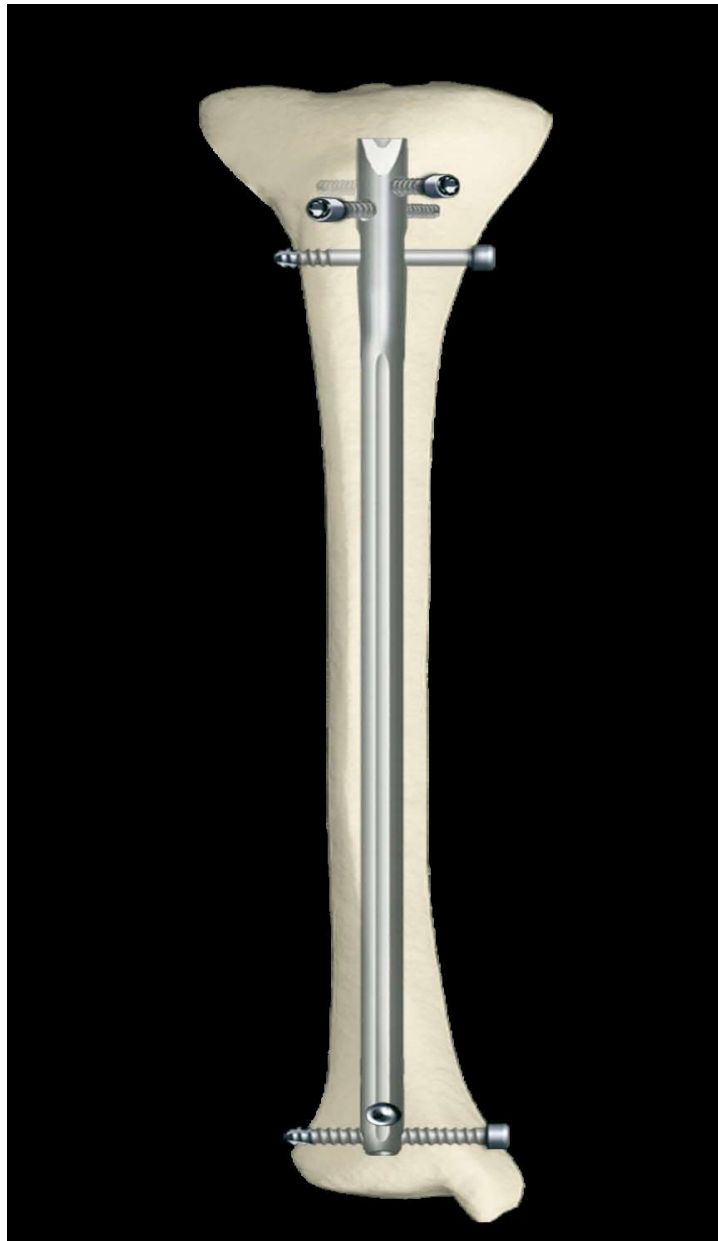


Σπουδαστές: Μισίκογλου Στέφανος

Εισηγητής: Καθηγητής Κων/ος Δαυΐδ

**ΘΕΜΑ:** Πειραματική διερεύνηση σε συνθετικά οστά κνήμης της αντοχής κοχλιοσυνδέσεων που χρησιμοποιούνται σε οστεοσυνδέσεις μέσω ήλων κράματος τιτανίου.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....

- Σκοπός της εργασίας.....

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....

- Τεχνικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων ήλων .....
- Υλικά ήλων .....
- Κόπωση υλικών .....
- Περιγραφή εξοπλισμού .....
- Προετοιμασία και συνθήκες πειραμάτων .....

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....

- Εκτέλεση πειραμάτων κόπωσης .....
- Εκτέλεση πειραμάτων προσδιορισμού στατικής ακαμψίας (στιβαρότητας) συμπλέγματος οστούν/ήλου.....
- Εκτέλεση πειραμάτων στρέψης.....

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθούν πειραματικά:

1. Τα εμβιομηχανικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων **ενδομυελικών ήλων** κνήμης που έχουν την δυνατότητα πολλαπλών μορφών κεντρικής ασφάλισης.
2. Τα εμβιομηχανικά χαρακτηριστικά του **συμπλέγματος οστού-ήλου** σε προσομοίωση καταγμάτων κεντρικού τριτημορίου κνήμης που αντιμετωπίζονται με ενδομυελικό ήλο και διαφορετικούς τρόπους κεντρικής σταθεροποίησης – ασφάλισης μέσω κοχλιοσύνδεσης (διπλή, τριπλή, τετραπλή κλπ. κοχλιοσύνδεση).

Στα κατάγματα κνήμης και ειδικότερα σε αυτά που προέρχονται από κακώσεις υψηλής ενέργειας χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότερο οι ενδομυελικοί ασφαλιζόμενοι ήλοι. Η ασφάλιση γίνεται και κεντρικά και περιφερικά του κατάγματος με ειδικούς κοχλίες που σταθεροποιούν τον ήλο επί του οστού για καλύτερη συγκράτηση του κατάγματος.

Στο εμπόριο υπάρχουν διαφορετικοί ήλοι από διαφορετικά υλικά και με διαφορετικό τρόπο κεντρικής ασφάλισης – σταθεροποίησης. Οι ήλοι που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα είναι οι παρακάτω:

**Ήλος Α:**



Εταιρεία κατασκευής: CITIEFFE

Υλικό: κράμα τιτανίου

**Ήλος Β:**



Εταιρεία κατασκευής: AESCULAP

Υλικό: Ti6Al4V

**Ήλος C:**



Εταιρεία κατασκευής: ORTHOSELECT

Υλικό:

**Ήλος D:**



Εταιρεία κατασκευής: ORTHOFIX

Υλικό: Stainless Steel

**Ήλος E:**



Εταιρεία κατασκευής: STRYKER

Υλικό: Ti6AL4V

## Ήλος F:



Εταιρεία κατασκευής:SYNTHES

Υλικό: Τί6Α14V

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας θα μελετηθεί η συμπεριφορά των ήλων ανάλογα με τον τρόπο κεντρικής ασφάλισης μέσω κοχλιοσυνδέσεων σε συγκεκριμένο τύπο ολικού κατάγματος ύψους 2 cm . Η πειραματική προσομοίωση θα γίνει σε συνθετικά μοντέλα οστού κνήμης της εταιρείας Sawbones από ρητίνη ενισχυμένη με υαλονήματα (GFRP). Τα συνθετικά οστά τοποθετούνται στη συνέχεια οι ασφαλιζόμενοι ενδομυελικοί ήλοι και θα ασφαλισθούν κεντρικά και περιφερικά με κοχλίες.

Σε υπολογιστικό επίπεδο θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μοντελοποίησης FEM (finite element modeling ) και ανάλυσης FEA (finite element analysis).

Αναλυτικότερα:

α) Εργαστηριακές τεχνικές: Χρησιμοποιούνται συνθετικά μοντέλα κνήμης (Sawbones) στα οποία γίνεται προσομοίωση επιλεγμένων τύπων κατάγματος και χειρουργική τοποθέτηση ασφαλιζόμενων ενδομυελικών ήλων. Μελετώνται διάφορες ομάδες τέτοιων μοντέλων κνήμης, όπου καθεμία θα χαρακτηρίζεται και από κάποια (υπό σύγκριση) διαφορετική παράμετρο. Στην πειραματική διαδικασία, κάθε ομάδα εκπροσωπείται από τουλάχιστον π.χ. 5 μοντέλα. Οι εργαστηριακές δοκιμές περιλαμβάνουν περιφερική και κεντρική σταθεροποίηση των μοντέλων σε μηχανή αντοχής υλικών (INSTRON 8801, INSTRON KN1200), κατάλληλη για βιοϊατρικές εφαρμογές και φόρτισή τους σε ελεγχόμενη αξονική συμπίεση και κάμψη με ταυτόχρονη καταγραφή δύναμης και μετατόπισης. Στα εργαστηριακά αποτελέσματα που θα προκύψουν περιλαμβάνονται μεγέθη χαρακτηριστικά της εμβιομηχανικής συμπεριφοράς και επάρκειας της κάθε

ομάδας (όπως π.χ. η στατική ακαμψία/ στιβαρότητα των συστημάτων, η δυναμική αντοχή σε κόπωση του συμπλέγματος οστούν - ήλος - κοχλίες).

β) Υπολογιστικές τεχνικές: Με τη μέθοδο μοντελοποίησης και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (finite element modeling and analysis, FEM-FEA) θα γίνει ανάλυση της καταπόνησης των ενδομυελικών ήλων και των συνθετικών μοντέλων κνήμης. Για το λόγο αυτό θα σχεδιαστεί η τρισδιάστατη στερεά γεωμετρία 3D στον υπολογιστή αφενός το ψηφιακό ανάλογο κνήμης ενήλικα (με κατάλληλη εξωτερική μορφολογία και επιμερισμό σε φλοιώδη και σπογγώδη περιοχή), αφετέρου όλες οι χειρουργικές τεχνικές που πρόκειται να συγκριθούν. Με την ολοκλήρωση της προετοιμασίας των ψηφιακών αυτών μοντέλων θα εφαρμοστούν τεχνικές FEM-FEA με σειρά κινηματικών ή/και κινητικών περιορισμών (οριακές συνθήκες) και στη συνέχεια θα γίνει εικονική φόρτισή τους τουλάχιστον σε αντίστοιχα με τα παραπάνω σενάρια ελεγχόμενης φόρτισης. Τα υπολογιστικά δεδομένα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με τα ανάλογα εργαστηριακά και έτσι η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών θα συμπληρωθεί και με υπολογιστικά αποτελέσματα.

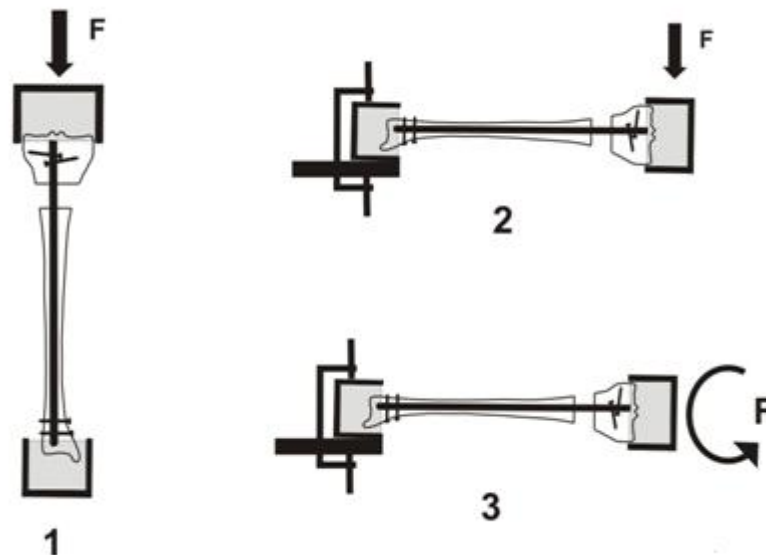
Πειραματικές ομάδες ενδομυελικών ήλων σύμφωνα με την εμπορική εταιρεία και υποομάδες ανάλογα με την δυνατότητα κεντρικής ασφάλισης που έχουν οι ήλοι από την κατασκευή τους.



**Εικόνα 1:** Προσομοίωση κατάγματος κεντρικού τριτημορίου κνήμης με διαφορετικούς τρόπους κλειδώματος του ήλου

Η Μελέτη των εμβιομηχανικών χαρακτηριστικών του συμπλέγματος του οστού και των ασφαλιζόμενων με κοχλίες ενδομυελικών ήλων περιλαμβάνει:

1. Πειραματική προσομοίωση κατάγματος κεντρικού τριτημορίου κνήμης:
  - α. Τμήμα δύο (2) εκατοστών από το οστούν θα αφαιρεθεί μετά την είσοδο του ήλου και την ασφάλιση με βίδες (αντιπροσωπεύοντας ένα συντριπτικό κάταγμα – το χειρότερο σενάριο)
  - β. Θα χρησιμοποιηθούν 5 διαφορετικοί ήλοι
  - γ. Θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τρόποι κλειδώματος του ήλου κεντρικά στο άνω τριτημόριο της κνήμης (Εικόνα 1).
  
2. Το σύμπλεγμα οστούν – ήλος - κοχλίες θα τεθεί σε μηχανική δοκιμασία (στατική και δυναμική) με σκοπό να μελετηθεί η ακαμψία κατά την:
  - α. Αξονική φόρτιση (εικόνα 2.1)
  - β. Επίδραση δυνάμεων κάμψης (εικόνα 2.2)
  - γ. Επίδραση στρεπτικών δυνάμεων (εικόνα 2.3)



**Εικόνα 2:** Μελέτη των εμβιομηχανικών χαρακτηριστικών του συμπλέγματος του οστού και των ασφαλιζόμενων ενδομυελικών ήλων (1 αξονική φόρτιση, 2 κάμψη, 3 στρέψη)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

### Τεχνικά χαρακτηριστικά των ήλων

| Group | Company          | Type                     | Dimensions mm | Profile             | Material                   | Proximal Holes | Proximal Slots | Distal Holes |
|-------|------------------|--------------------------|---------------|---------------------|----------------------------|----------------|----------------|--------------|
| A     | Citiefte         | Dynamic T Tibial Nail    | 9 X 335       | Tube cyclic section | Ti6Al4V<br>Eli F136        | 2              | 1              | 2            |
| B     | B-Braun Aesculap | Targon Tibial Nail       | 9 X 360       | full cyclic section | Ti6Al4V                    | 3              | 0              | 3            |
| C     | OrthoSelect      | ILN-Tibial Nail          | 9 X 345       | Tube clover section | Stainless Steel ISO 5832-1 | 2              | 0              | 2            |
| D     | Orthofix         | Tibial Nail              | 9 X 350       | full cyclic section | Stainless Steel            | 2              | 0              | 2            |
| E     | Stryker          | T2 Tibial Nail, Standard | 9 X 360       | Tube cyclic section | Ti Alloy                   | 2              | 1              | 2            |
| F     | Synthes          | Expert Tibial Nail       | 9 X 345       |                     | Titanium Alloy<br>Ti6Al4V  | 4              | 1              | 4            |



| A1: Εταιρία Citieffe   | B1: Εταιρία B-Braun Aesculap  |
|--|---|
|  |  |

**C1: Εταιρία OrthoSelect**



**D1: Εταιρία Orthofix**





**E1: Εταιρία Stryker**



**F1: Εταιρία Synthes**



## ΥΛΙΚΑ ΉΛΩΝ

### Κράματα Τιτανίου: Ti6Al4V

Οι πρώτες προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση του τιτανίου στην κατασκευή εμφυτευμάτων τοποθετούνται χρονικά στα τέλη της δεκαετίας του 1930, μετά από μελέτες που έδειχναν ότι ήταν καλώς ανεκτό στο μηριαίο οστό γάτας, όπως ήταν ο ανοξείδωτος χάλυβας και το βιτάλιο (Vitallium<sup>®</sup> - κράμα CoCrMo). Το τιτάνιο είναι πολύ ελαφρύ υλικό με πυκνότητα 4,5 g/cm<sup>3</sup>, τη χαμηλότερη από τα άλλα χρησιμοποιούμενα κράματα μετάλλων, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί, και εμφανίζει πολύ καλές μηχανικές και χημικές ιδιότητες, χαρακτηριστικά που το καθιστούν ενδιαφέρον και αξιοποιήσιμο για αυτές τις εφαρμογές.

| Κράμα                   | Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|--------------------------------|
| Ti και τα κράματά του   | 4,5                            |
| Ανοξείδωτος Χάλυβας 316 | 7,9                            |
| CoCrMo                  | 8,3                            |
| CoNiCrMo                | 9,2                            |
| NiTi                    | 6,7                            |

