



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Τριβολογικός σχεδιασμός σε άρθρωση γονάτου
σε καθεστώς μεικτής λίπανσης**

Μανανάς Αθανάσιος

A.M: 1072350

Νικολακόπουλος Παντελής, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών
Μηχανικών

ΜΑΝΑΝΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

© 5^ο Έτος – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας σπουδαστικής εργασίας μελετάται το καθεστώς κάτω από το οποίο μία τεχνητή άρθρωση γονάτου μπορεί να είναι λειτουργική σε ανθρώπους που πάσχουν από οστεοαρθρίτιδα. Υπό αυτό το πλαίσιο πραγματοποιείται γενική έρευνα για την ανατομία του γονάτου με τα εμπλεκόμενα οστά, τους χόνδρους, τους μηνίσκους, τους συνδέσμους και όλα τα βιολογικά κομμάτια που επηρεάζουν μία άρθρωση. Εν συνεχεία, αναλύεται η συμπεριφορά του γονάτου σε διαφορετικά μοτίβα φόρτισης, καθώς και ανάλυση της κίνησης της άρθρωσης. Ακόλουθα γίνεται μία εκτενής ανάλυση της διαδικασίας της αρθροπλαστικής γόνατος, που είναι και το βασικό θέμα της εργασίας, καθώς αποτελεί μία διαδικασία που μπορεί να λύσει πολλά προβλήματα στον τομέα των προβλημάτων των αρθρώσεων. ενώ μελετάται η λίπανση των τεχνικών αρθρώσεων, με μεγαλύτερη επικέντρωση στην μεικτή λίπανση που είναι και αυτή που αφορά το μοντέλο της εργασίας. Για την μελέτη του μοντέλου χρησιμοποιείται το λογισμικό MATLAB, και γίνεται ανάλυση σε πεπερασμένες διαφορές της εξίσωσης Reynolds μαζί με τα αποτελέσματα της. Τέλος, πραγματοποιείται μία εκτενής ανάλυση στα βιολιπαντικά, αναλύοντας βασικές ιδιότητες και θεωρητικά στοιχεία, ενώ μελετώνται και οι καμπύλες ιξώδους και τα χαρακτηριστικά τους με σκοπό την σύγκριση μεταξύ των υπαρχόντων βιολιπαντικών για την εύρεση του ιδανικού για το μοντέλο.

Λέξεις κλειδιά

Τριβολογία, Τεχνητές αρθρώσεις, Γόνατο, Βιολιπαντικά

ABSTRACT

Tribological design of knee joints in mixed lubrication

Mananas Athanasios

In the context of this student research project, the status under which an artificial knee joint can be functional in people suffering from osteoarthritis is studied. In this context, a general study of the anatomy of the knee with the bones involved, cartilage, menisci, ligaments and all the biological parts that affect a joint takes place. Subsequently, the behavior of the knee under different loading patterns is analyzed, as well as an analysis of the joint motion. Following this, an extensive analysis of the knee arthroplasty procedure is performed, which is the main topic of the thesis, as it is a procedure that can solve many problems in the field of joint problems; and the lubrication of technical joints is studied, with a greater focus on mixed lubrication, which is the one that is the subject of the model of the thesis. MATLAB software is used to study the model, and a finite difference analysis of the Reynolds equation is performed along with its results. Finally, an extensive analysis is carried out on the biolubricants, analyzing basic properties and theoretical elements, the viscosity curves and their characteristics are also studied in order to compare between the existing biolubricants to find the ideal one for the model.

Keywords

Tribology, Artificial joints, Knee, Biolubricants

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αναπαράσταση άρθρωσης γονάτου	5
Εικόνα 2: Gait cycle.....	7
Εικόνα 3: Σύσταση άρθρωσης τεχνητού γονάτου	8
Εικόνα 4: Λεπτομερής απεικόνιση τεχνητής άρθρωσης.....	9
Εικόνα 5: Σύγκριση αρθρικού γονάτου πριν και μετά την επέμβαση.....	10
Εικόνα 6: Κατανομή πίεσης ανάλυσης Reynolds	19
Εικόνα 7: Κατανομή πίεσης-πιστοποίηση	20
Εικόνα 8: Δημιουργία βιολιπαντικών	21
Εικόνα 9: Καμπύλες ιξώδους για λάδι σόγιας	24
Εικόνα 10: Σύγκριση λαδιού σόγιας με βιομηχανικά λάδια	25
Εικόνα 11: Καμπύλες ιξώδους θερμοκρασίας για διάφορα λάδια.....	26
Εικόνα 12: Καμπύλη διατμητική τάσης-ρυθμού διάτμησης ηλιέλαιο	27
Εικόνα 13: Καμπύλη διατμητική τάσης-ρυθμού διάτμησης σογιέλαιο	27
Εικόνα 14: Καμπύλη διατμητική τάσης-ρυθμού διάτμησης γιάτροφα.....	28
Εικόνα 15: Καμπύλη διατμητική τάσης-ρυθμού διάτμησης απόβλητων λαδιών	28
Εικόνα 16: Εφαρμογή βιολιπαντικού στην άρθρωση	30
Εικόνα 17: Κώδικας FDM Reynolds (1).....	35
Εικόνα 18: Κώδικας FDM Reynolds (2).....	36

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	V
ABSTRACT.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	IX
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1 Γενικά στοιχεία	3
1.2 Ανατομία γονάτου.....	3
1.2.1 Κόκκαλα.....	4
1.2.2 Χόνδροι και μηνίσκοι	4
1.2.3 Σύνδεσμοι	4
1.3 Κίνηση και φόρτιση	5
1.3.1 Βαθμοί ελευθερίας.....	5
1.3.2 Μοτίβο φόρτισης	5
1.3 Gait cycle	7
1.4 Αρθρωπλαστική γονάτου	7
1.5 Λίπανση τεχνητών αρθρώσεων.....	11
1.5.1 Μεικτή λίπανση στις τεχνητές αρθρώσεις.....	12
2. ΕΞΙΣΩΣΗ REYNOLDS	14
2.1 Ανάλυση Reynolds.....	15
2.2 Υπολογιστικά μοντέλα.....	18
2.3 Πιστοποίηση Reynolds	19
3. ΒΙΟΛΙΠΑΝΤΙΚΑ	20
3.1 Εισαγωγή στα βιολιπαντικά.....	20
3.2 Είδη βιολιπαντικών	22
3.3 Εφαρμογές	23
3.4 Καμπύλες ιξώδους	23

3.5 Βιολιπαντικά στις τεχνητές αρθρώσεις.....	29
3.5.1 Πλεονεκτήματα.....	29
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	31
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	32
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	35

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη σπουδαστική εργασία αποτελεί τμήμα του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών του τμήματος των Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υπολογισμού και Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών με επιβλέποντα καθηγητή τον καθηγητή και Διευθυντή του εργαστηρίου κ. Νικολακόπουλο Παντελή, τον οποίον και θα ήθελα να ευχαριστήσω για την επιστημονική καθοδήγηση και υποστήριξη, στην διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά στοιχεία

Η άρθρωση του γονάτου είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του ανθρώπινου μυοσκελετικού συστήματος και είναι υπεύθυνη για την πραγματοποίηση της κίνησης και μεταφοράς φορτίου κατά τις καθημερινές δραστηριότητες. Όντας η μεγαλύτερη άρθρωση του σώματος, το γόνατο δέχεται πολύ μεγάλες πιέσεις και είναι επιρρεπής σε τραυματισμούς, με κυριότερο όλων την οστεοαρθρίτιδα [1], [2]. Για την αντιμετώπιση τέτοιων παθήσεων χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μία επέμβαση που ονομάζεται αρθροπλαστική. Σε αυτήν ουσιαστικά αντικαθίσταται η υπάρχουσα τραυματισμένη άρθρωση με μία τεχνητή που αποτελείται από μεταλλικά, πλαστικά και άλλα μέλη. Η τριβολογία, που είναι η επιστήμη που μελετά την τριβή, την φθορά και την λίπανση, παίζει κρίσιμο ρόλο στον σχεδιασμό και την απόδοση που θα έχουν οι τεχνητές αρθρώσεις γονάτου. Η τριβολογική συμπεριφορά των υλικών των μοσχευμάτων και η γεωμετρία της άρθρωσης επιδρά άμεσα στην μακροζωία και την λειτουργικότητα της προσθετικής γονάτου [3], [4]. Παράγοντες όπως η επιλογή της φέρουσας επιφάνειας, οι μηχανισμοί λίπανσης και η κινηματική της άρθρωσης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα τριβολογικά χαρακτηριστικά μίας τεχνητής άρθρωσης γονάτου.

1.2 Ανατομία γονάτου

Η άρθρωση του γονάτου είναι μία από τις πιο μεγάλες και πιο περίπλοκες αρθρώσεις του ανθρώπινου σώματος, λειτουργώντας κυρίως ως επεξεργασμένος μεντεσές άρθρωσης. Επιτρέπει την κίνηση ενώ φέρει σημαντικά φορτία κατά την διάρκεια των δραστηριοτήτων όπως το περπάτημα, το τρέξιμο και η αναπήδηση. Η κατανόηση της ανατομίας του είναι απαραίτητη για την διάγνωση και την θεραπεία των παθήσεων που σχετίζονται με το γόνατο.

1.2.1 Κόκκαλα

Η άρθρωση του γονάτου αποτελείται από τέσσερα κύρια κόκκαλα. Το μηριαίο οστό, το οποίο περιλαμβάνει δύο σφαιρικές άκρες γνωστές ως μηριαίοι κόνδυλοι που διαρθρώνονται με το κνημιαίο οστό και την επιγονατίδα. Το απομακρυσμένο άκρο του μηριαίου οστού είναι πιο μεγάλο και σχηματίζει ένα διπλό κόνδυλο, που πραγματοποιεί την κατανομή βάρους κατά την διάρκεια της κίνησης. Το κνημιαίο οστό, το οποίο στηρίζει το βάρος και αρθρώνει μαζί με το μηριαίο οστό στο εγγύς άκρο. Το κνημιαίο οροπέδιο αποτελείται από το έσω και το έξω κόνδυλο, τα οποία είναι διαμορφωμένα για να δέχονται τους μηριαίους κονδύλους. Η επιγονατίδα είναι σησαμοειδές οστό που βρίσκεται στην επιγονατιδο-μηριαίο αύλακα του μηριαίου οστού. Προστατεύει την άρθρωση του γονάτου και βελτιώνει την λειτουργία του τετρακέφαλου τένοντα. Τέλος, η περόνη της κνήμης παρόλο που είναι παράλληλη με το κνημιαίο οστό και παρέχει σημεία ένωσης με ιστούς, η περόνη δεν συνεισφέρει άμεσα στην λειτουργία φόρτωσης της άρθρωσης του γονάτου.

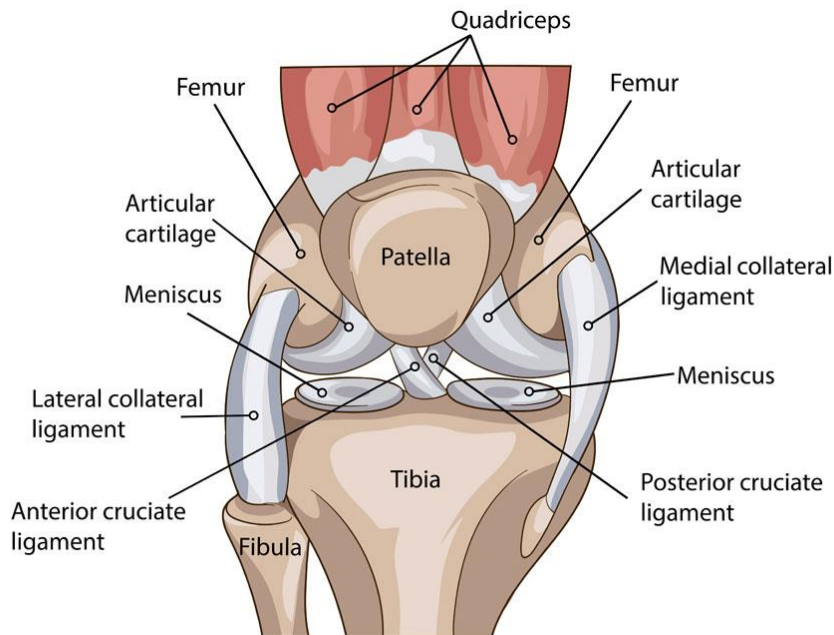
1.2.2 Χόνδροι και μηνίσκοι

Οι αρθρικές επιφάνειες του γονάτου καλύπτονται με υαλώδη χόνδρο, ο οποίος μειώνει την τριβή και απορροφά τους κραδασμούς κατά την κίνηση. Το γόνατο περιέχει επίσης δύο ημισεληνοειδείς δομές χόνδρου γνωστές μηνίσκοι (έσω και έξω), οι οποίες σταθεροποιούν περαιτέρω την άρθρωση κατανέμουν το φορτίο και ενισχύουν την συνάφεια μεταξύ του μηριαίου και κνημιαίου οστού.

