



ΚΡΗΤΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Φασματική απεικόνιση και ανάλυση οδοντικής παθολογίας

Θεοδωρόπουλος Μιχαήλ

Επιτροπή Διπλωματικής:

Μπάλας Κώστας, επιβλέπων Καθηγητής

Ζερβάκης Μιχάλης, Καθηγητής

Καλαϊτζάκης Κώστας, Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ 2013

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Κ. Μπάλα Κωνσταντίνο για την εμπιστοσύνη του και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα . Η άψογη συνεργασία και η καθοδήγηση του υπήρξαν για μένα σημαντικά εφόδια για την επιτυχή ολοκλήρωση της.

Στα πλαίσια της εργασίας μου είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ με τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του εργαστηρίου οπτοηλεκτρονικής Επιτρόπου Γιώργο, Ηλιού Δημήτρη και Καββαδία Βασίλη. Η υποστήριξή τους ήταν πολύπλευρη και καθοριστική. Με τις συμβουλές και τις επισημάνσεις τους με βοήθησαν να κατανοήσω καλύτερα αρκετές πτυχές του αντικειμένου. Οι συνεχείς συζητήσεις μας με βοήθησαν καθοριστικά στην επίλυση όλων των προβλημάτων που αντιμετώπισα. Για όλα αυτά τους ευχαριστώ.

Δε θα μπορούσα να μην αναφερθώ στους πολύτιμους συνεργάτες μας από την Οδοντιατρική σχολή Αθηνών και συγκεκριμένα από το Εργαστήριο Προληπτικής και Κοινωνικής Οδοντιατρικής η οποία μας παρείχε τα δείγματα δοντιών καθώς και την πολύτιμη καθοδήγηση τους όσον αφορά διαγνωστικές πληροφορίες. Τους ευχαριστώ θερμά και ιδιαιτέρως την Κα Ηλιάνα Διαμαντή.

Επίσης, θέλω να εκφράσω την εκτίμησή μου στους καθηγητές Ζερβάκη Μιχάλη και Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο , για την συμμετοχή τους στην επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας, προκειμένου να αξιολογήσουν την προσπάθειά μου αυτή.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω να πω και σε όλους τους φίλους μου που στάθηκαν συνοδοιπόροι στα όμορφα φοιτητικά μου χρόνια καθώς και σε ένα ιδιαίτερο πρόσωπο το οποίο ήταν για μένα στήριγμα σε όλους τους τομείς της φοιτητικής μου ζωής. Τους ευχαριστώ και την ευχαριστώ.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου για την αγάπη, τις θυσίες και τη διαρκή τους υποστήριξη, που επέτρεψαν την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου.

Περίληψη

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων ανίχνευσης παθολογικών καταστάσεων των δοντιών μέσω φασματικής απεικόνισης και ανάλυσης δειγμάτων δοντιών *in vitro*. Οι παθήσεις των δοντιών όντας από τις πιο συχνά εμφανιζόμενες παθήσεις χρίζουν ανάλυσης για την εγκυρότερη, γρηγορότερη διάγνωση τους στην όσο πιο δυνατόν πρώιμη μορφή τους. Στην πρώτη φάση έγινε η μελέτη των φασματικών ιδιοτήτων των οδοντικών ιστών μέσω φασματοσκοπίας για την ταυτοποίηση των φασματικών υπογραφών της κάθε παθολογικής κατάστασης των δοντιών με έμφαση στην τερηδόνα. Η μελέτη έγινε σε συνεργασία με την οδοντιατρική σχολή Αθηνών η οποία παρείχε δείγμα 12 εξαγμένων δοντιών για τα οποία υπήρχε και μια σχετική διάγνωση. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία υπερφασματικής απεικόνισης και πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων στο ορατό και μη ορατό φάσμα. Αρχικά με χρήση της υπερφασματικής κάμερας του εργαστηρίου ελήφθησαν εικόνες ανάκλασης φωτός με πόλωση σε 30 στενές φασματικές ζώνες (μπάντες) και πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση της παθολογικής κατάστασης του κάθε δοντιού χρησιμοποιώντας ψευδοχρωματικούς χάρτες. Για την χαρτογράφηση αυτή ήταν αναγκαία η ταξινόμηση των φασμάτων που το καθένα αντιστοιχεί σε ένα pixel. Τα φάσματα κατηγοριοποιούνται σε κλάσεις όπου κάθε κλάση εκφράζει μια διαφορετική παθολογική κατάσταση και κάθε κλάση αναπαριστάται με ένα χρώμα. Έτσι επιτυγχάνεται η άμεση οπτικοποίηση της διαγνωστικής πληροφορίας. Οι supervised ταξινομητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι : Spectral Angle Mapper (SAM) , Normalized Euclidean Distance (NEUC) , Spectral Gradient Angle Mapper (SGAM) , Spectral Information Divergence (SID), Spectral Correlation Mapper (SCM). Έπειτα από σύγκριση οι αποτελεσματικότεροι ταξινομητές ήταν οι: Normalized Euclidean Distance και Spectral Angle Mapper. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μείωση των απαιτούμενων μπαντών από τις 30 στις 4, 3 και 2 και επιβεβαιώθηκε ότι η διαγνωστική πληροφορία δεν αλλοιώνεται σημαντικά. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά πειραμάτων απεικόνισης ανάκλασης και φθορισμού κάτω από την επίδραση UV φωτός σε σκοτεινό δωμάτιο. Αρχικά με έγχρωμη κάμερα υψηλής ανάλυσης ελήφθησαν εικόνες στο υπεριώδες και στο ορατό (ανάκλασης και φθορισμού) και έπειτα μόνο στο ορατό (μόνο φθορισμός). Ως δεύτερη φάση χρησιμοποιήθηκε πάλι υπό τις ίδιες συνθήκες η υπερφασματική κάμερα του εργαστηρίου με την οποία ελήφθησαν εικόνες σε φίλτρο bandpass γύρω από τα 370nm με την πηγή φωτός (UV led) να εκπέμπει στα 370nm και 340nm. Τα αποτελέσματα των απεικονίσεων στο υπεριώδες είναι άκρως ενθαρρυντικά. Διακρίνεται μέχρι και η απομετάλλωση των οδοντικών ιστών που είναι η πρώτη ένδειξη εμφάνισης τερηδόνας (πρώιμη μορφή) καθώς και whitespots, brownspots και ρωγμές. Με την παρούσα εργασία έγινε δυνατή η ανίχνευση μη ορατών αλλοιώσεων, επιβεβαιώνοντας τις μεγάλες δυνατότητες για πρώιμη διάγνωση και ποσοτικοποίηση της διαγνωστικής διαδικασίας.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Ευρετήριο πινάκων	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΔΟΝΤΙΑ	8
1. Φυσικά δόντια.....	8
1.1 Λειτουργίες των δοντιών.....	8
1.2 Τύποι δοντιών.....	8
1.3 Αρίθμηση δόντιων.....	9
1.4 Ανατομία του δοντιού.	10
1.5 Ιστολογία της αδαμαντίνης	11
1.6 Ιστολογία της οδοντίνης.....	14
1.7 Ιστολογία πολφού	15
1.8 Παθολογία των δοντιών.....	15
1.9 Νόσος Τερηδόνα	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ηλεκτρομαγνητισμός και φασματοσκοπία	21
2.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	21
2.1.1 Υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared radiation) :.....	21
2.1.2 Ορατή ακτινοβολία (visible light) :	22
2.1.3 Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet radiation) :	22
2.2 Γενικά περί φασματοσκοπίας	22
2.2.1 Φθορισμός.....	24
2.2.2 Φωσφορισμός	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΕΡΗΔΟΝΑΣ	25
3.1 Φυσικές Αρχές που διέπουν την οπτική ανίχνευση τερηδόνας	26
3.1.1 Σκέδαση.....	28
3.1.2 Απορρόφηση με φθορισμό	28

3.2 Οπτικές μέθοδοι ανίχνευσης τερηδόνας	28
3.2.1 Quantitative light-induced fluorescence (QLF)	28
3.2.2 Κάμερα φθορισμού (VistaProof)	30
3.2.3 LASER INDUCED FLUORESCENCE-(DIAGNODent και DIAGNOdent-pen).....	31
3.2.4 OCT optical coherence tomography.....	33
3.2.5 Polarization sensitive optical coherence tomography	34
3.2.6 Fiber-optic transillumination (FOTI) and digital imaging fiber-optic transillumination (DIFOTI)	35
3.2.7 LED technology (Midwest Caries I.D.)	37
3.2.8 Απεικόνιση της τερηδόνας στο υπέρυθρο φως	38
3.2.9 Απεικόνιση ανάκλασης κοντά στο υπέρυθρο (NIR reflectance imaging) :	38
3.2.10 Υπέρυθρες-φθορισμός	39
3.2.11 Απεικόνιση με παλμούς Terahertz:.....	39
3.2.12 Πολυφωτονική απεικόνιση (Multiphoton Imaging):.....	39
3.3 ΣΥΝΟΨΗ.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Φασματική απεικόνιση.....	42
4.1 Σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης εργαστηρίου	45
4.2 Ταξινόμηση των φασματικών δεδομένων	46
4.3 Τρόποι ταξινόμησης	47
4.3.1 Supervised μέθοδοι ταξινόμησης οι οποίοι βασίζονται σε μετρήσεις ομοιότητας αποστάσεων.....	48
Στόχος διπλωματικής εργασίας.....	51
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Υπερφασματική απεικόνιση τερηδόνας	53
5.1 Φασματική απεικόνιση διάχυτης ανάκλασης με πόλωση	53
5.1.1 Διάταξη του πειράματος:	53
Εικόνα 5.1 Διάταξη πειράματος, πηγή φωτός δακτυλίου, πολωτές, υπερφασματική κάμερα.....	54
5.1.2 Διαδικασία πειράματος.....	54
5.1.3 Μελέτη των φασμάτων ανάκλασης που προέκυψαν από τους παραπάνω φασματικούς κύβους.	57
5.1.4 Κατηγοριοποίηση των περιοχών.....	58
5.1.5 Ταξινόμηση.....	60
5.1.6 Μείωση φασματικών ζωνών	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Φασματική απεικόνιση φθορισμού τερηδόνας με LED UV	70
6.1 Πείραμα 1: Υψηλής ανάλυσης έγχρωμη κάμερα.....	70

6.1.2 Διάταξη πειράματος:	70
6.1.3 Διαδικασία πειράματος:	70
6.1.4 Συμπεράσματα:	71
6.2 Πείραμα 2: UV υπερφασματική κάμερα.....	74
6.2.1 Διάταξη πειράματος:	74
6.2.2 Διαδικασία πειράματος:	74
6.2.3 Συμπεράσματα:	77
6.3 Πείραμα 3: Φάσμα UV (340 nm) για την ανίχνευση τερηδόνας.....	79
6.3.1 Διάταξη του πειράματος:	79
6.3.2 Διαδικασία του πειράματος:	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο : Συμπεράσματα και προοπτική εξέλιξης της Εργασίας.....	83
Συμπεράσματα	83
Προοπτική εξέλιξης της εργασίας	90
Αναφορές	91

Ευρετήριο πινάκων

2.1 Οι διάφοροι τύποι φασματοσκοπίας.....	25
3.1 Σύνοψη οπτικών μεθόδων.....	42
5.7 Αλγόριθμοι ταξινόμησης και οι αντίστοιχες χαρτογραφήσεις.....	61
5.8 Αλγόριθμοι ταξινόμησης και οι αντίστοιχες χαρτογραφήσεις.....	62
5.9 Αλγόριθμοι ταξινόμησης και οι αντίστοιχες χαρτογραφήσεις.....	62
5.12 Μείωση φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM.....	65
5.13 Μείωση φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM.....	65
5.14 Συνδυασμοί 4 φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM.....	66
5.15 Συνδυασμοί 4 φασματικών μπαντών, % ποσοστό ακρίβειας με αλγόριθμο SAM.....	66
5.16 Συνδυασμοί 3 φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM	67
5.17 Συνδυασμοί 3 φασματικών μπαντών, % ποσοστό ακρίβειας με αλγόριθμο SAM.....	67
5.18 Συνδυασμοί 2 φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM	68
5.19 Συνδυασμοί 2 φασματικών μπαντών, % ποσοστό ακρίβειας με αλγόριθμο SAM.....	68
5.20 Καλύτεροι συνδυασμοί φασματικών μπαντών, μέσος όρος ποσοστού ακρίβειας % με αλγόριθμο SAM.....	69
5.21 Διάγραμμα ακολουθίας φασματικής απεικόνισης.....	70
6.1 Φθορισμός υπό φωτισμό UV LED.....	72
6.2 Φθορισμός υπό φωτισμό UV LED.....	73
6.3 Φθορισμός υπό φωτισμό UV LED.....	73
6.4 Φθορισμός υπό φωτισμό UV LED.....	74
6.5 UV απεικόνιση.....	75
6.6 UV απεικόνιση.....	76
6.7 UV απεικόνιση.....	76
6.8 UV απεικόνιση.....	77
6.9 UV απεικόνιση.....	77
6.10 UV απεικόνιση.....	79
6.11 UV απεικόνιση.....	79
6.12 UV απεικόνιση , Συγκριτικά	81
6.13 UV απεικόνιση , Συγκριτικά	82
6.14 UV απεικόνιση, Συγκριτικά	83
7.1 Διάγραμμα πειραμάτων.....	85
7.2 Υπερφασματική απεικόνιση.....	86
7.3 UV απεικόνιση για εντοπισμό whitespot.....	87
7.4 UV απεικόνιση για εντοπισμό πρώιμων μορφών τερηδόνας.....	89

7.5 Απεικόνιση για εντοπισμό ρωγμών.....	89
7.6 Απεικόνιση για εντοπισμό βάρους brownspot.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΔΟΝΤΙΑ

Τα δόντια αποτελούν όργανο του γαστρεντερικού συστήματος που βρίσκεται μέσα στην στοματική κοιλότητα και στηρίζεται στο οστό των γνάθων. Τα δόντια οργανώνονται σε στοίχους, ή οδοντοστοιχίες. Διακρίνονται στην άνω και κάτω οδοντοστοιχία για την άνω και κάτω γνάθο αντίστοιχα.

1. Φυσικά δόντια.

1.1 Λειτουργίες των δοντιών.

Τα ανθρώπινα δόντια εξυπηρετούν τρεις πολύ σημαντικές λειτουργίες στο ανθρώπινο σώμα. Πρωταρχικά, εξυπηρετούν την λειτουργία της μάσησης. Η μάσηση είναι η διεργασία που επιτελείται από το στοματογναθικό σύστημα και έχει σκοπό τον τεμαχισμό της τροφής, την ανάμειξη της με το σάλιο και τον σχηματισμό του βλωμού. Κατά την μάσηση, η τροφή τεμαχίζεται από τους τομείς, συνθλίβεται από τους προγόμφιους και αλέθεται από τους γομφίους οδόντες. Έτσι αυξάνεται η επιφάνεια του τεμαχείου της τροφής, ώστε να δράσουν αποτελεσματικότερα τα ένζυμα του σάλιου. Στη συνέχεια η τροφή με την βοήθεια της γλώσσας μαζεύεται στο πίσω μέρος της στοματικής κοιλότητας όπου σχηματίζεται ο βλωμός που είναι έτοιμος για κατάποση. Σε δεύτερη φάση εξυπηρετούν την λειτουργία της ομιλίας και σε τρίτη φάση την λειτουργία της κατάποσης[1].

1.2 Τύποι δοντιών.

Υπάρχουν τέσσερα είδη δοντιών. Σε κανονικές συνθήκες, έως την ηλικία των τριών ετών έχουν ανατείλει και τα 20 νεογιλιά δόντια του μωρού, δέκα στην άνω γνάθο και δέκα στην κάτω. Σε ηλικία μεταξύ 5 και 14 ετών, τα δόντια του μωρού πέφτουν ένα-ένα, και αντικαθιστούνται από 28 μόνιμα δόντια. Τα τέσσερα τελευταία, οι φρονιμίτες, ενδέχεται να βγουν μετά από χρόνια.

Α) **Τομείς** (Incisors ή cutting teeth). Οι 8 τομείς είναι τα πρώτα μπροστινά δόντια με την επίπεδη επιφάνεια. Έχουν μία ευθεία κοφτερή γωνία για το κόψιμο και το δάγκωμα του φαγητού.

Β) **Κυνόδοντες** (Canine). Οι 4 κυνόδοντες είναι πολύ δυνατά μυτερά δόντια, για σχίσσιμο και τεμάχιση. Είναι πιά μεγάλοι από τους τομείς και πιο δυνατοί. Η μορφολογία του κυνόδοντα χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη κωνική μύλη που προεξέχει από το επίπεδο των υπόλοιπων δοντιών και από το μονόριζο τους που είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το υπόλοιπα δόντια.

Γ) **Προγόμφιοι** (Premolars). Οι 8 προγόμφιοι χρησιμεύουν στο μάσημα του φαγητού.

Δ) **Γόμφιοι** (Molars). Οι 12 γομφίοι είναι τα τελευταία δόντια στην οδοντοστοιχία του ανθρώπου. Έχουν πολύ διαφορετική μορφολογία από τα υπόλοιπα δόντια, με μεγάλη και επίπεδη επιφάνεια στο πάνω μέρος τους. Έχουν 2-4 ρίζες και χρησιμεύουν για το τελευταίο στάδιο του μασήματος, πριν την κατάποση.

1.3 Αρίθμηση δόντιων.

Το σύστημα αρίθμησης δημιουργήθηκε με σκοπό να υπάρχει ένας συγκεκριμένος τρόπος αναφοράς για κάποιο συγκεκριμένο δόντι. Το universal numbering system υιοθετήθηκε και από τον Αμερικάνικο οδοντιατρικό οργανισμό.

1. 3ος Γομφίος.

2. 2ος Γομφίος.

3. 1ος Γομφίος.

4. 1ος Προγόμφιος.

5. 2ος Προγόμφιος.

6. Κυνόδοντας.

7. Πλάγιος τομέας.

8. Κεντρικός τομέας.

9. Κεντρικός τομέας.

10. Πλάγιος τομέας.

11. Κυνόδοντας.

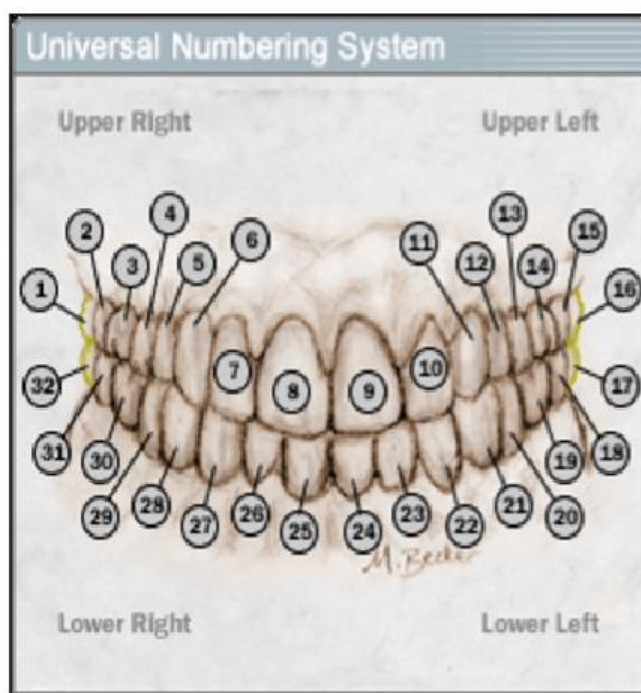
12. 1ος προγόμφιος.

13. 2ος προγόμφιος.

14. 1ος Γομφίος.

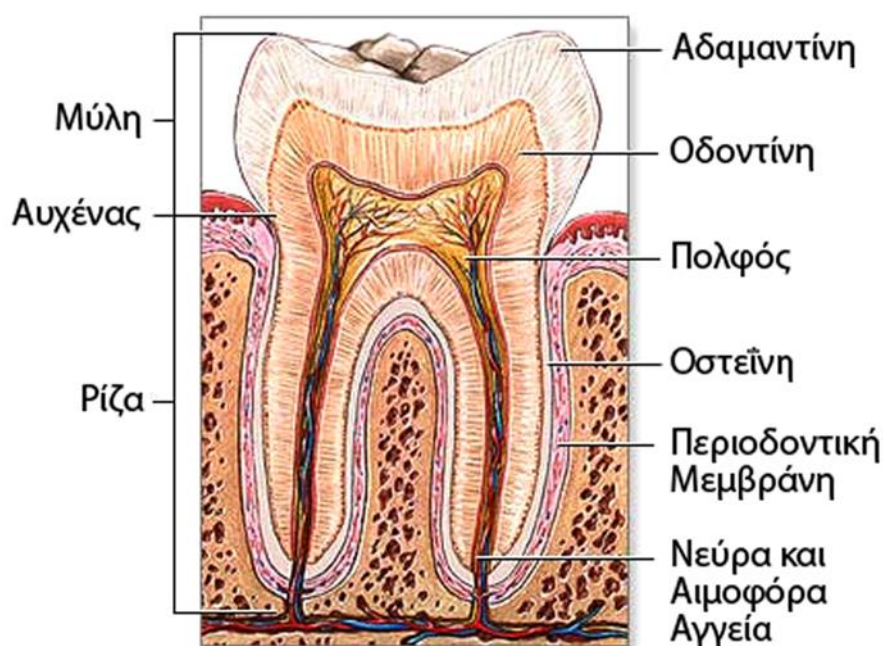
15. 2ος Γομφίος.

16. 3ος Γομφίος.



Σχήμα 1.1 α) Σύστημα αρίθμησης

1.4 Ανατομία του δοντιού.



Σχήμα 1.2: Ανατομία δοντιού

Αδαμαντίνη : Είναι η σκληρή εξωτερική επιφάνεια του δοντιού. Είναι λεία και γυαλιστερή και είναι η σκληρότερη ουσία του σώματος μας, γι' αυτό και είναι ανθεκτική στη μάσηση. Δίνει στο δόντι το λευκό του χρώμα και έχει πάχος 1-2 χιλιοστά.

Οδοντίνη : Είναι ένα σκληρό παχύ στρώμα ακριβώς κάτω από την αδαμαντίνη και αποτελεί το κύριο μέρος του δοντιού. Έχει πολλούς μικροσκοπικούς αγωγούς που περιέχουν νεύρα. Αυτό σημαίνει ότι τα δόντια μπορούν να ξεχωρίσουν τη διαφορά μεταξύ ζεστού και κρύου.

Πολφός : Βρίσκεται στο κέντρο του δοντιού και είναι ζωντανός ιστός. Είναι ένας χώρος μέσα στον οποίο βρίσκονται πολλά νεύρα και αιμοφόρα αγγεία. Μέσα από τα αιμοφόρα αγγεία κυκλοφορεί αίμα και έτσι διατηρείται ζωντανό και υγιές.

Ακρορριζιο : Αυτό είναι το άκρο της ρίζας και από εκεί περνάνε τα νεύρα και τα αγγεία μέσα στον πολφό. Αυτό είναι το σημείο όπου μπορεί να δημιουργηθεί φλεγμονή όταν το δόντι τραυματιστεί από διάφορα αίτια.

Αύλακες : Ονομάζονται και σχισμές. Είναι αύλακες σχήματος V στη μασητική επιφάνεια των οπίσθιων δοντιών που βοηθάνε στη μάσηση των τροφών.

Οστό : Οι ρίζες των δοντιών είναι στερεωμένες στο οστό της γνάθου, με τη βοήθεια συνδετικών ιστών δια μέσου της περιοδοντικής μεμβράνης.

1.5 Ιστολογία της αδαμαντίνης

Η αδαμαντίνη περιβάλλει το μυλικό τμήμα των δοντιών και έχει ως κύριο ρόλο την προστασία της υποκείμενης οδοντίνης και του πολφού από τα εξωτερικά βλαπτικά ερεθίσματα που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία του στοματογναθικού συστήματος[2]. Εμβρυολογικά προέρχεται από το έξω βλαστικό δέρμα. Η αδαμαντίνη διαφέρει από τους άλλους ενασβεστιωμένους ιστούς (οστίτη, οδοντίνη) σε 4 χαρακτηριστικά γνωρίσματα:

- είναι ο πλέον ενασβεστιωμένος και σκληρότερος ιστός του σώματος
- αποτελεί τον μόνο ενασβεστιωμένο ιστό επιθηλιακής προέλευσης
- είναι ο μόνος ιστός που δεν περιέχει κύτταρα ή κυτταρικά στοιχεία
- δεν απορροφάται, δεν ανασχηματίζεται και δεν αναγεννάτε.

Το πάχος της αδαμαντίνης δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη τη μυλική επιφάνεια των δοντιών. Ανάλογα με τον τύπο του δοντιού, το πάχος στα φύματα της μασητικής επιφάνειας μπορεί να φθάσει τα 2,5 χιλιοστά, ενώ στην υπόλοιπη μασητική επιφάνεια τα 1,8-2 χιλιοστά. Το πάχος της μειώνεται προοδευτικά στις αξονικές επιφάνειες των δοντιών μέχρι που σχεδόν μηδενίζεται στον αυχένα τους.

Η αδαμαντίνη είναι **διαφανής** με απόχρωση κυμαινόμενη από κυανόλευκη λευκοκίτρινη μέχρι «ασθενώς φαίά». Οι αποχρώσεις αυτές είναι συνάρτηση ποικίλων παραγόντων, όπως:

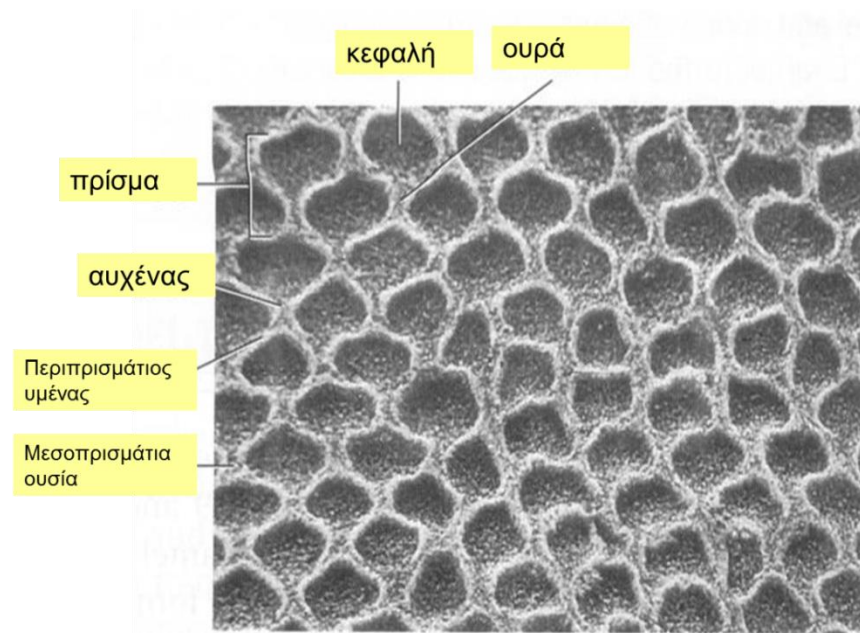
- του βαθμού διαφάνειας
- του πάχους
- της διάταξης των δομικών στοιχείων της
- της χημικής της σύστασης κ.λ.π.

Το έντονα κίτρινο χρώμα της οδοντίνης σε συνάρτηση με το πάχος της αδαμαντίνης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόχρωσή της. Αυτό γίνεται εμφανές κυρίως στους τομείς όπου η αδαμαντίνη είναι κιτρινόχρωμη στην αυχενική μοίρα επειδή το πάχος της εκεί είναι ελάχιστο και αφήνεται να διακρίνεται το κίτρινο χρώμα της οδοντίνης. Στις άκρες των δοντιών όπου δεν υπάρχει οδοντίνη κάτω από την αδαμαντίνη το χρώμα μπορεί να είναι κυανόλευκο. Ο βαθμός διαφάνειας της αδαμαντίνης εξαρτάται από τη διάταξη των δομικών της στοιχείων και το ποσοστό της ενασβεστιώσεώς της. Η ανομοιογενής, μερικές

φορές, εμφάνισή της καθώς και η παρουσία διάσπαρτων ή μεμονωμένων λευκωπών στιγμάτων στην εξωτερική της επιφάνεια οφείλονται κυρίως σε διαταραχές της δομής της.

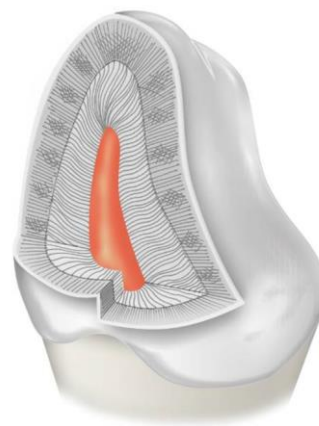
1.5.1 Μικροδομή της αδαμαντίνης

Η αδαμαντίνη αποτελείται από τα αδαμαντινικά πρίσματα, τα οποία εκτείνονται ελικοειδώς από την αδαμαντινοοδοντική ένωση μέχρι την εξωτερική αδαμαντινική επιφάνεια. Τα πρίσματα έχουν σχήμα μανιταριού και εμφανίζουν κεφαλή, αυχένα και ουρά.



Εικόνα 1.3 Η διάταξη των πρισμάτων. Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Η διάμετρος της κεφαλής κάθε πρίσματος κυμαίνεται από 4-7 μm και το μήκος τους είναι 9 μm . Κάθε πρίσμα αποτελείται από πολλούς κρυστάλλους υδροξυαπατίτη. Οι κρύσταλλοι υδροξυαπατίτη διατάσσονται σε δεσμίδες των 1000 κρυστάλλων, σχηματίζοντας τα αδαμαντινικά πρίσματα. Οι κρύσταλλοι του υδροξυαπατίτη δεν εμφανίζουν σε όλο το πρίσμα ομοιόμορφο προσανατολισμό. Στην κεφαλή του πρίσματος διατάσσονται με το μακρύ τους άξονα (c) παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα του πρίσματος, ενώ στον αυχένα και στην ουρά έχουν κατακόρυφη διεύθυνση. **Ο προσανατολισμός αυτός των κρυστάλλων της αδαμαντίνης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο ρυθμό της τερηδονικής προσβολής, αφού η διάλυση των κρυστάλλων γίνεται με ταχύτερο ρυθμό κατά τον εγκάρσιο άξονα σε σχέση με τον επιμήκη.** Επιπρόσθετα, η διάταξη των κρυστάλλων κατά αυτό τον τρόπο στη περιφέρεια του κάθε πρίσματος δημιουργεί μια μεσόφαση μεταξύ των πρισμάτων. Σε αυτές τις περιοχές τείνει να υπάρχει μεγαλύτερο **διακρυσταλλικό διάστημα**. Έτσι, αυτές οι περιοχές πιθανά αποτελούν **οδούς διάχυσης προς το εσωτερικό του ιστού, γεγονός που σχετίζεται με την τερηδόνα.**



Εικόνα 1.4. Η φορά των πρισμάτων στην

1.5.2 Μορφολογικά γνωρίσματα

Εκτός από την τυπική οργάνωση της αδαμαντίνης από αδαμαντινικά πρίσματα και μεσοπρισματίδια ουσία, παρατηρούνται, κατά τη μικροσκοπική εξέταση λεασμάτων, και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στοιχεία της μορφολογίας του ιστού. Τα μορφολογικά γνωρίσματα της αδαμαντίνης διακρίνονται στα επιφανειακά και στα εσωτερικά (Πίνακας 1)

Επιφανειακά μορφολογικά γνωρίσματα

- A) Pickerill. **Περικύματα** (Perikymata or imbrication lines) και γραμμές Pickerill (Pickerill lines). Τα περικύματα δεν είναι τίποτα άλλο, παρά η απόληξη των αυξητικών γραμμών στην επιφάνεια της αδαμαντίνης, ιδιαίτερα στην αυχενική μοίρα της προστοματικής επιφάνειας). Αυτά έχουν τη μορφή **κυματοειδών ανωμαλιών**. Η περιοχή μεταξύ δύο περικυμάτων ονομάζεται γραμμή.
- B) **Ρωγμές** (Cracks) (Εικ. 7). Είναι γραμμοειδείς λεπτές και αβαθείς σχισμές που αποτελούν είτε την εξωτερική απόληξη εσωτερικών μορφολογικών χαρακτηριστικών (π.χ αδαμαντινικά πετάλια), είτε δημιουργούνται από εξωτερικές πιέσεις κατά τη λειτουργία του δοντιού.

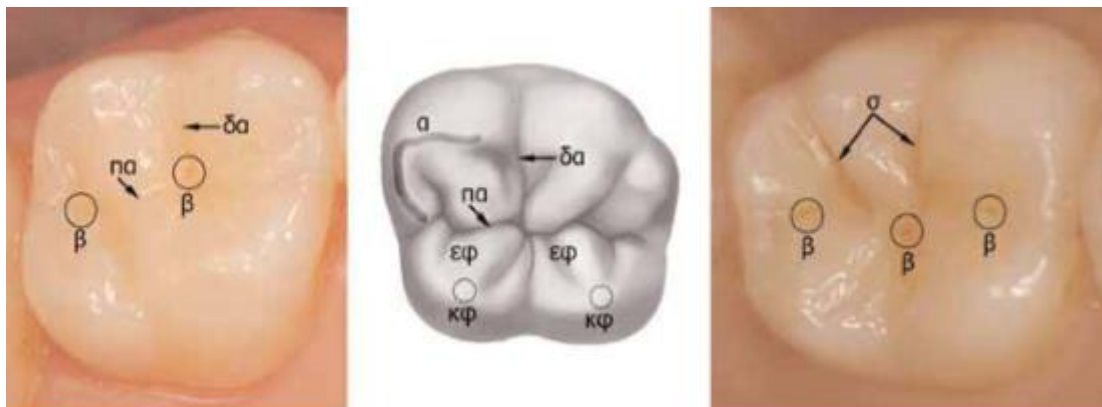


Εικόνα 1.5. Περικύματα και γραμμές Pickerill.



Εικόνα 1.6. Ρωγμή στο δόντι

Γ) **Αύλακες, οπές και σχισμές** (Grooves, pits and fissures) (Εικ 8). Τα μορφολογικά αυτά γνωρίσματα εντοπίζονται στις μασητικές, παρειακές, γλωσσικές και υπερώιες επιφάνειες των δοντιών.



Εικόνα 1.7. Βοθρία (β), πρωτογενείς (πα) και δευτερογενείς (δα) αύλακες και σχισμές

1.6 Ιστολογία της οδοντίνης

Η οδοντίνη είναι ένας ζωντανός ιστός, ο οποίος εκτείνεται στη μύλη και στη ρίζα του δοντιού. Αποτελεί τον μεγαλύτερο όγκο του δοντιού και καθορίζει το μέγεθος και το σχήμα του. Η οδοντίνη φυσιολογικά δεν εκτίθεται στο στοματικό περιβάλλον. Στη μύλη καλύπτεται από την αδαμαντίνη, ενώ στη ρίζα καλύπτεται από την οστεΐνη. Η σύσταση της οδοντίνης μοιάζει περισσότερο με αυτή του οστού. Κύριο χαρακτηριστικό της οδοντίνης είναι η αναγέννηση της, σε αντίθεση με αυτό που συμβαίνει στην αδαμαντίνη. Όταν στο δόντι επιδράσουν βλαπτικά ερεθίσματα, όπως τερηδόνα, αποτριβή, διάβρωση και τα ερεθίσματα αυτά φτάσουν στον πολφό, τότε δίνεται το σήμα να διαπλαστεί εκ νέου οδοντίνη κάτω από τις περιοχές που εμφανίζεται η βλάβη. Η οδοντίνη που σχηματίζεται ως αντίδραση στην επίδραση των εξωτερικών βλαπτικών ερεθισμάτων (π.χ τερηδόνα, τραύμα, χημικά ερεθίσματα, αποτριβή, κάταγμα) κατά τη διάρκεια της ζωής του δοντιού, ονομάζεται τριτογενής (tertiary dentin), η οποία μπορεί να είναι επανορθωτική ή αντιδραστική (reparative or reactionary).

1.6.1 Χημική σύσταση οδοντίνης

Η οδοντίνη αποτελείται από ανόργανα συστατικά σε ποσοστό 68-70% του βάρους της, από οργανικά σε ποσοστό 18-20%, ενώ το υπόλοιπο 10% περίπου είναι νερό.

Ανόργανα συστατικά

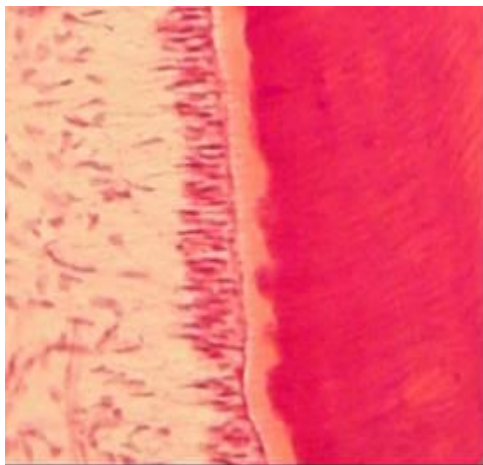
Όπως και στους άλλους ενασβεστιωμένους ιστούς, το κύριο ανόργανο συστατικό της οδοντίνης είναι το φωσφορικό ασβέστιο. Οι κρύσταλλοι του υδροξυαπατίτη της οδοντίνης είναι μικροί και λεπτοί, δηλαδή διαφορετικοί σε σχέση με αυτούς της αδαμαντίνης. Αυτό έχει ως επακόλουθο να παρουσιάζουν **μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με τα οξέα που παράγονται κατά την τερηδονική εξεργασία**. Το τελευταίο, μαζί με τη **μικρότερη σκληρότητα που παρουσιάζει η οδοντίνη**, εξηγεί σε μεγάλο βαθμό την **ταχύτερη εξέλιξη της τερηδόνας** στην οδοντίνη σε σύγκριση με την αδαμαντίνη.

Οργανικά συστατικά

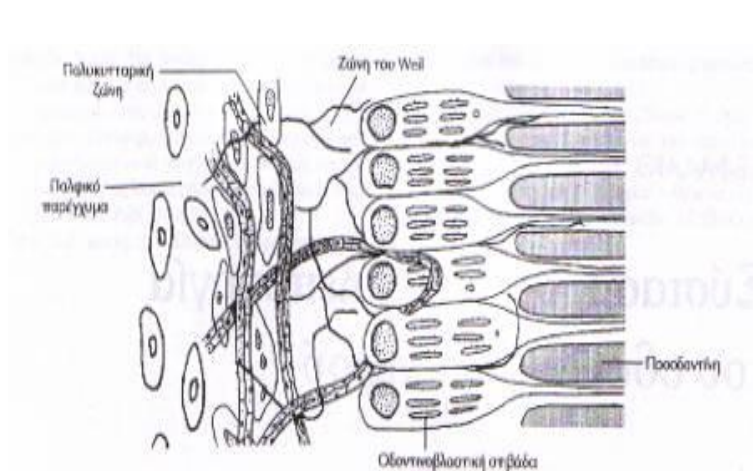
Τα οργανικά υπόστρωμα της οδοντίνης περιέχει μακρομόρια που αποτελούν χαρακτηριστικά του συνδετικού ιστού. Παρά το γεγονός ότι τα οργανικά συστατικά της οδοντίνης αποτελούν μόνο το 1/5 του βάρους της, είναι αυτά που καθορίζουν τις ιδιότητες και τη βιολογική της συμπεριφορά. Το 90% του βάρους των οργανικών συστατικών της οδοντίνης αποτελείται από κολλαγόνο, ενώ το υπόλοιπο από μη κολλαγονούχα στοιχεία όπως, διάφορες γλυκοπρωτεΐνες, λιποπρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λίπη.

