

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

«ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΜΑΚΡΩΝ ΟΣΤΩΝ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΕΙΔΙΚΩΝ ΤΡΟΦΩΝ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΟΣΤΙΤΗ ΙΣΤΟΥ»

Διπλωματική εργασία στην επιστημονική περιοχή της Εμβιομηχανικής του Αλέξανδρου-Στέργιου Δελαπάσχου

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

Αθήνα 2022

Εξεταστική επιτροπή

Σταύρος Κ. Κουρκουλής,	Καθηγητής Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (επιβλέπων)
Ευστάθιος Θεοτόκογλου,	Καθηγητής Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
Βασιλική Βαδαλούκα,	Επίκουρη Καθηγήτρια Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Αφιερώνω τη διπλωματική εργασία μου στον Δημήτρη Δελαπάσχο (1958-2021)

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Σ.Κ. Κουρκουλή που μου έδωσε την ευκαιρία να μελετήσω το συγκεκριμένο θέμα στην Εμβιομηχανική, έναν κλάδο, ιδιαίτερα, συναρπαστικό και πολλά υποσχόμενο. Ως επιβλέπων καθηγητής ήταν πάντα πρόθυμος να επιλύσει κάθε απορία που είχα κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας και να παρέχει καθοδήγηση, ιδέες και πολύτιμες συμβουλές.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω, χωρίς αμφιβολία, στην κυρία Ερμιόνη Πάσιου, μεταδιδακτορική ερευνήτρια του τομέα Μηχανικής, για την αδιάκοπη συμβολή της σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας. Κάθε στιγμή ήταν παρούσα με υπομονή, συμβουλές και καίριες παρατηρήσεις.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Θεοδώρα Τσιούρβα από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και τον φοιτητή Θεόδωρο Μανωλάτο για τη συμβολή τους στη διαδικασία της λείανσης των δοκιμίων.

Ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθειά τους τον πατέρα μου Αθανάσιο, για τις εύστοχες παρατηρήσεις, υπό το διακριτικό βλέμμα της πολυετούς μελετητικής εμπειρίας, και τις χρήσιμες συμβουλές σε όλη τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας και τη μητέρα μου Αλέκα για τη δύναμη που μου έχει εμφυσήσει, να βλέπω μόνο με αισιόδοξη ματιά τη ζωή και για την ηθική στήριξη, αμφότερων, σε όλη τη διάρκεια των σπουδών.

Ακόμη, θέλω να πω ευχαριστώ στον αδερφικό φίλο και συμφοιτητή Στέλιο Δανιηλίδη, που όλα αυτά τα χρόνια στα έδρανα της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. μοιραστήκαμε τις ίδιες ανησυχίες και τις αντιμετωπίζαμε, βοηθώντας ο ένας τον άλλον, με το σίγουρο ακαδημαϊκό τρόπο: το εντατικότερο διάβασμα.

Τέλος, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τη σύντροφό μου Αλεξία Παπαντώνη. Σε όλη τη διάρκεια των σπουδών, σε κάθε εξεταστική, σε κάθε δυσκολία και σε κάθε μάχη, μικρή ή μεγάλη, ήταν δίπλα μου με χαμόγελο και απεριόριστη στήριξη. Επίσης, την ευχαριστώ για τη φιλολογική αυστηρότητα στη διάρθρωση του κειμένου της παρούσας εργασίας.

Πρόλογος

Η Εμβιομηχανική είναι μια σύγχρονη επιστήμη, η οποία ξεκίνησε από την παρατήρηση των ζωντανών οργανισμών και την περιέργεια του ανθρώπινου είδους για τα βιολογικά συστήματα και τους μηχανισμούς λειτουργίας τους. Βαδίζει στη διεπιφάνεια Μηχανικής και Ιατρικής και έχει ως στόχο την επίλυση σημαντικών προβλημάτων που αφορούν τη λειτουργία των ανθρώπινων οργανισμών και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών.

Η Εμβιομηχανική του μυοσκελετικού συστήματος αποτελεί βασικό τομέα της κινησιολογίας, παράλληλα με την ορθοπεδική. Έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών στη χειρουργική, στα εμφυτεύσιμα υλικά, στα τεχνητά μελή, στην αποκατάσταση τραυμάτων, στην προσθετική και στη βελτίωση της απόδοσης των αθλητών.

Τα οστά του ανθρώπινου σκελετού αποτελούν βασικό πεδίο έρευνας της Εμβιομηχανικής του μυοσκελετικού. Ως υλικά έχουν ιδιαίτερα περίπλοκη γεωμετρία και είναι ανισότροπα. Οι μηχανικές ιδιότητες των οστών εξαρτώνται από την κατάσταση στην οποία εντοπίζονται. Επειδή είναι εξαιρετικά δύσκολο να μελετηθούν in vivo, έχουν επινοηθεί διάφορες πειραματικές μέθοδοι για την εργαστηριακή μελέτη της γεωμετρίας τους και την εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εμβιομηχανική αξιολόγηση πειραμάτων κάμψης μακρών οστών με στόχο τον προσδιορισμό του ρόλου ειδικών τροφών στις μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού, μέσω της εύρεσης της ακριβούς τάσης αστοχίας των δοκιμίων. Χρησιμοποιείται η μεθοδολογία της ακριβούς προσέγγισης και δεν πραγματοποιούνται καθόλου παραδοχές. Παλαιότερες έρευνες έδιναν έμφαση στη δύναμη αστοχίας ως μέτρο αντοχής του οστού. Στην παρούσα μελέτη, οι ακριβείς τάσεις και η ακριβής γεωμετρία της διατομής του οστού διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Η τάση είναι χαρακτηριστικό του υλικού και όχι της κατασκευής. Η εργασία αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου προγράμματος του εργαστηρίου Εμβιομηχανικής και Βιοϊατρικής Φυσικής της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που ερευνά την επίδραση διαφόρων τροφών και ουσιών στην αντοχή του οστίτη ιστού σε οστεοπορωτικά οστά.

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των γεωμετρικών μεγεθών και των μηχανικών ιδιοτήτων του μηριαίου οστού επιμύων, για τον προσδιορισμό της ακριβούς τάσης αστοχίας, καθώς και η σύγκριση της ποσοτικής επίδρασης δύο ειδικών τροφών (σησαμέλαιο και ταχίνι) στην αντοχή του οστίτη ιστού.

Το μηριαίο οστό είναι το μεγαλύτερο και ανθεκτικότερο οστό του ανθρώπινου σκελετού. Έχει τυπική δομή μακρού οστού, δηλαδή ένα κυρίως σώμα (διάφυση) και δύο άκρα (επιφύσεις). Η φέρουσα ικανότητα του μηριαίου οστού μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 2 τόνους ανά τετραγωνική ίντσα. Όπως όλα τα οστά, είναι ανισότροπο και έχει σύνθετη δομή, η οποία διακρίνεται στο φλοιώδες οστό και στο σπογγώδες οστό.

Η θεωρητική τεκμηρίωση της παρούσας μελέτης βασίστηκε στη θεωρία δοκών Euler – Bernoulli, στη θεωρία καθαρής κάμψης καθώς και στην τεχνική θεωρία στρέψης λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων.

Για την πειραματική διαδικασία, 40 μηριαία οστά θηλυκών επιμύων υποβλήθηκαν σε πείραμα κάμψης τριών σημείων, στο πλαίσιο φόρτισης MTS Insight. Στη συνέχεια, το ένα από τα δύο θραύσματα του οστού τοποθετήθηκε σε δοχείο, το οποίο πληρώθηκε με ρητίνη. Αφού στερεοποιήθηκε η ρητίνη, το δοκίμιο οστού-ρητίνης λειάνθηκε για να διακρίνεται η ολοκληρωμένη μορφή της διατομής του οστού. Έπειτα, όλα τα δοκίμια οστού-ρητίνης φωτογραφήθηκαν από στερεοσκόπιο.

Μεταγενέστερα, ακολούθησε η επεξεργασία των εικόνων που είχαν ληφθεί από το στερεοσκόπιο με το λογισμικό AutoCad και η ανάλυση των δεδομένων με το πρόγραμμα Microsoft Excel. Με αυτόν τον τρόπο, προσδιορίστηκαν τα εξής μεγέθη: το γεωμετρικό κέντρο της επιφάνειας διατομής του οστού, ο άξονας φόρτισης, η εκκεντρότητα του άξονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο, το εμβαδόν της διατομής, το μέσο πάχος της διατομής, το μέσο εμβαδόν της διατομής, οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης ως προς το κεντροβαρικό σύστημα αναφοράς, η γωνία στροφής του συστήματος για την εύρεση του κυρίου συστήματος αναφοράς, το κύριο σύστημα αναφοράς, οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης ως προς το κρίσιμο σημείο αστοχίας, η στρέψη και οι ροπές κάμψης.

Όλα τα παραπάνω μεγέθη οδήγησαν στον προσδιορισμό της ακριβούς τάσης αστοχίας του οστού και πραγματοποιήθηκε η σύγκριση του ρόλου ειδικών τροφών, μέσω της μεθοδολογίας ακριβούς προσέγγισης της διατομής. Η παρούσα διπλωματική εργασία κατέδειξε ότι η ποσοτική επίδραση του σησαμέλαιου στην αντοχή του οστίτη ιστού των επιμύων είναι, σημαντικά, μεγαλύτερη από την ποσοτική επίδραση του ταχινιού.

Abstract

The purpose of the present thesis is to study the geometrical characteristics and the mechanical properties of rats' femur bone in order to determine the exact failure stress, as well as to compare the quantitive effect of two special foods (sesame oil and tahini) on bone strength.

The femoral bone is the largest and the most durable bone in the human skeleton. It has a typical long bone structure, i.e. a main body (diaphysis) and two expanded ends (epiphyses). The bearing capacity of the femur can reach up to $2\text{ton}/inch^2$. Like all bones, it is anisotropic and has a complex structure, which is divided into cortical bone and cancellous bone.

The theoretical documentation of the present study was based on the theory of Euler-Bernoulli beams, the theory of pure bending, as well as the technical theory of torsion of thin-walled cylindrical specimens.

For the experimental procedure, 40 femoral bones of female rats underwent a three-point bending test under MTS Insight load frame. One of the two bone fragments was then placed in a beaker, which was filled with resin. After the resin solidified, the bone-resin specimen was sanded to distinguish the whole shape of the bone cross-section. Subsequently, all bone-resin specimens were photographed with a stereoscope.

This was followed by processing the images taken from the stereoscope with AutoCad software and analyzing the data with Microsoft Excel. In this way, the following quantities were determined: the geometrical center of the bone cross-sectional area, the loading axis, the eccentricity of the loading axis with respect to the geometrical center, the cross-sectional area, the mean cross-sectional thickness, the mean cross-sectional area, the second order surface moments with respect to the centripetal system, the turning angle of the system in order to find the principal system, the second order surface moments with respect to the neutral line equation, the failure point, torque and bending moments.

All the above quantities led to the determination of the exact failure stress and the comparison of the role of special foods was made, through the methodology of accurate approximation of the cross-section. The present study evinced that the quantitive effect of sesame oil on the bone strength of rats is, significantly, greater than the quantitive effect of tahini.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι	14
Εμβιομηχανική του οστίτη ιστού και στοιχεία ανατομίας μακρών οστών	14
1.1 Εμβιομηχανική	15
1.2 Ιστορία της Εμβιομηχανικής	16
1.3 Η Εμβιομηχανική σήμερα	18
1.4 Οστά και δομή των οστών	19
1.5 Οστίτης ιστός και εμβιομηχανική του οστίτη ιστού	21
1.5.1 Οστίτης ιστός	21
1.5.2 Εμβιομηχανική του οστίτη ιστού	22
1.6 Μακρά οστά	24
1.7 Ανατομία και στοιχεία Εμβιομηχανικής του μηριαίου οστού	26
1.8 Επίδραση σεσαμίνης και σεσαμολίνης στον οστίτη ιστό	28
КЕФАЛАЮ 2	29
Μηχανική των παραμορφωσίμων σωμάτων - Καθαρή κάμψη - Στρέψη	29
2.1 Θεωρία της κάμψης	30
2.1.1 Θεωρία δοκών Bernoulli - Euler	30
2.1.2 Καθαρή κάμψη	30
2.1.3 Καθαρή κάμψη συμμετρικών δοκών	31
2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας	34
2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων	34 36
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων 2.2.1 Κυκλική διατομή 	34 36 36
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων 2.2.1 Κυκλική διατομή 2.2.2 Μη κυκλική διατομή 	34 36 36 37
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων 2.2.1 Κυκλική διατομή 2.2.2 Μη κυκλική διατομή 2.3 Έυρεση κύριου συστήματος - Στροφή συστήματος αναφοράς 	34 36 36 37 39
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων 2.2.1 Κυκλική διατομή 2.2.2 Μη κυκλική διατομή 2.3 Έυρεση κύριου συστήματος - Στροφή συστήματος αναφοράς ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 	34 36 36 37 39 42
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων 2.2.1 Κυκλική διατομή 2.2.2 Μη κυκλική διατομή 2.3 Έυρεση κύριου συστήματος - Στροφή συστήματος αναφοράς ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 	34 36 36 37 39 42 42
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων 2.2.1 Κυκλική διατομή 2.2.2 Μη κυκλική διατομή 2.3 Έυρεση κύριου συστήματος - Στροφή συστήματος αναφοράς ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Πειραματική διαδικασία 	34 36 37 39 42 42 43
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων 2.2.1 Κυκλική διατομή 2.2.2 Μη κυκλική διατομή 2.3 Έυρεση κύριου συστήματος - Στροφή συστήματος αναφοράς ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Πειραματική διαδικασία	34 36 37 39 42 42 43 43
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων 2.2.1 Κυκλική διατομή 2.2.2 Μη κυκλική διατομή 2.3 Έυρεση κύριου συστήματος - Στροφή συστήματος αναφοράς ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Πειραματική διαδικασία 3.1 Πειραματική διαδικασία 3.1.1 Πείραμα κάμψης τριών σημείων 	 34 36 37 39 42 42 43 43 44
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων	 34 36 37 39 42 42 43 43 44 45
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων	 34 36 37 39 42 42 43 43 44 45 46
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων	 34 36 37 39 42 42 43 43 44 45 46 46
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων	 34 36 37 39 42 42 43 43 44 45 46 48
 2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας 2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων	 34 36 37 39 42 42 43 43 44 45 46 48 48

4.2 Διαδικασία ανάλυσης αποτελεσμάτων ανά δοκίμιο	49
4.3 Εύρεση κύριου συστήματος συντεταγμένων	51
4.4 Εξίσωση ουδέτερης γραμμής και ακριβής τάση αστοχίας	52
4.5 Στατιστικός έλεγχος	53
4.6 Ποιοτικός έλεγχος λόγου τάσεων	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	55
Αποτελέσματα και συμπεράσματα	55
5.1 Πίνακες αποτελεσμάτων	56
5.2 Συμπεράσματα	64
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	66
ПАРАРТНМА	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εμβιομηχανική του οστίτη ιστού και στοιχεία ανατομίας μακρών οστών

1.1 Εμβιομηχανική

Η Εμβιομηχανική είναι μία σύγχρονη επιστήμη, που τροφοδοτείται από την αέναη αναζήτηση του ανθρώπινου είδους για τους βιολογικούς μηχανισμούς όλων των οργανισμών. Πολλοί ορισμοί έχουν δοθεί κατά καιρούς που απαντούν στο ερώτημα *Τι είναι η Εμβιομηχανική επιστήμη*. Εκτιμάται πως κανένας τους δεν μπορεί να θεωρηθεί λανθασμένος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο εξής:

Η Εμβιομηχανική ορίζεται ως η επιστήμη μέσω της οποίας εφαρμόζοντας αρχές και μεθόδους της μηχανικής, της φυσικής, της χημείας, των μαθηματικών καθώς και της τεχνολογίας στην βιολογία και την ιατρική, οι επιστήμονες προσπαθούν να ερμηνεύσουν αλλά και να βελτιώσουν, ποιοτικά και ποσοτικά, τη λειτουργία των έμβιων οργανισμών. [1]

Ο συγκεκριμένος ορισμός χρησιμοποιείται για να καταδείξει το γεγονός πως πρόκειται για μία πολυεπίπεδη επιστήμη που με βάση την Μηχανική και την ταυτόχρονη συνδρομή άλλων επιστημών καλείται να ερευνήσει τους μηχανισμούς που λειτουργούν τα έμβια όντα και να επιλύσει ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών προβλημάτων. Για αρκετά από τα προβλήματα αυτά, η εμβιομηχανική θεώρηση των πραγμάτων είναι, ίσως, η προτιμότερη οδός, υπό την έννοια της πολύπλευρης επιστημονικής κάλυψης. Είναι ιδιαίτερα απαιτητικό επιστημονικό πεδίο μιας και το αντικείμενό του είναι η προτυποποίηση των πολυπλοκότερων όντων αυτού του πλανήτη.[2]

