



**ΑΝΩΤΑΤΟ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΡΗΤΗΣ**

**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Εφαρμοσμένης Πληροφορικής & Πολυμέσων**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση και επεξεργασία εικόνων από αντικείμενα ιστορικής
αξίας**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ
Μαρία Καρούση Α.Μ.44**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ
Παπαδάκης Βασίλης**

**Ευχαριστώ τον κ. Βασίλη Παπαδάκη
και την κ. Βιβή Πουλή
για την πολύτιμη βοήθεια τους.**

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	6
Το πρόβλημα	7
Δείγματα και συστήματα laser	10
Πειραματική διάταξη.....	11
Περιγραφή μετρήσεων.....	12
Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	18
Δείγμα από αρχαιολογικό χώρο με λεπτή επικάλυψη	19
Νεώτερο δείγμα από μαρμάρινο διάκοσμο	27
Γύψος με άνθρακα.....	36
Λευκό μάρμαρο με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάλυψης αιθάλης.....	42
Ιστογράμματα Μετρήσεων Αντίθεσης	47
Παράρτημα.....	56
Λεξιλόγιο.....	56
Βιβλιογραφία.....	57

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Visible	13
Εικόνα 3: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Infrared 1	14
Εικόνα 4: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Infrared 2	15
Εικόνα 5: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Red	16
Εικόνα 6: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Green	17
Εικόνα 7: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Blue	17
Εικόνα 8: Δείγμα από αρχαιολογικό χώρο	20
Εικόνα 9: Νεώτερο δείγμα από μαρμάρινο διάκοσμο.....	27
Εικόνα 10: Δείγμα Γύψου - Άνθρακα.....	37
Εικόνα 11: Δείγμα λευκού μαρμάρου με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάλυψης αιθάλης.....	43

Πίνακες συστημάτων laser

<i>Πίνακας 1: Παράμετροι των δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα από το αρχαιολογικό χώρο.....</i>	<i>21</i>
<i>Πίνακας 2: Παράμετροι των δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα από το αρχαιολογικό χώρο.....</i>	<i>22</i>
<i>Πίνακας 3: Παράμετροι των δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα από το αρχαιολογικό χώρο.....</i>	<i>24</i>
<i>Πίνακας 4: Παράμετροι των δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα από το αρχαιολογικό χώρο.....</i>	<i>25</i>
<i>Πίνακας 5: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.....</i>	<i>28</i>
<i>Πίνακας 6: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.....</i>	<i>29</i>
<i>Πίνακας 7: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.....</i>	<i>30</i>
<i>Πίνακας 8: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.....</i>	<i>31</i>
<i>Πίνακας 9: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.....</i>	<i>33</i>
<i>Πίνακας 10: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα γύψου και άνθρακα.....</i>	<i>38</i>
<i>Πίνακας 11: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα γύψου και άνθρακα.....</i>	<i>39</i>
<i>Πίνακας 12: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα γύψου και άνθρακα.....</i>	<i>40</i>
<i>Πίνακας 13: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα γύψου και άνθρακα.....</i>	<i>41</i>
<i>Πίνακας 14: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα του μαρμάρου με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάλυψης αιθάλης.....</i>	<i>44</i>
<i>Πίνακας 15: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα του μαρμάρου με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάλυψης αιθάλης.....</i>	<i>45</i>

Πίνακες Μετρήσεων Αντίθεσης

<i>Πίνακας 1: Απεικόνιση αποτελεσμάτων αντίθεσης και ποσοστών καθαρισμού από τον αρχαιολογικό χώρο.....</i>	<i>26</i>
---	-----------

Πίνακας 2: Απεικόνιση αποτελεσμάτων αντίθεσης και ποσοστών καθαρισμού από τον αρχαιολογικό χώρο.....	27
Πίνακας 3: Απεικόνιση αποτελεσμάτων αντίθεσης και ποσοστών καθαρισμού από το νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.....	35
Πίνακας 4: Απεικόνιση αποτελεσμάτων αντίθεσης και ποσοστών καθαρισμού από το νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.....	35

Ιστογράμματα Μετρήσεων Αντίθεσης

Δείγμα από αρχαιολογικό χώρο.....	47
Πίνακας 1 Πίνακας 2	47
Πίνακας 3 Πίνακας 4	47
Πίνακας 5 Πίνακας 6	47
Πίνακας 7 Πίνακας 8	48
Νεώτερο δείγμα από μαρμάρινο διάκοσμο	48
Πίνακας 1 Πίνακας 2	48
Πίνακας 3 Πίνακας 4	48
Πίνακας 5 Πίνακας 6	49
Πίνακας 7 Πίνακας 8	49
Πίνακας 9 Πίνακας 10	49
Πίνακας 11 Πίνακας 12	50
Πίνακας 13 Πίνακας 14	50
Πίνακας 15 Πίνακας 16	50
Πίνακας 17 Πίνακας 18	51
Πίνακας 19 Πίνακας 20	51
Πίνακας 21 Πίνακας 22	51
Πίνακας 23 Πίνακας 24	52
Γύψος με άνθρακα.....	52
Πίνακας 1 Πίνακας 2	52
Πίνακας 3 Πίνακας 4	52
Πίνακας 5 Πίνακας 6	53
Πίνακας 7 Πίνακας 8	53
Πίνακας 9 Πίνακας 10	53
Πίνακας 11 Πίνακας 12	54
Πίνακας 11 Πίνακας 13	54
Πίνακας 14 Πίνακας 15	54
Πίνακας 15 Πίνακας 16	55
Δείγμα με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάλυψης αιθάλης.....	55
Πίνακας 1 Πίνακας 2	55
Πίνακας 3 Πίνακας 4	55

Εισαγωγή

Στις μέρες μας η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς.

Στην εργασία που ακολουθεί θα ασχοληθούμε με αντικείμενα ιστορικής αξίας, και ειδικότερα με μαρμάρινα γλυπτά. Σε αυτά με την πάροδο του χρόνου και εξαιτίας της έκθεσης τους στη ρύπανση του περιβάλλοντος είναι δυνατή η ανάπτυξη μιας σκουρόχρωμης επικάλυψης στην επιφάνεια τους η οποία θα πρέπει να αφαιρεθεί όχι μόνο για αισθητικούς λόγους αλλά και για την καλύτερη διατήρησή τους. Τα τελευταία χρόνια για την αφαίρεση τέτοιων επικαθίσεων χρησιμοποιείται με επιτυχία η ακτινοβολία laser της οποίας την δράση θα επιδιώξουμε να αξιολογήσουμε στην εργασία αυτή.

Στο εργαστήριο οι δοκιμές καθαρισμού θα πραγματοποιηθούν με διαφορετικούς τύπους laser και κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Έτσι θα μπορεί να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα της επέμβασης για τις διαφορετικές παραμέτρους.

Σκοπός μας είναι να βρούμε ένα βέλτιστο επίπεδο καθαρισμού κατά το οποίο θα έχουμε επιτυχημένη απομάκρυνση της κρούστας με τις λιγότερο δυνατές αλλοιώσεις στην επιφάνεια του αντικειμένου. Αυτό μπορούμε να το ελέγξουμε έχοντας σαν σημείο αναφοράς μια περιοχή στην οποία δεν έχει αναπτυχθεί επικάλυψη υπό την καθοδήγηση ενός έμπειρου συντηρητή έργων τέχνης.

Στην εργασία αυτή θα επιλέξουμε 4 διαφορετικά αντικείμενα με διαφόρους τύπους επικαθίσεων (πραγματικές και προσομοιώσεις) στα οποία θα πραγματοποιηθούν οι δοκιμές καθαρισμού που θα οδηγήσουν σε ένα πλήθος διαφορετικών δειγμάτων. Εμείς με την βοήθεια προγραμμάτων ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας θα πάρουμε εικόνες από αυτά σε διαφορές απεικονιστικές μεθόδους (Ultraviolet, Visible, Infrared 1, Infrared 2), αλλά και από τον χρωματικό χώρο του Red, Green, Blue (RGB).

Κατόπιν θα πάρουμε μετρήσεις της έντασης της φωτεινότητας από διάφορα σημεία των δειγμάτων χρησιμοποιώντας το Hue, Saturation, Intensity (HSI), το οποίο είναι μια διαμόρφωση του χρωματικού χώρου RGB. Με αυτές τις μετρήσεις και με την μετέπειτα επεξεργασία που θα κάνουμε με βάση αυτές, θα προσπαθήσουμε να βρούμε μια τιμή για την αντίθεση όπου θα μας καθορίζει όσο το δυνατόν περισσότερο, ποιές παράμετροι του laser δίνουν το καλύτερο αποτέλεσμα για τον καθαρισμό των προς εξέταση αντικειμένων.

Το πρόβλημα

Τα έργα τέχνης και τα αντικείμενα αρχαιολογικής αξίας με την πάροδο του χρόνου μπορεί να εμφανίσουν αλλοίωση στην όψη τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στην έκθεση τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και σε διάφορα κοσμοϊστορικά γεγονότα, όπως πυρκαγιές, σεισμοί, πόλεμοι, αλλά και πολλούς άλλους παράγοντες ανάλογα με το που βρέθηκε το αντικείμενο. Ειδικότερα τα πέτρινα γλυπτά που εκτίθενται σε εξωτερικό περιβάλλον, και όχι στις προστατευόμενες συνθήκες κάποιου μουσείου ή εργαστηρίου, εμφανίζουν μια σκουρόχρωμη επικάλυψη.

Η επικάλυψη αυτή αναπτύσσεται σε περιοχές του αντικειμένου που εκτίθενται άμεσα σε περιβαλλοντικές συνθήκες (βροχή, χιόνι, αέρας κ.λ.π.) και οφείλεται στην διάβρωση της εξωτερικής επιφάνειας εξαιτίας των όξινων στοιχείων (π.χ. όξινη βροχή) και την μετατροπή του ανθρακικού ασβεστίου (κύριο συστατικό της πέτρας) σε θειικό ασβέστιο (γύψος). Η επανακρυστάλλωση του θειικού ασβεστίου στην επιφάνεια του αντικειμένου, που συνοδεύεται και από την παγίδευση σκουρόχρωμων αερογενών σωματιδίων (aerosols), όπως π.χ. σωματίδια από την ατελή καύση του άνθρακα που προέρχονται από την βιομηχανία ή τις εξελατμίσεις των αυτοκινήτων, χώμα, κ.λ.π., οδηγεί στην ανάπτυξη μιας σκουρόχρωμης επικάλυψης συνήθως με μεγάλο πάχος και ανομοιόμορφη δομή.

Η αφαίρεση της επικάλυψης αυτής δεν είναι απαραίτητη μόνο για αισθητικούς λόγους, αλλά και για την καλύτερη διατήρησή τους. Επίσης μας δίνει την δυνατότητα να μπορέσουμε να δούμε την πραγματική κατάσταση στην οποία βρίσκεται η υποκείμενη αυθεντική επιφάνεια. Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες καθαρισμού, από τις οποίες οι πιο συνηθισμένες είναι αυτές που βασίζονται στην χρήση νερού και χημικών. Καθώς επίσης και οι μηχανικές, όπως για παράδειγμα η απόξεση της επιφάνειας είτε με νυστέρια είτε με «αμμοβολή» δηλαδή. Με μικροσκοπικά τμήματα υλικών, όπως υαλοσφαιρίδια κ.λ.π. τα οποία εκτοξεύονται με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα ή και νερού. Αυτές οι μέθοδοι έχουν διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι αδυνατούν να απομακρύνουν την επικάλυψη από το αντικείμενο με ελεγχόμενο τρόπο και έτσι η εφαρμογή τους από μη εξειδικευμένους συντηρητές μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές αλλοιώσεις στην επιφάνεια του.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία των laser και έχουν καθιερωθεί μεθοδολογίες καθαρισμού για την απομάκρυνση διαφόρων ειδών επικαθίσεων από έργα τέχνης και αντικείμενα αρχαιολογικής αξίας

(π.χ. προϊόντα διάβρωσης από μεταλλικά αντικείμενα, επιζωογραφίες και αλλοιωμένα στρώματα βερνικιού σε πίνακες, εικόνες κ.λ.π.) με αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις μεθόδους που προαναφέραμε. (Cooper, M. *Laser Cleaning in Conservation: An Introduction*. In Butterworth Heineman (eds) Oxford. 1998.). Αυτά είναι:

1. **Μη επαφή:** Η ενέργεια που απελευθερώνεται σαν φως από το laser έχει μηδαμινή επαφή με το αντικείμενο και μας επιτρέπει να επεξεργαστούμε ακόμα και εύθραυστα αντικείμενα από απόσταση και χωρίς να τα ακουμπάμε και έτσι χωρίς κίνδυνο περαιτέρω καταστροφής.
2. **Επιλεκτικότητα:** Με την επιλογή του κατάλληλου μήκους κύματος το οποίο απορροφάται επιλεκτικά και μόνο από τις επικαθίσεις, αλλά ελάχιστα από την αυθεντική επιφάνεια, μπορούμε να καθαρίσουμε αυτά τα στρώματα χωρίς να αφαιρέσουμε υλικό από την επιφάνεια του αντικειμένου.
3. **Περιορισμένη εφαρμογή:** Το laser καθαρίζει μόνο εκεί όπου το κατευθύνουμε. Το μέγεθος της δέσμης του μπορεί να είναι από μερικά χιλιοστά έως εκατοστά και αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να μπορούμε να χρησιμοποιούμε το ίδιο εργαλείο για εξαιρετικά ακριβείς εφαρμογές αλλά και για μεγαλύτερης κλίμακας περιπτώσεις.
4. **Άμεσος έλεγχος:** Ο καθαρισμός μπορεί να σταματήσει αμέσως μόλις κλείσουμε το laser, σε αντίθεση π.χ. με τον χημικό καθαρισμό που συνεχίζει να δρα για αρκετό χρόνο μετά την εφαρμογή του ανεξέλεγκτα. Έτσι ο συντηρητής έχει τη δυνατότητα να σταματήσει την εφαρμογή όποτε αυτός θελήσει.
5. **Άμεση ανάδραση:** Η κατάσταση της επιφάνειας που καθαρίζεται παρακολουθείται συνεχώς από τον συντηρητή. Αυτό του επιτρέπει να πάρει αποφάσεις κατά την εφαρμογή αποφεύγοντας ρίσκα ή αμετάκλητες ζημιές στο αντικείμενο.
6. **Περιβάλλον:** Ο καθαρισμός με laser δεν παράγει μεγάλες ποσότητες άχρηστων υλικών παρά μόνο το υλικό που αφαιρείται από το αντικείμενο και αυτό είναι εύκολο να απομακρυνθεί. Δεν χρησιμοποιούνται επικίνδυνα χημικά ή διαλύτες και ο συντηρητής χρειάζεται μόνο ένα ζευγάρι ειδικά γυαλιά και μία μάσκα για να προστατευτεί από τυχόν ατυχήματα που μπορεί να συμβούν.

Ωστόσο για να καταλήξουμε στην διαδικασία του καθαρισμού θα πρέπει να προηγηθεί κάποια διαδικασία μελέτης και αξιολόγησης του αντικειμένου που θα βοηθήσει τον συντηρητή να εκτιμήσει ποιο υλικό πρέπει να αφαιρεθεί και σε ποια ποσότητα, με τέτοιο τρόπο ώστε να μένει ανέπαφη η επιφάνεια του.

Κατά τον καθαρισμό η μη ελεγχόμενη χρήση του laser μπορεί να προκαλέσει υπερκαθαρισμό στο αντικείμενο, που σημαίνει την απομάκρυνση της κρούστας αλλά και την φθορά της επιφάνειάς του. Από την άλλη μεριά μπορεί να προκληθεί ο υποκαθαρισμός του αντικειμένου το οποίο σημαίνει την μη επιτυχημένη απομάκρυνση της. Ο ιδανικότερος τρόπος καθαρισμού θα ήταν η ολοκληρωτική απομάκρυνση των επικαθίσεων χωρίς καμία φθορά στην επιφάνεια του αντικειμένου κάτι που όμως είναι δύσκολο να επιτευχθεί με τις συμβατικές μεθοδολογίες καθαρισμού. Παρόλα αυτά με την ελεγχόμενη χρήση του laser μπορούμε να επιτύχουμε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Εμείς κατά την εργασία μας θα χρησιμοποιήσουμε το Nd:YAG laser σε Q-Switched mode που εκπέμπει στα 355 nm και στα 1064 nm, και με αυτά θα ασχοληθούμε παρακάτω.

Συχνά παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή του laser Q-Switched Nd:YAG στα 1064 nm μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις λίθων και επικαθίσεων, να οδηγήσει στον δυσχρωματισμό της τελικής επιφάνειας προς κίτρινη απόχρωση. Αυτό το διαπιστώνουμε συγκρίνοντας την περιοχή που καθαρίσαμε με την επιφάνεια του αντικειμένου που έχουμε ορίσει σαν επιφάνεια αναφοράς ή ακόμα και με την ίδια επιφάνεια που έχει καθαριστεί με διαφορετικό μήκος κύματος. Σημαντική έρευνα προσπαθεί να εξηγήσει αυτόν τον δυσχρωματισμό ενώ μια πιθανή αιτία φαίνεται να είναι η επιλεκτική αεριοποίηση των σκούρων μορίων που βρίσκονται παγιδευμένα στην επικάλυψη και την δημιουργία κενών. Τα κενά αυτά με την σειρά τους προκαλούν αλλαγή του φάσματος απορρόφησης της επικάλυψης που έχει απομείνει, δίνοντας την εντύπωση ότι η επιφάνεια έχει αποκτήσει μία κιτρίνη απόχρωση.

Από την άλλη η ultraviolet (υπεριώδης) ακτινοβολία που εκπέμπει το laser Q-Switched Nd:YAG laser στα 355 nm απορροφάται το ίδιο από το σύνολο της κρούστας (το «πλαίσιο» (matrix) από γύψο και τα παγιδευμένα σκουρόχρωμα στοιχεία). Αυτό μπορεί να επηρεάσει τον ομοιογενή καθαρισμό της κρούστας ειδικότερα σε περιπτώσεις που το πάχος της είναι ιδιαίτερα ανομοιόμορφο (π.χ. δενδριτική) και να προκαλέσει φαινόμενα υπερκαθαρισμού. Επίσης κατά την χρήση του συγκεκριμένου τύπου laser έχει συχνά αναφερθεί δυσχρωματισμός προς γκρι.

Τελευταία έχει δειχθεί ότι μπορούμε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της εμφάνισης κίτρινης ή / και γκρι απόχρωσης στην επιφάνεια των αντικειμένων κατά τον καθαρισμό τους χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό των 2 ακτινοβολιών που προαναφέραμε. Παρακάτω θα ασχοληθούμε και με τις τρεις περιπτώσεις.

Δείγματα και συστήματα laser

Στην μελέτη αυτή ασχοληθήκαμε τόσο με πραγματικά δείγματα που φέρουν επικαθίσεις από την ρύπανση του περιβάλλοντος όσο και με δείγματα προσομοίωσης που παρασκευάσαμε στο εργαστήριο.

Συγκεκριμένα ασχοληθήκαμε με δυο μαρμάρινα δείγματα το ένα νεώτερο από τον μαρμάρινο διάκοσμο μιας Τράπεζας (νεώτερο δείγμα) σε κεντρική οδική αρτηρία του Ηρακλείου στο οποίο έχει αναπτυχθεί μια ομοιόμορφη λεπτή επικάλυψη σκούρου καφέ χρώματος και το άλλο πιο παλιό με αδρή επιφάνεια από αρχαιολογικό χώρο στο κέντρο της Αθήνας (αρχαίο δείγμα) το οποίο έχει ομοιόμορφη συμπαγή επικάλυψη σκούρου γκρι χρώματος.

Επίσης κάναμε δοκιμές σε ένα δείγμα γύψου με μικρή περιεκτικότητα άνθρακα το οποίο είναι μία απλή προσομοίωση κρούστας για μοντελοποίηση την οποία παρασκευάσαμε στο εργαστήριο. Δηλαδή δημιουργήσαμε μία τεχνητή κρούστα η οποία αποτελούνταν από τα κυριότερα συστατικά που υπάρχουν και στις πραγματικές κρουστές.

Τέλος ασχοληθήκαμε με ένα δείγμα λευκού μαρμάρου με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση αιθάλης, το οποίο όπως και το προηγούμενο παρασκευάστηκε στο εργαστήριο.

Όλα τα παραπάνω δείγματα ακτινοβολήθηκαν με τα συστήματα laser που αναφέρονται στον πίνακα.

Συστήματα Laser		Τύπος:	Μήκη κύματος (nm)	Διάρκεια Παλμού
A1	Modified Spectron, series SL850	Q-switched Nd:YAG	1064	10-20ns
A2			355	10-20ns
B	EL EN, series EOS1000	Long pulse Nd:YAG	1064	Up to 130μs
Γ	EKSPLA SL312	Q-switched Nd:YAG	1064	150ps

Σε όλα τα δείγματα μεταβάλλαμε πολλές φορές την πυκνότητα της ενέργειας και το πλήθος παλμών του laser. Έτσι κάθε δείγμα περιείχε ένα πλήθος από διαφορετικές δόκιμες. Αυτό μας βοήθησε να επιτύχουμε όσο το δυνατόν καλύτερα και αξιόπιστα αποτελέσματα στην εργασία μας και να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τα διάφορα επίπεδα καθαρισμού.

Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε είναι ένα σύστημα πολυφασματικής απεικόνισης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από :

1. High resolution B/W Camera Module
2. Computer
3. Monitor
4. Lenses
5. Hallogen Lamps & Power Supply
6. Mercury Lamp (365nm) & power supply.

Μας παρέχει τις εξής απεικονιστικές μεθόδους (imaging modes):

1. Infrared Band 1 (750nm-950nm)
2. Infrared Band 2 (950nm-1150nm)
3. Infrared Band 3 (1200nm-1550nm)
4. False Color Infrared
5. Visible Reflection
6. Visible Fluorescence
7. Ultraviolet (320nm-400nm)

Από όλες τις παραπάνω μεθόδους απεικόνισης θα χρησιμοποιήσουμε τις Visible Reflection, την Ultraviolet και τις Infrared 1,2 .Με την Visible Reflection βλέπουμε την εικόνα στην ορατή περιοχή του φάσματος και έτσι έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε λεπτομέρειες (π.χ. επιφανειακές αλλοιώσεις) με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, με την Ultraviolet παρατηρούμε την πιο εξωτερική επιφάνεια του δείγματος ενώ με την Infrared 1 προχωράμε βαθύτερα και ακόμα περισσότερο με την Infrared 2.

Με την χρήση του συστήματος πολυφασματικής απεικόνισης μας δίνεται η δυνατότητα να επεξεργαστούμε τις εικόνες των δειγμάτων που επιθυμούμε και να πάρουμε τις κατάλληλες μετρήσεις που θα μας βοηθήσουν στην εργασία μας.

