

# Αρχές εμβιομηχανικής των οστών

**Χ.Κ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ**

Εργαστήριο Έρευνας των Παθήσεων του Μυοσκελετικού Συστήματος, Πανεπιστήμιο Αθηνών

## Περίληψη

Η εμβιομηχανική είναι ο κλάδος της μηχανικής που μελετά την επίδραση των φυσικών δυνάμεων και νόμων στα βιολογικά συστήματα και υλικά καθώς και με το αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης. Παρατίθενται οι βασικές αρχές που διέπουν την εμβιομηχανική μελέτη των οστού και των καταγμάτων. Με την εμβιομηχανική γίνεται δυνατή η ποσοτική μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των οστών είτε είναι ανέπαφα είτε έχουν υποστεί λύση της συνέχειάς τους.

*Λέξεις κλειδιά: Ακαμψία, Απορρόφηση Ενέργειας, Εμβιομηχανική, Οστό, Παραμόρφωση, Πλαστικό, Τάση, Ψαθυρό*

## Principles of bone biomechanics

**C.K. YIANNAKOPOULOS**

Laboratory for the Research of the Musculoskeletal System, University of Athens

## Summary

Biomechanics is the branch of mechanics dealing with the internal and external forces acting on the human body and the effects produced by these forces. The basic principles describing the biomechanical behaviour of bone and fractures are presented. With biomechanics the quantitative evaluation of intact or severed bone is made possible.

*Keywords: Biomechanics, Bone, Deformation, Ductile, Energy Absorption, Plastic, Strain, Stiffness, Stress*

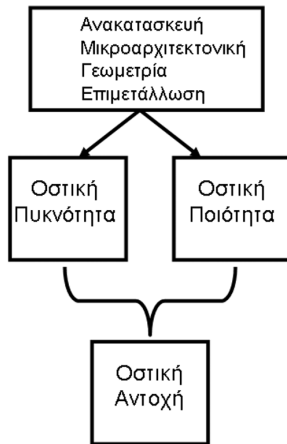
Η εμβιομηχανική είναι ο κλάδος της μηχανικής που μελετά την επίδραση των εσωτερικών και εξωτερικών μηχανικών φορτίσεων που ασκούνται στα βιολογικά συστήματα και ασχολείται με τη διερεύνηση του αποτελέσματός τους [1,2]. Η εμβιομηχανική μπορεί να μελετά μόρια όπως είναι το μόριο του κολλαγόνου ή να επεκτείνεται στη μελέτη ιστών και οργάνων. Η εμβιομηχανική μελετά την αεροδυναμική της πτήσης των πουλιών, την υδροδυναμική της κολύμβησης των δελφινιών και την κίνηση σε όλα τα επίπεδα από τα μεμονωμένα κύτταρα έως τους πλήρεις οργανισμούς. Η κινησιολογία ειδικότερα μελετά την κίνηση των ανθρώπων. Η εμβιομηχανική μελετά επίσης τις ιδιότητες των βιοϋλικών.

Το οστό είναι από εμβιομηχανικής άποψης ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από διαφορετικούς τύπους ιστών [3-5]. Η βασική κατασκευή του οστού περιλαμβάνει μία μήτρα, την αποσιτανωμένη θεμέλια ουσία, η οποία ενισχύεται με ίνες κολλαγόνου και γιθαυτό παρομοιάζεται με το πλέξιγκλας. Αποτελείται από ανόργανα άλατα (70%), πρωτεΐνες (22%) και νερό (18%) [3]. Η οστική ποσότητα και ποιότητα μπορεί να εκτιμηθεί με διάφορες μεθόδους:

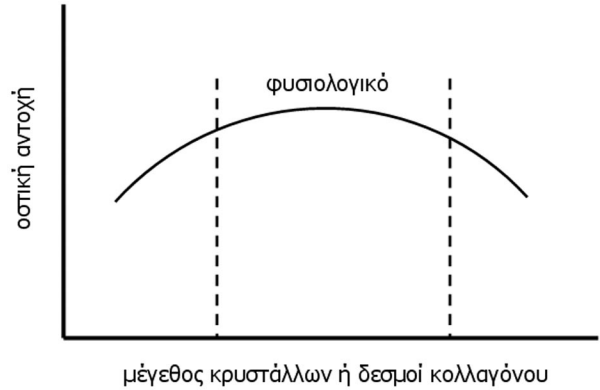
1. μέτρηση οστικής μάζας (βάρους στάχτης, QCT, pQCT, DEXA),
2. στατική/δυναμική ιστομορφομετρία,

3. δομική ανάλυση,
4. ιστολογική εξέταση (χαρακτηριστικά επιφύσεων, μυελού και αρθρικού χόνδρου),
5. εμβιομηχανική μελέτη.

