



INTERNATIONAL
HELLENIC
UNIVERSITY

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT

Μετρήσεις Σκέδασης με Κάμερα για Φορητούς Οπτικούς Βιοϊατρικούς Αισθητήρες

Scattering Measurements Using Cameras for Portable Biomedical Sensors

Καπεταν Γιώργη Ελένη

Επιβλέπων καθηγητής: Κιζήρογλου Ε. Μιχαήλ

Θεσσαλονίκη 2025

Abstract

The creation of a fully portable non-invasive biomedical sensor for blood examination, is important, not only for the improvement of its analysis, but also for the patient's experience. The goal of this dissertation is to contribute, through research, to the invention of such a device, for the measurement of light scattering, which occurs when emitted light collides with the components of blood. For this reason, a prototype of a recording system of the light scattering, through samples, was developed with the use of a laser light source and a camera capable of both in-vitro and in-vivo measurements. Experiments were conducted, during this effort, which consisted of capturing and analysing photographs of samples, containing synthetic material, whose composition is akin to real human blood. Afterwards, a presentation of the results of the tests was prepared, showing alignment with the hypothesis of correlation, between the intensity of the scattered light and the size of the round particles. However, more investigation is needed, on the relationship between their diameter and the scattering angle of the light. In all cases, the conclusion of this research is, that the integration of a digital camera into the device is a promising solution, for advancements in the development process of a non-invasive sensor for blood analysis.

Περίληψη

Η δημιουργία ενός πλήρως φορητού μη παρεμβατικού βιοϊατρικού αισθητήρα για την εξέταση των παραγόντων του αίματος, είναι σημαντική για τη βελτίωση της ανάλυσης αυτών, αλλά και για την εμπειρία του ασθενούς. Στόχος της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η συμβολή, μέσω της έρευνας, στην ανάπτυξη μίας τέτοιας συσκευής, για τη μέτρηση του φαινομένου της σκέδασης, που προκύπτει από την σύγκρουση εκπεμπόμενου φωτός με τα στοιχεία του αίματος. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο σύστημα καταγραφής της σκέδασης φωτός, μέσα από δείγματα, ικανό για μετρήσεις in-vitro και in-vivo, χρησιμοποιώντας μια πηγή laser και μια κάμερα. Κατά την προσπάθεια αυτή, διεξάχθηκαν, αρχικά, πειράματα λήψης και ανάλυσης φωτογραφικού υλικού, από δείγματα συνθετικού υλικού που προσομοιάζουν στη σύσταση του πραγματικού αίματος. Έπειτα, έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων, τα οποία συμφωνούν με την ύπαρξη συσχέτισης, μεταξύ της έντασης του σκεδαζόμενου φωτός και του μεγέθους των σφαιρικών σωματιδίων. Ωστόσο, χρειάζεται περεταίρω διερεύνηση της σχέσης της γωνίας σκέδασης, με τη διάμετρο αυτών. Σε κάθε περίπτωση, το γενικότερο συμπέρασμα που προκύπτει είναι, πως η ενσωμάτωση ψηφιακής κάμερας στη συσκευή είναι μία λύση υποσχόμενη θετικών εξελίξεων στην διαδικασία κατασκευής ενός μη παρεμβατικού αισθητήρα για την εξέταση της κατάστασης του αίματος.

Ευχαριστίες

Στην παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να παραληφθεί η έκφραση ευγνωμοσύνης, σε όλους όσους μου παρείχαν την βοήθεια τους, καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της.

Θα ήθελα, λοιπόν, να ευχαριστήσω τον επόπτη καθηγητή Δρ. Κιζήρογλου Ε. Μιχαήλ, για τη συστηματική καθοδήγηση, που μου πρόσφερε, κατά την έρευνα και τη συγγραφή της εργασίας, όπως και την προτροπή του, για περαιτέρω εμβάθυνση στον κλάδο της Βιοϊατρικής, στα πλαίσια αυτής.

Ακόμη, οφείλω ευχαριστίες, στους γονείς μου, για την επιμέλεια του κειμένου της εργασίας, από τη μητέρα μου, και για τη βοήθεια στον έλεγχο της λειτουργίας του λογισμικού της διάταξης, από τον πατέρα μου, καθώς και για την υποστήριξη αυτών, όπως και της υπόλοιπης οικογένειάς μου, με κάθε δυνατό τρόπο, σε όλο το διάστημα, όχι μόνο της ενασχόλησης μου με την εργασία, αλλά και συνολικά των σπουδών μου.

Τέλος, μη εξαιρετέοι, από την ομάδα των ανθρώπων που θέλω να ευχαριστήσω, είναι οι στενοί μου φίλοι, οι οποίοι, επίσης, με υποστήριζαν και με ενθάρρυναν κάθε φορά που αυτό ήταν απαραίτητο. Επιπροσθέτως, ευχαριστώ τη φίλη μου Τσαπουτζόγλου Σάρρα Ιωάννα, για την παροχή βιβλιογραφίας, ιδιαίτερας χρησιμής, για τη συγγραφή του θεωρητικού μέρους της εργασίας.

.

Πνευματικά Δικαιώματα

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία και τα συμπεράσματά της, σε οποιαδήποτε μορφή, αποτελούν συνιδιοκτησία του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος και του φοιτητή. Οι προαναφερόμενοι διατηρούν το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης και αναπαραγωγής (τμηματικά ή συνολικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να αναφέρεται ο τίτλος, ο συγγραφέας, ο επιβλέπων και το τμήμα του ΔιΠαΕ. Η έγκριση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η συγγραφέας δηλώνει υπεύθυνα ότι η παρούσα Πτυχιακή Εργασία είναι εξ' ολοκλήρου δικό της έργο και συγγράφηκε ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης. Επίσης, δηλώνει υπεύθυνα ότι κατά τη συγγραφή ακολούθησε την πρέπουσα ακαδημαϊκή δεοντολογία αποφυγής λογοκλοπής και έχει αποφύγει οποιαδήποτε ενέργεια που συνιστά παράπτωμα λογοκλοπής.

Καπεταν Γιώργη Ελένη, 21/06/2025

Πίνακας περιεχομένων

- 1 Εισαγωγή**
 - 1.1 Επιστημονική περιοχή της διπλωματικής
 - 1.2 Σκοπός και συνεισφορά της διπλωματικής
 - 1.3 Μεθοδολογία
 - 1.4 Δομή της διπλωματικής
- 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο**
 - 2.1 Σύσταση Αίματος
 - 2.1.1 Αίμα – Λειτουργίες και Συστατικά
 - 2.1.2 Ερυθρά Αιμοσφαίρια
 - 2.1.3 Λευκά Αιμοσφαίρια
 - 2.1.4 Αιμοπετάλια
 - 2.2 Εργαστηριακές Αναλύσεις Αίματος
 - 2.3 Σκέδαση Φωτός
- 3 Περιγραφή υλικού και λογισμικού αισθητήρα**
 - 3.1 Υλικό του Αισθητήρα
 - 3.1.1 Πλατφόρμα Μικροελεγκτή του Αισθητήρα
 - 3.1.2 Κάμερα του Αισθητήρα
 - 3.1.3 Συνδεσμολογία Διάταξης
 - 3.2 Λογισμικό του Αισθητήρα & Συνοδευτικό Λογισμικό
 - 3.2.1 Απαιτούμενο Λογισμικό του Η/Υ
 - 3.2.2 Πηγαίος Κώδικας του Μικροελεγκτή
 - 3.2.3 Κώδικας για Λήψη και Αποθήκευση Δεδομένων
 - 3.2.4 Κώδικας για Ανάλυση Ληφθέντων Δεδομένων
 - 3.2.5 Βήματα Εκτέλεσης των Προγραμμάτων
- 4 Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα**
 - 4.1 Επιλογή των Δειγμάτων των Πειραμάτων
 - 4.2 Προετοιμασία Υλικού και Λογισμικού για τα Πειράματα – Λήψη Δεδομένων
 - 4.3 Διαδικασία Ανάλυσης των Δεδομένων
 - 4.4 Αποτελέσματα
- 5 Προτάσεις για Βελτίωση**
 - 5.1 Πιθανοί Τρόποι Βελτίωσης
 - 5.2 Προβλέψεις Μελλοντικών Εφαρμογών
- 6 Συμπεράσματα**
- 7 Βιβλιογραφία**

Επεξήγηση ακρωνύμων

AC	Alternating Current
px	Pixel
fps	Frames Per Second
SPI	Serial Peripheral Interface
I ² C ή I2C	Inter Integrated Circuits
PWM	Pulse Width Modulation
DC	Direct Current
USB	Universal Serial Bus
H/Y	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
M/F	Male to Female
M/M	Male to Male
VS Code	Visual Studio Code
BCR	Community Bureau of Reference

1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την διερεύνηση των δυνατοτήτων που υπάρχουν, για ανάπτυξη και βελτίωση των ήδη υπάρχοντων βιοϊατρικών αισθητήρων, των οποίων κύριο αντικείμενο είναι η ανάλυση αίματος, μέσω οπτικών, μη επεμβατικών, μετρήσεων.

1.1 Επιστημονική περιοχή της διπλωματικής

Η κύρια ιδέα για την ανάπτυξη ενός μη παρεμβατικού οπτικού αισθητήρα για μετρήσεις σχετικές με την κατάσταση του αίματος ενός ασθενή πηγάζει από την ανάγκη για αντικατάσταση των κλασικών μεθόδων ανάλυσης, καθώς αυτές δεν συμβαδίζουν απόλυτα με τη γενική εξέλιξη της τεχνολογίας και τις επακόλουθες ευκολίες.

Για την εξέταση του αίματος, αυτή τη στιγμή, απαιτείται η αιμοληψία με χρήση βελόνας, κατά τη διάρκεια της οποίας είναι αναπόφευκτο κάποιες φορές να γίνουν ανθρώπινα λάθη, ικανά να καταστήσουν το, ήδη ευαίσθητο, δείγμα μη κατάλληλο για ανάλυση. [1] Ακόμη και αν δεν ληφθεί αυτό το πρόβλημα υπ' όψιν, θεωρώντας πως στις περισσότερες λήψεις η διαδικασία κυλά ομαλά και το δείγμα μπορεί να εξεταστεί, τα αποτελέσματα της ανάλυσης απαιτούν την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος, το οποίο σε κάποιες περιπτώσεις είναι ζωτικής σημασίας για την υγεία του ασθενούς. Εκτός της ύπαρξης τεχνικών περιορισμών, μειονέκτημα που δεν μπορεί να αγνοηθεί είναι και η δυσφορία που προκαλεί η τεχνική αυτή σε πολλούς ασθενείς, ειδικά αν πρόκειται για παιδικής ή προχωρημένης ηλικίας ατόμων, όπως και ομάδων σωματικά εξασθενημένων π.χ. ληπτών χημειοθεραπείας.

Επομένως, στόχος της έρευνας για τη δημιουργία μίας συσκευής για παρεμβατικής ανάλυσης του αίματος είναι τόσο η μεγαλύτερη αξιοπιστία της μέτρησης και η όσο το δυνατόν πιο άμεση πληροφόρηση της κλινικής κατάστασης του ασθενούς, μέσω των αναλύσεων του αίματος, όσο και η μείωση στο ελάχιστο της ταλαιπωρίας του.

1.2 Σκοπός και συνεισφορά της διπλωματικής

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η συμβολή στην προσπάθεια ανάπτυξης μίας συσκευής – αισθητήρα, για την παρακολούθηση των αιματολογικών δεικτών των ασθενών, χωρίς την ανάγκη λήψης φυσικού δείγματος αίματος από αυτούς. Αυτό δύναται να επιτευχθεί μέσω της λήψης φωτογραφιών ή βίντεο, για την ανάλυση της σκέδασης τύπου Mie του εκπεμπόμενου από τον αισθητήρα φωτός, που προσπίπτει στο σώμα του ασθενή και φτάνει στις φλέβες του, διαπερνώντας τα στρώματα δέρματος κατά την είσοδο και έξοδο του από το σώμα. Η εργασία συντελεί σε αυτό το έργο με την δημιουργία μιας διάταξης, σκοπός της οποίας είναι η λήψη φωτογραφιών - καρέ, όπου αποτυπώνεται η σκέδαση του φωτός μέσα από δοχεία με δείγματα. Αφού ολοκληρωθεί η αποθήκευση τους, ακολουθεί η ανάλυση των δεδομένων που προκύπτουν, για την εύρεση συσχέτισης μεταξύ της σκέδασης της ακτίνας φωτός και της διαμέτρου των συστατικών του δείγματος. Η επιτυχής κατασκευή μίας τέτοιας συσκευής θα αποτελέσει ένα σημαντικό επιστημονικό επίτευγμα, καθώς, μέχρι

στιγμής, τέτοιου είδους συσχετίσεις δεν καλύπτονται από τα υπάρχοντα συστήματα και η ανάγκη που αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.1 όχι μόνο είναι διαρκώς επίκαιρη, αλλά απόκτα με το πέρασμα του χρόνου όλο και μεγαλύτερο βάρος.

1.3 Μεθοδολογία

Κατά την εκπόνηση της εργασίας αναπτύχθηκε σύστημα, το οποίο αποτελείται κατά βάση από έναν μικροελεγκτή και μία κάμερα. Σε σύνδεση και συνεργασία με κάποιον ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y), η διάταξη αυτή είναι ικανή να κάνει λήψη των φωτογραφιών ενός δείγματος αίματος, το οποίο περιέχεται σε διαφανές δοχείο, φωτιζόμενο από ακτίνα laser. Έπειτα, γίνεται η αποθήκευση των ληφθέντων δεδομένων σε αρχεία είτε εικόνας ή κειμένου, η μετατροπή τους σε μορφή δεκαεξαδικού συστήματος και η επεξεργασία τους, μέσω εκτέλεσης κώδικα που δημιουργήθηκε ως μέρος της εργασίας. Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, συνάγονται συμπεράσματα για τη σύσταση του εξεταζόμενου δείγματος.

Έτσι η προσπάθεια αυτή, όντας μια έρευνα για την εξέλιξη των βιοϊατρικών αισθητήρων, συνδυάζει στοιχεία τριών επιστημονικών πεδίων, αυτών της βιοϊατρικής, της ηλεκτρονικής και του προγραμματισμού. Από τη βιοϊατρική επιστήμη αντλούνται πληροφορίες χρήσιμες για τη κατανόηση του περιεχομένου των δειγμάτων των πειραμάτων, αλλά και για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το πεδίο της ηλεκτρονικής λειτουργεί ως βάση για την συναρμολόγηση της διάταξης του αισθητήρα, όπως και για την ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του, με σκοπό την καλύτερη διαχείριση του υλικού αυτού ως διαθέσιμου πόρου. Ο προγραμματισμός συνεισφέρει ως συνδετικός κρίκος μεταξύ του τεχνικού μέρους της διαδικασίας, δηλαδή της λειτουργίας της ηλεκτρονικής διάταξης του αισθητήρα και του μέρους της διαχείρισης, αποθήκευσης, επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Τα πεδία αυτά, λοιπόν, συνθέτουν τον πυρήνα των απαραίτητων γνώσεων για την εκτέλεση του συγκεκριμένου εγχειρήματος.

1.4 Δομή της διπλωματικής

Στο τρέχον κεφάλαιο έγινε μία εισαγωγή στον λόγο ύπαρξης μη παρεμβατικών οπτικών αισθητήρων, για την εξέταση του ανθρώπινου αίματος και στη συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας στον τελικό στόχο. Κατόπιν, έγινε μία σύντομη περιγραφή της διάταξης και της λειτουργίας του αισθητήρα, όπως και των πεδίων γνώσεων που χρειάστηκε να μελετηθούν για τη δημιουργία του. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής ανάλυση των θεωρητικών γνώσεων, που είναι χρήσιμο να κατέχει ο αναγνώστης, ώστε να είναι σε θέση να κατανοήσει την ερμηνεία των ευρημάτων που προκύπτουν από τα πειράματα και των προτάσεων προς βελτίωση του αισθητήρα. Το τρίτο κεφάλαιο αποτελείται από τη λεπτομερή περιγραφή του υλικού και του λογισμικού, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ή δημιουργήθηκαν καθ' όλη τη διαδικασία της εκπόνησης της διπλωματικής. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην προετοιμασία, τη διεκπεραίωση των πειραματικών μετρήσεων και την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων για τη σχέση σκέδασης φωτός – σύστασης αίματος. Το πέμπτο κεφάλαιο περιέχει κάποιες προτάσεις βελτίωσης της απόδοσης της υπάρχουσας διάταξης, αλλά και μερικές ιδέες για τη μελλοντική προσέγγιση της επίτευξης του

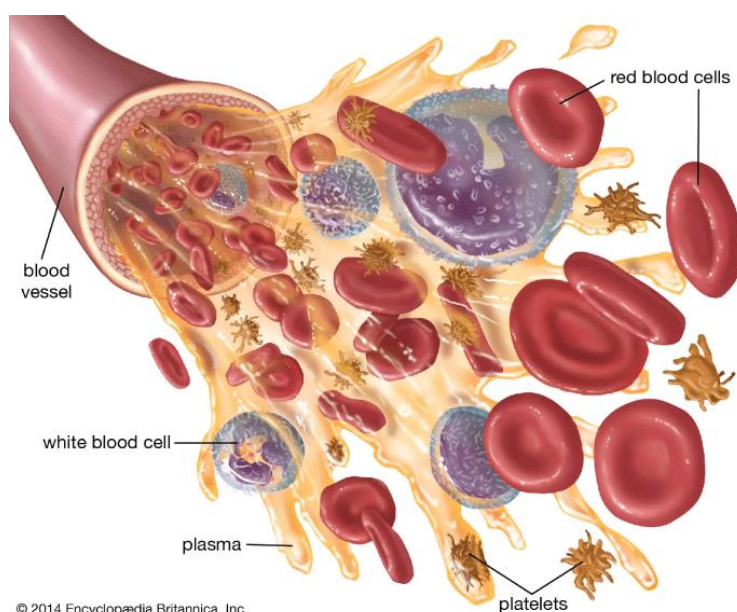
τελικού στόχου. Το έκτο κεφάλαιο ανακεφαλαιώνει τα συμπεράσματα, που προέκυψαν κατά την έρευνα αυτή. Τέλος, το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη λίστα πηγών των βιβλιογραφικών αναφορών, που έγιναν εντός της εργασίας.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή όσων θεωρητικών γνώσεων των πεδίων της βιοϊατρικής και της οπτικής είναι είτε απαραίτητες, για την κατανόηση των αποτελεσμάτων, τα οποία προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις, που διεξάχθηκαν και αναλύονται στο κεφάλαιο 6 της εργασίας, ή σχετικές με τα χαρακτηριστικά, για τα οποία είναι επιθυμητό να δίνει πληροφορίες ο αισθητήρας σε μελλοντικές του εκδοχές.

