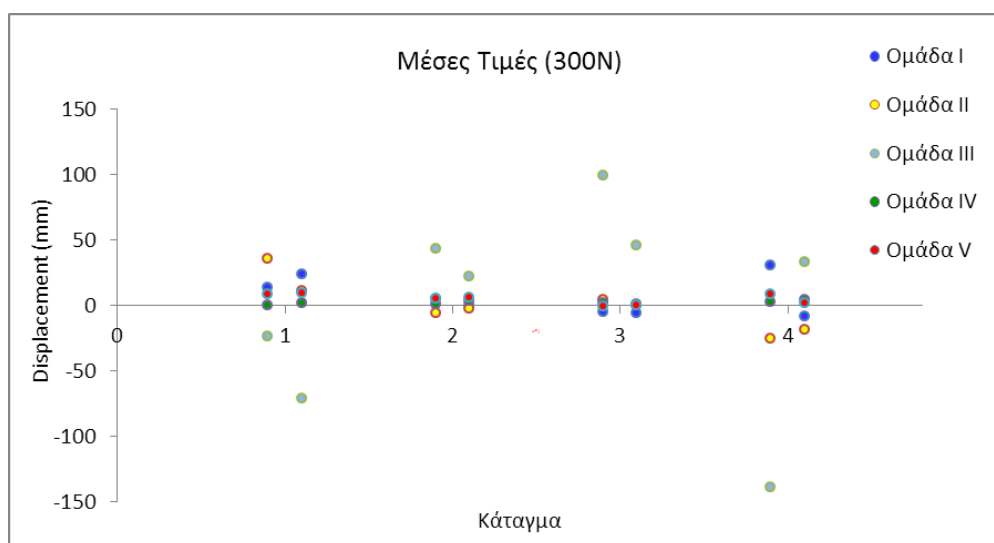


Σχήμα 6.9: Ιστόγραμμα που απεικονίζει για κάθε ομάδα (Ομάδα I έως V), για τα τέσσερα κατάγματα τη μέση τιμή της σχετικής μετατόπισης για τα clip 1, 2 (αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) για τιμή του φορτίου ίση με 100N.

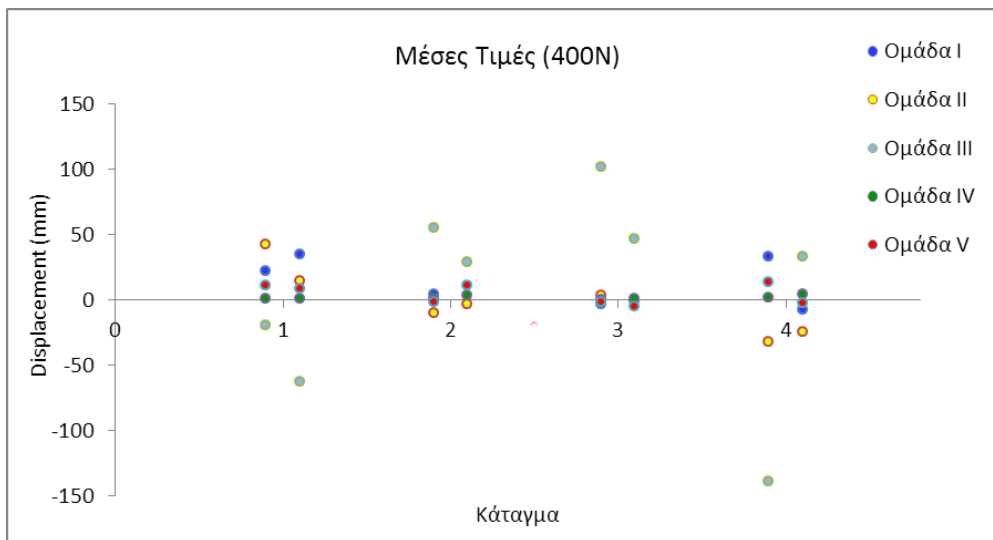
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



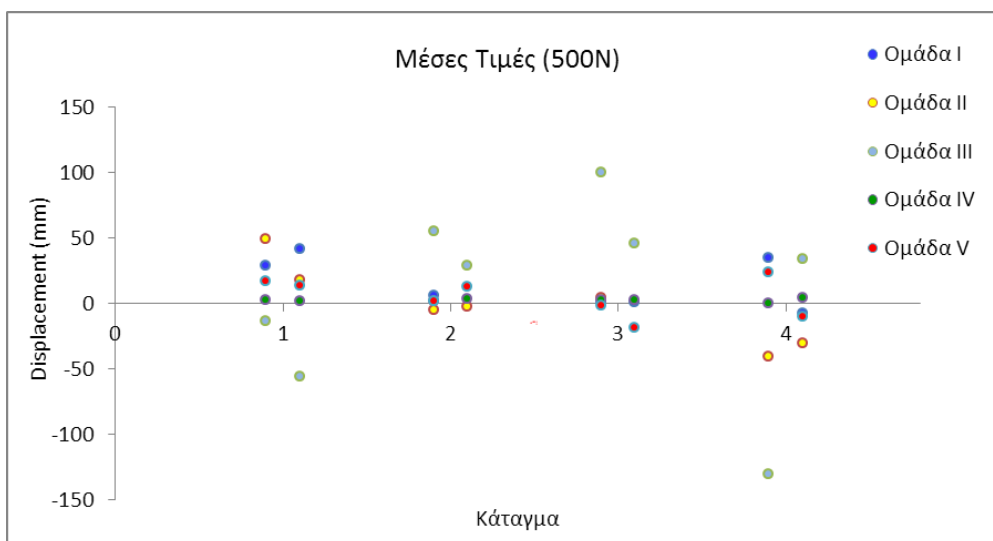
Σχήμα 6.10: Ιστόγραμμα που απεικονίζει για κάθε ομάδα (Ομάδα I έως V), για τα τέσσερα κατάγματα τη μέση τιμή της σχετικής μετατόπισης για τα clip 1, 2 (αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) για τιμή του φορτίου ίση με 200N.



Σχήμα 6.11: Ιστόγραμμα που απεικονίζει για κάθε ομάδα (Ομάδα I έως V), για τα τέσσερα κατάγματα τη μέση τιμή της σχετικής μετατόπισης για τα clip 1, 2 (αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) για τιμή του φορτίου ίση με 300N.

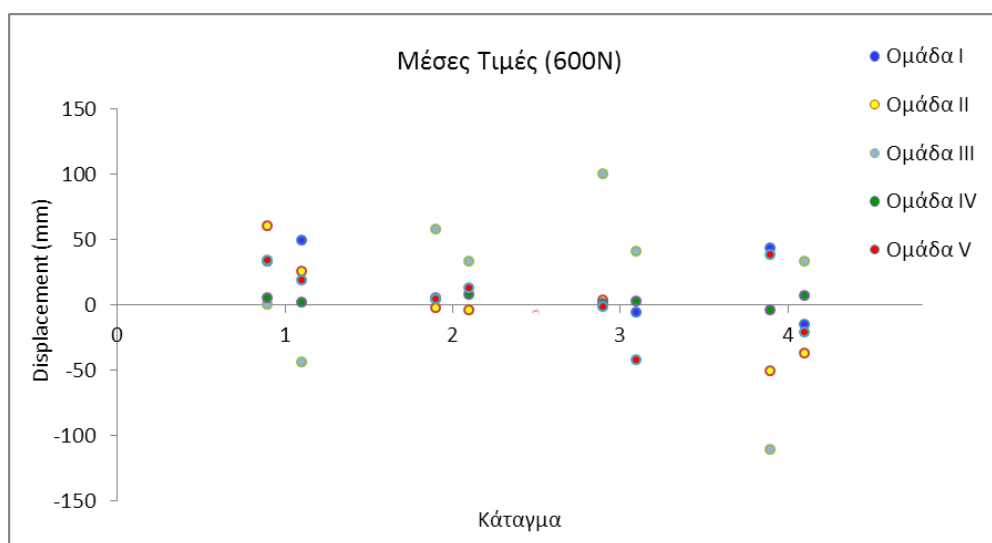


Σχήμα 6.12: Ιστόγραμμα που απεικονίζει για κάθε ομάδα (Ομάδα I έως V), για τα τέσσερα κατάγματα τη μέση τιμή της σχετικής μετατόπισης για τα clip 1, 2 (αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) για τιμή του φορτίου ίση με 400N.

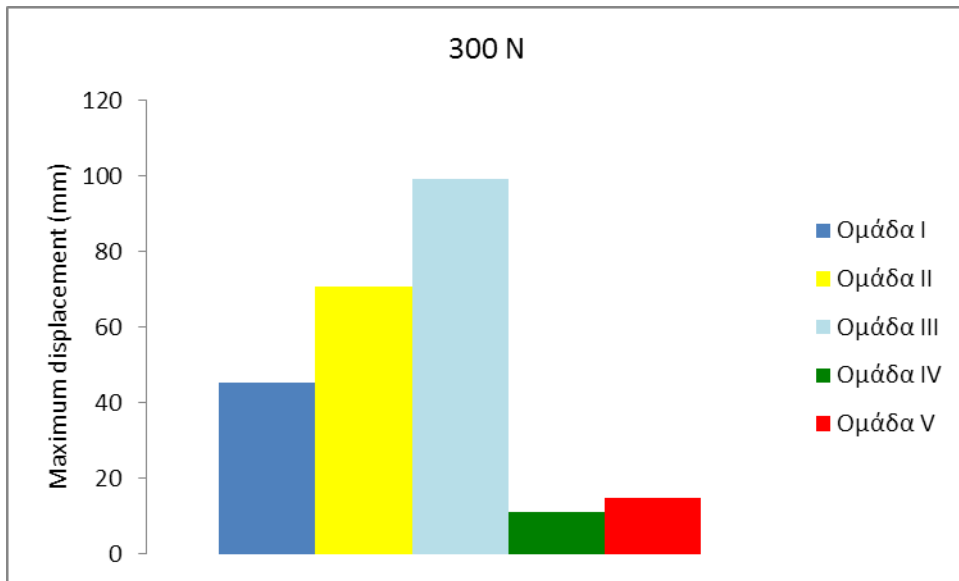


Σχήμα 6.13: Ιστόγραμμα που απεικονίζει για κάθε ομάδα (Ομάδα I έως V), για τα τέσσερα κατάγματα τη μέση τιμή της σχετικής μετατόπισης για τα clip 1, 2 (αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) για τιμή του φορτίου ίση με 500N.

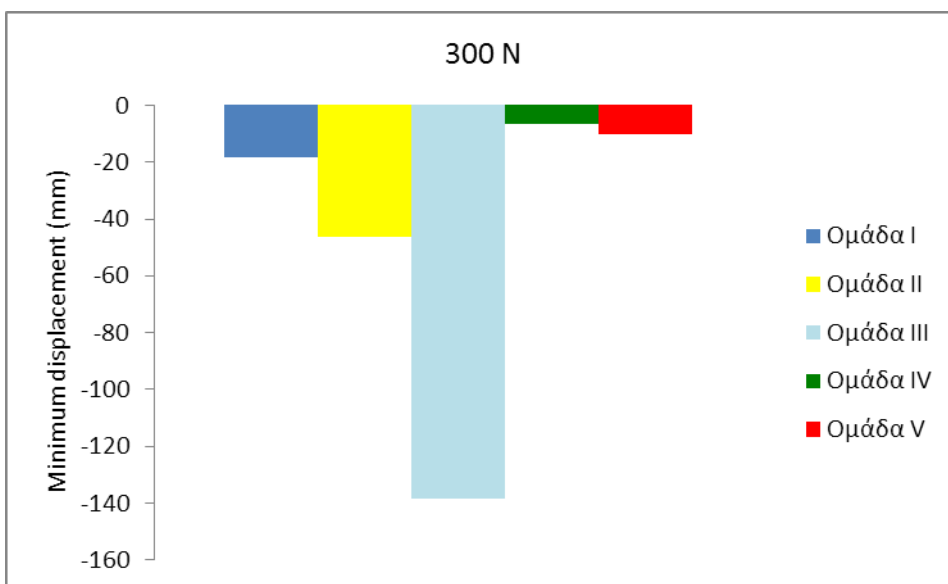
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πυέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήμα 6.14: Ιστόγραμμα που απεικονίζει για κάθε ομάδα (Ομάδα I έως V), για τα τέσσερα κατάγματα τη μέση τιμή της σχετικής μετατόπισης για τα clip 1, 2 (αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) για τιμή του φορτίου ίση με 600N.

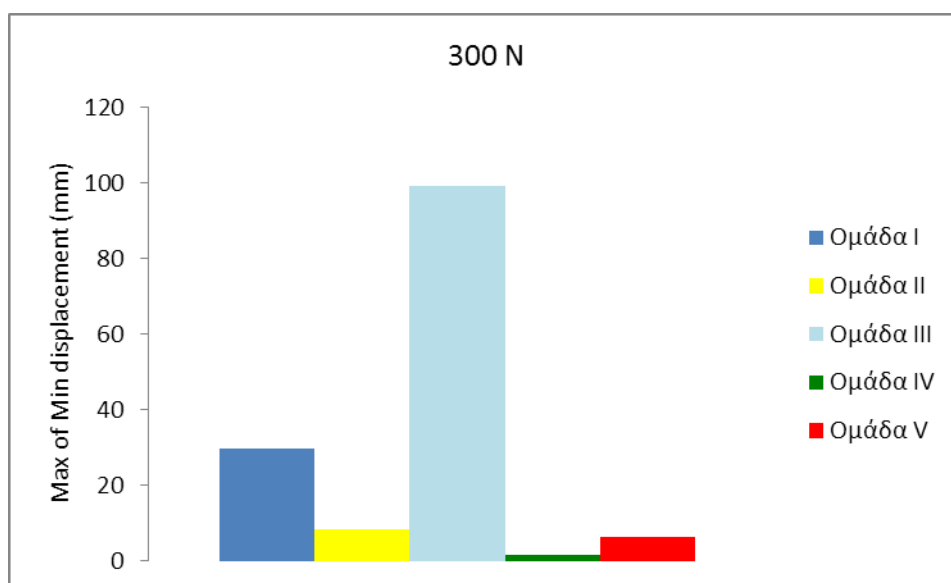


Σχήμα 6.15: Για τιμή του φορτίου ίση με 300N φαίνεται η τιμή της μέγιστης σχετικής μετατόπισης όλων των καταγμάτων για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης.

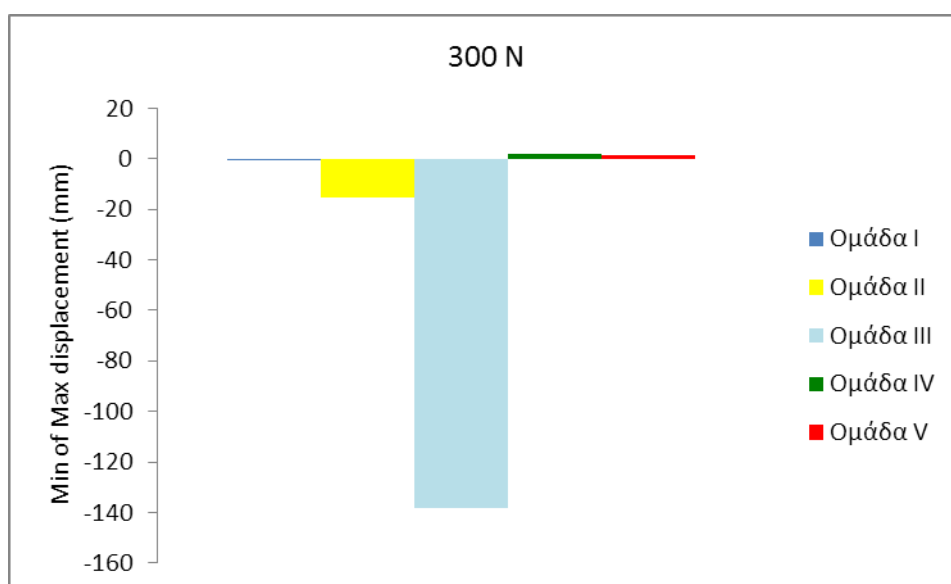


Σχήμα 6.16: Για τιμή του φορτίου ίση με 300N φαίνεται η τιμή της ελάχιστης σχετικής μετατόπισης όλων των καταγμάτων για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης.

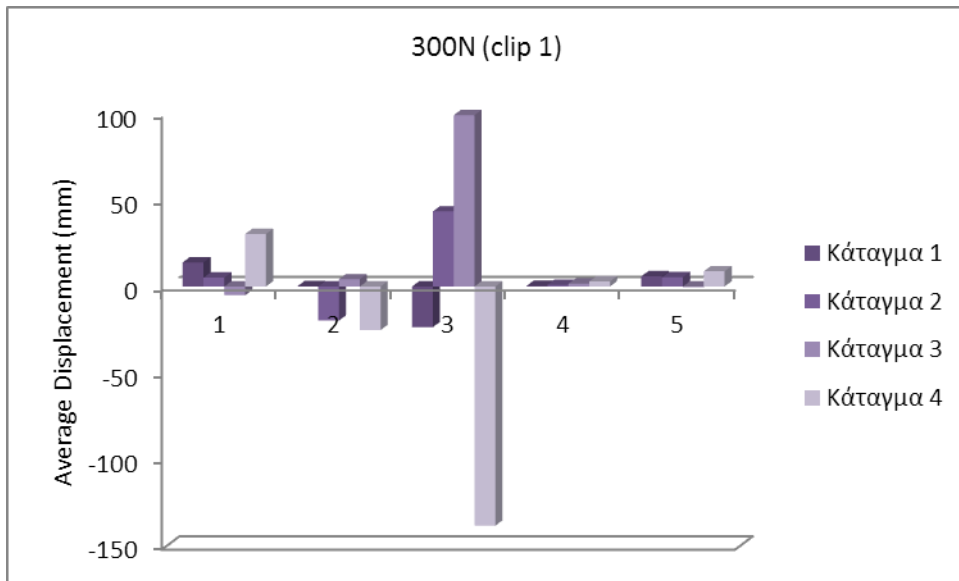
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



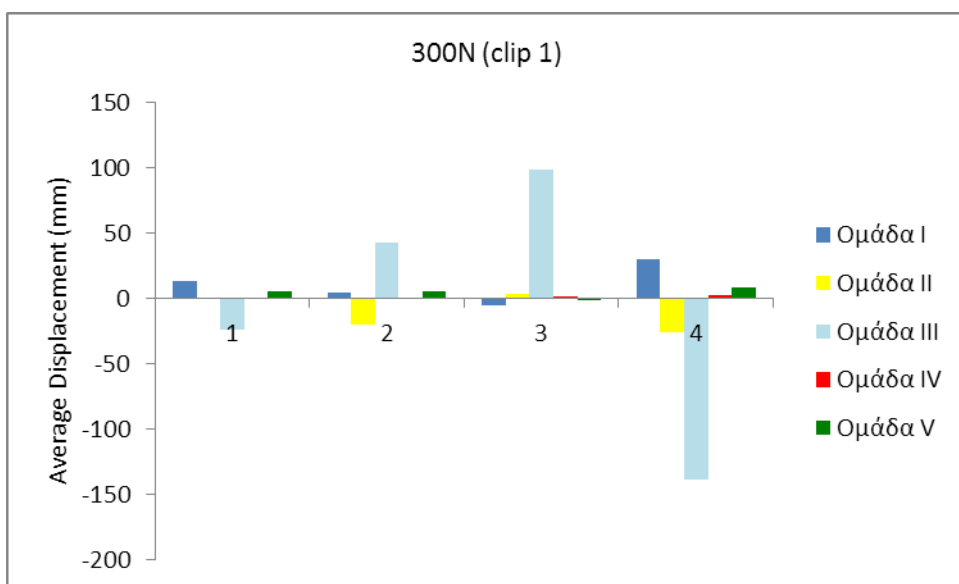
Σχήμα 6.17: Για τιμή του φορτίου ίση με 300N φαίνεται η τιμή της ελάχιστης των μεγίστων σχετικής μετατόπισης ή «άνοιγμα» από όλα τα κατάγματα για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης.



Σχήμα 6.18: Για τιμή του φορτίου ίση με 300N φαίνεται η τιμή της μέγιστης των ελάχιστων σχετικής μετατόπισης ή «άνοιγμα» από όλα τα κατάγματα για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης.

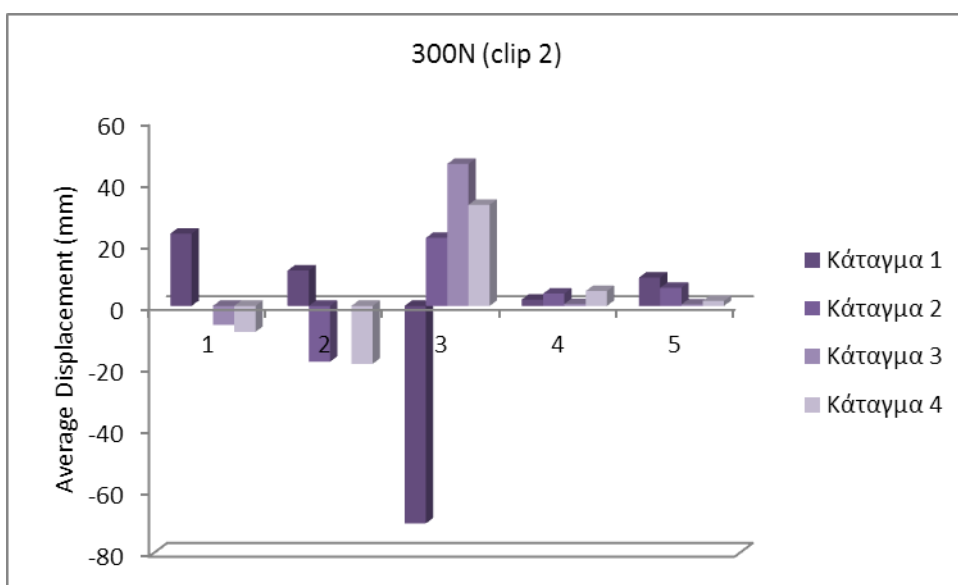


Σχήμα 6.19: Για τιμή του φορτίου ίση με 300N η μέση σχετική μετατόπιση ή μέσο «άνοιγμα» κάθε ομάδας οστεοσύνθεσης για κάθε κάταγμα για το clip 1.

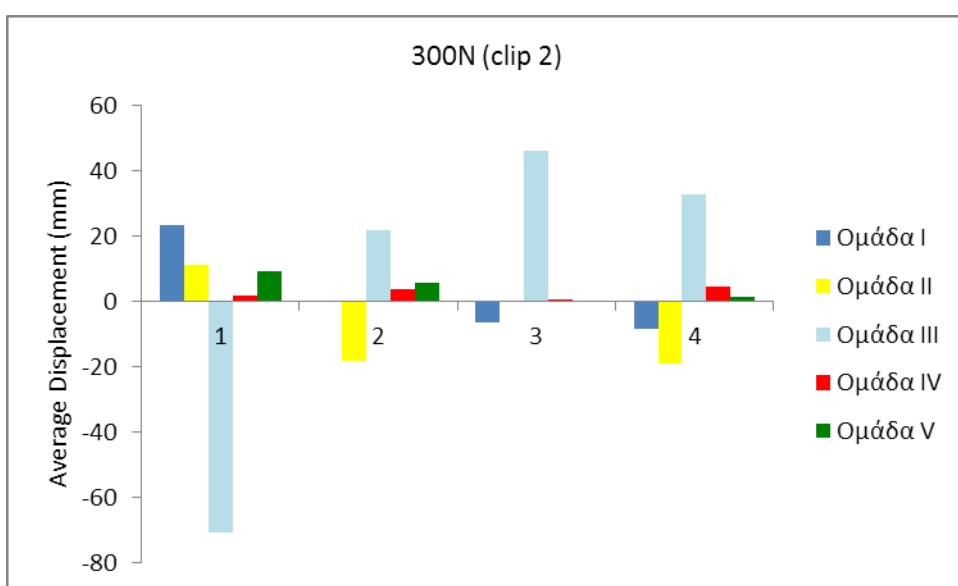


Σχήμα 6.20: Για τιμή του φορτίου ίση με 300N η μέση σχετική μετατόπιση ή μέσο «άνοιγμα» κάθε κατάγματος για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης για το clip 1.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)



Σχήμα 6.21: Για τιμή του φορτίου ίση με 300N η μέση σχετική μετατόπιση ή μέσο «άνοιγμα» κάθε ομάδας οστεοσύνθεσης για κάθε κάταγμα για το clip 2.



Σχήμα 6.22: Για τιμή του φορτίου ίση με 300N η μέση σχετική μετατόπιση ή μέσο «άνοιγμα» κάθε κατάγματος για κάθε ομάδα οστεοσύνθεσης για το clip 2.

6.2 Συμπεράσματα

Στη διπλωματική αυτή εργασία περιγράφηκε ένα πειραματικό πρωτόκολλο με βάση το οποίο μελετήθηκε αφενός η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής D.I.C. στη μελέτη οστεοσυνθετιμένων καταγματικών πυέλων (εμβιομηχανικό σκέλος) και αφετέρου επιχειρήθη μια πρώτη κλινική αξιολόγηση τεχνικών οστεοσύνθεσης που βασίζονται σε συνδυασμούς απλών και κλειδούμενων πλακών και κοχλιών (κλινικό σκέλος).

Κατεβλήθη προσπάθεια υπέρβασης σειράς δυσχερειών οι οποίες οφείλονται αφενός μεν στην πολύπλοκη γεωμετρία της συγκεκριμένης ανατομικής περιοχής, αφετέρου δε, στην ορθή προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών φόρτισης και στήριξης κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Επιπλέον δυσχέρειες εμφανίστηκαν δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκαν πτωματικές ημιπύελοι (ο βαθμός οστεοπόρωσης των οποίων διέφερε σε εξαιρετικό βαθμό) γεγονός το οποίο δημιουργεί αναπόφευκτα διασπορά στα πειραματικά αποτελέσματα. Ιδιαίτερα, για μια συγκριτική μελέτη ο συγκεκριμένος παράγοντας μπορεί να αποβεί καθοριστικός.

Για την υπέρβαση των -σχετικών με το πολύπλοκο της γεωμετρίας- δυσχερειών αποδείχθηκε καθοριστική η χρήση της τεχνικής D.I.C. για τη μέτρηση των πεδίων μετατοπίσεων κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Για την υπέρβαση των δυσχερειών προσομοίωσης των συνοριακών συνθηκών και της φόρτισης απεδείχθη καθοριστική η συμβολή της εμπειρίας εξειδικευμένων ορθοπεδικών (τους οποίους από τη θέση αυτή ευχαριστούμε θερμά). Δοκιμάστηκαν αρκετά «σενάρια» σε σειρά προκαταρκτικών πειραμάτων έως ότου καταλήξουμε στη μεθοδολογία που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Σχετικά με την υπέρβαση των δυσχερειών από τη διαφοροποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων είναι σαφές ότι η μόνη ενδεδειγμένη οδός είναι η αύξηση του δείγματος το οποίο εν μέρει μόνο ήταν δυνατό να επιτευχθεί στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας.

Η αξιολόγηση των δεδομένων από την πειραματική διαδικασία κατέδειξε ότι η τεχνική D.I.C. μπορεί να δώσει απαντήσεις σε αρκετά ανοιχτά προβλήματα σχετικά με την ποσοτική περιγραφή των συνιστωσών των πεδίων μετατοπίσεων τα οποία αναπτύσσονται σε μια καταγματική ημιπύελο ασχέτως του τρόπου οστεοσύνθεσης. Αυτό επιτυγχάνεται αφενός μεν γιατί καθίσταται περιττή η προ-επιλογή των σημείων στα οποία θα γίνεται η μέτρηση (όπως απαιτείται από πολλές παραδοσιακές τεχνικές) και αφετέρου γιατί είναι εφικτός ο προσδιορισμός των συνιστωσών των πεδίων μετατοπίσεων στις τρεις διαστάσεις. Είναι δηλαδή εφικτή η μέτρηση της σχετικής μετατόπισης οποιουδήποτε ζεύγους σημείων εκατέρωθεν οποιασδήποτε καταγματικής

γραμμής για οποιοδήποτε επίπεδο φόρτισης και σε οποιοδήποτε άξονα θεωρείται κρίσιμος.

Στην ίδια κατεύθυνση η δυνατότητα της συγκεκριμένης τεχνικής να διακρίνει και να απομονώνει τη συνιστώσα του πεδίου μετατοπίσεων που αναφέρεται σε στερεά μετατόπιση αλλά και σε στερεά στροφή είναι καθοριστική δεδομένου ότι επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των σχετικών μετατοπίσεων οι οποίες είναι και οι μόνες που έχουν σημασία τόσο από πλευράς Μηχανικής (δεδομένου ότι υπαγορεύουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων) όσο και από κλινική σκοπιά (δεδομένου ότι υπαγορεύουν το «άνοιγμα» της διακαταγματικής γραμμής).

Είναι σημαντικό, τέλος, να αναφερθεί ότι η χρήση της τεχνικής D.I.C. επιτρέπει τη μέτρηση της ολικής σχετικής μετατόπισης των κατεαγόντων ως υπέρθεση «ορθών» μετατοπίσεων (απομάκρυνση κάθετη στη διακαταγματική επιφάνεια) και μετατοπίσεων «ολίσθησης» (εντός της διακαταγματικής επιφάνειας).

Όσον αφορά στην κλινική σκοπιά (τη σχετική αξιολόγηση των τεχνικών οστεοσύνθεσης) είναι μάλλον παρακινδυνευμένη η εξαγωγή κατηγορηματικών συμπερασμάτων δεδομένων κυρίως των διαφορών «ποιότητας» των δοκιμίων και του σχετικά μικρού δείγματος ανά τεχνική οστεοσύνθεσης. Η διασπορά των αποτελεσμάτων καταδεικνύει σαφώς την ανάγκη συμπληρωματικού αριθμού πειραμάτων ανά τεχνική οστεοσύνθεσης και ίσως τελικώς τη χρήση τεχνητών ημιπυέλων προηγμένης γενιάς (ίσως τύπου sawbone: 4^{ης} γενιάς). Τόσο το κόστος μιας τέτοιας προσέγγισης όσο και η κύρια στόχευση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θέτουν εκτός αντικειμένου ένα τέτοιο βήμα.

Παρόλα αυτά, είναι δυνατόν, με ικανοποιητικό επίπεδο εμπιστοσύνης, να λεχθεί ότι η τεχνική οστεοσύνθεσης τύπου 4 (συνδυασμός απλής και κλειδούμενης πλακών οστεοσύνθεση) εμφανίζεται να πλεονεκτεί των υπολοίπων τεχνικών που μελετήθηκαν είτε θεωρηθεί ως κριτήριο η μέση τιμή της σχετικής μετατόπισης των κατεαγόντων είτε ληφθεί ως κριτήριο η μέγιστη σχετική μετατόπιση του συνόλου των καταγμάτων. Απεναντίας, η 3^η τεχνική οστεοσύνθεση που μελετήθηκε (συνδυασμός κλειδούμενης πλάκα και κοχλία) εμφανίζεται ως η λιγότερο ελκυστική (αν και ο αριθμός των τελικώς αξιολογηθέντων πειραμάτων είναι οριακά αποδεκτός από στατιστική σκοπιά).

Κλείνοντας, είναι απαραίτητο να τονισθεί ότι η έλλειψη προτυποποίησης (standardization) των σχετικών πειραμάτων σε συνδυασμό με την έλλειψη σαφών κριτηρίων ορισμού της αστοχίας της οστεοσύνθεσης δημιουργεί στον ερευνητή σοβαρά προβλήματα τα οποία επιτείνουν τα ήδη υπάρχοντα (όπως αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου).

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της μελέτης για την παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψε μια σειρά επιπλέον ερευνητικών ερωτημάτων που θα μπορούσαν και θα έπρεπε να αντιμετωπιστούν σε μελλοντικές μελέτες.

Κατ' αρχήν, για την καλύτερη εφαρμογή της τεχνικής που περιγράφηκε (D.I.C.) σε αυτήν την εργασία προτείνεται η προτυποποίηση της πειραματικής διαδικασίας ώστε να είναι εφικτή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Σημαντική θα ήταν επίσης η μελέτη της επίδρασης του τρόπου στήριξης των δοκιμίων, ιδιαίτερα δε η εύρεση των τρόπων εξάλειψης της στροφής ως στερεού σώματος του προσομοιώματος του μηριαίου οστού, η οποία παρατηρήθηκε σε ορισμένα πειράματα. Στην ίδια κατεύθυνση, πρέπει να μελετηθούν τρόποι εξάλειψης των μετατοπίσεων και των στροφών του στερεού σώματος των ημιπύελων.

Καθώς τα δοκίμια παρουσίαζαν διαφορετική διαβάθμιση οστικής πυκνότητας (διαφορετικός βαθμός οστεοπόρωσης), για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, συνίσταται η χρήση δοκιμίων αυξημένης ομοιογένειας ή σε περίπτωση που αυτό είναι εφικτό η χρήση τεχνητών ημιπύελων 4^{15} γενιάς.

Τέλος, για την ανάδειξη στατιστικώς σημαντικών διαφορών ανάμεσα στις διαφορετικές ομάδες οστεοσύνθεσης, προτείνεται η συλλογή δεδομένων από μεγαλύτερο μέγεθος δείγματος τόσο συνολικά όσο και ανά τύπο οστεοσύνθεσης.

Βιβλιογραφία

A. Επιστημονικά άρθρα

[A1] Patriquin M. L., Steyn M. and Loth S.R., *Metric analysis of sex differences in South African black and white pelvises*, Forensic science international, 2005.

[A2] Burgess A.R., Eastridge B.J., Young J.W., Ellison T.S., Ellison P.S. Jr, Poka A., Bathon G.H. and Brumback R.J., *Pelvic ring disruptions: effective classification system and treatment protocols*, Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 1990.

[A3] Tile M., *Pelvic ring fractures: should they be fixed?*, The Bone & Joint Journal, 1998.

[A4] Ji Wan Kim, Dong-Hoon Baek, Jae Hyun Kim and Kim Y.C., *Neurologic Injury within Pelvic Ring Injuries*, Journal of the Korean Fracture Society, 2014.

[A5] Helfet D.L., Borrelli J., Di Pasquale T. and Sanders R., *Stabilization of acetabular fractures in elderly patients*, The Journal of Bone & Joint Surgery, 1992.

[A6] Mouhsine E., Garofalo R., Borens O., Blanc C.H., Wettstein M. and Leyvraz P.F., *Cable fixation and early total hip arthroplasty in the treatment of acetabular fractures in elderly patients*, Journal of Arthroplasty, 2004.

[A7] Tile M., Helfet D.L. and Kellam J.F., *Fractures of the pelvis and acetabulum*, Lippincott Illustrated Reviews Series, 2003

[A8] Giannoudis P.V., Grotz M.R., Papakostidis C. and Dinopoulos H., *Operative treatment of displaced fractures of the acetabulum. A meta-analysis*, The Journal of Bone & Joint Surgery, 2005.

[A9] Matta J.M., *Fractures of the acetabulum: accuracy of reduction and clinical results in patients managed operatively within three weeks of the injury*, The Journal of Bone & Joint Surgery, 1996.

[A10] Mears D.C., Velyvis J.H. and Chang C.P., *Displaced acetabular fractures managed operatively: indicators of outcome*, Clinical Orthopaedics and Related Research, 2003.

[A11] Helfet D.L. and Virkus W., *Acetabular fractures in the elderly*, unpublished data, 2003.

[A12] Letournel E. and Judet R., *Fractures of the acetabulum*, 2nd edn. Springer-Verlag, 1993.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

[A13] Pagenkopf E., Grose A., Partal G., and Helfet D.L., *Acetabular Fractures in the Elderly: Treatment Recommendations*, HSS Journal, 2006.

[A14] Pohlemann T., Kiessling B., Gänsslen A., Bosch U. and Tscherne H., *Standardized osteosynthesis techniques for the pelvic ring. Analysis of a patient sample and surgical technique*, Der Orthopade, 1992.

[A15] Simonian P.T., Chip Jr. R., Harrington R.M. and Tencer A.F., *The Acetabular T-Type Fracture: A Biomechanical Evaluation of Internal Fixation*, Current Orthopaedic Practice, 1995.

[A16] Shazar N., Brumback R.J., Novak V.P. and Belkoff S.M., *Biomechanical Evaluation of Transverse Acetabular Fracture Fixation*, Current Orthopaedic Practice, 1998.

[A17] Culemann U., Holstein J.H., Köhler D., Tzioupis C.C., Pizanis A., Tosounidis G., Burkhardt M. and Pohlemann T., *Different stabilisation techniques for typical acetabular fractures in the elderly. A biomechanical assessment*, National Library of Medicine, 2009.

[A18] Ramin M., Bryn J., Qingan Z., and Broekhuysen H., *A biomechanical study of conventional acetabular internal fracture fixation versus locking plate fixation*, Canadian Journal of Surgery, 2009.

[A19] Holbrook T.L., Grazier K., Kelsey J.L. and Stauffer R.N., *The frequency of occurrence, impact, and cost of selected musculoskeletal conditions in the United States*, American Academy of Orthopedic Surgeons, 1984.

[A20] Khajavi K., Lee A. T., Lindsey D.P. and Leucht P., corresponding author Bellino M.J. and Giori N.J., *Single column locking plate fixation is inadequate in two column acetabular fractures. A biomechanical analysis*, Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 2010.

[A21] Yuntong Z., Yang T., Panfeng W., Xue Z., Shuogui X. and Chuncai Z., *Biomechanical Comparison of Different Stabilization Constructs for Unstable Posterior Wall Fractures of Acetabulum. A Cadaveric Study*, PLoS Journals, 2013.

[A22] Wang L., Wu X., He Q., Xu F. and Liu H., *Biomechanical Comparative Study On Four Internal Fixations For Acetabular Fractures In Quadrilateral Area*, Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2015.

[A23] Liu H., Li L., Wu X., Xu H. and Zhang R., *Biomechanical Research Of Different Internal Fixations Using Locking Reconstruction Plate For Acetabular*

Transverse Fracture, Chinese journal of reparative and reconstructive surgery, 2015.

[A24] Shim V., Böhmeb J., Vaitlb P., Klimac S., Jostenb C. and Anderson I., *Finite element analysis of acetabular fractures—development and validation with a synthetic pelvis*, Journal of Biomechanics, 2010.

[A25] Yanping F., Jianyin L., Feng Z., Zhiqiang L., Weiyi C. and Ximing L., *Biomechanical Analysis of the Fixation System for T-Shaped Acetabular Fracture*, Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2015.

[A26] Rommens P.M., Wagner D. and Hofmann A., *Surgical management of osteoporotic pelvic fractures: a new challenge*, Surgery European Journal of Trauma and Emergency, 2012.

[A27] Spencer R.F., *Acetabular fractures in older patient*, The Journal of Bone & Joint Surgery, 1989.

[A28] Matta J.M., Anderson L.M., Epstein H.C. and Hendricks P., *Fractures of the acetabulum: a retrospective analysis*, Clinical Orthopaedics and Related Research, 1986.

[A29] Hill B.W., Switzer J.A. and Cole P.A., *Management of High-Energy Acetabular Fractures in the Elderly Individuals*, Geriatric Orthopaedic Surgery & Rehabilitation, 2012.

[A30] Mears D. C., *Surgical Treatment of Acetabular Fractures in Elderly Patients With Osteoporotic Bone*, Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1999.

[A31] Hauschild O., Strohm P.C., Culemann U., Pohlemann T., Suedkamp N.P., Koestler W. and Schmal, H., *Mortality in Patients With Pelvic Fractures: Results From the German Pelvic Injury Register*, Journal of Trauma-Injury Infection & Critical Care, 2008

B. Βιβλία και επιστημονικές σημειώσεις

- [B1] Martin R.B., *A Genealogy of Biomechanics*, University of Pittsburgh, 1999.
- [B2] Borelli G.A., *De Motu Animalium*, 1680.
- [B3] Oatis C.A., *Kinesiology: the mechanics and pathomechanics of human movement*, Lippincott Williams & Wilkins, 2009.
- [B4] Κουρκουλής Σ., *Σημειώσεις μαθήματος «Εισαγωγή στην Εμβιομηχανική», Σχολή εφαρμοσμένων μαθηματικών και φυσικών επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.*
- [B5] Sobotta J., *Ατλας ανατομικής του ανθρώπου 2: θώρακας, κοιλιά, πύελος, κάτω άκρα, δέρμα*, Επιστημονικές Εκδόσεις Παρισιάνου, 1983.
- [B6] Gray H. and Carter H.V., (1858), *Anatomy Descriptive and Surgical*, London: John W. Parker and Son, retrieved 2011.
- [B7] MacPherson G., Schuenke R. and Schumacher S., *Atlas of Anatomy*, Εκδόσεις Thieme, 2012
- [B8] Κυριακού Φ., *Προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς άθικτης ανθρώπινης πύελου: In silico μελέτη*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013
- [B9] Muller M.E., Allgower M., Schneider R. and Willenegger H., *Manual of internal fixation: techniques recommended by the AO-ASIF group*, Εκδόσεις Springer-Verlag, 1991

Γ. Ιστότοποι

- [Γ1] <http://www.med.duth.gr/undergraduate/courses/dd2.shtml>
- [Γ2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Biomechanics>
- [Γ3] http://eclass.hua.gr/modules/document/file.php/DIET227/GENES_NUTRITION_INTERACTIONS_TENTA.pdf
- [Γ4] <http://againformed.wordpress.com/>
- [Γ5] <http://1epal-dafnis.att.sch.gr/bima/ergask/anatomy/lekani.htm>
- [Γ6] <http://digital.library.northwestern.edu/anatomyofgender/smellieImage01.html>
- [Γ7] <http://www.onlinehealthmag.com/pain-in-lower-back/>
- [Γ8] <https://www.studyblue.com/notes/note/n/practical-iii/deck/1287828>
- [Γ9] <http://myradnotes.wordpress.com/category/msk/>
- [Γ10] <http://mednhealth.com/medical-condition-library/condition-navigator/pelvis-conditions/muscle-bone/>
- [Γ11] http://wps.aw.com/bc_marieb_hap_9_oa/220/56481/14459302.cw/index.html
- [Γ12] <http://www.taylorillustration.com/portfolio/master-s-project/>
- [Γ13] <http://www.surgival.com/en/portfolio-item/osteosynthesis/>
- [Γ14] http://www.dmphellas.gr/en/portfolio_category/internal-fixation-systems/
- [Γ15] <https://www.aofoundation.org/>
- [Γ16] <http://erikdalton.com/treating-sacroiliac-sprain-spasm/>
- [Γ17] https://books.google.gr/books?id=3_DGAjPNoLkC&pg=PA27&lpg=PA27&dq=history+of+digital+image+correlation&source=bl&ots=DgW0EEAHa_&sig=T6bYDzDFyiFyHRC3L2E8o0wqBOc&hl=el&sa=X&ved=0ahUKEwi1ybzdxqnKAhXGUhQKHYDIDgYQ6AEIYjAI#v=onepage&q&f=true

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

[Γ18] https://en.wikipedia.org/wiki/Pinhole_camera

[Γ19] https://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device

[Γ20] <http://slideplayer.com/slide/5115526/>

[Γ21] <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0166996>

[Γ22] https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=akron1346171486&disposition=inline

[Γ23] http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported/393/393_fig1.jpg

[Γ24] <http://www.limess.com/en/products/digital-image-correlation>



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών

Τομέας Μηχανικής

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πυέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (*Digital Image Correlation – D.I.C.*)

Μέρος Β: Πρωτογενή πειραματικά δεδομένα



ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ
ΚΑΡΑΝΙΚΑ ΜΑΡΙΝΑ

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ Σ.Κ. Κουρκουλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΣΤΕΟ-ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΤΑΓΜΑΤΩΝ ΠΥΕΛΟΥ
ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ
ΕΙΚΟΝΩΝ (Digital Image Correlation)

Μέρος Β: Πρωτογενή πειραματικά δεδομένα

Διπλωματική εργασία στην επιστημονική περιοχή της Εμβιομηχανικής

Γεωργίου Δήμητρα
Καρανίκα Μαρίνα

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Σ.Κ. Κουρκουλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2016

Επιβλέπων καθηγητής

Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Καθηγητής,
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Καθηγητής,
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.
(επιβλέπων καθηγητής)

Βασίλειος Κεφαλάς, Επίκουρος Καθηγητής,
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π.

Δέσποινα Ν. Περρέα, Καθηγήτρια,
Ιατρική Σχολή Αθηνών, Ε.Κ.Π.Α.

Στις οικογένειές μας

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο: «Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πυέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation), εκπονήθηκε στον Τομέα Μηχανικής της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου από τον Νοέμβριο του 2014 έως και τον Απρίλιο του 2016 υπό την καθοδήγηση του επιβλέποντα Καθηγητή, Σταύρου Κουρκουλή.

Για την πολύτιμη βοήθεια που έχουμε δεχθεί κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα, τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. Σταύρο Κουρκουλή για τις επιστημονικές του παρατηρήσεις και την καθοδήγηση που μας προσέφερε τους τελευταίους μήνες των προπτυχιακών μας σπουδών. Κυρίως όμως, θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε για τα προηγούμενα έτη, καθώς, με τον ιδιαίτερο τρόπο διδασκαλίας του, ξεχωρίσαμε και αγαπήσαμε τα μαθήματα της Μηχανικής και ο ίδιος μας ενέπνευσε να ασχοληθούμε με την επιστήμη της Εμβιομηχανικής.

Χρυστάμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Πολιτικό Μηχανικό και διδάκτορα του Τομέα Μηχανικής Πάσιου Ερμιόνη η οποία όχι μόνο μας παρείχε αμέριστη υποστήριξη και ενθάρρυνση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας αλλά και για την ανεκτίμητη συμβολή της σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Θα θέλαμε, επίσης να ευχαριστήσουμε θερμά τους γιατρούς κ. Σπύρο Δαρμανή και κ. Αριστείδη Παπαδογούλα τόσο για την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν όσο και για την άρτια συνεργασία μας και τις πολύτιμες συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια της περάτωσης της εργασίας.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας και τους φίλους μας που μας στήριξαν με όλη τους την καρδιά ψυχολογικά και ηθικά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πυέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)» αποτελεί μια μελέτη του πεδίου της Εμβιομηχανικής. Πρόκειται, δηλαδή, για την πειραματική αξιολόγηση διάφορων τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγματικών πυέλων, ως προς την απόδοσή τους, με κριτήριο το σχετικό άνοιγμα των κατεαγμάτων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η τεχνική «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων».

Αναλυτικά η δομή της εργασίας φαίνεται παρακάτω. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην έννοια της Εμβιομηχανικής, αναφορά σε σημαντικά στοιχεία της ανατομίας και της φυσιολογίας των ανθρωπίνων οστών καθώς επίσης παρουσιάζονται και οι μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στοιχεία της ανατομίας της πυέλου και οι λειτουργίες της και εν συνεχεία, γίνεται μνεία και στους τύπους των καταγμάτων που εμφανίζει καθώς και στις τεχνικές οστεοσύνθεσης που χρησιμοποιούνται ευρέως για την αντιμετώπισή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο σκοπός της εργασίας. Στη συνέχεια, γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των σημαντικότερων εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί και αφορούν στην αξιολόγηση τεχνικών οστεοσύνθεσης που αφορούν σε διάφορα πυελικά κατάγματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή της τεχνικής D.I.C. ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της τόσο στις δύο όσο και στις τρεις διαστάσεις.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το πειραματικό πρωτόκολλο. Ξεκινώντας από την παρουσίαση του πειραματικού εξοπλισμού και των δοκιμών, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και ο τρόπος εξαγωγής και συλλογής πρωτογενών δεδομένων.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συγκριτικοί πίνακες και επιχειρείται η εξαγωγή συμπερασμάτων ενώ δίδονται επίσης και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Περίληψη

Τα πυελικά κατάγματα θεωρούνται εκ των πλέον σοβαρών και απασχολούν ιδιαίτερα την κοινότητα των ορθοπεδικών ιατρών διότι συνδέονται πέραν των άλλων και με υψηλή θνησιμότητα. Οι τεχνικές οστεοσύνθεσης εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία και δεν υπάρχει σχετική προτυποποίηση. Από τη σκοπιά της Εμβιομηχανικής η πειραματική αξιολόγηση των τεχνικών οστεοσύνθεσης εμφανίζεται δυσχερής κυρίως λόγω της εξαιρετικά περίπλοκης γεωμετρίας της πυέλου, των ασαφών συνοριακών συνθηκών και των δυσκολιών στη μέτρηση των σχετικών μετατοπίσεων.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται μια πρώτη απόπειρα αντιμετώπισης του τελευταίου προβλήματος με την εφαρμογή της πειραματικής τεχνικής της Συσχέτισης Ψηφιακής Εικόνας (Digital Image Correlation, D.I.C.). Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ένα πειραματικό πρωτόκολλο το οποίο υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών (τμήμα Εμβιομηχανικής) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε συνεργασία με ορθοπεδικούς ιατρούς του 401 Γενικού Στρατιωτικού Νοσοκομείου Αθηνών οι οποίοι ειδικεύονται στα πυελικά κατάγματα. Το πειραματικό πρωτόκολλο περιλαμβάνει σειρά από 19 πειράματα με καταγματικές πτωματικές ημιπύελους. Το κάταγμα, το οποίο είχε δημιουργηθεί με τεχνητό τρόπο, ήταν κάταγμα τύπου «Γ». Οι ημιπύελοι είχαν υποβληθεί σε οστεοσύνθεση με πέντε διαφορετικές τεχνικές οι οποίες αποτελούνται από συνδυασμούς απλών και κλειδούμενων πλακών και κοχλιών.

Τα πειράματα εκτελέστηκαν στο ηλεκτρομηχανικό πλαίσιο φόρτισης *MTS Insight 10kN*. Η παρακολούθηση των σχετικών μετατοπίσεων των κατεαγόμενων έγινε από το σύστημα 3D-D.I.C. της *Limess*. Τα πειράματα έγιναν υπό “οιονεί στατικές” συνθήκες με έλεγχο της μετατόπισης. Η φόρτιση ασκείται στην κατάλληλα πακτωμένη ημιπύελο μέσω μεταλλικού εμφυτεύματος (προσομοιώματος της κεφαλής μηριαίου οστού) έτσι ώστε το σύστημα να προσομοιώνει τη φόρτιση της πυέλου στην όρθια στάση. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το φορτίο και τα τρισδιάστατα πεδία μετατοπίσεων μετρήθηκαν και καταγράφηκαν συναρτήσει του χρόνου.

Ο στόχος του πρωτοκόλλου ήταν αρχικώς η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής D.I.C. όταν αυτή εφαρμόζεται για τον υπολογισμό τρισδιάστατων πεδίων μετατοπίσεων κατά τη μελέτη δοκιμίων περίπλοκης γεωμετρίας. Εν συνεχεία, έγινε απόπειρα άντλησης δεδομένων τα οποία θα επέτρεπαν την ταξινόμηση των τεχνικών οστεοσύνθεσης ανάλογα με την

αποτελεσματικότητά τους, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο το σχετικό άνοιγμα μεταξύ των κατεαγόντων.

Τα αρχικά αποτελέσματα της μελέτης αποδεικνύουν ότι η τεχνική 3D-D.I.C. πλεονεκτεί των κλασικών τεχνικών καταγραφής μετατοπίσεων, αφενός μεν διότι επιτρέπει την εκ των υστέρων επιλογή των σημείων μέτρησης (και μάλιστα χωρίς περιορισμό ως προς τον αριθμό) του ανοίγματος του κατάγματος (Fracture Opening Distance, FOD), με εξαιρετική ακρίβεια, αφετέρου δε διότι παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης, πέραν του FOD, και της σχετικής ολίσθησης μεταξύ των κατεαγόντων (επίσης με ακρίβεια) δεδομένου ότι επιτρέπει την απομόνωση τόσο της στερεάς μετακίνησης όσο και της στερεάς στροφής.

Abstract

Pelvic fractures are classified among the most dangerous ones since they are related to high mortality. The respective osteosynthesis techniques are not standardized and a great variety of approaches can be found in literature. From the biomechanical point of view the experimental assessment of these techniques is a challenging task due to the extremely complex geometry of the pelvis, the difficulties in reproducing the actual boundary and loading conditions and also the difficulties in measuring the relative displacements.

In the present diploma thesis, an attempt is described to address the above problem by applying the Digital Image Correlation (D.I.C.) technique. In this direction an experimental protocol was designed and took place in the Laboratory of Testing and Materials (Biomechanical Department) of the Mechanical Faculty of the National Technical University of Athens (N.T.U.A.) in collaboration with orthopaedics doctors from the 401st general military hospital, who are specialized in pelvic fractures. This protocol included nineteen tests with cadaveric semi-pelvises. The semi-pelvises were artificially fractured. The fractures simulated the most dangerous ones, usually denoted as T-type fracture. Five different osteosynthesis techniques were used to fixate the fractured pelvises consisting of various combinations of simple and locking plates and free fixation screws.

The tests were implemented with the aid of an *MTS Insight* electro-mechanical loading frame. A 3D-D.I.C. system by *Limess* was used to measure the relative displacements of the three parts of the fixated pelvis. The experiments were implemented under quasi-static loading conditions and displacement-control mode. The fixated semi pelvis was properly constrained using a proper clamp with three degrees of freedom permitting proper orientation of the loading axis that simulated loading for upright standing position. The load was transferred to the pelvis with the aid of a metallic implant which simulates the femoral head. During the test the load and the respective 3D-displacement fields were measured and recorded as functions of time.

The target of the protocol was two-folded: Assess the efficiency of D.I.C. in measuring three dimensional displacement fields for complicated geometries and on the other hand to classify the osteosynthesis techniques considered according to their efficiency, using as criterion the behavior of the gap across the various fracture lines.

Preliminary results indicate that 3D-D.I.C. is advantageous against classical techniques since it allows “post-mortem” choice of critical points (without limit as to their number) for the estimation of the opening of the fracture (Fracture Opening Distance,FOD), with very high accuracy. Moreover it enables measurement of the relative sliding between the three parts of the fractured pelvis as it allows isolation of rigid body displacement and rotation.

Μέρος Β

Σημείωση

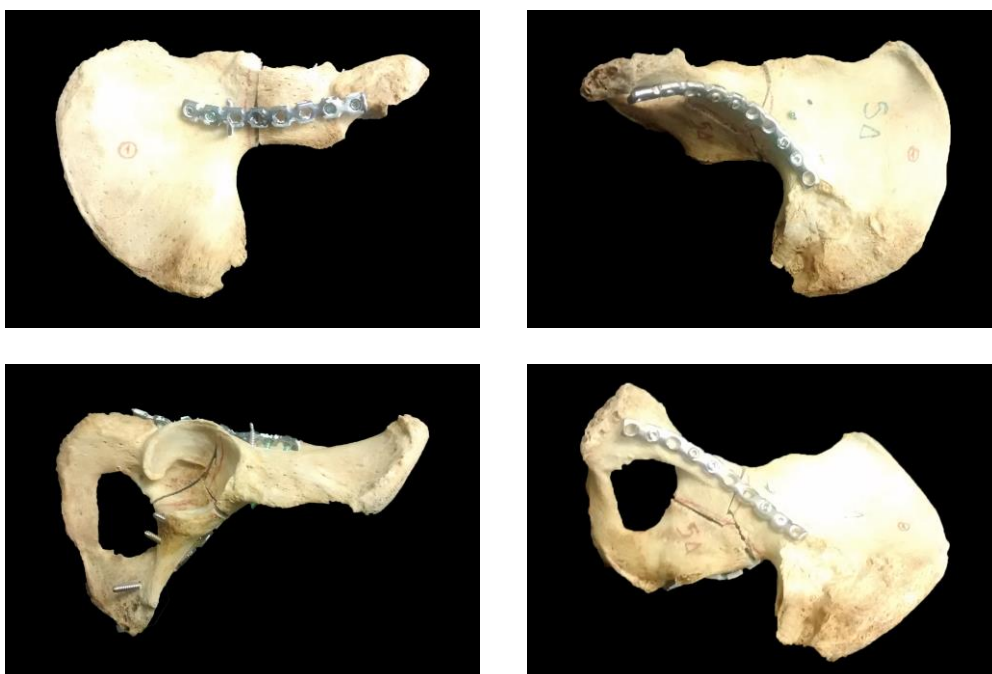
Ο παρών τόμος αποτελεί συνέχεια της εργασίας για απονομή του τίτλου του διπλωματούχου με θέμα: «Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)».

Ακολουθούν όλα τα πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα του κάθε δοκιμίου αναλυτικά κατά αύξοντα αριθμό κωδικής ονομασίας.

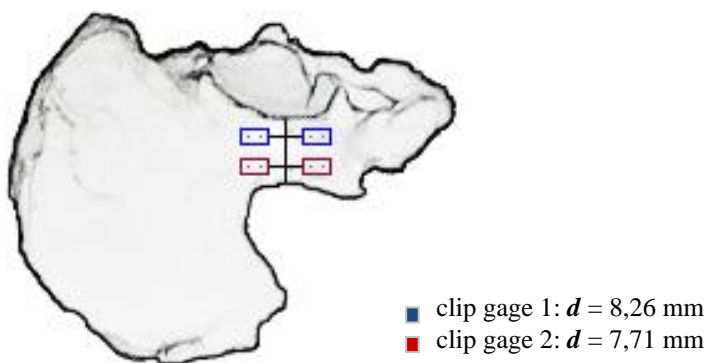
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 1-δεξί

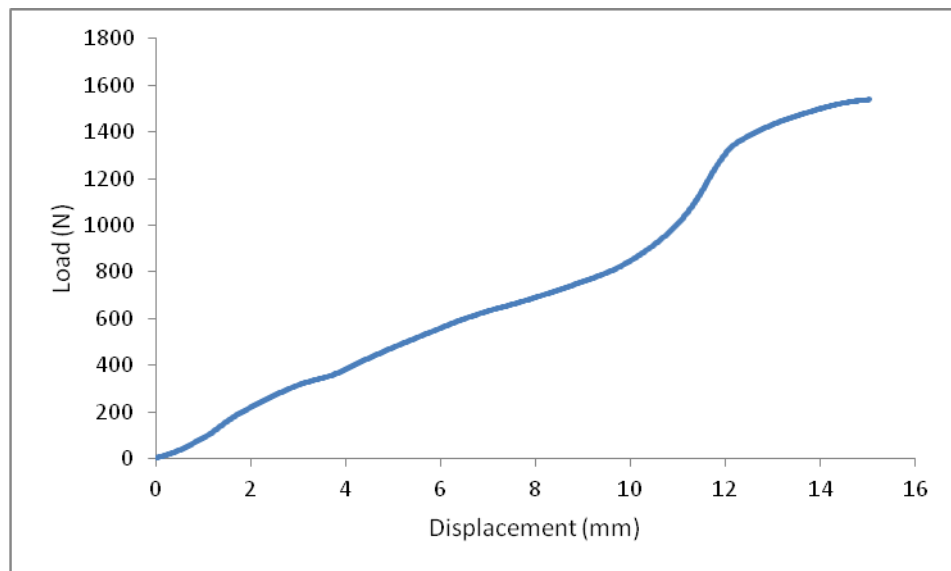
Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate (Stoppa), simple plate



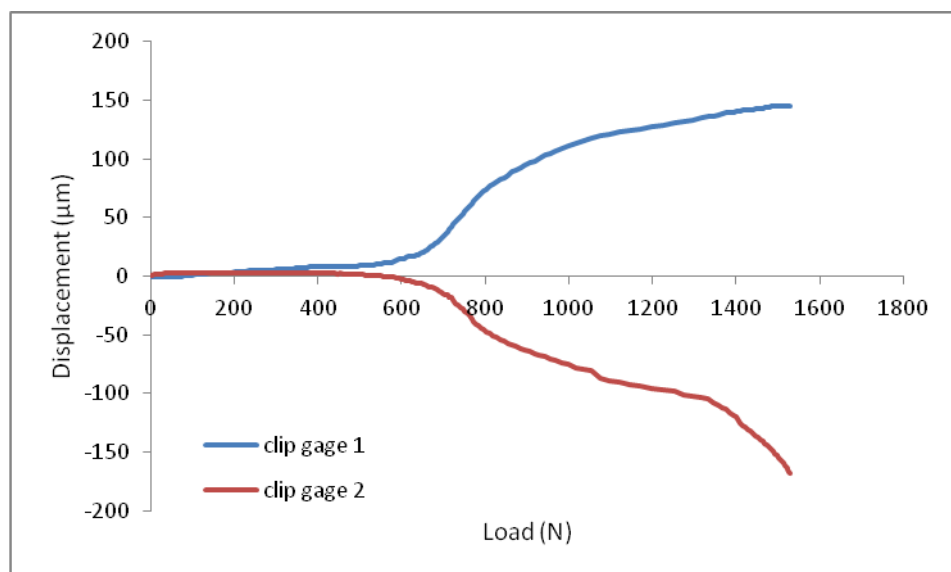
Σχήμα 1.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 1.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

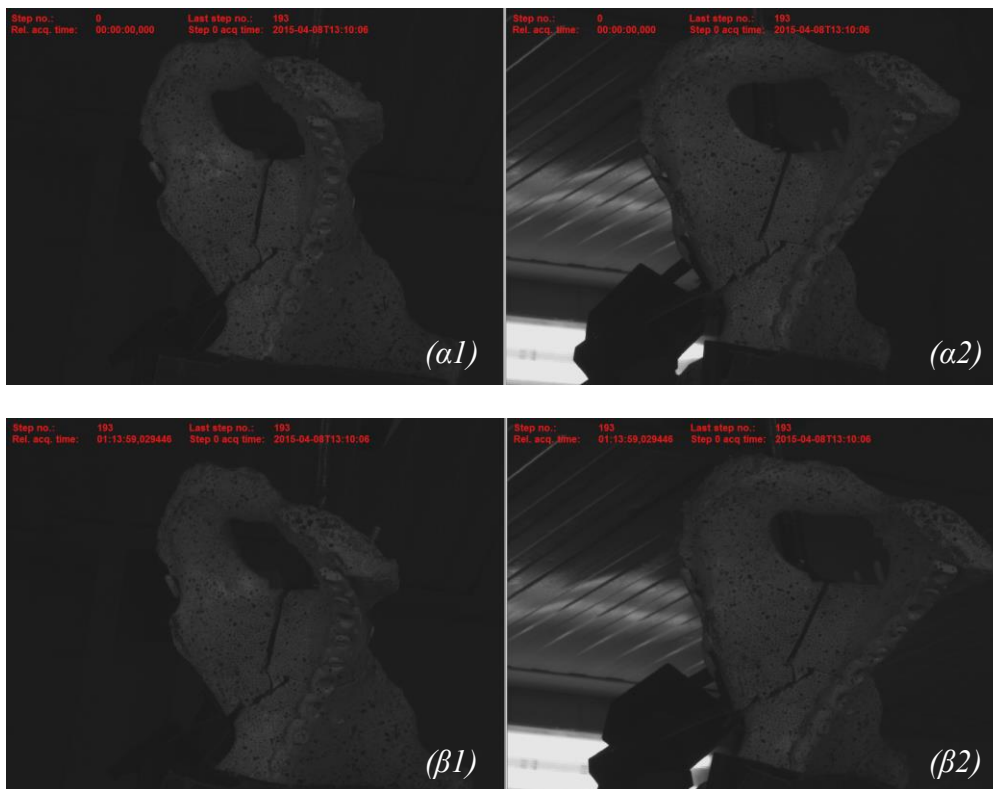


Σχήμα 1.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

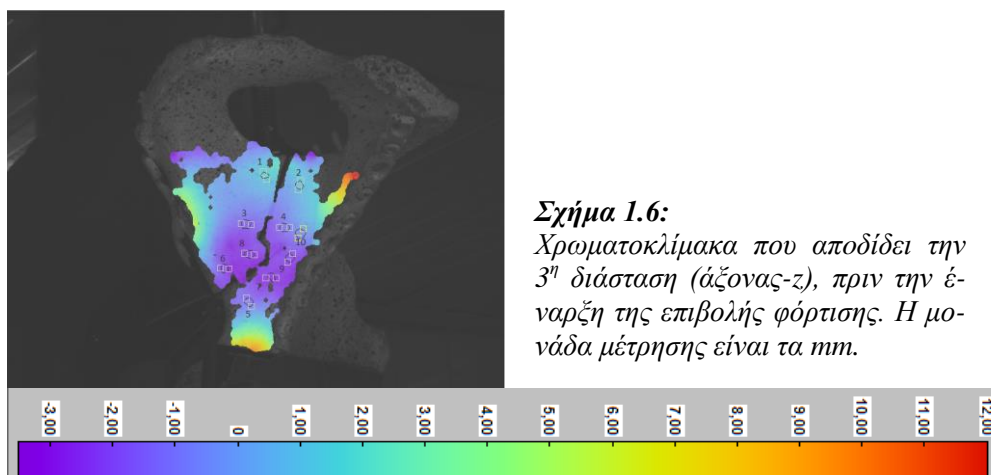


Σχήμα 1.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 1.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

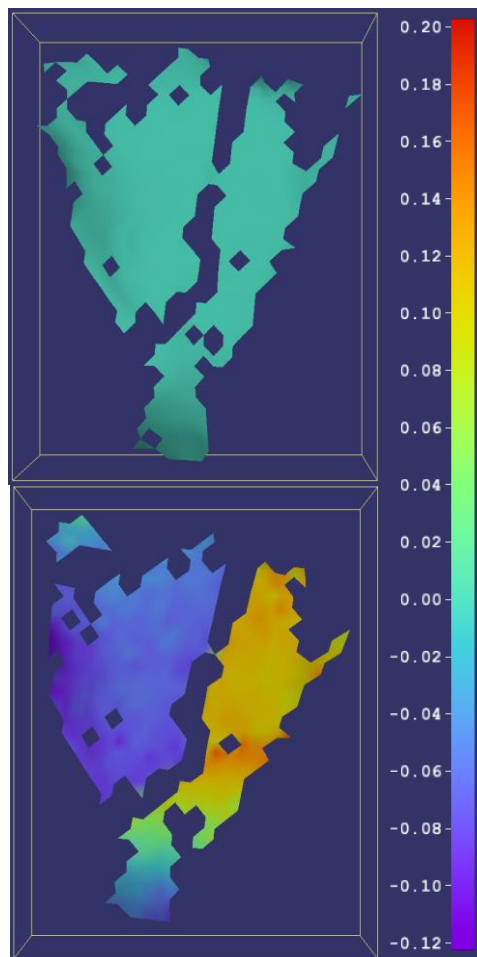
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



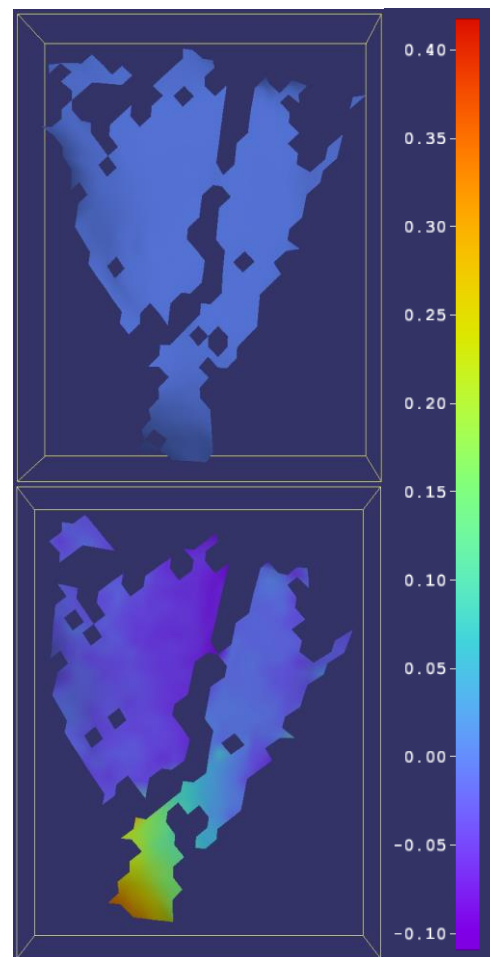
Σχήμα 1.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



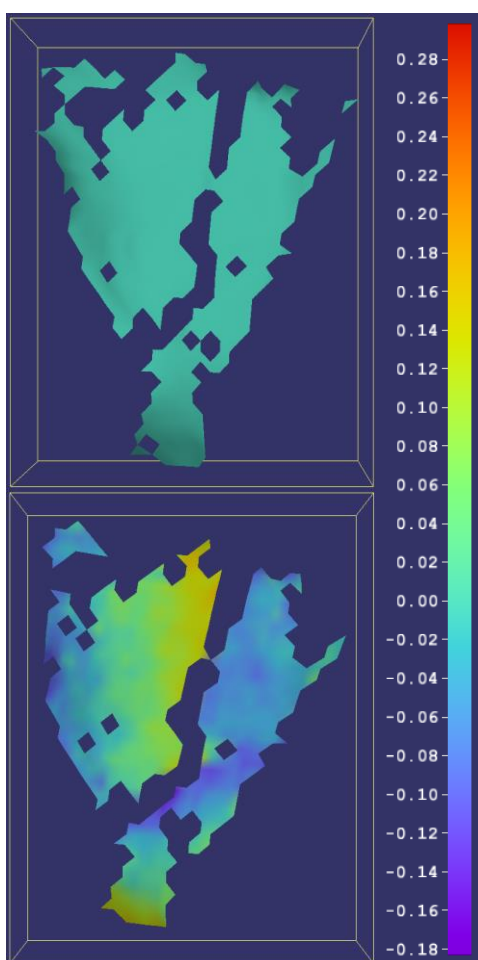
Σχήμα 1.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.