Το οστό παρουσιάζει ιεραρχική δομή στην κατασκευή του [6,7]. Οι μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά του οστού καθορίζονται από την εξειδίκευση της κατασκευής του. Το οστό έχει τη μοναδική ιδιότητα να επισκευάζει το ίδιο τις βλάβες που οφείλονται στη συνεχή καταπόνησή του, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η μηχανική του ακεραιότητα. Η μηχανική αντοχή των οστών τυπικά ελέγχεται σε δύο επίπεδα: στο επίπεδο του υλικού και στο επίπεδο ολόκληρου του οστού. Στην εμβιομηχανική οι ιδιότητες του οστού ως υλικό διαφέρουν από τις ιδιότητες του οστού ως κατασκευή και θα πρέπει να μελετώνται ξεχωριστά. Η μηχανική αντοχή ενός οστού ως υλικό εξαρτάται από τη μικροσκοπική κατασκευή και τις ιδιότητές του, ενώ η μηχανική αντοχή ως κατασκευή εξαρτάται από το μέγεθος, την κατανομή της μάζας του, τη μακροσκοπική γεωμετρία και την εσωτερική αρχιτεκτονική κατασκευή του, χαρακτηριστικά που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ διαφορετικών οστών και μεταξύ διαφορετικών περιοχών του ίδιου οστού (Εικόνες 1,2). Η αντοχή του οστού εξαρτάται επομένως από την οστική μάζα και πυκνότητα



**Εικ. 1.** Παράγοντες που καθορίζουν την οστική αντοχή.



**Εικ. 2.** Η οστική αντοχή εξαρτάται από την μικροσκοπική κατασκευή του οστού, το μέγεθος των κρυστάλλων υδροξυαπατίτη και από την κατασκευή του κολλαγόνου.

Χαρακτηριστικό	Σπογγώδες Οστό	Φλοιώδες Οστό
Μικροκατασκευή	Πάχος δοκίδων 100-640 $\mu\text{m}$	Διάμετρος οστεόνων 100-300 $\mu\text{m}$
Γραμμές τσιμέντου	Περισσότερες στο σπογγώδες	
Πάχος πεταλιών	1-5 $\mu\text{m}$	1-5 $\mu\text{m}$
	52 $\mu\text{m}^2$ , 577/ $\text{mm}^2$	30-40 $\mu\text{m}^2$ , 460/ $\text{mm}^2$
Μέγεθος κοιλοτήτων οστεοκυττάρων	294-942/ $\text{mm}^2$	

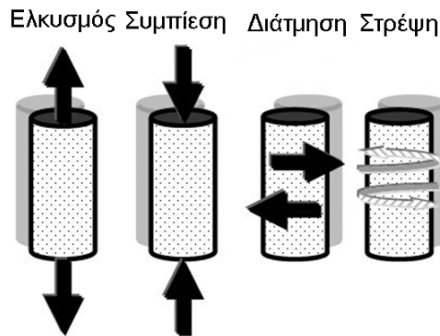
**Πίν. 1.** Διαφορές στη μικροκατασκευή του σπογγώδους και του φλοιώδους οστού.

αλλά και από το μέγεθος του οστού [8,9]. Οι μηχανικές ιδιότητες του οστού ως υλικό μεταβάλλονται ελάχιστα με την πάροδο της ηλικίας, ενώ οι μεταβολές της αντοχής των οστών οφείλονται κυρίως σε μεταβολές της μακροσκοπικής διαμόρφωσής τους εξαιτίας του φαινομένου της ανακατασκευής.

Το οστό διακρίνεται δομικά και λειτουργικά σε σπογγώδες και φλοιώδες οστό. Η χημική σύσταση του σπογγώδους και του φλοιώδους ιστού δε διαφέρει, αλλά η διαφορά τους εντοπίζεται στο μικροσκοπικό επίπεδο, πράγμα στο οποίο οφείλεται και η διαφορετική μηχανική τους συμπεριφορά (Πίνακας 1). Το οστό μπορεί να φορτιστεί με διάφορους τρόπους (Εικόνα 3). Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι φόρτισης του οστού: η συμπίεση, ο ελκυσμός και η διάτμηση. Η συμπίεση εφαρμόζεται, όπως και ο ελκυσμός, κάθετα στην επιφάνεια διατομής του οστού και τείνει να το βραχύνει, ενώ ο ελκυσμός τείνει να το επιμηκύνει. Κατά τη διάτμηση το ένα τμήμα του οστού τείνει να κινηθεί σε α-