**Πίνακας 1.5:** Η πυκνότητα των κυριότερων κραμάτων που χρησιμοποιούνται σε εμφυτεύματα

Υπάρχουν τέσσερεις τύποι μη κραματοποιημένου εμπορικά καθαρού τιτανίου κατάλληλοι για εφαρμογές στα χειρουργικά εμφυτεύματα, όπου εντοπίζονται ποσότητες οξυγόνου, σιδήρου και αζώτου και διαφοροποιούνται οι μηχανικές τους ιδιότητες, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 1.6. Παρατηρείται ότι η παρουσία του οξυγόνου επιφέρει αξιοσημείωτη μεταβολή στην ελατότητα και την αντοχή του υλικού (Πίνακας 1.7).

| Στοιχείο | Τύπος 1 | Τύπος 2 | Τύπος 3 | Τύπος 4 | Ti6Al4V* |
|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Αζωτο    | 0,03    | 0,03    | 0,05    | 0,05    | 0,05     |
| Άνθρακας | 0,10    | 0,10    | 0,10    | 0,10    | 0,08     |

|          |              |       |       |       |        |
|----------|--------------|-------|-------|-------|--------|
| Υδρογόνο | 0,015        | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,0125 |
| Σίδηρος  | 0,20         | 0,30  | 0,30  | 0,50  | 0,25   |
| Οξυγόνο  | 0,18         | 0,25  | 0,35  | 0,40  | 0,13   |
| Τιτάνιο  | Σε ισορροπία |       |       |       |        |

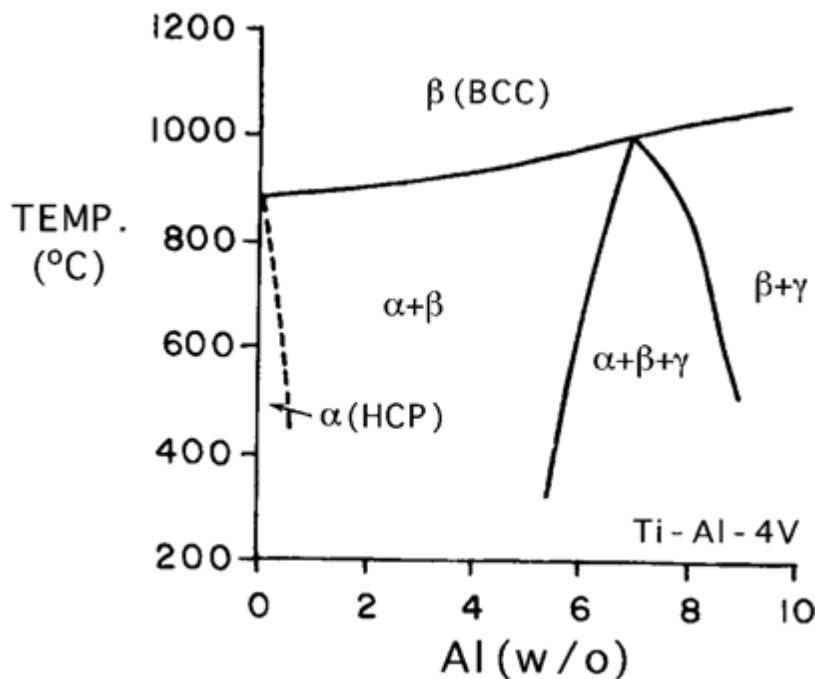
**Πίνακας 1. 6:** Χημική Σύσταση των τύπων εμπορικού τιτανίου και του κράματος Ti6Al4V (μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό κ.β.)

\*Το κράμα περιέχει επίσης Αργίλιο ~ 6,00% (5,50-6,50), Βανάδιο ~ 4,00% (3,50-4,50) με μέγιστο ποσοστό 0,40 % συνολικά

| Ιδιότητα                  | Τύπος 1 | Τύπος 2 | Τύπος 3 | Τύπος 4 | Ti6Al4V |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Εφελκυστική αντοχή (MPa)  | 240     | 345     | 450     | 550     | 860     |
| Όριο διαρροής 0,02% (MPa) | 170     | 275     | 380     | 485     | 795     |
| Επιμήκυνση (%)            | 24      | 20      | 18      | 15      | 10      |
| Μείωση της επιφάνειας (%) | 30      | 30      | 30      | 25      | 25      |

**Πίνακας 1.7:** Μηχανικές ιδιότητες των τύπων εμπορικού τιτανίου και του κράματος Ti6Al4V

Το κυριότερο χρησιμοποιούμενο κράμα τιτανίου για την κατασκευή εμφυτευμάτων είναι το Ti6Al4V, με κύρια συστατικά του το Αργίλιο ~ 6,00% (5,50-6,50) και το Βανάδιο ~ 4,00% (3,50-4,50). Το κράμα έχει διαρκή αντοχή στην κόπωση 550 MPa. Το τιτάνιο χαρακτηρίζεται ως αλλοτροπικό υλικό, το οποίο εμφανίζεται ως εξαγωνική δομή μέγιστης συσσωμάτωσης (hcp, α-Ti) μέχρι τους 882°C και χωροκεντρωμένη κυβική δομή (bcc, β-Ti) για υψηλότερες θερμοκρασίες. Τα κράματα τιτανίου μπορούν να ισχυροποιηθούν και να μεταβληθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες μέσα από διαφοροποίηση της σύστασης και θερμομηχανικές κατεργασίες. Η προσθήκη αλουμινίου σταθεροποιεί την α-φάση αυξάνοντας τη θερμοκρασία μετάβασης από την α-φάση στη β-φάση, ενώ το βανάδιο σταθεροποιεί τη β-φάση χαμηλώνοντας τη θερμοκρασία του μετασχηματισμού από την α στη β.

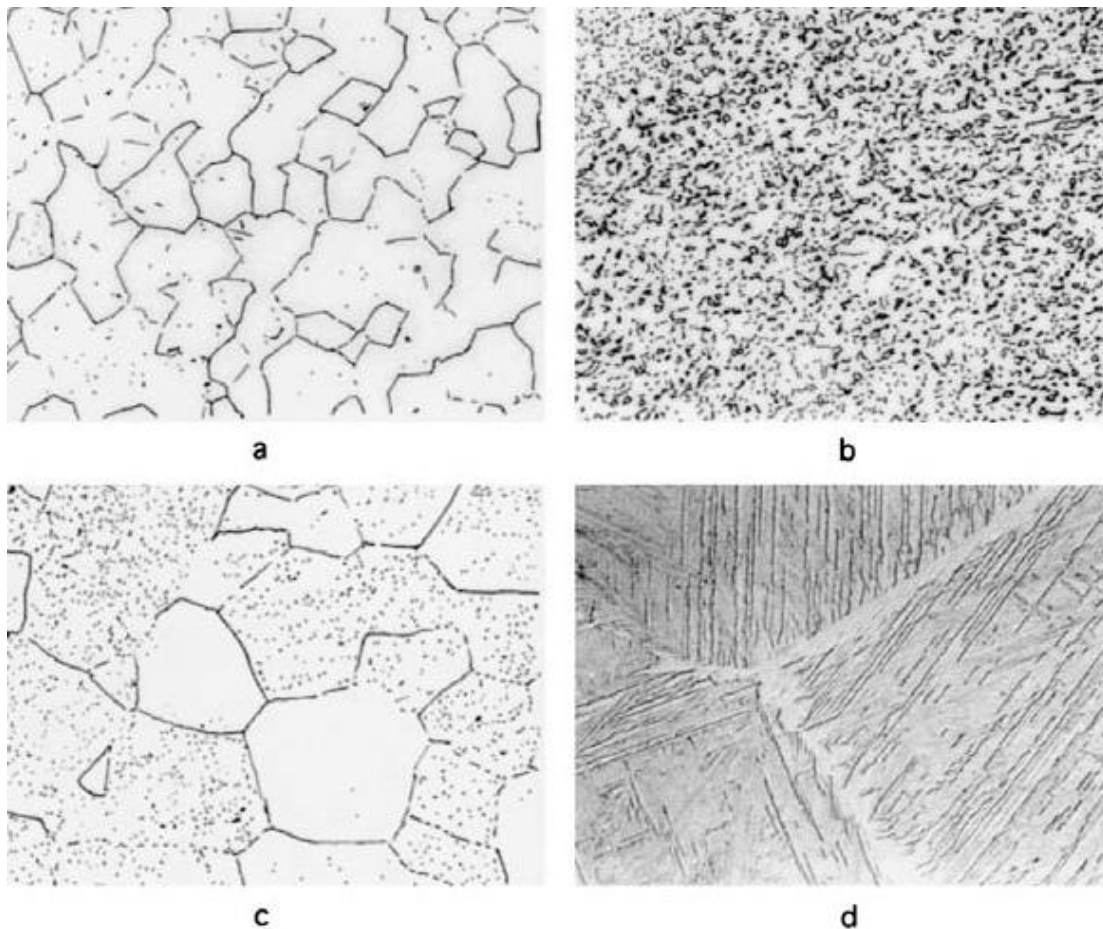


**Σχήμα 1.4:** Μέρος του διαγράμματος φάσης του κράματος Ti-Al-4V για περιεκτικότητα 4% w/o V

Το α-κράμα έχει μικροδομή μίας φάσης η οποία επιτρέπει την εύκολη συγκόλληση. Το αποτέλεσμα της σταθεροποίησης των κραμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε αλουμίνιο είναι τα καλά χαρακτηριστικά μηχανικής αντοχής και η αντοχή σε διάβρωση στις υψηλές θερμοκρασίες (300-600°C), ωστόσο δεν μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία για σκλήρυνση με κατακρήμνιση, καθώς είναι μονοφασικά.

Η προσθήκη ελεγχόμενων ποσοτήτων β-σταθεροποιητών έχει ως αποτέλεσμα να εξακολουθεί να παραμένει η β-φάση κάτω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού που οδηγεί σε διφασικό σύστημα. Τα κατακρημνίσματα της β-φάσης εμφανίζονται με θερμική κατεργασία στη θερμοκρασία του στερεού διαλύματος και με διαδοχική μείωσή της, ακολουθούμενη από γήρανση σε κάπως χαμηλότερη θερμοκρασία. Ο κύκλος γήρανσης προκαλεί την κατακρήμνιση μερικών α μορίων από τη μετασταθή β. Οι ρωγμές είτε αναχαιτίζονται είτε συγκρατούνται στα μόρια α, έτσι ώστε η σκληρότητα να είναι υψηλότερη από το στερεό διάλυμα. Το αποτέλεσμα ενός υψηλότερου ποσοστού β-σταθεροποιητικών στοιχείων (13% V σε κράμα Ti13V11Cr3AL) είναι μία μικροδομή ουσιαστικά β, η οποία μπορεί να ισχυροποιηθεί με θερμή κατεργασία.

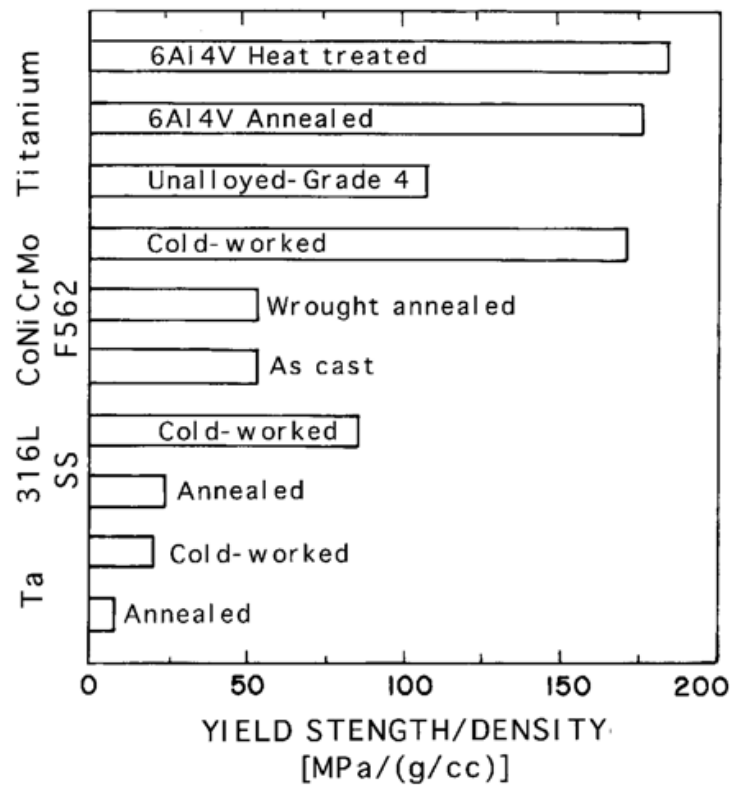




**Σχήμα 1.5:** Μικροδομή κραμάτων Ti (όλα σε μεγέθυνση 500X). a) Σκληρυμένο α-κράμα, b) Ti6Al4V, α-β κράμα σκληρυμένο, c) β-κράμα σκληρυμένο, d) Ti6Al4V με θερμική κατεργασία στους 1650°C και ψύξη

Το μέτρο ελαστικότητας αυτών των κραμάτων τιτανίου είναι περίπου 110 GPa. Παρατηρώντας τον πίνακα με τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων, διαπιστώνεται ότι η υψηλότερη περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες του cp-Ti οδηγεί σε υψηλότερη αντοχή και μειωμένη ελατότητα. Η αντοχή του υλικού κυμαίνεται από τιμές πολύ χαμηλότερες από αυτή του ανοξείδωτου χάλυβα 316 ή των κραμάτων CoCr μέχρι τιμές σχεδόν ίσες με αυτές του σκληρυμένου ανοξείδωτου χάλυβα 316 ή του χτυτού κράματος CoCrMo.

Συγκρινόμενα βάσει της ειδικής αντοχής, δηλαδή της αντοχής ως προς την πυκνότητα, τα κράματα τιτανίου υπερέχουν έναντι των άλλων υλικών που χρησιμοποιούνται στα εμφυτεύματα, όπως προκύπτει και από το σχήμα που ακολουθεί. Υστερούν, ωστόσο, σε διατμητική αντοχή, με αποτέλεσμα να μην προτιμώνται σε μερικά είδη εφαρμογών, όπως είναι οι βίδες για τα οστά και οι πλάκες. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι η τάση να φθείρονται και να παραμορφώνονται όταν κατά την ολίσθηση έρχονται σε επαφή με το αυτό ή άλλο μέταλλο.



**Σχήμα 1.6: Αντοχή σε ένδοση ως προς την πυκνότητα μερικών υλικών εμφυτευμάτων.**

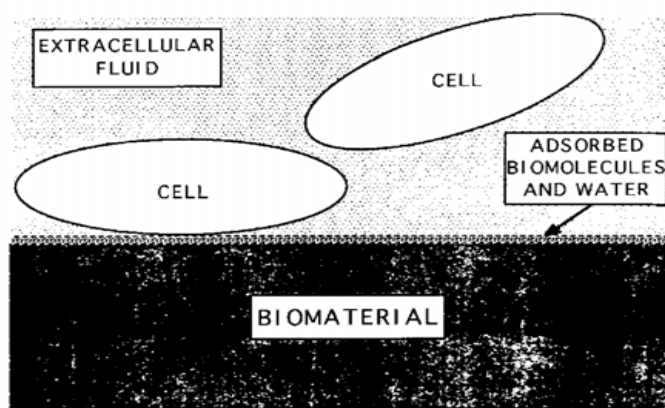
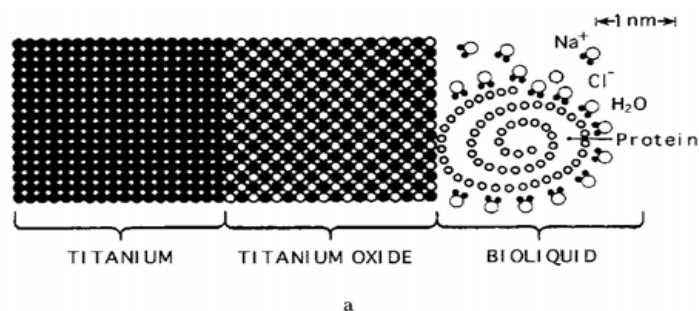
Την αντίσταση στη διάβρωση του τιτανίου προσδίδει ο σχηματισμός ενός στερεού στρώματος οξειδίου βάθους 10 nm. Σε συνθήκες *in vivo* το οξείδιο  $TiO_2$  είναι το μόνο σταθερό προϊόν αντίδρασης. Ωστόσο, οι μικροκινήσεις μεταξύ οστικού τσιμέντου- πρόσθεσης και οστικού τσιμέντου- οστού είναι αναπόφευκτες και, κατά συνέπεια, οξείδια του τιτανίου και μόρια κράματος τιτανίου απελευθερώνονται στην ενδοπρόσθεση. Κάποιες φορές, αυτά τα υπολείμματα από τη φθορά συγκεντρώνονται ως περιπροσθετικό υγρό και δίνει το ερέθισμα για έντονη κυτταρική απόκριση γύρω από το εμφύτευμα. Αυτή η κυστική συλλογή μεγεθύνεται και συγκεντρώνεται χρωματισμένο «μαύρο» υγρό που περιέχει μόρια από τη φθορά του τιτανίου και ιστοκύτταρα. Η ιστολογική εξέταση του χρωματισμένου μαλακού ιστού δείχνει θρομβωτικά νεκρωτικά κατάλοιπα και κολλαγονούχο ινώδη ιστό που περιλαμβάνει ιστοκύτταρα και ξένα σώματα. Η μετάλλωση, δηλαδή αυτή η μαύρη χρώση των περιπροσθετικών ιστών, εντοπίζεται σε περιπτώσεις εμφυτευμάτων, όπως για παράδειγμα τα εμφυτεύματα γόνατος.

