



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Φασματοσκοπία διάχυτης ανάκλασης για την ανάλυση θρεπτικών συστατικών
του εδάφους**

**Φοιτητής: Στασινός Δημοσθένης
ΑΜ: 18387051**

Επιβλέπων/ουσα Καθηγητής/τρια

**Κωνσταντίνος Μουτζούρης
Καθηγητής**

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

Diploma Thesis

Diffuse Reflectance Spectroscopy for Soil Analysis

**Student: Dimosthenis Stasinou
Registration Number: 18387051**

Supervisor

**Konstantinos Moutzouris
Professor**

ATHENS-EGALEO, MARCH 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Κωνσταντίνος Μουτζούρης Καθηγητής	Ηλίας Σταύρακας, Καθηγητής	Οδυσσέας Τσακίριδης, Επίκουρος Καθηγητής

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Ονοματεπώνυμο Φοιτητή/ήτριας),
Μήνας, Έτος**

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος **Στασινός Δημοσθένης** του **Θεοφάνη**, με αριθμό μητρώου 18387051 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών
Στασινός Δημοσθένης

(Υπογραφή φοιτητή/ήτριας)

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν δεκαπέντε (15) δείγματα χώματος, τα οποία περιείχαν διαφορετικές συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών, με τη φασματοσκοπική μέθοδο της φασματοσκοπίας διάχυτης ανάκλασης, σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων που περιλαμβάνει όλο το ορατό και φθάνει μέχρι τα 1050nm στο κοντινό υπέρυθρο. Σκοπός της μελέτης είναι να ελέγξει αν η φασματοσκοπική αυτή μέθοδος μπορεί να προσδιορίσει τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους (ποιοτικά ή/και ποσοτικά), αντικαθιστώντας (ή συμπληρώνοντας) αντίστοιχες διαδεδομένες χημικές αναλύσεις χώματος, οι οποίες είναι περισσότερο χρονοβόρες και λιγότερο «καθαρές». Πρωτογενή φασματικά δεδομένα ελήφθησαν, αναλύθηκαν και, μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων, συσχετίστηκαν με αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των δειγμάτων, οι οποίες διεξήχθησαν από αρμόδιους εξωτερικούς φορείς. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, η οποία φιλοδοξεί να αποτελέσει μόνο την αρχή μιας ευρύτερης συστηματικής έρευνας, είναι ενθαρρυντικά ως προς τη δυνατότητα της φασματοσκοπία διάχυτης ανάκλασης να προσδιορίσει το pH και τα ηrk χαρακτηριστικά του εδάφους.

Λέξεις – κλειδιά

Φασματοσκοπία, Διάχυτη ανάκλαση, Έδαφος, Θρεπτικά συστατικά.

Abstract

In this thesis we measured 15 soil samples, with each one having different concentration of nutrients. We used the method of spectroscopy and more specifically the method of diffused reflectance spectroscopy, in a wide range of frequencies, which includes the whole visible spectrum and it reaches the near-infrared at around 1050nm. The goal of this study is to conclude if this optic method is capable of determining the nutrients of each soil(qualitatively or/and quantitatively) replacing or supplementing corresponding chemical methods. These chemical methods are well established but they tend to waste a lot of time and are overall worse for the environment. Raw spectral data were obtained, analyzed and correlated with the results of the chemical analysis of the samples, that were conducted by competent external bodies. This correlation occurred through appropriate diagrams exported by our analysis of the data. The results of this study, which aspires to be the beginning of a wider systematic study, are encouraging in terms of the potential of spectroscopy to evaluate the pH and the NPK characteristics of the soil.

Keywords

Spectroscopy, Diffuse reflectance, Soil, Nutrients.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	10
Κατάλογος Εικόνων	10
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής.....	
1.2 Σκοπός και στόχοι.....	
1.3 Μεθοδολογία	
1.4 Δομή	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Φυσικές έννοιες και αρχές	18
2.1 Μια ιστορική αναδρομή στο φως	
2.2 Το φως σε διεπιφάνειες	
2.2.1 Διάθλαση	
2.2.2 Ανάκλαση	
2.3 Φασματοσκοπία	
2.3.1 Φασματοσκοπία σιάχυτης ανάκλασης.....	20
2.4 Frensel Reflectance	20
2.5 Θεωρία Kubelka-Munk.....	21
2.6 Παλαιότερες έρευνες.....	21
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Πειραματικό μέρος.....	22
3.1 Ανάλυση πειραματικής διαδικασίας	22
3.2 Ανάλυση δεδομένων.....	26
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Εξαγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων	31
4.1 Δείγματα ίδιας κατηγορίας	31
4.2 Δείγματα διαφορετικής κατηγορίας.....	35
4.3 Διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης.....	40
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	41
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	42

Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας 4.1 Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στα δείγματα κατηγορίας A.....[31]
- Πίνακας 4.2 Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου και νατρίου στα δείγματα κατηγορίας B[32]
- Πίνακας 4.3 Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου και νατρίου στα δείγματα κατηγορίας C[33]
- Πίνακας 4.4 Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στα δείγματα κατηγορίας D[33]
- Πίνακας 4.5 Συγκέντρωση νατρίου στα δείγματα κατηγορίας E[34]
- Πίνακας 4.6 Σύγκριση νιτρικού αζώτου μεταξύ του B2 και των δειγμάτων της κατηγορίας A[35]
- Πίνακας 4.7 Σύγκριση νιτρικού αζώτου μεταξύ του B2 και των δειγμάτων της κατηγορίας E[36]
- Πίνακας 4.8 Σύγκριση νιτρικού αζώτου μεταξύ του A1 και των δειγμάτων της κατηγορίας D[37]
- Πίνακας 4.9 Σύγκριση νιτρικού αζώτου μεταξύ του A1 και των δειγμάτων της κατηγορίας C[38]

Κατάλογος Εικόνων

- Εικόνα 2.1 Το ορατό φως στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (19).....[14]
- Εικόνα 2.2 Εκπομπή μέλανος σώματος (21).....[15]
- Εικόνα 2.3 Το φαινόμενο της διάθλασης (24).....[16]
- Εικόνα 2.4 Τα δύο είδη ανακλάσεως του φωτός (27).....[17]
- Εικόνα 2.5 Το φαινόμενο της ανάκλασης σε κυρτό καθρέφτη (29).....[18]
- Εικόνα 2.6 Οπτικοποίηση του πειράματος της φασματοσκοπίας (34).....[19]
- Εικόνα 3.1 Πίνακας με τις περιεκτικότητες των θρεπτικών συστατικών του κάθε δείγματος.....[23]
- Εικόνα 3.2 Πηγή φωτός SLS201L (41).....[24]
- Εικόνα 3.3 Παράδειγμα παραγόμενου φάσματος[24]
- Εικόνα 3.4 Η επιφάνεια του λογισμικού Keshet[25]
- Εικόνα 3.5 Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης.....[26]
- Εικόνα 3.6 Η διαφορά των φασμάτων στο δείγμα C3 μεταξύ δύο μετρήσεων μία στο κέντρο και μία δεξιά του δείγματος[27]

Εικόνα 3.7 Συγκεντρωτική εικόνα όλων των φασμάτων	[27]
Εικόνα 3.8 Ποσοστό ανακλαστικότητας του Spectralon που χρησιμεύει στην κανονικοποίηση των δειγμάτων (45).....	[28]
Εικόνα 3.9 Αφαίρεση μεταξύ των υποκατηγοριών του χρώματος A	[29]
Εικόνα 3.10 Αφαίρεση μεταξύ των υποκατηγοριών του χρώματος C	[29]
Εικόνα 3.11 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και B3	[30]
Εικόνα 3.12 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των C1 και C3	[30]
Εικόνα 4.1 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των A1 και A2	[32]
Εικόνα 4.2 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και B3	[33]
Εικόνα 4.3 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των C2 και C3	[34]
Εικόνα 4.4 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των D3 και D1	[34]
Εικόνα 4.5 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των E2 και E1	[35]
Εικόνα 4.6 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και A2	[36]
Εικόνα 4.7 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και E3	[37]
Εικόνα 4.8 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και E2	[37]
Εικόνα 4.9 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των A1 και D3	[39]
Εικόνα 4.10 Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των A1 και C2	[39]
Εικόνα 4.11 Παρουσίαση του μοτίβου ανάμεσα στα χρώματα C και A	[40]
Εικόνα 4.12 Παράδειγμα διαγράμματος στην περιοχή NIR (49)	[41]

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή και ιδιαίτερα στη χώρα μας ο πρωτογενής τομέας είναι ένας από τους σημαντικότερους κλάδους της οικονομίας αλλά και ολόκληρης της ζωής του ανθρώπου. Ένα μεγάλο μερίδιο ατόμων συντηρείται οικονομικά από αυτόν, ενώ όλα τα υπόλοιπα μέλη της κοινωνίας καταναλώνουν τα προϊόντα που παράγονται. Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με το κομμάτι των καλλιεργειών και θα προταθεί μια νέα μέθοδος ανάλυσης χώματος. Οι καλλιέργειες είναι αρκετά επιρρεπείς σε καταστροφές και επηρεάζονται αρκετά από τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον. Για να μπορέσουμε να διασφαλίσουμε την ακεραιότητα της σοδειάς πρέπει να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα, όπως ράντισμα και πότισμα της καλλιέργειας, την κατάλληλη χρονική στιγμή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυσης των θρεπτικών συστατικών του εδάφους. Έτσι αντλούμε σημαντικά δεδομένα για τα ΝΡΚ χαρακτηριστικά του χώματος, δηλαδή άζωτο(N) φώσφορο(P) και κάλιο (K), καθώς και για το ΡΗ του και λαμβάνουμε τις κατάλληλες αποφάσεις. Η συνηθέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για αυτή την ανάλυση είναι η χημική, η οποία όμως εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα. Προσπαθούμε λοιπόν να εισάγουμε την οπτική μέθοδο και συγκεκριμένα της διάχυτης ανάκλασης, η οποία είναι πιο καθαρή και οικολογική καθώς είναι μη καταστρεπτική, ενώ ταυτόχρονα και πιο οικονομική.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Το κύριο θέμα της παρούσας διπλωματικής είναι η διεξαγωγή πειραμάτων για να προσδιορίσουμε με τρόπο οπτικό και συγκεκριμένα με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας διάχυτης ανάκλασης τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους. Το ενδιαφέρον αυτού του θέματος έγκειται στο γεγονός πως είναι ένας καινοτόμος τρόπος για να διεξαχθεί αυτή η διαδικασία ενώ ταυτόχρονα συμβαδίζει και με την τεχνολογική επικαιρότητα. Καθώς βαδίζουμε προς το μέλλον αναζητάμε λύσεις οι οποίες είναι πιο οικονομικές και ταυτόχρονα πιο φιλικές προς το περιβάλλον, για να εξασφαλίσουμε μια σταθερότητα και βεβαιότητα για τις επερχόμενες γενιές. Αυτοί οι στόχοι επιτυγχάνονται πλήρως με τη χρήση της φασματοσκοπίας η οποία έχει αρχίσει και καθιερώνεται σε όλο και περισσότερες πτυχές της ζωής μας.

1.2 Σκοπός και στόχοι

Ο σκοπός της εργασίας είναι μέσω της πραγματοποίησης μετρήσεων να βρεθεί κάποια σύνδεση μεταξύ των παραγόμενων φασμάτων και των συστατικών στοιχείων του εκάστοτε εδάφους. Έχοντας στην κατοχή μας τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του κάθε χώματος προετοιμάζουμε το δείγμα και κατόπιν επεξεργασίας του φάσματος που λαμβάνουμε καταλήγουμε σε συμπεράσματα σχετικά με τη χημική σύσταση του κάθε δείγματος. Επιπλέον στόχος της εργασίας είναι να γίνει μια πρώτη εκτίμηση και να αναλυθεί πλήρως η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ώστε να γίνει περεταίρω μελέτη, ακόμα και να αναπτυχθούν αλγόριθμοι που να επιταχύνουν τη διαδικασία. Πέρα λοιπόν από την εξαγωγή κάποιων πρώτων συμπερασμάτων και το

έλεγχο της διαδικασίας για το αν παράγει γενικά αποτελέσματα, μπαίνουν και η βάσεις για την εξέλιξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας κάνοντας χρήση πιο οικονομικού εξοπλισμού.

1.3 Μεθοδολογία

Υλοποιούμε την διάταξη πραγματοποιώντας την απαραίτητη συνδεσμολογία για να γίνει η πειραματική διαδικασία. Τοποθετούμε το χόμα σε ένα δισκίο και με ένα βαρίδιο το πιέζουμε ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν πιο λεία επιφάνεια. Στη συνέχεια τοποθετούμε το δισκίο σε μία επιφάνεια και το φωτίζουμε με μία πηγή φωτός, ενώ ταυτόχρονα εντοπίζουμε την ανακλώμενη ακτίνα μέσω ενός αισθητήρα. Η ακτίνα δρομολογείται μέσω μιας οπτικής σε ένα φασματογράφο και από εκεί στον υπολογιστή όπου παίρνουμε και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Περνάμε τα δεδομένα, που αφορούν την ένταση του φωτός στο εύρος του μήκους κύματος που μελετάμε, στο excel όπου αναλύονται για να παραχθούν τα απαιτούμενα διαγράμματα. Στη συνέχεια συγκρίνουμε τη μορφολογία των διαγραμμάτων με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα που αφορούν τα συστατικά από τα οποία αποτελούνται τα χόματα και οδηγούμαστε σε ανάλογα συμπεράσματα.

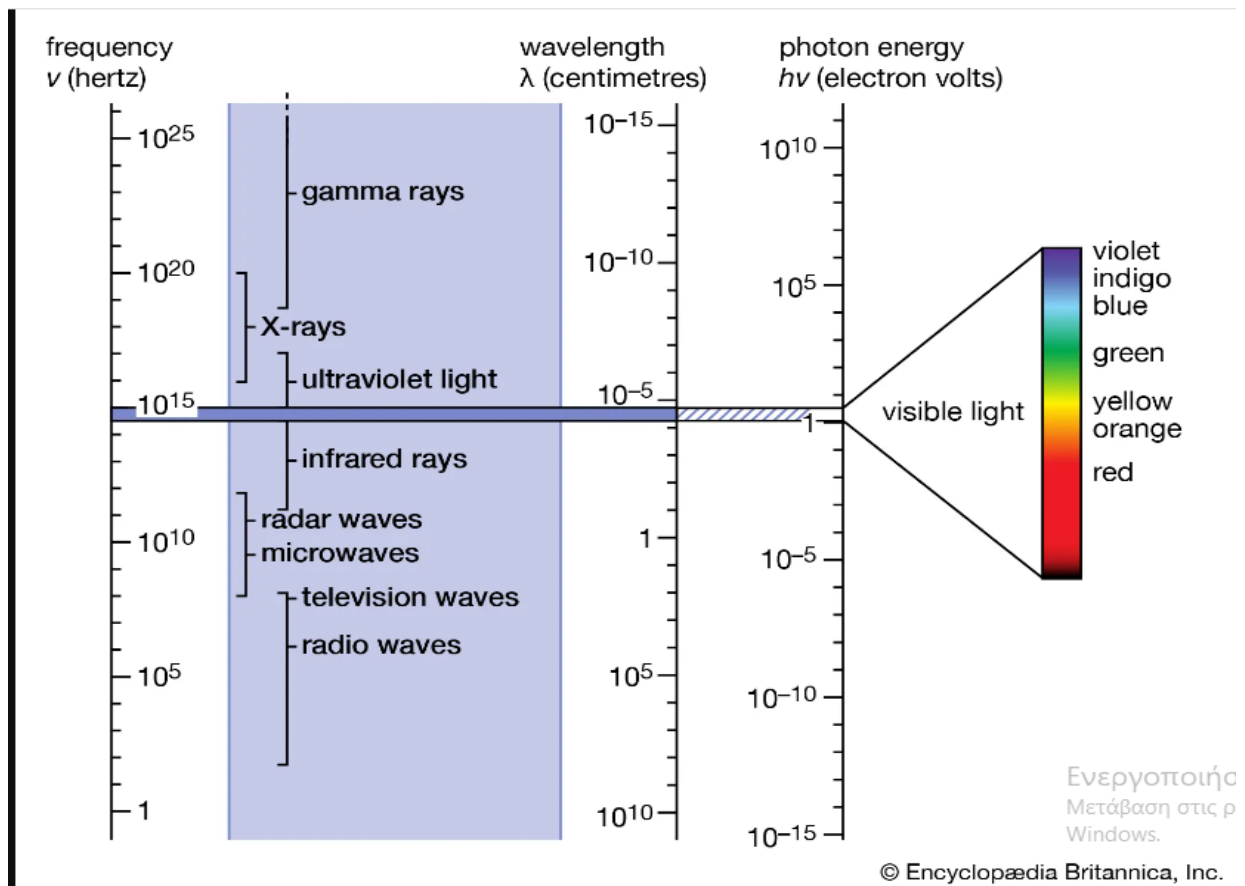
1.4 Δομή

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια. Το πρώτο είναι το εισαγωγικό κομμάτι στο οποίο δίνεται η γενική εικόνα της εργασίας και αφορά για παράδειγμα την κεντρική της ιδέα και τον τρόπο υλοποίησης της. Το δεύτερο κεφάλαιο έχει να κάνει με το θεωρητικό υπόβαθρο, απαραίτητο για την ολική κατανόηση του αντικειμένου, καθώς και μια αναφορά σε άλλα σχετικά πειράματα. Στο τρίτο κεφάλαιο επεξηγείται λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο διεξήχθη το πειραματικό μέρος και ο τρόπος με τον οποίο αναλύονται τα εξαγόμενα δεδομένα. Στο τέταρτο κεφάλαιο αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση των δεδομένων παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στα οποία καταλήξαμε. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη σύγκριση ίδιων τύπων δειγμάτων αλλά και διαφορετικών κατηγοριών ώστε να σχηματιστεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα. Επιπλέον αναφέρονται και άλλοι πιθανοί τρόποι προσέγγισης κάνοντας χρήση των δεδομένων που αντλήθηκαν από αυτή την εργασία. Τέλος υπάρχει ένα μικρό κεφάλαιο που περιέχει τα τελικά συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε καθώς και ένα παράρτημα με τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν στο excel.