ντίθετη κατεύθυνση από το άλλο. Κατά το λυγισμό η δύναμη ασκείται κάθετα στον επιμήκη άξονα του οστού με αποτέλεσμα στην κοίλη επιφάνεια να ασκείται δύναμη συμπίεσης και στην κυρτή δύναμη ελκυσμού. Σε πραγματικές συνθήκες το οστό φορτίζεται με συνδυασμό φορτίσεων, κυρίως λυγισμό και στρέψη, που είναι συνδυασμός των παραπάνω φορτίσεων. Το είδος των αναπτυσσόμενων φορτίσεων διαφέρει στα διάφορα οστά εξαιτίας του ασύμμετρου σχήματός τους. Η φόρτιση της μηριαίας κεφαλής π.χ. οδηγεί σε ανάπτυξη συμπιεστικών δυνάμεων στον έσω φλοιό του μηριαίου και δυνάμεων ελκυσμού στον έξω φλοιό. Οι διατμητικές δυνάμεις κατανομούνται οριζόντια γύρω από τη διάφυση του οστού για να αντισταθούν στα αναπτυσσόμενα φορτία, ενώ οι δυνάμεις συμπίεσης και ελκυσμού κατευθύνονται σε γωνία 45 μοιρών προς το οριζόντιο επίπεδο και σε ορθή γωνία μεταξύ τους.

Η αντοχή του οστού επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες:

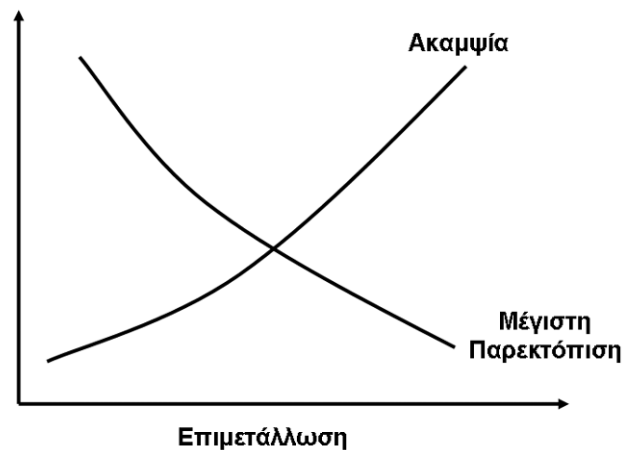


**Εικ. 3.** Οι βασικοί τρόποι φόρτισης του οστού. Συνήθως τα οστά φορτίζονται με συνδυασμό των παραπάνω βασικών τρόπων.

1. Τύπος της φόρτισης. Δυνάμεις ελκυσμού δημιουργούν εγκάρσια κατάγματα, συμπιεστικές δυνάμεις λοξά και στροφικές σπειροειδή.
2. Κατεύθυνση φόρτισης. Το οστό είναι ανισοτροπικό υλικό και επομένως οι ιδιότητές του εξαρτώνται από τον άξονα κατά τον οποίο φορτίζεται. Το οστό είναι ισχυρότερο στον επιμήκη άξονά του, παρά στον εγκάρσιο.
3. Ρυθμός φόρτισης. Η ταχεία φόρτιση προκαλεί αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και της μέγιστης δύναμης.

4. Κατάσταση του υλικού. Οι μηχανικές ιδιότητες του υγρού οστού διαφέρουν από αυτές του ξηρού.

Το οστό είναι ταυτόχρονα σκληρό, εξαιτίας της παρουσίας του απατίτη και ανθεκτικό λόγω της παρουσίας των ινών κολλαγόνου [10-12]. Είναι σκληρότερο τόσο από τον απατίτη όσο και από το κολλαγόνο, εάν αυτά τα υλικά εξεταστούν μεμονωμένα. Το κολλαγόνο συνεισφέρει σημαντικά στην αντοχή του οστού στον ελκυσμό αλλά όχι και στη συμπίεση εξαιτίας του υψηλού λόγου μήκους/πάχους που παρουσιάζει με αποτέλεσμα να λυγίζει εύκολα (Εικόνα 4). Το κολλαγόνο παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή του οστού, επηρεάζοντας τη σκληρότητά, αλλά έχει μικρή επίδραση στην ακαμψία του. Το κολλαγόνο τύπου I μετουσιώνεται στους 43°C και το επιμεταλλωμένο στους 150°C. Οι κρύσταλλοι του υδροξυαπατίτη συνεισφέρουν περισσότερο στην αντοχή σε συμπίεση. Η μέγιστη τάση που αντέχει το φλοιώδες οστό είναι 200 MPa σε συμπίεση, 135 MPa σε ελκυσμό και 70 MPa σε διάτμηση. Υπάρχει σημαντική διακύμανση στην αποτιάνωση του οστού, η οποία κυμαίνεται μεταξύ φυσιολογικού και παθολογικού οστού μεταξύ 45% και 85%, ενώ η επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες είναι ακόμα μεγαλύτερη. Το μέτρο ελαστικότητας του Young κυμαίνεται μεταξύ 4 και 32 GPa, η αντοχή στην κάμψη μεταξύ 50-300 MPa