1.7 Ιστολογία πολφού

Ο οδοντικός πολφός καταλαμβάνει το κεντρικό μέρος του δοντιού και είναι μαλακός συνδετικός ιστός. Είναι ο μόνος μη ενασβεστωμένος οδοντικός ιστός[3]. Περιβάλλεται από οδοντίνη και σε περιορισμένη έκταση, στο ακρορρίζιο, από οστεΐνη. Σχεδόν αποχωρισμένος από το περιβάλλον, επικοινωνεί μ' αυτό μέσω του ακρορριζικού τρήματος. Προέρχεται από την οδοντική θηλή και είναι αγγειοβριθής και κυτταροβριθής χαλαρός συνδετικός ιστός μεσεγχυματικής προέλευσης. Είναι κοινώς γνωστός ως «το νεύρο» του δοντιού.



Εικ. 1.9. Ιστολογική εικόνα πολφού στο όριο πολφού οδοντίνης



Εικ. 1.10 Σχεδιαγραμματική απεικόνιση στο σιβάδων του πολφού (Τζιαφάς 1999).

1.8 Παθολογία των δοντιών

Οι περισσότερες παθολογικές καταστάσεις των δοντιών έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια σκληρών οδοντικών ιστών (αδαμαντίνη & οδοντίνη)

Αποτριβή των δοντιών

Η αποτριβή των δοντιών δηλαδή η φθορά της επιφάνειάς τους μπορεί να οφείλεται σε φυσιολογικά ή παθολογικά αίτια. Φυσιολογικά, με το πέρασμα του χρόνου, τα δόντια σταδιακά αποτρίβονται λόγω των μασητικών δυνάμεων που ασκούνται επάνω τους. Η αποτριβή αυτή είναι αναπόφευκτη. Παράδειγμα παθολογικής αποτριβής είναι οι "εγκοπές" που δημιουργούνται στην αδαμαντίνη συνήθως κοντά στα ούλα, από λανθασμένη χρήση της οδοντόβουρτσας. Η δημιουργία αυτών των εγκοπών μπορεί να συνοδεύεται από εμφάνιση ευαισθησίας κυρίως στα κρύα ερεθίσματα. Η αποτριβή έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του χρώματος του δοντιού σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό.

Όταν η αποτριβή είναι φυσιολογική, μικρού ως μέτριου βαθμού και δε δημιουργεί αισθητικό πρόβλημα στον ασθενή, δε χρειάζεται καμία θεραπεία. Αν έχουν δημιουργηθεί εγχοπές στην εξωτερική επιφάνεια του δοντιού, αν υπάρχει αισθητικό πρόβλημα ή αν έχει φθαρεί μεγάλο μέρος του δοντιού, μπορούμε να την αποκαταστήσουμε με έμφραξη λευκού χρώματος. Σε πολύ προχωρημένες περιπτώσεις είναι αναγκαία η κάλυψη του δοντιού με στεφάνες (θήκες).

Διάβρωση των δοντιών

Η διάβρωση των δοντιών αποτελεί την απασβεστίωση και συνεπώς απώλεια σκληρών οδοντικών ιστών από την επίδραση οξέων, όχι όμως αυτών που παράγονται από τα μικρόβια της στοματικής κοιλότητας. Τα οξέα αυτά μπορεί είναι ενδογενή όπως π.χ. το υδροχλωρικό οξύ του στομάχου (σε καταστάσεις γαστροοισοφαγικής παλινδρόμησης ή βουλιμίας) ή να είναι εξωγενή όπως π.χ. υπερβολική κατανάλωση όξινων χυμών φρούτων (γκρέιπ φρουτ).

Κατάγματα των δοντιών

Τα κατάγματα των δοντιών είναι η απώλεια σκληρών οδοντικών ιστών μετά από τραυματισμό, λόγω κρούσης του δοντιού με σκληρή επιφάνεια. Τα κατάγματα μπορεί να αφορούν μόνο την μύλη, μόνο την ρίζα ή και τα δύο.

Οδοντική δυσχρωμία

Με τον όρο δυσχρωμία εννοείτε η αλλαγή του χρώματος της επιφάνειας ενός δοντιού. Τα δόντια αλλάζουν χρώμα από διάφορες αιτίες. Φυσιολογικά, με την πάροδο της ηλικίας, τα δόντια αποκτούν μια πιο κιτρινωπή απόχρωση.

Η συχνότερη αιτία για το κιτρίνισμα των δοντιών είναι η συσσώρευση πλάκας και τρυγίας. Επίσης το κάπνισμα, η κατανάλωση καφέ, ορισμένα φάρμακα, μερικές παιδικές ασθένειες, αποτελούν συχνές αιτίες χρωματισμού των δοντιών.

1.9 Νόσος Τερηδόνα

Η οδοντική τερηδόνα αποτελεί την βασικότερη ίσως νόσο που εμφανίζεται στη στοματική κοιλότητα των ανθρώπων.[4] Σήμερα η έρευνα έχει στραφεί πιο πολύ στην πρόληψη της τερηδόνας όπως και στην αναχαίτιση της επέκτασης της. Η οδοντική τερηδόνα είναι νόσος των σκληρών οδοντικών ουσιών και βασικά έχει μικροβιακή αιτιολογία. Κυρίως προσβάλλει την αδαμαντίνη, αλλά και την οδοντίνη. Η βλάβη που προκαλεί η τερηδόνα πολλές φορές δεν μπορεί να αναταχθεί από τον ανθρώπινο οργανισμό και τότε χρειάζεται η επέμβαση του οδοντιάτρου. Η βλάβη ξεκινά από μια τοπική διάλυση των ανόργανων συστατικών της επιφανείας του δοντιού, από την επίδραση οργανικών οξέων, που προέρχονται από την διάσπαση υδατανθράκων των τροφών από μικροοργανισμούς της στοματικής κοιλότητας. [5]Η συχνότητα εμφάνισης της τερηδόνας είναι το αποτέλεσμα δύο αντίθετων διεργασιών. Αφ' ενός των προκλητικών τερηδογονόνων παραγόντων που επικρατούν στη στοματική κοιλότητα και αφ' ετέρου των κάθε μορφής προληπτικών

μέτρων που εφαρμόζονται σ' αυτήν, σε συνδυασμό με τους αμυντικούς παράγοντες του σάλιου. Η τερηδόνα εμφανίζεται πιο συχνά αλλά και πιο επιθετικά στις μικρές ηλικίες, δηλαδή από 6-15 χρονών, ενώ αργότερα ο ρυθμός ανάπτυξης μειώνεται γιατί η αδαμαντίνη ωριμάζει και έτσι αυξάνεται η αντίσταση της σε τερηδογόνο προσβολή. Η βασική διαδικασία για τη δημιουργία της τερηδόνας είναι η διάλυση των ανόργανων συστατικών των οδοντικών ουσιών με οξέα.

1.9.1 Ταξινόμηση τερηδόνων

Τα κριτήρια ταξινόμησης της τερηδόνας μπορεί να είναι ποικίλα αλλά κατά το πλείστον χρησιμοποιούνται δύο:

- A. Ο ρυθμός εξέλιξης της τερηδόνας.
- B. Ο αρχικός ιστός εντόπισης της.

Ως προς το πρώτο κριτήριο, οι τερηδόνες θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε οξείες, χρόνιες και στάσιμες. Η πρώτη εμφανίζεται συνήθως σε νέα άτομα, που η αδαμαντίνη είναι σχετικά ανώριμη, πιο ευαίσθητη συνεπώς στην τερηδόνα και γι' αυτό υπάρχει ραγδαία εξέλιξη της. Αυτή η τερηδόνα σύντομα προσβάλλει τον πολφό, λόγω δε της ταχύτητας της δεν του δίνει περιθώρια να αντιδράσει, δημιουργώντας δευτερογενή οδοντίνη. Το χρώμα που έχει αυτή, συνήθως είναι ανοιχτό κίτρινο. Χρόνια τερηδόνα, είναι αυτή που εξελίσσεται σχετικά αργά και πολλές φορές διακόπτεται η εξέλιξη της. Εμφανίζεται συνήθως όταν η αδαμαντίνη είναι ώριμη, ο δε πολφός προλαβαίνει να αντιδράσει, ενώ συνήθως το χρώμα της είναι καφέ. Τέλος σαν στάσιμη τερηδόνα χαρακτηρίζεται εκδηλωθείσα τερηδονική προσβολή που έχει σταματήσει η εξελικτική της πορεία για κάποιους λόγους. Ένας από αυτούς είναι και η αναστολή της δράσης των τερηδογόνων μικροβίων. Η τερηδόνα αυτή έχει συνήθως σκούρο καφέ χρώμα και είναι σκληρή.

Ως προς το δεύτερο κριτήριο χωρίζονται σε:

Τερηδόνα αδαμαντίνης :Η τερηδόνα της αδαμαντίνης μπορεί να εντοπίζεται είτε σε οπές και σχισμές των δοντιών είτε σε λείες επιφάνειες, όπου αρχικά δίνει την κλινική εικόνα λευκών κηλίδων (**white spots**)[6]. Η λευκάζουσα αυτή κηλίδα πολλές φορές εμφανίζει και κάποια τονισμένα περικύματα τα οποία αποτελούν τα άκρα των γραμμών του Retzius[7]. Οι Zahradnik και Moreno, οι οποίοι με την τεχνική απορρόφησης του νερού κατέληξαν ότι τα **στάδια της αρχικής απασβεστίωσης που γίνονται υποεπιφανειακά είναι:**[8]

1. Απασβεστίωση αρχικά στους μεγάλους μεσοπρισματίους χώρους, με αποτέλεσμα τη διόγκωση τους ενώ οι μικροί δεν διογκώνονται.
2. Συνεχίζεται η διόγκωση των μεγάλων και αρχίζουν και οι μικροί, ενώ ίσως να ξεκινάει και κάποια μικρή απασβεστίωση περιπρισματικά χωρίς να επηρεάζεται το κυρίως σώμα του πρίσματος.
3. Προσβάλλονται όλοι οι πόροι και το σώμα του πρίσματος.

Η εξελικτική πορεία της τερηδόνας κατά τον Darling κατανέμεται σε έξι στάδια:

- I. Πρώτο στάδιο: Ελάχιστη αλλοίωση υποεπιφανειακά, διαπερατή από ακτίνες Χ. Στο πολωμένο φως εμφανίζονται πορώδη διαστήματα που καλύπτουν το σύνολο του όγκου αυτής της ζώνης.
- II. Δεύτερο στάδιο: Μοιάζει πολύ με το πρώτο αλλά είναι πιο προχωρημένο, στο πολωμένο φως φαίνεται μία σκοτεινή ζώνη και πριν από αυτήν μία διαφανής.
- III. Τρίτο στάδιο: Κατά αυτό, στο προσπίπτον φως φαίνεται μια διαφανής ζώνη που έχει προχωρήσει πιο βαθιά, η δε σκοτεινή ζώνη είναι ακόμη βαθύτερη. Η κυρίως αλλοίωση βρίσκεται αμέσως κάτω από την προσβληθείσα επιφάνεια. Εδώ η βλάβη ακόμα δε φαίνεται ακτινογραφικά.
- IV. Στο τέταρτο στάδιο που και αυτό αποτελεί συνέχεια του τρίτου, εμφανίζεται λευκή κηλίδα και η τερηδόνα αρχίζει να προσβάλλει την οδοντίνη.
- V. Στο πέμπτο στάδιο η επιφάνεια της αδαμαντίνης γίνεται εύθρυπτη. Σε αυτό το στάδιο ο ανιχνευτήρας μπορεί να εισέλθει στη μάζα της.
- VI. Κατάρρευση της αδαμαντίνης και δημιουργία κοιλότητας. Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα λεγόμενα *brownsots*. Η τερηδόνα αδαμαντίνης έχει την τάση να διεισδύει με κωνική μορφή η οποία αμβλύνεται όσο προχωράει βαθύτερα προς την οδοντίνη.

Τερηδόνα οδοντίνης: Η πορεία της τερηδόνας όταν αυτή προχωρήσει μέσα στην οδοντίνη μπορεί να είναι οξεία ή χρόνια. Στην οξεία της μορφή εμφανίζεται σε άτομα συνήθως σε νεαρή ηλικία, έχει κίτρινο χρώμα και καταστρέφει γρήγορα την οδοντίνη. Στους ενήλικες πιο συχνή είναι η χρόνια που έχει καφέ χρώμα και πιο αργό ρυθμό ανάπτυξης. **Οι ζώνες προσβολής της οδοντίνης είναι οι ακόλουθες:**

- I. Στη περιοχή ένωσης αδαμαντίνης - οδοντίνης η οδοντίνη έχει αποσυντεθεί, το δε χρώμα της είναι βαθύ κίτρινο.
- II. Έχει αρχίσει η αποδόμηση της οδοντίνης και τα οδοντινοσωληνάκια είναι διευρυμένα και με ανώμαλη διάταξη.
- III. Συνεχίζεται η δεύτερη ζώνη χωρίς να μεταβάλλεται η δομή της οδοντίνης και δεν έχει γίνει μικροβιακή προσβολή.
- IV. Γίνεται αύξηση των ανόργανων ιόντων της οδοντίνης και αυτό μάλλον σαν προσπάθεια αναστολής της εξέλιξης.
- V. Οδοντίνη φυσιολογική με εναλλαγές φωτεινών και σκοτεινών περιοχών. Το χαρακτηριστικότερο της οδοντινικής προσβολής είναι η διείσδυση μικροβίων στα οδοντινοσωληνάκια που έτσι αποφράσσονται.

1.9.2 Κριτήρια διάγνωσης και κατηγοριοποίηση βλαβών τερηδόνας

Σήμερα η τερηδόνα είναι η βασική αιτία καταστροφής των δοντιών και θεωρείται ότι αποτελεί την εκδήλωση μιας πολυπαραγοντικής μολυσματικής νόσου που πρέπει να αναγνωριστεί έγκαιρα ώστε η καταστροφική δράση της στα δόντια να μπορεί να αναστραφεί ή να αποκατασταθεί χωρίς μεγάλα προβλήματα. Η βασική άρα διαφορά μεταξύ της αντιμετώπισης της τερηδόνας του χθες και του σήμερα, έχει σχέση με τη δυνατότητα διάγνωσης των βλαβών σε πολύ αρχόμενα στάδια και την αποτελεσματικότητα της παρέμβασής μας σε αυτές, ώστε να μην φθάσουν ποτέ στο στάδιο της ανοικτής κοιλότητας. Δυστυχώς η αναγνώριση της νόσου δεν είναι πια μια απλή διαδικασία, αφού δεν στηρίζεται στον εντοπισμό της προχωρημένη βλάβης (δημιουργία κοιλότητας) των

σκληρών ιστών που εντοπίζεται εύκολα, αλλά σε ενδείξεις προσβολής του δοντιού προτού δώσει ορατές ενδείξεις αλλοίωσής της στα συνήθη διαγνωστικά μέσα.



Εικόνα 1.16 Τομή τερηδονισμένου δοντιού



Εικόνα 1.17 Κοιλότητα σε μασητική επιφ.

Η διαγνωστική επομένως διαδικασία καλείται να απαντήσει στα εξής βασικά ερωτήματα που είναι ταυτόχρονα και στόχοι της διάγνωσης.

- Υπάρχει τερηδόνα και ποιές επιφάνειες δοντιών έχει προσβάλλει;
- Ποιές οι διαστάσεις των βλαβών σε έκταση και βάθος;
- Οι βλάβες είναι ενεργείς ή στάσιμες;
- Αν οι βλάβες είναι ενεργείς πόσο γρήγορα εξελίσσονται ή θα εξελιχθούν;

Η πιο έγκυρη αυτή τη στιγμή κατηγοριοποίηση τερηδόνας είναι η **ICDAS II** [9] και είναι αυτή την οποία θα χρησιμοποιηθεί κατά την πειραματική διαδικασία. Το σύστημα έχει ήδη μεγάλη απήχηση και τείνει να γίνει παγκόσμιο πρότυπο.

Οι βλάβες που εντάσσονται στις κατηγορίες του είναι:

- Στην κατηγορία **0**, οι απόλυτα υγιείς ή έστω και με δυσπλασίες ή χρώσεις μη τερηδονικής αιτιολογίας επιφάνειες.
- Στην κατηγορία **1** οι επιφάνειες με μια μικρή μεταβολή στη διαφάνεια της αδαμαντίνης ορατή μετά από επίμονο στέγνωμα (5 δευτερόλεπτα) και που περιορίζεται στα όρια της σχισμής. Ιστολογικά η βλάβη θεωρείται ότι αφορά το εξωτερικό μισό της αδαμαντίνης.
- Στην κατηγορία **2** εντάσσονται οι σχισμές με εμφανή αλλαγή στη διαφάνεια ή το χρώμα της αδαμαντίνης ακόμα και με υγρή επιφάνεια, που δεν περιορίζεται στα όρια της σχισμής, και υποδηλώνει βλάβη στο εσωτερικό μισό της αδαμαντίνης και το μπορεί να φθάνει μέχρι το εξωτερικό 1/3 της οδοντίνης.
- Στην κατηγορία **3** εντάσσονται οι σχισμές με λευκή ή χρωματισμένη αδαμαντίνη γύρω από τη σχισμή και με λύση της συνέχειας της που θεωρείται ότι η βλάβη φθάνει το μέσο τριτημόριο της οδοντίνης.
- Στη κατηγορία **4** εντάσσονται οι σχισμές με σκίαση της γύρω από αυτές αδαμαντίνης από την υποκείμενη οδοντίνη, με ή χωρίς απώλεια ουσίας ή της συνέχειάς της. Η βλάβη και εδώ θεωρείται ότι αφορά το εσωτερικό τριτημόριο της οδοντίνης.
- Στην κατηγορία **5** εντάσσονται οι επιφάνειες με εμφανή κοιλότητα περιορισμένης έκτασης που εκθέτει όμως την οδοντίνη. Η βλάβη θεωρείται ότι έχει φθάσει στον πολφό.

- Στην κατηγορία 6 εντάσσονται οι επιφάνειες με εκτεταμένη κοιλότητα που εκθέτει εμφανώς την οδοντίνη. Και εδώ η βλάβη θεωρείται ότι έχει φθάσει στον πολφό.

Τα κριτήρια ICDAS II μας καθοδηγούν κύρια στην ένταξη της τερηδονικής αλλοίωσης σε μια από τις κατηγορίες του σταδίου εξέλιξής της (το βάθος της στους ιστούς).



Εικ 1.20 Απασβεστωμένες σχισμές. (άλλες κατηγορία 1 και άλλες 2 ICDASII)



Εικ 1.21 Έντονα απασβεστωμένες σχισμές με έλλειμμα οδοντικού ιστού. (κατηγορία 3 ICDASII)



Εικ. 1.22 Έντονα χρωσμένες σχισμές χωρίς κοιλότητα αλλά με σκίαση υποκείμενης οδοντίνης. (κατηγορία 4 ICDASII)



Εικ. 1.23 Τερηδόνα με κοιλότητα μέχρι την οδοντίνη. (κατηγορία 5 ICDASII)

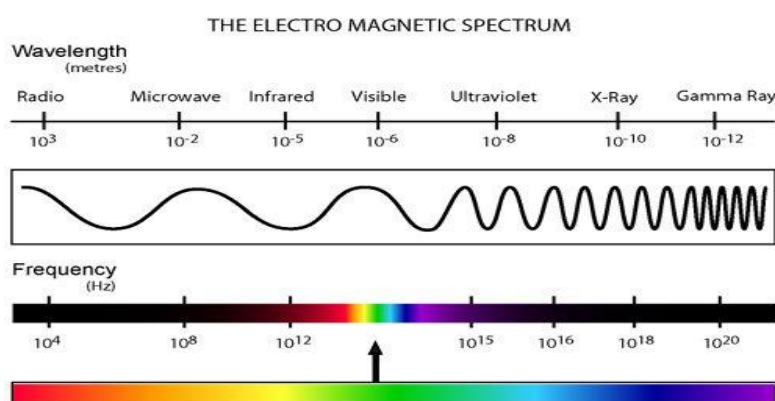


Εικ. 1.24 Εκτεταμένη κοιλότητα με ορατή την οδοντίνη. (κατηγορία 6 ICDASII)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ηλεκτρομαγνητισμός και φασματοσκοπία

2.1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ένα εγκάρσιο ενεργειακό κύμα το οποίο συνίσταται από ένα ταλαντώμενο ηλεκτρικό πεδίο και ένα ταλαντώμενο μαγνητικό πεδίο. Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι ορθογώνια μεταξύ τους, όπως και στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος. [10] Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι μορφή ενέργειας και διαδίδεται στο χώρο μέσω των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός και χαρακτηρίζονται από την συχνότητά τους ν και το μήκος κύματός τους λ . Τα μεγέθη αυτά είναι αντιστρόφως ανάλογα και συγκεκριμένα συνδέονται σε ένα μέσο με την παρακάτω σχέση : $\lambda \cdot \nu = c$ όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο μέσο. Για το κενό είναι $c_0 = 2.998 \cdot 10^8$ m/s. Η ενέργεια που μεταφέρουν τα κύματα αυτά αυξάνεται όσο μειώνεται το μήκος κύματός τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα υψίσυχνα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες X και γ) να μεταφέρουν μεγάλη ενέργεια, γεγονός που έχει σημαντικές επιπτώσεις στην αλληλεπίδραση των κυμάτων αυτών με τα υλικά σώματα. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πρέπει να επισημάνουμε ότι επεκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειών και μηκών κύματος. Η διανομή όλων των ακτινοβόλων ενεργειών μπορεί να σχεδιαστεί σε ένα διάγραμμα, γνωστό ως ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα καλύπτει ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος: από λιγότερο των 10^{-10} μm για την κοσμική ακτινοβολία μέχρι 10^{10} μm (και περισσότερο) για τα κύματα ηλεκτρικής ισχύος. Περιλαμβάνει επίσης τις ακτίνες γ , τις ακτίνες X, την υπεριώδη ακτινοβολία, το ορατό φως, την υπέρυθρη ακτινοβολία, τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα.



Εικ. 2.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

2.1.1 Υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared radiation) :

Ο Hershel ήταν αυτός που ανακάλυψε πρώτος την υπέρυθρη ακτινοβολία, καθώς μελετούσε τις φασματικές ιδιότητες της ηλιακής ακτινοβολίας με την χρήση ενός πρίσματος. Οι παράλληλες ακτίνες του ήλιου πέφτοντας πάνω στο πρίσμα διασκορπίζονταν σε διαφορετικά χρώματα. Από σύμπτωση ή όχι, ένα θερμόμετρο βρισκόταν στο τραπέζι, όπου το ηλιακό φάσμα ήταν ορατό. Ο Hershel παρατήρησε ότι η θερμοκρασία που έδειχνε το θερμόμετρο αυξήθηκε. Επειδή το φαινόμενο παρατηρήθηκε δίπλα στην ερυθρή περιοχή του ορατού φάσματος, ο Hershel ονόμασε την ακτινοβολία αυτή infrared (υπέρυθρη). Το μήκος κύματός της κυμαίνεται από 0.76 μm – 103 μm . Το εύρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας διαχωρίζεται, επίσης, σε near-infrared (0,76 μm ... 1.5 μm), σε shortwave infrared (1.5 μm ...3 μm), σε middle infrared (3 μm ...5.5 μm) και thermal infrared (5.5 μm ...103 μm).

2.1.2 Ορατή ακτινοβολία (visible light) :

Είναι η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εκτείνεται από 0.40 μm - 0.76 μm . Το χρώμα μιας επιφάνειας εξαρτάται από την ικανότητα της επιφάνειας να ανακλά διάφορα μήκη κύματος. Για παράδειγμα μια επιφάνεια θα φαίνεται στο ανθρώπινο μάτι πορτοκαλί, όταν ανακλά τις ακτινοβολίες με μήκη κύματος από 0.60 – 0.63 μm και απορροφά τις υπόλοιπες.

2.1.3 Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet radiation) :

Η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με μήκος κύματος από 10-2 μm – 0.40 μm . Έχει συχνότητα λίγο παραπάνω από αυτή του ορατού φωτός. Ωστόσο, η έντασή της είναι τέτοια που μπορεί να καταστρέψει ιστούς και κύτταρα. Ο ήλιος είναι μια πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας και μικρές δόσεις αυτής της ακτινοβολίας βοηθούν στην παραγωγή της βιταμίνης D. Η υπεριώδης ακτινοβολία παράγεται και από τους λαμπτήρες φθορισμού. Χρησιμοποιείται ευρέως στην ιατρική για αποστειρώσεις και για διάφορες θεραπείες.

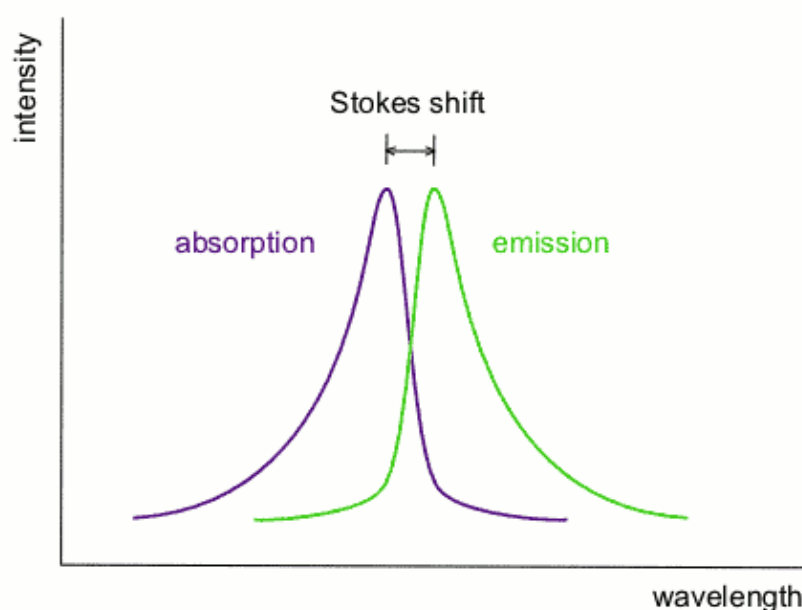
2.2 Γενικά περί φασματοσκοπίας

Η επιστήμη της φασματοσκοπίας χρησιμοποιεί τις ιδιότητες της απορρόφησης , εκπομπής ή σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα άτομα ή τα μόρια (ή αντίστοιχα τα ατομικά ή μοριακά ιόντα) για την ποιοτική ή ποσοτική μελέτη των ατόμων ή των μορίων. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη προκαλεί ανακατεύθυνση της ακτινοβολίας ή μεταβάσεις ανάμεσα στα ενεργειακά επίπεδα των ατόμων ή των μορίων. Για παράδειγμα η σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι του ίδιου ή ελαφρά διαφορετικού μήκους κύματος από την προσπίπτουσα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η φασματοσκοπία βασίζεται σε 3 κυρίως φυσικούς μηχανισμούς: την απορρόφηση, την εκπομπή και την σκέδαση. Οι μηχανισμοί αυτοί αναλύονται παρακάτω:

Απορρόφηση: όταν τα άτομα ή τα μόρια απορροφούν φως , η εισερχόμενη ενέργεια διεγείρει μία κβαντική δομή σε ένα υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο. Το είδος της διέγερσης βασίζεται στο μήκος κύματος του φωτός. Τα ηλεκτρόνια προωθούνται σε υψηλότερες

τροχιές με υπεριώδες ή ορατό φως, οι δονήσεις διεγείρονται από το υπέρυθρο φως, ενώ οι περιστροφές διεγείρονται από τα μικροκύματα. Το φάσμα απορρόφησης αναπαριστά την απορρόφηση του φωτός συναρτήσει του μήκους κύματος. Το φάσμα ενός ατόμου ή μορίου εξαρτάται από την δομή των ενεργειακών του επιπέδων και για το λόγο αυτό τα φάσματα απορρόφησης είναι χρήσιμα στην αναγνώριση των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται διάφορα μείγματα.

Εκπομπή: τα άτομα ή τα μόρια που διεγείρονται σε υψηλότερα ενεργειακά επίπεδα, στην συνέχεια αποδιεγείρονται με την ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας (εκπομπή ή φωταύγεια). Για τα άτομα που διεγείρονται από μια πηγή ενέργειας υψηλής θερμοκρασίας, η εκπομπή φωτός ονομάζεται ατομική ή οπτική εκπομπή, ενώ στην περίπτωση που τα άτομα διεγείρονται με φως ονομάζεται ατομικός φθορισμός. Για τα μόρια ονομάζεται φθορισμός, αν η μετάβαση πραγματοποιείται ανάμεσα στις καταστάσεις ίδιου spin και φωσφορισμός αν η μετάβαση πραγματοποιείται μεταξύ καταστάσεων διαφορετικού spin. Η ένταση εκπομπής είναι γραμμικά ανάλογη της συγκέντρωσης της ουσίας που εκπέμπει και είναι χρήσιμη για την ποσοτικοποίηση των στοιχείων που εκπέμπουν ακτινοβολία.



Εικόνα 2.2 Φάσμα απορρόφησης (absorption) και εκπομπής (emission) φθορισμού. Το φάσμα απορρόφησης (διέγερσης) είναι σχεδόν κατοπτρικό με το φάσμα εκπομπής. Η διαφορά μήκους κύματος μεταξύ των κορυφών απορρόφησης και εκπομπής καλείται μετατόπιση Stokes (Stokes shift).

Σκέδαση: όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διέρχεται μέσω της ύλης, το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας συνεχίζει στην αρχική του κατεύθυνση αλλά ένα μικρό κλάσμα σκεδάζεται προς άλλες κατευθύνσεις. Η φασματοσκοπία σκέδασης διαφέρει από την φασματοσκοπία εκπομπής λόγω του ότι η διαδικασία σκέδασης είναι πολύ πιο γρήγορη διαδικασία από ότι η εκπομπή ή η απορρόφηση. Μία από τις χρησιμότερες εφαρμογές της φασματοσκοπίας σκέδασης είναι η φασματοσκοπία Raman.

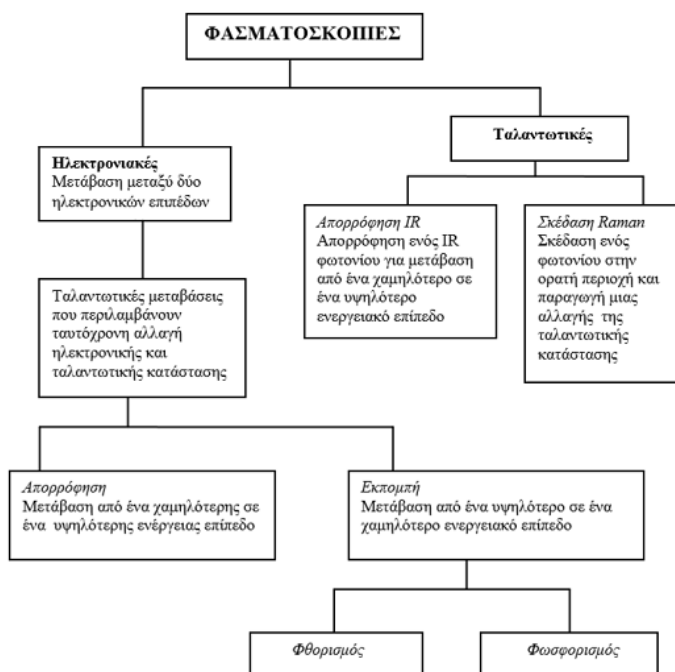
Διάδοση: Ένα μέρος της ακτινοβολίας διέρχεται από τον ιστό είτε με μικρή είτε με μεγάλη αλλοίωση.

2.2.1 Φθορισμός

Ως φθορισμός, ορίζεται η εκπομπή φωτός, η οποία προκαλείται από την ακτινοβόληση ενός δείγματος με φως. Το φως που προσπίπτει στο δείγμα προωθεί τα άτομα, τα ιόντα ή τα μόρια του δείγματος σε διεγερμένες στάθμες (λόγω της απορρόφησης των φωτονίων), από τις οποίες επανέρχονται στις θεμελιώδεις τους καταστάσεις με την αυθόρμητη εκπομπή φωτονίων φθορισμού. Επομένως κατά το φαινόμενο του φθορισμού, ένα μόριο απορροφά ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας και το επανεκπέμπει ως ένα φωτόνιο χαμηλότερης ενέργειας αλλά μεγαλύτερου μήκους κύματος. Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των απορροφόμενων και των εκπεμπόμενων φωτονίων αποδίδεται ως μοριακή διέγερση ή θέρμανση. Συνήθως το απορροφόμενο φωτόνιο είναι στο υπεριώδες και το εκπεμπόμενο φωτόνιο είναι στο ορατό

2.2.2 Φωσφορισμός

Το φαινόμενο της εκπομπής φωτεινής ακτινοβολίας από ουσίες ή σώματα που έχουν εκτεθεί σε ακτινοβολία, ακόμα μετά την παύση της έκθεσής τους. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία προκαλεί στα άτομα και στα μόρια της ουσίας μια κατάσταση διέγερσης, η οποία ακολουθείται από μια (επόμενη) κατάσταση αποδιέγερσης με εκπομπή φωτός. Η χρονική διάρκεια της αποδιέγερσης είναι, κατά μέσο όρο, ελάχιστη για τις φθορίζουσες ουσίες, ενώ, αντίθετα, είναι αρκετά μεγάλη για τις φωσφορίζουσες. Ο φωσφορισμός εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία, η οποία επηρεάζει την ένταση και τη διάρκεια της φωτοβολίας (αντίθετα με ό,τι συμβαίνει στον φθορισμό). Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η φωτοβολία παρουσιάζει μικρή ένταση και μεγάλη διάρκεια. Όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία, το φως που εκπέμπεται γίνεται εντονότερο και βραχύτερης διάρκειας.



ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1. Οι διάφοροι τύποι φασματοσκοπίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΕΡΗΔΟΝΑΣ

Η οδοντική τερηδόνα είναι μία από τις πιο διαδεδομένες χρόνιες ασθένειες των ανθρώπων σε όλο τον κόσμο.[11] Όταν όλα τα στάδια της νόσου λαμβάνονται υπόψη, από την αρχική μέχρι και την τελευταίου σταδίου αλλοίωση, πολύ λίγα άτομα είναι πραγματικά ανεπηρέαστα. Στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες το 60%-90% των παιδιών σχολικής ηλικίας παρουσιάζουν κάποια μορφή τερηδόνας. Όσο αναφορά τους ενήλικους στις περισσότερες χώρες η νόσος πλήττει σχεδόν το 100% του πληθυσμού.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριάντα ετών, ωστόσο, σημαντικές αλλαγές έχουν επέλθει στον τρόπο εξέλιξης της νόσου. **Η εξέλιξη της τερηδόνας στην αδαμαντίνη είναι τώρα πιο αργή**, έτσι πλέον υπάρχει χρόνος για την **προληπτική παρέμβαση** πριν κάποια μη αναστρέψιμη καταστροφή συμβεί. Κατά τα πρώτα στάδια η νόσος είναι αναστρέψιμη και μπορεί να αντιμετωπιστεί. Η επεμβατική παρέμβαση μπορεί να μετατρέψει τη κατάσταση ενός τραύματος από ενεργή σε ανενεργή. Κατάλληλες διαγνωστικές τεχνικές είναι απαραίτητες για την υποστήριξη αυτών των αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση της βλάβης. Ο κλινικός γιατρός πρέπει να είναι σε θέση να παρακολουθεί το αποτέλεσμα των μη επεμβατικών μέτρων και σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ενδείξεις βλαβών σε εξέλιξη, αποφασίζει να παρέμβει, με επεμβατικές τεχνικές για την αποκατάσταση των κατεστραμμένων δομών των δοντιών, χωρίς να φθείρει το δόντι. Η εφαρμογή τέτοιου είδους στρατηγικών για τον έλεγχο της τερηδόνας μπορεί να αντιστρέψει την εξέλιξη της νόσου να μειώσει την οικονομική επιβάρυνση, τον πόνο, την ταλαιπωρία τοποθέτησης σφραγισμάτων.

Αυτή η μοντέρνα, συντηρητική προσέγγιση στην κλινική αντιμετώπιση της τερηδόνας, η οποία έχει εξελιχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων είκοσι ετών, είχε ως συνέπεια μια κρίσιμη αξιολόγηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κλινική ανίχνευση της τερηδόνας.

Συμπληρώνοντας τις παραδοσιακές διαγνωστικές μεθόδους με προηγμένες, πιο ακριβείς μεθόδους θα βελτιώνονται οι διαγνωστικές διαδικασίες και ως εκ τούτου, η οδοντιατρική περίθαλψη και τη θεραπεία των ασθενών. Η εφαρμογή αυτών των συμπληρωματικών μεθόδων θα πρέπει να παρέχει αντικειμενική πληροφόρηση σχετικά με την παρουσία και τη σοβαρότητα της βλάβης, για να συμπληρώσει την υποκειμενική ερμηνεία του κλινικού γιατρού, παρέχοντας τεκμηριωμένη κλινική διάγνωση της τερηδόνας.

Η συμβατική εξέταση για την ανίχνευση της τερηδόνας βασίζεται κυρίως στην **υποκειμενική ερμηνεία του γιατρού, οπτική εξέταση και απτική αίσθηση**. Μελέτες που βασίζονται σε αυτές τις μεθόδους εμφανίζουν συχνά χαμηλή ευαισθησία και υψηλή ειδικότητα, δηλαδή, ένας μεγάλος αριθμός των βλαβών μπορεί να χαθεί. **Ευαισθησία και ειδικότητα** χρησιμοποιούνται ευρέως για να μετρηθεί και να προσδιοριστεί ποσοτικά η διαγνωστική ικανότητα ενός τεστ. Ευαισθησία είναι το μέτρο της ικανότητας της μεθόδου να **αναγνωρίζει σωστά όλες τις επιφάνειες που έχουν καταστραφεί από τερηδόνα**, και η

ειδικότητα το μέτρο να **αναγνωρίζει σωστά όλες τις υγιές επιφάνειες**. Ευαισθησία και ειδικότητα εκφράζονται ως τιμές μεταξύ 0 και 1 (100%), όσο πιο κοντά στο 1 είναι υποδεικνύεται ένα αποτέλεσμα υψηλής ποιότητας. Για της διαγνωστικές μεθόδους ανίχνευσης τερηδόνας, οι τιμές θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,75 για την ευαισθησία και πάνω 0.85 για ειδικότητα.