2. Φυσικές έννοιες και αρχές

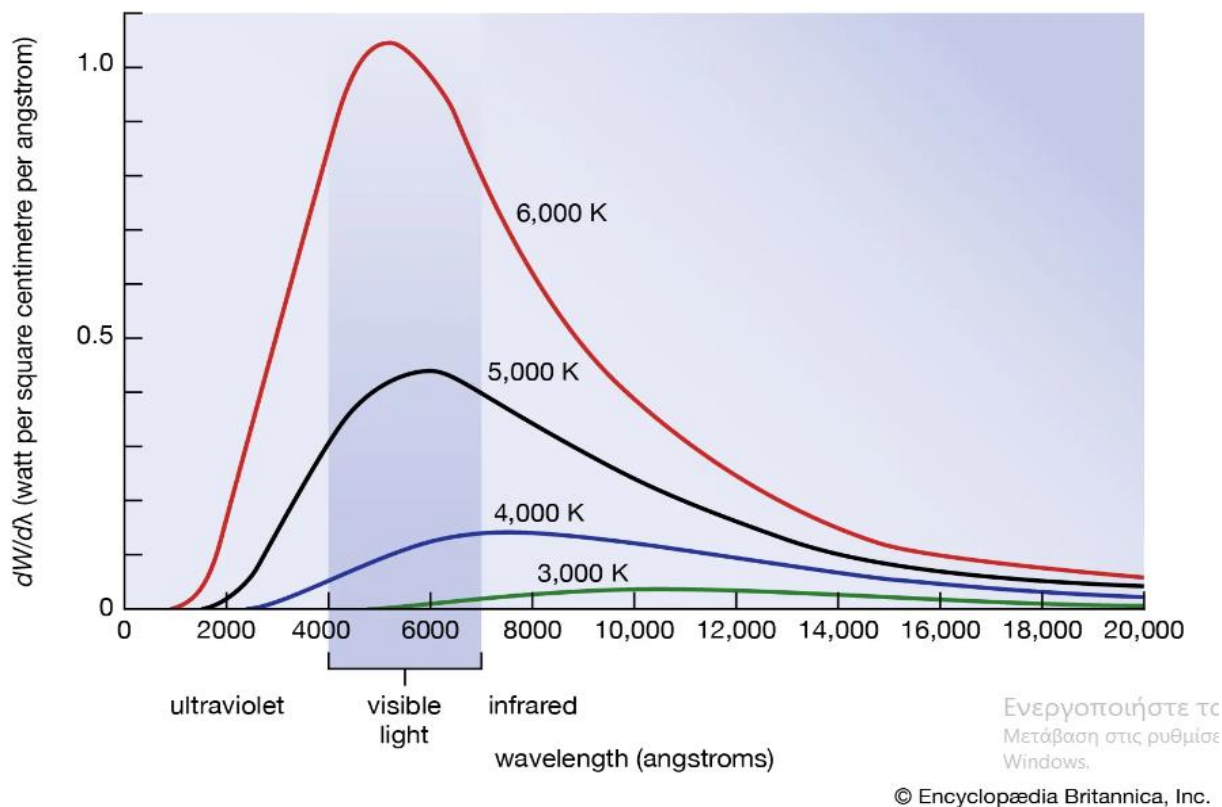
2.1 Μια ιστορική αναδρομή στο φως

Πριν γίνει ανάλυση της διάχυτης ανάκλασης πρέπει να κατανοήσουμε την έννοια του φωτός και τις διάφορες θεωρίες που αναπτύχθηκαν για αυτό, κάνοντας μια σύντομη ιστορική αναδρομή. Οι πρώτες θεωρίες που είναι κοντά στο μοντέλο που έχουμε υιοθετήσει και σήμερα είναι των Huygens και Newton. Ο Huygens θεώρησε για πρώτη φορά πως το φως είναι κύμα και συγκεκριμένα ένα σύνολο κυμάτων το οποίο εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις διαμέσου του αιθέρα. Αντιθέτως ο Νεύτωνας υποστήριξε πως το φως αποτελείται από μια δέσμη σωματιδίων η οποία ονομάζεται φωτόνιο . Οι δύο αυτές απόψεις αποτέλεσαν την βάση για την κατάληξη στην δυϊκή φύση του φωτός [17, 18]. Την σκυτάλη πήρε ο Maxwell ο οποίος περιέγραψε το φως ως ένα κύμα διάδοσης ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Προέβλεψε λοιπόν την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθώς και την ταχύτητα τους που ισοδυναμεί με την ταχύτητα του φωτός. Εν συνεχεία ο Hertz απέδειξε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και επιβεβαίωσε τον Maxwell μέσω πειραμάτων όπου μέτρησε διάφορες ιδιότητες του φωτός όπως η ανάκλαση και η διάθλαση του.[16, 19]



Εικόνα 2.1: Το ορατό φως στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [19]

Ο Thomas Young επιτρέποντας στο φως να περάσει από δυο κοντινές οπές οι δέσμες επικάλυπταν η μία την άλλη και δημιουργούνταν φωτινές και σκοτεινές ζώνες, οπτικοποιώντας έτσι το φαινόμενο της συμβολής. Αυτή η παρατήρηση αποτέλεσε ισχυρή απόδειξη της κυματικής φύσης του φωτός [20]. Μια εξίσου ενδιαφέρουσα θεωρία είναι της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, στην οποία το σώμα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε κάθε θερμοκρασία. Το φαινόμενο ερμηνεύθηκε εξ ολοκλήρου από τον Planck με τις δύο υποθέσεις που διατύπωσε. Πρώτον ότι η ενέργεια των ταλαντούμενων ατόμων δεν μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή αλλά διακριτές τιμές ($E = nhf$). Δεύτερον ότι η ενέργεια που μπορεί να εκπέμψει ή να απορροφήσει ένα άτομο είναι επίσης συγκεκριμένης τιμής [21].



Εικόνα 2.2: Εκπομπή μέλανος σώματος [21]

Τέλος ο Einstein επιβαβαιβέωσε για ακόμη μια φορά τη σωματιδιακή φύση του φωτός με την εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, δηλαδή την εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα αγωγό όταν σε αυτόν προσπέσει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συγκεκριμένης ενέργειας.

2.2 Το φως σε διεπιφάνειες

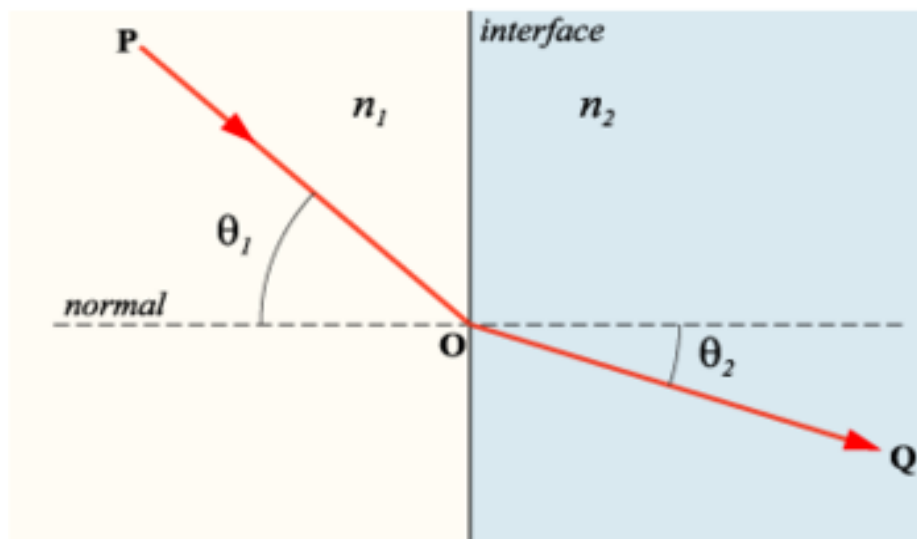
Η διάχυτη ανάκλαση είναι ένα από τα διάφορα αποτελέσματα που προκύπτουν όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια. Άλλες περιπτώσεις είναι η κατοπτρική ανάκλαση, η διάθλαση ή η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το μέσο. Ο τρόπος με τον οποίο το φως αλληλεπιδράει με το μέσο εξαρτάται από το υλικό και τις ιδιότητες του, όπως ο δείκτης διάθλασης. Η γωνία με την οποία το φως προσεγγίζει την επιφάνεια ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης και σχηματίζεται μεταξύ της εισερχόμενης ακτίνας και της επιφάνειας. Για τη βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων πρέπει να εξεταστούν όλες οι περιπτώσεις και η συμπεριφορά του φωτός σε αυτές [22].

2.2.1 Διάθλαση

Διάθλαση ονομάζεται το φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο μία δέσμη φωτός αλλάζει κατεύθυνση όταν διέρχεται από ένα μέσο με δείκτη διάθλασης n_1 σε ένα άλλο με δείκτη διάθλασης $n_2 \neq n_1$. Η διαχωριστική επιφάνεια που βρίσκεται στο μεταίχμιο των δύο επιφανειών ονομάζεται δίοπτρο [24]. Ως δείκτης διάθλασης ορίζεται το πηλίκο της ταχύτητας του φωτός c , μέσα σε κάποιο υλικό προς την ταχύτητα του στο κενό u ($n = c/u$) [26]. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι ο δείκτης διάθλασης χρησιμοποιείται για να εκφράσει το πως επηρεάζεται η ταχύτητα του φωτός όταν εισέρχεται σε οποιοδήποτε μέσο εκτός του κενού και ταυτόχρονα επιδρούν στη πορεία διάδοσης του αλλάζοντας τη γωνία που εμφανίζει με το δίοπτρο. Η τιμή του εξαρτάται από την

θερμοκρασιακή και την χρωματική διασπορά του υλικού. Ο νόμος του Snell λοιπόν καταφέρνει να συσχετίσει τη γωνία πρόσπτωσης και διάθλασης, με τους δείκτες διάθλασης μέσω της σχέσης:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \Rightarrow n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$



Εικόνα 2.3: Το φαινόμενο της διάθλασης [24]

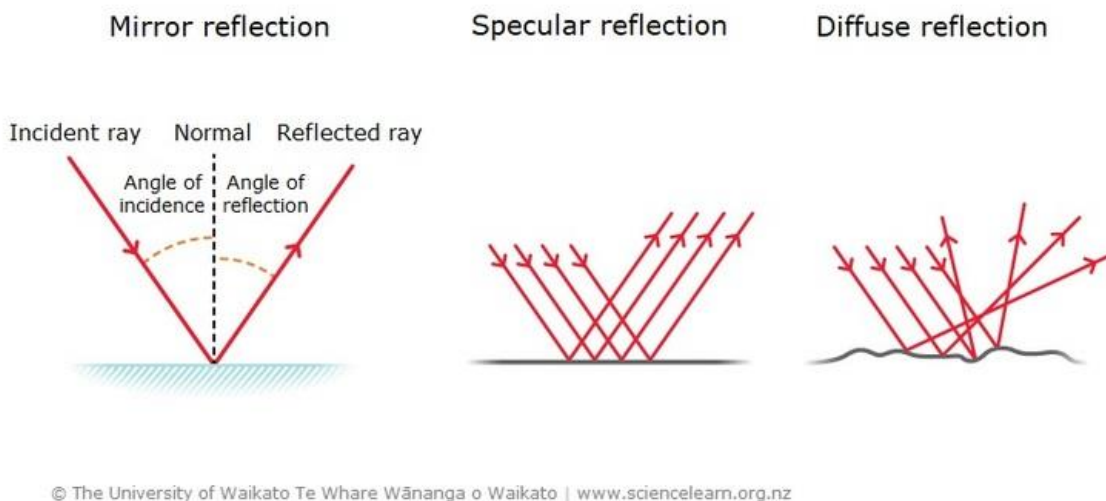
Αξίζει να αναφέρουμε πως ο νόμος του Snell εφαρμόζεται μόνο σε ισοτροπικά υλικά, δηλαδή υλικά στα οποία το φως διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα προς κάθε κατεύθυνση. Επιπλέον όταν το φως είναι μονοχρωματικό οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης είναι άμεσα εξαρτώμενες από το μήκος κύματος και μάλιστα ανάλογες:

$$\sin\theta_1/\sin\theta_2 = \lambda_1/\lambda_2 \quad [24]$$

Όταν η γωνία πρόσπτωσης(θ_1) πάρει πολύ μεγάλη τιμή η γωνία διάθλασης(θ_2) γίνεται κάθετη και ταξιδεύει κάθετα στη διεπιφάνεια. Αυτή η οριακή τιμή της θ_1 ονομάζεται *critical* και συμβολίζεται με θ_c . Για κάθε γωνία μεγαλύτερη από τη θ_c όλο το φως θα ανακλάται και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εσωτερική ανάκλαση.

2.2.2 Ανάκλαση

Η ανάκλαση είναι ένα φαινόμενο το οποίο εφαρμόζεται σε κάθε είδους κύμα, όπως είναι το φως, τα ηλεκτρομαγνητικά και τα ηχητικά κύματα. Όταν αυτά προσπίπτουν πάνω σε μία λεία επιφάνεια, όπως νερό ή γυαλί, δε τη διαπερνάνε αλλά επιστρέφουν πίσω και είναι ο λόγος που βλέπουμε αντανακλάσεις στον καθρέφτη και στην επιφάνεια του νερού. Ανάλογα με το μέτρο της γωνίας ανάκλασης σε σχέση με την προσπίπτουσα χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες την κατοπτρική ανάκλαση και τη διάχυτη ανάκλαση [22].



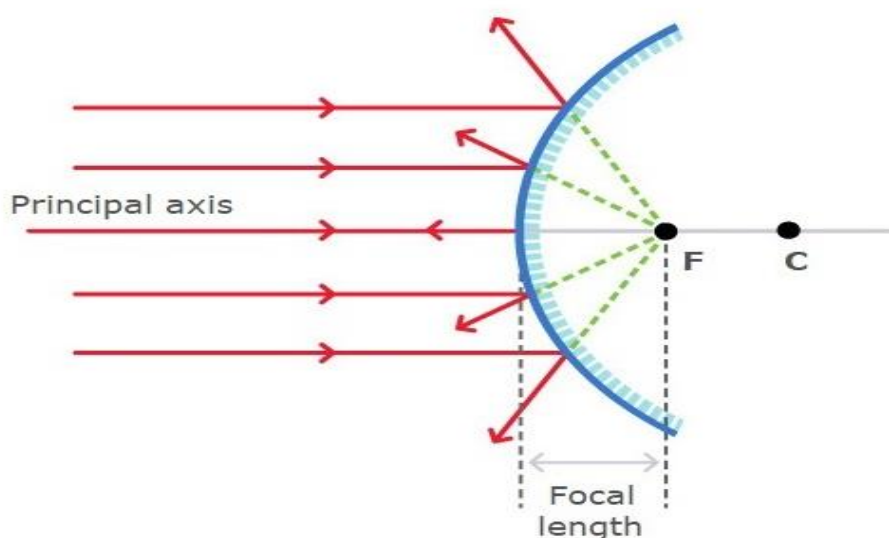
Εικόνα 2.4: Τα δύο είδη ανακλάσεως του φωτός [27]

Στην κατοπτρική ανάκλαση σχεδόν όλο το φως επιστρέφει πίσω και είναι ο λόγος για τον οποίο η αντανάκλαση που βλέπουμε είναι καθαρή με το θάμπωμα να έχει σχεδόν εξαφανιστεί. Συνήθως για να πετύχουμε υψηλά επίπεδα ανακλαστικότητας, όπως για παράδειγμα στους καθρέφτες, χρησιμοποιούμε μια λευκή πούδρα που βελτιώνει αυτή την ιδιότητα του υλικού. Επίσης στην ιδανική περίπτωση θα πρέπει η επιφάνεια να είναι όσο το δυνατόν πιο λεία και ταυτόχρονα επίπεδη γιατί οι ατέλειες επηρεάζουν τη γωνία ανάκλασης. Τέτοια υλικά διέπονται από τους κάποιους φυσικούς κανόνες που έχουν ονομαστεί ανάκλασης και είναι οι εξής:

- Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετος στην διεπιφάνεια βρίσκονται όλες στο ίδιο επίπεδο [28]
- Η προσπίπτουσα γωνία είναι πάντα η ίδια με τη γωνία ανάκλασης [28]

Παρόλο που ιδανικά στοχεύουμε σε όσο γίνεται πιο επίπεδη επιφάνεια σε ορισμένες περιπτώσεις δημιουργούμε κυρτότητα διότι μας εξυπηρετεί για μερικές εξειδικευμένες εφαρμογές. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές είναι αυτές του κοίλου και του κυρτού καθρέφτη. Στην περίπτωση του κοίλου καθρέφτη παράλληλες ακτίνες φωτός ανακλούνται υπό διαφορετικές γωνίες με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται σε ένα σημείο που ονομάζεται επίκεντρο. Αυτό λειτουργεί ως ένας τρόπος ενίσχυσης του φωτός και μπορούμε να παρατηρούμε αντικείμενα τα οποία θα ήταν αδύνατο να δούμε με γυμνό μάτι ή να δούμε αντικείμενα σε μεγέθυνση. Τέτοιοι καθρέφτες βρίσκουν εφαρμογή σε τηλεσκόπια και σε καθρέφτες καλλωπισμού. Επιπλέον υπάρχουν και οι κυρτοί καθρέφτες όπου παράλληλες ακτίνες φωτός ανακλούνται στην επιφάνεια και φεύγουν προς πάσα κατεύθυνση. Για να διευκολυνθούμε στους υπολογισμούς υποθέτουμε πως αν ακολουθήσουμε την πορεία των ακτινών ανάποδα οδηγούμαστε σε ένα κεντρικό σημείο από όπου απομακρύνονται. Αυτού του είδους οι καθρέφτες βρίσκουν για παράδειγμα χρησιμότητα σε καθρέφτες αυτοκινήτων καθώς προσφέρουν μία πιο ευρεία εικόνα [27].