**Εικ. 4.** Με την αύξηση του βαθμού επιμετάλλωσης του οστού αυξάνει και η ψαθυρότητα του οστού ως υλικό δηλαδή μειώνεται η μέγιστη δυνατότητα παραμόρφωσης υπό φόρτιση καθώς επίσης και η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

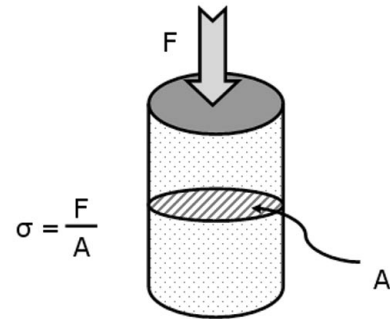
και το έργο μέχρι το κάταγμα μεταξύ 200-7000 Jm<sup>2</sup>. Ένα οστό δεν μπορεί να παρουσιάζει υψηλές τιμές και στις τρεις παραμέτρους. Σημαντικός βαθμός επιμετάλλωσης έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλού μέτρου ελαστικότητας αλλά μικρής απορρόφησης ενέργειας, η οποία αποτελεί μέτρο της σκληρότητας. Μέσες τιμές επιμετάλλωσης συνδυάζονται με υψηλές τιμές απορρόφησης ενέργειας αλλά με χαμηλές τιμές μέτρου ελαστικότητας και ενδιάμεσες τιμές αντοχής. Η επίδραση της επιμετάλλωσης οφείλεται στην αδυναμία των ανεπαρκώς ή υπερεπαρκώς αναπτυγμένων κρυστάλλων να εμποδίσουν τη δημιουργία και την επέκταση των ρωγμών.

Όλα τα υλικά παραμορφώνονται όταν υφίστανται τη δράση μίας δύναμης ή ενός φορτίου και η σχέση του εφαρμοζόμενου φορτίου με την προκαλούμενη παραμόρφωση καθορίζει τις ιδιότητες του υλικού [6]. Διαφορετικά υλικά παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες. Αντοχή ενός υλικού είναι το μέγεθος και το είδος των φορτίων που μπορεί να ανθέξει ένα υλικό προτού υποστεί μηχανική αποτυχία. Παραμόρφωση είναι η μεταβολή του σχήματος του υλικού ή του σώματος υπό την επίδραση μίας δύναμης. Η δύναμη σύμφωνα με το διεθνές σύστημα μετράται σε Newton (1 N=1 kg.m.s<sup>-2</sup>) και η παραμόρφωση σε μέτρα. Η δύναμη που ασκείται και η προκαλούμενη παραμόρφωση είναι δυνατό να συσχετιστούν στο αντίστοιχο διάγραμμα. Η σχέση μεταξύ τους εξαρτάται όμως από τις δεδομένες πειραματικές συνθήκες και από το σχήμα και το μέγεθος του οστού που εξετάζεται και επομένως δεν είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφόρων οστών. Για

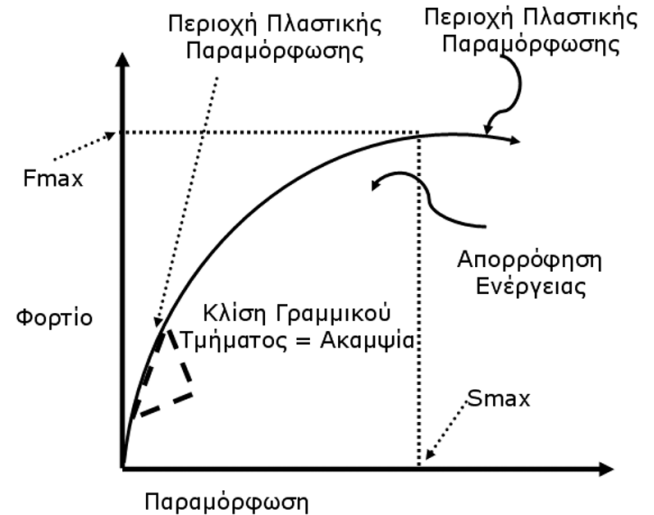
την αποφυγή αυτού του προβλήματος εισήχθησαν οι όροι της τάσης και της επιμήκυνσης [13, 14].