Είναι προφανές ότι οι συμβατικές μέθοδοι για την ανίχνευση της τερηδόνας των δοντιών δεν πληρούν τα κριτήρια για να θεωρούνται ιδανικές. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στην υποκειμενική ερμηνεία και δεν είναι ευαίσθητες στην έγκαιρη ανίχνευση της τερηδόνας. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι οι τρέχουσες μέθοδοι δεν μπορούν να εντοπίσουν βλάβες τερηδόνας μέχρι αρκετά προχωρημένο στάδιο και λαμβάνοντας υπόψη μόνο το ένα τρίτο από το πάχος της αδαμαντίνης.

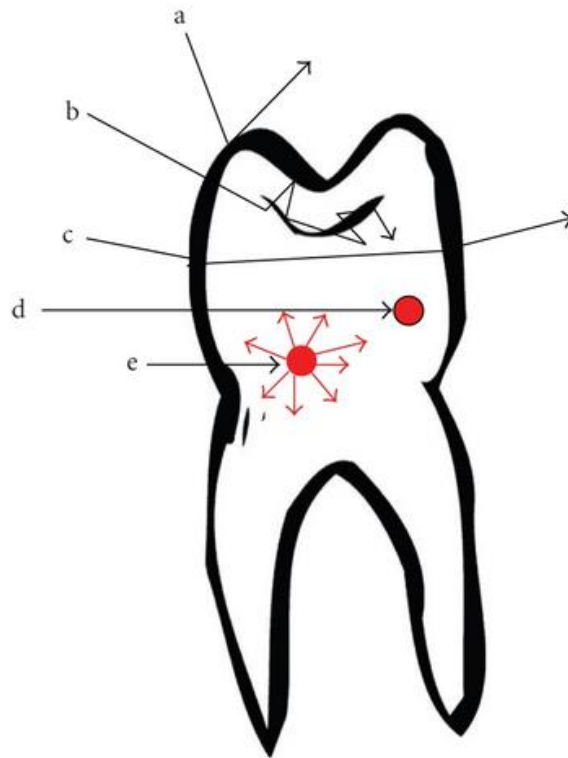
Ένα αρχικό αποτέλεσμα της νόσου τερηδόνας, είναι το **αυξημένο πορώδες** το οποίο οδηγεί σε μια διακριτή **αλλαγή στις οπτικές ιδιότητες** του προσβεβλημένου οδοντικού ιστού, παρέχοντας αποδεικτικά στοιχεία της αλλαγής στην τερηδονισμένη περιοχή.

Κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια υπήρξε εντατική έρευνα σε πιο εξελιγμένες μεθόδους για την έγκαιρη ανίχνευση της τερηδόνας. Υπάρχει ένας αριθμός από μεθόδους οπτικής ανίχνευσης τερηδόνας και μερικές συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Αρκετοί βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο και πραγματοποιείτε σημαντική προσπάθεια για την ανάπτυξη αυτών των τεχνικών. Ως εκ τούτου, **μελέτες επικύρωσης είναι απαραίτητες** για να προσδιοριστεί η κλινική χρησιμότητα τους πριν από την εφαρμογή στην πράξη. Οι μέθοδοι ανίχνευσης της τερηδόνας με βάση τις αλλαγές σε μια συγκεκριμένη οπτική ιδιότητα, αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως optically based methods. Η επόμενη ενότητα παρουσιάζει μια σύντομη περιγραφή των αρχών που διέπουν αυτές τις μεθόδους.

3.1 Φυσικές Αρχές που διέπουν την οπτική ανίχνευση τερηδόνας

Οι οπτικές μέθοδοι ανίχνευσης τερηδόνας βασίζονται στην παρατήρηση της αλληλεπίδρασης της ενέργειας που εφαρμόζεται στο δόντι ή την παρατήρηση της ενέργειας που εκπέμπεται από το δόντι. Τέτοια ενέργεια έχει τη μορφή ενός κύματος στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. (Σχήμα 1). Οι μέθοδοι ανίχνευσης τερηδόνας που περιγράφονται χρησιμοποιούν φως στην **ορατή και εγγύς υπέρυθρη** περιοχή (NIR).

Στην απλούστερη μορφή της, η τερηδόνα μπορεί να περιγραφεί ως μια διαδικασία που έχει ως αποτέλεσμα δομικές αλλαγές στους σκληρούς ιστούς των δοντιών. Η διάχυση του ασβεστίου και των φωσφορικών έξω από το δόντι, η διαδικασία απομετάλλωσης, θα οδηγήσει σε απώλεια της περιεκτικότητας σε ανόργανα άλατα. Η προκύπτουσα περιοχή της απομεταλλωμένης οδοντικής ουσίας περιέχει κυρίως βακτήρια και νερό. Το πορώδες αυτής της περιοχής είναι μεγαλύτερο από εκείνη της περιβάλλουσας. Η αυξημένη σκέδαση του προσπίπτοντος φωτός οφείλεται σε αυτή τη δομική αλλαγή και φαίνεται στο ανθρώπινο μάτι ως μια λευκή κηλίδα. Ως εκ τούτου, η νόσος οδηγεί σε διακριτές οπτικές αλλαγές που μπορούν να μετρηθούν και να προσδιοριστούν ποσοτικά με προηγμένες μεθόδους ανίχνευσης με βάση το φως που αλληλεπιδρά με το δόντι.



Εικόνα 3.1: αλληλεπιδράσεις του φωτός με το δόντι. Πώς τα κύματα μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τους σκληρούς ιστούς του δοντιού. (Α) ανάκλαση, (Β) σκέδαση, το προσπίπτον κύμα εισέρχεται στο δόντι και αλλάζει κατεύθυνση. Τα φωτόνια τότε φεύγουν από το δόντι είτε με οπισθοσκέδαση, όπου τα φωτόνια γυρίζουν μέσω της επιφάνειας με την οποία εισήλθαν, ή μέσω άλλης επιφάνειας (μετάδοση με διάχυτη σκέδαση) (C) μετάδοση, το κύμα φωτίζει το δόντι και διαθλάται επί των επιφανειών ? (D) απορρόφηση με παραγωγή θερμότητας? (E) απορρόφηση με φθορισμό. Οι περισσότερες αλληλεπιδράσεις των κυμάτων είναι ένας συνδυασμός αυτών των διαδικασιών.

3.1.1 Σκέδαση

Η σκέδαση είναι προϊόν **πολλαπλής ανάκλασης**. Είναι η διαδικασία κατά την οποία **η κατεύθυνση ενός φωτονίου μεταβάλλεται χωρίς απώλεια ενέργειας**. Το προσπίπτον φως αναγκάζεται να αποκλίνει από την ευθεία πορεία όταν αλληλεπιδρά με μικρά σωματίδια ή αντικείμενα στο μέσο μέσω του οποίου το φως διέρχεται. Από φυσική άποψη, η σκέδαση θεωρείται ως ιδιότητα του υλικού. Ένα ποτήρι γάλα θεωρείται ως λευκό επειδή το φως που προσπίπτει επί του γάλακτος σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις, αφήνοντας το γάλα χωρίς απορρόφηση. Εμφανίζεται το χιόνι λευκό, επειδή το φως που σκεδάζεται στο χιόνι προς όλες τις κατευθύνσεις από τους μικρούς κρυστάλλους πάγου. Το φως από όλα τα ορατά μήκη κύματος εξέρχεται του χιονιού χωρίς να υποστεί απορρόφηση. Η σκέδαση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στο μήκος κύματος, μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζουν περισσότερο[13] σε σχέση με μεγαλύτερα. Συνεπώς, οι μέθοδοι ανίχνευσης τερηδόνας χρησιμοποιούν μήκη κύματος στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (400 nm έως 700 nm), όπου περιορίζεται η σκέδαση. Μια πρόωρη βλάβη αδαμαντίνης φαίνεται λευκότερη από την περιβάλλουσα υγιή αδαμαντίνη λόγω της ισχυρής σκέδασης του φωτός εντός της τερηδονισμένης περιοχής. Οι μέθοδοι μέτρησης της σοβαρότητας της βλάβης βασίζονται στις διαφορές στην σκέδαση μεταξύ υγιούς και τερηδονισμένης αδαμαντίνης.

3.1.2 Απορρόφηση με φθορισμό

Η απορρόφηση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα φωτόνια σταματάνε σε ένα αντικείμενο και η ενέργεια των κυμάτων μεταφέρεται στο αντικείμενο. Η χαμένη ενέργεια κυρίως μετατρέπεται σε θερμότητα ή σε ένα άλλο κύμα που έχει λιγότερη ενέργεια και συνεπώς μεγαλύτερα μήκη κύματος. Από φυσική άποψη, η απορρόφηση θεωρείται ως μια ιδιότητα του υλικού. Το προηγούμενο παράδειγμα του ποτηριού γάλακτος το οποίο εμφανίζεται λευκό μπορεί να επεκταθεί και σε ένα φλιτζάνι τσαγιού. Το τσάι θεωρείται ως διαφανές διότι δεν σκεδάζει το φως, αλλά αυτό φαίνεται καφέ επειδή ένα μεγάλο μέρος του φωτός απορροφάται από το τσάι. Ομοίως, η λάσπη ή η ρύπανση σε λευκό χιόνι μπορεί να θεωρηθούν ως τα σκοτεινά σημεία, επειδή ορισμένα μήκη κύματος απορροφούνται από αυτά τα μολυσμένα σημεία. Η απορρόφηση του φωτός σε ιστό εξαρτάται έντονα από το μήκος κύματος. Το νερό είναι ένα παράδειγμα μιας ισχυρής απορρόφησης στο υπέρυθρο φάσμα. Μετά την απορρόφηση η ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί μέσω της την εκπομπής του φωτός σε ένα μεγαλύτερο μήκος κύματος, μέσω της διαδικασίας του φθορισμού. Ο φθορισμός εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του μήκους κύματος που φωτίζει το αντικείμενο και του μορίου σε αυτό το αντικείμενο. Η ενέργεια απορροφάται από το μόριο με συνεχόμενη ηλεκτρονική μετάβαση στην επόμενη κατάσταση, σε μια υψηλότερου επιπέδου κατάσταση όπου τα ηλεκτρόνια παραμένουν για μια σύντομη χρονική περίοδο. Από εκεί τα ηλεκτρόνια μπορούν να πέσουν πίσω στην κατάσταση του εδάφους και να απελευθερώσουν την αποκτηθείσα ενέργεια ως μεγαλύτερο μήκος κύματος και διαφορετικό χρώμα, η οποία σχετίζεται με την ενέργεια που δίνεται και το φθορίζον φως που μπορεί να εκπέμπεται. Ο αυτοφθορισμός, ο φυσικός φθορισμός του σκληρού ιστού των δοντιών χωρίς την προσθήκη άλλων ουσιών φωταύγειας είναι γνωστός για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η απομετάλλωση θα οδηγήσει σε απώλεια του αυτοφθορισμού, το οποίο μπορεί να προσδιορισθεί ποσοτικά με τη χρήση μεθόδων ανίχνευσης τερηδόνας με βάση τις διαφορές στο φθορισμό μεταξύ υγιών και τερηδονισμένων περιοχών.

3.2 Οπτικές μέθοδοι ανίχνευσης τερηδόνας

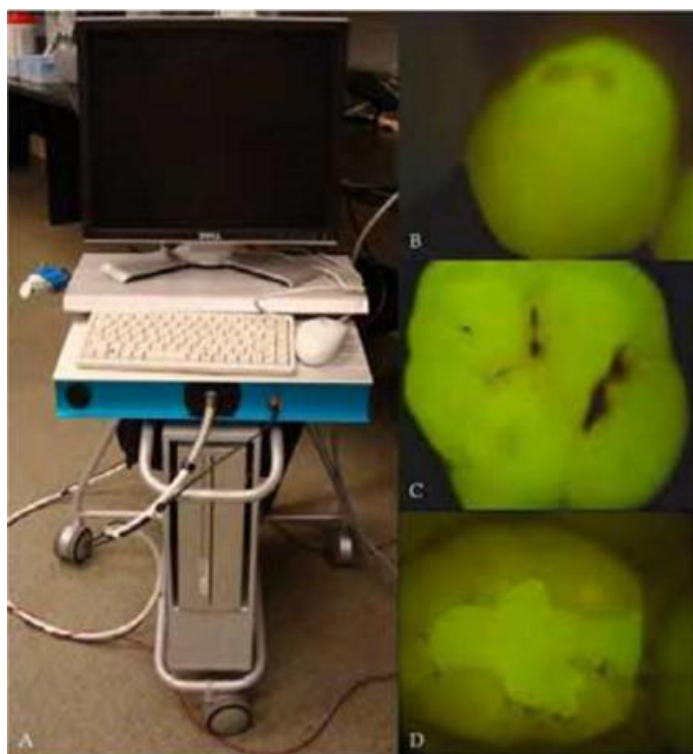
3.2.1 Quantitative light-induced fluorescence (QLF)

Στηρίζεται στην αρχή ότι όταν η υγιής αδαμαντίνη και οδοντίνη εκτίθενται σε ακτινοβολία Laser συγκεκριμένου μήκους κύματος μπορεί να προκληθεί φθορισμός [13]. Σε αυτήν την αρχή στηρίζεται η μέθοδος QLF όπου έχουμε **μείωση του φθορισμού σε απομεταλλωμένη αδαμαντίνη** όταν εκτίθεται σε **μπλε ιώδες φως (Laser)** με μήκος κύματος **$\lambda=488\text{nm}$** , οπότε οι περιοχές που έχουν απομεταλλωθεί εμφανίζονται ως μαύρες ζώνες. Είναι διαθέσιμο εμπορικά για κλινική χρήση. Η συσκευή αυτή αποτελείται από μια φορητή ενδοστοματική έγχρωμη microvideo κάμερα CCD, συνδεδεμένη με έναν υπολογιστή με το κατάλληλο λογισμικό (QLFpatient, Inspektor Research Systems BV, Άμστερνταμ,

Ολλανδία). Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να συλλάβει και να αναλύσει **in vivo** εικόνες των δοντιών κατά τη διάρκεια της κλινικής εξέτασης.

Το QLF χρησιμοποιεί ένα 50-watt xenon arc-lamp και ένα οπτικό φίλτρο προκειμένου να παραχθεί ένα μπλε φως με 290 - έως 490-nm μήκος κύματος και μέσω ενός οδηγού φωτός εφοδιασμένο με ένα οδοντικό καθρέφτη το φως φτάνει στο δόντι [14]. **Οι εικόνες του φθορισμού φιλτράρονται από ένα κίτρινο υπηπερατό φίλτρο ($\lambda \geq 540$ nm) και κατόπιν συλλαμβάνονται από μια έγχρωμη κάμερα CCD** (Al-Khateeb et al., 1997). Όταν η επιφάνεια του δοντιού φωτίζεται από αυτό το υψηλής έντασης μπλε φως, ο αυτοφθορισμός της αδαμαντίνης λαμβάνεται με την ενδοστοματική κάμερα, δεδομένου ότι όλο το φως διέγερσης είτε ανακλάται είτε διαχέεται είτε φιλτράρεται. **Όταν μια αλλοίωση είναι παρούσα επί της επιφανείας, μια αύξηση στην σκέδαση του φωτός παρατηρείται** σε σχέση με την περιβάλλουσα αδαμαντίνη. Το αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η αντίθεση μεταξύ υγιούς αδαμαντίνης και μιας τερηδονισμένης περιοχής αυξάνεται, όπου η τερηδονισμένη περιοχή φαίνεται ως σκούρο σε ανοιχτό πράσινο φόντο (Neuhaus et al., 2009).

Για να υπολογίσουμε τον **βαθμό απώλειας φθορισμού** σε τερηδονισμένους ιστούς, ο φθορισμός του υγιούς ιστού που ήταν αρχικά στη θέση της τερηδονισμένης περιοχής ανοικοδομείται με προέκταση του φθορισμού του υγιούς ιστού που βρίσκεται γύρω από τη τερηδονισμένη περιοχή. Η διαφορά μεταξύ των τιμών αλλοίωσης και των ανακατασκευασμένων τιμών επιτρέπει τον υπολογισμό της απώλειας φθορισμού. **Ο εκπεμπόμενος φθορισμός σχετίζεται άμεσα με τα μεταλλικά στοιχεία που περιέχονται στην αδαμαντίνη.** Έτσι, η εικόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για την **ποσοτικοποίηση του μεγέθους, το βάθος και τον όγκο της τερηδονισμένης αλλοίωσης** που παράγεται από τις παραμέτρους που παράγονται από το λογισμικό: περιοχή βλάβης (σε τετραγωνικά χιλιοστά), βάθος του τραύματος - ΔF (ποσοστό απώλειας φθορισμού) και όγκος τερηδόνας - ΔQ (το προϊόν της περιοχής της βλάβης σε mm² και το βάθος του τραύματος σε ποσοστό απώλειας φθορισμού) (Zandoná & Zero, 2006).



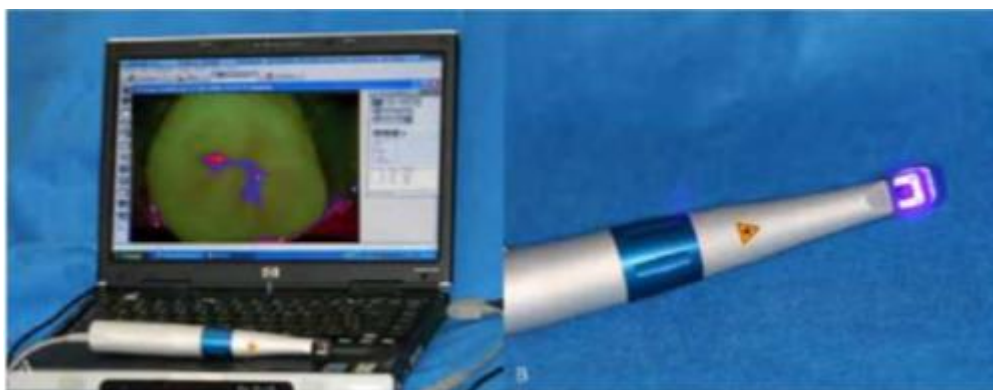
Εικόνα 3.2. (Α) QLF σύστημα. (Β)Εικόνα φθορισμού τερηδονισμένης αδαμαντίνης στην οδοντική επιφάνεια. (C)Εικόνα φθορισμού φθορισμού τερηδονισμένης αδαμαντίνης στην μασητική επιφάνεια. (D) Εικόνα φθορισμού μιας δευτερογενούς βλάβης τερηδόνας γύρω από ένα σύνθετο αποκατεστημένο δόντι.

Μέσω αυτών των παραμέτρων, είναι δυνατόν να ανιχνευθούν και να διαφοροποιηθούν οι αλλοιώσεις τερηδόνας σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, καθιστώντας αυτό το σύστημα μια πολύ χρήσιμη μέθοδο για τον ποσοτικό προσδιορισμό της τερηδόνας της αδαμαντίνης. Αυτή η μέθοδος φθορισμού απέδειξε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα από διαφορετικούς εξεταστές (Eggertsson et al., 1999). Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι **το QLF μπορεί να επηρεάζεται από ορισμένους παράγοντες, όπως λεκέδες, οδοντική πλάκα, οδοντική φθορίωση, ανεπαρκή μετάλλωση**. Έτσι, καθώς η παρουσία αυτών των συγχυτικών παραγόντων μπορούν να παράγουν εικόνες με παρόμοια εμφάνιση με εκείνη οδοντικής απομετάλλωσης, είναι σημαντικό ότι εξεταστές πρέπει να αναγνωρίζουν αυτούς τους παράγοντες και να τους διακρίνουν ώστε να εκτελέσουν μια σωστή διάγνωση.

3.2.2 Κάμερα φθορισμού (VistaProof)

Μια άλλη συσκευή με βάση το φως **φθορισμού** που προκαλείται από το φαινόμενο είναι η ενδοστοματική κάμερα VistaProof (Dürr Οδοντιατρική, Bietigheim-Bissingen, Γερμανία) (Σχήμα 8), που βασίζεται σε **έξι μπλε GaN-LEDs** τα οποία εκπέμπουν ένα φως **405-nm**. Με αυτή τη μηχανή είναι δυνατόν να ψηφιοποιηθεί το σήμα βίντεο από την οδοντική επιφάνεια κατά τη διάρκεια της εκπομπής φθορισμού χρησιμοποιώντας ένα αισθητήρα CCD (charge-coupled device). Σε αυτές τις εικόνες, είναι πιθανό να διακρίνουμε διαφορετικές περιοχές της οδοντικής επιφάνειας που φθορίζουν σε πράσινο (υγιούς οδοντικού ιστού) και κόκκινο (σάπιου οδοντιατρικού ιστού) (Thoms, 2006). Το DBSWIN λογισμικό χρησιμοποιείται για να αναλύει τις εικόνες και να μεταφράζει σε τιμές την

αναλογία έντασης του κόκκινου και του πράσινου φθορισμού. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, οι τιμές αυτές σχετίζονται με την έκταση της βλάβης. Όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός βακτηρίων, τόσο υψηλότερο είναι το κόκκινο σήμα φθορισμού. Το λογισμικό αναδεικνύει τις βλάβες και τα κατατάσσει σε μια κλίμακα 0 - 5, δίνοντας μια θεραπεία προσανατολισμού κατά την πρώτη αξιολόγηση: παρακολούθηση, επαναμετάλλωση ή επεμβατική θεραπεία. Πρόσφατα, αυτή η συσκευή έδειξε καλή απόδοση στην ανίχνευση και ποσοτικοποίηση της οδοντικής πλάκας που σχηματίζεται πάνω σε λείες επιφάνειες υπό υψηλή έκθεση σε σακχαρόζη (Raggio et al., 2010). Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο ασθενής μπορεί να δει στην οθόνη του υπολογιστή την όλη διαδικασία της ανίχνευσης τερηδόνας και τις περιοχές των δοντιών, όπου η ασθένεια δείχνει πιο σοβαρή.



Σχήμα. 3.3. (Α) VistaProof κάμερα φθορισμού και DBSWIN λογισμικού ανάλυση. (Β) Έξι μπλε LEDs εκπέμπουν ένα 405-nm φως.

3.2.3 LASER INDUCED FLUORESCENCE-(DIAGNODent και DIAGNODent-pen)

Το όργανο DIAGNODent είναι μία συσκευή που χρησιμοποιεί το **φθορισμό** για να ανιχνεύσει την παρουσία τερηδόνας[15]. Χρησιμοποιώντας ένα μικρό laser, το σύστημα παράγει ένα διεγερμένο μήκος κύματος **στα 650nm**, το οποίο παράγει κόκκινο φως. Σχεδιασμένο για σχισμές και κοιλότητες και για επίπεδες επιφάνειες. Το άκρο εκπέμπει το φως διέγερσης και μαζεύει τον προκύπτων φθορισμό. Αντίθετα με το QLF σύστημα, το DD δεν παράγει εικόνα του δοντιού, αλλά δείχνει μία αριθμητική τιμή στις δύο οθόνες led. Το σύστημα αυτό μετράει το βαθμό της βακτηριακής δράσης. Αυτό υποστηρίζεται από το γεγονός ότι το μήκος κύματος διέγερσης είναι κατάλληλο για **να προκαλέσει φθορισμό από βακτηριακές πορφυρίνες**, ένα προϊόν των αλλοιώσεων της τερηδόνας. Η συσκευή laser φθορισμού DIAGNODent είναι μη-επεμβατική και ποσοτική μέθοδος με βάση τον επαγόμενο από λέιζερ φθορισμό. Η πρώτη συσκευή λέιζερ φθορισμού, DIAGNODent 2095 (KaVo, Biberach, Γερμανία), αναπτύχθηκε το 1998. Βασίζεται στην ποσοτικοποίηση του εκπεμπόμενου φθορισμού από οργανικά συστατικά των οδοντικών ιστών όταν διεγείρονται από ένα 655nm λέιζερ (αλουμίνιο, γάλλιο, ίνδιο και φωσφόρο - AlGaInP) που βρίσκεται στην περιοχή του ερυθρού φάσματος.

Το εκπεμπόμενο φως φθάνει τους οδοντικούς ιστούς μέσα από ένα εύκαμπτο άκρο. Καθώς η **ώριμη αδαμαντίνη είναι πιο διαφανής**, αυτό το φως περνά μέσα από αυτόν τον ιστό χωρίς να εκτρέπεται. Σε επαφή με την **πληγείσα αδαμαντίνη, αυτό το φως διαθλάται**

και σκεδάζεται. Το οποίο είναι αργότερα σε θέση να διεγείρει είτε το σκληρό οδοντικό ιστό, **με αποτέλεσμα τον αυτοφθορισμό του ιστού, ή την παρουσία φθοροφόρων** στις αλλοιώσεις τερηδόνας. Οι φθοροφόροι προέρχονται από τα προϊόντα βακτηριακού μεταβολισμού και έχουν ταυτοποιηθεί ως **πορφυρίνες** (Hibst et al., 2001). **Ο εκπεμπόμενος φθορισμός από τις πορφυρίνες συλλέγεται από εννέα ομόκεντρες ίνες και μεταφράζονται σε αριθμητικές τιμές,** οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από 0 έως 99. Δύο οπτικές άκρες είναι διαθέσιμες: Μια για μασητικές επιφάνειες, και μια για μεσοδόντιες επιφάνειες. Αυτή η συσκευή έχει δείξει καλά αποτελέσματα στην ανίχνευση τερηδόνας στις μασητικές περιοχές, ωστόσο, ενδέχεται να μην χρησιμοποιηθεί ως η μόνη μέθοδος για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Bader & Shugars, 2006? Rodrigues et al, 2008.).



Εικόνα 3.4 . DIAGNOdent 2095 – laser φθορισμού για τον εντοπισμό τερηδόνας.

Πρόσφατα, μια νέα και συσκευή - DIAGNOdent 2190 ή DIAGNOdent-pen - (KaVo, Biberach, Γερμανία) (Σχήμα 6) έχει εισαχθεί στην αγορά. Αυτή η συσκευή λειτουργεί στην ίδια αρχή όπως το προηγούμενο. Για το λόγο αυτό, η συσκευή συρρικνώθηκε και οι άκρες τροποποιήθηκαν. Οι άκρες που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη συσκευή κατασκευάζονται από ίνες ζαφειριού και το ίδιο ενιαίο στερεό ζαφείρι στην άκρη της ίνας χρησιμοποιείται για πολλαπλασιασμό της διέγερσης και για τη συλλογή του φθορισμού, αλλά σε αντίθετες κατευθύνσεις και διαφορετικά μήκη κύματος (Lussi & Hellwig, 2006). Υπάρχουν δύο άκρες που μπορούν να συζευχθούν σε αυτή τη συσκευή: μία για μασητικές και μια για μεσοδόντιες. Ωστόσο, οι επιδόσεις του σε επιφάνειες μεσοδόντιες εξακολουθεί να είναι περιορισμένη. Τα βάρος της είναι 140g και μόνο μία μπαταρία (1,5 V) είναι απαραίτητη.



Εικόνα 3.5: (Α) DIAGNOdent 2190 or DIAGNOdent pen βαθμονόμησης κατά το πρότυπο κεραμικού. (Β) άκρη μασητικών περιοχών. (C) άκρη για μεσοδόντιες περιοχές.

Όπως αναφέρθηκε πριν, όταν μία αλλοίωση τερηδόνας ή μία οδοντική επιφάνεια αξιολογείται με DIAGNOdent σύστημα, μία τιμή μεταξύ 0 και 99 παρατηρείται. Αυτή η τιμή είναι, θεωρητικά, ανάλογη με το βάθος της αλλοίωσης. Για την ερμηνεία των τιμών, υπάρχουν αρκετά cut-off σημεία που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Αυτά τα σημεία αποκοπής διαφέρουν το ένα από το άλλο, σε ορισμένα σημεία της αδαμαντίνης και της οδοντίνης. Για το λόγο αυτό, συνιστάται ο εξεταστής να θεωρεί τις τιμές ως ένα δείγμα για την αξιολόγηση των αλλοιώσεων.

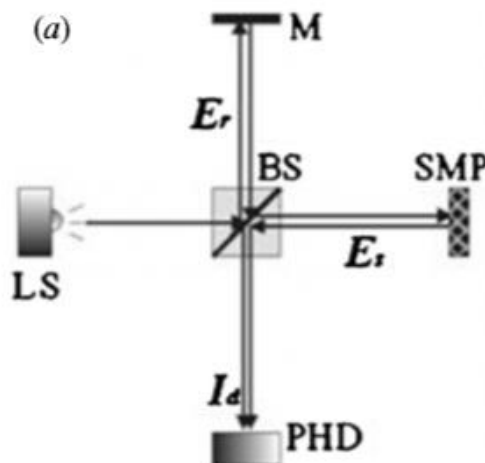
Άλλοι παράγοντες που θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν είναι η παρουσία των λεκέδων, εξαιτίας ανενεργών βλαβών ή πέτρας στις μασητικές επιφάνειες που οφείλονται σε βιολογικό σφράγισμα. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλές τιμές φθορισμού και κατά συνέπεια, σε ψευδώς-θετικά αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, όπως επίσης συνιστάται πριν από την μακροσκοπική εξέταση, **πρέπει να πραγματοποιείται καθαρισμός στις οδοντικές επιφάνειες πριν από τις μετρήσεις με λέιζερ φθορισμού**. (Diniz et al, 2011?. Lussi & Ράιχ, 2005).

3.2.4 OCT optical coherence tomography

Μια ακόμη ενδιαφέρουσα μέθοδος η οποία έχει σκοπό την **αξιολόγηση του βαθμού απομετάλλωσης τις οδοντίνης** χρησιμοποιεί OCT. [13] Ο Optical coherence tomography επινοήθηκε το 1990. Έχει τη δυνατότητα να απεικονίζει την μικροδομή του ιστού με μια ευκρίνεια (μm) που πλησιάζει αυτή της ιστολογίας. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους όπως ακτίνες Χ, μαγνητική τομογραφία ή υπέρηχους προσφέρει απεικονιστική

ευκρίνεια της τάξης του 1-10 μm , ενώ το απεικονιστικό βάθος ανάλογα με την διαφάνεια του ιστού είναι μεγαλύτερο των 2mm. Ο OCT βασίζεται σε ένα ιντερφερόμετρο χαμηλής συνοχής. Ένα συνιθισμένο OCT διαθέτει ιντερφερόμετρο (Michelson type), abroad-band, πηγή φωτός χαμηλής συνοχής, οπτικά διαχωρισμού φωτός, οπτικές ίνες και οπτικό αισθητήρα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Όπως φαίνεται στην εικόνα, το φως μπαίνοντας στην κοιλότητα του ιντερφερόμετρου χωρίζεται σε δύο δέσμες, η μια οδηγείται σε ένα καθρέπτη αναφοράς και η δεύτερη επικεντρώνεται στον ιστό. **Η ακτίνες αναφοράς ανακλώνται και παρεμβαίνουν κατασκευαστικά με τις ανακλώμενες ακτίνες από το δείγμα**, δεδομένου ότι και οι δύο ακτίνες έχουν ταξιδέψει την ίδιου μήκους οπτική διαδρομή. Επίσης, **μετακινώντας τον καθρέπτη αναφοράς αλλάζει και το αντίστοιχο βάθος δειγματοληψίας**.



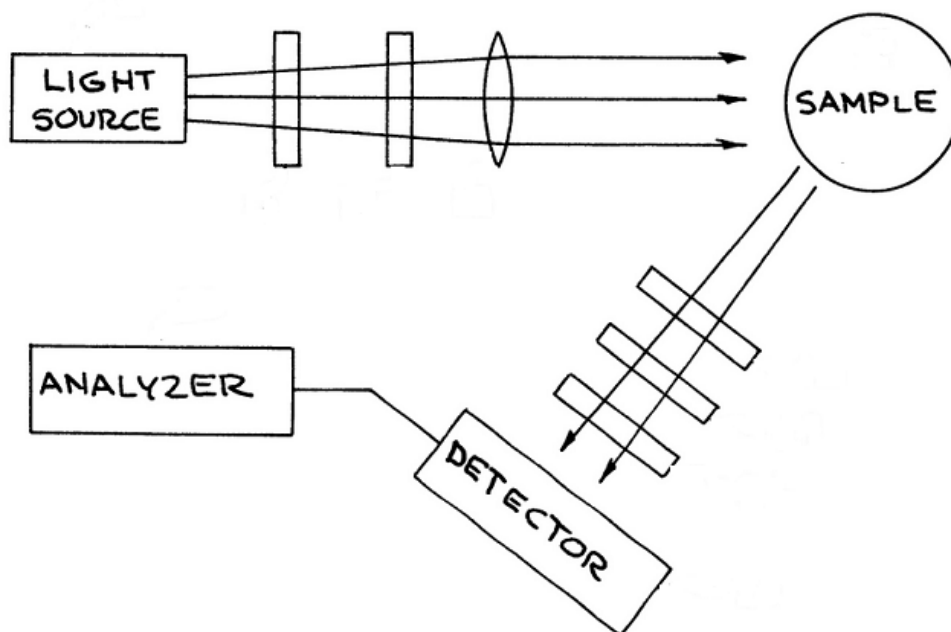
Εικόνα 3.6 : OCT

Στην έρευνα αυτή με *in vitro* μικροβιολογική μέθοδο αξιολογήθηκε η απομετάλλωση τεχνητά τερηδονισμένων ανθρώπινων δοντιών. Οι μασητικές επιφάνειες 6 ανθρωπίνων γομφίων (molars) λειάνθηκαν έως ότου δημιουργηθεί μια επίπεδη επιφάνεια και η αδαμαντίνη αφαιρέθηκε ώστε να εμφανιστεί η μασητική οδοντίνη. Τα δόντια αυτά χωρίστηκαν σε 12 μισά και χωρίστηκαν σε 3 ομάδες σύμφωνα με τη διάρκεια του μικροβιολογικού πειράματος ($n = 4$): G1: 7 μέρες, G2: 14 μέρες, G3: 21 μέρες. Οι επιφάνειες όλων των δειγμάτων ήταν προστατευμένες από ένα οξύ-ανθεκτικό βερνίκι νυχιών, εκτός από ένα παράθυρο όπου η αλλοίωση τερηδόνας προκλήθηκε από ένα βιοφίλμ *Streptococcus mutans* σε ένα μοντέλο batch-culture συμπληρωμένο με 5% σουκρόζη. Τα δείγματα στη συνέχεια αναλύθηκαν με οπτική τομογραφία συνοχής (OCT) με μία υπερ-luminescent δίοδο φωτός ($\lambda = 930 \text{ nm}$) με 6,0 μm πλευρική και διαμήκη ανάλυση (στον αέρα). Ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα (εικόνες και μέση απομετάλλωση οδοντίνης, αντιστοίχως) ελήφθησαν. Τα μέσα βάθη απομετάλλωσης ήταν (μm) 235 ± 31.4 , 279 ± 14 , και 271 ± 8.3 στις ομάδες 1, 2, και 3, αντίστοιχα. Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στο βάθος μέσης βλάβης για παραπάνω από 7 ημέρες από την πρόκληση τερηδόνας. Συμπερασματικά, ο OCT αποδείχθηκε ότι είναι μια αποτελεσματική και μη επεμβατική μέθοδος για την ανίχνευση του **βάθους των αλλοιώσεων που προκαλούνται από απομετάλλωση**. Επιπλέον, η επτά ημερών απομετάλλωση θεωρήθηκε επαρκής για να παρατηρηθούν τα τερηδονισμένα δόντια στην επιφάνεια της οδοντίνης.

3.2.5 Polarization sensitive optical coherence tomography

Η PS-OCT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση των πρώιμων βλαβών τερηδόνας και για την παρακολούθηση της εξέλιξης νόσου κατά την πάροδο του χρόνου. Υψηλής ανάλυσης εικόνες χρησιμοποιήθηκαν από φυσικές βλάβες τερηδόνας και

προσομοίωση βλαβών τερηδόνα ποικίλης σοβαρότητας που δημιουργήθηκε πάνω σε χρονικές περιόδους από 1 έως 14 ημέρες. Ένα γραμμικά πολωμένο φως στάλθηκε επί των δειγμάτων δοντιών και μετρήθηκε η ανακλώμενη ένταση σε δύο ορθογώνιες πολώσεις.[16]



Εικόνα 3.7: PS-OCT

Η προσφορά του PS-OCT ήταν ανεκτίμητη για την **αφαίρεση της επιρροής των ανακλάσεων επιφάνειας και της φυσική διάθλασης** που απαιτείτε για την βελτιωμένη ανάλυση της δομής της επιφάνειας της τερηδόνας. Αυτή η μελέτη έδειξε ότι η PS-OCT είναι κατάλληλη για την απεικόνιση στις διεπιφανειακές και μασητικές επιφάνειες τερηδόνας, την πρόωρη μορφή τερηδόνας της ρίζας, καθώς και για την απεικόνιση αποσύνθεσης υπό εμφράξεις. Διαμήκεις μετρήσεις της έντασης του ανακλώμενου φωτός κατά την ορθογώνια κατάσταση πόλωσης από την περιοχή της προσομοιωμένης τερηδονικής βλάβης συσχετίζεται γραμμικά με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου της απομετάλλωσης υποδεικνύοντας ότι η PS-OCT είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την παρακολούθηση των **μεταβολών της περιεκτικότητας μετάλλων της αδαμαντίνης κατά την πάροδο του χρόνου**.

3.2.6 Fiber-optic transillumination (FOTI) and digital imaging fiber-optic transillumination (DIFOTI)

Οι συσκευές FOTI και DIFOTI έχουν εισαχθεί για τη βελτίωση της έγκαιρης ανίχνευσης των τερηδονισμένων επιφανειών και έχουν γίνει αποδεκτές από τους κλινικούς ως συμπληρωματικό εργαλείο κατά τη διάρκεια κλινικών εξετάσεων.