Reflection of light on convex mirror



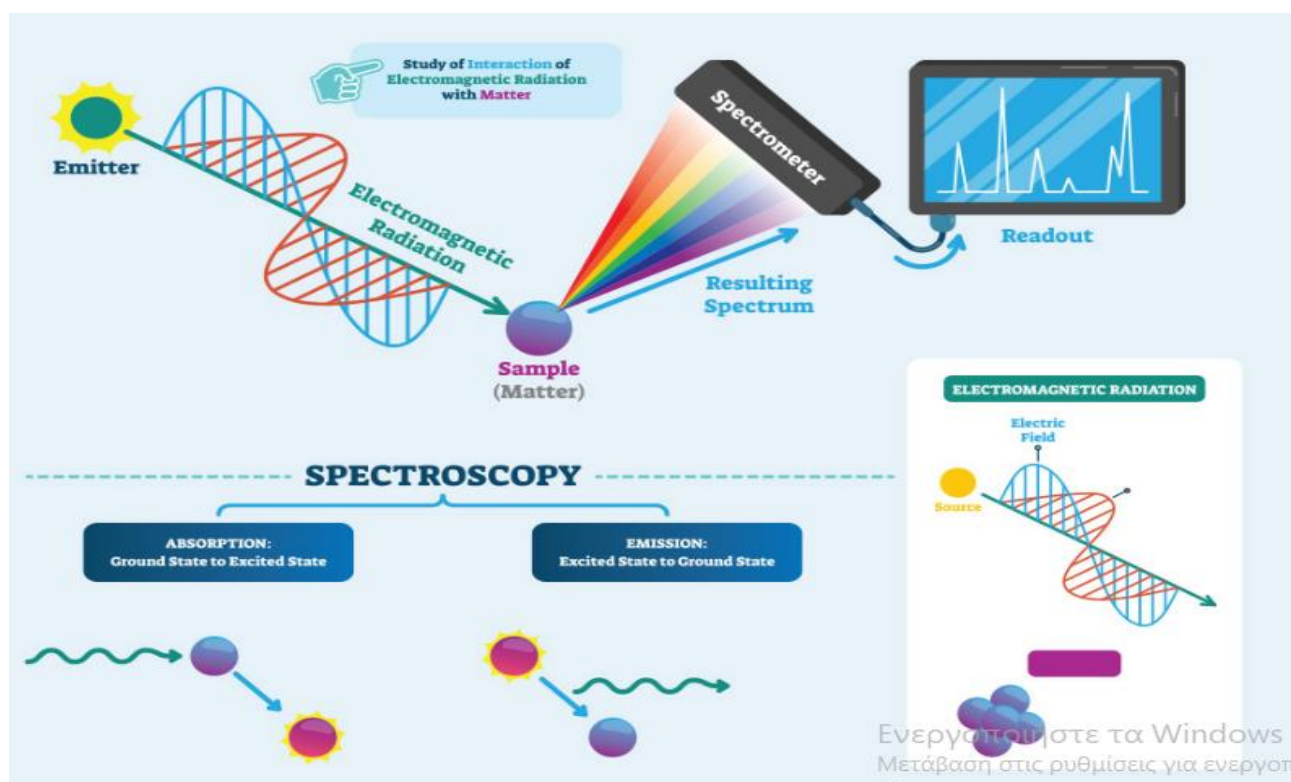
Εικόνα 2.5: Το φαινόμενο της ανάκλασης σε κυρτό καθρέφτη [29]

Στην περίπτωση της διάχυτης ανάκλαση το φως, όπως και άλλου είδους κύματα, όταν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια διασκορπίζεται σε πολλές γωνίες, σε αντίθεση με την κατοπτρική όπου υπάρχει μόνο μια γωνία ανάκλασης. Στην ιδανική περίπτωση παρουσιάζεται το φαινόμενο της Λαμπερτιανής ανάκλασης (Lambertian reflection) όπου κάθε ακτίνα παρουσιάζει την ίδια ένταση στη φωτεινότητα της ανεξάρτητα της γωνίας που διαχέεται. Η διάχυτη ανάκλαση συνήθως οφείλεται στις ατέλειες της επιφάνειας που είναι συγκρίσιμες ή αρκετά μεγαλύτερες του μήκος κύματος. Το φως ερχόμενο σε επαφή με αυτές διασκορπίζεται προς κάθε κατεύθυνση με κατανομή ανεξάρτητη της γωνίας πρόσπτωσης. Η ορατότητα λοιπόν των αντικειμένων οφείλεται κυρίως σε αυτό το φαινόμενο και επιτρέπει στον άνθρωπο να βλέπει αντικείμενα που δε γυαλίζουν από κάθε οπτική γωνία. Ωστόσο μια λεία επιφάνεια δε συνεπάγεται πως θα παρατηρούμε αποκλειστικά κατοπτρική ανάκλαση αλλά μπορεί να έχουμε και τις δύο μεθόδους ταυτόχρονα. Ανάλογα με το υλικό και την τραχύτητα της επιφάνειάς του μπορεί να υπερτερεί η μία ή η άλλη μέθοδος. Πολύ λίγα υλικά κάνουν εξ ολοκλήρου κατοπτρική ανάκλαση και μερικά κοινά υλικά με υψηλή απόδοση είναι το αλουμίνιο και το ασήμι. Επίσης το χρώμα ενός αντικειμένου οφείλεται στην διάχυτη ανάκλαση. Αυτό συμβαίνει λόγω ενός μηχανισμού όπου η προσπίπτουσα ακτίνα εισέρχεται μέσα στο υλικό και ανακλάται μερικώς από το πρώτο σωματίδιο που βρίσκει, μετά ανακλάται μερικώς από το δεύτερο και ούτω καθεξής δημιουργώντας πρωταρχικές και δευτερεύουσες ακτίνες. Αυτές ξαναγυρίζουν στην επιφάνεια όπου και εξέρχονται προς πάσα κατεύθυνση. Στην περίπτωση του χρώματος η ακτινοβολία απορροφάται και επιστρέφει πίσω μόνο το χρώμα που αντιλαμβανόμαστε, σε αντίθεση με την κατοπτρική ανάκλαση όπου η ακτίνα που επιστρέφεται έχει το χρώμα της προσπίπτουσας, συνήθως το άσπρο [27, 30].

2.3 Φασματοσκοπία

Η φασματοσκοπία είναι η επιστήμη που μελετάει την απορρόφηση και την εκπομπή του φωτός αλλά και άλλων ακτινοβολιών από την ύλη. Συγκεκριμένα σε ένα πείραμα φασματοσκοπίας, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ενός συγκεκριμένου εύρους μήκους κύματος, προσπίπτει πάνω στο ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Στασινός Δημοσθένης

δείγμα που μελετάμε. Αυτό ανάλογα με τη δομή που έχει μπορεί να οδηγήσει σε απορρόφηση ή εκπομπή της ακτινοβολίας και η ανάλυση αυτής της συμπεριφοράς είναι που μας δίνει τη χρήσιμη πληροφορία για το δείγμα και γίνεται μέσω του φάσματος [31,34,35]. Η δημιουργία του πραγματοποιείται χωρίζοντας το φως σε επιμέρους μήκη κύματος και υπολογίζοντας την ένταση του σε κάθε ένα από αυτά. Η τεχνική της διάσπασης του φωτός έχει ρίζες από το πείραμα του Νεύτωνα, ο οποίος με τη βοήθεια ενός διαφανούς πρίσματος κατάφερε να διαχωρίσει την ηλιακή ακτινοβολία σε διάφορα χρώματα. Μάλιστα στα πρώτα στάδια της φασματοσκοπίας χρησιμοποιούνταν το πρίσμα καθώς και ένα φωτογραφικό πιάτο, που αποτελούνταν από ένα φωτοευαίσθητο γαλάκτωμα ώστε να παίρνουν το επιθυμητό φάσμα. Η σύγχρονη φασματοσκοπία χρησιμοποιεί το πλέγμα περίθλασης (diffraction grating) για την διασπορά του φωτός, ένα οπτικό εξάρτημα με περιοδική δομή που διαχωρίζει το φως σε πολλαπλές ακτίνες που ταξιδεύουν σε διαφορετικές γωνίες περίθλασης [32,33].



Εικόνα 2.6: Οπτικοποίηση του πειράματος της φασματοσκοπίας [34]

Όταν τα μόρια του δείγματος βρίσκονται σε ηρεμία αναφερόμαστε στην μέθοδο της φασματοσκοπίας απορρόφησης. Μία φωτεινή πηγή εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία μόλις προπίπει στο αντικείμενο ενδιαφέροντος απορροφάται και τα μόρια διεγείρονται. Με την ενέργεια που δέχθηκαν ανεβαίνουν από τη θεμελιακή στάθμη χαμηλής ενέργειας σε υψηλότερες. Απέναντι από το δείγμα τοποθετείται ένας ανιχνευτής, όπως μία φωτοδίοδος, και μέσω του ανακλώμενου φωτός εντοπίζει το ποσοστό απορρόφησης σε όλο τη εύρος μελέτης.

Η μέθοδος λοιπόν της φασματοσκοπίας είναι αρκετά ευέλικτη και βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς κλάδους της επιστήμης. Το κάθε μόριο αλληλεπιδρά διαφορετικά με την ακτινοβολία άρα μας είναι αρκετά χρήσιμη στον εντοπισμό της μοριακής σύνθεσης του δείγματος, όπως για παράδειγμα στην παρούσα διπλωματική την ποσοτικοποίηση των θρεπτικών συστατικών του εδάφους[31].

2.3.1 Φασματοσκοπία διάχυτης ανάκλασης

Η φασματοσκοπία διάχυτης ανάκλασης υπάγεται στην κατηγορία της φασματοσκοπίας απορρόφησης αλλά αντί να μετράται η ακτίνα που εκπέμπεται από το δείγμα, μετράται το φως που ανακλάται από αυτό. Χρησιμοποιείται κυρίως για αδιαφανή δείγματα με υψηλή απορροφητικότητα ή με υψηλής διασπορά φωτός όπως σκόνες, κόκκοι και γενικότερα τραχιές επιφάνειες. Τα πρώτα πειράματα έγιναν στην περιοχή του ορατού φάσματος και καθώς η τεχνολογία αναπτυσσόταν τα πειράματα επεκτάθηκαν κοντά (near-infrared) και μέσα (mid-infrared) στην περιοχή του υπέρυθρου. Κάθε περιοχή του φάσματος προσφέρει διαφορετικές δυνατότητες αλλά και προβλήματα και σε πιο πρακτικό επίπεδο διαφορετικό εξοπλισμό για την πραγματοποίηση των πειραμάτων [7].

Τα μόρια απορροφούν, ανακλούν και εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με το δικό του χαρακτηριστικό τρόπο. Αυτή η μοναδικότητα καθιστά τη μέθοδο της διάχυτης ανάκλασης ιδιαίτερα εύχρηστη στο να εξάγει σημαντικά συμπεράσματα, που αφορούν τη σύσταση του δείγματος, και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς κλάδους της επιστήμης. Μερικά αξιοσημείωτα παραδείγματα είναι στο χαρακτηρισμό υλικών, όπου αναλύοντας τις ζώνες απορρόφησης στο φάσμα εντοπίζεται η παρουσία και η συγκέντρωση ορισμένων στοιχείων στο δείγμα. Στην ανάλυση του εδάφους για τον εντοπισμό των θρεπτικών συστατικών, των μετάλλων και την μόλυνση του εδάφους, καθώς και στον τομέα της ιατρικής για την κατασκευή κατάλληλων και καθαρών φαρμάκων.

Ο εξοπλισμός που συντελεί ένα πείραμα φασματοσκοπίας διάχυτης ανάκλασης αποτελείται από ένα φασματόμετρο, οπτικές ίνες, μίας πηγή φωτός και ένα δοχείο στο οποίο να τοποθετείται το δείγμα. Η διαδικασία της μέτρησης ξεκινάει προετοιμάζοντας το δείγμα και στη συνέχεια το ακτινοβολούμε με την πηγή φωτός μέσω μια οπτικής ίνας. Η ανακλώμενη ακτίνα συλλέγεται από έναν αισθητήρα και οδηγείται στο φασματόμετρο όπου μετράται η ένταση του φωτός κατά μήκος του επιθυμητού μήκους κύματος. Για να γίνει όμως σωστά η διαδικασία το δείγμα πρέπει να υποστεί την κατάλληλη προετοιμασία καθώς είναι πολλοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της μέτρησης. Επειδή στη διάχυτη ανάκλαση μας ενδιαφέρει η ακτινοβολία που διασκορπίζεται εντός του δείγματος και επιστρέφει στην επιφάνεια μας ενδιαφέρει το μέγεθος του σωματιδίου. Επιθυμούμε λοιπόν τα σωματίδια να είναι όσο μικρότερα γίνεται ώστε να μειώσουμε τη συμβολή της ανάκλασης από την επιφάνεια και να βελτιώσουμε την ποιότητα του παραγόμενου φάσματος. Σημαντικό ρόλο παίζει η συσκευασία του δείγματος, διότι το βάθος του δείγματος καθορίζει και την ικανότητα με την οποία διαχέει το φως, και η ομοιογένεια και ομοιομορφία ώστε να έχουμε κατάλληλα αποτελέσματα [40].

2.4 Frensel Reflectance

Τα φαινόμενα που οδηγούν στην διάχυτη ανάκλαση είναι αρκετά και ένα το οποίο πρέπει να μελετηθεί αρκετά είναι η ανάκλαση κατά Frensel. Αυτή μπορούμε να τη διαχωρίσουμε σε διάχυτη ανάκλαση κατά Frensel και κατοπτρική ανάκλαση κατά Frensel. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η επιφάνεια των κόκκων που αποτελούν το δείγμα δεν είναι παράλληλοι με την επιφάνεια του

δείγματος μακροσκοπικά. Έτσι παρόλο που η ανάκλαση στην πραγματικότητα είναι κατοπτρική σε εμάς παρουσιάζεται σαν να είναι διάχυτη γι' αυτό και την ορίζουμε με αυτό τον τρόπο. Στην ανάκλαση τύπου Frensel η ακτίνα φωτός αλληλεπιδρά μόνο με την επιφάνεια του δοκιμίου και στη συνέχεια εντοπίζουμε την ανακλώμενη ακτινοβολία. Στην πραγματικότητα όμως η ακτίνα του φωτός μπορεί να διεισδύσει στο εσωτερικό του δοκιμίου και μετά από πολλές διαθλάσεις, αν δεν απορροφηθεί, να εξέλθει από αυτό. Η ακτινοβολία αυτή δεν εμπεριέχεται στο φαινόμενο του Frensel και καλείται ακτινοβολία τύπου Kubelka-Munk [7, 50].

2.5 Θεωρία Kubelka-Munk

Η θεωρία των Kubelka-Munk αφορά την έκφραση της ανακλαστικότητας του δείγματος συναρτήσει της απορροφητικότητας και του τρόπου που διαχέεται η προσπίπτουσα ακτίνα μέσα στο δείγμα. Όπως αναφέρθηκε και πριν κατά την θεωρία Kubelka-Munk η προσπίπτουσα ακτίνα διεισδύει πάντα στο δείγμα και αν δεν απορροφηθεί πλήρως η ακτινοβολία που εκπέμπεται εντοπίζεται και μελετάται ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την περιεκτικότητα του δείγματος. Συνήθως γίνεται η μέτρηση σε ένα δείγμα με γνωστή δομή και χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τον ορισμό των αγνώστων δειγμάτων. Ωστόσο αυτή η θεωρία δε λαμβάνει υπόψιν την κατοπτρική ανάκλαση αλλά ούτε και άλλες περίπλοκες αλληλεπιδράσεις του φωτός με το δείγμα άρα βρίσκει καλύτερα εφαρμογή σε ομοιογενή δείγματα με ελάχιστες επιδράσεις στην επιφάνεια. Όμως στη διάχυτη ανάκλαση το εσωτερικό των δειγμάτων είναι ανομοιογενές και καθιστά δύσκολη την περιγραφή του φαινομένου. Για αυτό όλες οι γεωμετρικές ιδιαιτερότητες του δείγματος συμπυκνώνονται και αναλύονται μέσω μίας μόνο παραμέτρου του συντελεστή σκέδασης.

$$\frac{k}{s} = \frac{(1 - R)^2}{2R}$$

Όπου R είναι η απόλυτη τιμή ανακλαστικότητας, το s είναι ο συντελεστής σκέδασης και k ο μοριακός συντελεστής απορροφητικότητας. Αποτελέσματα μαθηματικής ανάλυσης έδειξαν ότι το καλύτερο εύρος μετρήσεων είναι μεταξύ 20% και 70% όσον αφορά την ανακλαστικότητα του δείγματος, ενώ εκτός αυτού του εύρους το σφάλμα αυξάνεται εκθετικά. Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως σε όλες τις μετρήσεις υπάρχει και κατοπτρική αλλά και διάχυτη ανάκλαση άρα έχουμε ένα συνδυασμό του φαινομένου του Frensel και του Kubelka-Munk [7, 39, 40]

2.6 Παλαιότερες έρευνες

Στο παρελθόν έχει πραγματοποιηθεί πληθώρα ερευνών οι οποίες μελετούν την αποτελεσματικότητα της φασματοσκοπίας διάχυτης ανάκλασης για τη μέτρηση διαφόρων συστατικών του εδάφους. Η συγκεκριμένη προσέγγιση καθώς και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι αρκετά καινοτόμα και γι' αυτό αυτές οι μελέτες αφορούν κυρίως την τελευταία εικοσαετία. Θα αναφερθούν συνοπτικά μερικές από αυτές ώστε να δοθεί μια γενική εικόνα σχετικά με τα έως τώρα επιτεύγματα σε αυτόν τον τομέα, την εξέλιξη που έχει γίνει και την πρόοδο που θα μπορούσε να γίνει στο μέλλον. Το 2006 δημοσιεύθηκε μία έρευνα από τον Viscarra Rossel όπου μελετούσε την αποτελεσματικότητα της φασματοσκοπίας σε διάφορα φάσματα για την αξιολόγηση διαφόρων ιδιοτήτων του εδάφους. Η μελέτη αφορούσε το ορατό φάσμα (400-700 nm), το ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Στασινός Δημοσθένης

φάσμα κοντά στο υπέρυθρο (700-2500 nm) και στη μέση του υπέρυθρου (2500-25000 nm) καθώς και ενός συνδυασμού αυτών των μεθόδων. Τα δείγματα πάρθηκαν από τη γη της Αυστραλίας και το συμπέρασμα ήταν ότι ο συνδυασμός των μεθόδων ήταν ο πιο αποτελεσματικός διότι κάθε φάσμα ήταν ικανό να προβλέπει συγκεκριμένες ιδιότητες του εδάφους. Το 2007 πραγματοποιήθηκε μια μελέτη από τον Raphael Linker όπου έγινε μια κατηγοριοποίηση 100 δειγμάτων μέσω της φασματοσκοπίας στο μέσω του υπέρυθρου φάσματος. Στη συγκεκριμένη έρευνα κατασκευάστηκε και ένα νευρωνικό δίκτυο για να βοηθήσει στη διαδικασία με πολύ καλή απόδοση. Με την πάροδο του χρόνου η επιστήμη αναπτύχθηκε ακόμα περισσότερο με σκοπό να μειώσει το κόστος της ανάλυσης των χωμάτων. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η έρευνα που δημοσιεύθηκε το 2019 από μία ομάδα επιστημόνων από τη Βραζιλία που αφορά τη μελέτη των NPK χαρακτηριστικών μέσω της φασματοσκοπίας. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε διάφορες ζώνες φάσματος και ανακαλύφθηκε ότι η υγρασία επηρεάζει αρνητικά στην άντληση αποτελεσμάτων. Τέλος το 2021 πραγματοποιήθηκε μια έρευνα από ένα πανεπιστήμιο στην Ισπανία που αφορούσε τη μελέτη του χρώματος σε αμπέλια. Όπως και στις προηγούμενες έρευνες που εξετάσαμε χρησιμοποιήθηκαν διάφορα εύρη μηκών κυμάτων για να γίνει διασταύρωση των δεδομένων και να ελεγχθεί σε ποιο εύρος είναι πιο αποτελεσματικό το μοντέλο. Μετά από αρκετά πειράματα διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η διάταξη του εξοπλισμού, η προετοιμασία των δειγμάτων και οι ιδιότητες του χώματος. Επιπλέον το μοντέλο ήταν πολύ αποτελεσματικό στην μέτρηση του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του φωσφόρου, ενώ λιγότερο αποτελεσματικό στην μέτρηση νατρίου και καλίου.

3. Πειραματικό μέρος

3.1 Ανάλυση πειραματικής διαδικασίας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια λεπτομερής ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε με σκοπό να γίνει πλήρως κατανοητή και να αναπαραχθεί για την εξέλιξη του αντικειμένου έρευνας. Παραλήφθηκαν δεκαπέντε διαφορετικά δείγματα που ζύγιζαν 2-3 κιλά το κάθε ένα. Τα δείγματα αποτελούνταν από πέντε διαφορετικά εδάφη και κατηγοριοποιήθηκαν ως A,B,C,D,E αντίστοιχα. Στην κάθε κατηγορία προστέθηκε και ένας δείκτης 1,2,3 ο οποίος με τη σειρά του συμβολίζει τις διαφορετικές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων σε κάθε έδαφος. Σκοπός λοιπόν είναι μέσα από πειράματα και με την κατασκευή διαγραμμάτων να γίνει μία συσχέτιση μεταξύ των θρεπτικών συστατικών του εδάφους και του τρόπου που ανακλάται το φως.

