



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ  
ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΛΕΥΡΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



## ***Ευχαριστίες***

Η εκπόνηση και ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δε θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί χωρίς την βοήθεια και υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα την εργασία αυτή, Λέκτορα του ΕΜΠ κ Λεωνίδα Αλεξόπουλο. Η πολύτιμη καθοδήγησή του και η αμέριστη στήριξη που μου προσέφερε κατέστησαν δυνατή την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική ήταν η υποστήριξη εκ μέρους του Υποψήφιου Διδάκτορα του Εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών του ΕΜΠ, Ιωάννη Μελά τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για το ενδιαφέρον του στην εκπόνηση της εργασίας αυτής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον τελειόφοιτο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ Νικόλαο Νικολάου με τον οποίο συνεργαστήκαμε γύρω από το θέμα αυτό και τη Διπλωματούχο των Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ Θεοφανά Ευταξιοπούλου, από τη διπλωματική εργασία της οποίας αντλήθηκαν πολύτιμες πληροφορίες.



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>5</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>7</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Η ΠΑΘΗΣΗ ΤΗΣ ΟΣΤΕΟΑΡΘΡΙΤΙΔΑΣ .....</b>	<b>9</b>
1.1 Αρθρώσεις .....	9
1.2 Παθήσεις των αρθρώσεων .....	10
1.3 Αντιμετώπιση της οστεοαρθρίτιδας.....	11
1.3.1 Σύγχρονη θεραπεία.....	11
1.3.2 Ο ρόλος του αρθρικού χόνδρου .....	11
1.3.3 Μηχανισμός εκφύλισης του χόνδρου .....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΧΟΝΔΡΟΥ .....</b>	<b>13</b>
2.1 Δομή της άρθρωσης.....	13
2.2 Δομή του αρθρικού χόνδρου και μηχανικές ιδιότητες.....	15
2.3 Το διφασικό πρότυπο του χόνδρου .....	17
2.4 Υδραυλική διαπερατότητα κ.....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΧΟΝΔΡΟΥ.....</b>	<b>19</b>
3.1 Γενική περιγραφή .....	19
3.2 Πειραματική δοκιμή συμπίεσης .....	19
3.3 Μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.....	21
3.3.1 Γενικά.....	21
3.3.2 Δοκιμή συμπίεσης στο ABAQUS.....	23
3.3.2.1 Γεωμετρία και καταπόνηση .....	23
3.3.2.2 Διαδικασία υπολογισμού με πεπερασμένα στοιχεία .....	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....</b>	<b>27</b>
4.1 Εισαγωγή.....	27
4.2 Απαιτήσεις.....	28
4.3 Γενική κατασκευαστική ιδέα.....	29
4.4 Πιθανές λύσεις στο πρόβλημα του αισθητήρα.....	30
4.4.1 Καπασιτόμετρα .....	31
4.4.1.1 Φυσικές και τεχνολογικές αρχές .....	31
4.4.1.2 Εφαρμογή στο πρόβλημα .....	32
4.4.2 Πηνιόμετρα.....	35
4.4.2.1 Φυσικές και τεχνολογικές αρχές .....	35
4.4.2.2 Εφαρμογή στο πρόβλημα .....	36

4.4.3 Cameras & scanner .....	37
4.4.3.1 Εφαρμογή στο πρόβλημα .....	38
4.4.4 Laser .....	39
4.4.4.1 Φυσικές και τεχνολογικές αρχές .....	40
4.4.4.2 Εφαρμογή στο πρόβλημα .....	40
4.5 Τελική αξιολόγηση και επιλογή αισθητήρα .....	43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....</b>	<b>45</b>
5.1 Αισθητήρας απόστασης.....	45
5.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά .....	46
5.1.2 Σύνδεση με προσωπικό υπολογιστή .....	46
5.1.3 Λογισμικό χειρισμού του αισθητήρα .....	49
5.1.4 Άλλα χαρακτηριστικά.....	54
5.1.5 Σφάλματα .....	55
5.2 Μηχανισμός κίνησης δοκιμίων.....	55
5.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες .....	56
5.2.2 Σύνδεση με προσωπικό υπολογιστή .....	57
5.2.3 Χειρισμός του xy stage.....	58
5.3 Φορείς συμπίεσης .....	60
5.3.1 Υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών.....	60
5.3.2 Κατασκευή.....	64
5.4 Στήριξη του αισθητήρα .....	67
5.5 Βάση της διάταξης.....	69
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....</b>	<b>71</b>
6.1 Εξέταση σφαλμάτων μέτρησης.....	71
6.1.1 Γεωμετρικές ατέλειες .....	71
6.1.2 Συλλέκτης ακτίνας laser .....	73
6.1.3 Θερμοκρασία.....	77
6.1.3.1 Περίοδος προθέρμανσης ( <i>warm-up time</i> ).....	78
6.1.3.2 Θερμοκρασιακή διαστολή.....	79
6.1.3.3 Θεωρητικός υπολογισμός .....	82
6.1.3.4 Εμπειρικός υπολογισμός .....	83
6.1.4 Ανακεφαλαίωση.....	85
6.2 Δοκιμή ερπυσμού ιζωδοελαστικού υλικού .....	85
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>89</b>
<b>ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ.....</b>	<b>91</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>93</b>

## Πρόλογος

Μέχρι το Μεσαίωνα, η ιατρική βασιζόταν σχεδόν αποκλειστικά στη διδασκαλία των Αρχαίων Ελλήνων γιατρών Ιπποκράτη και Γαληνού. Οι συμβουλές τους για τη θεραπεία των συνήθων νόσων και κακώσεων βασίζονταν στην πρακτική πείρα και δεν είχαν μεγάλη σχέση με την κατασκευή και λειτουργία του ανθρώπινου σώματος.

Η ιατρική ως Επιστήμη άρχισε τον 16ον αιώνα με την ανατομία και λεπτομερή σπουδή πτωμάτων από τον Ιταλό καλλιτέχνη και εφευρέτη Λεονάρντο ντα Βίντσι. Το 1543 ο Βέλγος επιστήμονας Ανδρέας Βεσάλιος έγραψε το πρώτο πλήρες βιβλίο ανατομίας, *De humani corporis fabrica* (Η κατασκευή του σώματος του Ανθρώπου). Ο Βεσάλιος κατόρθωσε να διορθώσει πολλές λανθασμένες αντιλήψεις στη διδασκαλία των Αρχαίων και έβαλε τα θεμέλια της σύγχρονης ανατομίας (της κατασκευής του σώματος) και φυσιολογίας (της λειτουργίας του σώματος). Ο επόμενος μεγάλος σταθμός ήταν το 1628, όταν ο Άγγλος γιατρός William Harvey εξήγησε για πρώτη φορά την πραγματική φύση της κυκλοφορίας του αίματος στο ανθρώπινο σώμα.

Το δίδυμο ανατομία και φυσιολογία αναπτύχθηκε σταθερά από τον Harvey. Οι μελέτες του έβαλαν τις ουσιαστικές βάσεις για την επιστημονική μελέτη των νόσων από παθολογοανατόμους και μικροβιολόγους και τη θεραπεία τους με φάρμακα και χειρουργική. Ο ρυθμός ανακαλύψεων επιταχύνθηκε με τις νέες τεχνικές μελέτης του σώματος – π.χ. την αξονική τομογραφία, τους υπερήχους, τα ραδιοϊσότοπικά σπινθηρογραφήματα και την ενδοσκόπηση.

Τη σημερινή εποχή, για την εξέλιξη της έρευνας απαιτείται η συνεργασία επιστημόνων από διαφορετικά πεδία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα άρτιας συνεργασίας μεταξύ δύο επιστημών αποτελεί η Βιοϊατρική Τεχνολογία όπου η έρευνα στην Ιατρική προωθείται με τη βοήθεια της Μηχανολογίας. Όπως είναι φυσικό η Βιοϊατρική Τεχνολογία διαιρείται σε αρκετούς κλάδους, ο κλάδος όμως που θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία είναι αυτός της Εμβιομηχανικής.

Με τον όρο Εμβιομηχανική εννοούμε την εφαρμογή των γνώσεων της μηχανικής στο ανθρώπινο σώμα. Από θεματική άποψη, η Βιοϊατρική Τεχνολογία και η Εμβιομηχανική καλύπτουν διάφορες περιοχές, όπως είναι η προσομοίωση της φυσιολογίας του ανθρώπινου οργανισμού ( physiological processes), ρεολογικά φαινόμενα, μηχανική και ανάπλαση των οστών (ορθοπεδική, οδοντιατρική), εφαρμογή του ηλεκτρομαγνητισμού, επεξεργασία εικόνας, λήψη και επεξεργασία δεδομένων, σχεδιασμός και προσομοίωση τεχνητών οργάνων κ.α.

Ένα από τα πολύ σοβαρά νοσήματα που αποτελεί αντικείμενο της Εμβιομηχανικής είναι η οστεοαρθρίτιδα, η εκφύλιση δηλαδή των μηχανικών ιδιοτήτων του αρθρικού χόνδρου. Ασθενείς με αυτό το νόσημα παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα ακόμα και σε απλές για την καθημερινότητά μας κινήσεις, ενώ υποφέρουν και από έντονους πόνους. Η σύγχρονη Ιατρική δεν έχει καταφέρει μέχρι στιγμής να ανακαλύψει την αιτιοπαθογένεια της ασθένειας και έτσι δεν υπάρχει προς το παρόν κάποιο συγκεκριμένο φάρμακο που να αναστέλλει τη πορεία εκφύλισης του αρθρικού χόνδρου. Η μελέτη, όμως της ενδοκυτταρικής συμπεριφοράς του κάτω από το πρίσμα της Συστημικής Βιολογίας, σε συνδυασμό με τη μελέτη των

μηχανικών ιδιοτήτων του που μας προσφέρει η Εμβιομηχανική θα μας δώσει πολύτιμες πληροφορίες για την οστεοαρθρίτιδα.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα περιγράψουμε τη διαμόρφωση μίας μετρητικής διάταξης παραμόρφωσης κυλινδρικών δοκιμίων σε συνθήκες ερπυσμού. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της διάταξης αυτής είναι ότι θα δύναται να λάβει μετρήσεις της παραμόρφωσης πολλαπλών δοκιμίων υπό συμπίεση. Απώτερος στόχος είναι τα δοκίμια αυτά να είναι δίσκια αρθρικού χόνδρου τα οποία θα συμπιέζονται κάτω από ένα σταθερό φορτίο και η μετρητική διάταξη θα μας πληροφορεί για την αντίστοιχη παραμόρφωση. Το σημαντικό, όμως είναι η πολλαπλότητα των δοκιμίων. Έχοντας ικανοποιητικό αριθμό δοκιμίων να καταπονούνται ταυτόχρονα είναι πιο εύκολη και πιο αποτελεσματική η σύγκριση της συμπεριφοράς τους, δεδομένου ότι με βάση τις αρχές της Συστημικής Βιολογίας κάθε ένα δοκίμιο θα τροφοδοτείται με διαφορετικές πιθανές φαρμακευτικές παρεμβάσεις και έτσι η αποτελεσματικότητά τους θα είναι πιο εμφανής.

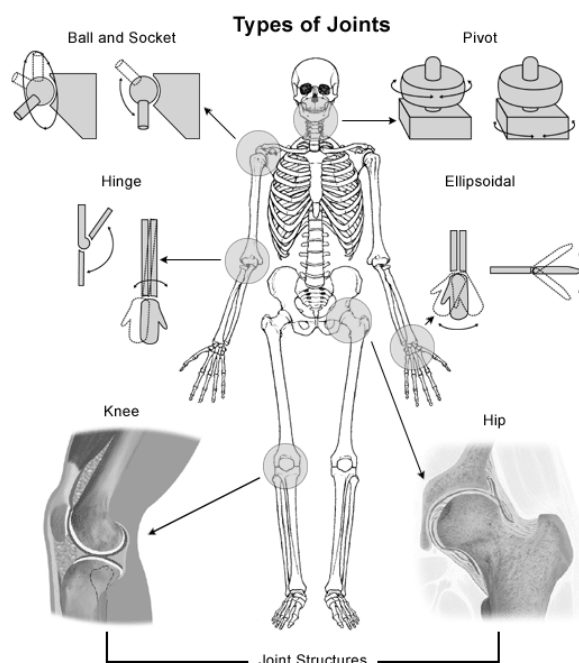
Στα πλαίσια της εργασίας μας, θα ασχοληθούμε με την σύλληψη της γενικής ιδέας των χαρακτηριστικών της διάταξης και των μονάδων που την απαρτίζουν. Επιπλέον θα εξετάσουμε κάποιες διαφορετικές λύσεις που απαντούν στις απαιτήσεις του προβλήματος και θα καταλήξουμε στις καταλληλότερες, με την υλοποίηση της μετρητικής διάταξης. Επίσης θα εξετασθούν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες καλείται να λειτουργήσει η διάταξη. Τέλος θα πραγματοποιηθεί μία μέτρηση παραμόρφωσης σε δοκιμή ερπυσμού ενός κυλινδρικού δοκιμίου με γνωστή μηχανική συμπεριφορά σε στατικές συνθήκες, ώστε να διαπιστωθούν οι δυνατότητές της.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Η Πάθηση της Οστεοαρθρίτιδας

## 1.1 Αρθρώσεις

Οι αρθρώσεις συνδέουν τα διάφορα οστά του ανθρώπινου σκελετού μεταξύ τους και γι' αυτό αποτελούν ένα πολύ σημαντικό και ζωτικό τμήμα του ανθρώπινου οργανισμού καθώς επιτρέπουν τις σχετικές κινήσεις των τμημάτων του σώματος μεταξύ τους. Υπάρχουν δύο τρόποι κατηγοριοποίησής τους. Ο πρώτος βασίζεται στην ελευθερία κίνησης την οποία οι αρθρώσεις επιτρέπουν και ο δεύτερος στο είδος των ιστών που τις αποτελούν.



Εικόνα 1.1: Οι βασικές αρθρώσεις του ανθρώπινου σώματος (cumc.columbia.edu)

Έτσι, σύμφωνα με το πρώτο τρόπο κατηγοριοποίησης, διακρίνουμε τις σταθερές αρθρώσεις ή ραφές που διατηρούν τα οστά συνδεδεμένα μεταξύ τους (πχ κρανίο), τις μερικώς κινητές αρθρώσεις που επιτρέπουν κάποια ευκαμψία (πχ σπονδυλική στήλη) και τις ελεύθερα κινητά αρθρώσεις που επιτρέπουν ευκαμψία σε πολλά επίπεδα, όπως ο ώμος με 5 βαθμούς ελευθερίας. Με βάση το είδος των ιστών τους, οι αρθρώσεις μπορούν να χωρισθούν σε τρεις τύπους. Τους ινώδεις, όπου τα οστά συνδέονται με πυκνό ινώδη συνδετικό ιστό (πχ τένοντες), τις χονδρικές όπου τα οστά συνδέονται με χόνδρο(πχ γόνατο) και τις υμενώδεις όπου οι δύο άκρες των οστών περιβάλλονται από ένα θύλακα πυκνού ινώδους ιστού.

Παρατηρώντας τη καθημερινότητά μας, βλέπουμε πως κάθε δραστηριότητά μας και κάθε κίνησή μας, προϋποθέτει την σωστή λειτουργία των αρθρώσεων. Άρα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι δυσλειτουργίες των αρθρώσεων μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές δυσχέρειες σε απλές και συνηθισμένες δραστηριότητες των ασθενών. Γι αυτό το λόγο οι παθήσεις των αρθρώσεων αποτελούν ένα σημαντικό κοινωνικό πρόβλημα αλλά ταυτόχρονα και μια πρόκληση για τη σύγχρονη επιστημονική κοινότητα.

## 1.2 Παθήσεις των αρθρώσεων

Οι διάφορες μορφές της αρθρίτιδας έχουν ως κοινά χαρακτηριστικά συμπτώματα τη πρόκληση ισχυρού πόνου, πρηξίματος και δυσκαμψίας στις αρθρώσεις, ανάλογα και με το στάδιο εξέλιξης της ασθένειας. Σε ένα δεύτερο επίπεδο μπορούν να οδηγήσουν σε παχυσαρκία, καρδιακά προβλήματα μέχρι και αναπηρία.

Υπάρχουν πάνω από 100 διαφορετικές μορφές αρθρίτιδας. Η πιο κοινή μορφή είναι η **οστεοαρθρίτιδα**, κατά την οποία *εκφυλίζεται ο χόνδρος*, δηλαδή περιορίζονται οι μηχανικές και άλλες ιδιότητές του και προκαλείται μετά από τραυματισμό ή μόλυνση της άρθρωσης ή λόγω της φθοράς του αρθρικού χόνδρου με το χρόνο. Εμφανίζεται σε μεγάλες αρθρώσεις του σώματος όπως το ισχίο ή το γόνατο. Επίσης κοινή είναι η **ρευματοειδής αρθρίτιδα**, η οποία είναι αυτοάνοσο νόσημα. Μέχρι στιγμής δεν είναι γνωστό για ποιο λόγο το ανοσοποιητικό σύστημα επιτίθεται στον αρθρικό χόνδρο, όπως και για την οστεοαρθρίτιδα δεν είναι πλήρως εξακριβωμένα τα αίτια εμφάνισής της, ενώ οι θεραπείες περιορίζονται στο να εξομαλύνουν τα συμπτώματα του πόνου. Η ρευματοειδής αρθρίτιδα εμφανίζεται συνήθως στα δάκτυλα, τους καρπούς, το γόνατο και τους αγκώνες και χαρακτηρίζεται από την παραμόρφωση που προκαλεί.

Στις εικόνες 1.2(α) και 1.2(β) φαίνονται ένα γόνατο με οστεοαρθρίτιδα και δάκτυλα με ρευματοειδή αρθρίτιδα αντίστοιχα. Είναι χαρακτηριστικό στην εικόνα 1.2(α), ότι στο φυσιολογικό γόνατο διακρίνεται ένα κενό στην ακτινογραφία μεταξύ των οστών του μηρού και της κνήμης το οποίο είναι ο αρθρικός χόνδρος, ενώ στο γόνατο με οστεοαρθρίτιδα φαίνεται ότι τα δύο οστά έρχονται σε επαφή. Αυτό γίνεται λόγω της μείωσης του πάχους του αρθρικού χόνδρου εξαιτίας της εκφύλισής του.



(α)  
Εικόνα 1.2: (α) γόνατο με οστεοαρθρίτιδα([www.mendmeshop.com](http://www.mendmeshop.com))  
(β) δάκτυλα με ρευματοειδή αρθρίτιδα([geekheartsscience.wordpress.com](http://geekheartsscience.wordpress.com))

Η εκφύλιση του χόνδρου και η ανάπτυξη της αρθρίτιδας είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα νοσήματα των αρθρώσεων που προσβάλλει ένα στους οκτώ Ευρωπαίους και σχεδόν το 50% των ατόμων ηλικίας άνω των 65 ετών. Στην πρόσφατη πανελλήνια επιδημιολογική έρευνα για τις ρευματικές παθήσεις στο γενικό πληθυσμό της χώρας μας, που οργανώθηκε και πραγματοποιήθηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα

Ρευματολογικών Ερευνών, βρέθηκε ότι ο συνολικός πληθυσμός προσβεβλημένος από συμπτωματική οστεοαρθρίτιδα, ανέρχεται στο 13,1% των ενηλίκων[1]. Μόνο στην Ελλάδα εκτιμάται ότι υπάρχουν 1.000.000 ασθενείς με οστεοαρθρίτιδα (13% των ενηλίκων) που αποτελεί την πιο συχνή πάθηση μετά την ισχαιμική καρδιοπάθεια (πηγές: Ορθοπαιδική και Τραυματολογική Εταιρία Μακεδονίας-Θράκης, Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας).

Η οστεοαρθρίτιδα είναι σημαντικά συχνότερη στις γυναίκες σε σύγκριση με τους άνδρες, ενώ η συχνότητά της αυξάνει σημαντικά με την πρόοδο της ηλικίας. Από όλες τις εντοπίσεις της συμπτωματικής οστεοαρθρίτιδας συχνότερη είναι η εκφυλιστική σπονδυλαρθροπάθεια (6,9%) και ακολουθούν η οστεοαρθρίτιδα του γόνατος (6%), των χεριών (2%) και του ισχίου (0,9%). Περίπου 20% των ασθενών με συμπτωματική οστεοαρθρίτιδα παρουσιάζουν δύο ή περισσότερες από τις παραπάνω εντοπίσεις (Ελληνικό ίδρυμα ρευματολογικών ερευνών, [www.elire.gr](http://www.elire.gr)).

Η κρισιμότητα αντιμετώπισης της ασθένειας έχει αποτελέσει κεντρικό ζήτημα στην Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (ΠΟΥ). Για τον λόγο αυτό, η ΠΟΥ έχει ανακηρύξει τη δεκαετία 2000-2010 ως "Δεκαετία Οστών και Αρθρώσεων".

### **1.3 Αντιμετώπιση της οστεοαρθρίτιδας**

#### **1.3.1 Σύγχρονη θεραπεία**

Μέχρι σήμερα, η αντιμετώπιση της οστεοαρθρίτιδας περιορίζεται σε θεραπείες που στόχο έχουν να μετριάσουν τα συμπτώματα της ασθένειας ή και να επιβραδύνουν την εξέλιξη της μέσω φαρμακευτικής ή μη αγωγής (απώλεια βάρους κτλ). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα χειρουργικής αντικατάστασης της άρθρωσης με τεχνητή -αρθροπλαστική- με εφαρμογή σε ασθενείς με οστεοαρθρίτιδα σε ισχίο ή γόνατο.

Αυτό το οποίο δεν έχει καταστεί εφικτό, και αποτελεί ερευνητικό στόχο της επιστημονικής κοινότητας, είναι η φαρμακευτική αναχαίτιση της εκφύλισης του χόνδρου. Για να γίνει αυτό καλύτερα κατανοητό θα πρέπει να αναφερθούμε, έστω επισκοπικά, στον ρόλο του αρθρικού χόνδρου και στο μηχανισμό εκφύλισής του.

#### **1.3.2 Ο ρόλος του αρθρικού χόνδρου**

Ο σκελετός του ανθρώπινου σώματος, πέρα από τις άλλες λειτουργίες του, είναι υπεύθυνος για την στήριξη του σώματος εναντίον της βαρύτητας αλλά και των μυών του σώματος. Κοινώς φέρει όλα τα φορτία τα οποία δέχεται το σώμα.

Οι αρθρώσεις, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, συνδέουν τα διάφορα οστά μεταξύ τους. Τα οστά όμως δεν είναι δυνατόν να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, καθώς οι δυνάμεις τριβής που θα αναπτύσσονταν θα προκαλούσαν φθορά στα οστά, όπως ακριβώς θα συνέβαινε κατά την έμφορτη επαφή μεταλλικών

αντικειμένων χωρίς λίπανση. Κάπως έτσι θα μπορούσε να περιγραφεί και ο πόνος που νιώθει ο ασθενής κατά την οστεοαρθρίτιδα.

Σε αυτό το σημείο παρεμβάλλεται ο αρθρικός χόνδρος. Στην άκρη κάθε οστού της άρθρωσης υπάρχει ένα λεπτό στρώμα χόνδρου, έτσι ώστε η επαφή να είναι χόνδρος με χόνδρο και όχι οστό με οστό. Έτσι, ο ρόλος του χόνδρου είναι να μην επιτρέπει την επαφή των οστών μεταξύ τους, να φέρει τα φορτία, ενώ λειτουργεί και ως λιπαντικό, κάτι που θα εξηγήσουμε παρακάτω.

### 1.3.3 Μηχανισμός εκφύλισης του χόνδρου

Όπως σε κάθε ιστό έτσι και στον χονδρικό, η ομοιόσταση του ιστού, δηλαδή η διατήρηση της δομής και των ιδιοτήτων του, καθορίζεται από μία λεπτή ισορροπία κυτταρικών μηχανισμών. Συνεπώς, η εκφύλισή του, που όπως αναφέρθηκε είναι ο περιορισμός των μηχανικών και άλλων ιδιοτήτων του, και η ανάπτυξη της οστεοαρθρίτιδας οφείλεται στην ανισορροπία αυτών των κυτταρικών μηχανισμών.

Οι μεταβολικές δραστηριότητες των κυττάρων οργανώνονται από μονοπάτια μεταγωγής σήματος. Ως μονοπάτι μεταγωγής σήματος ορίζεται μία αλληλουχία μετάδοσης μηνυμάτων μεταξύ βιομορίων (πρωτεϊνών), που ξεκινά από εξωκυτταρικά μόρια (π.χ., κυτταροκίνες, τροφικοί παράγοντες, κ.α.) και συνεχίζεται μέσα στο κύτταρο από ενδοκυτταρικές σηματοδοτικές πρωτεΐνες. Κάθε κύτταρο δέχεται πλήθος βιολογικών και μηχανικών ερεθισμάτων. Τα ερεθίσματα αυτά επάγουν σήματα προς πολύπλοκα και αλληλεπικαλυπτόμενα ενδοκυττάρια μονοπάτια σηματοδότησης. Επίσης, κάθε κύτταρο έχει μοναδικό σύστημα σηματοδότησης που καθορίζει και την απόκρισή του.

Ειδικά για τα κύτταρα του χόνδρου, η απόκριση του κυττάρου μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως α) καταβολική, όταν οδηγεί στην αποδόμηση του χόνδρου, β) αντι-καταβολική, όταν παρεμποδίζει τις δραστηριότητες αποδόμησης του χόνδρου και γ) αναβολική, όταν ενισχύει τις συνθετικές δραστηριότητες του ιστού. Κατά την ανάπτυξη της οστεοαρθρίτιδας, οι καταβολικές δραστηριότητες υποσκελίζουν τις αναβολικές με αποτέλεσμα την βαθμιαία φθορά του χόνδρου, η οποία διαρκεί πολλά έτη και καταλήγει στην πλήρη καταστροφή της άρθρωσης και την χειρουργική αντικατάστασή της με μία τεχνητή άρθρωση (αρθροπλαστική).

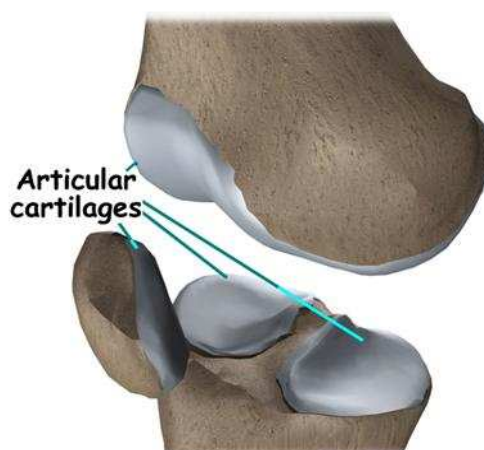
Η κατανόηση των κυτταρικών μηχανισμών του χονδρικού ιστού που οδηγούν στην ανάπτυξη της οστεοαρθρίτιδας είναι βασική για την ανάπτυξη νέων φαρμακευτικών θεραπειών, που στόχο θα έχουν την αναχαίτιση των καταβολικών δραστηριοτήτων του κυττάρου.

Η μοντελοποίηση των μονοπατιών μεταγωγής σήματος, η διακρίβωση καταβολικών μονοπατιών και η επιλογή κατάλληλων στόχων για το μπλοκάρισμά τους είναι αντικείμενο της **Συστημικής Βιολογίας (Systems Biology)**. Συνδυαζόμενα με τις μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων του χονδρικού ιστού, που είναι αντικείμενο της **Εμβιομηχανικής (Biomechanics)**, θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη πρωτοπόρων φαρμακευτικών παρεμβάσεων για την αντιμετώπιση της οστεοαρθρίτιδας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Εμβιομηχανική του Χόνδρου

### 2.1 Δομή της άρθρωσης

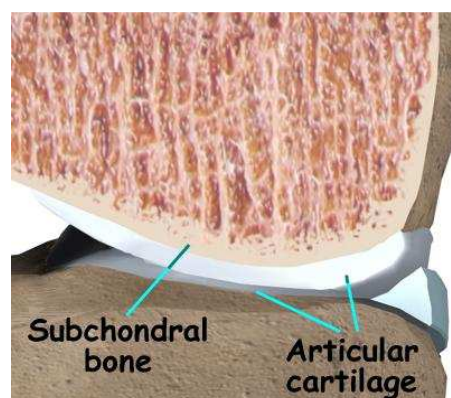
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο αρθρικός χόνδρος παρεμβάλλεται μεταξύ των οστών που συνδέονται μέσω της άρθρωσης, ώστε να αποτρέπεται η επαφή των οστών. Στην άκρη κάθε οστού υπάρχει ένα λεπτό στρώμα χόνδρου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1 [2].



Εικόνα 2.1: Αρθρικός χόνδρος γονάτου(www.eorthopod.com)

Ο χονδρικός ιστός συνδέεται με τα οστά με την έννοια ότι τα οστά είναι στην πραγματικότητα οστεοποιημένος χόνδρος. Κατά τη γέννηση ενός βρέφους πολύ μικρό μέρος του σκελετού είναι πραγματικά οστά. Τα περισσότερα απ' τα οστά είναι κατασκευασμένα από χόνδρο και μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται *οστεοποίηση* ο χόνδρος γίνεται πραγματικό οστό.

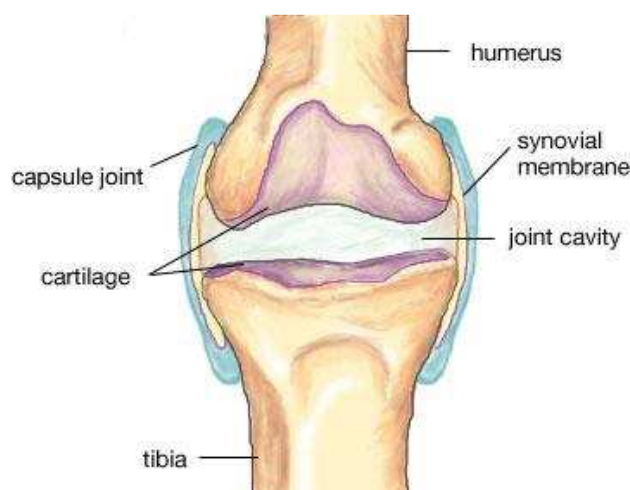
Η σχέση αυτή μεταξύ χόνδρου και οστού γίνεται φανερή και στη δομή μιας άρθρωσης. Μεταξύ του οστού και του χόνδρου υπάρχει το *υποχόνδριο οστό*, όπως βλέπουμε στην εικόνα 2.2. Στη πραγματικότητα όσο προχωρούμε από το οστό προς το χόνδρο, έχουμε μια βαθμιαία «μετάλλαξη» του οστού σε χονδρικό ιστό, που καταλήγει σε πλήρη αρθρικό χόνδρο. Η περιοχή αυτής της αλλαγής είναι το υποχόνδριο οστό.



Εικόνα 2.2: Οστό, υποχόνδριο οστό και χόνδρος(www.kneeandshouldersurgery.com)

Για να έχουμε μια πλήρη μακροσκοπική εικόνα της άρθρωσης μένει να αναφερθούμε στο αρθρικό υγρό (synovial fluid) μέσα στο οποίο βρίσκεται ο χόνδρος. Το αρθρικό υγρό συγκρατείται από τον αρθρικό υμένα (synovial membrane), όπως διακρίνουμε στην εικόνα 2.3, και παρέχει τα θρεπτικά συστατικά που έχει ανάγκη ο χονδρικός ιστός.

Παράλληλα, το αρθρικό υγρό παίζει σημαντικό ρόλο στη πολύ καλή λιπαντική λειτουργία της άρθρωσης. Η επιφάνεια του αρθρικού χόνδρου είναι λιγότερο λεία από ένα καλά κατασκευασμένο ρουλεμάν. Ωστόσο, έχει ένα χρήσιμο ρόλο στη λίπανση της άρθρωσης παγιδεύοντας ένα μέρος από το αρθρικό υγρό.



Εικόνα 2.3 Χόνδρος μέσα στο αρθρικό υγρό(www.aidmypain.com)

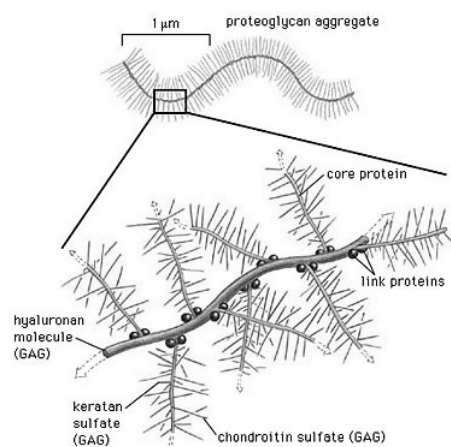
Οι καλές λιπαντικές ιδιότητες που έχει το αρθρικό υγρό θεωρείται ότι οφείλονται στην παρουσία υαλουρονικού οξέος και βλεννοπολυσακχαριτών, τα οποία αλλάζουν μορφή υπό συνθήκες φόρτισης.

Κάτω από τις συνήθεις εργαστηριακές συνθήκες είναι δύσκολο να μετρηθεί ο συντελεστής τριβής των αρθρώσεων. Οι Little, Freeman και Swanson περιέγραψαν την εξής διάταξη: Η φυσιολογική άρθρωση του ισχίου από ένα πτώμα τοποθετείται ανάποδα και η κεφαλή του μηριαίου πιέζεται μέσα στη θήκη της με την άσκηση βάρους. Το βάρος στην άρθρωση μπορεί να μεταβάλλεται ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών φορτίων. Όλη η μονάδα συμπεριφέρεται ως εκκρεμές, ενώ η άρθρωση παίζει το ρόλο του στροφέα. Έτσι είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή τριβής από το ρυθμό μείωσης του πλάτους της ταλάντωσης με το χρόνο. Ο συντελεστής τριβής εμφανίζεται ανεξάρτητος από το βάρος σε εύρος φορτίου μεταξύ 89 και 890N [3] και ανεξάρτητος του πλάτους των ταλαντώσεων. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λίπανση στο χόνδρο βοηθά στη μείωση του συντελεστή τριβής. Για όλες τις υγιείς αρθρώσεις που μελετήθηκαν ο συντελεστής τριβής βρέθηκε ότι είναι μικρότερος του 0.01, δηλαδή κατά πολύ μικρότερος του συντελεστή τριβής μεταξύ πάγου και ατσάλινης λεπίδας που αγγίζει το 0.03. Ο συντελεστής τριβής αυξάνεται σημαντικά όταν αφαιρεθεί το αρθρικό υγρό, κάτι που μαρτυρά το σημαντικό ρόλο του στη λίπανση της άρθρωσης.

## 2.2 Δομή του αρθρικού χόνδρου και μηχανικές ιδιότητες

Ο αρθρικός χόνδρος είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από απλούστερα βιολογικά υλικά, οπότε οι μηχανικές του ιδιότητες εξαρτώνται από τη σύσταση των υλικών αυτών. Οι ίνες κολλαγόνου αποτελούν περίπου το 60% με 70% του ξηρού βάρους του ιστού, ενώ οι πρωτεογλυκάνες περίπου το 30%. Όσον αφορά το σύνολο του ιστού το 70% με 85% είναι νερό.

Οι πρωτεογλυκάνες (proteoglycans) είναι πολυμερή που αποτελούνται από μεγάλες υδρόφιλες πολυσακχαρώδεις αλυσίδες, τις γλυκοαμιλογλυκάνες (GAGs), με την αρχιτεκτονική που φαίνεται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4 Πρωτεογλυκάνες και GAGs(www.rejuvenal.info)

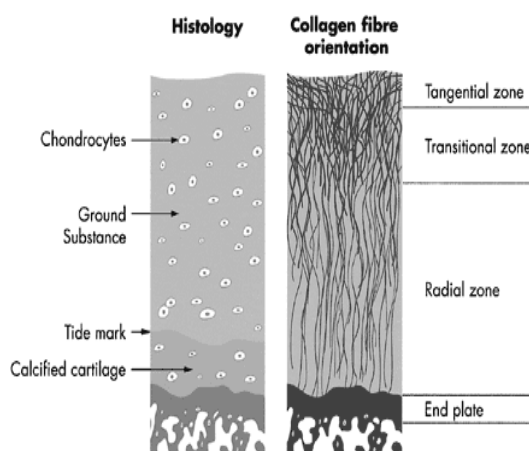
Επίσης υπάρχουν τα χονδροκύτταρα, τα οποία δεν παίζουν κάποιο άμεσο ρόλο στην στηρικτική ικανότητα του χόνδρου. Είναι, όμως, υπεύθυνα για την κατασκευή και τη συντήρηση των υπόλοιπων στοιχείων του χόνδρου και όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα ποικίλα βιολογικά και μηχανικά ερεθίσματα που δέχονται παίζουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στην εκφύλιση του χόνδρου.

Τις πρωτεογλυκάνες και τα χονδροκύτταρα συμπληρώνει το κολλαγόνο, που είναι μία ινώδης πρωτεΐνη, οι ίνες του οποίου είναι μια λευκωματώδης ουσία που εμφανίζεται ως νήματα οφιοειδούς μορφής. Έχουν μέγιστη εκτατότητα 50%, συμπεριφέρεται ως μη-γραμμικό ελαστικό υλικό ενώ εμφανίζει και πλαστικές παραμορφώσεις. Συνηθέστερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι  $3 \cdot 10^8 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$  για

100% επιμήκυνση και η τάση θραύσεως σε εφελκυσμό  $10^8 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$ . Στον αρθρικό χόνδρο η συντριπτική πλειοψηφία του κολλαγόνου είναι τύπου II και υπάρχουν και άλλου τύπου σε πολύ μικρό όμως ποσοστό.

Οι ίνες κολλαγόνου συνθέτουν μία πυκνή μήτρα, την *εξωκυτταρική μήτρα* (extracellular matrix) η ύπαρξη και η μορφή της οποίας συνιστούν σημαντικούς παράγοντες στη στηρικτική ικανότητα του χόνδρου. Μέσα σ' αυτή τη μήτρα συκκρατούνται τα χονδροκύτταρα και οι πρωτεογλυκάνες.

Καταρχάς υπάρχουν τέσσερις ζώνες μεταξύ της αρθρικής επιφάνειας και του υποχόνδριου οστού: η επιφανειακή εφραπτόμενη ζώνη, η ενδιάμεση ή μέση ζώνη, η βαθεία ή ακτινοβολούσα ζώνη, και τέλος η ασβεστογενής ζώνη (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5 Οι τέσσερις ζώνες του χόνδρου(www.kneejointurgery.com)

Στην επιφανειακή ζώνη, το πάνω μέρος της οποίας είναι η αρθρική επιφάνεια, οι ίνες κολλαγόνου είναι λεπτότερες απ' ότι στις βαθύτερες ζώνες και έχουν προσανατολισμό παράλληλο με την αρθρική επιφάνεια. Το πάχος αυτής της ζώνης είναι ίσο με 10%-20% του συνολικού πάχους του αρθρικού χόνδρου.

Στη μέση ζώνη οι ίνες είναι τυχαία προσανατολισμένες διαμορφώνοντας ένα δίκτυο και το πάχος αυτής της ζώνης είναι 40%-60% του συνολικού. Στη βαθεία ζώνη οι ίνες είναι ακτινικά προσανατολισμένες και κάθετες ως προς το οστό και το πάχος της ζώνης είναι περίπου ίσο με το 30% του συνολικού. Η ασβεστογενής ζώνη αποτελεί το σύνορο μεταξύ του χόνδρου και του υποχόνδριου οστού. Οι ίνες είναι προσανατολισμένες ακτινικά και στηρίζονται μέσα στο υποχόνδριο οστό.

Ο όγκος που καταλαμβάνεται από τα πρωτεογλυκανικά πολυμερή περιορίζεται από την εξωκυτταρική μήτρα του κολλαγόνου. Σε ένα υδατικό περιβάλλον, τα μόρια των πρωτεογλυκάνων έχουν αρνητικά φορτισμένες περιοχές που προκύπτουν από το θειικό άλας και τις καρβοξυλικές ομάδες τους. Σαν αποτέλεσμα, η αμοιβαία απόθεση αυτών των αρνητικών φορτίων αναγκάζει ένα πρωτεογλυκανικό μόριο να αυξηθεί και να καταλάβει έναν μεγάλο όγκο.

Η διόγκωση του πρωτεογλυκάνων ενάντια στις ίνες κολλαγόνου είναι ένα απαραίτητο στοιχείο στη μηχανική αντίδραση του χόνδρου. Όταν ο χόνδρος συμπιέζεται, οι αρνητικά χρεωμένες περιοχές ωθούνται πιο κοντά, αυξάνοντας την αμοιβαία αποθητική δύναμή τους και προσθέτοντας στη συμπιεστική ακαμψία του χόνδρου.