Εσωτερική τάση (stress) ορίζεται η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας και μετράται σε  $N.m^{-2}$  ( $1 \text{ Pascal} = 1N.m^{-2}$ ), ενώ εσωτερική επιμήκυνση (strain) είναι η μεταβολή του μήκους του ελεγχόμενου υλικού σε σχέση με το αρχικό μήκος του (Εικόνα 5). Είναι παράμετρος χωρίς διαστάσεις, εκφραζόμενη σαν ποσοστό (%). Η τάση αποτελεί μέτρο της εσωτερικά αναπτυσσόμενης δύναμης υπό την επίδραση μίας εξωτερικά ασκούμενης δύναμης, έχει αντίθετη κατεύθυνση και ίδιο μέτρο με αυτή και δεν είναι δυνατό να μετρηθεί άμεσα. Όταν πραγματοποιείται μηχανικός έλεγχος ενός υλικού, σε οποιαδήποτε μορφή καταπόνησης, καταγράφεται η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης ή τάσης-επιμήκυνσης. Η καμπύλη αυτή διακρίνεται σε διάφορα τμήματα που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές ιδιότητες του υλικού και το χαρακτηρίζουν (Εικόνα 6). Το διάγραμμα τάσης-επιμήκυνσης παρουσιάζει μια αρχική μη γραμμική περιοχή (toe region) που ακολουθείται από μία γραμμική περιοχή, κατά την οποία η συμπεριφορά του υλικού θεωρείται ότι είναι ελαστική, δηλαδή το υλικό επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα εάν σταματήσει η εφαρμογή της δύναμης. Σε αυτή την περιοχή ισχύει ο νόμος του Hooke, σύμφωνα με τον οποίο η επιμήκυνση παρουσιάζει γραμμική σχέση με την εφαρμοζόμενη δύναμη. Η τάση και η επιμήκυνση σχετίζονται με μία γραμμική σταθερά η οποία αποκαλείται μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young. Σε ένα σημείο της καμπύλης, που καλείται όριο αναλογίας (limit of proportionality), το διάγραμμα καμπυλώνεται και δεν ισχύει πια ο νόμος του Hooke. Ακολουθεί ένα μέγεθος τάσης, το οποίο αποκαλείται όριο ελαστικότητας (yield point), πέραν του οποίου η παραμόρφωση είναι μόνιμη. Η περιοχή αυτή καλείται πλαστική και η μόνιμη παραμόρφωση του υλικού οφείλεται σε μεταβολή της μικροκατασκευής του υλικού. Στην περιοχή αυτή υπάρχει σημαντική απώλεια ενέργειας. Αυξανόμενης της τάσης περιγράφεται η ύπαρξη του ορίου διαρροής, πέρα από το οποίο διαπιστώνεται μεγάλη αύξηση των επιμηκύνσεων με μικρή αύξηση των τάσεων. Αυξανόμενης της φόρτισης αναπτύσσεται η τάση θραύσης, στην οποία προκαλείται θραύση του υλικού, το οποίο έχει επιμηκυνθεί μέχρι την επιμήκυνση θραύσης.

Κατά τη θραύση του υλικού ακούγεται χαρακτηριστικός ήχος (κρακ) που οφείλεται στην απελευθέρωση ενέργειας. Το μέγιστο φορτίο ή μέγιστη τάση είναι το φορτίο ή η τάση που αναπτύσσονται αντίστοιχα σε αυτό το σημείο και θεωρούνται έκφραση της αντοχής του υλικού. Το μέγιστο φορτίο που αντέχει ένα οστό μπορεί να διαφέρει από το φορτίο θραύσης. Σε ορισμένα υλικά είναι δυνατή η ανάπτυξη της μέγι-

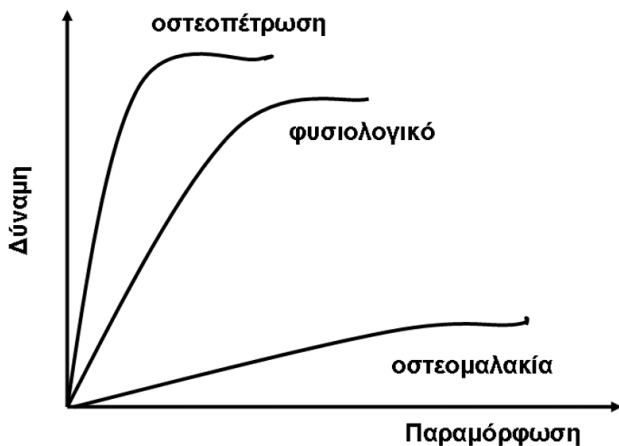


**Εικ. 5.** Η έννοια της τάσης. Η δύναμη που ασκείται σε ένα οστό διαιρείται με την επιφάνεια διατομής του οστού.



**Εικ. 6.** Η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης.  $F_{max}$ , το μέγιστο φορτίο και  $S_{max}$ , η μέγιστη παραμόρφωση. Η ακαμψία του γραμμικού τμήματος της καμπύλης εκφράζει την ακαμψία του υλικού.

