



Πολυτεχνείο
Κρήτης

**Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών**

*Αυτόματη ανίχνευση αγγειακών
διαφοροποιήσεων μέσω βίντεο τριχοειδοσκοπίας
σε παθολογικές σκληροδερμίες*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καδίτης Εμμανουήλ

Χανιά, Οκτώβριος 2020



Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Ζερβάκης Μιχάλης (επιβλέπων)

Επίκουρος Καθηγητής Fabrizio Pancaldi (UNIMORE)

Αναπληρωτής Καθηγητής Ευτύχιος Κουτρούλης

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Ζερβάκη του Πολυτεχνείου Κρήτης για την καθοδήγησή του κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου και την εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον καθηγητή Fabrizio Pancaldi από το πανεπιστήμιο University of Modena & Reggio Emilia (UNIMORE) για την πολύτιμή βοήθεια και τις συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης αλλά και της ζωής στην Reggio Emilia.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Alessandro Bertacchini και τον μεταδιδακτορικό Paolo La Torraca από το πανεπιστήμιο UNIMORE για τον βοήθεια του στο πρακτικό μέρος της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους και φίλους που γνώρισα μέσα στο Πολυτεχνείο αλλά και την οικογένειά μου για την στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η βίντεο-τριχοειδοσκοπία είναι μία μη επεμβατική τεχνική απεικόνισης για την *in vivo* μελέτη της μικροκυκλοφορίας του αίματος. Αρκετοί γιατροί προτείνουν την υιοθέτηση της τριχοειδοσκόπησης για την ανίχνευση της αγγειακής και σπλαχνικής συμμετοχής όπως τα δακτυλικά έλκη, την πνευμονική αρτηριακή υπέρταση και την διάμεση πνευμονοπάθεια. Δυστυχώς, η κλινική εφαρμογή της τριχοειδοσκοπίας περιορίζεται από την κακή απόδοση της μέτρησης, καθώς η ανίχνευση των παραμέτρων ενδιαφέροντος βασίζεται κυρίως στην υποκειμενική ερμηνεία της εικόνας από τον εκάστοτε γιατρό.

Αυτή η εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός νέου εργαλείου ικανό για την αυτόματη αναγνώριση και ποσοτικοποίηση των τριχοειδικών αλλαγών. Αφενός, η μελέτη που υπάρχει διαθέσιμη στον τομέα της φωτοπληθυσμογραφίας μπορεί να αξιοποιηθεί για τον εντοπισμό όγκων ή/και μεταβολών του όγκου στα αιμοφόρα αγγεία. Από την άλλη μεριά, η γνωστή θεωρία της βιοϊατρικής επεξεργασίας εικόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτική ανίχνευση των τριχοειδοσκοπικών αλλοιώσεων.

Οι δραστηριότητες που θα υλοποιηθούν με την παρούσα μελέτη είναι οι εξής:

- Σχεδιασμός υπέρυθρου φωτισμού για την εκμετάλλευση των οπτικών ιδιοτήτων του αίματος σε διάφορα μήκη κύματος
- Σχεδιασμός μηχανικής ρύθμισης κατάλληλης για την τυποποίηση της τοποθέτησης του καθετήρα και της πίεσης που ασκείται στο δέρμα
- Προσδιορισμός της κατάλληλης υπέρυθρης κάμερας
- Σχεδιασμός ή/και αναζήτηση ενός οπτικού συστήματος κατάλληλου για την παροχή της κατάλληλης κλίμακας μεγέθυνσης και σύλληψης
- Ενσωμάτωση όλων των επιλεγμένων τμημάτων σε ένα μόνο όργανο.

Abstract

Video - capillaroscopy is a non-invasive imaging technique for the in vivo study of microcirculation. Several doctors and physicians suggest the adoption of video - capillaroscopy to detect typical vascular and visceral involvement as digital ulcers, pulmonary arterial hypertension and pulmonary interstitial disease. Unluckily the routine clinical application of video - capillaroscopy is limited by the poor reproducibility of the measurement, since the detection of the parameters of interest is mainly based on the subjective image interpretation of the doctor.

This project aims at developing a new tool suitable to automatically recognize and quantify capillaroscopic alterations. On the one hand, the work available in the field of photoplethysmography can be exploited to detect volumes and / or variations of volume in blood vessels. On the other hand, the well known theory of biomedical image processing can be employed to quantitatively detect capillaroscopic alterations.

The activities assigned to this thesis are:

- Designing an infrared (IR) illuminator to exploit the optical properties of blood at various wavelengths.
- Designing the mechanical setup suitable to standardize the probe placement and pressure exerted on the skin.
- Identifying the proper IR video camera
- Designing and/or identifying an optical system suitable to provide the proper magnification and capture range
- Integrating all the selected parts into a single setup/instrument.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	7
1.1 Σκληρόδερμα – Σκληροδερμία	8
1.1.1 Σημεία και συμπτώματα σκληροδέρματος	9
1.1.2 Επιπλοκές σκληροδέρματος	9
1.1.3 Αιτιολογικοί παράγοντες σκληροδέρματος	10
1.1.4 Συνήθεις θεραπευτικές αγωγές για το σκληρόδερμα	10
1.1.5 Διάγνωση σκληροδέρματος	11
1.1.6 Σύντομο ιστορικό της νόσου	11
1.2 Τριχοειδοσκοπία – Τριχοειδοσκόπηση (Capillaroscopy)	12
1.2.1 Αρχές της Τριχοειδοσκοπίας	13
1.2.2 Το φαινόμενο του Raynaud	14
1.2.3 Τεχνικές κλινικής εξέτασης σκληροδερμίας στο παρόν	16
1.2.4 Μειονεκτήματα και ελαττώματα τριχοειδοσκοπίας με τον τρόπο που εκτελείται σήμερα	17
1.2.5 Πλεονεκτήματα και θετικά χαρακτηριστικά με τον τρόπο τριχοειδοσκοπίας που θα μελετηθεί στην εργασία	18
1.2.6 Προέκταση της επιτυχημένης τριχοειδοσκοπίας σε άλλα επίπεδα.....	19
Κεφάλαιο 2 – Ανθρώπινο Σώμα / Εξοπλισμός	20
2.1 Εισαγωγή.....	20
2.2 Near-Infrared (Κοντά στο υπέρυθρο - NIR).....	21
2.3 Οπτικό Σύστημα.....	23
2.3.1 Υπέρυθρη Κάμερα.....	25
2.3.2 Φακός Macro	26
2.4 LED (Light Emitting Diode)	27
2.4.1 LED Driver	29
2.4.2 LT1932 LED Driver	30
Κεφάλαιο 3 – Προσομοίωση και Σχεδιασμός.....	35
3.1 Εισαγωγή – LTspice XVII.....	35
3.2 Προσομοίωση του LT1932	36
3.3 Προσομοίωση του τελικού κυκλώματος	38
3.4 Δημιουργία του Printed Circuit Board (PCB).....	40
3.5 Σχεδιασμός της κατασκευής	48

3.5.1 Τρισδιάστατος Σχεδιασμός (Three-dimensional Design).....	49
Κεφάλαιο 4 – Πειραματικά Αποτελέσματα.....	51
Κεφάλαιο 5 – Μελλοντική Εργασία – Βιβλιογραφία	59
5.1 Μελλοντική Εργασία.....	59
5.2 Βιβλιογραφία	59

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Μέχρι και την εποχή του 21^{ου} αιώνα η ραγδαία εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας έχει λειτουργήσει ως καθοριστικός παράγοντας για την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου όλων των γήινων ζωντανών οργανισμών και ειδικότερα του ανθρώπου. Η βιολογία, η χημεία, η φυσική, η ιατρική και η μηχανική είναι κάποιες από τις θετικές επιστήμες που έχουν αναπτυχθεί ήδη σε υψηλό βαθμό και συνεχίζουν να αναπτύσσονται λειτουργώντας ταυτόχρονα προς όφελος του ανθρώπου, αυξάνοντας το προσδόκιμο ζωής του αλλά και βελτιώνοντας την ποιότητα της ζωής του.

Οι όροι βιοϊατρική τεχνολογία ή βιοϊατρική μηχανική αναφέρονται στην εφαρμογή των αρχών των θετικών επιστημών και των παραγώγων τους στην ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων στους τομείς της ιατρικής και της βιολογίας. Ο όρος βιοϊατρική υπονοεί έμφαση στην ανάπτυξη τεχνολογιών για τη διάγνωση και θεραπεία ασθενειών, ενώ η βιοϊατρική τεχνολογία από κοινού με την βιοτεχνολογία αποκαλούνται βιολογική μηχανική.

Σκοπός της βιοϊατρικής τεχνολογίας είναι να συμβάλλει στην κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας των βιολογικών συστημάτων και στην ανάπτυξη αποδοτικών τεχνολογιών, βασισμένων στη βιολογία, για να καλύψει έναν ευρύ φάσμα κοινωνικών αναγκών. Οι ανάγκες αυτές μπορεί να αφορούν τους τομείς της διάγνωσης, πρόληψης και θεραπείας ασθενειών, την ανάπτυξη νέων υλικών, συσκευών και διαδικασιών ακόμα και την αντιμετώπιση ευρύτερων περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Η βιοϊατρική τεχνολογία χωρίζεται σε δύο βασικούς επιστημονικούς κλάδους, τη βιοϊατρική μηχανική και τη βιολογική μηχανική.

Η βιοϊατρική μηχανική έχει ως επίκεντρο την ιατρική και εφαρμόζει γνώσεις από την βιολογία και άλλες επιστήμες στην επίλυση ιατρικών προβλημάτων. Από την άλλη πλευρά η βιολογική μηχανική εστιάζει κυρίως σε προβλήματα και ερωτήματα που ανακύπτουν μέσα από την ανάπτυξη της ίδιας της επιστήμης της βιολογίας και σκοπό έχει την εύρεση νέας γνώσης, είτε αυτή βρίσκει εφαρμογή στην ιατρική, είτε όχι.[1]

Η παρούσα εργασία υπάγεται στα πλαίσια της βιοϊατρικής μηχανικής καθώς στόχος της είναι η αναζήτηση ενός βέλτιστου τρόπου διάγνωσης και πρόληψης για την παθολογική σκληροδερμία.

1.1 Σκληρόδερμα – Σκληροδερμία

Το Σκληρόδερμα αποτελεί μία χρόνια αυτοάνοση ασθένεια, κατά την οποία παράγονται στον ανθρώπινο οργανισμό υπερβολικές ποσότητες κολλαγόνου. Πρόκειται για ένα συστηματικό, μη μεταδοτικό αυτοάνοσο νόσημα, το οποίο προσβάλλει το δέρμα, τις αρθρώσεις, το μυοσκελετικό σύστημα και διάφορα εσωτερικά όργανα, όπως είναι ο γαστρεντερικός σωλήνας, οι πνεύμονες, η καρδιά και τα νεφρά.

Στη συγκεκριμένη νόσο ενεργοποιείται το ανοσοποιητικό σύστημα, το οποίο επιτίθεται εσφαλμένα στον ίδιο μας τον οργανισμό, παράγοντας ειδικά αυτό-αντισώματα και προσβάλλονται τα αγγεία, με επακόλουθο την πάχυνση του τοιχώματος, τη στένωση και την απόφραξη (μικροαγγειοπάθεια).

Το σκληρόδερμα, ταυτόχρονα, επηρεάζει το συνδετικό ιστό και εμφανίζεται ίνωση, με αποτέλεσμα να επέρχεται σκλήρυνση των προσβεβλημένων ιστών, ιδίως των χεριών και του δέρματος. Το δέρμα, που προσβάλλεται, τεντώνεται και δεν αποκλείεται το ενδεχόμενο εμφάνισης πληγών στα χέρια.



Εικόνα 1 - Άτομο που πάσχει από σκληροδερμία

Το σκληρόδερμα διακρίνεται στο Εντοπισμένο και στο Συστηματικό σκληρόδερμα.

Στο εντοπισμένο σκληρόδερμα παρατηρούνται μονάχα εντοπισμένες, μονήρεις, δερματικές αλλοιώσεις, χωρίς να προσβάλλονται εσωτερικά όργανα. Αντιθέτως, στα άτομα που πάσχουν από συστηματικό σκληρόδερμα παρουσιάζονται προβλήματα και στα εσωτερικά όργανα, πέραν του δέρματος. Το συστηματικό σκληρόδερμα διακρίνεται στο περιορισμένο και στο διάχυτο. Το περιορισμένο σκληρόδερμα εντοπίζεται μόνο στο πρόσωπο, στα χέρια μέχρι τους αγκώνες και στα πόδια έως τα γόνατα, ενώ η προσβολή εσωτερικών οργάνων είναι πιο ήπια. Εν αντιθέσει με το περιορισμένο, το διάχυτο σκληρόδερμα επηρεάζει το δέρμα του κορμού και προσβάλλει σε μεγαλύτερο βαθμό τα εσωτερικά όργανα.

Το συστηματικό σκληρόδερμα πρόκειται για μια πολύ σπάνια ασθένεια, η οποία προσβάλλει δυο φορές συχνότερα τις γυναίκες, συγκριτικά με τους άνδρες. Μπορεί να εμφανιστεί σε όλες τις ηλικιακές ομάδες, πολύ σπάνια ακόμη και στα παιδιά, ωστόσο επηρεάζει συχνότερα τις ηλικίες μεταξύ 45 και 65 ετών.[2]

1.1.1 Σημεία και συμπτώματα σκληροδέρματος

Τα συμπτώματα του σκληροδέρματος είναι πολλά και διαφορετικά. Ποικίλλουν αρκετά από ασθενή σε ασθενή και η βαρύτητα της νόσου η καθορίζεται τόσο από τα όργανα που προσβάλλονται, όσο και από την έκταση προσβολής τους.

Δύο από τα πρώιμα συμπτώματα της νόσου αποτελούν το φαινόμενο Raynaud και το πρήξιμο των δακτύλων των χεριών. Το φαινόμενο Raynaud παρουσιάζεται με χαρακτηριστική εναλλαγή στο χρώμα του δέρματος των χεριών ή των ποδιών από λευκό σε μελανό και κατόπιν σε κόκκινο, έπειτα από έκθεση στο κρύο ή ως απόρροια του άγχους. Οι μεταβολές στο χρώμα των άκρων σταδιακά συνοδεύονται και από αλλαγές στη σύσταση και την υφή του δέρματος, λόγω της προοδευτικής ίνωσης.

Ταυτόχρονα, το σκληρόδερμα εκδηλώνεται με πάχυνση και σκλήρυνση του δέρματος, ειδικότερα στα χέρια και το πρόσωπο. Το δέρμα, μάλιστα, γίνεται σταδιακά γυαλιστερό. Προκαλείται δυσκαμψία των αρθρώσεων, παρατηρείται πόνος και μούδιασμα στις προσβαλλόμενες περιοχές και σημειώνονται διαταραχές στην κατάποση και την πέψη. Μπορεί, επίσης, να προσβληθεί η καρδιά, ο πνεύμονας ή τα νεφρά.

Από τη μία, σε περίπτωση προσβολής του πνεύμονα, οι ασθενείς χαρακτηρίζονται από δύσπνοια, η οποία ενδέχεται να επιφέρει αναπνευστική ανεπάρκεια. Από την άλλη, όταν το σκληρόδερμα επηρεάσει την καρδιά, το άτομο μπορεί να παρουσιάσει περικαρδίτιδα και αρρυθμίες, καταστάσεις, οι οποίες εκδηλώνονται με πόνο και αίσθημα παλμών. Παράλληλα, στα κλινικά συμπτώματα του σκληροδέρματος περιλαμβάνονται διαταραχές στην κινητικότητα του λεπτού εντέρου, ενώ η προσβολή των νεφρών επιφέρει υπέρταση και ταχέως εξελισσόμενη νεφρική ανεπάρκεια.[2]

1.1.2 Επιπλοκές σκληροδέρματος

Η Πνευμονική Αρτηριακή Υπέρταση και τα Δακτυλικά Έλκη αποτελούν τις δύο σοβαρότερες επιπλοκές της νόσου. Η Πνευμονική Αρτηριακή Υπέρταση εκδηλώνεται με συμπτώματα, όπως η δύσπνοια και η κόπωση κατά τη σωματική άσκηση, οι οποίες μπορεί εσφαλμένα να εκληφθούν από τους πάσχοντες ως σημεία άλλης αναπνευστικής ή καρδιακής διαταραχής.

Τα δακτυλικά έλκη είναι αποτέλεσμα της μικροαγγειοπάθειας και της κακής αιμάτωσης. Πρόκειται, στην ουσία, για επώδυνες πληγές στα δάχτυλα, οι οποίες αφενός δυσχεραίνουν την καθημερινότητα και φθίνουν την ποιότητα ζωής, αφετέρου αυξάνουν τον κίνδυνο εμφάνισης λοιμώξεων. Δεν αποκλείεται, μάλιστα, να προκαλέσουν σοβαρές επιπλοκές, όπως επιμολύνσεις, γάγγραινα, μέχρι και ακρωτηριασμό.[2]

1.1.3 Αιτιολογικοί παράγοντες σκληροδέρματος

Οι γνώσεις της ιατρικής σχετικά με το σκληρόδερμα έχουν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό συγκριτικά με παλαιότερα, όμως χαρακτηρίζονται ακόμη ελλιπείς. Γι' αυτό το λόγο, η αιτιολογία της νόσου παραμένει ακόμη άγνωστη, ωστόσο ενοχοποιούνται διάφοροι μηχανισμοί για την παθογένεια της νόσου, όπως είναι τα γονίδια και διάφοροι κληρονομικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες.

Παράλληλα, όπως όλα τα αυτοάνοσα νοσήματα, έτσι και το σκληρόδερμα προκαλείται, όταν διαταράσσεται η λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος. Διάφοροι επιγενετικοί παράγοντες, όπως οι τοξίνες του περιβάλλοντος και το άγχος, δε βοηθούν στη σωστή βιοχημεία του σώματος, με αποτέλεσμα ο οργανισμός να παρουσιάζει ελαττωμένα ή ανεπαρκή παραγωγή απαραίτητων ενζύμων και βασικών μικροθρεπτικών συστατικών, με αποτέλεσμα να επέρχονται αυτού του είδους οι διαταραχές και ανισορροπίες.[2]

1.1.4 Συνήθεις θεραπευτικές αγωγές για το σκληρόδερμα

Οριστική θεραπεία για την αντιμετώπιση του σκληροδέρματος δεν υπάρχει. Υπάρχουν, ωστόσο, θεραπευτικές αγωγές, οι οποίες ελαττώνουν σημαντικά την εμφάνιση συγκεκριμένων εκδηλώσεων της νόσου. Η θεραπευτική αντιμετώπιση της νόσου συνίσταται κυρίως στη χορήγηση ουσιών που συνδράμουν στην αναστολή υπερπαραγωγής κολλαγόνου.

Χρησιμοποιούνται ανοσορρυθμιστικά φάρμακα, όπως η κυκλοφωσφαμίδη και η αζαθειοπρίνη. Οι ασθενείς, μάλιστα, που έχουν διαγνωσθεί με το φαινόμενο Raynaud μπορούν να θεραπευτούν μέσω της χρήσης ουσιών που αυξάνουν τη ροή του αίματος στα δάχτυλα. Αυτές είναι η νιφεδιπίνη, η αμλοδιπίνη, η διλτιαζέμη κ.ά. Η ίνωση του δέρματος μπορεί να περιοριστεί με τη βοήθεια ουσιών, όπως η D-πενικιλαμίνη, η κολχίνη και οι κυκλοσπορίνες.

Το σκληρόδερμα αποτελεί μια αυτοάνοση πάθηση. Για το συγκεκριμένο λόγο, χορηγούνται ανοσοκατασταλτικά φάρμακα, κορτικοστεροειδή και συνθετικά νοσοτροποποιητικά φάρμακα κυρίως κυκλοφωσφαμίδη, μεθοτρεξάτη, αζαθειοπρίνη και μυκοφαινολική μοφετίλη. Επίσης, για τη μείωση των συμπτωμάτων του

Σκληροδέρματος χρησιμοποιούνται μη στεροειδή αντιφλεγμονώδη φάρμακα, γλυκοκορτικοειδή, αναστολείς του μετατρεπτικού ενζύμου της αγγειοτασίνης και της φωσφοδιεστεράσης τύπου 5, καθώς και ανταγωνιστές του υποδοχέα της ενδοθηλίνης.[2]

1.1.5 Διάγνωση σκληροδέρματος

Η διάγνωση της νόσου επιτυγχάνεται μέσα από μια σειρά εξειδικευμένων εξετάσεων. Απαιτείται εργαστηριακός έλεγχος με εξετάσεις αίματος και μπορεί να διενεργηθεί αξονική τομογραφία πνευμόνων, υπερηχογράφημα καρδιάς και τριχοειδοσκόπηση, που ενδείκνυται για τα δακτυλικά έλκη.

Το αναλυτικό ιστορικό και η ενδελεχής κλινική εξέταση βοηθούν σημαντικά στην εμπεριστατωμένη διάγνωση της ασθένειας. Η διάγνωση βασίζεται συνήθως σε αυτές τις παραμέτρους και με γνώμονα όλα αυτά καθορίζεται και η θεραπεία του ασθενούς εξατομικευμένα ανά περίπτωση. Πολλές φορές, επίσης, γίνονται εξετάσεις αίματος, για να ελεγχθεί η κατάσταση της καρδιάς, των πνευμόνων και της γαστρεντερικής οδού. [2]

1.1.6 Σύντομο ιστορικό της νόσου

Περιπτώσεις δερματικών ασθενειών παρόμοιες με το σκληρόδερμα έχουν βρεθεί στα γραπτά του Ιπποκράτη (460 - 370 π.Χ.), στον Oribasius (325-403 π.Χ.) και στον Paulus Aegineta (695-690 μ.Χ.). Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί βέβαια εάν αυτά ήταν πραγματικά παραδείγματα σκληροδέρματος επειδή οι περιγραφές είναι ανακριβείς. Η πρώτη οριστική περιγραφή της ασθένειας έγινε από τον Carlo Curzio σε μία μονογραφία που εκδόθηκε στην Νάπολη το 1753 και προκάλεσε το ενδιαφέρον Γαλλικών και Αγγλικών κύκλων.