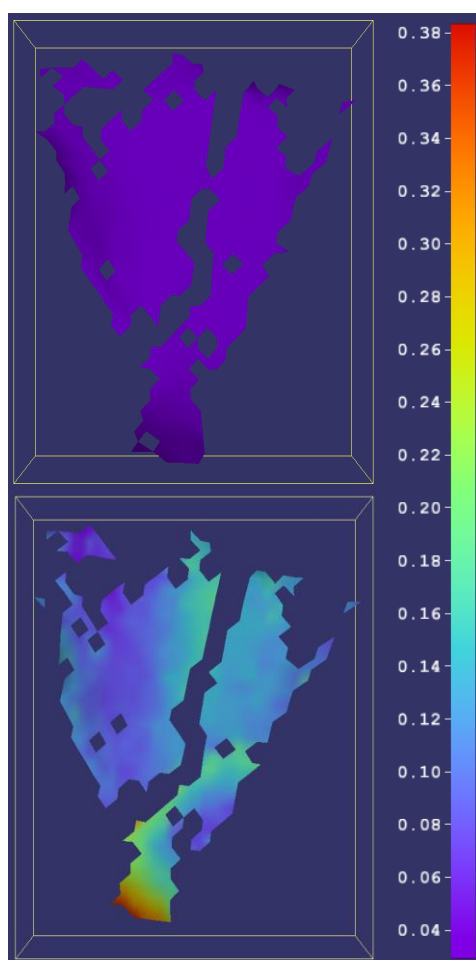
Σχήμα 1.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



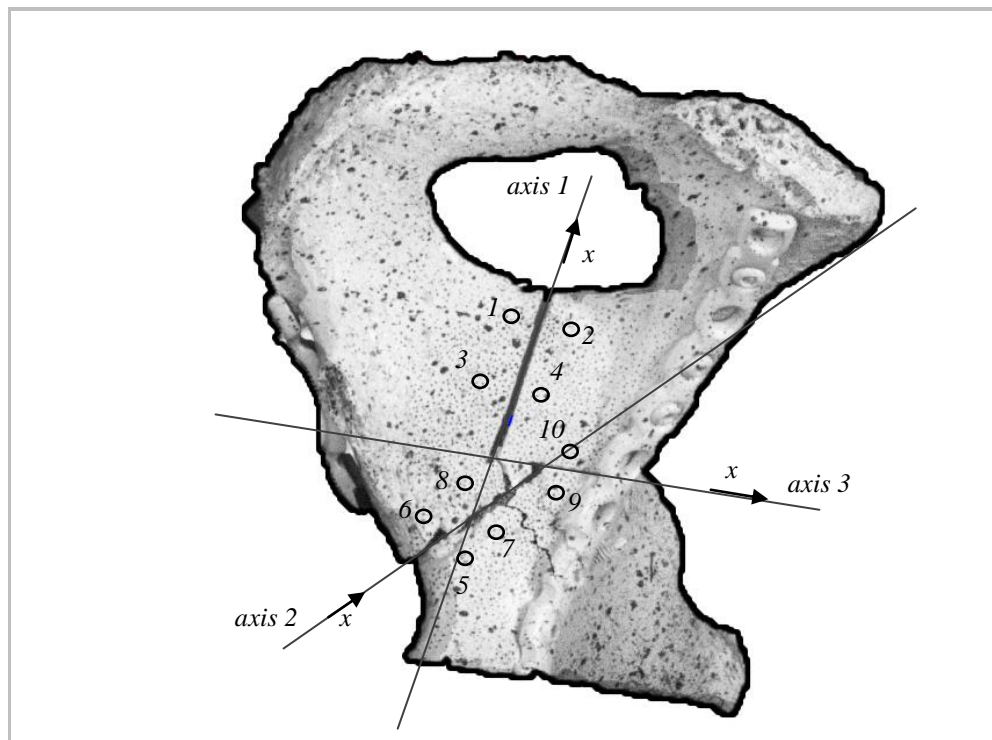
Σχήμα 1.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Σχήμα 1.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 1.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

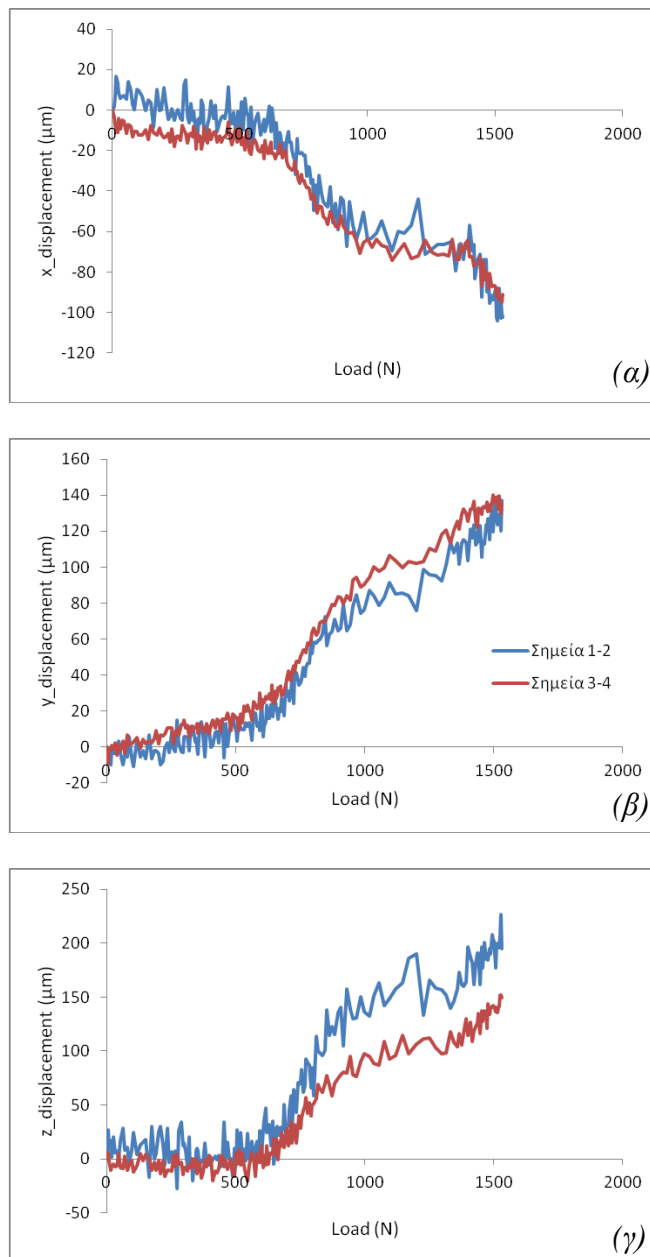


Σχήμα 1.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

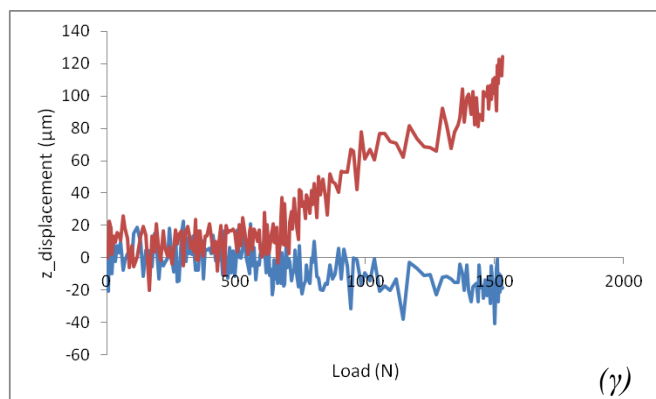
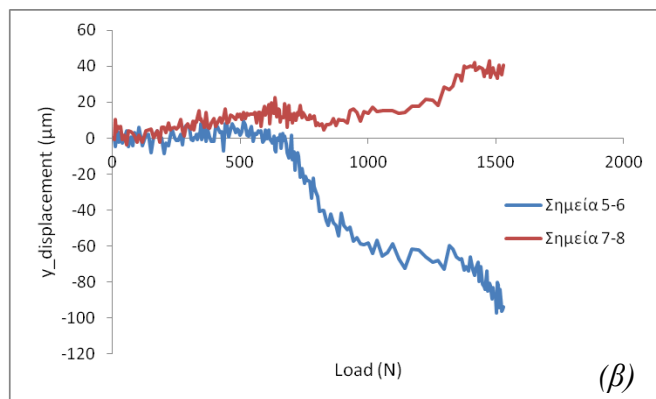
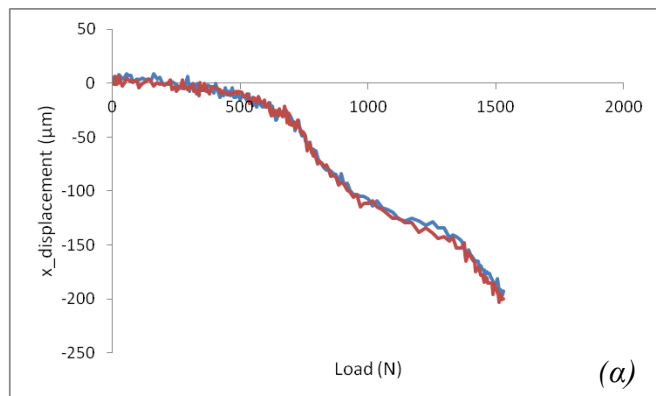
- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 9-10.

Κάταγμα 1



Σχήμα 1.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

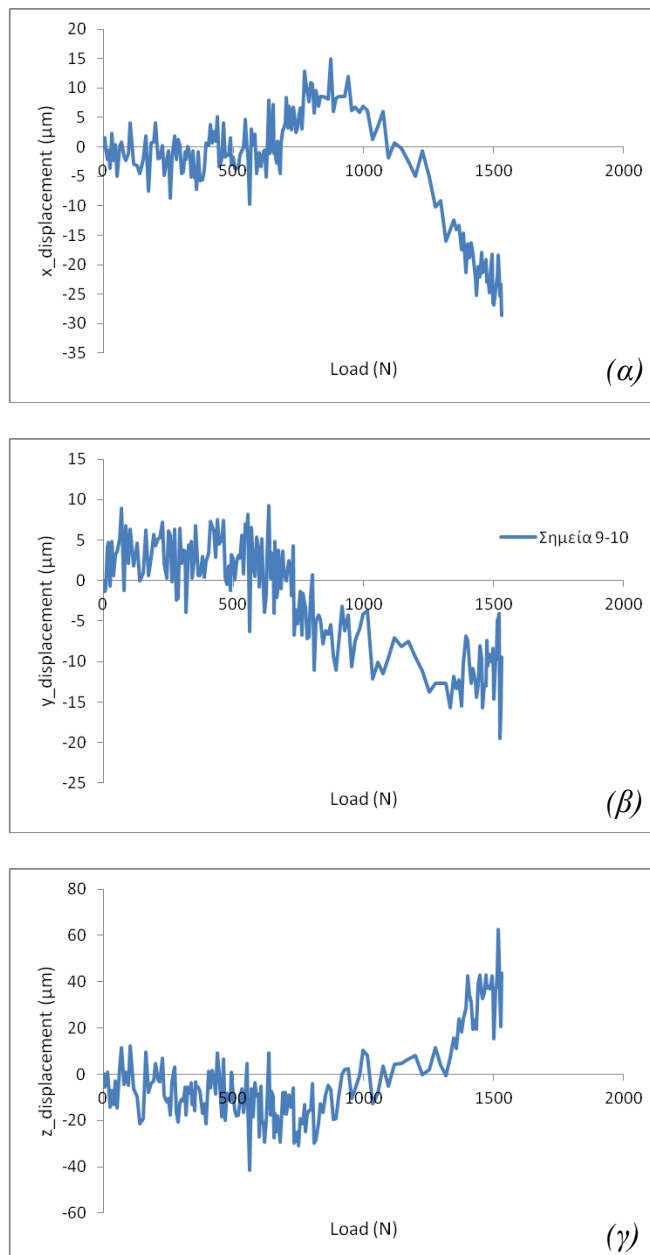
Κάταγμα 2



Σχήμα 1.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

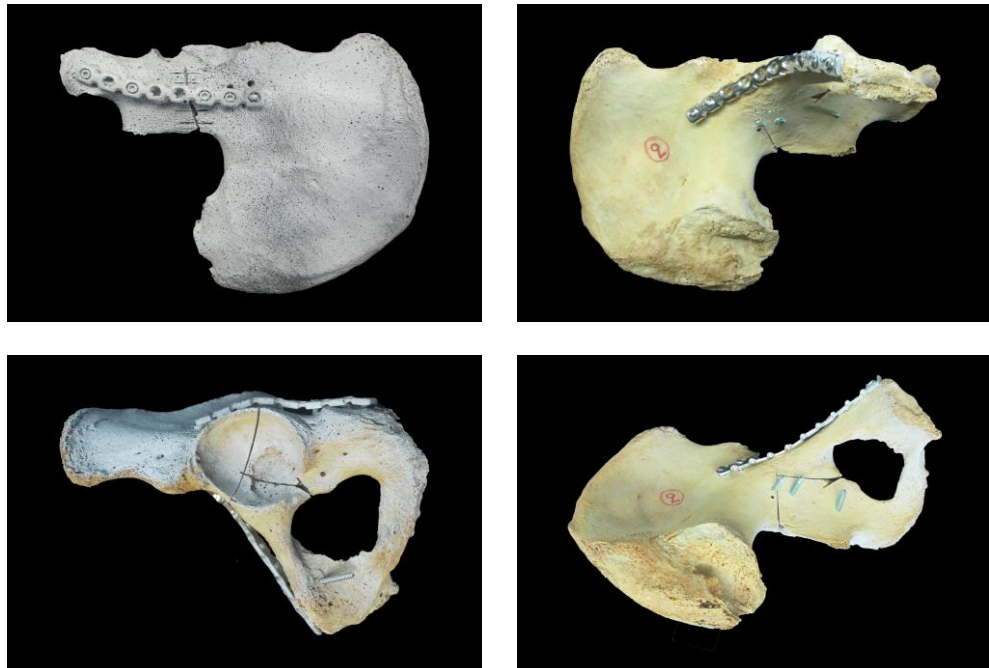
Κάταγμα 3



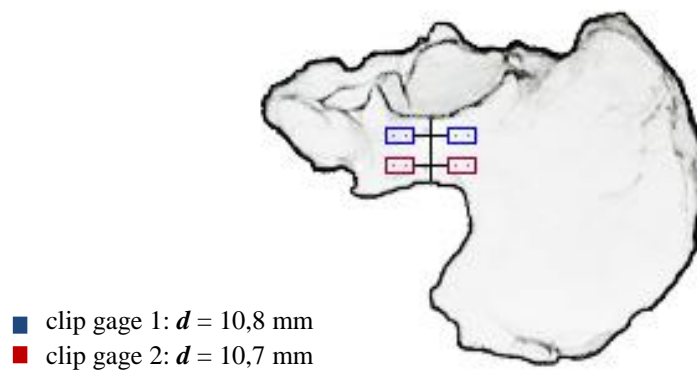
Σχήμα 1.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 2-αριστερό

Ομάδα οστεοσύνθεσης: locking plate, simple plate

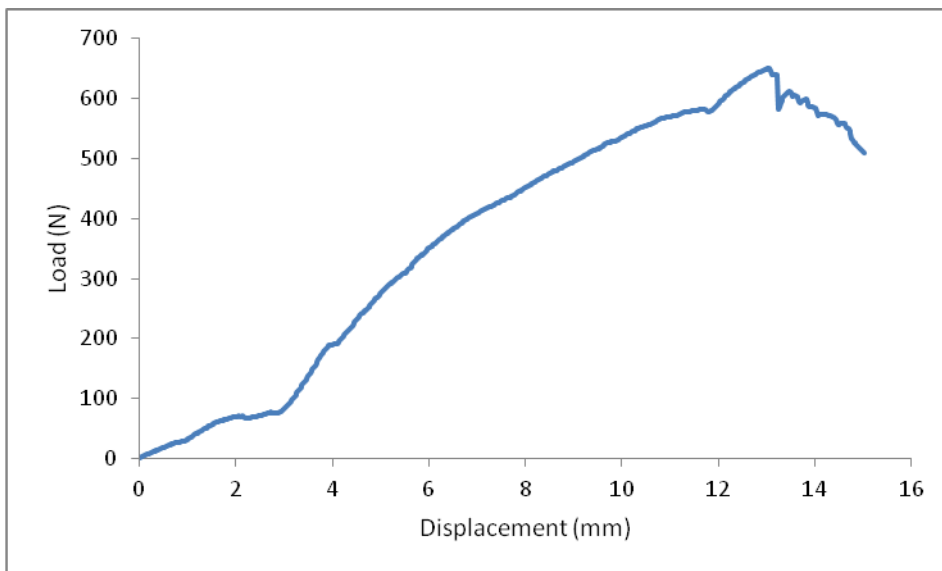


Σχήμα 2.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.

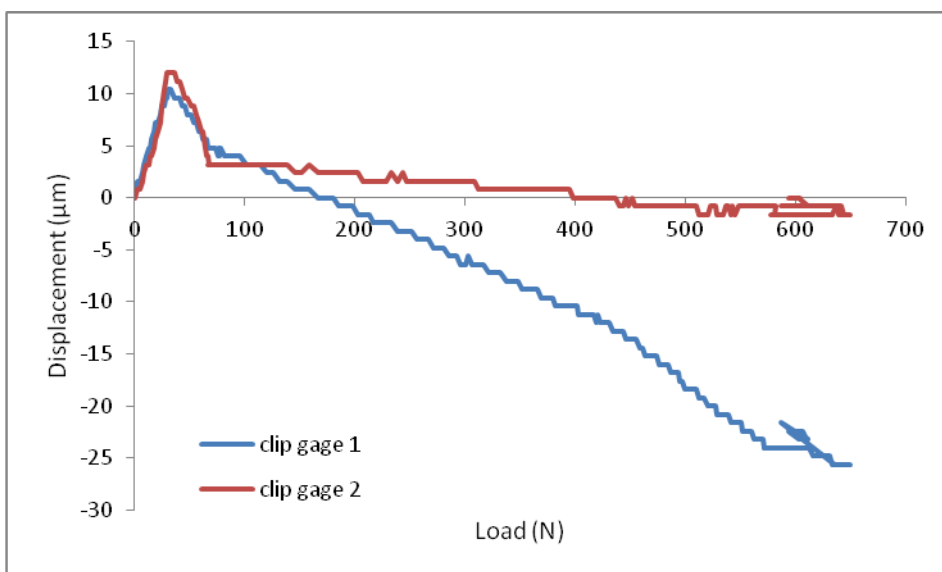


Σχήμα 2.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

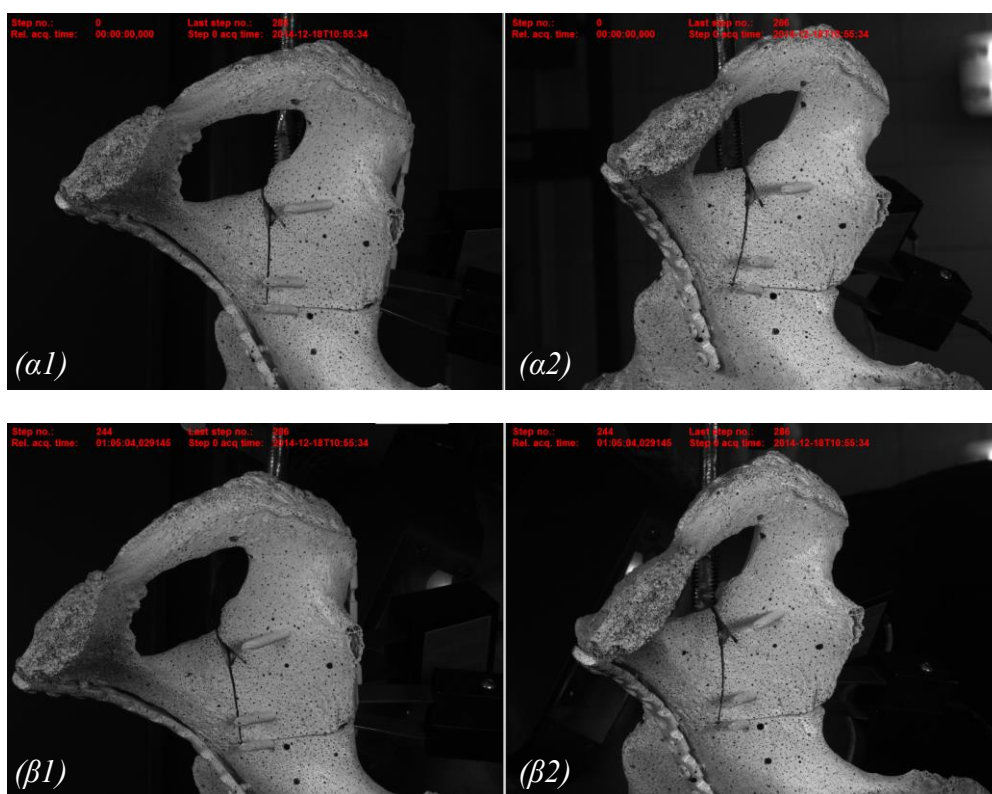
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



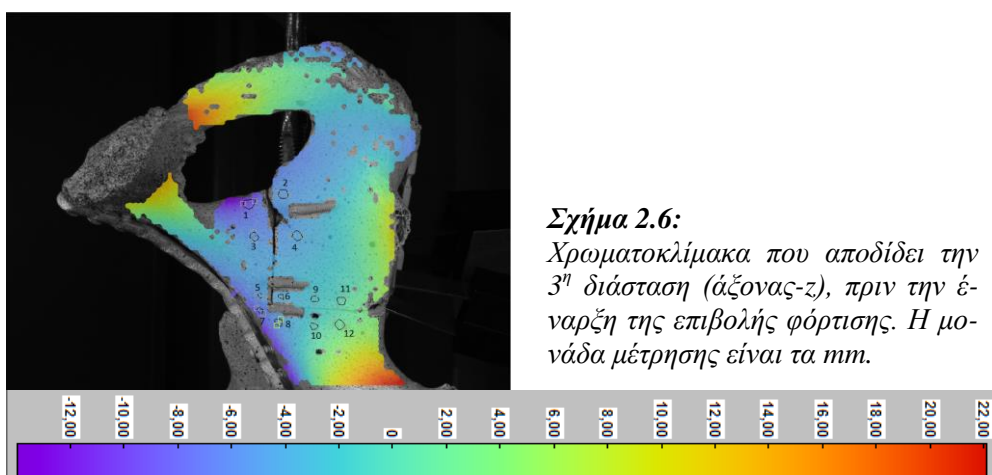
Σχήμα 2.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 2.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγατος του Σχ. 2.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

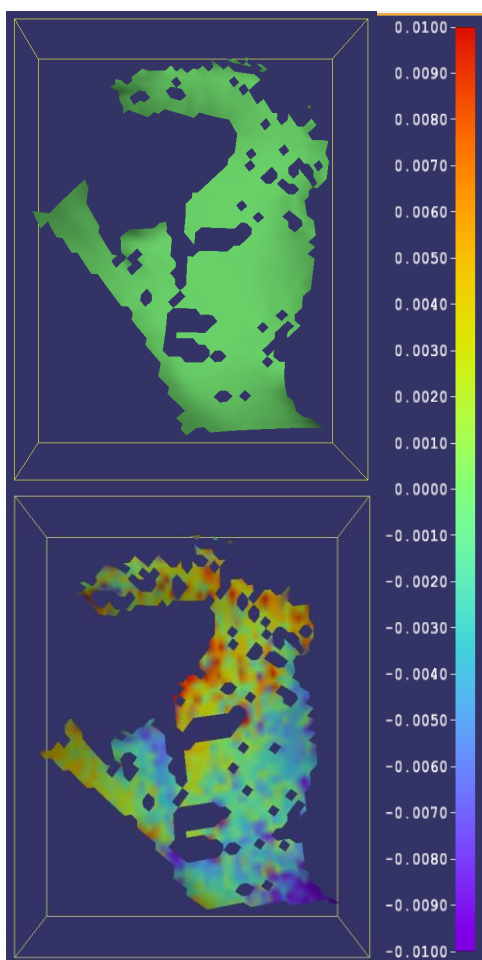


Σχήμα 2.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.

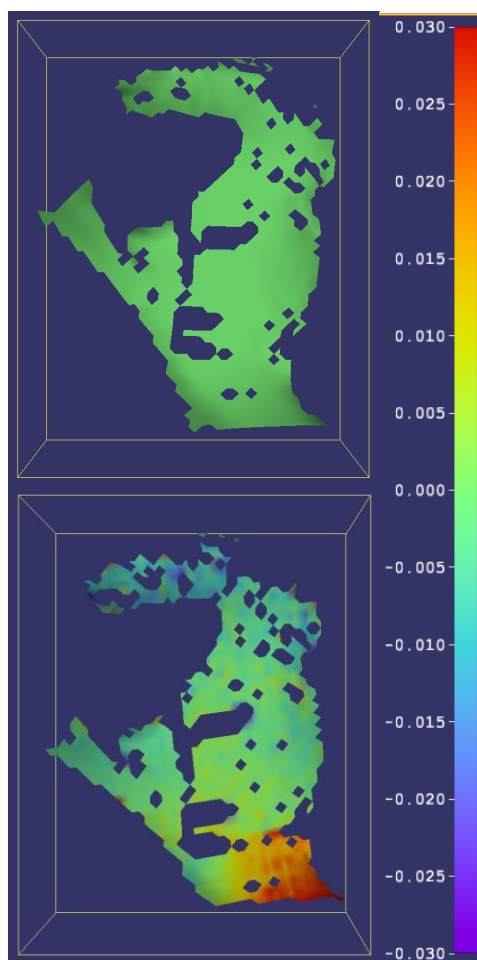


Σχήμα 2.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

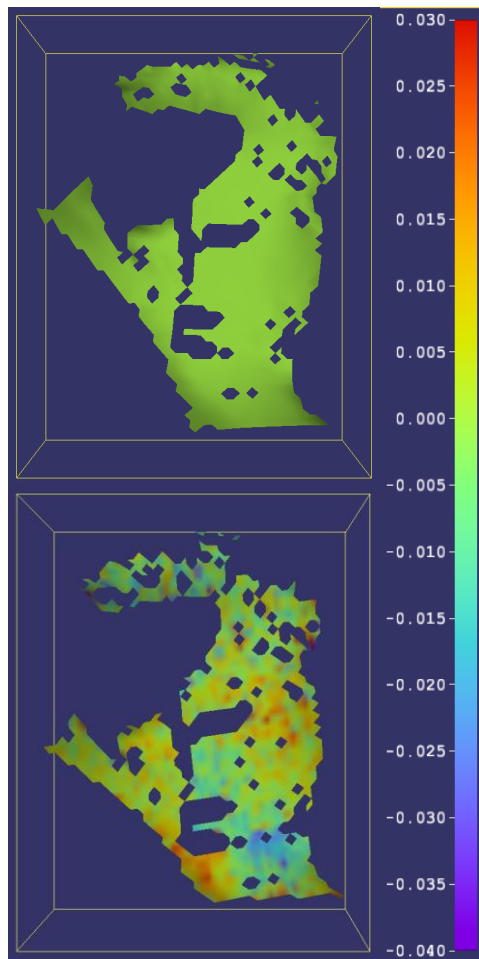
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



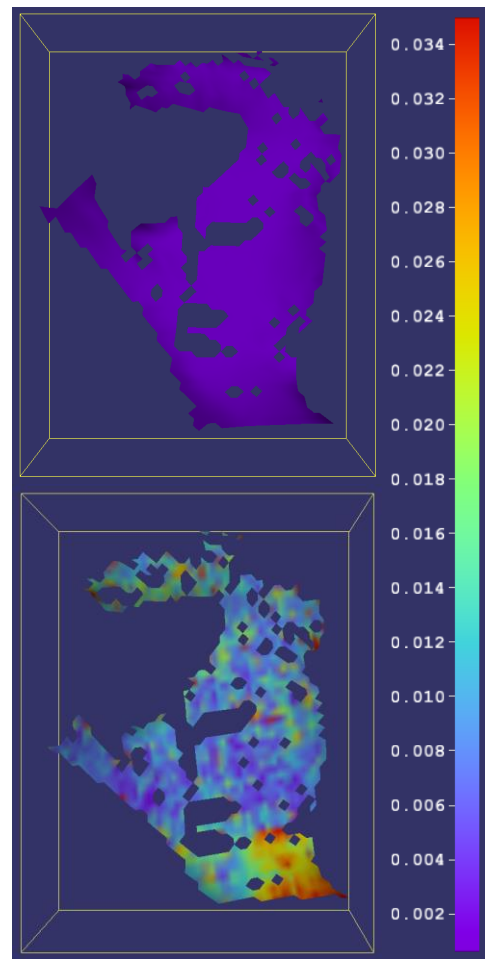
Σχήμα 2.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



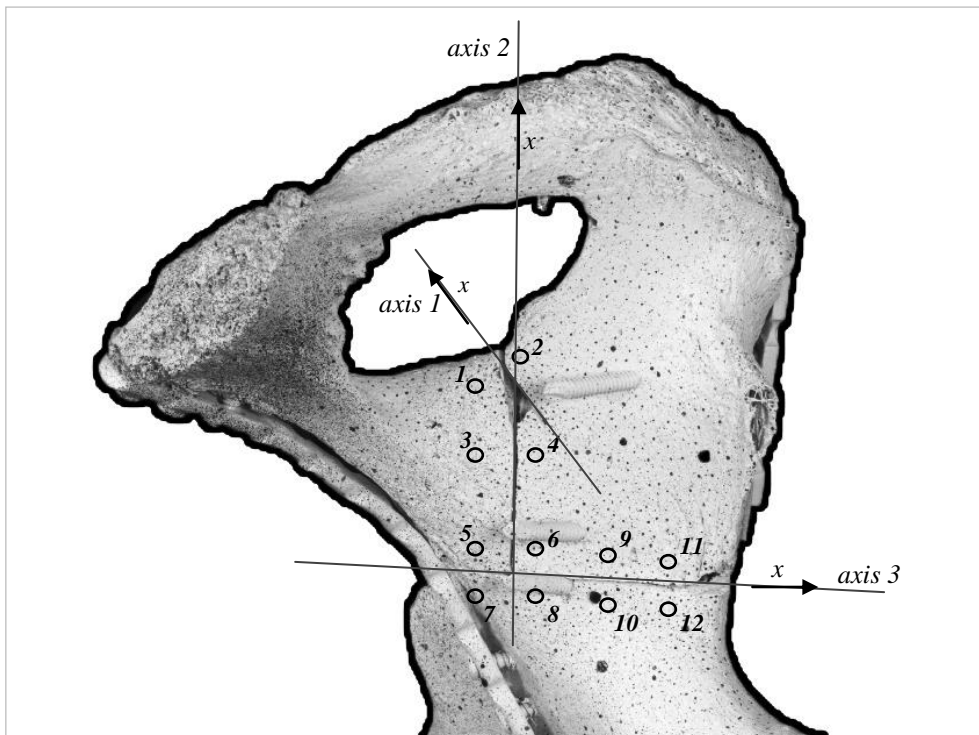
Σχήμα 2.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Σχήμα 2.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 2.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

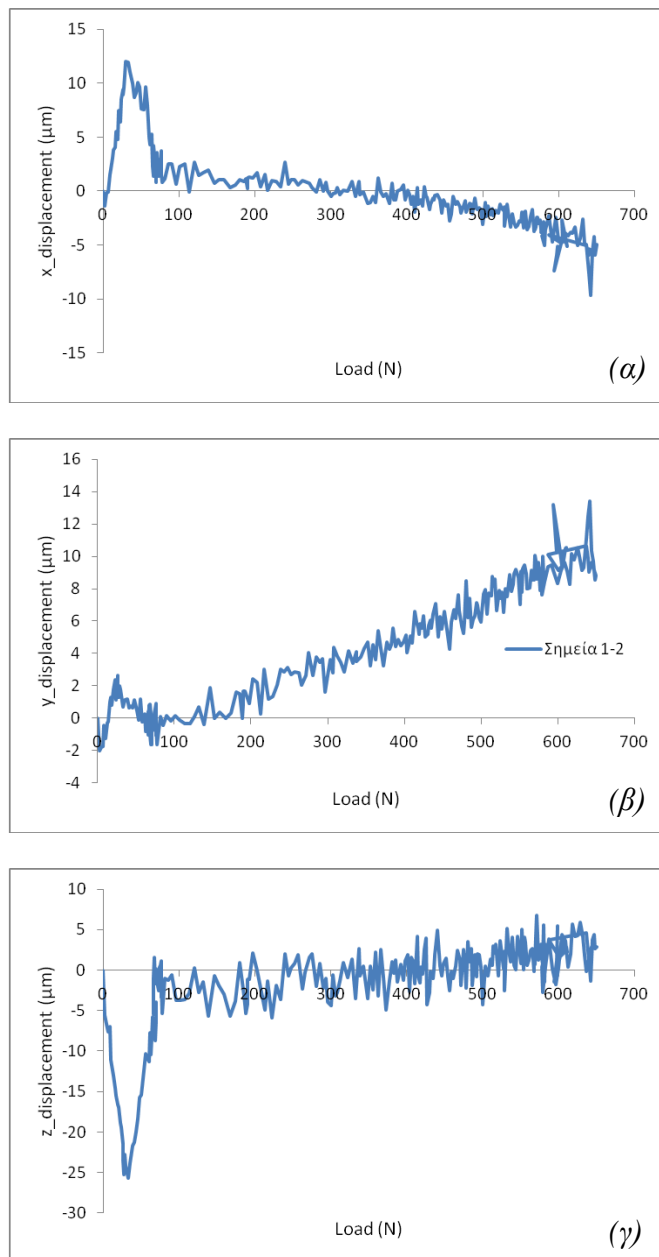


Σχήμα 2.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

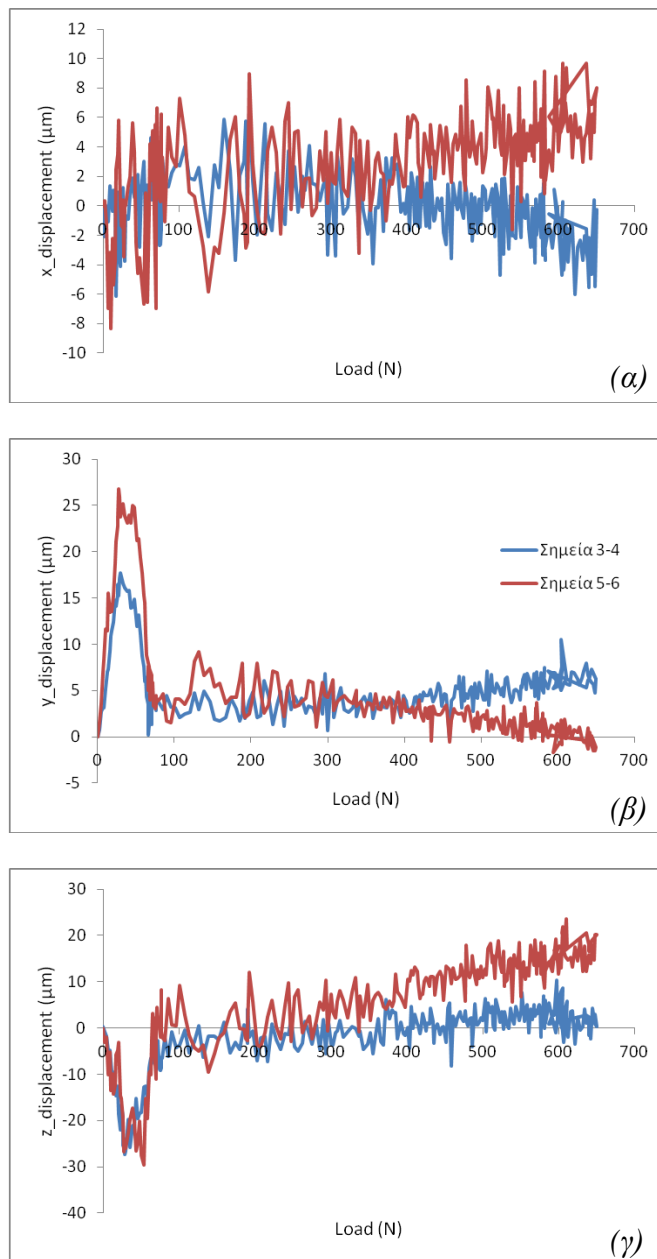
- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 3-4 και 5-6
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 5-7, 6-8, 9-10 και 11-12.

Κάταγμα 1



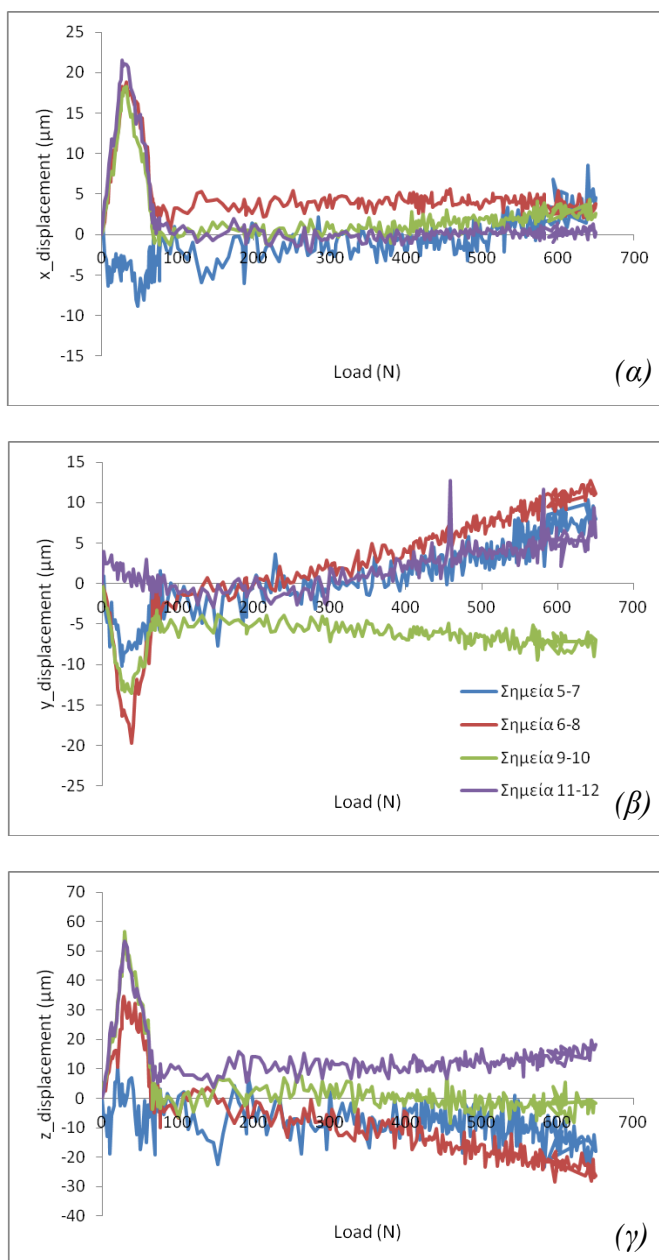
Σχήμα 2.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 2



Σχήμα 2.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

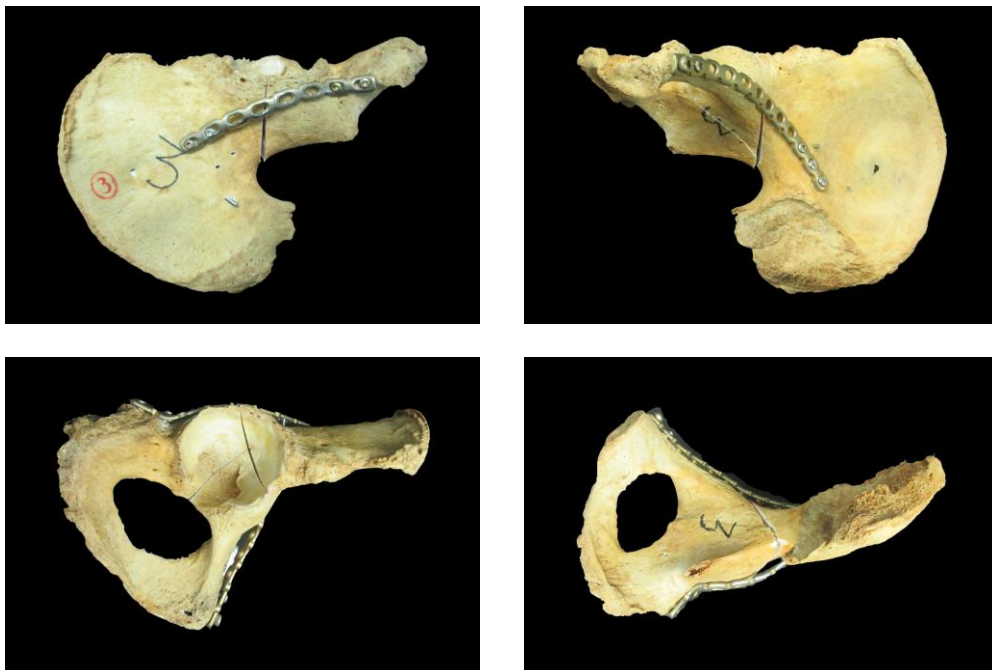
Κάταγμα 3



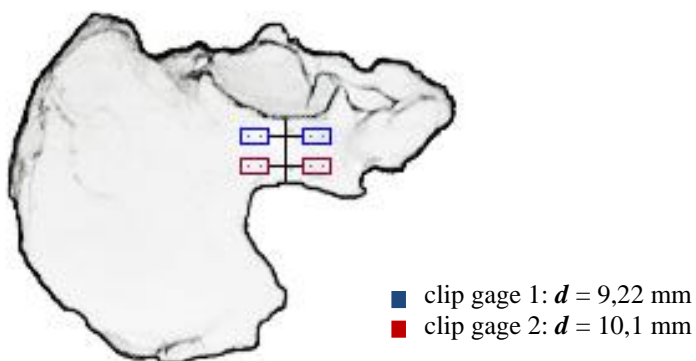
Σχήμα 2.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 3-δεξί

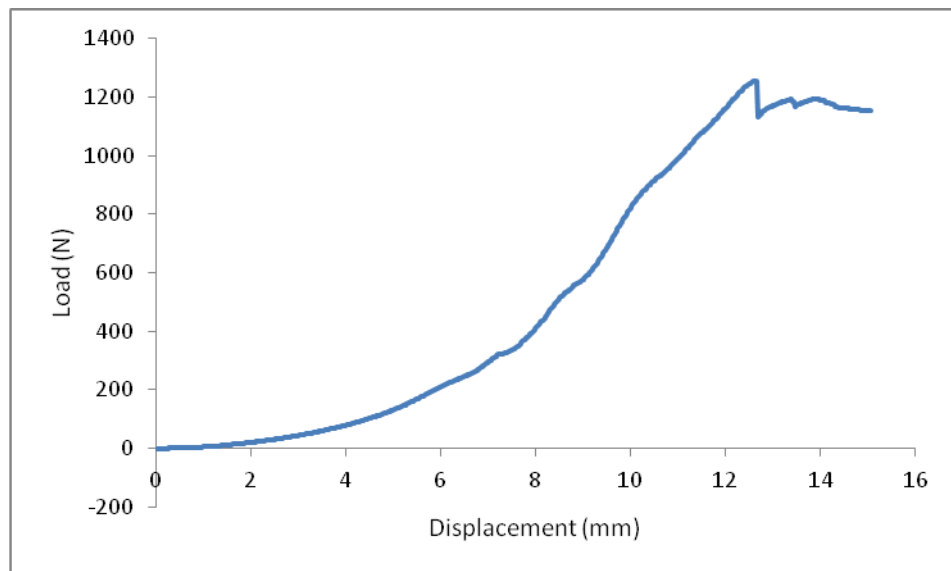
Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate, simple plate



Σχήμα 3.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.

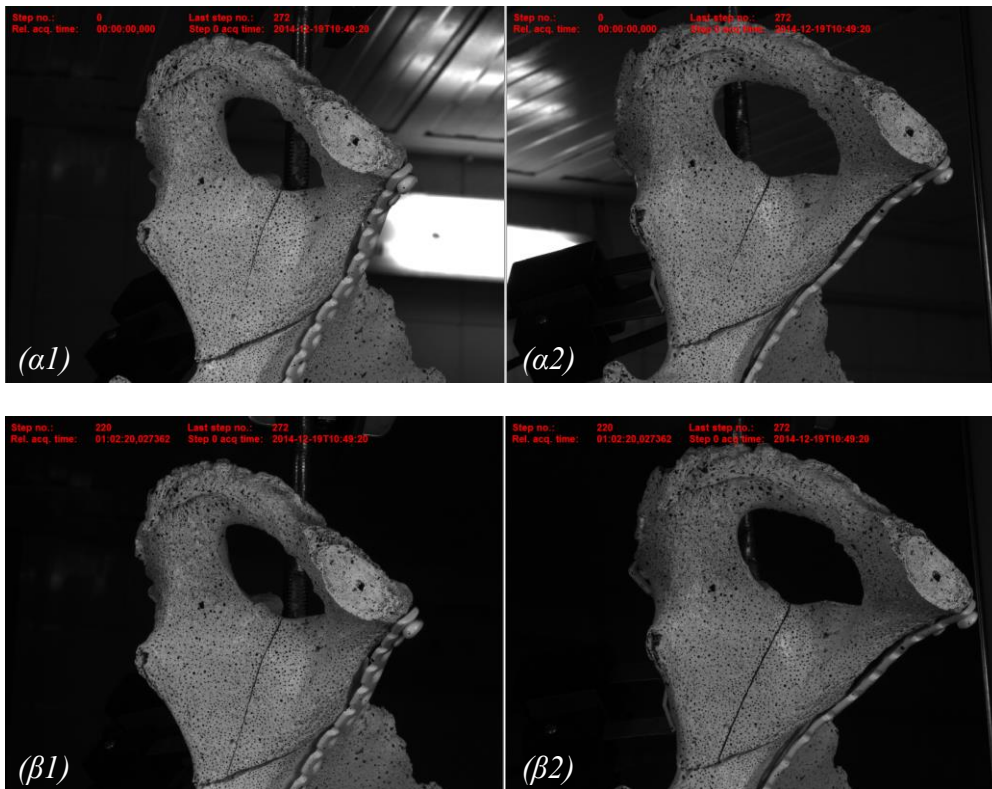


Σχήμα 3.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μηκνσιομέτρων» (clip gauges).

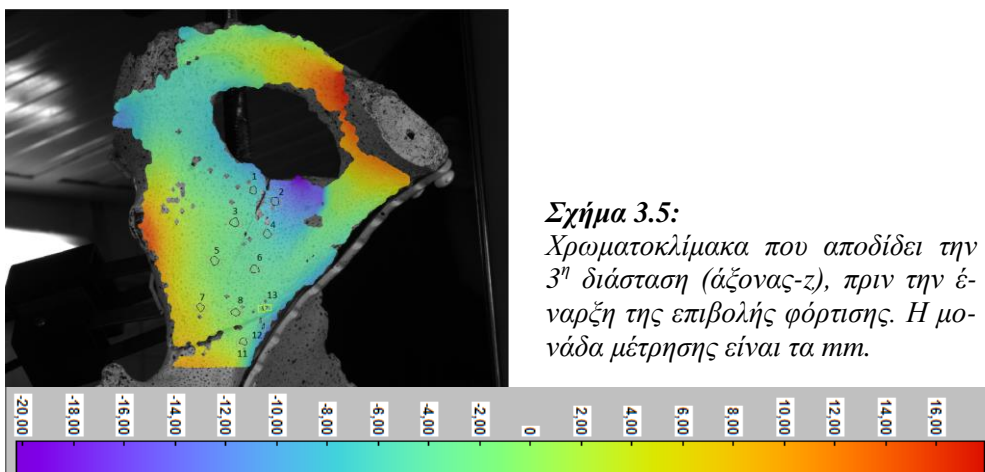


Σχήμα 3.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

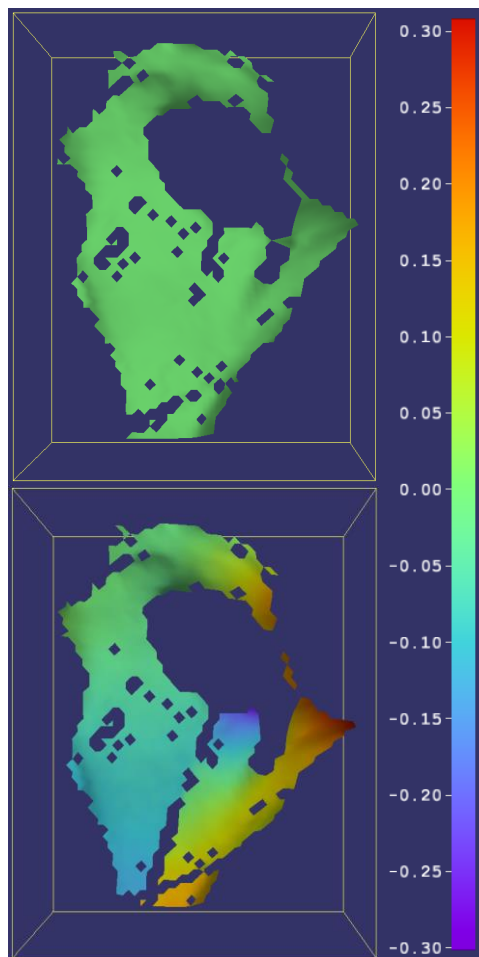
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



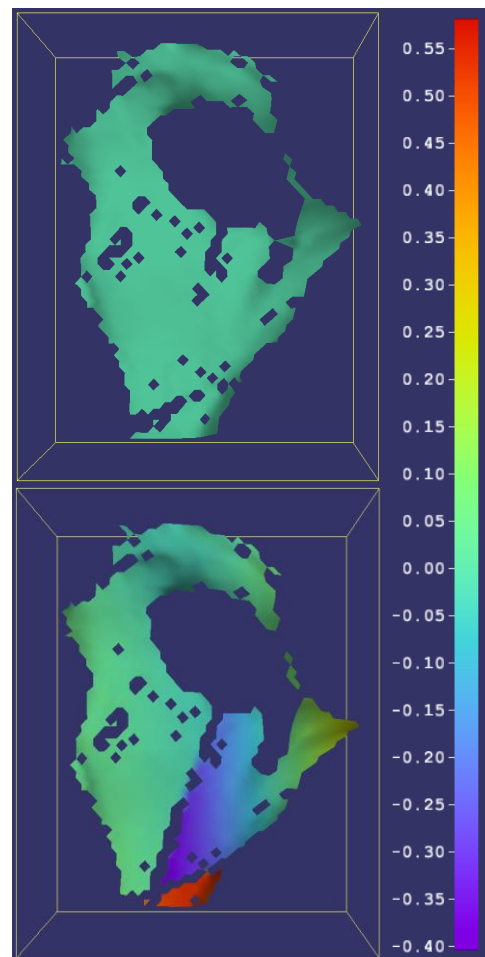
Σχήμα 3.4: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 3.5:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

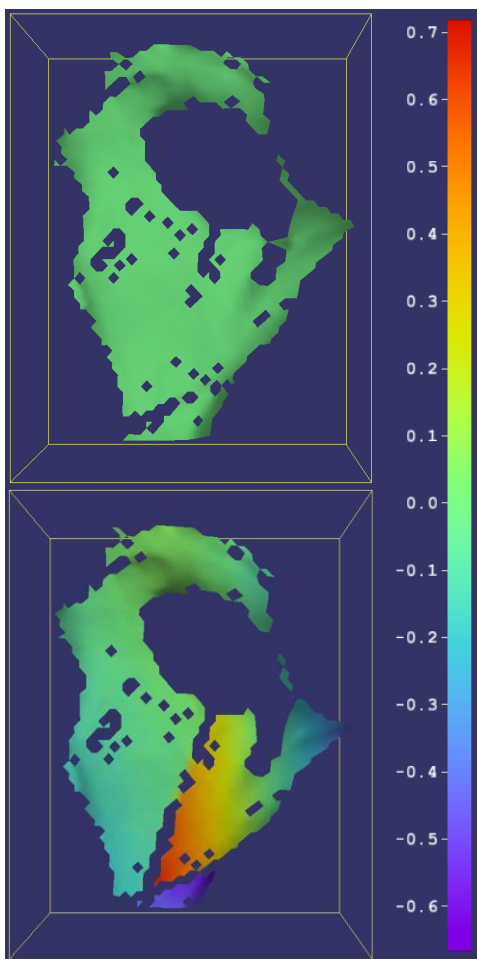


Σχήμα 3.6: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

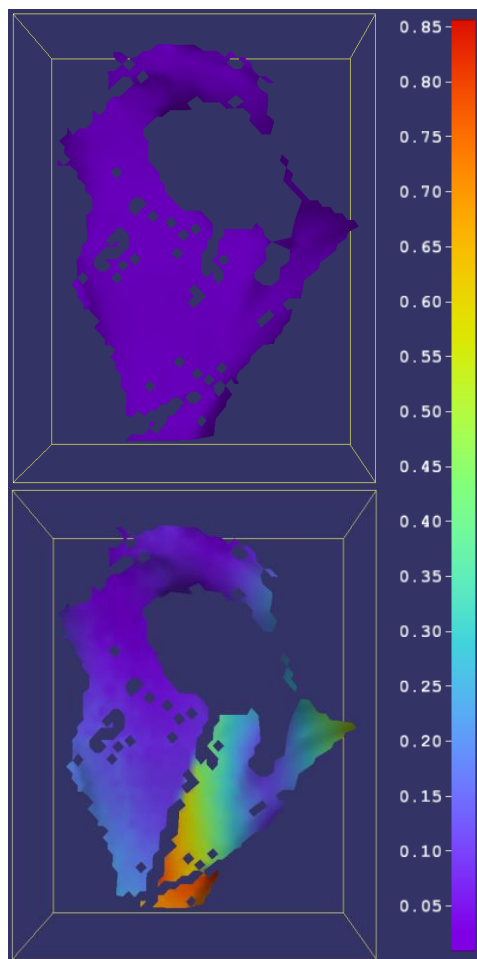


Σχήμα 3.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

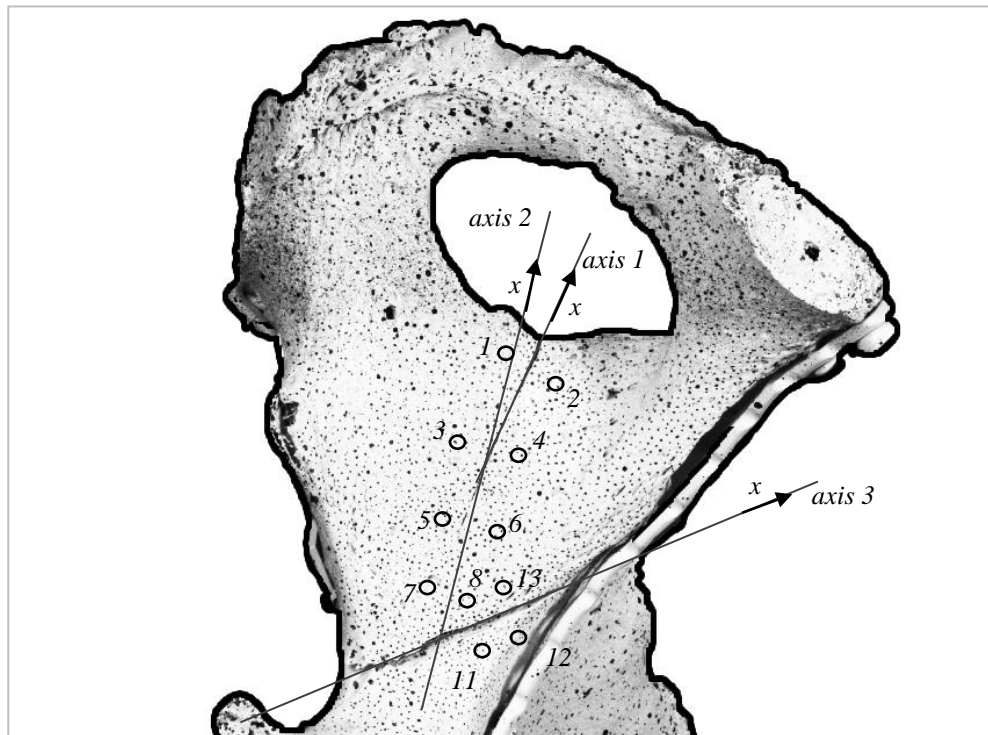
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



Σχήμα 3.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 3.9: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



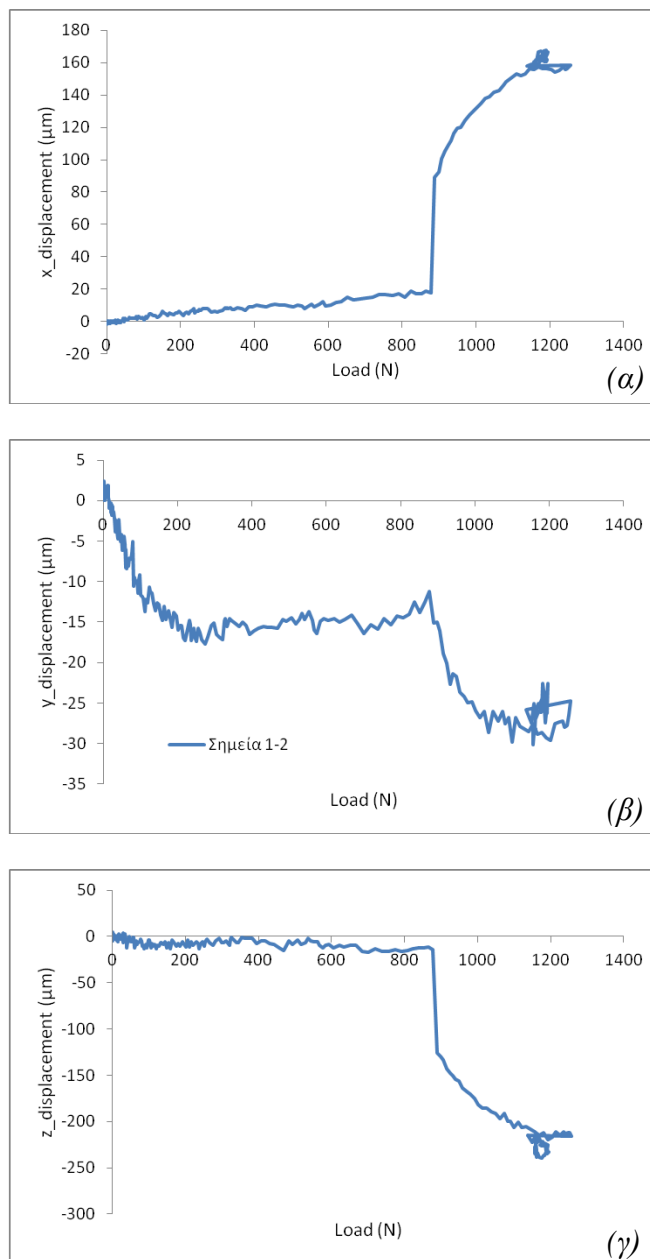
Σχήμα 3.10: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 3-4, 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 8-11 και 12-13.

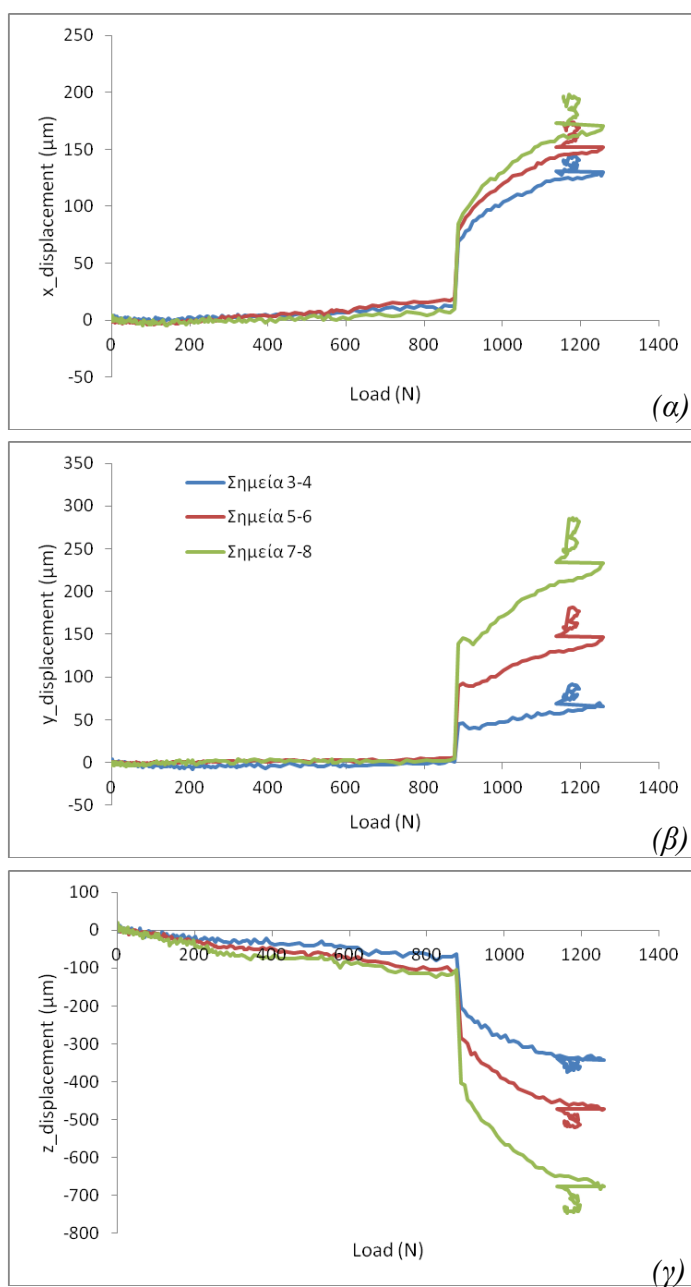
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 1



Σχήμα 3.11: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

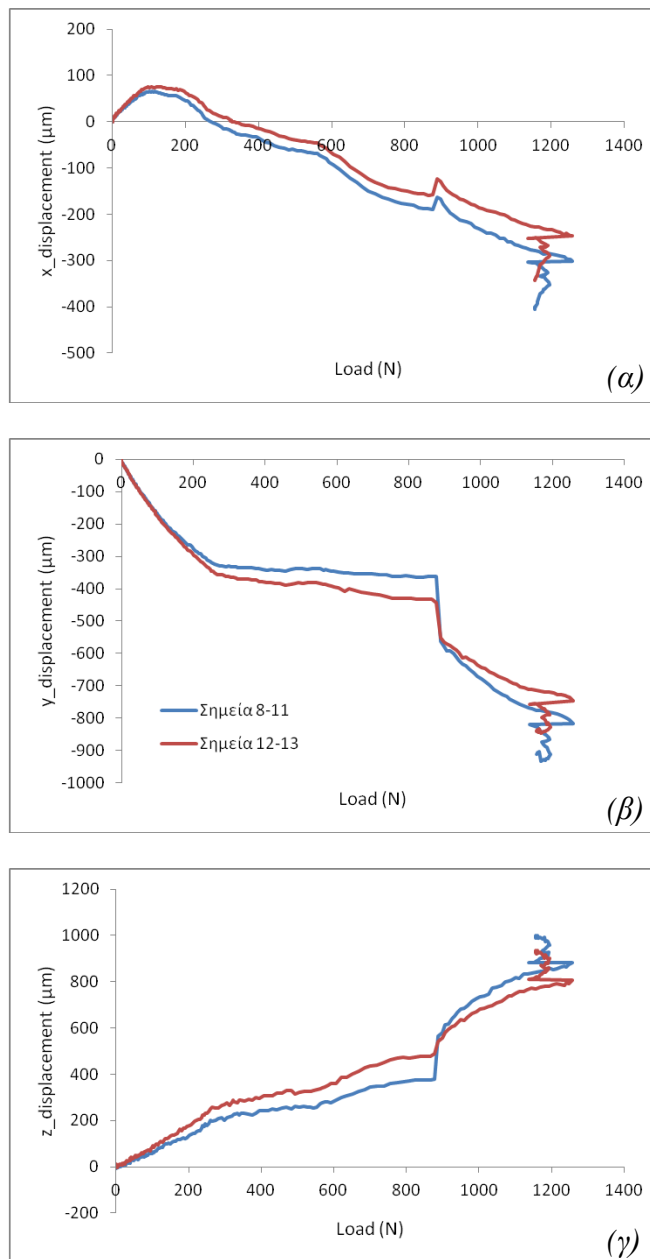
Κάταγμα 2



Σχήμα 3.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

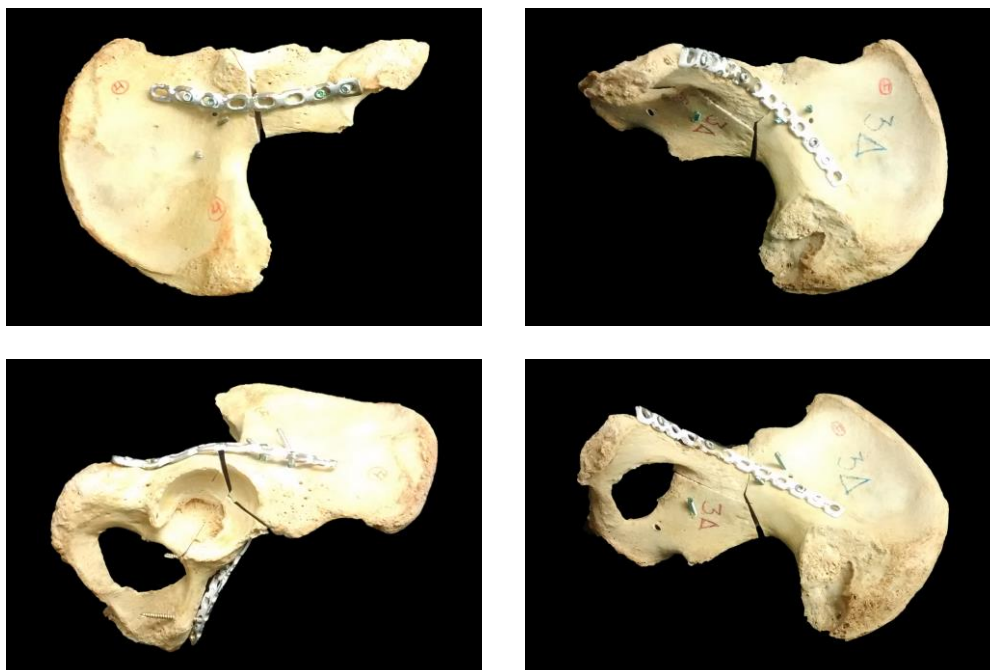
Κάταγμα 3



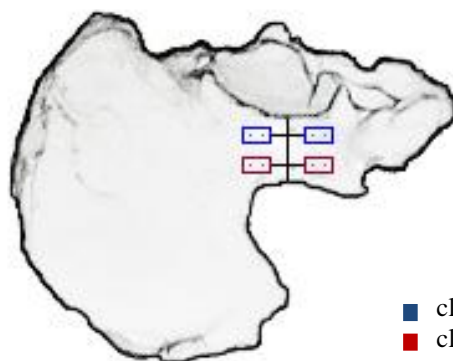
Σχήμα 3.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 4-δεξί

Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate (Stoppa), simple plate



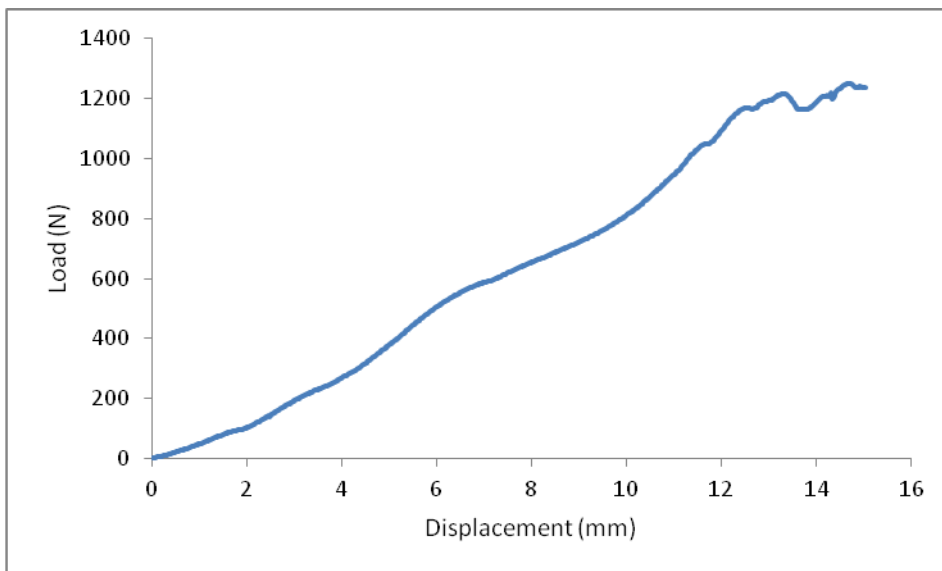
Σχήμα 4.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



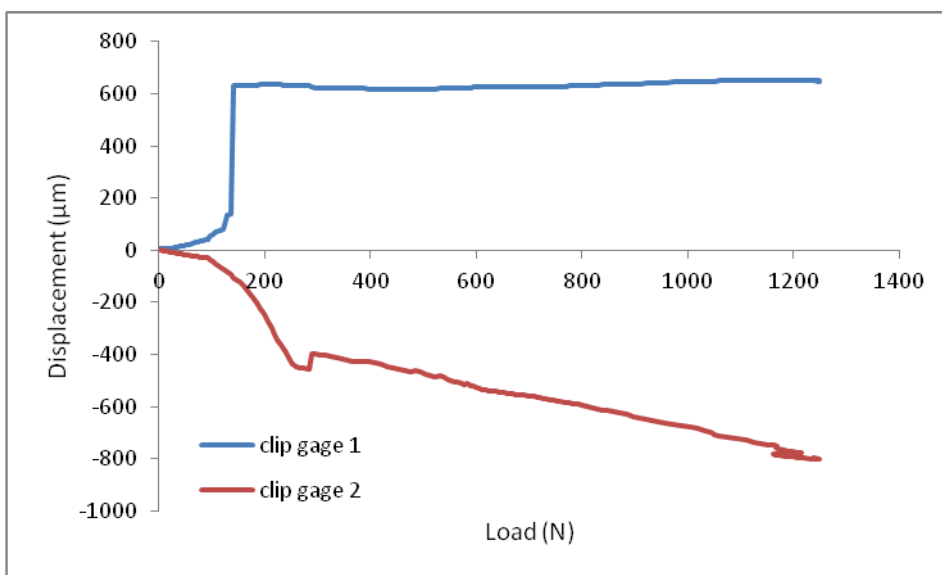
■ clip gage 1: $d = 8,10$ mm
■ clip gage 2: $d = 9,01$ mm