Η επιφάνεια ενός εμφυτεύματος τιτανίου αποτελείται από μία λεπτή στρώση οξειδίου και το βιολογικό υγρό μορίων νερού, διαλυμένων ιόντων και βιομορίων, κυρίως πρωτεϊνών



με περιβάλλον υδατικό κέλυφος, όπως αποδίδεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η μικροαρχιτεκτονική, δηλαδή η μικρογεωμετρία, η τραχύτητα και άλλες παράμετροι, της επιφάνειας και οι χημικές συστάσεις είναι σημαντικές για δύο λόγους:

- Η φύση της επιφάνειας σε ατομικό, μοριακό ή υψηλότερο επίπεδο σε σχέση με τις διαστάσεις των βιολογικών μονάδων μπορεί να προκαλέσει διαφορετικές επιφάνειες επαφής με βιομόρια και κύτταρα. Οι διαφορετικές επιφάνειες επαφής, διαδοχικά, μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές και τύπους πρόσδεσης των βιολογικών μονάδων, που είναι δυνατόν να επηρεάσουν τη διαμόρφωση και τη λειτουργία.
- Η χημική σύσταση της επιφάνειας μπορεί να δημιουργήσει διαφορετικούς τύπους πρόσδεσης με τα βιομόρια, τα οποία στη συνέχεια επηρεάζουν τις ιδιότητες και τη λειτουργία. Τα μέταλλα υφίστανται χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια που εξαρτώνται από το περιβάλλον, γεγονός που επιφέρει δυσκολίες κατανόησης της ακριβούς φύσης των αντιδράσεων.



**Σχήμα 1.7:** α) Διεπιφάνεια μεταξύ ενός εμφυτεύματος τιτανίου και βιοϋγρού και β) αλληλεπίδραση στην κυτταρική επιφάνεια

Η αλληλεπίδραση μεταξύ επιφάνειας του τιτανίου και ιστού είναι δυναμική και εξελίσσεται με τον χρόνο, αρχής γενομένης λίγα δευτερόλεπτα μετά την εμφύτευση. Για τα ελάχιστα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την εμφύτευση, υπάρχει μόνο νερό, διαλυμένα ιόντα και ελεύθερα βιομόρια σε εγγύτητα με την επιφάνεια, αλλά όχι κύτταρα. Η σύσταση του βιοϋγρού στη συνέχεια αλλάζει συνεχώς, καθώς εξελίσσονται οι διεργασίες της φλεγμονής και της επούλωσης, και πιθανώς προκαλούνται αλλαγές στη σύσταση του απορροφημένου στρώματος βιομορίων στην επιφάνεια του εμφυτεύματος μέχρις ότου επέλθει ημι-ισορροπία. Τελικά, τα κύτταρα και οι ιστοί προσεγγίζουν την επιφάνεια και, ανάλογα με τη φύση του προσροφώμενου στρώματος, αποκρίνονται με εξειδικευμένο τρόπο και το τροποποιούν περαιτέρω. Ο τύπος των πλησιέστερων στην επιφάνεια κυττάρων και οι δραστηριότητές τους μεταβάλλονται με τον χρόνο. Επί παραδείγματι, ανάλογα με τον τύπο της αρχικής αντίδρασης, το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να είναι είτε ο σχηματισμός ινώδους περιβλήματος είτε η ιστική ενσωμάτωση.

Ως οστεοενσωμάτωση ορίζεται η απευθείας επαφή χωρίς παρεμβαίνοντα μαλακό ιστό μεταξύ ενός ανακατασκευασμένου οστού και του εμφυτεύματος. Η τραχύτητα της επιφάνειας των κραμάτων τιτανίου έχει σημαντική επίδραση στην πρόσδεση οστού και εμφυτεύματος και στην ισχύ της διεπιφάνειας. Αυξανόμενη της μέσης τραχύτητας από 0,5 σε 5,9  $\mu\text{m}$ , η διεπιφανειακή διατμητική αντοχή αυξάνεται από 0,48 σε 3,50 MPa. Υψηλά επίπεδα πρόσδεσης οστεοβλαστών αποκτώνται σε αδρές επιφάνειες, όπου εντοπίζονται περισσότερα διαφοροποιημένα κύτταρα σε σχέση με τις λείες επιφάνειες. Οι χημικές μεταβολές της επιφάνειας του τιτανίου που ακολουθούνται από θερμική κατεργασία πιστεύεται ότι πάνω στην επιφάνεια  $\text{TiO}_2$  σχηματίζουν μία στρώση υδροπηκτώματος  $\text{TiO}_2$ , το οποίο είναι δυνατόν να επιφέρει σχηματισμό κρυστάλλου απατίτη.

Γενικά, στην τραχύτερες επιφάνειες παρατηρούνται μικρότεροι αριθμοί κυττάρων, μειωμένος αριθμός κυτταρικού πολλαπλασιασμού και αυξημένη παραγωγή μήτρας σε σχέση με τις λείες επιφάνειες. Ο σχηματισμός του οστού φαίνεται να σχετίζεται σημαντικά με την παρουσία του αυξητικού παράγοντα μετασχηματισμού β1 στη μήτρα του οστού.

| ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ     | ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ | ΚΟΒΑΛΤΙΟ-ΧΡΩΜΙΟ | ΤΙΤΑΝΙΟ |
|--------------------|---------------------|-----------------|---------|
| ΑΚΑΜΨΙΑ            | Υψηλή               | Μέτρια          | Χαμηλή  |
| ΑΝΤΟΧΗ             | Μέτρια              | Μέτρια          | Υψηλή   |
| ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ | Χαμηλή              | Μέτρια          | Υψηλή   |
| ΒΙΟΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ     | Χαμηλή              | Μέτρια          | Υψηλή   |

**Πίνακας 5.12:** Συγκριτικός πίνακας με τις ιδιότητες των μετάλλων για εμφυτεύματα αρθροπλαστικής ισχίου

### Ανοξειδωτος Χάλυβας

Ο πρώτος ανοξειδωτος χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για εφαρμογή σε εμφυτεύματα ήταν ο 18-8 (τύπος 302 στη σύγχρονη κατάταξη), που ήταν πιο ισχυρός και ανθεκτικός στη διάβρωση από τον vanadium steel, ο οποίος έπαψε να χρησιμοποιείται σε αυτές τις εφαρμογές λόγω της ανεπαρκούς του αντοχής στη διάβρωση in vivo. Αργότερα, εισήχθηκε ο 18-8s Mo ανοξειδωτος χάλυβας που περιέχει ένα μικρό ποσοστό μολυβδενίου για να βελτιώσει την αντοχή στη διάβρωση σε χλωριούχο διάλυμα (αλατόνερο). Αυτό το κράμα έγινε γνωστό ως ανοξειδωτος χάλυβας 316. Στη δεκαετία 1950 η περιεκτικότητα σε άνθρακα μειώθηκε από 0,08 σε μέγιστη ποσότητα 0,03% (κατά βάρος) αφενός για λόγους καλύτερης απόκρισης στη διάβρωση και αφετέρου για να μειωθεί η ευαισθητοποίηση, κράμα ανοξειδωτου χάλυβα 316L. Η ελάχιστη αποτελεσματική συγκέντρωση χρωμίου είναι 11% για να επιφέρει αντοχή στη διάβρωση στους ανοξειδωτους χάλυβες, καθώς το χρώμιο είναι δραστικό στοιχείο, αλλά αυτό και τα κράματά του μπορούν να παθητικοποιηθούν από 30% νιτρικό οξύ και να δώσουν αντοχή στη διάβρωση.

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες και ειδικότερα οι τύποι 316 και 316L, είναι οι πιο διαδεδομένοι για εφαρμογές στα εμφυτεύματα και δεν μπορούν να σκληρυνθούν με θερμή κατεργασία, αλλά μόνο με ψυχρή. Αυτή η ομάδα ανοξειδωτων χαλύβων είναι μη μαγνητική και διαθέτει καλύτερη αντοχή στη διάβρωση συγκρινόμενη με άλλες, ενώ η προσθήκη μολυβδενίου βελτιώνει την απόκριση στη διάβρωση (pitting corrosion) σε διάλυμα άλατος.

Προτιμότερο μεταξύ των δύο τύπων είναι ο 316L, λόγω της χαμηλότερης μέγιστης περιεκτικότητας σε άνθρακα.

Το νικέλιο σταθεροποιεί την ωστενιτική φάση [γ, εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (fcc)] σε θερμοκρασία δωματίου και, επίσης, αυξάνει την ικανότητα αντίστασης στη

διάβρωση. Ο σχηματισμός της ωστενιτικής φάσης μπορεί να επηρεαστεί εξίσου από τις περιεκτικότητες Ni και Cr, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί για ανοξείδωτο χάλυβα περιεκτικότητας 0,01% σε άνθρακα. Η ελάχιστη ποσότητα για τη διατήρηση της ωστενιτικής φάσης είναι περίπου 10%.

Αρκετά καθοριστική για τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα 316L είναι η μέθοδος που εφαρμόζεται για την κατεργασία του κράματος. Με τη θερμή κατεργασία αποκτάται μαλακότερο υλικό με μεγαλύτερη ικανότητα επιμήκυνσης, ενώ με την ψυχρή το υλικό έχει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και σκληρότητα. Αυτή η επίδραση αποδίδει και στο διάγραμμα που ακολουθεί. Ως εκ τούτου, απαιτείται μεγάλη προσοχή στην επιλογή της μεθόδου κατεργασίας.

| Στοιχείο   | Ποσοστό (%) |
|------------|-------------|
| Άνθρακας   | 0,03        |
| Μαγγάνιο   | 2,00        |
| Φωσφόρος   | 0,03        |
| Θείο       | 0,03        |
| Πυρίτιο    | 0,75        |
| Χρώμιο     | 17,00-20,00 |
| Νικέλιο    | 12,00-14,00 |
| Μολυβδένιο | 2,00-4,00   |

**Πίνακας 1.1:**Περιεκτικότητα Ανοξείδωτου Χάλυβα 316L

| Μορφοποίηση           | Μέγιστη Εφελκυστική Τάση (MPa) | Όριο διαρροής (MPa) | Επιμήκυνση (%) | Σκληρότητα Rockwel |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| Σκλήρυνση (annealing) | 485                            | 172                 | 40             | 95 HRB             |
| Ψυχρή κατεργασία      | 860                            | 690                 | 12             | -                  |

**Πίνακας 1.2:** Μηχανικές Ιδιότητες των εμφυτευμάτων από Ανοξείδωτο Χάλυβα 316L

Ακόμη και τα κράματα χάλυβα 316L, ωστόσο, μπορούν να διαβρωθούν μέσα στον οργανισμό κάτω από ορισμένες συνθήκες σε περιοχή όπου ασκούνται υψηλές τάσεις και έχουν μειωμένο οξυγόνο, όπως επί παραδείγματι οι κοχλίες των πλακών οστεοσύνθεσης. Γι' αυτό κρίνεται επιβεβλημένη η παραμονή τους μόνο για πρόσκαιρα εμφυτεύματα, πλάκες οστεοσύνθεσης, κοχλίες και ήλους για το ισχίο. Προκειμένου να βελτιωθεί η αντοχή στη διάβρωση, η ανοχή στη φθορά και η αντοχή στην κόπωση εφαρμόζονται

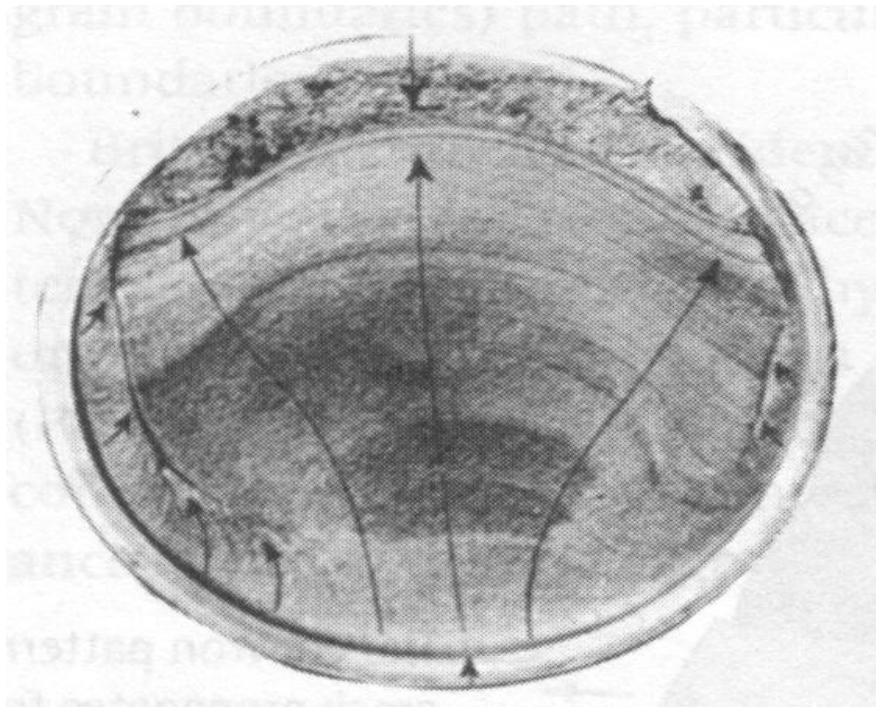
μέθοδοι τροποποίησης της επιφάνειας, όπως επί παραδείγματι η δημιουργία στρώματος ανόδου και η παθητικοποίηση. [Park, 2000]

### **Κόπωση υλικών**

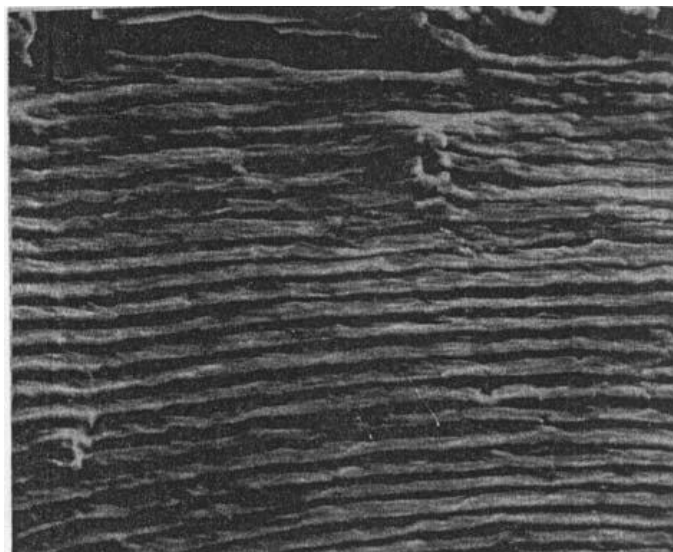
Η αστοχία που εμφανίζεται στα μεταλλικά υλικά λόγω της επίδρασης δυναμικών καταπονήσεων ονομάζεται κόπωση (Fatigue). Το βασικό χαρακτηριστικό της κόπωσης είναι ότι απαιτεί μία σημαντική χρονική περίοδο λειτουργίας του δομικού στοιχείου ή εξαρτήματος μίας κατασκευής για να εμφανιστεί. Σήμερα εκτιμάται ότι το 90% των αστοχιών, που προέρχονται από μηχανικά αίτια, οφείλεται στο μηχανισμό κόπωσης.