Ο πρώτος ασθενής ήταν μια νέα γυναίκα, 17 ετών, που ονομαζόταν Patrizia Galiera, που εισήχθη στο νοσοκομείο και την ανέλαβε ο Curzio. Τα συμπτώματα της όπως περιγράφηκαν περιλάμβαναν σκληρότητα του δέρματος (που διέφεραν σε βαθμό από σημείο σε σημείο), σφιχτότητα γύρω από το στόμα και το λαιμό. Επίσης, παρατηρήθηκε έλλειψη θερμότητας στο δέρμα της, όχι όμως άλλες επιπλοκές σε καρδιά, πεπτικό και αναπνευστικό σύστημα. Μεγάλο μέρος της αναφοράς περιλαμβάνει λεπτομέρειες της θεραπείας, που περιλάμβαναν ζεστό γάλα, ατμόλουτρα, και μικρές δόσεις υδραργύρου. Μετά από 11 μήνες, το δέρμα έγινε μαλακό και ευλύγιστο, και όλες οι φυσικές λειτουργίες αποκαταστάθηκαν. Οι παρατηρήσεις του Curzio, δημοσιεύτηκαν στα Γαλλικά το 1755 και προκάλεσαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τα δερματολογικά κείμενα του R. William στο Λονδίνο (1808)

και του μαθητή του J.L. Albert, στο Παρίσι (1818) αναφέρονται στις σημειώσεις του Curzio.[3]

1.2 Τριχοειδοσκοπία – Τριχοειδοσκόπηση (Capillaroscopy)

Η τριχοειδοσκοπία είναι μια μη επεμβατική in vivo διαγνωστική τεχνική που έχει σχεδιαστεί για την ανίχνευση μικρών αγγείων της μικροκυκλοφορίας. Η ιστορία της τριχοειδοσκοπίας χρονολογείται από το 1663, όταν ο Johan Christophorous Kolhaus χρησιμοποίησε ένα πρωτόγονο μικροσκόπιο για να παρατηρήσει τα μικρά αιμοφόρα αγγεία που περιβάλλουν τα νύχια. Στα μέσα του 19ου αιώνα, ο Ιταλός φυσικός Giovanni Rasori έδειξε τη σχέση μεταξύ της επιπεφυκίτιδας και των ανωμαλιών των τριχοειδών αγγείων, χρησιμοποιώντας έναν μεγεθυντικό φακό και περιγράφηκε ως «ένας αναπόσπαστος κόμβος τριχοειδών βρόχων». Το 1862, ο Maurice Raynaud παρουσίασε στο Παρίσι τη διατριβή του σχετικά με την τοπική ισχαιμική βλάβη στα χέρια, τα πόδια, τη μύτη και η γλώσσα και το όνομά του παρέμεινε συνδεδεμένο με αυτό το φαινόμενο. Στις αρχές του 20ου αιώνα, ο Hutchinson κατάφερε να κάνει διάκριση μεταξύ ενός πρωτογενούς και ενός δευτερεύοντος φαινομένου Raynaud, με βάση τις μικροαγγειακές διαφορές που βρέθηκαν.

Το 1911, ο Lombard ανακάλυψε ότι τοποθετώντας μια σταγόνα λάδι εμβάπτισης στην περιτοναϊκή περιοχή επιτυγχάνεται ευκολότερη απεικόνιση των ανθρώπινων τριχοειδών. Αυτό το εύρημα επηρέασε τον Weiss, ο οποίος το 1916 τυποποίησε την τεχνική της τριχοειδοσκοπίας και παρήγαγε τις πρώτες εικόνες χρησιμοποιώντας μια κάμερα. Μέχρι το 1925, οι Brown και O'Leary χρησιμοποίησαν τις αναλύσεις της τριχοειδοσκόπησης για να δείξουν τις ανωμαλίες του μικροαγγειακού συστήματος που σχετίζονται με τη σκληροδερμία, κάνοντας τη σύνδεση των τριχοειδών αγγείων που βρίσκονται στα νύχια με τις ρευματικές ασθένειες.

Μεταξύ 1970 και 1990, διάφοροι μελετητές συνέχισαν την ερευνητική προσπάθεια, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης φλουορεσκεΐνης, τη χρήση άλλων ανατομικών σημείων για την πραγματοποίηση της τριχοειδοσκόπησης και την ενσωμάτωση άλλων διαγνωστικών μέσων όπως το Laser Doppler. Τέλος, το 2000, ο Cutolo, επαναπροσδιόρισε το μοτίβο της τριχοειδοσκοπίας, δημιουργώντας ένα νέο πρότυπο ταξινόμησης σε αυτό το γνωστικό πεδίο και έθεσε νέα θεμέλια για τη μελέτη της μικροκυκλοφορίας.

Το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για την τριχοειδοσκόπηση έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Αυτό αντικατοπτρίζεται, για παράδειγμα, σε μια έρευνα που διεξήχθη το 2011 σε 32 πόλεις που ανήκουν στο European League

Against Rheumatism, όπου η τριχοειδοσκόπια μαζί με τον υπέρηχο ήταν τα πιο αξιόλογα εργαλεία. Απάντηση σε αυτό το αυξανόμενο ενδιαφέρον είχε δώσει η Ιταλία που από το 1996 η τριχοειδοσκόπηση έχει συμπεριληφθεί στο ακαδημαϊκό πρόγραμμα Ρευματολογίας. Επιπλέον, το 2010, δημιουργήθηκε μια ομάδα μελέτης στο Αμερικανικό Κολλέγιο Ρευματολογίας (ACR) αφιερωμένο στην τριχοειδοσκόπηση σε ρευματικές παθήσεις και κάθε 2 χρόνια πραγματοποιούνται εκπαιδευτικά μαθήματα παγκόσμιας εμβέλειας σε αυτήν την τεχνική και έχουν σχεδιαστεί και αξιολογηθεί πολύ αποτελεσματικές βραχυπρόθεσμες εκπαιδευτικές στρατηγικές. [4]

1.2.1 Αρχές της Τριχοειδοσκοπίας

A. Μικροκυκλοφορία

Το αγγειακό σύστημα της μικροκυκλοφορίας αποτελείται από τα μικρότερα αιμοφόρα αγγεία στο ανθρώπινο σώμα - αρτηριοειδή, τριχοειδή αγγεία και φλεβίδια. Τα τριχοειδή, με τη σειρά τους, σχηματίζονται από αρτηριακό άκρο, τριχοειδή βρόχο και φλεβικό άκρο. Αυτό το μοτίβο βρίσκεται σε κάθε ιστό εκτός από το συκώτι, τον σπλήνα και τον μυελό των οστών, όπου τα τριχοειδή αντικαθίστανται από ημιτονοειδή. Η κύρια λειτουργία της μικροκυκλοφορίας είναι η ανταλλαγή τριχοειδών - παροχή οξυγόνου και θρεπτικών ουσιών στους ιστούς και απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα και των αποβλήτων. Σε μια συστηματική ασθένεια στην οποία η αγγειακή βλάβη είναι ένας από τους παθογόνους παράγοντες, ανωμαλίες στη μορφολογία των τριχοειδών μπορεί να παρατηρηθούν πολύ πριν από την έναρξη των κλινικών συμπτωμάτων. Σε ασθενείς που έχουν ήδη διαγνωστεί με συστηματική νόσο, η βλάβη στα τριχοειδή μπορεί να αντικατοπτρίζει την εμπλοκή των εσωτερικών οργάνων και να βοηθήσει στον προσδιορισμό του σταδίου της νόσου.

Η μικροκυκλοφορία στα τριχοειδή φτάνει μέχρι το δέρμα του νυχιού ενώ επίσης, όλο το δέρμα αφθονεί σε τριχοειδή. Ωστόσο, τρέχουν κάθετα στην επιφάνεια του δέρματος και μόνο το άκρο του βρόχου είναι ορατό. Στο νύχι, οι τερματικές σειρές των τριχοειδών φτάνουν παράλληλα την επιφάνεια του δέρματος και, επομένως, μπορούν να εξεταστούν όλες οι μορφολογικές λεπτομέρειες και η φύση της ροής του αίματος.

B. Προετοιμασία ασθενούς

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν φυσιολογική συστολή των τριχοειδών αγγείων, επηρεάζοντας έτσι πολύ την τριχοειδοσκοπική εικόνα. Πριν από την εξέταση, οι ασθενείς θα πρέπει να εγκλιματιστούν σε θερμοκρασία 20–22°C για 15–20 λεπτά και θα πρέπει να απέχουν από το κάπνισμα και την

κατανάλωση καφεΐνης για 4 ώρες. Η τριχοειδοσκόπηση δεν πρέπει να πραγματοποιείται εάν ο ασθενής έχει πρόσφατα (για διάστημα 3 εβδομάδων) υποβληθεί σε αισθητική επέμβαση που περιλαμβάνει την περιοχή των νυχιών, καθώς τα επακόλουθα μικροτραύματα μπορούν να δώσουν ψευδώς θετικά αποτελέσματα.

Γ. Πραγματοποίηση τριχοειδοσκοπίας

Για την πραγματοποίηση της τριχοειδοσκοπίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια σειρά από οπτικές συσκευές, όπως για παράδειγμα: ένα δερματοσκόπιο, ένα οφθαλμοσκόπιο ή ένα παραδοσιακό μικροσκόπιο. Ωστόσο, είναι πιο αποτελεσματικό εάν γίνει η εξέταση με ειδικό εξοπλισμό αφιερωμένο στην τριχοειδοσκόπηση, δηλαδή ένα στερεομικροσκόπιο ή ένα ψηφιακό βιντεοκαπιλοσκόπιο.

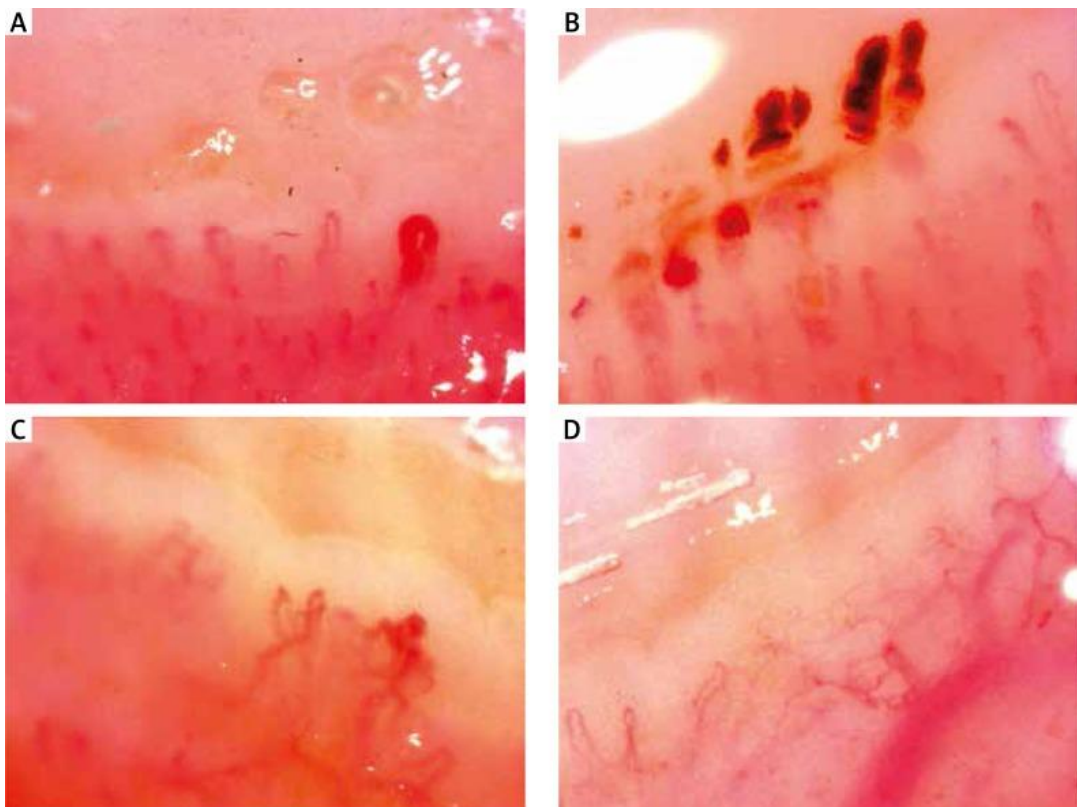
Προκειμένου να ενισχυθεί η διαφάνεια του δέρματος, εφαρμόζεται μια σταγόνα λάδι εμβάπτισης στο νύχι πριν από την τριχοειδοσκόπηση. Σε μια εξέταση ρουτίνας, ελέγχονται όλα τα δάχτυλα εκτός από τους αντίχειρες. Επιπλέον, ο ψηφιακός εξοπλισμός επιτρέπει την αποθήκευση και τη χρήση των ληφθέντων εικόνων για αντικειμενική σύγκριση σε περίπτωση που ο ασθενής χρειάζεται μεταγενέστερες εξετάσεις.

1.2.2 Το φαινόμενο του Raynaud

Η πιο σημαντική ένδειξη για την τριχοειδή εξέταση είναι το φαινόμενο του Raynaud. Αυτή η κατάσταση εμφανίζεται συνήθως στα δάχτυλα ή στα δάχτυλα των ποδιών, πιο σπάνια στη μύτη και στα αυτιά και περιλαμβάνει μια ακολουθία αλλαγών χρώματος του δέρματος, που οφείλονται στον αγγειοσπασμό και την επακόλουθη διαστολή των αγγείων. Αυτά περιλαμβάνουν το δέρμα που γίνεται λευκό (αγγειοσυστολή), στη συνέχεια μπλε (υποξία) και τέλος κόκκινο (επανέγχυση). Το φαινόμενο του Raynaud μπορεί να είναι πρωτογενές (ιδιοπαθές) ή δευτερεύον σε πολλές καταστάσεις.[5]



Εικόνα 2 - Φυσιολογική τριχοειδοσκόπηση με αγγεία σε σχήμα-U

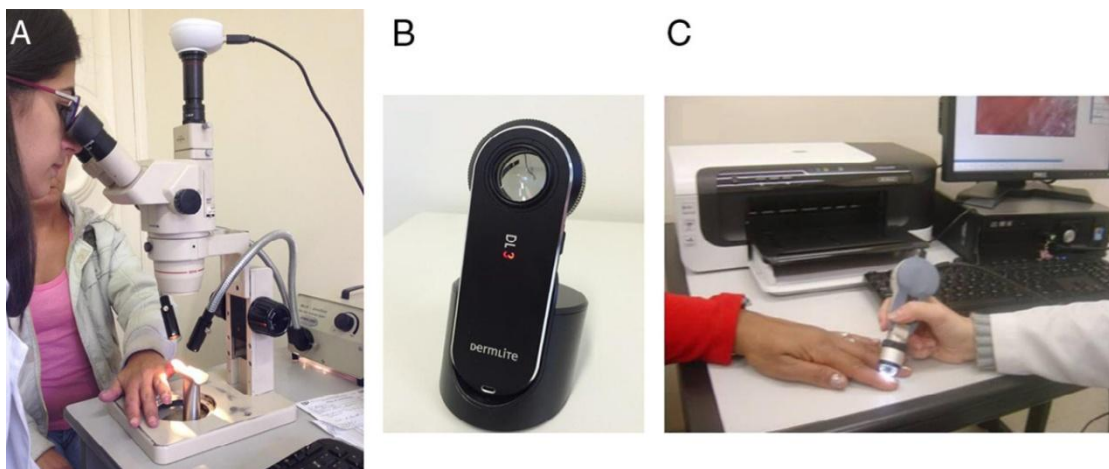


Εικόνα 3 - Άτομο που πάσχει από σκληροδερμία: Α – Πρώιμη, Β – Ενεργή, C και D - Προχωρημένη Σκληροδερμία

1.2.3 Τεχνικές κλινικής εξέτασης σκληροδερμίας στο παρόν

Εν έτει 2020 η κλινική εξέταση για την σκληροδερμία πραγματοποιείται ευρέως με 3 διαφορετικές τεχνικές στα ρευματολογικά κέντρα ή νοσοκομεία. Παρακάτω αναλύονται οι συγκεκριμένες τεχνικές:

1. Στερεομικροσκόπιο: Έχει την ικανότητα μεγέθυνσης 10-50 φορές και επιτρέπει την υλοποίηση της πανοραμικής τριχοειδοσκόπησης σε ακροδάχτυλα χεριών. Με το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο είναι δυνατή μια συνολική αξιολόγηση των νυχιών, για την καταγραφή ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων. Αυτή παραμένει η κύρια μέθοδος που εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σήμερα σε εθνικά και διεθνή κέντρα, λόγω της ευκολίας χρήσης και του χαμηλού κόστους.
2. Οφθαλμοσκόπιο και δερματοσκόπιο: Τεχνικές που παρέχουν εικόνες με χαμηλότερη μεγέθυνση και ποιότητα. Αυτές οι τεχνικές αποτελούν μια εναλλακτική λύση στις εξετάσεις που πραγματοποιούνται σε ιατρικά γραφεία που δεν διαθέτουν στερεομικροσκόπιο ή βιντεοκαπιλαροσκόπιο.
3. Χειροκίνητο βιντεοκαπιλαροσκόπιο: αποτελείται από το συνδυασμό μικροσκοπίου με μεγαλύτερο φακό μεγέθυνσης με ψηφιακή βιντεοκάμερα. Αυτή η τεχνική παρέχει σημαντικά υψηλότερη αύξηση στη μεγέθυνση της εικόνας (200-600 φορές) σε σύγκριση με το στερεομικροσκόπιο. Με τη βοήθεια συγκεκριμένων λογισμικών, επιτρέπει την ακριβή μέτρηση των τριχοειδών παραμέτρων (τριχοειδές μήκος, πλάτος και πυκνότητα). Ένα από τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η απώλεια πανοραμικής όψης των τριχοειδών βρόχων. Μόνο μία περιοχή της περιοχής των νυχιών μπορεί να εξεταστεί ανά πάσα στιγμή.



Εικόνα 4 - Συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κλινική εξέταση της σκληροδερμίας: Α - Στερεομικροσκόπιο, Β - Οφθαλμοσκόπιο/Δερματοσκόπιο, C - Χειροκίνητο βιντεοκαπιλαροσκόπιο

1.2.4 Μειονεκτήματα και ελαττώματα τριχοειδοσκοπίας με τον τρόπο που εκτελείται σήμερα

Τα χαρακτηριστικά τα οποία έχουν το μεγαλύτερο ιατρικό ενδιαφέρον σε μία τριχοειδοσκοπία είναι τα παρακάτω:

- Η μέση διάμετρος των τριχοειδών σε μικρά
- Η μέγιστη διάμετρος των τριχοειδών σε μικρά
- Οι μορφολογικές παράμετροι των τριχοειδών αγγείων (οδοντωτές άκρες, τριχοειδή ακράτειας, μικροαιμορραγίες, κλπ)
- Η ροή του αίματος σε ml/min

Η μέση διάμετρος και η μέγιστη διάμετρος των τριχοειδών αγγείων είναι πρακτικά αδύνατο να αξιολογηθούν με τα υπάρχοντα όργανα βίντεο-τριχοειδοσκοπίας. Ταυτόχρονα, οι μορφολογικές παράμετροι των τριχοειδών μπορούν να εκτιμηθούν ποιοτικά αλλά όχι ποσοτικά και τέλος, η ροή του αίματος στα τριχοειδή μπορεί να εκτιμηθεί μόνο με μάλλον εκλεπτυσμένα όργανα όπως για παράδειγμα ένα έγχρωμο laser Doppler.

Τα σημερινά εργαλεία τριχοειδοσκοπίας παρουσιάζουν τα εξής ελαττώματα, λαμβάνοντας υπόψιν και τα παραπάνω:

- Η διάταξη του φωτισμού λειτουργεί μονό στο ορατό εύρος και επομένως, δεν λαμβάνει υπόψη την απορρόφηση του αίματος σε υπέρυθρα μήκη κύματος (IR)
- Η κάμερα USB έχει πολύ χαμηλότερη ανάλυση και ρυθμό καρέ τις τρέχουσες εμπορικές κάμερες χαμηλού επιπέδου
- Το πεδίο λήψης περιορίζεται σε μερικά τετραγωνικά χιλιοστά (mm^2)
- Η πίεση που ασκείται από τον χειριστή μέσω του καθετήρα στα δάχτυλα αλλάζει τη ροή του αίματος στα τριχοειδή αγγεία και συνεπώς, στην πραγματικότητα, τα αποτελέσματα είναι επηρεασμένα και καθόλου φυσικά
- Η θέση της κάμερας είναι χειροκίνητη και μεταβλητή και επομένως, σε κάθε εξέταση τα αποτελέσματα έχουν διαφορετική οπτική
- Η εστίαση της κάμερας είναι χειροκίνητη με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να επιτευχθεί καθαρή εικόνα σε κάθε θέση

Ο συνδυασμός των προηγούμενων προβλημάτων έχει ως συνέπεια τα ακόλουθα νέα προβλήματα:

- Η αντίθεση (μεταξύ τριχοειδών αγγείων και δέρματος) στις εικόνες είναι πολύ μεταβλητή. Σε μερικές εικόνες τα άκρα των τριχοειδών είναι καλά καθορισμένα και σε άλλες οι ακμές είναι εμφανώς θολές
- Ο φωτισμός δεν είναι ομοιόμορφος μέσα σε μία εικόνα αλλά ούτε και μεταξύ διαφορετικών εικόνων
- Οι πληροφορίες που σχετίζονται με τη ροή του αίματος δεν χρησιμοποιούνται επειδή εξαρτώνται κατά πολύ από τον χειριστή, ενώ και από κλινικής άποψης θα μπορούσαν από μόνες τους να είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την υγεία του ασθενούς

1.2.5 Πλεονεκτήματα και θετικά χαρακτηριστικά με τον τρόπο τριχοειδοσκόπιας που θα μελετηθεί στην εργασία

Όλα τα παραπάνω μειονεκτήματα και ελαττώματα της τριχοειδοσκόπησης οδηγούν στην αναζήτηση ενός νέου τρόπου διεξαγωγής της εξέτασης δημιουργώντας ένα νέο εργαλείο το οποίο θα επιλύσει τα περισσότερα προβλήματα που έχουν παρατηρηθεί μέχρι στιγμής.