Οι εφαρμογές της Εμβιομηχανικής είναι πολυάριθμες. Έχει συμμετάσχει, ουσιαστικά, σε κάθε σύγχρονη πρόοδο της ιατρικής επιστήμης και της τεχνολογίας. Στάθηκε αρωγός στην επίλυση κλινικών προβλημάτων στο καρδιαγγειακό σύστημα με την εφεύρεση των μηχανημάτων καρδιακής υποστήριξης, της τεχνικής εξωσωματικής κυκλοφορίας, των μηχανημάτων εξωσωματικής κυκλοφορίας, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις εγχειρήσεις ανοικτής καρδιάς, των καρδιακών προσθετικών βαλβίδων και των μηχανημάτων αιμοκάθαρσης. Έχει, επίσης, διαδραματίσει σημαίνοντα ρόλο στην μεταμόσχευση καρδιάς καθώς και στην αντικατάσταση τεχνητής καρδιάς. Έχει συνδράμει, επιλύοντας προβλήματα σχετικά με τα μετεγγειρητικά τραύματα, την ατελεκτασία των πνευμόνων, το πνευμονικό οίδημα, την ανάλυση κυμάτων αρτηριακού παλμού, την φωνοαγγειογραφία, καθώς και την ανάλυση των θορύβων που παράγονται από αυτήν, ως ενδείξεις αθηροσκλήρωσης ή στένωσης των αρτηριών. Η αθηροσκλήρωση μελετάται από την Εμβιομηχανική ως αιμοδυναμική διαταραχή, επειδή τα σημεία όπου ευρίσκεται η αθηρωματική πλάκα φαίνεται ότι σχετίζονται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της ροής του αίματος. Οι έρευνες έγουν επικεντρωθεί στην επίδραση της τάσης στα ενδοθηλιακά κύτταρα και στην απόκριση αυτών στην τάση. Στην ορθοπαιδική, η Εμβιομηχανική έχει γίνει καθημερινό κλινικό εργαλείο. Η βασική έρευνα περιλαμβάνει όχι μόνο τη γειρουργική, τα εμφυτεύσιμα υλικά, την προσθετική και τα τεχνητά μέλη, αλλά και κυτταρικές και μοριακές πτυχές της θεραπείας σε σχέση με τις τάσεις και τις παραμορφώσεις και τη μηχανική των ιστών του χόνδρου, του τένοντα και του οστού. Η Εμβιομηχανική του τραύματος, του τραυματισμού και της αποκατάστασης καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική στο σύγχρονο κόσμο διότι τα θύματα τροχαίων ή και άλλων ατυχημάτων είναι νεότερα ηλικιακά και ο αντίκτυπος στην κοινωνία είναι μεγαλύτερος. Η μεγαλύτερη, ίσως, συνεισφορά της σύγχρονης Εμβιομηχανικής είναι η καλύτερη κατανόηση της φυσιολογίας. Η μεθοδολογία και τα πρότυπα της Μηχανικής, που έχουν αναπτυχθεί στην εποχή της εκβιομηχάνισης, μπορούν να υιοθετηθούν για να αντιμετωπίσουν σύνθετα προβλήματα στις επιστήμες υγείας και της τεχνολογίας. Έτσι, σταδιακά έννοιες όπως η ανάλυση συστήματος, η ανταλλαγή μάζας διαμέσου μεμβρανών, η ρεολογία των βιολογικών ιστών, τα διεπιφανειακά φαινόμενα και η μικροκυκλοφορία, παραδοσιακά *οχυρά* της Εμβιομηχανικής, έχουν γίνει κοινή λογική στην ιατρική επιστήμη. [3]

1.2 Ιστορία της Εμβιομηχανικής

Τα περισσότερα συγγράμματα, μολονότι παρουσιάζουν ασυμφωνία στον ορισμό της επιστήμης συμφωνούν, σχεδόν όλα, στην απαρχή της Εμβιομηχανικής επιστήμης. Οι πρώτες αναφορές εννοιών Εμβιομηχανικής βρίσκονται στο βιβλίο Περί ζώων μορίων του Αριστοτέλη (384-322 π.Χ.). Το βιβλίο αυτό έμεινε στην ιστορία για την περιεκτική περιγραφή της λειτουργίας και της ανατομίας των οργάνων, αλλά και για την ανάλυση της περισταλτικής κίνησης του ουρητήρα, η οποία θεωρήθηκε αξιοσημείωτα ακριβής. Σχεδόν σύγχρονο του προαναφερθέντος βιβλίου, είναι και το Nei Jing, άγνωστου συγγραφέα, όπου συζητιούνται έννοιες όπως η κυκλοφορία του αίματος και τα αιμοφόρα αγγεία.

Η Μηχανική, όμως, έδωσε την απαραίτητη ώθηση στη σύγχρονη Εμβιομηχανική. Ο Galileo Galilei ανακάλυψε τη σταθερά στην περίοδο του εκκρεμούς και χρησιμοποίησε το εκκρεμές για να μετρήσει τον καρδιακό παλμό των ανθρώπων. Εφηύρε, επίσης, το θερμοσκόπιο και ήταν ο πρώτος που σχεδίασε το μικροσκόπιο με τη σημερινή του μορφή, αν και τα πρώτα μικροσκόπια κατασκευάστηκαν από τον J.Janssen και τον γιο του. Ο William Harvey ανακάλυψε την κυκλοφορία του αίματος το 1615, χωρίς καν τη χρήση μικροσκοπίου. Ο Santorio Santorio, συνάδελφος του Galileo, καθηγητής Ιατρικής στο πανεπιστήμιο της Padua, χρησιμοποίησε τη μέθοδο μέτρησης του Galileo για να συγκρίνει το σωματικό βάρος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και συνθήκες. Τα αποτελέσματα του, τον οδήγησαν στην εξήγηση της εφίδρωσης και στη θεμελίωση του μεταβολισμού. Ο Alfonso Borelli είχε αποσαφηνίσει το ρόλο των μυών στην κίνηση και τη δυναμική του σώματος. Ασχολήθηκε με την πτήση των πουλιών, την κολύμβηση των ψαριών καθώς και τις κινήσεις της καρδιάς και των εντέρων. Το έργο του De Motu Animalium (1680) είναι αξιομνημόνευτο. Ο Marcello Malphigi, φίλος του Galileo και του Borelli ανακάλυψε τα τριχοειδή αγγεία, την ύπαρξη των οποίων είχε κάνει λογική αναγκαιότητα, 45 χρόνια πριν, ο Harvey. Ο Robert Boyle μελέτησε τη λειτουργία των πνευμόνων και ο Robert Hooke εκτός από το νόμο του Hooke μας έδωσε και τη λέξη «κύτταρο» στη βιολογία για να προσδιορίσουμε τις στοιχειώδεις οντότητες της ζωής. Ο Newton μας έδωσε το λογισμό, τους νόμους της κίνησης και τις καταστατικές εξισώσεις για ένα ιξώδες ρευστό, που είναι οι θεμελιώδεις αρχές της Εμβιομηχανικής επιστήμης. Ο Leonhard Euler γενίκευσε τους νόμους της κίνησης του Newton σε μία μερική διαφορική εξίσωση για το συνεχές μέσο και έκανε δημοσίευση το 1775 για τη διάδοση κυματικών παλμών στις αρτηρίες. Τις εξισώσεις που παρήγαγε ο Euler, έλυσε ο Riemann. Ο Thomas Young μελέτησε το σχηματισμό της φωνής, που την ταυτοποίησε ως δονήσεις, τις οποίες συνέδεσε με την ελαστικότητα των υλικών. Μας κληροδότησε το μέτρο Young (γνωστό και ως μέτρο ελαστικότητας), κατόπιν ανέπτυξε την κυματική θεωρία του φωτός και μία θεωρία για την έγχρωμη όραση και, επιπλέον, έδωσε λύση σ' ένα πρακτικό πρόβλημα του αστιγματισμού των φακών. Ο Poiseuille βελτίωσε το θερμόμετρο υδραργύρου για να μετρήσει την πίεση του αίματος στην αορτή του σκύλου. Έπειτα, ξεκίνησε να προσδιορίσει τη σχέση πίεσης-ροής στη ροή σωλήνα. Κατάλαβε τη σημασία των αναταράξεων σε αυτή τη σχέση, και αποφάσισε να χρησιμοποιήσει μικροπιπέτες στα πειράματά του για να βεβαιωθεί ότι η ροή ήταν στρωτή. Τα αποτελέσματά του, που δημοσιεύτηκαν το 1843, ήταν τόσο ακριβή που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη θέσπιση της συνθήκης μη ολίσθησης ως κατάλληλης οριακής συνθήκης μεταξύ ενός ιζώδους ρευστού και ενός στερεού. Η εμπειρική του σχέση, γνωστή πλέον ως νόμος του Poiseuille, χρησιμοποιείται εκτενώς στην καρδιολογία.

Ο Herrmann von Helmholtz έγραψε την πρώτη του δημοσίευση σχετικά με την αρχή διατήρησης της ενέργειας ενώ υπηρετούσε τη στρατιωτική του θητεία. θερμοδυναμική, Συνεισέφερε στην οπτική, στη στην ακουστική, στην ηλεκτροδυναμική, στη φυσιολογία και στην ιατρική. Ανακάλυψε το μηγανισμό με τον οποίο εστιάζει το μάτι και τυποποίησε, ακολουθώντας τον Young, την τριχρωματική θεωρία έγχρωμης όρασης. Εφηύρε το φακοσκόπιο για να μελετήσει αλλαγές στον φακό, το οφθαλμοσκόπιο για να μπορεί να παρατηρήσει τον αμφιβληστροειδή, το οφθαλμόμετρο για να μετρήσει τις διαστάσεις των οφθαλμών και το στερεοσκόπιο με ρυθμίσεις διακορικής απόστασης για στερεοσκοπική θέαση. Μελέτησε το μηχανισμό της ακοής και εφηύρε το αντιηχείο Helmholtz. Η θεωρία του για τη διατήρηση της τύρβης αποτελεί θεμέλιο της σύγχρονης ρευστομηχανικής. Το βιβλίο του Sensations of Tone είναι δημοφιλές μέχρι και σήμερα. Ήταν ο πρώτος που προσδιόρισε την ταχύτητα του νευρικού σήματος, γύρω στα 30m/s, και που έδειξε ότι η θερμότητα που απελευθερώνεται από τη σύσπαση των μυών είναι σημαντική πηγή της θερμότητας των ζώων. Δίκαια θα μπορούσε να πάρει τον τίτλο «Ο πατέρας της Εμβιομηγανικής». Μερικά, επιπλέον, ονόματα άξια αναφοράς για τη συνεισφορά τους στην Εμβιομηχανική είναι ο Fick, οι Korteweg και Lamb και ο Van der Pol. [3]



1. Από το κλασσικό έργο του Borreli De Motu Animalium[7]

1.3 Η Εμβιομηχανική σήμερα

Η Διεθνής Εταιρεία Εμβιομηχανικής (International Society of Biomechanics, ISB) ιδρύθηκε στο πολιτειακό πανεπιστήμιο του Penn στις 30 Αυγούστου του 1973 με σκοπό να προάγει τη μελέτη σε όλους τους τομείς της Εμβιομηχανικής σε παγκόσμιο επίπεδο. Ενθαρρύνει και υποστηρίζει την επικοινωνία των επιστημόνων

μεταξύ των χωρών, τη διάδοση της γνώσης καθώς και τις δράσεις από εθνικούς οργανισμούς στο πεδίο της Εμβιομηχανικής. Η ISB έχει ευρύ φάσμα όσον αφορά την επιστήμη της Εμβιομηχανικής και τις εφαρμογές της, πιστεύοντας ότι η Εμβιομηχανική έχει σημαντικό ρόλο στη μελέτη όλων των βιολογικών συστημάτων, από το επίπεδο ολόκληρου οργανισμού μέχρι το μοριακό επίπεδο. Ως εκ τούτου, στα μέλη της Εταιρείας περιλαμβάνονται επιστήμονες από πληθώρα επιστημονικών κλάδων όπως ανατομία, φυσιολογία, μηχανική, ορθοπαιδική, ιατρική αποκατάσταση, αθλητική επιστήμη, αθλητική ιατρική, εργονομία, ηλεκτροφυσιολογική κινησιολογία και άλλα. Από την ίδρυσή της έως σήμερα αριθμεί πάνω από 2000 μέλη και είναι αδελφοποιημένη με 21 εθνικές εταιρείες εμβιομηχανικής μεταξύ των οποίων και η ελληνική.[4]



2.Η άσκηση είναι απαραίτητη στο διάστημα προς αποφυγή απώλειας οστικής μάζας. [6]

Η Ελληνική Εταιρεία Εμβιομηχανικής (ΕΛΕΜΒΙΟ) είναι μη κερδοσκοπικός επιστημονικός σύλλογος που ιδρύθηκε το 2005 με στόχο να φέρει σε επαφή ακαδημαϊκούς, ερευνητές, επαγγελματίες και νέους επιστήμονες που δραστηριοποιούνται στο χώρο της Εμβιομηχανικής σε ευρύ φάσμα ερευνητικών πεδίων όπως: μυοσκελετικό σύστημα, εργονομία, αθλητισμός, ορθοπαιδική, ανάλυση βάδισης, καρδιαγγειακό σύστημα, νευρομυϊκό σύστημα, οδοντιατρική, βιοϋλικά. Αριθμεί περισσότερα από 220 μέλη.[5]

Οι τρέχουσες ερευνητικές τάσεις επικεντρώνονται στις αρτηρίες και τη ροή του αίματος, την καρδιά, τα οστά, τους χόνδρους και τους σκελετικούς μύες, τον εγκέφαλο και το πάγκρεας προσπαθώντας να θεραπεύσουν ασθένειες και να

επιλύσουν προβλήματα με τη χρήση της διαθέσιμης τεχνολογίας, την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, τις προηγμένες τομογραφίες, την τρισδιάστατη απεικόνιση και μοντελοποίηση.[2] Ως παράδειγμα που καταδεικνύει τη σημασία της Εμβιομηχανικής στο σύγχρονο κόσμο αξίζει να αναφερθεί ότι η αμερικανική εθνική υπηρεσία αεροναυτικής και διαστήματος (NASA) γρηματοδοτεί ένα πολυεπιστημονικό πρόγραμμα εμβιομηχανικών ερευνών προκειμένου να κατανοήσει την επίδραση έλλειψης βαρύτητας στο μυοσκελετικό σύστημα, δεδομένου ότι οι αστροναύτες που βρίσκονταν για αρκετές ημέρες εκτός πεδίου βαρύτητας της Γης επέστρεψαν με μυϊκή ατροφία, μειωμένη οστική πυκνότητα και αντοχή, αλλαγές στο καρδιαγγειακό και ανοσοποιητικό τους σύστημα. [6]

1.4 Οστά και δομή των οστών

Τα οστά του ανθρώπινου σώματος επιτελούν κοινές λειτουργίες ως δομική μονάδα και αποτελούνται από διάφορους τύπους ιστών. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως όργανα. Περιέχουν εκτός από οστίτη ιστό, νευρικό ιστό, αίμα, χόνδρο στους αρθρικούς χόνδρους και επιθηλιακό ιστό στα αιμοφόρα αγγεία τους. Οι κοινές λειτουργίες των οστών του σκελετικού συστήματος είναι οι εξής:

- 1. Στηρικτική λειτουργία: Τα οστά, μέσω του μηχανισμού του σκελετού, στηρίζουν το βάρος του σώματος.
- Κινητική λειτουργία. Τα οστά χρησιμεύουν ως μοχλοί, που με τη βοήθεια μυών και τενόντων, κινούν το ανθρώπινο σώμα.
- Προστατευτική λειτουργία. Τα οστά του κρανίου και της σπονδυλικής στήλης προστατεύουν τον εγκέφαλο και το νωτιαίο μυελό, αντίστοιχα, και ο θώρακας προστατεύει τους πνεύμονες και την καρδιά.
- Αποθηκευτική λειτουργία. Στα οστά αποθηκεύονται ανόργανα άλατα ασβεστίου και φωσφόρου που, με τη μορφή ιόντων, απελευθερώνονται στο αίμα και αξιοποιούνται ανάλογα με τις ανάγκες του οργανισμού.
- 5. Αιμοποιητική λειτουργία και αποθήκευση ενέργειας. Στα οστά περιέχεται ο ερυθρός και ο ωχρός μυελός των οστών.
- 6. Ενεργειακή μεταβολική λειτουργία. Τα οστεοπαραγωγικά κύτταρα παράγουν μία ορμόνη, την οστεοκαλσίνη, που επηρεάζει τη ρύθμιση του σακχάρου και την αποθήκευση λίπους στον ανθρώπινο οργανισμό.

Όλα τα οστά του ανθρώπινου σκελετού διατηρούν την ίδια δομή. Διαθέτουν μία πυκνή εξωτερική στοιβάδα, που ονομάζεται συμπαγές (φλοιώδες) οστό. Στο εσωτερικό της βρίσκεται το σπογγώδες οστό, που ονομάζεται και δοκιδώδες οστό, το οποίο μοιάζει με κηρήθρα η οποία αποτελείται από βελονοειδείς προσεκβολές, τις δοκίδες. Τα κενά διαστήματα μεταξύ των δοκίδων περιέχουν ερυθρό ή ωχρό μυελό

των οστών. Το συμπαγές οστό είναι γεμάτο με διόδους από τις οποίες διέρχονται νεύρα και αγγεία. Βασική δομική μονάδα του συμπαγούς οστού είναι ο οστεώνας ή σύστημα του Havers. Ο οστεώνας είναι μακριά κυλινδρική δομή με κατεύθυνση παράλληλη προς τον επιμήκη άξονά του οστού και τις κύριες θλιπτικές δυνάμεις. Βασικά, ο οστεώνας είναι μία ομάδα ομόκεντρων σωλήνων που μοιάζουν με τους δακτυλίους του κορμού ενός δέντρου. Κάθε σωλήνας είναι ένα πετάλιο, δηλαδή μια στοιβάδα εξωκυττάριας ουσίας, όπου οι ίνες κολλαγόνου και οι κρύσταλλοι ανόργανων αλάτων διατάσσονται προς μία μόνο κατεύθυνση. Εντούτοις, οι ίνες και οι κρύσταλλοι των διπλανών πεταλίων προσανατολίζονται πάντοτε σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η εναλλασσόμενη αυτή μορφή δίνει εξαιρετική αντοχή στην καταπόνηση από στροφικές δυνάμεις. Ο κεντρικός σωλήνας ή σωλήνας του Havers διέρχεται μέσα από τον πυρήνα του κάθε οστεώνα. Ο σωλήνας του Havers, όπως όλες οι εσωτερικές κοιλότητες, επενδύεται από ενδοόστεο και έχει νευρικές ίνες και αιμοφόρα αγγεία που τροφοδοτούν, συνεχώς, τα κύτταρα του οστεώνα με θρεπτικές ουσίες. Το ενδοόστεο είναι μία οστεοπαραγωγική στοιβάδα. Κάθετα προς τους κεντρικούς σωλήνες εντοπίζονται οι διατιτραίνοντες σωλήνες ή σωλήνες Volkmann, που συνδέουν τα αιμοφόρα αγγεία και τα νεύρα του περιόστεου με εκείνα των κεντρικών σωλήνων και της μυελικής κοιλότητας. Το περιόστεο είναι μια μεμβράνη συνδετικού ιστού που καλύπτει το εξωτερικό μέρος του οστού, εκτός από τα άκρα του. [8]



3. α) Σχηματική απεικόνισης διατομής διάφυσης μακρού οστού β) μεγέθυνση τμήματος του οστεώνα γ) μικρογραφία ΗΜΣ(αριστερά) και ΟΜ(δεξιά) της εγκάρσιας διατομής οστεώνα από νωπό οστό [8]

1.5 Οστίτης ιστός και εμβιομηχανική του οστίτη ιστού

1.5.1 Οστίτης ιστός

Ο οστίτης ιστός αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς τύπους κυττάρων και από εξωκυττάρια ουσία. Διαθέτει τόσο οργανικά συστατικά, δηλαδή κύτταρα, ίνες κολλαγόνου και άμορφη θεμέλια ουσία, όσο και ανόργανα συστατικά, όπως άλατα, που του προσδίδουν τη σκληρή σύσταση και την ψαθυρότητα. Ουσιαστικά, πρόκειται για επιμεταλλωμένο συνδετικό ιστό που οργανώνεται σε δύο τύπους: το συμπαγές οστούν και το σπογγώδες οστούν.