Περιγραφή μετρήσεων

Υπάρχουν πολλές παράμετροι του προγράμματος λειτουργίας του συστήματος οι οποίες επηρεάζουν την λήψη των εικόνων από τα αντικείμενα που θέλουμε να επεξεργαστούμε. Αυτοί είναι η ευαισθησία του ανιχνευτή, τα οπτικά μέσα όπως ο φακός, τα φίλτρα του ορατού και οι διάφορες πηγές φωτός όπως οι λάμπες.

Για να αποφύγουμε λανθασμένη λήψη της εικόνας η οποία αργότερα μπορεί να μας οδηγήσει σε διαγνωστικά λάθη το πρόγραμμα Mu.S.I.S 2007 μας παρέχει τη δυνατότητα να κάνουμε βαθμονόμηση (Calibration).

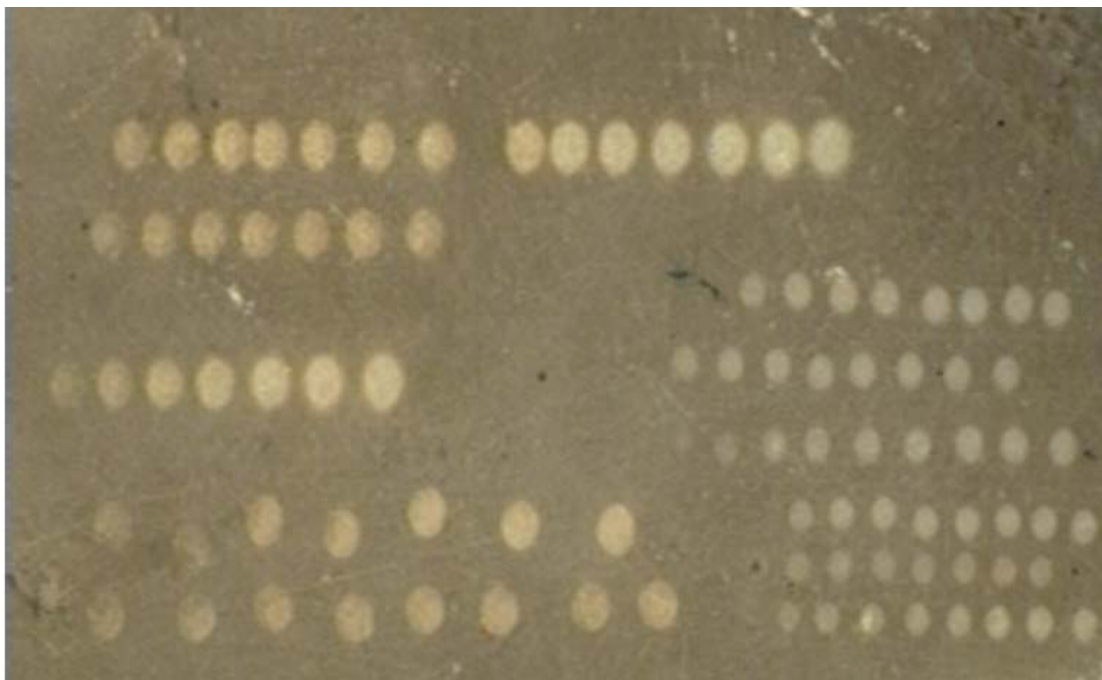
Έτσι μπορούμε να επιτύχουμε την αντιστάθμιση των προηγούμενων παραμέτρων για την ισορροπία του χρώματος, προκειμένου να έχουμε επαναλήψιμες και απόλυτες μετρήσεις του χρώματος των εικόνων που θέλουμε να επεξεργαστούμε. Επίσης μας δίνει τη δυνατότητα να κάνουμε βαθμονόμηση σε κάθε διαθέσιμη μέθοδο απεικόνισης της εικόνας.

Για παράδειγμα η διαδικασία που ακολουθήσαμε για να κάνουμε βαθμονόμηση στη μέθοδο απεικόνισης του ορατού «Visible Reflection» είναι η εξής:

Πατάμε το κουμπί calibration και στη δεξιά πλευρά της οθόνης μας εμφανίζεται ένα παράθυρο που περιέχει δύο κουμπιά με τις εντολές Start και Return. Την ίδια στιγμή ένα μικρό group από pixels αναβοσβήνουν στο κέντρο της εικόνας. Κάτω από το κουμπί Return μας εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο οι τιμές των συντεταγμένων του χρωματικού χώρου RGB (Red, Green, Blue). Πατώντας το ο χρήστης διακόπτει τη διαδικασία της καινούργιας βαθμονόμησης, και το σύστημα επιστρέφει στην αρχική εικόνα με τις προηγούμενες ρυθμίσεις. Πατώντας το κουμπί Start ο χρήστης ακυρώνει όλες τις προηγούμενες ρυθμίσεις οπότε ξεκινάει καινούργια διαδικασία. Ταυτόχρονα δύο νέα κουμπιά εμφανίζονται ανάμεσα στα δύο προϋπάρχοντα, το White και το Black. Το κουμπί Black ενεργοποιεί τη διαδικασία της βαθμονόμησης για το μαύρο όπου καθορίζει το χαμηλότερο επίπεδο της δυναμικής περιοχής του συστήματος. Αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε κλείνοντας την ίριδα του φακού ή το μπροστινό διάφραγμα του, εμποδίζοντας έτσι την είσοδο του φωτός στον ανιχνευτή και στη συνέχεια πατάμε το κουμπί. Τότε εμφανίζεται το μήνυμα «Black calibration» κάτω από το κουμπί Return και διαρκεί για όσο χρόνο χρειάζεται το σύστημα ώστε να εκτελέσει αυτόματα όλες τις απαιτούμενες ρυθμίσεις και αντισταθμίσεις. Όταν αυτό ολοκληρωθεί το προηγούμενο μήνυμα αντικαθίσταται από το «Black calibration end». Μετά τη βαθμονόμηση του μαύρου ακολουθεί η διαδικασία για το άσπρο. Τοποθετούμε ένα άσπρο χαρτί μπροστά στο φακό και ανοίγουμε την ίριδα τόσο ώστε οι τιμές των συντεταγμένων του

RGB να πλησιάζουν την τιμή 245. Πατώντας το κουμπί «White calibration» το σύστημα αυτόματα συντονίζει τις RGB διόδους της κάμερας μέχρι την επίτευξη της χρωματικής ισορροπίας ($R \approx G \approx B$). Αφού τελειώσει αυτή η διαδικασία θα πρέπει να ρυθμίσουμε την ίριδα του φακού ώστε οι τιμές RGB σε πραγματικό χρόνο να πλησιάζουν το 255 που είναι το υψηλότερο επίπεδο της 8-bits δυναμικής περιοχής του συστήματος. Για να αποφύγουμε τον τυχόν κορεσμό του ανιχνευτή καθώς ρυθμίζουμε την ίριδα, μας βοηθούν τα μηνύματα «Open aperture»/«Close aperture». Εμφανίζονται και αυτά στη δεξιά πλευρά της οθόνης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και παύουν να υπάρχουν όταν αυτή ολοκληρωθεί.

Αφού τελειώσουμε με τη διαδικασία της βαθμονόμησης, ξεκινάμε παίρνοντας μία εικόνα στην κανονική της μορφή χρησιμοποιώντας το Visible Reflection από το Imaging Modes Menu. Ένα παράδειγμα της μεθόδου απεικόνισης Visible Reflection είναι η εικόνα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο που ακολουθεί.

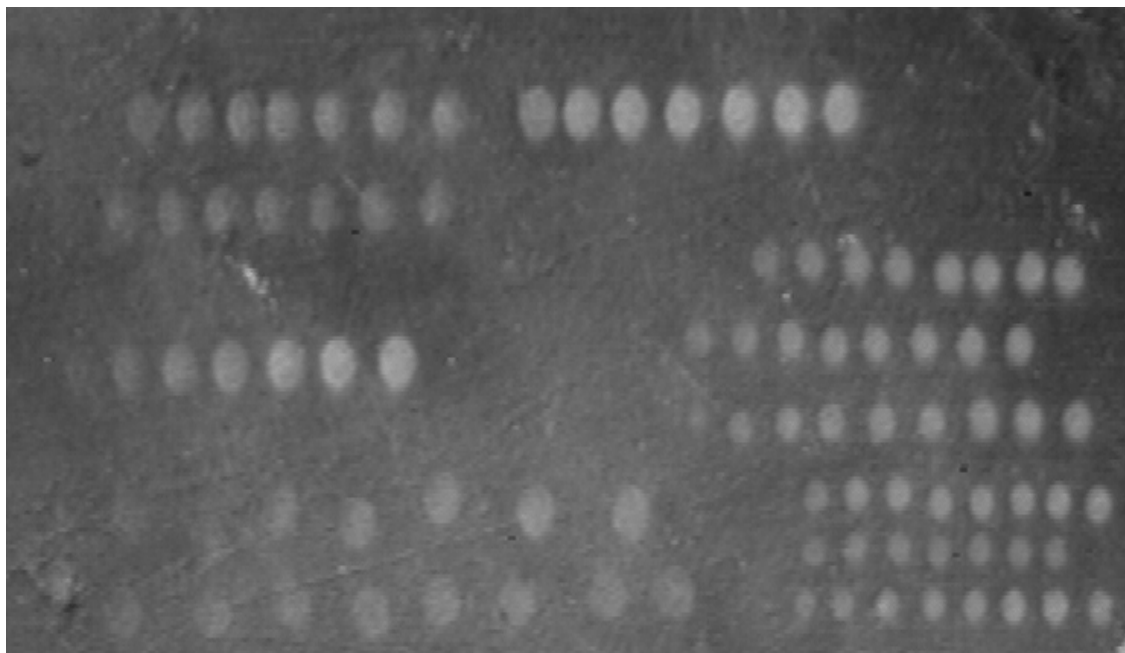


Εικόνα 1: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Visible

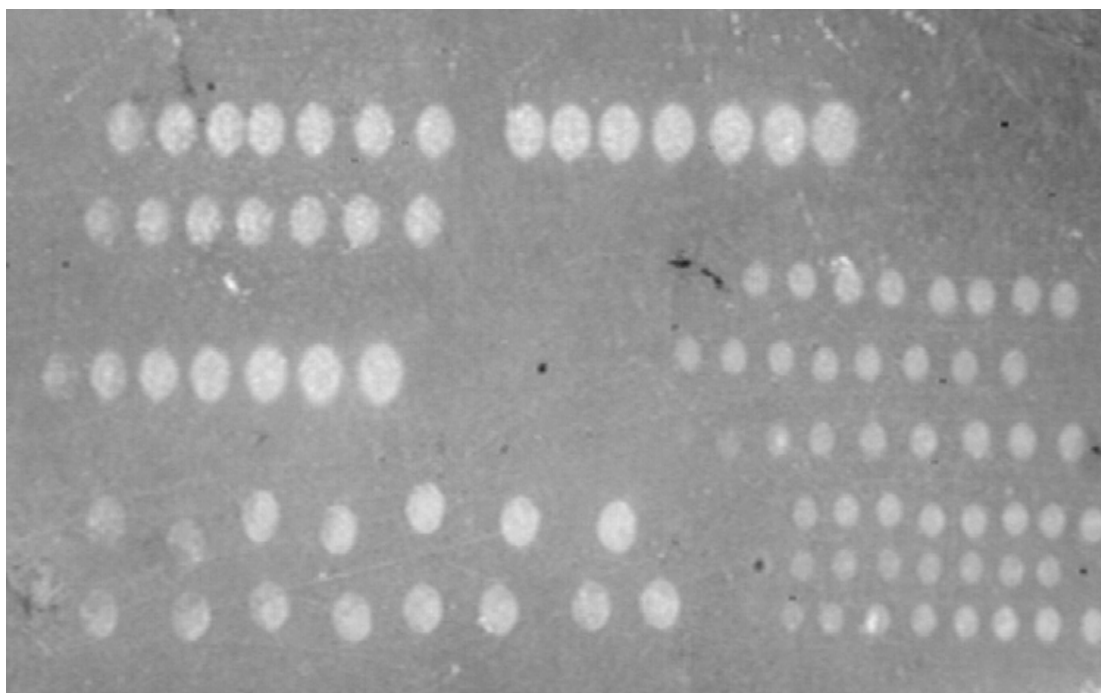
Μετά την λήψη της εικόνας την αποθηκεύουμε για την μετέπειτα επεξεργασία της.

Ανάλογες ρυθμίσεις και ενέργειες όπως αυτές που προαναφέραμε κάνουμε και για τις απεικονιστικές μεθόδους Infrared 1 και Infrared 2. Επίσης εδώ είναι απαραίτητο να ενισχύσουμε τον φωτισμό με λάμπες αλογόνου αλλά και να αλλάξουμε την ευαισθησία της κάμερας για την

σωστή λήψη των εικόνων. Παρακάτω ακολουθούν μερικές από τις εικόνες που πήραμε σε αυτές τις μεθόδους απεικόνισης.



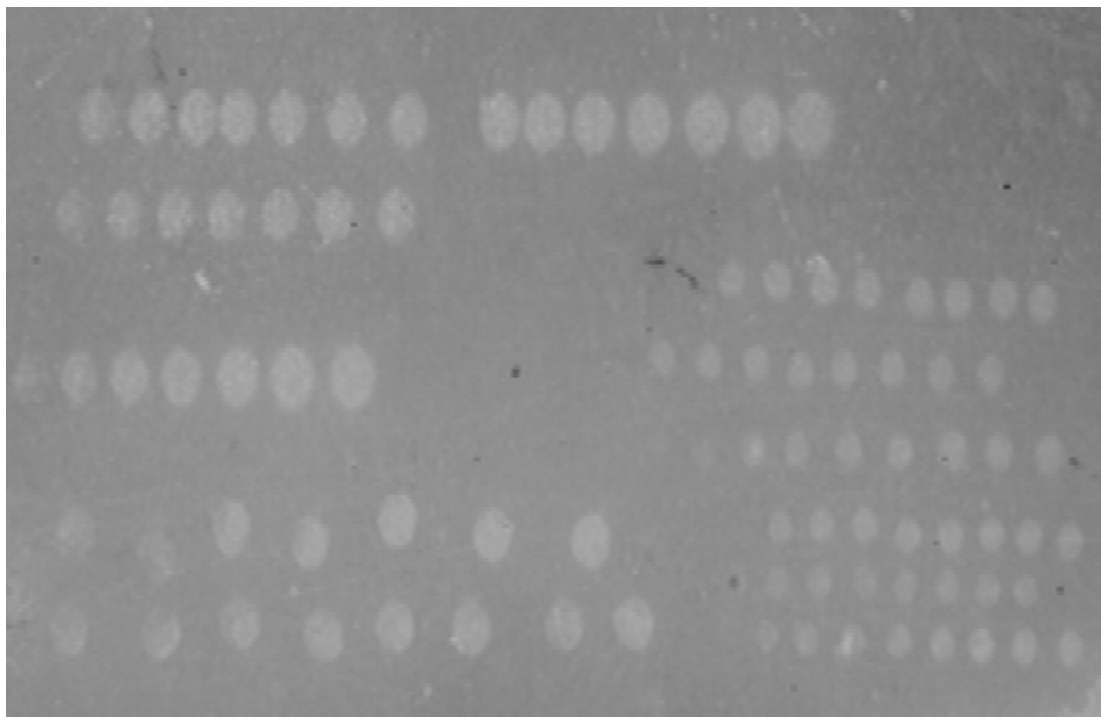
Εικόνα 2: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρينو διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Ultraviolet



Εικόνα 3: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρينو διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Infrared 1

Στην απεικονιστική μέθοδο του Ultraviolet εκτός από όλες τις προηγούμενες ενέργειες θα πρέπει και εδώ να αλλάξουμε την ευαισθησία

της κάμερας αλλά και να φωτίσουμε την εικόνα με την χρήση λάμπας που εκπέμπει υπεριώδη ακτινοβολία. Η εικόνα που ακολουθεί είναι ένα παράδειγμα από τις εικόνες που πήραμε στην συγκεκριμένη απεικονιστική μέθοδο.



Εικόνα 4: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Infrared 2

Αφού αποθηκεύσουμε τις εικόνες που πήραμε ανοίγουμε μία από αυτές χρησιμοποιώντας πάλι το πρόγραμμα λειτουργίας.

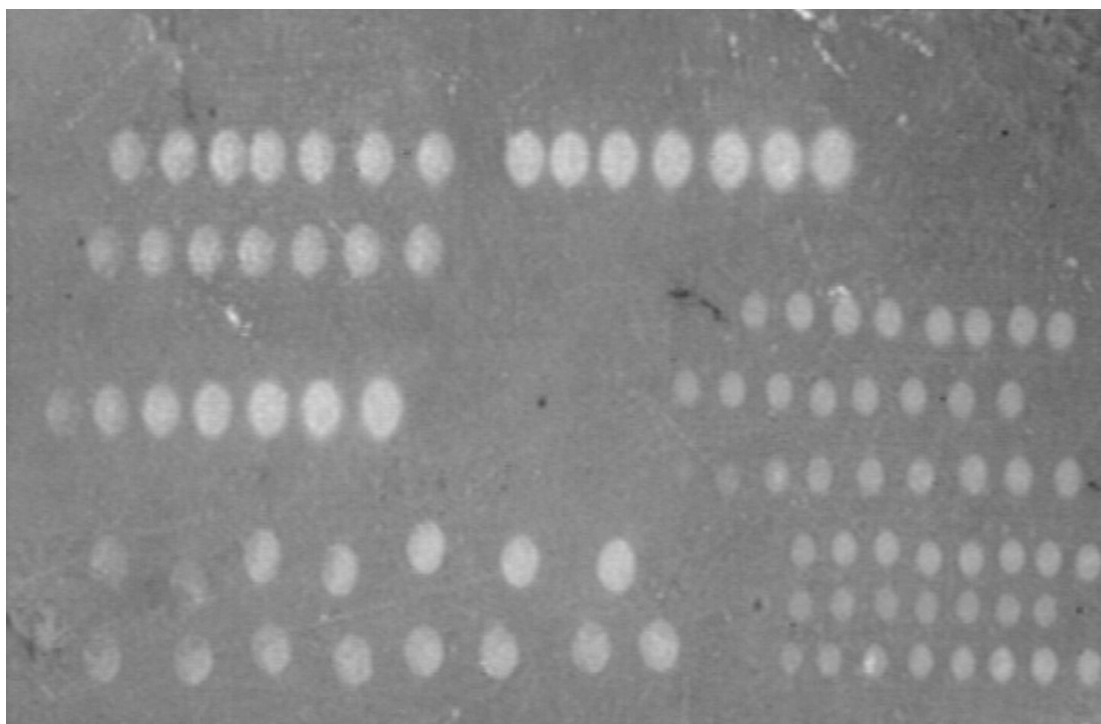
Με την βοήθεια του Color Image Analysis μπορούμε να υπολογίσουμε την απόχρωση (Hue), τον κορεσμό (Saturation) και την ένταση της φωτεινότητας της εικόνας (Intensity), τα οποία είναι μία «διαμόρφωση» του χρωματικού χώρου RGB. Η φωτεινότητα (Intensity) της εικόνας είναι και η παράμετρος που χρειαζόμαστε για να πάρουμε τις μετρήσεις που χρειαζόμαστε για την επεξεργασία της εικόνας που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε.

Το πρόγραμμα λειτουργίας μπορεί από μόνο του να μας υπολογίσει την μέση ένταση της φωτεινότητας της περιοχής της εικόνας που μας ενδιαφέρει. Για να αποφύγουμε όμως τυχόν λάθη λόγω του φωτισμού αλλά και της ανομοιομορφίας της επιφάνειας του αντικειμένου, παίρνουμε μετρήσεις της έντασης της φωτεινότητας από κάθε καθαρισμένη περιοχή καθώς επίσης και από την πλησιέστερη σε αυτήν ακαθάριστη. Επιλέγουμε διάφορα σημεία της περιοχής, κυρίως αυτά που

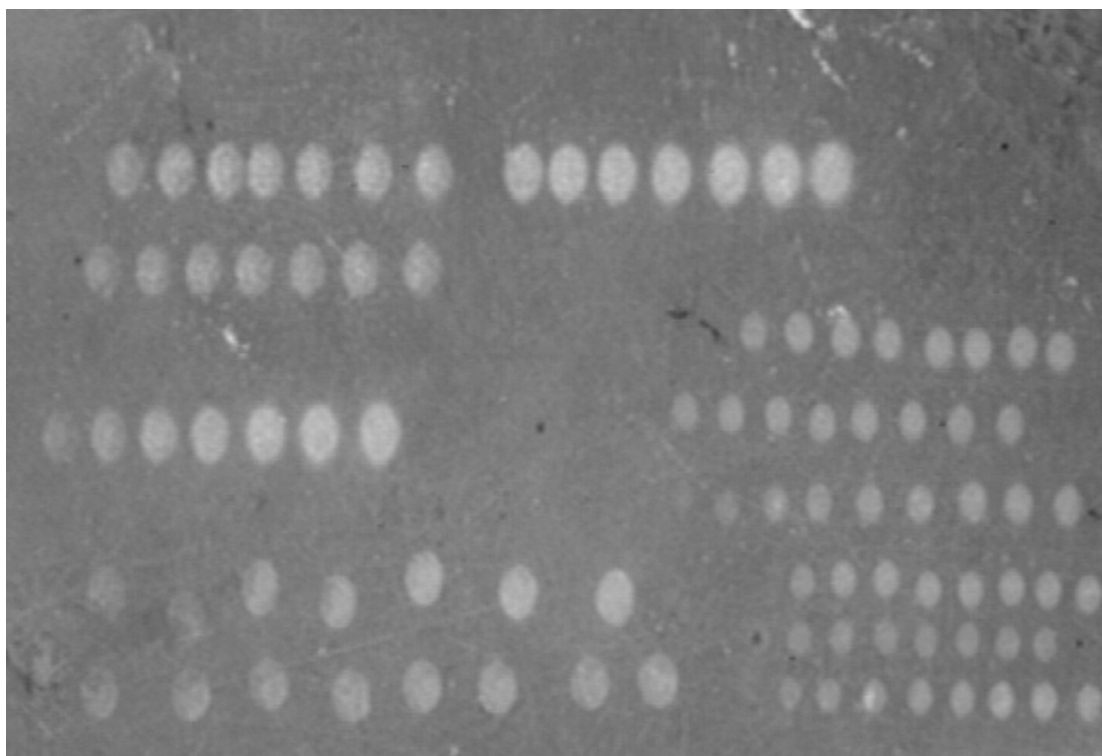
έχουν διαφορετική χρωματική απόχρωση, και καταγράφουμε τις τιμές της έντασης της φωτεινότητας που προκύπτουν.

Ανάλογη διαδικασία μπορούμε να επιτύχουμε και με το πρόγραμμα Image Pro. Σε αυτήν την περίπτωση όμως δεν μπορούμε να μετράμε την ένταση της φωτεινότητας μεμονωμένα από κάθε σημείο, αλλά με την βοήθεια ενός ελλειψοειδούς σχήματος επιλέγουμε όλη την περιοχή που μας ενδιαφέρει και πατώντας την επιλογή Histogram από το Menu Measure παίρνουμε την μέση τιμή της έντασης της φωτεινότητας της. Ακόμα με το Image Pro και χρησιμοποιώντας το color channel από το Menu Process επιτυγχάνουμε την ανάλυση της εικόνας στο χρωματικό χώρο RGB (Red,Green,Blue) κάτι που μας βοηθάει να κατανοήσουμε τις μεταβολές που έχει υποστεί το αντικείμενο μας. Μετέπειτα ακολουθούμε την διαδικασία που προαναφέραμε σχετικά με την καταγραφή των μετρήσεων.

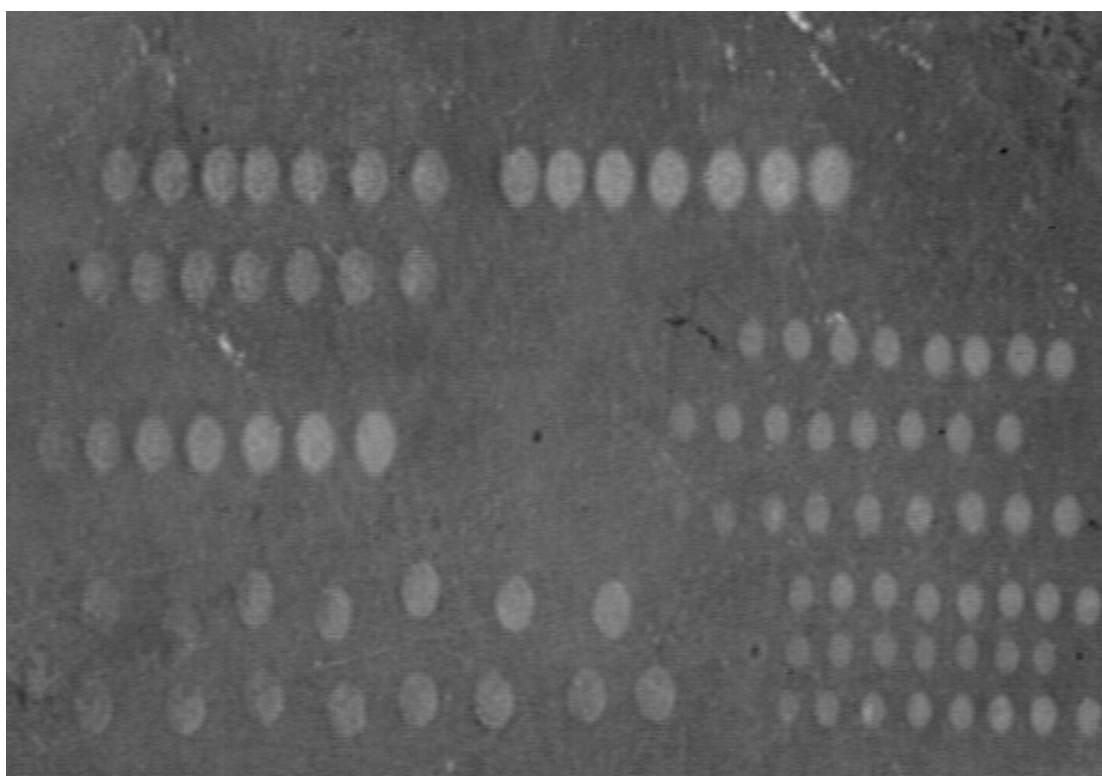
Μερικά από τα δείγματα των εικόνων που πήραμε με την βοήθεια του Image Pro στον χρωματικό χώρο του RGB παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 5: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Red



Εικόνα 6: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Green



Εικόνα 7: Δείγμα από νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο στην απεικονιστική μέθοδο του Blue

Όπως και στις προηγούμενες εικόνες έτσι και τώρα τις αποθηκεύουμε και καταχωρούμε τις τιμές που προέκυψαν κατά τις μετρήσεις της έντασης της φωτεινότητας.

Κατόπιν συγκεντρώνουμε και καταχωρούμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πήραμε από όλες τις εικόνες σε ένα φύλλο Excel. Αν χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις της έντασης της φωτεινότητας που καταγράψαμε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα λειτουργίας του συστήματος πολυφασματικής απεικόνισης και με την μέθοδο που προαναφέραμε, θα πρέπει να υπολογίσουμε το μέσο όρο της έντασης της φωτεινότητας από τα σημεία που μετρήσαμε για να βγάλουμε ένα συγκεντρωτικό αποτέλεσμα. Συγκρίνοντας το με το μέσο όρο που μας δίνει το σύστημα για την ένταση της φωτεινότητας της συγκεκριμένης περιοχής, δεν βλέπουμε ουσιαστικές διαφορές, με ελάχιστες εξαιρέσεις. Επίσης θα πρέπει να υπολογίσουμε την αντίθεση (Contrast), που είναι η διαφορά της έντασης της φωτεινότητας της καθαρισμένης περιοχής με την πλησιέστερη σε αυτή ακαθάριστη, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις που πήραμε.

Αν χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα Image Pro ακολουθούμε πάλι την ίδια διαδικασία με την μόνη διαφορά ότι εδώ δεν χρειάζεται να βρούμε το μέσο όρο για τις τιμές της έντασης της φωτεινότητας της εικόνας που καταχωρούμε στο Excel, αφού όπως προαναφέραμε αυτό μας το παρέχει το πρόγραμμα.

Θα ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία για όλες τις εικόνες από τα αντικείμενα που θέλουμε να επεξεργαστούμε.

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Μελετήσαμε τα δείγματα σύμφωνα με τις μεθόδους που προαναφέραμε. Έτσι με την λήψη των φωτογραφιών στις διάφορες περιοχές του φάσματος και την μέτρηση της αντίθεσης θα προσπαθήσουμε να βρούμε τις βέλτιστες συνθήκες απεικόνισης των ακτινοβολημένων περιοχών, προκειμένου να έχουμε την πιο ξεκάθαρη δυνατή εικόνα για την αξιολόγηση των δοκιμών καθαρισμού τους, καθώς επίσης και την δυνατότητα να μετρήσουμε χρωματικές μεταβολές που μπορεί να προκληθούν κατά τον καθαρισμό τους με laser.

Σε αυτό θα μας βοηθήσουν οι εικόνες που πήραμε από τις διάφορες απεικονιστικές μεθόδους. Με την Visible Reflection βλέπουμε την εικόνα στην ορατή περιοχή του φάσματος και έτσι έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε λεπτομέρειες (π.χ. επιφανειακές αλλοιώσεις) με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, με την Ultraviolet παρατηρούμε την πιο εξωτερική επιφάνεια του δείγματος ενώ με την

Infrared 1 προχωράμε βαθύτερα και ακόμα περισσότερο με την Infrared 2.

Δείγμα από αρχαιολογικό χώρο με λεπτή επικάλυψη

Αρχικά ασχοληθήκαμε με το αρχαίο μάρμαρο . Τα δείγματα που επεξεργαστήκαμε είχαν ακτινοβοληθεί με τις δυο ακτινοβολίες που εκπέμπει το Nd:YAG laser (στο υπέρυθρο στα 1064 nm και στο υπεριώδες στα 355 nm) τόσο μεμονωμένα όσο και σε συνδυασμό σε διάφορες αναλογίες πυκνοτήτων ενέργειας (F_{UV}/F_{IR}). Ο αριθμός των παλμών του laser έμεινε σταθερός σε όλα τα δείγματα αλλά μεταβάλαμε την πυκνότητα της ενέργειας του.

Επίσης σε αυτό το δείγμα η αντίθεση προέκυψε συγκρίνοντας τις μετρήσεις για την ένταση της φωτεινότητας από την καθαρισμένη περιοχή με την ακαθάριστη αλλά και με το μαύρο.



Εικόνα 8: Δείγμα από αρχαιολογικό χώρο

Μήκος κύματος (nm)	Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Σχόλια σχετικά με το σύστημα laser	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
IR 1064 + UV 355	1	0.3+0.3	6	1/1 αναλογία fluence UV / IR	85
UV 355	2	0.3	6		85
IR 1064	3	0.3	6		70
IR 1064 + UV 355	4	0.2+0.2	6	1/1 αναλογία fluence UV / IR	70
UV 355	5	0.2	6		70
IR 1064	6	0.2	6		50
IR 1064 + UV 355	7	0.8+0.4	6	1/2 αναλογία fluence UV / IR	70
UV 355	8	0.4	6		70
IR 1064	9	0.8	6		20
IR 1064 + UV 355	10	0.6+0.3	6	1/2 αναλογία fluence UV / IR	50
UV 355	11	0.3	6		50
IR 1064	12	0.6	6		20

Πίνακας 1: Παράμετροι των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα από το αρχαιολογικό χώρο

Σύμφωνα με τις τιμές της αντίθεσης της καθαρισμένης-ακαθάριστης περιοχής στις δόκιμες 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, παρατηρούμε ότι στις 1, 2, 3, 4, 5, 6, αυτές που ακτινοβολήθηκαν ταυτόχρονα και με τις δύο ακτινοβολίες, δηλαδή οι 1 και 4, η αντίθεση που παρουσιάζουν σε όλες τις φασματικές περιοχές είναι μεγαλύτερη από ότι στις 2,3,5,6, που ακτινοβολήθηκαν μεμονωμένα με κάθε ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές μειώνονται στις περιοχές που ακτινοβολήθηκαν με την UV ακτινοβολία και αυτή η μείωση συνεχίζεται στις περιοχές που ακτινοβολήθηκαν με την IR ακτινοβολία.

Στις δόκιμες 7, 8, 9, 10, 11, 12, παρατηρούμε μία μεγαλύτερη αύξηση της αντίθεσης σε όλες τις φασματικές περιοχές στις 7,11, που ακτινοβολήθηκαν με την UV ακτινοβολία, ενώ μειώνεται σε αυτές που ακτινοβολήθηκαν ταυτόχρονα και με τις δύο καθώς επίσης και με την IR ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτές τις δοκιμές έχει αλλάξει το ποσοστό της πυκνότητας της ενέργειας της επιμέρους δέσμης στον συνδυασμό τους.

Σύμφωνα με τα ποσοστά καθαρισμού που μας δόθηκαν από τον συντηρητή οι δοκιμές 6, 10, 11 είναι ικανοποιητικά καθαρισμένες. Αυτές έχουν ακτινοβοληθεί αντίστοιχα με την IR ακτινοβολία, ταυτόχρονα και με τις δυο ακτινοβολίες και με την UV ακτινοβολία. Ενώ οι περισσότερες από τις υπόλοιπες δοκιμές είναι υπερκαθαρισμένες αφού σε πολλές από

αυτές μπορούμε να διακρίνουμε τους κρυστάλλους του μαρμάρου κάτι που δηλώνει και την καταστροφή της επιφάνειάς του.

Από τις δικές μας μετρήσεις και από τις καμπύλες της αντίθεσης που προκύπτουν από την σύγκριση των ακτινοβολημένων και ακαθάριστων περιοχών, παρατηρούμε ότι σε όλες τις φασματικές περιοχές μόνο στην φασματική περιοχή του Ultraviolet η αντίθεση παρουσιάζει μία αναλογία με τα ποσοστά καθαρισμού που μας δόθηκαν από τον συντηρητή.

Από την άλλη μεριά η αντίθεση που βρήκαμε συγκρίνοντας την ακτινοβολημένη περιοχή με το απόλυτο μαύρο παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά σε όλες τις φασματικές περιοχές και οι τιμές του είναι σχεδόν σταθερές για όλες τις δοκιμές. Παρουσιάζουν πολύ μικρές αλλαγές τις οποίες παρατηρούμε κυρίως στις περιοχές των Ultraviolet και Visible. Αλλά αυτό δεν μας οδηγεί σε κάποιο συμπέρασμα.

Μήκος κύματος (nm)	Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Σχόλια σχετικά με το σύστημα laser	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
IR 1064 + UV 355	13	1.5+0.5	6	1/3 αναλογία fluence UV / IR	85
UV 355	14	0.5	6		85
IR 1064	15	1.5	6		85
IR 1064 + UV 355	16	1.2+0.4	6	1/3 αναλογία fluence UV / IR	85
UV 355	17	0.4	6		85
IR 1064	18	1.2	6		70
IR 1064 + UV 355	19	0.9+0.3	6	1/3 αναλογία fluence UV / IR	70
UV 355	20	0.3	6		70
IR 1064	21	0.9	6		20
IR 1064 + UV 355	22	0.6+0.2	6	1/3 αναλογία fluence UV / IR	50
UV 355	23	0.2	6		20
IR 1064	24	0.6	6		20

Πίνακας 2: Παράμετροι των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα από το αρχαιολογικό χώρο

Οι δοκιμές 13, 14, 15,16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, παρουσιάζουν όλες την ίδια συμπεριφορά στην φασματική περιοχή του Ultraviolet. Δηλαδή οι τιμές της αντίθεσης είναι αυξημένες στις περιοχές που έχουν ακτινοβοληθεί ταυτόχρονα και με τις δυο ακτινοβολίες και μειώνονται στις περιοχές που έχουν ακτινοβοληθεί μεμονωμένα με την UV ακτινοβολία και την IR ακτινοβολία. Οι υπόλοιπες φασματικές περιοχές

έχουν διαφορές από δείγμα σε δείγμα και δεν παρουσιάζουν κάποια ομοιομορφία που να μας οδηγεί σε κάποιο συμπέρασμα.

Πιο αναλυτικά, στις δοκιμές 13, 14, 15, οι τιμές της αντίθεσης στην απεικονιστική μέθοδο των Visible και Infrared 1 είναι σταθερές με μία μικρή μείωση στην τρίτη δοκιμή. Ενώ στην περιοχή του Infrared 2 παρουσιάζουν αυξομειώσεις.

Οι δοκιμές 16, 17, 18, έχουν σε όλες τις φασματικές περιοχές την ίδια συμπεριφορά. Δηλαδή είναι αυξημένη η τιμή της αντίθεσης στις δοκιμές που έχουν ακτινοβοληθεί ταυτόχρονα και με τις δύο ακτινοβολίες και μειώνεται στις δύο δοκιμές που έχουν ακτινοβοληθεί στα 355 nm και στα 1064 nm.

Οι δοκιμές 19, 20, 21, παρουσιάζονται αυξομειώσεις στις τιμές της αντίθεσης σε όλες τις φασματικές περιοχές με εξαίρεση την περιοχή του Ultraviolet όπως αρχικά αναφέραμε. Από την άλλη μεριά στις δοκιμές 22, 23, 24, στην περιοχή του Visible παρατηρούμε την ίδια συμπεριφορά με του Ultraviolet, αλλά στις υπόλοιπες φασματικές περιοχές εμφανίζονται αυξομειώσεις όπως και στις προηγούμενα.

Όλες οι δοκιμές που αναφερθήκαμε παραπάνω, σύμφωνα πάντα με την αξιολόγηση του συντηρητή είναι υπερκαθαρισμένες με εξαίρεση τις 21, 22, 24, που δεν είναι επαρκώς καθαρισμένες. Η 22 είναι η μοναδική ικανοποιητικά καθαρισμένη η οποία έχει καθαριστεί στα 355 nm. Αν παρατηρήσουμε τις καμπύλες των τιμών της αντίθεσης και των ποσοστών καθαρισμού παρατηρούμε συμβατότητα των αποτελεσμάτων μόνο στις δοκιμές 22, 23, 24. Επίσης στις περισσότερες δοκιμές οι τιμές της αντίθεσης στην φασματική περιοχή του Infrared 1 είναι ανάλογες με αυτές των ποσοστών καθαρισμού του συντηρητή.

Συγκρίνοντας τώρα την ακτινοβολημένη περιοχή με το απόλυτο μαύρο παρατηρούμε ότι όπως και στις προηγούμενες δοκιμές η αντίθεση που βρήκαμε παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά σε όλες τις φασματικές περιοχές και οι τιμές του είναι σχεδόν σταθερές για όλες.

Παρουσιάζονται πολύ μικρές αλλαγές κυρίως στις περιοχές των Ultraviolet και Visible.

Μήκος κύματος (nm)	Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Σχόλια σχετικά με το σύστημα laser	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
IR 1064 + UV 355	25	1.12+0.28	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	70
UV 355	26	0.28	6		50
IR 1064	27	1.12	6		50
IR 1064 + UV 355	28	1.46+0.36	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	85
UV 355	29	0.36	6		85
IR 1064	30	1.46	6		50
IR 1064 + UV 355	31	0.8+0.2	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	50
UV 355	32	0.2	6		20
IR 1064	33	0.8	6		20
IR 1064 + UV 355	34	0.4+0.1	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	50
UV 355	35	0.1	6		20
IR 1064	36	0.4	6		20

Πίνακας 3: Παράμετροι των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα από το αρχαιολογικό χώρο

Στις δοκιμές 25, 26, 27 και 28, 29, 30, 34, 35, 36, οι τιμές της αντίθεσης ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά σε όλες τις φασματικές περιοχές. Δηλαδή, όπως παρατηρήσαμε και στις προηγούμενες δοκιμές οι τιμές της αντίθεσης είναι αυξημένες στις περιοχές που έχουν ακτινοβοληθεί ταυτόχρονα και με τις δύο ακτινοβολίες και μειώνονται όταν έχουν ακτινοβοληθεί μεμονωμένα με το UV ή με το IR.

Στις δοκιμές 31, 32, 33, οι τιμές της αντίθεσης στην φασματική περιοχή του Ultraviolet έχουν την ίδια συμπεριφορά με τις προηγούμενες, ενώ οι τιμές στις περιοχές των Visible, Infrared 1 και Infrared 2 παρουσιάζουν αυξομειώσεις.

Σε αυτές τις δοκιμές σε αντίθεση με την προηγούμενη ομάδα δοκιμών που εξετάσαμε υπάρχουν αρκετές οι οποίες είναι ικανοποιητικά καθαρισμένες, σύμφωνα πάντα με την άποψη του συντηρητή. Δηλαδή η δοκιμή 26 που έχει ακτινοβοληθεί με το 355 nm, το 27 και η 30 που έχει ακτινοβοληθεί με το 1064 nm, και η 31 και η 34 που έχουν ακτινοβοληθεί ταυτόχρονα και με τις δυο ακτινοβολίες είναι ικανοποιητικά καθαρισμένες. Οι 25, 28 και 29 είναι υπερκαθαρισμένες. Ενώ όλες οι υπόλοιπες δεν είναι επαρκώς καθαρισμένες.

Επίσης αξιοσημείωτο είναι ότι εδώ παρατηρώντας τις καμπύλες των τιμών της αντίθεσης που έχουν προκύψει από την εργασία μας και των

ποσοστών καθαρισμού που μας έχει δώσει ο συντηρητής διαπιστώνουμε ότι η συμπεριφορά που ακολουθούν συμπίπτει.

Από την άλλη μεριά παρατηρούμε ότι και εδώ όπως και στις προηγούμενες δοκιμές που εξετάσαμε, η αντίθεση που βρήκαμε συγκρίνοντας την ακτινοβολημένη περιοχή με το απόλυτο μαύρο παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά σε όλες τις φασματικές περιοχές και οι τιμές του είναι σχεδόν σταθερές για όλες τις δόκιμες. Οι αλλαγές που παρουσιάζουν είναι πολύ μικρές και συμβαίνουν κυρίως στις περιοχές των Ultraviolet και Visible.

Μήκος κύματος (nm)	Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Σχόλια σχετικά με το σύστημα laser	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
IR 1064 + UV 355	37	Πρώτα IR 1.46 Έπειτα UV 0.46	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	ανομοιομορφία
IR 1064 + UV 355	38	Πρώτα UV 1.46 Έπειτα IR 0.46	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	ανομοιομορφία
IR 1064 + UV 355	39	Πρώτα IR 0.8 Έπειτα UV 0.2	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	ανομοιομορφία
IR 1064 + UV 355	40	Πρώτα UV 0.8 Έπειτα IR 0.2	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	ανομοιομορφία
IR 1064 + UV 355	41	Πρώτα IR 0.4 Έπειτα UV 0.1	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	ανομοιομορφία
IR 1064 + UV 355	42	Πρώτα UV 0.4 Έπειτα IR 0.1	6	1/4 αναλογία fluence UV / IR	ανομοιομορφία

Πίνακας 4: Παράμετροι των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα από το αρχαιολογικό χώρο

Σε αυτές τις δοκιμές εφαρμόστηκαν διαδοχικά και οι δυο ακτινοβολίες. Πιο συγκεκριμένα στις δοκιμές 37, 39, 41, εφαρμόσαμε πρώτα τα 355nm και μετά τα 1064nm. Ενώ στις δοκιμές 38, 40, 42, εφαρμόσαμε πρώτα τα 1064nm και μετά τα 355nm. Εδώ διαπιστώνουμε ότι σε αντίθεση με τα

αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα που έχουμε από την ταυτόχρονη εφαρμογή τους, όταν χρησιμοποιούμε διαδοχικά τις δυο ακτινοβολίες δεν έχουμε το ίδιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι εξαιτίας της ανομοιομορφίας τους δεν ήταν δυνατός ο ορισμός ενός συγκεκριμένου ποσοστού καθαρισμού από τον συντηρητή. Και από την άλλη μπορούμε να το διαπιστώσουμε και εμείς αυτό αφού οι τιμές της αντίθεσης που προκύπτουν από τις μετρήσεις μας, σε όλες τις φασματικές περιοχές, δεν παρουσιάζουν κάποιο συσχετισμό ώστε να μας οδηγήσουν σε κάποιο συμπέρασμα.

Εξετάζοντας πιο προσεκτικά όλες τις δοκιμές και συγκρίνοντας τις τιμές της αντίθεσης που έχουμε βρει με τα ποσοστά καθαρισμού που μας έχει δώσει ο συντηρητής, παρατηρούμε ότι υπάρχει μία σταδιακή αύξηση της αντίθεσης όσο αυξάνεται η ποσότητα του καθαρισμού σε όλες τις φασματικές περιοχές (Visible Reflection, Ultraviolet, Infrared 1, Infrared 2).

Πιο συγκεκριμένα και πάντα σύμφωνα με την γνώμη του συντηρητή που συμβουλευόμαστε οι δοκιμές που υπολογίζεται ότι έχουν καθαριστεί 80% είναι υπερκαθαρισμένες και κατεστραμμένες, 70% είναι υπερκαθαρισμένες, 50% είναι ικανοποιητικές και αυτές που είναι 20% δεν είναι ικανοποιητικά καθαρισμένες.

Αντίθεση

	UV		VIS		IR1		IR2
80%	0.2671	80%	0.0936	80%	0.1141	80%	0.0587
70%	0.1568	70%	0.0690	70%	0.0937	70%	0.0429
50%	0.1232	50%	0.0558	50%	0.0454	50%	0.0522
20%	0.0639	20%	0.0186	20%	0.0334	20%	0.0099

Πίνακας 1: Απεικόνιση αποτελεσμάτων αντίθεσης και ποσοστών καθαρισμού από τον αρχαιολογικό χώρο.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω και θεωρώντας ότι οι δοκιμές που εκτιμάται ότι έχουν καθαριστεί κατά 50% είναι τα καλύτερα καθαρισμένα με το λιγότερο κιτρίνισμα και την λιγότερη φθορά οι ιδανικότερες τιμές που μπορεί να πάρει η αντίθεση είναι για το Ultraviolet (UV): 0.1232 Visible (VIS): 0.0558, Infrared 1 (IR1): 0.0454, Infrared 2 (IR2): 0.0522.

Εδώ διαπιστώνουμε ότι την μεγαλύτερη αντίθεση την βλέπουμε στην περιοχή του Ultraviolet και έχει τιμή 0.1232, οπότε συμπεραίνουμε ότι σε αυτήν την τιμή της αντίθεσης φαίνεται καλύτερα ο καθαρισμός που έχει υποστεί το αντικείμενό μας.

Παράλληλα όμως θέλουμε να διαπιστώσουμε και σε ποιο από τα κανάλια RGB (Red, Green, Blue) φαίνεται καλύτερα η αντίθεση για να συγκρίνουμε

τα αποτελέσματα. Θα ακολουθήσω την ίδια διαδικασία με παραπάνω αλλά μόνο για τα δείγματα που έχουν καθαριστεί 50%.

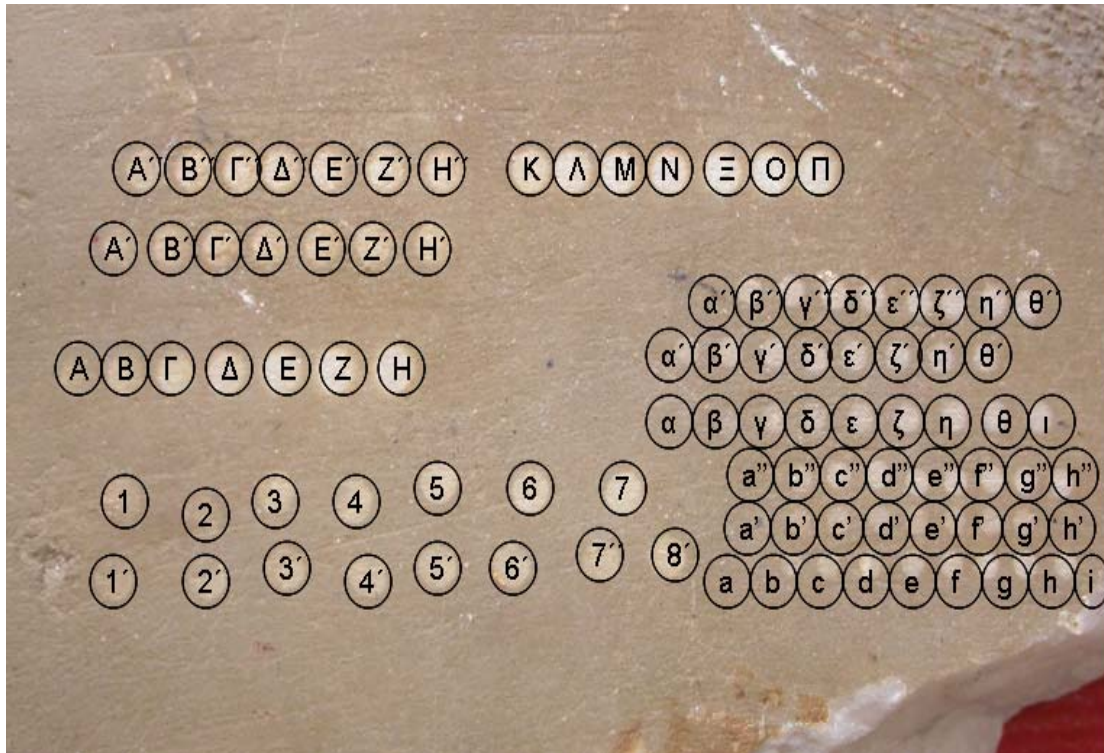
Αντίθεση

	Red		Green		Blue
50%	0,0950	50%	0,0944	50%	0,1166

Πίνακας 2: Απεικόνιση αποτελεσμάτων αντίθεσης και ποσοστών καθαρισμού από τον αρχαιολογικό χώρο.

Εδώ παρατηρούμε ότι οι ιδανικότερες τιμές που μπορεί να πάρει η αντίθεση στην περιοχή του Red είναι: 0,095, του Green: 0,094 και του Blue: 0,117. Διαπιστώνουμε ότι όλες οι περιοχές παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίθεση από την τιμή που βρήκαμε στην περιοχή του Visible.

Νεώτερο δείγμα από μαρμάρινο διάκοσμο



Εικόνα 9: Νεώτερο δείγμα από μαρμάρινο διάκοσμο

Για τις δοκιμές σε αυτό το δείγμα χρησιμοποιήσαμε την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα Q-Switched Nd:YAG laser στα 1064 nm μεταβάλλοντας την πυκνότητα της ενέργειας (J/cm^2) και τον αριθμό των παλμών. Επιπλέον θέλοντας να συγκρίνουμε την επίδραση της διάρκειας του παλμού της ακτινοβολίας στην διαδικασία του καθαρισμού, πραγματοποιήσαμε δοκιμές με διάφορα συστήματα laser

που εκπέμπουν όλα υπέρυθρους παλμούς (στα 1064 nm) με διαφορετική διάρκεια παλμού:

- 1) 150 ps στις δοκιμές Α-Π, Α'-Η, Α''-Η'',
- 2) 10-20 ns στις δοκιμές '1- 8, 1'-8', και
- 3) 130 μs στις δοκιμές α-ι, α'-θ', α''-θ''.

Ακολουθήσαμε αυτήν μέθοδο για να μπορέσουμε να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ξεκάθαρα αποτελέσματα σχετικά με τις μεταβολές και τις αντιδράσεις που παρουσιάζουν τα διάφορα υλικά που αποτελούν τις κρούστες καθώς και το ίδιο το υλικό για δέσμες laser με ίδιο μήκος κύματος αλλά διαφορετική διάρκεια παλμού και έτσι να αξιολογήσουμε την επίδραση της διάρκειας του παλμού στον καθαρισμό.

α) Δοκιμές με ΥΕ παλμούς διάρκειας 150 ps.

Αρχικά στις δοκιμές που ακολουθούν (Α-Η) οι οποίες ακτινοβολήθηκαν με υπέρυθρη ακτινοβολία με διάρκεια παλμού 10-20 ns, αλλάξαμε μόνο την πυκνότητα της ενέργειας αφήνοντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	διάρκεια παλμού (s)	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
Α	0,21	6	150ps	10
Β	0,42	6	150ps	20
Γ	0,60	6	150ps	40
Δ	0,71	6	150ps	50
Ε	0,93	6	150ps	70
Ζ	1,14	6	150ps	80
Η	1,33	6	150ps	90

Πίνακας 5:Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεότερο μαρμάρινο διάκοσμο

Παρατηρούμε ότι αυτές οι δοκιμές, Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ, Η, Θ, σε όποια φασματική περιοχή και αν τις μελετήσαμε παρουσιάζεται μία σταδιακή αύξηση των τιμών της αντίθεσης όσο αυξανόταν η πυκνότητα της ενέργειας.

Συγκρίνοντας την συμπεριφορά που ακολουθούν οι τιμές τις αντίθεσης με τα ποσοστά καθαρισμού που μας έχει δώσει ο συντηρητής βλέπουμε ότι οι συμπεριφορές τους συμπίπτουν. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα ήταν σχεδόν ιδανικά.

Στις επόμενες δοκιμές για τρεις επιλεγμένες τιμές πυκνότητας ενέργειας(0,42, 0,60 και 1,33) μεταβάλλαμε τον αριθμό των παλμών (1 έως 15).

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	διάρκεια παλμού (s)	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
A'	0,42	1	150ps	10
B'	0,42	2	150ps	20
Γ'	0,42	3	150ps	30
Δ'	0,42	4	150ps	30
E'	0,42	5	150ps	30
Z'	0,42	10	150ps	40
H'	0,42	15	150ps	20
A''	0,60	1	150ps	20
B''	0,60	2	150ps	30
Γ''	0,60	3	150ps	45
Δ''	0,60	4	150ps	50
E''	0,60	5	150ps	80
Z''	0,60	10	150ps	85
H''	0,60	15	150ps	80
K	1,33	1	150ps	50
Λ	1,33	2	150ps	60
M	1,33	3	150ps	85
N	1,33	4	150ps	90
Ξ	1,33	5	150ps	90
O	1,33	10	150ps	90
Π	1,33	15	150ps	95

Πίνακας 6: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεότερο μαρμάρινο διάκοσμο

Όπως παρατηρούμε οι δοκιμές A', B', Γ', Δ', E', Z', H', στην φασματική περιοχή του Ultraviolet παρουσιάζουν μία αύξηση της αντίθεσης μέχρι το Γ', η οποία στη συνέχεια μειώνεται. Σε όλες τις άλλες φασματικές περιοχές Visible, Infrared 1 και Infrared 2 η αντίθεση αυξάνεται σχεδόν σταθερά. Αυτό μπορεί να συμβαίνει γιατί η τιμή της πυκνότητας της ενέργειας είναι σχετικά χαμηλή και δεν παρατηρούμε καμία ουσιαστική μεταβολή μετά την δοκιμή Γ' παρά την αύξηση των παλμών. Από την άλλη μεριά η αύξηση της αντίθεσης που έχουμε στις υπόλοιπες φασματικές περιοχές μπορεί να οφείλεται σε αλλαγές οι οποίες δεν είναι ορατές στο ανθρώπινο μάτι αφού όπως προαναφέραμε με αυτές μπορούμε να εξετάσουμε τις μεταβολές που μπορεί να υποστεί το αντικείμενο βαθύτερα από την επιφάνεια του.

Στις δοκιμές A'', B'', Γ'', Δ'', E'', Z'', H'', παρατηρούμε την ίδια συμπεριφορά. Δηλαδή μία αύξηση στην αντίθεση σε όλες τις φασματικές περιοχές, με μόνη εξαίρεση τις δοκιμές Z'', H'', όπου παρατηρούμε μία μείωση. Αυτό μπορεί να οφείλετε στον υπερκαθαρισμό του μαρμάρου μετά από τη δοκιμή E''.

Στις δοκιμές Κ, Λ, Μ, Ν, Ξ, Ο, Π, όπου χρησιμοποιήθηκε μια σχετικά μεγάλη τιμή πυκνότητας ενέργειας ($1,33 \text{ J/cm}^2$), παρατηρούμε μία σταδιακή αύξηση της αντίθεσης με μία μικρή μείωση στη δοκιμή Ξ στην περιοχή του Ultraviolet, ενώ σε όλες τις άλλες φασματικές περιοχές τα επίπεδα της αντίθεσης είναι σχεδόν σταθερά. Αυτό είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι με εξαίρεση την πρώτη δοκιμή οι υπόλοιπες είναι υπερκαθαρισμένες.

β) δοκιμές με ΥΕ παλμούς διάρκειας 10-20 ns.

Στις δοκιμές που ακολουθούν αρχικά μεταβάλαμε την πυκνότητα της ενέργειας αφήνοντας σταθερό τον αριθμό των παλμών. Μετά παρατηρώντας τα αποτελέσματα και σύμφωνα πάντα και με την γνώμη του συντηρητή επιλέξαμε το μέγεθος της πυκνότητας της ενέργειας που μας έδινε τα καλύτερα δυνατόν αποτελέσματα ($0,60 \text{ J/cm}^2$) και μεταβάλλαμε τον αριθμό των παλμών.

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm^2)	Αριθμός παλμών	διάρκεια παλμού (s)	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
1	0,21	6	10-20ns	5
2	0,42	6	10-20ns	5
3	0,60	6	10-20ns	30
4	0,71	6	10-20ns	30
5	0,93	6	10-20ns	40
6	1,15	6	10-20ns	50
7	1,33	6	10-20ns	50
1'	0,60	1	10-20ns	10
2'	0,60	2	10-20ns	15
3'	0,60	3	10-20ns	25
4'	0,60	4	10-20ns	35
5'	0,60	5	10-20ns	40
6'	0,60	7	10-20ns	50
7'	0,60	10	10-20ns	40
8'	0,60	15	10-20ns	50

Πίνακας 7: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεότερο μαρμάρινο διάκοσμο

Στις δοκιμές 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, στις οποίες μεταβάλαμε την πυκνότητα της ενέργειας παρατηρούμε γενικότερα μια αύξηση της αντίθεσης στην περιοχή του Ultraviolet. Παρόμοια συμπεριφορά έχουν και οι δοκιμές στο Visible. Ενώ στο Infrared 1 και στο Infrared 2 παρατηρούμε σταδιακή αύξηση μέχρι την πέμπτη δοκιμή και μετά σταθεροποίηση των τιμών της αντίθεσης. Αυτό συμπίπτει και με τα ποσοστά καθαρισμού αφού οι δοκιμές 6,7 είναι και οι δύο ικανοποιητικά καθαρισμένες(50%)

Από την άλλη μεριά στις δοκιμές 1', 2', 3', 4', 5', 6', 7', 8', όπου μεταβάλαμε τον αριθμό των παλμών, η αντίθεση παρουσιάζει αύξηση σε όλες τις φασματικές περιοχές εκτός από την περιοχή του Ultraviolet που παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις μέχρι τη δοκιμή 4'. Ενώ στις δοκιμές που την ακολουθούν οι τιμές της αντίθεσης σχεδόν σταθεροποιούνται. Παρόμοια διαπίστωση είχαμε κάνει και παραπάνω στις δοκιμές Α', Β', Γ', Δ', Ε', Ζ', Η', που επίσης μεταβάλαμε τον αριθμό των παλμών. Για άλλη μία φορά παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα μας συμπίπτουν με τα ποσοστά καθαρισμού.

γ) δοκιμές με ΥΕ παλμούς διάρκειας 130 μs.

Η ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και για τις επόμενες δοκιμές για ΥΕ παλμούς laser διάρκειας 130 μs. Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση λεπτού στρώματος νερού κατά την διαδικασία καθαρισμού (δοκιμές a-i, a'-h', a''-h'').

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	διάρκεια παλμού (s)	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
α	4,1	6	130 μs	5
β	6,1	6	130 μs	10
γ	8,1	6	130 μs	20
ζ	10	6	130 μs	30
ε	12	6	130 μs	40
ζ	14	6	130 μs	50
η	16	6	130 μs	50
θ	18	6	130 μs	60
ι	20	6	130 μs	60
α'	12	1	130 μs	20
β'	12	2	130 μs	30
γ'	12	3	130 μs	40
δ'	12	4	130 μs	40
ε'	12	5	130 μs	40
ζ'	12	7	130 μs	50
η'	12	10	130 μs	60
θ'	12	15	130 μs	50
α''	16	1	130 μs	20
β''	16	2	130 μs	30
γ''	16	3	130 μs	40
δ''	16	4	130 μs	40
ε''	16	5	130 μs	50
ζ''	16	7	130 μs	60
η''	16	10	130 μs	70
θ''	16	15	130 μs	70

Πίνακας 8: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεότερο μαρμάρινο διάκοσμο

Στις δοκιμές α, β, γ, δ, ε, ζ, η, θ και ι, η αντίθεση αυξάνεται σταθερά σε όλες της περιοχές του φάσματος ακολουθώντας την ίδια συμπεριφορά. Σε αυτό συμφωνούν και τα ποσοστά καθαρισμού, τα οποία ακολουθούν εξίσου αυξητική πορεία. Επομένως, όπως και στις δοκιμές Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ, Η, Θ, θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα μας είναι ιδανικά.

Οι δοκιμές α', β', γ', δ', ε', ζ', η', θ', παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά σε όλες τις φασματικές περιοχές. Δηλαδή έχουμε μία σταδιακή αύξηση της αντίθεσης μέχρι και τη δοκιμή γ', ενώ μετά η καμπύλη των τιμών της αντίθεσης είναι σχεδόν σταθερή. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα ποσοστά καθαρισμού τα οποία μας δείχνουν ότι υπάρχει αύξηση του καθαρισμού σε όλες τις δοκιμές.

Στις δοκιμές α'', β'', γ'', δ'', ε'', ζ'', η'', έχουμε μία σταδιακή αύξηση της αντίθεσης σε όλες τις φασματικές περιοχές, και εδώ τα αποτελέσματα μας συμπίπτουν με τα ποσοστά καθαρισμού.

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	διάρκεια παλμού (s)	Σύστημα laser	Εκτίμηση ποσοστού καθαρισμού %
a	4,1	6	150 μs	with water	2
b	6,1	6	150 μs	with water	20
c	8,1	6	150 μs	with water	30
d	10	6	150 μs	with water	40
e	12	6	150 μs	with water	40
f	14	6	150 μs	with water	50
g	16	6	150 μs	with water	70
h	18	6	150 μs	with water	60
i	20	6	150 μs	with water	60
a'	8,1	1	150 μs	with water	5
b'	8,1	2	150 μs	with water	20
c'	8,1	3	150 μs	with water	30
d'	8,1	4	150 μs	with water	30
e'	8,1	5	150 μs	with water	30
f'	8,1	7	150 μs	with water	40
g'	8,1	10	150 μs	with water	40
h'	8,1	15	150 μs	with water	40
a''	16	1	150 μs	with water	25
b''	16	2	150 μs	with water	35
c''	16	3	150 μs	with water	40
d''	16	4	150 μs	with water	40
e''	16	5	150 μs	with water	40
f''	16	7	150 μs	with water	50
g''	16	10	150 μs	with water	60
h''	16	15	150 μs	with water	60

Πίνακας 9: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο

Στις δοκιμές a, b, c, d, e, f, g, h, i, μέχρι τη δοκιμή c έχουμε μία σταθερή αύξηση της αντίθεσης, σε όλες τις φασματικές περιοχές. Μετά την τρίτη δοκιμή όμως οι τιμές της αντίθεσης στην περιοχή του Infrared2 παραμένουν σχεδόν σταθερές ενώ στις υπόλοιπες φασματικές περιοχές μειώνονται στη τέταρτη δοκιμή και μετά αυξάνονται πάλι ως τη δοκιμή g όπου μειώνεται ξανά, με εξαίρεση τις τιμές στην περιοχή του Ultraviolet που συνεχίζουν να αυξάνονται. Αυτή ακανόνιστη συμπεριφορά πιθανότατα οφείλεται στον υπερκαθαρισμό των τελευταίων δοκιμών. Όπως και στις προηγούμενες δοκιμές, έτσι και στις δοκιμές a', b', c', d', e', f', g', h', έχουμε πάλι μία αύξηση της αντίθεσης ως την τρίτη δοκιμή ενώ μετά παρατηρούμε μείωση της αντίθεσης η οποία σταθεροποιείται στις υπόλοιπες δοκιμές με εξαίρεση την τελευταία όπου παρουσιάζει μία αύξηση στην περιοχή του Ultraviolet. Σε αυτήν την περίπτωση όμως σύμφωνα με τα ποσοστά καθαρισμού δεν υπάρχει υπερκαθαρισμός οπότε

δεν μπορούμε να εξηγήσουμε την διαφορά στην συμπεριφορά των τιμών της αντίθεσης.

Τέλος οι δοκιμές a'', b'', c'', d'', e'', f'', g'', h'', παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με τις πρώτες δοκιμές αυτής της ομάδας δοκιμών.

Ενώ αυτή η ομοιότητα της συμπεριφοράς της αντίθεσης μέχρι την τρίτη δοκιμή θα μπορούσε να μας οδηγήσει σε κάποιο συμπέρασμα δυστυχώς οι παράμετροι του laser που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαφορετικοί.

Παρατηρώντας όλες τις δοκιμές διαπιστώνουμε ότι καθώς αυξάνεται η πυκνότητα της ενέργειας ή ο αριθμός των παλμών του laser, αυξάνεται και το επίπεδο του καθαρισμού. Δηλαδή έχουμε μεγαλύτερη επιτυχία στην απομάκρυνση της επικάλυψης, κάτι που εν μέρη ήταν αναμενόμενο. Τα αποτελέσματα ήταν πιο ομαλά όταν μεταβάλαμε μόνο την ενέργεια της πυκνότητας. Φυσικά είχαμε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και όταν αυξάναμε τους παλμούς αλλά υπήρχαν και αρκετές εξαιρέσεις.

Γενικότερα παρατηρούμε ότι από το σύνολο των δοκιμών που εξετάσαμε οι περισσότερες δοκιμές που είχαν καθαριστεί επιτυχώς και παρουσίαζαν και ομαλή συμπεριφορά στις καμπύλες της αντίθεσης, σχεδόν σε όλες τις φασματικές περιοχές, είχαν καθαριστεί με το σύστημα laser Nd:YAG διάρκειας παλμού 130 μs. Επίσης στα δείγματα A, B, Γ, Δ, E, Z, H, Θ, παρατηρήσαμε ότι δημιουργήθηκε λιγότερο κιτρίνισμα από τα υπόλοιπα που καθαρίστηκαν με το σύστημα laser Nd:YAG διάρκειας παλμού 150 ps.

Μία άλλη παρατήρηση που κάναμε ήταν ότι κατά τις δοκιμές καθαρισμού του μαρμάρου με την χρήση του laser Nd:YAG διάρκειας παλμού 130 μs παρά τα επιτυχημένα αποτελέσματα που μας έδωσε εμφανίστηκε μία γκρι απόχρωση στην επιφάνεια του.

Όπως και στο δείγμα του μαρμάρου από αρχαιολογικό χώρο έτσι και εδώ θα συγκρίνουμε τα ποσοστά καθαρισμού με τις τιμές της αντίθεσης σε όλες τις φασματικές περιοχές για να βρούμε τις καλύτερες τιμές που μπορεί να πάρει η αντίθεση. Παρόλο που σε αυτές τις δοκιμές επειδή αλλάξαμε περισσότερες παραμέτρους του laser από ότι στο προηγούμενο δείγμα έχουμε περισσότερα ποσοστά καθαρισμού, και σε αυτό το δείγμα θεωρούμε ότι το ιδανικό επίπεδο καθαρισμού είναι στο 50%. και άρα οι δοκιμές που βρίσκονται κάτω από 50% θεωρούνται επαρκώς καθαρισμένες και όσες είναι επάνω από αυτό το ποσοστό είναι υπερκαθαρισμένες ή και, κατεστραμμένες.

Αντίθεση

	UV		VIS		IR1		IR2
2%	-0,0472	2%	-0,0460	2%	-0,0485	2%	-0,0245
5%	-0,0087	5%	-0,0030	5%	0,0004	5%	0,0022
10%	-0,0174	10%	-0,023	10%	-0,0236	10%	-0,0076
15%	0,0761	15%	0,0862	15%	0,0802	15%	0,0337
20%	-0,0774	20%	-0,0843	20%	-0,0886	20%	-0,0368
25%	-0,0563	25%	-0,0569	25%	-0,0523	25%	-0,0173
30%	-0,0572	30%	-0,0590	30%	-0,0676	30%	-0,0250
35%	0,0013	35%	0,0165	35%	0,0167	35%	0,0078
40%	-0,0639	40%	-0,0587	40%	-0,0577	40%	-0,0227
45%	-0,1304	45%	-0,1221	45%	-0,1321	45%	-0,0580
50%	-0,0631	50%	-0,0490	50%	-0,0467	50%	-0,0175
60%	-0,1282	60%	-0,1224	60%	-0,1080	60%	-0,0409
70%	-0,1417	70%	-0,1431	70%	-0,1213	70%	-0,0523
80%	-0,1859	80%	-0,1486	80%	-0,1455	80%	-0,0642
85%	-0,2137	85%	-0,1634	85%	-0,1523	85%	-0,0653
90%	-0,2578	90%	-0,1936	90%	-0,1690	90%	-0,0732
95%	-0,3009	95%	-0,2015	95%	-0,1722	95%	-0,0642

Πίνακας 3: Απεικόνιση αποτελεσμάτων αντίθεσης και ποσοστών καθαρισμού από το νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.

Οπότε θεωρώντας ότι ο καλύτερος καθαρισμός επιτυγχάνεται στο 50% οι ιδανικότερες τιμές που μπορεί να πάρει η αντίθεση είναι για το Ultraviolet (UV): -0,0631, για το Visible (VIS): -0,0490, για το Infrared 1 (IR1): -0,0467 και για το Infrared 2 (IR2): -0,0175. Διαπιστώνουμε ότι, σε αντίθεση με το προηγούμενο δείγμα του αρχαιολογικού χώρου, εδώ η μεγαλύτερη αντίθεση υπάρχει στην περιοχή του Ultraviolet και έχει τιμή 0.0631, οπότε συμπεραίνουμε ότι σε αυτήν την τιμή της αντίθεσης φαίνεται πιο καθαρά η επέμβαση.

Εξετάζοντας τις τιμές που παίρνει η αντίθεση στα κανάλια RGB (Red, Green, Blue) στις περιοχές που έχουν καθαριστεί 50% προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Αντίθεση

	Red		Green		Blue
50%	-0,1860	50%	-0,1985	50%	-0,2022

Πίνακας 4: Απεικόνιση αποτελεσμάτων αντίθεσης και ποσοστών καθαρισμού από το νεώτερο μαρμάρινο διάκοσμο.

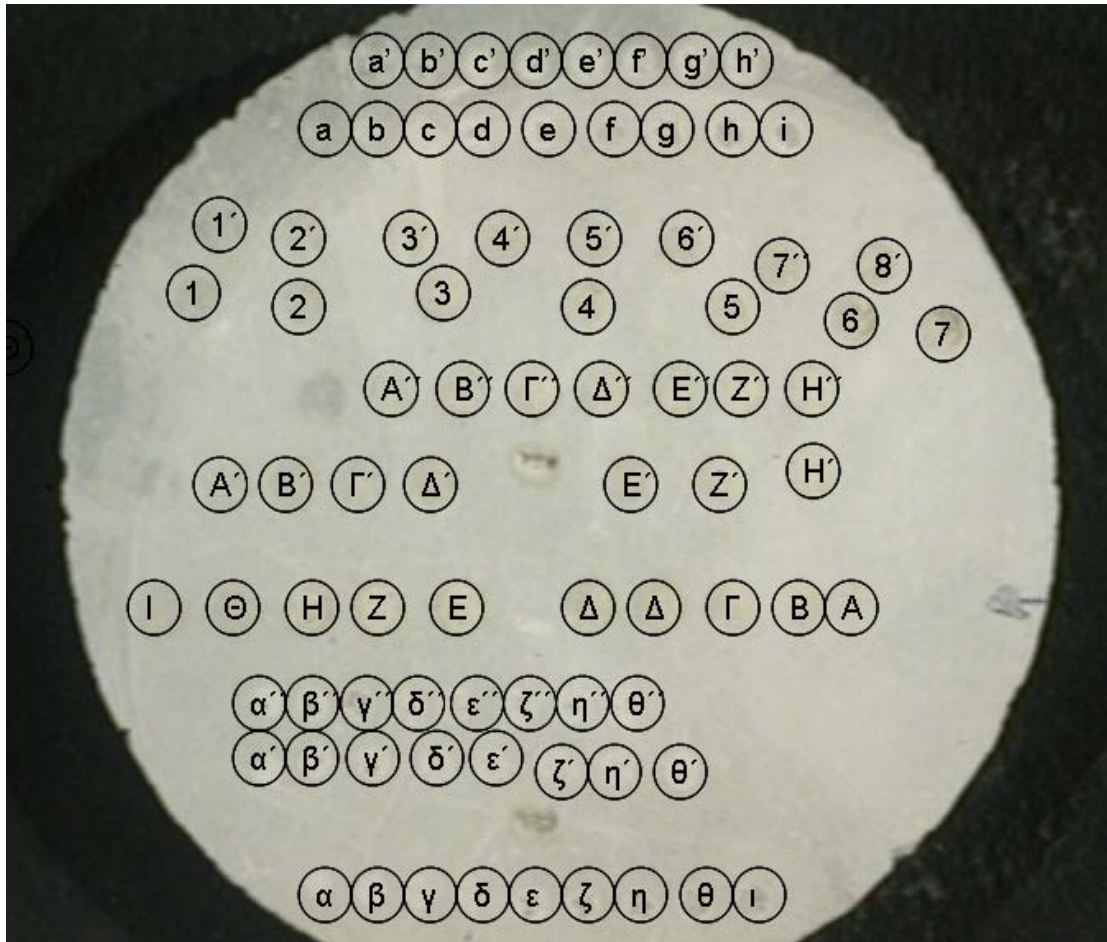
Παρατηρούμε ότι πάλι όπως και στο δείγμα της από τον αρχαιολογικό χώρο οι τιμές τις αντίθεσης σε όλα τα χρωματικά κανάλια είναι μεγαλύτερη από την τιμή που έχει στην φασματική περιοχή του Ultraviolet, στην οποία θεωρήσαμε ότι εκεί φαίνεται καλύτερα ο καθαρισμός.

Και στα δυο προηγούμενα δείγματα παρατηρήσαμε ότι οι τιμές τις αντίθεσης μετά το 50% είναι σχεδόν σταθερές. Οι βέλτιστες τιμές είναι στο 50% και βρίσκονται στις φασματικές περιοχές του Ultraviolet και του Infrared 1. Στις δόκιμες που κάναμε στον χρωματικό χώρο του RGB παρατηρήσαμε ότι και εδώ στα δείγματα που εξετάσαμε μετά το 50% επικρατεί ισορροπία στις τιμές της αντίθεσης. Οπότε συμπεραίνουμε ότι τα δείγματα που βρίσκονται πάνω από το 50% είναι κατεστραμμένα.

Γύψος με άνθρακα

Παρακάτω θα ασχοληθούμε με το δείγμα του γύψου και άνθρακα που όπως προαναφέραμε παρασκευάσαμε στο εργαστήριο. Προσπαθήσαμε να δημιουργήσουμε μια προσομοίωση επικαθίσης με συστατικά που αποτελούν και τις πραγματικές επικαθίσεις για να μπορέσουμε να μελετήσουμε την αλληλεπίδραση των διαφορετικών τύπων laser με τα συστατικά της επικαθίσης και άρα να κατανοήσουμε τον μηχανισμό απομάκρυνσης.

Σε αυτό το δείγμα χρησιμοποιήσαμε υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα laser Nd:YAG με διαφορετικές τιμές διάρκειας παλμού (10-20ns, 150ps, 130μs). Κατά τη δοκιμή μας μεταβάλαμε την πυκνότητα ενέργειας (J/cm^2) και τον αριθμό των παλμών.



Εικόνα 10: Δείγμα Γύψου - Άνθρακα

Στις δοκιμές που ακολουθούν για κάθε διαφορετικό σύστημα laser Nd:YAG (με διαφορετική διάρκεια παλμού) αρχικά μεταβάλλαμε την πυκνότητα της ενέργειας, αφήνοντας σταθερό τον αριθμό των παλμών του laser. Αργότερα για μια επιλεγμένη τιμή πυκνότητας της ενέργειας και μεταβάλαμε τον αριθμό των παλμών (από 1-15).

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Διάρκεια παλμού
A	0,21	6	150 ps
B	0,421	6	150 ps
Γ	0,596	6	150 ps
Δ	0,713	6	150 ps
Δ	0,713	6	150 ps
E	0,935	6	150 ps
Z	1,146	6	150 ps
H	1,333	6	150 ps
Θ	0,465	6	150 ps
A'	0,465	1	150 ps
B'	0,465	2	150 ps
Γ'	0,465	5	150 ps
Δ'	0,465	3	150 ps
E'	0,465	4	150 ps
Z'	0,465	7	150 ps
H'	0,465	10	150 ps
Θ'	0,465	15	150 ps
A''	0,596	1	150 ps
B''	0,596	2	150 ps
Γ''	0,596	3	150 ps
Δ''	0,596	4	150 ps
E''	0,596	5	150 ps
Z''	0,596	7	150 ps
H''	0,596	10	150 ps
Θ''	0,596	15	150 ps

Πίνακας 10:Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα γύψου και άνθρακα

Στις δοκιμές A, B, Γ, Δ, E, Z ,H, Θ, I, η αντίθεση στις φασματικές περιοχές των Ultraviolet και Visible ακολουθεί σταδιακή αύξηση μέχρι την τέταρτη δοκιμή. Μετά ακολουθεί μια μείωση στις επόμενες δύο δοκιμές και μετά παρουσιάζεται πάλι αύξηση. Όλες οι τιμές που παίρνει η αντίθεση είναι πάνω από το μηδέν. Από την άλλη μεριά η αντίθεση στις φασματικές περιοχές των Infrared 1 και Infrared 2 παίρνει τιμές κάτω από το μηδέν και η συμπεριφορά που ακολουθούν αυξάνεται σταδιακά μέχρι το Z δείγμα και μετά μειώνεται.

Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζουν και οι δοκιμές A', B', Γ', Δ', E', Z', H', Θ'. Δηλαδή η αντίθεση στις φασματικές περιοχές των Ultraviolet και Visible έχει τιμές πάνω από το μηδέν και ακολουθεί μία αυξομειωτική πορεία, ενώ η αντίθεση στις Infrared 1 και Infrared 2 έχει μία σχεδόν σταδιακή μείωση ξεκινώντας με τιμές πάνω από το μηδέν για την πρώτη δοκιμή και συνεχίζοντας με τις υπόλοιπες τιμές κάτω από το μηδέν.

Όμως και οι δοκιμές Α'', Β'', Γ'', Δ'', Ε'', Ζ'', Η'', δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές. Η συμπεριφορά στις Ultraviolet και Visible είναι σχεδόν η ίδια, αλλά και στις φασματικές περιοχές των Infrared 1 και Infrared 2 η συμπεριφορά των καμπυλών συμπίπτει. Η αντίθεση ξεκινάει με τιμές πάνω από το μηδέν για την πρώτη δοκιμή και μετά παίρνει τιμές κάτω από το μηδέν που ακολουθούν μία σταδιακή αύξηση χωρίς ιδιαίτερες αποκλίσεις.

Παρατηρούμε ότι αυτή η ομάδα δοκιμών παρουσιάζει μια ομοιομορφία σχετικά με την συμπεριφορά που ακολουθούν οι καμπύλες τους με τις τιμές της αντίθεσης, αν και σε όλες τις περιπτώσεις οι παράμετροι δοκιμών είναι διαφορετικοί.

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Διάρκεια παλμού
1	0,21	6	10 to 20 ns
2	0,421	6	10 to 20 ns
3	0,596	6	10 to 20 ns
4	0,713	6	10 to 20 ns
5	0,935	6	10 to 20 ns
6	1,146	6	10 to 20 ns
7	1,333	6	10 to 20 ns
1'	0,421	1	10 to 20 ns
2'	0,421	2	10 to 20 ns
3'	0,421	3	10 to 20 ns
4'	0,421	4	10 to 20 ns
5'	0,421	5	10 to 20 ns
6'	0,421	7	10 to 20 ns
7'	0,421	10	10 to 20 ns
8'	0,421	15	10 to 20 ns

Πίνακας 11: Παράμετροι δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα γύψου και άνθρακα

Για τις δοκιμές 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, μπορούμε να πούμε ότι η αντίθεση στην φασματική περιοχή του Ultraviolet και του Visible ακολουθούν γενικά μία ανοδική πορεία, ενώ οι άλλες περιοχές στην αρχή ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά αλλά μόνο μέχρι τη δοκιμή 3, μετά η συμπεριφορά της καμπύλης της αντίθεσης είναι ακανόνιστη. Δηλαδή παρουσιάζει αυξήσεις και μειώσεις.

Αλλά και στις δοκιμές 1', 2', 3', 4', 5', 6', 7', 8', παρατηρούμε την ίδια σχεδόν συμπεριφορά στις καμπύλες τις αντίθεσης σε όλες τις φασματικές περιοχές η οποία δεν μας οδηγούν σε κάποιο συμπέρασμα.

Οι τιμές της αντίθεσης σε αυτήν την ομάδα των δοκιμών είναι όλες πάνω από το μηδέν.

Παρατηρώντας όμως πιο προσεκτικά τις δοκιμές διαπιστώνουμε ότι ειδικά στις δοκιμές 6, 7, έχουν παρουσιαστεί μεγάλα κενά από την αφαίρεση του υλικού συγκριτικά με τα υπόλοιπα δείγματα.

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Διάρκεια παλμού
α	4,1	6	130 μs
β	6,1	6	130 μs
γ	8,1	6	130 μs
ζ	10	6	130 μs
ε	12	6	130 μs
ζ	14	6	130 μs
η	16	6	130 μs
θ	18	6	130 μs
ι	20	6	130 μs
α'	12	1	130 μs
β'	12	2	130 μs
γ'	12	3	130 μs
δ'	12	4	130 μs
ε'	12	5	130 μs
ζ''	12	7	130 μs
η'	12	10	130 μs
θ'	12	15	130 μs
α''	16	1	130 μs
β''	16	2	130 μs
γ''	16	3	130 μs
δ''	16	4	130 μs
ε''	16	5	130 μs
ζ''	16	7	130 μs
η''	16	10	130 μs
θ''	16	15	130 μs

Πίνακας 12: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα γύψου και άνθρακα

Στις δοκιμές α, β, γ, δ, ε, ζ, η, θ, ι, παρατηρούμε ότι στην περιοχή του Ultraviolet οι τιμές ταλαντεύονται πάνω και κάτω από το μηδέν αλλά στις τελευταίες τέσσερις δοκιμές ακολουθούν μια ανοδική πορεία πάνω από το μηδέν. Παρόμοια συμπεριφορά στις τελευταίες τέσσερις δοκιμές παρατηρούμε και στην περιοχή του Visible. Στις υπόλοιπες φασματικές περιοχές οι τιμές της αντίθεσης είναι κάτω από το μηδέν και γενικότερα παρουσιάζουν μια ακανόνιστη συμπεριφορά με αυξήσεις και μειώσεις. Στις δοκιμές α', β', γ', δ', ε', ζ', η', θ', παρατηρούμε πάλι μια ταλάντωση των τιμών της αντίθεσης στην περιοχή του Ultraviolet πάνω και κάτω από το μηδέν. Αλλά και στις υπόλοιπες περιοχές οι τιμές της αντίθεσης

παρουσιάζουν ακανόνιστη συμπεριφορά με αυξήσεις και μειώσεις, με τη διαφορά όμως ότι όλες οι τιμές τους βρίσκονται κάτω από το μηδέν. Αλλά και οι δοκιμές α', β', γ', δ', ε', ζ', η', θ', δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές. Πάλι η αντίθεση του Ultraviolet ταλαντώνεται πάνω κάτω από το μηδέν και όλες οι υπόλοιπες περιοχές έχουν και αυτές μία ακανόνιστη συμπεριφορά. Αυτή η ομάδα δοκιμών δεν παρουσιάζει καμία ομοιομορφία ως προς την συμπεριφορά της αντίθεσης.

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Διάρκεια παλμού	Σχόλια
a	4,1	6	130 μs	with water
b	6,1	6	130 μs	with water
c	8,1	6	130 μs	with water
d	10	6	130 μs	with water
e	12	6	130 μs	with water
f	14	6	130 μs	with water
g	16	6	130 μs	with water
h	18	6	130 μs	with water
i	20	6	130 μs	with water
a'	12	1	130 μs	with water
b'	12	2	130 μs	with water
c'	12	3	130 μs	with water
d'	12	4	130 μs	with water
e'	12	5	130 μs	with water
f'	12	7	130 μs	with water
g'	12	10	130 μs	with water
h'	12	15	130 μs	with water

Πίνακας 13: Παράμετροι δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα γύψου και άνθρακα

Στις δοκιμές a, b, c, d, e, f, g, h, i, παρατηρούμε μία αύξηση των τιμών της αντίθεσης στην περιοχή του Ultraviolet. Ξεκινάει με τιμές κάτω από το μηδέν και καταλήγει σε τιμές πάνω από το μηδέν με εξαίρεση την τελευταία δοκιμή όπου ξαναπαίρνει τιμή κάτω από το μηδέν. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και στην περιοχή του Visible. Αλλά και στις περιοχές Infrared 1 και Infrared 2 παρατηρούμε αύξηση των τιμών της αντίθεσης με την διαφορά ότι τιμές της είναι κάτω από το μηδέν με εξαίρεση τη δοκιμή h στην περιοχή του Infrared 1, που παίρνει μια μικρή τιμή πάνω από το μηδέν. Επίσης παρατηρούμε ότι και σε αυτές τις περιοχές υπάρχει διαφορά στην συμπεριφορά της τελευταίας δοκιμής, κάτι που παρατηρήσαμε σε προηγούμενες δοκιμές.

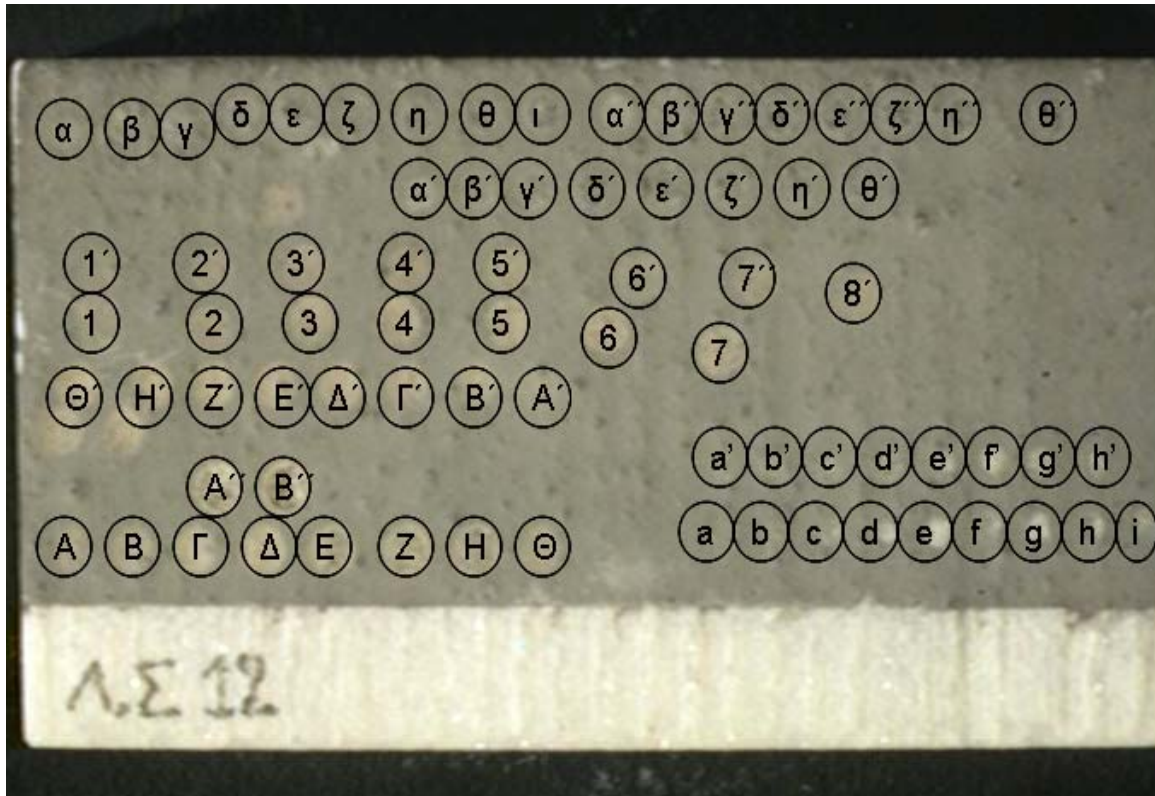
Από την άλλη μεριά στις δοκιμές a', b', c', d', e', f', g', h', παρατηρούμε ότι σε όλες τις φασματικές περιοχές μέχρι και την τέταρτη δοκιμή

υπάρχει μία σταδιακή αύξηση της αντίθεσης, ενώ από την πέμπτη δοκιμή μειώνεται.

Γενικότερα παρατηρούμε σε αυτό το δείγμα προσομοίωσης, η συμπεριφορά της αντίθεσης είναι παράξενη. Στις γραμμές που έχουμε καθαρίσει στην περιοχή του Ultraviolet υπάρχουν περιοχές που είναι άσπρες. Όσο ανεβαίνουμε αρχίζουν κάποιες γραμμές να γίνονται άσπρες και κάποιες να παραμένουν μαύρες μέχρις ωσότου να γίνουν άσπρες στο Infrared 2 εκτός από μεμονωμένα σημεία που είναι υπερκατεστραμένα. Αυτό μάλλον συμβαίνει λόγω της διαφορετικής αποδόμησης των διαφόρων στοιχείων που αποτελούν την επικάλυψη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία κενών, τα οποία με την σειρά τους δημιουργούν αποχρώσεις στην επιφάνεια που επηρεάζουν τις τιμές της αντίθεσης.

Λευκό μάρμαρο με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάλυψης αιθάλης.

Όπως και το δείγμα του γύψου και άνθρακα έτσι και αυτό το δείγμα το παρασκευάσαμε στο εργαστήριο. Προσπαθήσαμε να δημιουργήσουμε μια προσομοίωση επικάλυψης με συστατικά που αποτελούν και τις πραγματικές επικάλυψης, πάνω σε ένα λευκό μάρμαρο του οποίου η επιφάνεια δεν είναι ομοιόμορφη, για να μπορέσουμε να εξετάσουμε μεμονωμένα τις αντιδράσεις που παρουσιάζουν τα διάφορα συστήματα laser, αλλά και το πόσο επηρεάζει τον καθαρισμό η ανομοιόμορφη επιφάνεια .