1.2.3 Σύνδεσμοι

Η άρθρωση του γονάτου σταθεροποιείται από ένα σύμπλεγμα από συνδέσμους οι οποίοι κατηγοριοποιούνται σε δύο κατηγορίες. Οι εξωκαψικοί σύνδεσμοι περιλαμβάνουν τον επιγονατιδικό σύνδεσμο, το έσω παράπλευρο σύνδεσμο (MCL), τον πλάγιο παράπλευρο σύνδεσμο (LCL), και άλλους. Παρέχουν σταθερότητα και περιορίζουν την υπερβολική κίνηση. Οι εσωκαψικοί σύνδεσμοι περιλαμβάνουν τον πρόσθιο χιαστό (ACL) και τον οπίσθιο χιαστό σύνδεσμο (PCL) είναι ζωτικής σημασίας για την διατήρηση της ευθυγράμμισης του μηριαίου οστού και της κνήμης κατά την

διάρκεια της κίνησης. Ο πρόσθιος χιαστός εμποδίζει την πρόσθια μετακίνηση του κνημιαίου οστού σε σχέση με το μηριαίο, ενώ ο οπίσθιος εμποδίζει την οπίσθια κίνηση.



Εικόνα 1: Αναπαράσταση άρθρωσης γονάτου

1.3 Κίνηση και φόρτιση

1.3.1 Βαθμοί ελευθερίας

Η άρθρωση του γονάτου επιτρέπει την κάμψη και την έκταση, αλλά επιτρέπει επίσης έναν μικρό βαθμό για έσω και πλάγια περιστροφή ειδικά όταν το γόνατο είναι σε κάμψη. Αυτή η σύνθετη κίνηση είναι εφικτή λόγω της μοναδικής γεωμετρίας του μηριαίων και κνημιαίων κονδύλων, οι οποίοι επιτρέπουν την ομαλή διάρθρωση.

1.3.2 Μοτίβο φόρτισης

Το γόνατο έρχεται αντιμέτωπο με διάφορα μοτίβα φόρτισης κατά την διάρκεια των διαφόρων δραστηριοτήτων.

- **Στατικά φορτία:** Σε όρθια θέση, το γόνατο φέρει το βάρος του σώματος και οι δυνάμεις μοιράζονται κατά μήκος των μηριαίων και κνημιαίων επιφανειών. Η

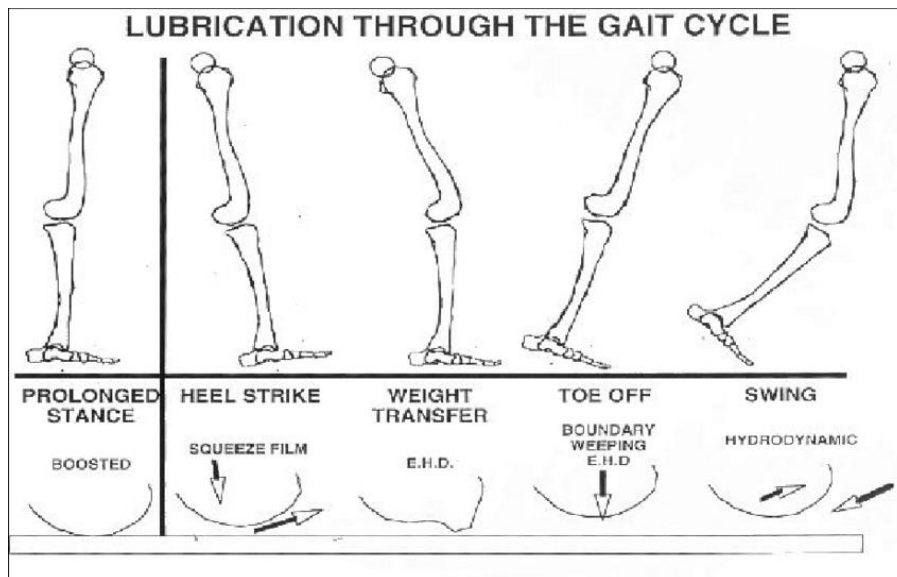
σωστή ευθυγράμμιση των μηχανικών και των ανατομικών αξόνων είναι ζωτικής σημασίας για την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Οι αποκλίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη τάση σε συγκεκριμένα τμήματα με πιθανά αποτελέσματα παθήσεις όπως η οστεοασθρίτιδα.

- **Δυναμικά φορτία:** Κατά την διάρκεια δραστηριοτήτων όπως το περπάτημα ή το τρέξιμο, το γόνατο υφίσταται δυναμική φόρτιση, η οποία περιλαμβάνει θλιπτικές δυνάμεις διατμητικές δυνάμεις και στρεπτικές δυνάμεις. Οι μηνίσκοι διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην κατανομή του φορτίου, συμβάλλοντας στην μείωση των μέγιστων πιέσεων στον αρθρικό χόνδρο και ενισχύοντας τη σταθερότητα της άρθρωσης.

Εκτός από την πιο μεγάλη άρθρωση του ανθρώπινου σώματος, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η άρθρωση του γονάτου αποτελεί και μία πολύ περίπλοκη άρθρωση του σώματος. Είναι μία αρθρική άρθρωση που συνδέει τρία οστά μεταξύ τους. Τα οστά αυτά είναι το μηριαίο οστό, την κνήμη και την επιγονατίδα. Η άρθρωση του γονάτου αποτελείται από δύο κύριες αρθρώσεις: την κνημομηριαία άρθρωση (είναι η άρθρωση μεταξύ κνήμης και μηριαίου οστού, η οποία αποτελεί την κύρια άρθρωση του γονάτου που φέρει βάρος) και η επιγονατιδομηριαία άρθρωση (είναι η άρθρωση μεταξύ επιγονατίδας και μηριαίου οστού, στην οποία η επιγονατίδα λειτουργεί ως τροχαλία αυξάνοντας το μηχανικό πλεονέκτημα του τετρακέφαλου μυός) [3], [2]. Η σταθεροποίηση της άρθρωσης επιτυγχάνεται με πολλούς συνδέσμους. Οι σύνδεσμοι αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες στους εξωαρθρικούς και εσωαρθρικούς. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν: σύνδεσμος επιγονατίδας, εσωτερικός και πλάγιος αμφιβληστροειδής επιγονατίδας, έσω-πλάγιος σύνδεσμος, έξω-πλάγιος σύνδεσμος, προσθιοπλάγιος σύνδεσμος. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν: πρόσθιος χιαστός σύνδεσμος, οπίσθιος χιαστός σύνδεσμος, εσωτερικοί και πλάγιοι μηνίσκοι [5], [2].

1.3 Gait cycle

Η κατασκευή μίας τεχνητής άρθρωσης γονάτου πρέπει να είναι πολύ λεπτομερής, αφού είναι απαραίτητο ο ασθενής στον οποίο θα χρησιμοποιηθεί το μόσχευμα να μπορεί να πραγματοποιεί τις κινήσεις που έκανε και πριν την εμφάνιση της οστεοαρθρίτιδας. Για τον λόγο έχει αναπτυχθεί το gait cycle. Μέσω αυτού αναλύεται η κίνηση που πραγματοποιεί το πόδι κατά την διάρκεια του περπατήματος. Αυτό δίνει την δυνατότητα να μελετηθούν οι απαιτούμενες κινήσεις του γονάτου, οι γωνίες που αναπτύσσει η άρθρωση με τα οστά και οι ανάγκες για λίπανση.



Εικόνα 2: Gait cycle

1.4 Αρθρωπλαστική γονάτου

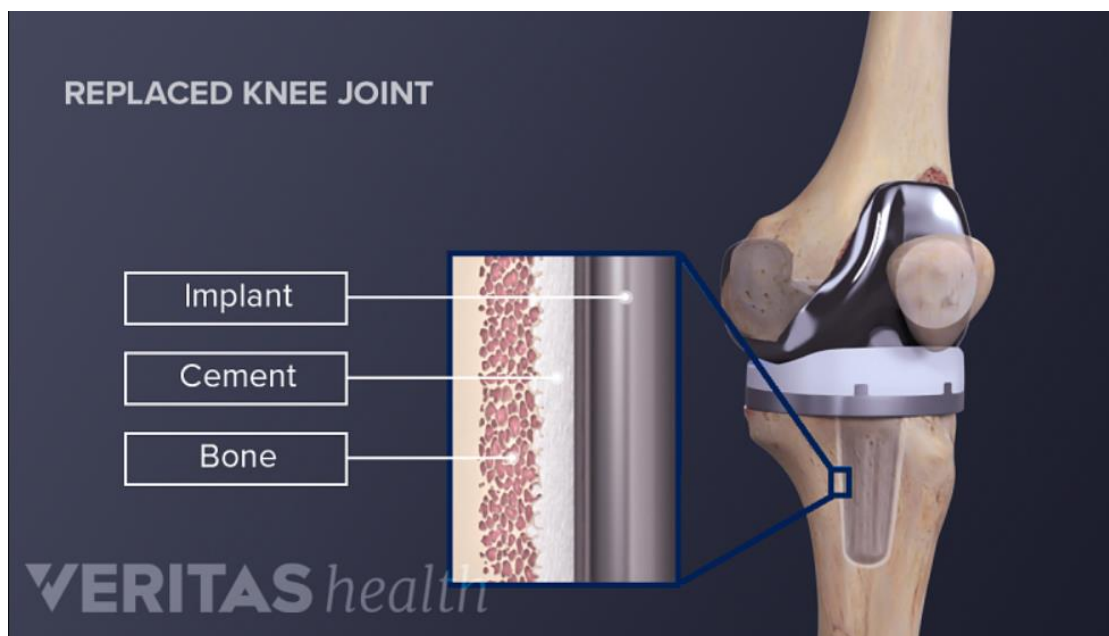
Η αρθροπλαστική γόνατος γνωστή και ως ολική αντικατάσταση γόνατος, είναι μία σημαντική διαδικασία που μπορεί να βελτιώσει αισθητά την ποιότητα ζωής ατόμων που πάσχουν από πόνο στο γόνατο και περιορισμούς στην κινητικότητα από παθήσεις όπως η οστεοαρθρίτιδα, ρευματοειδής αρθρίτιδα, μετά-τραυματική αρθρίτιδα και αγγειακή νέκρωση. Το κύριο όφελος είναι η ανακούφιση του ασθενή από τον πόνο που προκαλεί η αρθρίτιδα στις καθημερινές δραστηριότητες του ατόμου (περπάτημα, ανέβασμα σκάλας, ήρεμος ύπνος).

Η οστεοαρθρίτιδα καταστρέφει το χόνδρο της άρθρωσης του γονάτου, οι επιφάνειες γίνονται πιο σκληρές και το γόνατο δεν κινείται ομαλά προκαλώντας δυσφορία και πόνο. Μετά την αντικατάσταση της άρθρωσης του γονάτου ο σύνδεσμος μπορεί να κινηθεί ελεύθερα επαναφέροντας την κινητικότητα του ασθενή. Έτσι,

αυξάνεται η αυτονομία του ασθενή. Η αρθροπλαστική δίνει την δυνατότητα για να έναν πιο υγιή τρόπο ζωής, καθώς επιτρέπει την δυνατότητα άσκησης στον ασθενή, αφού πρώτα πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες φυσιοθεραπείες.