2.1 Σύσταση Αίματος

2.1.1 Αίμα – Λειτουργίες και Συστατικά



Σχήμα 2.1 – Ψηφιακή αναπαράσταση των συστατικών του αίματος – πλάσμα και έμμορφα στοιχεία μέσα σε αιμοφόρο αγγείο (Πηγή: Encyclopedia Britannica [2])

Το αίμα ανήκει στη κατηγορία των συνδετικών ιστών του ανθρώπου. Χάρη στη ρευστότητα του είναι ικανό να κυκλοφορεί, μέσω του αγγειακού συστήματος, σε όλους τους υπόλοιπους ιστούς και τα όργανα του σώματος. Επιτυγχάνει με τη κίνηση του να:

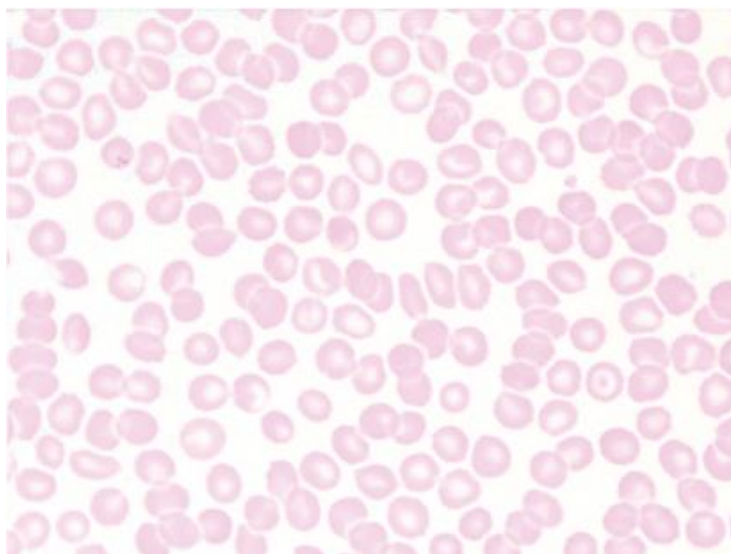
- ανταλλάσσει, μεταξύ των πνευμόνων και των λοιπών οργάνων, αέρια, εκπληρώνοντας έτσι τις ειδικές ανάγκες του κάθε σημείου για οξυγόνο, αλλά και συμμετέχοντας στην αποσυμφόρηση τους από το διοξείδιο του άνθρακα και τα απόβλητα που προκύπτουν από τις διάφορες διεργασίες του οργανισμού,
- μεταφέρει και προσφέρει θρεπτικά συστατικά (γλυκόζη, πρωτεΐνες, βιταμίνες κ.α.) που περιλαμβάνει στο εσωτερικό του,
- προφυλάσσει το σώμα από την είσοδο και διαμονή σε αυτό βλαβερών ουσιών, βακτηρίων, σωματιδίων κ.α. βοηθώντας στην εξάλειψή τους,
- εξισορροπεί το pH και τη θερμοκρασία του οργανισμού,
- επισκευάζει τυχόν ασυνέχειες στα τοιχώματα των αιμοφόρων αγγείων, διακόπτοντας την αιμορραγία

[3], [4], [5]. Από χημικής άποψης, θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί ως διάλυμα, αφού συντίθεται από συστατικά, που χωρίζονται σε δύο μέρη: το πλάσμα, στον ρόλο του διαλύτη, και τα έμμορφα στοιχεία, σε αυτόν της διαλυμένης ουσίας, όπως αυτά εμφανίζονται στην αναπαράσταση του εσωτερικού ενός αιμοφόρου αγγείου στο σχήμα 2.1. [3], [4]

Το πλάσμα είναι και το ίδιο ένα υγρό διάλυμα που περιέχει κυρίως νερό (92%) και πρωτεΐνες (7%), ενώ στον εναπομείναντα όγκο περιέχονται θρεπτικές ουσίες. Λόγω της κίτρινης ημιδιαφανούς όψης του, δίνει στο αίμα μια θερμή απόχρωση, αφού καταλαμβάνει την πλειονότητα του όγκου του (55%). Τα έμμορφα συστατικά του αίματος, δεν είναι κάτι άλλο παρά κύτταρα, κατανεμημένα σε τρεις κατηγορίες, με κριτήριο τα εξωτερικά τους χαρακτηριστικά και τη λειτουργία τους: τα ερυθρά αιμοσφαίρια (ερυθροκύτταρα ή red blood cells – RBC), τα λευκά αιμοσφαίρια (λευκοκύτταρα ή white blood cells – WBC) και τα αιμοπετάλια (θρομβοκύτταρα ή platelets – PLT). Ο αριθμός των στοιχείων αυτών πρέπει να κυμαίνεται εντός ενός σταθερού εύρους σε όλα τα στάδια της ζωής του ανθρώπου, όμως και τα τρία είδη έχουν μικρό χρόνο ζωής της τάξεως των μερικών ημερών. Παρ' αυτά, η ποσότητα τους σε έναν υγιή οργανισμό καταφέρνει να διατηρείται σε φυσιολογικά επίπεδα, με την καθημερινή παραγωγή νέων τέτοιων κυττάρων, που αντικαθιστούν εκείνα τα οποία έχουν φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής τους. [1], [3]

2.1.2 Ερυθρά Αιμοσφαίρια

Τα ερυθρά αιμοσφαίρια υπερτερούν σε αριθμό έναντι των άλλων δύο με 4.500.000 – 6.500.000/mm³ στα περίπου 5 – 6 λίτρα αίματος στο σώμα ενός υγιούς ενήλικα άνδρα και 4.000.000 – 5.500.000/mm³ στα 4,5 – 5,5 λίτρα αντίστοιχα στο σώμα μίας γυναίκας.[1], [4] Δεν διαθέτουν πυρήνα, ωστόσο στο εσωτερικό τους μεταφέρουν την αιμοσφαιρίνη, μία χρωμοπρωτεΐνη δομημένη από μία πρωτεΐνη (σφαιρίνη) και τη χρωστική (αίμη) που προσδίδει σε αυτά και κατ' επέκταση στο αίμα, το βαθύ κόκκινο χρώμα.[3], [4] Χάρη στην αιμοσφαιρίνη τα ερυθροκύτταρα είναι ικανά να εκτελέσουν την ανταλλαγή αερίων και θρεπτικών συστατικών μεταξύ ιστών και πνευμόνων, καθώς και να βοηθήσουν στη διατήρηση φυσιολογικού pH, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και κατά συνέπεια η μειωμένη τιμή είτε αυτής είτε γενικώς των ερυθροκυττάρων προκαλεί τις γνωστές αναιμίες.



Σχήμα 2.2 – Ερυθρά αιμοσφαίρια σε εξέταση με μικροσκόπιο (Πηγή: Wikimedia Commons, Δημιουργός: Echinaceapallida, CC BY-SA 4.0 [6])

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, τα κύτταρα αυτά έχουν μορφή αμφίκυκλου δίσκου, διάμετρο ίση με περίπου 7 – 8 μm και κυμαινόμενο πάχος από 1 μm μέχρι 2 μm , ανάλογα με το εκάστοτε σημείο του κυττάρου που εξετάζεται. [1], [3] Παράδειγμα της όψης των ερυθροκυττάρων, κατά την ανάλυση από μικροσκόπιο, φαίνονται στο σχήμα 2.2. Χαρακτηρίζονται ορθοκυτταρικά, εφόσον το μέγεθος τους ανήκει στα παραπάνω εύρη και ορθόχρωμα, εάν είναι σωστή η αναλογία μεταξύ της περιφερειακής έντονα χρωματισμένης περιοχής και της ημιδιαφανούς κεντρικής. [3] Σε περίπτωση που η διάμετρος των ερυθρών αιμοσφαιρίων ξεπερνά τα 9 μm ή είναι μικρότερη των 6 μm , χρησιμοποιούνται για αυτά οι όροι μακροκύτταρα και μικροκύτταρα, αντίστοιχα. Μερικές ακόμη, σημαντικές, μη φυσιολογικές καταστάσεις των ερυθροκυττάρων είναι οι/τα:

- Ανισοκυττάρωση – μεγάλο εύρος διαφορετικών μεγεθών κυττάρων
- Υποχρωμία – μείωση της πυκνότητας του χρώματος σε μερικά ή σε όλα τα ερυθρά αιμοσφαίρια του οργανισμού
- Ποικιλοκυττάρωση – μεγάλες διαφοροποιήσεις στο σχήμα των κυττάρων
- Σφαιροκυττάρωση – ερυθροκύτταρα των οποίων η μορφή πλησιάζει σε σφαιρική
- Δακρυοκύτταρα – κύτταρα με σχήμα δακρύου/σταγόνας
- Ακανθοκύτταρα – κύτταρα μικρά εξογκώματα σε μορφή αγκαθιού
- Σχιστοκύτταρα – αλλοιωμένα κύτταρα ή κατεστραμμένα μέρη αυτών
- Στοχοκύτταρα – ερυθροκύτταρα στα οποία η υψηλή ένταση χρώματος της περιφέρειας παρατηρείται και στο μέσο
- Δρεπανοκύτταρα – κύτταρα με μορφή δρεπανιού

Πέρα από τον ποιοτικό έλεγχο των ερυθρών αιμοσφαιρίων, λόγω της μεγάλης τους επιρροής στη γενική υγεία του ανθρώπινου σώματος, είναι επιτακτικός και ο ποσοτικός έλεγχος αυτών. Έτσι, έχει καθιερωθεί η χρήση ενός δείκτη της αναλογίας ανάμεσα στον όγκο των ερυθροκυττάρων και του συνολικού αίματος (ή των 100 ml αίματος για ευκολία στη μέτρηση), σε ποσοστό επί τοις εκατό, κοινώς γνωστός ως αιματοκρίτης, με εύρος κανονικών τιμών 40 – 50% για τους άνδρες και 37 – 47% για τις γυναίκες. Κάποιες από τις ενδείξεις που δίνει αυτός αφορούν το ποσοστό ενυδάτωσης του οργανισμού, την αποτελεσματικότητα της διανομής του οξυγόνου, την πιθανότητα έλλειψης επαρκούς όγκου αίματος, ύπαρξης αναιμίας και παθήσεων της καρδιάς και των νεφρών. [1]

2.1.3 Λευκά Αιμοσφαίρια

Άξια της ίδιας προσοχής με τα ερυθρά, είναι και τα λευκά αιμοσφαίρια. Ανεξαρτήτως φύλου, ένας ενήλικος άνθρωπος έχει φυσιολογικά στο αίμα του από 4.500/ mm^3 έως 11.000/ mm^3 από αυτά. [3] Τα λευκοκύτταρα, γενικά, συμβάλουν στη προστασία του οργανισμού από «εισβολείς», είτε μέσω της φαγοκυττάρωσης, δηλαδή της παγίδευσης και καταστροφής των επικίνδυνων μικροβίων, σωματιδίων κλπ. στο εσωτερικό τους, ή μέσω της ανάπτυξης αντισωμάτων και ειδικών λεμφοκυττάρων, των οποίων η δράση φέρνει το ίδιο αποτέλεσμα με τη φαγοκυττάρωση. [1], [7]

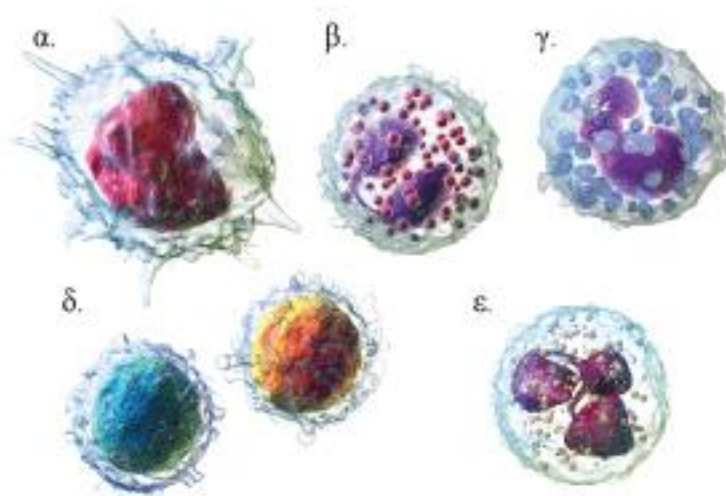
Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα είδη έμμορφων συστατικών και παρόλο που έχουν όλα μεταξύ τους μερικά κοινά χαρακτηριστικά, δεν είναι ίδια στη μορφή και τη λειτουργία. Η δημιουργία όλων τους, ξεκινά στον μυελό των οστών από έναν μοναδικό τύπο κυττάρου, τη βλάστη. Στα επόμενα βήματα της ανάπτυξής τους, όμως, αρχίζουν να εμφανίζουν διαφορές. Μπορούν, στη συνέχεια, να χωριστούν σε πέντε βασικές

κατηγορίες, οι οποίες παρουσιάζονται μαζί με το τυπικό μέγεθος των κυττάρων της κάθε μίας στον πίνακα 2.3, ενώ οι μορφές τους φαίνονται συγκεντρωμένες στο σχήμα 2.4.

Κατηγορία	Τυπικό μέγεθος (σε μm)
Ουδετερόφιλα (Neutrophil)	10 - 15
Εωσινόφιλα ή Ηωσινόφιλα (Eosinophil)	10 - 15
Βασεόφιλα (Basophil)	10 - 15
Μονοπύρρηνα (Monocyte)	12 - 20
Λεμφοκύτταρα (Lymphocyte)	7 - 18

Σχήμα 2.3 – Ψηφιακή αναπαράσταση των συστατικών του αίματος – πλάσμα και έμμορφα στοιχεία μέσα σε αιμοφόρο αγγείο

Οι τρεις πρώτες ανήκουν στη γενική οικογένεια των κοκκιοκυττάρων. [1], [3] Είναι γνωστά με τον όρο αυτό, επειδή φέρουν κοκκία στο εσωτερικό τους, των οποίων το χρώμα που προκύπτει μετά από εξέταση, καθορίζει σε ποια ειδική κατηγορία ανήκουν. Τα ουδετερόφιλα είναι αυτά που εκτελούν τη φαγοκυττάρωση για την εξόντωση των μικροοργανισμών, τα εωσινόφιλα είναι υπεύθυνα για την αντιμετώπιση παρασίτων και τα βασεόφιλα είναι μέρος της αντίδρασης του οργανισμού, που είναι γνωστή ως φλεγμονή. Η τυπική συγκέντρωσή τους στο αίμα ενός ενήλικα, είναι $2.500 - 7.500/\text{mm}^3$ για τα πρώτα, $40 - 500/\text{mm}^3$ για τα δεύτερα και $20 - 100/\text{mm}^3$ για τα τελευταία.



Σχήμα 2.4 – Μορφές λευκών αιμοσφαιρίων α. Μονοπύρρηνα, β. Εωσινόφιλα, γ. Βασεόφιλα, δ. Λεμφοκύτταρα, ε. Ουδετερόφιλα (Πηγή: Wikimedia Commons, Δημιουργός: Blausen.com Staff, CC BY 3.0 [8])

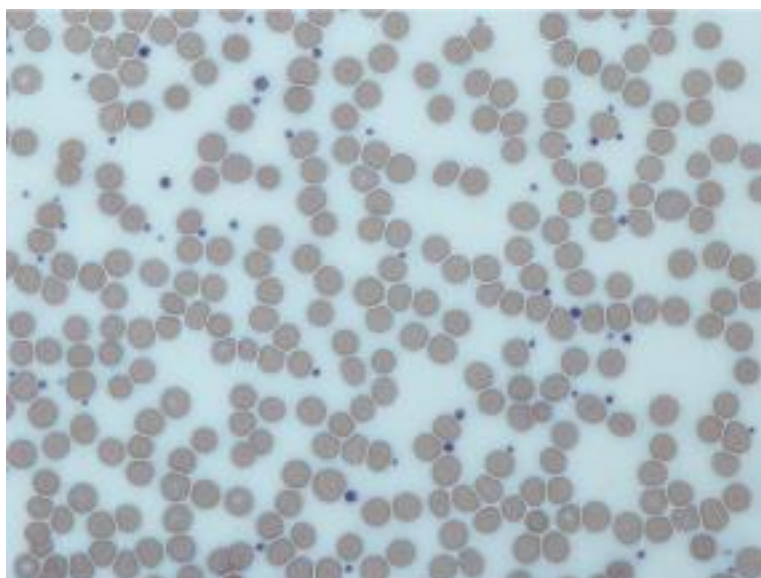
Τα μονοπύρρηνα, χαρακτηρίζονται από το σημαντικά μεγαλύτερο μέγεθος τους σε σύγκριση με αυτό των άλλων λευκοκυττάρων, τον πυρήνα σε σχήμα πετάλου και την κυριαρχία του γκρι προς μπλε χρώματος σε συνδυασμό με την παρατήρηση αχνού περιβλήματος. [3] Όπως και τα ουδετερόφιλα, η αποστολή τους είναι η εξαφάνιση των ξένων ουσιών, οργανισμών, σωματιδίων, αλλά και των κυττάρων που έχουν αλλοιωθεί ή έχουν φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής τους. [9] Η ποσότητα τους στο αίμα φτάνει στα $200 - 800$ ανά mm^3 .

Τέλος, τα λεμφοκύτταρα κατανέμονται και αυτά σε τρεις κατηγορίες: τα Τ-λεμφοκύτταρα, τα Β-λεμφοκύτταρα και τα NK (Natural Killers), με τα τελευταία να είναι μικρότερα σε αριθμό από τα δύο προηγούμενα. Εκτός από αυτή την

κατηγοριοποίηση γίνεται και μία ακόμη με κριτήρια το μέγεθος του κυττάρου, την εμφάνιση ή απουσία κοκκίων και άλλων βιολογικών χαρακτηριστικών. Από αυτή προκύπτουν οι ομάδες των μικρών, μεγάλων και μεγάλων με κοκκία λεμφοκυττάρων. Τα μικρά είναι τα πολυπληθέστερα και στη πλειοψηφία τους είναι Τ-λεμφοκύτταρα. Ακολουθούν σε αριθμό τα μεγάλα, εκ των οποίων μερικά είναι Β-λεμφοκύτταρα και άλλα είναι τύπου ΝΚ. Τελευταία είναι τα μεγάλα με κοκκία, που στο μεγαλύτερο τους ποσοστό είναι ΝΚ. Συνολικά, τα λεμφοκύτταρα ενός υγιούς οργανισμού είναι μεταξύ $1.500/\text{mm}^3$ και $3.500/\text{mm}^3$. Ανεξάρτητα με τις προαναφερθείσες κατανομές, όλα τα λεμφοκύτταρα έχουν τον ίδιο στόχο με τα υπόλοιπα λευκά αιμοσφαίρια, δηλαδή την ενίσχυση και την προστασία του ανθρώπινου σώματος από επιβλαβείς εξωτερικούς παράγοντες.

Σημαντικό εργαλείο για τη διάγνωση παθήσεων σχετιζόμενων με τα λευκοκύτταρα είναι ο λευκοκυτταρικός τύπος, που αφορά τη μέτρησης της ποσότητας κάθε μίας από τις κατηγορίες των λευκών αιμοσφαιρίων μέσα στο αίμα. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του λευκοκυτταρικού τύπου συγκρίνεται η ποσότητα κάθε ειδικής κατηγορίας έναντι του γενικότερου αριθμού των λευκοκυττάρων που κυκλοφορούν στο σώμα και τα αποτελέσματα δίνονται σε ποσοστό επί τοις εκατό. Οι περιπτώσεις μη φυσιολογικών καταστάσεων που μπορούν να εντοπιστούν εξαιτίας της εξέτασης του λευκοκυτταρικού τύπου είναι οι λευκοκυτταρώσεις – σχετικές με την ύπαρξη αυξημένης ποσότητας κυττάρων – και οι λευκοπενίες, όταν υπάρχει μειωμένος αριθμός κυττάρων. Στις λευκοκυτταρώσεις συμπεριλαμβάνονται οι: ουδετεροφιλία, ηωσινοφιλία, βασεοφιλία, μονοκυττάρωση και η λεμφοκυττάρωση. Στις μορφές λευκοπενίας ανήκουν η ουδετεροπενία και η λεμφοπενία. [3]

2.1.4 Αιμοπετάλια



Σχήμα 2.5 – Αιμοπετάλια από δείγμα αίματος σε φιλμ, μετά από χρώση, παρατηρούμενα από μικροσκόπιο (Πηγή: Wikimedia Commons, Δημιουργός: Dr Beards Graham, CC BY-SA 4.0 [10])

Το τελευταίο είδος κυττάρων, από εκείνα που ανήκουν στα έμμορφα συστατικά του αίματος, είναι τα αιμοπετάλια. Σε κανονικές συνθήκες ένας υγιής οργανισμός περιέχει $140.000 - 400.000$ από αυτά ανά mm^3 . [3] Κυρίαρχος ρόλος τους είναι η προστασία του σώματος από αιμορραγία, κάτι που πετυχαίνουν συμμετέχοντας στην πήξη του αίματος και στη δημιουργία θρόμβων, αναπτύσσοντας, έτσι, φυσικό εμπόδιο στην

απώλεια του αίματος. [1], [3] Εκτός αυτού, συμβάλουν και σε άλλες διεργασίες, όπως τη δημιουργία της φλεγμονής, την επιδιόρθωση των αιμοφόρων αγγείων, όπου και όταν χρειαστεί κ.α. [3]

Τα αιμοπετάλια είναι απύρρηνα, όπως και τα ερυθροκύτταρα, και έχουν σχήμα ελλειψοειδούς δίσκου, με διάμετρο από περίπου 2,9 έως 3,7 μm . Παρατηρούνται, μέσω μικροσκοπίου, μετά από επεξεργασία (χρώση), ως τα μικρότερα από τα κύτταρα ενός δείγματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Ακόμη ένα κοινό τους χαρακτηριστικό με τα ερυθρά αιμοσφαίρια είναι η πιθανότητα παρουσίασης ανισοκυττάρωσης ή μακροκυττάρωσης. Κατά την εμφάνιση της δεύτερης, όταν η διάμετρος τους ξεπερνά τα 4 μm ορίζονται ως μακροθρομβοκύτταρα και, αν φτάσουν σε μέγεθος συγκρίσιμο με αυτό των ερυθρών ή των λευκών αιμοσφαιρίων, χαρακτηρίζονται ως γιγάντια. Η ύπαρξη τέτοιων μπορεί να οφείλεται στη δημιουργία πλεονάζοντος αριθμού αυτών, στη διαδικασία της πήξης ή σε κάποια πάθηση. [1], [3] Επακόλουθο κάποιας διαταραχής μπορεί να είναι και η παραγωγή μικρότερων του κανονικού μεγέθους θρομβοκυττάρων. Τέτοιες ανωμαλίες είναι μέρος των παθήσεων που είναι γνωστές ως θρομβοπάθειες. Πέρα από μη φυσιολογικές καταστάσεις σχετικές με τη μορφή τους, μπορεί φυσικά να παρουσιαστεί και έλλειψη ή περίσσεια τους, που συναντώνται με τις ονομασίες θρομβοπενία και θρομβοκυττάρωση αντιστοίχως. [3]

2.2 Εργαστηριακές Αναλύσεις Αίματος



Σχήμα 2.6 – Αυτόματος Αιματολογικός Αναλυτής (μοντέλο Sysmex XT-4000i) σε περιβάλλον ιατρικού εργαστηρίου (Πηγή: Wikimedia Commons, Δημιουργός: Ptrump16, CC BY-SA 4.0 [11])

Οι γενικές αναλύσεις αίματος στα ιατρικά εργαστήρια γίνονται στην πλειονότητα τους με τη βοήθεια του αυτόματου αιματολογικού αναλυτή, ένα μηχάνημα που συνδυάζει την μέτρηση όλων όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως στο παρόν κεφάλαιο και ακόμη περισσότερων, με μεγάλη ταχύτητα, ευκολία και ακρίβεια. Ένα τυπικό τέτοιο μηχάνημα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6. Παρ'όλο που κυκλοφορούν διαφόρων ειδών αναλυτές, σε όλους οι μετρήσεις βασίζονται στην κυτταρομετρία ροής. Πιο λεπτομερώς, ο όρος αυτός αναφέρεται στην εξέταση του κάθε κυττάρου, εντός ενός δείγματος αίματος, ξεχωριστά από τα υπόλοιπα. Αυτό επιτυγχάνεται με την υψηλής

ταχύτητας ροή του υγρού από μία οπή στο εσωτερικό του αναλυτή, όπου, αφού φθάσει το εκάστοτε κύτταρο στην κατάλληλη θέση, εξετάζεται ως προς την αλληλεπίδραση του με ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ή μία ακτινοβολία. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ο διαχωρισμός των τεχνικών εξέτασης του κυττάρου σε ηλεκτρονικές:

- μεταβολή σύνθετης αντίστασης,
- μεταβολή αγωγιμότητας σε AC (εναλλασσόμενο ρεύμα – alternating current) υψηλής συχνότητας

και οπτικές, οι οποίες στηρίζονται στην εκπομπή ακτίνας laser, γεγονός που τις καθιστά περισσότερο σχετικές με το αντικείμενο της εργασίας:

- εντοπισμός της σκέδασης του εκπεμπόμενου φωτός μετά τη σύγκρουση με το κύτταρο,
- μέτρηση της δευτερογενούς ακτινοβολίας που προέρχεται από την πρόσκρουση της πρωτογενούς με κύτταρο το οποίο έχει υποστεί φθορισμό,
- ανάλυση της απορρόφησης της ακτινοβολίας.