Σχήμα 4.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

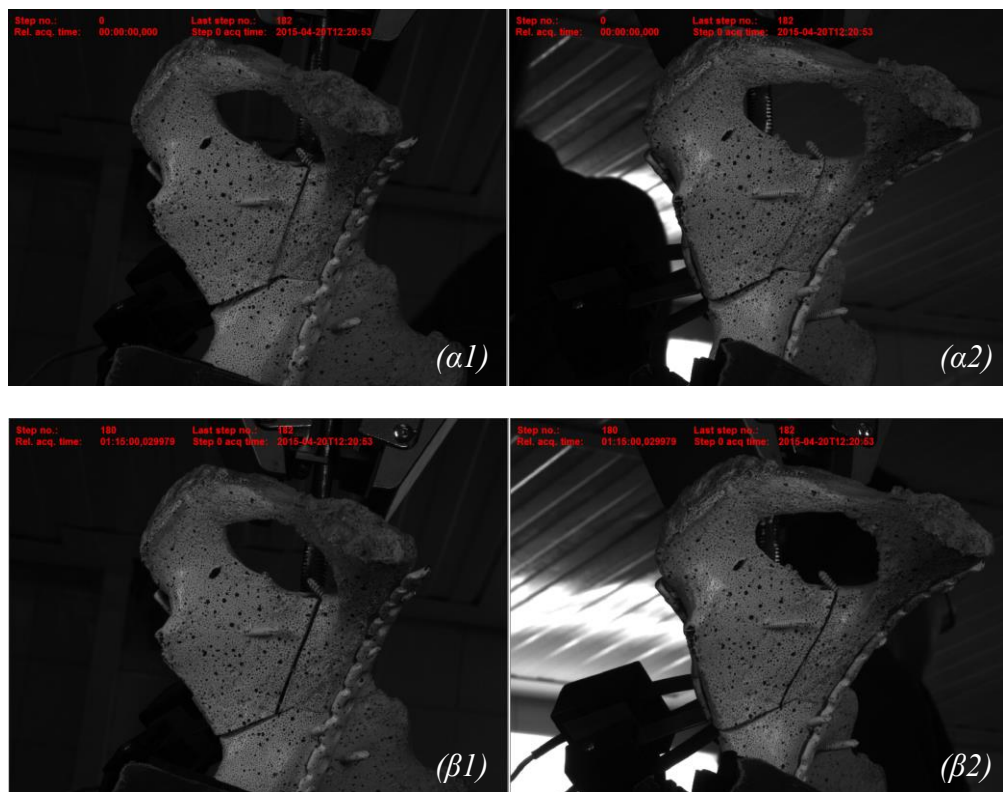
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



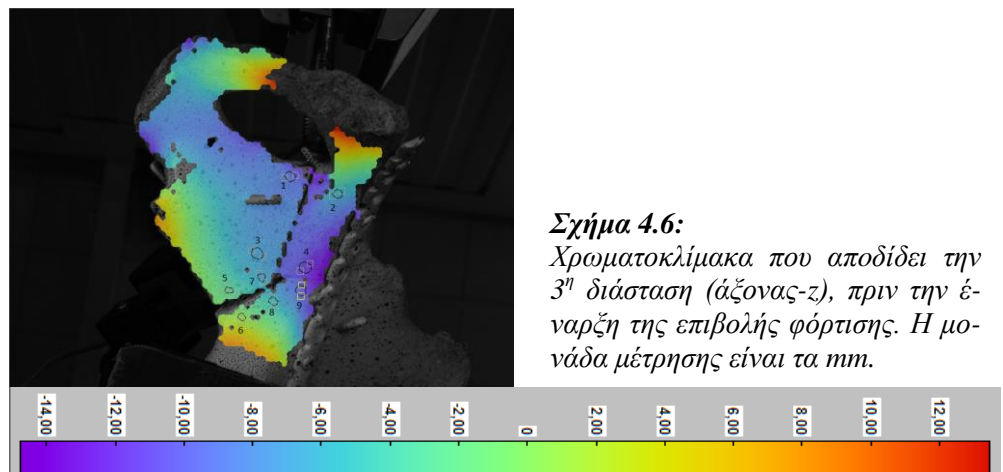
Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 4.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 4.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

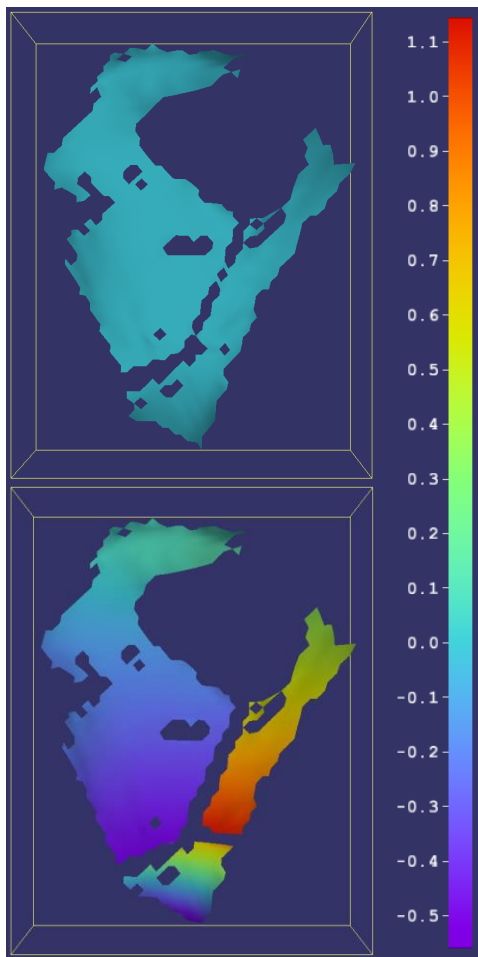


Σχήμα 4.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής

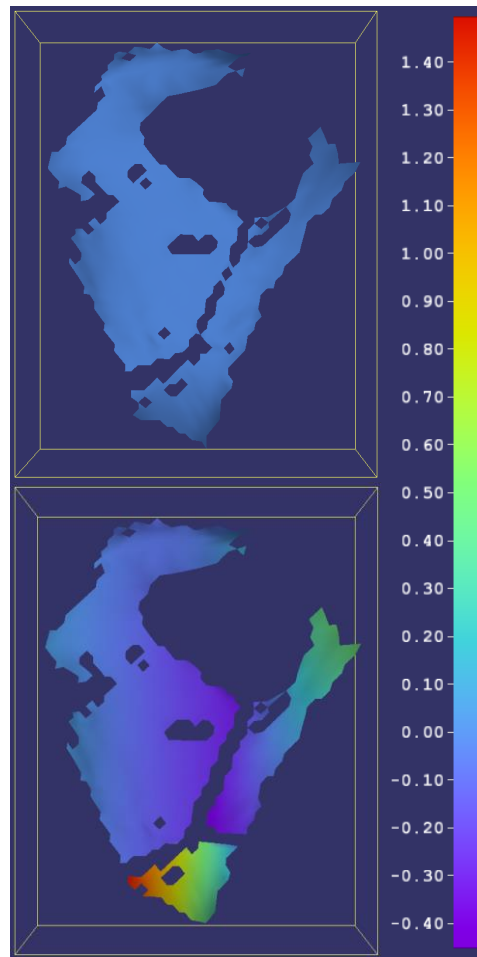


Σχήμα 4.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

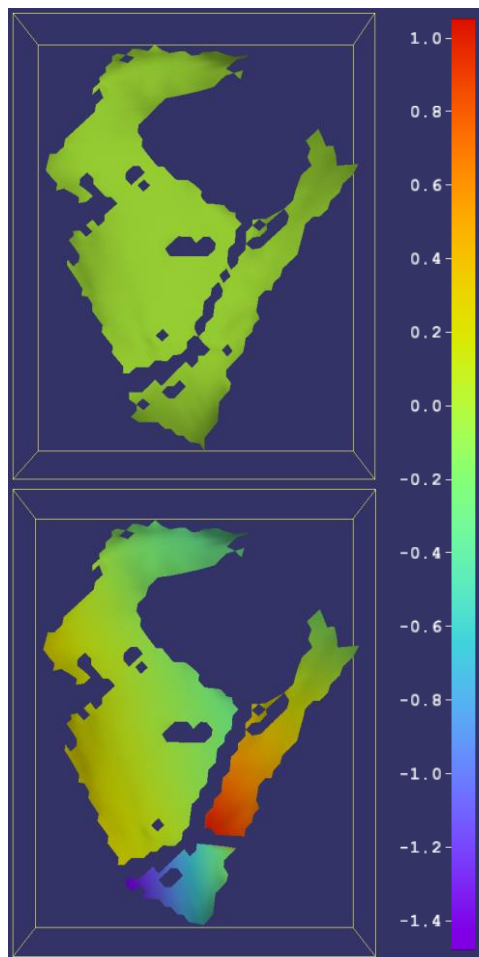
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



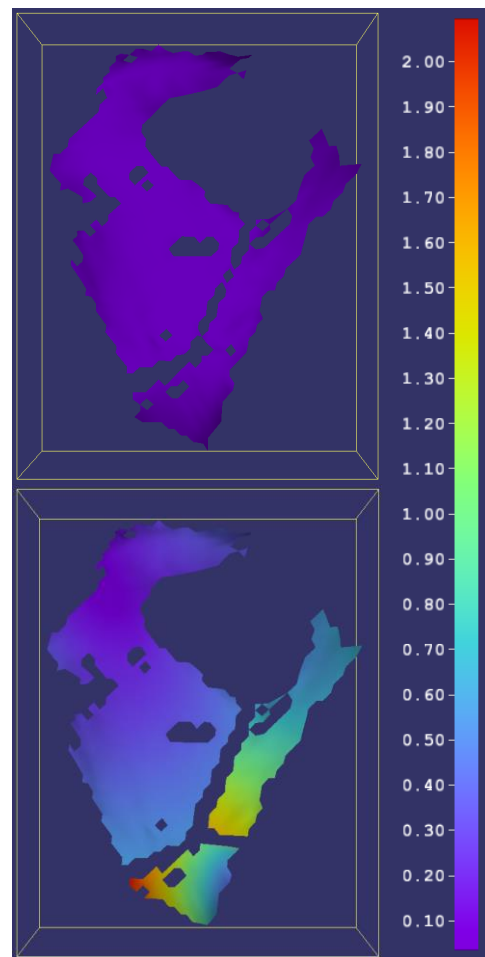
Σχήμα 4.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-x. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



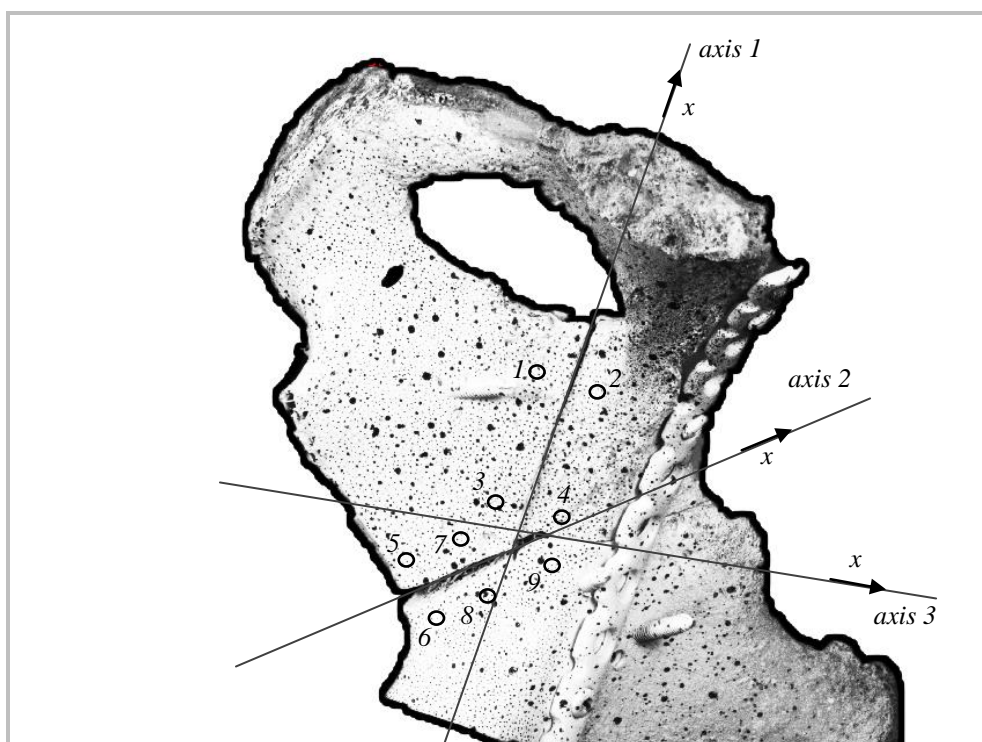
Σχήμα 4.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-y. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 4.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 4.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

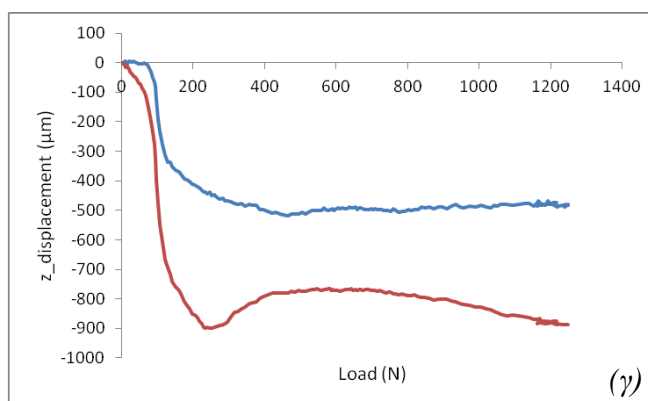
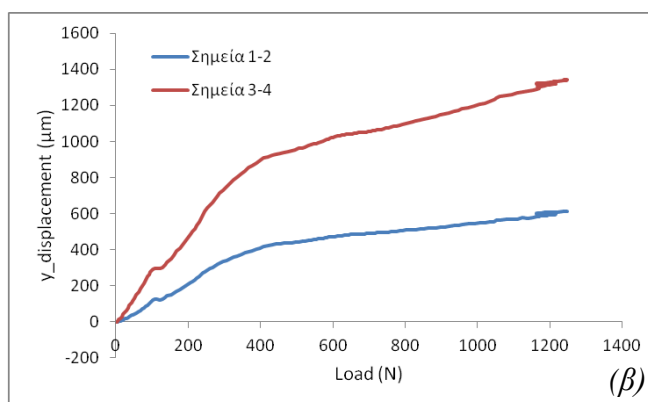
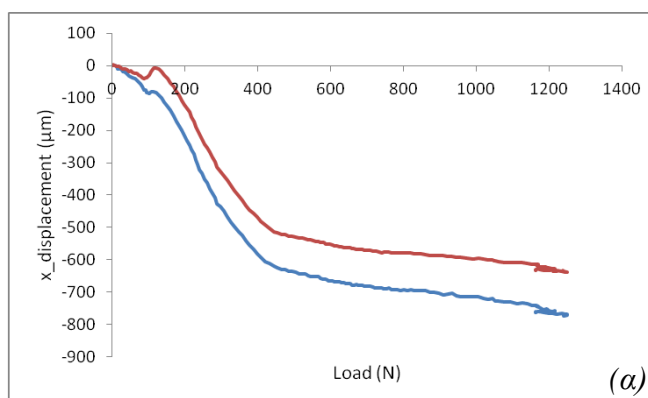


Σχήμα 4.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 4-9.

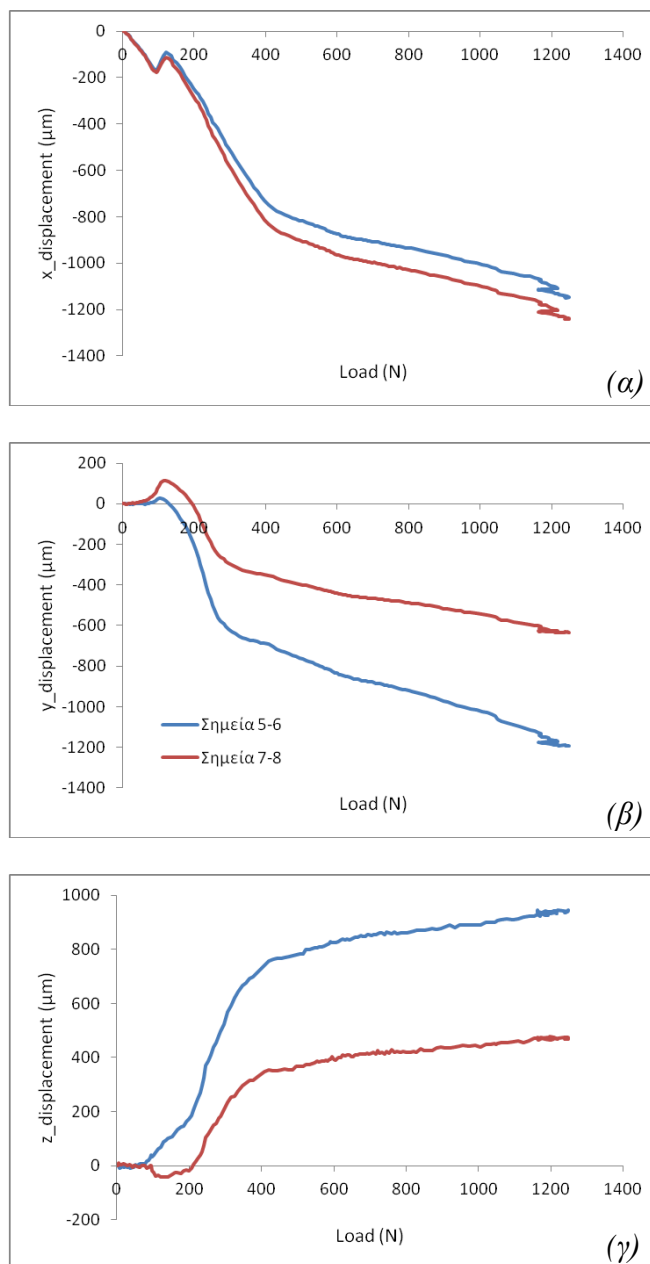
Κάταγμα 1



Σχήμα 4.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

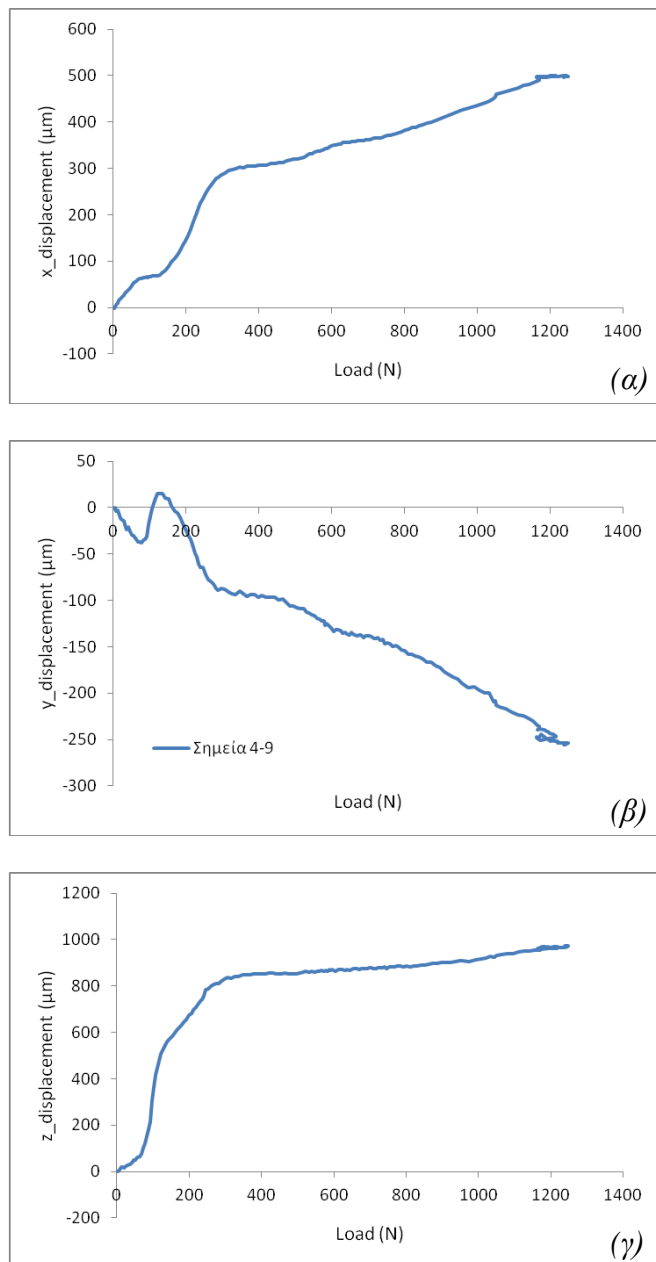
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 2



Σχήμα 4.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 3

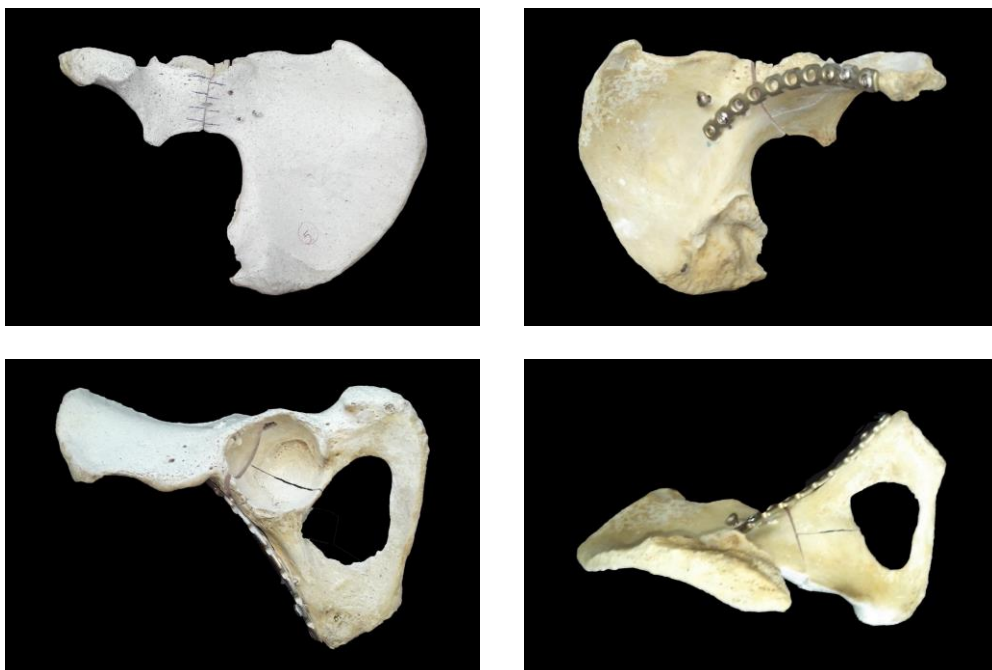


Σχήμα 4.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

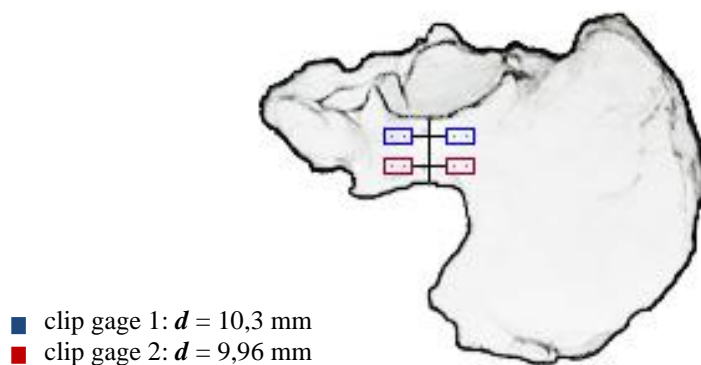
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 5-αριστερό

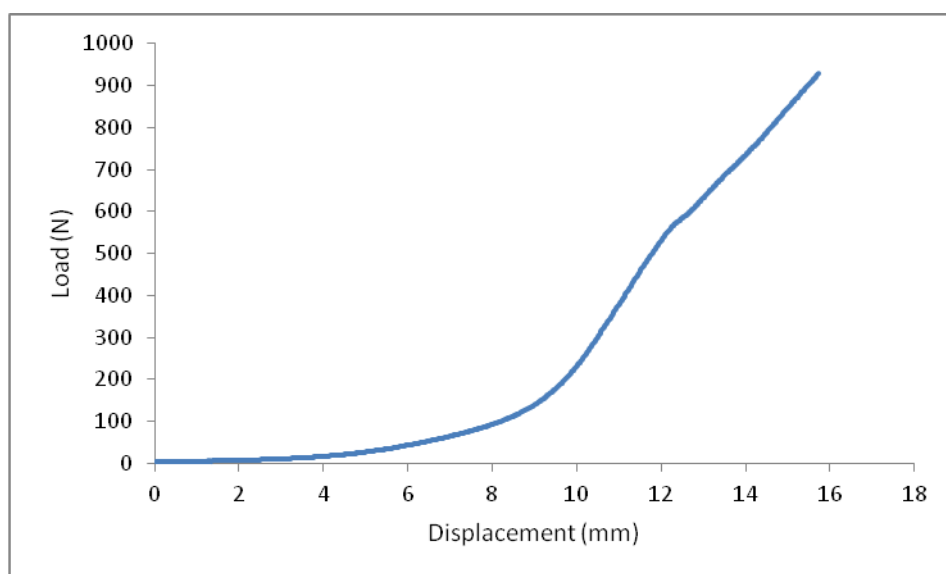
Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate, screw



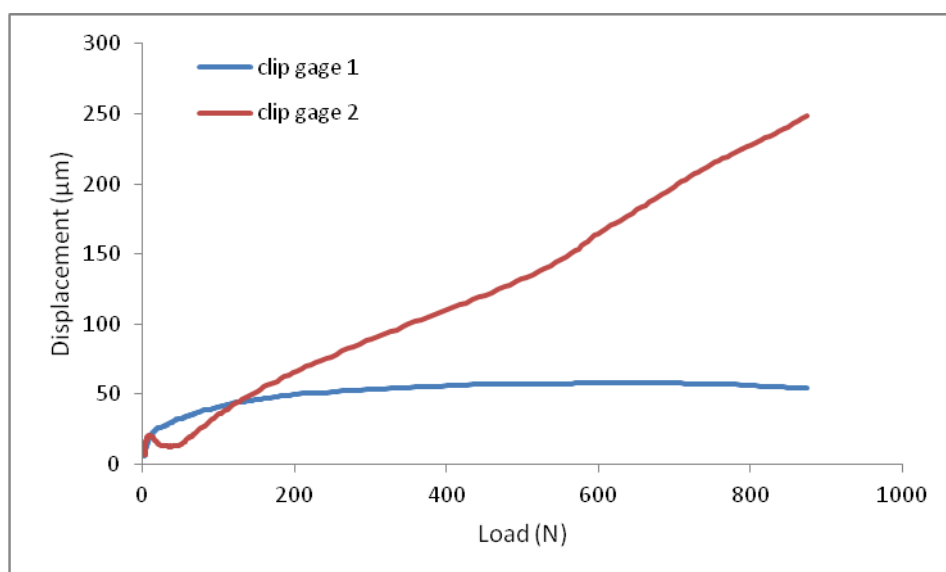
Σχήμα 5.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 5.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κνσιομέτρων» (clip gauges).

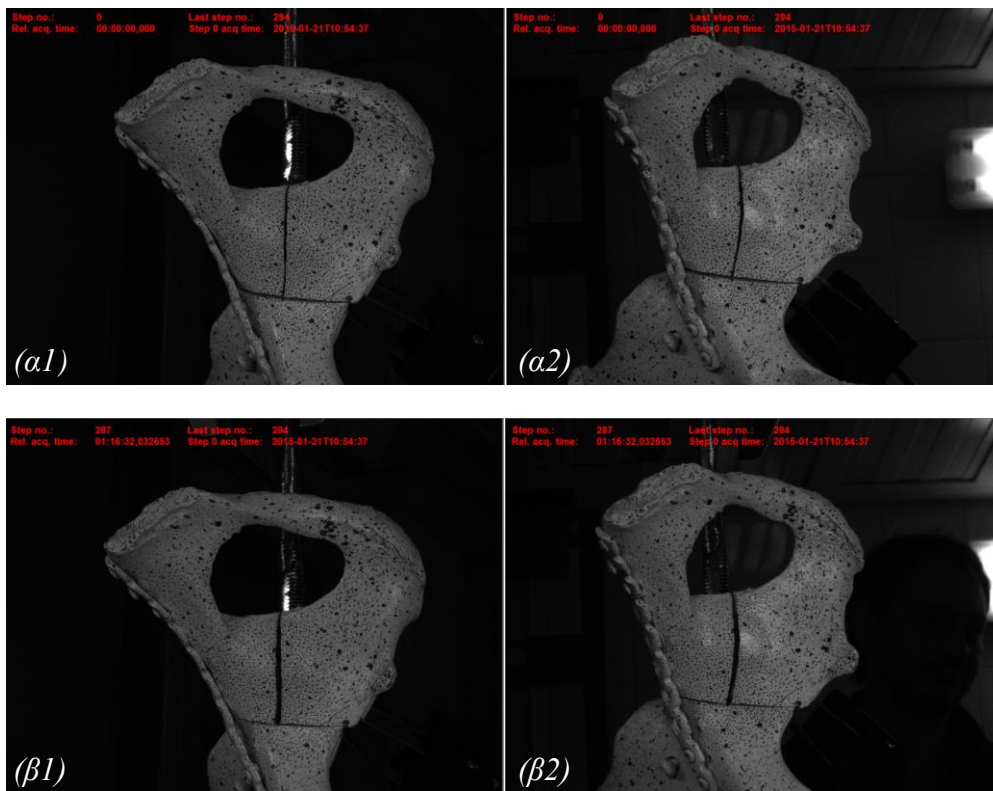


Σχήμα 5.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

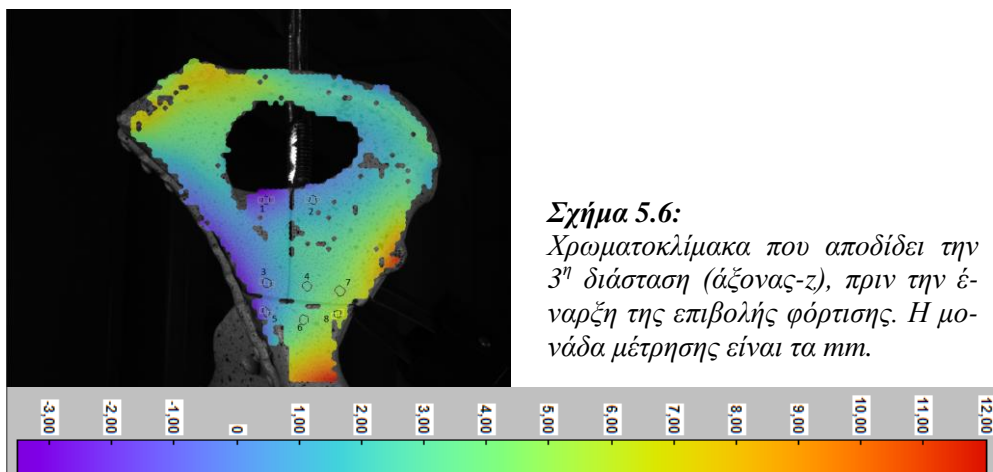


Σχήμα 5.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 5.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

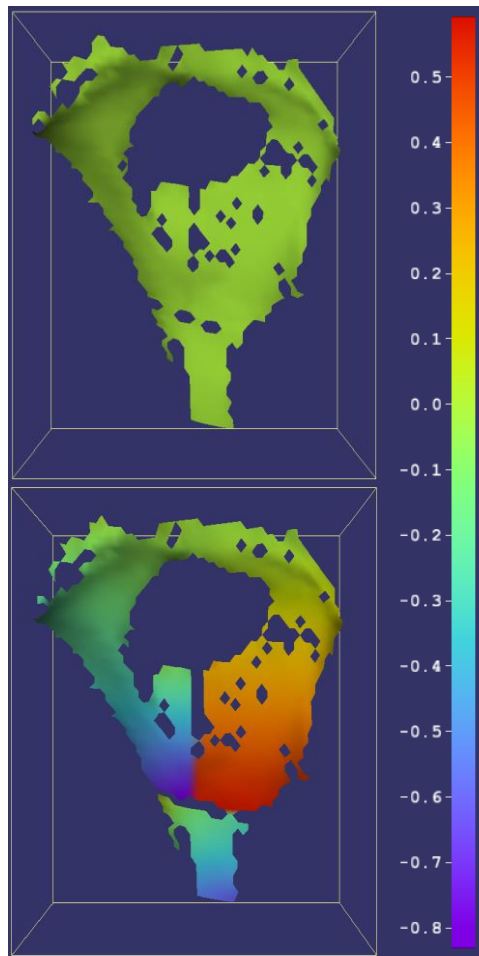
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



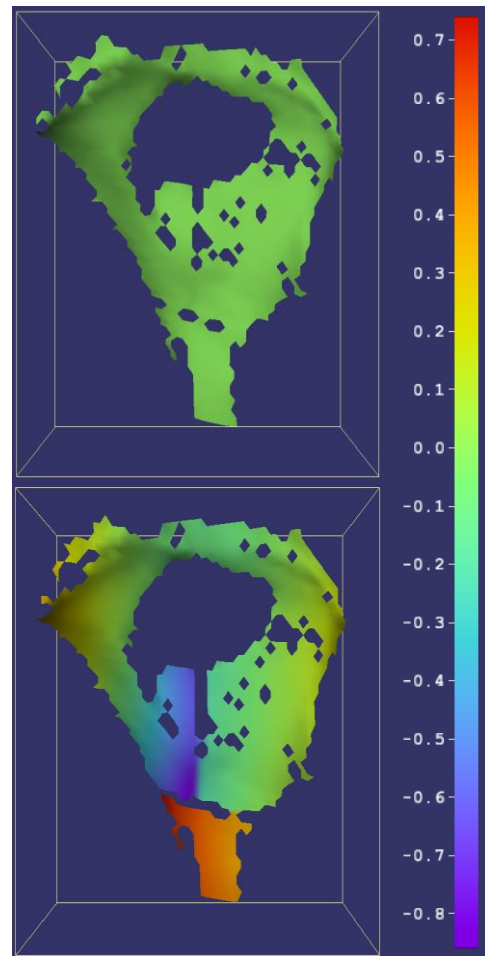
Σχήμα 5.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



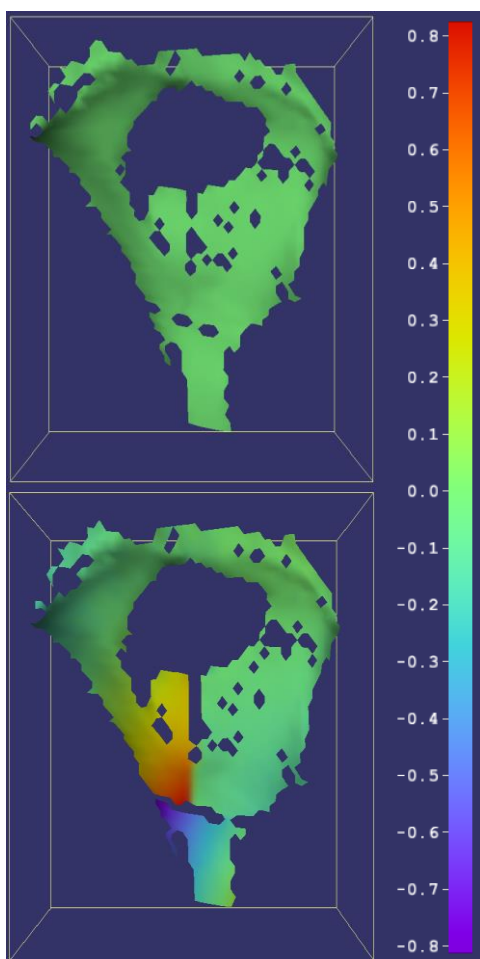
Σχήμα 5.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.



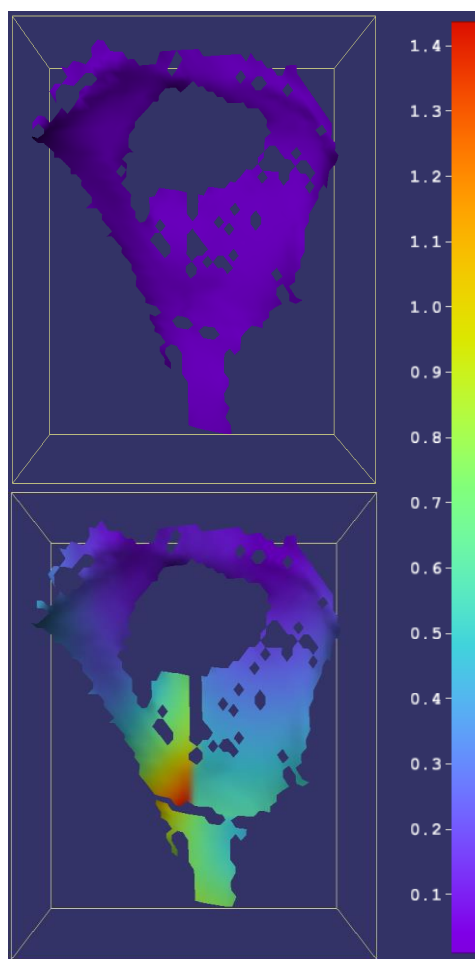
Σχήμα 5.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



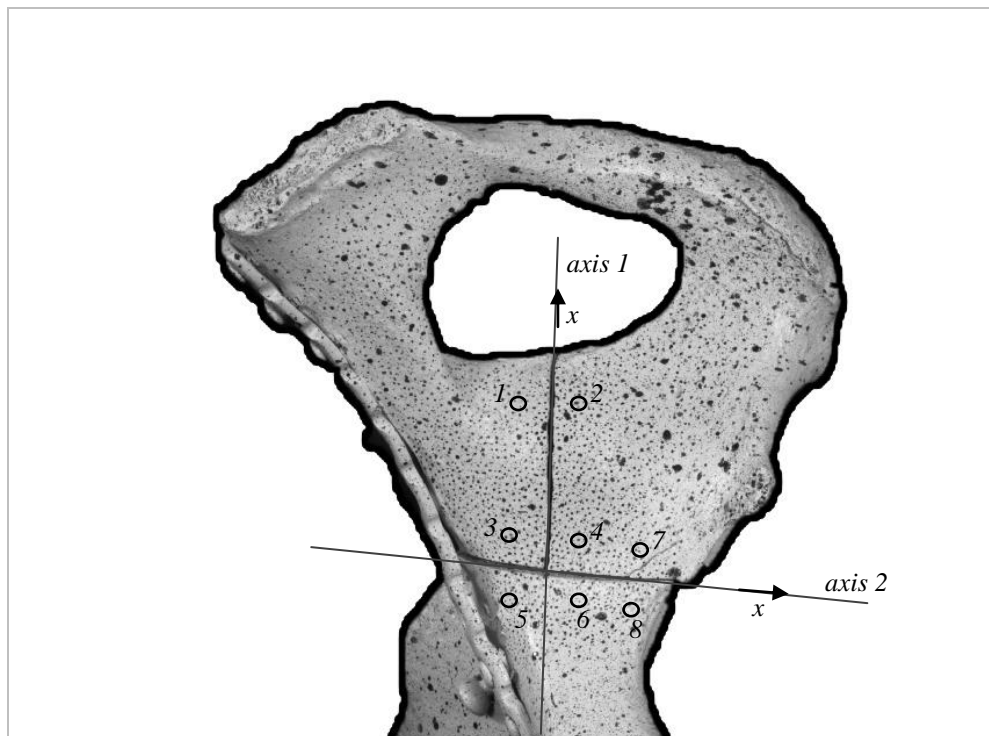
Σχήμα 5.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Σχήμα 5.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 5.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



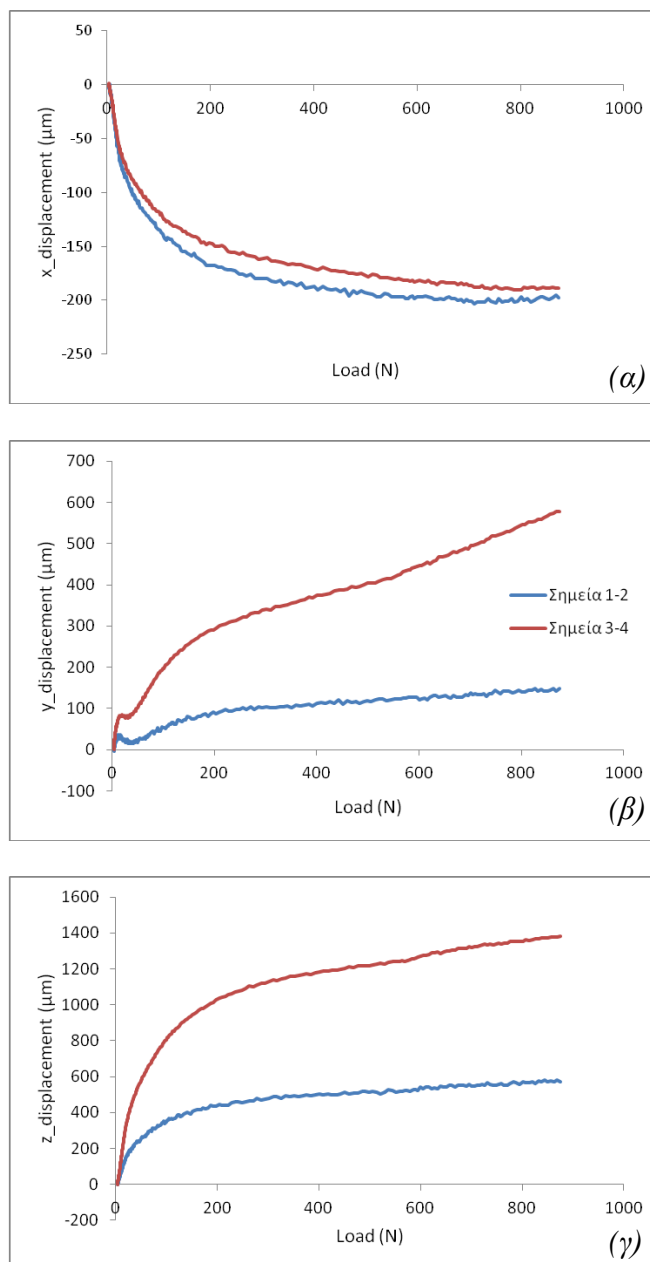
Σχήμα 5.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 3-5, 4-6 και 7-8.

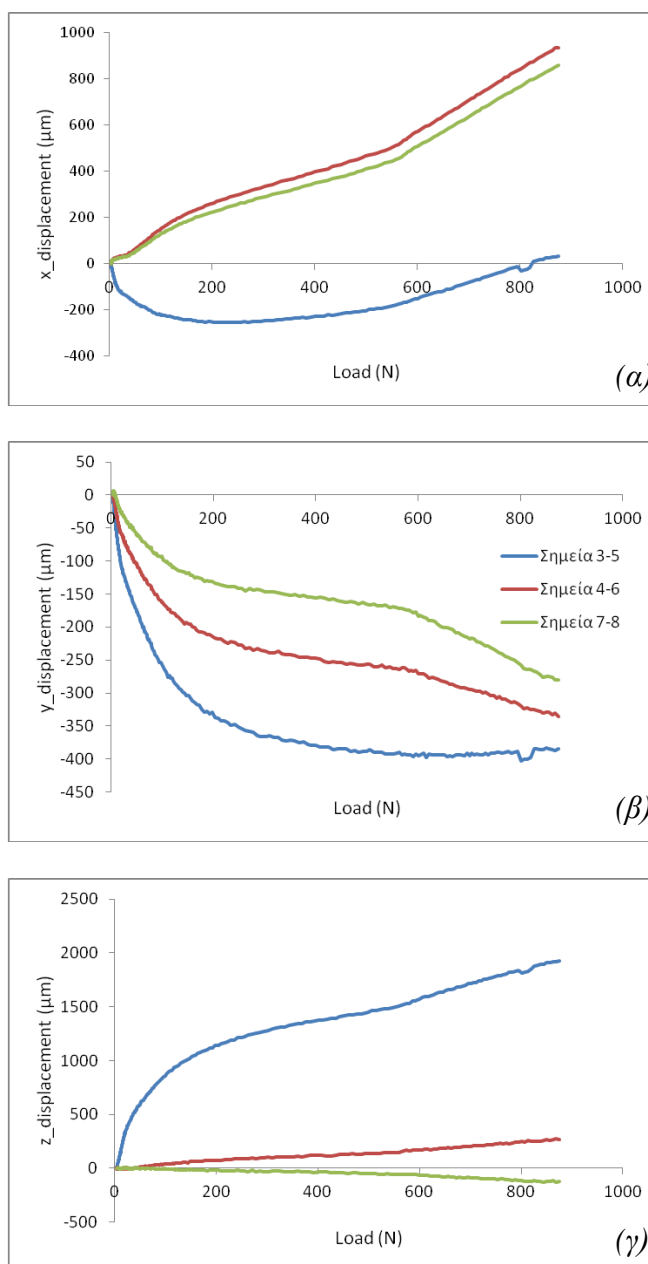
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 1



Σχήμα 5.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 2

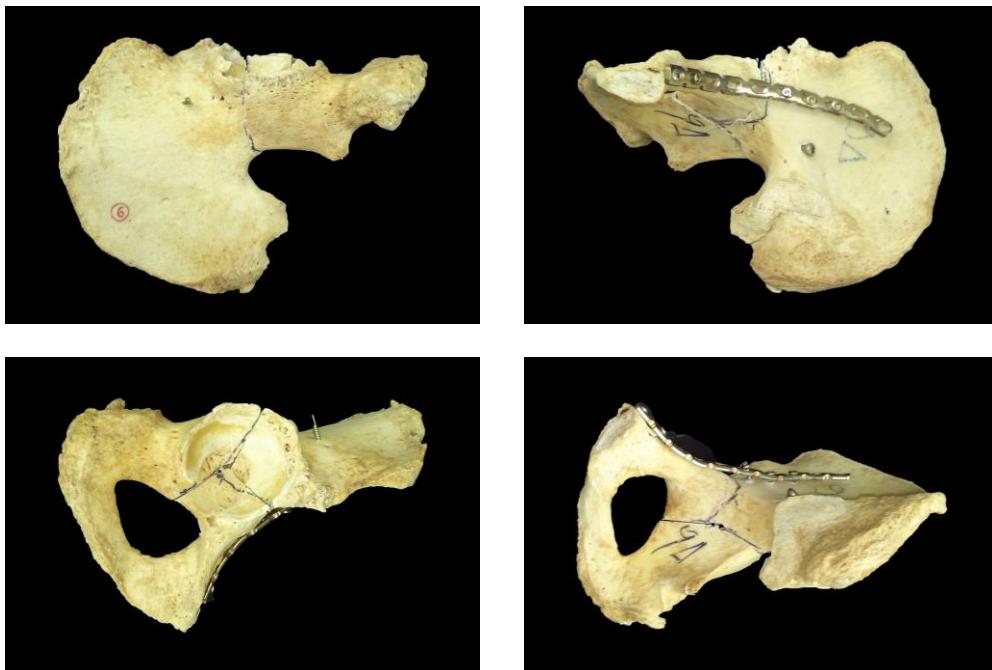


Σχήμα 5.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

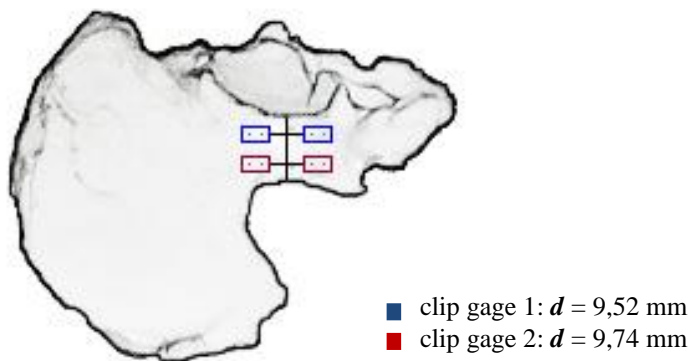
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 6-δεξί

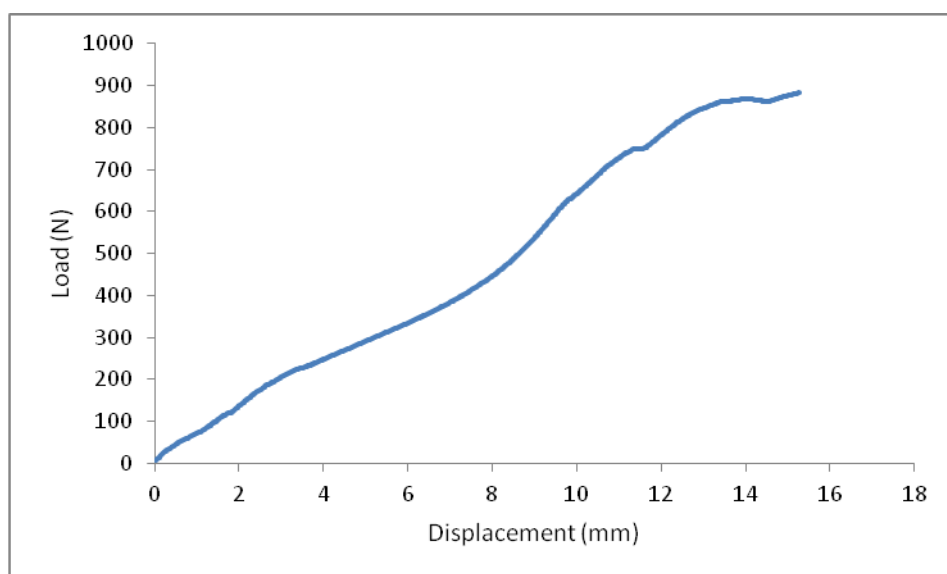
Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate, screw



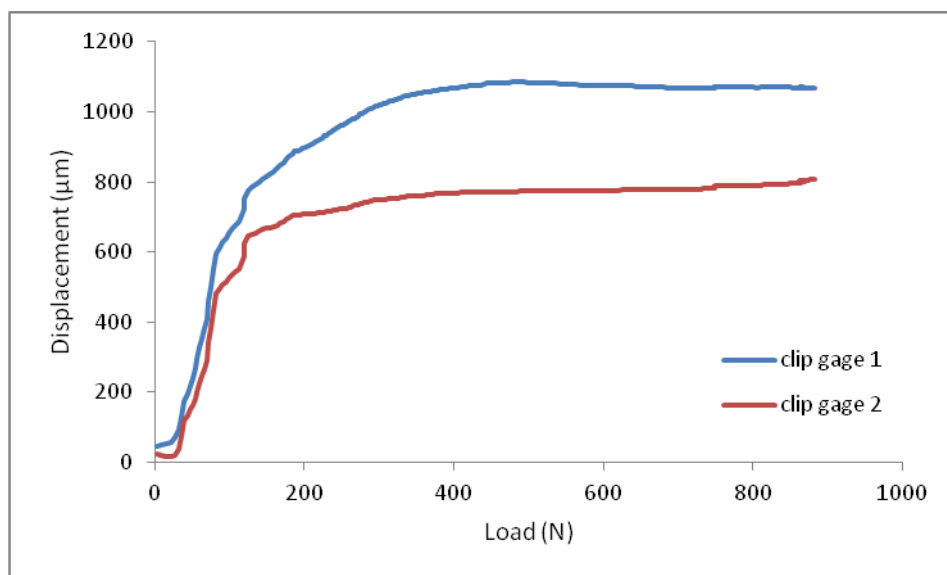
Σχήμα 6.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 6.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κνσιομέτρων» (clip gauges).

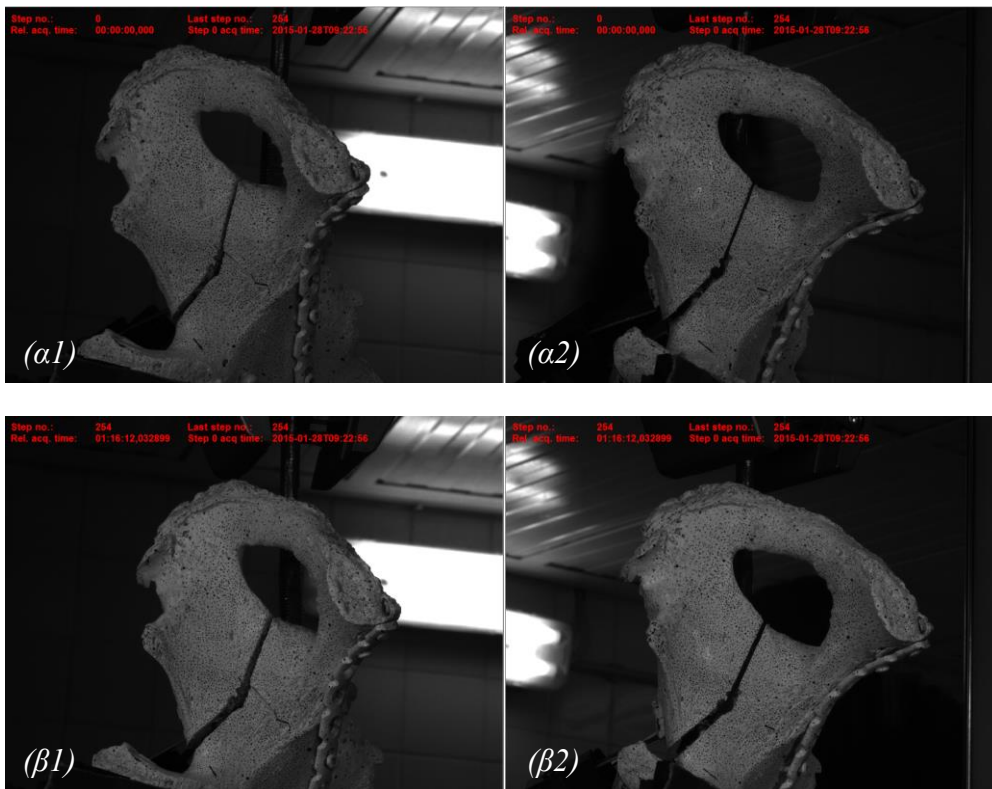


Σχήμα 6.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

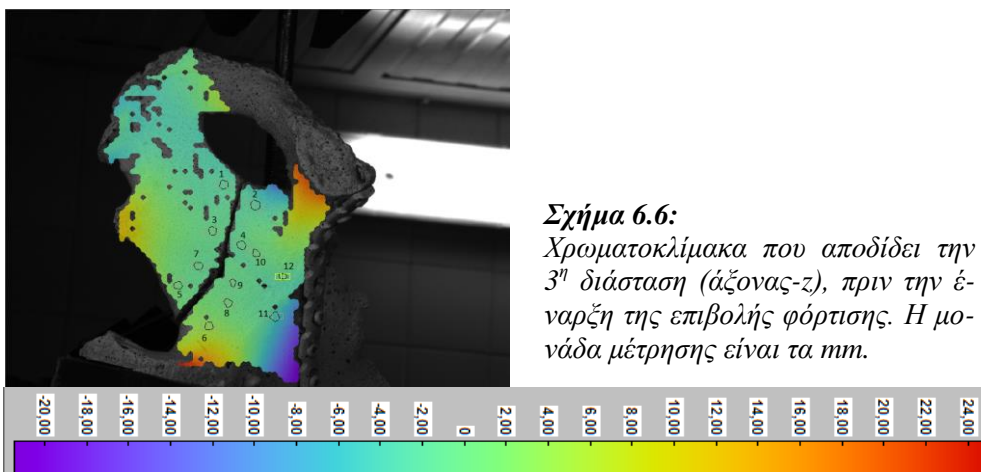


Σχήμα 6.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 6.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

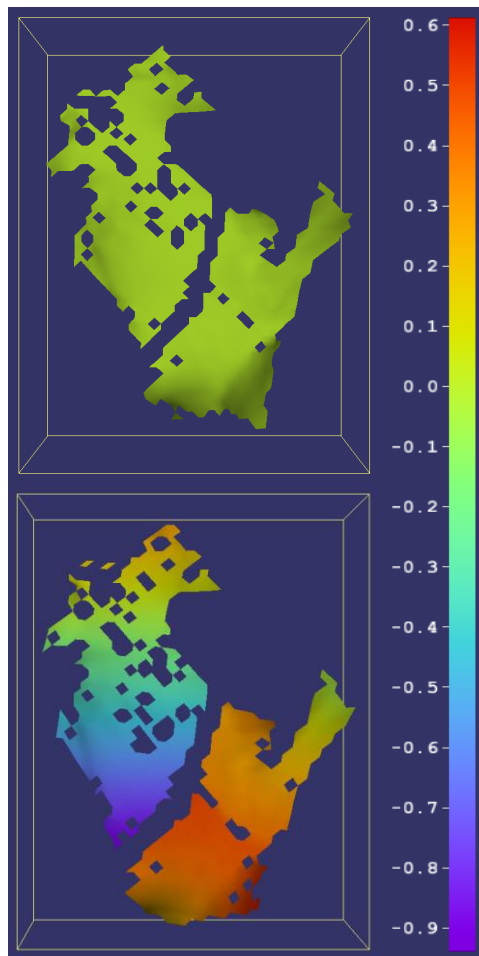
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



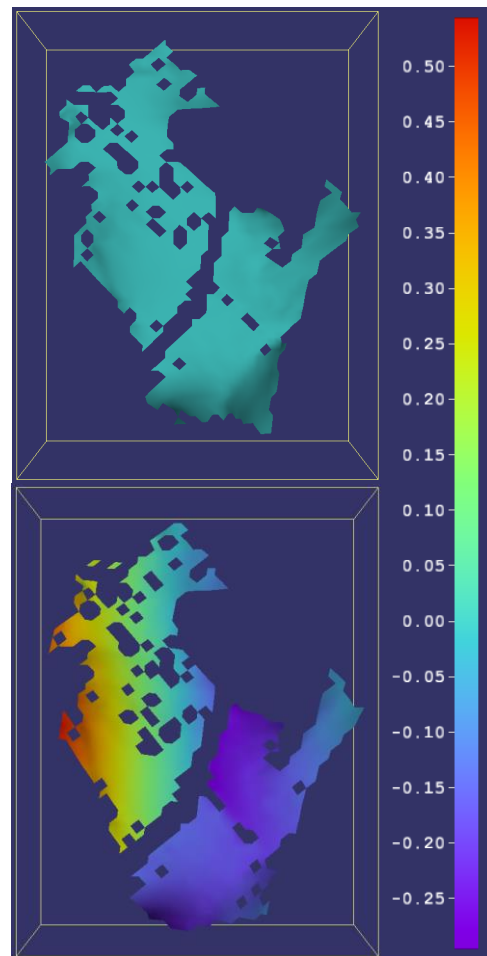
Σχήμα 6.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 6.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

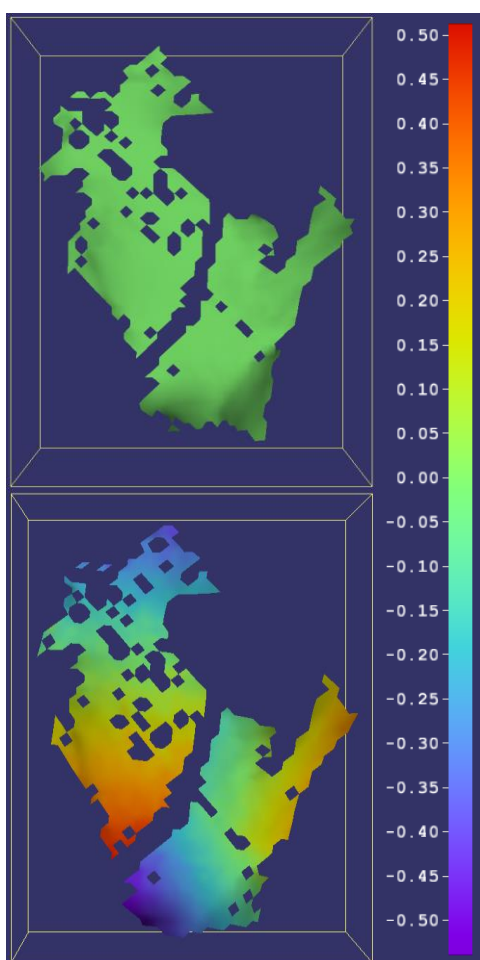


Σχήμα 6.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

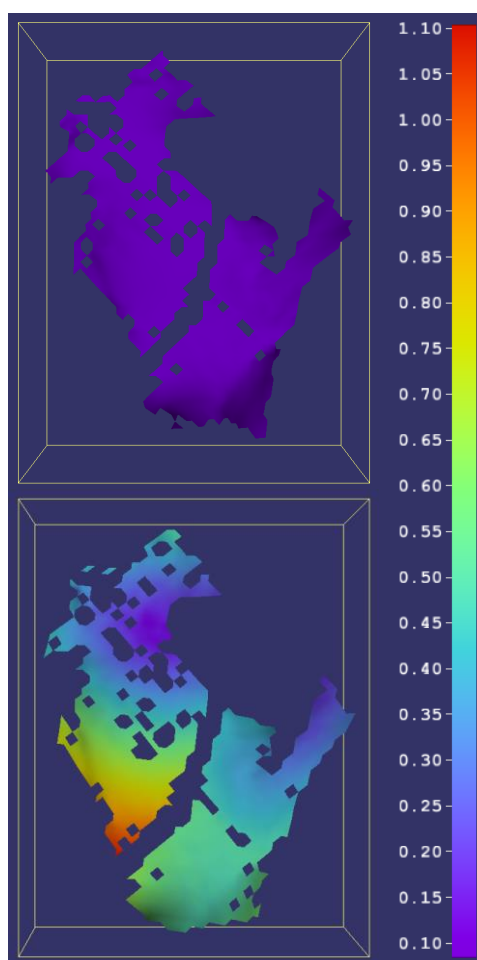


Σχήμα 6.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

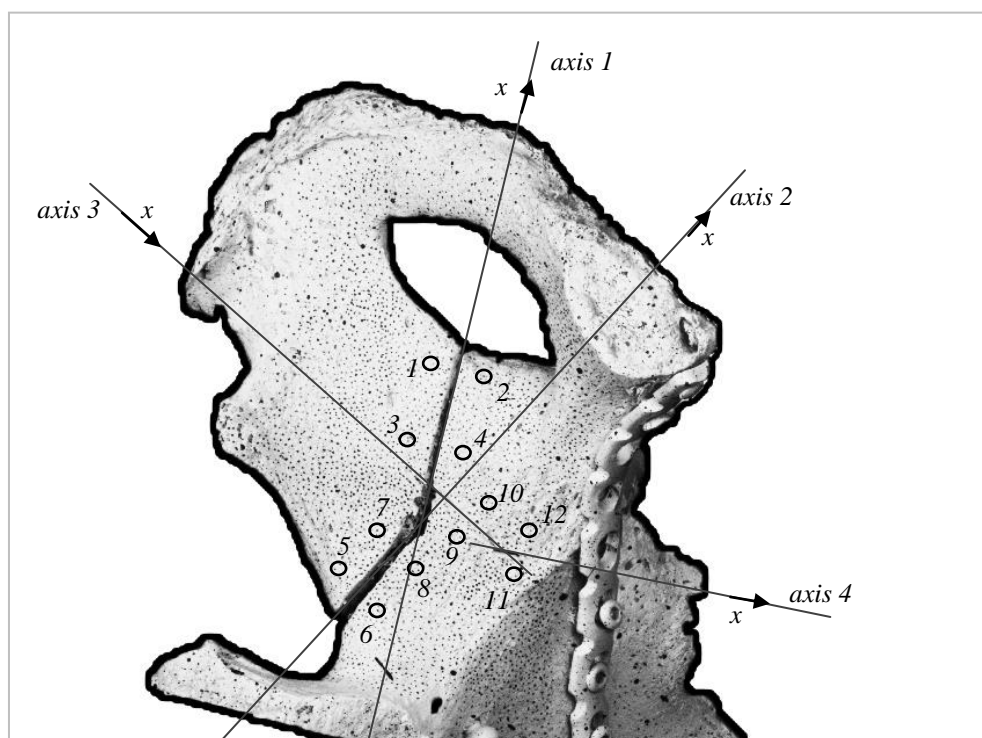
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλων με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



Σχήμα 6.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 6.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



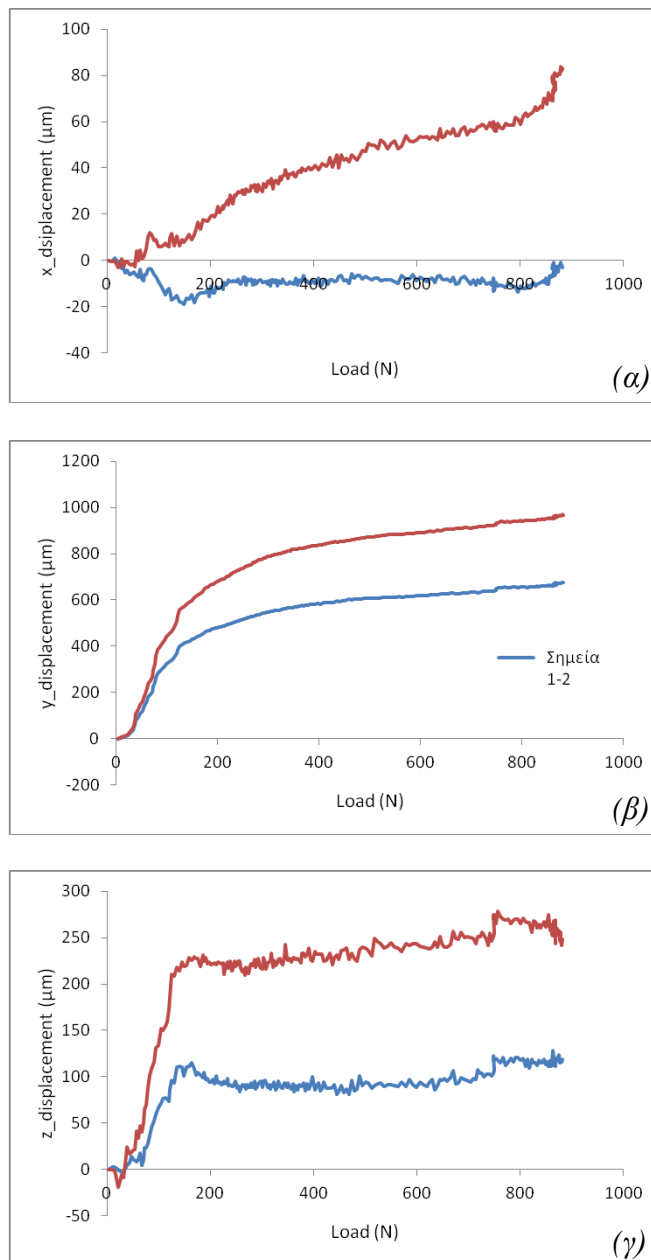
Σχήμα 6.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 9-10,
- ✓ Κάταγμα 4 (axis 4): σημεία 11-12.