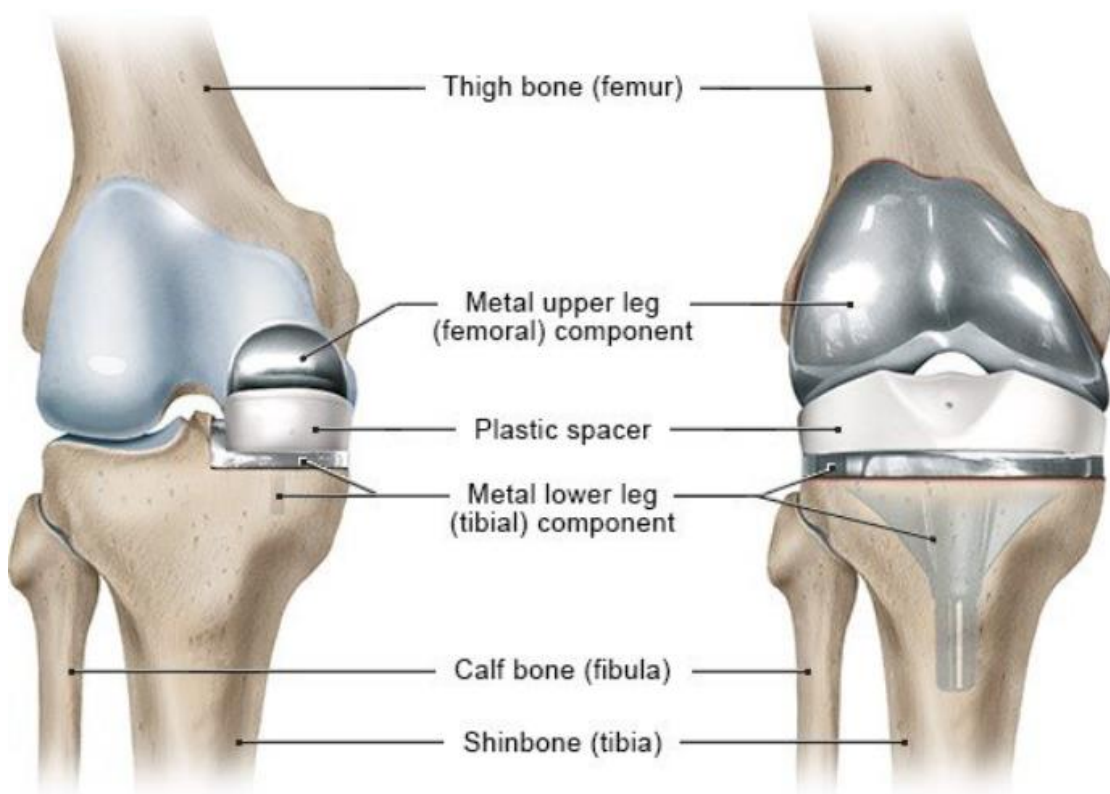
Συνολικά, ο στόχος της αρθροπλαστικής είναι να απαλλάξει από τον πόνο και να επαναφέρει την λειτουργικότητα της άρθρωσης μετά από την ζημιά λόγω της αρθρίτιδας, ενώ με την κατάλληλη προσοχή και φροντίδα μία τεχνητή άρθρωση μπορεί να διαρκέσει 15-20 χρόνια.[6], [7],[8].

Κατά την διάρκεια της επέμβασης, ο χειρουργός αφαιρεί τα κατεστραμμένα χόνδρο και κόκκαλο και τοποθετεί τα νέα μεταλλικά και πλαστικά εξαρτήματα για να επαναφέρει την ευθυγράμμιση και την λειτουργικότητα της άρθρωσης του γονάτου. Το μόσχευμα συνήθως αποτελείται από τρεις συνιστώσες: 1) Ένα κνημιαίο εξάρτημα για την επανεμφάνιση της κορυφής του οστού της κνήμης 2) Ένα μηριαίο εξάρτημα για την επανεμφάνιση του άκρου του μηριαίου οστού 3) Ένα επιγονατίδιο εξάρτημα για την επανεμφάνιση της κάτω πλευράς της επιγονατίδας. Τα εξαρτήματα είναι συνήθως εφαρμοσμένα πάνω στο κόκκαλο με τσιμέντο, αλλά υπάρχουν και εξαρτήματα χωρίς τσιμέντο δίνοντας την δυνατότητα για ανάπτυξη ιστού. Τέλος, πραγματοποιούνται ράμματα [7], [9], [10].

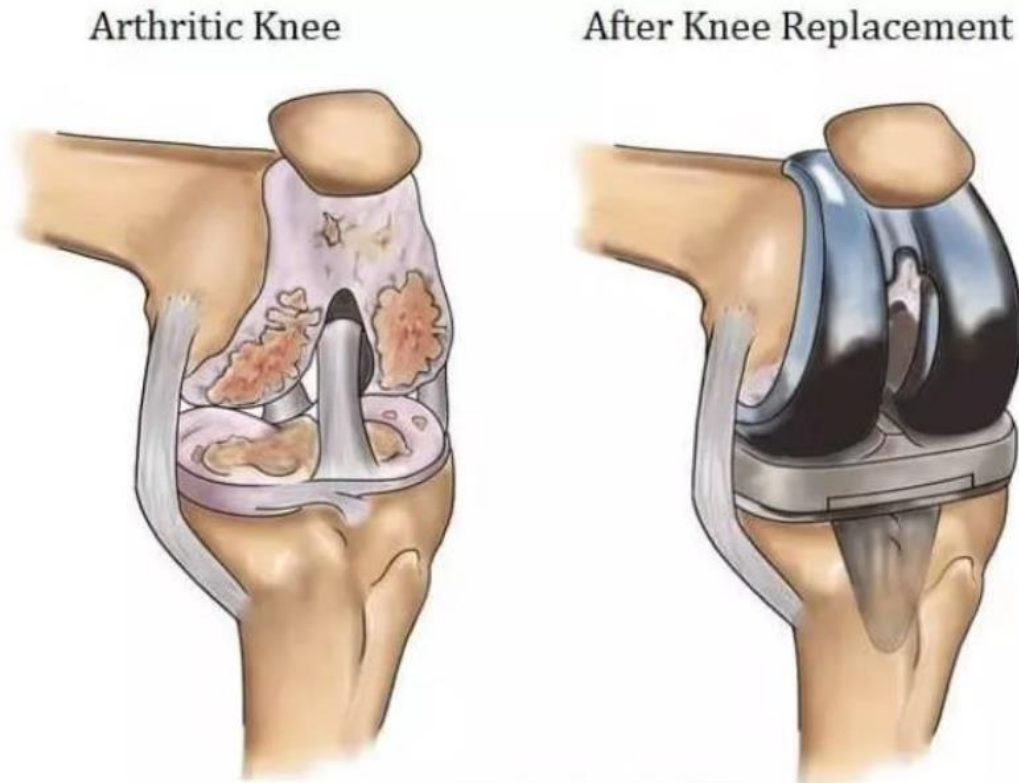


Εικόνα 3: Σύσταση άρθρωσης τεχνητού γονάτου

Η αντικατάσταση της άρθρωσης του γονάτου είναι μία συνήθης χειρουργική επέμβαση και πραγματοποιείται για να μειώσει την αίσθηση του πόνου και να επαναφέρει την κινητικότητα στους ασθενείς που υποφέρουν από οστεοαρθρίτιδα. Η τριβολογική απόδοση μίας τεχνητής άρθρωσης γονάτου είναι πολύ κρίσιμη για να διασφαλίσει την επιτυχή λειτουργία της σε βάθος χρόνου. Τα μοσχεύματα λειτουργούν κάτω από καθεστώς μεικτής λίπανσης, όπου συνυπάρχουν τόσο η οριακή όσο και η υδροδυναμική λίπανση [11], [12]. Η κατανόηση και η βελτίωση της τριβολογικής συμπεριφοράς σε αυτό το καθεστώς είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση της φθοράς και την μεγιστοποίηση της αντοχής της τεχνητής άρθρωσης. Τα υπολογιστικά μοντέλα έχουν γίνει ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την έρευνα της συμπεριφοράς των μοσχευμάτων στο γόνατο σε μεικτή λίπανση. Αυτά τα μοντέλα ενσωματώνουν παράγοντες όπως η γεωμετρία των εφαιπτόμενων επιφανειών, οι ιδιότητες των υλικών, τα φορτία και η ρεολογία του αρθρικού υγρού για την πρόβλεψη του πάχους του φιλμ, της τριβής και της φθοράς [12], [13].



Εικόνα 4: Λεπτομερής απεικόνιση τεχνητής άρθρωσης



Εικόνα 5: Σύγκριση αρθρικού γονάτου πριν και μετά την επέμβαση

Η αρθροπλαστική του γονάτου αν και είναι πολύ αποδοτική δεν έρχεται χωρίς τα πιθανά προβλήματα της. Οι πιθανές μολύνσεις είναι οι πιο πιθανές επιπλοκές κατά το χειρουργείο, καθώς μπορούν να βλάψουν οστά και μύες και να αποδυναμώσουν το μόσχευμα που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε επαναληπτικό χειρουργείο με σκοπό την αντικατάσταση του μολυσμένου κομματιού και ιστού. Παρόλα αυτά, είναι πιθανόν να χρειαστεί επαναληπτικό χειρουργείο ανεξάρτητα, καθώς με την πάροδο του χρόνου το μόσχευμα μπορεί να χαλαρώσει, κυρίως λόγω φθοράς, μόλυνσης ή σχισίματος, και να περιορίζει τον ασθενή. Κάποιος τραυματισμός σε ιστό είναι πιθανό να αναγκάσει σε συμπληρωματικό χειρουργείο καθώς θα χρειαστεί επανατοποθέτηση του μοσχεύματος για να μην περιορίζονται οι κινήσεις του ασθενή. Να σημειωθεί επιπλέον ότι μετά το χειρουργείο μπορεί να προκύψουν κατάγματα στα οστά γύρω από την τεχνητή άρθρωση. Σημαντικό να αναφερθεί όμως ότι τα πιθανά αυτά προβλήματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ηλικία και την υγεία του ασθενή και πάντα λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα πρόληψης πριν από τέτοιες επεμβάσεις [14].

1.5 Λίπανση τεχνητών αρθρώσεων

Το φυσικό λιπαντικό στην άρθρωση του γονάτου, ονομάζεται αρθρικό υγρό και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην λίπανση της άρθρωσης. Η σύνθεση του, συμπεριλαμβανομένων των πρωτεϊνών και του pH, επηρεάζει τον σχηματισμό των λιπαινόμενων φιλμ και του τζελ με υψηλό ιξώδες. Αντίθετα στις τεχνητές αρθρώσεις χρησιμοποιούνται κατά βάση βιολιπαντικά τα οποία και θα μελετηθούν εκτενώς στην συνέχεια της εργασίας. Να σημειωθεί ότι το αρθρικό υγρό που δρα στις φυσικές αρθρώσεις γονάτου δεν είναι διαθέσιμες σε τεχνητές αρθρώσεις. Αντίθετα, το αρθρικό υγρό που σχηματίζεται μετά την εμφύτευση δρα ως λιπαντικό.

Η λίπανση των τεχνητών αρθρώσεων του γονάτου βασίζονται σε συνδυασμό λιπαντικών μηχανισμών για να μειώσουν την τριβή και την φθορά.