Συνεπώς, το νέο ανεπτυγμένο εργαλείο θα περιλαμβάνει τις ακόλουθες τεχνολογίες:

- Διάταξη φωτισμού στο ορατό και στο υπέρυθρο φάσμα έτσι ώστε να αντλείται πληροφορία από το αίμα σε διάφορα μήκη κύματος
- Μηχανικές διατάξεις για σταθεροποίηση της θέσης του φακού και της κάμερας σε σχέση με το αντικείμενο που εξετάζεται. Οι κατασκευές αυτές θα υλοποιηθούν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με βιοσυμβατά υλικά
- Νέα εμπορική κάμερα υψηλής ανάλυσης με υψηλό ρυθμό καρέ, αυτόματη εστίαση και ευαισθησία στο υπέρυθρο φάσμα

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω, θα είναι δυνατή η λήψη εικόνων οι οποίες θα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ομοιόμορφη αντίθεση και φωτισμό σε ολόκληρο το πεδίο λήψης
- Αξιόπιστη και αναπαράξιμη πληροφορία για τη ροή του αίματος στα τριχοειδή αγγεία

Το νέο όργανο μπορεί να περιγραφεί ως μια φωτοπληθυσμογραφία για την τριχοειδοσκόπηση.

Οι εικόνες που αποκτώνται μέσω του νέο εργαλείου που θα αναπτυχθεί μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία μέσω κατάλληλων αλγορίθμων τεχνητής όρασης για την αυτόματη ανίχνευση αγγειακών προβλημάτων.

1.2.6 Προέκταση της επιτυχημένης τριχοειδοσκοπίας σε άλλα επίπεδα

Το έργο αυτό αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός νέου εργαλείου ικανό να αναγνωρίζει τις τριχοειδοσκοπικές αλλαγές και να επιτρέπει την αυτοματοποιημένη αναγνώρισή τους. Από τη μία πλευρά, είναι δυνατόν να επωφεληθούμε από τη δουλειά που έχει πραγματοποιηθεί στον τομέα της φωτοπληθυσμογραφίας για την παρακολούθηση του καρδιοαναπνευστικού συστήματος. Αυτή η τεχνική βασίζεται στο γεγονός ότι το αίμα μεταφέρει σημαντική πληροφορία σε ορισμένα μήκη κύματος. Επομένως, με κατάλληλο φωτιστικό και με κατάλληλη κάμερα είναι δυνατόν να ανιχνευθούν όγκοι και / ή αλλαγές στον όγκο του αίματος στα αιμοφόρα αγγεία.

Η ανάπτυξη, λοιπόν, του εργαλείου που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα:

- Καλύτερη ακρίβεια όσον αφορά την πρόγνωση και τη διάγνωση της ασθένειας
- Απεξάρτηση από τον χειριστή του μηχανήματος
- Εξοικονόμηση χρόνου όσον αφορά τη διεξαγωγή της τριχοειδοσκόπησης
- Δυνατότητα επιστημονικών συνεργασιών στην διεθνή επικράτεια
- Τυποποίηση της διαγνωστικής μεθόδου, το οποίο αποτελεί το πρώτο βήμα για την περαιτέρω επιστημονική μελέτη και έρευνα ενός πιο εξελιγμένου εργαλείου το οποίο θα δύναται να εξετάζει και άλλες νόσους

Κεφάλαιο 2 – Ανθρώπινο Σώμα / Εξοπλισμός

2.1 Εισαγωγή

Η απεικόνιση και η ανάλυση των αιμοφόρων αγγείων είναι σημαντικές διεργασίες για ιατρικούς και βιομετρικούς σκοπούς. Από ιατρική άποψη, τα ανθρώπινα αιμοφόρα αγγεία παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την υγεία και την πιθανή ασθένεια ή εγκεφαλικό επεισόδιο, επομένως είναι σημαντικό να αναπτυχθεί ένα ακριβές σύστημα λήψης εικόνων και αλγόριθμοι επεξεργασίας εικόνων. Οι δομές των αιμοφόρων αγγείων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίηση προσώπων, για παράδειγμα, αναγνώριση προτύπου φλεβικής παλάμης που έχει δημοφιλέστερο τα τελευταία χρόνια. Οι ανθρώπινες φλέβες παλάμης έχουν περίπλοκο μοτίβο αγγείου και επομένως, είναι μοναδικές σε κάθε άτομο. Συνεπώς, δίνει μια καλή ευκαιρία να χρησιμοποιηθούν για βιομετρικούς σκοπούς.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι λήψης εικόνων αιμοφόρων αγγείων σε σχεδόν υπέρυθρο φως. Η ποιότητα των εικόνων που αποκτώνται από κάθε μέθοδο θα αξιολογηθεί για να προσδιοριστεί η καλύτερη από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

Έως και σήμερα, η πιο διαδεδομένη μη επεμβατική εξέταση που αφορά ένα μέρος της ανάλυσης του αίματος είναι η μέτρηση του κορεσμού σε αυτό χρησιμοποιώντας οξύμετρα παλμού. Είναι μία οπτική τεχνική, βασισμένη στην φωτοπληθυσμογραφία, όπου εκπέμπεται κόκκινη και υπέρυθη ακτινοβολία στον ανθρώπινο ιστό. Θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα πως ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται ή ανακλάται από την αιμοσφαιρίνη του αίματος και ένα άλλο μέρος σκεδάζεται ή διαπερνά τον ανθρώπινο ιστό.

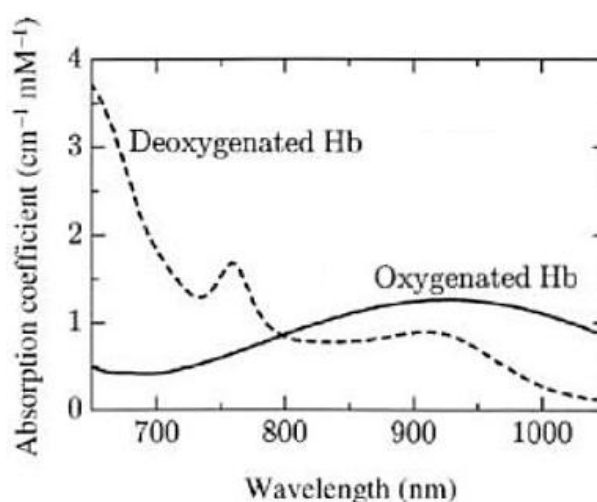
Παρακάτω αναφέρονται αρκετά παραδείγματα από μελέτες και από προϊόντα του εμπορίου τα οποία εκπέμπουν ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος κοντά στο κόκκινο και στο υπέρυθρο. Ο λόγος που χρησιμοποιείται ευρέως αυτή η τεχνική είναι επειδή η αιμοσφαιρίνη, η οποία είναι πρωτεΐνη του αίματος που προσδένει οξυγόνο, συμπεριφέρεται με διαφορετική ευαισθησία και απορροφητικότητα κοντά σε αυτό το φάσμα.

2.2 Near-Infrared (Κοντά στο υπέρυθρο - NIR)

Οι περισσότερες από τις δημοφιλείς μεθόδους απεικόνισης αιμοφόρων αγγείων βασίζονται στην απορρόφηση υπέρυθρου φωτός υπέρυθρου από το αίμα (IR).

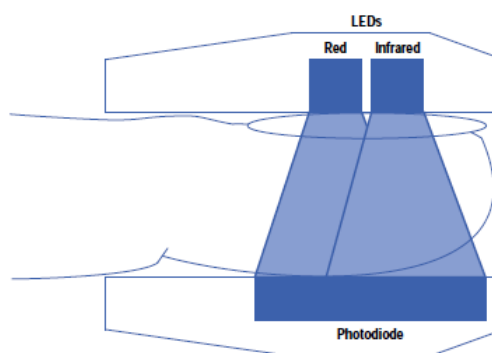
Η αιμοσφαιρίνη είναι ο κύριος μεταφορέας οξυγόνου στα θηλαστικά και σε πολλά άλλα είδη. Έρευνες έχουν δείξει ότι η αιμοσφαιρίνη στο αίμα όταν αποχωρεί από τους πνεύμονες είναι περίπου κατά 98-99% κορεσμένη με οξυγόνο. Η αιμοσφαιρίνη αποξυγονώνεται όταν το οξυγόνο χάνεται στα περιφερειακά αγγεία του σώματος. Οι αρτηρίες περιέχουν οξυγονωμένη αιμοσφαιρίνη και οι φλέβες περιέχουν αποξυγονωμένη. Αυτοί οι δύο τύποι αιμοσφαιρίνης έχουν διαφορετικά φάσματα απορρόφησης.

Η οξυγονωμένη αιμοσφαιρίνη απορροφά περισσότερο ακτινοβολία με μήκος κύματος περίπου 760 nm και η αποξυγονωμένη απορροφά ακτινοβολία κοντά στα 925nm δηλαδή εντός της περιοχής κοντά στο υπέρυθρο (NIR). Κατά τη λήψη μιας εικόνας ενός σώματος, τα αγγεία θα φαίνονται πιο σκοτεινά από τα υπόλοιπα σημεία, επειδή απορροφούν τις ακτίνες IR καλύτερα από τον περιβάλλοντα ιστό.[7]

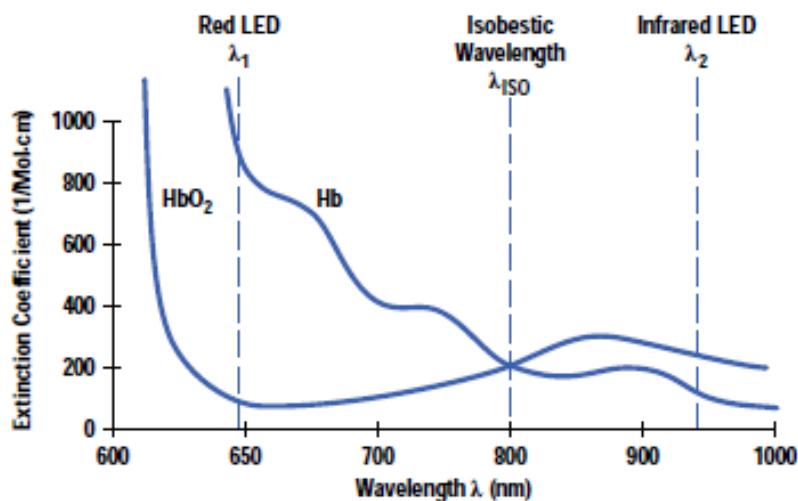


Εικόνα 5 - Φάσμα απορρόφησης της αιμοσφαιρίνης

Επιπροσθέτως, τα παραπάνω δεδομένα επιβεβαιώνονται και από μία έρευνα της γνωστής εταιρίας Hewlett-Packard για μια νέα οικογένεια αισθητήρων για τα οξύμετρα παλμού. Συγκεκριμένα, αναφέρεται πως για τη σωστή μέτρηση χρειάζονται 2 LEDs τα οποία εκπέμπουν ακτινοβολία σε διαφορετικά μήκη κύματος. Ένα LED το οποίο θα εκπέμπει στα 650nm (κόκκινο) και άλλο ένα το οποίο εκπέμπει στα 940nm (NIR) με την διάταξη που φαίνεται στην διπλανή εικόνα:



Εικόνα 6 - Τα βασικά εξαρτήματα ενός οξύμετρου παλμού

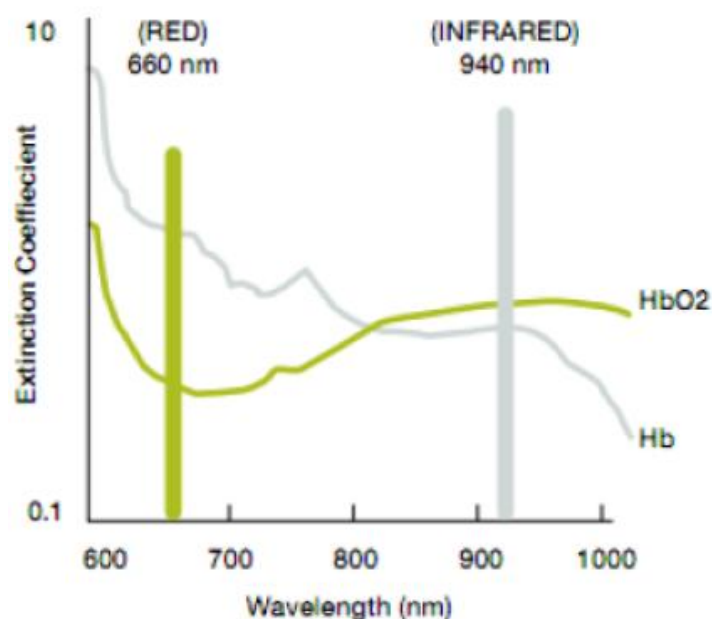


Εικόνα 7 - Φάσμα απορρόφησης της αιμοσφαιρίνης
Πηγή: HP

[8]

Παράλληλα με την HP, το 2012 η εταιρία NXP δημοσίευσε την δική της έρευνα για την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα μόρια της αιμοσφαιρίνης. Στην συγκεκριμένη έρευνα αναφέρεται πως χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μήκη κύματος ακτινοβολίας για τη μέτρηση της απορρόφησης από την Hb και HbO₂. Η κυκλοφορία του αίματος επηρεάζεται και από την συγκέντρωση των Hb και HbO₂ και οι συντελεστές απορρόφησης τους μετρώνται χρησιμοποιώντας 2 μήκη κύματος: 660nm (κόκκινο) και 940nm (NIR).

[9]



Εικόνα 8 - Φάσμα απορρόφησης της αιμοσφαιρίνης
Πηγή: NXP

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, γίνεται εύκολα κατανοητό πως τα μόρια αιμοσφαιρίνης παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά απορροφητικότητας κοντά στο κόκκινο/υπέρυθρο, δηλαδή στο εύρος φάσματος 600-1000nm. Τα αιμοφόρα αγγεία, τα οποία μελετώνται σε αυτή την εργασία, παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με την αιμοσφαιρίνη άρα το κόκκινο/υπέρυθρο εύρος φάσματος είναι το καταλληλότερο προς μελέτη όσον αφορά τις παθολογικές σκληροδερμίες.

2.3 Οπτικό Σύστημα

Οι βασικές απαιτήσεις του νέου συστήματος, το οποίο θα είναι κατάλληλο για την λήψη τριχοειδοσκοπικών εικόνων είναι οι εξής:

- Τα αιμοφόρα αγγεία που μελετώνται στην παρούσα εργασία έχουν διάμετρο 10-100 μm . Συνεπώς, το μέγεθος του κάθε εικονοστοιχείου (pixel) δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από μερικά τετραγωνικά μm .
- Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι πολύ περιορισμένη, της τάξης των μερικών τετραγωνικών χιλιοστών (mm^2).
- Σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο (2.2), το νέο σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί τόσο στο ορατό, όσο και στο υπέρυθρο φάσμα (IR). Προσεγγιστικά, στο εύρος 500-1000nm (NIR).
- Τέλος, το σύστημα θα πρέπει να είναι κατάλληλο για in-vivo μέτρηση έτσι ώστε το βάθος του πεδίου (depth of field) να μπορεί να προσαρμοστεί αναλόγως (της τάξης των μερικών mm).

Για τον σκοπό του συγκεκριμένου πειράματος, εκτός από μία κάμερα η οποία θα πρέπει να λειτουργεί στο ορατό και στο υπέρυθρο, είναι απαραίτητος ένας φακός ο οποίος είναι κατάλληλος να λειτουργεί αλάνθαστα σε μικρή απόσταση από το αντικείμενο μελέτης ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να έχει υψηλές αναλογίες αναπαραγωγής (reproduction ratio).

Οι τηλεκεντρικοί φακοί (telecentric lenses) φαίνονται να αποτελούν μια ενδιαφέρουσα λύση στο παραπάνω πρόβλημα, ωστόσο η μεγέθυνση τους είναι συνήθως χαμηλή (της τάξης 0.1x-1x) και αυτό ενδέχεται να περιορίσει την ανάλυση της εικόνας. Επιπλέον, το βάθος πεδίου (depth of field) είναι πολύ περιορισμένο (μικρότερο από 1mm) το οποίο είναι μεγάλο μειονέκτημα διότι το αντικείμενο μελέτης (δηλαδή ανθρώπινο δάκτυλο στο συγκεκριμένο σενάριο) μπορεί να διαφέρει αρκετά κάθε φορά. Για παράδειγμα, το μέγεθος του δακτύλου ενός οδηγού νταλίκας θα είναι αρκετά διαφορετικό από το μέγεθος του δακτύλου ενός παιδιού.

Καταλληλότεροι φακοί για την συγκεκριμένη μελέτη είναι οι φακοί Macro. Ένας Macro φακός είναι ένας ειδικός φακός κάμερας, ο οποίος είναι οπτικά βελτιστοποιημένος ώστε να χειρίζεται εξαιρετικά μικρές αποστάσεις εστίασης (focus) και να λαμβάνει ευκρινείς, εξαιρετικά λεπτομερείς εικόνες μικροσκοπικών αντικειμένων. Σε αντίθεση με άλλες κατηγορίες φακών, οι macro φακοί έχουν υψηλές αναλογίες αναπαραγωγής. Αυτό σημαίνει ότι η αναλογία του μεγέθους του αντικειμένου στον αισθητήρα είναι παρόμοια ή μεγαλύτερη από το φυσικό μέγεθος του αντικειμένου στην πραγματική ζωή.



Εικόνα 9 - Παράδειγμα φωτογραφίας ενός φύλλου με χρήση Macro φακού

Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε ένα οπτικό σύστημα με σταθερό εστιακό βάθος. Στο πειραματικό κομμάτι επιλέχθηκε να μετακινείται το μπλοκ «κάμερα-φακός» για να επιτευχθεί η επιθυμητή μεγέθυνση και εστίαση. Η μεγέθυνση μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον τύπο του Gauss: [10]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots + \frac{1}{f_{optical}} \quad (1) \quad \text{και το σύστημα} \quad \begin{cases} \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{1}{f} \\ m = \frac{S_2}{S_1} \end{cases} \quad (2)$$

Όπου $f_1, f_2, f_3 \dots$ όλα τα focal lengths των φακών, f το συνολικό focal length του συστήματος, S_1 - S_2 η απόσταση του αντικειμένου και του ειδώλου αντίστοιχα και m το magnification (μεγέθυνση).

2.3.1 Υπέρυθρη Κάμερα

Η κάμερα που επιλέχθηκε για την απεικόνιση των αιμοφόρων αγγείων είναι **Basler MED ace 5.1MP 35 colour** η οποία παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

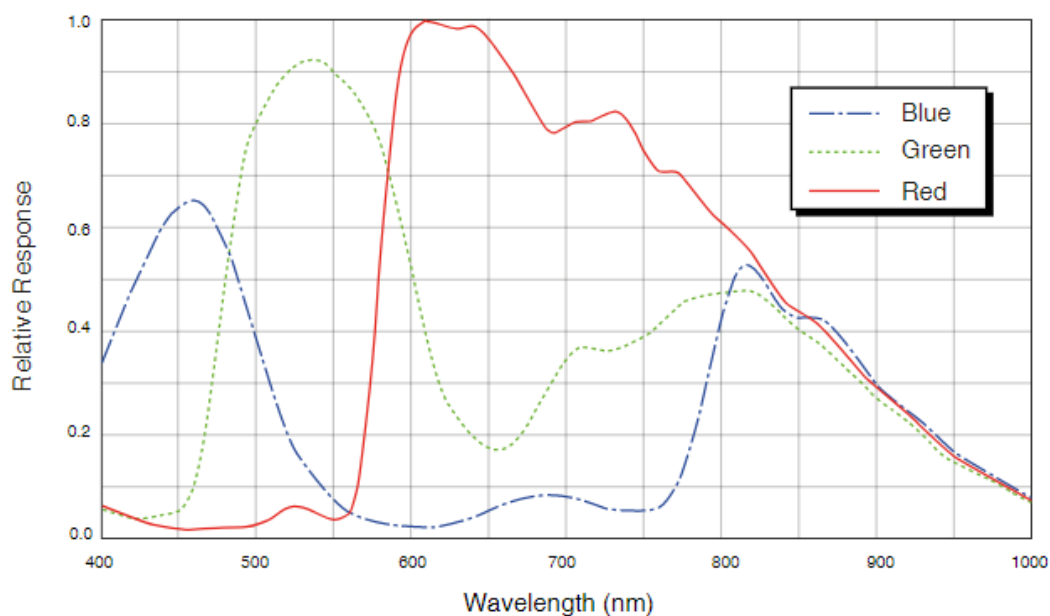


Εικόνα 10 - Υπέρυθρη Κάμερα Basler MED ace 5.1MP 35 colour

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της παραπάνω κάμερας φαίνονται παρακάτω:

- Resolution (H x V Pixels): 2464 x 2056 (full resolution) / 2448 x 2048 (default resolution)
- Pixel Size (H x V): 3.45 μm x 3.45 μm
- Optical Size: 2/3"
- Effective Sensor Diagonal: 11.1 mm
- Frame Rate: 35 fps
- Lens Mount: C-mount
- Image Data Interface: USB 3.0, nominal max. 5Gbit/s (superspeed)

Η φασματική απόκριση της κάμερας απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 11 - Φασματική Απόκριση της Basler MED ace 5.1MP

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα, είναι σαφές ότι αυτή η κάμερα ανταποκρίνεται καλύτερα στο κόκκινο/υπέρυθρο φάσμα, και συγκεκριμένα στην περιοχή των 550-950nm, που είναι σχεδόν το εύρος που χρειάζεται η συσκευή για να διακρίνει τα αιμοφόρα αγγεία. Επίσης, το μέγεθος εικονοστοιχείων της κάμερας είναι αρκετά μικρό όπως επιθυμείται και ο ρυθμός καρέ (frame rate) είναι αρκετά χαμηλός καθώς το δάκτυλο μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν ακίνητο. [11]

2.3.2 Φακός Macro

Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ένας Schneider-Kreuznach Componon-S 2.8/50 Macro φακός με V-mount κούμπωμα. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς φακούς κάμερας όπου η οπτική απόδοση μειώνεται όσο αυξάνεται η μεγέθυνση, οι φακοί Schneider-Kreuznach έχουν αναπτυχθεί για να λειτουργούν ορθά σε πολύ κοντινές αποστάσεις.