Εικόνα 11: Δείγμα λευκού μαρμάρου με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικαθισης αιθάλης

Για τον καθαρισμό αυτού του δείγματος χρησιμοποιήσαμε υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από συστήματα Nd:YAG laser με διαφορετική διάρκεια παλμού. Στις δοκιμές μεταβάλλαμε την πυκνότητα ενέργειας (J/cm^2) και τον αριθμό των παλμών. Επίσης στην ομάδα των δοκιμών a, b, c, d, e, f, g, h, i, a', b', c', d', e', f', g', h', κατά την ακτινοβολήση τους χρησιμοποιήσαμε επικουρικά και νερό. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζουμε αναλυτικά τις παραμέτρους των δοκιμών που πραγματοποιήσαμε.

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Διάρκεια παλμού(s)
A	0,21	6	150 ps
B	0,42	6	150 ps
Γ	0,60	6	150 ps
Δ	0,71	6	150 ps
E	0,93	6	150 ps
Z	1,15	6	150 ps
H	1,33	6	150 ps
Θ	0,36	6	150 ps
A'	0,42	1	150 ps
B'	0,42	2	150 ps
Γ'	0,42	3	150 ps
Δ'	0,42	4	150 ps
E'	0,42	5	150 ps
Z'	0,42	7	150 ps
H'	0,42	10	150 ps
Θ'	0,42	15	150 ps
A''	1,15	100	150 ps
B''	1,33	50	150 ps
1	0,21	6	150 ps
2	0,42	6	150 ps
3	0,60	6	150 ps
4	0,71	6	150 ps
5	0,93	6	150 ps
6	1,15	6	150 ps
7	1,33	6	150 ps
1'	0,42	1	150 ps
2'	0,42	2	150 ps
3'	0,42	3	150 ps
4'	0,42	4	150 ps
5'	0,42	5	150 ps
6'	0,42	7	150 ps
7'	0,42	9	150 ps
8'	0,42	15	150 ps

Πίνακας 14: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα του μαρμάρου με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάθισης αιθάλης

Περιοχή	Πυκνότητα ενέργειας (J/cm ²)	Αριθμός παλμών	Διάρκεια παλμού (s)	Σχόλια
A	4,1	6	130 μs	
B	6,1	6	130 μs	
Γ	8,1	6	130 μs	
Z	10	6	130 μs	
E	12	6	130 μs	
Z	14	6	130 μs	
H	16	6	130 μs	
Θ	18	6	130 μs	
I	20	6	130 μs	
α'	16	1	130 μs	
β'	16	2	130 μs	
γ'	16	3	130 μs	
δ'	16	4	130 μs	
ε'	16	5	130 μs	
ζ'	16	7	130 μs	
η'	16	10	130 μs	
θ'	16	15	130 μs	
α''	20	1	130 μs	
β''	20	2	130 μs	
γ''	20	3	130 μs	
δ''	20	4	130 μs	
ε''	20	5	130 μs	
ζ''	20	7	130 μs	
η''	20	10	130 μs	
θ''	20	15	130 μs	
A	4,1	6	130 μs	with water
B	6,1	6	130 μs	with water
C	8,1	6	130 μs	with water
D	10	6	130 μs	with water
E	12	6	130 μs	with water
F	14	6	130 μs	with water
G	16	6	130 μs	with water
H	18	6	130 μs	with water
I	20	6	130 μs	with water
a'	10	1	130 μs	with water
b'	10	2	130 μs	with water
c'	10	3	130 μs	with water
d'	10	4	130 μs	with water
e'	10	5	130 μs	with water
f'	10	7	130 μs	with water
g'	10	10	130 μs	with water
h'	10	15	130 μs	with water

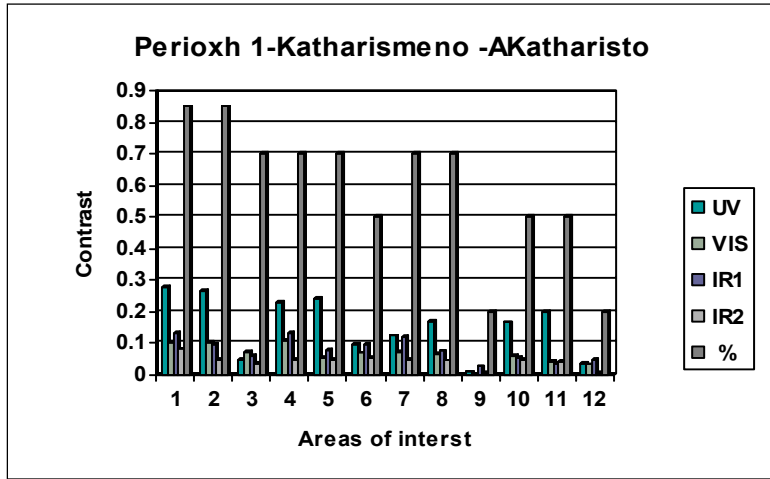
Πίνακας 15: Παράμετροι δοκίμων που πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα του μαρμάρου με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάθισης αιθάλης

Το συγκεκριμένο δείγμα δεν ανταποκρίνεται σωστά στην εξέλιξη της αντίθεσης λόγω της εξαιρετικά μεγάλης χωρικής ανομοιομορφίας της επιφάνειας του . Αυτό προξενεί θόρυβο που επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα της μέτρησης και όλες οι προσπάθειες που κάναμε δεν μπόρεσαν να μας οδηγήσουν σε κάποιο συμπέρασμα το οποίο θα μας βοηθούσε στην εργασία μας. Για αυτό δεν ασχοληθήκαμε περαιτέρω με αυτό το δείγμα.

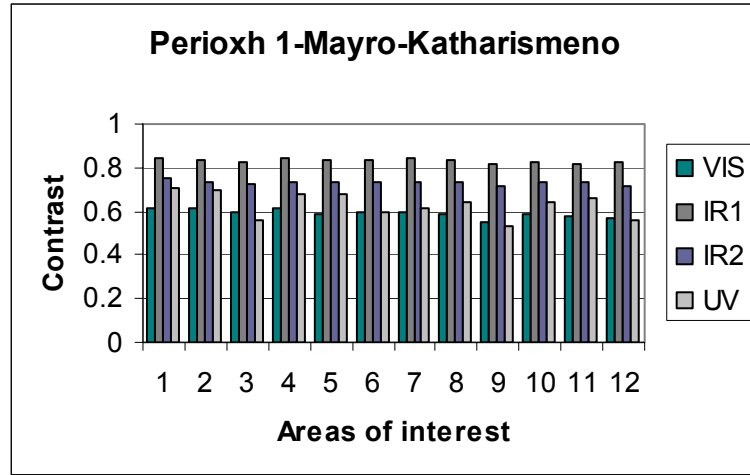
Σαν γενικότερο συμπέρασμα αυτής της εργασίας μπορούμε να πούμε ότι μελετώντας μια αρχική περιοχή του δείγματος που θα καθαριστεί μπορούμε να βρούμε κάποιο επίπεδο της τιμής της αντίθεσης στο οποίο υπάρχει ο βέλτιστος καθαρισμός. Βαθμονομώντας με αυτόν τον τρόπο κάθε δείγμα πριν τον καθαρισμό του μπορούμε να βρούμε ένα τρόπο σχεδίασης αυτομάτου καθαρισμού των δειγμάτων, έτσι ώστε να καθορίζουμε από την αρχή τις παραμέτρους ακτινοβολήσης. Σαν μελλοντική εργασία θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα για τον καθαρισμό πετρωμάτων. Για να γίνει αυτό όμως απαιτείται να κατάλληλη επιλογή πολλών διαφορετικών πετρωμάτων, να επεξεργαστούμε και να καταγράψουμε την αντίδραση τους στις διαφορετικές μεθόδους που χρησιμοποιούμε για απομάκρυνση της επικάλυψης που καλύπτει την επιφάνεια τους. Όπως η εργασία που παρουσιάσαμε. Για να πραγματοποιηθεί αυτό απαιτείται πολύ δουλειά ακόμα. Ελπίζουμε όμως ότι θέσαμε τις βάσεις για να συνεχιστεί και να πραγματοποιηθεί μελλοντικά αυτό το σύστημα.

Ιστογράμματα Μετρήσεων Αντίθεσης

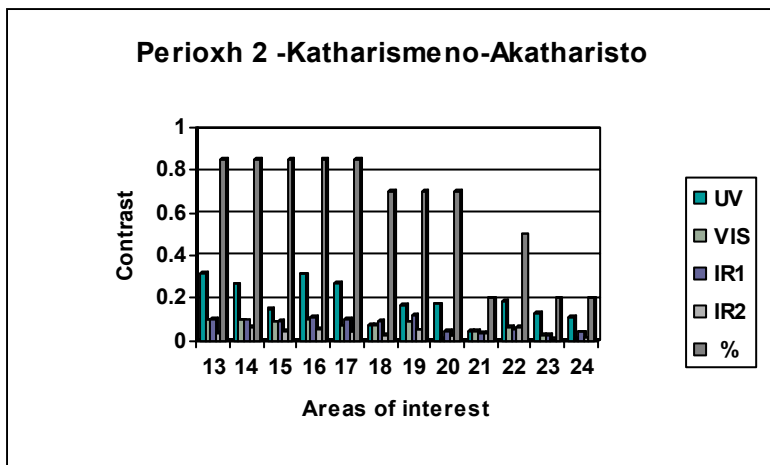
Δείγμα από αρχαιολογικό χώρο



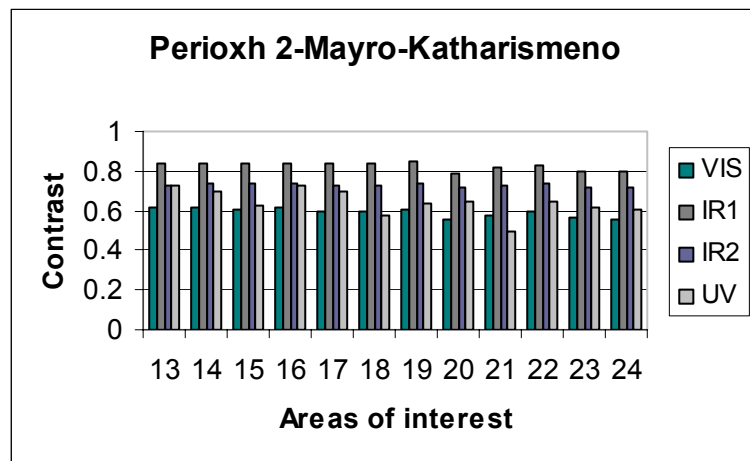
Πίνακας 1



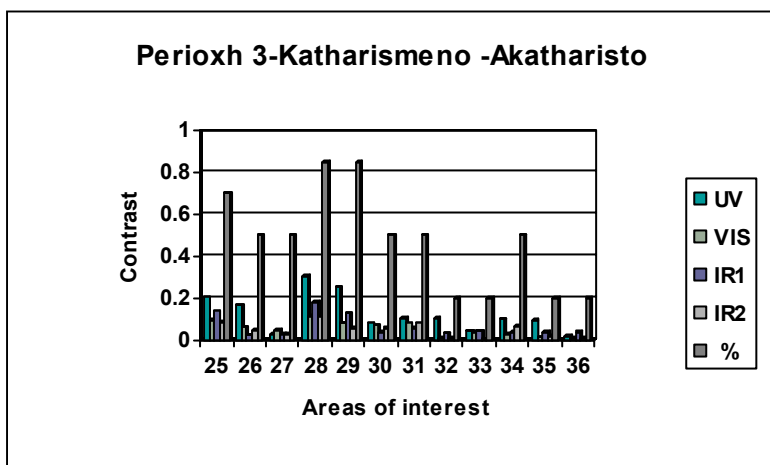
Πίνακας 2



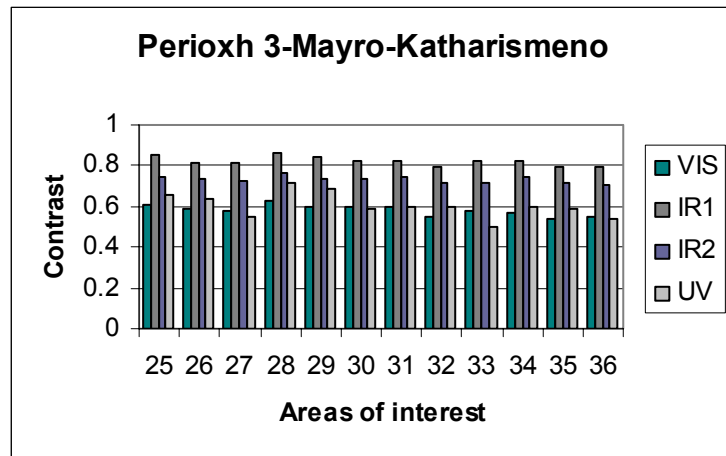
Πίνακας 3



Πίνακας 4

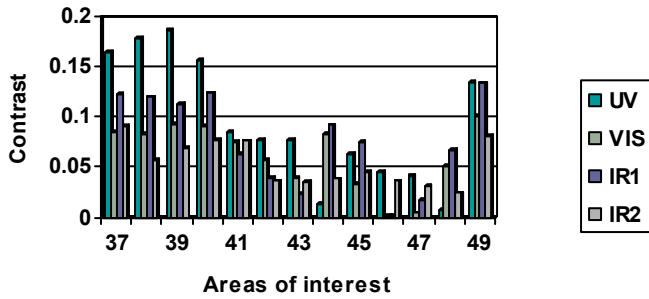


Πίνακας 5



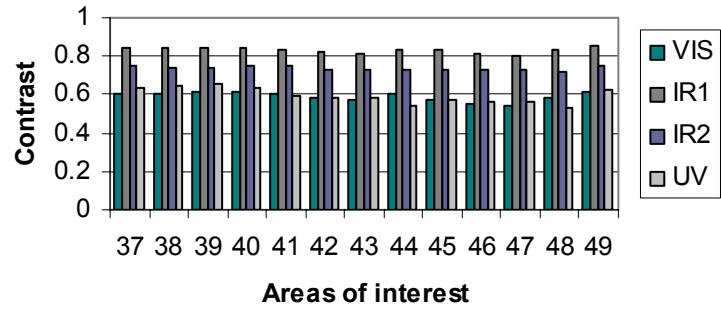
Πίνακας 6

Periochh 4-Katharismeno-Katharismeno



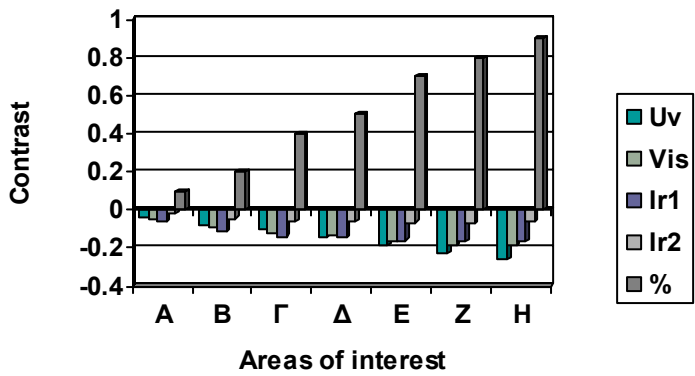
Πίνακας 7

Periochh 4-Mayro-Katharismeno

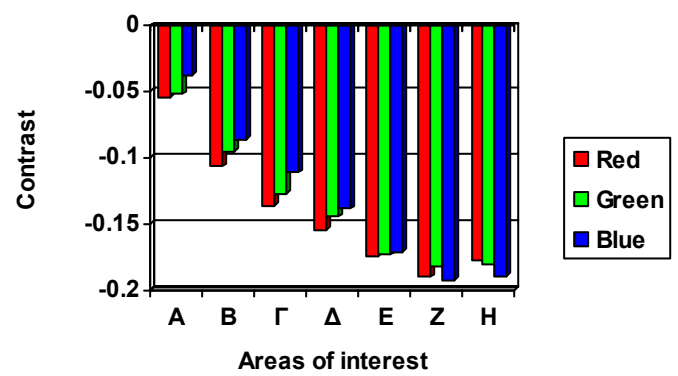


Πίνακας 8

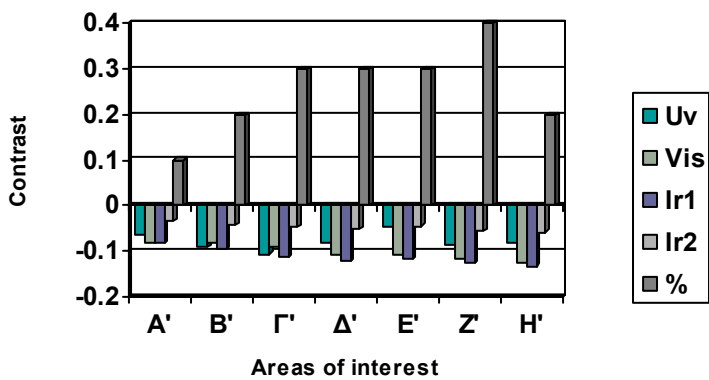
Νεώτερο δείγμα από μαρμάρινο διάκοσμο



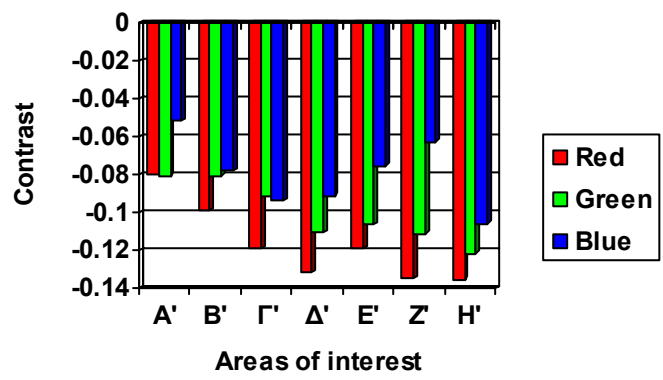
Πίνακας 1



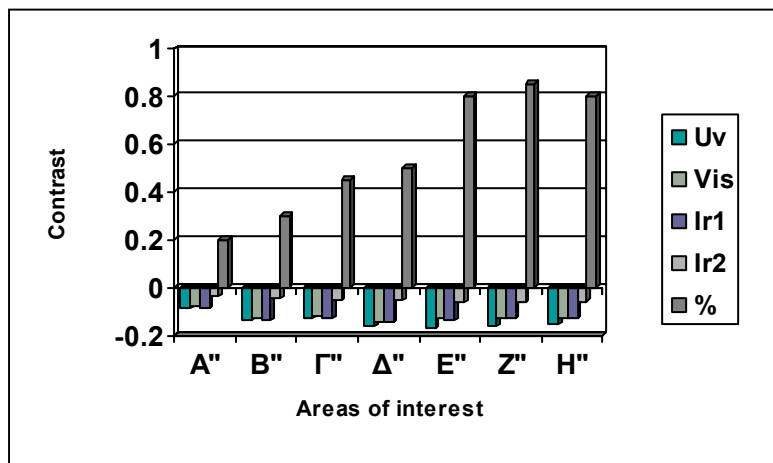
Πίνακας 2



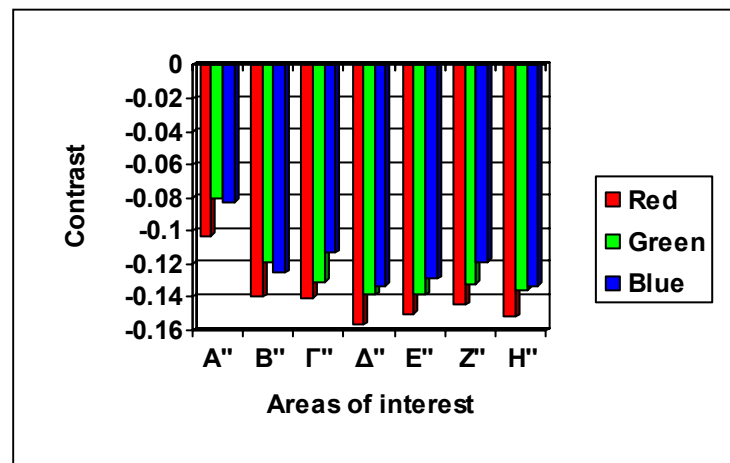
Πίνακας 3



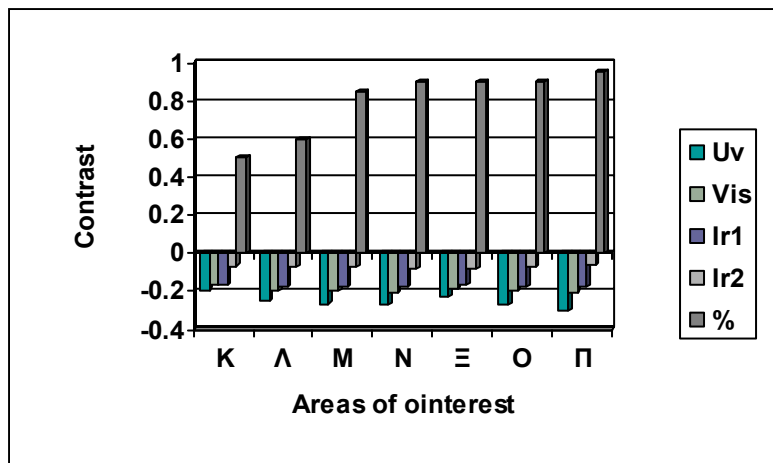
Πίνακας 4



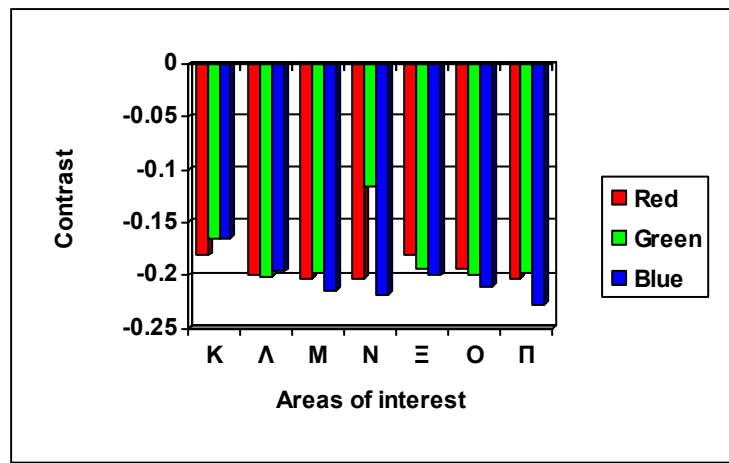
Πίνακας 5



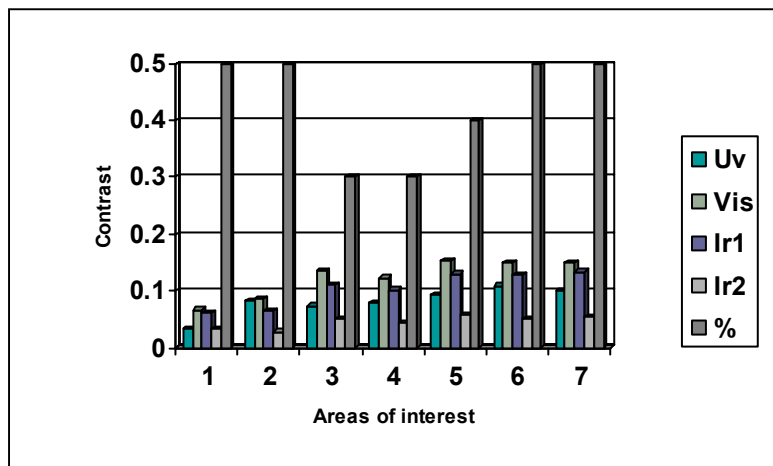
Πίνακας 6



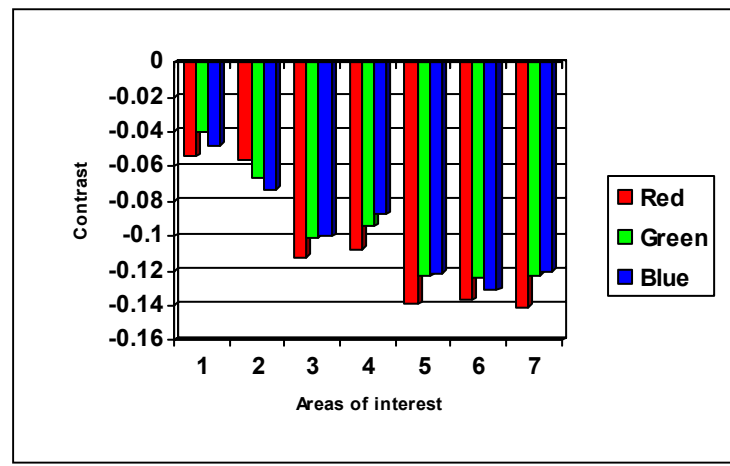
Πίνακας 7



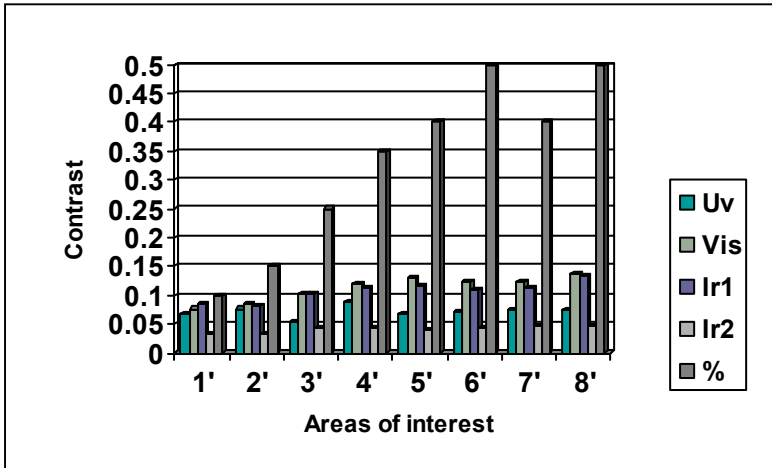
Πίνακας 8



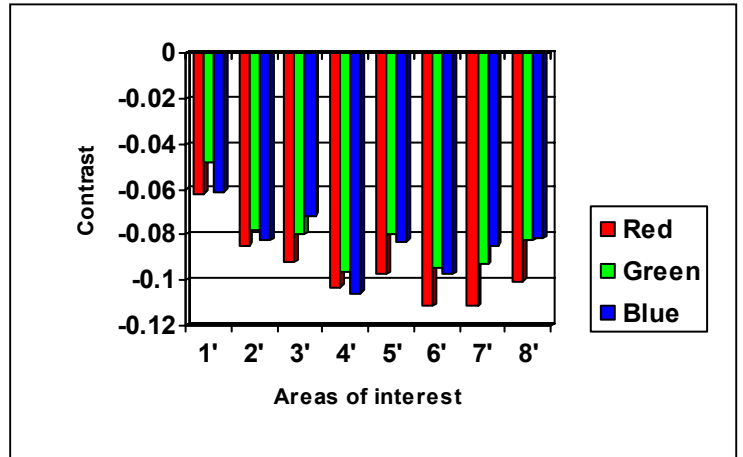
Πίνακας 9



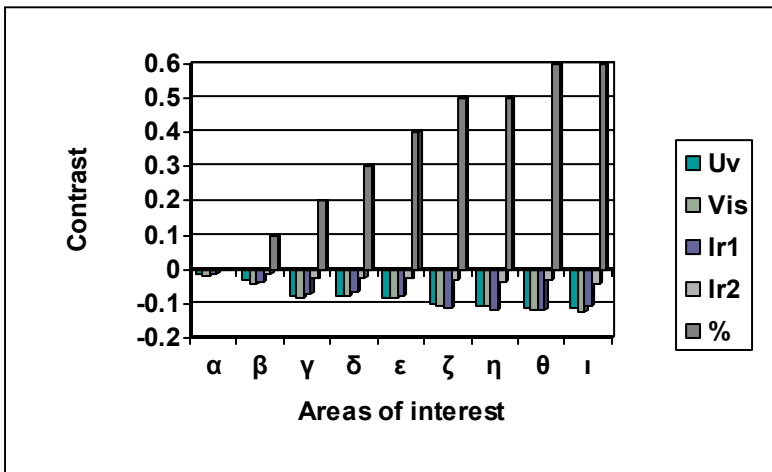
Πίνακας 10



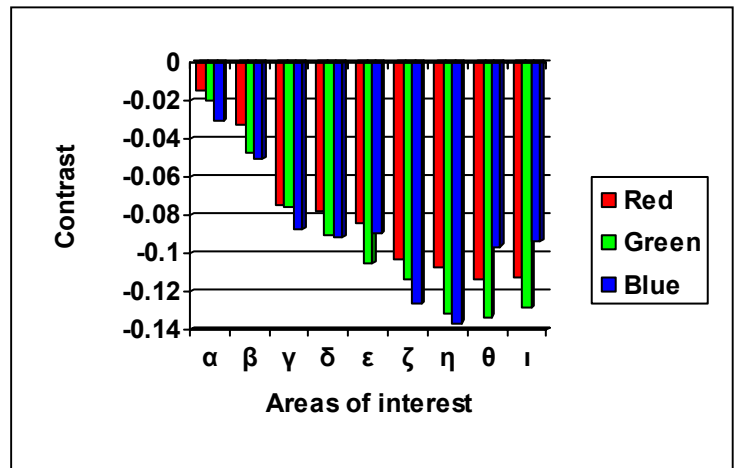
Πίνακας 11



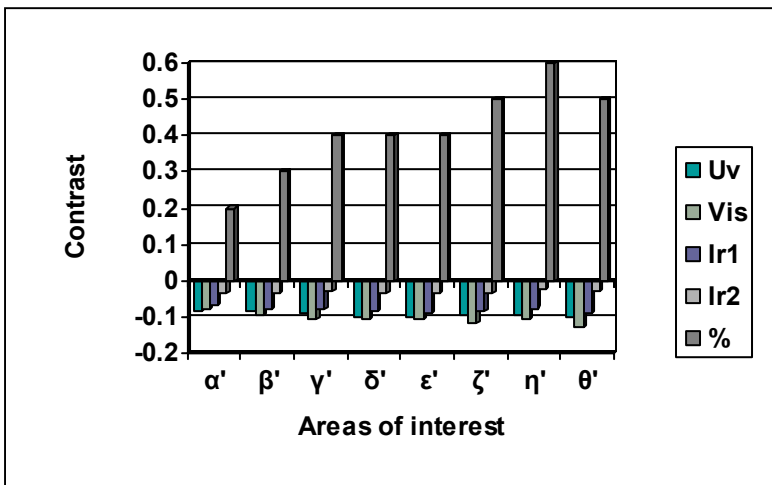
Πίνακας 12



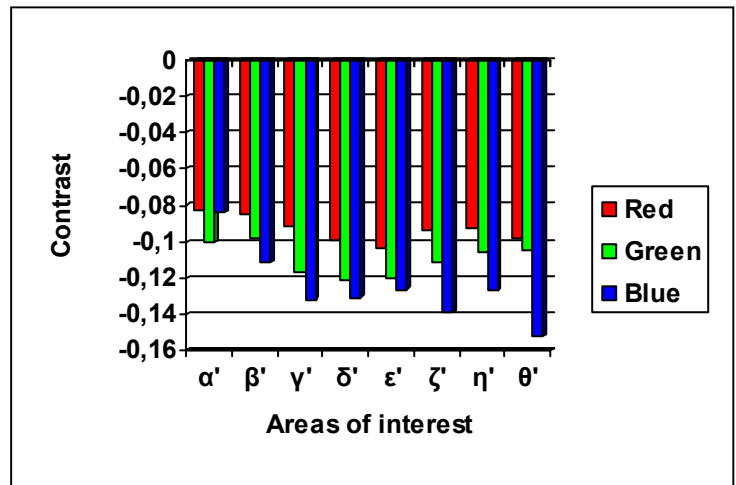
Πίνακας 13



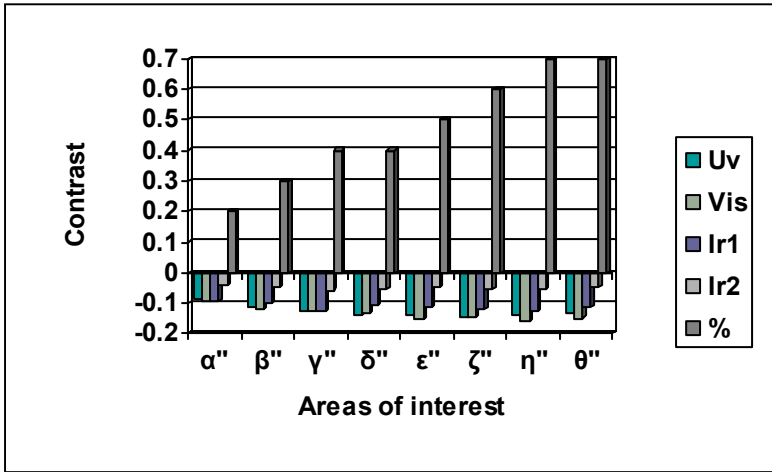
Πίνακας 14



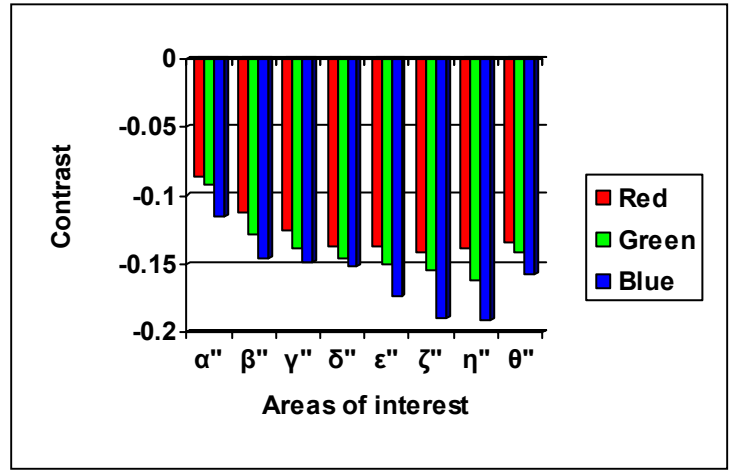
Πίνακας 15



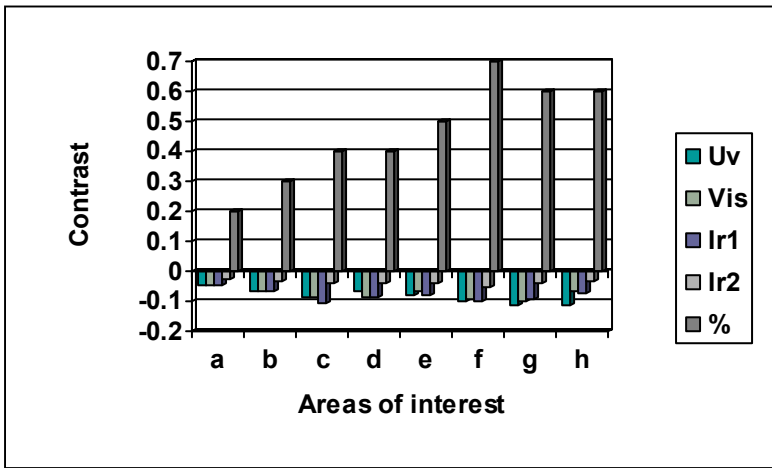
Πίνακας 16



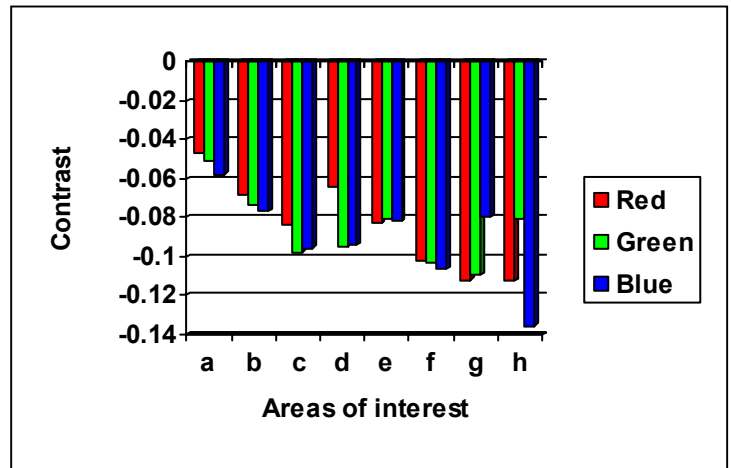
Πίνακας 17



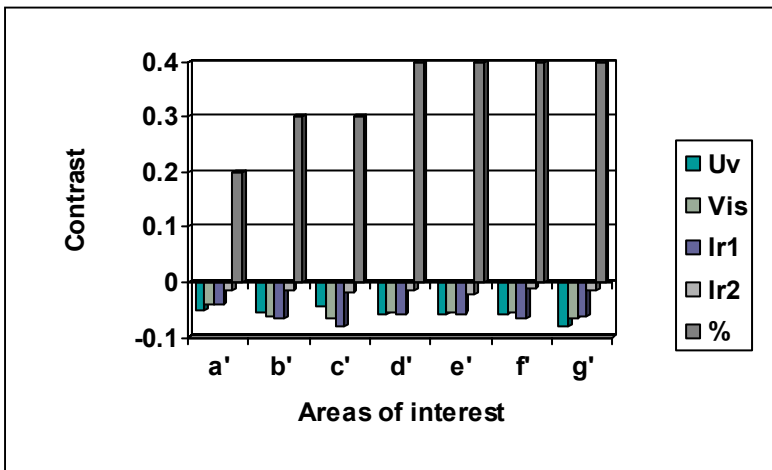
Πίνακας 18



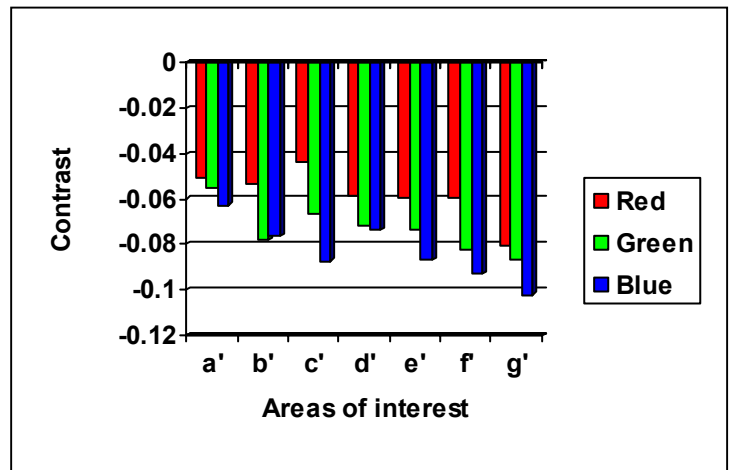
Πίνακας 19



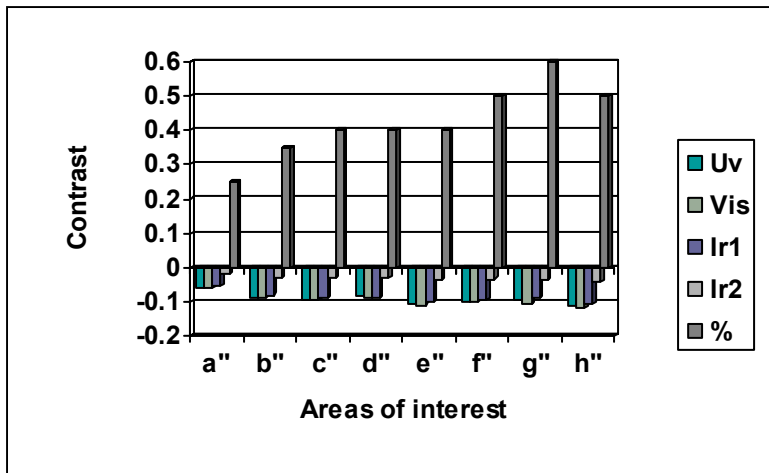
Πίνακας 20



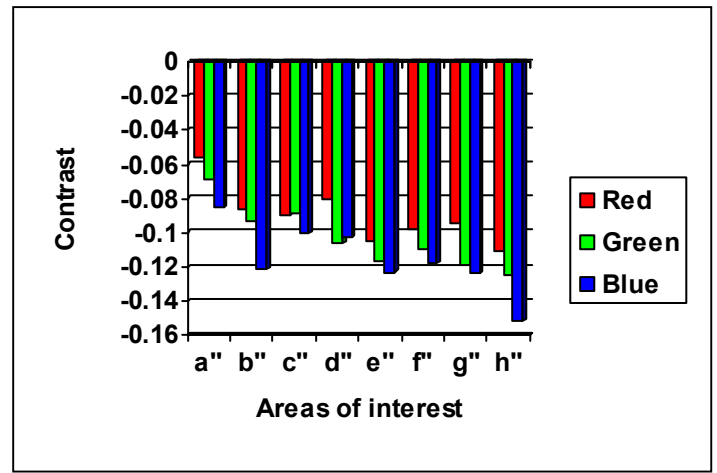
Πίνακας 21



Πίνακας 22

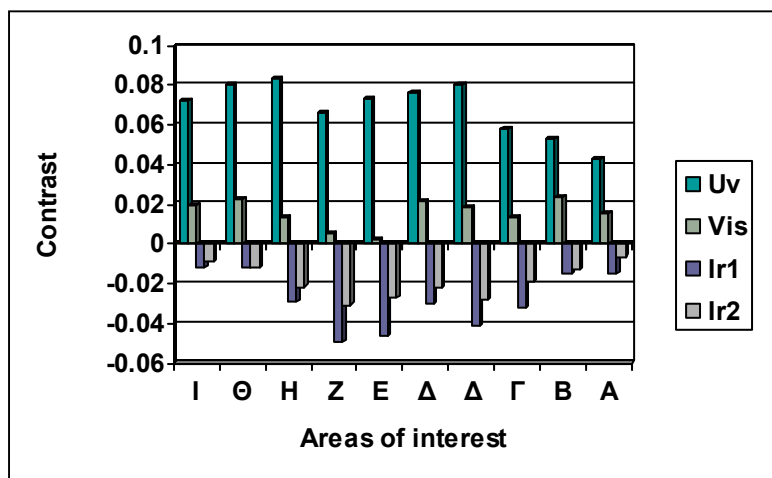


Πίνακας 23

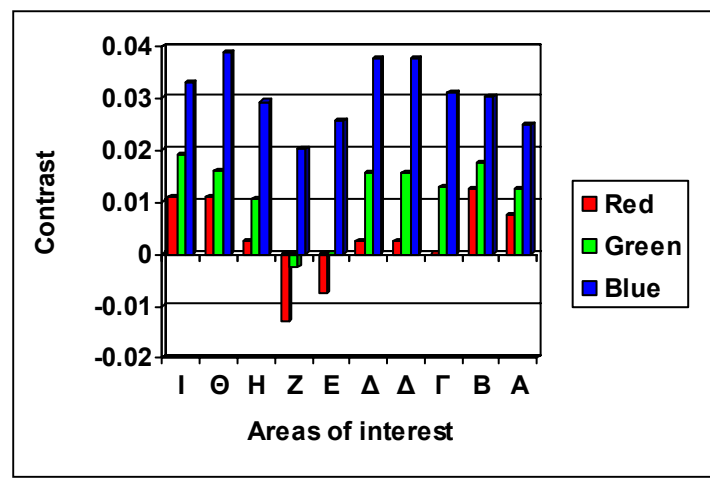


Πίνακας 24

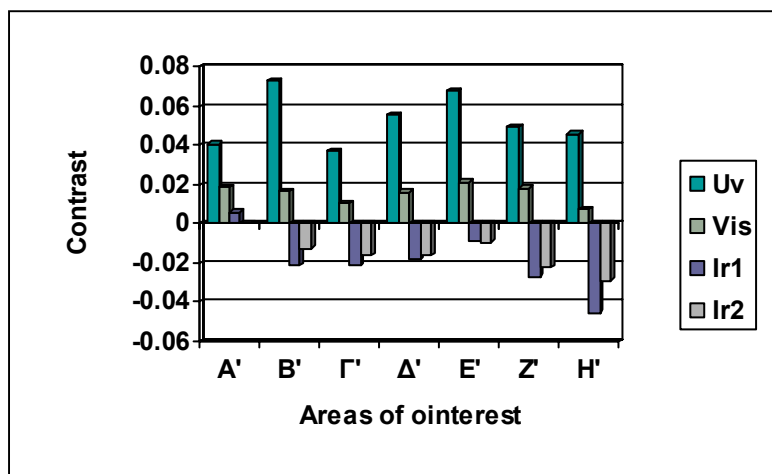
Γύψος με άνθρακα



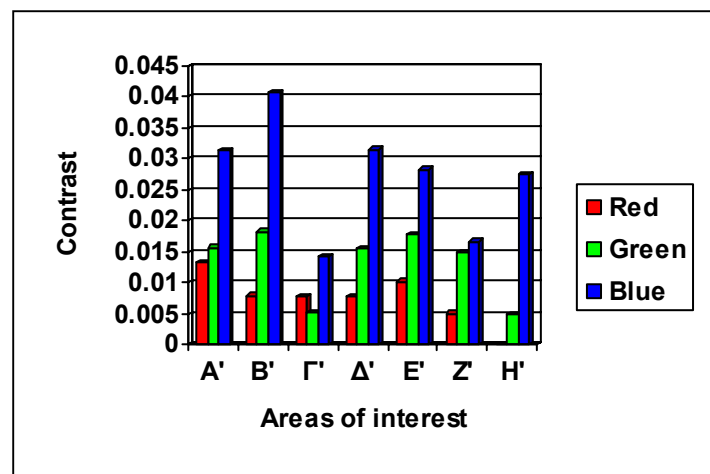
Πίνακας 1



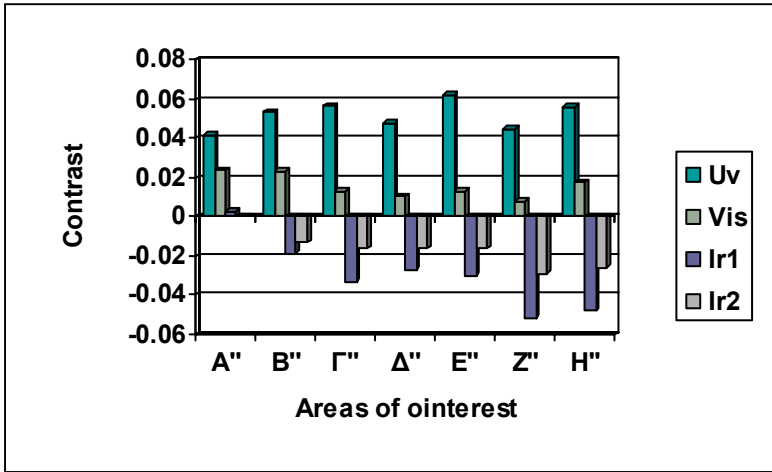
Πίνακας 2



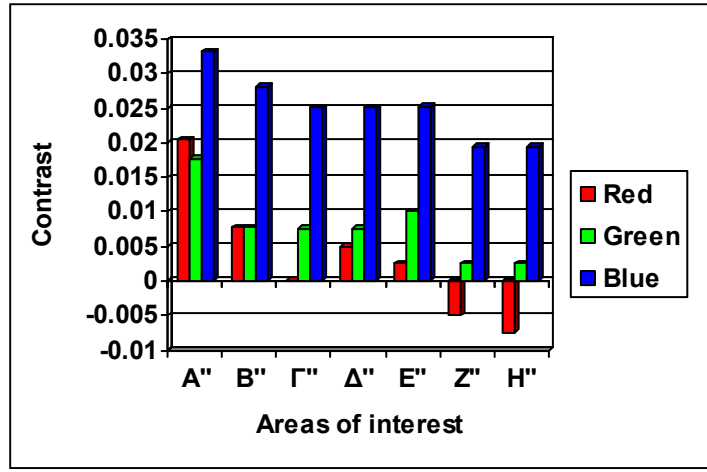
Πίνακας 3



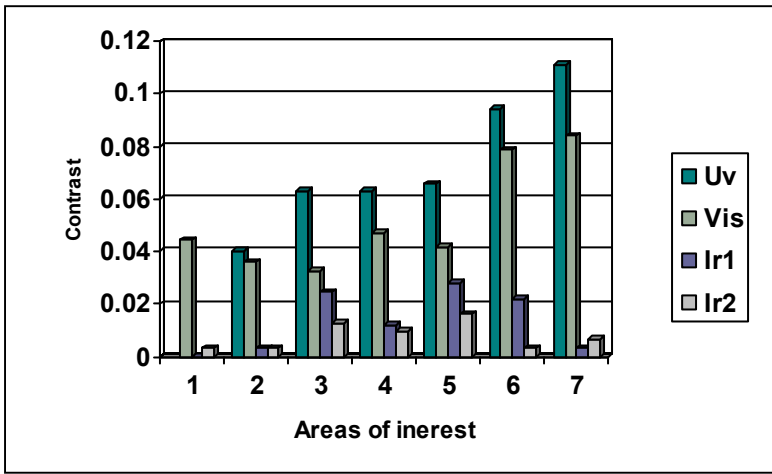
Πίνακας 4



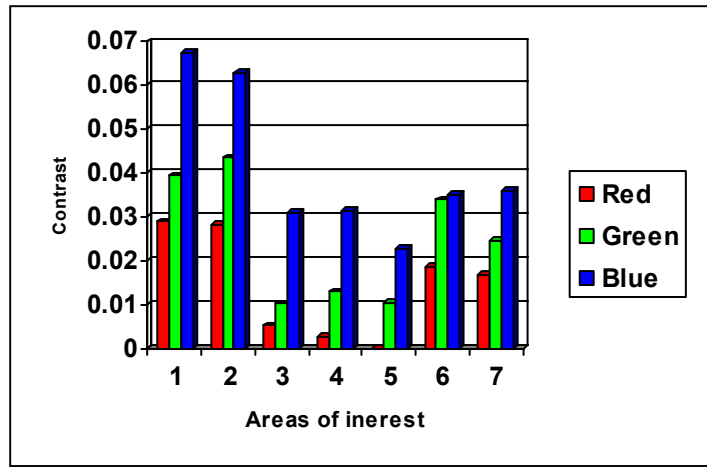
Πίνακας 5



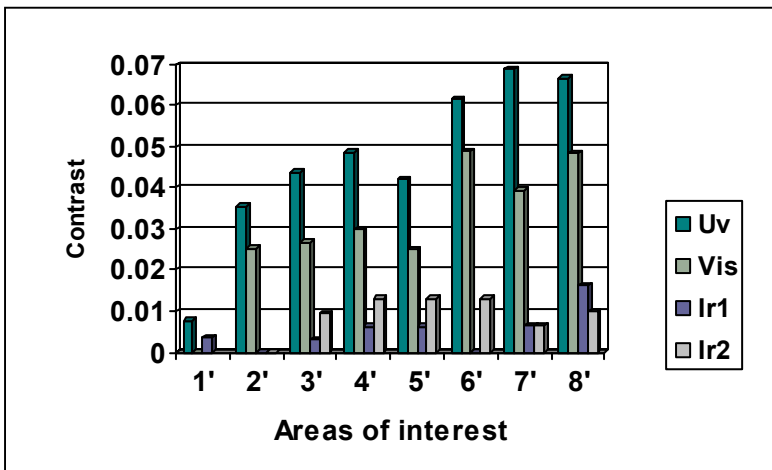
Πίνακας 6



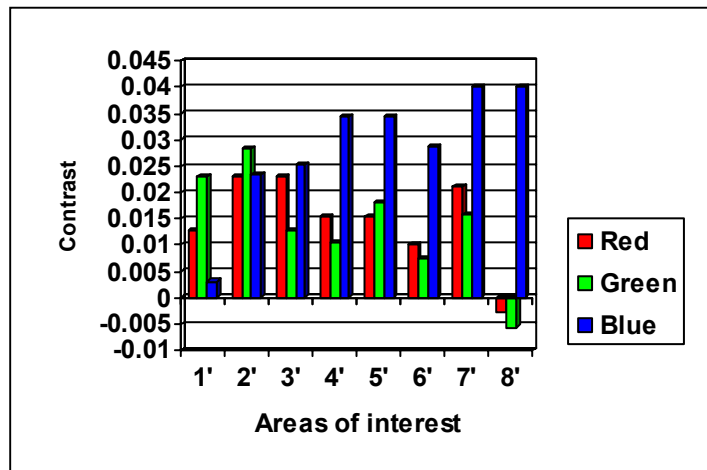
Πίνακας 7



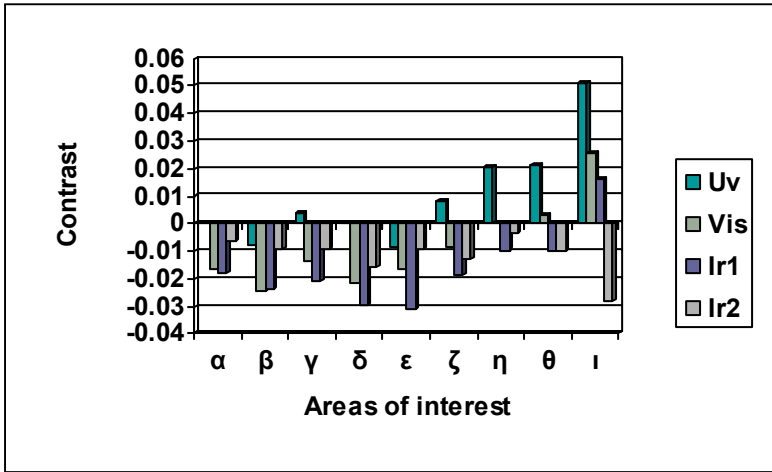
Πίνακας 8



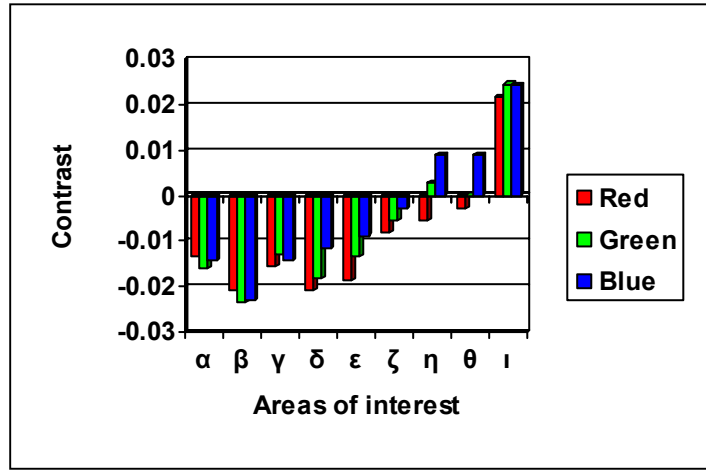
Πίνακας 9



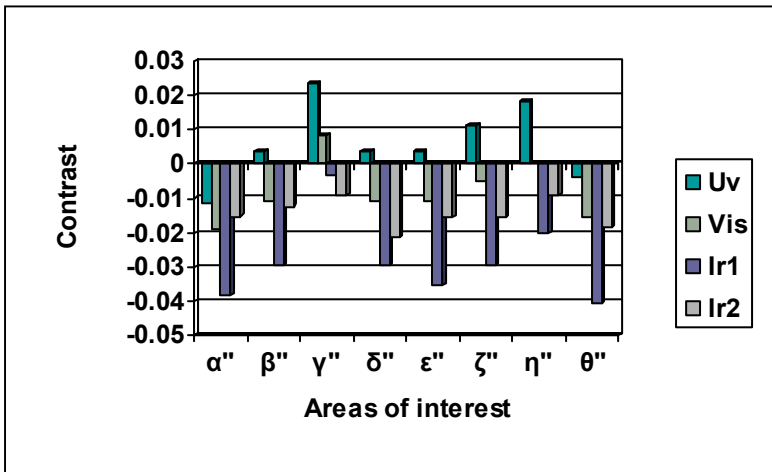
Πίνακας 10



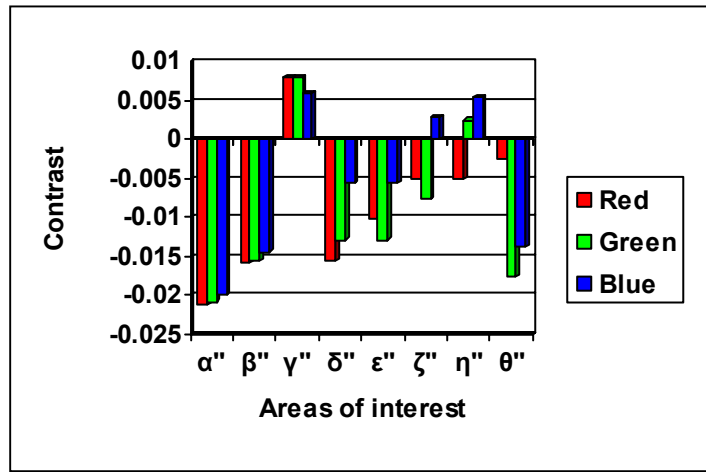
Πίνακας 11



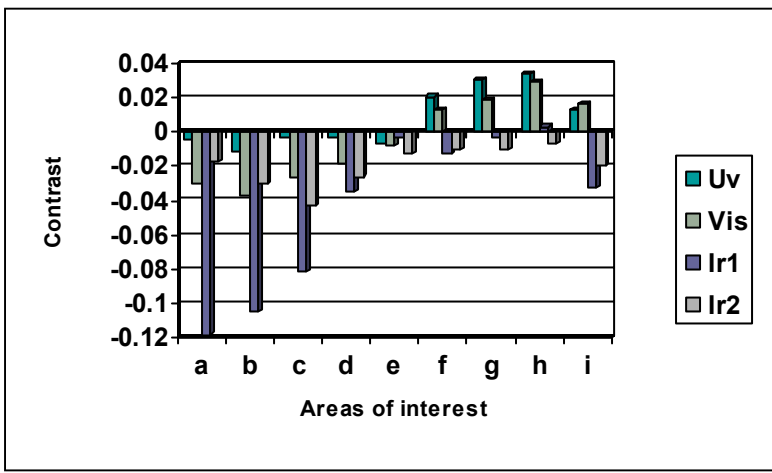
Πίνακας 12



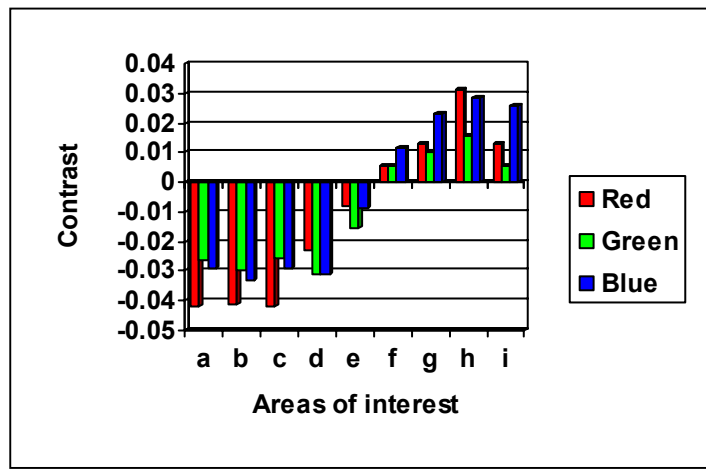
Πίνακας 11



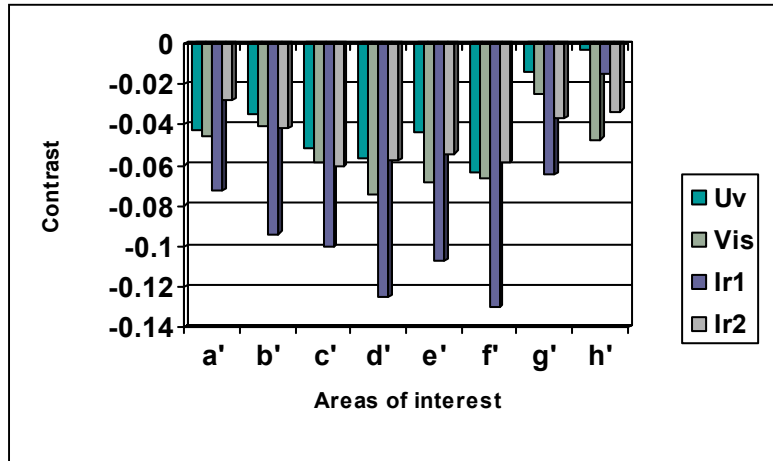
Πίνακας 13



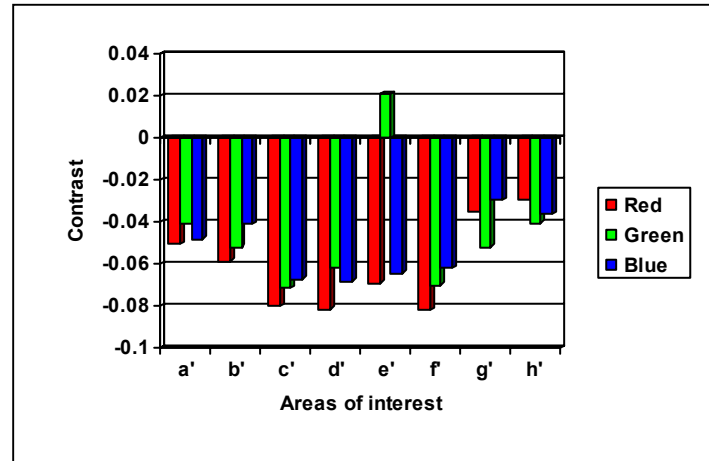
Πίνακας 14



Πίνακας 15

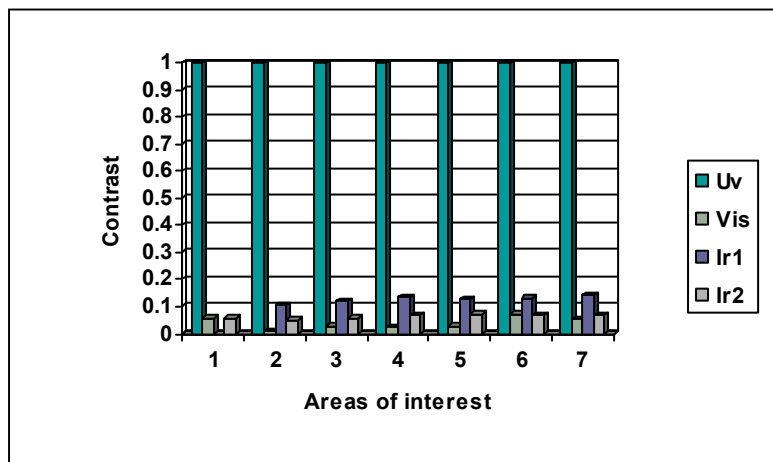


Πίνακας 15

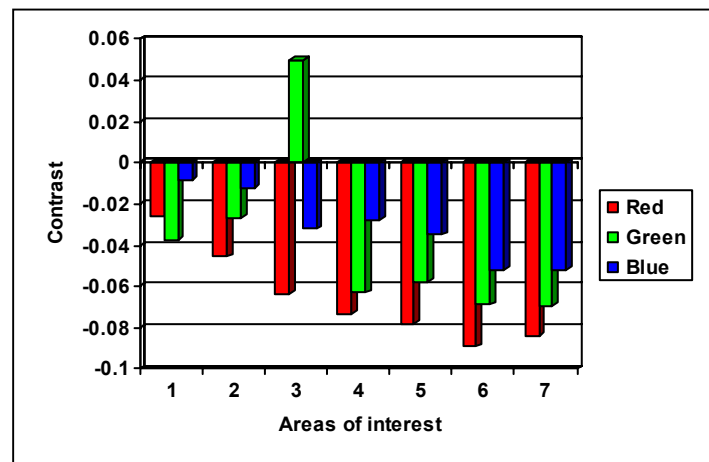


Πίνακας 16

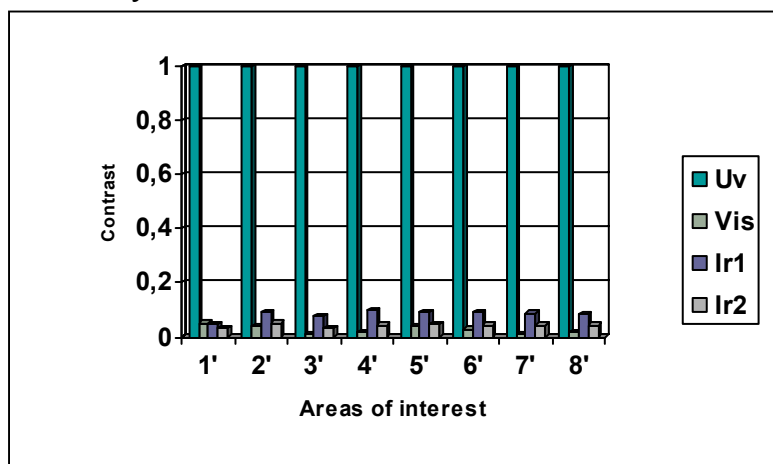
Δείγμα με αδρή επιφάνεια και προσομοίωση επικάλυψης αιθάλης



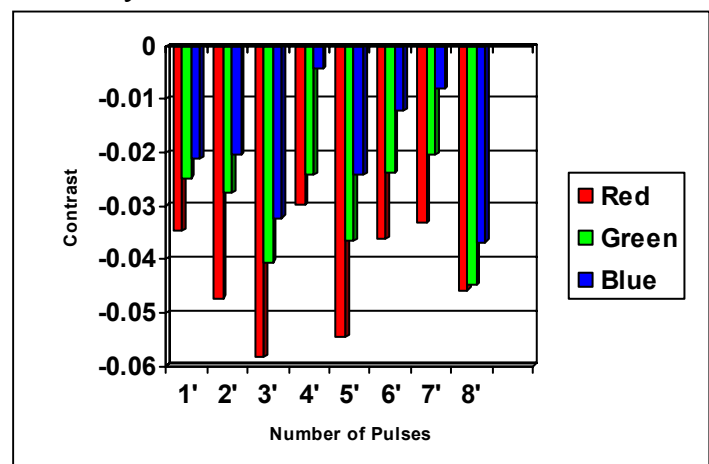
Πίνακας 1



Πίνακας 2



Πίνακας 3



Πίνακας 4

Παράρτημα

Λεξιλόγιο

Infrared	Υπέρυθρο
Ultraviolet	Υπεριώδης
Visible	Ορατό
Hue	Απόχρωση
Saturation	Κορεσμός
Intensity	Ένταση
Calibration	Βαθμονόμηση
RGB Red Green Blue	Κόκκινο Πράσινο Μπλε
Δυναμική περιοχή	Μαθηματική έκφραση μιας παραμέτρου με βάση κάποιες μεταβλητές

Βιβλιογραφία

1. Cooper, M. Laser Cleaning in Conservation: An Introduction. In Butterworth Heineman (eds) Oxford. 1998.
2. V. Zafiropulos, P. Pouli, V. Kylikoglou, P. Maravelaki-Kalaitzaki, B.S. Luk'yanchuk, A. Dogariu. “Synchronous use of IR and UV laser pulses in the removal of encrustation: Mechanistic aspects, discoloration phenomena and benefits”. Proceedings of the 5th International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA V), Series Eds. K. Dickmann, C. Fotakis, J. F. Asmus (Springer Proceedings in Physics 100, 2005) pp 311-318
3. P. Pouli, K. Frantzikinaki, E. Papakonstantinou, V. Zafiropulos, C. Fotakis. “Pollution encrustation removal by means of combined ultraviolet and infrared laser radiation: The application of this innovative methodology on the surface of the Parthenon West Frieze”, Proceedings of the 5th International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA V), Series Eds. K. Dickmann, C. Fotakis, J. F. Asmus (Springer Proceedings in Physics 100, 2005) pp 333-340.
4. J. Kolar et al. “Laser cleaning of paper using Nd: YAG laser running at 532”, Journal of Cultural Heritage 4 (2003) S185-187
5. J. Kolar et al. “IR pulsed laser light interaction with soiled cellulose and paper”, Appl. Phys. A 75, 673–676 (2002)
6. P. Maravelaki-Kalaitzaki, V. Zafiropulos, P. Pouli, D. Anglos, C. Balas, R. Salimbeni, S. Siano, R. Pini. “Short Free Running Nd: YAG laser to clean different encrustation on Pentelic marble: procedure and evaluation of the effects”, Journal of Cultural Heritage 4, pp S77-S82 (2003).
7. P. Pouli, V. Zafiropulos, C. Balas, Y. Doganis, A. Galanos. “Laser cleaning of inorganic encrustation on excavated objects: evaluation of the cleaning result by means of multi-spectral imaging”, Journal of Cultural Heritage 4, pp S338-S342 (2003)
8. Vergès-Belmin V. & Dignard, C. 2003 Laser yellowing: myth or reality? Journal of Cultural Heritage (4) pp 238