Η μηχανική αντίδραση του χόνδρου είναι επίσης έντονα συνδεδεμένη με τη ροή ρευστού μέσω του ιστού. Όταν ο χόνδρος παραμορφώνεται, ρευστό ρέει διαμέσου του πέρα από την αρθρική επιφάνεια. Εάν μια διαφορά πίεσης εφαρμοσθεί σε ένα τμήμα του χόνδρου, ρευστό διαρρέει επίσης τον ιστό. Αυτές οι παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι ο χόνδρος συμπεριφέρεται όπως ένα σφουγγάρι.



### 2.3 Το διαφοσικό πρότυπο του χόνδρου

Από όσα έχουμε ήδη αναφέρει για τη δομή του αρθρικού χόνδρου, συμπεραίνουμε ότι κατά τη μηχανική του καταπόνηση παίζουν ρόλο τόσο τα στερεά τμήματά του όσο και το αρθρικό υγρό. Γι αυτό το λόγο ο χόνδρος χαρακτηρίζεται ως **δισφασικό υλικό**, αποτελούμενο από τη στερεά και την υγρή φάση ενώ το μαθηματικό μοντέλο που τον διέπει λέγεται **δισφασικό πρότυπο του χόνδρου**. Τη στερεά φάση αποτελούν τα χονδροκύτταρα, οι ίνες κολλαγόνου, οι πρωτεογλυκάνες και λιπίδια, ενώ η υγρή αποτελείται από νερό.

Μηχανικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι τη στερεά φάση την αποτελούν μόνο οι ίνες κολλαγόνου. Λόγω της δομής τους (εξωκυτταρική μήτρα), σχηματίζεται ένα πορώδες σώμα το οποίο μοντελοποιείται ως γραμμικώς ελαστικό. Όπως περιγράψαμε προηγουμένως, ανάμεσα απ' αυτό το πορώδες υπό την επιβολή πίεσεως, ρέει ρευστό το οποίο δέχεται δυνάμεις αντίστασης προσφέροντας έτσι στην απόσβεση δυναμικών φορτίων.

Η μηχανική συμπεριφορά του χόνδρου περιγράφεται από ένα σύστημα τριών γραμμικών διαφορικών εξισώσεων (2.1),(2.2),(2.3), όπως αρχικά προτάθηκε από τον Mow [4], [5].

$$\nabla \cdot \sigma^s + \Pi^s = 0 \quad \text{εξίσωση ισορροπίας στερεού} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \sigma^f + \Pi^f = 0 \quad \text{εξίσωση ισορροπίας ρευστού} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot (\varphi^f v^f + \varphi^s v^s) = 0 \quad \text{εξίσωση συνέχειας} \quad (2.3)$$

όπου:  $\sigma^s$  ο τανυστής των τάσεων στη στερεά φάση,  
 $\sigma^f$  ο τανυστής των τάσεων στην υγρή φάση,  
 $\Pi^s$ ,  $\Pi^f$  είναι η μεταφορά ορμής στον όγκο του στερεού/υγρού αντίστοιχα εξαιτίας της ροής του ρευστού,  
 $\varphi^s$ ,  $\varphi^f$  το κατά όγκο ποσοστό στερεού και ρευστού αντίστοιχα,  
 $v^s$ ,  $v^f$  τα διανύσματα της ταχύτητας στερεού και ρευστού αντίστοιχα.

Ενώ οι καταστατικές εξισώσεις του υλικού (2.4),(2.5),(2.6) είναι:

$$\sigma^s = -\varphi^s p I + \lambda_s e^s I + 2\mu_s \varepsilon^s \quad (2.4)$$

$$\sigma^f = -\varphi^f p I \quad (2.5)$$

$$\Pi^s = K(v^f - v^s) \quad (2.6)$$

} καταστατικές εξισώσεις

όπου:  $p$  είναι η πίεση,  $I$  ο μοναδιαίος πίνακας,  
 $\lambda_s$ ,  $\mu_s$  οι ελαστικές σταθερές Lamé της πορώδους στερεάς φάσης,  
 $e^s$  η ποσοστιαία μεταβολή όγκου,  
 $\varepsilon^s$  ο τανυστής των παραμορφώσεων,  
 $K$  ο συντελεστής αντίστασης ροής.

Ειδικά για ροές με χαμηλές ταχύτητες (όπως αυτή που εξετάζεται στο παρόν) ο συντελεστής αντίστασης  $K$  συνδέεται με ένα πολύ σημαντικό μέγεθος που ονομάζεται *υδραυλική διαπερατότητα*  $\kappa$ , σύμφωνα με τον τύπο (2.7).

$$K = \frac{(\varphi')^2}{\kappa} \quad (2.7)$$

## 2.4 Υδραυλική διαπερατότητα $\kappa$

Η υδραυλική διαπερατότητα εισήχθη σαν μέγεθος για την περιγραφή της ροής ενός ρευστού διαμέσου ενός πορώδους σώματος (ροή νερού μέσα απ' το έδαφος) και συγκεκριμένα απ' τον Henry Darcy.

Ο νόμος του Darcy, που είναι μία έκφραση της αρχής διατήρησης της ορμής, βασίζεται στην αρχή ότι η μέση ταχύτητα ροής ( $V_{avg}$ ) ενός ρευστού διαμέσου του εδάφους είναι ανάλογη προς τη κλίση της πίεσης ( $\nabla P$ ). Η σταθερά αυτής της αναλογίας καλείται διαπερατότητα ( $\kappa$ ).

$$V_{avg} = \kappa \cdot \nabla P \quad (2.8)$$

Όπου η κλίση της πίεσης προκύπτει απ' τη σχέση

$$\nabla P = \frac{P_2 - P_1}{h} \quad (2.9)$$

Η εξίσωση (2.8) ισχύει για αργές, ιξώδεις ροές όπως η ροή ρευστού διαμέσου του εδάφους και η ροή ρευστού διαμέσου του πορώδους του χόνδρου. Τυπικά ισχύει για τιμές του αριθμού Reynolds μικρότερες του 1.

Η υδραυλική διαπερατότητα του αρθρικού χόνδρου κυμαίνεται μεταξύ  $10^{-15}$  και  $10^{-16} \text{ m}^4/\text{Ns}$ . Δηλαδή, εάν εφαρμοσθεί πίεση περί τα 210kPa, η μέση ταχύτητα του ρευστού διαμέσου του πορώδους θα είναι της τάξης των  $10^{-8} \text{ m/sec}$ .

Η τιμή που λαμβάνει η υδραυλική διαπερατότητα του χόνδρου ποικίλει ανάλογα με τη παραμόρφωση του ιστού και εξαρτάται και απ' το σημείο του ιστού που εξετάζεται. Όσο αυξάνει η παραμόρφωση του ιστού τόσο μειώνεται η τιμή της διαπερατότητας με αποτέλεσμα λιγότερο υγρό να ρέει απ' την αρθρική επιφάνεια. Επίσης, η διαπερατότητα παίρνει τη μέγιστη τιμή της κοντά στις κλειδώσεις επιτρέποντας στο ρευστό να ρέει σχετικά εύκολα, ενώ στην πιο βαθεία ζώνη η τιμή της είναι ελάχιστη δυσκολεύοντας περισσότερο τη ροή του ρευστού.

Έτσι, οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά του χόνδρου και συνεπώς μεγέθη που υποδεικνύουν την ικανότητά του να δέχεται φορτία, είναι:

- το μέτρο ελαστικότητας  $E$ ,
- ο λόγος του Poisson  $\nu$  και
- η υδραυλική διαπερατότητα  $\kappa$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Μέθοδος Μέτρησης Μηχανικών Ιδιοτήτων Χόνδρου**

### **3.1 Γενική περιγραφή**

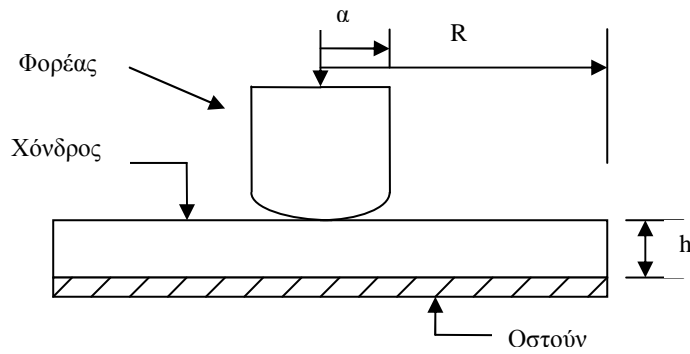
Κατά τη μελέτη της εκφύλισης του αρθρικού χόνδρου σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ικανότητα μέτρησης των μηχανικών του ιδιοτήτων. Αυτό ισχύει καθώς ο βαθμός εκφύλισής του, πέρα από τις βιολογικές παρατηρήσεις, μπορεί να υποδειχθεί και από τις μηχανικές ιδιότητες του ιστού (μέτρο ελαστικότητας κτλ). Άλλωστε μία προσπάθεια διακοπής της εκφυλιστικής διαδικασίας δε θα μπορούσε να μην περιλαμβάνει αποτυπώσεις της μηχανικής συμπεριφοράς του χόνδρου αφού εν τέλει, ζητούμενο είναι η ικανότητα του ιστού να δέχεται μηχανικά φορτία [6], [7].

Όπως αναφέραμε προηγουμένως ο αρθρικός χόνδρος είναι ένα διφασικό υλικό το οποίο περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.1)-(2.6). Για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων αυτών απαιτείται η δημιουργία πλέγματος και η κατάλληλη έκφρασή τους στους κόμβους αυτού. Εναλλακτικά, ο υπολογισμός της μηχανικής συμπεριφοράς του χόνδρου μπορεί να γίνει μέσω του ευρύτατα διαδεδομένου εμπορικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, όπου ο χόνδρος μοντελοποιείται ως ένα ποροελαστικό υλικό. Φυσικά αυτό ισχύει μόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, που ευτυχώς εκπληρώνονται από τις αναγκαίες πειραματικές δοκιμές.

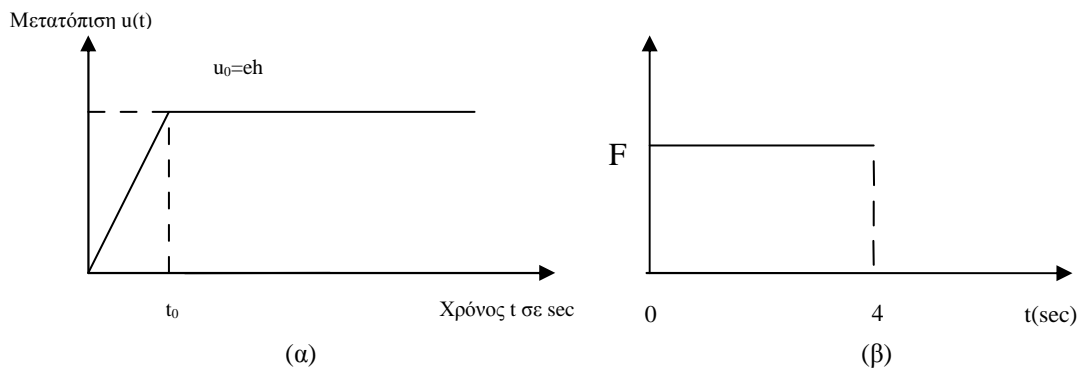
Έτσι η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων έχει ως εξής. Πρώτα γίνεται η δοκιμή συμπίεσης του χόνδρου σε μηχανική πρέσα και μετρίεται η αντίδραση του. Ακολούθως, γίνεται η προσομοίωση της προηγούμενης δοκιμής στο υπολογιστικό μοντέλο. Αυτό γίνεται εύκολα έχοντας γνώση του εύρους των συνήθων τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του χόνδρου. Τελικά επιλύεται το υπολογιστικό μοντέλο και λαμβάνεται η αντίστοιχη αντίδραση. Έτσι, μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής και της πειραματικής δοκιμής γίνεται ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του χόνδρου.

### **3.2 Πειραματική δοκιμή συμπίεσης**

Κατά την πειραματική δοκιμή συμπίεσης η κεντρική ιδέα βασίζεται στη κλασσική δοκιμή συμπίεσης. Γενικά, ένα κυλινδρικό στρώμα χόνδρου τοποθετήθηκε πάνω σε μία στεγανή άκαμπτη πλάκα, που αντιπροσωπεύει το οστόν, ενώ ένας άκαμπτος, πορώδης και χωρίς τριβή κυλινδρικός φορέας καταπονεί το στρώμα χόνδρου. Το γενικό σχήμα της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο σχήμα 3.1 όπου οι παράμετροι του σχήματος έχουν τιμές  $a = 4.5mm, R = 1.5mm, h = 1mm$ . Όσον αφορά την καταπόνηση δύναται να εφαρμοσθούν δύο περιπτώσεις φόρτισης, μία ερπυσμού και μία χαλάρωσης. Κατά τη χαλάρωση εφαρμόζεται στο δοκίμιο μία σταθερή μετατόπιση (σχήμα 3.2α) και μετράται το φορτίο αντίδρασης, ενώ κατά τον ερπυσμό εφαρμόζεται στο δοκίμιο μία σταθερή δύναμη (σχήμα 3.2β) και ακολούθως μετράται η μετατόπιση. Επίσης ο φορέας συμπίεσης μπορεί να είναι είτε επίπεδος είτε σφαιρικός.

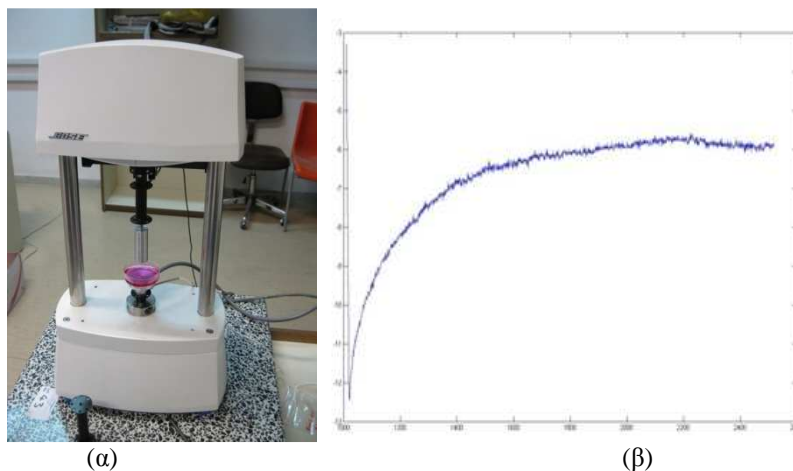


Σχήμα 3.1 Δοκιμή συμπίεσης με σφαιρικό φορέα



Σχήμα 3.2 Είσοδοι μετατόπισης και φορτίου σε χαλάρωση και ερπυσμό αντίστοιχα

Να σημειώσουμε ότι για την εκτέλεση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρομηχανική πρέσα ονομαστικού φορτίου 22N με την εμπορική ονομασία BOSE electroforce 3100, που φαίνεται στην εικόνα 3.1(α). Στην εικόνα 3.1(β) βλέπουμε τη καμπύλη του φορτίου αντίδρασης που προέκυψε από τη πειραματική δοκιμή χαλάρωσης. Η μορφή της καμπύλης είναι ίδια με αυτή που πήραμε από τη μοντελοποίηση της ίδιας δοκιμής, όπως θα δούμε παρακάτω. Η μέγιστη τιμή της αλλά και ο χρόνος που αυτή εμφανίζεται και ξεκινά η σταθεροποίησή της είναι διαφορετικά, όπως είναι φυσικό λόγω των διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δύο δοκιμών.

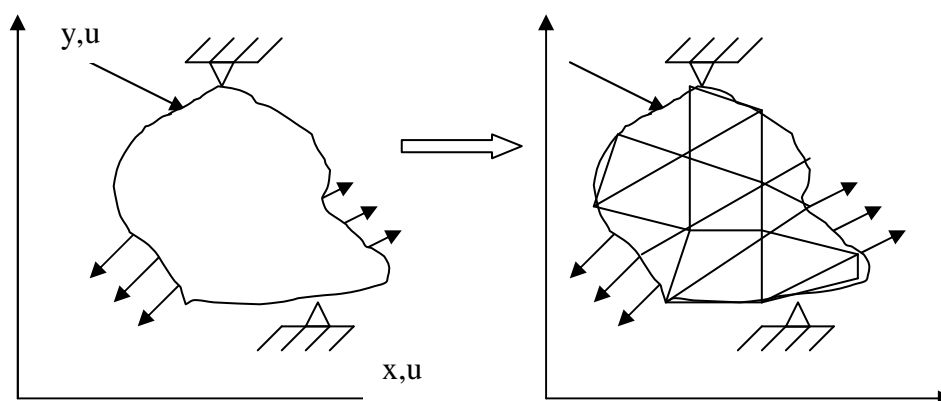


Εικόνα 3.1 BOSE electroforce 3100(α) και καμπύλη φορτίου αντίδρασης κατά τη πειραματική δοκιμή χαλάρωσης(β)

### 3.3 Μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

#### 3.3.1 Γενικά

Κεντρικό στοιχείο της μεθόδου είναι ο χωρισμός της κατασκευής σε έναν αριθμό περιοχών που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (σχήμα 3.3). Όσο περισσότερα είναι αυτά, τόσο ακριβέστερη είναι και η λύση που προκύπτει αλλά και τόσο περισσότερη υπολογιστική ισχύς απαιτείται. Άρα η επιλογή του αριθμού των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν δεν ορίζεται μονοσήμαντα, αλλά είναι μια συνάρτηση της απαιτούμενης ακρίβειας και ταχύτητας της λύσης και φυσικά των υλικών δυνατοτήτων σε υπολογιστική ισχύ [8].



Σχήμα 3.3 Χωρισμός κατασκευής σε πεπερασμένα στοιχεία[3]

Το προκύπτον σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται πλέγμα, ενώ η διαδικασία δημιουργίας τους πλεγματοποίηση. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το αρχικό πρόβλημα συνεχούς μέσου ανάγεται σε πρόβλημα πεπερασμένων βαθμών ελευθερίας, αφού όλες οι μεταβλητές, τα φορτία και οι οριακές συνθήκες εκφράζονται στους βαθμούς ελευθερίας των πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία διατηρούν τις ιδιότητες του αρχικού σώματος.

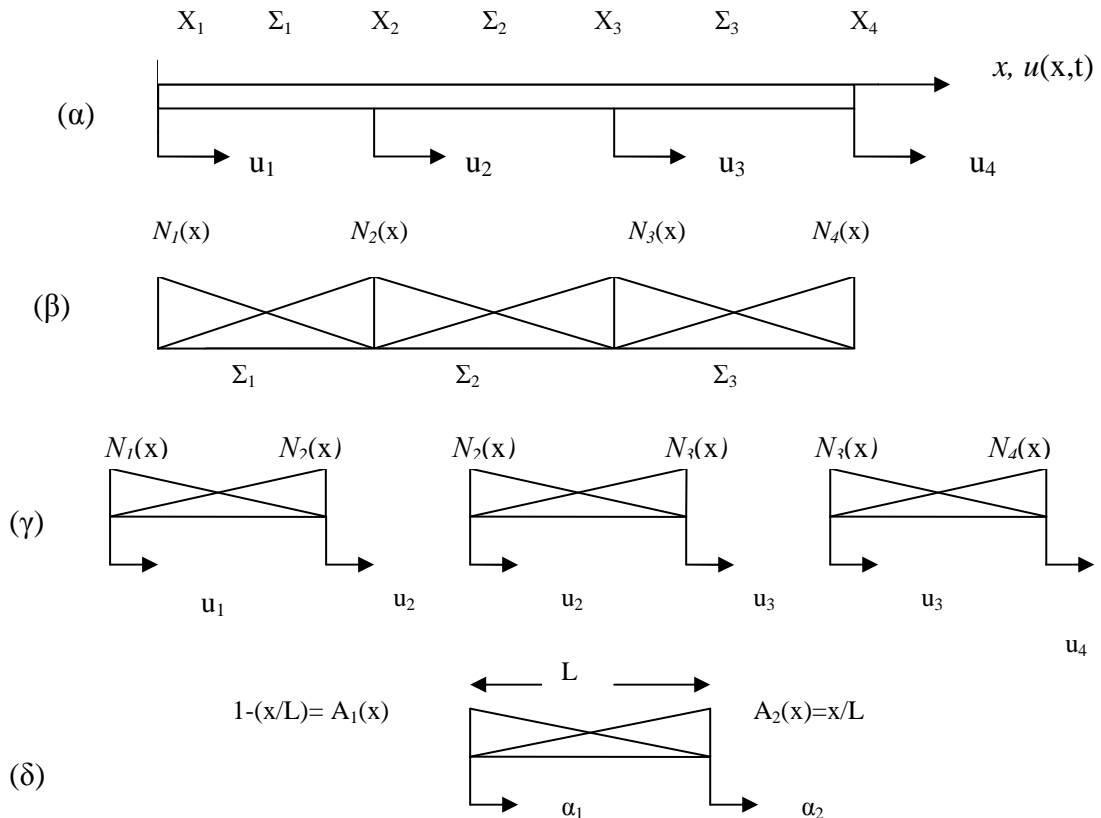
Ας πάρουμε για παράδειγμα ένα ελαστικό σώμα το οποίο καταλαμβάνει ένα χώρο  $D$ . Εάν ο χώρος είναι διδιάστατος τα πεπερασμένα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για τη διακριτοποίηση του προβλήματος θα είναι διδιάστατα, εάν είναι τρισδιάστατος θα έχουμε τρισδιάστατα στοιχεία κοκ. Σημειώνουμε ότι ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν περισσότερα τους ενός τύπου στοιχεία σε μία περίπτωση.

Χάριν ευκολίας υποθέτουμε ότι μας δίνεται μία ράβδος μήκους  $L$ , η οποία μπορεί να αναλυθεί ως μονοδιάστατο σώμα(Σχήμα 3.4α). Η ράβδος αυτή χωρίζεται σε  $N$  πεπερασμένα στοιχεία, ενώ τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους μέσω  $n$  σημείων τα οποία ονομάζονται κόμβοι, κάθε ένας από τους οποίους έχουν  $k$  βαθμούς ελευθερίας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε 3 στοιχεία, 4 κόμβους με 1 βαθμό ελευθερίας ο καθένας.

Αφού διακριτοποιηθεί η κατασκευή μας σε πεπερασμένους βαθμούς ελευθερίας  $i=1,2,\dots$  εισάγονται για κάθε έναν τυποποιημένες συναρτήσεις  $N_i(x)$  έτσι ώστε να ισχύει

$$u(x,t) = \sum_i N_i(x) \cdot u_i(t) \quad (3.1)$$

Η τυποποιημένη συνάρτηση κατανομής  $N_i(x)$  της εξίσωσης (3.1) είναι ίση με τη μονάδα για τη συντεταγμένη  $x_i$  (του βαθμού ελευθερίας  $u_i$  στον οποίο αναφέρεται



Σχήμα 3.4 Γραμμική ράβδος και ανάλυσή της σε πεπερασμένα στοιχεία[3]

η  $N_i(x)$ ) και ίση με το μηδέν για τις συντεταγμένες  $x_{i-1}$  και  $x_{i+1}$  των γειτονικών βαθμών ελευθερίας  $u_{i-1}$  και  $u_{i+1}$ . (σχήμα 3.4β).

Εάν τώρα θεωρηθούν ως πεπερασμένα στοιχεία  $\Sigma_i$  τα στοιχεία που ορίζονται από δύο οποιοσδήποτε συντεταγμένες  $x_{i-1}$  και  $x_{i+1}$ , τότε παρατηρείται ότι τόσο οι βαθμοί ελευθερίας  $u_{i-1}$  και  $u_{i+1}$ , όσο και οι συναρτήσεις κατανομής  $N_i(x)$  και  $N_{i+1}(x)$  κάθε στοιχείου  $\Sigma_i$  είναι επίσης τυποποιημένες (σχήμα 3.4γ). Έτσι προκύπτει τελικά ένα τυποποιημένο Πεπερασμένο στοιχείο (σχήμα 3.4δ), με τυποποιημένους βαθμούς ελευθερίας  $a_1(t)$  και  $a_2(t)$  και τυποποιημένες συναρτήσεις κατανομής  $A_1(x)$  και  $A_2(x)$ :

$$u(x,t) = A_1(x) \cdot a_1(t) + A_2(x) \cdot a_2(t), \quad A_1(x) = 1 - x/L, \quad A_2(x) = x/L \quad (3.2)$$

Με την εφαρμογή των εξισώσεων κατάστασης, ισορροπίας και ενεργειακών θεωρημάτων, όπως η Αρχή των Δυνατών Έργων μπορούμε να υπολογίσουμε τις μετατοπίσεις των κόμβων του προβλήματος και συνεπώς τις παραμορφώσεις και τις

τάσεις τους. Τέλος, με χρήση παρεμβολής μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά τις μετατοπίσεις κάθε σημείου του στοιχείου.

### 3.3.2 Δοκιμή συμπίεσης στο ABAQUS<sup>1</sup>

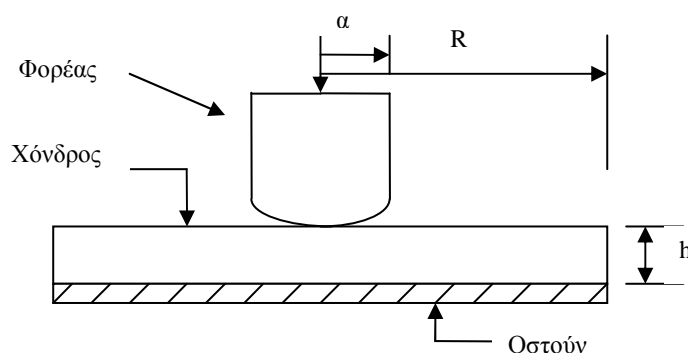
Το πακέτο λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων *ABAQUS* αποτελεί ένα ευρύτατα διαδεδομένο πακέτο CAE με χρήση στη κατασκευή αεροσκαφών και αυτοκινήτων και σε πολλούς τομείς ερευνητικού επιπέδου.

Σε κάθε ανάλυση με ένα πακέτο λογισμικού CAE, κεντρικό ρόλο παίζει η επιλογή του κατάλληλου στοιχείου που ταιριάζει καλύτερα στις απαιτήσεις του προβλήματος. Γενικά, τα πεπερασμένα στοιχεία ποικίλουν ανάλογα με τις διαστάσεις στις οποίες ορίζονται, τον αριθμό των κόμβων τους και των βαθμών ελευθερίας και τον τύπο της μεταβλητής τους (πχ μετατόπιση, θερμοκρασία κτλ). Επίσης υπάρχουν και κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως αξονοσυμμετρία, ποροελαστικότητα κα.

Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης χρησιμοποιείται η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Keenan et al (2009) [9]. Η γενικότερη φιλοσοφία του υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του αρθρικού χόνδρου βασίζεται στη σύγκριση πειραματικών δεδομένων με λύσεις που παρέχονται από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Η λύση που ταιριάζει καλύτερα στη πειραματική μέτρηση μας δίνει τις ζητούμενες τιμές.

#### 3.3.2.1 Γεωμετρία και καταπόνηση

Κατά την ανάπτυξη της μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές ερπυσμού σε ένα δοκίμιο αρθρικού χόνδρου σε 5 διαφορετικές περιοχές του. Η διάμετρος του δοκίμιου ήταν 10mm ενώ μετά το τέλος της δοκιμής μετρούνταν το πάχος του δοκίμιου με χρήση μετρητικής βελόνας.

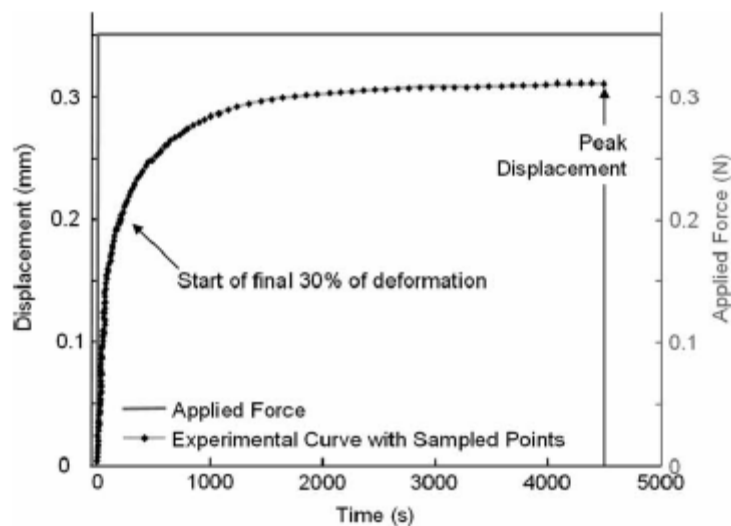


Σχήμα 3.5 Δοκιμή συμπίεσης με σφαιρικό φορέα

Ο φορέας συμπίεσης είχε διάμετρο 2mm με ακτίνα καμπυλότητας 127 $\mu$ m, ενώ ήταν πορώδης κατά 50%. Το φορτίο που επιβλήθηκε ήταν 0.35N και επιτεύχθηκε σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα ήταν 0.015N όπου και το δοκίμιο αφέθηκε να ηρεμήσει

<sup>1</sup> Η ανάλυση του κεφαλαίου 3.3.2 αφορά εξ ολοκλήρου τη μέθοδο που παρουσιάστηκε από τους Keenan et al(2009)

πριν επιβληθεί το σύνολο της δύναμης. Η πραγματοποίηση των δύο αυτών βημάτων έγινε για να εξασφαλισθεί η επαφή του φορέα με το δοκίμιο. Η συνολική διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων ήταν περίπου 4000sec. Στην εικόνα 3.2 φαίνεται η καμπύλη που προέκυψε από την δοκιμή ερπυσμού του δοκιμίου σε μία περιοχή του.



Εικόνα 3.2 Πειραματική δοκιμή ερπυσμού[9]

### 3.3.2.2 Διαδικασία υπολογισμού με πεπερασμένα στοιχεία

Κεντρικό στοιχείο της περιγραφόμενης μεθόδου υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του χόνδρου είναι ο ορισμός της χονδρικής επιφάνειας απόκρισης με παρεμβολή (cartilage interpolant response surface). Η επιφάνεια αυτή ορίζεται ως τετραδιάστατη, με μία διάσταση να είναι το πάχος του δοκιμίου και οι υπόλοιπες τρεις οι μηχανικές του ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson και υδραυλική διαπερατότητα). Η επιφάνεια αυτή χρησιμοποιείται για να μας δώσει λύσεις ανάλογα με τις τιμές εισόδου των τεσσάρων μεταβλητών της.

Κατά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε το ποροελαστικό μοντέλο το οποίο έχει αποδειχθεί ότι προσομοιάζει το γραμμικό διαφασικό μοντέλο για σχεδόν στατικές συνθήκες, μικρές παραμορφώσεις και σταθερή υδραυλική διαπερατότητα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τετραπλευρικά, αξονοσυμμετρικά συνεχή στοιχεία με διγραμμικές συναρτήσεις μορφής της μετατόπισης και της πίεσης πόρων.

Ο φορέας συμπίεσης μοντελοποιήθηκε ως μία πορώδης, στέρεη επιφάνεια με μικρή ακτίνα καμπυλότητας στη περιοχή επαφής με το μοντέλο του χόνδρου. Η διαπερατότητα του φορέα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της αρθρικής επιφάνειας του χόνδρου και έτσι το ρευστό που ρέει από έξω τον χόνδρο αντιμετωπίζει ελάχιστη αντίσταση από το φορέα. Η επιφάνεια επαφής φορέα και χόνδρου θεωρήθηκε ότι είχε στατικό συντελεστή τριβής ίσο με 0.26 όπως έχει προκύψει από παλαιότερες μελέτες.

Το φορτίο που επιβλήθηκε ήταν ίσο με 0.35N και έφτασε στη τιμή αυτή σε 12sec ενώ διατηρήθηκε σταθερό για άλλα 4000sec. Οι λύσεις αποκτήθηκαν μέσω του



προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS για σταθερή τιμή της διαπερατότητας.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η λογική της μεθόδου βασίζεται στη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις λύσεις του μοντέλου. Η λύση που πλησιάζει περισσότερο στη πειραματική καμπύλη θεωρείται ως αντιπροσωπευτική και είναι αυτή που μας δίνει τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του ιστού. Η λύση βασίζεται στις τιμές εισόδου των τεσσάρων μεταβλητών της επιφάνειας που ορίσαμε. Το εύρος των τιμών αυτών που θα χρησιμοποιηθούν για τις διάφορες λύσεις, προκύπτουν από τον πίνακα 3.1 και βασίζονται σε παλαιότερες μελέτες.

Parameter	Range of values
Aggregate modulus, $H_A$ (MPa)	0.3: 0.1: 0.5 and 0.65: 0.25: 1.9
Poisson's ratio, $\nu$	0.0: 0.05: 0.30
Permeability, $k$ ( $10^{-15} \text{ m}^4/\text{N s}$ )	0.1: 2.0: 8.1
Cartilage thickness (mm)	1.0: 0.5: 3.5

Πίνακας 3.1 Εύρος τιμών των τεσσάρων μεταβλητών[9]

Συνολικά προέκυψαν 1890 διαφορετικές λύσεις. Κάθε μία από αυτές χαρακτηρίζεται από μία καμπύλη ερπυσμού και αφορά σε ένα μόνο συνδυασμό των τεσσάρων μεταβλητών. Ακολουθώντας με χρήση παρεμβολής οι λύσεις αυτές έγιναν 1.779.750 με τιμές εισόδου από τον πίνακα 3.2. Κάθε καμπύλη αποτελούνταν από 75 σημεία.

Parameter	Range of values
Aggregate modulus, $H_A$ (MPa)	0.3: 0.025: 1.9
Poisson's ratio, $\nu$	0.0: 0.025: 0.30
Permeability, $k$ ( $10^{-15} \text{ m}^4/\text{N s}$ )	0.1: 0.1: 8.1
Cartilage thickness (mm)	1.0: 0.1: 3.5

Πίνακας 3.2 Εύρος τιμών μετά την παρεμβολή[9]

Έχοντας τις καμπύλες που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση, μπορούμε να προχωρήσουμε στη σύγκρισή τους με την πειραματική καμπύλη και έτσι να αποφανθούμε για τις μηχανικές ιδιότητες του ιστού. Να σημειώσουμε ότι πρακτικά η επιφάνεια που ορίσαμε προηγουμένως δεν είναι τετραδιάστατη αλλά τρισδιάστατη αφού το πάχος του δοκιμίου μετράται και άρα είναι γνωστό. Αυτό περιορίζει τη σύγκριση σε 68.445 λύσεις για κάθε τιμή του πάχους.

Η σύγκριση γίνεται με τη βοήθεια του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) κανονικοποιημένου ως προς τη μέγιστη τιμή της μετατόπισης[9]. Η λύση με τη μικρότερη τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος είναι αυτή που αντιπροσωπεύει καλύτερα τη πειραματική καμπύλη.

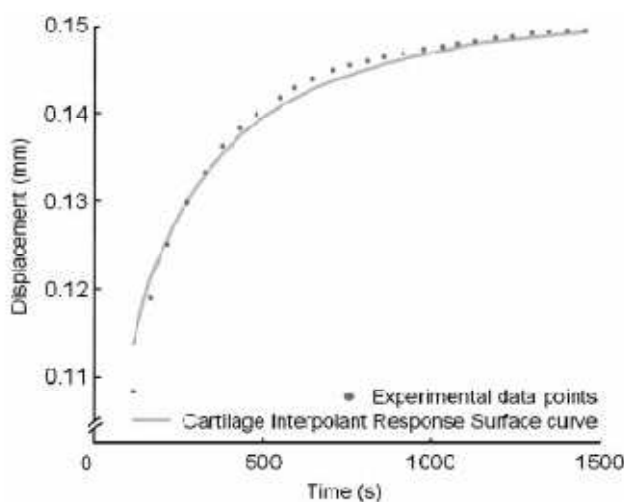
$$\text{Normalised\_RMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{n=1}^N (\text{Model}(t_n) - \text{Experimental}(t_n))^2}}{\text{Peak\_displacement}}$$

όπου N: ο αριθμός των σημείων  
n: κάθε ένα από τα σημεία

$t_n$ : ο χρόνος που αντιστοιχεί στο σημείο n  
 Model: η τιμή της μετατόπισης στο μοντέλο  
 Experimental: η πειραματική τιμή της μετατόπισης  
 Peak displacement: η πειραματική μέγιστη τιμή της μετατόπισης

Να σημειώσουμε επίσης ότι για τη σύγκριση των λύσεων του μοντέλου με τη πειραματική καμπύλη χρησιμοποιήθηκαν δεν χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία που αντιστοιχούν στην αρχική φόρτιση και αποτελούν περίπου το 70% της συνολικής μετατόπισης ή το 10% του συνολικού χρόνου. Έτσι η σύγκριση βασίζεται στο τελευταίο 30% της συνολικής μετατόπισης.

Στην εικόνα 3.3 φαίνονται μαζί το τελευταίο 30% της μετατόπισης των πειραματικών δεδομένων και της λύσης του μοντέλου για μία συγκεκριμένη τιμή του πάχους.



Εικόνα 3.3 Αποτελέσματα πειραμάτων και μοντελοποίησης[9]

Τελικά οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του αρθρικού χόνδρου προέκυψαν, μέσω της δοκιμής ερπυσμού, ως εξής:

- μέτρο ελαστικότητας 0.48-1.58MPa
- λόγος Poisson 0.00-0.05
- υδραυλική διαπερατότητα  $1.7-5.4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^4/\text{Ns}$

Αναλυτικά για τις 5 διαφορετικές περιοχές όπου εφαρμόσθηκε η δοκιμή ερπυσμού βλέπουμε τον πίνακα 3.3

Specimen test site	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	2.33	1.51	1.68	2.70	1.14
Aggregate modulus (MPa)	0.73	0.75	0.70	1.58	0.48
Poisson's ratio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
Permeability ( $10^{-15} \text{ m}^4/\text{Ns}$ )	2.7	5.4	3.7	2.8	1.7
Normalised RMSE	2.37%	0.374%	0.677%	2.38%	1.15%

Πίνακας 3.3 Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για τις πέντε περιοχές του δοκιμίου[9]

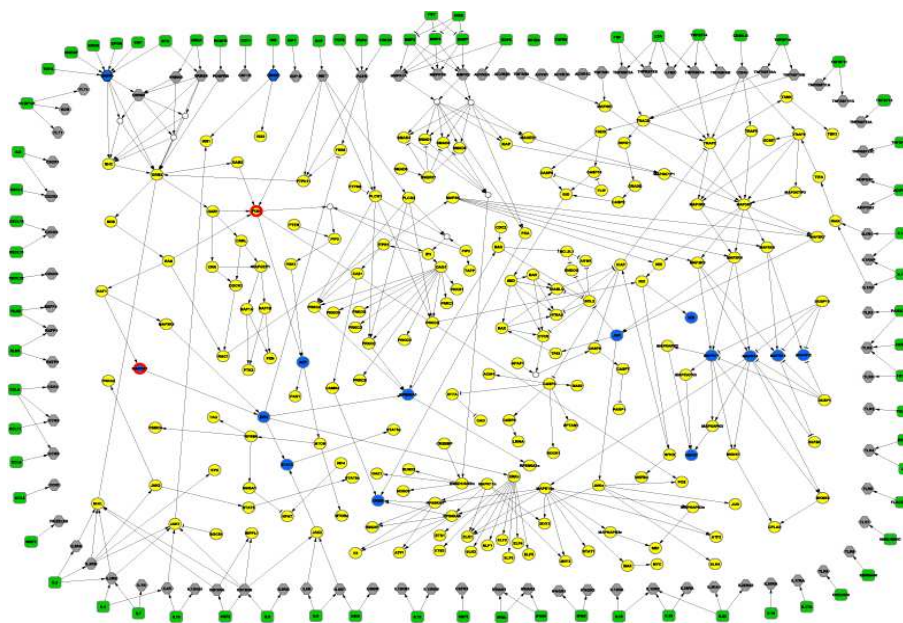
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Σχεδιασμός Μετρητικής Διάταξης**

### **4.1 Εισαγωγή**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράψαμε τη διαδικασία μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων ενός δοκιμίου αρθρικού χόνδρου. Παρότι η διαδικασία αυτή μας παρέχει ικανοποιητικά ακριβή αποτελέσματα, ωστόσο μας περιορίζει σε σημαντικό βαθμό. Εάν αναλογιστούμε τη γενικότερη φύση των πειραμάτων αλλά και το σκοπό στον οποίο υποτάσσονται, ο οποίος είναι η κατανόηση και αντιμετώπιση της οστεοαρθρίτιδας, διαπιστώνουμε πως απαιτείται μια διαφορετική προσέγγιση.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η μελέτη της οστεοαρθρίτιδας αποτελεί συνδυασμό και συνεργασία της Εμβιομηχανικής και της Συστημικής Βιολογίας. Υπό το πρίσμα της δεύτερης, γίνεται μία προσπάθεια καταγραφής των ενδοκυτταρικών καταβολικών μονοπατιών μεταγωγής σήματος τα οποία ευθύνονται για την εκφυλιστική διαδικασία του ιστού με απώτερο στόχο την ανάπτυξη φαρμακευτικών παρεμβάσεων για το μπλοκάρισμά τους [10].