1) Οριακή λίπανση

- Όταν η άρθρωση είναι στάσιμη ή κινείται αργά, με τις επιφάνειες να είναι διαχωρισμένες από μία λεπτή δεσμίδα μορίων λιπαντικού προσροφημένα στις φέρουσες επιφάνειες.
- Αυτό το οριακό φιλμ αποτρέπει άμεση επαφή των μεταλλικών και πλαστικών εξαρτημάτων

2) Μεικτή λίπανση

- Σε υψηλότερες ταχύτητες και φορτία οι επιφάνειες διαχωρίζονται από συνδυασμό οριακής λίπανσης και ενός πιο παχύρευστου ρευστού φιλμ
- Το ρευστό φιλμ παράγεται από την κίνηση της άρθρωσης με τρόπο παρόμοιο με την υδροδυναμική λίπανση στις μηχανές

3) Λίπανση ρευστού φιλμ

- Σε πολύ υψηλές ταχύτητες οι επιφάνειες της άρθρωσης είναι εντελώς διαχωρισμένες από ένα παχύ ρευστό φιλμ, ελαχιστοποιώντας την απευθείας επαφή
- Παρόλο που επιτυγχάνεται σπάνια σε τεχνητές αρθρώσεις γονάτου σε σχετικά αργές κινήσεις της άρθρωσης και σε διακοπόμενο φορτίο

Οι πειραματικές μελέτες έχουν συνεισφέρει σε σημαντικό βαθμό στους μηχανισμούς λίπανσης με πολύ σημαντικές πληροφορίες για την λειτουργία της άρθρωσης του γονάτου. Τεχνικές όπως ο φθορισμός που προκαλείται από λέιζερ έχουν επιτρέψει την άμεση οπτική παρατήρηση των διεπαφών επαφής και το σχηματισμό λιπαντικού φιλμ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα βασικά συστατικά του αρθρικού υγρού όπως η γ-σφαιρίνη, τα φωσφολιπίδια και το υαλουρονικό οξύ αλληλεπιδρούν για να σχηματίσουν ένα οριακό λιπαντικό φιλμ που ενισχύεται από την προσρόφιση της λευκωμίνης.

Παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την λίπανση της τεχνητής άρθρωσης είναι το υλικό του μοσχεύματος και ο σχεδιασμός με την γεωμετρία της άρθρωσης. Πιο αναλυτικά η αλληλεπίδραση των υλικών του μοσχεύματος όπως σε περιπτώσεις μέταλλο με μέταλλο ή μέταλλο με πλαστικό μπορεί να επηρεάσει τους μηχανισμούς λίπανσης. Ο σύνδεσμος μέταλλο σε μέταλλο πχ τείνει να έχει μεγαλύτερη τριβή σε σύγκριση με τον αντίστοιχο μέταλλο σε πλαστικό. Όσον αφορά τον σχεδιασμό και την γεωμετρία των μερών της τεχνητής άρθρωσης, όπως τις φέρουσες επιφάνειες, μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση της λίπανσης. Ακόμη παράγοντες όπως τραχύτητα επιφάνειας, καθαρότητα και συμμόρφωση μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο.

1.5.1 Μεικτή λίπανση στις τεχνητές αρθρώσεις

Η μεικτή λίπανση στις οποίας το καθεστώς θα επικεντρωθεί η παρούσα εργασία είναι πολύ σημαντική στον σχεδιασμό και στην λειτουργικότητα της τεχνητής άρθρωσης γόνατος, καθώς πρόκειται για τον λιπαντικό μηχανισμό που λειτουργεί μεταξύ των φερόμενων επιφανειών των μοσχευμάτων. Αυτό το καθεστώς συνδυάζει δύο λιπαντικές καταστάσεις, την υδροδυναμική λίπανση, όπου το ρευστό φιλμ διαχωρίζει τις επιφάνειες και την οριακή λίπανση, όπου υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ των επιφανειών λόγω ανεπαρκούς πάχους ρευστού φιλμ [13].

Μεικτή λίπανση πραγματοποιείται όταν οι λιπαντικές συνθήκες δεν είναι καθαρά υδροδυναμικές ή οριακές αλλά ένας συνδυασμός των δύο. Αυτή η κατάσταση είναι πολύ συνήθης στις τεχνητές αρθρώσεις γόνατος, όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ του μοσχεύματος και τον γύρω αρθρικών υγρών μπορούν να οδηγήσουν σε διάφορες λιπαντικές καταστάσεις ανάλογα με τις συνθήκες κίνησης και φορτίου. Η παρουσία

του αρθρικού υγρού, το οποίο έχει μία σύνθετη ρεολογική συμπεριφορά παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην διατήρηση ενός επαρκούς λιπαντικού φιλμ κατά την διάρκεια της κίνησης της άρθρωσης [12], [13].

Στα πλαίσια των τεχνητών αρθρώσεων, η μεικτή λίπανση είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση της φθοράς και της τριβής μεταξύ των φερόμενων επιφανειών. Οι αρθρώσεις του γονάτου αντιμετωπίζουν σύνθετες καταστάσεις φόρτισης και κίνησης στις καθημερινές δραστηριότητες, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε διακυμάνσεις στο πάχος του λιπαντικού φιλμ του λιπαντικού. Όταν το πάχος του λιπαντικού είναι επαρκές, κυριαρχεί η υδροδυναμική λίπανση, παρέχοντας διαχωρισμό μεταξύ των επιφανειών. Ωστόσο, κατά την ύπαρξη υψηλών φορτίων ή χαμηλών ταχυτήτων, το φιλμ μπορεί να γίνει αρκετό λεπτό για να υπάρξει μετάβαση από υδροδυναμική οριακή λίπανση αυξάνοντας το ρίσκο για φθορά και βλάβη στις επιφάνειες του μοσχεύματος [11], [12], [13].

Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει διάφορα μοντέλα για να προσομοιώσουν την μεικτή λίπανση των αρθρώσεων του γονάτου. Αυτά τα μοντέλα βοηθούν στην πρόβλεψη της τριβολογικής απόδοσης των αρθρώσεων κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Για παράδειγμα, υπολογιστικά μοντέλα μπορούν να αναλύσουν παράγοντες όπως την γεωμετρία των επιφανειών επαφής, τις ιδιότητες των υλικών και τις συνθήκες φόρτισης για να βελτιώσουν τον σχεδιασμό του μοσχεύματος για καλύτερη λιπαντική απόδοση.

2. ΕΞΙΣΩΣΗ REYNOLDS

Η εξίσωση του Reynolds είναι μία βασική εξίσωση στην ρευστομηχανική και κυρίως στην θεωρία της λίπανσης, στην οποία περιγράφει την κατανομή της πίεσης σε λεπτά φιλμ ροής. Προκύπτει από την παραγωγή των εξισώσεων Navier-Stokes κάτω από συγκεκριμένες υποθέσεις, όπως την κυριαρχία των δυνάμεων ιξώδους έναντι των αδρανειακών και αμελητέων δυνάμεων του σώματος και οι διακυμάνσεις της πίεσης κατά μήκος του ρευστού φιλμ [15], [16]. Η εξίσωση Reynolds φαίνεται παρακάτω.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h(u_a + u_b)}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h(v_a + v_b)}{2} \right) + \rho(\omega_a - \omega_b) - \rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} - \rho v_a \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Όπου:

- p : πίεση ρευστού φιλμ
- x, y : συντεταγμένες για το πλάτος και το μήκος
- z : η συντεταγμένη για το πάχος του ρευστού φιλμ
- h : πάχος του ρευστού φιλμ
- ρ : πυκνότητα
- u, v, w : οι ταχύτητες του οριακού σώματος στους x, y, z αντιστοίχως
- a, b : δείκτες για το άνω και κάτω οριακό σώμα αντίστοιχα

Για μεικτή λίπανση, η οποία περιλαμβάνει και υδροδυναμική και οριακή λίπανση, η εξίσωση του Reynolds χρειάζεται να τροποποιηθεί λόγω των σύνθετων αλληλεπιδράσεων μεταξύ του λιπαντικού και των σκληρών επιφανειών. Αυτό συνήθως πραγματοποιείται με χρήση της μέσης ροής λιπαντικού ή των αριθμητικών προσεγγίσεων.

2.1 Ανάλυση Reynolds

Η εξίσωση Reynolds που παρουσιάστηκε πριν μπορεί να γραφτεί:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{X^2}{Z^2} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right) = \frac{C}{X} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}} \quad (1)$$

Όπου

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \right) = \frac{\bar{h}_{i+0,5,j}^3 * \bar{p}_{i+1,j} + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 * \bar{p}_{i-1,j} - (\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3) * \bar{p}_{i,j}}{(\Delta \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right) = \frac{\bar{h}_{i,j+0,5}^3 * \bar{p}_{i,j+1} + \bar{h}_{i,j-0,5}^3 * \bar{p}_{i,j-1} - (\bar{h}_{i,j+0,5}^3 + \bar{h}_{i,j-0,5}^3) * \bar{p}_{i,j}}{(\Delta \bar{z})^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}} = \frac{\bar{h}_{i+1,j} - \bar{h}_{i-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \quad (4)$$

$$\bar{p}_{i,j} = A_{i,j} * \bar{p}_{i,j+1} + B_{i,j} * \bar{p}_{i,j-1} + C_{i,j} * \bar{p}_{i+1,j} + D_{i,j} * \bar{p}_{i-1,j} + E_{i,j} \quad (5)$$

Με αντικατάσταση στην (1) προκύπτει:

$$\begin{aligned} & (\bar{h}_{i+0,5,j}^3 * \bar{p}_{i+1,j} + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 * \bar{p}_{i-1,j} - (\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3) * \bar{p}_{i,j}) + \frac{X^2}{Z^2} \\ & * \left(\frac{\Delta \bar{x}}{\Delta \bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 (\bar{p}_{i,j+1} + \bar{p}_{i,j-1} - 2\bar{p}_{i,j}) = \frac{C}{X} \frac{\Delta \bar{x}}{2} (\bar{h}_{i+1,j} - \bar{h}_{i-1,j}) \Leftrightarrow \end{aligned}$$

Με διαχωρισμό για την απομόνωση της μέση πίεσης στην τρέχουσα θέση είναι:

$$\begin{aligned} & (\bar{h}_{i+0,5,j}^3 * \bar{p}_{i+1,j} + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 * \bar{p}_{i-1,j}) + \frac{X^2}{Z^2} * \left(\frac{\Delta \bar{x}}{\Delta \bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 (\bar{p}_{i,j+1} + \bar{p}_{i,j-1}) - \frac{C}{X} \frac{\Delta \bar{x}}{2} (\bar{h}_{i+1,j} \\ & - \bar{h}_{i-1,j}) = (\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta \bar{x}}{\Delta \bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3) \bar{p}_{i,j} \Leftrightarrow \end{aligned}$$

Λύνοντας ως προς την μέση πίεση στην τρέχουσα θέση είναι:

$$\begin{aligned}
\bar{p}_{i,j} = & \left(\frac{\bar{h}_{i+0,5,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)} * \bar{p}_{i+1,j} \right. \\
& + \frac{\bar{h}_{i-0,5,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)} * \bar{p}_{i-1,j} \Bigg) \\
& + \frac{\frac{X^2}{Z^2} * \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)} * (\bar{p}_{i,j+1} + \bar{p}_{i,j-1}) \\
& - \frac{C}{X} \frac{\Delta\bar{x}}{2} \frac{(\bar{h}_{i+1,j} - \bar{h}_{i-1,j})}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)}
\end{aligned}$$

Κάνοντας αντιστοίχιση της τελευταίας έκφρασης με την (5) προκύπτουν οι συντελεστές A, B, C, D και E. Έτσι, είναι:

$$\begin{aligned}
A_{i,j} &= \frac{\frac{X^2}{Z^2} * \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)} \\
B_{i,j} &= \frac{\frac{X^2}{Z^2} * \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)} \\
C_{i,j} &= \frac{\bar{h}_{i+0,5,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)} \\
D_{i,j} &= \frac{\bar{h}_{i-0,5,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta\bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)}
\end{aligned}$$

$$E_{i,j} = \frac{C}{X} \frac{\Delta \bar{x}}{2} \frac{(\bar{h}_{i+1,j} - \bar{h}_{i-1,j})}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \left(\frac{\Delta \bar{x}}{\Delta \bar{z}} \right)^2 \bar{h}_{i,j}^3 \right)}$$