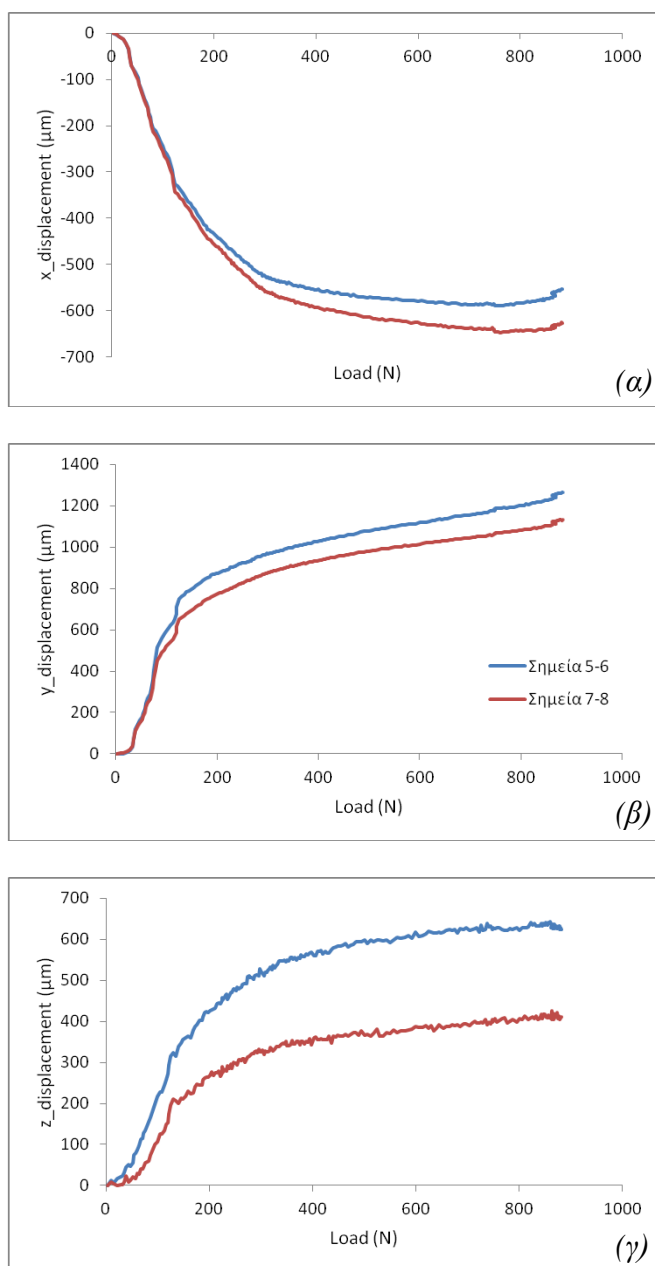
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 1



Σχήμα 6.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

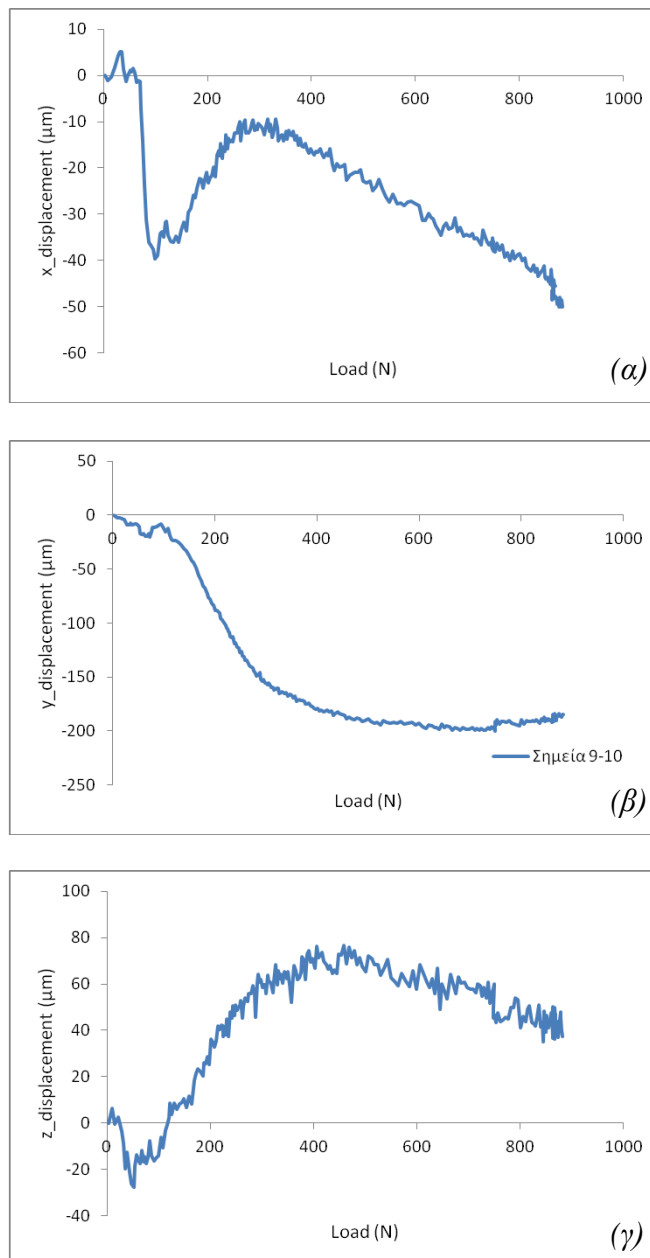
Κάταγμα 2



Σχήμα 6.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

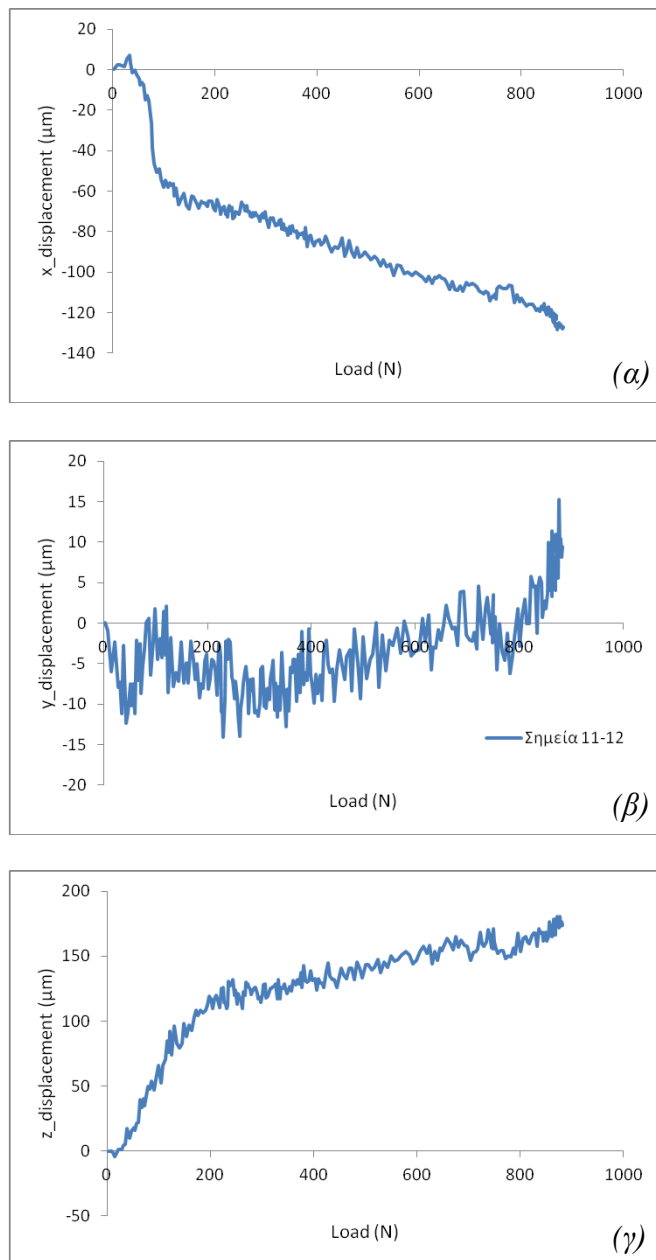
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 3



Σχήμα 6.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 4

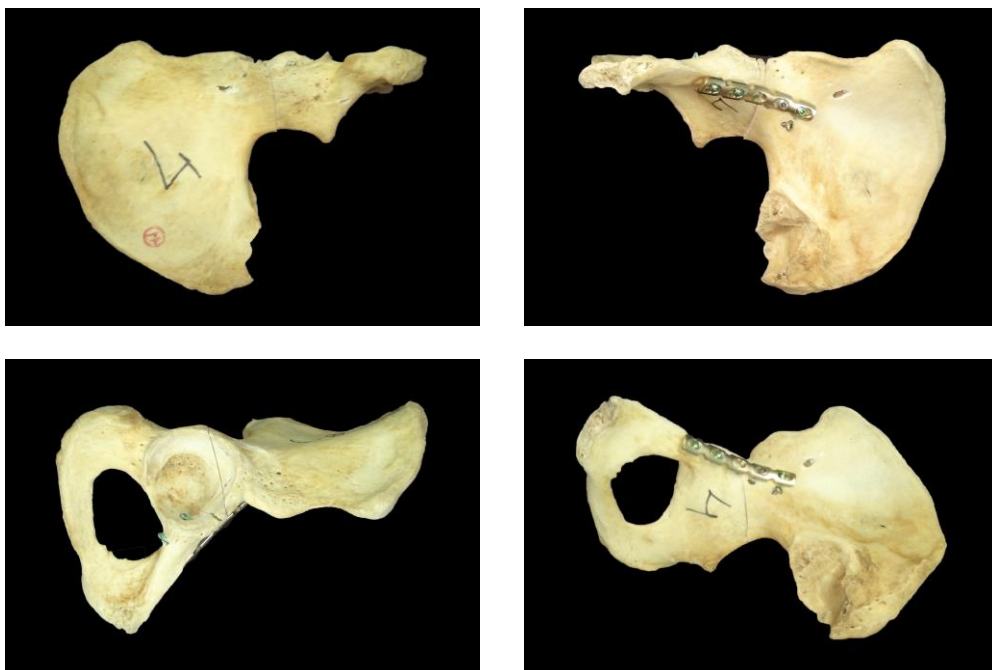


Σχήμα 6.15: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 4 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

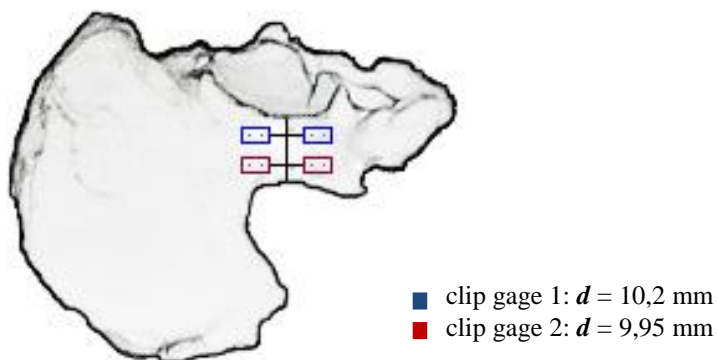
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 7-δεξί

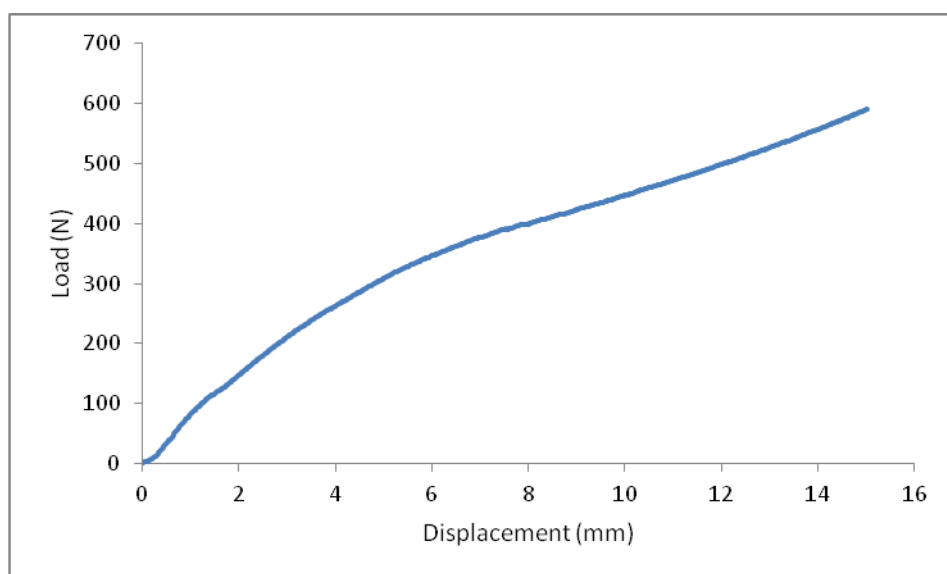
Ομάδα οστεοσύνθεσης: locking plate, screw



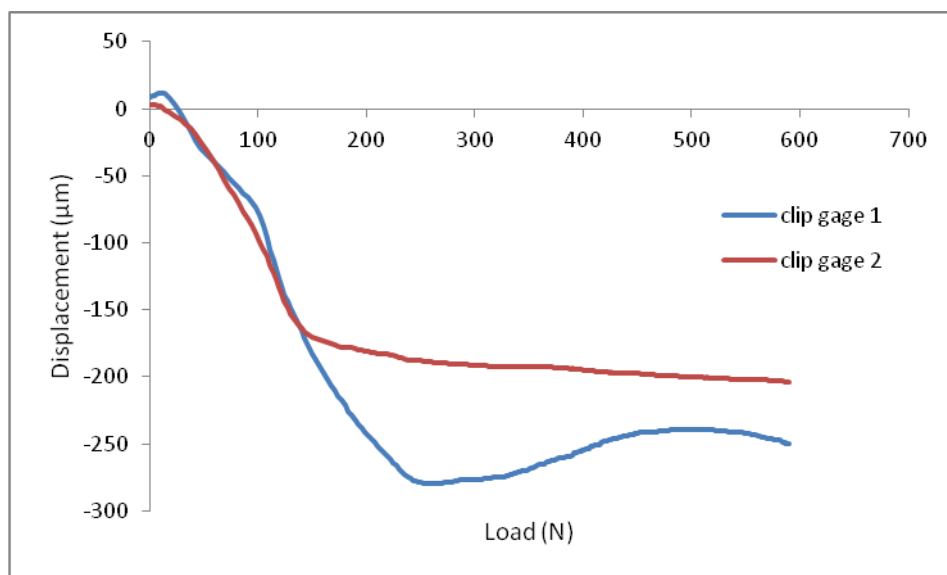
Σχήμα 7.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 7.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυσιομέτρων» (clip gauges).

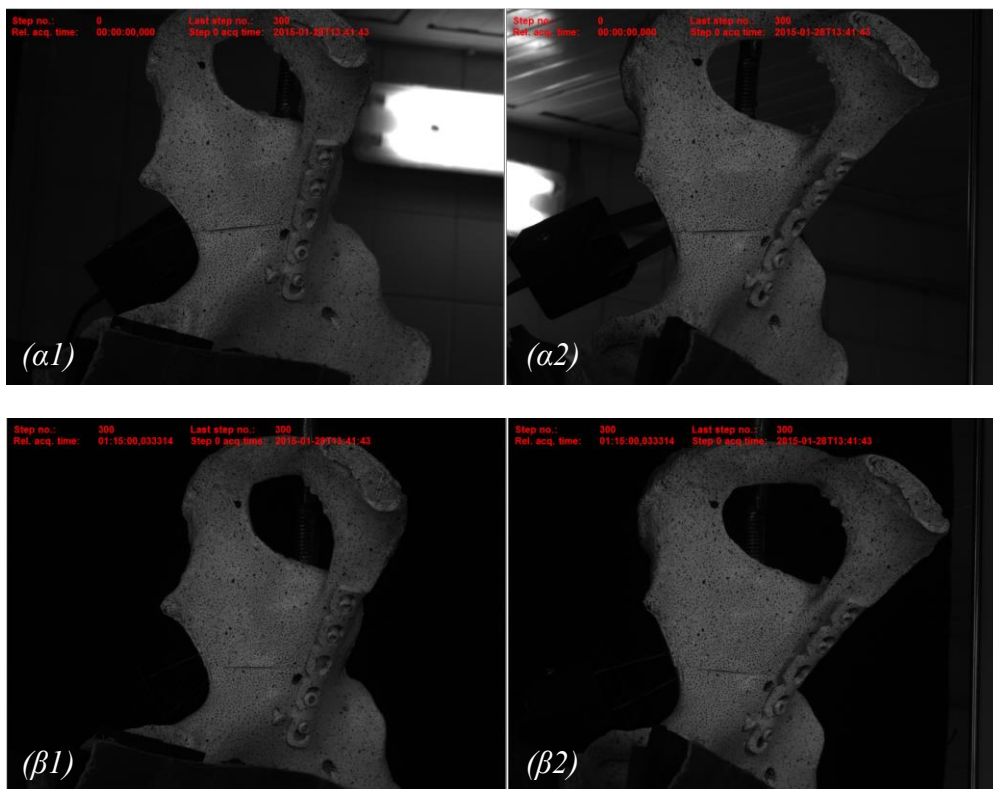


Σχήμα 7.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

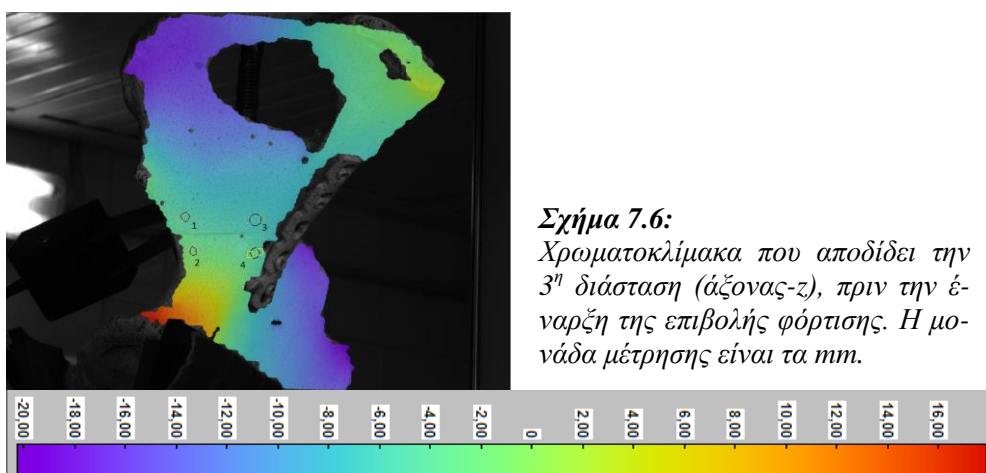


Σχήμα 7.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 7.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

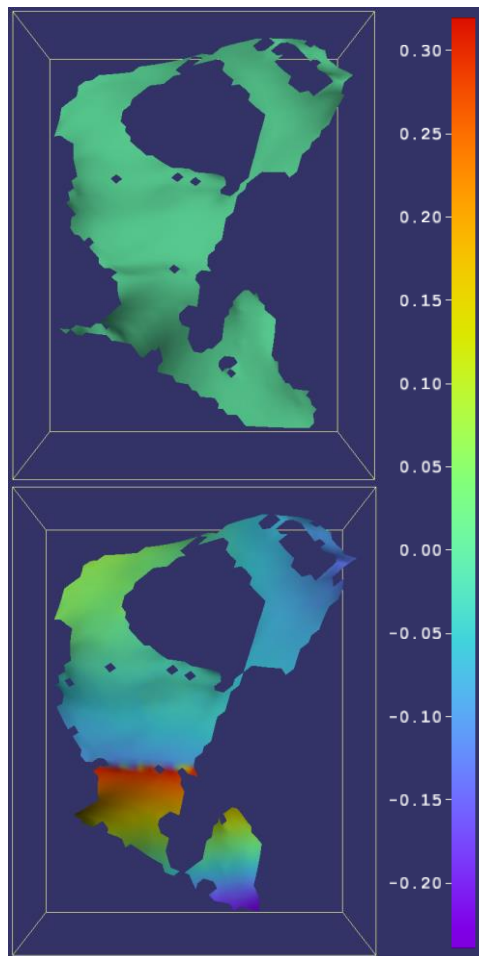
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



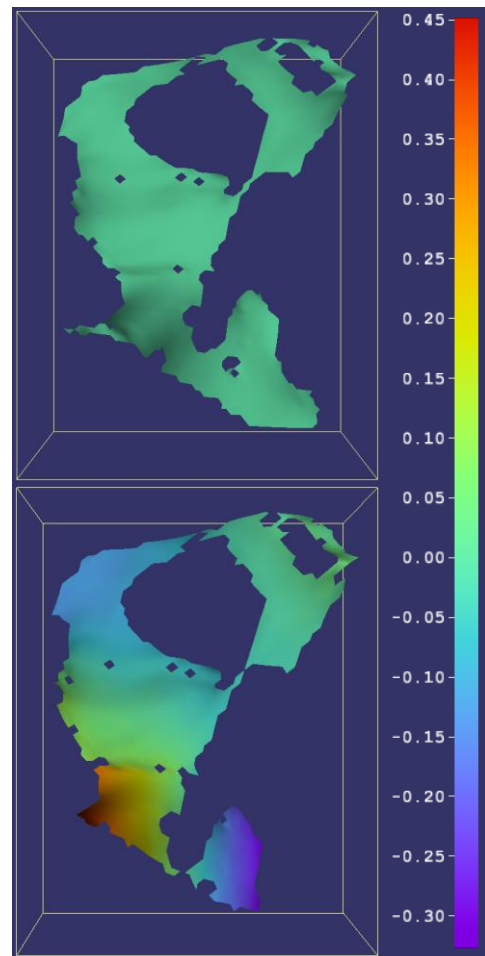
Σχήμα 7.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 7.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

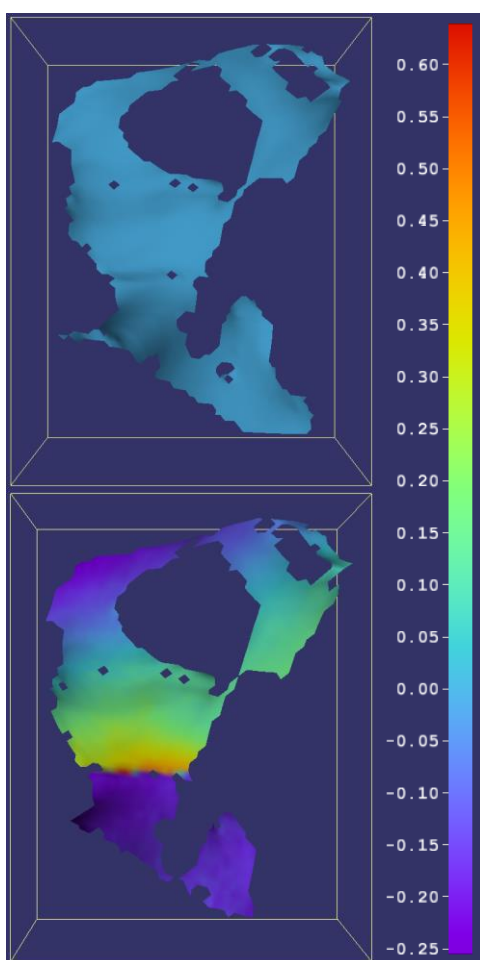


Σχήμα 7.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

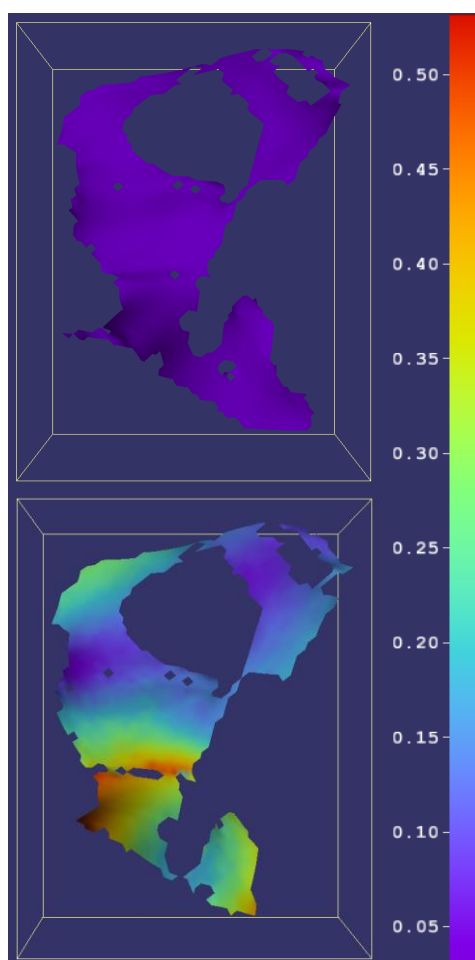


Σχήμα 7.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

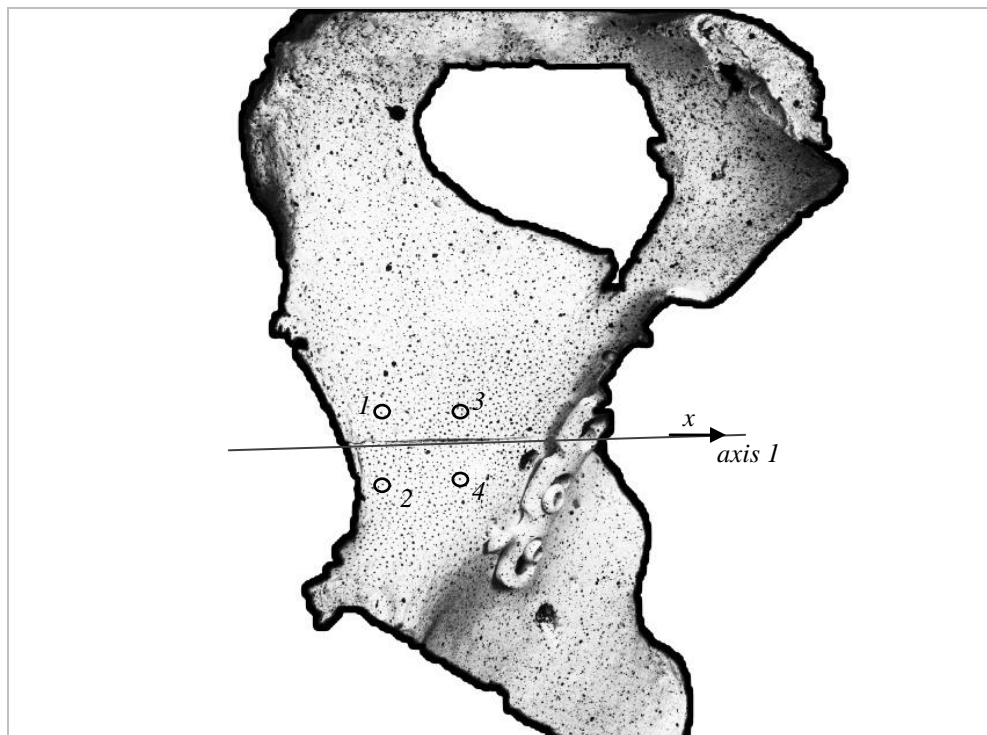
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλων με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



Σχήμα 7.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 7.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

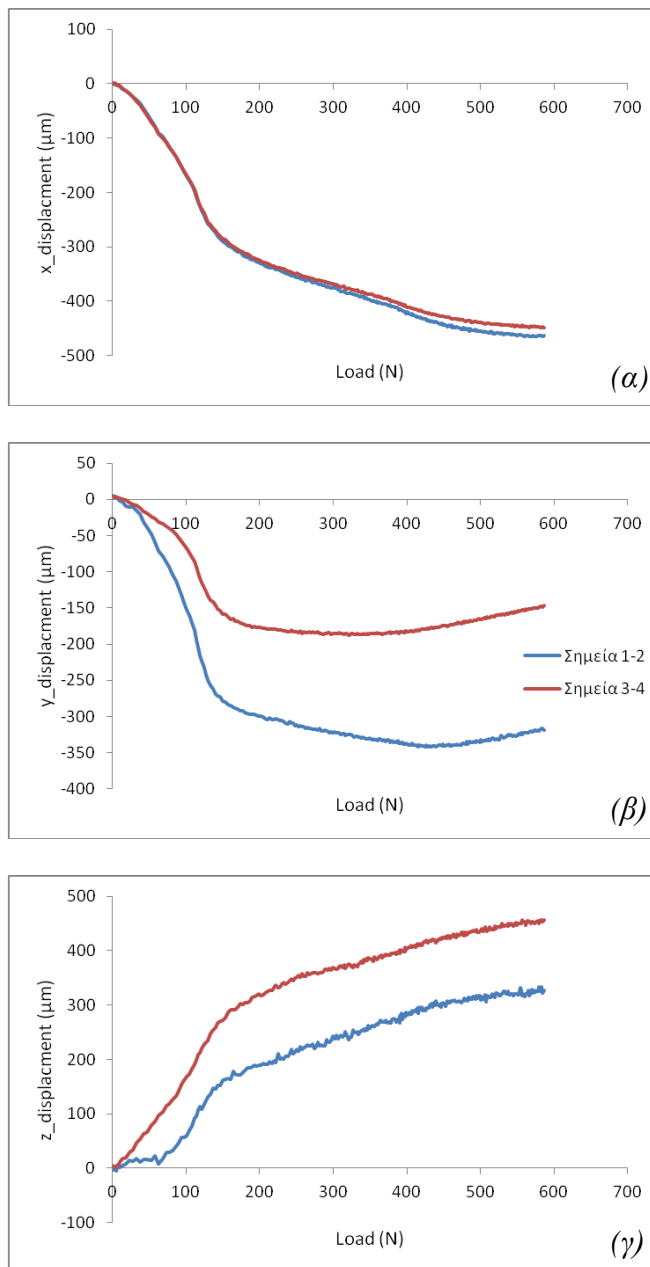


Σχήμα 7.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4.

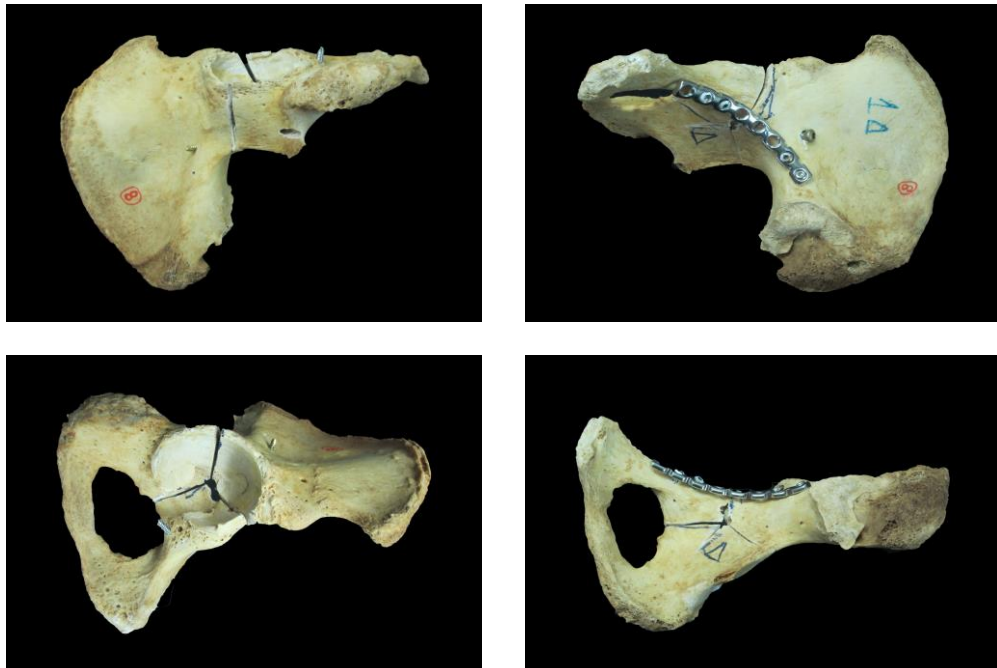
Κάταγμα 1



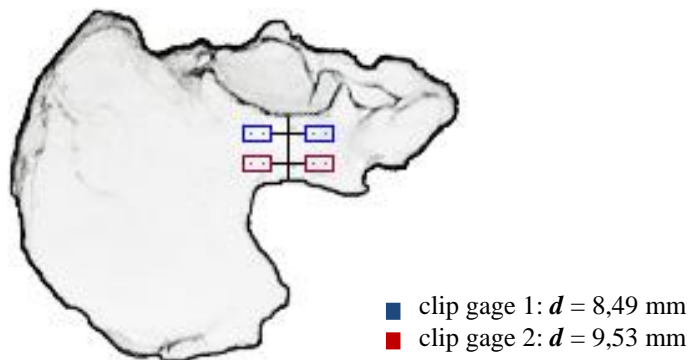
Σχήμα 7.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 8-δεξί

Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate, screw

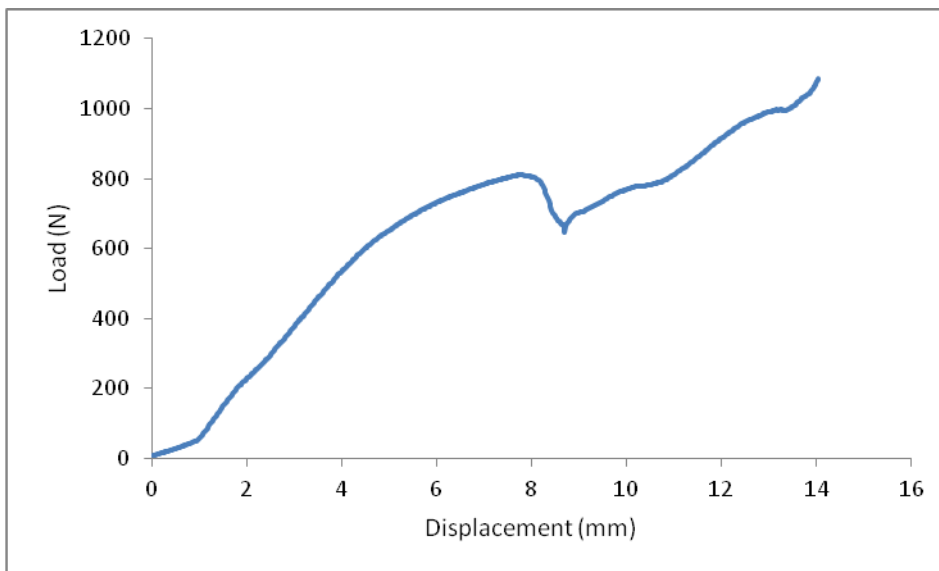


Σχήμα 8.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.

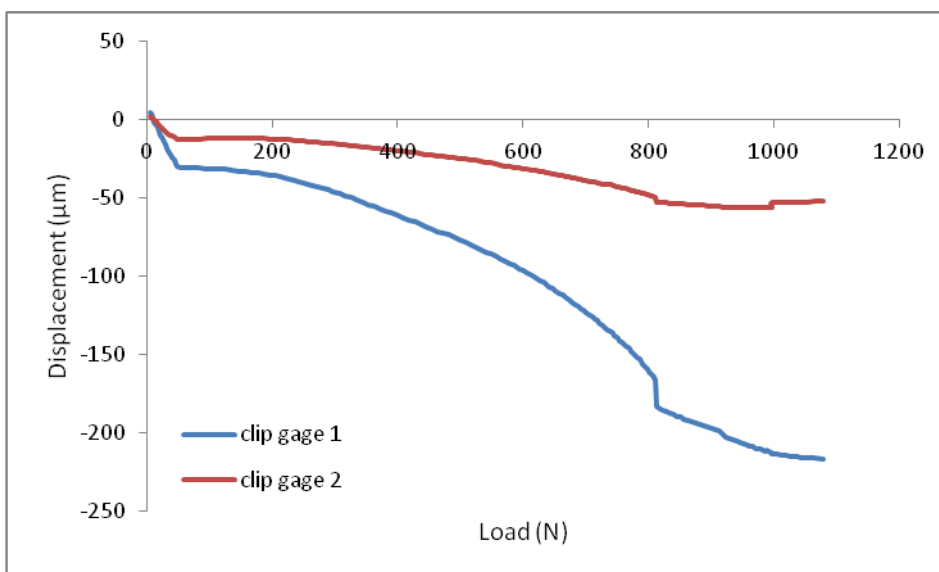


Σχήμα 8.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

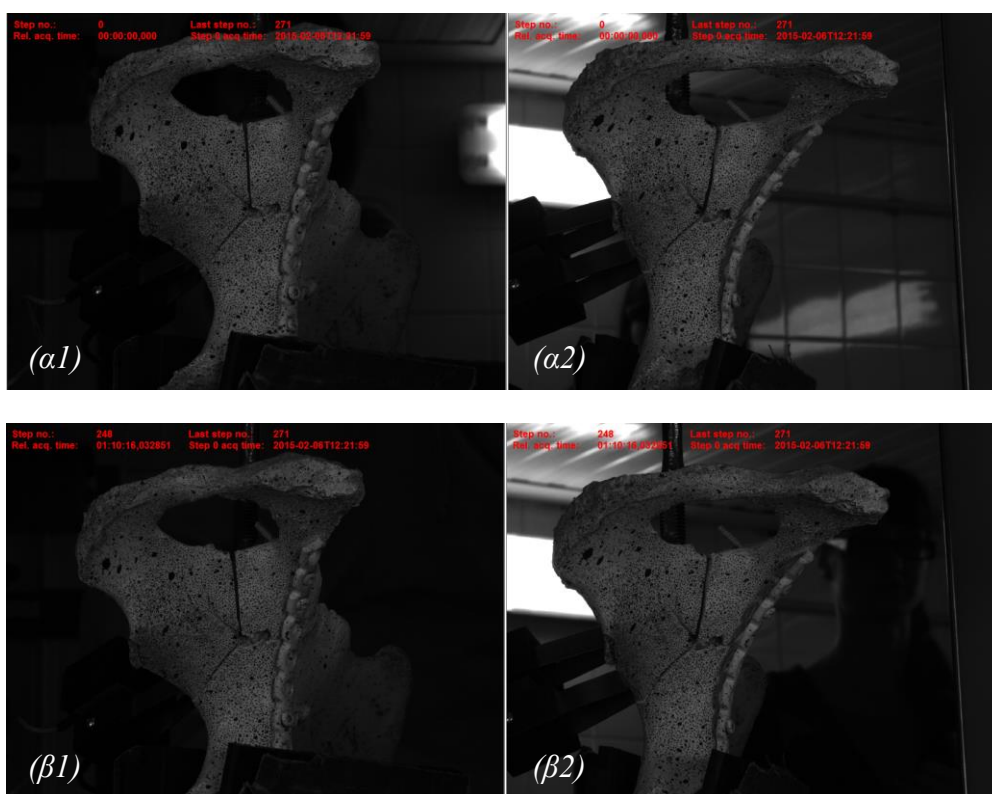
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



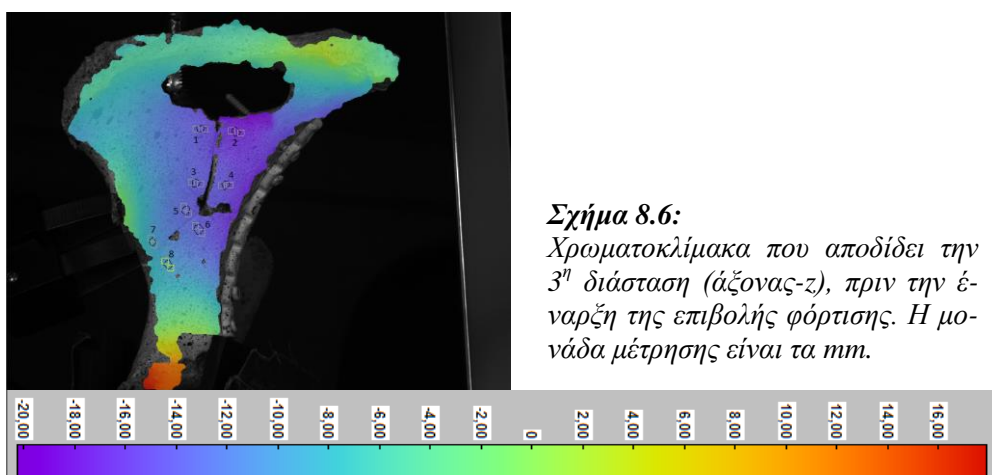
Σχήμα 8.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 8.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 8.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.



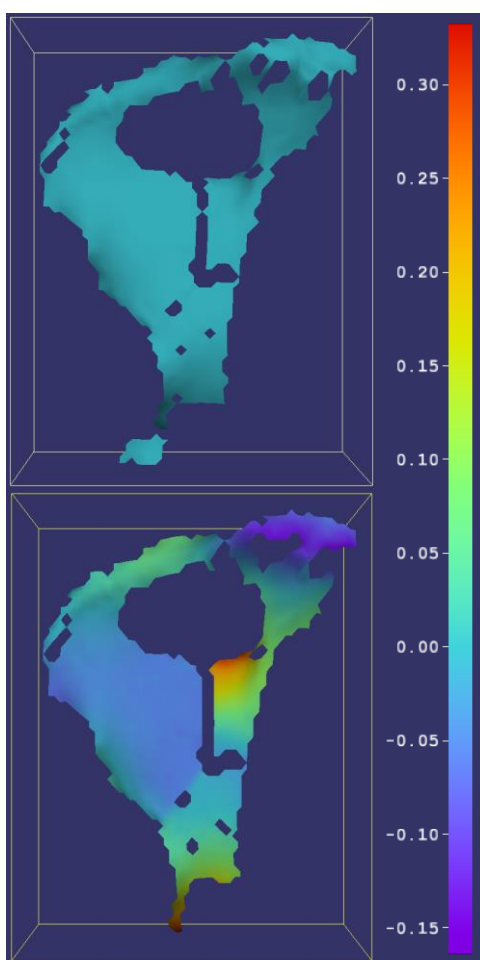
Σχήμα 8.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



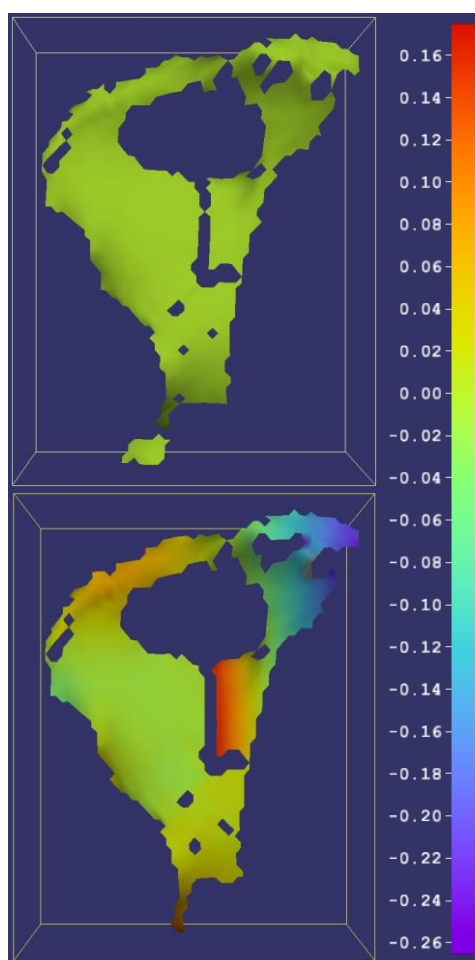
Σχήμα 8.6:

Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

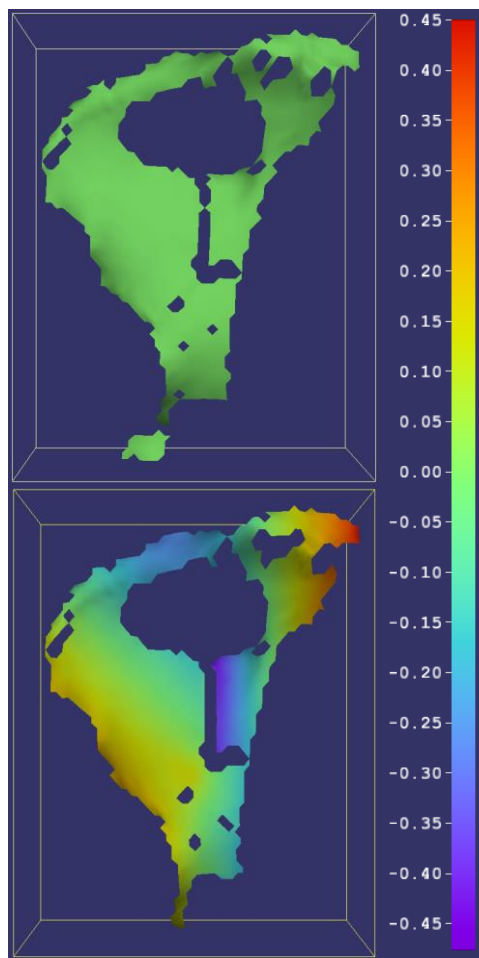
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



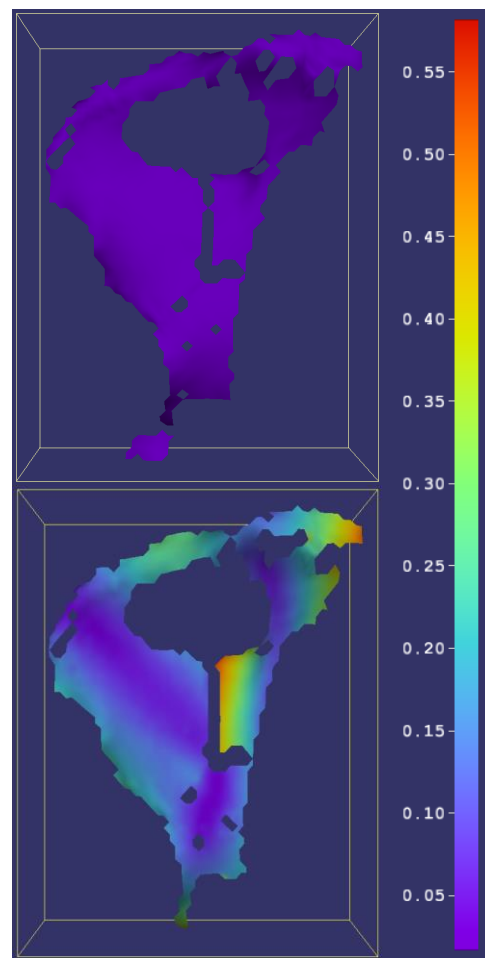
Σχήμα 8.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Σχήμα 8.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

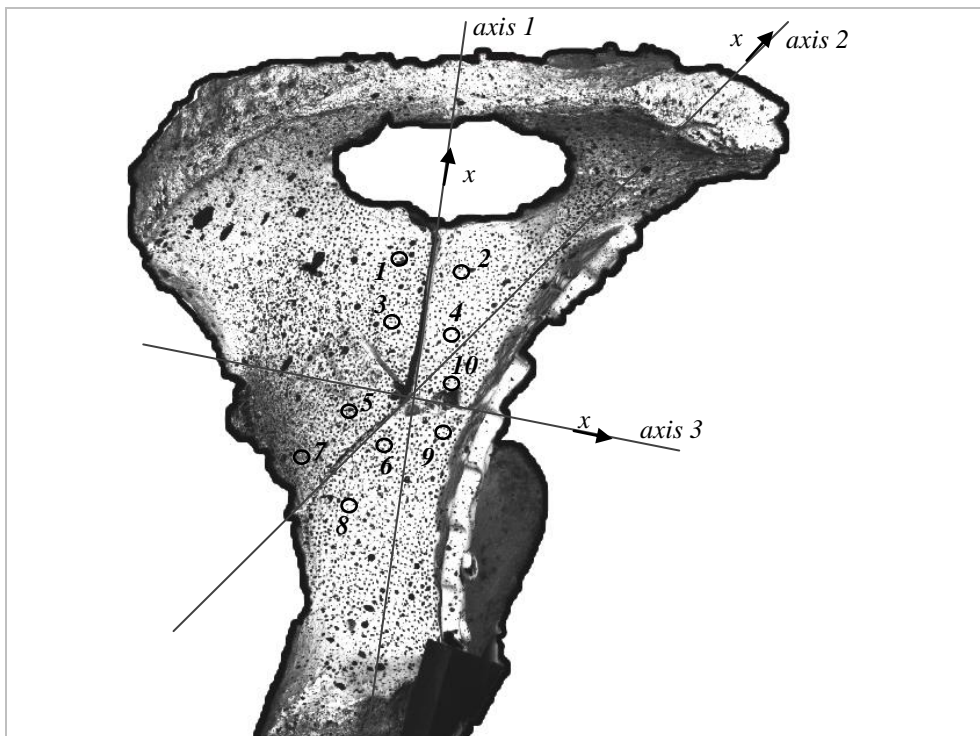


Σχήμα 8.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 8.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

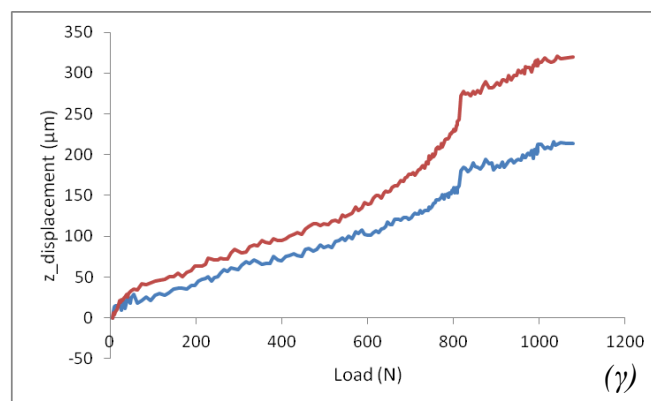
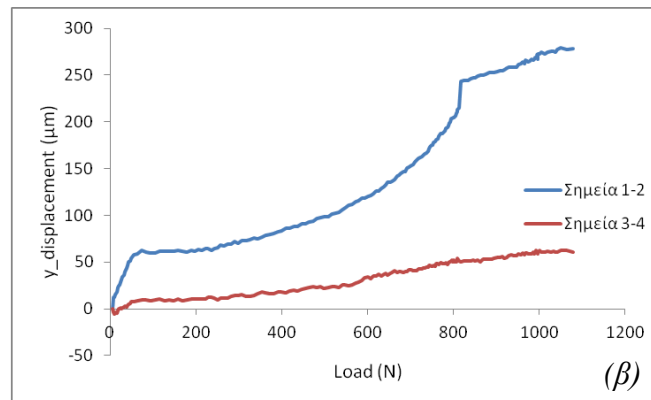
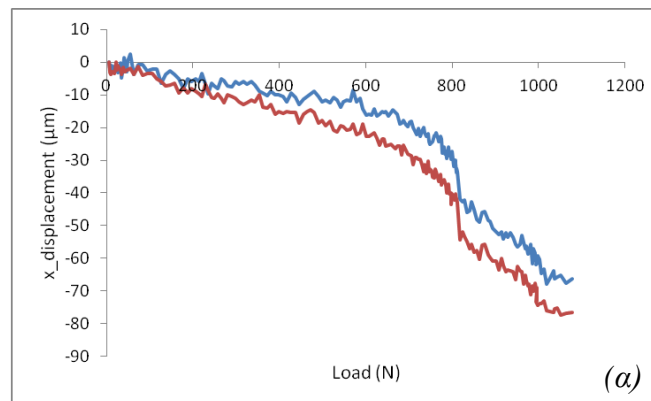


Σχήμα 8.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 9-10.

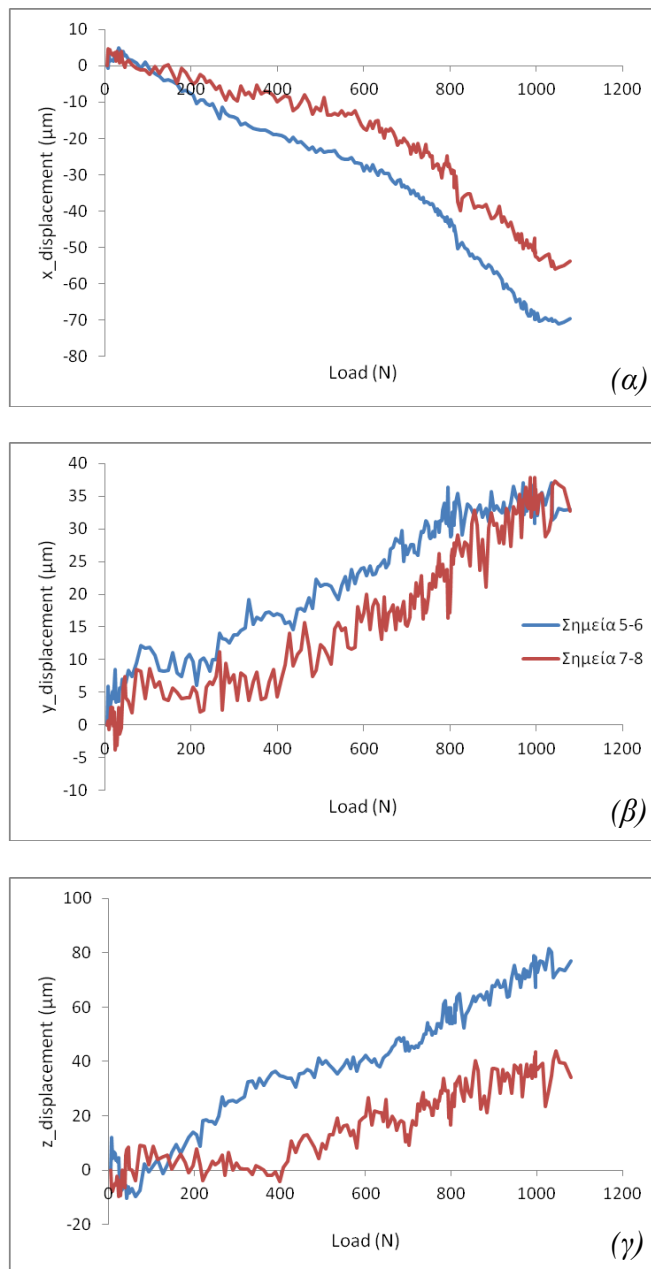
Κάταγμα 1



Σχήμα 8.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

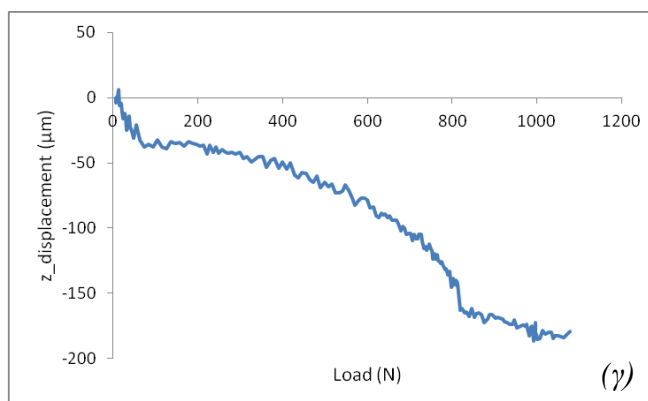
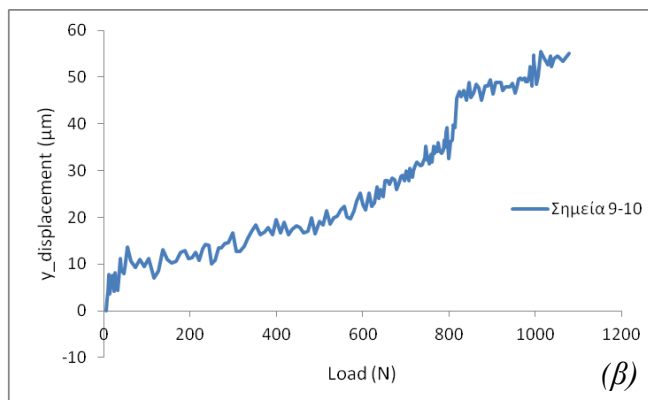
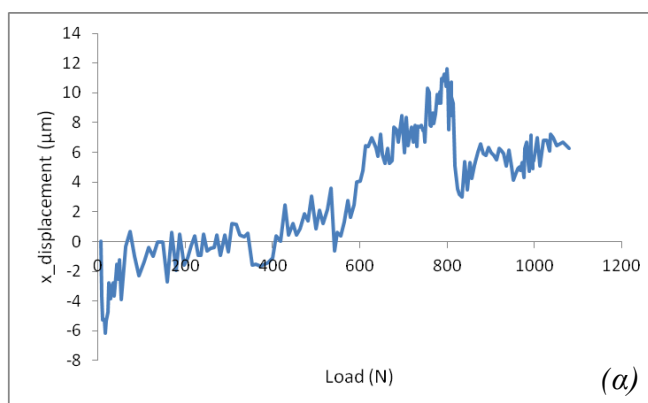
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 2



Σχήμα 8.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 3

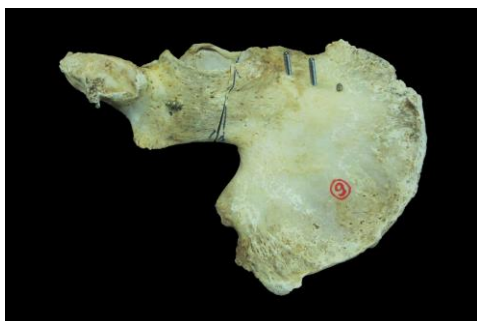


Σχήμα 8.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

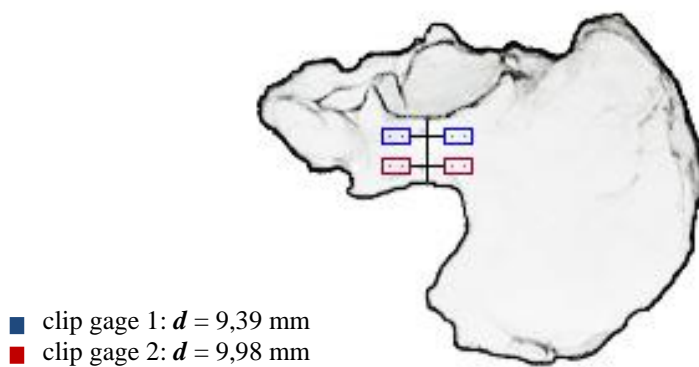
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 9-αριστερό

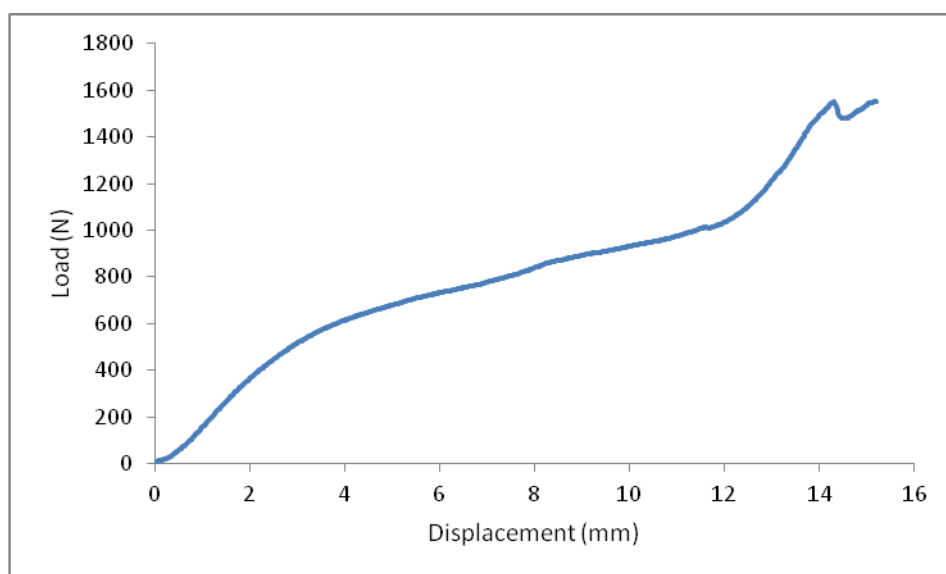
Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate, screw



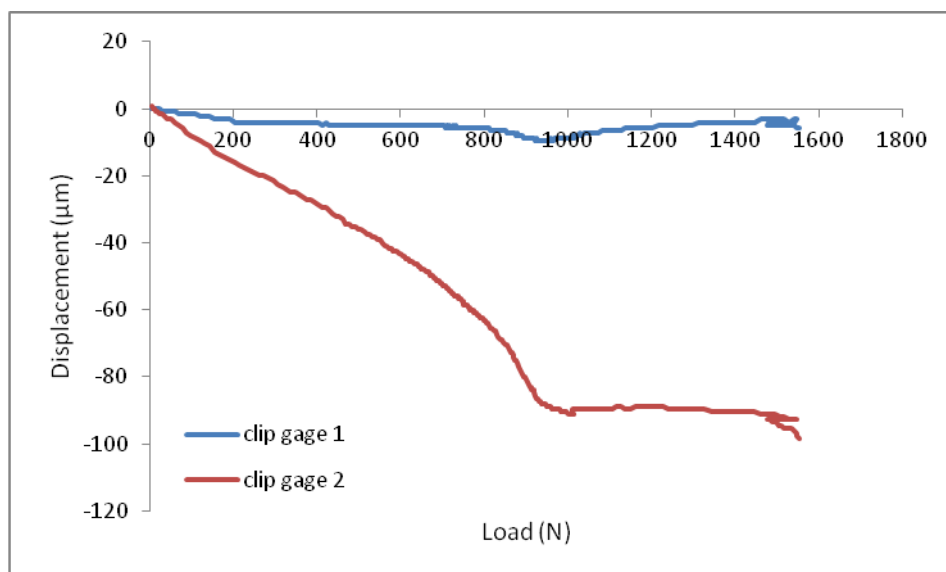
Σχήμα 9.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 9.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

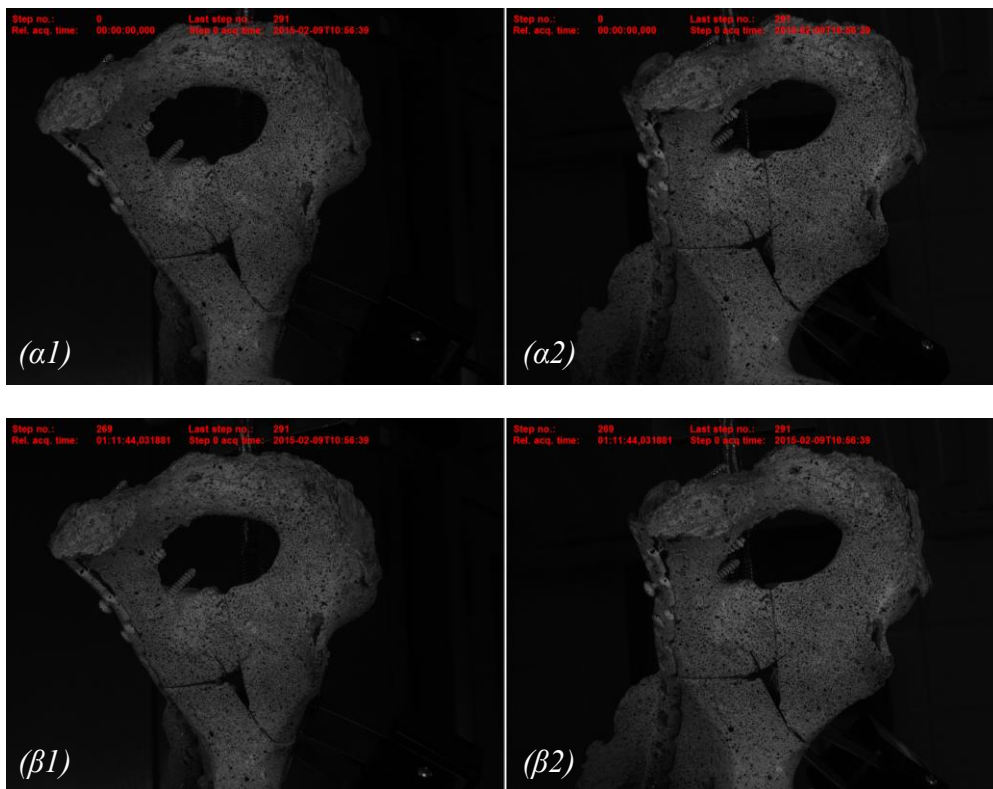


Σχήμα 9.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

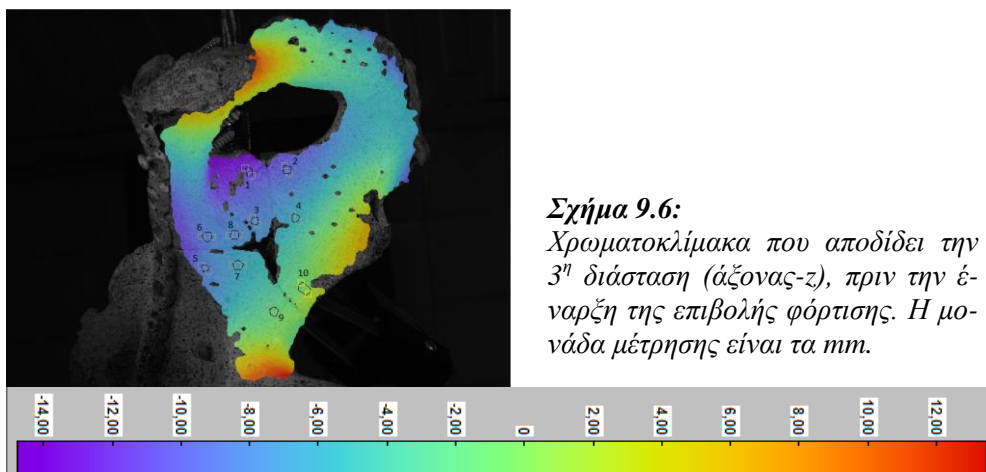


Σχήμα 9.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 9.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

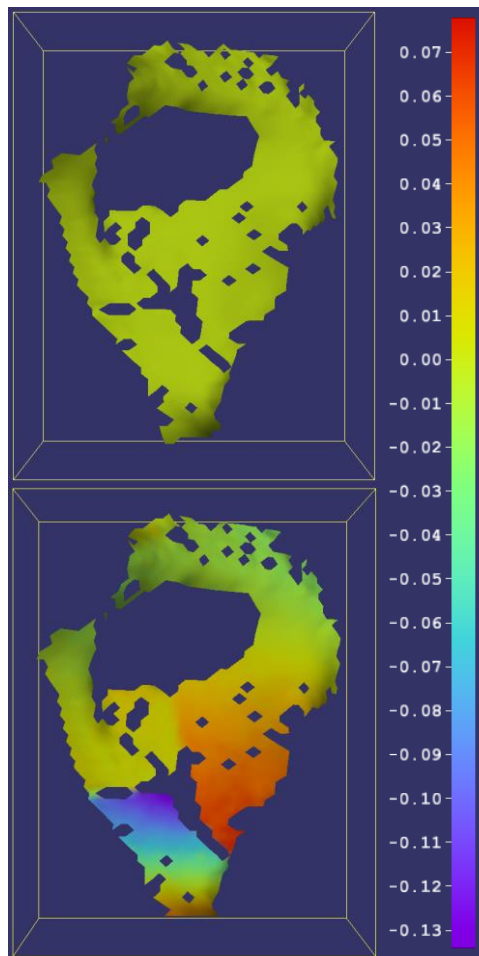
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



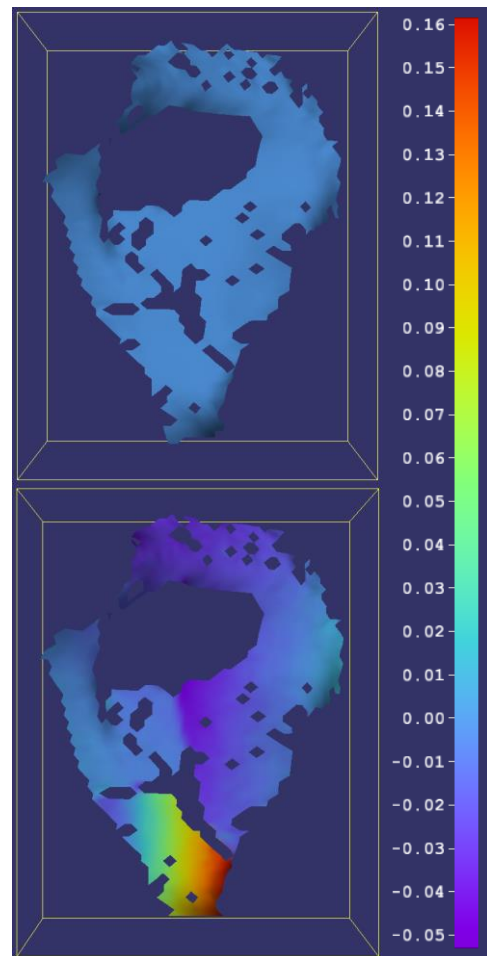
Σχήμα 9.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 9.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

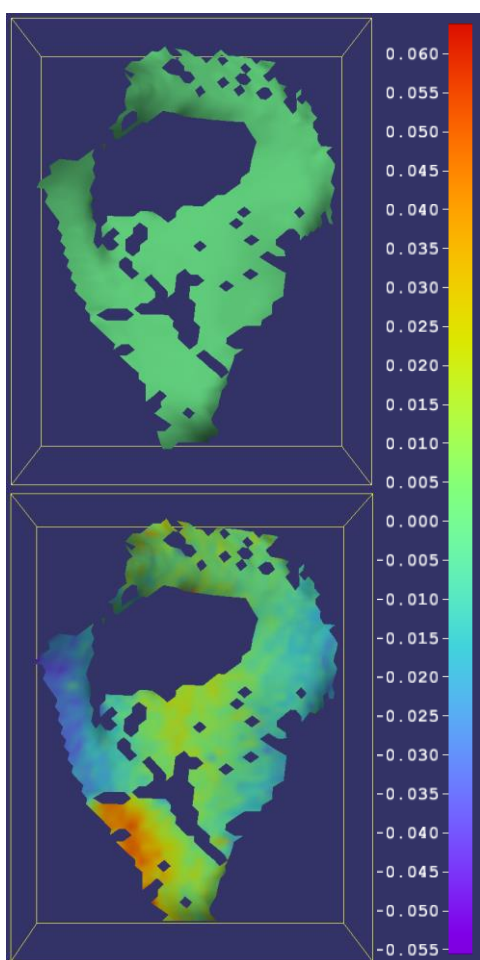


Σχήμα 9.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

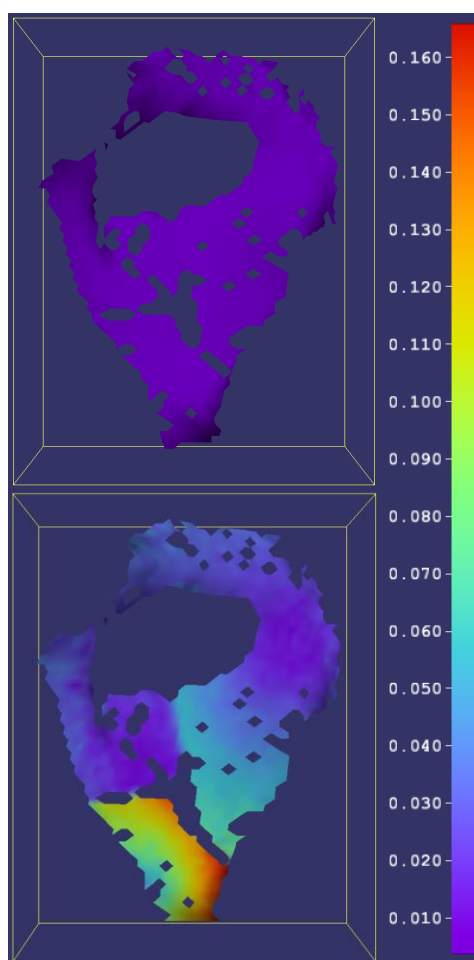


Σχήμα 9.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

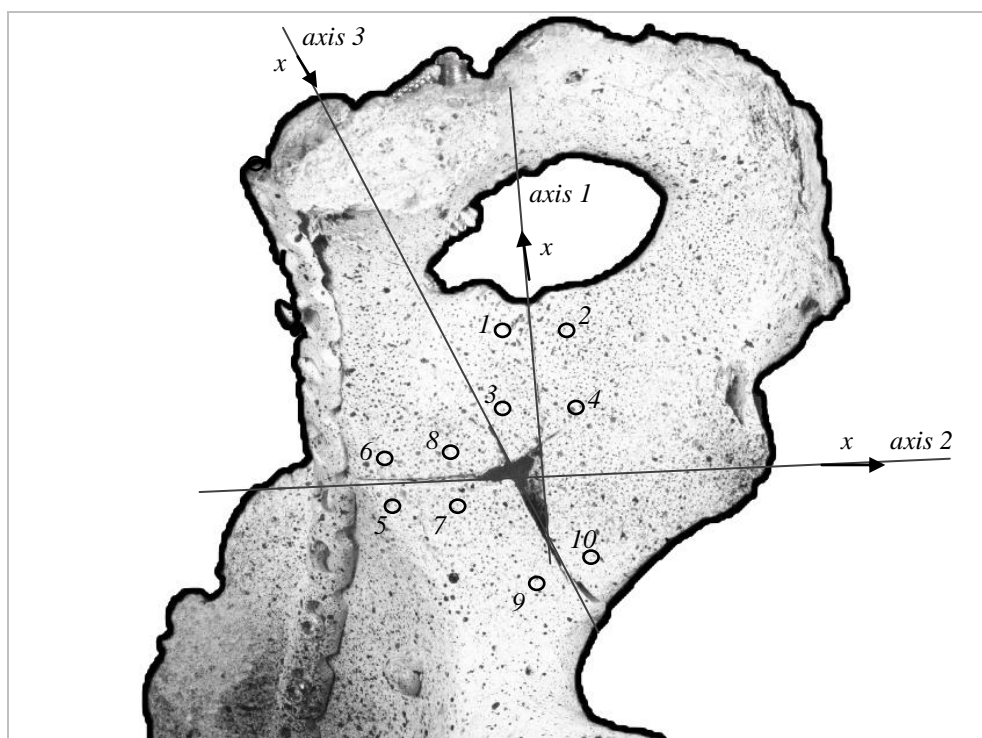
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



Σχήμα 9.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 9.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

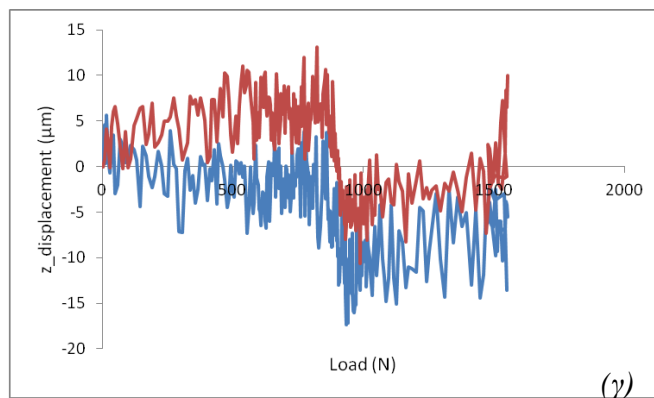
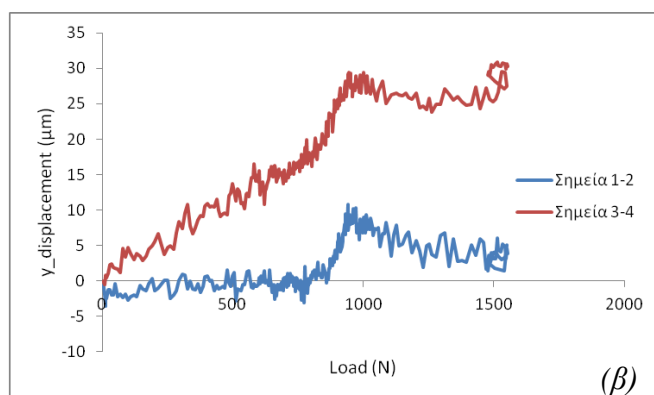
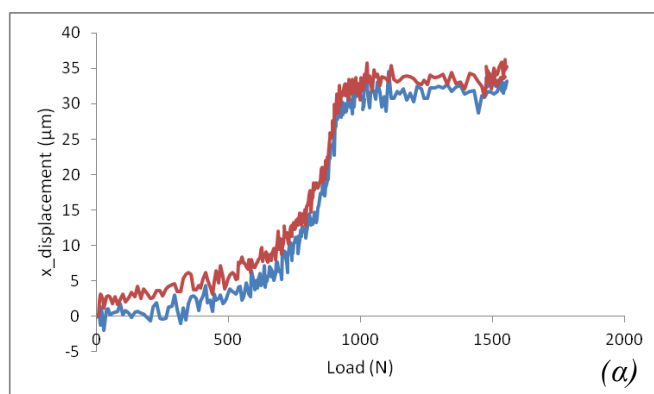


Σχήμα 9.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

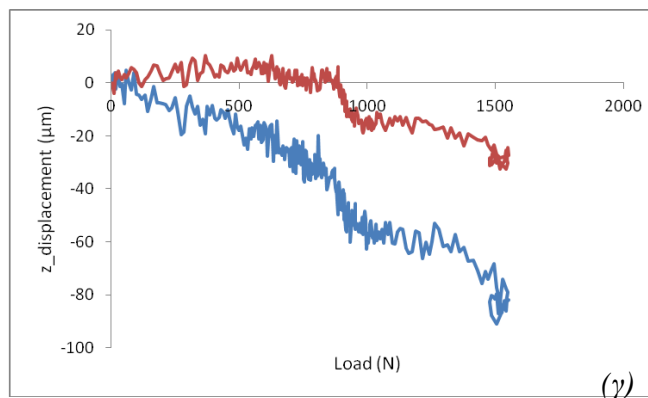
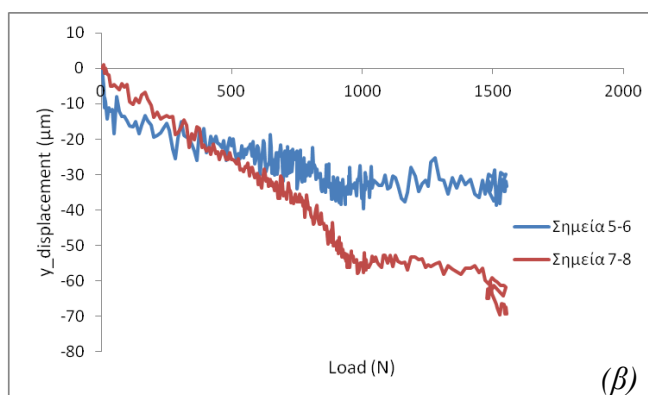
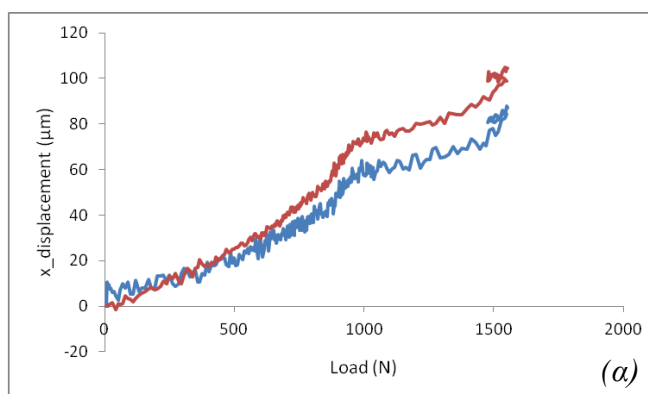
- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 9-10.