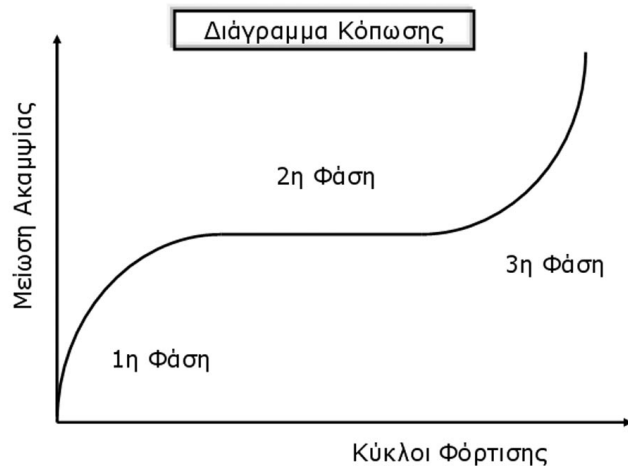
στης τάσης προ της πλήρους αποτυχίας του υλικού. Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη ονομάζεται σκληρότητα (toughness) και είναι μέτρο της ενέργειας που έχει απορροφηθεί, ενώ η επιφάνεια της καμπύλης μέχρι το όριο ελαστικότητας αποκαλείται επαναταξιμότητα (resilience). Ακαμψία (stiffness,  $N/m$ ) είναι η κλίση της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης και μέτρο ελαστικότητας του Young (MPa) είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-επιμήκυνσης. Η ακαμψία του υλικού αποτελεί εκτίμηση των ιδιοτήτων του. Μαλακά οστά, όπως σε οστεομαλάκυνση, έχουν μικρή ακαμψία και επίπεδη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, ενώ ψαθυρά οστά, όπως παρατηρούνται στην οστεοπέτρωση,



**Εικ. 7.** Η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για το φυσιολογικό οστό, το οστό με οστεοπέτρωση και το οστό με οστεομαλακία. Σε οστεοπέτρωση το οστό υφίσταται μηχανική αποτυχία και θραύση σε μικρότερο επίπεδο φόρτισης, γεγονός που το καθιστά ψαθυρό υλικό. Στην οστεομαλακία το οστό παραμορφώνεται σημαντικά προτού επέλθει η μηχανική αποτυχία, γεγονός που καθιστά το οστό όλκιμο υλικό.

έχουν αυξημένη ακαμψία (Εικόνα 7). Υλικά που επιμηκύνονται πολύ προ της αποτυχίας τους ονομάζονται όλκιμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακαμψία ή ο συντελεστής ελαστικότητας, τόσο πιο δύσκολη είναι η διάταση ή η κάμψη ενός υλικού.

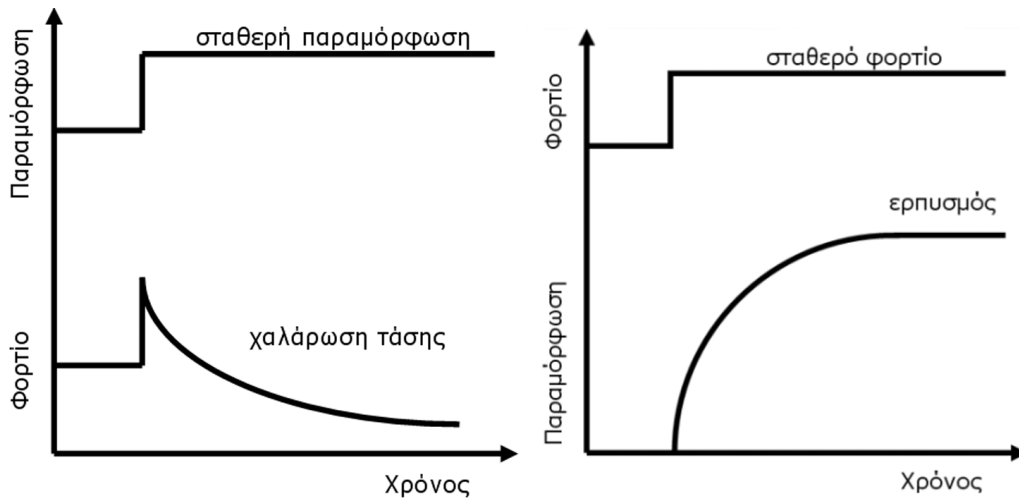
Όταν ένα οστό φορτιστεί μεταβάλλεται τόσο το μήκος, όσο και το πλάτος του [1, 13]. Ο λόγος της μεταβολής του εύρους του οστού ως προς το μήκος του αποκαλείται λόγος Poisson και για το φλοιώδες οστό κυμαίνεται μεταξύ 0.28 και 0.45. Αυτό σημαίνει ότι όταν φορτίζεται ένα οστό, επιμήκυνση 1% σε έναν άξονα προκαλεί επιμήκυνση μεταξύ 0.28 και 0.45 στον κάθετο σε αυτόν άξονα. Ένα υλικό με ίδιες ιδιότητες σε όλες τις κατευθύνσεις αποκαλείται ισότροπο. Το οστό παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες όταν φορτιστεί σε διαφορετικές κατευθύνσεις, ιδιότητα που το καθιστά ανισότροπο. Τα ανισότροπα υλικά που έχουν διαφορετικές ιδιότητες και στους τρεις άξονες καλούνται ορθότροπα, ενώ εάν έχουν ίδιες ιδιότητες και στους δύο άξονες αποκαλούνται εγκάρσια ισότροπα. Οι οστεόνες είναι εγκάρσια ισότροπες δομές. Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του οστού διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή που ελέγχεται και με το είδος της φόρτισης. Το οστό είναι ασθενέστερο στον ελκυσμό απ' ό,τι στη συμπίεση. Η επαναλαμβανόμενη φόρτιση του οστού οδηγεί σε πρόκληση βλαβών που δεν αποκαθίστανται και αποκαλείται κόπωση. Η αντοχή του οστού στην κόπωση είναι πολύ μικρότερη