Τα οργανικά στοιχεία αποτελούν περίπου το 35% της ιστικής του μάζας. Τα συστατικά αυτά και, κυρίως, το κολλαγόνο προσδίδουν στα οστά ευλυγισία και αντοχή σε εφελκυσμό, καθιστώντας τα ικανά να αντιστέκονται σε διατατικές και στροφικές δυνάμεις. Τα ανόργανα συστατικά αποτελούν το υπόλοιπο 65% της ιστικής μάζας του οστίτη ιστού. Είναι ανόργανοι υδροξυαπατίτες και ανόργανα άλατα, κυρίως φωσφορικού ασβεστίου. Εμφανίζονται με τη μορφή μικροσκοπικών κρυστάλλων και εντοπίζονται γύρω και μέσα στις ίνες κολλαγόνου της εξωκυττάριας ουσίας. Οι κρύσταλλοι αυτοί, που η συγκέντρωσή τους βρίσκεται σε αρκετά υψηλό επίπεδο, δίνουν στο οστό εξαιρετικά σκληρή σύσταση με αποτέλεσμα να μπορεί να συμπεριφερθεί με τρόπο βέλτιστο σε θλιπτικές φορτίσεις. Στα ανόργανα άλατα οφείλεται, επίσης, η αντοχή, εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια αργότερα, των οστέινων ευρημάτων των διαφόρων αρχαιολογικών ανακαλύψεων. Η δομή του οστίτη ιστού μπορεί να παραλληλιστεί με το οπλισμένο σκυρόδεμα: οι ίνες κολλαγόνου, όπως οι ράβδοι από χάλυβα, παρέγουν αντοχή σε εφελκυσμό και τα μεταλλικά άλατα, όπως η πέτρα και η άμμος, προσδίδουν αντοχή στα θλιπτικά φορτία. Στην πραγματικότητα, ο οστίτης ιστός καταφέρνει να ανθίσταται καλύτερα στις θλιπτικές δυνάμεις από το οπλισμένο σκυρόδεμα και, σχεδόν, το ίδιο στις εφελκυστικές δυνάμεις. Όμως, ούτε το οστό ούτε το οπλισμένο σκυρόδεμα αντιστέκονται επαρκώς σε στρεπτικές φορτίσεις. Η πλειοψηφία των καταγμάτων στα άκρα προκαλείται από στρεπτικές καταπονήσεις. Η ανάμειξη οργανικών και ανόργανων συστατικών καθιστά το οστό ιδιαίτερα σκληρό, ανθεκτικό και, σχετικά, ελαστικό χωρίς να θραύεται εύκολα.

Οι τέσσερις τύποι κυττάρων του οστίτη ιστού είναι οι εξής: οστεοπρογονικά κύτταρα, οστεοβλάστες, οστεοκύτταρα και οστεοκλάστες. Οι τρεις πρώτοι τύποι αφορούν την παραγωγή και τη συντήρηση του οστίτη ιστού ενώ ο τέταρτος τύπος αφορά την απορρόφηση των άχρηστων κυττάρων. Τα οστεοπρογονικά κύτταρα είναι βλαστικά κύτταρα που διαφοροποιούνται σε οστεοπαραγωγικά κύτταρα, τις οστεοβλάστες. Οι οστεοβλάστες παράγουν και εκκρίνουν την άμορφη θεμέλια ουσία και τις ίνες κολλαγόνου της εξωκυττάριας ουσίας, δηλαδή τα οργανικά συστατικά του οστίτη ιστού. Η συγκεκριμένη οργανική ουσία που εκκρίνεται από τις οστεοβλάστες συομάζεται οστεοειδές. Κρύσταλλοι ανόργανων αλάτων ασβεστίου σχηματίζονται εντός του οστεοειδούς, σε διάστημα μίας εβδομάδας. Όταν οι οστεοβλάστες σταματούν να παράγουν νέο οστεοειδές, αφού, προηγουμένως, έχουν καλυφθεί από

εξωκυττάρια ουσία, μετατρέπονται σε οστεοκύτταρα. Τα οστεοκύτταρα είναι επιφορτισμένα με τη συντήρηση του οστίτη ιστού και τη διατήρηση της εξωκυττάριας ουσίας. Τα οστεοκύτταρα όταν καταστρέφονται υφίστανται απορρόφηση. Ο τέταρτος τύπος κυττάρων, οι οστεοκλάστες, είναι υπεύθυνος για αυτή τη διεργασία. Οι οστεοκλάστες, οι οποίοι προέρχονται από τα μονοκύτταρα του αίματος, εκκρίνουν υδροχλωρικό οξύ για να διασπάσουν τα ανόργανα συστατικά της εξωκυττάριας ουσίας και λυσοσωμικά ένζυμα για να αποδομήσουν τα οργανικά συστατικά. Η καταστροφή του παλαιού οστίτη ιστού και η αναδόμηση του με νέο ιστό είναι μία διαρκής διαδικασία που συμβάλλει στη διατήρηση της οστικής ισχύος και καθιστά τα οστά ικανά να ανταπεξέρχονται στις μεταβαλλόμενες καταπονήσεις. Στα σωματικά δραστήρια άτομα, παράγεται νέος οστίτης ιστός που ενισχύει τη στήριξη που παρέχει ο σκελετός. Αντιθέτως, στα σωματικά αδρανή άτομα, άτομα που για οποιονδήποτε λόγο μένουν αρκετό καιρό κλινήρη, η οστική απορρόφηση υπερτερεί της αναδόμησης, επειδή το οστό δεν επιφορτίζεται με τη στήριξη του σώματος. [8]

1.5.2 Εμβιομηχανική του οστίτη ιστού

Η Εμβιομηχανική του οστίτη ιστού αφορά τη μελέτη και τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τού οστού. Για τον σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η παρασκευή ομοιόμορφων δοκιμίων, που υποβάλλονται σε εργαστηριακά προκαθορισμένες συνθήκες φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις (σ) και οι παραμορφώσεις (ε) που αναπτύσσονται και να προκύψουν τα κατάλληλα διαγράμματα σ-ε, τα οποία χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν και άλλες εμβιομηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού, μέσω της ελαστικής και πλαστικής περιοχής τους.

Οι μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού επηρεάζονται σημαντικά από παράγοντες όπως:

- i) η υγρασία των δοκιμίων
- ii) η φαινόμενη πυκνότητα, ανάλογα με το αν εξετάζουμε συμπαγές ή σπογγώδες οστό
- iii) η ανισοτροπία του οστού, δηλαδή η διαφορετική απόκριση του οστίτη ιστού ανάλογα με τη διεύθυνση της φόρτισης
- iv) το επίπεδο μετάλλων στο οστό
- ν) η ταχύτητα επιβολής του φορτίου
- vi) η συχνότητα της φόρτισης
- vii) ο χαρακτήρας της φόρτισης, δηλαδή αν η φόρτιση είναι μονοτονική ή κυκλική
- viii) ο χρόνος παραμονής του φορτίου πριν την απομάκρυνση αυτού

Η εξάρτηση αυτή υπάρχει σχεδόν σε όλα τα βιοϋλικά και σχετίζεται είτε με το ίδιο το υλικό είτε με τις συνθήκες φόρτισής του. Επίσης, σημαίνοντα ρόλο έχει η ηλικία του οστού καθώς επηρεάζει όλους τους παραπάνω παράγοντες.

Ξηρά δοκίμια οστού, σε εργαστηριακή δοκιμή. παρουσιάζουν υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας αλλά, ταυτογρόνως, αστογούν χαμηλότερες τιμές σε παραμόρφωσης και ενέργειας. Έχουν, σημαντικά, μικρότερη αντοχή. Αντιθέτως, δοκίμια νωπά προσομοιώνουν καλύτερα τις φυσιολογικές συνθήκες, δηλαδή in vivo λειτουργία, και παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές παραμόρφωσης και ενέργειας προτού αστοχήσουν. (Εικόνα 4).

Η φαινόμενη πυκνότητα του οστού προκαλεί αύξηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητάς του και μείωση της δυνάμενης παραμόρφωσης του. Η παρατήρηση αυτή σημειώνεται για πυκνό σπογγώδες



 Καμπύλες τάσης και παραμόρφωσης για ξηρά και υγρά δοκίμια φλοιώδους οστού.[9]

οστό σε σχέση με λιγότερο πυκνό αλλά και για συμπαγές συγκριτικά με σπογγώδες οστό. (Εικόνα 5).



5.Καμπύλη τάσης και παραμόρφωσης ανάλογα με τη φαινόμενη πυκνότητα του οστίτη ιστού.[9] Η επιμήκης διάταξη του οστίτη ιστού προκαλεί αναμενόμενη αύξηση της αντοχής στην παραλαβή φορτίων στη συγκεκριμένη διεύθυνση. Η αντοχή σε εφελκυσμό ή θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση αυτή παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές σε σχέση με εγκάρσιες ή υπό γωνία διευθύνσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ανισοτροπία του οστού. (Εικόνα 6). Αυξημένο μέτρο ελαστικότητας, τάσης διαρροής και μέγιστης αντοχής παρατηρούνται αν αυξηθεί η ταχύτητα φόρτισης των δοκιμίων οστίτη ιστού. Ωστόσο, υπάρχει μία κρίσιμη ταχύτητα φόρτισης για τον οστίτη ιστό στην οποία η παραμόρφωση και η απορροφούμενη ενέργεια κατά την αστοχία φτάνουν σε μέγιστη τιμή και εν συνεχεία

φθίνουν.

ποσοτικά Τέλος, παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά για τις μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού. Για το φλοιώδες οστό, η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό κατά τη διεύθυνση της μικροδομής είναι περί τα 130 MPa και σε θλίψη 190 ΜΡα, ενώ εγκάρσια προς τη μικροδομή οι τιμές μέγιστης αντογής είναι ασθενέστερες και τυπικά 50 και 130 MPa, αντίστοιχα. Για το φλοιώδες οστό, το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση της μικροδομής κυμαίνεται από 17 έως και 22 GPa, ενώ εγκάρσια προς αυτήν είναι περίπου 11GPa. Το μέτρο διάτμησης του φλοιώδους οστού σε στρέψη περί τον επιμήκη άξονα υπολογίζεται μεταξύ 3 και 4 GPa. Για



6.Καμπύλη τάσης και παραμόρφωσης σε δοκίμια μηριαίου φλοιού με διαφορετικό προσανατολισμό ως προς την μικροδομή του ιστού.[9]

το σπογγώδες οστό, η μέγιστη αντοχή σε θλίψη είναι περί τα 50 MPa, ενώ σε εφελκυσμό ελαττώνεται στα 8 MPa. Για το σπογγώδες οστό, το μέτρο ελαστικότητας

μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0.5 GPa έως και 10 GPa με επικρατούσα τιμή τα 2GPa, ενώ σε χαμηλό ρυθμό παραμόρφωσης η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού του φλοιώδους οστού είναι 130 MPa και το μέτρο ελαστικότητας 20 GPa, με μέγιστες τιμές άνω των 250 MPa και 30 GPa, αντίστοιχα. Η φαινόμενη πυκνότητα του φλοιώδους οστού είναι τυπικά 1.8 g/cm³, ενώ για το σπογγώδες οστό βρίσκεται κάτω από 1 g/cm³. [9]

1.6 Μακρά οστά

Το κύριο χαρακτηριστικό των μακρών οστών είναι ότι έχουν σημαντικά μεγαλύτερο μήκος από ότι πλάτος και τούτο είναι το διακριτικό τους στοιχείο όσον αφορά την ταξινόμηση των οστών. Ένα οστό μπορεί να είναι μακρό, ανεξάρτητα από το μέγεθός του: τα οστά των δακτύλων των άκρων είναι μακρά. Αν και έχουν μικρό μέγεθος, ανήκουν στη συγκεκριμένη κατηγορία λόγω του επιμήκους σχήματος που παρουσιάζουν. Όλα, σχεδόν, τα μακρά οστά του ανθρώπινου σκελετού έχουν την ίδια δομή.

Αποτελούνται από ένα μακρόστενο κύριο σώμα, τη διάφυση, και δύο διακριτά άκρα, τις επιφύσεις. Η άκρη κάθε επίφυσης καλύπτεται από ένα πολύ λεπτό στρώμα υαλοειδούς χόνδρου, που ονομάζεται αρθρικός χόνδρος και εφάπτεται στην αρθρική επιφάνεια κάθε οστού. Η επιφυσιακή γραμμή, που αποτελεί υπόλειμμα του συζευκτικού χόνδρου που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια των παιδικών χρόνων του ανθρώπου και εξυπηρετεί την επιμήκη ανάπτυξη των οστών, εντοπίζεται ανάμεσα στη διάφυση και τις επιφύσεις των μακρών οστών των ενηλίκων.

Τα μακρά οστά διαθέτουν πλούσια αγγείωση, όπως και κάθε άλλο οστό. Άλλωστε, το 3% έως 11% του αίματος οποιαδήποτε χρονική στιγμή περιέχεται στον ανθρώπινο σκελετό. Η διάφυση αιματώνεται από την τροφοφόρο αρτηρία και την τροφοφόρο φλέβα. Τα δύο αυτά αγγεία διέρχονται από το τροφοφόρο τρήμα, μια οπή στο τοίχωμα της διάφυσης. Ο μυελός των οστών και το σπογγώδες οστό αιματώνονται από την τροφοφόρο αρτηρία, η οποία διαπερνά το συμπαγές οστό. Το συμπαγές οστό αιματώνεται από ορισμένους κλάδους της τροφοφόρου αρτηρίας. Με όμοιο τρόπο, οι επιφύσεις αιματώνονται από πολλές επιφυσιακές αρτηρίες και φλέβες.

Το κεντρικό τμήμα της διάφυσης των μακρών οστών ονομάζεται μυελική κοιλότητα και δεν περιέχει καθόλου οστίτη ιστό. Στα ενήλικα άτομα, η κοιλότητα αυτή πληρούται από ωχρό μυελό των οστών. Το περιόστεο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι μία μεμβράνη συνδετικού ιστού που καλύπτει ολόκληρο το εξωτερικό μέρος του οστού, εκτός από τα άκρα κάθε επίφυσης που καλύπτονται από αρθρικό χόνδρο. Το περιόστεο αποτελείται από δύο επί μέρους τμήματα: μία επιπολής στοιβάδα ακανόνιστου συνδετικού ιστού, που αντιστέκεται όταν το οστό υποβάλλεται σε καμπτικές φορτίσεις, και μία εν τω βάθει στοιβάδα που επαφίεται στο συμπαγές οστό. Η εν τω βάθει στοιβάδα είναι οστεοσονος και αποτελείται τόσο από οστεοπαραγωγικά κύτταρα όσο και από οστεοαπορροφητικά. Ο λόγος που όλα τα κατάγματα συνοδεύονται από πόνο και αιμορραγία οφείλεται στο γεγονός ότι το

τροφοφόρων και επιφυσιακών αγγείων. Οι ίνες Sharpey είναι παχιές δεσμίδες κολλαγόνων ινών, οι οποίες διαπερνούν το περιόστεο και καταλήγουν στην εξωκυττάρια θεμέλια ουσία.

Το ενδοόστεο είναι μία πολύ λεπτή μεμβράνη συνδετικού ιστού, η οποία επενδύει τις εσωτερικές επιφάνειες των οστών. Πιο συγκεκριμένα, το ενδοόστεο επενδύει τους σωλήνες του Havers στους οστεώνες και τις δοκίδες του σπογγώδους οστού. Είναι οστεογόνος δομή, όπως και το περιόστεο. [8]



7. Δομή μακρού οστού (βραχιόνιο) α) Πρόσθια άποψη μετωπιαίας διατομής β) Συμπαγές και σπογγώδες οστό επιφυσιακού άκρου γ) Μεγέθυνση της διάφυσης της εικόνας α). [8]

1.7 Ανατομία και στοιχεία Εμβιομηχανικής του μηριαίου οστού

Το μηριαίο οστό είναι το μακρύτερο οστό του ανθρώπινο σκελετού. Ανήκει στον εξαρτηματικό σκελετό και, συγχρόνως, είναι το πιο ανθεκτικό οστό του ανθρώπου. Η φέρουσα ικανότητά του σε καταπόνηση μπορεί να φτάσει έως και 2 τόνους ανά τετραγωνική ίντσα. Το μηριαίο οστό μορφώνεται προς τα έσω καθώς κατέρχεται προς το γόνατο, διότι με αυτόν τον τρόπο οι αρθρώσεις των γονάτων βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο βάρους του σώματος, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη ισορροπία. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο εμφανές στις γυναίκες, επειδή έχουν ευρύτερη πύελο. Έτσι, μεγαλώνει η γωνία ανάμεσα στο μηριαίο και το κνημιαίο οστό, καθιστώντας ορισμένες αθλήτριες πιο ευάλωτες σε προβλήματα που εντοπίζονται, κυρίως, στα γόνατα. Ως μακρό οστό, το μηριαίο οστό αποτελείται από ένα κύριο σώμα, τη διάφυση, και δύο άκρα, τις επιφύσεις.