[3] Η εκτέλεση της μέτρησης πραγματοποιείται με την είσοδο του δείγματος στον αναλυτή, από το οποίο χρησιμοποιούνται συνολικά 200 – 300 μικρόλιτρα. Η ποσότητα αυτή διαχωρίζεται σε μικρότερες, που οδηγούνται σε ξεχωριστά σημεία του αναλυτή, για την εξέταση, μετά από κατάλληλη επεξεργασία (λύση ή αραίωση): α. των λευκοκυττάρων και της αιμοσφαιρίνης, β. των ερυθροκυττάρων και των αιμοπεταλίων και σε μερικές περιπτώσεις γ. του λευκοκυτταρικού τύπου σε εξελιγμένα μοντέλα, που επιτρέπουν κάτι τέτοιο. [1] Μετά το πέρας της διαδικασίας, εξάγονται τα ευρήματα με τη μορφή αριθμητικών τιμών, λεκτικών μηνυμάτων, ιστογραμμάτων και νεφελογραμμάτων. Από αυτά προκύπτουν οι συγκεντρώσεις κάθε ενός από τα είδη των έμμορφων συστατικών και υπολογίζονται οι δείκτες που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους μαζί με πληθώρα άλλων. [1], [3]

2.3 Σκέδαση Φωτός

Το φυσικό φαινόμενο της σκέδασης του φωτός σχετίζεται με τη διασπορά του κατά τη σύγκρουση του με ένα ή περισσότερα σωματίδια. Δηλαδή, εάν μια ακτίνα φωτός, άρα ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα εκπέμπεται σε τέτοια κατεύθυνση, που να συναντά ένα μοναδικό ή μια ομάδα σωματιδίων, μέρος της ενέργειάς του καταναλώνεται κατά την επαφή και η εναπομένουσα ενέργεια διαχέεται προς διάφορες διευθύνσεις, αφού διαπεράσει το/τα σωματίδιο/α. [12], [13] Πιο συγκεκριμένα, κατά τη συνάντηση της ακτίνας φωτός με το σωματίδιο, το ηλεκτρικό πεδίο της πρώτης προκαλεί μετακίνηση των ιόντων του σωματιδίου, που καταλήγει στη διαλογή τους με βάση το πρόσημο του φορτίου τους. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και ως δημιουργία ηλεκτρικού δίπολου. Αυτές οι δύο ομάδες ιόντων, μετά την συνάντησή τους με το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αρχίζουν να ακολουθούν τη συχνότητα ταλάντωσης του. Εξαιτίας αυτού, λειτουργούν ως μέσο μεταφοράς της υπολειπόμενης ενέργειας του κύματος σε πολλαπλές διευθύνσεις. [12] Η συμπεριφορά αυτή ορίζεται ως σκέδαση.

Το αποτέλεσμα της εξαρτάται από χαρακτηριστικά των σωματιδίων αλλά και του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Για τα σωματίδια έχουν σημασία πληροφορίες όπως η γεωμετρία, οι διαστάσεις, η συγκέντρωσή τους, η ύπαρξη ενός ή περισσότερων ειδών σωματιδίων στο σώμα στο οποίο προσκρούεται η ακτίνα κ.α. Όσο για την ακτίνα φωτός κάποια χαρακτηριστικά που θα πρέπει να είναι γνωστά είναι το μήκος κύματος και η σχετική ένταση της. Η ένταση αυτή, είναι η διαφορά της έντασης του αρχικού κύματος

από αυτής του «παραμορφωμένου» από το φαινόμενο της σκέδασης. Επηρεάζεται έντονα από έναν συντελεστή που ονομάζεται «παράμετρος μεγέθους σκέδασης (scattering size parameter)» και συμβολίζεται συνήθως με x . Αυτός, δεν είναι κάτι άλλο, παρά ένας συσχετισμός της διαμέτρου του σωματιδίου – θεωρώντας ως ιδανική συνθήκη ότι αυτό έχει απόλυτα σφαιρική επιφάνεια – με το μήκος κύματος της ακτίνας και περιγράφεται από τον μαθηματικό τύπο:

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda},$$

όπου r η ακτίνα του σωματιδίου και λ το μήκος κύματος. [13] Ενδεικτικά, οι τιμές του μηκών κύματος για τα βασικά, ορατά για τον άνθρωπο, χρώματα εκπεμπόμενου φωτός, συγκαταλέγονται με αύξουσα σειρά στο σχήμα 2.7 [13], [14]:

Χρώμα στο ορατό φάσμα	Μήκος κύματος - λ (σε μm)
Ιώδες (Μωβ)	0.4 – 0.43
Μπλε	0.43 – 0.5
Πράσινο	0.5 – 0.56
Κίτρινο έως και πορτοκαλί	0.56 – 0.62 (για το κίτρινο θεωρούμε αντιπροσωπευτική τιμή τα 0.6)
Πορτοκαλί έως και κόκκινο	0.62 - 0.7 (αντιπροσωπευτική τιμή του κόκκινου = 0.7)

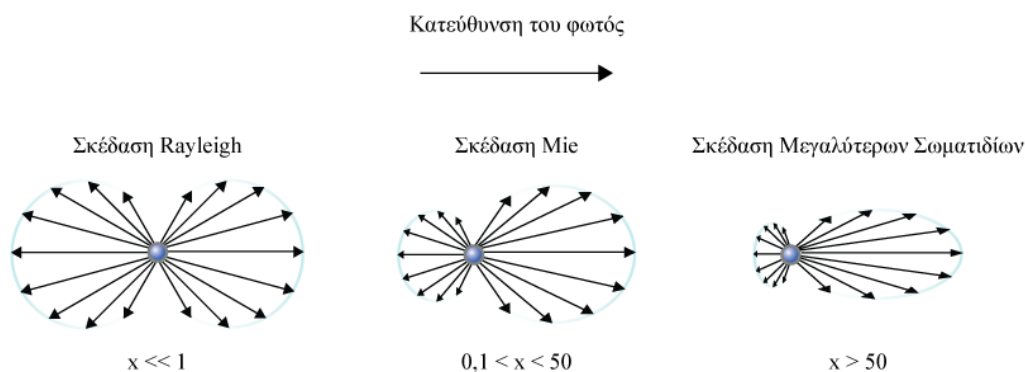
Σχήμα 2.7 – Λίστα αντιστοιχίσεων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκλαμβάνονται ως ορατά χρώματα με τιμές μήκους κύματος

Για τα πειράματα έχει χρησιμοποιηθεί ακτίνα laser κόκκινου χρώματος, χάριν ευκολίας στους υπολογισμούς και διαθεσιμότητας.

Η σκέδαση χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες: την ελαστική και την ανελαστική. Η διαφορά μεταξύ των δύο πηγάζει από τη μεταβλητότητα του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αν παραμένει σταθερό το ίδιο και επομένως η ενέργειά του, η σκέδαση είναι ελαστική, ενώ αν μεταβάλλονται κατά τη μετάδοση από την πηγή στο σημείο που συμβαίνει η σκέδαση, τότε αναφέρεται ως ανελαστική. Στη παρούσα εργασία, αναλύεται μόνο η ελαστική, καθώς θεωρούμε πως η ακτίνα laser παραμένει αναλλοίωτη, ως προς την ενέργεια και τη συχνότητα της, καθ' όλη τη διαδρομή της, από την πηγή, προς τα διαλύματα των δειγμάτων που εξετάζονται και μέχρι, τέλος, τον φακό της κάμερας. [13], [15]

Οι θεωρίες που κυριαρχούν στην ελαστική σκέδαση φωτός είναι δύο: η Rayleigh και η Mie, που έχουν πάρει τα ονόματά τους από τους αντίστοιχους επιστήμονες που τις σχημάτισαν. Η παλαιότερη, η Rayleigh, αφορά σκεδάσεις για τις οποίες η τιμή του x είναι πολύ μικρότερη του ενός ($<<1$). Σε αυτόν τον τύπο του φαινομένου, τα σωματίδια είναι σημαντικά μικρότερα σε μέγεθος από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός. Εξαιτίας αυτού, το φως διαμοιράζεται ισόποσα προς τη διεύθυνση που ακολουθεί η ακτίνα και προς την αντίθετη από αυτή. Η Mie είναι μία περισσότερο περίπλοκη ανάλυση που βασίζεται στη Rayleigh, εστιάζει όμως στη περιοχή τιμών της παραμέτρου μεγέθους σκέδασης, η οποία δεν υποστηρίζεται από τη Rayleigh και συμπεριλαμβάνει τις τιμές από 0,1 μέχρι 50. Κατά τη θεωρία του Mie, όταν η ακτίνα φωτός συγκρούεται με τα σωματίδια, το μεγαλύτερο μέρος του φωτός συνεχίζει να ταξιδεύει στη κατεύθυνση της ακτίνας και μόνο ένα μικρό κομμάτι του φωτός αυτού

ανακατευθύνεται προς την αντίθετη φορά. Για τιμές της παραμέτρου μεγαλύτερες του 50, η περίπτωση σκέδασης εξετάζεται με τη βοήθεια της γεωμετρικής οπτικής, καθώς μόνο μία αμελητέα ποσότητα του φωτός γυρίζει προς την αντίθετη διεύθυνση, ενώ όλη η υπόλοιπη ακολουθεί την αρχική ακτίνα. [13] Στο σχήμα 2.8 περιλαμβάνονται διαγράμματα που δείχνουν τη κατανομή της ενέργειας ή «ποσότητας» ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε περιπτώσεις που αντιστοιχούν στις τρεις διαφορετικές κατηγορίες σκέδασης όπως περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 2.8 – Κατευθύνσεις σκεδαζόμενου φωτός από σωματίδια διαφορετικών μεγεθών που εμπίπτουν στις θεωρίες Rayleigh, Mie και στη γεωμετρική οπτική (Πηγή: Wikimedia Commons, Δημιουργός: Sharayanan, CC BY-SA 3.0 [16])

Έχοντας υπ' όψιν, λοιπόν, τα όσα είναι γνωστά για τα συστατικά του αίματος και την ανάλυσή τους, αλλά και τη δυνατότητα που μας δίνεται, για να γίνουν οι απαραίτητες, μετρήσεις για τη συγκέντρωση ή την ταυτοποίηση αυτών, μέσω του φαινομένου της σκέδασης, το μόνο που απομένει είναι να παρουσιαστεί ο τρόπος και τα μέσα – όπως αυτά παρουσιάζονται στο κεφάλαιο που ακολουθεί - με τη βοήθεια των οποίων θα καταστούν οι μετρήσεις αυτές εφικτές.

3 Περιγραφή Υλικού και Λογισμικού Αισθητήρα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται πλήρης περιγραφή του χρησιμοποιούμενου υλικού της διάταξης - κάμερας, μικροελεγκτή, Η/Υ - καθώς και του λογισμικού, δηλαδή των απαιτούμενων προγραμμάτων, βιβλιοθηκών και κωδίκων, που εγκαταστάθηκαν, τροποποιήθηκαν ή αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας.

3.1 Υλικό του Αισθητήρα

3.1.1 Πλατφόρμα Μικροελεγκτή του Αισθητήρα



Σχήμα 3.1 – Μοντέλο πλακέτας μικροελεγκτή «Uno» της Arduino (Πηγή: Wikimedia Commons, Δημιουργός: SparkFun Electronics, CC BY 2.0 [17])

Κύριο εξάρτημα/στοιχείο της διάταξης του βιοϊατρικού αισθητήρα είναι ο μικροελεγκτής. Για αυτόν επιλέχθηκε ένα συμβατό μοντέλο με το Uno (σχήμα 3.1), σχεδιασμένο από την εταιρεία Arduino, διότι αυτή, ως πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα (open-source), δίνει την δυνατότητα σε οποιονδήποτε επιθυμεί να κατασκευάσει κάποιο μοντέλο. Κατά συνέπεια, υπάρχει μεγάλος αριθμός κλώνων - μοντέλων Arduino στο εμπόριο με ακόμη χαμηλότερο κόστος από τα επίσημα και μικρή έως καθόλου διαφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες. Πριν την τελική αγορά εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί σχεδιαστές/κατασκευαστές μικροελεγκτών - μικροεπεξεργαστών, με κύρια κριτήρια τις απαιτήσεις ισχύος και το κόστος, αφού ο τελικός στόχος είναι η δημιουργία ενός φορητού αισθητήρα και δευτερεύοντα τη διαθέσιμη υποστήριξη για τα μοντέλα τους στο διαδίκτυο και την ικανότητα τους να διαχειριστούν το επίπεδο πολυπλοκότητας της εφαρμογής της εργασίας. Αυτές, όπως και τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται συνοπτικά στον πίνακα (σχήμα 3.2):

Πλατφόρμα/ Σχεδιάστρια εταιρεία	Arduino	Raspberry Pi	Nordic nRF
--	---------	--------------	------------

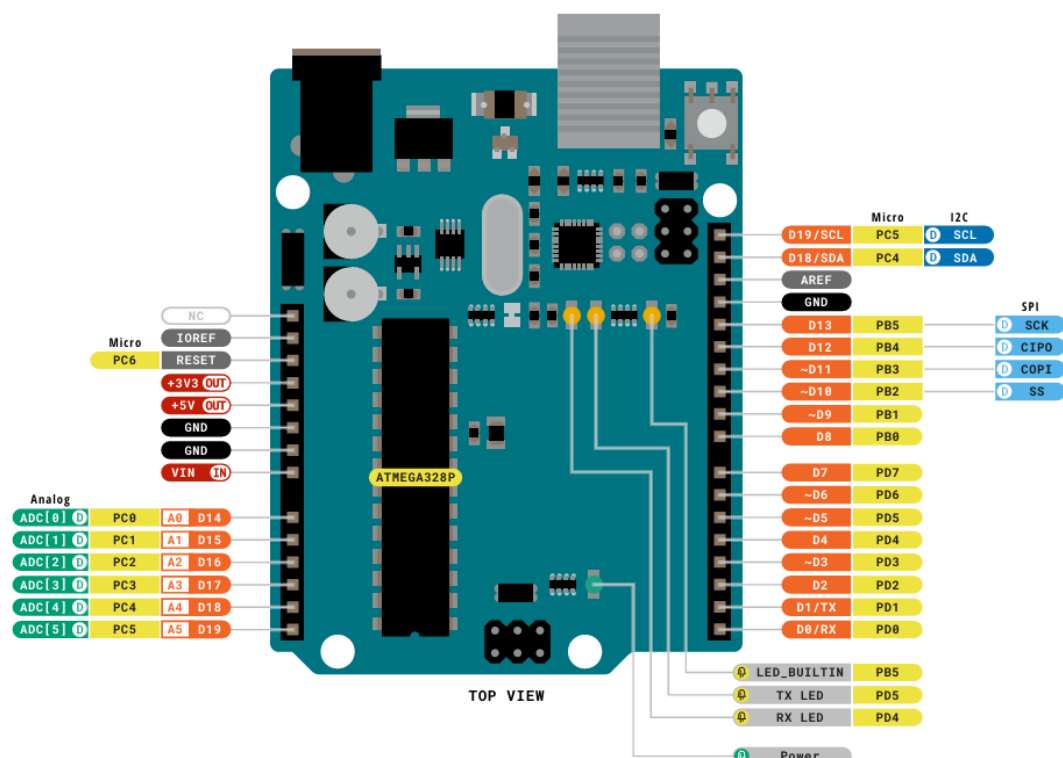
Απαιτήσεις ισχύος	Χαμηλή κατανάλωση ισχύος [18], [19]	Υψηλότερη κατανάλωση ισχύος από τους Arduino [18], [19]	Μεταβλητή κατανάλωση ισχύος, ανάλογη με την εφαρμογή – συνήθως μεγαλύτερη από τους Arduino [20]
Κόστος	Χαμηλό* (βολικό για μαζική παραγωγή) [18], [19]	Μέτριο [18], [19]	Μέτριο έως υψηλό ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μοντέλου [21]
Υποστήριξη στο Διαδίκτυο	Εκτεταμένη τεχνική υποστήριξη – Open Source Πλατφόρμα (επίσημη και από την κοινότητα) [22], [23]	Εκτεταμένη τεχνική υποστήριξη (επίσημη και από την κοινότητα)[24], [25]	Τεχνική υποστήριξη (επίσημη και από την κοινότητα), λιγότερο εκτενής σε σχέση με τις Arduino & Raspberry Pi [26], [27]
Καταλληλότητα για εφαρμογές	Εφαρμογές μικρής/μέτριας πολυπλοκότητας	Εφαρμογές όλων των επιπέδων πολυπλοκότητας	Εφαρμογές όλων των επιπέδων πολυπλοκότητας - Εξειδίκευση σε εφαρμογές που απαιτούν ασύρματη επικοινωνία

Σχήμα 3.2 – Συνοπτική σύγκριση διαθέσιμων πλατφορμών μικροελεγκτών για χρήση στην εφαρμογή

Το Uno, είναι μία πλακέτα με βάση το μοντέλο μικροελεγκτή ATmega328P της Atmel. Το ATmega328P έχει μέγιστη συχνότητα ρολογιού τα 16 MHz, μνήμη Flash μεγέθους 32 kB, μνήμη SRAM μεγέθους 2 kB και μνήμη EEPROM μεγέθους 1 kB. Ακόμη, περιλαμβάνει δύο χρονιστές των 8-bit και έναν των 16-bit. Υποστηρίζει, επίσης, το πρωτοτόκολλο σειριακής επικοινωνίας Serial Peripheral Interface (SPI) όπως και το Inter Integrated Circuits (I²C ή I2C), καθιστώντας εφικτή την επικοινωνία με την κάμερα και τον ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y).[28]

Η πλακέτα διαθέτει συνολικά 20 ακροδέκτες ψηφιακών εισόδων/εξόδων, από τους οποίους οι 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως αναλογικές εισοδοί/έξοδοι. Από τους 14 που προορίζονται για ψηφιακά σήματα, οι 6 έχουν τη δυνατότητα να παράξουν σήμα εξόδου τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμού (Pulse Width Modulation - PWM), γεγονός που απέβη χρήσιμο στην εφαρμογή αυτή, αφού μέσω ενός τέτοιου ακροδέκτη η κάμερα παίρνει ως είσοδο το σήμα για τη συχνότητα της. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται το διάγραμμα των ακροδεκτών της. [29], [30] Τέλος, το Uno είναι δυνατό να τροφοδοτηθεί είτε από πηγή συνεχούς ρεύματος (Direct Current - DC) ή από καλώδιο τύπου Universal Serial Bus (USB) male B. Στην πρώτη περίπτωση δέχεται τάση μεταξύ 6 V και 20 V, ενώ στη δεύτερη 5 V με ανοχή +0,5 V. [30] Χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη, διότι η σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι αναπόφευκτο κομμάτι της εφαρμογής, λόγω της ανάγκης για άμεση αποθήκευση των δεδομένων σε μνήμη

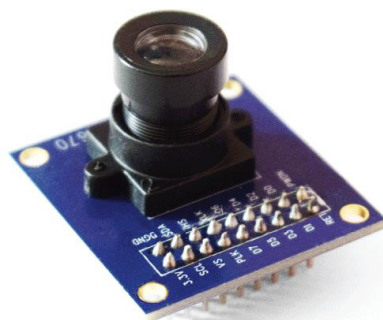
επαρκούς μεγέθους και ταχύτητας λειτουργίας, πράγμα που δεν καλύπτεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου.