Η συσκευή FOTI (Σχήμα 10) είναι μια πρακτική, εύκολη, γρήγορη και φθηνή μέθοδος απεικόνισης των δοντιών η οποία χρησιμοποιεί **πολλαπλή σκέδαση**. Βασίζεται

στις αλλαγές στην σκέδαση και στο φαινόμενο απορρόφησης του φωτός που αυξάνει την αντίθεση μεταξύ υγιούς και τερηδονισμένης αδαμαντίνης. Με άλλα λόγια, τα αποτελέσματα από μια τοπική μείωση της εν λόγω διαφανοσκόπησης οφείλονται στα χαρακτηριστικά της τερηδονισμένης περιοχής. Ο φωτισμός παρέχεται μέσω οπτικών ινών από μια πηγή φωτός στην επιφάνεια των δοντιών. **Το φως διαδίδεται από την οπτική ίνα κατά μήκος του ιστού του δοντιού σε μη φωτιζόμενες επιφάνειες.** Οι προκύπτουσες εικόνες κατανομής του φωτός στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση. Η μετάδοση του μπορεί να παρατηρηθεί είτε στις μεσοδόντιες είτε στις μασητικές επιφάνειες, κατά την ανάλυση γομφίων και προγομφίων. Καθώς **η σκέδαση του φωτός είναι υψηλότερη στην απομεταλλωμένη αδαμαντίνη**, είναι δυνατόν να δούμε την αλλοίωση ως μία σκοτεινή περιοχή ή μία σκιά. Εκτός αυτού, στην περίπτωση



Εικόνα 3.8 Fiber-optic transillumination (FOTI).

τερηδονισμένης οδοντίνης φαίνεται πορτοκαλί, καφέ ή γκρι κάτω από την αδαμαντίνη. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη διαφοροποίηση μεταξύ βλάβης αδαμαντίνης και οδοντίνης. Ωστόσο, έχειδειχθεί ότι διάγνωση FOTI με γυμνό μάτι μπορεί να υπόκειται σε **υποκειμενικές αποφάσεις διάγνωσης** από τον εξεταστή (Neuhaus et al., 2009).

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της μεταβλητότητας της συσκευής FOTI, μια νέα μέθοδος έχει δοκιμαστεί. Η συσκευή DIFOTI (σχήμα 11) είναι μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί **ψηφιακή επεξεργασία εικόνας** για την **ποσοτική διάγνωση και πρόγνωση** στην οδοντιατρική. Βασίζεται σε διάδοση του φωτός ακριβώς κάτω από την επιφάνεια των δοντιών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για **τον προσδιορισμό του βάθους** του τραύματος. Χρησιμοποιεί διαφανοσκόπηση οπτικών ινών ασφαλούς ορατού φωτός για να απεικονίσει το δόντι. Σε αυτό το σύστημα, **το μεταφερόμενο φως από τις οπτικές ίνες συλλέγεται από την άλλη πλευρά του δοντιού με ένα σύστημα κατόπτρου** και καταγράφεται από μια κάμερα CCD, ακαριαία. Έτσι, η συσκευή DIFOTI παράγει εικόνες με επαναλήψιμο τρόπο διατηρώντας έναν αριθμό παραμέτρων ελέγχου απεικόνισης. Τότε η αποκτηθείσα πληροφορία αποστέλλεται σε έναν υπολογιστή για ανάλυση με ειδικούς αλγορίθμους, ο οποίος παράγει ψηφιακές εικόνες που μπορούν να προβληθούν στον οδοντίατρο και στον ασθενή σε πραγματικό χρόνο ή να αποθηκευθούν για μεταγενέστερη αξιολόγηση. Επιπλέον, το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας για την ενίσχυση της αντίθεσης ανάμεσα σε υγιές και τερηδονισμένους ιστούς και ποσοτικοποιεί τα χαρακτηριστικά μιας αρχόμενης ή δευτερεύουσας βλάβης στην μασητική τερηδόνα ή στην περιοχή ανάμεσα σε δύο δόντια ή και σε λείες επιφάνειες. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει άλλες μεταβολές στη στεφανιαία ανατομία των δοντιών, όπως είναι τα κατάγματα των δοντιών και η φθορίωση. Η συσκευή DIFOTI **παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην ανίχνευση πρώιμων αλλοιώσεων**, σε σύγκριση με την ακτινογραφική εξέταση και έχει τη δυνατότητα για ποσοτική παρακολούθηση των επιλεγμένων βλαβών κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (Bin-Shuwaish et al, 2008. Young & Featherstone, 2005).



Εικόνα 3.9 (Α) Digital imaging fiber-optic transillumination (DIFOTI). (Β) Άκρη για μασητικές επιφάνειες.

3.2.7 LED technology (Midwest Caries I.D.)

Πρόσφατα, μια άλλη συσκευή για την ανίχνευση της τερηδόνας αναπτύχθηκε και βασίζεται σε τεχνολογία LED (DENTSPLY Professional, York, PA, USA). Η φορητή συσκευή εκπέμπει από μία δίοδο φωτός (LED) μεταξύ 635 nm και 880 nm και αναλύει την ανάκλαση και την διάθλαση του φωτός που εκπέμπεται από την επιφάνεια του δοντιού, η οποία συλλαμβάνεται από οπτικές ίνες και μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα για ανάλυση. Ο μικροεπεξεργαστής της συσκευής περιέχει ένα υπολογιστή ο οποίος βασιζόμενος σε αλγόριθμους, προσδιορίζει τις διαφορετικές οπτικές υπογραφές (αλλαγές στην οπτική διαύγεια και αδιαφάνεια) μεταξύ υγιών και **απομεταλλωμένων** δοντιών (Strassler και Sensi, 2008).



Εικόνα 3.10: Midwest Caries I.D. συσκευή και το πρότυπο για τη διαδικασία βαθμονόμησης.

Η απομετάλλωση οδηγεί σε μια αλλαγή στο LED από πράσινο σε κόκκινο με ταυτόχρονο ηχητικό σήμα, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τη σοβαρότητα των αλλοιώσεων τερηδόνας. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, όταν υπάρχει μια αλλαγή στην οπτική διαύγεια

και την αδιαφάνεια των οδοντικών ιστών, αλλαγές φωτός σε πράσινο και σε κόκκινο πραγματοποιούνται και ένα ηχητικό σήμα ακούγεται. Όσο πιο γρήγορα ακουστεί το σήμα, τόσο πιο βαθιά είναι η βλάβη. Στη βιβλιογραφία, υπάρχει μόνο μία δημοσιευμένη μελέτη η οποία αξιολόγησε την Midwest Caries ID σε απόδοση in vitro για την ανίχνευση μασητικής τερηδόνας (Rodrigues et al., 2011). Σε αυτή τη μελέτη, η συσκευή παρουσίασε τα ίδια cut-off όρια για τερηδόνα σε ελεύθερες περιοχές και τερηδόνα αδαμαντίνης. Αυτό σημαίνει ότι η Caries Midwest I.D. δεν ήταν σε θέση να διακρίνει βλάβες αδαμαντίνης από υγιείς επιφάνειες.

3.2.8 Απεικόνιση της τερηδόνας στο υπέρυθρο φως

Μία τερηδονισμένη περιοχή μπορεί να εξεταστεί με λευκό φως το οποίο εισέρχεται στο δόντι. Τα **μήκη κύματος του ορατού φάσματος** (400-700 nm), έχουν τον περιορισμό που **προκαλεί η ισχυρή σκέδαση** του φωτός, ο οποίος καθιστά δύσκολη την απεικόνιση σε βάθος μεγαλύτερο από 1 mm ή 2 mm. Επομένως, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μήκη κύματος στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (400-700 nm), όπως QLF ($\lambda > 520$ nm), LF ($\lambda = 655$ nm), και DIFOTI η οποία χρησιμοποιεί υψηλής έντασης λευκό φως, ιδιαίτερα περιορίζεται από σκέδαση. Μέθοδοι που χρησιμοποιούν μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπως στην NIR (780-1550 nm), μπορούν να διαπεράσει τον ιστό πιο βαθιά. Η βαθύτερη διείσδυση είναι ζωτικής σημασίας για την διαφανοσκόπηση (Transillumination) TI μέθοδο. Η έρευνα έχει δείξει ότι **η αδαμαντίνη έχει υψηλή διαφάνεια στο εύρος NIR (750 nm-1500 nm)** λόγω της ασθενούς σκέδασης και απορρόφησης στους σκληρούς ιστούς σε αυτά τα μήκη κύματος[13].

3.2.9 Απεικόνιση ανάκλασης κοντά στο υπέρυθρο (NIR reflectance imaging) :

Στην τεχνική αυτή, εκπέμπεται στο δόντι φως (ακτινοβολήση) μήκους κύματος μεταξύ 700 και 1500 nm. Η σκέδαση του φωτός στην υγιή αδαμαντίνη μειώνεται σημαντικά στην περιοχή NIR και μελέτες έχουν δείξει ότι η αδαμαντίνη έχει την **υψηλότερη διαφάνεια κοντά στα 1310 nm**. Σε αυτό το μήκος κύματος, ο συντελεστής εξασθένησης είναι μόνο 2 έως 3 cm⁻¹, ο οποίος είναι ένας παράγοντας 20 έως 30 φορές μικρότερος από ό, τι στην ορατή περιοχή. Σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, η απορρόφηση του νερού αυξάνεται σημαντικά και έτσι μειώνει τη διείσδυση του φωτός στην NIR περιοχή. Ακόμη και αν η σκέδαση του φωτός για την υγιή αδαμαντίνη είναι στο ελάχιστο στην NIR περιοχή, ο συντελεστής διασποράς του φωτός της αδαμαντίνης αυξάνεται κατά 2-3 φορές εάν υπάρχει απομετάλλωση πράγμα το οποίο οφείλεται **στο σχηματισμό πόρων** σε παρόμοια κλίμακα μεγέθους με τα μήκη κύματος **οι οποίοι ενεργούν ως σκεδαστές**. Ως εκ τούτου, οι βλάβες της τερηδόνας μπορούν να απεικονισθούν με βέλτιστη αντίθεση στα 1310 nm. Η ανίχνευση γίνεται με υπέρυθρες και ως ανιχνευτές CCD ή ταινία. Σύμφωνα με την Christian Zakian η ευαισθησία είναι > 99% και ειδικότητα 87,5% για βλάβες αδαμαντίνης και ευαισθησία 80% και ειδικότητα >99% για αλλοιώσεις οδοντίνης. Η φύση της τεχνικής αυτής προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι **η ικανότητα να χαρτογραφηθεί η αλλοίωση** αντί της μέτρησης ενός μόνου σημείου, είναι επίσης μη επεμβατική, χωρίς επαφή, και ανεξάρτητη από κηλίδες. Αυτά τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η φασματική

απεικόνιση NIR είναι μία πιθανή κλινική τεχνική για την ποσοτική διάγνωση τερηδόνας και η οποία μπορεί να προσδιορίσει τη παρουσία αλλοιώσεων στις μασητικές περιοχές αδαμαντίνης και οδοντίνης.

3.2.10 Υπέρυθρες-φθορισμός

Υπάρχουν ελάχιστες αναφορές για τη τεχνική αυτή. Στη θεωρία, το δόντι είναι εκτεθειμένο στο φως (ακτινοβολία) με μήκος κύματος μεταξύ **700 και 15000 nm**. Τα φίλτρα Barrier χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση τυχόν φθορισμού. Μελέτες από τον Alfano αναφέρουν έκθεση των δοντιών σε μήκη κύματος άνω των 700 nm. Ανέκδοτες αναφορές αναφέρουν ότι η τεχνική αυτή είναι σε θέση να διακρίνει μεταξύ υγιούς και τερηδονισμένης αδαμαντίνης και οδοντίνης. Περαιτέρω προσπάθειες απαιτούνται για να καθορίσουν εάν το σήμα φθορισμού από την έκθεση σε υπέρυθρη ακτινοβολία είναι μεγαλύτερο από ότι σε άλλα μήκη κύματος. Επιπλέον, **τα αποτελέσματα θερμότητας από την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για το οδοντικό πολφό**, δεδομένης της αυξημένης διείσδυσης και μειωμένης διασποράς ενός μεγαλύτερου μήκους κύματος. Ειδικά συνεκτικές πηγές τέτοιας ακτινοβολίας ήταν σχετικά δύσκολο να υπάρξουν και η ανίχνευση απαιτεί τη χρήση των υπέρυθρων ευαίσθητων ανιχνευτών όπως CCD ή film.

3.2.11 Απεικόνιση με παλμούς Terahertz:

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί **τα κύματα με συχνότητα terahertz** ($= 1,012 \text{ Hz}$ ή **ένα μήκος κύματος περίπου 30μm**) και για να ληφθεί μια εικόνα με εκπομπή ακτινοβολίας terahertz το αντικείμενο τοποθετείται στη διαδρομή της δέσμης. Είναι δυνατόν να καταγραφούν εικόνες χρησιμοποιώντας terahertz ανιχνευτή CCD. Δεν έχει επικίνδυνες θερμικές επιδράσεις, είναι μη ιονίζουσα χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), αλλά το κόστος του εξοπλισμού είναι υψηλό, και απαιτείται προσεκτική ερμηνεία. Έως τώρα στην οδοντιατρική οι εφαρμογές της τεχνική αυτής είναι περιορισμένες, αλλά πολλά υποσχόμενες. Διαμήκης τμήματα με τρία δόντια έχουν δείξει αυξημένη απορρόφηση από αρχόμενες μασητικής περιοχής τερηδόνες και την προφανή ικανότητα να διαφοροποιηθεί η τερηδόνα από την υπομετάλλωση της αδαμαντίνης.

3.2.12 Πολυφωτονική απεικόνιση (Multiphoton Imaging):

Για την πολυφωτονική απεικόνιση των δοντιών χρησιμοποιείτε **υπέρυθρο φως στα 850 nm**. Στη συμβατική απεικόνιση φθορισμού (QLF), ένα μπλε φωτόνιο χρησιμοποιείται για να διεγείρει μία φθορίζουσα ένωση στο δόντι. Στην τεχνική αυτή **δύο φωτόνια υπερύθρων** (με το ήμισυ της ενέργειας του μπλε φωτονίου) **απορροφώνται ταυτόχρονα**. Με την τεχνική αυτή, **ο υγιής ιστός των δοντιών φθορίζει έντονα**, ενώ ο **αλλοιωμένος φθορίζει σε πολύ μικρότερο βαθμό**. Στην πράξη, χρησιμοποιώντας κινητήρες με ακρίβεια micron, μπορεί να **μετακινηθεί το επίπεδο εστίασης** στον ιστό και να καταγραφούν εικόνες τομής από το δόντι για να **σχηματίσουν μια εικόνα 3D**. Η τερηδόνα θα εμφανιστεί ως μια σκοτεινή μορφή με το δόντι να φθορίζει πιο έντονα.

3.3 ΣΥΝΟΨΗ

Η τρέχουσα έρευνα και οι νέες τεχνολογίες έχουν επεκτείνει το οπλοστάσιο των οδοντιάτρων για την έγκαιρη ανίχνευση της τερηδόνας. Προτείνεται το **λέιζερ φθορισμού ως η κορυφαία τεχνολογία που υπάρχει έως τώρα** για την έγκαιρη ανίχνευση τερηδόνας. Εργαλεία όπως το QLF, DIAGNOdent, DIFOTI ή FOTI θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως συμπληρώματα για μια κλινική απόφαση και λειτουργούν κατά κύριο λόγο ως ένα εργαλείο υποστήριξης για την κατασκευή προληπτικών σχεδίων θεραπείας σε συνδυασμό με την εκτίμηση του κινδύνου τερηδόνας. Είναι σημαντικό οι πληροφορίες που εξάγονται από τα εργαλεία αυτά να αξιολογούνται προσεκτικά και να συνυπολογίζονται με επιμέρους παράγοντες των ασθενών και την επαγγελματική εμπειρία πριν γίνει η οριστική διάγνωση και το σχέδιο θεραπείας. **Πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετη βοήθεια διάγνωσης της πρώιμης ανίχνευσης της τερηδόνας και όχι ως δικαιολογία για πρόωρη παρέμβαση.** Ωστόσο, υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα για την κατανόηση και άλλων τεχνικών στον τομέα της οδοντιατρικής. Δυστυχώς, δεν υπάρχει μία συσκευή που να διαθέτει όλα τα πλεονεκτήματα η οποία να μπορεί να χαρακτηριστεί ως ιδανική. Αλλά με τα διαθέσιμα έως τώρα στοιχεία τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.[17]

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Κλινικές εφαρμογές
Optical coherence tomography (OCT)	1) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρακολουθεί ποσοτικά τις αλλαγές των μεταλλικών στοιχείων σε μια αλλοίωση τερηδόνας. 2) Μπορεί να καθορίσει το βάθος της αλλοίωσης.	Περιοχές υψηλού οπισθοσκεδασμού φωτός που δεν σχετίζονται με την ανάπτυξη τερηδόνας μπορεί να οδηγήσουν σε ψευδώς θετικά αποτελέσματα.	Απεικόνιση πρώιμης τερηδόνας των δοντιών στη μεσοδόντια και στη μασητική περιοχή και για την απεικόνιση τερηδόνας υπό εμφράξεις.
Fiber Optic Transillumination (FOTI)	1) Μη ιονίζουσα. 2) Δίνει άμεσα εικόνες.	1) Οι ασβεστοποιήσεις και οι υποασβεστοποιήσεις είναι σημαντικός παράγοντας σύγχυσης.	Για την ανίχνευση των μεσοδόντιων, μασητικών και λείων επιφανειών τερηδόνας.
Quantitative Lightinduced Fluorescence (QLF)	1) Μπορεί παρέχει ποσοτικές παραμέτρους της βλάβης τερηδόνας όπως η περιοχή, το βάθος και ο όγκος. 2) Η εικόνα μπορεί να αποθηκευτεί για μετέπειτα μελέτη.	1) Δεν μπορεί να διαφοροποιηθεί το αν υπάρχει βλάβη τερηδόνας ή υποπλασία. 2) Δεν έχει ικανότητα να ανιχνεύσει μεσοδόντιες αλλοιώσεις. 3) Έχει περιορισμένο βάθος μέτρησης.	Έχει εφαρμογές σε κλινικές δοκιμές, στην εκπαίδευση του ασθενή, καθώς και στην προληπτική κλινική πρακτική. Μπορεί αποτελεσματικά να παρακολουθήσει την απομετάλλωση και επαναμετάλλωση των δοντιών in-vitro. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της πιθανότητας διάβρωσης μιας σειράς στοματικών πλύσεων in vitro. Φανερώνει δευτερογενείς βλάβες τερηδόνας κάτω από αποκαταστάσεις αμαλγάματος.
Laser induced fluorescence (DIAGNOdent)	1) Εύκολη και γρήγορη χρήση. 2) Ασφαλής και μη έκθεση σε ραδιενέργεια (ακτινογραφία).	1) Οι επιφάνειες των δοντιών που αξιολογούνται θα πρέπει να είναι καθαρές και στεγνές. 2) Δεν υπάρχουν αποδεικτικά στοιχεία που επιβεβαιώνει την ανίχνευση μεσοδόντιων ή δευτεροβάθμιας τερηδόνας βλάβες δίπλα σε	Η συσκευή αποδίδει σε λείες επιφάνειες και σε μασητικές περιοχές και σχισμές.

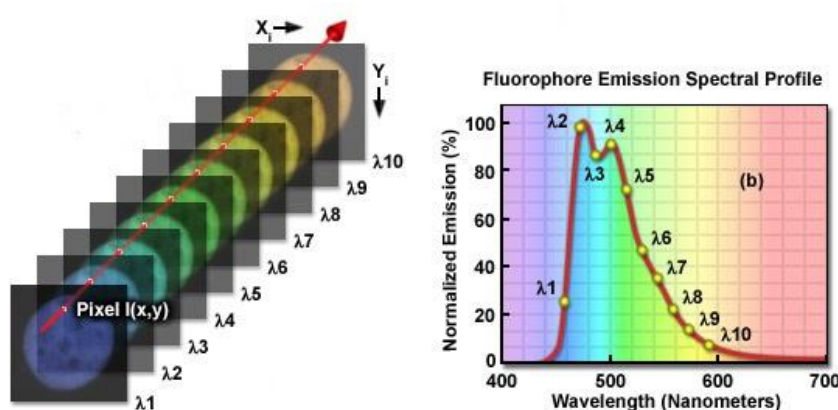
		υπάρχουσες αποκαταστάσεις.	
Transillumination with Near-Infrared light	1)Μειωμένη οπισθοσκέδαση 2) Μπορεί εύκολα να διαφοροποιηθεί από λεκέδες, μελάγχρωση και υπομετάλλωση (φθορίωση)	Περισσότερες μελέτες για τις βλαβερές συνέπειες στον πολφό.	Μια πολλά υποσχόμενη τεχνική απεικόνισης για την ανίχνευση παρουσίας τερηδόνας και μέτρηση της σοβαρότητας της.
Near-Infrared reflectance imaging	1) Η ικανότητα χαρτογράφησης της έκτασης της βλάβης και όχι την ανίχνευση ενός μόνο σημείου μέτρησης 2) μη-επεμβατική, χωρίς επαφή, και ανεπηρέαστη από λεκέδες.	Περισσότερες μελέτες για τις βλαβερές συνέπειες στον πολφό.	Για την ποσοτική διάγνωση τερηδόνας και μπορεί να προσδιοριστεί η παρουσία αλλοιώσεων στις μασητικές επιφάνειες αδαμαντίνης και οδοντίνης.
Infrared fluorescence	Μη-επεμβατική, χωρίς επαφή, και ανεπηρέαστη από λεκέδες.	Περισσότερες μελέτες για τις βλαβερές συνέπειες στον πολφό.	Για την ποσοτική διάγνωση τερηδόνας.
Terahertz Pulse Imaging	1) Σχετική διαφάνεια του ανθρώπινου ιστού προς terahertz ακτίνες. 2) Οι ανεπιθύμητες θερμικές επιδράσεις πιστεύεται ότι είναι απίθανες.	Απαιτείτε ειδική ερμηνεία της εικόνας, αφού τα κύματα terahertz απορροφούνται σε μεγάλο βαθμό από το νερό.	Οι εφαρμογές αυτής της τεχνικής είναι περιορισμένες, αλλά πολλά υποσχόμενες.
Multiphoton Imaging	Ικανή να συλλέγει πληροφορίες έως 500 microns βάθος.	Μπορεί να προκαλέσει βλάβη στους ιστούς, αλλά αυτό διορθώνεται με τη χρήση εξαιρετικά βραχέων παλμών.	Επί του παρόντος η τεχνική έχει εφαρμοστεί μόνο in-vitro.

Πινάκας 3.1 Σύνοψη οπτικών μεθόδων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Φασματική απεικόνιση

Η φασματική απεικόνιση (SI) συνδυάζει φασματοσκοπία και απεικόνιση. Μια φασματική κάμερα παρέχει φασματικές πληροφορίες σε κάθε pixel ενός δισδιάστατου ανιχνευτή πίνακα.[18] Τα συστήματα φασματικής απεικόνισης απαιτούν ένα τριών διαστάσεων σύνολο δεδομένων φασματικής και χωρικής πληροφορίας, που είναι γνωστή ως φασματικός κύβος. Ο φασματικός κύβος μπορεί να θεωρηθεί ως μια στοίβα εικόνων όπου η κάθε μια από αυτές αποκτήθηκαν σε διαφορετικό μήκος κύματος. Συνδυάζοντας χωρική και φασματική πληροφορία μεγάλες δυνατότητες ανοίγονται στον τομέα της μη καταστρεπτικής/επεμβατικής έρευνας ποικίλων προς μελέτη δειγμάτων.

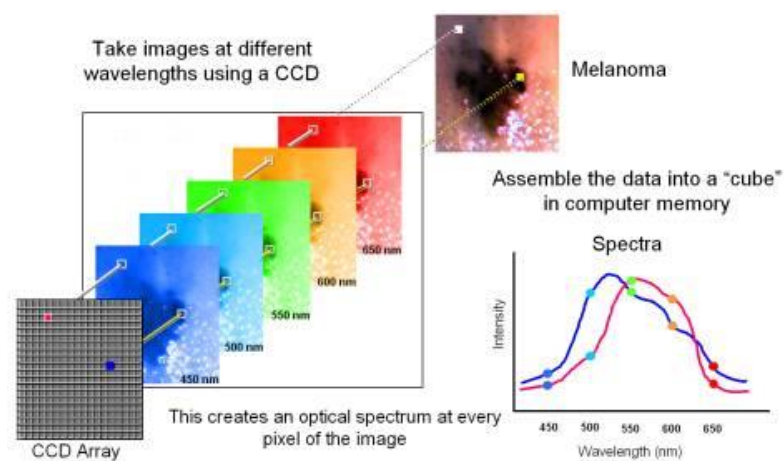
Διαφορετικοί τύποι και τρόποι φασματοσκοπίας υπάρχουν, ανάλογα με την οπτική ιδιότητα που πρόκειται να μετρηθεί, συγκεκριμένα: απορρόφηση, εκπομπή (φθορισμός, φωσφορισμός), σκέδαση (Rayleigh ελαστική, Raman ανελαστική) κλπ. Καθώς το φως ταξιδεύει μέσα στο δείγμα, τα φωτόνια υπόκεινται στο φαινόμενο της απορρόφησης, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπή φθορισμού και πολλαπλή σκέδαση λόγω των τοπικών μεταβολών του δείκτη διάθλασης. Τα φασματόμετρα μετρούν την ένταση του φωτός που εξέρχεται από το δείγμα ως συνάρτηση του μήκους κύματος.



Εικ. 4.1 Φασματικός κύβος, φάσμα εκπομπής φθορισμού για συγκεκριμένο pixel.

Το φως το οποίο συλλέγεται περνά μέσα από ένα στοιχείο διασποράς φωτός, το οποίο χωρίζει τα χωρικά μήκη κύματος φωτός επάνω στην επιφάνεια ενός οπτικού αισθητήρα πίνακα, ο οποίος συνδέεται με έναν υπολογιστή για την καταγραφή και την επεξεργασία του φάσματος. Η αναπαράσταση του δείγματος μπορεί να παρέχεται είτε από μία ευρείας ζώνης (π.χ. λευκό φως) είτε από μία στενής ζώνης πηγή φωτός. Στην πρώτη περίπτωση, τα μετρούμενα φάσματα παρέχουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά απορρόφησης και σκέδασης του ιστού. Στη δεύτερη περίπτωση, τα μετρούμενα φάσματα ανιχνεύουν τα χαρακτηριστικά φθορισμού του δείγματος. Ιδιαίτερα, σε σταθερή κατάσταση φασματοσκοπίας φθορισμού, μια στενής ζώνης πηγή φωτός χρησιμοποιείται για τη διέγερση φθορισμού, όπως τα γνωστά λέιζερ ή LED ή φιλτραρισμένες πηγές φωτός, που εκπέμπουν συνήθως στην μπλε-υπεριώδη μπάντα. Ένας ευαίσθητος οπτικός αισθητήρας χρησιμοποιείται για την συλλογή των φασμάτων εκπομπής.

Τα συλλεχθέντα φάσματα είναι ικανά να παρέχουν διαγνωστικές πληροφορίες για την σύνθεση του δείγματος. Διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετική μοριακή δομή και συνεπώς η αλληλεπίδραση τους με το φως καταλήγει σε διαφορετικά φάσματα για κάθε υλικό. Έτσι, είναι ίσως πιθανό να αποκτήσουμε διαφορετικές φασματικές αποκρίσεις για κάθε είδος υλικού. Τα φάσματα αυτά αποτελούν τις φασματικές υπογραφές (spectral signature).



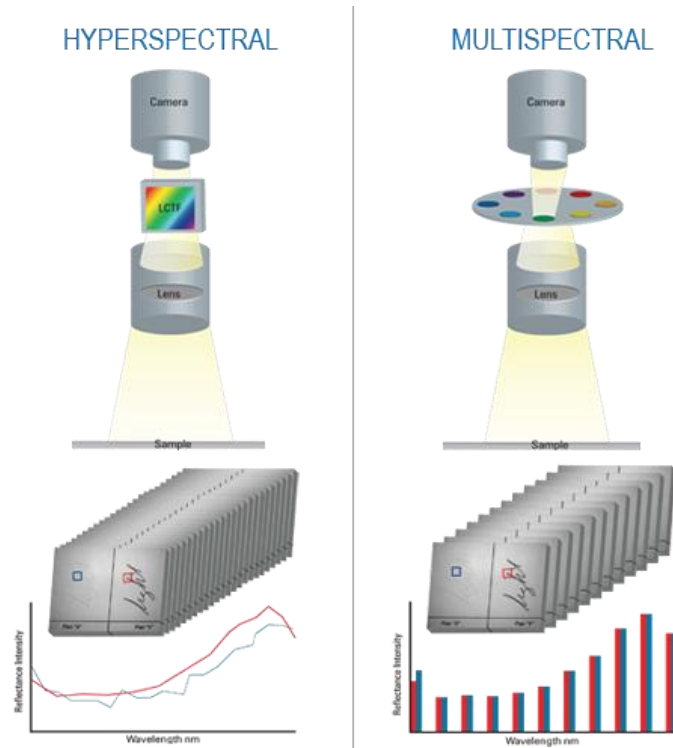
Εικ. 4.2 μη επεμβατική διάγνωση, φάσματα υγιούς και καρκινικού pixel αντίστοιχα.

Απεικόνιση και φασματοσκοπία εξακολουθούν να επηρεάζονται από τις τεχνολογικές καινοτομίες που επιτρέπουν την ταχύτερη απόκτηση υψηλής ποιότητας δεδομένων. Η φασματική απεικόνιση έχει το μοναδικό χαρακτηριστικό να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και της απεικόνισης και της φασματοσκοπίας (υψηλή χωρική και φασματική ανάλυση) σε ένα ενιαίο μέσο. Ως ένα παράδειγμα, μια συσκευή SI με ενσωματωμένο έναν αισθητήρα απεικόνισης με 1000X1000 pixels παρέχει 1 εκατομμύριο επιμέρους φάσματα. Λόγω του τεράστιου μεγέθους του συνόλου των δεδομένων που συλλέγονται και αποθηκεύονται, καθώς και η επεξεργασία και ανάλυση τους απαιτούν γρήγορους υπολογιστές και τεράστια χωρητικότητα μνήμης. Διάφορες μαθηματικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για φασματική ταξινόμηση και κατάτμηση της μετρούμενης εικόνας βάσει των αποκτηθέντων φασματικών χαρακτηριστικών. Τα φάσματα ταξινομούνται με τη χρήση διαφόρων κριτηρίων φασματικής ομοιότητας και οι προκύπτουσες διαφορετικές φασματικές κλάσεις αναγνωρίζονται ως χρωματικά κωδικοποιημένες κλάσεις στην εκάστοτε εικόνα.

Μιμούμενες την ανθρώπινη όραση οι συσκευές απεικόνισης χρωμάτων περιγράφουν συνήθως το χρώμα με τρεις παραμέτρους (τιμές RGB), οι οποίες είναι εύκολο να ερμηνευτούν, δεδομένου ότι μοντελοποιούν τα γνωστά χρώματα. Μοιράζονται όμως και τους περιορισμούς της ανθρώπινης όρασης. Οι έγχρωμες κάμερες και η ανθρώπινη όραση αναγνωρίζουν το εισερχόμενο φως ως τρεις συντεταγμένες χρώματος χάνοντας έτσι σημαντικές φασματικές πληροφορίες. Σε αντίθεση με τις εικόνες που λαμβάνονται με τις κλασικές κάμερες χρώματος (RGB), στην φασματική απεικόνιση οι πληροφορίες δεν είναι διακριτές από το ανθρώπινο μάτι. Μια σειρά εικόνων αποκτάται σε πολλά μήκη κύματος, που παράγουν τον φασματικό κύβο, όπου κάθε εικονοστοιχείο αναπαριστά το φάσμα σε

εκείνο το σημείο. Ουσιαστικά, συλλέγουν μια στοίβα εικόνων, όπου κάθε εικόνα αποκτάται σε μια στενή φασματική ζώνη και όλες μαζί συνθέτουν το φασματικό κύβο.

Μια κάμερα συστήματος φασματικής απεικόνισης αποτελείται από έναν μονόχρωμο αισθητήρα, ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο μηχανισμό χωρικής ή φασματικής σάρωσης, οπτικά εργαλεία απεικόνισης και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την αποθήκευση, την απεικόνιση της ανάλυσης και της επεξεργασίας των δεδομένων εικόνας. Ηλεκτρονικά ελέγχου συγχρονίζουν την σάρωση και τα δεδομένα που λαμβάνονται, έτσι ώστε ένα σύνολο φασματικών εικόνων να συλλέγεται ως μέλη του φασματικού κύβου. Ο αριθμός των φασματικών ζωνών που είναι ικανό ένα σύστημα φασματικής απεικόνισης να αποκτήσει καθορίζει την διάκριση μεταξύ πολυφασματικής και υπερφασματικής απεικόνισης. Οι συσκευές πολυφασματικής απεικόνισης (MSI) αποκτούν συνήθως 5-20 φασματικές ζώνες, ενώ αυτές της υπερφασματικής απεικόνισης (HSI) αποκτούν μέχρι μερικές εκατοντάδες φασματικές ζώνες χρησιμοποιώντας τεχνολογία LCTFs (Liquid crystal tunable filters) τα οποία είναι οπτικά φίλτρα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ελεγχόμενα στοιχεία υγρών κρυστάλλων για μεταδώσουν το επιλεγμένο μήκος κύματος φωτός και να μην συμπεριλάβουν τα άλλα.



Εικόνα 4.3 Υπερφασματική –Πολυφασματική απεικόνιση

Το γεγονός ότι ο χωρικός και ο φασματικός χρόνος σάρωσης είναι γενικά κρίσιμος, περιορίζει την ικανότητα απόκτησης σωστών φασματικών κύβων μόνο στις περιπτώσεις όπου ο στόχος είναι σταθερός ή φασματικά αμετάβλητος κατά την διαδικασία της σάρωσης του από την συσκευή. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι τα Staring imaging systems τα οποία λειτουργούν με ηλεκτρονικά συντονιζόμενα φίλτρα (electronically

tunable filters-ETF) χωρίς κινούμενα μέρη. Ο χρόνος συντονισμού των φίλτρων είναι ελάχιστος(χιλιοστά του δευτερολέπτου) που επιτρέπει την σύλληψη ενός προεπιλεγμένου αριθμού φασματικών εικόνων σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, η φασματική πληροφορία μειώνεται στο επίπεδο πολυφασματικής απεικόνισης (MSI).

Για τους παραπάνω λόγους τα συστήματα σάρωσης των συσκευών φασματικής απεικόνισης μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την τεχνολογική προσέγγιση που χρησιμοποιούν για την ρύθμιση του μήκους κύματος απεικόνισης. Δύο γενικές κατηγορίες των συσκευών μπορούν να οριστούν ανάλογα με το αν ο μονοχρωμάτορας απεικόνισης τους περιέχει ή όχι κινούμενα μέρη. Στην πρώτη περίπτωση τα μηχανικά μέρη στα οποία είναι τοποθετημένα φίλτρα ή καθρέπτες μεταφράζονται χωρικά ώστε να διαλέξουν το μήκος κύματος απεικόνισης. Η κατηγορία αυτή ως ηλεκτρομηχανολογικά συντονιζόμενα φίλτρα (electromechanical tunable filters - EMTF). Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται σε συστήματα που βασίζονται σε μη κινούμενα οπτικά μέρη στα οποία η αλλαγές φασματικών ζωνών ελέγχονται ηλεκτρονικά μέσω της εφαρμογής τάσης ή ακουστικού σήματος , κλπ. Για το λόγο αυτό, τα μέλη αυτής της κατηγορίας συσκευών είναι γνωστά ως ηλεκτρονικά συντονίσιμα φίλτρα (electronically tunable filters -ETF).

4.1 Σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης εργαστηρίου

Τα πειράματα που πραγματοποιήσαμε έγιναν με το σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης που είναι διαθέσιμο στο εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το σύστημα αυτό βασίζεται σε έναν όλο-οπτικό μονοχρωμάτορα απεικόνισης και παράγει φασματικές εικόνες 5nm Full Width Half Maximum (FWHM), με βήμα ρύθμισης 3nm, στη φασματική ζώνη 360nm – 1550nm. Ο μονοχρωμάτορας είναι συνδεδεμένος με μια ασπρόμαυρη CCD κάμερα και είναι ικανός να παράγει εικόνες σε ένα ποσοστό 15 frames/sec σε πλήρη ανάλυση και περισσότερες από 30 frames/sec σε VGA ανάλυση. Η μετατόπιση των οπτικών στοιχείων των πιο πρόσφατων αποτελεσμάτων στο συντονισμό του μήκους κύματος απεικόνισης εκτελείται με τη βοήθεια μηχανικών χειρισμών που ελέγχονται από τον υπολογιστή μέσω ενός μικροελεγκτή.

Ο συντονισμός του φασματικού εύρους ταιριάζει με το φασματικό εύρος της δυνατότητας απόκρισης (responsivity) του CCD (Charge Couple Device), αλλά μπορεί να επεκταθεί και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, μέχρι τη μέση-υπέρυθρη περιοχή. Το παραγόμενο σήμα ανατροφοδότησης του μονοχρωμάτορα φέρει τις πληροφορίες για την κατάσταση του μεταβλητού φίλτρου, επιτρέποντας κατά συνέπεια το συγχρονισμό του με τη διαδικασία σύλληψης της εικόνας. Ένα ειδικά αναπτυγμένο λογισμικό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του συστήματος και του μονοχρωμάτορα καθώς επίσης και για τη φασματική ανάλυση της εικόνας. Το σύστημα λειτουργεί σε δύο καταστάσεις: την κατάσταση της φασματοσκοπίας και την κατάσταση της φασματομετρίας. Η πρώτη επιτρέπει την τυχαία επιλογή και την απεικόνιση, σε πραγματικό χρόνο, των επιθυμητών φασματικών εικόνων, ενώ η κατάσταση της φασματομετρίας εκτελεί συγχρονισμένα τη φασματική σύλληψη και ανίχνευση της εικόνας και, τελικά, τον υπολογισμό ενός πλήρους φάσματος ανά εικονοστοιχείο εικόνας. Ομοίως και στις δύο περιπτώσεις, μια ειδική

διαδικασία βαθμονόμησης εκτελείται πριν από αυτές τις διαδικασίες απεικόνισης, προκειμένου να αντισταθμιστεί η εξάρτηση μήκους κύματος της απόκρισης των ηλεκτροπτικών μερών του συστήματος, όπως το CCD, ο φωτισμός κ.τ.λ. Ο μονορωμάτορας ανιχνεύει τη συνολική φασματική ζώνη και σε κάθε βήμα το διάφραγμα (shutter) και το gain της κάμερας ρυθμίζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται τιμή λίγο κάτω από 200. Αυτό εξασφαλίζει ότι η δυναμική περιοχή του CCD αξιοποιείται πλήρως. Οι τιμές των shutter και gain, που χρησιμοποιούνται για να λάβουν το άσπρο επίπεδο 255, αποθηκεύονται σε κάθε μήκος κύματος, μαζί με την εικόνα του άσπρου δείγματος, αποτελώντας το σύνολο των στοιχείων βαθμονόμησης του συστήματος.