Κάταγμα 1



Σχήμα 9.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

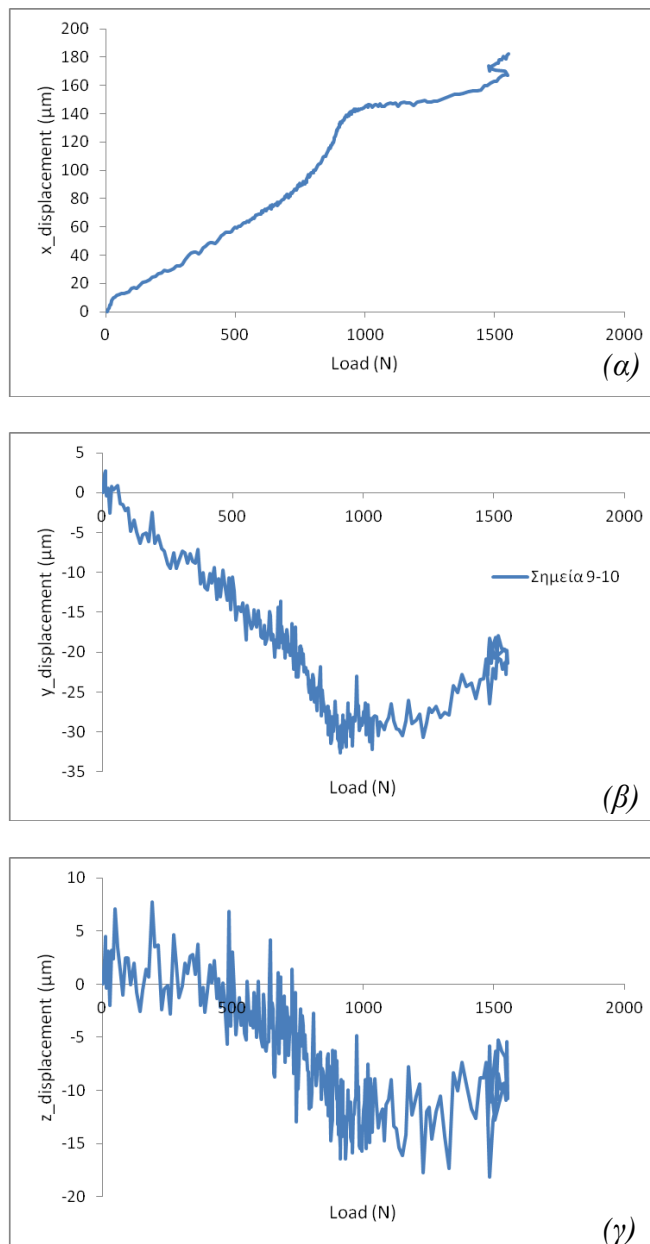
Κάταγμα 2



Σχήμα 9.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

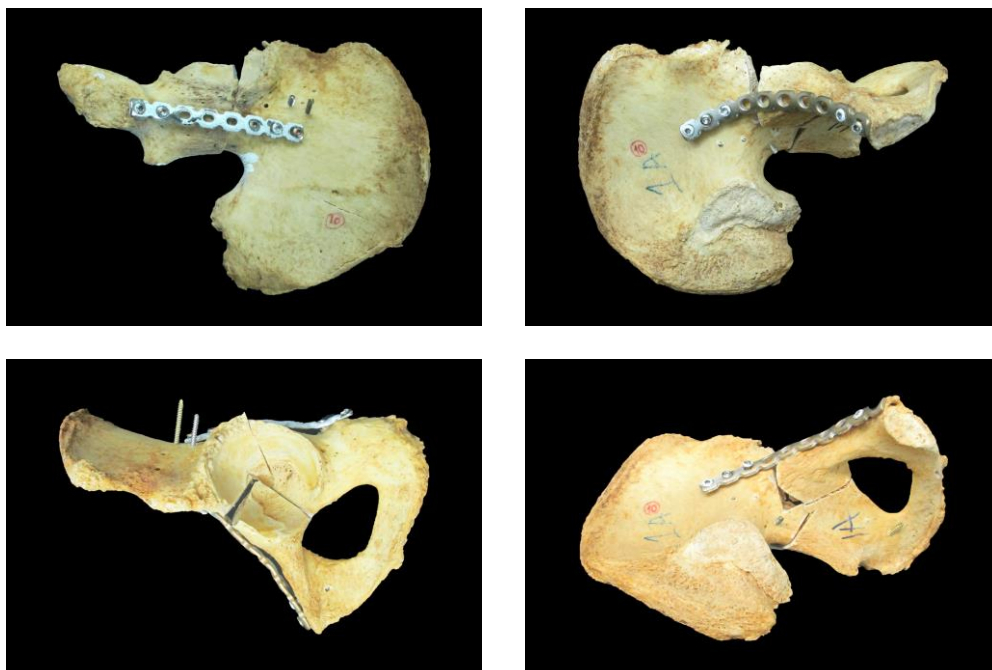
Κάταγμα 3



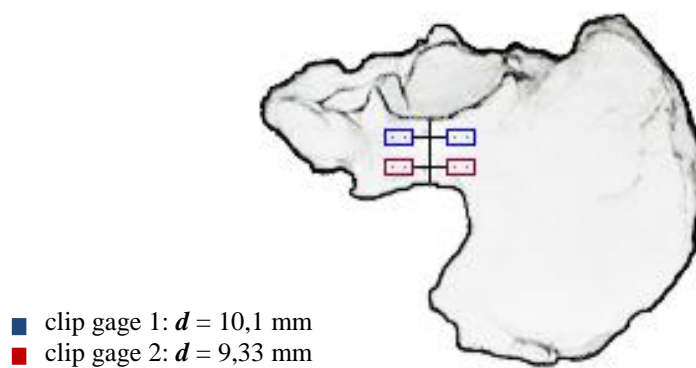
Σχήμα 9.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 10-αριστερό

Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate, simple plate

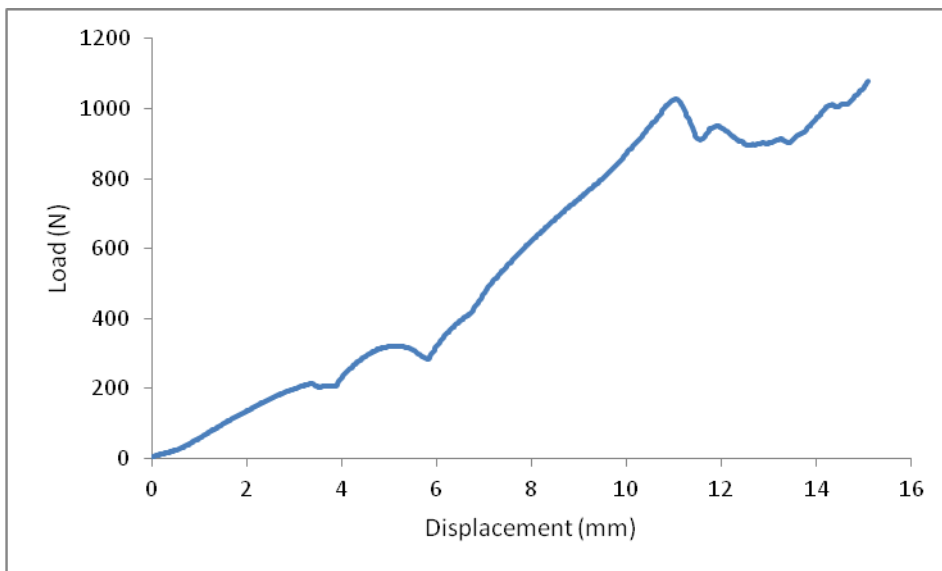


Σχήμα 10.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.

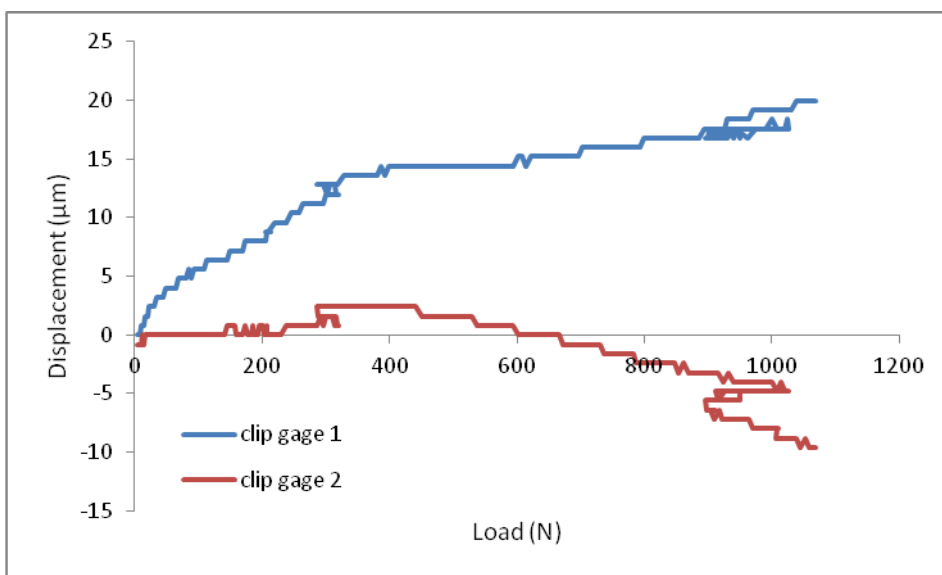


Σχήμα 10.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

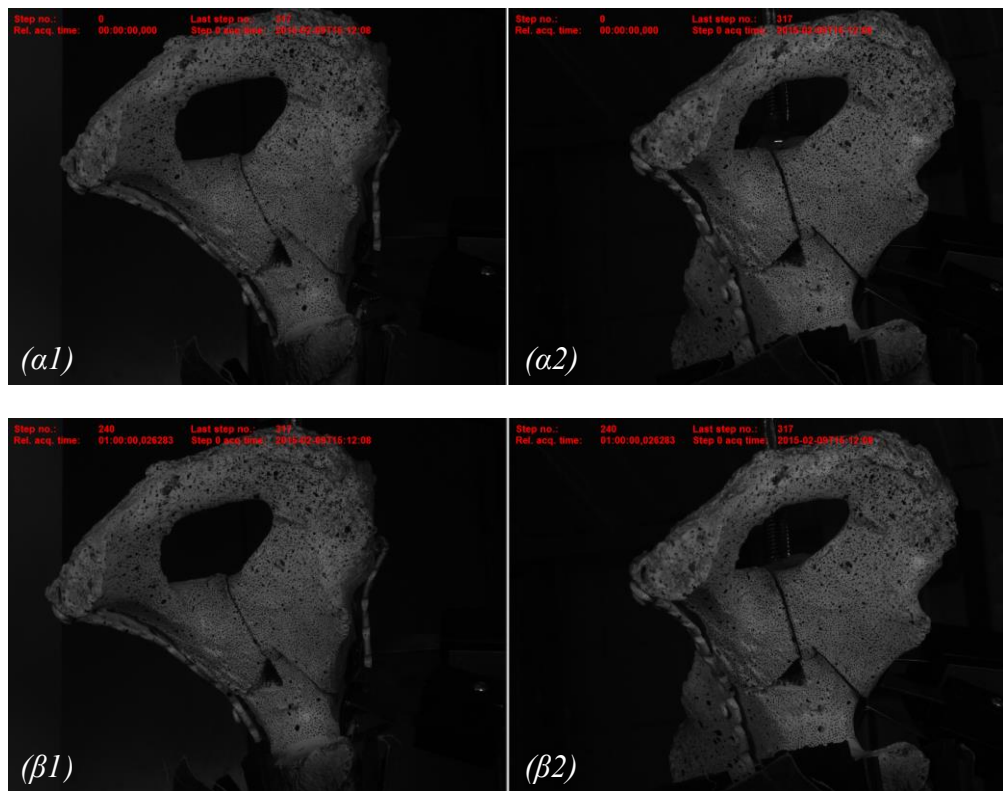
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



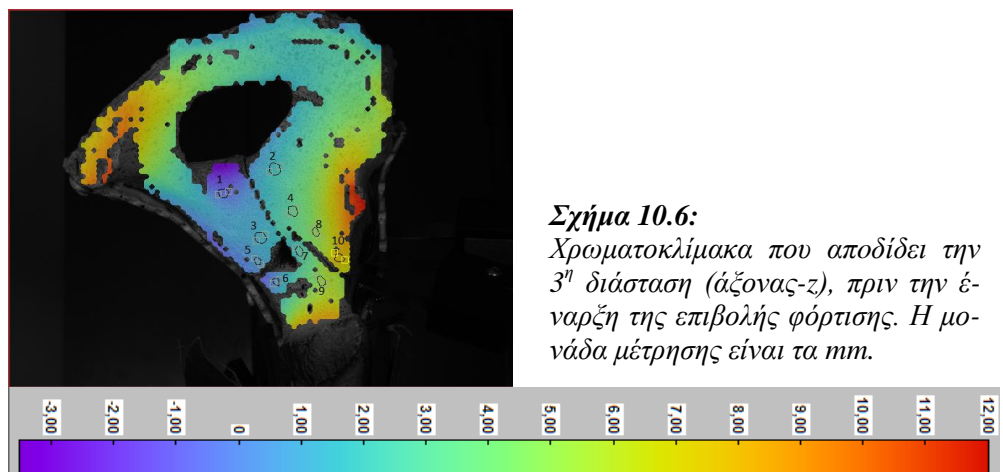
Σχήμα 10.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 10.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ.10.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

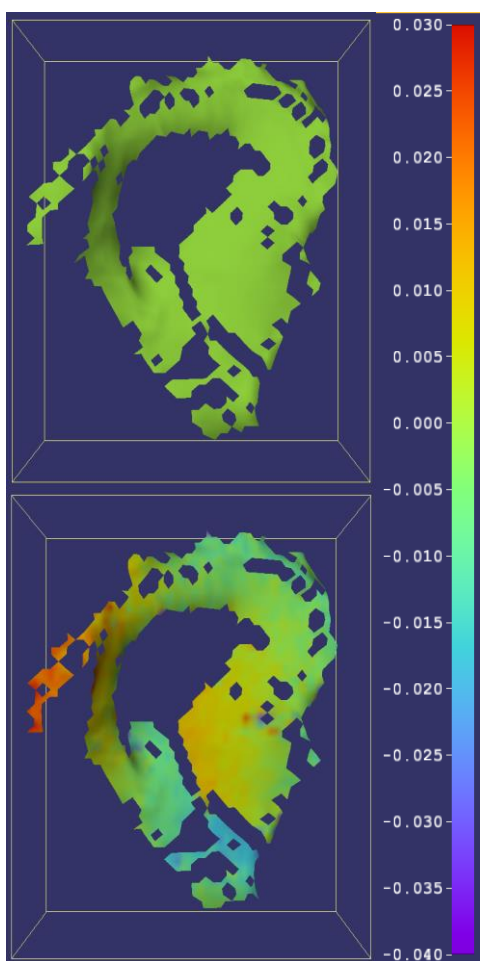


Σχήμα 10.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.

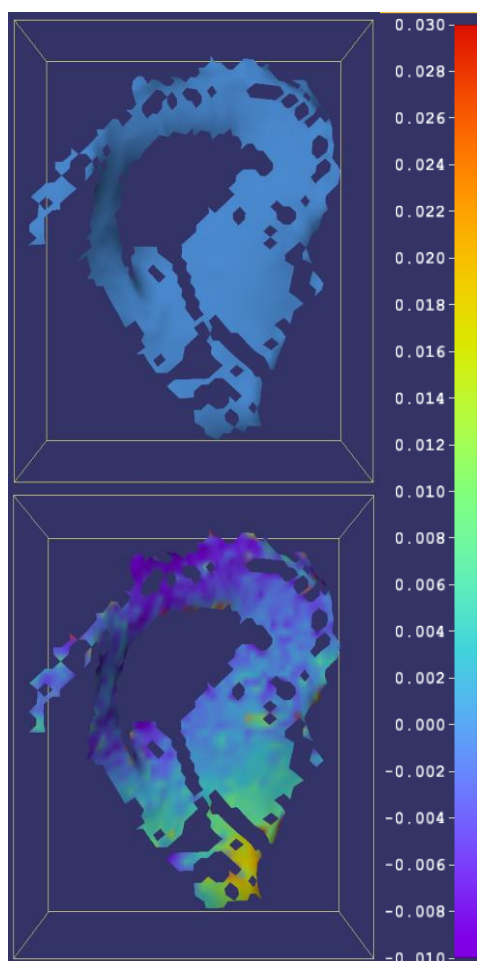


Σχήμα 10.6: Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

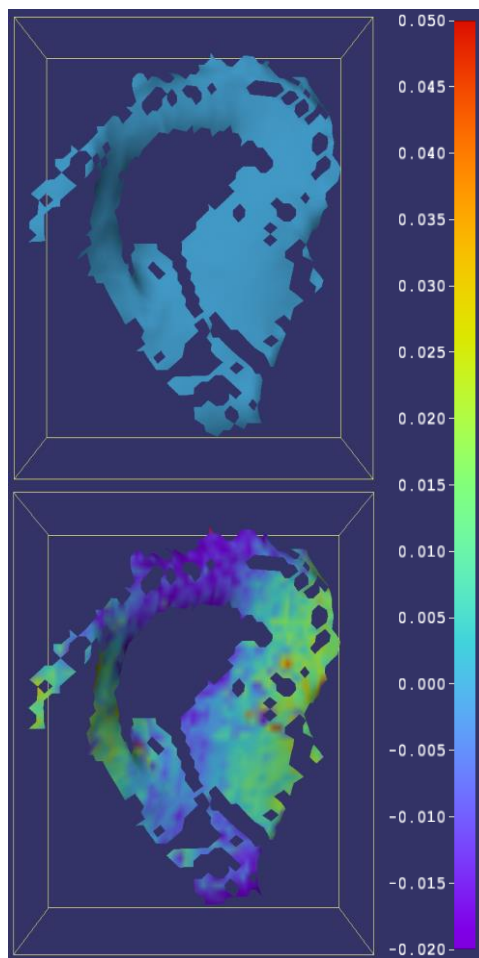
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



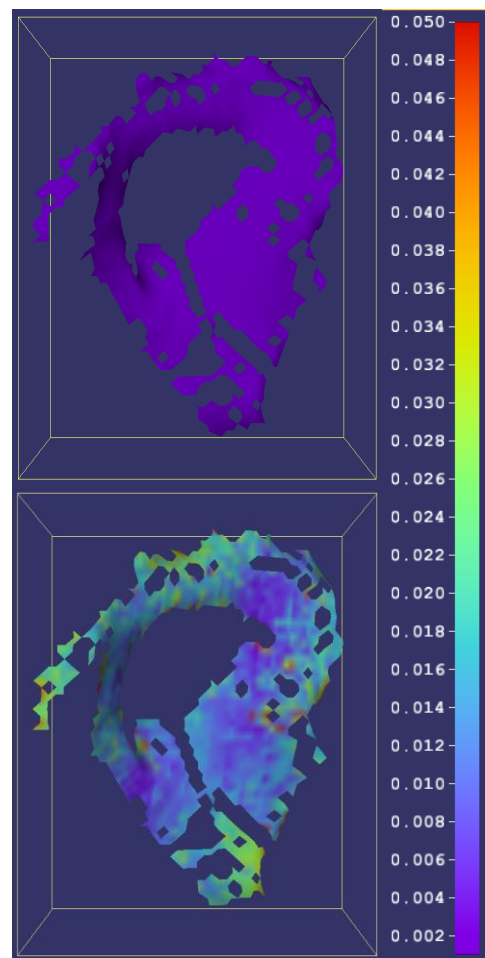
Σχήμα 10.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Σχήμα 10.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

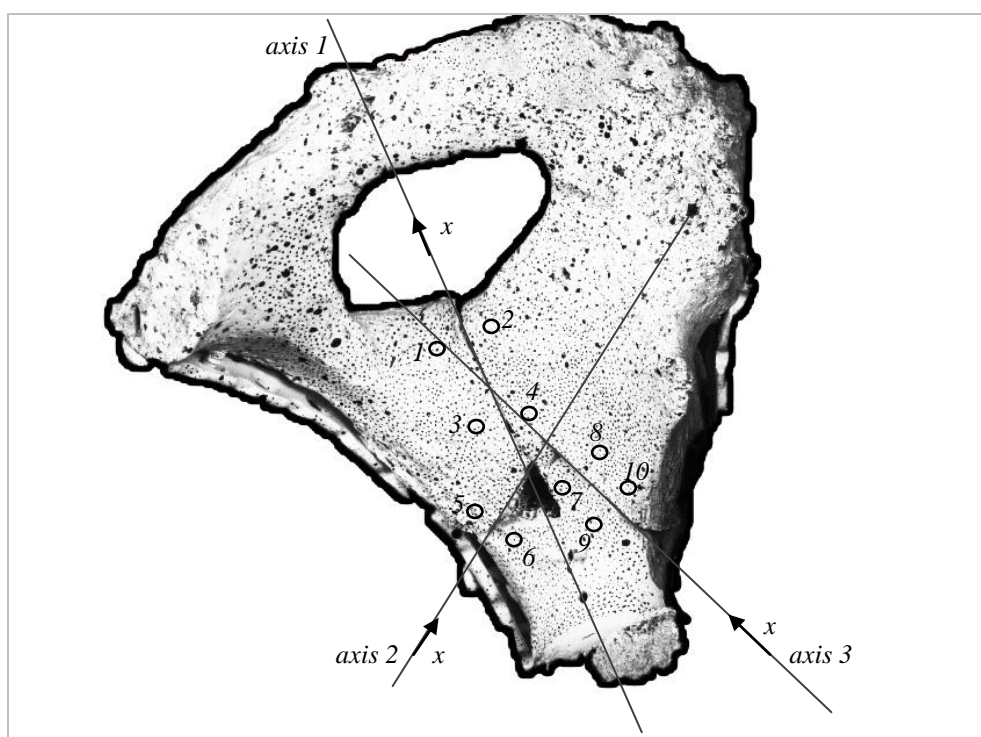


Σχήμα 10.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 10.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

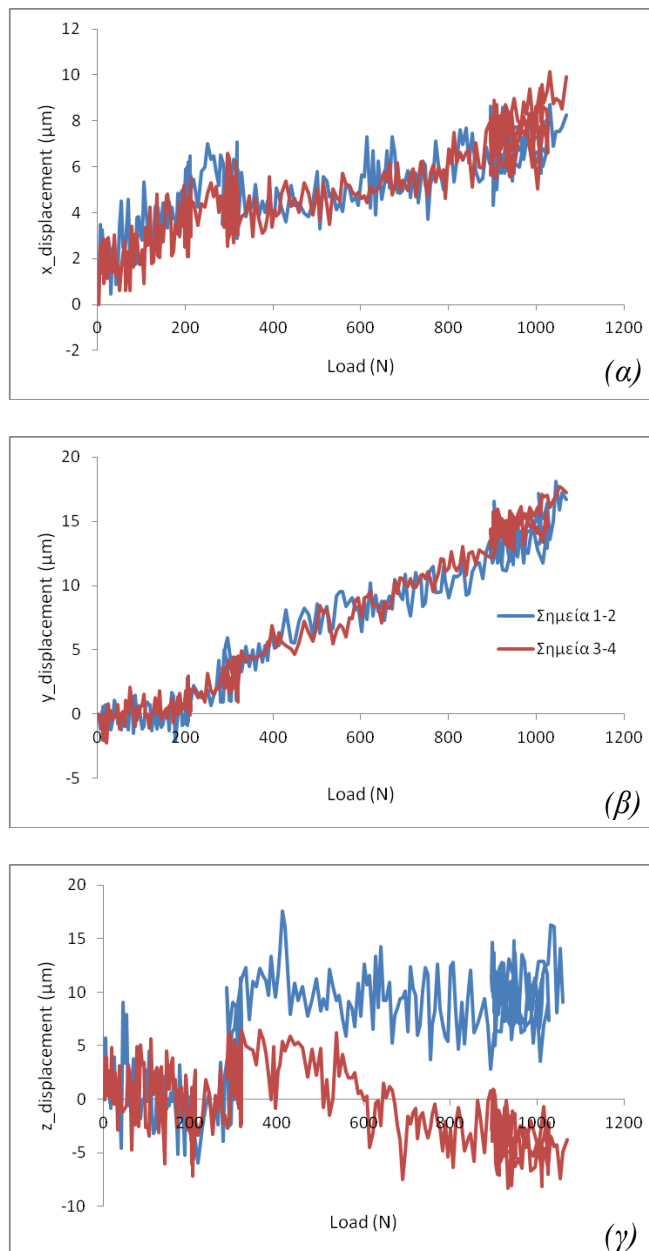


Σχήμα 10.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

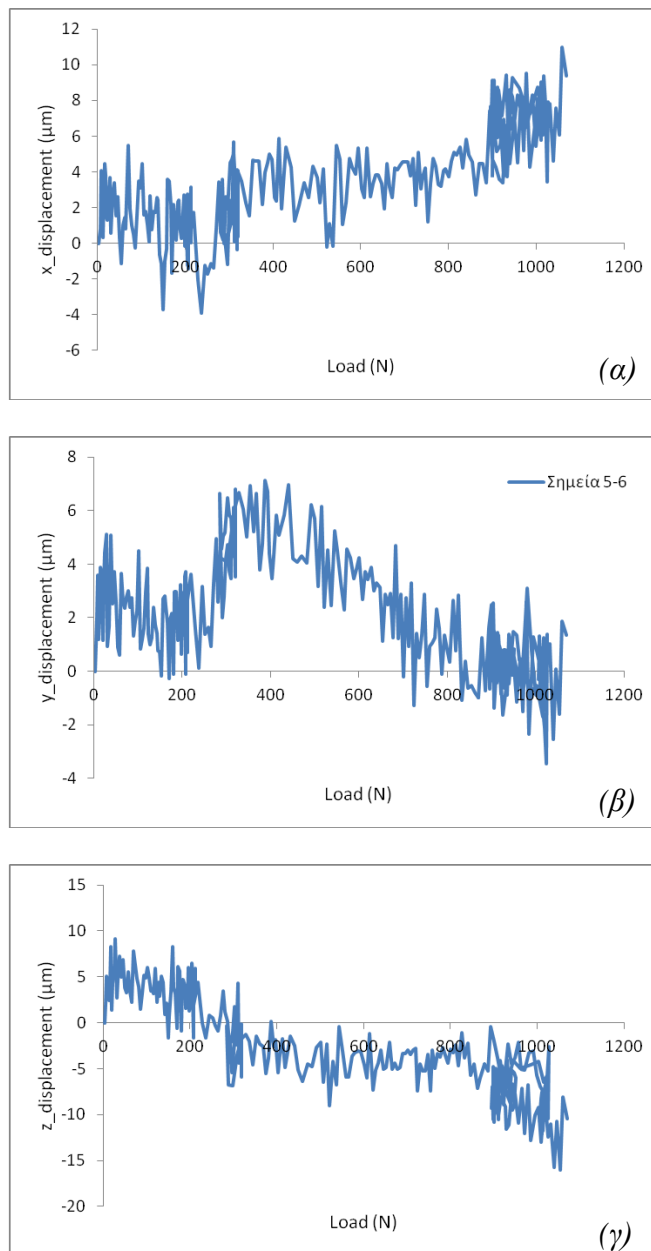
- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 3-7,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 7-8, 9-10.

Κάταγμα 1



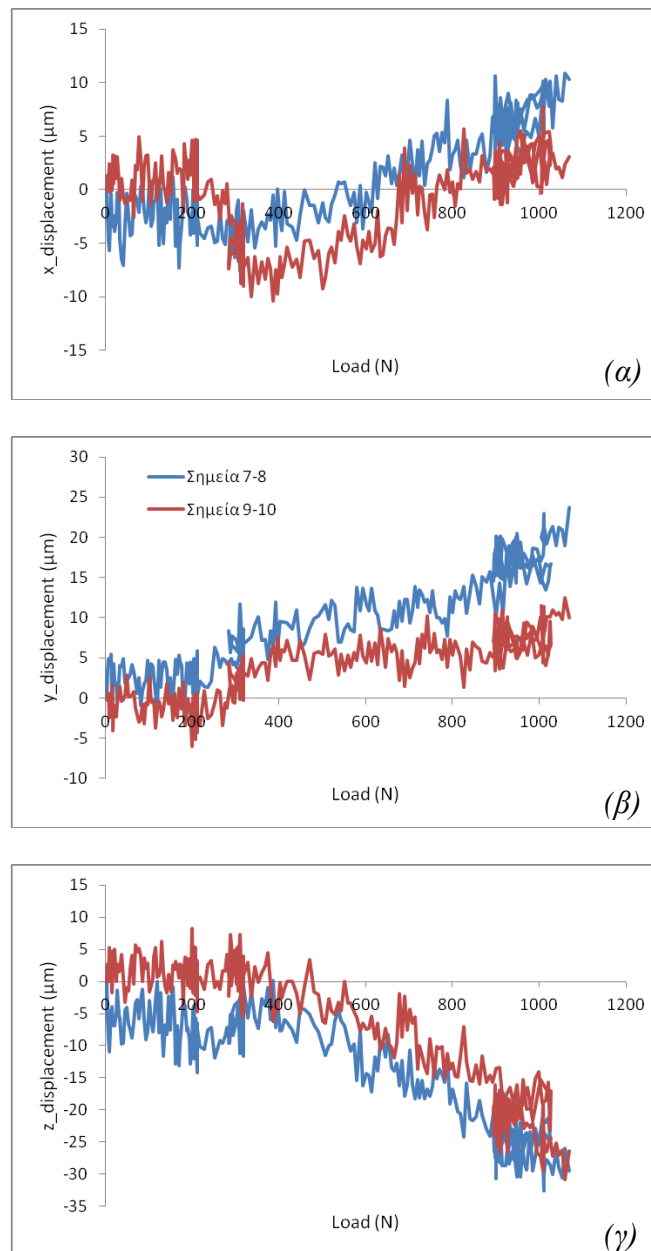
Σχήμα 10.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 2



Σχήμα 10.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 3

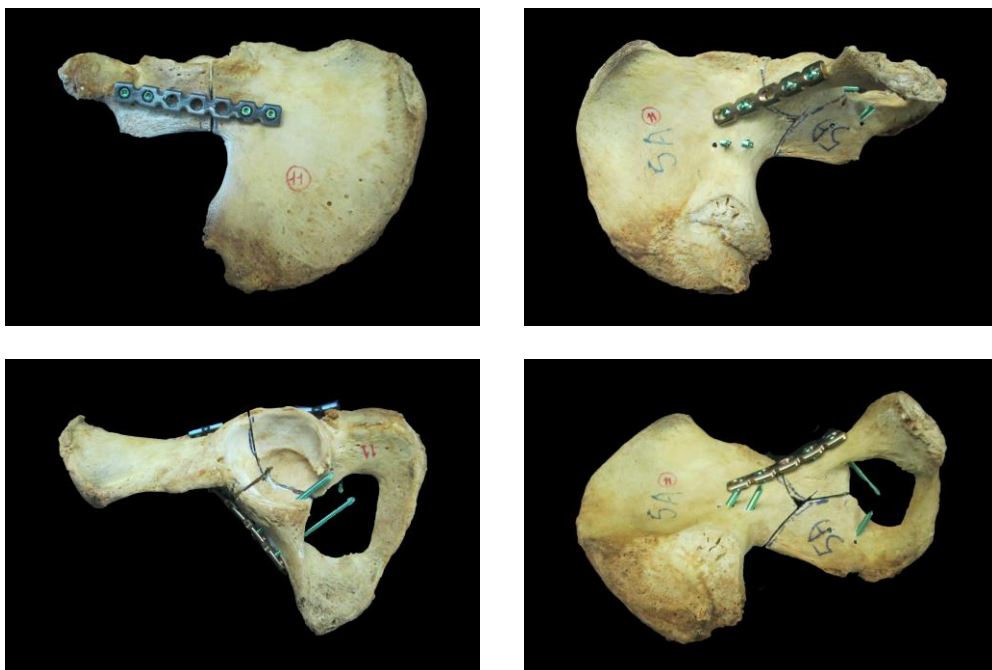


Σχήμα 10.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

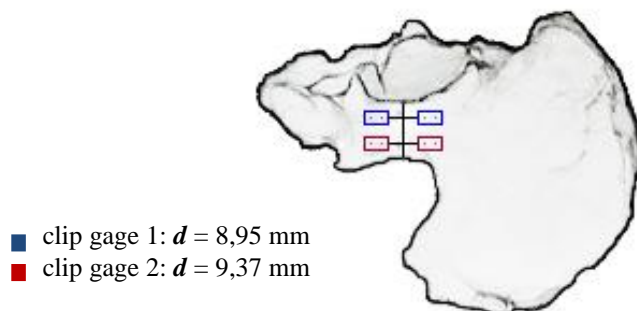
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 11-αριστερό

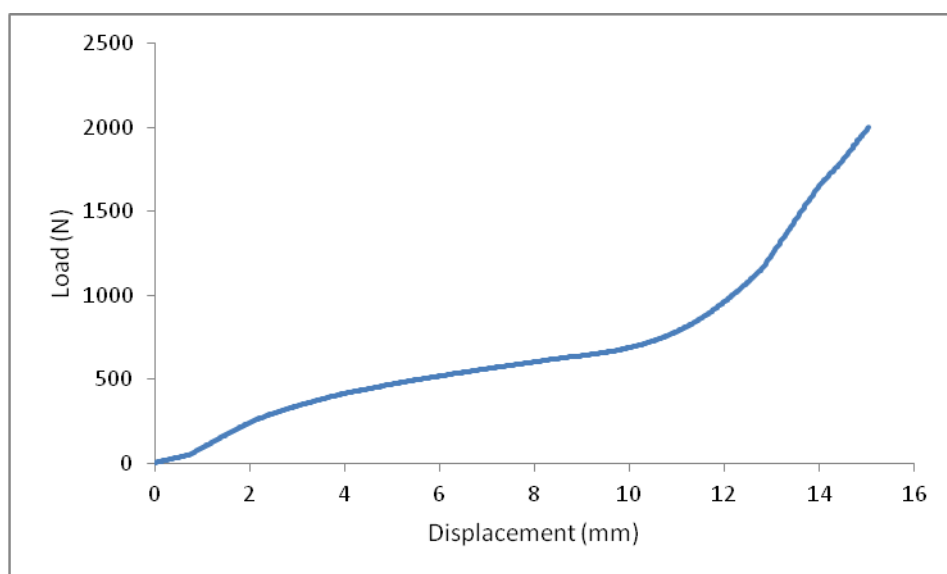
Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate, simple plate



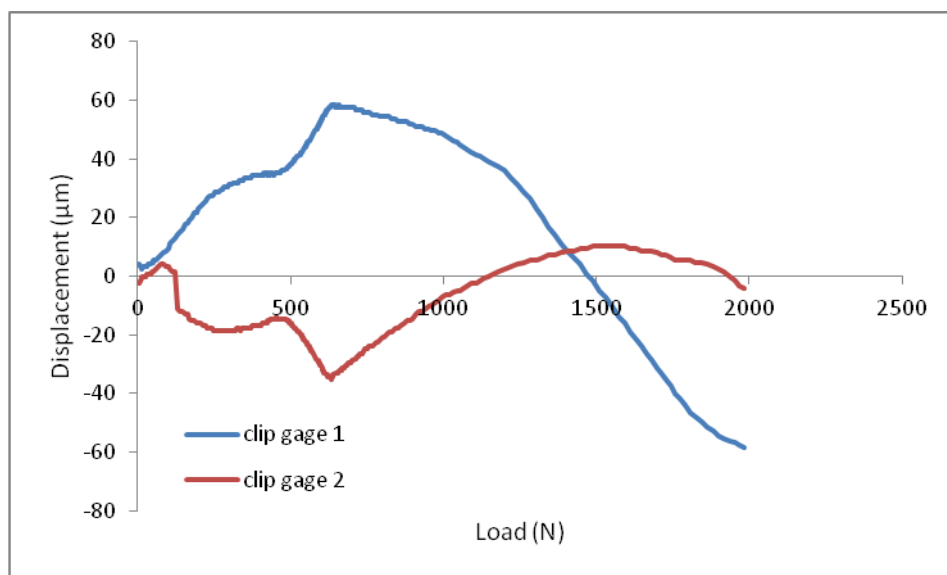
Σχήμα 11.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 11.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

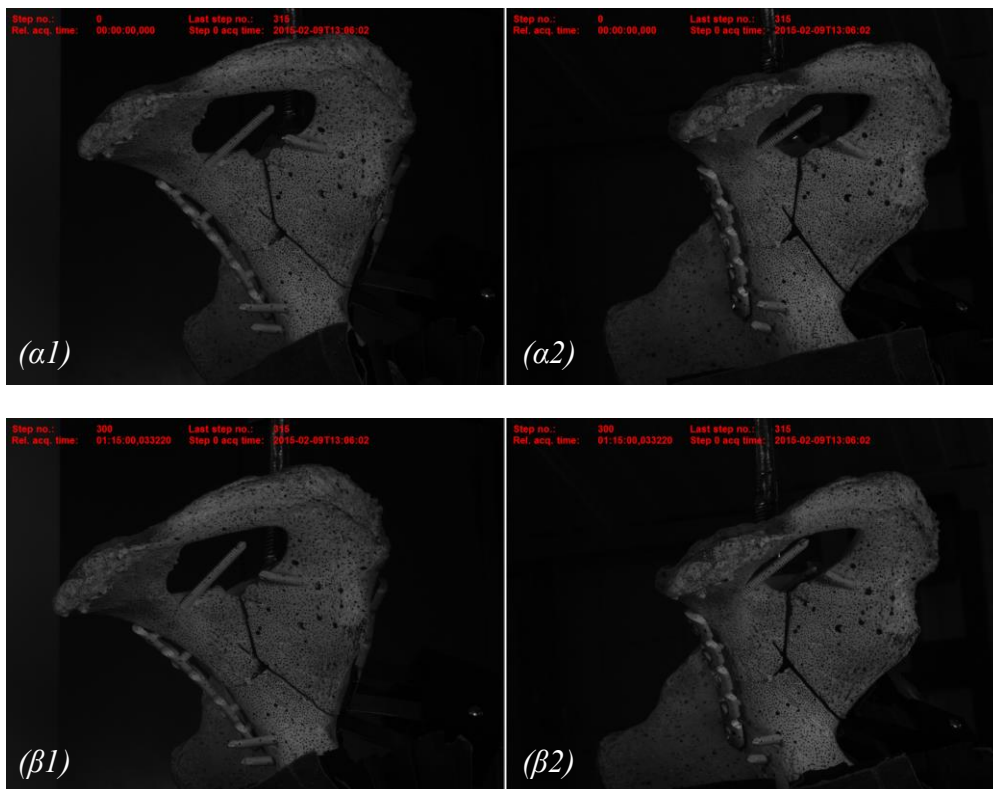


Σχήμα 11.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

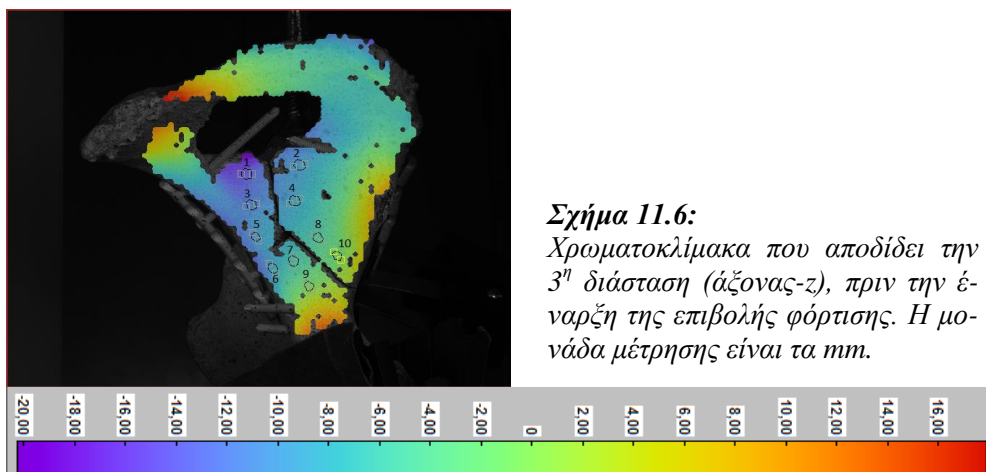


Σχήμα 11.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 11.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

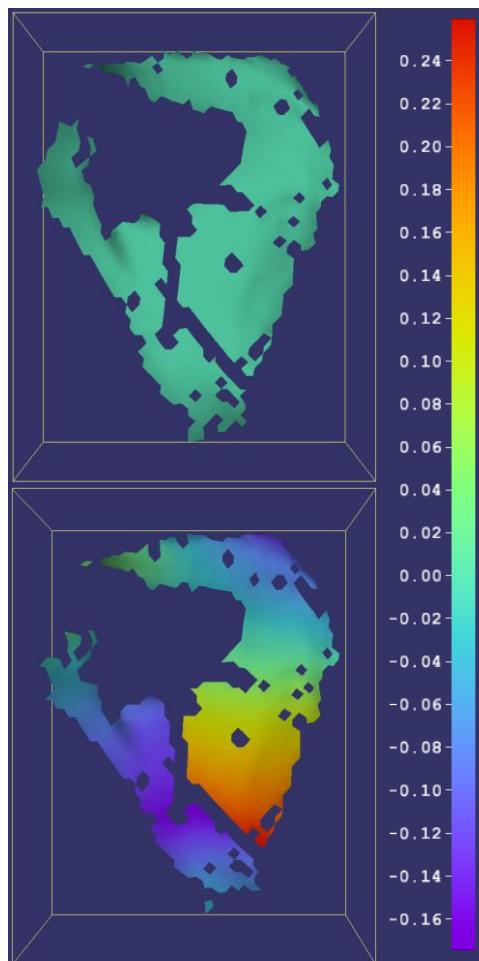
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



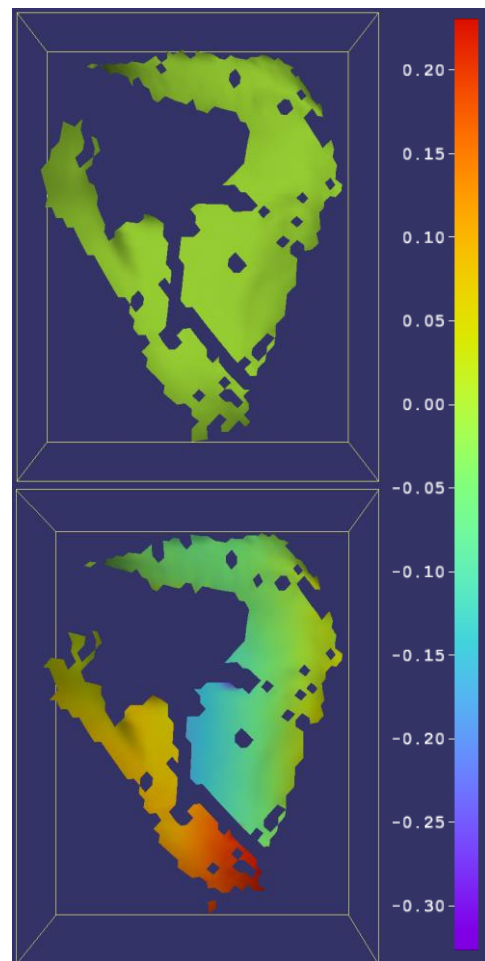
Σχήμα 11.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 11.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

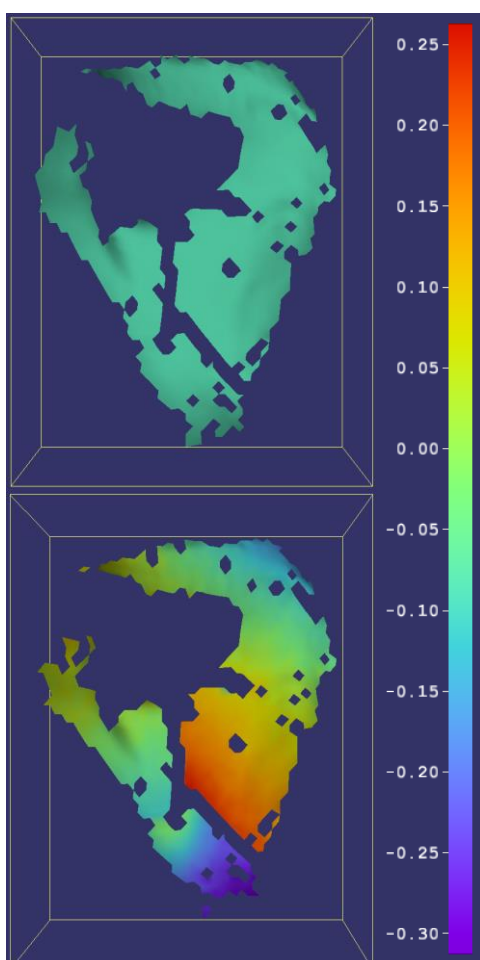


Σχήμα 11.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

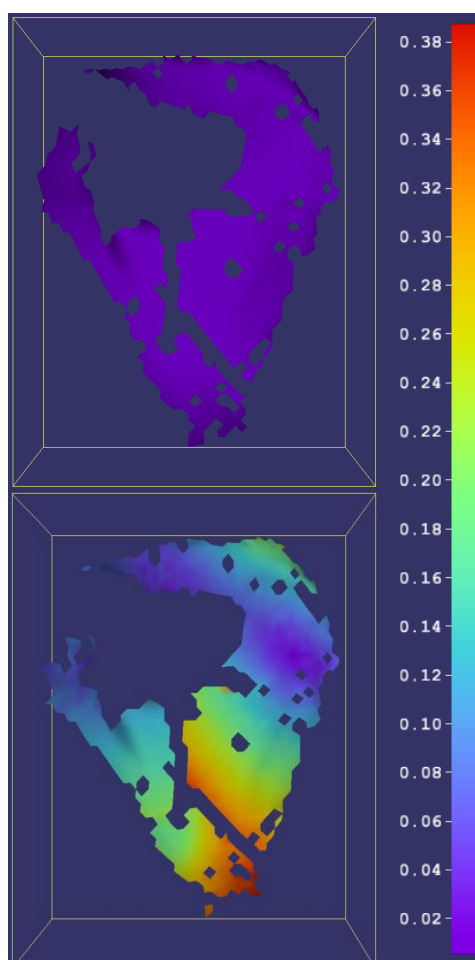


Σχήμα 11.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

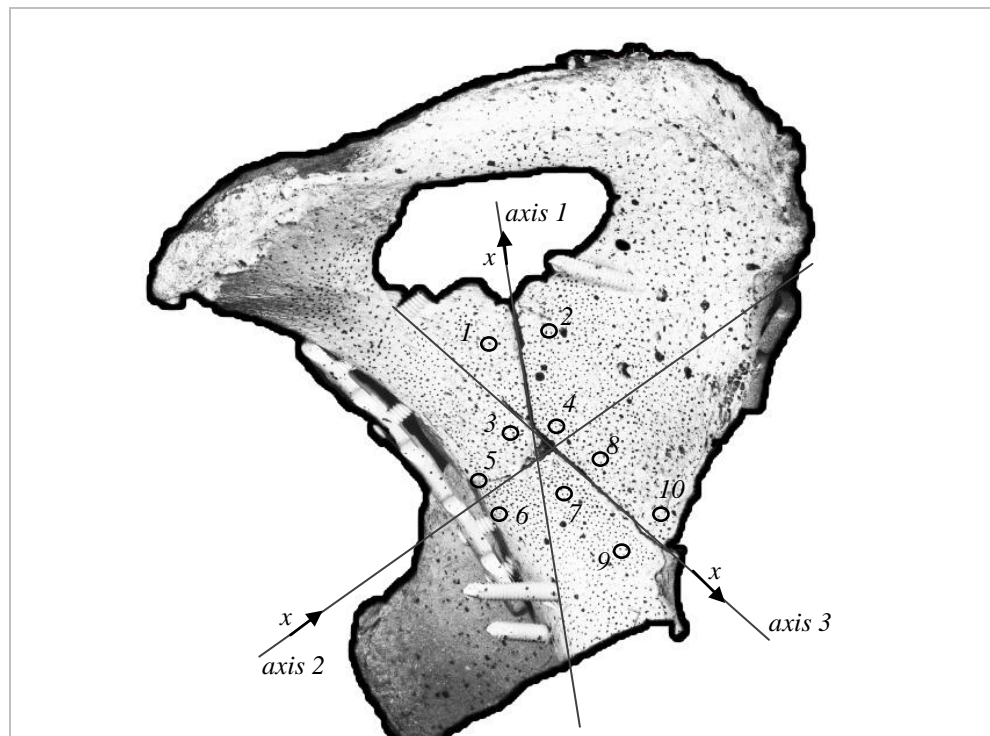
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλων με με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



Σχήμα 11.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 11.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



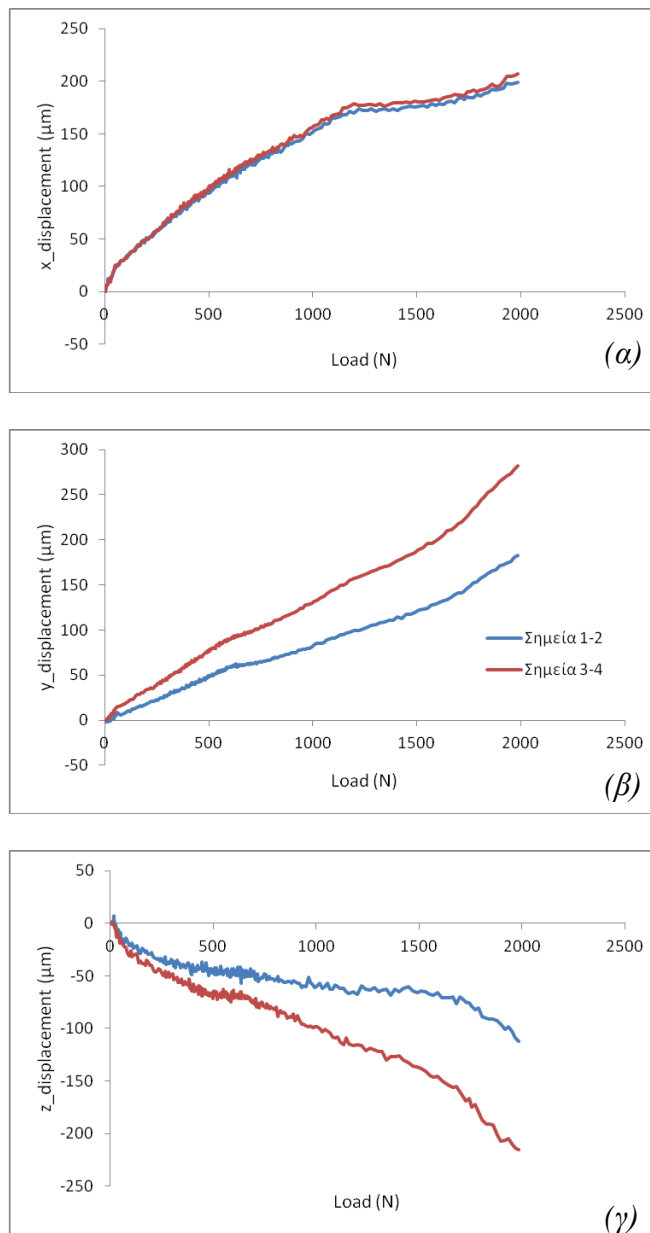
Σχήμα 11.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 3-7,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 7-8 και 9-10.

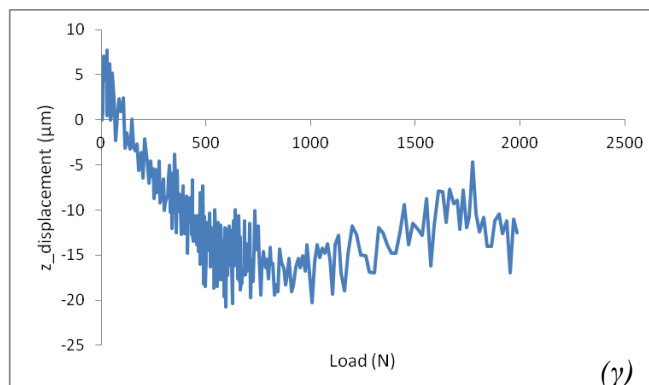
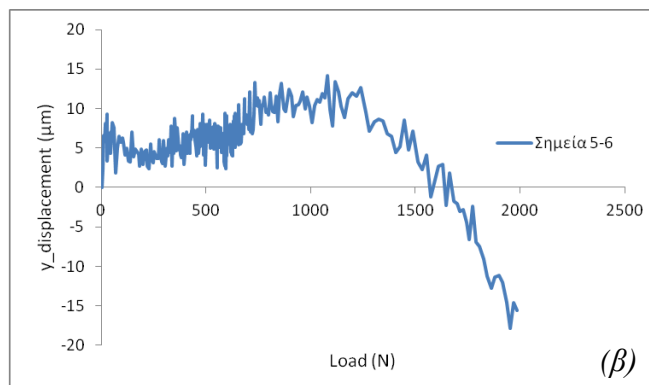
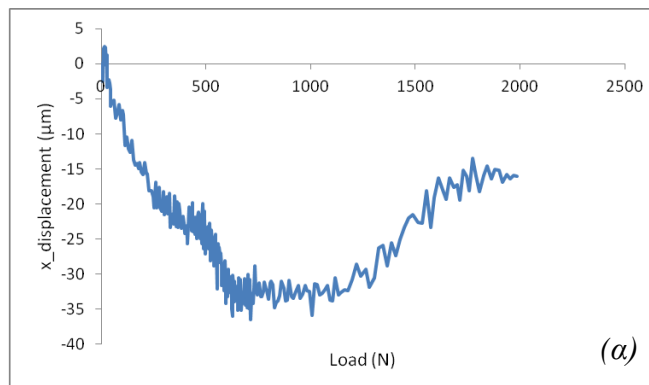
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 1



Σχήμα 11.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

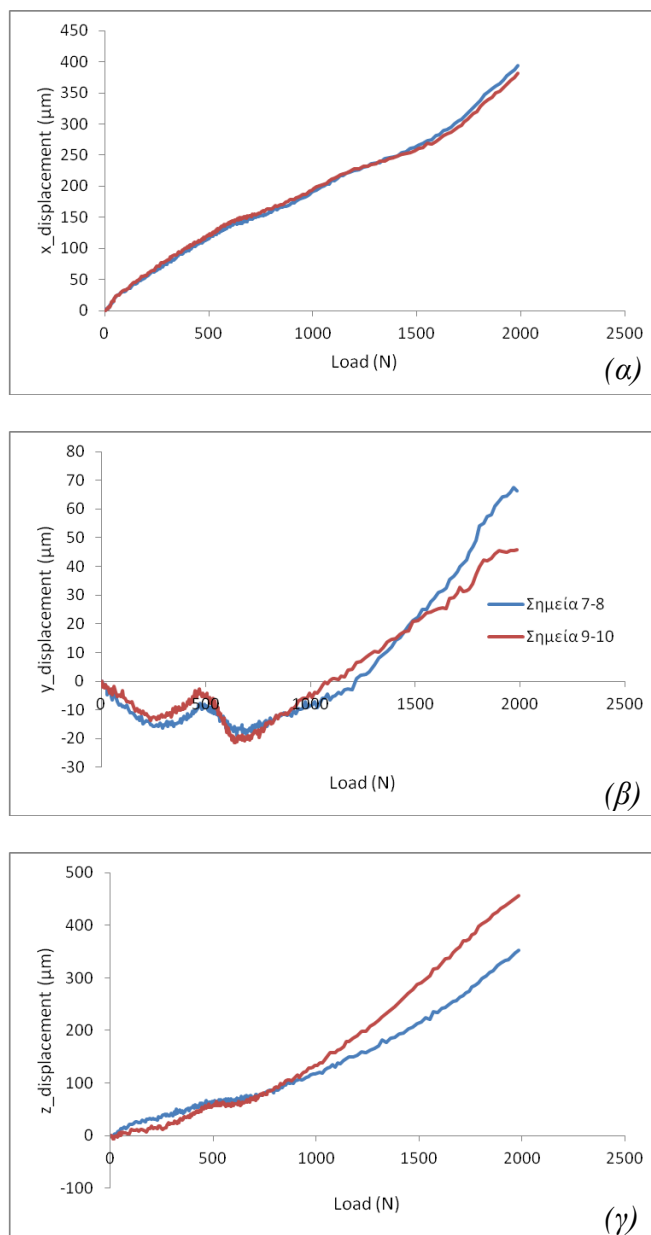
Κάταγμα 2



Σχήμα 11.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

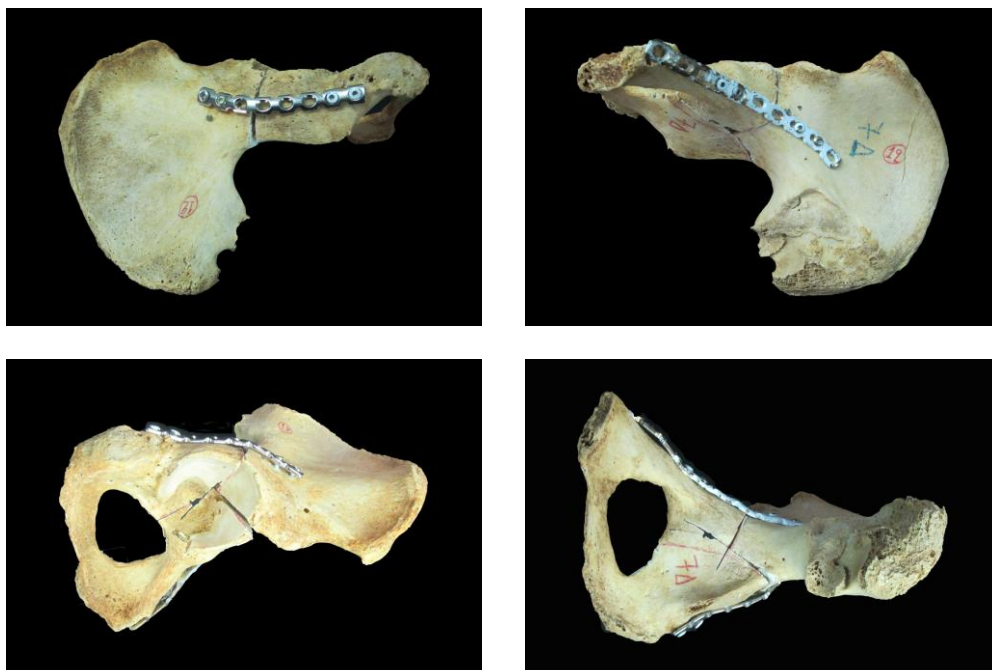
Κάταγμα 3



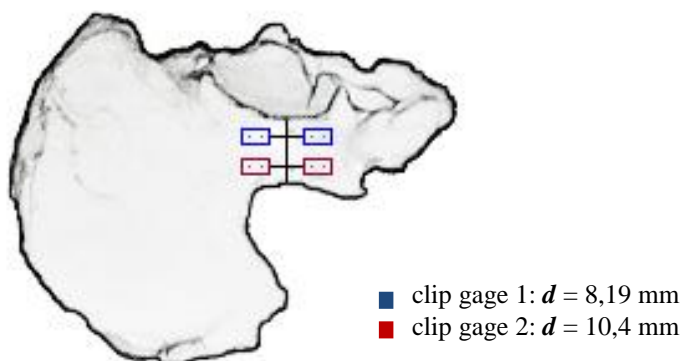
Σχήμα 11.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 12-δεξί

Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate, simple plate

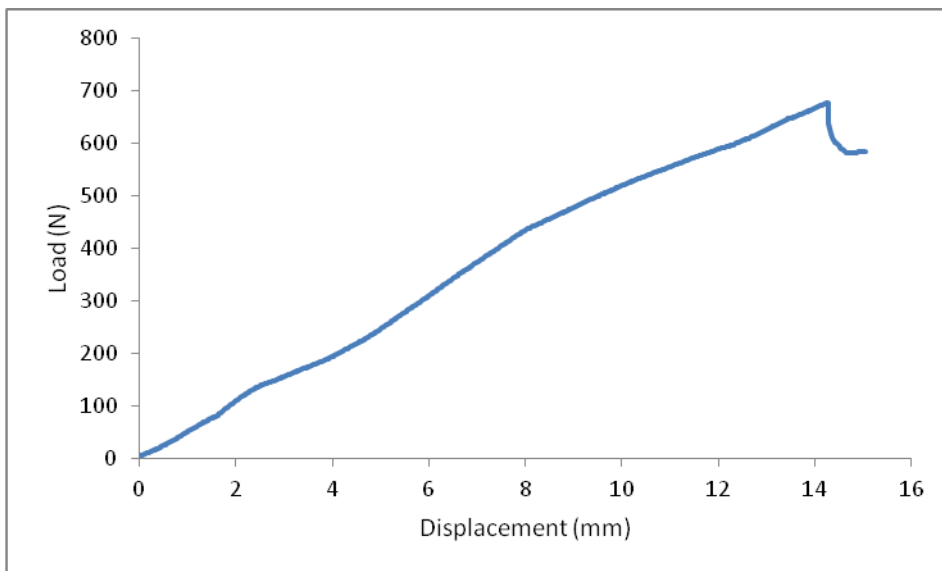


Σχήμα 12.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.

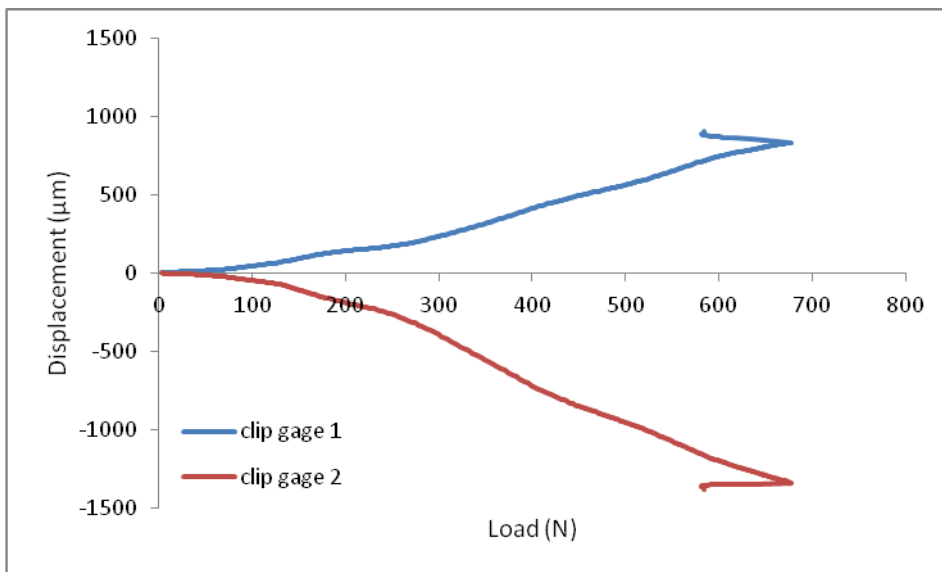


Σχήμα 12.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

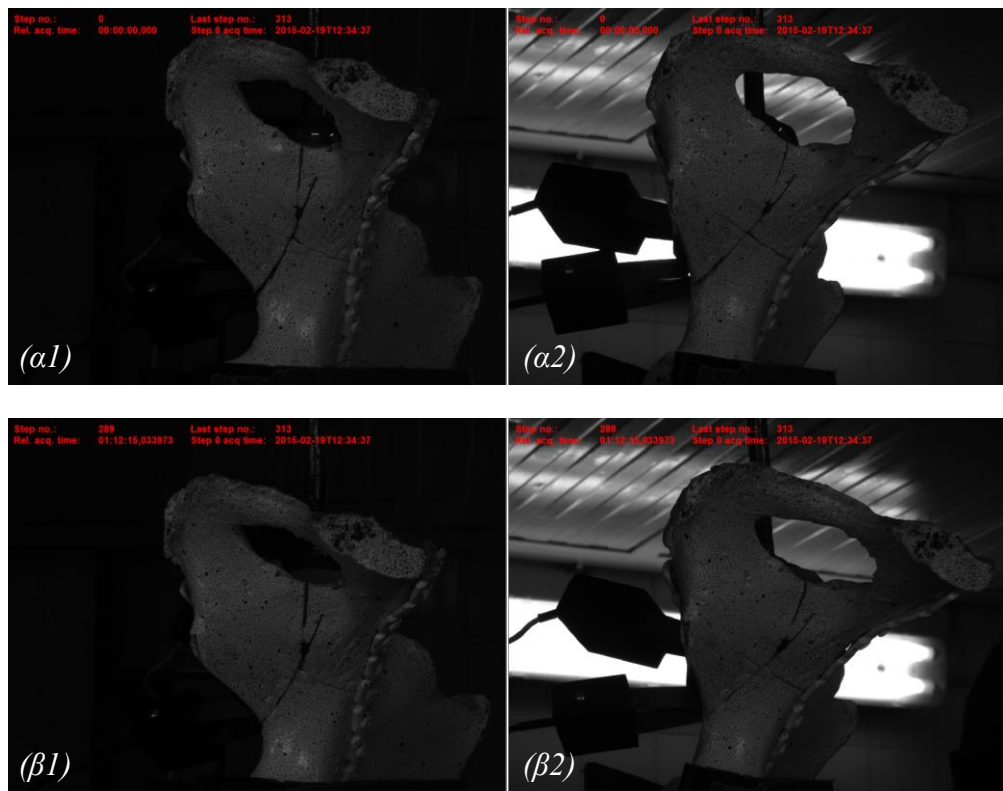
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



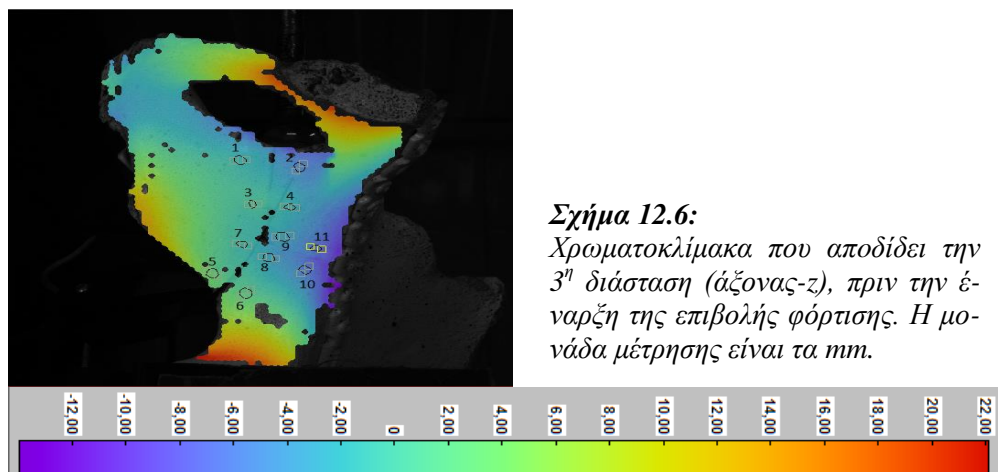
Σχήμα 12.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 12.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 12.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

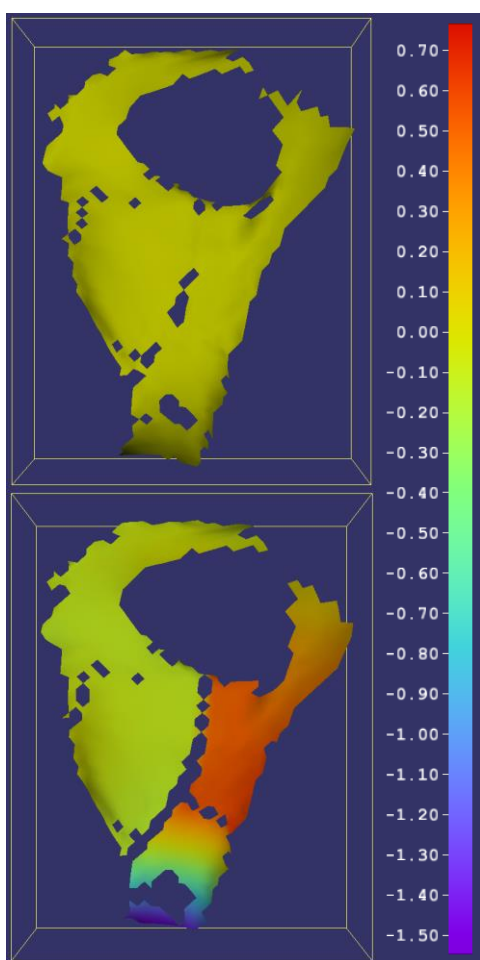


Σχήμα 12.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.