Σχήμα 3.3 – Διάγραμμα ακροδεκτών της πλακέτας μικροελεγκτή «Uno» της Arduino (Πηγή: docs.arduino.cc, CC BY-SA 4.0 [29])

3.1.2 Κάμερα του Αισθητήρα

Παράλληλα με την πλατφόρμα του μικροελεγκτή, βασικό στοιχείο της εφαρμογής είναι φυσικά και η ψηφιακή κάμερα του βιοϊατρικού αισθητήρα, μέσω της οποίας γίνεται η λήψη των καρέ-φωτογραφιών του εκάστοτε δείγματος. Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένα το μοντέλο OV7670 της εταιρίας OmniVision (σχήμα 3.4), μία κάμερα τεχνολογίας CMOS χαμηλής τάσης, συνολικών διαστάσεων 3,785 cm x 4.235 cm, με απαιτούμενη ισχύ 60 mW εν ώρα κανονικής λειτουργίας και τάση τροφοδοσίας μεταξύ 2,45 V και 3 V. Έχει τη δυνατότητα να παράγει φωτογραφίες και βίντεο με μέγιστη ανάλυση τα 640 x 480 pixel (εικονοστοιχεία), γνωστή και ως

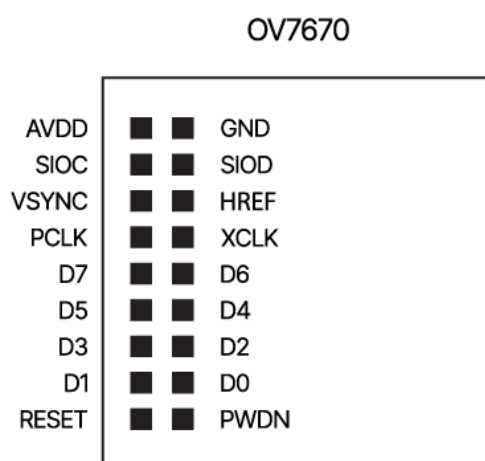


Σχήμα 3.4 – Κάμερα OV7670 από την OmniVision

ανάλυση VGA, ελάχιστη τα 40 x 30 px και ποικίλων ενδιάμεσων αναλύσεων, μετά από ανάλογες ρυθμίσεις από τον χρήστη. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση QVGA, δηλαδή τα 160 x 120 px, ως ένα επαρκές μέγεθος για την καταγραφή των απαραίτητων πληροφοριών, αλλά ταυτόχρονα αρκετά μικρό ώστε να είναι εύκολη η διαχείριση του σε όλα τα στάδια, από τη λήψη έως την ανάλυση. Όσο αφορά τη λήψη βίντεο, η μέγιστη ταχύτητα λήψης είναι τα 30 frames per second (καρέ ανά δευτερόλεπτο). [31] Οι υποστηριζόμενες μορφές χρωματικών προφίλ των φωτογραφιών/καρέ κατά την εξαγωγή τους σε αρχείο παρατίθενται παρακάτω [32]:

1. Raw Bayer RGB
2. Processed Bayer RGB
3. YUV/YCbCr 4:2:2
4. GRB 4:2:2
5. RGB565
6. RGB555

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων προτιμήθηκε η λήψη ασπρόμαυρων, έναντι των φωτογραφιών με χρώμα, αφού περιλαμβάνει τα απαραίτητα για την ανάλυση δεδομένα και προσφέρεται, λόγω μικρότερου μεγέθους, για ταχεία επεξεργασία και αποθήκευση τους. Γι' αυτό, από τα παραπάνω προφίλ επιλέχθηκε η χρήση του YUV 4:2:2, καθώς σε αυτό, εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα, διαχωρίζεται η φωτεινότητα της φωτογραφίας, από την πληροφορία του κόκκινου και του μπλε χρώματος, λόγω των 3 διαφορετικών καναλιών του. [33] Έτσι, καθίσταται η πιο βολική για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Πέρα από τις διαθέσιμες επιλογές ανάλυσης και χρωματικού προφίλ, ο χρήστης είναι ελεύθερος να αλλάξει χειροκίνητα ρυθμίσεις που αφορούν, μεταξύ άλλων, την έκθεση φωτός, την αντίθεση, τη φωτεινότητα, τον κορεσμό των χρωμάτων και την ευκρίνεια ή να επιλέξει την αυτόματη λειτουργία τους. [32]



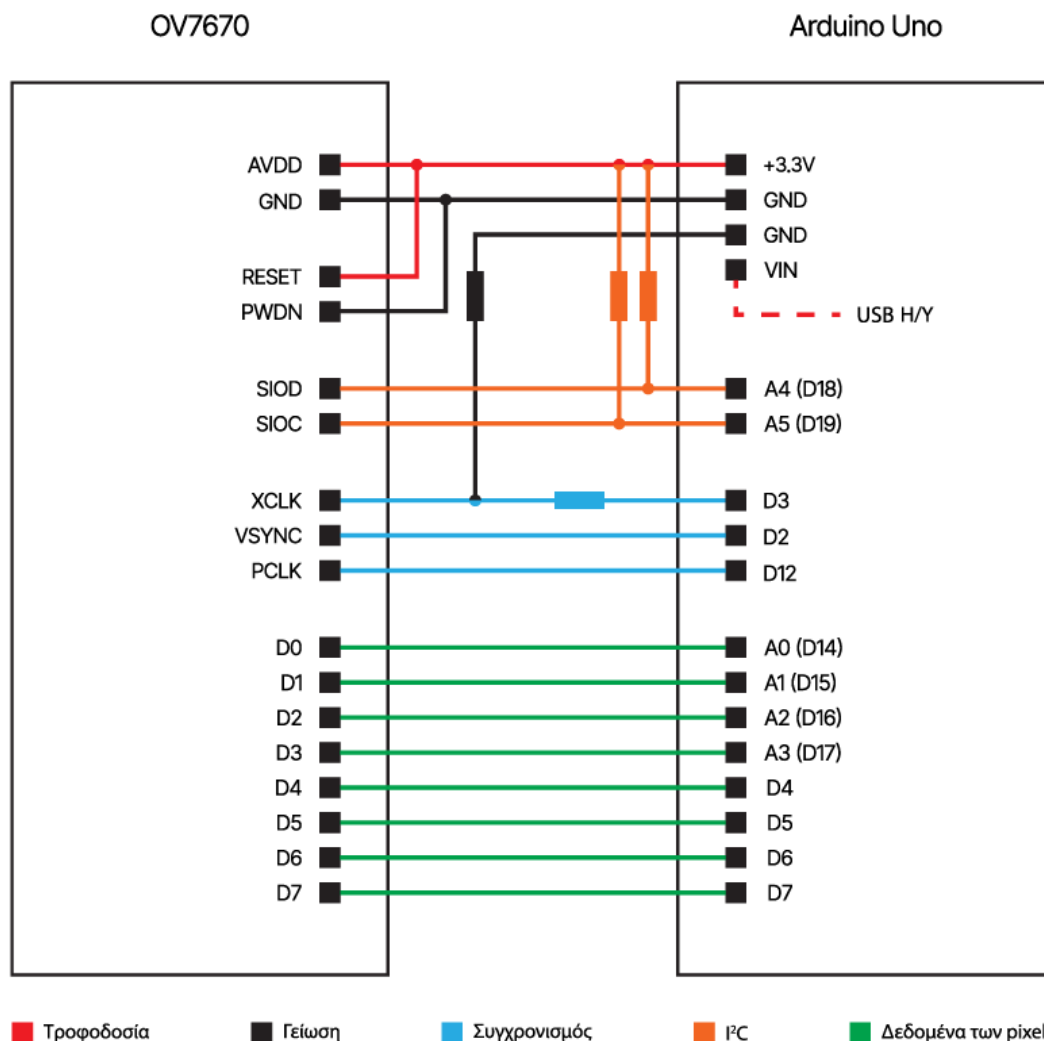
Σχήμα 3.5 – Διάγραμμα ακροδεκτών της κάμερας OV7670

Η κάμερα διαθέτει συνολικά 18 ακροδέκτες, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί στο σχήμα 3.5. Στη συνέχεια παρατίθενται όλοι, εκτός από τον HREF (Horizontal Reference), ο οποίος δεν χρησιμοποιήθηκε, μαζί με μία σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του καθενός [31]:

- AVDD – Προσφέρει τροφοδοσία τάσης στη κάμερα, προερχόμενη από τη πλατφόρμα του μικροελεγκτή
- GND – Παρέχει γείωση

- RESET – Δίνει τη δυνατότητα επανεκκίνησης της κάμερας μέσω του μικροελεγκτή
- PWDN – Μέσω αυτού γίνεται η επιλογή της λειτουργίας της κάμερας, ανάμεσα σε κανονική ή power down
- SIOD – Ακροδέκτης συσχετισμένος με το πρωτόκολλο I²C και συγκεκριμένα με τη μετάδοση των δεδομένων μέσω αυτού
- SIOC – Ακόμη ένας ακροδέκτης που συσχετίζεται με το I²C, όμως αυτός φροντίζει για τον συγχρονισμό των συσκευών κατά την επικοινωνία
- XCLK – Παροχή παλμού ρολογιού από εξωτερική πηγή, στη συγκεκριμένη περίπτωση από τον Arduino, με τη μορφή εξαγόμενου σήματος διαμόρφωσης PWM
- VSYNC – Σηματοδότηση έναρξης καρέ, ώστε να βρίσκεται σε θέση ο μικροελεγκτής να δέχεται τα καρέ χωρίς παραμόρφωση
- PCLK – Παράγει σήμα συγχρονισμού για να διαβάζονται από τον Uno σωστά τα pixels στην εξόδο της κάμερας

3.1.3 Συνδεσμολογία Διάταξης



Σχήμα 3.6 – Διάγραμμα συνδεσμολογιών ανάμεσα στην πλατφόρμα του μικροελεγκτή και την κάμερα

Η σύνδεση των ακροδεκτών της διάταξης έγινε επάνω σε πλακέτα δοκιμών (breadboard). Η λύση αυτή επιλέχθηκε λόγω της ευχέρειας που προσφέρει η πλακέτα

για δοκιμή διαφορετικών συνδεσμολογιών της κάμερας και του Uno, μέχρι να βρεθεί η κατάλληλη, με κριτήριο τόσο την αποδοτικότητα, όσο και την συμβατότητα με το πρόγραμμα οδήγησης που τελικά χρησιμοποιήθηκε και περιγράφεται με λεπτομέρεια στην παράγραφο 3.5 του κεφαλαίου αυτού. Παραπάνω, στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι συνδέσεις που υλοποιήθηκαν μεταξύ των δύο εξαρτημάτων, με χρήση καλωδίων δοκιμών (jumper wires) τύπων male to female (M/F) και male to male (M/M). Το σύνολο των συνδέσεων μπορεί να χωριστεί στις εξής κατηγορίες:

- Συνδέσεις για την τροφοδοσία κατάλληλης τάσης του μικροελεγκτή και της κάμερας όπως και για την γείωσης τους
- Ενώσεις των οκτώ ακροδεκτών της κάμερας που είναι υπεύθυνοι για την μετάδοση των pixels ανά 8 bits, με ακροδέκτες ψηφιακής εισόδου του Uno [31]
- Συνδέσεις για να καταστεί δυνατή η επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου I²C – σε αυτές ήταν αναγκαία η προσθήκη pull-up αντιστάσεων, οι οποίες κρατούν την τάση σταθερά σε υψηλό λογικό επίπεδο, για όσο διάστημα οι συνδέσεις δεν χρησιμοποιούνται και θα βρίσκονταν διαφορετικά σε ενδιάμεσο απροσδιόριστο επίπεδο τάσης. Διασφαλίζουν, έτσι, την ασφαλή και αξιόπιστη μετάδοση του σήματος μεταξύ των δύο συσκευών. [34], [35]
- Συμπληρωματικές συνδέσεις, στις οποίες οφείλεται η μεταφορά σημάτων για τη λειτουργία της κάμερας, αλλά και ο απαραίτητος συγχρονισμός για τη λήψη των φωτογραφιών, μεταξύ ψηφιακών εισόδων/εξόδων του Uno και ακροδεκτών της κάμερας όπως οι VSYNC, XCLK κ.α. Για την ένωση του δεύτερου με το Uno, ήταν αναγκαίο να προστεθεί διαιρέτης τάσης, αφού ο XCLK μπορεί να δεχτεί τάση 3 V, ενώ οι ψηφιακές έξοδοι του Uno, μία εκ των οποίων παρέχει τον παλμό ρολογιού στο XCLK με τη μορφή σήματος διαμόρφωσης PWM, δίνουν τάση 5 V.

Όσο αφορά την τροφοδοσία της διάταξης, η σειριακή σύνδεση του μικροελεγκτή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή λειτούργησε ως παροχή ρεύματος σε αυτόν.

3.2 Λογισμικό του Αισθητήρα & Συνοδευτικό Λογισμικό

3.2.1 Απαιτούμενο Λογισμικό του Η/Υ

Το λογισμικό που είναι απαραίτητο για την υλοποίηση των πειραμάτων αποτελείται από τρία μέρη: ένα πρόγραμμα για την διαχείριση του κώδικα του μικροελεγκτή, ένα που αφορά την αποθήκευση και τη μετατροπή των ληφθέντων από την κάμερα δεδομένων σε αρχεία εικόνας και ένα για τη μετέπειτα ανάλυση των ίδιων δεδομένων.

Το Arduino IDE και συγκεκριμένα η έκδοση 1.8.19 χρησιμοποιείται για το πρώτο μέρος και είναι open-source, επομένως και δωρεάν, λογισμικό δημιουργημένο από την σχεδιάστρια εταιρεία, με σκοπό τη συγγραφή τη μεταγλώτιση (compilation) και την μεταφόρτωση (upload) του κώδικα της ρουτίνας του μικροελεγκτή. [36] Το δεύτερο μέρος καλύπτεται από το Visual Studio Code (έκδοση 1.97.2), ένα περιβάλλον προγραμματισμού κατασκευασμένο από την Microsoft, επίσης δωρεάν και ανοιχτού κώδικα. [37], [38] Με αυτό γίνεται συγγραφή (build), αποσφαλμάτωση (debug), και εκτέλεση (run) του κώδικα, υπεύθυνου για την παραλαβή των δεδομένων της κάμερας μέσω της σειριακής θύρας USB και των υπόλοιπων σχετικών ενεργειών. Κύρια χαρακτηριστικά του VS Code είναι η υποστήριξη συγγραφής σχεδόν σε όλες τις

γνωστές υπάρχουσες γλώσσες προγραμματισμού και η εύκολη εξατομίκευση του χώρου εργασίας του χρήστη μέσα από μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων extensions. [39] Χάριν των ευκολιών που προσφέρονται από το VS Code, για την εκπόνηση της εργασίας επιλέχθηκε, για το δεύτερο κομμάτι, η συγγραφή κώδικα σε γλώσσα Python (έκδοση: 3.9.13) σε συνδυασμό με το, ενσωματωμένο στο πακέτο της γλώσσας, «Python Debugger» για την αποσφαλμάτωσή του. [40] Συμπληρωματικά, χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα που αναπτύχθηκε οι παρακάτω βιβλιοθήκες, με σκοπό την απλοποίηση του κώδικα και την πιο εύκολη διαχείριση των δεδομένων:

- «pyserial» (έκδοση 3.5): χρησιμεύει στην επίτευξη της σειριακής επικοινωνίας μεταξύ του υπολογιστή και του μικροελεγκτή [41]
- «numpy» (έκδοση 2.0.2): δίνει τη δυνατότητα της εκτέλεσης επιστημονικών υπολογισμών και στη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογισμών με πίνακες, στους οποίους περιέχονται τα δεδομένα του εκάστοτε καρέ [42]
- «imageio» (έκδοση 2.36.1): λειτουργεί ως εργαλείο για τη δημιουργία, μετατροπή και αποθήκευση αρχείων εικόνας, δημιουργημένων από τα ληφθέντα δεδομένα [43]

Το τρίτο μέρος έχει ως βάση το VS Code και την Python, όπως και το δεύτερο, με τη διαφορά όμως, πως ο κώδικας έχει συγγραφεί σε περιβάλλον Jupyter Notebook εντός του VS Code, εγκατεστημένο ως extension. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στις επιπλέον ευκολίες που προσφέρει το Jupyter Notebook, όταν χρησιμοποιείται συνοδευτικά ως προς το VS Code, όπως η εκτέλεση του κώδικα τμηματικά, η προβολή των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης εντός του προγραμματιστικού περιβάλλοντος, ακόμη και αν πρόκειται για οπτικά στοιχεία όπως εικόνες και διαγράμματα και η προσθήκη μη εκτελέσιμου κειμένου ανάμεσα στα μέρη του κώδικα για καλύτερη οργάνωση και εύκολη διαχείριση του. [44] Παράλληλα, για τη λειτουργία του ίδιου μέρους, απαραίτητη είναι η εγκατάσταση των βιβλιοθηκών:

- «pandas» (έκδοση 2.2.3): γνωστή για την προσφορά της δυνατότητας επεξεργασίας και ανάλυσης μεγάλου αριθμού δεδομένων, με απλότητα και αρκετά υψηλή ταχύτητα [45]
- «matplotlib» & «pyplot» (έκδοση 3.9.4): η matplotlib καθιστά δυνατή τη σχεδίαση γραφημάτων 2 διαστάσεων – το τμήμα pyplot ενισχύει τη βιβλιοθήκη με εντολές για περαιτέρω εξατομίκευση των γραφημάτων [46]

3.2.2 Πηγαίος Κώδικας του Μικροελεγκτή

Ο πηγαίος κώδικας, που εκτελείται από τον μικροελεγκτή, είναι υπεύθυνος για τον συγχρονισμό του με την κάμερα και την μετάδοση των δεδομένων, που συλλέγονται από εκείνη. Στα πρώτα στάδια της εκπόνησης της εργασίας, έγινε δοκιμή συγγραφής εξ' αρχής νέου κώδικα για τις παραπάνω λειτουργίες, αλλά και χρήσης, μετά από μεταποίηση, ήδη υπάρχοντων αρχείων κώδικα και βιβλιοθηκών, δημιουργημένων με τον ίδιο σκοπό.