Λαμβάνοντας ίσες αποστάσεις στην διακριτοποίηση του x και του z μπορεί να γραφτεί ότι:

$$\frac{\Delta \bar{x}}{\Delta \bar{z}} = 1$$

Οπότε μπορεί να απαλειφθεί από τις προηγούμενες σχέσεις δίνοντας τελικά:

$$A_{i,j} = \frac{\frac{X^2}{Z^2} * \bar{h}_{i,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \bar{h}_{i,j}^3 \right)}$$

$$B_{i,j} = \frac{\frac{X^2}{Z^2} * \bar{h}_{i,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \bar{h}_{i,j}^3 \right)}$$

$$C_{i,j} = \frac{\bar{h}_{i+0,5,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \bar{h}_{i,j}^3 \right)}$$

$$D_{i,j} = \frac{\bar{h}_{i-0,5,j}^3}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \bar{h}_{i,j}^3 \right)}$$

$$E_{i,j} = \frac{C}{X} \frac{\Delta \bar{x}}{2} \frac{(\bar{h}_{i+1,j} - \bar{h}_{i-1,j})}{\left(\bar{h}_{i+0,5,j}^3 + \bar{h}_{i-0,5,j}^3 + \frac{2X^2}{Z^2} \bar{h}_{i,j}^3 \right)}$$

2.2 Υπολογιστικά μοντέλα

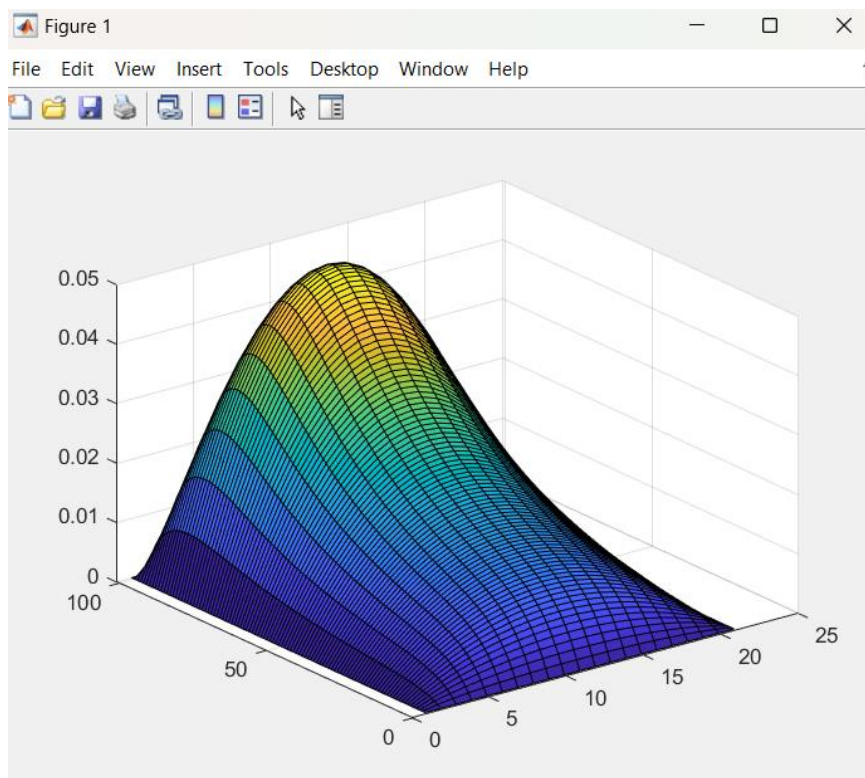
Όπως έχει σημειωθεί και νωρίτερα τα υπολογιστικά μοντέλα παίζουν σημαντικό ρόλο στην μελέτη της τριβολογικής συμπεριφοράς των μοσχευμάτων στο γόνατο. Η εξίσωση του Reynolds είναι πολύ σημαντική στην λίπανση ενός τεχνητού γονάτου, καθώς περιγράφει την ροή του ρευστού και την κατανομή της πίεσης στο λιπαντικό κενό ανάμεσα στις επιφάνειες επαφής. Αυτό είναι σημαντικό για να μπορέσουν να γίνουν κατανοητοί οι μηχανισμοί λίπανσης και η συμπεριφορά φθοράς του συνόλου των μοσχευμάτων που χρησιμοποιούνται για την οστεοαρθρίτιδα.

Στα πλαίσια αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της εξίσωσης Reynolds και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (FDM). Ο κώδικας φαίνεται στην αντίστοιχη ενότητα.

Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν:

Μήκος (L_b)	0,12 m
Ακτίνα (R_b)	0,1 m
Ασκούμενη δύναμη (F_w)	1962 N
Γωνιακή ταχύτητα (w)	3000 rpm
Συντελεστής ιξώδους (η)	0,04
Ακτινική χάρη (c)	0,6 m
Πλέγμα	100*20

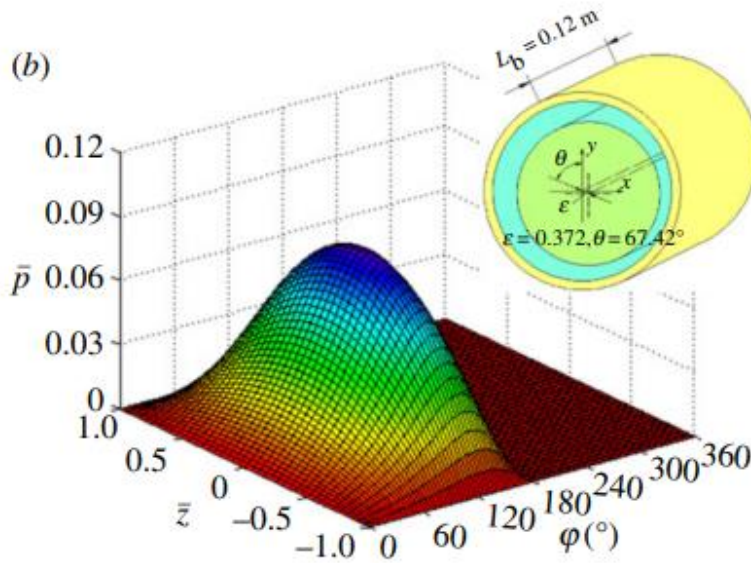
Το διάγραμμα που προκύπτει φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6: Κατανομή πίεσης ανάλυσης Reynolds

2.3 Πιστοποίηση Reynolds

Για την πιστοποίηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η μελέτη των W. Zhou, X. Wei, G. Wu με τίτλο “A superlinear iteration method for calculation of finite length journal bearing’s static equilibrium” [17]. Το πείραμα στην συγκεκριμένη μελέτη έγινε για διαφορετικές τιμές. Εδώ φαίνεται μόνο για την περίπτωση που ταυτίζεται με τα δικά μας δεδομένα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί η κατανομή πίεση είναι πολύ κοντά με κορυφή λίγο κάτω από τα 0,05. Στην εικόνα 9 φαίνεται και το αντίστοιχο διάγραμμα.



Εικόνα 7: Κατανομή πίεσης-πιστοποίηση

3. ΒΙΟΛΙΠΑΝΤΙΚΑ

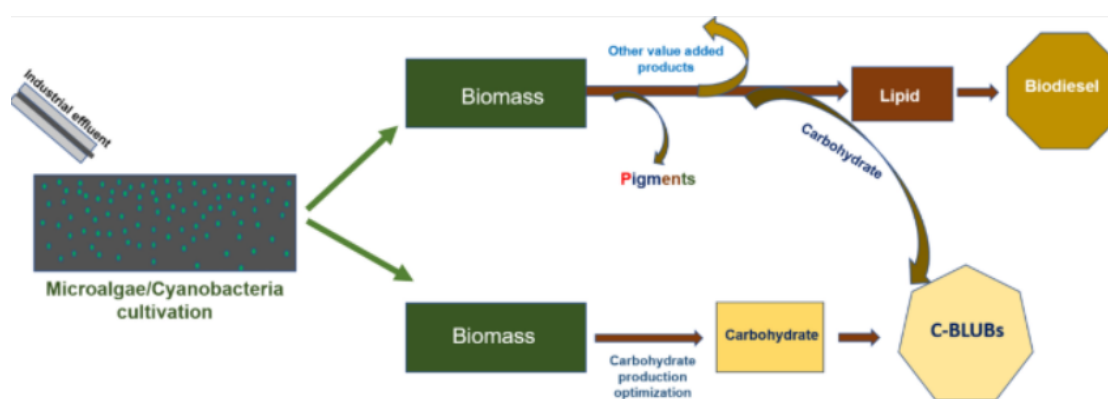
3.1 Εισαγωγή στα βιολιπαντικά

Τα βιολιπαντικά είναι λιπαντικά που προέρχονται από βιολογικές πηγές, συνήθως έλαια από λαχανικά και λειτουργούν ως μία εναλλακτική στα παραδοσιακά λιπαντικά με βάση το πετρέλαιο. Τα βιολιπαντικά παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα συμπεριλαμβανομένων:

- Βιοδιασπώμενα και μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- Βελτιωμένες ιδιότητες λίπανσης και μειωμένη τριβή
- Δυνατότητα χρήσης σε εφαρμογές αυτοκινήτων

Τα βιολιπαντικά αποτελούνται κυρίως από έλαια όπως το φοινικέλαιο και σογιέλαιο. Αυτά τα έλαια έχουν λιπαντικές ιδιότητες λόγω της χημικής τους σύστασης, η οποία περιλαμβάνει λιπαρά οξέα και τριγλυκερίδια. Συγκριτικά με τα ορυκτέλαια, τα βιολιπαντικά προσφέρουν: υψηλότερο δείκτη ιξώδους, χαμηλότερη αστάθεια, υψηλότερα σημεία ανάφλεξης και σημεία πυρκαγιάς, καθώς και καλύτερες λιπαντικές ιδιότητες. Εν αντιθέσει με τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν, τα βιολιπαντικά έχουν χαμηλότερη οξειδωτική σταθερότητα, υψηλότερο κόστος, ενώ και οι ιδιότητες τους σε

χαμηλές θερμοκρασίες είναι φτωχές. Για να διευρυνθεί το εύρος χρήσης των βιολιπαντικών και να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί που έχουν, αναμειγνύονται με άλλα ορυκτέλαια ή συνθετικά πρόσθετα, εισάγονται σε αυτά πρόσθετα για την μείωση της φθοράς και τριβής και χρησιμοποιούνται πορώδη υλικά για την παγίδευση προϊόντων οξείδωσης και την παράταση της διάρκειας ζωής του λιπαντικού. Γενικά ο στόχος όλων των παραπάνω είναι να βελτιώσουν τις λιπαντικές ιδιότητες, την οξειδωτική σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα τους σε σχέση με την τιμή τους για ευρεία χρήση και σε διάφορες εφαρμογές [18],[19],[20],[21].



Εικόνα 8: Δημιουργία βιολιπαντικών

3.2 Είδη βιολιπαντικών

Τα βιολιπαντικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα φυσικά και τα συνθετικά έλαια. Τα φυσικά χωρίζονται σε δύο επί μέρους κατηγορίες τα φυτικά και από λίπη ζώων.

1. Φυσικά έλαια

Φυτικά έλαια:

- Σογιέλαιο: με υψηλή λιπαντική ικανότητα και υψηλή προσκολλησιμότητα σε μέταλλα
- Καστορέλαιο: χαμηλή αστάθεια και καλές λιπαντικές ικανότητες
- Έλαιο γιάτροφας: χρησιμοποιείται στην βιομηχανία λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του και την υψηλή περιεκτικότητα σε ελαϊκό οξύ
- Φοινικέλαιο: επιδραστικό στην μείωση εκπομπών όταν χρησιμοποιείται σε μηχανές [22], [23]

Ζωικά λίπη: Τα ζωικά λίπη μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν βιολιπαντικά, αλλά χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο από τα φυτικά έλαια.