Εικόνα 12 - Macro Φακός Componon-S 2.8/50

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παραπάνω φακού φαίνονται παρακάτω:

- F-number: 2.8
- Focal Length: 50.2mm
- Image Circle: 43.2mm
- Magnification: 1:20 to 1:1, optimized for -0.10
- Transmission: 400-700nm
- Interface: V38-Mount

Σημείωση: Σε αυτή την περίπτωση, θα χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας V-mount σε C-mount μεταξύ της κάμερας και του φακού, καθώς αυτές οι 2 συσκευές δεν είναι συμβατές μεταξύ τους

[12]

2.4 LED (Light Emitting Diode)

Για την επιθυμητή εκπομπή ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2, είναι απαραίτητη η χρήση διόδων εκπομπής φωτός (LED, Light Emitting Diode). LED αποκαλείται ένας ημιαγωγός ο οποίος εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος όταν του παρέχεται μία ηλεκτρική τάση κατά τη φορά ορθής πόλωσης (forward-biased).

Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση του ημιαγωγικού υλικού που χρησιμοποιείται, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται, και, κατά συνέπεια, το χρώμα του, εξαρτάται από το χάσμα ενέργειας των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του περάσματος p-n, όπου:

- p = Υλικό νοθευμένο με αποδέκτες.
- n = Υλικό νοθευμένο με δότες.

Η βασική αρχή των LED είναι μια επαφή p-n η οποία πολώνεται ορθά για να εγχέει ηλεκτρόνια και οπές μέσα στις p- και n- πλευρές αντίστοιχα. Το εγχεόμενο φορτίο μειονότητας επανασυνδέεται με το φορτίο πλειονότητας στην περιοχή απογύμνωσης ή στην ουδέτερη περιοχή. Σε ημιαγωγούς αμέσου διάκενου η επανασύνδεση οδηγεί σε εκπομπή φωτός αφού η ακτινοβολία επανασύνδεση κυριαρχεί σε υλικά υψηλής ποιότητας. Σε υλικά έμμεσου χάσματος, η απόδοση εκπομπής φωτός είναι αρκετά φτωχή και οι περισσότερες από τις διαδρομές επανασύνδεσης είναι μη ακτινοβόλες με παραγωγή θερμότητας μάλλον παρά φωτός.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των LEDs είναι:

- Απόδοση: Τα LED παράγουν περισσότερο φως ανά watt συγκριτικά με της λάμπες πυράκτωσης.
- Χρώμα: Τα LED εκπέμπουν φως συγκεκριμένου χρώματος χωρίς την χρήση φίλτρων που απαιτούν οι παραδοσιακοί μέθοδοι φωτισμού. Είναι πιο αποδοτικά και χαμηλώνουν το αρχικό κόστος.
- Ψυχρό φως: Σε αντίθεση με τις κοινές πηγές φωτός, τα LED εκπέμπουν πολύ λίγη θερμότητα σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας που μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε ευαίσθητα αντικείμενα ή κατασκευές. Η ενέργεια που χάνεται διαχέεται ως θερμότητα μέσω της βάσης του LED.
- Χρόνος ζωής: Τα LED έχουν μεγάλους χρόνους ζωής. Οι ώρες λειτουργίας τους κυμαίνονται από 35.000 έως 50.000 ώρες, αριθμός τεράστιος συγκριτικά με αυτόν των λαμπτήρων πυράκτωσης που κυμαίνεται από 1.000 έως 2.000 ώρες και των λαμπτήρων φθορισμού που κυμαίνεται από 10.000 έως 15.000 ώρες.
- Αντίσταση σε κραδασμούς: Τα LED, όντας στοιχεία στερεάς κατάστασης, είναι δύσκολο να υποστούν ζημιά από κραδασμούς όπως συμβαίνει με τις λάμπες πυράκτωσης και φθορισμού.
- Εστίαση: Τα LED μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να εστιάζουν το φως σε ένα συγκεκριμένο σημείο ή περιοχή. Οι λάμπες πυράκτωσης και φθορισμού απαιτούν ένα εξωτερικό ανακλαστήρα για να συλλέγει το φως και να το κατευθύνει με ένα χρήσιμο τρόπο.
- Τοξικότητα: Τα LED δεν περιέχουν υδράργυρο όπως οι λάμπες φθορισμού.

Επιπροσθέτως, τα LED έχουν ευρεία χρήση λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων τους. Οι κύριες εφαρμογές τους είναι σε: 1. Ορατές απεικονίσεις, όπου το φως κατευθύνεται κατευθείαν περισσότερο ή λιγότερο στο ανθρώπινο μάτι για να μεταφέρει ένα μήνυμα ή μία έννοια, 2. Σε φωταγωγήση χώρων, όπου το φως από τα LED ανακλάται από αντικείμενα για να μπορούν να είναι ορατά, 3. Σε παραγωγή φωτός για μέτρηση και αλληλεπίδραση με διαδικασίες που δεν γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο μάτι.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, τα LEDs είναι οι καταλληλότερες συσκευές φωτισμού για συσκευές όπως αυτή που μελετάται στην παρούσα εργασία. [13]



Εικόνα 13 - LED σε διάφορα χρώματα και μεγέθη

Για την ορθή χρήση και τροφοδοσία των LED είναι απαραίτητη η χρήση ενός LED Driver. Ένας οδηγός LED είναι μία αυτόνομη τροφοδοσία που ρυθμίζει την απαιτούμενη ισχύ για ένα LED ή μία σειρά από LEDs.

2.4.1 LED Driver

Ένας LED Driver μπορεί να παρομοιαστεί με τον αυτόματο πιλότο σε ένα αυτοκίνητο. Το απαιτούμενο επίπεδο ισχύος μεταβάλλεται καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας των LED ανάλογα με την θερμοκρασία τους. Χωρίς τον κατάλληλο οδηγό LED, τα LEDs μπορεί να υπερθερμανθούν και να γίνουν ασταθείς με αποτέλεσμα να αστοχούν και συνεπώς να έχουν κακή απόδοση.

Υπάρχουν 2 τύποι LED Drivers: Εσωτερικού και εξωτερικού τύπου. Οι εσωτερικού τύπου χρησιμοποιούνται συνήθως σε οικιακούς λαμπτήρες LED και βρίσκονται τοποθετημένοι στο εσωτερικό του κάθε λαμπτήρα.



Εικόνα 14 - LED Driver Εσωτερικού τύπου

Οι οδηγοί εξωτερικού τύπου τοποθετούνται ξεχωριστά από τα LED και συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως: εξωτερικός φωτισμός, εμπορικός φωτισμός, φωτισμός δρόμων κλπ. Με αυτόν τον τρόπο είναι ευκολότερο και οικονομικότερο να αντικατασταθεί ένας οδηγός.

Οι LED Drivers μπορούν να διακριθούν σε 2 ακόμη κατηγορίες:

1. Σταθερού Ρεύματος: Παρέχουν σταθερό ρεύμα εξόδου και μπορεί να έχουν ένα ευρύ φάσμα τάσεων εξόδου. Ένα παράδειγμα σταθερού ρεύματος είναι ένας οδηγός ο οποίος παρέχει σταθερό ρεύμα εξόδου 700mA με εύρος τάσης εξόδου 4-13 Volts.
2. Σταθερής Τάσης: Παρέχουν σταθερή τάση εξόδου και μεταβαλλόμενο ρεύμα εξόδου. Αυτοί οι οδηγοί χρησιμοποιούνται συχνότερα τροφοδοτώντας

συστήματα με σταθερή τάση πχ. 12 ή 24 Volts. Ένας τυπικός LED Driver μπορεί να παρέχει μέγιστο ρεύμα εξόδου 1.04A σε 24 Volts.



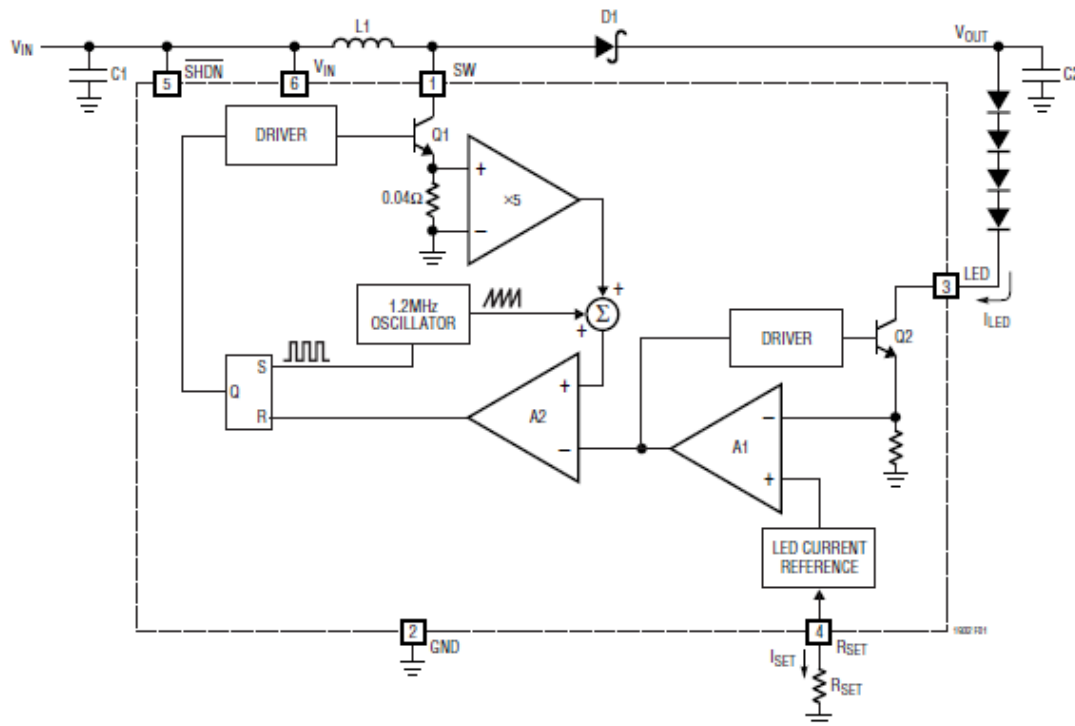
Εικόνα 15 - LED Driver Εξωτερικού τύπου

[14]

2.4.2 LT1932 LED Driver

Για τους σκοπούς του συγκεκριμένου πειράματος επιλέχθηκε ένας γραμμικός LED Driver σταθερού ρεύματος εξόδου. Ο LT1932 είναι ένας γραμμικός οδηγός με σταθερό ρεύμα εξόδου και είναι ιδανικός για χρήση σε συστοιχίες LED των οποίων η ένταση του φωτός που εκπέμπουν είναι ανάλογη με το ρεύμα που διέρχεται από αυτές και όχι με την τάση στα άκρα τους. Με εύρος τάσης εισόδου από 1 έως 10 Volts, η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει με διάφορες πηγές εισόδου ενώ παράλληλα, μία μοναδική εσωτερική αντίσταση ρυθμίζει το ρεύμα που διέρχεται από τα LED μεταξύ 5mA και 40mA. Τέλος, η συχνότητα μεταγωγής της συγκεκριμένης συσκευής (1,2MHz) επιτρέπει την χρήση πολύ μικρών κεραμικών και low-profile πυκνωτών και πηνίων με σκοπό τη βελτιστοποίηση όσον αφορά τη φορητότητα και το μέγεθος της κατασκευής.

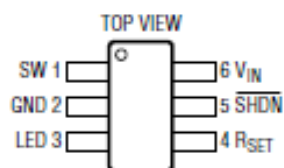
Παρακάτω φαίνεται το block diagram για το LT1932:



Εικόνα 16 - Block Diagram LT1932

Όπως παρατηρείται και στο παραπάνω block diagram, το LT1932 έχει 6 ακροδέκτες οι λειτουργίες των οποίων αναφέρονται παρακάτω:

- SW (Pin 1): Αυτός είναι ο συλλέκτης ενός εσωτερικού transistor Q1 (διακόπτης) NPN.
- GND (Pin 2): Γείωση
- LED (Pin 3): Αυτός είναι ο συλλέκτης ενός εσωτερικού transistor Q2 και συνδέεται σε αυτόν η κάθοδος ενός LED
- Rset (Pin 4): Αντίσταση η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του pin και της γείωσης και ρυθμίζει την ένταση του ρεύματος στα LED
- SHDN (Pin 5): Ακροδέκτης τερματισμού. Εάν η τάση σε αυτόν τον ακροδέκτη εφαρμόζεται τάση μεγαλύτερη από 0.85V τότε το LT1932 ενεργοποιείται ενώ αν η τάση είναι μικρότερη από 0.25V τότε το LT1932 απενεργοποιείται
- Vin (Pin 6): Τάση εισόδου



Εικόνα 17 - Top View του LT1932

Το επόμενο και σημαντικό βήμα του πειράματος είναι η επιλογή της αντίστασης R_{set} η οποία κατά συνέπεια καθορίζει το ρεύμα που διέρχεται από τα LEDs. Μελετώντας μια σειρά από διάφορα NIR LEDs, παρατηρείται πως η συντριπτική πλειοψηφία των παραπάνω λαμπτήρων λειτουργούν στο Peak Wavelength τους με ρεύμα $I_{led} = 20\text{mA}$. Σε περίπτωση που το ρεύμα διέλευσης είναι πολύ διαφορετικό από 20mA τότε παρατηρούνται φαινόμενα απόκλισης της τάξεως των $\pm 10\text{nm}$ από το μήκος κύματος του εκάστοτε LED.

Electro-Optical Characteristics						
Item	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	U_F	$I_F = 20\text{ mA}$	-	1.3	1.5	V
Forward Voltage *	U_F	$I_F = 100\text{ mA}$	-	1.4	1.7	V
Reverse Voltage	U_R	$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$	5	-	-	V
Radiation Power	P_O	$I_F = 20\text{ mA}$	5	7	-	mW
Radiation Power *	P_O	$I_F = 100\text{ mA}$	-	30	-	mW
Radiation Intensity	I_E	$I_F = 20\text{ mA}$	20	30	-	mW/sr
Radiation Intensity *	I_E	$I_F = 100\text{ mA}$	-	120	-	mW/sr
Peak Wavelength	λ_P	$I_F = 20\text{ mA}$	900	910	915	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F = 20\text{ mA}$	-	65	-	nm
Viewing Angle	ϕ	$I_F = 20\text{ mA}$	-	25	-	deg.
Switching Time	t_r, t_f	$I_F = 20\text{ mA}$	-	400	-	ns

* measured after 30s current flow

Εικόνα 18 - Πίνακας Χαρακτηριστικών LED IR 910nm

Optical and Electrical Characteristics						
$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified						
Parameter	Test conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward voltage	$I_F = 20\text{ mA}$	V_F		1.8	2.2	V
Reverse voltage	$I_R = 10\text{ }\mu\text{A}$	V_R	5			V
Radiant power	$I_F = 20\text{ mA}$	Φ_e	5.5	8		mW
Radiant power*	$I_F = 50\text{ mA}$	Φ_e		18		mW
Luminous intensity	$I_F = 20\text{ mA}$	I_v	550	780		mcd
Luminous intensity	$I_F = 50\text{ mA}$	I_v		1500		mcd
Peak wavelength	$I_F = 20\text{ mA}$	λ_p	660	670	680	nm
Spectral bandwidth at 50%	$I_F = 20\text{ mA}$	$\Delta\lambda_{0.5}$		25		nm
Viewing angle	$I_F = 20\text{ mA}$	ϕ		20		deg.
Switching time	$I_F = 20\text{ mA}$	t_r, t_f		15		ns

*measured after 30s current flow

Εικόνα 19 - Πίνακας Χαρακτηριστικών LED 670nm

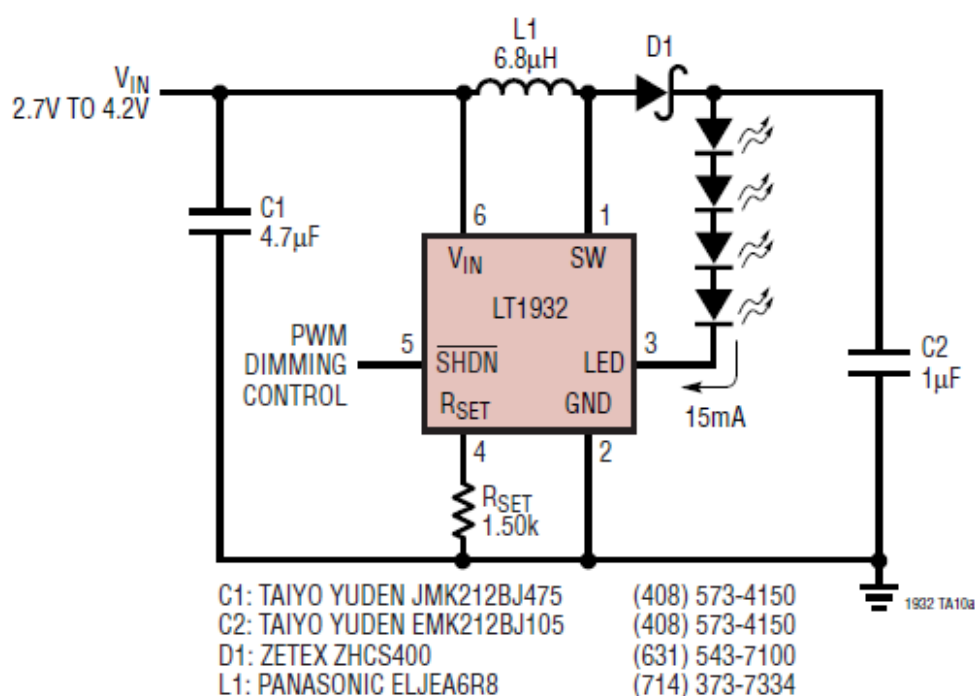
Σύμφωνα με το Datasheet του LT1932, ισχύει ο παρακάτω πίνακας και με βάση αυτόν μπορεί να γίνει η επιλογή της αντίστασης R_{SET} :

Table 4. R_{SET} Resistor Values

I_{LED} (mA)	R_{SET} VALUE
40	562 Ω
30	750 Ω
20	1.13k
15	1.50k
10	2.26k
5	4.53k

Επιλέγεται, λοιπόν, η τιμή της αντίστασης να είναι 1.13k Ω ώστε το ρεύμα να είναι 20mA όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Παρακάτω αποτυπώνεται το κύκλωμα και ο τρόπος σύνδεσης της τάσης, των πυκνωτών και πηνίων, της αντίστασης και των led και τα προτεινόμενα components:

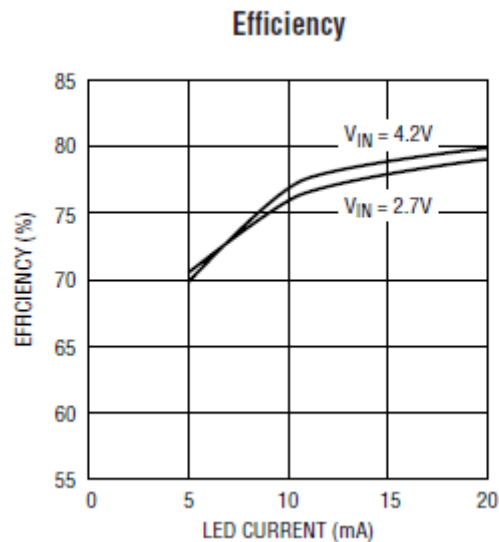


Εικόνα 20 - Ενδεικτική συνδεσμότητα LT1932 με 4 White LEDs

Σημείωση: Ο συγκεκριμένος LED Driver επιλέχθηκε πρώτον επειδή πληροί όλες τις απαιτήσεις του συστήματος και δεύτερον επειδή υπήρχε διαθέσιμο online το μοντέλο του για το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για το simulation του

κυκλώματος και το footprint του για το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του PCB.

Τέλος, σύμφωνα με το datasheet του LT1932, το διάγραμμα που απεικονίζει την αποδοτικότητα του οδηγού σε συνάρτηση με το ρεύμα που τον διαρρέει βρίσκεται παρακάτω:



Εικόνα 21 – Αποδοτικότητα του LT1932

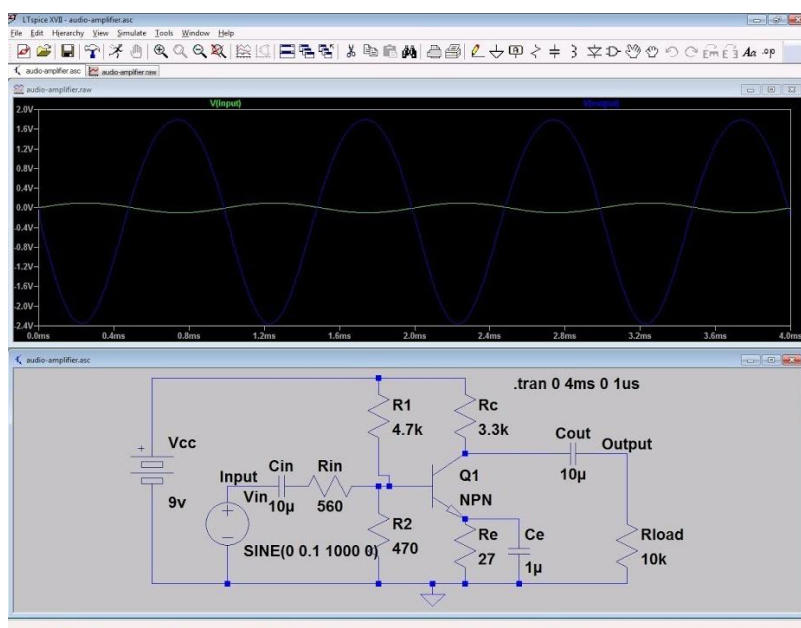
Επιλέγεται, λοιπόν, να εφαρμοστεί τάση εισόδου 4.2 Volt στην είσοδο του οδηγού αφού σύμφωνα με την εικόνα 21, στα 20mA η αποδοτικότητα του οδηγού είναι η μέγιστη (80%).[15]

Κεφάλαιο 3 – Προσομοίωση και Σχεδιασμός

3.1 Εισαγωγή – LTspice XVII

Για την προσομοίωση του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε το δωρεάν λογισμικό LTspice XVII της ANALOG DEVICES. Το LTspice XVII είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης κυκλώματος με βάση το σχηματικό διάγραμμα. Ο προσομοιωτής LTspice βασίστηκε στο Berkeley SPICE 3F4/5. Ο προσομοιωτής έχει περάσει από έναν πλήρη επανέλεγχο προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του, να διορθώσει σφάλματα και να επεκταθεί έτσι ώστε να μπορεί να εκτελεί βιομηχανικά πρότυπα ημιαγωγών. Επίσης, προστέθηκε η δυνατότητα ψηφιακής προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένης της συν-προσομοίωσης. Έχουν γίνει εκτεταμένες βελτιώσεις στον αναλογικό προσομοιωτή SPICE, όπως η παράλληλη επεξεργασία και δυναμική συναρμολόγηση και δημιουργία αντικειμένων στον SPARSE για να καταστήσει τον LTspice XVII τον απόλυτο βιομηχανικό αναλογικό προσομοιωτή.

Το LTspice προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως προσομοιωτής SPICE γενικής χρήσης. Τα νέα κυκλώματα μπορούν να σχεδιαστούν με την ενσωματωμένη σχηματική τους εικόνα. Οι εντολές και οι παράμετροι προσομοίωσης τοποθετούνται ως κείμενο στο σχηματικό διάγραμμα χρησιμοποιώντας την καθιερωμένη σύνταξη SPICE. Οι κυματομορφές των κόμβων του κυκλώματος και των ρευμάτων της συσκευής μπορούν να σχεδιαστούν κάνοντας κλικ στους κόμβους στο σχηματικό διάγραμμα κατά τη διάρκεια ή μετά την προσομοίωση.[16]



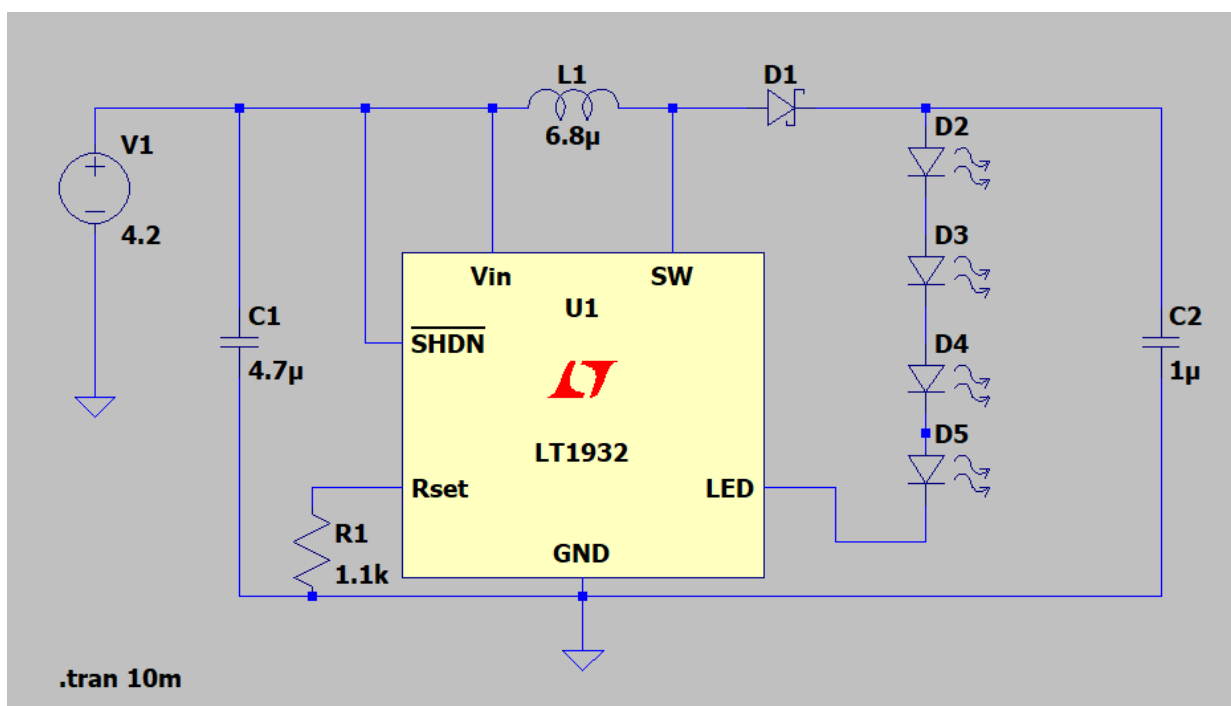
Εικόνα 22 – Το περιβάλλον εργασίας και προσομοίωσης του LTspice XVII

3.2 Προσομοίωση του LT1932

Σαν πρώτο πείραμα στο περιβάλλον του LTspice, σχεδιάστηκε το κύκλωμα που απεικονίζεται στην εικόνα 20 με βάση το datasheet του LT1932 και με τάση εισόδου 4.2 Volt, Rset 1.1kΩ και το pin SHDN να είναι συνδεδεμένο με την τάση εισόδου προκειμένου το ολοκληρωμένο να είναι πάντα ενεργό κατά την διάρκεια της προσομοίωσης όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4.2.

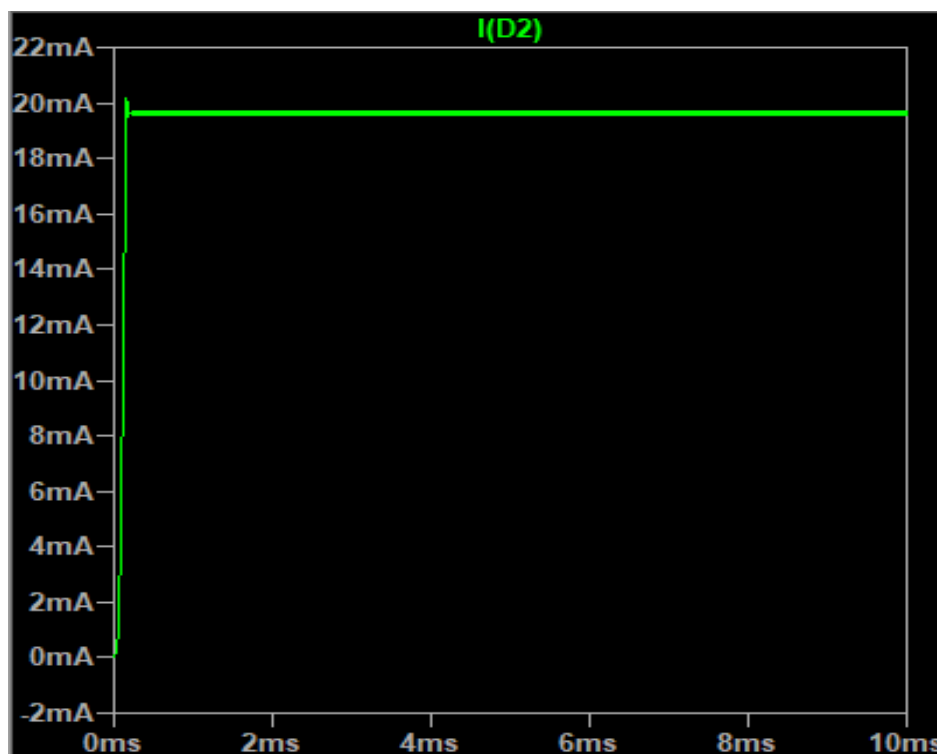
Όλα τα υπόλοιπα components (πυκνωτές, πηνία, αντιστάσεις, δίοδος schottky, LEDs, γείωση) είναι εκείνα ακριβώς που συστήνει ο κατασκευαστής

Το κύκλωμα εμφανίζεται στο LTspice ως εξής:



Εικόνα 22 – Σχεδιασμός του κυκλώματος στο LTspice με 1 LT1932 και 4 LEDs

Τα αποτελέσματα του παραπάνω simulation απεικονίζονται παρακάτω:



Εικόνα 23 – Αποτελέσματα του simulation με 1 LT1932 και 4 LEDs – Απεικονίζεται το ρεύμα στο LED D2

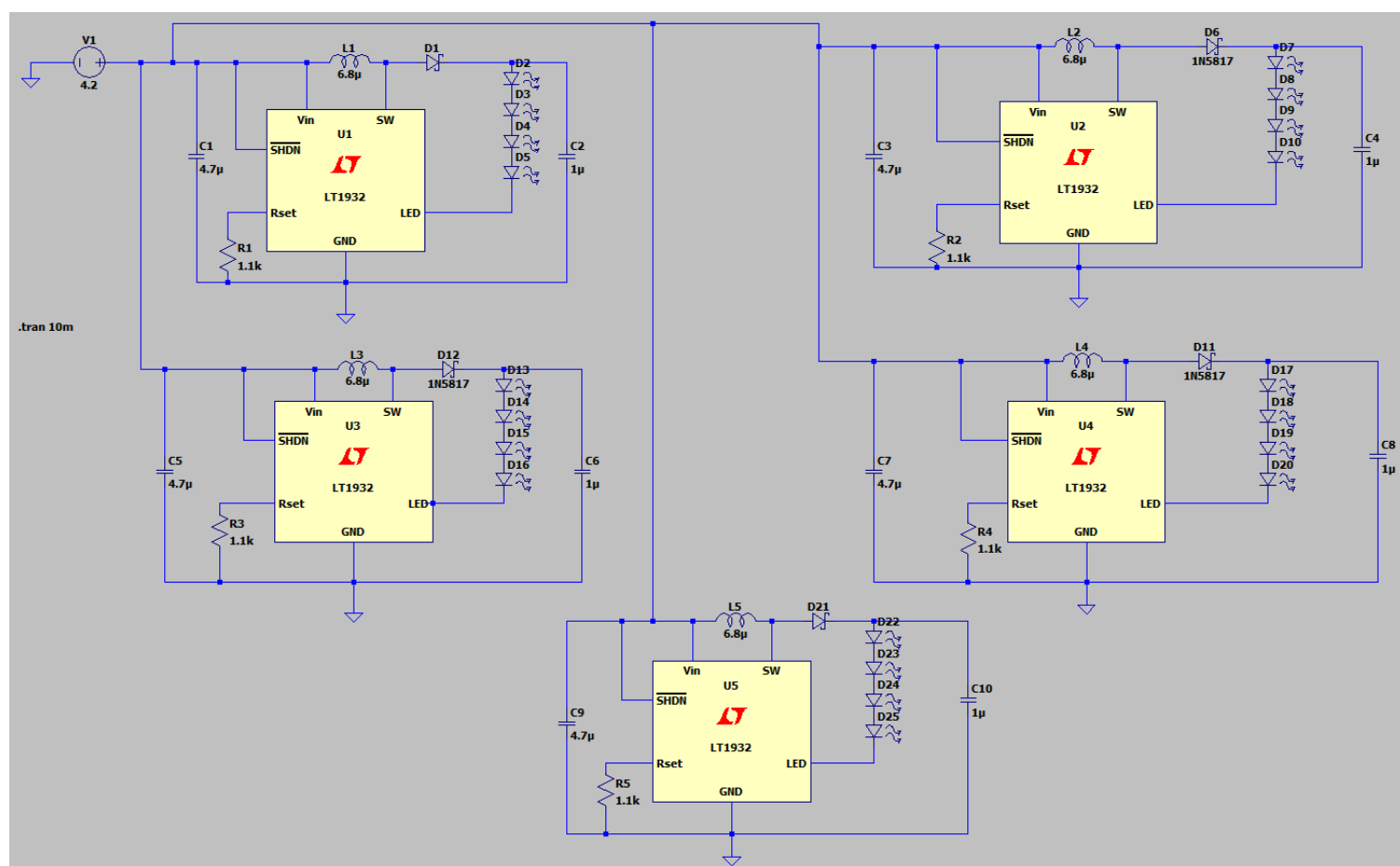
Όπως παρατηρείται στην εικόνα 23, το ρεύμα που διέρχεται από το LED D2 είναι 20mA σταθερά. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα σε ολόκληρο τον κλάδο που περιλαμβάνει τα LEDs D2, D3, D4 και D5 είναι 20mA ίσο, δηλαδή, με το επιθυμητό. Αυτό σημαίνει πως και η αντίσταση Rset η οποία επιλέχθηκε να είναι 1,1kΩ είναι σωστή και η τάση εισόδου (4.2V) είναι σωστή και προφανώς και η συνδεσμολογία είναι σωστή.

Το επόμενο βήμα της προσομοίωσης είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του κυκλώματος με 5 LT1932 και 20 LED συνολικά. Ο λόγος που επιλέχθηκαν 5 LT1932 προκύπτει από το γεγονός ότι για τις ανάγκες της μελέτης χρειάζονται 5 σετ των τεσσάρων LED για την κατάλληλη εκπομπή φωτός προς το δάκτυλο που εξετάζεται. Η λογική αυτή βασίζεται στο ότι μπορούν να δημιουργηθούν 5 σειρές από LEDs και η κάθε σειρά εκπέμπει φως σε διαφορετικό μήκος κύματος. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται στην κατασκευή η δυνατότητα να εξετάζει σε 5 διαφορετικές συχνότητες, είτε ταυτόχρονα είτε μεμονωμένα με χρήση διακοπών. Ο σχεδιασμός αυτός δίνει ένα μεγάλο πλεονέκτημα στην συγκεκριμένη μελέτη αφού δεν είναι υποχρεωτικό να εκπέμπει ακτινοβολία μόνο σε 2 μήκη κύματος όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2 αλλά και σε διαφορετικά μήκη κύματος γύρω από αυτά τα 2 (660 nm και 940nm).

3.3 Προσομοίωση του τελικού κυκλώματος

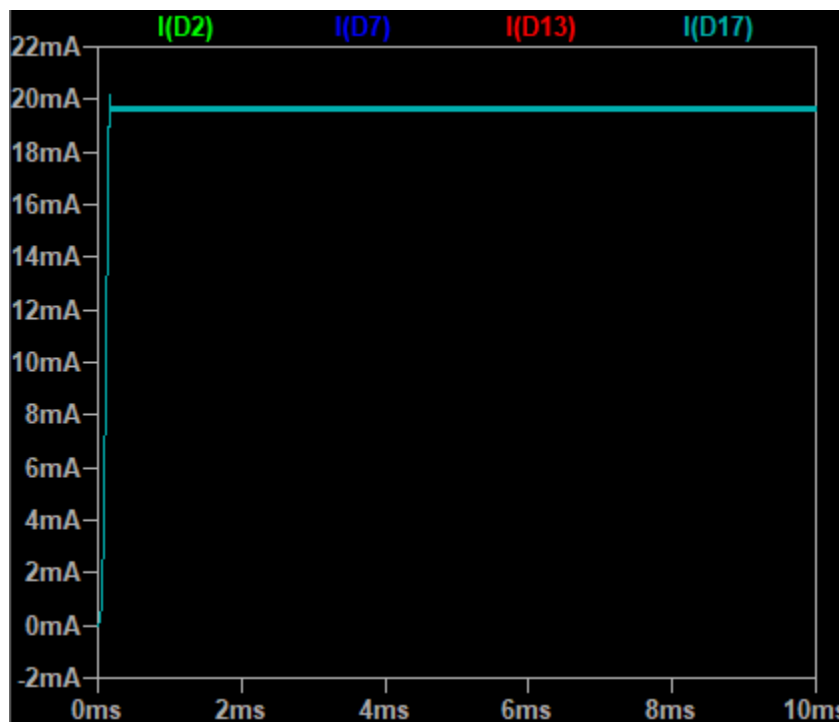
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το τελικό κύκλωμα περιλαμβάνει 5 LED Drivers LT1932, 20 LEDs, 10 πυκνωτές, 5 πηνία, 5 διόδους Schottky, 5 αντιστάσεις και την τάση εισόδου 4.2 Volt. Όλα τα components (πυκνωτές, πηνία, αντιστάσεις, δίοδος schottky, LEDs, γείωση) είναι εκείνα ακριβώς που συστήνει ο κατασκευαστής και η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε είναι βασισμένη στην προτεινόμενη από το datasheet του LT1932.

Το τελικό κύκλωμα εμφανίζεται στο LTspice ως εξής:



Εικόνα 24 – Σχεδιασμός του τελικού κυκλώματος στο LTspice με 5 LT1932 και 20 LEDs.

Τα αποτελέσματα του simulation για το παραπάνω κύκλωμα απεικονίζονται παρακάτω:



Εικόνα 25 - Αποτελέσματα του simulation με 5 LT1932 και 20 LEDs –
Απεικονίζεται το ρεύμα στα LED D2, D7, D13 και D17

Στην εικόνα 25 απεικονίζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για το τελικό κύκλωμα με 5 οδηγούς LT1932 και 20 LEDs. Το ρεύμα I(D2) αντιστοιχεί στον βρόχο με τα LED D2 έως και D5. Το ρεύμα I(D3) αντιστοιχεί στον βρόχο με τα LED D7 έως και D10 κ.ο.κ. Παρατηρείται, λοιπόν, πως ακόμα και στο σενάριο που όλοι οι drivers λειτουργούν ταυτόχρονα και τροφοδοτούν με ρεύμα και τα 20 LEDs, το ρεύμα σε κάθε βρόχο που περιέχει τις σειρές LED είναι 20mA ίσο, δηλαδή, με το επιθυμητό. Αυτό επιβεβαιώνει για ακόμη μία φορά πως και η αντίσταση Rset η οποία επιλέχθηκε να είναι 1.1kΩ είναι σωστή και η τάση εισόδου (4.2V) είναι σωστή και προφανώς και η συνδεσμολογία είναι σωστή.

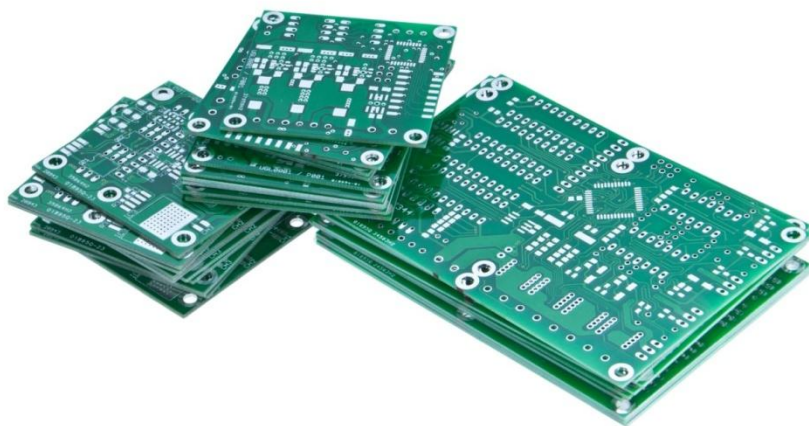
Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του PCB (Printed Circuit Board) η οποία θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο.

3.4 Δημιουργία του Printed Circuit Board (PCB)

Μία πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB στην Αγγλική γλώσσα) υποστηρίζει μηχανικά και στηρίζει ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα χρησιμοποιώντας αγώγιμα υλικά και άλλα χαρακτηριστικά, χαραγμένα σε ένα ή περισσότερα στρώματα φύλλων χαλκού που είναι τοποθετημένα σε στρώσεις ή/ και ανάμεσα σε στρώματα φύλλων ενός μη αγώγιμου υποστρώματος. Τα εξαρτήματα συγκολλούνται στο PCB για να συνδεθούν και να στερεωθούν σε αυτό.

Τα PCB χρησιμοποιούνται σε όλα τα απλούστερα ηλεκτρονικά προϊόντα αλλά και σε ορισμένα ηλεκτρικά και μπορούν να είναι είτε μονής όψης (ένα στρώμα χαλκού) είτε διπλής όψης (δύο στρώματα χαλκού και στις δύο πλευρές ενός υποστρώματος). Τα PCB πολλαπλών στρωμάτων επιτρέπουν πολύ υψηλότερη πυκνότητα συστατικών, επειδή τα σημάδια του κυκλώματος στα εσωτερικά στρώματα θα καταλαμβάνουν διαφορετικά την επιφάνεια μεταξύ των εξαρτημάτων.