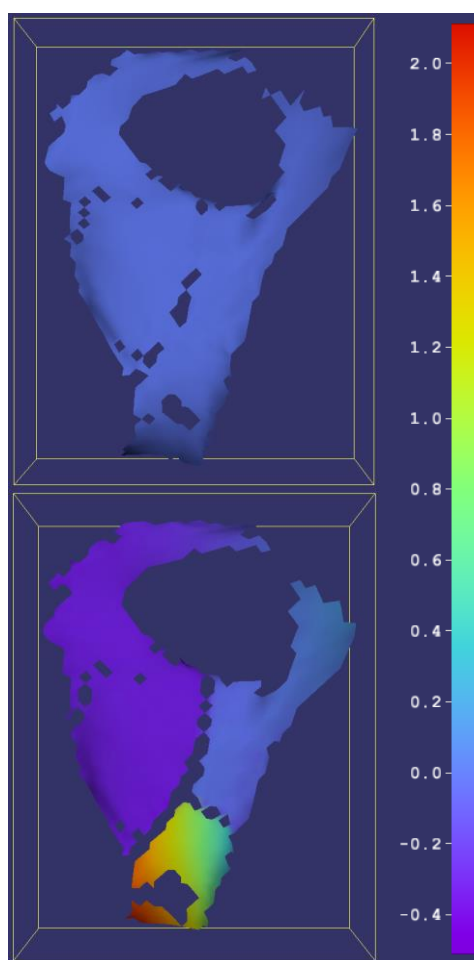


Σχήμα 12.6: Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

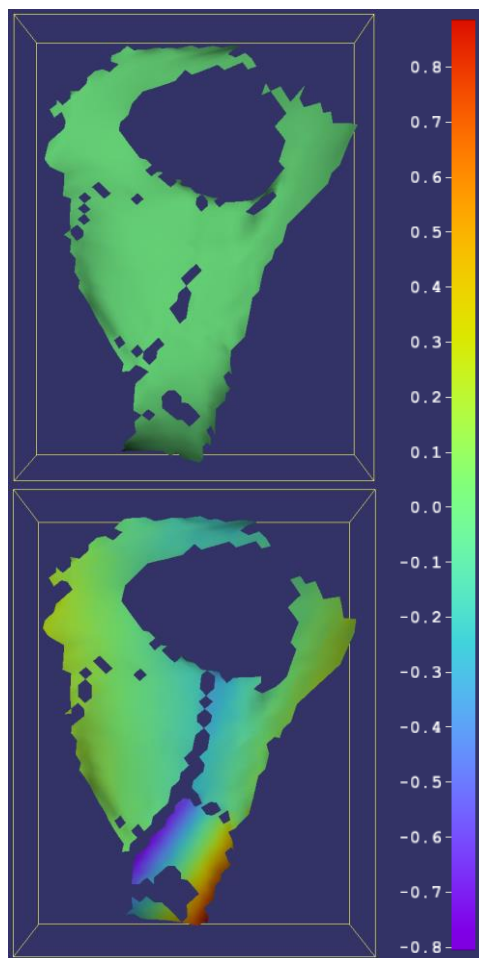
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



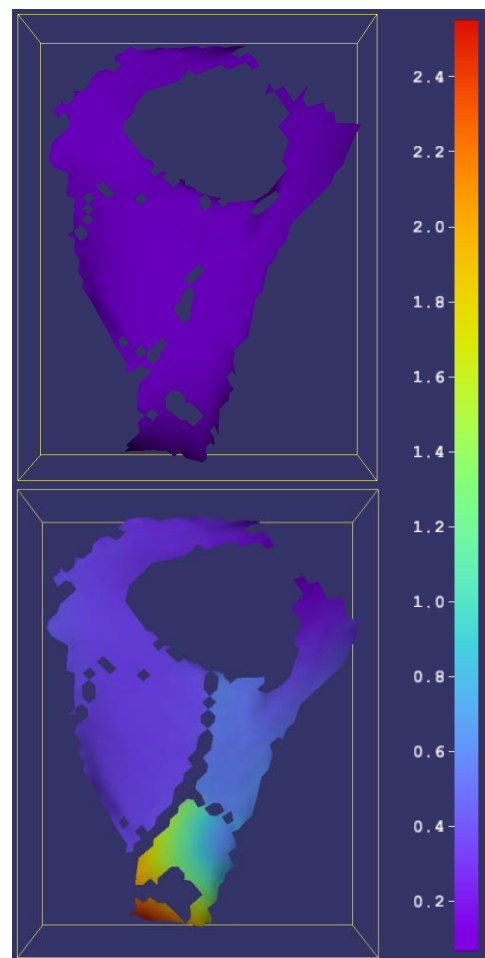
Σχήμα 12.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Σχήμα 12.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

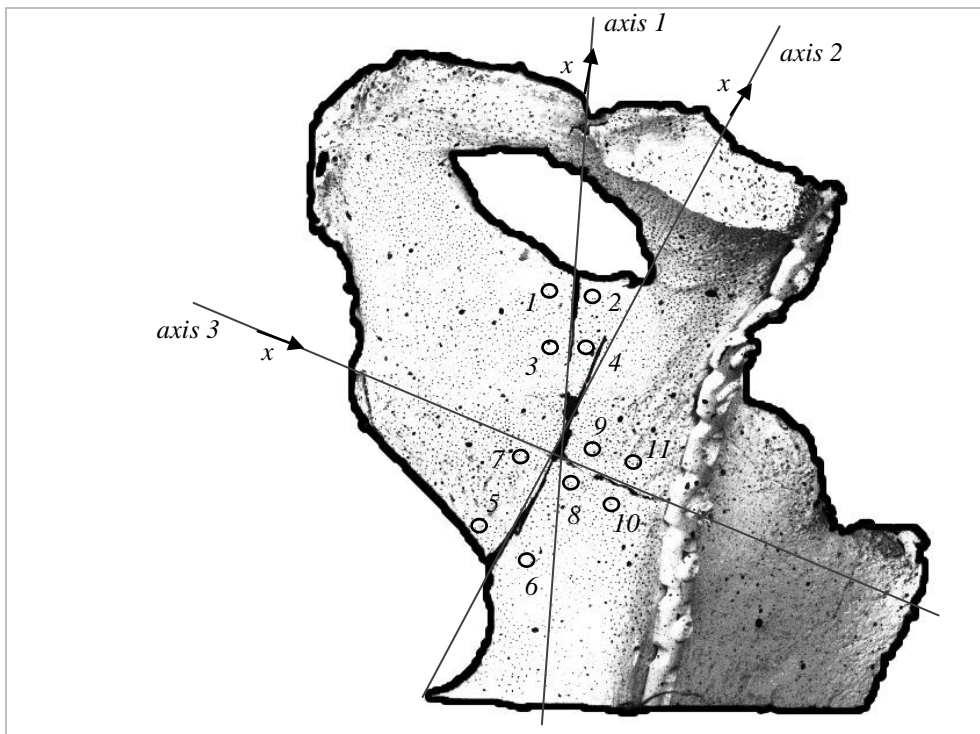


Σχήμα 12.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 12.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

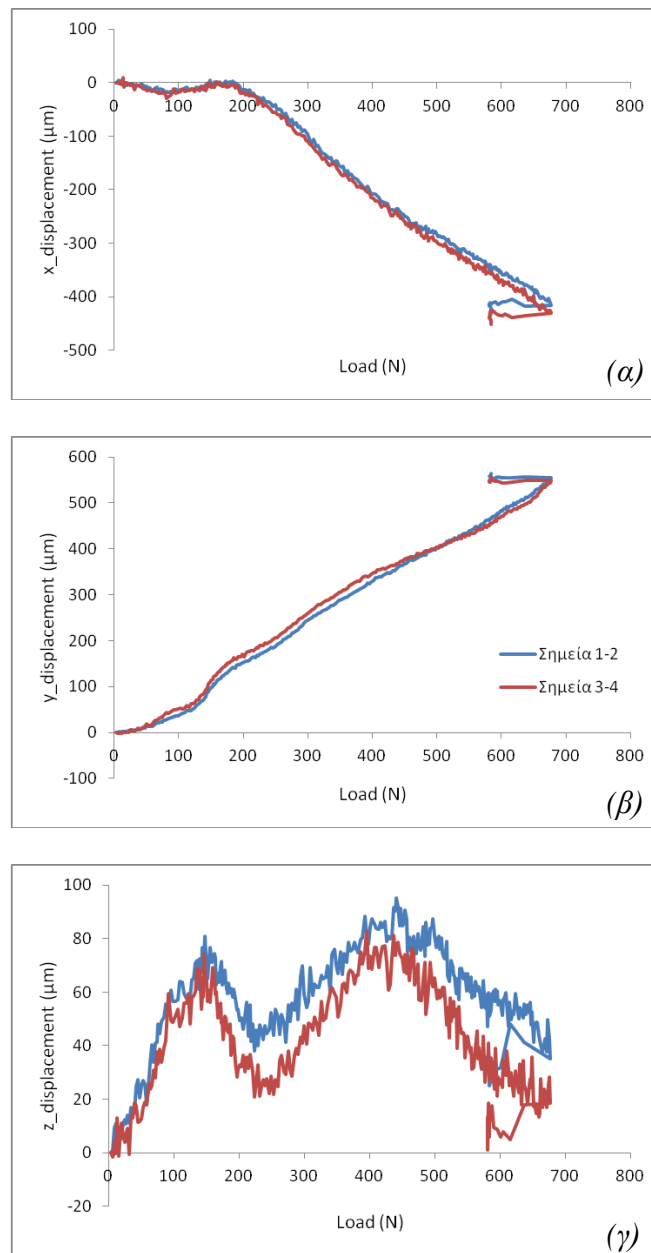


Σχήμα 12.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 8-9 και 10-11.

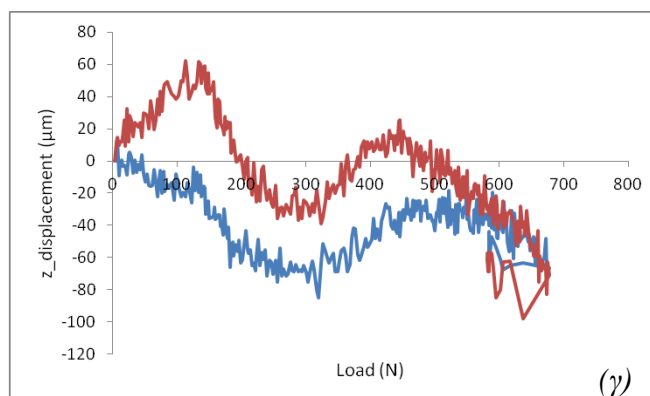
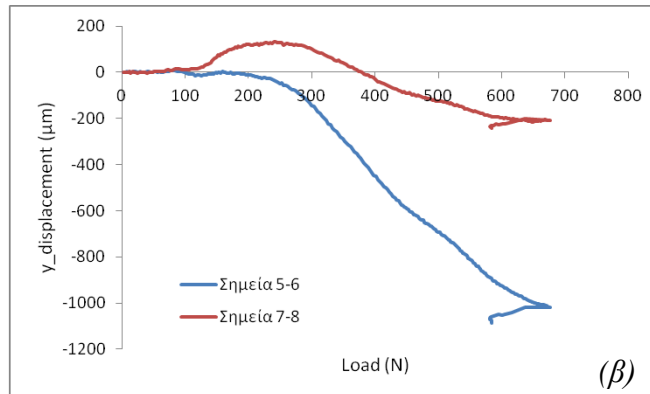
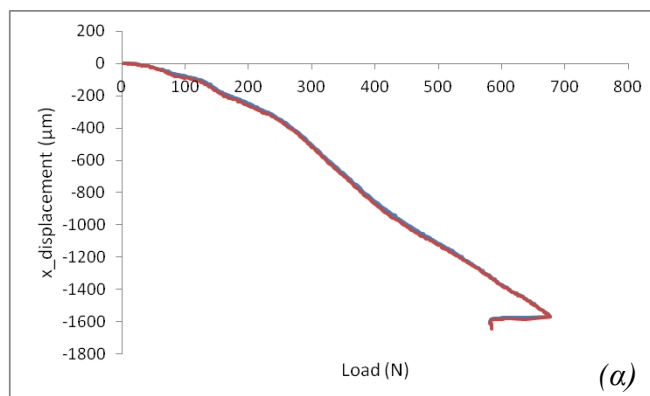
Κάταγμα 1



Σχήμα 12.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

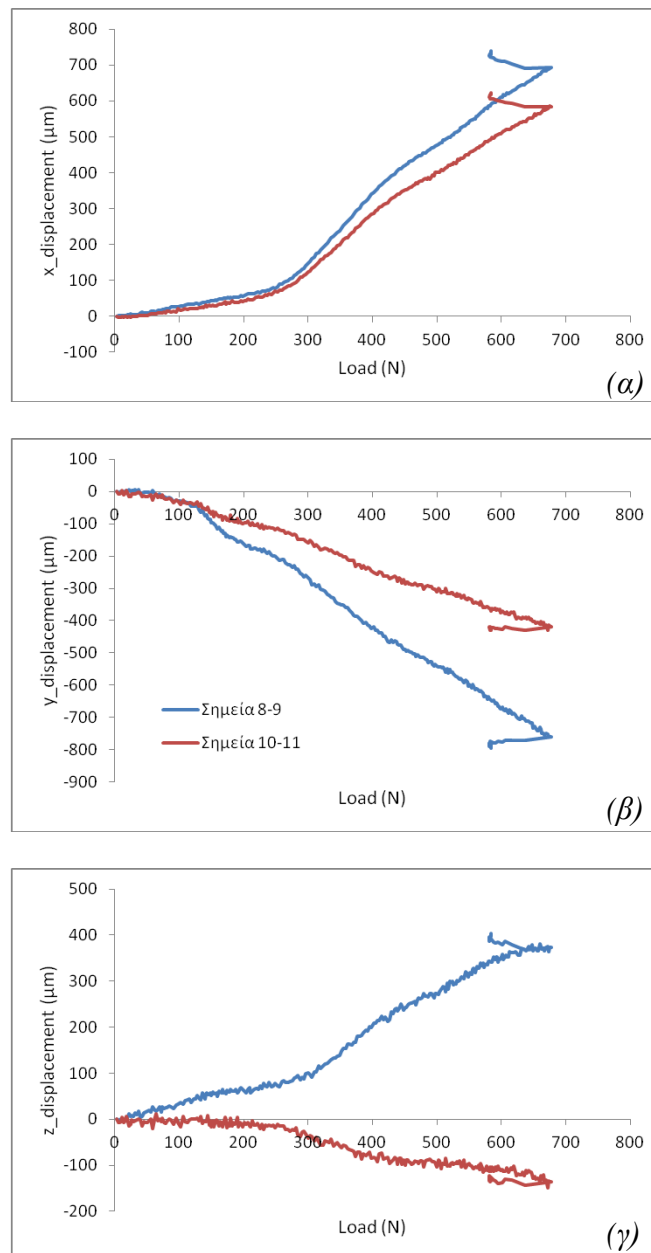
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 2



Σχήμα 12.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 3

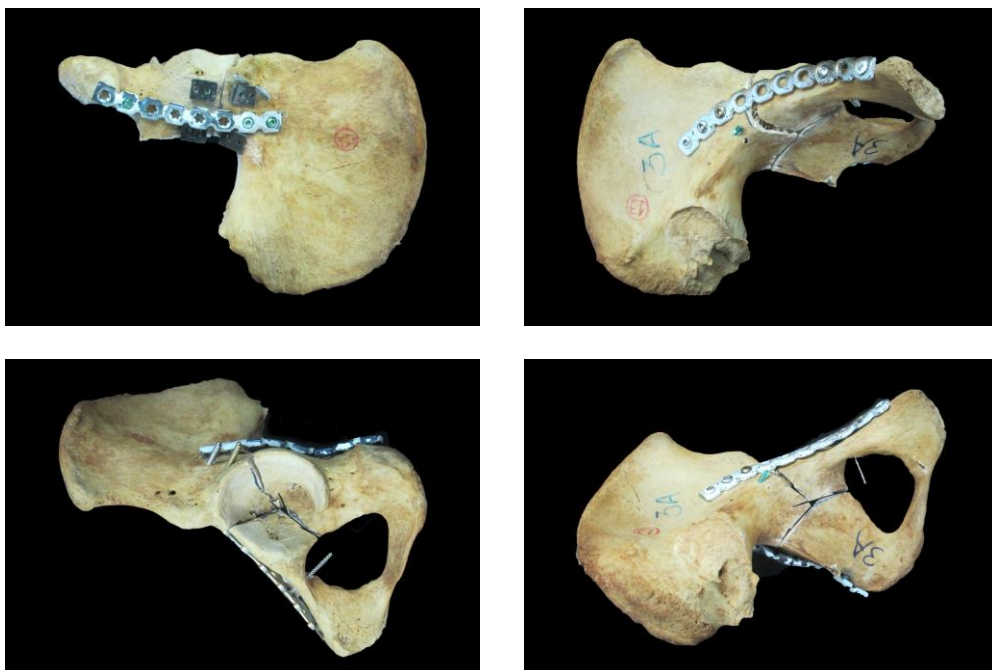


Σχήμα 12.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

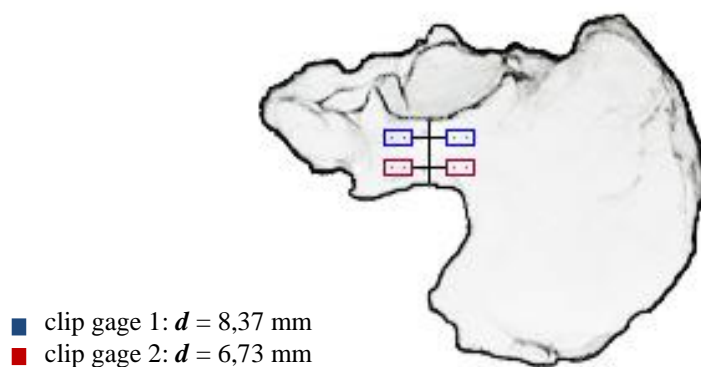
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 13-αριστερό

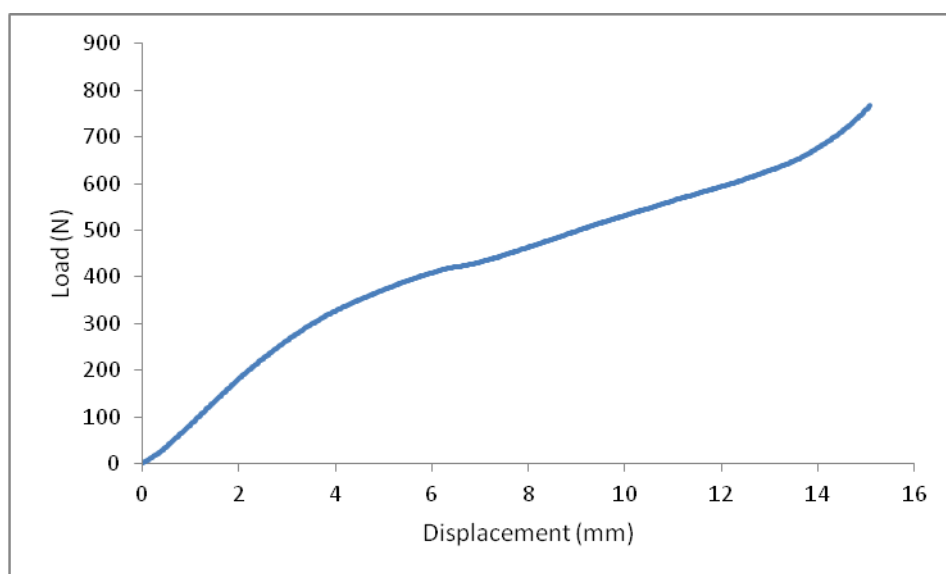
Ομάδα οστεοσύνθεσης: locking plate, simple plate



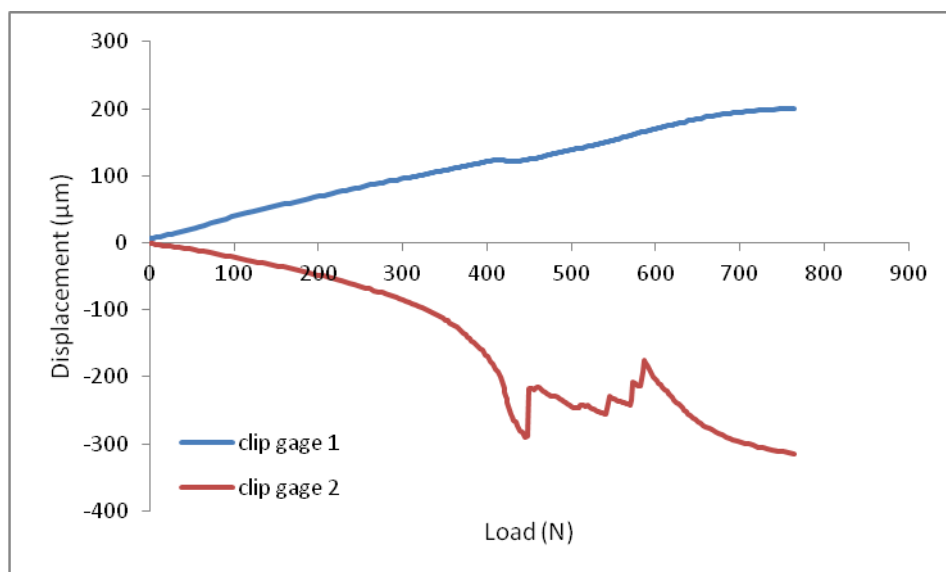
Σχήμα 13.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 13.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

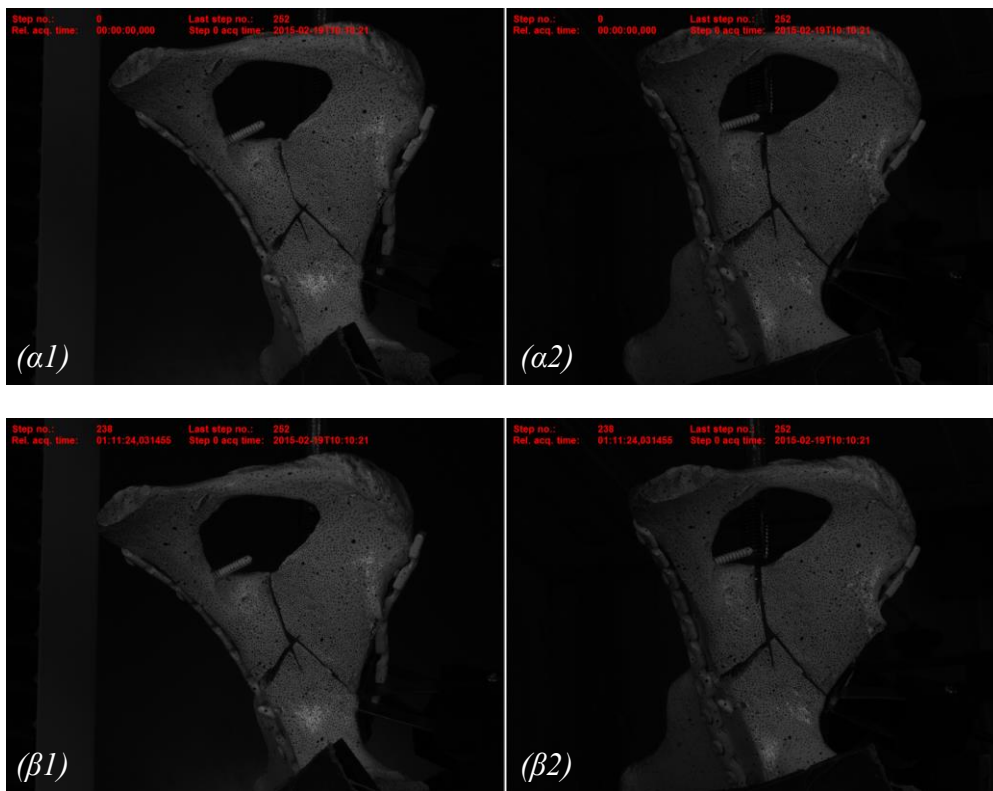


Σχήμα 13.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

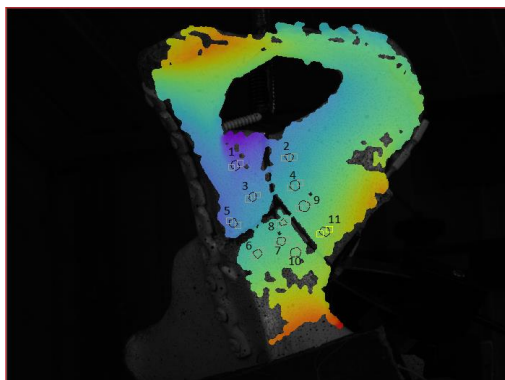


Σχήμα 13.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 13.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

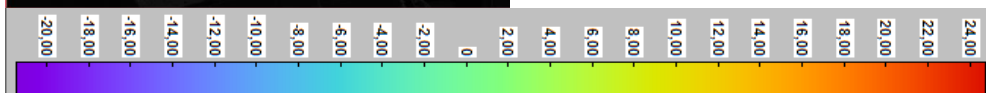
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

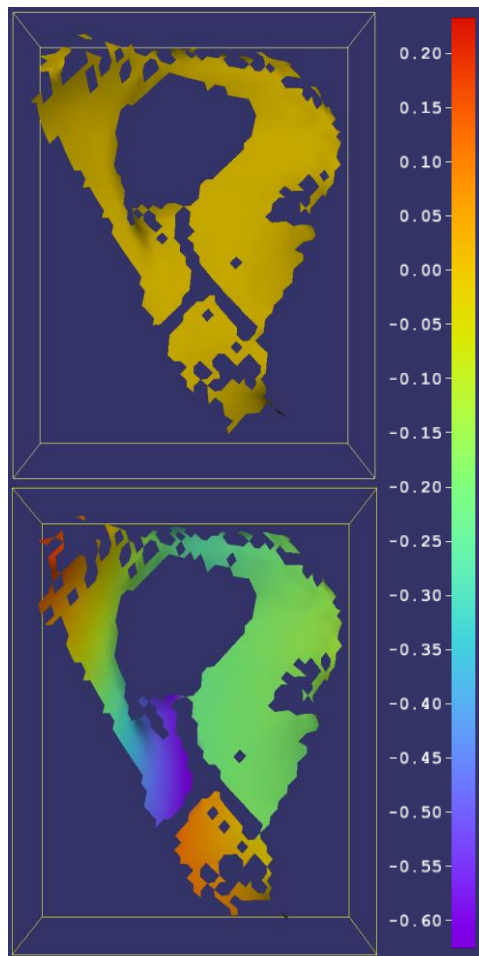


Σχήμα 13.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.

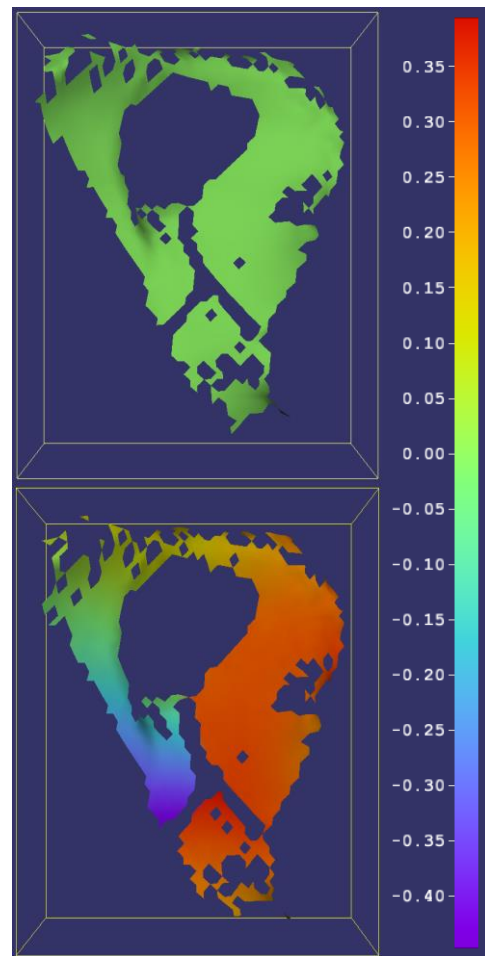


Σχήμα 13.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.



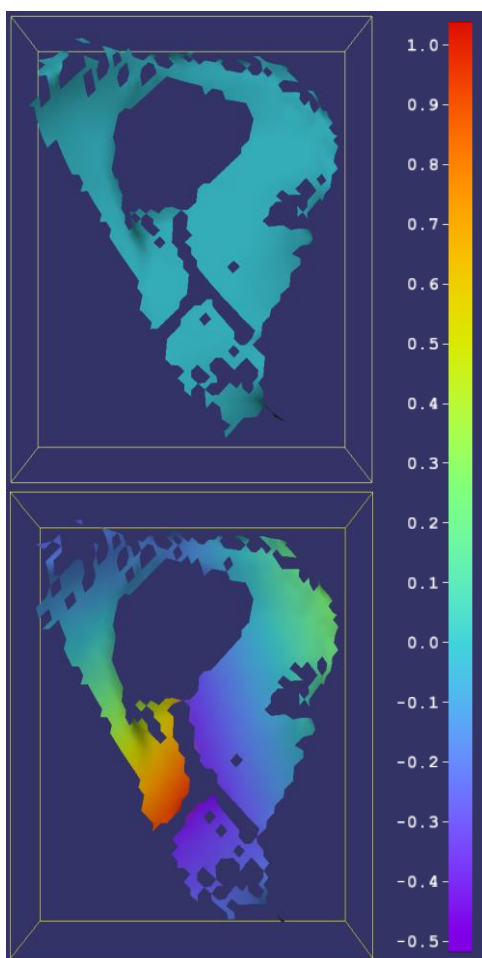


Σχήμα 13.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

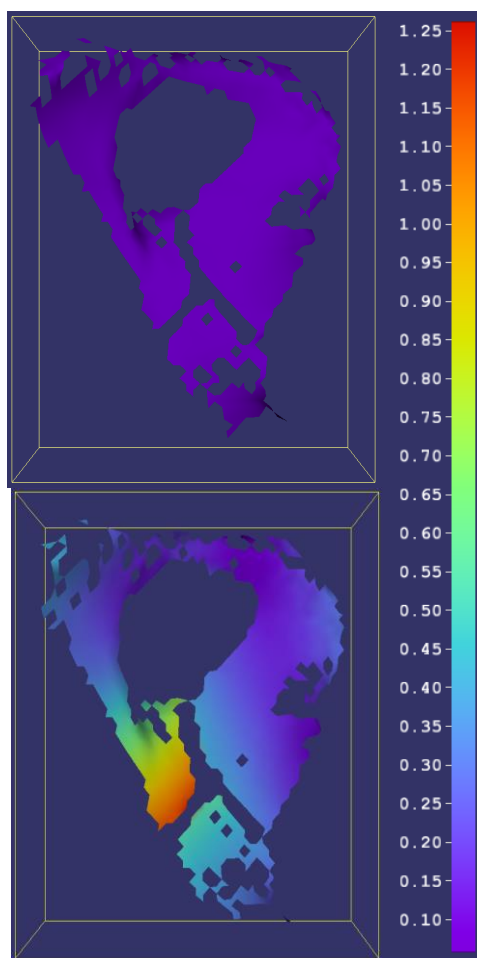


Σχήμα 13.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

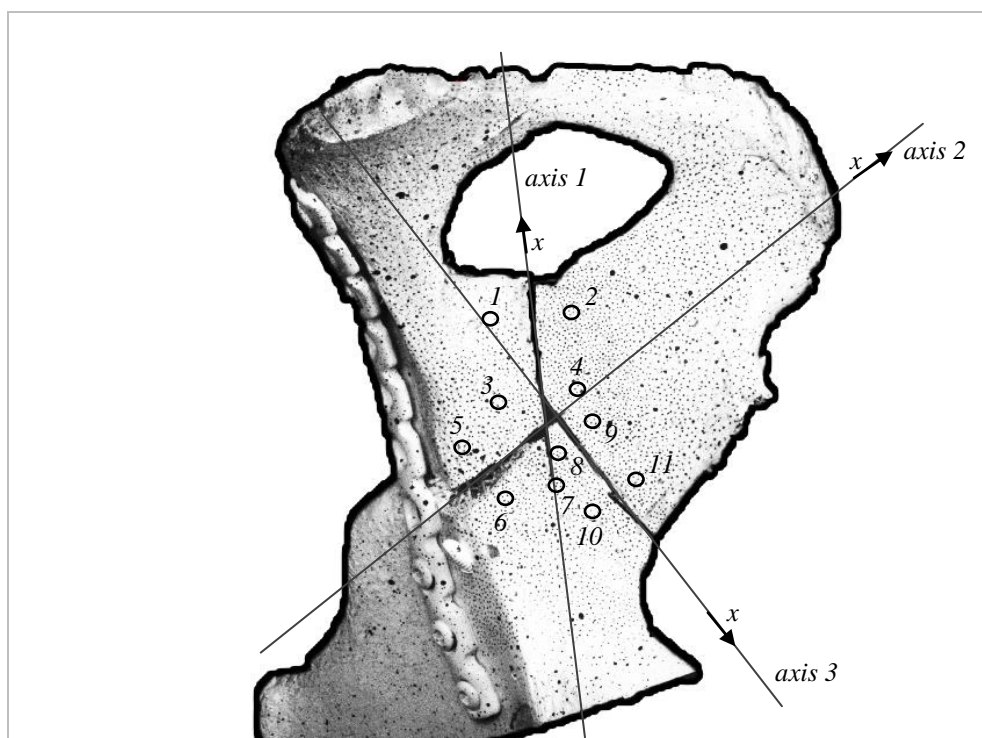
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



Σχήμα 13.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 13.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



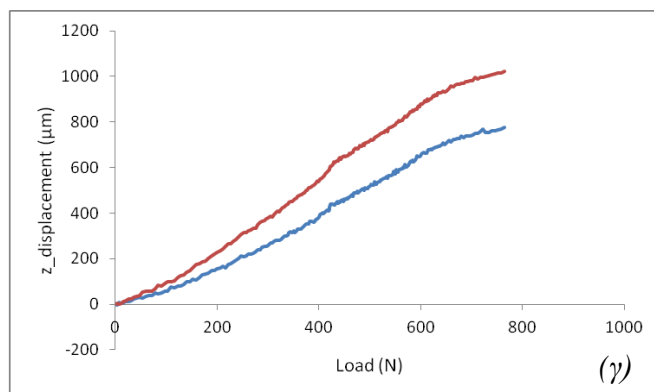
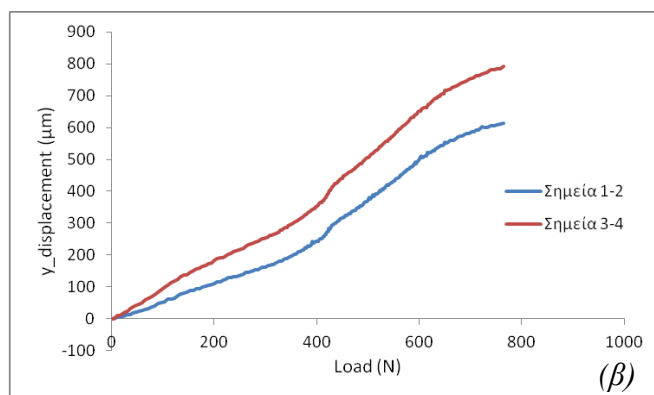
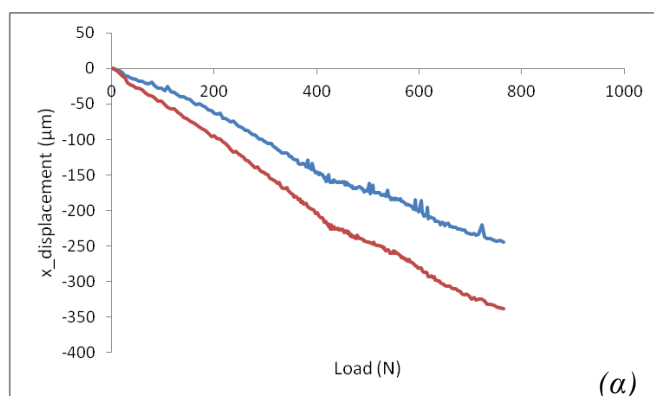
Σχήμα 13.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 3-7,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 8-9 και 10-11.

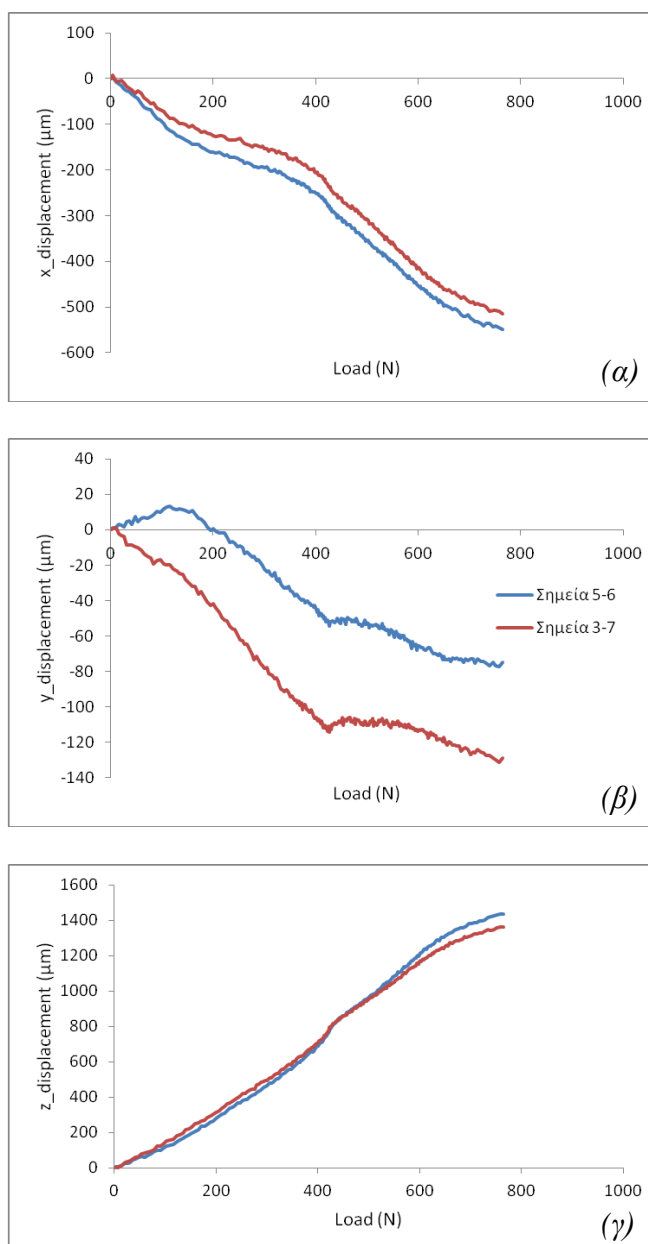
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 1



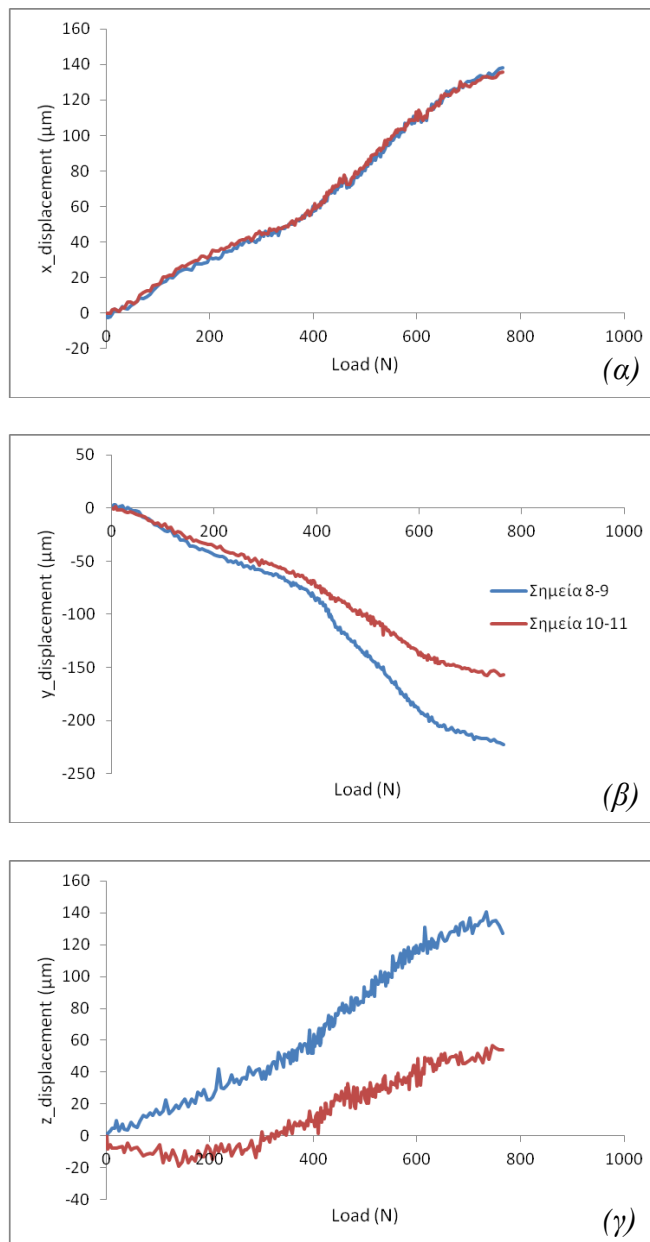
Σχήμα 13.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 2



Σχήμα 13.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

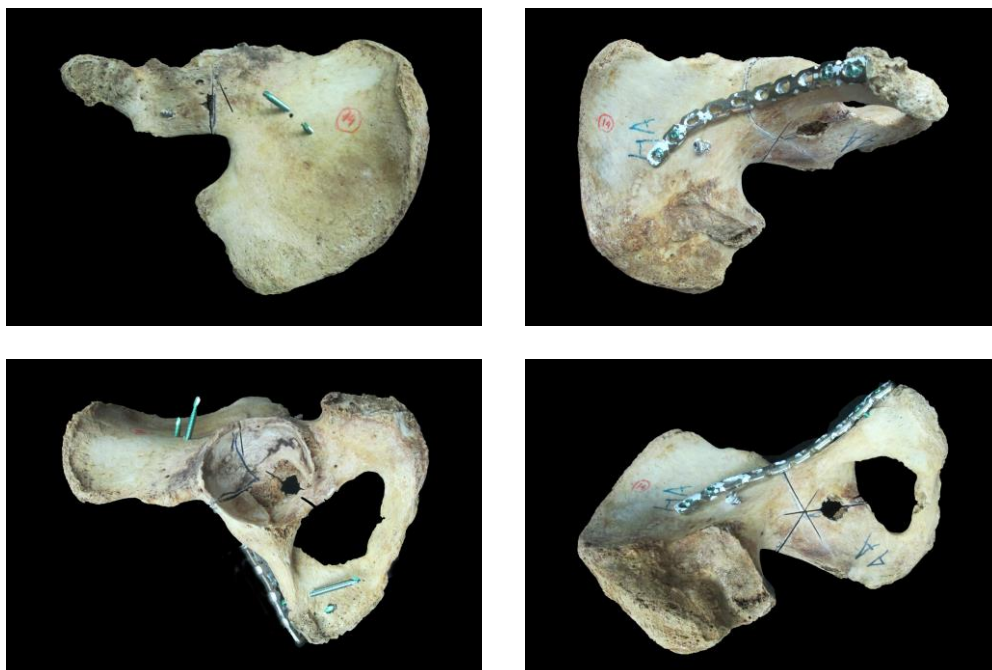
Κάταγμα 3



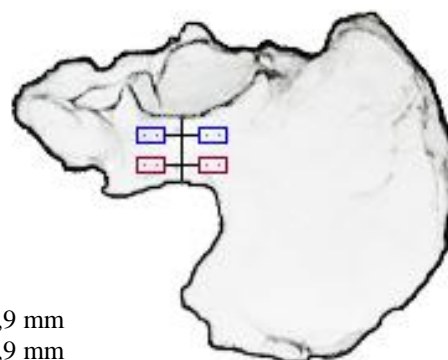
Σχήμα 13.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 14-αριστερό

Ομάδα οστεοσύνθεσης: locking plate, screw



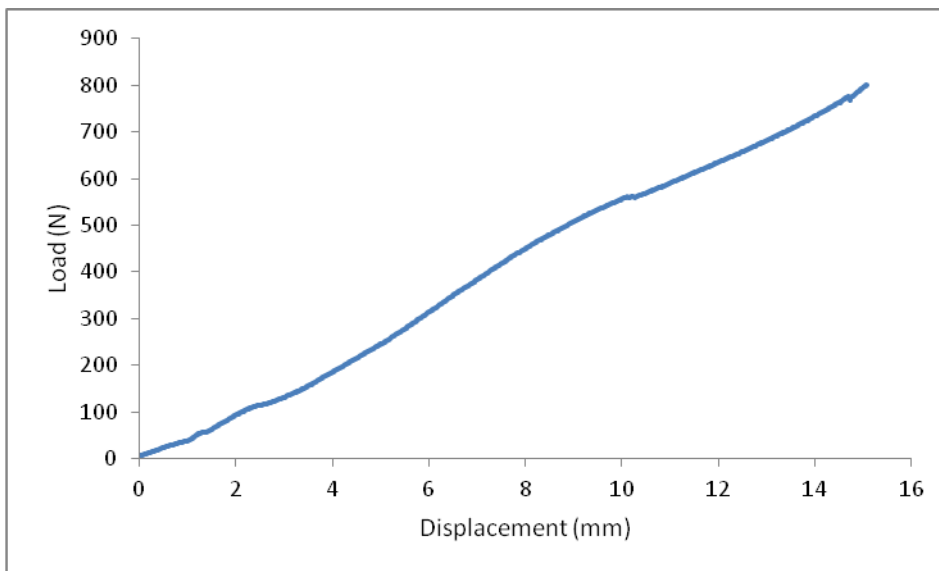
Σχήμα 14.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



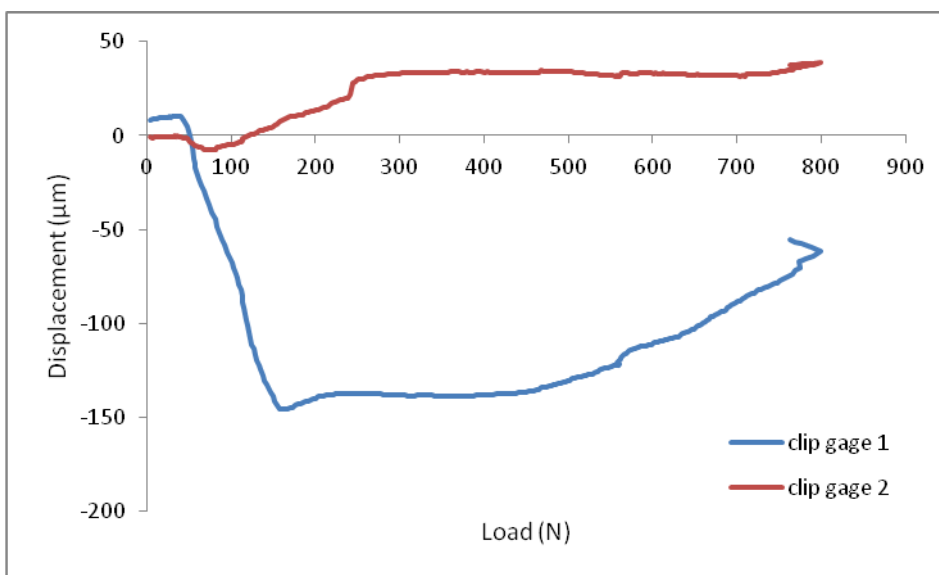
■ clip gage 1: $d = 11,9$ mm
■ clip gage 2: $d = 10,9$ mm

Σχήμα 14.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

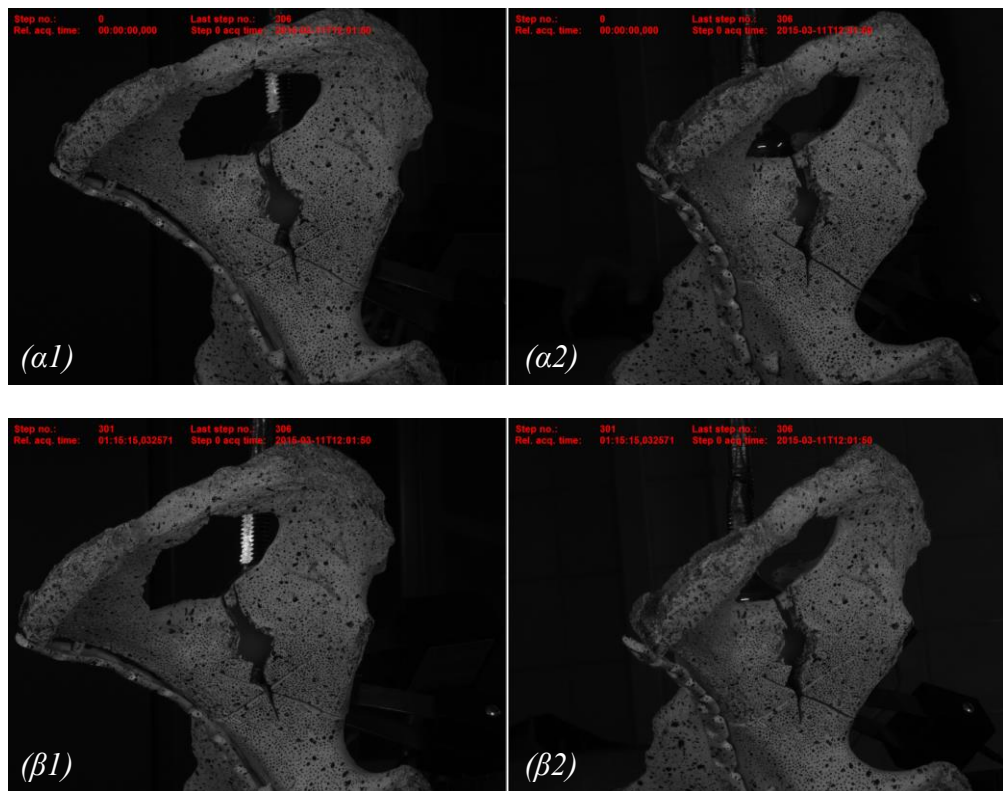
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



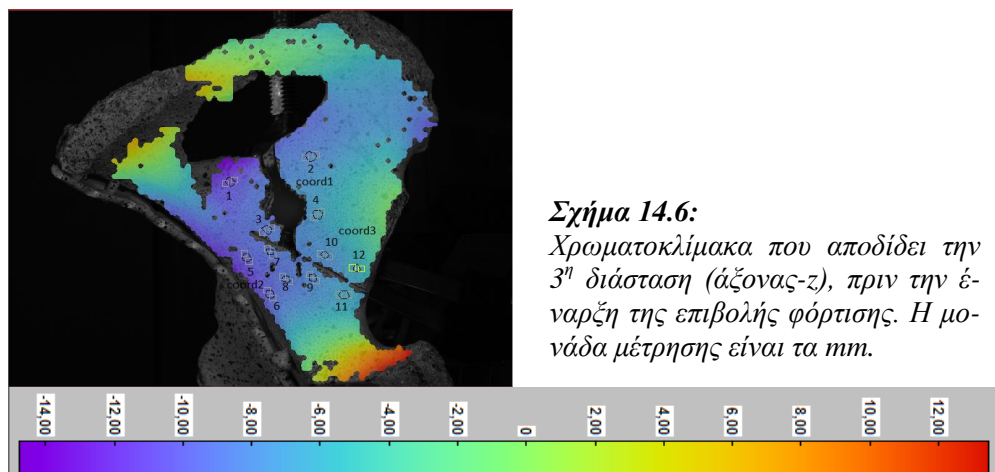
Σχήμα 14.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 14.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 14.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.



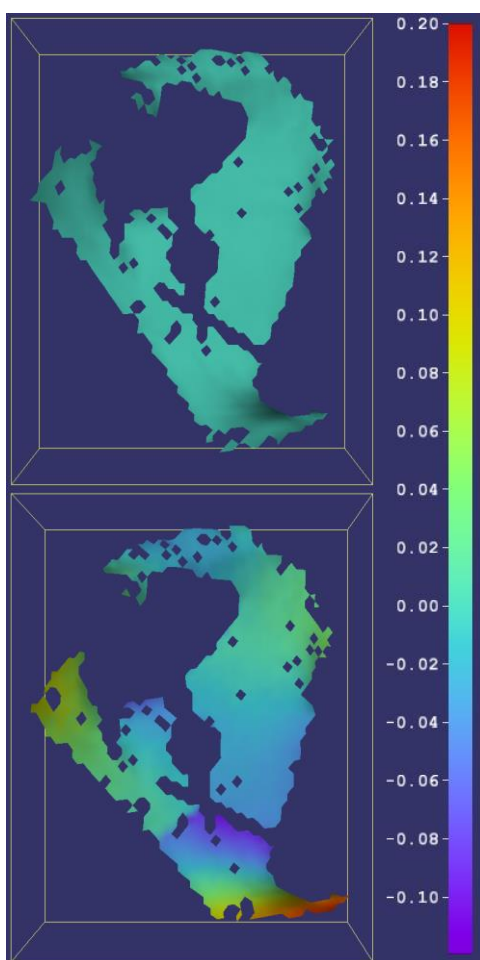
Σχήμα 14.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



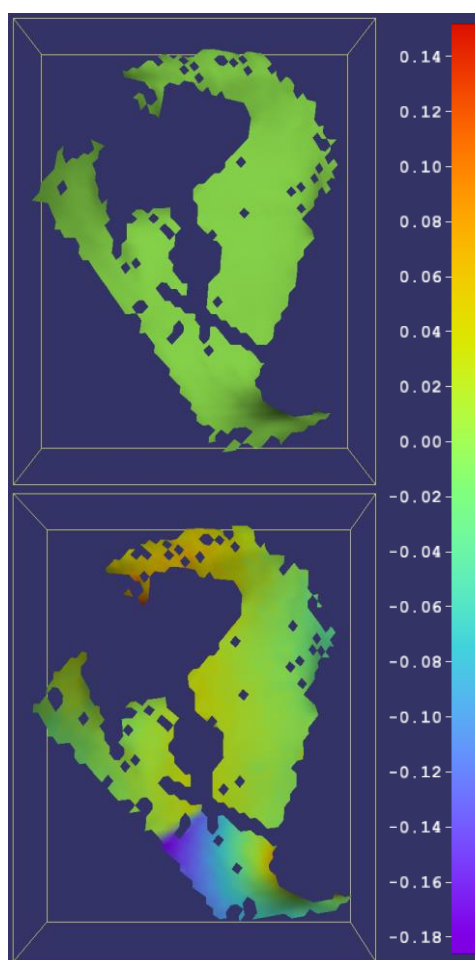
Σχήμα 14.6:

Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

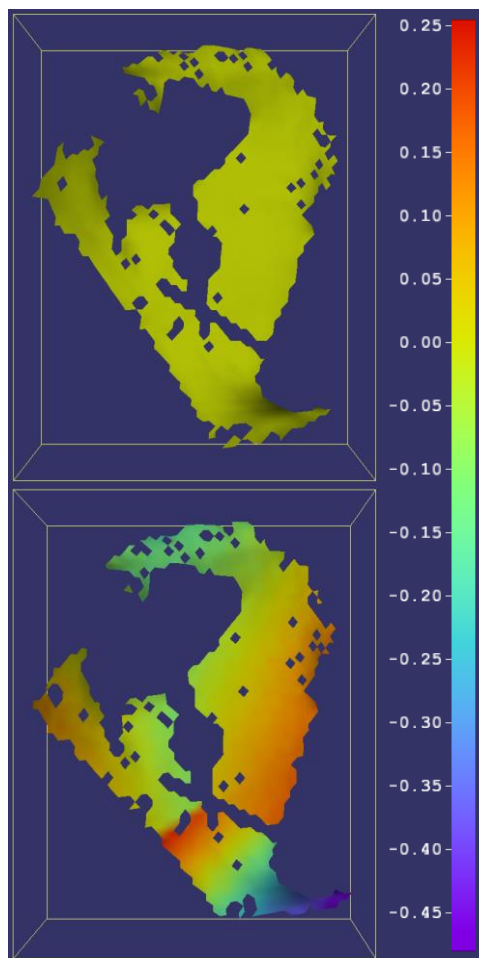
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



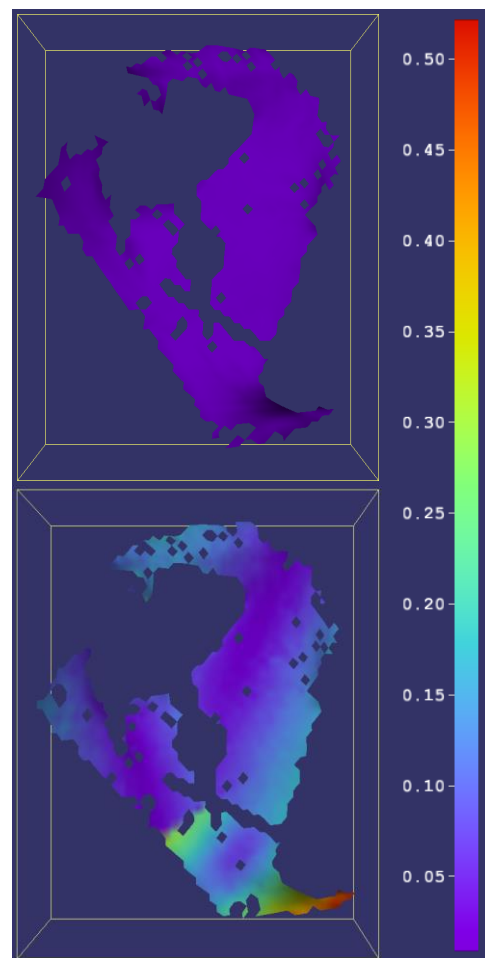
Σχήμα 14.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-x. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 14.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-y. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

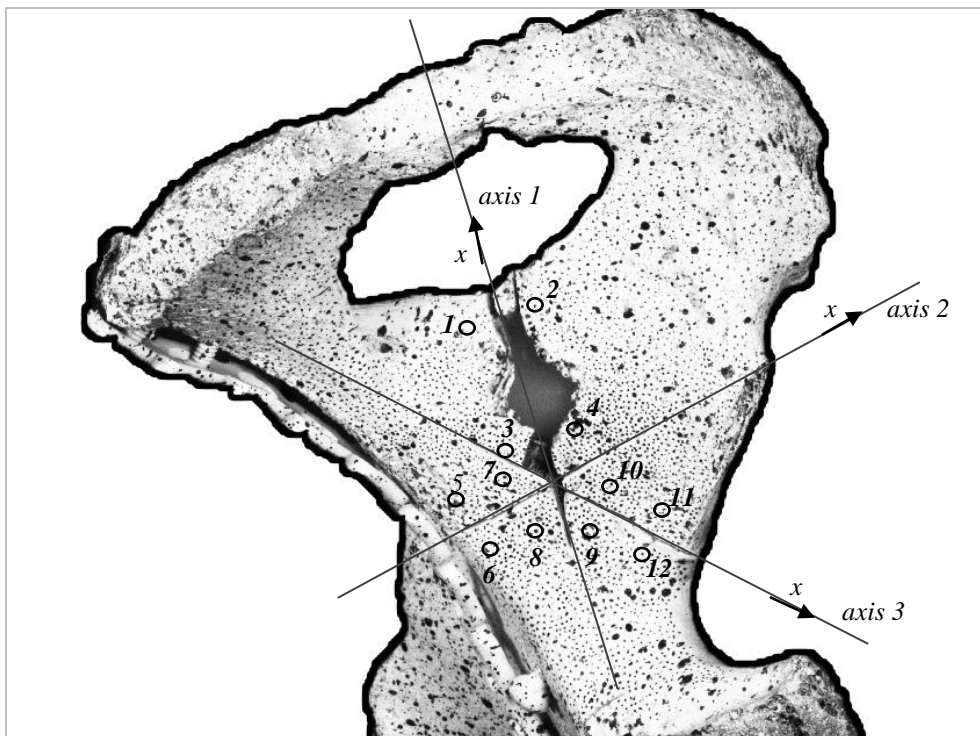


Σχήμα 14.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 14.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

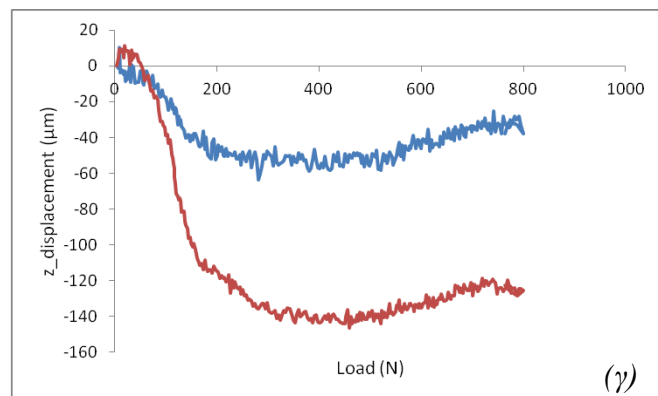
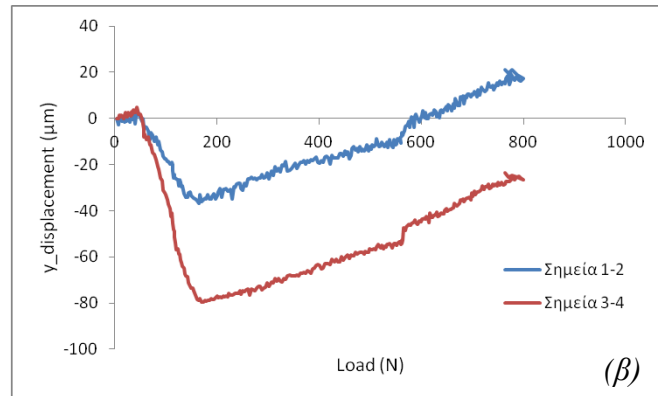
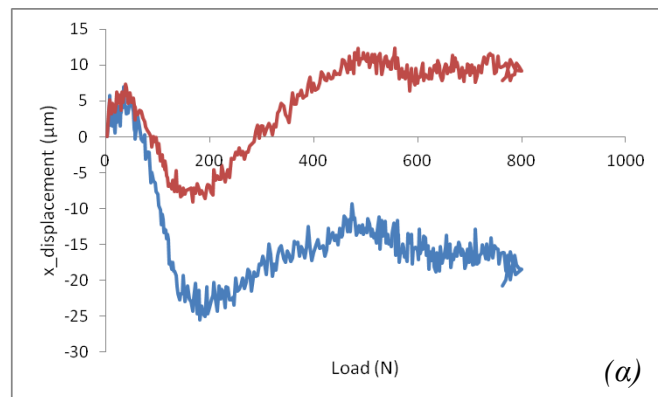


Σχήμα 14.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

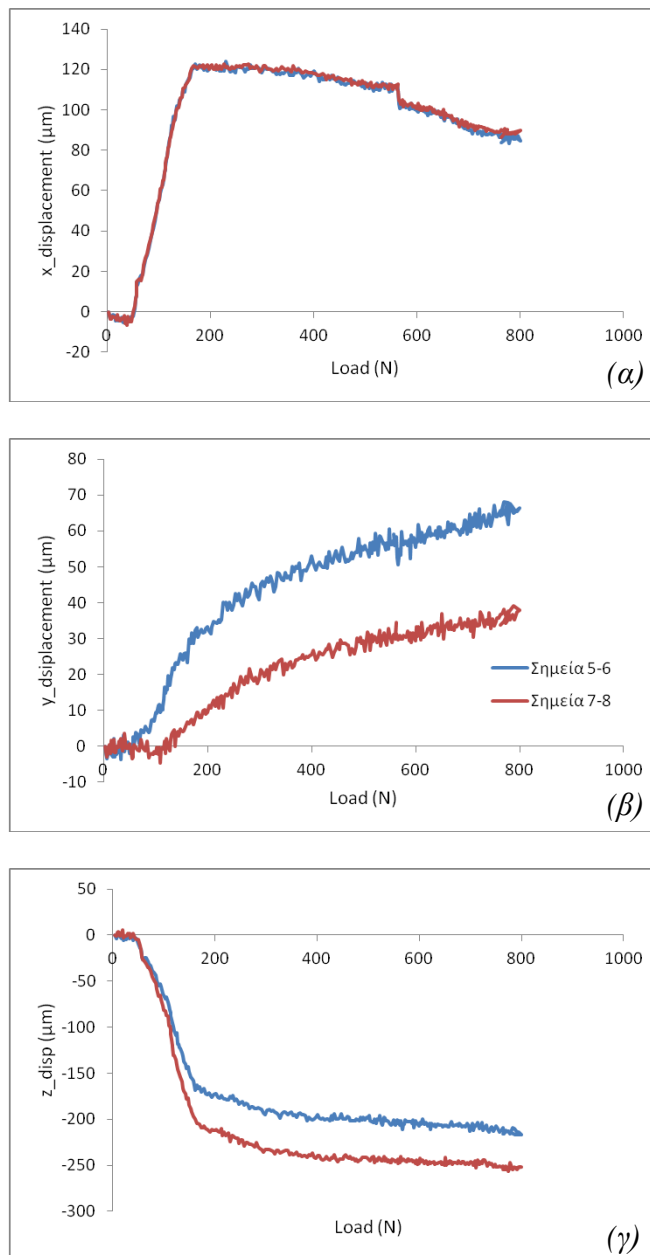
- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 9-10 και 11-12.

