

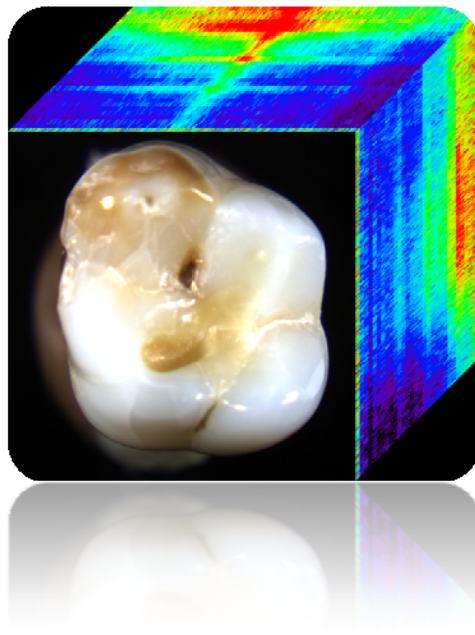


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

*Φασματική απεικόνιση και
αλγόριθμοι ταξινόμησης φασμάτων ανάκλασης
για την ανίχνευση και χαρτογράφηση τερηδόνας*

Λάγγα Πέγκο



Επιτροπή διπλωματικής

Μπάλας Κώστας, Αναπληρωτής Καθηγητής (επιβλέπων)

Ζερβάκης Μιχάλης, Καθηγητής

Μπούχερ Ματτίας, Επίκουρος Καθηγητής

XANIA, ΜΑΙΟΣ 2009

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου Κώστα Μπάλα, που με εμπιστεύτηκε να αναλάβω την διπλωματική αυτή εργασία με θέμα : «Φασματική απεικόνιση και αλγόριθμοι ταξινόμησης φασμάτων ανάκλασης για την ανίχνευση και χαρτογράφηση τερηδόνας». Οι πολύτιμες συμβουλές του σε κάθε στάδιο της διπλωματικής μου εργασίας με καθοδήγησαν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στους υποψήφιους διδάκτορες, Παπουτσόγλου Γεώργιο και Τσάπρα Αθανάσιο για την βοήθεια και την συμπαράσταση που μου προσέφεραν στην πορεία και την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Ιδιαίτερως ευχαριστώ ακόμα τον μεταπτυχιακό φοιτητή Επιτρόπου Γεώργιο, του οποίου η υποστήριξη και η καθοδήγηση συνέβαλαν καθοριστικά στην αποπεράτωση αυτής της μελέτης. Όλα τα μέλη του εργαστηρίου αποτέλεσαν ένα άψογο ερευνητικό περιβάλλον και οι εμπειρίες που αποκόμισα μαζί τους είναι πολύ χρήσιμες για την μελλοντική μου πορεία.

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

Δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στους φίλους μου, που αποτέλεσαν μέρος της όμορφης φοιτητικής μου ζωής όλα αυτά τα χρόνια και συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της προσωπικότητάς μου, μέσα από τις μοναδικές εμπειρίες που απέκτησα μαζί τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον Θοδωρή για την αγάπη του και το Δημήτρη που είναι πάντα δίπλα μου, με απίστευτη υπομονή και κατανόηση.

Πάνω απ' όλα όμως, ευχαριστώ τους γονείς μου, Βασίλη και Γεωργία, και την αναντικατάστατη αγαπημένη μου αδέρφη, την Αφροδίτη, οι οποίοι με στηρίζουν πάντα και μου δίνουν κουράγιο και δύναμη να συνεχίζω κάθε προσπάθεια, αλλά και να τολμώ να κάνω νέα ξεκινήματα. Αφιερώνω, λοιπόν, την διπλωματική αυτή εργασία στην οικογένειά μου, ως ελάχιστη έκφραση της αγάπης μου γι' αυτούς...

Περίληψη

Στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν η διερεύνηση των διαγνωστικών δυνατοτήτων της υπερφασματικής απεικόνισης σε παθήσεις των ανθρώπινων δοντιών. Στην πρώτη φάση της εργασίας αυτής έγινε μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων του ιστού και αναλύθηκαν τα φασματικά χαρακτηριστικά σε φυσιολογικές και παθολογικές καταστάσεις, με εστίαση στην τερηδόνα. Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά η τεχνολογία υπερφασματικής απεικόνισης για την λήψη φασματικών εικόνων εντός και εκτός του ορατού φάσματος, καθώς και για την φασματική χαρτογράφηση του δοντιού. Ειδικότερα, μέσω της υπερφασματικής κάμερας καταγράφηκαν άνω των 2 εκατομμυρίων φασμάτων για κάθε δείγμα (ένα φάσμα σε κάθε pixel). Τα φάσματα αυτά αναλύθηκαν με φασματικούς ταξινομητές διερευνώντας τις δυνατότητές τους στην ανίχνευση, εντοπισμό και εκτίμηση του βαθμού της αλλοίωσης. Τα φάσματα κατατάσσονται σε κλάσεις και κάθε κλάση αναπαρίσταται με ένα ψευδόχρωμα. Σε κάθε pixel αντιστοιχίζεται ένα ψευδόχρωμα (κλάση) και έτσι δημιουργείται ένας ψευδοχρωματικός χάρτης ο οποίος μπορεί να υπερτίθεται της εικόνας του αντικειμένου. Τα χρώματα του χάρτη εκφράζουν διαφορετικές παθολογικές καταστάσεις, καθιστώντας έτσι δυνατή την άμεση οπτικοποίηση της διαγνωστικής πληροφορίας. Με στόχο την μεγιστοποίηση της τελευταίας αξιολογήθηκαν συγκριτικά οι φασματικοί ταξινομητές: unsupervised (ISODATA) και supervised (Maximum Likelihood, Normalized Euclidean Distance, Spectral Angle Mapper, Spectral Correlation Mapper, Spectral Information Divergence, Spectral Gradient Mapper). Από την σύγκριση αυτή προκρίθηκαν οι ταξινομητές Normalized Euclidean Distance και Spectral Angle Mapper ως οι πιο αποτελεσματικοί. Για τους αλγόριθμους αυτούς έγινε σταδιακή μείωση των φασματικών διαστάσεων (dimensionality) με στόχο την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων απεικονιστικών συχνοτήτων, διατηρώντας παράλληλα την διαγνωστική ακρίβεια σταθερή. Αποδείχθηκε τελικά ότι οι επιλεγέντες αλγόριθμοι έχοντας ως είσοδο φασματικές εικόνες σε 3 στενές περιοχές συχνοτήτων στο ορατό και στο υπέρυθρο μέρος του φάσματος αποτελούν την βέλτιστη επιλογή.

Η προκαταρκτική εφαρμογή της μεθόδου αυτής σε δόντια με διαφορετικού βαθμού τερηδονικών αλλοιώσεων έδειξε ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ειδικότερα έγινε δυνατή η ανίχνευση μη ορατών αλλοιώσεων, επιβαίνοντας τις μεγάλες της δυνατότητες στην πρώιμη διάγνωση και στην ποσοτικοποίηση και κατ' επέκταση στην αντικειμενικοποίηση της διαγνωστικής διαδικασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Το δόντι και η ασθένεια της τερηδόνας	10
1.1 Γενικές πληροφορίες για τα δόντια	10
1.2 Ανατομία των δοντιών	11
1.3 Ιστολογία της αδαμαντίνης.....	12
1.3.1 Γενικά	12
1.3.2 Μικροδομή της αδαμαντίνης.....	12
1.3.3 Χημική σύσταση της αδαμαντίνης	13
1.3.3.1 Ανόργανα συστατικά της αδαμαντίνης	13
1.3.3.2 Οργανικά συστατικά της αδαμαντίνης	14
1.4 Ιστολογία της οδοντίνης.....	14
1.4.1 Γενικά	14
1.4.2 Μικροδομή της οδοντίνης	15
1.4.3 Χημική σύσταση της οδοντίνης	15
1.4.3.1 Ανόργανα συστατικά της οδοντίνης.....	16
1.4.3.2 Οργανικά συστατικά της οδοντίνης	16
1.5 Ιστολογία του πολφού	16
1.6 Παθολογία των δοντιών	17
1.6.1 Η αποτριβή των δοντιών	17
1.6.2 Η διάβρωση των δοντιών	17
1.6.3 Η απόσπαση των δοντιών.....	18
1.6.4 Η νόσος τερηδόνα	18
1.6.4.1 Στάδια της τερηδόνας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης και αρχές φασματοσκοπίας	22
2.1 Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	22
2.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	23
2.3 Φασματοσκοπία.....	24
2.3.1 Απορρόφηση – Εκπομπή.....	24
2.3.1.1 Φθορισμός – Φωσφορισμός.....	25
2.3.2 Ανάκλαση – Σκέδαση.....	26
2.3.3 Είδη και μέθοδοι φασματοσκοπίας	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Μέθοδοι και τεχνολογίες ανίχνευσης της τερηδόνας	28
3.1 Γενικά.....	28
3.2 Μελέτες φασματοσκοπίας φθορισμού και ανάκλασης των δοντιών.....	29
3.3 Νέες τεχνολογίες για την ανίχνευση της τερηδόνας	39
3.4 Συγκρίσεις μεθόδων	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Υπερφασματική απεικόνιση και αλγόριθμοι ταξινόμησης	48
4.1 Υπερφασματική απεικόνιση (Hyperspectral Imaging).....	48
4.2 Σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης (MuSIS)	51
4.3 Επεξεργασία υπερφασματικών δεδομένων	53
4.3.1 Γενικά	53
4.3.2 Προεπεξεργασία δεδομένων.....	53
4.3.3 Ταξινόμηση υπερφασματικών δεδομένων	54
4.4 Αλγόριθμοι ταξινόμησης.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα	60
5.1 Στάδια εργασίας	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα και προοπτική εξέλιξης της εργασίας	94
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	97

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

<i>Εικόνα 1.1</i> Είδη και θέση νεογιλών και μόνιμων δοντιών και ηλικία ανθρώπου που ανατείλλουν.....	10
<i>Εικόνα 1.2</i> Ανατομία του δοντιού.....	11
<i>Εικόνα 1.3</i> Δομή της αδαμαντίνης	13
<i>Εικόνα 1.4</i> Κρύσταλλοι υδροξυαπατίτη.....	14
<i>Εικόνα 1.5</i> Τα στόμια των οδοντινοσωληναρίων και η σιγμοειδής πορεία τους σε όλο το μήκος της οδοντίνης	15
<i>Εικόνα 1.6</i> Απεικόνιση των σιβάδων του πολφού.....	16
<i>Εικόνα 1.7</i> Δόντια με τερηδόνα.....	19
<i>Εικόνα 1.8</i> Μηχανισμός δημιουργίας της τερηδόνας στα δόντια μας	19
<i>Εικόνα 1.9</i> Στάδια της τερηδόνας	21
<i>Εικόνα 2.1</i> Ηλεκτρομαγνητικό κύμα	22
<i>Εικόνα 2.2</i> Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	23
<i>Εικόνα 2.3</i> Φαινόμενα που συμβαίνουν όταν φως έρθει σε επαφή με κάποια επιφάνεια ενός άλλου μέσου	24
<i>Εικόνα 2.4</i> Ατομικό σύστημα αποτελούμενο από δύο ενεργειακές στάθμες.....	25
<i>Εικόνα 2.5</i> Διαγράμματα Jablonski.....	25
<i>Εικόνα 2.6</i> Περιπτώσεις ανάκλασης	26
<i>Εικόνα 3.1</i> Το σύστημα φθορισμού με εισαγωγή laser αζώτου	30
<i>Εικόνα 3.2</i> Αριθμός δειγμάτων δοντιών που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε ένα διαφορετικό στάδιο εξέλιξης της τερηδόνας	30
<i>Εικόνα 3.3α</i> Σύγκριση μεταξύ των φασμάτων της υγιούς αδαμαντίνης του δοντιού (enamel) και της οδοντίνης (dentin).....	30
<i>Εικόνα 3.3β</i> Φάσματα υγιούς περιοχής δοντιών και δοντιών που έχουν υποστεί απομετάλλωση	30
<i>Εικόνα 3.3γ</i> Κανονικοποιημένα φάσματα υγιών και απομεταλλωμένων περιοχών των δοντιών	30
<i>Εικόνα 3.4α</i> Φάσματα διαφόρων σταδίων εξέλιξης της τερηδόνας, συγκρινόμενα με φάσμα υγιών περιοχών των δοντιών.....	31
<i>Εικόνα 3.4β</i> Κανονικοποιημένα στο μέγιστο φάσματα των διαφόρων σταδίων εξέλιξης της τερηδόνας.....	31
<i>Εικόνα 3.5</i> Σύστημα φθορισμού και ανάκλασης για την ανίχνευση των αλλοιώσεων τερηδόνας	32
<i>Εικόνα 3.6</i> Φάσματα φθορισμού με διέγερση στα 337nm για υγιές δόντι (sound), δόντι με τερηδόνα επιπέδου οδοντίνης (dentin level) και με τερηδόνα πολφού (pulp level).....	33
<i>Εικόνα 3.7</i> Οι συνιστώσες μπάντες των φασμάτων φθορισμού για υγιές δόντι, δόντι με τερηδόνα σε επίπεδο οδοντίνης και επίπεδο πολφού	33

Εικόνα 3.8 Φάσματα διάχυτης ανάκλασης για υγιές δόντι (60 δείγματα), τερηδόνα οδοντίνης (10 δείγματα), τερηδόνα πολφού (20 δείγματα).....	34
Εικόνα 3.9 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για ανίχνευση τερηδόνας στα δόντια, μέσω φασμάτων ανάκλασης τους.....	35
Εικόνα 3.10 Φάσματα ανάκλασης για κομμάτια αδαμαντίνης και οδοντίνης και για υγιή επιφάνεια δοντιού.....	35
Εικόνα 3.11 Φάσματα ανάκλασης για δέκα δείγματα υγιών δοντιών.....	36
Εικόνα 3.12 Φάσματα ανάκλασης για διαφορετικά στάδια τερηδόνας.....	37
Εικόνα 3.13 Αλλαγές στην ένταση για διάφορα μήκη κύματος, σε συνάρτηση με το στάδιο της τερηδόνας.....	38
Εικόνα 3.14 Λόγοι $R1= R450 / R900$ και $R2=R650 / R900$, που χρησιμοποιούνται για διάκριση των αλλοιώσεων τερηδόνας.....	38
Εικόνα 3.15 Απεικονιστική διάταξη στο υπέρυθρο φώς.....	39
Εικόνα 3.16 (Α)Απεικόνιση ανακλώμενου φωτός (ορατό) ενός γομφίου με εκτεταμένη πρόσληψη φθορίου(fluorosis) και μία μεγάλη αλλοίωση (κίτρινος κύκλος) στο κεντρικό βαθούλωμα, (Β) Ακτινογραφία, (C) Απεικόνιση NIR του δοντιού ,η αλλοίωση είναι η μεγάλη αδιαφάνεια.....	40
Εικόνα 3.17 (Α) Απεικόνιση ανακλώμενου φωτός (ορατό) ενός γομφίου με τερηδόνα στις σχισμές, (Β) Ακτινογραφία, (C) Απεικόνιση NIR του δοντιού, δείχνει τοπικές περιοχές με τερηδόνα.....	41
Εικόνα 3.18 (Α) Απεικόνιση ανακλώμενου φωτός (ορατό) ενός υγιούς γομφίου χωρίς τερηδόνα, (Β) Ακτινογραφία, (C) Απεικόνιση NIR του δοντιού.....	41
Εικόνα 3.19 QLF εξοπλισμός.....	42
Εικόνα 3.20 Ανάλυση αλλοίωσης χρησιμοποιώντας QLF.....	43
Εικόνα 3.21 Απεικόνιση QLF.....	43
Εικόνα 3.22 Η συσκευή DIAGNODent.....	44
Εικόνα 3.23 (α)Το σύστημα DIFOTI, περιλαμβάνει ένα φωτεινό κουτί και υπολογιστή,(b)Η συσκευή χειρός, (c)Η επίπεδη επιφάνεια φωτίζεται.....	45
Εικόνα 4.1 Υπερφασματική απεικόνιση : φασματικός κύβος και φάσματα ανάκλασης για κάθε pixel.....	49
Εικόνα 4.2 Φασματικές υπογραφές διαφόρων υλικών.....	49
Εικόνα 4.3 Περιληπτικά οι διαφορές των διαφορετικών τύπων φασματικής απεικόνισης.....	50
Εικόνα 4.4 Απαιτούμενα βήματα από την απόκτηση του φασματικού κύβου έως την απεικόνιση ουσιώδους πληροφορίας.....	53
Εικόνα 4.5 Βήματα για μεθόδους Supervised και Unsupervised ταξινόμησης.....	55
Εικόνα 4.6 Αναπαράσταση διανυσμάτων δύο φασμάτων για 3 διαφορετικά λ.....	57
Εικόνα 4.7 Αναπαράσταση διανυσμάτων δύο φασμάτων για 3 διαφορετικά λ.....	57
Εικόνα 5.1 Φασματικός κύβος για το δόντι 1, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS.....	61
Εικόνα 5.2 Χρωματικοί χάρτες που παρουσιάζουν διάφορα στάδια εξέλιξης της τερηδόνας, για το δόντι 1.....	65
Εικόνα 5.3 Χρωματικοί χάρτες για τα υπόλοιπα 6 δείγματα δοντιών.....	66
Εικόνα 5.4 Εικόνες από την εφαρμογή αλγορίθμων στα 7 δείγματα δοντιών.....	68
Εικόνα 5.5 Εικόνες στα 420nm, 520nm, 700nm και 900nm από τους φασματικούς κύβους που προέκυψαν για 6 διαφορετικές συνθήκες φωτισμού.....	70
Εικόνα 5.6 Εικόνες από την εφαρμογή αλγορίθμων στις 6 διαφορετικές συνθήκες φωτισμού του δοντιού 1.....	72

Εικόνα 5.7 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	74
Εικόνα 5.8 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	75
Εικόνα 5.9 Εικόνες που προέκυψαν από τον SID, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	75
Εικόνα 5.10 Εικόνες που προέκυψαν από τον SCM, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	76
Εικόνα 5.11 Εικόνες που προέκυψαν από τον SGA, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	76
Εικόνα 5.12 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 4 μπαντών.....	79
Εικόνα 5.13 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 4 μπαντών.....	79
Εικόνα 5.14 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών.....	82
Εικόνα 5.15 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών.....	83
Εικόνα 5.16 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα.....	89
Εικόνα 5.17 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα.....	90
Εικόνα Π1 Φασματικός κύβος για το δόντι 2, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS.....	97
Εικόνα Π2 Φασματικός κύβος για το δόντι 3, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS.....	97
Εικόνα Π3 Φασματικός κύβος για το δόντι 4, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS.....	98
Εικόνα Π4 Φασματικός κύβος για το δόντι 5, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS.....	98
Εικόνα Π5 Φασματικός κύβος για το δόντι 6, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS.....	98
Εικόνα Π6 Φασματικός κύβος για το δόντι 7, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS.....	99
Εικόνα Π7 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	99
Εικόνα Π8 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	100
Εικόνα Π9 Εικόνες που προέκυψαν από τον SID, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	100
Εικόνα Π10 Εικόνες που προέκυψαν από τον SCM, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	101
Εικόνα Π11 Εικόνες που προέκυψαν από τον SGA, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε.....	101
Εικόνα Π12 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 4 μπαντών.....	102
Εικόνα Π13 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 4 μπαντών.....	102

<i>Εικόνα Π14 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών.....</i>	<i>103</i>
<i>Εικόνα Π15 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών.....</i>	<i>104</i>
<i>Εικόνα Π16 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα.....</i>	<i>105</i>
<i>Εικόνα Π17 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα.....</i>	<i>106</i>

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 2.1 Περιοχές του ηλεκτομαγνητικού φάσματος.....</i>	<i>23</i>
<i>Πίνακας 3.1 Λόγοι εντάσεων ανάκλασης για υγρή και τερηδονισμένα δόντια.....</i>	<i>34</i>
<i>Πίνακας 3.2 Παθολογικές ομάδες και αριθμός δειγμάτων που ανήκει στην κάθε μία.....</i>	<i>35</i>
<i>Πίνακας 5.1 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του SAM για 4 μπάντες, συγκριτικά με SAM για 30 μπάντες.....</i>	<i>80</i>
<i>Πίνακας 5.2 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του NEUC για 4 μπάντες, συγκριτικά με NEUC για 30 μπάντες.....</i>	<i>80</i>
<i>Πίνακας 5.3 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του SAM για 3 μπάντες, συγκριτικά με SAM για 30 μπάντες.....</i>	<i>84</i>
<i>Πίνακας 5.4 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του NEUC για 3 μπάντες, συγκριτικά με NEUC για 30 μπάντες.....</i>	<i>85</i>
<i>Πίνακας 5.5 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του SAM για 3 μπάντες στο ορατό φάσμα, συγκριτικά με SAM για 30 μπάντες.....</i>	<i>91</i>
<i>Πίνακας 5.6 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του NEUC για 3 μπάντες, συγκριτικά με NEUC για 30 μπάντες.....</i>	<i>92</i>

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ύπαρξη των χρωμάτων αποτελεί την πιο απλή μορφή αλληλεπίδρασης μεταξύ του φωτός και της ύλης. Αντιλαμβανόμαστε το φως και το χρώμα μέσω της όρασης, που αποτελεί την βασικότερη αίσθηση. Οι διαφορές των χρωμάτων είναι το πιο απλό και βασικό κριτήριο αντίληψης, προκειμένου να κατηγοριοποιήσουμε διάφορα αντικείμενα. Το φως κινείται μέσα στο χώρο και όταν πέσει πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου αλληλεπιδρά με αυτή. Η αλληλεπίδραση αυτή αποτελεί την βάση πολλών φυσικών επιστημών, που προσπαθούν να περιγράψουν όλες τις μορφές των αντιδράσεων. Η κατανόηση του φωτός και οι ιδιότητες του ήταν κρίσιμες και πολλές θεωρίες εξελίχθηκαν έχοντας σκοπό να δώσουν απαντήσεις για όλα τα φαινόμενα που συνέβησαν στον κόσμο και στα επιστημονικά πειράματα. Έτσι, το φως μπορεί να θεωρηθεί είτε ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα είτε ως μόνιο.

Το χρώμα των αντικειμένων σχηματίζεται μέσω της απορρόφησης και της ανάκλασης των τμημάτων του ορατού φάσματος και είναι κάτι που μπορεί να συλλάβει το ανθρώπινο μάτι. Ωστόσο, προκύπτει η απορία εάν υπάρχουν κι άλλες μορφές αλληλεπίδρασης μεταξύ του φωτός και της ύλης, τις οποίες δεν μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι. Τί γίνεται εάν το μάτι μας μπορεί να δει μόνο ένα μέρος του φάσματος χρωμάτων;

Για να πάμε ένα βήμα μπροστά, τί θα γινόταν αν μπορούσαμε να επεκτείνουμε το ορατό τμήμα του φάσματος με τεχνικά μέσα, έτσι ώστε το μάτι μας να μπορεί να δει περισσότερα πράγματα; Υπάρχουν πολλά συστήματα και εξελίσσονται διάφορες επιστήμες, προκειμένου να εξασφαλιστούν τα μέσα για επέκταση της όρασης μας πέρα από το ορατό μέρος του φάσματος. Η επέκταση της όρασης μας συνεπάγεται έρευνα σε άλλες όψεις της αλληλεπίδρασης φωτός – ύλης, ανάλογα με ποιο μέρος του φάσματος επιλέγεται ως διαγνωστικό εργαλείο. Η απορρόφηση και η εκπομπή του φωτός είναι η βάση πολλών γνωστών απεικονιστικών συστημάτων, που όλα μοιράζονται βασικές αρχές, παρ' όλο που χρησιμοποιούν διαφορετικές μπάντες του φάσματος.

Ένα τέτοιου είδους σύστημα και συνεπώς εξελικτική επιστήμη (μέσω των συγκεκριμένων του εφαρμογών) είναι η φασματική απεικόνιση. Θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η φασματική απεικόνιση είναι ένα είδος συστήματος αισθητήρα, όπου τα φάσματα ενός αντικειμένου είναι η διέγερση του συστήματος και συνεπώς εξασφαλίζει πληροφορίες για το αντικείμενο. Ένας βασικός παράγοντας που διακρίνει την υπερφασματική απεικόνιση (Hyperspectral Imaging) από άλλες τεχνολογίες απεικόνισης είναι το μέρος του φάσματος που χρησιμοποιείται στις εφαρμογές. Αναφερόμαστε σε μήκη κύματος από 300nm έως 1000nm, 1200nm ή 2500nm. Τα κύματα αυτών των μηκών κύματος έχουν μικρά ποσά ενέργειας και

μπορούμε εύκολα να προσομοιώσουμε μία παρόμοια διέγερση στο φυσικό φως με τεχνικά μέσα, χρησιμοποιώντας κοινά εξαρτήματα φωτισμού και εξοπλισμό. Αυτό είναι σημαντικό για ιατρικές και άλλες εφαρμογές, όπου οι στόχοι δεν θα πρέπει να ακτινοβολούνται, σε αντίθεση με τις ακτίνες X κ.τ.λ.

Η υπερφασματική απεικόνιση είναι ένα πεδίο μεγάλης σημασίας, λόγω της διακριτικής ικανότητας της, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί με το φως της ημέρας ή με τεχνητή πηγή φωτός με μικρά ποσά ενέργειας, οπότε δεν επηρεάζει τους ιστούς ή τα δείγματα που εξετάζονται. Εξασφαλίζει μία τεράστια πηγή πληροφορίας και εκτός από τις προκλήσεις που εμφανίζονται κατά την εξέλιξη της ίδιας της τεχνολογίας, υπάρχουν πολλά πεδία όπου μπορεί να εφαρμοστεί η υπερφασματική απεικόνιση, όπως η ορυκτολογία, η ιατρική, η γεωργία κ.τ.λ.

Χρησιμοποιώντας το υπερφασματικό σύστημα απεικόνισης στα δόντια, σκοπεύουμε αρχικά να διασαφηνίσουμε την αντίληψή μας όσον αφορά την κατάσταση της υγείας των δοντιών. Γνωρίζουμε ότι ένα δόντι είναι υγιές μέσω του χρώματος του, δηλαδή όσο πιο λευκό είναι ένα δόντι, τόσο πιο υγιές είναι. Συγχρόνως, το χρώμα ενεργεί σαν δείκτης όταν υπάρχει κάποιο σφάλμα και ενημερώνει τον οδοντίατρο ή τον ερευνητή. Τότε, αντιλαμβάνονται την φθορά σε περίπτωση που υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά χρώματος μεταξύ υγιών και τερηδονισμένων δοντιών. Η εμπειρία και ο συνεχής έλεγχος είναι σημαντικό να οδηγούν εγκαίρως σε αναγνώριση του κινδύνου, μέσω ορατών συμπτωμάτων, ώστε να γίνεται εφαρμογή κατάλληλης θεραπείας. Το χρώμα των δοντιών σχηματίζεται λόγω απορρόφησης σε προκαθορισμένα μήκη κύματος φωτός των χρωμοφόρων βακτηριδίων που είναι παρόντα στην τερηδόνα. Επίσης, είμαστε ίσως σε θέση να αναγνωρίσουμε διάφορα στάδια εξέλιξης της τερηδόνας, ως αρχικό στάδιο δημιουργίας της, προχωρημένο στάδιο εξέλιξης της ή τελικό στάδιο της ασθένειας, μέσω των οπτικών ιδιοτήτων των χρωμοφόρων.

Στην μελέτη μας προτείνουμε την χρήση υπερφασματικής απεικόνισης ως επιτυχή, προκειμένου να αναγνωρίσουμε την κατάσταση υγείας του δοντιού. Η δυνατότητα αυτή είναι διαθέσιμη εκτελώντας τεχνικές ταξινόμησης στα αποκτηθέντα φάσματα. Επιπλέον εξετάζουμε τις ελάχιστες μπάντες που απαιτούνται για το υπερφασματικό σύστημα απεικόνισης, ώστε να εξασφαλιστούν σίγουρες πληροφορίες που αφορούν την παθολογία του δοντιού.

Αναλυτικότερα, στην συνέχεια του κειμένου ακολουθούν τα εξής :

Κεφάλαιο 1 : Δίνουμε γενικές πληροφορίες για τα δόντια, την ανατομία, την ιστολογία και την παθολογία των δοντιών, ενώ επικεντρωνόμαστε στην νόσο τερηδόνα και αναφέρουμε τα στάδια εμφάνισης της.

Κεφάλαιο 2 : Περιγράφουμε τους τρόπους αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τους ιστούς, που αποτελούν τις βασικές φυσικές αρχές στις οποίες στηρίζονται όλες οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήσαμε.

Κεφάλαιο 3 : Αναφέρουμε τεχνικές φασματοσκοπίας φθορισμού και ανάκλασης που βασίζονται στις οπτικές ιδιότητες των ιστών και συσκευές ανίχνευσης τερηδόνας που έχουν ήδη εφαρμοστεί, σημειώνοντας όμως τα μειονεκτήματά τους.

Κεφάλαιο 4 : Παρουσιάζουμε τις γενικές έννοιες της υπερφασματικής απεικόνισης και της ταξινόμησης υπερφασματικών δεδομένων, ενώ αναλύουμε το σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS που χρησιμοποιούμε στην έρευνα αυτή, καθώς και τους αλγορίθμους ταξινόμησης φασμάτων ανάκλασης που εφαρμόζουμε για την ανίχνευση και την χαρτογράφηση της τερηδόνας.

Κεφάλαιο 5 : Περιγράφουμε την πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε σε όλη την διάρκεια της εργασίας μας, αναφέρουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν με εφαρμογή διαφόρων μεθόδων και αναλύουμε τα τελικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6 : Συνοψίζουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την διάρκεια της έρευνάς μας και κάνουμε προτάσεις για μελλοντική επέκταση της δουλειάς μας.

Παράρτημα : Εκθέτουμε εικόνες χρωματικών χαρτών που προέκυψαν από διάφορες διαδικασίες που περιγράφονται αναλυτικά στα διάφορα στάδια του 5^{ου} κεφαλαίου.

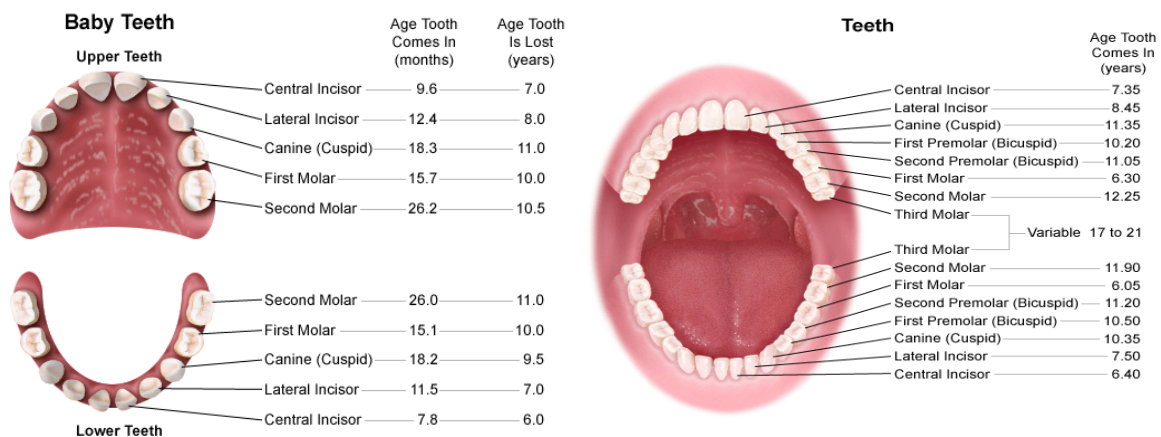
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Το δόντι και η ασθένεια της τερηδόνας

1.1 Γενικές πληροφορίες για τα δόντια

Το δόντι αποτελεί όργανο του γαστρεντερικού συστήματος που βρίσκεται μέσα στην στοματική κοιλότητα και στηρίζεται στο οστό των γνάθων. Τα δόντια οργανώνονται σε στοίχους, τις οδοντοστοιχίες, και έτσι έχουμε την άνω και κάτω οδοντοστοιχία για την άνω και κάτω γνάθο αντίστοιχα. Η ανατολή μιας σειράς δοντιών από το οστό των γνάθων ονομάζεται οδοντοφυΐα. Στον άνθρωπο υπάρχουν δύο οδοντοφυΐες, η νεογιλή και η μόνιμη. Η νεογιλή ή παιδική οδοντοφυΐα αποτελείται από 20 δόντια από τα οποία το πρώτο εμφανίζεται στην στοματική κοιλότητα τον έβδομο μήνα της ζωής και το τελευταίο αποπίπτει στην ηλικία των 12 ετών περίπου. Τα νεογιλά δόντια αρχίζουν να αντικαθίστανται από τα μόνιμα στην ηλικία των 6 περίπου ετών. Η μόνιμη οδοντοφυΐα αποτελείται από 32 δόντια και ολοκληρώνεται στην ηλικία των 18 ετών με την ανατολή και του τελευταίου μόνιμου δοντιού, του σωφρονιστήρα ή φρονιμίτη. Τα δόντια ανάλογα με την εξωτερική τους μορφολογία αλλά και την θέση τους στις γνάθους διακρίνονται στις εξής ομάδες :

1. Τομείς (κεντρικός και πλάγιος) [incisors]
2. Κυνόδοντες [canines]
3. Προγόμφιοι (1ος και 2ος) [premolars]
4. Γομφίοι (1ος, 2ος και 3ος ή φρονιμίτης) [molars]

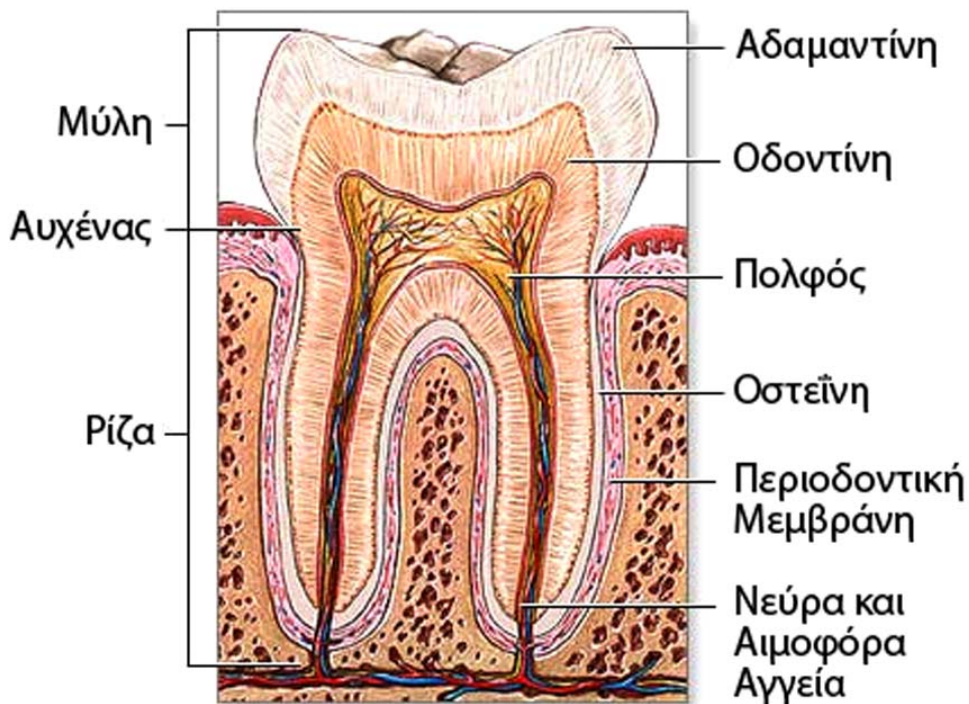
Παρουσιάζονται παρακάτω (εικόνα 1.1) τα είδη και η θέση των δοντιών (νεογιλών και μόνιμων) καθώς και η ηλικία του ανθρώπου που ανατείλλουν αυτά.



Εικόνα 1.1 Είδη και θέση νεογιλών και μόνιμων δοντιών και ηλικία ανθρώπου που ανατείλλουν

1.2 Ανατομία των δοντιών

Το δόντι εμφανίζει δύο τμήματα: την *μούλη* και την *ρίζα*. Η *ρίζα* είναι το τμήμα του δοντιού που βρίσκεται μέσα στο οστό της γνάθου ενώ η *μούλη* αποτελεί το τμήμα του δοντιού που φαίνεται μέσα στην στοματική κοιλότητα. Το σχήμα της μύλης καθορίζει τη λειτουργία του δοντιού. Για παράδειγμα, τα μπροστινά δόντια είναι κοφτερά, σε σχήμα σμίλης, για να κόβουν, ενώ οι τραπεζίτες (γομφίοι) έχουν επίπεδες επιφάνειες για να μασούν. Η μύλη με την ρίζα διαχωρίζονται από μια νοητή γραμμή που ονομάζεται *αυχέννας* του δοντιού. (εικόνα 1.2)



Εικόνα 1.2 Ανατομία του δοντιού

Κάθε δόντι αποτελείται από τέσσερις επιμέρους ιστούς: την *αδαμαντίνη*, την *οδοντίνη*, την *οστεΐνη* και τον *πολφό*. Η οδοντίνη βρίσκεται τόσο στην μύλη όσο και στην ρίζα. Η αδαμαντίνη καλύπτει την εξωτερική επιφάνεια της οδοντίνης στην μύλη ενώ η οστεΐνη καλύπτει την εξωτερική επιφάνεια της οδοντίνης στην ρίζα. Η οδοντίνη στο εσωτερικό της εμφανίζει μια κοιλότητα η οποία υποδέχεται τον πολφό. Ο πολφός αποτελείται από αγγεία και νεύρα και χρησιμεύει στην θρέψη του δοντιού.

Αναλυτικότερα:

- Η *αδαμαντίνη* βρίσκεται στην μύλη του δοντιού, είναι σκληρή και διαφανής και προστατεύει το δόντι κατά τη μάσηση. Η αδαμαντίνη είναι η πιο σκληρή ουσία του ανθρώπινου σώματος.
- Η *οδοντίνη* βρίσκεται στην μύλη και στη ρίζα, είναι πιο μαλακή από την αδαμαντίνη, έχει κίτρινο χρώμα και περιέχει μερικές από τις νευρικές ίνες του πολφού.
- Η *οστεΐνη* καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ρίζας του δοντιού και βοηθά στην σύνδεση του δοντιού με το οστό της γνάθου. Πάνω της συνδέονται οι ίνες της περιοδοντικής μεμβράνης.
- Ο *πολφός* βρίσκεται στο κέντρο του δοντιού και περιέχει τα αγγεία και τα νεύρα του δοντιού.
- Η *περιοδοντική μεμβράνη* είναι ένας δυνατός ιστός που κρατάει το δόντι στη θέση του. Οι ίνες της περιοδοντικής μεμβράνης ενώνουν τη ρίζα του δοντιού με την γνάθο.
- Τα *νεύρα* και τα *αιμοφόρα αγγεία* μεταδίδουν σήματα (μεταφέροντας μηνύματα όπως ζεστό, κρύο, πόνος) από και προς τον εγκέφαλο και μεταφέρουν τροφή στο δόντι, αντίστοιχα.

1.3 Ιστολογία της αδαμαντίνης

1.3.1 Γενικά

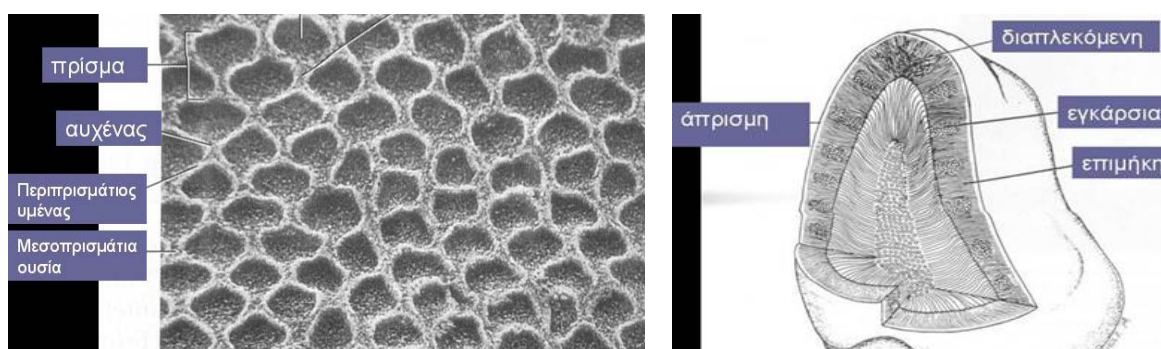
Η αδαμαντίνη περιβάλλει το μυλικό τμήμα των δοντιών και έχει ως κύριο ρόλο την προστασία της υποκείμενης οδοντίνης και του πολφού από τα εξωτερικά βλαπτικά ερεθίσματα που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία του στοματογναθικού συστήματος. Εμβρυολογικά προέρχεται από το έξω βλαστικό δέρμα. Η αδαμαντίνη 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 αναγεννάται.

1.3.2 Μικροδομή της αδαμαντίνης

Η αδαμαντίνη είναι δομημένη αποκλειστικά από ενασβεστιωμένες μονάδες, τα *αδαμαντινικά πρίσματα*, που συνήθως συνάπτονται μεταξύ τους με την παρεμβολή *μεσοπρισματίας ουσίας*. Η κατεύθυνση των αδαμαντινικών πρισμάτων δεν είναι όμοια σε όλη τη μάζα της αδαμαντίνης. Η ιδιόμορφη αυτή διάταξη των αδαμαντινικών

πρισμάτων δημιουργεί τις προϋποθέσεις για να ανταποκριθεί η αδαμαντίνη στα μεγάλα φορτία της μασητικής λειτουργίας των δοντιών. Το δε πάχος της αδαμαντίνης δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη τη μυλική επιφάνεια των δοντιών. Ανάλογα με τον τύπο του δοντιού, το πάχος στα φύματα 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 μηδενίζεται στον αυχένα των δοντιών. (εικόνα 1.3)



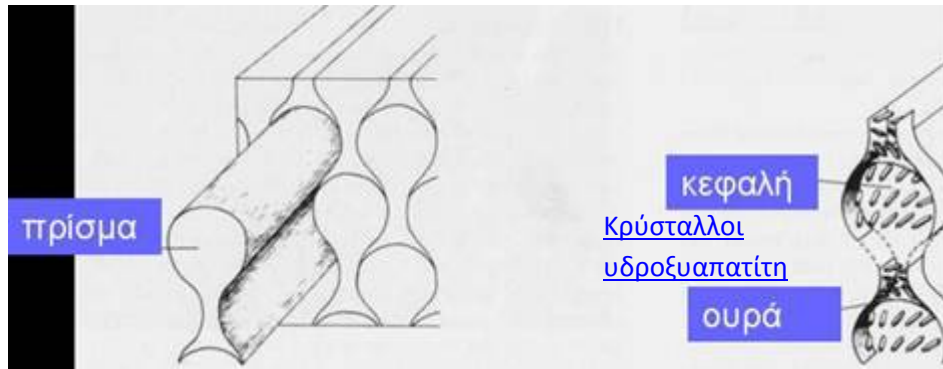
Εικόνα 1.3 Δομή της αδαμαντίνης

1.3.3 Χημική σύσταση της αδαμαντίνης

Η αδαμαντίνη αποτελείται κυρίως από *ανόργανα συστατικά* (92-96% κ.β), από *ελάχιστα οργανικά* (1-2% κ.β) και από *νερό* (2-4% κ.β).

1.3.3.1 Ανόργανα συστατικά της αδαμαντίνης

Το *φωσφορικό ασβέστιο* με τη μοριακή μορφή του *υδροξυαπατίτη* [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$] αποτελεί το κυρίως ανόργανο υλικό της αδαμαντίνης. Το ανθρακικό ασβέστιο και το ανθρακικό μαγνήσιο αποτελούν επίσης μόρια που συναντώνται στην αδαμαντίνη σε πολύ μικρότερη όμως αναλογία. Οι κρύσταλλοι του υδροξυαπατίτη που αποτελούν τη κύρια χημική ένωση της δομής της αδαμαντίνης έχουν πάχος περίπου 30 nm και μήκος που φθάνει τα λίγα μικρά. Το μέγεθος τους είναι μεγαλύτερο (μέχρι και 10 φορές) από τους κρυστάλλους των άλλων ενασβεστωμένων ιστών. Η ανάπτυξη των κρυστάλλων γίνεται παράλληλα με την διεύθετηση των αδαμαντινικών πρισμάτων. (εικόνα 1.4)



Εικόνα 1.4 Κρύσταλλοι υδροξυαπατίτη

1.3.3.2 Οργανικά συστατικά της αδαμαντίνης

Από τις μοριακές οργανικές ενώσεις της προαδαμαντίνης δύο συστατικά απομονώνονται στην ώριμη αδαμαντίνη:

—Οι εναμελίνες, πρωτεϊνικές ενώσεις οι οποίες αποτελούν αραιό δίκτυο οργανικού υλικού γύρω από τους κρυστάλλους.