Οι ρυθμίσεις αυτές προσδιορίζουν το επίπεδο ευαισθησίας της κάμερας, το οποίο αυξάνεται όταν το μήκος κύματος απεικόνισης συντονιστεί σε μικρότερα ή μεγαλύτερα μήκη κύματος, σε σχέση με τη ζώνη των μηκών κύματος όπου επιτυγχάνεται τόσο η μέγιστη ρυθμοαπόδοση του φωτός όσο και η απόδοση του συστήματος. Αυτό καθιστά την απόκρισή του συστήματος, σχεδόν, ανεξάρτητη του μήκους κύματος, διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο φασματική απεικόνιση και φασματομετρία ανεξάρτητες της συσκευής. Οι αποθηκευμένες φασματικές εικόνες του λευκού δείγματος χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των ανωμαλιών της φωτεινότητας της εικόνας εξαιτίας της μη ομοιόμορφης συνάρτησης της οπτικής. Τρέχοντας τον κώδικα για την κατάσταση της φασματομετρίας, που ακολουθεί τη διαδικασία της βαθμονόμησης, το σύστημα εκτελεί συγχρονισμένα τη ρύθμιση του μήκους κύματος απεικόνισης της εικόνας, τη σύλληψη της εικόνας και την αποθήκευση της υπό ανάλυσης περιοχής. Σε κάθε βήμα, η ευαισθησία της κάμερας ρυθμίζεται αυτόματα σύμφωνα με τις αποθηκευμένες τιμές του shutter και gain. Από την αποθηκευμένη “στοίβα” των φασματικών εικόνων, ένα φάσμα μπορεί να υπολογιστεί και να αναπαρασταθεί σε οποιοδήποτε επιλεγμένο χωρικό σημείο της φασματικής εικόνας. Τα φάσματα υπολογίζονται από τις γκρι τιμές της φασματικής στήλης που αντιστοιχεί στο pixel που επιλέγεται. Η χωρική ανάλυση του ανιχνευτή προσδιορίζει τον αριθμό των φασμάτων που δύναται να συλλεχθούν σε ένα κύκλο πειράματος. Με την παραπάνω περιγραφή, ένα εκατομμύριο φάσματα δύναται να συλλεχθούν σε δύο λεπτά, περίπου, χρόνου ανίχνευσης. Τέλος, το σύστημα ενσωματώνει μια γρήγορη διαδικασία αποθήκευσης σε μικρότερη ανάλυση, η οποία μειώνει το χρόνο ανίχνευσης του συστήματος.

4.2 Ταξινόμηση των φασματικών δεδομένων

Όπως έχει συζητηθεί στις προηγούμενες παραγράφους, η φασματική απεικόνιση είτε μακροσκοπική ή μικροσκοπική απεικονίζεται συνήθως σε ένα φασματικό κύβο, ο οποίος διαθέτει μια φασματική και δύο χωρικές διαστάσεις (συντεταγμένες του pixel). Τα δεδομένα SI μεταμορφώνουν τα χρώματα RGB σε μιας υψηλής ανάλυσης τρισδιάστατη αναπαράσταση διανυσμάτων έντασης που αντιστοιχούν σε διαφορετικά μήκη κύματος. Για την ταξινόμηση και την εξαγωγή διαγνωστικής πληροφορίας απαιτείται επεξεργασία και ανάλυση αυτών των φασματικών δεδομένων. Η ταξινόμηση μιας υπερφασματικής εικόνας είναι η διαδικασία της δημιουργίας μιας πληροφοριακής αναπαράστασης της εικόνας, η οποία δείχνει τη χωρική κατανομή κάποιων χαρακτηριστικών διαγνωστικής σημασίας σε μια περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Το πρώτο βήμα για την επεξεργασία των φασματικών δεδομένων με σκοπό την ταξινόμηση τους είναι η δημιουργία ενός συνόλου εκπαιδευσεως (training set). Συνήθως ένα σύνολο εκπαιδευσεως των φασμάτων συλλέγεται για κάθε κατηγορία, με το μέγεθος του σετ να εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του υλικού υπό διερεύνηση. Η κατασκευή ενός βέλτιστου συνόλου εκπαίδευσης εξαρτάται από το πόσο πλήρες και με ακρίβεια είναι η συλλογή φασμάτων διαφόρων κατηγοριών τα οποία διαθέτουμε. Μια διαδικασία ταξινόμησης περιλαμβάνει συνήθως την ανάθεση του κάθε pixel σε μια προκαθορισμένη τάξη. Οι τάξεις θα πρέπει να περιλαμβάνουν όχι μόνο τους στόχους της ανίχνευσης, αλλά και όλες τις άλλες διακριτές κατηγορίες που είναι παρόν στο δείγμα.

Σε γενικές γραμμές, θα πρέπει να καθορίζεται ένας επαρκής αριθμός διαφορετικών κατηγοριών που αντικατοπτρίζουν την πολυπλοκότητα του υλικού έτσι ώστε όλα τα pixel να ταξινομούνται σωστά. Ένα άλλο σημαντικό θέμα, κατά τη συλλογή φασμάτων για την εκπαίδευση, είναι ότι οι τάξεις θα πρέπει να διαχωρίζονται με βάση τα διαθέσιμα φασματικά χαρακτηριστικά. Η χαμηλή διαχωριστικότητα μπορεί να οφείλεται στην ομοιότητα των φασματικών υπογραφών που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κατηγορίες, οι οποίες είναι τα θεμέλια για καθαρά αποτελέσματα, ανεξάρτητα από την αποτελεσματικότητα του ταξινομητή.

Η συζήτηση μέχρι τώρα βασίστηκε στην υπόθεση ότι μόνο μία τάξη μπορεί να εκχωρηθεί σε μία περιοχή που αντιστοιχεί σε ένα pixel. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, συχνά αυτή η περιοχή αποτελείται από διάφορα συστατικά αναμειγμένα και ως εκ τούτου το φάσμα από αυτό το εικονοστοιχείο έχει ασαφή πληροφορία για όλα αυτά τα συστατικά. Αυστηρά μιλώντας, οι πληροφορίες για τα συστατικά των μιγμάτων χάνονται κατά την ταξινόμηση ολόκληρων pixels. Η αναγνώριση ότι τα pixels-ενδιαφέροντος είναι συχνά ένας συνδυασμός πολλών διαφορετικών συστατικών εισήγαγε την ανάγκη για την ποσοτική αποσύνθεση αυτών των μιγμάτων (unmixing) . Η ανάγκη για subpixel ανάλυση αντιμετωπίζεται με φασματικές μεθόδους unmixing.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της απόκτησης διδιάστατων φασματικών πληροφοριών από μία σειρά πλήρων εικόνων, σε αντίθεση με την απόκτηση ενός μόνο σημείου πληροφορίας, είναι ότι τόσο η φασματική και χωρική πληροφορία μπορεί να απεικονίζεται και να εμφανίζεται διεξοδικά με τη βοήθεια των λεγόμενων «θεματικών χαρτών» . Ένας θεματικός χάρτης μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μιας διαδικασίας ταξινόμησης ή unmixing και είναι κατασκευασμένο από διαφορετικά τεχνητά χρώματα ή αποχρώσεις του γκρι για ομάδες pixel τα οποία ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες. Αυτό διευκολύνει την άμεση απεικόνιση των διαφόρων ομάδων pixel που εντοπίστηκαν στις αναγνωρισμένες τάξεις.

4.3 Τρόποι ταξινόμησης

Μετά την εξαγωγή των κατάλληλων χαρακτηριστικών που εκπροσωπούν τις διάφορες τάξεις, το επόμενο βήμα είναι να εκχωρηθεί κάθε pixel σε μία από αυτές τις κατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο ομοιότητας με τη βοήθεια μιας μεθόδου ταξινόμησης. Σε γενικές γραμμές η επιλογή του προτύπου ταξινόμησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εκάστοτε εφαρμογή και απαιτεί εκτεταμένη έρευνα για τον προσδιορισμό του

καταλληλότερου αλγορίθμου. Η ταξινόμηση μιας εικόνας μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας είτε **supervised** είτε **unsupervised** τεχνικές, ανάλογα με το αν υπάρχει ανθρώπινη συμμετοχή στη διαμόρφωση του μοντέλου ταξινόμησης.

Στην supervised μέθοδο εκμεταλλευόμαστε την εκ των προτέρων γνώση όσον αφορά τα φασματικά χαρακτηριστικά ορισμένων αντικειμένων στον φασματικό κύβο. Έπειτα, χρησιμοποιούμε την πληροφορία αυτή σαν σύνολο εκπαίδευσης και εκπαιδεύουμε το σύστημά μας. Οι unsupervised μέθοδοι βασίζονται στην αυτόματη ομαδοποίηση των pixels που έχουν παρόμοια στατιστικά και φασματικά χαρακτηριστικά (μέσα, τυπικές αποκλίσεις, πίνακες συμμεταβλητότητας κ.α), σε μοναδικές ομάδες (clusters), σύμφωνα με στατιστικά καθορισμένα κριτήρια.

Οι μέθοδοι ταξινόμησης μπορούν επίσης να διαχωριστούν σε παραμετρικές (parametric) και μη παραμετρικές (non – parametric). Στην παραμετρική ταξινόμηση τα γνωρίσματα της κάθε τάξης ορίζονται από την PDF (συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας) της τάξης, οπότε οι παράμετροί της πρέπει να είναι γνωστοί ή να προσδιορίζονται στη διαδικασία της εκπαίδευσης. Ένα παράδειγμα μίας PDF είναι η πολυδιάστατη Gaussian κατανομή, με κάθε διάσταση να αντιστοιχεί σε μία φασματική ζώνη και με παραμέτρους το μέσο διάνυσμα (mean vector) και τον πίνακα συμμεταβλητότητας (covariance matrix). Στην μη παραμετρική ταξινόμηση η PDF της κάθε τάξης δεν μας ενδιαφέρει.

Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει προηγούμενη γνώση για την ακριβή θέση των αντιπροσωπευτικών δειγμάτων (φασματική υπογραφή) μιας κλάσης, οι unsupervised μέθοδοι παρέχουν μια επισκόπηση των διάφορων ομάδων που υπάρχουν στο σύνολο των δεδομένων. Σε σύνθετα βιοϊατρικά δείγματα για παράδειγμα δεν είναι πάντοτε δυνατό να γίνει διάκριση μοναδικών φασματικών υπογραφών άρα και του κατάλληλου συνόλου εκπαίδευσης. Έτσι η unsupervised ταξινόμηση απαιτεί συνήθως τον προσδιορισμό μόνο ενός μικρού πλήθους παραμέτρων που αφορούν τον αριθμό και τα χαρακτηριστικά των ομάδων. Αρκετοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης υπάρχουν οι οποίοι επαναληπτικά (τοπικά) εντοπίζουν την ελάχιστη μέση απόσταση από κάθε pixel στο πλησιέστερο μέσο μια ομάδας. Ο K-means (MacQueen 1967) είναι ένας πολύ γνωστός unsupervised αλγόριθμος εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται ευρέως για την ταξινόμηση δεδομένων.

4.3.1 Supervised μέθοδοι ταξινόμησης οι οποίοι βασίζονται σε μετρήσεις ομοιότητας αποστάσεων.

Spectral Angle Mapper (SAM)

Ο αλγόριθμος SAM είναι ένας μη παραμετρικός, supervised ταξινομητής απόστασης, που θεωρεί κάθε pixel σαν ένα διάνυσμα στον n - διάστατο χώρο, όπου n είναι ο αριθμός των μπαντών στον φασματικό κύβο.[19] Ως διάνυσμα έχει δύο χαρακτηριστικά, μήκος και κατεύθυνση. Το μήκος του διανύσματος αναπαριστά την φωτεινότητα του pixel και η κατεύθυνση τα φασματικά χαρακτηριστικά του.

Η φασματική υπογραφή είναι η γωνία μεταξύ της αρχής του n – διάστατου χώρου και του διανύσματος. Η διαδικασία της ταξινόμησης αποτελείται από την σύγκριση των γωνιών ανάμεσα στο pixel – διάνυσμα και ορισμένα διανύσματα αναφοράς, των οποίων ο

αριθμός ορίζει και τον αριθμό των τάξεων. Τότε, κάθε pixel ταξινομείται στην τάξη που αναπαριστάται από το διάνυσμα αναφοράς που οδηγεί στην μικρότερη γωνία. Τα διανύσματα αναφοράς επιλέγονται από το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης (training dataset), είτε από τις φασματικές βιβλιοθήκες (spectral libraries) ή τυχαία από τον φασματικό κύβο.

Ο SAM δεν επηρεάζεται από τον φωτισμό, αφού χρησιμοποιεί μόνο την κατεύθυνση του διανύσματος και όχι το μήκος του. Έστω x, y δεδομένα M διάστασης, ο SAM υπολογίζει την γωνία μεταξύ των δύο φασμάτων ως εξής :

$$\angle(x, y) = ||x|| ||y|| \cos(x, y) \rightarrow$$

$$\theta(x, y) = SAM(x, y) = \cos^{-1} \left(\frac{\langle x, y \rangle}{||x|| ||y||} \right), 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

Normalized Euclidean Distance (NEUC)

Η Ευκλείδεια απόσταση είναι η συνηθισμένη απόσταση μεταξύ δύο φασμάτων, που θα μπορούσε κάποιος να μετρήσει με ένα χάρακα, το οποίο μπορεί να αποδειχτεί με επαναλαμβανόμενη εφαρμογή του Πυθαγόρειου θεωρήματος. Έστω x, y δεδομένα M διάστασης, ο NEUC υπολογίζει την απόσταση μεταξύ των δύο φασμάτων ως εξής :

$$\Delta(x, y) = ||x - y|| = \sqrt{\sum_{i=1}^M (x_i - y_i)^2}$$

Ο NEUC υπολογίζει αποτελεσματικά την Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ δύο φασμάτων, διαιρώντας με τις μέσες τιμές των δειγμάτων. Αυτό μετατρέπει τον NEUC σε σταθερό στην πολλαπλασιαστική κλίμακα :

$$NEUC \left(\frac{x}{\bar{x}}, \frac{y}{\bar{y}} \right) = \left\| \frac{x}{\bar{x}} - \frac{y}{\bar{y}} \right\| = \sqrt{\sum_{i=1}^M \left(\frac{x_i}{\bar{x}} - \frac{y_i}{\bar{y}} \right)^2}$$

Spectral Correlation Mapper (SCM)

Η συνάρτηση της απόστασης αυτής υπολογίζει αποτελεσματικά μια στατιστική μονάδα μέτρησης της ανεξαρτησίας, γνωστή ως συντελεστής συσχέτισης Pearson. Στην θεωρία πιθανοτήτων και στην στατιστική, η συσχέτιση (που μετριέται συχνά ως συντελεστής συσχέτισης), υποδεικνύει την δύναμη και την κατεύθυνση μίας γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών. Ο SCM αναφέρεται ως μία βελτιωμένη έκδοση του SAM, εφόσον αναγνωρίζει την αρνητική συσχέτιση.

$$SCM(x, y) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

όπου x, y είναι τα δύο M – διάστατα φάσματα που συγκρίνονται και , είναι οι μέσες τιμές δειγμάτων αντίστοιχα. Επίσης, μπορεί να οριστεί και μία γωνία συσχέτισης ως εξής: [2]

$$SCA(x, y) = \cos^{-1} \left(\frac{SCM(x, y) + 1}{2} \right)$$

Spectral Information Divergence (SID)

Ο SID είναι μία μετρική απόστασης που προέρχεται από την ιδέα της απόκλισης στην θεωρία πληροφορίας, όπου x, y μπορούν να επιδειχτούν σαν τυχαίες μεταβλητές, προσδιορίζοντας κατάλληλες κατανομές πιθανότητας :

$$P_j = \frac{x_j}{\sum_{i=1}^M x_i}, \quad P_j = \frac{y_j}{\sum_{i=1}^M y_i} \quad \text{όπου } p = \{p_m\}_{m=1}^M, \quad q = \{q_m\}_{m=1}^M \text{ είναι τα επιθυμητά}$$

διανύσματα πιθανοτήτων που προκύπτουν από τα pixel – διανύσματα x, y αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας τα p, q , ο SID ορίζεται ως :

$$SID(x, y) = D(x||y) + (y||x), \quad \text{όπου}$$

$$D(x||y) = \sum_{i=1}^M p_i \log \left(\frac{p_i}{q_i} \right) \quad \text{και} \quad D(y||x) = \sum_{i=1}^M p_i \log \left(\frac{q_i}{p_i} \right).$$

Ο SID θεωρεί κάθε pixel σαν τυχαία μεταβλητή και χρησιμοποιεί το φασματικό του ιστόγραμμα για να ορίσει μία κατανομή πιθανότητας. Έπειτα, μετράει την ασυμφωνία των πιθανοκρατούμενων συμπεριφορών, ανάμεσα στα φάσματά τους. Ο όρος $D ||$ ονομάζεται σχετική εντροπία του y σε σχέση με το x , που είναι επίσης γνωστό ως συνάρτηση πληροφορίας Kullack – Leihler.

[2] Spectral Gradient Angle (SGA)

Ο SGA περιγράφει τις επιφάνειες ανάκλασης και είναι σταθερός στην γεωμετρία της τοποθεσίας συμβάντος και στον προσπίπτον φωτισμό, για επίπεδες και διάχυτες επιφάνειες. Οι σταθερές ιδιότητες του SGA εμφανίζονται εξετάζοντας τον ρυθμό αλλαγής στην ένταση ανάκλασης. Η SGA ορίζεται ως εξής :

$$SGA(x, y) = \cos^{-1} \left(\frac{\left\langle \frac{d \ln[I(x, \lambda)]}{d \lambda}, \frac{d \ln[I(y, \lambda)]}{d \lambda} \right\rangle}{\left\| \frac{d \ln[I(x, \lambda)]}{d \lambda} \right\| \left\| \frac{d \ln[I(y, \lambda)]}{d \lambda} \right\|} \right), \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

όπου , $\frac{d \ln[I(x, \lambda)]}{d \lambda}, \frac{d \ln[I(y, \lambda)]}{d \lambda}$ είναι τα μερικά παράγωγα των x, y M – διάστατων εντάσεων σε σχέση με το λ .

Στόχος διπλωματικής εργασίας

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω βιβλιογραφική επισκόπηση καλούμαστε να αναγνωρίσουμε το **διαγνωστικό κενό** που υπάρχει στις υπάρχουσες οπτικές και μη, μεθόδους. Διαπιστώνεται ότι όλες οι έως τώρα μελέτες δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδανικές. Βασιζόμενοι στην τεχνολογία την οποία διαθέτουμε θα επιχειρήσουμε καινοτόμα πειράματα τα οποία θα καταλήξουν σε έγκυρες και όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικές διαγνωστικές προσεγγίσεις των οδοντικών παθήσεων και κυρίως της τερηδόνας. Επίσης σε συνεργασία με την οδοντιατρική σχολή Αθηνών καταλήξαμε στην ανάγκη ανίχνευσης και χαρτογράφησης των **whitespots** αλλοιώσεων τερηδόνας καθώς και στην εξακρίβωση του **βάθους μιας brownspot** αλλοίωσης.

Δεδομένων των υπάρχουσων μεθόδων ανίχνευσης τερηδόνας παρατηρούμε ότι δεν έχει εφαρμοστεί ξανά σε εμπεριστατωμένη μελέτη η τεχνολογία **υπερφασματικής απεικόνισης**. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθεί χαρτογραφικά η τερηδόνα καθώς και άλλες παθήσεις των δοντιών. Μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την σύσταση και την δομή, σε κάθε χωρικό σημείο της περιοχής που μελετάμε. Το κύριο πλεονέκτημα που αποσκοπούμε να αποκομίσουμε είναι η αντικειμενικότητα. Τα υπερφασματικά δεδομένα προσφέρουν λεπτομερείς πληροφορίες για τα δείγματα δοντιών και αποκαλύπτουν φασματικά χαρακτηριστικά που δεν είναι ορατά με άλλο τρόπο. Χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος φάσματος για την δημιουργία του φασματικού κύβου παρέχεται η δυνατότητα ακριβέστερης καταγραφής των φασματικών υπογραφών της κάθε πάθησης. Αντιθέτως, άλλες μέθοδοι καταγράφουν πολλές φορές ψευδώς θετικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπου στοιχεία διαφορετικών παθήσεων παρουσιάζουν ίδια φασματική συμπεριφορά στο συγκεκριμένο μήκος κύματος το οποίο η κάθε μέθοδος λειτουργεί.

Στη συνέχεια θα γίνει μια προσπάθεια απεικόνισης σε συγκεκριμένα μήκη κύματος πέραν του ορατού ώστε να ανιχνευτούν τυχόν οδοντικές αλλοιώσεις οι οποίες δεν είναι εμφανείς στην υπερφασματική απεικόνιση (420nm - 1000nm) την οποία αναλύσαμε παραπάνω. Παρατηρείτε ότι δεν υπάρχει καμία μέθοδος η οποία να χρησιμοποιεί καθαρά υπεριώδες φως παρότι έχουν ανακαλυφθεί οι διαγνωστικές ικανότητες πρώιμης μορφής τερηδόνας με χρήση μπλε φωτός πάνω από τα 400nm. Για το λόγο αυτό, θα επικεντρωθούμε στην απεικόνιση στο **υπεριώδες φως** λαμβάνοντας μετρήσεις σε σκοτεινό δωμάτιο ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις μας από φως διαφορετικού μήκους κύματος. Έτσι πήραμε αποτελέσματα με διάφορους τρόπους, είτε εκμεταλλευόμενοι την ανάκλαση του υπεριώδους φωτός και καταγραφή του, είτε τον φθορισμό που προκαλεί το υπεριώδες φως και καταγραφή του φθορισμού αυτού, είτε συνδυασμό και των δύο. Εκ των προτέρων γνωρίζουμε από άλλες μεθόδους (QLF, VistaProof) ότι σε χαμηλά μήκη κύματος απεικονίζεται η εξωτερικές επιφάνειες των δοντιών και μπορούμε έτσι να παρατηρήσουμε καλύτερα μια εξωτερική αλλοίωση όπως είναι η απομετάλλωση του οδοντικού ιστού. Άρα με τα πειράματα αυτά θα γίνει προσπάθεια εντοπισμού των whitespots τα οποία είναι σε ένα βαθμό πρώιμη μορφή τερηδόνας και όπως θα δούμε τα αποτελέσματα είναι πολύ θετικά και πρωτοποριακά.

Σε αντίθεση όμως με τα whitespots τα οποία εντοπίζονται στις εξωτερικές επιφάνειες των δοντιών , ένα πρόβλημα που καλούμαστε να ερευνήσουμε και να ποσοτικοποιήσουμε είναι το βάθος στο οποίο έχει φθάσει ένα brownspot. Για την περίπτωση αυτή θα προσπαθήσουμε να εκμεταλλευτούμε την ιδιότητα της αδαμαντίνης να διαφανίζει κάτω από την επίδραση **υπέρυθρου φωτός** ώστε να φανερωθεί το βάθος της αλλοίωσης.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Υπερφασματική απεικόνιση τερηδόνας

5.1 Φασματική απεικόνιση διάχυτης ανάκλασης με πόλωση

Η πρώτη φάση της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση εξοπλισμού του εργαστηρίου οπτοηλεκτρονικής του πολυτεχνείου Κρήτης:

- Η υπερφασματική κάμερα, η οποία βασίζεται σε έναν ολο-οπτικό μονοχρωμάτορα απεικόνισης.
- Μία πηγή αλογόνου με κατευθυνόμενη δέσμη φωτός μέσω οπτικής ίνας και κατάληξη σε δακτύλιο.
- Δύο πολωτές φωτός (πολωτικό φίλτρο).

Επιπλέον, απαραίτητα υλικά για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι τα 12 δείγματα δοντιών τα οποία χρησιμοποιήσαμε *in vitro*.

5.1.1 Διάταξη του πειράματος:

Η υπερφασματική κάμερα τοποθετήθηκε στην κοντινότερη δυνατή απόσταση από το προς μέτρηση δείγμα. Χρησιμοποιήθηκε ο πρόσθετος φακός με δυνατότητα χειροκίνητης εστίασης στο δείγμα. Ενδιάμεσα του δείγματος δοντιού και της κάμερας τοποθετήθηκαν κατά σειρά ο πρώτος πολωτής, ο δακτύλιος φωτισμού της πηγής αλογόνου και έπειτα ο δεύτερος πολωτής σε σχήμα δακτυλίου .

Η πειραματική διάταξη φαίνεται καλύτερα στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5.1 Διάταξη πειράματος, πηγή φωτός δακτυλίου, πολωτές, υπερφασματική κάμερα

5.1.2 Διαδικασία πειράματος

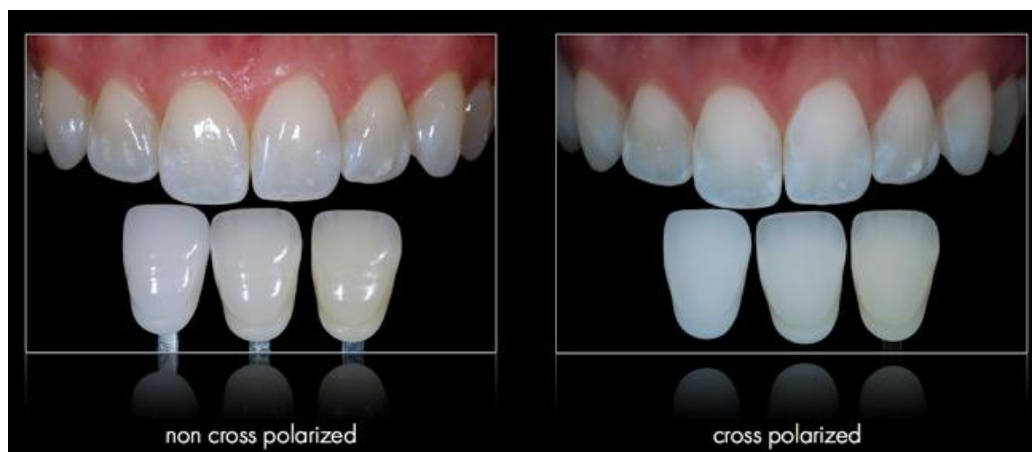
Τα βήματα που ακολουθήσαμε κατά τη διαδικασία του πειράματος:

Πόλωση φωτός

Ο σκοπός για τον οποίο χρησιμοποιήσαμε πολωτές είναι για να πολώσουμε γραμμικά το φώς έτσι ώστε να μειώσουμε το φαινόμενο του κορεσμού (εμφανίζεται ως γυαλάδα στις φασματικές φωτογραφίες).

Ένας πολωτής επιτρέπει την πλήρη διέλευση όλων των κυμάτων φωτός που είναι πολωμένα στο ίδιο επίπεδο με το υλικό του πολωτικού φίλτρου και ανακόπτει όλα τα κύματα που είναι πολωμένα κάθετα στο επίπεδο του υλικού του πολωτικού φίλτρου. Έτσι χρησιμοποιώντας 2 πολωτικά φίλτρα και περιστρέφοντας το ένα από τα δύο ώστε το επίπεδο του ενός να είναι σε γωνία 90° από του άλλου μπορούμε να επιτύχουμε ανακοπή του πολωμένου φωτός. Όταν τα επίπεδα των δύο πολωτών είναι 0° (δηλαδή συμπίπτει το επίπεδο) το πολωμένο φως διέρχεται αφιltrάριστο. Στην περίπτωση μας ρυθμίσαμε τα δύο φίλτρα έτσι ώστε να έχουν γωνία ενδιάμεση $0^\circ - 90^\circ$ όπου το πολωμένο φως διέρχεται μερικώς σε βαθμό που να ανακόπτει το κορεσμό αλλά να μην μειώνει το φως παραπάνω

από όσο χρειάζεται ώστε να εξαλείφονται οι ανακλάσεις, να έχει ζωντανότερα (πιο κορεσμένα) χρώματα αλλά και καλύτερη αντίθεση - διαύγεια η τελική φωτογραφία.



Εικόνα 5.2 μη πολωμένη - πολωμένη λήψη

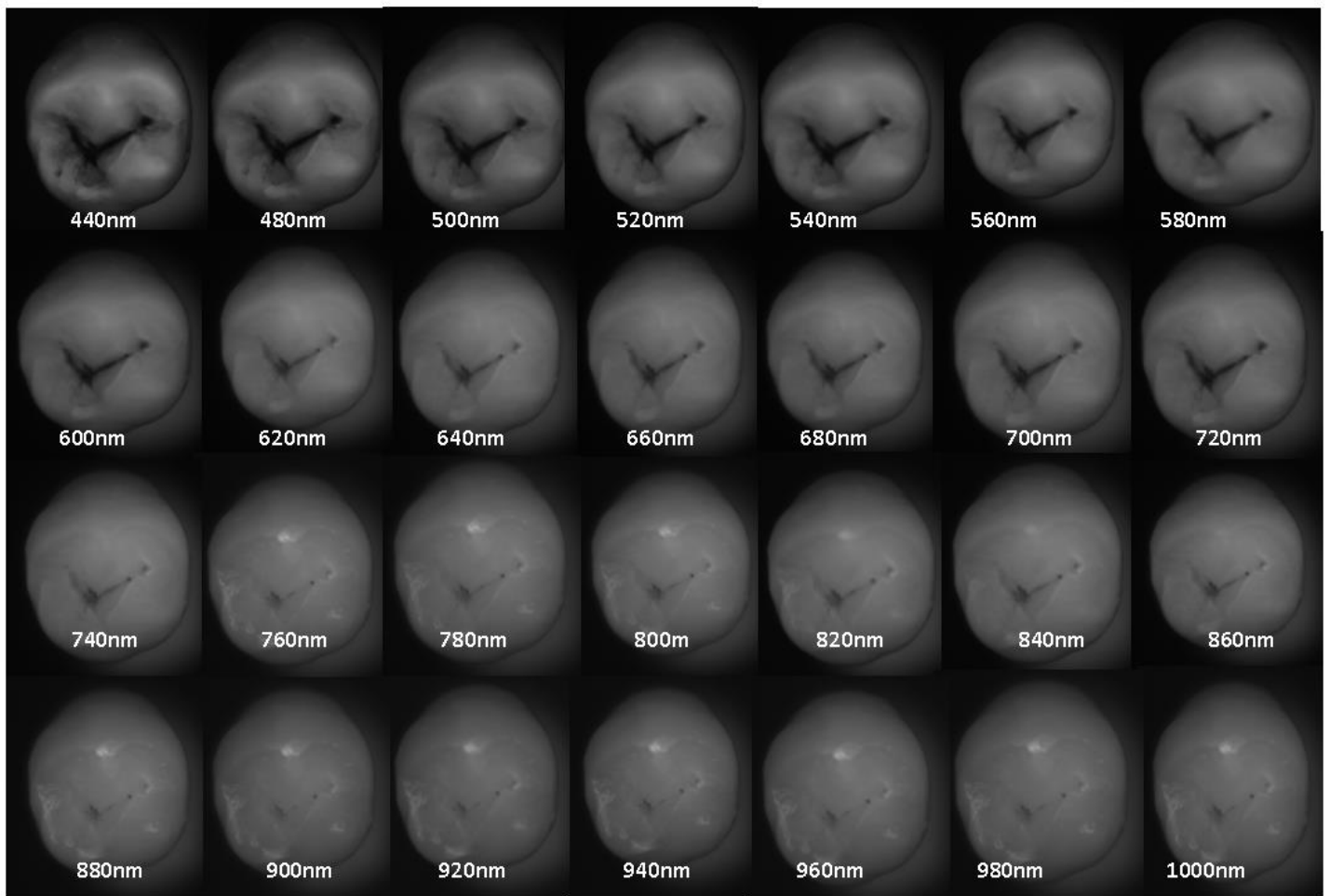
Παρατήρηση:

Οι συνθήκες φωτισμού δεν θα μπορούσαν να αλλάξουν ώστε να έχουμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα καθώς χρησιμοποιήσαμε όλη την ισχύ της πηγής αλογόνου. Λιγότερη ισχύ έδινε χειρότερα αποτελέσματα ανεξάρτητα από την θέση των πολωτών.

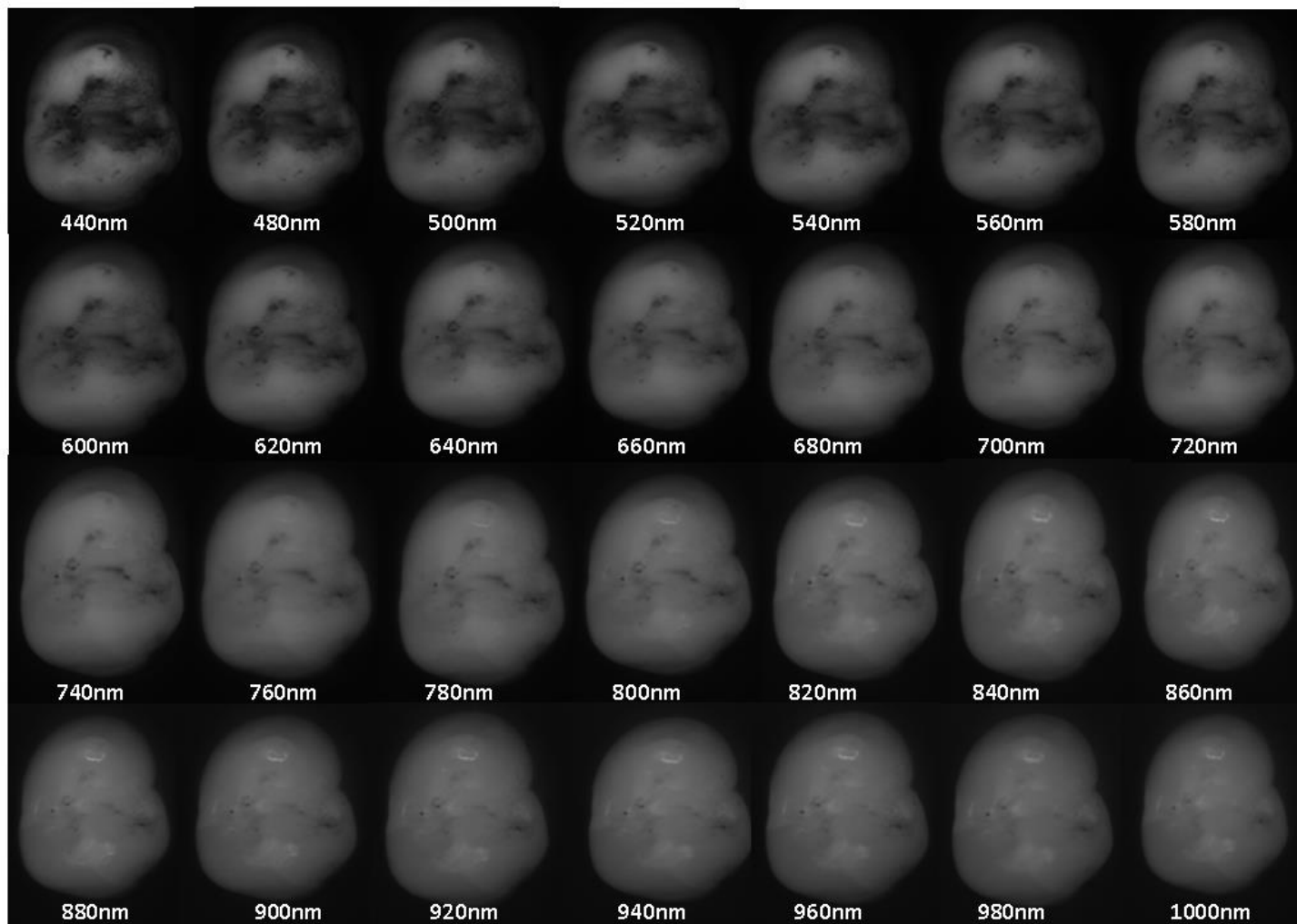
Απόκτηση του φασματικού κύβου

Αρχικά μέσω της καθιερωμένης διαδικασίας πήραμε συνολικά 55 φασματικούς κύβους για κάθε ενδιαφέρον περιοχή και των 12 δειγμάτων δοντιών που έχουμε στη διάθεση μας. Οι ενδιαφέρουσες περιοχές είναι αυτές οι οποίες παρουσιάζουν από μία ελάχιστη αλλοίωση τερηδόνας μέχρι και περιοχές με τερηδόνα τελικού σταδίου και βρίσκονται είτε στις μασητικές επιφάνειες είτε στις όμορες επιφάνειες των δοντιών. Κατά την απόκτηση του κάθε φασματικού κύβου χρησιμοποιήσαμε συνολικά 29 μπάντες πλάτους 20 nm η κάθε μία από τα 440 έως και τα 1000nm. Αποκλείστηκε η φασματική ζώνη στα 420 nm λόγω επανειλημμένης αποτυχίας της κάμερας να σταθεροποιήσει το εξαγόμενο φάσμα.

Για το πρώτο δόντι, παρουσιάζεται παρακάτω ο φασματικός κύβος που προέκυψε κάνοντας χρήση της υπερφασματικής κάμερας.



Εικόνα 5.3 Φασματικός κύβος



Εικόνα 5.4 Φασματικός κύβος

5.1.3 Μελέτη των φασμάτων ανάκλασης που προέκυψαν από τους παραπάνω φασματικούς κύβους.

Έχοντας στη διάθεσή μας τους φασματικούς κύβους τώρα είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε την περαιτέρω ανάλυση με σκοπό να ταξινομήσουμε το κάθε εικονοστοιχείο (pixel). Για να γίνει αυτό θα χρειαστεί να μελετήσουμε τα φάσματα που προέκυψαν με σκοπό να δημιουργήσουμε ένα διαγνωστικό κριτήριο με το οποίο θα μπορέσουμε να κατηγοριοποιήσουμε την ύπαρξη τερηδόνας σε κάθε περιοχή.

Παρατηρώντας φάσματα από διάφορες περιοχές διακρίνουμε μεγαλύτερη απορρόφηση φωτός σε τερηδονισμένες περιοχές άρα και μικρότερη ένταση διάχυτης ανάκλασης σε αυτές. Αυτό οφείλεται στο ότι τα χρωμοφόρα βακτηρίδια που είναι παρόντα στην τερηδόνα έχουν μεγάλη απορρόφηση στην μπλέ - πράσινη φασματική περιοχή, οπότε η φασματική ένταση της ανάκλασης μειώνεται στην περιοχή 400nm - 600nm. Η μέγιστη διαφορά παρατηρείτε στα 440 nm ενώ όσο μεγαλώνει το μήκος κύματος η ένταση αυξάνεται σταδιακά μέχρι και τα 900 nm όπου η ένταση μιας υγιούς περιοχής είναι ίση με μία τερηδονισμένη. **Άρα το διαγνωστικό μας κριτήριο θα είναι η ποσοστιαία διαφορά της έντασης από τα 420nm έως τα 900nm για κάθε εικονοστοιχείο.**

Στο συμπέρασμα αυτό καταλήξαμε αφότου παρατηρήσαμε τα φάσματα από κάθε κατηγορία περιοχής (είτε υγιής είτε τερηδονισμένη είτε σε ενδιάμεση κατάσταση) λαμβάνοντας δείγματα φασμάτων από όλα τα δόντια όπου φάνηκε ότι τα φάσματα έχουν την ίδια ποσοστιαία διαφορά έντασης.