Από τις δύο επιλογές, προέκυψε πιο λειτουργική η δεύτερη, διότι μια ακόμη προσπάθεια, για την επίτευξη του ίδιου στόχου με τους προηγούμενους συγγραφείς, δεν θα πρόσθετε κάποια αξία στην έρευνα αυτή, αντιθέτως θα στεκόταν εμπόδιο στην περαιτέρω παραγωγική αξιοποίηση του χρόνου. Μετά από πειραματισμό με τις διάφορες διαθέσιμες λύσεις λογισμικού, επιλέχθηκε η χρήση της βιβλιοθήκης LiveOV7670 του συγγραφέως Luuk Indrek, διαθέσιμη στο κοινό δωρεάν στην πλατφόρμα του GitHub και σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφονται σύντομα οι αλλαγές που έγιναν κατά την επεξεργασία των αρχείων της. [47]

Η LiveOV7670 δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης του Uno με την OV7670 και προβολής των καρτέ που προκύπτουν με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους, από τους οποίους επιλέχθηκε ο τρίτος κατά σειρά εμφανιζόμενος, μέσα από το αρχείο τύπου Header (για την γλώσσα C/C++) «setup.h», το οποίο είναι και το πρώτο στη σειρά της λογικής – δομής της βιβλιοθήκης και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7. Επιλέχθηκε, λοιπόν, η λειτουργία της βιβλιοθήκης ως μέσο για την αποστολή των δεδομένων στον υπολογιστή και την προβολή τους, μέσω εφαρμογής του συγγραφέως σε γλώσσα Java. Το δεύτερο κομμάτι της λειτουργίας, η προβολή των καρτέ στην εφαρμογή, αντικαταστάθηκε από τον κώδικα, που αναφέρεται παραπάνω ως το δεύτερο μέρος του απαιτούμενου λογισμικού, και αναλύεται αργότερα στο παρόν κεφάλαιο.

```
//
// Created by indrek on 1.05.2016.
//

#ifndef LIVEOV7670_SETUP_H
#define LIVEOV7670_SETUP_H

/*
 * EXAMPLE = 1
 * Use LiveOV7670Library class that reads line into buffer and
 * sends data to TFT over SPI during blank lines.
 *
 * EXAMPLE = 2
 * Use LiveOV7670Library class that processes data pixel by pixel
 * sends data to TFT during each pixel reading loop.
 * VGA can not be used with line buffer since there is no
 * time (no blank lines) to do something useful with a buffered line
 *
 * EXAMPLE = 3
 * Reads data from LiveOV7670Library and send it over UART to computer
 * Java application for receiving picture from UART
 * https://github.com/indrekluuk/ArduImageCapture
 *
 * EXAMPLE = 4
 * Gray scale image @20Hz. Interlaced image.
 */

#define EXAMPLE 3

void initializeScreenAndCamera();
void processFrame();

#endif //LIVEOV7670_SETUP_H
```

Σχήμα 3.7 – «setup.h» - Αρχείο τύπου header, μέρος της βιβλιοθήκης LiveOV7670, εντός του οποίου καθορίζεται ο τρόπος λειτουργίας της βιβλιοθήκης

Με στόχους την επίτευξη συμβατότητας της βιβλιοθήκης με τον νέο κώδικα του δεύτερου μέρους, όπως και την απλοποίηση των υπολογισμών, ώστε να μειωθεί το μέγεθος και να βελτιωθεί η επίδοση του μικροελεγκτή, το μεγαλύτερο μέρος των αλλαγών έχει γίνει στο αρχείο «ExampleUart.cpp», εντός του οποίου ορίζονται όλες οι απαραίτητες συναρτήσεις. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται δύο κύριες, που καλούνται στο αρχείο «LiveOV7670.ino» και κάποιες δευτερεύουσες, καλούμενες από τις κύριες. Η σύνθεση αυτών και όλων των υπόλοιπων στοιχείων οδηγεί στο «LiveOV7670.ino», του σχήματος 3.8, που φορτώνεται και εκτελείται στον μικροελεγκτή με τη βοήθεια του Arduino IDE.

```
// change setup.h to switch between buffered and pixel-by-pixel processing
#include "setup.h"

void setup() {

    // This is not necessary and has no effect for ATMEGA based Arduinos.
    // WAVGAT Nano has slower clock rate by default. We want to reset it to
    // maximum speed
    // CLKPR = 0x80; // enter clock rate change mode
    // CLKPR = 0; // set prescaler to 0. WAVGAT MCU has it 3 by default.

    initializeScreenAndCamera();

}

void loop() {
    processFrame();
}
```

Σχήμα 3.8 – «LiveOV7670.ino» – Αρχείο τύπου πηγαίου κώδικα της Arduino που αποθηκεύεται και τρέχει στον μικροελεγκτή

Πιο ειδικά, το «ExampleUart.cpp» έχει προσαρμοστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η διάταξη να λειτουργεί συγκεκριμένα για χρωματικό προφίλ YUV Grayscale, διαστάσεις καρέ 160X120 και ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων 2 Mbps. Συνεπώς, έχουν αφαιρεθεί οι γραμμές κώδικα και οι ορισμοί συναρτήσεων συσχετιζόμενων με όλους τους υπόλοιπους δυνατούς συνδυασμούς χρώματος, διαστάσεων και ταχύτητας, που περιλαμβάνονταν στην αρχική εκδοχή, με την πλειοψηφία αυτών να αφορούν την διαχείριση του προφίλ RGB.

Περαιτέρω αλλαγή αποτελεί η απλοποίηση των συναρτήσεων «initializeScreenAndCamera()» και «processFrame()», δηλαδή των δύο κύριων. Αυτή κρίθηκε απαραίτητη, μετά από τη διαπίστωση πως μερικές από τις εντολές, οι οποίες περιλαμβάνονταν σε αυτές προηγουμένως, ήταν μεν χρήσιμες για την προβολή των καρέ στην εφαρμογή, που αναφέρθηκε στη δεύτερη παράγραφο, αλλά ήταν αιτία δε - κατά τον νέο τρόπο χρήσης της βιβλιοθήκης - είτε εμφάνισης προβλημάτων συγχρονισμού του υπολογιστή με τον μικροελεγκτή, οδηγώντας σε χαμένα pixels κατά την αποθήκευση των φωτογραφιών, ή απλώς εισήγαγαν μη απαραίτητες πληροφορίες στα μεταφερόμενα δεδομένα. Σε συνέχεια της αλλαγής αυτής, αφαιρέθηκαν επιπλέον ορισμοί δευτερευουσών συναρτήσεων, η κλήση των οποίων δεν υφίσταται πλέον. Προστέθηκαν, ωστόσο, στη μία εκ των δύο συναρτήσεων, δύο εντολές για τη ρύθμιση της φωτεινότητας και της αντίθεσης της κάμερας. Τελευταίο και συντομότερο κομμάτι της εξατομίκευσης, είναι η διαγραφή κάποιων γραμμών της δευτερεύουσας συνάρτησης που αφορά την εκτύπωση ενημερώσεων σε μορφή λέξεων - κωδικών κατά το στάδιο του debugging του κώδικα, για τους λόγους που περιγράφηκαν στην αρχή της προηγούμενης παραγράφου.

Μετά από τις επεμβάσεις, ο κώδικας που προέκυψε ακολουθεί την εξής λογική σειρά:

1. Δήλωση μεταβλητών, που χρησιμοποιούνται στις συναρτήσεις
2. Ορισμός πρώτης κύριας συνάρτησης εκκίνησης της σειριακής επικοινωνίας και αρχικοποίησης της κάμερας
3. Ορισμός κύριας και δευτερεύουσας συνάρτησης για συλλογή και αποστολή των δεδομένων ενός frame
4. Ορισμός βοηθητικών συναρτήσεων, για την δευτερεύουσα του προηγούμενου βήματος

Παρόλο που θα ήταν προτιμότερη και ίσως σωστότερη προγραμματιστικά η αντιστροφή των βημάτων 3 & 4, επιλέχθηκε να μη τροποποιηθεί η σειρά, προς αποφυγή άσκοπων αλλαγών. Αναλυτικότερα, ολόκληρος ο κώδικας του αρχείου «ExampleUart.cpp» της βιβλιοθήκης παρουσιάζεται στις επόμενες σελίδες, στο σχήμα 3.9.

```
//
// Created by indrek on 1.05.2016.
//

// set EXAMPLE to EXAMPLE_UART in setup.h to activate
#include "setup.h"
#if EXAMPLE == 3
#include "Arduino.h"
#include "CameraOV7670.h"

// select resolution and communication speed:
// 1 - 115200bps 160x120 rgb
// 2 - 115200bps 160x120 grayscale
// 3 - 500000bps 160x120 rgb
// 4 - 500000bps 160x120 grayscale
// 5 - 500000bps 320x240 rgb
// 6 - 500000bps 320x240 grayscale
// 7 - 1Mbps 160x120 rgb
// 8 - 1Mbps 160x120 grayscale
// 9 - 1Mbps 320x240 rgb
// 10 - 1Mbps 320x240 grayscale
// 11 - 1Mbps 640x480 grayscale
// 12 - 2Mbps 160x120 rgb
// 13 - 2Mbps 160x120 grayscale
// 14 - 2Mbps 320x240 rgb
// 15 - 2Mbps 320x240 grayscale
// 16 - 2Mbps 640x480 rgb
// 17 - 2Mbps 640x480 grayscale

#define UART_MODE 13

const uint16_t UART_PIXEL_FORMAT_GRAYSCALE = 0x02;

void processGrayscaleFrameBuffered();
typedef void (*ProcessFrameData)(void) ;

#if UART_MODE==13
const uint16_t lineLength = 160;
const uint16_t lineCount = 120;
const uint32_t baud = 2000000;
const ProcessFrameData processFrameData = processGrayscaleFrameBuffered;
const uint16_t lineBufferLength = lineLength;
const bool isSendWhileBuffering = false;
const uint8_t uartPixelFormat = UART_PIXEL_FORMAT_GRAYSCALE;
CameraOV7670 camera(CameraOV7670::RESOLUTION_QQVGA_160x120,
CameraOV7670::PIXEL_YUV422, 2);
#endif

uint8_t lineBuffer[lineBufferLength]; // Two bytes per pixel
uint8_t * lineBufferSendByte;

uint16_t frameCounter = 0;
uint16_t processedByteCountDuringCameraRead = 0;
```

```

void commandDebugPrint(const String debugText);
uint8_t sendNextCommandByte(uint8_t checksum, uint8_t commandByte);

inline void processNextGrayscalePixelByteInBuffer() __attribute__((always_inline));
inline uint8_t formatPixelByteGrayscaleFirst(uint8_t byte)
__attribute__((always_inline));
inline uint8_t formatPixelByteGrayscaleSecond(uint8_t byte)
__attribute__((always_inline));
inline void waitForPreviousUartByteToBeSent() __attribute__((always_inline));
inline bool isUartReady() __attribute__((always_inline));

// this is called in Arduino setup() function
void initializeScreenAndCamera() {
    Serial.begin(baud);
    if (camera.init()) {
        camera.setContrast(0x4f);
        camera.setBrightness(0xa0);
    }
}

// this is called in Arduino loop() function
void processFrame() {
    processedByteCountDuringCameraRead = 0;
    noInterrupts();
    processFrameData();
    interrupts();
    frameCounter++;
}

void processGrayscaleFrameBuffered() {

    camera.waitForVsync();
    commandDebugPrint("Vsync");
    camera.ignoreVerticalPadding();

    for (uint16_t y = 0; y < lineCount; y++) {
        lineBufferSendByte = &lineBuffer[0];
        camera.ignoreHorizontalPaddingLeft();

        uint16_t x = 0;
        while ( x < lineBufferLength) {
            camera.waitForPixelClockRisingEdge(); // YUV422 grayscale byte
            camera.readPixelByte(lineBuffer[x]);
            lineBuffer[x] = formatPixelByteGrayscaleFirst(lineBuffer[x]);

            camera.waitForPixelClockRisingEdge(); // YUV422 color byte. Ignore.
            if (isSendWhileBuffering) {
                processNextGrayscalePixelByteInBuffer();
            }
            x++;

            camera.waitForPixelClockRisingEdge(); // YUV422 grayscale byte
            camera.readPixelByte(lineBuffer[x]);
            lineBuffer[x] = formatPixelByteGrayscaleSecond(lineBuffer[x]);

            camera.waitForPixelClockRisingEdge(); // YUV422 color byte. Ignore.
            if (isSendWhileBuffering) {
                processNextGrayscalePixelByteInBuffer();
            }
            x++;
        }
        camera.ignoreHorizontalPaddingRight();
    }
}

```

```

    // Debug info to get some feedback how much data was processed during line
    // read.
    processedByteCountDuringCameraRead = lineBufferSendByte - (&lineBuffer[0]);
    // Send rest of the line
    while (lineBufferSendByte < &lineBuffer[lineLength]) {
        processNextGrayscalePixelByteInBuffer();
    }
};
}

void processNextGrayscalePixelByteInBuffer() {
    if (isUartReady()) {
        UDR0 = *lineBufferSendByte;
        lineBufferSendByte++;
    }
}

uint8_t formatPixelByteGrayscaleFirst(uint8_t pixelByte) {
    // For the First byte in the parity chek byte pair the last bit is always 0.
    pixelByte &= 0b11111110;
    if (pixelByte == 0) {
        // Make pixel color always slightly above 0 since zero is a command marker.
        pixelByte |= 0b00000010;
    }
    return pixelByte;
}

uint8_t formatPixelByteGrayscaleSecond(uint8_t pixelByte) {
    // For the second byte in the parity chek byte pair the last bit is always 1.
    return pixelByte | 0b00000001;
}

void commandDebugPrint(const String debugText) {
    if (debugText.length() > 0) {

        waitForPreviousUartByteToBeSent();
        uint8_t checksum = 0;
        for (uint16_t i=0; i<debugText.length(); i++) {
            checksum = sendNextCommandByte(checksum, debugText[i]);
        }

        waitForPreviousUartByteToBeSent();
    }
}

uint8_t sendNextCommandByte(uint8_t checksum, uint8_t commandByte) {
    waitForPreviousUartByteToBeSent();
    UDR0 = commandByte;
    return checksum ^ commandByte;
}

void waitForPreviousUartByteToBeSent() {
    while(!isUartReady()); //wait for byte to transmit
}

bool isUartReady() {
    return UCSR0A & (1<<UDRE0);
}

#endif

```

Σχήμα 3.9 – «ExampleUart.cpp» – Αρχείο τύπου C++, μέρος της βιβλιοθήκης LiveOV7670, εντός του οποίου ορίζονται όλες οι καλούμενες συναρτήσεις του «LiveOV7670.ino»

3.2.3 Κώδικας για Λήψη και Αποθήκευση Δεδομένων

```
import serial, numpy as np, imageio

file_path = "C:/Users/Eleni/Desktop/iem/experiment/text_files/Output_shot.log"

def monitor():

    ser = serial.Serial()
    ser.port = 'COM6'
    ser.baudrate = 2000000
    ser.timeout = None

    frames = 0
    resolution = 120*160
    buffer_pixels=b''
    first_frame_found = 0

    ser.open()

    with open(file_path, "wb") as text_file:

        while (first_frame_found != 1):
            line = ser.read(1)

            if (line == b"V"):

                line = line + ser.read(4)

                if (line == b"Vsync"):
                    first_frame_found = 1

        while (frames < 30):

            pixels=0

            while (pixels < resolution):

                line = ser.read(5)
                buffer_pixels = buffer_pixels + line
                pixels +=5

                if (buffer_pixels != b"Vsync"):
                    text_file.write(buffer_pixels)
                    buffer_pixels = b''

                else:
                    pixels -= 5
                    buffer_pixels = b''

            print(pixels)
            frames+=1

    text_file.close()
    print("Stop Monitoring")
    ser.close()
```

```

def save_png():
    width = 160
    height = 120

    with open(file_path, "rb") as text_file:
        # 1 - raw data read
        raw_data = text_file.read()
        print(len(raw_data))

        # 1 & 2 - divide raw data by frame size to get the number of frames
        # create a matrix with smaller ones for the individual frame
        num_of_frames = len(raw_data) // (width * height)
        frames = np.frombuffer(raw_data, dtype=np.uint8).reshape((num_of_frames,
height, width))

        # save to png and automatically put in the name the number of the frame
        for i, frame in enumerate(frames):
            imageio.imwrite(f"frame_{i}.png", frame)
            print(f"Saved frame_{i}.png")

    text_file.close()

print("Start Serial Monitor")

#COMPORT = COM6
#BAUDRATE = 2000000

monitor()
print("The frames have been saved successfully to the log file.")
save_png()
print("The frames have been saved successfully as png photos.")

```

Σχήμα 3.10 – «Frames_Save_v5.py» – Αρχείο γλώσσας Python, μέσα από το οποίο συλλέγονται τα δεδομένα και μετατρέπονται σε png φωτογραφίες

Θεωρώντας ως δεδομένο, ότι ο μικροελεγκτής έχει λάβει και εκτελεί τον κώδικα του σχήματος 3.8, το επόμενο στάδιο, για τη λειτουργία του αισθητήρα είναι η εκτέλεση του αρχείου Python «Frames_Save_v5.py», που παρατίθεται στο σχήμα 3.10 και του οποίου ο ρόλος είναι να λαμβάνει τα δεδομένα που στέλνονται από τον Uno στη σειριακή θύρα του υπολογιστή, να τα αποθηκεύει σε αρχείο τύπου log, άρα πρακτικά αρχείο κειμένου, και να μετατρέπει τα ίδια σε αρχεία εικόνας τύπου png.

Όλα αυτά τα καταφέρνει ως εξής:

1. Ανοίγει, αρχικά, τη σειριακή επικοινωνία και δημιουργεί το αρχείο κειμένου.
2. Ελέγχει, έπειτα, τα εισερχόμενα δεδομένα, έως ότου βρει για πρώτη φορά την αρχή ενός frame. Ο έλεγχος αυτός βασίζεται στην εύρεση της λέξης «Vsync» μέσα στην ακολουθία των δεδομένων, επειδή η εμφάνιση της κωδικής αυτής λέξης έχει καθοριστεί, μέσω του αρχείου «ExampleUart.cpp» να εμφανίζεται πριν το πρώτο pixel του κάθε καρέ. Αναζητά, λοιπόν, την πρώτη περίπτωση στην οποία ένα εισερχόμενο byte, αντιστοιχεί στη δυαδική μορφή του γράμματος «V» και, μόλις την βρει, ελέγχει αν τα επόμενα τέσσερα εισερχόμενα bytes αντιστοιχούν στο «sync», το υπόλοιπο της λέξης. Εάν ισχύει κάτι τέτοιο, αλλάζοντας την κατάσταση μίας σημαίας, προχωρά στην αποθήκευση 30 συνεχόμενων frames, αγνοώντας κάθε επόμενη εμφάνιση της «Vsync». Στην αντίθετη περίπτωση, ξεκινά η διαδικασία αναζήτησης του

- επόμενου γράμματος «V», ώσπου να βρεθεί ολοκληρωμένη η λέξη και τα δεδομένα των frames να εγγραφούν στο αρχείο κειμένου.
3. Ακολούθως, διαβάζει, από το πλέον αποθηκευμένο αρχείο τύπου log, τα δεδομένα στη δυαδική τους μορφή και τα μεταφορτώνει σε έναν «τριδιάστατο» πίνακα, αποθηκευμένο σε μεταβλητή, ως σύνολο τόσων δισδιάστατων πινάκων όσα είναι και τα καρέ.
 4. Τελικά, περνώντας από όλα τα κελιά του γενικού πίνακα, αντλεί τα δεδομένα και με τη βοήθεια βιβλιοθήκης δημιουργεί τις εικόνες png.

3.2.4 Κώδικας για Ανάλυση Ληφθέντων Δεδομένων

Μετά την επιτυχή αποθήκευση του αρχείου κειμένου μιας λήψης και των αντίστοιχων φωτογραφιών, είναι πλέον δυνατή η ανάλυση των δεδομένων της λήψης. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μετάφραση της αποτύπωσης του φαινομένου της σκέδασης, που προέρχεται από τη σύγκρουση της ακτίνας laser και του εξεταζόμενου δείγματος, σε έναν συνδυασμό διαγραμματικής σχεδίασης της κατεύθυνσης του φωτός και παράλληλα της μετρούμενης τιμής έντασης της φωτεινότητας. Στο σχήμα 3.11 δίνεται ο ακριβής κώδικας, που αναπτύχθηκε για αυτόν τον σκοπό, ο οποίος εκτελείται μέσω του αρχείου Jupyter Notebook με όνομα «data_analysis_of_frames.ipynb».

Η συγγραφή του τελευταίου αυτού μέρους του λογισμικού, προσεγγίστηκε ως ένα πρόβλημα ανάλυσης δεδομένων, ώστε, μέσω των αποτελεσμάτων, να εντοπισθεί επί της ουσίας η σχέση μεταξύ της διαμέτρου των σφαιριδίων και της παρατηρούμενης σκέδασης και να κατηγοριοποιηθούν τα δείγματα, βάσει αυτής, στα αντίστοιχα έμμορφα κύτταρα. Με περισσότερη λεπτομέρεια, ο κώδικας ακολουθεί την παρακάτω σειρά:

1. Πρώτα, φορτώνονται στη μνήμη τα δεδομένα από το επιλεγμένο αρχείο κειμένου και αποθηκεύονται σε έναν γενικό πίνακα, με τον ίδιο τρόπο που γίνεται αυτό στο αρχείο «Frames_Save_v5.py».
2. Ακολουθεί η μεταφόρτωση των δεδομένων από τον πίνακα σε ξεχωριστά dataframes, δηλαδή δομές δεδομένων – στοιχεία της βιβλιοθήκης pandas, ένα για κάθε καρέ και ομαδοποιούνται σε μια λίστα.
3. Αμέσως μετά, γίνεται η καταγραφή του αριθμού εμφανίσεων της κάθε τιμής φωτεινότητας που υπάρχει σε ένα επιλεγμένο καρέ και η οποία δίνει ως πληροφορίες την μέγιστη φωτεινότητα, αλλά και το γενικότερο εύρος τιμών φωτεινότητας της φωτογραφίας.
4. Εν συνεχεία, εντοπίζεται η γραμμή pixels με την πιο συχνή εμφάνιση της μέγιστης τιμής φωτεινότητας.
5. Ως τελευταίο βήμα, σχεδιάζεται ένα διάγραμμα κατανομής της φωτεινότητας σε ολόκληρη τη γραμμή, που βρέθηκε να είναι η πιο φωτεινή, με σκοπό την παρατήρηση, από τον χρήστη, της ύπαρξης ή μη της σκέδασης και της έντασής της.