2. Συνθετικά έλαια

Τα συνθετικά βιολιπαντικά είναι χημικά επεξεργασμένα για συγκεκριμένες ιδιότητες και περιλαμβάνουν:

- Εστέρες: Προερχόμενοι από την αντίδραση λιπαρών οξέων με αλκοόλες, οι εστέρες προτιμώνται για την βιοδιασπασιμότητα τους και την απόδοση τους σε χαμηλές θερμοκρασίες. Συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή θερμικά σταθερότητα. [22], [23]
- Πολυαλφολεφίνες: Αυτά οι συνθετικοί υδρογονάνθρακες αντιγράφουν τις ιδιότητες των ορυκτέλαιων, αλλά προσφέρουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά το ιξώδες και την σταθερότητα. [22]
- Εστολίδες: Πρόκειται για διακλαδώσεις εστέρων που σχηματίζονται από λιπαρά οξέα που παρουσιάζουν υδρολυτική σταθερότητα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά τριγλυκερίδια. [23]
- Ρευστά χωρίς υδρογονάνθρακες

3.3 Εφαρμογές

Τα βιολιπαντικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες περιπτώσεις συμπεριλαμβανομένων:

- Λάδια μηχανής: μπορούν να μειώσουν τις βλαβερές εκπομπές και βελτιώνει την απόδοση της μηχανής
- Υδραυλικά ρευστά: χρησιμοποιείται σε μηχανήματα, όπου ενδιαφέρει η επίδραση στο περιβάλλον
- Γράσα: κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν λίπανση μεγάλης χρονικής διάρκειας σε ακραίες συνθήκες. [24], [25]

3.4 Καμπύλες ιξώδους

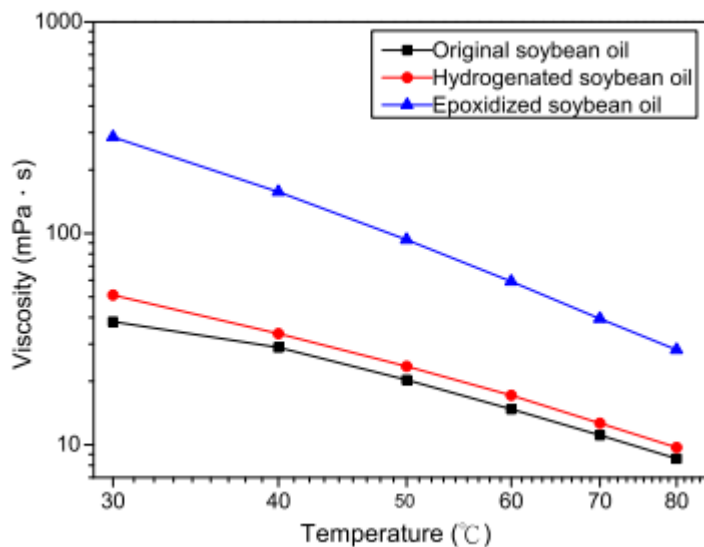
Τα βιολιπαντικά έχουν συνήθως υψηλές τιμές δεικτών ιξώδους, το οποίο σημαίνει ότι το ιξώδες τους αλλάζει λιγότερο με την μεταβολή της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τα κλασσικά λιπαντικά. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων μη κορεσμένων λιπαρών οξέων στα φυτικά έλαια, τα οποία σχηματίζουν άτομα τριγλυκερόλης. Το ιξώδες των βιολιπαντικών είναι μία σημαντική ιδιότητα που επηρεάζει την απόδοσή τους. Τα φυτικά έλαια έχουν γενικά κινηματικό ιξώδες 30-40 mm²/s στους 40°C, όμως στο καστορέλαιο είναι μεγαλύτερο με τιμή περίπου στα 220 mm²/s, λόγω της ομάδας υδροξυλίου. Για να ρυθμιστεί το ιξώδες των βιολιπαντικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες προσθετικές ουσίες για να επιτευχθούν συγκεκριμένα απαιτήσεις. Τα πολυμερή του αιθυλενίου είναι ένα είδος προσθέτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ρύθμιση του ιξώδους του βιολιπαντικού. Το ιξώδες των βιολιπαντικών μετριέται συνήθως στους 40°C-100°C, με τις τιμές να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του δείκτη ιξώδους. Τα βιολιπαντικά που παράγονται από διαφορετικά φυτικά έλαια μέσω μετεστεροποίησης φαίνεται να έχουν δείκτες ιξώδους παρόμοιους με αυτούς που υπάρχουν στην βιβλιογραφία [7], [26], [27].

Έχουν μελετηθεί πολλά από τα φυτικά έλαια για να βρεθούν οι ιδιότητες τους και κυρίως για την εύρεση του ιξώδους, το οποίο όπως εξηγήθηκε είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα για τα λιπαντικά. Στο άρθρο [28] μελετήθηκε το παραγόμενο λάδι από το φυτό σόγια και πραγματοποιήθηκαν πειράματα για να μελετηθεί το ιξώδες και ο δείκτης ιξώδους. Το συγκεκριμένο έλαιο επιλέχθηκε, καθώς είναι φιλικό προς το περιβάλλον, είναι ανανεώσιμο και βιοδιασπώμενο, το σημείο φλόγας είναι πολύ

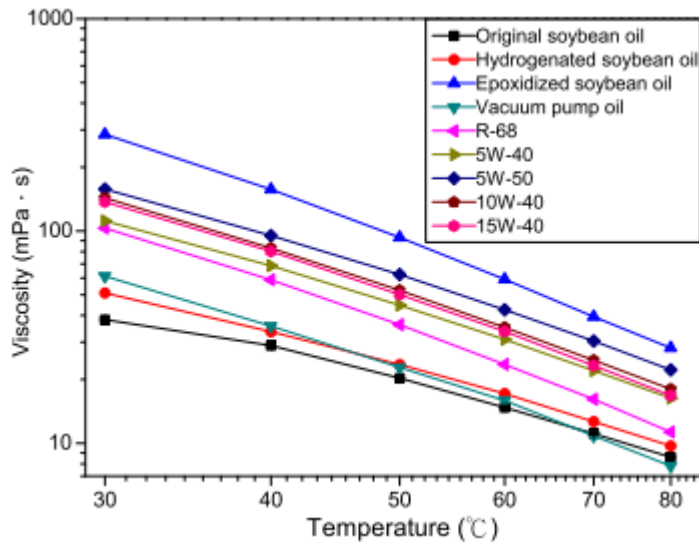
υψηλό, έχει πολύ σταθερό ιξώδες σε σχέση με άλλα λιπαντικά, άρα μεγαλύτερο δείκτη ιξώδους, ενώ πολύ σημαντικό είναι το γεγονός πως το λάδι σόγιας είναι πολύ φθηνότερο ως βιολιπαντικό από άλλα που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10, αλλά αναφέρθηκε και νωρίτερα με διάφορα πρόσθετα μπορεί να ρυθμιστεί το ιξώδες του βιολιπαντικού. Με υδρογόνωση του λαδιού σόγιας (κόκκινη καμπύλη) αυξάνεται το ιξώδες του λαδιού ελαφρώς σε σχέση με την αρχική του κατάσταση (μαύρη καμπύλη). Αισθητή διαφορά φαίνεται στην οξείδωση του λαδιού (μπλε καμπύλη) όπου το ιξώδες του εποξειδομένου λαδιού σόγιας έχει περίπου δεκαπλασιάσει το ιξώδες του σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

Βλέποντας τώρα τις 3 καταστάσεις λαδιού σόγιας που παρουσιάζονται στην Εικόνα 10 και συγκρίνοντας τες με άλλα λάδια τις βιομηχανίας προκύπτει το διάγραμμα της Εικόνας 11 όπου φαίνεται ότι το τελικό εποξειδομένο λάδι σόγιας έχει αισθητά καλύτερο ιξώδες από λάδια όπως το 10w-40 και το 15w-40, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην βιομηχανία.



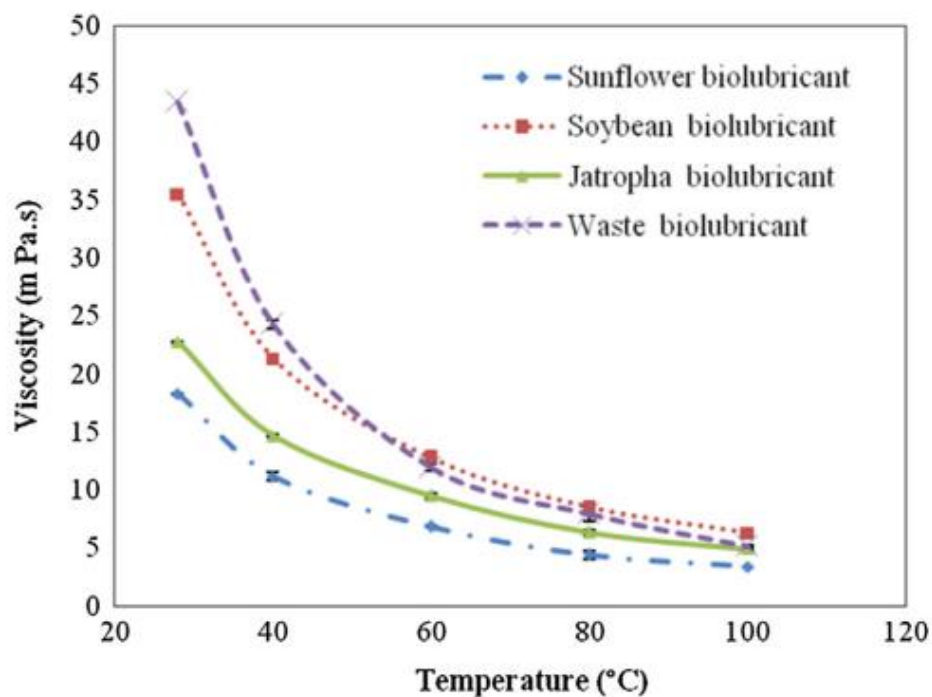
Εικόνα 9: Καμπύλες ιξώδους για λάδι σόγιας



Εικόνα 10: Σύγκριση λαδιού σόγιας με βιομηχανικά λάδια

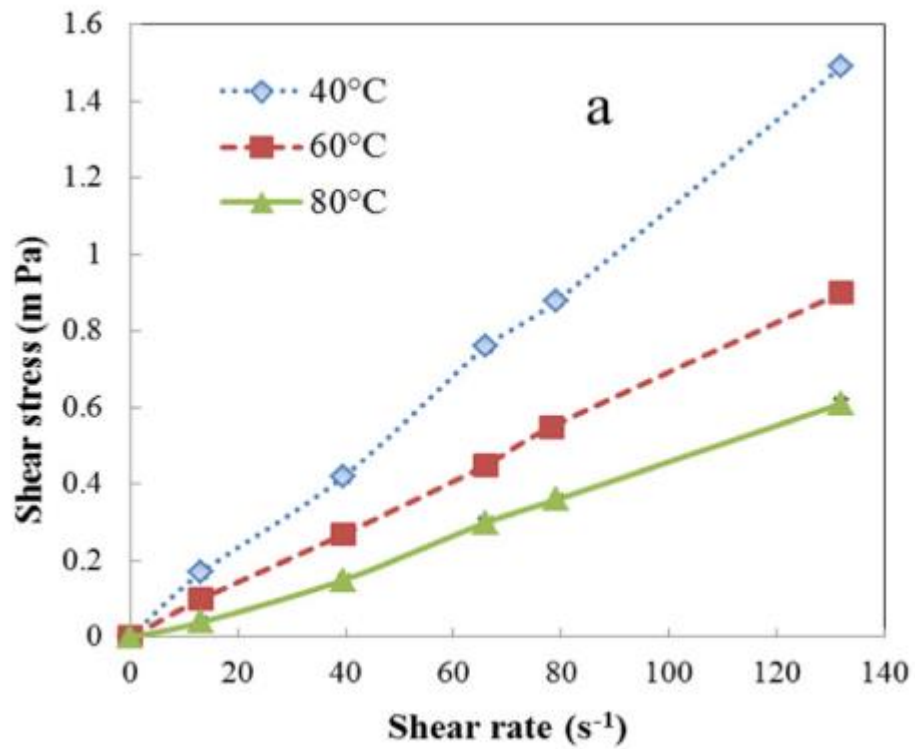
Άλλες έρευνες έχουν ασχοληθεί με την σύγκριση των βιολιπαντικών μεταξύ τους μέσω πειραμάτων. Έτσι, μπορεί να γίνει η σύγκριση ανάμεσα στο λάδι σόγιας και σε έλαια όπως το καστορέλαιο, ηλιέλαιο, το λάδι του φυτού γιάτροφα και υπολείμματα λαδιών που χρησιμοποιούνται στην μαγειρική. Στο άρθρο [29] έχουν πραγματοποιηθεί τέτοια πειράματα για την σύγκριση βιολιπαντικών.