ΠΕΡΙΟΧΗ	Μηχανική	ΑΜΜΟΣ		ΑΡΓΙΟΣ	ΙΛΥΣ	pH πολλτού	Ec	O.O.	CaCO ₃	ΝΙΤΡΙΚΑ	ΝΙΤΡΙΚΟ ΑΖΩΤΟ	ΦΩΣΦΟ- ΡΟΣ	ΚΑΛΙΟ	Εναλλακ. Mg
	Σύσταση	S%		C %	Si %		mS/cm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A1	SL	52	0,01923	14	34	7,15	2,660	1,86	1,1	71,2	16,07	17,19	119,82	218,60
A2	SL	52	0,01923	14	34	7,20	2,726	1,92	1,3	140,6	31,75	20,81	137,10	223,58
A3	SL	52	0,01923	14	34	7,23	2,680	1,86	1,2	106,9	24,13	31,31	146,36	219,22
B1	L	30	0,03333	22	48	7,46	3,072	2,18	3,1	44,9	10,13	24,47	153,38	330,14
B2	L	30	0,03333	22	48	7,54	3,077	2,01	2,9	84,5	19,07	30,51	159,16	324,29
B3	L	30	0,03333	22	48	7,53	2,904	1,99	3,1	123,3	27,83	28,37	178,60	330,54
C1	SiL	24	0,04167	24	52	7,50	3,160	2,03	3,3	41,9	9,47	23,65	186,97	400,31
C2	SiL	24	0,04167	24	52	7,51	3,140	2,32	3,0	107,7	24,31	30,30	209,34	402,74
C3	SiL	24	0,04167	24	52	7,54	3,151	2,09	3,1	75,1	16,95	34,81	204,69	389,36
D1	SiCL	20	0,05	28	52	7,54	2,945	2,39	4,1	107,4	24,26	32,14	254,30	426,53
D2	SiCL	20	0,05	28	52	7,60	2,937	2,25	3,9	168,7	38,09	41,16	281,12	413,67
D3	SiCL	20	0,05	28	52	7,57	3,038	2,35	4,0	176,3	39,80	45,53	312,35	408,01
E1	C	12	0,08333	50	38	7,50	3,560	2,78	3,6	66,7	15,06	29,49	410,76	715,89
E2	C	12	0,08333	50	38	7,57	3,475	2,91	3,7	94,8	21,40	37,33	437,07	735,87
E3	C	12	0,08333	50	38	7,56	3,344	2,88	3,7	64,5	14,57	41,24	483,38	746,29

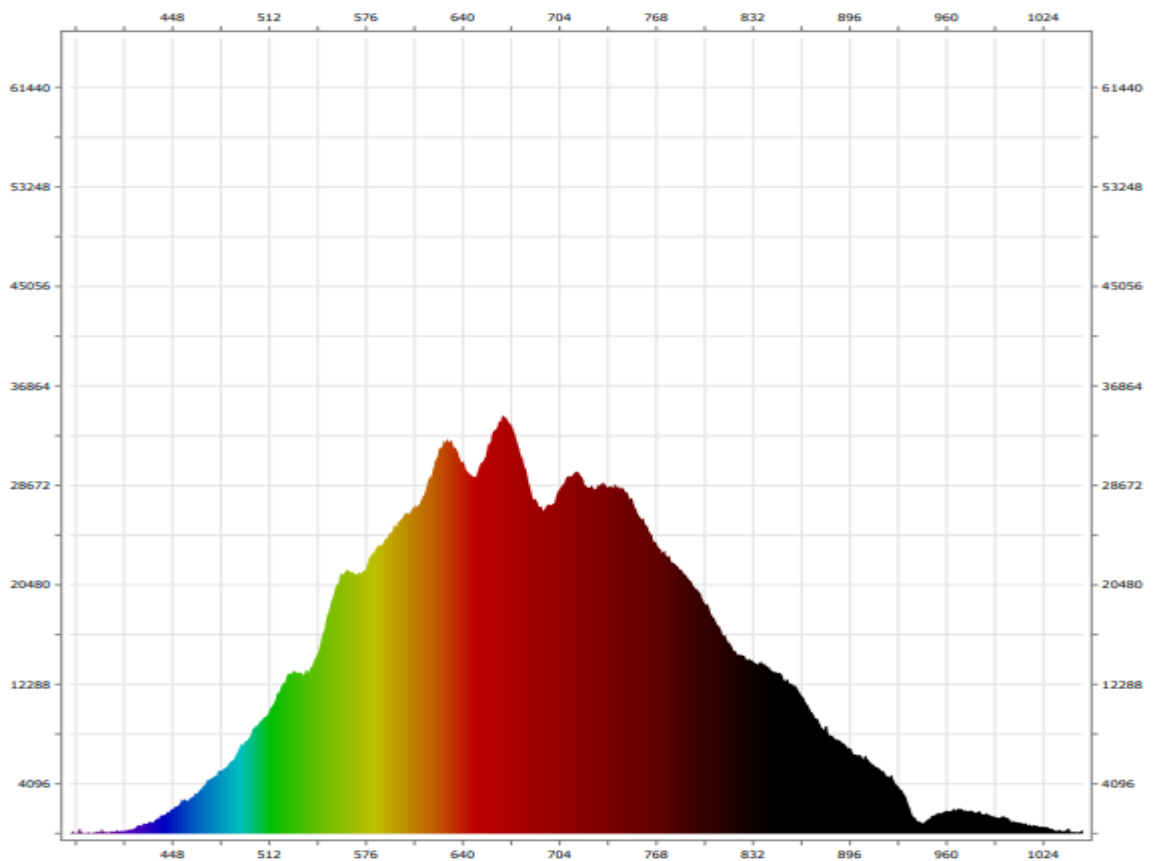
Εικόνα 3.1: Πίνακας με τις περιεκτικότητες των θρεπτικών συστατικών του κάθε δείγματος

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της μέτρησης πρέπει να προετοιμαστεί το δείγμα κατάλληλα. Το “δοχείο” γεμίζεται σχεδόν ολόκληρο, ώστε να υπάρχει αρκετό βάθος και να γίνεται σωστά η διάχυση του φωτός εντός του δείγματος. Η επιφάνεια του πιέζεται με ένα χάλκινο βαρίδιο ώστε να γίνει όσο πιο λεία γίνεται και να επιτύχουμε ομοιογένεια για να έχουμε όσο δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα. Αφού ολοκληρωθεί η προετοιμασία ξεκινάει το πείραμα της φασματοσκοπίας για το οποίο θα γίνει μία σύντομη αναφορά του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε. Μία πηγή φωτός SLS201L η οποία παράγει φως σταθερής έντασης και εκπέμπει ακτινοβολία μέλανος σώματος η οποία έχει εύρος από 360 – 2600 nm. Οπτικές ίνες που μεταφέρουν το φως από την πηγή στο δείγμα και από εκεί στον φασματόμετρο, μία βάση για την τοποθέτηση του δείγματος στην οποία προσαρμόζεται και ένας αισθητήρας για να λαμβάνει το ανακλώμενο φως στην επιθυμητή γωνία και ένα φασματόμετρο της εταιρείας Keshet.



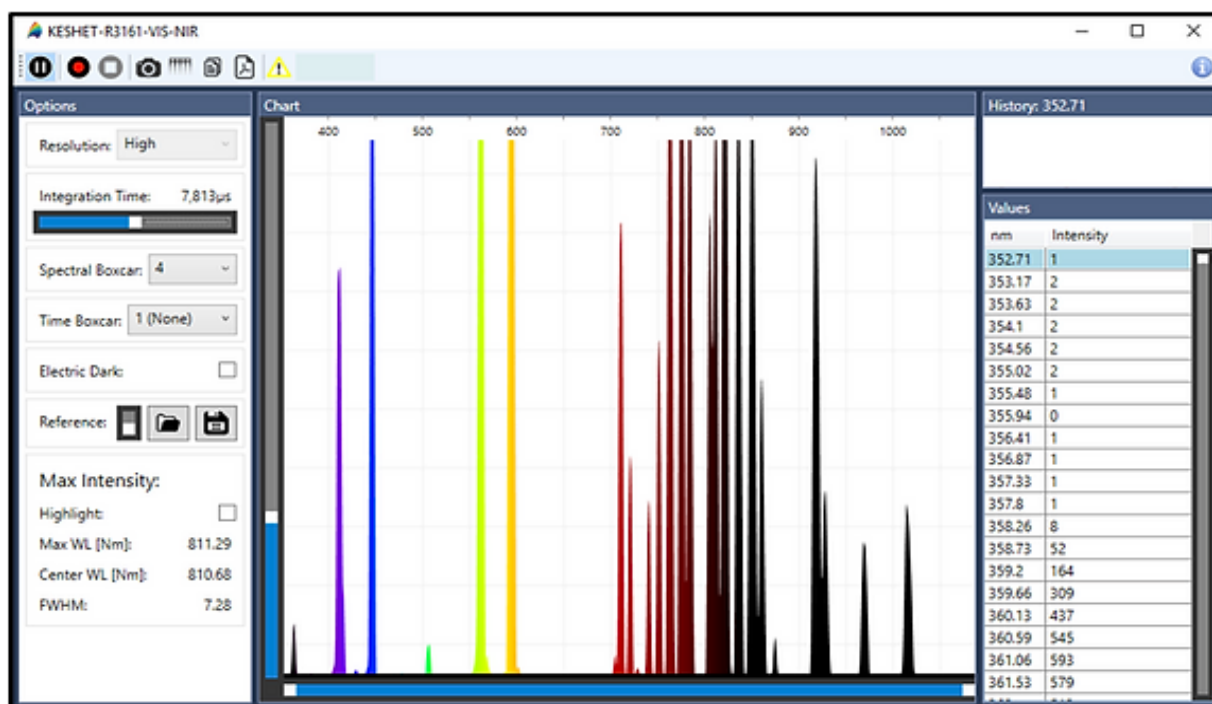
Εικόνα 3.2: Πηγή φωτός SLS201L

Το δείγμα τοποθετείται στη βάση και φωτίζεται από την πηγή μέσω μιας οπτικής ίνας και στη συνέχεια κατευθύνεται στο φασματόμετρο όπου διαχωρίζεται στα επιμέρους μήκη κύματος και τελικά λαμβάνουμε το φάσμα του φωτός



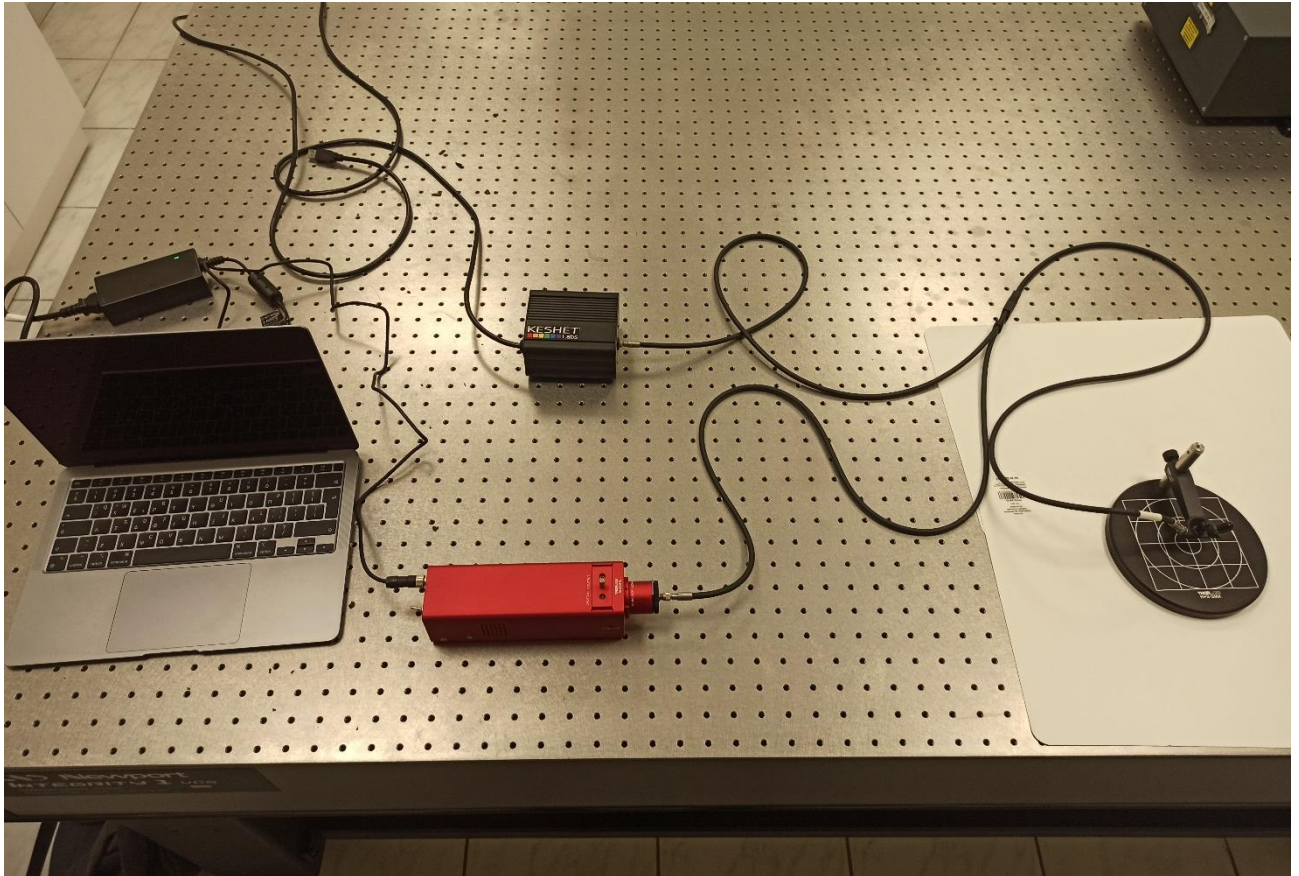
Εικόνα 3.3: Παράδειγμα παραγόμενου φάσματος

Το φάσμα παράγεται εντός του λογισμικού της Keshet όπου μπορεί να υποστεί και περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 3.4: Η επιφάνεια εργασίας του λογισμικού της Keshet

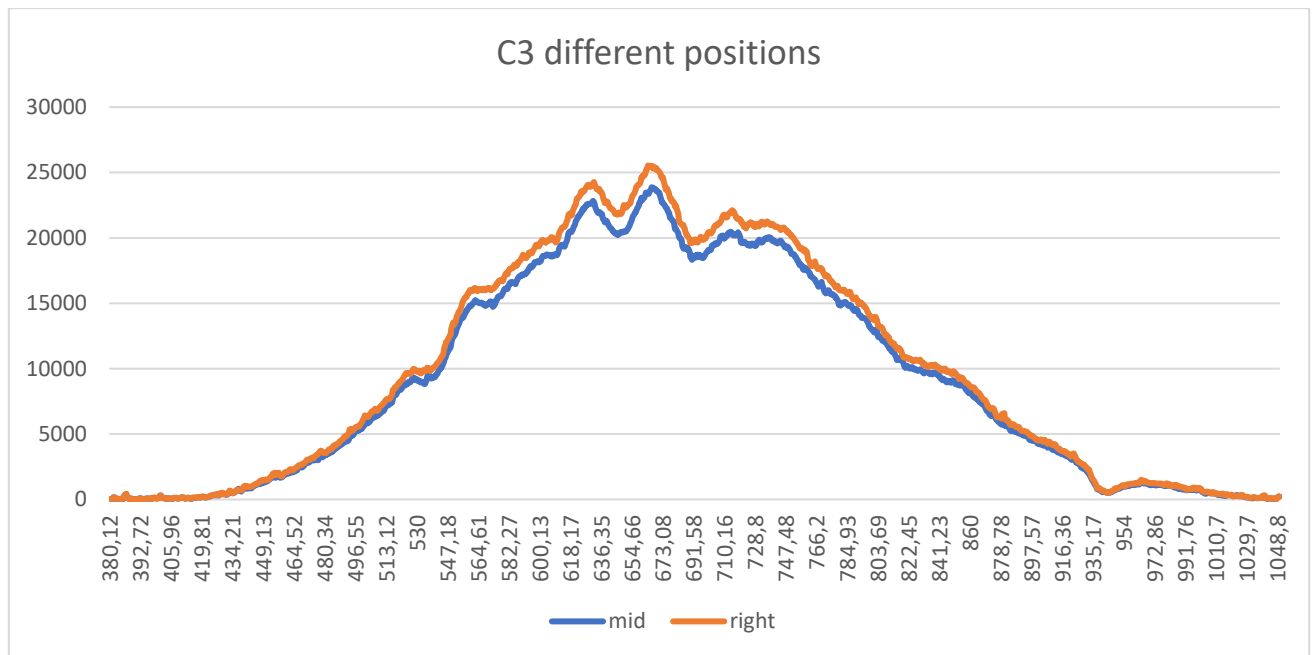
Το integration time ορίζει το χρονικό περιθώριο κατά το οποίο παίρνονται οι μετρήσεις και έχει σαν σκοπό να μειώσει το θόρυβο και να αποδώσει πιο πιστά τα χαρακτηριστικά του φάσματος. Μεγάλες τιμές οδηγούν σε πιο αργή απόδοση των δεδομένων το οποίο μπορεί να μην είναι ιδανικό σε πειράματα που χρειάζονται χαμηλή χρονική απόκριση. Στο συγκεκριμένο πείραμα οι μεγάλες τιμές του integration time μας οδηγούσαν σε κορεσμό. Οι τιμές time boxcar και spectral boxcar λειτουργούν σαν περιοδικές συναρτήσεις οι οποίες διατηρούν τη μορφή του διαγράμματος και τα δεδομένα εντός του παλμού ενώ μηδενίζουν τις τιμές έξω από αυτών οι οποίες και θεωρούνται θόρυβος. Αυτό μας βοηθάει στην κατασκευή πιο λείων και ευανάγνωστων διαγραμμάτων ενώ παράλληλα αφαιρεί το θόρυβο. Ωστόσο οι πολύ μεγάλες τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε αλλοίωση χρήσιμης πληροφορίας [42,43]. Στα πειράματα που διεξήχθησαν το φως ακτινοβολούσε το δείγμα από τα 36mm από τη βάση του holder, το integration time ορίστηκε στα 181,000 µs, διότι έδινε αρκετά καλή ακρίβεια ενώ ταυτόχρονα αποφεύγαμε τον κορεσμό. Η τιμή του spectral boxcar ορίστηκε στο 4 και του time boxcar στο 2.