Η κεφαλή του μηριαίου οστού έχει σφαιροειδή μορφή και φέρει ένα εντύπωμα στο κέντρο της, το οποίο ονομάζεται βοθρίο της κεφαλής. Στο σημείο αυτό, το μηριαίο οστό αρθρώνεται με την κοτύλη του ανώνυμου οστού της πυέλου. Ο αυχένας του μηριαίου οστού ενώνει την κεφαλή με την διάφυση και φέρεται προς τα πίσω, έξω και κάτω, σχηματίζοντας γωνία 125° περίπου με τον επιμήκη άξονα του σώματος, αντικατοπτρίζοντας το γεγονός ότι το μηριαίο οστό συντάσσεται με την πλάγια περιοχή της πυέλου. Η γωνία αυτή παρουσιάζεται οριακά μικρότερη στη γυναίκα.[10] Ο αυχένας είναι το πιο αδύναμο μέρος του μηριαίου οστού και υφίσταται, συχνά, κατάγματα.

Ο μείζων τρογαντήρας προς τα έξω και ο ελάσσων τρογαντήρας προς τα πίσω και έσω αποτελούν σημεία πρόσφυσης των μυών και βρίσκονται στην ένωση διάφυσης και αυχένα. Συμβάλλουν προς τα εμπρός με τη μεσοτρογαντήρια γραμμή και προς τα πίσω με την ευμεγέθη μεσοτροχαντήρια ακρολοφία. Ακριβώς από κάτω, στο οπίσθιο μέρος της διάφυσης βρίσκεται το γλουτιαίο τράχυσμα. Το κάτω μέρος του γλουτιαίου τραχύσματος συνενώνεται με μία επιμήκη κατακόρυφη γραμμή, την τραχεία γραμμή. Όλες αυτές οι περιοχές είναι σημεία πρόσφυσης μυών. Στο κάτω τμήμα του, το μηριαίο οστό καταλήγει στον έξω και έσω κόνδυλο για να συνταχθεί, τελικά, με το κνημιαίο οστό μέσω αρθρικών επιφανειών. Το έξω και έσω υπερκονδύλιο κύρτωμα βρίσκονται άνω των κονδύλων και αποτελούν σημεία πρόσφυσης μυών. Το φύμα του μέγα προσαγωγού μυός είναι μια προεξογή στο άνω μέρος του έσω υπερκονδύλιου κυρτώματος. Η μηριαία τροχιλία είναι μία αρθρική επιφάνεια ανάμεσα στους δύο κόνδυλους που ενώνεται με την επιγονατίδα. Στο οπίσθιο μέρος, ο μεσοκονδύλιος βόθρος εντοπίζεται ανάμεσα στους δύο κονδύλους. Η έσω και έξω υπερκονδύλια γραμμή ανέρχονται από τους κονδύλους και συμβάλλουν στην τραχεία γραμμή. [8]



8. Το μηριαίο οστό [8]

1.8 Επίδραση σεσαμίνης και σεσαμολίνης στον οστίτη ιστό

Η οστεοπόρωση είναι μία ασθένεια των οστών που πλήττει εκατομμύρια ανθρώπους και, κυρίως, γυναίκες. Κύρια χαρακτηριστικά της ασθένειας είναι η μειωμένη αντοχή των οστών και η ψαθυρότητα που καθιστά τον ανθρώπινο σκελετό επιρρεπή σε κατάγματα.

Η σεσαμίνη και η σεσαμολίνη ανήκουν στην οικογένεια των λιγνανών, μιας ομάδας πολυφαινολών χαμηλού μοριακού βάρους. Εντοπίζονται σε μεγάλες ποσότητες στο σουσάμι και τα παράγωγά του, όπως το σησαμέλαιο και το ταχίνι. Πλήθος ερευνών επιβεβαιώνει τα πολλαπλά οφέλη των δύο αυτών ουσιών. Αμφότερες, έχουν αντιοξειδωτική, αντιφλεγμονώδη και αντικαρκινική δράση. Ενδείξεις υπάρχουν για την ευεργετική επίδρασή τους στα οστά.

Μελέτες που διεξήχθησαν σε ιστούς από μηριαία οστά θηλέων ωοθηκεκτομημένων Sprague Dawley επιμύων έδειξαν ότι η σεσαμίνη ενίσχυσε, σημαντικά, την οστεοκαλσίνη και την έκφραση Κολλαγόνου Τύπου Ι. Επιπλέον, προήγαγε την οστεοβλαστική διαφοροποίηση των μεσεγχυματικών κυττάρων μυελού των οστών στους επίμυες και βελτίωσε, συνολικά, τη δομή των οστών. [11]

Σε παρόμοιες έρευνες, η σεσαμινόλη ανέστειλε αποτελεσματικά το σχηματισμό οστεοκλαστών in vitro και μείωσε την έκφραση ορισμένων γονιδίων, που μέσω της παραγωγής πρωτεϊνών, σχετίζονταν με την απορρόφηση κυττάρων του οστίτη ιστού.

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι, ιδιαίτερα, ενθαρρυντικά όσον αφορά τη θεραπεία, αλλά και την πρόληψη της οστεοπόρωσης. [12]



9. Ανίχνευση κολλαγόνου τύπου 1 σε μηριαία οστά τρωκτικών ύστερα από χορήγηση σεσαμίνης [11]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μηχανική των παραμορφωσίμων σωμάτων - Καθαρή κάμψη - Στρέψη

2.1 Θεωρία της κάμψης

2.1.1 Θεωρία δοκών Bernoulli - Euler

Η θεωρία δοκών Bernoulli – Euler διατυπώθηκε γύρω στο 1750 από τους Leonard Euler και Daniel Bernoulli και αφορά το πρόβλημα της μαθηματικής περιγραφής της κάμψης των δοκών. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μια απλούστευση της γραμμικής θεωρίας ελαστικότητας και παρέχει έναν ολοκληρωμένο τρόπο υπολογισμού της ικανότητας παραλαβής φορτίων και της παραμόρφωσης των δοκών που υπόκεινται σε κάμψη. Η ειδοποιός διαφορά της θεωρίας Bernoulli – Euler είναι η χαμηλότερη δυνατή πολυπλοκότητά της και αποτελεί τον λόγο για τον οποίο είναι ευρέως διαδεδομένη. Για τον σκοπό αυτό και για την περαιτέρω απλοποίηση του εκάστοτε προβλήματος η θεωρία συνοδεύεται, πάντοτε, από τις εξής παραδοχές:

- Το υλικό της δοκού θεωρείται γραμμικώς ελαστικό υλικό, που υπακούει στο νόμο του Hooke.
- Κάθε επίπεδη και κάθετη διατομή στον διαμήκη άξονα της δοκού παραμένει επίπεδη και κάθετη στον διαμήκη άξονα και μετά την κάμψη της δοκού. Η παραδοχή αυτή είναι γνωστή και ως υπόθεση των Bernoulli – Navier.
- Οι μετατοπίσεις της δοκού θεωρούνται, σημαντικά, μικρές και οι διατμητικές παραμορφώσεις είναι αμελητέες.
- Οι διαστάσεις της διατομής είναι μικρές σε σχέση με το μήκος της δοκού. [13]

2.1.2 Καθαρή κάμψη

Καθαρή κάμψη καλείται η περίπτωση φόρτισης, όπου δρουν δύο ίσες και αντίθετες καμπτικές ροπές στο ίδιο διαμήκες επίπεδο, χωρίς την ύπαρξη διατμητικών τάσεων. Οι ορθές τάσεις είναι μη μηδενικές. Μία τέτοια ειδική περίπτωση είναι η κάμψη τεσσάρων σημείων.

2.1.3 Καθαρή κάμψη συμμετρικών δοκών



 α) Κάμψη τεσσάρων σημείων συμμετρικής δοκού b) Αριστερό τμήμα της ίδιας δοκού μετά από ιδεατή τομή [14]

Στο πείραμα κάμψης τεσσάρων σημείων, η δοκός φορτίζεται όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 9α. Αρχικά, υπολογίζονται οι αντιδράσεις, οι οποίες λόγω συμμετρίας είναι ίσες με Ρ. Έπειτα, πραγματοποιείται ιδεατή τομή mn, σε τυχαίο σημείο της δοκού, και εξετάζεται το αριστερό τμήμα. Από την ισορροπία του αριστερού τμήματος παρατηρείται ότι οι εσωτερικές δυνάμεις στη συγκεκριμένη διατομή mn, που αντιπροσωπεύουν τη δράση του δεξιού αποκομμένου τμήματος της δοκού, πρέπει να είναι στατικά ισοδύναμες με ένα ζεύγος ίσων και αντίρροπων δυνάμεων, των οποίων το αποτέλεσμα είναι ροπή ίση κατά μέτρο και αντίθετη στην καμπτική ροπή Pa. Σκοπός είναι η εύρεση της κατανομής των εσωτερικών δυνάμεων πάνω στη διατομή, γι' αυτό δεν πρέπει να αμεληθεί η παραμόρφωση της δοκού. Η κάμψη συντελείται στο επίπεδο που δρουν οι εξωτερικές ροπές, για δοκούς που έχουν διαμήκες επίπεδο συμμετρίας.



11. Κάμψη τεσσάρων σημείων: α) Διαμήκης τομή δοκού b) Εγκάρσια τομή δοκού [14]

Οι κάθετες, προ κάμψης, γραμμές mm και pp παραμένουν ευθείες κατά την κάμψη της δοκού και περιστρέφονται με τρόπο τέτοιο ώστε να μένουν κάθετες στις ίνες της δοκού, σε δοκούς ορθογωνικής διατομής, όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Η ακόλουθη θεωρία στηρίζεται στη υπόθεση ότι όχι μόνο γραμμές σαν την pp παραμένουν ευθείες, αλλά ολόκληρες οι εγκάρσιες διατομές της δοκού παραμένουν επίπεδες και κάθετες στις διαμήκεις ίνες της μετά την κάμψη. Η πειραματική διαδικασία έχει δείξει ότι η παραπάνω υπόθεση δίνει αρκετά ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά την αλλαγή του μήκους των διαμηκών ινών και την παραμόρφωση των δοκών. Επιπλέον, με χρήση αυτής της υπόθεσης, διαπιστώνεται ότι η κυρτή πλευρά εφελκύεται, ενώ η κοίλη θλίβεται. Η ίνα nn₁ είναι το ίχνος μιας επιφάνειας όπου αμφότερες δεν υφίστανται καμία καταπόνηση. Ονομάζονται ουδέτερος άξονας και ουδέτερη επιφάνεια, αντίστοιχα. Σε απόσταση y από την ουδέτερη επιφάνεια, η επιμήκυνση s₁s' βρίσκεται αν σχεδιάσουμε τη γραμμή n_1s_1 παράλληλη στην mm. Από ομοιότητα των τριγώνων non₁ και s_1n_1s' η επιμήκυνση της ίνας ss' δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_{\chi} = \frac{s's_1}{nn_1} = \frac{y}{r} \tag{2.1}$$

όπου r είναι η ακτίνα καμπυλότητας. Είναι προφανές, από τη σχέση (2.1), ότι η παραμόρφωση των διαμηκών ινών είναι ανάλογη της απόστασης y από την ουδέτερη επιφάνεια και αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας καμπυλότητας. Η παραμόρφωση κατά την πλευρική διεύθυνση, δηλαδή τον άξονα z της διατομής της δοκού, όπως φαίνεται στην εικόνα 10b, είναι:

$$\varepsilon_z = -\mu\varepsilon_x = -\mu\frac{y}{r} \tag{2.2}$$

όπου μείναι ο λόγος Poisson. Οι ίνες της διατομής που είναι παράλληλες στον άξονα z, λόγω της ε_z , καμπυλώνονται ώστε να παραμένουν κάθετες στις πλευρές της διατομής. Η ακτίνα της καμπυλότητας τους R θα είναι μεγαλύτερη από την r, όπως η ε_x είναι μεγαλύτερη από την ε_z . Έτσι έχουμε τον τύπο:

$$R = \frac{1}{\mu}r\tag{2.3}$$

Επειδή οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες του ορίου αναλογίας, όπως προκύπτει από τις παραμορφώσεις των διαμηκών ινών, η δοκός βρίσκεται στην ελαστική περιοχή και υπακούει στο νόμο του Hooke:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = E\frac{y}{r} \tag{2.4}$$

Η κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων πάνω στη διατομή φαίνεται στην εικόνα 11:



Η τάση είναι ανάλογη της απόστασης y από την ουδέτερη επιφάνεια. Έστω dA, μία στοιχειώδης επιφάνεια της διατομής σε απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα nn. Η δύναμη που ασκείται σε αυτή την επιφάνεια είναι ίση με:

$$\sigma_x dA = E \frac{y}{r} dA \tag{2.5}$$

Λόγω ισορροπίας, η συνολική δύναμη είναι μηδενική και έτσι έχουμε:

$$\int E \frac{y}{r} dA = \frac{E}{r} \int y dA = \frac{E}{r} Q_x = 0$$
(2.6)

όπου Q_x είναι η επιφανειακή ροπή πρώτης τάξης ως προς τον άξονα x, η οποία από τη σχέση (2.6) αποδεικνύεται ότι είναι μηδενική. Άρα ο ουδέτερος άξονας διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Η συνισταμένη ροπή στην διατομή είναι το άθροισμα των ροπών στις στοιχειώδεις επιφάνειες dA:

$$\int \frac{E}{r} y^2 dA = \frac{EI_z}{r} = M \quad \acute{\eta} \quad \frac{1}{r} = \frac{M}{EI_z}$$
(2.7)

όπου I_z είναι η δευτεροβάθμια επιφανειακή ροπή. Το γινόμενο EI_z ονομάζεται στιβαρότητα. Με απαλοιφή του r, εισάγοντας την σχέση (2.4) στην (2.7) προκύπτει η κατανομή των ορθών τάσεων καθ' ύψος της διατομής:

$$\sigma_{\chi} = \frac{My}{I_z} \tag{2.8}$$

Στην σχέση (2.8) η απόσταση y είναι θετική κάτω από την ουδέτερη επιφάνεια και η ροπή M είναι θετική όταν η δοκός στρέφει τα κοίλα άνω. Η θεώρηση που αναπτύχθηκε παραπάνω, αφορά ορθογωνικές διατομές. Ισχύει και για οποιοδήποτε σχήμα διατομής, αρκεί η δοκός να έχει ένα διαμήκες επίπεδο συμμετρίας και να υποβάλλεται σε καθαρή κάμψη. Βασική προϋπόθεση είναι τα επίπεδα των διατομών να παραμένουν επίπεδα, μετά την κάμψη, και κάθετα στον διαμήκη άξονα της δοκού. Η μέγιστη εφελκυστική και η μέγιστη θλιπτική τάση αναπτύσσονται στις ακραίες ίνες της δοκού. [14]

2.1.4 Καθαρή κάμψη δοκών σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας

Ας εξετάσουμε την περίπτωση όπου το επίπεδο που δρουν οι ροπές που προκαλούν την κάμψη δεν είναι επίπεδο συμμετρίας. Υποθέτουμε ότι ο άξονας nn της



13. Δοκός υπό κάμψη χωρίς επίπεδο συμμετρίας [15]

εικόνας 12, είναι κάθετος στο επίπεδο xy. Η δύναμη που ασκείται στη στοιχειώδη επιφάνεια dA έχει μέτρο EydA/r και είναι κάθετη στη διατομή. Από τις εξισώσεις ισορροπίας λαμβάνουμε:

$$\frac{E}{r}\int_A y dA = 0, \qquad \frac{E}{r}\int_A y^2 dA = 0, \qquad \frac{E}{r}\int_A yz dA = 0 \qquad (2.9)$$

Η πρώτη εξίσωση από τις εξισώσεις (2.9) υποδεικνύει ότι ο ουδέτερος άξονας διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Η δεύτερη εξίσωση προσδιορίζει την καμπυλότητα 1/r της εξίσωσης της ελαστικής γραμμής. Η τρίτη εκ των εξισώσεων (2.9) υποδηλώνει ότι οι άξονες y και z είναι κύριοι άξονες αδρανείας και ότι τα xy και xz είναι κύρια επίπεδα της δοκού. Στη γενική περίπτωση, το επίπεδο της κάμψης συμπίπτει με το επίπεδο που ασκούνται οι ροπές αν και μόνο αν το τελευταίο

είναι κύριο επίπεδο της δοκού. Αν δεν διέρχεται από κύριο άξονα το επίπεδο που δρα το ζεύγος ροπών, τότε η τρίτη από τις εξισώσεις (2.9) δεν ικανοποιείται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ουδέτερος άξονας να μην είναι κάθετος στο επίπεδο του ζεύγους των ροπών. Αν η δράση του ζεύγους ροπών είναι σε ένα επίπεδο που τέμνει τη διατομή της δοκού στη γραμμή mm, κεκλιμένη κατά γωνία θ από τον κύριο άξονα y, τότε το



14. Ανάλυση της ροπής σε κύριο σύστημα αναφοράς [15]

διάνυσμα της ροπής Μ μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, όπως φαίνεται στην εικόνα 13. Αφού κάθε συνιστώσα της ροπής ασκείται σε ένα από τα κύρια επίπεδα της δοκού, τότε οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε οποιοδήποτε σημείο της διατομής δίνονται από την εξίσωση Bernoulli – Euler:

$$\sigma = \frac{M\cos\theta}{I_z}y + \frac{M\sin\theta}{I_y}z$$
(2.10)

Επειδή ο ουδέτερος άξονας δεν υπόκειται σε καταπόνηση, μηδενίζουμε την τάση στην εξίσωση (2.10) και προκύπτει η εξίσωση του ουδέτερου άξονα:

$$\frac{M\cos\theta}{I_z}y + \frac{M\sin\theta}{I_y}z = 0$$
(2.11)

Η εφαπτομένη της γωνίας $\hat{\beta}$ είναι $tan\hat{\beta} = -\frac{y}{z} = \frac{I_z}{I_y}tan\hat{\theta}$. Παρέχει την κλίση του ουδέτερου άξονα και είναι, γενικά, διαφορετική από την γωνία $\hat{\theta}$. Η ισότητα ισχύει αν $\hat{\theta} = 0$ ή $I_z = I_y$. [15]