Κάταγμα 1



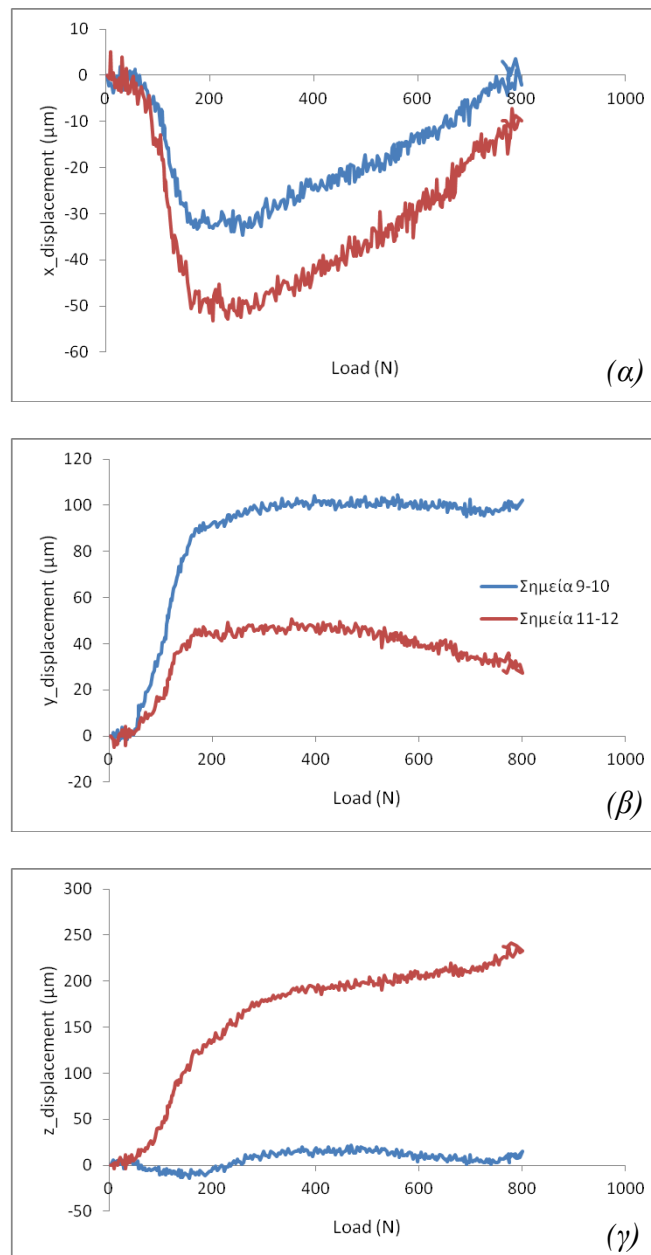
Σχήμα 14.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 2



Σχήμα 14.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 3

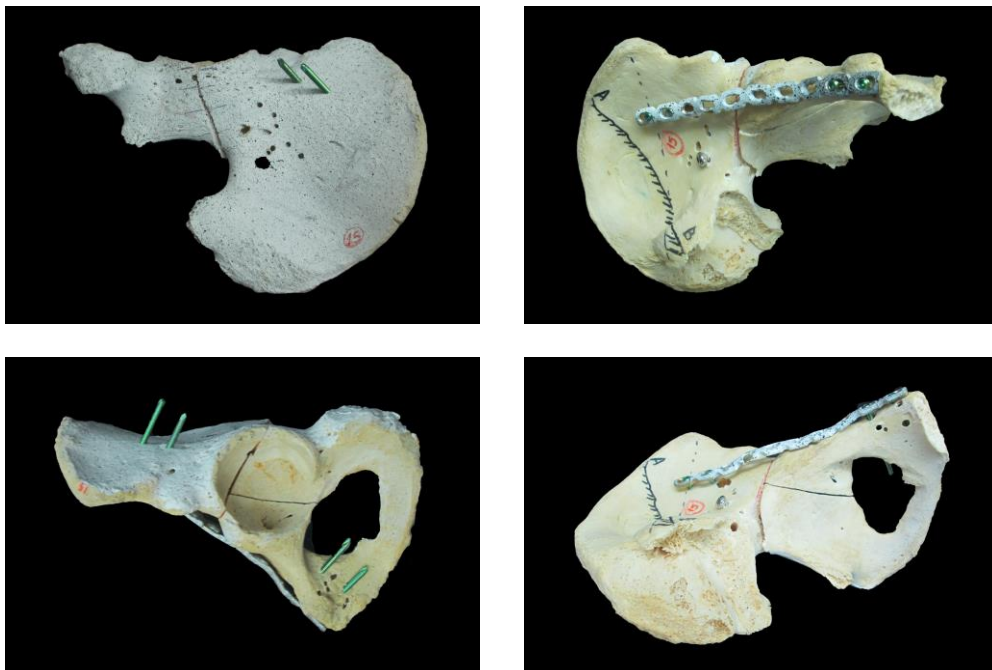


Σχήμα 14.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

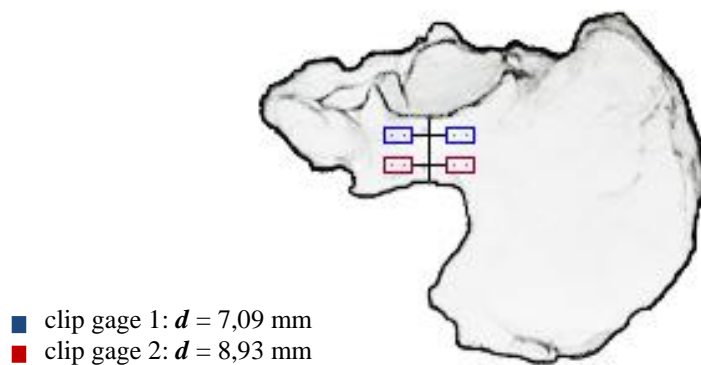
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 15-αριστερό

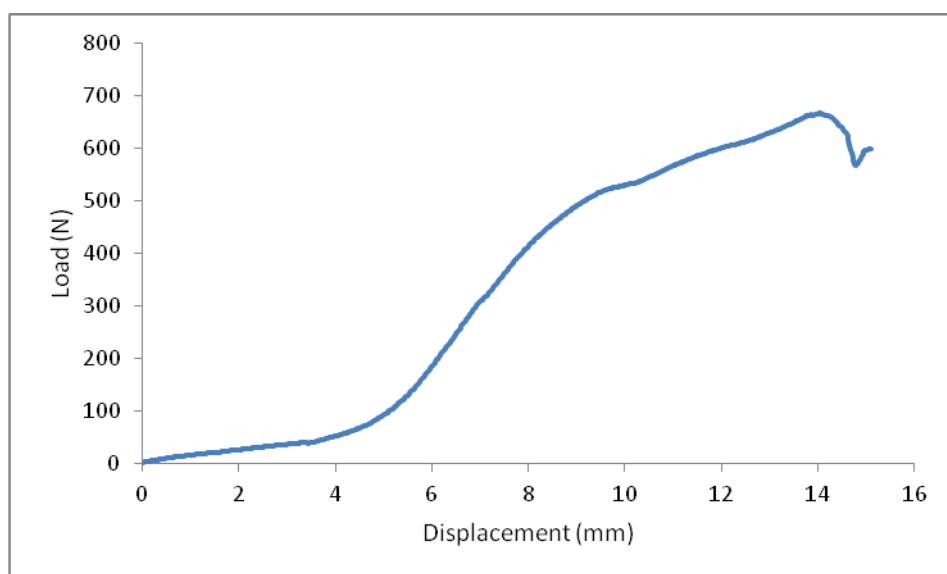
Ομάδα οστεοσύνθεσης: locking plate, screw



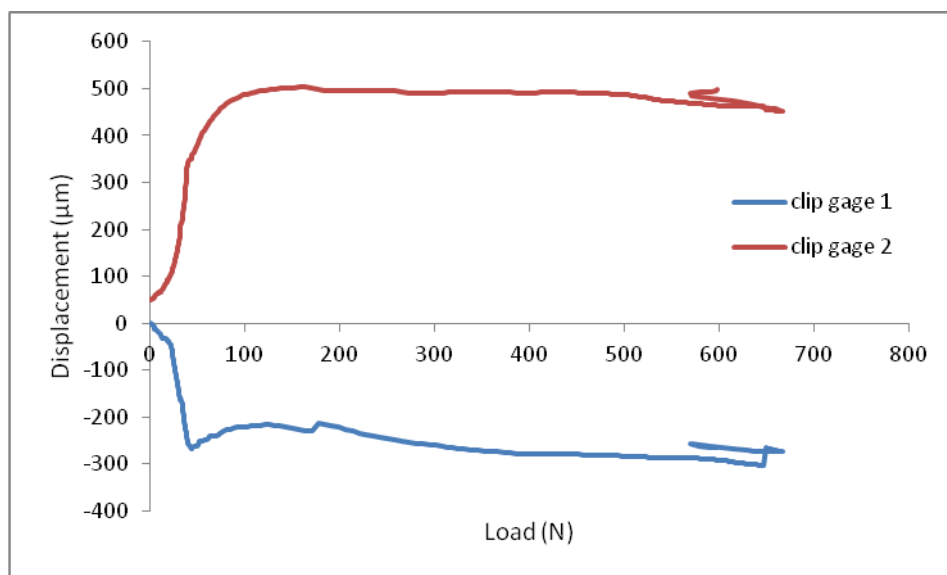
Σχήμα 15.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 15.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

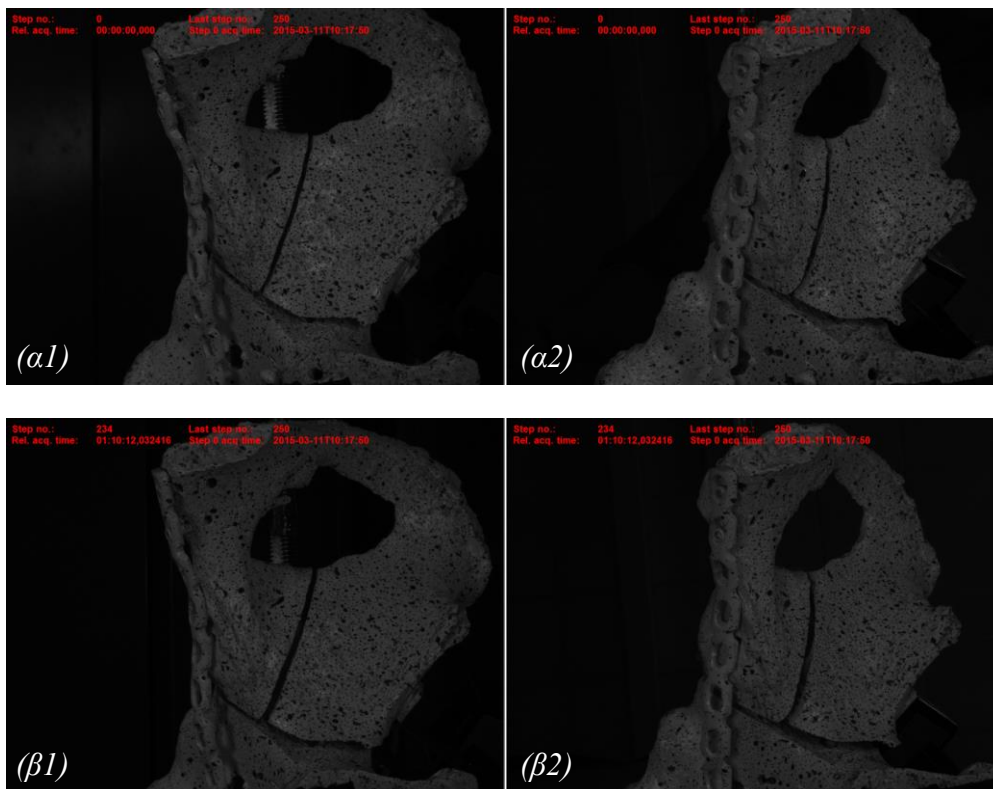


Σχήμα 15.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

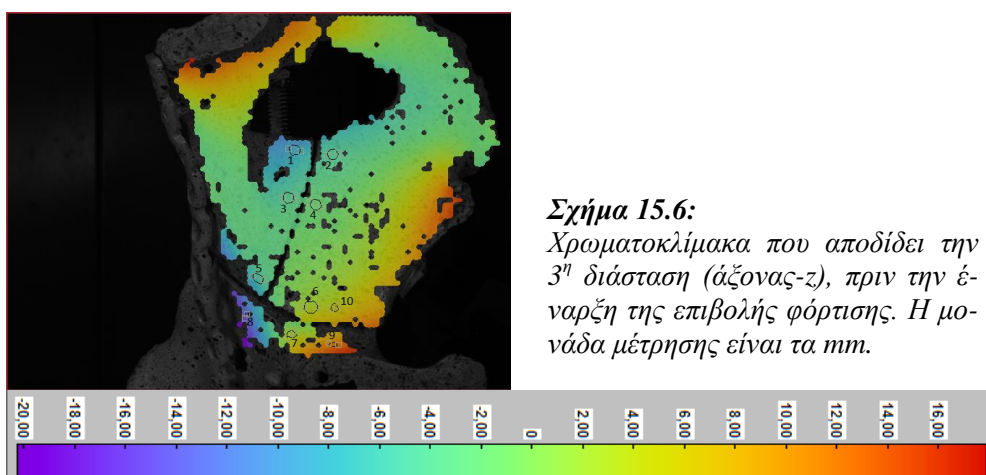


Σχήμα 15.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 15.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

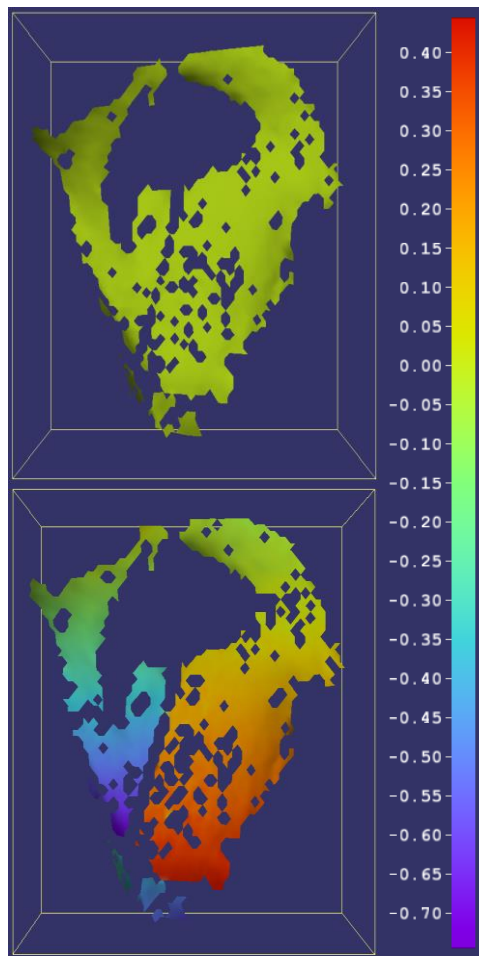
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



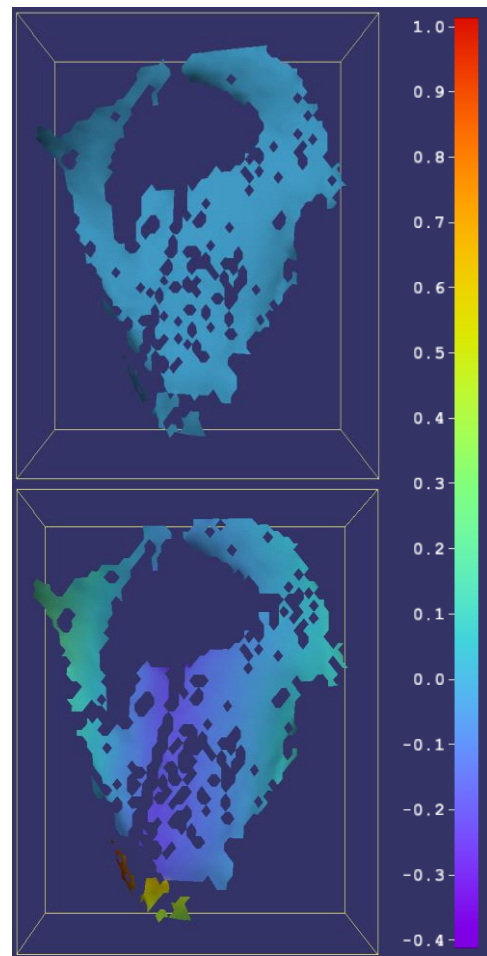
Σχήμα 15.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 15.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

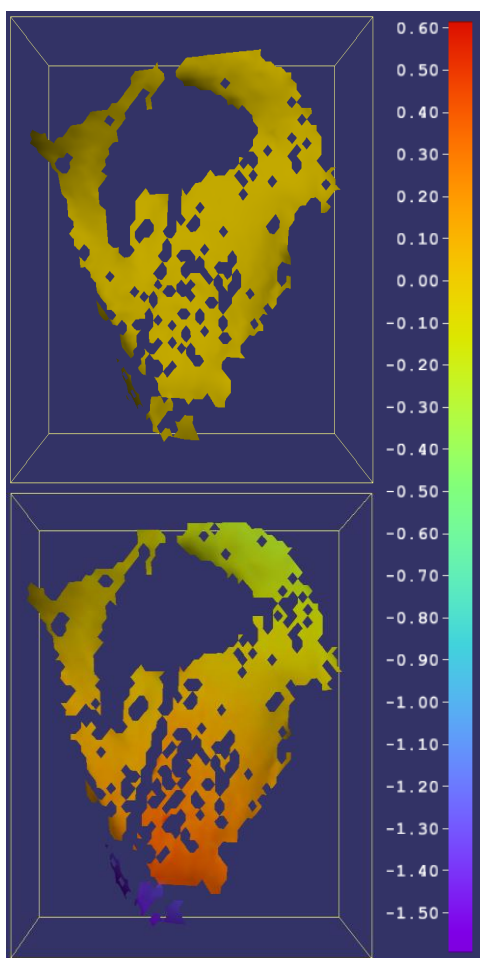


Σχήμα 15.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

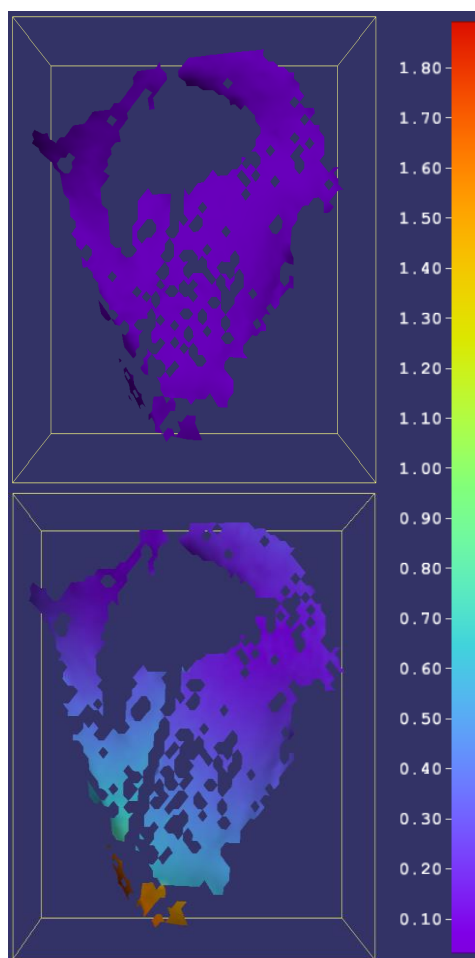


Σχήμα 15.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

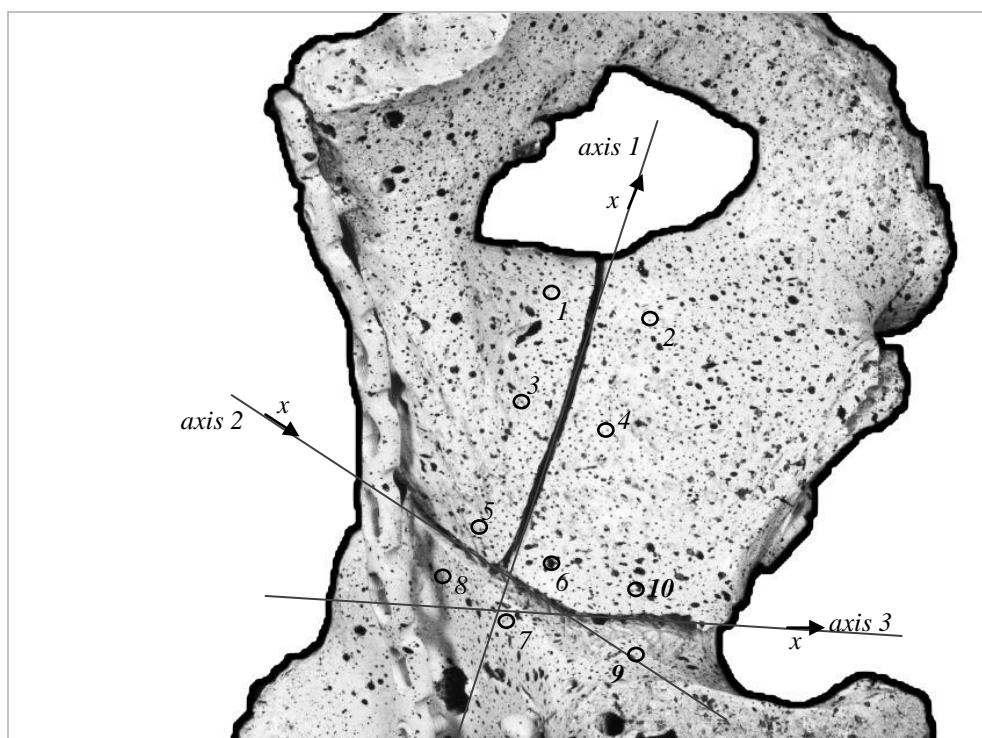
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



Σχήμα 15.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 15.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



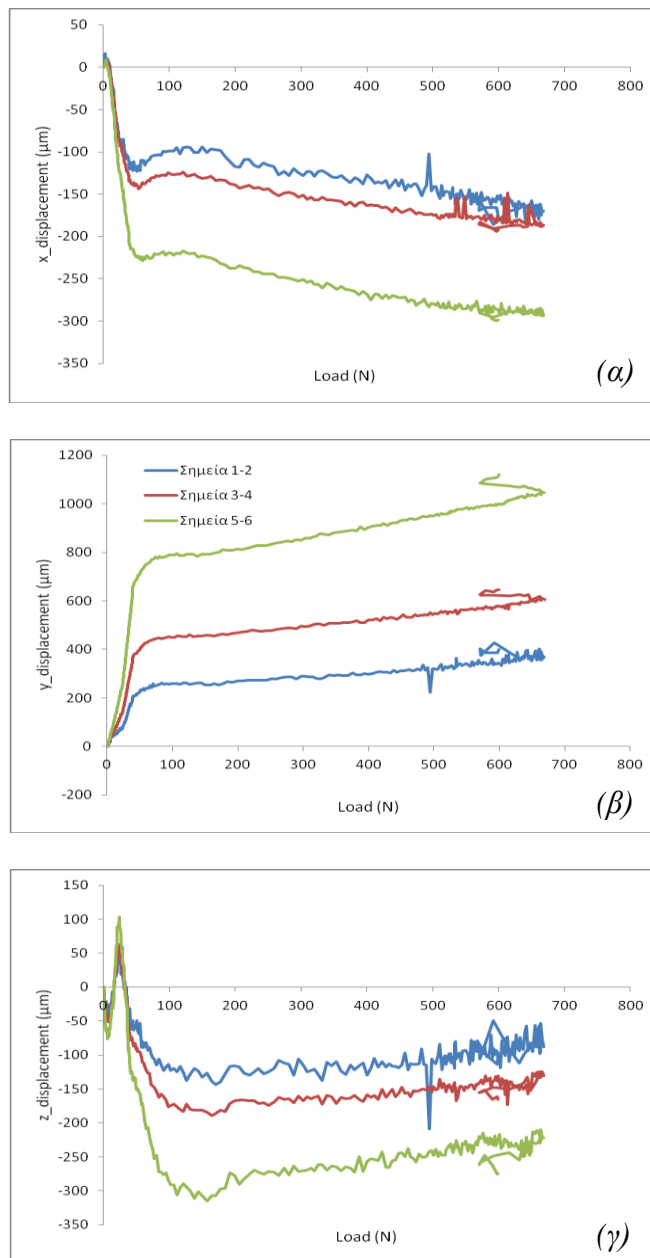
Σχήμα 15.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2, 3-4 και 5-6,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-8 και 6-7,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 9-10.

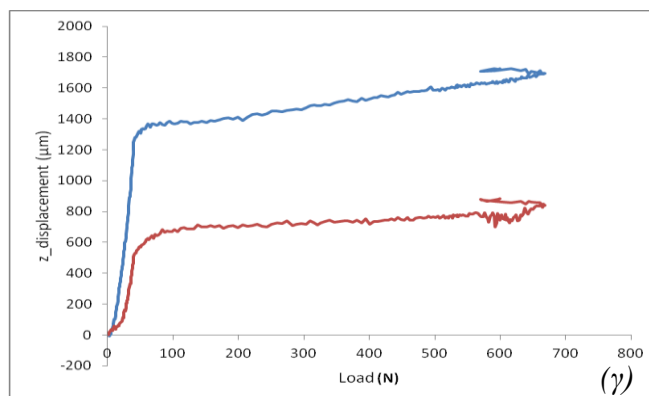
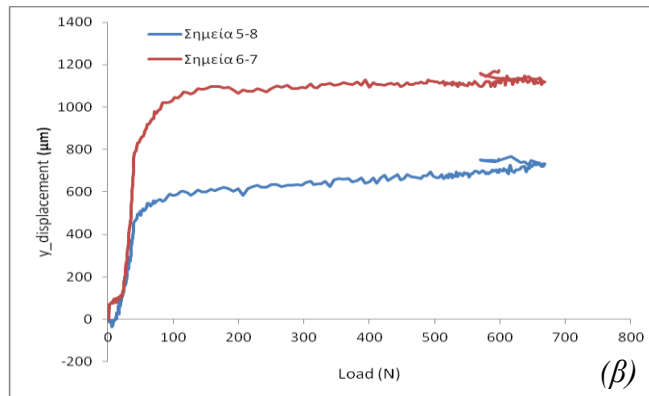
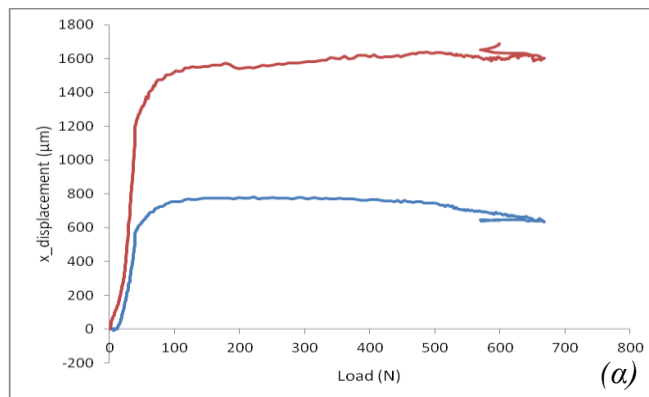
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 1



Σχήμα 15.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

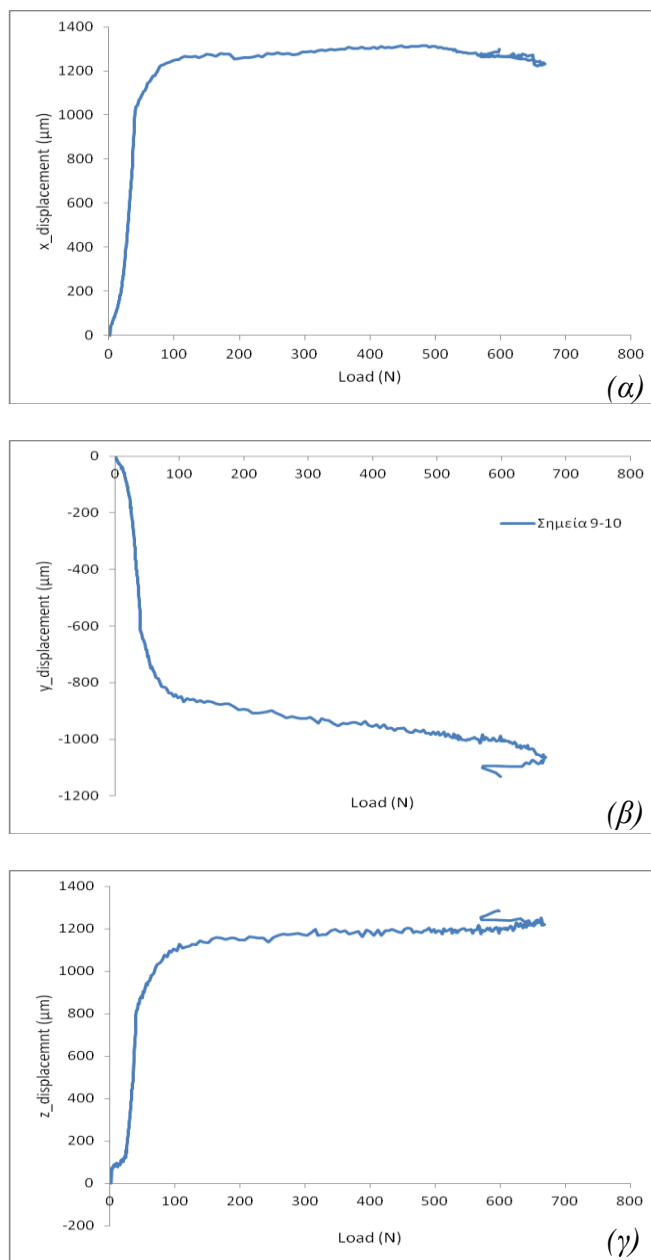
Κάταγμα 2



Σχήμα 15.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

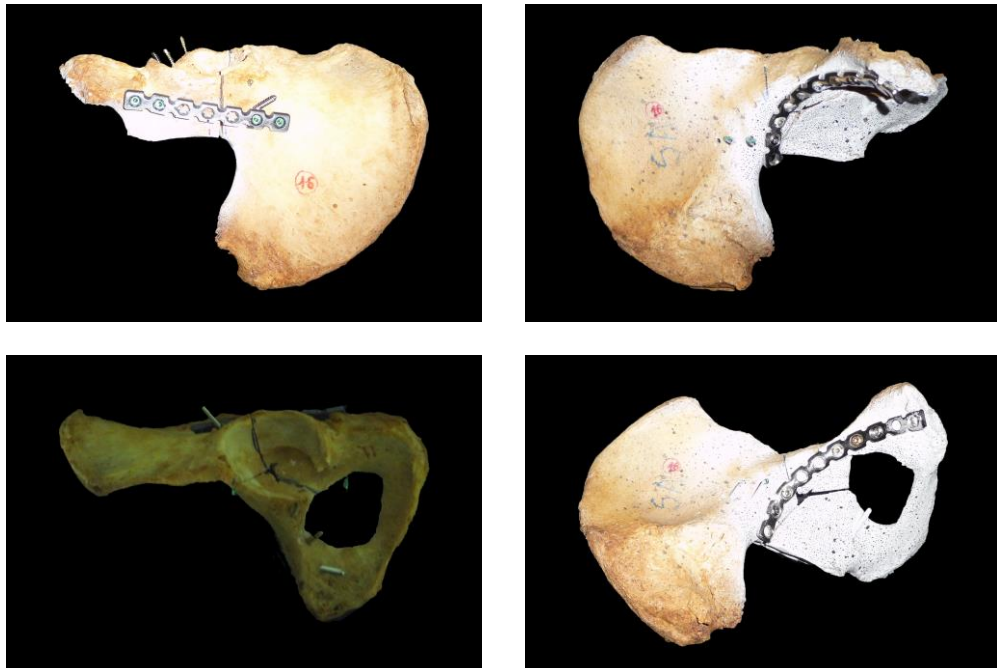
Κάταγμα 3



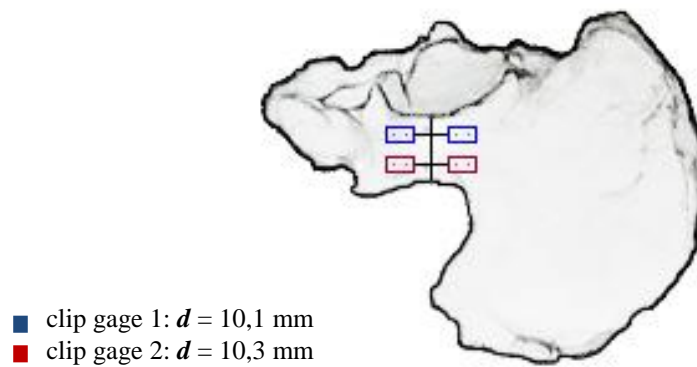
Σχήμα 15.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 16-αριστερό

Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate (stoppa), simple plate

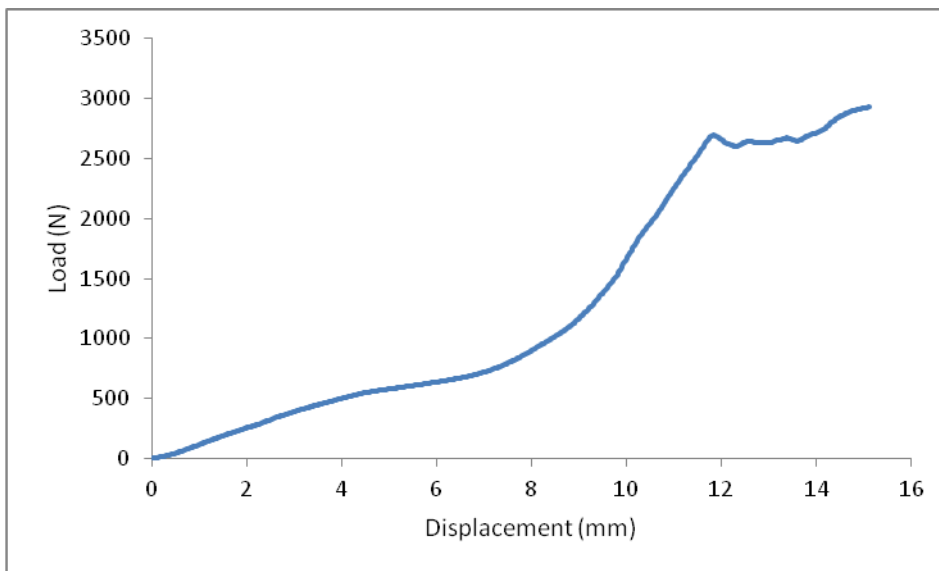


Σχήμα 16.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.

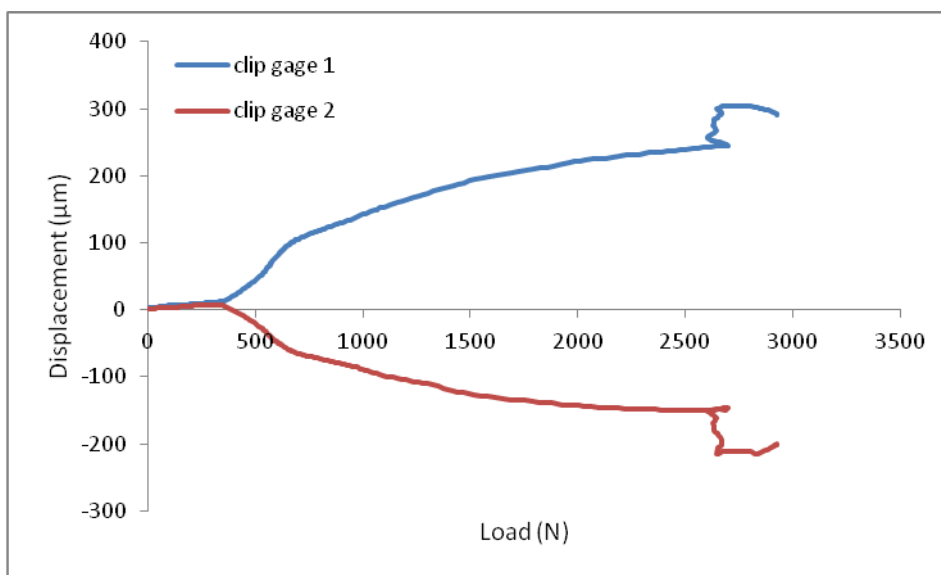


Σχήμα 16.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

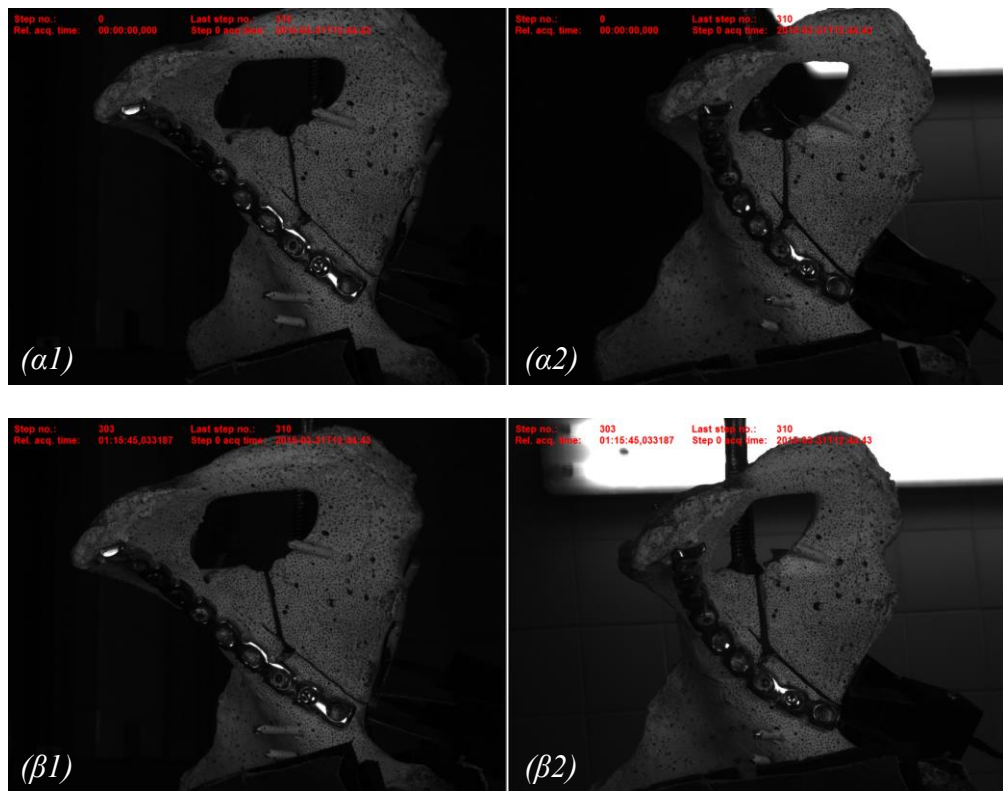
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



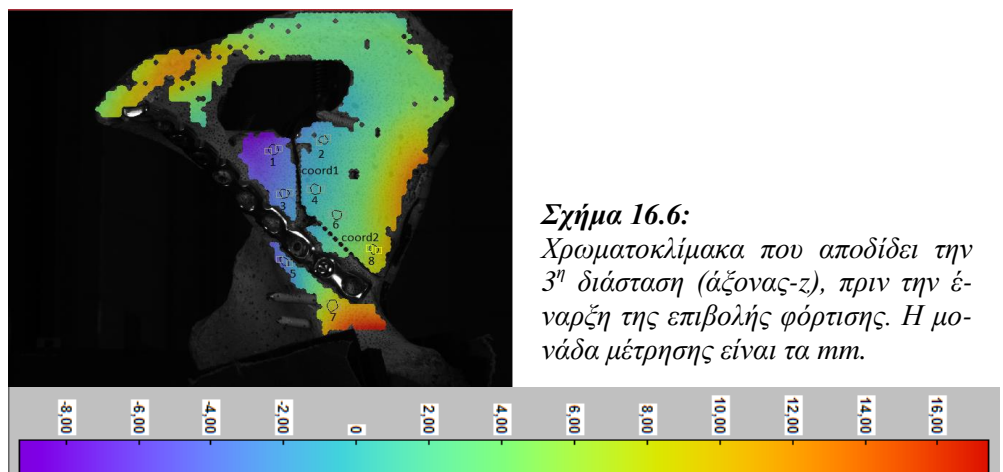
Σχήμα 16.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 16.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 16.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

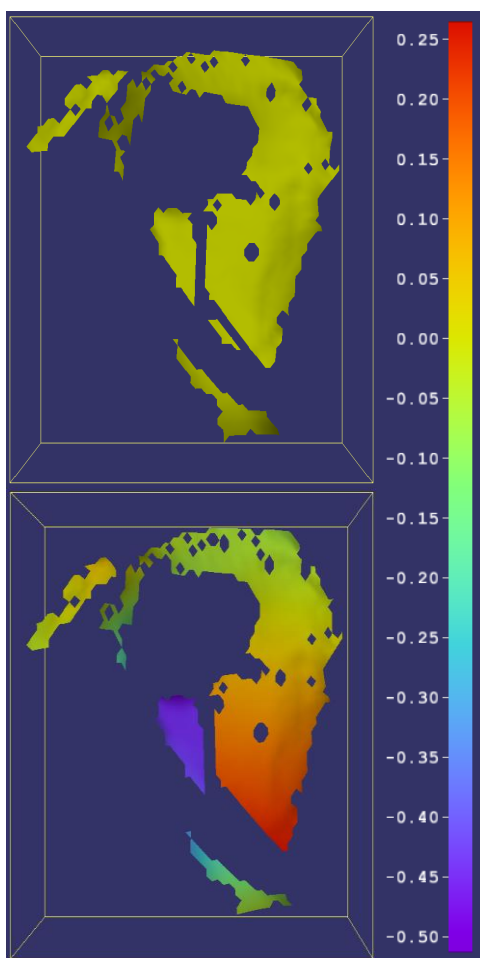


Σχήμα 16.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.

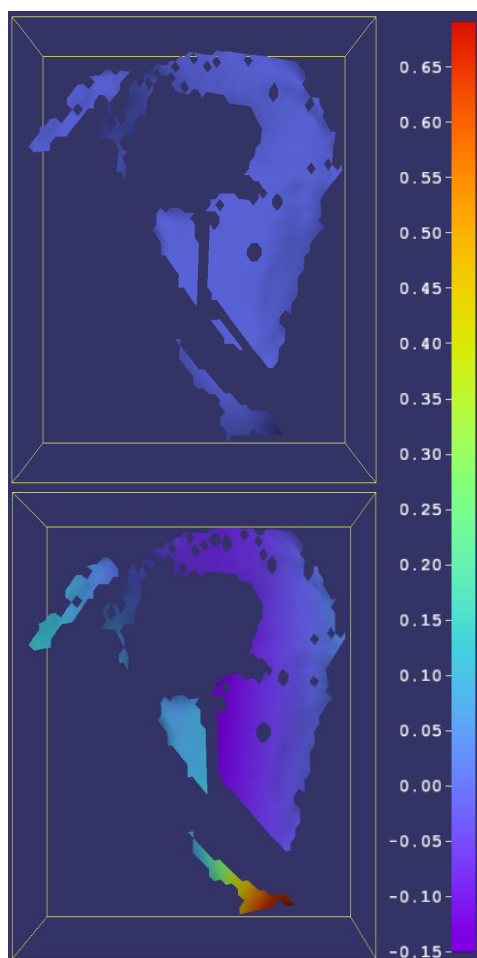


Σχήμα 16.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

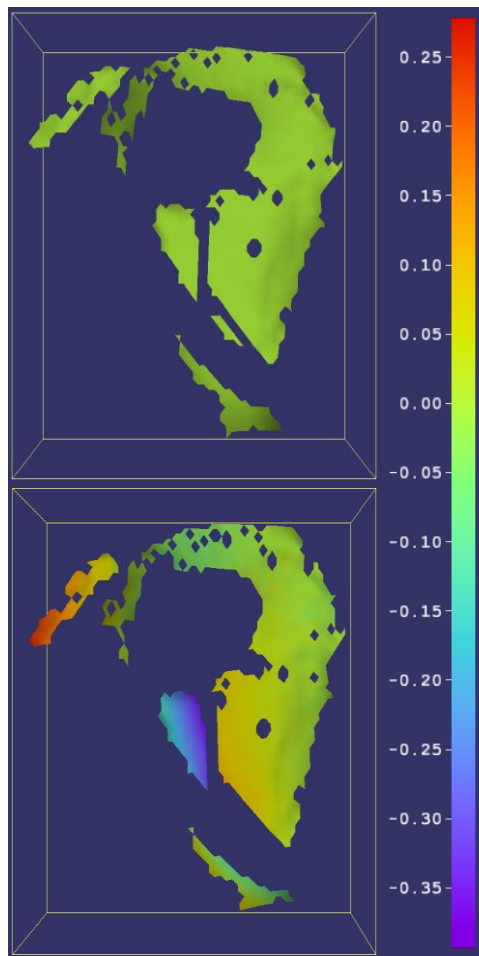
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλων με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



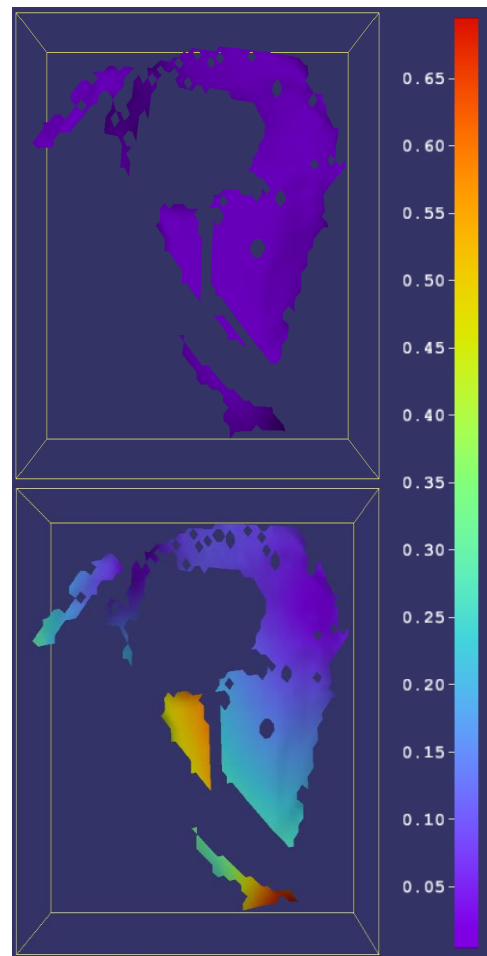
Σχήμα 16.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Σχήμα 16.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

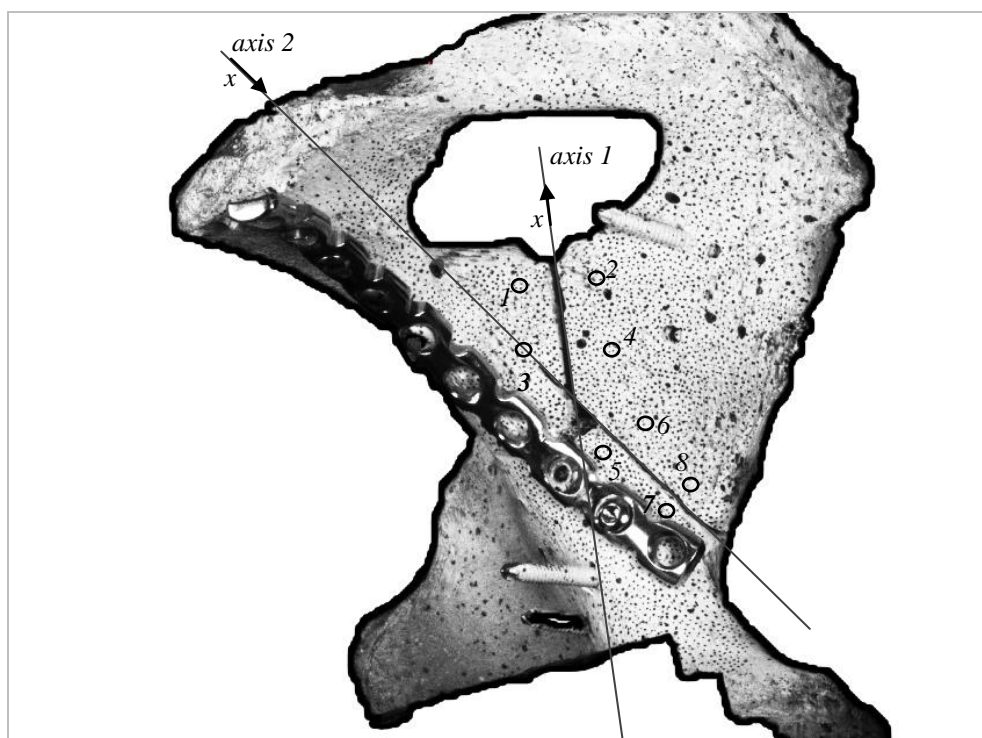


Σχήμα 16.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 16.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

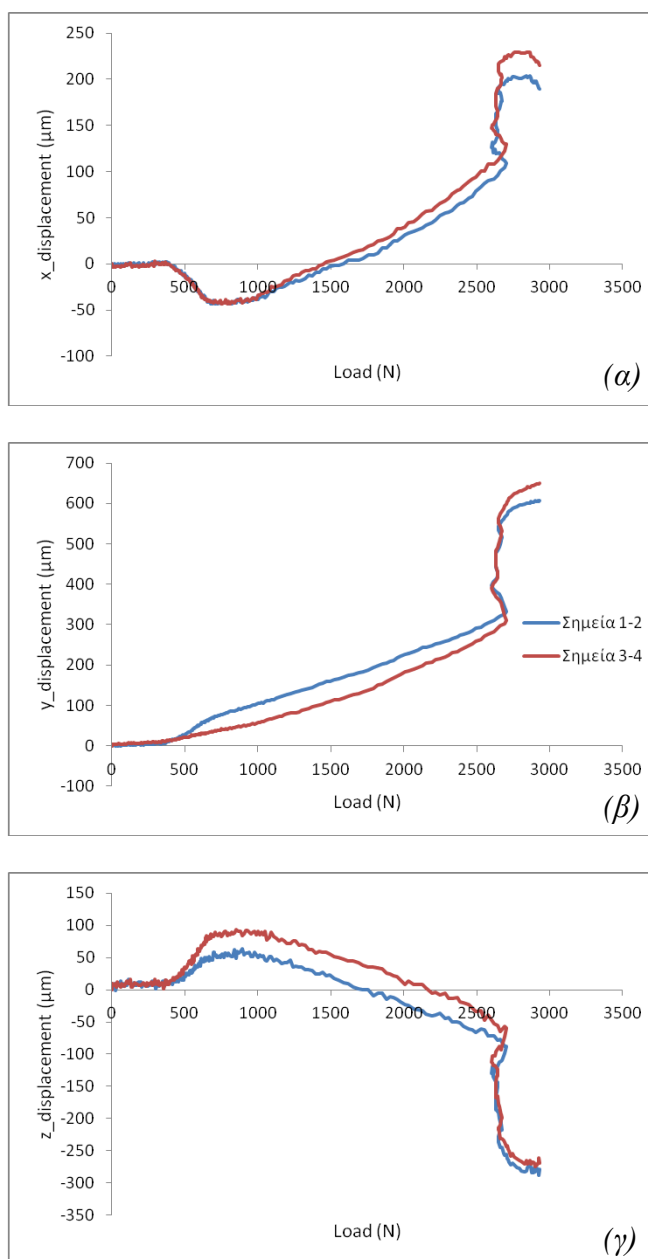


Σχήμα 16.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8.

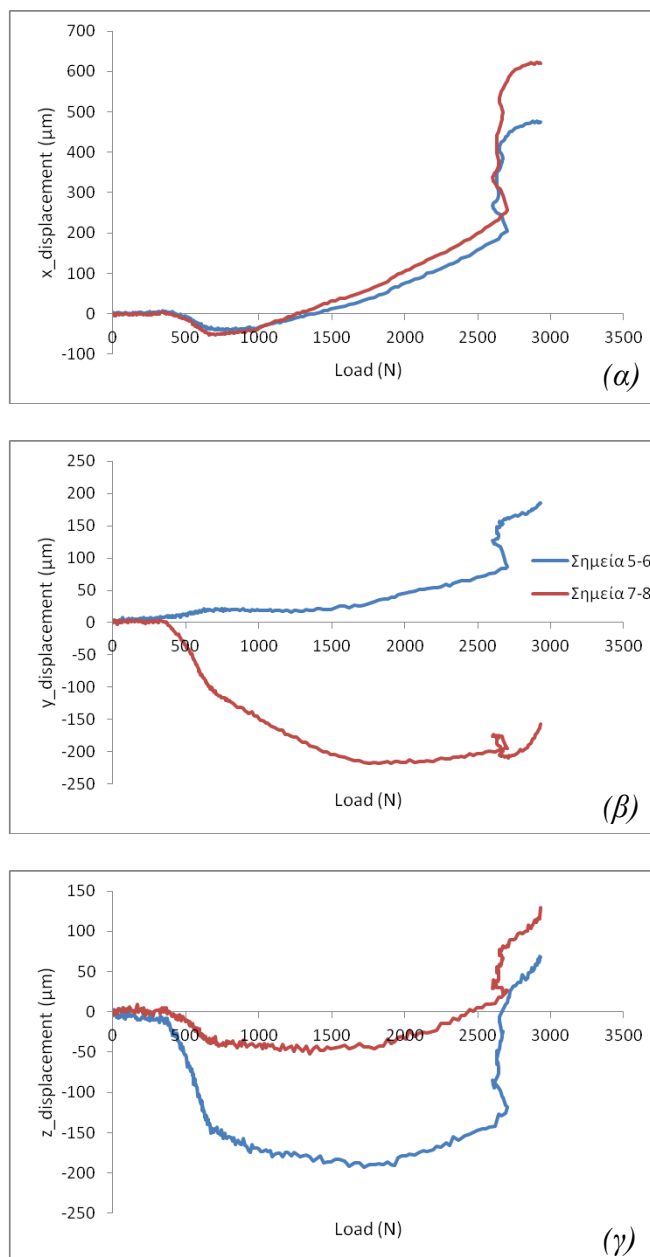
Κάταγμα 1



Σχήμα 16.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλων με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

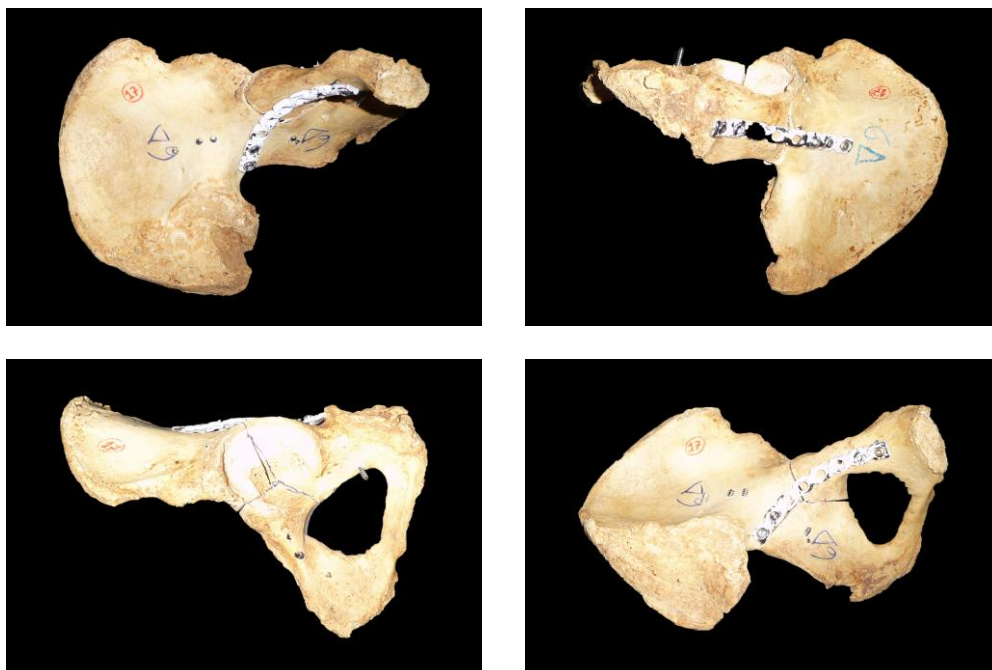
Κάταγμα 2



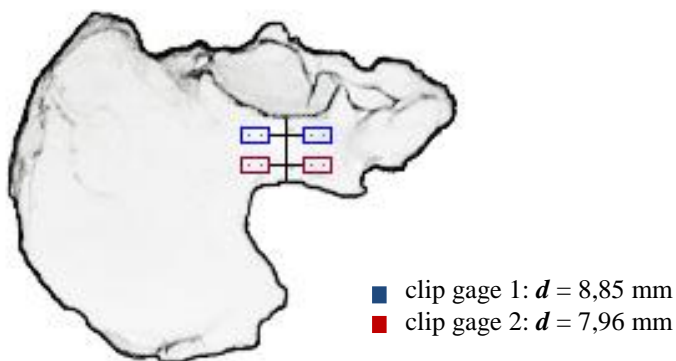
Σχήμα 16.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 17-δεξί

Ομάδα οστεοσύνθεσης: simple plate (Stoppa), simple plate

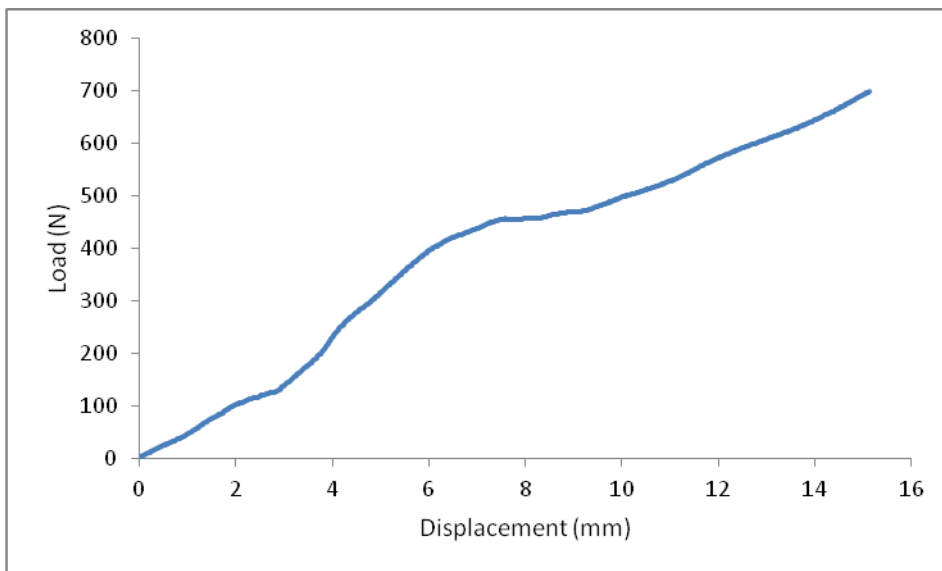


Σχήμα 17.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.

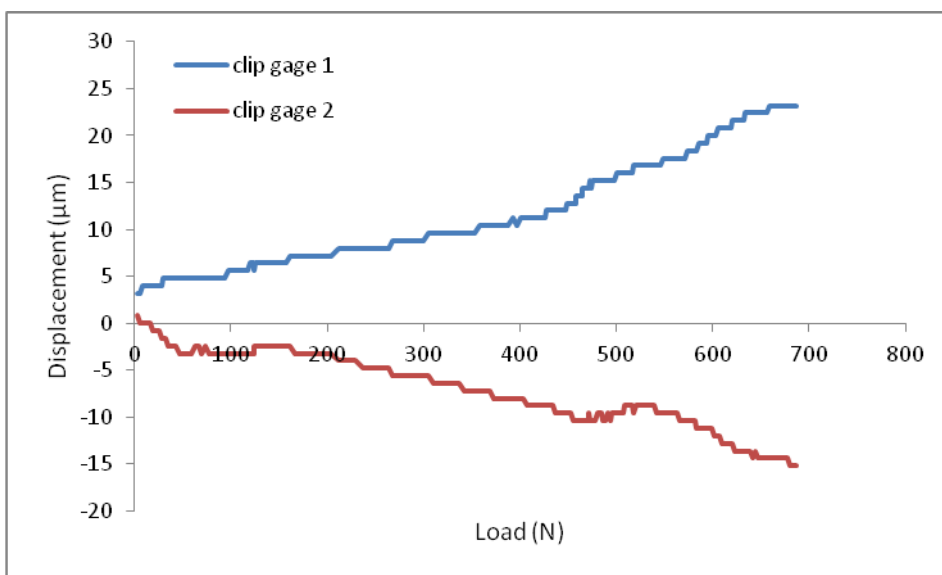


Σχήμα 17.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

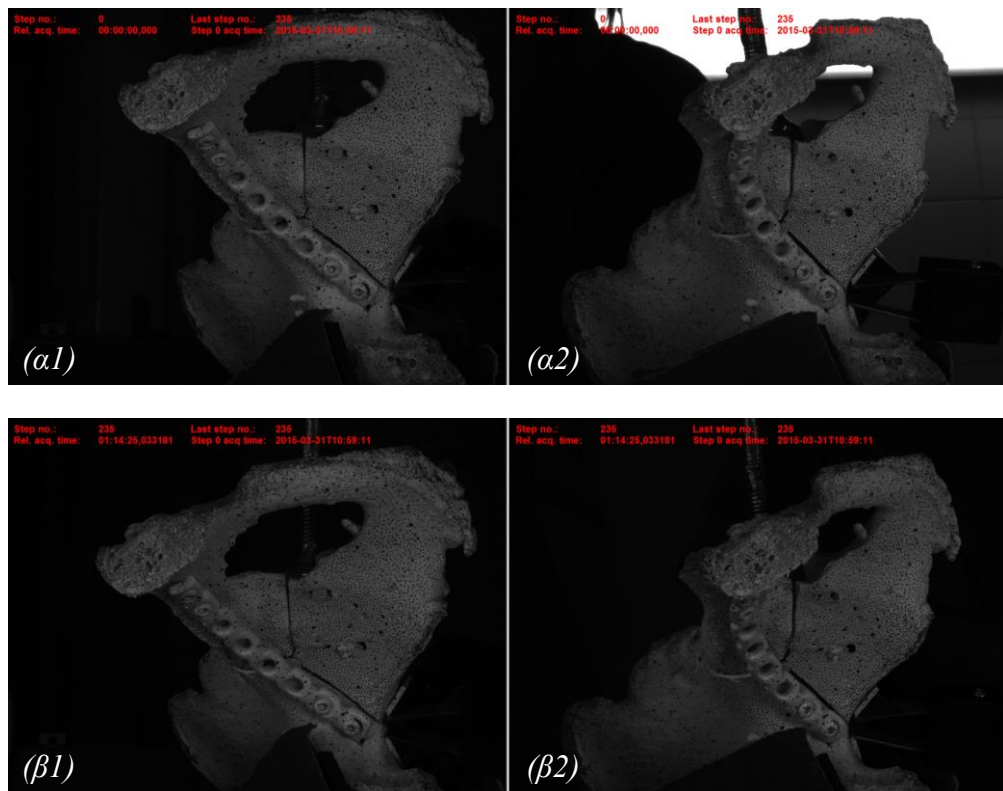
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



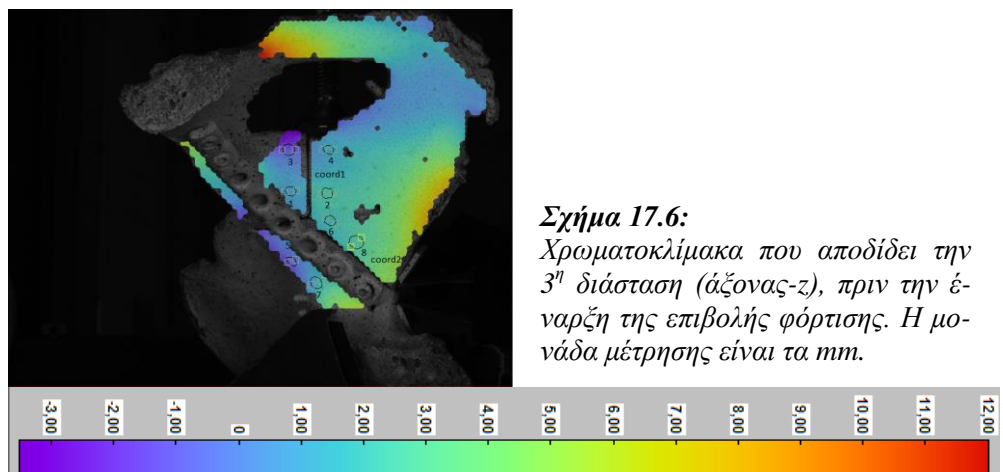
Σχήμα 17.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 17.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 17.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

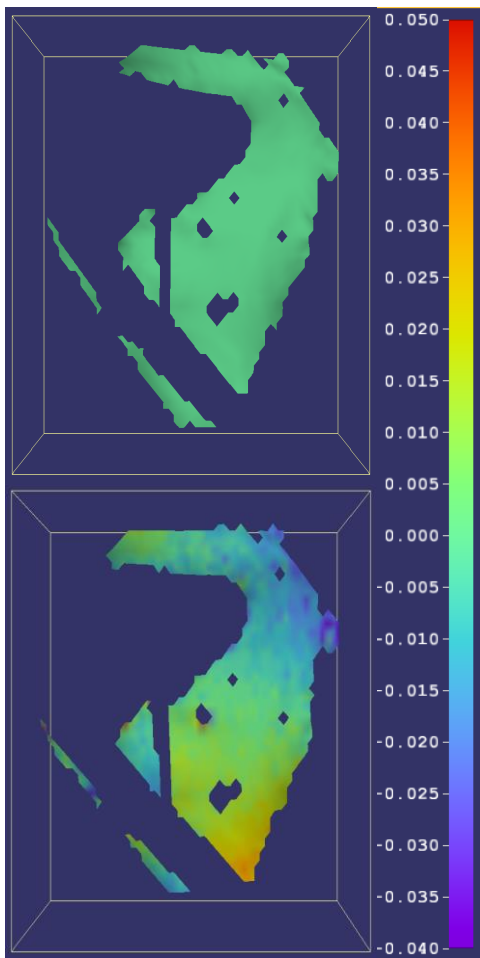


Σχήμα 17.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.

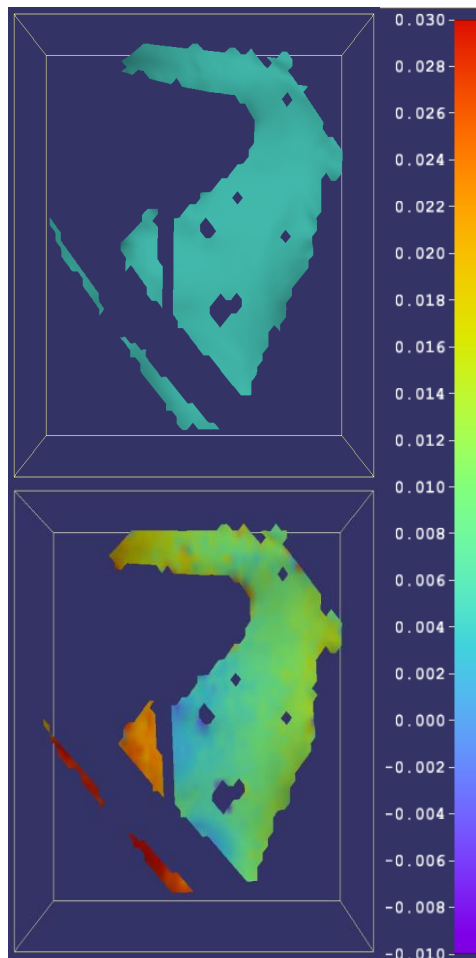


Σχήμα 17.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

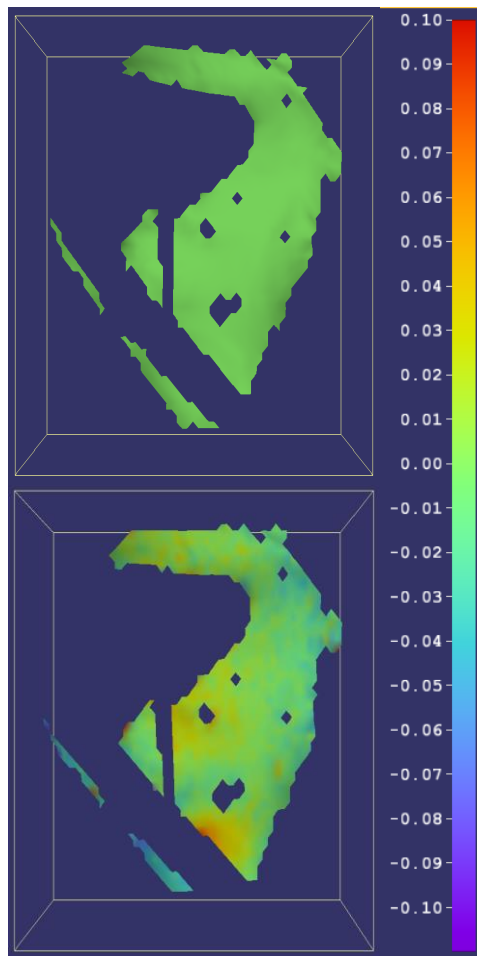
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



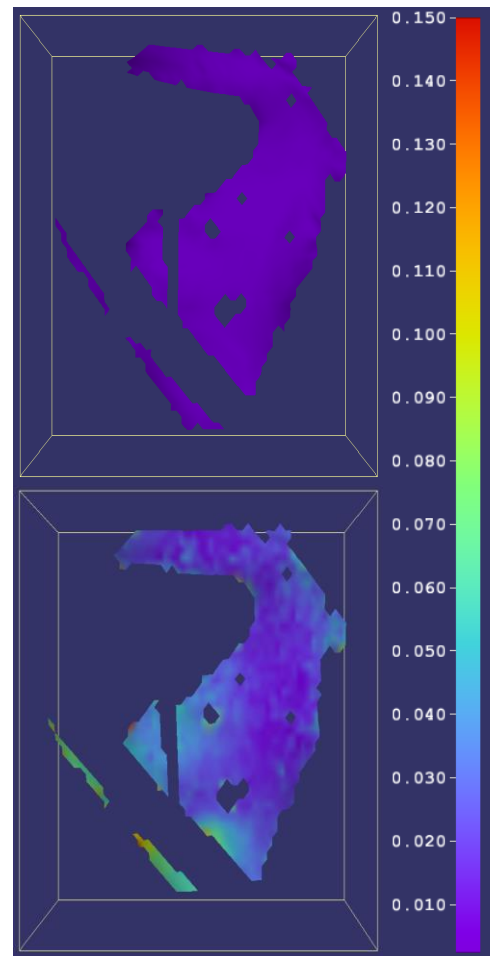
Σχήμα 17.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-x. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



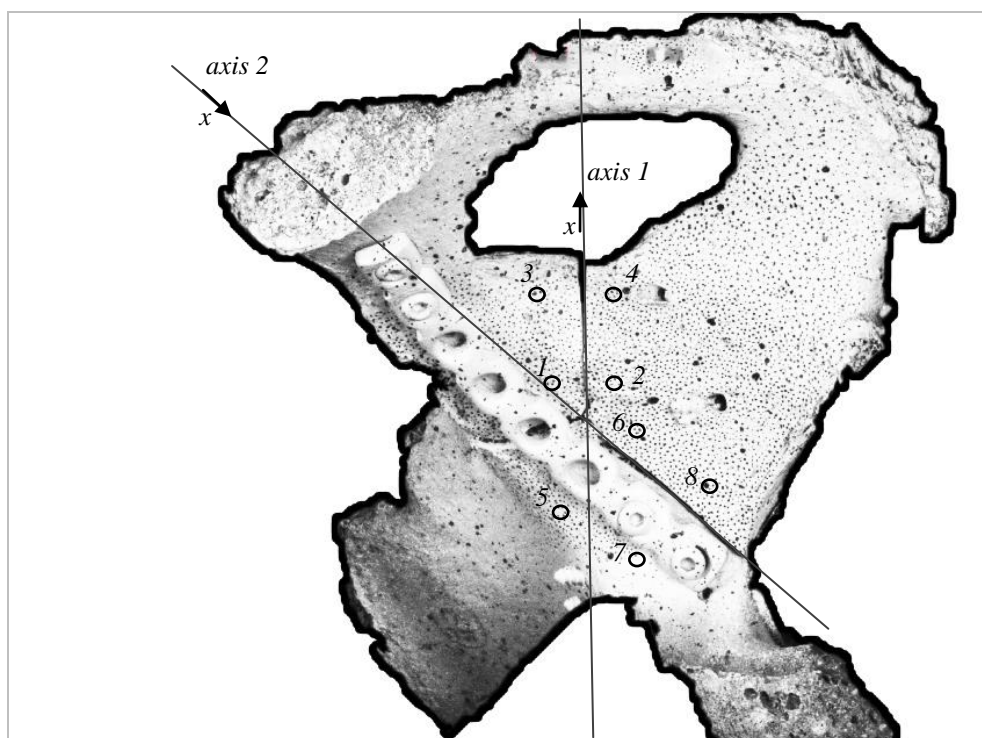
Σχήμα 17.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-y. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 17.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 17.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

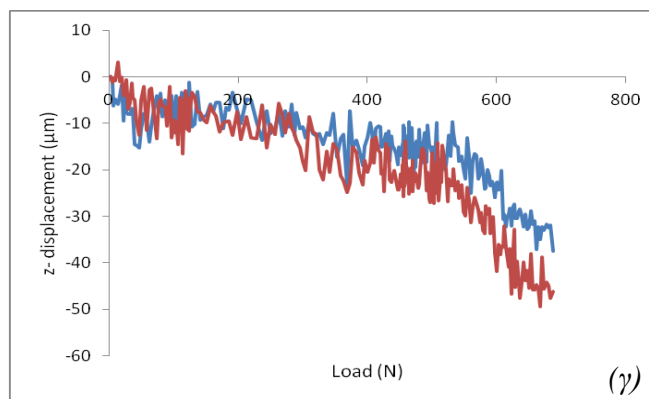
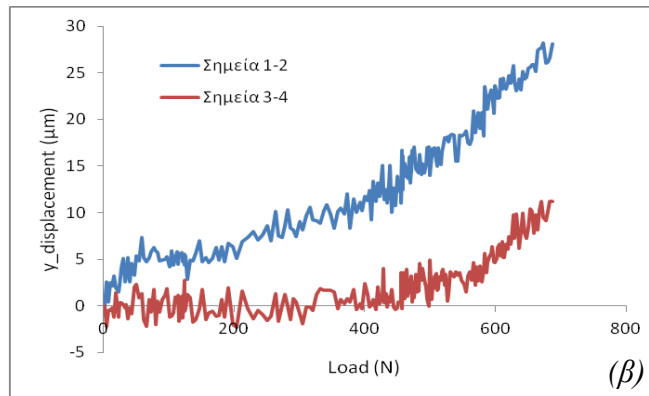
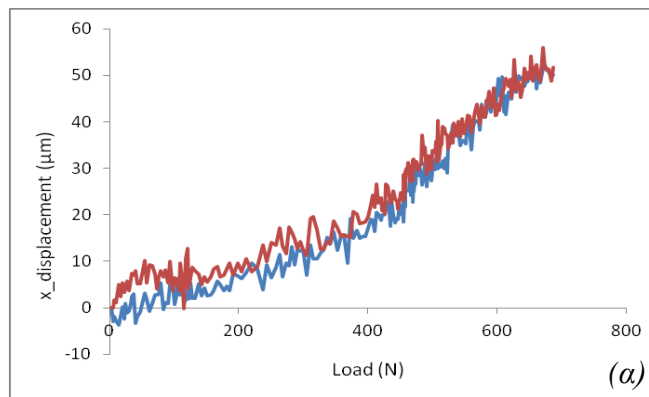


Σχήμα 17.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8.