Η κόπωση των μεταλλικών υλικών είναι ένας από τους πλέον “ύπουλους” μηχανισμούς αστοχίας, καθώς πραγματοποιείται χωρίς να εμφανίζει προειδοποιητικές ενδείξεις. Μία αστοχία λόγω κόπωσης μπορεί να αναγνωρισθεί, αφότου εκδηλωθεί, από ορισμένα χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης. Μία επιφάνεια θραύσης από κόπωση φαίνεται στη φωτογραφία του Σχ. 1. Ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας θραύσης έχει λεία εμφάνιση, η οποία οφείλεται στην τριβή των επιφανειών του ρήγματος μεταξύ τους, καθώς αυτό προωθείται σταδιακά κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Αντίθετα, ένα μικρότερο τμήμα της επιφάνειας, το οποίο αντιστοιχεί στο τελικό στάδιο της θραύσης, έχει ανώμαλη εμφάνιση και οφείλεται στη γρήγορη τελική προώθηση του ρήγματος με όλκιμο τρόπο μέσα στο υλικό, καθώς η μειωμένη διατομή του υλικού που έχει απομείνει δεν μπορεί να αντέξει πλέον τα επιβαλλόμενα φορτία. Ένα ακόμη πιο τυπικό χαρακτηριστικό των επιφανειών θραύσης που προήλθαν από κόπωση είναι οι γραμμώσεις (striations) που δημιουργούνται σε αυτήν. Οι γραμμώσεις αυτές έχουν συνήθως σχήμα τόξων από ομόκεντρους κύκλους, το κέντρο των οποίων υποδεικνύει το σημείο όπου βρισκόταν το αρχικό ρήγμα. Η απόσταση της μίας γράμμωσης από την άλλη δίνει μία καλή εκτίμηση της ταχύτητας με την οποία προωθήθηκε το ρήγμα μέσα στο υλικό. Χαρακτηριστικές γραμμώσεις κόπωσης φαίνονται στην φωτογραφία του Σχ. 2.





**Σχήμα. 1:** Επιφάνεια θραύσης από κόπωση σε περιστρεφόμενο άξονα.



**Σχ. 2:** Γραμμώσεις κόπωσης σε επιφάνεια θραύσης από κράμα Ti-6Al-4V.

Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που απαιτούνται για να εμφανισθεί αστοχία από κόπωση: α) μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική τάση, β) μία αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία και γ) ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης. Εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση επηρεάζεται και από μία σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η

θερμοκρασία, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, η μικροδομή του υλικού, η ύπαρξη παραμενουσών εσωτερικών τάσεων στο υλικό, κ.α. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η κόπωση των μεταλλικών υλικών δεν έχει εξηγηθεί πλήρως θεωρητικά και η ανάλυσή της βασίζεται σε μεγάλο βαθμό, ακόμη και σήμερα, σε πειραματικές και εμπειρικές παρατηρήσεις.

## **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ:**

### **Τομογράφος (Tomoscope HV 225 Werth)**

Πλεονεκτήματα συσκευής:

- 1) Μέτρηση σύνθετων και πολυδιάστατων εξαρτημάτων σε ελάχιστο χρόνο (<20min).
- 2) Ακρίβεια στις μετρήσεις μεταξύ μερικών μικρομέτρων (τυπική μέτρηση) έως κλάσμα ενός μικρομέτρου (μετρήσεις ακριβείας).
- 3) Επιτάχυνση διαδικασιών μέτρησης με αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας.

Διαφοροποίηση στη χρήση των ακτίνων X μεταξύ βιομηχανικών και ιατρικών εφαρμογών:

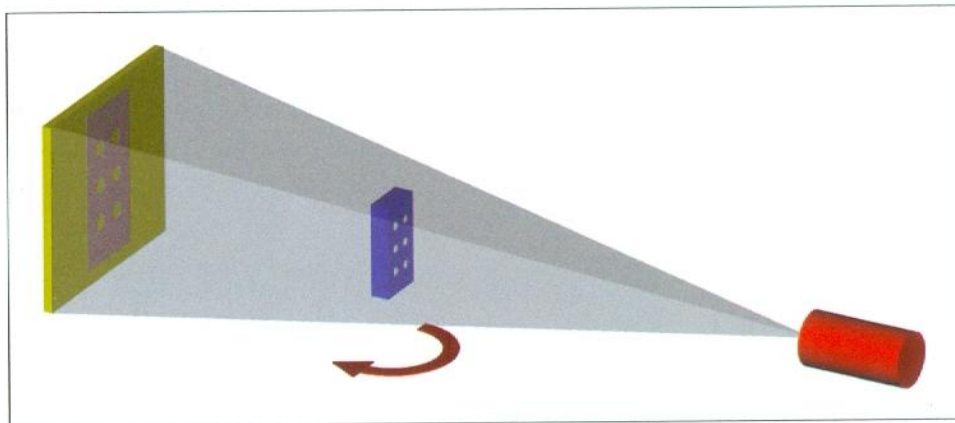
- 1) Στη βιομηχανία η μονάδα X-Ray ( πηγή ακτινοβολίας με αισθητήρα ) παραμένει σταθερή και περιστρέφεται το αντικείμενο, ενώ στην ιατρική η μονάδα περιστρέφεται γύρω από τον ασθενή, ο οποίος βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας.
- 2) Στη βιομηχανία ανάλογα με την υλική σύσταση των διαφόρων εξεταζόμενων αντικειμένων απαιτείται παραμετροποίηση της ακτινοβολίας, σε σύγκριση με την ιατρική.
- 3) Οι απαιτήσεις ανάλυσης και ακριβείας είναι διαφορετικές.
- 4) Η ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το εξεταζόμενο αντικείμενο στη βιομηχανία, δεν αποτελεί πρόβλημα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες εντάσεις ακτινοβολίας από ότι στην ιατρική.

### **Βασική αρχή της Τομογραφίας**

Η βασική αρχή της τομογραφίας με ακτίνες X είναι η ικανότητα της ακτινοβολίας αυτής να διαπερνά αντικείμενα.

Μέσω μιας λυχνίας εκπέμπεται η αποκλίνουσα δέσμη ακτίνων X (κωνικής μορφής), η οποία στοχεύει προς το εξεταζόμενο αντικείμενο και καθώς το διαπερνά, μέρος της απορροφάται. Η μη απορροφούμενη-εξερχόμενη ακτινοβολία καταγράφεται από τον ακτινογραφικό αισθητήρα, ο οποίος βρίσκεται αντιδιαμετρικά με την λυχνία.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας X από το εξεταζόμενο αντικείμενο είναι συναρτήσσει α) του μήκους διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα στην ύλη του αντικειμένου, και β) του υλικού του αντικειμένου.



Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία της τομογραφίας παίρνουμε 2-D εικόνες του εξεταζόμενου αντικειμένου, τις «X-ray ακτινογραφίες».

Συγκεκριμένα τα βήματα στην τομογραφία είναι:

- Η λυχνία εκπέμπει αποκλίνουσα δέσμη ακτίνων X προς το εξεταζόμενο αντικείμενο.
- Ο αισθητήρας καταγράφει τις μερικές εκατοντάδες έως χιλιάδες εικόνες που προκύπτουν σταδιακά και διαδοχικά στις εκάστοτε θέσεις που παίρνει το αντικείμενο καθώς αυτό περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του.
- Ακολουθεί η κωδικοποίηση των εικόνων σε ψηφιακή μορφή.
- Η 3-D πληροφορία του αντικειμένου βρίσκεται στην εναπόθεση των ψηφιακών εικόνων. Έτσι με κατάλληλους μαθηματικούς μετασχηματισμούς υπολογίζεται το 3-D μοντέλο, το οποίο περιγράφει πλήρως την γεωμετρία του εξεταζόμενου αντικειμένου
- ΑΠΟ ΤΗΝ 2-D ΕΙΚΟΝΑ (X-RAY ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑ) ΣΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ 2-D ΣΕ 3-D



- ΑΠΟ PIXEL ΣΕ VOXEL
- Στην τομογραφία με ακτίνες X το 3-D στοιχείο Voxel περιγράφει την απορρόφηση της ακτινοβολίας από το εξεταζόμενο αντικείμενο.
- Σκουρόχρωμα Voxel αντιπροσωπεύουν περιοχές χαμηλής απορρόφησης ακτινοβολίας (π.χ. αέρας), ενώ ανοιχτόχρωμα περιοχές υψηλής απορρόφησης αντίστοιχα (π.χ. μέταλλα).

### Λυχνία ακτίνων X

Η παραγωγή των ακτίνων X επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κατάλληλων διατάξεων που ονομάζονται λυχνίες ακτίνων X. Η αρχή λειτουργίας αυτών των λυχνιών βασίζεται στο φαινόμενο ότι όταν ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια ( $e^-$ ) προσπέσουν σε μεταλλικό στόχο παράγεται ακτινοβολία X. Το 99% της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων ( $e^-$ ) μετατρέπεται σε θερμότητα πάνω στον μεταλλικό στόχο και μόνο το 1% σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (κυρίως ακτίνες X).

Η λυχνία είναι κατάλληλα θωρακισμένη (ώστε οι ακτίνες X να εξέρχονται μόνο από το ειδικό παράθυρο) και εξοπλισμένη με συστήματα ψύξης. Ειδικό κατευθυντήρες διαμορφώνουν τη γεωμετρία της εξερχόμενης δέσμης & ειδικά φίλτρα διαμορφώνουν την ποιότητα (τις ενέργειες) της εξερχόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η γεννήτρια είναι η πηγή ενέργειας για τη λειτουργία της λυχνίας και σε αυτήν ρυθμίζονται: (α) η τιμή τα διαφοράς δυναμικού που θα επιταχύνει τα ηλεκτρόνια (ενέργεια), (β) η τιμή της έντασης του ρεύματος που καθορίζει τον αριθμό των παραγομένων φωτονίων (ένταση) και (γ) ο χρόνος έκθεσης

Η ακρίβεια των μετρήσεων επηρεάζεται από:

- Ακτινική απόκλιση
- Αξονική απόκλιση
- Γωνιακή απόκλιση
- Άξονα περιστροφής

Μηχανή κόπωσης Instron 8801





**Μηχανή στατικής θλίψης Instron KN1200**



Στατικό πείραμα ενός δοκιμίου στην μηχανή στατικής θλίψης Instron KN1200

**Μηχανή στρέψης Instron 55MT2**

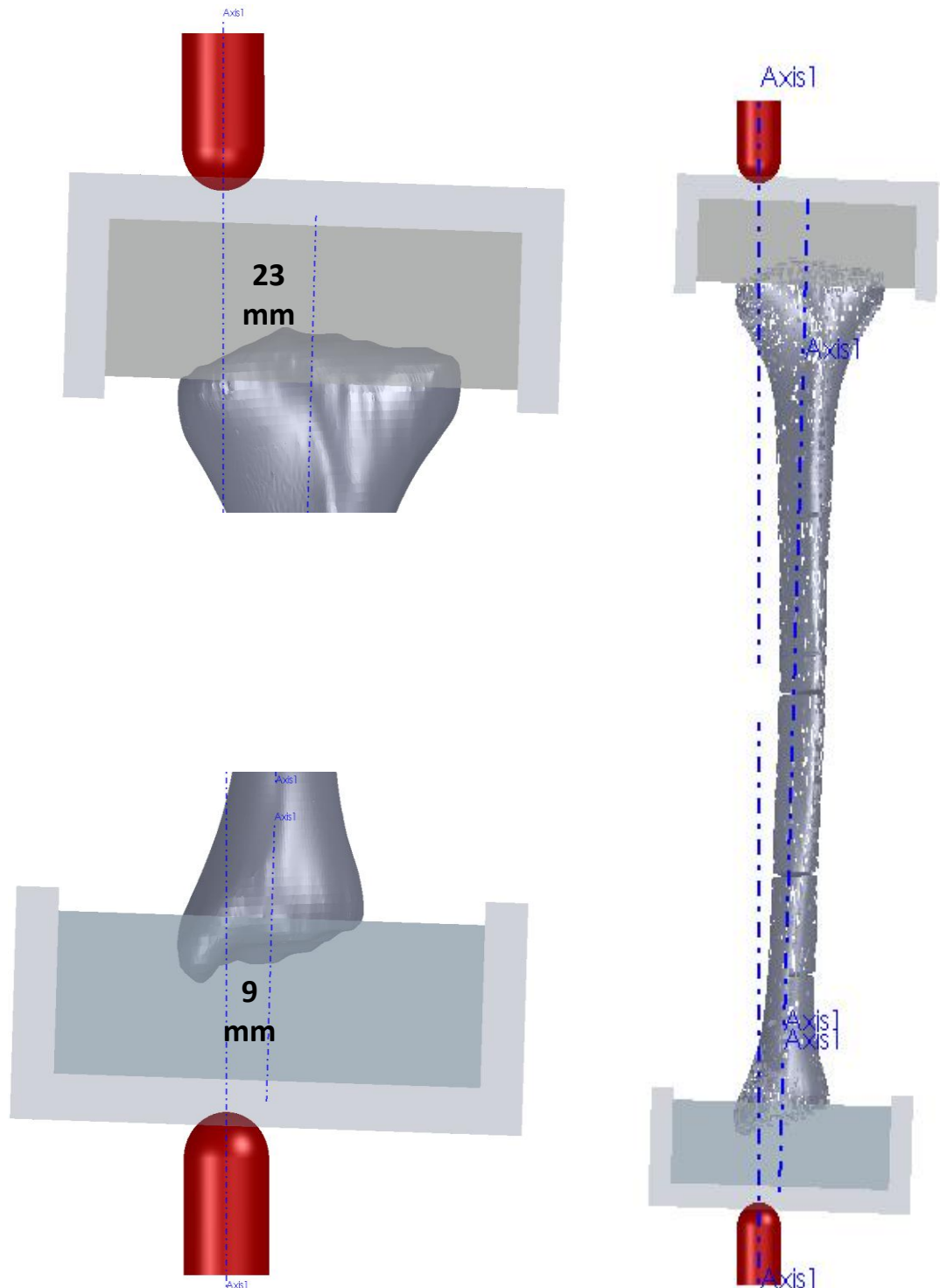


Πείραμα στρέψης ενός δοκιμίου στην μηχανή στρέψης Instron 55MT2

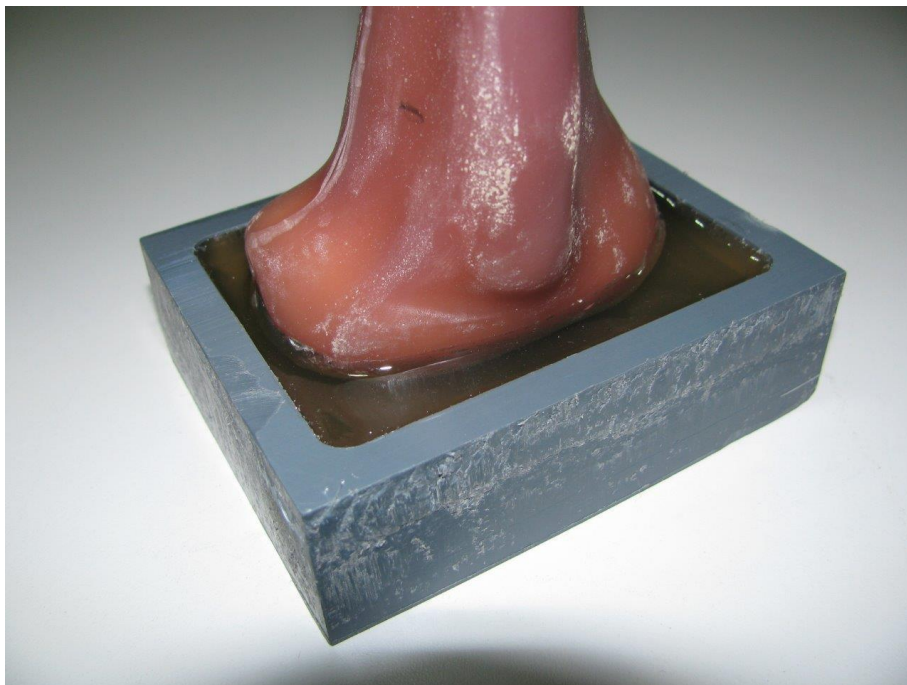
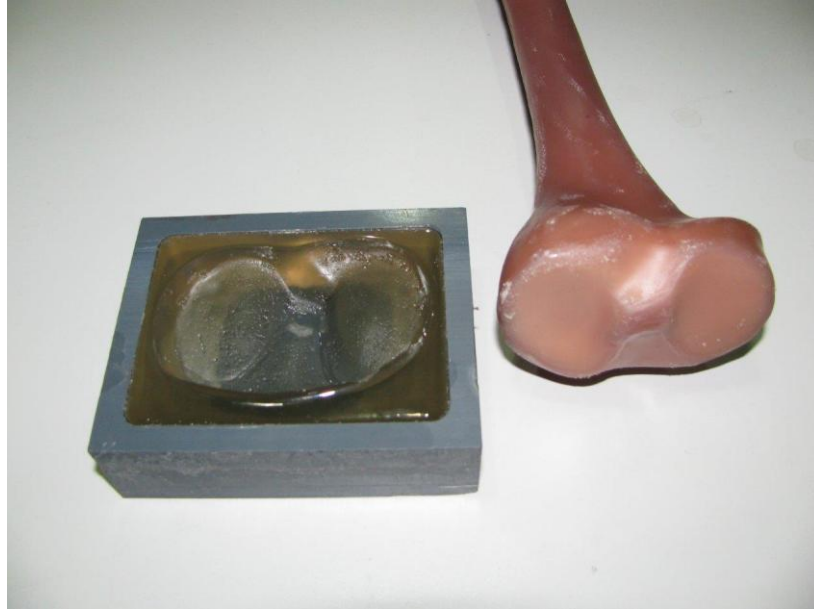


## ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Προκειμένου να αναπτύσσεται κατά τη δοκιμασία κόπωσης σύνθετη καταπόνηση του συμπλέγματος οστού-ήλου με μορφή θλίψης και κάμψης, επιλέχθηκε η έκκεντρη φόρτιση των δοκιμίων σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα.



Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε ειδικό καλούπι για τη στήριξη του συμπλέγματος οστού-ήλου στη μηχανή κόπωσης.





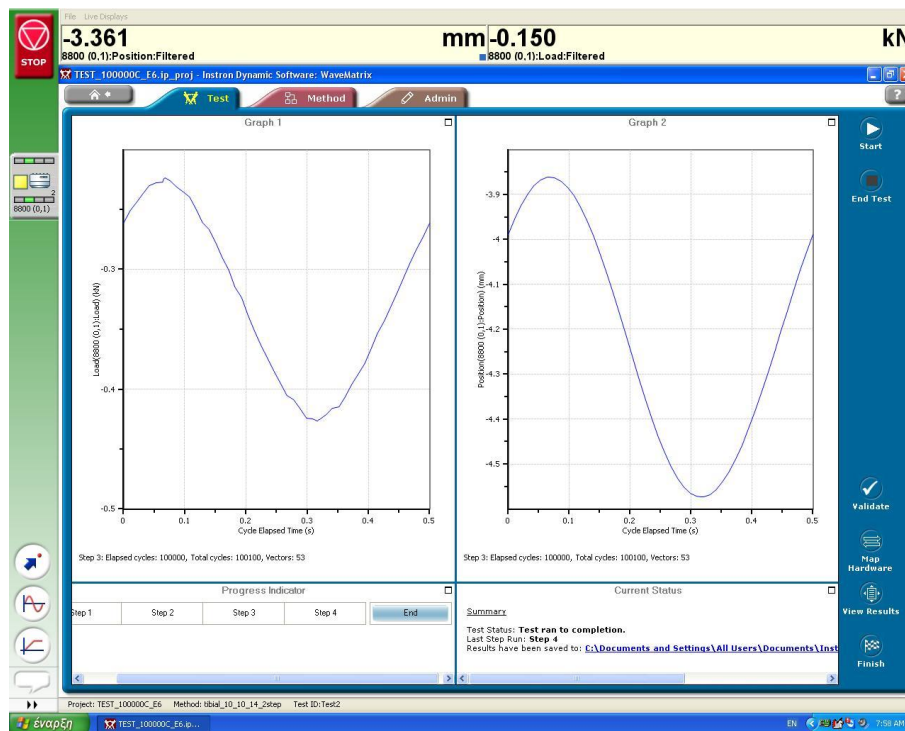
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

### Πειράματα κόπωσης

#### Συνθήκες πειραμάτων:

Συχνότητα κυκλικής φόρτισης 2 Hz  
 Αριθμός κύκλος φόρτισης 100.000  
 Εύρος δύναμης: 200N- 450N  
 Προφόρτιση: 150N

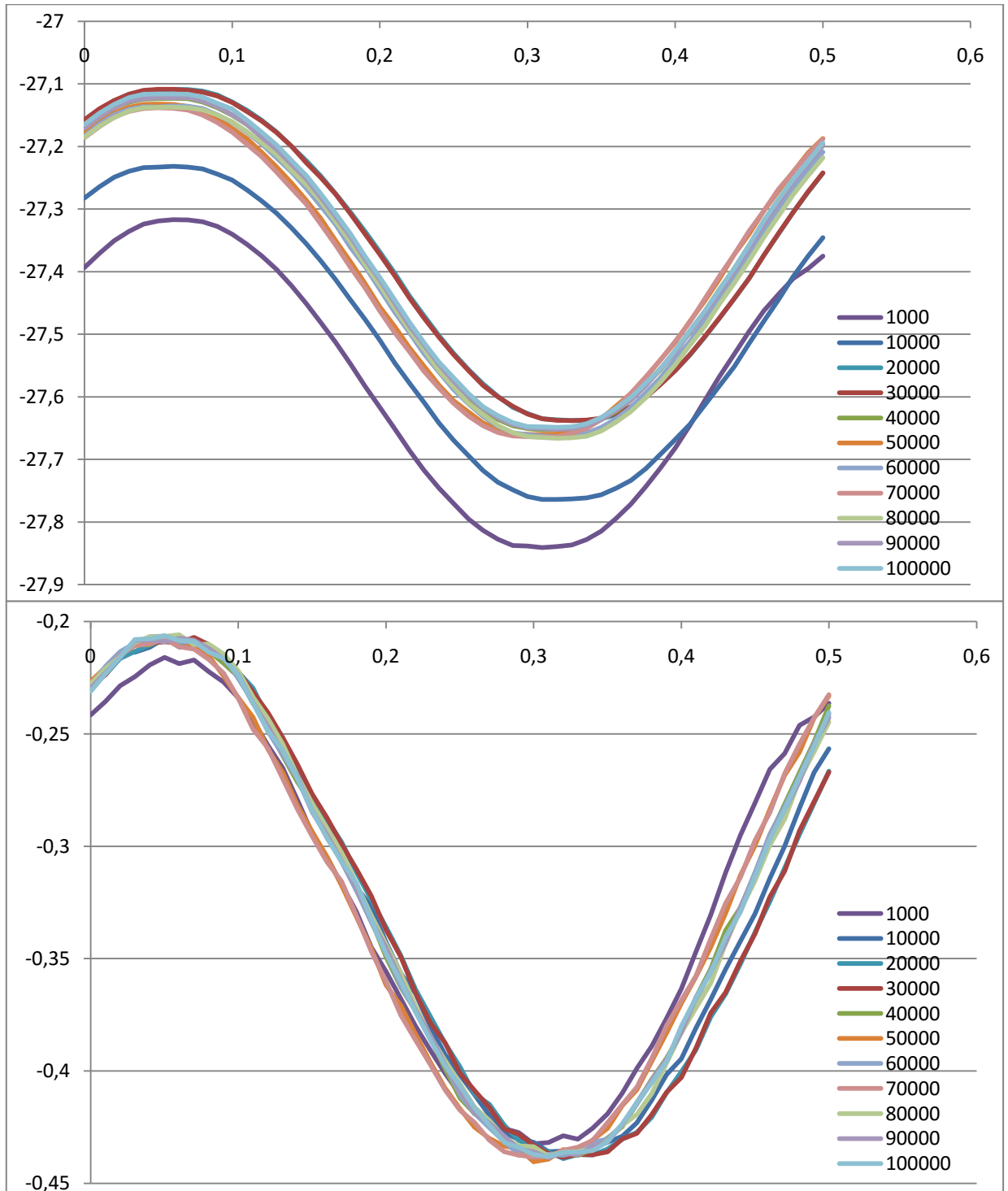
Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε το καταγεγραμμένο σήμα της δύναμης (Haversine) και της μετατόπισης ενός κύκλου φόρτισης.



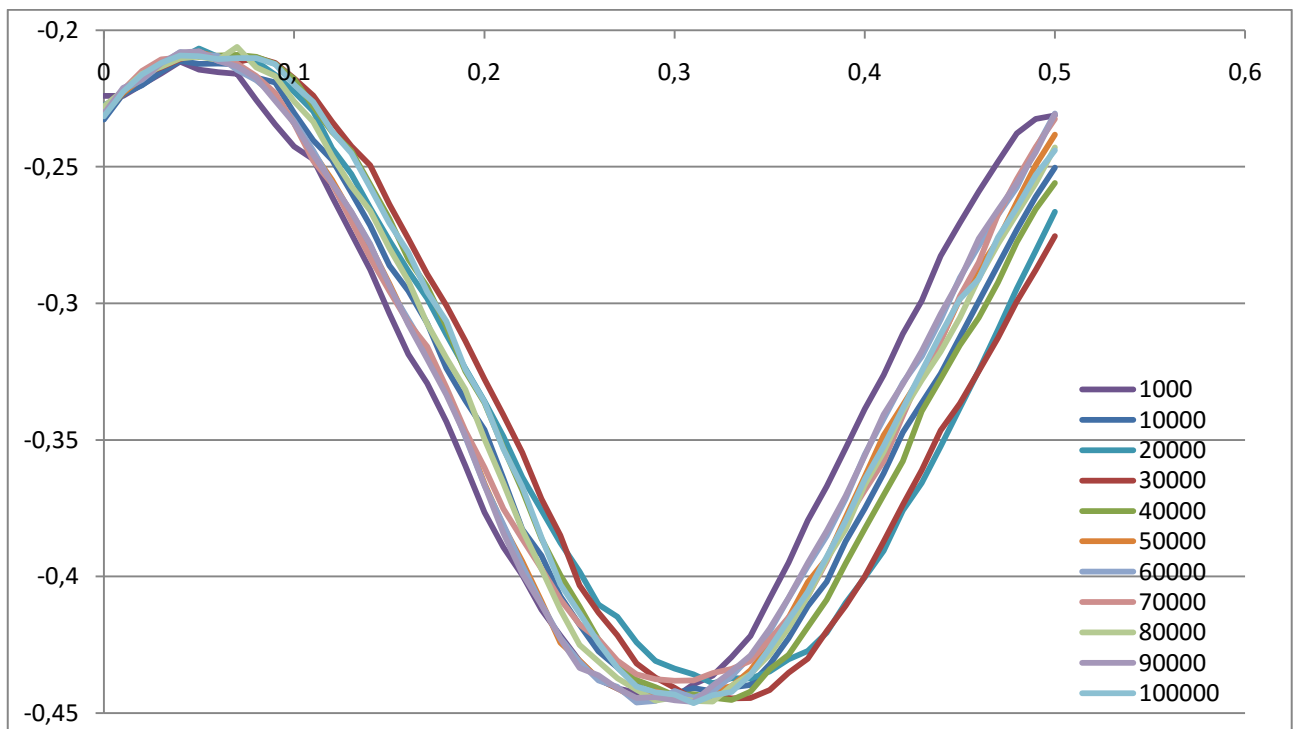
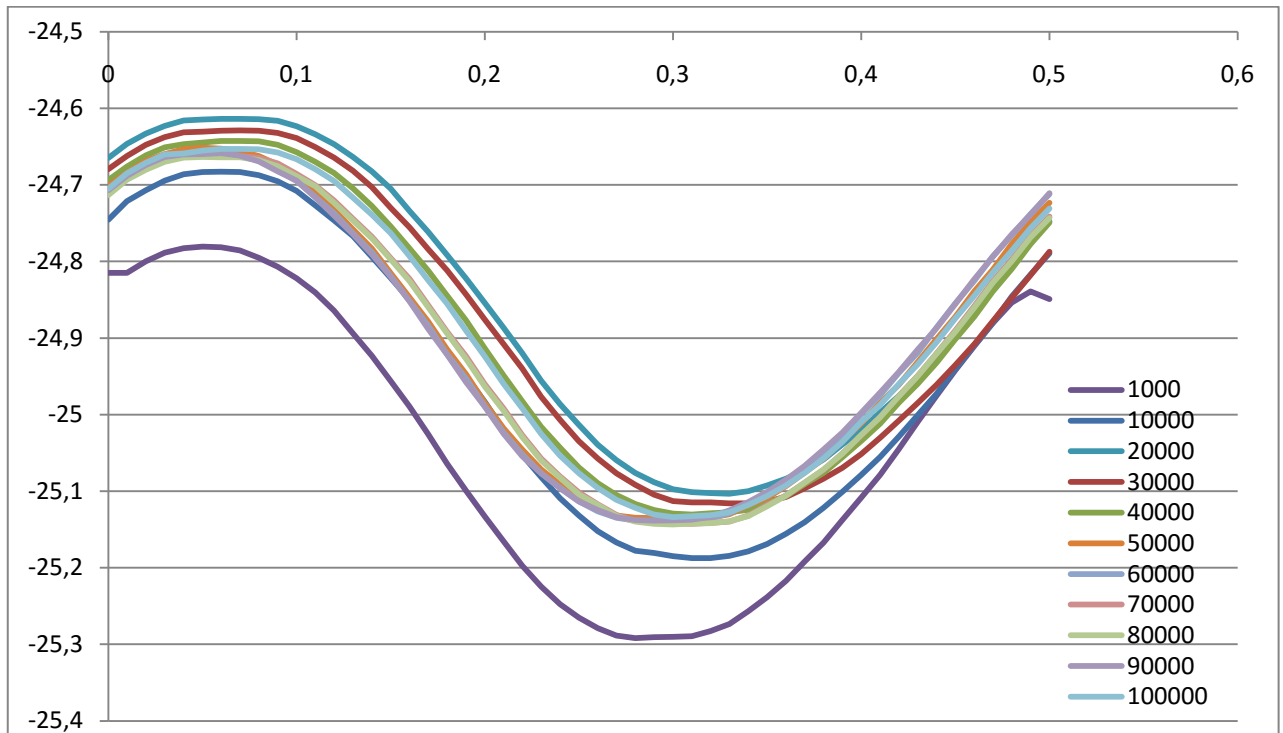