Η σκοπιμότητα της εκτέλεσης των βημάτων 4 & 5, περιγράφεται ολοκληρωμένα στο κεφάλαιο 4 της εργασίας.

```

import numpy as np, pandas as pd, matplotlib.pyplot as plt

# Resolution
width = 160
height = 120

# Load Data from Log Files to Dataframes
with
open("C:/Users/elenk/Desktop/iem/Πτυχιακή/experiment/final/text_files/Output_covered_
_lens_250608.log", "rb") as text_file:
    # Read raw data
    raw_data = text_file.read()
    print(len(raw_data))

    # Divide raw data by frame size to get the number of frames
    num_of_frames = len(raw_data) // (width * height)

    # Create a 3d matrix with numpy that holds all 30 frames
    all_frames = np.frombuffer(raw_data, dtype=np.uint8).reshape((num_of_frames,
height, width))

    # Create empty dataframe list
    df_all_frames = []

    # Loop through each (i) frame and all each pixels (frame) each time
    for i, frame in enumerate(all_frames):

        df_individual_frame = pd.DataFrame(frame)
        df_individual_frame.index.name = 'Line'
        df_individual_frame.columns.name = 'Column'

        # Append = Create list of dataframes for easy access
        df_all_frames.append(df_individual_frame)

text_file.close()

# Find Brightest Values Occurances
# List to store value counts per frame
brightness_counts_all_frames = []

# Loop through each frame DataFrame
for i, df_frame in enumerate(df_all_frames):
    # Flatten frame into 1D array of brightness values
    pixel_values = df_frame.values.flatten()

    # Count brightness values
    brightness_counts_per_frame =
pd.Series(pixel_values).value_counts().sort_index()

    # Append result
    brightness_counts_all_frames.append(brightness_counts_per_frame)

# Find Brightest Line
frame_number = 20
frame_to_analyse = df_all_frames[frame_number]
max_brightness_value = brightness_counts_all_frames[frame_number].index.max()
brightest_line = ((frame_to_analyse == max_brightness_value).sum(axis=1)).idxmax()

df_brightest_line = frame_to_analyse.loc[brightest_line]

```

```
#Plot Brightness Values
plt.figure(figsize=(24, 14))
plt.plot(df_brightest_line.values, color='red', marker='o', linestyle='-',
markersize=8)
plt.title(f'Brightness values along line {brightest_line} of frame {frame_number}
for covered lens', fontsize=25)
plt.xlabel('Column of pixels', fontsize=25)
plt.ylabel('Brightness', fontsize=25)
#plt.xticks(np.arange(0, 71, 2),fontsize=20)
plt.xticks(fontsize=20)
plt.yticks(np.arange(0, 256, 10), fontsize=18)
plt.grid(True)
plt.show()
```

Σχήμα 3.11 – «data_analysis_of_frames.ipynb» – Αρχείο γλώσσας Python μέσα σε Jupyter Notebook,, εκ του οποίου προκύπτει η ανάλυση των δεδομένων

3.2.5 Βήματα Εκτέλεσης των Προγραμμάτων

Συνοψίζοντας, για τη σωστή λειτουργία της διάταξης και την καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων των φωτογραφιών, ακολουθείται μία συγκεκριμένη σειρά εκτέλεσης των επιμέρους προγραμμάτων. Ξεκινώντας, μεταφορτώνεται το αρχείο «LiveOV7670.ino» στον μικροελεγκτή, αφού περιέχει τον πηγαίο κώδικα, που θα εκτελεί αυτός επαναλαμβανόμενα, για όσο είναι συνδεδεμένος με πηγή τροφοδοσίας. Αμέσως μετά την εκκίνηση του Uno και εφόσον εκείνος λειτουργεί κανονικά, είναι έτοιμο να εκτελεστεί το αρχείο «Frames_Save_v5.py», οποιαδήποτε στιγμή αποφασιστεί η λήψη 30 συνεχόμενων frames, αρκεί η διαδρομή του αρχείου προς δημιουργία να είναι έγκυρη. Τέλος, σε δεύτερο χρόνο μπορεί να εκτελεστεί το αρχείο «data_analysis_of_frames.ipynb», για να συναχθούν συμπεράσματα από τις αποθηκευμένες φωτογραφίες.

4 Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία της προετοιμασίας της διάταξης και των δειγμάτων για την εκτέλεση των πειραμάτων. Στη συνέχεια, περιγράφεται η μέθοδος ανάλυσης των καταγεγραμμένων δεδομένων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από αυτή.

4.1 Επιλογή των Δειγμάτων των Πειραμάτων

Η εκτέλεση των πειραμάτων αποφασίσθηκε να γίνει με τη χρήση δειγμάτων προερχόμενων από το Community Bureau of Reference (BCR), ένα πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στο οποίο συμμετέχουν περισσότερα από 700 εργαστήρια. Στόχος του BCR είναι η δημιουργία πρωτοτύπων, σε ό,τι αφορά μετρήσεις φυσικών ποσοτήτων και ιδιοτήτων διάφορων υλικών, αλλά και χημικές αναλύσεις. Απώτερος σκοπός αυτού είναι η ύπαρξη μίας κοινής βάσης αναφοράς για όλες τις εταιρείες, τους οργανισμούς και λοιπούς φορείς κατά την Ευρώπη, των οποίων αντικείμενο είναι τα παραπάνω, για την μείωση ή αποφυγή των αποκλίσεων, που προκύπτουν στα αποτελέσματα τους, εξαιτίας της χρήσης μη τυποποιημένων δειγμάτων. [48]

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα σφαιρικών σωματιδίων τριών διαφορετικών μεγεθών, κατασκευασμένων από λάτεξ, περιεχόμενων σε υδατικό εναιώρημα συγκέντρωσης 2 g/L. Η αποθήκευση τους έχει γίνει σε μικρά πλαστικά διαφανή δοχεία, σφραγισμένων από πώματα, που εφάπτονται στα δοχεία με τη τεχνική του σπειρώματος. Επιλέχθηκαν διαλύματα σωματιδίων με μέσες διαμέτρους 2 μm , 4,8 μm και 9,6 μm , τα οποία προσομοιάζουν εκείνα του ανθρώπινου αίματος. Παραδείγματα αντιστοίχισης των σφαιριδίων των δειγμάτων με κάποια έμμορφα συστατικά, μαζί με την παράμετρο σκέδασης, που προκύπτει για κάθε ένα από αυτά και αναλύεται σε επόμενο υποκεφάλαιο, δίνονται στο σχήμα 4.1. Οι κωδικοί αναφοράς των δειγμάτων στο BCR είναι BCR – 165A για τα σφαιρίδια των 2 μm [49], BCR – 166A για αυτά των 4,8 μm [50] και BCR – 167A για των 9,6 μm [51].

Διάμετρος Σφαιριδίων (σε μm)	Έμμορφο Κύτταρο σε αντιστοιχία	Διάμετρος Έμμορφου Κυττάρου (σε μm)	Παράμετρος Σκέδασης
2	Αιμοπετάλια	Υγιή: $\approx 2 - 4$	19,33
4,8	Μικροκύτταρα (Μη Φυσιολογικά Ερυθρά Αιμοσφαίρια)	Υγιή: $\approx 7 - 8$ (Μικροκύτταρα: ≤ 6)	46,39
9,6	Λεμφοκύτταρα (Λευκά αιμοσφαίρια)	Υγιή: $\approx 7 - 18$	92,79

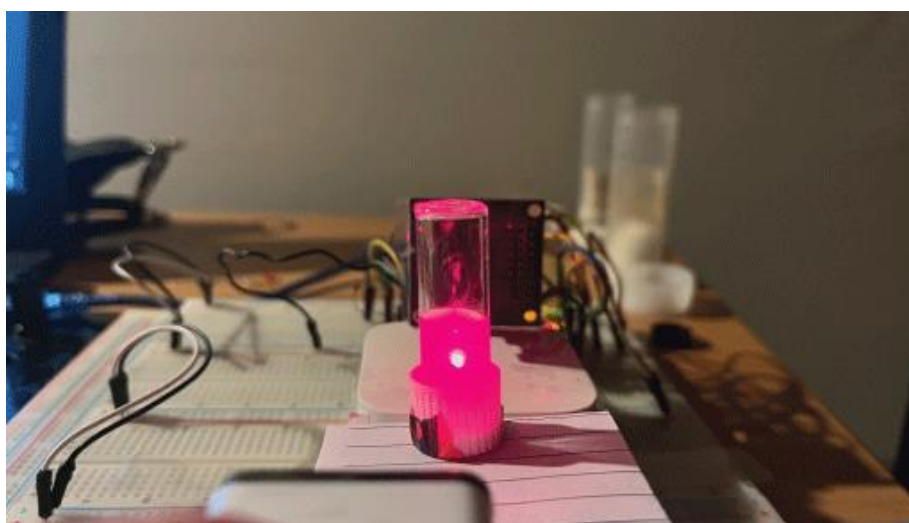
Σχήμα 4.1 – Αντιστοίχιση ειδών έμμορφων κυττάρων με τα σωματίδια των δειγμάτων, ως προς το μέγεθος και την παράμετρο σκέδασης

4.2 Προετοιμασία Υλικού και Λογισμικού για τα Πειράματα – Λήψη Δεδομένων

Πρώτο βήμα της διεξαγωγής των πειραμάτων ήταν η προετοιμασία της διάταξης των δειγμάτων και του περιβάλλοντος χώρου. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3, η βάση της διάταξης είναι η πλακέτα δοκιμών, επάνω στην οποία στηρίζεται η πλατφόρμα του μικροελεγκτή. Η κάμερα, το εκάστοτε δοχείο και η πηγή της ακτίνας laser χρειάζονταν επιπλέον υποστήριξη για τη σταθεροποίηση τους και τη διατήρηση του κάθε ενός στο σωστό ύψος, που θα επέτρεπε στο φως να διαπερνά το μέσο του κυλινδρικού δοχείου και να καταλήγει στο κέντρο του φακού της κάμερας. Αρχικό πλάνο, για την κάλυψη αυτής της ανάγκης, ήταν η προσθήκη μίας βάσης εκτυπωμένης με τη τεχνική του 3D Printing, σχεδιασμένης με τέτοιο τρόπο, ώστε τα στηρίγματα των επιμέρους στοιχείων να είναι αποσπώμενα και να κουμπώνουν επάνω στο κυρίως μέρος αυτής. Λόγω έλλειψης χρόνου, βρέθηκε ως προσωρινή λύση η στήριξη των στοιχείων σε απλά, αλλά σκληρά αντικείμενα, που μπορούν να βρεθούν εύκολα σε ακαδημαϊκό ή οικιακό περιβάλλον, για την εκπόνηση των πειραμάτων.

Ακολούθησε η ετοιμασία των δειγμάτων, με την αφαίρεση, αρχικά, των ετικετών του BCR, τα οποία κάλυπταν το μεγαλύτερο από το διαφανές μέρος των δοχείων, διότι διαφορετικά θα ήταν αδύνατο η ακτίνα φωτός να τα διαπεράσει. Έπειτα, έγινε σήμανση της διαμέτρου των σωματιδίων του κάθε δοχείου σε κολλητική ταινία, η οποία επικολλήθηκε σε, μη εμφανές στην κάμερα, σημείο του πώματος και σε μέγεθος τέτοιο ώστε να μη ξεπερνά το ύψος αυτού. Επακολούθως, καθαρίστηκε με αιθυλική αλκοόλη το εξωτερικό των δοχείων για την αφαίρεση υπολειμμάτων κόλλας και δακτυλικών αποτυπωμάτων, που θα αλλοίωναν το τελικό αποτέλεσμα της αποτύπωσης του φαινομένου της σκέδασης. Μετά τον καθαρισμό, τα δοχεία αφέθηκαν σε σταθερή θέση, ώστε να διαλυθούν οι φυσαλίδες που προκλήθηκαν από τη κίνηση τους στα προηγούμενα βήματα. Παρατηρήθηκε, αργότερα, η διατήρηση ενός μικρού αριθμού αυτών, όμως θεωρήθηκε αμελητέος, εξαιτίας του μεγέθους τους και του γεγονότος ότι δεν επηρέασαν την τελική ανάλυση.

Προχωρώντας στην προετοιμασία του χώρου, πριν τη λήψη των φωτογραφιών, παρατηρήθηκε, μετά από δοκιμές, πως για την καλύτερη δυνατή αποτύπωση του



Σχήμα 4.2 – Μορφή της διάταξης κατά τη διαδικασία λήψης του φωτογραφικού υλικού

φαινομένου της σκέδασης στα καρέ, ήταν σημαντικό να υπάρχει αντίθεση ανάμεσα στην ακτίνα φωτός του laser και του περιβάλλοντος γύρω από τη διάταξη. Έτσι, επιλέχθηκε η εκτέλεση των πειραμάτων σε σκοτεινό χώρο, με το ελάχιστο δυνατό τεχνητό φως. Όσο αφορά την ακτίνα laser χρησιμοποιήθηκε, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.3, πηγή ακτινοβολίας κόκκινου φωτός. Το μήκος κύματος αυτής κυμαίνεται από περίπου 0,65 μm έως 0,7 μm , καθώς προέρχεται από laser pointer μαζικής παραγωγής, γεγονός που δημιουργεί την πιθανότητα ύπαρξης απόκλισης από την αναγραφόμενη τιμή στα χαρακτηριστικά του προϊόντος. Για τους υπολογισμούς, χρησιμοποιείται η τιμή των 0,65 μm , όμως η μέθοδος, η οποία ακολουθήθηκε για την ανάλυση, ισχύει και είναι η ίδια για όλες τις τιμές εντός του εύρους.

Ως τελευταίο βήμα, διεξάχθηκαν τα πειράματα με την τοποθέτηση όλων των στοιχείων στη σωστή θέση, την ενεργοποίηση της πηγής φωτός και την εκτέλεση των βήματων του λογισμικού, όπως ακριβώς περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 3.3 για τη λήψη των καρέ. Όπως αναφέρεται και εκεί, η ποσότητα των καρέ, που αποθηκεύονται σε κάθε εκτέλεση του αντίστοιχου κώδικα, είναι 30. Ο αριθμός αυτός προκύπτει ως συμβιβασμός μεταξύ, από τη μία πλευρά, της ανάγκης για εύκολη και γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων και από την άλλη, της επιθυμίας παρατήρησης τυχόν φαινομένων κίνησης του διαλύματος – κυρίως για μελλοντικές εκδοχές του αισθητήρα, όπου το δείγμα θα είναι πλέον πραγματικό ανθρώπινο αίμα – καθώς και την παράκαμψη του εμποδίου της μη ελεγχόμενης / αυτόματα ρυθμιζόμενης έκθεσης του φακού της κάμερας, μέσω της δυνατότητας επιλογής για την ανάλυση, του βέλτιστου ως προς αυτήν, από το σύνολο των καρέ. Επιπλέον, έγιναν 50 λήψεις για κάθε διαφορετική διάμετρο σφαιριδίων, με σκοπό τη διαπίστωση της ύπαρξης επαναληψιμότητας στον τρόπο εμφάνισης της σκέδασης της ακτίνας στις φωτογραφίες. Από τα, συνολικά, 1.500 καρέ για κάθε μέγεθος (30 καρέ επί 50 λήψεις), παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους τα ευρήματα ανάλυσης ενός καρέ με τον φακό πλήρως καλυμμένο, ως σημείο αναφοράς, και από ένα για τα 2 μm , τα 4,8 μm και τα 9,6 μm . Ένα στιγμιότυπο από την εκτέλεση των λήψεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2 για την προβολή της τελικής θέσης της διάταξης, των δοχείων και της πηγής φωτός.

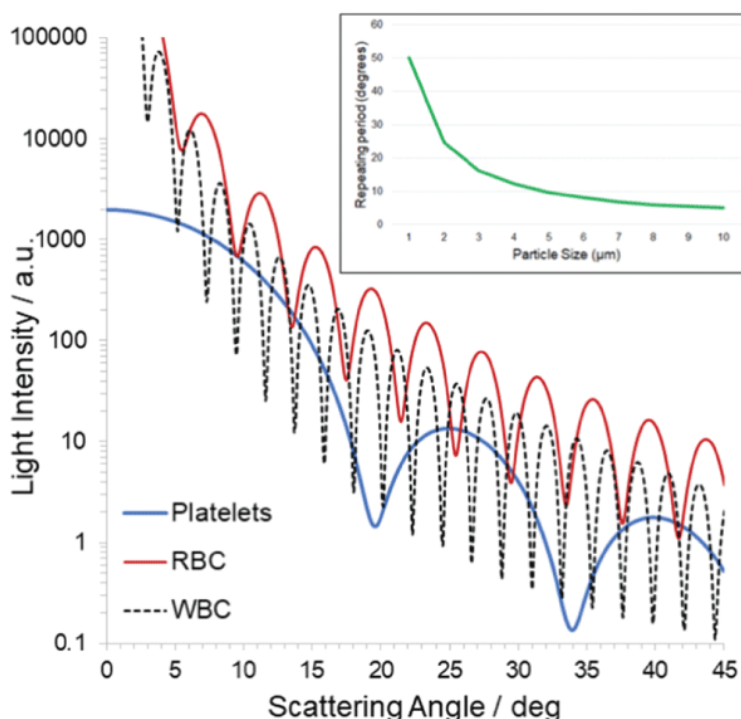
4.3 Διαδικασία Ανάλυσης των Δεδομένων

Η διαδικασία της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε σε τρία μέρη: την μελέτη της θεωρητικής αιτιολόγησης του φαινομένου της σκέδασης, την μετάβαση, από το γενικό πλαίσιο μελέτης, στην εφαρμογή των θεωρητικών γνώσεων και τον υπολογισμό των παραμέτρων, ειδικά, για τα επιλεγμένα δείγματα και τέλος την σύγκριση των προσδοκούμενων αποτελεσμάτων αποτύπωσης του φαινομένου σκέδασης με τα πραγματικά.

Κατ'αρχάς, έγινε υπολογισμός της παραμέτρου μεγέθους σκέδασης για το μήκος κύματος του κόκκινου χρώματος της ακτίνας laser και για τις τρεις διαμέτρους σωματιδίων, με τον τύπο που παρατίθεται στο υποκεφάλαιο 2.3. Εδώ, τα δείγματα από το BCR είναι συνθετικά κατασκευασμένα, επομένως το σχήμα τους είναι ιδανικά σφαιρικό, πράγμα που δεν θα ίσχυε, αν τα εξεταζόμενα δείγματα περιείχαν πραγματικό ανθρώπινο αίμα. Σε εκείνη την περίπτωση θα χρειαζόταν πιθανότατα να γίνει κάποια παραδοχή, πριν την εκτέλεση των υπολογισμών.