2.2 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων

2.2.1 Κυκλική διατομή

Έστω ότι η διατομή του δακτυλίου της εικόνας 14 είναι κυκλική. Η διαφορά σε αυτήν την περίπτωση, σε σχέση με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι ότι το εξωτερικό και το εσωτερικό σύνορο της διατομής εντοπίζονται σε διαφορετικά οριζόντια επίπεδα και η επιφάνεια mn τα συνδέει. Η καμπυλότητα της επιφάνειας mn



15. Λεπτότοιχο κυλινδρικό δοκίμιο - σκαρίφημα εγκάρσιας τομής [16]

μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, αν το πάχος της δακτυλιοειδούς διατομής είναι μικρό, και οι γραμμές mn μπορεί να θεωρηθούν ευθείες. Τότε, η κλίση της επιφάνειας mn είναι σταθερή σε όλο το πάχος του τοιχώματος και ίση με δ/h, όπου δ είναι η διαφορά των επιπέδων των δύο συνόρων και h το πάχος, το οποίο μπορεί να μην είναι σταθερό μεταξύ των συνόρων. Σε αυτή την περίπτωση, οι διατμητικές τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια της διατομής και είναι ίσες με την κλίση:

$$\tau = \frac{\delta}{h} \tag{2.12}$$

Άρα, η διατμητική τάση είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους του δακτυλίου. Ο όγκος που περιέχεται ανάμεσα στις επιφάνειες mm και nn υπολογίζεται με τη χρήση της βοηθητικής διακεκομμένης γραμμής, όπως φαίνεται στην εικόνα 14, που ονομάζεται μέση γραμμή. Εάν Α είναι η περικλειόμενη επιφάνεια από τη μέση γραμμή και κάποιο σύνορο τότε ο όγκος mmnn είναι Αδ και η στρεπτική ροπή δίνεται από τον τύπο:

$$M_t = 2A\delta \tag{2.13}$$
Με αντικατάσταση της (2.12) στη σχέση (2.13) λαμβάνουμε:

$$\tau = \frac{M_t}{2Ah} \tag{2.14}$$

Ο τύπος (2.14) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων σε λεπτότοιχα κυλινδρικά δοκίμια κυκλικής δακτυλιοειδούς διατομής που υφίστανται στρεπτικές καταπονήσεις υπό την προϋπόθεση ότι το πάχος δεν μεταβάλλεται απότομα και ότι δεν υπάρχουν αιχμηρές γωνίες. [16]

2.2.2 Μη κυκλική διατομή

Έστω ότι το λεπτότοιχο δοκίμιο έχει αιχμηρές γωνίες, όπως στο σχήμα 15. Τότε στις γωνίες αυτές υπάρχει σημαντική συγκέντρωση τάσεων που δεν μπορεί να αμεληθεί. Η μέγιστη τάση είναι μεγαλύτερη από αυτήν που δίνεται από την εξίσωση (2.14) και εξαρτάται από την ακτίνα α του εγγεγραμμένου, από το εσωτερικό σύνορο, τόξου της αιχμηρής γωνίας της διατομής.



16. Λεπτότοιχη διατομή με αιχμηρές γωνίες [17]

Για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης χρησιμοποιούμε το ανάλογο της μεμβράνης το οποίο μας παρέχει την εξίσωση της μεμβράνης στην αιχμηρή γωνία:

$$\frac{d^2 z}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dz}{dr} = -\frac{q}{s}$$
(2.15)

όπου dz/dr είναι η κλίση της μεμβράνης, q είναι το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο και S η ομοιόμορφη τάση. Παρατηρώντας ότι τ=- dz/dr και αντικαθιστώντας το q/S με 2Gθ έχουμε:

$$\frac{d\tau}{dr} + \frac{1}{r}\tau = 2G\theta \tag{2.16}$$

Αν με τ_0 συμβολιστεί η τάση, υπολογισμένη από την (2.14), και υποτεθεί ότι έχουμε δακτυλιοειδή διατομή σταθερού πάχους δ τότε σε σημαντική απόσταση από τη γωνία μέσω της σχέσης $\tau ds = \frac{M_t}{2A} \int \frac{ds}{\delta} = 2G\theta A$ λαμβάνουμε: $2G\theta = \frac{\tau_0 s}{A}$ και αντικαθιστώντας στην (2.16) προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{d\tau}{dr} + \frac{1}{r}\tau = \frac{\tau_0 s}{A} \tag{2.17}$$

η οποία έχει γενική λύση :

$$\tau = \frac{c}{r} + \frac{\tau_0 sr}{2A} \tag{2.18}$$

με σταθερά ολοκλήρωσης $\mathcal{C} = \tau_0 \delta \frac{1-(\frac{\delta}{4A})(2\alpha+\delta)}{\ln(1+\frac{\delta}{\alpha})}$ και, τελικά, η (2.18) γίνεται:

$$\tau = \frac{\tau_0 \delta}{r} \frac{1 - (\frac{\delta}{4A})(2\alpha + \delta)}{\ln(1 + \frac{\delta}{\alpha})} + \frac{\tau_0 sr}{2A}$$
(2.19)

Για λεπτότοιχα κυλινδρικά δοκίμια οι όροι S(2α+δ)/A και sr/A είναι αμελητέοι οπότε η (2.19) γίνεται, τελικά:

$$\tau = \tau_0 \frac{\delta}{r} / \ln(1 + \frac{\delta}{\alpha}) \tag{2.20}$$

όπου για r=α λαμβάνουμε την τάση στην αιχμηρή γωνία. [17]

2.3 Έυρεση κύριου συστήματος - Στροφή συστήματος αναφοράς

Ως κύριο σύστημα αναφοράς, ορίζεται το σύστημα εκείνο στο οποίο δρουν μόνο οι κύριες (ορθές) τάσεις σ_1 και σ_2 , ενώ οι διατμητικές είναι μηδέν. Οι κύριες τάσεις σ_1 και σ_2 του συστήματος είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, αντίστοιχα, που λαμβάνουν οι ορθές τάσεις.



17. Εύρεση κυρίου συστήματος αναφοράς [14]

Στην εικόνα 16, τα επίπεδα x και y είναι κάθετα και οι τάσεις σ_x και σ_y , που δρουν σε αυτά τα επίπεδα, είναι η μέγιστη και, αντίστοιχα, η ελάχιστη ορθή τάση. Για κάθε κεκλιμένο επίπεδο, όπως το επίπεδο pq, η τιμή της ορθής τάσης σ_n κυμαίνεται εντός των ορίων αυτών. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, το σύστημα xy είναι κύριο σύστημα αναφοράς. Είναι εφικτό να προσδιορίζεται κάθε φορά το κύριο σύστημα αναφοράς, αρκεί να είναι γνωστές οι τάσεις σε ένα μη κύριο σύστημα αναφοράς. Ο απλούστερος τρόπος, για να πραγματοποιηθεί αυτός ο προσδιορισμός, είναι με χρήση του κύκλου του Mohr.



18. α) Δοκός ορθογωνικής διατομής b) Κύκλος του Mohr [14]

Έστω ότι οι τάσεις σ_x και σ_y , που δρουν στη στοιχειώδη ορθογωνική διατομή της εικόνας 17α, δεν είναι κύριες, καθώς στο σύστημα xy δρουν και διατμητικές τάσεις. Για την κατασκευή του κύκλου του Mohr είναι αναγκαίο να σχεδιαστούν τα σημεία $D(\sigma_x, \tau)$ και $D_1(\sigma_y, -\tau)$. Αφού τα δύο αυτά σημεία παριστάνουν τις τάσεις που δρουν στα επίπεδα x και y που είναι κάθετα μεταξύ τους, το μήκος DD_1 παριστάνει τη διάμετρο του κύκλου Mohr. Η τομή του άξονα x με την DD_1 είναι το κέντρο C του κύκλου. Η τομή του κύκλου με τον άξονα x στα σημεία A και B καθορίζει τα μέτρα της μέγιστης και , αντίστοιχα, ελάχιστης ορθής τάσης. Αυτές ονομάζονται κύριες τάσεις και συμβολίζονται με σ_1 και σ_2 . Με χρήση του σχήματος της εικόνας 17b μπορούν να υπολογιστούν οι κύριες τάσεις σ_1 και σ_2 ως εξής:

$$\sigma_1 = \overrightarrow{OA} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CD} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$
(2.21)

$$\sigma_2 = \overrightarrow{OB} = \overrightarrow{OC} - \overrightarrow{CD} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$
(2.22)

Οι σχέσεις (2.21) και (2.22) ονομάζονται τύποι στροφής του συστήματος αναφοράς. Με βάση το σχήμα μπορούν να προσδιοριστούν, επίσης, οι κατευθύνσεις των κύριων τάσεων. Η γωνία DCA είναι διπλάσια της γωνίας φ που σχηματίζει ο άξονας x με την κύρια τάση σ₁. Αφού η γωνία αυτή μετριέται από το D στο A με ωρολογιακή φορά η κύρια τάση σ₁ οφείλει να έχει κατεύθυνση όπως στην εικόνα 17α. Όσον αφορά τον υπολογισμό της φ̂, από το σχήμα έχουμε:

$$|\tan 2\varphi| = \frac{\overline{DE}}{\overline{CE}}$$
(2.23)

Λαμβάνοντας υπόψη πως το πρόσημο της γωνίας φ πρέπει να ληφθεί αρνητικό, διότι η φορά είναι δεξιόστροφη, τότε:

$$\tan 2\varphi = -\frac{\overline{DE}}{\overline{CE}} = -\frac{2\tau}{\sigma_x - \sigma_y}$$
(2.24)

Από την ακτίνα του κύκλου υπολογίζουμε τη μέγιστη διατμητική τάση, η οποία είναι:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$
(2.25)

Με τις εξισώσεις (2.21) - (2.25) είναι, πάντοτε, εφικτός ο υπολογισμός των μέγιστων ορθών και διατμητικών τάσεων, εάν δίνονται οι ορθές και οι διατμητικές τάσεις που δρουν σε οποιαδήποτε δύο κάθετα επίπεδα. [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πειραματική διαδικασία

3.1 Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία απαρτίζεται από τρεις οντότητες: το πείραμα, το οποίο αποτελείται από τρία ξεχωριστά στάδια, τα πειραματόζωα από τα οποία προκύπτουν τα δοκίμια οστίτη ιστού και τον πειραματικό εξοπλισμό. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στα εξής στάδια: δοκιμή κάμψης τριών σημείων μηριαίων οστών επιμύων, εγκιβωτισμός των δοκιμίων σε ρητίνη και φωτογράφιση των δοκιμίων στο στερεοσκόπιο. Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι ο βέλτιστος προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής του οστού με τελικό στόχο τον υπολογισμό της ακριβούς τάσης αστοχίας.

3.1.1 Πείραμα κάμψης τριών σημείων

Τα δοκίμια διατηρούνταν σε κλειστά δοχεία στους -20° C, καθώς με αυτόν τον τρόπο έχει δειχθεί ότι δεν επέρχονται σημαντικές αλλοιώσεις στις μηγανικές ιδιότητες των οστών και παρέχεται η δυνατότητα πραγματοποίησης των πειραμάτων σε διαφορετικό χρόνο από εκείνον της θανάτωσης των πειραματόζωων. [18] Κάθε ζεύγος δοκιμίων, αριστερό και δεξιό μηριαίο οστό του ίδιου επίμυα, υποβλήθηκε σε κάμψη την ίδια ημέρα. Προ της κάμψεως, τα δοκίμια είχαν κωδικοποιηθεί με βάση πρωτόκολλο της Εμβιομηχανικής ως εξής: LF (left femur) για τα αριστερά μηριαία οστά και RF (right femur) για τα δεξιά μηριαία οστά και αρίθμηση σε αντιστοιγία με τον αριθμό του πειραματόζωου. Η σειρά κάθε ζεύγους οστών, με την οποία υποβαλλόταν στο πείραμα κάμψης, καθοριζόταν από την ημερομηνία ευθανασίας του επίμυα. Τα δοκίμια παρέμειναν για μία ώρα σε θερμοκρασία δωματίου τυλιγμένα σε γάζες εμποτισμένες με φυσικό ορό και καθαρίστηκαν από μαλακούς ιστούς, έτσι ώστε να μην προκύψουν ενδεχόμενες αλλοιώσεις στις μετρήσεις. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε φωτογράφηση της εμπρόσθιας και οπίσθιας πλευράς του κάθε κατεγράφη οποιαδήποτε ανατομική διαφοροποίηση. δοκιμίου και Αφού σημειώνονταν το μέσο κάθε δοκιμίου, τα μηριαία οστά τοποθετούνταν στο πλαίσιο φόρτισης MTS Insight. Οι θέσεις στήριξης των οστών στο πλαίσιο φόρτισης απείχαν 16mm σε όλες τις επαναλήψεις της διαδικασίας.



19.Πλαίσιο φόρτισης MTS Insight: α) Εμπρόσθια όψη b) Οπίσθια όψη

Σε προσομοίωση στατικών συνθηκών (quasi-static loading conditions) πραγματοποιήθηκε η επιβολή του φορτίου στο κέντρο της διάφυσης του μηριαίου οστού στο πρόσθιο-οπίσθιο επίπεδο. Στο έμβολο του πλαισίου φόρτισης είχε προσαρμοστεί, κατάλληλα, ειδικός κύλινδρος διαμέτρου 2mm, έτσι ώστε να μην προκαλούνται αλλοιώσεις στο οστό κατά την επιβολή του φορτίου. Ο ρυθμός με τον οποίο κατερχόταν το έμβολο ήταν 1mm/min. Όταν το επιβαλλόμενο φορτίο προσέγγιζε την τιμή των 10N η διαδικασία διακόπτονταν και πάνω στο οστό σχεδιαζόταν μια γραμμή που διευκόλυνε τον προσδιορισμό της διεύθυνσης φόρτισης. Η διαδικασία συνεχιζόταν έως ότου επερχόταν η θραύση του οστού, όπου σήμαινε και τη λήξη του πειράματος κάμψης για το δοκιμαζόμενο οστούν. Έπειτα, ακολουθούσε η φωτογράφιση των σπασμένων δοκιμίων και η επανατοποθέτησή τους στην ψύξη. Σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας τα δεδομένα καταγράφονταν από το πρόγραμμα TestWorks 4 του πλαισίου φόρτισης.

3.1.2 Εγκιβωτισμός δοκιμίων

Για να μελετηθεί η γεωμετρία του οστού, μέσω της διατομής του δοκιμίου που αστόχησε, επιλέχθηκε το ένα από τα δύο θραύσματα του οστού. Συνήθως, επιλεγόταν το μέρος εκείνο που περιελάμβανε το γόνατο. Σε όσα δοκίμια είχαν αστοχήσει μακριά από το σημείο φόρτισης, εγγύτερα προς το γόνατο, επιλεγόταν το θραύσμα από τη μεριά του ισχίου. Με τη βοήθεια ειδικής διάταξης καθετότητας και πλαστελίνης, τα μέρη του οστού τοποθετήθηκαν κάθετα σε δοχεία, τα οποία πληρώθηκαν με μείγμα ρητίνης. Αφού αφέθηκαν στον πάγκο του εργαστηρίου έως ότου σταθεροποιηθεί η ρητίνη, τα δοκίμια οστού-ρητίνης εξήχθησαν από τα δοχεία. Ο αριθμός του κάθε δοκιμίου κατεγράφη πάνω στην ρητίνη του αντίστοιχου δοκιμίου οστού-ρητίνης με την τοποθέτηση αυτοκόλλητης ετικέτας προς αποφυγή λαθών κατά την πειραματική διαδικασία.



20. Τα δοκίμια οστού-ρητίνης LF36 & RF20

3.1.3 Λείανση - Στερεοσκόπιο

Στη συνέχεια, τα δοκίμια οστού-ρητίνης μεταφέρθηκαν στη μονάδα μεταλλουργικού χαρακτηρισμού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Επειδή τα οστά δεν έσπασαν με τρόπο τέτοιο ώστε η διατομή να είναι εγκάρσια στον διαμήκη άξονα του οστού, κρίθηκε αναγκαίο να λειανθούν στη μηχανή λείανσης του εργαστηρίου, προτού παρθούν οι λήψεις φωτογραφιών στο στερεοσκόπιο. Με τη λείανση αφαιρέθηκαν τυχόν προεξογές στην επιφάνεια του οστού που προήλθαν από τη θραύση με στόγο την πιο λεπτομερή απεικόνιση της διατομής και της γεωμετρίας του οστού. Κατά τη διάρκεια της λείανσης, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο να παραμείνουμε όσο το δυνατόν εγγύτερα στη διατομή αστοχίας. Αυτό επετεύχθη με τη χρήση γυαλόχαρτου διαφορετικού νούμερου κόκκων (80, 500, 2000) και συνέβη για να βελτιωθεί η των αποτελεσμάτων. Έπειτα, όλα τα δοκίμια οστού-ρητίνης ακρίβεια φωτογραφήθηκαν με το στερεοσκόπιο LEICA MZ6 και οι λήψεις αποθηκεύτηκαν σε υπολογιστή με το πρόγραμμα Image-Pro Plus, με σημειωμένη την κλίμακα του 1mm.



21. Κάτοψη δοκιμίου LF36 έπειτα από λείανση



22. Φωτογραφία του δοκιμίου LF36 στο στερεοσκόπιο.

3.2 Πειραματόζωα

Τα πειραματόζωα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη ήταν 20 θηλυκοί ωοθηκεκτομημένοι επίμυες Wistar, ηλικίας 10 μηνών. Το πειραματικό πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε, πλήρως εναρμονισμένο με τις ευρωπαϊκές συστάσεις για τα πειραματόζωα, εγκρίθηκε από τη Γενική Διεύθυνση Κτηνιατρικών Υπηρεσιών, σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία. Όλοι οι επίμυες στεγάζονταν σε κλωβούς 45x30x20 cm, 3 πειραματόζωα ανά κλωβό, σε τυπικές συνθήκες εργαστηρίου: θερμοκρασία 19-22°C, σχετική υγρασία 55-65% και δωδεκάωρο κύκλο φώτισης. Οι επίμυες χωρίστηκαν σε δύο ομάδες που τρέφονταν είτε με ταχίνι είτε με σησαμέλαιο και είχαν ελεύθερη πρόσβαση σε νερό και τροφή.

3.3 Πειραματικός εξοπλισμός

Για την υλοποίηση των πειραμάτων που αναφέρονται στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

 Ηλεκτρομηχανικό πλαίσιο φόρτισης MTS Insight 1kN. Το συγκεκριμένο πλαίσιο φόρτισης έχει δυνατότητα καταγραφής του ασκούμενου φορτίου κάθε χρονική στιγμή μέσω ειδικής δυναμοκυψελίδας (load cell) ευαισθησίας 0,01kN. Η δυνατότητα αυτή αξιοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του φορτίου αστοχίας.

- Διάταξη στήριξης μακρών δοκιμίων για την ορθή επιβολή του φορτίου και τη συγκράτηση του δοκιμίου με ειδικές ακμές που απέχουν μεταξύ τους 16mm.
- Διάταξη μέτρησης διαστάσεων.
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής με κατάλληλο λογισμικό (TestWorks 4).
- Μηχανή λείανσης Labopol 5 για τη λείανση των δοκιμίων οστού-ρητίνης.
- Στερεοσκόπιο Leica MZ6 με μέγιστη μεγέθυνση x64.
- Ρητίνη Versocit 2 με χρόνο στερεοποίησης 10 λεπτά και ρητίνη Epofix με χρόνο στερεοποίησης 12 ώρες.
- Λογισμικό Autodesk AutoCAD Civil 3D 2016 για την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τον προσδιορισμό μεγεθών όπως το γεωμετρικό κέντρο της διατομής, οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης κ.ά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Επεξεργασία και ανάλυση

4.1 Επεξεργασία των μετρήσεων

Η επεξεργασία των μετρήσεων συνίσταται στην ανάλυση των πρωτογενών δεδομένων και τον έλεγχό τους. Σκοπός της επεξεργασίας είναι ο προσδιορισμός της ακριβούς τάσης αστοχίας του οστού. Εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της ακριβούς προσέγγισης της διατομής (actual section's outline) και δεν χρησιμοποιήθηκαν καθόλου παραδοχές, όπως η προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων με χρήση μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων ή η προσέγγιση δακτυλιοειδούς διατομής ελαχίστου πάχους. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε δύο άξονες: τη στατιστική αξιοπιστία των τιμών, που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της πειραματικής διαδικασίας, και την εγκυρότητα των δεδομένων του πειράματος από τη σκοπιά της Μηχανικής επιστήμης. Για να υλοποιηθεί η παρούσα έρευνα για την επίδραση του ρόλου ειδικών τροφών (ταχίνι και σησαμέλαιο) στις μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού, σε κάθε δοκίμιο προσδιορίστηκαν, με τη βοήθεια του Autocad και του Microsoft Excel, τα παρακάτω μεγέθη :

- το γεωμετρικό κέντρο της επιφάνειας διατομής του οστού
- ο άξονας φόρτισης
- η εκκεντρότητα του άξονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο
- το εμβαδόν της διατομής
- το μέσο πάχος της διατομής
- το μέσο εμβαδόν της διατομής
- οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης ως προς το κεντροβαρικό σύστημα αναφοράς
- η γωνία στροφής του συστήματος για την εύρεση του κυρίου συστήματος αναφοράς
- το κύριο σύστημα αναφοράς
- οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς
- η εξίσωση ουδέτερης γραμμής
- το κρίσιμο σημείο αστοχίας
- η στρέψη και οι ροπές κάμψης
- η τάση αστοχίας του οστού

4.2 Διαδικασία ανάλυσης αποτελεσμάτων ανά δοκίμιο

Αρχικά, η φωτογραφία του δοκιμίου από το στερεοσκόπιο εισήχθη στο πρόγραμμα AutoCAD. Η εικόνα είχε σημειωμένο το 1mm και με αυτόν τον τρόπο υλοποιήθηκε η αντιστοίχιση, μέσω κατάλληλου παράγοντα κλίμακας, ούτος ώστε ότι μετράται στην οθόνη να είναι, στην πραγματικότητα, σε χιλιοστά. Έπειτα, σχεδιάστηκε η εξωτερική και εσωτερική περίμετρος της διατομής του οστού, με τη βοήθεια δύο πολυγωνικών γραμμών πάνω στην φωτογραφία. Η αυξημένη διαμέριση των πολυγωνικών γραμμών, σε επιμέρους ευθύγραμμα τμήματα, διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην προσέγγιση, με σχεδόν αμελητέο σφάλμα, των πραγματικών περιμέτρων στην απεικόνιση της διατομής. Μετά από αλληλουχία εντολών, δημιουργήθηκε ένας όγκος πάνω στις δύο περιμέτρους, από τον οποίο αφαιρέθηκε η περιοχή του χώρου που περικλειόταν από την εσωτερική περίμετρο. Πραγματοποιήθηκε διαγραφή ολόκληρου του όγκου και παρέμεινε μόνο η μία πλευρά του, ο δακτύλιος της διατομής του οστού. Η διαδικασία αυτή υλοποιήθηκε με σκοπό το λογισμικό AutoCAD να αντιληφθεί την δακτυλιοειδή διατομή ως επιφάνεια και όχι ως δύο κλειστές πολυγωνικές γραμμές.

Το σημείο του οστού που άγγιξε το έμβολο ήταν προσημασμένο με μαρκαδόρο, καθώς και το αντιδιαμετρικό του σε ορισμένες φωτογραφίες. Με αυτόν τον τρόπο επετεύχθη η σχεδίαση του άξονα φόρτισης. Στην αρχή του άξονα φόρτισης, δηλαδή στο προαναφερθέν σημείο που ακούμπησε το έμβολο, μεταφέρθηκε η αρχή του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Ο άξονας y συνέπιπτε με τον άξονα φόρτισης, αφού όλο το σύστημα αναφοράς περιστράφηκε αριστερόστροφα ώστε, σε σχέση με την αρχή των αξόνων, τα θετικά του άξονα x να εντοπίζονται αριστερά και τα θετικά του άξονα y προς τα κάτω.

Στη συνέχεια, το λογισμικό παρείχε τις εξής πληροφορίες: το γεωμετρικό κέντρο της επιφάνειας της δακτυλιοειδούς διατομής, το εμβαδόν της διατομής και τις επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς. Η απόλυτη τιμή της τετμημένης του γεωμετρικό κέντρου αποτελούσε την εκκεντρότητα του άζονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο. Η εκκεντρότητα είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ροπής στρέψης και, κατ' επέκταση, για τον προσδιορισμό των διατρμητικών τάσεων. Κατόπιν, ο άζονας y μεταφέρθηκε παράλληλα ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής, το οποίο έγινε η αρχή του νέου συστήματος αναφοράς. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε καμία εκ των περιπτώσεων ο άζονας φόρτισης δεν διερχόταν από το γεωμετρικό κέντρο της επιφάνειας της διατομής. Σε αυτό το σημείο, αντλήθηκαν από το λογισμικό οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης ως προς το κεντροβαρικό σύστημα αξόνων, μέσω των οποίων υπολογίστηκε η γωνία στροφής για την εύρεση του κύριου συστήματος αναφοράς. Με κατάλληλη περιστροφή, ίση με την προαναφερόμενη γωνία στροφής, σχεδιάστηκε το κύριο σύστημα αναφοράς.

Ακολούθως, η μέγιστη δύναμη αναλύθηκε σε συνιστώσες, η ροπή κάμψης υπολογίστηκε και αναλύθηκε σε συνιστώσες και, με βάση τη θεωρία, προσδιορίστηκε η εξίσωση της ουδέτερης γραμμής, η οποία και σχεδιάστηκε. Με παράλληλη μεταφορά της ουδέτερης γραμμής μέχρι να γίνει εφαπτόμενη στην εξωτερική περίμετρο της διατομής, από το ημιεπίπεδο του θετικού ημιάζονα Oy, εντοπίστηκε το μοναδικό κοινό σημείο της γραμμής και της περιμέτρου, που ονομάζεται κρίσιμο σημείο αστοχίας. Το κρίσιμο σημείο είναι εκείνο που αστοχεί πρώτο, διότι η μέγιστη τάση αναπτύσσεται εκεί. Με βάση τις συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου υπολογίστηκε η ακριβής τάση αστοχίας του οστού. Έπειτα, μετρήθηκαν οι αποστάσεις μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής περιμέτρου σε αρκετά σημεία και από τον μέσο όρο τους προσδιορίστηκε το μέσο πάχος της διατομής. Ενώνοντας τα μέσα των προαναφερθέντων αποστάσεων, σχηματίστηκε μία επιφάνεια της οποίας η μέτρηση παρείχε το μέσο εμβαδόν. Χρησιμοποιώντας τη ροπή στρέψης, το μέσο πάχος της διατομής και το μέσο εμβαδόν υπολογίστηκαν οι διατμητικές τάσεις.



23. Εικόνα από το Autocad του δοκιμίου LF25. Με κόκκινο συμβολίζεται ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και το κρίσιμο σημείο, με κίτρινο η γωνία στροφής, με γαλάζιο το κύριο σύστημα αναφοράς και με πορτοκαλί η ουδέτερη γραμμή.

4.3 Εύρεση κύριου συστήματος συντεταγμένων

Για την εύρεση του κύριου συστήματος συντεταγμένων κρίθηκε απαραίτητο να υπολογιστεί η γωνία στροφής του αρχικού κεντροβαρικού συστήματος αναφοράς. Για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$\tan 2\theta_p = \frac{2I_{xy}}{I_{yy} - I_{xx}} \tag{4.1}$$

όπου θ_p η γωνία στροφής και I_{xx} , I_{yy} είναι οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης και I_{xy} το γινόμενο αδρανείας ως προς το αρχικό κεντροβαρικό σύστημα αναφοράς. Λύνοντας τον τύπο ως προς θ_p και παρατηρώντας τη γωνία που μηδενίζουν τα γινόμενα αδρανείας στο AutoCad, χρησιμοποιήθηκε η εξής σύμβαση: θετικό πρόσημο σημαίνει αριστερόστροφη φορά και αρνητικό πρόσημο σημαίνει δεξιόστροφη φορά. [15]

4.4 Εξίσωση ουδέτερης γραμμής και ακριβής τάση αστοχίας

Το μέγιστο φορτίο P, μέχρις αστοχίας του δοκιμίου, έχει καταγραφεί με το πέρας της δοκιμής κάμψης. Η μέγιστη δύναμη P αναλύεται σε δύο συνιστώσες πάνω στους άξονες του κύριου συστήματος:

$$P_x = Psin\theta_p$$
$$P_y = Pcos\theta_p$$

Έπειτα, υπολογίζεται η μέγιστη ροπή κάμψης $M = P \frac{l}{4}$, όπου l είναι η απόσταση μεταξύ των αρπάγων του πλαισίου φόρτισης, και αναλύεται σε δύο συνιστώσες $M_x = Mcos |\theta_p|$ και $M_y = Msin |\theta_p|$. [15] Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κύριων τάσεων του συστήματος είναι:

$$\sigma_{zz} = +\frac{M_x}{I_{x_p x_p}} y - \frac{M_y}{I_{y_p y_p}} x \tag{4.2}$$

όπου $I_{x_px_p}$, $I_{y_py_p}$ είναι οι κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης και τα x,y είναι οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείο ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς. Το θετικό πρόσημο στη σχέση (4.2) δηλώνει ότι η συνιστώσα P_y εφελκύει την θετική ίνα αναφοράς, ενώ το αρνητικό πρόσημο στην ίδια σχέση δηλώνει ότι η συνιστώσα P_x θλίβει τη θετική ίνα, όπως συμβαίνει για αρνητική γωνία στροφής. Επειδή η ουδέτερη γραμμή δεν υφίσταται καμία καταπόνηση ισχύει ότι $\sigma_{zz} = 0$. Με αντικατάσταση στην (4.2) βρίσκεται ότι η εξίσωση της ουδέτερης γραμμής είναι της μορφής y=αx με

$$\alpha = \frac{M_y I_{xpxp}}{M_x I_{ypyp}} = \frac{I_{xpxp}}{I_{ypyp}} tan\theta_p$$
(4.3)

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής α της εξίσωσης της ουδέτερης γραμμής είναι θετικός για αρνητική γωνία στροφής. Εάν η γωνία στροφής είναι θετική, τότε η συνιστώσα P_y εφελκύει την θετική ίνα, όμοια και η συνιστώσα P_x , και ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι:

$$\sigma_{zz} = +\frac{M_x}{I_{x_p x_p}} y + \frac{M_y}{I_{y_p y_p}} x \tag{4.4}$$

και η εξίσωση της ουδέτερης γραμμής είναι, πάλι, της μορφής y=αx με συντελεστή:

$$\alpha = \frac{M_y I_{xpxp}}{M_x I_{ypyp}} = -\frac{I_{xpxp}}{I_{ypyp}} tan\theta_p$$
(4.5)

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής α της εξίσωσης της ουδέτερης γραμμής είναι αρνητικός για θετική γωνία στροφής.

Η ακριβής τάση αστοχίας σ_{zz} υπολογίζεται και στις δύο περιπτώσεις, αρνητικής ή θετικής γωνίας στροφής, από τις σχέσεις (4.2) ή (4.4), αντίστοιχα, αν στη θέση των x και y τοποθετηθούν οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου.

Η διατμητική τάση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\tau = \frac{M_{\tau}}{2A_m t} \tag{4.6}$$

όπου M_{τ} είναι η στρεπτική ροπή, A_m το μέσο εμβαδόν της διατομής και t το μέσο πάχος της διατομής. Η ισοδύναμη κατά Mises τάση υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{zz}^2 + 3\tau^2} \tag{4.7}$$

4.5 Στατιστικός έλεγχος

Όλα τα δεδομένα των δοκιμίων υποβλήθηκαν σε έλεγχο με το κριτήριο Chauvenet. Το, εν λόγω, κριτήριο εξασφαλίζει σε βέλτιστο βαθμό την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν. Διευκολύνει τη λήψη απόφασης απόρριψης ή μη μίας απόμακρης τιμής στο δείγμα, καθορίζοντας ένα αποδεκτό επίπεδο διασποράς γύρω από τη μέση τιμή. Με αυτόν τον τρόπο, οι «ύποπτες» τιμές εξετάζονται επιμελώς και το δείγμα καθίσταται ομοιογενές και πιο αξιόπιστο.

Έστω δείγμα Ν μετρήσεων x_1, \ldots, x_N μίας τυχαίας ποσότητας X, που θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή \bar{x} και τυπική απόκλιση σ_x . Εάν μία από τις μετρήσεις, έστω x_{sus} , φαίνεται «ύποπτη» επειδή απέχει πολύ από τη μέση τιμή \bar{x} , τότε υπολογίζουμε την ποσότητα:

$$t = \frac{|x_{sus} - \bar{x}|}{\sigma_x} \tag{4.8}$$

όπου t είναι ο αριθμός των τυπικών αποκλίσεων που απέχει η τιμή x_{sus} από τη μέση τιμή x̄. Από ειδικούς στατιστικούς πίνακες που περιέχουν την πιθανότητα $P[x_{sus} \in (εντός \pm t\sigma_x)]$, υπολογίζουμε την πιθανότητα $P[x_{sus} \in (εκτός \pm t\sigma_x)] = 1$ - $P[x_{sus} \in (εντός \pm t\sigma_x)]$ και, έπειτα πολλαπλασιάζουμε με το πλήθος του δείγματος Ν. Αν το αποτέλεσμα $N \times P[x_{sus} \in (εκτός \pm t\sigma_x)]$ είναι μεγαλύτερο του $\frac{1}{2}$ τότε κρατάμε την απόμακρη τιμή x_{sus} , ενώ αν είναι μικρότερο του $\frac{1}{2}$ την απορρίπτουμε και υπολογίζουμε εκ νέου το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι να μην απορρίπτεται καμία μέτρηση.

Η τιμή ¹/₂ είναι αυθαίρετη. Όμως, είναι λογική και υπάρχει πληθώρα επιχειρημάτων που συνηγορούν στην επιλογή της. Γενικά, το κριτήριο Chauvenet δηλώνει ότι εάν ο αναμενόμενος αριθμός των μετρήσεων, που αποκλίνουν όσο και η απόμακρη μέτρηση που εξετάζουμε, είναι μικρότερος από το ένα δεύτερο τότε η «ύποπτη» μέτρηση πρέπει να απορρίπτεται. Χρησιμοποιείται όταν δεν είναι εύκολο να επαναληφθεί το πείραμα και για δείγματα, σχετικά, μικρού μεγέθους. [19]

4.6 Ποιοτικός έλεγχος λόγου τάσεων

Ο εμπειρικός εργαστηριακός έλεγχος από τη σκοπιά της επιστήμης της Μηχανικής πραγματοποιήθηκε με τη θέσπιση του λόγου διατμητικών προς ορθών τάσεων. Αν ο λόγος είναι μικρότερος του 10% τότε το αποτέλεσμα θεωρείται ορθό, πειραματικά, και η εμφάνιση των διατμητικών τάσεων θεωρείται ότι οφείλεται σε παρασιτικά φαινόμενα στρέψης και δεν αλλοιώνει το αποτέλεσμα. Τα φαινόμενα αυτά εξηγούνται από σφάλματα κατά την πειραματική διαδικασία όπως παραδείγματος χάριν την περιστροφή του δοκιμίου στις αρπάγες αμέσως μετά την επιθυμητές και, αν είναι εφικτό, καλό είναι να αναιρούνται για να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες του εκάστοτε προβλήματος. [20]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα και συμπεράσματα

5.1 Πίνακες αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων σε πίνακες με τη μεθοδολογία της ακριβούς προσέγγισης, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Η παράθεση των αποτελεσμάτων στους πίνακες εξυπηρετεί την πλήρη εποπτεία και την επαλήθευση της έρευνας ως προς: όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ακριβούς τάσης αστοχίας, όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για τον που την εύρεση των διατμητικών τάσεων, τον έλεγχο λόγου ορθών προς διατμητικών τάσεων και τον μέσο όρο ισοδύναμων τάσεων όλων των ομάδων.

Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε δύο ομάδες Α (πράσινο) και Β (γαλάζιο), βάση του τύπου διατροφής, και σε αριστερά και δεξιά, βάση του πρωτοκόλλου που αναφέρεται στην ενότητα 3.1.1. Η ομάδα Α τρεφόταν, αποκλειστικά, με ταχίνι και η ομάδα Β τρεφόταν, αποκλειστικά, με σησαμέλαιο.

Α) Προσδιορισμός ακριβούς τάσης αστοχίας

Πίνακας 5. 1. 1.: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Α και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. Χς και Υς οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου, Ιχρ και Ιγρ οι κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, Α το εμβαδόν της διατομής, Μb η μέγιστη καμπτική ροπή, Μτ η ροπή στρέψης, σ η τάση λόγω κάμψης, τ η τάση λόγω στρέψης και σeq η ισοδύναμη κατά Mises τάση (Με κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα Α Left	Δύναμη	Хс	уc	İxp	lyp	А	Mb	Μτ	σ	τ	σeq
Δοκίμιο	[N]	[mm]	[mm]	[mm⁴]	[mm⁴]	[mm²]	[Nm]	[Nm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
LF 14	156,17	0,567	1,299	3,505	5,204	5,204	0,625	0,002	239,884	0,278	239,885
LF 17	138,26	-0,501	1,442	3,673	5,648	4,859	0,553	0,032	222,2	5,225	222,384
LF 20	131,56										
LF 23	129,1	1,07	1,308	3,823	5,264	4,953	0,516	0,003	205,475	0,544	205,477
LF 27	103,9	0,398	1,244	2,926	4,14	5,141	0,416	0,004	177,476	0,719	177,480
LF 30	97,09	-0,81	1,099	2,213	4,237	4,26	0,388	0,005	206,572	1,065	206,580
LF 32	98,18	-0,145	1,317	2,691	4,288	4,527	0,393	0,01	177,765	1,941	177,797
LF 33	124,33	-0,749	1,2	2,691	4,188	4,603	0,497	0,032	237,208	6,277	237,457
LF 34	74,36	-0,765	1,281	2,424	3,743	4,275	0,297	0,006	167,635	1,264	167,649
LF 36	115,61	-0,53	1,396	2,963	6,29	4,824	0,462	0,006	221,349	0,921	221,355

Ομάδα A Right	Δύναμη	Xc	Уc	Ixp	lyp	А	Mb	Μτ	σ	τ	σeq
Δοκίμιο	[N]	[mm]	[mm]	[mm⁴]	[mm⁴]	[mm²]	[Nm]	[Nm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
RF 14	155,47	-0,431	1,378	3,843	5,502	5,345	0,622	0,044	219,406	6,879	219,729
RF 17	134,84	0,363	1,471	3,74	5,719	4,943	0,539	0,018	212,171	2,902	212,231
RF 20	115,27	-0,658	1,622	3,977	5,819	4,751	0,461	0,013	188,243	2,086	188,278
RF 23	127,08	-0,156	1,55	4,097	5,444	5,137	0,508	0,043	173,449	6,757	173,843
RF 27	121,79	-0,384	1,326	2,603	4,327	4,574	0,487	0,005	227,683	0,914	227,689
RF 30	107,3	-0,001	1,265	2,662	4,358	5,012	0,429	0,047	201,504	8,855	202,087
RF 32	98,2	-0,563	1,29	2,824	4,541	4,482	0,393	0,053	166,201	9,844	167,073
RF 33	113,41	0,963	1,162	2,758	4,571	5,231	0,454	0,01	212,98	1,815	213,003
RF 34	97,63	0,358	1,301	2,475	3,842	4,335	0,391	0,013	208,654	2,772	208,709
RF 36	90,42	-0,207	1,278	2,517	4,545	4,336	0,362	0,01	183,35	1,911	183,380

Πίνακας 5. 1. 2.: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Α και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. Χς και Yc οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου, Ixp και Iyp οι κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, Α το εμβαδόν της διατομής, Mb η μέγιστη καμπτική ροπή, Mτ η ροπή στρέψης, σ η τάση λόγω κάμψης, τ η τάση λόγω στρέψης και σeq η ισοδύναμη κατά Mises τάση (Mε κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Πίνακας 5. 1. 3.: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Β και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. Χς και Υς οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου, Ιχρ και Ιγρ οι κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, Α το εμβαδόν της διατομής, Μb η μέγιστη καμπτική ροπή, Μτ η ροπή στρέψης, σ η τάση λόγω κάμψης, τ η τάση λόγω στρέψης και σeq η ισοδύναμη κατά Mises τάση (Με κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα Β Left	Δύναμη	Хс	Уc	İxp	Іур	А	Mb	Μτ	σ	τ	σeq
Δοκίμιο	[N]	[mm]	[mm]	[mm⁴]	[mm⁴]	[mm²]	[Nm]	[Nm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
LF 25	107,01	0,274	1,464	3,348	4,937	5,268	0,428	0,037	174,983	6,1	175,302
LF 26	111,26	-0,861	1,399	3,364	5,705	4,649	0,445	0,05	185,771	8,238	186,318
LF 28	110,92	-0,824	1,28	2,479	4,238	4,531	0,444	0,037	240,606	7,511	240,957
LF 29											
LF 31	126,07	0,831	1,406	3,445	5,59	5,576	0,504	0,025	219,13	3,848	219,231
LF 35	134,87	-0,462	1,419	3,171	4,574	4,357	0,539	0,027	247,171	4,86	247,314
LF 37	128,22	-0,187	1,473	3,971	6,054	5,377	0,513	0,044	190,197	6,614	190,542
LF 41	153,76	-0,159	1,583	4,337	6,683	5,656	0,615	0,061	217,457	8,303	217,932
LF 42	125,32	-0,129	1,414	3,182	5,834	4,789	0,501	0,034	216,506	5,524	216,717
LF 48	143,76	1,336	1,004	5,828	3,276	4,9	0,575	0,009	205,671	1,418	205,686

Πίνακας 5. 1. 4.: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Β και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. Χς και Yc οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου, Ιxp και Iyp οι κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, Α το εμβαδόν της διατομής, Mb η μέγιστη καμπτική ροπή, Mt η ροπή στρέψης, σ η τάση λόγω κάμψης, τ η τάση λόγω στρέψης και σεq η ισοδύναμη κατά Mises τάση (Mε κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα B Right	Δύναμη	Хс	Уc	İxp	lyp	А	Mb	Μτ	σ	τ	σeq
Δοκίμιο	[N]	[mm]	[mm]	[mm⁴]	[mm⁴]	[mm²]	[Nm]	[Nm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
RF 25	131,68	0,756	1,355	4,402	3,155	5,14	0,527	0,017	169,147	2,977	169,226
RF 26	122,74	1,104	1,275	3,252	4,867	4,5	0,491	0,007	222,367	1,245	222,377
RF 28	120,62	-0,736	1,084	2,493	4,182	4,594	0,482	0,061	211,993	12,061	213,020
RF 29	136,37	0,264	1,556	3,649	4,897	4,878	0,545	0,037	227,08	6,171	227,331
RF 31	132,66	0,979	1,24	2,817	4,163	4,83	0,531	0,021	263,701	3,928	263,789
RF 35	128,25	-0,155	1,489	3,154	4,795	4,651	0,513	0,022	242,446	3,972	242,544
RF 37	151,12	-0,924	1,353	4,216	6,31	5,428	0,604	0,037	205,577	5,148	205,770
RF 41	123,34	0,544	1,344	2,958	4,94	4,877	0,493	0,007	224,44	1,245	224,450
RF 42	131,34	-0,605	1,219	2,853	4,411	4,022	0,525	0,01	233,049	1,948	233,073
RF 48	132,57	0,058	1,405	3,158	5,138	4,799	0,53	0,038	229,696	6,537	229,975

B) Εύρεση διατμητικών τάσεων

Πίνακας 5. 1. 5.: Διατμητικές τάσεις για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Α και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. [X] η εκκεντρότητα του άξονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο της διατομής, Am το μέσο εμβαδόν της διατομής, Mτ η ροπή στρέψης, μέσο t το μέσο πάχος της διατομής και τ η τάση λόγω στρέψης (Mε κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα Α Left	Δύναμη	x	Μτ	Am	μέσο t	τ
Δοκίμιο	[N]	[mm]	[Nm]	[mm²]	[mm]	[MPa]
LF 14	156,17	0,011	0,002	4,682	0,659	0,278
LF 17	138,26	0,233	0,032	5 <i>,</i> 565	0,554	5,225
LF 20	131,56					
LF 23	129,1	0,026	0,003	5,218	0,591	0,544
LF 27	103,9	0,038	0,004	3,705	0,741	0,719
LF 30	97,09	0,052	0,005	4,153	0,571	1,065
LF 32	98,18	0,103	0,01	4,356	0,598	1,941
LF 33	124,33	0,258	0,032	4,273	0,598	6,277
LF 34	74,36	0,080	0,006	4,036	0,583	1,264
LF 36	115,61	0,048	0,006	5,142	0,586	0,921

Πίνακας 5. 1. 6.: Διατμητικές τάσεις για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Α και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. [X] η εκκεντρότητα του άξονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο της διατομής, Am το μέσο εμβαδόν της διατομής, Mτ η ροπή στρέψης, μέσο t το μέσο πάχος της διατομής και τ η τάση λόγω στρέψης (Mε κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα A Right	Δύναμη	x	Μτ	Am	μέσο t	τ
Δοκίμιο	[N]	[mm]	[Nm]	[mm²]	[mm]	[MPa]
RF 14	155,47	0,283	0,044	4,816	0,664	6,879
RF 17	134,84	0,135	0,018	5,436	0,577	2,902
RF 20	115,27	0,116	0,013	5,945	0,539	2,086
RF 23	127,08	0,342	0,043	5,298	0,607	6,757
RF 27	121,79	0,04	0,005	4,203	0,634	0,914
RF 30	107,3	0,444	0,047	3,773	0,713	8,855
RF 32	98,2	0,540	0,053	4,628	0,582	9,844
RF 33	113,41	0,087	0,010	3,693	0,736	1,815
RF 34	97,63	0,137	0,013	4,062	0,594	2,772
RF 36	90,42	0,109	0,010	4,58	0,563	1,911

Πίνακας 5. 1. 7.: Διατμητικές τάσεις για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Β και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. |X| η εκκεντρότητα του άξονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο της διατομής, Am το μέσο εμβαδόν της διατομής, Mτ η ροπή στρέψης, μέσο t το μέσο πάχος της διατομής και τ η τάση λόγω στρέψης (Mε κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα Β Left	Δύναμη	x	Μτ	Am	μέσο t	τ
Δοκίμιο	[N]	[mm]	[Nm]	[mm²]	[mm]	[MPa]
LF 25	107,01	0,346	0,037	4,317	0,703	6,1
LF 26	111,26	0,445	0,05	5,596	0,537	8,238
LF 28	110,92	0,337	0,037	4,046	0,615	7,511
LF 29						
LF 31	126,07	0,198	0,025	4,336	0,748	3,848
LF 35	134,87	0,197	0,027	5,148	0,531	4,86
LF 37	128,22	0,347	0,044	5,223	0,644	6,614
LF 41	153,76	0,396	0,061	5,416	0,677	8,303
LF 42	125,32	0,275	0,034	5,26	0,593	5,524
LF 48	143,76	0,060	0,009	5,138	0,592	1,418

Πίνακας 5. 1. 8.: Διατμητικές τάσεις για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Β και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. [X] η εκκεντρότητα του άξονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο της διατομής, Am το μέσο εμβαδόν της διατομής, Mτ η ροπή στρέψης, μέσο t το μέσο πάχος της διατομής και τ η τάση λόγω στρέψης (Mε κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα B Right	Δύναμη	x	Μτ	Am	μέσο t	τ
Δοκίμιο	[N]	[mm]	[Nm]	[mm²]	[mm]	[MPa]
RF 25	131,68	0,127	0,017	3,926	0,716	2,977
RF 26	122,74	0,057	0,007	5,252	0,535	1,245
RF 28	120,62	0,506	0,061	3,991	0,634	12,061
RF 29	136,37	0,273	0,037	5,061	0,596	6,171
RF 31	132,66	0,156	0,021	3,944	0,668	3,928
RF 35	128,25	0,174	0,022	4,902	0,573	3,972
RF 37	151,12	0,244	0,037	5,476	0,654	5,148
RF 41	123,34	0,057	0,007	4,525	0,624	1,245
RF 42	131,34	0,073	0,010	5,434	0,453	1,948
RF 48	132,57	0,283	0,038	4,823	0,595	6,537

C) Έλεγχος λόγου

Πίνακας 5. 1. 9.: Λόγος ορθών προς διατμητικών τάσεων για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Α και σε ποσοστό (Με κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα Α Left	σ	τ	τ/σ	τ/σ %
Δοκίμιο	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
LF 14	239,884	0,278	0,001	0,1
LF 17	222,2	5,225	0,024	2,4
LF 20				
LF 23	205,475	0,544	0,003	0,3
LF 27	177,476	0,719	0,004	0,4
LF 30	206,572	1,065	0,005	0,5
LF 32	177,765	1,941	0,011	1,1
LF 33	237,208	6,277	0,026	2,6
LF 34	167,635	1,264	0,008	0,8
LF 36	221,349	0,921	0,004	0,4

Πίνακας 5. 1. 10.: Λόγος ορθών προς διατμητικών τάσεων για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Α και σε ποσοστό (Με κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα Α Right	σ	τ	τ/σ	τ/σ %
Δοκίμιο	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
RF 14	219,406	6,879	0,031	3,1
RF 17	212,171	2,902	0,014	1,4
RF 20	188,243	2,086	0,011	1,1
RF 23	173,449	6,757	0,039	3,9
RF 27	227,683	0,914	0,004	0,4
RF 30	201,504	8,855	0,044	4,4
RF 32	166,201	9,844	0,059	5,9
RF 33	212,98	1,815	0,009	0,9
RF 34	208,654	2,772	0,013	1,3
RF 36	183,35	1,911	0,010	1,0

Ομάδα B Left	σ	τ	τ/σ	τ/σ %
Δοκίμιο	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
LF 25	174,983	6,1	0,035	3,5
LF 26	185,771	8,238	0,044	4,4
LF 28	240,606	7,511	0,031	3,1
LF 29				
LF 31	219,13	3,848	0,018	1,8
LF 35	247,171	4,86	0,020	2,0
LF 37	190,197	6,614	0,035	3,5
LF 41	217,457	8,303	0,038	3,8
LF 42	216,506	5,524	0,026	2,6
LF 48	205,671	1,418	0,007	0,7

Πίνακας 5. 1. 11.: Λόγος ορθών προς διατμητικών τάσεων για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Β και σε ποσοστό (Με κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Πίνακας 5. 1. 12.: Λόγος ορθών προς διατμητικών τάσεων για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Β και σε ποσοστό (Με κίτρινο συμβολίζονται τα δοκίμια που δεν λήφθηκαν υπόψιν καθόλου στην έρευνα, ενώ με κόκκινο όσα απορρίφθηκαν από το κριτήριο Chauvenet).

Ομάδα B Right	σ	τ	τ/σ	τ/σ %
Δοκίμιο	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
RF 25	169,147	2,977	0,018	1,8
RF 26	222,367	1,245	0,006	0,6
RF 28	211,993	12,061		
RF 29	227,08	6,171	0,027	2,7
RF 31	263,701	3,928	0,015	1,5
RF 35	242,446	3,972	0,016	1,6
RF 37	205,577	5,148	0,025	2,5
RF 41	224,44	1,245	0,006	0,6
RF 42	233,049	1,948	0,008	0,8
RF 48	229,696	6,537	0,028	2,8

D) Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις ισοδύναμων κατά Mises τάσεων

Πίνακας 5. 1. 13.: Μέσοι όροι ισοδύναμων τάσεων και τυπικές αποκλίσεις για τα αριστερά δοκίμια της έρευνας ανά ομάδα.

Left	Average Stress [MPa] & STDEV
Ομάδα Α	206,2 ± 26,7
Ομάδα Β	211,1 ± 24,2

Πίνακας 5. 1. 14.: Μέσοι όροι ισοδύναμων τάσεων και τυπικές αποκλίσεις για τα δεξιά δοκίμια της έρευνας ανά ομάδα.

Right	Average Stress [MPa] & STDEV
Ομάδα Α	199,6 ± 20,4
Ομάδα Β	223,2 ± 24,7

Πίνακας 5. 1. 15.: Μέσοι όροι ισοδύναμων τάσεων και τυπικές αποκλίσεις για όλα δοκίμια της έρευνας ανά ομάδα.

Left & Right	Average Stress [MPa] & STDEV
Ομάδα Α	202,7 ± 23,2
Ομάδα Β	217,5 ± 24,6

5.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση πειραμάτων κάμψης μακρών οστών και προσδιορίστηκε ο ρόλος ειδικών τροφών (σησαμέλαιο και ταχίνι) στις μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι ακριβείς τάσεις αστοχίας των δοκιμίων, με τη μεθοδολογία της ακριβούς προσέγγισης της διατομής. Με αυτόν τον τρόπο, ποσοτικοποίηθηκε η επίδραση των ειδικών τροφών και υποδείχθηκε, μέσω της σύγκρισης των μέγιστων τάσεων, η ειδική τροφή που επιδρά περισσότερο στην αντοχή των οστών.

Αξίζει να αναφερθεί ότι τα δοκίμια LF20 και LF29 δεν συμπεριλήφθηκαν καθόλου στην έρευνα, καθώς δεν κατέστη εφικτός ο εγκιβωτισμός τους σε ρητίνη και η φωτογράφισή τους από το στερεοσκόπιο. Επιπλέον, η διατμητική τάση τ του δοκιμίου RF28, το μέσο πάχος διατομής t του δοκιμίου RF42 και η κύρια επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης Ixp του δοκιμίου LF48 απορρίφθηκαν βάση του κριτηρίου Chauvenet.