**Αποτελέσματα πειραμάτων κόπωσης**

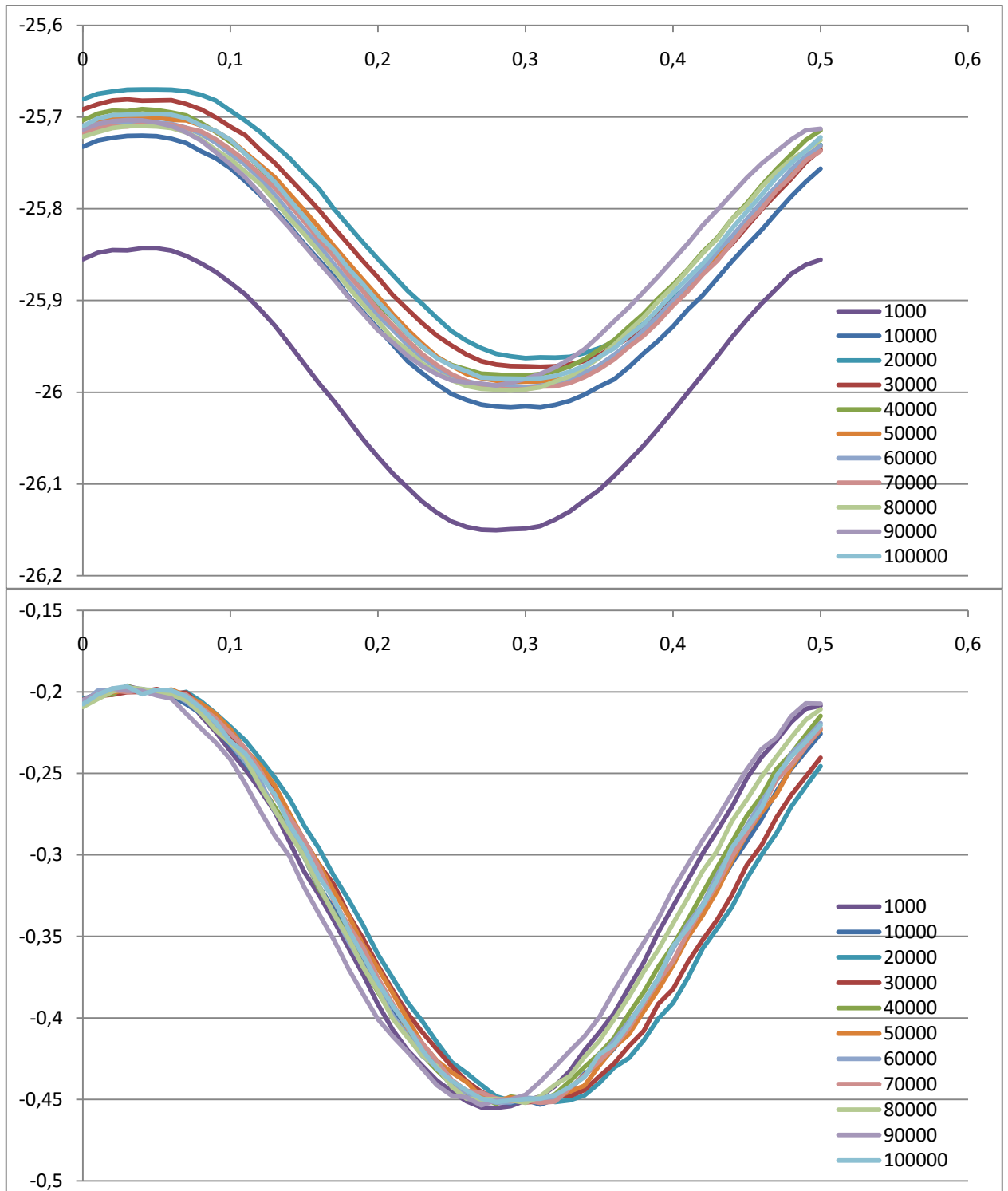
**Δοκίμιο Α1: 100.000 κύκλοι φόρτισης**



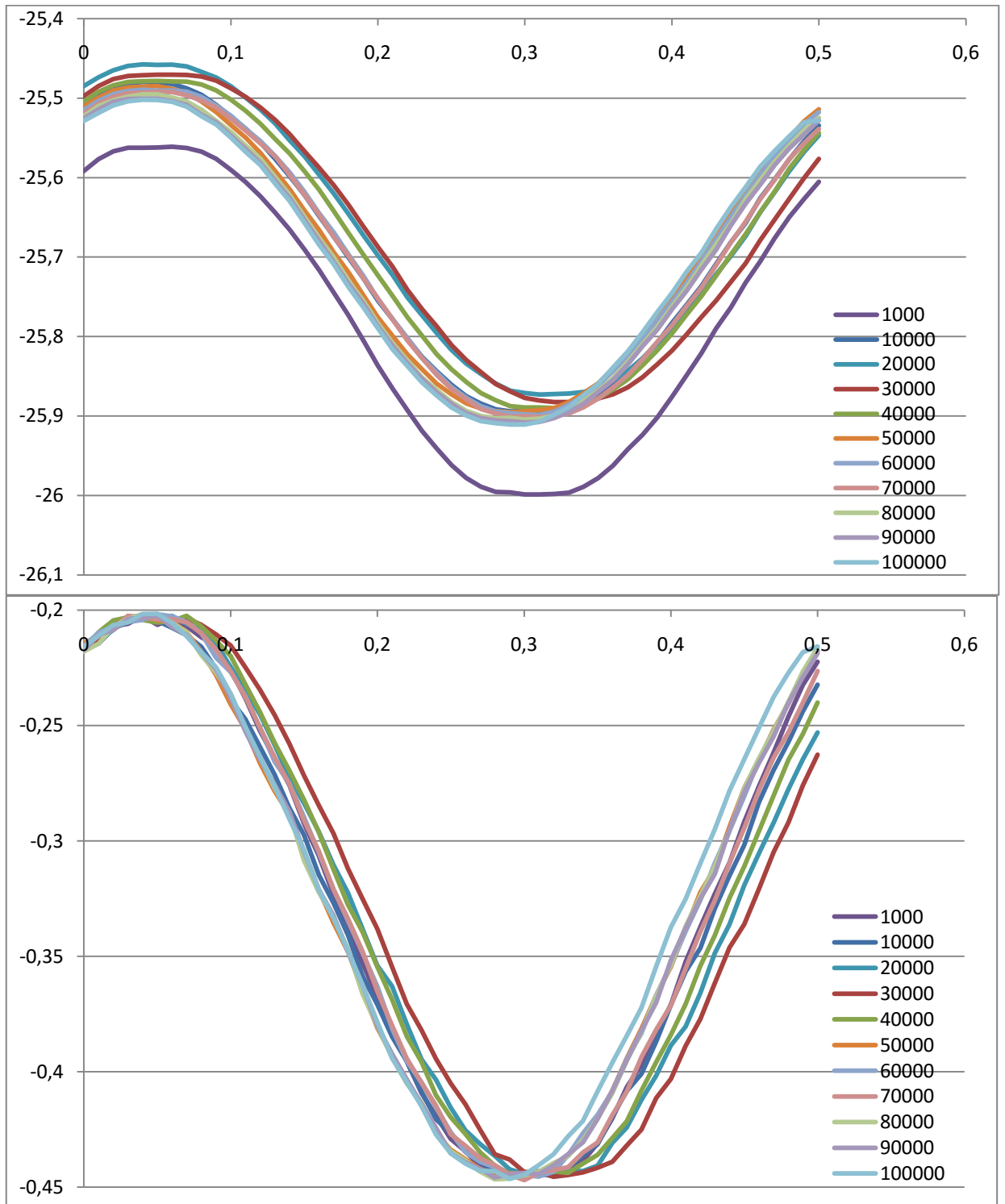
**Δοκίμιο Β1: 100.000 κύκλοι φόρτισης**



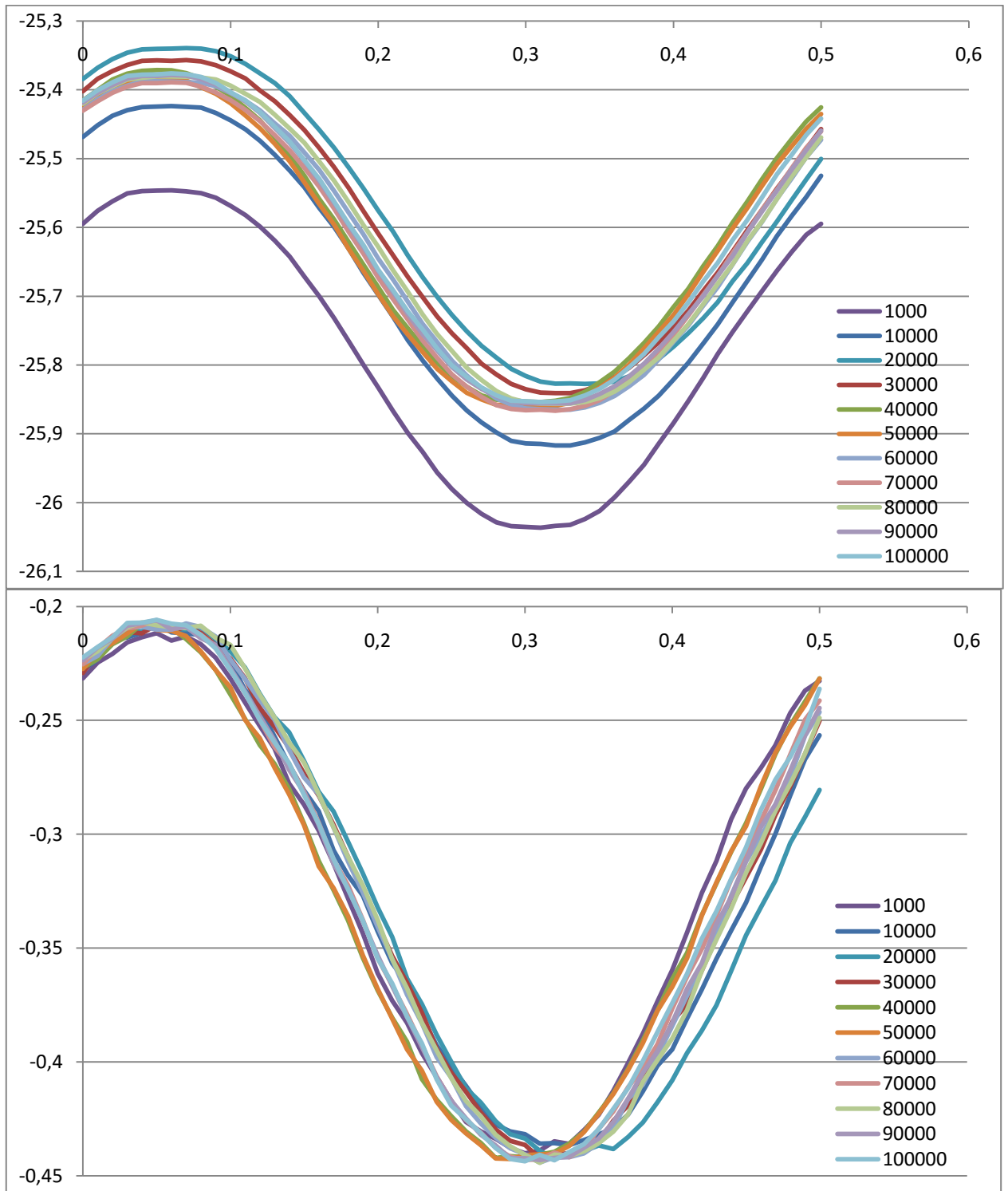
**Δοκίμιο D1: 100.000 κύκλοι φόρτισης**



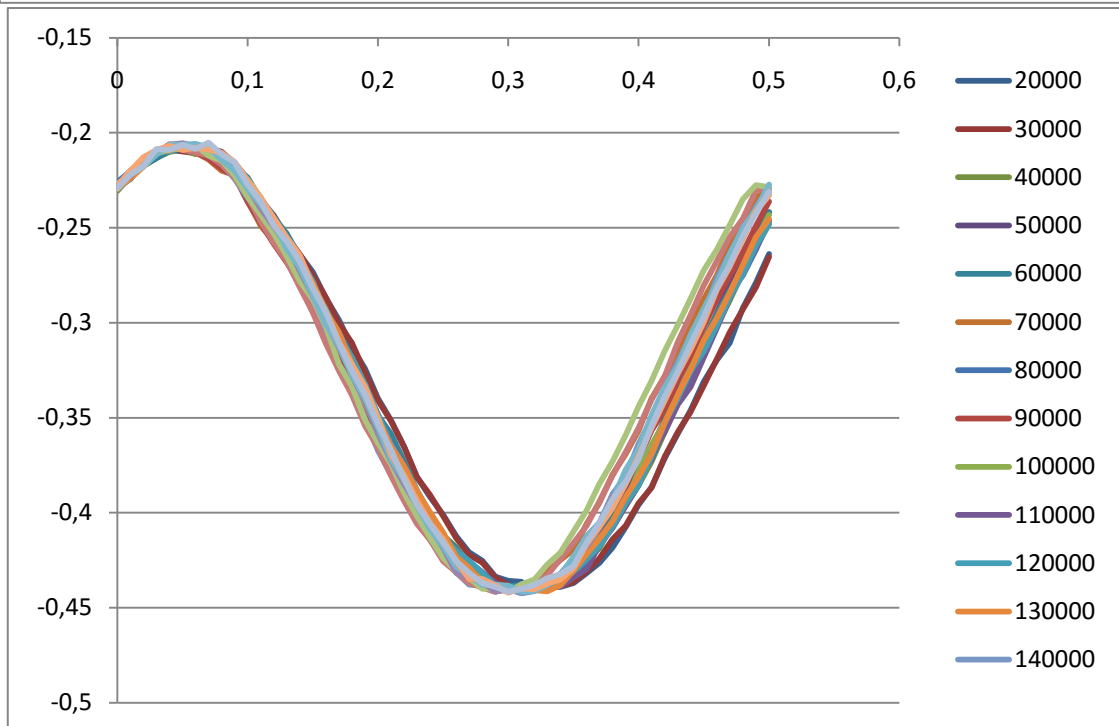
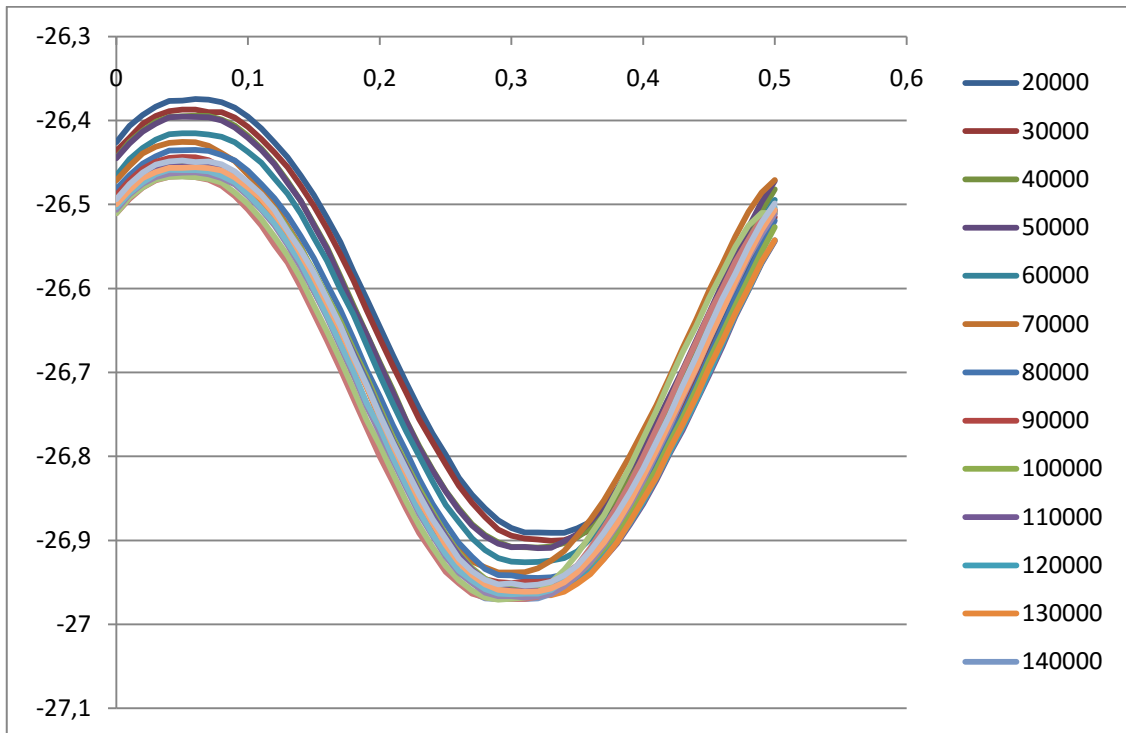
**Δοκίμιο F4: 100.000 κύκλοι φόρτισης**