Η παραπάνω τεχνική απαιτεί πρόσθετη προσπάθεια σχεδιασμού για να μπορέσει να αποτυπωθεί το κύκλωμα πάνω σε μία πλακέτα χαλκού αλλά η κατασκευή και η συναρμολόγηση μπορούν να αυτοματοποιηθούν. Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής με το κατάλληλο ηλεκτρονικό λογισμικό σχεδιασμού μπορεί να κάνει το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας. Επιπλέον, τα κυκλώματα μαζικής παραγωγής με PCB είναι φθηνότερα και ταχύτερα σε σχέση με άλλες μεθόδους καλωδίωσης αφού η συνδεσμολογία αποτυπώνεται στην πλακέτα και είναι έτοιμη προς χρήση εφόσον τοποθετηθούν και συγκολληθούν πάνω σε αυτή όλα τα εξαρτήματα. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να κατασκευαστεί μεγάλος αριθμός PCB ενώ ο σχεδιασμός του θα γίνει μόνο μία φορά. Φυσικά, τα PCB μπορούν να κατασκευαστούν χειροκίνητα σε μικρές ποσότητες, με λιγότερα οφέλη.[17]



Εικόνα 26 - Ενδεικτικά PCB του εμπορίου

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα EAGLE από την AUTODESK έγινε ο σχεδιασμός της πλακέτας PCB. Το EAGLE είναι ένα ευρέως γνωστό δωρεάν λογισμικό ηλεκτρονικής σχεδίασης που επιτρέπει στους σχεδιαστές πλακέτας τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) να σχεδιάσουν σε αυτό την πλακέτα, η οποία σε επόμενη φάση θα εκτυπωθεί. Για τον σχεδιασμό της πλακέτας χρησιμοποιήθηκε το footprint του LT1932 το οποίο βρέθηκε στο διαδίκτυο στην σελίδα snapeda.com και η βιβλιοθήκη Adafruit Eagle Library. Η διαδικασία του σχεδιασμού χωρίζεται σε 2 βασικές φάσεις:

- Στην πρώτη φάση είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί στο EAGLE το σχηματικό διάγραμμα επιλέγοντας όλα τα components που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο κύκλωμα με τα αντίστοιχα footprints τους.
- Στη δεύτερη φάση σχεδιάζεται το PCB προσπαθώντας να γίνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση σε μέγεθος πλακέτας, καλωδίων, και αποστάσεις components. Είναι σημαντικό σε αυτό το στάδιο του σχεδιασμού να αποφασιστεί σωστά εάν θα γίνει χρήση και των δύο όψεων της πλακέτας (ή μόνο της μίας) και έπειτα ποια εξαρτήματα θα τοποθετηθούν σε κάθε όψη και σε ποια θέση. Ένα από τα δυσκολότερα σημεία του σχεδιασμού είναι η καλωδίωση των components πάνω στην πλακέτα. Το EAGLE προσφέρει την λειτουργία Auto-Wire (αυτόματη καλωδίωση) όμως αυτό το εργαλείο δεν λειτουργεί βέλτιστα και συνεπώς δεν λειτουργεί προς όφελος του σχεδιαστή. Εξίσου σημαντικό βήμα πριν την έναρξη του σχεδιασμού, είναι η επιλογή για το πάχος των καλωδίων, το πάχος για τις τρύπες στις οποίες θα τοποθετηθούν εξαρτήματα, το πάχος για τις τρύπες που θα δημιουργηθούν για την στήριξη της πλακέτας κ.α.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφερθούν κάποιες μετατροπές που εφαρμόστηκαν στο κύκλωμα προκειμένου να είναι πιο λειτουργικό στην τελική του μορφή:

- Τοποθετήθηκαν 5 jumper διακόπτες με 2-pin ο κάθε ένας, ανάμεσα στο Shutdown άκρο κάθε LT1932 και στην είσοδο με σκοπό να υπάρχει έλεγχος για το ποιος οδηγός είναι ενεργοποιημένος κάθε φορά και κατά συνέπεια ποια LEDs είναι ενεργά για να είναι εύκολο να εντοπιστεί το μήκος κύματος που εκπέμπεται την κάθε στιγμή.
- Τοποθετήθηκαν 5 μεταβλητές αντιστάσεις στην θέση των Rset αντιστάσεων προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερος έλεγχος κατά τη λειτουργία του κυκλώματος. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν 5 333P-1-202LF Trimmer Resistors από την BOURNS INC. Η μέγιστη τιμή αντίστασης που μπορούν να έχουν είναι 2kΩ και η ισχύς τους είναι 0.5Watt.

Σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή για το LT1932 αλλά και την διαθεσιμότητα των εξαρτημάτων στο εμπόριο την συγκεκριμένη χρονική στιγμή χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω εξαρτήματα:

- C1: TAIYO YUDEN JMK212BJ475 (C0805)
- C2: TAIYO YUDEN EMK212BJ105 (C0805)
- D1: ZETEX ZHCS400 (SOD-323)
- L1: MURATA LQH3C4R7M24 (L1210)
- Όλα τα LEDs ανήκουν στην κατηγορία των 5mm
 - Τα LEDs που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν στο τελικό πείραμα έχουν τα εξής μήκη κύματος: 625 nm, 710 nm, 780 nm, 850 nm και 900 nm.

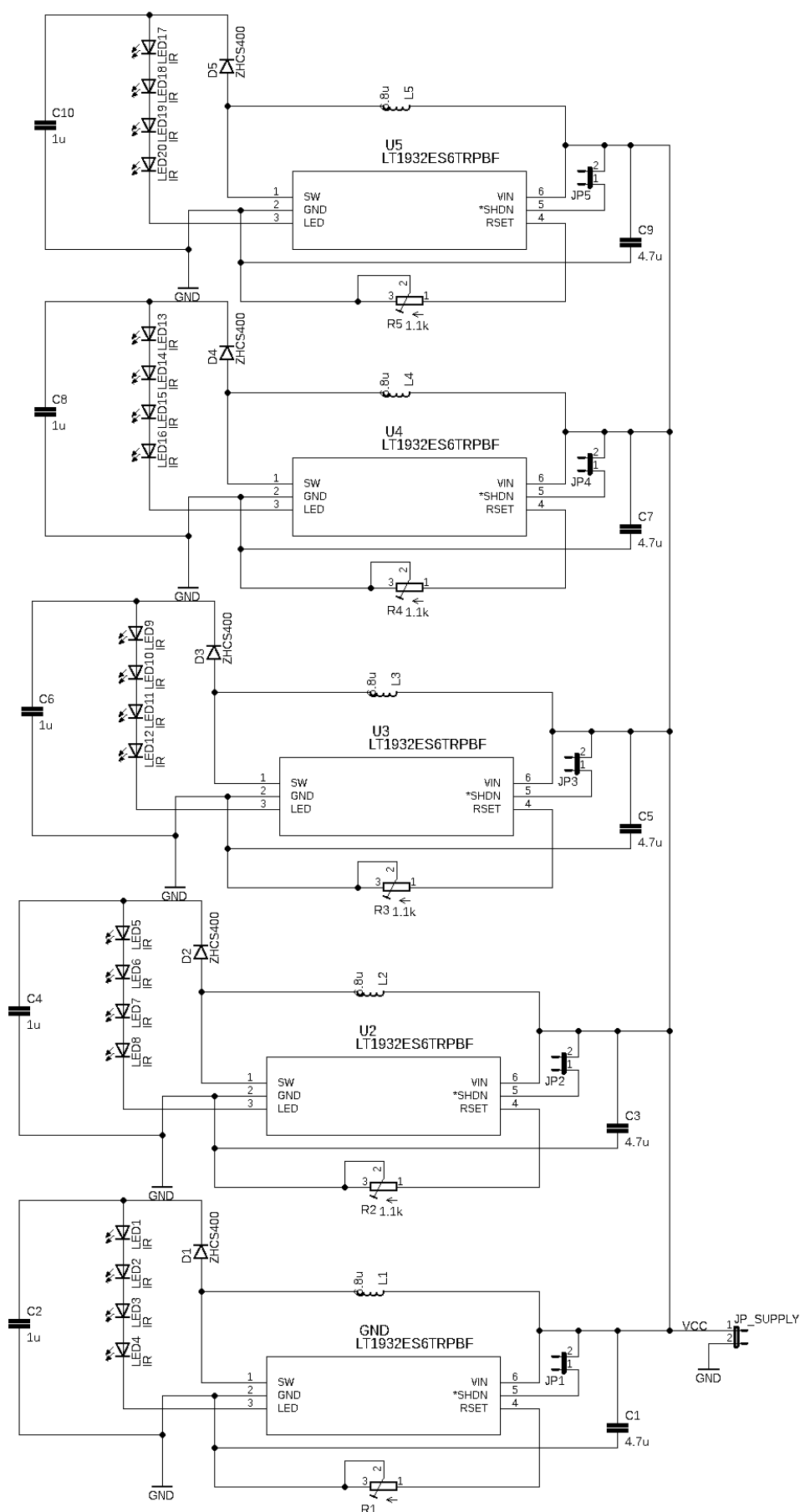
Σημείωση: Αντί να χρησιμοποιηθεί L1: PANASONIC ELJEA6R8 χρησιμοποιήθηκε L1: MURATA LQH3C4R7M24 το οποίο έχει με ίδιες τιμές με το πρώτο. Αυτό συνέβη λόγω έλλειψης του πρώτου από το εμπόριο.

Στις παρενθέσεις δίπλα σε κάθε εξάρτημα αναγράφεται ο τύπος του και κατά συνέπεια το footprint του. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται πιο αναλυτικά:

C1: TAIYO YUDEN JMK212BJ475	Πυκνωτής 4.7μF		
C2: TAIYO YUDEN EMK212BJ105	Πυκνωτής 1μF		
D1: ZETEX ZHCS400	Δίοδος Schottky		
L1: MURATA LQH3C4R7M24	Πηνίο 6.8μH		
LED	5mm		

Two-pin Jumper	Διακόπτης		
333P-1-202LF	Trimmer Resistor		

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το κύκλωμα όπως σχεδιάστηκε στο EAGLE:



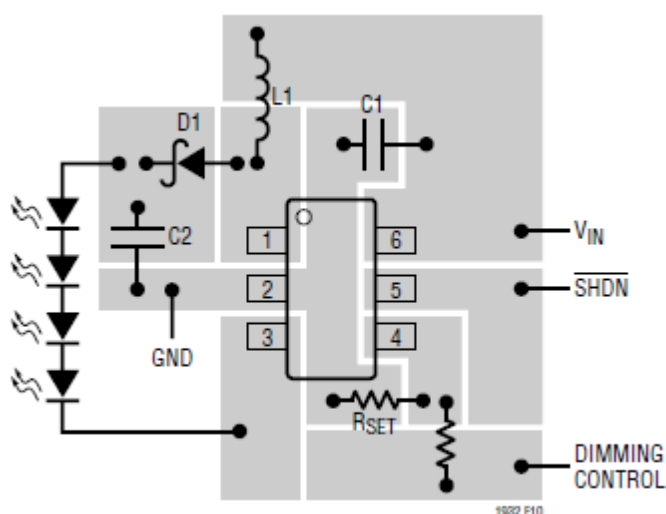
Εικόνα 27 – Σχεδιασμός του κυκλώματος στο EAGLE

Το επόμενο βήμα αποτελεί ο σχεδιασμός της πλακέτας.

Η τεχνική που ακολουθήθηκε είναι σχετικά απλή. Στην επάνω όψη της πλακέτας τοποθετήθηκαν όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα εκτός από τα LEDs τα οποία τοποθετήθηκαν στην κάτω πλευρά έτσι ώστε να μπορούν να είναι προσβάσιμα πιο εύκολα για τον κατασκευαστή.

Σχηματίστηκαν 5 σειρές με 4 LEDs στην κάθε σειρά που όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, κάθε σειρά εκπέμπει φως σε διαφορετικό μήκος κύματος.

Σύμφωνα με το datasheet του LT1932, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα αλλά και προς αποφυγή άλλων προβλημάτων που είναι πιθανό να εμφανιστούν στην πορεία, η προτεινόμενη τοποθέτηση των εξαρτημάτων είναι η εξής (εικόνα 28):



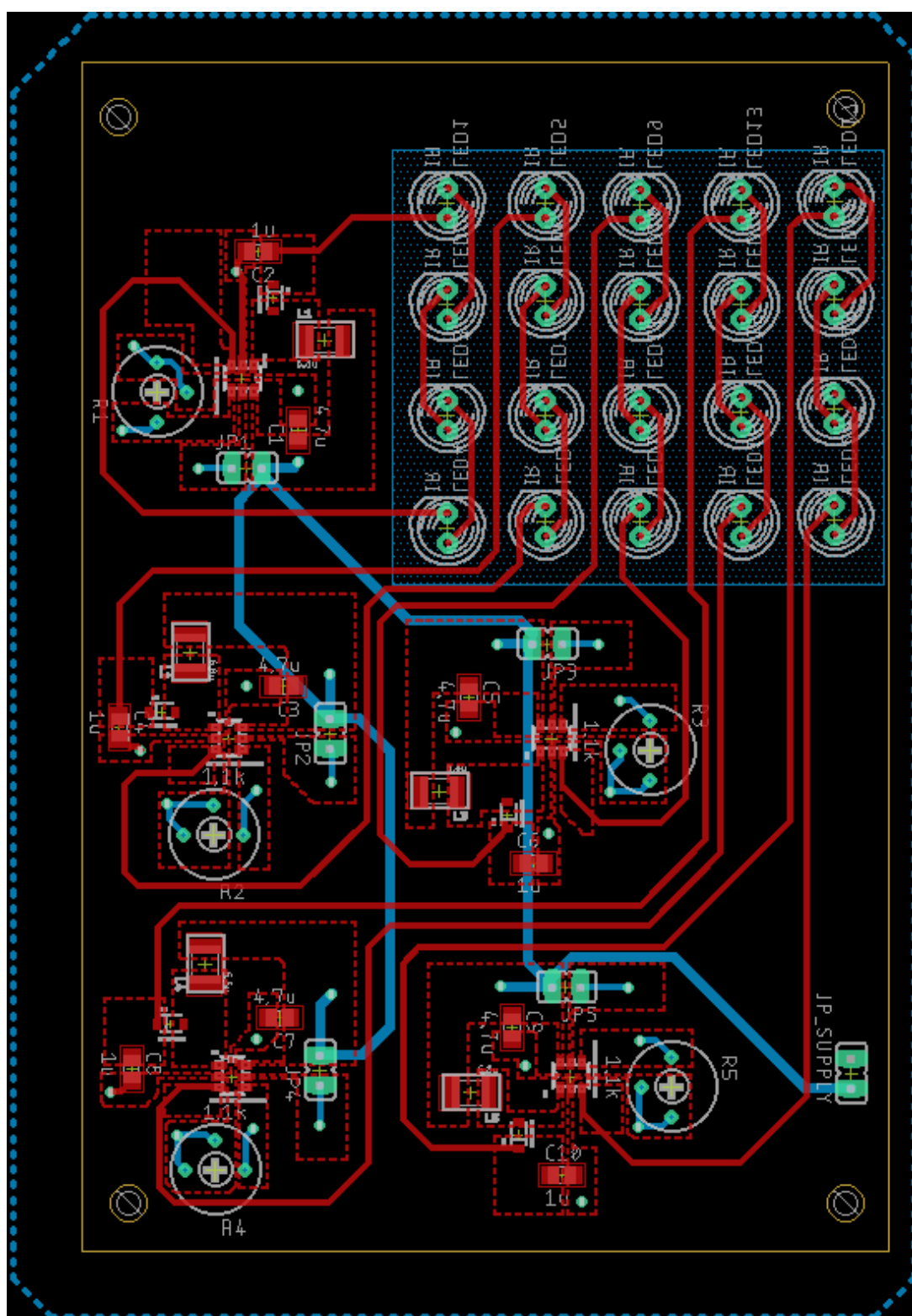
Εικόνα 28 – Προτεινόμενος τρόπος σύνδεσης εξαρτημάτων στην πλακέτα

Το εργαλείο “Polygon” χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθεί ο παραπάνω σχεδιασμός δημιουργώντας περιοχές ανάλογα με το κάθε pin του LT1932. Παράλληλα, δημιουργήθηκε ένα μεγάλο «πολύγωνο» στην κάτω πλευρά της πλακέτας το οποίο ονομάστηκε “GND” προκειμένου να οριστεί η γείωση και χρησιμοποιώντας νίαις γειώθηκε και το πάνω μέρος της πλακέτας.

Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι προστέθηκε ένας ακόμη two-pin jumper ο οποίος χρησιμοποιείται για να τροφοδοτείται το κύκλωμα με την τάση εισόδου.

Τέλος, όλη η διαδικασία του routing έγινε χειροκίνητα, χωρίς να χρησιμοποιηθεί κανένα εργαλείο που να αυτοματοποιεί οποιαδήποτε σύνδεση. Όλα τα καλώδια στην επάνω όψη έχουν πλάτος 0.508 mm και στην κάτω όψη έχουν 0.8128 mm πλάτος. Επίσης, έχουν σχεδιαστεί 4 τρύπες στις 4 γωνίες της πλακέτας με διάμετρο 3 mm προκειμένου να είναι ευκολότερο να στερεωθεί σε οποιαδήποτε κατασκευή.

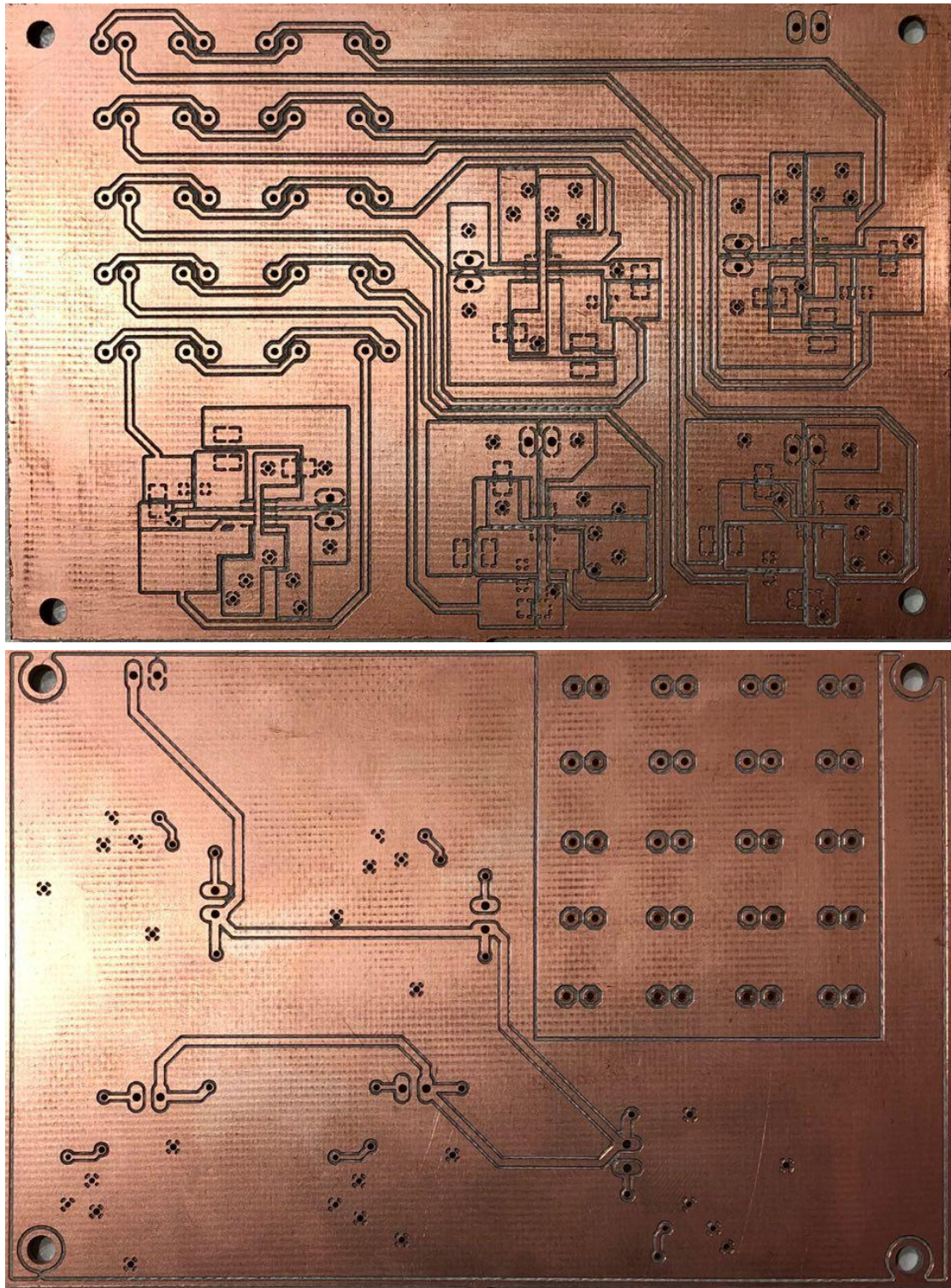
Το τελικό μέγεθος της πλακέτας είναι 111.3 mm x 77.2 mm και παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 29 – Το τελικό σχέδιο του PCB όπως εμφανίζεται στο EAGLE

Σημείωση: Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται τα καλώδια και τα components που θα τοποθετηθούν στην επάνω όψη της πλακέτας ενώ με ανοιχτό πράσινο φαίνονται τα components που θα τοποθετηθούν στην επάνω πλευρά αλλά θα κολληθούν στην αντίθετη και τέλος με μπλε χρώμα απεικονίζεται η καλωδίωση στην κάτω πλευρά.