Οι ενδοκυτταρικοί μηχανισμοί είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1 και με δεδομένη την ύπαρξη βιολογικών και μηχανικών ερεθισμάτων που δέχεται ένα κύτταρο του ιστού υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός περιπτώσεων που πρέπει να εξετασθούν. Απαραίτητο είναι να καταγράψουμε τη μηχανική συμπεριφορά του ιστού στις διάφορες αυτές περιπτώσεις, ώστε να διαπιστωθεί ο βαθμός εκφύλισής του και συνεπώς να απαντηθεί το ερώτημα εάν το εξεταζόμενο μονοπάτι μεταγωγής σήματος είναι καταβολικό ή όχι αλλά και σε ένα επόμενο στάδιο εάν επιτυγχάνεται το μπλοκάρισμά του.



Εικόνα 4.1 Χάρτης μεταγωγής σήματος ενδοκυτταρικών σηματοδοτικών πρωτεϊνών χονδροκυττάρου

Η μηχανική πρέσα που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις των πειραμάτων όταν εισάγεται η φιλοσοφία της

Συστημικής Βιολογίας με δεδομένο κιάλας ότι η μέτρηση ενός δοκιμίου μπορεί να διαρκέσει μέχρι και δύο εβδομάδες. Επίσης μας στερεί από ευελιξία στη διεξαγωγή των πειραμάτων και από δυνατότητα σύγκρισης των δοκιμίων μεταξύ τους.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι απαιτείται ένας νέος τρόπος μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων που θα ξεπερνά τα προβλήματα που αναφέραμε. Στόχος είναι η διαμόρφωση μίας μετρητικής διάταξης που να συνδυάζει την επιθυμητή ακρίβεια μέτρησης, σημαντικά μικρότερο χρονικό διάστημα πραγματοποίησης της και δυνατότητα παράλληλης μέτρησης πολλών δοκιμίων. Το πεδίο εφαρμογής της διάταξης αυτής, όπως είναι φυσικό, είναι η Εμβιομηχανική και πιο συγκεκριμένα η Ιστομηχανική (tissue engineering), όπου η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των ιστών αποτελεί κεντρικό ζήτημα.

## 4.2 Απαιτήσεις

Ξεκινώντας μια διαδικασία εύρεσης και επιλογής της κατάλληλης κατασκευαστικής λύσης πρέπει να θέσουμε τα δεδομένα του προβλήματος, τα οποία εν μέρει προκύπτουν και από την υπάρχουσα εμπειρία μοντελοποίησης και πειραμάτων και εν συνεχεία τις απαιτήσεις που η διάταξη πρέπει να πληροί [11].

### Δεδομένα

1. Δοκιμή συμπίεσης
2. Χρήση κοίλου φορέα συμπίεσης
3. Κυλινδρικό δοκίμιο αρθρικού χόνδρου διαμέτρου 3mm και πάχους 1mm
4. Παραμόρφωση δοκιμίου 100-200μm
5. Ασκούμενη δύναμη περί τα 0,16N
6. Διάρκεια μέτρησης περίπου 3000sec

Με βάση αυτά προκύπτουν οι απαιτήσεις της προς διαμόρφωση μετρητικής διάταξης. Να σημειώσουμε ότι για την ικανοποιητικά ακριβή μέτρηση απαιτούνται τουλάχιστον 20 βήματα ή αλλιώς, η προκύπτουσα καμπύλη αποτελεσμάτων πρέπει να έχει τουλάχιστον 20 σημεία.

### Απαιτήσεις

- Διακριτική ικανότητα μετρητικού οργάνου, συνυπολογίζοντας πιθανά σφάλματα και αποκλίσεις λόγω κατασκευαστικών ατελειών, ίση με **5μm**.
- Δυνατότητα σύνδεσης με προσωπικό υπολογιστή, για την ανάκτηση των αποτελεσμάτων και το γενικότερο χειρισμό της διάταξης.
- Δυνατότητα παράλληλης μέτρησης πολλαπλών δοκιμίων.
- Πραγματοποίηση μέτρησης διάρκειας 2 εβδομάδων

Ο ακριβής αριθμός των δοκιμίων δεν περιορίζεται από κάποια συγκεκριμένη απαίτηση. Η ανάγκη για ταυτόχρονη μέτρηση αυτών, προκύπτει από το πρόβλημα μείωσης του απαιτούμενου χρόνου μέτρησης ενός δοκιμίου. Εάν στον ίδιο χρόνο που

μετρούσαμε ένα δοκίμιο στη πρέσα μπορούμε να μετρήσουμε πχ 10 δοκίμια, θα έχουμε περίπου υποδεκαπλασιάσει τον χρόνο μέτρησης ενός δοκιμίου. Έτσι, με τη παράλληλη μέτρηση πολλαπλών δοκιμίων μπορούμε έμμεσα να μειώσουμε τον χρόνο μέτρησης ενός δοκιμίου, ενώ θα έχουμε και ευκολότερες συνθήκες σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Το μόνο που μπορεί να αναφερθεί ως περιορισμός έχει να κάνει με την τυποποίηση των δοχείων πηγαδιών (well plates) μέσα στα οποία είναι τοποθετημένα τα δοκίμια αρθρικού χόνδρου μαζί με το περιβάλλον υγρό τους. Στο οποίο περιέχονται οι απαραίτητες κάθε φορά πρωτεΐνες κα. Συγκεκριμένα, η παραγωγή των δοχείων αυτών γίνεται με 12,24,48,96 πηγάδια.

Στις απαιτήσεις δεν περιλαμβάνεται κάποιος περιορισμός χώρου κι αυτό επειδή η διάταξη δεν προβλέπεται, τουλάχιστον προς το παρόν, να τοποθετηθεί σε κάποιο ειδικό χώρο για τη διεξαγωγή των πειραμάτων σε συγκεκριμένο περιβάλλον. Έτσι, τα ζητήματα χώρου εξαρτώνται πλήρως από τη γεωμετρία της ίδιας της διάταξης και θα ληφθούν υπόψη ταυτόχρονα με τη διαμόρφωσή της.

### **4.3 Γενική κατασκευαστική ιδέα**

Μέχρι στιγμής δεν έχουμε αναφερθεί καθόλου στο είδος της καταπόνησης του δοκιμίου που θα εφαρμοσθεί για τις πειραματικές δοκιμές. Όπως είδαμε, στην ηλεκτρομηχανική πρέσα εφαρμόστηκε μόνο η δοκιμή χαλάρωσης. Εκεί ο επίπεδος φορέας επέβαλλε στο δοκίμιο μία μετατόπιση και με χρήση δυναμόμετρου, το οποίο βρισκόταν κάτω ακριβώς από το δοχείο του δοκιμίου, μετρούνταν το φορτίο αντίδρασης.

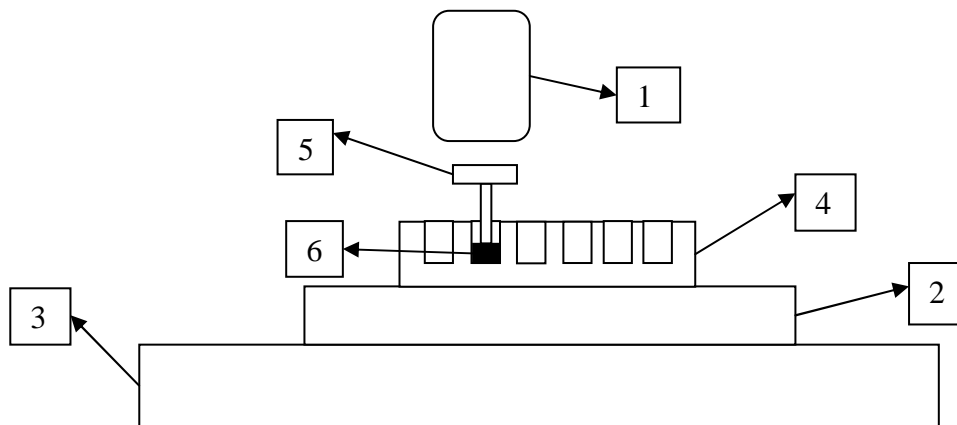
Είναι δεδομένο λοιπόν, ότι εάν στην νέα διάταξη εφαρμόσουμε τη δοκιμή χαλάρωσης χρειαζόμαστε ένα τρόπο ώστε να επιβάλλουμε την αρχική μετατόπιση με κάποια σχετική ακρίβεια και φυσικά έναν αισθητήρα δύναμης. Αντίθετα, εάν εφαρμόσουμε την δοκιμή ερπυσμού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την δύναμη βαρύτητας του ίδιου του φορέα συμπίεσης ως είσοδο και να μετρήσουμε τη μετατόπιση κάτι που σε γενικές γραμμές είναι ευκολότερο από το να μετρήσουμε δύναμη. Εάν υπολογίσουμε κιόλας ότι για τη δοκιμή χαλάρωσης θα χρειαζόμασταν τη δυνατότητα σχετικής κίνησης μεταξύ δοχείου και δυναμόμετρου λόγω των πολλαπλών δοκιμίων, τότε αντιλαμβανόμαστε ότι η πολυπλοκότητα αυτής της περίπτωσης είναι αρκετά μεγάλη. Έτσι, καταλήγουμε στην εφαρμογή της **δοκιμής ερπυσμού**.

Παράλληλα, λόγω των πολλαπλών δοκιμίων πρέπει να έχουμε τη δυνατότητα παράλληλης μέτρησης αυτών με έναν αισθητήρα, άρα χρειαζόμαστε σχετική κίνηση μεταξύ αισθητήρα και δοκιμίων. Επιγραμματικά να αναφέρουμε ότι με ακίνητο τον αισθητήρα θέλουμε κίνηση σε δύο άξονες των δοκιμίων. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα με χρήση βηματικών κινητήρων αλλά θα αναφερθούμε αναλυτικά σε επόμενο στάδιο της υλοποίησης της διάταξης. Έχοντας καταλήξει στο τύπο της καταπόνησης που θα εφαρμόσουμε, μπορούμε να αναφέρουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της διάταξης.

1. Αισθητήρας μετατόπισης
2. Μηχανισμός σχετικής κίνησης μεταξύ δοκιμίων και αισθητήρα

3. Βάση της διάταξης
4. Δοχείο δοκιμίων (well plate)
5. Φορέας συμπίεσης
6. Δοκίμιο

Η γενική ιδέα της διάταξης φαίνεται στο σχήμα 4.1. Το δοχείο των δοκιμίων είναι τοποθετημένο πάνω στο μηχανισμό που προσφέρει την σχετική κίνηση αυτού και του αισθητήρα μετατόπισης. Έτσι μπορούμε κάθε φορά μετακινώντας το δοχείο των δοκιμίων να θέτουμε το επιθυμητό δοκίμιο προς μέτρηση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόμενη μας δίνει τη δυνατότητα να μετράμε παράλληλα πολλαπλά δοκίμια. Ο αισθητήρας βρίσκεται ακριβώς πάνω από τα δοκίμια και τους φορείς συμπίεσης. Έτσι, μετρώντας τη μετατόπιση του φορέα κάθε φορά στην ουσία μετράμε τη παραμόρφωση του δοκιμίου.



Σχήμα 4.1 Γενική ιδέα της διάταξης

1. Αισθητήρας μετατόπισης 2. Μηχανισμός σχετικής κίνησης μεταξύ δοκιμίων και αισθητήρα 3. Βάση της διάταξης 4. Δοχείο δοκιμίων (well plate) 5. Φορέας συμπίεσης 6. Δοκίμιο

#### **4.4 Πιθανές λύσεις στο πρόβλημα του αισθητήρα**

Όπως αναφέραμε προηγούμενα, ο αισθητήρας πρέπει να έχει διακριτική ικανότητα μέτρησης ίση με 5μm. Με τον αισθητήρα αυτό, μετρώντας κάθε φορά την απόστασή του από την πάνω διατομή του φορέα συμπίεσης, στην ουσία μπορούμε να εξάγουμε την μεταβολή της θέσης του φορέα και άρα την μετατόπιση και την παραμόρφωση του δοκιμίου. Επίσης σημαντικό είναι ότι δεν πρέπει να υπάρχει επαφή με το στόχο (target) μέτρησης και δει, με την πάνω διατομή του φορέα συμπίεσης κι αυτό γιατί η παραμικρή επαφή του αισθητήρα με το φορέα θα άλλαζε σημαντικά τις συνθήκες του πειράματος με τρόπο σχετικά αβέβαιο και άρα μη προβλέψιμο. Παρακάτω παρατίθενται οι λύσεις που εξετάστηκαν στο πρόβλημα του αισθητήρα.

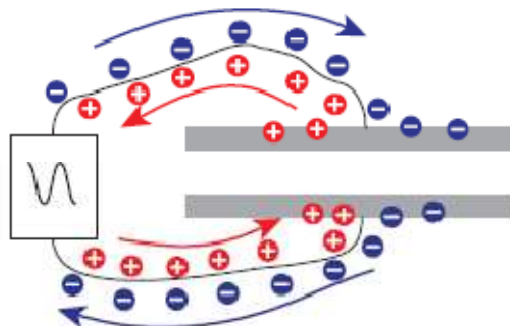
#### 4.4.1 Καπασιτόμετρα

Ο πρώτος τύπος αισθητήρα απόστασης ο οποίος εξετάστηκε ήταν το **καπασιτόμετρο** (capacitive sensors). Όπως ίσως γίνεται φανερό και από το όνομά του, ο αισθητήρας αυτός εκμεταλλεύεται τις φυσικές αρχές των πυκνωτών ηλεκτρικού φορτίου για να υπολογίσει απόσταση και άλλα μεγέθη, και συγκεκριμένα τον ορισμό της χωρητικότητας τους.

##### 4.4.1.1 Φυσικές και τεχνολογικές αρχές

Όταν σε δύο επίπεδες παράλληλες μεταλλικές ή γενικά αγώγιμες πλάκες εφαρμοσθεί μία διαφορά τάσης τότε δημιουργείται το φαινόμενο του πυκνωτή. Η τάση που εφαρμόζεται στις δύο πλάκες προκαλεί την αναδιάταξη των φορτίων στο εσωτερικό κάθε πλάκας ανάλογα με την πολικότητα της κάθε πλάκας. Τότε δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των δύο πλακών με αποτέλεσμα τα θετικά και αρνητικά φορτία του εσωτερικού μέσου των δύο πλακών να συλλέγονται στην αντίστοιχη πλάκα [12].

Όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι εναλλασσόμενη, περίπτωση που περιλαμβάνει και τα καπασιτόμετρα, προκαλείται μία συνεχής αλλαγή της πολικότητας του πυκνωτή (εικόνα 4.2). Η κίνηση αυτή των φορτίων δημιουργεί ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο είναι και αυτό που ανιχνεύει ο αισθητήρας.



Εικόνα 4.2 Πυκνωτής με εναλλασσόμενη τάση [12]

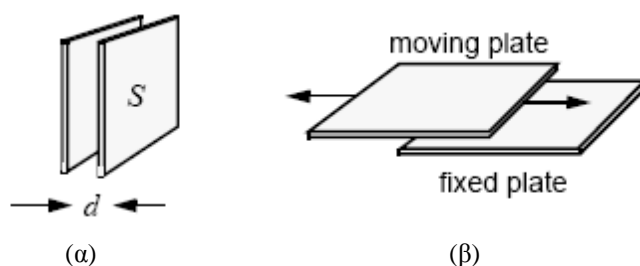
Όσον αφορά την περίπτωση των δύο επίπεδων παράλληλων πλακών που είναι και η τυπική περίπτωση πυκνωτή, η χωρητικότητα δίνεται από έναν πολύ βολικό για τη περίπτωσή μας τύπο (4.1) [13]

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.1)$$

- όπου C είναι η χωρητικότητα
- A η επιφάνεια των δύο πλακών
- $\epsilon_r$  η διηλεκτρική σταθερά του μέσου του διακένου μεταξύ των πλακών
- $\epsilon_0$  η ηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
- d το διάκενο μεταξύ των πλακών

Σε τυπικές περιπτώσεις μέτρησης απόστασης με καπασιτόμετρα, ο αισθητήρας έχει μορφή κυλινδρικού προβόλου και παίζει το ρόλο της μίας πλάκας ενώ ο στόχος της άλλης. Όπως βλέπουμε και στον τύπο (4.1), η χωρητικότητα μεταξύ παράλληλων επιπέδων πλακών εξαρτάται από την επιφάνεια των πλακών, το διάκενο μεταξύ τους και το μέσο του διακένου. Άρα κάποια μεταβολή της χωρητικότητας οφείλεται σε μεταβολή των τριών αυτών χαρακτηριστικών. Έτσι μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις μέτρησης.

- Μεταβολή της απόστασης  $d$  (εικόνα 4.3α)
- Μεταβολή της επιφάνειας  $A$  (εικόνα 4.3β)
- Μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς



Εικόνα 4.3 Περιπτώσεις μεταβολής της χωρητικότητας πυκνωτή παράλληλων πλακών [13]

#### 4.4.1.2 Εφαρμογή στο πρόβλημα

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η συνολική αναμενόμενη μετατόπιση του φορέα συμπίεσης λόγω της παραμόρφωσης του δοκιμίου θα είναι 100-200 $\mu\text{m}$ . Επίσης, η μέτρηση θέλουμε να γίνει με ανάλυση 5 $\mu\text{m}$ . Τέλος, η επιφάνεια-στόχος θα είναι μεταλλική διαμέτρου 9mm.

Για την σωστή λειτουργία του αισθητήρα είναι απαραίτητος ο εξοπλισμός με κάποιο κατάλληλο *controller* στο οποίο θα συνδέεται ο αισθητήρας. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η μέτρηση μεταφράζεται σε τάση, την οποία δέχεται ο *controller* και μας δίνει την μετρούμενη απόσταση.

Για την πληρέστερη επισκόπηση του θέματος εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις αισθητήρων.

- Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε ήταν το σύστημα **capaNCDT 6100**

Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν αισθητήρα, ένα καλώδιο που συνδέει τον αισθητήρα με το *controller*, το *controller*, ένα καλώδιο σύνδεσης με το τροφοδοτικό και το τροφοδοτικό [14].

Το *controller* του συστήματος είναι μονοκάναλο (single-channel), δηλαδή υποστηρίζει μόνο έναν αισθητήρα (εικόνα 4.4). Η έξοδος είναι σε Volts και συγκεκριμένα 0-10V. Όσον αφορά τον αισθητήρα, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής από ένα σύνολο με διαφορετικά χαρακτηριστικά (πίνακας 4.1).





Εικόνα 4.4 Το controller του συστήματος capaNCDT 6100

Specification		Sensor								
		CS02	CS05	CS1	CS1HP <sup>1)</sup>	CS2	CS3	CS5	CS10	
Measuring range	mm	.2	.5	1	1	2	3	5	10	
	inch	.008	.02	.04	.04	.08	.12	.2	.4	
Extended range <sup>2)</sup>	mm	.4	1	2	2	4	5	10	20	
	inch	.016	.04	.08	.08	.16	.24	.4	8	
Linearity	standard <math>\leq 0.3\% \text{ FSO}</math>	$\mu\text{m}$	0.6	1.5	3	3	6	9	30	
	tuned <sup>3)</sup> <math>\leq 0.1\% \text{ FSO}</math>	$\mu\text{m}$	0.2	0.5	1	1	2	3	10	
Resolution		<math>\leq 0.016\% \text{ FSO}</math>								
Sensor outer diameter	mm	8	8	10	10	20	30	40	50	
	inch	.26	.31	.39	.39	.78	1.17	1.56	2.34	
Weight	g	2	12	7.1	7.1	51	95	120	230	
Active measuring area	Diameter	mm	2.3	3.9	5.5	5.5	7.9	9.8	12.6	17.8
		inch	.09	.15	.21	.21	.31	.38	.48	.69
Guard ring width	mm	1	1.4	1.5	1.5	4	6.1	11.8	18.1	
	inch	.04	.05	.06	.06	.16	.32	.46	.71	
Mini. diameter of target	mm	5	7	9	9	17	27	37	57	
	inch	.2	.3	.36	.36	.7	1.1	1.5	2.3	
Temperature stability	Sensors	<math>\leq 0.01\% \text{ FSO} / ^\circ\text{C}</math>								
	Controller	<math>\leq 0.03\% \text{ FSO} / ^\circ\text{C}</math>								
Sensitivity	W/mm	50	20	10	10	5	3.33	2	1	
	W/inch	1270	508	254	254	127	83.68	50.8	25.4	
Output	Standard Option I	0 + 10 V								
		Resistance min. 1.2 k Ohm / Capacitance max. 1 nF 4 + 20 mA / load max. 400 Ohm								
Power supply		24 VDC / 85 mA (9...35 VDC) or $\pm 15\text{V} / \pm 55 \text{ mA}$								
Bandwidth		10 Hz (-3 dB) / 2 kHz <sup>4)</sup> (-3 dB) (switchable)								
Temperature range	Sensors and cables	+50 to +150 °C (+50 to +300 °F)								
	Controller	+10 to +50 °C (+50 to +125 °F)								
Sensor ambient air humidity		5 to 95 % (non condensing)								
Electromagnetic compatibility EMC		EN 50081-1 Spurious emission EN 50082-2 Immunity to interference <sup>5)</sup>								
Protection class	Sensors	IP 54								

FSO = Full Scale Output

1  $\mu\text{m}$  = 1 micron

1) INVAR sensor

2) Factory setting

3) Controller and sensor matched and calibrated

4) Factory default setting

5) Uncertainty of measurement: Immunity to Interference / electromagnetic fields acc. to EN 50082-2 max. 1 %

Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά [14]

Ως καταλληλότερος για την περίπτωση μας θεωρήθηκε ο αισθητήρας CS1, με εύρος μέτρησης 1mm, ανάλυση μέτρησης 0.015% FSO δηλαδή 0.15μm και ελάχιστη διάμετρο στόχου 9mm. Τόσο το εύρος όσο και η ελάχιστη διάμετρος είναι κατάλληλα για τη μέτρηση, ενώ η ανάλυση αυτής είναι υπεραρκετή ίσως και υπερβολική. Όσον αφορά τη κοστολόγηση, το κόστος του συστήματος ήταν περίπου 3200€.

- Η δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε ήταν το σύστημα **CD-1 Compact Driver**.

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει επίσης έναν *controller* μονοκάναλο (εικόνα 4.5), ενώ ο αισθητήρας πάλι μπορεί να επιλεγεί από μία λίστα (πίνακας 4.2) [15], [16].



Εικόνα 4.5 Controller του συστήματος CD-1

Sensing Area	Min. Target Ø	Ultrafine (Elite Series Only)					Fine					Standard					Extended (Elite Series Only)								
		Range	Near Gap	Resolution*		Lin.*	Range	Near Gap	Resolution*		Lin.*	Range	Near Gap	Resolution*		Lin.*	Range	Near Gap	Resolution*		Lin.*				
Body Options	mm inch	μm mil	μm mil	BW Hz	nm μm	%FS.	μm mil	μm mil	BW Hz	nm μm	%FS.	μm mil	μm mil	BW Hz	nm μm	%FS.	μm mil	μm mil	BW Hz	nm μm	%FS.				
F1	0.8 0.03	—	—	—	—	—	10 0.4	20 0.8	100 6k	1.1 1.5	0.04 0.06	0.25	50 2.0	50 2	100 6k	3.8 5.0	0.15 0.20	0.30	80 3.0	60 2.5	100 6k	5.8 9.0	0.27 0.36	0.85	
C3, C5, C6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
E1	1.0 0.04	—	—	—	—	—	25 1.0	75 3.0	100 6k	3.0 4.0	0.12 0.16	0.15	100 4.0	100 4	100 6k	7.5 10	0.30 0.40	0.15	—	—	—	—	—	—	
C3, C5, C6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
D	2.5 0.10	10 0.4	20 0.8	100 15k	0.2 0.4	0.01 0.02	0.15	50 2.0	75 3.0	100 15k	1.0 2.0	0.04 0.08	0.15	250 10.0	125 5	100 15k	4.5 9	0.18 0.35	0.10	500 20.0	125 5	100 15k	9.0 18.0	0.36 0.71	0.15
C3, C5, C6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
C	2.3 0.09	10 0.4	20 0.8	100 15k	0.2 0.4	0.01 0.02	0.20	50 2.0	75 3.0	100 15k	1.2 2.4	0.05 0.09	0.15	250 10.0	125 5	100 15k	5.0 10	0.20 0.40	0.10	500 20.0	125 5	100 15k	9.0 18.0	0.36 0.71	0.20
C23, C24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
B	4.1 0.16	—	—	—	—	—	—	50 2.0	125 5.0	100 15k	1.0 2.0	0.04 0.08	0.20	500 20.0	250 10	100 15k	5.0 10	0.20 0.40	0.15	1250 50.0	250 10	100 15k	20.0 40.0	0.79 1.6	0.20
C23, C24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
A	7.6 0.30	—	—	—	—	—	—	50 2.0	225 9.0	100 15k	0.8 1.5	0.03 0.05	0.20	500 20.0	500 20	100 15k	6.0 12	0.24 0.47	0.20	2000 80.0	250 10	100 15k	20.0 40.0	0.79 1.6	0.45
C1, C2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
H	25 1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2500 100	5000 200	100 15k	100 50	3.9 2.0	0.20	8000 250.0	3000 100	100 15k	180 90	7.1 3.5	0.25
R2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

\*Resolution and linearity (lin.) values are for Elite Series sensors. Compact Driver resolution and linearity values are 2X higher. For other bandwidths use 100kHz values with these multipliers: 1kHz-1.4, 10kHz-1.8, 15kHz-2.0 (standard unfiltered). Resolution values are RMS. Peak-to-peak values are typically ten times greater than the RMS values. 110kHz maximum bandwidth for these sensing areas.

Πίνακας 4.2

Ως καταλληλότερος για την περίπτωση θεωρήθηκε ο αισθητήρας C23-B με εύρος 500μm, τελική ανάλυση 34nm και ελάχιστη διάμετρο στόχου 4.1mm. Η ανάλυση και η ελάχιστη διάμετρος είναι υπεραρκετά, ενώ το εύρος σχετικά απαιτητικό κατά το στήσιμο της διάταξης. Το κόστος του συστήματος ήταν περίπου 3700€.

#### 4.4.2 Πηνιόμετρα

Ο δεύτερος τύπος αισθητήρων που εξετάστηκε ήταν τα πηνιόμετρα. Παρότι η γενική αντίληψη της διεξαγωγής της μέτρησης παραμένει ίδια με τα καπασιτόμετρα, οι φυσικές αρχές που εκμεταλλεύονται οι δύο αισθητήρες διαφέρουν. Ενώ τα καπασιτόμετρα χρησιμοποιούσαν τη χωρητικότητα πυκνωτή, τα πηνιόμετρα χρησιμοποιούν την **μαγνητική αντίσταση**.

##### 4.4.2.1 Φυσικές και τεχνολογικές αρχές

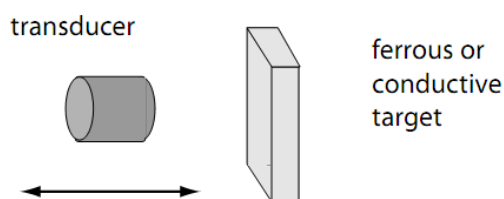
Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμεύουν στην μέτρηση αποστάσεων χωρίς επαφή, είναι κυλινδρικοί (εικόνα 4.6) και περιλαμβάνουν δύο πηνία. Το ένα χρησιμοποιείται άμεσα στη μέτρηση της μαγνητικής αντίστασης και το άλλο συμμετέχει έμμεσα, καθώς χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της επίδρασης της θερμοκρασίας [17].



Εικόνα 4.6 Τυπικά πηνιόμετρα

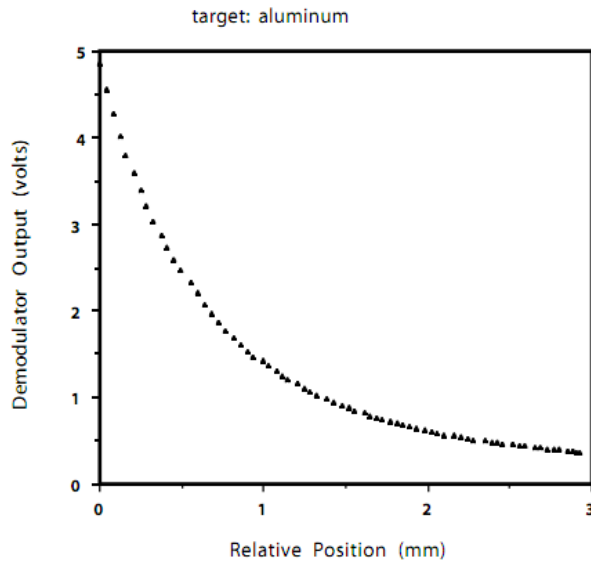
Όταν η κάτω διατομή του αισθητήρα, που είναι και η επιφάνεια μέτρησης, πλησιάσει αρκετά ένα μεταλλικό ή γενικά αγώγιμο υλικό, τότε επηρεάζεται το μαγνητικό πεδίο του πηνίου μέτρησης και συγκεκριμένα αλλάζει η μαγνητική του αντίσταση, ενώ το δεύτερο πηνίο λειτουργεί ως αναφορά.

Τα δύο πηνία διεγείρονται από μία υψηλόσυχνη ημιτονοειδή πηγή και η μαγνητική τους αντίσταση μετράται από έναν αποδιαμορφωτή. Με τη σύγκριση των μετρούμενων τιμών της μαγνητικής αντίστασης των δύο πηνίων έχουμε μία πολύ ευαίσθητη μέτρηση της μεταβολής της απόστασης του αντικειμένου (εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7 Λειτουργία πηνιόμετρου [17]

Όταν ο στόχος είναι μεταλλικός τότε επηρεάζεται η μαγνητική αντίσταση του αισθητήριου πηνίου, λόγω της μεταβολής της διαπερατότητας του μαγνητικού πεδίου. Όταν ο στόχος είναι ένα αγωγίμο σώμα τότε χρησιμοποιείται η αλληλεπίδραση του ρεύματος επαγωγής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του στόχου και του πεδίου του αισθητήριου πηνίου. Για στόχο από αλουμίνιο, το διάγραμμα 4.1 δείχνει την μεταβολή της εξόδου του αποδιαμορφωτή σε Volts με την απόσταση.



Διάγραμμα 4.1 Έξοδος αισθητήρα [17]

#### 4.4.2.2 Εφαρμογή στο πρόβλημα

Όπως έχουμε αναφέρει οι απαιτήσεις της εφαρμογής μας είναι διακριτική ικανότητα 5μm και συνολική μετατόπιση 100-200μm. Για την εκπλήρωση αυτών εξετάστηκε το σύστημα **Non-contact DVRT**. Αυτό αποτελείται από έναν αισθητήρα και ένα *signal controller*. Ως controller επιλέχθηκε το DEMOD-DC τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον πίνακα 4.3 [17].

Sensor Types	Inductive (DVRTs)
Excitation	Regulated Sinewave, 75 kHz standard 150 kHz optional
Demodulation	Asynchronous, DC output
Output	0 to 5 V typical, digitally trimmed
Gain	Factory Adjustable from 10 to 10,000
Low Pass Filter	2 Pole, 3 dB down @ 800 Hz standard Factory Adjustable 10 Hz – 8kHz
Supply Voltage	+ 6.0 to + 16 volts DC
Supply Current	22 milliamps
Warm-up Time	30 seconds recommended
Operating Temp.	-40 to 85 °C
Enclosure Size	50 mm x 20 mm x 10 mm
Connections	Power, ground, analog output
Connector	micro-D (MIL-C-83513/5) mating connector included

Πίνακας 4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά DEMOD-DC

Όσον αφορά στον αισθητήρα υπήρχε η δυνατότητα επιλογής από ένα σύνολο προσφερόμενων αισθητήρων (πίνακας 4.4). Ως καταλληλότερος επιλέχθηκε ο NC-DVRT-1.5 με εύρος μέτρησης 1.5mm και ανάλυση 0.1% ή 1.5μm. Το συνολικό κόστος ανερχόταν στα 2000€.

### Electrical Specifications

(with MicroStrain's DEMOD-DVRT)

Measurement range	
NC-DVRT-0.5	0.5 mm
NC-DVRT-1.0	1.0 mm
NC-DVRT-1.5	1.5 mm
NC-DVRT-2.5	2.5 mm
Nonlinearity	exponential output
Sensitivity	5 volts/mm typical
Signal to noise	Standard - 1000 to 1 with filter 3 dB down at 1 KHz
Resolution	0.1% minimum
Frequency response	800 Hz standard, 20 KHz optional
Temperature coefficient	offset 0.0039%/°C (typical) span 0.016%/°C (typical)
Repeatability	±2 μm typical (at constant temperature)

### Mechanical Specifications

Size	diameter x length (thread)
NC-DVRT-0.5	2.84 mm x 8.4 mm (4-40 UNC-2A)
NC-DVRT-1.0	4.83 mm x 19.0 mm (10-32 UNF-2A)
NC-DVRT-1.5	6.35 mm x 19.0 mm (¼-28 UNF-2A)
NC-DVRT-2.5	12.70 mm x 19.0 mm (½-20 UNF 2A)
Housing material	300 series stainless steel
Fixturing method	threaded stainless nuts
Leadouts	45 cm, shielded, teflon insulated
Strain Relief	Stainless wire reinforced multistrand conductors
Connector	Lemo 4-pin male with shrink polyolefin covering
Operating temperature	-55 to 175 °C

U.S. Patent No. 4,813,435 and Patents Pending

NC-DVRT-0.5 can only be used with DEMOD-DVRT - it is not compatible with DEMOD-DC2.

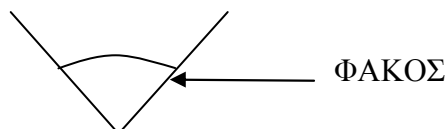
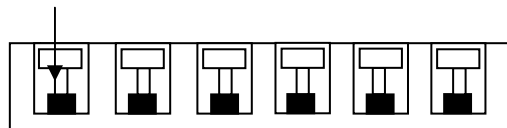
Πίνακας 4.4

Οι αισθητήρες αυτοί είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι στο τομέα της Εμβιομηχανικής και συγκεκριμένα στη μέτρηση της παραμόρφωσης ιστών, όπως επίσης και στον έλεγχο ρομποτικών συστημάτων, στον έλεγχο γραμμής παραγωγής, στη μέτρηση γραμμικής και γωνιακής θέσης κα.

#### 4.4.3 Cameras & scanner

Ο τρίτος τύπος μέτρησης της παραμόρφωσης του δοκιμίου που εξετάστηκε κινούνται σε μία εντελώς διαφορετική λογική. Το όλο σκεπτικό βασιζόταν στην οπτική αποτύπωση των διάφορων σταδίων της παραμόρφωσης του δοκιμίου με χρήση κάποιας ειδικής βιομηχανικής φωτογραφικής μηχανής ή scanner.

Η περίπτωση αυτή παρουσίαζε το εξής πλεονέκτημα. Δεν απαιτούνταν κάποιος μηχανισμός σχετικής κίνησης μεταξύ δοκιμίων και αισθητήρα. Ο φακός θα αποτύπωνε κάθε φορά όλα τα δοκίμια μαζί. Η γενική ιδέα της διάταξης φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Γενική ιδέα της διάταξης με οπτική αποτύπωση

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ο φακός θα αποτυπώνει την κάτοψη του δοχείου πηγαδιών των δοκιμίων. Σε κάθε βήμα της παραμόρφωσης, ο φορέας θα έρχεται πιο κοντά στο φακό με αποτέλεσμα να αποτυπώνεται κάθε φορά μεγαλύτερος. Μετά από κάθε αποτύπωση, η φωτογραφία θα αναλύεται σε pixels και ανάλογα με τον αριθμό των pixels που θα αντιστοιχούν στον φορέα συμπίεσης θα υπολογίζεται η ακριβής θέση του και άρα η παραμόρφωση του δοκιμίου.

#### 4.4.3.1 Εφαρμογή στο πρόβλημα

Για την διερεύνηση της συγκεκριμένης περίπτωσης αισθητήρα θα χρησιμοποιήσουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εμπορικού μοντέλου βιομηχανικής φωτογραφικής μηχανής piA2400-12gm [18].

Στην ιδανική περίπτωση ο φακός θα εστιάσει ακριβώς στις διαστάσεις του αντικειμένου που θέλουμε να αποτυπωθεί, δηλαδή του δοχείου πηγαδιών των δοκιμίων, του οποίου οι διαστάσεις είναι 127,9x85,6mm (object size). Ο αισθητήρας της μηχανής έχει διαστάσεις 8.47x7.10mm, ανάλυση 2456x2058 pixels και άρα μέγεθος pixel στον αισθητήρα ή sensor pixel size=3.45x3.45μm [19].

Έτσι, μπορούμε να υπολογίσουμε την μεγέθυνση  $m$  του ειδώλου:

$$m = \frac{8.47 * 7.1}{127.9 * 85.6} = 0.005492844$$

Δεν έχουμε προχωρήσει σε στρογγυλοποίηση ώστε να είμαστε όσο το δυνατόν ακριβείς στους υπολογισμούς. Ακολουθώντας υπολογίζουμε το μέγεθος των pixels στο αντικείμενο.

$$object\ pixel\ size(OPS) = \frac{3.45}{m} = 628.0899294\mu m$$

Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε τον αριθμό των pixels που αντιστοιχούν στην επιφάνεια του φορέα συμπίεσης.

$$pixels = \frac{\pi * d^2}{4 * OPS} = 101286.85$$

Τώρα υποθέτουμε ότι ο φορέας μετατοπίζεται κατά 5μm προς το μέρος του φακού, δηλαδή εξελίσσεται το πείραμα της συμπίεσης. Θα υπολογίσουμε τον νέο αριθμό των pixels του φορέα ώστε να διαπιστώσουμε αν είναι δυνατή η καταγραφή της μεταβολής αυτής.

Αρχικά υπολογίζουμε τη νέα μεγέθυνση

$$\begin{aligned} m' &= \frac{D'_i}{D'_o} = \frac{D_i}{D_o - 5\mu m} = \frac{D_i}{\frac{D_i}{m} - 5\mu m} = \frac{D_i * m}{D_i - m * 5\mu m} \\ &= \frac{10 * m}{10 - 0.005 * m} = 0.005492859 \end{aligned}$$

Και το νέο μέγεθος των pixels στο μετατοπισμένο αντικείμενο είναι

$$OPS' = 3.45/m' = 628.0882044$$

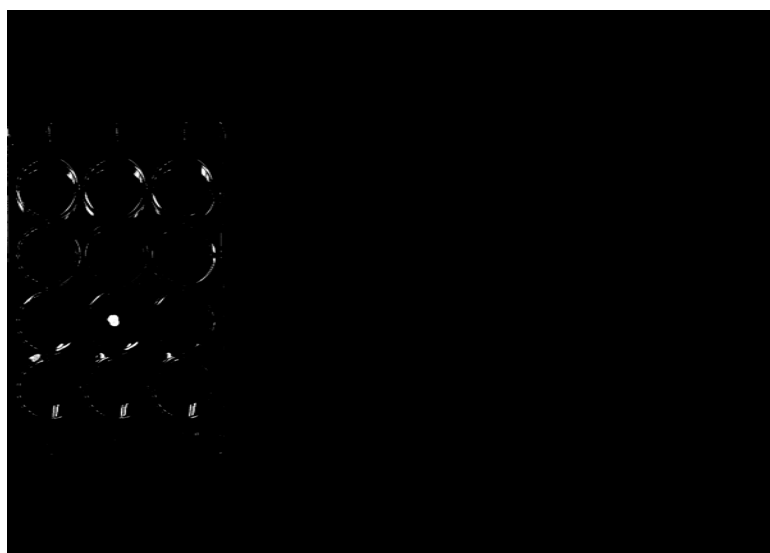
Άρα ο νέος αριθμός των pixels είναι

$$pixels = \frac{\pi * d^2}{4 * OPS'} = 101287.13$$

Βλέπουμε ότι ο αριθμός των pixels πριν και μετά τη μετατόπιση είναι πολύ κοντά, με αποτέλεσμα να μην διακρίνεται η μετατόπιση που θέλουμε. Και διπλάσια ανάλυση να είχε ο φακός τα αποτελέσματα θα ήταν τα ίδια. Η μετατόπιση θα ήταν και πάλι κρυφή.