**Δοκίμιο Α2: 200.000 (100.000 + 100.000) κύκλοι φόρτισης**



**A3 300.0000 (100.000 + 200.000) κύκλους φόρτισης**



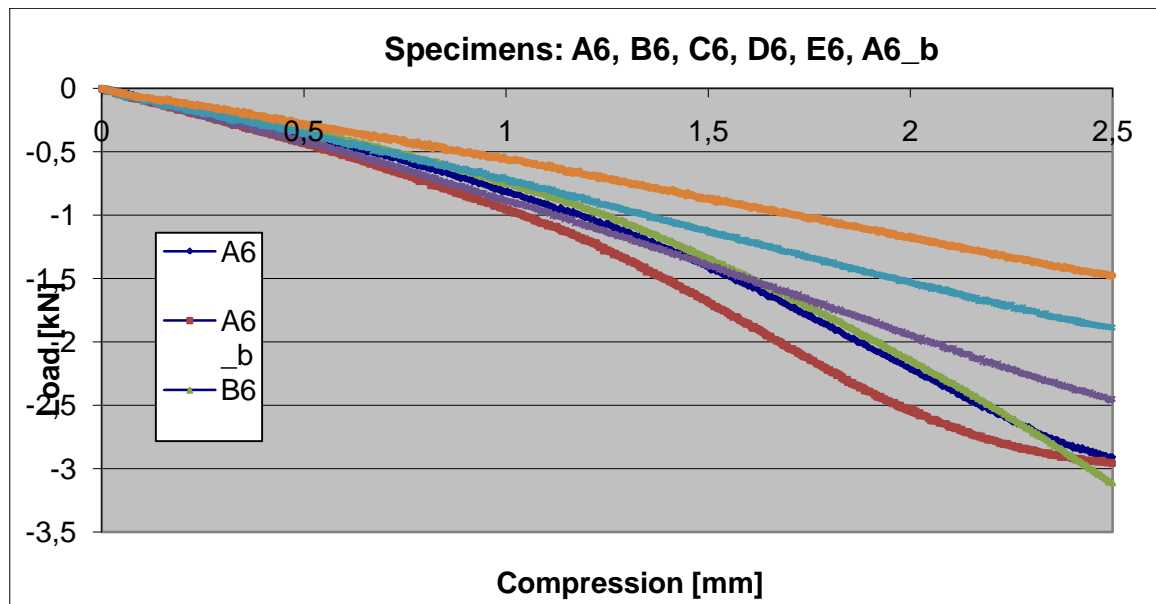
Στον παρακάτω πίνακα καταχωρείται η δυναμική στιβαρότητα που προκύπτει από τα πειράματα κόπωσης.

| Ενδομυελικοί ήλοι κνήμης / Κύκλοι φόρτισης | Δυναμική Στιβαρότητα $K_{dyn}$ [N/mm] |
|--|---------------------------------------|
| A1 Citieffe /100.000 κύκλοι                | 433                                   |
| B1 Braun Aescular/100.000 κύκλοι           | 481                                   |
| D1 Orthofix /100.000 κύκλοι                | 870                                   |
| F4 Synthes /100.000 κύκλοι                 | 587                                   |
| A2 200.0000 (100.000 + 100.000) κύκλοι     | 485                                   |
| A3 300.0000 (100.000 + 200.000) κύκλοι     | 460                                   |

### Πειράματα στατικής φόρτισης άνευ κόπωσης

Ταχύτητα φόρτισης 2mm/min

### Ομοαξονική φόρτιση άνευ κόπωσης

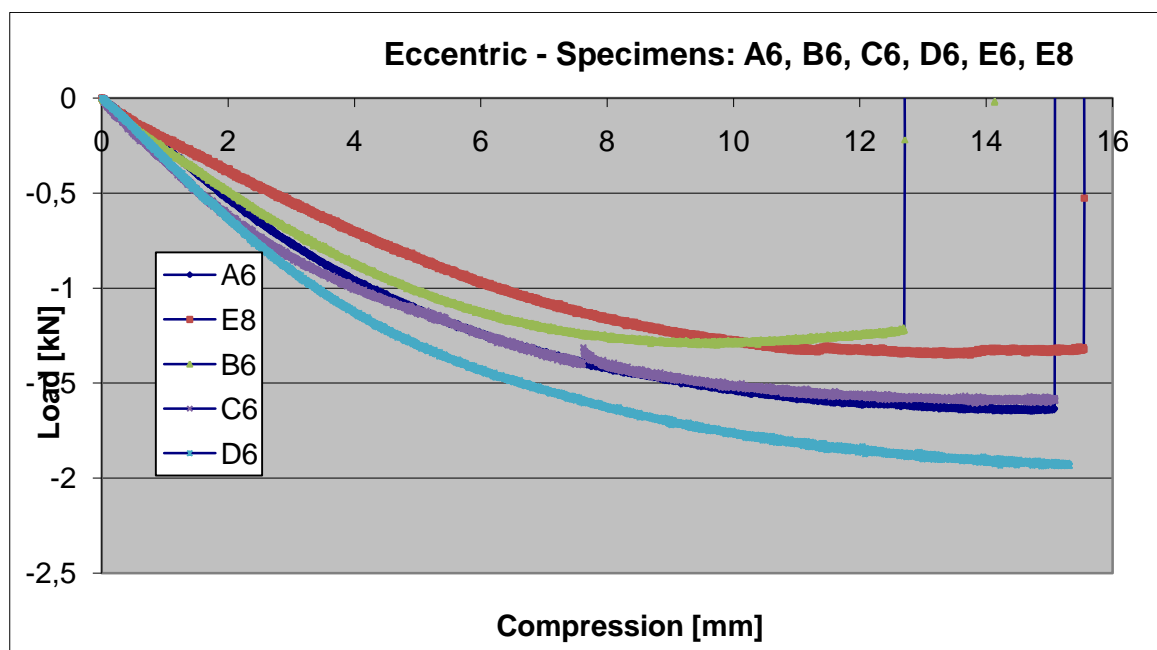


Διάγραμμα μετά από την στατική ομοαξονική φόρτιση άνευ κόπωσης, των δοκιμίων (A6, A6\_b, B6, C6, D6, E6, F6)

Στον παρακάτω πίνακα καταχωρείτε η στατική στιβαρότητα η οποία προκύπτει από τα στατικά πειράματα ομοαξονικής φόρτισης άνευ κόπωσης.

| Ενδομυελικοί ήλοι κνήμης / Κύκλοι φόρτισης | Στατική στιβαρότητα k N/mm |
|--|----------------------------|
| A6 Citieffe                                | 1209                       |
| A6_b Citieffe                              | 1500,92                    |
| B6 Braun Aesculap                          | 1475                       |
| C6 OrthoSelect                             | 1116,55                    |
| D6 Orthofix                                | 2111,48                    |
| E6 Stryker                                 | 645,12                     |

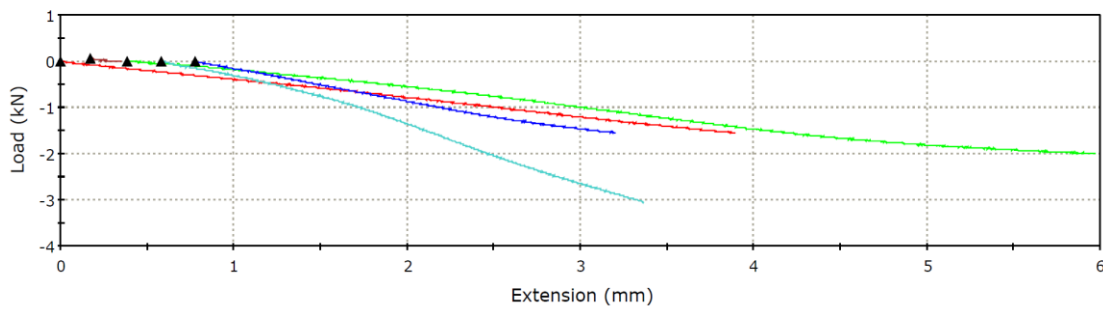
### Έκκεντρη αξονική φόρτιση



Διάγραμμα μετά από την στατική έκκεντρη φόρτιση άνευ κόπωσης, των δοκιμίων (A6, B6, C6, D6, E6, F6)



Πείραμα στατικής φόρτισης μετά από κόπωση (Ομοαξονικά)



Για το δοκίμιο (E2, τιτάνιο σωλήνας) μπλε καμπύλη

Για το δοκίμιο (C1, stainless steel Πλήρους διατομής) σιέλ-γαλάζιο καμπύλη

Στον παρακάτω πίνακα προκύπτει η στατική στιβαρότητα μετά από τα στατικά πειράματα ομοαξονικής φόρτισης σε δοκίμια που είχαν υποστεί κόπωση (100.000 κύκλοι).

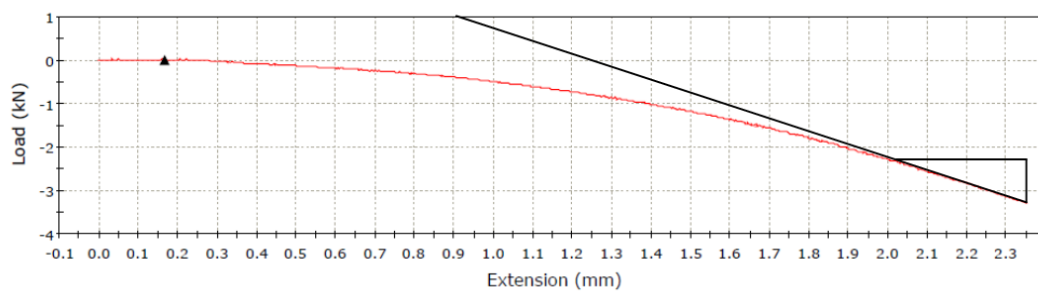
| Ενδομυελικοί ήλοι κνήμης / Κύκλοι φόρτισης | Στατική στιβαρότητα k N/mm |
|--|----------------------------|
| C1 OrthoSelect / 100.000 κύκλοι            | 1222,93                    |
| E2 Stryker / 1000.000 κύκλοι               | 943,40                     |

## Πείραμα στατικής φόρτισης συνθετικού οστού άνευ ήλου (Sawbone)

Μηχανικές ιδιότητες σύμφωνα με τον κατασκευαστή

| Πυκνότητα | Εφελκυσμός     |                     | Θλίψη          |                     |
|-----------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
|           | Μέγιστη Αντοχή | Μέτρο Ελαστικότητας | Μέγιστη Αντοχή | Μέτρο Ελαστικότητας |
| g/cc      | MPa            | GPa                 | MPa            | GPa                 |
| 1.64      | 106            | 16.0                | 157            | 16.7                |

Από το στατικό πείραμα θλίψης προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα μετά από την στατική ομοαξονική φόρτιση του συνθετικού οστού άνευ ήλου (E8 Sawbone)

Η στιβαρότητα που προκύπτει μετά από υπολογισμούς του sawbone μετά από το πείραμα είναι:

|                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| <b>E8 Sawbone</b> | $K = 3333 \text{ N/mm}$ |
|-------------------|-------------------------|