Εικόνα 3.5: Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης

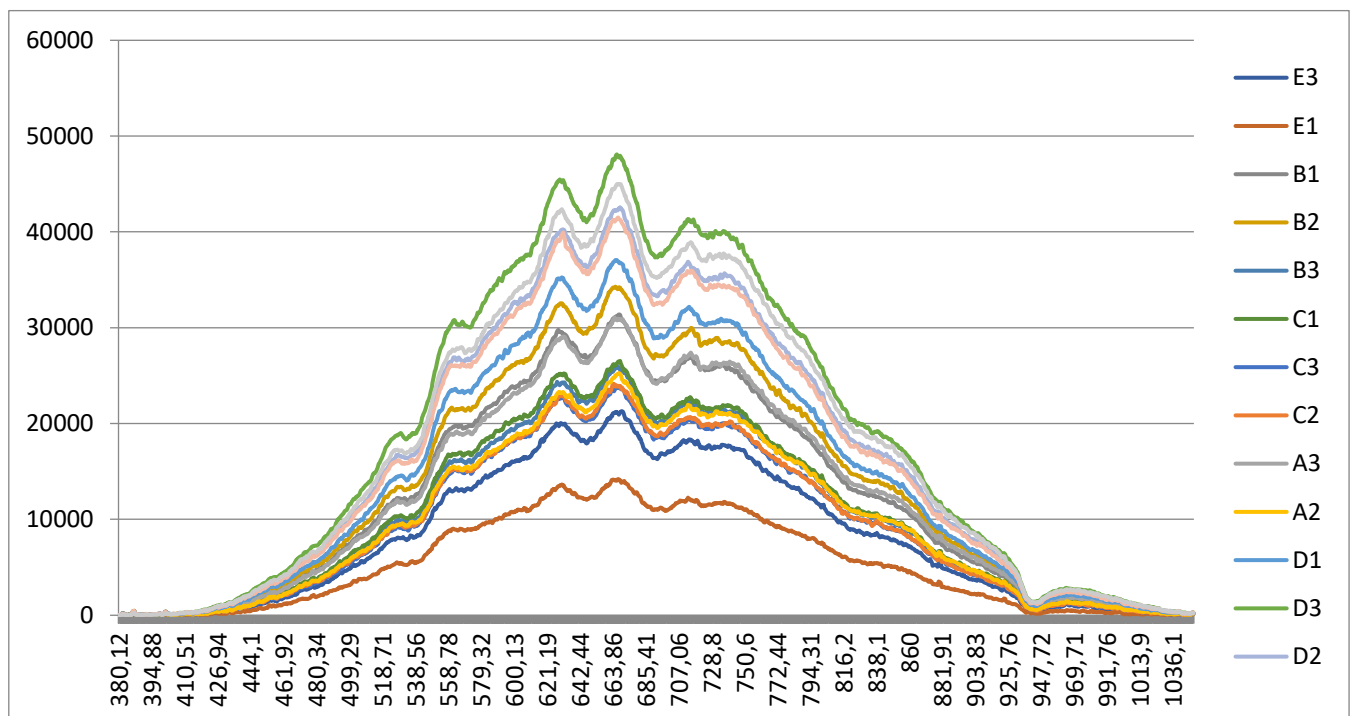
3.2 Ανάλυση δεδομένων

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της μέτρησης τα δεδομένα καταγράφονται στο excel όπου και θα αναλυθούν και θα εξαχθούν συμπεράσματα για να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Η μέτρηση του δείγματος γίνεται σε πέντε διαφορετικά σημεία, στο κέντρο του δείγματος και αριστερά, δεξιά, πάνω και κάτω από αυτό οπότε λαμβάνουμε πέντε σειρές δεδομένων που αφορούν την ένταση του φωτός που ανακλάται. Αυτό συμβαίνει διότι η επιφάνεια δεν είναι απόλυτα ομοιογενής άρα σε διαφορετικά σημεία λόγω της γεωμετρίας του δείγματος το φως διαχέεται διαφορετικά και υπάρχουν αισθητές διαφορές στην ένταση του. Από αυτές τις πέντε μετρήσεις φτιάχνουμε ένα μέσο όρο και είναι αυτός που χρησιμοποιείται για να γίνουν οι συγκρίσεις με άλλα δείγματα.



Εικόνα 3.6: Η διαφορά των φασμάτων στο δείγμα C3 μεταξύ δύο μετρήσεων μία στο κέντρο και μία δεξιά του δείγματος

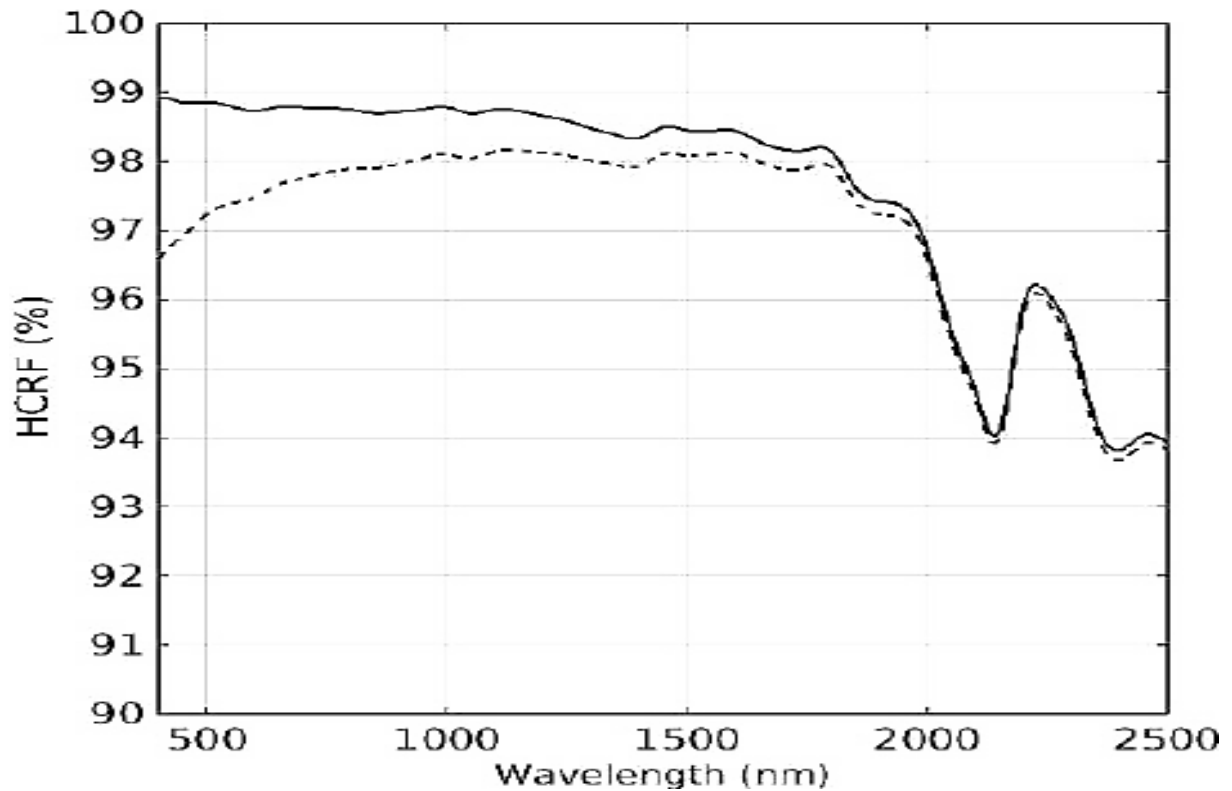
Η αρχική προσέγγιση είναι η ομαδοποίηση όλων των διαγραμμάτων έντασης του φωτός με σκοπό να αντληθεί μια πρώτη εικόνα σχετικά με τη συμπεριφορά των χωμάτων στο συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος.



Εικόνα 3.7: Συγκεντρωτική εικόνα όλων των φασμάτων

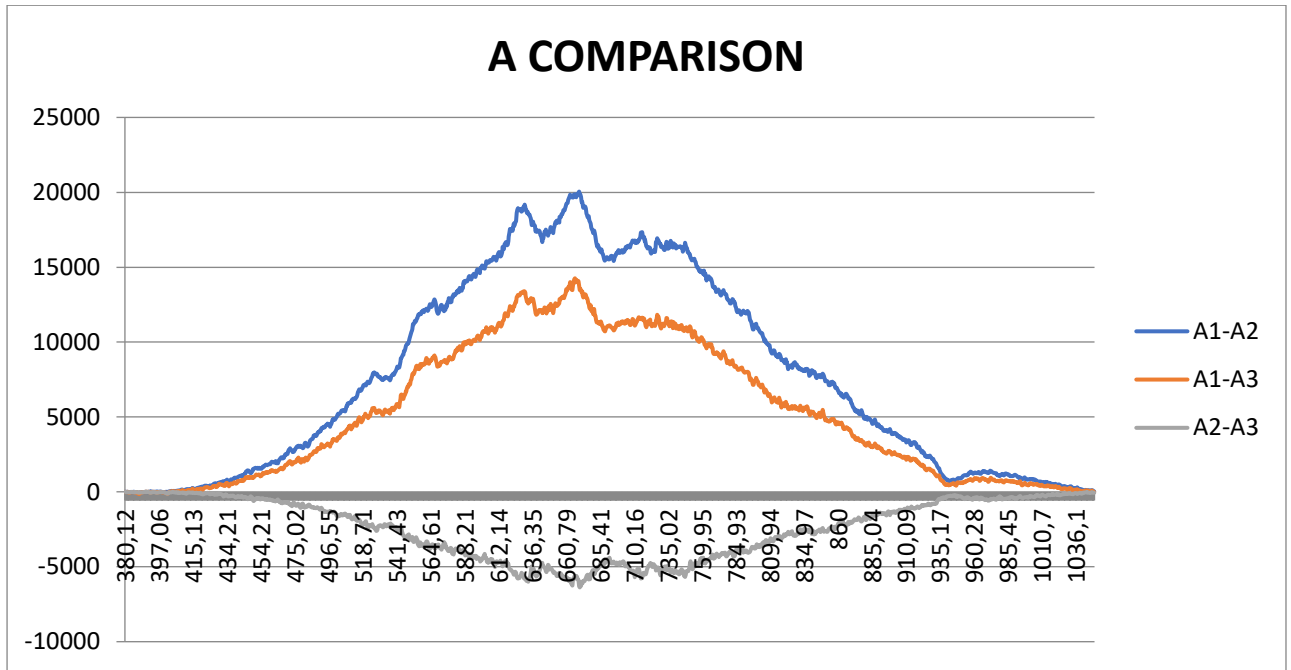
Ωστόσο η πληροφορία του συγκεκριμένου διαγράμματος είναι αρκετά περιορισμένη και δεν μπορεί να μας βοηθήσει ώστε να συσχετίσουμε αυτή τη συμπεριφορά του εδάφους με την περιεκτικότητα του σε θρεπτικά συστατικά. Μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα πως κάποια δείγματα έχουν μεγαλύτερο ποσοστό ανακλαστικότητας από κάποια άλλα, αλλά δεν μπορούμε να ορίσουμε ακριβώς

αυτό το ποσοστό. Για να επιτευχθεί αυτό θα χρειαζόμασταν ένα πλήρη ανακλαστή δηλαδή ένα υλικό που σε αυτό το εύρος θα ανακλά πλήρως το φώς και διαιρώντας την ένταση του με την ένταση του κάθε δείγματος θα βρίσκαμε το ποσοστό ανακλαστικότητας. Επιπλέον μπορούμε να αντιληφθούμε πως στα μικρά μήκη κύματος το έδαφος είναι αρκετά απορροφητικό και δεν ανακλάει σχεδόν καθόλου και το ίδιο ίσως να συμβαίνει και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, ωστόσο θα μπορούσε να είναι και αδυναμία εντοπισμού του φωτός από το φασματομέτρο ή τον αισθητήρα.

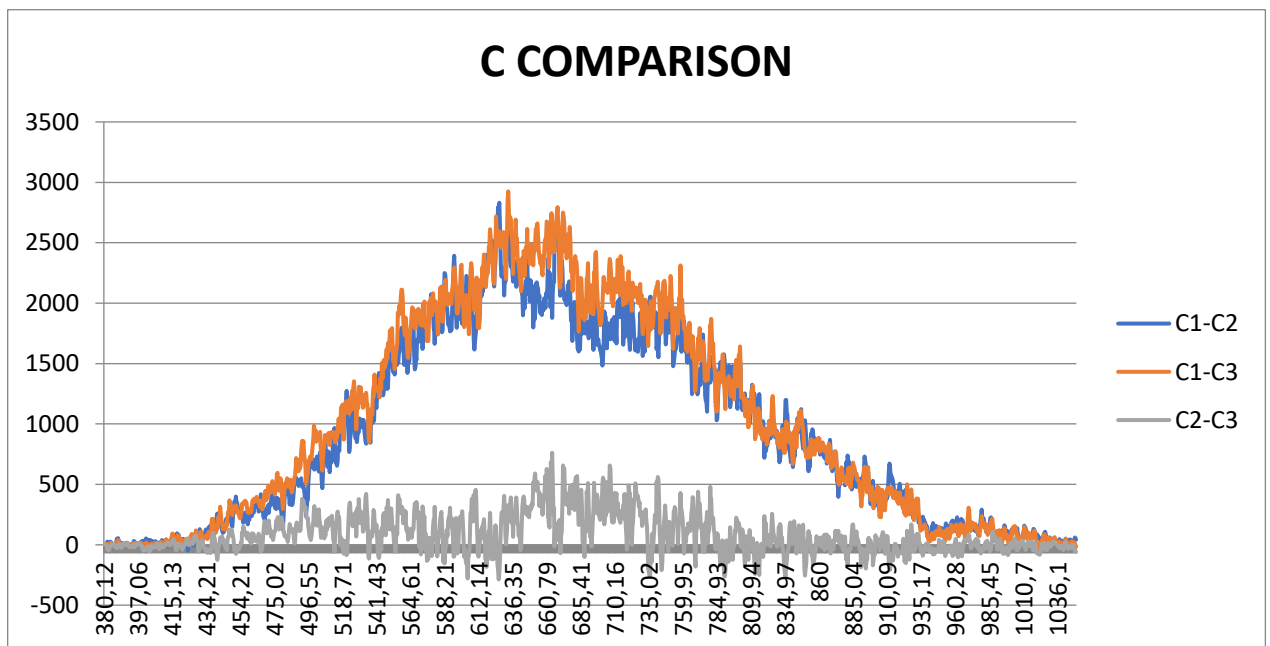


Εικόνα 3.8: Ποσοστό ανακλαστικότητας του Spectralon που χρησιμοποιεί στην κανονικοποίηση των δειγμάτων [45]

Μία δεύτερη προσέγγιση ήταν η αφαίρεση των διαγραμμάτων μεταξύ με σκοπό να αποσπάσουμε κάποια χρήσιμη πληροφορία για την περαιτέρω ανάλυση των δειγμάτων. Η αρχική ιδέα ήταν η παραγωγή ενός εύκολα αναγνώσιμου διαγράμματος όπως μιας ευθείας με την εμφάνιση διαφόρων κορυφών κατά το μήκος της. Όμως όπως φαίνεται και από τα επόμενα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν κάτι τέτοιο δε συμβαίνει και αυτή η προσέγγιση εγκαταλείφθηκε γρήγορα.



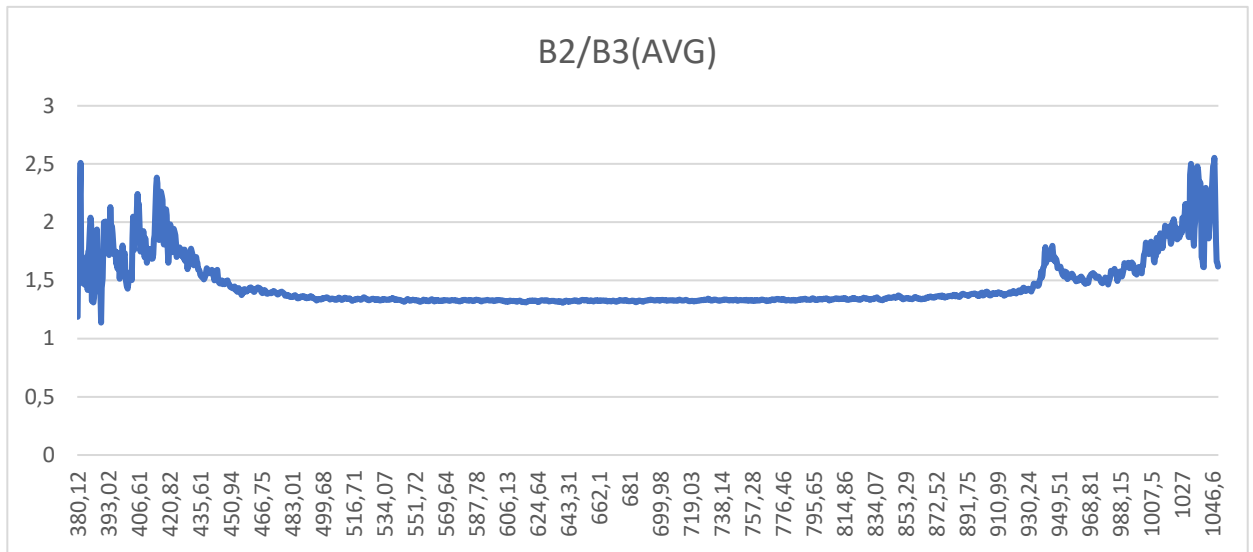
Εικόνα 3.9: Αφαίρεση μεταξύ των υποκατηγοριών του χρώματος Α



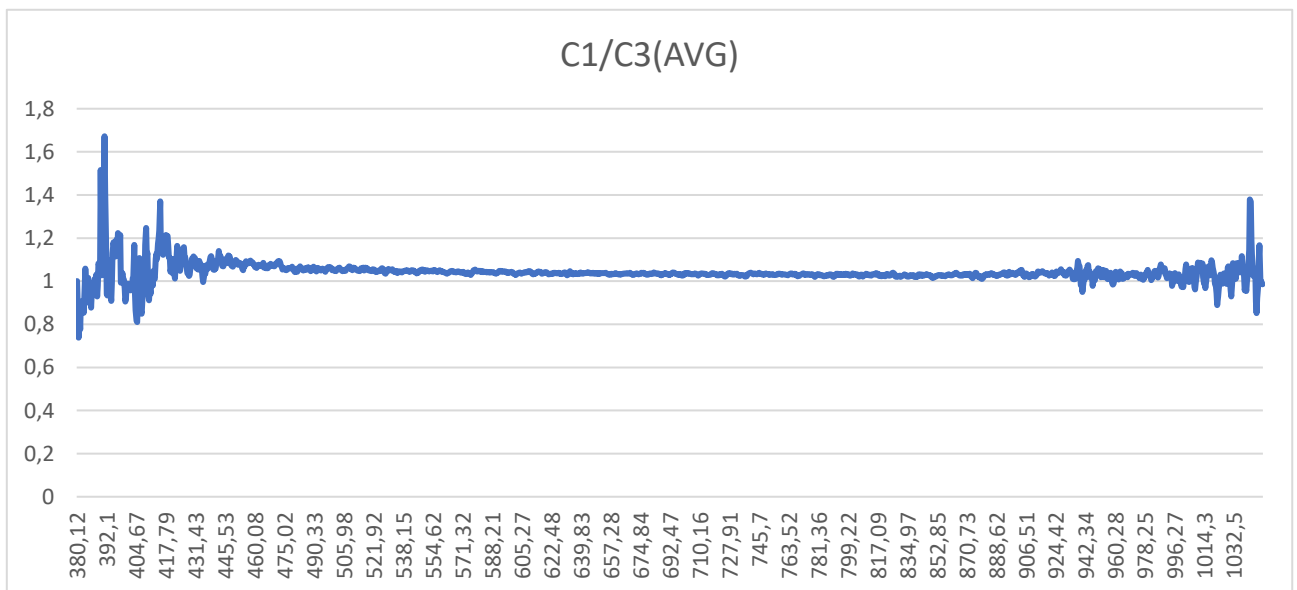
Εικόνα 3.10: Αφαίρεση μεταξύ των υποκατηγοριών του χρώματος C

Η τελευταία και πιο εύστοχη προσέγγιση είναι η διαίρεση μεταξύ δύο δειγμάτων. Η υπόθεση που κάνουμε είναι ότι αυτό που ανακλάται είναι το φως της λάμπας άρα σε κάθε μήκος κύματος η ένταση του φωτός θα είναι η ίδια. Έτσι ας θεωρήσουμε πως για ένα μήκος κύματος λ_1 η ισχύς του φωτός θα ισούται με P_{λ_1} . Το δείγμα όμως θα έχει ένα συγκεκριμένο συντελεστή απορρόφησης (έστω α) ο οποίος θα υποβαθμίζει την ισχύ του φωτός. Αυτό σημαίνει πως για δύο χρώματα σε ένα μήκος κύματος λ_1 η ισχύς του φωτός θα είναι $\alpha_1 \cdot P_{\lambda_1}$ και $\alpha_2 \cdot P_{\lambda_1}$ αντίστοιχα. Άρα θεωρητικά διαιρώντας τις ισχύς των δύο δειγμάτων μεταξύ τους θα προκύψει μια τιμή $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ η οποία θα είναι σταθερή και θα δημιουργηθεί ένα διάγραμμα που είναι μία ευθεία σε όλο το εύρος. Αν λοιπόν σε ένα τέτοιο διάγραμμα παρατηρηθεί κορυφή σε κάποιο μήκος κύματος σημαίνει πως εκεί άλλαξε η συμπεριφορά

του υλικού και πολύ πιθανόν να οφείλεται στην συγκέντρωση ή έλλειψη κάποιας θρεπτικής ουσίας. Επιπλέον ο θόρυβος στα άκρα του διαγράμματος οφείλεται στην απορροφητικότητα του δείγματος. Όπως είδαμε από τη θεωρία του Kubelka-Munk για τιμές απορροφητικότητας μικρότερες του 20% και μεγαλύτερες του 70% μεγαλώνουν κατά πολύ το σφάλμα και για αυτό η ευανάγνωστη περιοχή εμφανίζεται στο ενδιάμεσο του φάσματος μελέτης. Το διάγραμμα μπορεί να γίνει ακόμα πιο ομαλό κάνοντας του μια μετατροπή κατά Kubelka-Munk ,το οποίο γίνεται εύκολα με τη βοήθεια κάποιου λογισμικού πακέτου. Η μετατροπή διαχωρίζει το μέτρο της συνεισφοράς της απορροφητικότητας και της διαχυτικότητας του υλικού από την ολική ανακλαστικότητα που κανονικά μετράμε. Αυτό επιτρέπει να απομονώσουμε αυτές τις οπτικές ιδιότητες και να τις ποσοτικοποιήσουμε μέσω του φάσματος κάνοντας τη σύγκριση μεταξύ των χωμάτων πιο εύκολη.