Συμπεραίνουμε ότι με το συγκεκριμένο μοντέλο το κόστος του οποίου ήταν παρόμοιο με των άλλων αισθητήρων, δεν είναι δυνατή η καταγραφή των αποτελεσμάτων και ότι για αυτή τη διαδικασία θα χρειαζόμασταν τουλάχιστον 4πλάσια ανάλυση. Να σημειώσουμε ότι οι υπολογισμοί αυτοί έχουν γίνει χωρίς να λάβουμε υπόψη τυχόν σφάλματα. Γενικά η διακριτική ικανότητα μιας μέτρησης πρέπει να είναι αρκετά καλύτερη της επιθυμητής.

Στην εικόνα 4.8 βλέπουμε την αποτύπωση του δοχείου των δοκιμίων με χρήση scanner υπό την ίδια φιλοσοφία της διάταξης. Είναι εμφανής η αδυναμία αποτύπωσης της παραμόρφωσης.



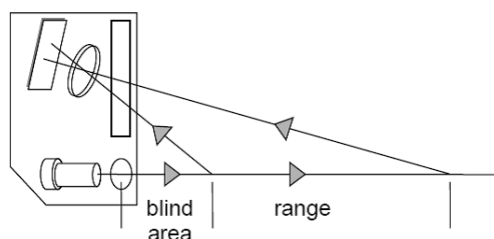
Εικόνα 4.8 Αποτύπωση με scanner

#### 4.4.4 Laser

Ως τελευταία λύση στην αναζήτηση αισθητήρα και σε κάποιο βαθμό επέκταση της προηγούμενης περίπτωσης, εξετάσθηκε η περίπτωση αισθητήρα απόστασης με ακτίνα laser.

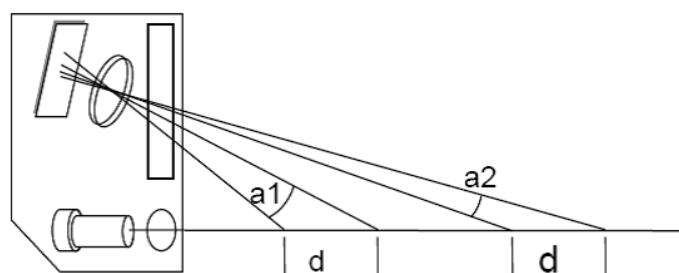
#### 4.4.4.1 Φυσικές και τεχνολογικές αρχές

Οι αισθητήρες αυτού του τύπου εκμεταλλεύονται την αρχή της τριγωνικότητας για τον υπολογισμό απόστασης. Η αρχή λειτουργίας έχει ως εξής. Μία ακτίνα laser εκπέμπεται από τον αισθητήρα. Η ακτίνα αυτή προσκρούει στην επιφάνεια στόχο και αντανακλάται (εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα laser [21]

Ο αισθητήρας διαθέτει έναν πολύ ευαίσθητο δέκτη φωτός, συνήθως της τεχνολογίας συζευγμένου φορτίου (charged-coupled device ή CCD) ο οποίος συλλέγει την ανακλώμενη ακτίνα laser. Ανάλογα με την θέση εντοπισμού της ακτίνας πάνω στο δέκτη υπολογίζεται η απόσταση του στόχου. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη γωνία που σχηματίζει η ανακλώμενη ακτίνα (εικόνα 4.10) [20].



Εικόνα 4.10 Αρχή της τριγωνικότητας [21]

Όσο πιο κοντά στον αισθητήρα είναι η τελικά μετρούμενη απόσταση  $d$ , τόσο πιο μεγάλη είναι η γωνία  $a$ . Για παράδειγμα στην εικόνα 4.10 η  $a_1$  είναι μεγαλύτερη από την  $a_2$ . Αφού συλλεχθεί η ακτίνα φωτός τότε ένας μικροεπεξεργαστής στο εσωτερικό του αισθητήρα υπολογίζει τη γωνία  $a$  με βάση τη θέση της ανακλώμενης ακτίνας στο συλλέκτη. Έτσι υπολογίζεται η ακριβής απόσταση του αντικειμένου-στόχου.

Φυσικά, επειδή η γεωμετρία στο εσωτερικό του αισθητήρα είναι προκαθορισμένη και επειδή ο συλλέκτης έχει πεπερασμένο μήκος, ο αισθητήρας έχει ένα εύρος μέτρησης το οποίο ξεκινά σε μία απόσταση  $x_1$  έως μία απόσταση  $x_2$ . Συνήθως οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούν ακτίνες σημείου (laser spot), ενώ κάποιοι χρησιμοποιούν ακτίνες γραμμής αλλά οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται περισσότερο για μέτρηση πάχους ή απόστασης σε τραχείς, πορώδεις επιφάνειες.

#### 4.4.4.2 Εφαρμογή στο πρόβλημα



Για την περίπτωση που μας ενδιαφέρει εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις τέτοιου τύπου αισθητήρα.

- Η πρώτη ήταν της σειράς **LAS-TM/LAS-T**

Όπως έχουμε αναφέρει μας ενδιαφέρει η μέτρηση συνολικής μετατόπισης 100μm και διακριτικής ικανότητας 5μm. Στο πίνακα 4.5 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτής της σειράς. Ως καταλληλότερο για τη περίπτωση μας κρίθηκε το μοντέλο LAS-TM-10 με εύρος μέτρησης 16-26mm, ανάλυση 2-5μm και έξοδο 4-20mA. Παρότι δεν χρειαζόμαστε κάποιο εξωτερικό controller αφού διαθέτει ο αισθητήρας, είναι απαραίτητος ο εξοπλισμός με έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (analogue-digital converter) για τη ψηφιοποίηση της εξόδου και την επικοινωνία με ηλεκτρονικό υπολογιστή [21]. Το κόστος της συγκεκριμένης περίπτωσης ανερχόταν στα 1500€.

Typ	LAS-TM-10	LAS-TM-104	LAS-T-40	LAS-T-250	LAS-T-500	LAS-T-800
Range	16...26 mm	16...120 mm	30...70 mm	50...300 mm	100...600 mm	200...1000 mm
resolution	0,002...0,005 mm	0,002...0,1 mm	0,004...0,02 mm	0,02...0,35 mm	0,03...0,6 mm	0,03...0,7 mm
Linearity	±0,006...±0,015 mm	±0,006...±0,35 mm	±0,012...±0,06 mm	±0,03...±1 mm	±0,05...±2 mm	±0,07...±2,5 mm
Min. teach-in range	1 mm	2 mm	2 mm	5 mm	10 mm	10 mm
Response time	<0,9 ms					< 10 ms
Sensing element	photo diode array					
Alarm output	-	-	-	PNP		
Switching current	-	-	-	100mA		
Power indicator	LED green					
Alarm indicator	LED red					
Pollution	LED red flashing					
Supply	12 - 28 VDC					
Max. current	< 100 mA			< 120 mA		
Light source	Laser diode red, pulsed					
Laser class	2					
Wave length	675 nm					
supp reverse polarity	yes					
Short circuit protectio	yes					
Housing material	Die-cast zinc					Aluminium
Protection class	IP67					
working temperature	0...+50°C					

#### Beam type

Laser spot ( Ø ray )	0,5...0,2 mm	0,9...0,5 mm	1...0,2 mm	2,0 mm	2,0 mm	2,0 mm
----------------------	--------------	--------------	------------	--------	--------	--------

#### Output

Analogue output	4...20 mA	4...20 mA / 0...10 V, wahlweise
-----------------	-----------	---------------------------------

Πίνακας 4.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά LAS-TM/LAS-T [21]

- Η δεύτερη περίπτωση ήταν η σειρά **ODS Black-line**

Σε αυτή τη περίπτωση, τα τεχνικά χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στο πίνακα 4.6, καταλληλότερο κρίθηκε το μοντέλο ODS 115 (εικόνα 4.11), με εύρος μέτρησης 100-130mm, ανάλυση 2μm και δυνατότητα σύνδεσης με προσωπικό υπολογιστή μέσω των πρωτοκόλλων RS232 ή RS422 [22]. Το κόστος ήταν της τάξης των 2600€.

Models Select-10:	ODS 20.5	ODS 115	ODS 150	ODS 200	ODS 250	ODS 450	ODS 750
High target Temperature:	-	+	+	+	+	+	+
<b>Measurement data:</b>							
Measuring range (FS)	9 mm	30 mm	100 mm	200 mm	300 mm	500 mm	700 mm
Measuring range	16-25	100-130	100-200	100-300	100-400	200-700	400-1100
Center distance	20.5 mm	115 mm	150 mm	200 mm	250 mm	450 mm	750 mm
Resolution *)	0.0008 mm **)	0.002 mm	0.010 mm **)	0.05 mm	0.08 mm	0.1 mm	0.5 mm
Reproducibility *)	± 0.0008 mm **)	± 0.002 mm	± 0.010 mm **)	± 0.05 mm	± 0.08 mm	± 0.1 mm	± 0.5 mm
Linearity *)	± 0.0045 mm	± 0.030 mm	± 0.050 mm	± 0.10 mm	± 0.20 mm	± 0.3 mm	± 0.7 mm
Updating frequency ***)	10 kHz	10 kHz	10 kHz	10 kHz	10 kHz	10 kHz	10 kHz
Temperature deviation	± 0.03% FS/C°	± 0.03% FS/C°	± 0.03% FS/C°	± 0.03% FS/C°	± 0.03% FS/C°	± 0.03% FS/C°	± 0.03% FS/C°
Light source (nm)	LASER (655/670)	LASER (655/670)	LASER (655/670)	LASER (655/670)	LASER (655/670)	LASER (655/670)	LASER (655/670)
Size of spot	Ø 0.1 mm	Ø 1 mm	Ø 1 mm	Ø 2 mm	Ø 2 mm	Ø 2 mm	Ø 4 mm
Laser protection class	IEC 2	IEC 2	IEC 2	IEC 2	IEC 2	IEC 2	IEC 2
<b>Output data:</b>		<b>Electrical data:</b>		<b>Environment data:</b>		<b>Physical data:</b>	
Voltage output ***):	1-9 V DC	Supply voltage	24 VDC ±10%	Operating temperature	0 - +45 C°	Dimensions	136*146*50mm <sup>Ⓜ</sup> )
Current output ***):	4-20 mA	Power consumption	max 4.5 W	Storage temperature	-20 - +70 C°	Weight excl. Cable	1600 g
Digital output:	RS232 or RS422			Humidity non condensing	Max 90 % RH	Cable length	2.5 m
Baud rate: 38400 (default)	1 kHz output frequency			Degree of protection	IEC IP65	Housing	Steel/ Aluminum/
Baud rate: 115200	2½kHz output frequency						Aluminum/
Baud rate: 230400	5 kHz output frequency (Requires RS422)						
Baud rate: 460800	10kHz output frequency (Requires RS422)						

Πίνακας 4.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά ODS Black-line [22]



Εικόνα 4.11 Αισθητήρας απόστασης ODS 115

- Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε ήταν η σειρά **optoNCDT 1402**

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτής της περίπτωσης φαίνονται στον πίνακα 4.7. Καταλληλότερο για την εφαρμογή μας κρίθηκε το μοντέλο ILD 1402-10 (εικόνα 4.12). Το συγκεκριμένο έχει εύρος μέτρησης 20-30mm, ανάλυση 1µm σε στατικές συνθήκες όπως η δική μας περίπτωση και δυνατότητα άμεσης σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του πρωτοκόλλου RS422 και εξ ολοκλήρου χειρισμού του αισθητήρα μέσω αυτού. Το κόστος



Εικόνα 4.12 optoNCDT 1402

αυτής της περίπτωσης ανερχόταν στα 1400€ και παρουσιάζει το πλεονέκτημα της άμεσης σύνδεσης και χειρισμού μέσω προσωπικού υπολογιστή καθώς και ότι δεν απαιτείται κάποια επιπλέον συσκευή για τη λειτουργία του αισθητήρα εκτός από τον ίδιο και το καλώδιο σύνδεσής του με προσωπικό υπολογιστή [20].

Model	ILD	1402-5	1402-10	1402-20	1402-50	1402-100	1402-200	1402-250VT	1402-600
Measurement range	mm	5	10	20	50	100	200	250	600
Start of range	mm	20	20	30	45	50	60	100	200
Midrange	mm	22.5	25	40	70	100	160	225	500
End of range	mm	25	30	50	95	150	260	350	800
Linearity	$\mu\text{m}$	5 ... 9	5 ... 18	7 ... 36	12 ... 90	20 ... 180	40 ... 360	50 ... 1200	120 ... 3000
		$\leq 0.18\%$ FSO						$\leq 0.5\%$ FSO	
Resolution	static, $\mu\text{m}$	0.6	1	2	5	10	20	50	120
		$0.01\%$ FSO <sup>1</sup>						$0.02\%$ FSO <sup>1</sup>	
	dynamic, $\mu\text{m}$ 1.5 kHz	1 ... 3	2 ... 5	5 ... 10	6 ... 25	12 ... 50	13 ... 100	32 ... 300	80 ... 600
		$0.02 \dots 0.05\%$ FSO						$0.02 \dots 0.12\%$ FSO	
Measurement rate, programmable:		1.5 kHz; 1 kHz; 750 Hz; 375 Hz; 50 Hz							
Light source		Semiconductor laser 1 mW, 670 nm (red)							
Laser class		Class 2 (II) acc. to DIN EN 60825-1: 2001-11							
Spot diameter	SMR, $\mu\text{m}$	110	110	210	1100	1400	2300	5000	2,6 x 5 mm
	MR, $\mu\text{m}$	380	650	530	110	130	2200	5000	2,6 x 5 mm
	EMR, $\mu\text{m}$	650	1200	830	1100	1400	2100	5000	2,6 x 5 mm
Protection class		IP 67							
Vibration		15 g / 10 Hz ... 1 kHz						20 g / 10 Hz ... 1 kHz	
Shock		15 g / 6 ms (IEC 68-2-29)							
Weight, without cable		approx. 83 g						approx. 130 g	
Temperature stability		0.03 % FSO/°C				0.08 % FSO/°C			
Operation temperature		0 ... 50 °C							
Storage temperature		-20 °C ... 70 °C							
Measurement value output	analog	4 ... 20 mA (1 ... 5 V with cable PC 1402-3/U) or							
	digital	RS422							

Πίνακας 4.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά optoNCDT 1402 [20]

#### 4.5 Τελική αξιολόγηση και επιλογή αισθητήρα

Η επιλογή του αισθητήρα ξεκινά αρχικά με την επιλογή του τύπου αισθητήρα και ακολούθως του συγκεκριμένου μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί στις πειραματικές μετρήσεις. Κεντρικό ρόλο στην επιλογή του αισθητήρα θα παίξουν κυρίως δύο κριτήρια. Η κάλυψη των απαιτήσεων της μέτρησης και η ευκολία χειρισμού του αισθητήρα και ανάκτησης των αποτελεσμάτων.

Η περίπτωση των **καπασιτόμετρων** υπερκαλύπτει τις ανάγκες της μέτρησής μας. Συγκεκριμένα η διακριτική ικανότητά τους κρίνεται υπερβολική, αφού είναι της τάξης των nm, ενώ η απαίτηση είναι 5 $\mu\text{m}$ . Επίσης, είναι ιδιαίτερα απαιτητικά κατά την εγκατάστασή τους ως προς την επιπεδότητα και άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ενώ απαιτείται ο εξοπλισμός με controller και έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC) για την ανάκτηση των αποτελεσμάτων και τη σύνδεση του αισθητήρα με προσωπικό υπολογιστή. Για αυτούς τους λόγους αλλά και για λόγους συγκριτικού κόστους η λύση αυτή **απορρίπτεται**.

Η δεύτερη περίπτωση αισθητήρων, τα **πηνιόμετρα**, και πάλι κάλυπτε τις ανάγκες της μέτρησής μας με καλύτερη σχέση δυνατοτήτων-απαιτήσεων απ' ό,τι τα καπασιτόμετρα. Και πάλι όμως ήταν αναγκαίος ο εξοπλισμός με controller και ADC για την ανάκτηση των αποτελεσμάτων και τη σύνδεση με υπολογιστή για την επεξεργασία τους. Η λύση αυτή **απορρίπτεται** γιατί είχαμε καλύτερες επιλογές σχετικά με τις δυνατότητες του αισθητήρα αλλά και την ευκολία χειρισμού και την αξιοπιστία του.

Η τρίτη περίπτωση της **οπτικής αποτύπωσης με cameras** δεν κάλυπτε τις ανάγκες της μέτρησης χωρίς να συνυπολογίσουμε πιθανά σφάλματα. Συνεπώς, η λύση αυτή **απορρίπτεται**.

Η τέταρτη επιλογή, της χρήσης αισθητήρων με ακτίνα **laser**, ήταν και αυτή που συγκέντρωνε τα περισσότερα πλεονεκτήματα σε όλους σχεδόν τους τομείς της ανάλυσής μας. Η διακριτική ικανότητα των οργάνων παρουσιάζει τη καλύτερη σχέση δυνατοτήτων-απαιτήσεων, ενώ δεν απαιτείται κάποιος controller αφού υπάρχει ενσωματωμένος στους αισθητήρες. Αυτό σημαίνει μεγαλύτερη ευκολία χειρισμού, εξάλειψη κινδύνου θορύβων και απουσία ανάγκης για ρύθμιση των διάφορων εξαρτημάτων, αφού αυτό έχει γίνει εργοστασιακά. Για αυτούς τους λόγους **επιλέχθηκε η λύση των αισθητήρων με ακτίνα laser.**

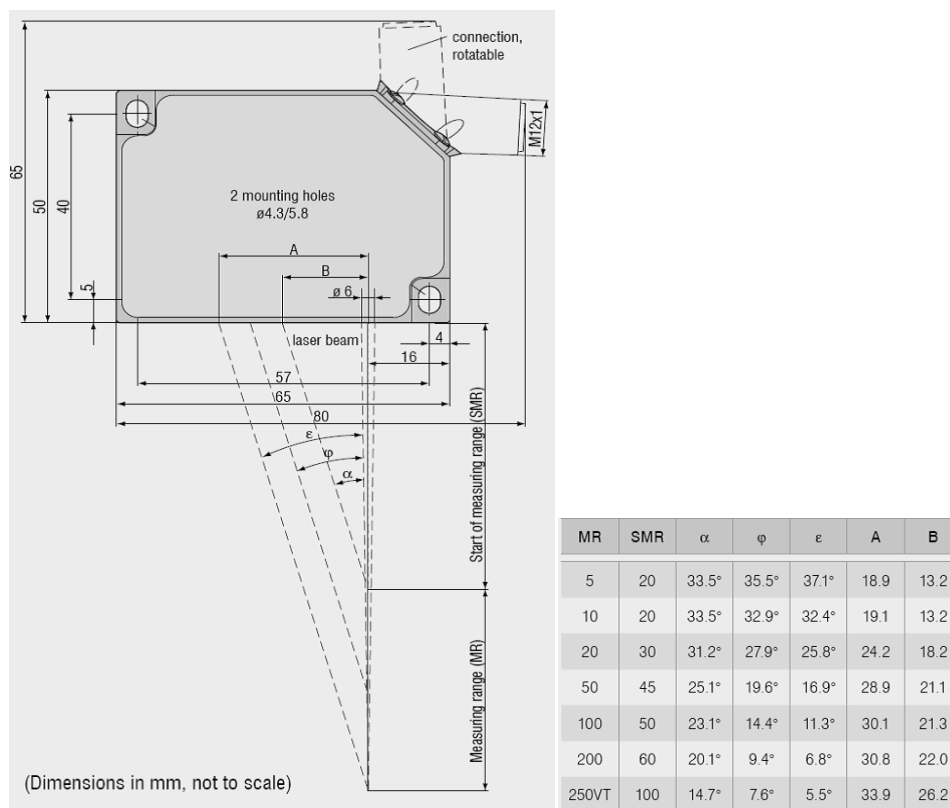
Από τα τρία διαφορετικά μοντέλα αισθητήρα τέτοιου τύπου που εξετάστηκαν, επιλέχθηκε το **ILD 1402-10** της σειράς **optoNCDT 1402** γιατί παρουσίαζε την καλύτερη ανάλυση σε σχέση με τα άλλα δύο, 1μm έναντι 2μm και 2...5μm. Επίσης έχει τη δυνατότητα άμεσης σύνδεσης με υπολογιστή, ενώ το LAS-TM-10 όχι. Παράλληλα το εύρος μέτρησής του είναι 20-30mm, ενώ το ODS 115 είχε εύρος 100-130mm κάτι που ίσως δημιουργούσε προβλήματα στην διαμόρφωση της διάταξης και το κόστος του ήταν σχεδόν διπλάσιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Υλοποίηση της Μετρητικής Διάταξης

Αφού έχει επιλεγθεί ο αισθητήρας που θα χρησιμοποιηθεί για τις πειραματικές μετρήσεις όπως περιγράψαμε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, μπορούμε να προχωρήσουμε στην υλοποίηση και την περιγραφή του συνόλου της διάταξης. Αν έπρεπε να χωρίσουμε τη διάταξη σε κάποιες μονάδες, τότε θα διακρίναμε πέντε και συγκεκριμένα τον αισθητήρα απόστασης που είναι και η βασική μονάδα της διάταξης, το μηχανισμό σχετικής κίνησης μεταξύ του δοχείου των δοκιμίων και του αισθητήρα, τους φορείς συμπίεσης που λειτουργούν και ως επιφάνειες μέτρησης, το σύστημα στήριξης του αισθητήρα και τη βάση της διάταξης.

### 5.1 Αισθητήρας απόστασης

Ο αισθητήρας απόστασης είναι το βασικότερο κομμάτι της μετρητικής διάταξης. Όπως έχουμε περιγράψει στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, ο αισθητήρας αυτός λαμβάνει τιμές απόστασης χωρίς να ασκεί επαφή στην επιφάνεια-στόχο. Αυτό το επιτυγχάνει εκπέμποντας μία ακτίνα laser από την ειδική δίοδο που διαθέτει. Η ακτίνα ανακλάται στο αντικείμενο στόχο και συλλέγεται από έναν εσωτερικό αισθητήρα CCD. Με βάση την αρχή της τριγωνικότητας και το σημείο στο οποίο προσκρούει η ανακλώμενη ακτίνα laser υπολογίζεται η ακριβής θέση του στόχου από ένα ενσωματωμένο controller (εικόνα 5.1). Η έξοδος του αισθητήρα μπορεί να είναι είτε αναλογική είτε σειριακή.



Εικόνα 5.1 Αρχή της τριγωνικότητας για τον ILD 1402-10

### 5.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το εύρος μέτρησης του αισθητήρα είναι συνολικά 10mm και συγκεκριμένα 20-30mm και παρουσιάζει ανάλυση 1μm σε στατικές συνθήκες όπως η δική μας περίπτωση. Σύμφωνα με τον πίνακα των τεχνικών του χαρακτηριστικών (πιν 4.7), η γραμμικότητα του αισθητήρα είναι της τάξης των 5-18μm. Βέβαια αυτό δεν επηρεάζει τη δική μας περίπτωση επειδή η συνολική αναμενόμενη μετατόπιση είναι 200μm και μάλιστα σε διάστημα 1 ώρας, ενώ οι μετρήσεις που θα λαμβάνονται σε κάθε βήμα της συνολικής μέτρησης δεν θα αφήνουν περιθώριο για σφάλματα λόγω γραμμικότητας.

Η πηγή της ακτίνας, είναι ένας ημιαγωγός laser με μήκος κύματος 670nm, δηλαδή χρώματος κόκκινου. Οι αισθητήρες αυτοί κατατάσσονται στη κλάση laser 2(II) και παρότι η συνολική ενέργεια δεν ξεπερνάει το 1mW, δεν συνιστάται από τους κανόνες ασφαλείας η απευθείας οπτική επαφή με την ακτίνα. Η διάμετρος της ακτίνας είναι ίση με 110μm σε απόσταση ίση με την αρχή του εύρους μέτρησης (20mm), 650μm για τον μέσον του εύρους (25mm) και 1200μm για το τέλος του εύρους (30mm).

Το συνολικό βάρος του αισθητήρα είναι περίπου 83g χωρίς να υπολογίζουμε το καλώδιο σύνδεσης με προσωπικό υπολογιστή. Η θερμοκρασία λειτουργίας προσδιορίζεται ως 0-50 °C, ενώ η μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει τον αισθητήρα και συγκεκριμένα για 1 °C έχουμε αστάθεια ίση με 3μm.

Η έξοδος του αισθητήρα, δηλαδή η τιμή της μέτρησης, μπορεί να είναι είτε αναλογική είτε ψηφιακή. Σχετικά με την αναλογική, η έξοδος μπορεί να είναι σε τιμές έντασης ρεύματος – 4-20mA – ή σε τιμές τάσης, 1-5V. Φυσικά η μορφή της αναλογικής εξόδου εξαρτάται από το καλώδιο με το οποίο συνδέεται ο αισθητήρας. Η ψηφιακή εκδοχή της εξόδου βασίζεται στο σειριακό πρωτόκολλο RS422. Τέλος, η τάση λειτουργίας του αισθητήρα κυμαίνεται από 11-30V συνεχούς τάσης, με τυπική τιμή τα 24V.

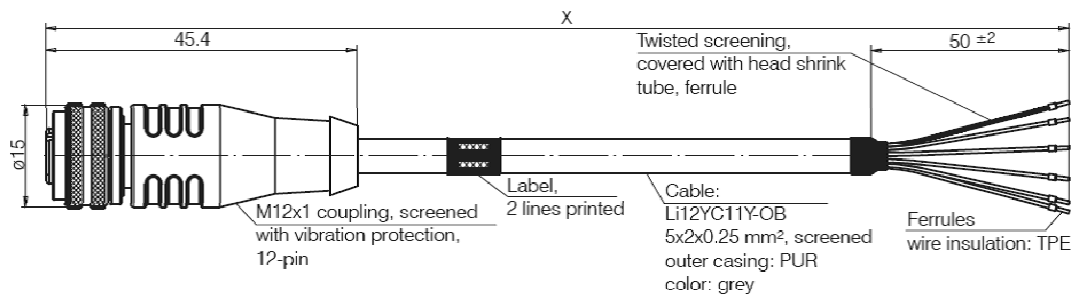
### 5.1.2 Σύνδεση με προσωπικό υπολογιστή

Η σύνδεση του αισθητήρα με προσωπικό υπολογιστή είναι κομβικής σημασίας. Παρέχει τη δυνατότητα ευκολότερου χειρισμού και ανάκτησης των αποτελεσμάτων της μέτρησης, ενώ γίνεται πολύ απλή η διαδικασία περαιτέρω επεξεργασίας των δεδομένων.

Όπως αναφέραμε και στα τεχνικά χαρακτηριστικά η έξοδος μπορεί να είναι ψηφιακή με βάση το πρωτόκολλο RS422. Το πρωτόκολλο αυτό προσδιορίζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου ψηφιακής επικοινωνίας. Με χρήση αυτού του πρωτοκόλλου, αλλά και άλλων όπως το RS232, έχει γίνει σχετικά απλή υπόθεση η επικοινωνία μεταξύ ηλεκτρικών συσκευών και η ανταλλαγή δεδομένων καθώς τα ψηφιακά σήματα είναι πλέον τυποποιημένα με βάση αυτά τα πρωτόκολλα.

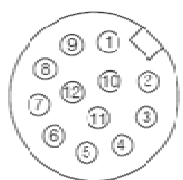
Τα καλώδια σύνδεσης του αισθητήρα, είτε διαθέτουν έξοδο σε ένταση ηλεκτρικού ρεύματος είτε σε τάση, έχουν τη δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας με προσωπικό υπολογιστή. Τα καλώδια αυτά (εικόνα 5.2), έχουν στη μία άκρη τους τη

θηλυκή σύνδεση με τη συσκευή του αισθητήρα και στην άλλη ελεύθερα συνδεδεμένα καλωδίων.



Εικόνα 5.2 Καλώδιο σύνδεσης αισθητήρα

Κάθε ένα από τα συνολικά 12 συνδεδεμένα αντιστοιχούν σε κάποια λειτουργία και στην ουσία αποτελούν προέκταση των αντίστοιχων αρσενικών υποδοχών της συσκευής του αισθητήρα (πίνακας 5.1).

Pin	Description	Color code PC1402-x/l	Specification	 Pin side male sensor connector
3	RS422 Rx+	green	Internally terminated with 120 Ohm	
4	RS422 Rx-	yellow		
5	RS422 Tx+	grey	Terminate externally with 120 Ohm	
6	RS422 Tx-	pink		
7	+U <sub>B</sub>	red	11 ... 30 VDC, typ. 24 VDC / 50 mA	
8	Laser off	black	Laser is active, if pin 8 is connected with GND	
9	Teach in	violet	Connect to GND for at least 30 ms	
10	Error	brown	Open-Collector (NPN), I <sub>max</sub> = 100 mA, U <sub>max</sub> = 30 VDC, short circuit proof, Turn off the power supply to reset the short circuit protection	
11	I <sub>out</sub>	white	R <sub>load</sub> < (U <sub>B</sub> - 6 V) / 20 mA; R <sub>load</sub> max. = 250 Ohm with U <sub>B</sub> = 11 V	
12	GND	blue	Supply and signal ground	
1 & 2	n.c.			

Πίνακας 5.1 Αντιστοίχιση των συνδεδεμένων

Τα συνδεδεμένα 3,4 της υποδοχής του αισθητήρα αντιστοιχούν στα πράσινο και κίτρινο του καλωδίου και είναι η σειριακή είσοδος. Τα 5,6 με τα γκρι και ροζ είναι η σειριακή έξοδος του αισθητήρα. Το 7 και το κόκκινο του καλωδίου είναι η παροχή τάσης στον αισθητήρα. Να σημειώσουμε ότι για να κλείσει το κύκλωμα και να λειτουργήσει ο αισθητήρας πρέπει το 8 (μαύρο) να συνδεθεί με το 12 (μπλε) που είναι η γείωση. Το 9 (βιολετί) σχετίζεται με τη λειτουργία teach in για την οποία θα μιλήσουμε αργότερα, το 10 (καφέ) δίνει το σήμα σφάλματος και το 11 (άσπρο) την αναλογική έξοδο σε Amperes.

Για την ευκολία προσδιορισμού της κατάλληλης αντιστοίχισης των συνδεδεμένων των καλωδίων με αυτά του υπολογιστή χρησιμοποιήσαμε το εξάρτημα της εικόνας 5.3. Όπως βλέπουμε και στην εικόνα, το εξάρτημα αυτό έχει από τη μία πλευρά 6 υποδοχές συνδεδεμένων και από την άλλη μία θηλυκή έξοδο σύνδεσης DB-9. Στη πλευρά των 6 υποδοχών βλέπουμε από αριστερά προς τα δεξιά τις εξής ενδείξεις: T-,T+,R+,R-,GND,+9V. Οι τέσσερις πρώτες είναι οι θύρες σειριακής επικοινωνίας (transmit, receive) και οι άλλες δύο είναι η γείωση και η παροχή τάσης αντίστοιχα. Να σημειώσουμε ότι τα συνδεδεμένα σειριακής επικοινωνίας πρέπει να συνδεθούν σταυρωτά μεταξύ του καλωδίου και του υπολογιστή. Δηλαδή το T- του υπολογιστή συνδέεται με το R- του καλωδίου (κίτρινο χρώμα) και το T+ του υπολογιστή με το R+ του καλωδίου (πράσινο). Επίσης το R+ του υπολογιστή με το T+ (γκρι) και το R-

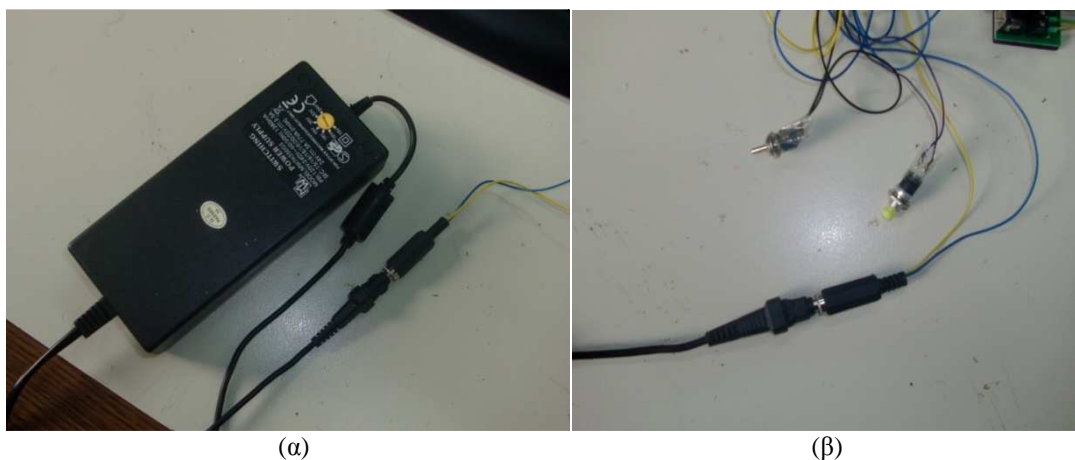
του υπολογιστή με το T- (ροζ). Αυτό συμβαίνει επειδή ότι στέλνει (transmits) ο υπολογιστής το λαμβάνει (receives) ο αισθητήρας και αντίστροφα.



Εικόνα 5.3

Όσον αφορά στην τροφοδοσία του αισθητήρα με ηλεκτρικό ρεύμα, υπήρχε η δυνατότητα αυτό να γίνει κατευθείαν μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή και συγκεκριμένα από τις υποδοχές GND και +9V του εξαρτήματος της εικόνας 5.3. Το πρόβλημα όμως ήταν ότι ο αισθητήρας λειτουργεί με τάση 11-30V, άρα δε θα ήταν δυνατό να τροφοδοτηθεί με τη κατάλληλη τάση από τον υπολογιστή. Γι αυτό το λόγο επιλέξαμε η τροφοδοσία του αισθητήρα να είναι ξεχωριστή, από το οικιακό δίκτυο του εργαστηρίου, εναλλασσόμενης τάσης 220V. Έτσι ήταν απαραίτητος ο εξοπλισμός με ένα μετασχηματιστή τάσης, από εναλλασσόμενο σε συνεχές με έξοδο στη περιοχή των 11-30V. Και αφού υπήρχε η δυνατότητα, επιλέξαμε η τάση εξόδου του μετασχηματιστή να είναι η τυπική τιμή τάσης λειτουργίας του αισθητήρα, δηλαδή 24V. Προς εξυπηρέτηση των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε ο MW7H350GS (εικόνα 5.4α), με μεταβλητή έξοδο και συγκεκριμένα 15,16,18,19,20,22,24 V. Εμείς τον λειτουργούμε στην επιθυμητή τάση των 24V DC.

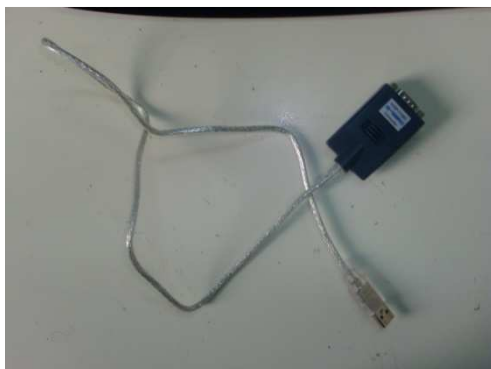
Επίσης, τοποθετήσαμε δύο διακόπτες, έναν τύπου on/off και έναν τύπου push-on (εικόνα 5.4β). Ο πρώτος, όταν κλείνει το κύκλωμα, συνδέει το συνδετικό 8 με το 12(GND) και έτσι ενεργοποιείται ο αισθητήρας. Όταν ανοίγει ο διακόπτης, ανοίγει το κύκλωμα του αισθητήρα και απενεργοποιείται. Ο δεύτερος διακόπτης συνδέει το 9 με το 12 και χρησιμοποιείται για τη λειτουργία teach in.



Εικόνα 5.4 Μετασχηματιστής MW7H350GS(α) και διακόπτες(β)



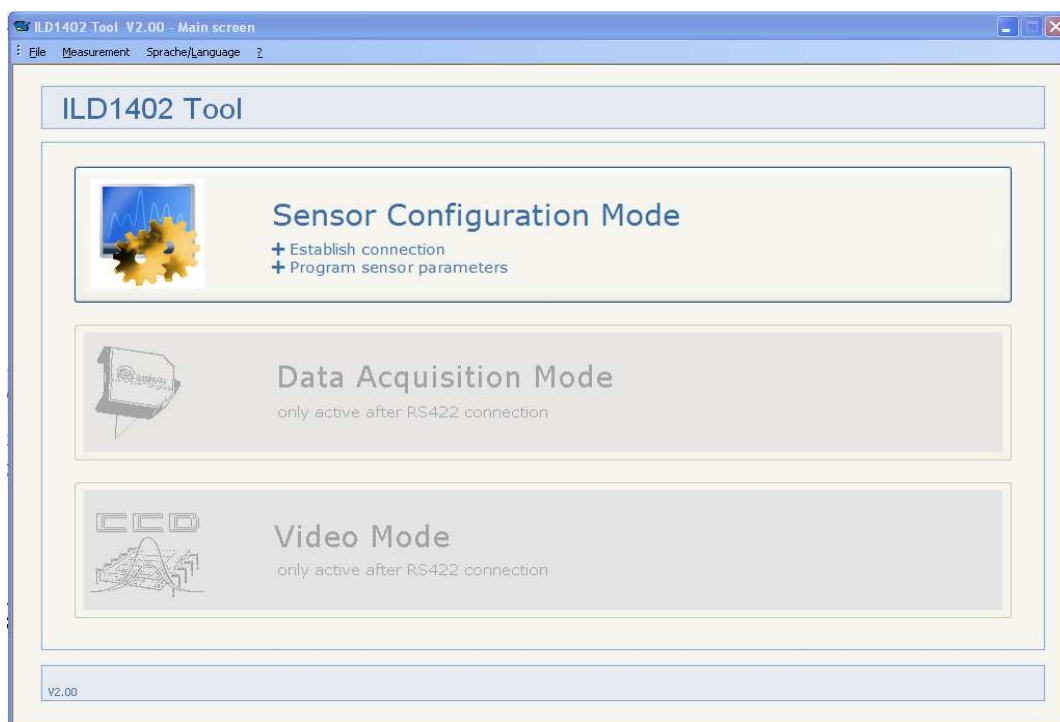
Τώρα μπορούμε να συνδέσουμε την άλλη άκρη του εξαρτήματος της εικόνας 5.3 με την θηλυκή υποδοχή DB-9 με κάποια ίδια αρσενική του υπολογιστή. Για μεγαλύτερη ευκολία και αξιοπιστία στην επικοινωνία χρησιμοποιούμε ένα καλώδιο μετατροπής της θύρας από DB-9 σε USB, όπως αυτό που φαίνεται στην εικόνα 5.5. Έτσι καταλήγουμε να έχουμε σύνδεση του αισθητήρα με το πρωτόκολλο RS422 με μία θύρα USB του υπολογιστή. Για να μπορεί ο υπολογιστής να λάβει και να στείλει δεδομένα μέσω αυτής της θύρας με βάση το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας πρέπει να εγκαταστήσουμε στον υπολογιστή ένα κατάλληλο πρόγραμμα οδήγησης (driver) για αυτό το τύπο της σύνδεσης. Για την εφαρμογή μας επιλέχθηκε το pl2303 usb-serial driver.



Εικόνα 5.5 Καλώδιο μετατροπής σήματος RS422/485-USB

Τώρα έχουμε έτοιμη τη σύνδεση του αισθητήρα με τον προσωπικό μας υπολογιστή, όσον αφορά το υλικό κομμάτι (hardware). Επόμενο βήμα είναι να περιγράψουμε το λογισμικό (software) του αισθητήρα.