Για την απαραίτητη σύγκριση θα χρησιμοποιηθούν και εδώ αρχικά, διαγράμματα ιξώδους-θερμοκρασίας. Όπως διατυπώθηκε και νωρίτερα το λάδι σόγιας αποτελεί μία πολύ καλή εναλλακτική για τα μηχανέλαια. Γίνεται έκδηλο και στην Εικόνα 12 ότι το λάδι σόγιας είναι μία από τις καλύτερες επιλογές από τα βιολιπαντικά. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι τα υπολείμματα από άλλα λάδια που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπως το μαγείρεμα (waste-μωβ καμπύλη) μπορούν να δώσουν μία εξαιρετική εναλλακτική λίπανσης και μάλιστα σε θερμοκρασίες μέχρι τους 55°C προσφέρουν το μεγαλύτερο ιξώδες σε σχέση με τα άλλα βιολιπαντικά που μελετήθηκαν. Συνολικά, όλα αυτά τα βιολιπαντικά που μελετήθηκαν είναι πολύ καλές επιλογές για λίπανση.

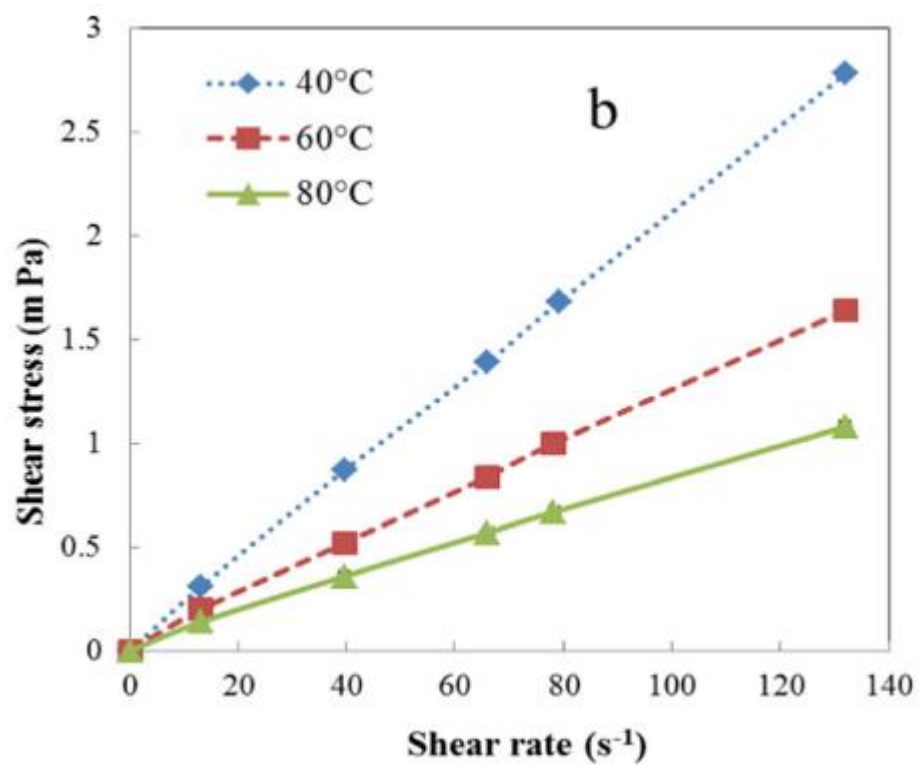


Εικόνα 11: Καμπύλες ιξώδους θερμοκρασίας για διάφορα λάδια

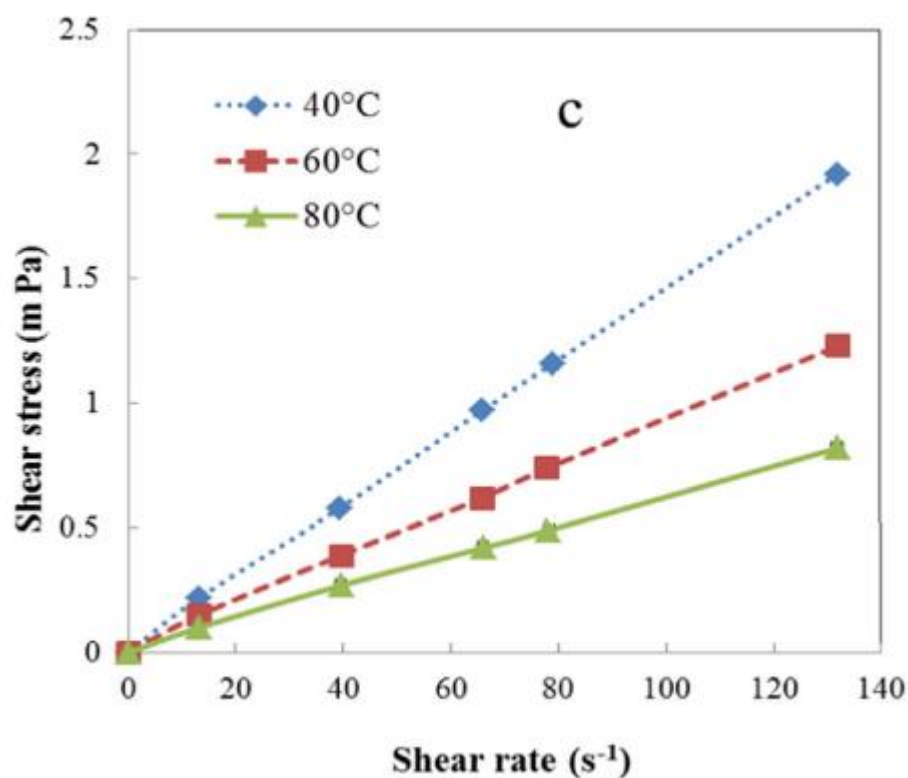
Ένας μηχανικός δίνει μεγάλη βάση στις ρεολογικές ιδιότητες των λιπαντικών. Η ρεολογική συμπεριφορά μετράται κατά βάση από την σχέση μεταξύ του ρυθμού διάτμησης και τη διατμητική τάση. Πιο συγκεκριμένα ο ρυθμός διάτμησης αφορά τον ρυθμό κατά τον οποίο οι ρευστές επιφάνειες ρέουν η μία πάνω στην άλλη, ενώ η διατμητική τάση είναι η δύναμη ανά επιφάνεια. Ελέγχθηκαν και τα τέσσερα λιπαντικά σε 3 θερμοκρασίες 40, 60 και 80°C.



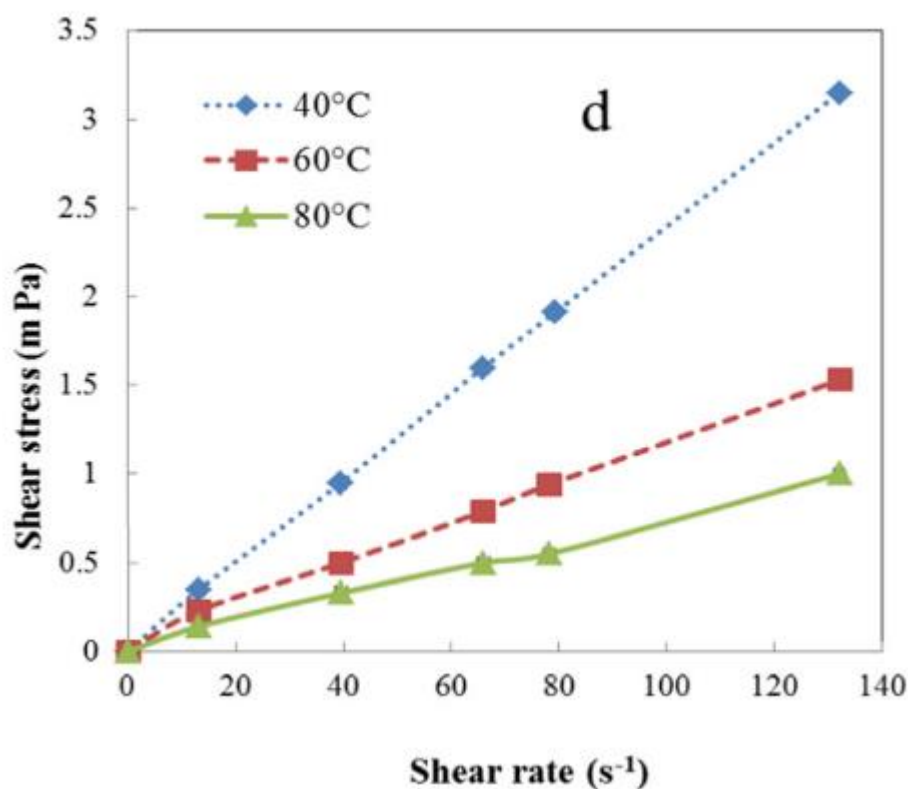
Εικόνα 12: Καμπύλη διατμητική τάσης-ρυθμού διάτμησης ηλιέλαιο



Εικόνα 13: Καμπύλη διατμητική τάσης-ρυθμού διάτμησης σογιέλαιο



Εικόνα 14: Καμπύλη διατμητική τάσης-ρυθμού διάτμησης γιάτροφα



Εικόνα 15: Καμπύλη διατμητική τάσης-ρυθμού διάτμησης απόβλητων λαδιών

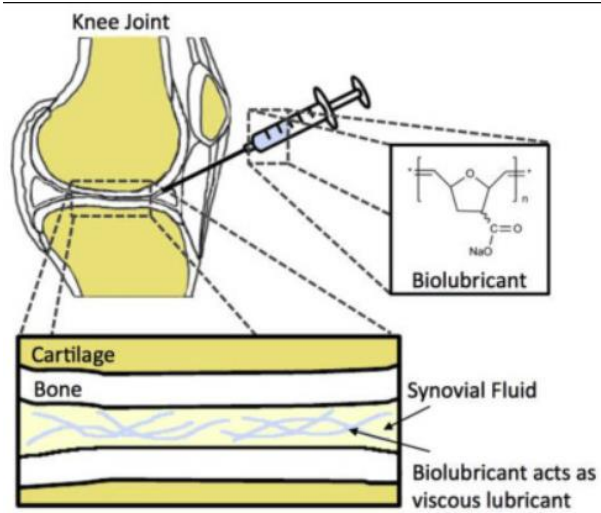
Από τις εικόνες 13-16 παρατηρείται μία γραμμική αύξηση της διατμητικής τάσης με αύξηση του ρυθμού διάτμησης, όπου η κλίση δίνεται από το ιξώδες του ρευστού. Η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών είναι γραμμική παρά την αύξηση της θερμοκρασίας, το οποίο σημαίνει ότι τα λάδια συμπεριφέρονται ως νευτώνεια ρευστά και υπακούουν στον νόμο των νευτώνειων ρευστών $\tau = \mu \cdot \gamma$, με το τ (mPa) να συμβολίζει την διατμητική τάση, το μ (mPa *s) το ιξώδες του ρευστού και το γ (s⁻¹) ο ρυθμός διάτμησης. Αυτό σημαίνει ότι το λάδι θα έχει σταθερό ιξώδες ακόμα και αν ρέει πιο γρήγορα και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υδραυλικό βιολιπαντικό.

3.5 Βιολιπαντικά στις τεχνητές αρθρώσεις

3.5.1 Πλεονεκτήματα

Τα βιολιπαντικά στις τεχνητές αρθρώσεις γονάτου είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη δράση. Ο στόχος τους είναι να βελτιώσουν την απόδοση και την μακροζωία του εμφυτεύματος, καθώς σε σύγκριση με αυτά τα παραδοσιακά λιπαντικά μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη τριβή και φθορά στην επιφάνεια του συνδέσμου.