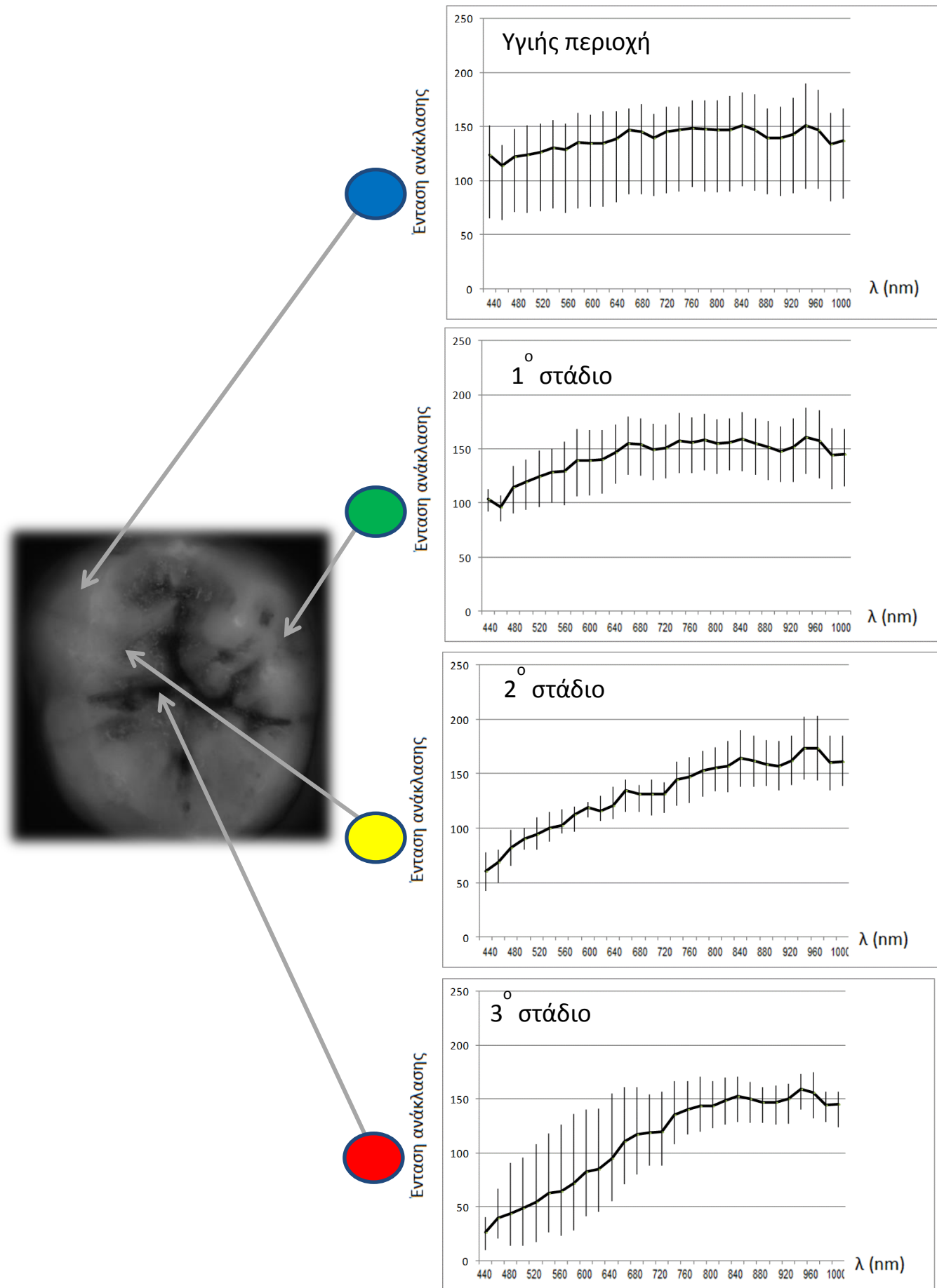
Ο υποκειμενικός παράγοντας δε μπορούσε να αποφευχθεί καθώς στη θεώρησή μας εμείς κρίναμε την κατάσταση στην οποία βρίσκεται κάθε περιοχή χωρίς την διάγνωση κάποιου ειδικού ιατρού είτε κάποιου έγκυρου διαγνωστικού συστήματος και χωρίς να είμαστε σίγουροι ότι μια αλλοίωση προέρχεται από τερηδόνα και όχι από κάποια άλλη ασθένεια των δοντιών.

5.1.4 Κατηγοριοποίηση των περιοχών

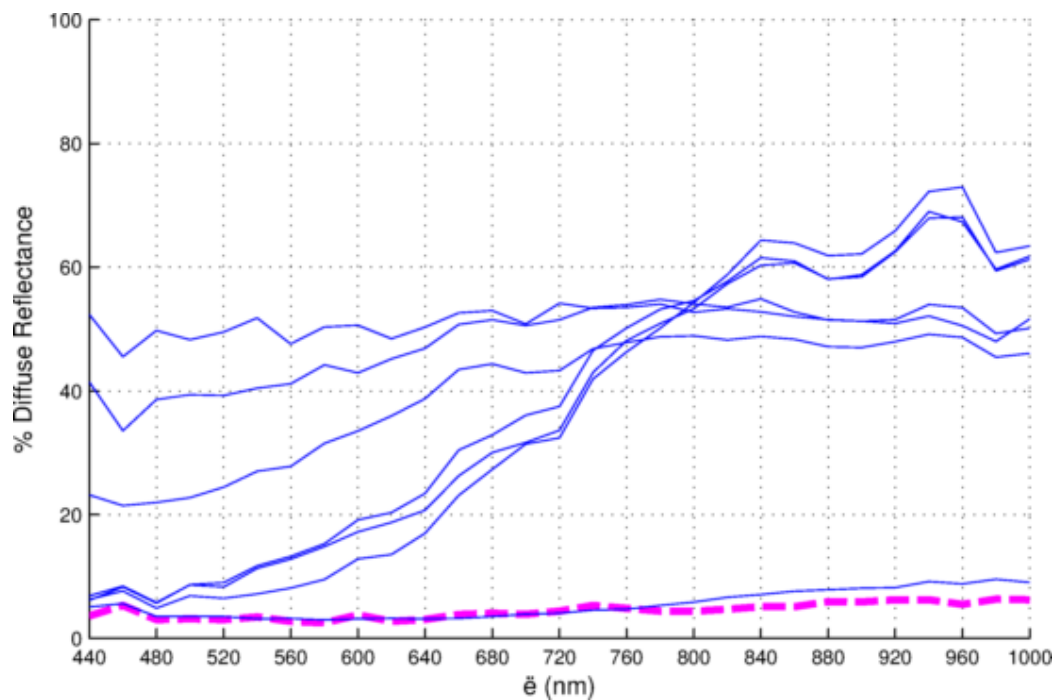
Επόμενο βήμα ήταν η κατηγοριοποίηση των περιοχών με κριτήριο το βαθμό αλλοίωσης τους. Έτσι ακολουθώντας τον οδοντιατρικό διαχωρισμό των σταδίων εξέλιξης της τερηδόνας καταλήξαμε στη δημιουργία τεσσάρων κλάσεων για κάθε στάδιο της νόσου. Την κάθε κλάση την έχουμε αντιστοιχίσει και σε ένα χρώμα, το οποίο θα μας βοηθήσει στη δημιουργία ενός ψευδοχρωματικού χάρτη (colourmap) του δοντιού μέσω του λογισμικού Matlab.

- Υγιής περιοχή (μπλε χρώμα).
- 1^ο στάδιο της νόσου, η αδαμαντίνη στα σημεία απώλειας έχει μετατραπεί σε μια λευκή πορώδη κηλίδα. (πράσινο χρώμα).
- 2^ο στάδιο της νόσου, κατάρρευση της αδαμαντίνης και δημιουργία κοιλότητας (κίτρινο χρώμα).
- 3^ο στάδιο της νόσου, τερηδόνα με κοιλότητα μέχρι την οδοντίνη (κόκκινο χρώμα).

Οι παρακάτω εικόνες παραθέτουν τον μέσο όρο καθώς και την μέγιστη και ελάχιστη τιμή κάθε φάσματος για κάθε κλάση σύμφωνα με τις τιμές κατωφλίου που έχουμε θέσει για κάθε κλάση.



Εικόνα 5.5 Κλάσεις αλλοιώσεων τερηδόνας, Φάσματα ανάκλασης για 29 μπάντες.

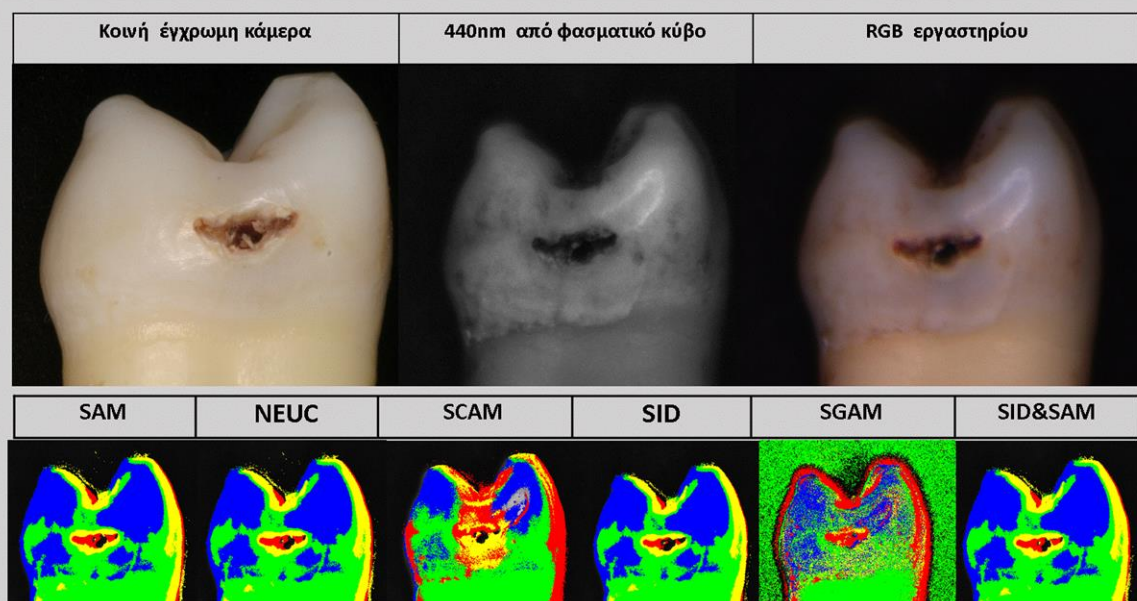


Εικόνα 5.6 Φάσματα κλάσεων τερηδόνας

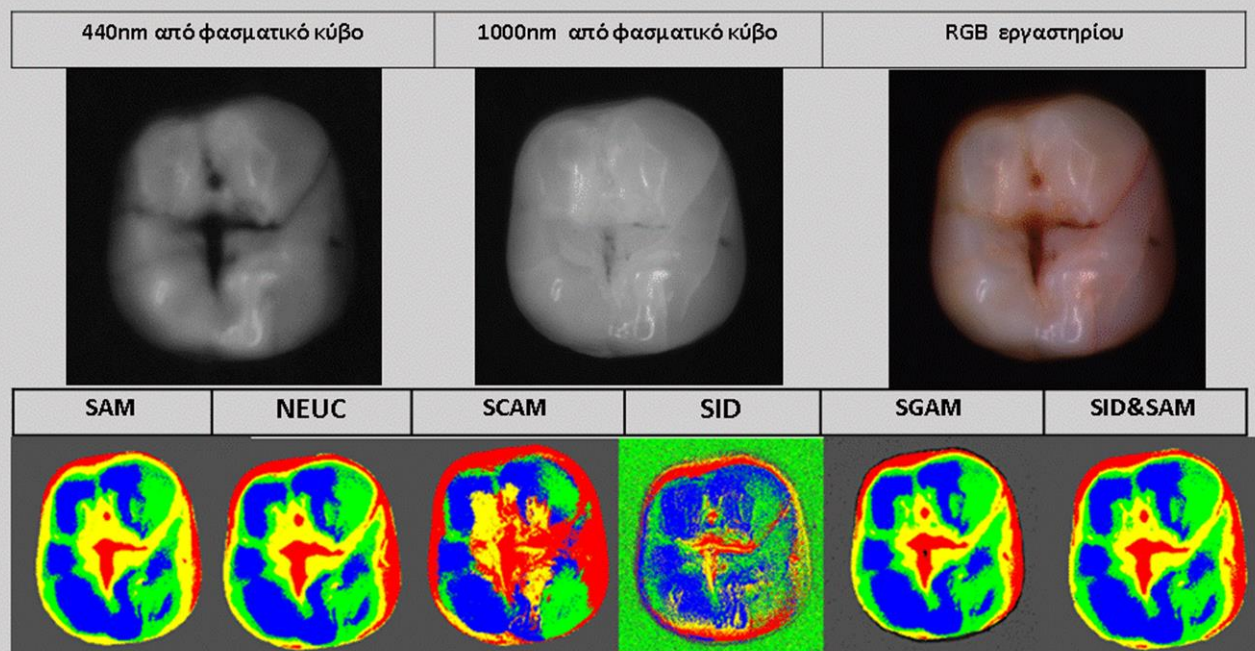
5.1.5 Ταξινόμηση

Στη συνέχεια για την εξαγωγή των πρώτων ψευδοχρωματικών χαρτών είναι απαραίτητη η διαδικασία της ταξινόμησης δηλαδή της ταυτοποίησης και καταχώρησης κάθε εικονοστοιχείου του φασματικού κύβου σε μία συγκεκριμένη τάξη, σύμφωνα με κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών των εντάσεων, που αναπαρίστανται από τα φάσματα του pixel αυτού. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε **Supervised** αλγόριθμους ταξινόμησης καθώς είχαμε τη δυνατότητα να συλλέξουμε κάποια δείγματα αναφοράς για κάθε κλάση. Μέσα από αυτή τη διαδικασία συλλογής στοιχείων από κάθε δόντι δημιουργήσαμε τα δείγματα εκπαίδευσης (training set). Συνολικά λάβαμε εκατοντάδες δείγματα αναφοράς από όλα τα δόντια και για όλες τις κλάσεις με σκοπό να γίνει η έρευνά μας όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη και αντικειμενική. Τα φασματικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων αυτών χρησιμοποιήθηκαν έπειτα στην εκπαίδευση του εκάστοτε αλγορίθμου για την ταξινόμηση και των υπολοίπων pixels της κάθε εικόνας.

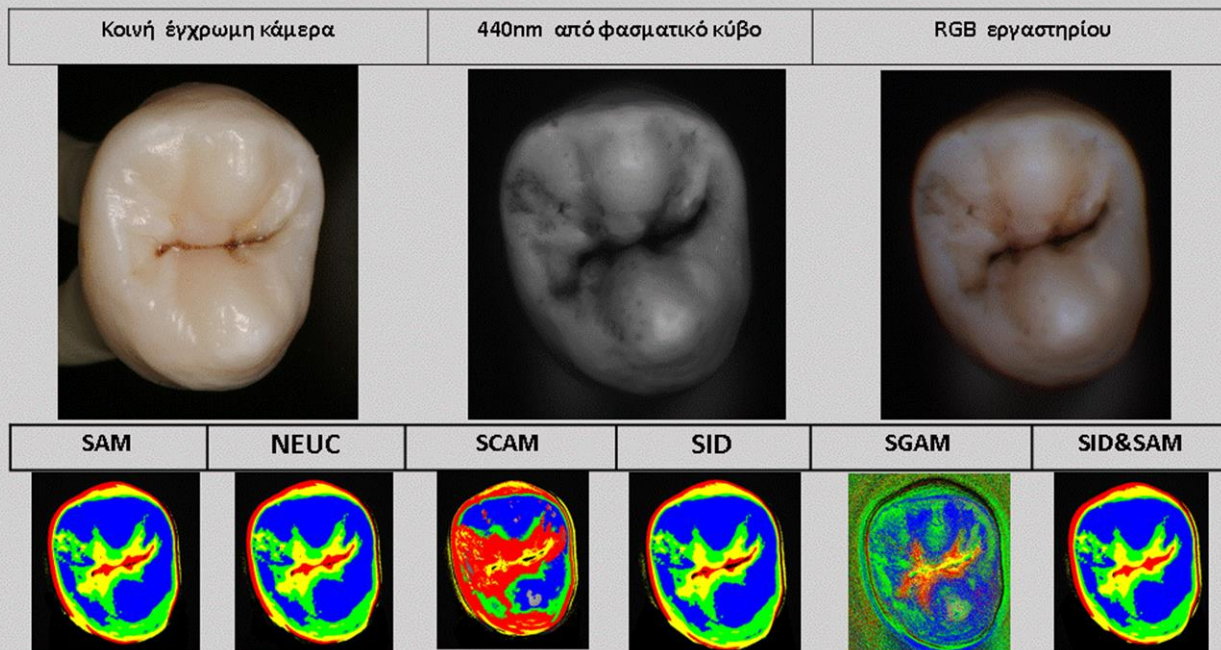
Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήσαμε είναι οι: SAM (Spectral Angle Mapper), NEUC (Normalized Euclidean Distance), SCAM (Spectral Correlation Angle Mapper), SGAM (Spectral Gradient Angle Mapper), SID (Spectral Information Divergence), SAM&SID. Παραθέτουμε μερικά αποτελέσματα προς σύγκριση.



Εικόνα 5.7 Αλγόριθμοι ταξινόμησης και οι αντίστοιχες χαρτογραφήσεις



Πίνακας 5.8 Αλγόριθμοι ταξινόμησης και οι αντίστοιχες χαρτογραφήσεις

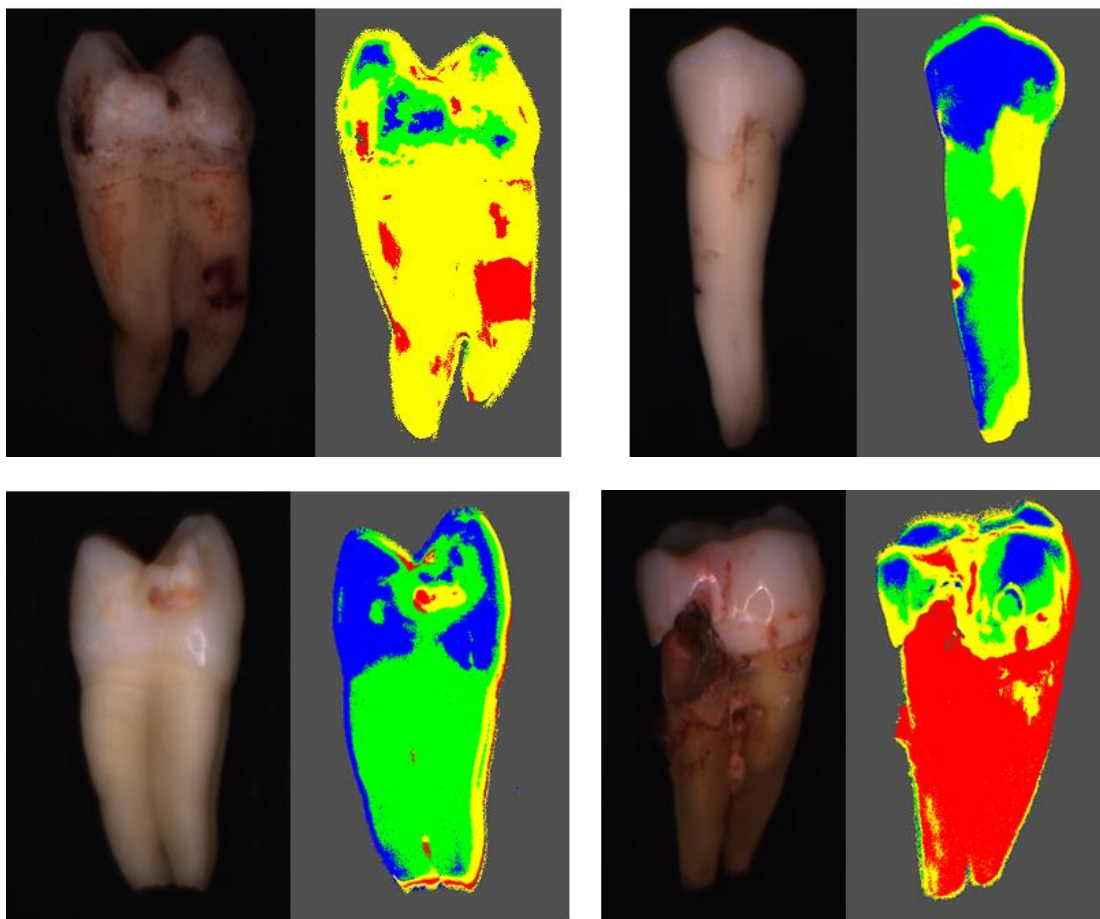


Πίνακας 5.9 Αλγόριθμοι ταξινόμησης και οι αντίστοιχες χαρτογραφήσεις

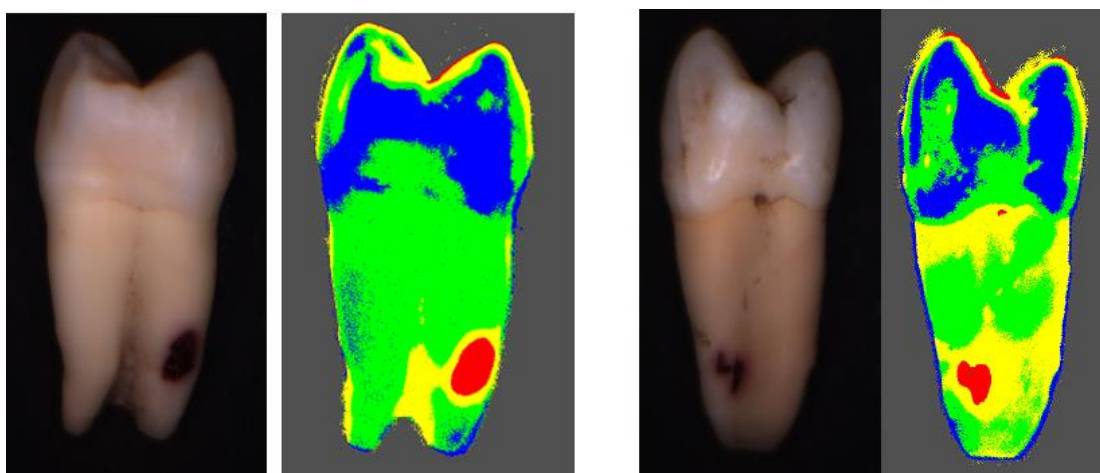
Με μια πρώτη ματιά βλέπουμε ότι όλοι οι αλγόριθμοι ξεχωρίζουν τις περιοχές στις οποίες η τερηδόνα είναι εμφανής. Αυτό δηλώνει ότι τα δείγματα εκπαίδευσης που συλλέξαμε είναι ικανά να χαρτογραφήσουν την τερηδόνα με αρκετά καλή ακρίβεια. Ωστόσο ο κάθε αλγόριθμος οριοθετεί διαφορετικά την κάθε περιοχή και για το λόγο αυτό καλούμαστε να βρούμε τους αλγόριθμους οι οποίοι χαρτογραφούν καλύτερα το κάθε δόντι.

Έπειτα από προσεκτική παρατήρηση όλων των ψευδοχρωματικών χαρτών για όλα τα δείγματα δοντιών που έχουμε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι αλγόριθμοι SAM και NEUC είναι αυτοί που παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα καθώς οριοθετούν πιο καθαρά και ευδιάκριτα την κάθε διαφορετική περιοχή (κλάση). Έτσι θα ήταν λογικό για την συνέχεια του πειράματος να επικεντρωθούμε στους αλγόριθμους SAM και NEUC.

Παρακάτω ακολουθούν περισσότερα αποτελέσματα χαρτογράφησης έχοντας χρησιμοποιήσει τον αλγόριθμο ταξινόμησης SAM.



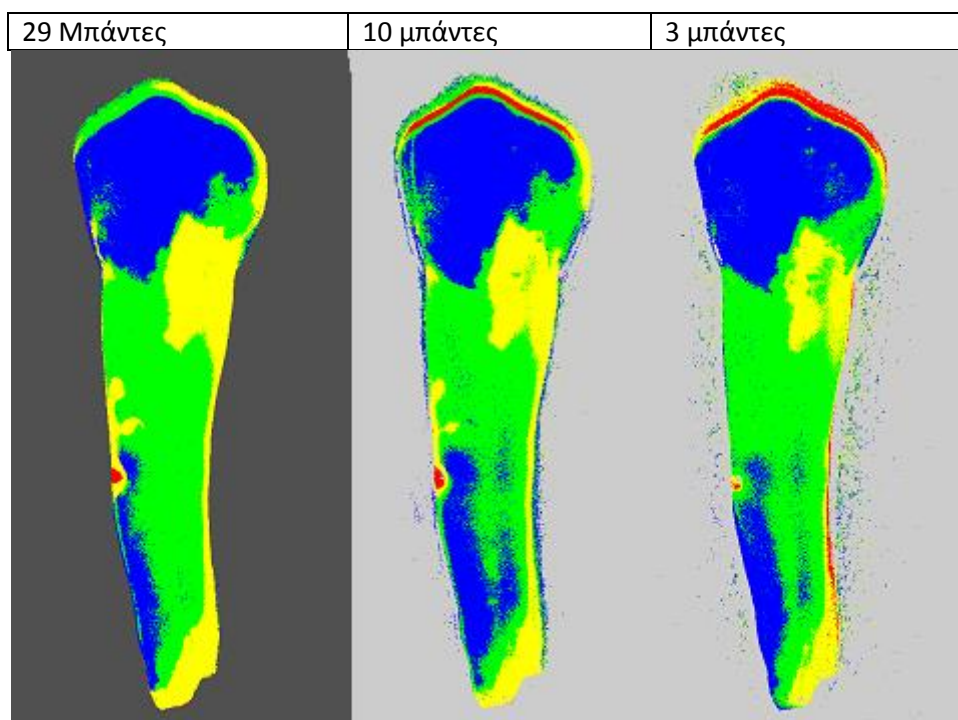
Εικόνα 5.10 Αλγόριθμος ταξινόμησης SAM και χαρτογράφηση



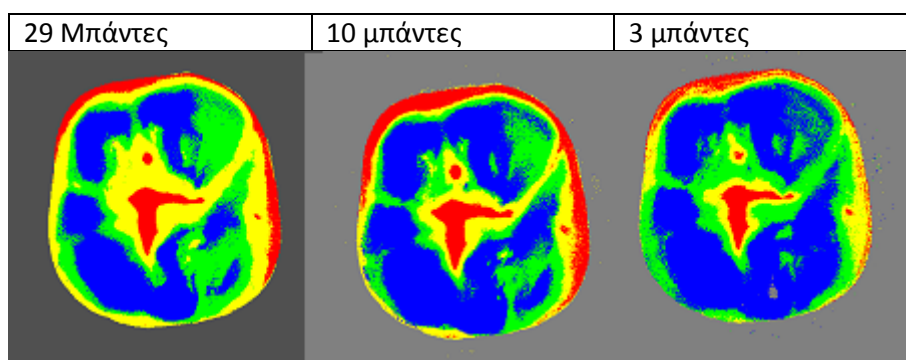
Εικόνα 5.11 Αλγόριθμος ταξινόμησης SAM και χαρτογράφηση

5.1.6 Μείωση φασματικών ζωνών

Το γεγονός ότι ένας υπερφασματικός κύβος αποτελείται από έως και εκατομμύρια φάσματα μας οδηγεί στη προσπάθεια μείωσης των μπαντών που χρησιμοποιούμε με σκοπό την οικονομία χώρου και χρόνου στην υπερφασματική απεικόνιση ανάλυση και επεξεργασία των φασμάτων. Έτσι στη περίπτωση μας πήραμε φασματικούς κύβους σταδιακά από λιγότερες μπάντες. Κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα παραθέτονται.

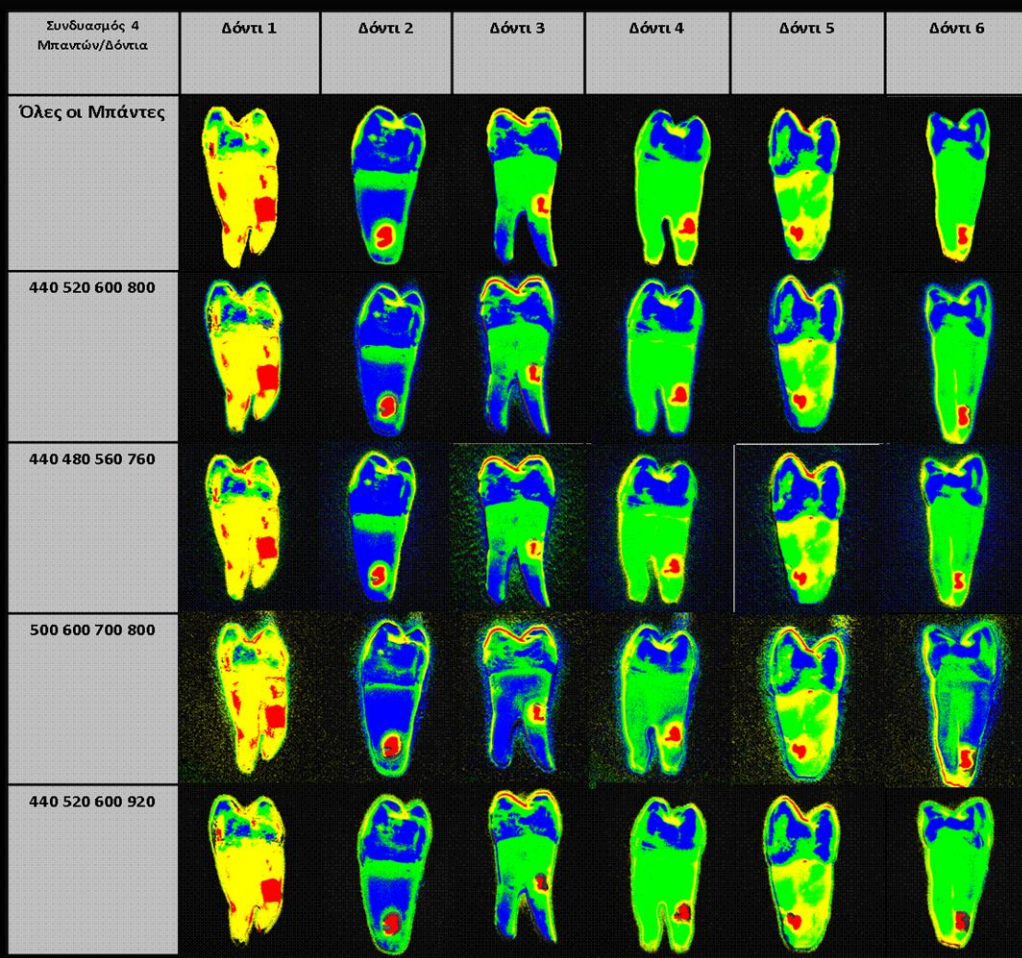


Πίνακας 5.12 Μείωση φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM



Πίνακας 5.13 Μείωση φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM

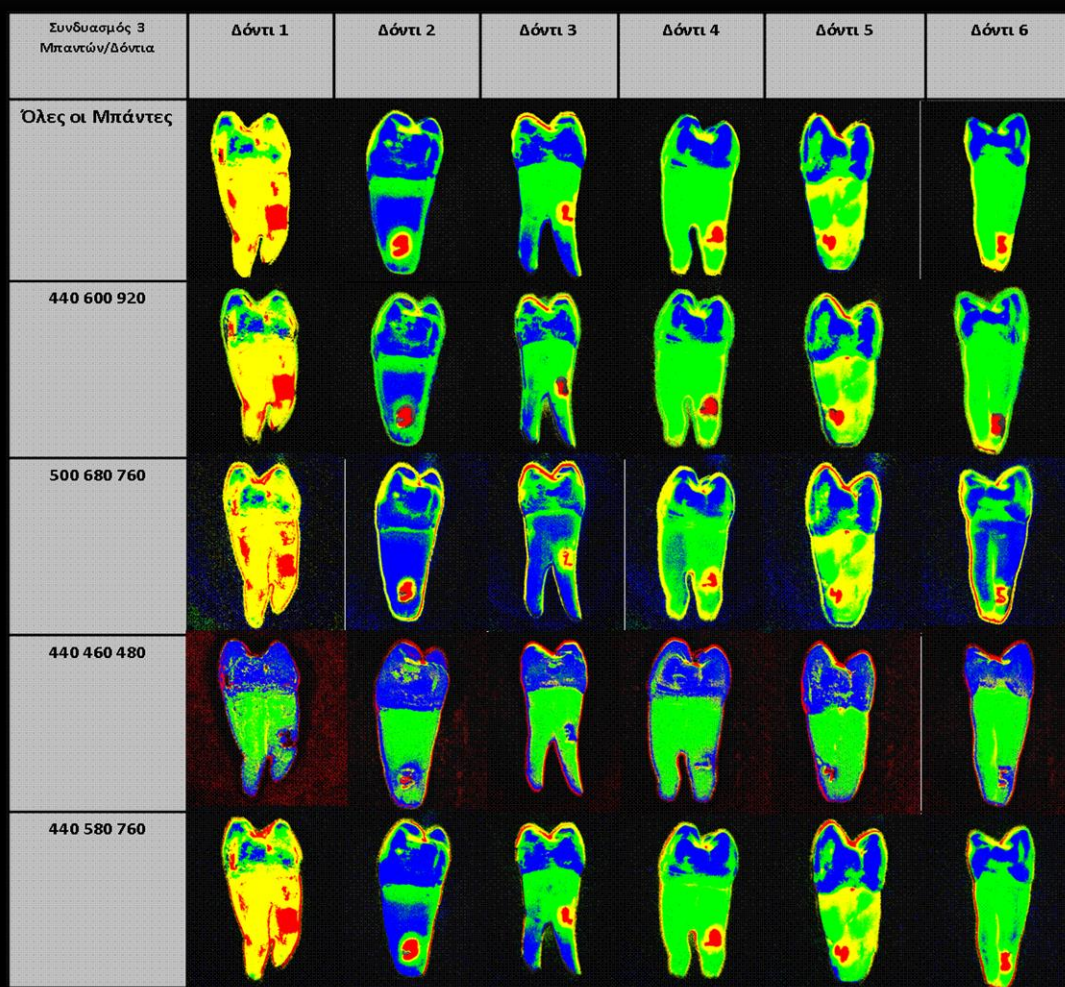
Στο στάδιο αυτό θα ασχοληθούμε μόνο με τον αλγόριθμο SAM, εφαρμόζοντάς τον με 4 , 3 και 2 μπάντες. Συγκεκριμένα, παραθέτονται ορισμένοι από τους πολλούς χρωματικούς χάρτες που προέκυψαν από συνδυασμούς τεσσάρων, τριών και δύο μπαντών και θα συγκριθούν μεταξύ τους αλλά και με τους χρωματικούς χάρτες των 30 μπαντών, δείχνοντας και ποσοστά ακρίβειας που φανερώνουν κατά πόσο συμπίπτουν οι χρωματικοί χάρτες των 4,3 και 2 μπαντών με αυτούς των όλων των μπαντών.



Πίνακας 5.14 Συνδυασμοί 4 φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM

Συνδυασμός 4 Μπαντών/Δόντια	Δόντι 1	Δόντι 2	Δόντι 3	Δόντι 4	Δόντι 5	Δόντι 6	Μέσος Όρος για κάθε μπάντα
440 520 600 800	83,14	89,17	89,89	88,85	87,72	90,01	88,13
440 480 560 760	88,98	89,72	90,36	90,43	87,9	88,16	89,26
500 600 700 800	92,95	84,73	73,65	88,22	92,89	76,96	84,91
440 520 600 920	85,93	93,04	93,76	93,36	95,32	93,63	92,50

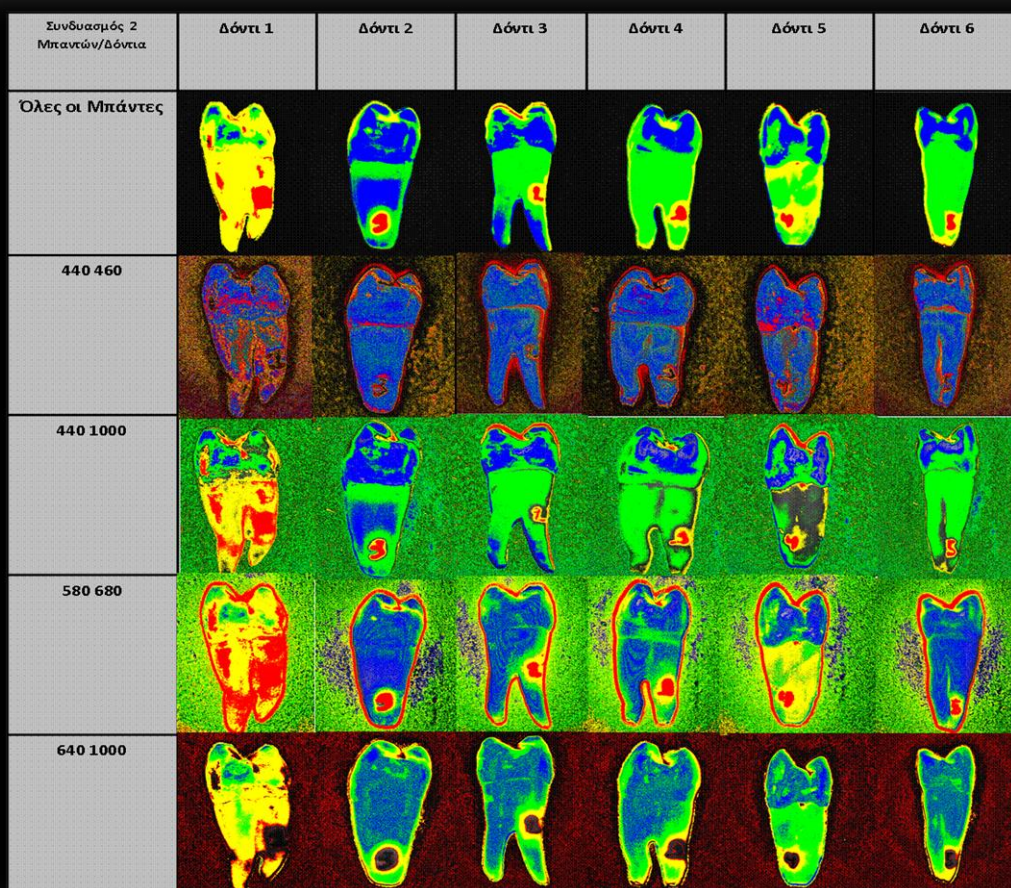
Πίνακας 5.15 Συνδυασμοί 4 φασματικών μπαντών, % ποσοστό ακρίβειας με αλγόριθμο SAM



Πίνακας 5.16 Συνδυασμοί 3 φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM

Συνδυασμός 3 Μπαντών/Δόντια	Δόντι 1	Δόντι 2	Δόντι 3	Δόντι 4	Δόντι 5	Δόντι 6	Μέσος Όρος για κάθε μπάντα
440 600 900	81,01	92,61	93,88	92,87	92,65	92,11	90,85
500 680 760	91,63	82,12	73,27	90,96	92,17	67,33	82,91
440 460 480	22,02	81,26	80,02	71,75	59,24	75,20	64,91
440 580 760	81,14	89,32	91,36	89,22	86,00	85,76	87,13

Πίνακας 5.17 Συνδυασμοί 3 φασματικών μπαντών, % ποσοστό ακρίβειας με αλγόριθμο SAM



Πίνακας 5.18 Συνδυασμοί 2 φασματικών μπαντών, χαρτογράφηση με αλγόριθμο SAM

Συνδυασμός 2 Μπαντών/Δόντια	Δόντι 1	Δόντι 2	Δόντι 3	Δόντι 4	Δόντι 5	Δόντι 6	Μέσος Όρος για κάθε μπάντα
440 460	16,4	67,48	50,49	40,01	40,78	41,77	42,82
440 1000	65,84	90,85	87,34	78,61	61,12	79,62	77,23
580 680	63,4	78,76	70,01	66,84	82,69	53,88	69,26
640 1000	65,18	83,76	73,90	71,47	71,06	71,02	72,73

Πίνακας 5.19 Συνδυασμοί 2 φασματικών μπαντών, % ποσοστό ακρίβειας με αλγόριθμο SAM

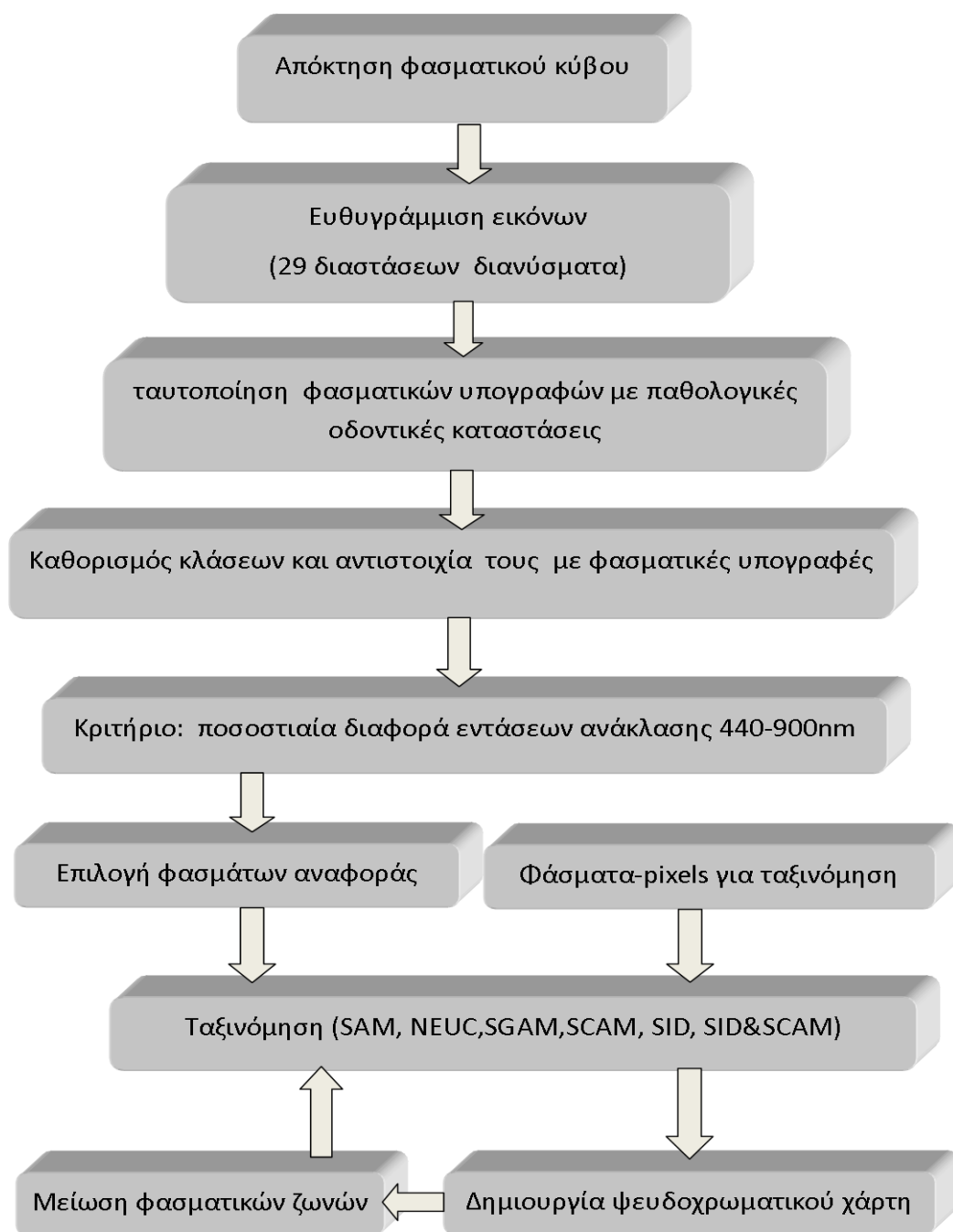
Όσον αφορά τα ποσοστά ακρίβειας του αλγόριθμου SAM στους παραπάνω πίνακες, υπολογίστηκαν συγκρίνοντας τα pixel μίας εικόνας που είχε δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας και τις 30 μπάντες, με τα pixel εικόνων που είχαν δημιουργηθεί από διάφορους συνδυασμούς 4, 3 και 2 μπαντών. Τα μεγαλύτερα ποσοστά προφανώς σημειώνονται, από τους συνδυασμούς των 4 μπαντών από τους οποίους προκύπτουν και οι πιο ακριβείς χαρτογραφήσεις.

Μελετώντας τα ποσοστά που προέκυψαν, οι συνδυασμοί μπαντών (4, 3 και 2 μπάντες) που δίνουν τα μεγαλύτερα ποσοστά ακρίβειας, αποτελούν τις μπάντες που προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες είναι οι εξής :

Αριθμός Μπαντών	Μήκη κύματος μαντών	Μ.Ο Ακρίβειας %
Καλύτεροι συνδυασμοί 4 μπαντών	440 520 600 920	92,5 %
Καλύτεροι συνδυασμοί 3 μπαντών	440 600 900	90,85 %
Καλύτεροι συνδυασμοί 2 μπαντών	440 1000	77,23 %

Πίνακας 5.20 Καλύτεροι συνδυασμοί φασματικών μπαντών, μέσος όρος ποσοστού ακρίβειας % με αλγόριθμο SAM

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι ακόμα και με την μείωση των μπαντών είναι ακόμα ευδιάκριτες οι περιοχές που παρουσιάζουν αλλοίωση τερηδόνας, ωστόσο είναι φανερό ότι υπάρχει μείωση της ακρίβειας σε σχέση με την χαρτογράφηση με 29 μπάντες. Έτσι καταλήγουμε σε κάτι υποκειμενικό καθώς επιτρέπεται η μείωση των φασματικών ζωνών μόνο σε περιπτώσεις όπου η μειωμένη ακρίβεια δε θα έπαιζε καθοριστικό ρόλο.



Πίνακας 5.21 διάγραμμα ακολουθίας φασματικής απεικόνισης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Φασματική απεικόνιση φθορισμού τερηδόνας με LED UV

Σε αυτή τη φάση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα φασματικής απεικόνισης φθορισμού των δοντιών για την ανίχνευση και την έγκαιρη διάγνωση τερηδόνας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν μία δίοδος LED ως και δύο διαφορετικές κάμερες του εργαστηρίου οπτοηλεκτρονικής πολυτεχνείου Κρήτης.

Κάμερες:

1. Η υπερφασματική κάμερα.
2. Υψηλής ανάλυσης έγχρωμη κάμερα.

Πηγή:

LED το οποίο εκπέμπει στο υπεριώδες φάσμα και συγκεκριμένα στα 365 nm έχοντας τοποθετημένο πάνω του ειδικό UV φίλτρο το οποίο ανακόπτει το ορατό μπλέ φως και αφήνει μόνο το υπεριώδες.

6.1 Πείραμα 1: Υψηλής ανάλυσης έγχρωμη κάμερα

6.1.2 Διάταξη πειράματος:

Στην πρώτη περίπτωση το LED UV φωτίζει υπό γωνία το εκάστοτε δόντι. Η RGB κάμερα έχει πάνω της ειδικό φακό UV. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε επίσης σε σκοτεινό δωμάτιο. Το συγκεκριμένο πείραμα είχε δύο φάσεις.

1. Έγινε απεικόνιση σε όλο το δυνατό φάσμα δηλαδή και στο υπεριώδες και στο ορατό.
2. Έγινε απεικόνιση μόνο φθορισμού στο ορατό και συγκριμένα σε μεγαλύτερα από 520nm μήκη κύματος.

6.1.3 Διαδικασία πειράματος:

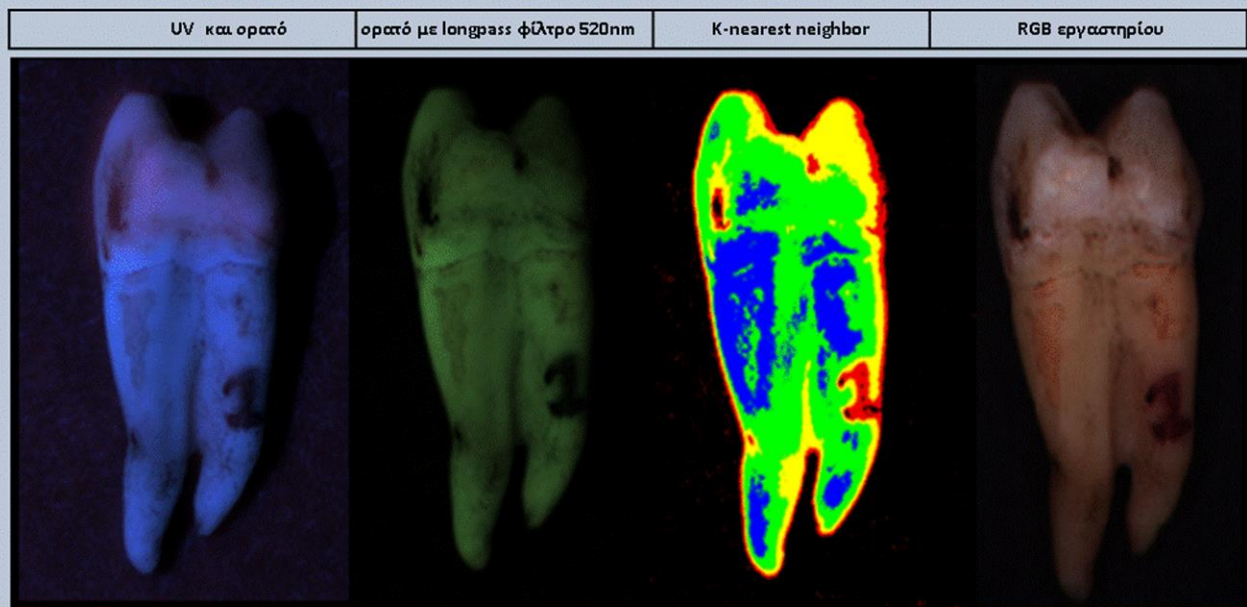
Το LED UV το οποίο εκπέμπει στα 365 nm προκαλεί την ακτινοβολία φάσματος φθορισμού του δοντιού. Μια βλάβη τερηδόνας μπορεί να διακριθεί από έναν υγιή ιστό στην περιοχή των ζωνών φθορισμού στο ορατό φως και πιο συγκεκριμένα σε φασματικές ζώνες με μήκος κύματος μεγαλύτερο κατά 50-75 nm σε σχέση με το φάσμα εκπομπής της

πηγής. Οι πρώτες απεικονίσεις (μπλε εικόνες) αφήνουν και το υπεριώδες φάσμα και το ορατό άρα αντίστοιχα και τα φάσματα ανάκλασης και φθορισμού να επηρεάζουν τις εικόνες. Οι δεύτερες (πράσινες εικόνες) με το φίλτρο, αφήνουν μόνο το σήμα φθορισμού που είναι ορατό και πάνω από 520nm(κίτρινο φίλτρο) να επηρεάσει την απεικόνιση.

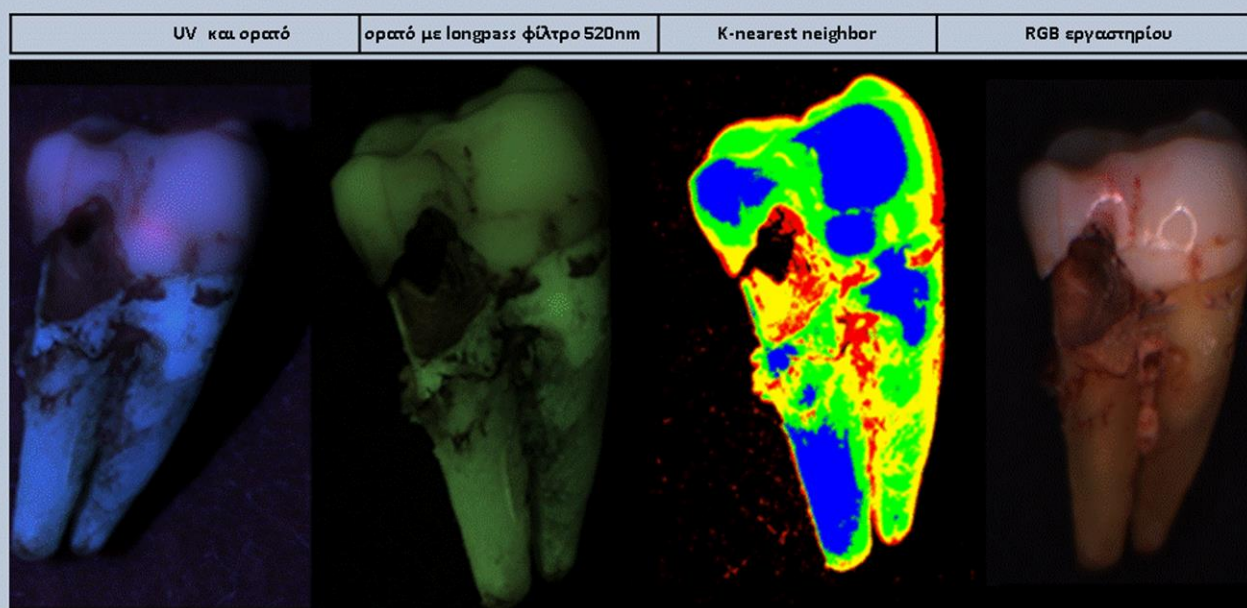
6.1.4 Συμπεράσματα:

Τα φάσματα φθορισμού μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως δείκτης της περιεκτικότητας σε ανόργανα άλατα για να παρακολουθείτε έτσι η υγιή κατάσταση των δοντιών με βάση τα φάσματα φθορισμού υδροξυαπατίτη. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η απομετάλλωση των δοντιών τόσο πιο γρήγορα μειώνεται η ένταση του σήματος φθορισμού. Έτσι η ένταση αυτή μειώνεται για όλες τις τερηδονισμένες περιοχές, ανάλογα με το στάδιο εξέλιξης της ασθένειας, με την βαθιά κοιλότητα να παρουσιάζει τον πιο ασθενή φθορισμό.

Συγκριτικά οι εικόνες με και χωρίς φίλτρο (long pass >520nm) έχουν φασματικές διαφορές. Παρατηρώντας προσεχτικά αντιλαμβανόμαστε καλύτερη ευκρίνεια στις τερηδονισμένες περιοχές με χρήση του φίλτρου. Έπειτα έγινε ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων σε θεματικό χάρτη με χρήση του αλγόριθμου kNearest Neighbor για τις φιλτραρισμένες εικόνες. Παραθέτονται κάποιες ενδεικτικές εικόνες:



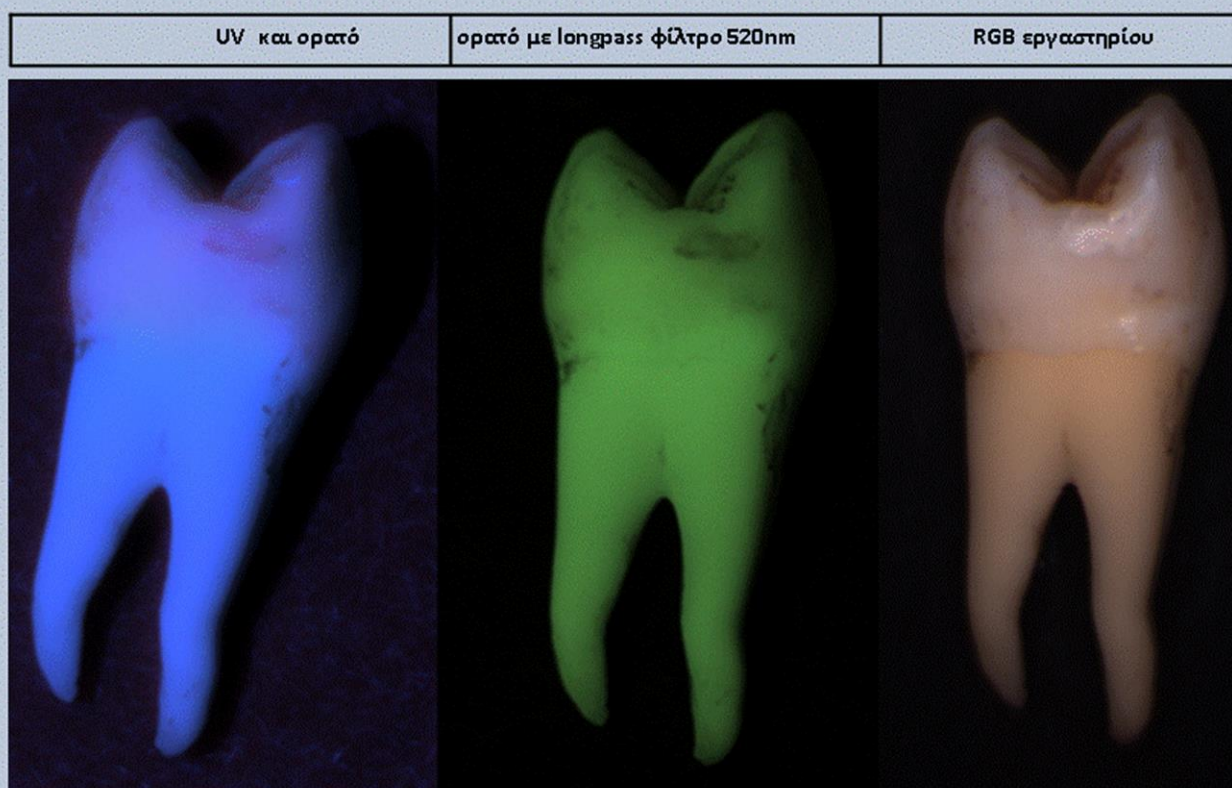
Πίνακας 6.1 Φθορισμός υπό φωτισμό UV LED



Πίνακας 6.2 Φθορισμός υπό φωτισμό UV LED



Πίνακας 6.3 Φθορισμός υπό φωτισμό UV LED



Πίνακας 6.4 Φθορισμός υπό φωτισμό UV LED

6.2 Πείραμα 2:UV υπερφασματική κάμερα

6.2.1 Διάταξη πειράματος:

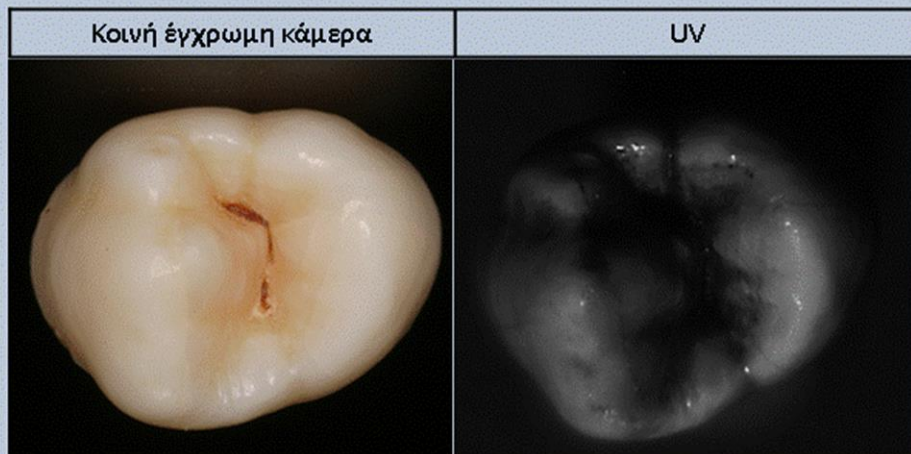
Η υπερφασματική κάμερα τοποθετήθηκε στο κοντινότερο δυνατό σημείο από τα δόντια έτσι ώστε να επιτύχουμε μεγαλύτερη εστίαση και σε συνδυασμό με την τη πηγή LED η οποία εκπέμπει υπό γωνία, να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη σκίαση της επιφάνειας των δοντιών. Επίσης για να έχουμε την δυνατότητα λήψης φασμάτων και στο υπεριώδες, χρησιμοποιήθηκε ειδικός φακός UV.

6.2.2 Διαδικασία πειράματος:

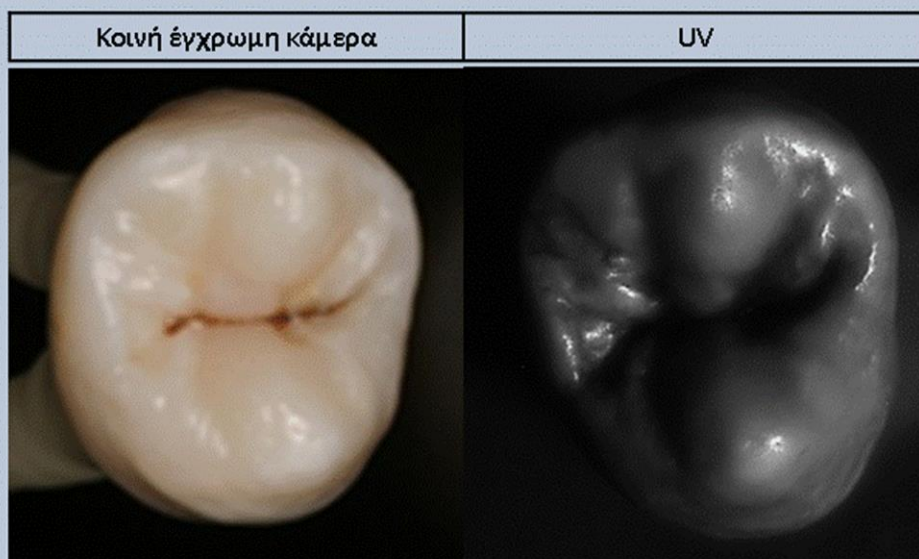
Η διαδικασία του πειράματος πραγματοποιήθηκε σε σκοτεινό δωμάτιο έτσι ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από εξωτερικό φως πέραν του υπεριώδους διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration) της κάμερας μας έδειξε ότι δεν θα μπορούσαμε να πάρουμε εικόνες σε ορατό φάσμα. Το λευκό δείγμα βαθμονόμησης που χρησιμοποιήσαμε δεν έδινε την αναμενόμενη τιμή (>200 για βέλτιστη ρύθμιση gain και shutter) το οποίο οφείλεται στην έλλειψη ισχύος του LED. Έτσι περιοριστήκαμε στην απεικόνιση μόνο του υπεριώδους φάσματος. Παραθέτουμε αρχικά κάποιες εικόνες από το πείραμα μας μαζί με τις αντίστοιχες έγχρωμες:



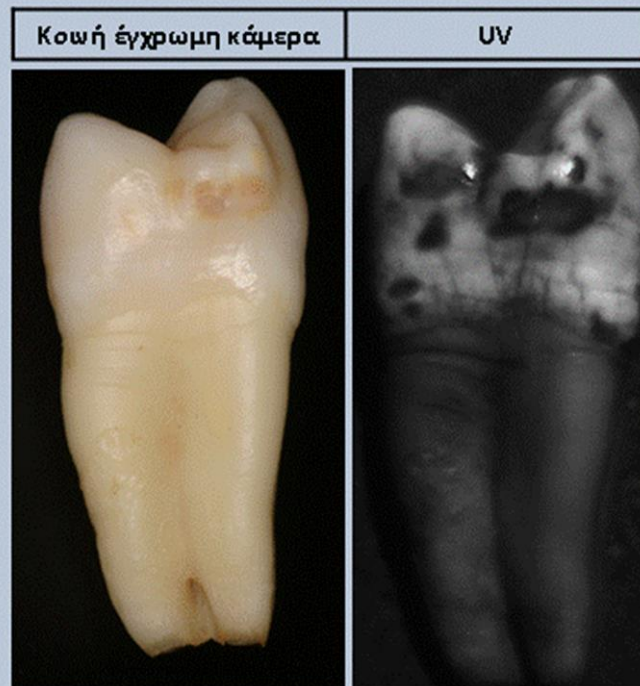
Πίνακας 6.5 UV απεικόνιση



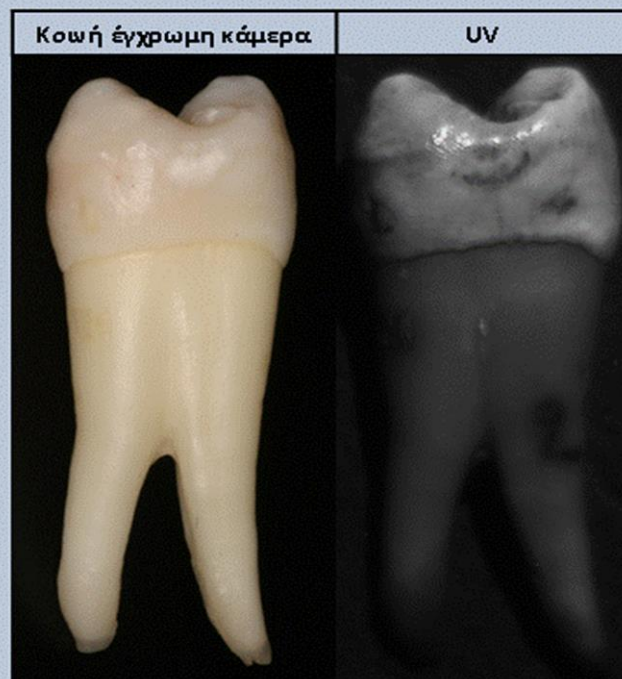
Πίνακας 6.6 UV απεικόνιση



Πίνακας 6.7 UV απεικόνιση



Πίνακας 6.8 UV απεικόνιση



Πίνακας 6.9 UV απεικόνιση

6.2.3 Συμπεράσματα:

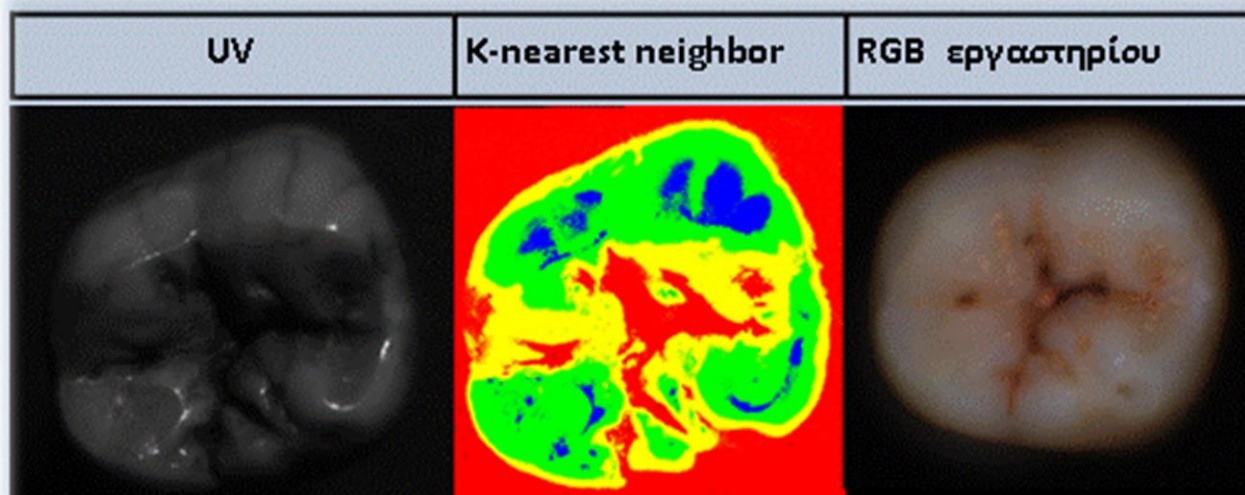
Οι εφαρμογές απεικόνισης UV εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι το UV φως τείνει να απορροφάται πιο εύκολα από το ορατό ή το υπέρυθρο φως. Η υψηλότερη ενέργεια των φωτονίων κοντά στο υπεριώδες έχει ως αποτελέσματα πιο άμεσες αλληλεπιδράσεις των φωτονίων με τα ηλεκτρόνια των υλικών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ισχυρότερη απορρόφηση σε σχέση με το ορατό και εγγύς υπέρυθρο φως.

Πράγματι, ένα από τα πρώτα πράγματα που παρατηρείτε στις εικόνες στην UV μπάντα είναι το πόσο σκούρα φαίνονται τα δόντια. Η υψηλότερη απορρόφηση σημαίνει επίσης ότι τείνει να απεικονίζει τις πιο εξωτερικές στρώσεις του δοντιού οι οποίες μπορεί να είναι ελαφρώς ημιδιαφανές σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Για πολλά υλικά κυρίως οργανικά, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός, τόσο ισχυρότερη είναι η απορρόφηση και μικρότερο το βάθος της διείσδυσης.

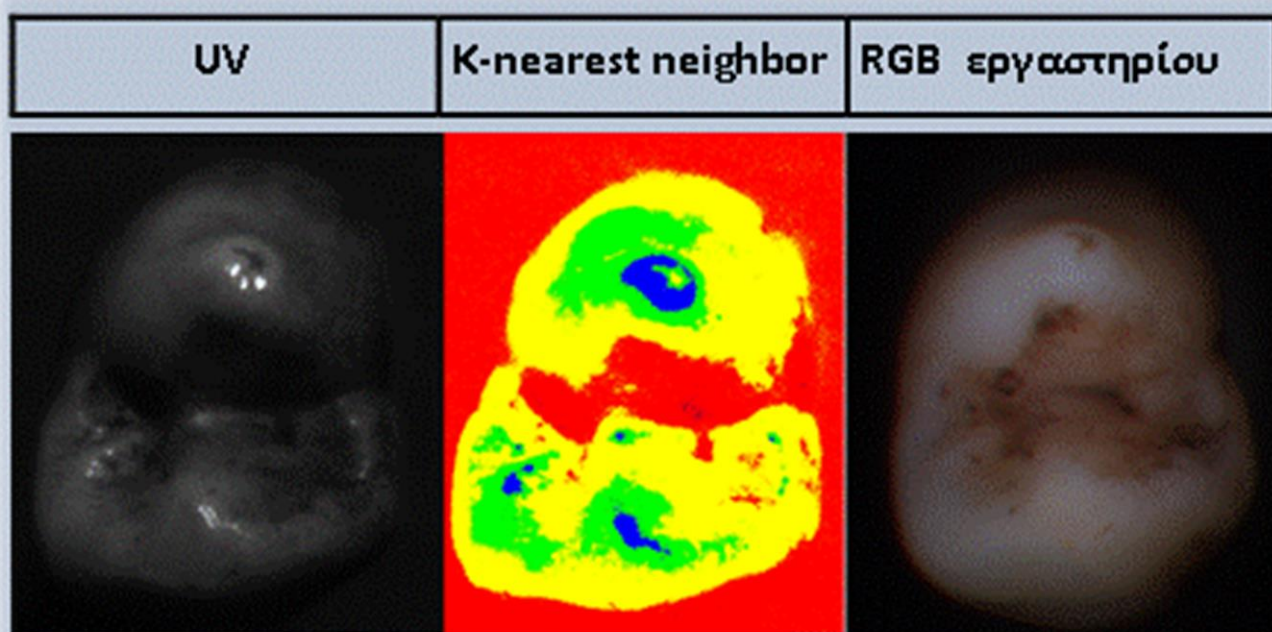
Η τερηδόνα απορροφάται έντονα στην UV ζώνη, και γίνεται ισχυρότερη καθώς το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο. Το υλικό των δοντιών είναι ανόργανο, και τείνει να αντανakλά το UV εύκολα λόγω ανάκλασης Fresnel στη διεπιφάνεια μεταξύ του αέρα και των μικροκρυστάλλων του υδροξυαπατίτη, το στοιχείο που αποτελεί το σμάλτο των δοντιών. Από τις εικόνες μας διακρίνεται ουσιαστικά η απομετάλλωση των εξωτερικών επιφανειών του δοντιού. Άρα μπορεί αποτελεσματικά να διακριθεί η απομετάλλωση και η επαναμετάλλωση των δοντιών με τη μέθοδο αυτή και έτσι να έχουμε μια πρώτη ένδειξη για την εμφάνιση τερηδόνας.

Επίσης σε μερικά δόντια εμφανίζονται κάποιες εσωτερικές ρωγμές οι οποίες είναι μια ένδειξη για την αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης στη περιοχή της ρωγμής. Οι ρωγμές αυτές είναι τις περισσότερες φορές στην αδαμαντίνη και υπάρχει πιθανότητα στην πορεία να προκαλέσουν κάταγμα του δοντιού. Αυτές δημιουργούνται είτε από τη δήξη (δάγκωμα) κάποιου σκληρού αντικειμένου είτε από βρυγμό.

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος k-Nearest Neighbor όπου έγινε ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων σε σχέση με το βαθμό βλάβης τερηδόνας. Παραθέτουμε ενδεικτικά τις παρακάτω εικόνες:



Πίνακας 6.10 UV απεικόνιση



Πίνακας 6.11 UV απεικόνιση

6.3 Πείραμα 3: Φάσμα UV (340 nm) για την ανίχνευση τερηδόνας

Έπειτα από τα θετικά αποτελέσματα ανίχνευσης τερηδόνας στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο υπεριώδες φως έγινε μια προσπάθεια για την εύρεση της βέλτιστης απεικόνισης τερηδόνας σε χαμηλότερα μήκη κύματος.

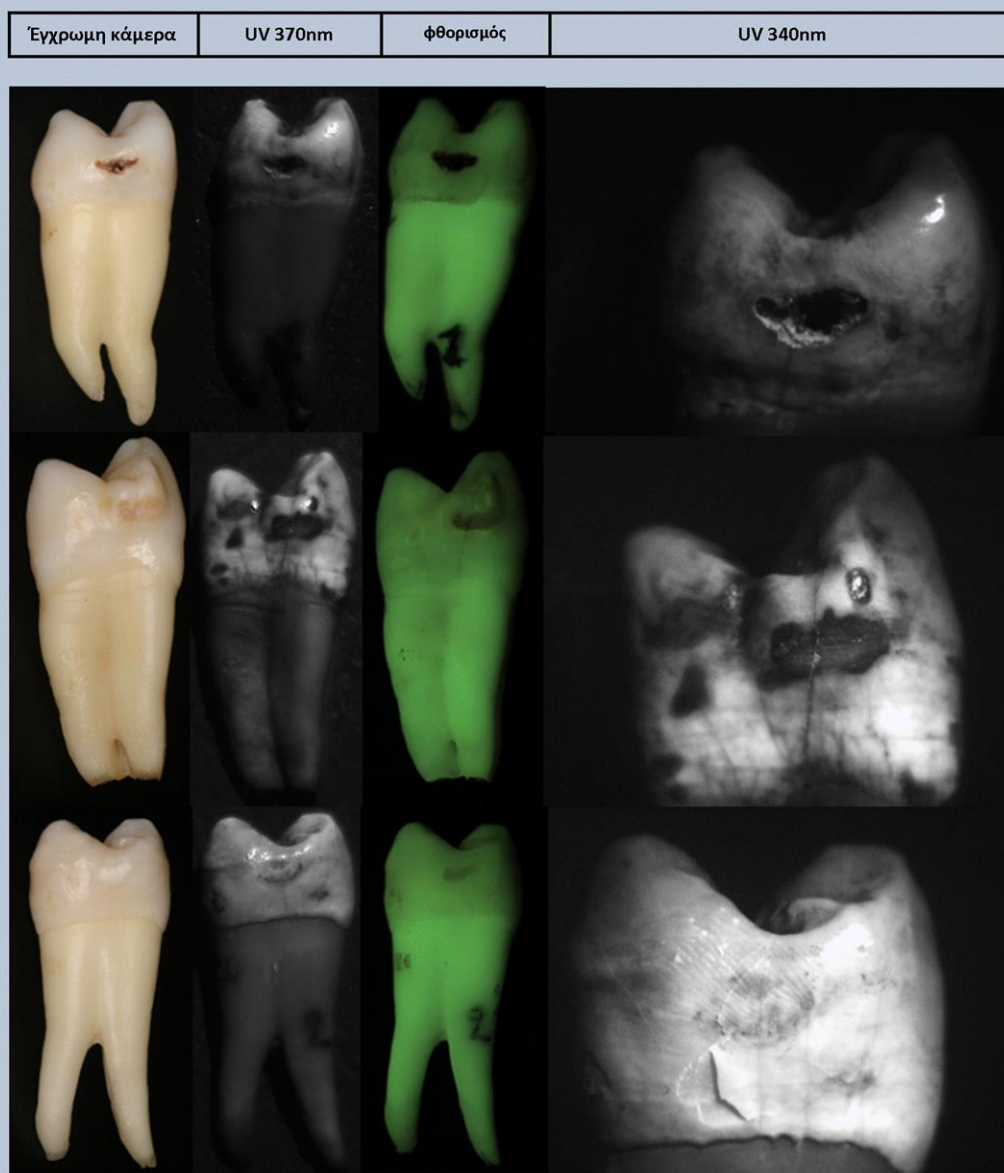
6.3.1 Διάταξη του πειράματος:

Στο προηγούμενο μας πείραμα είχαμε χρησιμοποιήσει LED UV το οποίο εκπέμπει στα 365nm και την υπερφασματική κάμερα με φίλτρο UV bandpass. Στις καινούριες μας μετρήσεις χρησιμοποιήσαμε δύο ακόμη LED υπεριώδους φωτός, το ένα στα 340 nm και το άλλο στα 250 nm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε σκοτεινό δωμάτιο επίσης με την υπερφασματική κάμερα .