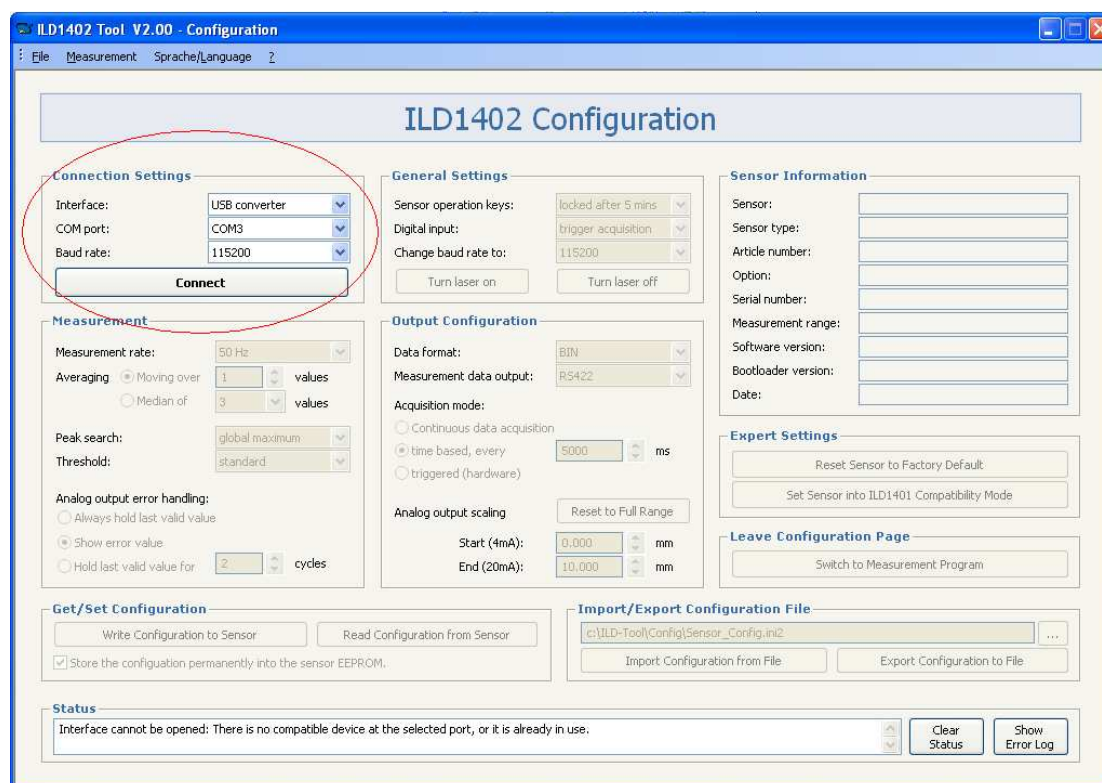
### 5.1.3 Λογισμικό χειρισμού του αισθητήρα



Εικόνα 5.6 Αρχικό μενού του προγράμματος χειρισμού του αισθητήρα

Το λογισμικό του αισθητήρα είναι το ILD1402 tool V2.00 [20] και μας επιτρέπει τον εύκολο χειρισμό του αισθητήρα. Στην εικόνα 5.6 φαίνεται το αρχικό μενού του προγράμματος. Με το που εκκινήσει το πρόγραμμα, ο αισθητήρας δεν έχει αναγνωρισθεί από τον υπολογιστή. Για να εδραιώσουμε την επικοινωνία τους επιλέγουμε τη μόνη δυνατή επιλογή που μας επιτρέπει το πρόγραμμα, δηλαδή τη sensor configuration mode.

Τότε μεταπηδούμε στη σελίδα που φαίνεται στην εικόνα 5.7. Στο πάνω αριστερά μέρος βλέπουμε τρεις επιλογές με τις οποίες καθορίζουμε κάποιες παραμέτρους της σύνδεσης, όπως τη θύρα επικοινωνίας και το Baud rate. Πατώντας την επιλογή Connect το πρόγραμμα προσπαθεί να αναγνωρίσει τον αισθητήρα και να εδραιώσει την επικοινωνία μεταξύ τους.



Εικόνα 5.7 Sensor configuration mode

Μόλις αυτό επιτευχθεί, ενεργοποιούνται και οι υπόλοιπες επιλογές της σελίδας αυτής (εικόνα 5.8). Σε αυτή βλέπουμε εννιά διαφορετικά πεδία επιλογών.

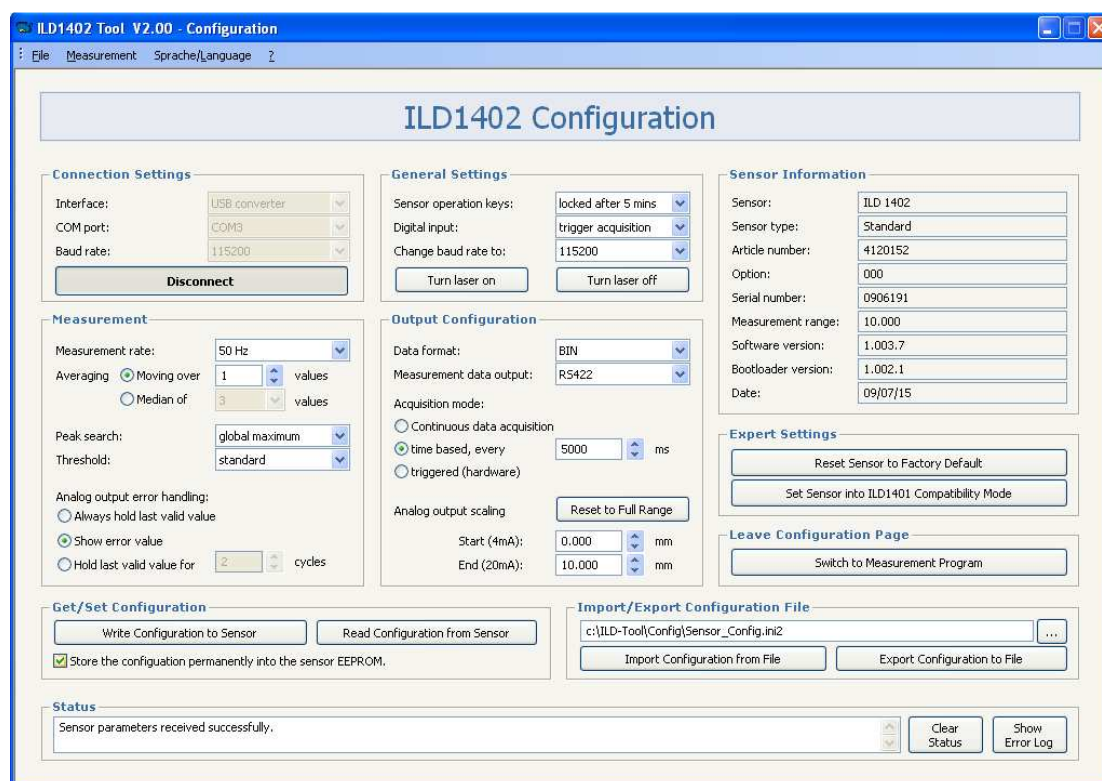
### 1. Measurement

Στο πεδίο αυτό μπορούμε να επιλέξουμε τον επιθυμητό ρυθμό με τον οποίο ο αισθητήρας θα λαμβάνει τιμές (measurement rate) και το αν θα διατηρεί τη μέση τιμή αυτών πχ 5 τιμών ή τον διάμεσο αυτών. Να σημειώσουμε ότι κάθε νέα τιμή που μετράται βάσει του ρυθμού μέτρησης δημιουργεί και ένα νέο δείγμα αριθμών που θα μας δώσει μια νέα επεξεργασμένη τιμή. Πχ έστω ότι έχουμε μετρήσει τις τιμές 1,2,5,5,6,7 και έχουμε ενεργοποιήσει το averaging 5 τιμών. Τότε η τιμή n θα προκύψει από τις 5 πρώτες τιμές (1,2,5,5,6) και η τιμή n+1 από τις 5 τελευταίες (2,5,5,6,7). Επίσης μπορούμε να ορίσουμε το τρόπο που ο αισθητήρας θα αναγνωρίζει αντανakλάσεις από επιφάνειες που καθρεφτίζουν (peak search) και να

θέσουμε υψηλότερο ή χαμηλότερο όριο για τον χαρακτηρισμό των σημάτων ως έγκυρων προς αποφυγή θορύβων (threshold). Τέλος, μπορούμε να ορίσουμε στην ουσία πως θα χειρίζεται το πρόγραμμα τα σήματα σφάλματος (analog error output handling).

## 2. Get/Set configuration

Με τις επιλογές αυτού του πεδίου μπορούμε να στείλουμε τις ρυθμίσεις στον αισθητήρα αλλά και να τις λάβουμε από αυτόν. Τέλος μπορούμε να επιλέξουμε το αν οι ρυθμίσεις που καθορίζουμε θα αποθηκευτούν ή αν στην επόμενη ενεργοποίηση του αισθητήρα θα έχουν χαθεί (store the configuration permanently).



Εικόνα 5.8 Ρύθμιση παραμέτρων αισθητήρα

## 3. Status

Στο πεδίο αυτό μας εμφανίζονται μηνύματα για τη κατάσταση του αισθητήρα, μπορούμε να διαγράψουμε το ιστορικό αυτών των μηνυμάτων και να διαβάσουμε την αναφορά σφαλμάτων του αισθητήρα.

## 4. General settings

Σε αυτό το πεδίο μπορούμε επιλέξουμε τη κατάσταση ενεργοποίησης του πλήκτρου λειτουργίας -select- που έχει ο αισθητήρας (sensor operation key). Επίσης, να θέσουμε την είσοδο του αισθητήρα ως trigger ή ως teach. Με τη λειτουργία trigger ο αισθητήρας πραγματοποιεί μετρήσεις ανάλογα με το σήμα εισόδου του που έχει τη μορφή παλμού, ενώ με τη λειτουργία teach μπορούμε να θέσουμε νέο μικρότερο εύρος μέτρησης για να βελτιώσουμε την ανάλυση. Εναλλακτικά αυτό μπορεί να γίνει

με το πλήκτρο select. Τέλος μπορούμε να θέσουμε νέο Baud rate στην επικοινωνία και να ανοίξουμε ή να κλείσουμε τον αισθητήρα.

## 5. Output configuration

Εδώ ρυθμίζουμε τις παραμέτρους της εξόδου. Αρχικά μπορούμε να επιλέξουμε για τη δομή της δεδομένων μεταξύ BIN και ASCII και το αν θα έχουμε αναλογική ή ψηφιακή έξοδο. Επίσης μπορούμε να ρυθμίζουμε το τρόπο ανάκτησης των δεδομένων ως συνεχούς, διακοπτόμενο (πχ κάθε 5sec) και βάσει της λειτουργίας trigger. Τέλος μπορούμε να ρυθμίσουμε το εύρος μέτρησης για την αναλογική έξοδο.

## 6. Import/Export configuration file

Αποθηκεύουμε τις ρυθμίσεις σε ένα ξεχωριστό αρχείο ή διαβάζουμε τις ρυθμίσεις που υπάρχουν σε κάποιο αρχείο.

## 7. Sensor information

Εδώ αναγράφονται πληροφορίες σχετικά με τον αισθητήρα που είναι συνδεδεμένο το πρόγραμμα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο ειδικά όταν χρησιμοποιούμε πολλαπλούς αισθητήρες.

## 8. Expert settings

Φορτώνουμε στον αισθητήρα τις εργοστασιακές του ρυθμίσεις και μπορούμε να τον θέσουμε σε συμβατότητα με προηγούμενη έκδοση του προγράμματος ILD1401.

## 9. Leave configuration page

Μέσω αυτού του πεδίου μπορούμε να μεταπηδήσουμε στη σελίδα μέτρησης (measurement program) που είναι και η δεύτερη επιλογή του αρχικού μενού (εικόνα 5.9).

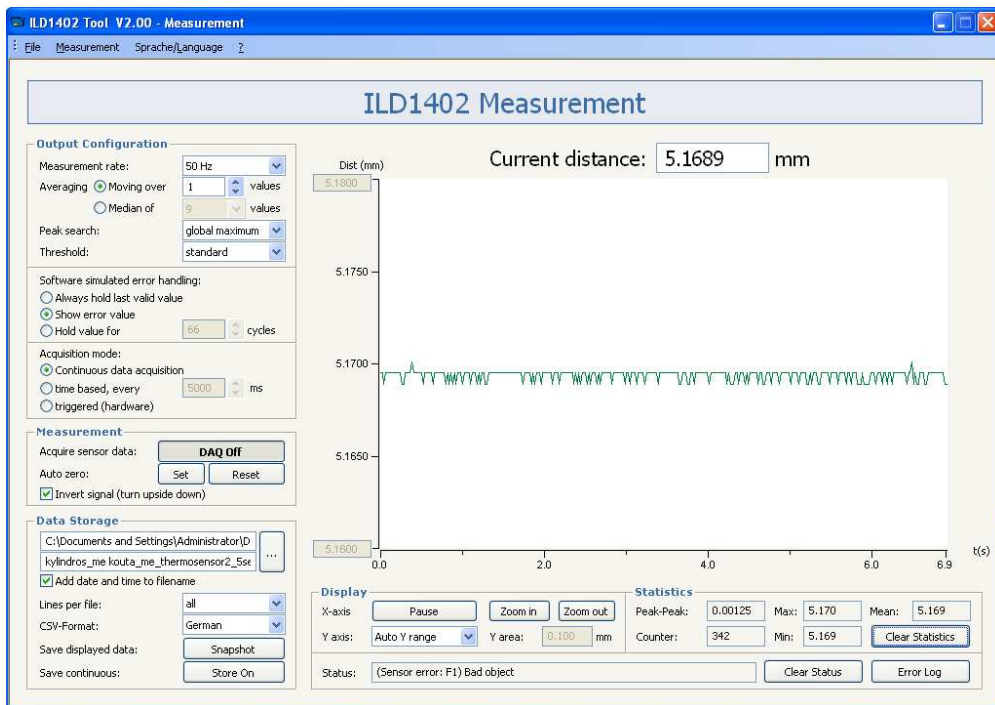
Με το που εμφανισθεί η σελίδα αυτή ο αισθητήρας αρχίζει τη μέτρηση σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που του έχουμε θέσει. Σε αυτή τη σελίδα μπορούμε να αλλάξουμε κάποιες από τις ρυθμίσεις που περιγράψαμε πριν, κατά τη διάρκεια όμως της μέτρησης. Οι νέες δυνατότητες που έχουμε είναι τρεις:

### I. Measurement

Σε αυτό το πεδίο μπορούμε να σταματήσουμε και να ξαναρχίσουμε την ανάκτηση των δεδομένων (DAQ Off/On), ενώ μπορούμε να θέσουμε ως μηδενική τιμή τη τρέχουσα, το SMR ή το EMR.

### II. Data storage

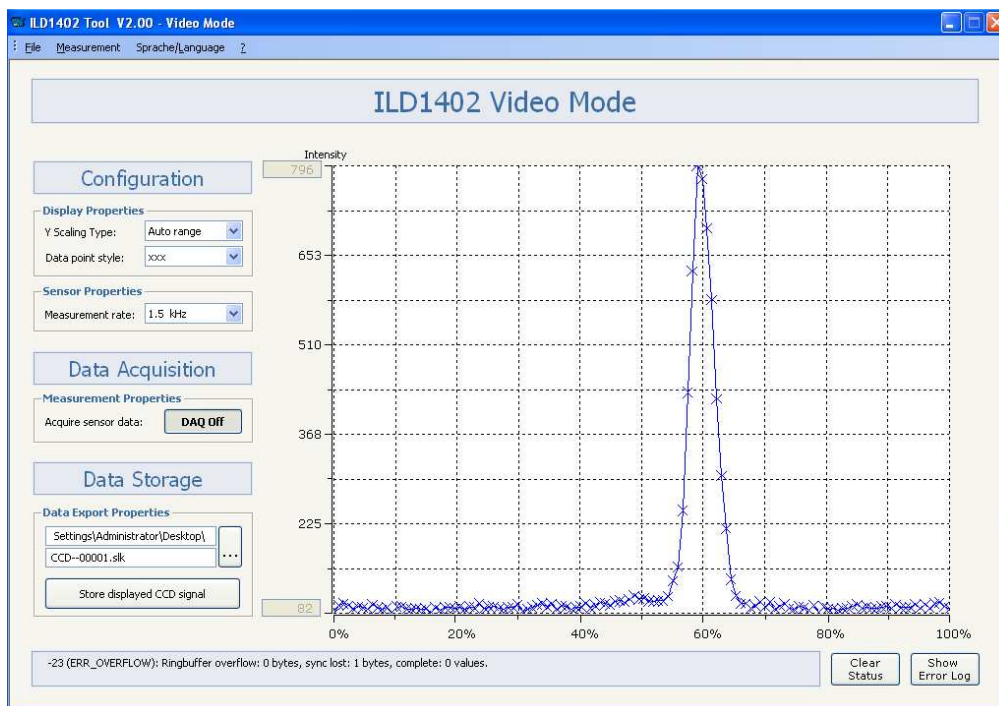
Εδώ μπορούμε να επιλέξουμε την αποθήκευση των δεδομένων αλλά και ρυθμίσουμε τις παραμέτρους αυτής, όπως το όνομα του αρχείου κα.



Εικόνα 5.9 Σελίδα μέτρησης του προγράμματος

### III. Display-Statistics

Με τις επιλογές του πεδίου αυτού μπορούμε να χειριστούμε την γραφική αναπαράσταση των δεδομένων που βλέπουμε ακριβώς πάνω από αυτό το πεδίο και να δούμε κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά αυτής, όπως μέγιστο-ελάχιστο, εύρος, μέση τιμή.

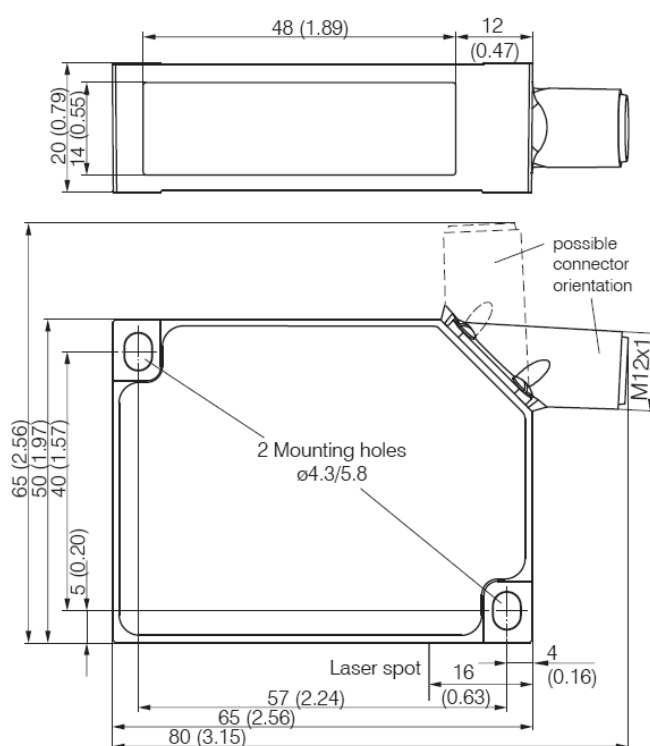


Εικόνα 5.10 Σελίδα video mode του προγράμματος

Τέλος το πρόγραμμα έχει μία τρίτη επιλογή, τη video mode, που ήταν και στη σελίδα του αρχικού μενού. Για να μεταβούμε σε αυτή πατάμε στη γραμμή εργασιών του παραθύρου Measurement>Video Mode. Τότε εμφανίζεται η σελίδα με τις αντίστοιχες επιλογές (εικόνα 5.10). Στη σελίδα αυτή βλέπουμε μια γραφική αναπαράσταση της έντασης του φωτός που συλλέγει ο αισθητήρας CCD. Έχουμε τη δυνατότητα αποθήκευσης αυτών των δεδομένων, προσδιορισμού του ρυθμού μέτρησης του αισθητήρα και ρύθμισης των παραμέτρων της γραφικής απεικόνισης.

#### 5.1.4 Άλλα χαρακτηριστικά

Δεν έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Στην εικόνα 5.11 βλέπουμε δύο όψεις του αισθητήρα με τις διαστάσεις του.



Εικόνα 5.11 Σκαρίφημα του αισθητήρα [20]

Ο αισθητήρας διαθέτει δύο ελλειπτικές οπές αντιδιαμετρικά για τη στερέωση του. Επίσης η αρσενική υποδοχή σύνδεσης με καλώδιο μπορεί να έχει δύο κατευθύνσεις, οριζόντια και κάθετα ανάλογα με τη περιβάλλουσα χωροταξία.

Στο πάνω μέρος του ο αισθητήρας, εκτός από το πλήκτρο select για το οποίο μιλήσαμε προηγουμένως, διαθέτει μία ένδειξη τύπου LED. Αυτή μπορεί να έχει τρία διαφορετικά χρώματα ανάλογα με τη κατάσταση του αισθητήρα (status). Όταν μετράται ένα αντικείμενο εντός του εύρους μέτρησης είναι πράσινο, όταν το αντικείμενο είναι στο μέσο του εύρους είναι κίτρινο και όταν έχουμε κάποιο σφάλμα στη μέτρηση ή ο αισθητήρας έχει απενεργοποιηθεί είναι κόκκινο.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί ο controller για να υπολογίσει την μετρούμενη τιμή. Για την αναλογική έξοδο, όταν έχουμε ως σημείο αναφοράς την αρχή του εύρους μέτρησης (SMR) τότε η εξίσωση είναι:

$$x \text{ [mm]} = (I_{\text{OUT}} - 4 \text{ mA}) * \frac{\text{MR [mm]}}{16 \text{ [mA]}}$$

ενώ για την ψηφιακή έξοδο έχουμε:

$$x \text{ [mm]} = (\text{digital}_{\text{OUT}} * \frac{1.02}{16368} - 0.01) * \text{MR [mm]}$$

όταν αλλάζει το σημείο αναφοράς πχ έχουμε ως τέτοιο το τέλος του εύρους μέτρησης, αφαιρείται από τις εξισώσεις το MR (εύρος μέτρησης). Να σημειώσουμε ότι ο ρυθμός με τον οποίο αποθηκεύονται τα δεδομένα (output rate) δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό μέτρησης και δίνεται από το παρακάτω τύπο:

$$\text{Output rate} = \text{Measuring rate} / n$$

Abbreviations used:

n = Partial factor

int = Integral part of ( )

b = Byte/measurement value (binary format b=2, ASCII b=6)

MR = Measurement rate [Hz]

BR = Baud rate [Baud]

$$n = \text{int} (b * 11 * \text{MR} / \text{BR}) + 1$$

### 5.1.5 Σφάλματα

Σφάλματα στη μέτρηση μπορούν να προκληθούν τόσο από τη ποιότητα της επιφάνειας του μετρούμενου αντικείμενου όσο και από τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της μέτρησης. Για παράδειγμα οι έντονα αντανάκλαστικές επιφάνειες δημιουργούν προβλήματα στην αναγνώριση της σωστής ακτίνας από τον αισθητήρα CCD. Σε αυτή τη περίπτωση χρειάζεται μεγαλύτερη έκθεση του αντικείμενου στην ακτίνα ή αλλιώς σχετικά μικρό ρυθμό μέτρησης. Επιπλέον, μπορεί να προκύψουν προβλήματα, εάν το αντικείμενο κινείται γρήγορα, ή υποβάλλεται σε μηχανικές δονήσεις ή έχει διαφορετικά έντονα χρώματα.

Σφάλματα στη μέτρηση προκαλεί και η μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο του περιβάλλοντος όσο και του ίδιου του αισθητήρα. Συγκεκριμένα, όταν ενεργοποιείται ο αισθητήρας, το διαρρέον ρεύμα προκαλεί απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του και προβλήματα στη μέτρηση. **Προς αποφυγήν αυτού, συνίσταται να αφήνουμε τον αισθητήρα να λειτουργεί για περίπου 20 λεπτά χωρίς να καταγράφουμε τις μετρήσεις ώστε να προθερμανθεί (warm-up time).** Τέλος μετρητικά σφάλματα μπορεί να προκαλέσουν όπως είναι φυσικό και γεωμετρικές ατέλειες, όπως η ύπαρξη μη καταγεγραμμένων γωνιών κατά τη διεξαγωγή της μέτρησης.

### 5.2 Μηχανισμός κίνησης δοκιμίων

Σύμφωνα με τη γενική ιδέα της διάταξης, πρέπει να υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δοχείου των δοκιμίων και του αισθητήρα, ώστε να μπορεί αυτός να

λαμβάνει μετρήσεις από όλα τα δοκίμια. Ο αισθητήρας θα παραμένει σταθερός και το δοχείο θα μετακινείται κάθε φορά στην επιθυμητή θέση για τη μέτρηση του επόμενου δοκιμίου. Για το σκοπό αυτό, όπως αναφέραμε, θα χρησιμοποιηθεί ένας μηχανισμός κίνησης στους δύο οριζόντιους άξονες του χώρου (εικόνα 5.12), σε καθένα από τους οποίους η κίνηση θα πραγματοποιείται από ένα βηματικό κινητήρα.



Εικόνα 5.12 Ο μηχανισμός xy stage

Επίσης υπάρχουν και δύο πλατφόρμες που συνδέονται με τους κινητήρες μέσω ενός συστήματος με ιμάντες, ώστε η περιστροφική κίνηση των κινητήρων να μετατρέπεται σε γραμμική. Οι δύο κινητήρες ελέγχονται από μία κάρτα ελέγχου βηματικών κινητήρων, απ' όπου αντλούν και την απαραίτητη ισχύ και έτσι ο χειρισμός τους γίνεται μέσω προσωπικού υπολογιστή. Χάριν συντομίας, από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε στο μηχανισμό αυτό ως *xy stage*.

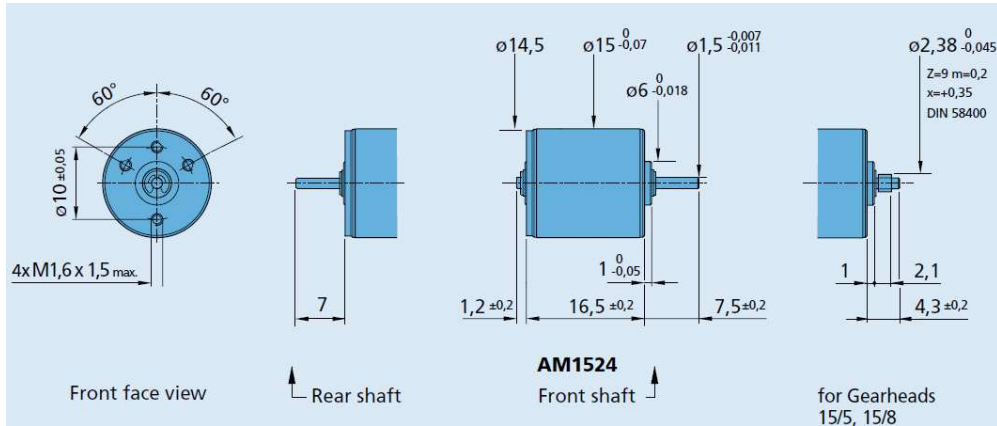
### 5.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες

Το xy stage χρησιμοποιεί δύο ίδιους βηματικούς κινητήρες για την πραγματοποίηση της κίνησης στους δύο άξονες. Οι κινητήρες αυτοί είναι διαφασικοί και συγκεκριμένα είναι το μοντέλο AM1524 A-0.25-12.5 της Faulhaber [23]. Σε μία πλήρη περιστροφή της ατράκτου τους πραγματοποιούν 24 βήματα (steps) ή αλλιώς κάθε βήμα τους αντιστοιχεί σε  $15^\circ$  γωνιακής μετατόπισης. Η ονομαστική τάση λειτουργίας τους είναι 3.5V και το ονομαστικό ρεύμα 0.25A ανά φάση. Η ακρίβεια στην μετατόπιση της ατράκτου είναι  $\pm 10\%$  ενός βήματος, ενώ η άτρακτος διαμέτρου 1.5mm μπορεί να φέρει φορτία 0.5N ακτινικά και 0.5N αξονικά. Στην εικόνα 5.13 βλέπουμε ένα σκαρίφημα με τις διαστάσεις τους.

Στην κάθε άτρακτο είναι πακτωμένη μία οδοντωτή τροχαλία διαμέτρου 9.9mm μέσω της οποίας μεταφέρεται η κίνηση στον κάθε ιμάντα. Και οι δύο ιμάντες είναι πακτωμένοι στο μέσον του μήκους τους πάνω στις δύο πλατφόρμες αντίστοιχα. Οι πλατφόρμες αυτές διαθέτουν από ένα σύστημα οδηγού γραμμικής κίνησης με σφαίρες κύλισης. Έτσι η περιστροφική κίνηση της ατράκτου του κινητήρα μετατρέπεται σε γραμμική κίνηση των δύο πλατφορμών. Επίσης στα άκρα της διαδρομής κάθε πλατφόρμας υπάρχουν δύο αισθητήρες. Όταν η πλατφόρμα φθάσει σε ένα άκρο της διαδρομής της ενεργοποιεί τον αισθητήρα και αυτός με τη σειρά του



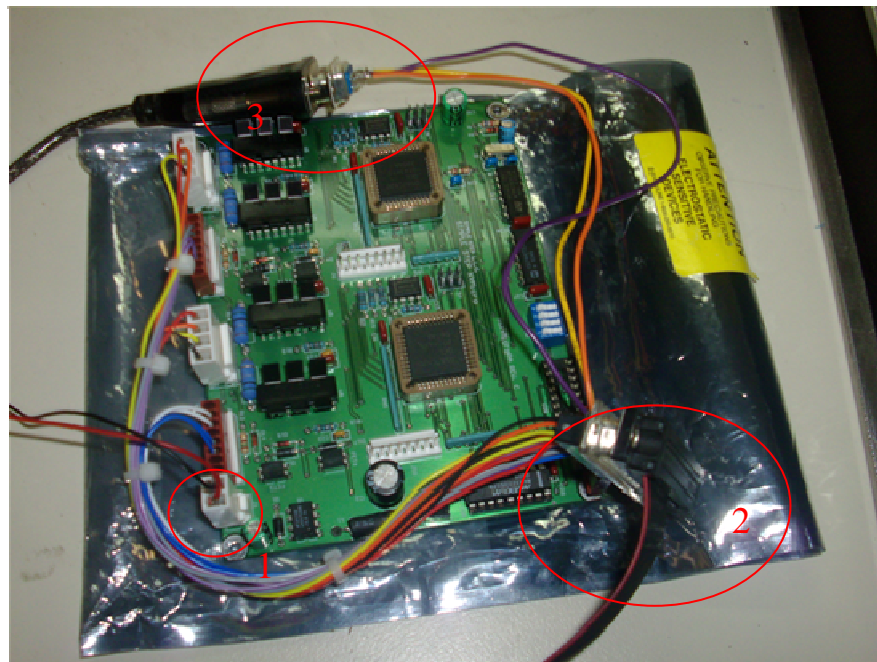
στέλνει σήμα στην κάρτα ελέγχου και έτσι ακινητοποιείται η πλατφόρμα. Οι αισθητήρες αυτοί αναγνωρίζονται από την κάρτα ελέγχου ως home (αρχή της διαδρομής) και limit (τέλος της διαδρομής) κάτι που ορίζεται από το χρήστη με κάθε εκκίνηση του προγράμματος. Το σύνολο της διαδρομής κάθε πλατφόρμας είναι περίπου 4.8'' ή 122mm.



Εικόνα 5.13 Σκαρίφημα του βηματικού κινητήρα

### 5.2.2 Σύνδεση με προσωπικό υπολογιστή

Το xy stage ελέγχεται από μία ειδική κάρτα ελέγχου βηματικών κινητήρων. Μέσω αυτής, οι κινητήρες δέχονται εντολές κίνησης και άλλες και στέλνονται τα κατάλληλα σήματα για τον έλεγχο της κίνησης (home sensor, απόλυτη θέση κινητήρα κα). Η κάρτα που χρησιμοποιείται είναι της σειράς Simple Step και συγκεκριμένα το μοντέλο SSXYMicro (εικόνα 5.14). Στο κάτω αριστερά μέρος της εικόνας (κύκλος 1) φαίνεται η σύνδεση της κάρτας με το τροφοδοτικό της (εικόνα 5.15). Η τάση εισόδου της κάρτας είναι 12V συνεχούς τάσης.



Εικόνα 5.14 Κάρτα ελέγχου SSXYMicro

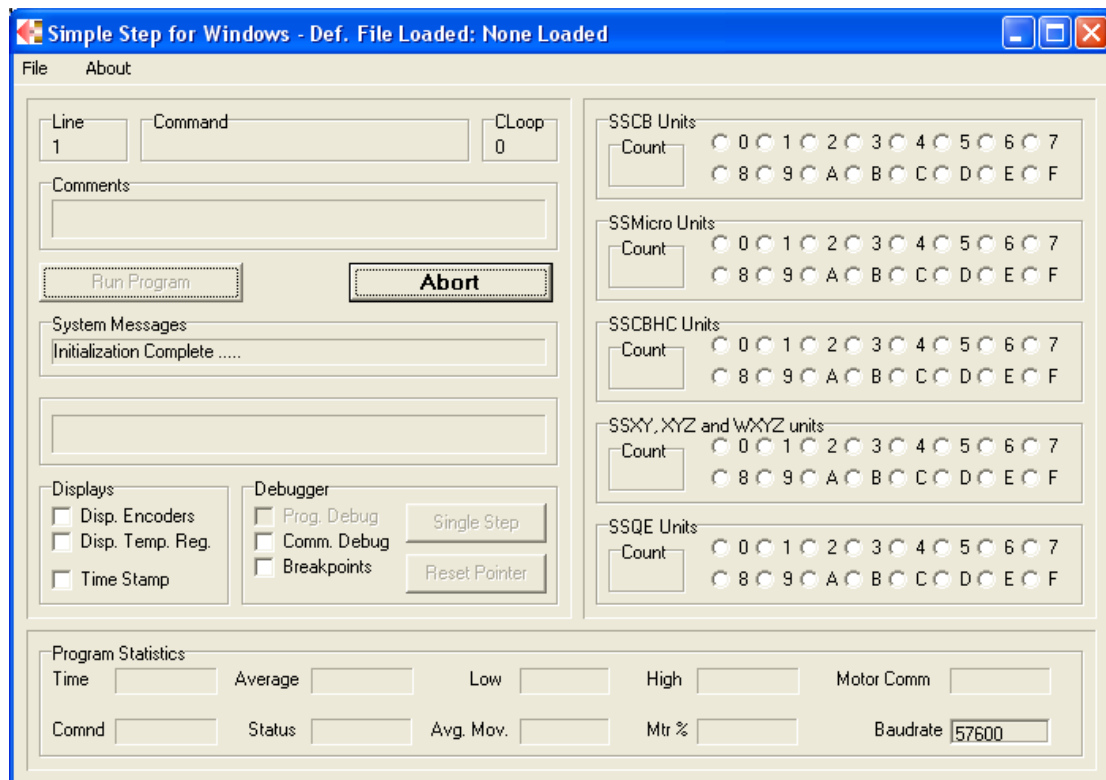
Κάτω δεξιά στον κύκλο δύο φαίνεται η σύνδεση της κάρτας ελέγχου με τους βηματικούς κινητήρες (κύκλος 2), ενώ στο πάνω μέρος της εικόνας 5.14 φαίνεται η σύνδεση της κάρτας ελέγχου με τον προσωπικό υπολογιστή, βάσει του πρωτοκόλλου RS232 (κύκλος 3).



Εικόνα 5.15 Τροφοδοτικό 12VDC της κάρτας ελέγχου

### 5.2.3 Χειρισμός του xy stage

Όπως αναφέραμε, το xy stage συνδέεται σειριακά με προσωπικό υπολογιστή μέσω της κάρτας ελέγχου. Ο χειρισμός του πραγματοποιείται με χρήση του προγράμματος SSWin (εικόνα 5.16). Η έκδοση που χρησιμοποιήσαμε ήταν η 1.0.4. Με την εκκίνηση του προγράμματος ο χρήστης καλείται να επιλέξει το Baud rate της σύνδεσης. Ακολούθως το πρόγραμμα αναζητά για κάρτες ελέγχου που να είναι συνδεδεμένες στον υπολογιστή και ενεργοποιημένες.



Εικόνα 5.16 Κεντρική σελίδα προγράμματος SSWin

Οι εντολές κίνησης και όλες οι υπόλοιπες εντολές εισάγονται μέσω αυτού του προγράμματος με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να φορτώσει το πρόγραμμα ένα αρχείο της γενικής ονομασίας \*.def στο οποίο περιέχονται τυποποιημένες εντολές. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε το πρόγραμμα OldSSXYMicro.def αναφέροντας έτσι κάποιες από τις βασικές εντολές. Το αρχείο μπορούμε να το φορτώσουμε επιλέγοντάς το από File>Load Define File. Επίσης μπορούμε να το επεξεργαστούμε από File>Edit Define File.

#### OldSSXYMicro.def

ssxyz,0,"GGH4";	ορίζουμε στη κάρτα της θέσης 0, σε όλους τους άξονες (GG) ως μέθοδο βηματισμού το 1/16. Γενικά έχουμε 0: 1/1, 1: 1/2, 2: 1/4, 3: 1/8, 4: 1/16, 5: 1/32.
ssxyz,0,"GGP128,0,0";	Ορίζουμε σε όλους τους άξονες μέγιστη τιμή ρεύματος, τιμή ρεύματος ακινησίας και ρεύμα μικροβήματος
ssxyz,0,"GGN+0HLS";	Ορίζουμε τη θετική φορά κίνησης όλων των αξόνων
ssxyz,0,"GGE3000";	Θέτουμε τη ταχύτητα εκκίνησης
ssxyz,0,"GGB100";	Θέτουμε την τελική ταχύτητα
ssxyz,0,"GGS7";	Θέτουμε τη τιμή της επιτάχυνσης/επιβράδυνσης
ssxyz,0,"XM20000,YM15000";	Δίνουμε εντολή στον άξονα X να κινηθεί στη θέση 20000 και στον Y στη θέση 15000
wait_ssxyz_done,0,X;	Δίνουμε εντολή αναμονής της ολοκλήρωσης της κίνησης του άξονα X
wait_ssxyz_done,0,Y;	Αναμονή ολοκλήρωσης της κίνησης του άξονα Y
end_program;	Τέλος προγράμματος

Να σημειώσουμε ότι στις εντολές M, η τιμή που εισάγουμε αντιστοιχεί σε απόσταση τόσο αριθμού βημάτων από την αρχή της διαδρομής. Επίσης η τιμή που εισάγουμε στις εντολές ταχύτητας είναι μία ψηφιακή τιμή (user value) που αντιστοιχίζεται σε βήματα ανά δευτερόλεπτο (sps) και αντίστροφα με τους τύπους:

$$\text{Steps per second (sps)} = 1 / [(46379 - \text{User Value}) * 0.0000005425347]$$

$$\text{User Value} = 46379 - [(1 / \text{sps}) / 0.0000005425347]$$

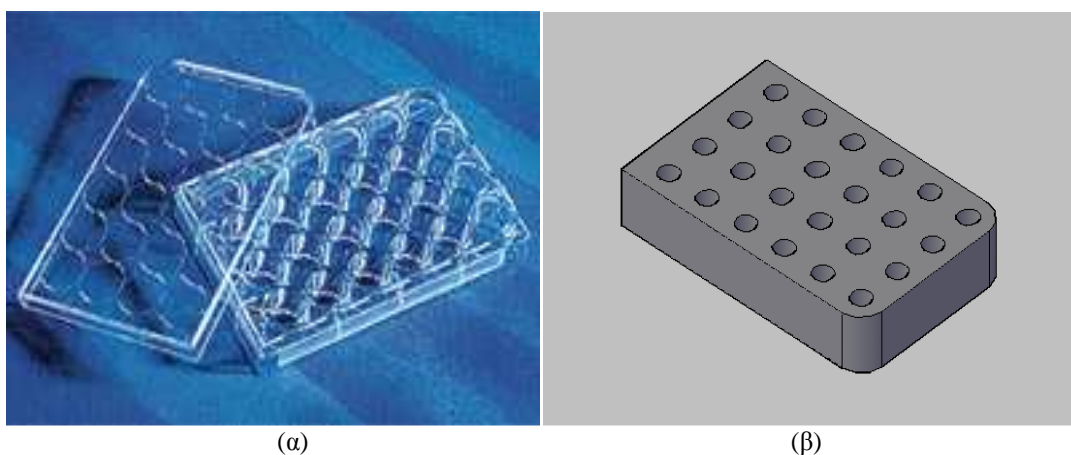
Ο δεύτερος τρόπος να εισάγουμε εντολές είναι μεμονωμένα επιλέγοντας File>Terminal and Network Scanning και εισάγοντας στο παράθυρο που εμφανίζεται την εντολή που θέλουμε, πχ GGH2. Όταν θέλουμε να δώσουμε εντολή πχ στον X άξονα της θέσης 15 (F) να κινηθεί στη θέση 2000 πληκτρολογούμε XFM2000<enter>. Ο τρόπος αυτός επικοινωνίας είναι χρήσιμος γιατί μπορούμε να ζητήσουμε από τη κάρτα ελέγχου να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με τη κατάστασή της. Εάν θέλουμε πχ την τρέχουσα θέση του άξονα Y πληκτρολογούμε YFm<enter> και το πρόγραμμα μας απαντάει με την πληροφορία που ζητήσαμε.