—Οι ταφτελίνες, οι οποίες συναντώνται κυρίως σε ορισμένα μορφολογικά στοιχεία της αδαμαντίνης, τους αδαμαντινικούς θυσάνους και τις αδαμαντινικές ατράκτους.[1]

1.4 Ιστολογία της οδοντίνης

1.4.1 Γενικά

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. Εμβρυολογικά προέρχεται από το μέσο βλαστικό δέρμα. Η σύσταση της οδοντίνης μοιάζει περισσότερο με αυτή του οστού.

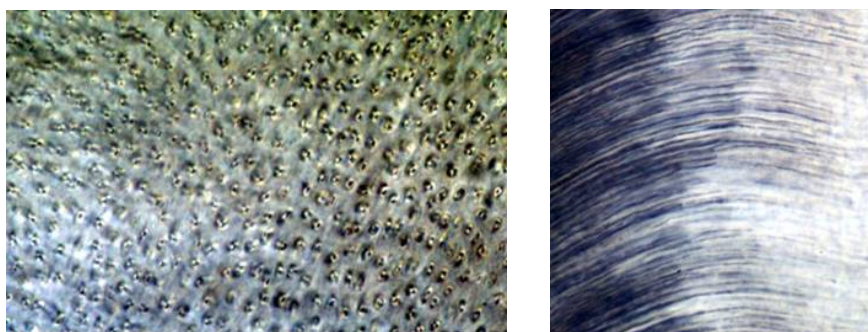
Κύριο χαρακτηριστικό της οδοντίνης είναι η αναγέννηση της, σε αντίθεση με αυτό που συμβαίνει στην αδαμαντίνη. Όταν στο δόντι επιδράσουν βλαπτικά ερεθίσματα, όπως τερηδόνα, αποτριβή, διάβρωση και τα ερεθίσματα αυτά φτάσουν στον πολφό, τότε δίνεται το σήμα να διαπλαστεί εκ νέου οδοντίνη κάτω από τις περιοχές που εμφανίζεται η βλάβη.

Η οδοντίνη που σχηματίζεται κατά την ανάπτυξη των δοντιών μέχρι την πλήρη ανατολή τους, ονομάζεται πρωτογενής οδοντίνη. Η πρωτογενής οδοντίνη αποτελεί το μεγαλύτερο ποσό μάζας της οδοντίνης ενός δοντιού. Η οδοντίνη που σχηματίζεται μετά την πλήρη ανατολή των δοντιών, κατά τη διάρκεια της φυσιολογικής λειτουργίας τους, ονομάζεται δευτερογενής οδοντίνη. Η δευτερογενής οδοντίνη τοπογραφικά βρίσκεται προς την πολφική πλευρά του δοντιού

και παράγεται φυσιολογικά με χαμηλό ρυθμό. 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*, η οποία μπορεί να είναι *επανορθωτική* ή *αντιδραστική*.

1.4.2 Μικροδομή της οδοντίνης

Το κύριο χαρακτηριστικό της δομής της οδοντίνης, που τη διαφοροποιεί από τους υπόλοιπους ενασβεστωμένους ιστούς, είναι τα *παράλληλα οδοντινοσωληνάκια* που διασχίζουν όλη τη μάζα της και περιέχουν στον αυλό τους ή σε τμήματα του αυλού τους τις *οδοντινοβλαστικές αποφυάδες*. Τα οδοντικά σωληνάκια σχηματίζονται κατά τη διάρκεια εναπόθεσης της οδοντίνης γύρω από τις αποφυάδες των οδοντινοβλαστών. Η συνεχής εναπόθεση οδοντίνης κατά το λειτουργικό στάδιο της ζωής του δοντιού μειώνει σταδιακά το εύρος του αυλού τους. (εικόνα 1.5)



Εικόνα 1.5 Τα στόμια των οδοντινοσωληναρίων και η σιγμοειδής πορεία τους σε όλο το μήκος της οδοντίνης

Η κυρίως οδοντίνη που βρίσκεται μεταξύ των οδοντικών σωληναρίων ονομάζεται *μεσοσωληναριακή οδοντίνη*. Η δε ποσότητα της εξαρτάται από την απόσταση της από τον πολφό. Η ποσότητα είναι τόσο μικρότερη, όσο πλησιέστερα προς τον πολφό βρίσκεται. Το οδοντικό υλικό που περιβάλλει τα οδοντικά σωληνάκια, αναφέρεται ως *περισωληναριακή οδοντίνη*. Πρόκειται για υλικό με σαφώς υψηλότερο βαθμό ενασβεστίωσης, συγκριτικά με την μεσοσωληναριακή οδοντίνη. Περιέχει αραιότερες κολλαγόνες ίνες που συνέχονται με αυτές της μεσοσωληναριακής οδοντίνης.

1.4.3 Χημική σύσταση της οδοντίνης

Η οδοντίνη αποτελείται από *ανόργανα συστατικά* σε ποσοστό 68-70% του βάρους της οδοντίνης, από *οργανικά συστατικά* σε ποσοστό 18-20%, ενώ το υπόλοιπο 12% είναι *νερό*.

1.4.3.1 Ανόργανα συστατικά της οδοντίνης

Τα ανόργανα συστατικά της οδοντίνης αποτελούν το 68-70% του βάρους της. Όπως και στους άλλους ενασβεστωμένους ιστούς, το κύριο ανόργανο συστατικό της οδοντίνης είναι το *φωσφορικό ασβέστιο*. Υπάρχει στη δομή της οδοντίνης κυρίως με τη μορφή *ώριμων κρυστάλλων υδροξυαπατίτη*, ενώ ανευρίσκεται ακόμη και ως *άμορφο φωσφορικό ασβέστιο*, που αποτελεί την πρόδρομη μορφή των κρυστάλλων του υδροξυαπατίτη. Άλλο σημαντικό σε περιεκτικότητα συστατικό της οδοντίνης είναι το *ανθρακικό ασβέστιο*. Τέλος, έχει αναφερθεί μεγάλος αριθμός ανόργανων στοιχείων που συνυπάρχουν στη δομή της οδοντίνης. Τα κυριότερα από τα στοιχεία αυτά είναι το *φθόριο*, ο *μόλυβδος*, το *μαγνήσιο*, ο *ψευδάργυρος*, ο *σίδηρος*, το *στρόντιο* κ.α. Έχουν ακόμη μετρηθεί στην οδοντίνη περισσότερα από 40 στοιχεία, δεν είναι διευκρινισμένο όμως, αν αυτά υπάρχουν στη δομή των κρυστάλλων, ή βρίσκονται απορροφημένα στην διεπιφάνεια αλληλεπίδρασης υγρού των ιστών και δομής της οδοντίνης (πολφική επιφάνεια οδοντίνης και εσωτερική επιφάνεια του αυλού των οδοντινικών σωληναρίων).

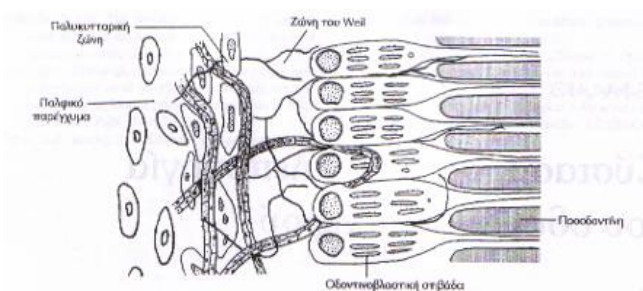
1.4.3.2 Οργανικά συστατικά της οδοντίνης

Παρά το γεγονός ότι τα συστατικά αυτά αποτελούν μόνο το 1/5 του βάρους της οδοντίνης, είναι αυτά που καθορίζουν τις ιδιότητες και τη βιολογική της συμπεριφορά. Το 90% του βάρους των οργανικών συστατικών της οδοντίνης αποτελείται από *κολλαγόνο*. Τα υπόλοιπα αποτελείται από *μη κολλαγονοειδή* συστατικά όπως διάφορες πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λίπη.

Επίσης, άλλα μόρια και χημικές ουσίες, όπως οστεοκαλσίνη, αυξητικοί παράγοντες και λιπίδια έχουν απομονωθεί στην οδοντίνη.[1]

1.5 Ιστολογία του πολφού

Ιστολογικά, στον πολφό των ώριμων δοντιών διακρίνονται 4 ανατομικές περιοχές, από την περιφέρεια προς το κέντρο. (εικόνα 1.6) [2]



Εικόνα 1.6 Απεικόνιση των στιβάδων του πολφού

1. Οδοντινοβλαστική στιβάδα
2. Ακύτταρη ζώνη του Weil
3. Πολυκυτταρική ή κυτταροβριθής ζώνη
4. Κεντρική μοίρα του πολφού ή πολφικό παρέγχυμα

1.6 Παθολογία των δοντιών

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

1.6.1 Η αποτριβή των δοντιών

Γενικά, με τον όρο *αποτριβή*, εννοούμε την προοδευτική απώλεια μέρους μιας ουσίας, αποτέλεσμα της τριβής της με άλλες ουσίες, μεγαλύτερης, όμοιας ή και μικρότερης σκληρότητας.

Σε όλες τις μορφές αποτριβής, το μέγεθος και η ταχύτητα της απώλειας εξαρτάται από την σκληρότητα και την ποιότητα της ουσίας που αποτριβείται, την σκληρότητα αλλά και την ποιότητα της ουσίας με την οποία τρίβεται, τον χρόνο τριβής, την δύναμη τριβής και τέλος το μέσο που παρεμβάλλεται μεταξύ των αποτριβόμενων ουσιών.

Στα δόντια, μια τέτοιας μορφής προοδευτική απώλεια των σκληρών ουσιών τους είναι δυνατόν να προκληθεί με την μάσηση, με την χρήση της οδοντόβουρτσας και των οδοντογλυφίδων, με το κράτημα της πίπας καπνίσματος και βελονών ραφής, με το κόψιμο κλωστών με τα δόντια κ.λ.π.

Η αποτριβή διακρίνεται σε *φυσιολογική* και *παθολογική*.

1.6.2 Η διάβρωση των δοντιών

Με τον όρο *διάβρωση*, εννοούμε την προοδευτική απώλεια της οδοντικής ουσίας, αποτέλεσμα της χημικής (διαλυτικής) δράσης ουσιών στην επιφάνεια του δοντιού. Εμφανίζεται στις χειλικές και γλωσσικές επιφάνειες των δοντιών και μπορεί να περιορίζεται μόνο στην περιοχή του αυχένα ή να επεκτείνονται σε όλη την χειλική επιφάνεια. Οι πιθανότερες αιτίες για την απώλεια των οδοντικών ουσιών του τύπου αυτού είναι τα εξωγενή και ενδογενή οξέα. Στα *εξωγενή* περιλαμβάνονται τα οξέα των τροφών, όπως νωπών φρούτων (λεμόνι, πορτοκάλι, μανταρίνι, γκρέπ φρούτ κ.λ.π), οι χυμοί των φρούτων, τα αεριούχα ποτά και τα αναψυκτικά, τα φάρμακα με όξινο pH και τα οξέα του εισπνεόμενου αέρα στους χώρους δουλειάς (χημικά εργοστάσια, βιοτεχνίες παραγωγής ή χρήσης οξέων, όπως φορμικού, υδροχλωρικού, νιτρικού, πικρικού, ταρταρικού). Στα *ενδογενή* υπάγονται τα οξέα του γαστρικού περιεχομένου που έρχονται σε επαφή με τους οδοντικούς ιστούς. Πιστεύεται όμως ότι για να εκδηλωθούν οι διαβρώσεις στα δόντια, απαιτείται η συχνή και για μεγάλη περίοδο (1-2 χρόνια) δράση των οξέων αυτών πάνω στους οδοντικούς ιστούς. Έτσι, μόνο χρόνιαι έμμετοι, ο μυρηκασμός, η εξέμεση και η αναγωγή του γαστρικού περιεχομένου θα μπορούσαν να προκαλέσουν τις βλάβες. Οι ψυχογενείς έμμετοι (στρες, νευρικής βουλιμίας), οι στομαχικές διαταραχές (πεπτικά έλκη,

διαφραγματοκήλη κ.λ.π), μεταβολικές διαταραχές (ουρεμία, διαβητική οξέωση, εγκυμοσύνης κ.λ.π) αλλά και φαρμακικής αιτιολογίας έμμετοι (χημειοθεραπευτικά, οπιοειδή, ισταμίνη, διουρητικά κ.λ.π) μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στους οδοντικούς ιστούς με τη μορφή της διάβρωσης.

1.6.3 Η απόσπαση των δοντιών

Η *απόσπαση* είναι μία άλλη μορφή απώλειας της οδοντικής ουσίας, που παρουσιάζεται στις μασητικές, τις κοπτικές ή και τις αυχενικές περιοχές των δοντιών και οφείλεται στην άσκηση ισχυρών πιέσεων πάνω στα δόντια. Διακρίνεται σε *τοπική* και *απομακρυσμένη*.

Τοπική απόσπαση ονομάζεται η απόσπαση τμημάτων της αδαμαντίνης από τις κοπτικές και μασητικές επιφάνειες των δοντιών, εξ αιτίας της εφαρμογής ισχυρών θλιπτικών δυνάμεων πάνω σε αυτές. Απομακρυσμένη απόσπαση είναι η απόσπαση τμημάτων αδαμαντίνης και οδοντίνης από τις αυχενικές περιοχές των δοντιών, εξ αιτίας των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στην περιοχή και είναι αποτέλεσμα ισχυρών δυνάμεων που ενεργούν σε περιοχές μακριά από αυτές, όπως στις μασητικές επιφάνειες.

1.6.4 Η νόσος τερηδόνα

Η *τερηδόνα* είναι μια νόσος που καταστρέφει τους οδοντικούς ιστούς, η οποία είναι και από τις πλέον διαδεδομένες νόσους παγκοσμίως. Δημιουργεί κοιλότητες που συχνά έχουν την εμφάνιση μαύρων ή καφέ κηλίδων ή στιγμάτων. Ανάλογα βέβαια την περιοχή και τη φάση της τερηδόνας έχουμε διαφορετικό χρώμα (άσπρο, κίτρινο, καφέ, μαύρο) και διαφορετικό μέγεθος. Η περιοχή που εντοπίζεται συχνότερα είναι οι όμορες περιοχές των δοντιών, δηλαδή στα μεσοδόντια και κατά κύριο λόγο στα οπίσθια δόντια. Παρ' όλα αυτά πολύ συχνά εντοπίζουμε τερηδόνα στη μασητική επιφάνεια, αλλά ακόμα και σε πρόσθιες (προστομιακές) ή υπερώιες/γλωσσικές περιοχές των δοντιών.

Η τερηδόνα εμφανίζεται με τις ακόλουθες μορφές:

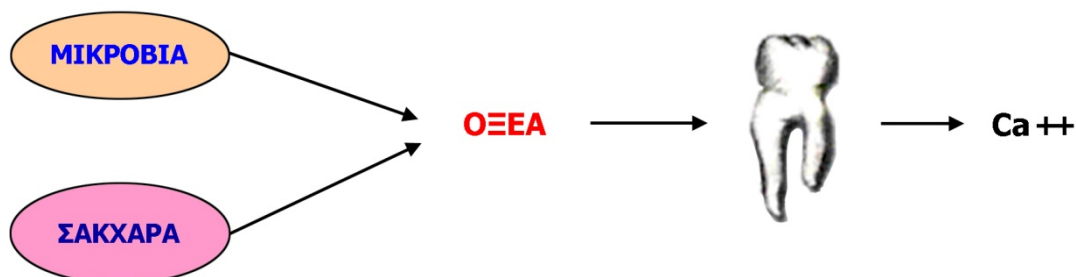
- *Τερηδόνα της μύλης* : η πιο κοινή μορφή τερηδόνας που πλήττει παιδιά και ενήλικες και εμφανίζεται στις μασητικές επιφάνειες και ανάμεσα στα δόντια.
- *Τερηδόνα των ριζών* : καθώς μεγαλώνουμε, τα ούλα συρρικνώνονται και εκθέτουν τμήματα των δοντιών που δεν καλύπτονται από σμάλτο, τα οποία και είναι περισσότερο ευάλωτα στην τερηδόνα.

- *Τερηδόνα των άκρων των παλιών σφραγισμάτων* : εμφανίζεται γύρω από παλιά σφραγίσματα ή θήκες. Στα σημεία αυτά συσσωρεύεται πλάκα η οποία με τον καιρό δημιουργεί τερηδόνα.



Εικόνα 1.7 Δόντια με τερηδόνα

Βασική αιτία δημιουργίας της τερηδόνας είναι ο μικροβιακός παράγοντας. Συγκεκριμένα βακτήρια που βρίσκονται στην στοματική κοιλότητα όπως τα *Streptococcus mutans*, *Lactobacillus species* και *Actinomyces species*, έχοντας θρεπτικό υλικό τους υδατάνθρακες, παράγουν οξέα που έμμεσα καταστρέφουν τους οδοντικούς ιστούς και έτσι δημιουργείται η τερηδονισμένη κοιλότητα. Η έμμεση δράση των οξέων έχει να κάνει με το pH που μειώνεται κατά την παραγωγή τους. Έτσι, όταν 'πέσει' κάτω από το 5.5 το pH του σάλιου, τότε η 'ισορροπία' της ανταλλαγής ιόντων και μεταλλικών στοιχείων μεταξύ δοντιού και σάλιου διαταράσσεται με αποτέλεσμα να καταστρέφεται η σύσταση του οδοντικού ιστού που είναι εκτεθειμένος. Ακολουθεί σχηματικά ο μηχανισμός δημιουργίας της τερηδόνας στα δόντια. (εικόνα 1.8)



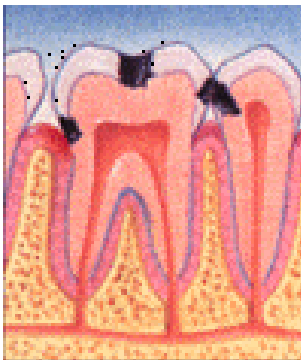
Εικόνα 1.8 Μηχανισμός δημιουργίας της τερηδόνας στα δόντια μας

1.6.4.1 Στάδια της τερηδόνας



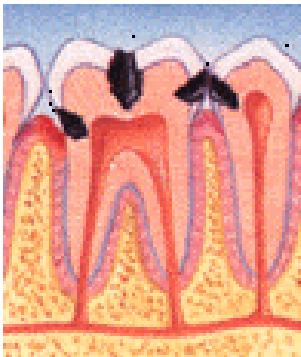
1^ο στάδιο

Σε πρώτη φάση αυτό που προκαλούν τα οξέα είναι η απώλεια των αλάτων και κυρίως των ιόντων ασβεστίου Ca^{++} από την αδαμαντίνη (το σκληρό περίβλημα των δοντιών). Η αδαμαντίνη στα σημεία απώλειας μετατρέπεται σε μια λευκή πορώδη κηλίδα.



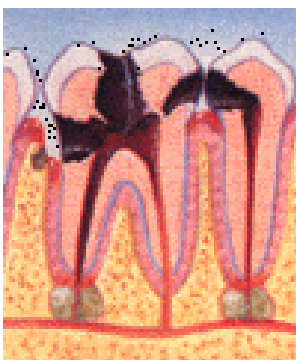
2^ο στάδιο

Στη δεύτερη φάση της τερηδόνας, ενώ συνεχίζεται η απώλεια των ιόντων ασβεστίου λόγω των παραγόντων που προαναφέραμε και που εξακολουθούν να υφίστανται, δημιουργείται μια τρύπα στην αδαμαντίνη και η βλάβη προχωρά στην οδοντίνη (το μαλακό κίτρινο στρώμα κάτω από το περίβλημα της αδαμαντίνης). Το δόντι γίνεται ευαίσθητο στο ξινό-γλυκό και στο ζεστό-κρύο.



3^ο στάδιο

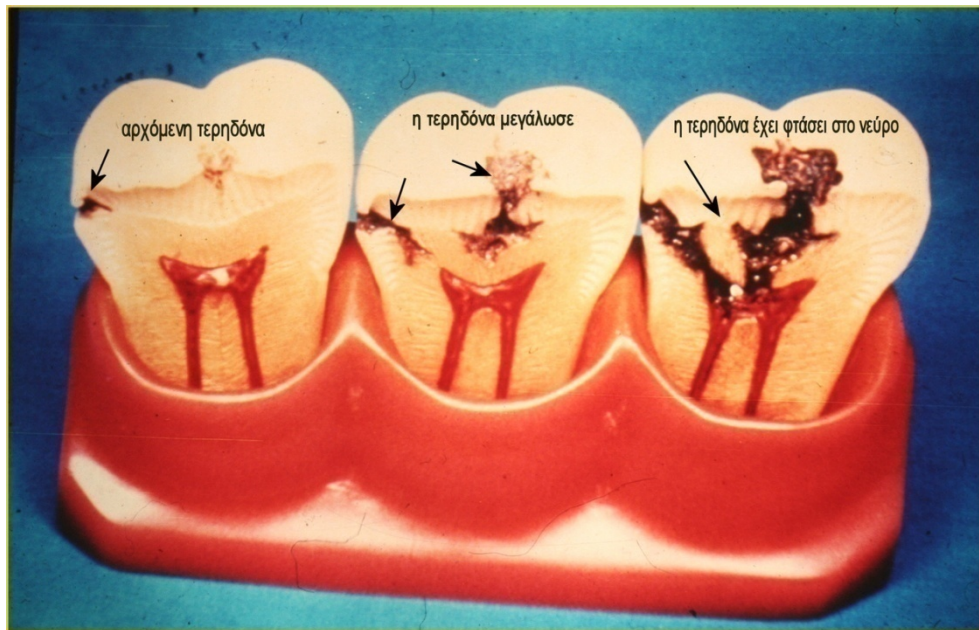
Στην τρίτη φάση η τερηδόνα προχωρά στον πολφό του δοντιού (περιβάλλεται από την οδοντίνη και περιέχει τα νεύρα και τα αιμοφόρα αγγεία) και μολύνεται. Οι πόνοι γίνονται επίμονοι και έντονοι.



4^ο στάδιο

Σε τελευταία φάση, μολύνεται όλη η έκταση του πολφού προσβάλλοντας το νεύρο και προκαλώντας φλεγμονές. Το νεύρο νεκρώνεται ενώ υπάρχει πιθανότητα δημιουργίας αποστήματος. Σε αυτό το τελευταίο στάδιο η εξαγωγή του δοντιού από τον οδοντίατρο κρίνεται απαραίτητη. Η επέμβαση όμως του οδοντιάτρου μπορεί να γίνει σε προηγούμενα στάδια με εμφράξεις ή απονευρώσεις.

Συνοψίζοντας, τα στάδια εξέλιξης της τερηδόνας παρουσιάζονται στην εικόνα 1.9.

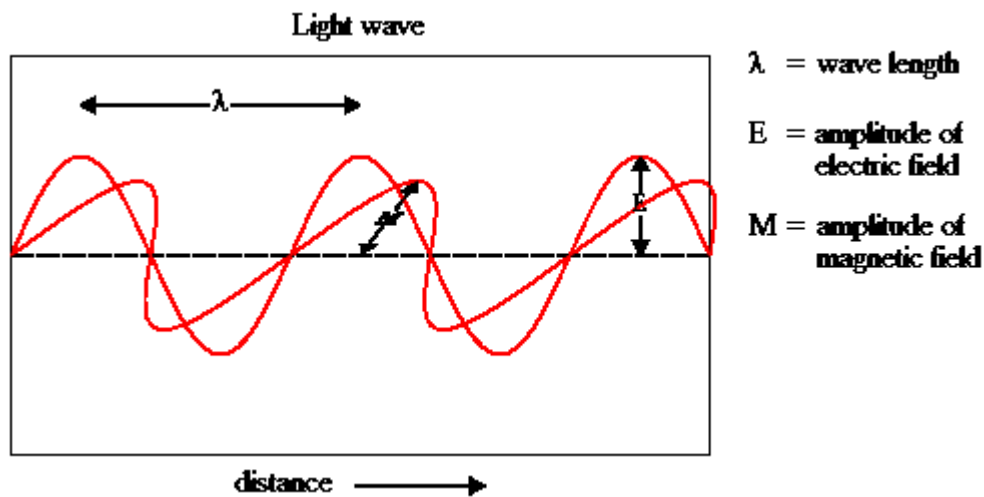


Εικόνα 1.9 Στάδια της τερηδόνας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης και αρχές φασματοσκοπίας

2.1 Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι τύπος κυμάτων σε μορφή ακτινοβολίας, με συνιστώσες ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, που διαδίδονται στην ύλη και στο κενό. Ο κόσμος όλος βομβαρδίζεται καθημερινά από ενέργεια σε μορφή ακτινοβολίας που ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ένα μέρος αυτής είναι το ορατό φως. Όμως το μεγαλύτερο μέρος της είναι αόρατο όπως οι ακτίνες X, η υπεριώδης ακτινοβολία, τα μικροκύματα κ.τ.λ.

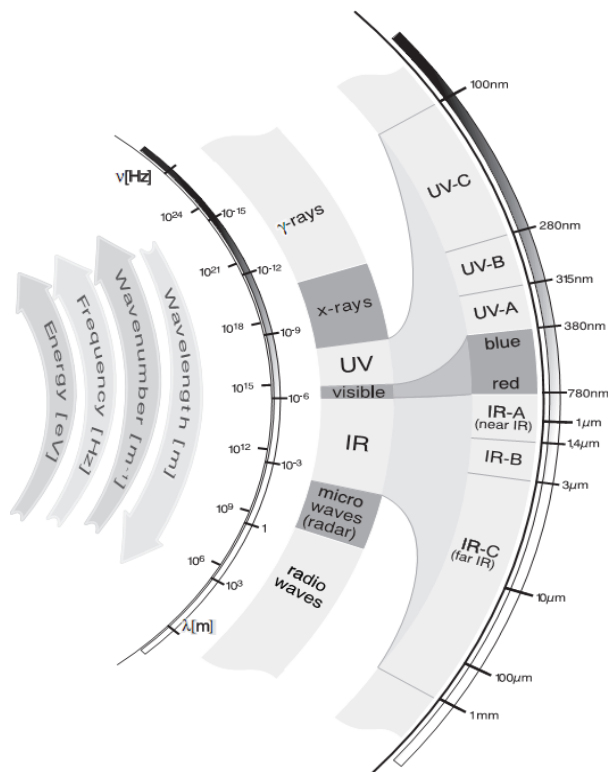


Εικόνα 2.1 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παρουσιάζει και κυματικά και σωματιδιακά χαρακτηριστικά. Αυτή τη δυική φύση της ακτινοβολίας, την σωματιδιακή και κυματική, οι οποίες δεν αποκλείουν η μία την άλλη, αλλά αλληλοσυμπληρώνονται, αντιλήφθηκε πρώτος ο Einstein και την εξέφρασε σαν μία συνεχή ροή διακριτών σωματιδίων ή κυματικών ενεργειακών «πακέτων», τα οποία αργότερα ονομάστηκαν φωτόνια.

Η ενέργεια E ενός φωτονίου εξαρτάται από τη συχνότητα (ή το μήκος κύματος) της ακτινοβολίας : $E = h\nu = hc / \lambda$,
όπου h είναι η σταθερά Planck ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ J s), c η ταχύτητα του φωτός, ν η συχνότητα και λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

2.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα



Εικόνα 2.2 Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Ολόκληρο το εύρος του μήκους κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αποτελεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Για λόγους ευκολίας διαιρούμε το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σε φασματικές περιοχές, οι οποίες λόγω των διαφορετικών ενεργειών αλληλεπιδρούν με την ύλη πολύ διαφορετικά. Μια φασματική ζώνη (spectral band) αποτελείται από κάποια καθορισμένη ομάδα φασματικών γραμμών, όπου κάθε φασματική γραμμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος.

Προσεγγιστικά, καταγράφονται μήκη κύματος, συχνότητες και ενέργειες των διάφορων περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. (πίνακας 2.1)

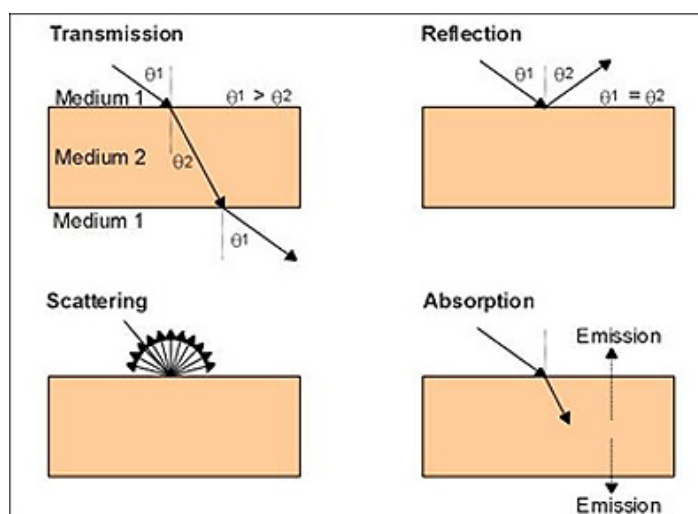
	Μήκος κύματος	Συχνότητα (Hz)	Ενέργεια
Ραδιοκύματα	> 10 cm	< 3 x 10 ⁹	< 2 x 10 ⁻²⁴ J
Μικροκύματα	10 cm - 1 mm	3 x 10 ⁹ - 3 x 10 ¹¹	2 x 10 ⁻²⁴ - 2 x 10 ⁻²² J
Υπέρυθρο	1 mm - 750 nm	3 x 10 ¹¹ - 4 x 10 ¹⁴	2 x 10 ⁻²² - 3 x 10 ⁻¹⁹ J
Οπτικό	750 nm - 450 nm	4 x 10 ¹⁴ - 7.5 x 10 ¹⁴	1.8 eV - 3 eV
Υπεριώδες	450 nm - 10 nm	7.5 x 10 ¹⁴ - 3 x 10 ¹⁶	5 x 10 ⁻¹⁹ - 2 x 10 ⁻¹⁷
Ακτίνες-X	10 nm - 0.01 nm	3 x 10 ¹⁶ - 3 x 10 ¹⁹	2 x 10 ⁻¹⁷ - 2 x 10 ⁻¹⁴
Ακτίνες-γ	< 0.01 nm	> 3 x 10 ¹⁹	> 2 x 10 ⁻¹⁴

Πίνακας 2.1 Περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Οι κύριες διαιρέσεις του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ορίζονται στην ουσία αυθαίρετα, αφού μεταξύ συγκεκριμένων ζωνών του φάσματος υπάρχουν πολλές υποδιαιρέσεις (αποχρώσεις), επειδή η μετάβαση από τη μία ζώνη φάσματος στην άλλη είναι βαθμιαία και όχι απότομη.

2.3 Φασματοσκοπία

Η φασματοσκοπία θα μπορούσε να οριστεί ως η χρήση των φαινομένων αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη : μετάδοση (απορρόφηση (absorption), ανάκλαση (reflection), εκπομπή (emission), σκέδαση (scattering), με σκοπό την ποσοτική ή ποιοτική ανάλυση της ύλης ή τη μελέτη φυσικών διεργασιών. Η ύλη μπορεί να είναι άτομα, μόρια, ατομικά ή μοριακά ιόντα ή στερεά. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη μπορεί να προκαλέσει ανακατεύθυνση της ακτινοβολίας ή μεταπτώσεις ανάμεσα στα ενεργειακά επίπεδα των ατόμων ή μορίων.

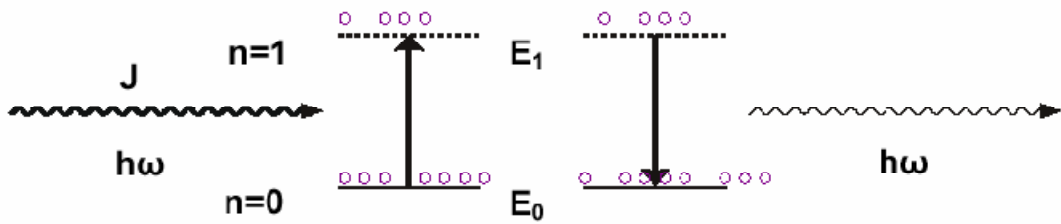


Εικόνα 2.3 Φαινόμενα που συμβαίνουν όταν φως έρθει σε επαφή με κάποια επιφάνεια ενός άλλου μέσου

2.3.1 Απορρόφηση – Εκπομπή

Η φυσική βάση της φασματοσκοπίας είναι η αλληλεπίδραση φωτός και ύλης, πράγμα το οποίο εντοπίστηκε από τον Hertz κατά τη διάρκεια πειραμάτων, ανακαλύπτοντας τυχαία το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Θεωρούμε ατομικό σύστημα αποτελούμενο από δύο ενεργειακές στάθμες E_0 και E_1 με $E_0 < E_1$, οι οποίες καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια.



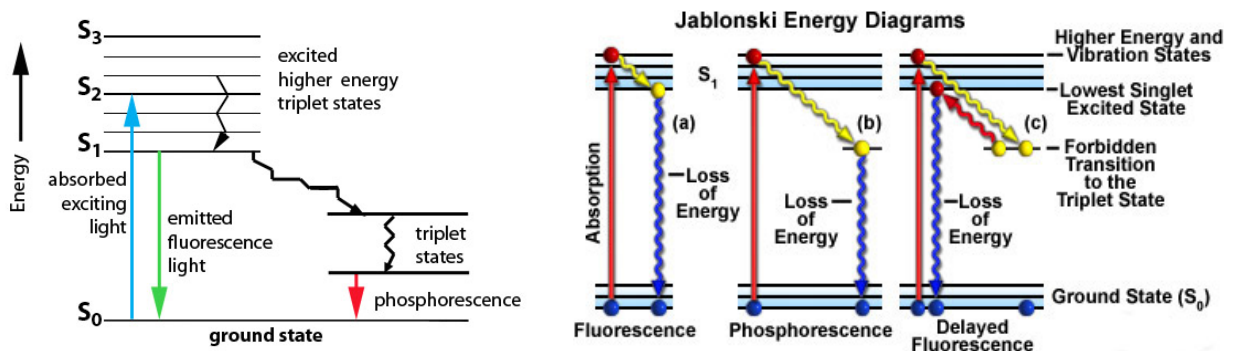
Εικόνα 2.4 Ατομικό σύστημα αποτελούμενο από δύο ενεργειακές στάθμες

Έστω ότι το άτομο βρίσκεται στην κατάσταση $n=0$, με ενέργεια E_0 . Τα ηλεκτρόνια του ατόμου αυτού μπορούν να μεταβούν σε μία διεγερμένη κατάσταση $n=1$ υψηλότερης ενέργειας E_1 , αν αλληλεπιδράσει με αυτό θερμική ακτινοβολία πυκνότητας ενέργειας J και συχνότητας ω , τέτοιας ώστε το γινόμενο $h\omega$ να ισούται με τη διαφορά ενέργειας των δύο επιπέδων, δηλαδή $h\omega = E_1 - E_0$.

Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται *απορρόφηση* (absorption). Η μετάπτωση από την διεγερμένη κατάσταση $n=1$ στην αρχική κατάσταση $n=0$, με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου με συχνότητα ω , όπου $h\omega = E_1 - E_0$, ονομάζεται *εκπομπή* (emission).

2.3.1.1 Φθορισμός - Φωσφορισμός

Όταν ένα εξωτερικό ηλεκτρόνιο διεγείρεται σε ένα υψηλότερο ενεργειακά επίπεδο με απορρόφηση ακτινοβολίας, τότε αυτό μπορεί να επιστρέψει στην βασική στοιβάδα με ή χωρίς εκπομπή ακτινοβολίας. Στην περίπτωση της εκπομπής έχουμε δύο διαφορετικές διεργασίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά : τον *φθορισμό* (fluorescence) και τον *φωσφορισμό* (phosphorescence). Συνολικά τα δύο φαινόμενα ονομάζονται *φωταύγεια* (luminescence). Η βασική διαφορά μεταξύ φθορισμού και φωσφορισμού είναι ο χρόνος που διαρκεί η ακτινοβολία μετά την διέγερση. Η ερμηνεία των δύο φαινομένων δίνεται σχηματικά με το γνωστά ως διαγράμματα Jablonski.

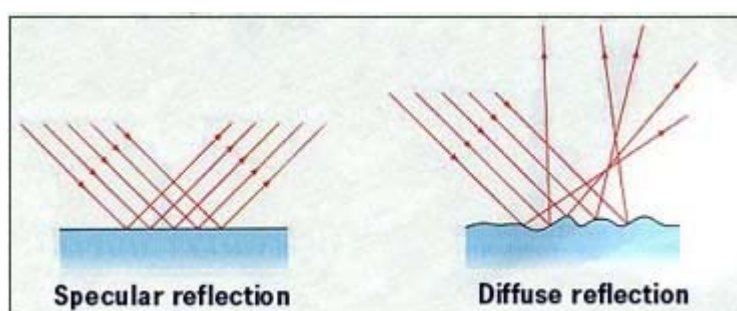


Εικόνα 2.5 Διαγράμματα Jablonski

2.3.2 Ανάκλαση – Σκέδαση

Η ανάκλαση του φωτός είναι το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο το φως (ή κάποιου άλλου είδους ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) συναντά μια επιφάνεια, η οποία δεν μπορεί να το απορροφήσει και "το επιστρέφει πίσω". Η ακτίνα φωτός πριν συναντήσει την επιφάνεια λέγεται προσπίπτουσα, ενώ μετά την ανάκλασή της ανακλώμενη. Η ανάκλαση από μία επιφάνεια γίνεται με τρόπο που είναι ενδιάμεσος των εξής δύο ακραίων περιπτώσεων:

1. Κατοπτρική ανάκλαση (specular reflection)
2. Διαχυτική ανάκλαση (diffuse reflection)



Εικόνα 2.6 Περιπτώσεις ανάκλασης

Εάν η ακτινοβολία ανακλάται προς μία κατεύθυνση (όπως σε ένα καθρέφτη) έχουμε κατοπτρική ανάκλαση. Εάν η ανακλώμενη ακτινοβολία εμφανίζει ισοκατανομή της ισχύος προς πολλές διευθύνσεις τότε έχουμε διάχυση. Στην πραγματικότητα κάθε επιφάνεια ανακλά με τρόπο που είναι ενδιάμεσος αυτών των δύο ακραίων καταστάσεων. Ο παράγοντας που παίζει ρόλο είναι η *τραχύτητα* (roughness) του στόχου (δηλ. μία κλίμακα μήκους L) σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας λ . Αν το μήκος κύματος $\lambda \ll L$ τότε κυριαρχεί η διαχυτική ανάκλαση ενώ όταν $\lambda \gg L$ τότε κυριαρχεί η κατοπτρική ανάκλαση. Πραγματικά, όταν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερο από τις μικρο-ανωμαλίες της επιφάνειας του στόχου αυτή δεν μπορεί να 'δεί' τις ανωμαλίες αυτές και άρα ο στόχος μοιάζει με κάτοπτρο.

Η σκέδαση είναι προϊόν πολλαπλής ανάκλασης. Η απορρόφηση ενέργειας από ένα σύστημα (σκεδαστής) από ένα προσπίπτον φωτόνιο και η επανεκπομπή μέρους της ενέργειας του παραπάνω φωτονίου από το ίδιο σύστημα ορίζεται σαν σκέδαση. Το φαινόμενο της σκέδασης εξαρτάται από την φύση του σκεδαστή (υλικό, μέγεθος) και την διάταξή του στο χώρο (τυχαία ή κατανεμημένη). Η σκεδαζόμενη ακτινοβολία δύναται να έχει διαφορετικό μήκος κύματος λ_0 , ένταση, φάση, διεύθυνση διάδοσης και πόλωση από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Τέλος, υπάρχουν τα ακόλουθα είδη σκέδασης :

- Rayleigh
- Raman
- Mie
- Stokes και Anti-Stokes
- Brillouin

2.3.3 Είδη και μέθοδοι φασματοσκοπίας

Τα είδη της φασματοσκοπίας διαχωρίζονται κυρίως με βάση τα παραπάνω φαινόμενα αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη. Έτσι μπορούμε να διακρίνουμε τη φασματοσκοπία απορρόφησης, τη φασματοσκοπία εκπομπής, ανάκλασης, φθορισμού και σκέδασης, με κάθε είδος να εξυπηρετεί σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό συγκεκριμένες εφαρμογές.

Οι μέθοδοι φασματοσκοπίας, δηλαδή οι διατάξεις και οι διαδικασίες που ακολουθούνται προκειμένου να μελετηθεί η αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη, μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες σύμφωνα με την ιδιότητα του αντικειμένου το οποίο θα μελετηθεί. Συγκεκριμένα, η πιο απλή μορφή φασματοσκοπίας είναι αυτή που αφορά τη μέτρηση για ένα μοναδικό σημείο και ονομάζεται αντίστοιχα φασματοσκοπία σημείου. Στην περίπτωση αυτή, οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι πολύ απλές και συνήθως αποτελούνται από ένα φασματόμετρο και μία οπτική ίνα. Στην περίπτωση που η μέτρηση πρέπει να γίνει σε δυσδιάστατες εικόνες, τότε χρησιμοποιούνται πιο πολύπλοκες διατάξεις και οι μέθοδοι που εφαρμόζονται συνήθως είναι η πολυφασματική ή η υπερφασματική απεικόνιση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Μέθοδοι και τεχνολογίες ανίχνευσης της τερηδόνας

3.1 Γενικά

Η ανίχνευση της οδοντικής τερηδόνας χρησιμοποιώντας οπτικές τεχνικές λαμβάνει μεγάλη πρόοδο στις μέρες μας. Η πρώιμη ανίχνευση τερηδόνας δίνει τη δυνατότητα λήψης προληπτικών μέτρων, πριν οι φυσικές και χημικές αλλαγές της αδαμαντίνης και της οδοντίνης προκαλέσουν αμετάκλητη φθορά στα δόντια. Έως τώρα χρησιμοποιούνταν κυρίως ο οπτικός έλεγχος και ακτινογραφικές τεχνικές, προκειμένου να διαγνωστεί η οδοντική τερηδόνα. Αφού όμως οι τεχνικές αυτές δεν μπορούν να ανιχνεύσουν τις αλλοιώσεις της τερηδόνας σε πρώιμο στάδιο, η εξέλιξη νέων διαγνωστικών μεθόδων κρίνεται απαραίτητη για την ανίχνευση πρώιμων σημαδιών απομετάλλωσης της αδαμαντίνης.

Όταν αναφερόμαστε στον όρο απομετάλλωση (demineralization) του δοντιού εννοούμε την διαδικασία της αφαίρεσης ανόργανων ουσιών, με τη μορφή ανόργανων ιόντων, από την οδοντική αδαμαντίνη. Η απομετάλλωση είναι μία άλλη έκφραση της 'διάλυσης' της αδαμαντίνης. Όπως είδαμε η οδοντική αδαμαντίνη είναι ένα κρυσταλλικό δίκτυο που αποτελείται από διάφορα ανόργανα υλικά, κύριο συστατικό του οποίου είναι ο υδροξυαπατίτης (hydroxyapatite). Ένας ουσιώδης αριθμός ανόργανων ιόντων μπορεί να αφαιρεθεί από το δίκτυο κρυστάλλων υδροξυαπατίτη, χωρίς να καταστραφεί η δομική του ευστάθεια. Ωστόσο, τέτοιου είδους απομεταλλωμένη αδαμαντίνη μεταδίδει ζεστό, κρύο, πίεση και πόνο πολύ πιο άμεσα απ' ό,τι η κανονική αδαμαντίνη. Όταν όμως διαλύονται πολλά ανόργανα υλικά σε ένα δίκτυο κρυστάλλων υδροξυαπατίτη, δημιουργούνται κοιλότητες, οι οποίες αποτελούν απώλεια της δομής των κρυστάλλων. Η απομετάλλωση των δοντιών είναι μία περιοχή όπου η πρώιμη διάγνωση μπορεί να φανεί χρήσιμη. Η απομετάλλωση μπορεί να προκαλέσει γρήγορη εξέλιξη της τερηδόνας, γεγονός που μπορεί να αποφευχθεί με κατάλληλη θεραπεία στις περιοχές που πάσχουν, στο αρχικό ακόμα στάδιο.

Η πρώιμη διάγνωση των αλλοιώσεων της τερηδόνας θεωρήθηκε ιδιαίτερης σημασίας, καθώς η ικανότητα ανίχνευσης των αναστρέψιμων αυτών πρώιμων αλλοιώσεων προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένου ευκαιριών μελέτης και συντόμευσης του χρόνου θεραπείας. Οποιαδήποτε διαγνωστική διαδικασία για την διάγνωση τερηδονισμένης δομής δοντιού πρέπει να είναι συγκεκριμένη, έγκυρη, αξιόπιστη και κλινικά αποδεδειγμένη. Τα συστήματα ανίχνευσης τερηδόνας θα πρέπει να επιτρέπουν ορθή διάκριση μεταξύ των υγιών και των άρρωστων δομών των δοντιών. Η διαθεσιμότητα μη παρεμβατικών, ευαίσθητων, ποσοτικών μεθόδων για κλινική διάγνωση τερηδόνας θα κάνει διαθέσιμες νέες δυνατότητες για έρευνα και για εφαρμογές στην κλινική πρακτική. Έτσι, οι οδοντίατροι θα αποκτήσουν ένα ισχυρό εργαλείο για να ελέγχουν τις αλλαγές στην

επιφάνεια του δοντιού, το οποίο θα εξασφαλίζει την βάση για μία σωστή απόφαση για την κατάλληλη επιλογή της θεραπείας.

Οι οπτικές ιδιότητες των ιστών είναι σημαντικές και πληροφοριακές και οι φασματοσκοπικές όψεις κυριαρχούν στο πεδίο του προσδιορισμού και της τοποθέτησης της αλλοίωσης. Οι οπτικές μέθοδοι πάντα διαδραμάτιζαν σημαντικό ρόλο για τη μελέτη των βιολογικών φαινομένων.

Η εισαγωγή της οπτικής φασματοσκοπίας στο πεδίο της οδοντιατρικής αναπτύσσεται όσον αφορά τη διάγνωση τερηδόνας και αρκετοί ερευνητές μελέτησαν τη χρήση φασματοσκοπικών τεχνικών φθορισμού και ανάκλασης, προκειμένου να αποφασίσουν διάφορες αλλαγές στη δομή και τη σύνθεση των δοντιών. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται παρακάτω οι πιο ουσιαστικές φασματοσκοπικές μελέτες φθορισμού και ανάκλασης για την εξέλιξη του τομέα αυτού.

3.2 Μελέτες φασματοσκοπίας φθορισμού και ανάκλασης των δοντιών

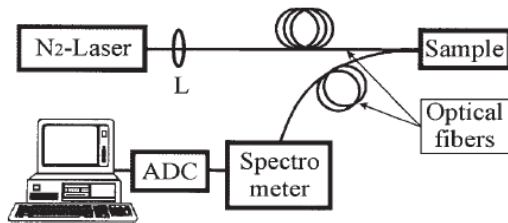
1^η μελέτη

Οι Borisova, Uzunov, Avramov επεδίωξαν, κάνοντας χρήση της φασματοσκοπίας φθορισμού, να κάνουν μία πρώιμη διάκριση μεταξύ της τερηδόνας και των διαφόρων σταδίων απομετάλλωσης του δοντιού. Συγκεκριμένα, δημιούργησαν ένα σύστημα φθορισμού με εισαγωγή laser αζώτου στα 337 nm.

Το σύστημα αυτό αποτελούταν από οπτικές ίνες, οι οποίες διένειμαν τα σήματα διέγερσης και φθορισμού προς και από τα δείγματα δοντιών, από ένα φασματόμετρο που κατέγραφε τα φάσματα φθορισμού των δοντιών και από έναν υπολογιστή με τα απαραίτητα προγράμματα λογισμικού για την επεξεργασία τους, ο οποίος είχε τον γενικότερο έλεγχο του συστήματος, ενώ επίσης αποθήκευε και εμφάνιζε τα δεδομένα. (εικόνα 3.1)

Έπειτα, χρησιμοποίησαν 32 υγιή ανθρώπινα δόντια που είχαν εξαχθεί για διάφορους λόγους, όπως λόγω περιοδοντικών προβλημάτων, για να εξετάσουν τα στάδια απομετάλλωσης τους. Ετοιμάστηκαν κατόπιν λεπτές φέτες αδαμαντίνης και οδοντίνης από διάφορα υγιή δείγματα δοντιών, προκειμένου να αποκτηθούν ενδεικτικά φάσματα φθορισμού από τις ανθρώπινες οδοντικές δομές. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα 35% φωσφορικό οξύ για την απομετάλλωση των δοντιών για διάφορες χρονικές διάρκειες : 10 δευτερόλεπτα, 30 δευτερόλεπτα, 1 λεπτό, 5 λεπτά και 24 ώρες. Η απομετάλλωση που διήρκησε 24 ώρες οδήγησε σε πλήρη φθορά της οδοντικής αδαμαντίνης και συνεπώς στην εμφάνιση της περιοχής της οδοντίνης. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα άλλων 162 δοντιών, που είχαν εξαχθεί και λόγω

εμφάνισης προβλημάτων τερηδόνας αυτή τη φορά, ώστε να εξεταστούν οι φασματικές ιδιότητες των διαφόρων σταδίων τερηδόνας. Συγκεκριμένα, το στάδιο εξέλιξης της νόσου της τερηδόνας για τα δείγματα των δοντιών προσδιορίστηκε σύμφωνα με το ICD-10 (International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems). (εικόνα 3.2)

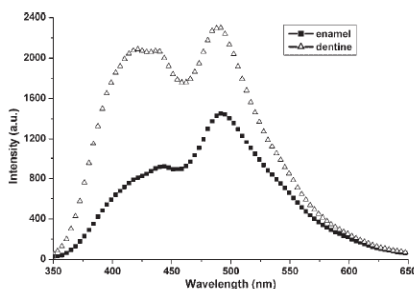


Εικόνα 3.1 Το σύστημα φθορισμού με εισαγωγή laser αζώτου

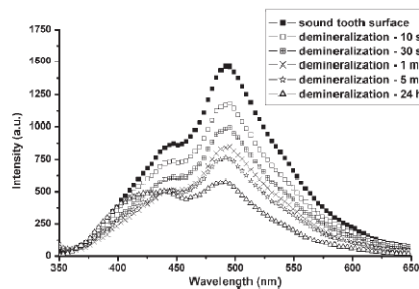
Condition	Number of teeth
White spot lesion	32
Brown spot lesion	33
Superficial cavity	32
Medium depth cavity	31
Deep cavitation	34

Εικόνα 3.2 Αριθμός δειγμάτων δοντιών που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε ένα διαφορετικό στάδιο εξέλιξης της τερηδόνας

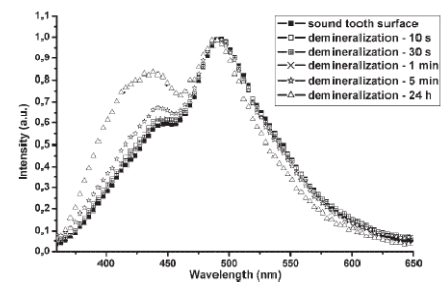
Έχοντας λοιπόν στη διάθεσή τους όλα αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, κατέγραψαν τους μέσους όρους των φασμάτων φθορισμού της υγιούς αδαμαντίνης και οδοντίνης, των διαφορετικών σταδίων απομετάλλωσης των οδοντικών επιφανειών, καθώς και των τμημάτων των δειγμάτων που έπασχαν από τερηδόνα. Αναλυτικά παρουσιάζονται παρακάτω όλα τα φάσματα φθορισμού που προέκυψαν για κάθε περίπτωση. Αρχικά φαίνονται τα αντιπροσωπευτικά κανονικοποιημένα φάσματα φθορισμού της υγιούς αδαμαντίνης και οδοντίνης. (εικόνα 3.3α) Ακολουθούν τα φάσματα που προκύπτουν για το στάδιο απομετάλλωσης των δοντιών για διαφορετικές χρονικές διάρκειες, συγκριτικά με το φάσμα μιας υγιούς επιφάνειας δοντιού. (εικόνες 3.3β και 3.3γ)



Εικόνα 3.3α Σύγκριση μεταξύ των φασμάτων της υγιούς αδαμαντίνης του δοντιού (enamel) και της οδοντίνης (dentine)



Εικόνα 3.3β Φάσματα υγιούς περιοχής δοντιών και δοντιών που έχουν υποστεί απομετάλλωση

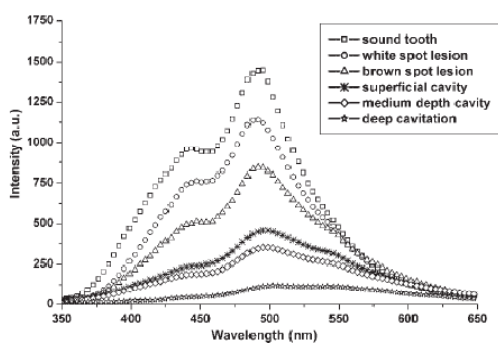


Εικόνα 3.3γ Κανονικοποιημένα φάσματα υγιών και απομεταλλωμένων περιοχών των δοντιών

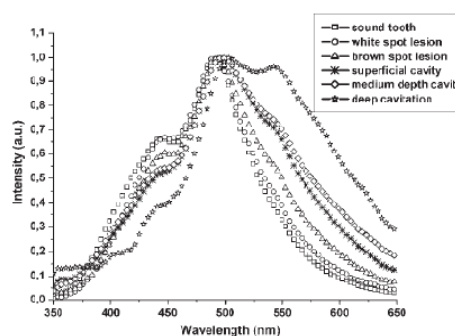
Παρατηρούμε ότι το φάσμα της υγιούς αδαμαντίνης αποτελείται από μία ευρύα 'μπάντα' με ένα μέγιστο στα 490nm και ένα δευτερεύων μέγιστο στα 440nm. Ομοίως, το φάσμα της υγιούς οδοντίνης έχει ένα μέγιστο στα 490nm, αλλά η κορυφή του στα 440nm έχει ένταση συγκρίσιμη με αυτή των 490nm. Ακόμα, η ένταση κορυφής του σήματος φθορισμού της οδοντίνης στα 490nm είναι μεγαλύτερη κατά έναν παράγοντα 1.5-2 από την ένταση φθορισμού της αδαμαντίνης.

Διαπιστώθηκε ότι το φάσμα της υγιούς επιφάνειας του δοντιού ήταν όμοιο με αυτό της υγιούς αδαμαντίνης, ενώ όσο εξελισσόταν η απομετάλλωση των δοντιών, τόσο πιο γρήγορα μειωνόταν η ένταση του σήματος φθορισμού. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα φάσματα φθορισμού διαφορετικών σταδίων απομετάλλωσης κανονικοποιημένα στην μέγιστη ένταση, ώστε να είναι εφικτή καλύτερη σύγκριση των φασματικών διαφορών. Παρατηρείται ότι τα φάσματα μετά την απομετάλλωση για τις χρονικές διάρκειες των 10, 30 και 60 δευτερολέπτων είναι αρκετά όμοια. Ωστόσο, αρχίζουν να διακρίνονται σημαντικές αλλαγές για διάρκεια απομετάλλωσης 1 λεπτού και άνω. Τότε, τα φάσματα αρχίζουν να προσεγγίζουν τη μορφή του φάσματος της υγιούς οδοντίνης, μέχρι τελικά η απομετάλλωση για 24 ώρες να δημιουργήσει φάσμα ίδιων χαρακτηριστικών με αυτό της υγιούς οδοντίνης.

Τέλος, εμφανίζονται οι μέσοι όροι των αντιπροσωπευτικών φασμάτων φθορισμού για υγιείς περιοχές δοντιών και για δόντια που πάσχουν από τερηδόνα σε διάφορα στάδια εξέλιξης, όπως απλά μία αλλοίωση λευκού στίγματος (white spot lesion) ή μία αλλοίωση καφέ στίγματος (brown spot lesion), μία ρηγή (επιφανειακή) κοιλότητα (superficial cavity), μία μεσαίου βάθους κοιλότητα (medium-depth cavity) και μία βαθιά κοιλότητα (deep cavitation). (εικόνα 3.4α και 3.4β)



Εικόνα 3.4α Φάσματα διαφόρων σταδίων εξέλιξης της τερηδόνας, συγκρινόμενα με φάσμα υγιών περιοχών των δοντιών



Εικόνα 3.4β Κανονικοποιημένα στο μέγιστο φάσματα των διαφόρων σταδίων εξέλιξης της τερηδόνας

Παρατηρήθηκε ότι το φάσμα φθορισμού των υγιών περιοχών αποτελείται από μία ευρύα ‘μπάντα’ με ένα μέγιστο στα 490nm και ένα δευτερεύον μέγιστο στα 440nm, ενώ τα φάσματα των τερηδονισμένων δοντιών παρουσίασαν μεν τα ίδια μέγιστα στα 490nm και 440nm, αλλά εμφάνισαν ένα ακόμα δευτερεύον μέγιστο στα 550nm. Η ένταση φθορισμού στα 490nm για την αλλοίωση λευκού στίγματος ήταν χαμηλότερη από εκείνη του υγιούς δοντιού. Φαίνεται επίσης η εξέλιξη όλων των φασματικών αλλαγών. 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.

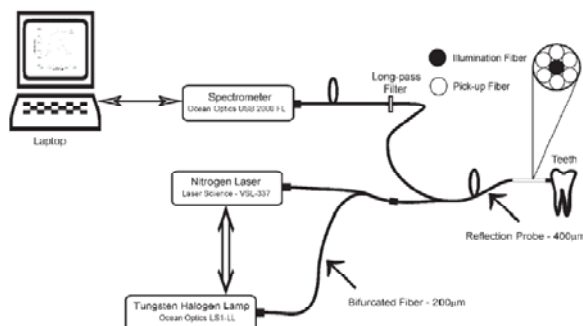
Επιπλέον, παρουσιάζονται και τα ίδια φάσματα κανονικοποιημένα ως προς την μέγιστη ένταση κορυφής. Στην περίπτωση αυτή η δευτερεύουσα κορυφή των τερηδονισμένων περιοχών στα 440nm είχε πολύ μικρότερη ένταση από αυτή των υγιών περιοχών. Ωστόσο, η κορυφή στα 550nm αυξήθηκε ανάλογα με το στάδιο εξέλιξης της τερηδόνας.

Συνεπώς, όλα τα παραπάνω συμπεράσματα οδήγησαν σε μία άμεση σχέση μεταξύ των φασματικών αλλαγών και την κατάσταση της τερηδόνας. Τα δόντια που πάσχουν από τερηδόνα παρουσίασαν μικρότερα σήματα φθορισμού, ενώ το μειωμένο σήμα φθορισμού σχετίζεται με την αύξηση του συντελεστή απορρόφησης, που προκύπτει από την συγκέντρωση της ουσίας της τερηδόνας που έχει μεγάλο συντελεστή απορρόφησης. [3]

2^η μελέτη

Στην μελέτη που ακολουθεί οι Subhash, Thomas, Mallia και Jose έκαναν ταυτόχρονες μετρήσεις φθορισμού και διάχυτης ανάκλασης πάνω στο ίδιο σύνολο υγιών και τερηδονισμένων δειγμάτων δοντιών, χρησιμοποιώντας ένα laser αζώτου και έναν λαμπτήρα βολφραμίου αλογόνου. Συγκεκριμένα, τα δόντια που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις κατηγοριοποιήθηκαν σε υγιή (sound) και με τερηδόνα επιπέδου οδοντίνης (dentin level) και πολφού (pulp level), ανάλογα με το βάθος της κοιλότητας. Τα δόντια με καθαρές και άθικτες επιφάνειες αδαμαντίνης θεωρήθηκαν υγιή, τα δόντια με 3-4mm βάθος τερηδόνας θεωρήθηκαν επιπέδου οδοντίνης και εκείνα με παραπάνω από 4mm θεωρήθηκαν επιπέδου πολφού. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 90 δείγματα δοντιών, από τα οποία τα 10 έχουν επηρεαστεί από τερηδόνα επιπέδου οδοντίνης, τα 20 από τερηδόνα πολφού και τα υπόλοιπα είναι υγιή.

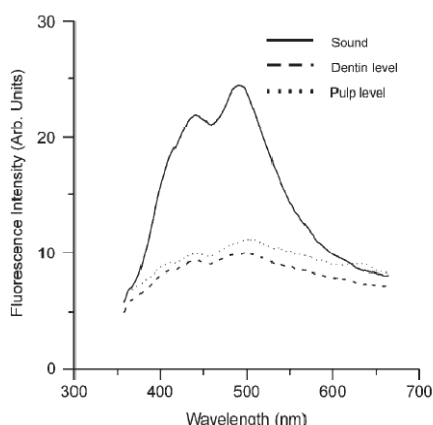
Το σύστημα που δημιουργήθηκε προκειμένου να επιτευχθούν οι μετρήσεις φθορισμού και ανάκλασης αποτελούταν από τις δύο πηγές φωτός, οι οποίες ήταν δυνατόν να εναλλάσσονται με έναν διακόπτη, από οπτικές ίνες, οι οποίες διένειμαν τα σήματα εκπομπής φωτός από κάθε πηγή αλλά και τα σήματα φθορισμού και ανάκλασης που προέρχονταν από τα δείγματα δοντιών, από ένα φασματόμετρο που κατέγραφε τα φάσματα φθορισμού και ανάκλασης των δοντιών και από έναν υπολογιστή, που ήταν απαραίτητος για όλη την διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων που θα ακολουθούσε. (εικόνα 3.5)



Εικόνα 3.5 Σύστημα φθορισμού και ανάκλασης για την ανίχνευση των αλλοιώσεων τερηδόνας

Όπως διαπίστωσαν και οι ερευνητές της προηγούμενης μελέτης το φάσμα του υγιούς δοντιού που προκύπτει από τον φθορισμό από laser αζώτου στα 337 nm αποτελείται από δύο ευρείς ‘ζώνες’, που έδειξαν μέγιστη ένταση γύρω στα 440nm και 490nm. Ωστόσο, η καινοτομία στην έρευνα αυτή εντοπίζεται στο ότι το φάσμα φθορισμού αναλύθηκε από ένα πρόγραμμα προσαρμογής καμπυλών, προκειμένου να αποφασιστούν οι ακριβείς θέσεις των κορυφών των ‘ζωνών’ και η συμβολή τους στο συνολικό φάσμα. Συγκεκριμένα, για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκαν φασματικές συναρτήσεις Gaussian, καθώς θεωρήθηκαν οι πιο κατάλληλες στην περίπτωση αυτή. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Marquardt – Levenberg και υπολογίζει την ακριβή, απόλυτη, ελάχιστη τιμή του αθροίσματος των αποκλίσεων, υψωμένων στο τετράγωνο (την τιμή του χ^2), μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας. Ο συντελεστής συσχέτισης (r^2) και οι τιμές χ^2 προσδιορίζουν την ποιότητα της προσαρμογής.

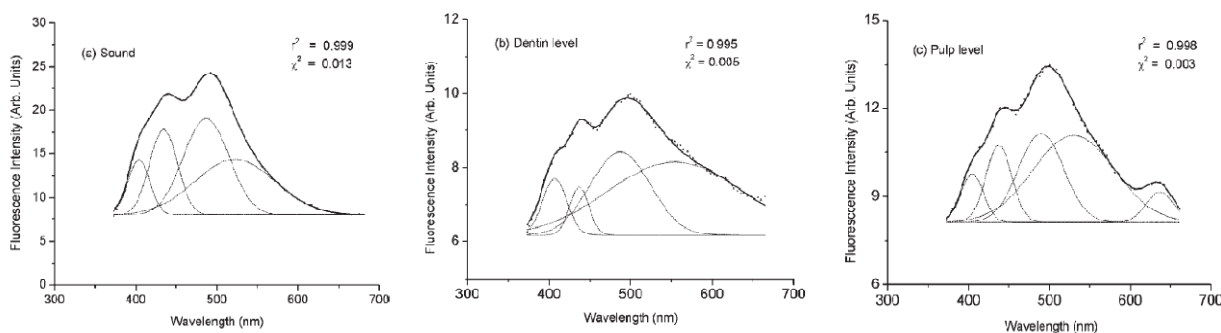
Όπως παρατηρούμε, τα φάσματα φθορισμού των οδοντικών ιστών διαφέρουν λόγω των αλλαγών στην σύνθεση των παθολογικών περιοχών και των οπτικών ιδιοτήτων των ιστών.



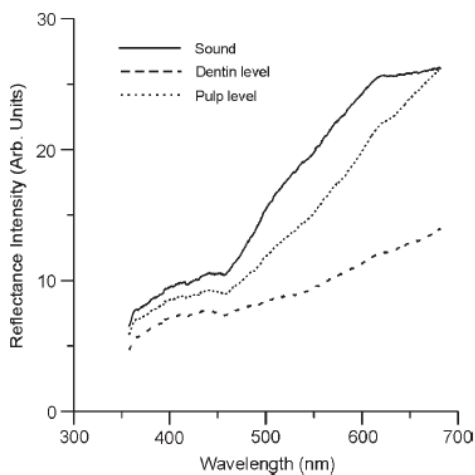
Απεικονίζεται ο μέσος όρος φασμάτων φθορισμού που προκύπτουν από 60 υγιή δείγματα δοντιού, 10 με τερηδόνα επιπέδου οδοντίνης και 20 με τερηδόνα πολφού. Η συνολική ένταση φθορισμού βρέθηκε χαμηλότερη για τα δόντια με τερηδόνα σε επίπεδο οδοντίνης, ενώ αυξήθηκε οριακά για την τερηδόνα που επηρεάζει τον πολφό.

Εικόνα 3.6 Φάσματα φθορισμού με διέγερση στα 337nm για υγιές δόντι (sound), δόντι με τερηδόνα επιπέδου οδοντίνης (dentin level) και με τερηδόνα πολφού (pulp level).

Ακολουθούν τα φάσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της προσαρμογής καμπυλών, μέσω των φασματικών συναρτήσεων Gaussian.



Εικόνα 3.7 Οι συνιστώσες μάντρες των φασμάτων φθορισμού για υγιές δόντι, δόντι με τερηδόνα σε επίπεδο οδοντίνης και επίπεδο πολφού



Επιπλέον, η έρευνα αυτή συνεχίστηκε με τις μετρήσεις διάχυτης ανάκλασης, χρησιμοποιώντας έναν λαμπτήρα βολφραμίου αλογόνου. Φαίνεται το φάσμα διάχυτης ανάκλασης, που προέκυψε από το μέσο όρο 10 μετρήσεων, στην περιοχή από 350 έως 700nm, για 60 υγιή δόντια, 10 δείγματα δοντιού με τερηδόνα σε επίπεδο οδοντίνης και 20 με τερηδόνα σε επίπεδο πολφού.

Εικόνα 3.8 Φάσματα διάχυτης ανάκλασης για υγιές δόντι (60 δείγματα), τερηδόνα οδοντίνης (10 δείγματα), τερηδόνα πολφού (20 δείγματα)

Στις παραπάνω μετρήσεις, η ένταση ανάκλασης των τερηδονισμένων δοντιών σε επίπεδο οδοντίνης βρέθηκε χαμηλότερη από αυτή των υγιών δοντιών και των τερηδονισμένων σε επίπεδο πολφού δοντιών. Ωστόσο, πέρα από τα 700nm, η φασματική ένταση της τερηδόνας σε επίπεδο οδοντίνης αυξήθηκε και παρέμεινε υψηλότερη μέχρι τα 900nm (δεν φαίνεται το φάσμα).

Tooth type	n	R500/R700	R600/R700	R650/R700
Sound tooth	60	0.63 ± 0.08	0.98 ± 0.04	1.05 ± 0.03
Dentin level caries	10	0.54 ± 0.05	0.78 ± 0.04	0.91 ± 0.04
Pulp level caries	20	0.42 ± 0.04	0.76 ± 0.03	0.93 ± 0.02

Ratios given as mean of 10 measurements ± SD; n = number of specimens.

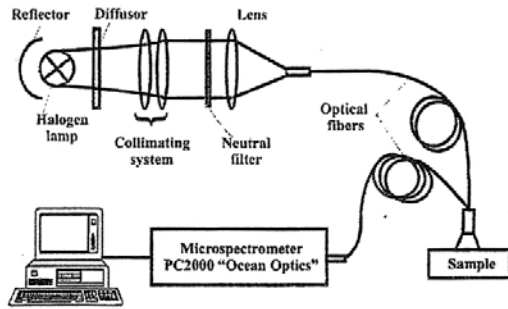
Πίνακα 3.1 Λόγοι εντάσεων ανάκλασης για υγιή και τερηδονισμένα δόντια

Επίσης, παρουσιάζονται στον πίνακα οι λόγοι των εντάσεων ανάκλασης (R500/R700, R600/R700, R650/R700) που προέκυψαν από τα φάσματα ανάκλασης των δοντιών. [4]

3^η μελέτη

Οι Borisova, Uzunov, Valkanov, Avramov προσπάθησαν να μελετήσουν την εφαρμογή της φασματοσκοπίας ανάκλασης στην ανίχνευση των διαφορετικών σταδίων τερηδόνας, καταγράφοντας φάσματα ανάκλασης των δοντιών ύστερα από έκθεσή τους σε λαμπτήρα αλογόνου, στα 400-900nm. Έτσι, απέκτησαν σήματα ανάκλασης από υγιή αδαμαντίνη και οδοντίνη και από διαφορετικά στάδια αλλοίωσης των μελετούμενων δειγμάτων δοντιών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν 147 δόντια, τα οποία είχαν εξαχθεί για διάφορους λόγους, όπως τερηδόνα και περιοδοντικά προβλήματα. Περιληπτικά παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2 οι διαφορετικές παθολογικές ομάδες που βρέθηκαν, μετά από κλινική μελέτη και ο αριθμός των δειγμάτων που ανήκει στην κάθε μία.

Η πειραματική διάταξη που δημιουργήσαν αποτελούταν από τον κατάλληλο φωτισμό λαμπτήρα αλογόνου, από οπτικές ίνες που οδηγούσαν το φως από την πηγή στο δείγμα δοντιού αλλά και επέστρεφαν το ανακλώμενο φως στο φασματόμετρο, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με έναν υπολογιστή, όπου και αποθηκεύονταν όλα τα δεδομένα και γινόταν ο γενικότερος έλεγχος της διάταξης. (εικόνα 3.9)

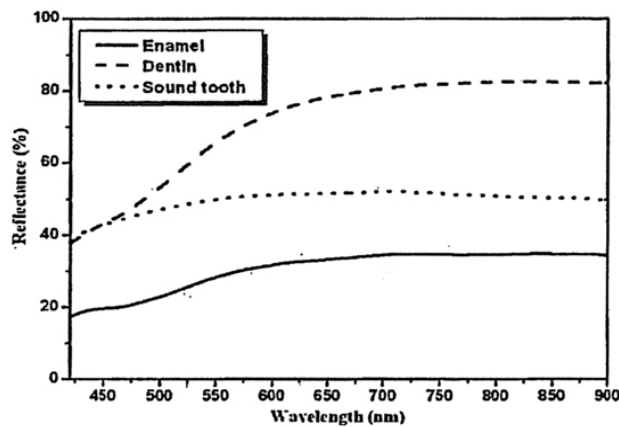


Εικόνα 3.9 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για ανίχνευση τερηδόνας στα δόντια, μέσω φασμάτων ανάκλασης τους

Tooth condition	Number of samples
White spot lesion	32
Brown spot lesion	31
Superficial cavity	30
Medium depth cavity	32
Deep cavitation	36
Odontolithiasis	37
Fluorosa dentis	11

Πίνακας 2.2 Παθολογικές ομάδες και αριθμός δειγμάτων που ανήκει στην κάθε μία

Από τις μετρήσεις που έγιναν προέκυψαν οι παρακάτω μέσοι όροι φασμάτων ανάκλασης για υγιή αδαμαντίνη και οδοντίνη και για υγιή επιφάνεια δοντιού.



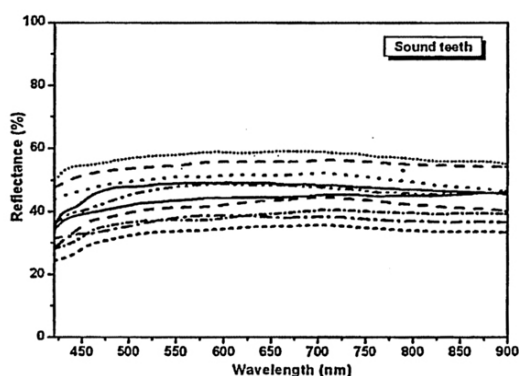
Εικόνα 3.10 Φάσματα ανάκλασης για κομμάτια αδαμαντίνης και οδοντίνης και για υγιή επιφάνεια δοντιού

Όπως παρατηρήθηκε η ένταση ανάκλασης της υγιούς αδαμαντίνης είναι αρκετά μικρότερη απ' αυτήν της υγιούς οδοντίνης, αποτέλεσμα της σχεδόν διαφάνειας του στρώματος της αδαμαντίνης, αφού σημαντικό μέρος του προσπίπτοντος φωτός περνάει διαμέσου όλου του στρώματος της και δεν συμμετέχει στο αποκτηθέν οπισθοσκεδαζόμενο σήμα. Το φάσμα του υγιούς δοντιού σχηματίζεται από την ανάκλαση των στρωμάτων της αδαμαντίνης και της οδοντίνης και η έντασή του είναι υψηλότερη, ενώ αποτελεί το άθροισμα της ανάκλασης της αδαμαντίνης και του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος από το στρώμα της οδοντίνης.

Το διάχυτο οπισθοσκεδαζόμενο σήμα των υγιών δοντιών μπορεί να περιγραφεί σαν συνδυασμός διαφόρων παραγόντων, σχετικών με τις δομικές και οπτικές ιδιότητες των στρωμάτων αδαμαντίνης και οδοντίνης, οι οποίοι είναι οι εξής:

- κατοπτρική συνιστώσα (5-9%)
- οδοντίνη : υψηλός συντελεστής σκέδασης (μ_c) και χαμηλός παράγοντας ανισοτροπίας (g), συνεπώς υψηλή ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας
- αδαμαντίνη : χαμηλότερος συντελεστής σκέδασης (μ_c) και πρίσματα αδαμαντίνης, κυρίως εμπρόσθια σκέδαση
- σήμα κάτω από 550nm – υψηλές τιμές για παράγοντα ανισοτροπίας για $\lambda < 550\text{nm}$ – επικρατέστερη η εμπρόσθια σκέδαση

Συμπερασματικά, το σήμα από το υγιές δόντι αποτελείται από κατοπτρική ανάκλαση από την επιφάνεια του δοντιού, από οπισθοσκεδαζόμενο σήμα από το στρώμα της αδαμαντίνης καθώς και από ανάκλαση και οπισθοσκέδαση από το στρώμα της οδοντίνης.



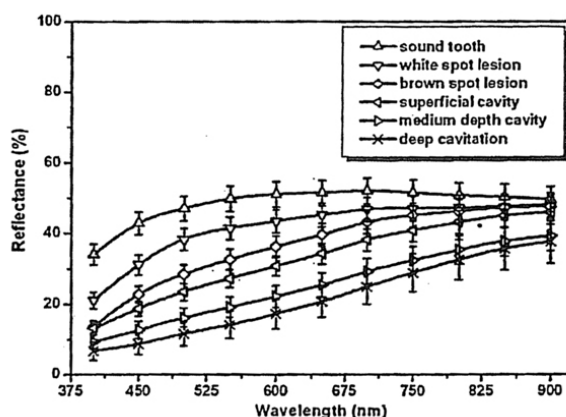
Εικόνα 3.11 Φάσματα ανάκλασης για δέκα δείγματα υγιών δοντιών

Τα φάσματα ανάκλασης των υγιών δοντιών είναι διαφορετικά σε επίπεδο έντασης, λόγω αποκλίσεων μεταξύ των δειγμάτων. Ωστόσο, το φασματικό σχήμα του ανακλώμενου σήματος δεν επηρεάζεται από τις αποκλίσεις αυτές.

Η ένταση ανάκλασης εξαρτάται κυρίως από την απόχρωση της οδοντικής επιφάνειας, που σχετίζεται με πολλούς παράγοντες όπως η ηλικία, το φύλο, η γενική κατάσταση υγείας του ατόμου, η διατροφή, το κάπνισμα κ.λ.π, ενώ το φασματικό σχήμα εξαρτάται περισσότερο από την κατάσταση υγείας του δοντιού που εξετάζεται.

Η μελέτη συνεχίζεται παρατηρώντας τα φάσματα ανάκλασης που προκύπτουν από διαφορετικά στάδια πριν τη δημιουργία της τερηδόνας, όπως μία αλλοίωση λευκού στίγματος (white spot lesion) ή μία αλλοίωση καφέ στίγματος (brown spot lesion), αλλά και κατά την διάρκεια εξέλιξης της τερηδόνας στα δόντια, όπως μία ρηγή (επιφανειακή) κοιλότητα (superficial cavity), μία μεσαίου βάθους κοιλότητα (medium-depth cavity) και μία βαθιά κοιλότητα (deep cavitation) και συγκρίνοντάς τα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επιφάνεια του υγιούς δοντιού. Τα

φάσματα παρουσιάζονται με την τυπική απόκλιση τους, που λαμβάνεται μετά τον υπολογισμό του μέσου όρου όλων των δειγμάτων για κάθε στάδιο της ασθένειας.



Εικόνα 3.12 Φάσματα ανάκλασης για διαφορετικά στάδια τερηδόνας

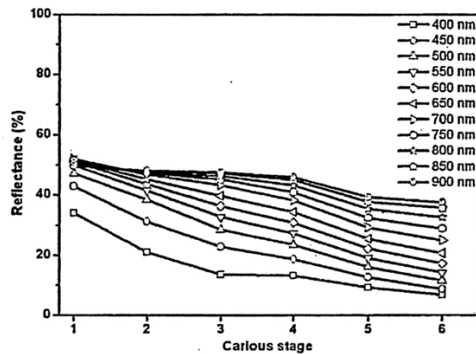
Στα στάδια πριν τη δημιουργία της τερηδόνας συμβαίνουν ορισμένες αλλαγές στις δομές κυματοδηγού της αδαμαντίνης, λόγω της καταστροφής της επιφάνειας κατά την διάρκεια δημιουργίας της αλλοίωσης. Οι αλλαγές αυτές στην μορφολογική δομή του στρώματος της αδαμαντίνης οδηγούν σε αλλαγές στον παράγοντα ανισοτροπίας. Εφόσον οι συνθήκες κυματοδηγού εκπληρώνονται για μικρότερα μήκη κύματος στις υγιείς δομές της αδαμαντίνης παρά στα στρώματα αδαμαντίνης όπου επέρχεται καταστροφή, είναι αναμενόμενο να παρατηρήσουμε σημαντικές μεταβολές στις συνθήκες μεταφοράς φωτισμού στην μπλέ – πράσινη φασματική περιοχή. Αυτό παρατηρείται και στο παραπάνω φάσμα, όπου υπάρχει μεγάλη μείωση του σήματος στην φασματική περιοχή των μικρών μηκών κύματος.

Στα προχωρημένα στάδια αλλοιώσεων της τερηδόνας, παρατηρείται μείωση στο σήμα σε ολόκληρη την φασματική περιοχή. Στην περίπτωση αυτή, πηγή των φασματικών αλλαγών αποτελεί η εισαγωγή των εξωγενών μορίων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης της τερηδόνας. Η απορρόφηση των αλλοιώσεων προέρχεται από την απορρόφηση του 'υλικού' της τερηδόνας, η οποία δεν είναι συγκεκριμένη για ολόκληρη την ορατή φασματική περιοχή. Η συγκέντρωση αυτών των εξωγενών απορροφητών αυξάνεται υπό τη συσσώρευση των προϊόντων μεταβολισμού των βακτηρίων, κυρίως κατά την ανάπτυξη των αλλοιώσεων. Με αυτόν τον τρόπο, η απορρόφηση αυξάνεται για μεσαίου βάθους και βαθιές κοιλότητες, γι' αυτό και παρατηρούμε ραγδαία μείωση της έντασης ανάκλασης για τα στάδια αυτά.

Το υγιές στρώμα αδαμαντίνης έχει μία δομή πρίσματος με ιδιότητες κυματοδηγού και αν πέσει ακτινοβολία πάνω στην επιφάνεια του δοντιού, τότε το φως θα διεισδύσει βαθιά. Όταν όμως η επιφάνεια του δοντιού καταστρέφεται, φθείρεται η πρισματική δομή του στρώματος αδαμαντίνης και οι ιδιότητες του κυματοδηγού

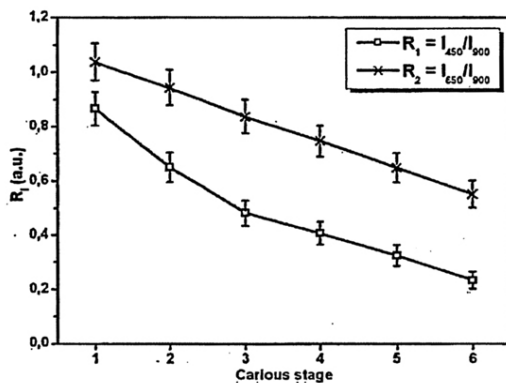
εξαφανίζονται, οπότε το φως δεν διεισδύει τόσο βαθιά όσο στην περίπτωση της υγιούς δομημένης αδαμαντίνης και το σήμα που λαμβάνεται έχει μειωμένη ένταση σε σύγκριση με την ανάκλαση του υγιούς δοντιού. Έτσι, οι αλλοιώσεις εμφανίζονται πιο σκοτεινές από την υγιή αδαμαντίνη.

Η δυναμική των φασματικών αλλαγών, σχετιζόμενη με τις δομικές μεταβολές, φαίνεται παρακάτω, όπου εμφανίζονται οι τιμές της έντασης σε συνάρτηση με το στάδιο της τερηδόνας, για διαφορετικά μήκη κύματος.



- 1:υγιές δόντι
- 2:αλλοίωση λευκού στίγματος (white spot lesion)
- 3:αλλοίωση καφέ στίγματος (brown spot lesion)
- 4:ρηχή (επιφανειακή) κοιλότητα (superficial cavity)
- 5:μεσαίου βάθους κοιλότητα (medium-depth cavity)
- 6:βαθιά κοιλότητα (deep cavitation)

Εικόνα 3.13 Αλλαγές στην ένταση για διάφορα μήκη κύματος, σε συνάρτηση με το στάδιο της τερηδόνας



Εικόνα 3.14 Λόγοι $R_1 = R_{450} / R_{900}$ και $R_2 = R_{650} / R_{900}$, που χρησιμοποιούνται για διάκριση των αλλοιώσεων τερηδόνας

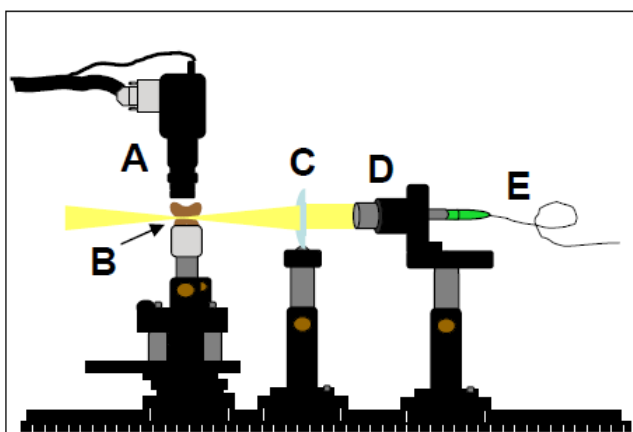
Η μελέτη συνεχίστηκε, προσπαθώντας να αποφασίσουν ποιές είναι οι πιο σημαντικές φασματικές αλλαγές, που θα δίνουν πληροφορίες για την ανάπτυξη ενός διαγνωστικού αλγορίθμου, για διάκριση μεταξύ των σταδίων πριν την δημιουργία της τερηδόνας και κατά τη διάρκεια εξέλιξης της. Επιλέχτηκαν έτσι δύο αδιάστατοι λόγοι εντάσεων, στα 450nm, 650nm και 900nm, R_{450} / R_{900} και R_{650} / R_{900} .

Στην περίπτωση των αλλαγών στον παράγοντα ανισοτροπίας πριν την δημιουργία της τερηδόνας (αλλοίωση λευκού στίγματος ή μία αλλοίωση καφέ στίγματος), που σχετίζονται με την καταστροφή της δομής της αδαμαντίνης, παρατηρούμε ραγδαία μείωση του σήματος στην μπλέ φασματική περιοχή (λόγος R_1 στα σημεία 2 και 3). Στην περίπτωση της τερηδόνας (ρηχή (επιφανειακή) κοιλότητα, μεσαίου βάθους κοιλότητα και βαθιά κοιλότητα), όπου η πηγή των αλλαγών είναι η εισαγωγή εξωγενών μορίων κατά τη διάρκεια της τερηδόνας, η απορρόφηση γίνεται σε ολόκληρη την φασματική περιοχή, το οποίο φαίνεται καθαρά στους δύο λόγους R_1 (μπλέ / υπέρυθρο) και R_2 (κόκκινο / υπέρυθρο), που χρησιμεύουν σαν δείκτες της κατάστασης του δοντιού. (σημεία 4, 5, 6) [5]

3.3 Νέες τεχνολογίες για την ανίχνευση της τερηδόνας

Είναι σημαντικό να διακρίνουμε τα συστήματα που περιγράφονται παρακάτω σε συστήματα ανίχνευσης τερηδόνας, παρά σε διαγνωστικά συστήματα. Η διάγνωση είναι μία διαδικασία απόφασης που βασίζεται στον γιατρό και ενημερώνεται αρχικά από την ανίχνευση μίας αλλοίωσης, ενώ ακολουθείται από προσδιορισμό των κινδύνων τερηδόνας των ασθενών, που πιθανώς να περιλαμβάνουν τον αριθμό των καινούριων αλλοιώσεων τερηδόνας, περασμένες εμπειρίες τερηδόνας, την διατροφή κ.τ.λ. Αυτά τα συστήματα ανίχνευσης σκοπεύουν στο να προσαυξήσουν την διαγνωστική διαδικασία, διευκολύνοντας την πρόωμη ανίχνευση των ασθενειών ή καθιστώντας την ικανή να τις ποσοτικοποιεί με έναν αντικειμενικό τρόπο. Ο οπτικός έλεγχος, που αποτελεί το πιο διαδεδομένο σύστημα ανίχνευσης τερηδόνας, είναι υποκειμενικός. Ο προσδιορισμός ορισμένων χαρακτηριστικών, όπως το χρώμα και η υφή, παρέχει ορισμένες πληροφορίες για την σοβαρότητα της ασθένειας, αλλά υστερεί στην ποσοτικοποίηση. Επίσης, περιορίζεται στο κατώφλι ανίχνευσης και η ικανότητά του να ανιχνεύει πρόωμες αλλοιώσεις, χωρίς κοιλότητα, είναι μικρή. Αυτή η ικανότητα ποσοτικοποίησης και ανίχνευσης της πρόωμης τερηδόνας είναι τα ουσιαστικά οφέλη που προσφέρουν τα σύγχρονα διαγνωστικά συστήματα στον γιατρό.

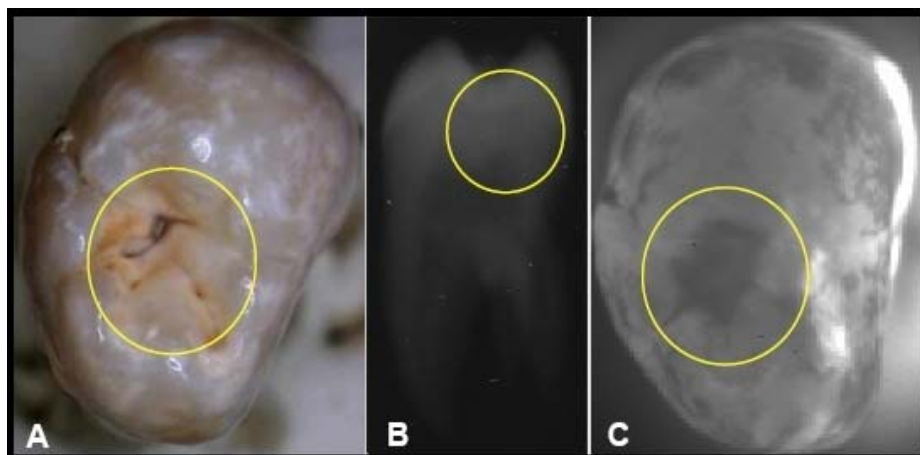
1. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΤΕΡΗΔΟΝΑΣ ΣΤΟ ΥΠΕΡΥΘΡΟ ΦΩΣ ΣΤΑ 1310nm



Εικόνα 3.15 Απεικονιστική διάταξη στο υπέρυθρο φως

Οι Buhler, Ngaotheppitak και Fried δημιούργησαν μια απεικονιστική διάταξη όπου διαδίδεται στο δόντι φως κοντά στην υπέρυθρη ακτινοβολία (1310nm). Συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελούταν από την κατάλληλη πηγή φωτός στο υπέρυθρο, από οπτικές ίνες, από έναν κυλινδρικό φακό που έκανε την απαραίτητη εστίαση και από μία διάταξη που κατέγραφε τις εικόνες των δοντιών.

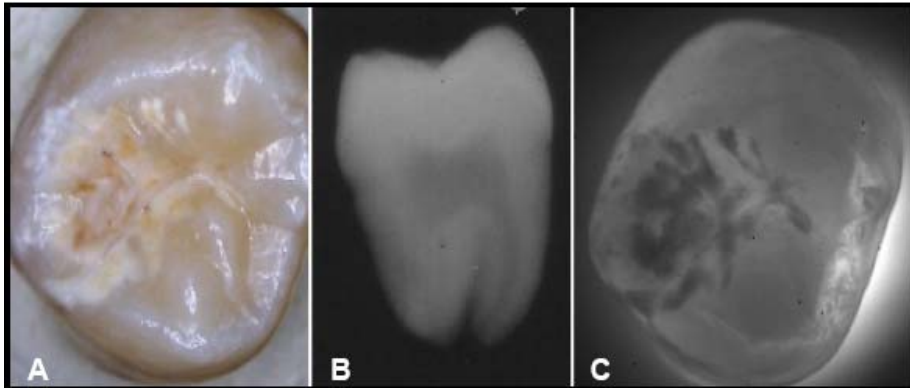
Έπειτα, χρησιμοποιήθηκαν ορισμένα δόντια που είχαν εξαχθεί γι' αυτό το λόγο και έγιναν ορισμένα πειράματα με αυτά. Παρουσιάζεται αρχικά, στο υπέρυθρο φως, ένα δόντι (γομφίος) με ένα μεγάλο κεντρικό βαθούλωμα. (εικόνα 3.16)



Εικόνα 3.16 (A) Απεικόνιση ανακλώμενου φωτός (ορατό) ενός γομφίου με εκτεταμένη πρόσληψη φθορίου (fluorosis) και μία μεγάλη αλλοίωση (κίτρινος κύκλος) στο κεντρικό βαθούλωμα, (B) Ακτινογραφία, (C) Απεικόνιση NIR του δοντιού, η αλλοίωση είναι η μεγάλη αδιαφάνεια

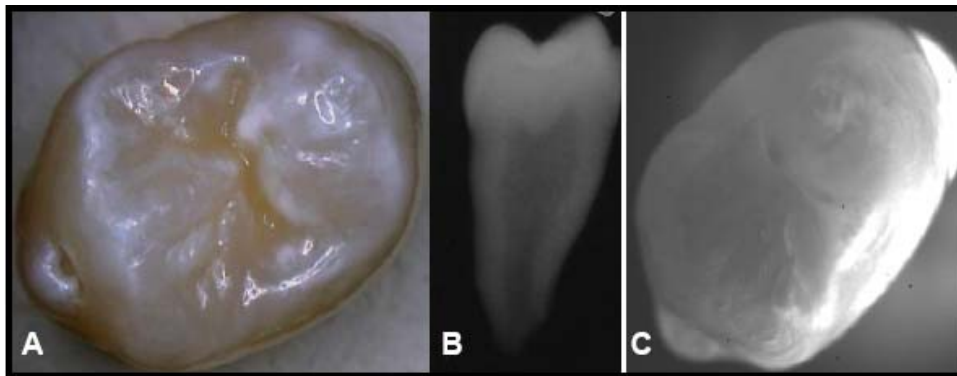
Η απεικόνιση ανακλώμενου φωτός δείχνει ένα σκοτεινό βαθούλωμα στο κέντρο, το οποίο περιβάλλεται από καφέ περιοχές. Προφανώς ένας οδοντίατρος θα έβρισκε αυτό το δόντι 'ύποπτο' και θα εξέταζε την περιοχή του βαθουλώματος για να δει αν το υλικό του βαθουλώματος είναι μαλακό, πριν αποφασίσει αν θα χρειαστεί να επέμβει (δηλαδή να τρυπήσει το δόντι) ή όχι. Ωστόσο, τέτοιου είδους οπτική προσέγγιση έχει χαμηλή ευαισθησία, κάτω από 50%, για την ανίχνευση βλάβων που προκαλεί η τερηδόνα. Το δόντι αυτό καλύπτεται με λευκές κηλίδες, κυρίως λόγω υπερβολικής πρόσληψης φθορίου (fluorosis). Δυστυχώς, η τερηδόνα εμφανίζεται επίσης λευκή στο ορατό και έτσι δεν είναι εύκολο να διακριθούν μεταξύ τους. Η περιοχή της τερηδόνας (σκοτεινή περιοχή) μπορεί να διακριθεί καθαρά από την περιοχή που έχει περισσότερο φθόριο (λευκή περιοχή) στην απεικόνιση κοντά στο υπέρυθρο. (C) Συμβαίνει βέβαια η βλάβη να είναι τόσο μεγάλη και αρκετά βαθιά ώστε να φανεί σε μία ακτινογραφία, όπως και στην περίπτωση αυτή. (B) Τότε, σημαίνει πως η τερηδόνα είναι εκτεταμένη και χρειάζεται αποκατάσταση του δοντιού από τον οδοντίατρο.

Ακολουθεί μία λιγότερο σοβαρή βλάβη, με πιο επιφανειακή τερηδόνα. (εικόνα 3.17) Η απεικόνιση ανακλώμενου φωτός (A) δείχνει λευκές και καφέ περιοχές, γύρω από τις σχισμές της επιφάνειας του δοντιού. Στο ορατό φως είναι δύσκολο να εντοπίσεις την θέση της τερηδόνας, λόγω του ίδιου χρώματος της γερής αδαμαντίνης και της διαβάθμισης του χρωματισμού. Επίσης, η ακτινογραφία (B) δεν δείχνει τερηδόνα. Στην απεικόνιση NIR (C), οι περιοχές με τερηδόνα δείχνουν υψηλή αντίθεση από τις υγιείς και είναι εύκολα διαφοροποιήσιμες από τη γερή αδαμαντίνη. Οι λεκέδες και ο χρωματισμός, δεν επεμβαίνουν στην απεικόνιση NIR.



Εικόνα 3.17 (A) Απεικόνιση ανακλώμενου φωτός (ορατό) ενός γομφίου με τερηδόνα στις σχισμές, (B) Ακτινογραφία, (C) Απεικόνιση NIR του δοντιού, δείχνει τοπικές περιοχές με τερηδόνα

Εν συνεχεία, έχουμε ένα υγιές δόντι χωρίς τερηδόνα, για να δούμε τις διαφορές με τα προηγούμενα. (εικόνα 3.18) Παρ'όλο που το δόντι δεν έχει τερηδόνα, υπάρχουν περιοχές που εμφανίζονται με ποικίλες διαβαθμίσεις του λευκού, οι οποίες είναι εύκολο να θεωρηθούν είτε ως περιοχές που πάσχουν από τερηδόνα, είτε ως περιοχές με υπερβολικό φθόριο. (A) Ωστόσο παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ίχνη τερηδόνας, ούτε στην ακτινογραφία (B) ούτε στην NIR απεικόνιση. (C)



Εικόνα 3.18 (A) Απεικόνιση ανακλώμενου φωτός (ορατό) ενός υγιούς γομφίου χωρίς τερηδόνα, (B) Ακτινογραφία, (C) Απεικόνιση NIR του δοντιού

Τελικά, όλες οι παραπάνω απεικονίσεις στο υπέρυθρο απέδειξαν ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση και απεικόνιση τερηδόνας στις επιφάνειες που κλείνουν τα δόντια (occlusal). Εκμεταλλεύτηκαν την υψηλή διαφάνεια της οδοντικής αδαμαντίνης, τη δυνατή σκέδαση και την ασθενή απορρόφηση της οδοντίνης, προκειμένου να επιτύχουν ομοιόμορφη διανομή του σκεδασμένου NIR φωτός κάτω από τη διαφανή αδαμαντίνη της μύλης, ώστε να διευκολυνθεί ο υψηλός βαθμός διαφοράς φωτεινού-σκούρου στην NIR απεικόνιση και να ανιχνευτούν κρυμμένες αλλοιώσεις κάτω από την επιφάνεια. Έδειξαν, ακόμα, απεικονίζοντας δόντια με διάφορες φυσικές αλλοιώσεις ότι η τεχνολογία απεικόνισης κοντά στο υπέρυθρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποκτήσουμε εικόνες της τερηδόνας που δεν είναι ανιχνεύσιμη με τα συμβατικά μέσα, είτε την

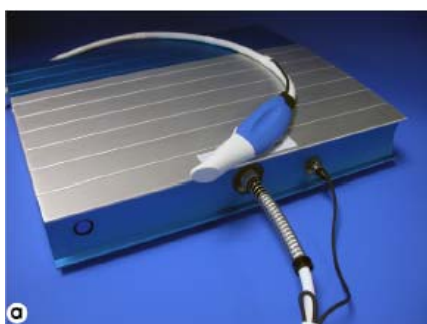
ακτινογραφία, είτε οπτική ή ψηλαφητή εξέταση. Επιπλέον, ότι η υπερβολική πρόσληψη φθορίου, ο χρωματισμός και τα στίγματα, δεν επεμβαίνουν σημαντικά στην απεικόνιση της τερηδόνας στο υπέρυθρο. Αντίθετα, τέτοιου είδους μεταβλητές επεμβαίνουν σημαντικά στην οπτική διάγνωση της τερηδόνας και προκαλούν λάθη στις μεθόδους ανίχνευσης της τερηδόνας με φθορισμό.

Παρ' όλα αυτά τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής στο υπέρυθρο, δεν έχει προχωρήσει ακόμα η κατασκευή ενός κλινικού πρωτοτύπου για δοκιμές και ελέγχους της εφαρμογής του. [6]

2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΦΘΟΡΙΣΜΟ

➤ *QLF(Quantitative Light-induced Fluorescence)*

Η συσκευή QLF (Quantitative Light-induced Fluorescence) χρησιμοποιεί φως από λυχνία αλογόνου για την ποσοτικοποίηση της απώλειας μεταλλικών στοιχείων από την επιφάνεια των δοντιών. Η μέθοδος QLF στηρίζεται στο φωτισμό του δοντιού με μπλέ φως (370nm) προερχόμενο από μία λάμπα ξένου 50W. Η φθορίζουσα εικόνα του δοντιού καταγράφεται σε ένα ειδικό CCD και με τη βοήθεια λογισμικού αναλύεται και η απώλεια φθορισμού της συσχετίζεται με την απώλεια μεταλλικών στοιχείων της επιφάνειας, ποσοτικοποιώντας έτσι την μέτρηση. Η συσκευή είναι πολύ ευαίσθητη στην διάγνωση της πρώιμης απώλειας μεταλλικών στοιχείων (96% σε 5% απώλεια στοιχείων), όμως είναι δυστυχώς ελάχιστα ειδική στη βλάβη (μόλις 11% σε 5% απώλεια). Σε βλάβες πάντως μεγαλύτερης απώλειας, πιο προχωρημένες, 10% ή 15%, η ευαισθησία της πέφτει στο 83.5% και στο 64.1%, αυξανόμενης όμως της ειδικότητας της μέχρι και το 54.7%, που πάντως εξακολουθεί να είναι χαμηλή.

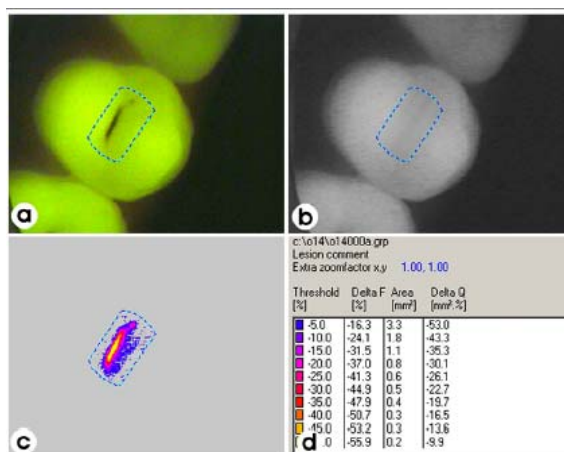


Ο εξοπλισμός του QLF αποτελείται από ένα φωτεινό κουτί που περιέχει μία ηλεκτρική λυχνία στοιχείου ξένου και μία συσκευή χειρός, που μοιάζει με ενδοστοματική κάμερα. (α) Το φως περνάει στη συσκευή χειρός μέσω ενός υγρού οδηγού φωτός και η συσκευή περιέχει το διαπερατό φίλτρο. (β) Οι εικόνες των δοντιών επιδεικνύονται μέσω ενός υπολογιστή και ειδικό λογισμικό πρόγραμμα παρουσιάζει τις λεπτομέρειες που ενδιαφέρουν κάθε ασθενή.

Εικόνα 3.19 QLF εξοπλισμός(α) το QLF φωτεινό κουτί, μια συσκευή χειρός και υγρός οδηγός φωτός (β) μία κοντινή εικόνα από την ενδοστοματική κάμερα

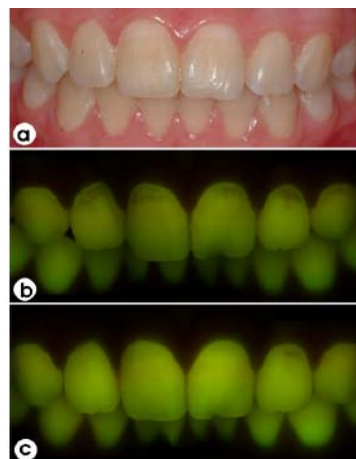
Από τη στιγμή που θα ληφθεί μία εικόνα, το επόμενο στάδιο είναι η ανάλυση των αλλοιώσεων και η παραγωγή ποσοτικής αποτίμησης της κατάστασης της τερηδόνας στο δόντι. Αυτό γίνεται από ένα κατάλληλο πρόγραμμα που χρησιμοποιεί ένα μικρό κομμάτι που ορίζει τις περιοχές της υγιούς αδαμαντίνης, γύρω από την αλλοίωση που μας ενδιαφέρει. Ακολουθώντας αυτήν, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τις τιμές των pixels της υγιούς αδαμαντίνης για να αναδομήσει την επιφάνεια του δοντιού και έπειτα αφαιρεί εκείνα τα pixels που θεωρούνται αλλοιωμένα. Αυτό ελέγχεται από ένα κατώφλι απώλειας φθορισμού, που είναι γενικά στο 5%. Δηλαδή, όλα τα pixels με απώλεια φθορισμού μεγαλύτερη από 5% του μέσου όρου της τιμής της υγιούς αδαμαντίνης, θεωρούνται μέρος της αλλοίωσης. Αφού τα pixels χαρακτηριστούν ως υγιή ή αλλοιωμένα, το πρόγραμμα υπολογίζει το μέσο όρο της απώλειας φθορισμού στην αλλοίωση, γνωστό σαν % ΔF , καθώς και την συνολική περιοχή της αλλοίωσης σε mm^2 . Ο πολλαπλασιασμός των δύο αυτών μεταβλητών καταλήγει σε ένα τρίτο μετρικό αποτέλεσμα, γνωστό ως % ΔQ . Παρακάτω φαίνεται η ανάλυση και η προκύπτουσα αλλοίωση.(εικόνα 3.20)

Παρουσιάζεται επίσης ένα παράδειγμα απεικόνισης με QLF (εικόνα 3.21), όπου αρχικά ανιχνεύεται τερηδόνα, λόγω της έντονης διαφοράς της υγιούς και της αλλοιωμένης αδαμαντίνης (b), ενώ μετά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός εξαμήνου θεραπευτικού προγράμματος στοματικής υγιεινής (c).



Εικόνα 3.20 Ανάλυση αλλοίωσης χρησιμοποιώντας QLF

(a) Αλλοίωση στην επιφάνεια ενός προτόμφου αναγνωρίζεται και ένα κομμάτι ανάλυσης τοποθετείται στη γερή αδαμαντίνη, (b) Η αναδομή επιδεικνύει το σωστό κομμάτι τοποθέτησης και η επιφάνεια μοιάζει ομοιογενής, (c) Η αφαιρεμένη αλλοίωση δείχνεται με λάθος χρώμα, αποδεικνύοντας τη σοβαρότητα της τερηδόνας, (d) Το ποσοτικό αποτέλεσμα από την ανάλυση σε μια ποικιλία επιπέδων κατωφλίων φθορισμού



Εικόνα 3.21 Απεικόνιση QLF

(a) Απεικόνιση λευκού φωτός πρόιμης τερηδόνας, (b) QLF απεικόνιση την ίδια στιγμή με την (a), (c) 6 μήνες μετά την έναρξη ενός προγράμματος στοματικής υγιεινής, οι αλλοιώσεις έχουν διαλυθεί

Η μέθοδος QLF έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές in vitro και in vivo μελέτες, για επίπεδες επιφάνειες με τερηδόνα. Η πιθανότητα να υιοθετήσουμε τη μέθοδο αυτή για διάγνωση τερηδόνας σε επιφάνειες που βρίσκονται ανάμεσα στα δόντια (interproximal) ερευνάται ακόμα. Έχει δείχτει ότι το QLF είναι μία μέθοδος που μπορεί να αναπαραχθεί για την ποσοτικοποίηση των αλλοιώσεων της τερηδόνας σε επίπεδες επιφάνειες. Ωστόσο, φαίνεται να είναι περιορισμένη σε ένα βάθος αλλοιώσεων περίπου 400μm. Γενικά, προσφέρει επιπλέον πλεονεκτήματα, πέρα από εκείνα της πρώιμης ανίχνευσης αλλοιώσεων και της ποσοτικοποίησης. Το QLF είναι μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες στην ανίχνευση τερηδόνας, σταθερή προς το παρόν, παρ'όλα αυτά απαιτείται περισσότερη έρευνα, ώστε να επιδειχτεί η ικανότητά του να ελέγχει σωστά τις αλλαγές των αλλοιώσεων μέσα στο χρόνο. [7]

➤ **LASER FLUORESCENCE-DIAGNODent**



Εικόνα 3.22 Η συσκευή DIAGNODent

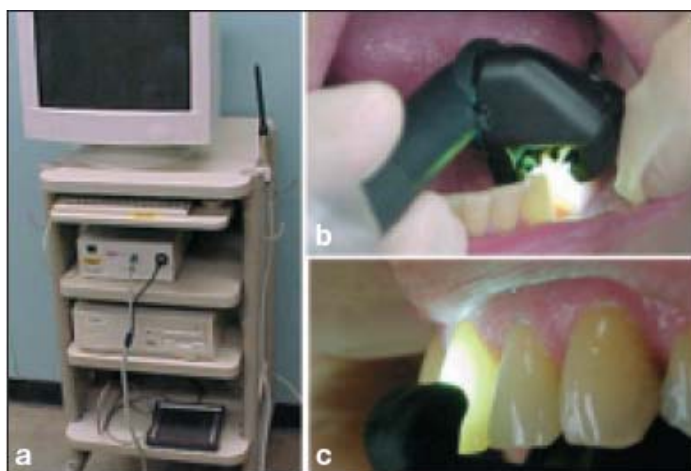
Το όργανο DIAGNODent είναι μία άλλη συσκευή που χρησιμοποιεί το φθορισμό για να ανιχνεύσει την παρουσία τερηδόνας. Χρησιμοποιώντας ένα μικρό laser, το σύστημα παράγει ένα διεγερμένο μήκος κύματος στα 650nm, το οποίο παράγει κόκκινο φως. Αυτό μεταφέρεται σε ένα από τα δύο ενδοστοματικά άκρα, ένα σχεδιασμένο για σχισμές και κοιλότητες και το άλλο 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 δεν απαιτεί κάποιες ιδιαίτερες προϋποθέσεις για την καλή εφαρμογή της, πέρα ίσως του καθαρισμού των δοντιών για την σωστή ανάγνωση της βλάβης. Η μέχρι τώρα έρευνα έχει δείξει ότι η συσκευή μπορεί πράγματι να αποκαλύψει

αρχόμενες βλάβες στις μασητικές επιφάνειες των δοντιών σε πολύ πρώιμα στάδια, όπου η ακτινογραφία υστερεί, ενώ φαίνεται να συσχετίζει καλύτερα από τις άλλες τεχνικές την ένδειξη με το βάθος της ιστολογικής βλάβης. Μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου δεν ενδείκνυται η χρήση ακτινογραφίας, λόγω ακτινοβολίας, όπως στις έγγυες γυναίκες. Είναι εύκολη στη χρήση, σχετικά προσιτή σε τιμή και όταν συνδυάζεται με οπτική εξέταση, βελτιώνει την ικανότητα του ειδικού να ανιχνεύσει την τερηδόνα. Ωστόσο, έχει αμφισβητηθεί αρκετά για τα αποτελέματά της και δεν υπάρχουν επαρκείς αποδείξεις για να υποστηρίξουν τη χρήση αυτής της συσκευής σαν βασικό μέσο ανίχνευσης της τερηδόνας. [7]

3.ΔΙΑΔΟΣΗ ΦΩΤΟΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ(DiFOTI)

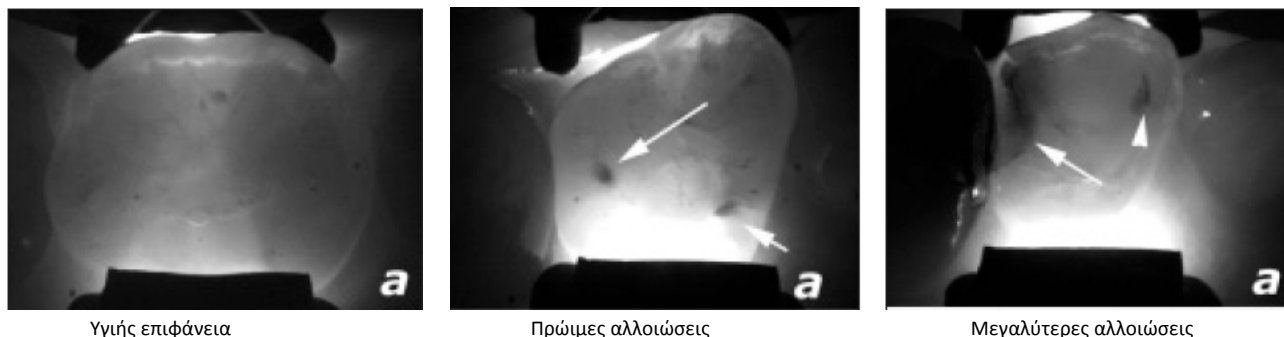
Η μέθοδος DiFOTI ή Ψηφιακή Απεικόνιση με Διερχόμενο Φωτισμό Οπτικών Ινών (Digital Imaging Fiber Optic Transillumination), εκμεταλλεύεται τις οπτικές ιδιότητες της αδαμαντίνης και τις εντείνει χρησιμοποιώντας ένα υψηλής έντασης λευκό φως.



Εικόνα 3.23 (α)Το σύστημα DiFOTI, περιλαμβάνει ένα φωτεινό κομμάτι και υπολογιστή, (β)Η συσκευή χειρός, (γ)Η επίπεδη επιφάνεια φωτίζεται

Το σύστημα Digital Imaging Fiber Optic Transillumination (DiFOTI) επιτρέπει ψηφιακή λήψη εικόνων από όλες τις επιφάνειες του δοντιού και έπειτα αποθήκευσή τους. Η αρχή πίσω από την διάδοση του φωτός στα δόντια είναι ότι οι περιοχές της αδαμαντίνης ή της οδοντίνης που πάσχουν από τερηδόνα, σκεδάζουν το φως (στην περίπτωση αυτή το υψηλής έντασης λευκό φως) περισσότερο από τις υγιείς περιοχές. Η αρχόμενη τερηδόνα εμφανίζεται σαν πιο σκοτεινή περιοχή στις προκύπτουσες εικόνες. Το φιλικό προς το χρήστη σύστημα DiFOTI αποτελείται από δύο συσκευές χειρός, μία για τις επιφάνειες που κλείνουν τα δόντια και μία για

τις επίπεδες και τις ενδιάμεσα στα δόντια περιοχές. Επίσης έχει έναν υπολογιστή, όπου λαμβάνονται και αποθηκεύονται οι προκύπτουσες εικόνες. Δίνονται παραδείγματα απεικόνισης σε DiFOTI σύστημα, για υγιή δόντια, πρώιμα τερηδονισμένα και δόντια με μεγαλύτερες αλλοιώσεις.



Ωστόσο, ένα ενδεχόμενο πρόβλημα με το DiFOTI σχετίζεται με την ερμηνεία των εικόνων που προκύπτουν. Το DiFOTI δεν είναι ποσοτική τεχνική και το λογισμικό του δεν παρουσιάζει καμία ανάλυση (τα αποτελέσματα δεν ποσοτικοποιούνται κατευθείαν). Αντί αυτού οι εικόνες πρέπει να αναλυθούν από τον ειδικό, με τον ίδιο τρόπο που γίνεται με τις ακτινογραφίες, ο οποίος κάνει υποκειμενική θεώρηση, βασιζόμενος στην εμφάνιση της σκέδασης του φωτός. Βέβαια, το περιεχόμενο των εικόνων δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ισοδύναμο με αυτό που εμφανίζεται στις ακτινογραφίες, εφ' όσον οι αλλοιωμένες περιοχές που εμφανίζονται εκεί θα πρέπει να αποκατασταθούν. Όμως, οι περιοχές με τερηδόνα που ανιχνεύει το σύστημα DiFOTI είναι, γενικά, αρχόμενες αλλοιώσεις, που είναι υποκείμενες σε μη επεμβατικές θεραπείες.

3.4 Συγκρίσεις μεθόδων

Γενικά, δεν μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι αυτές οι συσκευές προσφέρουν φανερές βελτιώσεις σε σχέση με τα πιο παραδοσιακά συστήματα. Ωστόσο, προσφέρουν ευδιάκριτα πλεονεκτήματα, π.χ. οι εικόνες του QLF και του DiFOTI μπορούν να αποθηκευτούν και να εξεταστούν σε μία μετέπειτα χρονική στιγμή. Το DIAGNODent παράγει έναν απλό αριθμητικό δείκτη απομετάλλωσης, που μπορεί να σημειωθεί και να ελέγχεται κατά διαστήματα. Τελικά, η πληθώρα των μεθόδων και τα συστήματα αξιολόγησης κάνουν τις συγκρίσεις δύσκολες και θέτουν μία πρόκληση στον οδοντίατρο, που πρέπει να μένει ενήμερος για τις τεχνολογικές εξελίξεις. Δυστυχώς όμως καμία συσκευή δεν μπορεί να καλύψει όλα τα ενδεχόμενα διάγνωσης στον βαθμό ακρίβειας που απαιτείται. Ωστόσο, προσφέρουν υπόσχεση για έλεγχο αρχικών αλλοιώσεων τερηδόνας και καθορίζονται κατάλληλα προληπτικές τεχνικές οδοντιατρικής. [8]

Συνοψίζοντας, παρ'όλο που οι καινούριες αυτές τεχνολογίες προσφέρουν σημαντική ελπίδα, δεν υπάρχουν αρκετές αποδείξεις για καμία διαγνωστική μέθοδο, ώστε να συστηθεί ως υποκατάστατο των παραδοσιακών μεθόδων. Ωστόσο, προσαρμόζοντας την οπτική επιθεώρηση και την ακτινογραφία δοντιών, η μακροχρόνια εφαρμογή αυτών των καινούργιων μεθόδων θα εξασφαλίσει πρόσθετη ποσοτική πληροφορία για τις αλλαγές των ανόργανων υλών, ως βάση για την αποτίμηση της δράσης της τερηδόνας και του κινδύνου επιβολής της. Πάντως, ο οδοντίατρος θα πρέπει πάντα να είναι υπεύθυνος για την ερμηνεία κάθε πληροφορίας και να εντοπίζει τις σχετικές πληροφορίες μέσα στις ποσοτικές μετρήσεις, παίρνοντας τη σωστή απόφαση ανάλογα την περίπτωση.

Έτσι, αφού διαπιστώσαμε την ανάγκη ανάπτυξης απεικονιστικών συστημάτων τα οποία θα παρείχαν πληροφορίες για την σύσταση και την δομή, σε κάθε χωρικό σημείο της περιοχής που μελετάμε, αποφασίσαμε να ασχοληθούμε με την φασματική απεικόνιση των δοντιών, κάνοντας χρήση της υπερφασματικής κάμερας MuSIS, σε συνδυασμό με την εφαρμογή αλγορίθμων φασμάτων ανάκλασης για την ανίχνευση και την χαρτογράφηση της τερηδόνας. Εκτενέστερη περιγραφή της μελέτης που υλοποιήσαμε ακολουθεί στα παρακάτω κεφάλαια. Βασικά, το ζητούμενο σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η ανάπτυξη μίας τέτοιας τεχνολογίας η οποία θα προσφέρει την μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών ενός μεγάλου αριθμού σημείων της υπό εξέταση περιοχής. Με τη συμβατική τεχνολογία θα μπορούσαμε να επιτύχουμε ένα αντίστοιχο αποτέλεσμα κάνοντας χρήση ενός μεγάλου αριθμού φασματομέτρων σε παράλληλη διάταξη, όπου κάθε ένα από αυτά θα κατέγραφε φασματική πληροφορία από ένα ξεχωριστό χωρικό σημείο, πράγμα αδύνατο πρακτικά και ασύμφορο οικονομικά. Ωστόσο, τα υπερφασματικά δεδομένα προσφέρουν λεπτομερείς πληροφορίες για τα δείγματα δοντιών και αποκαλύπτουν φασματικά χαρακτηριστικά που δεν είναι ορατά με άλλο τρόπο. Επιπλέον, πέρα από τη μη επεμβατική ανάλυση της φασματικής απεικόνισης, τα υπερφασματικά συστήματα προσφέρουν μία γρήγορη, υψηλής ποιότητας ανάλυση των δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Υπερφασματική απεικόνιση και αλγόριθμοι ταξινόμησης

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρέχουμε πληροφορίες όσον αφορά το πειραματικό μέρος της εργασίας μας, τα μέσα που χρησιμοποιήσαμε για την επίτευξη του στόχου μας και τα βασικά στοιχεία των αλγορίθμων ταξινόμησης φασμάτων ανάκλασης που χρησιμοποιήσαμε για την ανίχνευση και χαρτογράφηση της τερηδόνας.

4.1 Υπερφασματική απεικόνιση (Hyperspectral Imaging)

Η φασματική απεικόνιση (spectral imaging) αποτελεί την εφαρμογή της φασματοσκοπίας ανάκλασης για κάθε pixel μίας εικόνας. Η φασματοσκοπία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάδειξη ιδιαίτερων φασματικών χαρακτηριστικών, τα οποία οφείλονται στους χημικούς δεσμούς των στερεών, υγρών ή αερίων σωμάτων. Η ανίχνευση των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φασματική κάλυψη, τη φασματική ανάλυση, το βαθμό του θορύβου των φασματομέτρων, τη συγκέντρωση του υλικού και την ισχύ των χαρακτηριστικών απορρόφησης αυτού του υλικού στη μετρούμενη περιοχή μήκους κύματος.

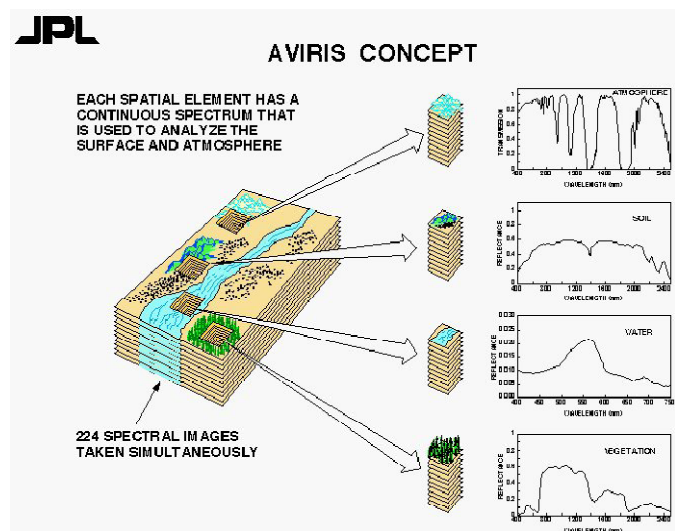
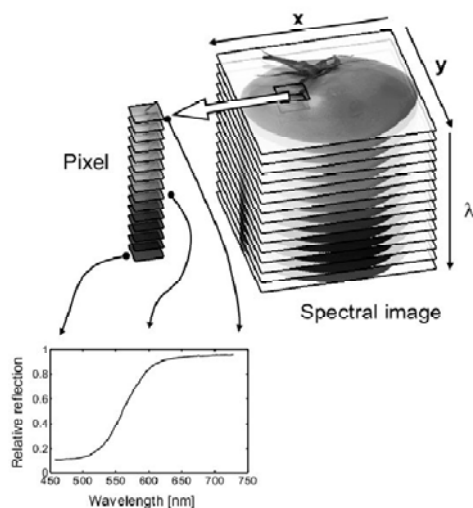
Η υπερφασματική απεικόνιση (hyperspectral imaging) ήταν η πιο επαναστατική πρόοδος στον τομέα της τηλεπισκόπησης (remote sensing) και αρχικά αναπτύχθηκε με σκοπό την ανίχνευση και ταυτοποίηση βλάστησης, ορυκτών πόρων και θαλάσσιου φυσικού περιβάλλοντος. Ένα υπερφασματικό απεικονιστικό σύστημα συλλέγει και επεξεργάζεται την πληροφορία από ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Η υπάρχουσα τεχνολογία συστημάτων υπερφασματικής απεικόνισης συνίσταται ουσιαστικά σε ειδικά φίλτρα τα οποία συζευγνύονται οπτικά με απεικονιστικούς ανιχνευτές, οι οποίοι καταγράφουν τις διερχόμενες από το φίλτρο στενές φασματικά εικόνες. Τα εν λόγω φίλτρα έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν την φασματική περιοχή στην οποία αυτά είναι διαπερατά, κάτω από την επίδραση μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, αντί της χωρικής σάρωσης η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην φασματική σάρωση, η οποία επιτρέπει την παρατήρηση σε πραγματικό χρόνο και την καταγραφή στενών φασματικά εικόνων με την δυνατότητα άμεσης επιλογής του μήκους κύματος απεικόνισης. Ακόμη, παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης διαδοχικών εικόνων κατά μήκος του φάσματος με αρκετά μεγάλη ταχύτητα και δυνητικά ο μετέπειτα υπολογισμός των φασμάτων σε διάφορα χωρικά σημεία από τις καταχωρημένες εικόνες. Τα υπερφασματικά δεδομένα είναι πολύ μεγάλα σύνολα δεδομένων που απαιτούν νέες μεθόδους επεξεργασίας και συλλέγονται και

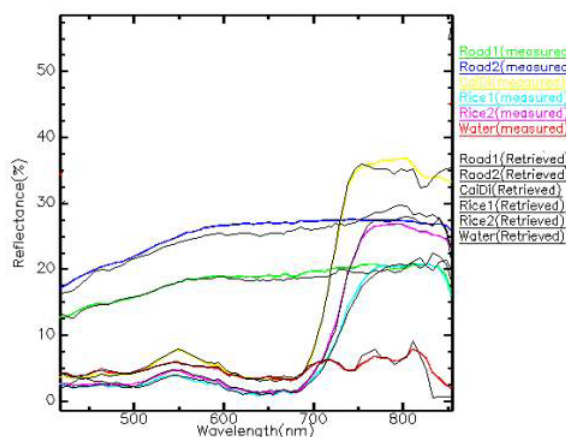
αναπαριστώνται με τη μορφή ενός κύβου (spectra cube), με χωρική πληροφορία στη x και y διάσταση και φασματική στην z . [9]

Τα φασματομέτρα απεικόνισης (imaging spectrometers) ή υπερφασματικοί αισθητήρες (hyperspectral sensors), είναι τηλεσκοπικά αισθητήρια όργανα τα οποία συνδυάζουν τη χωρική απεικόνιση ενός αισθητήρα απεικόνισης (imaging sensor) με τις αναλυτικές ικανότητες ενός φασματομέτρου. Μπορούν να έχουν έως και εκατοντάδες, πολύ στενές φασματικές ζώνες, με φασματική ανάλυση της τάξης των 10 nm ή και μικρότερη. Τα φασματομέτρα απεικόνισης παράγουν ένα πλήρες, συνεχές φάσμα για κάθε pixel της εικόνας. Το αποτέλεσμα αυτής της υψηλής φασματικής ανάλυσης των φασματομέτρων απεικόνισης είναι η δυνατότητα της ταυτοποίησης υλικών, ενώ με τους ευρείας ζώνης πολυφασματικούς αισθητήρες μπορούσαμε απλά να κάνουμε διακρίσεις μεταξύ υλικών.

Οι φασματικές εικόνες κύβων είναι παρόμοιες με το σύνολο των εικόνων ενός αντικειμένου, δείγματος ή τοποθεσίας, όπου κάθε εικόνα αποκτάται σε μία στενή φασματική ζώνη. Κάθε pixel στους κύβους εικόνων απεικονίζει το φάσμα σε εκείνο το σημείο.



Εικόνα 4.1 Υπερφασματική απεικόνιση : φασματικός κύβος και φάσματα ανάκλασης για κάθε pixel

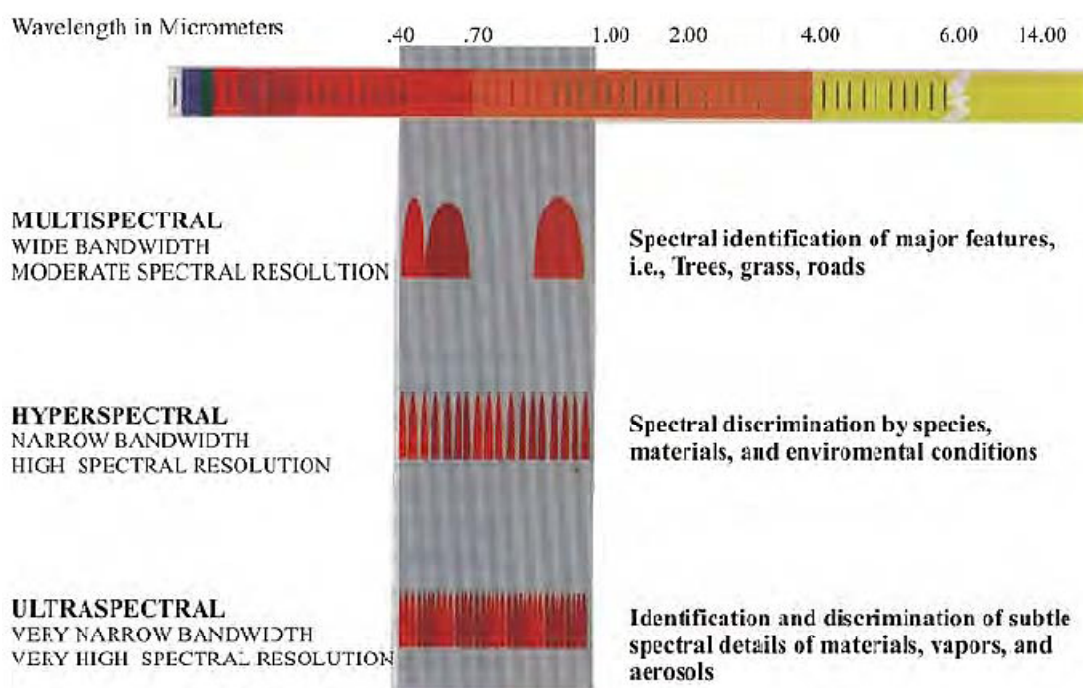


Εικόνα 4.2 Φασματικές υπογραφές διαφόρων υλικών

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 (έχοντας τον απαραίτητο εξοπλισμό) να αποκτήσουμε διαφορετικές φασματικές αποκρίσεις για κάθε είδος υλικών. Τα φάσματα αυτά αποτελούν τις φασματικές υπογραφές (spectral signature) για

γνωστά υλικά, όπως το χώμα, το νερό, η βλάστηση κ.τ.λ.

Τα συστήματα υπερφασματικής απεικόνισης απαιτούν υψηλή χωρική και φασματική ανάλυση. Επίσης, μπορούμε να διακρίνουμε τον αριθμό των ζωνών από τις οποίες αποτελείται ένας κύβος. Λιγότερες ζώνες οδηγούν σε πολυφασματικά συστήματα που έχουν φίλτρα περιορισμένων ζωνών, με μεγαλύτερο εύρος φάσματος συγκριτικά με της υπερφασματικής απεικόνισης, προκαλώντας μικρότερη φασματική ανάλυση. Η υπερφασματική απεικόνιση χρησιμοποιεί στενό εύρος φάσματος, εξασφαλίζοντας υψηλή φασματική ανάλυση. Συγκεκριμένα, στα συστήματα πολυφασματικής απεικόνισης, οι απεικονιστικοί μονοχρωμάτορες είναι σχετικά απλές διατάξεις και επιτρέπουν την λήψη εικόνων σε δέκα ή λιγότερες διαφορετικές περιοχές του οπτικού φάσματος. Αντίθετα, στην περίπτωση της υπερφασματικής απεικόνισης οι μονοχρωμάτορες επιτρέπουν την λήψη διαδοχικών εικόνων σε 30-100 διαφορετικές περιοχές του οπτικού φάσματος και η τεχνολογία τους είναι πολύ υψηλού επιπέδου.



Εικόνα 4.3 Περιληπτικά οι διαφορές των διαφορετικών τύπων φασματικής απεικόνισης

4.2 Σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης (MuSIS)

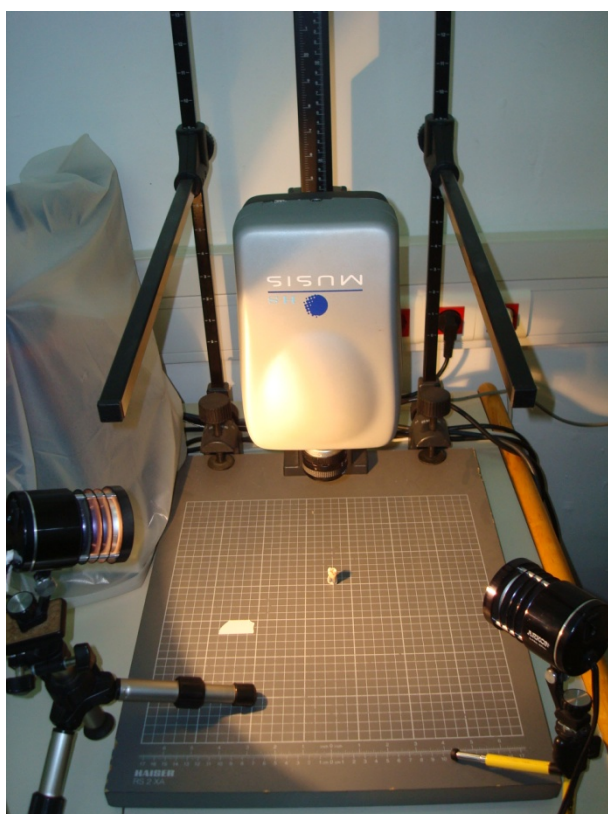
Τα πειράματα που διενεργήσαμε έγιναν κάνοντας χρήση ενός υπερφασματικού συστήματος απεικόνισης (MuSIS), βασισμένο σε έναν ολο-οπτικό μονοχρωμάτορα απεικόνισης. Η μετατόπιση των οπτικών στοιχείων των πιο πρόσφατων αποτελεσμάτων στο συντονισμό του μήκους κύματος απεικόνισης εκτελείται με τη βοήθεια μηχανικών χειρισμών που ελέγχονται από τον υπολογιστή μέσω ενός μικροελεγκτή. Το σύστημα είναι σε θέση να παράγει φασματικές εικόνες 5nm Full Width Half Maximum (FWHM), με βήμα ρύθμισης 3nm, στη φασματική ζώνη 360nm – 1550nm, περίπου 20nm πλάτους η κάθε μία. Ο φωτισμός πραγματοποιείται από 2 λάμπες αλογόνου 250W. 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. Ο μονοχρωμάτορας είναι συνδεδεμένος με μια ασπρόμαυρη CCD κάμερα, βασισμένη στο πρωτόκολλο μετάδοσης δεδομένων 1394 της IEEE, το οποίο μπορεί να παράγει τις εικόνες σε ένα ποσοστό 15 frames/s σε πλήρη ανάλυση και περισσότερων από 30 frames/s σε ανάλυση VGA.

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. Μια πλάκα Ba₂SO₄ με ενιαίο συντελεστή ανάκλασης στη φασματική ζώνη 400-1000 nm χρησιμοποιείται ως δείγμα βαθμολόγησης. Το δείγμα τοποθετείται στο οπτικό πεδίο του φακού και η γκρι τιμή του κεντρικού τομέα της εικόνας αναπαρίσταται σε πραγματικό χρόνο. Κατόπιν ο μονοχρωμάτορας 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 255. Αυτό εξασφαλίζει ότι η δυναμική περιοχή του CCD αξιοποιείται πλήρως. Οι τιμές των shutter και gain, που χρησιμοποιούνται για να λάβουν το γκρι επίπεδο 255, αποθηκεύονται σε κάθε μήκος κύματος, μαζί με την εικόνα του άσπρου δείγματος, αποτελώντας το σύνολο των στοιχείων βαθμονόμησης του συστήματος.

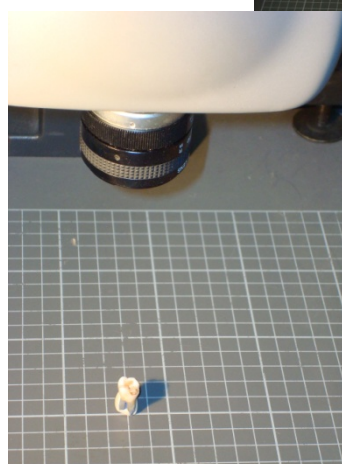
Αυτές οι ρυθμίσεις καθορίζουν το επίπεδο ευαισθησίας του συστήματος, το οποίο αυξάνεται όσο το μήκος κύματος απεικόνισης συντονίζεται σε μικρότερα ή μεγαλύτερα μήκη κύματος από τη ζώνη μηκών κύματος στην οποία η μέγιστη ρυθμαπόδοση του φωτός και η αποδοτικότητα του συστήματος λαμβάνονται. Αυτό καθιστά την απόκριση του συστήματος σχεδόν ανεξάρτητη από το μήκος κύματος, εξασφαλίζοντας κατά συνέπεια φασματική απεικόνιση και φασματομετρία ανεξάρτητες από τη συσκευή. Οι αποθηκευμένες φασματικές εικόνες του άσπρου δείγματος χρησιμοποιούνται προκειμένου να διορθώσουν την ανωμαλία της φωτεινότητας της εικόνας λόγω της ανομοιόμορφης συνάρτησης μεταφοράς της οπτικής (flat field correction = επίπεδη διόρθωση τομέων).

Με το τρέξιμο του τμήματος κώδικα για την κατάσταση της φασματομετρίας, που ακολουθεί τη διαδικασία βαθμονόμησης, το σύστημα εκτελεί συγχρονισμένα τη ρύθμιση του μήκους κύματος απεικόνισης της εικόνας και τη σύλληψη της εικόνας ενώ αποθηκεύει την υπό εξέταση περιοχή. Σε κάθε βήμα, η ευαισθησία του συστήματος είναι αυτόματα ρυθμισμένη σύμφωνα με τις αποθηκευμένες τιμές του διαφράγματος (shutter) και του gain.

Από το σύνολο των φασματικών εικόνων, ένα φάσμα μπορεί να υπολογιστεί και να επιδειχθεί σε οποιοδήποτε επιλεγμένο από το χρήστη χωρικό σημείο της εικόνας. Τα φάσματα υπολογίζονται από τις γκρι τιμές της επιλεγμένης φασματικής στήλης pixel. Η χωρική ανάλυση του ανιχνευτή καθορίζει τον αριθμό των φασμάτων που μπορούν να συλλεχθούν σε ένα κύκλο πειράματος. Με την περιγεγραμμένη διαμόρφωση, ένα εκατομμύριο φάσματα μπορούν να συλλεχθούν σε περίπου δύο λεπτά χρόνου ανίχνευσης. Το σύστημα ενσωματώνει επίσης μια γρήγορη διαδικασία αποταμίευσης σε μικρότερη ανάλυση (VGA). [9],[10]



Εικόνες κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας με την κάμερα MuSIS



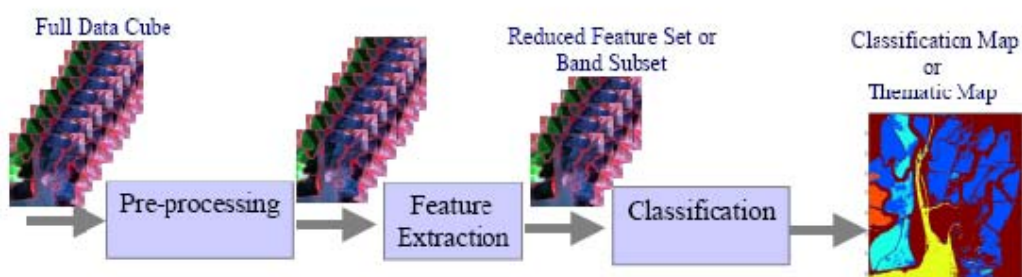
4.3 Επεξεργασία υπερφασματικών δεδομένων

4.3.1 Γενικά

Οι υπερφασματικές εικόνες μας παρέχουν ευρεία φασματική πληροφορία για την αναγνώριση και το διαχωρισμό υλικών, δίνοντας έτσι μία προοπτική για πιο ακριβή και λεπτομερή εξαγωγή πληροφορίας.

Γενικά υπάρχουν τέσσερα βασικά βήματα που ακολουθούμε, όταν θέλουμε να αποκτήσουμε πληροφορίες χρησιμοποιώντας ένα σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης :

1. η απόκτηση του φασματικού κύβου (acquiring the spectral cube)
2. η προεπεξεργασία των δεδομένων (pre-processing)
3. η εξαγωγή των χαρακτηριστικών (feature extraction)
4. η ταξινόμηση (classification).



Εικόνα 4.4 Απαιτούμενα βήματα από την απόκτηση του φασματικού κύβου έως την απεικόνιση ουσιάδους πληροφορίας

4.3.2 Προεπεξεργασία δεδομένων

Η διαδικασία της απόκτησης μίας εικόνας σε ένα περιβάλλον τηλεπισκόπησης περιλαμβάνει την συμμετοχή διαφόρων παραγόντων, που συνεπάγονται θόρυβο, μη ευθυγράμμιση του φασματικού κύβου κ.τ.λ. Έτσι, πριν χρησιμοποιήσουμε τον φασματικό κύβο στο περιβάλλον ανάλυσής μας, πρέπει να περιορίσουμε, να αφαιρέσουμε ή να εμπλουτίσουμε κάποιες όψεις των κύβων μας, ώστε να αφαιρέσουμε τις ατέλειες που επιβάλλονται κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Αυτό περιλαμβάνει προεπεξεργασία του φασματικού κύβου. Ορισμένες μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι η Ατμοσφαιρική Διόρθωση (Atmospheric Correction), η Ραδιομετρική βαθμονόμηση (Radiometric Calibration) και το Image Registration. Στην δική μας μελέτη γίνεται Image Registration από την πολυφασματική κάμερα MuSIS. Η ανάγκη αυτή δημιουργήθηκε από την σχετική κίνηση ανάμεσα στον

μηχανισμό μέτρησης και τον στόχο αλλά και τις οπτικές ιδιότητες των οπτικών εξαρτημάτων, που καταλήγουν σε λανθασμένη τοποθέτηση των εικόνων στην στοίβα του φασματικού κύβου. Ευθυγραμμίζοντας τις εικόνες του φασματικού κύβου ευθυγραμμίζουμε τα pixels, έτσι ώστε η επιλογή ενός pixel να καταλήγει στο ίδιο pixel για κάθε φέτα του φασματικού κύβου.

4.3.3 Ταξινόμηση υπερφασματικών δεδομένων

Η ταξινόμηση των υπερφασματικών δεδομένων είναι μία μέθοδος ταυτοποίησης και καταχώρησης κάθε pixel του φασματικού κύβου σε μία συγκεκριμένη τάξη, σύμφωνα με κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών των εντάσεων, που αναπαρίστανται από τα φάσματα του pixel αυτού. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια και αλγόριθμοι που υπολογίζουν για διάφορες στατιστικές ιδιότητες ή άλλα διαθέσιμα χαρακτηριστικά γνωρίσματα και είναι πολύ καλά όσον αφορά την ικανότητα ταξινόμησης. Η ικανότητα ταξινόμησης καθορίζεται στην πράξη και ίσως χρησιμοποιήσουμε ένα σύνολο δειγμάτων εκπαίδευσης (training data), ώστε να εξασφαλίσουμε μία βασική ιδέα. Η ταξινόμηση αποτελεί τμήμα ενός ευρύτερου επιστημονικού πεδίου, της αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition).

Μέσω της ταξινόμησης έχουμε σκοπό να δημιουργήσουμε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα που ταξινομεί τα δεδομένα μας, καταλήγοντας σε έναν ψευδοχρωματικό χάρτη (pseudo – colourmap) όπου κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει pixel με όμοια φασματικά χαρακτηριστικά. Ο βαθμός ομοιότητας προσδιορίζεται από τον αλγόριθμο ταξινόμησης και την συνάρτηση απόφασης που χρησιμοποιείται.

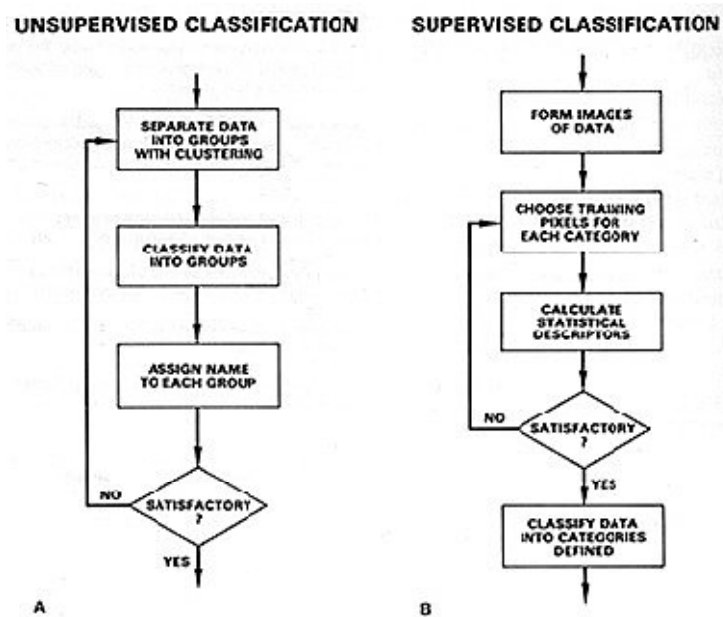
Ξεκινώντας από τον χώρο χαρακτηριστικών, δηλώνουμε κάθε αντικείμενο με ένα διάνυσμα $[x(1), x(2), \dots, x(N)]$, όπου το $x(i)$, ($i = 1$ έως N), δηλώνει ένα χαρακτηριστικό από το σύνολο των N .

Στην περίπτωση των φασματικών κύβων, ο χώρος χαρακτηριστικών είναι μία συλλογή δισδιάστατων διανυσμάτων. Κάθε pixel του φασματικού κύβου πρέπει να ταξινομηθεί. Έτσι, κάθε pixel – διάνυσμα $x(i,j)$ αναπαριστά τις διαφορετικές τιμές των εντάσεων, σε κάθε φασματική ζώνη, του κύβου στην θέση (i,j) . Το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η ταξινόμηση του pixel – διανύσματος $x(i,j)$ σε μία τάξη ω_j , όπου $j = 1$ έως K , με K τον συνολικό αριθμό των τάξεων. Κάθε pixel – διάνυσμα του χώρου χαρακτηριστικών συγκρίνεται με ένα διάνυσμα αναφοράς (ή με τα αντικείμενα $x(i)$).

$$\text{refvec} = [\text{ref}(1), \text{ref}(2), \dots, \text{ref}(K)],$$

όπου K είναι ο αριθμός των τάξεων, χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση απόφασης (decision function) $f(x)$, τέτοια ώστε $f(x) = \omega_j$, $j = 1$ έως K .

Ανάλογα με την διαδικασία ταξινόμησης, διακρίνουμε την *Supervised* και *Unsupervised* μέθοδο 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 εκπαιδύουμε το σύστημά μας. Απ' την άλλη, 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.



Εικόνα 4.5 Βήματα για μεθόδους Supervised και Unsupervised ταξινόμησης

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.

4.4 Αλγόριθμοι ταξινόμησης

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι που οδηγούν σε ταξινόμηση των pixel μιας φασματικής εικόνας. Τα pixel ταξινομούνται σύμφωνα με ποιο φάσμα αναφοράς μοιάζουν και μπορούν να ψευδοχρωματιστούν ώστε να υποδείξουν τα αποτελέσματα της ταξινόμησης. Η απόφαση ποιά φάσματα να χρησιμοποιηθούν για την διαδικασία της ταξινόμησης δεν είναι πάντα άμεση και ακριβής. Σε απλές περιπτώσεις τα φάσματα αναφοράς μπορούν να επιλεγούν από προφανείς δομές της εικόνας ή από φασματικές βιβλιοθήκες. Εναλλακτικά, πληροφοριακά φάσματα μπορούν να αποσπαστούν, χρησιμοποιώντας μεθόδους στατιστικής ανάλυσης, όπως Principal Component Analysis (PCA).

▪ *Maximum likelihood (ML)*

Η μέθοδος Maximum likelihood αποτελεί έναν γνωστό Supervised αλγόριθμο ταξινόμησης, που βασίζεται στην υπόθεση ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για κάθε τάξη είναι Gaussian. Εφόσον περικλείονται παραπάνω από ένα χαρακτηριστικά, χρησιμοποιείται η γενίκευση της κανονικής κατανομής για πολλές μεταβλητές. Το ισοδύναμο της διακύμανσης (variance) για τις πολλές μεταβλητές είναι ο πίνακας συμμεταβλητότητας (covariance), που απεικονίζει την διακύμανση των τιμών των pixels για κάθε χαρακτηριστικό, μέσα σε μία συγκεκριμένη τάξη, και τους συσχετισμούς μεταξύ των χαρακτηριστικών. Ο ταξινομητής Maximum likelihood δημιουργεί εκτιμήσεις για τον πίνακα συμμεταβλητότητας και για το μέσο της φασματικής απάντησης της κατηγορίας, κατά την διάρκεια της διαδικασίας εκπαίδευσης. Η ακόλουθη διαχωρίζουσα συνάρτηση, για κάθε pixel του υπερφασματικού κύβου, υλοποιείται από την ML ταξινόμηση :

$$g_i(\mathbf{x}) = -\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i)^T \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i) - \frac{1}{2} \ln |\boldsymbol{\Sigma}_i| + \ln P(\omega_i)$$

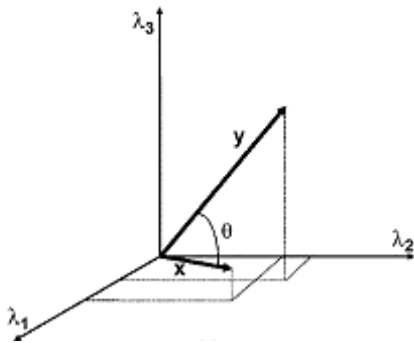
όπου i = η τάξη, \mathbf{x} = τα δεδομένα M διάστασης (όπου M είναι ο αριθμός των φασματικών ζωνών), $P(\omega_i)$ = η πιθανότητα η τάξη ω_i να βρίσκεται στον κύβο και θεωρείται η ίδια για όλες τις τάξεις, $|\boldsymbol{\Sigma}_i|$ = ορίζουσα του πίνακα συμμεταβλητότητας των δεδομένων στην τάξη ω_i , $\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}$ = ο αντίστροφος πίνακας, $\boldsymbol{\mu}_i$ = μέσο διάνυσμα. [11]

▪ *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. 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. [12]

Ο SAM δεν επηρεάζεται από τον φωτισμό, αφού χρησιμοποιεί μόνο την κατεύθυνση του διανύσματος και όχι το μήκος του.



Εικόνα 4.6 Αναπαράσταση διανυσμάτων δύο φασμάτων για 3 διαφορετικά λ

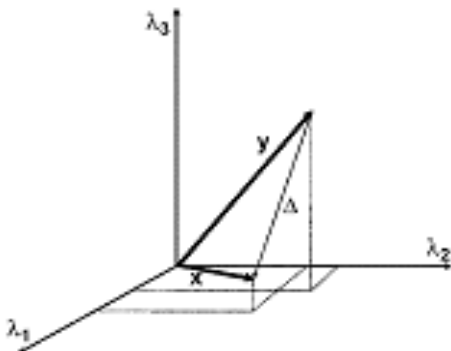
Έστω x, y δεδομένα M διάστασης, ο SAM υπολογίζει την γωνία μεταξύ των δύο φασμάτων ως εξής :

$$\langle x, y \rangle = \|x\| \|y\| \cos(\theta) \rightarrow$$

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

- **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.



Εικόνα 4.7 Αναπαράσταση διανυσμάτων δύο φασμάτων για 3 διαφορετικά λ

Έστω x, y δεδομένα M διάστασης, ο EUC 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 EUC σε σταθερό στην πολλαπλασιαστική κλίμακα :

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

- **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. [13]

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

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

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

- **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 :

$p_j = \frac{x_j}{\sum_{i=1}^M x_i}$, $q_j = \frac{y_j}{\sum_{i=1}^M y_i}$, όπου $\mathbf{p} = \{p_m\}_{m=1}^M$, $\mathbf{q} = \{q_m\}_{m=1}^M$ είναι τα επιθυμητά διανύσματα πιθανοτήτων που προκύπτουν από τα pixel – διανύσματα x, y αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας τα \mathbf{p}, \mathbf{q} , ο SID ορίζεται ως :

$$SID(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = D(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y}) + D(\mathbf{y} \parallel \mathbf{x}) , \quad \acute{o}\pi\omega\upsilon$$

$$D(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^M p_i \log \left(\frac{p_i}{q_i} \right) \quad \kappa\alpha\iota \quad D(\mathbf{y} \parallel \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^M q_i \log \left(\frac{q_i}{p_i} \right).$$

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 $D(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y})$ ονομάζεται σχετική εντροπία του \mathbf{y} σε σχέση με το \mathbf{x} , που είναι επίσης γνωστό ως συνάρτηση πληροφορίας Kullback – Leibler. [14]

- **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 :

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

όπου $\frac{\partial \ln[I(\mathbf{x}, \lambda)]}{\partial \lambda}, \frac{\partial \ln[I(\mathbf{y}, \lambda)]}{\partial \lambda}$ είναι τα μερικά παράγωγα των \mathbf{x}, \mathbf{y} M – διάστατων εντάσεων σε σχέση με το λ . [15]

- **ISODATA**

Ο ISODATA σημαίνει Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques. Είναι ένας παραμετρικός αλγόριθμος που επιτρέπει να ρυθμιστεί αυτόματα ο αριθμός των clusters κατά την διάρκεια των επαναλήψεων, συνενώνοντας όμοιες ομάδες και διαχωρίζοντας ομάδες με μεγάλες αποκλίσεις. Μετά από αρκετές δοκιμές καταλήξαμε στις παρακάτω τιμές για τις ζητούμενες παραμέτρους :

Number of classes : 4-9
 Maximum Iterations : 100
 Change threshold : 2
 Minimum number of pixel in class : 1
 Maximum class stdr : 1,3
 Minimum class distance : 4 [16]

[17]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

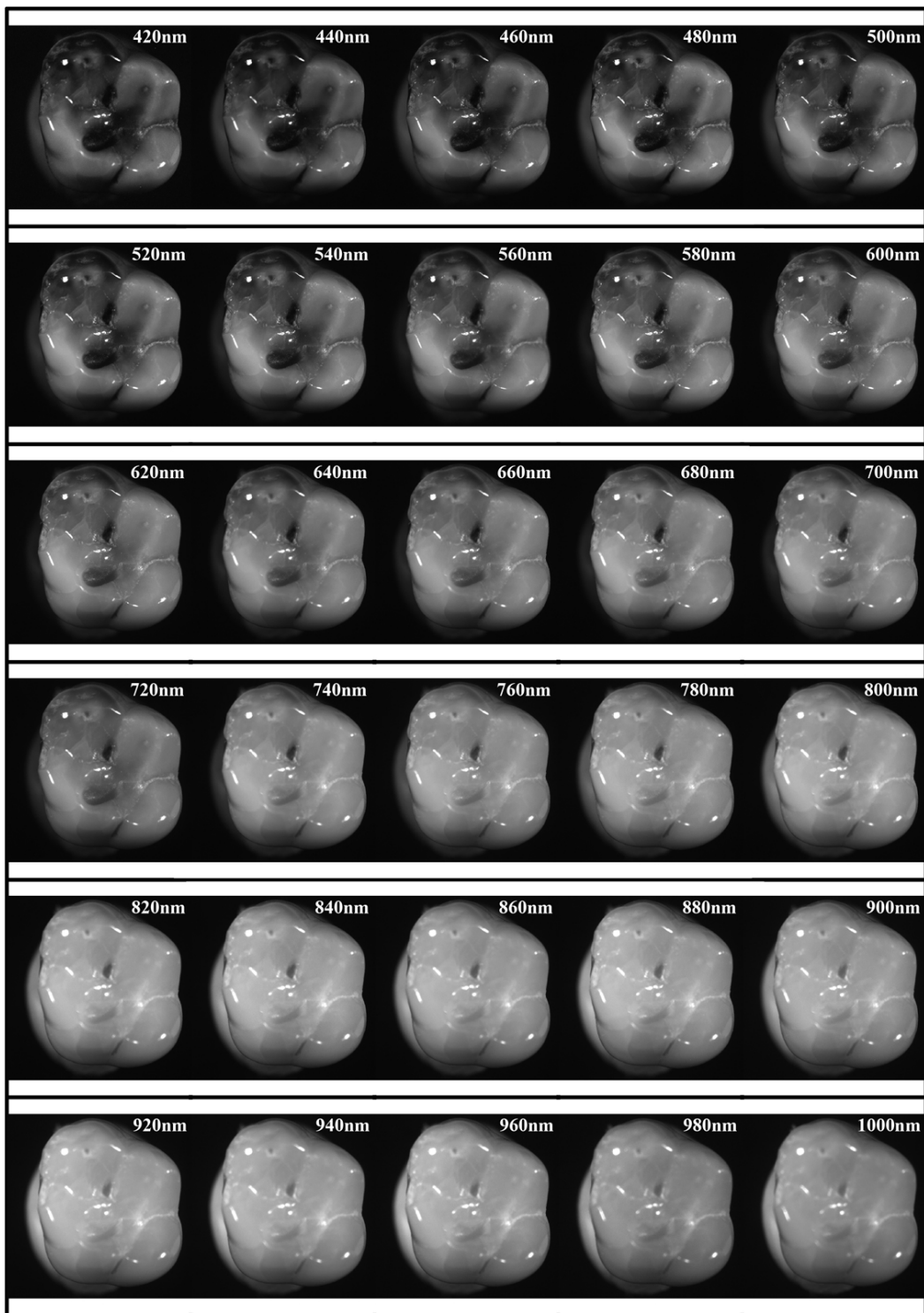
5.1 Στάδια εργασίας

○ 1^ο ΣΤΑΔΙΟ

Στο πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήσαμε το σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης (MuSIS) που υπάρχει στο εργαστήριο Ηλεκτρονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και το οποίο περιγράψαμε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ακόμα, απαραίτητα υλικά για την μελέτη που διεξάγαμε αποτελούν 7 δείγματα δοντιών, τα οποία χρησιμοποιήσαμε ύστερα από την εξαγωγή τους από την στοματική κοιλότητα, είτε για λόγους περιοδοντικούς, είτε λόγω φθοράς ή λόγω αντικατάστασης τους από τα μόνιμα δόντια (στην περίπτωση των νεογιλών δοντιών).

Πρώτος στόχος ήταν η λήψη των φασματικών κύβων των 7 διαφορετικών δοντιών από 420nm – 1000nm, προκειμένου να γίνει φασματική απεικόνιση των διαφόρων περιοχών των δοντιών, υγιών, τερηδονισμένων και ενδιάμεσων καταστάσεων εξέλιξης της τερηδόνας του δοντιού και κατόπιν να επιτευχθεί ανίχνευση και χαρτογράφηση της τερηδόνας μέσω των φασμάτων ανάκλασης των δοντιών. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι η κατάσταση της υγείας κάθε δοντιού χαρακτηρίστηκε από εμάς, με κριτήριο την οπτική παρατήρηση και την μελέτη των διαφόρων χαρακτηριστικών των δοντιών, που προέκυψαν ύστερα από την υπερφασματική απεικόνιση τους και την καταγραφή των φασμάτων. Ο υποκειμενικός παράγοντας ήταν αναπόφευκτος, αφού δεν υπάρχουν επαρκείς γνώσεις και ενδείξεις για την διαδικασία εξέλιξης της τερηδόνας και οι προσπάθειες ανίχνευσης της τερηδόνας στο πρώιμο στάδιο εμφάνισης της είναι ακόμα σε αρχική φάση.

Συγκεκριμένα, για το πρώτο δόντι, παρουσιάζεται παρακάτω ο φασματικός κύβος που προέκυψε κάνοντας χρήση της κάμερας MuSIS (εικόνα 5.1):



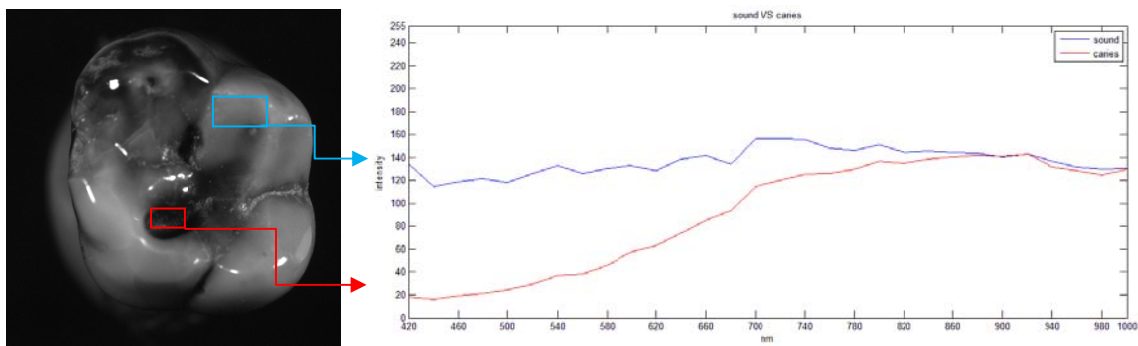
Εικόνα 5.1 Φασματικός κύβος για το δόντι 1, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS

Οι φασματικοί κύβοι που προέκυψαν από τα πειράματα και στα υπόλοιπα 6 δόντια που χρησιμοποιήσαμε παρουσιάζονται συγκεντρωμένοι στο Παράρτημα. (εικόνες Π1-Π6)

ο 2^ο ΣΤΑΔΙΟ

Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας όσον αφορά το στάδιο της υπερφασματικής απεικόνισης, έχουμε στην διάθεσή μας ένα σύνολο από 7 φασματικούς κύβους, κάθε ένας εκ των οποίων αντιστοιχεί σε ένα δόντι (από τα 7 διαφορετικά δείγματα που χρησιμοποιήσαμε). Σκοπός του δεύτερου σταδίου είναι η μελέτη των φασματικών ιδιοτήτων των δοντιών, προκειμένου να εντοπίσουμε ένα διαγνωστικό κριτήριο το οποίο θα μας βοηθήσει στην καλύτερη διάκριση μεταξύ των υγιών και των τερηδονισμένων περιοχών των δοντιών, καθώς και των ενδιάμεσων σταδίων εξέλιξης της τερηδόνας.

Έτσι, ξεκινήσαμε αποκτώντας τα φάσματα ανάκλασης από περίπου 15 σημεία (pixel) που με οπτική παρατήρηση φαίνονταν υγιή (λευκό και υγιές χρώμα) και από άλλα τόσα που με οπτική παρατήρηση φαίνονταν να πάσχουν από την νόσο τερηδόνα. Έπειτα, υπολογίσαμε τον μέσο όρο των φασμάτων αυτών, βρίσκοντας μία αντικειμενική προσέγγιση των φασμάτων ανάκλασης για υγιείς και τερηδονισμένες περιοχές. Την διαδικασία αυτή την ακολουθήσαμε για όλα τα δείγματα δοντιών, προκειμένου να πειστούμε για την αντικειμενικότητα και την ορθότητα του κριτηρίου υπολογισμού που χρησιμοποιήσαμε. Ωστόσο, παρουσιάζουμε παρακάτω την διαδικασία που ακολουθήσαμε για ένα μόνο δείγμα δοντιού, το οποίο εμφανίζει διάφορες χρωματικές περιοχές, ώστε να αποφύγουμε περιττές επαναλήψεις πληροφοριών.



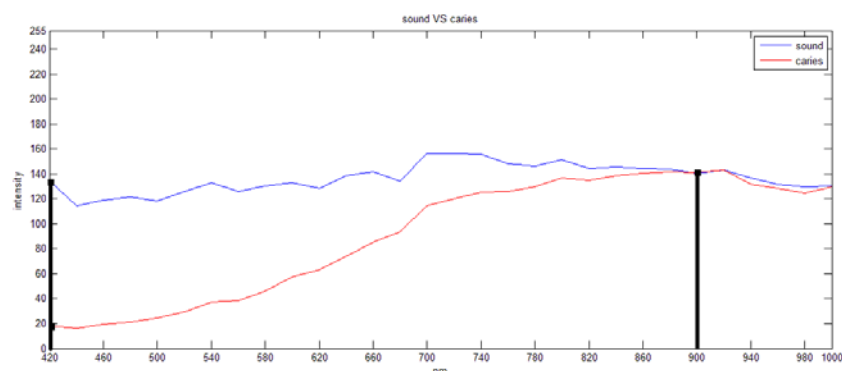
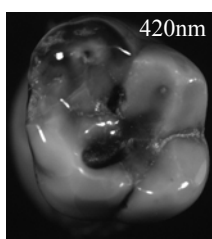
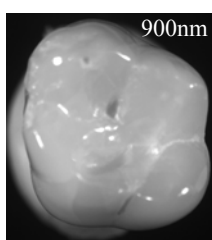
Μέσοι όροι φασμάτων ανάκλασης για υγιείς (sound) και τερηδονισμένες (caries) περιοχές ενός δοντιού

Όπως παρατηρούμε από τις δύο ακραίες αυτές καταστάσεις υγείας του δοντιού, δηλαδή υγιές δόντι και τελικό στάδιο τερηδόνας, χωρίς να περιλαμβάνουμε τις ενδιάμεσες καταστάσεις υγείας, υπάρχει σαφής διαφοροποίηση μεταξύ των φασμάτων αυτών, σύμφωνα πάντα με την θεώρηση που χρησιμοποιήσαμε για τα στάδια εξέλιξης της τερηδόνας κατά την διεξαγωγή του πειράματος.

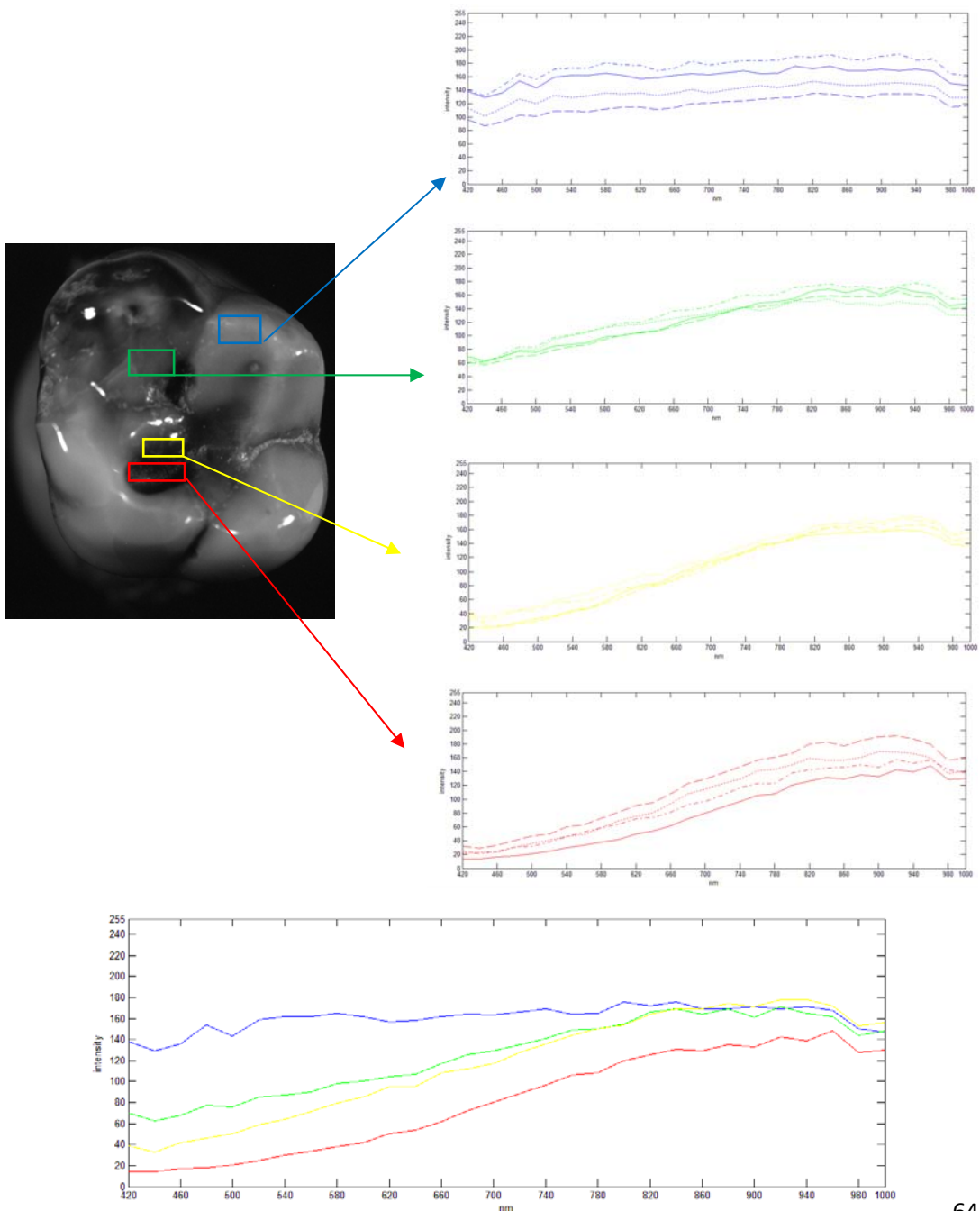
Καταρχήν, βρίσκοντας τις διαφορές στις τιμές των εντάσεων (intensity) μεταξύ υγιών και τερηδονισμένων περιοχών για κάθε μήκος κύματος (nm), διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη διαφορά εντάσεως παρατηρείται στα 420nm, ενώ η ελάχιστη στα 900nm, γεγονός που επιβεβαιώνεται και γραφικά από τα φάσματα παραπάνω. Όπως

παρατηρούμε, τα δύο φάσματα έχουν μεγάλες αποκλίσεις τιμών έντασης από τα 400nm έως περίπου τα 700nm. Από το σημείο αυτό και για μεγαλύτερα μήκη κύματος οι τιμές για τα δύο φάσματα αρχίζουν να πλησιάζουν μεταξύ τους, ώσπου τελικά για 900nm οι τιμές έντασης φωτός για το υγιές δόντι σχεδόν συμπίπτουν με αυτές του τερηδονισμένου. Συνεπώς, προκειμένου να βγάλουμε συμπεράσματα για την κατάσταση του δοντιού που μας ενδιαφέρει αλλά και για το στάδιο εξέλιξης της τερηδόνας είναι αποτελεσματικότερο να έχουμε ως περιοχή μελέτης περίπου τα 400nm - 700nm. 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.

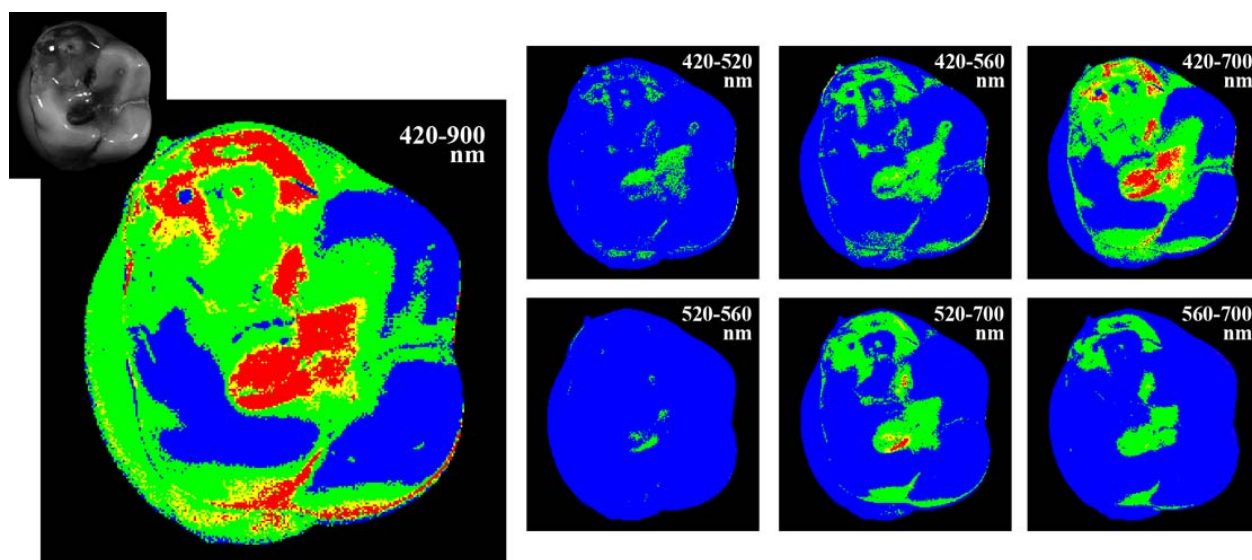
Έπειτα από τις προηγούμενες παρατηρήσεις, έγινε προσπάθεια χαρτογράφησης της τερηδόνας, δηλαδή δημιουργίας ενός ψευδοχρωματικού χάρτη (colourmap) του δοντιού μέσω του λογισμικού Matlab. Στην ψευδοχρωματική αυτή εικόνα, στην οποία ο χρωματισμός βασίστηκε στις κλίσεις των φασμάτων όλων των pixel, παρουσιάζεται ο βαθμός αλλοίωσης μίας περιοχής σύμφωνα με το χρώμα που περιέχει. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος που υλοποιήσαμε σε Matlab υπολογίζει τις κλίσεις του φάσματος για κάθε pixel των δεδομένων μας, ενώ ο χρωματισμός κάθε pixel γίνεται με βάση κάποιες τιμές κατωφλίων που ορίστηκαν. Όπως είναι εμφανές, στα 900nm βρίσκεται ένα σταθερό σημείο, όπου τέμνονται τα φάσματά μας, το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την εύρεση του διαγνωστικού κριτηρίου. Ακόμη, τα 420nm, όπου παρατηρείται η μέγιστη φασματική διαφορά περιέχει σαφώς χρήσιμη πληροφορία για τον υπολογισμό μας. Όταν το δόντι χαρακτηρίζεται υγιές η κλίση του φάσματος τήνει να γίνει μηδενική, δηλαδή ο λόγος της έντασης στα 900nm προς την ένταση στα 420nm τείνει στην μονάδα. Ο λόγος αυτός των εντάσεων είναι ανάλογος με το βαθμό αλλοίωσης του δοντιού, δηλαδή όσο μεγαλώνει τόσο αυξάνεται και ο βαθμός αλλοίωσης της περιοχής. Το γεγονός αυτό αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό διαφοροποίησης των φασμάτων, οπότε η περαιτέρω μελέτη μας επικεντρώθηκε στον παράγοντα αυτόν. Αρκεί, λοιπόν, να υπολογίσουμε το πηλίκο των τιμών των εντάσεων των pixel στα μήκη κύματος 900nm και 420nm, συνεπώς είναι αρκετό να διαιρέσουμε μεταξύ τους τις εικόνες που αντιστοιχούν στα 900nm και 420nm, ώστε να υπολογίσουμε το πηλίκο για όλα τα pixel του φασματικού κύβου. Το αποτέλεσμα του πηλίκου αυτού θα δώσει το μετέπειτα χρωματισμό.



Αναλυτικότερα, ο χρωματικός χάρτης (colourmap) που δημιουργήσαμε για κάθε δόντι παρουσιάζει το βαθμό αλλοίωσης κάθε περιοχής του δοντιού, αντιστοιχίζοντας κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της εικόνας μας με ένα χρώμα από το χρωματικό κώδικα RGB. Συγκεκριμένα, προσπαθήσαμε να διαχωρίσουμε τα διάφορα στάδια εξέλιξης της ασθένειας της τερηδόνας, αντιστοιχίζοντας τις υγιείς περιοχές του δοντιού με μπλέ χρώμα, τις περιοχές που νοσούν από τερηδόνα με κόκκινο χρώμα, καθώς και τα ενδιάμεσα στάδια εξέλιξης της ασθένειας με πράσινο (για τις περιοχές που αρχίζουν να εμφανίζουν κάποια συμπτώματα τερηδόνας, αλλά με κατάλληλη θεραπεία μπορούν να θεραπευτούν) και κίτρινο χρώμα (για τις περιοχές με εμφανή σημάδια τερηδόνας, ένα βήμα πριν το τελικό στάδιο εμφάνισης της ασθένειας). Χρωματικά, τα στάδια εξέλιξης της τερηδόνας, ξεκινώντας από το υγιές δόντι, απεικονίζονται ως εξής: μπλέ → πράσινο → κίτρινο → κόκκινο.

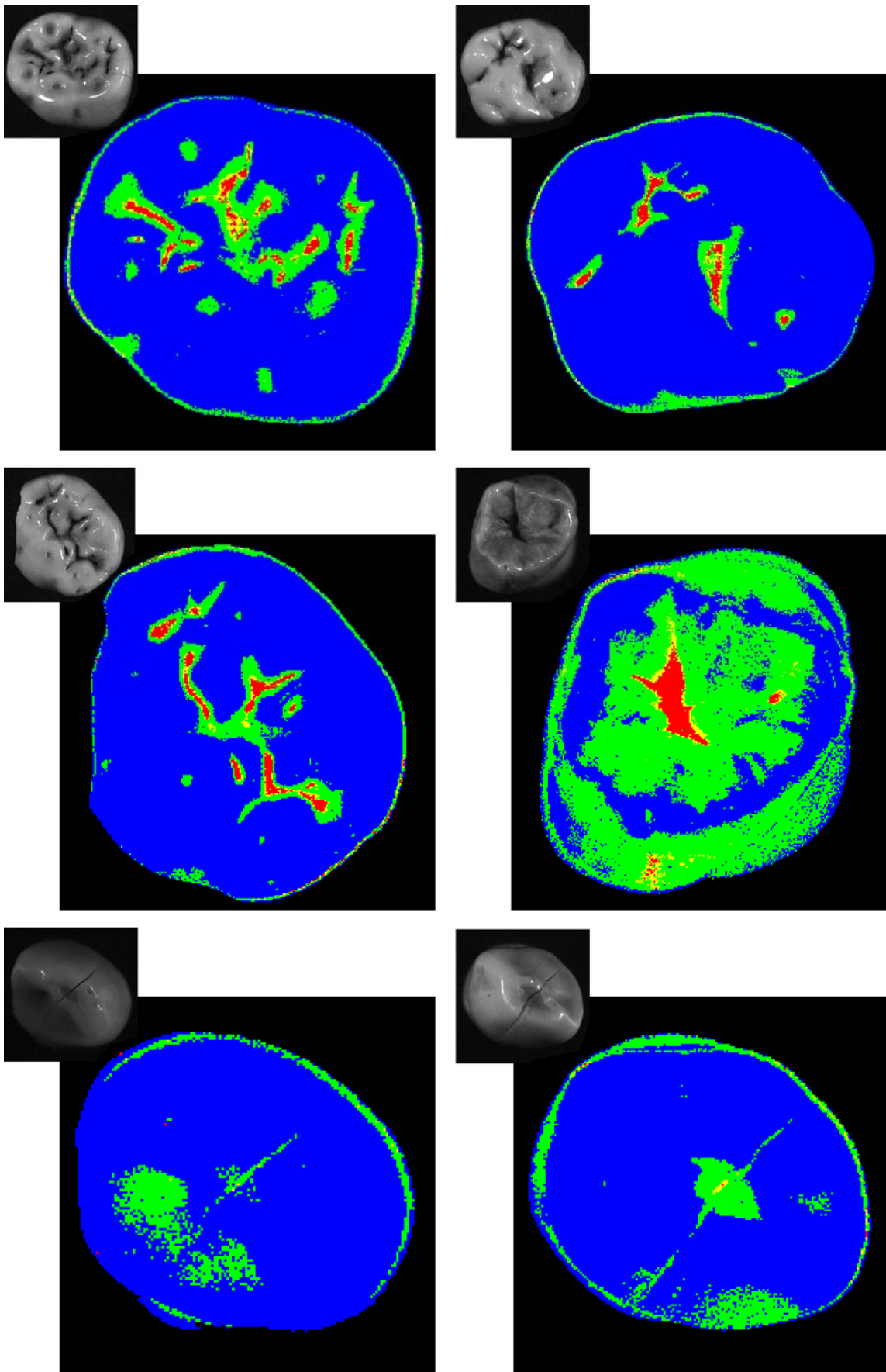


Συγκεκριμένα, ακολουθεί ο χρωματικός χάρτης που προέκυψε για το παραπάνω δόντι, κάνοντας χρήση του πηλίκου των εντάσεων για 900nm / 420nm και ο οποίος προσδιορίζει σε αρκετά μεγάλο βαθμό την κατάσταση υγείας του δοντιού και το στάδιο εξέλιξης της τερηδόνας. Επιπλέον, δίνονται ενδεικτικά και οι χρωματικοί χάρτες που προκύπτουν για το ίδιο δόντι, κάνοντας όμως χρήση διαφορετικών πηλίκων εντάσεων (520nm / 420nm, 560nm / 420nm, 700nm / 420nm, 560nm / 520nm, 700nm / 520nm, 700nm / 560nm) αλλά με τις ίδιες τιμές κατωφλίων. Όπως παρατηρήθηκε, ορθώς χρησιμοποιήθηκε ως διαγνωστικό κριτήριο το πηλίκιο 900nm / 420nm, καθώς υπερτερεί συγκριτικά με όλα τα υπόλοιπα και διαχωρίζει σε πολύ καλύτερο βαθμό τις διάφορες περιοχές του δοντιού. (εικόνα 5.2)



Εικόνα 5.2 Χρωματικοί χάρτες που παρουσιάζουν διάφορα στάδια εξέλιξης της τερηδόνας, για το δόντι 1

Ακόμα, δίνονται οι χρωματικοί χάρτες που δημιουργήσαμε και για τα υπόλοιπα 6 δείγματα δοντιών, κάνοντας χρήση του πηλίκου των εντάσεων για 900nm / 420nm, ορίζοντας τις ίδιες καταστάσεις εξέλιξης της ασθένειας και χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές κατωφλίων. (εικόνα 5.3)



Εικόνα 5.3 Χρωματικοί χάρτες για τα υπόλοιπα 6 δείγματα δοντιών

ο 3^ο ΣΤΑΔΙΟ

Συνεχίζοντας την έρευνά μας, εφαρμόσαμε σε κάθε δόντι τους εξής αλγορίθμους : Maximum Likelihood (ML), Normalized Euclidean Distance (NEUC), Spectral Correlation Mapper (SCM), Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Information Divergence (SID), Spectral Gradient Angle (SGA), Iterative Self-Organizing Data Analysis (ISODATA), Principal Component Analysis (PCA). Από τους αλγόριθμους αυτούς προέκυψαν χρωματικοί χάρτες που θα μας βοηθήσουν στην προσπάθειά μας για μη επεμβατική ανίχνευση και διάγνωση της ασθένειας της τερηδόνας στα πρώιμα στάδια εμφάνισης της. Συγκεκριμένα, για την εφαρμογή τους ορίσαμε 4 κλάσεις, αυτήν των υγιών περιοχών του δοντιού (μπλέ), των τερηδονισμένων σε τελικό στάδιο (κόκκινο), των τερηδονισμένων σε πολύ πρώιμο στάδιο όπου με εφαρμογή κατάλληλης θεραπείας, π.χ. φθορίωση, εξαλείφεται κάθε ίχνος τερηδόνας (πράσινο) και την κλάση των περιοχών με τερηδόνα σε αρκετά προχωρημένο στάδιο, λίγο πριν την ολική διάρθρωση (κίτρινο). Επίσης, όσον αφορά τα φάσματα αναφοράς που χρησιμοποιήσαμε για την εφαρμογή των αλγορίθμων, προέκυψαν και από τα 7 δείγματα δοντιών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήσαμε συνολικά 225 δείγματα αναφοράς από όλα τα δόντια (για ‘κόκκινες’, ‘κίτρινες’, ‘πράσινες’, ‘μπλέ’ περιοχές και υπόβαθρο εικόνας), παίρνοντας από κάθε δόντι 9 φάσματα αναφοράς από κάθε διαφορετική περιοχή που περιείχε, προκειμένου να κάνουμε την μελέτη μας όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη και να βγάλουμε αντικειμενικά συμπεράσματα από την παρατήρηση των χρωματικών χαρτών που προέκυψαν από την εφαρμογή κάθε αλγορίθμου. Επιπλέον, έχουμε υλοποιήσει και ορισμένους αλγορίθμους παίρνοντας δείγματα αναφοράς μόνο από ένα συγκεκριμένο δόντι κάθε φορά, δηλαδή από αυτό το οποίο εξετάζουμε και λαμβάνουμε το χρωματικό του χάρτη (SAM_1 , SID_1 , ML_1), ώστε να γίνει άμεση σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν παίρνοντας δείγματα και από τα 7 δόντια (SAM_7 , SID_7 , ML_7). (εικόνα 5.4)

	ΔΟΝΤΙ 1	ΔΟΝΤΙ 2	ΔΟΝΤΙ 3	ΔΟΝΤΙ 4	ΔΟΝΤΙ 5	ΔΟΝΤΙ 6	ΔΟΝΤΙ 7
Εικόνα από MuSIS (420nm)							
ISODATA							
NEUC							
SAM7							
SAM1							
SID7							
SID1							
SGA							
SCM							
ML1							
ML7							
PCA							

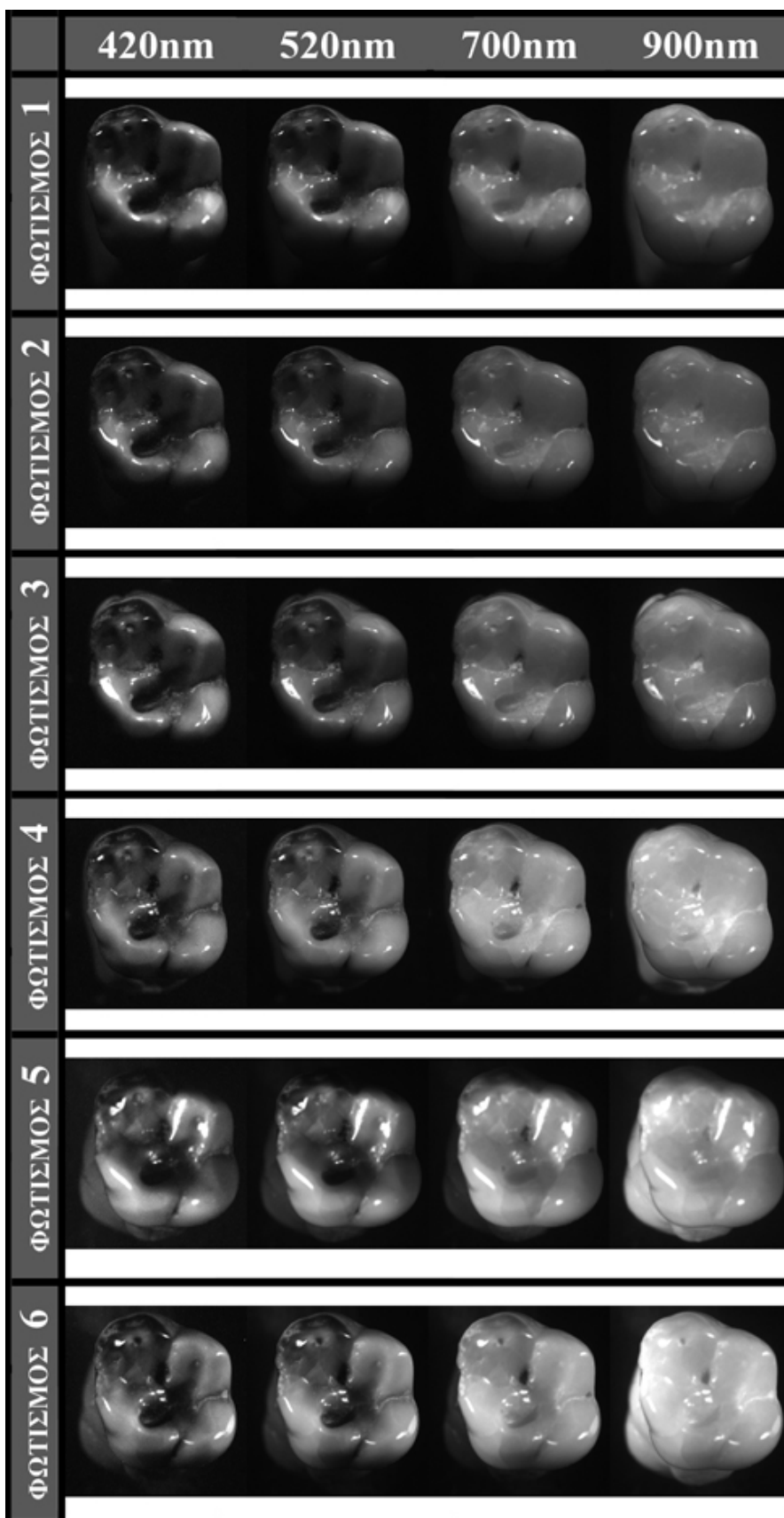
Εικόνα 5.4 Εικόνες από την εφαρμογή αλγορίθμων στα 7 δείγματα δοντιών

Από την σύγκριση όλων των χρωματικών χαρτών που προκύπτουν από την εφαρμογή των αλγορίθμων, παρατηρούμε ότι οι περιοχές που μας ενδιαφέρουν (υγιείς, ενδιάμεσες, τερηδονισμένες) διαφοροποιούνται σε κάθε περίπτωση με τον ίδιο περίπου τρόπο, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι τα κριτήρια επιλογής μας για τον διαχωρισμό των διαφόρων βαθμών αλλοίωσης μίας περιοχής είναι σωστά. Επιπλέον, αυτό επιβεβαιώνεται και από την εικόνα που προκύπτει από τον PCA και παρουσιάζει την κατανομή της τερηδόνας με αρκετά όμοιο τρόπο με αυτόν που έχει προκύψει από τις δικές μας υλοποιήσεις. Ακόμα, αρχίζουμε να διακρίνουμε ότι οι χρωματικοί χάρτες που δίνουν οι αλγόριθμοι SAM και NEUC παρουσιάζουν αντικειμενικά τις πιο ευδιάκριτες περιοχές για την κατάσταση υγείας του δοντιού. Τέλος, το γεγονός ότι οι αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν για κάθε δόντι παίρνοντας φάσματα αναφοράς είτε από το ίδιο το δόντι είτε από όλα τα δείγματα δοντιών έχουν μεγάλο βαθμό ομοιότητας μεταξύ τους, αποτελεί απόδειξη εγκυρότητας της διάκρισης που κάναμε για τα διάφορα στάδια εξέλιξης της τερηδόνας σε πολλά δόντια.

○ 4^ο ΣΤΑΔΙΟ

Στο σημείο αυτό κάνουμε πάλι πειράματα με την γνωστή πλέον μέθοδο της υπερφασματικής απεικόνισης, αλλά αυτή τη φορά αλλάζοντας τις συνθήκες φωτισμού. Έτσι, χρησιμοποιήσαμε ένα δόντι παίρνοντας μετρήσεις με 6 ακόμα διαφορετικούς φωτισμούς, επιπλέον απ' αυτόν που χρησιμοποιήσαμε στις προηγούμενες μετρήσεις μας. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να διαπιστώσουμε εάν και πόσο επηρεάζονται οι χρωματικοί χάρτες των δοντιών και κατ' επέκταση η εφαρμογή των αλγορίθμων, από το φωτισμό που υπάρχει στο περιβάλλον των μετρήσεων. Το συμπέρασμα που θα προκύψει θα αποβεί πολύ σημαντικό στην περαιτέρω έρευνά μας καθώς και σε πιθανές θεωρήσεις και μελέτες που θα είναι απαραίτητο να υλοποιηθούν σε μία πιθανή πρακτική εφαρμογή όσων ερευνούμε.

Ακολουθούν τέσσερις μόνο ενδεικτικές εικόνες από κάθε φασματικό κύβο που προέκυψε από τα πειράματα μας, για κάθε μία διαφορετική απόσταση φωτισμού, για το ίδιο δόντι, στα 420nm, 520nm, 700nm και 900nm. (εικόνα 5.5)



Εικόνα 5.5 Εικόνες στα 420nm, 520nm, 700nm και 900nm από τους φασματικούς κίβους που προέκυψαν για 6 διαφορετικές συνθήκες φωτισμού

ο 5^ο ΣΤΑΔΙΟ

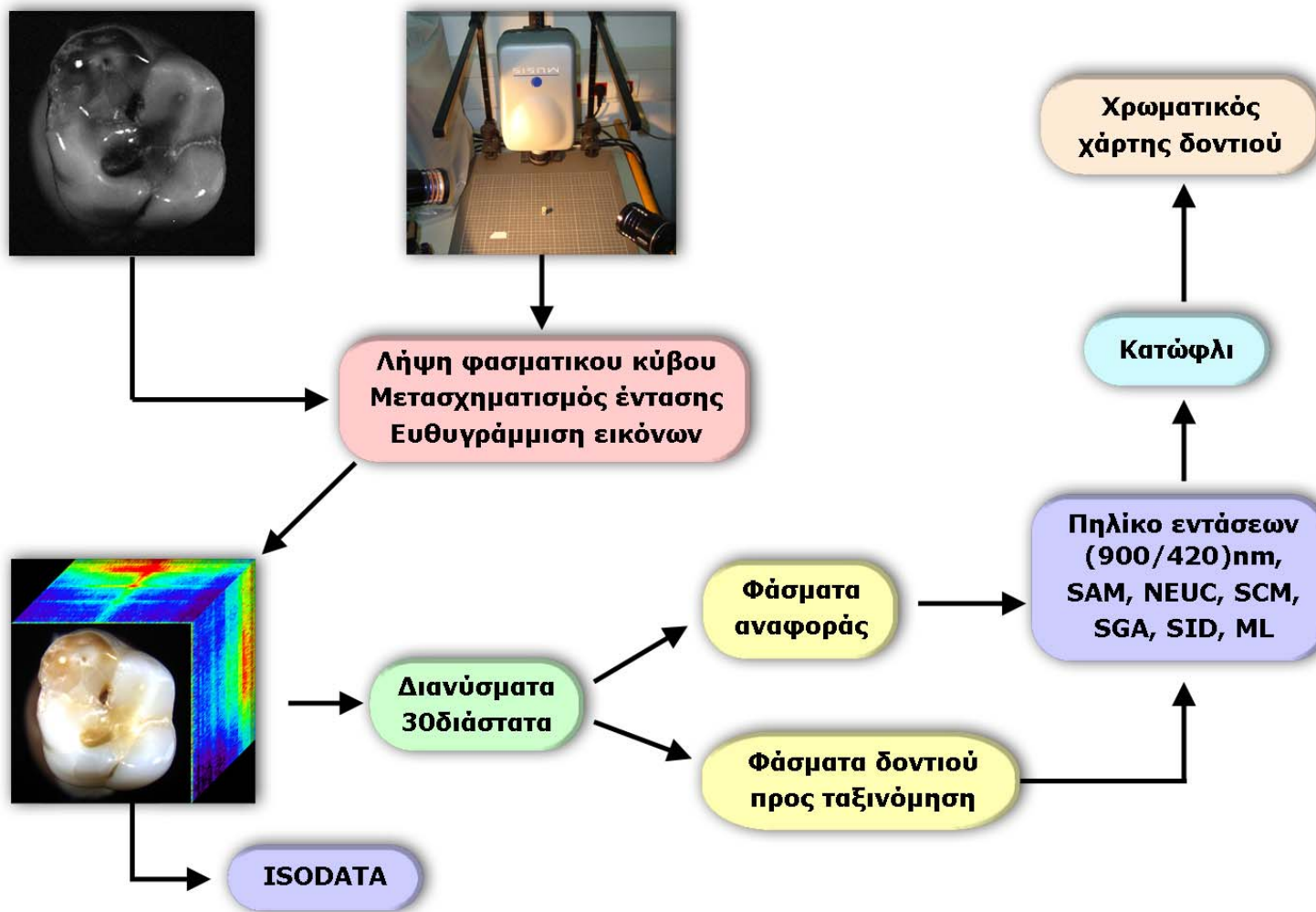
Εδώ χρησιμοποιούμε τους 6 φασματικούς κύβους που λάβαμε από το παραπάνω στάδιο και εφαρμόζουμε σε αυτούς όλους τους αλγόριθμους που είχαμε αναφέρει και παραπάνω : Maximum Likelihood (ML), Normalized Euclidean Distance (NEUC), Spectral Correlation Mapper (SCM), Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Information Divergence (SID), Spectral Gradient Angle (SGA), Principal Component Analysis (PCA). Σκοπός μας είναι να δούμε εάν, πόσο αλλά και ποιό αλγόριθμοι επηρεάζονται από τις αλλαγές στις συνθήκες φωτισμού. Ακόμα, υλοποιήσαμε για τις διαφορετικές αυτές συνθήκες φωτισμού έναν χρωματικό χάρτη (colourmap), κάνοντας χρήση του πηλίκου των εντάσεων για 900nm / 420nm, ορίζοντας τις καταστάσεις εξέλιξης της τερηδόνας που ήδη αναφέραμε και χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές κατωφλίων. (εικόνα 5.6)

Όπως παρατηρούμε τα αποτελέσματα των αλγορίθμων SAM και NEUC είναι ικανοποιητικά, αφού οι χρωματικοί χάρτες που προκύπτουν σε όλες τις διαφορετικές συνθήκες φωτισμού έχουν μεγάλο βαθμό ομοιότητας μεταξύ τους και διακρίνουν με σχετικά μεγάλη ακρίβεια τις διαφορετικές καταστάσεις υγείας του δοντιού. Αντίθετα, η εφαρμογή των SID, SCM και SGA δεν δίνει καλά αποτελέσματα για τις διαφορετικές συνθήκες φωτός, αλλοιώνοντας τα αποτελέσματα που φανερώνουν την κατάσταση υγείας του δοντιού. Επιπλέον, ο ML δεν παρουσιάζει τα επιθυμητά αποτελέσματα, γεγονός αναμενόμενο, καθώς υλοποιείται παίρνοντας ως φάσματα αναφοράς διάφορες περιοχές και από τα 7 διαφορετικά δόντια. Ομοίως, ούτε ο χρωματικός χάρτης που δημιουργήθηκε μόνο με τις εικόνες στα 420nm και στα 900nm διακρίνει στο βαθμό που επιθυμούμε τα στάδια της τερηδόνας, αφού τα όρια των περιοχών επηρεάζονται από την αλλαγή του φωτισμού.

	ΦΩΤΙΣΜΟΣ 1	ΦΩΤΙΣΜΟΣ 2	ΦΩΤΙΣΜΟΣ 3	ΦΩΤΙΣΜΟΣ 4	ΦΩΤΙΣΜΟΣ 5	ΦΩΤΙΣΜΟΣ 6
Εικόνα από MuSIS (420nm)						
colourmap						
NEUC						
SAM ₇						
SAM ₁						
SID ₇						
SID ₁						
SGA						
SCM						
ML ₇						
PCA						

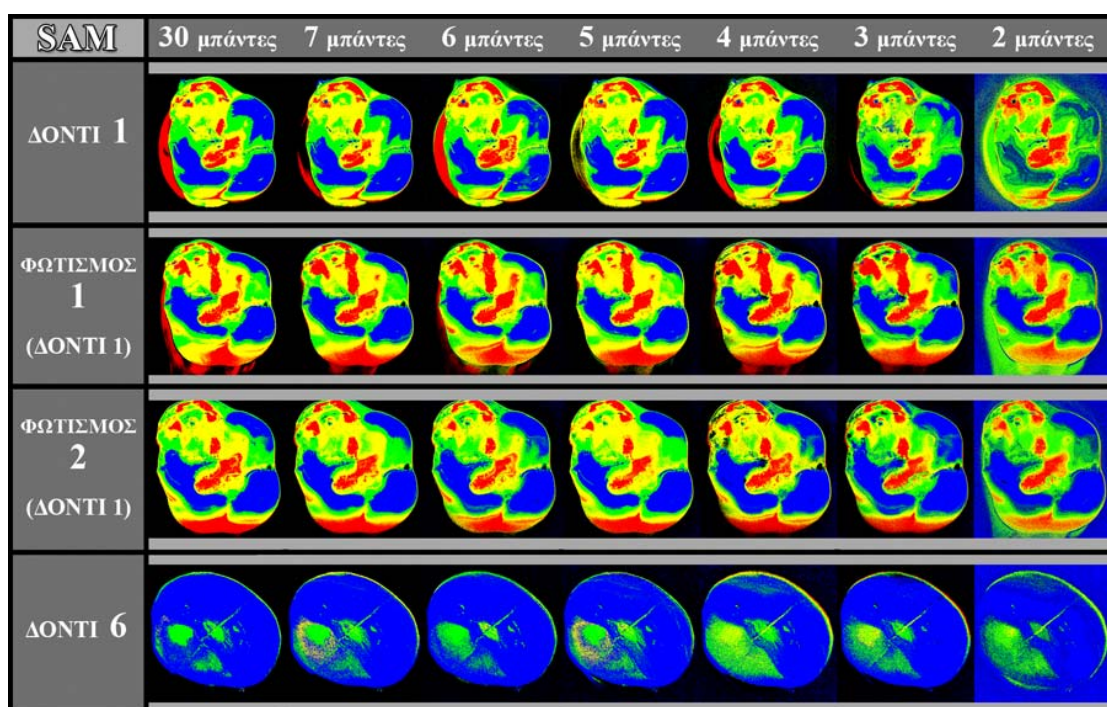
Εικόνα 5.6 Εικόνες από την εφαρμογή αλγορίθμων στις 6 διαφορετικές συνθήκες φωτισμού του δοντιού 1

Συνοψίζοντας, όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας που έχουμε περιγράψει έως εδώ παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:

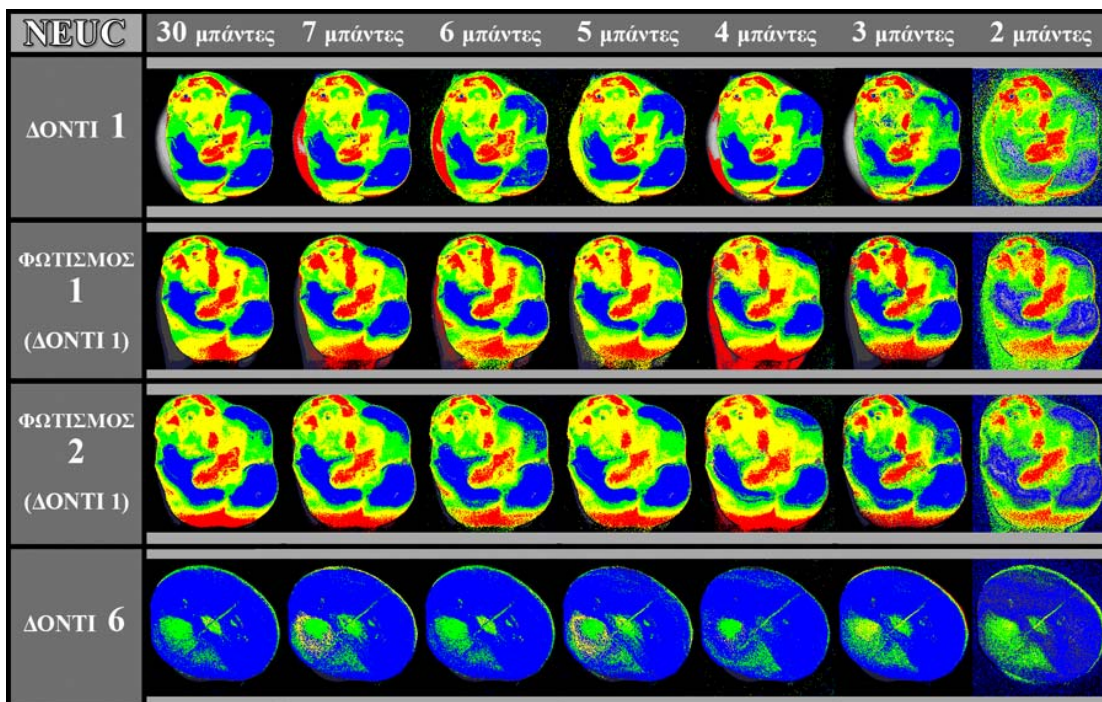


Συνεχίζοντας, εφαρμόζουμε τους γνωστούς αλγόριθμους Normalized Euclidean Distance (NEUC), Spectral Correlation Mapper (SCM), Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Information Divergence (SID) και Spectral Gradient Angle (SGA), μειώνοντας όμως σταδιακά τις μπάντες που χρησιμοποιούμε (30, 7, 6, 5, 4, 3, 2 bands). Αναλυτικά, οι καλύτεροι συνδυασμοί μπαντών στους οποίους καταλήξαμε ύστερα από πολλαπλές δοκιμές είναι οι παρακάτω : 30 μπάντες → 420nm έως 1000nm (ανά 20nm), 7 μπάντες → 420nm – 500nm – 600nm – 700nm – 800nm – 900nm – 1000nm, 6 μπάντες → 420nm – 520nm – 620nm – 720nm – 820nm – 920nm, 5 μπάντες → 420nm – 500nm – 800nm – 900nm – 1000nm, 4 μπάντες → 500nm – 700nm – 900nm – 1000nm, 3 μπάντες → 420nm – 700nm – 1000nm, 2 μπάντες → 420nm – 900nm. Η εφαρμογή των αλγορίθμων με λιγότερες μπάντες γίνεται ενδεικτικά σε δύο από τα επτά δείγματα δοντιών, αφού θα ήταν πολύ χρονοβόρο να επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία και για τα επτά δόντια, αλλά και στις έξι διαφορετικές αποστάσεις φωτισμού για το πρώτο δείγμα δοντιού, προκειμένου να διαπιστώσουμε το κατά πόσο επηρεάζονται οι χρωματικοί μας χάρτες συνολικά από τις διαφορετικές συνθήκες φωτισμού αλλά και από τη μείωση των μπαντών που χρησιμοποιούμε.

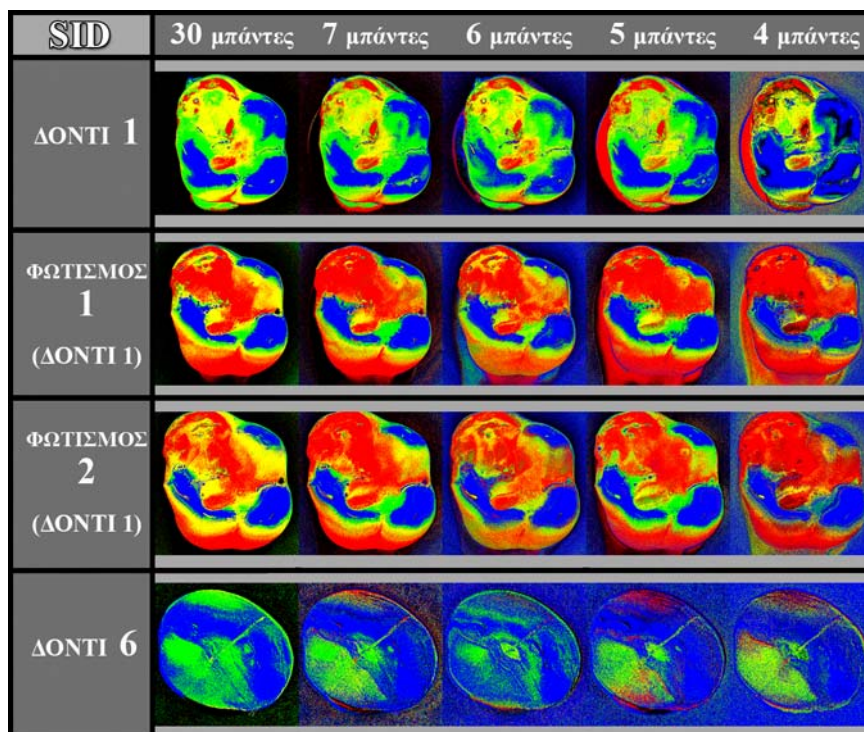
Παρακάτω παρουσιάζονται ένας ένας οι αλγόριθμοι χρησιμοποιώντας διάφορες μπάντες (30, 7, 6, 5, 4, 3, 2), για δύο δείγματα δοντιών και για δύο διαφορετικές αποστάσεις φωτισμού (για το ένα δόντι). (εικόνες 5.7 – 5.11) Οι υπόλοιπες εικόνες που προέκυψαν, για τις άλλες τέσσερις αποστάσεις φωτισμού, παρουσιάζονται στο Παράρτημα. (εικόνες Π7-Π11)



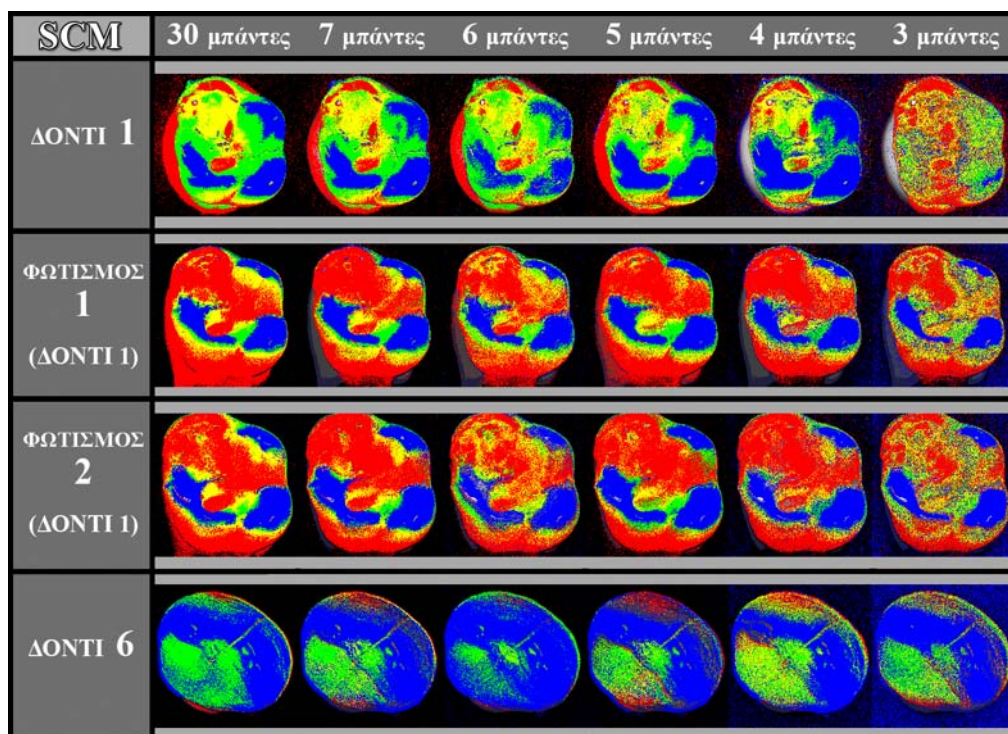
Εικόνα 5.7 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε



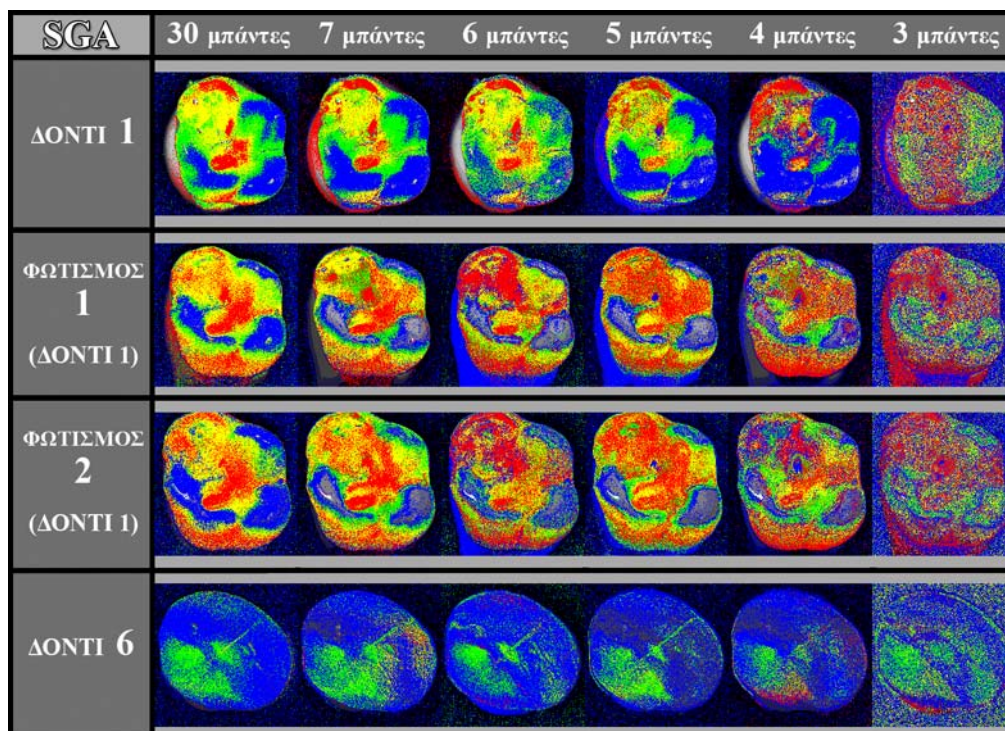
Εικόνα 5.8 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε



Εικόνα 5.9 Εικόνες που προέκυψαν από τον SID, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε



Εικόνα 5.10 Εικόνες που προέκυψαν από τον SCM, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε



Εικόνα 5.11 Εικόνες που προέκυψαν από τον SGA, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε

Όπως διαπιστώνουμε οι αλγόριθμοι NEUC και SAM αποδίδουν τα καλύτερα αποτελέσματα, αφού οι χρωματικοί χάρτες που προκύπτουν από αυτούς κάνουν εμφανή τον διαχωρισμό των διαφορετικών περιοχών του δοντιού. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι SCM, SGA και SID δεν δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα γενικώς, ανεξάρτητα με τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε. Οι περιοχές δεν απεικονίζονται κατανοητά και τα όρια δεν είναι καθόλου σαφή. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι οι πλέον χρήσιμοι αλγόριθμοι στην περίπτωση μας είναι μόνο οι NEUC και SAM, οπότε επικεντρωνόμαστε σε αυτούς στην συνέχεια της μελέτης μας.

Επίσης, παρατηρώντας τις εικόνες που προέκυψαν για διαφορετικό αριθμό μπαντών διαπιστώνουμε ότι ο ελάχιστος αριθμός μπαντών που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ώστε να απεικονίζονται οι περιοχές του δοντιού με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και ομοιότητα με την αντίστοιχη εικόνα που έχει προκύψει κάνοντας χρήση και των 30 μπαντών είναι 3.

ο 6^ο ΣΤΑΔΙΟ

Όπως διαπιστώσαμε από τις διαδικασίες που ακολουθήσαμε στο παραπάνω στάδιο, οι αλγόριθμοι SAM και NEUC δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα, σύμφωνα με οπτική παρατήρηση, δηλαδή οι χρωματικοί χάρτες τους δίνουν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τον διαχωρισμό των διαφόρων περιοχών του δοντιού και προσδιορίζουν την κατάσταση υγείας του και το στάδιο εξέλιξης της τερηδόνας. Επιπλέον, παρατηρήσαμε ότι ο μικρότερος αριθμός μπαντών που δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκριτικά με τους χρωματικούς χάρτες που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τον μέγιστο αριθμό μπαντών, δηλαδή 30, είναι 3.

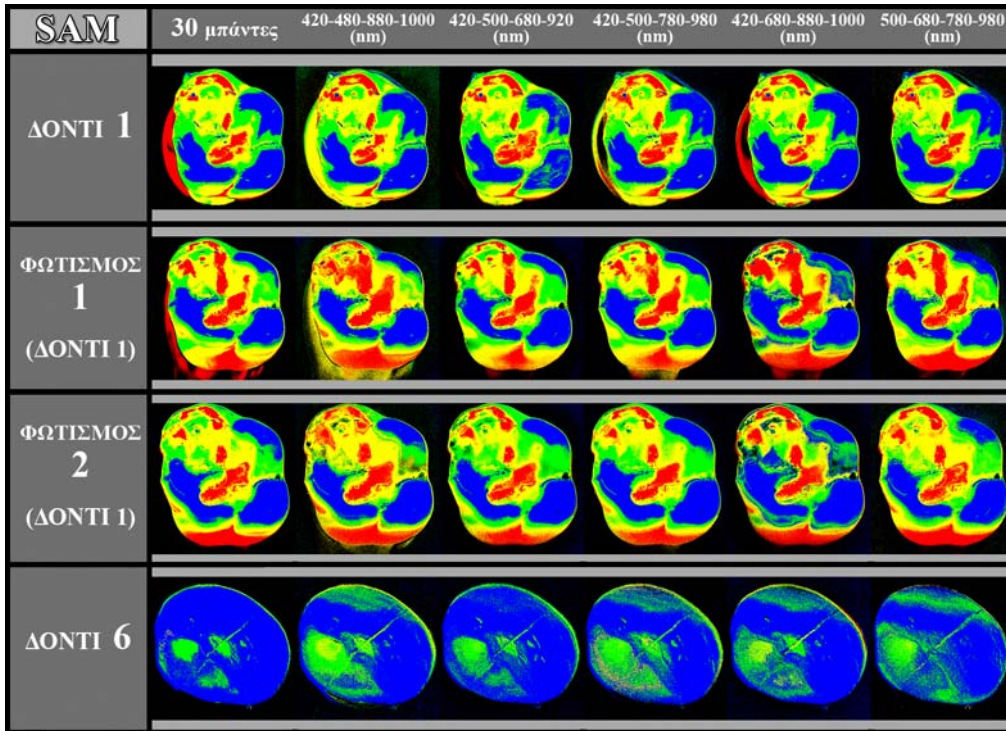
Συνεπώς, στο στάδιο αυτό θα ασχολήθουμε μόνο με τους αλγόριθμους SAM και NEUC, εφαρμόζοντάς τους με 4 και 3 μπάντες. Συγκεκριμένα, θα δείξουμε ορισμένους από τους πολλούς χρωματικούς χάρτες που προέκυψαν από συνδυασμούς τεσσάρων και τριών μπαντών που κάναμε και θα τους συγκρίνουμε μεταξύ τους αλλά και με τους χρωματικούς χάρτες των 30 μπαντών, δείχνοντας και ποσοστά ακρίβειας που φανερώνουν κατά πόσο συμπίπτουν οι χρωματικοί χάρτες των 3 και 4 μπαντών με αυτούς των 30 μπαντών.

Αρχικά, παρουσιάζουμε τους χρωματικούς χάρτες που προέκυψαν από εφαρμογή των αλγορίθμων SAM και NEUC σε δύο δόντια και έξι επιπλέον διαφορετικές αποστάσεις φωτισμού για το ένα δόντι, ώστε να μελετήσουμε την επιρροή του φωτισμού και των μειωμένων μπαντών στην εφαρμογή των αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, αναφέρουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας πέντε συνδυασμούς 4 μπαντών, οι οποίοι είναι οι εξής :

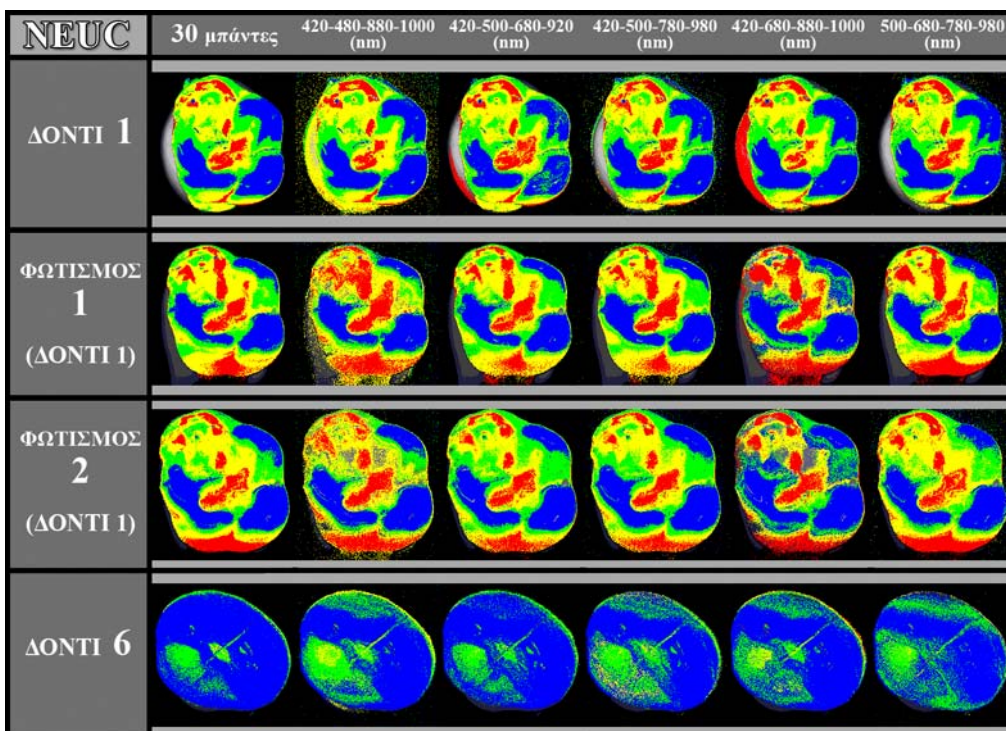
- 1.^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 480nm – 880nm – 1000nm
- 2.^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 500nm – 680nm – 920nm
- 3.^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 500nm – 780nm – 980nm
- 4.^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 680nm – 880nm – 1000nm
- 5.^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 680nm – 780nm – 980nm
(εικόνα 5.12 και 5.13)

Επίσης, ακολουθούν πίνακες με τα ποσοστά ακρίβειας (%) των αλγορίθμων SAM και NEUC, δηλαδή τα ποσοστά αυτά αναδεικνύουν το βαθμό (%) που μοιάζουν μεταξύ τους οι χρωματικοί χάρτες που δημιουργήθηκαν κάνοντας χρήση 4 μπαντών, με αυτούς που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας όλες τις μπάντες, δηλαδή και τις 30. Σημειώνονται τα μεγαλύτερα ποσοστά, όπου προφανώς οι συνδυασμοί των 4 μπαντών από τους οποίους προκύπτουν είναι οι πιο χρήσιμοι. (πίνακας 5.1 και 5.2)

Οι χρωματικοί χάρτες που προέκυψαν για τους υπόλοιπους φωτισμούς, με 4 μπάντες, παρουσιάζονται στο Παράρτημα, για εξοικονόμηση χώρου. (εικόνα Π12 και Π13)



Εικόνα 5.12 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 4 μπαντών



Εικόνα 5.13 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 4 μπαντών

ΑΚΡΙΒΕΙΑ (%) ΤΟΥ SAM ΓΙΑ 4 ΜΠΑΝΤΕΣ

4 μπάντες (nm)	ΔΟΝΤΙ 1	ΦΩΣ 1 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 2 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 3 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 4 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 5 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 6 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΔΟΝΤΙ 6
420-480-880-1000	83.8904	75.1510	80.7983	76.8395	72.7464	69.9848	71.9977	79.8774
420-500-680-920	84.6457	85.3725	86.9720	83.2481	78.6304	82.7848	83.4992	88.1605
420-500-780-980	85.6756	84.2351	88.1622	85.2627	75.7320	79.7288	78.7335	83.5443
420-680-880-1000	88.1692	77.1249	78.4751	74.0550	79.3317	72.5943	70.9439	80.1389
500-680-780-980	85.6542	80.8732	83.4611	82.0073	72.6789	72.4588	76.5301	79.9340

Πίνακας 5.1 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του SAM για 4 μπάντες, συγκριτικά με SAM για 30 μπάντες

ΑΚΡΙΒΕΙΑ (%) ΤΟΥ NEUC ΓΙΑ 4 ΜΠΑΝΤΕΣ

4 μπάντες (nm)	ΔΟΝΤΙ 1	ΦΩΣ 1 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 2 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 3 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 4 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 5 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 6 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΔΟΝΤΙ 6
420-480-880-1000	89.3486	85.8666	86.7628	82.6507	84.7942	82.4247	82.3590	88.6053
420-500-680-920	91.3660	93.1673	92.4379	90.7505	90.3699	91.8021	92.8228	94.3182
420-500-780-980	92.3165	91.9686	92.7144	91.0457	88.3963	89.8846	90.3837	89.6517
420-680-880-1000	90.7323	85.9649	85.8386	80.0137	86.6526	82.8376	79.0663	89.6422
500-680-780-980	93.2946	90.4278	90.2727	89.8767	87.7027	84.5791	89.8474	86.7722

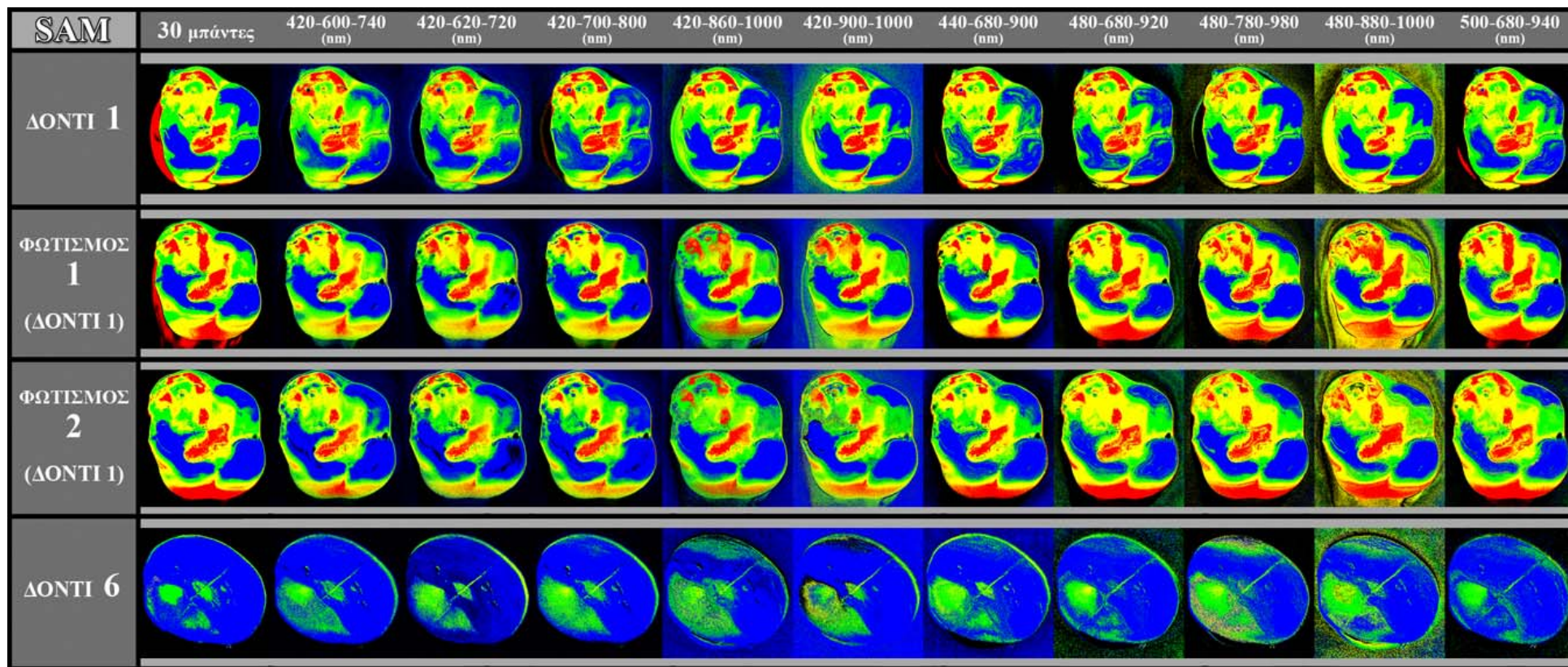
Πίνακας 5.2 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του NEUC για 4 μπάντες, συγκριτικά με NEUC για 30 μπάντες

Συνεχίζοντας, θα παρουσιάσουμε δέκα χρωματικούς χάρτες που προέκυψαν από την υλοποίηση των αλγορίθμων SAM και NEUC σε δύο δόντια και έξι επιπλέον διαφορετικές αποστάσεις φωτισμού για το ένα δόντι, χρησιμοποιώντας δέκα διαφορετικούς συνδυασμούς 3 μπαντών. Κατά την διάρκεια της εργασίας μας αποκτήσαμε πολύ περισσότερους χρωματικούς χάρτες, πάνω από πενήντα, ωστόσο επειδή η επίδειξη όλων αυτών δεν θα οδηγούσε σε πιο ουσιαστική κατανόηση της έρευνάς μας, αντιθέτως θα αποτελούσε περιττή συσσώρευση πληροφοριών, εκθέτουμε παρακάτω μόνο τους 10 από αυτούς τους χρωματικούς χάρτες. Το κριτήριο στο οποίο βασίστηκε η επιλογή μας ήταν η οπτική παρατήρηση και σύγκριση όλων των χαρτών με τους συνδυασμούς των 3 μπαντών, με τον χάρτη που προέκυψε και από τις 30 μπάντες. Συγκεκριμένα, εκθέτουμε τους χρωματικούς χάρτες που προέκυψαν χρησιμοποιώντας δέκα συνδυασμούς 3 μπαντών, που είναι οι εξής :

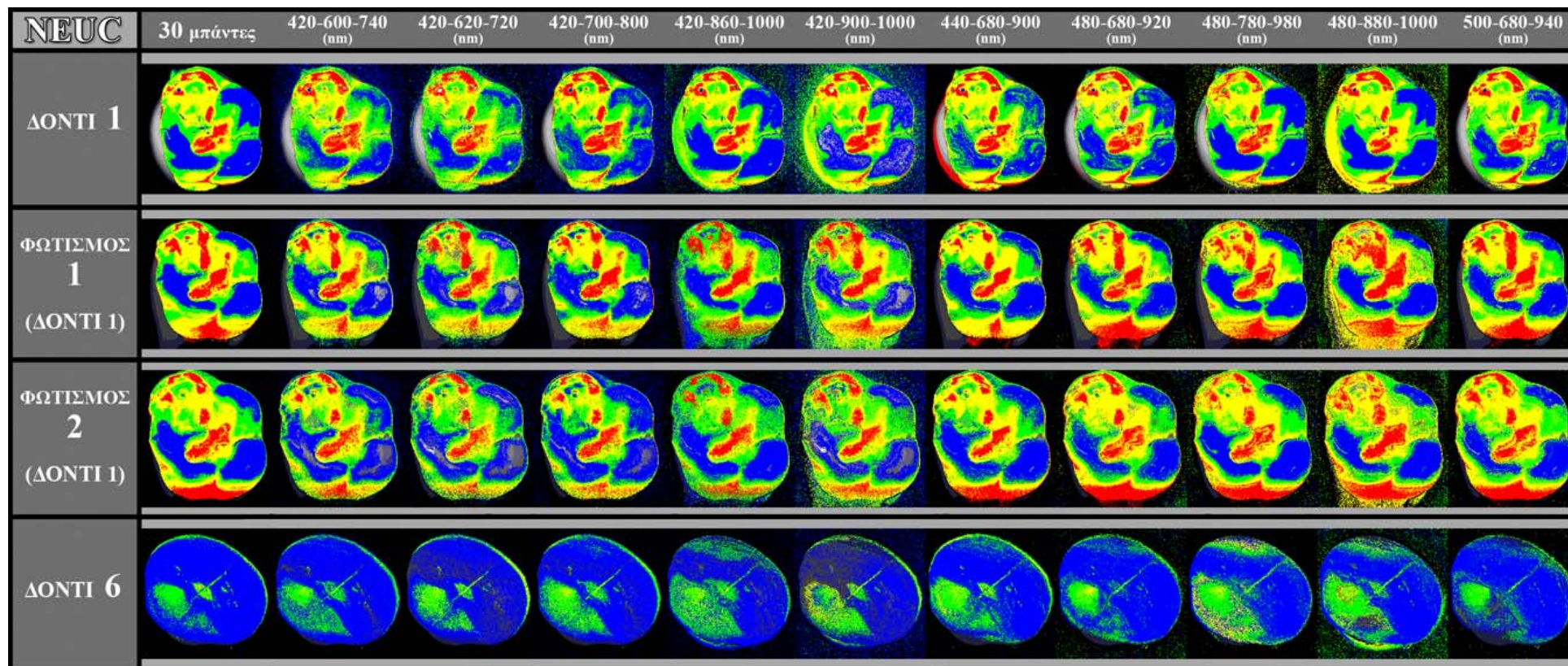
1. 1^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 600nm – 740nm
2. 2^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 620nm – 720nm
3. 3^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 700nm – 800nm
4. 4^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 860nm – 1000nm
5. 5^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 900nm – 1000nm
6. 6^{ος} συνδυασμός μπαντών : 440nm – 680nm – 900nm
7. 7^{ος} συνδυασμός μπαντών : 480nm – 680nm – 920nm
8. 8^{ος} συνδυασμός μπαντών : 480nm – 780nm – 980nm
9. 9^{ος} συνδυασμός μπαντών : 480nm – 880nm – 1000nm
10. 10^{ος} συνδυασμός μπαντών : 500nm – 680nm – 940nm
(εικόνα 5.14 και 5.15)

Οι χρωματικοί χάρτες που προέκυψαν για τους υπόλοιπους φωτισμούς, με 3 μπάντες, παρουσιάζονται στο Παράρτημα, για εξοικονόμηση χώρου. (εικόνα Π14 και Π15)

Επίσης, ακολουθούν πίνακες με τα ποσοστά ακρίβειας (%) των αλγορίθμων SAM και NEUC, δηλαδή τα ποσοστά αυτά αναδεικνύουν το βαθμό (%) που μοιάζουν μεταξύ τους οι χρωματικοί χάρτες που δημιουργήθηκαν κάνοντας χρήση 3 μπαντών, με αυτούς που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας όλες τις μπάντες, δηλαδή και τις 30. Σημειώνονται τα μεγαλύτερα ποσοστά, όπου προφανώς οι συνδυασμοί των 3 μπαντών από τους οποίους προκύπτουν είναι οι πιο χρήσιμοι. (πίνακας 5.3 και 5.4)



Εικόνα 5.14 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών



Εικόνα 5.15 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών

ΑΚΡΙΒΕΙΑ (%) ΤΟΥ SAM ΓΙΑ 3 ΜΠΑΝΤΕΣ

3 μπάντες (nm)	ΔΟΝΤΙ 1	ΦΩΣ 1 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 2 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 3 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 4 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 5 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 6 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΔΟΝΤΙ 6
420-600-740	71.0808	78.2010	77.9178	68.0513	72.5702	73.0044	70.6667	87.7112
420-620-720	65.3791	73.2576	72.0313	60.4523	63.6391	71.8408	64.7731	76.9720
420-700-800	71.3094	74.5912	70.6302	65.1601	67.1790	71.7880	70.2179	85.4112
420-860-1000	69.6969	61.6799	65.9914	55.0676	63.9405	48.5433	60.1845	56.3708
420-900-1000	53.9229	48.7233	49.8769	40.9142	55.0917	36.6207	49.9462	45.0442
440-680-900	79.8113	74.7771	80.0117	77.0623	72.2758	73.5619	76.0382	63.0383
480-680-920	82.2621	78.2791	78.7382	75.1755	71.5661	78.0060	76.5275	78.4422
480-780-980	80.3160	78.3795	82.4801	76.9732	71.2844	72.0064	71.5330	78.6459
480-880-1000	73.2732	59.5768	65.4867	63.6236	64.9975	54.1830	64.0685	57.5251
500-680-940	81.0872	81.8889	80.7676	78.8254	72.7909	79.5041	76.8782	83.9564

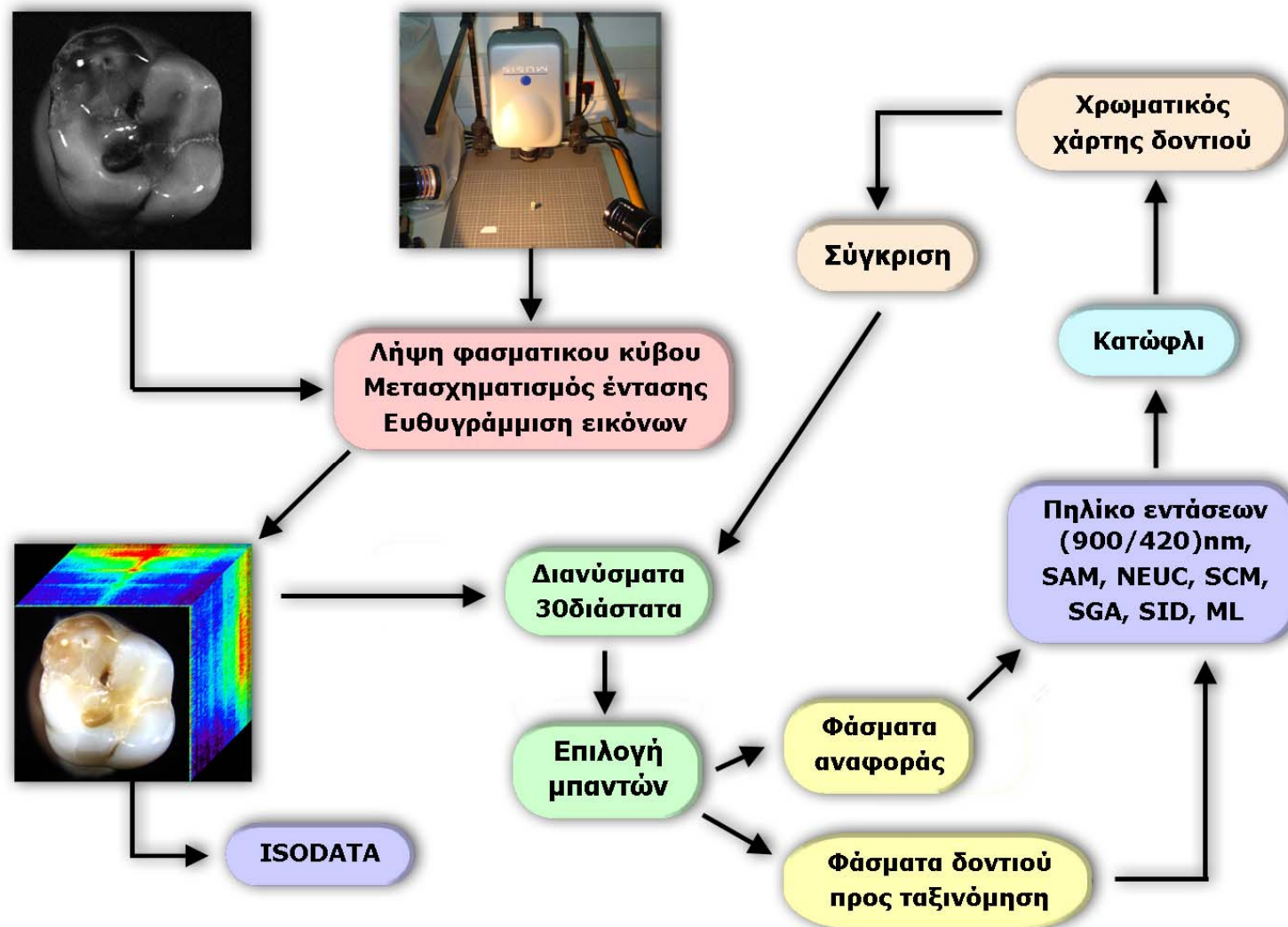
Πίνακας 5.3 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του SAM για 3 μπάντες, συγκριτικά με SAM για 30 μπάντες

ΑΚΡΙΒΕΙΑ (%) ΤΟΥ ΝΕUC ΓΙΑ 3 ΜΠΑΝΤΕΣ

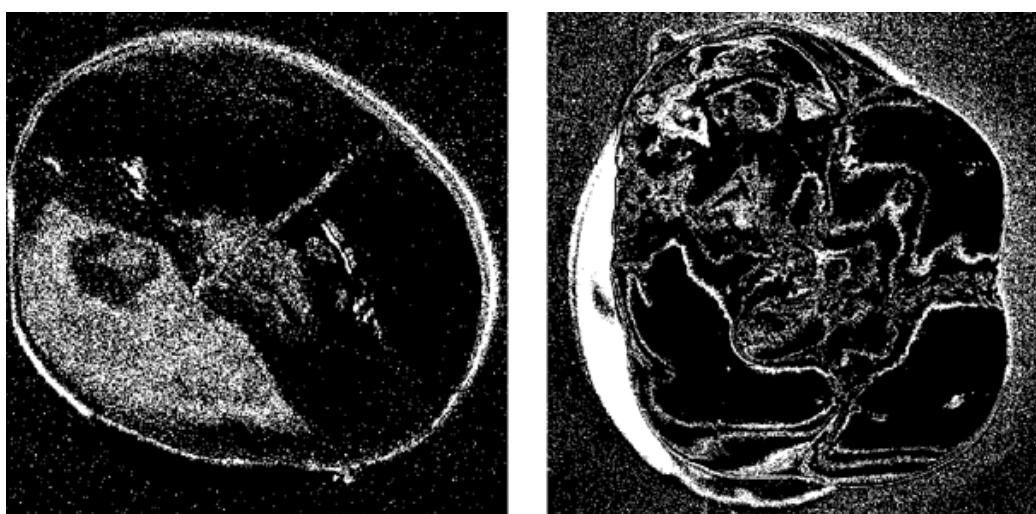
3 μπάντες (nm)	ΔΟΝΤΙ 1	ΦΩΣ 1 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 2 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 3 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 4 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 5 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 6 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΔΟΝΤΙ 6
420-600-740	81.6104	87.3222	84.6662	78.9476	85.7270	85.7883	85.4917	92.0565
420-620-720	82.6162	85.4170	82.1091	75.2574	83.0025	83.9182	84.1098	88.1464
420-700-800	83.9393	86.5949	82.3542	79.2195	84.3022	84.8126	86.1063	90.8933
420-860-1000	82.1337	80.9210	82.9721	73.6632	80.3947	74.7077	77.9475	82.7546
420-900-1000	73.3967	74.4079	75.2478	69.3832	72.3826	69.3904	71.6086	75.0320
440-680-900	87.2376	89.3049	89.8667	88.1102	85.5259	87.4582	86.3852	89.8231
480-680-920	89.8161	89.7106	88.4379	87.7767	86.4757	87.2437	87.8427	90.1085
480-780-980	90.7916	88.9550	89.6464	87.0677	85.9746	83.5731	86.5914	86.5778
480-880-1000	86.9518	81.2451	83.6131	79.3654	80.8120	76.7247	79.3316	81.3783
500-680-940	89.1024	91.4874	89.6886	88.7422	87.4482	88.1149	88.1806	88.0712

Πίνακας 5.4 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του ΝΕUC για 3 μπάντες, συγκριτικά με ΝΕUC για 30 μπάντες

Η διαδικασία μείωσης των μπαντών προκειμένου να εντοπίσουμε τον ελάχιστο δυνατό συνδυασμό μπαντών, που θα επιφέρει σχεδόν όμοιους χρωματικούς χάρτες με αυτούς που προέκυψαν κάνοντας χρήση 30 μπαντών, περιγράφεται μέσω του παρακάτω διάγραμματος:



Όσον αφορά τα ποσοστά ακρίβειας των αλγορίθμων SAM και NEUC που αναφέρουμε 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 3 και 4 μπαντών. Αν τα pixel ήταν ίδια, δίναμε μαύρο χρώμα στο pixel που βρισκόταν στην αντίστοιχη θέση, μιας καινούριας εικόνας που δημιουργήσαμε. Αντίθετα, δίναμε άσπρο χρώμα στο pixel. Έτσι, μετρώντας τελικά τον αριθμό των μαύρων pixel, τα οποία ήταν τα pixel που είχαν ίδια τιμή για τις εικόνες που συγκρίναμε, υπολογίζαμε το ποσοστό (%) του βαθμού ομοιότητας των δύο εικόνων. Παρακάτω δίνονται παράδειγματα κάποιων εικόνων που προέκυψαν από αυτή την διαδικασία για δύο δόντια.



Μελετώντας τα ποσοστά που προέκυψαν καταλήξαμε ότι οι συνδυασμοί μπαντών (3 και 4 μπάντες) που δίνουν τα μεγαλύτερα ποσοστά και για τους δύο αλγόριθμους, οπότε αποτελούν τις μπάντες που προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για τη μελέτη μας είναι οι εξής :

ΚΑΛΥΤΕΡΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ 3 ΜΠΑΝΤΩΝ	ΚΑΛΥΤΕΡΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ 4 ΜΠΑΝΤΩΝ
500-680-940 (nm)	420-500-680-920 (nm)
480-780-980 (nm)	420-500-780-980 (nm)

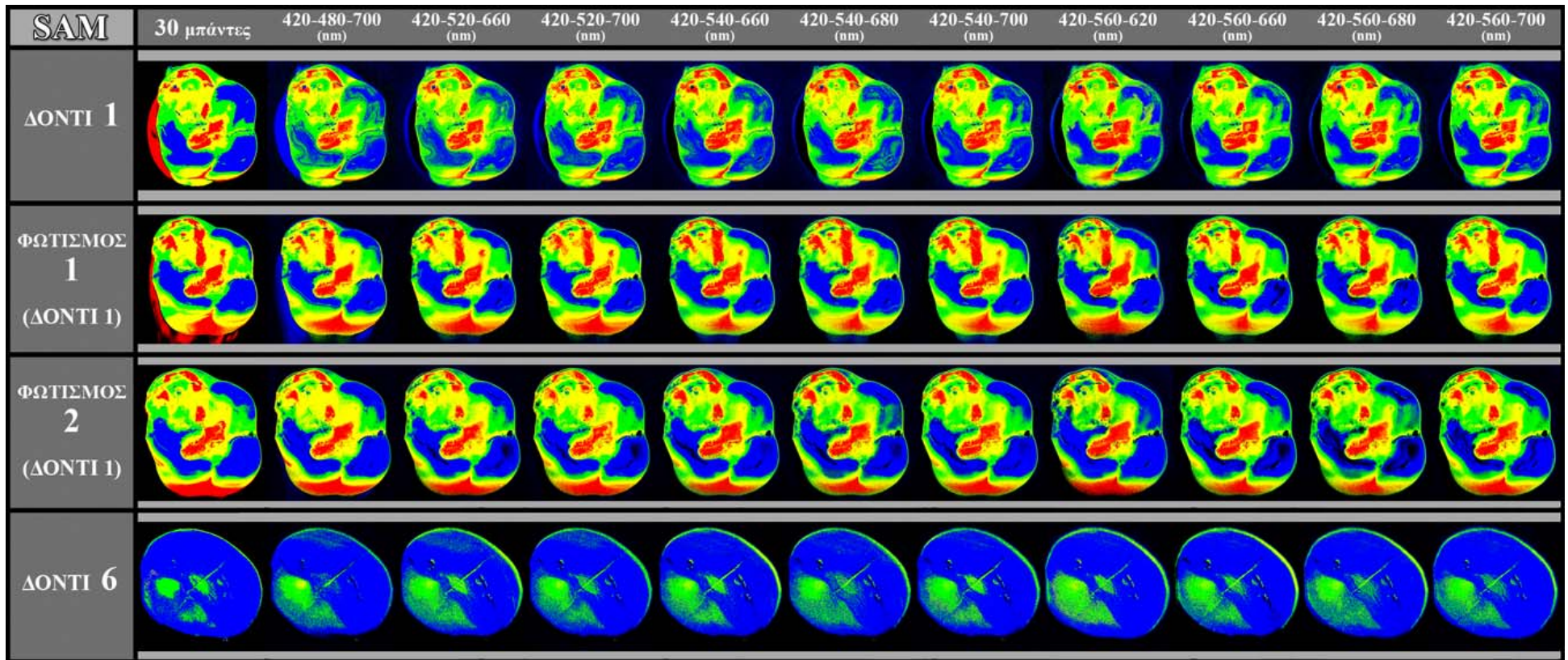
ο 7^ο ΣΤΑΔΙΟ

Τελικός σκοπός της μελέτης μας, αφού πλέον προσδιορίσαμε τους χρήσιμους αλγόριθμους για την επίτευξη της ανίχνευσης και της χαρτογράφης της τερηδόνας και εντοπίσαμε ότι 3 μπάντες είναι αρκετές ώστε να κάνουμε ένα σωστό διαχωρισμό των περιοχών του δοντιού, σχεδόν όμοιο με αυτόν που προκύπτει κάνοντας χρήση όλων των μπαντών, είναι ο εντοπισμός 3 μπαντών, οι οποίες όμως αυτήν την φορά θα περιορίζονται στο φάσμα του ορατού, δηλαδή περίπου από 400nm – 700nm. Ο λόγος που προσπαθήσαμε να περιορίσουμε τις 3 μπάντες που χρησιμοποιούμε στο φάσμα του ορατού είναι ότι μία πιθανή εξέλιξη της εργασίας μας σε συσκευή ανίχνευσης της πρώιμης τερηδόνας, θα μπορεί σαφώς να υλοποιηθεί πιο εύκολα, κάνοντας χρήση μίας κλασικής χρωματικής κάμερα. Ειδικά, θα χρειαζόμασταν επιπλέον και μία υπέρυθη κάμερα, η οποία αφενώς απαιτεί περισσότερο χώρο, γεγονός που θα δυσκόλευε την κατάσταση στον σχετικά μικρό χώρο της στοματικής περιοχής και αφετέρου θα μας επιβάρυνε περισσότερο οικονομικά. Ακολουθήσαμε λοιπόν την προηγούμενη διαδικασία, εφαρμόζοντας τους αλγόριθμους SAM και NEUC με 3 μπάντες που εκτείνονται στο ορατό. Συνολικά, δημιουργήσαμε 20 χρωματικούς χάρτες για καθένα από τα δύο δόντια που χρησιμοποιήσαμε και προηγουμένως αλλά και για έξι διαφορετικές συνθήκες φωτισμού (για SAM και NEUC). Παρακάτω εκθέτουμε τους δέκα από αυτούς, ενώ ακολουθούν πίνακες με ποσοστά ακρίβειας, που υπολογίστηκαν όπως περιγράψαμε πιο πάνω, για όλα τα δόντια και τις διάφορες συνθήκες φωτισμού. (πίνακας 5.5 και 5.6)

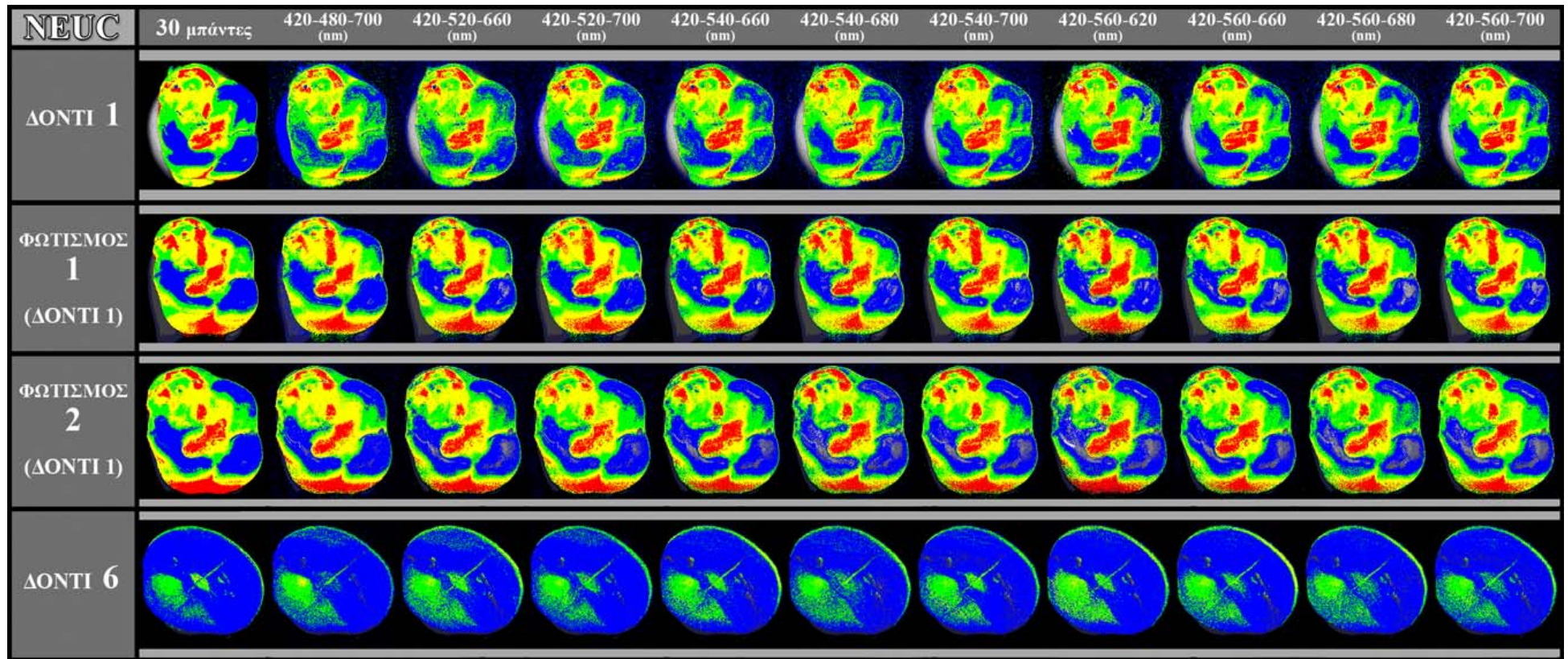
Συγκεκριμένα, εκθέτουμε τους χρωματικούς χάρτες που προέκυψαν χρησιμοποιώντας δέκα συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα, που είναι οι εξής:

1. 1^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 480nm – 700nm
 2. 2^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 520nm – 660nm
 3. 3^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 520nm – 700nm
 4. 4^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 540nm – 660nm
 5. 5^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 540nm – 680nm
 6. 6^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 540nm – 700nm
 7. 7^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 560nm – 620nm
 8. 8^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 560nm – 660nm
 9. 9^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 560nm – 680nm
 10. 10^{ος} συνδυασμός μπαντών : 420nm – 560nm – 700nm
- (εικόνα 5.16 και 5.17)

Οι χρωματικοί χάρτες που προέκυψαν για τους υπόλοιπους φωτισμούς, με 3 μπάντες στο ορατό φάσμα, παρουσιάζονται στο Παράρτημα, για εξοικονόμηση χώρου. (εικόνα Π16 και Π17)



Εικόνα 5.16 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα



Εικόνα 5.17 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα

ΑΚΡΙΒΕΙΑ (%) ΤΟΥ SAM ΓΙΑ 3 ΜΠΑΝΤΕΣ ΣΤΟ ΟΡΑΤΟ ΦΑΣΜΑ

3 μπάντες στο ορατό φάσμα (nm)	ΔΟΝΤΙ 1	ΦΩΣ 1 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 2 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 3 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 4 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 5 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 6 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΔΟΝΤΙ 6
420- 480-700	74.3611	79.2594	85.4625	76.4114	72.7295	77.8202	71.8067	85.3657
420- 500-580	66.2414	72.4103	72.4389	61.5741	61.5468	70.4493	60.8162	85.9339
420- 520-620	70.9392	78.4555	79.2990	68.7648	70.9652	75.6658	69.5151	85.5724
420- 520-660	70.2613	82.0562	84.1063	77.0793	73.0108	80.7320	70.1391	85.3254
420-520-700	74.3057	82.4786	85.0553	74.7549	74.1007	80.8542	72.6825	87.0367
420-540-660	72.5690	79.0094	82.0440	73.3552	73.9352	77.9139	71.4737	86.0059
420-540-680	71.6180	78.0247	77.7062	65.2785	71.2640	75.0924	70.3986	85.8228
420-540-700	74.5903	79.8333	82.8345	72.7237	73.6548	79.0175	73.7075	87.3347
420-560-620	70.0536	74.3433	75.5481	67.2917	70.6556	71.7575	69.0250	85.2937
420-560-660	73.6056	78.9773	80.4260	71.0390	74.6503	77.6512	71.8694	86.3974
420-560-680	74.8163	78.6162	75.6080	64.1136	73.3691	75.3012	71.8345	86.6499
420-560-700	76.0925	79.7666	81.5997	70.7199	75.7526	78.5895	73.8736	87.1705
440-540-680	60.4785	60.7781	69.6821	62.2111	62.6939	57.1378	60.1976	67.9371
440-560-680	64.0777	65.8283	72.0693	62.7162	65.4741	66.0183	65.6909	68.5220
440-580-700	68.0950	69.0976	75.4227	69.0325	70.7264	65.5824	66.0466	72.7189
460-540-600	60.5074	71.9025	75.2090	72.6808	65.7140	76.9292	59.4529	76.6169
480-500-580	67.1736	70.2823	71.5415	68.9076	61.1355	60.8862	61.1344	72.8329
480-580-680	65.2155	60.4313	66.5141	64.8989	62.4371	51.5890	61.3799	62.1971
500-600-700	66.2966	67.7158	70.0525	66.5338	64.8131	52.4849	60.4105	64.4404
540-620-700	64.8865	61.7228	64.9033	59.3118	57.5369	52.6676	61.0753	65.3293

Πίνακας 5.5 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του SAM για 3 μπάντες στο ορατό φάσμα, συγκριτικά με SAM για 30 μπάντες

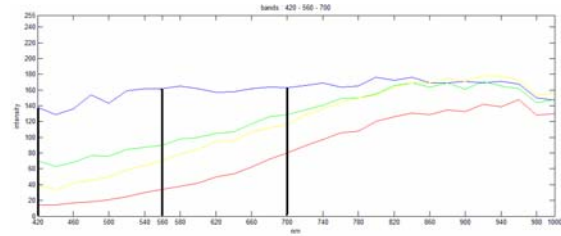
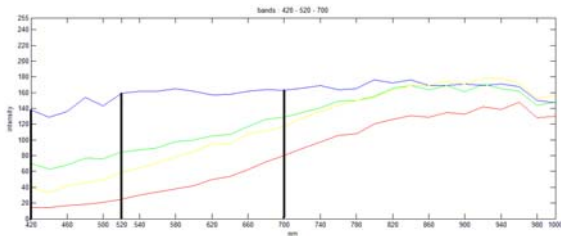
ΑΚΡΙΒΕΙΑ (%) ΤΟΥ ΝΕΥC ΓΙΑ 3 ΜΠΑΝΤΕΣ ΣΤΟ ΟΡΑΤΟ ΦΑΣΜΑ

3 μπάντες στο ορατό φάσμα (nm)	ΔΟΝΤΙ 1	ΦΩΣ 1 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 2 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 3 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 4 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 5 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΦΩΣ 6 (ΔΟΝΤΙ 1)	ΔΟΝΤΙ 6
420- 480-700	82.9876	89.5584	91.1570	85.6875	84.6244	88.2270	83.1791	92.2429
420- 500-580	80.1776	84.3946	81.8265	74.2728	80.7052	83.7800	80.3747	92.1839
420- 520-620	83.6347	87.1455	84.9633	76.6179	85.1271	85.5473	84.7811	92.5253
420- 520-660	82.9316	90.0996	89.1589	86.6760	86.1586	89.9562	85.8762	92.0606
420-520-700	84.3172	90.9223	90.8409	85.1249	86.3654	91.0468	86.3031	93.6876
420-540-660	84.8866	89.2996	88.4436	83.7309	88.1606	89.8466	87.6549	92.5677
420-540-680	83.5386	88.1068	85.0656	78.2846	86.7738	87.2165	86.6370	91.1973
420-540-700	86.2779	89.6984	88.9841	83.0404	88.0437	89.0298	88.8265	92.8216
420-560-620	85.0030	87.3695	83.6278	75.1573	87.4679	83.6517	85.9524	92.3446
420-560-660	85.3457	88.8216	88.7459	84.7270	88.2474	89.8736	87.6606	92.3610
420-560-680	85.9889	89.1423	86.3406	80.3489	87.5016	88.3341	87.5752	92.0242
420-560-700	87.4833	90.0515	88.7904	83.1798	89.3521	90.0968	88.9430	92.2514
440-540-680	82.2430	85.4763	85.7800	80.0134	83.8479	85.1767	83.5499	89.1097
440-560-680	84.7082	86.9425	86.7371	81.9768	85.6235	88.1196	86.3020	89.6099
440-580-700	83.7803	85.6147	85.9551	82.7913	86.7063	87.1654	85.8838	87.5171
460-540-600	82.2917	86.3959	87.5061	86.8006	85.1888	86.8461	82.0197	85.1501
480-500-580	83.4800	85.6726	84.4356	83.2732	80.0961	78.6844	80.1048	84.8199
480-580-680	84.7168	85.1965	84.1050	82.9546	80.5038	74.9787	80.3793	85.8649
500-600-700	83.8404	86.2870	85.0890	83.2237	83.4515	80.6732	83.7146	86.3589
540-620-700	79.6850	80.2604	80.5122	76.1054	75.5447	73.7963	77.4554	86.0155

Πίνακας 5.6 Πίνακας με ποσοστά ακρίβειας (%) του ΝΕΥC για 3 μπάντες, συγκριτικά με ΝΕΥC για 30 μπάντες

Μελετώντας τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι πιο χρήσιμοι συνδυασμοί 3 μπαντών στο ορατό φάσμα είναι οι εξής :

ΚΑΛΥΤΕΡΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ 3 ΜΠΑΝΤΩΝ ΣΤΟ ΟΡΑΤΟ ΦΑΣΜΑ	
420-520-700 (nm)	420-560-700 (nm)



Έτσι, διαπιστώσαμε ότι κάνοντας μία καλή προσέγγιση στο ορατό φάσμα, είναι εφικτό να εντοπίσουμε 3 μπάντες σε αυτό που θα δίνουν ίδια αποτελέσματα με μπάντες ολόκληρου του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα και προοπτική εξέλιξης της εργασίας

Κλείνοντας, συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε, δηλαδή ο συνδυασμός της υπερφασματικής απεικόνισης, κάνοντας χρήση των δυνατοτήτων που μας προσέφερε η υπερφασματική κάμερα MuSIS που διαθέτουμε στο εργαστήριο μας, μαζί με την εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων ταξινόμησης στα δόντια, μας προσέφερε μια νέα τεχνική ανίχνευσης και χαρτογράφησης της ασθένειας της τερηδόνας.

Έως σήμερα, κάθε μέθοδος και τεχνική που είχε εφαρμοστεί στον τομέα αυτό είχε τουλάχιστον και ένα ξεχωριστό μειονέκτημα, που ωστόσο είναι αρκετό για να μην μπορεί καμία τεχνολογία να καλύψει όλα τα ενδεχόμενα διάγνωσης, στον βαθμό ακρίβειας που απαιτείται. Έτσι, παρ'όλο που οι καινούριες αυτές τεχνολογίες προσφέρουν σημαντική ελπίδα, δεν υπάρχουν αρκετές αποδείξεις για καμία διαγνωστική μέθοδο, ώστε να συστηθεί ως υποκατάστατο των παραδοσιακών μεθόδων.

Αναλυτικότερα, δικό μας ζητούμενο στην εφαρμογή αυτή ήταν η ανάπτυξη μίας τέτοιας τεχνολογίας η οποία θα προσφέρει την μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών ενός μεγάλου αριθμού σημείων της υπό εξέταση περιοχής, γι' αυτό εφαρμόσαμε την μέθοδο της υπερφασματικής απεικόνισης. Οι άλλες μέθοδοι που έχουν γίνει έως σήμερα περιόριζαν τη μελέτη τους με χρήση φασματομέτρων, λόγω έλλειψης πιο εξελιγμένης τεχνολογίας, οπότε αναφερόντουσαν κάθε φορά στο φάσμα ενός μόνο σημείου (pixel) της εικόνας. Επιπλέον, η χρήση της υπερφασματικής κάμερας MuSIS μας έδωσε την δυνατότητα λήψης φασμάτων από όλες τις περιοχές του δοντιού (υγιείς, τερηδονισμένες και άλλες με ενδιάμεσα στάδια εξέλιξης της ασθένειας) και από 30 φασματικές μπάντες (420nm-1000nm). Συνεπώς, είχαμε το πλεονέκτημα να μελετήσουμε την φασματική πληροφορία κάθε σημείου, καθώς και να εντοπίσουμε χαρακτηριστικά του δοντιού, που δεν φαίνονται όμως στο ορατό φάσμα του φωτός. Αντίθετα, όλες οι υπόλοιπες έρευνες που έγιναν στο παρελθόν είτε δεν χρησιμοποιούσαν καθόλου φάσματα του δοντιού (π.χ. DIAGNOdent), είτε χρησιμοποιούσαν συγκεκριμένες μπάντες του φάσματος (π.χ. ορισμένες μελέτες φασματοσκοπίας φθορισμού που αναφέρονται στο 3^ο κεφάλαιο), οπότε ίσως έχαναν χρήσιμες πληροφορίες από κάποιες άλλες μπάντες. Επιπλέον, η εφαρμογή των αλγορίθμων Maximum Likelihood (ML), Normalized Euclidean Distance (NEUC), Spectral Correlation Mapper (SCM), Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Information Divergence (SID), Spectral Gradient Angle (SGA), Iterative Self-Organizing Data Analysis (ISODATA), Principal Component Analysis (PCA) μας βοήθησε να ταξινομήσουμε με πιο αντικειμενικά κριτήρια τις περιοχές αλλοίωσης κάθε δοντιού. Τελικά, καταλήξαμε ότι οι NEUC και SAM δίνουν τα καλύτερα

αποτελέσματα κατηγοριοποίησης σε σχέση με τους υπόλοιπους. Τέλος, μετά από πάρα πολλές δοκιμές, συμπεράναμε ότι οι δύο συνδυασμοί 3 μπαντών του ορατού :

1. 420nm-520nm-700nm

2. 420nm-560nm-700nm

καταλήγουν σχεδόν στους ίδιους χρωματικούς χάρτες που προκύπτουν από τις 30 μπάντες.

