



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών  
και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής Και Συστημάτων  
Πληροφορικής

## Σχεδίαση και κατασκευή αισθητήρα θολότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άλκης Ν. Κουκοβίνης

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2011





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών  
και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής Και Συστημάτων  
Πληροφορικής

## Σχεδίαση και κατασκευή αισθητήρα θολότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άλκης Ν. Κουκοβίνης

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21η Ιουλίου 2011.  
Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....  
Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Βασίλειος Λούμος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ελευθέριος Καγιάφας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....  
Άλκης Ν. Κουκοβίνης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

**Copyright** © Άλκης Ν. Κουκοβίνης, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. **All rights reserved.**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός αισθητήρα θολότητας – θολομέτρου, που θα υπολογίζει την σχετική διαύγεια υγρών διαλυμάτων. Η μέτρηση της θολότητας είναι μία από τις πιο σημαντικές «αισθητικές» μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας διαλυμάτων και αποτελεί μία ποιοτική διαδικασία προσέγγισης της ποσότητας αιωρούμενων σωματιδίων που μπορεί να βρίσκονται μέσα σε αυτά.

Ο αισθητήρας θολότητας ανήκει στην γενικότερη κατηγορία οπτικών αισθητήρων και η λειτουργία του βασίζεται στην θεωρία της διάχυσης του φωτός που προκαλείται από την παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων σε ένα υγρό διάλυμα. Μία πηγή φωτός εκπέμπει ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε ένα υγρό δείγμα και ένα σύστημα φωτοδεκτών ανιχνεύει την ένταση της διαχεόμενης ακτινοβολίας.

Το θολόμετρο που κατασκευάστηκε είναι ένα θολόμετρο λόγου όπου η πηγή φωτός είναι ένα LED υπέρυθρης ακτινοβολίας και το σύστημα φωτοδεκτών περιλαμβάνει τρεις φωτοδιόδους πυριτίου που τοποθετούνται περιμετρικά σε γωνίες  $90^\circ$ ,  $150^\circ$  και  $180^\circ$  μοιρών ως προς την διεύθυνση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Η τιμή της θολότητας υπολογίζεται με βάση ένα λόγο μεταξύ των εντάσεων διαχεόμενης ακτινοβολίας των φωτοδίοδων, ο οποίος εκφράζει την ένταση διαχεόμενης ακτινοβολίας σε γωνία  $90^\circ$  (φωτοδέκτης  $90^\circ$ ) σε σχέση με την ένταση διαχεόμενης ακτινοβολίας που ανιχνεύεται από τις άλλες δύο φωτοδιόδους (φωτοδέκτης εμπρόσθιας διάχυσης και φωτοδέκτης μετάδοσης του φωτός).

Αυτή η συσκευή θολότητας αποτελείται από δύο επιμέρους μονάδες: την μονάδα δειγματοληψίας, στην οποία τοποθετούνται το δοχείο δείγματος και τα οπτικά στοιχεία, και το τυπωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα που επεξεργάζεται, υπολογίζει και απεικονίζει την τιμή της θολότητας. Στην διπλωματική εργασία παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι σχεδίασης, κατασκευής και βαθμονόμησης καθώς και ο τρόπος λειτουργίας του αισθητήρα, με σκοπό την χρήση του θολομέτρου σε εφαρμογές που αφορούν τον έλεγχο της ποιότητας του νερού.

Τέλος παρουσιάζεται μία πλήρης αξιολόγηση του θολομέτρου που κατασκευάστηκε αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας και την ακρίβεια του, η οποία έχει σαν στόχο την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση παρόμοιων συσκευών αισθητήρων.

## Λέξεις κλειδιά

Αισθητήρα θολότητας, διαύγεια, διάλυμα, αιωρούμενα σωματίδια, οπτικοί αισθητήρες, θεωρία διάχυσης του φωτός, θολόμετρο λόγου, πηγή φωτός, σύστημα φωτοδεκτών, ποιότητα του νερού.

## Abstract

The objective of this diploma thesis is the design and construction of a turbidity sensor – turbidity meter, which calculates the relative clarity of liquid solutions. Turbidity measurement is one of the most important “aesthetic” measurements that are used in order to control the quality of solutions, and constitutes a qualitative approximation process of the quantity of suspended particles that could be found into these solutions.

The turbidity sensor belongs to the wider category of optical sensors and its function is based on the theory of scattered light, which is caused by the presence of suspended particles in a liquid solution. A light source emits radiation that strikes on a liquid sample, and a photo-detection system detects the intensity of scattered radiation.

The turbidity meter, that has been constructed, is a ratio turbidity meter in which the light source is an infrared LED and the photo-detection system encompasses three silicon photodiodes which are arranged in circles at angles of  $90^\circ$ ,  $150^\circ$  and  $180^\circ$  from the direction of the incident light. The value of turbidity is calculated according to a ratio among the photodiodes’ scattered light intensities which expresses the  $90^\circ$  – angle scattered light intensity ( $90^\circ$  photo-detector) in relation to the intensity of scattered light that is detected by the other two photodiodes (forward scatter photo-detector and transmittance photo-detector).

This turbidity device consists of two partial units: the sampling unit, where the sample cell and the optical components are located, and the printed electronic circuit which processes, calculates and displays the final turbidity value. This diploma thesis presents in detail the methods for the design, construction and calibration of the turbidity sensor, as well as its function, in order for the turbidity meter to be used in applications related to the control of water quality.

Finally, a complete evaluation of the constructed turbidity meter regarding its functionality and accuracy is presented, which aims at further development and improvement of similar sensor devices.

## Key Words

Turbidity sensor, clarity, solution, suspended particles, optical sensors, theory of scattered light, ratio turbidity meter, light source, photo-detection system, water quality.

Ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Ιωάννη Αβαριτσιώτη, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής, την υπομονή που επέδειξε και την υποστήριξη του κατά την διάρκεια εκπόνησης της.

Ευχαριστώ επίσης τον Απόστολο Ψαρρό υπεύθυνο του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητήρων καθώς και τον διδάκτορα Σωτήρη Κοκόση για την πολύτιμη την συμβολή τους στην επίλυση των τεχνικών προβλημάτων που ανέκυψαν κατά την διάρκεια της υλοποίησης και για την άριστη συνεργασία που είχαμε.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την απόλυτη στήριξη που μου προσφέρει, καθώς και φίλους και συναδέλφους που με βοήθησαν στην περάτωση της διπλωματικής εργασίας.

# Περιεχόμενα

1	Η έννοια της θολότητας.....	15
1.1	Ο ορισμός της θολότητας.....	15
1.2	Η θεωρία διάχυσης του φωτός.....	16
1.2.1	Η θεωρία διάχυσης του Rayleigh.....	16
1.2.2	Η θεωρία διάχυσης του Mie.....	17
1.2.3	Διαφορές μεταξύ των θεωριών διάχυσης του Rayleigh και του Mie ....	19
1.3	Η θεωρία της διάχυσης του φωτός για την θολότητα.....	20
1.4	Ιστορική Αναδρομή.....	22
1.5	Μέθοδοι προτυποποίησης της μέτρησης της θολότητας.....	24
1.5.1	Μέθοδος USEPA 180.1.....	24
1.5.2	Μέθοδος ISO 7027.....	26
1.6	Πρότυπα θολότητας.....	27
1.7	Νεφελομετρία.....	29
1.8	Παρεμβολές στη μέτρηση θολότητας.....	30
1.9	Μοντέρνες τεχνολογίες μέτρησης θολότητας.....	32
1.9.1	Πηγές προσπίπτοντος φωτός.....	33
1.9.2	Δέκτες-ανιχνευτές διαχεόμενης ακτινοβολίας.....	35
1.9.3	Γεωμετρία οπτικού συστήματος.....	38
1.9.3.1	Μήκος μονοπατιού – path length.....	39
1.9.3.2	Γωνία λήψης.....	39
1.9.3.3	Rationing.....	41
1.9.4	Αθροιστικός πίνακας μοντέρνων τεχνολογιών.....	43
1.10	Η σημασία της θολότητας.....	49
1.10.1	Η σημασία της θολότητας για το περιβάλλον.....	49
1.10.2	Η σημασία της θολότητας για τον άνθρωπο.....	50
2	Υλοποίηση κυκλώματος θολομέτρου.....	53
2.1	Εισαγωγή.....	53
2.2	Συνοπτική περιγραφή του θολομέτρου.....	55
2.3	Επιμέρους διατάξεις του θολομέτρου.....	55



2.3.1	Μονάδα δειγματοληψίας – οπτική διάταξη .....	56
2.3.2	Τυποποιημένο κύκλωμα – ηλεκτρονική διάταξη .....	58
2.4	Σχεδίαση αναλογικού κυκλώματος θολομέτρου.....	60
2.4.1	Κύκλωμα πηγής ακτινοβολίας.....	60
2.4.1.1	Εισαγωγή .....	60
2.4.1.2	Αρχή λειτουργίας LED.....	61
2.4.1.3	Μέθοδοι τροφοδοσίας LED.....	62
2.4.1.4	Περιοχές λειτουργίας ενός διπολικού τρανζίστορ BJT.....	63
2.4.1.5	Επιλογή κυκλώματος οδήγησης LED .....	67
2.4.1.6	Το LED που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα του θολομέτρου.....	68
2.4.1.7	Τελικό κύκλωμα οδήγησης LED.....	71
2.4.2	Σύστημα – κύκλωμα δεκτών.....	76
2.4.2.1	Εισαγωγή .....	76
2.4.2.2	Χαρακτηριστικά μιας φωτοδιόδου .....	76
2.4.2.3	Αρχή λειτουργίας φωτοδιόδου .....	77
2.4.2.4	Φωτοδιόδος πυριτίου.....	78
2.4.2.5	Μέθοδοι μέτρησης του σήματος μιας φωτοδιόδου .....	80
2.4.2.5.1	Παρουσίαση μεθόδων.....	80
2.4.2.5.2	Μέθοδος λειτουργίας που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα .....	81
2.4.2.5.3	Πολώνοντας την φωτοδιόδο .....	81
2.4.2.6	Φωτοδιόδοι κυκλώματος.....	83
2.4.2.7	Τελικό κύκλωμα φωτοδιόδων-φωτοδεκτών.....	85
2.4.3	Κύκλωμα βαθυπερατού φίτρου .....	88
2.4.3.1	Εισαγωγή .....	88
2.4.3.2	Ενεργό βαθυπερατό φίλτρο .....	89
2.4.3.3	Τοπολογία ενεργού βαθυπερατού φίτρου.....	90
2.4.3.4	Ενεργά βαθυπερατά φίλτρα κυκλώματος θολομέτρου.....	91
2.4.4	Τελικό στάδιο διόρθωσης σήματος.....	94
2.4.4.1	Εισαγωγή .....	94
2.4.4.2	Επιλογή τελεστικού ενισχυτή.....	95
2.4.4.3	Κυκλώματα αντιστροφής κι ενίσχυσης των σημάτων των φωτοδιόδων.....	97
2.4.5	Τροφοδοσία κυκλώματος θολομέτρου .....	100
2.5	Σχεδίαση ψηφιακού κυκλώματος θολομέτρου .....	103

2.5.1	Κύκλωμα του μικροελεγκτή (MCU) .....	103
2.5.2	Κύκλωμα οθόνης υγρών κρυστάλλων (LCD Display) .....	104
2.5.3	Κύκλωμα αποσφαλματωτή (debugger) .....	105
2.6	Τελικό κύκλωμα θολομέτρου.....	107
3	Βαθμονόμηση θολομέτρου.....	113
3.1	Κυκλωματική βαθμονόμηση.....	113
3.2	Αλγοριθμική βαθμονόμηση .....	113
4	Προγραμματισμός του μικροελεγκτή για την λειτουργία του θολομέτρου .....	123
4.1	Εισαγωγή.....	123
4.2	Αρχικοποίηση μικροελεγκτή (MCU) και οθόνης υγρών κρυστάλλων LCD 123	
4.2.1	Αρχικοποίηση MCU .....	124
4.2.2	Αρχικοποίηση της οθόνης LCD.....	124
4.3	Διαδικασία ψηφιοποίησης αναλογικών σημάτων των φωτοδιόδων .....	124
4.4	Διαδικασία διόρθωσης τιμής αναλογικών σημάτων .....	128
4.5	Διαδικασία Υπολογισμού της θολότητας.....	129
5	Πειραματικές μετρήσεις .....	133
5.1	Χώμα βροχής.....	133
5.2	Άμμος.....	135
5.3	Στιγμαίος καφές .....	137
6	Συμπεράσματα και περαιτέρω βελτιώσεις .....	139
6.1	Συμπεράσματα .....	139
6.2	Περαιτέρω βελτιώσεις.....	141
6.2.1	Περαιτέρω βελτιώσεις για καλύτερη λειτουργία και μεγαλύτερη ακρίβεια	141
6.2.2	Χωροταξικές βελτιώσεις.....	143
	Παράρτημα.....	145
	Βιβλιογραφία .....	167

## Πίνακας εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1-1: ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΘΕΩΡΙΕΣ ΤΟΥ RAYLEIGH ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΙΕ .....	19
ΕΙΚΟΝΑ 1-2: ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΜΕ ΜΕΓΕΘΟΣ (Α) ΜΙΚΡΟΤΕΡΟ ΤΟΥ 1/10 ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΦΩΤΟΣ (Β) ΠΕΡΙΠΟΥ ΙΣΟ ΜΕ ΤΟ ¼ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ (C) ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ .....	21
ΕΙΚΟΝΑ 1-3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΟΙΧΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΟΥΣ ΠΟΥ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΒΡΕΘΟΥΝ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ. ....	21
ΕΙΚΟΝΑ 1-4: ΘΟΛΟΜΕΤΡΟ ΚΕΡΙΟΥ (JACKSON CANDLE TURBIDIMETER): (1): ΚΕΡΙ, (2): ΦΛΟΓΑ, (3): ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΒΕΛΟΥΣ ΕΙΝΑΙ ΑΝΑΛΟΓΟ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ, (4): ΔΙΑΧΕΟΜΕΝΟ ΦΩΣ ΑΔΥΝΑΜΟ – ΜΕΤΑΔΙΔΟΜΕΝΟ ΦΩΣ ΙΣΧΥΡΟ, (5): ΔΙΑΧΕΟΜΕΝΟ ΦΩΣ ΚΑΙ (6): ΤΟ ΔΙΑΧΕΟΜΕΝΟ ΦΩΣ ΕΙΝΑΙ ΤΟΣΟ ΕΝΤΟΝΟ ΟΣΟ ΤΟ ΜΕΤΑΔΙΔΟΜΕΝΟ – Η ΕΙΚΟΝΑ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΕΞΑΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΣΕ ΑΥΤΟ ΤΟ ΒΑΘΟΣ.....	23
ΕΙΚΟΝΑ 1-5 : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ USEPA 180.1, ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΟΛΟΜΕΤΡΟΥ. ....	25
ΕΙΚΟΝΑ 1-6: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ISO 7027, ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΟΛΟΜΕΤΡΟΥ. ....	26
ΕΙΚΟΝΑ 1-7: ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΜΑΖΙΝΗΣ .....	27
ΕΙΚΟΝΑ 1-8: ΠΗΓΕΣ ΠΥΡΑΚΤΩΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ – ΛΑΜΠΗΡΕΣ ΜΕ ΝΗΜΑ ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ (INCANDESCENT LIGHT SOURCES) .	33
ΕΙΚΟΝΑ 1-9: ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ LED (LIGHT EMITTING DIODE).....	34
ΕΙΚΟΝΑ 1-10: ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ LASER .....	34
ΕΙΚΟΝΑ 1-11: ΤΥΠΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΛΑΜΠΗΤΡΑ ΜΕ ΝΗΜΑ ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ, ΣΕ ΤΡΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΧΡΩΜΑΤΟΣ, ΓΙΑ ΕΝΑ LED ΜΕ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΤΑ 560nm, ΓΙΑ ΕΝΑ LASER ΗΛΙΟΥ-ΝΕΟΝ (He/Ne LASER) ΚΑΙ ΓΙΑ ΕΝΑ LED ΣΤΑ 860 nm ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ISO 7027.....	34
ΕΙΚΟΝΑ 1-12: ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ (PHOTOMULTIPLIER) .....	35
ΕΙΚΟΝΑ 1-13: ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ ΚΕΝΟΥ (VACUUM PHOTODIODE).....	36
ΕΙΚΟΝΑ 1-14: ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (SILICON PHOTODIODE) .....	36
ΕΙΚΟΝΑ 1-15: ΦΩΤΟΑΓΩΓΟΣ ΑΠΟ ΘΕΙΟΥΧΟ ΚΑΔΜΙΟ (CADMIUM SULFIDE PHOTOCONDUCTOR).....	36
ΕΙΚΟΝΑ 1-16: ΤΥΠΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΦΩΤΟΔΕΚΤΩΝ.....	37
ΕΙΚΟΝΑ 1-17: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΠΗΓΗ ΜΕ ΛΑΜΠΗΤΡΑ ΠΥΡΑΚΤΩΣΕΩΣ ΣΤΟΥΣ 3000 ΒΑΘΜΟΥΣ ΚΕΛΒΙΝ ΚΑΙ ΑΠΟ ΔΕΚΤΗ ΜΕ ΦΩΤΟΑΓΩΓΟ ΑΠΟ ΘΕΙΟΥΧΟ ΚΑΔΜΙΟ. ....	38
ΕΙΚΟΝΑ 1-18: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΠΗΓΗ ΜΕ ΛΑΜΠΗΤΡΑ ΠΥΡΑΚΤΩΣΕΩΣ ΣΤΟΥΣ 3000 ΒΑΘΜΟΥΣ ΚΕΛΒΙΝ ΚΑΙ ΑΠΟ ΔΕΚΤΗ ΜΕ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟ ΑΠΟ ΠΥΡΙΤΙΟ. ....	38
ΕΙΚΟΝΑ 1-19: ΘΟΛΟΜΕΤΡΟ ΜΕ ΓΩΝΙΑ ΛΗΨΗΣ 90 ΜΟΙΡΩΝ.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 1-20: ΘΟΛΟΜΕΤΡΟ ΜΕ ΓΩΝΙΑ ΛΗΨΗΣ 180 ΜΟΙΡΩΝ. ....	40
ΕΙΚΟΝΑ 1-21: ΘΟΛΟΜΕΤΡΟ ΜΕ ΓΩΝΙΑ ΛΗΨΗΣ ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΣΗΣ (BACK-SCATTERING). ....	41
ΕΙΚΟΝΑ 1-22: ΘΟΛΟΜΕΤΡΟ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΛΗΨΗΣ (RATIIONING).....	41
ΕΙΚΟΝΑ 1-23: ΘΟΛΟΜΕΤΡΟ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΛΗΨΗΣ (RATIIONING).....	42
ΕΙΚΟΝΑ 1-24: ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΥΟ ΠΗΓΩΝ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΔΥΟ ΔΕΚΤΩΝ. ....	42
ΕΙΚΟΝΑ 1-25: ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΥΔΡΟΒΙΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΑΠΕΝΑΝΤΙ ΑΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ. ....	50
ΕΙΚΟΝΑ 1-26: ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΠΟΥ ΠΑΡΕΧΟΥΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΒΙΑ. ....	51
ΕΙΚΟΝΑ 2-1: ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΘΟΛΟΜΕΤΡΩΝ ΛΟΓΟΥ (RATIO TURBIDIMETERS). ....	54
ΕΙΚΟΝΑ 2-2: ΜΟΝΑΔΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ – ΟΠΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ. ....	56
ΕΙΚΟΝΑ 2-3: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ IR LED ΚΑΙ ΦΩΤΟΔΙΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΜΟΝΑΔΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 2-4: ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ. ....	58
ΕΙΚΟΝΑ 2-5: ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΘΟΛΟΜΕΤΡΟΥ.....	58
ΕΙΚΟΝΑ 2-6: ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΘΟΛΟΜΕΤΡΟΥ. ....	60
ΕΙΚΟΝΑ 2-7: ΔΟΜΗ LED.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 2-8: ΣΥΝΗΘΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ LED.....	61

ΕΙΚΟΝΑ 2-9: ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ LED .....	62
ΕΙΚΟΝΑ 2-10: ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ LED ΜΕ ΔΙΑΚΟΠΤΗ .....	62
ΕΙΚΟΝΑ 2-11: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ N-P-N ΔΙΠΟΛΙΚΟΥ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥ. 63	
ΕΙΚΟΝΑ 2-12: ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥ ΕΝΟΣ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΤΥΠΟΥ N-P-N. ....	65
ΕΙΚΟΝΑ 2-13: IR LED SFH-480 (ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΙΝΑΙ ΣΕ ΜΜ). ....	69
ΕΙΚΟΝΑ 2-14: ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΟΥ LED. ....	70
ΕΙΚΟΝΑ 2-15: ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ 2N2222A. ....	70
ΕΙΚΟΝΑ 2-16: ΤΕΛΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ LED. ....	72
ΕΙΚΟΝΑ 2-17: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ LED. ....	75
ΕΙΚΟΝΑ 2-18: ΔΙΑΤΟΜΗ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ. ....	78
ΕΙΚΟΝΑ 2-19: ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ ΕΝΩΣΗΣ PN. ....	78
ΕΙΚΟΝΑ 2-20: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ. ....	78
ΕΙΚΟΝΑ 2-21: ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΩΝ. ....	81
ΕΙΚΟΝΑ 2-22: Α) ΓΕΝΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΑΣΗ ΜΕ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΟΛΩΣΗ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ ΚΑΙ Β) ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΝΤΑΙ ΤΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΛΟΓΩ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ. ....	82
ΕΙΚΟΝΑ 2-23: ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ SFH 213 FA (ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΜΜ). ....	83
ΕΙΚΟΝΑ 2-24: Α) ΤΗΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ SFH 213 FA ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, Β) ΤΟ ΣΚΟΤΕΙΝΟ ΡΕΥΜΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ $V_R$ , Γ) ΤΑ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ. ....	84
ΕΙΚΟΝΑ 2-25: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ D180. ....	85
ΕΙΚΟΝΑ 2-26: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΔΙΟΔΩΝ D180, D150 ΚΑΙ D90 ΤΟΥ ΘΟΛΟΜΕΤΡΟΥ. .....	88
ΕΙΚΟΝΑ 2-27: ΒΑΘΥΠΕΡΑΤΟ ΠΑΘΗΤΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ RC. ....	89
ΕΙΚΟΝΑ 2-28: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ Sallen-Key ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ 2 <sup>ο</sup> ΒΑΘΜΟΥ. ....	90
ΕΙΚΟΝΑ 2-29: ΒΑΘΥΠΕΡΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ 2 <sup>ο</sup> ΒΑΘΜΟΥ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ Sallen-Key ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΤΥΠΟΥ BESSEL ΠΟΥ ΣΑΝ ΕΙΣΟΔΟ ΕΧΕΙ ΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΣΕ ΓΩΝΙΑ 180 <sup>ο</sup> ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΣΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (D180). ....	93
ΕΙΚΟΝΑ 2-30: ΒΑΘΥΠΕΡΑΤΑ ΦΙΛΤΡΑ 2 <sup>ο</sup> ΒΑΘΜΟΥ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ Sallen-Key ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΤΥΠΟΥ BESSEL ΠΟΥ ΣΑΝ ΕΙΣΟΔΟ ΕΧΟΥΝ ΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ D150 ΚΑΙ D90 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ. ....	94
ΕΙΚΟΝΑ 2-31: ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ LMC 6082AIN. ....	96
ΕΙΚΟΝΑ 2-32: ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ. ....	98
ΕΙΚΟΝΑ 2-33: ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟ D180. ....	99
ΕΙΚΟΝΑ 2-34: ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ-ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥΣ D150 ΚΑΙ D90. ....	100
ΕΙΚΟΝΑ 2-35: ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ (VOLTAGE REGULATOR) L78S05. ....	101
ΕΙΚΟΝΑ 2-36: ΤΕΛΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ. ....	102
ΕΙΚΟΝΑ 2-37: ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ TL082CP. ....	102
ΕΙΚΟΝΑ 2-38: ΈΝΔΕΙΞΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ. ....	103
ΕΙΚΟΝΑ 2-39: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΡΟΔΕΚΤΩΝ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ PIC 16F882. ....	104
ΕΙΚΟΝΑ 2-40: ΟΘΟΝΗ ΥΓΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ (LCD). ....	105
ΕΙΚΟΝΑ 2-41: DEBUGGER PICKIT3 ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥ ΜΕ ΤΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥΣ ΑΚΡΟΔΕΚΤΕΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ..... 106	
ΕΙΚΟΝΑ 2-42: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ. ....	106
ΕΙΚΟΝΑ 2-43: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΘΟΛΟΜΕΤΡΟΥ. ....	108
ΕΙΚΟΝΑ 2-44: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ. ....	109
ΕΙΚΟΝΑ 2-45: ΜΑΣΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΝΩ ΠΛΕΥΡΑΣ ΤΟΥ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ. . 110	
ΕΙΚΟΝΑ 2-46: ΜΑΣΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΩ ΠΛΕΥΡΑΣ ΤΟΥ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ... 111	
ΕΙΚΟΝΑ 2-47: ΤΕΛΙΚΟ ΤΥΠΩΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΘΟΛΟΜΕΤΡΟΥ. ....	112
ΕΙΚΟΝΑ 2-48: ΠΛΗΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ – ΘΟΛΟΜΕΤΡΟ. ....	112

ΕΙΚΟΝΑ 3-1: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΦΩΤΟΔΙΟΔΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΓΑΛΑΚΤΟΣ ΠΟΥ ΠΡΟΣΤΕΘΗΚΕ.....	116
ΕΙΚΟΝΑ 3-2: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ. ....	121
ΕΙΚΟΝΑ 3-3: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΓΑΛΑΚΤΟΣ ΠΟΥ ΔΙΟΧΕΤΕΥΕΤΑΙ ΣΤΟ ΥΓΡΟ ΔΕΙΓΜΑ. ....	121
ΕΙΚΟΝΑ 4-1: ΒΑΣΙΚΟΤΕΡΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ. ....	123
ΕΙΚΟΝΑ 4-2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ. ....	126
ΕΙΚΟΝΑ 4-3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ. ....	129
ΕΙΚΟΝΑ 4-4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΚΩΔΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ.....	131
ΕΙΚΟΝΑ 5-1: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΧΩΜΑΤΟΣ ΒΡΟΧΗΣ ΠΟΥ ΤΟΠΟΘΕΤΗΘΗΚΕ ΜΕΣΑ ΣΕ ΑΥΤΟ. ....	134
ΕΙΚΟΝΑ 5-2: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΑΜΜΟΥ ΠΟΥ ΤΟΠΟΘΕΤΗΘΗΚΕ ΜΕΣΑ ΣΕ ΑΥΤΟ. ....	136
ΕΙΚΟΝΑ 5-3: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΟΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΟΥ ΚΑΦΕ ΠΟΥ ΤΟΠΟΘΕΤΗΘΗΚΕ ΜΕΣΑ ΣΕ ΑΥΤΟ. ....	138



# 1 Η έννοια της θολότητας

## 1.1 Ο ορισμός της θολότητας

**Θολότητα** είναι η μέτρηση του διαχεόμενου φωτός, το οποίο προκύπτει από την αλληλεπίδραση του προσπίπτοντος φωτός με τα υλικά σωματίδια που βρίσκονται σε ένα υγρό δείγμα. Η American Public Health Association (APHA) ορίζει την θολότητα ως μια έκφραση των οπτικών ιδιοτήτων ενός δείγματος όπου προκαλεί ακτίνες φωτός να διαχέονται ή να απορροφούνται αντί να μεταδίδονται σε ευθεία γραμμή διαμέσου του δείγματος. Επίσης μπορεί να ερμηνευτεί διαφορετικά και σαν μέτρηση της σχετικής διαύγειας του δείγματος.

Συνήθως το υγρό δείγμα είναι δείγμα νερού και η αιωρούμενη ύλη που προκαλεί την διάχυση του φωτός αποτελείται από μία μεγάλη ποικιλία υλικών. Άρα η θολότητα του νερού συχνά προκαλείται από την παρουσία αιωρούμενης και διαλυμένης ύλης όπως για παράδειγμα την παρουσία αργίλου, χόματος, σκόνης οργανικής ύλης, πλαγκτόν, άλλων μικροοργανισμών, οργανικών οξέων και χρωστικών. Όλα αυτά τα υλικά σωματίδια είναι τυπικά ανεπιθύμητα στο νερό, από σκοπιά υγιεινής, και η αφαίρεση των είναι απαραίτητη όταν το νερό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για κατανάλωση. Γι' αυτό το λόγο η θολότητα έχει χρησιμοποιηθεί σαν παράμετρος κλειδί της ποιότητας του νερού για την εκτίμηση της υγείας και της ποιότητας των υδάτινων πόρων του περιβάλλοντος. Υψηλότερες τιμές θολότητας είναι συσχετισμένες με χαμηλότερη ποιότητα νερού.

Παρ' όλα αυτά η μέτρηση της θολότητας *δεν είναι ευθέως συσχετισμένη με συγκεκριμένο αριθμό ή σχήμα σωματιδίων*. Αντιθέτως είναι μία μέτρηση, ποσοτικοποίηση, της διάχυσης που προκαλούν τέτοια σωματίδια όταν αλληλεπιδρούν με το φως. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω, η θολότητα έχει ιστορικά αντιμετωπιστεί σαν *ποιοτική και όχι ποσοτική μέτρηση*. Για να μετατρέψουμε τις μεθόδους μέτρησης της θολότητας έτσι ώστε να έχουμε και ποσοτική αντιστοίχιση θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τυποποιημένοι μέθοδοι και πρότυπα.

Επομένως, η μέτρηση της θολότητας είναι μια ποιοτική παράμετρος για το νερό, αλλά η ανιχνευσιμότητα της με βάση ένα πρωτεύον πρότυπο της επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί και σαν ποσοτική μέτρηση. Όταν χρησιμοποιείται σαν ποσοτική μέτρηση, η θολότητα μετράται σε μονάδες θολότητας (*turbidity units*, *TU's*) ή σε νεφελομετρικές μονάδες θολότητας (*nephelometric turbidity units*, *NTU's*). Το πρωτεύον πρότυπο για την παράμετρο αυτή είναι μία πολυμερής ένωση γνωστή ως φορμαζίνη (*formazin*) η οποία χρησιμοποιείται για το καλιμπράρισμα όλων των τύπων των θολομέτρων (*turbidity meters*). Για περίοδο πάνω από 30 χρόνια η φορμαζίνη χρησιμοποιούνταν ως το πρωτεύον πρότυπο για την ανίχνευση της θολότητας. Αυτό σημαίνει ότι οι μονάδες θολότητας (*TU's*) είναι ισοδύναμες με τις νεφελομετρικές μονάδες θολότητας (*NTU's*) όπου και οι δύο είναι ισοδύναμες με

όλες τις άλλες μονάδες μέτρησης της θολότητας στις οποίες το πρότυπο βαθμονόμησης είναι η φορμαζίνη ή κάποιο παράγωγο αυτής.

## 1.2 Η θεωρία διάχυσης του φωτός

Η μέθοδος λειτουργίας του αισθητήρα θολότητας είναι βασισμένη στη *θεωρία της διάχυσης* η οποία δίνει την ένταση της διαχεόμενης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με άλλες παραμέτρους όπως το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, την γωνία που σχηματίζουν το διαχεόμενο με το μεταδιδόμενο φως και την απόσταση. Οι θεωρίες διάχυσης που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω.

### 1.2.1 Η θεωρία διάχυσης του Rayleigh

Η θεωρία διάχυσης του Rayleigh (*Rayleigh's scattering theory*) αναφέρεται στην διάχυση του φωτός από σωματίδια πολύ μικρότερα σε μέγεθος από το μήκος κύματος,  $\lambda$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συμβαίνει όταν το φως κινείται διαμέσου διαφανών στερεών, υγρών και αερίων.

Η ένταση ακτινοβολίας του φωτός, με μήκος κύματος  $\lambda$ , διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις σχηματίζοντας μία γωνία  $\theta$  με την προσπίπτουσα ένταση φωτός  $I_0$  και είναι ανάλογη του μεγέθους  $(1 + \cos^2\theta)$  ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος  $\lambda^4$ . Το τελευταίο σημείο είναι αξιοσημείωτο γιατί φανερώνει πόσο μεγαλύτερη- έντονη είναι η διάχυση σε μικρότερα μήκη κύματος. Η εξίσωση για την ένταση της διαχεόμενης ακτινοβολίας  $I_{\text{measured}}$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{\text{measured}} = I_0 \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + (\cos \theta)^2) \quad (1-1)$$

- $I_0$  : είναι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από μία πηγή φωτός
- $I_{\text{measured}}$  : είναι η ένταση ακτινοβολίας διαχέοντος φωτός
- $N$  : είναι το μέγεθος της σκέδασης (ισοδύναμο με την συγκέντρωση σωματιδίων)



- $\lambda$  : είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας
- $\theta$  : είναι η γωνία διάχυσης
- $R$  : η απόσταση μεταξύ των σημείων εκπομπής και λήψης της ακτινοβολίας
- $\alpha$  : είναι η πολωσιμότητα

(Πολωσιμότητα είναι η σχετική τάση του νέφους ηλεκτρονίων ενός ατόμου να νοθεύεται, σε σχέση με το κανονικό του σχήμα από την παρουσία ενός κοντινού ιόντος ή δίπολου. Η ηλεκτρονική πολωσιμότητα  $\alpha$  προσδιορίζεται ως ο λόγος της επαγόμενης διπολικής ροπής  $P$  ενός ατόμου προς την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  που δημιουργεί το δίπολο ( $P=aE$ ) και μετράται σε  $\text{cm}^2 \times \text{V}^{-1}$  αλλά συχνά εκφράζεται ως όγκος πολωσιμότητας σε  $\text{cm}^3$ .)

## 1.2.2 Η θεωρία διάχυσης του Mie

Η θεωρία διάχυσης του Mie (*Mie's scattering theory*) αναφέρεται στην διάχυση του φωτός από σωματίδια ίσου μεγέθους ή και μεγαλύτερα από το μήκος κύματος,  $\lambda$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο Gustave Mie πρώτος βρήκε λύση για την διάχυση επίπεδων κυμάτων από μία σφαίρα όταν η διάμετρος της είναι λίγο μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η θεωρία του Mie προσφέρει ακριβείς λύσεις για την ένταση της διάχυσης από σφαιρικά σωματίδια σε μια συγκεκριμένη γωνία.

Το αποτέλεσμα των υπολογισμών του Mie οδηγούν στο μέγεθος που ορίζεται ως ενεργός διατομή σκέδασης,  $C_{\text{sca}}$ . Η ενεργός διατομή σκέδασης είναι μια υποθετική περιοχή που περιγράφει την πιθανοφάνεια της ακτινοβολίας που σκεδάζεται από εν σωματίδιο. Συχνά η παράμετρος αυτή διαιρείται με την ενεργό διατομή περιοχής, όπου  $r$  είναι η ακτίνα του σωματιδίου, με σκοπό να δοθεί μία πιο αποδοτική παράμετρος διάχυσης ανεξάρτητη των διαστάσεων,  $Q_{\text{sca}}$ .

$$Q_{\text{sca}} = \frac{C_{\text{sca}}}{\pi r^2} \quad (1-2)$$

Μία παράμετρος με μεγαλύτερη απόδοση είναι η παράμετρος διάχυσης ανά μικρό, (Scattering Coefficient Per Micron – SCPM) οριζόμενη ως ο λόγος της ενεργούς διατομής σκέδασης με τον όγκο του σωματιδίου.

$$\text{SCPM} = \frac{C_{\text{sca}}}{\frac{4\pi r^3}{3}} \quad (1-3)$$

Από τη στιγμή που η ένταση ακτινοβολίας ποικίλει με βάση την γωνία διάχυσης, αυτή η ασύμμετρη παράμετρος ( $\theta$ ) μαζί με την παράμετρο SCPM πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν την παράμετρο διάχυσης  $S$  ( $mm^{-1}$  - Scattering Coefficient).

$$S = \frac{3}{4}(1 - \cos \theta)SCPM \quad (1-4)$$

Η ένταση της διαχεόμενης ακτινοβολίας,  $I_{measured}$  δίνεται από την σχέση:

$$I_{measured} = I_0(1 - S) \quad (1-5)$$

Για να μετρήσουμε την θολότητα χρειαζόμαστε την σχέση μεταξύ της έντασης της διαχεόμενης ακτινοβολίας  $I_{measured}$  και του πλήθους των σωματιδίων  $N$ . Η σχέση αυτή σίνεται από τον νόμο του Beer:

$$T_c = e^{-\mu_t d} \quad (1-6)$$

Όπου το  $d$  είναι το μήκος από το οπτικό μονοπάτι (optical pathlength),  $\mu_t$  είναι παράμετρος ολικής εξασθένησης και  $T_c$  είναι η ευθυγραμμισμένη μετάδοση.

$$\mu_t = \mu_s + \mu_a \quad (1-7)$$

Υποθέτοντας ότι το δείγμα έχει μικρή ικανότητα απορρόφησης ( $\mu_a \approx 0$ ) η ολική εξασθένηση ισούται μόνο με την εξασθένηση λόγω διάχυσης.

$$\mu_t \approx \mu_s = C_{sca} N_u \quad (1-8)$$

Όπου  $\mu_s$  είναι η παράμετρος εξασθένησης λόγω διάχυσης και  $N_u$  είναι το πλήθος των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου.

Έτσι έχουμε :

$$T_c = e^{-\mu_t d} = e^{-C_{sca} N_u d} \quad (1-9)$$

$$C_{sca} = \frac{-\ln T_c}{N_u d} = \frac{-\ln T_c}{N d} V \quad (1-10)$$

Έτσι συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι :

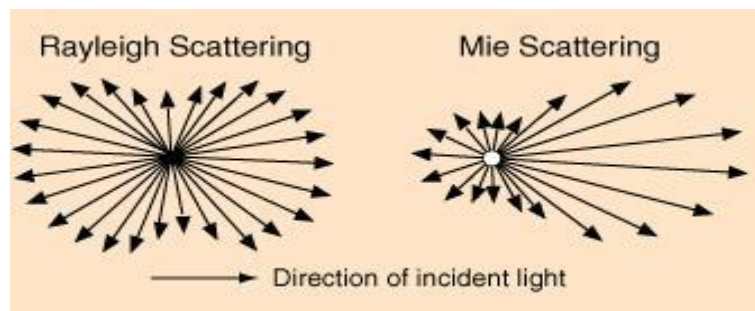
$$I_{measured} = I_0 \left( 1 - \frac{3}{4} (1 - \cos\theta) \frac{\frac{-\ln T_c V}{N d}}{\frac{4\pi r^3}{3}} \right) \quad (1-11)$$

### 1.2.3 Διαφορές μεταξύ των θεωριών διάχυσης του Rayleigh και του Mie

Η διάχυση του Rayleigh αναφέρεται στην σκέδαση ενέργειας σωματιδίων με μικρότερο μέγεθος από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει κυρίως στα αέρια της ατμόσφαιρας. Επειδή οι διαχειριστές διάχυσης είναι τόσο μικροί υπάρχει μία απόκλιση διάχυσης προς μικρότερα μήκη κύματος.

Η θεωρία διάχυσης του Mie αναφέρεται κυρίως σε αιωρούμενα σωματίδια που είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αέρια.

Επίσης ο τρόπος διάχυσης είναι διαφορετικός. Στη διάχυση Rayleigh η πλευρική, οπίσθια και προς τα μπρός διάχυση είναι πρακτικά ομοιόμορφες και ισοδύναμες μεταξύ τους. Αντίθετα στην διάχυση του Mie η διάχυση προς τα μπρός κυριαρχεί (Εικόνα 1-1).

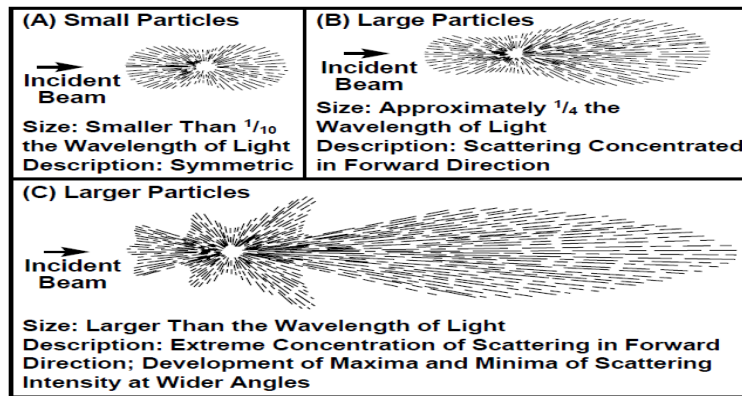


**Εικόνα 1-1:** Μορφολογία διάχυσης σύμφωνα με τις θεωρίες του Rayleigh και του Mie

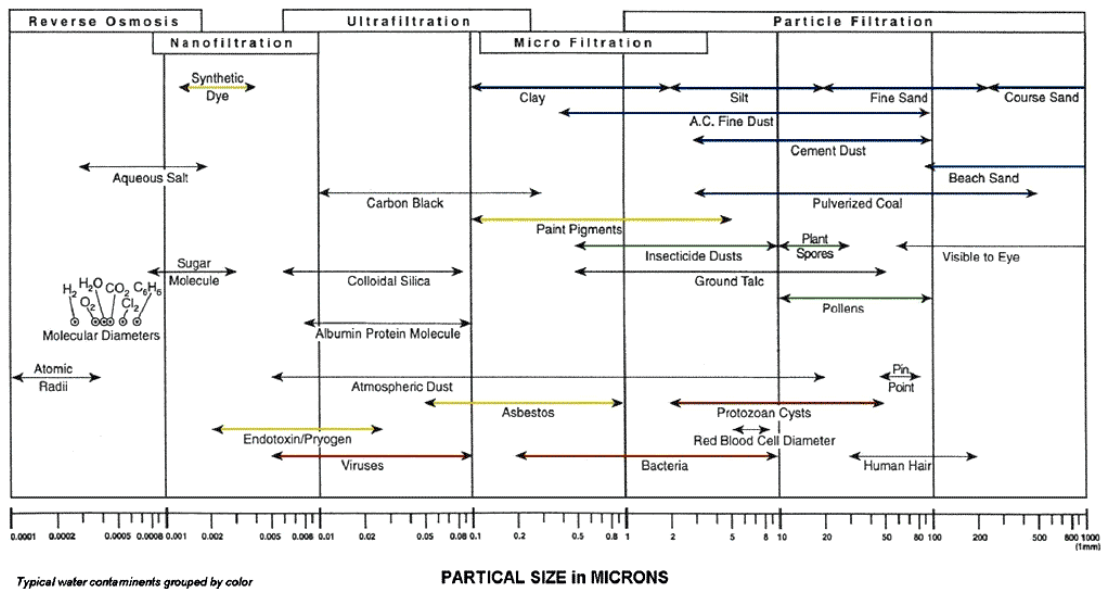
## 1.3 Η θεωρία της διάχυσης του φωτός για την θολότητα

Η οπτική ιδιότητα που εκφράζει την θολότητα είναι με απλά λόγια η *αλληλεπίδραση του φωτός με τα αιωρούμενα σωματίδια που βρίσκονται στο νερό*. Μία κατευθυνόμενη δέσμη φωτός παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη όταν μεταδίδεται διαμέσου απολύτως καθαρού νερού, αλλά ακόμα και τα μόρια σε ένα καθαρό διάλυμα θα προκαλέσουν διάχυση φωτός σε κάποιο βαθμό. *Συνεπώς κανένα διάλυμα δε θα έχει μηδενική θολότητα*. Σε δείγματα τα οποία περιέχουν αιωρούμενα στερεά, ο βαθμός στον οποίο το δείγμα αλληλεπιδρά με την μετάδοση ακτινοβολίας σχετίζεται με το μέγεθος, το σχήμα και την σύσταση-δομή των σωματιδίων που βρίσκονται στο διάλυμα καθώς και με το μήκος κύματος (χρώμα) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Ένα λεπτό σωματίδιο αλληλεπιδρά με την προσπίπτουσα ακτινοβολία *απορροφώντας* την ενέργεια του φωτός και μετά, σαν μία σημειακή πηγή φωτός, *επανεκπέμπει* την ενέργεια του φωτός προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτή η πανκατευθυντική επανεκπομπή συνιστά την διάχυση του προσπίπτοντος φωτός. Η χωρική διανομή του διαχεόμενου φωτός εξαρτάται από τον λόγο του μεγέθους του σωματιδίου προς το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Σωματίδια πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας εκθέτουν μία συμμετρική διανομή διάχυσης με περίπου ισοδύναμες ποσότητες οπίσθιας και προς τα μπρός διαχεόμενης ακτινοβολίας (backward and forward scattering). Όσο τα μεγέθη των σωματιδίων μεγαλώνουν σε σχέση με το μήκος κύματος, το διαχεόμενο φως, από διαφορετικά σημεία στο δείγμα σωματιδίων, δημιουργεί πρότυπα παρεμβολής τα οποία έχουν κατεύθυνση προς τα μπρός (επιπρόσθετες παρεμβολές στην διάχυση προς τα μπρός). Αυτή η παρεμβολή λόγω δομής των σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτει μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας προς την μπροστινή κατεύθυνση παρά προς τις άλλες κατευθύνσεις. Επιπλέον, μικρότερα σωματίδια προκαλούν πιο έντονη διάχυση σε μικρά μήκη κύματος (μπλε) ενώ σε μεγαλύτερα (κόκκινο) προκαλούν ελάχιστη επίδραση. Αντίθετα, μεγαλύτερα σωματίδια διαχέουν μεγαλύτερα μήκη κύματος με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τα μικρά μήκη κύματος (Εικόνα 1-2). Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 1-3) παρουσιάζονται κάποια σωματίδια ύλης που μπορεί να βρεθούν στο νερό με τα αντίστοιχα μεγέθη τους.



**Εικόνα 1-2:** Μορφολογία διάχυσης που προκαλούν σωματίδια με μέγεθος (Α) μικρότερο του 1/10 του μήκους κύματος της πηγής προσπίπτοντος φωτός (Β) περίπου ίσο με το 1/4 του μήκους κύματος και (C) μεγαλύτερο του μήκους κύματος.



**Εικόνα 1-3:** Διάγραμμα σωματιδίων και των αντίστοιχων μεγεθών τους που μπορεί να βρεθούν σε δείγματα νερού.

Το σχήμα των σωματιδίων καθώς και ο δείκτης διάθλασης επηρεάζουν εξίσου την διανομή και την ένταση της διάχυσης. Σφαιρικά σωματίδια εκθέτουν μεγαλύτερο λόγο μπροστινής προς οπίσθιας διάχυσης σε σχέση με σπειροειδή και ραβδοειδή σχήματα σωματιδίων. Ο δείκτης διάθλασης ενός σωματιδίου είναι μία μέτρηση του πως ανακατευθύνει την ακτινοβολία καθώς διαπερνά από άλλο μέσο (υγρό με αιωρούμενα σωματίδια). Πρέπει να είναι διαφορετικός από τον δείκτη διάθλασης του δείγματος υγρού έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η διάχυση. Όσο η διαφορά μεταξύ των δεικτών διάθλασης των αιωρούμενων σωματιδίων και του υγρού αυξάνεται, η διάχυση γίνεται πιο έντονη.

Επίσης, το χρώμα των αιωρούμενων στερεών και του δείγματος υγρού είναι σημαντικοί παράγοντες στην ανίχνευση διαχεόμενης ακτινοβολίας. Μία έγχρωμη ουσία απορροφά φωτεινή ενέργεια σε συγκεκριμένες ζώνες του φάσματος ορατού φωτός, αλλάζοντας την συμπεριφορά του μεταδιδόμενου και διαχεόμενου φωτός και εμποδίζουν ένα συγκεκριμένο τμήμα του διαχεόμενου φωτός να φτάσει στο σύστημα ανίχνευσης.

Η ένταση της διαχεόμενης ακτινοβολίας αυξάνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των σωματιδίων. Όμως, όσο η διαχεόμενη ακτινοβολία συγκρούεται με όλο και περισσότερα σωματίδια προκύπτει πολλαπλή διάχυση και η βαθμός απορρόφησης της ακτινοβολίας αυξάνεται. Όταν η συγκέντρωση σωματιδίων ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι, τα επίπεδα ανίχνευσης μεταδιδόμενης και διαχεόμενης ακτινοβολίας πέφτουν ταχύτατα δηλώνοντας το ανώτερο όριο που μπορεί να φτάσει η μετρήσιμη θολότητα. Μειώνοντας το μήκος μονοπατιού του φωτός (path length) διαμέσου του δείγματος, μειώνεται ο αριθμός των σωματιδίων μεταξύ της φωτεινής πηγής και του φωτεινού δέκτη και επεκτείνεται το ανώτερο όριο της μετρήσιμης θολότητας.

## 1.4 Ιστορική Αναδρομή

Οι πρώτες πρακτικές προσπάθειες να προσδιοριστεί η θολότητα, χρονολογούνται το 1900 περίπου όταν οι Whipple και Jackson ανέπτυξαν ένα πρότυπο αιώρημα υγρού χρησιμοποιώντας 1000 ppm (parts per million) από γη διατόμων σε αποσταγμένο νερό. Αραίωση αυτού του πρότυπου αιωρήματος είχε ως αποτέλεσμα μία σειρά από πρότυπα αιωρήματα που χρησιμοποιήθηκαν για να παράγουν μία κλίμακα ppm-silica (μέρη ανά εκατομμύριο – πυρίτιο) για την βαθμονόμηση σύγχρονων θολομέτρων.

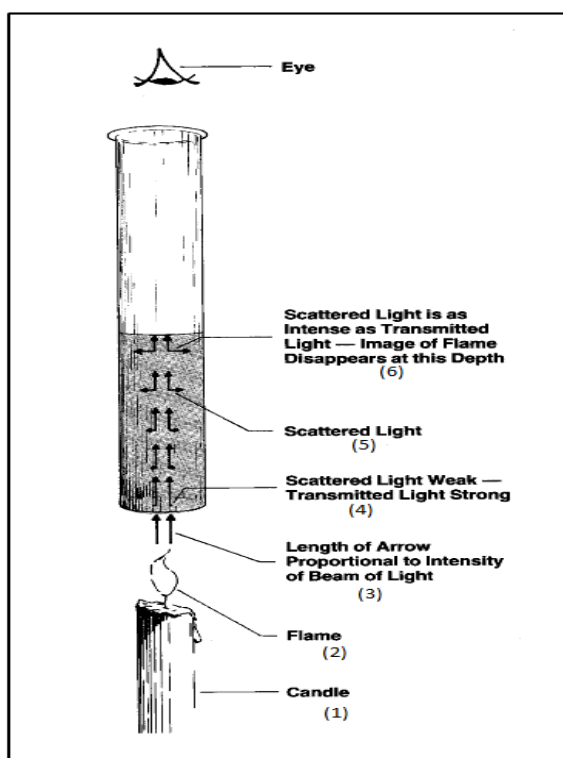
Η γη διατόμων ή διατομίτης ή Kieselguhr είναι ένα ορυκτό φυτικής προέλευσης. Σχηματίζεται από την συσσώρευση ενός τεράστιου αριθμού απολιθωμένων διατόμων. Η γη διατόμων προέρχεται από ένα μονοκύτταρο φυτό, το οποίο έχει μικροσκοπικό μέγεθος. Υπάρχουν πολλές ποικιλίες αυτού, που ζουν τόσο σε γλυκά όσο και σε θαλασσινά νερά. Τα φυτά αυτά παραμένουν κοντά στην επιφάνεια και αποτελούν ένα ποσοστό του πλαγκτόν, που υπάρχει σε αφθονία.