Περισσότερες πληροφορίες για το χειρισμό του xy stage μπορούμε να προμηθευθούμε από το εγχειρίδιο της κάρτας ελέγχου [24]. Η περαιτέρω περιγραφή και ανάλυση του xy stage δεν είναι αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και η σύντομη αναφορά σε αυτό το μηχανισμό έγινε για λόγους πληρότητας της παρουσίασης της διάταξης μέτρησης των δοκιμίων.

### 5.3 Φορείς συμπίεσης

Όπως αναφέραμε στη γενική ιδέα της διάταξης, το κάθε δοκίμιο θα συμπιέζεται από έναν κυλινδρικό φορέα συμπίεσης. Οι φορείς αυτοί θα έχουν διπλό ρόλο. Πέρα από τη καταπόνηση χαλάρωσης των δοκιμίων με την άσκηση του ίδιου τους του βάρους, θα λειτουργούν και ως επιφάνειες μέτρησης. Η παραμόρφωση των δοκιμίων λόγω της ασκούμενης πίεσης, αναπόφευκτα θα σημαίνει και μία μετατόπιση των φορέων. Η μετατόπιση αυτή θα μετράται με τον αισθητήρα απόστασης και έτσι θα εξάγεται και η παραμόρφωση των δοκιμίων.

Για να καταστεί δυνατή η άσκηση της δύναμης από τους φορείς στα δοκίμια, πρέπει να εξασφαλίσουμε την καθετότητα των φορέων χωρίς όμως να επηρεάζεται η ασκούμενη δύναμη. Για το λόγο αυτό, θα χρησιμοποιηθεί μία ορθογωνική πλάκα κατάλληλου πάχους (εικόνα 5.17β), η οποία θα εφαρμόζει στο πάνω μέρος του δοχείου των δοκιμίων (εικόνα 5.17α). Επίσης θα έχει τόσες κάθετες οπές όσα θα είναι και τα πηγάδια του δοχείου ή αλλιώς όσα θα είναι τα δοκίμια μέσα από τις οποίες θα διέρχεται ο φορέας για τη πραγματοποίηση της συμπίεσης. Η διάμετρος των οπών αυτών θα είναι τέτοια ώστε να μην επιτρέπει στο φορέα σχετικά μεγάλη απόκλιση από την επιθυμητή καθετότητα αλλά ούτε να εμποδίζει το φορέα κατά τη συμπίεση λόγω τριβών. Χάριν συντομίας, από δω και στο εξής θα αναφερόμαστε στη πλάκα ως οδηγό φορέων.

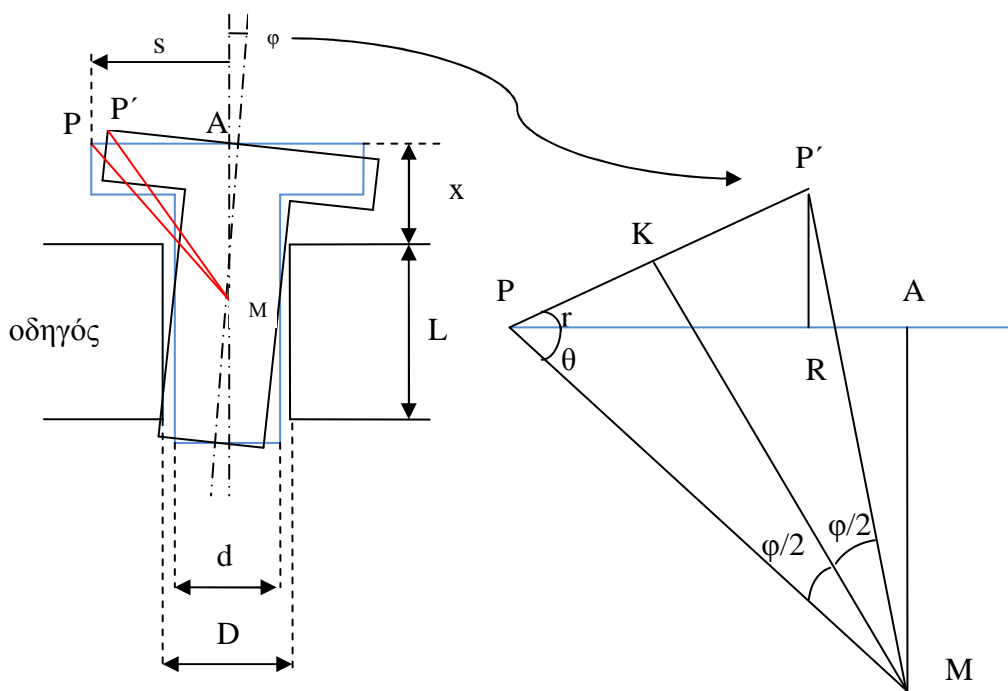


Εικόνα 5.17 Δοχείο δοκιμίων(α) και πλάκα-οδηγός(β)

Τέλος, στο πάτο κάθε πηγαδιού θα τοποθετηθεί ένας κυλινδρικός δακτύλιος. Η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου θα είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του δοκιμίου και ο σκοπός του θα είναι το κεντράρισμα των δοκιμίων κατά τη τοποθέτησή τους στα πηγάδια και να αποτρέπουν τη πλάγια μετατόπισή τους κατά τη συμπίεση. Η κάτω επιφάνεια του δακτυλίου θα είναι επίπεδη ενώ η πάνω κωνική ώστε να μην εμποδίζεται η ροή του ρευστού του δοκιμίου κατά τη συμπίεση, κάτι που θα αλλοίωνε σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα των δοκιμών.

#### 5.3.1 Υπολογισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του φορέα συμπίεσης και του οδηγού των φορέων, θεωρούμε έναν φορέα διαμέτρου  $d$  και τον οδηγό πάχους  $L$ , με οπές διαμέτρου  $D$  (σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1 Σκαρίφημα υπολογισμού γεωμετρίας

Θεωρούμε ότι η διάμετρος  $D$  είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο  $d$ , έτσι ώστε η συμπίεση να γίνεται ανεμπόδιστα και με μικρή τιμή της δύναμης αντίστασης λόγω τριβής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο φορέας να αποκλίνει από τον κάθετο άξονά του και να στρέφεται κατά γωνία  $\varphi$  γύρω από άξονα κάθετο στο επίπεδο του χαρτιού που διέρχεται από το σημείο  $M$ . Το  $M$  βρίσκεται στο μέσον της απόστασης  $L$  και στο μέσον των διαμέτρων  $D, d$ .

Αυτό το οποίο θα εξετάσουμε είναι η επίδραση της στροφής του φορέα στην μέτρηση της απόστασης από τον αισθητήρα. Υποθέτουμε ότι η ακτίνα laser προσκρούει στην επιφάνεια μέτρησης σε ένα σημείο  $P$ , το οποίο βρίσκεται σε απόσταση  $s/2$  από τον κάθετο άξονα του φορέα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1, εάν έχει στραφεί ο φορέας, το σημείο  $P$  μετατοπίζεται και έτσι προκαλείται ένα σφάλμα στη μέτρηση ίσο με την απόσταση  $P'R$ . Θα υπολογίσουμε την τιμή του σφάλματος αυτού για δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και θα αξιολογήσουμε την επάρκειά τους. Έστω ότι έχουμε:

$$s = 1, x = 1, L = 20, D = 9, d = 8.98$$

Αρχικά θα υπολογίσουμε την γωνία στροφής  $\varphi$ .

$$\varphi = a \tan\left(\frac{D-d}{L}\right) = a \tan\left(\frac{0.02}{20}\right) = a \tan(0.001) = 0.001 \text{ rad} = 0.0573^\circ$$

Ακολούθως θα υπολογίσουμε τις γωνίες  $\theta, r$ . Τα ευθύγραμμα τμήματα  $PM$  και  $P'M$  έχουν ίσο μήκος καθώς αποτελούν το ίδιο γεωμετρικό χαρακτηριστικό για το κάθετο και τον υπό γωνία φορέα αντίστοιχα. Έτσι το τρίγωνο  $PP'M$  είναι ισοσκελές. Η γωνία  $P'MP$  είναι ίση με  $\varphi$  αφού όσο στράφηκε ο κάθετος άξονας τόσο στράφηκε και ο φορέας και άρα το ευθύγραμμο τμήμα  $PM$ .

Η γωνία  $\theta$  υπολογίζεται με βάση το ορθογώνιο τρίγωνο  $PAM$  ως εξής

$$\theta = a \tan\left(\frac{\frac{L}{2} + x}{\frac{s}{2}}\right) = a \tan\left(\frac{L + 2 * x}{s}\right) = a \tan\left(\frac{20 + 2 * 1}{1}\right)$$

$$= a \tan(22) = 1.5254 \text{ rad} = 87.4^\circ$$

Για τη γωνία  $r$ , φέρουμε τη μεσοκάθετο  $KM$  του ισοσκελούς τριγώνου  $PP'M$  και ο υπολογισμός της θα γίνει με βάση το ορθογώνιο τρίγωνο  $PKM$ . Αφού το τρίγωνο είναι ορθογώνιο τότε το άθροισμα των γωνιών  $\theta, r, \varphi/2$  είναι ίσο με  $90^\circ$ . Τότε έχουμε

$$r = \frac{\pi}{2} - \theta - \frac{\varphi}{2} = 0.0449 \text{ rad} = 2.5739^\circ$$

Έχοντας υπολογίσει τις γωνίες μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό της απόστασης  $P'R$ . Αρχικά παρατηρώντας το ορθογώνιο τρίγωνο  $PP'R$  βλέπουμε ότι

$$P'R = PP' * \sin(r) = 2 * KP * \sin(r) \quad (5.1)$$

αφού η  $KM$  είναι μεσοκάθετος του τριγώνου  $PP'R$  και άρα  $PP' = 2 * KP$ .

Όσον αφορά στην  $KP$ , βάσει του ορθογώνιου τριγώνου  $KMP$  ισχύει ότι

$$KP = PM * \sin(\varphi / 2) \quad (5.2)$$

Οπότε αντικαθιστώντας την (5.2) στην (5.1) έχουμε

$$P'R = 2 * PM * \sin(\varphi / 2) * \sin(r) \quad (5.3)$$

Παραπέρα, η  $PM$  είναι υποτείνουσα του ορθογώνιου τριγώνου  $PMA$ , όπου έχουμε

$$AM = \frac{L}{2} + x \quad \text{και} \quad AP = \frac{s}{2} \quad (5.4)$$

οπότε, σύμφωνα με το πυθαγόρειο θεώρημα έχουμε

$$PM^2 = AM^2 + AP^2 \Rightarrow PM = \sqrt{AM^2 + AP^2} \quad (5.5)$$

και αντικαθιστώντας τις (5.4) στην (5.5) έχουμε

$$PM = \sqrt{\left(\frac{L}{2} + x\right)^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (5.6)$$

έτσι, αντικαθιστώντας την (5.6) στην (5.3) έχουμε

$$P'R = 2 * \sqrt{\left(\frac{L}{2} + x\right)^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} * \sin(\varphi / 2) * \sin(r) \quad (5.7)$$

και αν κάνουμε τις αριθμητικές αντικαταστάσεις προκύπτει

$$P'R = 0.4945 \mu m$$

*Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι σε μία περιοχή διαμέτρου 1mm της επιφάνειας μέτρησης, το σφάλμα με τα δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι περίπου 0.5μm, που είναι αρκετά μικρό με βάση τις απαιτήσεις της μέτρησης. Να σημειώσουμε ότι η απόσταση x δεν παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο του σφάλματος. Χαρακτηριστικό είναι ότι για x=0mm έχουμε σφάλμα 0.495μm και για x=10mm έχουμε σφάλμα 0.49μm. Οπότε καταλήγουμε στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά*

$$D = 9mm, d = 8.98mm, L = 20mm$$

ενώ θα περιορίζουμε το σημείο πρόσπτωσης της ακτίνας laser σε μία ακτίνα 0.5mm γύρω από τον κάθετο άξονα του φορέα (περιοχή διαμέτρου s=1mm). Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς εάν s=5mm τότε το σφάλμα γίνεται περίπου 2.5μm. Έχοντας προσδιορίσει τη διάμετρο των οπών του οδηγού και το πάχος του έχουμε όλα τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, αφού τα υπόλοιπα ακολουθούν τη γεωμετρία του δοχείου των δοκιμών.

Όσον αφορά στον φορέα συμπίεσης, το μόνο που έχουμε καθορίσει είναι η διάμετρος του στη περιοχή όπου θα διέρχεται από τον οδηγό. Τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θα προκύψουν με βάση το επιθυμητό βάρος του αλλά και το βάθος των πηγαδιών και το πάχος του οδηγού. Η συνολική μάζα του προς κατασκευή φορέα θέλουμε να είναι περίπου 16-18g. Υποθέτουμε ότι θα κατασκευαστεί από αλουμίνιο πυκνότητας  $\rho=3g*cm^{-3}$ .

Ξέρουμε ότι ο φορέας στο ύψος που διέρχεται μέσα από την οπή του οδηγού (L=20mm) θα έχει διάμετρο  $d_1=8.98mm$ . Ακριβώς πάνω από αυτό το τμήμα του θα εκτείνεται ένα κυλινδρικό τμήμα διαμέτρου  $d_2$  και ύψους b τέτοια ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συνολικού βάρους του φορέα. Άρα θα έχουμε:

$$m = 16g = \rho * V = 3 * 10^{-3} gmm^{-3} * (L * \frac{\pi d_1^2}{4} + b * \frac{\pi d_2^2}{4}) mm^3 \Rightarrow$$

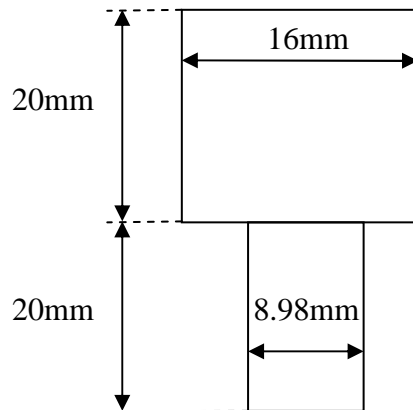
$$16 = 3 * 10^{-3} * (20 * \frac{\pi * 8.98^2}{4} + b * \frac{\pi d_2^2}{4}) \Rightarrow$$

$$\frac{48.8 * 10^3}{3\pi} = b * d_2^2 \quad (5.8)$$

Εάν στην (5.8) αντικαταστήσουμε  $b=20mm$  προκύπτει  $d_2=16.09mm$ . Έτσι επιλέγουμε

$$b = 20mm, d_2 = 16mm$$

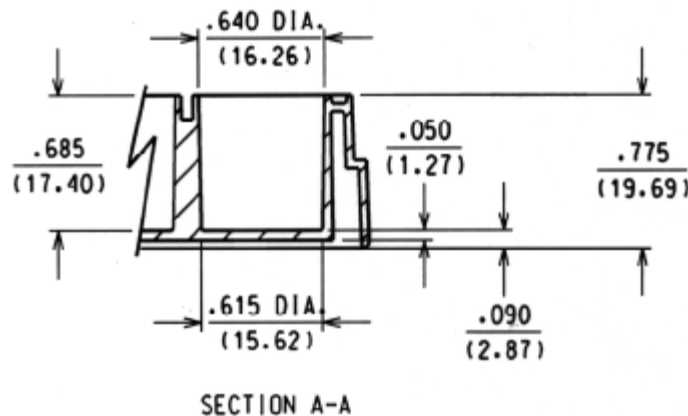
Οπότε έχουμε όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φορέα ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 5.2, μάζας περίπου 16g.



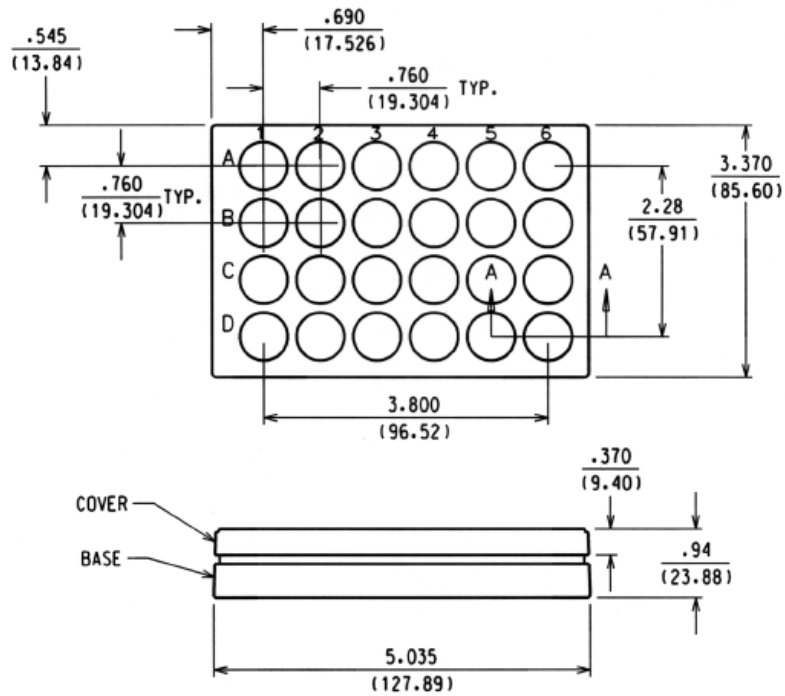
Σχήμα 5.2 Κυλινδρικός φορέας συμπίεσης

### 5.3.2 Κατασκευή

Αφού έχουν υπολογιστεί και αποφασισθεί όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδηγού των φορέων, του δακτυλίου και των φορέων μπορούμε να περάσουμε στη κατασκευή και στη παρουσίασή τους.

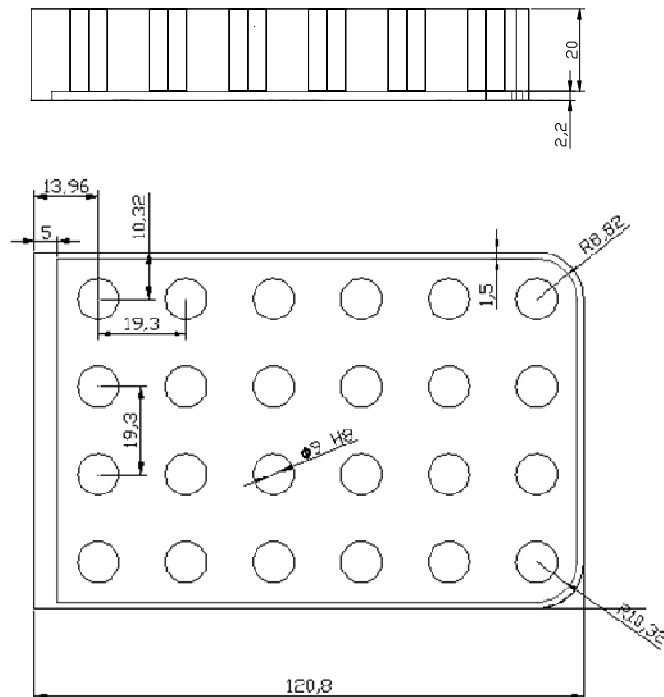






Εικόνα 5.18 Σκαρίφημα του δοχείου δοκιμών(www.corning.com)

Ο οδηγός των φορέων ακολουθεί πιστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοχείου των δοκιμών (εικόνα 5.18), ενώ η διάμετρος των οπών του είναι 9mm. Στην εικόνα 5.19 φαίνεται το σκαρίφημα του οδηγού των φορέων.



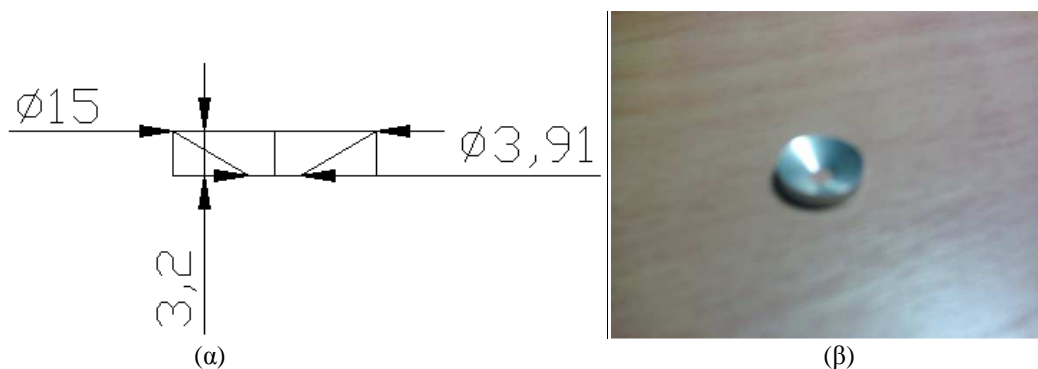
Εικόνα 5.19 Σκαρίφημα του οδηγού φορέων

Αρχικά κατασκευάστηκε μόνο η πάνω αριστερά γωνία του οδηγού (εικόνα 5.20) με μόνο μία οπή ώστε να εξετασθεί η λειτουργικότητα του ζεύγους φορέας-οδηγός.



Εικόνα 5.20 Γωνία του οδηγού φορέων

Αντίστοιχα κατασκευάστηκε ένας δακτύλιος και ένας φορέας. Στην εικόνα 5.21α φαίνεται το σκαρίφημα του δακτυλίου και στην 5.21β μία φωτογραφία του.

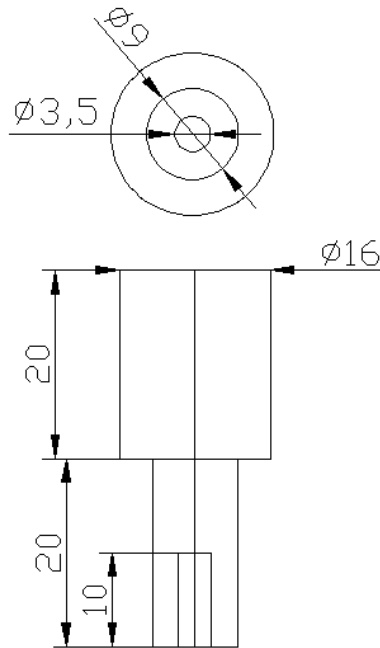


Εικόνα 5.21 Σκαρίφημα(α) και φωτογραφία(β) του δακτυλίου

Τέλος προχωρήσαμε και στη κατασκευή του φορέα. Εδώ θα αναφέρουμε ένα ακόμα χαρακτηριστικό των φορέων. Για λόγους χρηστικότητας ο φορέας θα αποτελείται από δύο κομμάτια. Το ένα θα είναι αυτό που αναλύθηκε πριν και φαίνεται στο σχήμα 5.2 και το άλλο θα είναι ένας ειδικός φορέας που θα έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο διαμέτρου 3.5mm, μήκους 20mm με σφαιρικό άκρο. Ο φορέας που περιγράψαμε πριν θα έχει μία οπή λίγο μεγαλύτερη από 3.5mm ώστε να υποδέχεται αυτόν που θα έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο.



Εικόνα 5.22 Ο φορέας συμπίεσης με τα δύο τμήματά του



Εικόνα 5.23 Σκαρίφημα του φορέα

Επίσης θα έχει μία οπή με σπείρωμα κάθετη στον άξονά του ώστε να συσφίγγεται ο φορέας με επαφής με αυτόν που τον υποδέχεται. Αυτό γίνεται ώστε να μην χρειάζεται να αλλάζει ολόκληρος ο φορέας πχ εάν θέλουμε επίπεδη επαφή με το δοκίμιο και όχι σφαιρική, αλλά μόνο το άκρο του που πραγματοποιεί την επαφή. Στην 5.22 φαίνεται ολόκληρος ο φορέας με το τμήμα του που έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο και στην 5.23 φαίνεται το σκαρίφημα του τμήματος του φορέα που περιγράψαμε προηγουμένως.

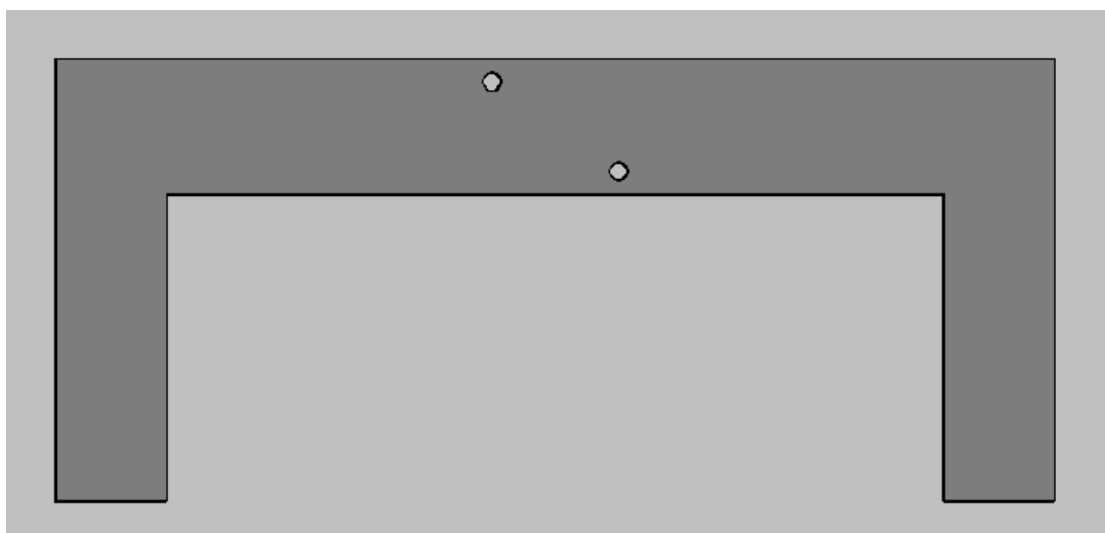
Μετά την κατασκευή όλων των τεμαχίων που περιγράψαμε, προχωρήσαμε σε μία μέτρηση της δύναμης που ασκεί ο φορέας συμπίεσης λόγω του βάρους του όταν διέρχεται από την οπή του οδηγού. Προς αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο και το αποτέλεσμα ήταν **0.163N**. Η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στην επιθυμητή αφού αντιστοιχεί σε μάζα 16.6g.

#### **5.4 Στήριξη του αισθητήρα**

Η στήριξη του αισθητήρα είναι αρκετά σημαντική καθώς, όπως έχουμε αναφέρει, οι μετρήσεις τέτοιας ακρίβειας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε γεωμετρικές ατέλειες. Ειδικότερα, είναι πολύ σημαντική η σταθερότητα που θα παρέχεται στον αισθητήρα, η όσο το δυνατόν επίτευξη της καθετότητας της εκπεμπόμενης ακτίνας laser. Πιθανές γωνίες στη στήριξη του αισθητήρα μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα, τα οποία όμως είναι αντιμετωπίσιμα όπως θα περιγράψουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Για τη στήριξη λοιπόν, επιλέχθηκε ένα αρκετά ελαστικό υλικό, το πλεξιγκλάς (plexiglass). Αυτό έγινε επειδή η κατασκευή και διαμόρφωση της στήριξης έγινε στο εργαστήριο και χρειαζόμασταν ευελιξία. Άλλωστε το συνολικό βάρος που πρέπει να φέρει η κατασκευή είναι σημαντικά μικρό ακόμα και για ένα τόσο ελαστικό υλικό.

Για τη κατασκευή της στήριξης προμηθευθήκαμε με δύο φύλλα πλεξιγκλάς πάχους 5mm τα οποία κατεργαστήκαμε με πριονοκορδέλα και τρυπάνι. Η γενική ιδέα της κατασκευής αυτής ήταν δύο κάθετες πλάκες πάχους 5mm σχήματος "Π", όπως αυτή που φαίνεται στην εικόνα 5.24, που θα είχαν ανάμεσα τους τον αισθητήρα. Μέσω των οπών των πλακών και των οπών στήριξης του αισθητήρα, θα πραγματοποιούνταν η σύσφιξή τους, ενώ θα υπήρχε και χώρος για το καλώδιο σύνδεσης του αισθητήρα. Το xy stage με τα δοκίμια θα τοποθετούνταν ακριβώς κάτω από τον αισθητήρα ανάμεσα στα δύο πόδια της κάθε πλάκας στήριξης.



Εικόνα 5.24 Μία από τις δύο πλάκες πλεξιγκλάς για τη στήριξη του αισθητήρα

Όσον αφορά τη γεωμετρία, δύο είναι τα χαρακτηριστικά που ήθελαν ιδιαίτερη προσοχή. Πρώτον η θέση των οπών από όπου θα γινόταν η σύσφιξη των δύο πλακών με τον αισθητήρα και η εσωτερική απόσταση των ποδιών της πλάκας, ώστε να υπάρχει αρκετός χώρος για τη μία πλατφόρμα του xy stage να εκτελέσει ολόκληρη τη διαδρομή της. Η άλλη πλατφόρμα δεν βρίσκει κάποιο εμπόδιο στη διαδρομή της. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των δύο ποδιών ήταν 303.5mm που προέκυπτε από το άθροισμα της διαδρομής 122mm και του μήκους της πλατφόρμας 181.5mm. Τελικά κατασκευάστηκε με απόσταση 350mm.

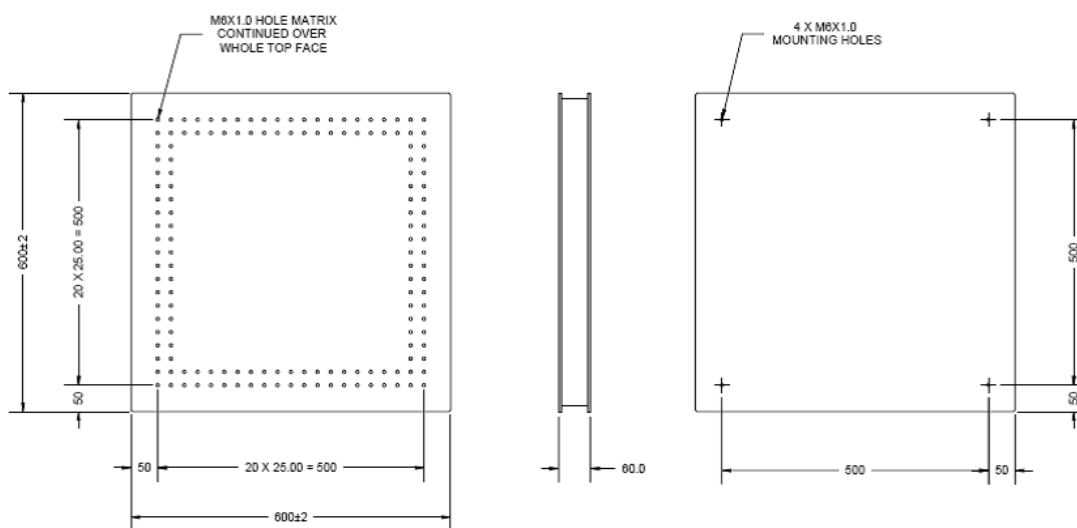
Η θέση των οπών στήριξης εξαρτιόνταν από τη θέση των οπών στον αισθητήρα και τη μεταξύ τους απόσταση. Σύμφωνα με το σκαρίφημα του αισθητήρα οι δύο οπές έχουν μεταξύ τους οριζόντια απόσταση 57mm και κάθετη 40mm. Οι δύο οπές έγιναν με αυτές τις αποστάσεις γύρω από το μέσον του μήκους της πλάκας, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη παραλληλότητα σχετικά με το επίπεδο της βάσης. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και το ύψος των οπών αυτών. Με δεδομένο το ύψος της επιφάνειας μέτρησης σε σχέση με τη βάση, πρέπει οι οπές να είναι σε τέτοιο ύψος ώστε ο αισθητήρας να είναι εντός του εύρους μέτρησής του. Έτσι, για να είναι ακριβώς στο μέσον του εύρους μέτρησης πρέπει η κάτω από τις δύο οπές να είναι σε ύψος 145mm. Αυτό θα καθορισθεί έμμεσα από τη στερέωση των πλακών στη βάση, η οποία θα γίνει με χρήση ειδικών στηρικτικών γωνιών με κατάλληλες οπές για κοχλίες στο κάτω μέρος των ποδιών των πλακών. Έτσι το πρόβλημα του ύψους του αισθητήρα μετατρέπεται σε πρόβλημα απόστασης μεταξύ των οπών σύσφιξης του αισθητήρα από τις οπές στερέωσης των δύο πλακών. Μετρώντας την απόσταση των οπών στερέωσης των γωνιών από το επίπεδο της βάσης βρήκαμε 50mm. Έτσι οι οπές

του αισθητήρα και της στερέωσης διανοίχθηκαν σε απόσταση 95mm μεταξύ τους και έτσι ο αισθητήρας ήταν πολύ κοντά στο μέσον του εύρους μέτρησής του.

Τέλος, χρησιμοποιήσαμε κάποιο από το περισσεύον υλικό και τοποθετήσαμε πλάκες συνολικού πάχους 20mm στις δύο πάνω γωνίες μεταξύ των δυο πλακών στήριξης και τις συσφίξαμε με κοχλίες. Αυτό έγινε για να προσδώσουμε στην όλη κατασκευή μεγαλύτερη στιβαρότητα.

## 5.5 Βάση της διάταξης

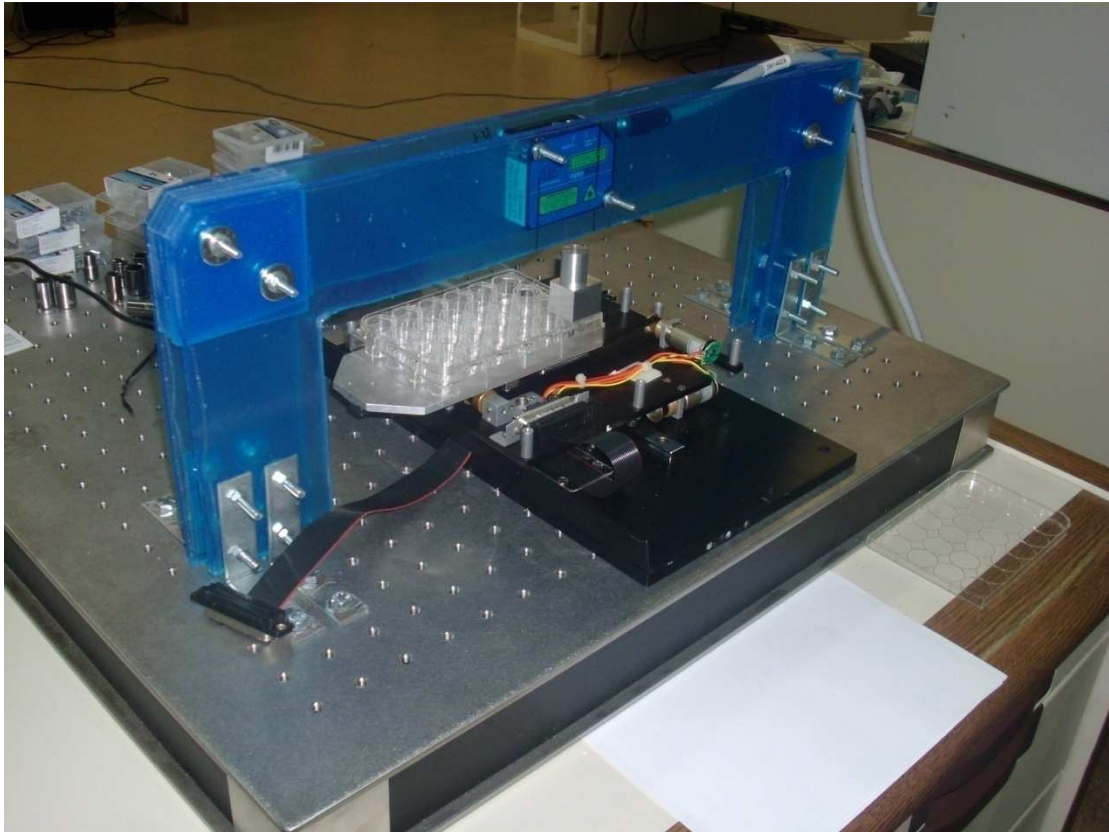
Ως βάση της διάταξης χρειαζόμασταν μία ιδιαίτερα βαριά βάση ώστε να είναι ικανοποιητικά σταθερή και φυσικά να έχει υποδοχές ώστε να στερεωθούν τα διάφορα τμήματα της διάταξης (πλεξιγκλάς στήριξης και xy stage). Έτσι για βάση της διάταξης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PerformancePlus Breadboard PBI51505 βάρους 44kg και διαστάσεων 600mm x 600mm x 60mm [25]. Η επιφάνεια της βάσης έχει επιπεδότητα  $\pm 0.10\text{mm}/0.3\text{m}^2$ . Στην πάνω πλευρά της, για λόγους στήριξης διαθέτει 441 οπές με σπείρωμα M6x1mm βάθους 16mm από την πάνω επιφάνεια της βάσης. Για τη στερέωση των τμημάτων της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες εξαγωνικής κεφαλής M6x1mm και μήκους 12mm.



Εικόνα 5.25 Σκαρίφημα της βάσης της διάταξης(www.thorlabs.com)

Η πάνω και η κάτω επιφάνειά του αποτελείται από δύο ανοξείδωτες χαλύβδινες πλάκες πάχους 5mm, ενώ το εσωτερικό του αποτελείται από υψηλής πυκνότητας κυψελοειδή χάλυβα με το αντίστοιχο κάλυμμα. Η συγκεκριμένη βάση παρέχει την επιθυμητή σταθερότητα στη διάταξη για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Στην εικόνα 5.25 φαίνεται το σκαρίφημα της βάσης.

Έχοντας ολοκληρώσει τη περιγραφή όλων των τμημάτων της μετρητικής διάταξης που φαίνεται στην εικόνα 5.26 μπορούμε να προχωρήσουμε σε μια πρώτη απόπειρα διεξαγωγής μετρήσεων σε στατικές συνθήκες για να διαπιστώσουμε τις πραγματικές δυνατότητες μέτρησης με τον αισθητήρα laser.



Εικόνα 5.26 Η μετρητική διάταξη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Διεξαγωγή Μετρήσεων

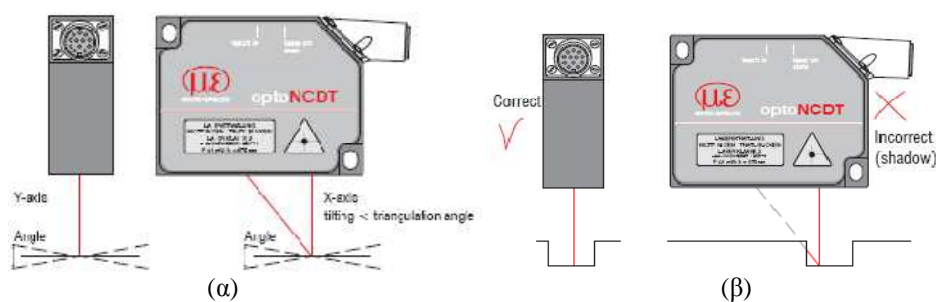
### 6.1 Εξέταση σφαλμάτων μέτρησης

Όπως σε κάθε πειραματική μέτρηση, έτσι και στην πειραματική δοκιμή ερπυσμού των δοκιμίων που περιγράφουμε υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της κάθε μέτρησης. Οι παράγοντες αυτοί, άλλοι σε μεγαλύτερο άλλοι σε μικρότερο βαθμό, με τυχαίο ή σταθερό τρόπο, μπορούν να προκαλέσουν αποκλίσεις στις πειραματικές μετρήσεις σε σχέση με την πραγματική κατάσταση των δοκιμίων και να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τους παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάζουν τις μετρήσεις μας και θα αναζητήσουμε τρόπους για να εξισορροπήσουμε τις συνέπειες των παραγόντων αυτών. Η εξέταση αυτή θα γίνει σε εντελώς στατική κατάσταση του δοκιμίου. Αυτό θα γίνει ώστε να εξασφαλίσουμε ότι ο αισθητήρας απόστασης είναι σε θέση να καταγράφει τα αποτελέσματα χωρίς αποκλίσεις που να υπερβαίνουν τις απαιτήσεις της μέτρησης. Ακολούθως θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της δοκιμής ερπυσμού ενός ιξωδοελαστικού δοκιμίου, υλικό το οποίο παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τον αρθρικό χόνδρο.