Παρακάτω παρουσιάζεται η πλακέτα μετά την δημιουργία της:

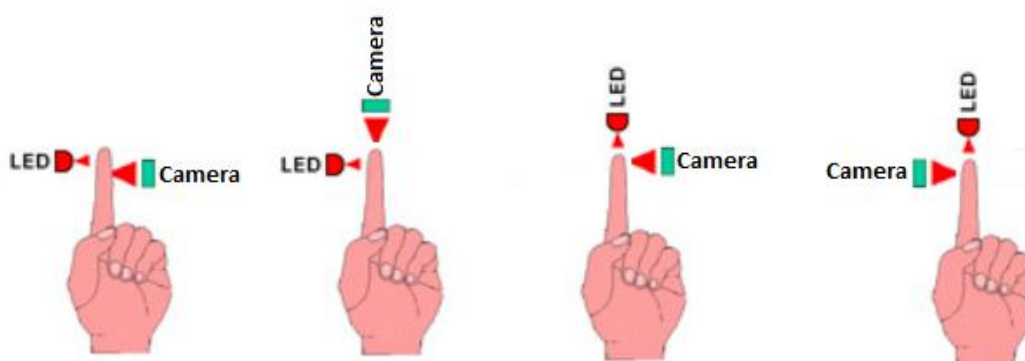


Εικόνα 30 – Α. Επάνω όψη της πλακέτας και Β. Κάτω όψη της πλακέτας

3.5 Σχεδιασμός της κατασκευής

Στο επόμενο κομμάτι αυτής της εργασίας, περιλαμβάνεται ο σχεδιασμός και το στήσιμο της κατασκευής. Το κομμάτι αυτό αφορά κυρίως την τοποθέτηση των LEDs σε σχέση με το αντικείμενο που εξετάζεται (δάκτυλο) και με την υπέρυθρη κάμερα.

Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί στησίματος τοποθετώντας την κάμερα και τα LEDs σε διαφορετικές θέσεις.



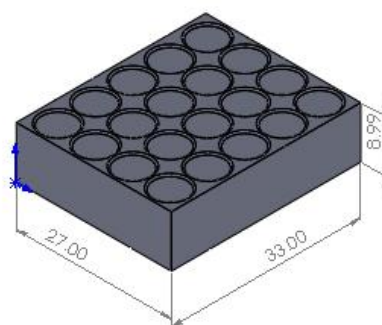
Εικόνα 31 – Πιθανές τοποθετήσεις της υπέρυθρης κάμερας και των LEDs

Το πρώτο σενάριο δείχνει τα LEDs τοποθετημένα επάνω από το δάκτυλο και την κάμερα τοποθετημένη κάτω από αυτό. Το δεύτερο σενάριο δείχνει ξανά τα LEDs τοποθετημένα επάνω από το δάκτυλο όμως η διαφορά είναι πως η κάμερα αυτή τη φορά τοποθετείται μπροστά από το δάκτυλο. Στο προτελευταίο σενάριο, τα LEDs τοποθετούνται μπροστά από το δάκτυλο και η κάμερα κάτω από αυτό ενώ στην τελευταία περίπτωση τοποθετούνται ξανά τα LEDs μπροστά από το δάκτυλο και η κάμερα επάνω από αυτό.

3.5.1 Τρισδιάστατος Σχεδιασμός (Three-dimensional Design)

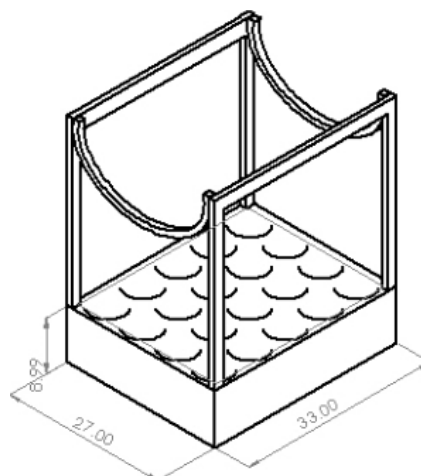
Για τον τρισδιάστατο σχεδιασμό των αντικειμένων που θα χρησιμοποιηθούν για την στήριξη των LEDs αλλά και για την στήριξη του δακτύλου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα 3D CAD από την εταιρία SOLIDWORKS.

Το πρώτο αντικείμενο που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα ήταν μία απλή κατασκευή πάνω στην οποία θα μπορούσαν να τοποθετηθούν τα 20 LEDs. Η διάμετρος της κάθε τρύπας είναι ακριβώς 5.75 mm όσο δηλαδή και η διάμετρος ενός LED.

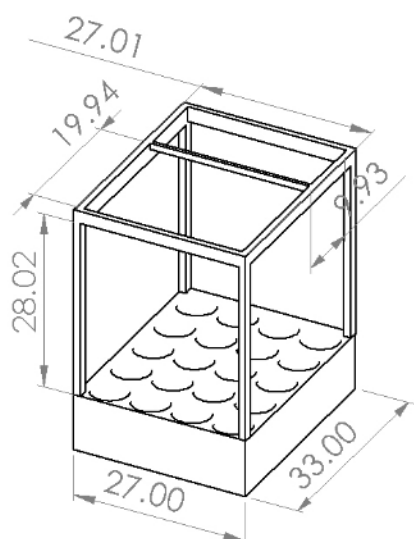


Εικόνα 32 – Πρώτη κατασκευή για στήριξη των LEDs

Το δεύτερο αντικείμενο που σχεδιάστηκε βασίστηκε στην ιδέα του πρώτου με μία απλή προσθήκη. Όπως το πρώτο, έχει και αυτό 20 τρύπες με 5 σειρές και 4 στήλες και κάθε τρύπα έχει διάμετρο 5.75 mm. Η προσθήκη σε αυτή την περίπτωση είναι ένα ημικυκλικό στήριγμα για ένα δάκτυλο σε απόσταση 30 mm από την βάση της. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο φωτισμός του δακτύλου από την κάτω όψη.



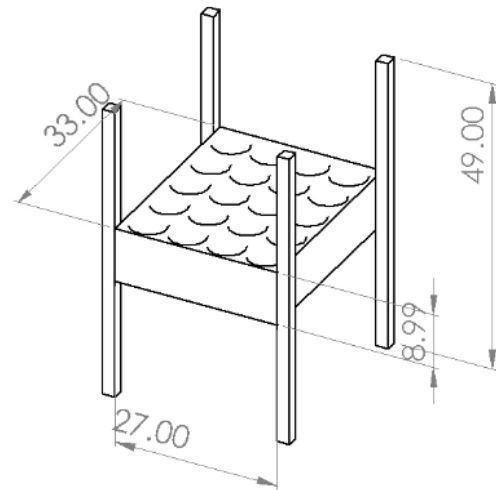
Εικόνα 33 – Δεύτερη κατασκευή για στήριξη των LEDs και ενός δακτύλου



Εικόνα 34 – Τρίτη κατασκευή για στήριξη των LEDs και ενός δακτύλου

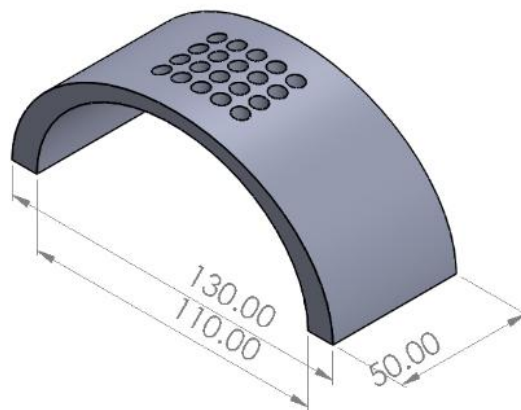
Η τρίτη κατασκευή που σχεδιάστηκε αποτελεί παραλλαγή της δεύτερης. Βασίζεται και αυτή στην πρώτη ιδέα όμως διαφέρει το στήριγμα σε αυτό το σενάριο. Η απόσταση του δακτύλου από την βάση των LEDs είναι 28 mm.

Το τέταρτο σχέδιο είναι επίσης βασισμένο στο πρώτο. Έχει όμως το πλεονέκτημα πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρεις τρόπους. Είτε πάνω από ένα δάκτυλο, είτε μπροστά από αυτό, είτε κάτω από αυτό.



Εικόνα 35 – Τέταρτη κατασκευή για φωτισμό ενός δακτύλου

Το τελευταίο σχέδιο διαφέρει αρκετά σε σχέση με τα υπόλοιπα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αυτό με 2 τρόπους. Είτε επάνω από ένα δάκτυλο, είτε μπροστά από αυτό. Είναι μία κυρτή κατασκευή πάνω στην οποία μπορούν να στηριχθούν τα LEDs. Το πλεονέκτημα αυτής της κατασκευής είναι το γεγονός πως λόγω της κυρτότητας της, όλη η ακτινοβολία από τα LEDs συγκεντρώνεται στο κέντρο του. Το πλάτος της κατασκευής αυτής είναι 50 mm, το μήκος της είναι 130 mm ενώ η ακτίνα του κύκλου είναι 50mm.



Εικόνα 36 – Πέμπτη κατασκευή για φωτισμό ενός δακτύλου

Κεφάλαιο 4 – Πειραματικά Αποτελέσματα

Η συγκεκριμένη μελέτη έλαβε χώρα κατά την διάρκεια της πανδημίας Covid-19 η οποία αναντίρρητα επηρέασε καθοριστικά όλους τους τομείς της ανθρώπινης ζωής και καθημερινότητας. Δεδομένου τούτου και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας συνδέονται και έχουν επηρεαστεί άμεσα από το γεγονός αυτό.

Συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο η παρούσα μελέτη έχει επηρεαστεί οφείλεται στο γεγονός πως τα περισσότερα εργαλεία και εξαρτήματα για την εκτέλεση του πειράματος υπήρχαν σε διαθεσιμότητα σε διάφορες χώρες ανά την υφήλιο. Όπως είναι λογικό, τα διαδοχικά lockdown, πρώτα σε Κίνα και στην συνέχεια σε Ιταλία και άλλες ευρωπαϊκές χώρες, εμπόδισαν την άμεση μεταφορά των αντικειμένων στο πανεπιστήμιο UNIMORE που βρίσκεται στην πόλη Reggio Emilia (Emilia-Romagna) στο οποίο εκπονήθηκε όλη η έρευνα και μελέτη για το συγκεκριμένο πείραμα.

Από την άλλη μεριά, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα σε ένα υγιές άτομο με εξαρτήματα κατώτερα από αυτά που αναφέρονται παραπάνω, στο εργαστήριο οπτοηλεκτρονικής στο ίδιο πανεπιστήμιο στην Modena και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος στο τμήμα μηχανικών “Enzo Ferrari” στο πανεπιστήμιο UNIMORE είναι ο εξής:

1. Κάμερα Edmund Optics EO1312M 1/2" CCD Monochrome USB Camera [18]

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας αναφέρονται παρακάτω:

- Resolution (H x V pixels): 1280 x 1024
- Pixel Size: 5.3 x 5.3 μm
- Frame rate: 60 fps
- Lens Mount: C/CS-Mount
- Video Output: USB 3.0



Εικόνα 37 – EO-1312 Color USB 3.0
Lite Edition Camera

2. Φακός – Οπτικό Σύστημα KOWA LM50JCM, 2 Megapixel Rated [19]

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φακού αναφέρονται παρακάτω:

- F-number: 2.8
- Focal Length: 50mm
- Image size: 2/3" (Φ11)
- Interface: C-Mount



και 4 φακοί (F=1000mm, F=750mm, F=500mm, F=300mm) με διάμετρο 50.8mm

Εικόνα 38 – Φακός KOWA LM50JCM

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε τις αποστάσεις και το magnification του οπτικού setup χρησιμοποιώντας τον τύπο του Gauss [10]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4} + \frac{1}{f_{opt}} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{750} + \frac{1}{500} + \frac{1}{300} + \frac{1}{50} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{750} + \frac{1}{500} + \frac{1}{300} + \frac{1}{50} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{3 + 4 + 6 + 10 + 60}{3000} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{f} = \frac{83}{3000} \Rightarrow f = \frac{3000}{83} = 36.14 \cong 36 \text{ mm}$$

Με αυτό τον τρόπο το focal length ολόκληρου του setup διαμορφώθηκε σε 36mm το οποίο επιτρέπει στην κάμερα να έχει μεγαλύτερο field-of-view σε σχέση με το αρχικό 50mm.

Στην συνέχεια έπρεπε να υπολογιστούν οι υπόλοιπες αποστάσεις του συστήματος και η μεγέθυνση σύμφωνα με το παρακάτω σύστημα εξισώσεων δεδομένου ότι το αντικείμενο τοποθετήθηκε σε απόσταση S1=220mm:

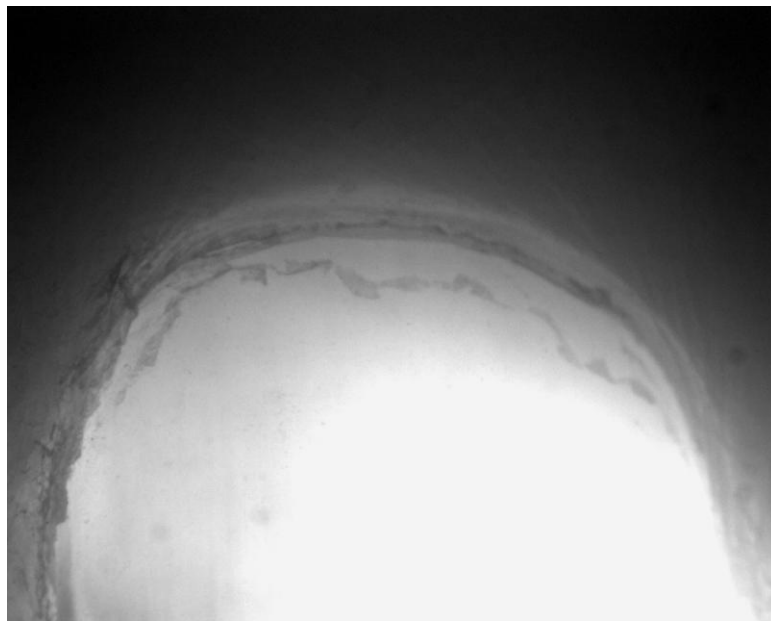
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s_1} \Rightarrow \frac{1}{s_2} = \frac{1}{36} - \frac{1}{220} \Rightarrow \dots \Rightarrow s_2 \cong 43 \text{ mm} \\ m = \frac{s_2}{s_1} = \frac{43}{220} \cong 0.2 \end{array} \right.$$

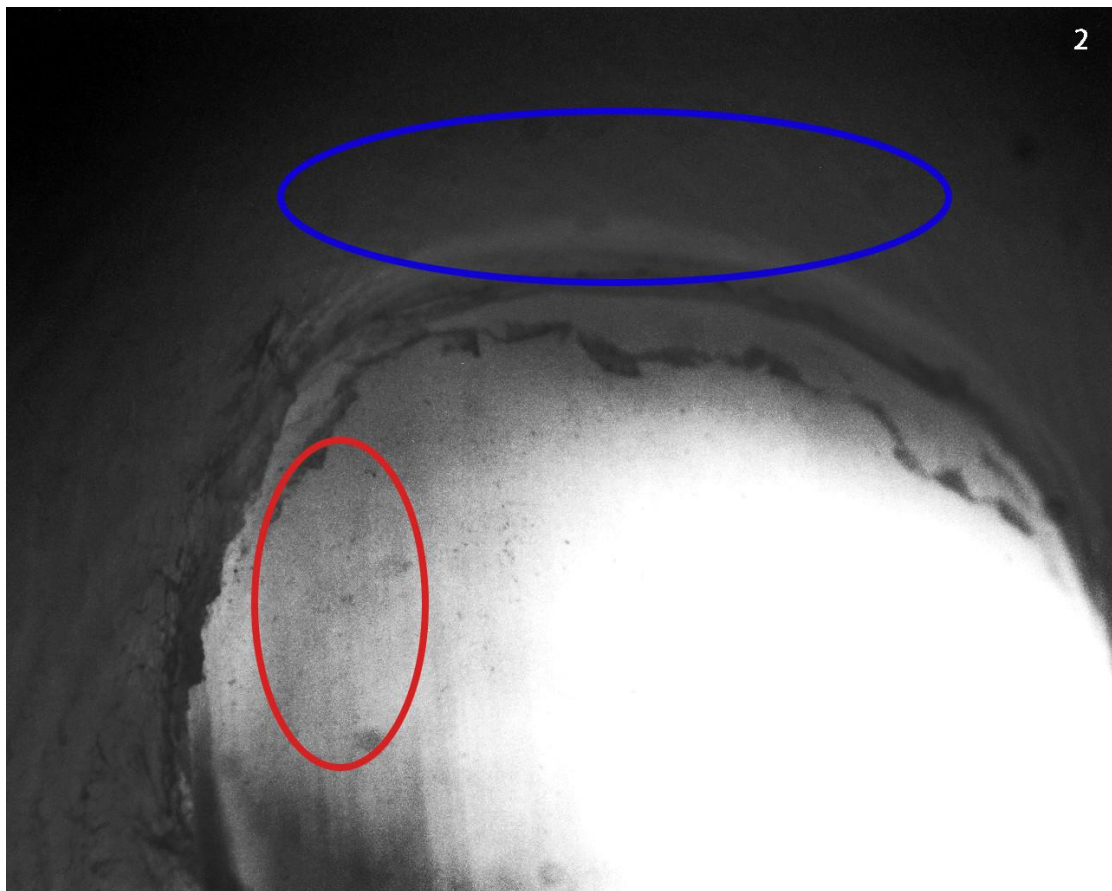
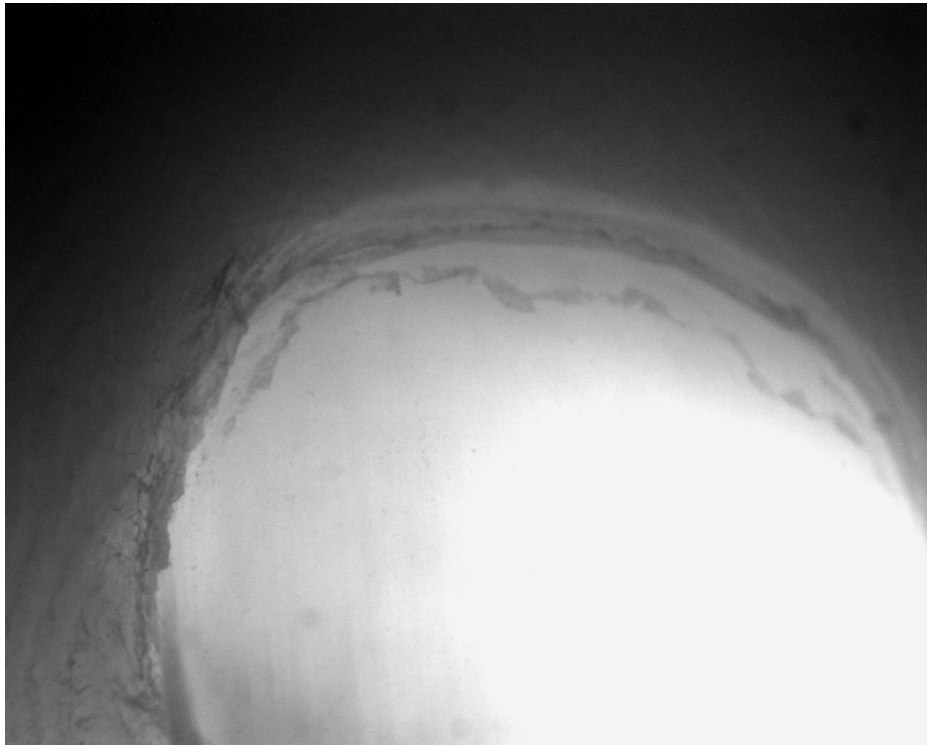
Όπως φαίνεται από το παραπάνω σύστημα εξισώσεων η μεγέθυνση ήταν m=0.2 .