Ένα πρόβλημα που προέκυψε ήταν ότι η πραγματική διατομή του οστού δεν παρουσίαζε καμίας μορφής συμμετρία. Η χρήση της θεωρίας κάμψης σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας [15] της ενότητας 2.1.4 της παρούσας εργασίας αντιμετώπισε την προαναφερθείσα αδυναμία.

Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις η φόρτιση δεν ήταν κεντρική, δηλαδή ο άξονας φόρτισης δεν διερχόταν από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Το γεγονός αυτό οφειλόταν στη δυσχέρεια ακριβούς προσδιορισμού της σχετικής θέσεως του άζονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο της διατομής και είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία, πέραν της αναμενόμενης καμπτικής ροπής, και μίας παρασιτικής στρεπτικής ροπής. Ως εκ τούτου, εμφανίστηκαν διατμητικές συνιστώσες των τάσεων, ταυτόχρονα με τις ορθές. Με τον έλεγχο λόγου ορθών προς διατμητικών τάσεων, σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, δείχθηκε ότι οι διατμητικές τάσεις δεν υπερβαίνουν το 10% των ορθών τάσεων, όπως ήταν αναμενόμενο. Η μέση τιμή του ποσοστού των διατμητικών σε σχέση με τις ορθές τάσεις είναι 2% με ελάχιστη τιμή 0,1% και μέγιστη 5,9%. Ο υπολογισμός της ισοδύναμης (κατά Mises) τάσης θραύσης λαμβάνει υπόψη τη δράση των ορθής, αλλά και της διατμητικής συνιστώσας των τάσεων. Εφόσον οι διατμητικές τάσεις είναι κατά πολύ μικρότερες του 10% των ορθών τάσεων, η συνεισφορά τους στον υπολογισμό της ισοδύναμης τάσης εκτιμάται ότι είναι αμελητέα, γι' αυτό και χαρακτηρίζονται ως παρασιτικές.

Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε διαφορά στην τάση αστοχίας των μηριαίων οστών (δεξιού και αριστερού) του ίδιου επίμυα. Η μέγιστη διαφορά που παρουσιάστηκε στα δοκίμια LF27 & RF27 ήταν 50,21 MPa, ενώ η ελάχιστη που εμφανίστηκε στα δοκίμια LF35 & RF35 ήταν 4,73 MPa. Ο μέσος όρος των διαφορών μεταξύ δεξιού και αριστερού μηριαίου οστού υπολογίστηκε στα 23,11 MPa. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται είτε σε σφάλματα κατά την πειραματική διαδικασία είτε στην ασυμμετρία των δύο πλευρών που εμφανίζεται, σχεδόν, σε όλα τα θηλαστικά. Σύμφωνα με την ασυμμετρία των δύο πλευρών, τίποτα δεν είναι πανομοιότυπο μορφολογικά ανάμεσα στην δεξιά και την αριστερή πλευρά των οργανισμών. Επακόλουθο είναι η ασυμμετρία να επεκτείνεται και στις μηχανικές ιδιότητες. Μικρότερη τάση αστοχίας μεταφράζεται σε μεγαλύτερη πιθανότητα κατάγματος του μηριαίου οστού του ίδιου οργανισμού. Επειδή η μέση τιμή των διαφορών κυμαίνεται στο 10%-11% των μέσων τάσεων και των δύο ομάδων, οι διαφορές αξιολογήθηκαν ως αποδεκτές.

Η μέγιστη τάση καταγράφηκε στο δοκίμιο RF31 και υπολογίστηκε στα 263,789 MPa. Το δοκίμιο RF31 αστόχησε σε επιβαλλόμενη δύναμη 132,66 N. Η μέγιστη δύναμη, προ αστοχίας, σημειώθηκε στο δοκίμιο LF14 και ήταν ίση με 156,17 N. Για το δοκίμιο LF14 η μέγιστη τάση υπολογίστηκε στα 239,885 MPa. Στο δοκίμιο LF41 η επιβαλλόμενη δύναμη έφτασε τα 153,76 N και η μέγιστη τάση προσδιορίστηκε στα 217,932 MPa. Η συγκεκριμένη παρατήρηση επιβεβαιώνει την βασική αρχή που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, δηλαδή τη χρήση της ακριβούς τάσεως θραύσης ως μέτρο της αντοχής του οστού. Η τάση είναι χαρακτηριστικό του υλικού και όχι της κατασκευής, ενώ η δύναμη αστοχίας χαρακτηρίζει περισσότερο την κατασκευή παρά το ίδιο το υλικό.

Ο υπολογισμός των τάσεων θραύσης κατέστησε εφικτή τη σύγκριση της επίδρασης των δύο ειδικών τροφών στην αντοχή του μηριαίου οστού των επιμύων. Η ομάδα B, που τρεφόταν αποκλειστικά με σησαμέλαιο, παρουσίασε κατά 7,3% αυξημένη οστική αντοχή σε σχέση με την ομάδα A, που τρεφόταν αποκλειστικά με ταχίνι. Ειδικότερα, ο μέσος όρος των ισοδύναμων τάσεων στην ομάδα A υπολογίστηκε στα 202,7 MPa, ενώ ο μέσος όρος στην ομάδα B υπολογίστηκε στα 217,5 MPa. Η ομάδα B υπερέχει στις τάσεις αστοχίας έναντι της ομάδας A και στον διαχωρισμό των δοκιμίων σε αριστερά και δεξιά, όπως διαφαίνεται από τους πίνακες 5.1.13 & 5.1.14. Η μέση τιμή του μέσου πάχους t της διατομής κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα για τις δύο ομάδες, περίπου 0,62mm. Όμως, η μέση τιμή των μέσων εμβαδών Am των διατομών υπολογίστηκε στα 4,61mm² και 4,83mm² για τις ομάδες A και B, αντίστοιχα. Το ίδιο παρατηρείται και για τα πραγματικά εμβαδά των διατομών κάθε ομάδας. Η ομάδα A έχει μέσο όρο πραγματικών εμβαδών 4,78mm² και η ομάδα B 4,89mm².

Συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω στοιχεία, το γενικό συμπέρασμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ότι η ποσοτική επίδραση της διατροφής με σησαμέλαιο στις μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού υπερέχει, σαφέστατα, από την επίδραση της διατροφής με ταχίνι. Η μεθοδολογία της ακριβούς προσέγγισης της διατομής κρίνεται απαραίτητη λόγω της αναγκαιότητας του ακριβούς προσδιορισμού των τάσεων θραύσης που απαιτείται για την πραγματοποίηση της ως άνω σύγκρισης.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά την περίοδο της έρευνας για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψαν ορισμένες αδυναμίες και αρκετά επιστημονικά ερωτήματα. Οι περισσότερες δυσκολίες αντιμετωπίστηκαν, καθώς προχωρούσε η έρευνα. Η συγκεκριμένη ενότητα αφορά προτάσεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικών μελετών.

Η πρώτη δυσχέρεια εμφανίστηκε στην ακρίβεια προσδιορισμού του άξονα φόρτισης. Η κάθοδος του εμβόλου του πλαισίου φόρτισης έπρεπε να διακοπεί, όταν το επιβαλλόμενο φορτίο προσέγγιζε την τιμή των 10Ν, για να σχεδιαστεί μια γραμμή που διευκόλυνε τον προσδιορισμό της διεύθυνσης φόρτισης. Προτείνεται να μελετηθεί η τοποθέτηση ειδικής χρώσης μέσω καλύμματος στο κάτω μέρος του εμβόλου, στο σημείο που έρχεται σε επαφή με το οστό, έτσι ώστε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία του προσδιορισμού του άξονα φόρτισης και να ευρεθεί ο βαθμός κατά τον οποίο η χρωστική ουσία επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του οστού.

Δόκιμο θα ήταν να διερευνηθεί η ύπαρξη δυνατότητας τοποθέτησης των δοκιμίων οστού-ρητίνης πάνω στη μηχανή λείανσης, μέσω πειραματικής διάταξης με αεροστάθμη. Μέχρι πρότινος, η λείανση των δοκιμίων συντελούταν χειροκίνητα και πολλές φορές ανέκυψαν οριακές αποκλίσεις ως προς τον προσανατολισμό του δοκιμίου πάνω στο δίσκο λείανσης, που δυσχέραιναν τη διαδικασία φωτογράφισης.

Επιπροσθέτως, σε κάποια δοκίμια η διάκριση του φλοιώδους από το σπογγώδες οστό δεν ήταν προφανής. Η κάλυψη από ρητίνη, σε συνδυασμό με την προαναφερόμενη αδυναμία κατά τη λείανση, δυσκόλευε το σχεδιασμό του εσωτερικού περιγράμματος της διατομής του οστού, το οποίο πρέπει να προσεγγίζει, επαρκώς, το σύνορο μεταξύ φλοιώδους και σπογγώδους οστού. Συνίσταται να ερευνηθεί αν θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί η εν λόγω δυσλειτουργία μέσω της φωτογράφισης με χρήση φωτόμετρου ή άλλης μεθόδου φασματοσκοπίας, έτσι ώστε το σύνορο να είναι, σαφώς, διακριτό και να ενσωματώνεται σήμανση κατά τη φωτογράφιση.

Σημαντικό θα ήταν να διερευνηθεί, πιθανώς ιστολογικά, ο λόγος που το σησαμέλαιο έχει αυξημένη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του οστίτη ιστού σε σχέση με το ταχίνι.

Μερικές φορές εμφανίστηκε δυσκολία στον ακριβή σχεδιασμό του εξωτερικού περιγράμματος της διατομής στο AutoCad. Η βελτίωση του σχεδιασμού του περιγράμματος, μέσω της εύρεσης μιας προτυποποιημένης διαδικασίας, θα ελαχιστοποιήσει τις αποκλίσεις.

Ένα, εξίσου, κρίσιμο ζήτημα είναι οι διαφορές που παρουσιάζονται στα μηχανικά μεγέθη αριστερού και δεξιού μηριαίου οστού του ίδιου επίμυα. Προτείνεται να ερευνηθεί πειραματικά το φαινόμενο της ασυμμετρίας των δύο πλευρών, που αναφέρθηκε στα συμπεράσματα.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η δημιουργία μιας διατμηματικής βάσης δεδομένων μεταξύ των πανεπιστημίων, έτσι ώστε να μπορούν να έχουν οι ερευνητές πρόσβαση σε παρόμοιες μελέτες και να ενισχύεται, ουσιωδώς, η αξιοπιστία των συμπερασμάτων που εξάγουν.

ПАРАРТНМА

Κωδικός δοκιμίου: LF14 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 156,17 Ν



Εικόνα Π 1: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF14, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 2: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF14, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF17 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 138,26 N



Εικόνα Π 3: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF17, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 4: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF17, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF23 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 129,1 Ν



Εικόνα Π 5: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF23, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 6: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF23, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF27 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 103,9 Ν



Εικόνα Π 7: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF27, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 8: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF27, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.
Κωδικός δοκιμίου: LF30 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 97,09 Ν



Εικόνα Π 9: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF30, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 10: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF30, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF32 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 98,18 Ν



Εικόνα Π 11: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF32, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 12: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF32, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF33 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 124,33 N



Εικόνα Π 13: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF33, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 14: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF33, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF34 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 74,36 N



Εικόνα Π 15: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF34, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 16: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF34, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF36 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 115,61 Ν



Εικόνα Π 17: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF36, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 18: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF36, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF14 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 155,47 Ν



Εικόνα Π 19: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF14, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 20: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF14, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF17 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 134,84 N



Εικόνα Π 21: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF17, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 22: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF17, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF20 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 115,27 Ν



Εικόνα Π 23: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF20, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 24: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF20, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF23 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 127,08



Εικόνα Π 25: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF23, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 26: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF23, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF27 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 121,79 Ν



Εικόνα Π 27: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF27, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 28: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF27, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF30 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 107,3 N



Εικόνα Π 29: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF30, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 30: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF30, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF32 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 98,2 Ν



Εικόνα Π 31: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF32, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 32: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF32, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF33 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 113,41



Εικόνα Π 33: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF33, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 34: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF33, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF34 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 97,63 Ν



Εικόνα Π 35: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF34, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 36: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF34, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF36 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 90,42



Εικόνα Π 37: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF36, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 38: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF36, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Yc προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Y είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF25 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 107,01 N



Εικόνα Π 39: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF25, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 40: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF25, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF26 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 111,26 Ν



Εικόνα Π 41: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF26, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 42: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF26, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF28 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 110,92 Ν



Εικόνα Π 43: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF28, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 44: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF28, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF31 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 126,07 Ν



Εικόνα Π 45: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF31, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 46: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF31, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF35 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 134,87 Ν



Εικόνα Π 47: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF35, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 48: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF35, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF37 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 128,22 N



Εικόνα Π 49: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF37, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 50: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF37, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF41 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 153,76 N



Εικόνα Π 51: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF41, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 52: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF41, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF42 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 125,32 Ν



Εικόνα Π 53: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF42, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 54: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF42, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: LF48 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 143,76 N



Εικόνα Π 55: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου LF48, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 56: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου LF48, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF25 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 131,68 N



Εικόνα Π 57: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF25, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 58: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF25, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF26 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 122,74 N



Εικόνα Π 59: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF26, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 60: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF26, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF28 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 120,62 N



Εικόνα Π 61: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF28, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 62: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF28, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF29 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 136,37 N



Εικόνα Π 63: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF29, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 64: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF29, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF31 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 132,66 N



Εικόνα Π 65: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF31, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 66: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF31, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF35 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 128,25 N



Εικόνα Π 67: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF35, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 68: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF35, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF37 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 151,12 Ν



Εικόνα Π 69: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF37, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 70: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF37, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF41 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 123,34 N



Εικόνα Π 71: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF41, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 72: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF41, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF42 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 131,34 Ν



Εικόνα Π 73: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF42, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 74: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF42, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

Κωδικός δοκιμίου: RF48 Ομάδα Α Μέγιστο φορτίο: 132,57 Ν



Εικόνα Π 75: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής του δοκιμίου RF48, στο σημείο αστοχίας (σημειώνεται η κλίμακα του 1mm).



Εικόνα Π 76: Μοντέλο διατομής AutoCad του δοκιμίου RF48, στο σημείο αστοχίας. Ο επιμήκης άξονας είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας Υς προκύπτει από παράλληλη μετατόπιση του άξονα φόρτισης, ώστε να διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Χ και Υ είναι οι άξονες του κυρίου συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Ιατρικής, 2022. *Εμβιομηχανική*.[online] Διαθέσιμο από: <https://med.duth.gr/courses/εμβιομηχανική> (accessed at 04/03/2022)

2. Μασσαλάς, Χ., Ποτσίκα, Β. και Φωτιάδης, Δ., 2018. Εισαγωγή στην Εμβιομηχανική. Αθήνα: Gutenberg

3. Fung, Y.C., 1993. *Biomechanics-Mechanical properties of living tissues*, 2nd edition. New York: Springer-Verlag

4. International Society of Biomechanics, 2022. *General Information*.[online] Διαθέσιμο από: <https://isbweb.org/aboutus/general-information> (online 13/03/2022)

5. Ελληνική Εταιρεία Εμβιομηχανικής, 2022. Αρχική.[online] Διαθέσιμο από: < https://elembio.gr/> (online 13/03/2022)

6. Hall, S.J , 2019. *Basic Biomechanics*, 8th edition. New York: McGraw-Hill Education.

7. Ethier, C.R. and Simmons, G., 2007. *Introductory Biomechanics-From Cells to organisms*. New York: Cambridge University Press.

8. Marieb, E.N., Wilhelm, P.B. and Mallatt, J., 2018. Ανατομία,8th edition. Μεταφράστηκε από Αγγλικά από Ιατρικές Εκδόσεις Λαγός Δημήτριος. San Fransisco : Pearson Education, Inc. p.132-139, p.201.

9. Κορρές, Δ.Σ., Λυρίτης, Γ.Π. και Σουκάκος, Π.Ν., 2010. Εμβιομηχανική των οστών και του οστίτη ιστού, Σε Ορθοπαιδική και Τραυματολογία του Μυοσκελετικού Συστήματος, Επιμέλεια από Μαγνήσαλης, Ε.Α., Αθήνα: Ιατρικές Εκδόσεις Κωνσταντάρας.

10. Snell, R.S., 2012. *Clinical Anatomy by Regions*, 9th edition. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins| Wolters Kluwer.

11. Ma Z., Zhang Z., Yang Yi. & Yang Y., 2019. Sesamin Promotes Osteoblastic Differentiation and Protects Rats from Osteoporosis. *Medical Science Monitor*, 25, pp.5312-5320, DOI: 10.12659/MSM.915529 12. Yang X., Liang J., Wang Z., Su Y., Zhan Y., Wu Z., Li J., Li X., Chen R., Zhao J., Xu J., Liu Q. & Zhou B., 2021. Sesamolin Protects Mice From Ovariectomized Bone Loss by Inhibiting Osteoclastogenesis and RANKL-Mediated NF-κB and MAPK Signaling Pathways. *Frontiers in Pharmacology*, 12. DOI: 10.3389/fphar.2021.664697

13. Κανάρη Λ., 2012. Εμβιομηχανική του μηριαίου οστού κονίκλου: Τρισδιάστατη ανακατασκευή του μηριαίου οστού και συγκριτική αξιολόγηση των πειραματικών διατάξεων κάμψεως. Μεταπτυχιακή εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

14. Timoshenko, S., 1940. *Strength of Materials – Part I*, 2nd edition. New York: Van Nostrand Company, Inc.

15. Timoshenko, S., 1986. *Strength of Materials – Part I*, 3rd edition. New Delhi: CBS Publishers & Distributors

16. Timoshenko, S., 1940. *Strength of Materials – Part II*, 2nd edition. New York: Van Nostrand Company, Inc.

17. Timoshenko, S. and Goodier J.N., 1951, *Theory of Elasticity*, 2nd edition. New York: McGraw-Hill Education.

18. Panjabi, M.M., et al., 1985. *Biomechanical time-tolerance of fresh cadaveric human spine specimens*. J Orthop Res, 3(3): p. 292-300

19. Taylor, J.R., 1997. An Introduction to Error Analysis, 2nd edition. California: University Science Books.

20. Τσαμασφύρος, Γ.Ι., 1990. Μηχανική παραμωρφοσίμων σωμάτων Ι. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.