#### 6.1.1 Γεωμετρικές ατέλειες

Η μέτρηση απόστασης με τον αισθητήρα βασίζεται στην αρχή της τριγωνικότητας. Στην ουσία, όπως αναφέραμε στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, σχηματίζεται ένα τρίγωνο μεταξύ της πηγής της ακτίνας, του σημείου πρόσπτωσης στην επιφάνεια μέτρησης και αυτού στο συλλέκτη CCD. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση την θέση του σημείου πρόσπτωσης στον συλλέκτη. Εάν για κάποιο λόγο η επιφάνεια μέτρησης και η κάτω επιφάνεια του αισθητήρα δεν είναι παράλληλες, δηλαδή σχηματίζουν κάποια γωνία, τότε υπάρχει ένα έμμεσο σφάλμα στη μέτρηση αφού το αποτέλεσμα δεν είναι η κάθετη απόσταση από τον αισθητήρα μέχρι την επιφάνεια μέτρησης αλλά η απόσταση που διανύει η ακτίνα εκπεμπόμενη κάθετα από τον αισθητήρα μέχρι να συναντήσει την επιφάνεια μέτρησης (εικόνα 6.1α). Έτσι η μετρούμενη απόσταση προκύπτει μεγαλύτερη από την πραγματική.



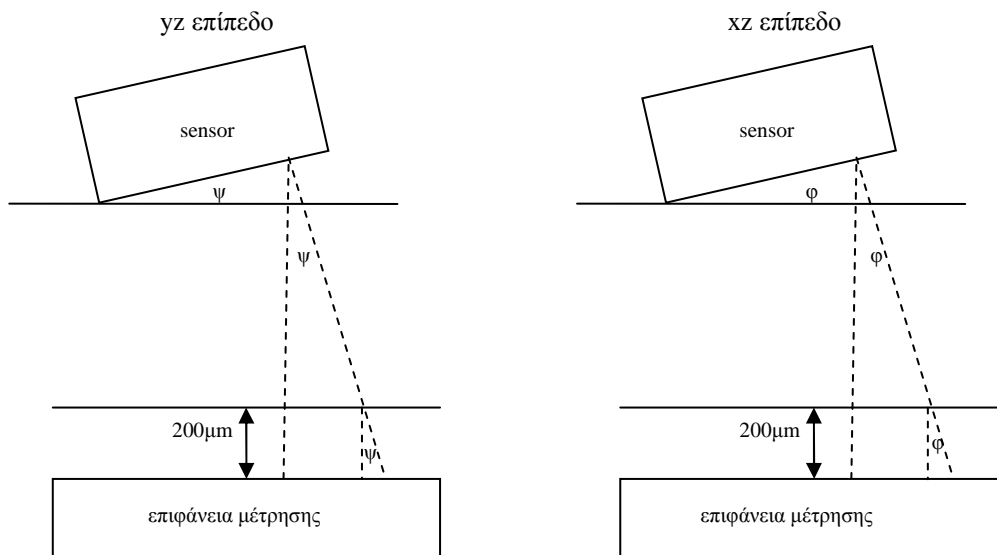
Εικόνα 6.1 Ύπαρξη γωνιών κατά τη μέτρηση [20]

Φυσικά οι γωνίες που επηρεάζουν τη μέτρηση είναι αυτές που σχηματίζονται γύρω από τους δύο παράλληλους με την επιφάνεια μέτρησης άξονες (τυπικά τους X

και Y). Η στροφή γύρω από τον άξονα Z δεν είναι πρόβλημα αρκεί να μην διακόπτεται η πορεία την ακτίνας (εικόνα 6.1β).

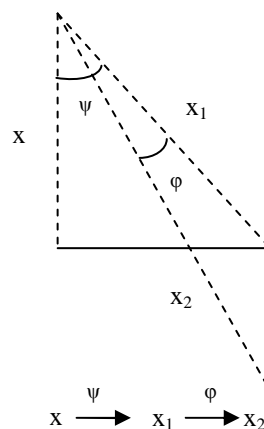
Στη δική μας περίπτωση μας ενδιαφέρει η παραμόρφωση του δοκιμίου δηλαδή η συνολική μετατόπιση της επιφάνειας μέτρησης του φορέα συμπίεσης και όχι η απόλυτη απόστασή της από τον αισθητήρα. Η μετατόπιση αυτή αναμένεται να μην ξεπερνάει περίπου τα 200μm. Η επιφάνεια μέτρησης μπορεί να θεωρηθεί παράλληλη με το επίπεδο της βάσης. Έτσι εάν μετρήσουμε τις γωνίες που σχηματίζει ο αισθητήρας γύρω από τους άξονες X και Y σε σχέση με το επίπεδο της βάσης, κάτι που είναι εύκολο με ένα απλό γωνιόμετρο, μπορούμε να υπολογίσουμε το σφάλμα που προκαλείται στη μέτρηση λόγω της μη παραλληλότητας.

Ας θεωρήσουμε ότι ο αισθητήρας σχηματίζει γωνία  $\psi$  με την επιφάνεια μέτρησης γύρω από τον X και γωνία  $\phi$  γύρω από τον Y (σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1 Γωνίες  $\phi, \psi$

Ας ονομάσουμε τη πραγματική κάθετη μετατόπιση της επιφάνειας μέτρησης  $x$  και  $x_1$  την μετατόπιση που μετράται με ύπαρξη της γωνίας  $\psi$ . Επίσης ονομάζουμε  $x_2$  τη μετρούμενη μετατόπιση με ύπαρξη των γωνιών  $\psi$  και  $\phi$  (σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2 Αποστάσεις  $x, x_1, x_2$



Από τα τρίγωνα του σχήματος 6.2 προκύπτουν δύο εξισώσεις που συνδέουν τις αποστάσεις με τις γωνίες:

$$x_1 = \frac{x}{\cos \psi}, x_2 = \frac{x_1}{\cos \varphi} \quad (6.1)$$

Συνδυαζόμενες οι εξισώσεις (6.1) μπορούν να μας δώσουν έναν τύπο που να συνδέει τη πραγματική απόσταση  $x$  με την μετρούμενη απόσταση  $x_2$ .

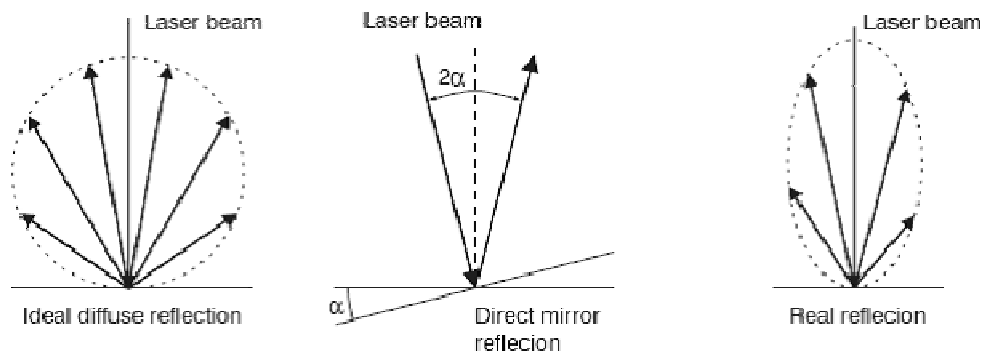
$$x_2 = \frac{x}{\cos \varphi * \cos \psi} \Rightarrow x = x_2 * \cos \varphi * \cos \psi \quad (6.2)$$

Έτσι έχοντας μετρήσει τις γωνίες  $\psi$ ,  $\varphi$  μπορούμε να μετατρέψουμε την εσφαλμένη μέτρηση  $x_2$  στην πραγματική  $x$ . Είναι σημαντικό οι γωνίες  $\varphi$ ,  $\psi$  να μετρώνται κάθε φορά που επανατοποθετείται ο αισθητήρας στη θέση του και πριν την διεξαγωγή κάποιου σετ μετρήσεων.

Εάν θέλουμε να δούμε τη τάξη μεγέθους του σφάλματος που προκαλείται μπορούμε να εφαρμόσουμε ένα αριθμητικό παράδειγμα. Έστω ότι μετρήσαμε τις γωνίες  $\varphi$ ,  $\psi$  ίσες με  $5^\circ$  τη καθεμία. Και έστω ότι η πραγματική συνολική μετατόπιση είναι  $200\mu\text{m}$ . **Τότε λόγω των γωνιών η συνολική μετρούμενη μετατόπιση θα είναι  $201.5\mu\text{m}$ . Εάν αναλύσουμε το σφάλμα αυτό σε βήματα των  $10\mu\text{m}$  τότε το σφάλμα θα είναι  $0.08\mu\text{m}$  περίπου ανά βήμα ή περίπου  $0.75\%$ .**

### 6.1.2 Συλλέκτης ακτίνας laser

Όπως αναφέραμε η μέτρηση βασίζεται στο σημείο πρόσπτωσης της ακτίνας laser στο συλλέκτη CCD. Εάν η επιφάνεια μέτρησης είναι αντανάκλαστική τότε λόγω της διαφορετικής διάχυσης της ακτίνας μετά την πρόσπτωση στην επιφάνεια μέτρησης (εικόνα 6.2) προκαλείται σφάλμα στη μέτρηση. **Σε αυτές τις περιπτώσεις, όπως και σε περιπτώσεις πολύ σκοτεινών επιφανειών, απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος έκθεσης του αντικειμένου και αυτό επιτυγχάνεται μειώνοντας το ρυθμό μέτρησης (measurement rate).**

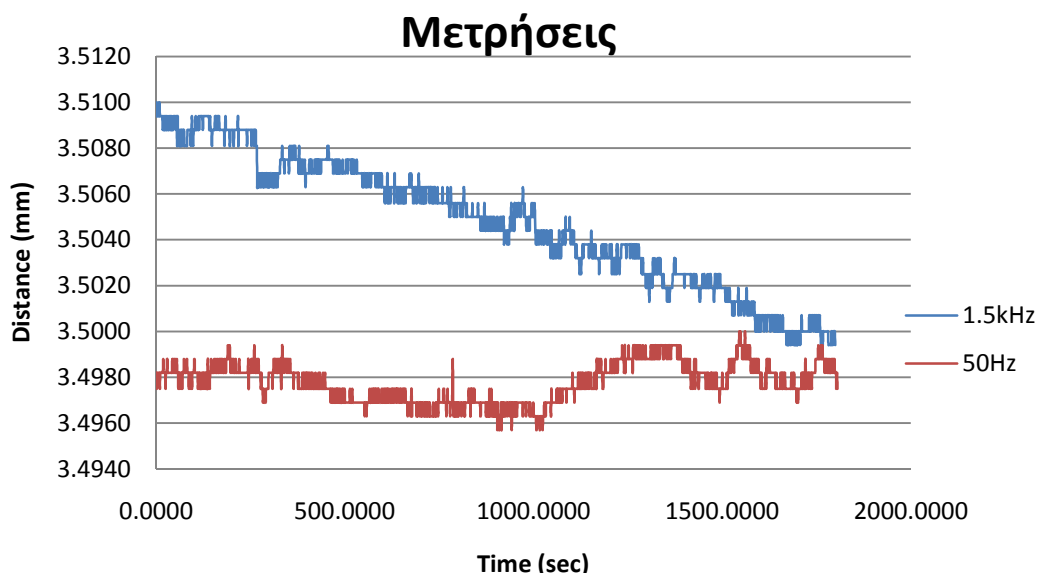


Εικόνα 6.2 Διάχυση ακτίνας σε διαφορετικές επιφάνειες

Γενικά δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένα όρια αντανάκλασης ώστε να είναι σωστή η μέτρηση. Απλώς μειώνοντας τον ρυθμό μέτρησης γίνεται φανερό ότι πλέον δεν επηρεάζεται η μέτρηση. Στη δική μας περίπτωση, η επιφάνεια μέτρησης του φορέα συμπίεσης είναι ιδιαίτερα αντανάκλαστική, λόγω του ότι αποτελείται από αλουμίνιο και έχει λειανθεί πολύ καλά ώστε να έχει ικανοποιητική επιπεδότητα.

Για να διαπιστώσουμε την επίδραση του ρυθμού μέτρησης στα αποτελέσματα πραγματοποιήσαμε δύο σετ μετρήσεων. Το αντικείμενο προς μέτρηση ήταν ο επίπεδος φορέας όπως περιγράψαμε στη γενική ιδέα της διάταξης. Το δοχείο των δοκιμίων τοποθετήθηκε πάνω στο xy stage, ενώ η γωνία του οδηγού των φορέων πάνω στο δοχείο. Ο φορέας συμπίεσης διερχόταν μέσα από την οπή του οδηγού, χωρίς όμως να έχει τοποθετηθεί δοκίμιο. Έτσι παρέμενε σταθερός για τις μετρήσεις.

Οι μετρήσεις έγιναν στο ίδιο αντικείμενο μέτρησης με ρυθμό 1.5kHz και 50Hz αντίστοιχα για διάστημα 30 λεπτών με βήμα του 1 sec. Τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων φαίνονται στο διάγραμμα 6.1. Με μπλέ χρώμα φαίνεται η μέτρηση με ρυθμό 1.5kHz και με κόκκινο αυτή με 50Hz.



Διάγραμμα 6.1 Διαγράμματα μετρήσεων

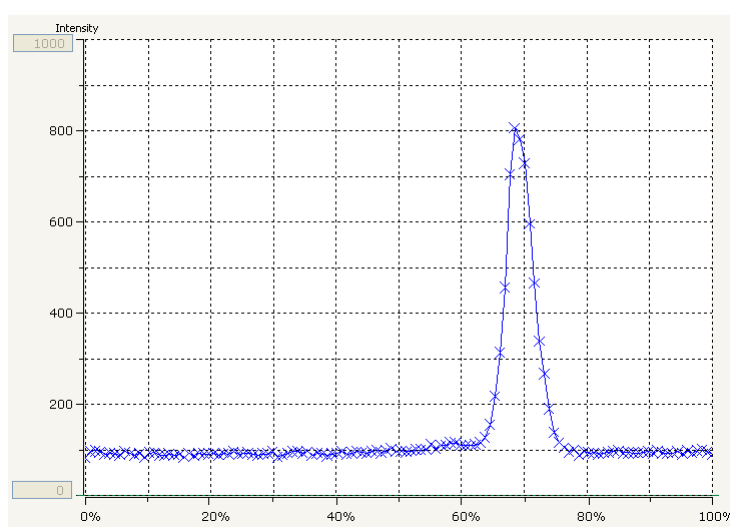
Η μέγιστη τιμή της μέτρησης με ρυθμό 1.5kHz ήταν 3.51mm και η ελάχιστη 3.4994mm, δηλαδή παρουσίασε εύρος 10.6 $\mu$ m. Αντίστοιχα, η μέτρηση με ρυθμό 50Hz είχε μέγιστη τιμή 3.5mm και ελάχιστη 3.4957mm, δηλαδή εύρος 4.3 $\mu$ m. Οι συνθήκες που διεξήχθησαν οι δύο μετρήσεις ήταν ίδιες, οπότε η διαφορά που παρατηρείται στο εύρος των αποτελεσμάτων οφείλεται στον διαφορετικό ρυθμό μέτρησης. Εκτός από το διπλάσιο εύρος παρατηρούμε ότι η μέτρηση με 50Hz παρουσιάζει μία σταθερότητα καθώς κινείται με αυξομειώσεις γύρω από την τιμή 3.4978 $\mu$ m, ενώ η μέτρηση με 1.5kHz έχει μία συνεχή φθίνουσα τάση.

Να σημειώσουμε πως ο φορέας ήταν ακίνητος και στις δύο περιπτώσεις μέτρησης και άρα η πραγματική του απόσταση ήταν σταθερή. Αυτό δεν αποτυπώθηκε στις μετρήσεις αλλά έχουμε κάποιο εύρος, κάτι που όμως είναι φυσικό λόγω του ότι κάθε μετρητικό όργανο έχει μία διακριτική ικανότητα και μία ανάλυση.

Η μετρούμενη τιμή περιστρέφεται γύρω από το πραγματικό μέγεθος ανάλογα με τις ικανότητες του οργάνου.

Επίσης βλέπουμε πως η μετρούμενη τιμή είναι γύρω στα 3.5mm. Η τιμή αυτή σημαίνει ότι η επιφάνεια μέτρησης βρίσκεται εντός του εύρους μέτρησης και σε 3.5mm απόσταση από το τέλος αυτού. Δηλαδή σε αυτά τα σετ μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε ως τιμή αναφοράς (τιμή ίση με το μηδέν) το τέλος του εύρους (EMR). Παράλληλα εάν τοποθετηθεί δοκίμιο ύψους 2mm τότε η επιφάνεια μέτρησης θα βρίσκεται πολύ κοντά στο μέσον του εύρους κάτι που συμφωνεί με τον αρχικό σχεδιασμό της στήριξης του αισθητήρα.

Τέλος, ενδεικτική για την επίδραση του ρυθμού μέτρησης σε αντανακλαστικές επιφάνειες είναι η κατανομή της έντασης του φωτός που αναγνωρίζει ο συλλέκτης CCD όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.2, από την επιλογή video mode του προγράμματος χειρισμού του αισθητήρα. Αριστερά από την κορυφή βλέπουμε ένα μικρό φούσκωμα που οφείλεται σε αντανακλάσεις.

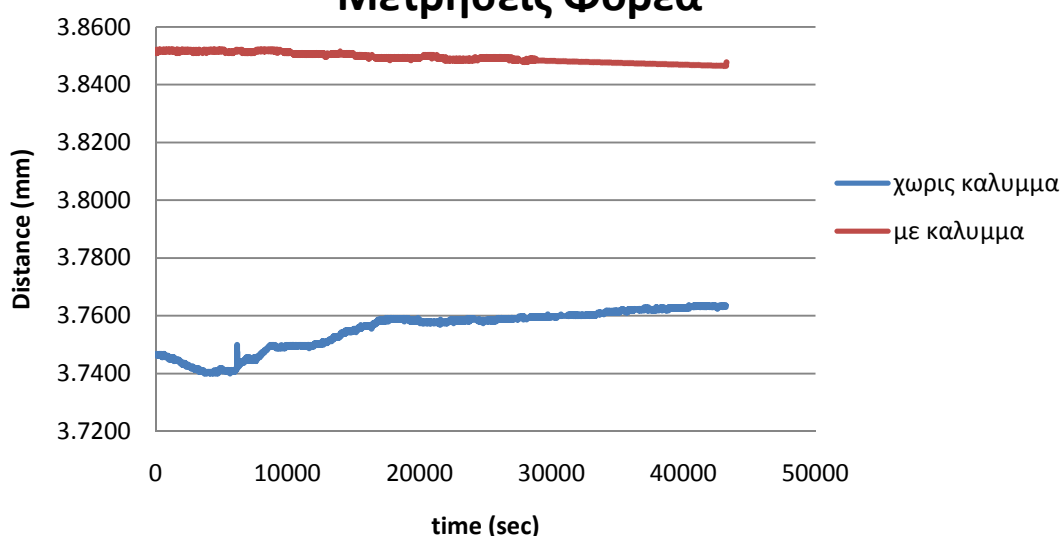


Διάγραμμα 6.2 Ένταση φωτός κατά μήκος του συλλέκτη

Μία κάπως παρόμοια πηγή σφαλμάτων είναι όταν ο συλλέκτης καταγράφει φως από άλλες πηγές εκτός της ακτίνας laser. Παρότι υπάρχει πρόβλεψη στις ρυθμίσεις του αισθητήρα για τέτοιες περιπτώσεις, η επίδραση άλλων πηγών φωτός μπορεί να γίνει έντονη όταν έχουμε αντανακλαστικές επιφάνειες και χαμηλό ρυθμό μέτρησης όπως στη περίπτωσή μας. Τότε, συστήνεται από τον κατασκευαστή η χρήση κάποιας προστασίας του αισθητήρα έναντι άλλων πηγών φωτός.

Για να διαπιστώσουμε το βαθμό στον οποίο επηρεάζεται η μέτρησή μας από άλλες πηγές φωτός πραγματοποιήσαμε άλλα δύο σετ μετρήσεων. Οι συνθήκες και οι ρυθμίσεις των μετρήσεων ήταν ίδιες. Η διαφορά έγκειται ότι στη μία, όλη η διάταξη σκεπάστηκε από ένα ειδικό κάλυμμα και έτσι δεν επέτρεπε σε φως προερχόμενο από άλλες πηγές να εισέλθει στο χώρο της μέτρησης και να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Στην άλλη, η διάταξη ήταν εκτεθειμένη σε φυσιολογικές πηγές φωτός (φως ημέρας, λάμπες γραφείου). Σε αυτή τη περίπτωση η διάρκεια της κάθε μέτρησης ήταν σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με τις προηγούμενες και συγκεκριμένα ήταν περίπου 12 ώρες με βήμα 10sec. Στο διάγραμμα 6.3 φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων συναρτήσει του χρόνου.

## Μετρήσεις Φορέα



Διάγραμμα 6.3 Αποτελέσματα μετρήσεων με και χωρίς κάλυμμα

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα, έχουμε σημαντικές διαφορές. Όταν χρησιμοποιήσαμε το κάλυμμα το εύρος των αποτελεσμάτων ήταν 5.6μm, ενώ χωρίς το κάλυμμα ήταν 23.6μm. Επίσης, οι δύο μετρήσεις εμφανίζουν μία μεταξύ τους απόκλιση της τάξης των 120μm. Αυτό όμως οφείλεται στο ότι ο φορέας επανατοποθετήθηκε για τη δεύτερη μέτρηση με αποτέλεσμα να αλλάξει κάπως η μετρούμενη απόσταση. Για να διαπιστώσουμε εάν όντως η διαφορά στο εύρος οφείλεται στο κάλυμμα θα προχωρήσουμε στην εξής επεξεργασία. Θα χωρίσουμε τα αποτελέσματα στη μέση σε δύο ομάδες των 6 ωρών. Επειδή και οι δύο μετρήσεις ξεκίνησαν στις 16:00 μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τις συνθήκες φωτισμού της πρώτης ομάδας ως φωτεινές και της δεύτερης ως σκοτεινές. Εάν η διαφορά οφείλεται όντως στη παρουσία του καλύμματος θα πρέπει οι σκοτεινές ομάδες των δύο μετρήσεων να έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Προχωρώντας στην παραπάνω ανάλυση εξάγουμε τους παρακάτω πίνακες (πίνακες 6.1 και 6.2).

Δείγμα Μέγεθος(mm)	Σύνολο	Φωτεινή	Σκοτεινή
Ελάχιστο	3.7400	3.7400	3.7568
Μέγιστο	3.7636	3.7593	3.7636
Εύρος	0.0236	0.0193	0.0068

Πίνακας 6.1 Χωρίς κάλυμμα

Δείγμα Μέγεθος(mm)	Σύνολο	Φωτεινή	Σκοτεινή
Ελάχιστο	3.8465	3.8484	3.8465
Μέγιστο	3.8521	3.8521	3.8496
Εύρος	0.0056	0.0037	0.0031

Πίνακας 6.2 Με κάλυμμα

Παρατηρούμε ότι όταν δεν έχουμε κάλυμμα, στη φωτεινή ομάδα έχει εμφανισθεί εύρος ίσο με 81.8% του συνολικού, ενώ όταν έχουμε κάλυμμα το αντίστοιχο ποσοστό είναι 66.3%. Επίσης στη σκοτεινή ομάδα χωρίς κάλυμμα

εμφανίζεται εύρος ίσο με 28.8%, ενώ με κάλυμμα 55.2%. Βλέπουμε λοιπόν ότι όταν χρησιμοποιούμε το κάλυμμα εμφανίζεται στη φωτεινή και στη σκοτεινή ομάδα της μέτρησης πολύ κοντινό ποσοστό του συνολικού εύρους μέτρησης. Αντίθετα, όταν δεν χρησιμοποιούμε κάλυμμα το ποσοστό του εύρους που εμφανίζεται στη φωτεινή ομάδα είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της σκοτεινής. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη αστάθεια στη φωτεινή ομάδα της μέτρησης χωρίς κάλυμμα σε σχέση με τη σκοτεινή, έχοντας ως σημείο αναφοράς τις αντίστοιχες ομάδες της μέτρησης με κάλυμμα.

Βέβαια, η απόλυτη τιμή του εύρους στις δύο μετρήσεις είναι πολύ διαφορετική, περίπου τετραπλάσιο εύρος έχουμε στη μέτρηση χωρίς κάλυμμα. Η διαφορά αυτή, όμως, στην απόλυτη τιμή δεν οφείλεται εξ ολοκλήρου σε άλλες πηγές φωτός που επηρεάζουν τον συλλέκτη. Εάν συνέβαινε αυτό, τότε στις σκοτεινές ομάδες η τιμή του εύρους έπρεπε να είναι περίπου ίδια, αφού δεν υπήρχαν πηγές φωτός να επηρεάσουν τον αισθητήρα. Αντίθετα βλέπουμε ότι η σχέση των απόλυτων τιμών του εύρους παρότι έχει εξομαλυνθεί δεν είναι όπως θα αναμέναμε και συγκεκριμένα έχουμε διπλάσιο εύρος στη σκοτεινή μέτρηση χωρίς κάλυμμα σε σχέση με αυτή με κάλυμμα (6.8 $\mu\text{m}$  έναντι 3.1 $\mu\text{m}$ ).

*Από τις μετρήσεις αυτές συμπεραίνουμε ότι οι άλλες πηγές φωτός ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων με κάπως ασταθή τρόπο, αφού εξαρτώνται πολύ από απρόβλεπτους παράγοντες (πχ καιρός).* Η διαφορετική όμως συμπεριφορά της διάταξης που παρατηρήθηκε, μας οδηγεί στο συμπέρασμα να θεωρήσουμε απαραίτητη τη χρήση καλύμματος, για να αποφύγουμε την επιρροή από άλλες πηγές φωτός εκτός της ακτίνας laser. Παρατηρούμε όμως ότι ακόμα και να εξαλείψουμε την επιρροή αυτή, υπάρχουν σημαντικές διαφορές (εύρος σκοτεινών ομάδων) που οφείλονται σε άλλους παράγοντες.

### 6.1.3 Θερμοκρασία

Ένας παράγοντας που δεν έχει εξετασθεί μέχρι στιγμής είναι η θερμοκρασία. Γενικά, κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων είναι πολύ σημαντικό να έχουμε επαρκή γνώση των συνθηκών που επικρατούν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των μετρήσεων. Πολύ παραπάνω, όταν έχουμε πειραματικές μετρήσεις είναι απαραίτητη τόσο η καταγραφή όσο και η εξέταση της επίδρασης των συνθηκών στα αποτελέσματα.

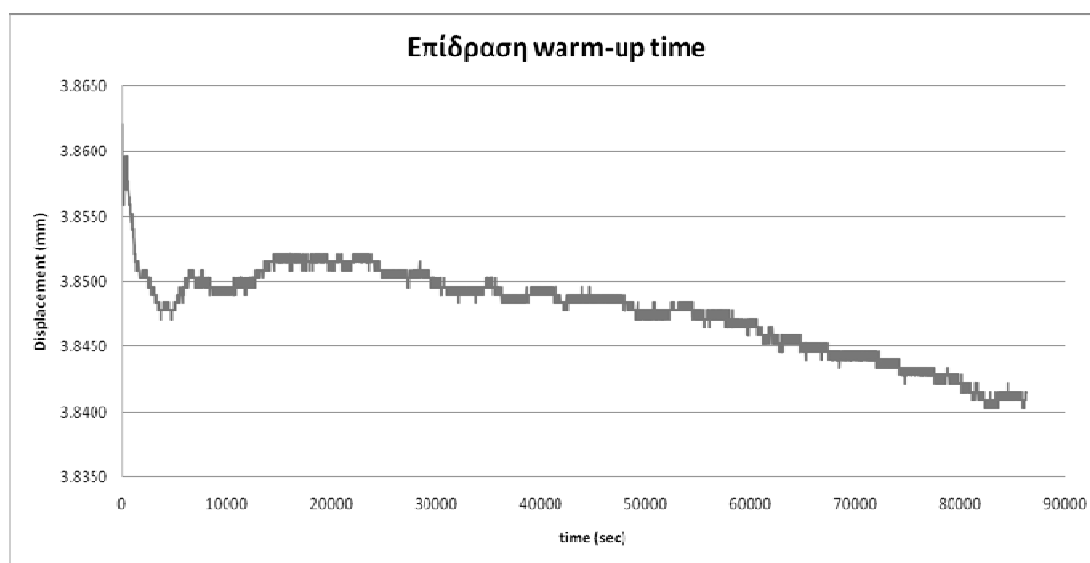
Η θερμοκρασία είναι από τους πιο συχνούς παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη διεξαγωγή μετρήσεων και στις περισσότερες των περιπτώσεων επιδιώκεται ειδικό μονωμένο περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας. Ειδικά στη δική μας περίπτωση, όπου η ανάλυση των μετρήσεων είναι της τάξης των 5 $\mu\text{m}$ , είναι αναμενόμενο η θερμοκρασία να παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της μετρούμενης τιμής.

Στη περίπτωση της μετρητικής διάταξης που περιγράφεται, υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους παρεμβαίνει η θερμοκρασία και επηρεάζει τα αποτελέσματα. Ο πρώτος αφορά αποκλειστικά στον αισθητήρα και στην εσωτερική του λειτουργία και ο δεύτερος αφορά στο σύνολο της διάταξης.

### 6.1.3.1 Περίοδος προθέρμανσης (warm-up time)

Όταν ο αισθητήρας ενεργοποιείται για πρώτη φορά μετά από κάποιο διάστημα τότε αρχίζει να διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Είναι γνωστό ότι η ροή ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου κάποιου αγωγού προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του και μάλιστα είναι μία ιδιότητα των κυκλωμάτων που χρησιμοποιείται ευρύτατα (πχ ασφάλειες). Εάν το διάστημα το οποίο ήταν απενεργοποιημένος ο αισθητήρας, ήταν αρκετό ώστε η θερμοκρασία του να εξισωθεί με αυτή του περιβάλλοντός του, τότε κατά την επόμενη ενεργοποίηση του αισθητήρα, η απότομη ροή ηλεκτρικού ρεύματος στα κυκλώματά του προκαλεί απότομη αύξηση της θερμοκρασίας τους και άνιση κατανομή αυτής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκαλούνται σοβαρές στρεβλώσεις στη καταγραφή των μετρήσεων.

Για να διαπιστώσουμε την επίδραση της απότομης αύξησης της εσωτερικής θερμοκρασίας του αισθητήρα πραγματοποιήσαμε μία μέτρηση του ίδιου με πριν αντικειμένου. Αυτή τη φορά η διάρκεια της μέτρησης ήταν περίπου 24 ώρες με σκοπό να έχουμε επαρκή σύγκριση του αρχικού σταδίου με το σύνολο των μετρήσεων. Η καταγραφή των αποτελεσμάτων έγινε αμέσως μετά την ενεργοποίηση του αισθητήρα και είχε ρυθμό μέτρησης 50Hz και βήμα 10sec. Στο διάγραμμα 6.4 φαίνεται η γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 6.4 Επίδραση περιόδου προθέρμανσης στις μετρήσεις

Όπως βλέπουμε και στο διάγραμμα, στα πρώτα 1250sec έχουμε μία καμπύλη με πολύ μεγάλη κλίση ενώ υπάρχουν και δύο αλλαγές στο πρόσημο της κλίσης. Συγκεκριμένα το εύρος των αποτελεσμάτων σε αυτό το διάστημα είναι 10.6μm, ενώ στα υπόλοιπα 85150sec το εύρος των αποτελεσμάτων είναι 11.8μm. Δηλαδή, σε 20 λεπτά εμφανίζεται εύρος σχεδόν ίσο με το εύρος που εμφανίζεται σε 23.5 περίπου ώρες.

Η περίοδος της απότομης αυτής αύξησης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αισθητήρα λόγω της ενεργοποίησής του χαρακτηρίζεται ως περίοδος προθέρμανσης (warm-up time) και είναι περίπου ίση με 20 λεπτά. Οι συνέπειες που μπορεί να προκύψουν στα αποτελέσματα εάν δεν ληφθεί υπόψη η ανάγκη προθέρμανσης του αισθητήρα, όπως διαπιστώσαμε και από τις μετρήσεις του

διαγράμματος 6.4, είναι συγκριτικά τεράστιες. *Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητο, μετά από κάθε ενεργοποίηση του αισθητήρα να προβλέπεται περίοδος προθέρμανσης τουλάχιστον 20 λεπτών, διάστημα κατά το οποίο ο αισθητήρας δεν θα λαμβάνει μετρήσεις.*

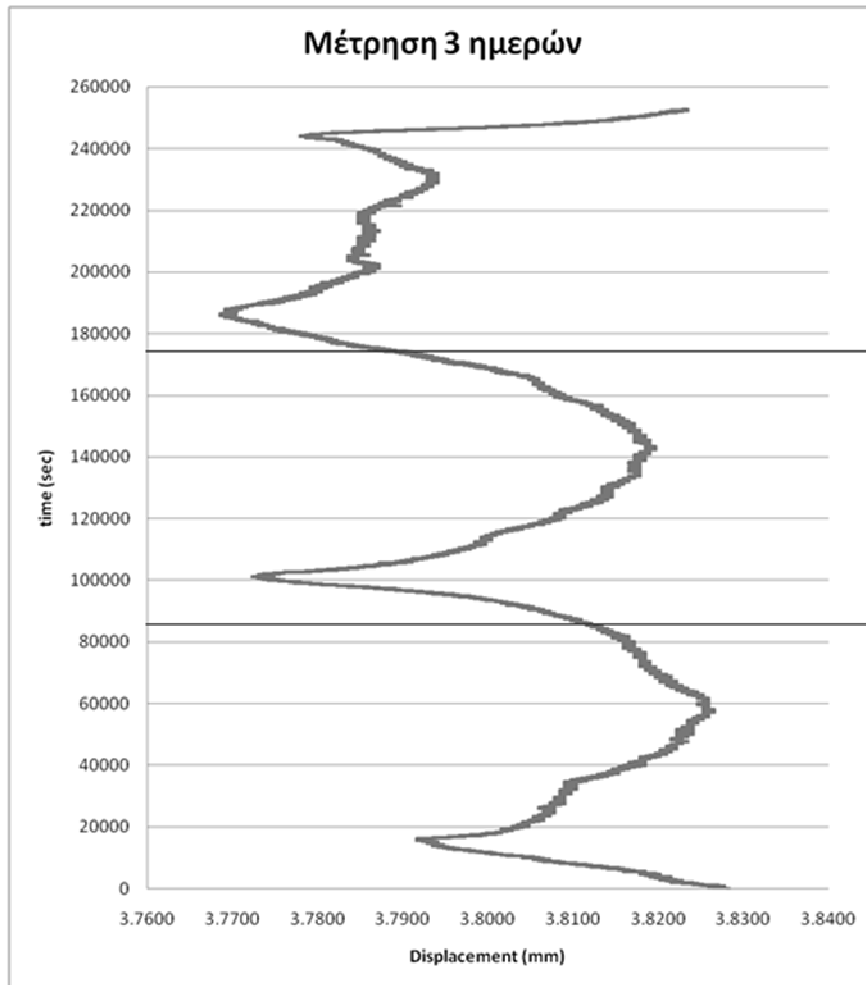
#### 6.1.3.2 Θερμοκρασιακή διαστολή

Ακόμα όμως και στο διάστημα μετά την περίοδο προθέρμανσης παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα δεν κινούνται γύρω από κάποια τιμή, με δεδομένο ότι το αντικείμενο-στόχος είναι εντελώς ακίνητο, όπως συνέβαινε και στις προηγούμενες μετρήσεις. Αντίθετα εμφανίζεται κάποιο εύρος στα αποτελέσματα αρκετά μεγαλύτερο από την ανάλυση του αισθητήρα. Επιπλέον τα αποτελέσματα αυτά δεν φαίνεται να συμπεριφέρονται έτσι με τυχαίο τρόπο αλλά μάλλον ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη μεταβολή. Το γεγονός αυτό εξηγείται από το δεύτερο τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται οι μετρήσεις μας από τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, οφείλεται στο **νόμο της συστολής-διαστολής** του συνόλου της διάταξης. Ακόμα και αν όλες οι μονάδες της διάταξης αποτελούνταν από το ίδιο υλικό, κάτι που φυσικά είναι αδύνατον, πάλι θα είχαμε τέτοιες μεταβολές λόγω των διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Για να διαπιστώσουμε το ρόλο που παίζει η μεταβολή της θερμοκρασίας σε αυτή την μεταβολή των αποτελεσμάτων πραγματοποιήσαμε δύο μετρήσεις. Και στις δύο ο ρυθμός μέτρησης ήταν 50Hz ενώ χρησιμοποιήθηκε το ειδικό κάλυμμα έναντι άλλων πηγών φωτός.

Σκοπός της πρώτης μέτρησης ήταν να αναζητήσουμε περισσότερες ενδείξεις για το γεγονός ότι η θερμοκρασία ήταν ένας σοβαρός παράγοντας επηρεασμού των αποτελεσμάτων. Ο καλύτερος τρόπος ήταν να εκμεταλλευτούμε τη περιοδικότητα που εμφανίζει η θερμοκρασία λόγω των καιρικών αλλαγών κατά τη διάρκεια ενός 24ωρου. Έτσι η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε με διάρκεια 70 ωρών, ώστε να μπορούμε να παρατηρήσουμε πλήρως περίπου τρία ολόκληρα 24ωρα. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 15:00. Τα αποτελέσματα της μέτρησης φαίνονται στο διάγραμμα 6.5.

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα, τα δύο πρώτα 24ωρα παρουσιάζουν εξαιρετική ομοιότητα. Έστω και αν κάποιες κορυφές δεν έχουν πολύ κοντινή τιμή είναι εμφανής η περιοδικότητα μεταξύ των πρώτων δύο 24ωρων. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο 24ωρο έχουμε μία συνεχή μείωση της μετρούμενης απόστασης για τις πρώτες 4,5 ώρες, δηλαδή από τις 15:00 έως τις 19:30 ενώ στο δεύτερο 24ωρο έχουμε συνεχή μείωση για τις πρώτες 4 ώρες. Και στα δύο πρώτα 24ωρα, έχουμε για τις επόμενες 16 ώρες μία συνεχή αύξηση της απόστασης ενώ στις τελευταίες 4 ώρες έχουμε μία συνεχή μείωση. Χαρακτηριστικό της περιοδικότητας είναι επίσης ότι οι αυξομειώσεις αυτές της απόστασης στα δύο 24ωρα γίνονται με τον ίδιο περίπου τρόπο, δηλαδή με πολύ κοντινή, για τα δεδομένα μας, τιμή της κλίσης. Μόνο στο τρίτο 24ωρο παρατηρείται κάποια διαφορά. Παρόλη τη διαφορά φαίνεται πως κάτι έχει διαταράξει τη μορφή της καμπύλης σε σχέση με τα δύο προηγούμενα 24ωρα. Η άποψη αυτή ενισχύεται καθώς τις τελευταίες 3 περίπου ώρες υπάρχει μία τάση της καμπύλης να επανέλθει στη μορφή που παρατηρήθηκε πριν. Η διαταραχή αυτή δεν είναι τίποτε άλλο εκτός από τη συνηθισμένη βροχόπτωση που συνέβη γύρω στις 22:00 του τρίτου 24ωρου.