Όσον αφορά κάποια μελλοντική επέκταση της έρευνας μας, θα ήταν δυνατό να υλοποιηθεί κάποια συσκευή, εκμεταλλευόμενοι τον συνδυασμό 3 μπαντών στο φάσμα του ορατού που δίνει καλά αποτελέσματα για ανίχνευση και χαρτογράφηση τερηδόνας. Βέβαια, θα πρέπει να γίνουν πολύ περισσότερες δοκιμές, ώστε να είμαστε τελείως σίγουροι για το αποτέλεσμα, αλλά και να γίνουν κάποιες ακόμα μελέτες που δεν ήταν εφικτό να υλοποιήσουμε στα πλαίσια μίας μόνο διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, θα πρέπει όλη η διαδικασία που ακολουθήσαμε να επιβεβαιωθεί σε μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων, για αξιόπιστα και αντικειμενικά αποτελέσματα. Ακόμα, θα ήταν απαραίτητο να μελετηθούν και άλλες παθολογικές καταστάσεις του δοντιού, ώστε να είμαστε σίγουροι ότι γίνεται ανίχνευση τερηδόνας και όχι κάποιας άλλης πιθανώς μη επεκτατικής βλάβης και να βεβαιωθεί ότι τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από στίγματα του δοντιού, χρωματισμούς ή καταστάσεις υπερβολικής πρόσληψης φθορίου (fluorosis). Στο σημείο αυτό ίσως να είναι χρήσιμη και η συνεργασία μας με κάποιους οδοντίατρους, προκειμένου να τους συμβουλευτούμε σε θέματα που είναι περισσότερο ειδικευμένοι. Επίσης, η εφαρμογή ακόμα περισσότερων αλγορίθμων, ίσως αποκαλύψει νέες πτυχές στην ήδη υπάρχουσα μελέτη.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

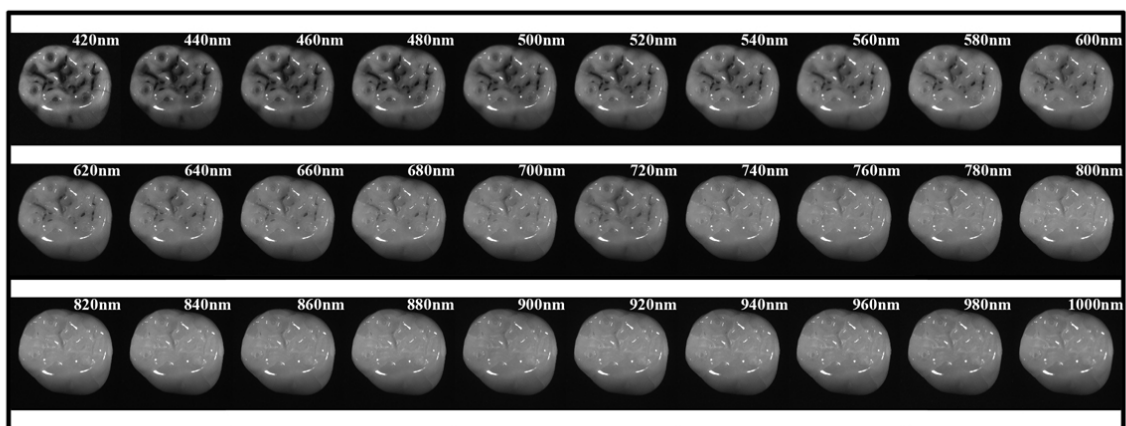
- [1] Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Εμβρυολογία και Ιστολογία των σκληρών οδοντικών ιστών, <http://eclass.uoa.gr/modules/document/document.php>
- [2] Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιστολογία πολφού, <http://eclass.uoa.gr>
- [3] Ekaterina G. Borisova, MS,1* Tzonko T. Uzunov, MD,2 and Latchezar A. Avramov, PhD, Early Differentiation Between Caries and Tooth Demineralization Using Laser-Induced Autofluorescence Spectroscopy, *Lasers in Surgery and Medicine* 34:249–253 (2004)
- [4] Narayanan Subhash,1* Shiny Sara Thomas,1 Rupananda J. Mallia,1 and Mini Jose, Tooth Caries Detection by Curve Fitting of Laser-Induced Fluorescence Emission: A Comparative Evaluation With Reflectance Spectroscopy, *Lasers in Surgery and Medicine* 37:320–328 (2005)
- [5] E.Borisova, Tz.Uzunov, S.Valkanov,L.Avramov,Light diffuse reflectance for detection and differentiation of teeth caries lesions,*Proc of SPIE Vol.6535,65350a,(2007)*
- [6] Christopher M. Bühler, Patara Ngaotheppitak and Daniel Fried, ," Imaging of occlusal dental caries (decay) with near-IR light at 1310-nm," *Opt. Express* 13, 3582-3585, (2005)
- [7] Iain A. Pretty, " Caries detection and diagnosis: Novel technologies," *j o u r n a l o f d e n t i s t r y* 34 (2 0 0 6) 72 7 – 73 9
- [8] Iain A. Pretty, BDS(Hons), MSc, PhD , Gerardo Maupomé, PhD," A Closer Look at Diagnosis in Clinical Dental Practice: Part 5. Emerging Technologies for Caries Detection and Diagnosis,"
- [9] C. Balas, G. Themelis, A. Papadakis, E. Vasgiouraki, A. Argyros, E.Koumantakis, A. Tosca, E. Helidonis "A Novel Hyper-Spectral Imaging System : Application on in-vivo Detection and Grading of Cervical Precancers and of Pigmented Skin Lesions"
- [10]Balas, C, (2001) "A novel optical imaging method for the early detection, quantitative grading, and mapping of cancerous and precancerous lesions of cervix" *IEEE Trans Biomed Eng* 48: 96-104
- [11]Richards, J.A., 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer-Verlag, Berlin, p. 240
- [12] G. Girouand, A.Bannari, A. El. Harti and A. Descrochers (2004), Validated Spectral Angle Mapper Algorithm for Geological Mapping: Comparative study between Quickbird and Landsat-TM, *Geo-Imagery Bridging Continents, Istanbul*, 599-604
- [13] Carvalho Junior, O.A. and Menezes, P.R. 2000, "Spectral Correlation Mapper (SCM): an improving Spectral Angle Mapper (SAM)". *Proceedings of the Nineth JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 00-18, pp 65-74*
- [14] H. Du, C.-I. Chang, H. Ren, C-C Chang, J. O. Jensen, and F. M.D'Amico, "New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization", *Optical Engineering*, 43, no 8, 2004, 1777–1786
- [15] E. Angelopoulou, S. W. Lee, R. Bajcsy, "Spectral gradients: A material descriptor invariant to geometry and incident illumination", *Proc IEEE Int Conf on Comp Vision. IEEE Computer Society Press*, 1999, 861-867
- [16]Tou, J. T. and R. C. Gonzalez,. *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley Publishing Company, 1974 Reading, Massachusetts
- [17] Giorgos Epitropou, *Hyperspectral imaging and spectral classification algorithms for the non-destructive analysis of El Greco's paintings*, 2009

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

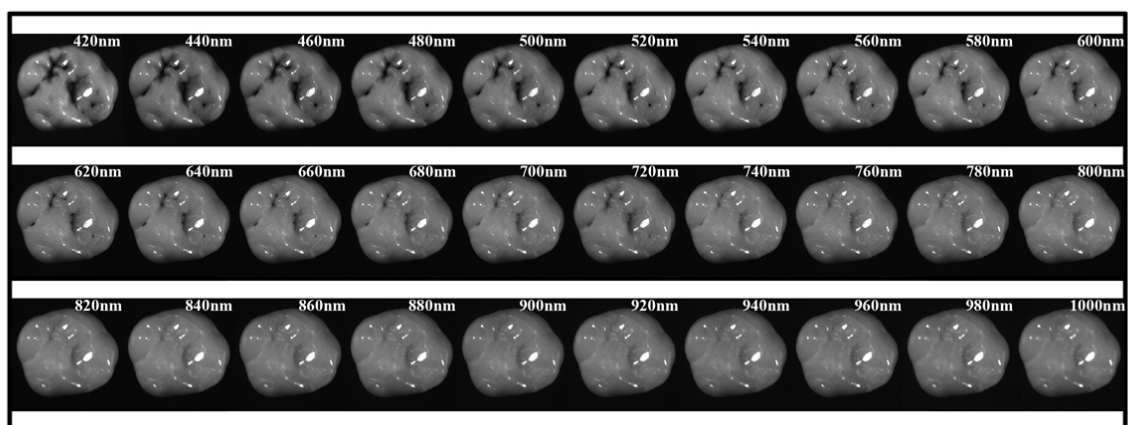
Στο Παράρτημα βρίσκονται εικόνες που ανήκουν στο κεφάλαιο 5 : «Πειραματική διαδικασία και Αποτελέσματα», προκειμένου να εξοικονομήσουμε ορισμένο χώρο από το κείμενο. Οι εικόνες εμφανίζονται ανάλογα με το στάδιο εργασίας στο οποίο ανήκουν. Έχουμε λοιπόν :

ο 1^ο ΣΤΑΔΙΟ

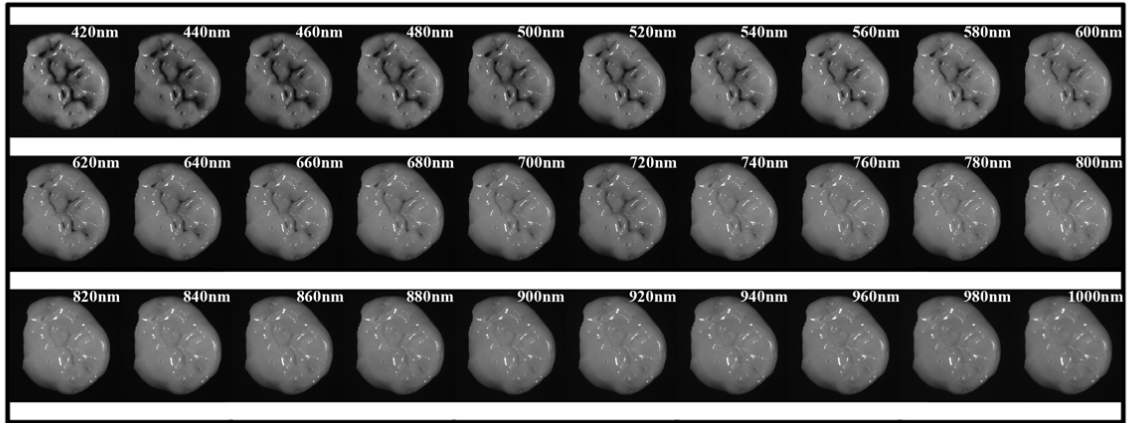
Παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά οι φασματικοί κύβοι για τα υπόλοιπα 6 δόντια, που ελήφθησαν μετά από πειράματα με την υπερφασματική κάμερα MuSIS.



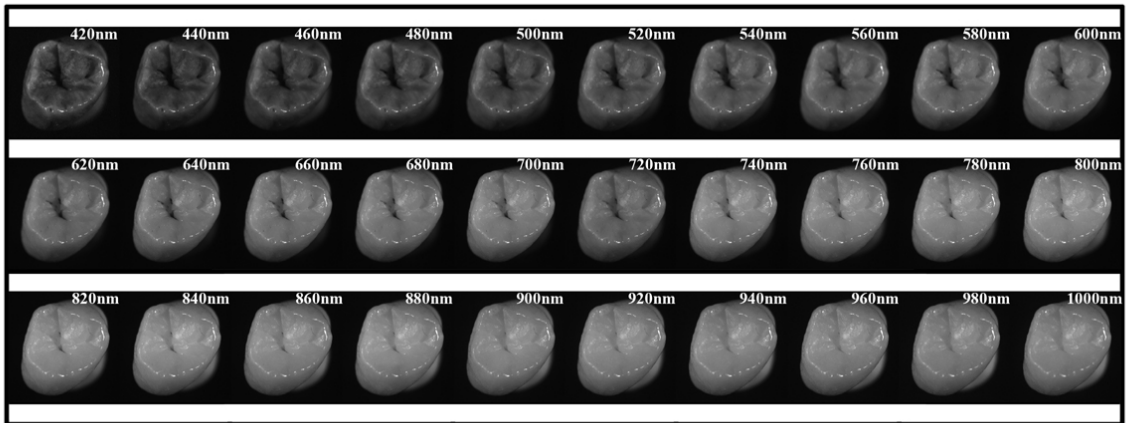
Εικόνα Π1 Φασματικός κύβος για το δόντι 2, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS



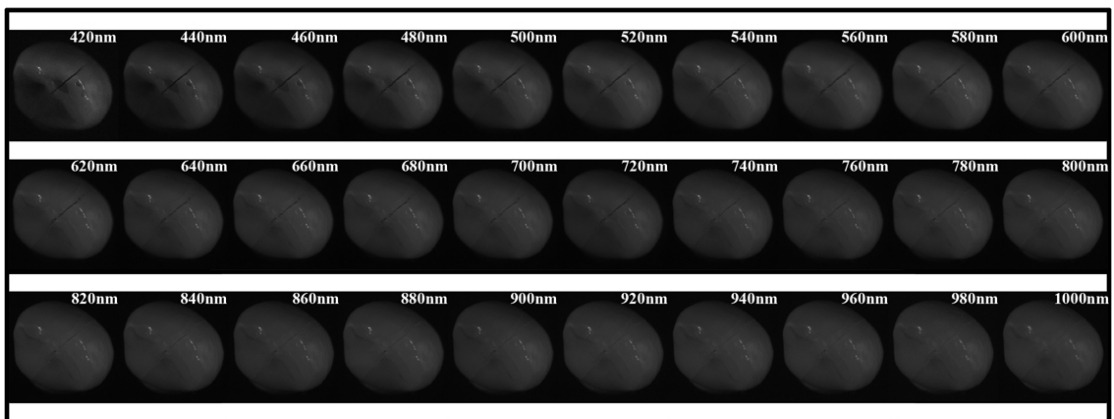
Εικόνα Π2 Φασματικός κύβος για το δόντι3, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS



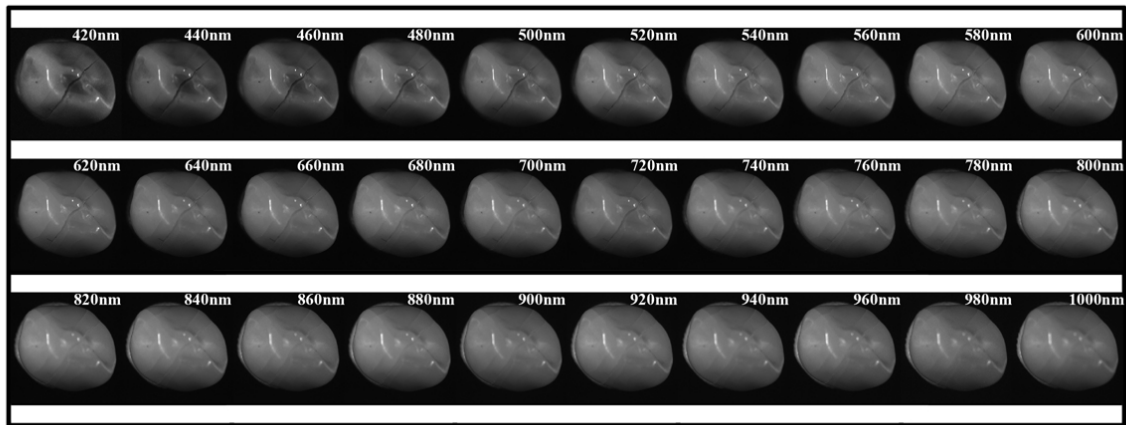
Εικόνα Π3 Φασματικός κύβος για το δόντι4, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS



Εικόνα Π4 Φασματικός κύβος για το δόντι5, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS



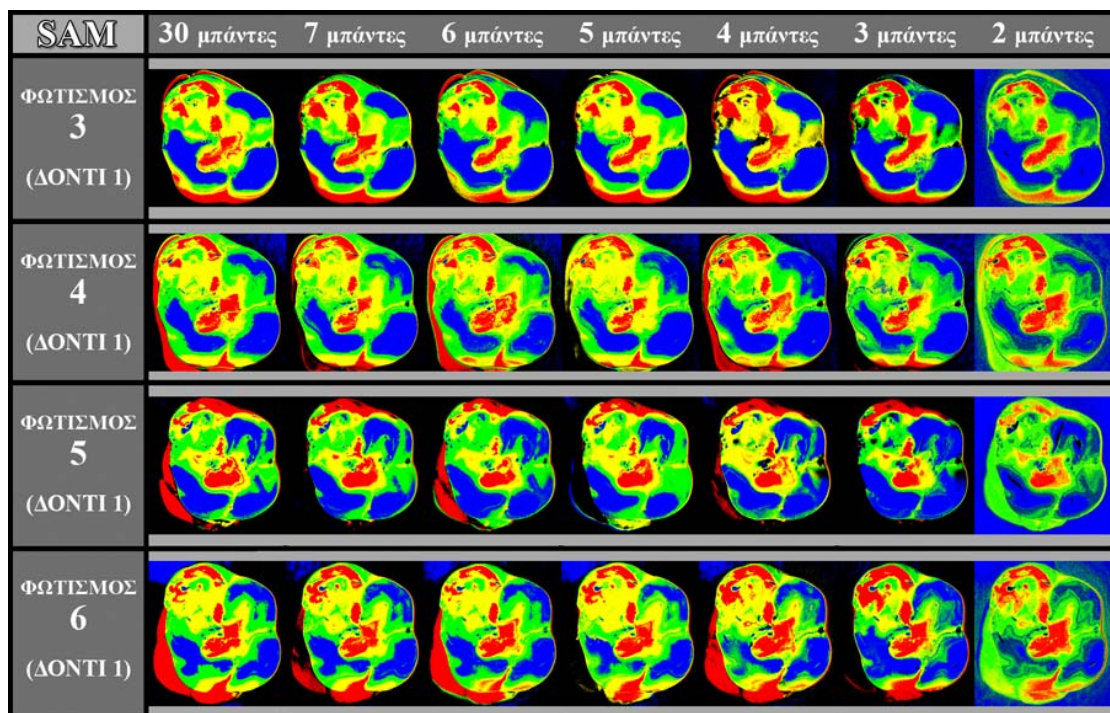
Εικόνα Π5 Φασματικός κύβος για το δόντι6, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS



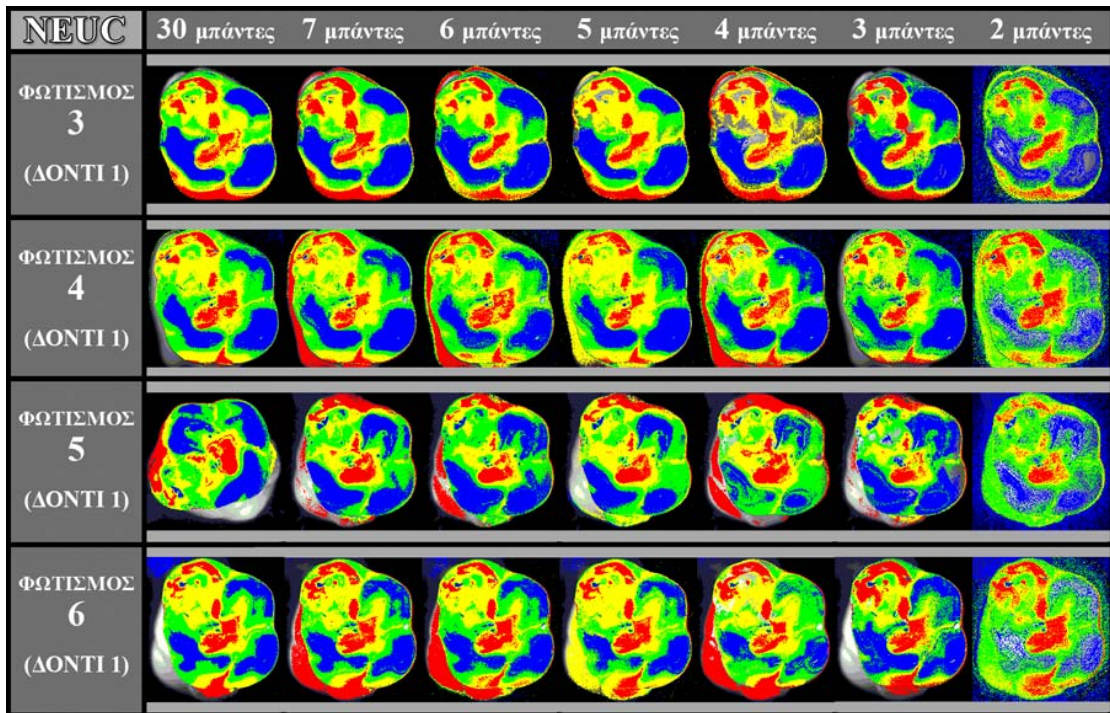
Εικόνα Π6 Φασματικός κύβος για το δόντι7, κάνοντας χρήση του συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης MuSIS

○ 5^ο ΣΤΑΔΙΟ

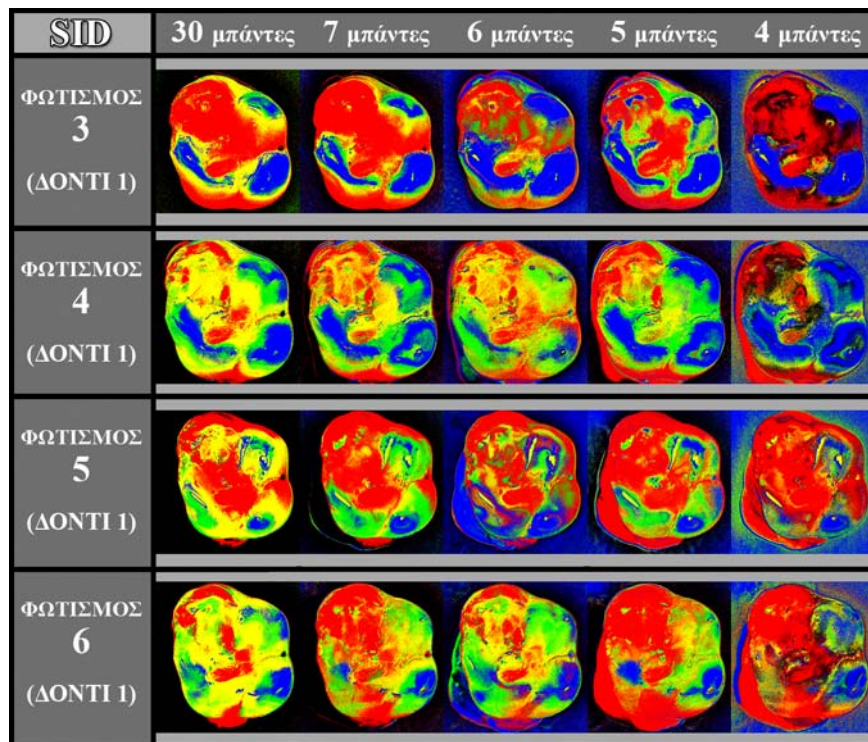
Παρουσιάζονται οι υπόλοιπες εικόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή των γνωστών μας αλγορίθμων στα δόντια, μειώνοντας σταδιακά τις μπάντες.



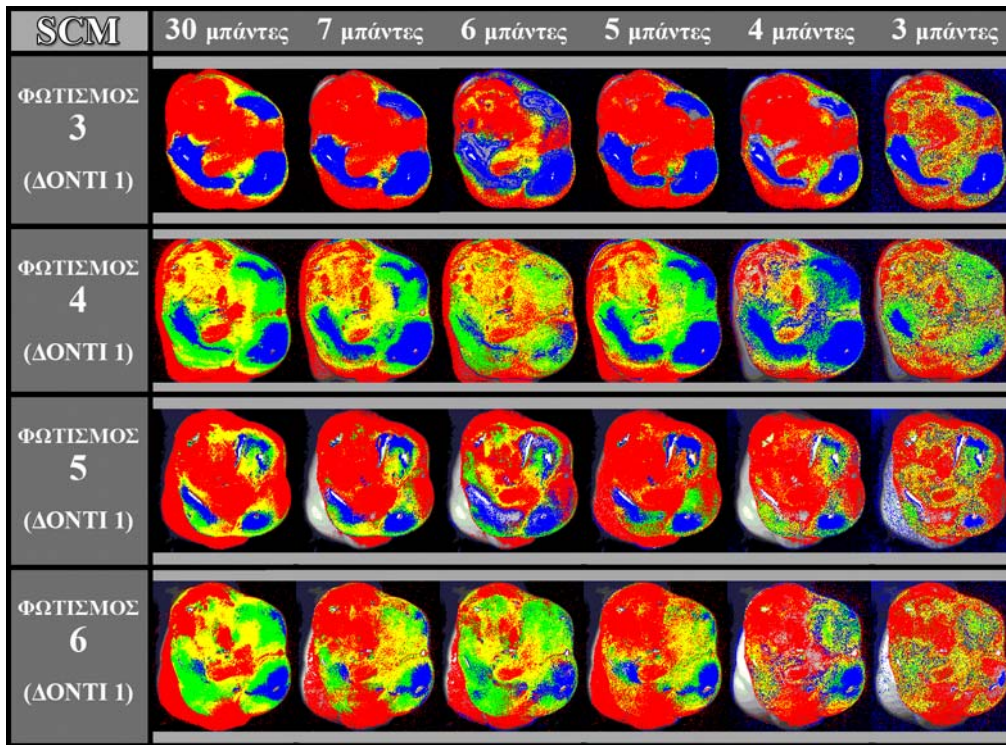
Εικόνα Π7 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε



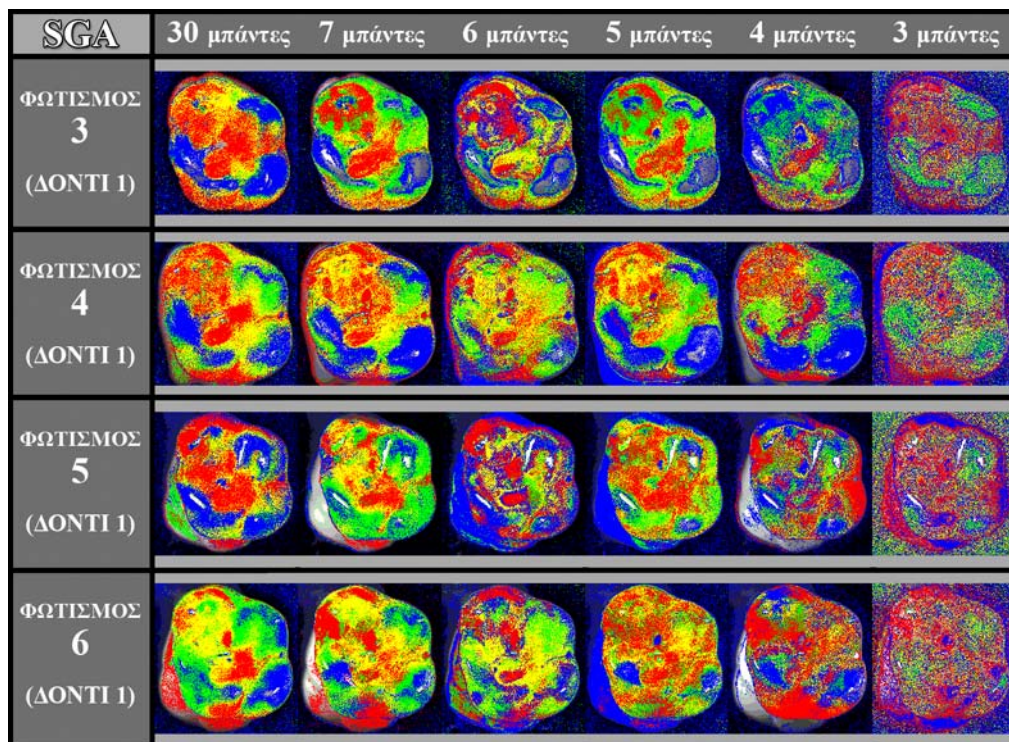
Εικόνα Π8 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε



Εικόνα Π9 Εικόνες που προέκυψαν από τον SID, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε



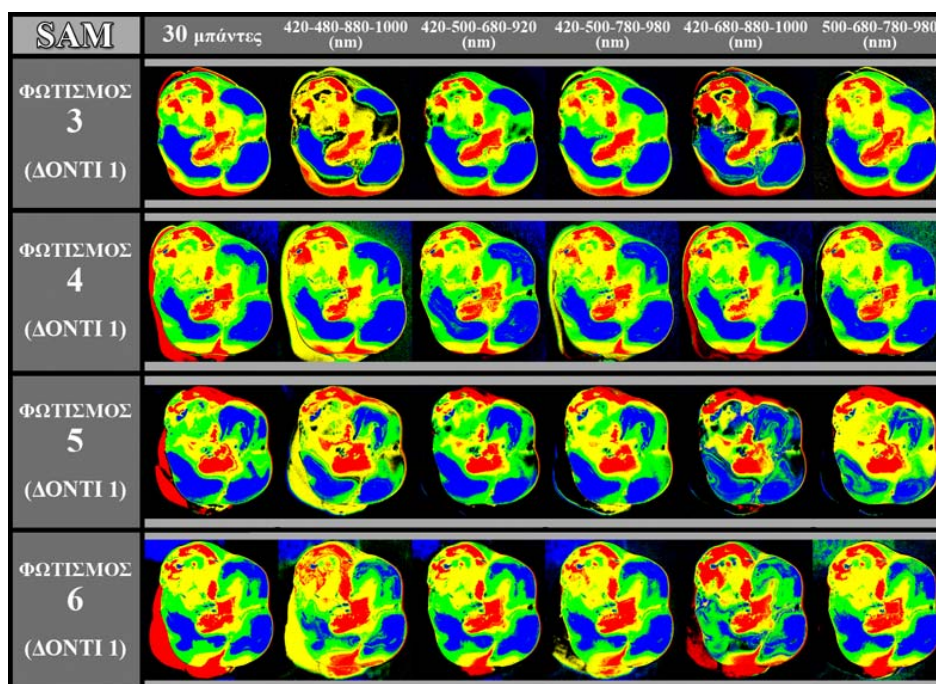
Εικόνα Π10 Εικόνες που προέκυψαν από τον SCM, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε



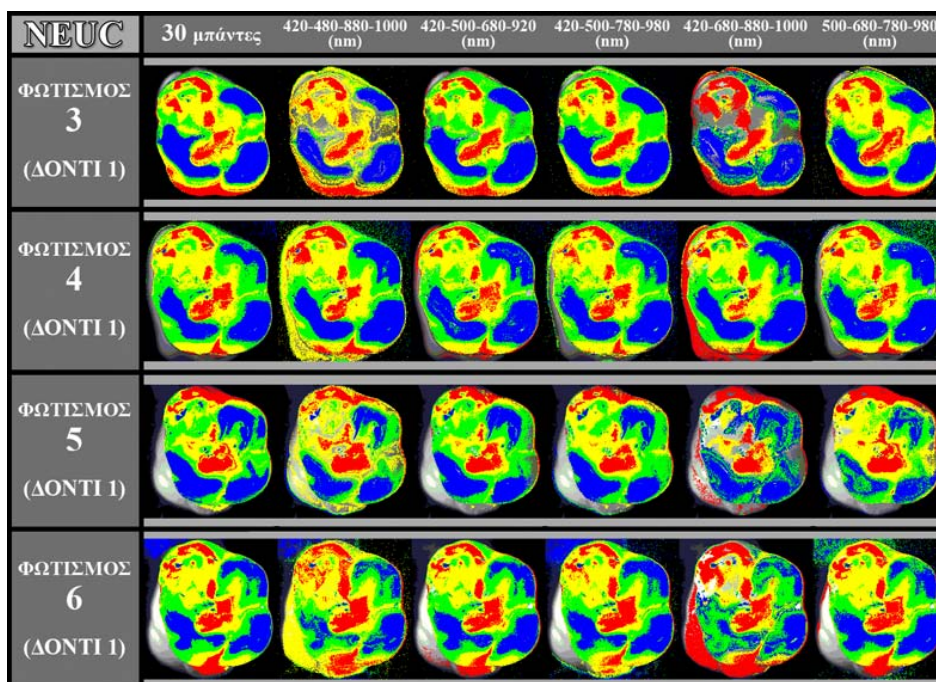
Εικόνα Π11 Εικόνες που προέκυψαν από τον SGA, μειώνοντας τον αριθμό των μπαντών που χρησιμοποιούμε

ο 6^ο ΣΤΑΔΙΟ

Παρουσιάζονται οι χρωματικοί χάρτες που προέκυψαν από εφαρμογή των αλγορίθμων SAM και NEUC, με πέντε συνδυασμούς 4 μπαντών, στις υπόλοιπες τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις φωτισμού για το ένα δόντι, ώστε να μελετήσουμε την επιρροή του φωτισμού και των μειωμένων μπαντών στην εφαρμογή των αλγορίθμων.

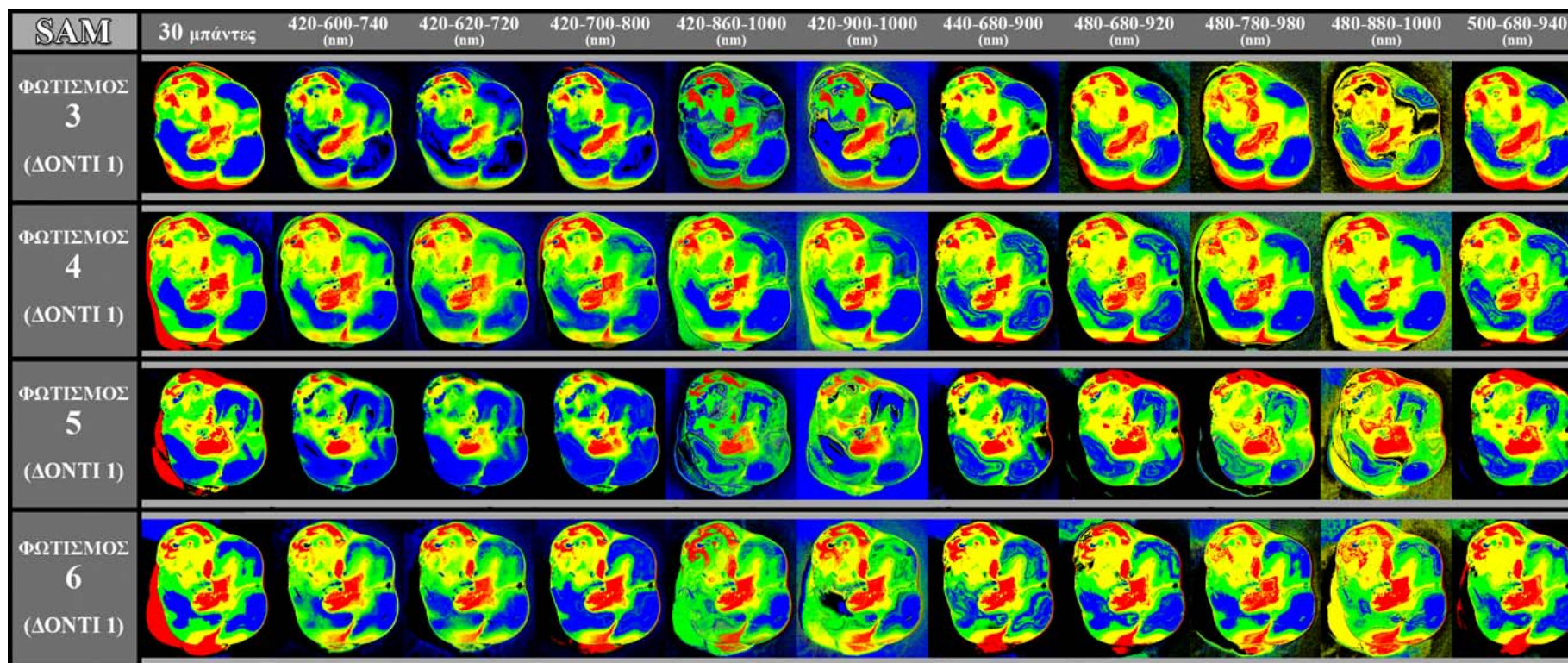


Εικόνα Π12 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 4 μπαντών

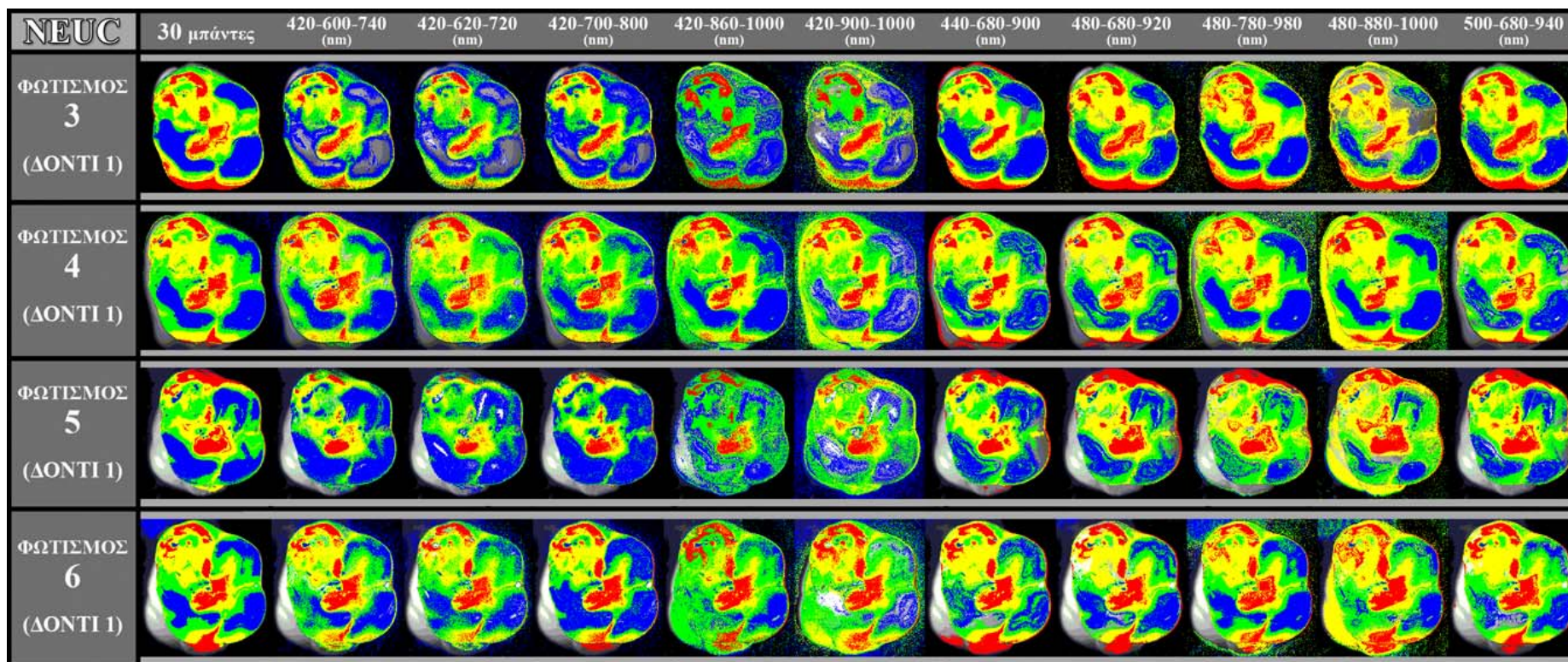


Εικόνα Π13 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 4 μπαντών

Εδώ παρουσιάζονται οι χρωματικοί χάρτες που προέκυψαν από εφαρμογή των αλγορίθμων SAM και NEUC, με δέκα συνδυασμούς 3 μπαντών, στις υπόλοιπες τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις φωτισμού για το ένα δόντι.



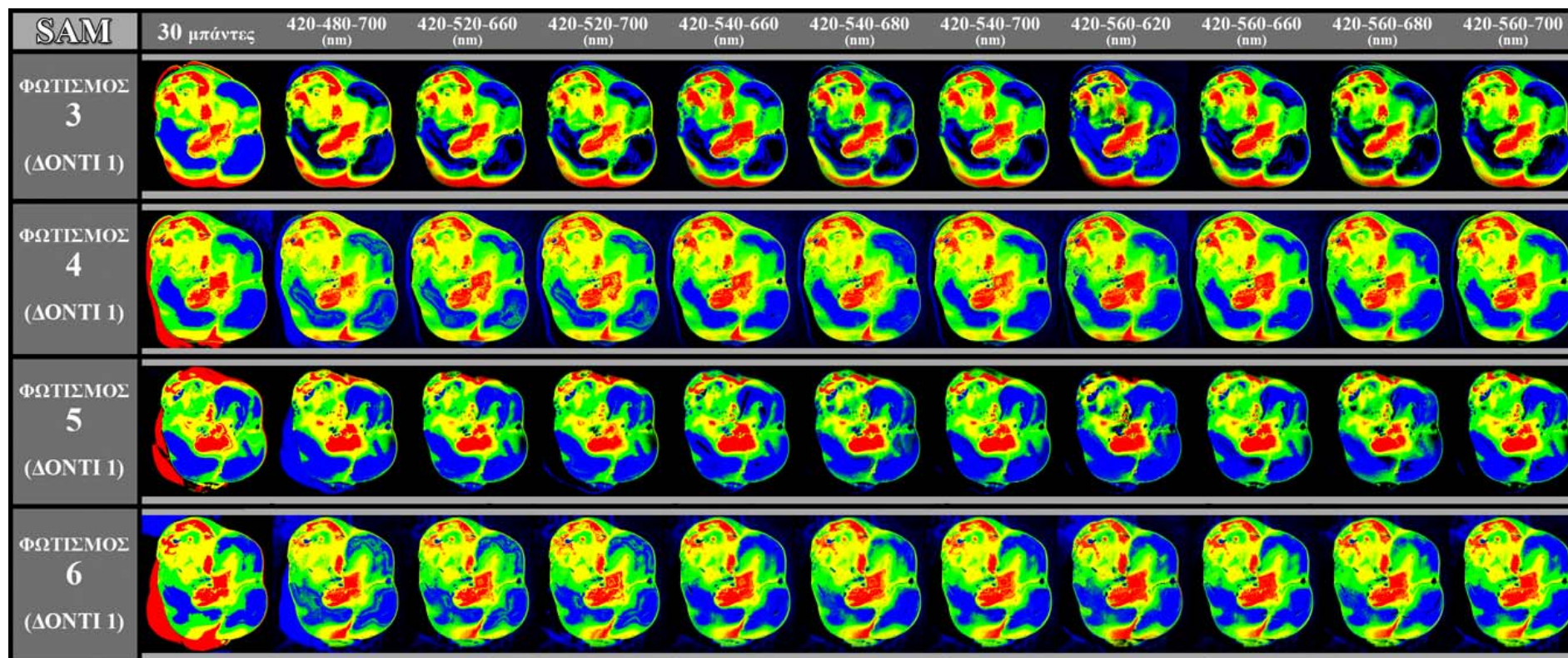
Εικόνα Π14 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών



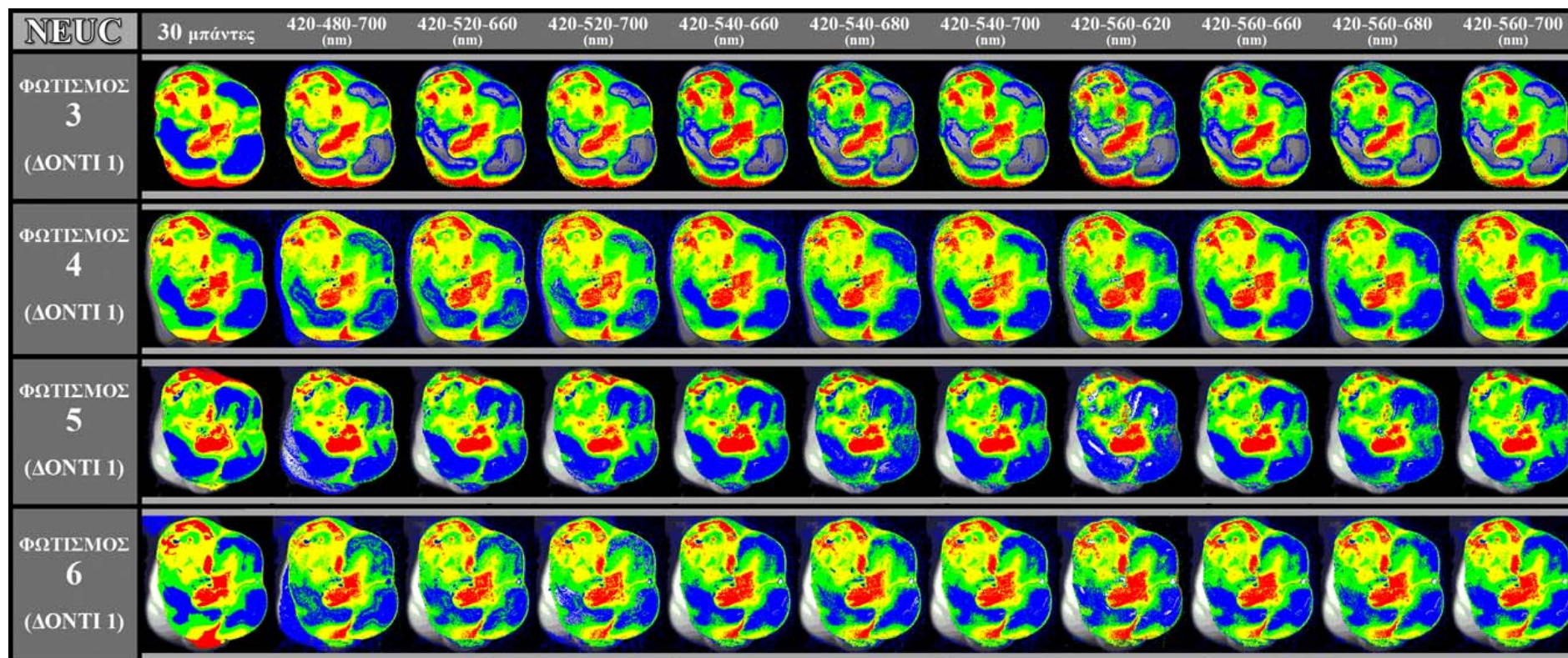
Εικόνα Π15 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών

ο 7^ο ΣΤΑΔΙΟ

Εδώ παρουσιάζονται οι χρωματικοί χάρτες που προέκυψαν από εφαρμογή των αλγορίθμων SAM και NEUC, με δέκα συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα, στις υπόλοιπες τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις φωτισμού για το ένα δόντι.



Εικόνα Π16 Εικόνες που προέκυψαν από τον SAM, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα



Εικόνα Π17 Εικόνες που προέκυψαν από τον NEUC, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς 3 μπαντών στο ορατό φάσμα