Η τιμή της παραμέτρου που προέκυψε είναι: 19,33 για την διάμετρο των 2 μm , 46,39 για τα 4,8 μm και 92,79 για τα 9,6 μm . Άρα, τα σωματίδια των πρώτων δύο ανήκουν στο εύρος που εξετάζεται από τη θεωρία σκέδασης Mie, ενώ της τελευταίας είναι μεγαλύτερα, ξεπερνούν αυτό το εύρος και εξετάζονται ως αντικείμενο της γεωμετρικής οπτικής. Η διαφορά αυτή αναμένεται να είναι εμφανής, ως παρατήρηση μεγαλύτερων τιμών της έντασης, που λαμβάνεται από την κάμερα, γύρω από την κύρια κατεύθυνση της ακτίνας, διότι σε σύγκριση με την σκέδαση από τα μικρότερα σωματίδια, αυτά προκαλούν εκπομπή μεγαλύτερου μέρους της ακτίνας, που σκεδάζεται προς την αρχική κατεύθυνση αντί προς την αντίθετη. [13]

Εκτός από την τιμή της έντασης, βέβαια, κάτι ακόμη που θα πρέπει, φυσιολογικά να είναι παρατηρήσιμο κατά την ανάλυση της αποτύπωσης του φαινομένου, είναι το γεγονός, ότι η έκταση του χώρου που καλύπτεται από το σκεδαζόμενο μέρος του φωτός και περιβάλλει τη βασική κατεύθυνση του, επεκτείνεται, όσο μεγαλώνει η διάμετρος των σφαιριδίων. Αντιστρόφως ανάλογα με το σκεδαζόμενο, η έκταση που καταλαμβάνει το μέρος της αρχικής ακτινοβολίας, μειώνεται. Με πιο απλά λόγια, το κομμάτι της ακτίνας που έχει υποστεί σκέδαση προβλέπεται, με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων, να παρουσιάζεται όλο και λιγότερο «συμπυκνωμένο» γύρω από το μέσο της ακτινοβολίας, επειδή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το ποσοστό του ακτινοβολούμενου κύματος που σκεδάζεται, διαχέεται περισσότερο στον χώρο και ταυτόχρονα γίνεται όλο και υψηλότερο. Η συμπεριφορά αυτή στηρίζεται στην παρατηρούμενη αλλαγή της έντασης του σκεδαζόμενου φωτός, κατά την αύξηση της εξεταζόμενης γωνίας σκέδασης. Αντιστρόφως ανάλογη σχέση, μεταξύ των δύο, εμφανίζεται για όλα τα διαφορετικά μεγέθη σφαιριδίων, που εμπίπτουν στη θεωρία Mie, ωστόσο ακολουθεί διαφορετικό μοτίβο στην κάθε περίπτωση, οδηγώντας, κατά συνέπεια, στις προηγουμένως αναφερθείσες αναμενόμενες παρατηρήσεις. Ενδεικτικά,



Σχήμα 4.3 – Διαγραμματική αποτύπωση της σχέσης, ανάμεσα στην ένταση του φωτός και τη γωνία σκέδασης των έμμορφων κυττάρων, σε προσομοίωση της σκέδασης Mie (Πηγή: Elsevier [52])

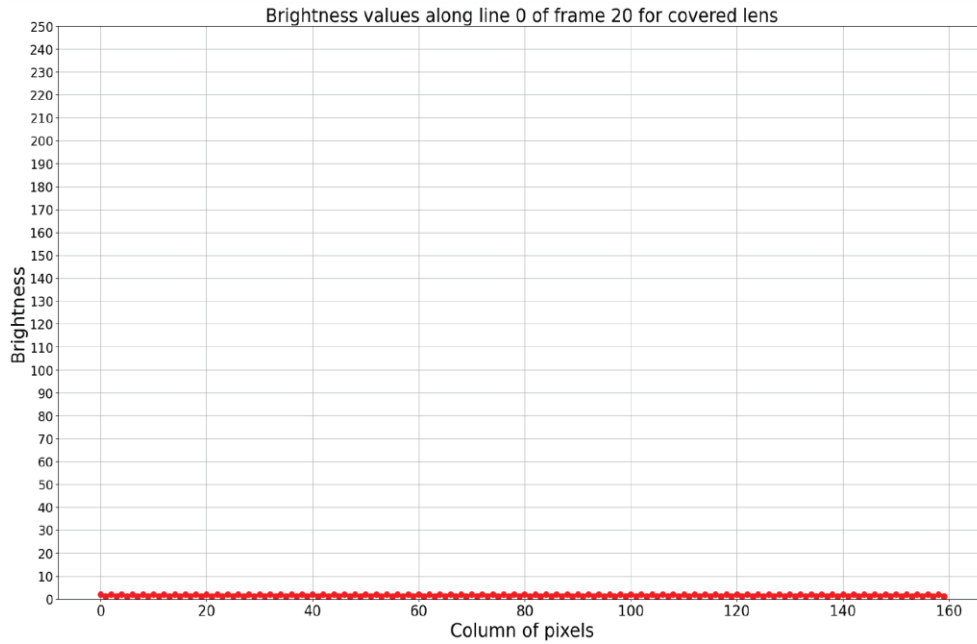
παρατίθενται στο σχήμα 4.3 κάποια παραδείγματα προσομοίωσης αυτής της σχέσης, για τα τρία κύρια είδη κυττάρων και για πηγή μήκους κύματος 0,65 μm .

Σε επόμενο στάδιο, επιλέχθηκαν χειροκίνητα τα καρέ, από τα οποία εξάχθηκαν τα συμπεράσματα, με κριτήριο την βέλτιστη αντίθεση και εμφάνιση του φαινομένου. Η διαγραμματική σχεδίαση της κατανομής του φωτός, γίνεται, αφότου εντοπιστεί από το πρόγραμμα της παραγράφου 3.2.4 η γραμμή, που περιέχει τα περισσότερα από τα πιο φωτεινά pixels της εξεταζόμενης φωτογραφίας, ή με άλλα λόγια της διαμέτρου του κύκλου, ο οποίος σχηματίζεται στη φωτογραφία, ως απόρροια της εκπομπής του φωτός με κατεύθυνση προς τον φακό της κάμερας. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν.

4.4 Αποτελέσματα

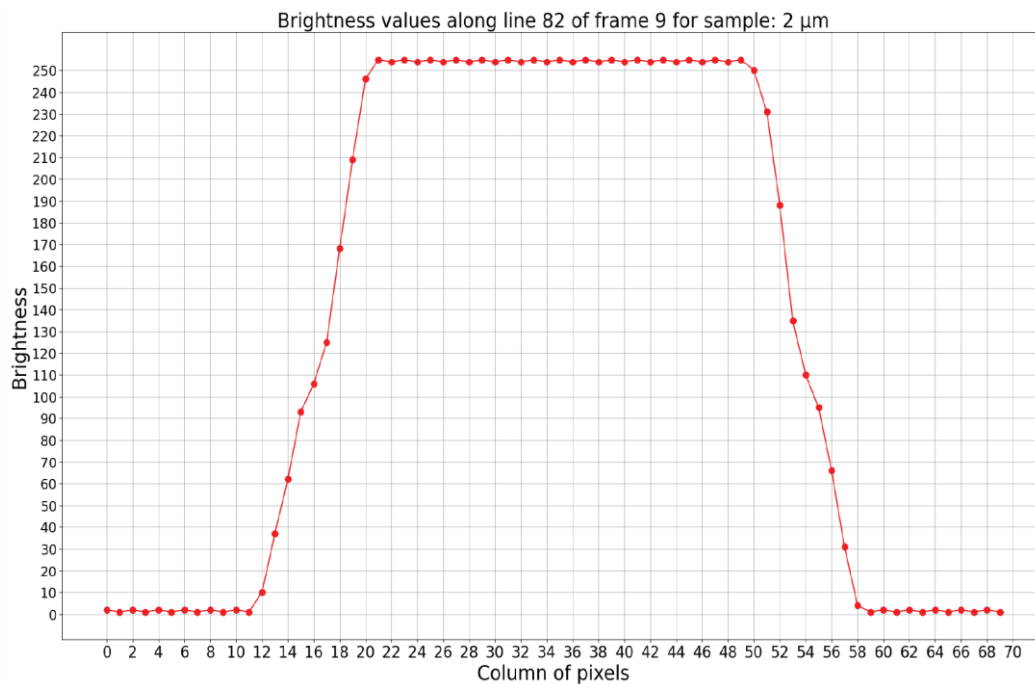
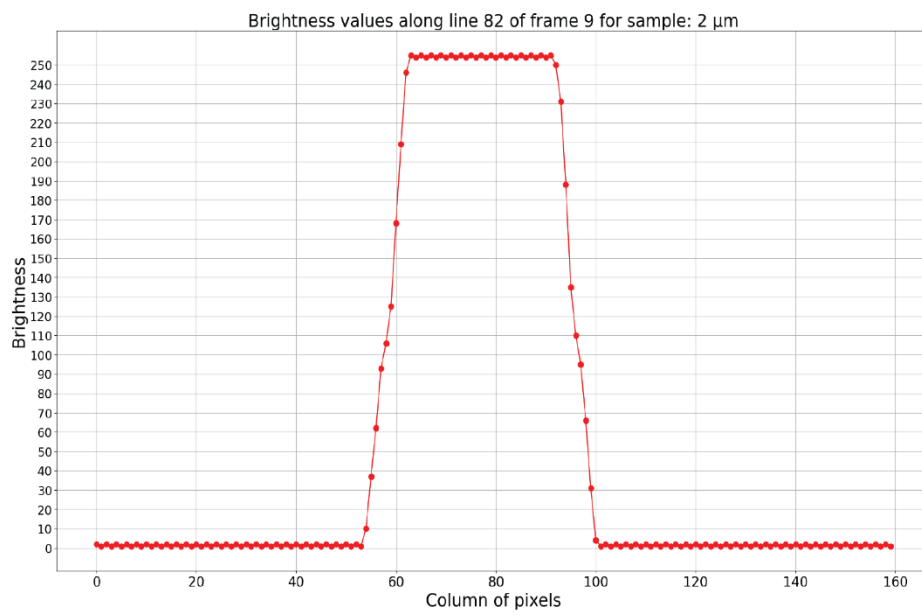
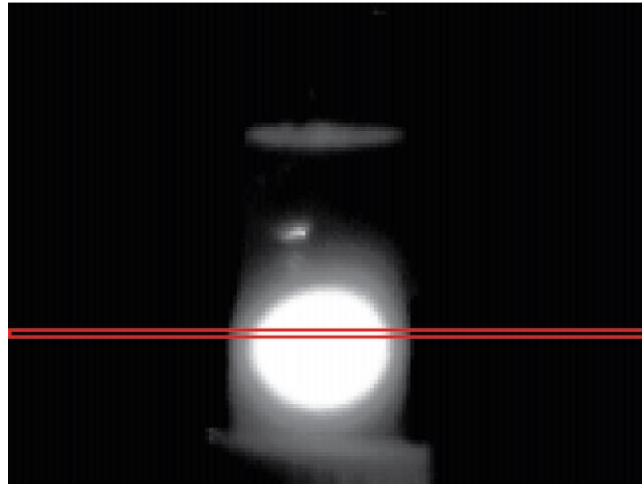
Η φωτογραφία και το αντίστοιχο διάγραμμα της λήψης αναφοράς δίνονται στο σχήμα 4.3, ενώ αυτά των λήψεων για το κάθε δείγμα, δίνονται κατά αύξουσα σειρά διαμέτρου των σφαιριδίων στα σχήματα 4.4 – 4.6. Σε κάθε ένα από τα σχήματα των δειγμάτων συμπεριλαμβάνεται, εκτός του καρέ, ένα διάγραμμα με τη συνολική κατανομή των τιμών φωτεινότητας μέσα στην αναλυόμενη γραμμής pixels και ένα αντίγραφό του με μεγέθυνση στην περιοχή μεγαλύτερου ενδιαφέροντος, δηλαδή στο σημείο που περιλαμβάνει την καταγραφή της έντασης στην κατεύθυνση της κύριας ακτίνας και την γύρω περιοχή, με διατήρηση στο διάγραμμα του ίδιου αριθμού pixels κάθε φορά, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση τους. Ο κάθετος άξονας αφορά την τιμή φωτεινότητας από 0 έως 255. Το εύρος αυτό προκύπτει από την αποθήκευση της πληροφορίας κάθε pixel σε ένα byte, το οποίο μπορεί να αναπαραστήσει τον δεκαδικό αριθμό 255 κατά μέγιστον. Ο οριζόντιος άξονας αποτελείται από τα pixel της γραμμής, αριθμημένα από τα αριστερά προς τα δεξιά, με τη σειρά που εμφανίζονται στη φωτογραφία. Επίσης, η εμφάνιση ασυμμετρίας, στα σχήματα που αφορούν τα δείγματα, είναι αναμενόμενη και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν κατά την ανάλυση κανενός δείγματος, αφού είναι γνωστό, πως το φαινόμενο της σκέδασης οξύνεται ή αμβλύνεται από τα ακανόνιστα σχήματα και την οργάνωση των κυττάρων, ειδικά όταν κατά τη μέτρηση δεν χρησιμοποιείται κάποιου είδους φίλτρο, όπως στην προκειμένη περίπτωση. [53]



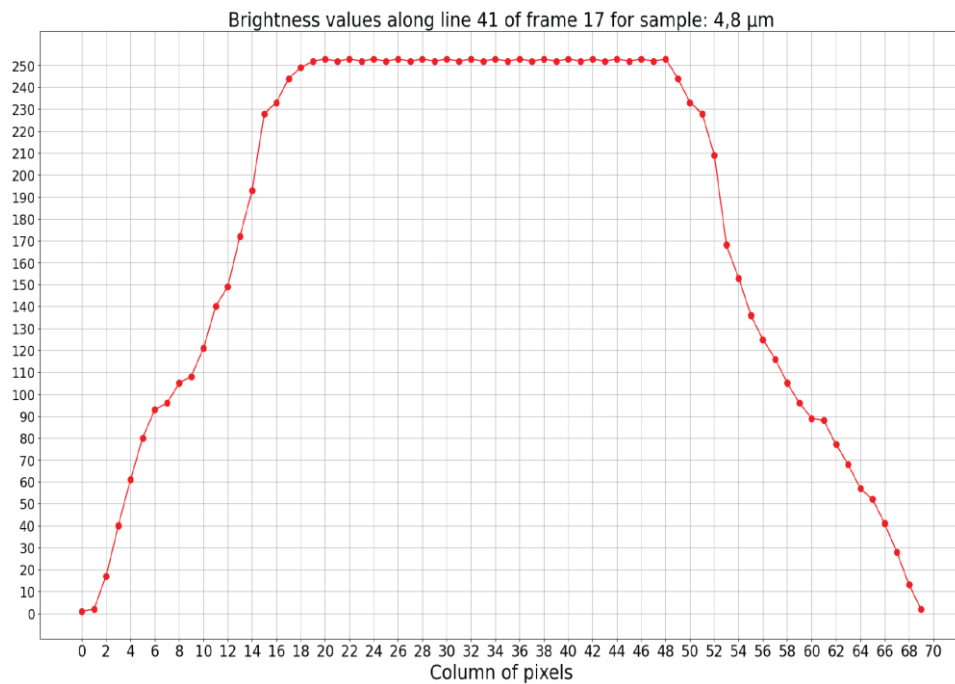
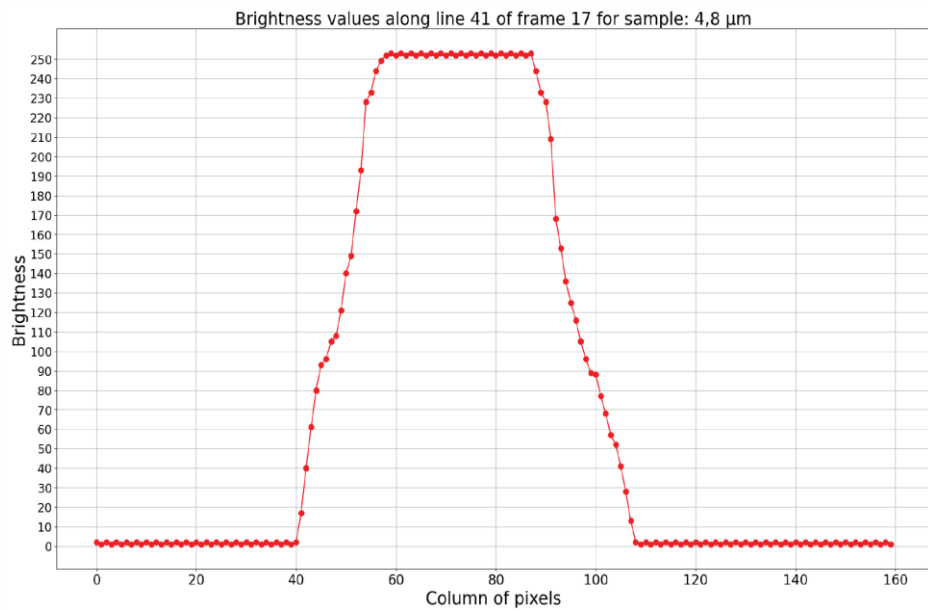
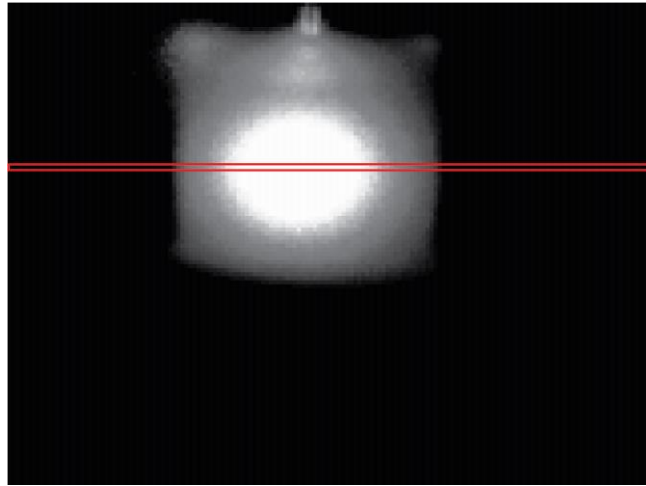


Σχήμα 4.3 – Καρέ και διαγραμματική αναπαράσταση των τιμών της φωτεινότητας από την λήψη με τον φακό καλυμμένο