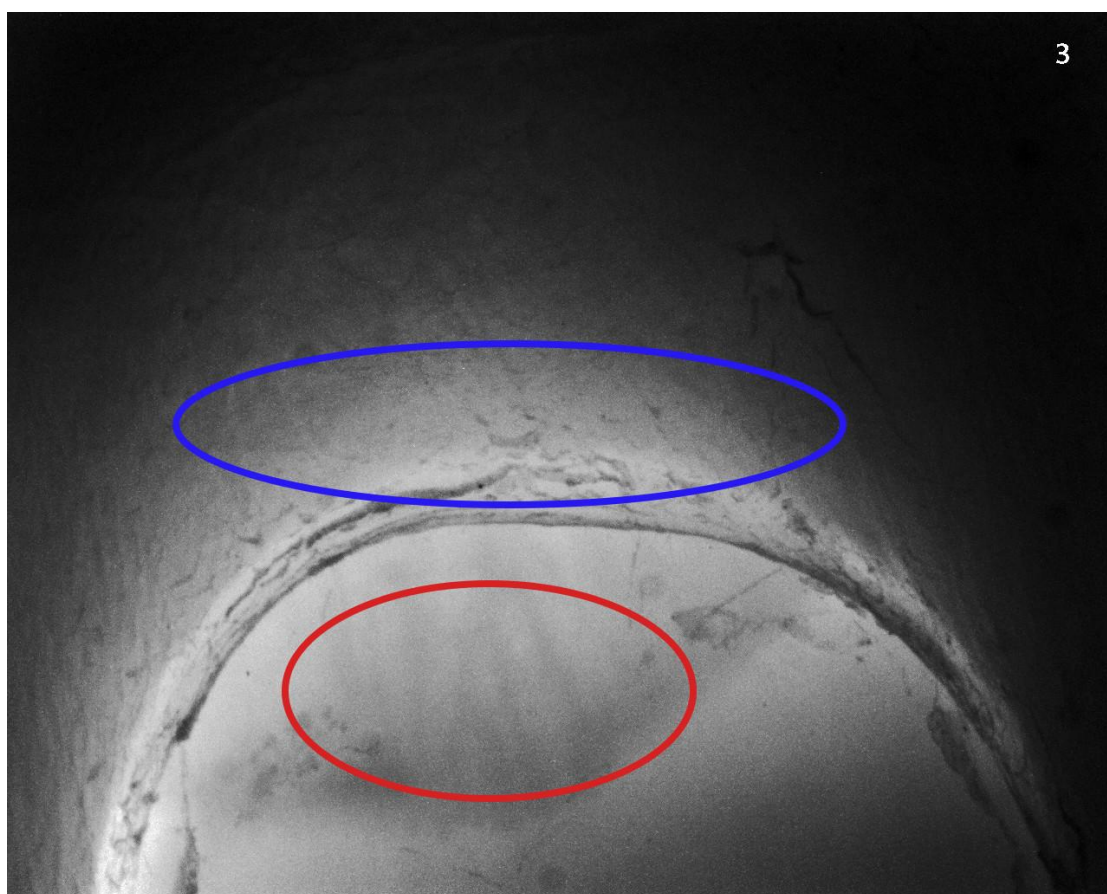
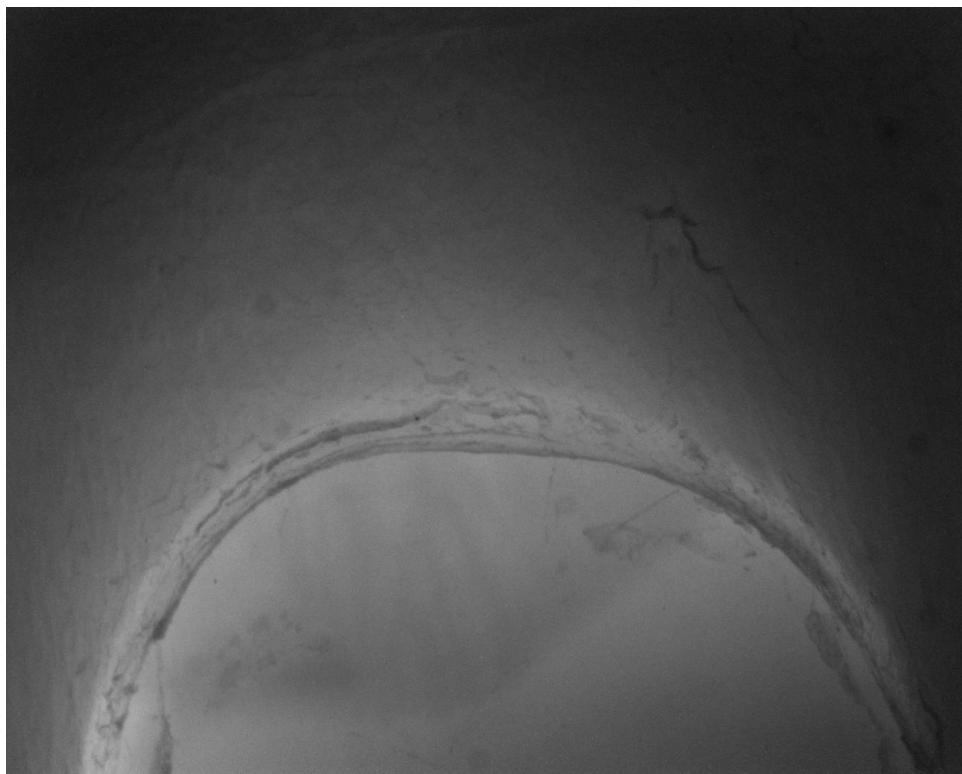
Τα αποτελέσματα του πειράματος με τον εξοπλισμό και τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν ήταν απόλυτα ικανοποιητικά αφού τα μικρά αιμοφόρα αγγεία είναι της τάξης των 8-10 μm και το μέγεθος των pixel της κάμερας είναι της τάξης των 5x5 τετραγωνικών μm πράγμα που σημαίνει πως το pixel size της συγκεκριμένης κάμερας είναι συγκριτικά αρκετά μεγάλο για το αντικείμενο που χρειάζεται να αποτυπωθεί.

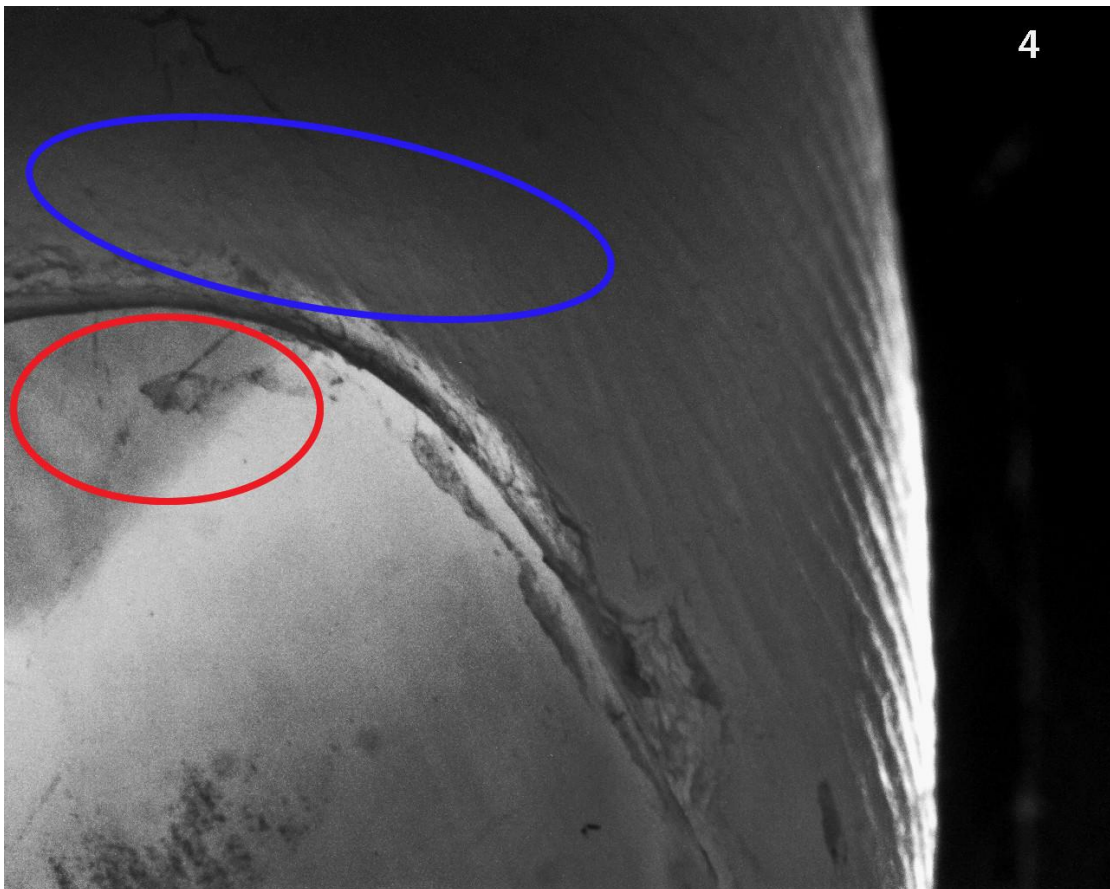
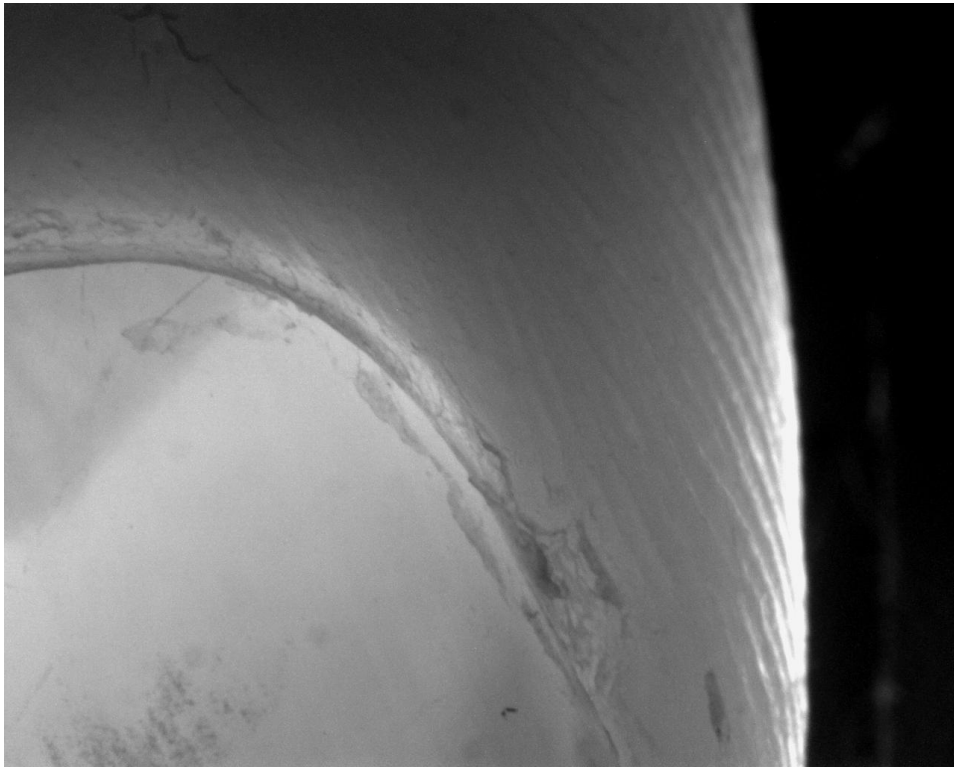
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (πρώτα εμφανίζεται η raw εικόνα):

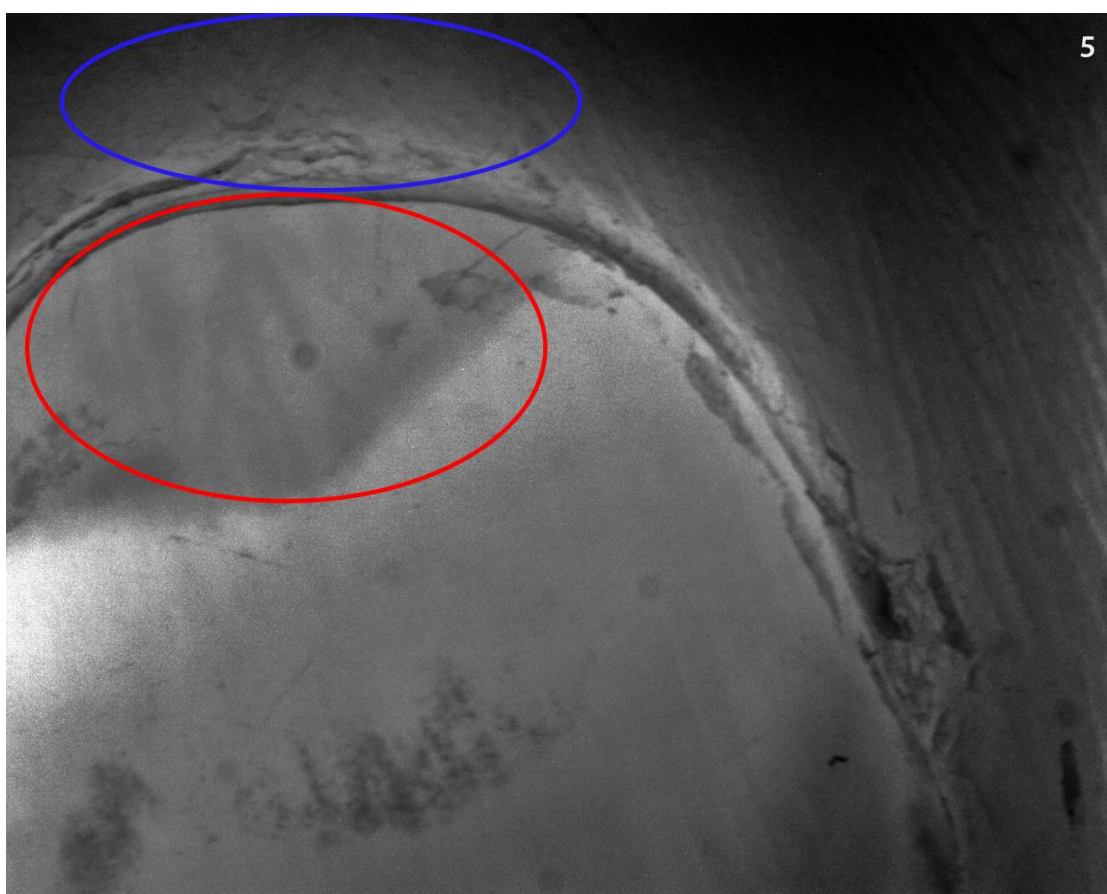
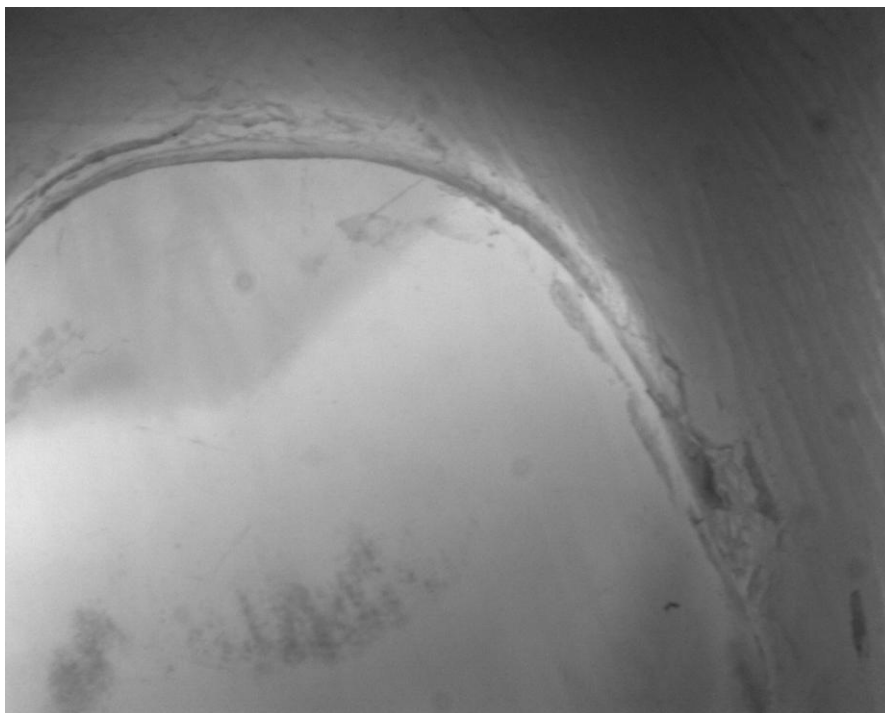
Σημείωση: Οι παρακάτω φωτογραφίες έχουν επεξεργαστεί στο επίπεδο της φωτεινότητας και αντίθεσης με το πρόγραμμα Photoshop της Adobe.











Αυτό που μπορεί να φανεί εύκολα από τις παραπάνω φωτογραφίες, είναι το περιεχόμενο των κόκκινων ελλείψεων το οποίο είναι μικρο-αιμορραγίες. Οι μικρο-αιμορραγίες είναι ένα φυσιολογικό φαινόμενο κατά την ανάπτυξη των νυχιών και έχουν μέγεθος της τάξης των μερικών δεκάδων nm πράγμα που τις καθιστά δύσκολα αναγνωρίσιμες με γυμνό μάτι.

Η περιοχή στην οποία εστιάζεται η μελέτη αυτή, είναι η περιοχή γύρω από το νύχι η οποία έχει επισημανθεί στις παραπάνω φωτογραφίες με μπλε ελλείψεις. Όπως είναι προφανές, στις εικόνες 1 και 2 τα αποτελέσματα δεν είναι σχεδόν καθόλου εμφανή. Στις φωτογραφίες 3 και 4 τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ικανοποιητικά σε σχέση με τις 2 πρώτες λήψεις όμως και πάλι είναι μακριά από το επιθυμητό. Στην 5^η λήψη οι μικρο-αιμορραγίες φαίνονται καλύτερα.

Παρόλο που το πεδίο της συγκεκριμένης έρευνας δεν είναι οι μικρο-αιμορραγίες, αποδεικνύεται το γεγονός πως η θεμελιώδης αρχή της έρευνας, δηλαδή η εκμετάλλευση της απορρόφησης της IR ακτινοβολίας από την αιμοσφαιρίνη είναι ικανή να επισημάνει λεπτομέρειες που είναι παρόμοιες με τα μικρά αιμοφόρα αγγεία που είναι ο στόχος της μελέτης.

Επιβεβαιώνεται, δηλαδή, πως με τον κατάλληλο εξοπλισμό (κάμερες, φακοί και LEDs) το αποτέλεσμα θα είναι εμφανώς καλύτερο αφού η κάμερα που επιλέχθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη έχει αρκετά μεγαλύτερη ανάλυση και αρκετά μικρότερο μέγεθος pixel σε σχέση με την κάμερα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ενώ ταυτόχρονα η θεωρία πάνω στην οποία βασίστηκε η συγκεκριμένη έρευνα επαληθεύεται.

Κεφάλαιο 5 – Μελλοντική Εργασία – Βιβλιογραφία

5.1 Μελλοντική Εργασία

Σε επόμενο επίπεδο η συγκεκριμένη εργασία θα μπορούσε να συνεργαστεί με την εργασία «Αυτοματοποιημένο σύστημα επεξεργασίας εικόνας για την ανάλυση αγγείων μικροκυκλοφορίας δακτύλου» της Κωνσταντίνας Μπάντρα η οποία αφορά την μελέτη και αξιολόγηση των τριχοειδών αγγείων ως προς τα διάφορα χαρακτηριστικά τους με εμβάθυνση στο αλγοριθμικό και λειτουργικό κομμάτι. Με αυτό τον τρόπο η διαδικασία εξέτασης για την συγκεκριμένη ασθένεια θα μπορέσει να αυτοματοποιηθεί, εφόσον τα αποτελέσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία, διοχετεύονται στο σύστημα αναγνώρισης το οποίο έχει δημιουργηθεί από την συνάδελφο ενώ τα αποτελέσματα ερμηνεύονται ορθά άμεσα με την βοήθεια ενός λογισμικού. Σαφώς, εύκολα θα μπορούσε να σκεφτεί οποιοσδήποτε τον συνδυασμό των παραπάνω μελετών με στόχο την δημιουργία ενός λογισμικού και μίας κατασκευής φιλικής προς τον χρήστη με σκοπό την ευκολότερη και ορθότερη διάγνωση.[20]

Σε μεγαλύτερο στάδιο, η συγκεκριμένη τεχνική θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ενδεχομένως και σε διάφορες άλλες δερματολογικές παθήσεις είτε σε διαφορετικά σημεία του ανθρωπίνου σώματος αλλά και σε διαφορετικά μήκη κύματος.

5.2 Βιβλιογραφία

[1]Wikipedia: “Βιοϊατρική τεχνολογία”.

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CE%B9%CE%BF%CF%8A%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1>

[2]Dermatologic.gr: “Αυτοάνοσα Νοσήματα – Σκληρόδερμα”.

https://dermatologic.gr/home/autoanosa-dermatologika/skliroderma/?gclid=CjwKCAjwkun1BRAIEiwA2mJRWa53CIV7NP_YKtV48HRm2g3cyaP8DBNm1Q2O8aMqfhBO_kV1omrN8xoCbdsQAvD_BwE

[3] Wikipedia: “Σκληρόδερμα”.

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%8C%CE%B4%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B1>

- [4] Lina María Colmenares Roldán, Carlos Jaime Velásquez Franco, Miguel Antonio Mesa Navas. Capillaroscopy in systemic sclerosis - A narrative literature review. <https://www.elsevier.es/en-revista-revista-colombiana-reumatologia-english-edition--474-articulo-capillaroscopy-in-systemic-sclerosis-a-S2444440516300504>
- [5] Marek M. Chojnowski, Anna Felis-Giemza, Marzena Olesińska. Capillaroscopy – a role in modern rheumatology. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4918046/>
- [6] Eduardo José do Rosário e Souzaa, Cristiane Kayser. Nailfold capillaroscopy: relevance to the practice of rheumatology. https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0482-50042015000300264&script=sci_arttext&tlng=en
- [7] R. Fuksis, M. Greitans, O. Nikisins, M. Pudzs. Infrared Imaging System for Analysis of Blood Vessel Structure. https://www.researchgate.net/publication/266162574_Infrared_Imaging_System_for_Analysis_of_Blood_Vessel_Structure
- [8] Siegfried Kästle, Friedemann Noller, Siegfried Falk, Anton Bukta, Eberhard Mayer, Dietmar Miller. A New Family of Sensors for Pulse Oximetry. <https://www.hpl.hp.com/hpjournal/97feb/feb97a7.pdf>
- [9] Santiago Lopez. Pulse Oximeter Fundamentals and Design. <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4327.pdf>
- [10] Mells Griot. Fundamental Optics. <https://sites.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Fundamental-Optics.pdf>
- [11] Basler MED ace 5.1 MP 35 Color. <https://www.baslerweb.com/en/products/medical-and-life-sciences-portfolio/basler-med-ace-series/basler-med-ace-5-1-mp-35-color/#tab=specs>
- [12] Schneider Kreuznach. Componon-S 2.8/50-0018. <https://schneiderkreuznach.com/application/files/5115/2845/6368/Componon-S-2.8-50.pdf>
- [13] Wikipedia: “Δίοδος Εκπομπής Φωτός “. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%AF%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82_%CE%B5%CE%BA%CF%80%CE%BF%CE%BC%CF%80%CE%AE%CF%82_%CF%86%CF%89%CF%84%CF%8C%CF%82
- [14] Sunpower Electronics. LED Driver. <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-an-led-driver/>

- [15] Linear Technology. LT1932 Constant-Current DC/DC LED Driver in ThinSOT (Datasheet). <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1932f.pdf>
- [16] Wikipedia. "LTSpice". <https://en.wikipedia.org/wiki/LTspice>
- [17] Wikipedia: "Printed Circuit Board".
https://en.wikipedia.org/wiki/Printed_circuit_board
- [18] EO Edmund optics. EO-1312 Color USB 3.0 Lite Edition Camera.
<https://www.edmundoptics.com/p/eo-1312-color-usb-30-lite-edition-camera/32171/>
- [19] RMA Electronics. KOWA LM50JCM Lens. <https://www.edmundoptics.com/p/eo-1312-color-usb-30-lite-edition-camera/32171/>
- [20] Konstantina Bantra. Automated Image Processing system for the analysis of small vessels of the microcirculation in the nailfold (Capillaroscopy)
<https://dias.library.tuc.gr/view/86370>