**Μελέτη αντοχής στατικής φόρτισης συνθετικού οστού (sawbone) με FEM**



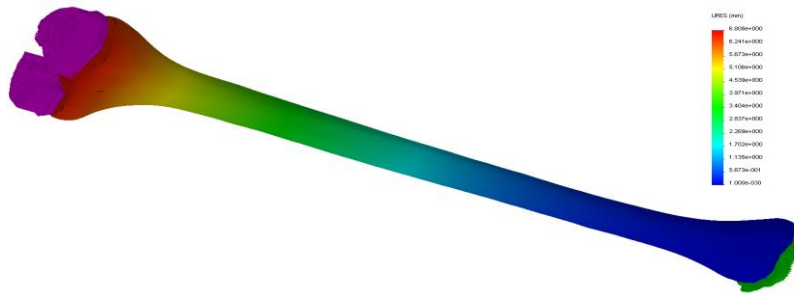
**3D Γεωμετρία**



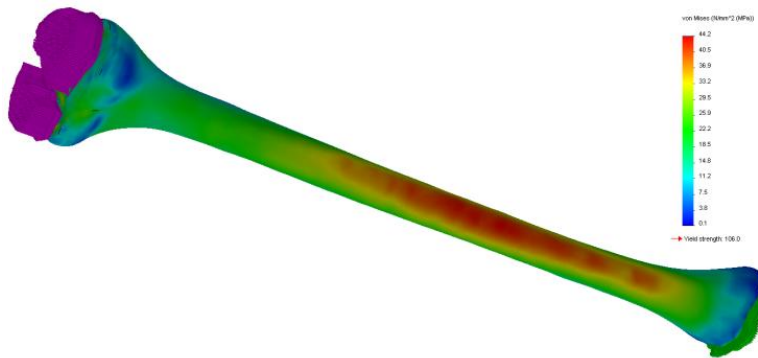
**Πλεγματοποίηση**



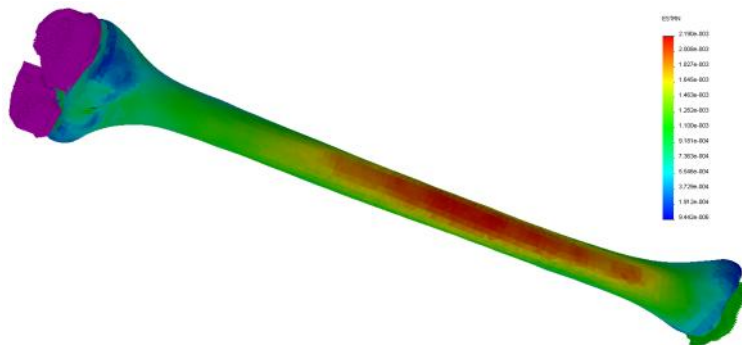
**Οριακές συνθήκες στήριξης**



**Συνολική Παραμόρφωση**



**Τάσεις Von Mises**

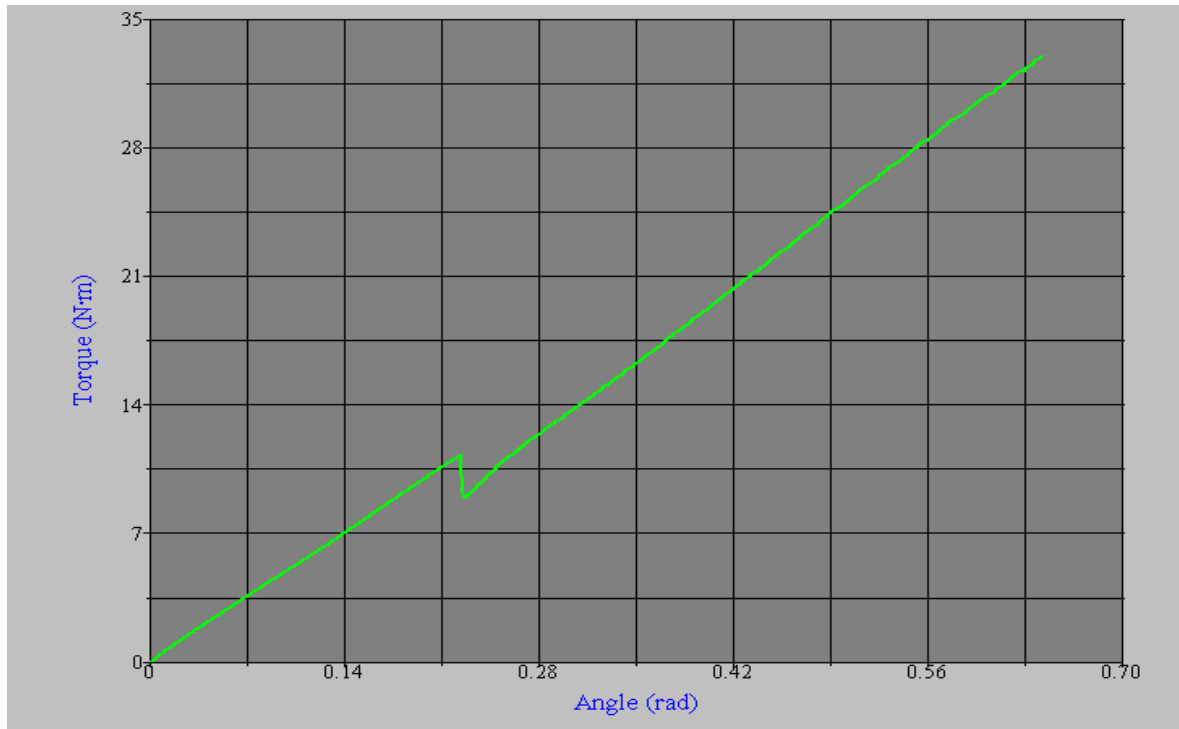


**Ειδική Παραμόρφωση**

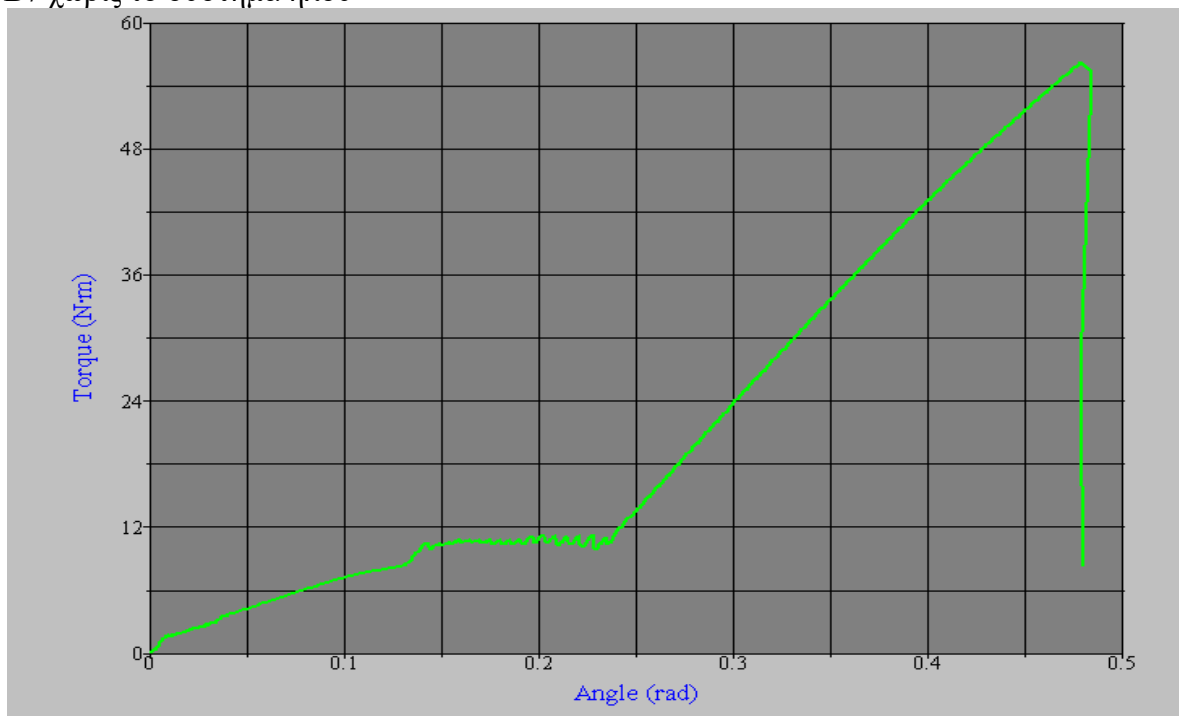
## Πειράματα στρέψης

Συνθήκες πειραμάτων: Ταχύτητα στρέψης  $15^\circ / \text{min}$

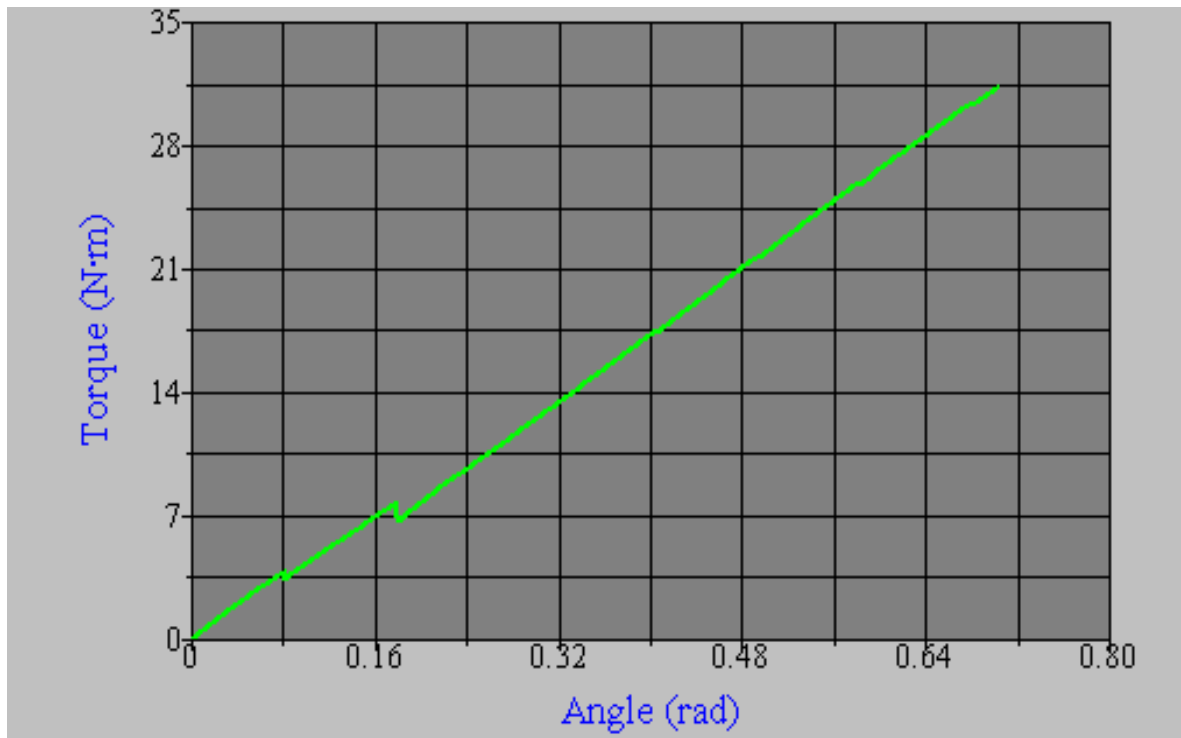
Δοκίμιο: A7



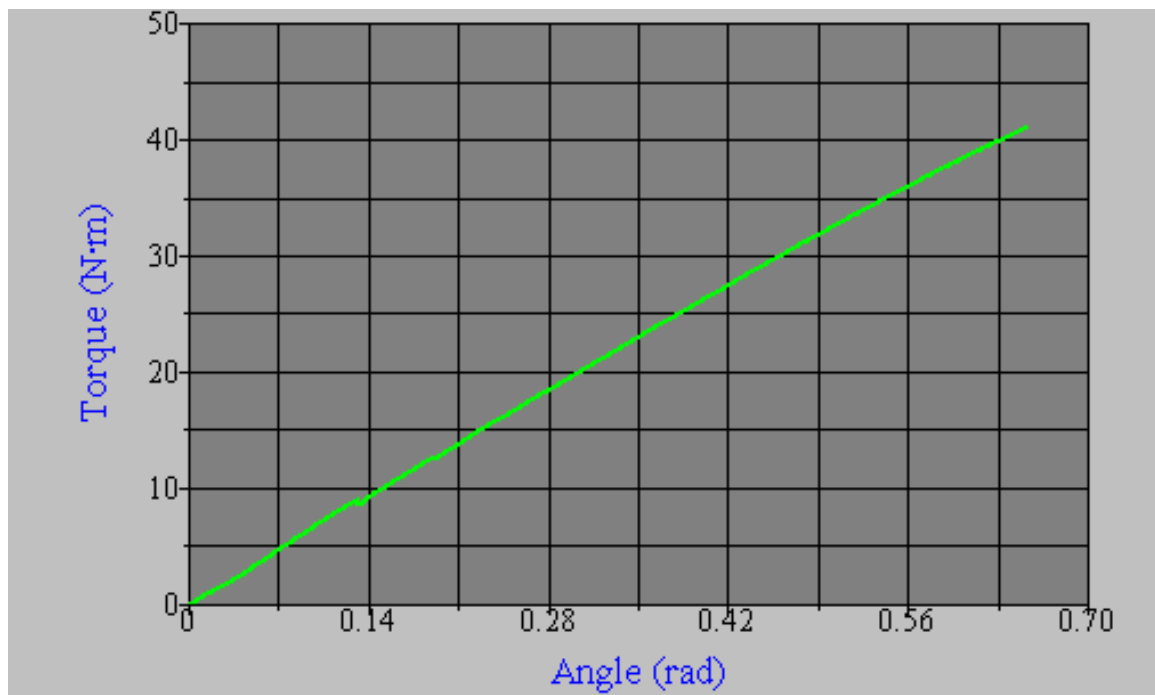
B7 χωρίς το σύστημα ήλου



B7a

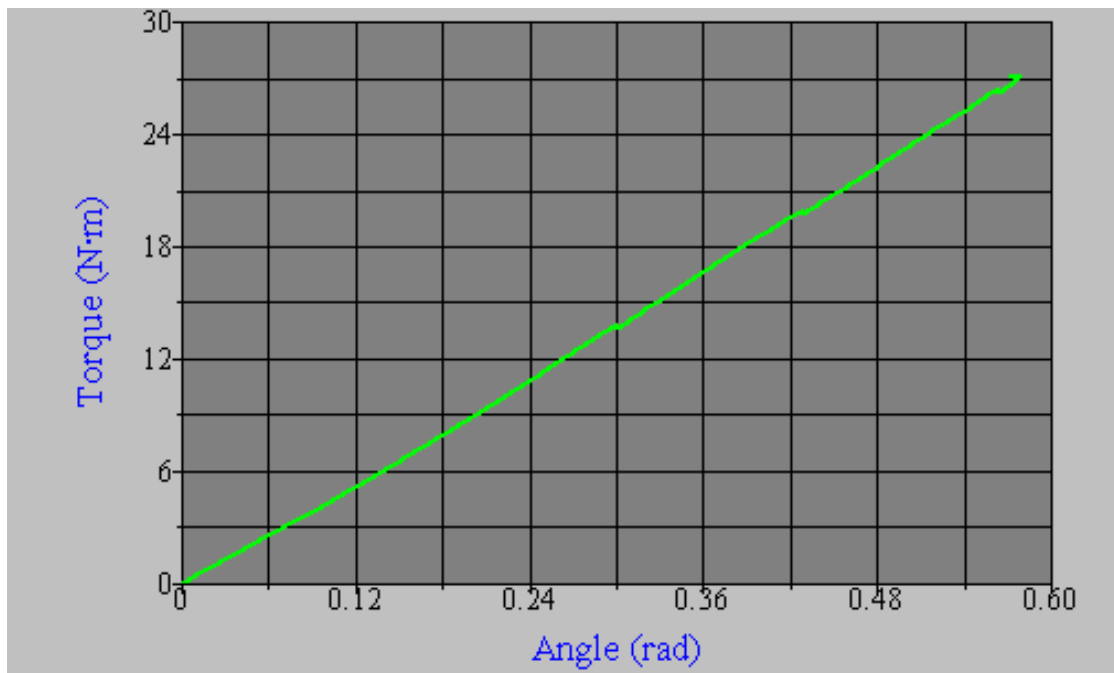


C7

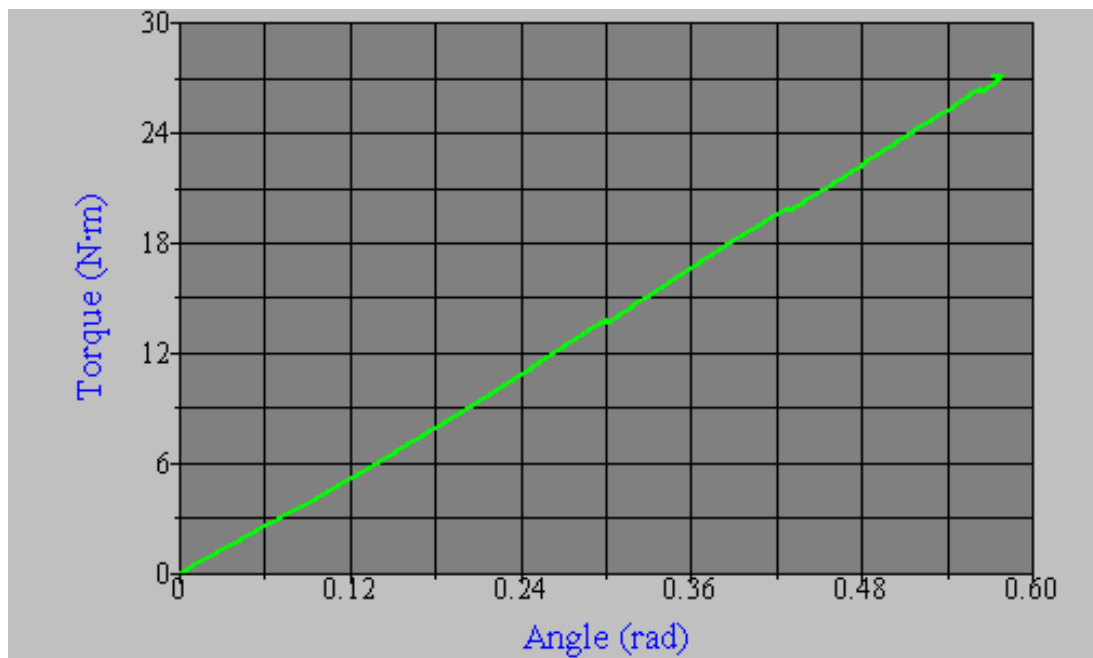




D7



E7



#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα πειράματα ξεκίνησαν με την διαδικασία κόπωσης των οστεοσυνδέσεων.

Πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα δοκίμια (Α,Β,С,Д,Е,Ғ) 100.000 κύκλοι φόρτισης και προέκυψε η στιβαρότητα τους. Τα πειράματα συνεχίστηκαν για τα δοκίμια Α2 και Α3 που είχαν την χαμηλότερη στιβαρότητα για ακόμα 100.000 και 200.000 κύκλους φόρτισης αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα μας έδειξαν ότι η στιβαρότητα μεγάλωσε.

Ακολούθησαν στατικά πειράματα στα δοκίμια άνευ κόπωσης και στα δοκίμια που είχαν υποστεί κόπωση 100.0000 κύκλοι και παρατηρήσαμε πάλι ότι η στιβαρότητα μεγάλωσε στα δοκίμια που είχαν υποστεί κόπωση.

Δεν υπήρχε κανένα πρόβλημα ακαμψίας ούτε παρατηρήθηκε κανένα ράγισμα ή κανένα χαλάρωμα τον κοχλιών.

Τέλος τα πειράματα στρέψης έγιναν με επιτυχία χωρίς κανένα πρόβλημα και μας έδειξαν ότι αντέχουν.