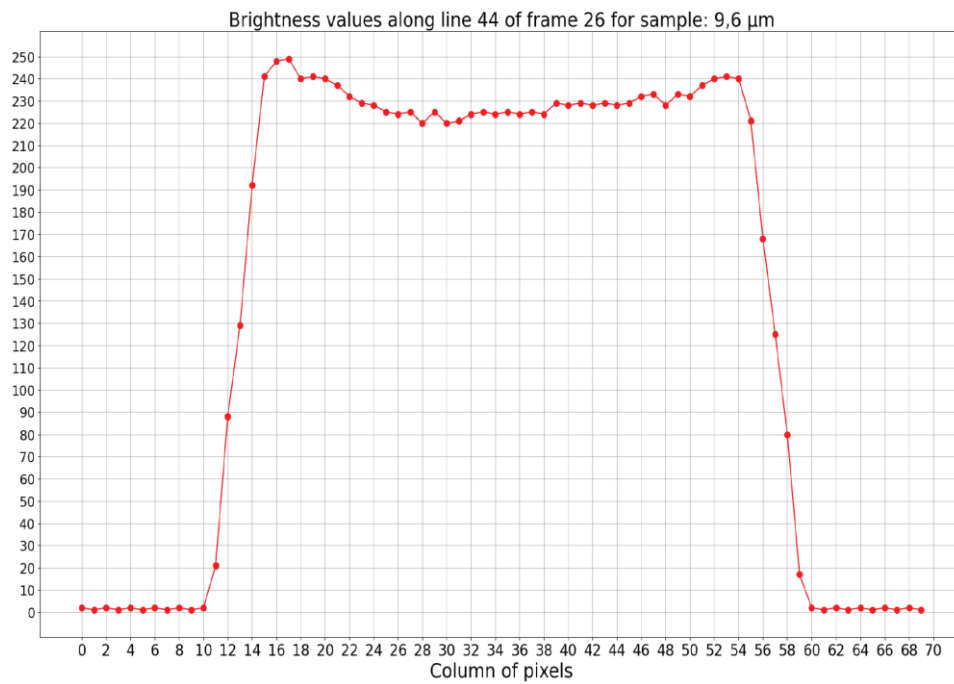
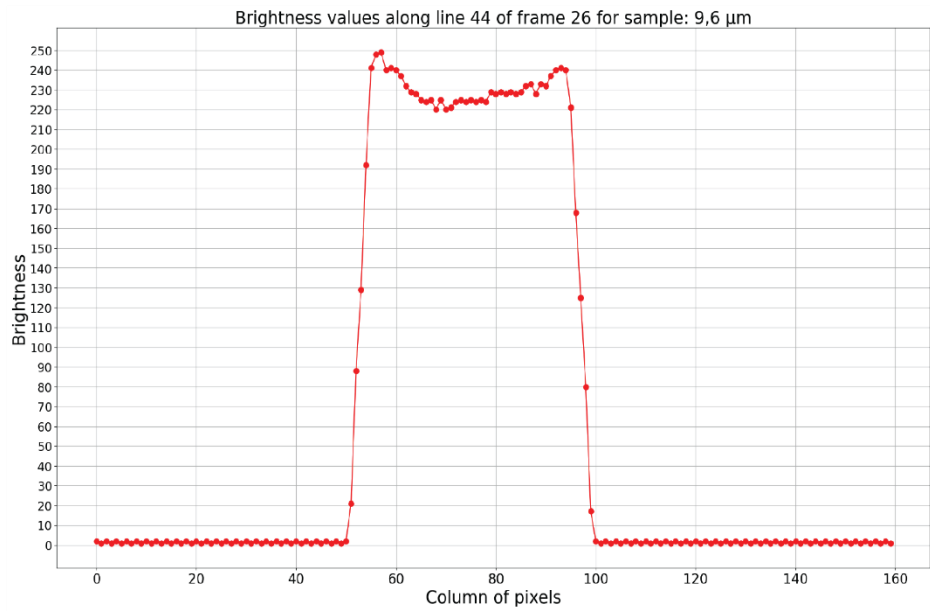
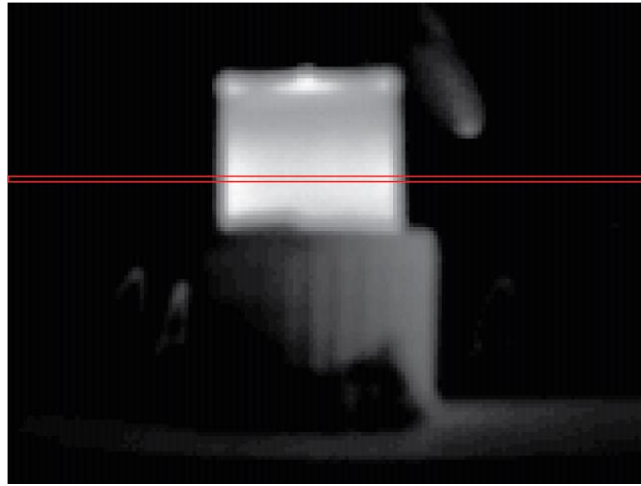
Παρατηρείται, όπως προβλεπόταν, ότι στις πρώτες δύο περιπτώσεις στο κέντρο της ακτίνας η ληφθείσα φωτεινότητα είναι σχεδόν ίδια και κατέχει τιμές κοντά στη μέγιστη, ενώ στην τρίτη οι τιμές είναι χαμηλότερες. Το κύριο ενδιαφέρον, όμως, ως προς τις αναλύσεις των μετρήσεων, βρίσκεται στη διαπίστωση, πως όσο αυξάνεται η διάμετρος των σωματιδίων, τόσο πιο έντονη είναι η παρουσία φωτός, συνέπειας της σκέδασης, στην περιοχή που εκτείνεται δεξιά και αριστερά από το κέντρο, ενώ ταυτόχρονα μικραίνει η μεσαία περιοχή, που αντιστοιχεί στο φως της αρχικής ακτίνας του laser. Για τα 2 μm είναι φανερή η ραγδαία εξασθένηση της έντασης εκτός των ορίων της ακτίνας του laser, για τα 4,8 μm αρχίζει να φαίνεται αχνά κάποια μεγαλύτερη διαβάθμιση, ενώ για τα 9,6 μm είναι, πλέον, προφανές το φαινόμενο της σκέδασης της ακτινοβολίας σε κατευθύνσεις εκτός της κύριας. Ως προς την απόσταση από το μέσο, στην οποία εκτείνονται οι σκεδαζόμενες ακτίνες, μεγαλύτερη είναι αυτή του δείγματος των 4,8 μm , ενώ οι άλλες δύο είναι σχεδόν όμοιες, κρίνοντας από τα μεγεθυμένα διαγράμματα στα σχήματα 4.4 και 4.6. Κατά συνέπεια, η αρχικά προβλεπόμενη συμπεριφορά, ως προς την έκταση, επαληθεύεται για τις περιπτώσεις που καλύπτονται από τη θεωρία Mie, όχι όμως για τη διάμετρο των 9,6 μm , γεγονός του οποίου η αιτία εικάζεται πως είναι η έλλειψη βοηθητικού εξοπλισμού κατά τη λήψη, όπως είναι τα φίλτρα πόλωσης.



Σχήμα 4.4 – Καρέ και διαγραμματική αναπαράσταση των τιμών της φωτεινότητας στη διάμετρο του κύκλου, με τη μορφή του οποίου εμφανίζεται η εκπομπή της ακτίνας laser μέσα από το δείγμα των 2 μm



Σχήμα 4.5 – Καρέ και διαγραμματική αναπαράσταση των τιμών της φωτεινότητας στη διάμετρο του κύκλου, με τη μορφή του οποίου εμφανίζεται η εκπομπή της ακτίνας laser μέσα από το δείγμα των 4,8 μm



Σχήμα 4.6 – Καρέ και διαγραμματική αναπαράσταση των τιμών της φωτεινότητας στο πιο φωτεινό σημείο της εκπομπής της ακτίνας laser μέσα από το δείγμα των 9,6 μm

5 Προτάσεις για Βελτίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνονται κάποιες ιδέες, των οποίων η υλοποίηση πιστεύεται πως θα οδηγήσει στη βελτίωση του αισθητήρα, τόσο από άποψη λειτουργικότητας, όσο και καλύτερης απόδοσης και ανάλυσης του φαινομένου της σκέδασης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες εικασίες για τα χαρακτηριστικά, που θα έχουν προστεθεί σε επόμενες μορφές του αισθητήρα, μετά από περαιτέρω έρευνα.

5.1 Πιθανοί Τρόποι Βελτίωσης

Μία από τις σημαντικότερες βελτιώσεις, που θα μπορούσαν να γίνουν σε επόμενες προσπάθειες, αφορά τη λήψη καθαρότερων – δηλαδή χωρίς εξωτερικό θόρυβο – φωτογραφιών και κατ’ ακολουθίαν την ακριβέστερη ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων. Αυτή, συνδυάζει την προσθήκη στη διάταξη δύο φίλμ πόλωσης και μιας βάσης, η οποία σχεδιάζόταν να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση των πειραμάτων, που συμπεριλήφθηκαν στην εργασία, κάτι που δεν πραγματοποιήθηκε για λόγο που αναφέρεται στην παράγραφο 2.4. Τα φίλμ πόλωσης εκτιμάται ότι θα συμβάλουν θετικά στην ποιότητα των φωτογραφιών, αφού θα αφήνουν μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας να ταξιδέψει από την πηγή μέχρι τον φακό και θα μειώνουν με αυτό τον τρόπο τον θόρυβο. Η βάση θα βοηθήσει στη σταθεροποίηση των επιμέρους στοιχείων (πηγή ακτίνας laser, δείγμα, κάμερα, λοιπά βοηθητικά στοιχεία) στις σωστές θέσεις, που μέχρι στιγμής τοποθετούνται χειροκίνητα, και έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγάλη επιρροή του ανθρώπινου παράγοντα στην ποιότητα των λήψεων.

Ακόμη μία πρόταση είναι η αντικατάσταση της πλατφόρμας του μικροελεγκτή, από κάποια ισχυρότερη, με περισσότερη διαθέσιμη προσωρινή μνήμη. Σκοπός αυτής της προτεινόμενης τροποποίησης είναι η αύξηση της ικανότητας και της ταχύτητας επεξεργασίας και αποστολής των δεδομένων, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η καταγραφή της σκέδασης σε βίντεο μικρότερης συχνότητας λήψης, πράγμα που θα δώσει μεγαλύτερη ευχέρεια στη παρατήρηση του φαινομένου. Άλλη ενδιαφέρουσα απόρροια της επιπλέον υπολογιστικής δύναμης, θα είναι η δυνατότητα της δοκιμής της μεταφοράς μέρους του κώδικα, που εκτελείται τη δεδομένη στιγμή, από τον H/Y στον μικροελεγκτή, για την εξέλιξη του αισθητήρα ένα βήμα πιο κοντά στην ανεξάρτητη από εξωτερικές συσκευές λειτουργία του.

5.2 Προβλέψεις μελλοντικών εφαρμογών

Σε επόμενα στάδια ανάπτυξης του βιοϊατρικού αισθητήρα είναι προσδοκούμενη η επίτευξη της εξέλιξής του σε πλήρως φορητή συσκευή. Αυτό προαπαιτεί τη μελέτη και εύρεση τρόπου λειτουργίας, κατά τον οποίο: α. θα είναι επαρκής η τροφοδοσία του από μπαταρία και β. τα ληφθέντα δεδομένα μαζί με τα εξαγομένα αποτελέσματα από την επεξεργασία των πρώτων, θα μπορούν να σταλθούν μέσω κάποιας μορφής ασύρματης επικοινωνίας σε έναν H/Y ή σε αποθηκευτικό χώρο στο cloud, για τη δημιουργία δυνατότητας απομακρυσμένης πρόσβασης σε αυτά.

Σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα, εκτιμάται ως χρήσιμη η ηλεκτρονική επισύναψη στα δείγματα κάθε ενός ασθενούς επιπλέον πληροφοριών για την κατάσταση της υγείας του. Το περιεχόμενο τους δύναται να είναι παρόμοιο με αυτό της ιατρικής καρτέλας

του ασθενούς ή να προκύψει από τη συλλογή των απόψεων ενός συνόλου ιατρικού προσωπικού επί του θέματος, καταλήγοντας στην εύρεση των πληροφοριών με την ύψιστη σημασία για τη διαδικασία της διάγνωσης. Σε ακόμη πιο εξελιγμένα μοντέλα θα μπορούσε να δίνεται η δυνατότητα εξατομίκευσης, από τον χειριστή των κατηγοριών των πληροφοριών, που θα αποθηκεύονται και θα συνδέονται με τα δείγματα.

6 Συμπεράσματα

Από την εκπόνηση των πειραμάτων και την επεξεργασία των δεδομένων, που προέκυψαν από αυτά, συμπεραίνεται πως μπορεί να προκύψει συσχέτιση του μεγέθους συνθετικών σωματιδίων, που προσομοιάζουν σε πραγματικούς παράγοντες του ανθρώπινου αίματος, με την καταγραφή της έντασης της σκεδαζόμενης ακτίνας φωτός από τα σωματίδια και τη διαγραμματική παρουσίαση της. Ο αισθητήρας στην παρούσα μορφή δεν πληροί τα κριτήρια για αξιόπιστη σύνδεση της γωνίας μεταξύ της αρχικής και των σκεδαζόμενων ακτινών και της διαμέτρου των σφαιριδίων. Κατά συνέπεια, υποστηρίζεται πως ο αισθητήρας θα είναι ικανός, σε επόμενες εκδοχές, να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο που, μετά από βελτιώσεις, θα μπορεί να επιτελέσει ταυτοποίηση των έμμορφων συστατικών του αίματος και να μετρήσει την συγκέντρωσή τους.

7 Βιβλιογραφία

- [1] Ο. Σεραφειμίδου και Ε. Πατζιαρέλα, *Εργαστηριακή Προσέγγιση στη Γενική Αίματος*, Α'. Εκδόσεις Α. Αλτιντζή, 2008.
- [2] 'Blood | Definition, Composition, & Functions | Britannica'. Ημερομηνία πρόσβασης: 11 Μάιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.britannica.com/science/blood-biochemistry>
- [3] Βαγδατλή Ελένη, *Εμμορφα Στοιχεία του Αίματος*. Εκδόσεις Α. Αλτιντζή, 2010.
- [4] Α. Τσελέπης, Δ. Πανταζή, και Κ. Τέλλης, *Κλινική Βιοχημεία – Διαγνωστική*. 2024. doi: 10.57713/kallipos-964.
- [5] Μ. Λαγκαδινού, 'Φυσιολογία Αίματος - ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ Γ', Ημερομηνία πρόσβασης: 12 Μάιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Feclass.upatras.gr%2Fmodules%2Fdocument%2Ffile.php%2FNURS318%2F%25CE%25A6%25CE%25A5%25CE%25A3%25CE%2599%25CE%259F%25CE%259B%25CE%259F%25CE%2593%25CE%2599%25CE%2591%2520%25CE%2591%25CE%2599%25CE%259C%25CE%2591%25CE%25A4%25CE%259F%25CE%25A3-%25CE%25B1%25CE%25BD%25CE%25B1%25CF%2580%25CE%25BD%25CE%25B5%25CF%2585%25CF%2583%25CF%2584%25CE%25B9%25CE%25BA%25CE%25BF%25CF%2585.pptx&wdOrigin=BROWSELINK>
- [6] Echinaceapallida, *English: erythrocytes (Blood smear with Wright's stain)*. 2009. Ημερομηνία πρόσβασης: 10 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blood-rbcs.jpg>
- [7] Δ. Γρίβας, 'Ηλεκτρονική Πύλη του ΙΑΣΠΙΣ, Πανεπιστήμιο Αθηνών', Φαγοκυττάρωση, Ηλεκτρονική Πύλη του Ασκληπιακού Πάρκου. Ημερομηνία πρόσβασης: 25 Μάιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://panacea.med.uoa.gr/topic.aspx?id=137>
- [8] Blausen.com Staff, *English: White Blood Cells. See a full animation of this medical topic*. 2017. Ημερομηνία πρόσβασης: 10 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blausen_0909_WhiteBloodCells_\(note xt\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blausen_0909_WhiteBloodCells_(note xt).png)
- [9] Δ. Λουκόπουλος και Μ. Πολίτου, *Μαθήματα Αιματολογίας*. 2016. doi: 10.57713/kallipos-726.
- [10] G. Dr Beards, *English: Platelets in a Giemsa-stained blood film*. 2014. Ημερομηνία πρόσβασης: 10 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Platelets2.JPG>
- [11] Ptrump16, *English: Sysmex XT-4000i automated hematology analyzer in use at a general hospital*. 2019. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sysmex_XT-4000i.jpg

- [12] Α. Γ. Αλεξοπούλου, Α. Α. Καμινάρη, Α. Μουτσάτσου, και Π. Μπάνου, *Απεικονιστικές Τεχνικές στη Μελέτη της Πολιτιστικής Κληρονομιάς*. 2024. doi: 10.57713/kallipos-362.
- [13] Ι. Χριστοδουλάκης, *Ηλεκτρομαγνητισμός – Ηλεκτρισμός – Οπτική*. Kallipos, Open Academic Editions, 2025. doi: 10.57713/kallipos-1060.
- [14] Γ. Κωσταντακόπουλος, ‘Light Website : Πηγές ορατού φωτός’. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Μάρτιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://light.physics.auth.gr/enc/sources.html>
- [15] Α. Πασχαλίδου, *Μαθήματα Φυσικής του Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος*. 2023. doi: 10.57713/kallipos-219.
- [16] Sharayanan, English: *Depiction of Mie scattering on a spheric particle. The graph roughly displays scattering intensity per direction. From left to right : Rayleigh, intermediate and full Mie scattering*. 2007. Ημερομηνία πρόσβασης: 10 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mie_scattering.svg
- [17] SparkFun Electronics from Boulder, *Arduino Uno R3*. 2013. Ημερομηνία πρόσβασης: 10 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino_Uno_-_R3.jpg
- [18] ‘Difference between Arduino and Raspberry Pi’, GeeksforGeeks. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-arduino-and-raspberry-pi/>
- [19] Les Pounder, ‘Raspberry Pi vs Arduino: Which Board is Best?’, Tom’s Hardware. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.tomshardware.com/features/raspberry-pi-vs-arduino>
- [20] ‘Online Power Profiler - opp - Online Power Profiler - Nordic DevZone’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://devzone.nordicsemi.com/power/w/opp?utm_source=chatgpt.com
- [21] ‘Nordic Semiconductor distributor inventory lookup below.’ Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.nordicsemi.com/About-us/BuyOnline>
- [22] ‘Arduino Docs | Arduino Documentation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://docs.arduino.cc/>
- [23] ‘Arduino Forum’, Arduino Forum. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://forum.arduino.cc/>
- [24] ‘Raspberry Pi Documentation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>
- [25] ‘Raspberry Pi Forums - Index page’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://forums.raspberrypi.com/>

- [26] ‘Nordic Technical Documentation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://docs.nordicsemi.com/>
- [27] ‘Nordic DevZone’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://devzone.nordicsemi.com/>
- [28] ‘Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet’. Atmel Corporation, Ιανουάριος 2015. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [29] ‘Arduino UNO Full Pinout’. 6 Οκτώβριος 2022. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://docs.arduino.cc/resources/pinouts/A000066-full-pinout.pdf>
- [30] ‘Arduino UNO Product Reference Manual’. 12 Φεβρουάριος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- [31] ‘Advanced Information Preliminary Datasheet for OV7670/OV7171 CMOS VGA CameraChip Sensor with OmniPixel Technology’. OmniVision Technologies, Inc., 21 Αύγουστος 2006. Ημερομηνία πρόσβασης: 15 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://web.mit.edu/6.111/www/f2016/tools/OV7670_2006.pdf
- [32] ‘OV7670/OV7171 CMOS VGA CameraChip Implementation Guide’. OmniVision Technologies, Inc., 9 Φεβρουάριος 2005. Ημερομηνία πρόσβασης: 15 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://web.mit.edu/6.111/www/f2016/tools/OV7670app.pdf>
- [33] M. Podpora, G. P. Korbaś, και A. Kawala-Janik, ‘YUV vs RGB—Choosing a Color Space for Human-Machine Interaction’, παρουσιάστηκε στο 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Σεπτεμβρίου 2014, σελ. 29–34. doi: 10.15439/2014F206.
- [34] J. Bartlett, *Electronics for Beginners: A Practical Introduction to Schematics, Circuits, and Microcontrollers*. Berkeley, CA: Apress L. P, 2020.
- [35] R. Arora, ‘I2C Bus Pull-Up Resistor Calculation’, 2015.
- [36] ‘Arduino IDE | Arduino Documentation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://docs.arduino.cc/software/ide/#ide-v1>
- [37] ‘Visual Studio Code FAQ’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://code.visualstudio.com/docs/supporting/faq>
- [38] ‘Why did we build Visual Studio Code?’ Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://code.visualstudio.com/docs/editor/whyvsc>

- [39] ‘Visual Studio Code - Code Editing. Redefined’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://code.visualstudio.com/>
- [40] ‘Python Debugger - Visual Studio Marketplace’. Ημερομηνία πρόσβασης: 16 Φεβρουάριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=ms-python.debugpy>
- [41] ‘pySerial — pySerial 3.4 documentation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Μάρτιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/pyserial.html>
- [42] ‘NumPy documentation — NumPy v2.2 Manual’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Μάρτιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://numpy.org/doc/stable/>
- [43] ‘Welcome to imageio’s documentation! — imageio 2.37.0 documentation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 9 Μάρτιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://imageio.readthedocs.io/en/stable/>
- [44] ‘The Jupyter Notebook — Jupyter Notebook 7.5.0a0 documentation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://jupyter-notebook.readthedocs.io/en/latest/notebook.html>
- [45] ‘pandas - Python Data Analysis Library’. Ημερομηνία πρόσβασης: 3 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://pandas.pydata.org/about/index.html>
- [46] ‘Matplotlib: Python plotting — Matplotlib 2.0.2 documentation’. Ημερομηνία πρόσβασης: 4 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://matplotlib.org/2.0.2/index.html>
- [47] I. Luuk, *LiveOV7670*. (17 Οκτώβριος 2021). C++. Ημερομηνία πρόσβασης: 4 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://github.com/indrekluk/LiveOV7670>
- [48] ‘THE COMMUNITY BUREAU OF REFERENCE : AN INSTRUMENT FOR THE ATTAINMENT OF THE 'BIG MARKET'', European Commission - European Commission. Ημερομηνία πρόσβασης: 2 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/memo_86_102
- [49] ‘BCR-165_ST-WB-CERT-1768887-1-1-1.pdf’. Ημερομηνία πρόσβασης: 2 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://assets.lgcstandards.com/sys-master%2Fpdfs%2Fh29%2Fhfa%2F10136531730462%2FCOA_BCR-165_ST-WB-CERT-1768887-1-1-1.PDF
- [50] ‘BCR-166_ST-WB-CERT-1768888-1-1-1.pdf’. Ημερομηνία πρόσβασης: 2 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://assets.lgcstandards.com/sys-master%2Fpdfs%2Fh8e%2Fhef%2F10136510398494%2FCOA_BCR-166_ST-WB-CERT-1768888-1-1-1.PDF
- [51] ‘BCR-167_ST-WB-CERT-1768889-1-1-1.pdf’. Ημερομηνία πρόσβασης: 2 Ιούνιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο:

https://assets.lgcstandards.com/sys-master%2Fpdfs%2Fh9f%2Fhc2%2F10136598577182%2FCOA_BCR-167_ST-WB-CERT-1768889-1-1-1.PDF

- [52] K. Karakostas, S. Gkagkanis, K. Katsaliaki, P. Köllensperger, A. Hatzopoulos, και Μ. Ε. Kiziroglou, ‘Portable optical blood scattering sensor’, *Microelectron. Eng.*, τ. 217, σελ. 111129, Σεπτεμβρίου 2019, doi: 10.1016/j.mee.2019.111129.
- [53] Σ. Ριζοπούλου, Χ. Χειμών, Δ. Ι. Κούκου, και Δ. Γκίκας, *Βιομηχανική & Βιομέτρηση*. 2021. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Μάρτιος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/8019>