**Εικ. 8.** Το διάγραμμα κόπωσης του οστού σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση.

της μέγιστης στατικής αντοχής. Η καμπύλη κόπωσης του οστού παρουσιάζει τρεις φάσεις (Εικόνα 8). Στην πρώτη φάση η απώλεια της ακαμψίας (0-15% του μέγιστου αριθμού κύκλων φόρτισης) είναι ταχεία εξαιτίας της δημιουργίας ρωγμών. Στη δεύτερη φάση (15-90% του μέγιστου αριθμού κύκλων φόρτισης) η απώλεια ακαμψίας είναι σταθερή, ενώ στην τρίτη φάση (>90% του μέγιστου αριθμού κύκλων φόρτισης) προκαλείται μηχανική αποτυχία του οστού. Όριο κόπωσης είναι η μέγιστη τάση υπό την οποία ένα υλικό δε θα αποτύχει όταν υποβληθεί σε απεριόριστους κύκλους φόρτισης, ενώ αντοχή στην κόπωση είναι το μέγιστο κυκλικό φορτίο που ένα υλικό θα απορροφήσει προτού υποστεί θραύση. Το οστό έχει τη δυνατότητα αποκατάστασης ρωγμών που δημιουργούνται στο φλοιό σαν αποτέλεσμα φόρτισης. Σύμφωνα με τον Frost εάν διακοπεί η λειτουργία της ανακατασκευής εντός δύο ετών το οστό θα οδηγηθεί σε μηχανική αποτυχία λόγω κόπωσης.

Το οστό και οι σύνδεσμοι είναι γλοιοελαστικά υλικά, δηλαδή η μηχανική συμπεριφορά τους είναι χρονοεξαρτώμενη, ιδιότητα που οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού [1, 13, 15]. Ερπυσμός είναι η παραμόρφωση που υφίσταται ένα υλικό όταν υπόκειται σε σταθερή φόρτιση ενώ υστέρηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ενώ ένα υλικό παραμορφώνεται όταν αρθεί η δύναμη που εξασκείται επανέρχεται στην αρχική κατάσταση με διαφορετική διαδρομή (Εικόνα 9). Η απώλεια ενέργειας μεταξύ των δύο καταστάσεων οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού. Τα γλοιοελαστικά υλικά είναι σκληρότερα και ανθεκτικότερα σε υψηλό ρυθμό φόρτισης. Όσο ταχύτερος είναι ο






**Εικ. 9.** Τα φαινόμενα χαλάρωσης τάσης και ερπυσμού που χαρακτηρίζουν την γλοιοελαστική συμπεριφορά του οστού. Στον ερπυσμό η φόρτιση του οστού διατηρείται σταθερή, αλλά η παραμόρφωση σταθεροποιείται και παραμένει αμετάβλητη μετά την πάροδο ορισμένου χρονικού διαστήματος. Στο φαινόμενο της χαλάρωσης τάσης η παραμόρφωση διατηρείται σταθερή με αποτέλεσμα μείωση της προκαλούμενης τάσης μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα.

ρυθμός φόρτισης, τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση ενέργειας πριν από την πρόκληση κατάγματος. Το φορτίο θραύσης του ανθρώπινου μηριαίου αυξάνει κατά 20% όταν αυξηθεί ο ρυθμός φόρτισης κατά 50 φορές. Η επιμήκυνση που είναι δυνατό να ανθέξει το οστό είναι αντίστροφα ανάλογη με το χρόνο εφαρμογής της δύναμης.

Μεγαλύτερα οστά έχουν μεγαλύτερη ακαμψία, αν και οι ιδιότητες του οστού σαν υλικό δε διαφέρουν, επομένως υπάρχει διαφορά στην ακαμψία των οστών όταν μελετώνται ως υλικό και όταν μελετώνται ως κατασκευή. Μεγάλη σημασία έχει και η κατανομή του οστού στο χώρο (Εικόνα 10). Διπλασιάζοντας τη διάμετρο ενός οστού, χωρίς μεταβολή της οστικής μάζας η αντοχή σε κάμψη αυξάνεται κατά 8 φορές. Σε γενικές γραμμές όσο μεγαλύτερη είναι η οστική μάζα τόσο μεγαλύτερη προβλέπεται να είναι και η αντοχή του οστού, αφού μεγαλύτερη ποσότητα οστού θα κατανέμεται γύρω από τον κεντρικό άξονά του.