Διάγραμμα 6.5 Μέτρηση 3 ημερών

Έχοντας αποκτήσει πλέον πολλά στοιχεία που να επιβεβαιώνουν την αρχική μας εκτίμηση, το μόνο που μένει είναι να διεξαχθούν μετρήσεις της απόστασης της επιφάνειας μέτρησης του ακίνητου φορέα συμπίεσης, παράλληλα και με την καταγραφή της θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό εξοπλιστήκαμε με έναν αισθητήρα θερμοκρασίας, τον TEMPer1 (εικόνα 6.3). Ο αισθητήρας αυτός έχει δυνατότητα άμεσης σύνδεσης με προσωπικό υπολογιστή μέσω θύρας USB στο ένα του άκρο και στο άλλο άκρο υπάρχει το αισθητήριο της θερμοκρασίας το οποίο δημιουργεί το σήμα που στέλνεται στον υπολογιστή. Η ανάλυση της μέτρησης είναι  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$  και το εύρος μέτρησης είναι  $-50$  έως  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

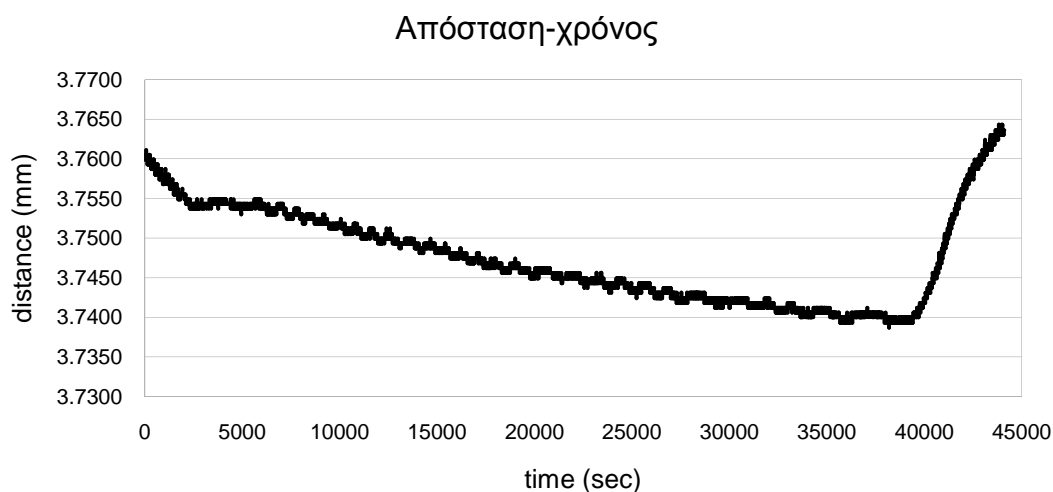


Εικόνα 6.3 Ο αισθητήρας θερμοκρασίας TEMPer1

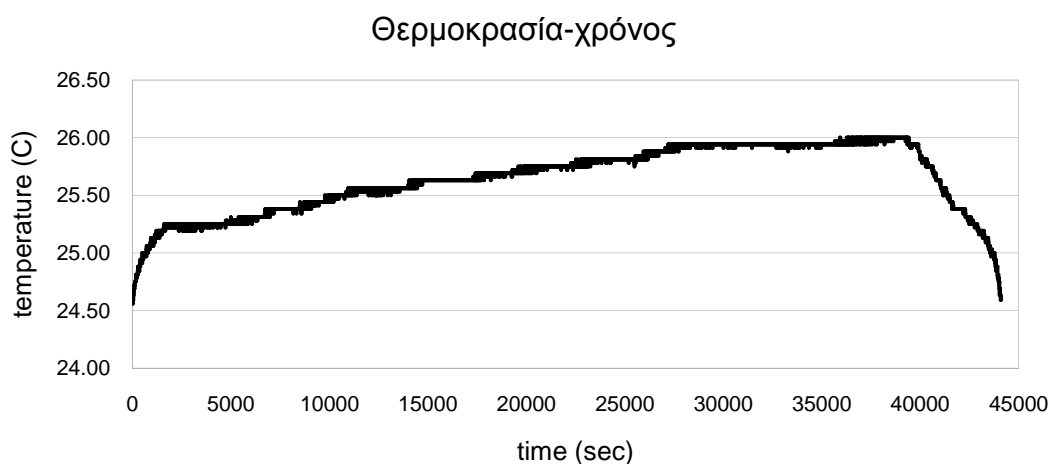
Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων και ο χειρισμός του αισθητήρα αυτού γίνεται μέσω του προγράμματος HID TEMPer το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για αυτόν τον αισθητήρα. Υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής των αποτελεσμάτων σε



\*.txt αρχεία για την μετέπειτα επεξεργασία και αποθήκευσή τους. Επίσης μπορούμε να καθορίζουμε το ρυθμό μέτρησης και το ρυθμό καταγραφής των αποτελεσμάτων. Η μέτρηση αυτή είναι η δεύτερη που διεξήχθη για τον προσδιορισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας στη μέτρηση της απόστασης και είχε διάρκεια 20 ωρών και βήμα 5sec. Αντίστοιχη διάρκεια και βήμα είχε και η καταγραφή της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απόστασης φαίνονται στο διάγραμμα 6.6 και στο διάγραμμα 6.7 φαίνεται η καταγραφή της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 6.6 Μέτρηση απόστασης



Διάγραμμα 6.7 Καταγραφή θερμοκρασίας

Με μία απλή παρατήρηση των διαγραμμάτων 6.6 και 6.7 γίνεται φανερό ότι η θερμοκρασία παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της μετρούμενης τιμής της απόστασης. *Σαν γενικό κανόνα μπορούμε να πούμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας, δηλαδή διαστολή της διάταξης, σημαίνει απομάκρυνση του αισθητήρα από την επιφάνεια μέτρησης και ότι μείωση της θερμοκρασίας συνεπάγεται προσέγγιση του αισθητήρα προς την επιφάνεια μέτρησης.* Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από τα υλικά που συνθέτουν τη διάταξη. Παρότι μία ακριβής μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς της διάταξης είναι πολύ δύσκολη, είναι χαρακτηριστικό ότι ο

συντελεστής θερμικής διαστολής του αλουμινίου, υλικό του φορέα συμπίεσης, είναι ίσος με  $0.000024\text{mm}/^{\circ}\text{Cmm}$  ενώ του πλεξιγκλάς είναι ίσος με  $0.000093\text{mm}/^{\circ}\text{Cmm}$ . Δηλαδή κάθε αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί τετραπλάσια αύξηση του μήκους του πλεξιγκλάς απ' ότι του αλουμινίου στη μονάδα του μήκους. Και όλα αυτά χωρίς να συνυπολογίσουμε ότι το πλεξιγκλάς είναι κατά  $z$  διπλάσιο απ' το υπόλοιπο της διάταξης. Έτσι προκαλείται απομάκρυνση του αισθητήρα από την επιφάνεια μέτρησης με κάθε αύξηση της θερμοκρασίας, αφού η στήριξη του αισθητήρα διαστέλλεται περισσότερο από την υπόλοιπη διάταξη, και προσέγγισή τους με κάθε μείωση της θερμοκρασίας.

### 6.1.3.3 Θεωρητικός υπολογισμός

Έστω και αν από τις μέχρι τώρα μετρήσεις είναι περισσότερο από προφανές ότι η θερμοκρασιακή διαστολή των μονάδων της διάταξης επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις μετρούμενες τιμές της απόστασης, είναι απαραίτητο να προχωρήσουμε σε έναν θεωρητικό αναλυτικό υπολογισμό της μεταβολής αυτής. Άλλωστε δε πρέπει να ξεχνάμε ότι σκοπός μας είναι η πλήρης γνώση και εξάλειψη των σφαλμάτων σε ικανοποιητικό επίπεδο. Παρότι ο θεωρητικός υπολογισμός δε μπορεί να χρησιμεύσει άμεσα στη διεξαγωγή των μετρήσεων λόγω πρακτικών δυσκολιών, εντούτοις είναι απαραίτητος για την επιστημονική πληρότητα των συμπερασμάτων μας.

Δεδομένου του χαρακτήρα των υπολογισμών μας θα προχωρήσουμε σε κάποιες απλοποιήσεις χάριν ευκολίας, αφού στόχος δεν είναι να εξάγουμε ακριβή αποτελέσματα αλλά να τεκμηριώσουμε θεωρητικά την επίδραση της θερμοκρασιακής διαστολής στις μετρήσεις μας. Θεωρούμε το  $xy$  stage και το δοχείο των δοκιμίων απαραμόρφωτα κάτω από την επίδραση της θερμοκρασίας. Έστω και αν αυτό δεν είναι απόλυτα σωστό, η πραγματική μεταβολή τους δεν επηρεάζει σημαντικά τη μέτρηση λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας τους και της δυνατότητας αλληλοαναιρέσεων των μεταβολών τους.

Επίσης θεωρούμε ότι η μετατόπιση του αισθητήρα οφείλεται στη διαστολή του τμήματος της στήριξής του από το επίπεδο της βάσης έως την πάνω οπή στήριξής του,  $l$ . Επιπλέον θεωρούμε τον οδηγό των φορέων και το πάνω τμήμα του φορέα διαμέτρου  $16\text{mm}$  ως ένα συμπαγές σώμα ύψους  $b=40\text{mm}$ . Τέλος θεωρούμε τη διαστολή των υλικών γραμμική κατά  $z$ .

Για τους υπολογισμούς μας και την επαλήθευσή τους θα χρησιμοποιήσουμε τη προηγούμενη μέτρηση του διαγράμματος 6.6. Συγκεκριμένα παίρνουμε 2 σημεία αυτής. Για  $t_1=20000\text{sec}$  έχουμε μετρούμενη τιμή  $3.7543\text{mm}$  και για  $t_2=50000\text{sec}$  έχουμε τιμή  $3.7406\text{mm}$ . Η θερμοκρασιακή διαφορά ήταν  $\Delta\theta=\theta_2-\theta_1=0.69$ . Θα θεωρήσουμε ότι για  $t_1$  οι διαστάσεις των αντικειμένων είναι οι ιδανικές ανεπηρέαστες από τη θερμοκρασία. Έτσι υπολογίζοντας την διαστολή τους έως τον χρόνο  $t_2$  και συγκρίνοντας το αποτέλεσμα με τη πειραματικώς μετρούμενη τιμή θα εκτιμήσουμε την ορθότητα της ανάλυσής μας.

Αρχικά θα υπολογίσουμε το ύψος  $l$  της πάνω οπής στήριξης με βάση τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Το ύψος του  $xy$  stage είναι  $52.35\text{mm}$  και του δοχείου των δοκιμίων  $19.69\text{mm}$ . Ο οδηγός και ο φορέας έχουν ύψος  $b=40\text{mm}$  και η πάνω οπή στήριξης απέχει από την κάτω επιφάνεια του αισθητήρα  $45.75\text{mm}$ . Τέλος

ονομάζουμε  $x$  την απόσταση της επιφάνειας μέτρησης του φορέα από το κάτω επίπεδο του αισθητήρα. Τότε:

$$l = 52.35 + 19.69 + 40 + x + 45.75mm$$

Για  $t_1$  έχουμε τιμή μέτρησης 3.7543mm άρα  $x=30-3.7543=26.2457mm$ . Έτσι προκύπτει  $l=184.036mm$ . Υπενθυμίζουμε ότι ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι για το αλουμίνιο  $a_{al}=0.000024mm/^{\circ}Cmm$  και για το πλεξιγκλάς  $a_{pl}=0.000093mm/^{\circ}Cmm$ .

Έτσι για  $t_2$  όπου έχουμε θερμοκρασιακή μεταβολή  $\Delta\theta=0.69$  υπολογίζουμε τις νέες διαστάσεις  $l'$  και  $b'$ .

$$l' = l + l \cdot a_{pl} \cdot \Delta\theta = 184.036 + 184.036 \cdot 0.000093 \cdot 0.69 = 184.048mm$$

$$b' = b + b \cdot a_{al} \cdot \Delta\theta = 40 + 40 \cdot 0.000024 \cdot 0.69 = 40.0007mm$$

Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε τη πρόβλεψή μας  $x'$  της τιμής μέτρησης για τη χρονική στιγμή  $t_2$ .

$$x' = l' - 45.75 - b' - 19.69 - 52.35 = 26.2573mm$$

Η πειραματικώς καταγεγραμμένη τιμή για  $t_2$  ήταν 3.7406 ή  $x_2=30-3.7406=26.2594mm$ . Η διαφορά της θεωρητικής τιμής με την πειραματική είναι 2.1 $\mu m$  σε μία πειραματικώς καταγεγραμμένη μεταβολή 13.7 $\mu m$ . Ακόμα όμως κι έτσι επιβεβαιώνεται και θεωρητικά η επίδραση της θερμοκρασίας στις μετρήσεις μας. Οι απλοποιήσεις όμως που κάναμε και οι πολλαπλές πράξεις που απαιτούνται δεν μας επιτρέπουν να χρησιμοποιήσουμε αυτό τον τρόπο εξαλείψης της θερμοκρασιακής μεταβολής κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

#### 6.1.3.4 Εμπειρικός υπολογισμός

Ένας άλλος τρόπος για να εξαλείψουμε την επίδραση της θερμοκρασίας στις μετρήσεις μας είναι ο εμπειρικός. Σύμφωνα με αυτόν, θα χρησιμοποιήσουμε την εμπειρία από προηγούμενες μετρήσεις ώστε να δημιουργήσουμε μία βάση δεδομένων της επίδρασης των θερμοκρασιακών μεταβολών. Έτσι σε κάθε νέα μέτρηση, καταγράφοντας τη θερμοκρασία θα γνωρίζουμε εμπειρικά την επίδραση της θερμοκρασίας και θα την εξαλείψουμε. Συνολικά η μέθοδος αυτή έχει 5 βήματα.

1) Παίρνουμε  $j=5$  σετ μετρήσεων με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες και βρίσκουμε τους μέσους όρους τους,  $X_{av}^j$  και  $T_{av}^j$  αντίστοιχα.

2) Για κάθε καταγεγραμμένη τιμή της θερμοκρασίας  $T_i$ , από κάθε  $j$  σετ βρίσκω τις διαφορές  $T_i^j - T_{av}^j$  και  $X_i^j - X_{av}^j$  αντίστοιχα, όπου  $i$  τα σημεία μίας μέτρησης και  $j=1...5$  τα σετ των μετρήσεων.

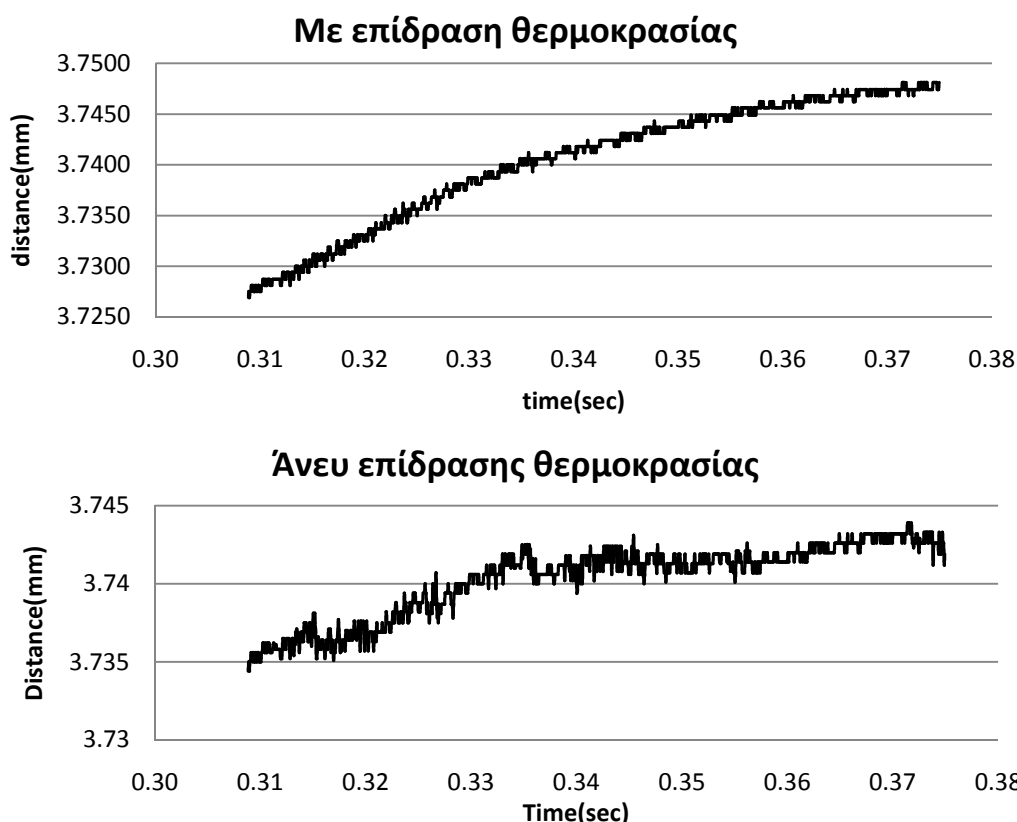
3) Αφού κανονικοποιήσουμε τα δεδομένα ως προς  $\Delta T$  φτιάχνουμε ένα πίνακα όπου στη πρώτη στήλη έχουμε τις διαφορές  $\Delta T$ , στις επόμενες πέντε τις διαφορές  $\Delta X$

από τα πέντε σετ μετρήσεων και στην τελευταία το μέσο όρο των διαφορών  $\Delta X$  που αντιστοιχούν στο ίδιο  $\Delta T$ . Έτσι έχουμε ένα πίνακα όπου σε κάθε  $\Delta T$  αντιστοιχίζεται μόνο μία τιμή, η  $\Delta X_{av}$ .

4) Σε κάθε νέα μέτρηση που διεξάγουμε, θα βρίσκουμε το  $T_{av}$ . Για κάθε σημείο  $X_i$  της νέας μέτρησης θα βρίσκουμε τη διαφορά  $T_i - T_{av}$  και από το πίνακα του βήματος 3 θα βρίσκουμε το αντίστοιχο  $\Delta X_{av}$ .

- 5) Εάν  $T_i - T_{av} > 0$  τότε προσθέτουμε στη τιμή  $X_i$  το  $\Delta X_{av}$ .  
 Εάν  $T_i - T_{av} < 0$  τότε αφαιρούμε από την τιμή  $X_i$  το  $\Delta X_{av}$ .  
 Εάν  $T_i - T_{av} = 0$  τότε αφήνουμε όπως έχει την τιμή  $X_i$ .

Μία εφαρμογή αυτού του τρόπου απόσβεσης της επίδρασης της θερμοκρασίας φαίνεται στα διαγράμματα 6.7. Πριν την εφαρμογή του εμπειρικού τρόπου απόσβεσης του σφάλματος, τα αποτελέσματα είχαν εύρος  $21.2\mu\text{m}$ . Με την εφαρμογή του το εύρος μειώθηκε στα  $9.5\mu\text{m}$ . Το νέο εύρος βέβαια είναι και πάλι αρκετά μεγάλο λόγω έλλειψης ικανοποιητικού αριθμού αρχικών δεδομένων, προβλημάτων στην καταγραφή της θερμοκρασίας και ιδιαιτερότητας των δείγματος που επεξεργασθήκαμε. Ωστόσο, το νέο εύρος είναι μειωμένο περίπου 55%.



Διάγραμμα 6.8 Καμπύλη μέτρησης υπό την επίδραση θερμοκρασιακής μεταβολής και με απόσβεση αυτής

Παρατήρηση 1: Στο βήμα 6, το αν θα προσθέσουμε ή θα αφαιρέσουμε το  $\Delta X_{av}$  εξαρτάται από το επίπεδο αναφοράς της μέτρησης, δηλαδή από το μηδέν της. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε ορίσαμε ως επίπεδο αναφοράς το τέλος του εύρους μέτρησης (EMR), όπου ισχύουν τα όσα περιγράψαμε στο βήμα 6. Εάν είχαμε ως

επίπεδο αναφοράς την αρχή του εύρους μέτρησης (SMR) τότε οι πράξεις θα ήταν αντίθετες. Γενικά, όταν έχουμε  $\Delta T > 0$  κάθε διόρθωση πρέπει να οδηγεί σε "προσέγγιση" του αισθητήρα και της επιφάνειας μέτρησης, ενώ για  $\Delta T < 0$  πρέπει να οδηγεί σε "απομάκρυνσή" τους.

Παρατήρηση 2: Με τον εμπειρικό υπολογισμό, στην ουσία ανάγουμε κάθε σημείο της μέτρησης σε μία θερμοκρασία, την  $T_{av}$ , μέσω του πίνακα του βήματος 3. Χάριν αυτής της παρατήρησης μπορούμε να ξεπεράσουμε και το μόνο πρόβλημα του εμπειρικού υπολογισμού, το οποίο είναι το εύρος της θερμοκρασιακής μεταβολής του πίνακα του βήματος 3. Εάν μία μέτρηση παρουσίαζε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος από το πίνακα δεν θα ήταν δυνατή η αναγωγή των τιμών σε μία θερμοκρασία. Μπορούμε όμως να χωρίσουμε την μέτρηση σε κατάλληλο αριθμό ομάδων ώστε να είναι εντός του θερμοκρασιακού εύρους του πίνακα και να ανάγουμε κάθε ομάδα σε μία θερμοκρασία. Έτσι θα προέκυπτε μία καμπύλη με τόσα τμήματα όσα και οι ομάδες, μετατοπισμένα μεταξύ τους. Μετά, θα ήταν εύκολο να ενώσουμε τα τμήματα μεταξύ τους και να έχουμε τη καμπύλη σταθερής θερμοκρασίας (η θερμοκρασία αυτή μπορεί να είναι η θερμοκρασία αναγωγής ενός τμήματος ή ο μέσος όρος τους κα).

#### 6.1.4 Ανακεφαλαίωση

Συγκεντρωτικά, τα πιθανά σφάλματα κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων με την παρούσα διάταξη είναι:

1. Λόγω κλίσης του φορέα συμπίεσης  
Όπως είδαμε στο 5.3.1, σε μία περιοχή διαμέτρου 1mm γύρω από τον άξονα του φορέα το σφάλμα είναι 0.4945μm.
2. Λόγω κλίσης του αισθητήρα  
Για γωνίες έως 5° το σφάλμα δεν ξεπερνάει το 0.75% της συνολικής μετατόπισης.
3. Ανακλαστικότητα επιφάνειας μέτρησης  
Αντιμετωπίζεται με μείωση του ρυθμού μέτρησης.
4. Άλλες πηγές φωτός  
Κρίθηκε απαραίτητη η χρήση προστατευτικού καλύμματος.
5. Περίοδος προθέρμανσης αισθητήρα  
Συνίσταται ο αισθητήρας να λειτουργεί για 20 λεπτά χωρίς να λαμβάνει μετρήσεις ώστε να προθερμανθεί.
6. Θερμική διαστολή  
Μέσω του εμπειρικού υπολογισμού, που περιγράψαμε προηγουμένως, εξαλείφεται η επίδραση των θερμοκρασιακών αλλαγών.

#### 6.2 Δοκιμή ερπυσμού ιξωδοελαστικού υλικού

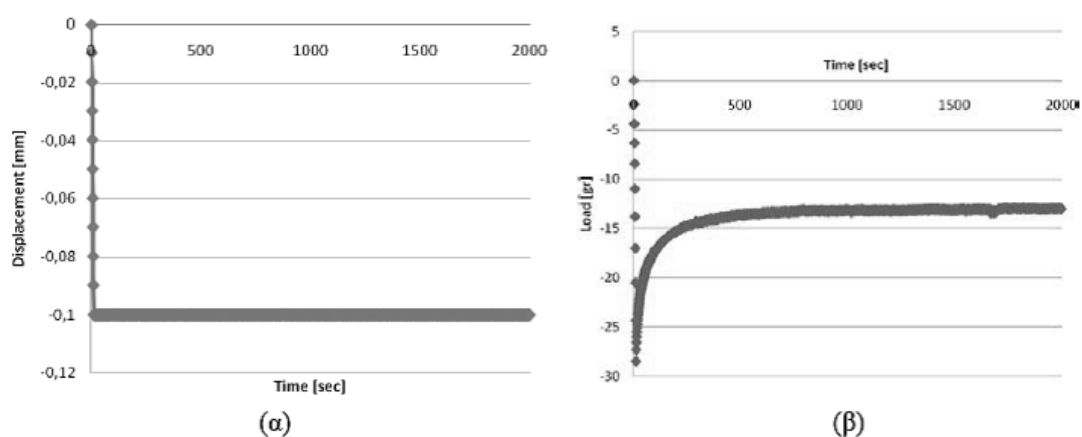
Έχοντας πλέον εξηγήσει τις συνθήκες διεξαγωγής των μετρήσεων, μπορούμε να προχωρήσουμε σε μία πρώτη απόπειρα εφαρμογής της δοκιμής ερπυσμού. Προς

τούτο, επιλέξαμε να μην χρησιμοποιήσουμε δοκίμιο αρθρικού χόνδρου. Ο λόγος είναι ότι κάθε δοκίμιο χόνδρου που θα χρησιμοποιούσαμε θα έλειπε από την άρθρωση ενός ανθρώπου και γι αυτό δεν ήταν κατάλληλο για αυτό το στάδιο των πειραματικών δοκιμών στη διάταξη. Αντί αυτού έγινε χρήση ενός ιξωδοελαστικού υλικού που λόγω της ιξώδους συμπεριφοράς του παρουσιάζει μία παρόμοια συμπεριφορά με τον χόνδρο σε συνθήκες συμπίεσης για μικρές παραμορφώσεις. Το υλικό αυτό είναι η κοινή εμπορική γόμα.

Γενικά οι μηχανικές ιδιότητες της γόμας προσδιορίζονται από τις ελαστικές (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson) και από τις ιξώδεις (λόγος απόσβεσης  $c$ ). Λόγω της ιξώδους συμπεριφοράς της, έχει παρόμοια συμπεριφορά με τον αρθρικό χόνδρο, πχ σε δοκιμή χαλάρωσης έχουμε απότομη αύξηση του φορτίου και στη συνέχεια σταδιακή μείωσή του έως την κατάσταση ηρεμίας. Βέβαια, τόσο το μέγιστο φορτίο, το φορτίο ηρεμίας και ο χρόνος αποκατάστασης της ηρεμίας διαφέρουν. Στο διάγραμμα 6.8 φαίνονται τα αποτελέσματα μιας παλαιότερης δοκιμής χαλάρωσης που πραγματοποιήθηκε στη πρέσα που περιγράψαμε προηγουμένως.

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα 6.8(α), εφαρμόστηκε μία παραμόρφωση 100μm η οποία επέφερε το φορτίο αντίδρασης που φαίνεται στο διάγραμμα 6.8(β). Η μέγιστη τιμή του φορτίου ήταν περίπου 30gr και το φορτίο ηρεμίας περίπου 12gr. Ο χρόνος όπου επήλθε η ηρεμία ήταν περίπου 2000sec, ενώ ήδη από τα 500sec φαίνεται η τάση σταθεροποίησης.

Όσον αφορά στις ελαστικές ιδιότητες του δοκιμίου που μας ενδιαφέρουν και συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κατάσταση ηρεμίας του δοκιμίου. Έτσι, από παλαιότερη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε με συνολική μετατόπιση 200μm σε 5 βήματα, εξάγαμε το πίνακα 6.3. Μετά από κάθε βήμα, το δοκίμιο αφηνόταν να ηρεμήσει για 5 λεπτά και έτσι βρίσκαμε το φορτίο ηρεμίας για τη μέχρι τότε παραμόρφωση. Το δοκίμιο είχε διάμετρο 1.5mm και ύψος 3mm.



Διάγραμμα 6.8 Δοκιμή χαλάρωσης δοκιμίου γόμας

Παραμόρφωση(mm)	Φορτίο Ηρεμίας (N)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
0,040	-0,139	5,899343
0,080	-0,286	6,069108
0,120	-0,432	6,11155

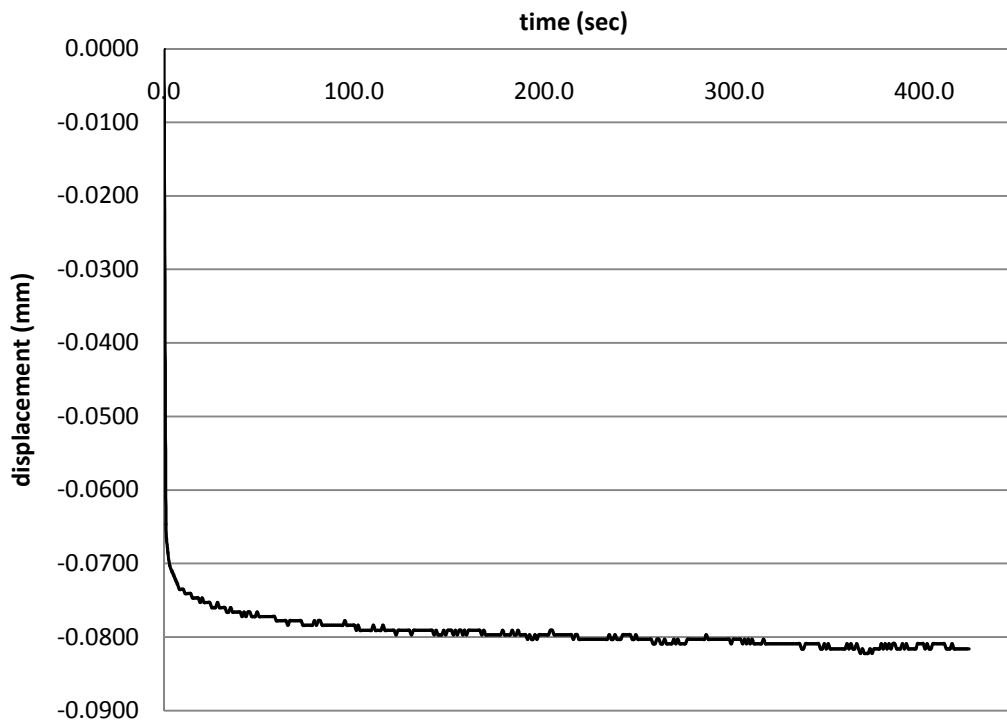
0,160	-0,591	6,270705
0,200	-0,775	6,578404

Πίνακας 6.3 Φορτία ηρεμίας και μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου γόμας

Από τον πίνακα 6.3 υπολογίσαμε τη μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας όπως υπολογίσθηκε για τα 5 βήματα., ίση με  $E_{av}=6.19\text{MPa}$ .

Έχοντας κάποια στοιχεία για τη μηχανική συμπεριφορά της γόμας προχωρήσαμε στη δοκιμή ερπυσμού στη πειραματική διάταξη με τον αισθητήρα laser. Το δοκίμιο που χρησιμοποιήσαμε ήταν διαμέτρου  $d=3\text{mm}$  και ύψους  $l=2\text{mm}$ . Το φορτίο συμπίεσης, όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 5.3, ήταν  $F=0.163\text{N}$  και η διάρκεια της μέτρησης ήταν διάρκειας 420sec. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης η θερμοκρασία παρέμενε μεταξύ ενός εύρους  $0,06^\circ\text{C}$  και έτσι η επίδραση της θερμοκρασίας στη μέτρηση ήταν αμελητέα. Στο διάγραμμα 6.9 βλέπουμε τα αποτελέσματα της μέτρησης.

Συγκρίνοντας το διάγραμμα 6.9 με την εικόνα 3.2 της μοντελοποίησης της δοκιμής ερπυσμού με κοίλο φορέα στο ABAQUS βλέπουμε τις αναμενόμενες ομοιότητες στη μορφή της καμπύλης. Φυσικά οι τιμές της μετατόπισης είναι διαφορετικές λόγω του ότι η μοντελοποίηση αφορούσε δοκίμιο χόνδρου και οι συνθήκες της δοκιμών ήταν διαφορετικές (φορτίο συμπίεσης).



Διάγραμμα 6.9 Δοκιμή ερπυσμού γόμας στη πειραματική διάταξη

Επιπλέον υπολογίσαμε και το μέτρο ελαστικότητας με βάση τη τιμή της παραμόρφωσης στην οποία ηρεμεί το δοκίμιο η οποία μετρήθηκε  $h=81.6\mu\text{m}$ . Να σημειώσουμε ότι επειδή ο φορέας ήταν κοίλος με ακτίνα καμπυλότητας  $r=1.75\text{mm}$  η επιφάνεια επαφής με το δοκίμιο υπολογίστηκε ως επιφάνεια σφαιρικού τμήματος.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/(2\pi rh)}{h/l} = \frac{0.163/(2 \cdot \pi \cdot 1.75 \cdot 0.0816)}{0.0816/2} = 4.45 \text{MPa}$$

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που προέκυψε είναι πολύ κοντά σε αυτή που υπολογίσαμε από τις δοκιμές χαλάρωσης στη πρέσα (6.19MPa). Οπότε συμπεραίνουμε ότι η πειραματική δοκιμή ερπυσμού στη διάταξη με τον αισθητήρα απόστασης με laser ήταν επιτυχής.



## Συμπεράσματα

Η ανάλυση που προηγήθηκε βασίστηκε στην ανάγκη ταχύτερης και αποτελεσματικότερης έρευνας γύρω από την εκφύλιση των μηχανικών ιδιοτήτων του αρθρικού χόνδρου σε πάσχοντες με οστεοαρθρίτιδα. Το γεγονός ότι ένας στους έξι ανθρώπους πάσχουν σήμερα από αυτήν την ασθένεια κάνει ακόμα πιο επιτακτική την ανάγκη εξεύρεσης φαρμακευτικών παρεμβάσεων που θα διακόπτουν την εκφυλιστική πορεία του ιστού.

Μέσα από την διαμόρφωση και παρουσίαση της μετρητικής διάταξης παραμόρφωσης κυλινδρικών δοκιμίων υπό συμπίεση, έγινε φανερό ότι αυτή μπορεί να δώσει λύση στην ανάπτυξη μεγάλου όγκου (high-throughput) πειραματικών μετρήσεων δοκιμίων αρθρικού χόνδρου. Εξετάστηκαν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες καλείται να λειτουργήσει η μετρητική διάταξη και εξακριβώθηκε η επίδρασή τους στις μετρούμενες τιμές. Έτσι έγινε δυνατό να πραγματοποιηθούν μετρήσεις που να καλύπτουν τις απαιτήσεις των πειραμάτων.

Η καταλληλότητα της διάταξης για τα δοκίμια αρθρικού χόνδρου επιβεβαιώνεται και από τη διεξαχθείσα μέτρηση της παραμόρφωσης κυλινδρικού δοκιμίου ιξωδοελαστικού υλικού. Το υλικό αυτό, που δεν είναι άλλο από τη κοινή γόμα του εμπορίου, παρουσιάζει για μικρές παραμορφώσεις παρόμοια συμπεριφορά με τον αρθρικό χόνδρο, πχ σε δοκιμή χαλάρωσης απότομη αύξηση του φορτίου και ακολούθως μείωση έως το φορτίο ηρεμίας. Η μέτρηση που πραγματοποιήθηκε με το δοκίμιο αυτό έδωσε ικανοποιητικά κοντινά αποτελέσματα με προηγούμενες γνωστές μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων του.

Συμπερασματικά, διαπιστώσαμε ότι η προτεινόμενη μετρητική διάταξη μπορεί να εκπληρώσει τις ανάγκες δοκιμών συμπίεσης που εμφανίζονται στη μελέτη εκφύλισης του αρθρικού χόνδρου αλλά και σε άλλους τομείς της Ιστομηχανικής. Τέλος, η διάταξη αυτή καλύπτει τις απαιτήσεις που θέτουν οι πειραματικές μετρήσεις και είναι σε θέση να καταγράψει σωστά τη μηχανική αντίδραση ενός δοκιμίου με παρόμοια συμπεριφορά με τον αρθρικό χόνδρο, όταν υφίσταται καταπόνηση ερπυσμού.



## Μελλοντική Εξέλιξη

Απώτερος στόχος της διαμόρφωσης αυτής της μετρητικής διάταξης είναι η μέτρηση της παραμόρφωσης μεγάλου όγκου (high-throughput) δοκιμίων αρθρικού χόνδρου σε δοκιμή συμπίεσης, ώστε να διακριβωθεί η αντίδραση του ιστού σε διάφορα εξωκυτταρικά ερεθίσματα με γενικότερο στόχο την ανάπτυξη φαρμακευτικών παρεμβάσεων ενάντια στην εκφυλιστική διαδικασία του ιστού κατά την οστεοαρθρίτιδα. Με βάση το στάδιο εξέλιξης της διάταξης όπως περιγράφηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία, η μελλοντική εξέλιξή της περιλαμβάνει:

- Εξέταση της ικανότητας διεξαγωγής μετρήσεων πολλαπλών δοκιμίων σε μη στατικές συνθήκες, δηλαδή με ενεργοποίηση του μηχανισμού σχετικής κίνησης του δοχείου των δοκιμίων.
- Χειρισμός της διάταξης κεντρικά από ένα πρόγραμμα (πχ labview)
- Διενέργεια μετρήσεων με δοκίμια αρθρικού χόνδρου προς τυπική διαπίστωση της καταλληλότητας της διάταξης.
- Αυτόματη διόρθωση της επίδρασης της θερμοκρασίας με χρήση ειδικών προβόλων ως επιφάνειες αναφοράς.
- Επέκταση των δυνατοτήτων της διάταξης και σε δοκιμή χαλάρωσης αλλά και σε δοκιμές με διαφορετικά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά.
- Επέκταση του πεδίου εφαρμογής της διάταξης σε άλλους τομείς της Ιστομηχανικής (tissue engineering), όπως μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς οστού.



## **Βιβλιογραφία**

- [1]. Andrianakos, A., et al., *Prevalence of rheumatic diseases in Greece: a cross-sectional population based epidemiological study. The ESORDIG Study.* J Rheumatol, 2003. **30**(7): p. 1589-601.
- [2]. Προβατίδης, Χ., *Εμβιομηχανική και βιοϊατρική τεχνολογία.* ΕΜΠ, 2005.
- [3]. Ευταξιοπούλου, Θ., *Διπλωματική εργασία: Μοντελοποίηση της εμβιομηχανικής συμπεριφοράς του αρθρικού χόνδρου σε συμπίεση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.* ΕΜΠ, 2006.
- [4]. Mow, V.C., et al., *Biphasic creep and stress relaxation of articular cartilage in compression. Theory and experiments.* J Biomech Eng, 1980. **102**(1): p. 73-84.
- [5]. Mak, A.F., W.M. Lai, and V.C. Mow, *Biphasic indentation of articular cartilage--I. Theoretical analysis.* J Biomech, 1987. **20**(7): p. 703-14.
- [6]. Mow, V.C., et al., *Biphasic indentation of articular cartilage--II. A numerical algorithm and an experimental study.* J Biomech, 1989. **22**(8-9): p. 853-61.
- [7]. Alexopoulos, L.G., et al., *Alterations in the mechanical properties of the human chondrocyte pericellular matrix with osteoarthritis.* J Biomech Eng, 2003. **125**(3): p. 323-33.
- [8]. Α. Κανάραχος, Χ.Π., *Πεπερασμένα στοιχεία στη μηχανολογία.* Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2000.
- [9]. Keenan, K.E., et al., *New resource for the computation of cartilage biphasic material properties with the interpolant response surface method.* Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2009. **12**(4): p. 415-22.
- [10]. Alexopoulos, L.G. and J. Saez-Rodriguez, *High throughput protein-based technologies and computational models for drug development, efficacy and toxicity. Drug Efficacy, Safety, and Biologics Discovery: Emerging Technologies and Tools.* S. Ekins and J. J. Xu, Wiley: 29-52, 2009.
- [11]. Σιμόπουλος, Σ.Ε., *Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών.* ΕΜΠ, 1989.
- [12]. LionPrecision, *Capacitive sensor operation and optimization.* [www.lionprecision.com](http://www.lionprecision.com), 2009.
- [13]. Baxler, L.K., *Capacitive sensors.* Piscataway N.J., 1997.
- [14]. MicroEpsilon, *Instruction manual capaNCDT 6100.* [www.micro-epsilon.com](http://www.micro-epsilon.com).
- [15]. LionPrecision, *Capacitive sensors catalogue.* [www.lionprecision.com](http://www.lionprecision.com).
- [16]. IBS, *Non-contact measurement with capacitive and inductive systems.* [www.ibspe.com](http://www.ibspe.com).
- [17]. MicroStrain, *Non-Contact DVRT.* [www.microstrain.com](http://www.microstrain.com).
- [18]. BaslerVision, *Industrial cameras-product line overview.* [www.baslerweb.com](http://www.baslerweb.com).
- [19]. Κυριακόπουλος, Κ., *Βιομηχανικά ηλεκτρονικά.* ΕΜΠ, 2005.
- [20]. MicroEpsilon, *Instruction Manual optoNCDT 1402.* [www.micro-epsilon.com](http://www.micro-epsilon.com).
- [21]. WayCon, *Analogue Laser Displacement Transduce.* [www.waycon.de](http://www.waycon.de).

- [22]. DSE, *ODS Black line specificarions*. [www.sensor.dk](http://www.sensor.dk).
- [23]. Faulhaber, *AM-1524 stepper motors*. [www.faulhaber.de](http://www.faulhaber.de).
- [24]. SimpleStepLLC, *Product manual*. [www.simplestep.com](http://www.simplestep.com).
- [25]. ThorLabs, *PerformancePlus Series Optical Breadboards*. [www.thorlabs.com](http://www.thorlabs.com).

## Βιογραφικό συντάκτη

**Αλευράς Παναγιώτης**

mc04009@mail.ntua.gr

palevras@hotmail.com

### ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

- 10/2004-σήμερα: Τελειόφοιτος φοιτητής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
- 09/2001-06/2004: 3<sup>ο</sup> Ενιαίο Λύκειο Πειραιά  
Βαθμός Απολυτηρίου 18,3

### ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

- 09/2009-σήμερα: Μέλος της ερευνητικής ομάδας του κ. Λεωνίδα Αλεξόπουλου του Εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών του ΕΜΠ με κύρια ενασχόληση *modeling signal pathways of cartilage degeneration*

### ΓΝΩΣΕΙΣ Η/Υ

- Καλή γνώση Microsoft Windows, Microsoft Office
- Εμπειρία προγραμματισμού σε Matlab, Fortran
- Γνώση λογισμικού σχεδίασης Autocad
- Γνώση λογισμικών ανάλυσης κατασκευών Ansys, LS-Dyna

### ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

- Certificate of Proficiency in English-University of Cambridge(12/2008)

### ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ

- Εισακτέος στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών με σειρά 9<sup>η</sup>

### ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ-ΣΥΝΕΔΡΙΑ

- 4<sup>th</sup> PhillionNet CAE Conference “Drive Innovation with Simulation”