Τα βιολιπαντικά που προέρχονται από φυσικές πηγές όπως τα φυτικά έλαια μπορούν να προσφέρουν βελτιωμένες ιδιότητες και μειωμένη τριβή σε σύγκριση με τα παραδοσιακά λιπαντικά όπως οι οροί των βοοειδών όταν χρησιμοποιούνται για δοκιμές φθοράς ορθοπεδικών υλικών εμφυτευμάτων. Επίσης, έχουν την δυνατότητα να προστατεύσουν τον χόνδρο και να επιβραδύνουν της εξέλιξης της οστεοαρθρίτιδας, καθυστερώντας ενδεχομένως την ανάγκη για χειρουργική επέμβαση αντικατάστασης γόνατος. Επιπλέον πλεονέκτημα των βιολιπαντικών, είναι ότι μπορούν να παραμείνουν περισσότερη χρόνο στις αρθρώσεις συγκριτικά με τα ιξώδη συμπληρώματα με βάση το υαλουρονικό οξύ. Να σημειωθεί εδώ ότι τα βιολιπαντικά έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιηθούν και σε μικρότερες αρθρώσεις όπως δάχτυλα και αστραγάλους, γεγονός που δείχνει την γενικότερη συμβατότητα τους με τις ορθοπεδικές εφαρμογές [30], [31].



Εικόνα 16: Εφαρμογή βιολιπαντικού στην άρθρωση

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκπόνηση της εργασίας έδωσε σημαντικά στοιχεία σχετικά με την γεωμετρία της άρθρωσης του γονάτου, αλλά και του τρόπου λειτουργίας του δίνοντας την δυνατότητα μοντελοποίησής του, το οποίο θα γίνει με την βοήθεια της ανάλυσης της εξίσωσης της Reynolds σε πεπερασμένες διαφορές.

Η μελέτη της επέμβασης ολικής αντικατάστασης άρθρωσης έδωσε την δυνατότητα κατανόησης της διαδικασίας και της κατανόησης της σημαντικότητας επιλογής υλικών. Αυτό δεν αφορά μόνο την ανθεκτικότητα τους, αλλά και την μεταξύ τους συμβατότητα, όσο και με το λιπαντικό.

Παράλληλα, η εκτενής ανάπτυξη των βιολιπαντικών και η σύγκριση τους έδωσε την δυνατότητα επιλογής του κατάλληλου για μία διαδικασία αντικατάστασης γονάτου, μέσω της μελέτης των καμπύλων ιξώδους της βιβλιογραφίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. Abougabal, M. Elsayed, A. Khalifa, and A. Marzouk, “CLINICAL, MRI, AND ARTHROSCOPIC CORRELATION IN MENISCAL INJURIES OF THE KNEE,” 2020. [Online]. Available: www.ejor.sohag-univ.edu.eg
- [2] M. Sabalbal, M. Johnson, and V. McAlister, “Absence of the genicular arterial anastomosis as generally depicted in textbooks,” *Ann R Coll Surg Engl*, vol. 95, no. 6, pp. 405–409, 2013, doi: 10.1308/003588413X13629960046831.
- [3] B. Olufemi Samuel Ashaolu, “HUMAN SYNOVIAL JOINTS AND MODELLING OF HUMAN KNEE JOINT A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF APPLIED SCIENCES OF NEAR EAST UNIVERSITY.”
- [4] K. Simou, “NANOPARTICLE-BASED FORMULATION FOR THE TREATMENT OF OSTEOARTHRITIS: A TRIBOLOGICAL STUDY,” 2022.
- [5] D. Dissertations, E. Anne Craig, and E. Anne, “Trace: Tennessee Research and Creative Exchange Bones Of The Knee Joint And Individual Features That can Be Used For Forensic Identification Recommended Citation,” 1994. [Online]. Available: https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/4029
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Arthroplasty>
- [7] “Knee Replacement Surgery Procedure | Johns Hopkins Medicine.” <https://www.hopkinsmedicine.org/health/treatment-tests-and-therapies/knee-replacement-surgery-procedure>
- [8] “Knee replacement - Mayo Clinic.” <https://www.mayoclinic.org/tests-procedures/knee-replacement/about/pac-20385276>
- [9] “Mayo Clinic leading the way in TKA technology - Mayo Clinic.” <https://www.mayoclinic.org/medical-professionals/orthopedic-surgery/news/mayo-clinic-leading-the-way-in-tka-technology/mac-20558274>

- [10] “Advances in hip and knee replacement - Mayo Clinic Health System.” <https://www.mayoclinichealthsystem.org/hometown-health/speaking-of-health/advances-in-hip-and-knee-replacement>
- [11] S. Khot and R. Guttal, “Mechanics of Bio-tribology in Bionic Joints- Analytical Approach,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1070, no. 1, p. 012113, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1070/1/012113.
- [12] H. Butt, L. Nissim, L. Gao, C. Myant, G. de Boer, and R. Hewson, “Transient mixed lubrication model of the human knee implant,” *Biosurf Biotribol*, vol. 7, no. 4, pp. 206–218, Dec. 2021, doi: 10.1049/BSB2.12020.
- [13] L. Gao, X. Lu, X. Zhang, Q. Meng, and Z. Jin, “Lubrication Modelling of Artificial Joint Replacements: Current Status and Future Challenges,” *Lubricants 2022, Vol. 10, Page 238*, vol. 10, no. 10, p. 238, Sep. 2022, doi: 10.3390/LUBRICANTS10100238.
- [14] “Knee Replacement Complications | Problems After Knee Surgery.” <https://www.drugwatch.com/knee-replacement/complications/>
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_equation
- [16] Q. J. Wang and H. S. Cheng, “Average Reynolds Equation,” *Encyclopedia of Tribology*, pp. 154–159, 2013, doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_154.
- [17] W. Zhou, X. Wei, L. Wang, and G. Wu, “A superlinear iteration method for calculation of finite length journal bearing’s static equilibrium position,” *R Soc Open Sci*, vol. 4, no. 5, May 2017, doi: 10.1098/rsos.161059.
- [18] M. Wang, “Biolubricants and Biolubrication,” 2014.
- [19] A. Bahari, T. Slatter, and R. Lewis, “Thesis Investigation into Tribological Performance of Vegetable Oils as Biolubricants at Severe Contact Conditions,” 2017.
- [20] H. M. Mobarak *et al.*, “The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 34–43, May 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2014.01.062.
- [21] D. Kania, R. Yunus, R. Omar, S. Abdul Rashid, and B. Mohamad Jan, “A review of biolubricants in drilling fluids: Recent research, performance, and applications,” *J Pet Sci Eng*, vol. 135, pp. 177–184, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.PETROL.2015.09.021.

- [22] J. A. Cecilia, D. B. Plata, R. M. A. Saboya, F. M. T. de Luna, C. L. Cavalcante, and E. Rodríguez-Castellón, “An Overview of the Biolubricant Production Process: Challenges and Future Perspectives,” *Processes* 2020, Vol. 8, Page 257, vol. 8, no. 3, p. 257, Feb. 2020, doi: 10.3390/PR8030257.
- [23] J. Salimon, B. M. Abdullah, R. M. Yusop, and N. Salih, “Synthesis, reactivity and application studies for different biolubricants,” *Chem Cent J*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2014, doi: 10.1186/1752-153X-8-16/FIGURES/4.
- [24] “Understanding Types of Lubricants: Biolubricants - Petroleum Service Company.” <https://petroleumservicecompany.com/blog/understanding-biolubricants/>
- [25] “Types of Biolubricants – www.biosmeermiddelen.com.” <https://biosmeermiddelen.com/en/types-of-biolubricants/>
- [26] J. A. Cecilia, D. B. Plata, R. M. A. Saboya, F. M. T. de Luna, C. L. Cavalcante, and E. Rodríguez-Castellón, “An Overview of the Biolubricant Production Process: Challenges and Future Perspectives,” *Processes* 2020, Vol. 8, Page 257, vol. 8, no. 3, p. 257, Feb. 2020, doi: 10.3390/PR8030257.
- [27] J. M. Encinar, S. Nogales, and J. F. González, “Biodiesel and biolubricant production from different vegetable oils through transesterification,” *Engineering Reports*, vol. 2, no. 12, p. e12190, Dec. 2020, doi: 10.1002/ENG2.12190.
- [28] C. C. Ting and C. C. Chen, “Viscosity and working efficiency analysis of soybean oil based bio-lubricants,” *Measurement*, vol. 44, no. 8, pp. 1337–1341, Oct. 2011, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2011.04.005.
- [29] N. K. Attia, S. A. El-Mekkawi, O. A. Elardy, and E. A. Abdelkader, “Chemical and rheological assessment of produced biolubricants from different vegetable oils,” *Fuel*, vol. 271, p. 117578, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.117578.
- [30] J. Salimon, N. Salih, and E. Yousif, “Biolubricants: Raw materials, chemical modifications and environmental benefits,” May 2010. doi: 10.1002/ejlt.200900205.
- [31] “Interdisciplinary group creating biolubricants to combat arthritis | Cornell Chronicle.” <https://news.cornell.edu/stories/2023/07/interdisciplinary-group-creating-biolubricants-combat-arthritis>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ο κώδικας που ακολουθεί δίνει την ανάλυση της εξίσωσης Reynolds σε πεπερασμένες διαφορές με τη χρήση του λογισμικού MATLAB. Ο κώδικας είναι σχεδιασμένος για την ανάλυση της εξίσωσης Reynolds σε πεπερασμένες διαφορές υπολογίζοντας την μέγιστη τιμή της πίεσης

```

1 - close all;
2 - clear
3 - clc;
4
5 - %% Initial conditions
6 - C=0.6; %clearance
7 - Lb=0.12;
8 - Rb=0.1; %radius
9 - Fw=1962;
10 - W=3000;
11 - n=0.04; %viscosity
12 - %% Grid
13 - N=100;
14 - M=20;
15 - Z1=Lb;
16 - X1=Rb;
17 - delxbar=1/N;
18 - delzbar=1/M;
19 - const1=X1*X1/(Z1*Z1);
20 - iter=1000;
21 - for I=1:N+1
22 -     for J=1:M+1
23 -         p(I,J)=0.0;
24 -     end
25 - end
26 - %% Boundary Conditions
27 - for K=1:iter
28 -     sumij=0.0;
29 -     for I=2:N
30 -         X(I)= 1/N*(I-1);
31
32 -         h=2/3*(2-X(I));
33 -         hm05=2/3*(2-X(I)-0.5*delxbar);

```

Εικόνα 17: Κώδικας FDM Reynolds (1)


```

33 -     hm05=2/3*(2-X(I)-0.5*delxbar);
34 -     hp05=2/3*(2-X(I)+0.5*delxbar);
35 -     hm1=2/3*(2-X(I)-delxbar);
36 -     hp1=2/3*(2-X(I)+delxbar);
37 -
38 -     h3=h*h*h;
39 -     h3m05=hm05*hm05*hm05;
40 -     h3p05=hp05*hp05*hp05;
41 -
42 -     const2=(h3p05+h3m05+2*const1*h3);
43 -
44 -     A1=const1*h3/const2;
45 -     A2=h3p05/const2;
46 -     A3=h3m05/const2;
47 -     E=-0.5*delxbar*(hp1-hm1)*C/(const2*X1);
48 -
49 -     for J=2:M
50 -         z(J)=1/M*(J-1);
51 -         p(I,J)=A1*p(I,J+1)+A1*p(I,J-1)+A2*p(I+1,J)+A3*p(I-1,J)-E;
52 -         sumij=sumij+p(I,J);
53 -     end
54 - end
55 -
56 -     sum(K+1)=sumij;
57 -     percentage=abs(sum(K+1)-sum(K))/abs(sum(K+1));
58 -
59 -     if percentage<0.001
60 -         break
61 -     end
62 - end
63 -
64 -     y=K;
65 -     surf(p)

```

Εικόνα 18: Κώδικας FDM Reynolds (2)