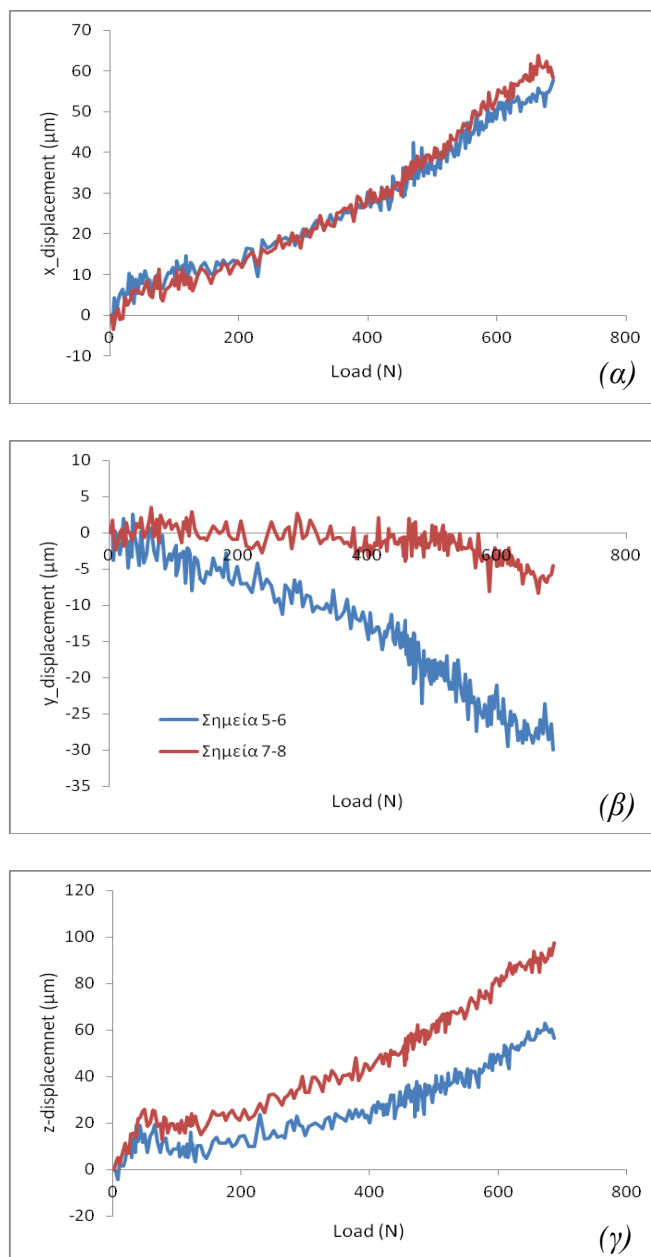
Κάταγμα 1



Σχήμα 17.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

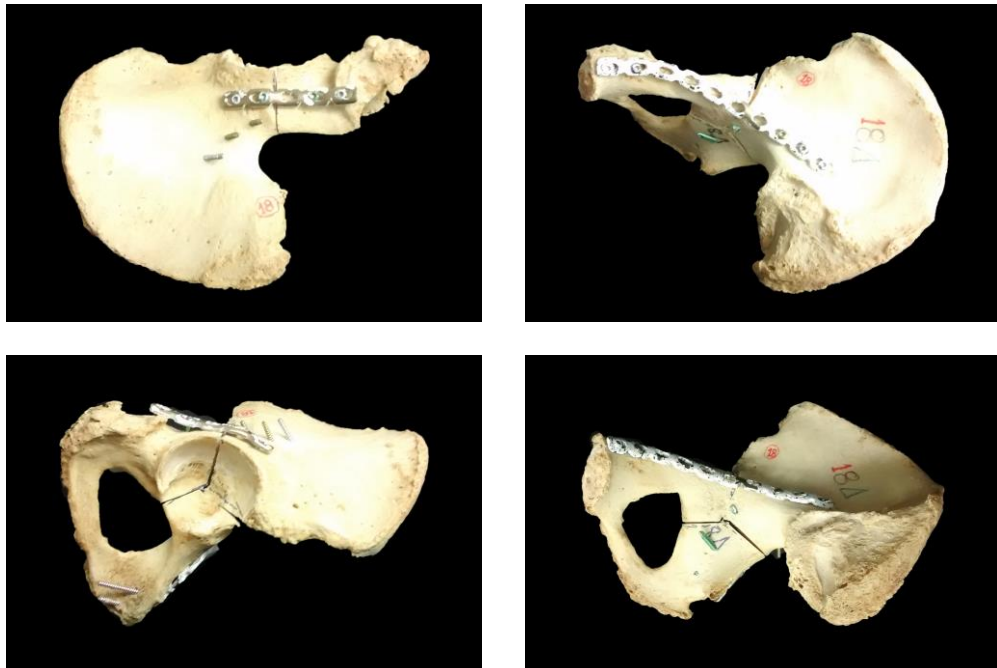
Κάταγμα 2



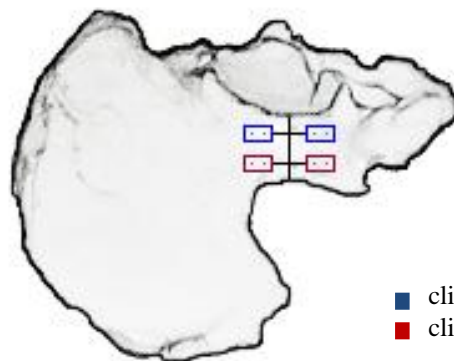
Σχήμα 17.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κωδικός δοκιμίου: 18-δεξί

Ομάδα οστεοσύνθεσης: locking plate, simple plate



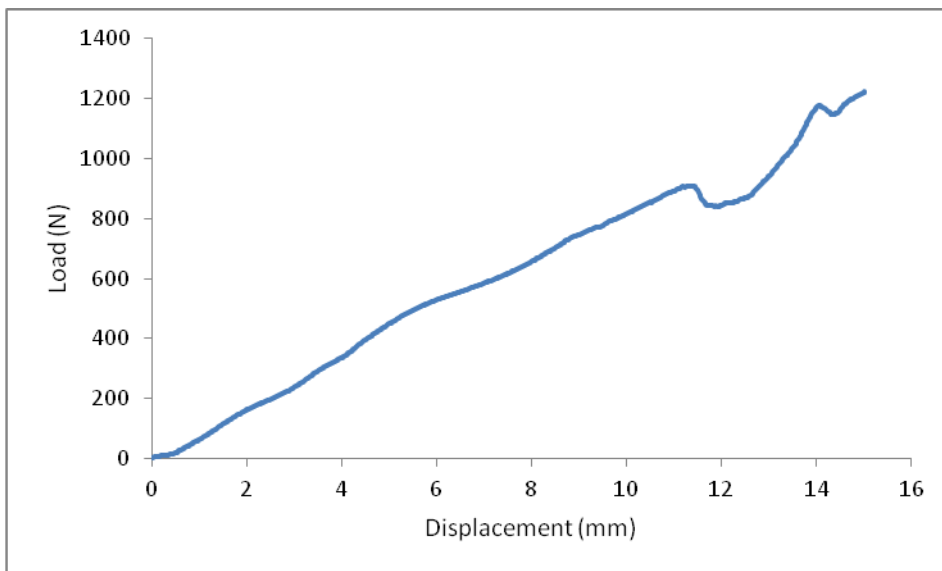
Σχήμα 18.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



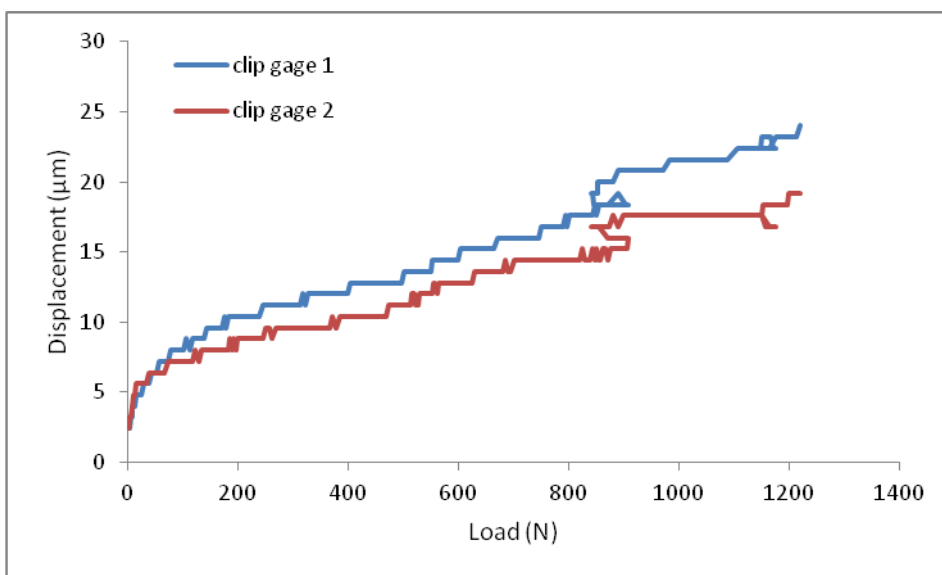
■ clip gage 1: $d = 9,82$ mm
■ clip gage 2: $d = 7,80$ mm

Σχήμα 18.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

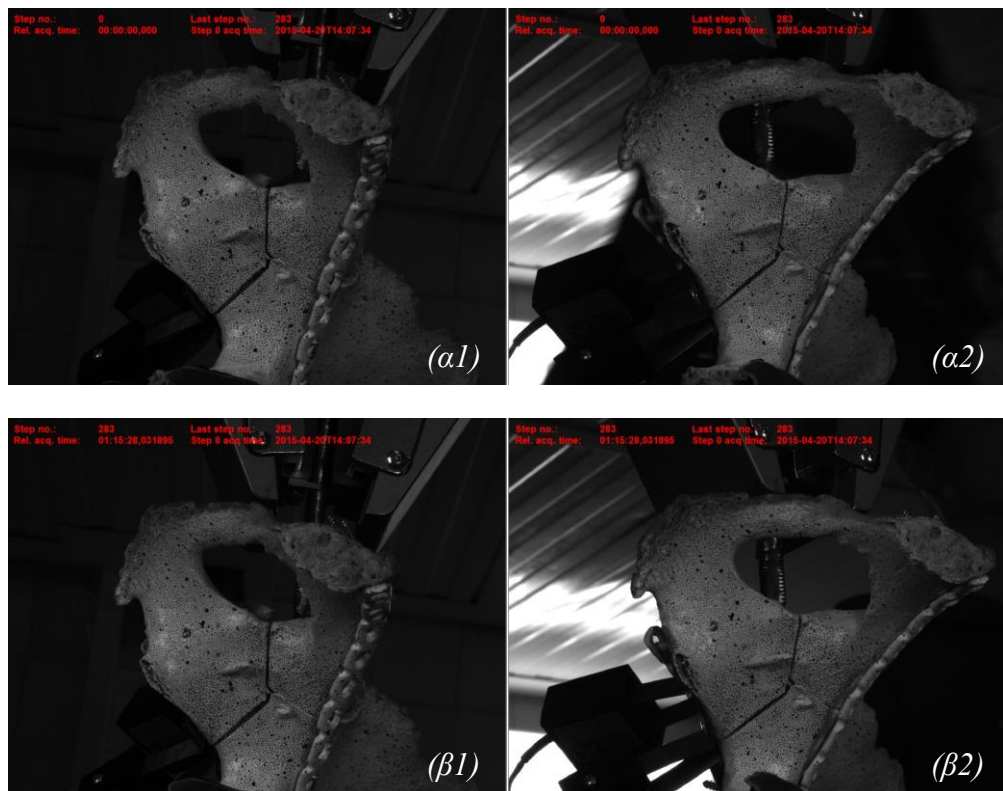
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



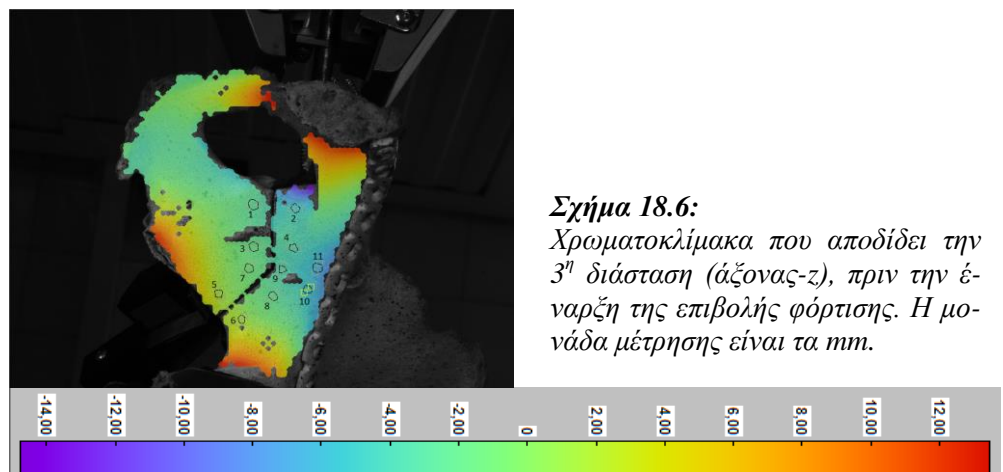
Σχήμα 18.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.



Σχήμα 18.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 18.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

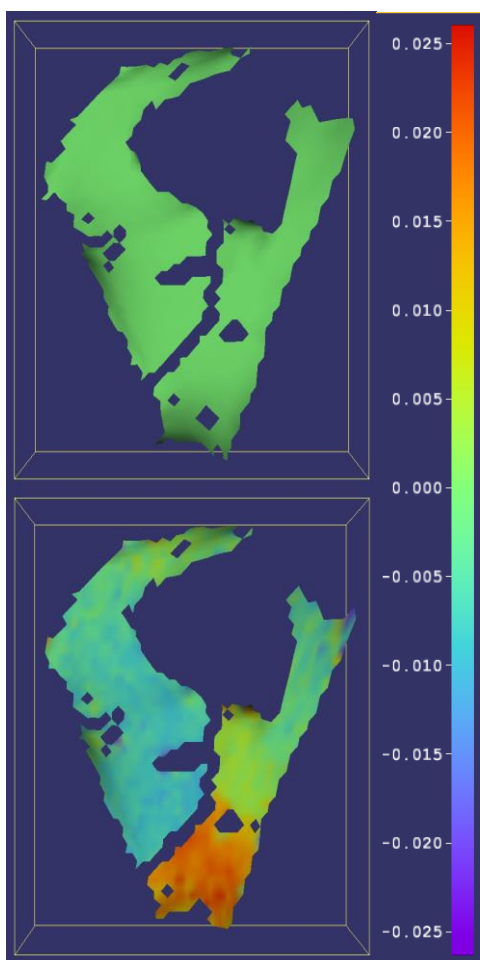


Σχήμα 18.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.

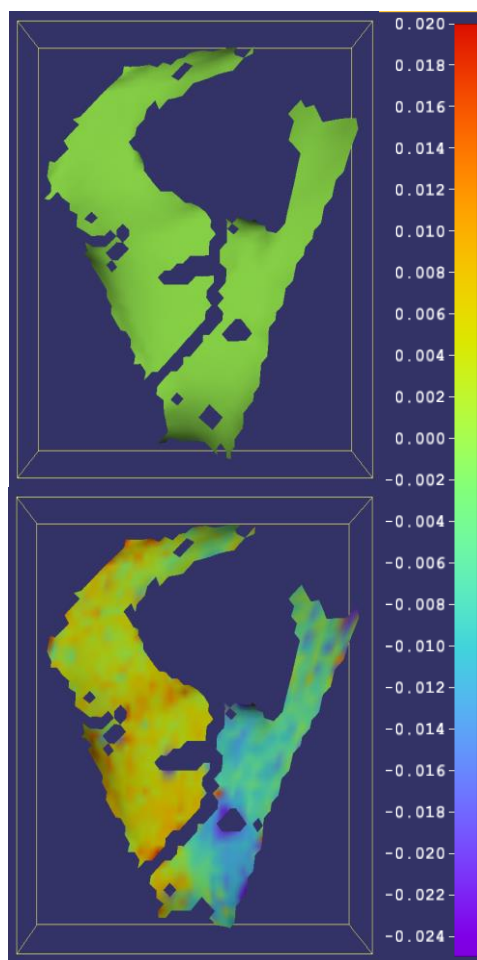


Σχήμα 18.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

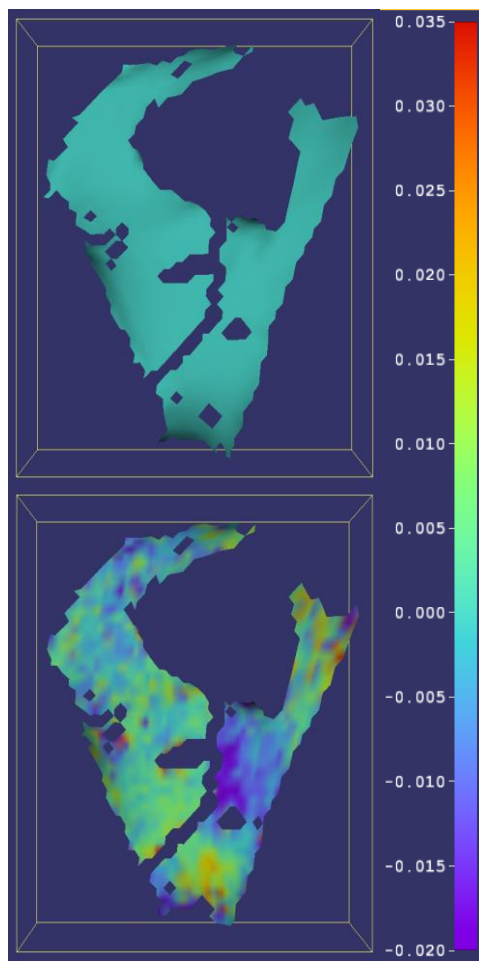
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



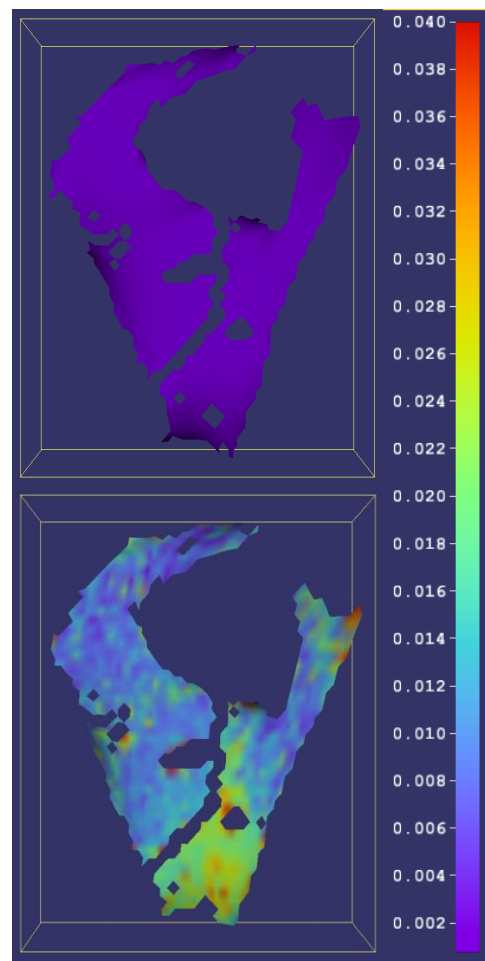
Σχήμα 18.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .



Σχήμα 18.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

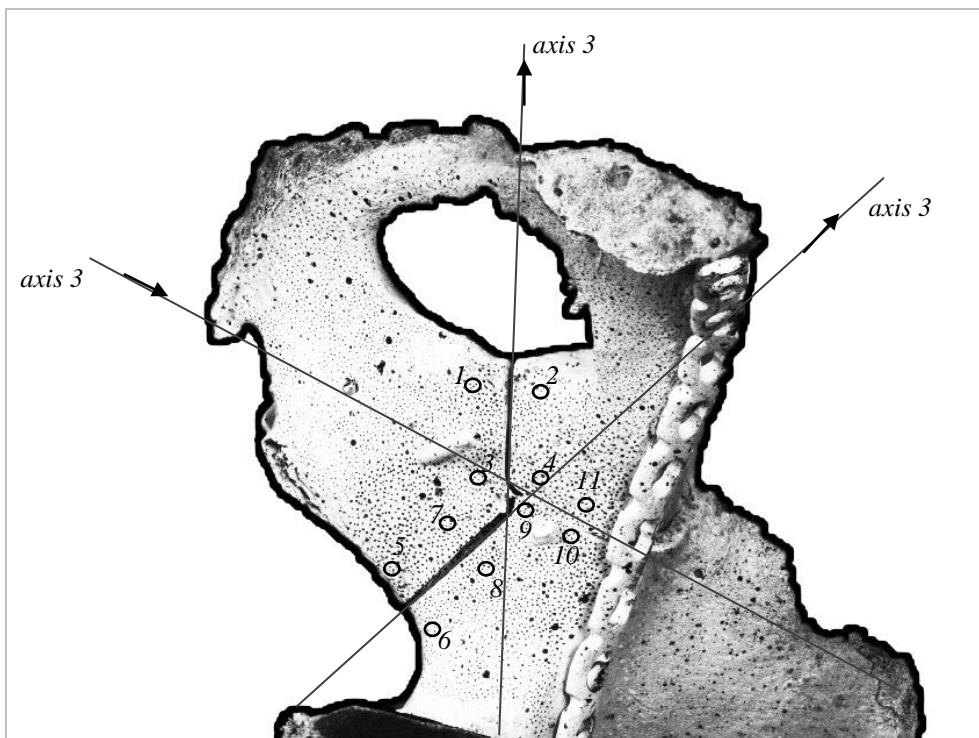


Σχήμα 18.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 18.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

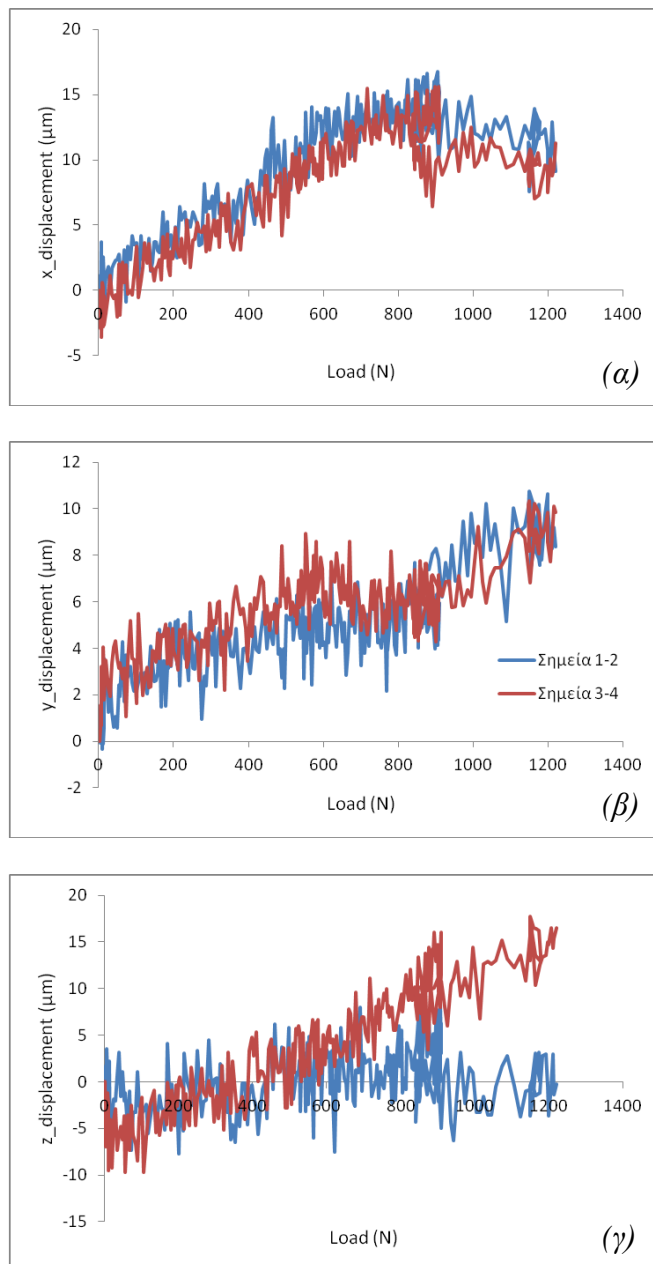


Σχήμα 18.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

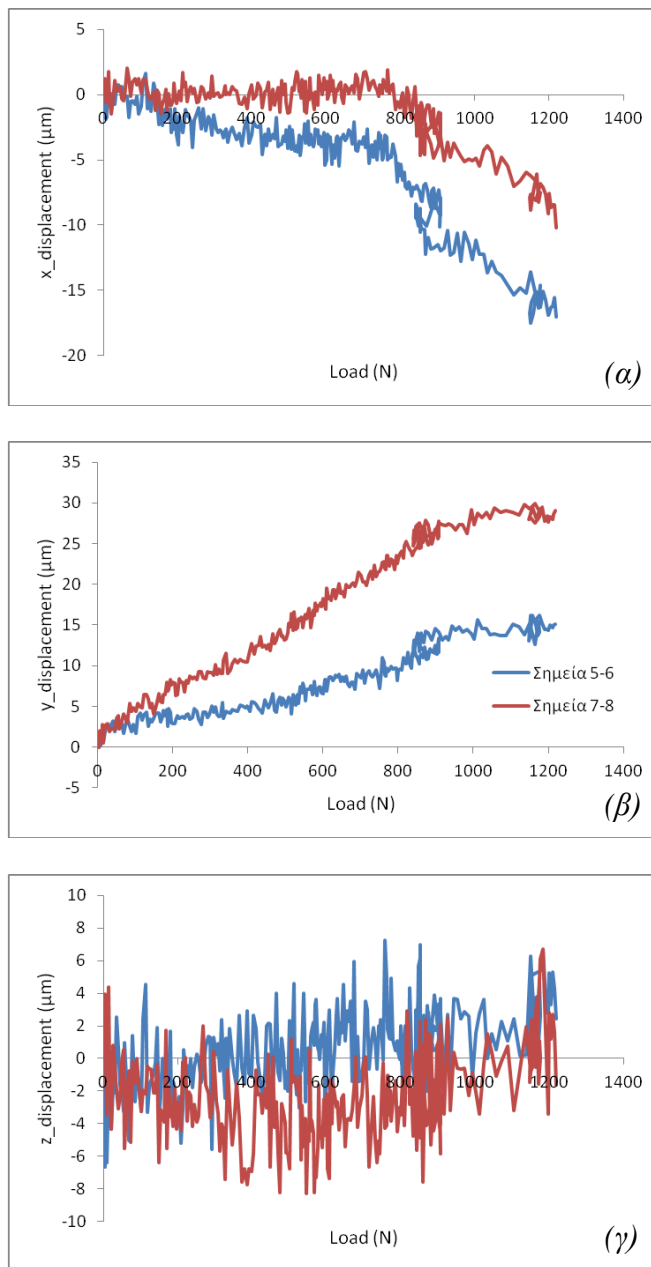
- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 4-9 και 10-11.

Κάταγμα 1



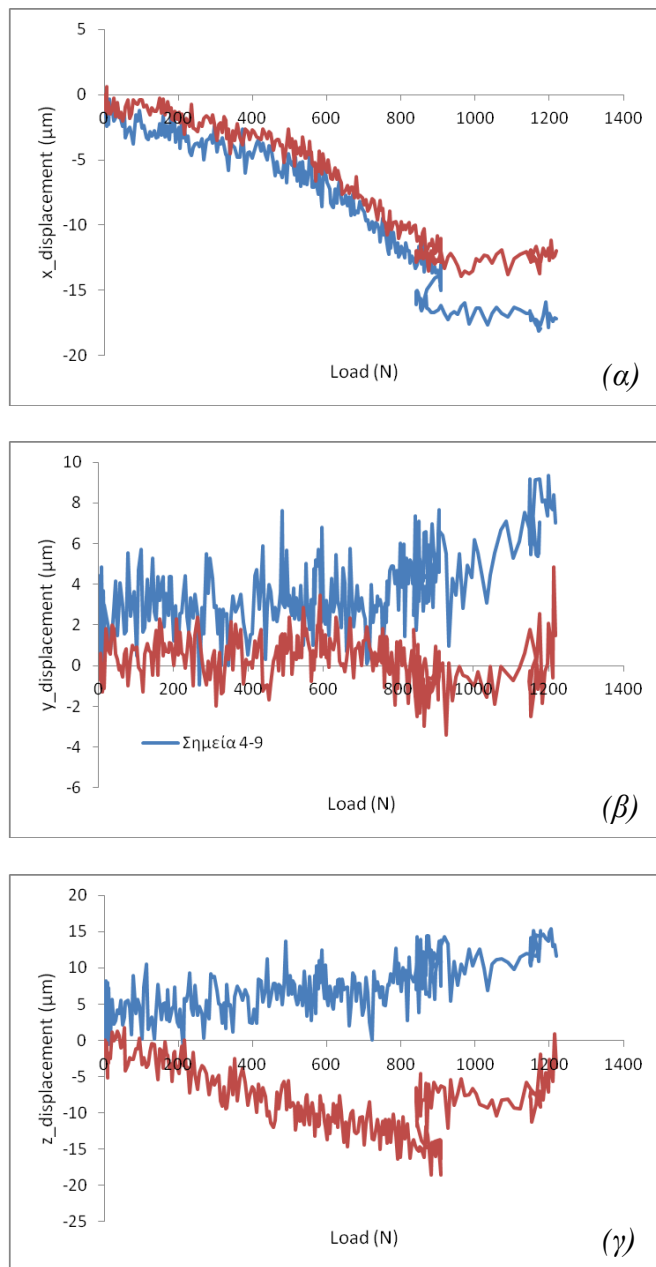
Σχήμα 18.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 2



Σχήμα 18.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 3

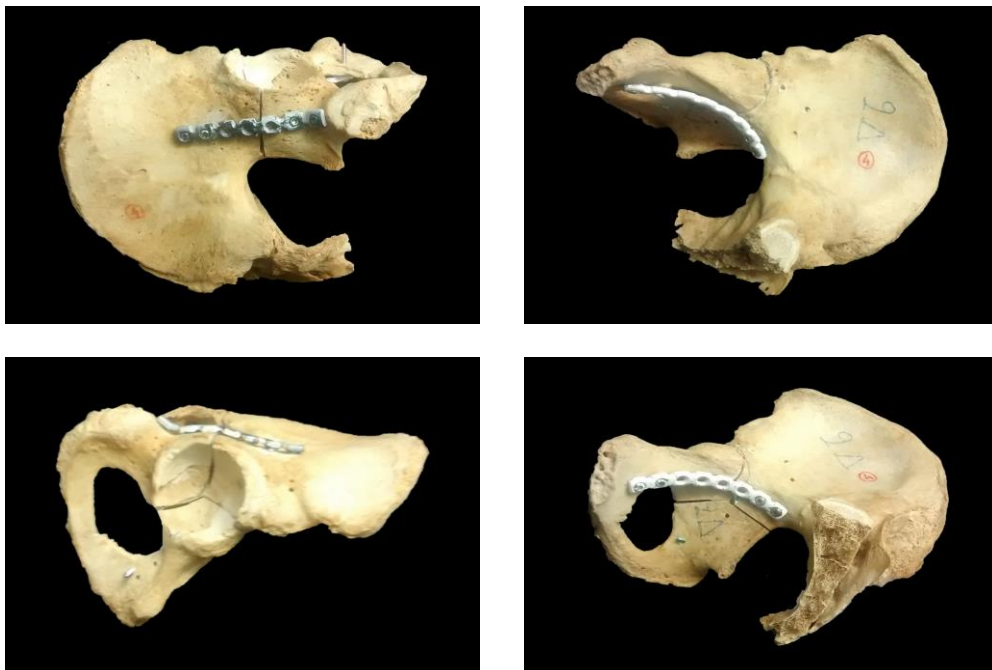


Σχήμα 18.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

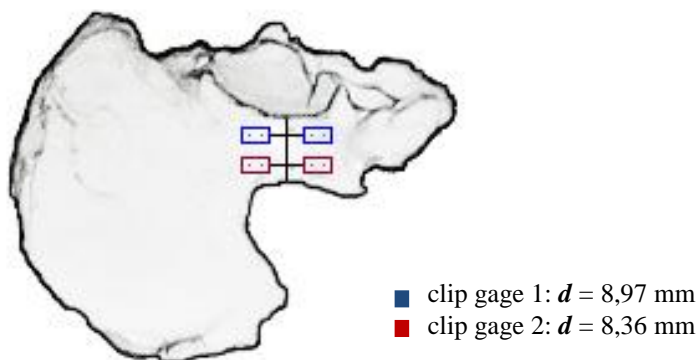
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κωδικός δοκιμίου: 19-δεξί

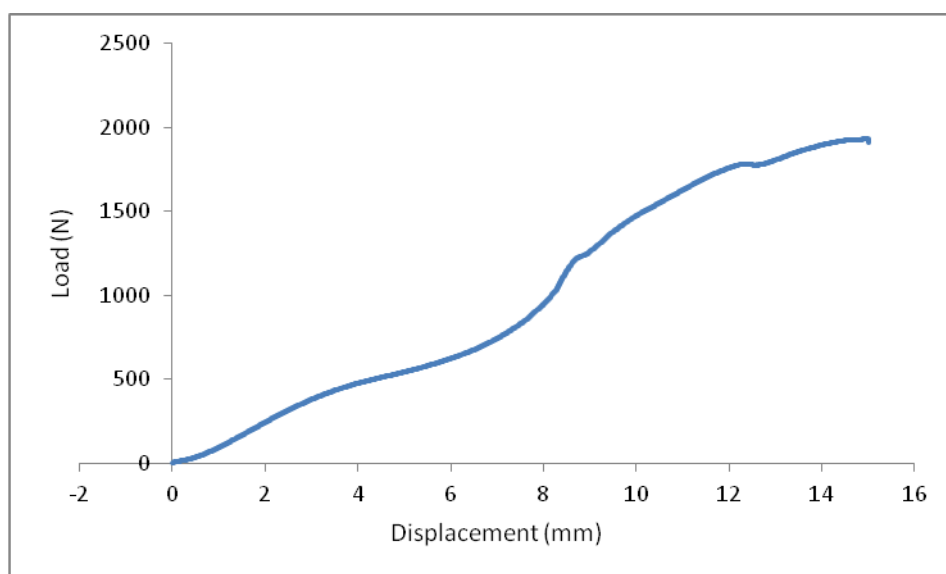
Ομάδα οστεοσύνθεσης: locking plate, simple plate



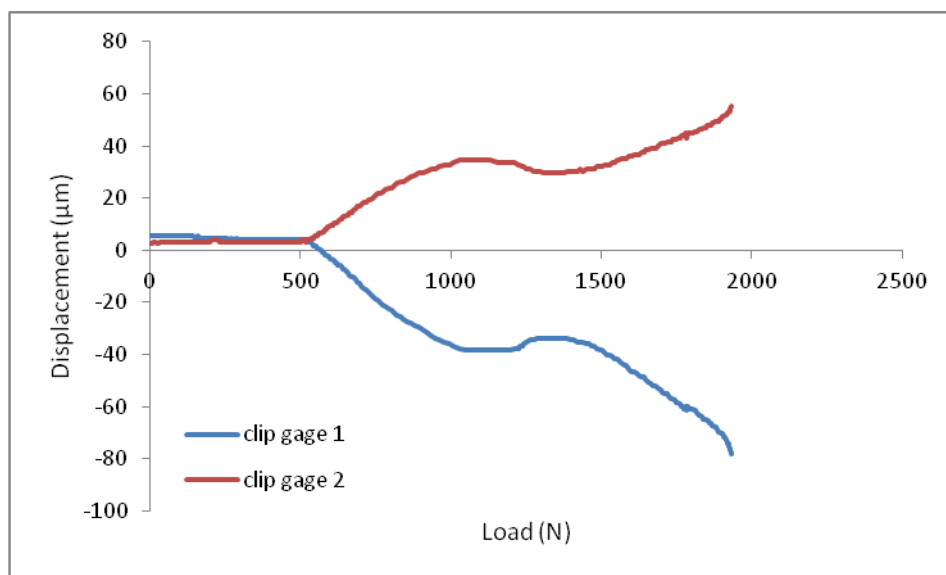
Σχήμα 19.1: Διάφορες όψεις του δοκιμίου πριν τη φόρτιση.



Σχήμα 19.2: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου που υποδεικνύει τη σχετική θέση των «μη-κυνσιομέτρων» (clip gauges).

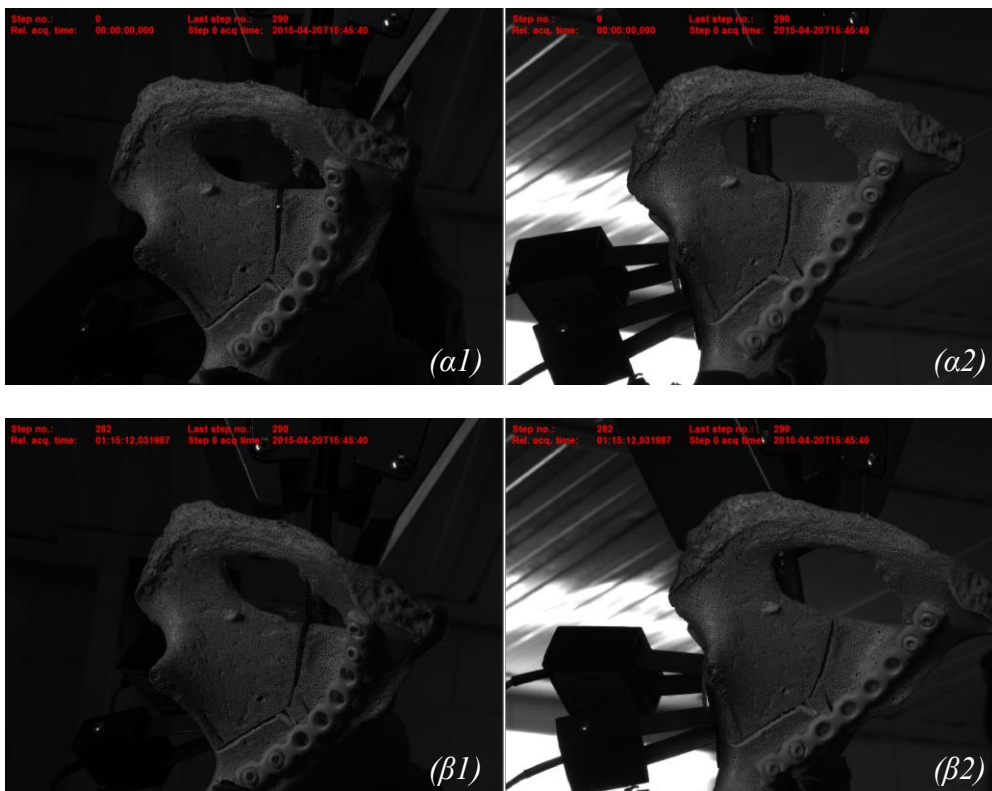


Σχήμα 19.3: Γραφική παράσταση της δύναμης συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

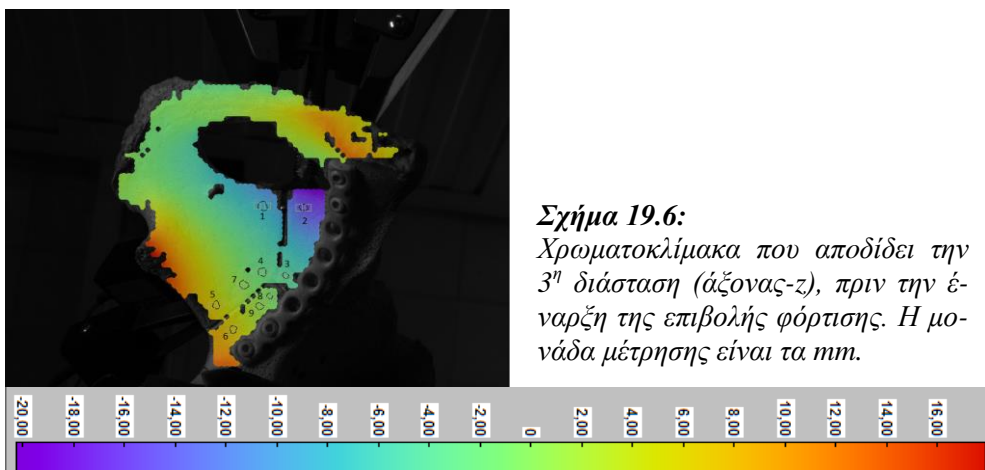


Σχήμα 19.4: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος του Σχ. 19.2 (στα οποία έχουν προσαρμοστεί τα clip gauges) συναρτήσει του φορτίου.

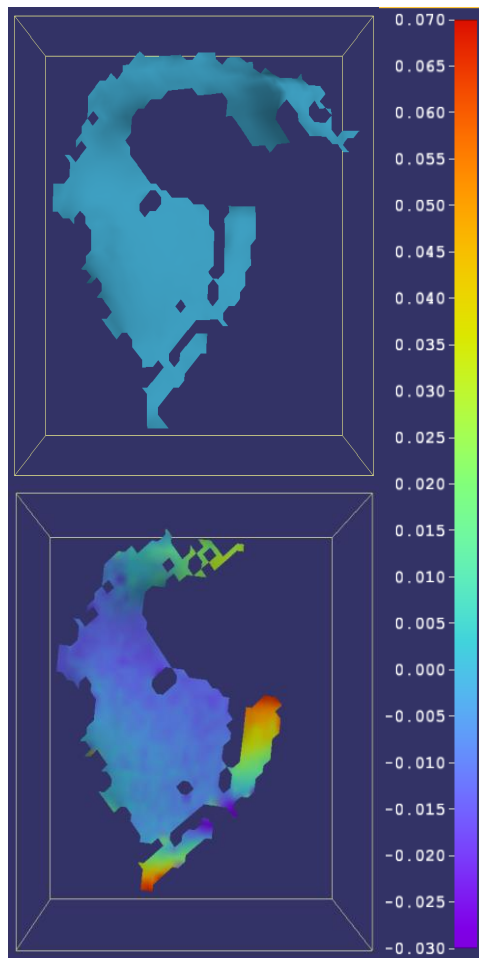
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



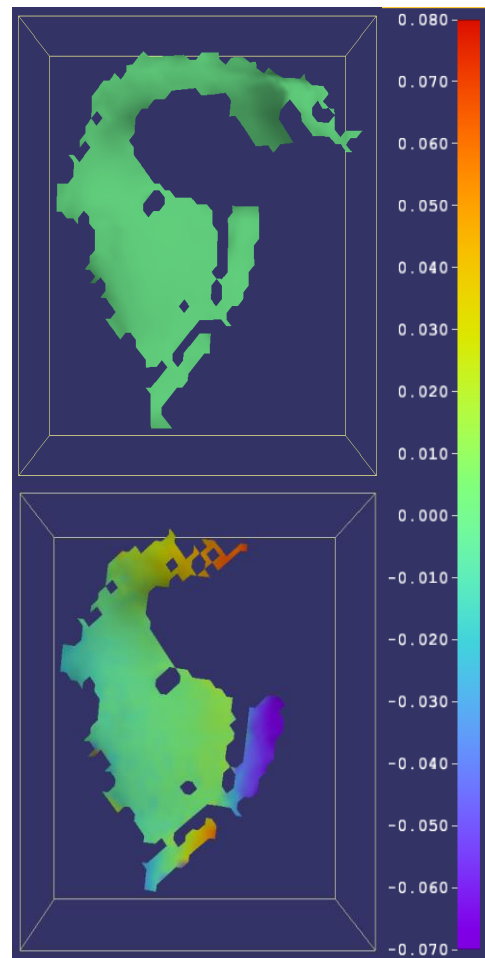
Σχήμα 19.5: Φωτογραφίες των δύο καμερών του συστήματος D.I.C. (α) πριν και (β) μετά το τέλος της δοκιμής.



Σχήμα 19.6:
Χρωματοκλίμακα που αποδίδει την 3^η διάσταση (άξονας-z), πριν την έναρξη της επιβολής φόρτισης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

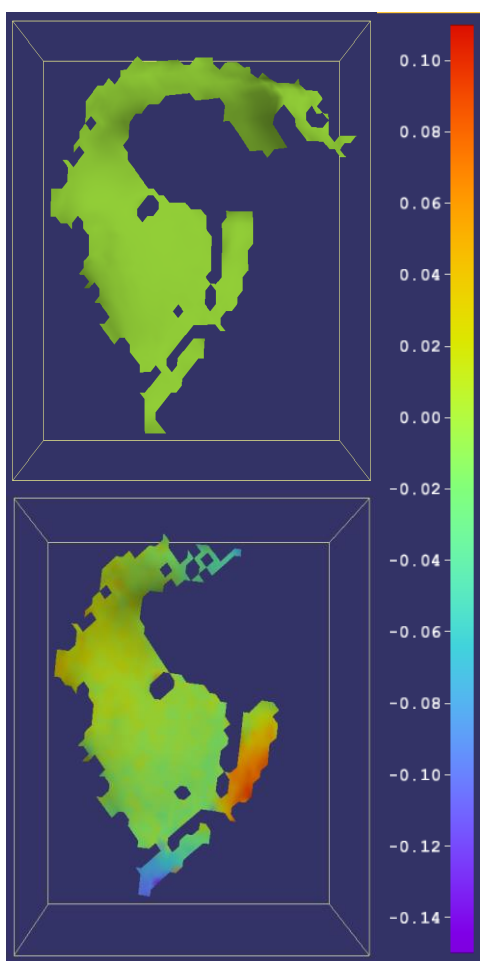


Σχήμα 19.7: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- x . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

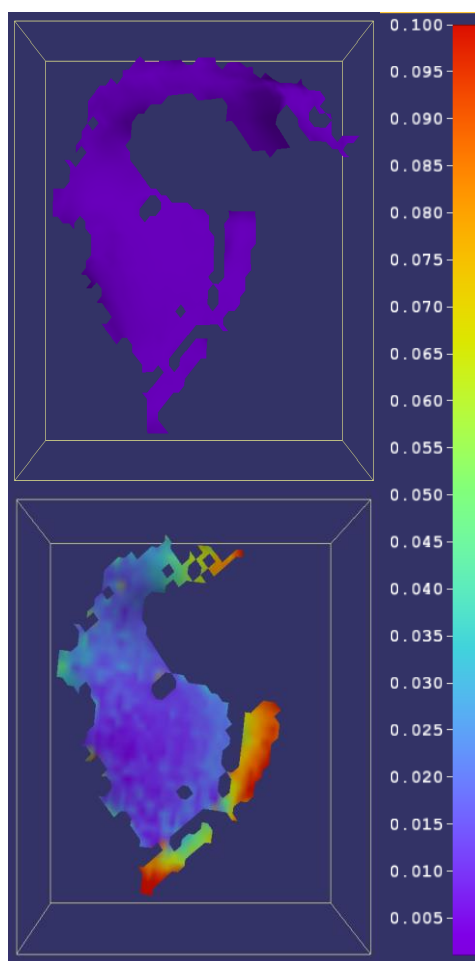


Σχήμα 19.8: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα- y . Η κλίμακα αναφέρεται σε mm .

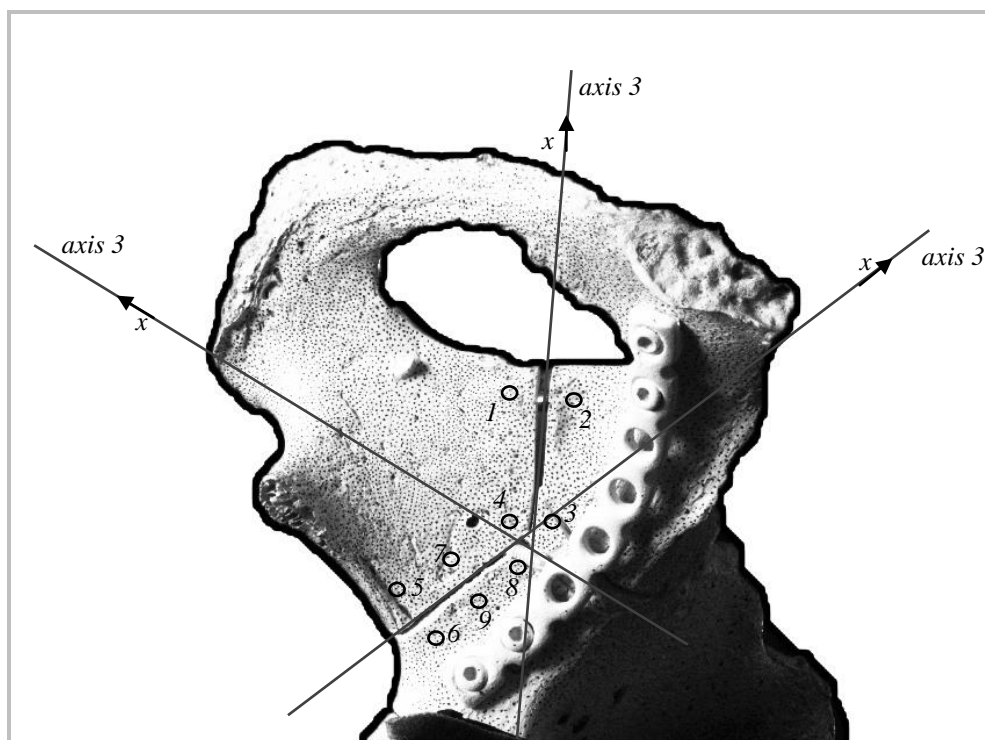
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλων με με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)



Σχήμα 19.9: Αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



Σχήμα 19.10: Ολικό αρχικό και τελικό πεδίο μετατοπίσεων. Η κλίμακα αναφέρεται σε mm.



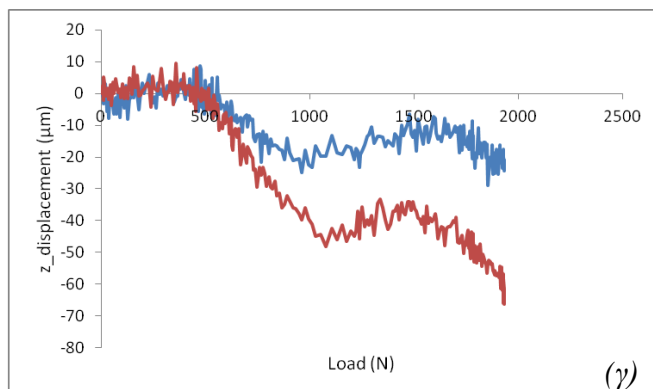
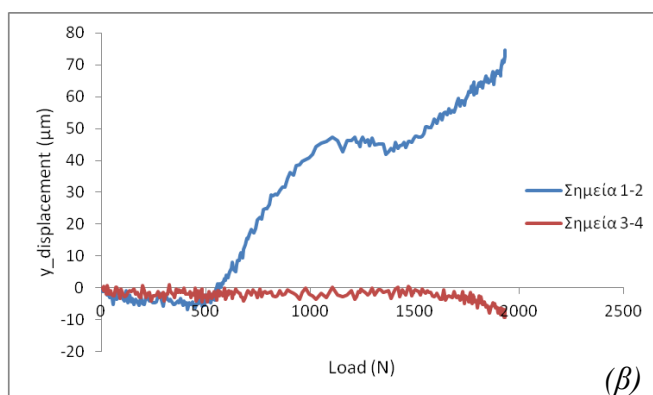
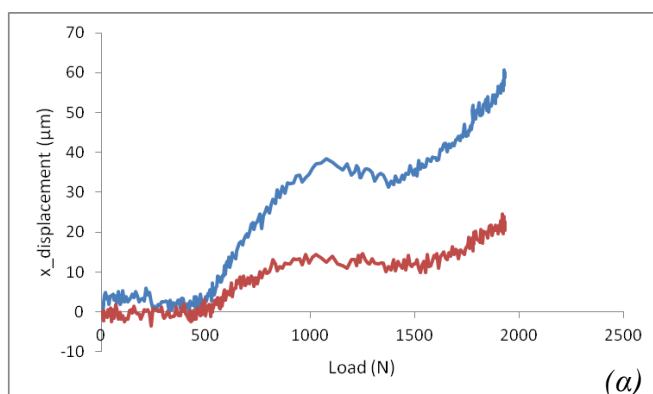
Σχήμα 19.11: Σκαρίφημα του δοκιμίου που υποδεικνύει το εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων -που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του κάθε κατάγματος- και τις σχετικές θέσεις των, εκ των υστέρων τοποθετημένων, μετρητών (σημεία).

Για τη μελέτη των καταγμάτων επιλέχθηκαν τα κάτωθι σημεία:

- ✓ Κάταγμα 1 (axis 1): σημεία 1-2 και 3-4,
- ✓ Κάταγμα 2 (axis 2): σημεία 5-6 και 7-8,
- ✓ Κάταγμα 3 (axis 3): σημεία 3-8.

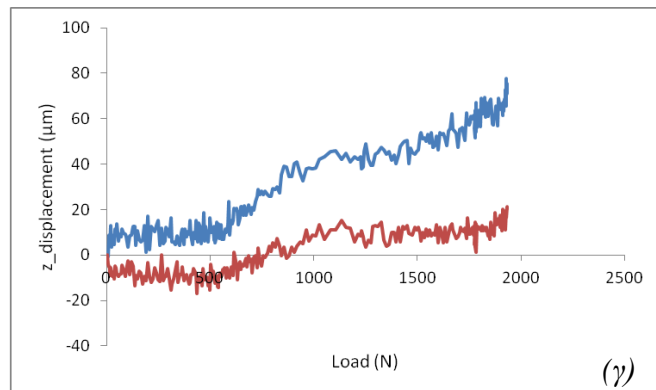
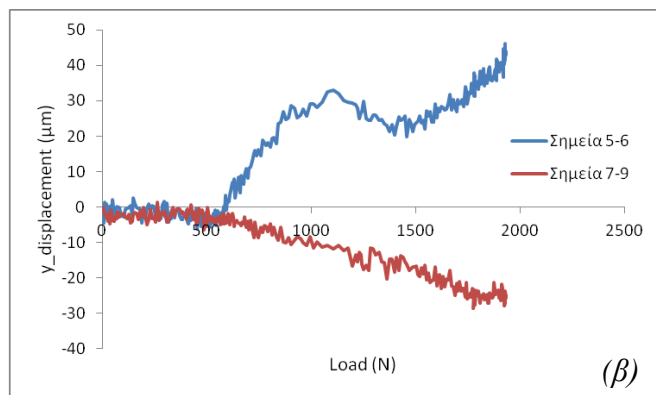
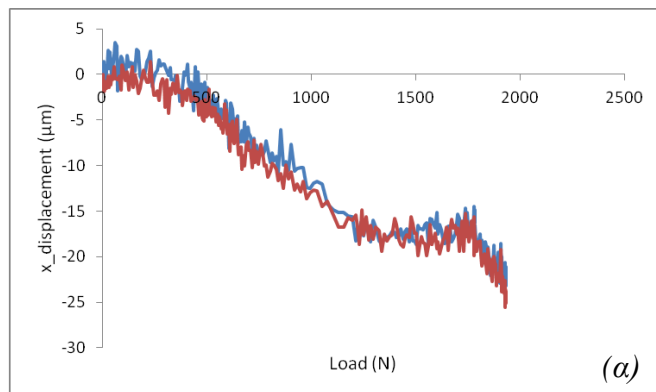
Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation – D.I.C.)

Κάταγμα 1



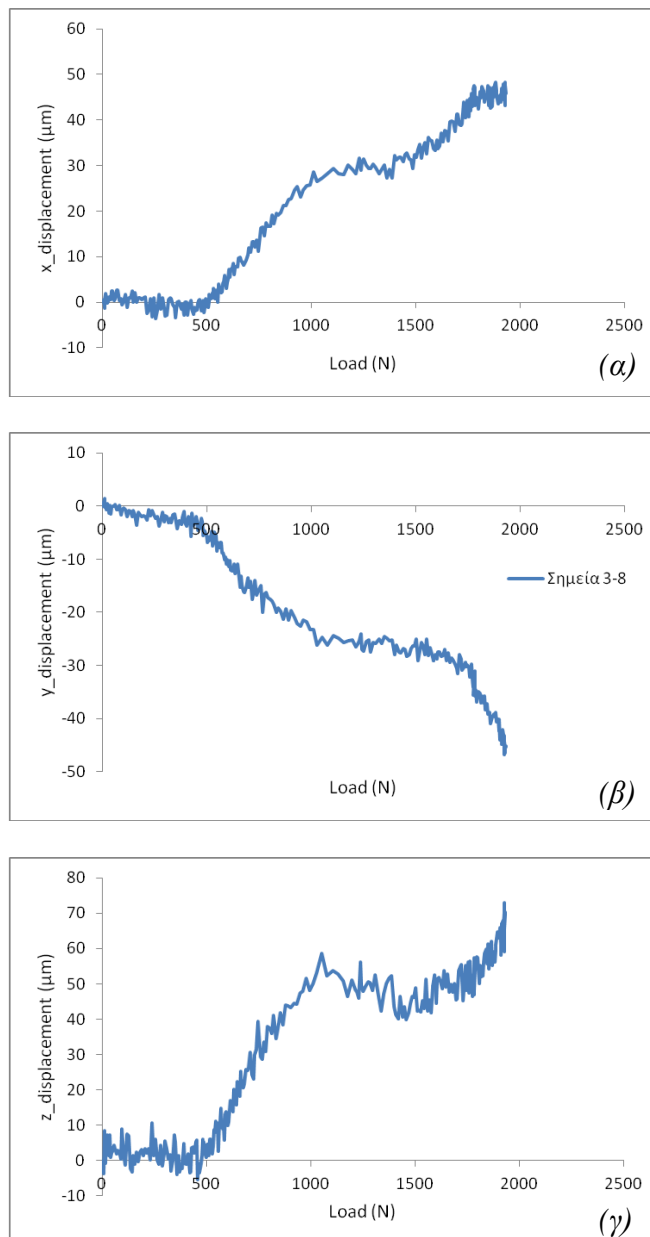
Σχήμα 19.12: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 1 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 2



Σχήμα 19.13: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 2 κατά τον άξονα (α) x , (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Κάταγμα 3



Σχήμα 19.14: Η μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο τμημάτων του κατάγματος 3 κατά τον άξονα (α) x, (β) y και (γ) z συναρτήσει του φορτίου.

Βιβλιογραφία

A. Επιστημονικά άρθρα

[A1] Patriquin M. L., Steyn M. and Loth S.R., *Metric analysis of sex differences in South African black and white pelvises*, Forensic science international, 2005.

[A2] Burgess A.R., Eastridge B.J., Young J.W., Ellison T.S., Ellison P.S. Jr, Poka A., Bathon G.H. and Brumback R.J., *Pelvic ring disruptions: effective classification system and treatment protocols*, Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 1990.

[A3] Tile M., *Pelvic ring fractures: should they be fixed?*, The Bone & Joint Journal, 1998.

[A4] Ji Wan Kim, Dong-Hoon Baek, Jae Hyun Kim and Kim Y.C., *Neurologic Injury within Pelvic Ring Injuries*, Journal of the Korean Fracture Society, 2014.

[A5] Helfet D.L., Borrelli J., Di Pasquale T. and Sanders R., *Stabilization of acetabular fractures in elderly patients*, The Journal of Bone & Joint Surgery, 1992.

[A6] Mouhsine E., Garofalo R., Borens O., Blanc C.H., Wettstein M. and Leyvraz P.F., *Cable fixation and early total hip arthroplasty in the treatment of acetabular fractures in elderly patients*, Journal of Arthroplasty, 2004.

[A7] Tile M., Helfet D.L. and Kellam J.F., *Fractures of the pelvis and acetabulum*, Lippincott Illustrated Reviews Series, 2003

[A8] Giannoudis P.V., Grotz M.R., Papakostidis C. and Dinopoulos H., *Operative treatment of displaced fractures of the acetabulum. A meta-analysis*, The Journal of Bone & Joint Surgery, 2005.

[A9] Matta J.M., *Fractures of the acetabulum: accuracy of reduction and clinical results in patients managed operatively within three weeks of the injury*, The Journal of Bone & Joint Surgery, 1996.

[A10] Mears D.C., Velyvis J.H. and Chang C.P., *Displaced acetabular fractures managed operatively: indicators of outcome*, Clinical Orthopaedics and Related Research, 2003.

[A11] Helfet D.L. and Virkus W., *Acetabular fractures in the elderly*, unpublished data, 2003.

[A12] Letournel E. and Judet R., *Fractures of the acetabulum*, 2nd edn. Springer-Verlag, 1993.

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πύελου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

[A13] Pagenkopf E., Grose A., Partal G., and Helfet D.L., *Acetabular Fractures in the Elderly: Treatment Recommendations*, HSS Journal, 2006.

[A14] Pohlemann T., Kiessling B., Gänsslen A., Bosch U. and Tscherne H., *Standardized osteosynthesis techniques for the pelvic ring. Analysis of a patient sample and surgical technique*, Der Orthopade, 1992.

[A15] Simonian P.T., Chip Jr. R., Harrington R.M. and Tencer A.F., *The Acetabular T-Type Fracture: A Biomechanical Evaluation of Internal Fixation*, Current Orthopaedic Practice, 1995.

[A16] Shazar N., Brumback R.J., Novak V.P. and Belkoff S.M., *Biomechanical Evaluation of Transverse Acetabular Fracture Fixation*, Current Orthopaedic Practice, 1998.

[A17] Culemann U., Holstein J.H., Köhler D., Tzioupis C.C., Pizanis A., Tosounidis G., Burkhardt M. and Pohlemann T., *Different stabilisation techniques for typical acetabular fractures in the elderly. A biomechanical assessment*, National Library of Medicine, 2009.

[A18] Ramin M., Bryn J., Qingan Z., and Broekhuysen H., *A biomechanical study of conventional acetabular internal fracture fixation versus locking plate fixation*, Canadian Journal of Surgery, 2009.

[A19] Holbrook T.L., Grazier K., Kelsey J.L. and Stauffer R.N., *The frequency of occurrence, impact, and cost of selected musculoskeletal conditions in the United States*, American Academy of Orthopedic Surgeons, 1984.

[A20] Khajavi K., Lee A. T., Lindsey D.P. and Leucht P., corresponding author Bellino M.J. and Giori N.J., *Single column locking plate fixation is inadequate in two column acetabular fractures. A biomechanical analysis*, Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 2010.

[A21] Yuntong Z., Yang T., Panfeng W., Xue Z., Shuogui X. and Chuncai Z., *Biomechanical Comparison of Different Stabilization Constructs for Unstable Posterior Wall Fractures of Acetabulum. A Cadaveric Study*, PLoS Journals, 2013.

[A22] Wang L., Wu X., He Q., Xu F. and Liu H., *Biomechanical Comparative Study On Four Internal Fixations For Acetabular Fractures In Quadrilateral Area*, Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2015.

[A23] Liu H., Li L., Wu X., Xu H. and Zhang R., *Biomechanical Research Of Different Internal Fixations Using Locking Reconstruction Plate For Acetabular*

Transverse Fracture, Chinese journal of reparative and reconstructive surgery, 2015.

[A24] Shim V., Böhmeb J., Vaitlb P., Klimac S., Jostenb C. and Anderson I., *Finite element analysis of acetabular fractures—development and validation with a synthetic pelvis*, Journal of Biomechanics, 2010.

[A25] Yanping F., Jianyin L., Feng Z., Zhiqiang L., Weiyi C. and Ximing L., *Biomechanical Analysis of the Fixation System for T-Shaped Acetabular Fracture*, Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2015.

[A26] Rommens P.M., Wagner D. and Hofmann A., *Surgical management of osteoporotic pelvic fractures: a new challenge*, Surgery European Journal of Trauma and Emergency, 2012.

[A27] Spencer R.F., *Acetabular fractures in older patient*, The Journal of Bone & Joint Surgery, 1989.

[A28] Matta J.M., Anderson L.M., Epstein H.C. and Hendricks P., *Fractures of the acetabulum: a retrospective analysis*, Clinical Orthopaedics and Related Research, 1986.

[A29] Hill B.W., Switzer J.A. and Cole P.A., *Management of High-Energy Acetabular Fractures in the Elderly Individuals*, Geriatric Orthopaedic Surgery & Rehabilitation, 2012.

[A30] Mears D. C., *Surgical Treatment of Acetabular Fractures in Elderly Patients With Osteoporotic Bone*, Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1999.

[A31] Hauschild O., Strohm P.C., Culemann U., Pohlemann T., Suedkamp N.P., Koestler W. and Schmal, H., *Mortality in Patients With Pelvic Fractures: Results From the German Pelvic Injury Register*, Journal of Trauma-Injury Infection & Critical Care, 2008

B. Βιβλία και επιστημονικές σημειώσεις

- [B1] Martin R.B., *A Genealogy of Biomechanics*, University of Pittsburgh, 1999.
- [B2] Borelli G.A., *De Motu Animalium*, 1680.
- [B3] Oatis C.A., *Kinesiology: the mechanics and pathomechanics of human movement*, Lippincott Williams & Wilkins, 2009.
- [B4] Κουρκουλής Σ., *Σημειώσεις μαθήματος «Εισαγωγή στην Εμβιομηχανική», Σχολή εφαρμοσμένων μαθηματικών και φυσικών επιστημών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.*
- [B5] Sobotta J., *Ατλας ανατομικής του ανθρώπου 2: θώρακας, κοιλιά, πύελος, κάτω άκρα, δέρμα*, Επιστημονικές Εκδόσεις Παρισιάνου, 1983.
- [B6] Gray H. and Carter H.V., (1858), *Anatomy Descriptive and Surgical*, London: John W. Parker and Son, retrieved 2011.
- [B7] MacPherson G., Schuenke R. and Schumacher S., *Atlas of Anatomy*, Εκδόσεις Thieme, 2012
- [B8] Κυριακού Φ., *Προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς άθικτης ανθρώπινης πύελου: In silico μελέτη*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013
- [B9] Muller M.E., Allgower M., Schneider R. and Willenegger H., *Manual of internal fixation: techniques recommended by the AO-ASIF group*, Εκδόσεις Springer-Verlag, 1991

Γ. Ιστότοποι

- [Γ1] <http://www.med.duth.gr/undergraduate/courses/dd2.shtml>
- [Γ2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Biomechanics>
- [Γ3] http://eclass.hua.gr/modules/document/file.php/DIET227/GENES_NUTRITION_INTERACTIONS_TENTA.pdf
- [Γ4] <http://againformed.wordpress.com/>
- [Γ5] <http://1epal-dafnis.att.sch.gr/bima/ergask/anatomy/lekani.htm>
- [Γ6] <http://digital.library.northwestern.edu/anatomyofgender/smellieImage01.html>
- [Γ7] <http://www.onlinehealthmag.com/pain-in-lower-back/>
- [Γ8] <https://www.studyblue.com/notes/note/n/practical-iii/deck/1287828>
- [Γ9] <http://myradnotes.wordpress.com/category/msk/>
- [Γ10] <http://mednhealth.com/medical-condition-library/condition-navigator/pelvis-conditions/muscle-bone/>
- [Γ11] http://wps.aw.com/bc_marieb_hap_9_oa/220/56481/14459302.cw/index.html
- [Γ12] <http://www.taylorillustration.com/portfolio/master-s-project/>
- [Γ13] <http://www.surgival.com/en/portfolio-item/osteosynthesis/>
- [Γ14] http://www.dmphellas.gr/en/portfolio_category/internal-fixation-systems/
- [Γ15] <https://www.aofoundation.org/>
- [Γ16] <http://erikdalton.com/treating-sacroiliac-sprain-spasm/>
- [Γ17] https://books.google.gr/books?id=3_DGAjPNoLkC&pg=PA27&lpg=PA27&dq=history+of+digital+image+correlation&source=bl&ots=DgW0EEAHa_&sig=T6bYDzDFyiFyHRC3L2E8o0wqBOc&hl=el&sa=X&ved=0ahUKEwi1ybzdxqnKAhXGUhQKHYDIDgYQ6AEIYjAI#v=onepage&q&f=true

Μελέτη τεχνικών οστεοσύνθεσης καταγμάτων πέλου με τη βοήθεια της τεχνικής «Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων» (Digital Image Correlation - D.I.C.)

[Γ18] https://en.wikipedia.org/wiki/Pinhole_camera

[Γ19] https://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device

[Γ20] <http://slideplayer.com/slide/5115526/>

[Γ21] <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0166996>

[Γ22] https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=akron1346171486&disposition=inline

[Γ23] http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported/393/393_fig1.jpg

[Γ24] <http://www.limess.com/en/products/digital-image-correlation>