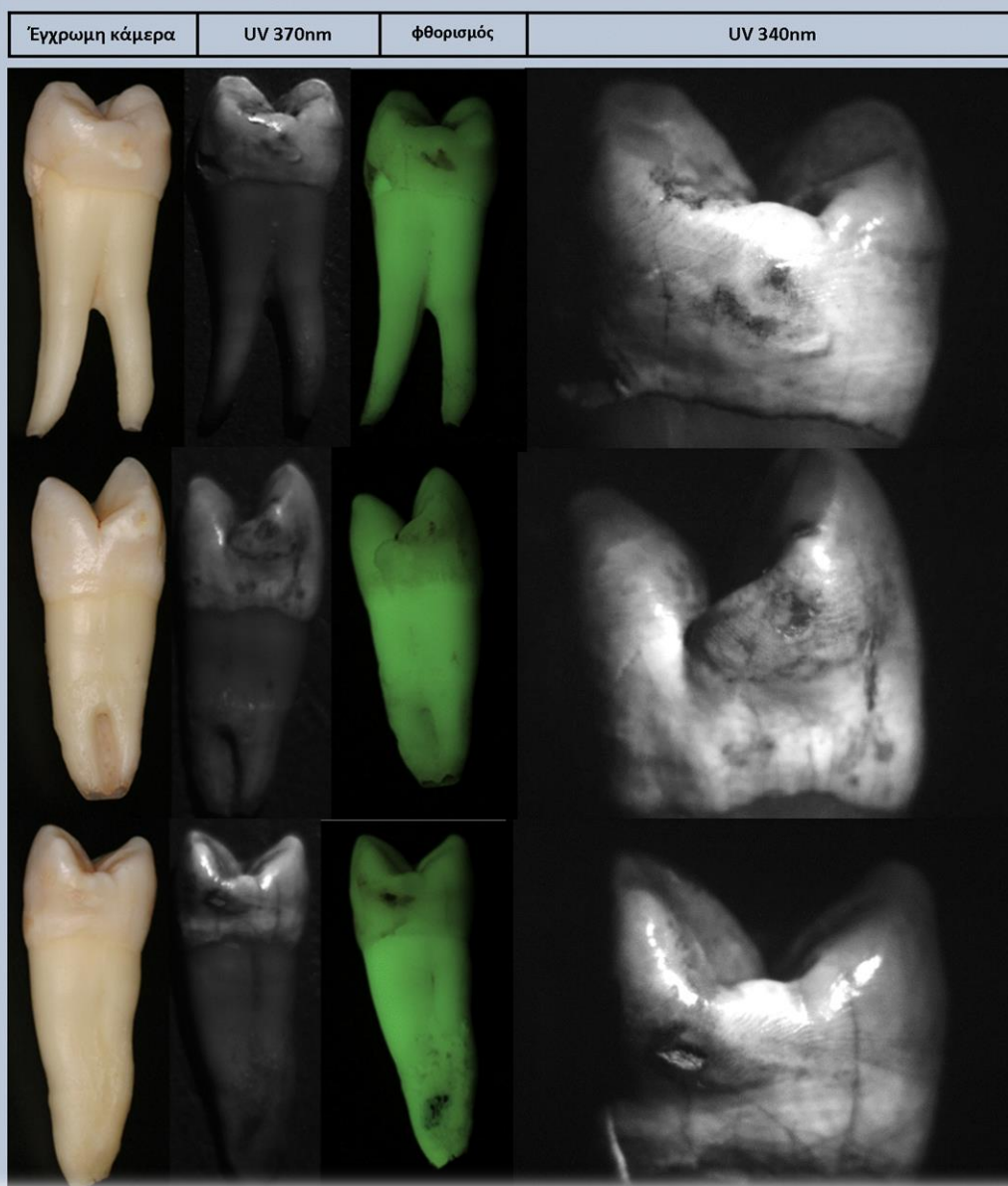
6.3.2 Διαδικασία του πειράματος:

Η απεικόνιση με το LED στα **250 nm κρίθηκε αδύνατη** για την δεδομένη ισχύ του LED. Ακόμη και αν παραβλέψουμε τις βλαβερές συνέπειες μιας τόσο χαμηλούς κύματος ακτινοβολίας στους ανθρώπινους ιστούς σε οποιαδήποτε πιθανή in vivo εξέταση , οι μετρήσεις σε τόσο χαμηλά μήκη κύματος δεν μας έδιναν αρκετή πληροφορία (υπερβολικά σκοτεινές).

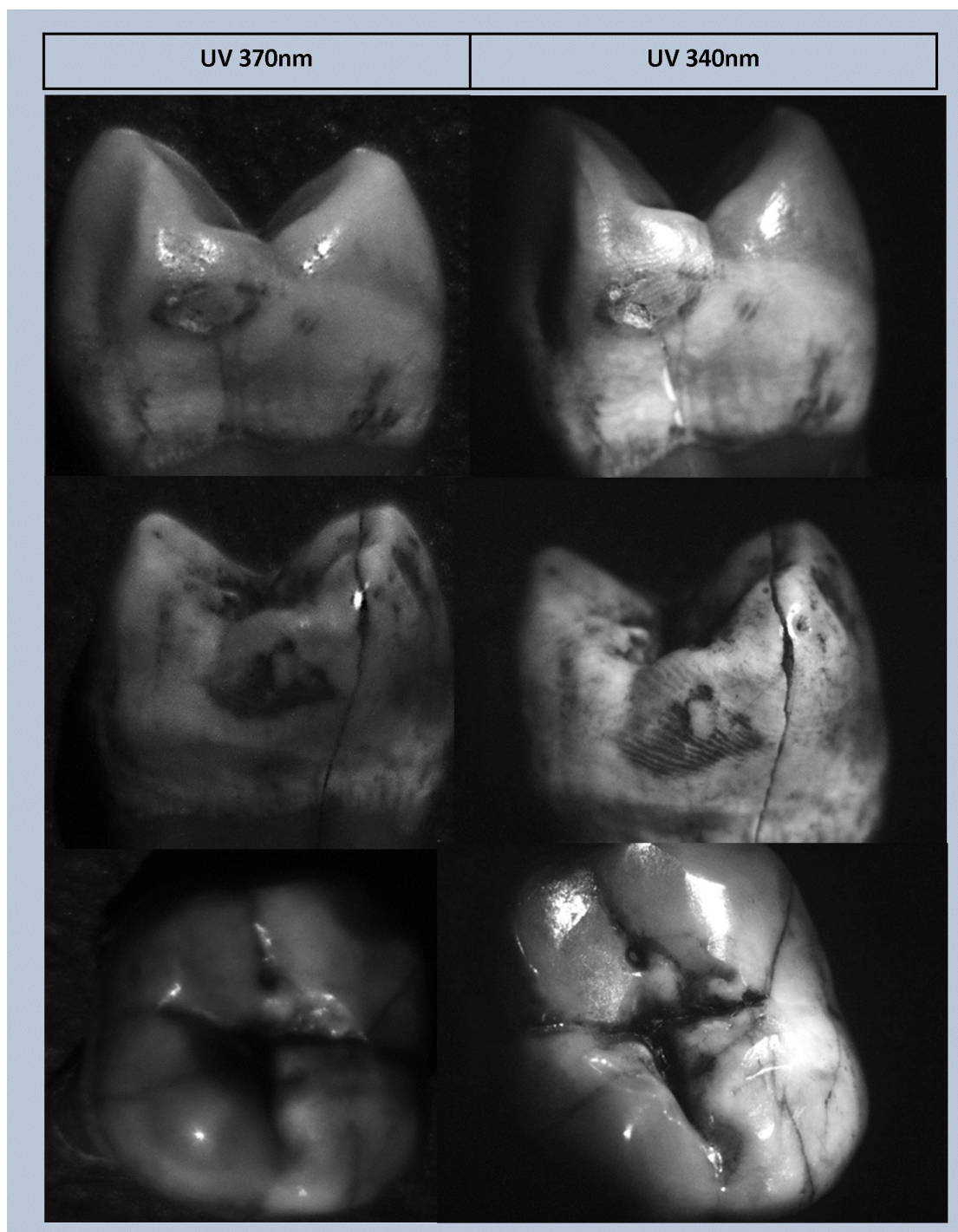
Χρησιμοποιώντας LED το οποίο εκπέμπει στα 340 nm και με φίλτρο bandpass στα 370 nm **πετύχαμε πολύ θετικά αποτελέσματα** . Επίσης έγινε ακόμη καλύτερη εστίαση ακριβώς στη περιοχή της βλάβης, στην αδαμαντίνη. Παραθέτονται αποτελέσματα συγκριτικά και με προηγούμενες μετρήσεις:



Πίνακας 6.12 UV απεικόνιση , Συγκριτικά



Πίνακας 6.13 UV απεικόνιση , Συγκριτικά



Πίνακας 6.14 UV απεικόνιση , Συγκριτικά

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο : Συμπεράσματα και προοπτική εξέλιξης της

Εργασίας

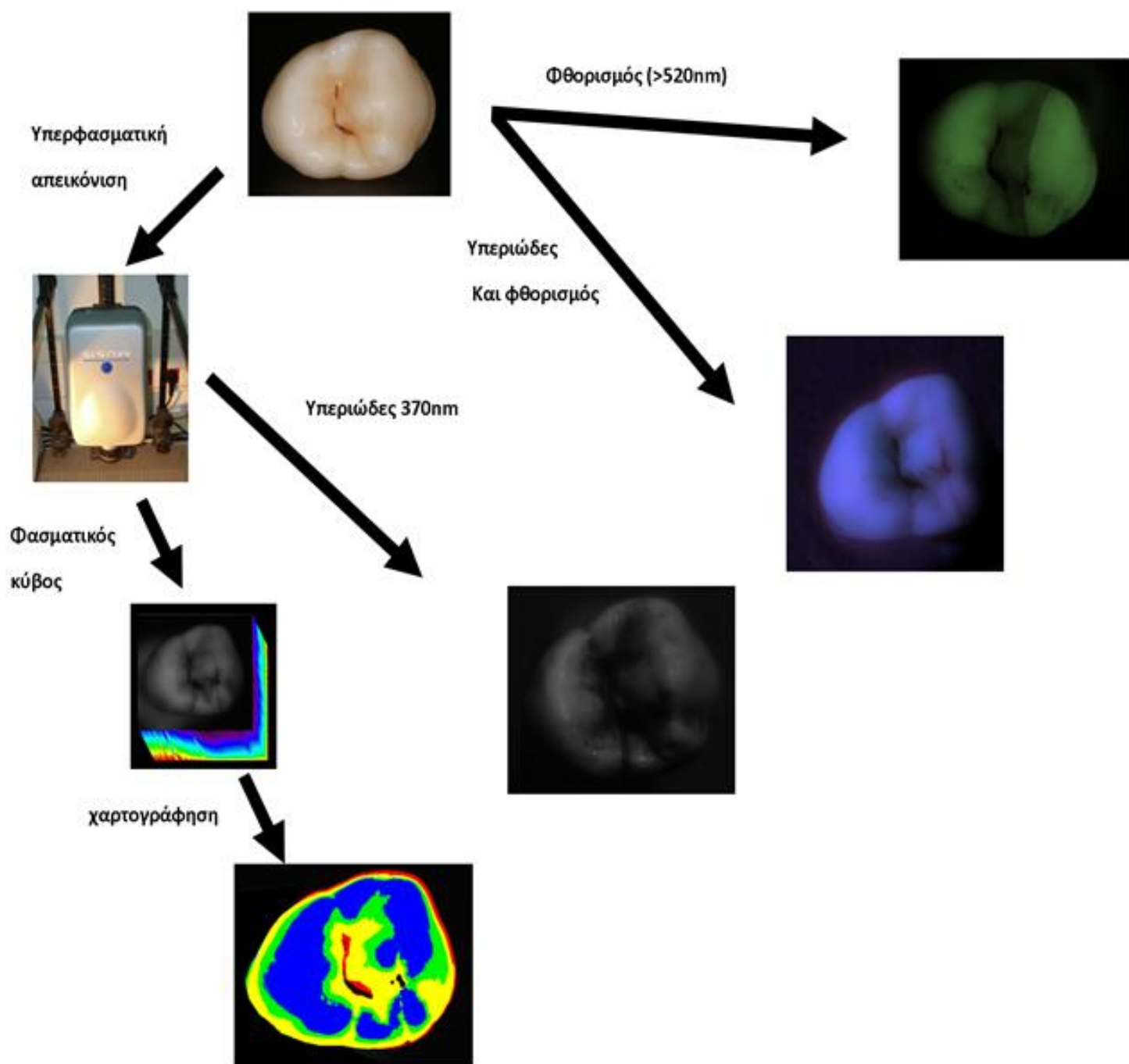
Συμπεράσματα

Κλείνοντας, με ικανοποίηση αναφέρουμε ότι τα αποτελέσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας ανέδειξαν καινούριες διαγνωστικές μεθόδους και επιβεβαίωσε τις μεγάλες δυνατότητες της υπερφασματικής απεικόνισης στο τομέα της βιοϊατρικής και συγκεκριμένα της οδοντιατρικής. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν πολλές συσκευές απεικόνισης του εργαστηρίου οπτοηλεκτρονικής του πολυτεχνείου Κρήτης πάντα με την άριστη καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή Κ. Μπάλα και των βοηθών του εργαστηρίου. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια περαιτέρω πιο συνδυαστική ανάλυση των αποτελεσμάτων με σκοπό να αναδείξουμε την αποτελεσματικότητα των νέων μεθόδων.

Αρχικά, θέτοντας τους στόχους μας είχαμε αναφερθεί στα εξής ζητούμενα:

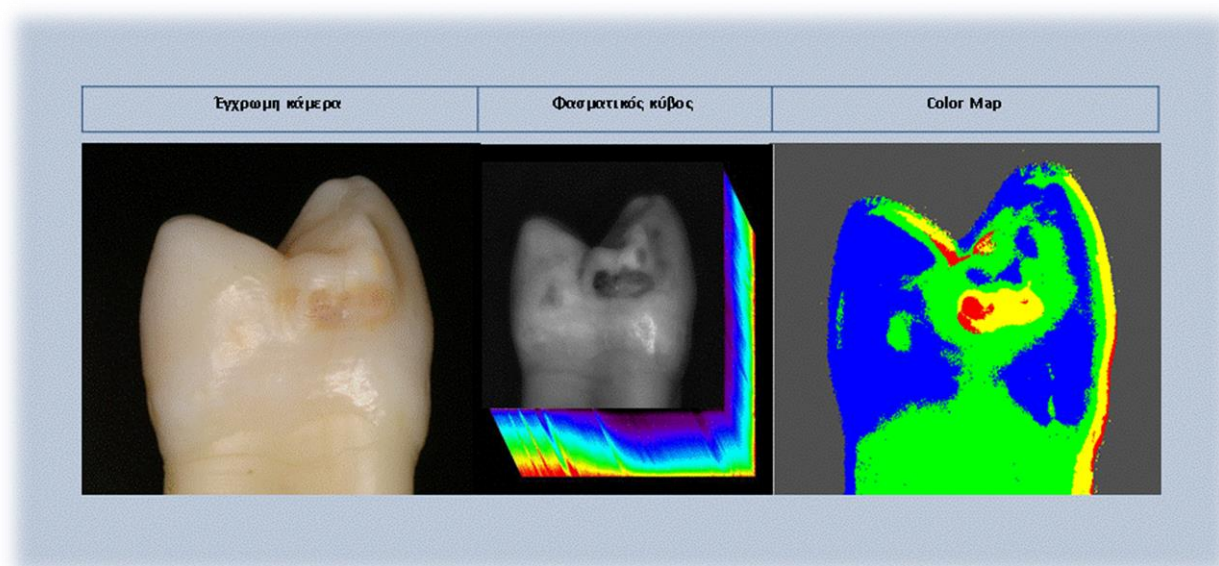
1. Αναγνώριση ποσοτικοποίηση και χαρτογράφηση μιας παθολογικής κατάστασης ενός δοντιού για καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.
2. Αναγνώριση αρχικών μορφών τερηδόνας (whitespots-λευκές κηλίδες).
3. Αναγνώριση πρώιμης μορφής τερηδόνας (demineralization-απομετάλλωση ιστού).
4. Αναγνώριση ρωγμών.
5. Αναγνώριση βάθους κοιλοτήτων τερηδόνας (brownspots).

Με βάση τα παραπάνω θα γίνει η ανάλυση των αποτελεσμάτων.



7.1 Διάγραμμα πειραμάτων

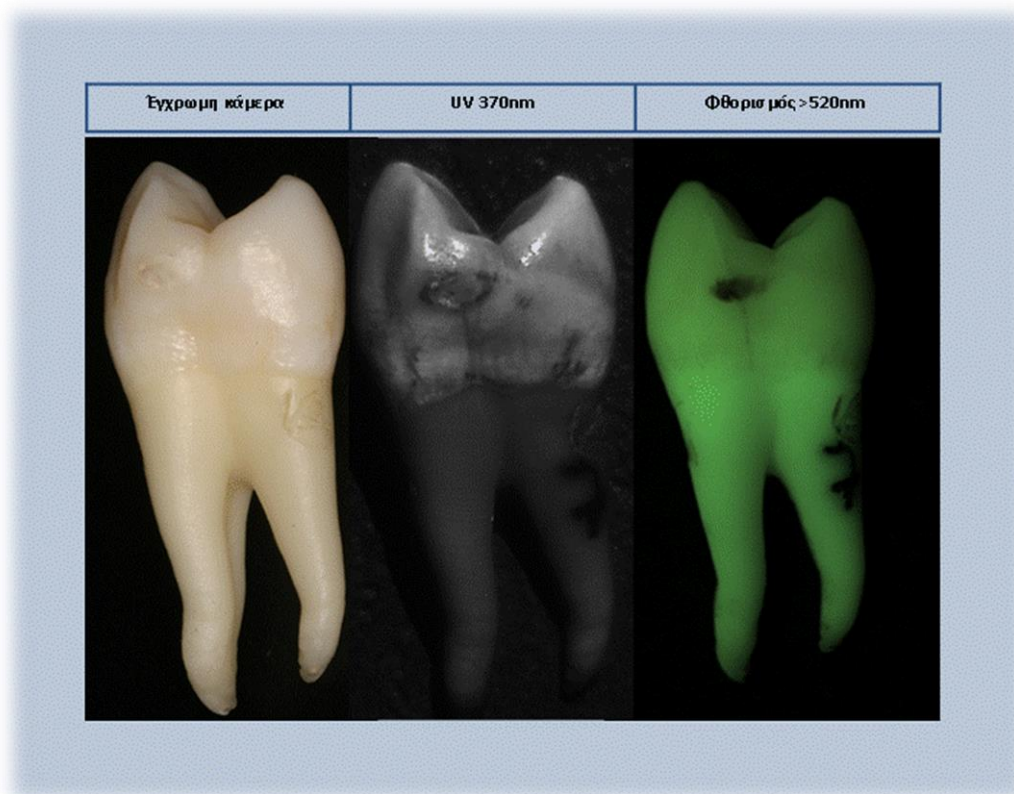
1. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία υπερφασματικής απεικόνισης μέσω της υπερφασματικής κάμερας του εργαστηρίου έγινε δυνατή η **αναγνώριση του βαθμού αλλοίωσης ενός οδοντικού οστού από τη νόσο τερηδόνα**. Μετά την απόκτηση του φασματικού κύβου και την εξαγωγή των χαρακτηριστικών αναγνωρίστηκαν οι φασματικές υπογραφές για την κάθε κατηγορία και μέσω αυτών έγινε η ταξινόμηση των φασματικών δεδομένων και η δημιουργία των ψευδοχρωματικών χαρτών. Παρατηρείτε μεγάλη ακρίβεια στις χαρτογραφήσεις η οποία επιβεβαιώνεται από τους περισσότερους αλγόριθμους ταξινόμησης που χρησιμοποιήθηκαν το οποίο δηλώνει επίσης ότι τα δείγματα εκπαίδευσης που συλλέξαμε είναι σωστά. Από τους αλγόριθμους που δοκιμάστηκαν καλύτερα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν από τους SAM, NEUC.



Πίνακας 7.2 Υπερφασματική απεικόνιση

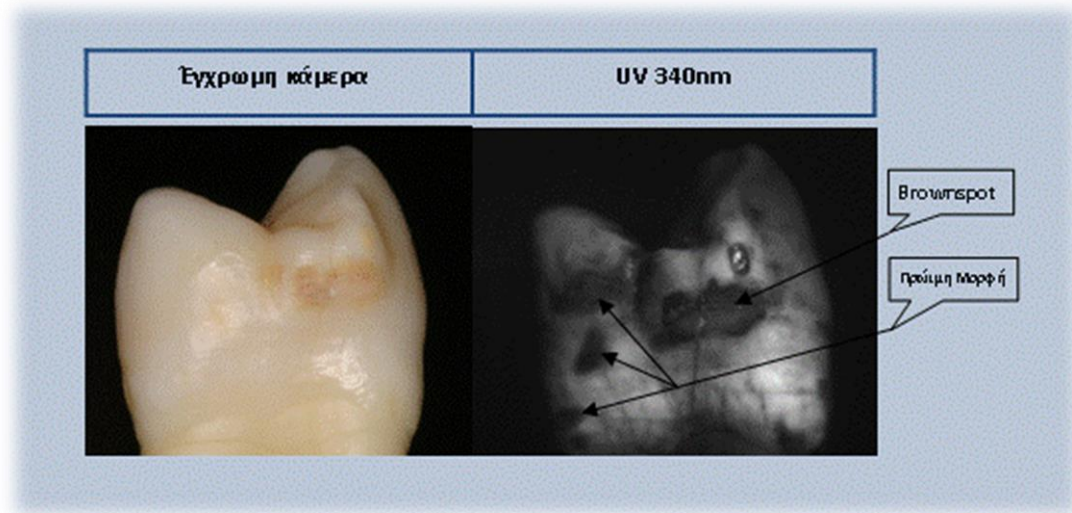
2. Για τον εντοπισμό των **λευκών κηλίδων** των λεγόμενων **whitespots** η υπερφασματική απεικόνιση δεν εντόπιζε πάντα τις περιοχές αυτές καθώς σε μερικές περιπτώσεις εμφάνιζαν κοινές φασματικές υπογραφές με υγιής περιοχές. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο ότι κάθε δόντι μπορεί να έχει τελείως διαφορετικό χρώμα υγιούς ιστού. Λύση στο πρόβλημα αυτό έδωσε η μέθοδος απεικόνισης στο υπεριώδες η οποία είχε την διακριτική ικανότητα να εντοπίζει τις λευκές κηλίδες. Στα πειράματά μας με χρήση υπεριώδους πηγής LED επιβεβαιώθηκε η διάγνωση με δύο τρόπους. Α) με την απεικόνιση φθορισμού από την υψηλής ανάλυσης έγχρωμη κάμερα Β) με την απεικόνιση ανάκλασης και φθορισμού. Συγκεκριμένα το πείραμα το οποίο βασίζεται στον φθορισμό προσομοιώνει σε ένα βαθμό μια υπάρχουσα έγκυρη διαγνωστική μέθοδο-συσκευή, την Quantitative light-induced fluorescence (QLF). Το QLF χρησιμοποιεί ένα 50-watt xenon arc-lamp και ένα οπτικό φίλτρο προκειμένου να παραχθεί ένα μπλε φως με 290 - έως 490-nm μήκος κύματος ενώ στο πείραμα μας χρησιμοποιήθηκε LED μήκους κύματος 365nm. Οι

εικόνες του φθορισμού φιλτράρονται από ένα κίτρινο υπερπυκνωμένο φίλτρο ($\lambda \geq 540 \text{ nm}$) ενώ στο δικό μας πείραμα το υπερπυκνωμένο φίλτρο ήταν ($\lambda \geq 520 \text{ nm}$) και κατόπιν συλλαμβάνονται από μια έγχρωμη κάμερα CCD και στις δύο περιπτώσεις. Αυτή η προσομοίωση θα οδηγήσει στην επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων καθώς το αναγνωρισμένο αυτό σύστημα έχει την ικανότητα να αναγνωρίζει τα whitespots. Αλλά κυρίως τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται καθώς συμπίπτουν με τη διάγνωση για κάθε δόντι που μας έχει δοθεί από την οδοντιατρική σχολή. Με το δεύτερο πείραμα στο υπεριώδες χρησιμοποιήθηκαν 2 πηγές LED, η μία στα 365nm και η άλλη στα 340nm και η υπερφασματική κάμερα του εργαστηρίου με bandpass φίλτρο UV. Στην απεικόνιση αυτή διακρίνονται οι αλλοιώσεις μορφής whitespot το οποίο επιβεβαιώνεται και από το προηγούμενο πείραμα και από την διάγνωση του κάθε δοντιού.



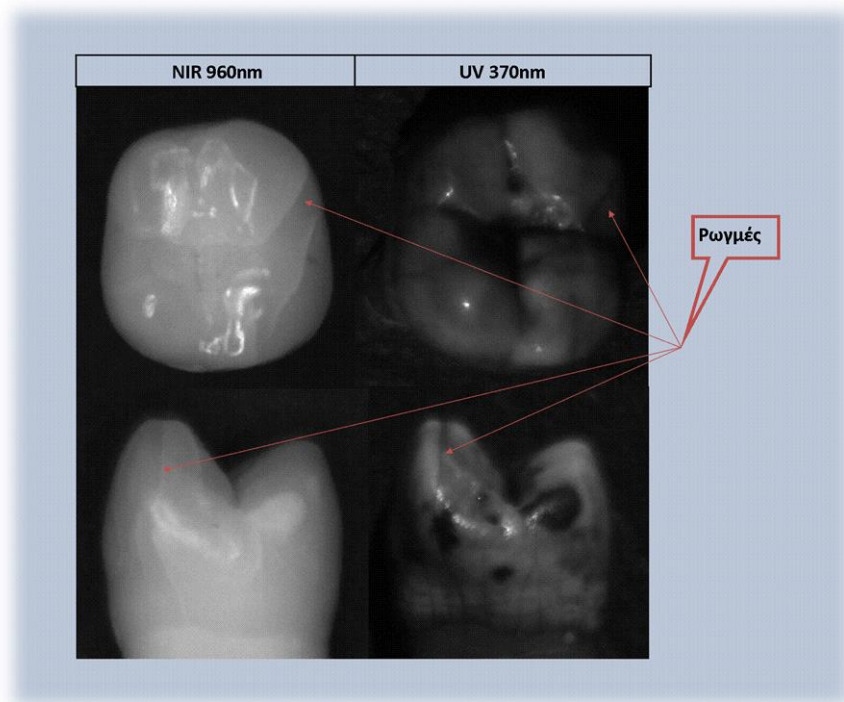
Πίνακας 7.3 UV απεικόνιση για εντοπισμό whitespot

3. Όσο αναφορά την **αναγνώριση πρώιμης μορφής τερηδόνας** η οποία ήταν και η μεγαλύτερη πρόκληση για την έρευνα αυτή έδωσε λύση μόνο το σύστημα που περιγράψαμε παραπάνω. Ως πρώιμη μορφή ορίζουμε μια περιοχή στην οποία διαπιστώνεται μερική απομετάλλωση της αδαμαντίνης ενώ με γυμνό μάτι δεν παρατηρείτε καμία διαφορά από τον υγιή ιστό. Στην απεικόνιση αυτή, μια πρώιμη μορφή τερηδόνας εμφανίζεται ως μια μαύρη σκιά και παρατηρείται ότι εμφανίζεται συνήθως σε είδη τερηδονισμένα δόντια δίπλα σε whitespots και brownspots.



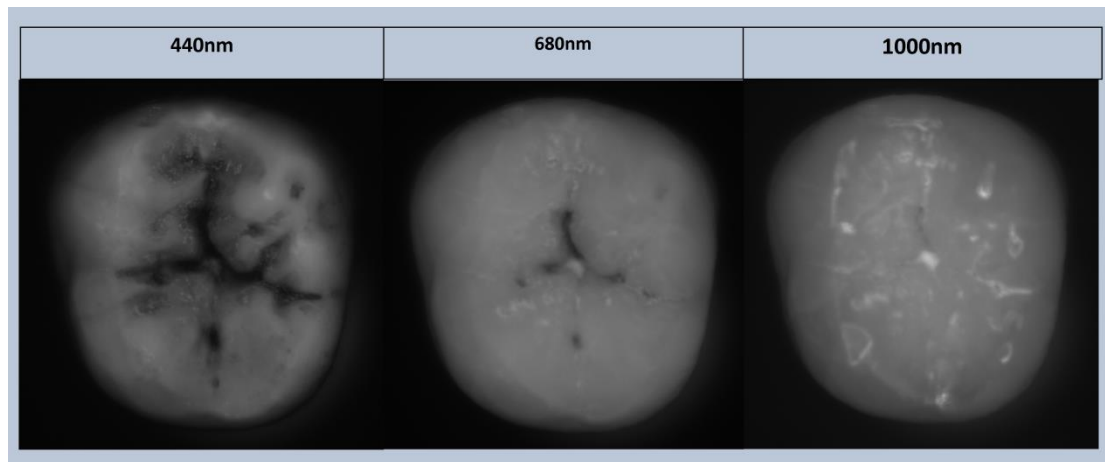
Πίνακας 7.4 UV απεικόνιση για εντοπισμό πρώιμων μορφών

4. Οι οδοντικοί ιστοί σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζουν **ρωγμές** οι οποίες με γυμνό μάτι δεν μπορούν να διακριθούν. Μια ρωγμή μπορεί σε αρχικό στάδιο να είναι ακίνδυνη αλλά στην πορεία μπορεί να προκαλέσει κάταγμα του δοντιού. Δημιουργούνται είτε από τη δήξη (δάγκωμα) κάποιου σκληρού αντικειμένου είτε από βρυγμό. Στα πειράματα οι ρωγμές αυτές διακρίθηκαν σε δύο περιπτώσεις. Αρχικά στο υπέρυθρο και έπειτα και στο υπεριώδες και εντοπίζονται κυρίως στην αδαμαντίνη.



Πίνακας 7.5 απεικόνιση για εντοπισμό ρωγμών

5. Επίσης σημαντικό ζητούμενο είναι η αναγνώριση του βάθους ενός brownspot. Brownspot ονομάζεται η αλλοίωση τερηδόνας η οποία έχει εισχωρήσει στην αδαμαντίνη και έχει δημιουργήσει κοιλότητα. Ο υπολογισμός του βάθους της είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την αντιμετώπιση της καθώς ο οδοντίατρος χρειάζεται να γνωρίζει πόσο έχει προχωρήσει στην αδαμαντίνη η τερηδόνα, ώστε να πράξει ανάλογα. Στα πειράματα διαπιστώθηκε ότι οι αλλοιώσεις τύπου brownspot είναι εμφανής μέχρι κάποιο συγκεκριμένο μήκος κύματος διαφορετικό για κάθε δόντι. Σε μερικές περιπτώσεις η αλλοίωση είναι φανερή μέχρι τα 600 nm και σε άλλες μέχρι τα 900nm. Λαμβάνοντας υπόψη το παραπάνω στοιχείο σε συνδυασμό με την ιδιότητα της αδαμαντίνης να διαφανίζει στο υπέρυθρο φως και επίσης την ιδιότητα της τερηδόνας να διεισδύει προς το εσωτερικό της αδαμαντίνης του δοντιού με κωνική μορφή αντιλαμβανόμαστε ότι μπορεί να γίνει μια εκτίμηση για το βάθος ενός brownspot με κριτήριο μέχρι πιο μήκος κύματος εμφανίζεται αλλοίωση κατά την υπερφασματική απεικόνιση (μεγαλύτερο μήκος κύματος μεγαλύτερο βάθος).



Πίνακας 7.6 απεικόνιση για εντοπισμό βάθους brownspot.

Η έρευνα αυτή έδωσε λύσεις στα παραπάνω ζητήματα με διαφορετικές μεθόδους απεικόνισης. Σημαντικό θα ήταν να γίνει δυνατή η επιλογή μιας συσκευής απεικόνισης που θα ικανοποιούσε όλες τις απαιτήσεις μιας σωστής διάγνωσης. Αυτή η συσκευή είναι η υπερφασματική κάμερα του εργαστηρίου η οποία είναι ικανή να αναγνωρίζει όλες τις προαναφερθείσες παθολογικές αλλοιώσεις.

Τέλος, στην εργασία αυτή, λόγω της εμπλοκής δύο μεγάλων επιστημονικών κλάδων τίθεται θέμα δεοντολογίας. Πρέπον είναι να διευκρινίσουμε ότι η εργασία αυτή αναδεικνύοντας νέες διαγνωστικές μεθόδους έχει σκοπό να προάγει την οδοντιατρική επιστήμη και να εξυπηρετήσει τον εκάστοτε οδοντίατρο. Προτείνει μια πιο εύκολη μη επεμβατική μη καταστρεπτική και αντικειμενικότερη διάγνωση μεγαλύτερης ακρίβειας και σε καμία περίπτωση δεν θέτει θέμα αντικατάστασης του οδοντίατρου. Μια πιθανή εφαρμογή των νέων διαγνωστικών μεθόδων προϋποθέτει πάντα την συνεργασία του ιατρού ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για την τελική διάγνωση.

Προοπτική εξέλιξης της εργασίας

Παρότι τα πειράματα διεξήχθησαν σε εξαγμένα δείγματα δοντιών (in vitro), η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για διάγνωση in vivo αρκεί να τροποποιηθεί η υπερφασματική κάμερα σε διαγνωστική φορητή συσκευή ικανή να λάβει εικόνες μέσα από την στοματική κοιλότητα. Ωστόσο, η κατασκευή μιας φορητής συσκευής ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Στο στάδιο αυτό, για την εξακρίβωση μερικών πρωτοπόρων αποτελεσμάτων, όπως είναι η πρώιμη μορφή τερηδόνας, είναι απαραίτητη η τομή των εξαχθέντων πειραματικών δοντιών έτσι ώστε να αποκαλυφθεί αν η αλλοίωση την οποία κατέγραψε η μέθοδος μας και η οποία δεν είναι εμφανής με άλλες μεθόδους επιβεβαιωθεί από την βιοψία. Υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο ένας οδοντικός ιστός να έχει επηρεαστεί από διαφορετικές παθολογικές καταστάσεις εκτός της τερηδόνας, όπως κάποιας άλλης πιθανώς μη επεκτατικής βλάβης, είτε από στίγματα του δοντιού, χρωματισμούς είτε καταστάσεις υπερβολικής πρόσληψης φθορίου (fluorosis). Επίσης, η διαδικασία αυτή προϋποθέτει ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα έως ότου να βγουν πορίσματα από αυτή την ανάλυση πράγμα που την θέτει εκτός των πλαισίων της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Όσον αφορά τη μέθοδο αυτή καθαυτή ενδεχόμενες βελτιώσεις μπορούν να υπάρξουν με εφαρμογή ακόμα περισσότερων αλγορίθμων ταξινόμησης, οι οποίοι ίσως αποκαλύψουν νέα δεδομένα στην υπάρχουσα έρευνα.

Αναφορές

1. Ζαφείρη, Βασιλική ,2008, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ)), Οδοντική ανθρωπολογία - προσδιορισμός της βιολογικής ηλικίας σε σκελετικό υλικό και σύγχρονο πληθυσμιακό δείγμα ελέγχου,19-47.
2. Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιστολογία Αδαμαντίνης Οδοντίνης, http://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/DENT170/Ιστολογία_Αδαμαντίνης_Οδοντίνης
3. Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ελένη Μέλιου, εμβρυολογία και ιστολογία του οδοντικού πολφού, <http://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/DENT172/POLFOS.doc>
4. Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Caries Diagnosi.doc.doc <http://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/DENT120/Caries%20Diagnosi.doc.doc>
5. ΝΙΚΟΛΑΟΣ Η. ΚΡΑΝΙΑΣ, Τεχνικές αποκατάστασης τερηδόνων ρίζας, 2000 <http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/12641#page/12/mode/2up>
6. Vasundhara Shivanna, B Shivakumar, 2004, Novel treatment of white spot lesions: A report of two cases.
7. Σερεμίδα Κ. ,Καθβαδία Α. ΠΑΙΔΟΔΟΝΤΙΑ 2009, Λευκές κηλίδες κατά την ορθοδοντική θεραπεία: Επιπολασμός και καταγραφή βλαβών, Τόμος 23(1): 112-120 http://www.hspd.gr/Journal/2009/Issue_4/Seremidi.pdf
8. Ουλής Κ, Λαγουβάρδος Π, ΠΑΙΔΟΔΟΝΤΙΑ 2011 ,Στρατηγικές διάγνωσης και αντιμετώπισης μασητικών τερηδόνων μόνιμων δοντιών, Τόμος 25(4): 151-172 http://www.hspd.gr/Journal/2011/Issue_4/Oulis.pdf
9. ICDAS : Coordinating Committee. Rationale and Evidence for the International Caries Detection and Assessment System (ICDAS II),University of Michigan, Ann Arbor MI, 2005
10. Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Οργανική Χημεία 2, Φάσμα, http://www.chem.uoa.gr/courses/instrumental2/Spectro/7h-8h_SPECTR.pdf
11. Lena Karlsson :“Caries Detection Methods Based on Changes in Optical Properties between Healthy and Carious Tissue”,vol 2010, 270729,2010, p 1-4

12. E. Borisova, T. Uzunov, and L. Avramov, "Laser-induced autofluorescence study of caries model in vitro," *Lasers in Medical Science*, vol. 21, no. 1, pp. 34–41, 2006
13. Costas Balas: "Review of biomedical optical imaging—a powerful, non-invasive, non-ionizing technology for improving in vivo diagnosis",2009.
14. Michele Baffi Diniz¹, Jonas de Almeida Rodrigues² and Adrian Lussi: "Traditional and Novel Caries Detection Methods"p116-123. 2012
15. P. Gerasimou¹, E. Koliniotou-Koumpia², P. Kouros³:" Modern methods for caries diagnosis: Diagnosis, justification".2010.
16. Cynthia Soares de Azevedo(a) Luciana Cardoso Espejo Trung(a) Maria Regina Lorenzetti Simionato(b) Anderson Zanardi de Freitas(c) Adriana Bona Matos(a):" Evaluation of caries-affected dentin with optical coherence tomography" 2011
17. N.K.Prabhakar*, Kiran kumar .N*, M.Kala* :“A REVIEW OF MODERN NON-INVASIVE METHODS FOR CARIES DIAGNOSIS” AOSR 2011;1(3):168-177
18. Balas C, Pappas C, Epitropou G, Handbook of Biomedical Optics , Multi/Hyper-Spectral Imaging,
Dept of Electronic and Computer Engineering, CRC press, Taylor & Francis Group.
19. Pilar-Beatriz García-Allende, Olga M. Conde and José Miguel López-Higuera(2011), *Hyperspectral Imaging for Raw Material Sorting and Processed Product Quality Control* ,University of Cantabria ,Spain