Εικόνα 3.11: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και B3



Εικόνα 3.12: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των C1 και C3

Όπως λοιπόν θεωρήσαμε στο πρώτο διάγραμμα παρατηρούμε μια γραμμική συμπεριφορά και περίπου στα 950nm μία κορυφή, ενώ στο επόμενο παράδειγμα δεν υπήρξε κάποια κορυφή. Ο

θόρυβος που υπάρχει στα άκρα του διαγράμματος από τα 380 – 450 nm και από τα 980 – 1050 nm οφείλεται στο γεγονός ότι τα δείγματα έχουν μεγάλη απορροφητικότητα οπότε οι τιμές της έντασης είναι μικρές και ανακριβείς άρα επικαλύπτει η μία την άλλη. Στη σύγκριση του D3 με το D2 η πρώτη τιμή μορφοποιήθηκε από την πραγματική τιμή στην τιμή ένα, καθώς και οι τρεις πρώτες τιμές της σύγκρισης του C3 με τα C1 και C2 διότι ήταν πολύ μεγάλες συγκριτικά με τις υπόλοιπες και επηρέαζαν τη μορφή του διαγράμματος.

4. Εξαγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων

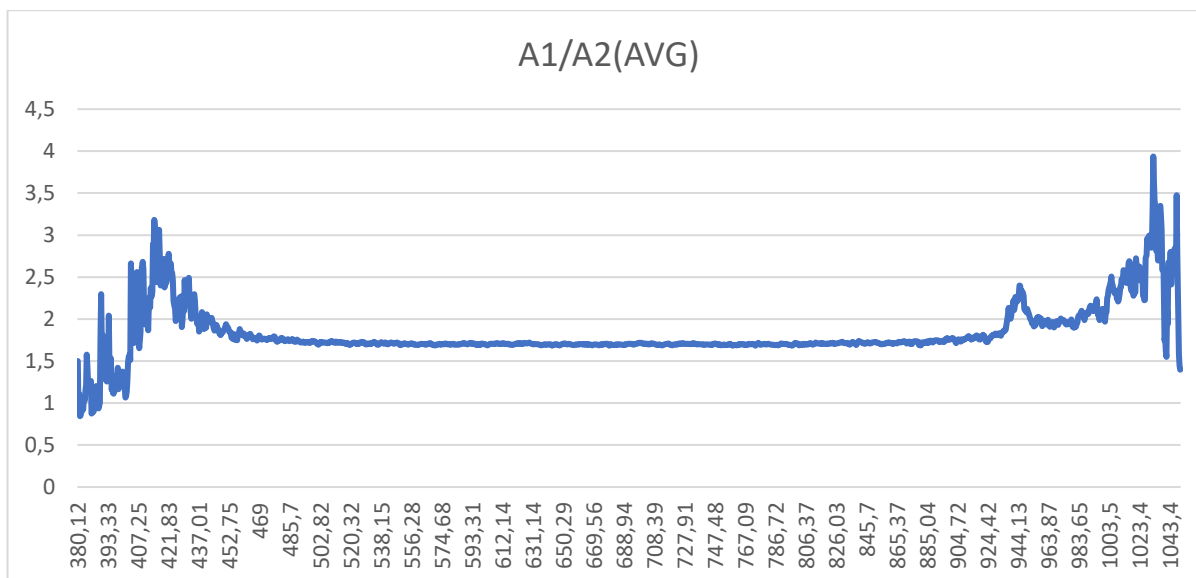
4.1 Δείγματα ίδια κατηγορίας

Η πρώτη απόπειρα μελέτης για την εξαγωγή κάποιων πρώτων συμπερασμάτων έγινε στα διαγράμματα που συγκρίνουν δείγματα της ίδιας κατηγορίας. Το γεγονός ότι αναφερόμαστε στο ίδιο είδος χρώματος σημαίνει πως έχει και τις ίδιες ιδιότητες, άρα οι διαφορές είναι πιο εύκολα εντοπίσιμες και τα αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν με μεγαλύτερη σιγουριά.

Ξεκινώντας συγκρίνοντας μεταξύ τους τα δείγματα των χρωμάτων της κατηγορίας A παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν όλα κορυφή κοντά στα 950 nm με τη μεγαλύτερη να είναι μεταξύ του A1 και A2. Αυτή η συμπεριφορά συνάδει με τις συγκεντρώσεις των δειγμάτων σε νιτρικό άζωτο διότι οι μεγαλύτερες κορυφές εμφανίζονται και στις υποκατηγορίες των χρωμάτων A που έχουν τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη κορυφή εμφανίζεται ανάμεσα στα A1 και A2 με τη συγκέντρωση νιτρικού αζώτου του πρώτου να είναι σχεδόν η διπλάσια του δεύτερου.

Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου σε ppm
A1	16,07
A2	31,75
A3	24,13

Πίνακας 4.1: Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στα δείγματα κατηγορίας A

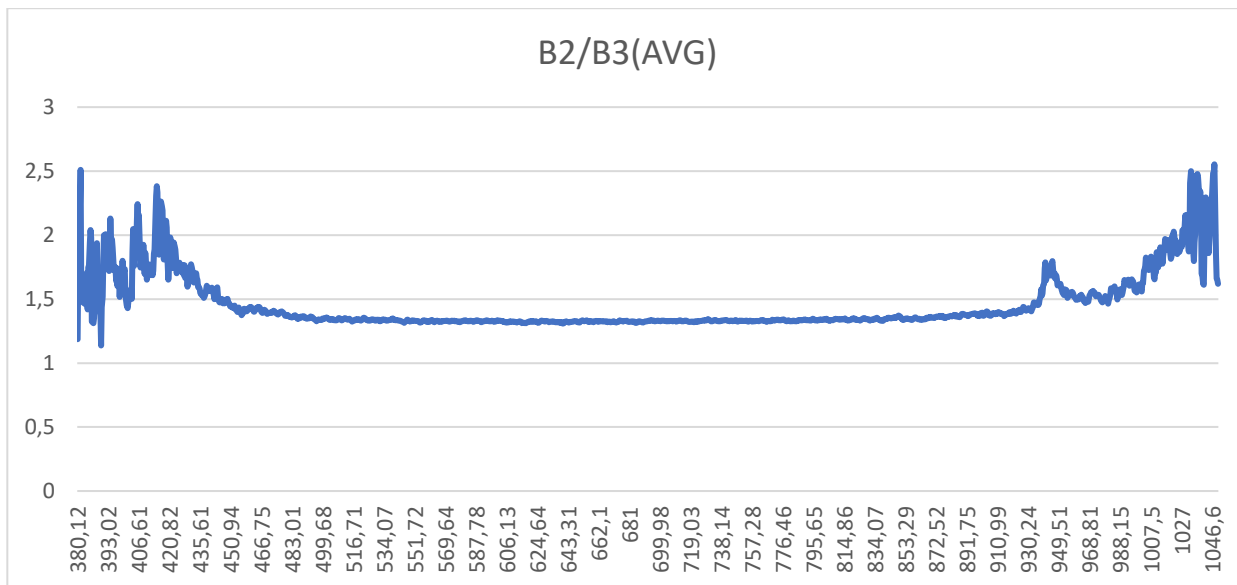


Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των A1 και A2

Στα δείγματα της κατηγορίας B δεν μπορούμε να καταλήξουμε στο ίδιο συμπέρασμα. Παρόλο που η σύγκριση των B2 και B3 συμβαδίζει με την προηγούμενη θεώρηση, που καταλήγει σε μία άμεση σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε νιτρικό άζωτο και τις κορυφές στην περιοχή των 950nm, οι υπόλοιπες συγκρίσεις κάνουν το ίδιο. Το B1 εμφανίζει μία σχεδόν ευθεία γραμμή διαιρούμενο με τα άλλα δύο. Παρατηρούμε ωστόσο ότι οι συμπεριφορές των διαγραμμάτων συνάδουν με τις περιεκτικότητες νατρίου και γίνεται μία πρώτη υπόθεση ότι ίσως να συνδέεται και αυτό στην ίδια περιοχή του εύρους του μήκους κύματος.

Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου σε ppm	Συγκέντρωση νατρίου σε ppm
B1	10,13	112,59
B2	19,07	104,54
B3	27,83	121,27

Πίνακας 4.2: Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου και νατρίου στα δείγματα κατηγορίας B

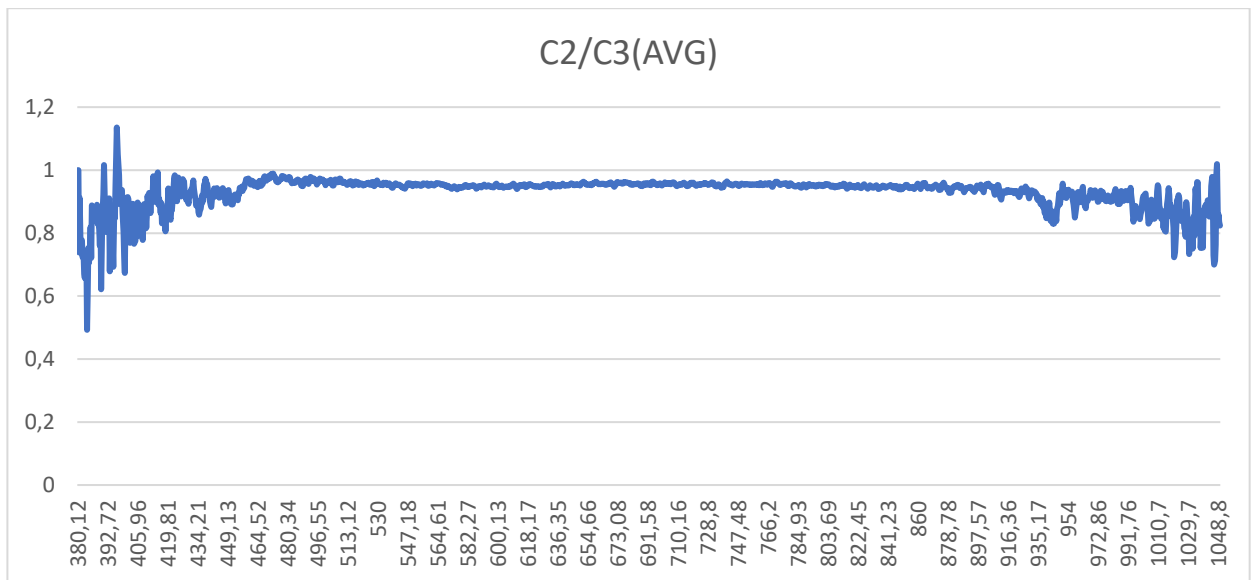


Εικόνα 4.2: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και B3

Στα δείγματα τύπου C το C2 εμφανίζει κορυφή με τα άλλα δύο δείγματα στην περιοχή των 950nm ενώ ταυτόχρονα έχει τη μεγαλύτερη τιμή νιτρικού αζώτου με το ίδιο να ισχύει και με τις τιμές του νατρίου. Το μέγεθος όμως των κορυφών είναι αρκετά μικρό σε σχέση με τις περιεκτικότητες του νιτρικού αζώτου κάνοντας πιο πιθανή την περίπτωση να οφείλονται στο νάτριο. Η ίδια τάση συνεχίζει να εμφανίζεται και με τα δείγματα τύπου D με το D1 να εμφανίζει κορυφές με τα δείγματα D2 και D3 με την τιμή του πρώτου να είναι εμφανώς μικρότερη από τις άλλες δύο. Παρόλο όμως που αρχίζει να υπάρχει μία επαναληψιμότητα μεταξύ των κορυφών και της περιεκτικότητας των χωμάτων σε νιτρικό άζωτο δεν εμφανίζονται μόνο όταν η τιμή ενός δείγματος είναι μέγιστη αλλά και όταν είναι ελάχιστη το οποίο δημιουργεί πρόβλημα στην αξιοπιστία αυτού του συμπεράσματος. Οι τιμές του νατρίου δε φαίνεται να σχετίζονται με την περίπτωση του δείγματος D.

Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου σε ppm	Συγκέντρωση νατρίου σε ppm
C1	9,47	134,21
C2	24,31	143,58
C3	16,95	140,09

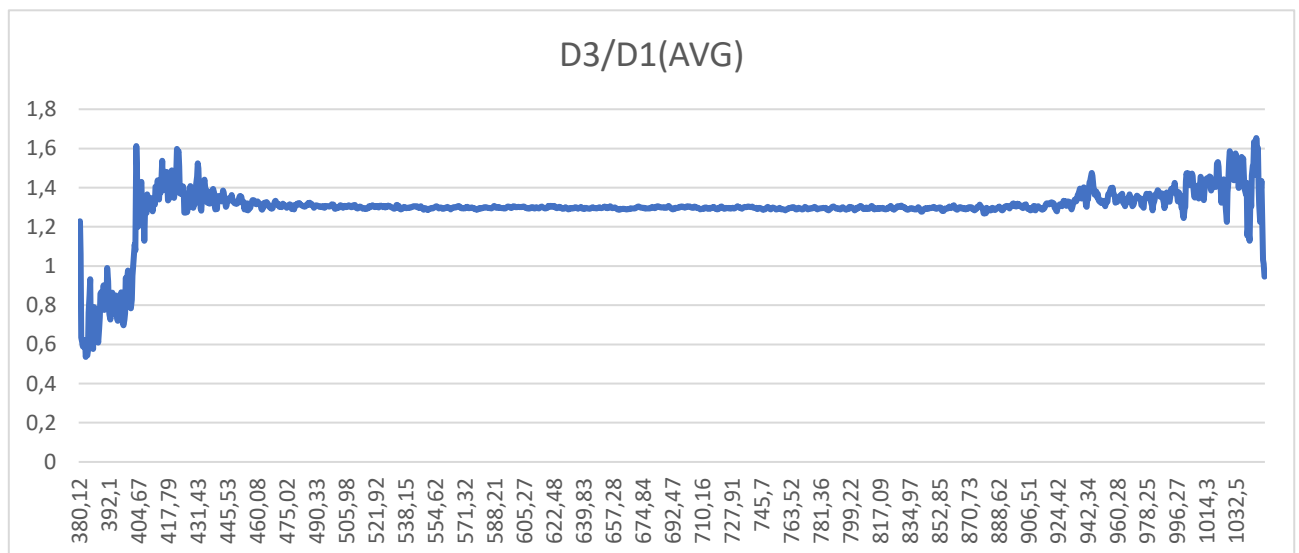
Πίνακας 4.3: Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου και νατρίου στα δείγματα κατηγορίας C



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των C2 και C3

Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου σε ppm
D1	24,26
D2	38,09
D3	39,80

Πίνακας 4.4: Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου στα δείγματα κατηγορίας D



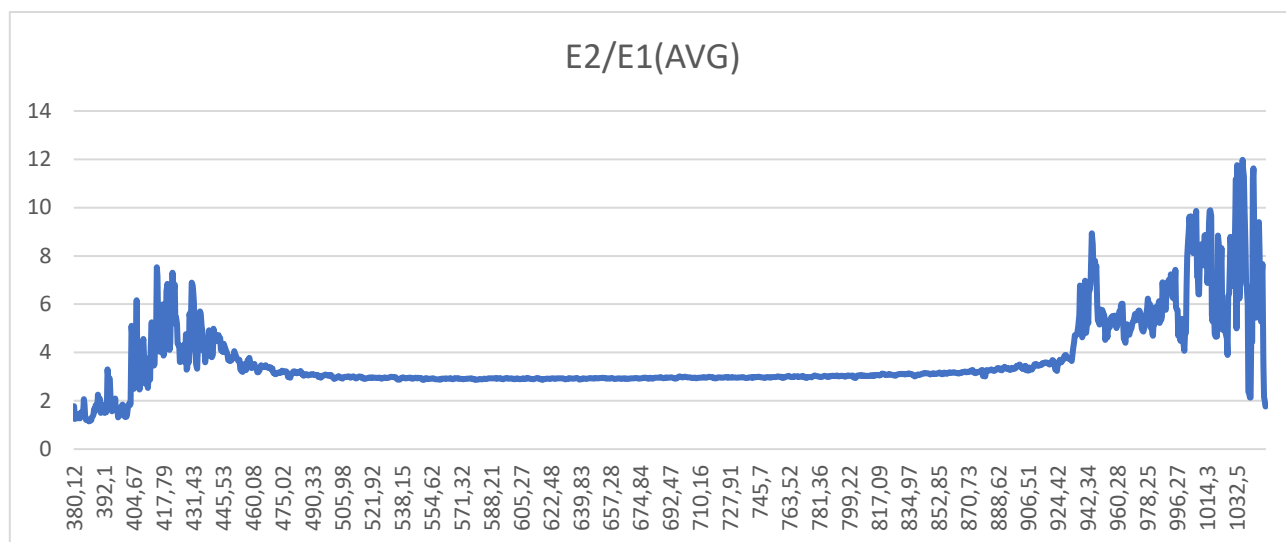
Εικόνα 4.4: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των D3 και D1

Τέλος στη περίπτωση των δειγμάτων E οι κορυφές εμφανίζονται στις συγκρίσεις με το δείγμα E1 όμως δε συνάδουν με τα δεδομένα που αφορούν το νιτρικό άζωτο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση

διαπιστώνεται πως η συμπεριφορά των διαγραμμάτων ταυτίζεται με αυτή των τιμών του νατρίου κάτι που παρατηρήθηκε και στην περίπτωση των δειγμάτων της κατηγορίας Β και C.

Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νατρίου σε ppm
E1	91,23
E2	45,00
E3	78,68

Πίνακας 4.5: Συγκέντρωση νατρίου στα δείγματα κατηγορίας E



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των E2 και E1

Στην περίπτωση λοιπόν των δειγμάτων ίδιας κατηγορίας παρατηρούμε ένα μοτίβο που συνδέει τους συντελεστές απορρόφησης με τις περιεκτικότητες νιτρικού αζώτου και νατρίου, οι οποίες εντοπίζονται μέσω των κορυφών που εμφανίζονται στα διαγράμματα στην περιοχή ανάμεσα στα 940 και τα 960 nm. Η εμπλοκή όμως δύο διαφορετικών ποσοτήτων μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στη συγκεκριμένη ζώνη δεν ενεργεί μόνο μια θρεπτική ουσία για όλα τα είδη χωμάτων και θα πρέπει να ερευνήσουμε από προηγούμενα δεδομένα αν η αλληλεπίδραση με το νάτριο ή το νιτρικό άζωτο πριν ξεκινήσουμε να κάνουμε μελλοντικές προβλέψεις.

4.2 Δείγματα διαφορετικής κατηγορίας

Μεταβαίνοντας στην σύγκριση δειγμάτων που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες παρατηρούμε ότι το μοντέλο δεν λειτουργεί εξίσου καλά. Ένας λόγος είναι ότι το κάθε χρώμα συμπεριφέρεται με ξεχωριστό τρόπο και τα όρια των τιμών στις οποίες εμφανίζονται οι κορυφές διαφέρουν από χρώμα σε χρώμα. Θα παρουσιαστούν όμως μερικές απόπειρες επιδίωξης κάποιου συσχετισμού, καθώς και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτές.

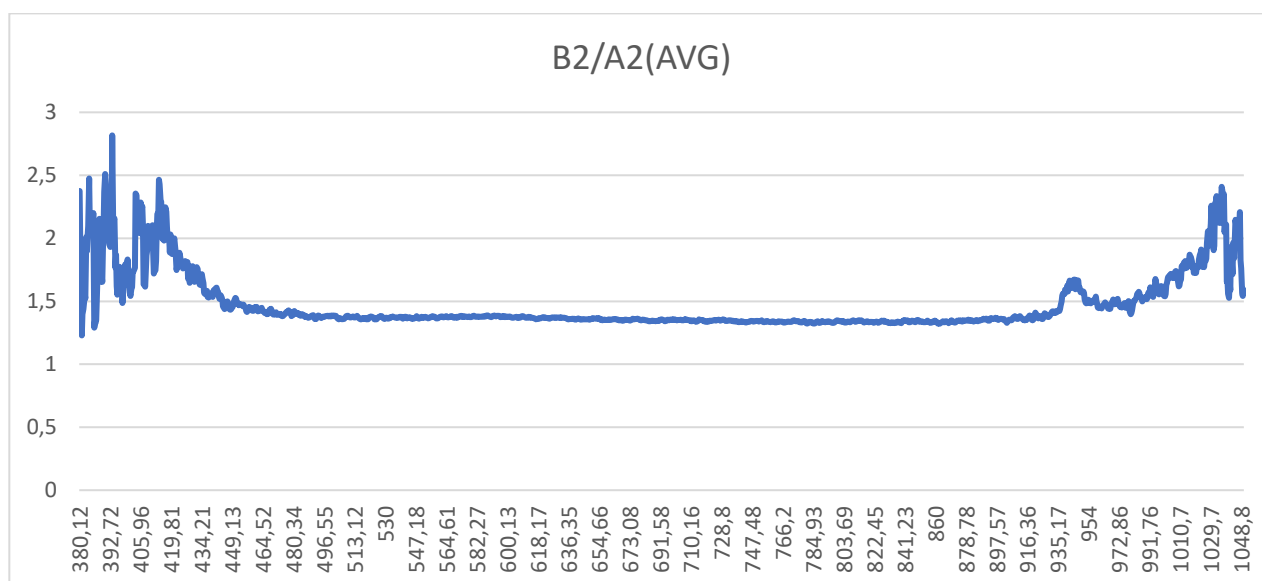
Αρχικά μελετήθηκε το δείγμα B2 με διάφορα δείγματα ταυτόχρονα για να εξεταστεί αν υπάρχει μια γενική συμπεριφορά με τα δείγματα και τις περιεκτικότητές τους. Εξετάζουμε πάλι την περίπτωση

του νιτρικού αζώτου διότι έχουμε εντοπίσει μία σύνδεση μεταξύ των κορυφών σε αυτή την περιοχή και στις συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου, ωστόσο δεν καταλήγουμε σε ένα καθολικό αποτέλεσμα. Επιπλέον οι τιμές των άλλων τιμών θρεπτικών ουσιών δεν εμφανίζουν κάποιο μοτίβο με τα διαθέσιμα διαγράμματα ούτε και του νάτριο παρόλο που και αυτό εμφάνισε κάποια συσχέτιση στα προηγούμενα πειράματα.

Επιχειρήθηκε λοιπόν μια διαφορετική προσέγγιση όπου συγκρίναμε ένα δείγμα με μία ολόκληρη κατηγορία δειγμάτων η οποία αποδείχθηκε αρκετά πιο αποτελεσματική. Η πρώτη περίπτωση αφορά τη σύγκριση του δείγματος B2 με τα δείγματα της κατηγορίας A.

Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου σε ppm
B2	19,07
A1	16,07
A2	31,75
A3	24,13

Πίνακας 4.6: Σύγκριση νιτρικού αζώτου μεταξύ του B2 και των δειγμάτων της κατηγορίας A



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και A2

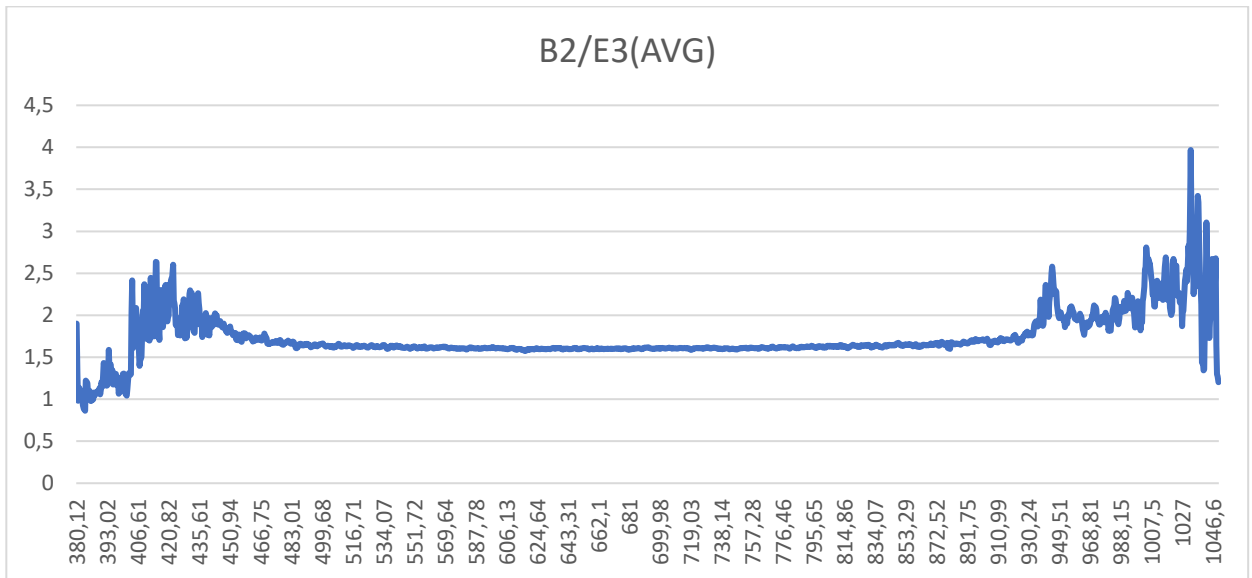
Παρόλο που πριν συσχέτισαμε την περιοχή των 950 nm με το νιτρικό άζωτο στην περίπτωση του A, ενώ στην περίπτωση του B με το νάτριο τα διαγράμματα στην σύγκριση αυτών των δύο δειγμάτων ταιριάζουν περισσότερο με τις τιμές του νιτρικού αζώτου.

Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε την αξιοπιστία του συμπεράσματος που εξάγαμε επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία και με τα δείγματα της κατηγορίας E.

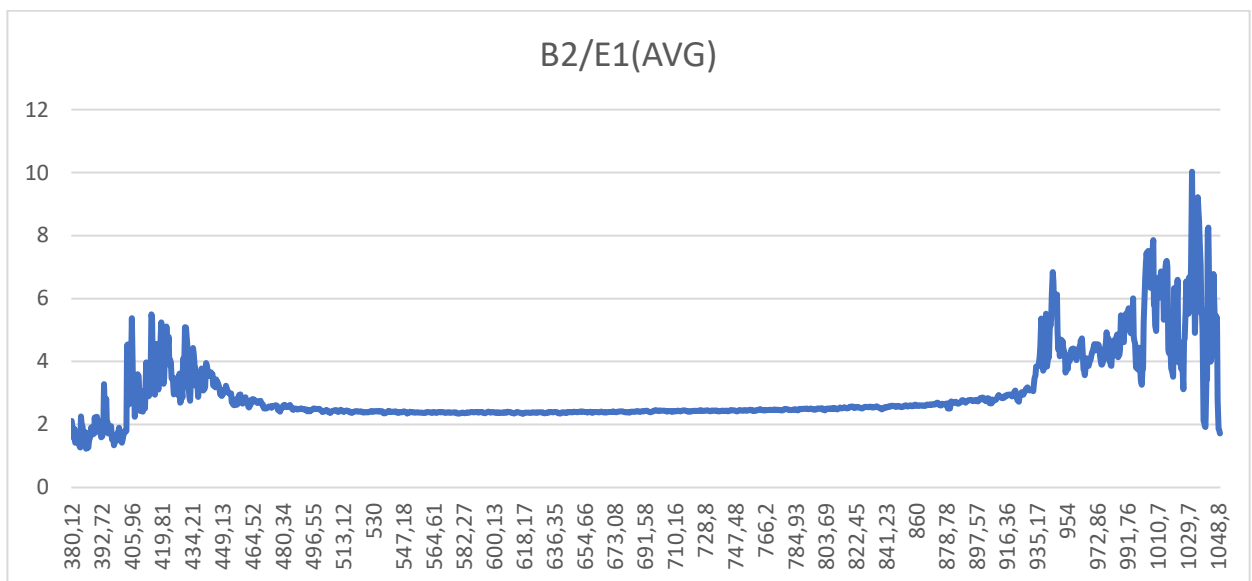
Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου σε ppm
B2	19,07

E1	15,06
E2	21,40
E3	14,57

Πίνακας 4.7: Σύγκριση νιτρικού αζώτου μεταξύ του B2 και των δειγμάτων της κατηγορίας E



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και E3



Εικόνα 4.8: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των B2 και E2

Στην περίπτωση με τις κατηγορίες του E αν και η μεγαλύτερη διαφορά εμφανίζεται με το E3 η μεγαλύτερη κορυφή εμφανίζεται με το E1 αλλά σε αυτό ίσως να επηρεάζουν και άλλες τιμές όπως αυτή του νατρίου. Επίσης εδώ οι κορυφές εμφανίζονται σε τιμές που είναι μικρότερες και όχι μεγαλύτερες από τη συγκρίσιμη σε αντίθεση με την περίπτωση του B. Παρόλα αυτά συνεχίζει να υπάρχει φανερή συσχέτιση με τις τιμές του νιτρικού αζώτου παρά το γεγονός πως και τα δύο είδη χωμάτων που συγκρίνονται, δηλαδή των κατηγοριών A και E, όταν έγινε ο έλεγχος ανάμεσα στις υποκατηγορίες τους εμφάνισαν συσχέτιση με το νάτριο.

Η τελευταία περίπτωση που θα εξεταστεί λεπτομερώς είναι αυτή του δείγματος A1 καθώς εμφανίζει μια πιο ιδιαίτερη συμπεριφορά. Αρχικά θα μελετηθεί με τα δείγματα της κατηγορίας τύπου C.

Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου σε ppm
A1	16,07
C1	9,47
C2	24,31
C3	16,95

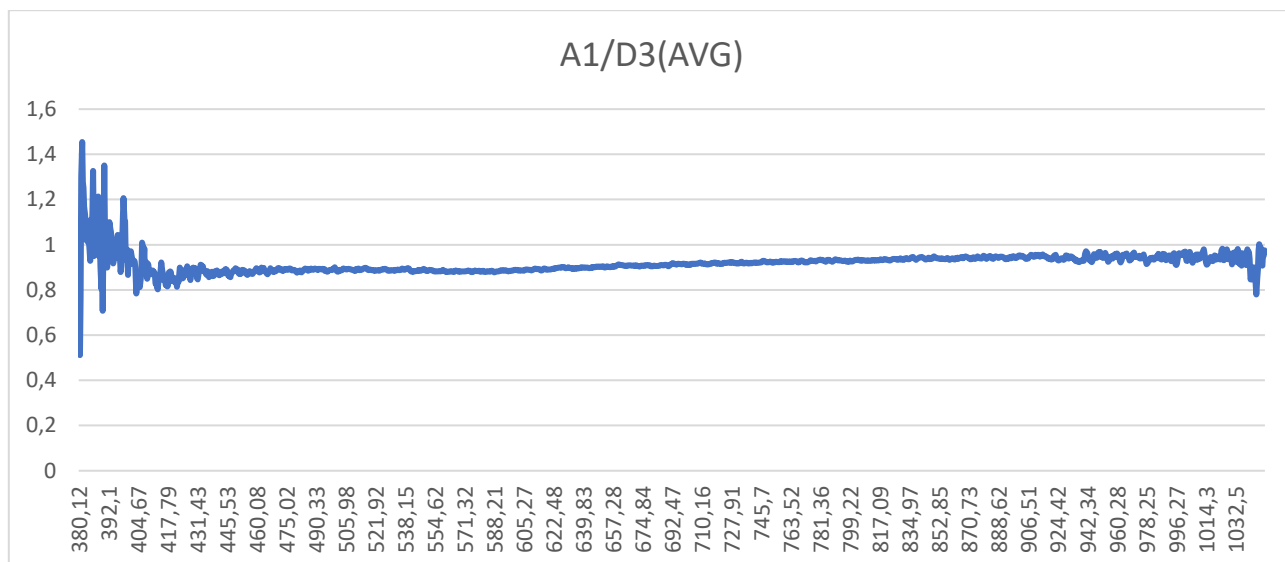
Πίνακας 4.8: Σύγκριση νιτρικού αζώτου μεταξύ του A1 και των δειγμάτων της κατηγορίας C

Για ακόμα μια φορά το μέγεθος των κορυφών ταυτίζεται με το μέγεθος των διαφορών μεταξύ του δείγματος A1 και των άλλων τριών ωστόσο το γεγονός ότι σχηματίζεται κορυφή, και όχι για παράδειγμα κοιλία, ανεξάρτητα με το αν η τιμή είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα. Όταν η σύγκριση γίνεται χωρίς να γνωρίζουμε τις περιεκτικότητες των χωμάτων θα μπορούμε να εντοπίσουμε τυχόν διαφορές και το μέγεθός τους αλλά δεν θα μπορούμε να προβλέψουμε ή έστω να προσεγγίσουμε την πραγματική τιμή.

Κατηγορία δείγματος	Συγκέντρωση νιτρικού αζώτου σε ppm
A1	16,07
D1	24,26
D2	38,09
D3	39,80

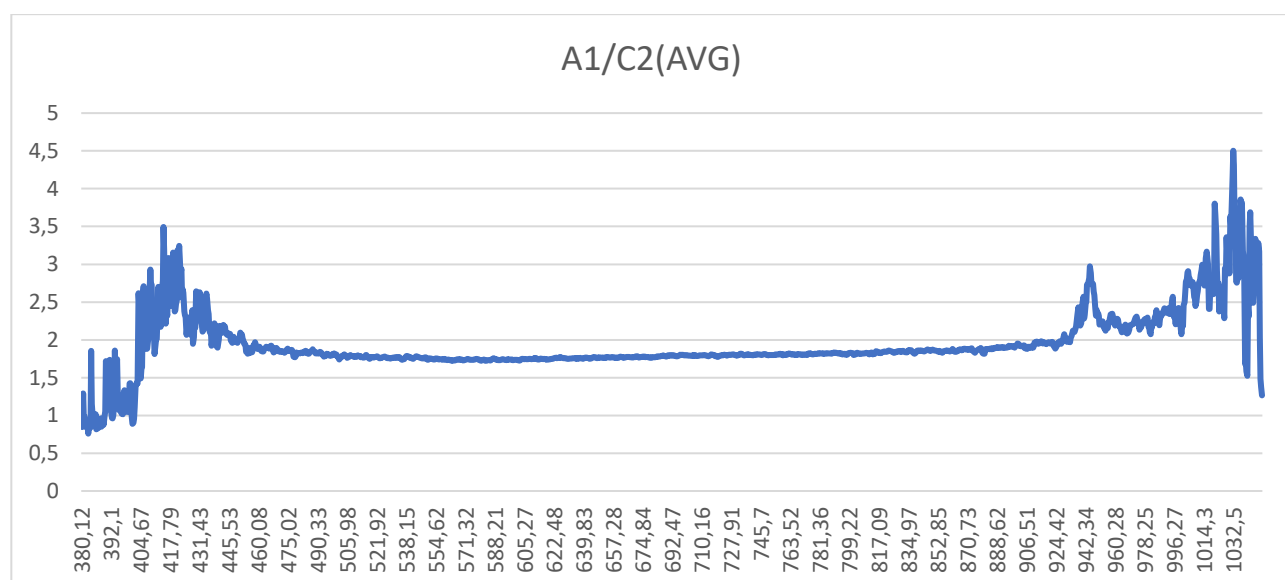
Πίνακας 4.9: Σύγκριση νιτρικού αζώτου μεταξύ του A1 και των δειγμάτων της κατηγορίας D

Τέλος στην περίπτωση της σύγκρισης με τα δείγματα D2 και D3 τα διαγράμματα δεν παρουσιάζουν κάποια κορυφή αλλά μία ευθεία συμπεριφορά και παράλληλα μια σχεδόν ανεπαίσθητη αλλά ανοδική τάση. Αυτό αντιτίθεται σε όσα έχουν παρατηρηθεί μέχρι στιγμής καθώς αναμέναμε μία κορυφή και μάλιστα μεγαλύτερη από αυτή με το D1. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι ο συντελεστής απορρόφησης, στη συγκεκριμένη περιοχή μηκών κύματος, τυχαίνει να είναι παρόμοιος και άρα επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες που συντελούν την κατηγορία του χώματος. Άλλη περίπτωση είναι ότι ο φασματογράφος εντοπίζει διαφορές έως ένα όριο και οι υπόλοιπες περιπτώσεις του είναι μη αντιληψίμες.