Ο Jackson εφάρμοσε την κλίμακα ppm-silica σε ένα ήδη υπάρχον θολόμετρο που ονομαζόταν διαφανόμετρο (diaphanometer), δημιουργώντας αυτό που τελικά έγινε γνωστό ως θολόμετρο κεριού (**Jackson Candle Turbidimeter**).

Αποτελούμενο από ένα ειδικό κερί και ένα γυάλινο σωλήνα με φαρδύ πάτο, το θολόμετρο αυτό βαθμονομήθηκε από τον Jackson σε διαβαθμίσεις θολότητας ισοδύναμες με τα ppm αιωρούμενου πυριτίου. Η μέτρηση έγινε με σταδιακή έκχυση

θολού δείγματος μέσα στον σωλήνα μέχρι το σημείο όπου η εικονική αναπαράσταση της φλόγας του κεριού να φαίνεται από το πάνω-ανοιχτό μέρος του σωλήνα διάχυτη σε μια ενιαία λάμψη (Εικόνα 1-4). Η εικόνα της φλόγας θα εξαφανιστεί όταν το διαχεόμενο φως γίνει ίσο με το μεταδιδόμενο φως. Στην συνέχεια το βάθος του δείγματος στον σωλήνα διαβαζόταν σύμφωνα με την κλίμακα ppm-silica και η θολότητα στην οποία αναφερόταν είχε μονάδες : μονάδες θολότητας Jackson (Jackson Turbidity Units – JTU).

Παρ' όλα αυτά πρότυπα αυτά προετοιμάζονταν από υλικά που υπήρχαν στη φύση, όπως σμηκτρίσι γη (το χώμα που καθαρίζει τα λίπη), πυριτικό άργιλο και ίζημα υδάτινων ρευμάτων, κάνοντας την συνεκτικότητα της φόρμουλας δύσκολο να επιτευχθεί.



**Εικόνα 1-4:** Θολόμετρο κεριού (Jackson Candle Turbidimeter): (1): κεριό, (2): φλόγα, (3): το μήκος του βέλους είναι ανάλογο με την ένταση της ακτινοβολίας της δέσμης του φωτός, (4): διαχεόμενο φως αδύναμο – μεταδιδόμενο φως ισχυρό, (5): διαχεόμενο φως και (6): το διαχεόμενο φως είναι τόσο έντονο όσο το μεταδιδόμενο – η εικόνα της φλόγας εξαφανίζεται σε αυτό το βάθος.

## 1.5 Μέθοδοι προτυποποίησης της μέτρησης της θολότητας

Οι δύο πιο σημαντικές και διαδεδομένες μέθοδοι-πρότυπα μέτρησης της θολότητας είναι :

- Η μέθοδος ISO 7027 (International Standardization Organization Method 7027)
- Τυποποιημένες μέθοδοι για την εξέταση του νερού και των λυμάτων, 2130B. Η United States Environmental Protection Agency Method 180.1 – USEPA για την θολότητα είναι πανομοιότυπη όσο αφορά τα κριτήρια σχεδιασμού των αντίστοιχων οργάνων.

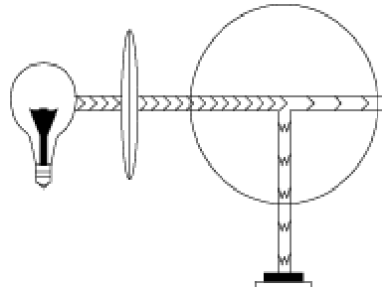
Αυτές οι μέθοδοι είναι βασισμένες στις μεθόδους μέτρησης θολότητας που χρησιμοποιούνται πιο συχνά από τις υπηρεσίες κανονιστικών ρυθμίσεων.

### 1.5.1 Μέθοδος USEPA 180.1

Η USEPA 180.1 είναι η πιο γνωστή κανονιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται στον κόσμο. Τα σχεδιαστικά κριτήρια που υπακούν την μέθοδο αυτή είναι τα ακόλουθα (Εικόνα 1-5) :

- Ο βασικός δέκτης πρέπει να είναι για νεφελομετρικές μετρήσεις (90 μοίρες με εύρος  $\pm 30$  μοίρες).
- Η πηγή φωτός πρέπει να είναι λαμπτήρες με νήμα από βολφράμιο με θερμοκρασία χρώματος μεταξύ 2200 K και 3000K.
- Η μέγιστη απόκριση φάσματος για τον δέκτη πρέπει να είναι μεταξύ 400-600nm, τα προτεύοντα μήκη κύματος του φωτός.
- Το εύρος μέτρησης θα είναι 0 - 40 NTU. Κάθε δείγμα που έχει θολότητα μεγαλύτερη από αυτό το εύρος πρέπει να αραιώνεται μέχρι η τιμή να βρίσκεται ανάμεσα από τα 0 - 40 NTU.





**Εικόνα 1-5 :** Χαρακτηριστικό σχηματικό αναπαράστασης της μεθόδου USEPA 180.1, για την κατασκευή θολομέτρου.

Η μέθοδος 180.1 έχει αρκετά πλεονεκτήματα :

- Χρησιμοποιεί μικρά μήκη κύματος φωτός που είναι πιο ευαίσθητα στη διάχυση που προκαλούν μικρά σωματίδια (όπως αυτά που διαλύονται στο νερό).
- Οι λάμπες βολφραμίου εκπέμπουν ακτινοβολία εννιά φορές πιο αποτελεσματική όσο αφορά την διάχυση από μικρά σωματίδια σε σχέση με μία πηγή φωτός στα 860nm.
- Είναι η πιο εφαρμόσιμη σε δείγματα καθαρού νερού, κάτω από 1 NTU.
- Οι λάμπες βολφραμίου είναι πιο εύκολα διαθέσιμες και μάλιστα με χαμηλό κόστος.
- Είναι καλά ορισμένη και ευρέως κατανοητή.

Βέβαια υπάρχουν δύο ουσιαστικά μειονεκτήματα στη μέθοδο αυτή. Πρώτον, είναι ευαίσθητη σε παρεμβολές λόγω χρώματος το οποίο απορροφά ακτινοβολία με μήκος κύματος στο διάστημα 400-600nm. Δεύτερον, οι πηγές ακτινοβολίας από νήμα βολφραμίου χρειάζονται μεγάλους χρόνους για να αποκτήσουν την απαραίτητη θερμοκρασία με σκοπό να πετύχουν μία σταθερότητα που δεν θα διαρκέσει πολύ. Γι' αυτόν το λόγο πρέπει να βαθμονομούνται συχνά.

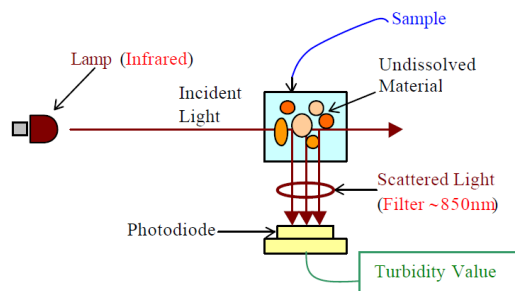
Η συμφωνία με τους περιορισμούς για το πόσιμο νερό χρησιμοποιώντας την μέθοδο USEPA 180.1 απαιτεί μόνο την μέτρηση των χαμηλών επιπέδων θολότητας. Στο παρελθόν, η τελική έκχυση νερού στις μονάδες επεξεργασίας πόσιμου νερού έπρεπε να έχει θολότητα μικρότερη από 0,5 NTU, το 95% του χρόνου, με μέγιστο κατώφλι τα 2 NTU. Το 1998, ο περιορισμός αυτός έγινε πιο αυστηρός σε μία τιμή θολότητας 0,3 NTU, το 95% του χρόνου, με ένα μέγιστο κατώφλι στο 1 NTU.

Πολλές μονάδες επεξεργασίας νερού έχουν γραφτεί σε ένα μόρφωμα συνεργασίας (Partnership of Safe Drinking Water)\* που επιβάλλει μέγιστο επίπεδο θολότητας 0,1 NTU. Σε αυτά τα επίπεδα θολότητας τα αντίστοιχα όργανα θα πρέπει να μετρούν με μεγάλη ακρίβεια και οι αποκλίσεις μεταξύ τους θα πρέπει να είναι γνωστές.

## 1.5.2 Μέθοδος ISO 7027

Η μέθοδος ISO 7027 εμφανίστηκε στην βιομηχανία της ζυθοποιίας και εφαρμόζεται κυρίως στην Ευρώπη. Έχει γίνει αποδεκτή για περιοριστικούς όρους για το νερό από την δεκαετία του 80'. Τα κριτήρια σχεδιασμού που απαιτούνται είναι τα εξής (Εικόνα 1-6) :

- Ο βασικός δέκτης πρέπει να είναι κατάλληλος για νεφελομετρική μέτρηση (σε γωνία 90 μοιρών με εύρος  $\pm 1,5$  μοίρες).
- Η πηγή φωτός θα πρέπει να έχει μήκος κύματος στα 860nm. Ένα υπέρυθρο Led ή ένας συνδυασμός λαμπτήρων με νήμα βολφραμίου με φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να πετύχουν αυτό το μήκος κύματος.
- Το φασματικό εύρος του φωτός θα πρέπει να είναι  $860\pm 30\text{nm}$ .
- Το εύρος μέτρησης θα είναι 0 - 40 NTU. Κάθε δείγμα που έχει θολότητα μεγαλύτερη από αυτό το εύρος πρέπει να αραιώνεται μέχρι η τιμή να βρίσκεται ανάμεσα από τα 0 - 40 NTU.

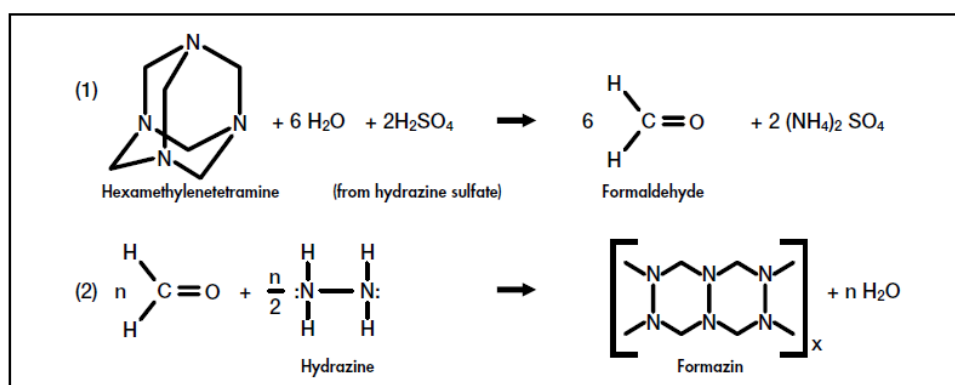


**Εικόνα 1-6:** Χαρακτηριστικό σχηματικό αναπαράστασης της μεθόδου ISO 7027, για την κατασκευή θολομέτρου.

Το στοιχείο που ισχυροποιεί αυτή τη μέθοδο είναι η χρήση ακτινοβολίας κοντά στην μονοχρωματική η οποία είναι σταθερή, έχει μικρή παρεμβολή λόγω απορρόφησης από το δείγμα και προκαλεί λιγότερο παράσιτο φως. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα λόγω της χρησιμοποίησης πηγής φωτός με μεγάλο μήκος κύματος είναι ότι μειώνεται η ευαισθησία σε μικρά σωματίδια. Η μειωμένη ευαισθησία μπορεί να ενισχυθεί αλλά θα ενισχυθεί κι ο θόρυβος-σφάλμα των μετρήσεων σε χαμηλά επίπεδα θολότητας.

## 1.6 Πρότυπα θολότητας

Το 1926, οι Kingsbury και Clark ανέπτυξαν την φορμαζίνη (formazin), ένα σχεδόν ιδανικό αιώρημα για τα πρότυπα της θολότητας. Ζύγισαν και διέλυσαν 5gram θεικής υδραζίνης (hydrazine sulfate-  $H_6N_2O_4S$ ) και 50gram μίας ετεροκυκλικής οργανικής ένωσης (hexamethylenetetramine-  $(CH_2)_6N_4$ .) σε ένα λίτρο αποσταγμένου νερού (Εικόνα 1-7). Το διάλυμα δημιουργεί μία λευκή θολότητα αφού παραμείνει στους  $25^\circ C$  για 48 ώρες. Κάτω από ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας και φωτός, η φόρμουλα αυτή μπορεί να ετοιμαστεί επαναλαμβανόμενα με ακρίβεια  $\pm 1\%$ . Η φορμαζίνη είναι το μόνο γνωστό πρότυπο θολότητας που μπορεί επαναλαμβανόμενα να δημιουργηθεί από ανιχνεύσιμα ακατέργαστα υλικά. Όλα τα υπόλοιπα πρότυπα, εναλλακτικά και δευτερεύοντα, πρέπει να ελέγχονται σύμφωνα με την φορμαζίνη. Πρωταρχικά πρότυπα θολότητας που ετοιμάζονται από απευθείας συνθέσεις της φορμαζίνης έχουν γίνει αποδεκτά παγκοσμίως από την υδάτινη βιομηχανία και άλλες σχετικές βιομηχανίες.



Εικόνα 1-7: Σύνθεση της φορμαζίνης

Η φορμαζίνη έχει μερικά επιθυμητά χαρακτηριστικά που την κάνουν εξαιρετικό πρότυπο θολότητας. Πρώτον, μπορεί να αναπαραχθεί με μεγάλη ακρίβεια από ακατέργαστα υλικά. Δεύτερον, τα φυσικά χαρακτηριστικά της την κάνουν ιδανικό πρότυπο βαθμονόμησης της διάχυσης του φωτός. Το πολυμερές φορμαζίνης περιέχει αλυσίδες αρκετών διαφορετικών μεγεθών οι οποίες συνδέονται με τυχαίο τρόπο. Το αποτέλεσμα είναι μια μεγάλη ποικιλία από σχήματα και μεγέθη σωματιδίων που κυμαίνονται μεταξύ 0,1-10 μm. Μελέτες για την κατανομή σωματιδίων δείχνουν ανώμαλες κατανομές μεταξύ διαφορετικών ειδών προτύπων αλλά η ολική στατιστική θολομετρική διάχυση αναπαράγεται πολύ εύκολα. Αυτή η μεγάλη ποικιλία σωματιδίων ταιριάζει με την μεγάλη ποικιλία μεγεθών σωματιδίων που βρίσκονται και στα πραγματικά δείγματα. Εξαιτίας της δυνατότητας να παράγεται επαναλαμβανόμενα το ίδιο διαχεόμενο φως που προκαλεί το πολυμερές της φορμαζίνης στο λευκό φως, όργανα που χρησιμοποιούν λαμπτήρα με νήμα

βολφραμίου μπορούν να βαθμονομηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η τυχαιότητα των μεγεθών και των σχημάτων των σωματιδίων εντός της φορμαζίνης αποδίδει, στατιστικά, διάχυση που μπορεί να αναπαραχθεί σε όλα τα θολόμετρα. Εξαιτίας της ικανότητας της φορμαζίνης να αναπαράγεται, των χαρακτηριστικών διάχυσης και της ανιχνευσιμότητας, οι αλγόριθμοι βαθμονόμησης των θολομέτρων και τα κριτήρια απόδοσης πρέπει να είναι βασισμένα σε αυτό το πρότυπο.

Το 1955, η σχέση των ppm (parts per million silica concentration) και της θολότητας εγκαταλείφθηκε και μετά την 10<sup>η</sup> έκδοση των «πρότυπων μεθόδων» (Standard Methods) η θολότητα περιγράφεται με όρους που αφορούν τη διάχυση του φωτός από αιωρούμενα σωματίδια. Ο όρος ppm και η silica κλίμακα αντικαταστάθηκαν από απλές μονάδες θολότητας (turbidity units-TU). Όταν η φορμαζίνη έγινε αποδεκτή ως πρωταρχικό πρότυπο αναφοράς οι μονάδες μέτρησης της θολότητας έγιναν γνωστές σαν μονάδες θολότητας φορμαζίνης (formazin turbidity units-FTU). Η φορμαζίνη υιοθετήθηκε για πρώτη φορά από την APHA (American Public Health Association) και την AWWA (American Water Works Association) ως το πρωταρχικό υλικό πρότυπο για την θολότητα στην 13<sup>η</sup> έκδοση των «πρότυπων μεθόδων» (Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater).

Το θέμα των προτύπων στην μέτρηση της θολότητας είναι κατά κάποιο τρόπο πολύπλοκο εξαιτίας της ποικιλίας των τύπων των προτύπων που χρησιμοποιούνται και εξαιτίας των διαφοροποιήσεων στον ορισμό που χρησιμοποιείται από οργανισμούς όπως η USEPA και από την APHA και την AWWA στην Standard Methods.

Η Standard Methods ορίζει ένα πρωταρχικό πρότυπο ως το πρότυπο το οποίο προετοιμάζεται από τον χρήστη από ανιχνεύσιμα ακατέργαστα υλικά, χρησιμοποιώντας ακριβείς μεθοδολογίες κάτω από ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στην θολότητα, το μόνο πρότυπο που μπορεί να θεωρηθεί αυστηρά ως πρωταρχικό, είναι η φορμαζίνη που έχει ετοιμαστεί από τον χρήστη στο εργαστήριο. Επίσης, ορίζει ως δευτερεύοντα πρότυπα τα πρότυπα που ο κατασκευαστής έχει θεωρήσει ότι προκαλούν ισοδύναμα αποτελέσματα στην βαθμονόμηση με αυτά που βγήκαν όταν το όργανο βαθμονομήθηκε με το πρότυπο από φορμαζίνη που δημιούργησε ο χρήστης. Δευτερεύοντα διαλύματα διαθέσιμα για βαθμονόμηση περιλαμβάνουν αιωρήματα φορμαζίνης εμπορίου (4000 NTU), σταθεροποιημένα αιωρήματα φορμαζίνης και αιωρήματα πολυμερούς στυρενίου-διβινυλοβενζολίου.

Οι ορισμοί της USEPA διαφέρουν από αυτούς της Standard Methods. Η USEPA προσδιορίζει όλα τα παραπάνω σκευάσματα-αιωρήματα σαν πρωταρχικά πρότυπα βαθμονόμησης. Ο όρος δευτερεύοντα πρότυπα, χρησιμοποιείται από την USEPA για να περιγράψει τα πρότυπα τα οποία χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση των βαθμονομήσεων. Η χρήση των δευτερευόντων προτύπων δεν επεκτείνεται στην βαθμονόμηση οργάνων περιορίζεται μόνο στην επαλήθευση.

## 1.7 Νεφελομετρία

Ιστορικά, η ανάγκη για ακριβείς μετρήσεις για χαμηλές τιμές θολότητας σε δείγματα που περιέχουν λεπτά σωματίδια απαιτούσε εξελίξεις στην απόδοση των θολομέτρων. Το θολόμετρο του Jackson (Jackson Candle Turbidimeter) παρουσίαζε σημαντικούς πρακτικούς περιορισμούς επειδή δεν μπορούσε να μετρήσει θολότητα μικρότερη από 25 JTU, ήταν κατά κάποιον τρόπο ογκώδης και ήταν εξαρτημένο από την ανθρώπινη κρίση για τον προσδιορισμό του συγκεκριμένου σημείου όπου το φως εξαφανίζεται. Επίσης, επειδή η πηγή ακτινοβολίας για το συγκεκριμένο θολόμετρο ήταν ένα κερί, η προσπίπτουσα ακτινοβολία είχε μεγάλο μήκος κύματος, προς το τέλος του φάσματος του ορατού φωτός (κίτρινο - κόκκινο), κι έτσι δεν ήταν αποτελεσματικό για τα πολύ λεπτά αιωρήματα. Το θολόμετρο του Jackson ήταν όντως ακατάλληλο για την μέτρηση θολότητας εξαιτίας μαύρων σωματιδίων, όπως ο ξυλάνθρακας, γιατί το ποσοστό απορρόφησης του φωτός ήταν πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό του διαχεόμενου. Έτσι το πεδίο παρατήρησης γινόταν σκοτεινό πριν τοποθετηθεί στον σωλήνα ικανή ποσότητα δείγματος.

Πολλά θολόμετρα, τα οποία βασίζονταν στην εικονική έκλειψη, αναπτύχθηκαν αργότερα με βελτιωμένες πηγές φωτός και τεχνικές σύγκρισης, αλλά τα σφάλματα εξαιτίας της ανθρώπινης κρίσης οδηγούσαν σε μία σημαντική έλλειψη ακρίβειας. Οι φωτοηλεκτρικοί δέκτες οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε μικρές μεταβολές της έντασης της ακτινοβολίας, έγιναν δημοφιλείς στην μέτρηση της εξασθένησης της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας διαμέσου ενός δείγματος συγκεκριμένου όγκου. Τα όργανα αυτά παρείχαν πολύ καλύτερη ακρίβεια κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, αλλά ήταν ακόμη περιορισμένα σε σχέση με την ικανότητα να μετρούν υψηλές ή πολύ χαμηλές τιμές θολότητας. Σε χαμηλής έντασης διαχύσεις, οι μεταβολές του μεταδιδόμενου φωτός ήταν τόσο μικρές που δεν μπορούν να ανιχνευθούν με κανένα τρόπο. Τυπικά, το σήμα είχε ήδη χαθεί στον ηλεκτρονικό θόρυβο. Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, η πολλαπλή διάχυση παρεμπόδιζε την απευθείας διάχυση.

Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ήταν η μέτρηση της διαχεόμενης ακτινοβολίας σε μία γωνία, σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία, και στην συνέχεια η συσχέτιση της με την πραγματική θολότητα του δείγματος. Μία γωνία λήψης 90° θεωρείται πολύ ευαίσθητη στην διάχυση που προκαλούν τα σωματίδια. Τα περισσότερα μοντέρνα όργανα μετρούν διάχυση 90° και ονομάζονται νεφελόμετρα ή νεφελομετρικά θολόμετρα (nephelometers).

Εξαιτίας της ευαισθησίας της νεφελομετρίας, της ακρίβειας και της ικανότητας εφαρμογής πάνω σε ένα μεγάλο εύρος μεγεθών και συγκέντρωσης σωματιδίων, η Standard Methods υιοθέτησε τα νεφελόμετρα ως το προτιμότερο μέσο για την μέτρηση της θολότητας. Παρομοίως, η προτιμότερη έκφραση για την θολότητα είναι οι νεφελομετρικές μονάδες θολότητας (NTU). Η έκδοση της USEPA, «Μέθοδοι για την Χημική Ανάλυση του Νερού και των Λυμάτων» (Methods of

Chemical Analysis of Water and Wastes), προσδιορίζει την νεφελομετρική μέθοδο ανάλυσης για την μέτρηση της θολότητας.

Για τον διαχωρισμό της θολότητας που προέρχεται από το νεφελόμετρο από την θολότητα που προέρχεται από εικονικές μεθόδους οι παραπάνω θολότητες εκφράζονται σε NTU και JTU αντίστοιχα ( $1 \text{ JTU} = 4 \text{ NTU's}$ ). Επιπλέον χρησιμοποιούνται και οι όροι FNU (Formazin Nephelometric Unit) και FAU (Formazin Attenuation Unit). Η μονάδα FNU εφαρμόζεται σε νεφελομετρική μέτρηση και η FAU αναφέρεται σε μέτρηση εξασθένησης. Παρόλα αυτά, οι μονάδες NTU, FTU, FNU, FAU είναι όλες βασισμένες στο ίδιο πρωταρχικό πρότυπο φορμαζίνης.

## 1.8 Παρεμβολές στη μέτρηση θολότητας

Η μέτρηση της θολότητας επηρεάζεται από μία σειρά παρεμβολών. Οι πιο κυρίαρχες παρεμβολές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1-1). Οι παρεμβολές της θολότητας προκαλούν είτε θετική είτε αρνητική επιρροή στις μετρήσεις. Αποτελέσματα μέτρησης με αρνητική απόκλιση, δίνοντας τιμές μικρότερες από τις πραγματικές, είναι συνήθως συνυφασμένα με μετρήσεις μεγαλύτερες του 1 NTU και μπορούν να γίνουν σημαντικές όταν η τιμή της μέτρησης αυξάνει. Αποτελέσματα μέτρησης με θετική απόκλιση είναι συνήθως συνυφασμένα με μετρήσεις αρκετά χαμηλής θολότητας, που κυμαίνονται κάτω από το 0.1 NTU, και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις μετρήσεις σε περίπτωση που έχουμε νερό υψηλής καθαρότητας όπως το φιλτραρισμένο πόσιμο νερό.

Παρεμβολή	Αποτέλεσμα παρεμβολής πάνω στη μέτρηση θολότητας
Σωματίδια που απορροφούν ακτινοβολία (έγχρωμα)	Αρνητική απόκλιση (η αναφερόμενη θολότητα είναι χαμηλότερη από την πραγματική).
Χρώμα μέσα στη μήτρα	Αρνητική απόκλιση αν το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός επικαλύψει το απορροφητικό φάσμα εντός της μήτρας του δείγματος.

Μέγεθος σωματιδίων	Είτε αρνητική είτε θετική απόκλιση (εξαρτάται από το μήκος κύματος) :  Α) Τα μεγάλα σωματίδια σκεδάζουν μεγάλα μήκη κύματος πιο εύκολα σε σχέση με τα μικρά σωματίδια  Β) Τα μικρά σωματίδια σκεδάζουν μικρά μήκη κύματος πιο αποτελεσματικά από ότι τα μεγάλα μήκη.
Φυσαλίδες	Θετική απόκλιση που προκαλεί επιπτώσεις στην ακρίβεια μέτρησης σε όλα τα επίπεδα θολότητας.
Ποικιλομορφία του δοχείου δείγματος	Είτε αρνητική είτε θετική απόκλιση. Η απόκλιση αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την χρήση τεχνικών συναρμογής και εύρεσης δεικτών καθώς και με εφαρμογή λαδιού σιλικόνης με σκοπό την μείωση των ανακλάσεων εξαιτίας αμυχών που μπορεί να υπάρχουν στο δοχείο. Η επίπτωση αυτής της παρεμβολής είναι πιο σοβαρή σε μικρά επίπεδα θολότητας.
Παράσιτο φως	Θετική απόκλιση (η αναφερόμενη θολότητα είναι λίγο υψηλότερη από την πραγματική).
Πυκνότητα σωματιδίων	Αρνητική απόκλιση (η αναφερόμενη θολότητα είναι χαμηλότερη από την πραγματική).
Καθίζηση σωματιδίων	Είτε αρνητική είτε θετική απόκλιση που προκύπτει εξαιτίας της γρήγορης καθίζησης σωματιδίων και εξαρτάται από την χρονική στιγμή και την διάρκεια μιας μέτρησης. Αυτό έχει σχέση με το στιγμιαίο δείγμα και εργαστηριακές/φορητές μετρήσεις.
Παρεμβολή λόγω οργάνου μέτρησης	Ποιοτική υποβάθμιση των οπτικών εξαρτημάτων μπορεί να έχει και θετικές και αρνητικές επιπτώσεις στη μέτρηση αλλά η απόκλιση είναι συνήθως αρνητική.
Επιμόλυνση	Θετική απόκλιση (η αναφερόμενη θολότητα είναι υψηλότερη από την πραγματική).

**Πίνακας 1-1:** Τυπικές παρεμβολές που έχουν σχέση με την μέτρηση θολότητας

Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 1-1), το χρώμα έχει καταγραφεί ως παρεμβολή. Παρ' όλα αυτά, εξαρτάται από την εφαρμογή, το χρώμα μπορεί να θεωρηθεί και μέρος της μέτρησης θολότητας και όχι σαν παρεμβολή. Πολλά σχέδια οργάνων έχουν αναπτυχθεί για την μείωση της επίπτωσης αυτής της παραμέτρου (απορροφητικότητα λόγω χρώματος) πάνω στα εξαρτήματα που είναι υπεύθυνα για την λήψη του διαχεόμενου φωτός.

Σε μία προσπάθεια για ελαχιστοποίηση των παρεμβολών και βελτίωσης της αξιοπιστίας των μετρήσεων, έχουν ανακύψει κάποιες διαφορετικές μέθοδοι για την μέτρηση της θολότητας. Μερικά από αυτά τα σχέδια έχουν σκοπό να αυξήσουν την ευαισθησία στη θολότητα όσο αφορά την καθαρότητα των νερών. Άλλα σχέδια ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις από τις παρεμβολές, όπως είναι το χρώμα. Και τέλος άλλες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί με σκοπό να λειτουργούν για ένα συγκεκριμένο τύπο εφαρμογής ή πάνω σε ένα διακριτό εύρος θολότητας. Τα κρίσιμα «εξαρτήματα» σε μία μέτρηση θολότητας και οι συνακόλουθες παρεμβολές, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του δείγματος και την τεχνολογία μέτρησης που εφαρμόζεται, μπορούν να επηρεάσουν την αναφερόμενη τιμή. Διαφορετικές τεχνολογίες συχνά παράγουν διαφορετικές τιμές μέτρησης πάνω στο ίδιο δείγμα.

## 1.9 Μοντέρνες τεχνολογίες μέτρησης θολότητας

Αν και σήμερα υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των προσμίξεων νερού η μέτρηση θολότητας είναι ακόμα σημαντική γιατί είναι ένας απλός κι αδιαμφισβήτητος δείκτης για την αλλαγή της ποιότητας του νερού. Μία ξαφνική αλλαγή στην τιμή της θολότητας μπορεί να φανερώσει μία πρόσθετη πηγή μόλυνσης (βιολογική, οργανική ή ανόργανη) ή μπορεί προειδοποιήσει για πρόβλημα στην διαδικασία επεξεργασίας του νερού.

Μοντέρνα όργανα απαιτούνται για να μετρηθεί κι η πολύ υψηλή κι η πολύ χαμηλή τιμή θολότητας για ένα μεγάλο εύρος μεγέθους και σύστασης σωματιδίων. Η ικανότητα ενός θολομέτρου να μετρά ένα μεγάλο εύρος θολότητας εξαρτάται από τον σχεδιασμό του ίδιου του οργάνου.

Το μεγάλο πλήθος διαφορετικών τεχνολογιών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με τρεις διαφορετικές παραμέτρους. Μία παράμετρος είναι ο τύπος της πηγής προσπίπτοντος φωτός που χρησιμοποιείται. Η δεύτερη παράμετρος είναι ο τύπος συστημάτων ανίχνευσης-λήψης του διαχεόμενου φωτός. Η τρίτη παράμετρος είναι η οπτική γεωμετρία του οργάνου που περιλαμβάνει τη γωνία λήψης του διαχεόμενου φωτός και την εφαρμογή πολλαπλών δεκτών (multiple detectors), μέθοδος γνωστή ως ratio-method (η έξοδος/το αποτέλεσμα είναι ένα κλάσμα με όρους τις εξόδους των δεκτών σε συγκεκριμένο συνδυασμό).



## 1.9.1 Πηγές προσπίπτοντος φωτός

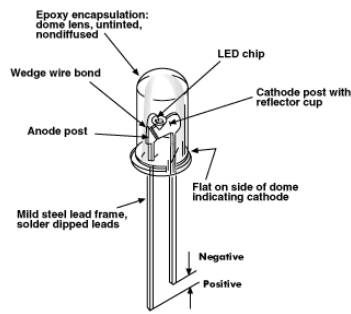
Οι πηγές φωτός μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες : σε πηγές πυρακτωμένου φωτός (incandescent lamps), σε πηγές φωτός LED (Light Emitting diode : δίοδοι που εκπέμπουν φως) και σε πηγές φωτός laser (Εικόνα 1-11).

Οι πηγές πυρακτωμένου φωτός – λαμπτήρες με νήμα βολφραμίου (incandescent light sources) είναι συνήθως πηγές πολυχρωματικού φωτός το οποίο απαιτεί συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας χρώματος. Πιο συχνά το εύρος της θερμοκρασίας συγκεκριμενοποιείται στο διάστημα 2200-3000 βαθμούς Kelvin. Υπό αυτή την συνθήκη λειτουργίας, η πηγή εκπέμπει ενέργεια που περιέχει μήκη κύματος μεταξύ 400-600nm. Η θερμοκρασία χρώματος καθώς και το φάσμα που εκπέμπει ο λαμπτήρας είναι μία συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στον λαμπτήρα. Για να επιτευχθεί σταθερή φωτεινότητα-έξοδος από τον λαμπτήρα απαιτείται μία καλά ρυθμισμένη τροφοδοσία. Αυτά τα μικρά μήκη κύματος μπορούν να διαχυθούν πιο αποδοτικά από μικρότερα σωματίδια (Εικόνα 1-8).



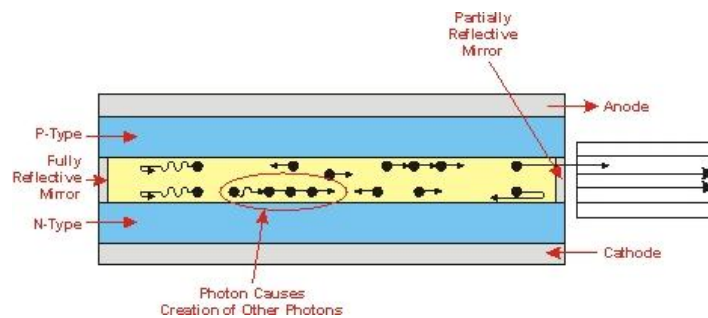
**Εικόνα 1-8:** Πηγές πυρακτωμένου φωτός – λαμπτήρες με νήμα βολφραμίου (incandescent light sources)

Οι πηγές φωτός LED (Light Emitting diode) συνήθως εφαρμόζουν τεχνολογίες LED φωτισμού με συνήθη μήκη κύματος (που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της θολότητας) μεταξύ 830-890nm(κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν έχουμε συγκεκριμένους τύπους σωματιδίων ή όταν απαιτείται μία σωστά χαρακτηρισμένη πηγή φωτός. Είναι πιο «ευφείς» στην παραγωγή ακτινοβολίας από ότι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως κι έτσι απαιτείται πολύ μικρότερη ενέργεια λειτουργίας για μία δεδομένη ένταση ακτινοβολίας. Αυτές οι πηγές φωτός δεν επηρεάζονται από το ορατό χρώμα μέσα στο δείγμα και είναι ευρέως διαδεδομένες (Εικόνα 1-9).

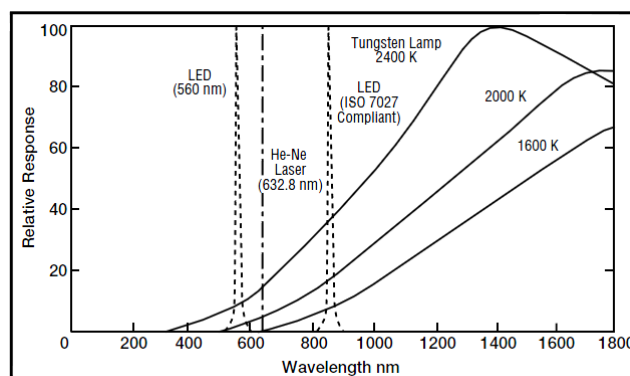


**Εικόνα 1-9:** Πηγές φωτός LED (Light Emitting diode)

**Πηγές φωτός laser.** Ένα μικρό δείγμα πηγών προσπίπτοντος φωτός περιέχει τις πηγές φωτός που βασίζονται στο laser οι οποίες εκπέμπουν ενέργεια σε ένα διακριτό μήκος κύματος μεταξύ 400-700nm. Είναι πολύ ευαίσθητες σε μικρές αλλαγές της θολότητας και συχνά χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της διαδικασίας φιλτραρίσματος για τον καθαρισμό του νερού (Εικόνα 1-10).



**Εικόνα 1-10:** Πηγές φωτός laser



**Εικόνα 1-11:** Τυπικά φασματικά χαρακτηριστικά για τον λαμπτήρα με νήμα βολφραμίου, σε τρεις θερμοκρασίες χρώματος, για ένα LED με μήκος κύματος στα 560nm, για ένα laser ηλίου-νέον (He/Ne laser) και για ένα LED στα 860 nm σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7027.

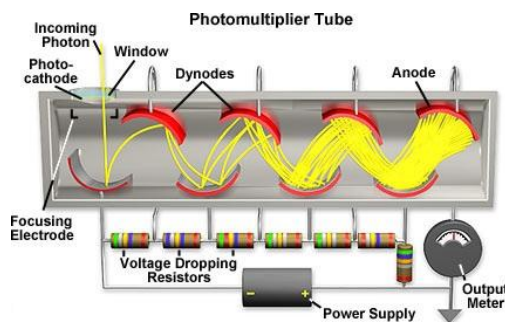
## 1.9.2 Δέκτες-ανιχνευτές διαχεόμενης ακτινοβολίας

Αφού το επιβαλλόμενο φως αλληλεπιδράσει με το δείγμα στην συνέχεια είναι δουλειά του συστήματος ανιχνευτών να λάβει το διαχεόμενο φως. Υπάρχουν τέσσερα είδη δεκτών ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται σήμερα στα θολόμετρα :

- Ο φωτό-πολλαπλασιαστικός σωλήνας (photo-multiplier tube)
- Η φωτοδίοδος κενού (vacuum photodiode)
- Η φωτοδίοδος πυριτίου (silicon photodiode)
- Ο φωτοαγωγός από θειούχο κάδμιο (cadmium sulfide photoconductor).

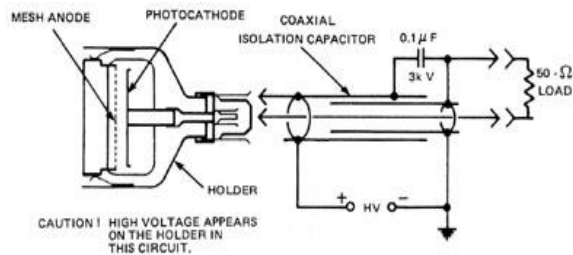
Αυτοί οι δέκτες διαφέρουν στην απόκριση τους σύμφωνα με μία κατανομή μήκους κύματος όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1-16).

**Οι φωτοπολλαπλασιαστές (photomultipliers)** που χρησιμοποιούνται σε ένα θολόμετρο έχουν μέγιστη ευαισθησία σε εύρος φάσματος κοντά στο υπεριώδες και στο μπλε τελείωμα του φάσματος του ορατού φωτός. Για να διατηρήσουν σταθερή λειτουργία απαιτούν μία καλά ρυθμισμένη ηλεκτρική τροφοδοσία υψηλής τάσης.



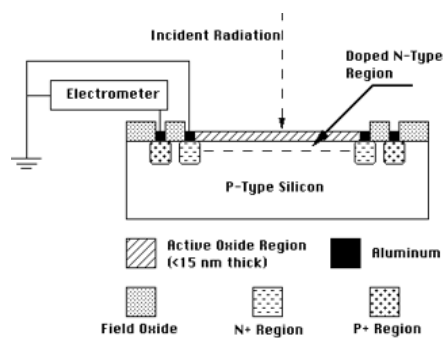
Εικόνα 1-12: Φωτοπολλαπλασιαστής (photomultiplier)

**Μία φωτοδίοδος κενού (vacuum photodiode)** ανταποκρίνεται σε ένα εύρος φάσματος παρόμοιο με αυτό του φωτοπολλαπλασιαστή και είναι κάπως πιο σταθερή από αυτόν. Παρ' όλα αυτά, τα χαρακτηριστικά της επηρεάζονται από περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η υγρασία.



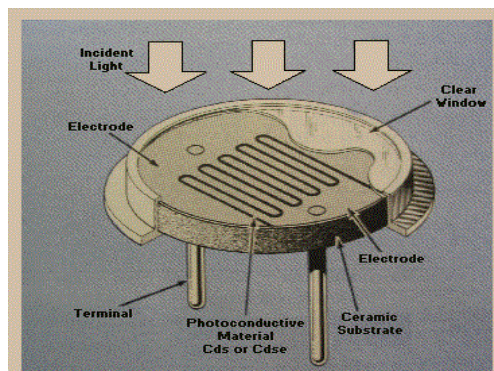
**Εικόνα 1-13:** Φωτοδιόδος κενού (vacuum photodiode)

Οι φωτοδιόδοι πυριτίου (silicon photodiode) παρουσιάζουν μέγιστη ευαισθησία στην ορατή κόκκινη περιοχή του φάσματος ή κοντά στην υπέρυθη.

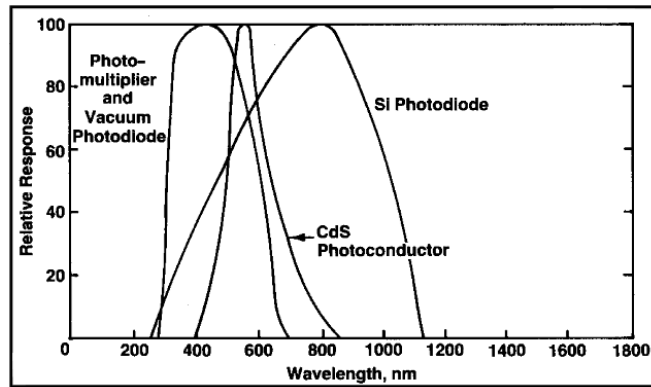


**Εικόνα 1-14:** Φωτοδιόδος πυριτίου (silicon photodiode)

Ο φωτοαγωγός από θειούχο κάδμιο (cadmium sulfide photoconductor) έχει μέγιστη απόκριση φάσματος κάπου μεταξύ του φωτοπολλαπλασιαστή και της φωτοδιόδου από πυρίτιο.



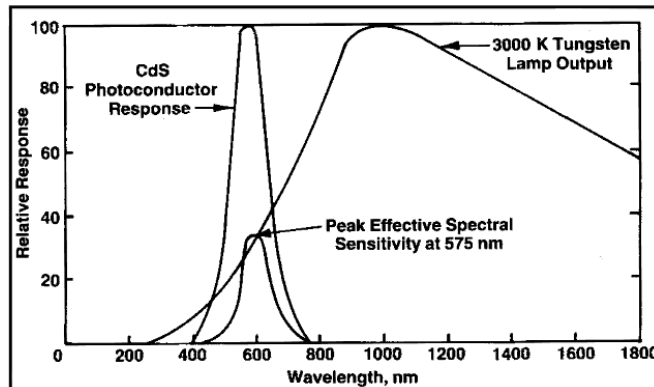
**Εικόνα 1-15:** Φωτοαγωγός από θειούχο κάδμιο (cadmium sulfide photoconductor)



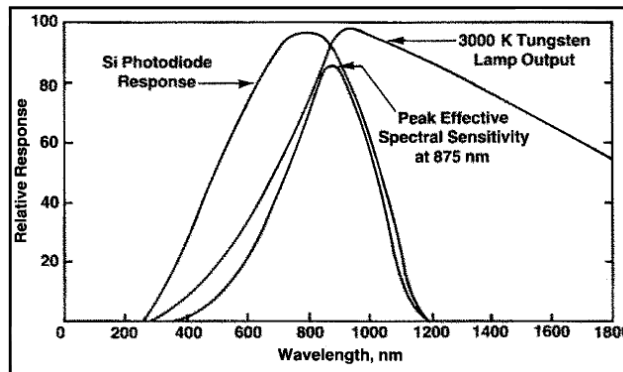
**Εικόνα 1-16:** Τυπικά χαρακτηριστικά απόκρισης φάσματος τεσσάρων τύπων φωτοδεκτών.

Η κατανομή φάσματος τόσο της πηγής όσο και της λήψης της ακτινοβολίας είναι στοιχεία κλειδί για την απόδοση του θολομέτρου. Γενικά, ανεξαρτήτως τύπου δέκτη, όταν το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι πολύ μικρό τότε το όργανο είναι πιο ευαίσθητο στη διάχυση που προκαλούν μικρότερα σωματίδια. Αντίθετα, όταν το μήκος κύματος είναι μεγάλο τότε το όργανο θα είναι πιο ευαίσθητο σε σχετικά μεγαλύτερα σωματίδια. Ο δέκτης του οργάνου επηρεάζει την απόκριση με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Επειδή ο φωτοπολλαπλασιαστής και η φωτοδίοδος κενού παρουσιάζουν μέγιστη απόκριση σε χαμηλά μήκη κύματος (εύρος φάσματος κοντά στο υπεριώδες και στο μπλε τελείωμα του φάσματος του ορατού φωτός) συνδυάζονται αποτελεσματικά με πηγή πολυχρωματικού φωτός και είναι περισσότερο ευαίσθητοι στη διαχεόμενη ακτινοβολία μικρών σωματιδίων. Η φωτοδίοδος πυριτίου παρουσιάζει μέγιστη απόκριση σε μεγαλύτερα μήκη κύματος γι' αυτό και χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν μεγαλύτερα σωματίδια.

Σε ένα πραγματικό όργανο ο συνδυασμός πηγής/δέκτη ορίζει το εύρος φάσματος στο οποίο το όργανο είναι αποτελεσματικό και τον τρόπο με τον οποίο θα ανταποκριθεί στο δείγμα. Παρακάτω απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά φάσματος ενός οργάνου που χρησιμοποιεί σαν πηγή ακτινοβολίας λαμπτήρα από νήμα βολφραμίου και σαν δέκτη φωτοαγωγός από θειούχο κάδμιο (Εικόνα 1-17). Το όργανο αυτό έχει μέγιστη ευαισθησία φάσματος σε μήκος κύματος περίπου ίσο με 575nm. Η επόμενη εικόνα (Εικόνα 1-18) δείχνει τα χαρακτηριστικά φάσματος ενός οργάνου που χρησιμοποιεί την ίδια πηγή φωτός αλλά σαν δέκτη έχει μία φωτοδίοδο πυριτίου. Η μέγιστη ευαισθησία φάσματος διαμορφώνεται αντίστοιχα στα 875nm. Εξαιτίας αυτής της διαφοράς στην φασματική απόκριση το όργανο της εικόνας- είναι πιο ευαίσθητο στα μικρά σωματίδια σε σχέση με το όργανο που τα χαρακτηριστικά του απεικονίζονται στην εικόνα-. Επίσης, τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν ότι η μεγαλύτερη απόδοση του συστήματος επιτυγχάνεται όταν η πηγή και ο δέκτης φωτός είναι καλά ταιριασμένοι και οι φασματικές τους καμπύλες παρουσιάζουν μέγιστη επικάλυψη.



**Εικόνα 1-17:** Αποτελεσματική κατανομή φάσματος συστήματος αποτελούμενο από πηγή με λαμπτήρα πυρακτώσεως στους 3000 βαθμούς Kelvin και από δέκτη με φωτοαγωγό από θειούχο κάδμιο.



**Εικόνα 1-18:** Αποτελεσματική κατανομή φάσματος συστήματος αποτελούμενο από πηγή με λαμπτήρα πυρακτώσεως στους 3000 βαθμούς Kelvin και από δέκτη με φωτοδίοδο από πυρίτιο.

### 1.9.3 Γεωμετρία οπτικού συστήματος

Η τρίτη πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την χαρακτηριστική απόκριση ενός θολομέτρου είναι η οπτική του γεωμετρία, η οποία έχει να κάνει με παραμέτρους που αφορούν τον σχεδιασμό του οργάνου όπως το μέγιστο μήκος-απόσταση που διανύει το διαχεόμενο φως καθώς κι τη γωνία στην οποία είναι τοποθετημένος ο δέκτης.

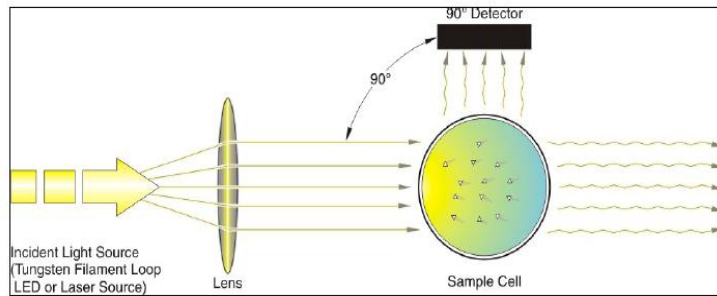
### **1.9.3.1 Μήκος μονοπατιού – path length**

Το μήκος του δρόμου-μονοπατιού (path length) που διανύεται από το διαχεόμενο φως αποτελεί παράμετρο σχεδίασης που έχει άμεση σχέση με το κατά πόσο ευαίσθητα και γραμμικά θα λειτουργεί το θολόμετρο. Όσο αυξάνεται το μήκος μονοπατιού, αυξάνεται και η ευαισθησία του οργάνου ενώ ταυτόχρονα η γραμμικότητα θυσιάζεται ειδικά σε υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων εξαιτίας της πολλαπλής διάχυσης και απορρόφησης. Αντίθετα, αν το μήκος μονοπατιού μειωθεί, το εύρος της γραμμικότητας του οργάνου αυξάνεται αλλά χάνεται η ευαισθησία ειδικά σε χαμηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων. Βέβαια, αυτός ο συμβιβασμός είναι δυνατόν να εκλείψει αν μπορέσει να δημιουργηθεί ένα προσαρμοζόμενο-μεταβαλλόμενο μήκος μονοπατιού. Η χρήση ενός μικρού μονοπατιού μπορεί επίσης να αυξήσει την επίδραση της παρεμβολής λόγω παράσιτου φωτός. Σύμφωνα και με τις δύο μεθόδους, USEPA 180.1 και ISO 7027, απαιτείται το θολόμετρο να έχει μήκος μονοπατιού μικρότερο από 10cm (αναφέρεται στην απόσταση της πηγής φωτός από τον δέκτη).

### **1.9.3.2 Γωνία λήψης**

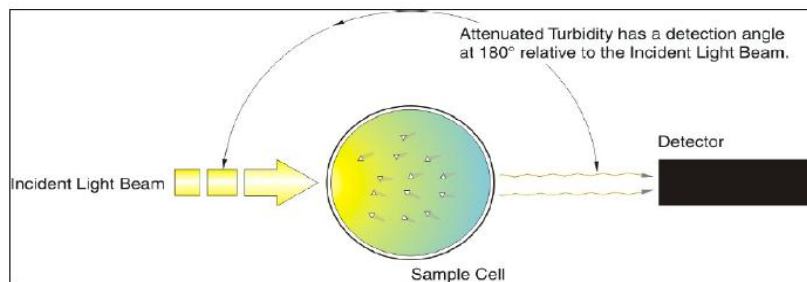
Η γωνία λήψης μπορεί να έχει σοβαρή επιρροή στην ανίχνευση των σωματιδίων, από άποψη μεγέθους αυτών, και στο εύρος μέτρησης θολότητας του οργάνου. Επίσης ο αριθμός των δεκτών και η σχετική τους γωνία ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία μπορεί να βοηθήσει στην μείωση επιρροής παρεμβολών όπως το χρώμα και τις αλλαγές στα επί μέρους στοιχεία του οργάνου.

- **Γωνία λήψης 90 μοιρών.** Αυτή η γωνία συνήθως αναφέρεται κι ως νεφελομετρική γωνία λήψης και είναι η γωνία που σχηματίζουν η κεντρική γραμμή του προσπίπτοντος φωτός με την κεντρική γραμμή της γωνίας λήψης του δέκτη. Αυτή είναι η πιο κοινή γωνία λήψης εξαιτίας της ευαισθησίας της σε ένα ευρύ φάσμα μεγέθους σωματιδίων. Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1-19) παρουσιάζει μία νεφελομετρική γωνία λήψης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιαδήποτε από τις πηγές φωτός που αναφέρθηκαν παραπάνω.



**Εικόνα 1-19:** Θολόμετρο με γωνία λήψης 90 μοιρών.

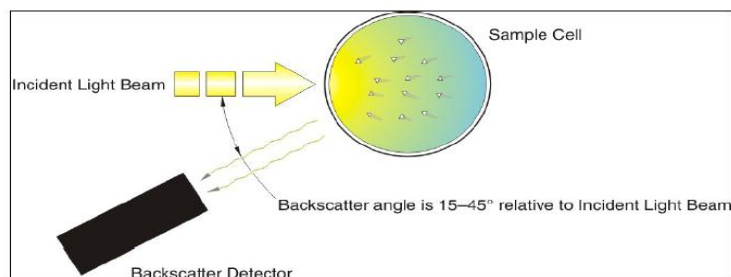
**Γωνία λήψης 180 μοιρών-εξασθένησης.** Αυτή η γωνία λήψης είναι γεωμετρικά οριοθετημένη σε γωνία 180 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Μετράει την εξασθένιση του προσπίπτοντος φωτός εξαιτίας της διάχυσης και της απορρόφησης της ενέργειας του φωτός. Αυτή η γωνία έχει την καλύτερη επιδεικτικότητα σε παρεμβολές όπως είναι η απορρόφηση και το χρώμα. Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1-20) παρουσιάζει μία γωνία λήψης εξασθένησης.



**Εικόνα 1-20:** Θολόμετρο με γωνία λήψης 180 μοιρών.

**Γωνία λήψης οπισθοσκέδασης (back-scattering).** Αυτή η γεωμετρία έχει ένα δέκτη που είναι κεντραρισμένος σε μία γωνία μεταξύ 15-45 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Είναι ευαίσθητη στο διαχεόμενο φως που ανακλάται πίσω αντίθετα προς την κατεύθυνση του προσπίπτοντος φωτός και είναι απαραίτητη για δείγματα με υψηλή θολότητα. Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1-21) παρουσιάζει μία γωνία λήψης οπισθοσκέδασης.



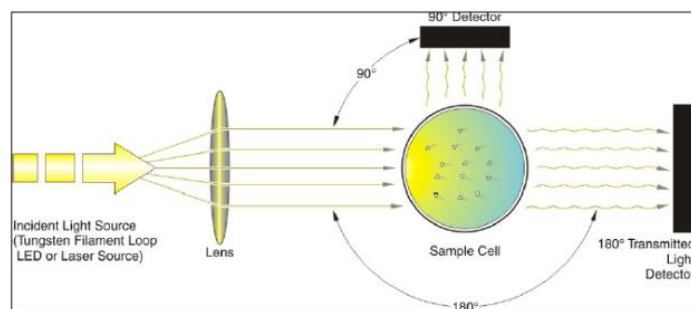


**Εικόνα 1-21:** Θολόμετρο με γωνία λήψης οπισθοσκέδασης (back-scattering).

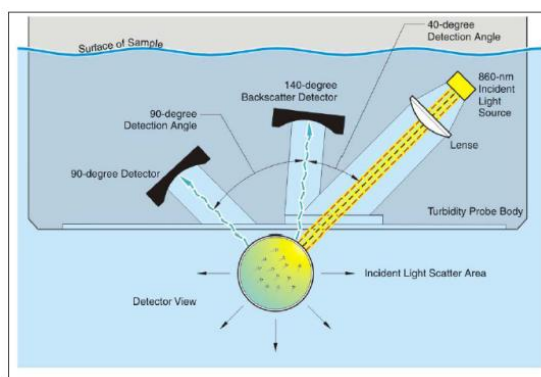
### 1.9.3.3 Rationing

Αυτή η τεχνολογία θολότητας εμπεριέχει τη χρήση δύο ή περισσότερων δεκτών για τον καθορισμό της τιμής εντός του δείγματος. Μια δεύτερη τεχνολογία χρησιμοποιεί το συνδυασμό δύο πηγών φωτός και δύο δεκτών.

**Πολλαπλές γωνίες λήψης.** Αυτή η προσέγγιση εγκαθιστά έναν πρωταρχικό δέκτη που συνήθως είναι σε γωνία 90 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία (νεφελομετρικός) και συχνά αναφέρεται ως πρωταρχικός δέκτης. Άλλοι δέκτες είναι τοποθετημένοι σε κρίσιμες γωνίες συμπεριλαμβανομένων των γωνιών εξασθένησης οπίσθιας και μπροστινής σκέδασης. Αυτοί οι δέκτες μπορούν να βοηθήσουν στην αποκατάσταση παρεμβολών λόγου χρώματος και οπτικών αλλαγών όπως είναι η ποιοτική υποβάθμιση των πηγών φωτός. Οι παρακάτω εικόνες (Εικόνα 1-22 - Εικόνα 1-23)είναι χαρακτηριστικές.

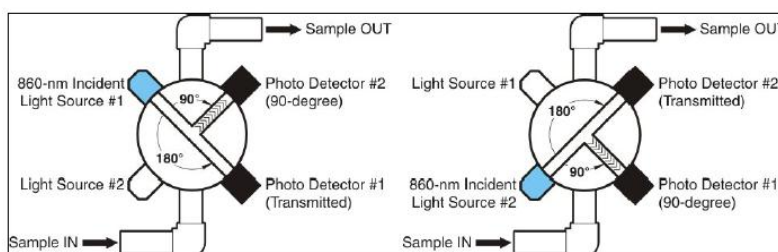


**Εικόνα 1-22:** Θολόμετρο με πολλαπλές γωνίες λήψης (Rationing)



**Εικόνα 1-23:** Θολόμετρο με πολλαπλές γωνίες λήψης (Rationing)

**Συνδυασμός δύο πηγών φωτός και δύο δεκτών.** Αυτή η μοναδική προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό πηγών φωτός που είναι γεωμετρικά οριοθετημένες σε γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους. Οι δέκτες είναι οριοθετημένοι με τον ίδιο τρόπο κι επιπλέον είναι σε γωνία 90 και 180 μοιρών από τις πηγές φωτός. Στην πρώτη φάση της μέτρησης ο ένας δέκτης παίζει τον ρόλο του νεφελομετρικού δέκτη (90 μοίρες) και ο άλλος θα βρίσκεται σε γωνία 180 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία της πηγής που είναι ενεργοποιημένη (δέκτης εξασθένισης). Στην δεύτερη φάση της μέτρησης η δεύτερη πηγή φωτός θα ενεργοποιηθεί κι οι θέσεις καθώς κι οι ρόλοι των δεκτών της πρώτης φάσης αντιστρέφονται. Μετά χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος λογισμικού με σκοπό να παραχθεί η τιμή της θολότητας κι από τις δύο διαφορετικές φάσεις της μέτρησης. Ο συνδυασμός των δύο φάσεων παρέχει μία μέτρηση θολότητας η οποία διορθώνει απορροφήσεις λόγω χρώματος καλύπτοντας κι όποιες οπτικές αλλαγές-αλλοιώσεις συμβούν. Μία αναπαράσταση των παραπάνω φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1-24).



**Εικόνα 1-24:** Συνδυασμός δύο πηγών φωτός και δύο δεκτών.

Η σύσταση του δείγματος, τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του και η επιλεγμένη τεχνολογία μέτρησης μπορούν να έχουν μία κρίσιμη επιρροή στις προκύπτουσες τιμές θολότητας. Ένα δείγμα μπορεί να περιέχει παρεμβολές που θα οδηγούν σε μεγάλες αποκλίσεις, πάνω σε συγκεκριμένες τεχνολογίες, και σε πολύ μικρές σε άλλες. Για παράδειγμα, πολλές από τις νεότερες τεχνολογίες, όπως αυτές που συνδυάζουν πηγές φωτός κοντά στο υπέρυθρο φως και δέκτες σε διάφορες γωνίες (ratio method) δε θα επηρεάζονται από το χρώμα σε σχέση με παλαιότερες

τεχνολογίες που χρησιμοποιούσαν πηγή πυρακτωμένου φωτός. Παρόλα αυτά, αυτές οι ίδιες τεχνολογίες μπορεί να έχουν περιορισμένες δυνατότητες λειτουργίας που μπορεί να είναι ή να μην είναι δεκτές για την απαιτούμενη εφαρμογή. Έτσι είναι σημαντική η κατανόηση του τύπου του δείγματος και της εφαρμογής της μέτρησης έτσι ώστε να βελτιωθεί η απόδοση και η συνεκτικότητα των μετρήσεων.

## 1.9.4 Αθροιστικός πίνακας μοντέρνων τεχνολογιών

Οι μετρήσεις θολότητας ενός κοινού δείγματος συνήθως δεν είναι συνεπείς σε μία μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών μέτρησης. Η αλήθεια της παραπάνω πρότασης ενισχύεται ειδικά για δείγματα με υψηλότερη θολότητα όπως στα περιβαλλοντικά υδάτινα συστήματα και σε δείγματα νερού που αλλάζουν σημαντικά με το πέρασμα του χρόνου. Ιστορικά, η μέτρηση της θολότητας έχει υιοθετήσει μία γενική μονάδα θολότητας, όπως NTU και FTU, δίνοντας λίγη προσοχή στον τύπο της τεχνολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στη μείωση της ικανότητας ανίχνευσης της τεχνολογίας μέτρησης και συχνά ακυρώνει κάθε είδος σύγκρισης που θα μπορούσε να γίνει μεταξύ διαφορετικών δειγμάτων.

Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε δύο διαφορετικά δείγματα τρεχούμενου νερού και τα οποία έχουν μετρηθεί χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές τεχνολογίες μετρήσεων. Η μία τεχνολογία είχε σαν αποτέλεσμα μία τιμή θολότητας για το 1<sup>ο</sup> δείγμα διπλάσια από αυτή στο 2<sup>ο</sup> δείγμα που μετράται με μία άλλη τεχνολογία. Έτσι, δεν γίνεται με κανένα τρόπο να επισημοποιηθεί – εγκριθεί ότι πράγματι το 1<sup>ο</sup> δείγμα είναι διπλάσιο του 2<sup>ου</sup> εκτός κι αν γνωρίζουμε ότι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν τελικά είναι πανομοιότυπες μεταξύ τους.

Το παραπάνω σενάριο εμφανίζεται συχνά όταν χρειάζεται να συγκρίνουμε δεδομένα από ιστορική σκοπιά. Χωρίς την γνώση της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για την πραγμάτωση της μέτρησης, δεν υπάρχουν διακριτοί τρόποι να συγκρίνουμε δεδομένα διαφορετικών πηγών. Αν παρέχεται η προέλευση του οργάνου, τότε δίνεται μια δυνατότητα ερμηνείας των διάφορων τιμών θολότητας.

Οι υποεπιτροπές θολότητας της ASTM (American Society Testing and Materials) κι η USGS (United States Geological Survey) αναγνωρίζουν την έλλειψη ικανότητας ανίχνευσης των μετρήσεων θολότητας σε ιστορικής σημασίας βάσεις δεδομένων. Σε μία προσπάθεια βελτίωσης της ποιότητας και συλλογής των δεδομένων, αναπτύχθηκαν διακριτές μονάδες αναφοράς για την θολότητα οι οποίες βασίζονται στις διάφορες τεχνολογίες των οργάνων. Σε κάθε τεχνολογία αντιστοιχεί μία μοναδική μονάδα θολότητας. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 1-2) παρέχει ένα σύνολο από διάφορες γνωστές τεχνολογίες θολότητας που είναι διαθέσιμες και τις αντίστοιχες μονάδες αναφοράς. Επίσης παρέχονται και κάποιες κατάλληλες εφαρμογές για την κάθε τεχνολογία.

Σχέδιο οργάνου και προτεινόμενη μονάδα μέτρησης	Ανάλογη λειτουργία και κυρίαρχες παρεμβολές	Στοιχεία κλειδιά του σχεδιασμού	Προτεινόμενη εφαρμογή και εύρος λειτουργίας
Νεφελομετρικό θολόμετρο, non-ratiometric (NTU)	Θολόμετρα λευκού φωτός. Αυτά τα σχέδια είναι σύμφωνα με την μέθοδο USEPA 180.1 για την παρακολούθηση χαμηλού επιπέδου θολότητας. Το χρώμα είναι η βασική αρνητική παρεμβολή και οι οπτικές διαφοροποιήσεις δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτές από αυτή την τεχνική.	Ο δέκτης είναι κεντραρισμένος σε γωνία 90 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η πηγή προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως που λειτουργεί σε μία θερμοκρασία-χρώμα 2200-3000 βαθμούς Kelvin.	Συνήθως για πόσιμο νερό. Το ιδανικό εύρος λειτουργίας είναι 0,0 – 40 μονάδες.
Θολόμετρα λευκού φωτός, ratiometric (NTRU)	Συμφωνεί με τους περιορισμούς της μεταβατικής βελτιωμένης μεθόδου για την μεταχείριση του νερού, USEPA, και με τις τυποποιημένες μεθόδους 2130B. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για χαμηλού και για υψηλού επιπέδου θολότητας. Η παρεμβολή λόγω χρώματος (αρνητική) μειώνεται και οι διαφοροποιήσεις της λάμπας γίνονται αντιληπτές από αυτή την τεχνική.	Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζει την ίδια πηγή φωτός όπως ισχύει για την μέθοδο USEPA 180.1, αλλά χρησιμοποιεί διάφορους δέκτες για την μέτρηση. Ένας πρωταρχικός δέκτης τοποθετείται σε γωνία 90 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία και οι άλλοι δέκτες τοποθετούνται σε άλλες γωνίες. Ένας αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των δεδομένων των δεκτών για να παράγει την τελική μέτρηση.	Συνήθως για πόσιμο νερό και υπολειμματικό νερό. Εύρος λειτουργίας είναι 0,0 – 40 NTU's. Η τεχνολογία μπορεί να μετρήσει, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, μέχρι και 10.000 μονάδες.
Νεφελομετρικά θολόμετρα, κοντά στην υπέρυθρη	Το σχέδιο του οργάνου είναι σύμφωνο με τις προδιαγραφές ISO	Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί μία πηγή φωτός κοντά στην υπέρυθρη ακτινοβολία	Συνήθως για πόσιμο νερό και υπολειμματικό νερό (στην

<p>ακτινοβολία (IR), non-ratiometric (FNU)</p>	<p>7027. Το μήκος κύματος είναι λιγότερο ευάλωτο σε παρεμβολές λόγω χρώματος. Η πηγή φωτός αντέχει πολύ στο χρόνο επειδή η έξοδος της μπορεί να ελεγχθεί σε με μεγάλη ακρίβεια. Αυτή η τεχνική είναι κατάλληλη για εφαρμογές με έγχρωμα δείγματα και χαμηλά επίπεδα θολότητας. Μόνο δείγματα που απορροφούν φως πάνω από 800nm μπορεί να προκαλέσουν αρνητική παρεμβολή.</p>	<p>(LED near-IR) με εύρος μήκους κύματος 830-890 nm. Ο δέκτης είναι κεντραρισμένος σε γωνία 90 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.</p>	<p>Ευρώπη). Εύρος λειτουργίας είναι 0,0 – 40 NTU's. Η τεχνολογία μπορεί να μετρήσει μέχρι και 1.000 μονάδες.</p>
<p>Νεφελομετρικά θολόμετρα, κοντά στην υπέρυθρη ακτινοβολία (IR), ratiometric (FNRU)</p>	<p>Το σχέδιο του οργάνου είναι σύμφωνο με τις προδιαγραφές ISO 7027. Αυτή η τεχνική είναι εφαρμόσιμη για δείγματα με υψηλά επίπεδα χρώματος και για την παρακολούθηση υψηλών επιπέδων θολότητας. Μόνο δείγματα που απορροφούν φως πάνω από 800nm μπορεί να προκαλέσουν αρνητική παρεμβολή.</p>	<p>Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζει την ίδια πηγή φωτός όπως ισχύει για την μέθοδο ISO 7027. Χρησιμοποιεί διάφορους δέκτες για την μέτρηση. Ένας πρωταρχικός δέκτης τοποθετείται σε γωνία 90 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία και οι άλλοι δέκτες τοποθετούνται σε άλλες γωνίες. Ένας αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των δεδομένων των δεκτών για να παράγει την τελική μέτρηση.</p>	<p>Συνήθως για πόσιμο νερό και υπολειμματικό νερό (στην Ευρώπη). Εύρος λειτουργίας είναι 0,0 – 40 NTU's. Η τεχνολογία μπορεί να μετρήσει μέχρι και 10.000 μονάδες.</p>
<p>Θολόμετρα επιφανειακής διάχυσης (NTU)</p>	<p>Η θολότητα καθορίζεται μέσω του διαχεόμενου φωτός πάνω ή κοντά στην επιφάνεια του δείγματος. Αρνητικές</p>	<p>Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζει την ίδια πηγή φωτός όπως έχουμε στην μέθοδο USEPA 180.1. Ο δέκτης είναι</p>	<p>Το δείγμα ρέει διαμέσου του οργάνου. Αυτό είναι ένα καλό όργανο λεκάνης απορροής και το</p>

	<p>παρεμβολές λόγω χρώματος μειώνονται σε σύγκριση με το νεφελομετρικό θολόμετρο, non-ratiometric (NTU).</p>	<p>κεντραρισμένος σε γωνία 90 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Και η πηγή και ο δέκτης τοποθετούνται σε θέση ακριβώς πάνω από το δείγμα.</p>	<p>εύρος μέτρησης του είναι 0,5 – 10.000 μονάδες.</p>
<p>Οπισθοσκέδαση φορμαζίνης (FBU)</p>	<p>Αυτή η τεχνολογία δεν είναι συνήθως εφαρμόσιμη για κανονιστικούς σκοπούς. Εφαρμόζεται καλύτερα σε δείγματα υψηλής θολότητας. Μόνο δείγματα που απορροφούν φως πάνω από 800nm μπορεί να προκαλέσουν αρνητική παρεμβολή</p>	<p>Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί μία μονοχρωματική πηγή φωτός κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία (LED near-IR) με εύρος μήκους κύματος 780-900 nm. Ο δέκτης είναι κεντραρισμένος σε γωνία <math>30\pm 15</math> μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.</p>	<p>Αυτή η τεχνολογία είναι η ταιριάζει καλύτερα σε μετρήσεις όπου το probe είναι τοποθετημένο στο δείγμα για σκοπούς συνεχόμενης παρακολούθησης. Εφαρμόζεται καλύτερα για θολότητες με εύρος 100-10.000+ μονάδες.</p>
<p>Μονάδα οπισθοσκέδασης (BU)</p>	<p>Αυτή η τεχνολογία δεν είναι συνήθως εφαρμόσιμη για κανονιστικούς σκοπούς. Εφαρμόζεται καλύτερα σε δείγματα υψηλής θολότητας. Η μέτρηση θα είναι ευάλωτη σε οποιοδήποτε ορατό φως και στην απορρόφηση από τα σωματίδια που έχει σαν αποτέλεσμα αρνητική παρεμβολή.</p>	<p>Το σχέδιο εφαρμόζει πηγή λευκού φάσματος φωτός με εύρος 400-680nm. Ο δέκτης είναι κεντραρισμένος σε γωνία <math>30\pm 15</math> μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.</p>	<p>Αυτή η τεχνολογία είναι η ταιριάζει καλύτερα σε μετρήσεις όπου το probe είναι τοποθετημένο στο δείγμα για σκοπούς συνεχόμενης παρακολούθησης. Εφαρμόζεται καλύτερα για θολότητες με εύρος 100-10.000+ μονάδες.</p>
<p>Μονάδα εξασθένησης φορμαζίνης (FAU)</p>	<p>Αυτή η τεχνολογία μπορεί να είναι συνήθως εφαρμόσιμη για κανονιστικούς σκοπούς. Η μέτρηση συνήθως πραγματοποιείται με</p>	<p>Η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι σε μήκη κύματος <math>860\pm 30</math> nm. Ο δέκτης είναι κεντραρισμένος σε γωνία 180 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα</p>	<p>Η μέτρηση αυτή είναι μέρος των κανονισμών τις μεθόδου ISO 7027. Το βέλτιστο εύρος θολότητας είναι 20 – 1000</p>

	σπεκτροφωτόμετρα (spectrophotometers) . Εφαρμόζεται καλύτερα σε δείγματα υψηλής θολότητας. Η απορρόφηση λόγω σωματιδίων αποτελεί φλέγουσα παρεμβολή.	ακτινοβολία. Αυτή είναι μία τυπική μέτρηση εξασθένησης.	μονάδες.
Μονάδα εξασθένησης (AU)	Αυτή η τεχνολογία δεν είναι συνήθως εφαρμόσιμη για κανονιστικούς σκοπούς. Η μέτρηση συνήθως πραγματοποιείται με σπεκτροφωτόμετρα (spectrophotometers) . Το χρώμα και η απορρόφηση αποτελούν φλέγοντες παρεμβολές αν το φάσμα απορρόφησης είναι το ίδιο με το φάσμα εκπομπής του προσπίπτοντος φωτός.	Η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι σε μήκη κύματος 400-680 nm . Ο δέκτης είναι κεντραρισμένος σε γωνία 180 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Αυτή είναι μία τυπική μέτρηση εξασθένησης.	Εφαρμόζεται καλύτερα σε δείγματα που το χρώμα είναι μέρος της μέτρησης θολότητας. Το βέλτιστο εύρος θολότητας είναι 20 – 1000 μονάδες.
Νεφελομετρική μονάδα θολότητας με πολλαπλή ακτινοβολία (FTMU)	Το σχέδιο του οργάνου είναι σύμφωνο με τις προδιαγραφές ISO 7027, USEPA και GLI method 2. Είναι εφαρμόσιμο στην κανονιστική παρακολούθηση του πόσιμου και υπολειμματικού νερού καθώς και για βιομηχανικές εφαρμογές. Η τεχνολογία είναι πολύ σταθερή. Αυτή η τεχνολογία δεν νοσεί στην απορρόφηση λόγω χρώματος κάτω από τα 800 nm. Πάνω από τα 800 nm οι	Αυτή η μοναδική προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό πηγών φωτός που είναι γεωμετρικά οριοθετημένοι σε γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους. Οι δέκτες είναι οριοθετημένοι με τον ίδιο τρόπο κι επιπλέον είναι σε γωνία 90 και 180 μοιρών από τις πηγές φωτός. Στην πρώτη φάση της μέτρησης ο ένας δέκτης θα είναι ο νεφελομετρικός δέκτης (90 μοίρες) και ο άλλος θα βρίσκεται σε γωνία 180 μοιρών σε σχέση με την	Κανονιστική παρακολούθηση σε χαμηλά επίπεδα θολότητας με εύρος 0,02-40 μονάδες. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να μετρήσει μέχρι και 4.000 μονάδες.

	<p>παρεμβολές της απορρόφησης λόγω χρώματος και σωματιδίων θα μειώνεται.</p>	<p>προσπίπτουσα ακτινοβολία της πηγής που είναι ενεργοποιημένη. Στην δεύτερη φάση της μέτρησης η δεύτερη πηγή φωτός θα ενεργοποιηθεί και οι θέσεις και οι ρόλοι των δεκτών της πρώτης φάσης αντιστρέφονται. Μετά χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος λογισμικού με σκοπό να παραχθεί η τιμή της θολότητας κι από τις δύο διαφορετικές φάσεις μέτρησης</p>	
<p>Laser μονάδες θολότητας (mNTU)</p>	<p>Αυτή η τεχνολογία συμφωνεί με την USEPA εγκεκριμένη Hach μέθοδο 10133. Η εφαρμογή αυτή είναι για παρακολούθηση και έλεγχο του φιλτραρίσματος. Παρεμβολή λόγω χρώματος μπορεί να υπάρξει αν απορροφά το ίδιο μήκος κύματος με το μήκος κύματος της πηγής. Παρόλα αυτά το χρώμα είναι σημαντικός παράγοντας στην διαδικασία φιλτραρίσματος.</p>	<p>Αυτή η τεχνολογία περιέχει laser πηγή προσπίπτοντος φωτός σε μήκος κύματος 660nm και έναν δέκτη που είναι ένας υπερευαίσθητος φωτοπολλαπλασιαστής (photomultiplier detector – PMT detector). Ο δέκτης είναι κεντραρισμένος σε γωνία 90 μοιρών σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.</p>	<p>Ρυθμισμένη παρακολούθηση πόσιμου νερού και συστημάτων ρευστών αποβλήτων. Το εύρος της μετρούμενης θολότητας είναι 0,007 – 5 μονάδες. Όπου 1 NTU = 1000 mNTU</p>

**Πίνακας 1-2 :** Αθροιστικός πίνακας μοντέρνων τεχνολογιών



## 1.10 Η σημασία της θολότητας

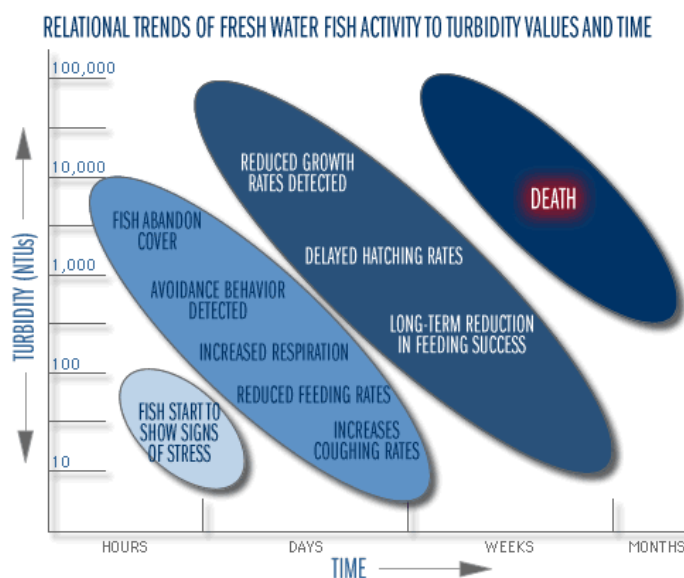
Μπορεί να ακούγεται σαν πολύπλοκος επιστημονικός όρος, αλλά η θολότητα ουσιαστικά είναι μία έκφραση συσχετισμένη με την καθαρότητα του νερού. Σήμερα, υπάρχει διαθέσιμο πλήθος οργάνων (θολομέτρων) ικανών να μετρήσουν οποιαδήποτε τιμή της θολότητας. Οποιοσδήποτε τύπος θολομέτρου κι αν χρησιμοποιείται, τα αποτελέσματα του είναι εξίσου σημαντικά για το περιβάλλον και την κοινωνία. Αν δεν υπήρχαν τα όργανα αυτά δεν θα υπήρχε η δυνατότητα να εκτιμηθούν οι επιδράσεις της θολότητας στο περιβάλλον καθώς δεν θα είχαμε και πόσιμο νερό ασφαλές για χρήση. Μπορεί η παράμετρος της θολότητας να μην είναι τόσο διαδεδομένη αλλά είναι πολύ σημαντική για την υγεία όλων των ζωντανών οργανισμών.

### 1.10.1 Η σημασία της θολότητας για το περιβάλλον

Η πιο σοβαρή πηγή θολότητας στα «ανοιχτά» των υδάτινων συστημάτων (θάλασσα, ποτάμια και λίμνες) είναι κυρίως το φυτοπλαγκτόν. Όσο πλησιάζουμε προς την στεριά κάνουν αισθητή την παρουσία τους σωματίδια, όπως άργιλος και λάσπη που προκύπτουν από την διάβρωση της ακτής, αιωρούμενα ιζήματα και τρίμματα οργανικών ουσιών εξαιτίας της διοχέτευσης λυμάτων. Εργασίες βυθοκόρησης, διοχετευτικής διαρρύθμισης, αυξημένη ροή, πλημμύρες ή ακόμα και μεγάλο πλήθος ψαριών που τρέφονται από τον πυθμένα, όπως οι κυπρίνοι, μπορούν να ανακατέψουν ιζήματα που τυχόν υπάρχουν στον πυθμένα και να αυξήσουν την θολότητα του νερού.

Καθώς σωματίδια αργίλου, λάσπης και οργανικής ύλης βρίσκουν καταφύγιο στον πυθμένα, μπορούν να οδηγήσουν σε πνιγμό νέες εκκολαπτόμενες προνύμφες και να γεμίσουν τα διαστήματα μεταξύ των βράχων οι οποίοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν οικισμός για τους υδρόβιους οργανισμούς. Πολύ μικρή σωματιδιακή ύλη μπορεί να προκαλέσει ζημιά στα βράχια των ψαριών, να αποτρέψει την σωστή ανάπτυξη των αυγών και να έχει και συνέπειες στις διατροφικές δραστηριότητες των οργανισμών. Υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδιακής ύλης μπορούν να επηρεάσουν την διείσδυση του φωτός. Αν το φως που διεισδύει μειωθεί σημαντικά, η ανάπτυξη των μακρόφυτων μπορεί να μειωθεί γεγονός που θα έχει σημαντική επίδραση στους οργανισμούς καθώς είναι εξαρτημένοι από αυτά σε επίπεδο φαγητού και κάλυψης. Η μειωμένη φωτοσύνθεση μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μικρότερη καθημερινή απελευθέρωση οξυγόνου στο νερό. Οι επιδράσεις στην ανάπτυξη του φυτοπλαγκτόν είναι πολύπλοκες και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Πολύ υψηλά επίπεδα θολότητας για ένα μικρό χρονικό διάστημα μπορεί

να μην είναι σημαντικά και ίσως προκαλούν μικρότερο πρόβλημα σε σχέση με χαμηλά επίπεδα θολότητας τα οποία διαρκούν περισσότερο. Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1-25) δείχνει πως οι υδρόβιοι οργανισμοί επηρεάζονται από τα διάφορα επίπεδα θολότητας σε σχέση με τον χρόνο.



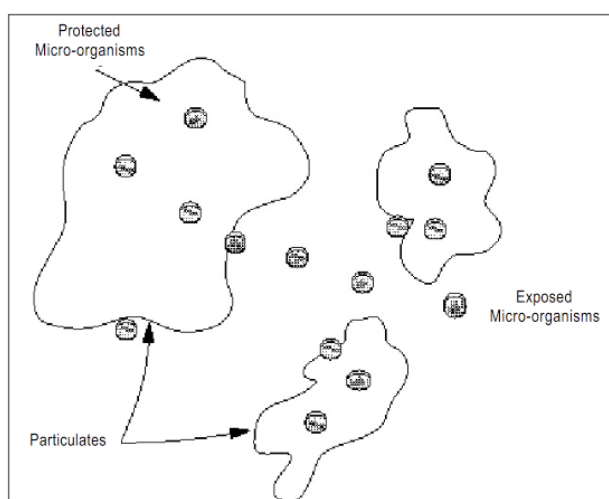
**Εικόνα 1-25:** Συμπεριφορά των υδρόβιων οργανισμών απέναντι στην αύξηση της θολότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο.

## 1.10.2 Η σημασία της θολότητας για τον άνθρωπο

Οι ίδιες ουσίες, που αναφέρθηκαν και παραπάνω, (άργιλος, λάσπη και άλλες οργανικές ουσίες) μπορεί να υπάρξουν και στο πόσιμο νερό συμβάλλοντας στην ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών και μειώνοντας την αποδοτικότητα των διαδικασιών απολύμανσης (χλωρίωση) με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερο ρίσκο όσο αφορά την υγιεινή.

Η υπερβολική θολότητα στο πόσιμο νερό είναι αισθητικά μη επιθυμητή και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας. Καθώς μπορεί να αποτελέσει κατάλληλο περιβάλλον ανάπτυξης παθογόνων οργανισμών (Εικόνα 1-26). Τα αιωρούμενα σωματίδια παρέχουν καταφύγιο στα μικρόβια μειώνοντας την πιθανότητα έκθεσης τους σε ουσίες απολύμανσης. Αν δεν αφαιρεθεί η θολότητα θα προκαλέσει εμμέσως πολλαπλασιασμό των μικροβίων στα συστήματα διανομής νερού προκαλώντας με την σειρά τους υδατογενείς λοιμώξεις, με πιο συχνά συμπτώματα αυτά της γαστρεντερίτιδας, που μπορούν να οδηγήσουν και σε θάνατο. Επιπλέον υδάτινα συστήματα με υψηλή θολότητα λόγω αυξημένης ποσότητας οργανικής ύλης υπάρχει

περίπτωση να αυξήσουν την ζήτηση σε χλώριο, κατά την διαδικασία απολύμανσης, με αποτέλεσμα η περιεκτικότητα του νερού σε χλώριο να το κάνει επικίνδυνο για κατανάλωση. Μολυσματικές προσμίξεις στο πόσιμο νερό μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις στους ανθρώπους εξαιτίας και των πολλαπλών οδών από τις οποίες πραγματοποιείται έκθεση του ανθρώπου στο νερό (κατάποση νερού, αναπνευστική οδός, δέρμα).



**Εικόνα 1-26:** Σωματίδια που παρέχουν προστασία στα μικρόβια.

Επομένως, η θολότητα είναι μία σημαντική παράμετρος αισθητικής αποδοχής από τους καταναλωτές, αλλά και λειτουργικής καταλληλότητας στο βαθμό που επηρεάζεται αρνητικά η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης. Η σημασία της έγκειται και στο γεγονός ότι αποτελεί αναγκαίο υποκατάστατο για την συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του νερού στα υδάτινα συστήματα και στις εγκαταστάσεις λυμάτων καθώς οι παραδοσιακές τεχνικές δειγματοληψίας συνήθως είναι απαιτητικές, χρονοβόρες και πολυδάπανες.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η ποιότητα του νερού που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση καθορίζεται από την DWD (Drinking Water Directive) σύμφωνα με την οδηγία 98/83/EC. Σύμφωνα με αυτήν την επιτροπή ένα πλήθος μικροβιολογικών και χημικών παραμέτρων πρέπει να παρακολουθούνται και να ελέγχονται πολύ συχνά και οι τιμές τους να μην ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Μία από αυτές είναι και η θολότητα. Επιπλέον η WHO (World Health Organization) συστήνει την επιτήρηση των συστημάτων αποθήκευσης υδάτων προς κατανάλωση καθώς είναι πιο ευάλωτο στην μόλυνση.

Οι δύο αυτοί Οργανισμοί, WHO και DWD, ορίζουν ότι η θολότητα πόσιμου νερού δεν πρέπει να ξεπερνά το 1NTU, ενώ η εμφάνιση νερού με θολότητα μικρότερη των 5 NTU είναι συνήθως αποδεκτή για τους καταναλωτές.



## 2 Υλοποίηση κυκλώματος θολομέτρου

### 2.1 Εισαγωγή

Το θολόμετρο που κατασκευάστηκε και παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία, ανήκει στην οικογένεια *θολομέτρων λόγου* (*ratio turbidity meters*). Με την χρήση θολομέτρων λόγου επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του φαινομένου παρεμβολής λόγω χρώματος του διαλύματος και διορθώνονται πιθανές διακυμάνσεις της ακτινοβολίας που παράγει ο λαμπτήρας πυρακτώσεως ή, στην περίπτωση μας, το LED. Τα θολόμετρα λόγου χρησιμοποιούν σαν πρωταρχικό δέκτη του διαχεόμενου φωτός την νεφελομετρική μέτρηση ( $I_{90}$ ), αλλά περιέχουν και άλλους δέκτες οι οποίοι αποκαθιστούν τις απώλειες ακτινοβολίας εξαιτίας της απορρόφησης της λόγω της παρουσίας χρώματος (Εικόνα 2-1). Οι υπόλοιποι δέκτες μετρούν τυπικά την μεταδιδόμενη ακτινοβολία ή την ακτινοβολία που προκύπτει από εμπρόσθια σκέδαση (forward scattering). Ο δέκτης μετάδοσης, ( $I_T \equiv I_{180}$ ) προσδιορίζει την ποσότητα της ακτινοβολίας που έχει χαθεί είτε εξαιτίας της απορρόφησης της από το διάλυμα είτε εξαιτίας των διακυμάνσεων της πηγής ακτινοβολίας. Ο δέκτης εμπρόσθιας σκέδασης, ( $I_{FS} \equiv I_{90...180}$ ) προσδιορίζει την ποσότητα της ακτινοβολίας που έχει διαχυθεί στην μπροστινή κατεύθυνση εξαιτίας μεγαλύτερων ή μη σφαιρικών σωματιδίων που υπάρχουν στο διάλυμα. Ο αλγόριθμος που προσδιορίζει την θολότητα για θολόμετρα τέτοιου τύπου είναι :

$$T_{ratio} = \frac{I_{90}}{a_1 I_T + a_2 I_{FS}} \quad (2-1)$$

όπου :

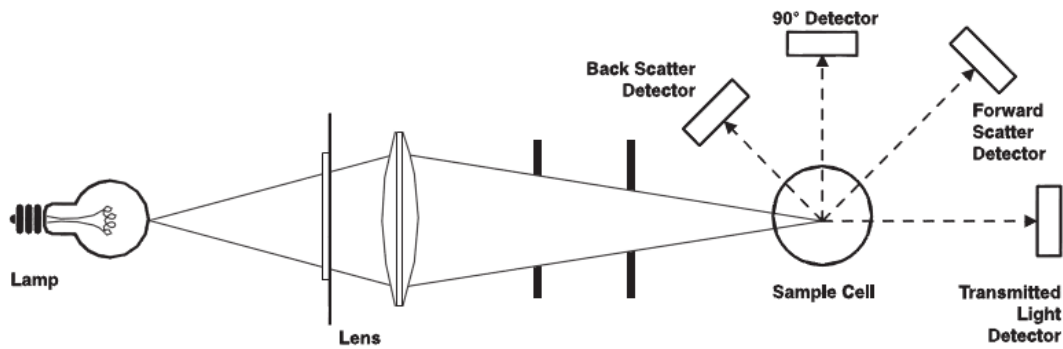
$I_{90}$  : νεφελομετρική λήψη διαχεόμενου φωτός

$I_T$  : λήψη μεταδιδόμενου φωτός

$a_1$  : σταθερά για το μεταδιδόμενο φως (προσδιορίζεται στην βαθμονόμηση)

$I_{FS}$ : εμπρόσθια λήψη διαχεόμενου φωτός

$a_2$  : σταθερά για το φως εμπρόσθιας διάχυσης



**Εικόνα 2-1:** Οικογένεια θολομέτρων λόγου (ratio turbidimeters).

Όταν χάνεται ακτινοβολία λόγω απορρόφησης ή διακυμάνσεων, το επίπεδο του λαμβανόμενου μεταδιδόμενου φωτός μειώνεται με ανάλογη σχέση με το σήμα που φωτός που χάνεται από τον πρωταρχικό δέκτη ( $I_{90}$ ). Επομένως η μείωση του παρανομαστή οδηγεί σε συσχετιζόμενη μείωση του αριθμητή. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται διόρθωση της τιμής.

Με την ίδια λογική, όταν χάνεται ποσότητα ακτινοβολίας εξαιτίας της μη συμμετρικής διάχυσης προς την μπροστινή κατεύθυνση, το επίπεδο της εμπρόσθιας λήψης διαχεόμενου φωτός αλλάζει ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που χάνεται στον πρωταρχικό δέκτη. Αυτή η αλλαγή στον παρανομαστή οδηγεί σε μία αντίστοιχη αλλαγή στον αριθμητή κι έτσι το αποτέλεσμα συσχετίζεται.

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά φαίνεται ότι η συγκεκριμένη τοπολογία θολομέτρου είναι δεν επηρεάζεται, από πλευράς σφαλμάτων, από την μορφή των σωματιδίων που βρίσκονται στο διάλυμα και από το ίδιο το χρώμα του διαλύματος, αφού οποιεσδήποτε παρεμβολές προκύψουν αναιρούνται σε μεγάλο βαθμό μέσω του συγκεκριμένου λόγου.

Τέλος η εμπρόσθια διάχυση προκύπτει πιο συχνά σε δείγματα με θολότητα μεγαλύτερη των 40 NTU και δεν χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη όταν επεξεργάζομαστε δείγματα με θολότητα κάτω του 1 NTU. Με τον ίδιο τρόπο η λήψη οπίσθιας διάχυσης χρησιμοποιείται σε δείγματα με θολότητα μεγαλύτερη των 1000 NTU. Η λήψη οπίσθιας διάχυσης, που φαίνεται και στο σχήμα, είναι προαιρετική και δεν έχει τοποθετηθεί στο θολόμετρο που υλοποιήθηκε.

## 2.2 Συνοπτική περιγραφή του θολομέτρου

Το θολόμετρο που κατασκευάστηκε έχει επιλεγεί έτσι ώστε να ικανοποιεί, σε γενικές γραμμές, την πρότυπη μέθοδο ISO 7027. Τα γενικά δομικά χαρακτηριστικά αυτού το θολομέτρου, με βάση και την (Εικόνα 2-1), είναι τα παρακάτω :

- Η πηγή φωτός αποτελείται από ένα υπέρυθρο LED με μήκος κύματος ακτινοβολίας 880nm.
- Το σύστημα των δεκτών αποτελείται από τρεις φωτοδιόδους τοποθετημένες σε σταθερές γωνίες ως προς το LED (0°), κυκλικά ως προς το δοχείο δείγματος. Υπάρχει ένας νεφελομετρικός δέκτης σε γωνία 90° ως προς το LED (D90), ένας δέκτης μετάδοσης ακριβώς απέναντι από το LED (σε γωνία 180° –D180) και ο τρίτος δέκτης είναι δέκτης εμπρόσθιας σκέδασης και είναι τοποθετημένος σε γωνία 150° σε σχέση με το LED D150).
- Το δοχείο δείγματος είναι ένα κυλινδρικό γυάλινο δοχείο με διάμετρο 7cm περίπου και όγκο 300ml.

Ο αλγόριθμος που προσδιορίζει την θολότητα και ταυτόχρονα περιγράφει την αρχή λειτουργίας για το συγκεκριμένο θολόμετρο, σύμφωνα με την παραπάνω σχέση (2-1), θα είναι :

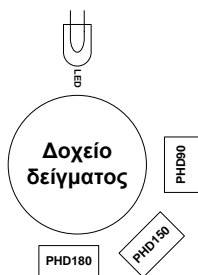
$$T_{ratio} = \frac{I_{D90}}{a_1 I_{D180} + a_2 I_{D150}}$$

## 2.3 Επιμέρους διατάξεις του θολομέτρου

Η κατασκευή του θολομέτρου αποτελείται από δύο επιμέρους διατάξεις : Την διάταξη που περιέχει την πηγή φωτός (LED) και τους φωτοδέκτες (φωτοδιόδους) προσαρμοσμένους στο δοχείο δείγματος (μονάδα δειγματοληψίας-οπτική διάταξη) και την διάταξη τυποποιημένου κυκλώματος (αναλογικού και ψηφιακού) που είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία των σημάτων και τον υπολογισμό της θολότητας (ηλεκτρονική διάταξη).

### 2.3.1 Μονάδα δειγματοληψίας – οπτική διάταξη

Η μονάδα δειγματοληψίας – οπτική διάταξη είναι η μονάδα τοποθέτησης του δοχείου δείγματος και των οπτικών στοιχείων του θολομέτρου (Εικόνα 2-2).



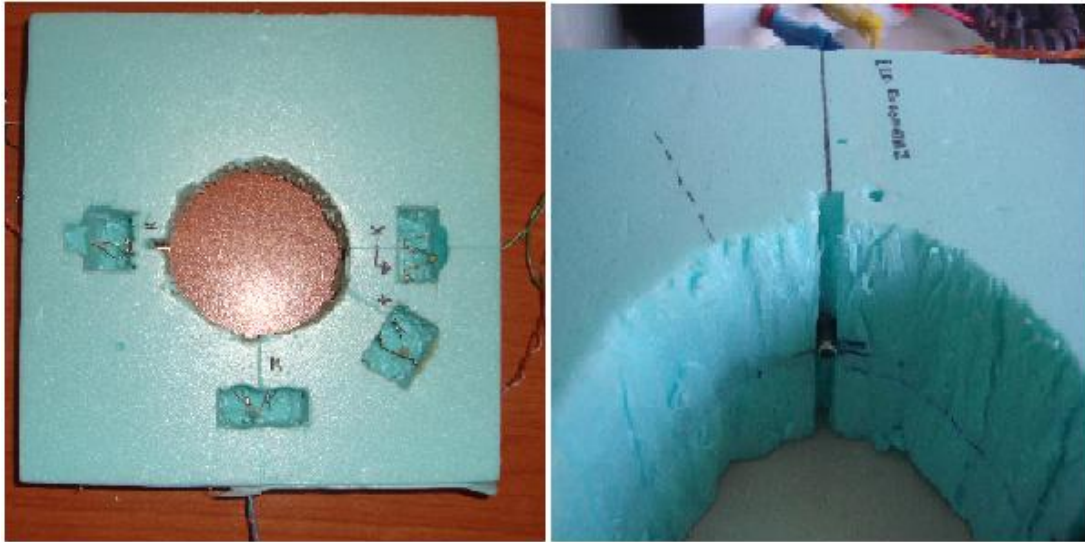
Εικόνα 2-2: Μονάδα δειγματοληψίας – Οπτική διάταξη.

Αποτελείται κατά κύριο λόγο από ένα υλικό που χρησιμοποιείται σαν βάση και ονομάζεται διογκωμένη πολυστερίνη. Η διογκωμένη πολυστερίνη ή εν συντομία EPS, είναι ένα ελαφρύ, άκαμπτο, πλαστικό και αφρώδες, υλικό που παράγεται από συμπαγείς σταγόνες πολυστυρολίου. Είναι ένα οικονομικό, εύχρηστο και ευέλικτο υλικό, ανθεκτικό στην υγρασία και την θερμοκρασία. Η βάση της μονάδας δειγματοληψίας έχει μήκος 20cm, πλάτος 20cm και πάχος 5cm. Στο κέντρο της επιφάνειας της ανοίχθηκε μία τρύπα κυκλικής διατομής με διάμετρο 7cm (ακτίνα 3,5cm) και πάχος 5cm (διαμετρής τρύπα κυλινδρικού σχήματος) έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η τοποθέτηση του δοχείου δείγματος.

Το δοχείο δείγματος είναι ένα γυάλινο κυλινδρικό δοχείο με διάμετρο 7cm και χωρητικότητα 250mL.

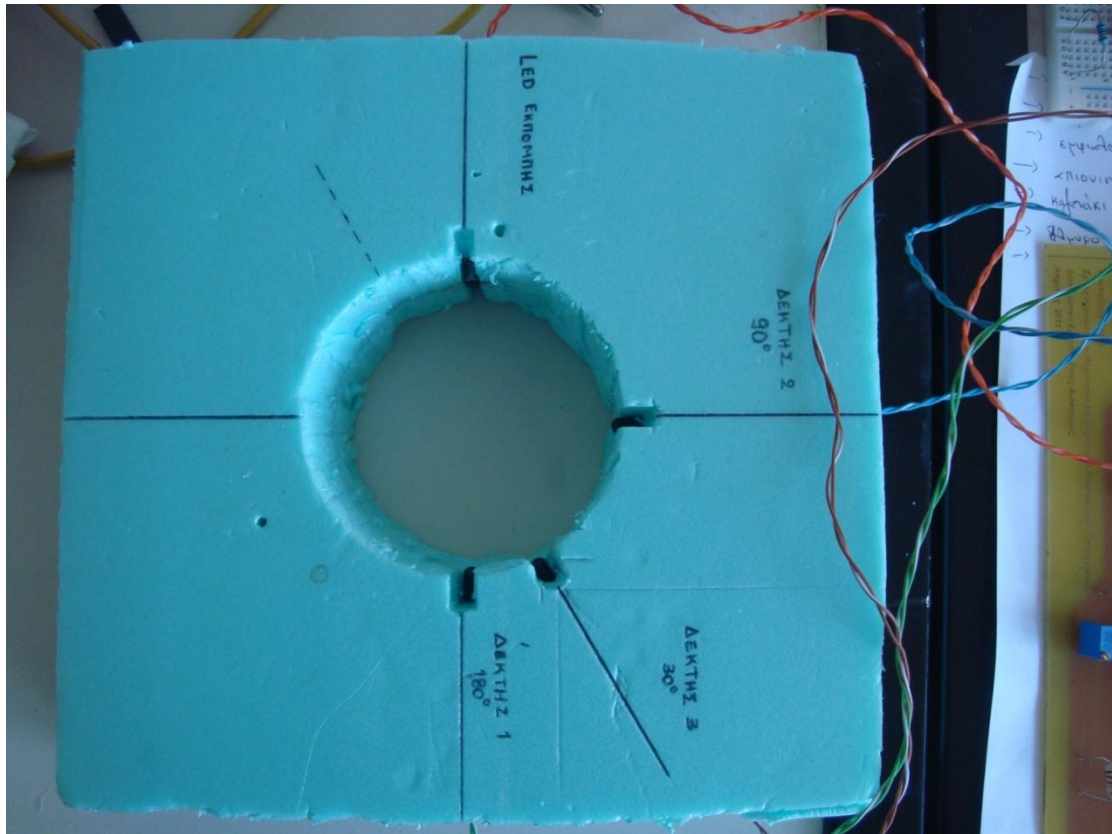
Αρχικά, σε κάποιο σημείο, βολικό για την όλη κατασκευή, εσωτερικά της κυλινδρικής διατομής και σε ύψος 2,5 cm από τον πάτο της βάσης (ακριβώς στην μέση του πάχους της βάσης) τοποθετήθηκε το IR LED εκπομπής σε οριζόντια διεύθυνση έτσι ώστε να εκπέμπει οριζόντια προς το δοχείο δείγματος. Κάνοντας μια τρύπα κατά μήκος του IR LED και προς την εξωτερική επιφάνεια της βάσης συνδέουμε την πηγή φωτός με καλώδιο το οποίο συνδέεται από την άλλη πλευρά με την ηλεκτρονική διάταξη έτσι ώστε να επιτευχθεί η λειτουργία του. Στο κάτω μέρος της βάσης ανοίχθηκε μία μικρή τρύπα για την κόλληση του καλωδίου με το IR LED και χρησιμοποιήθηκε σιλικόνη για την στεγανοποίηση της συνδεσμολογίας (Εικόνα 2-3).





**Εικόνα 2-3:** Τοποθέτηση IR LED και φωτοδίοδων στην Μονάδα δειγματοληψίας.

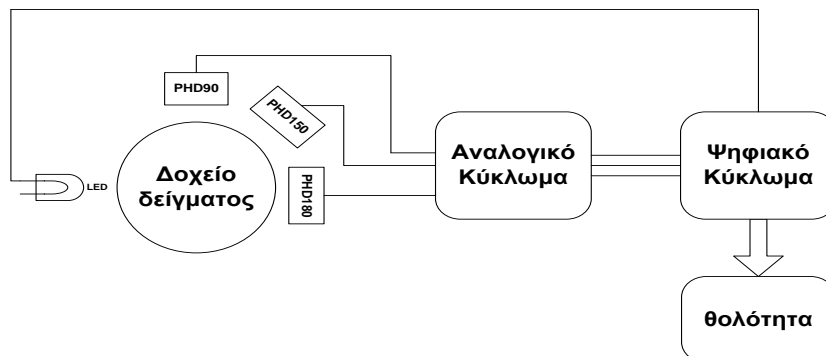
Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο τοποθετούνται και οι τρεις φωτοδίοδοι περιμετρικά της κυλινδρικής διατομής και στο ίδιο ύψος. Η μόνη διαφορά είναι ότι τα σημεία τοποθέτησης τους είναι πλέον συγκεκριμένα. Τα τρία αυτά σημεία είναι σε γωνίες  $180^\circ$  ,  $150^\circ$  και  $90^\circ$  σε σχέση με την διεύθυνση του IR LED. Παρακάτω παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη μονάδα δειγματοληψίας (Εικόνα 2-4).



**Εικόνα 2-4:** Τελική μονάδα δειγματοληψίας.

### 2.3.2 Τυποποιημένο κύκλωμα – ηλεκτρονική διάταξη

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα του θολομέτρου μπορεί να χωριστεί σε δύο υποκυκλώματα, το αναλογικό και το ψηφιακό κύκλωμα (Εικόνα 2-5).



**Εικόνα 2-5:** Αναλογικό και ψηφιακό κύκλωμα θολομέτρου.

Το αναλογικό κύκλωμα είναι υπεύθυνο για την λειτουργία της πηγής ακτινοβολίας και για την μετατροπή της διέγερσης των φωτοδιόδων, εξαιτίας της παρουσίας ακτινοβολίας, σε αναλογικό ρεύμα ή τάση καθώς και για την διαμόρφωση των μεγεθών αυτών έτσι ώστε οι τιμές τους να μπορούν να ανιχνευθούν και να επεξεργαστούν με ακρίβεια από το ψηφιακό κύκλωμα.

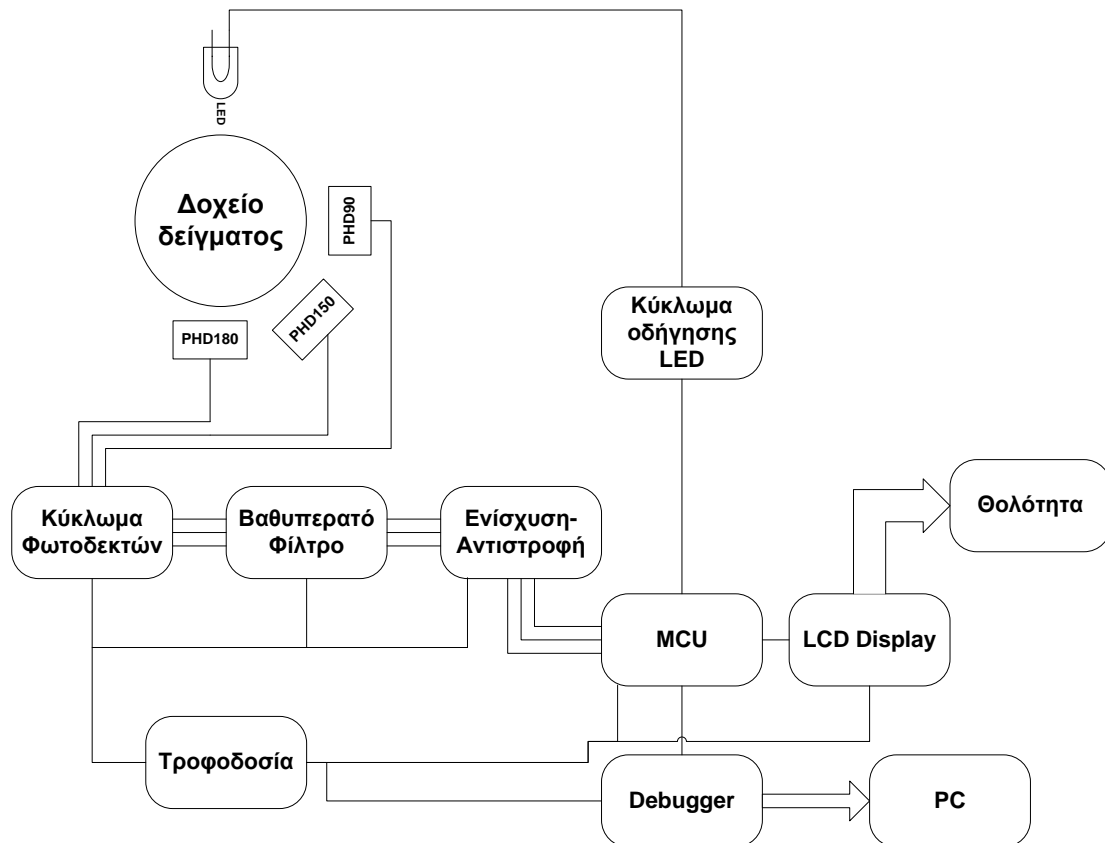
Στο **αναλογικό κύκλωμα** περιέχονται τα εξής στάδια :

- *Κύκλωμα οδήγησης της πηγής ακτινοβολίας* : Το κύκλωμα αυτό τροφοδοτεί το IR LED έτσι ώστε να ακτινοβολεί.
- *Κύκλωμα φωτοδεκτών* : Το ρεύμα που παράγει η κάθε φωτοδίοδος, λόγω της διέγερσης της από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, μετατρέπεται σε τάση, η τιμή της οποίας είναι χαρακτηριστική για μια συγκεκριμένη ένταση διέγερσης.
- *Κύκλωμα βαθυπερατού φίλτρου* : Το σήμα κάθε φωτοδιόδου, που προκύπτει από το προηγούμενο στάδιο, φιλτράρεται έτσι ώστε να μηδενιστούν υψηλής συχνότητας συνιστώσες που προκαλούν θόρυβο.
- *Κύκλωμα ενίσχυσης-αντιστροφής* : Κύκλωμα απαραίτητο για την διόρθωση, πιθανή ενίσχυση και αντιστροφή της τάσης των φωτοδιόδων.

Αντίστοιχα, το ψηφιακό κύκλωμα υποδέχεται την τελική μορφή των αναλογικών σημάτων, τα ψηφιοποιεί και τα επεξεργάζεται αλγοριθμικά έτσι ώστε να υπολογιστεί και να απεικονιστεί η τιμή της θολότητας. Επίσης είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο λειτουργίας του κυκλώματος οδήγησης του IR LED.

Στο **ψηφιακό κύκλωμα** περιέχονται τα εξής στάδια :

- *Κύκλωμα του μικροελεγκτή* : ο μικροελεγκτής υποδέχεται τα τρία προς επεξεργασία σήματα εξόδου του αναλογικού κυκλώματος κι από μία έξοδο ελέγχει την τροφοδοσία του LED.
- *Κύκλωμα της οθόνης υγρών κρυστάλλων (LCD Display)* : μία LCD οθόνη συνδέεται ψηφιακά με τον μικροελεγκτή με σκοπό την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.
- *Κύκλωμα αποσφαλματωτή (debugger)* : Δημιουργία κυκλώματος για έναν debugger με σκοπό να ελέγχουμε ανά πάσα στιγμή την λειτουργία του μικροελεγκτή.



Εικόνα 2-6: Διάταξη τυποποιημένου κυκλώματος θολομέτρου.

## 2.4 Σχεδίαση αναλογικού κυκλώματος θολομέτρου

### 2.4.1 Κύκλωμα πηγής ακτινοβολίας

#### 2.4.1.1 Εισαγωγή

Η πηγή φωτός που θα χρησιμοποιηθεί για το συγκεκριμένο θολόμετρο θα είναι ένα LED υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR LED) με μήκος κύματος μεταξύ 850-900 nm. Θα τοποθετηθεί σε ένα οποιοδήποτε σημείο του κυλινδρικού δακτυλίου (που ορίζουμε σαν θέση  $0^\circ$  μοιρών) και σύμφωνα με αυτό θα τοποθετηθούν οι φωτοδέκτες.

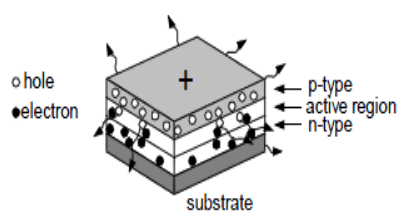
Αναλύοντας τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των LED θα προκύψουν συμπεράσματα για την κατάλληλη επιλογή LED καθώς και για τον τρόπο με τον οποίο θα τροφοδοτηθεί έτσι ώστε να ακτινοβολεί με τον τρόπο που θέλουμε.

### 2.4.1.2 Αρχή λειτουργίας LED

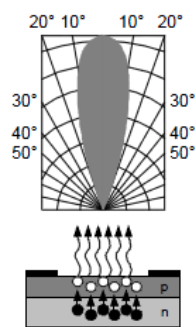
Η δίοδος εκπεμπόμενου φωτός (Light Emitting Diode – LED) είναι μία ένωση p-n η οποία παράγει υπέρυθρη (infrared-IR) ή ορατή ακτινοβολία. Το υλικό από το οποίο φτιάχνεται είναι κυρίως το αρσενικούχο γάλλιο (gallium arsenide – GaAs) και όχι το πυρίτιο ή το γερμάνιο.

Ένας τρόπος κατασκευής LED είναι η απόθεση τριών ημιαγωγικών στρωμάτων πάνω σε μία βάση. Μεταξύ των στρωμάτων τύπου-p και τύπου-n μία ενεργός περιοχή εκπέμπει ακτινοβολία όταν ένα ηλεκτρόνιο επανασυνδέεται με μία οπή. Όταν η δίοδος (LED) είναι ορθά πολωμένη (θετική τάση στην άνοδο – αρνητική τάση στην κάθοδο), οπές από το στρώμα τύπου-p και ηλεκτρόνια από το στρώμα τύπου-n οδηγούνται στην ενεργό περιοχή. Η επανασύνδεση τους στην ενεργό περιοχή έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή φωτονίων υπέρυθρου ή ορατού φωτός (Εικόνα 2-7). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ηλεκτροφωτοεκπομπή (electroluminescence). Τα στρώματα του LED εκπέμπουν φως προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από την δομή του. Στην ένωση αυτή τοποθετείται ένα πολύ μικρό ανακλαστικό περίβλημα έτσι ώστε η ακτινοβολία του ενεργού στρώματος να ανακλάται προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

Το LED είναι μία κατευθυντική πηγή ακτινοβολίας, με την μέγιστη εκπεμπόμενη ενέργεια να μεταδίδεται σε εγκάρσια κατεύθυνση σε σχέση με την επιφάνεια εκπομπής (η περισσότερη ενέργεια μεταδίδεται εντός 20° σε σχέση με την κατεύθυνση του μέγιστου φωτός-Εικόνα 2-8).



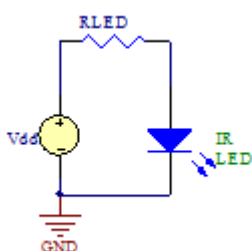
Εικόνα 2-7: Δομή LED.



Εικόνα 2-8: Συνήθης κατεύθυνση ακτινοβολίας LED.

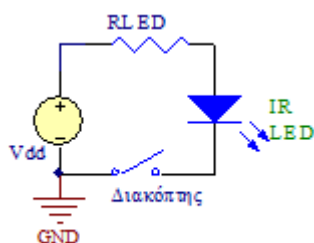
### 2.4.1.3 Μέθοδοι τροφοδοσίας LED

Τα δύο πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός LED, αφού έχουμε καταλήξει στο μήκος κύματος εκπομπής του, είναι το ρεύμα και η τάση προώθησης (forward current -  $I_F$  και forward voltage -  $V_F$ ). Το ρεύμα προώθησης αποτελεί το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαρρέει το LED και η τάση προώθησης είναι η τάση στην οποία πρέπει να πολωθεί ορθά το LED ώστε να λειτουργήσει (να άγει η δίοδος). Το πιο απλό κύκλωμα τροφοδοσίας ενός LED αποτελείται από μία τάση τροφοδοσίας Vdd, τέτοια ώστε να καλύπτει τάση αγωγής του LED, και μία αντίσταση Rled η οποία θα οδηγεί κατάλληλο ρεύμα I προς το LED, με  $I \leq I_F$  (Εικόνα 2-9).



Εικόνα 2-9: Κύκλωμα τροφοδοσίας LED.

Παρ' όλα αυτά, με βάση το παραπάνω κύκλωμα, το LED θα εκπέμπει συνεχώς με αποτέλεσμα, ιδιαίτερα αν το  $I > 30mA$ , να έχουμε μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και να τίθεται θέμα αξιοπιστίας της λειτουργίας του LED σε βάθος χρόνου. Γενικά για την κατασκευή ενός συστήματος θέτουμε σαν σημαντική προϋπόθεση την αυτονομία, την λειτουργικότητα και το χαμηλό του κόστος. Μια προσαρμογή που μπορεί να γίνει στο παραπάνω κύκλωμα είναι η τοποθέτηση ενός διακόπτη μετά την πηγή, ο οποίος θα ανοιγοκλείνοντας θα αναβοσβήνει το LED (Εικόνα 2-10), ή μίας εναλλασσόμενη πηγής τάσης (ενός τετραγωνικού παλμού, εφόσον μας ενδιαφέρουν δύο καταστάσεις λειτουργίας on-off).



Εικόνα 2-10: Κύκλωμα τροφοδοσίας LED με διακόπτη.

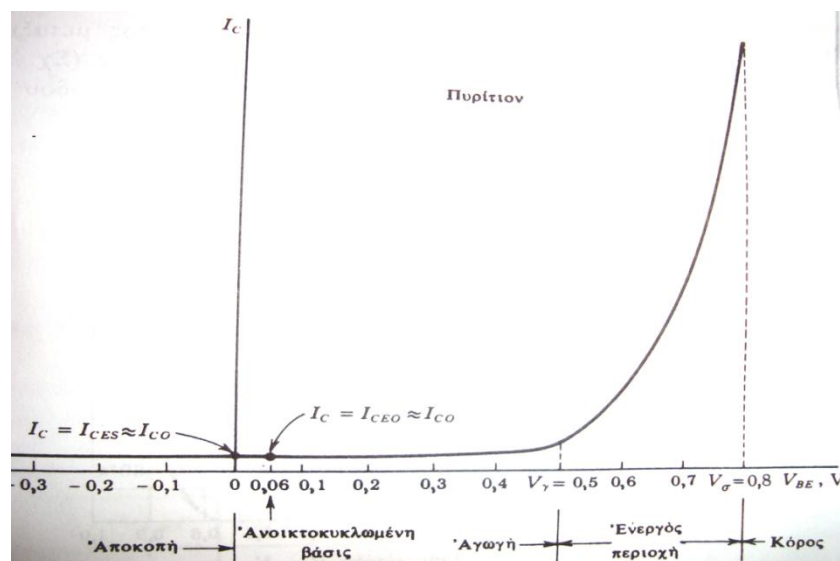
Όπως φαίνεται, το ζητούμενο είναι να κατασκευαστεί ένα κύκλωμα με διακοπτική λογική για να προσφέρει με ακρίβεια και ταχύτητα την εναλλαγή των καταστάσεων λειτουργίας στο LED. Μία πιο αποτελεσματική προσέγγιση είναι η τοποθέτηση του LED στον συλλέκτη και η οδήγηση του με ένα τρανζίστορ. Μεταβάλλοντας τις καταστάσεις λειτουργίας του τρανζίστορ μπορεί να επιτευχθεί μεταβολή και στην κατάσταση λειτουργίας του LED.

#### 2.4.1.4 Περιοχές λειτουργίας ενός διπολικού τρανζίστορ BJT

Η συνδεσμολογία του τρανζίστορ που θα μελετηθεί είναι η συνδεσμολογία κοινού εκπομπού ενός n-p-n διπολικού τρανζίστορ πυριτίου (Common Emitter – CE). Στην συνδεσμολογία αυτή ο εκπομπός είναι γειωμένος. Η τάση εισόδου,  $V_{BE}$  και το ρεύμα εξόδου,  $I_C$  είναι οι εξαρτώμενες μεταβλητές και η τάση εξόδου,  $V_{CE}$  με το ρεύμα εισόδου,  $I_B$  είναι ανεξάρτητες.

$$V_{BE} = f_1(V_{CE}, I_B) \quad \& \quad I_C = f_2(V_{CE}, I_B)$$

Η σχέση που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η συνάρτηση μεταξύ του ρεύματος συλλέκτη,  $I_C$  και της πόλωσης της βάσης με τον εκπομπό,  $V_{BE}$ . Παρακάτω φαίνεται μία γραφική παράσταση της σχέσης αυτής (Εικόνα 2-11) η οποία είναι η πιο χαρακτηριστική για την παρουσίαση των περιοχών λειτουργίας του τρανζίστορ κοινού εκπομπού.



Εικόνα 2-11: Περιοχές λειτουργίας n-p-n διπολικού τρανζίστορ πυριτίου σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού.

Τέλος, η ολική ισχύς κατανάλωσης ενός τρανζίστορ δίνεται από την σχέση :

$$P_{tot} = V_{CE}I_C \quad (2-2)$$

### Περιοχές λειτουργίας

#### Ενεργός περιοχή

Στην ενεργό περιοχή η ένωση συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη και η ένωση εκπομπού είναι ορθά πολωμένη. Στην περιοχή αυτή το ρεύμα εξόδου του τρανζίστορ,  $I_C$  (ρεύμα συλλέκτη) αποκρίνεται με την μέγιστη ευαισθησία σε ένα σήμα εισόδου.

Όταν η ένωση εκπομπού είναι ανάστροφα πολωμένη, το ρεύμα της βάσης είναι πολύ μικρό της τάξεως των νανοαμπερ για το πυρίτιο. Όταν η ένωση εκπομπού πολωθεί ορθά, πάλι το ρεύμα βάσης δε θα είναι σημαντικό μέχρι την στιγμή που η πόλωση πάρει τιμή  $|V_{BE}| \geq |V_\gamma|$ , όπου  $V_\gamma$  η τάση αγωγής. Επειδή το ρεύμα συλλέκτη είναι ανάλογο με το ρεύμα βάσης, το ρεύμα συλλέκτη δεν θα έχει σημαντική τιμή παρά μόνο μέχρι τη στιγμή που θα εφαρμοστεί η αγωγή τάσης.

Εάν το τρανζίστορ πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτής ρεύματος, χωρίς σημαντική παραμόρφωση πρέπει η λειτουργία του να περιορίζεται σε αυτήν τη περιοχή.

Για τα ρεύματα του τρανζίστορ (δεχόμενοι σαν θετικές τις φορές που φαίνονται στην Εικόνα 2-12), ισχύει :

$$I_C = I_{C0} - aI_E \quad (2-3)$$

&

$$I_B + I_C = -I_E \quad (2-4)$$

Όπου :

$I_{C0}$  : ρεύμα κόρου ανάστροφης πόλωσης

$a$  : κέρδος ρεύματος ισχυρού σήματος

Με συνδυασμό των δύο παραπάνω εξισώσεων ( $I_C = I_{C0} - aI_E$  (2-3),(2-4))

$$I_{measured} = I_0 \frac{8\pi^4 N a^2}{\lambda^4 R^2} (1 + (\cos \theta)^2) \quad (\text{έχουμε:})$$

$$I_C = \frac{I_{C0}}{1-a} + \frac{aI_B}{1-a} \quad (2-5)$$



Αν  $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$  τότε θα έχουμε :

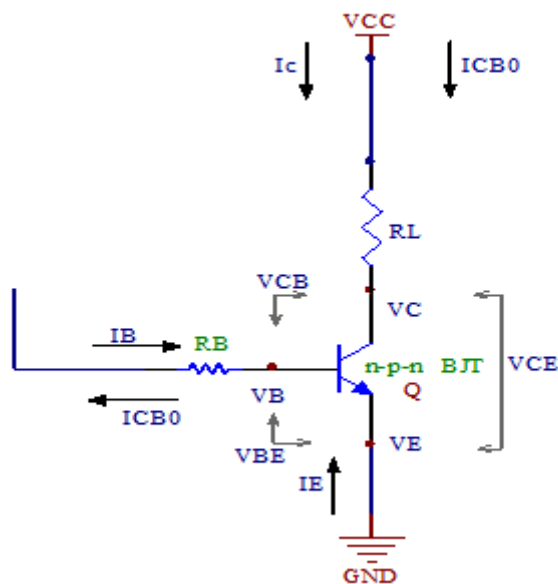
$$I_C = (1 + \beta)I_{C0} + \beta I_B \quad (2-6)$$

Συνήθως το  $I_B \gg I_{C0}$ , επομένως προκύπτει ότι εντός της ενεργούς περιοχής ισχύει :

$$I_C \approx \beta I_B \quad (2-7)$$

Όπου  $\beta$ , ορίζεται κι αυτό σαν κέρδος ρεύματος υψηλού σήματος αλλά επί της ουσίας αντιπροσωπεύει το αρνητικό κέρδος του  $\alpha$ .

Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς για την ενεργό περιοχή προκύπτει το εξής συμπέρασμα : Αν το  $\alpha$  παρέμενε σταθερό τότε σύμφωνα με την εξίσωση το  $I_C$  θα ήταν ανεξάρτητο της  $V_{CE}$ . Έστω ότι λόγω του φαινομένου Early, το  $\alpha$  αυξάνεται κατά 0,5%, δηλαδή από την τιμή  $\alpha=0,98$  να πάει στην τιμή 0,985, όταν η  $V_{CE}$  αυξάνεται από μερικά βολτ σε 10V. Τότε η τιμή του  $\beta$  αυξάνεται από 49 ( $0,98/(1-0,98)$ ) σε 66 ( $0,985/(1-0,985)$ ), 34% περίπου αύξηση. Αυτό σημαίνει ότι μικρή μεταβολή στην τιμή του  $\alpha$  προσδίδει μεγάλη μεταβολή στην τιμή του  $\beta$ . Πιο απλά, μικρή μεταβολή της τάσης  $V_{CE}$  προκαλεί μεγάλη μεταβολή στο ρεύμα  $I_C$ .



**Εικόνα 2-12:** Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού ενός τρανζίστορ πυριτίου τύπου n-p-n.

### Περιοχή αποκοπής

Για να βρίσκεται ένα τρανζίστορ n-p-n πυριτίου στην περιοχή αποκοπής θα πρέπει :

$$I_E = 0 \quad (2-8)$$

&

$$I_C = I_{C0} \quad (2-9)$$

&

$$I_B = -I_C = -I_{C0} \quad (2-10)$$

&

$$V_{BE} = 0 \text{ (μόνο για το πυρίτιο)} \quad (2-11)$$

Λόγω των φαινομένων της θερμοκρασίας, του πολλαπλασιασμού χιονοστιβάδας και της μεγάλης παραλλακτικότητας ενός συγκεκριμένου τύπου τρανζίστορ, για διάφορα δείγματα, υπάρχει ρεύμα  $I_{CB0} \neq 0$  (το ρεύμα κόρου ανάστροφης πόλωσης συλλέκτη όταν το ρεύμα στον εκπομπό είναι μηδέν). Για να διατηρηθεί το τρανζίστορ στην κατάσταση αποκοπής θα πρέπει να εφαρμοστεί μία ανάστροφη τάση στην βάση  $V_{bb}$  τέτοια ώστε για το πυρίτιο να ισχύει :

$$V_{BE} = -V_{BB} + R_B I_{CB0} \approx 0 \quad (2-12)$$

Κάθε τρανζίστορ έχει μια μέγιστη ανάστροφη τάση διάσπασης,  $V_{EB0}$  πάνω από την οποία το τρανζίστορ καταστρέφεται.

### Περιοχή κόρου

Ένα τρανζίστορ βρίσκεται στην περιοχή κόρου όταν η ένωση εκπομπού είναι ορθά πολωμένη και η ένωση συλλέκτη είναι κι αυτή ορθά πολωμένη και μάλιστα με τάση πόλωσης ίση με την τάση αγωγής έτσι ώστε η  $V_{CE} \rightarrow 0$ . Παρατηρείται ότι το ρεύμα συλλέκτη είναι σχεδόν ανεξάρτητο από το ρεύμα βάσης στην περιοχή του κόρου. Το ρεύμα συλλέκτη επομένως δίνεται από την σχέση:

$$I_C = V_{CC}/R_L \quad (2-13)$$

Και πλέον εξαρτάται μόνο από την αντίσταση φορτίου και από την τάση της πηγής  $V_{CC}$ .

Υπάρχουν κάποιες χαρακτηριστικές τιμές τάσης για κάθε τρανζίστορ που σηματοδοτούν την λειτουργία του στον κόρο :  $V_{CE,sat}$  &  $V_{BE,sat}$ .

Μία ακόμη πιο ενδιαφέρουσα παράμετρος του τρανζίστορ είναι το κέρδος ρεύματος DC  $h_{FE}$  που ορίζεται ο λόγος του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα βάσης. Στην ενεργό περιοχή θεωρείται περίπου ισοδύναμο με το  $\beta$  ( $h_{FE} \approx \beta$ ).

Στην περιοχή του κόρου, η παράμετρος  $h_{FE}$  είναι πολύ χρήσιμη και όταν πρόκειται για τρανζίστορ διακοπής παρέχεται από τον κατασκευαστή. Υπολογίζοντας το ρεύμα συλλέκτη και έχοντας γνωστό το  $h_{FE}$  μπορούμε να προσδιορίσουμε το ελάχιστο ρεύμα βάσεως το οποίο απαιτείται για να φτάσει το τρανζίστορ στον κόρο.

#### 2.4.1.5 Επιλογή κυκλώματος οδήγησης LED

Με βάση τις περιοχές λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ πυριτίου σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Στην ενεργό περιοχή, το ρεύμα συλλέκτη που παράγεται είναι πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές της εισόδου με αποτέλεσμα να μην αποτελεί ιδανικό τροφοδότη φορτίου όπου απαιτεί σταθερό ρεύμα. Αν το LED τοποθετηθεί στον συλλέκτη του τρανζίστορ θα διαρρέεται από το αντίστοιχο ρεύμα και θα εκπέμπει μία συγκεκριμένη ένταση ακτινοβολίας. Σε οποιαδήποτε μεταβολή του, ευαίσθητου, ρεύματος συλλέκτη θα μεταβάλλεται και η ένταση ακτινοβολίας που θα εκπέμπει το LED με αποτέλεσμα οι φωτοδιόδοι να παρουσιάζουν έντονα σφάλματα και να χάνουν την ακρίβεια τους. Υπάρχει έτσι και ο κίνδυνος το ρεύμα συλλέκτη να γίνει μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα διέλευσης του LED με αποτέλεσμα να το καταστρέψει. Επίσης στην ενεργό περιοχή το τρανζίστορ παρουσιάζει σχετικά μεγάλη κατανάλωση ισχύος.
- Η περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ στον κόρο είναι η ιδανική κατάσταση λειτουργίας για να επιτευχθεί σωστή εκπομπή ακτινοβολίας από το LED. Το ρεύμα συλλέκτη εξαρτάται μόνο από την αντίσταση φορτίου και από την τάση της πηγής  $V_{CC}$ .

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_L} \quad (2-14)$$

Επομένως με την κατάλληλη επιλογή τάσης πηγής και αντίστασης φορτίου θα παράγεται σταθερό (πρακτικά αμετάβλητο) ρεύμα συλλέκτη ικανό για την σωστή ακτινοβολήση του LED ( $I \leq I_F$ ).

- Η περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ στην αποκοπή είναι η ιδανική κατάσταση λειτουργίας κατά την οποία το LED θα παραμένει σβηστό. Το ρεύμα του συλλέκτη θα είναι ίσο με το ρεύμα κόρου ανάστροφης πόλωσης του συλλέκτη ( $I_{CBO} \ll I_C \leq I_F$ ) το οποίο είναι πολύ μικρό και δεν θα μπορέσει να ενεργοποιήσει το LED.

Γενικά η οδήγηση του LED με την βοήθεια ενός τρανζίστορ, μεταβαίνοντας από την περιοχή αποκοπής στην περιοχή κόρου, είναι η πιο αποδοτική μέθοδος οδήγησης. Συμπερασματικά επιτυγχάνονται τα εξής :

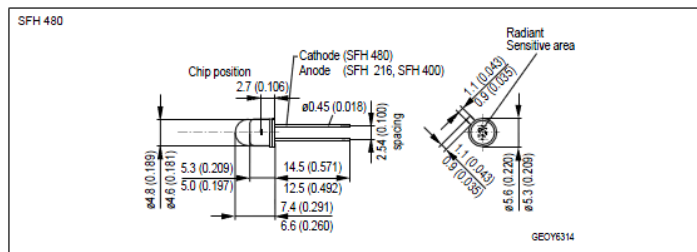
- Σταθερό και πλήρως ελεγχόμενο ρεύμα συλλέκτη – ρεύμα προώθησης του LED.
- Καλύτεροι χρόνοι απόκρισης κατά την διαδικασία της μετάβασης από την μία περιοχή λειτουργίας στην άλλη, ιδιαίτερα όταν για τρανζίστορ διακοπής (switching transistor).
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος για το κύκλωμα οδήγησης. Η πιο σημαντική κατανάλωση ισχύος επιτυγχάνεται πάνω στην αντίσταση φορτίου.
- Μειωμένος θόρυβος περισσότερη ακρίβεια.

#### ***2.4.1.6 Το LED που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα του θολομέτρου***

Το LED, που θα χρησιμοποιηθεί σαν πηγή φωτός για το θολόμετρο επιλέγεται να έχει μήκος κύματος κοντά στο μήκος κύματος που απαιτεί η πρότυπη μέθοδος ISO 7027. Το συγκεκριμένο LED που τελικά επιλέχθηκε είναι ένα υπέρυθρο LED ( $\lambda=880\text{nm}$ ) κατασκευασμένο από αρσενικούχο αργιλογάλλιο (GaAlAs Infrared Emitter) και το μοντέλο του είναι : SFH-480 της Opto Semiconductors (OSRAM – Εικόνα 2-13)



SFH 480

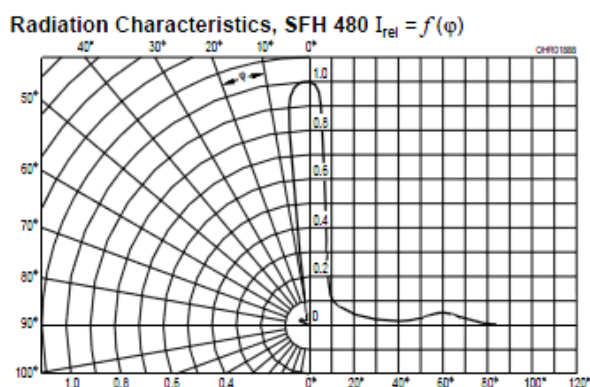


Εικόνα 2-13: IR LED SFH-480 (οι διαστάσεις είναι σε mm).

Κάποια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του LED παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-1).

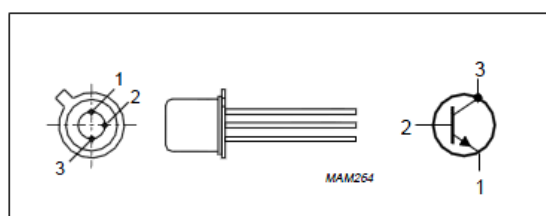
Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Θερμοκρασία λειτουργίας - αποθήκευσης	$T_{op} - T_{stg}$	(-40) - (+125)	°C
Μέγιστη ανάστροφη τάση	$V_R$	5	V
Ρεύμα προώθησης	$I_F$	200	mA
Μέγιστη ολική κατανάλωση ισχύος	$P_{tot}$	470	mW
Μήκος κύματος μέγιστης ακτινοβολίας, $I_F = 100mA$	$\lambda_{peak}$	880	nm
Φασματικό εύρος στο 50% της έντασης ακτινοβολίας με $I_F = 100mA$	$\Delta\lambda$	80	nm
Γωνία ημίσειας τιμής	$\phi$	$\pm 6$	Grad deg.
Χρόνος ανύψωσης της έντασης ακτινοβολίας από το 10% στο 90% με $I_F = 100mA, R_L = 50\Omega$	$t_r$	0.6	$\mu s$
Χρόνος πτώσης της έντασης ακτινοβολίας από το 90% στο 10% με $I_F = 100mA, R_L = 50\Omega$	$t_f$	0.5	$\mu s$
Χωρητικότητα με $V_R = 0V, f = 1MHz$	$C_0$	25	pF
Τάση αγωγής	$V_F$	1.5( $\leq 1.8$ )	V
Ανάστροφο ρεύμα με $V_R = 5V$	$I_R$	0.01( $\leq 1$ )	$\mu A$

Πίνακας 2-1: Πίνακας χαρακτηριστικών του LED SFH-480 σε θερμοκρασία  $T_A=25$  °C.



**Εικόνα 2-14:** Κατευθυντικότητα ακτινοβολίας του LED.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα διπολικό τρανζίστορ τύπου n-p-n σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, θα είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία του LED. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το τρανζίστορ 2N2222A (Εικόνα 2-15) γιατί λειτουργεί ικανοποιητικά σαν διακόπτης και μπορεί να αντέξει μεγάλο ρεύμα συλλέκτη (800 mA maximum). Κάποια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του τρανζίστορ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-2) τα οποία χρησιμοποιώντας τα με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του LED θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε όλες τις παραμέτρους του κυκλώματος που τροφοδοτεί την πηγή ακτινοβολίας.



**Εικόνα 2-15:** Τρανζίστορ 2N2222A.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Μέγιστο ρεύμα συλλέκτη	$I_C$	800	<b>mA</b>
Μέγιστη ολική κατανάλωση ισχύος	$P_{tot}$	500	mW
Κέρδος ρεύματος DC με $I_C = 150$ mA; $V_{CE} = 1$ V	$h_{FE}$	50	-
Μέγιστο ρεύμα βάσης	$I_{BM}$	200	<b>mA</b>
Ρεύμα κόρου ανάστροφης πόλωσης συλλέκτη με $I_E = 0$	$I_{CB0}$	10	nA

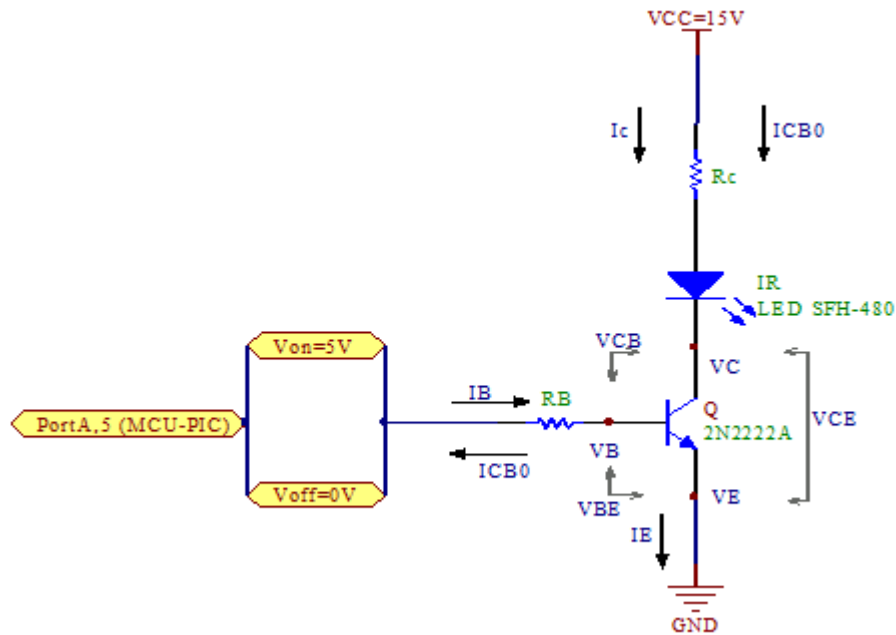
Τάση κόρου συλλέκτη-εκπομπού για $I_C = 150mA$ και $I_B = 15mA$	$V_{CE,sat}$	0.3	V
Τάση κόρου βάσης-εκπομπού για $I_C = 150mA$ και $I_B = 15mA$	$V_{BE,sat}$	0.6-1.2	V
Ανάστροφη τάση διάσπασης εκπομπού βάσης	$V_{EBO}$	6	V

**Πίνακας 2-2:** Πίνακας χαρακτηριστικών του τρανζίστορ 2N2222A σε θερμοκρασία  $T_A=25\text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 2.4.1.7 Τελικό κύκλωμα οδήγησης LED

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2-16) φαίνεται το τελικό κύκλωμα οδήγησης του LED από το τρανζίστορ. Όπως έχει αναφερθεί, το τρανζίστορ μεταβαίνει συνεχώς από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση κόρου αναβοσβήνοντας το LED. Τον έλεγχο αυτής της μετάβασης τον έχουμε δώσει στον μικροελεγκτή, ο οποίος τροφοδοτεί το κύκλωμα της βάσης του τρανζίστορ με την απαραίτητη τάση. Όταν στέλνει μία τάση  $V_{on}$  το τρανζίστορ πηγαίνει στον κόρο ενώ όταν στέλνει μία τάση  $V_{off}$  πηγαίνει στην περιοχή αποκοπής.

Επομένως, αφού ο μικροελεγκτής πρέπει να υπολογίσει την τιμή της θολότητας με βάση τις τιμές εξόδου των φωτοдиодων θα πρέπει να φροντίσουμε αμέσως πριν αρχίσει η διαδικασία της ψηφιοποίησης (analog to digital conversion) των αναλογικών σημάτων να ενεργοποιείται το LED και αμέσως μετά το τέλος των επαναλαμβανόμενων ψηφιοποιήσεων να απενεργοποιείται. Η λειτουργία αυτή ρυθμίζεται αλγοριθμικά στέλνοντας σε μία έξοδο γενικού σκοπού του μικροελεγκτή τιμές 1 και 0 (PortA,5) που αντιστοιχούν σε τάσεις  $V_{on}=5V$  και  $V_{off} = 0V$ .



Εικόνα 2-16: Τελικό κύκλωμα οδήγησης LED.

### Περιοχή κόρου

Για να βρίσκεται το τρανζίστορ στον κόρο θα πρέπει :

$$V_{CE,sat} = 0,3V \text{ \& } V_{BE,sat} = 0.6 \dots 1.2V$$

Το μέγιστο ρεύμα προώθησης του LED είναι :  $I_F = 200mA$  και τελικά θα εφαρμοστεί ρεύμα :  $I' = I_C = 100mA = \frac{I_F}{2}$ .

Με βάση τις τάσεις κορεσμού, αν εφαρμοστούν τάσεις  $V_{CE} = 0,2V$  &  $V_{BE} = 0.8V$  το τρανζίστορ θα βρίσκεται ακόμα στην περιοχή του κόρου.

Επομένως ισχύουν :

- $V_{CE} = 0,2V$
- $V_{BE} = 0.8V$
- $I_C = 100mA$
- $V_{CC} = 15V$  (επιλογή επιτρεπτή που δεν προκαλεί προβλήματα στην λειτουργία του κυκλώματος)
- $V_{LED} = V_F = 1.8V$  , σύμφωνα με τον πίνακα χαρακτηριστικών του LED (Πίνακας)

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Kirchhoff παίρνουμε :



$$-V_{CC} + I_C R_C + V_{LED} + V_{CE} = 0 \Leftrightarrow \quad (2-15)$$

$$-15V + 10^{-1}A \times R_C + 1.8V + 0.2V = 0 \Leftrightarrow$$

$$10^{-1}A \times R_C = 13V \Leftrightarrow$$

$$R_C = 130 \Omega$$

Σύμφωνα με τον πίνακα χαρακτηριστικών του LED (Πίνακας 2-1) το κέρδος ρεύματος DC,  $h_{FE} = 50$ .

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} = 50 \Leftrightarrow$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{100mA}{50} = 2mA \Leftrightarrow \quad (2-16)$$

$$I_{B,min} = 2mA$$

Αν η τάση  $V_{on}$ , που τροφοδοτεί το κύκλωμα βάσης είναι ίση με 5V τότε για το ρεύμα βάσης θα ισχύει (Kirchhoff) :

$$-V_{on} + I_B R_B + V_{BE} = 0 \Leftrightarrow \quad (2-17)$$

$$-5V + I_B R_B + 0.8V = 0 \Leftrightarrow$$

$$I_B R_B = 4.2V \Leftrightarrow$$

Τοποθετώντας μία αντίσταση  $R_B = 300\Omega$ , το ρεύμα βάσης γίνεται :

$$I_B = \frac{4.2V}{300\Omega} \Leftrightarrow$$

$$I_B = 14mA > I_{B,min} = 2mA$$

Επίσης, η ισχύς που καταναλώνει το τρανζίστορ (2-2) στην περιοχή κόρου είναι :

$$P_{sat} = V_{CE}I_C \Leftrightarrow$$

$$P_{sat} = (0.2V)(100mA) \Leftrightarrow$$

$$P_{sat} = 20mW$$

Βέβαια απαιτείται προσοχή στην επιλογή της  $R_C = 130 \Omega$ , όσο αφορά την αντοχή της. Η κατανάλωση ισχύος στην αντίσταση  $R_C$  είναι :

$$P_{RC} = I_C^2 R_C \Leftrightarrow$$

$$P_{RC} = (10^{-1}A)^2 130 \Leftrightarrow$$

$$P_{RC} = 1.3W$$

Η  $P_{RC}$  είναι αρκετά μεγάλη. Είναι η μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος λόγω της επιλογής τάσης  $V_{CC} = 15V$ . Αν είχα μικρότερη τάση  $V_{CC}$  η  $P_{RC}$  θα ήταν μικρότερη ( μπορεί και 300mW για  $V_{CC} = 5V$ ). Οι υπολογισμοί αυτοί οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η χρήση του τρανζίστορ σαν διακόπτη είναι απαραίτητη για την εξοικονόμηση ενέργειας του κυκλώματος.

Επομένως για να τροφοδοτείται το LED με σταθερό ρεύμα  $I_C = 100mA$  η αντίσταση του συλλέκτη πρέπει να είναι  $R_C = 130 \Omega$  και για να διατηρείται στον κόρο θα πρέπει η τάση  $V_{on}$  να είναι ίση με 5V και η αντίσταση στο κύκλωμα βάσης  $R_B = 300\Omega$ . Επίσης το ρεύμα βάσης έχει σχετικά μικρή τιμή για την βάση ικανή όμως να την προσφέρει ο μικροελεγκτής, ο οποίος αντέχει ρεύματα μέχρι 30 mA.

### Περιοχή αποκοπής

Στην περιοχή αποκοπής θα πρέπει να ισχύουν τα παρακάτω :

- $V_{BE} = 0V$ , για τρανζίστορ πυριτίου
- $I_E = 0A$
- $I_C = I_{CB0} = 10nA$
- $I_B = -I_{CB0} = -10nA$ , (το πρόσημο επισημαίνει αλλαγή φοράς του ρεύματος βάσης)

Για να διατηρηθεί το τρανζίστορ στην περιοχή αποκοπής, θα πρέπει να πολωθεί ανάστροφα το κύκλωμα βάσης με μία τάση  $V_{off}$  τέτοια ώστε :

$$V_{BE} = 0 \Leftrightarrow$$

$$V_{off} + I_{CBO}R_B = 0 \Leftrightarrow (Kirchhoff) \quad (2-18)$$

$$V_{off} = -(10nA)(300\Omega) \Leftrightarrow$$

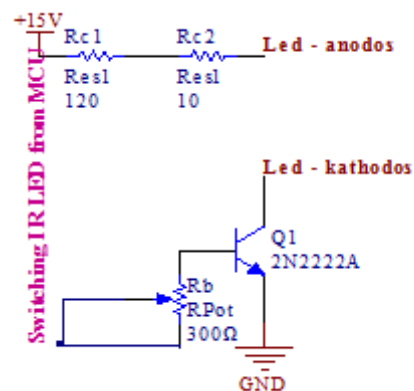
$$V_{off} = -3\mu V \approx 0V$$

Επίσης :

$$P_{RC} = I_C^2 R_C \approx 0W \quad (2-19)$$

$$P_{trans} = V_{CE}I_C = 150nW \approx 0W \quad (2-20)$$

Ακολουθεί το σχηματικό το κυκλώματος όπως τελικά πραγματοποιήθηκε :



Εικόνα 2-17: Σχηματικό κυκλώματος οδήγησης LED.

## 2.4.2 Σύστημα – κύκλωμα δεκτών

### 2.4.2.1 Εισαγωγή

Η τοπολογία του θολομέτρου που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία αποτελείται από τρεις φωτοδιόδους – δέκτες ακτινοβολίας οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε γωνίες  $180^\circ$ ,  $150^\circ$  και  $90^\circ$  μοιρών σε σχέση με την νοητή ευθεία που σχηματίζει η προσπίπτουσα ακτινοβολία του LED (θέση του LED στην τοπολογία –  $0^\circ$  μοίρες).

Αναλύοντας τα χαρακτηριστικά των φωτοδίοδων θα προκύψουν οι αντίστοιχες προϋποθέσεις τεχνολογίας που θα πρέπει να τηρούν οι φωτοδιόδοι που θα τοποθετηθούν καθώς και τα αντίστοιχα κυκλώματα που θα υλοποιηθούν, τα οποία θα συντελέσουν στην πιο αξιόπιστη μεταφορά του οπτικού σήματος προς επεξεργασία.

### 2.4.2.2 Χαρακτηριστικά μιας φωτοδιόδου

Οι φωτοδιόδοι είναι ημιαγώγιμοι αισθητήρες φωτός, οι οποίοι παράγουν ρεύμα ή τάση όταν η ένωση P-N του ημιαγωγού εκτεθεί σε ακτινοβολία. Ο όρος φωτοδιόδος μπορεί να ορισθεί με την ευρεία έννοια συμπεριλαμβάνοντας ακόμα και τους ηλιακούς συσσωρευτές, αλλά συνήθως αναφέρεται σε αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της έντασης της ακτινοβολίας (φωτός). Οι φωτοδιόδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την λειτουργία και τον τρόπο κατασκευής τους σε τέσσερις τύπους :

- 1) Φωτοδιόδο PN
- 2) Φωτοδιόδο PIN
- 3) Φωτοδιόδο τύπου Schottky
- 4) Φωτοδιόδο χιονοστιβάδας (Avalanche photodiode – APD)

Όλοι οι παραπάνω τύποι φωτοδίοδων προσφέρουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανίχνευση της έντασης, της θέσης, του χρώματος και της παρουσίας του φωτός.

Χαρακτηριστικά φωτοδίοδων:

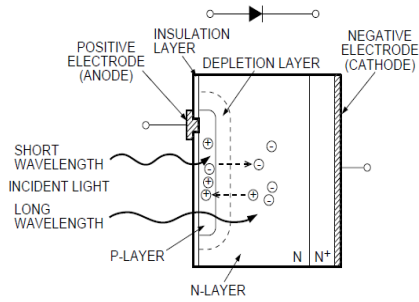
- Εξαιρετική γραμμικότητα σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία
- Χαμηλό θόρυβο

- Φασματική απόκριση μεγάλου εύρους
- Ενισχυμένα μηχανικά
- Συμπαγή και με μικρό βάρος
- Με μεγάλο χρόνο ζωής

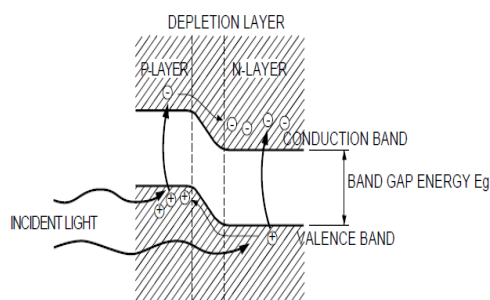
### 2.4.2.3 Αρχή λειτουργίας φωτοδιόδου

Η Εικόνα 2-18 δείχνει την τομή μίας φωτοδιόδου. Ένα στρώμα τύπου-P στην ενεργό επιφάνεια και ένα στρώμα τύπου-N στην βάση δημιουργούν μία ένωση PN που λειτουργεί σαν φωτοηλεκτρικός μετατροπέας. Το στρώμα τύπου-P για μία φωτοδίοδο πυριτίου σχηματίζεται από την επιλεκτική διάχυση βορίου σε ένα λεπτό στρώμα (περίπου 1μm). Η ουδέτερη περιοχή μεταξύ των στρωμάτων τύπου-P και τύπου-N είναι γνωστή σαν περιοχή μετάβασης-ζώνη διέλευσης (depletion layer). Ελέγχοντας το πάχος του στρώματος τύπου-P, του στρώματος βάσης τύπου-N και του τελευταίου στρώματος τύπου-N<sup>+</sup>, η φασματική απόκριση και η απόκριση συχνότητας μπορούν να ελεγχθούν.

Όταν το φως πέφτει πάν σε μία φωτοδίοδο, το ηλεκτρόνιο εντός της κρυσταλλικής δομής διεγείρεται. Αν η ενέργεια του φωτός είναι μεγαλύτερη της ενέργειας ιοντισμού  $E_g$  (band gap energy), τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν στην στη ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) αφήνοντας οπές στην ζώνη σθένους (valence band-Εικόνα 2-19). Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών προκύπτουν σε όλο το στρώμα τύπου-P, στο στρώμα τύπου-N και στη ζώνη διέλευσης. Στη ζώνη διέλευσης το ηλεκτρικό πεδίο επιταχύνει τα ηλεκτρόνια προς το στρώμα τύπου-N και τις οπές προς το στρώμα τύπου-P. Τα ηλεκτρόνια του τύπου-N καθώς και αυτά που προέρχονται από το στρώμα τύπου-P παραμένουν στην ζώνη αγωγιμότητας ενώ οι οπές από το στρώμα τύπου-N που διαχέονται προς το στρώμα τύπου-P συλλέγονται στην ζώνη σθένους του τύπου-P. Έτσι ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας που πέφτει στην φωτοδίοδο παράγονται αντίστοιχα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών και το στρώμα τύπου-N φορτίζεται αρνητικά ενώ το στρώμα τύπου-P θετικά. Όταν αυτή η ένωση PN συνδεθεί σε ένα κύκλωμα, ενώ εκτίθεται σε ακτινοβολία, θα παράγει ρεύμα (λόγω της κίνησης οπών και ηλεκτρονίων) το οποίο θα είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



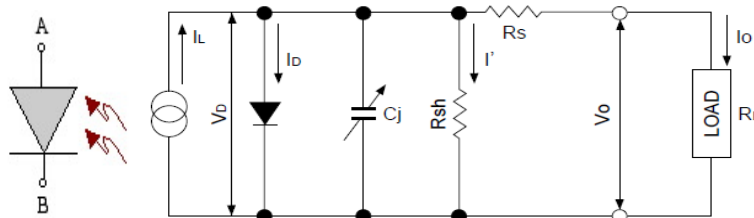
**Εικόνα 2-18:** Διατομή φωτοδιόδου.



**Εικόνα 2-19:** Κατάσταση φωτοδιόδου ένωσης PN.

#### 2.4.2.4 Φωτοδίοδος πυριτίου

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτοδιόδου πυριτίου φαίνεται στην παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2-20) :



**Εικόνα 2-20:** Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοδιόδου.

- $I_L$  : Παραγόμενο ρεύμα από την προσπίπτουσα ακτινοβολία
- $I_D$  : Ρεύμα διόδου (ιδανικής)

- $C_j$  : Χωρητικότητα ένωσης
- $I'$  : ρεύμα αντίστασης διακλάδωσης ή αλλιώς σκοτεινό ρεύμα (dark current) που είναι ένα μικρό ρεύμα που ρέει όταν η φωτοδίοδος πολώνεται ανάστροφα από μία τάση  $V_R$  και αποτελεί σημαντική πηγή θορύβου.
- $R_{sh}$  : Αντίσταση διακλάδωσης που προκύπτει από την σχέση  $R_{sh} = \frac{V_R}{I'}$ , σκοτεινό ρεύμα  $I'$  που οφείλεται ανάστροφη τάση  $V_R$
- $V_D$  : Τάση διόδου
- $I_o$  : Ρεύμα εξόδου
- $V_o$  : Τάση εξόδου

Σύμφωνα με τα παραπάνω το ρεύμα εξόδου δίνεται από την σχέση :

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_S \left( \exp \frac{eV_D}{kT} - 1 \right) - I' \quad (2-21)$$

$I_S$  : ανάστροφο ρεύμα κορεσμού φωτοδίοδου

$e$  : φορτίο ηλεκτρονίου

$k$  : σταθερά Boltzmann

$T$  : απόλυτη θερμοκρασία φωτοδίοδου

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{OC}$ , είναι η τάση εξόδου όταν το  $I_o$  είναι μηδέν και ισούται με :

$$V_{OC} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_L - I'}{I_S} + 1 \right) \quad (2-22)$$

Αν το  $I'$  είναι αμελητέο και αφού το  $I_S$  αυξάνεται εκθετικά από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, η  $V_{OC}$  θα είναι αντιστρόφως ανάλογη με την θερμοκρασία περιβάλλοντος και ανάλογη με το λογάριθμο του  $I_L$ .

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$ , που είναι το ρεύμα όταν η αντίσταση φορτίου  $R_L$  γίνει μηδέν, δίνεται από την σχέση :

$$I_{SC} = I_L - I_S \left( \frac{eI_{SC}R_s}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{SC}R_s}{R_{sh}} \quad (2-23)$$

Από την στιγμή που η  $R_s$  είναι μερικά  $\Omega$  και η  $R_{sh}$  είναι  $10^7 \mu\epsilon 10^{11} \Omega$  ο δεύτερος και τρίτος όρος της εξίσωσης γίνονται αμελητέοι για ένα μεγάλο εύρος τιμών.

Επομένως το ρεύμα βραχυκύκλωσης γίνεται ίσο με το ρεύμα που παράγεται λόγω προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

#### **2.4.2.5 Μέθοδοι μέτρησης του σήματος μιας φωτοδιόδου**

##### **2.4.2.5.1 Παρουσίαση μεθόδων**

Το σήμα μιας φωτοδιόδου μπορεί να μετρηθεί είτε σαν τάση είτε σαν ρεύμα. Οι μετρήσεις του ρεύματος επιδεικνύουν πολύ μεγαλύτερη γραμμικότητα, μικρότερο σφάλμα και καλή απόδοση στο εύρος λειτουργίας. Το ρεύμα που παράγεται είναι ανάλογο με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και μερικές φορές απαιτείται, από το υπόλοιπο κύκλωμα, να μετατραπεί σε τάση χρησιμοποιώντας έναν ενισχυτή σύνθετης αντίστασης. Η φωτοδίοδος μπορεί να λειτουργήσει και σε ορθή και σε ανάστροφη πόλωση ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής. Υπάρχουν δύο γενικοί τρόποι μέτρησης του σήματος μιας φωτοδιόδου :

- 1) Η φωτοβολταϊκή μέθοδος (photovoltaic mode)
- 2) Η μέθοδος φωτοαγωγιμότητας (photoconductive mode)

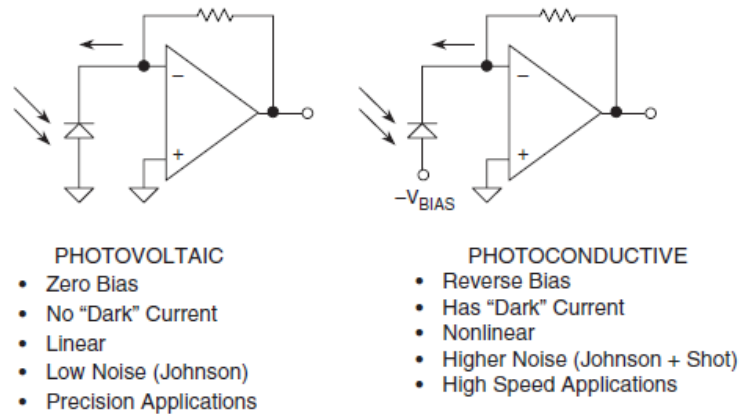
##### *Φωτοβολταϊκή μέθοδος (PV)*

Η φωτοβολταϊκή μέθοδος λειτουργίας (ορθή πόλωση φωτοδιόδου) προτιμάται όταν η φωτοδίοδος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλής συχνότητας (μέχρι 350 KHz) και χαμηλού επιπέδου φωτισμού. Επίσης τα φωτορεύματα επηρεάζονται λιγότερο από την θερμοκρασία. Με την μέθοδο αυτή παρουσιάζεται πιο ακριβής γραμμική λειτουργία και ο θόρυβος που προκύπτει οφείλεται στον θερμικό θόρυβο της αντίστασης διακλάδωσης χωρίς όμως να δημιουργείται σκοτεινό ρεύμα (dark current).

##### *Μέθοδος φωτοαγωγιμότητας (PC)*

Η μέθοδος φωτοαγωγιμότητας αναφέρεται σε τοπολογία όπου η φωτοδίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη (θετική κάθοδος – αρνητική άνοδος). Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή η ταχύτητα απόκρισης και η γραμμικότητα των αντίστοιχων συσκευών βελτιώνεται αρκετά λόγω της αύξησης του πλάτους της ζώνη διέλευσης και επαγωγικά λόγω της μείωσης της χωρητικότητας της ένωσης. Εφαρμόζοντας όμως ανάστροφη πόλωση θα αυξηθεί ο θόρυβος και το σκοτεινό ρεύμα.





**Εικόνα 2-21:** Μέθοδοι λειτουργίας φωτοδιόδων.

#### 2.4.2.5.2 Μέθοδος λειτουργίας που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα

Για λόγους οικονομίας ενέργειας, μικρής θερμοκρασιακής λειτουργίας και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής του LED και του κυκλώματος γενικότερα το τρανζίστορ λειτουργεί σαν διακόπτης αναβοσβήνοντας το LED με μία συγκεκριμένη συχνότητα που προκύπτει από τον κώδικα του μικροελεγκτή. Επομένως το βασικότερο χαρακτηριστικό της τοπολογίας των ανιχνευτών θα πρέπει να είναι η ταχύτερη και μέγιστη απόκριση τους εφαρμόζοντας ανάστροφη πόλωση στην φωτοδίοδο, θυσιάζοντας σε μικρό βαθμό την ακρίβεια και την γραμμικότητα τους. Έτσι η μέθοδος λειτουργίας της φωτοδιόδου που υιοθετείται για την κατασκευή του κυκλώματος λήψης ακτινοβολίας είναι η μέθοδος φωτοαγωγιμότητας (photoconductive mode).

#### 2.4.2.5.3 Πολώνοντας την φωτοδίοδο

Η ανάστροφη πόλωση στην πραγματικότητα αυξάνει την ταχύτητα του φωτοδέκτη με δύο τρόπους: αυξάνοντας την ταχύτητα απόκρισης της φωτοδιόδου και μειώνοντας την χωρητικότητα της.

Η πόλωση προκαλεί την διεύρυνση του πλάτους της ζώνης διέλευσης η οποία πλέον περιλαμβάνει περισσότερους φωτοπαραγόμενους φορείς. Έτσι η προκύπτουσα διαβάθμιση του ηλεκτρικού πεδίου επιταχύνει τους φορείς και τους μεταφέρει στους ακροδέκτες πιο γρήγορα. Αυτή η επιτάχυνση αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα

απόκρισης της φωτοδιόδου και πλέον το εύρος ζώνης λειτουργίας του κυκλώματος της φωτοδιόδου εξαρτάται από το εύρος ζώνης του ενισχυτή που χρησιμοποιείται.

Σε συνθήκες ανάστροφης πόλωσης, η διευρυμένη ζώνη διέλευσης προκαλεί επίσης μείωση της χωρητικότητας. Αύξηση του πλάτους της ζώνης διέλευσης σημαίνει αύξηση του πάχους του διηλεκτρικού υλικού που με την σειρά του σημαίνει μείωση της χωρητικότητας της φωτοδιόδου. Η σχέση της χωρητικότητας της φωτοδιόδου  $C_D$ , μετά την εφαρμογή ανάστροφης τάσης πόλωσης  $V_R$ , είναι :

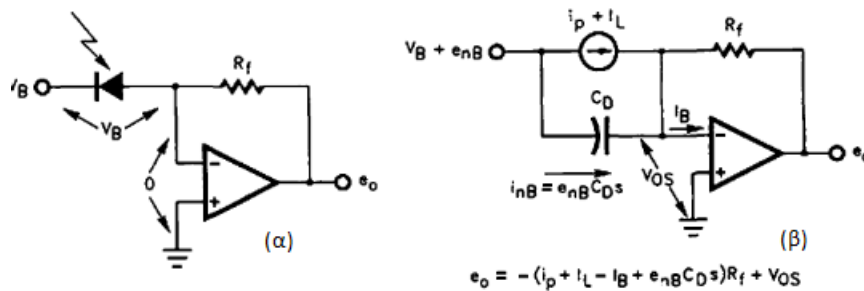
$$C_D = \frac{C_{D0}}{\sqrt{1+V_R/\phi_B}} \quad (2-24)$$

$C_{D0}$  : χωρητικότητα φωτοδιόδου όταν  $V_R = 0$

$\phi_B$  : η ενσωματωμένη τάση της ένωσης της διόδου, για φωτοδιόδους πυριτίου  $\phi_B \approx 0,6V$

Διαλέγοντας  $V_R \gg \phi_B$  δημιουργείται η κατάλληλη μείωση στην τιμή της χωρητικότητας.

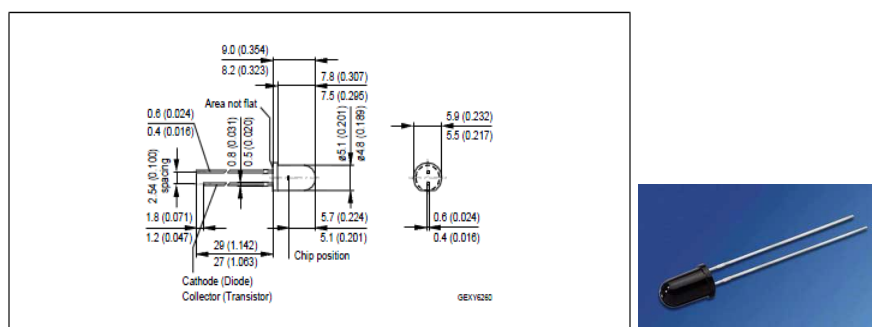
Βέβαια με μία τέτοια απλή πόλωση προκύπτουν σφάλματα λόγω έντονης παρουσίας θορύβου και μεγαλύτερου σκοτεινού ρεύματος. Ένα απλό RC παθητικό φίλτρο ή ένα αντίστοιχο ενεργό, λειτουργώντας στις κατάλληλες συχνότητες, μπορεί να αφαιρέσει αρκετό από τον επιπρόσθετο θόρυβο λόγω πόλωσης.



**Εικόνα 2-22:** α) Γενικό κύκλωμα ενισχυτή μετατροπής ρεύματος σε τάση με ανάστροφη πόλωση φωτοδιόδου και β) Αντίστοιχο κύκλωμα στο οποίο παρουσιάζονται τα σφάλματα που προκύπτουν λόγω ανάστροφης πόλωσης.

### 2.4.2.6 Φωτοдиодοι κυκλώματος

Για την λειτουργία του κυκλώματος των δεκτών χρησιμοποιήθηκαν τρεις PIN φωτοдиодοι πυριτίου με πολύ μικρό χρόνο απόκρισης. Αφού το IR LED εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda=880\pm 80$  nm, το βασικότερο χαρακτηριστικό του μοντέλου φωτοдиодων που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι το μήκος κύματος ανίχνευσης. Το μοντέλο αυτών των φωτοдиодων είναι : SFH-213 FA της Opto Semiconductors (OSRAM - Εικόνα 2-23). Κάποια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά των φωτοдиодων αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-3).



Εικόνα 2-23: Φωτοдиодος SFH 213 FA (διαστάσεις σε mm).

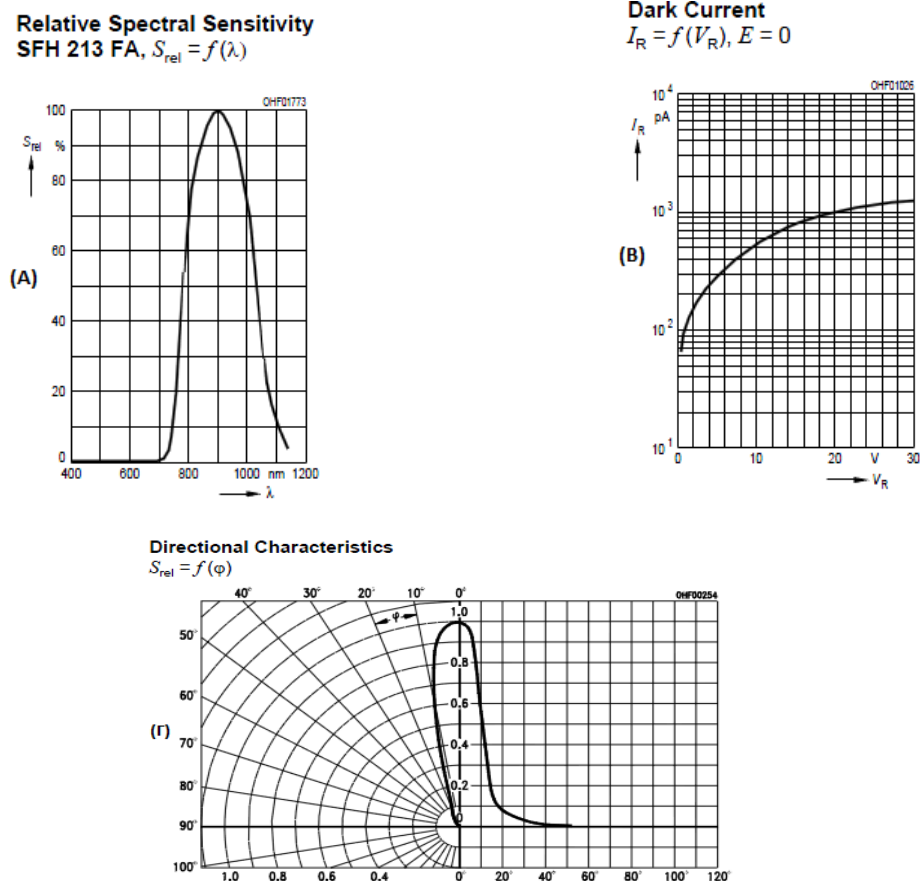
Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Θερμοκρασία λειτουργίας αποθήκευσης	$T_{op} - T_{stg}$	(-40) - (+100)	°C
Μέγιστη ανάστροφη τάση	$V_R$	50	V
Μέγιστη ολική κατανάλωση ισχύος	$P_{tot}$	150	mW
Φωτορεύμα για : $V_R=5$ V, $\lambda=870$ nm, $E_e=1$ mW/cm <sup>2</sup>	$I_P$	90(≥65)	mA
Μήκος κύματος μέγιστης ευαισθησίας	$\lambda_{S max}$	900	nm
Φασματικό εύρος ευαισθησίας $S=10\% * S_{max}$	$\lambda$	750 – 1100	nm
Ευαίσθητη περιοχή ακτινοβολίας	$A$	1	mm <sup>2</sup>
Γωνία ημίσειας τιμής	$\phi$	±10	Grad deg.
Σκοτεινό ρεύμα, για $V_R=20$ V	$I_R$	1(≤5)	nA
Ευαισθησία φάσματος, για $\lambda=870$ nm	$S_\lambda$	0.59	A/W
Τάση ανοιχτού κύκλου, για : $\lambda=870$ nm, $E_e=0.5$ mW/cm <sup>2</sup>	$V_O$	380(≥300)	mV

Ρεύμα βραχυκύκλωσης, για : $\lambda=870$ nm, $E_e=0.5$ mW/cm <sup>2</sup>	$I_{SC}$	42	μA
Χωρητικότητα φωτοδιόδου, για : $V_R=0$ V, $f=1$ MHz, $E=0$	$C_O$	11	pF
Θερμοκρασιακή παράμετρος του $V_O$	$TC_V$	-2.6	mV/K
Θερμοκρασιακή παράμετρος του $I_{SC}$ , για $\lambda=870$ nm	$TC_I$	0.2	%/K

**Πίνακας 2-3:** Πίνακας χαρακτηριστικών της φωτοδιόδου SFH-213 FA σε θερμοκρασία  $T_A=25$  °C.

Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις δίνουν :

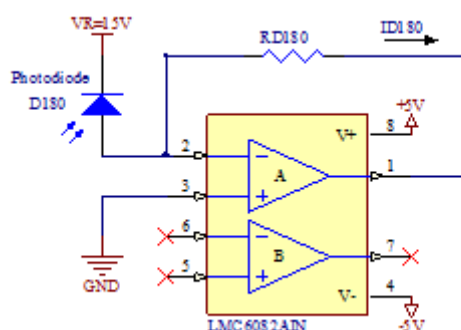
- A)** την φασματική ευαισθησία συναρτήσει του μήκους κύματος ( $S_{rel} = f(\lambda)$ ),  
**B)** το σκοτεινό ρεύμα συναρτήσει της τάσης ανάστροφης πόλωσης  $V_R$  ( $I_R = f(V_R)$ ,  $E = 0$ ),  
**Γ)** τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά της φασματικής ευαισθησίας.



**Εικόνα 2-24:** A) την φασματική ευαισθησία της φωτοδιόδου SFH 213 FA συναρτήσει του μήκους κύματος, B) το σκοτεινό ρεύμα συναρτήσει της τάσης ανάστροφης πόλωσης  $V_R$ , Γ) τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά της φασματικής ευαισθησίας.

### 2.4.2.7 Τελικό κύκλωμα φωτοδιόδων-φωτοδεκτών

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2-25) φαίνεται το σχηματικό του κυκλώματος μίας εκ των τριών φωτοδιόδων (φωτοδίοδος σε γωνία  $180^\circ$  σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία-D180). Σαν τελεστικός ενισχυτής χρησιμοποιήθηκε ο διπλός, τεχνολογίας CMOS, ενισχυτής ακριβείας LMC 6082 AIN (η επιλογή του ενισχυτή θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο).



Εικόνα 2-25: Σχηματικό του κυκλώματος της φωτοδιόδου D180.

Με βάση το παραπάνω κύκλωμα βγαίνουν κάποια συμπεράσματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά των φωτοδιόδων καθώς και τον υπολογισμό της τιμής της αντίστασης  $R_D$  που είναι το ζητούμενο για να ολοκληρωθεί το στάδιο κατασκευής του κυκλώματος των φωτοδιόδων.

Νέα χωρητικότητα φωτοδιόδου :

- Η τάση ανάστροφης πόλωσης  $V_R$ , που εφαρμόζεται είναι :  $V_R = 15V$ .
- Η χωρητικότητα της φωτοδιόδου για μηδενική πόλωση είναι :  $C_{D0} = 11pF$
- Για μια φωτοδίοδο πυριτίου το  $\phi_B = 0,6V$

Άρα η νέα χωρητικότητα θα δίνεται από τη σχέση (2-24):

$$C_D = \frac{C_{D0}}{\sqrt{1 + V_R/\phi_B}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow C_D = \frac{11 pF}{\sqrt{1 + 15 V/0.6 V}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow C_D = \frac{11 \text{ pF}}{\sqrt{26}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow C_D = 2.157 \text{ pF}$$

$$C_D \approx \frac{C_{D0}}{5}$$

### Υπολογισμός αντίστασης $R_D$

Το κύκλωμα του θολομέτρου θα πρέπει κάθε φορά να παίρνει τις αναλογικές εξόδους των δεκτών και να τις επεξεργάζεται μέσω του μικτοελεγκτή με σκοπό να υπολογιστεί η θολότητα αλγοριθμικά μέσω της σχέσης (2-1) που δίνει την θολότητα για την συγκεκριμένη κατασκευή. Ο μικροελεγκτής διαθέτει εσωτερικά ένα μετατροπέα αναλογικής τάσης σε ψηφιακή (analog-to-digital converter) που όμως θέτει κάποια όρια όσον αφορά την τάση εξόδου του αναλογικού κυκλώματος. Η τάση εξόδου θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0 V και Vdd, όπου Vdd η τροφοδοσία του μικροελεγκτή ( Vdd=5V). Επίσης όπως φαίνεται στο παραπάνω κύκλωμα της φωτοδιόδου D180 το ρεύμα που παράγεται από αυτή διαρρέει την ανάδραση του ενισχυτή με φορά προς την έξοδο του ενισχυτή, άρα η τάση εξόδου θα έχει διαφορά φάσης 180° από την τάση εισόδου, δηλαδή θα έχει αρνητική τιμή και ίση με (η άνοδος της διόδου έχει τάση ίση με μηδέν λόγω «κατ' ουσίαν γης» της αρνητικής με την θετική είσοδο του ενισχυτή):

$$V_{180} = -I_{D180} \times R_{D180} \quad (2-25)$$

Έτσι αφού η τάση εξόδου είναι αρνητική θα πρέπει, ένα στάδιο πριν από την είσοδο του σήματος στον μικροελεγκτή, να αντιστραφεί με την βοήθεια ενός ενισχυτή αντιστροφής. Άρα το ζητούμενο πλέον είναι η τάση εξόδου του κυκλώματος των φωτοδιόδων να είναι ανάμεσα στις τιμές 0...(-5)V.

Η επιλογή της φωτοδιόδου, που βρίσκεται στην θέση 180° δεν είναι τυχαία (D180). Με βάση αυτήν θα βρούμε την τιμή της αντίστασης  $R_{D180}$  ώστε να μπορεί το υπόλοιπο κύκλωμα να αντιλαμβάνεται κάθε μεταβολή της έντασης ακτινοβολίας του LED – πομπού. Η φωτοδιόδος D180 είναι μηχανικά τοποθετημένη σε ευθεία γραμμή με το Led εκπομπής και σε απόσταση 7cm επομένως όταν δεν υπάρχει εμπόδιο όλη η ένταση της ακτινοβολίας του LED θα πέσει πάνω στην D180.

Τοποθετούμε στο σύστημα LED-φωτοδιόδων το γυάλινο δοχείο το οποίο περιέχει καθαρό νερό. Θεωρητικά ο δέκτης D180 (δέκτης εξασθένησης) θα πρέπει να δείχνει την μέγιστη τιμή σε σχέση με άλλα διαλύματα. Επομένως θα πρέπει να

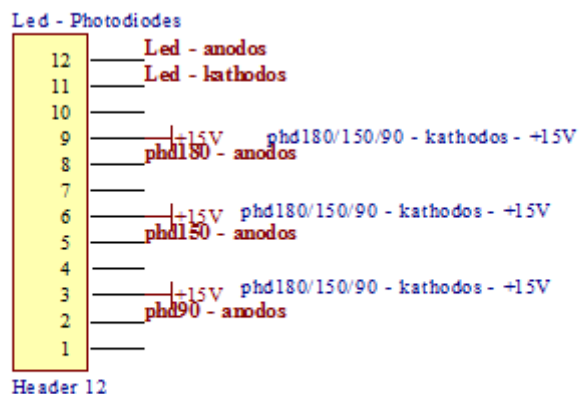
συσχετίσουμε την ακτινοβολία που λαμβάνει η φωτοδιόδος D180 (μέγιστη ακτινοβολία) με την μέγιστη τάση που μπορεί να αντληφθεί ο μικροελεγκτής.

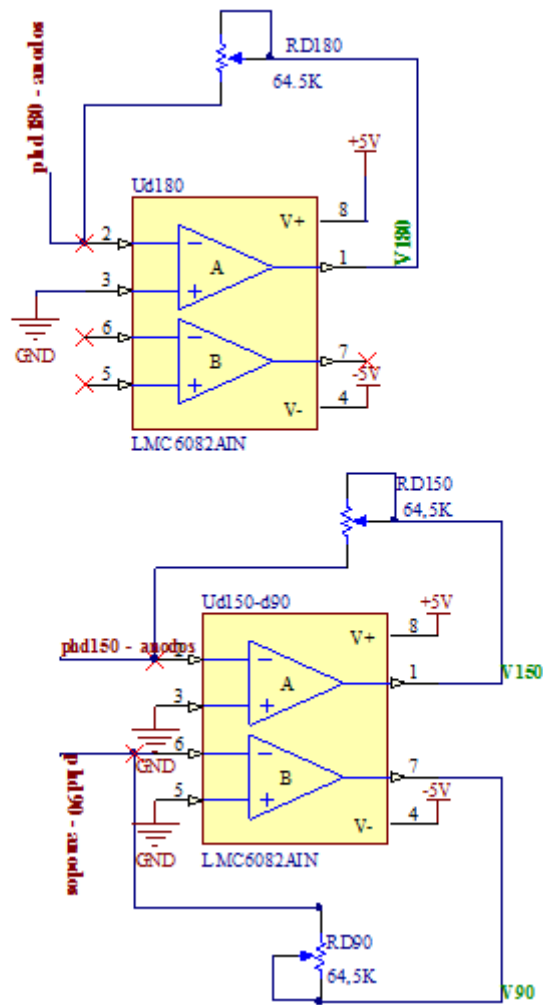
Τοποθετώντας ένα κανάλι του παλμογράφου στην έξοδο του ενισχυτή του κυκλώματος (Εικόνα) ελέγχω σε ποια τιμή της αντίστασης  $R_{D180}$  η τάση εξόδου θα γίνει ίση με :  $V_{180} = -5 V$

Όπως προκύπτει τελικά η αντίσταση  $R_{D180}$  έχει τιμή :

$$R_{D180} = 64,5 K\Omega$$

Για την ομοιόμορφη λειτουργία και των τριών φωτοδιόδων το κύκλωμα κάθε φωτοδιόδου θα πρέπει να είναι πανομοιότυπο με τα υπόλοιπα. Επομένως η πόλωση σε κάθε φωτοδιόδο θα πρέπει να είναι  $V_R = 15V$  και η αντίσταση, η οποία είναι υπεύθυνη για την μετατροπή ρεύματος σε τάση,  $R_D = 64.5K\Omega$ . Χρησιμοποιούνται επίσης δύο διπλοί CMOS ενισχυτές ακριβείας LMC 6082 για τις τρεις φωτοδιόδους. Το αντίστοιχο σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος των φωτοδιόδων του θολομέτρου φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 2-26) :





Εικόνα 2-26: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος των φωτοδιόδων D180, D150 και D90 του θολομέτρου.

## 2.4.3 Κύκλωμα βαθυπερατού φίτρου

### 2.4.3.1 Εισαγωγή

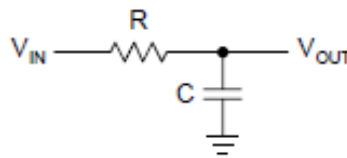
Με μία απλή ανάστροφη πόλωση του κυκλώματος των φωτοδιόδων προκύπτουν σφάλματα λόγω έντονης παρουσίας θορύβου και μεγαλύτερου σκοτεινού ρεύματος. Ένα απλό RC παθητικό βαθυπερατό φίλτρο ή ένα αντίστοιχο ενεργό, λειτουργώντας στις κατάλληλες συχνότητες, μπορεί να αφαιρέσει αρκετό από τον επιπρόσθετο θόρυβο λόγω πόλωσης.



Ένα απλό RC βαθυπερατό παθητικό φίλτρο (Εικόνα 2-27) έχει συνάρτηση μεταφοράς:

$$A(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{1}{1 + sRC} \quad \mu\epsilon \quad s = j\frac{\omega}{\omega_c} = j\frac{f}{f_c} \quad (2-26)$$

$f_c$  : κεντρική συχνότητα αποκοπής



Εικόνα 2-27: Βαθυπερατό παθητικό φίλτρο RC.

Η συνάρτηση μεταφοράς του παθητικού βαθυπερατού φίλτρου RC δεν παρέχει μεγάλη δυνατότητα βελτιστοποίησης εξαιτίας της έλλειψης σύνθετων πόλων. Η μόνη δυνατότητα παραγωγής σύζευξης σύνθετων πόλων, χρησιμοποιώντας μόνο παθητικά στοιχεία, είναι η κατασκευή φίλτρου LRC (πρόσθεση επαγωγής-πηνίου). Τα φίλτρα LRC χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων. Σε εφαρμογές χαμηλότερων συχνοτήτων ( $< 10\text{MHz}$ ) οι τιμές που θα πρέπει να πάρει η επαγωγή του πηνίου είναι πολύ μεγάλες και δεν συμφέρουν οικονομικά τον κατασκευαστή. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ενεργά βαθυπερατά φίλτρα που αποτελούνται από δίκτυα παθητικών στοιχείων (RC) συνδεδεμένα με ενεργά στοιχεία (τελεστικούς ενισχυτές).

#### 2.4.3.2 Ενεργό βαθυπερατό φίλτρο

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός ενεργού βαθυπερατού φίλτρου n-οστού βαθμού είναι :

$$A(s) = \frac{A_0}{\prod_i (1 + a_i s + b_i s^2)}, \quad i = 1 \dots n \quad (2-27)$$

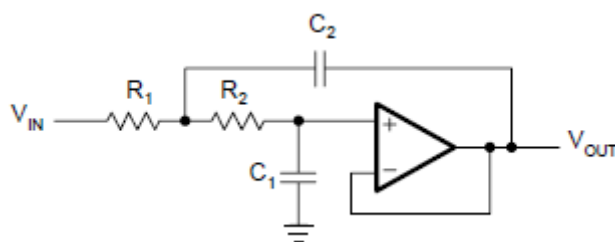
Οι παράμετροι,  $a_i$  και  $b_i$ , είναι υπολογισμένοι παράμετροι και η τιμή τους εξαρτάται από το είδος του ενεργού βαθυπερατού φίλτρου:

- Butterworth
- Tschebyscheff και
- Bessel

Το  $n$ , αντιπροσωπεύει την μείωση του σήματος μετά την κεντρική συχνότητα  $f_c$  ( $-n \times 20\text{dB}/\text{δεκάδα}$ ), ενώ τα  $a_i$  και  $b_i$  την συμπεριφορά του κέρδους στην ζώνη διέλευσης. Επιπλέον ο λόγος  $\frac{\sqrt{b_i}}{a_i} = Q$  ορίζεται σαν ποιότητα πόλου του φίλτρου. Όσο μεγαλύτερο είναι το  $Q$ , τόσο το φίλτρο οδεύει προς την αστάθεια.

### 2.4.3.3 Τοπολογία ενεργού βαθυπερατού φίλτρου

Η τοπολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των ενεργών βαθυπερατών φίλτρων, που θα τοποθετηθούν μετά το κύκλωμα των φωτοδιόδων, είναι η τοπολογία Sallen-Key μοναδιαίου κέρδους (Εικόνα 2-28). Η τοπολογία αυτή εφαρμόζεται συνήθως σε φίλτρα στα οποία απαιτείται υψηλή ακρίβεια, μοναδιαίο κέρδος και μικρός συντελεστής ποιότητας πόλων ( $Q < 3$ ). Στην συγκεκριμένη τοπολογία το ενεργό φίλτρο είναι δευτέρου βαθμού, κατάλληλο για τις απαιτήσεις του συστήματος του θολομέτρου.



**Εικόνα 2-28:** Τοπολογία Sallen-Key μοναδιαίου κέρδους 2<sup>ου</sup> βαθμού.

Η συνάρτηση μεταφοράς του παραπάνω φίλτρου είναι της μορφής :

$$A(s) = \frac{A_0}{(1+a_1s+b_1s^2)} \quad (2-28)$$

και δίνεται από την σχέση :

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \omega_c [C_1(R_1 + R_2) + (1 - A_0)R_1C_2]s + \omega_c^2 R_1R_2C_1C_2s^2}$$

&

$$A_0 = 1$$

Επομένως :

$$A(s) = \frac{1}{1 + \omega_c C_1(R_1 + R_2)s + \omega_c^2 R_1R_2C_1C_2s^2} \quad (2-29)$$

Η σύγκριση των παραμέτρων των εξισώσεων ((2-28),(2-29)) δίνει :

- $A_0 = 1$
- $a_1 = \omega_c C_1(R_1 + R_2)$
- $b_1 = \omega_c^2 R_1R_2C_1C_2$

Με γνωστές τις χωρητικότητες των πυκνωτών,  $C_1$  και  $C_2$ , οι τιμές των αντιστάσεων δίνονται από την σχέση :

$$R_{1,2} = \frac{a_1 C_2 \mp \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2}}{4\pi f_c C_1 C_2} \quad (2-30)$$

Έτσι ώστε να προκύψουν πραγματικές τιμές για τις αντιστάσεις, η χωρητικότητα του πυκνωτή  $C_2$ , για δοσμένη χωρητικότητα του πυκνωτή  $C_1$ , πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση :

$$C_2 \geq C_1 \frac{4b_1}{a_1^2} \quad (2-31)$$

#### 2.4.3.4 Ενεργά βαθυπερατά φίλτρα κυκλώματος θολομέτρου

Ο πιο κατάλληλος τύπος φίλτρων για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ο τύπος φίλτρων Bessel. Τα βαθυπερατά φίλτρα Bessel έχουν γραμμική απόκριση φάσης σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, που έχει σαν αποτέλεσμα μία σταθερή ομάδα υστέρησης σε αυτό το διάστημα. Επιπλέον, παρέχουν την πιο ικανοποιητική μετάδοση τετραγωνικών παλμών σε σχέση με τους άλλους τύπους φίλτρων, ιδιότητα σημαντική για την ακριβή λειτουργία του θολομέτρου.

Έτσι για την κατασκευή του θολομέτρου θα χρησιμοποιηθούν τελικά τρία ενεργά βαθυπερατά φίλτρα 2<sup>ου</sup> βαθμού τοπολογίας Sallen-Key μοναδιαίου κέρδους τύπου Bessel. Τα φίλτρα αυτά θα έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά : κέρδος  $A_0 = 1$  και κεντρική συχνότητα με τιμή  $f_c = 100\text{KHz}$  πάνω από την οποία μηδενίζονται όλες οι επιπλέον αρμονικές οι οποίες δημιουργούν παράσιτο θόρυβο. Επομένως αφού τα φίλτρα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά θα είναι ισοδύναμα μεταξύ τους και ο υπολογισμός των παραμέτρων του ενός αρκεί για να προσδιοριστούν και οι παράμετροι των υπόλοιπων. Παρακάτω παρουσιάζεται ο υπολογισμός των παραμέτρων των φίλτρων αυτών. Σαν ενισχυτή χρησιμοποιήσαμε πάλι τον διπλό, τεχνολογίας CMOS, ενισχυτή ακριβείας LMC 6082 AIN.

Οι παράμετροι,  $a_i$  και  $b_i$ , για ένα βαθυπρατό φίλτρο Bessel 2<sup>ου</sup> βαθμού έχουν τιμές :

$$a_i = 1.3617$$

$$b_i = 0.618$$

Επίσης :

$$A_0 = 1$$

$$f_c = 100\text{KHz} \Rightarrow \omega_c = 2\pi f_c$$

Επιλέγοντας τιμή για την χωρητικότητα του  $C_1 = 1,2\text{nF}$  (χωρητικότητα κεραμικού πυκνωτή που υπάρχει στο εμπόριο) και σύμφωνα με την σχέση (2-31), η χωρητικότητα του πυκνωτή  $C_2$  έχει τιμή :

$$C_2 \geq C_1 \frac{4b_1}{a_1^2} \Leftrightarrow$$

$$C_2 \geq 1,5998\text{nF}$$

$$C_2 = 1,8\text{nF}$$

Η λογική της συγκεκριμένης επιλογής έγκειται στο γεγονός ότι η χωρητικότητα 1,8 nF είναι η αμέσως μεγαλύτερη τιμή χωρητικότητας από την 1,5998 nF κεραμικού πυκνωτή που υπάρχει στο εμπόριο.

Έχοντας γνωστές και τις τιμές των χωρητικοτήτων των πυκνωτών υπολογίζονται και οι αντίστοιχες τιμές των αντιστάσεων σύμφωνα με την σχέση (2-30) :

$$R_{1,2} = \frac{a_1 C_2 \mp \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2}}{4\pi f_c C_1 C_2} \Leftrightarrow$$

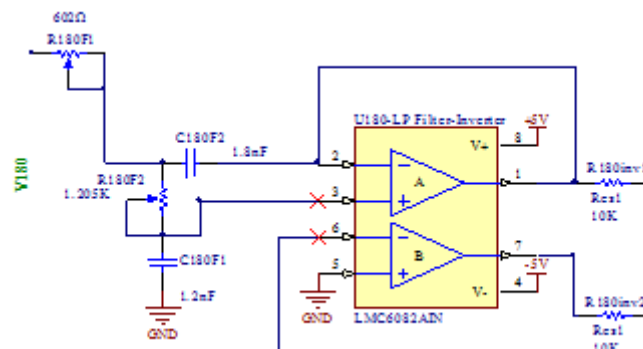
$$R_1 = 602.16\Omega \text{ και } R_2 = 1204.76\Omega \Leftrightarrow$$

$$R_1 = 0,602K\Omega \text{ και } R_2 = 1,205K\Omega$$

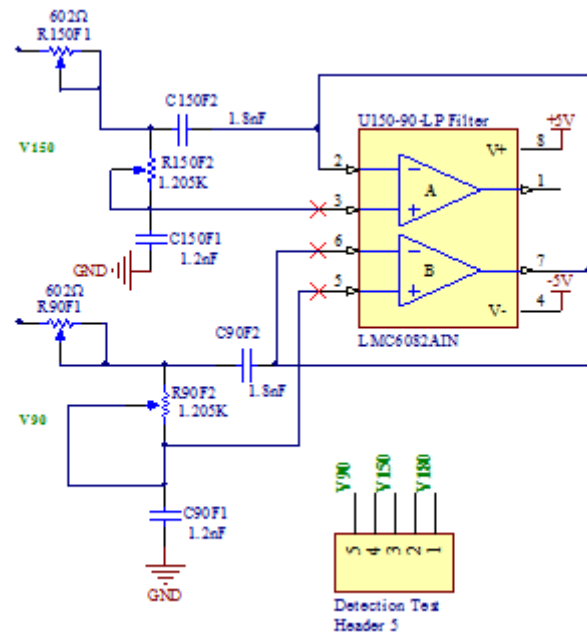
Για τον συντελεστή ποιότητας του φίλτρου ισχύει :

$$Q = \frac{\sqrt{b_1}}{a_1} = 0.58$$

Το αντίστοιχο σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος των βαθυπερατών φίλτρων του θολομέτρου φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 2-29 - Εικόνα 2-30) :



**Εικόνα 2-29:** Βαθυπερατό φίλτρο 2<sup>ου</sup> βαθμού τοπολογίας Sallen-Key μοναδιαίου κέρδους τύπου Bessel που σαν είσοδο έχει την έξοδο του κυκλώματος φωτοδιόδου που βρίσκεται σε γωνία 180<sup>ο</sup> σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία (D180).



**Εικόνα 2-30:** Βαθυπερατά φίλτρα 2<sup>ου</sup> βαθμού τοπολογίας Sallen-Key μοναδιαίου κέρδους τύπου Bessel που σαν είσοδο έχουν την έξοδο του κυκλώματος φωτοδίοδου D150 και D90 αντίστοιχα.

## 2.4.4 Τελικό στάδιο διόρθωσης σήματος

### 2.4.4.1 Εισαγωγή

Ύστερα και από το στάδιο του φιλτραρίσματος, τα σήματα εξόδου των φωτοδίοδων είναι σχεδόν έτοιμα να εισέλθουν στον μικροελεγκτή έτσι ώστε να συνεχιστεί ο υπολογισμός της θολότητας πλέον αλγοριθμικά σύμφωνα με την σχέση (2-1).

Κατά την διάρκεια λειτουργίας του θολομέτρου το LED εκπέμπει συγκεκριμένη ένταση ακτινοβολίας ( $I_C = I_{LED} = 100mA$ ) η οποία προσπίπτει πάνω στο δείγμα (διάλυμα εντός του γυάλινου δοχείου) και διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι τρεις φωτοδίοδοι (D180, D150 και D90) διεγείρονται με αποτέλεσμα, μέσω του κυκλώματος φωτοδίοδων, να παράγονται αντίστοιχες τάσης της μορφής :

$$V_{180} = -I_{D180} \times R_{D180}$$

$$V_{150} = -I_{D150} \times R_{D150}$$

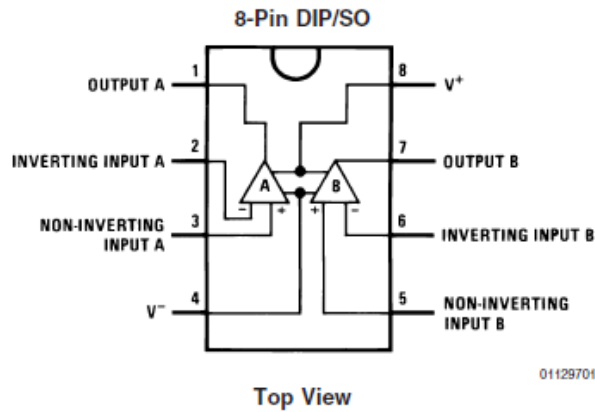
$$V_{90} = -I_{D90} \times R_{D90}$$

Λόγω της ανάστροφης πόλωσης των φωτοδιόδων, οι παραπάνω τάσεις έχουν αρνητικές τιμές με εύρος 0...(-5)V (όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο). Στην συνέχεια οι τάσεις αυτές εισέρχονται στο επόμενο στάδιο, στάδιο φιλτραρίσματος. Αφού τα ενεργά φίλτρα που υλοποιήθηκαν έχουν μοναδιαίο κέρδος οι τάσεις εισόδου  $V_{180}$ ,  $V_{150}$  και  $V_{90}$  θα παραμείνουν σχεδόν ανεπηρέαστες, ως προς το πλάτος και την φάση τους (θα υπάρχει βέβαια μείωση του θορύβου λόγω αποκοπής συχνοτήτων  $f \geq f_c = 100\text{KHz}$ ) με αποτέλεσμα να διατηρήσουν αρνητική τιμή.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο μικροελεκτης έχει την δυνατότητα να αναγνωρίζει αναλογικές τάσεις με τιμές 0 ...  $V_{dd}$  (στην περίπτωση μας  $V_{dd} = 5V$ ), επομένως οι τάσεις  $V_{180}$ ,  $V_{150}$  και  $V_{90}$ , πριν φτάσουν στον μικροελεκτη θα πρέπει να υποστούν αντιστροφή φάσης και να πάρουν θετικές τιμές. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία τριών κυκλωμάτων αντιστροφής, ένα για κάθε τάση, με την χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή σε αναστρέφουσα λειτουργία. Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά του ενισχυτή που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και τα κυκλώματα αντιστροφής για κάθε τάση ξεχωριστά.

#### 2.4.4.2 Επιλογή τελεστικού ενισχυτή

Για το στάδιο αντιστροφής θα χρησιμοποιηθεί πάλι ο διπλός, τεχνολογίας CMOS, ενισχυτής ακριβείας LMC 6082 AIN (Εικόνα 2-31). Στην παράγραφο αυτή παρέχεται η δυνατότητα να παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ενισχυτή που τον κάνουν τον πλέον κατάλληλο ενισχυτή για τα βασικότερα στάδια λειτουργίας του θολομέτρου καθώς, εκτός από τα κυκλώματα αντιστροφής, έχει επιλεχθεί σαν ενισχυτής και για τα κυκλώματα φωτοδιόδων και για τα αντίστοιχα κυκλώματα των φίλτρων. Κάποια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του ενισχυτή LMC 6082AIN παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-4).



Εικόνα 2-31: Ενισχυτής LMC 6082AIN.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Τάση τροφοδοσίας	$V_+ - V_-$	16	V
Τάση απόκλισης εισόδου	$V_{OS}$	150	$\mu V$
Ρεύμα πόλωσης εισόδου	$I_B$	0.010	pA
Ρεύμα απόκλισης εισόδου	$I_{OS}$	0.005	pA
Αντίσταση εισόδου	$R_{IN}$	>10	Tera $\Omega$
Ταλάντωση τάσης εξόδου με $V_+ = +5V, V_- = -5V$	$V_O$	(-5)...(+5), rail-to-rail	V
Ρεύμα εξόδου	$I_O$	30	mA
Εύρος ζώνης κέρδους	<b>GBW</b>	1.3	MHz
Χρόνος απόκρισης	<b>SR</b>	1.5	V/ $\mu s$

Πίνακας 2-4: Πίνακας χαρακτηριστικών του ενισχυτή LMC 6082AIN σε θερμοκρασία  $T_j=25^\circ C$ .

Ο LMC 6082 AIN είναι ένας διπλός, τεχνολογίας CMOS τελεστικός ενισχυτής ακριβείας και λειτουργεί με απλή ή διπλή τροφοδοσία μέγιστης διαφοράς τάσης στα 16V. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά, που αφορούν την απόδοση του, είναι το πολύ χαμηλό ρεύμα πόλωσης εισόδου (στα 0,010 pA), το υψηλό κέρδος τάσης που εξασφαλίζει, η rail-to-rail ταλάντωση της τάσης εξόδου, το πολύ χαμηλό ρεύμα απόκλισης εισόδου (0,005pA) και η πολύ χαμηλή τάση απόκλισης εισόδου (150 $\mu V$ ). Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τον LMC 6082 AIN τον κατάλληλο ενισχυτή για εφαρμογές ακρίβειας, όπως :

- Ενισχυτών οργάνων



- Συστημάτων λήψης ακτινοβολίας (φωτοδιόδων και δεκτών υπέρυθρης ακτινοβολίας)
- Για ενισχυτές μετατροπής σήματος

Σύμφωνα με τα παραπάνω, φαίνεται πόσο σημαντικό ρόλο παίζει ο συγκεκριμένος ενισχυτής για την αποτελεσματική λειτουργία του θολομέτρου. Τοποθετείται σε όλα τα επιμέρους κυκλώματα που αφορούν την λήψη και ποσοτικοποίηση της ακτινοβολίας (κύκλωμα φωτοδιόδων) και την μεταφορά του σήματος για την ψηφιακή του επεξεργασία.

#### Κύκλωμα φωτοδιόδων

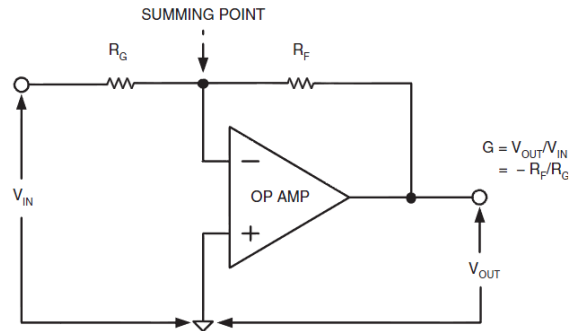
Ο LMC 6082 AIN έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου και στην είσοδο του μπορεί να αντιληφθεί πολύ μικρά ρεύματα με αποτέλεσμα να είναι ιδανικός σαν ενισχυτής μετατροπής ρεύματος σε τάση (current to voltage converter), ενός ρεύματος που προέρχεται από την διέγερση της φωτοδιόδου. Επομένως είναι ικανός να αντιληφθεί και πολύ μικρές εντάσεις ακτινοβολίας που μπορεί να πιάσει η φωτοδίοδος.

#### Κύκλωμα ενεργού φίλτρου και αντιστροφής

Ο LMC 6082 AIN έχει πολύ μικρή τάση απόκλισης εισόδου, στοιχείο που επιτρέπει και στην συνδεσμολογία των φίλτρων και στην συνδεσμολογία των αντιστροφέων την αντίληψη και ενίσχυση πολύ μικρών σημάτων (της τάξης των 150μV) μεγάλωνοντας έτσι το εύρος σημάτων εξόδου που συνεπάγεται και αύξηση του εύρους μετρήσιμων τιμών του θολομέτρου.

### **2.4.4.3 Κυκλώματα αντιστροφής κι ενίσχυσης των σημάτων των φωτοδιόδων**

Για τα κυκλώματα αντιστροφής θα χρησιμοποιηθεί ο ενισχυτής LMC 6082 AIN σε μία απλή ανάστροφη συνδεσμολογία ενίσχυσης σήματος όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 2-32: Κύκλωμα ανάστροφης συνδεσμολογίας τελεστικού ενισχυτή.).



**Εικόνα 2-32:** Κύκλωμα ανάστροφης συνδεσμολογίας τελεστικού ενισχυτή.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, το κέρδος τάσης του ενισχυτή για μία τάση εισόδου  $V_{in}$  είναι :

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_F}{R_G}$$

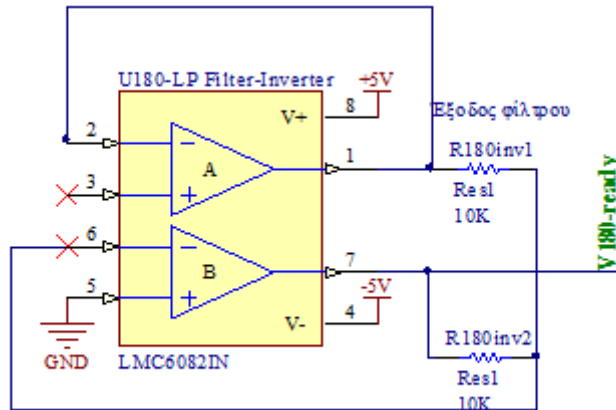
Όπου  $V_{out}$ , η τάση εξόδου ενισχυμένη κατά G και ανεστραμμένη σε σχέση με την τάση εισόδου (η τάση εξόδου έχει διαφορά φάσης  $180^\circ$  σε σχέση με την τάση εισόδου). Με  $R_F = R_G$  επιτυγχάνεται μόνο αντιστροφή της τάσης εισόδου.

Τα κυκλώματα αντιστροφής των φωτοдиодων D180, D150 και D90 δεν είναι ισοδύναμα γι' αυτό παρακάτω θα μελετηθούν ξεχωριστά.

#### Κύκλωμα αντιστροφής φωτοδιόδου D180

Για την φωτοδιόδο D180 κατασκευάστηκε ένα απλό κύκλωμα αντιστροφής με  $R_{180inv1} = R_{180inv2} = 10K\Omega$  και τοποθετήθηκε ακριβώς μετά το αντίστοιχο ενεργό βαθυπερατό φίλτρο. Το παρακάτω σχηματικό είναι αντιπροσωπευτικό (Εικόνα 2-33: Κύκλωμα αντιστροφής για την φωτοδιόδο D180.) :

$$V_{180-ready} = -V_{180}$$



**Εικόνα 2-33:** Κύκλωμα αντιστροφής για την φωτοδίοδο D180.

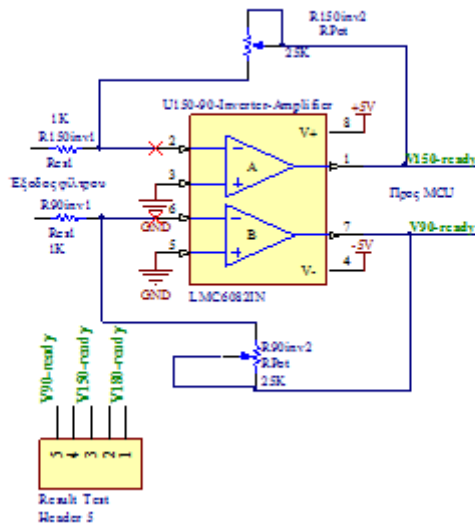
Κύκλωμα αντιστροφής φωτοδιόδων D150 και D90

Για τον υπολογισμό του εύρους τιμών τάσεως που παράγει η κάθε φωτοδίοδος πριν το στάδιο της επεξεργασίας πραγματοποιήθηκαν κάποια πειράματα στο εργαστήριο μετρώντας την θολότητα διαφορετικών διαλυμάτων του νερού με φρέσκο γάλα.

Σύμφωνα με τα πειράματα, η τιμή της τάσης που παράγεται από την φωτοδίοδο D180 κυμαίνεται μεταξύ 50mV...4950mV. Η τιμή της τάσης που παράγει η φωτοδίοδος D150 κυμαίνεται περίπου μεταξύ 20mV...200mV, ενώ η αντίστοιχη τιμή της D90 κυμαίνεται μεταξύ 10mV...100mV.

Όπως φαίνεται οι φωτοδιόδοι D150 και D90 παράγουν τιμές τάσης με εύρος πολύ μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο εύρος που παράγει η D180. Από την άλλη πλευρά, η διακριτική ικανότητα του μικροελεγκτή περιορίζεται αρκετά σε περιπτώσεις χαμηλού αναλογικού σήματος. Υπάρχει δηλαδή πιθανότητα ο μικροελεγκτής να μην «βλέπει» το αναλογικό σήμα που παράγουν οι φωτοδιόδοι D150 και D90 επειδή έχει πολύ μικρή τιμή (λίγα mV). Επομένως είναι απαραίτητη μία επιπλέον ενίσχυση του σήματος των δύο φωτοδιόδων, πριν το στάδιο επεξεργασίας (μικροελεγκτής). Η ενίσχυση αυτή θα αφαιρεθεί αλγοριθμικά μέσα στον κώδικα του μικροελεγκτή έτσι ώστε να μπορούν τα αποτελέσματα των δύο αυτών φωτοδιόδων να συσχετιστούν με το αποτέλεσμα της φωτοδίοδου D180 και να υπολογιστεί χωρίς περαιτέρω σφάλματα η θολότητα.

Για τις φωτοδιόδους D150 και D90 κατασκευάστηκε ένα απλό κύκλωμα αντιστροφής-ενίσχυσης με  $R_{150inv1} = R_{90inv1} = 1K\Omega$  και  $R_{150inv2} = R_{90inv2} = 25K\Omega$  και τοποθετήθηκε ακριβώς μετά το αντίστοιχο ενεργό βαθυπερατό φίλτρο. Το παρακάτω σχηματικό είναι αντιπροσωπευτικό (Εικόνα 2-34: Κύκλωμα αντιστροφής-ενίσχυσης για τις φωτοδιόδους D150 και D90.) :



Εικόνα 2-34: Κύκλωμα αντιστροφής-ενίσχυσης για τις φωτοδιόδους D150 και D90.

Πλέον, οι τάσεις έχουν αντιστραφεί και ενισχυθεί κατά 25:

$$V_{150-ready} = -25V_{150}$$

$$V_{90-ready} = -25V_{90}$$

## 2.4.5 Τροφοδοσία κυκλώματος θολομέτρου

Η τροφοδοσία που απαιτείται για τα επιμέρους κυκλώματα που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-5).

Επιμέρους κύκλωμα	Αντίστοιχη Τροφοδοσία
Τάση τροφοδοσίας του τρανζίστορ 2N2222A, οδήγησης του LED SFH-480.	$V_{CC} = 15V$
Ανάστροφη τάση πόλωσης των φωτοδίοδων SFH-213 στο κύκλωμα των φωτοδεκτών.	$V_R = 15V$
Διπλή τάση τροφοδοσίας των (5) ενισχυτών LMC 6082 AIN	$V_+ = 5V$ & $V_- = -5V$

Τάση τροφοδοσίας του μικροελεγκτή (MCU) PIC16F883	$V_{dd}=5V$
Τάση τροφοδοσίας του LCD DISPLAY	$V_{dd} = 5V$
Τάση τροφοδοσίας του debugger Pickit 3	$V_{dd} = 5V$

**Πίνακας 2-5:** Τροφοδοσία επιμέρους κυκλωμάτων.

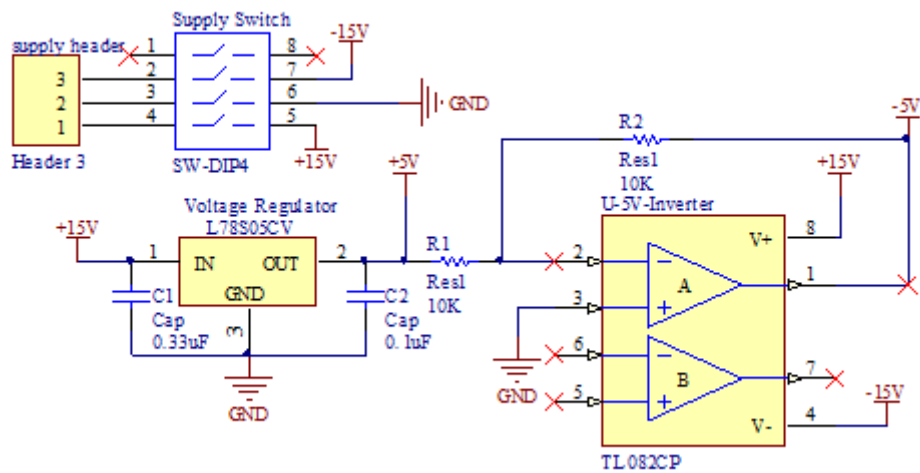
Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η μέγιστη τροφοδοσία που απαιτείται είναι +15V dc τάση, επομένως χρειαζόμαστε ένα τροφοδοτικό που να μπορεί να παρέχει στο κύκλωμα +15V σταθερή τάση. Για να επιτύχουμε τροφοδοσία +5V χρησιμοποιούμε έναν ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) L78S05 ο οποίος μειώνει την τάση +15V σε σταθερή τάση +5V (Εικόνα 2-35: Ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) L78S05.).



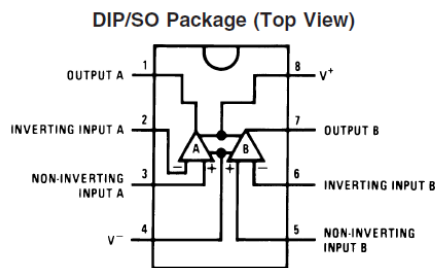
**Εικόνα 2-35:** Ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) L78S05.

Τέλος απαιτείται σταθερή τάση τροφοδοσίας -5V για την αρνητική τροφοδοσία του κάθε τελεστικού ενισχυτή LMC 6082 AIN. Για την παραγωγή της τάσης αυτής χρησιμοποιούμε έναν αντιστροφέα στην έξοδο του ρυθμιστή τάσης (+5V). Ο αντιστροφέας αποτελείται από ένα τελεστικό ενισχυτή TL082CP (Εικόνα 2-37: **Τελεστικός ενισχυτής TL082CP.**) ο οποίος τροφοδοτείται από τάσεις +15V και -15V με τιμές αντιστάσεων στην ανάστροφη συνδεσμολογία ίσες με  $10K\Omega$  ( $R_1 = R_2 = 10K\Omega$ ). Προτιμήθηκε από τον ενισχυτή LMC 6082AIN κυρίως λόγω κόστους, αφού η συγκεκριμένη εφαρμογή δεν απαιτεί μεγάλη ακρίβεια.

Το τελικό κύκλωμα τροφοδοσίας του θολομέτρου φαίνεται στο παρακάτω σχηματικό :



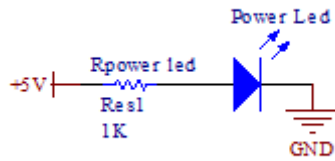
Εικόνα 2-36: Τελικό κύκλωμα τροφοδοσίας.



Εικόνα 2-37: Τελεστικός ενισχυτής TL082CP.

Τέλος, για την ένδειξη λειτουργίας του κυκλώματος του θολομέτρου, έχει τοποθετηθεί ένα LED κόκκινου χρώματος (Εικόνα 2-38). Η τάση αγωγής του LED είναι 2,1V. Τροφοδοτώντας το με μία τάση 5V και οδηγώντας το με μία αντίσταση 1KΩ, διαρρέεται από ρεύμα ικανό έτσι ώστε να ακτινοβολεί το LED και να μην καταναλώνεται πολύ ισχύς :

$$I_{power\ led} = \frac{5 - 2.1V}{R_{power\ led}} = \frac{2.9V}{1K\Omega} = 2,9mA$$



**Εικόνα 2-38:** Ένδειξη λειτουργίας του κυκλώματος.

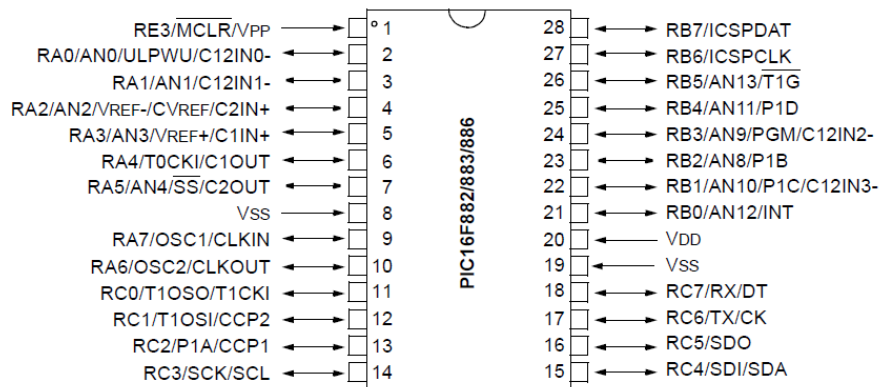
## 2.5 Σχεδίαση ψηφιακού κυκλώματος θολομέτρου

### 2.5.1 Κύκλωμα του μικροελεγκτή (MCU)

Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής PIC 16F882 της Microchip (Εικόνα 2-39), κάποια γενικά χαρακτηριστικά του οποίου είναι :

- Συνολικός αριθμός ακροδεκτών 28
- Τροφοδοσία  $V_{dd} = 5V$
- Μέγεθος μνήμης εντολών προγράμματος, 2048 λέξεις (words)
- Μνήμη δεδομένων, 256 Bytes
- 24 ακροδέκτες εισόδου-εξόδου- 3 καταχωρητές των 8bits
- 11 κανάλια που οδηγούν σε μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (analog to digital converter-ADC ) ακρίβειας 10-bit
- Εσωτερική συχνότητα λειτουργίας έως και 8 MHz

## 28-pin PDIP, SOIC, SSOP



Εικόνα 2-39: Διάγραμμα ακροδεκτών του μικροελεγκτή PIC 16F882.

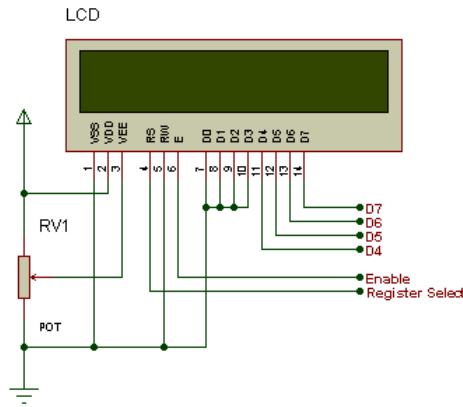
Μέσω των ακροδεκτών RA1/AN1, RA2/AN2 και RA3/AN3 του καταχωρητή A (PORTA) εισέρχονται στον μικροελεγκτή τα, έτοιμα προς ψηφιοποίηση, αναλογικά σήματα των φωτοδιόδων D180, D150 και D90 αντίστοιχα. Τα κανάλια αυτά οδηγούν τα αναλογικά σήματα στον επεξεργαστή, όπου ξεκινά η ψηφιοποίηση τους στον ADC με σκοπό την επεξεργασία τους. Πριν από τους τρεις συγκεκριμένους ακροδέκτες μπορούν προαιρετικά να τοποθετηθούν παθητικά βαθυπερατά φίλτρα, κεντρικής συχνότητας 1MHz, σε περίπτωση που τα τελικά αναλογικά σήματα διανύσουν μεγάλη απόσταση (μεγάλο μήκος αγωγού) μέχρι να φτάσουν στον μικροελεγκτή.

Ο ακροδέκτης RA5/AN4 του καταχωρητή A ορίζεται σαν ψηφιακή έξοδος και τροφοδοτεί το κύκλωμα βάσης του τρανζίστορ που είναι υπεύθυνο για την οδήγηση του IR LED. Η έξοδος αυτή παίρνει τιμές 0V και 5V, με μία συχνότητα που καθορίζεται αλγοριθμικά εντός του μικροελεγκτή, αναβοσβήνοντας το IR LED.

## 2.5.2 Κύκλωμα οθόνης υγρών κρυστάλλων (LCD Display)

Μία οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) συνδέεται με τον μικροελεγκτή έτσι ώστε να απεικονίζει τη μετρούμενη τιμή της θολότητας που προκύπτει από την επεξεργασία του μικροελεγκτή. Η LCD οθόνη (Εικόνα 2-40) λειτουργεί με επεξεργαστή της HITACHI HD44780, έχει μέγεθος 16 χαρακτήρων και 2 γραμμών και αποτελείται από 16 ακροδέκτες.





**Εικόνα 2-40:** Οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD).

Τα κυκλωματικά χαρακτηριστικά της οθόνης LCD είναι τα εξής :

- Τάση τροφοδοσίας  $V_{dd} = 5V$  και  $V_{ss} = 0V$
- Η μεταφορά δεδομένων προς και από τον μικροελεγκτή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους : ανά 8 (σύνολο ακροδεκτών δεδομένων) και ανά 4 που προτιμάται γιατί απαιτούνται λιγότερες συνδέσεις.
- Ο ακροδέκτης R/W ελέγχει αν ο μικροελεγκτής διαβάζει ή γράφει στην οθόνη (όταν  $R/W=0$  τότε ο μικροελεγκτής γράφει στην οθόνη)
- Ο ακροδέκτης RS (register select) ρυθμίζει αν τα δεδομένα που στέλνονται στην οθόνη είναι εντολές ή δεδομένα προς απεικόνιση. ( $RS=0$  – εντολή ,  $RS=1$  – δεδομένα)
- Ο ακροδέκτης E έχει την ιδιότητα όταν από την τιμή 1 πάει στην τιμή 0 να εκτελείται μία διεργασία εντολής ή απεικόνισης.

Οι παραπάνω ακροδέκτες της οθόνης, εκτός της τροφοδοσίας και του ακροδέκτη R/W, συνδέονται απευθείας με τους έξι πρώτους ακροδέκτες του καταχωρητή B (PORTB) του μικροελεγκτή (RB0,RB1,RB2,RB3, RB4 και RB5).

### 2.5.3 Κύκλωμα αποσφαλματωτή (debugger)

Το κύκλωμα του debugger είναι πολύ σημαντικό για την λειτουργία του θολομέτρου. Επιτυγχάνει σύνδεση του μικροελεγκτή με ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή με την βοήθεια του οποίου ελέγχεται ανά πάσα στιγμή η λειτουργία του μικροελεγκτή. Ο debugger που χρησιμοποιείται είναι ο PICkit 3 της Microchip και είναι πλήρως συμβατός με τον μικροελεγκτή. Τοποθετούμε μία σειρά 6 ακροδεκτών

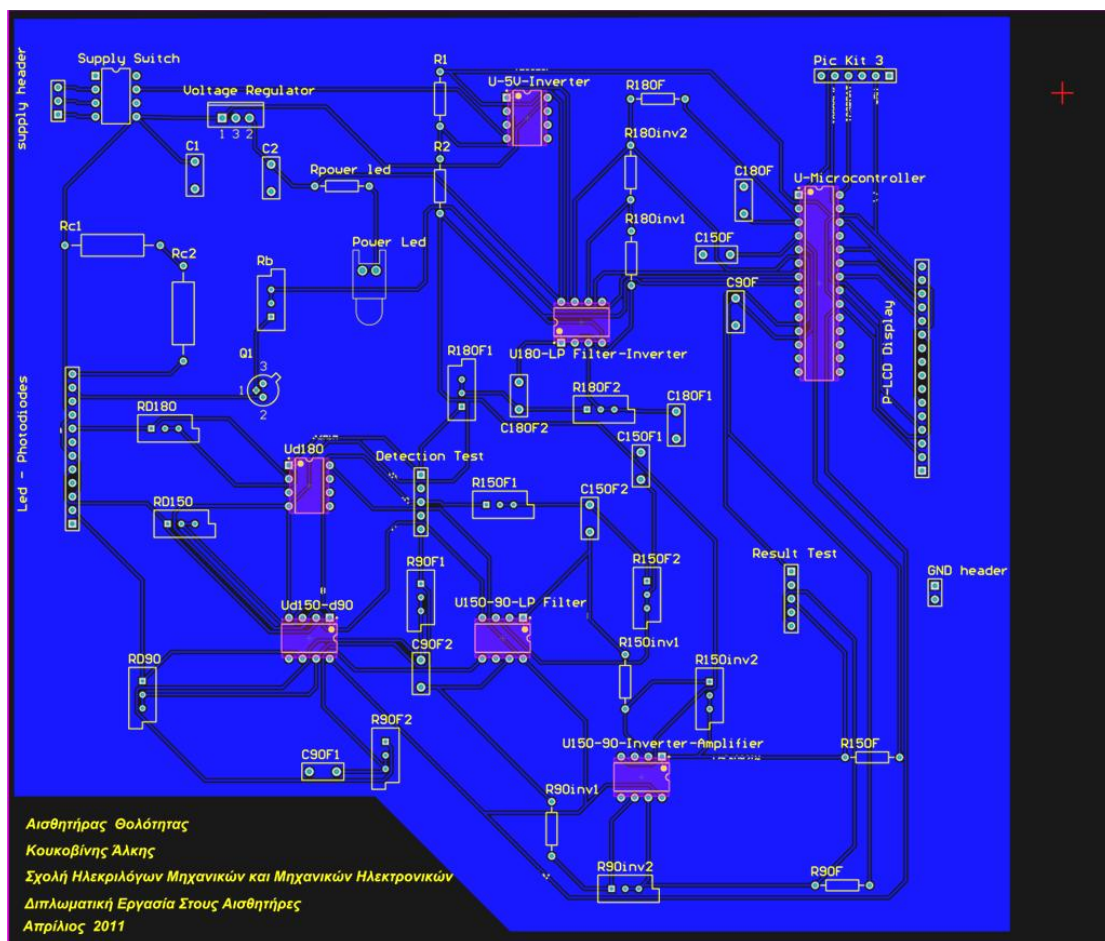


## **2.6 Τελικό κύκλωμα θολομέτρου**

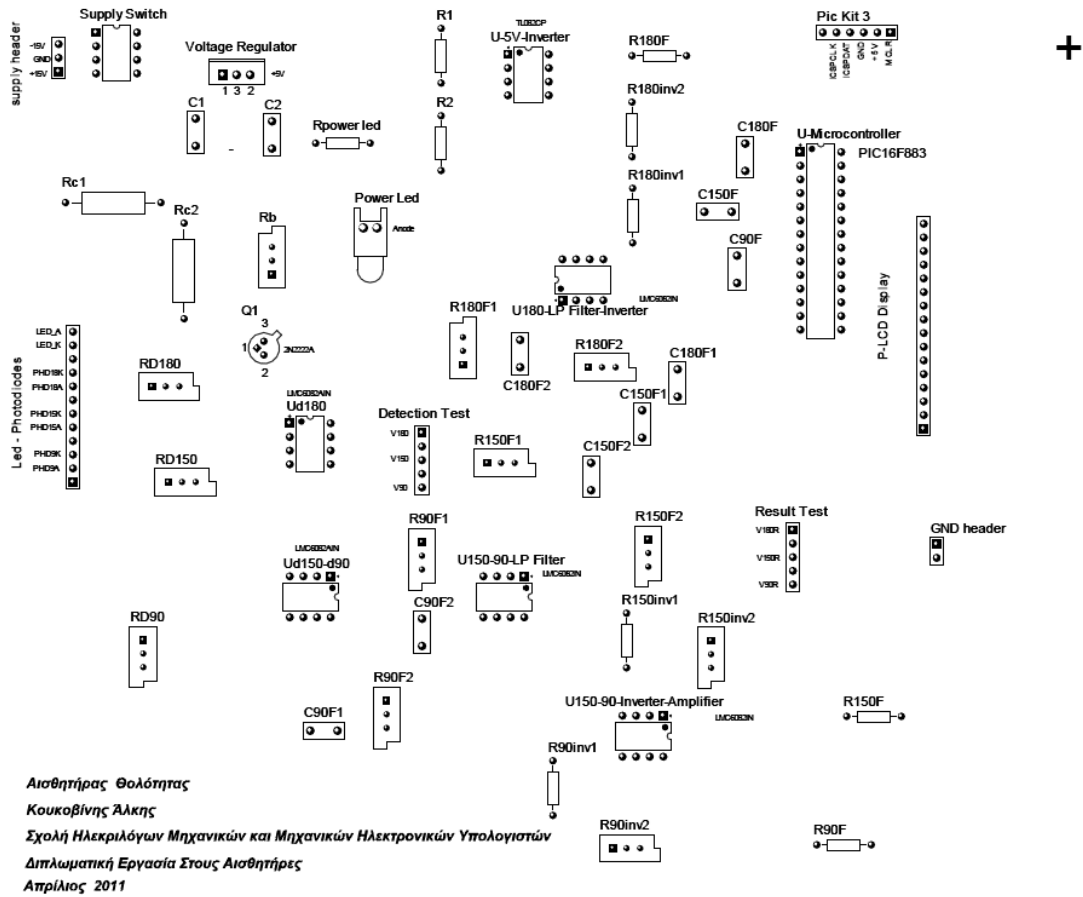
Το τελικό συνολικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε για την κατασκευή του θολομέτρου, σύμφωνα με τις μεθόδους λειτουργίας και σύνδεσης που περιγράφηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, φαίνεται στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα (Εικόνα 2-43).



Με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος Altium Designer, αφού σχεδιάστηκε το παραπάνω κύκλωμα, υλοποιήθηκε το προς τύπωση κύκλωμα (PCB-printed circuit board) θολομέτρου όπως φαίνεται στην εικόνα (Εικόνα 2-44). Πρόκειται για μία πλακέτα όπου όλα τα στοιχεία του κυκλώματος τοποθετήθηκαν στο πάνω μέρος της, διαμέσου οπών, κι όλοι οι αντίστοιχοι αγωγοί δρόμοι χαραχθήκαν στο κάτω μέρος της. Οι δύο μάσκες που χρησιμοποιήθηκαν τελικά για την τύπωση του κυκλώματος φαίνονται στις εικόνες (Εικόνα 2-45 - Εικόνα 2-46). Η μεγάλη έκταση της μαύρης περιοχής αποτελεί επιφάνεια γείωσης που τοποθετήθηκε με σκοπό την μείωση φαινομένων αστάθειας σήματος και θορύβου (crosstalk).

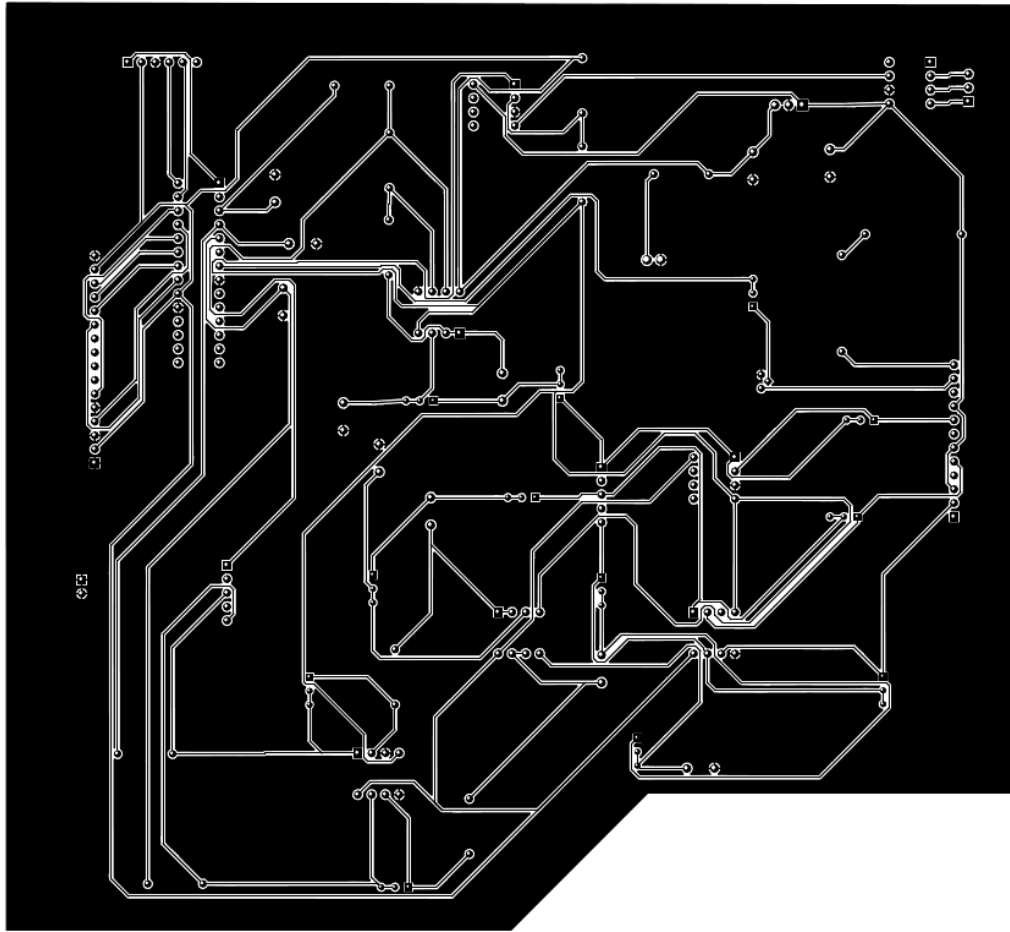


Εικόνα 2-44: Σχεδίαση τυπωμένου κυκλώματος.



**Εικόνα 2-45:** Μάσκα που χρησιμοποιήθηκε για την τύπωση της πάνω πλευράς του τυπωμένου κυκλώματος.

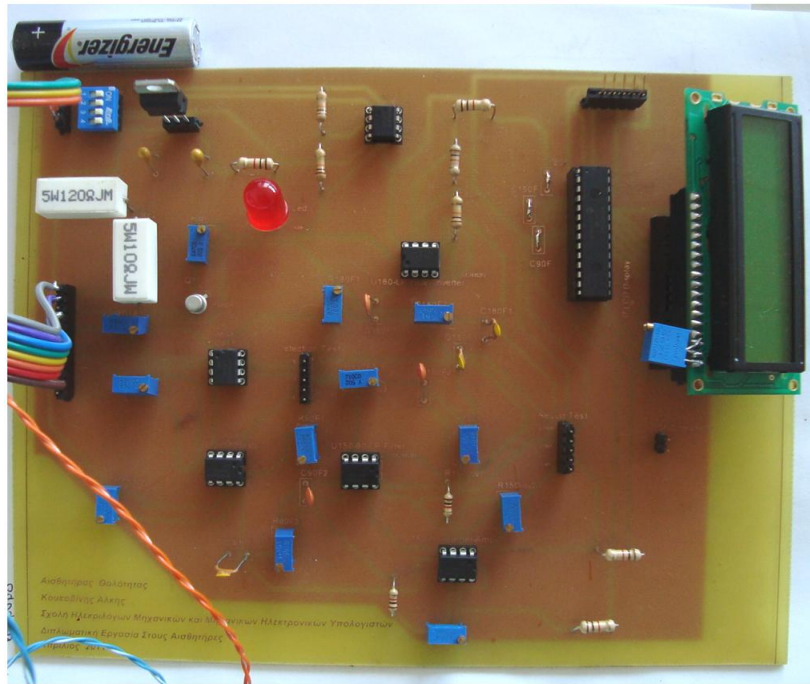
+



**Εικόνα 2-46:** Μάσκα που χρησιμοποιήθηκε για την τύπωση της κάτω πλευράς του τυπωμένου κυκλώματος.

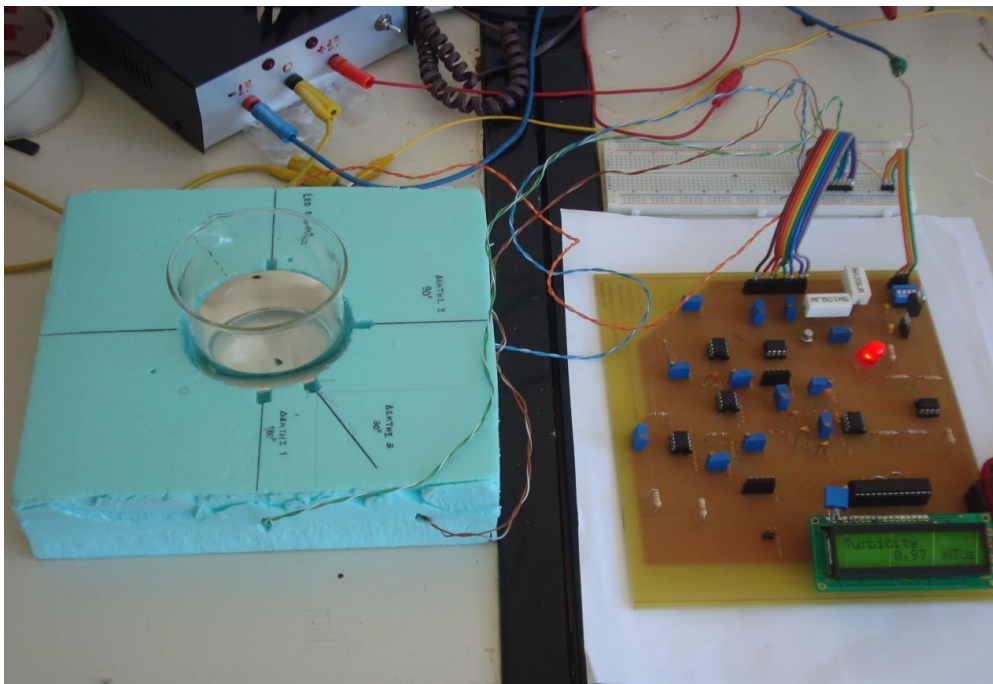
Μετά την διαδικασία της τύπωσης, την δημιουργία οπών και την τοποθέτηση των στοιχείων του κυκλώματος το τυποποιημένο κύκλωμα του θολομέτρου έχει την παρακάτω μορφή (Εικόνα 2-47). Στην ίδια εικόνα συγκρίνεται το μέγεθος του τυπωμένου κυκλώματος με το μέγεθος μίας μπαταρίας μεγέθους AA. Οι διαστάσεις της πλακέτας είναι 21cm × 17cm, υπάρχουν όμως πολλά περιθώρια ελαχιστοποίησης της επιφάνειας που καλύπτει το κύκλωμα.





**Εικόνα 2-47:** Τελικό τυπωμένο κύκλωμα θολομέτρου.

Τέλος το πλήρες σύστημα μέτρησης θολότητας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2-48).



**Εικόνα 2-48:** Πλήρες σύστημα αισθητήρα θολότητας – Θολόμετρο.



## 3 Βαθμονόμηση θολομέτρου

Η βαθμονόμηση ενός οργάνου μέτρησης αποτελεί μία από τις βασικότερες διαδικασίες που απαιτούνται για την υλοποίηση του. Με την βοήθεια της βαθμονόμησης το όργανο θα μπορεί να εκτελεί μετρήσεις με ακρίβεια και να συγκριθεί επάξια με τα ήδη υπάρχοντα όργανα που κυκλοφορούν στην αγορά. Επομένως η ικανοποιητική λειτουργία του θολομέτρου (αισθητήρα θολότητας) στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην σωστή βαθμονόμηση του.

Η βαθμονόμηση για τον αισθητήρα θολότητας, που κατασκευάστηκε, αποτελείται από δύο επιμέρους βαθμονομήσεις, την «κυκλωματική» και την «αλγοριθμική» βαθμονόμηση.

### 3.1 Κυκλωματική βαθμονόμηση

Κυκλωματικά, η βαθμονόμηση του θολομέτρου έχει άμεση σχέση με τις τάσεις που παράγουν οι διεγερόμενες φωτοдиодοι. Όπως αναφέρθηκε όταν παρουσιάστηκε το κύκλωμα φωτοδιόδων, η τιμή της αντίστασης που μετατρέπει το ρεύμα διέγερσης των φωτοδιόδων σε τάση πρέπει να είναι συγκεκριμένη. Η τιμή αυτή ορίστηκε στα  $65\text{ K}\Omega$  ( $R_{D180} = R_{D150} = R_{D90} = 64,5\text{ K}\Omega$ ) με βασικό γνώμονα την φωτοδιόδο D180 που βρίσκεται ακριβώς απέναντι από το IR LED εκπομπής. Σε πλήρως καθαρό νερό η ακτινοβολία που προσπίπτει στην φωτοδιόδο εξασθένησης D180 θα πρέπει να είναι η μέγιστη που μπορεί να ανιχνευθεί, αφού η ακτινοβολία διαπερνά το δείγμα πραγματοποιώντας ελάχιστες διαχύσεις. Η μέγιστη τάση που μπορεί να ανιχνευθεί από το ψηφιακό κύκλωμα είναι 5V. Επομένως η αντίσταση  $R_{D180}$  ρυθμίστηκε με σκοπό η μέγιστη ακτινοβολία που προσπίπτει στην φωτοδιόδο D180 να παράγει στην έξοδο την μέγιστη τάση ανίχνευσης, 5V.

### 3.2 Αλγοριθμική βαθμονόμηση

Αλγοριθμικά η βαθμονόμηση έχει άμεση σχέση με την εκτέλεση πειραμάτων με σκοπό την επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες μέτρησης από έτοιμα όργανα μέτρησης που είναι κοινώς αποδεκτά.

Το θολόμετρο που υλοποιήθηκε υπολογίζει την θολότητα σύμφωνα με την σχέση (2-1) :

$$T_{ratio} = \frac{V_{90}}{a_1 V_{180} + a_2 V_{150}}$$

Επομένως εκτελώντας συγκεκριμένα πειράματα για διάφορα διαλύματα υπολογίζονται οι τάσεις των φωτοδίοων V180, V150 και V90.

Αν χρησιμοποιηθεί ένα θολόμετρο εμπορίου αντιστοιχίζονται οι τιμές της πραγματικής θολότητας με τις τάσεις αυτές κι έτσι υπολογίζονται οι παράμετροι  $a_1$  και  $a_2$ . Τα  $a_1$  και  $a_2$  μπορεί είτε να είναι σταθερά σε όλο το εύρος μετρήσεων του θολομέτρου είτε μπορεί να διαφοροποιούνται αν χωρίσουμε το όλον εύρος μετρήσεων σε επιμέρους διαστήματα, γεγονός που προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα στις μετρήσεις. Επίσης, υπάρχουν στην αγορά πρότυπες ουσίες, οι οποίες διαλυμένες στο νερό σε συγκεκριμένες αναλογίες προκαλούν ελεγχόμενη θολότητα, τιμής κοινώς αποδεκτής. Τέτοιες ουσίες είναι η φορμαζίνη και κάποια παράγωγα της, οι οποίες, εκτός από επιπλέον κόστος, απαιτούν κατάλληλες συνθήκες επεξεργασίας και περιβάλλοντος, λόγω κυρίως της τοξικότητάς τους, που πιθανότητα μπορούν να παρέχονται μόνο σε χημικά εργαστήρια.

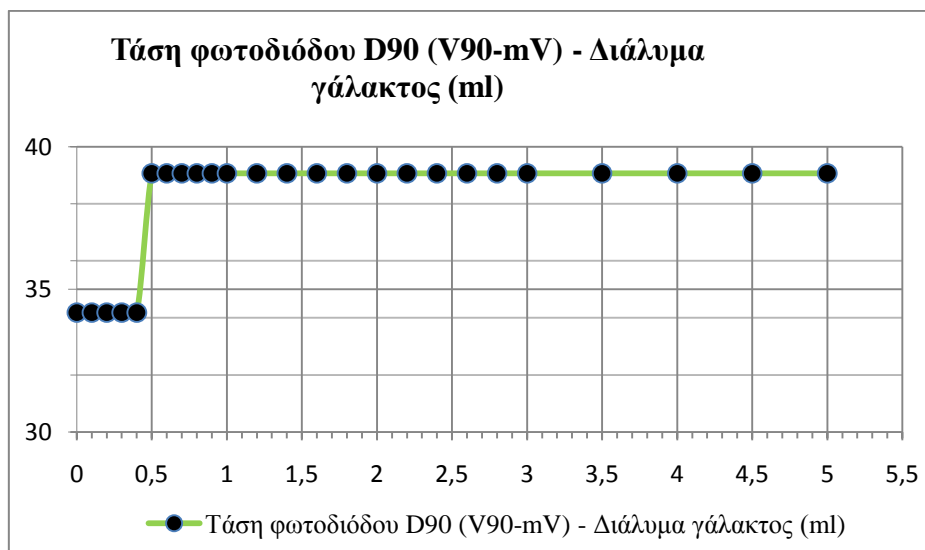
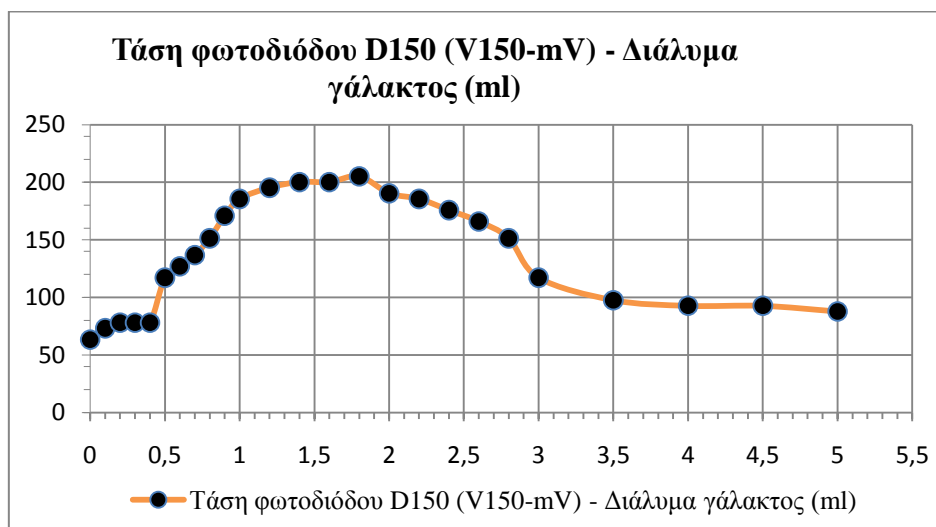
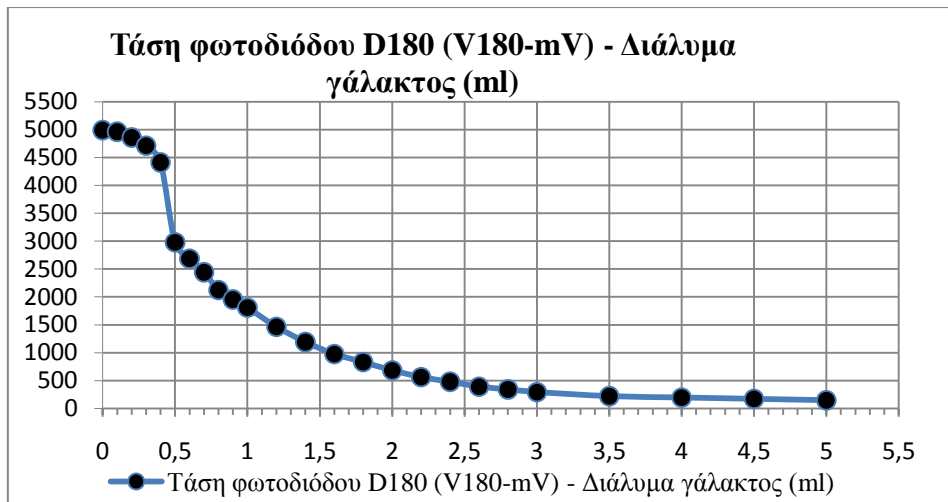
Στην περίπτωση της βαθμονόμησης του παρόντος θολομέτρου, δεν υπήρξε η δυνατότητα χρήσης θολομέτρου του εμπορίου όπως επίσης και πρότυπων ουσιών θολότητας με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί σχετική βαθμονόμηση. Σε αυτήν τη μορφή της βαθμονόμησης διαμορφώνεται μία σχετική κλίμακα θολότητας όπου φυσική σημασία έχουν κυρίως οι μεταβολές της θολότητας από δείγμα σε δείγμα και όχι τόσο οι απόλυτες τιμές της. Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης αυτής χρησιμοποιήθηκε ένα διάλυμα νερού με σταδιακή εναπόθεση γάλακτος. Καθώς προστίθεται όλο και περισσότερο γάλα οι τιμές των τάσεων των φωτοδίοων μεταβάλλονται και η θολότητα αυξάνεται.

Αρχικά διαλύουμε 25ml φρέσκου γάλακτος με 3,5% λιπαρά σε 100ml καθαρού νερού (διάλυμα γάλακτος). Στην συνέχεια προσθέτουμε σε καθαρό νερό ποσότητες αυτού του διαλύματος (διάλυμα δείγματος) με διάφορα βήματα μέχρι το σημείο όπου το θολόμετρο σταματά να ανταποκρίνεται (οι τάσεις διέγερσης πλέον να μην μεταβάλλονται). Επί της ουσίας αφού θεωρήσουμε ότι το προστιθέμενο διάλυμα γάλακτος είναι ομοιογενές, το  $\frac{1}{4}$  της ποσότητας του που βρίσκεται κάθε φορά στο διάλυμα δείγματος αντιστοιχεί σε ποσότητα καθαρού γάλακτος που βρίσκεται στο δείγμα. Παρακάτω ακολουθεί πίνακας προσεγγιστικών μετρήσεων των τάσεων διέγερσης που προέκυψαν από τις διαδοχικές διαλύσεις, οι οποίες επαναλήφθηκαν αρκετές φορές (Πίνακας 3-1).

Διάλυμα δείγματος	V180 (mV)	V150 (mV)	V90 (mV)
Απιονισμένο νερό	4990,234375	63,4765625	34,1796875
Νερό βρύσης	4980,46875	68,359375	34,1796875
0,1ml (+0,1ml)	4960,9375	73,2421875	34,1796875
0,2 ml	4858,398438	78,125	34,1796875
0,3 ml	4711,914063	78,125	34,1796875
0,4 ml	4409,179688	78,125	34,1796875
0,5 ml	2978,515625	117,1875	39,0625
0,6 ml	2685,546875	126,953125	39,0625
0,7 ml	2441,40625	136,71875	39,0625
0,8 ml	2124,023438	151,3671875	39,0625
0,9 ml	1953,125	170,8984375	39,0625
1 ml	1806,640625	185,546875	39,0625
1,2 ml (+0,2ml)	1464,84375	195,3125	39,0625
1,4 ml	1191,40625	200,1953125	39,0625
1,6 ml	976,5625	200,1953125	39,0625
1,8 ml	830,078125	205,078125	39,0625
2 ml	683,59375	190,4296875	39,0625
2,2 ml	561,5234375	185,546875	39,0625
2,4 ml	478,515625	175,78125	39,0625
2,6 ml	390,625	166,015625	39,0625
2,8 ml	341,796875	151,3671875	39,0625
3 ml	292,96875	117,1875	39,0625
3,5 ml (+0,5 ml)	219,7265625	97,65625	39,0625
4 ml	195,3125	92,7734375	39,0625
4,5 ml	170,8984375	92,7734375	39,0625
5 ml	146,484375	87,890625	39,0625

**Πίνακας 3-1:** Μέτρηση τάσης διέγερσης φωτοδιόδων με βάση την ποσότητα διαλύματος γάλακτος σε θερμοκρασία 25°C.

Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις απεικονίζουν την σχέση της τιμής των τάσεων των φωτοδιόδων με την ποσότητα του διαλύματος γάλακτος που προστέθηκε.



**Εικόνα 3-1:** Γραφικές παραστάσεις των τάσεων των φωτοδιόδων με την ποσότητα του διαλύματος γάλακτος που προστέθηκε.

Καθώς η ποσότητα του δείγματος αυξάνεται η τάση της φωτοδιόδου εξασθένησης D180, που βρίσκεται ακριβώς απέναντι από την πηγή ακτινοβολίας, V180 μειώνεται ομοιόμορφα προσεγγίζοντας τελικά μια οριακά μηδενική τιμή. Περισσότερη ποσότητα δείγματος σημαίνει περισσότερες διαχύσεις με αποτέλεσμα να μειώνεται η ένταση της ακτινοβολίας που διαπερνά ανεπηρέαστη το δείγμα. Η ομοιόμορφη μείωση της τάσης άρα και της ακτινοβολίας οφείλεται στο γεγονός ότι η φωτοδιόδος D180 είναι ακριβώς κεντραρισμένη με το IR LED εκπομπής κι επομένως κάθε μείωση γίνεται άμεσα αντιληπτή.

Η τάση της φωτοδιόδου εμπρόσθιας διάχυσης, D150, δεν έχει σταθερή μονοτονία. Μέχρι κάποια τιμή θολότητας αυξάνεται και στην συνέχεια μειώνεται προσεγγίζοντας τελικά μια οριακά μηδενική τιμή. Λόγω του μεγέθους και του σχήματος των σωματιδίων του γάλακτος αναδεικνύεται η εμπρόσθια σκέδαση. Όταν όμως η ποσότητα διαλύματος γάλακτος αυξηθεί αρκετά πραγματοποιούνται πιο πολλές διαχύσεις που προσεγγίζουν περισσότερο άλλες γωνίες διάχυσης. Δηλαδή όσο θολώνει το διάλυμα η συνισταμένη των διαχύσεων κινείται προς την νεφελομετρική φωτοδιόδο (D90).

Η τάση της νεφελομετρικής φωτοδιόδου (V90) αυξάνεται πολύ αργά (είναι σχεδόν σταθερή για το εύρος μετρήσεων του θολομέτρου). Γενικά, με την συγκεκριμένη κυκλωματική βαθμονόμηση που εφαρμόστηκε, οι δύο τελευταίες τάσεις έχουν μικρότερες τιμές από την V180 και ιδιαίτερα η V90. Πιθανότατα, αν το θολόμετρο είχε μεγαλύτερο εύρος μετρήσεων, οι τιμές της τάσης V90 να αυξάνονταν περισσότερο. Επιπρόσθετος σημαντικός παράγοντας που οδηγεί σε αυτό το αποτέλεσμα είναι η ίδια η οπτική γεωμετρία της κατασκευής. Η γωνία ημίσειας τιμής του IR LED εκπομπής είναι  $\pm 6^\circ$  ενώ των φωτοδιόδων είναι  $\pm 10^\circ$ . Αυτό σημαίνει ότι η διαχεόμενη ακτινοβολία είναι δύσκολο να πέφτει συνεχώς στο φάσμα λήψης των φωτοδιόδων ( $\pm 10^\circ$ ) ειδικά όταν το η διάμετρο τους δοχείου δείγματος είναι σχετικά μεγάλη (7cm). Με μικρότερο δοχείο δείγματος ίσως είχαμε πιο χαρακτηριστικά, σε σχέση με το φαινόμενο της διάχυσης, αποτελέσματα.

Τέλος, λόγω της αλλαγής μονοτονίας της τάσης εμπρόσθιας διάχυσης, V150 πρέπει να χωρίσουμε το εύρος μετρήσεων σε τουλάχιστον δύο διαστήματα για να έχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε πειραματικά, ότι η συμπεριφορά της τάσης V150 αλλάζει όταν η τάση V180 φτάσει περίπου τα  $732 \pm 100 \text{mV}$ . Επομένως τα διαστήματα μέτρησης θολότητας που προκύπτουν με βάση την τάση V180 είναι :

$$\Delta 1 = [5000 \text{mV} \dots 732 \text{mV}] \quad \text{και} \quad \Delta 2 = [732 \text{mV} \dots \rightarrow 0 \text{mV}]$$

Για να προσδιοριστούν οι παράμετροι της εξίσωσης της θολότητας για το κάθε διάστημα χρειάζονται δύο σημεία λειτουργίας από το κάθε διάστημα. Επειδή δεν ορίζεται μηδενική θολότητα, ορίζουμε σαν μικρότερη τιμή θολότητας την μονάδα και αντιστοιχεί στο αποσταγμένο νερό. Επίσης θεωρούμε ότι στο τέλος του διαστήματος  $\Delta 1$  και στην αρχή του διαστήματος  $\Delta 2$  η θολότητα είναι 100 NTU

καθώς και στην τελευταία μέτρηση της βαθμονόμησης θεωρούμε ότι η θολότητα είναι 300 NTU.

Για δύο σημεία λειτουργίας σε ένα διάστημα μετρήσεων του θολομέτρου και με βάση την εξίσωση για την θολότητα ισχύει :

$$[V_{180,1}, V_{150,1}, V_{90,1} : T_{ratio,1}] \leftrightarrow T_{ratio,1} = \frac{V_{90,1}}{a_1 V_{180,1} + a_2 V_{150,1}}$$

$$\&$$

$$[V_{180,2}, V_{150,2}, V_{90,2} : T_{ratio,2}] \leftrightarrow T_{ratio,2} = \frac{V_{90,2}}{a_1 V_{180,2} + a_2 V_{150,2}}$$

Με την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων ως προς  $a_1$  και  $a_2$  προκύπτει :

$$a_1 = \frac{\frac{V_{90,2}}{T_{ratio,2}} - \frac{V_{90,1} \times V_{150,2}}{V_{150,1} \times T_{ratio,1}}}{V_{180,2} - \frac{V_{180,1} \times V_{150,2}}{V_{150,1}}}$$

&

$$a_2 = \frac{V_{90,1}}{V_{150,1} \times T_{ratio,1}} - a_1 \times \frac{V_{180,1}}{V_{150,1}}$$

Ακολουθεί ο υπολογισμός των παραμέτρων  $a_1$  και  $a_2$  για τα δύο διαστήματα μετρήσεων σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις και με βάση τα τρία σημεία λειτουργίας που φαίνονται στον Πίνακα 3-2.

Διάλυμα δείγματος	V180 (mV)	V150 (mV)	V90 (mV)	Σχετική θολότητα (NTU)
1ο διάστημα				
Αποσταγμένο νερό	4990,234375	63,4765625	34,1796875	1
1,8 ml	830,078125	205,078125	39,0625	100
2ο διάστημα				
1,8 ml	830,078125	205,078125	39,0625	100
5 ml	146,484375	87,890625	39,0625	300

**Πίνακας 3-2:** Διαστήματα μετρήσεων θολότητας.

Επομένως για το 1ο διάστημα, όσο δηλαδή η τάση V150 αυξάνεται και η τάση V180 $\geq$ 732mV, η θολότητα θα δίνεται από την σχέση :

$$T_{\text{ratio}} = \frac{V_{90}}{0,0072V_{180}-0,0272V_{150}} \quad (3-1)$$

Για το 2ο διάστημα, όσο δηλαδή η τάση V150 μειώνεται και η τάση V180 $<$ 732mV, η θολότητα θα δίνεται από την σχέση :

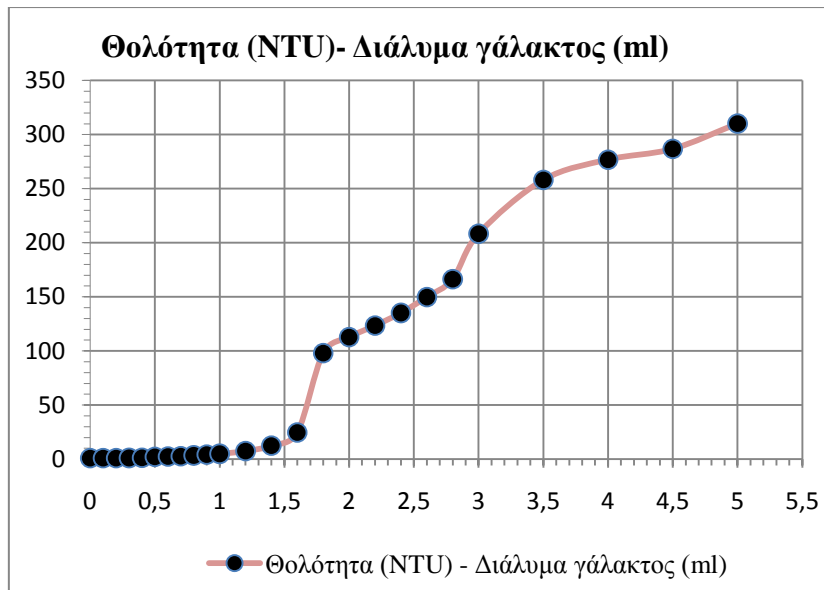
$$T_{\text{ratio}} = \frac{V_{90}}{0,0002V_{180}+0,0011V_{150}} \quad (3-2)$$

Η θολότητα του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση και υπολογίστηκε σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3-3) μαζί με την αντίστοιχη γραφική παράσταση (Εικόνα 3-2):

Διάλυμα δείγματος	Σχετική θολότητα (NTU)
Απιονισμένο νερό	0,999
Νερό βρύσης	1,005
0,1ml (+0,1ml)	1,013
0,2 ml	1,04
0,3 ml	1,075
0,4 ml	1,154
0,5 ml	2,139
0,6 ml	2,459
0,7 ml	2,818
0,8 ml	3,495
0,9 ml	4,149
1 ml	4,907
1,2 ml (+0,2ml)	7,463
1,4 ml	12,469
1,6 ml	24,631
1,8 ml	98,039
2 ml	112,835
2,2 ml	123,457
2,4 ml	135,135
2,6 ml	149,813
2,8 ml	166,32
3 ml	208,333
3,5 ml (+0,5 ml)	258,065
4 ml	276,817
4,5 ml	286,738
5 ml	310,078

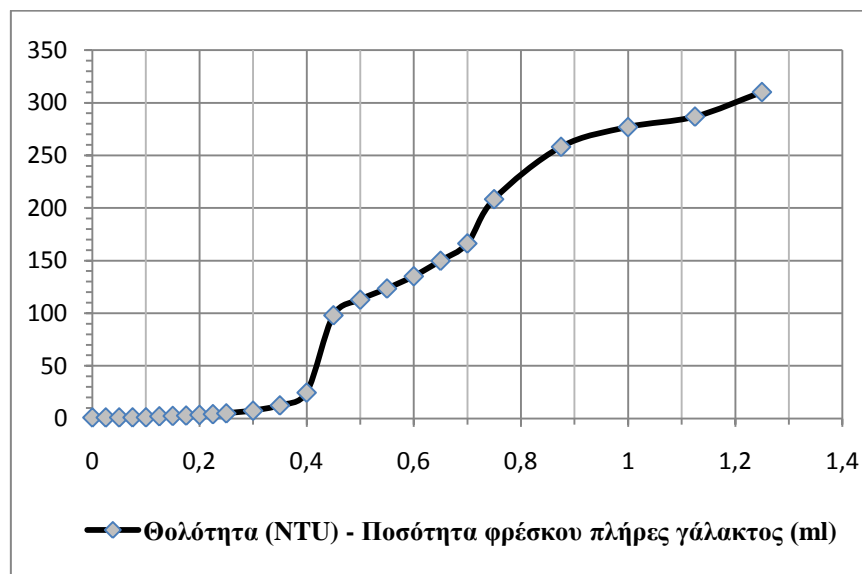
**Πίνακας 3-3:** Θολότητα δείγματος βαθμονόμησης.





**Εικόνα 3-2:** Γραφική παράσταση θολότητας δείγματος βαθμονόμησης.

Με βάση το γεγονός ότι το  $\frac{1}{4}$  του διαλύματος γάλακτος είναι καθαρό γάλα, δίνεται η δυνατότητα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, να εκφραστεί η θολότητα ενός υγρού διαλύματος όταν σε αυτό προστίθεται ποσότητα φρέσκου πλήρους αγελαδινού γάλακτος 3,5% λιπαρών. Ο πίνακας (Πίνακας 3-4) και η γραφική παράσταση (Εικόνα 3-3) που ακολουθούν περιγράφουν τη σχέση της θολότητας συναρτήσει της ποσότητας γάλακτος που διοχετεύεται στο υγρό δείγμα.



**Εικόνα 3-3:** Γραφική παράσταση της θολότητας συναρτήσει της ποσότητας γάλακτος που διοχετεύεται στο υγρό δείγμα.

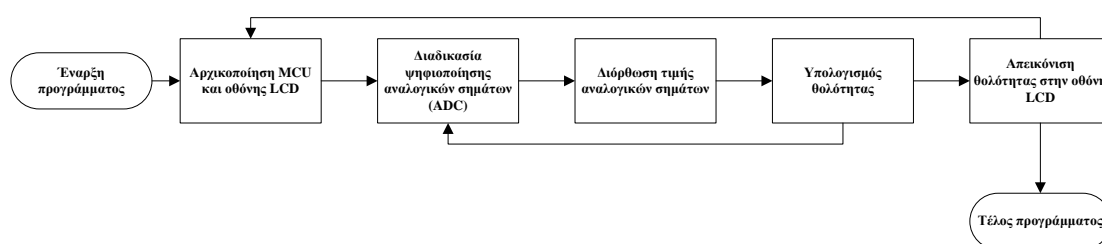
<u>Ποσότητα διαλύματος γάλακτος στο διάλυμα δείγματος (ml)</u>	<u>Ποσότητα γάλακτος στο διάλυμα δείγματος (ml)</u>	<u>Θολότητα διαλύματος δείγματος (NTU)</u>
Απιονισμένο νερό (0 ml)	0	1
0,1	0,025	1,01
0,2	0,05	1,04
0,3	0,075	1,08
0,4	0,1	1,15
0,5	0,125	2,14
0,6	0,15	2,46
0,7	0,175	2,82
0,8	0,2	3,5
0,9	0,225	4,15
1	0,25	4,91
1,2	0,3	7,46
1,4	0,35	12,47
1,6	0,4	24,63
1,8	0,45	98,04
2	0,5	112,84
2,2	0,55	123,46
2,4	0,6	135,14
2,6	0,65	149,81
2,8	0,7	166,32
3	0,75	208,33
3,5	0,875	258,07
4	1	276,82
4,5	1,125	286,74
5	1,25	310,08

**Πίνακας 3-4:** Πίνακας της θολότητας συναρτήσει της ποσότητας γάλακτος που διοχετεύεται στο υγρό δείγμα.

## 4 Προγραμματισμός του μικροελεγκτή για την λειτουργία του θολομέτρου

### 4.1 Εισαγωγή

Για τον έλεγχο λειτουργίας του μικροελεγκτή (MCU) και κατά συνέπεια ολόκληρου του κυκλώματος του θολομέτρου, έχει γραφεί μέσω του λογισμικού MPLAB IDE της Microchip, συμβατού με τον μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται, σε γλώσσα χαμηλού επιπέδου – Assembly ένα πρόγραμμα (αλγόριθμος) και παρουσιάζεται εξ' ολοκλήρου στο παράρτημα. Ο κώδικας αυτός προγραμματίζει τον μικροελεγκτή με σαφή προσανατολισμό τον έλεγχο της λειτουργίας του IR LED, την αποτελεσματική λήψη και ψηφιοποίηση των αναλογικών σημάτων, τον έλεγχο της οθόνης LCD, της δεύτερης ψηφιακής συσκευής του κυκλώματος και τον υπολογισμό της θολότητας που είναι και το ζητούμενο. Τα βασικά μέρη του προγράμματος παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα :



Εικόνα 4-1: Βασικότερα μέρη του κώδικα προγραμματισμού του μικροελεγκτή.

### 4.2 Αρχικοποίηση μικροελεγκτή (MCU) και οθόνης υγρών κρυστάλλων LCD

Όπως συμβαίνει για κάθε κώδικα, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση πρέπει στην αρχή του προγράμματος να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες αρχικοποιήσεις στον μικροελεγκτή αλλά και στην οθόνη LCD ώστε να είναι προετοιμασμένα να δεχτούν και να επεξεργαστούν τα δεδομένα.

## 4.2.1 Αρχικοποίηση MCU

Η πρώτη παράμετρος που αρχικοποιείται, κατά την γενικότερη αρχικοποίηση του MCU, είναι ο ορισμός συχνότητας λειτουργίας του μικροελεγκτή. Επιλέγεται, μέσω του καταχωρητή OSCCON, λειτουργία εσωτερικού ρολογιού (εντός του μικροελεγκτή) με συχνότητα 4 MHz. Επίσης ορίζονται οι τρόποι λειτουργίας των ακροδεκτών που συνδέονται με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος και μηδενίζονται οι τιμές των αντίστοιχων καταχωρητών. Συγκεκριμένα :

- Οι ακροδέκτες PORTA (1,2 και 3) αρχικοποιούνται σαν αναλογικοί είσοδοι : σήματα φωτοδιόδων
- Ο ακροδέκτης PORTA,5 αρχικοποιείται σαν ψηφιακή έξοδος : έλεγχος IR LED
- Οι ακροδέκτες PORTB(0,1,2,3,4,5) αρχικοποιούνται σαν ψηφιακοί έξοδοι : σύνδεση με οθόνη LCD
- Οι ακροδέκτες PORTB(6,7) αρχικοποιούνται σαν ψηφιακοί είσοδοι : σύνδεση μικροελεγκτή με debugger.

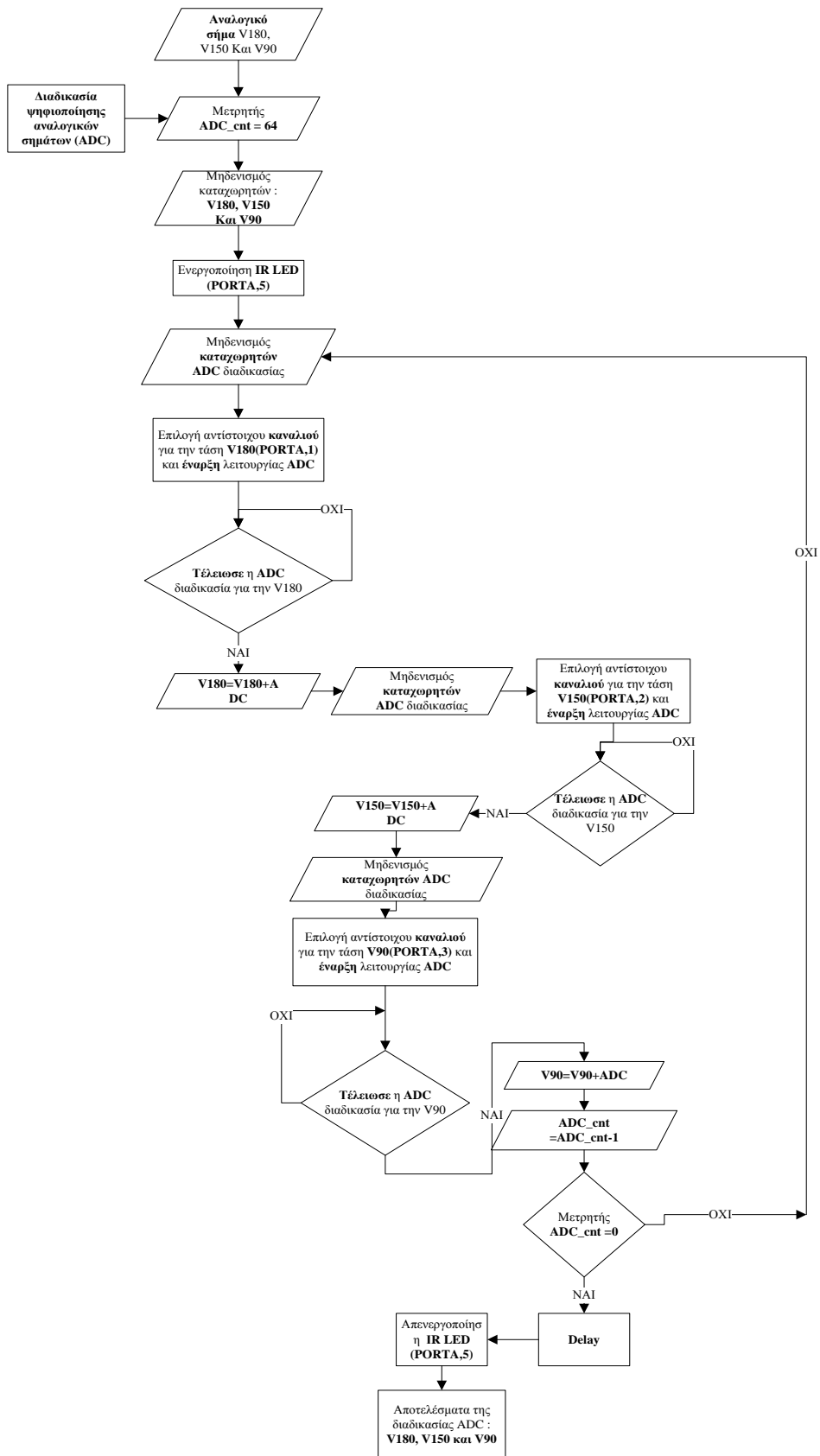
## 4.2.2 Αρχικοποίηση της οθόνης LCD

Η οθόνη LCD δεν μπορεί να λειτουργήσει κατευθείαν αφού τροφοδοτηθεί. Πρέπει να αρχικοποιηθεί. Έτσι, μέσω του κώδικα, στέλνονται στην οθόνη για να εκτελεστούν κάποιες εντολές οι οποίες αφορούν κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά και κάποιες βασικές καταστάσεις λειτουργίας από τις οποίες πρέπει να περάσει η οθόνη για να μπορεί να λειτουργεί κανονικά.

## 4.3 Διαδικασία ψηφιοποίησης αναλογικών σημάτων των φωτοδιόδων

Το επόμενο στάδιο του αλγορίθμου είναι η διαδικασία ψηφιοποίησης (ADC procedure) των αναλογικών σημάτων των φωτοδιόδων με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία τους. Σήμα από κάθε φωτοδίοδο φτάνει σε διαφορετικό ακροδέκτη του μικροελεγκτή, που πρέπει να έχει οριστεί σαν αναλογική είσοδος (PORTA1,2,3).

Στον μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται υπάρχει μόνο μία μονάδα ψηφιοποίησης, επομένως τα σήματα ψηφιοποιούνται το καθένα ξεχωριστά και διαδοχικά (σειριακή ψηφιοποίηση). Έτσι μόνο όταν τελειώσει η ψηφιοποίηση ενός αναλογικού σήματος ξεκινά η επόμενη. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής του τμήματος του κώδικα που περιγράφει την λειτουργία της διαδικασίας ψηφιοποίησης (Εικόνα 4-2).



Εικόνα 4-2: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας ψηφιοποίησης.

Όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα ροής, σε πρώτο στάδιο αρχικοποιείται ένας μετρητής (ADC\_cnt) στην τιμή 64 έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί για κάθε αναλογική είσοδο δειγματοληψία 64 φορές για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην συνέχεια μηδενίζονται οι καταχωρητές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των τάσεων των φωτοδιόδων ( $V180=V150=V90=0$ ). Με την βοήθεια μιας εντολής, η οποία στέλνει στην ψηφιακή έξοδο (PORTA,5) τάση 5V, αρχίζει να εκπέμπει το IR LED με αποτέλεσμα να αρχίζουν να φτάνουν στην είσοδο του μικροελεγκτή τα αντίστοιχα αναλογικά σήματα. Στην συνέχεια μηδενίζονται οι δύο προσωρινοί καταχωρητές ψηφιοποίησης, επιλέγεται το κανάλι-ακροδέκτης το οποίο θα αποτελέσει την είσοδο προς ψηφιοποίηση και ξεκινά η διαδικασία. Όταν ολοκληρώνεται η διαδικασία, για ένα αναλογικό σήμα, ο μετατροπέας AD (analog to digital) στέλνει σήμα σε κατάλληλο καταχωρητή του μικροελεγκτή, αποθηκεύεται η τιμή της ψηφιακής πλέον τάσης και προστίθεται στον αντίστοιχο καταχωρητή τάσης ( $V180=V150=V90$ ). Τέλος, γίνεται έλεγχος στον μετρητή ADC\_cnt κι αν έχει μηδενιστεί, δηλαδή αν κάθε αναλογικό σήμα έχει διαβαστεί 64 φορές, τότε το LED απενεργοποιείται, με εντολή αντίστροφης λειτουργίας από την προηγούμενη, και η διαδικασία ψηφιοποίησης ολοκληρώνεται.

Οι προσωρινοί καταχωρητές ψηφιοποίησης έχουν μέγεθος 10-bits, επομένως η διακριτική ικανότητα του ADC είναι 10-bits. Με πιο απλά λόγια, ένα αναλογικό σήμα με εύρος τιμών 0...5V, με τον συγκεκριμένο ADC, θα έχει ψηφιακό εύρος τιμών 0...1023 (ακέραιος αριθμός). Διαιρώντας τις δύο τιμές μεταξύ τους προκύπτει :

$$\Delta V = \frac{5000\text{mV}}{1024} = 4.883\text{mV}$$

Επομένως, η ψηφιακή ακέραια τιμή της κάθε τάσης μεταβάλλεται κάθε 4,883mV, ξεκινώντας από το μηδέν. Το σφάλμα της μονάδας ψηφιοποίησης είναι περίπου  $\pm 1/2$  bit.

Από όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι το IR LED είναι ενεργοποιημένο μόνο κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας. Ο χρόνος λειτουργίας του προκύπτει από τον χρόνο που διαρκεί η διαδικασία της ψηφιοποίησης. Η χρονική διάρκεια, από την στιγμή που ενεργοποιείται η διαδικασία της ψηφιοποίησης μέχρι την στιγμή που υπολογίζεται η πρώτη τιμή για την θολότητα, είναι 17,5 msec περίπου. Αυτή η χρονική διάρκεια αποτελεί περίπου την περίοδο λειτουργίας του IR LED. Επομένως η συχνότητα λειτουργίας είναι:

$$F_{LED} = \frac{1}{T_{LED}} \approx \frac{1}{17,5\text{msec}} = 57 \text{ Hz}$$

Η διαδικασία ψηφιοποίησης πραγματοποιείται 64 φορές και διαρκεί 15 msec με αποτέλεσμα το Duty Cycle της λειτουργίας του IR LED να είναι :

$$DC\%_{LED} = \frac{15msec}{17.5msec} \times 100\% \approx 86\%$$

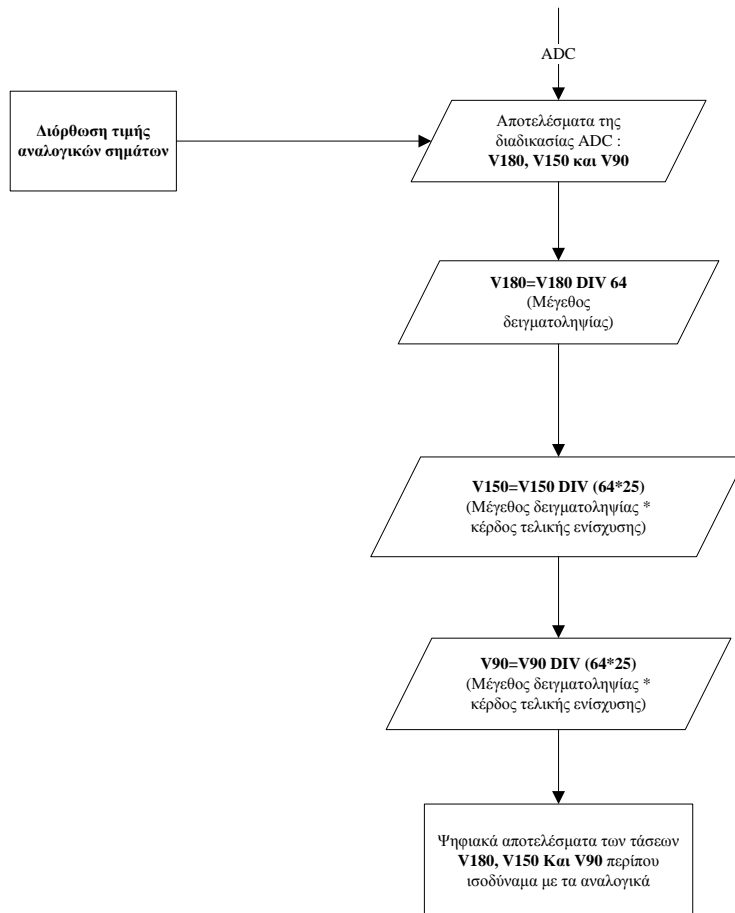
Επομένως το IR LED είναι αναμμένο στο 86% της διάρκειας της συνολικής λειτουργίας του θολομέτρου. Με περαιτέρω βελτίωση του κώδικα μπορεί να επιτευχθεί μικρότερο Duty Cycle έτσι ώστε το θολόμετρο να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια.

## **4.4 Διαδικασία διόρθωσης τιμής αναλογικών σημάτων**

Κατά την διαδικασία ψηφιοποίησης, κάθε σήμα της κάθε φωτοδιόδου ανιχνεύθηκε 64 φορές και αποθηκεύθηκε αθροιστικά στους αντίστοιχους καταχωρητές τάσης (V180=V150=V90). Αυτό σημαίνει ότι η πραγματική τιμή του αναλογικού σήματος που εισήλθε είναι 64 φορές μεγαλύτερη από την πραγματική. Μία διαίρεση του κάθε καταχωρητή τάσης με το πλήθος επαναλήψεων (64) θα έχει ως αποτέλεσμα την διόρθωση του ψηφιακού σήματος έτσι ώστε να συμπίπτει με το αναλογικό.

Επίσης, στο κύκλωμα τελικής ενίσχυσης, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι τάσεις των φωτοδίοδων D150 και D90 ενισχύονται επιπλέον κατά 25 με σκοπό να γίνονται αντιληπτές από τον μικροελεγκτή. Επομένως απαιτείται επιπλέον διόρθωση των αντίστοιχων ψηφιακών τάσεων. Δηλαδή, οι τάσεις V150 και V90 διαιρούνται πλέον με (64\*25) για να προκύψουν οι πραγματικές τιμές. Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα ροής (Εικόνα 4-3).





Εικόνα 4-3: Διάγραμμα ροής διόρθωσης τιμής αναλογικών σημάτων.

## 4.5 Διαδικασία Υπολογισμού της θολότητας

Το σημαντικότερο κομμάτι του προγράμματος αφορά τον υπολογισμό της θολότητας. Για το θολόμετρο που κατασκευάστηκε, η εξίσωση που δίνει την τιμή της θολότητας σε σχέση με τις τάσεις που προκύπτουν από την διέγερση των φωτοδιόδων είναι :

$$T_{\text{ratio}} = \frac{V_{90}}{a_1 V_{180} + a_2 V_{150}}$$

Όπου  $a_1$  και  $a_2$  αντίστοιχοι πραγματικοί παράμετροι των τάσεων που υπολογίστηκαν κατά την βαθμονόμηση του οργάνου.

Από τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης προκύπτουν δύο διαφορετικές εξισώσεις για την θολότητα. Εξισώσεις της παραπάνω μορφής, αλλά με διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Μετά από επαναλαμβανόμενη βαθμονόμηση, παρατηρήθηκε ότι μέχρι ένα κατώφλι τάσης,  $V_{th}$ , για την τάση της φωτοδιόδου D180 (V180), η τάση της φωτοδιόδου D150 (V150) αυξάνεται σταδιακά, ενώ ξεπερνώντας αυτό το κατώφλι η τάση V150 μειώνεται. Παράλληλα, η τάση της φωτοδιόδου D180 μειώνεται και η τάση της φωτοδιόδου D90 αυξάνεται καθ' όλο το εύρος μέτρησης του οργάνου. Ποιοτικά αυτό σημαίνει ότι, μέχρι κάποια τιμή της θολότητας η εμπρόσθια διάχυση είναι η κυρίαρχη αλλά όταν το διάλυμα θολώσει περισσότερο (περισσότερη αιωρούμενη ύλη) η διάχυση τείνει να γίνει κυρίως νεφελομετρική. Αν το συγκεκριμένο εύρος μετρήσεων του οργάνου ήταν μεγαλύτερο, θα παρατηρούνταν και μείωση στην τάση V90 καθώς πλέον η μεγαλύτερη διάχυση θα ήταν οπίσθια. Επομένως, αφού ολοκληρωθεί το προηγούμενο στάδιο επεξεργασίας και διορθωθούν οι ψηφιακές τιμές των τάσεων, ο κώδικας επιλέγει με βάση την τιμή της τάσης V180 τον τρόπο υπολογισμού θολότητας (Εικόνα 4-4).

Έτσι για  $V_{180} \geq V_{th}$  θα ισχύει :

$$T_{ratio} = \frac{V_{90}}{|a_1|V_{180} - |a_2|V_{150}}$$

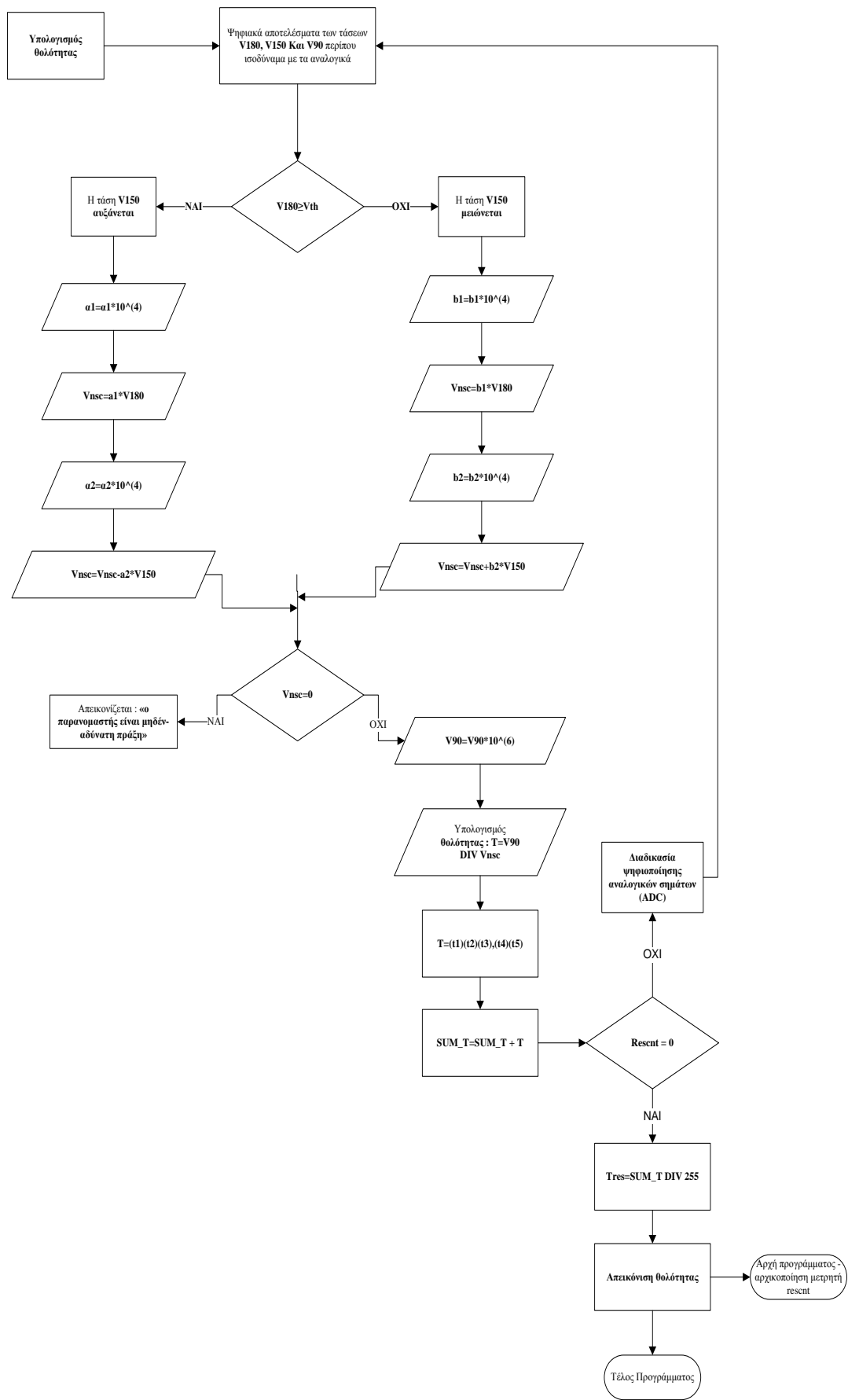
και για  $V_{180} < V_{th}$  θα ισχύει :

$$T_{ratio} = \frac{V_{90}}{|b_1|V_{180} + |b_2|V_{150}}$$

Το κατώφλι,  $V_{th}$  ορίστηκε προσεγγιστικά, με βάση την βαθμονόμηση σε τιμή :

$$V_{th} = 732 \text{ mV}$$

Τέλος, στην αρχή του προγράμματος έχει οριστεί ένας μετρητής (rescnt=255) με βάση τον οποίο όλη η διαδικασία, που περιγράφεται μέχρι αυτό το σημείο, επαναλαμβάνεται 255 φορές. Έτσι οι 255 τιμές θολότητας που υπολογίστηκαν προστίθενται σε έναν καταχωρητή ο οποίος στην συνέχεια διαιρείται με το μέγεθος του μετρητή. Έτσι κάθε φορά απεικονίζεται μια τιμή θολότητας (μερικός μέσος όρων στιγμιαίων μετρήσεων θολότητας) σχετικά ανεπηρέαστη από τις πολύ γρήγορες μεταβολές των τάσεων των φωτοδιοδών σε γειτονικές τιμές.



Εικόνα 4-4: Διάγραμμα ροής κώδικα για τον υπολογισμό της θολότητας.



## 5 Πειραματικές μετρήσεις

Για την ολοκλήρωση της παρουσίασης της κατασκευής του θολομέτρου λόγου, πραγματοποιήθηκαν κάποιες πειραματικές μετρήσεις θολότητας σε διαλύματα νερού στα οποία γίνεται σταδιακή πρόσθεση ποσότητας διαφόρων ουσιών – υλικών. Στόχος των πειραματικών μετρήσεων είναι να αξιολογηθεί η ικανότητα μέτρησης του οργάνου καθώς και να γίνει πιο κατανοητή η έννοια της θολότητας.

### 5.1 Χώμα βροχής

Στην πρώτη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε χώμα βροχής – χώμα και σκόνη της ατμόσφαιρας που μεταφέρουν οι σταγόνες της βροχής. Σε δείγμα νερού πραγματοποιήθηκε σταδιακή πρόσθεση χώματος βροχής με σκοπό την δημιουργία μίας γραφικής παράστασης της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της ποσότητας χώματος βροχής που βρίσκεται μέσα σε αυτό.

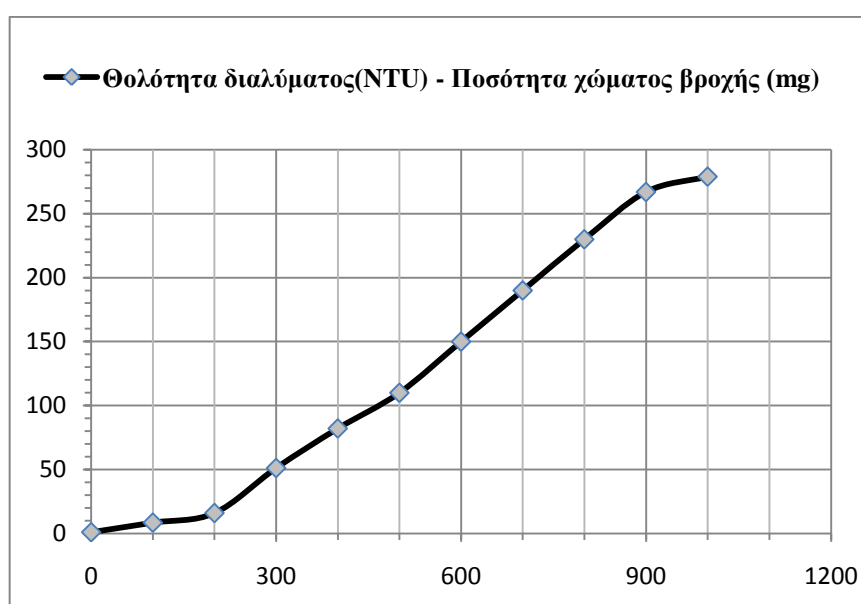
Επειδή δεν υπήρχε η δυνατότητα χρήσης ζυγού με ακρίβεια mg, η ποσότητα του χώματος βροχής υπολογίστηκε σε ογκομετρικές μονάδες (ml) και μέσω της πυκνότητας του (σωματιδιακή πυκνότητα) υπολογίστηκε και η αντίστοιχη μάζα του. Η πυκνότητα του χώματος βροχής υπολογίστηκε πειραματικά και ισούται περίπου με 1 gr/ml.

Παρακάτω φαίνονται ο πίνακας μετρήσεων (Πίνακας 5-1) και η γραφική παράσταση (Εικόνα 5-1: Γραφική παράσταση της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας χώματος βροχής που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.) της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας χώματος βροχής που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.

<u>Ποσότητα χώματος βροχής στο διάλυμα δείγματος (ml)</u>	<u>Ποσότητα χώματος βροχής στο διάλυμα δείγματος (mg)</u>	<u>Θολότητα διαλύματος δείγματος (NTU)</u>
0	0	1,02
0,1	100	8,5
0,2	200	16

0,3	300	51,2
0,4	400	82,1
0,5	500	110
0,6	600	150
0,7	700	190
0,8	800	230
0,9	900	267
1	1000	279

**Πίνακας 5-1:** Πίνακας μετρήσεων της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας χρώματος βροχής που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.



**Εικόνα 5-1:** Γραφική παράσταση της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας χρώματος βροχής που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.

Κατά την διάρκεια της εναπόθεσης, το χρώμα βροχής – λόγω μεγέθους και μάζας – βυθίζεται στο δοχείο δείγματος δημιουργώντας ίζημα. Κάθε φορά που προστίθεται χρώμα βροχής αναμιγνύουμε με απαλές κινήσεις το διάλυμα έτσι ώστε να επιτευχθεί ομαλή τεχνητή αιώρηση και να μετρηθεί η θολότητα. Το χρώμα χρειάζεται περίπου 30 δευτερόλεπτα για να δημιουργήσει ίζημα. Έτσι οι μετρήσεις καταγράφονται 10 – 20 δευτερόλεπτα μετά την εναπόθεση χρώματος. Αν περάσει αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα τότε το χρώμα θα καλύψει τον βυθό του δοχείου δείγματος και η τιμή της θολότητας θα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα καθώς πλέον πολύ μικρή ποσότητα χρώματος θα αιωρείται.

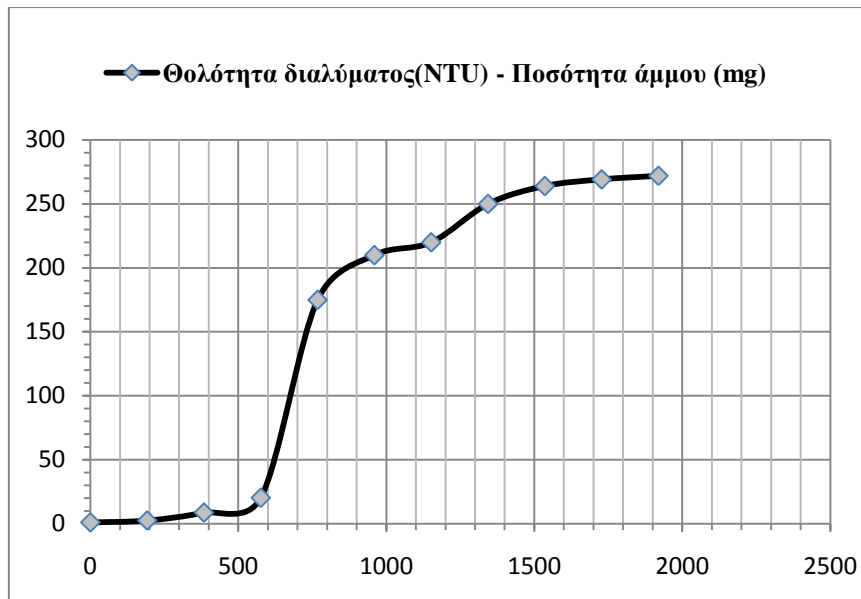
## 5.2 Άμμος

Στην δεύτερη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε άμμος που προέκυψε από το κοσκίνισμα αμμοχάλικου – κοινού οικοδομικού υλικού. Σε δείγμα νερού πραγματοποιήθηκε σταδιακή πρόσθεση άμμου με σκοπό την δημιουργία μίας γραφικής παράστασης της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της ποσότητας άμμου που βρίσκεται μέσα σε αυτό. Η μάζα της ποσότητας της άμμου υπολογίστηκε με βάση την πυκνότητα της, όπως έγινε και στο πείραμα με το χρώμα βροχής. Η πυκνότητα της άμμου υπολογίστηκε πειραματικά και είναι περίπου ίση με 1,92 gr/ml.

Παρακάτω φαίνονται ο πίνακας μετρήσεων (Πίνακας 5-2) και η γραφική παράσταση (Εικόνα 5-2) της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας άμμου που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.

<u>Ποσότητα άμμου στο διάλυμα δείγματος (ml)</u>	<u>Ποσότητα άμμου στο διάλυμα δείγματος (mg)</u>	<u>Θολότητα διαλύματος δείγματος (NTU)</u>
0	0	1,05
0,1	192	2,55
0,2	384	8,7
0,3	576	20,3
0,4	768	175
0,5	960	210
0,6	1152	220
0,7	1344	250
0,8	1536	264
0,9	1728	269,2
1	1920	272

**Πίνακας 5-2:** Πίνακας μετρήσεων της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας άμμου που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.



**Εικόνα 5-2:** Γραφική παράσταση της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας άμμου που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.

Κατά την διάρκεια της εναπόθεσης της άμμου, μεγάλο μέρος της ποσότητας της βυθίζεται γρήγορα προς τον πάτο του δοχείου δείγματος, όπως συνέβαινε και στην περίπτωση του χώματος βροχής. Παρατηρείται όμως ότι υπάρχει σημαντική καθυστέρηση έως ότου δημιουργηθεί πλήρες ίζημα. Κόκκοι άμμου με μικρότερο μέγεθος συνεχίζουν να αιωρούνται θολώνοντας έτσι το διάλυμα για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Κάθε φορά που προστίθεται άμμος, αναμιγνύουμε με απαλές κινήσεις το διάλυμα έτσι ώστε να επιτευχθεί ομαλή τεχνητή αιώρηση και να μετρηθεί η θολότητα. Η καταγραφή της τιμής της θολότητας πραγματοποιείται ένα λεπτό μετά από κάθε εναπόθεση, ενώ μεταβάλλεται (λόγω δημιουργίας ιζήματος) με πιο μικρό ρυθμό σε σχέση με την αντίστοιχη μεταβολή των τιμών θολότητας του διαλύματος που περιείχε χώμα βροχής.

Το «νέφος» που δημιουργείται στο υγρό δείγμα, εξαιτίας της παρουσίας των μικροσκοπιών κόκκων άμμου, ίσως είναι το πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα σε σχέση με την μορφή των υδάτινων διαλυμάτων τα οποία υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον και μελετούνται ως προς τη θολότητα τους με σκοπό τον έλεγχο της ποιότητάς τους.



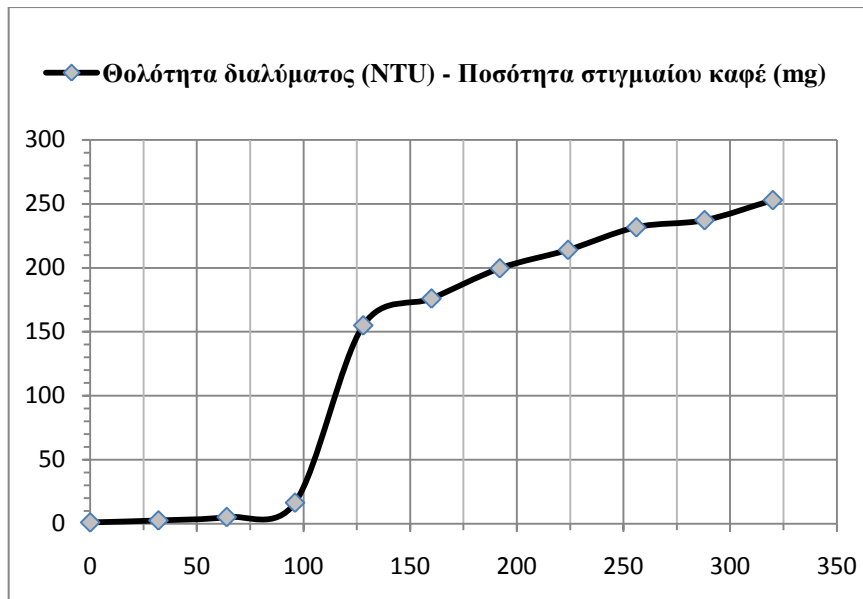
## 5.3 Στιγμιαίος καφές

Στην τελευταία πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε στιγμιαίος καφές. Σε δείγμα νερού πραγματοποιήθηκε σταδιακή πρόσθεση στιγμιαίου καφέ με σκοπό την δημιουργία μίας γραφικής παράστασης της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της ποσότητας στιγμιαίου καφέ που βρίσκεται μέσα σε αυτό. Ο καφές φαίνεται ότι διαλύεται στο δείγμα νερού, αλλά επί της ουσίας διαιρείται σε πολύ μικρότερα σωματίδια τα οποία αιωρούνται μέσα στο διάλυμα. Έτσι όσο η ποσότητα του στιγμιαίου καφέ αυξάνεται, τόσο μεγαλώνει η θολότητα του δείγματος. Η μάζα της ποσότητας του στιγμιαίου καφέ υπολογίστηκε με βάση την πυκνότητα του, όπως έγινε και στο πείραμα με το χρώμα βροχής. Η πυκνότητα του στιγμιαίου καφέ υπολογίστηκε πειραματικά και είναι περίπου ίση με 0,32 gr/ml.

Παρακάτω φαίνονται ο πίνακας μετρήσεων (Πίνακας 5-3) και η γραφική παράσταση (Εικόνα 5-3) της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας στιγμιαίου καφέ που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.

<u>Ποσότητα στιγμιαίου καφέ στο διάλυμα δείγματος (ml)</u>	<u>Ποσότητα στιγμιαίου καφέ στο διάλυμα δείγματος (mg)</u>	<u>Θολότητα διαλύματος δείγματος (NTU)</u>
0	0	1,08
0,1	32	2,62
0,2	64	5,28
0,3	96	16,46
0,4	128	155
0,5	160	176
0,6	192	199,6
0,7	224	213,97
0,8	256	231,7
0,9	288	237,22
1	320	252,87

**Πίνακας 5-3:** Πίνακας μετρήσεων της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας στιγμιαίου καφέ που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.



**Εικόνα 5-3:** Γραφική παράσταση της θολότητας του διαλύματος συναρτήσει της μάζας στιγμιαίου καφέ που τοποθετήθηκε μέσα σε αυτό.

Στην περίπτωση του καφέ δεν χρειάζεται τόσο προσοχή στους χρόνους μέτρησης, αφού μετά από μικρό χρονικό διάστημα η τιμή της θολότητας σταθεροποιείται για μεγάλη χρονική διάρκεια. Η παρεμβολή λόγω χρώματος γίνεται αντιληπτή σε μικρό βαθμό, αφού η τοπολογία των φωτοδεκτών σε συνδυασμό με την συνάρτηση υπολογισμού της θολότητας περιορίζουν αυτού του είδους την παρεμβολή. Επίσης έγχρωμα διαλύματα απορροφούν πιο δύσκολα ακτινοβολίες με μεγάλο μήκος κύματος, όπως είναι η υπέρυθη ακτινοβολία.

## 6 Συμπεράσματα και περαιτέρω βελτιώσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

Η μέτρηση της θολότητας είναι μία από τις πιο σημαντικές «αισθητικές» μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας του νερού, αλλά κι άλλων διαλυμάτων, και πλέον βρίσκεται στην ίδια κατηγορία χρησιμότητας με μετρήσεις όπως η μέτρηση του pH και της αγωγιμότητας. Αποτελεί μία ποιοτική διαδικασία προσέγγισης της ποσότητας των ξένων και μη σωματιδίων που αιωρούνται σε ένα υγρό δείγμα, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη αξιολόγηση του δείγματος.

Οι περισσότερες βιομηχανίες υγρών σκευασμάτων βασίζουν την ποιότητα της παραγωγής τους στον έλεγχο της θολότητας των προϊόντων τους. Επιπλέον, οπουδήποτε χρησιμοποιούνται υδάτινα δείγματα, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για πόσιμο νερό ή όχι, υπάρχει διαρκής έλεγχος έτσι ώστε η θολότητα τους να διατηρείται σε τιμή κατάλληλη για την εκάστοτε χρήση.

Τα πιο συνηθισμένα όργανα μέτρησης θολότητας που χρησιμοποιούνται είναι τα νεφελόμετρα. Τα περισσότερα φορητά θολόμετρα, που κυκλοφορούν στην αγορά, εξετάζουν κυρίως την νεφελομετρική διάχυση (χρήση δέκτη διαχεόμενης ακτινοβολίας σε γωνία  $90^\circ$  ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία.). Παρ' όλα αυτά, εδώ και είκοσι χρόνια, έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται και να χρησιμοποιούνται ευρύτερα θολόμετρα λόγου (ratio turbidimeter). Τα θολόμετρα τέτοιου τύπου, τα οποία επιτυγχάνουν μεγαλύτερες επιδόσεις και παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα νεφελόμετρα, αποτέλεσαν πρότυπο για την κατασκευή του θολομέτρου που παρουσιάζεται στην εργασία.

Το θολόμετρο που κατασκευάστηκε είναι ένα θολόμετρο λόγου με εύρος τιμών μέτρησης 1 – 300 NTU. Σύμφωνα με την βαθμονόμηση, που πραγματοποιήθηκε χωρίς την χρήση προτύπων μεθόδων (θολόμετρο εμπορίου, πρότυπες ουσίες θολότητας), η κλίμακα που αποτελεί το εύρος τιμών μέτρησης του θολομέτρου είναι σχετική. Έτσι, δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις πραγματικές αντίστοιχες τιμές θολότητας σε απόλυτες τιμές και μόνο η σχετική μεταβολή της θολότητας μπορεί να θεωρηθεί χρήσιμη.

Με βάση την συγκεκριμένη βαθμονόμηση και τα πειράματα που έγιναν για την μέτρηση της θολότητας διαφόρων διαλυμάτων, το θολόμετρο παρουσιάζει πιο ακριβή αποτελέσματα για τιμές (σχετικής) θολότητας 60 – 300 NTU. Δηλαδή, μπορεί να αντληφθεί με καλύτερη προσέγγιση και γραμμικότητα τις μεταβολές της θολότητας που πραγματοποιούνται σε αυτό το διάστημα.

Σε μικρότερες τιμές θολότητας (μικρότερη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων) το θολόμετρο χάνει την διακριτική του ικανότητα και οι μεταβολές που

προκύπτουν δεν γίνονται αντιληπτές. Συγκρίνοντας τις τιμές θολότητας αποσταγμένου νερού με την θολότητα εμφιαλωμένου ή του νερού από την βρύση, που υπάρχει στο εργαστήριο, δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές παρά το γεγονός ότι το θολόμετρο, στο συγκεκριμένο διάστημα τιμών, έχει ελάχιστη ακρίβεια εκατοστού (η ελάχιστη ακρίβεια κατά διαστήματα διαφοροποιείται). Επομένως το θολόμετρο που κατασκευάστηκε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του πόσιμου νερού.

Το θολόμετρο όμως, χρησιμοποιεί πηγή φωτός με μήκος κύματος στα 860 nm (IR LED) γεγονός που εξηγεί την έλλειψη διακριτικής του ικανότητας σε μετρήσεις που έχουν να κάνουν με την ύπαρξη σωματιδίων μεγέθους μικρότερου του μήκος κύματος και τα οποία μπορεί περιέχονται σε υδάτινα δείγματα που προορίζονται για κατανάλωση. Από την άλλη πλευρά σημαντικό ρόλο παίζει και η υπάρχουσα οπτική γεωμετρία του θολομέτρου. Κάποιες σημαντικές χωροταξικές αλλαγές στην μονάδα τοποθέτησης δοχείου δείγματος και οπτικών στοιχείων θα οδηγούσαν στην σημαντική αύξηση της ακρίβειας του θολομέτρου για μικρές τιμές θολότητας.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι το θολόμετρο, που παρουσιάστηκε, κατασκευάστηκε σύμφωνα με αναγνωρισμένα πρότυπα αρχιτεκτονικής και λειτουργίας (πρότυπο ISO 7027) και ανταποκρίνεται ικανοποιητικά, όσο αφορά την γενικότερη απόκριση ενός αισθητήρα θολότητας. Η ποσοτικοποίηση ενός οπτικού φαινομένου, της διάχυσης του φωτός που προκύπτει από πρόσπτωση ακτινοβολίας σε αιωρούμενα σωματίδια που περιέχονται σε ένα διάλυμα, πραγματοποιήθηκε με επιτυχία. Από την άλλη πλευρά, λόγω του μικρού εύρους μέτρησης και της μειωμένης σχετικής ακρίβειας που παρουσιάζει σε κάποια διαστήματα, το συγκεκριμένο θολόμετρο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή μέτρησης θολότητας. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις βελτίωσης της λειτουργίας, ακρίβειας και του εύρους εφαρμογών του θολομέτρου λόγου (ratio turbidity meter) που υλοποιήθηκε.

## 6.2 Περαιτέρω βελτιώσεις

Ύστερα από σχετική μελέτη, διαπιστώθηκε ότι η συσκευή του θολομέτρου επιτρέπει βελτιώσεις, όσον αφορά τον συγκεκριμένο τρόπο υλοποίησης κι όχι μόνο. Οι περαιτέρω βελτιώσεις για το θολόμετρο μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις βελτιώσεις που αφορούν την λειτουργία και την ακρίβεια του οργάνου και τις χωροταξικές βελτιώσεις.

### 6.2.1 Περαιτέρω βελτιώσεις για καλύτερη λειτουργία και μεγαλύτερη ακρίβεια

Η ακρίβεια του θολομέτρου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά πραγματοποιώντας μεταβολές είτε στο ηλεκτρονικό του κύκλωμα είτε στην μονάδα δειγματοληψίας. Ειδικά η μονάδα δειγματοληψίας αποτελεί σημαντικό τμήμα της κατασκευής, αφού εκεί τοποθετούνται τα οπτικά στοιχεία που θα δημιουργήσουν και θα αισθανθούν το φαινόμενο της διάχυσης.

Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά στοιχεία λειτουργίας του IR LED αλλά και των φωτοδιόδων πυριτίου, που χρησιμοποιούνται, είναι η γωνία ημίσειας τιμής. Η γωνία αυτή αντιστοιχεί στο χωροταξικό εύρος εκπομπής ή ανίχνευσης της ακτινοβολίας. Όσο μεγαλύτερη γωνία ημίσειας τιμής έχει μια φωτοδίοδος, σε συνδυασμό με αντίστοιχη τιμή γωνίας ημίσειας τιμής του LED εκπομπής, τόσο περισσότερο ευαίσθητη είναι στην ανίχνευση της ακτινοβολίας. Έχει δηλαδή, μεγαλύτερο επιφανειακό φάσμα ανίχνευσης. Επομένως για το IR LED και τις τρεις φωτοδιόδους, οι οποίες βρίσκονται στο ίδιο τεταρτημόριο ( $90^\circ$ ,  $150^\circ$  και  $180^\circ$ ), μία κατάλληλη τιμή της γωνίας ημίσειας τιμής είναι  $\pm 20^\circ$  (διπλάσια από αυτή που χρησιμοποιήθηκε). Με αυτόν τον τρόπο οι φωτοδιόδοι θα αντιλαμβάνονται μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολίας μεγαλώνοντας έτσι το εύρος λειτουργίας του θολομέτρου και βελτιώνοντας την ακρίβεια του για μικρές μεταβολές της έντασης της ακτινοβολίας.

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια του αισθητήρα θολότητας είναι και το μέγεθος του δοχείου δείγματος. Σύμφωνα με τα πρότυπα που έχουν ορισθεί από τις USEPA και ISO (USEPA 180.1 & ISO 7027), η μέγιστη οριακή απόσταση της πηγής φωτός από τον φωτοδέκτη πρέπει να είναι 10cm. Όταν ένα LED με γωνία ημίσειας τιμής  $\pm \varphi$  ( $\varphi$  σε rad) εκπέμπει ακτινοβολία σε κυκλική διατομή του κυλινδρικού δοχείου δείγματος (στο ίδιο επίπεδο με το LED) δημιουργείται ένα «φωτεινό» τόξο μήκους  $\varphi \times r$ , όπου  $r$  ακτίνα κυλινδρικού δοχείου. Όσο μεγαλύτερο είναι το τόξο που δημιουργείται τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να βρίσκεται η φωτοδίοδος μέσα σε αυτό και να λαμβάνει την

ακτινοβολία. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος ( $2 \times r$ ) του δοχείου δείγματος τόσο η ευαισθησία του θολομέτρου αυξάνεται. Από την άλλη, όσο μικραίνει η διάμετρος τόσο μειώνεται η ευαισθησία, αλλά αυξάνεται το εύρος γραμμικότητας των μετρήσεων.

Τα περισσότερα θολόμετρα της αγοράς χρησιμοποιούν δοχεία δείγματος διαμέτρου μικρότερης ή ίσης με 4 cm. Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω, μια ικανοποιητική τιμή για την διάμετρο θα ήταν 4 ... 5 cm, το μισό της μέγιστης οριακής τιμής που ορίζουν τα πρότυπα των ISO και USEPA, με την βοήθεια της οποίας μπορεί να μειωνόταν σε μικρό βαθμό η ακρίβεια του θολομέτρου αλλά θα βελτιωνόταν σε μεγαλύτερο βαθμό η συνολική λειτουργία και απόκριση του.

Τα πιο σημαντικά ηλεκτρονικά στοιχεία που αφορούν την ποιότητα λειτουργίας του θολομέτρου είναι οι τελεστικοί ενισχυτές και ο μικροελεγκτής.

Στην περίπτωση των ενισχυτών έγινε η κατάλληλη επιλογή, από πλευράς υλικού, καθώς χρησιμοποιήθηκαν CMOS τελεστικοί ενισχυτές ακριβείας, ιδικοί για κυκλώματα και εφαρμογές αισθητήρων. Στο κύκλωμα των φωτοδιόδων επιλέχθηκε σύνδεση του ενισχυτή με τις φωτοδιόδους με βάση την μέθοδο φωτοαγωγιμότητας (ανάστροφη πόλωση) με στόχο οι φωτοδιόδοι να αντιδρούν πιο γρήγορα στις μεταβολές της ακτινοβολίας. Τελικά το κύκλωμα δεν λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες και η χρησιμοποίηση της φωτοβολταϊκής μεθόδου (ορθή – μηδενική πόλωση) θα φάνταζε πιο ικανοποιητική αφού ενισχύει την γραμμική συμπεριφορά της φωτοδιόδου και εξαλείφει το «σκοτεινό» ρεύμα (dark current) μειώνοντας τον θόρυβο σήματος.

Η ακρίβεια του θολομέτρου οφείλεται επίσης και στην διαδικασία της ψηφιοποίησης. Η επιλογή ενός μικροελεγκτή ή ενός αυτόνομου ψηφιακού αποκωδικοποιητή με μεγαλύτερη ανάλυση ψηφίων (resolution) των 10 bit θα καθιστούσε ικανό το σύστημα να αντιλαμβάνεται μεταβολές  $\mu V$  κι έτσι να έχει και μεγαλύτερη ακρίβεια.

Τέλος, η βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε ήταν σχετική με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η ακρίβεια του θολομέτρου. Ένας τρόπος βελτίωσης της διαδικασίας της βαθμονόμησης θα ήταν η ταυτόχρονη χρήση ενός θολομέτρου εμπορίου με την βοήθεια του οποίου θα μπορούσαν να αντιστοιχηθούν οι πραγματικές τιμές θολότητας με τις τιμές θολότητας (τις τάσης διέγερσης των φωτοδιόδων) που υπολογίζει το υπό κατασκευή θολόμετρο.

Η χρήση πρότυπων ουσιών θολότητας, όπως η φορμαζίνη, θα ενίσχυε σημαντικά την διαδικασία της βαθμονόμησης, ενώ η διαίρεση του εύρους μετρήσεων σε περισσότερα διαστήματα (κάθε διάστημα – διαφορετικές παραμέτρους εξίσωσης) θα είχε σαν αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της ακρίβειας του οργάνου.

## 6.2.2 Χωροταξικές βελτιώσεις

Οι χωροταξικές βελτιώσεις έχουν σαν στόχο την μείωση της επιφάνειας που καλύπτει το ηλεκτρονικό κύκλωμα της συσκευής του θολομέτρου αλλά και την αυτονομία του. Η μείωση και των δύο αυτών χαρακτηριστικών του ηλεκτρονικού κυκλώματος μπορεί να επιτευχθεί μεταβάλλοντας κάποια κυκλωματικά χαρακτηριστικά με βασικό γνώμονα ότι πλέον η τροφοδοσία του θολομέτρου θα είναι +5V. Στο κύκλωμα του θολομέτρου που κατασκευάστηκε, χρησιμοποιήθηκε τροφοδοσία  $\pm 15V$  (συλλέκτης τρανζίστορ οδήγησης IR LED, ανάστροφη πόλωση φωτοδιόδων και ανάστροφος ενισχυτής τροφοδοσίας), ενώ αρκετά στοιχεία χρησιμοποιούσαν και τροφοδοσία  $\pm 5V$  (τελεστικοί ενισχυτές ακριβείας, μικροελεγκτής, LCD display και LED ένδειξης τροφοδοσίας) με αποτέλεσμα κατά την δημιουργία του τυπωμένου κυκλώματος (PCB) να εμφανίζονται πολλές διακλαδώσεις κι έτσι να μεγαλώνει η επιφάνεια του. Αν η τροφοδοσία όλων των στοιχείων του κυκλώματος είναι η ίδια καθώς κι αν χρησιμοποιηθούν και τα δύο επίπεδα της πλακέτας για χάραξη αγωγών δρόμων, το τυπωμένο κύκλωμα θα είναι πιο απλό και τα ηλεκτρονικά στοιχεία θα μπορέσουν να τοποθετηθούν σε αισθητά μικρότερη επιφάνεια.

**Κύκλωμα τρανζίστορ οδήγησης :** Η τάση του συλλέκτη,  $V_{cc}$ , θα γίνει πλέον ίση με +5V και πλέον θα πρέπει να τοποθετηθεί μια νέα αντίσταση  $R_c$  τέτοια ώστε το IR LED να διαρρέεται από ρεύμα 100mA.

**Κύκλωμα φωτοδιόδων:** Η τάση ανάστροφης πόλωσης πρέπει να γίνει ίση με +5V. Βέβαια, δεν θα υπάρχει τάση (-5V) για την αρνητική τροφοδοσία του ενισχυτή ακριβείας έτσι ώστε να μπορεί η έξοδος του να είναι αρνητική (λόγω ανάστροφης πόλωσης). Επομένως, η φωτοβολταϊκή μέθοδος λειτουργίας του κυκλώματος φωτοδιόδων γίνεται επιτακτική, αφού σε αυτήν την περίπτωση η τάση εξόδου θα είναι θετική κι έτσι ο ενισχυτής αρκεί να τροφοδοτηθεί με θετική τάση τροφοδοσίας +5V και αρνητική τάση τροφοδοσίας την γείωση. Η αντίσταση μετατροπής ρεύματος σε τάση ( $R_{D180}$ ,  $R_{D150}$  και  $R_{D90}$ ) πλέον αλλάζει.

Με αυτήν τη λογική επιτυγχάνεται και πρόσθετη μείωση της επιφάνειας του κυκλώματος αφού το κύκλωμα αντιστροφής της πολικότητας της τάσης διέγερσης των φωτοδιόδων δεν χρειάζεται πλέον.

**Κύκλωμα τροφοδοσίας:** Στο κύκλωμα τροφοδοσίας ο ενισχυτής TL082CP, υπεύθυνος για την παραγωγή τάσης -5V, πλέον δεν είναι απαραίτητος.

Τέλος, με την επίτευξη των αλλαγών αυτών, δεν επιτυγχάνεται μόνο χωροταξική μείωση του κυκλώματος του αισθητήρα, αλλά και σημαντική μείωση στην μέγιστη και στη συνολική ισχύ που καταναλώνει, καθιστώντας το θολόμετρο αυτόνομο σε μεγάλο βαθμό.





# Παράρτημα

## Λογισμικό Μικροελεγκτή

Στο παράρτημα παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή με σκοπό τον υπολογισμό της μετρούμενης θολότητας. Ακολουθεί το κυρίως πρόγραμμα η λειτουργία του οποίου περιγράφεται στα σχόλια που παρατίθενται καθώς και στο 4ο Κεφάλαιο (Προγραμματισμός του μικροελεγκτή για την λειτουργία του θολομέτρου).

```
;  
;*****  
; This file is a basic code template for object module code *  
; generation on the PIC16F882. This file contains the *  
; basic code building blocks to build upon. *  
; *  
; Refer to the MPASM User's Guide for additional information on *  
; features of the assembler and linker (Document DS33014). *  
; *  
; Refer to the respective PIC data sheet for additional *  
; information on the instruction set. *  
; *  
;*****  
; *  
; Filename: turbidity sensor.asm *  
; Date: 11/7/2011 *  
; *  
; *  
; Author: Alkis Koukovinis *  
; *  
; *  
; *  
;*****  
; *  
; Files required: P16F882.INC *  
; *  
; *  
; *  
;*****  
; *  
; Notes: *  
; *  
; *  
; *  
; *  
;*****  
  
list p=16f882 ; list directive to define processor  
#include <p16f882.inc> ; processor specific variable definitions  
  
org 0x0000  
nop
```

```

goto START

org 0x0004
goto START

;*****
;*****;Variables*****
;*****

        CBLOCK 0x30

MET1
MET3
MET4
DDR
d1
d2
;-----adc
adccnt
m
v180h
v180l
v150h
v150l
v90h
v90l
v180th

;-----alu
vnsc3
vnsc2
vnsc1
b3
b2
b1
a6
a5
a4
a3
a2
a1
RES6
RES5
RES4
RES3
RES2
RES1
consth
constl
REMH
REML
RMH
REL
REH
RM1
RM2
loopcnt
temp
BitCount
REM3
REM2
REM1
t1
t2
t3
t4

```



```

    bcf STATUS,RP1           ; go to bank 00

;#####
;###
;LCD initializaton

MAIN

    CALL    LDEL           ;delay 200 ms

    CALL    LCDINIT       ;Initialization of LCD

DISP    CALL LCDDATA      ;display the content of LCDDATA in order to
                                ;see that lcd display is working properly

;-----
;average procedure
;-----

avgstart
    movlw 0xff           ;rescntl=ffHex=255,initialize the counter of average
    movwf rescntl       ;calculation of turbidity value

    clrf x1             ;clear temporary registers
    clrf x2
    clrf x3
    clrf x4
    clrf x5
    clrf x6

;-----
;/ ADC procedure /
;-----

;adc initialization
ADCSTART

    movlw 0x40           ;adccnt=40Hex=64,initialize the adc counter
    movwf adccnt       ;adc procedure takes place 64 times in order
                                ;measurements have better accuracy

    clrf v180h
    clrf v180l         ;clearing the registers that will be used
    clrf v150h         ;to store adc results from each photodiode
    clrf v150l
    clrf v90h
    clrf v90l

    bsf PORTA,LED      ;pin A5 (+5V going to turn on the
led)

adcproc
;gives v180h-1
    clrf ADRESH        ;initialize the adc registers BANK
00

    bsf STATUS,RP0      ;and BANK 01
    clrf ADRESL
    bcf STATUS,RP0

    movlw 0x85         ;10000101=> 10:fosc/32,4MHz,8usec & 0001:AN1
&

    movwf ADCON0       ;0:go/(done)' & 1:adc is enabled
    call shortdelay
    bsf ADCON0,1       ;1=go/(done)':starts adc
check180    btfs ADCON0,1
            goto check180 ;when adc completes continue
(go/(done)'=>0)

```

```

    bsf STATUS,RP0
    movf ADRESL,0
    bcf STATUS,RP0

    addwf v180l,1
    btfsc STATUS,0
    incf v180h,1           ;v180h-1=v180h-1+porta1 (64 times)
    movf ADRESH,0
    addwf v180h,1

;gives v150h-1
    clrf ADRESH

    bsf STATUS,RP0
    clrf ADRESL
    bcf STATUS,RP0

    movlw 0x89           ;10001001=> 10:fosc/32,4MHz,8usec & 0010:AN2
&
    movwf ADCON0        ;0:go/(done)' & 1:adc is enabled
    call shortdelay
    bsf ADCON0,1        ;1=go/(done)':starts adc
check150    btfsc  ADCON0,1
    goto check150      ;when adc completes continue
(go/(done)'=>0)

    bsf STATUS,RP0
    movf ADRESL,0
    bcf STATUS,RP0

    addwf v150l,1
    btfsc STATUS,0
    incf v150h,1        ;v150h-1=v150h-1+porta2 (64 times)
    movf ADRESH,0
    addwf v150h,1

;give v90h-1
    clrf ADRESH

    bsf STATUS,RP0
    clrf ADRESL
    bcf STATUS,RP0
    movlw 0x8d           ;10001101=> 10:fosc/32,4MHz,8usec & 0011:AN3
&
    movwf ADCON0        ;0:go/(done)' & 1:adc is enabled
    call shortdelay
    bsf ADCON0,1        ;1=go/(done)':starts adc
check90    btfsc  ADCON0,1
    goto check90      ;when adc completes continue
(go/(done)'=>0)

    bsf STATUS,RP0
    movf ADRESL,0
    bcf STATUS,RP0

    addwf v90l,1
    btfsc STATUS,0
    incf v90h,1         ;v90h-1=v90h-1+porta3 (64 times)
    movf ADRESH,0
    addwf v90h,1

    decfsz adccnt,1    ;decrease adc counter, when adc counter=0
    goto adcproc       ;the adc procedure ends and when that
happens

;digital-V180=V180h-1/64,
;digital-V150=V150h-1/64 &
;digital-V90=V90h-1/64

```

```

        bcf PORTA,LED           ;(0V going to turn off the led)

;-----
;/ real results from adc  /
;-----

;v180h-1=v180h-1/64
div180  clrf a3
        movf v180h,0           ;a(3,2,1)=V180h-1
        movwf a2
        movf v180l,0
        movwf a1
        movlw 0x00             ;b(2,1)=40hex=64
        movwf b2
        movlw 0x40
        movwf b1
        call Div2416           ;a=a/b (24/16 bits)
        movf a2,0
        movwf v180h           ;a(3)=0, real-V180h-1=a(2,1)
        movf a1,0
        movwf v180l

;v150h-1=v150h-1/1536 (1536=64*24)
div150  clrf a3
        movf v150h,0           ;a(3,2,1)=V150h-1
        movwf a2
        movf v150l,0
        movwf a1
        movlw 0x06             ;b(2,1)=600hex=1536
        movwf b2               ;V150 is already amplified by the analog
circuit by 24(gain)

        movlw 0x00             ;so real-V150h-1=V150h-1/(64*24)
        movwf b1
        call Div2416           ;a=a/b (24/16 bits)
        movf a2,0
        movwf v150h
        movf a1,0
        movwf v150l           ;a(3)=0, real-V150h-1=a(2,1)

;v90h-1=v90h-1/512 (1536=64*24)
div90   clrf a3
        movf v90h,0           ;a(3,2,1)=V90h-1
        movwf a2
        movf v90l,0
        movwf a1
        movlw 0x06             ;b(2,1)=600hex=1536
        movwf b2               ;V90 is already amplified by the analog
circuit by 24(gain)

        movlw 0x00             ;so real-V90h-1=V90h-1/(64*24)
        movwf b1
        call Div2416           ;a=a/b (24/16 bits)
        movf a2,0
        movwf v90h
        movf a1,0
        movwf v90l           ;a(3)=0, real-V90h-1=a(2,1)

;in this stage adc procedure for the voltage of photodiodes has been
;completed
;v180, v150 and v90 are ready for turbidity calculation

;
;

```

```
goto denominator
```

```

;
;
;choosing between v150decreasing and v150increasing
denominator
    movlw 0x96
    movwf v180th
    incf v180h,1
    decfsz v180h,1      ;v180th is v180threshold which determines
    goto v150incr      ;the equation that must be taken for
turbidity
    movf v180th,0      ;if v180th>=150=730mV the value of v150h-1
    ;increases as the turbidity increases
    subwf v180l,0
    btfsc STATUS,C      ;or else the value of v150h-1 decreases
    goto v150incr

v150decr
    clrf vnscl
    clrf vnscl2
    clrf vnscl3      ; vnscl = V not scattered at 90 degrees

    movlw 0x00
    movwf b3
    movwf b2
    movlw 0x02
    movwf b1      ; b(3,2,1)= 02 hex =2 (8 bits)

    movf v180h,0
    movwf a2
    movf v180l,0
    movwf a1      ; a(2,1) = v180h-1 (10 bits)

    call Mult1624      ;result RES5:RES4:RES3:RES2:RES1 of which
    ;RES5,RES4=0,(8bits x 10bits = 18 bits)

    movf RES3,0
    movwf vnscl3
    movf RES2,0
    movwf vnscl2
    movf RES1,0
    movwf vnscl1      ;vnscl(3,2,1) = 2xV180h-1

    movlw 0x00
    movwf b3
    movlw 0x00
    movwf b2
    movlw 0x0b
    movwf b1      ; b(3,2,1)=0bhex =12 (8 bits)

    movf v150h,0
    movwf a2
    movf v150l,0
    movwf a1      ; a(2,1) = v150h-1 (10 bits)

    call Mult1624      ;result RES5:RES4:RES3:RES2:RES1 of which
    ;RES5,RES4=0,(8bits x 10bits = 18 bits)

    movf RES1,0
    addwf vnscl1,1
    btfss STATUS,0      ;carry check
    goto secondByte
    incf vnscl2,1
    btfsc STATUS,2      ;carry check
    incf vnscl3,1

```

```

secondByte  movf RES2,0
            addwf vncs2,1
            btfsc STATUS,0      ;carry check
            incf vncs3,1

            movf RES3,0
            addwf vncs3,1      ;finally vncs(3,2,1) =2xV180h-1 + 12xV150h-
1
            goto check        ;go to check if denominator is zero

v150incr    clr f vncs3
            clr f vncs2
            clr f vncs1      ; vncs = V not scattered

            movlw 0x00
            movwf b3
            movwf b2
            movlw 0x48
            movwf b1        ; b(3,2,1)=48hex =72 (8 bits)

            movf v180h,0
            movwf a2
            movf v180l,0
            movwf a1        ; a(2,1) = v180h-1 (10 bits)

            call Mult1624    ;result RES5:RES4:RES3:RES2:RES1 of which
                            ;RES5,RES4=0 (8bits x 10bits = 18 bits)

            movf RES3,0
            movwf vncs3
            movf RES2,0
            movwf vncs2
            movf RES1,0
            movwf vncs1    ;vncs(3,2,1) =72xV180h-1

            movlw 0x00
            movwf b3
            movlw 0x01
            movwf b2
            movlw 0x10
            movwf b1        ; b(3,2,1)=110hex =272 (8 bits)

            movf v150h,0
            movwf a2
            movf v150l,0
            movwf a1        ; a(2,1) = v150h-1 (10 bits)

            call Mult1624    ;result RES5:RES4:RES3:RES2:RES1 of which
                            ;RES5,RES4=0 (8bits x 10bits = 18 bits)

sub24      movf RES1,0
            subwf vncs1,1    ;subtract two numbers of 24bits axV180-bxV150
            btfsc STATUS,C  ;for this range of data axV180 is always
greater
            goto cont      ;than bxV150, so the result is always
positive
            decf vncs2,1

            incfsz vncs2,0
            goto cont
            decf vncs3,1

cont       movf RES2,0
            subwf vncs2,1

```



```

        btfss STATUS,C           ;carry check
        decf vnc3,1

        movf RES3,0
        subwf vnc3,1           ;vnc3=72xV180h-1 - 272xV150h-1 and then
check                                     ;if denominator is zero

;check if the denominator(Vnsc)=0
check  incf vnc1,1
        decfsz vnc1,1
        goto continue
        incf vnc2,1
        decfsz vnc2,1
        goto continue
        incf vnc3,1
        decfsz vnc3,1           ;if denominator is not zero continue by
display                                     ;calculating the ratio turbidity, else
        goto print_zerodiv     ;zero denominator and restart process

continue
v90modify  movlw 0x0f
          movwf b3
          movlw 0x42
          movwf b2
          movlw 0x40
          movwf b1           ;b(3,2,1)=0f4240 hex = 1000000=10(^6)

          movf v90h,0
          movwf a2
          movf v90l,0
          movwf a1           ;a(2,1) = v90h-1

          call Mult1624      ;result
RES5:RES4:RES3:RES2:RES1=10(^6)xV90h-1,
          ;I keep all of them

result  movlw 0x00
        movwf a6
        movf RES5,0
        movwf a5
        movf RES4,0
        movwf a4
        movf RES3,0
        movwf a3
        movf RES2,0
        movwf a2
        movf RES1,0
        movwf a1           ;a(6,5,4,3,2,1) = RES (5,4,3,2,1)
        movf vnc3,0
        movwf b3
        movf vnc2,0
        movwf b2
        movf vnc1,0
        movwf b1           ;b(3,2,1)= vnc(3,2,1)

        call DIVIDE_48by24   ;the result is equal to
                             ;turbidity*100=10(^6)xV90h-
1/10(^4)xVnsc=a(2,1)
                             ;and it is 48bits but the we will only need
                             ;the last 16 bits
                             ;cause the other bits are equal to zero

;each turbidity value is added to temporary register x(6,5,4,3,2,1)

```

```

;when the addition of 256 values of turbidity is completed we calculate
;the average value of turbidity in order to have better accuracy
avgtag
    movf a1,0                ;x(6,5,4,3,2,1)=x(6,5,4,3,2,1)+a(1)
    addwf x1,1
    btfss STATUS,0          ;carry check
    goto second_reg
    incf x2,1
    btfss STATUS,2          ;carry check
    goto second_reg
    incf x3,1
    btfss STATUS,2          ;carry check
    goto second_reg
    incf x4,1
    btfss STATUS,2          ;carry check
    goto second_reg
    incf x5,1
    btfsc STATUS,2          ;carry check
    incf x6,1

second_reg
    movf a2,0                ;x(6,5,4,3,2)=x(6,5,4,3,2)+a(2)
    addwf x2,1
    btfss STATUS,0          ;carry check
    goto loopres
    incf x3,1
    btfss STATUS,2          ;carry check
    goto loopres
    incf x4,1
    btfss STATUS,2          ;carry check
    goto loopres
    incf x5,1
    btfsc STATUS,2          ;carry check
    incf x6,1

loopres decfsz rescnt1,1    ;when average counter rescnt1 becomes equal
to                          ;zero temporary register x will be divided
    goto ADCSTART          ;255 in order to calculate average turbidity
by                          ;which will be displayed in the LCD

    movf x1,0
    movwf a1
    movf x2,0
    movwf a2
    movf x3,0
    movwf a3
    movf x4,0
    movwf a4
    movf x5,0
    movwf a5
    movf x6,0                ;a(6,5,4,3,2,1)=x(6,5,4,3,2,1), 48bits
    movwf a6

    movlw 0x00
    movwf b3                ;b(3,2,1)=ffhex=255
    movlw 0x00
    movwf b2
    movlw 0xff
    movwf b1

    call DIVIDE_48by24      ;the result is equal to turbidity*100 and it
is                          ;48bits but the we will only need the
                           ;last 16 bits

```

```

;just keeping a2 and a1
clear di  clrf t1      ;the value of a(2,1) expresses a five digit number
          clrf t2      ;(turbidity value)=(t1) (t2) (t3), (t4) (t5)
          clrf t3
          clrf t4
          clrf t5

digit1   clrf a6
          clrf a5
          clrf a4
          clrf a3
          movlw 0x27      ;multiple of 10000
          movwf b2
          movlw 0x10      ;t1=turbidity/10000
          movwf b1
          call Div2416
          movf a1,0       ;0=<quotient a3:a2:a1<10
          movwf t1       ;t1=a1

digit2   clrf a3
          movf REMH,0     ;the division balance is multiple of 1000
          movwf a2
          movf REML,0     ;t2=turbidity/1000
          movwf a1
          movlw 0x03
          movwf b2
          movlw 0xE8
          movwf b1
          call Div2416    ;0=<quotient a3:a2:a1<10
          movf a1,0
          movwf t2       ;t2=a1

digit3   clrf a3
          movf REMH,0     ;the division balance is multiple of 100
          movwf a2
          movf REML,0     ;t3=turbidity/100
          movwf a1
          movlw 0x00
          movwf b2
          movlw 0x64
          movwf b1
          call Div2416    ;0=<quotient a3:a2:a1<10
          movf a1,0
          movwf t3       ;t3=a1

digit4   clrf a3
          movf REMH,0     ;the division balance is multiple of 10
          movwf a2
          movf REML,0     ;t4=turbidity/10
          movwf a1
          movlw 0x00
          movwf b2
          movlw 0x0A
          movwf b1
          call Div2416    ;0=<quotient a3:a2:a1<10
          movf a1,0
          movwf t4       ;t4=a1

digit5   movf REML,0     ;the division balance is t5
          movwf t5

;result  turbidity=(t1) (t2) (t3), (t4) (t5)

```

```

call CLD          ;clear LCD
call LCDDATA
CPOT H'16'          ;go to 2nd line 7th position

incf t1,1
decfsz t1,1       ;check if t1=0 in order to not be displayed
goto print_t1

incf t2,1
decfsz t2,1       ;check if t2=0 in order to not be displayed
goto print_t2

goto print_t3     ;even if t3=0, the result will have the following
                  ;format 0,00

print_t1    DIG t1          ;1st digit of result in ascii mode  t1=t1+30 (HEX)
print_t2    DIG t2          ;2nd digit of result in ascii mode  t2=t2+30 (HEX)
print_t3    DIG t3          ;3rd digit of result in ascii mode  t3=t3+30 (HEX)
print_flt   CHAR ', '      ;floating point
print_t4    DIG t4          ;4th digit of result in ascii mode  t4=t4+30 (HEX)
print_t5    DIG t5          ;5th digit of result in ascii mode  t5=t5+30 (HEX)

          goto tend

print_zerodiv
          call CLD
          call LCDDATA
          CPOT H'13'        ;go to 2nd line, 4th position
          CHAR 'z'
          CHAR 'e'
          CHAR 'r'          ;display this message if denominator is equal to
zero
          CHAR 'o'
          CHAR 'd'
          CHAR ' '
          CHAR ':'
          CHAR '('
tend       goto avgstart

END          ; directive 'end of program'

```

Τέλος, ακολουθούν οι συναρτήσεις και οι μακροεντολές τις οποίες καλεί το πρόγραμμα του μικροελεγκτή.

```

;*****
;Subroutines and Macros
;*****

;-----
;Equalize the bits PORTB,CCC and DDR,DDD.
;The DDR holds temporarily the LCD data or the LCD instruction.
;-----
;
EQB MACRO DDD,CCC
    BSF PORTB,CCC
    BTFSS DDR,DDD
    BCF PORTB,CCC

    ENDM

;-----
;write an instruction to LCD
;-----
INST MACRO LIT1 ;LIT1 holds the instruction code
;
    BSF PORTB,LCDRS ;instruction to LCD
    MOVLW LIT1
    MOVWF DDR ;temporary register
    CALL LCDWR
;
    ENDM

;-----
;write a character to LCD
;-----
CHAR MACRO LIT2 ;LIT2 holds the code
;
    BSF PORTB,LCDRS ;data to LCD
    MOVLW LIT2
    MOVWF DDR ;temporary register
    CALL LCDWR
;
    ENDM

;-----
;write a digit to LCD
;-----
DIG MACRO REG ;REG holds the BCD code of digit
;
    BSF PORTB,LCDRS ;data to LCD
    MOVF REG,W
    ADDLW 30H ;conversion BCD TO ASCII
    MOVWF DDR ;temporary register
    CALL LCDWR
;
    ENDM
;
;

```

```

-----
;clear LCD
-----
CLD INST    B'00000001' ;clear display
  CALL     DEL      ;delay 6 msec
;
  RETURN
;
;
;
;
-----
;Move LCD cursor to the position that the POT points
;Values for POT:
;  H'00' to H'0F' for first LCD line
;  H'10' to H'1F' for second LCD line
-----
CPOT      MACRO    POT      ;POT holds the position of LCD cursor
;
  MOVLW    POT
  MOVWF    DDR      ;temporary register
  CALL     SCPOT
;
  ENDM
;
;
-----
;Change the position of LCD cursor
-----
SCPOT     BCF PORTB,LCDRS ;instruction to LCD
;
  BTFSS    DDR,4      ;Check if the first hex digit of
  GOTO     $+3        ;DDR is 0
;
  BCF     DDR,4      ;first hex digit of DDR is 1 so
  BSF     DDR,6      ;sent address for second LCD line
;
  BSF     DDR,7
  CALL    LCDWR      ;write the instruction to LCD
;
  RETURN
;
;
;
;
-----
; Write the content of W to LCD by using the macro EQB(DDD,CCC)
-----
LCDWR     EQB 4,DB4      ;
          EQB 5,DB5      ;upper 4 bits
          EQB 6,DB6      ;
          EQB 7,DB7      ;
;
  BSF PORTB,LCDE ;write to LCD
  NOP
  BCF PORTB,LCDE ;
;
  MOVLW   .40          ;
  MOVWF   MET3         ; delay 120 us
  DEFSZ   MET3,F      ;
  GOTO    $-1         ;
;
  EQB 0,DB4          ;
  EQB 1,DB5          ;lower 4 bits
  EQB 2,DB6          ;
  EQB 3,DB7          ;

```

```

;
;   BSF PORTB,LCDE ;write to LCD
;   NOB
;   BCF PORTB,LCDE ;
;
;   MOVLW .40 ;
;   MOVWF MET3 ; delay 120 us
;   DECFSZ MET3,F ;
;   GOTO $-1 ;
;
;   RETURN

;-----
;Initialization of LCD.
;
;The first macro sends two 4-bit data to LCD (one or two LCD
;instructions). If the LCD setting was for 8-bit data then the
;first 4-bit data (one LCD instruction) holds the same setting
;and the second 4-bit data (another LCD instruction) do the same.
;If the LCD setting was for 4-bit data then the first 4-bit data
;(half LCD instruction) changes the setting for 8-bit data and the
;second 4-bit data do nothing.
;
;The second macro sends two LCD instructions.
;The first 4-bit data (one LCD instruction) sets 8-bit LCD data.
;The second 4-bit data changes the setting for 4-bits data
;
;Attention: The 4-bit data 0011 should be send three times.
;
;-----
;
;LCDINIT INST B'00110011' ;first macro
;
;   INST B'00110010' ;second macro
;
;   INST B'00101000' ;data length = 4 bits, 2 lines
;
;   INST B'00001100'
;turn on the LCD, off the cursor, no blink of cursor position character
;
;   INST B'00000110' ;moving of cursor one position right
;
;   CALL CLD ;clear display
;
;   RETURN
;
;
;
;-----
;Create a time delay about 6 msec.
;-----
DEL MOVLW .8
MOVWF MET4
;
;   CLRF MET1
;   DECFSZ MET1,F
;   GOTO $-1
;
;   DECFSZ MET4,F
;   GOTO $-4
;
;   RETURN
;
;

```

```

;
;-----
;Create a time delay about 200 msec.
;-----
LDEL
  CLRF    MET4
  CLRF    MET1
  DECFSZ  MET1, F
  GOTO    $-1
;
  DECFSZ  MET4, F
  GOTO    $-4
;
  RETURN

;-----
;Create a time delay 50usec, for clock=4MHz => instruction cycle=1usec.
;-----

shortdelay

  movlw  0x0c
  movwf  d1      ;d1=hex-0c=12
  movlw  0x02
  movwf  d2      ;d2=hex-02=2

TAG3    decfsz d2,1
        goto  TAG4
        return      ;==>50usec

TAG4    decfsz d1,1
        goto  TAG4
        goto  TAG3

;-----
;display the term "Turbidity" and its units "NTUs"
;-----

LCDDATA
  CPOT    H'00'      ;first position of first LCD line
;
  CHAR    'T'
  CHAR    'u'
  CHAR    'r'
  CHAR    'b'
  CHAR    'i'
  CHAR    'd'
  CHAR    'i'
  CHAR    't'
  CHAR    'y'
  CHAR    ' '
  CHAR    ' '

  CPOT    H'1c'      ;14th position of second LCD line
  CHAR    'N'
  CHAR    'T'
  CHAR    'U'
  CHAR    's'
;
  RETURN

;-----
;16*24 bits multiplication, a(2,1)*b(3,2,1)=RES5,RES4,RES3,RES2,RES1
;-----
Mult1624
  clrf  RES5
  clrf  RES4
  clrf  RES3

```



```

    clrf RES2
    clrf RES1
    clrw

A2B3  movf a2,0
      movwf RM1 ;RM1=a2
      movf b3,0
      movwf RM2 ;RM2=b3
      call Mult8 ;a2*b3
      movf REL,0
      addwf RES4,1 ; RES4=RES4+REL

      movf REH,0
      addwf RES5,1 ;RES5=RES5+REH

A2B2  movf a2,0
      movwf RM1 ;RM1=a2
      movf b2,0
      movwf RM2 ;RM2=b2
      call Mult8 ;a2*b2
      movf REL,0
      addwf RES3,1 ;RES3=RES3+REL

      movf REH,0
      addwf RES4,1 ;RES4=RES4+REH

      btfsc STATUS,0
      incf RES5,1 ;RES5=RES5+possible_carry4

A2B1  movf a2,0
      movwf RM1 ;RM1=a2
      movf b1,0
      movwf RM2 ;RM2=b1
      call Mult8 ;a2*b1
      movf REL,0
      addwf RES2,1 ;RES2=RES2+REL

      movf REH,0
      addwf RES3,1 ;RES3=RES3+REH

      btfss STATUS,0 ;RES4=RES4+pc3
      goto A1B3
      incf RES4,1

      btfsc STATUS,2 ;RES5=RES5+pc4
      incf RES5,1

A1B3  movf a1,0
      movwf RM1 ;RM1=a1
      movf b3,0
      movwf RM2 ;RM2=b3
      call Mult8 ;a2*b2
      movf REL,0
      addwf RES3,1 ;RES3=RES3+REL

      btfss STATUS,0 ;RES4=RES4+pc3
      goto A1B3c
      incf RES4,1

      btfsc STATUS,2 ;RES5=RES5+pc4
      incf RES5,1

A1B3c movf REH,0
      addwf RES4,1 ;RES4=RES4+REH

      btfsc STATUS,0 ;RES5=RES5+pc4
      incf RES5,1

```

```

A1B2    movf a1,0
        movwf RM1    ;RM1=a1
        movf b2,0
        movwf RM2    ;RM2=b2
        call Mult8   ;a1*b2
        movf REL,0
        addwf RES2,1    ;RES2=RES2+REL

        btfss STATUS,0
        goto A1B2c
        incf RES3,1

        btfss STATUS,2
        goto A1B2c
        incf RES4,1

        btfsc STATUS,2
        incf RES5,1

A1B2c   movf REH,0
        addwf RES3,1    ;RES3=RES3+REH

        btfss STATUS,0
        goto A1B1
        incf RES4,1

        btfsc STATUS,2
        incf RES5,1

A1B1    movf a1,0
        movwf RM1    ;RM1=a1
        movf b1,0
        movwf RM2    ;RM2=b1
        call Mult8   ;a1*b1
        movf REL,0
        addwf RES1,1    ;RES1=RES1+REL

        movf REH,0
        addwf RES2,1    ;RES2=RES2+REH

        btfss STATUS,0
        goto AB
        incf RES3,1

        btfss STATUS,2
        goto AB
        incf RES4,1

        btfsc STATUS,2
        incf RES5,1

AB       return

;-----
;8*8 bits multiplication, RM1*RM2=REH,REL
;-----
Mult8
        clrf RMH
        clrf REL
        clrf REH
        clr w

Mult8a  bcf STATUS,0
        rrf RM2,1
        btfss STATUS,0    ;if the last significant bit, which goes to
        goto Mult8b      ;carry bit is equal to 1 REH,REL=REH,REL+RM1

        clr w

```

```

    movf RM1,0
    addwf REL,1
    movlw 0x01
    andwf STATUS,0
    addwf RMH,0
    addwf REH,1

Mult8b bcf STATUS,0
       rlf RM1,1
       rlf RMH,1
       incf RM2,1
       decfsz RM2,1
       goto Mult8a
return

;-----
;24/16 bits division, a(3,2,1)/b(2,1)=a(3,2,1) & division balance=REMH,REML
;-----

Div2416
    clrf REMH
    clrf REML
    movlw .24
    movwf loopcnt

Diva  rlf a1,1
      rlf a2,1
      rlf a3,1

      rlf REML,1
      rlf REMH,1

      rlf loopcnt,1

      movf b1,0
      subwf REML,1
      movf b2,0
      btfss STATUS,0
      incfsz b2,0
      subwf REMH,0

      btfsc STATUS,0
      bsf loopcnt,0

      btfsc loopcnt,0
      goto Divb

      movf b1,0
      addwf REML,1
      movf REMH,0

Divb  movwf REMH
      clrc
      rrf loopcnt,1
      decfsz loopcnt,1
      goto Diva

      rlf a1,1
      rlf a2,1
      rlf a3,1
return

;-----
;48/24 bits division, a(6,5,4,3,2,1)/b(3,2,1)=a(6,5,4,3,2,1)
;-----

DIVIDE_48by24

```

```

; prepare used variables
CLRF    REM3
CLRF    REM2
CLRF    REM1

clrf    temp

MOVLW   .48          ; initialize bit counter
MOVWF   BitCount

DIVIDE_LOOP_48by24
RLF     a1,1
RLF     a2,1
RLF     a3,1
RLF     a4,1
RLF     a5,1
RLF     a6,1          ; shift in highest bit from dividend through
RLF     REM1,1        ; carry in temp
RLF     REM2,1
RLF     REM3,1

rlf     temp,1

MOVF    b1,0          ; get LSB of divisor
btfsc   temp, 7
goto    Div48by24_add

SUBWF   REM1,1        ; subtract 24 bit divisor from 24 bit temp
                        ; subtract

MOVF    b2,0          ; get middle byte
btfss   STATUS,0      ; if overflow ( from prev. subtraction )
INCFSZ  b2,0          ; increase source
SUBWF   REM2,1        ; and subtract from dest.

MOVF    b3,0          ; get top byte
btfss   STATUS,0      ; if overflow ( from prev. subtraction )
INCFSZ  b3,0          ; increase source
SUBWF   REM3,1        ; and subtract from dest.

movlw   1
btfss   STATUS,0
subwf   temp, 1
GOTO    DIVIDE_SKIP_48by24 ; carry was set, subtraction ok,
                        ; continue with next bit

Div48by24_add
; result of subtraction was negative restore temp
ADDWF   REM1,1        ; add it to the lsb of temp

MOVF    b2,0          ; middle byte
BTFSC   STATUS,0      ; check carry for overflow from previous
addition
INCFSZ  b2,0          ; if carry set we add 1 to the source
ADDWF   REM2,1        ; and add it if not zero in that case
                        ; Product + Multiplan=Product

MOVF    b3,0          ; MSB byte
BTFSC   STATUS,0      ; check carry for overflow from previous
INCFSZ  b3,0          ; addition
ADDWF   REM3,1        ; handle overflow

movlw   1
btfsc   STATUS,0
addwf   temp,1

DIVIDE_SKIP_48by24
DECFSZ  BitCount,1    ; decrement loop counter

```

```
        GOTO    DIVIDE_LOOP_48by24      ; another run
; finally shift in the last carry
        RLF    a1,1
        RLF    a2,1
        RLF    a3,1
        RLF    a4,1
        RLF    a5,1
        RLF    a6,1
return
```



# Βιβλιογραφία

- [1] **Αβαριτσιώτης, Ιωάννης Ν.** *Τεχνολογία Αισθητήρων και Μικροσυστημάτων*. Αθήνα : ΕΜΠ, 2003.
- [2] **Elgar, Peter.** *Sensors for Measurements and Control*. Nottingham : 1998.
- [3] **Millman, Jacob και Χαλκιάς, Χρήστος.** "Ωλοκληρωμένη Ηλεκτρονική". Αθήνα : Εκδόσεις Συμμετρία, 2000. Τόμ. Α & Β.
- [4] **Sedra, Adel S. και Smith, Kenneth C.** "Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα". [επιμ.] Γιάννης Ε. Παπανάνος. Αθήνα : ΕΜΠ, 1994. Τόμ. Α & Β.
- [5] **Πεκμεστζή, Κιαμάλ.** "Συστήματα Μικροπολογιστών". Αθήνα : Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.
- [6] **Sadar, Michael J.** "Turbidity Science". USA : Hach Company, 1998. Technical Information Series.
- [7] **Sadar, Michael J.** "Turbidimeter Instrument Comparison: Low - Level Sample Measurements". USA : Hach Company, 1999. Technical Information Series.
- [8] **Harrison, Daniel και Fisch, Michael.** "Turbidity Measurement". [συγγρ. βιβλίου] John G. Webster. "The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook". USA : CRC Press, 1999, σσ. 1689-1698.
- [9] **Gabasa, Luis και Cornago, Javier.** "Study and Improvement of Turbidity Sensor". 2006.
- [10] **McNab, Incorporated.** "Optical Measurement of In-Process Fluids". New York : 2004.
- [11] **Sadar, Michael J.** "Turbidity Instrumentation - An Overview of Today's Available Technology". 2002.
- [12] **Omar, Ahmad Fairuz Bin και Matjafri, Mohd Zubir Bin.** "turbidimeter Design and Analysis: A Review on Optical Fiber Sensors for the Measurement of Water Turbidity". *Sensors Journal*. 20 October 2009. [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors).
- [13] **ABB Instrumentation.** "Turbidity Measurement". s.l. : Technical Support Department, 1999. Technical Note.
- [14] **Sugarman, Samuel C.** "Importance of Turbidity". 1999. EPA Guidance Manual.
- [15] **Michaud, J. P.** "A Citizen's Guide to Understanding and Monitoring Lakes and Streams". Washington State Department of Ecology. USA : 1991.
- [16] **Moore, M. L.** "NALMS Management Guide for Lakes and Reservoirs". USA : 1989. (NALMS: North American Lake Management Society) [www.nalms.org](http://www.nalms.org).

- [17] **Lawler, Damian M. και Brown, Robert M.** "A Simple and Inexpensive Turbidity Meter for the Estimation of Suspended Sediment Concentrations". *Hydrological Processes*. 1992, Τόμ. 6, σσ. 159-168.
- [18] **Johnson, Mark.** "Remote Turbidity Measurement With a Laser Reflectometer". *Water Science and Technology*. 1998, Τόμ. 37, σσ. 255-261.
- [19] **Postolache, Octavian, και συν.** "An IR Turbidity Sensor: Design and Application". USA : IEEE Instrumentation and Measurement, 2002.
- [20] **Shauri, Ahmad, και συν.** "Optical Transmission - Based Water Turbidity Measurement System". *International Journal of Engineering and Technology*. 2006, Τόμ. 3, σσ. 257-262.
- [21] **O'Dell, James W.** "METHOD 180.1 Determination of Turbidity By nephelometry". Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development, US. Environmental Protection Agency. OHIO : 1993.
- [22] **International Organization for Standards (ISO).** "International Standard ISO 7027 – Determination of Turbidity". s.l. : ISO, 1990.
- [23] **Postolache, O., Pereira, J. M. και Silva Girao, P.** "Optical Fiber Based Turbidity Sensing System". *Proc IMEKO TC19 Symp.* 2007, Τόμ. 2, σσ. 71-75.
- [24] **Ripka, Pavel και Tipek, Alois.** "Optical Sensors". "Modern Sensors Handbook". Great Britain and the United States : ISTE Ltd, 2007.
- [25] **Carter, Bruce και Mancini, Ron.** "Op Amps for Everyone". USA : Elsevier, 2009.
- [26] **Graeme, Jerald G.** "Photodiode Amplifiers". USA : The McGraw-Hill Companies Inc, 1996.
- [27] **Di Jasio, Lucio, και συν.** "PIC Microcontrollers". USA : Elsevier Inc, 2008.
- [28] **Smith, D. W.** "PIC in Practice". Great Britain : Elsevier Inc, 2006.
- [29] **Ibrahim, Dogan.** "PIC BASIC Projects". Great Britain : Elsevier Inc, 2006.
- [30] **OSRAM.** "GaAlAs Infrared Emitters (880 nm) - SFH 480". s.l. : OSRAM Opto Semiconductors GmbH, 2008. <http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000000003d3660001003a&act=showBookmark&catId=EN&lang=en>.
- [31] "A nephelometric Turbidity System for Monitoring Residential Water Quality". **Lambrou, Theofanis P., Panayiotou, Christos G. και Anastasiou, Christos C.** Cyprus : s.n., 2010. Sensor Applications, Experimentation, and Logistics - First International Conference, SENSAPPEAL 2009, Athens, Greece, September 25, 2009, Revised Selected Papers 2010. σσ. 43-55.
- [32] **OSRAM.** "Silicon PIN Photodiode with Very Short Switching Time - SFH 213". s.l. : OSRAM Opto Semiconductors GmbH, 2007. <http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?act=showBookmark&favOid=000000000003238e0001003a>.



- [33] **Hitachi Ltd.** "*HD44780U (LCD-II) (Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver)*". Japan : Hitachi Ltd, 1998. <http://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>.
- [34] **National Semiconductor.** "*LMC6082 Precision CMOS Dual Operational Amplifier*". s.l. : National Semiconductor, 2000. <http://www.national.com/ds/LM/LMC6082.pdf>.
- [35] **Microchip Technology Inc.** "*PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet 28/40/44-Pin, Enhanced Flash-Based 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology*". s.l. : Microchip Technology Inc., 2009. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41291F.pdf>.
- [36]. **Microchip Technology Inc.** "*DEVELOPMENT TOOLS DESIGN ADVISORY*". s.l. : Microchip Technology Inc., 2010 . <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41291F.pdf>.
- [37]. **Hamamatsu Corporation.** "*Photodiode Technical Information*". s.l. : Hamamatsu Corporation. [http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode\\_technical\\_information.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode_technical_information.pdf).
- [38]. "*Turbidity Sensor for Underwater Applications*". **Mylvaganam, Saba και Jakobsen, Torgeir.** Nice , France : 1998. OCEANS '98 Conference Proceedings. σσ. 158-161.