Μικροσκοπικά με την πάροδο της ηλικίας το οστό είναι δυνατό να υποστεί υποβάθμιση των ιδιοτήτων του εξαιτίας μειωμένης ή αυξημένης επιμετάλλωσης, άθροισης μικροβλαβών και ελλειμμάτων και συσσώρευσης πολλών γραμμών τσιμέντου εξαιτίας της ηλικιακής ανακατασκευής [16]. Οι παραπάνω αλλοιώσεις μειώνουν την ποιότητα του οστού. Όταν ο όρος ποιότητα του οστού αναφέρεται στην αντοχή του οστού σαν κατασκευή τότε εξαρτάται από τη μορφολογία και από τις διαστάσεις του φλοιώδους

	Επιφάνεια	Αντίσταση σε	
		κάμψη/θλίψη	λυγισμό/στρέψη
	1	100%	100%
	1	100%	164%
	0.87	87%	208%

**Εικ. 10.** Η σχέση μεταξύ της επιφάνειας διατομής του οστού και των μηχανικών του ιδιοτήτων.

οστού και από τη σύνδεση μεταξύ των δοκίδων του σπογγώδους οστού ή την ύπαρξη διατρήσεων και μικροκαταγμάτων. Η αντοχή του οστού σε ελκυσμό μειώνεται μετά την 3<sup>η</sup> δεκαετία με ταχύτερο ρυθμό από τη μείωση της οστικής πυκνότητας. Η οστική αντοχή και η οστική μάζα σχετίζονται με μεγάλο εύρος τιμών του συντελεστή συσχέτισης ( $r=0.34-0.89$ ,  $r^2=0.12-0.79$ ) επιβεβαιώνοντας την άποψη ότι η μηχανική αντοχή εξαρτάται και από άλλους παράγοντες εκτός από την πυκνότητα των ανοργάνων αλάτων. Μεταξύ των ασθενών με οστεοπορωτικά κατάγματα διαπιστώνεται επίσης σημαντική μεταβλητότητα στις τιμές της οστικής πυκνότητας.

**Correspondence**

C.K. Yannakopoulos,  
2 Byzantiou str.,  
17121 Nea Smyrni, Athens, Greece  
E-mail: cky@ath.forthnet.gr

**Αλληλογραφία:**

Χ.Κ. Γιαννακόπουλος,  
Βυζαντίου 2,  
17121 Νέα Σμύρνη, Αθήνα  
E-mail: cky@ath.forthnet.gr

**Βιβλιογραφία**

1. An YH, Draughn RA (1999). Mechanical testing of bone. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
2. Cowin S (2001). Bone mechanics handbook. CRC Press.
3. Boskey AL, Wright TM, Blank RD. Collagen and bone strength. J Bone Miner Res 1999; 14(3):330-335.
4. Buckwalter JA, Glimcher MJ, Cooper RR, Recker R. Bone biology. I: Structure, blood supply, cells, matrix, and mineralization. Instr Course Lect 1996; 45:371-386.
5. Martin RB. Determinants of the mechanical properties of bones. J. Biomech 1991; 24:79-88.
6. Weiner S, Wagner HD. The material bone: Structure mechanical function relations. Ann Rev Material Sci 1998; 28:271-298.
7. Mow VC, Hayes WC (1991). Basic orthopaedic biomechanics. New York, Raven Press, 93-142.
8. Currey JD. Bone strength: what are we trying to measure? Calcif Tissue Int 2001; 68(4):205-210.
9. Einhorn TA. Bone strength: The bottom line. Calcif Tissue Int 1992; 51:333-339.
10. Zioupos P, Currey JD, Hamer AJ. The role of collagen in the declining mechanical properties of aging human cortical bone. J Biomed Mater Res 1999; 45(2):108-116.
11. Wang X, Bank RA, TeKoppele JM, Agrawal CM. The role of collagen in determining bone mechanical properties. J Orthop Res 2001; 19(6):1021-1026.
12. Hasegawa K, Turner CH, Burr DB. Contribution of collagen and mineral to the elastic anisotropy of bone. Calcif Tissue Int 1994; 55:381-386.
13. Turner CH, Burr DB. Basic Biomechanical measurements of bone: A Tutorial. Bone 1993; 14:595-608.
14. Nordin M, Frankel VH (1996). Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System. Second Edition, Lea & Febiger, Philadelphia.
15. Carter DR, Hayes WC. Bone compressive strength: the influence of density and strain rate. Science 1976; 194:1174-1176.
16. Burstein AH, Reilly DT, Martens M. Aging of bone tissue: mechanical properties. J Bone Joint Surg 1976; 58A:82-86.