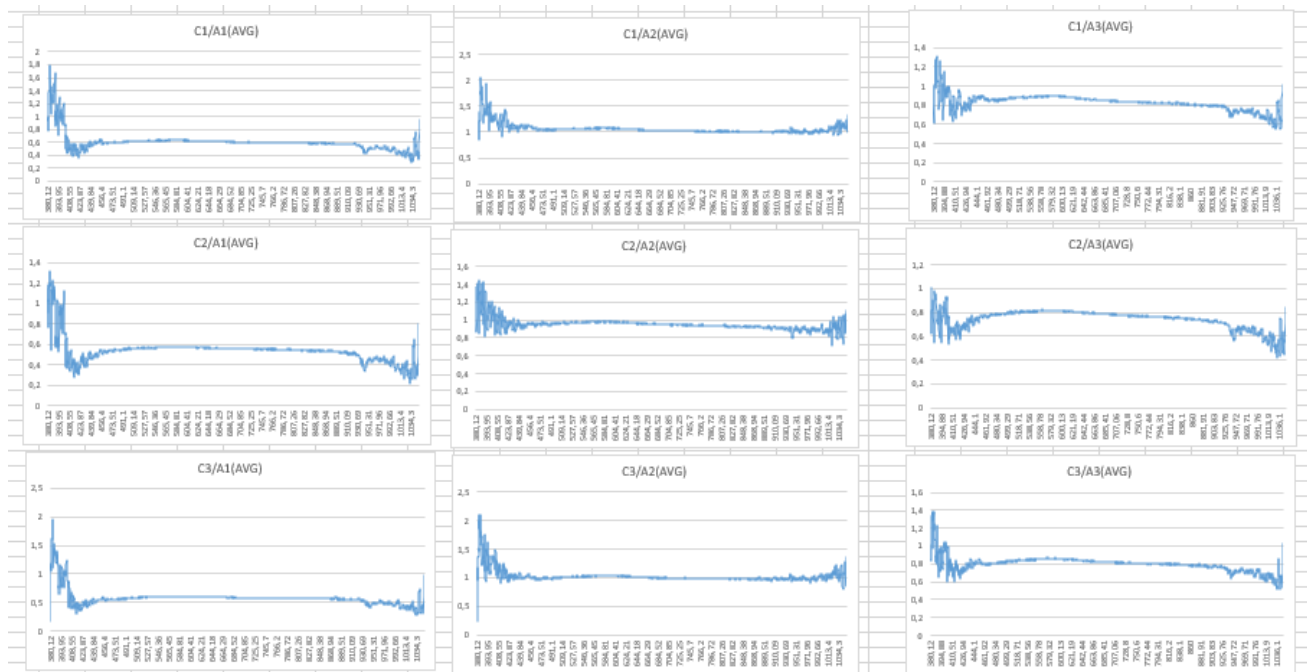


Εικόνα 4.9: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των A1 και D3

Μέσα όμως από εκτενέστερο πειραματισμό και την παραγωγή περισσότερων διαγραμμάτων αρχίζουμε να εντοπίζουμε αρκετά προβλήματα που δυσχεραίνουν την εξαγωγή ενός ενιαίου συμπεράσματος. Αρχικά όταν συγκρίνουμε την κάθε υποκατηγορία ενός χρώματος με ένα άλλο παρατηρείται ένα μοτίβο το οποίο δεν ερμηνεύεται πάντα με τον ίδιο τρόπο. Για παράδειγμα στην περίπτωση της σύγκρισης των χρωμάτων της κατηγορίας C με της κατηγορίας A θα μπορούσε να γίνει ένας συσχετισμός με τις τιμές του νατρίου. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα η πρώτη τιμή πολλών διαγραμμάτων άλλαξε για την καλύτερη ανάγνωση τους, όπως έγινε και στην περίπτωση της σύγκρισης του C με το A. Κατά τη μέτρηση οι τιμές της έντασης είχαν συνεχείς μεταβολές που κυμαίνονταν από 0 έως 15 μονάδες. Επειδή όμως οι πρώτες τιμές ήταν πολύ μικρές οι μεταβολές αυτές γίνονται αρκετά αισθητές και κατά τη διαίρεση τους οδηγούμαστε σε πολύ μεγάλες οι μικρές τιμές αλλοιώνοντας έτσι το διάγραμμα.



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα πηλίκου μεταξύ των μέσων όρων των A1 και C2



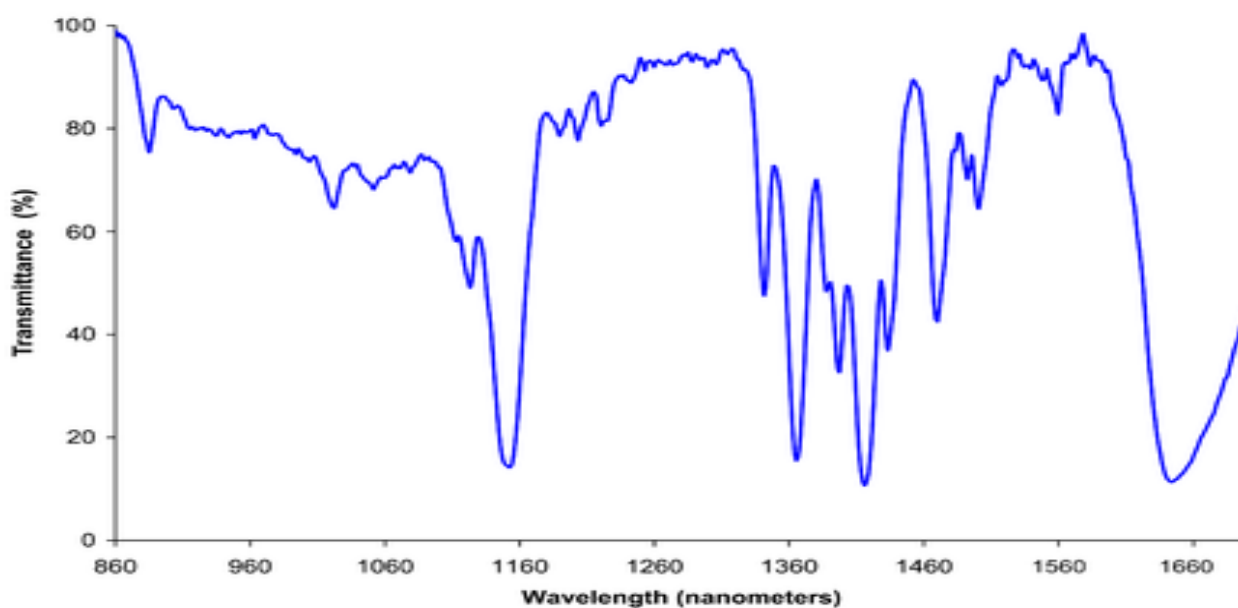
Εικόνα 4.11: Παρουσίαση του μοτίβου ανάμεσα στα χρώματα C και A

Σε άλλες περιπτώσεις όπως στη σύγκριση των δειγμάτων D και B πάλι εμφανίζεται ένα μοτίβο αλλά δε συνδέεται με καμία από τις τιμές των θρεπτικών ουσιών. Αυτή η ασυνέπεια δε μπορεί να μας δώσει απόλυτη σιγουριά για τα εξαγόμενα συμπεράσματα και δεν καθιστά το μοντέλο ιδιαίτερα αποτελεσματικό στη σύγκριση διαγραμμάτων διαφορετικών κατηγοριών.

4.3 Διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν θα μπορούσαν να επεκταθούν ακόμα περισσότερο ή και να χρησιμοποιηθούν τελείως διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης του προβλήματος. Ένας τρόπος ώστε να αξιοποιηθούν τα υπάρχοντα δεδομένα και να καταλήξουμε σε πιο αξιόπιστα και πιο γρήγορα συμπεράσματα θα ήταν με τη βοήθεια ενός νευρωνικού δικτύου. Αφού κατασκευαστεί το νευρωνικό δίκτυο “καθαρίζουμε” τα δεδομένα από τιμές που θεωρούνται outliers και θόρυβο και τα κανονικοποιούμε. Στη συνέχεια τα χωρίζουμε σε τρεις κατηγορίες που ονομάζονται training, validation και testing όπου το καθένα εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο σκοπό στη ρύθμιση του μοντέλου. Το training συνεισφέρει στην εκπαίδευση του μοντέλου, το validation αξιολογεί την απόδοση του μοντέλου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης και το testing αξιολογεί την απόδοση του μοντέλου μετά το πέρας της εκπαίδευσης και αφού το τροφοδοτήσουμε με νέα δεδομένα. Έτσι σε νέα δείγματα χρωμάτων έχουμε γρηγορότερες και πιο εύστοχες προβλέψεις αυξάνοντας κατά πολύ την απόδοση της διαδικασίας της φασματοσκοπίας. Μία άλλη ευρέως διαδεδομένη προσέγγιση στην επιστήμη της φασματοσκοπίας είναι αυτή του μοντέλου Monte Carlo λόγω της ακρίβειας και της ευελιξίας του. Το πρόγραμμα αυτό είναι εύκολο στη χρήση και παρέχει χρήσιμα δεδομένα που αφορούν τις οπτικές ιδιότητες του μέσου όπως το συντελεστή απορροφήσεως, το συντελεστή διασποράς και τον παράγοντα ανισοτροπίας που μετράει την ένταση του φωτός που συνεχίζει στην ίδια κατεύθυνση μετά από ένα γεγονός που οδηγεί στη διασπορά του [45]. Η συσχέτιση αυτών των οπτικών ιδιοτήτων με τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε μερικά αρκετά ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Μία διαφορετική προσέγγιση θα ήταν οι μετρήσεις να επαναληφθούν σε διαφορετικά εύρη μηκών κύματος καθώς η συμπεριφορά πολλών θρεπτικών συστατικών μπορεί να εμφανίζεται σε μήκη κύματος οι τιμές των οποίων δεν είναι εντοπίσιμες από τον υπάρχον εξοπλισμό. Αυτά τα μήκη αφορούν την περιοχή κοντά στο υπέρυθρο(NIR) με εύρος συνήθως από 800nm έως 2500nm, που χρησιμοποιείται συχνά στην ανάλυση του εδάφους και των αγροτικών προϊόντων, το μέσο του υπέρυθρου με εύρος από 2500nm έως 25000nm και στα άκρα του υπέρυθρου από 25000nm έως 100000nm. Μία συνηθισμένη τεχνική είναι η χρήση διαφόρων εύρων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων δεδομένων που αφορούν τα χαρακτηριστικά του χρώματος. Τέλος τα μεγάλα εύρη δίνουν μία πληρέστερη εικόνα όσον αφορά τα διαγράμματα που παράγονται κάνοντας τα πιο ευανάγνωστα και πιο εύκολα εντοπίσιμες τις κοιλίες και τις κορυφές



Εικόνα 4.12: Παράδειγμα διαγράμματος στην περιοχή NIR

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και απαιτείται η περαιτέρω μελέτη και η ανάπτυξη ισχυρών μοντέλων ώστε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα με μεγαλύτερη βεβαιότητα βγήκαν κάποια πολύ σημαντικά πρώτα συμπεράσματα. Η μέθοδος της φασματοσκοπίας φαίνεται να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν πρόκειται για δείγματα της ίδιας κατηγορίας και συγκεκριμένα στον εντοπισμό του νιτρικού αζώτου ή του νατρίου, ανάλογα από το είδος του χρώματος που μελετάμε. Αντιθέτως αποδείχθηκε μη αποδοτικό όσον αφορά τη σύγκριση δειγμάτων που αφορούν διαφορετικές κατηγορίες, καθώς δεν υπάρχει συνέπεια στη συσχέτιση των κορυφών με τις θρεπτικές ουσίες, σε σημείο που σε ορισμένες περιπτώσεις η συμπεριφορά του διαγράμματος δεν ταυτίζεται με καμία τιμή των θρεπτικών ουσιών. Επιπλέον τα αποτελέσματα που εξάγαμε είναι κατά κύριο λόγο ποιοτικά και όχι ποσοτικά. Είναι δυνατός ο προσδιορισμός κάποιου NPK χαρακτηριστικού στο χρώμα, ακόμα και το αν βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες ή όχι, αλλά δεν είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της τιμής του. Ακόμα ένα συμπέρασμα που αντλείται είναι ότι η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ευαίσθητη σε κάθε είδους αλλαγή και απαιτείται τεράστια ακρίβεια και προσοχή στον τρόπο που παίρνονται οι μετρήσεις.

Παρατηρήθηκε ότι ακόμα και μικρές ατέλειες στην επιφάνεια του δοκιμίου, αλλαγές στην υψομετρική διαφορά μεταξύ της επιφάνειας και του φωτός αλλά και της γωνίας υπό την οποία το χτυπάει, μπορούν να επιφέρουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Για την ορθή σύγκριση λοιπόν των δειγμάτων απαιτείται η μέθοδος να επαναληφθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ομοιότητα γίνεται. Επιπρόσθετα το εύρος στο οποίο γίνεται η μελέτη είναι ιδιαίτερα μικρό και περιορίζεται και άλλο λόγω του θορύβου που υπάρχει στα άκρα του με αποτέλεσμα αρκετή πληροφορία να μην μας είναι διαθέσιμη. Ένα μεγαλύτερο εύρος μηκών κύματος πολύ πιθανό να μαρτυρήσει περισσότερη πληροφορία, εμφανίζοντας κάποιες κορυφές σε μεγαλύτερες τιμές του φάσματος, και ίσως μας δώσει τη δυνατότητα να αντλήσουμε και συμπεράσματα για άλλες ουσίες του εδάφους, όπως το φώσφορο, το κάλιο ή το pH. Τέλος η διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα ώστε να γίνει χειροκίνητα, ειδικά όταν έχουμε να συγκρίνουμε τεράστιο όγκο δεδομένων. Απαιτεί την κατασκευή διαγραμμάτων για κάθε μέτρηση ξεχωριστά και σύγκριση μεταξύ τους για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, οι οποίες ορισμένες φορές μπορεί να είναι και εσφαλμένες. Για αυτό το λόγο θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η κατασκευή και η χρήση ενός συστήματος τεχνητής νοημοσύνης το οποίο θα κάνει αυτόματα τη διαδικασία και με πολύ μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

1. https://www.researchgate.net/publication/363450236_Application_of_Diffuse_Reflectance_Spectroscopy_DRS_for_Assessment_of_Various_Soil_Properties
2. https://www.researchgate.net/publication/361610035_Quantification_and_Depth_Distribution_Analysis_of_Carbon_to_Nitrogen_Ratio_in_Forest_Soils_using_Reflectance_Spectroscopy
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Diffuse_reflectance_spectroscopy
4. <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=2344>
5. <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/diffuse-reflectance-spectroscopy>
6. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5293522/>
7. <tps://mmrc.caltech.edu/FTIR/Literature/Diff%20Reflectance/Diffuse%20Reflectants%20Spec%20%20J.%20Blitz.pdf>
8. https://www.researchgate.net/publication/349428959_Determination_of_soil_nutrients_NPK_using_optical_methods_a_mini_review
9. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/10/1895>

10. https://www.researchgate.net/publication/324537136_Optimization_of_Nitrogen_Phosphorus_and_Potassium_Fertilization_Rates_for_Overseeded_Perennial_Ryegrass_Turf_on_Dormant_Bermudagrass_in_a_Transitional_Climate
11. https://www.researchgate.net/publication/346940195_The_Optimized_N_P_and_K_Fertilization_for_Bermudagrass_Integrated_Turf_Performance_during_the_Establishment_and_Its_Importance_for_the_Sustainable_Management_of_Urban_Green_Spaces
12. Clark, R.N., 1999. Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. In *Manual of Remote Sensing*, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York
13. Simon Steger , Heike Stege , Simone Bretz , Oliver Hahn, 2018. *Capabilities and limitations of handheld Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy (DRIFTS) for the analysis of colourants and binders in 20th-century reverse paintings on glass*
14. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CF%89%CE%BD%CE%AF%CE%B1_%CE%B1%CE%BD%CE%AC%CE%BA%CE%BB%CE%B1%CF%83%CE%B7%CF%82?fbclid=IwAR3Vta_GqJ-M3lTtRkDraZ49LaMQqcvKy2pf8E_akAtU9OC-jgeOYYiCT8E
15. https://el.lamdageeks.com/specular-and-diffuse-reflection/?utm_content=cmp-true&fbclid=IwAR2Oku2Irt_LKREqguef3T2qgLVPbm20TrADIPdYVPX3XogU6mSYsNtINC8
16. http://users.auth.gr/~katsiki/kef11a_anaklash.pdf?fbclid=IwAR1-gnqrGbW7V_DtKCgnu9079RYNmKGrhww7vJQOHKpgAuZC7I2PumJFO3o
17. <https://el.thpanorama.com/articles/fsica/teora-ondulatoria-de-la-luz-de-huygens.html>
18. <http://light.physics.auth.gr/history/two/particle.html>
19. <https://www.britannica.com/science/light/Light-as-electromagnetic-radiation>
20. <https://www.britannica.com/biography/Thomas-Young>
21. <https://www.britannica.com/science/blackbody>
22. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BA%CE%BB%CE%B1%CF%83%CE%B7>
23. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%B8%CE%BB%CE%B1%CF%83%CE%B7>
24. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CF%82_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%A3%CE%BD%CE%B5%CE%BB
25. <http://light.physics.auth.gr/enc/refraction.html>

26. http://www.geo.auth.gr/212/0_properties/isotropic_anisotropic.htm
27. <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/48-reflection-of-light>
28. <https://www.geeksforgeeks.org/reflection-of-light/>
29. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/diffuse-reflection>
30. https://en.wikipedia.org/wiki/Lambertian_reflectance
31. <https://www.atascientific.com.au/spectrometry/>
32. https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction_grating
33. <https://www.khanacademy.org/science/physics/light-waves/interference-of-light-waves/v/diffraction-grating>
34. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%83%CE%BA%CE%BF%CF%80%CE%AF%CE%B1>
35. <https://www.pasco.com/products/guides/what-is-spectroscopy>
36. I. Schelkanova, A. Douplik, in *Biophotonics for Medical Applications*, 2015
37. G. Kortim, *Reflectance Spectroscopy*, Springer-Verlag, Germany, 1969
38. https://en.wikipedia.org/wiki/Kubelka%E2%80%93Munk_theory
39. <https://mmrc.caltech.edu/FTIR/Literature/Diff%20Reflectance/Kubelka-Munk.pdf>
40. https://cmdis.rpi.edu/sites/default/files/DiffuseReflectance_FTIR.pdf
41. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7269
42. <https://www.zhinst.com/europe/en/resources/principles-of-boxcar-averaging>
43. https://spectrum-instrumentation.com/applications/product_notes/PN_Boxcar_Average_Function.php
44. CLAIR L. WYATT, in *Radiometric Calibration: Theory and Methods*, 1978
45. Porcar-Castell, Albert & Mac Arthur, Alasdair & Rossini, Micol & Eklundh, Lars & Pacheco-Labrador, Javier & Anderson, Karen & Balzarolo, Manuela & Martín, Maria & Jin, Hongxiao & Tomelleri, Enrico & Cerasoli, Sofia & Sakowska, Karolina & Hueni, Andreas & Julitta, Tommaso & Nichol, C. & Vescovo, Loris. (2015). *EUROSPEC: at the interface*

between remote-sensing and ecosystem CO₂ flux measurements in Europe. Biogeosciences. 12. 6103-6124.

46. *Frei RW. Diffuse Reflectance Spectroscopy; Applications, Standards, and Calibration (With Special Reference to Chromatography). J Res Natl Bur Stand A Phys Chem. 1976 Jul-Aug;80A(4):551-565*
47. <https://www.keshetlabs.com/product-page/spectrometer>
48. *Lan, Qing; McClarren, ryan; Vishwanath, Karthik (2023). Neural Network-based Inverse Model for Diffuse Reflectance Spectroscopy. Optica Open. Preprint.*
49. https://en.wikipedia.org/wiki/Near-infrared_spectroscopy
50. https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations