

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

«Χώρος, Σχεδιασμός και Δομημένο Περιβάλλον»

2η Θεματική Ενότητα: «Ολοκληρωμένη Προστασία Ιστορικού
Δομημένου Περιβάλλοντος με Σύγχρονες Τεχνολογίες και
Προηγμένα Υλικά»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ

**Ανίχνευση βλάβης σε έργα τέχνης με χρήση προηγμένης τεχνολογίας
laser - Εφαρμογή σε νωπογραφίες**

Μουστεράκη Μαρία

Επιβλέπων. Καθηγητής : Προβιδάκης Κωνσταντίνος
Εξεταστική επιτροπή: Ανδρεαδάκης Δημήτριος, Αναπλ.Καθηγητής,
Βαζάκας Αλέξανδρος, Λέκτορας

Χανιά, Δεκέμβριος 2016

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη για την πολύτιμη βοήθειά του στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω του Ευάγγελο Λιαράκο και Σταύρο Τσιστράκη για τη πολύτιμη βοήθειά τους σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Αναπληρωτή Καθηγητή Δημήτριο Ανδρεαδάκη και τον Λέκτορα Αλέξανδρο Βαζάκα για τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους και για τον χρόνο που διέθεσαν για την βελτιστοποίηση αυτής της Μεταπτυχιακής Διατριβής.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο τομέας της αποκατάστασης έργων τέχνης αποτελεί έναν διαρκώς εξελισσόμενο κλάδο που, στηριζόμενος στις νέες τεχνολογίες και υλικά, αποσκοπεί στην ανίχνευση, αξιολόγηση και αποκατάσταση των βλαβών που τυχόν έχουν δημιουργηθεί, ως αποτέλεσμα διαφόρων παραγόντων. Η ανάπτυξη μεθόδων ανέπαφης και απομακρυσμένης διάγνωσης βλαβών κρίνεται ολοένα και πιο αναγκαία, ιδίως στις περιπτώσεις των νωπογραφιών (buonfresco), που αποτελούν έργα ύψιστης καλλιτεχνικής και ιστορικής αξίας.

Στο πρώτο στάδιο αυτής της εργασίας μελετήθηκε η εξέλιξη των τοιχογραφιών και ειδικότερα των νωπογραφιών, η φύση των νωπογραφιών, οι τεχνικές και οι παράγοντες αλλοίωσης της εμφάνισής τους καθώς και οι συνηθέστεροι μέθοδοι ελέγχου, παραδοσιακοί και σύγχρονοι, παραθέτοντας και παραδείγματα αυτών των εφαρμογών. Κατόπιν, αφού αναπτύχθηκαν οι αρχές του θεωρητικού υποβάθρου που χρησιμοποιήθηκαν, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε μια μη καταστρεπτική και ανέπαφη μέθοδο, όπου με τη χρήση ενός LaserDopplerΔονησιόμετρου Σάρωσης (SLDV) μπορούν να εξαχθούν μετρήσιμα και συγκρίσιμα αποτελέσματα περί της δομικής ακεραιότητας ενός έργου.

Στη συνέχεια, διενεργήθηκαν διάφορα πειράματα εντός του εργαστηρίου, με τη βοήθεια ενός SLDV της εταιρίας Polytec, σε διάφορες μορφές εγκατάστασης, προσομοιώνοντας, κατά το δυνατόν, μια νωπογραφία για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, την εξοικείωση με τον εξοπλισμό, και την ανάλυση της ευαισθησίας της μεθόδου σε διαφοροποιήσεις και αλλαγές των ρυθμίσεων.

Στο τελευταίο στάδιο της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πραγματική τοιχογραφία κατασκευασμένη με την τεχνική της νωπογραφίας στο Παλιό Καθολικό της Ιεράς Μονής Παναγιάς Οδηγήτριας Γωνιάς Χανίων στο Κολυμπάρι Χανίων, ώστε να ανιχνευθούν οι υποκρύπτουσες βλάβες του έργου χωρίς να υπάρχει επαφή με την επιφάνειά του. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνουν τη δυνατότητα αξιολόγησης των βλαβών και διάρθρωση των τρόπων αντιμετώπισής τους.

Τέλος, ακολουθούν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου καθώς και προτάσεις για περαιτέρω εξέλιξη και βελτίωση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή	6
1.2 Οι νωπογραφίες στην ιστορία	7
1.3 Η τεχνική της νωπογραφίας	20

Κεφάλαιο 2

2.1 Μέθοδοι ελέγχου	23
<u>-Ψηφιακή σημειακή Φωτογραφία (Digital Speckle Photography)</u>	
<u>-Εξέταση με υπερήχους</u>	
<u>-Θερμογραφική Αναπαραγωγή Σήματος (Thermographic Signal Reconstruction</u>	
<u>-Τρισδιάστατη απεικόνιση (3D Scanning)</u>	
<u>-Συμβολομετρία (Interferometry)</u>	
<u>-Τομογραφία (Shearography)</u>	
2.2 Παραδείγματα εφαρμογών	37
2.3 Άλλες χρήσεις των laser..	41

Κεφάλαιο 3

Θεωρητικό υπόβαθρο προτεινόμενης μεθοδολογίας	44
<u>-Περί κυμάτων</u>	
<u>-Το φαινόμενο Doppler</u>	

Κεφάλαιο 4

4.1	<u>Σάρωση με Laser Doppler Δονησιόμετρο {Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV)}</u>	<u>47</u>
4.2	<u>Μέθοδοι διέγερσης κατασκευής</u>	<u>52</u>
	<u>-Διέγερση με ηχητικά μέσα</u>	
	<u>-PCB general purpose single axis accelerometer PCB</u>	
4.3	<u>Νωπογραφίες και εικόνες</u>	<u>55</u>
4.4	<u>Παραδείγματα εφαρμογών Laser Doppler Vibrometer</u>	<u>56</u>

Κεφάλαιο 5

	<u>Πειραματική εφαρμογή προτεινόμενης μεθόδου</u>	<u>61</u>
--	---	-----------

Κεφάλαιο 6

6.1	<u>Επιτόπια εφαρμογή σε τοιχογραφίες</u>	<u>83</u>
	<u>Διάγνωση βλαβών νωπογραφίας στο παλιό Καθολικό της Ιεράς Μονής Παναγίας Οδηγήτριας Γωνιάς Χανίων</u>	
6.2	<u>Σύγκριση αποτελεσμάτων</u>	<u>95</u>

Κεφάλαιο 7

	<u>Συμπεράσματα</u>	<u>98</u>
--	---------------------	-----------

	<u>Βιβλιογραφία/Αναφορές</u>	<u>101</u>
--	------------------------------	------------

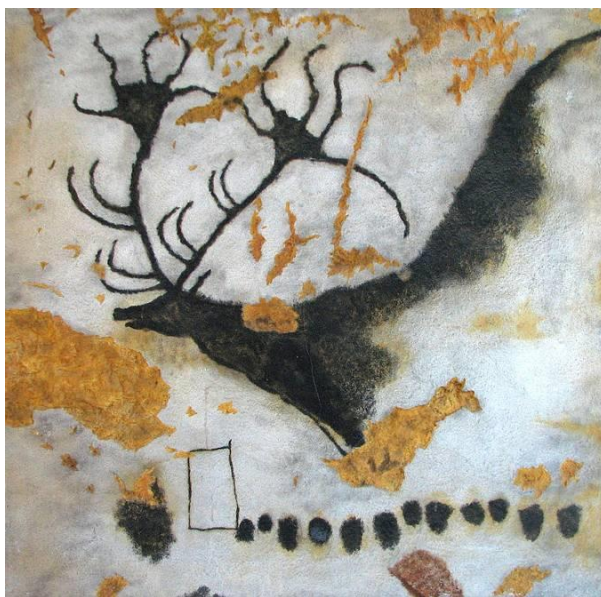
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μελετώντας τον άνθρωπο από την γέννησή του είναι εμφανής η διαρκής προσπάθειά του να εκφράσει τις καλλιτεχνικές του ανησυχίες μέσω διαφόρων μορφών τέχνης. Από τα προϊστορικά χρόνια ακόμα, η τέχνη αντανakλούσε την κοινωνική ζωή σε όλες τις εκφάνσεις του τόπου που τη γέννησε ανάλογα με τη γεωγραφική του θέση.

Τα πρώτα δείγματα είναι οι προϊστορικές τοιχογραφίες που σχεδιάστηκαν σε σπήλαια χρησιμοποιώντας υλικά όπως ο αιματίτης και το κάρβουνο, χρονολογούνται μερικές χιλιάδες χρόνια πριν και αναπαριστούν κυρίως ζώα και ανθρώπινες φιγούρες, με παραδείγματα στην Ινδονησία, τη Γαλλία και την Ισπανία. Η διατήρηση της καλής τους κατάστασης οφείλεται κυρίως στις ειδικές συνθήκες που επικρατούσαν σε αυτά τα σπήλαια. Σε περιπτώσεις όπως το σπήλαιο Λασκώ (Γαλλία) (Σχήμα 1), η έκθεση του σπηλαίου σε ξεναγήσεις οδήγησε στην εμφάνιση διαφόρων προβλημάτων που προέκυψαν από την αυξημένη ποσότητα εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα και τις νέες περιβαλλοντικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την αλλοίωση των τοιχογραφιών και την ανάγκη νέων εφαρμογών καθαρισμού και ανίχνευσης βλαβών.

Η εξέλιξη του εμπορίου, οι διαρκείς πόλεμοι και οι εκάστοτε θρησκείες συνέβαλαν στη αλληλεπίδραση των πολιτισμών και την ανταλλαγή τεχνικών και μεθόδων καλλιτεχνικής έκφρασης, διευκολύνοντας τη διάδοση και την εξέλιξη των τεχνών. Ουσιαστικά, οι διαφοροποιήσεις ανά περιόδους εξαρτώνται από τον τόπο, τις κλιματολογικές συνθήκες, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, την οικονομική κατάσταση του ιδιοκτήτη του έργου, το κτίριο και το προσωπικό ύφος του κάθε καλλιτέχνη, επηρεάζοντας κάθε φορά το αποτέλεσμα.



Σχήμα1 : Ο Μεγαλόκερος, Σπήλαιο Λασκώ[1]

1.2 ΟΙ ΝΩΠΟΓΡΑΦΙΕΣ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ

Οι τοιχογραφίες αποτελούν ίσως την πιο πρωτότυπη, την πιο χαρακτηριστική έκφραση του πολιτισμού της Εποχής του Χαλκού. Οι πρώτες τοιχογραφίες στον ελληνικό χώρο εμφανίζονται στη μινωική Κρήτη γύρω στα 1600 π.Χ., στη Νεοανακτορική περίοδο, αλλά καθώς φαίνεται υπήρχαν και παλαιότερα, στα πρώτα ανάκτορα της Κνωσού. Από την Παλαιοανακτορική όμως περίοδο σώζονται μόνο επιχρίσματα σε τοίχους και δάπεδα. Από την Κρήτη η τέχνη της τοιχογραφίας διαδόθηκε στις Κυκλάδες και στην ηπειρωτική Ελλάδα.

Η άνθηση και διάδοση των τοιχογραφιών βρίσκεται σε άμεση συσχέτιση με τις οικονομικές συνθήκες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα οι τοιχογραφίες σε αρχαίους αιγυπτιακούς τάφους, με τη τεχνική *secco* (ξηρή τοιχογραφία), και στα μινωικά ανάκτορα της Κρήτης, όπου αποτελούν και τα πρώτα δείγματα τοιχογραφιών στην Ελλάδα με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον διάσημο 'Ταυρομάχο' (Σχήμα 2), ο οποίος είναι φτιαγμένος με την τεχνική της νωπογραφίας (*buon fresco*).

Στη μινωική Κρήτη η τεχνική της νωπογραφίας είχε ιδιαίτερη θέση στη καθημερινή ζωή και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα δείγματα *frescoes* στην Ελλάδα. Αντίθετα με τις αιγυπτιακές τοιχογραφίες που έχουν ως κύριο θέμα ιστορικά γεγονότα και σκηνές από τη ζωή των ηγεμόνων, οι μινωικές τοιχογραφίες εξυμνούν τη θεοποιημένη φύση. Αναπαριστούν κυρίως τελετές, σκηνές λατρείας, ιερά αθλήματα, πομπές ιερέων, ταυροκαθάψια, κ.α..



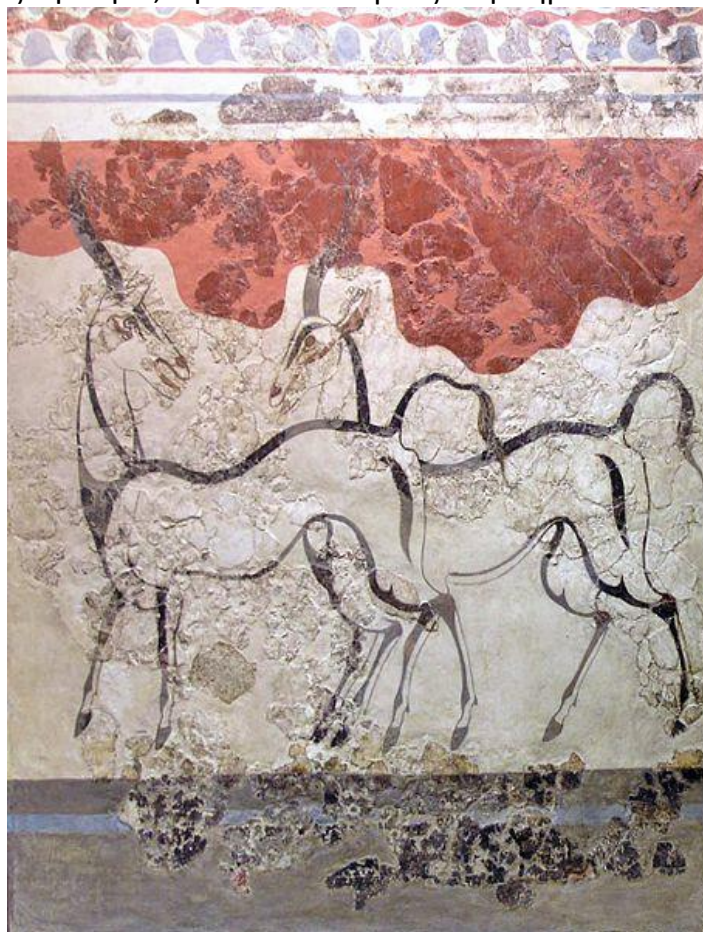
Σχήμα 2 : Ο ταυρομάχος [2]

Τοιχογραφικός διάκοσμος βρέθηκε στα Μινωικά ανάκτορα αλλά και σε μία σειρά από πολυτελείς επαύλεις. Το εικονογραφικό πρόγραμμα των

τοιχογραφιών διαμορφωνόταν ανάλογα με τη χρήση των χώρων που διακοσμούσαν. Έτσι, τους τοίχους των ιερών χώρων διακοσμούσαν παραστάσεις θρησκευτικού χαρακτήρα, ενώ σε ιδιωτικούς χώρους επικρατούσαν καθαρά διακοσμητικά θέματα. Η ειδική θεματογραφία και η εκζήτηση στην κατασκευή των τοιχογραφιών πρόβαλλαν το κύρος των ηγεμόνων, των ιδιοκτητών της οικίας ή το κύρος της επίσημης θρησκείας. Η εικονογράφηση αναπτυσσόταν συχνά σε όλους τους τοίχους των δωματίων, με θέματα που συμπλήρωναν το ένα το άλλο με έναν ιεραρχικό και λειτουργικό τρόπο. Η ανάπτυξή τους προσαρμοζόταν στο χώρο που διακοσμούσαν αναδεικνύοντας έτσι τη διαρρύθμιση και τη λειτουργία του.

Η τεχνική της τοιχογραφίας χρησιμοποιήθηκε επίσης συχνά για να αποδώσει την επένδυση μαρμάρου σε εσωτερικούς χώρους, εκεί όπου ήταν αδύνατη η κατασκευή πραγματικής ορθομαρμάρωσης [3].

Η λαμπρή εποχή των μινωικών τοιχογραφιών είναι η Νεοανακτορική (1650-1450 π.Χ.) ενώ τοιχογραφίες βρίσκουμε και στη κρητο-μυκηναϊκή εποχή (1450-1300 π.Χ.) στα ανάκτορα, στα μέγαρα, στις επαύλεις και τα πολυτελή σπίτια των μεγάλων κέντρων. Καλλιτεχνικό κέντρο της ζωγραφικής είναι η Κνωσός. Έξω από την Κρήτη, συναντώνται τοιχογραφίες και σε άλλες περιοχές, όπως τη Μήλο, την Κέα και κυρίως στη Θήρα.



Σχήμα 3 : λεπτομέρεια από αντιλόπες από το Ακρωτήριο της Θήρας[4]

Η κατασκευή των τοιχογραφιών στη μινωική Κρήτη ακολουθούσε τα παρακάτω στάδια [5]. Αρχικά, κατασκευάζεται το κατώτερο στρώμα από πηλό με ξένες ύλες, όπως άχυρα, επάνω στη λιθοδομή. Κατόπιν, απλώνονταν αλλεπάλληλα στρώματα κονιάματος σβησμένου ασβέστη με ξένες ύλες (όπως τρίχες ζώων), σε αντίθεση με το αιγυπτιακό κονίαμα που αποτελούταν από γύψο ή λάσπη. Για την ισχυρότερη συγκράτηση των κονιαμάτων πάνω στη λιθοδομή χρησιμοποιούσαν κάποιες φορές ξύλινους γόμφους (σφήνες). Το προτελευταίο στρώμα είχε πάχος περίπου 15 χιλιοστά ενώ το τελευταίο μόλις 5 χιλιοστά, αποτελούμενα από καθαρό σβησμένο ασβέστη. Σε ορισμένες παραστάσεις γινόταν στίλβωση της επιφάνειας ίσως με ασπράδι αυγού και με τρίψιμο.

Τα χρώματα των μινωικών τοιχογραφιών ήταν κυρίως ορυκτά ή γαιοχρώματα. Για το μαύρο χρησιμοποιούταν κάρβουνο και μαγγάνιο, για το λευκό ασβέστης και ασπρόχρωμα, για το κόκκινο κόκκινη ώχρα και αιματίτης, για το κίτρινο κίτρινη ώχρα, για το γαλάζιο *lapislazouli*, φυσικός σίδηρος ή αιγυπτιακό γαλάζιο ενώ για το πράσινο μίξη αιγυπτιακού γαλαζίου και κίτρινης ώχρας ή από θρυμματισμένο μαλαζίτη. Οι πρώιμες τοιχογραφίες (17ου, 16ου και 15ου αιώνα π.Χ.) στην ηπειρωτική Ελλάδα και την Κρήτη χαρακτηρίζονται από λαμπρό χρωματισμό ενώ αυτές των τοιχογραφιών των τελευταίων αιώνων είχαν πιο ασαφείς αποχρώσεις.

Μέχρι σήμερα, η θεματολογία των τοιχογραφιών άλλαξε και ξεκίνησε η χρήση τους ως μέσο διακόσμησης κτιρίων και ταφικών μνημείων με διάφορες παραστάσεις από την καθημερινότητα. Τα διακοσμητικά θέματα των τοιχογραφιών επηρεάζονται ή και πηγάζουν απευθείας από άλλες τέχνες, όπως η κεραμική και η υφαντική. Ιδιαίτερα οι πολλές ομοιότητες του τοιχογραφικού διακόσμου με την Καμαραϊκή κεραμική δείχνουν ότι οι πρώτοι τεχνίτες τοιχογραφιών ίσως να ήταν αγγειογράφοι. Ο τρόπος που απεικονίζονται οι μορφές, τα τοπία και τα συμπληρωματικά θέματα στις τοιχογραφίες φανερώνει Αιγυπτιακές και Συρο-παλαιστινιακές επιδράσεις. Ο σχετικά περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων χρωμάτων οδήγησε σε ορισμένες καλλιτεχνικές συμβάσεις που αντλήθηκαν από τις Αιγυπτιακές τοιχογραφίες. Έτσι, για τη δήλωση του δέρματος των ανθρώπινων μορφών χρησιμοποιήθηκαν το λευκό και το κόκκινο χρώμα, όπου το κόκκινο δήλωνε τις ανδρικές μορφές ενώ το λευκό τις γυναικείες. Η φύση και τα μέσα αυτής της τέχνης, όπου τα θέματα μπορούσαν να εκτυλιχθούν σε μία πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια από ότι στα αγγεία και τα έργα της μικροτεχνίας, συντέλεσε στο να αναπτυχθούν μεγάλες, σύνθετες παραστάσεις όπου καταγράφονταν με λεπτομέρεια σκηνές της καθημερινής ζωής και της λατρείας. Έτσι, οι τοιχογραφίες, εκτός από φορείς της υψηλής τέχνης, αποτελούν εξαιρετικά πολύτιμες πηγές πληροφοριών για την καθημερινή ζωή στη μινωική Κρήτη [6].



Σχήμα 4 : Οι μπλε κυρίες, Κνωσός[7]

Κατά την ύστερη ρωμαϊκή περίοδο, γίνεται η τοιχογράφηση κατακομβών με χριστιανικά σύμβολα και σκηνές από τη Βίβλο από του πρώτους χριστιανούς που ζούσαν στη Ρώμη. Κατά τη Βυζαντινή αυτοκρατορία και με την επικράτηση του χριστιανισμού ως επίσημο θρήσκευμα, πραγματοποιούνται πληθώρα τοιχογραφιών σε εκκλησίες και μονές σε Ελλάδα, Κύπρο, Έφεσο, Καππαδοκία, Αντιόχεια[8].

Στη Μυκηναϊκή εποχή συχνά εικονίζονται άρματα στις τοιχογραφίες και είναι φανερό ότι οι ρόδες τους έχουν σχεδιασθεί με διαβήτη. Καμιά φορά το προκαταρκτικό αυτό σχέδιο ζωγραφιζόταν με ένα απαλό κίτρινο χρώμα το οποίο στη συνέχεια καλυπτόταν με ένα πολύ λεπτό - ένα χιλιοστό πάχος - κονίαμα. Μερικές φορές, όταν το απαιτούσε το θέμα ή όταν το έδαφος είχε στεγνώσει, αφαιρούσαν ολόκληρα τμήματα από την επιφάνεια ασβεστοκονιάματος και γέμιζαν τα κενά με ασβεστοκονίαμα διαφορετικού χρώματος.

Οι μυκηναϊκές τοιχογραφίες είναι νωπογραφίες, που σημαίνει ζωγραφική σε υγρή επιφάνεια, αλλά δεν είναι καθαυτό *buon fresco*, όπως π.χ. οι τοιχογραφίες της ιταλικής αναγέννησης. Στο *buon fresco*, την πραγματική νωπογραφία, ολόκληρη η σύνθεση ζωγραφίζεται στον νωπό σοβά, γι' αυτό και είναι μια ζωγραφική πολύ ανθεκτική στο χρόνο και τις καιρικές μεταπτώσεις. Η τεχνική των μυκηναϊκών τοιχογραφιών είναι ένας συνδυασμός του *buon fresco* και του *fresco secco* και παρουσιάζει διάφορες διαβαθμίσεις. Ο καλλιτέχνης αρχίζει να ζωγραφίζει όταν ο σοβάς είναι νωπός, αλλά αν το έργο δεν έχει τελειώσει εγκαίρως, τον ξαναβρέχει, ή συνεχίζει στη

στεγνή επιφάνεια. Γι' αυτό και συχνά στην ίδια τοιχογραφία η διατήρηση είναι άνιση: αλλού τα χρώματα έχουν εισχωρήσει σε βάθος και διατηρούνται καλά, και αλλού αποκολλούνται εύκολα.

Οι τοιχογραφίες συνήθως τοποθετούνται σε ένα μέτρο απόσταση από το δάπεδο και έχουν ύψος 70-80 εκατοστά. Βρίσκονται δηλαδή στο επίπεδο του ματιού. Το άνω μέρος τους φθάνει έως την πόρτα του δωματίου το οποίο κοσμούν. Μερικές μικρογραφικές τοιχογραφίες τοποθετούνται στον τοίχο ψηλά, σαν ζωφόροι. Οι τοιχογραφίες είχαν πλαίσια άνω και κάτω τα οποία αποτελούντο από παράλληλες γραμμές και η αντίθεση ανάμεσα στην εικόνα και το πλαίσιο δημιουργούσε έντονη εντύπωση. Από το δάπεδο έως την τοιχογραφία υπήρχαν ορθομαρμαρώσεις από λίθινες ή γύψινες πλάκες, συνήθως όμως ο τοίχος ήταν ζωγραφισμένος με σχέδια που μιμούνται λίθο. Η τελική φάση είναι το στίλβωμα, που κάνει την τοιχογραφία να φαίνεται εντελώς λεία. Αυτή είναι μια παλαιά τεχνική γνωστή ήδη στην Κρήτη από την Προανακτορική περίοδο.

Υπάρχουν τοιχογραφίες που εικονίζουν μόνο διακοσμητικά θέματα, όπως σπείρες και άλλα γεωμετρικά σχέδια. Στον τρόπο της απεικόνισης όλες οι αιγαιακές τοιχογραφίες, μινωικές, κυκλαδικές και μυκηναϊκές υιοθετούν τις ίδιες συμβατικές λύσεις που πρωτοεμφανίστηκαν στην Κρήτη: το σχέδιο είναι δισδιάστατο, του λείπει εντελώς η τρίτη διάσταση η προοπτική. Οι μορφές αποδίδονται σαν "σιλουέτα", δεν έχουν πλαστικό όγκο, είναι επίπεδες. Τα γυνά μέρη των ανδρών ζωγραφίζονται κόκκινα, των γυναικών λευκά. Το μάτι αποδίδεται κατ' ενώπιον ακόμη και όταν το πρόσωπο εικονίζεται σε κατατομή. Γραμμή εδάφους πολλές φορές δεν υπάρχει και τότε οι μορφές μοιάζουν να αιωρούνται στον χώρο, πράγμα που δίνει σε ορισμένες εικόνες έναν εξώ κοσμο και αφηρημένο χαρακτήρα.

Οι παλαιότερες τοιχογραφίες που σώζονται στην ηπειρωτική Ελλάδα χρονολογούνται γύρω στα 1400 π.Χ. και είναι σύγχρονες με τα ανάκτορα. Ορισμένα θραύσματα από τις Μυκήνες χρονολογήθηκαν στα 1450 π.Χ, οπότε θα ανήκαν σ' ένα παλαιότερο ανακτορικό κτίσμα. Όλα τα μυκηναϊκά ανάκτορα ήταν τοιχογραφημένα, αλλά τοιχογραφίες υπήρχαν και σε άλλα κτίρια, σπίτια, τάφους και ιερούς χώρους. Οι οροφές και τα δάπεδα είχαν επίσης επιχρίσματα, τα δάπεδα των ανακτόρων είχαν συχνά εικονιστικές παραστάσεις. Η τοιχογραφία ήταν μια τέχνη αρκετά διαδεδομένη.

Οι Μυκηναίοι διδάχθηκαν την τέχνη της τοιχογραφίας από τους Μινωίτες και στην εικονογραφία τους όσο και στην διακόσμηση των ανακτόρων ακολουθούν τα μινωικά πρότυπα προσαρμοσμένα όμως στη δική τους νοοτροπία. Στην Κρήτη, η τοιχογραφία ξεκίνησε από έναν ποιητικό νατουραλισμό: τα πρόσωπα κινούνται ελεύθερα στο χώρο, οι σκηνές έχουν ζωντάνια και κίνηση, η φύση αναπαρίσταται πλούσια και μπαίνει μέσα στα ανάκτορα και τα σπίτια. Βαθμιαία οι μορφές τυποποιούνται, οι σκηνές οργανώνονται σε ζώνες, απομακρύνονται από τη φυσική διάταξη και γίνονται ανώνυμες και περιγραφικές, στερεότυπα σύμβολα της πραγματικής κίνησης.

Οι Μυκηναίοι υιοθέτησαν αυτόν τον τύπο, αυτή τη φάση της μινωικής τοιχογραφίας γιατί συνέπεσε ακριβώς την εποχή αυτή να έχουν αναπτύξει στενές επαφές με την Κρήτη, αλλά και επειδή από αισθητική άποψη ανταποκρινόταν στον επίσημο, μνημειακό χαρακτήρα που χαρακτηρίζει την τέχνη τους.

Οι μυκηναϊκές τοιχογραφίες, πολύ περισσότερο από τις μινωικές, δείχνουν μια τάση για τυποποίηση και σχηματοποίηση, για συμβατικότητα και επανάληψη. Πολλά θέματα παρουσιάζονται σύμφωνα μ' έναν καθιερωμένο τύπο, με μια συμβατική προκαθορισμένη "συνταγή". Μέσα από τις τοιχογραφίες, όπως και μέσα από άλλα μυκηναϊκά καλλιτεχνήματα, γίνεται αντιληπτή η διάθεση των Μυκηναίων για αφαίρεση και συμβολισμό.

Οι μυκηναϊκές τοιχογραφίες έχουν χρώματα ζωηρά χωρίς διαβαθμίσεις και φωτοσκιάσεις. Οι μορφές έχουν σαφήνεια και σωστές αναλογίες παρ' όλη τη στατικότητα και την ακαμψία τους. Οι γραμμές είναι συχνά σκληρές. Τα περιγράμματα των μορφών είναι καθαρά, πολλές φορές έντονα. Τοπικές σχολές ζωγραφικής δεν υπάρχουν, οι καλλιτέχνες εμπνέονται από μια κοινή παράδοση και μέσα στα πλαίσια αυτής κινούνται. Τα θέματα μεταδίδονται έτοιμα από το ένα κέντρο στο άλλο και εξελίσσονται ομοιόμορφα[9].

Η μετάβαση από την τέχνη της αρχαίας ζωγραφικής των πορτρέτων στις απαρχές της τέχνης των πρώιμων βυζαντινών εικόνων, λαμβάνει χώρα καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου που είναι γνωστή ως 'ύστερη αρχαιότητα'. Τα πορτρέτα των Φαγιούμ, ένα corpus 1000 περίπου έργων, διατηρήθηκε χάρη στο μοναδικό ξηρό υπέδαφος των αιγυπτιακών νεκροπόλεων. Εξαιτίας αυτών των ιδιαίτερα ευνοϊκών κλιματολογικών συνθηκών στην Κοιλάδα του Νείλου, διατηρήθηκαν οι πιο πρώιμες χριστιανικές εικόνες και τα κοπτικά υφάσματα, τα άλλα χνάρια που άφησαν οι πρώτοι χριστιανοί. [10]

Η περίοδος των τριών πρώτων αιώνων χαρακτηρίζεται από πολιτισμικό, φυλετικό και θρησκευτικό συγκρητισμό. Τα πορτρέτα του Φαγιούμ απεικονίζουν στην πλειονότητά τους μορφές παγανιστών, όμως είναι πιθανόν μερικά από αυτά να απεικονίζουν τις πρώτες μορφές των πρώτων πιστών του Χριστού. Η χριστιανική τέχνη κληρονόμησε τις ελληνιστικές μορφές τέχνης, που κυριαρχούσε σε όλη τη Μεσόγειο την εποχή του Χριστού, στοιχεία των οποίων απέβαλε σταδιακά κατά την διάρκεια των επόμενων αιώνων, καθώς μετεξελίχθηκε από απαγορευμένη τέχνη κατατρεγμένων μειονοτήτων σε τέχνη της επίσημης θρησκείας της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας.

Όταν οι ζωγράφοι παγανιστικών θεοτήτων κλήθηκαν να ζωγραφίσουν χριστιανικές εικόνες, το έκανα με τον μόνο τρόπο που ήξεραν, δηλαδή με τον παραδοσιακό τρόπο. Η γνώση της ρεαλιστικής ζωγραφικής των πορτρέτων, έτσι όπως εμφανίζεται στο corpus του Φαγιούμ, έδωσε στους πρώτους χριστιανούς τη δυνατότητα να αποκτήσουν πιστές νατουραλιστικές απεικονίσεις των προσώπων των αγίων και των μαρτύρων της εποχής.

Η γνώση της αρχαίας τεχνικής υπήρξε ένα από τα θύματα του εικονοκλαστικού φαινομένου, που εκ των πραγμάτων οδήγησε στην απώλεια της ικανότητας των ζωγράφων να απεικονίζουν νατουραλιστικά τα θέματά τους. Η μεταφυσική υπόσταση που έχουν τα βλέμματα των χριστιανών αγίων στις βυζαντινές εικόνες επιτεύχθηκε μέσω της βαθμιαίας αποβολής εκ μέρους των βυζαντινών αγιογράφων των νατουραλιστικών στοιχείων της αρχαίας ζωγραφικής. Η σταδιακή τυποποίηση των εικόνων είναι αποτέλεσμα εν μέρει της τεχνητής διακοπής στη συνέχεια της ελληνικής ζωγραφικής παράδοσης λόγω της Εικονομαχίας και εν μέρει της ανάγκης των χριστιανών, καθώς ο Χριστιανισμός απλωνόταν σε ολόκληρη τη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία, να εξοβελίσουν το ρεαλισμό, τον οποίο ταύτιζαν με τη βλασφημία.

Ελληνιστική και Ρωμαϊκή τέχνη

Ο όρος Ελληνιστική αναφέρεται στους τρεις περίπου αιώνες που μεσολάβησαν από το θάνατο του Αλέξανδρου το 323 π.Χ. ως το 31 π.Χ., οπότε το τελευταίο από τα βασίλειά του απορροφήθηκε από τη Ρώμη.

Κατά την Ελληνιστική, οι νεκροί στην Αθήνα είτε αποτεφρώνονταν είτε θάβονταν σε απλούς τάφους που συνοδεύονταν από τις γνωστές επιτύμβιες στήλες. Οι αντιλήψεις των Ελλήνων για τη μετά θάνατο ζωή και η αποστροφή τους για κάθε είδους αποθέωση του νεκρού δεν ευνοούσαν τη φιλοτέχνηση δοξαστικών μνημείων. Στη σαρκοφάγο του Αλεξάνδρου, τα εικονογραφικά και άλλα στοιχεία της μαρτυρούν μια 'εισβολή' στην Ελληνική τέχνη στοιχείων από άλλους πολιτισμούς, κάτι που είχε παρατηρηθεί από την πολύ προγενέστερη περίοδο της Ανατολίζουσας τεχνοτροπίας.

Η προσωπογραφία, είδος μάλλον ασυνήθιστο στην Ελληνική τέχνη, άρχισε να ανθεί μετά τον 4^ο π.Χ. αιώνα. Τα αγάλματα, τα έργα ζωγραφικής ακόμα και οι ναοί, παύουν πια να αντιμετωπίζονται ως τελετουργικές εικόνες και αναβαθμίζονται σε 'έργα τέχνης', σε δημιουργήματα επώνυμων καλλιτεχνών, που δουλεύουν για επώνυμους εργοδότες. Άλλωστε, και η εμφάνιση του νέου θεσμού του συλλέκτη έργων τέχνης θα οδηγήσει ένα ακόμα βήμα μπροστά τη διαδικασία αποθησαυρευτικοποίησης της τέχνης και κοινωνικής αναγνώρισης του καλλιτέχνη. Τα νέα ρεύματα στην αρχαία ελληνική σκέψη, συμπίπτοντας χρονικά και με την ενίσχυση των νατουραλιστικών τάσεων στις εικαστικές τέχνες, άλλαξαν ριζικά την παραδοσιακή αντίληψη των Ελλήνων για την ομορφιά. Τώρα πια, μια όχι ιδιαίτερα ελκυστική εξωτερική εμφάνιση μπορούσε να υποκρύπτει ευγένεια και χάρη της ψυχής.

Ζωγραφική και ψηφιδωτά των ελληνιστικών και ρωμαϊκών χρόνων

Οι τοιχογραφίες και τα ψηφιδωτά που διακοσμούσαν τα σπίτια της Ιταλικής Χερσονήσου το 20 και 10 π.Χ. καθώς και τον 1^ο μ.Χ. αιώνα ανήκουν σε ένα εικαστικό ύφος που αναπτύχθηκε στα ελληνιστικά βασίλεια- σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις είναι και έργα καλλιτεχνών από την Ανατολική Μεσόγειο. Στις αρχές του 2^{ου} π.Χ. αιώνα, οι Ρωμαίοι είχαν ήδη

κυριαρχήσει όχι μόνο στην Ιταλία, τη Σικελία, τη Σαρδηνία και την Κορσική, αλλά και στις πρώην καρχηδονικές αποικίες της νότια Γαλλίας και της Ισπανίας. Το 151 π.Χ. υπέταξαν οριστικά την Καρχηδόνα και τα αφρικανικά εδάφη της, ενώ τρία χρόνια αργότερα, το 148 π.Χ., προσάρτησαν την Ελλάδα και το 131 π.Χ. το Βασίλειο της Περγάμου. Η μεγάλη γεωγραφική και εθνική επέκταση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας γεννά κάποια αξεπέραστα προβλήματα σχετικά με τον καθορισμό των ορίων της Ρωμαϊκής τέχνης.

Τα γλυπτά, οι τοιχογραφίες, τα ψηφιδωτά και τα άλλα έργα τέχνης από την Πομπηία και το Ερκουλάνεουμ, που έμειναν θαμμένα κάτω από τη λάβα και τις στάχτες του Βεζούβιου από το 79 μ.Χ. ως το 18^ο αιώνα, γεννούν παρόμοια ακριβώς προβλήματα. Η Πομπηία και το Ερκουλάνεουμ ήταν επαρχιακές πόλεις. Από άποψη πλούτου και τεχνών δεν μπορούν να συγκριθούν με την Αλεξάνδρεια, ή τη Ρώμη. Από τη στιγμή επομένως που οι γνώσεις μας για την Ελληνιστική και Ρωμαϊκή τέχνη στηρίζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό στις τοιχογραφίες τους, υπάρχει κίνδυνος η εικόνα που έχουμε να μην είναι ακριβής. Πολύ σπάνια οι τοιχογραφίες της Πομπηίας διαθέτουν την τεχνική αρτιότητα της 'Μάχης της Ισούς' (ψηφιδωτό που απεικονίζει τη νίκη του Αλέξανδρου κατά των Περσών στην Ισσό). Μερικές μάλιστα από αυτές δίνουν μια εντύπωση προχειρότητας και τραχύτητας.

Ήδη από τις αρχές του 1^{ου} αιώνα π.Χ. κάνουν την εμφάνισή τους φιλόδοξα διακοσμητικά σχέδια που επιδιώκουν να διευρύνουν οπτικά το χώρο των δωματίων με κίονες, θριγκούς και άλλα αρχιτεκτονικά στοιχεία. Συχνά στις διακοσμητικές αυτές τοιχογραφίες ενσωματώνονται και εικονιστικές σκηνές, σαν ένα είδος από πίνακες κρεμασμένοι από τους τοίχους της βασικής αρχιτεκτονικής σύνθεσης. Αργότερα, στον ίδιο τοίχο δημιουργούνται οπτικά ανοίγματα, είτε πραγματικά είτε με τη μορφή ψευδοπαράθυρων. Τον 1^ο μ.Χ αιώνα, η ιδιότυπη αυτή αρχιτεκτονική εκτελείται με ακόμα μεγαλύτερη φαντασία, απεικονίζοντας κτίρια κομψότερα ίσως και πιο κομψά που είχε να επιδείξει η πραγματικότητα. Το προοπτικό βάθος υποβάλλεται με ένα σύστημα ορθογώνιων ή γραμμών, που συγκλίνουν προς έναν κεντρικό άξονα και όχι ένα σημείο φυγής, σύστημα που εμπνέεται προφανώς από τις συμβάσεις της θεατρικής σκηνογραφίας και που πιθανότατα πρωτο-χρησιμοποιήθηκε στην ελληνιστική Ανατολή.

Οι τοιχογραφίες της Πομπηίας κατατάσσονται συνήθως σε μια από τις λεγόμενες Πομπηϊανές τεχνοτροπίες Α', Β', Γ', και Δ', τα όρια των οποίων δεν είναι βέβαια απόλυτα σαφή και αυστηρά. Η πορεία δεν ήταν γραμμική αλλά προσθετική, και φυσικά δεν ήταν υπόθεση κυρίας, ή πρωταρχικά της Πομπηίας, απλώς εκεί έχουν σωθεί τα περισσότερα δείγματα του είδους. Στο σπίτι κάποιων εμπόρων της Πομπηίας υπάρχει, χαρακτηριστικά, μια αίθουσα όπου συναντά κανείς τέσσερις διαφορετικές ιλουζιονιστικές τεχνοτροπίες: μια ζώνη στο κάτω μέρος του τοίχου με ζωγραφισμένα ομοιώματα σπάνιων μαρμάρων, πίνακες κρεμασμένους ή τοποθετημένους στον τοίχο μέσα σε πλαίσια που δίνουν την αίσθηση ότι προεξέχουν, παράθυρα μέσα από τα

οποία προβάλλουν αέρινα κτίσματα και αγάλματα στην κορυφή του τοίχου, πίσω από τα οποία διακρίνονται επίσης φανταστικά κτίρια. Ορισμένες φορές, οι 'πίνακες' απεικόνιζαν φρούτα, ψάρια και σκεύη μισογεμισμένα με νερό (τις πρώτες νεκρές φύσεις στην ιστορία της ζωγραφικής), που αποτελούσαν επίσης παραλλαγές και ασκήσεις στο θέμα της οπτικής ψευδαίσθησης, του ιλουζιονισμού, καθώς στηρίζονταν σε ένα περίπλοκο και επιτηδευμένο παιχνίδι με τα διάφορα επίπεδα της πραγματικότητας. Οι ζωγραφικές παραστάσεις κάθε σπιτιού αντανakλούσαν, σε έναν βαθμό, την κοινωνική θέση και το πνευματικό επίπεδο του ιδιοκτήτη: οι μορφωμένες ανώτερες τάξεις προτιμούσαν τα ελληνικά θέματα, ενώ οι νεόπλουτοι τη διακοσμητική υπερβολή και χλιδή. Οι διακοσμήσεις των κατοικιών της εποχής περιελάμβαναν συχνά και τοπία ή μάλλον συνθέσεις με πρόσωπα σε ένα φυσικό τοπίο.

Οι καλύτερες από τις τοιχογραφίες της Πομπηίας και της Ρώμης διακρίνονται για τη φρεσκάδα τους, τη ζωντάνια τους και την ελευθερία τους στην απόδοση του θέματος. Οι αρετές αυτές μπορούν να εκτιμηθούν καλύτερα παρατηρώντας ορισμένες λεπτομέρειες, που συχνά αναδεικνύουν την εξαιρετική τεχνική και τη φινέτσα του καλλιτέχνη, ενώ αντίθετα δεν διακρίνουν πάντοτε τις προσωπογραφίες της εποχής.

Η τάση για συλλογή έργων τέχνης έπαιξε οπωσδήποτε κάποιο ρόλο στη διαφορετική αντιμετώπιση που άρχισαν πια να έχουν οι καλλιτέχνες για τη δουλειά τους. Έργα αφιερωμένα σε κάποιο θεό των Ελλήνων, και επομένως τοποθετημένα στο ιερό του, έχαναν κάθε σχεδόν θρησκευτική σημασία και αξία από τη στιγμή που μεταφέρονταν σε ιδιωτικές κατοικίες της Ιταλίας. Εκεί μετατρέπονταν σε έργα για συλλέκτες, σε ενδείξεις πολυτελούς διαβίωσης και ανώτερης κοινωνικής θέσης, με αποτέλεσμα να χαθεί το μυστήριο που φαίνεται ότι περιέβαλλε τους καλλιτέχνες παλιότερα.

Πρωτοχριστιανική και Βυζαντινή τέχνη

Στα χρόνια του Τάκιτου (2^{ος} αιώνας μ.Χ.) ο Χριστιανισμός δεν ήταν παρά μια αίρεση που ασπάζονταν κυρίως μικρομαγαζάτορες και τεχνίτες. Η ταπεινοφροσύνη που οι Ρωμαίοι τη θεωρούσαν αδυναμία του χαρακτήρα, αναγορευόταν από τους χριστιανούς σε αρετή, με ύψιστο παράδειγμα την ενσάρκωση και το μαρτύριο του ίδιου του Χριστού. Σε αντίθεση με τους Ρωμαίους που συνήθιζαν να αποσυνδέουν την ηθική από τη θρησκεία και τις λατρευτικές συνήθειες, για τους χριστιανούς μια τέτοια διάκριση ήταν αδιανόητη. Άρχισαν να αποτελούν κοινότητα με έντονη την αίσθηση ότι ανήκουν στην Εκκλησία, με συνάθροιση των ανθρώπων τόσο στη γη όσο και μετά θάνατον. Η τάση αυτή, για συσπείρωση και αλληλοϋποστήριξη, ενώ αποτελούσε πηγή δύναμης για τους ίδιους, άρχισε με τον καιρό να ανησυχεί σοβαρά τους υπόλοιπους πολίτες της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Ήδη στις αρχές του 3^{ου} αιώνα μ.Χ. είχε αρχίσει να παραβιάζονται τα σύνορα της αυτοκρατορίας.

Παρόλο που οι χριστιανοί είχαν υιοθετήσει τον σταυρό ως σύμβολο και σημείο αναγνώρισης, απέφευγαν τις απροκάλυπτες απεικονίσεις της σταύρωσης. Παράλληλα, ως τα τέλη του 3^{ου} και τις αρχές του 4^{ου} αιώνα μ.Χ. ήταν πολύ διστακτικοί να αναπαραστήσουν τον ίδιο τον Χριστό, που αποτελεί το βασικό πρόσωπο των νωπογραφιών που πραγματοποιήθηκαν μέχρι και την περίοδο της Αναγέννησης. Η απαραίτητη, λόγω των διώξεων, σύνεση και μυστικότητα ήτα φυσικό να ενθαρρύνει την εμφάνιση μιας απόκρυφης και έντονα συμβολικής εικονογραφίας, προσιτή μόνο στους μνημένους. Τα πρώτα χριστιανικά σύμβολα ήταν μάλλον σημειολογικού παρά αναπαραστατικού χαρακτήρα.

Τα πρώτα χριστιανικά σύμβολα κυριαρχούν και στις νωπογραφίες, που σώζονται στις κατακόμβες της Ρώμης. Αυτά τα υπόγεια νεκροταφεία αποτελούσαν ήδη από το 2^ο αιώνα τόπο συνάθροισης και ταφής των χριστιανών και βρίσκονται κατά κανόνα στις παρυφές της πόλης, όπου η γη ήταν φθηνότερη. Τόσο οι οροφές όσο και οι τοίχοι των υπόγειων θαλάμων και διαδρόμων που αποτελούσαν τις κατακόμβες καλύπτονται κατά κανόνα με τις γνωστές χριστιανικές συμβολικές παραστάσεις, όπως μονογράμματα, ψάρια, άγκυρες ελπίδας, κ.α. . Οι καλλιτέχνες που είχαν την ευθύνη για τις παραστάσεις αυτές δεν ήταν απαραίτητα χριστιανοί, αλλά συχνά απλοί επαγγελματίες που παράλληλα διακοσμούσαν τα σπίτια των ευκατάστατων ρωμαίων της εποχής. Η ζωγραφική των κατακομβών δεν διακρίνεται για την υφολογική της πρωτοτυπία. Οι χριστιανοί της Ρώμης κληρονόμησαν την εικαστική και λογοτεχνική γλώσσα των ειδωλολατρών, επενδύοντας απλώς τις παλαιές εικόνες με νέα σημασία.

Οι πρώτες χριστιανικές εκκλησίες της Ρώμης καλύπτοντας στο εσωτερικό τους από νωπογραφίες, Τα πιο ανθεκτικά ψηφιδωτά, που γνώρισαν μεγάλη ανάπτυξη στα Ελληνιστικά χρόνια, κόστιζαν περισσότερο και γι αυτό η χρήση τους ήταν περιορισμένη. [11]

Η ζωγραφική των βυζαντινών εικόνων θα περισώσει τα μυστικά της ζωγραφικής της αρχαίας προσωπογραφίας, όπως αυτή εμφανίζεται στα πορτρέτα του Φαγιούμ. Στα πρόσωπα των βυζαντινών αγίων επιβιώνει η παράδοση της χρήσης της τετραχρωμίας για τις επιφάνειες της σάρκας, ενώ κληρονομούν το χρυσό φόντο, τη μετωπική στάση του σώματος καθώς και τον τύπο εικόνας στον οποίο ο εικονιζόμενος/η κρατά στο ένα χέρι σταυρό ενώ το άλλο το έχει σηκωμένο σε θέση που ερμηνεύεται ως δέηση ή ως κίνηση αποτροπής του κακού.

Τα περισσότερα δείγματα νωπογραφιών, που σώζονται μέχρι τις μέρες μας στον Ελλαδικό χώρο, είναι αγιογραφίες που φιλοτεχνήθηκαν κατά την ελληνιστική και βυζαντινή περίοδο.

Η τοιχογραφία έφτασε στο αποκορύφωμά της κατά την περίοδο της Αναγέννησης, με προεκτάσεις σε όλο τον ευρωπαϊκό χώρο. Πληθώρα καλλιτεχνών διακοσμούν πολλά κυβερνητικά κτίρια και εκκλησίες, με διασημότερο παράδειγμα την Καπέλα Σιξτίνα από τον Μιχαήλ- Άγγελο, με πλούσιο διάκοσμο σε όλες τις επιφάνειες της αίθουσας με μοναδικές παραστάσεις καλλιτεχνικής αξίας.

Η τεχνική του fresco επέτρεπε στον καλλιτέχνη να απεικονίσει σύνθετες αφηγήσεις και να πειραματιστεί με το βάθος και τη σχέση του έργου με το χώρο. Κατά την περίοδο αυτή, της Αναγέννησης, τα κύρια θέματα των νωπογραφιών ήταν η ζωή του Χριστού, η Παρθένος Μαρία, ή ο άγιος για τον οποίο χτίστηκε ο ναός ή το μοναστήρι.

Μερικές από τις πιο γνωστές νωπογραφίες της Αναγέννησης είναι η “Καπέλα Σιξτίνα” (Sistine Chapel) του Μιχαήλ Άγγελου στο παρεκκλήσι του Αποστολικού Παλατιού, της επίσημης κατοικίας του Πάπα, με τη “Δημιουργία του Αδάμ” να αποτελεί το γνωστότερο ίσως έργο όλων των εποχών (Σχήμα 5), “Η Σχολή των Αθηνών” του Ραφαήλ σε ένα από τα “δωμάτια των υπογραφών” στο Αποστολικό Παλάτι στο Βατικανό, απεικονίζοντας τους 21 φιλοσόφους της αρχαίας Ελλάδας (Σχήμα 6), την “Κοίμηση της Θεοτόκου” του Antonio de Correggio στον θόλο του Καθεδρικού της Πάρμας στην Ιταλία (Σχήμα 7), το έργο “Battle of Anghiari” του Λεονάρντο Ντα Βίντσι (σχήμα 8) κ.α.. Μερικοί από τους γνωστότερους καλλιτέχνες νωπογραφιών της εποχής ήταν ο Μιχαήλ Άγγελος, ο Ραφαήλ, ο Λεονάρντο Ντα Βίντσι, ο Μποτιτσέλι και ο Τιτιάνο.



Σχήμα5 : Sistine Chapel, Μιχαήλ Άγγελος[12]



Σχήμα 6 : Η δημιουργία του Αδάμ, Μιχαήλ Άγγελος[13]



Σχήμα 7 : Κοίμηση της Θεοτόκου, Antonio de Correggio[14]



Σχήμα8 : Battle of Anghiari, Leonardo Da Vinci[15]

Υπάρχουν διαφορετικά είδη τοιχογραφιών. Το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι ότι αποτελούνται από τοιχοδομή επικαλυμμένη με κονίαμα, που αποτελεί το υπόστρωμα του έργου, και τη ζωγραφική επιφάνεια. Ο τοίχος συνήθως κατασκευασμένος από πέτρα ή τούβλο καλύπτεται από κονίαμα αποτελούμενο από συστατικά όπως η άμμος και ο ασβέστης, τα οποία μετατρέπονται σε κονίαμα με την προσθήκη νερού. Με την εξάτμιση του νερού, ο ασβέστης κρυσταλλώνεται γύρω από τους κόκκους άμμου και οι κρύσταλλοί του διεισδύουν στην τοιχοδομή, προσδίδοντας συνοχή. Ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την τεχνική, το κονίαμα μπορούσε να περιέχει και άλλα υλικά, όπως αυγό, λάδι, γιδότριχα, λεπτοκομμένο άχυρο, κεραμιδόσκονη κ.α.. Οι τοιχογραφίες χωρίζονται σε είδη όπως οι νωπογραφίες, η εγκοιμητική, η τέμπερα, οι ελαιογραφίες, οι υδατογραφίες, η ακουαρέλα, κ.α. .

Η τέμπερα είναι η ζωγραφική μέθοδος κατά την οποία η χρωστική αναμειγνύεται με αυγό για να παραχθεί μια ανθεκτική βαφή. Οι τύποι των χρωμάτων που μπορούσαν να πετύχουν οι ζωγράφοι ήταν περιορισμένοι και ήταν επιλογή των ζωγράφων μέχρι τα τέλη του 15^{ου} αιώνα, όπου και υιοθετήθηκαν οι ελαιογραφίες.

Οι ελαιογραφίες έγιναν ευρέως διαδεδομένες κυρίως στη βόρεια Ευρώπη το πρώτο μισό του 15^{ου} αιώνα, αλλά ελάχιστα δημοφιλείς στην Ιταλία μέχρι και τα τέλη αυτού.

Το χρώμα έχει την ιδιότητα να στεγνώνει με αργό ρυθμό, καθιστώντας το εύκολο στην κατεργασία και τις επιδιορθώσεις καθώς στεγνώνει. Σε αντίθεση με τις νωπογραφίες, οι ελαιογραφίες δίνουν στον καλλιτέχνη τη δυνατότητα να δημιουργήσουν διαφάνεια, μιας και το χρώμα μπορεί να εφαρμοστεί ελαφρά σαν λούστρο. Έτσι, η ελαιογραφία έχει ευρύτερη γκάμα χρωμάτων

συγκριτικά με τους τρόπους ζωγραφικής που επιτρέπει την αναπαραγωγή πιο ρεαλιστικών προσωπογραφιών, όπως αρχιτεκτονικής και του φυσικού περιβάλλοντος.

1.3 Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΝΩΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

Νωπογραφία (buon fresco) θεωρείται το έργο που πραγματοποιείται σε στρώσεις. Αποτελείται από το τοιχοστρώμα, το κατώτερο στρώμα κονιάματος πάχους 10mm, που μπαίνει απευθείας πάνω στα λιθοσώματα και αποτελείται από ένα μέρος ασβέστη, δύο μέρη άμμου (ποταμίσια) ή αργιλώδες χώμα, άχυρο και λινάρι (τα οποία περιέχουν κυτταρίνη που λειτουργεί ως στερεωτικό ενάντια στις ρηγματώσεις μετά το στέγνωμα), το ανώτερο στρώμα κονιάματος ή επίστρωμα πάχους περίπου 3mm, με ασβέστη και λεπτότερη άμμο και ενίοτε λεπτότατη μαρμαρόσκονη, και τέλος η ζωγραφική επιφάνεια πάχους 2mm. Στην ουσία, το υδροξείδιο του ασβεστίου που περιέχεται στο κονίαμα αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και μετατρέπεται σε ανθρακικό ασβέστιο σύμφωνα με την αντίδραση :

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται ανθρακοποίηση και το σχηματιζόμενο νερό συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του κονιάματος και σιγά-σιγά εξατμίζεται. Πάνω σε αυτή την επιφάνεια, ο καλλιτέχνης φιλοτεχνούσε το προσχέδιο της σύνθεσης με κάρβουνο [16]. Αργότερα, το προσχέδιο σχεδιαζόταν σε χαρτί και μεταφερόταν στην επιφάνεια με τη βοήθεια βελόνας, έβαφε τις γραμμές με χρωστική ουσία σε σκόνη και στη συνέχεια διαμόρφωνε το τελικό λεπτό και λείο στρώμα κονιάματος, πάνω στο οποίο έμπαινε το χρώμα, διαλυμένο με νερό. Οι κόκκοι της χρωστικής που χρησιμοποιείται συγκρατούνται στο κρυσταλλικό πλέγμα του ανθρακικού ασβεστίου, που λειτουργεί ως συνδετικό υλικό, και το προφυλάσσει, προσδίδοντας διάρκεια στο χρόνο. Ανάλογα με τη χρονική στιγμή της εφαρμογής του χρώματος, προκύπτει διαφορετικό τελικό αποτέλεσμα.

Ως νωπογραφία (fresco) νοείται η τεχνική κατά την οποία τα χρώματα απλώνονται απευθείας πάνω σε νωπό κονίαμα, ως secco η τεχνική κατά την οποία τα χρώματα τοποθετούνται σε επιφάνεια κονιάματος που έχει στεγνώσει με τη βοήθεια συνδετικού υλικού, όπως το αυγό και το λάδι, και mezzo fresco αυτή όπου τα χρώματα μπαίνουν πάνω στο κονίαμα που έχει στεγνώσει μερικώς με τη βοήθεια συνδετικού υλικού αλλά δεν απορροφώνται όπως στην πρώτη περίπτωση.

Στην τεχνική του secco fresco καταργείται η περίπλοκη προετοιμασία του τοίχου με το νωπό κονίαμα. Αντ' αυτού, ο ξηρός τελειωμένος τοίχος εμποτίζεται με ασβεστόνερο και ζωγραφίζεται ενώ είναι υγρό. Τα χρώματα δεν διεισδύουν στο κονίαμα αλλά σχηματίζουν ένα επιφανειακό φιλμ, όπως

και οποιοδήποτε άλλο είδος μπογιάς. Αυτό το είδος ζωγραφικής υστερεί σε σχέση με το *buon fresco* (νωπογραφία) καθώς έχει μικρότερη αντοχή. Οι χρωστικές ουσίες απαιτούν κάποιο συνδετικό μέσο, όπως το αυγό, κόλλα ή λάδι για να προσκολληθούν στον τοίχο. Είναι εύκολο να διακριθεί η εφαρμογή *secco* που έγινε πάνω σε *buon fresco*, κάτι που γινόταν κατά κόρον από τον Μεσαίωνα και μετά, και των *secco fresco* που έγιναν απευθείας σε σκέτο τοίχο. Γενικά, οι νωπογραφίες έχουν μεγαλύτερη διάρκεια στο χρόνο από οποιαδήποτε εφαρμογή *secco fresco*, καθώς το τελευταίο δουλεύει καλύτερα σε μια αδρή επιφάνεια, ενώ οι πραγματικές νωπογραφίες σε λεία. Οι πρόσθετες εργασίες με *secco* γινόντουσαν ως διορθώσεις του έργου και κάποιες φορές για να προστεθούν μεγαλύτερες λεπτομέρειες. Έτσι, η εφαρμογή *secco* σε *buon fresco* έδινε τη δυνατότητα για προσθήκη περισσότερων χρωματικών αποχρώσεων που δεν υπάρχουν στις νωπογραφίες, όπου μόνο ορισμένες χρωστικές ουσίες συνεργάζονται με το πολύ αλκαλικό περιβάλλον του φρέσκου σοβά με κύριο συστατικό τον ασβέστη.

Ακόμα και στην πρώιμη περίοδο της Ιταλικής Αναγέννησης, οι καλλιτέχνες συνδύαζαν τις δύο πρακτικές για να τις προσδώσουν περισσότερες χρωματικές επιλογές. Συνοψίζοντας, η τεχνική του *secco* συγκεντρώνει τρία βασικά χαρακτηριστικά, την ταχύτητα εφαρμογής, το πλεονέκτημα της διόρθωσης των λαθών και την ποικιλία χρωμάτων όταν απλώνονται σε εντελώς στεγνό σοβά. Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα αυτή της τεχνικής είναι το πορτραίτο του Δάντη Αλιγκέρι από τον Τζιότο, το έργο “Μυστικός Δείπνος” του Λεονάρντο Ντα Βίντσι, κ.α. .

Στην τεχνική *mezzo fresco*, που είναι μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ *buon fresco* και *secco fresco*, η επάλειψη με χρώμα γίνεται όσο είναι ελαφρά νωπό το κονίαμα επιτρέποντας τη μερική διείσδυση του χρώματος στο σοβά. Τα *mezzo fresco* ζωγραφίζονται σε ελαφρώς νωπό κονίαμα, το οποίο είναι αρκετά σκληρό για να μην μπορεί να αποτυπωθεί κάποιο αποτύπωμα αλλά να μπορούν τα χρώματα να διεισδύσουν ελαφρώς στον σοβά. Μέχρι τα τέλη του 16^{ου} αιώνα, το *mezzo fresco* αντικατέστησε σταδιακά το *buon fresco* και το χρησιμοποιούσαν καλλιτέχνες όπως ο Giambattista Tiepolo και ο Μιχαήλ Άγγελος.

Κατά τη διαδικασία της νωπογραφίας χρησιμοποιούνται μόνο εκείνες οι χρωστικές που δεν αντιδρούν χημικά με τον ασβέστη. Έτσι, υπάρχει περιορισμός στις χρωματικές αποχρώσεις. Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο μια λεπτή, διαφανής επάλειψη χρωστικής ουσίας, ώστε να μην επιβαρυνθεί το κονίαμα με περισσότερους κόκκους από αυτούς που μπορούν να απορροφηθούν φυσιολογικά από τη δράση του ασβέστη κατά το στέγνωμα. Έτσι, τα χρώματα που αντέχουν είναι τα γεώδη κόκκινα, ώχρες, όμπρες, το lapis lazuli, το σμάλτο, το terreverte, το μπλε ουλτραμαρίνα, το πράσινο κοβάλτιο, κ.α. . Επιπλέον, η νωπογραφίες μπορούν να εφαρμοστούν

μόνο σε εποχές που δεν κάνει κρύο. Το λεπτό επίχρισμα των νωπογραφιών κάλυπτε τόσο τμήμα της τοιχοδομής όσο μπορούσε να ολοκληρώσει ο καλλιτέχνης σε μια ημέρα, όσο ήταν το κονίαμα νωπό.

Η εφαρμογή των κονιαμάτων σε στρώσεις (Σχήμα 9) και η ισχυρή προσκόλλησή τους επάνω στην τοιχοποιία, κατάφεραν να δημιουργήσουν έργα ανθεκτικά στο χρόνο. Η εξωτερική επιφάνεια της νωπογραφίας αποτελεί, μετά την ολοκλήρωση του έργου, αναπόσπαστο κομμάτι του υποστρώματος και λειτουργεί πλέον σαν ένα σώμα. Εντούτοις, παρατηρούνται διάφορες βλάβες κατά περιπτώσεις με διαφορετικά αίτια.

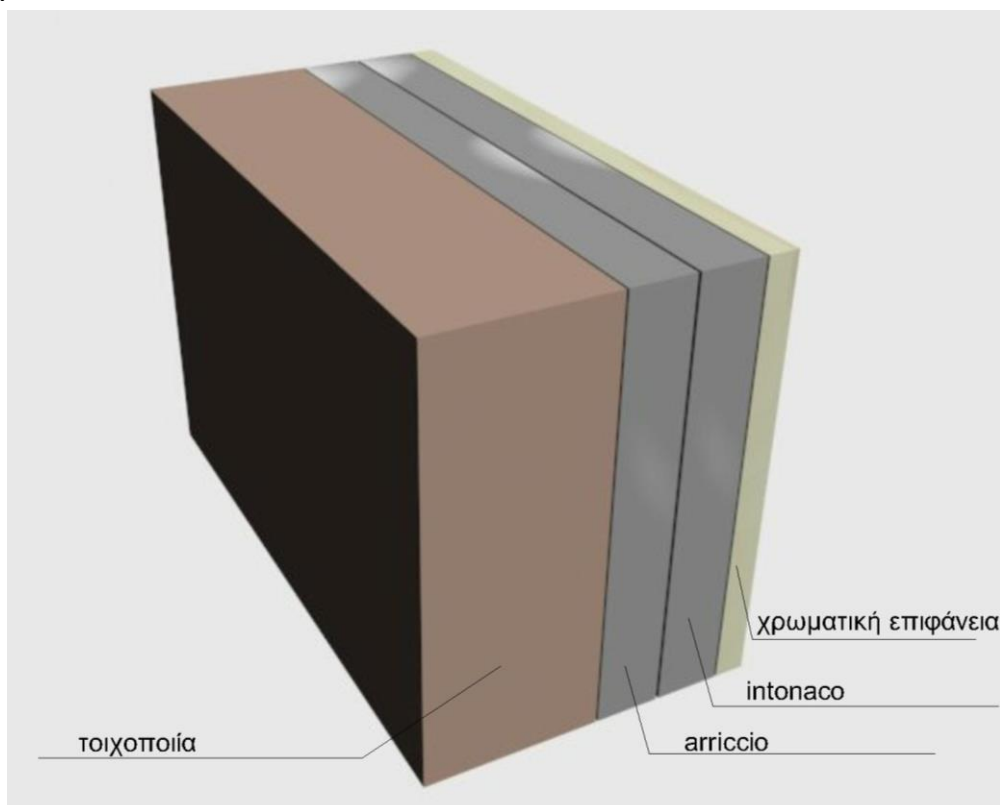
Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την δομική κατάσταση μιας νωπογραφίας είναι η υγρασία. Η σύνθεση των ασβεστιτικών κονιαμάτων από υδροσκοπικά υλικά είναι τέτοια ώστε, σε συνθήκες περιβάλλοντος με αυξημένα επίπεδα υγρασίας να δημιουργούνται έντονα προβλήματα στη δομή τους. Το νερό εισβάλλει στο εσωτερικό του υλικού και δεσμεύεται στο εσωτερικών των μορίων του. Εκεί, η συστολοδιαστολές των μορίων του νερού προκαλούν ρήγματα στο εσωτερικό της τοιχογραφίας. Η δράση των αλάτων, μαζί με τις μεταβολές της περιβάλλουσας υγρασίας που συντελούν ώστε να γίνεται διάλυση και κρυσταλλοποίηση των αλάτων, οδηγούν σε αποσάθρωση της επιφάνειας των νωπογραφιών. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί και η επιρροή που έχουν οι βιολογικοί παράγοντες, όπως μύκητες, λειχήνες, περιττώματα πουλιών και άλλοι μικροοργανισμοί. Η χημική τους σύνθεση προσβάλλει τη σύσταση των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Άλλες αιτίες είναι οι μηχανικές καταπονήσεις και οι φυσικές καταστροφές όπως σεισμοί, πλημμύρες, κλπ, που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του φορέα μέχρι και την οριστική κατάρρευση της λιθοδομής. Επιπλέον, αρνητικές επιπτώσεις μπορεί να παρουσιαστούν εξαιτίας της υπερ-έκθεσης στο φως και σε ρυπογόνα αέρια, που προκαλούν αλλοιώσεις των χρωμάτων του έργου. Τέλος, υπάρχει ο ανθρώπινος παράγοντας, όπου με τη φυσική του παρουσία στον χώρο των έργων είτε είναι μεγάλοι χώροι συνάθροισης κοινού είτε μικρότεροι, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην επιφάνεια της τοιχογραφίας αλλά και στο σύνολο της.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες προκαλούν, είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά, εμφανή προβλήματα στις νωπογραφίες όπως ρηγματώσεις, αποσαθρώσεις, αποκολλήσεις, αποχρωματισμούς, με συνηθέστερη την εμφάνιση αποσάθρωσης και αποκολλήσεων του εξωτερικού κονιάματος, εξαιτίας της ανάπτυξής τους σε στρώματα.. Η στρωματογραφική ανάπτυξη των τοιχογραφιών αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου. Αυτή ακριβώς η ιδιαιτερότητα των τοιχογραφιών επιτρέπει την διείσδυση ύδατος στο εσωτερικό του κονιάματος, το οποίο εξαιτίας των μεταβαλλόμενων θερμοκρασιών, της μεταβολής της μάζας του νερού και των αλάτων, ασκούνται δυνάμεις στα στρώματα κονιάματος με αποτέλεσμα την αποκόλληση ολόκληρων κομματιών και τη διάσπαση της συνεκτικότητας του κονιάματος. Η ζωγραφική μέθοδος που έχει ακολουθηθεί, buon fresco,

mezzo fresco ή secco fresco, παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή του έργου στο χρόνο.

Σε περιπτώσεις ορισμένων έργων τέχνης προτιμάται η μεταφορά τους σε χώρους με ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος ώστε να προστατευθούν από κάθε παθογόνο μικροοργανισμό ή εξωτερικό παράγοντα που μπορεί να επιφέρει αλλοίωση του συνόλου. Δυστυχώς οι νωπογραφίες λόγω της φύσης τους είναι αδύνατη η μεταφορά τους σε προστατευόμενο περιβάλλον καθώς αποτελούν ένα ενιαίο οργανισμό με τη λιθοδομή και αναπόσπαστο κομμάτι της.



Σχήμα 9: Στρωματογραφική ανάπτυξη νωπογραφίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Για τον έλεγχο της κατάστασης στην οποία βρίσκεται μια νωπογραφία απαιτείται η διερεύνηση των προσφερόμενων μεθόδων ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να παρέμβουν στην δομική και καλλιτεχνική ακεραιότητα του έργου χωρίς να προκαλέσουν περαιτέρω προβλήματα.

Ανάλογα με τον συνδυασμό των τεχνικών ανάλυσης και των εργαλείων λήψης δοκιμών από το έργο, γίνεται ένας πρώτος διαχωρισμός σε μεθόδους καταστροφικές και μη καταστροφικές. Στις μη καταστροφικές μεθόδους

συγκαταλέγονται όλες εκείνες οι μέθοδοι που δεν έχουν καμία επαφή με την κατασκευή είτε για τη διέγερσή της είτε για τη λήψη των αποτελεσμάτων, παρέχοντας τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου της κατασκευής, ενώ στις καταστροφικές αυτές που οποιαδήποτε ρύθμιση ή επιλογή ως προς τον τρόπο εισαγωγής δυνάμεων ή παλμών και ως προς τη συλλογή των δεδομένων μπορούν να προκαλέσουν αποκόλληση, διάνοιξη ρωγμών ή αλλοίωση των χρωμάτων και των υλικών.



Σχήμα 10 : Μετάφραση από το κείμενο "Nondestructive Testing of Historic Structures", RICHARD A. LIVINGSTON

Ο συνηθέστερος τρόπος ελέγχου της κατάστασης μιας νωπογραφίας είναι ο οπτικός έλεγχος και ο έλεγχος που γίνεται με τη χρήση ενός σφυριού. Στον οπτικό έλεγχο, γίνεται μια πρώτη εκτίμηση των βλαβών στο έργο που είναι ορατές με γυμνό μάτι, όπως η επιφανειακή διάβρωση του υλικού του "καμβά", οι επιφανειακές ρηγματώσεις, η σκουριά σε μεταλλικές επιφάνειες, κ.α. . Η παρατήρηση με γυμνό μάτι δεν προσφέρεται για τον εντοπισμό βλαβών που βρίσκονται σε επίπεδα κάτω από την εξωτερική επιφάνεια του έργου τέχνης, που όμως μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρότερα προβλήματα μέχρι και την ολική καταστροφή του.

Στην δεύτερη περίπτωση, ο συντηρητής "σαρώνει" την επιφάνεια αποκατάστασης χτυπώντας με ένα σφυρί. Ανάλογα με τον ήχο που παράγεται από το σφυρί, προσδιορίζονται τα σημεία των βλαβών. Το σφυρί χρησιμοποιείται κυρίως για φορητές μετρήσεις μηχανικών κατασκευών. Προσφέρει τη δυνατότητα εισαγωγής δύναμης με ευρύ φάσμα συχνοτήτων, που εξαρτάται από τη διάρκεια και το σχήμα της δύναμης κρούσης. Η δύναμη κρούσης μπορεί να ελεγχθεί από τον χειριστή και μπορεί να περιοριστεί.

Αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να θεωρηθεί μετρήσιμη μέθοδος, καθώς επαφίεται εξ ολοκλήρου στην ικανότητα και την εμπειρία του συντηρητή και δεν μπορεί να δώσει μετρήσιμα αποτελέσματα. Είναι υποκειμενική και μη επαναλαμβανόμενη και για τον λόγο αυτό δεν θεωρείται κατάλληλη μέθοδος για την παρακολούθηση της εξέλιξης των ελαττωματικών περιοχών σε βάθος χρόνου. Ένα ακόμα μειονέκτημα σχετίζεται με το γεγονός ότι αποτελεί επεμβατική μέτρηση και απαιτεί φυσική πρόσβαση ενός χειριστή σε όλα τα σημεία που πρέπει να εξεταστούν στην επιφάνεια του πίνακα και γι αυτό

απαιτεί αρκετό χρόνο. Αυτό υποδηλώνει τη χρήση ικριωμάτων, που παρεμβαίνουν στην κανονική λειτουργία της κατασκευής όπου συντηρείται το έργο. Στην ουσία, αυτό σημαίνει ότι αυτή η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για συχνή παρακολούθηση του έργου σε βάθος χρόνου.

Μια διαφοροποιημένη εφαρμογή αυτής της μεθόδου, αποτελεί η μέθοδος *impact-pulse* (*pulse-echo*) [17], όπου χρησιμοποιείται το σφυρί για την παραγωγή δονήσεων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και της νωπογραφίας σε συνδυασμό με έναν αισθητήρα που τοποθετείται σε διάφορες θέσεις πάνω στην επιφάνεια του τοίχου. Ο συντηρητής, χτυπώντας τον τοίχο με το ειδικό σφυρί, παράγει κύματα που ταξιδεύουν μέσα στη μάζα της κατασκευής, προκαλώντας ταλαντώσεις των μορίων των υλικών. Ο αισθητήρας που έχει τοποθετηθεί στην επιφάνεια της τοιχογραφίας λαμβάνει τα διαμήκη, εγκάρσια και επιφανειακά κύματα και εξάγει αποτελέσματα σχετικά με την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων μέσα στο υλικό. Και τα δύο, αισθητήρας και σφυρί, συνδέονται με τον κατάλληλο εξοπλισμό, ώστε να παραχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα, συγκρίνοντας τη δύναμη κρούσης, καθώς το σφυρί επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό της παραγόμενης δύναμης και έτσι επιτρέπει την εκτίμηση των επιπέδων της ενέργειας που είναι ικανά να παράγουν δονήσεις στον τοίχο, με την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων στο σώμα του τοίχου. Εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη μέθοδο σε σημεία ενταγμένα σε έναν κάρναβο, μπορούν να προσδιοριστούν τα ευπαθή και ελαττωματικά σημεία του τοίχου.

Ο παραπάνω τρόπος ανίχνευσης βλαβών παρουσιάζει παρόμοια μειονεκτήματα με την πρώτη μέθοδο, καθώς χρειάζεται η φυσική πρόσβαση του ερευνητή σε απομακρυσμένα σημεία και η επεμβατικότητα της μεθόδου μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω βλάβες στη νωπογραφία. Ένα εξίσου βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η ένταση της ενέργειας μειώνεται ταχύτατα καθώς διαπερνά τον τοίχο, γεγονός που μειώνει τη μέγιστη απόσταση μεταξύ των σημείων εφαρμογής της δύναμης και μέτρησης της κινητικότητας. Σε χαμηλές συχνότητες που δημιουργούνται από το σφυρί δεν εμφανίζεται κανένα ίχνος συντονισμού και δεν προκύπτει κάποια μετρήσιμη δόνηση. Στην ουσία, μικρές δονήσεις σε περιοχές χωρίς ιδιαίτερες βλάβες που δημιουργούνται με μικρή δύναμη κρούσης, είναι τόσο μικρές που δεν μπορούν να επιλυθούν σωστά και επισκιάζονται από θόρυβο.

Είναι σημαντικό, για την ανάπτυξη και εξέλιξη των τεχνικών μέτρησης στη διαγνωστική διαδικασία των νωπογραφιών, να συνυπολογιστεί η δυσκολία στην πρόσβαση σε ορισμένες περιπτώσεις, καθώς βρίσκονται σε θόλους ή τοίχους, των οποίων οι διαστάσεις είναι σχετικά μεγάλες. Επιπλέον, συνήθως είναι τοποθετημένα σε σημεία με υψηλή πολιτιστική αξία ή σε κτίρια θρησκευτικού χαρακτήρα, όπου συναντάται μεγάλος αριθμός επισκεπτών. Μια διαγνωστική μέθοδος θα πρέπει να περιορίσει όσο το δυνατόν περισσότερο τα εμπόδια σε κανονική χρήση του κτιρίου. Γι αυτό, η απομακρυσμένη παρακολούθηση αποτελεί σημαντικό στοιχείο της

μετρήσιμης τεχνικής, καθώς αποφεύγεται η ανάγκη εγκατάστασης ικριωμάτων στο εσωτερικό του κτιρίου για διευκόλυνση της πρόσβασης στη νωπογραφία, κατά την φάση περιοδικού ελέγχου.

Μια τέτοια μέθοδος για την ανίχνευση των βλαβών σε μια νωπογραφία είναι η υπέρυθρη θερμογραφία (Infrared Thermography). Όλα τα αντικείμενα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αντικειμένου. Η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη θερμοκρασία. Στην υπέρυθρη θερμογραφία, η ακτινοβολία ανιχνεύεται και μετράται με υπέρυθρες συσκευές απεικόνισης (ραδιόμετρα). Οι συσκευές αυτές περιέχουν έναν υπέρυθρο ανιχνευτή που μετατρέπει την εκπεμπόμενη ακτινοβολία σε ηλεκτρικά σήματα που προβάλλονται σε έγχρωμο ή ασπρόμαυρο μόνιτορ.

Η αρχή αυτής της μεθόδου είναι σχετικά απλή. Αρχικά η επιφάνεια παρατήρησης οριοθετείται με τη βοήθεια σημαδιών και η κάμερα λαμβάνει μερικές θερμικές εικόνες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα σημάδια βοηθούν στην ταυτοποίηση της θερμικής εικόνας και της πραγματικής. Κατόπιν, το εξεταζόμενο δείγμα εκτίθεται είτε σε ροή φωτονίων, όπου η απορρόφησής τους παράγει σημειακή αύξηση της θερμοκρασίας στη γειτονική περιοχή του σημείου “κρούσης”, είτε θερμαίνεται με μια συσκευή θέρμανσης με αέρα για μικρό χρονικό διάστημα. Η θέρμανση με αέρα εγγυάται μια χαμηλή θερμοκρασιακή ανωμαλία, που μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με τον διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης των διαφορετικών επιφανειακών χρωμάτων. Αυτή η θέρμανση διαχέεται μέσα στη νωπογραφία και στις περιοχές με βλάβη, που χαρακτηρίζονται συνήθως από αέρα (προσδίδοντας θερμική μόνωση σε σχέση με το μείγμα κονιάματος), η διάχυση της θερμότητας επιβραδύνεται. Κατόπιν γίνεται η παρατήρηση των εκπεμπόμενων διαφορών του υλικού με τη χρήση μια κάμερας υπέρυθρης θερμογραφίας, όπου η θερμοκρασία μειώνεται με πιο αργό ρυθμό στα σημεία με βλάβη συγκριτικά με τις γειτονικές υγιείς περιοχές, με αποτέλεσμα εντονότερων υπέρυθρων σημαδιών για τα σημεία αυτά.

Το φωτοθερμικό σήμα που συλλέγεται από το υπέρυθρο ραδιόμετρο εξαρτάται από τις βασικές παραμέτρους που ελέγχουν τα φυσικά φαινόμενα, όπως η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διάχυση, η εκπομπή, η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η ειδική θερμότητα, αλλά και από άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με αυτές, όπως οι πτυχώσεις της επιφάνειας, η παρουσία αποκολλήσεων, η ύπαρξη ρωγμών, ο τρόπος εξέλιξης των φυσικοχημικών μεταβολών, η ξήρανση, οι καθιζήσεις, κλπ. Η καταγραφή των θερμικών εικόνων γίνονται για μερικά λεπτά μετά την απομάκρυνση του θερμαντικού μέσου, μέχρι οι μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο να γίνουν αμελητέες. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου ελέγχου της κατάστασης μιας νωπογραφίας (και μιας κατασκευής γενικότερα) είναι ο μη καταστρεπτικός χαρακτήρας καθώς δεν υπάρχει επαφή με το έργο, η ευελιξία και η εύκολη παραμετροποίηση ανάλογα με τις

ανάγκες που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του ελέγχου. Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως για να προκύψουν μετρήσιμα αποτελέσματα, θα πρέπει η επιφάνεια να θερμανθεί σε περισσότερο από 15-20 βαθμούς Κελσίου. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη μέθοδος παράγει αμφίβολα αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται για την ανίχνευση αποκολλήσεων.

Μια παραλλαγή των παραπάνω είναι γνωστή ως ηλεκτρονική ολογραφική συμβολομετρία (Electronic Speckle Pattern Interferometer ESPI), για την εξέταση τοιχογραφιών. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι φωτισμός οπτικής ίνας και κάμερα στερεάς κατάστασης συνδεδεμένη με έναν υπολογιστή. Οι εικόνες που παράγονται μετά από ελαφρά θέρμανση του έργου με μια υπέρυθρη λάμπα συγκρίνονται με εικόνες αναφοράς. Οι διαφορές στα σημειακά μοτίβα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίηση ρωγμών και αποκολλήσεων κάτω από την επιφάνεια. Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί *in situ* καθώς και για παρακολούθηση της κατάστασης του έργου τέχνης στο πέρασμα του χρόνου και να εκτιμηθεί η επιτυχία οποιαδήποτε θεραπείας[18].

Στην κατηγορία των μη καταστρεπτικών μεθόδων κατατάσσεται και η περίπτωση διέγερσης της επιφάνειας με τη χρήση ακουστικών μέσων[19]. Η αξιοποίηση μέσων παραγωγής ήχου για τη ταλάντωση μιας κατασκευής προσφέρει τη δυνατότητα αποφυγής της δυσκολίας πρόσβασης στα επιθυμητά σημεία μέτρησης. Ουσιαστικά ο ήχος που εκπέμπεται από ένα τηλεχειριζόμενο ηχείο μπορεί να προκαλέσει δονήσεις σε οποιαδήποτε περιοχής μιας νωπογραφίας, εάν μεταφερθεί η απαιτούμενη ενέργεια από τον αέρα στην επιφάνεια του τοίχου.

Τα ακουστικά κύματα μπορούν να παράγουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, ώστε να επιτευχθεί ο συντονισμός των αποκολλημένων σημείων του έργου. Η μέτρηση της εισαγόμενης δύναμης, ή της εισαγόμενης πίεσης, είναι περίπλοκο να εκτιμηθεί με ακρίβεια. Γι αυτό είναι μεν κατάλληλη μέθοδος διέγερσης αλλά δεν είναι πρακτική για την ακριβή μέτρηση των συχνοτήτων συντονισμού. Μόνο το φάσμα των συχνοτήτων ή το εύρος της δόνησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των ελαττωματικών περιοχών. Η επιστημονική κοινότητα ερευνά την πιθανότητα παροχής σημάτων λευκού θορύβου ώστε το παραγόμενο σήμα να εξαγεί συντονισμένες δονήσεις, εάν υπάρχει ατέλεια. Μια τέτοια μέθοδος συνδυασμένη με ένα Scanning Laser Doppler Vibrometer για τις μετρήσεις των επιφανειακών ταχυτήτων βασισμένες σε έναν κάρναβο σημείων, μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας μετρήσεων με χαρακτηριστικό τον αποκλεισμό της επαφής και τη χρήση τηλεχειρισμού. Η χρήση μιας μονής συχνότητας για την ηχητική διέγερση επιτρέπει στη μείωση του απαιτούμενου επιπέδου έντασης του ήχου, συγκριτικά με τον λευκό θόρυβο. Μια δοκιμασμένη μέθοδος με καλά αποτελέσματα είναι η χρήση ενός ακουστικού συστήματος που σαρώνει διάφορες συχνότητες μέσα στο εύρος των συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Το

laser στοχεύει στην επιφάνεια της νωπογραφίας και καταγράφει τις δονήσεις. Όταν μια ηχητική συχνότητα είναι ίδια με τη συχνότητα συντονισμού της κατασκευής, η επιφάνεια του τοίχου δονείται με σχετικά μεγάλο εύρος. Επομένως, για κάθε βλάβη στον τοίχο η συχνότητα συντονισμού μπορεί να καταγραφεί κατά την πρώτη σάρωση. Κατόπιν, πραγματοποιείται σάρωση σε πιο πυκνό κάρναβο κοντά στα σημεία που έχουν παρατηρηθεί βλάβες καθώς το ηχητικό σύστημα δονείται στην συχνότητα συντονισμού της συγκεκριμένης βλάβης.

Η διαφορά ανάμεσα στις δύο ήχους μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τα 10dB όταν το επίπεδο του ήχου είναι γύρω στα 70dB. Κάτι τέτοιο καταδεικνύει το πρόβλημα σχετιζόμενο με την διεισδυτικότητα της μεθόδου, καθώς υψηλά επίπεδα ήχου μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στη νωπογραφία ή στον περιβάλλοντα χώρο της νωπογραφίας.

Η παρακάτω ακουστική μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη επεμβατική καθώς το ανιχνευτικό σύστημα σαρώνει την επιφάνεια του πίνακα χωρίς άμεση επαφή με αυτή. Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση της απορροφούμενης ακουστικής ενέργειας, όταν ο πίνακας διεγερθεί από κατάλληλο ακουστικό κύμα και στην προκύπτουσα μεταξύ του συντελεστή απορρόφησης και των αποκολλήσεων. Η ακουστική μέθοδος που υιοθετείται σε αυτή τη τεχνική πληρεί τις προϋποθέσεις για τον χαρακτηρισμό ως μη επεμβατική μέθοδος και για in-situ παρακολούθηση των νωπογραφιών και η εφαρμογή της μπορεί να επεκταθεί και σε άλλα είδη αρχαιοτήτων, όπως τα μωσαϊκά. Αυτή η μέθοδος συνδυάζει τη λογική της τοπικής ανίχνευσης της απορροφούμενης ακουστικής ενέργειας από τη βλάβη και στα θετικά χαρακτηριστικά της μεθόδου "Αλγόριθμος μετασχηματισμού Fourier του λογάριθμου του μετασχηματισμού κύματος" που μπορεί να απομονώσει τη συγκεκριμένη συμβολή στο ακουστικό σήμα παρά την παρουσία πολλαπλών ήχων. Στη μελέτη αυτή έγινε εφαρμογή της μεθόδου τόσο σε κατασκευασμένα δείγματα στο εργαστήριο όσο και σε πραγματικές νωπογραφίες στην εκκλησία St. Passera στη Ρώμη και την οικία του Giorgio Vasari στη Φλωρεντία[20].

Ψηφιακή Σημειακή Φωτογραφία (Digital Speckle Photography)

Η ψηφιακή φωτογραφία (speckle photography) είναι η κύρια οδός στην σημειακή μετρολογία (speckle metrology). Στη σημειακή φωτογραφία η πληροφορία φέρεται από την κίνηση του κύριου όγκου του σημειακού μοντέλου καθώς το αντικείμενο παραμορφώνεται, σε αντίθεση με τις συμβολομετρικές τεχνικές όπου η πληροφορία δίνεται από τη διαφορά φάσης σε συγκεκριμένο σημείο. Επομένως, χρησιμοποιείται μόνο μια μονή δέσμη φωτισμού που απλοποιεί την εγκατάσταση. Η Ψηφιακή Σημειακή Φωτογραφία (DSP) είναι ψηφιακός "συγγενής" της παραδοσιακής σημειακής

φωτογραφίας. Τα σημειακά μοντέλα που εμφανίζονται στην εικόνα ενός φωτιζόμενου αντικειμένου, πριν και μετά την παραμόρφωση, καταχωρούνται από μια συσκευή ανίχνευσης σύζευξης φορτίου (CCD) και αποθηκεύονται χωριστά σε έναν υπολογιστή, όπου η σχετική κίνηση μεταξύ τους αναλύεται με αυθαίρετη χωρική ανάλυση. Γίνεται χρήση ειδικών αλγορίθμων εικόνας για να ταυτοποιηθεί η θέση κάθε στίγματος στην επιφάνεια και να υπολογιστεί η μετατόπιση κάθε σημείου μετά από φόρτιση του εξεταζόμενου αντικειμένου με θερμικό φορτίο. Το πεδίο της μετατόπισης τίθεται προς την τελική του επεξεργασία ώστε να ληφθεί μια πλήρης εικόνα για τις τάσεις της επιφάνειας.

Εξέταση με υπερήχους (Ultrasonic Testing UT)

Για τον έλεγχο μιας κατασκευής με υπερήχους χρησιμοποιείται ηχητική ενέργεια υψηλής συχνότητας για την πραγματοποίηση ελέγχων και τη λήψη μετρήσεων. Ο έλεγχος με υπερήχους μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανίχνευση/εκτίμηση ροής, τη διαστασιολόγηση, τον χαρακτηρισμό των υλικών κ.α. . Το σύστημα που εφαρμόζεται αποτελείται από δύο αισθητήρες, όπου ο ένας λειτουργεί ως πομπός και ο άλλος ως δέκτης. Ο πομπός εισάγει στο δοκίμιο κύματα υψηλών συχνοτήτων τα οποία διαδίδονται μέσα στο σώμα του υλικού. Ο δέκτης λαμβάνει τα κύματα και με την ανάλυση των ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων και τις συχνότητες εξάγονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την κατάσταση του εξεταζόμενου στοιχείου.

Θερμογραφική Αναπαραγωγή Σήματος (Thermographic Signal Reconstruction TSR)

Στον Θερμογραφικό Μη Καταστρεπτικό Έλεγχο (Thermographic Nondestructive Testing TNDT) η εσωτερική κατάσταση του δείγματος συνάγεται από την ανάλυση της απόκρισης της επιφανειακής θερμοκρασίας σε εφαρμοσμένη θερμική διέγερση. Με την παραδοσιακή προσέγγιση, ο χειριστής βλέπει μια ακολουθία υπέρυθρων εικόνων που εκπροσωπούν την απόκριση της επιφάνειας και δύναται να αναγνωρίσει οπτικά τις πιθανές ελαττωματικές περιοχές ως ευρύτερες περιοχές με ανώμαλη πτώση θερμοκρασίας, με βάση τις θερμοκρασιακές αντιθέσεις. Η Θερμογραφική Ανασυγκρότηση Σήματος είναι μια μέθοδος που αναπτύχθηκε το 2000 και έχει γίνει ευρέως γνωστή ως μέθοδος χρησιμοποιούμενη για την επεξεργασία δεδομένων στο πεδίο του χρόνου και την ανάλυση των δεδομένων του TNDT. Βασίζεται στη συμπεριφορά των λογαριθμικών παραγώγων του χρόνου για την επιφανειακή θερμοκρασία κάθε pixel. Καθώς η επιφανειακή θερμοκρασία επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, οι

διακυμάνσεις στην επιφανειακή εκπομπή ή την ομοιομορφία θέρμανσης, και η αντανάκλαση των υποκείμενων αντικειμένων, αυτά τα σταθερά ή αργά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά απαλείφονται από τη διαδικασία διαφοροποίησης. Ως αποτέλεσμα, τόσο ο χρονικός θόρυβος όσο και τα χωρικά αντικείμενα απαλείφονται στα παράγωγα εικόνες TSR. Τα παράγωγα αυτά είναι, επίσης, δείκτες ευαισθησίας για την διαταραχή της διαδικασίας ψύξης κατά τη μια διάσταση που ακολουθεί την θέρμανση της επιφάνειας.

Μέχρι τις μέρες μας, το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών που αφορούν τις νωπογραφίες συγκεντρώνονται, κατά κύριο λόγο, στην ανάλυση των μικροοργανισμών που μπορούν να αναπτυχθούν στην επιφάνεια μιας τοιχογραφίας, προκαλώντας αλλοιώσεις στην τελική εικόνα του έργου, προσφέροντας εξαιρετικές δυνατότητες στις προσπάθειες καθαρισμού και αποκατάστασης. Αναπτύσσονται διαρκώς νέες εφαρμογές που βασίζονται κυρίως στη νέα τεχνολογία και ειδικότερα σε μηχανήματα laser για την εξέλιξη των τεχνικών συντήρησης και αποκατάστασης.

Για την ενημέρωση των υπηρεσιών καθώς και των ενασχολούμενων σε αυτόν τον τομέα, πραγματοποιήθηκαν συνέδρια, με αξιοσημείωτο το 5ο Διεθνές Συνέδριο LACONA VI, που πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία το 2003 και παρουσιάστηκαν πολλές εργασίες με αντικείμενο την εφαρμογή προϊόντων laser στην αποκατάσταση έργων τέχνης [21], με εκτενέστερη αναφορά στη χρήση τους στον καθαρισμό, συντήρηση και παρακολούθηση των εφαρμογών καθαρισμού των έργων τέχνης. Αναφέρεται η χρήση μηχανημάτων Laser που γίνεται για τον καθαρισμό διάφορων υλικών, όπως σε μοντέλα χαρτιού[22], για τον καθαρισμό από μύκητες[23] και άλλους μικροοργανισμούς, σε στοιχεία μετάλλου για την αφαίρεση των διαβρωμένων τμημάτων του μετάλλου [24][25], αλλά και σε επιφάνειες μαρμάρου και γλυπτά [26], σε ξύλινες επιφάνειες [27], κ.α. .

Επίσης, γίνονται διαρκώς νέες έρευνες και για τις παρενέργειες που προκαλούνται από τη χρήση ή την κακή χρήση των laser, καθώς χρειάζεται ειδική μεταχείριση και προσοχή ώστε να μην τραυματιστούν τα έργα υπό μελέτη. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει αλλοιώσεις στις οργανικές χρωστικές ουσίες [28] και στις υπόλοιπες στρώσεις μιας εικόνας, αλλοιώνοντας την αξία του έργου. Επιπλέον, παρουσιάζονται αρκετές καινοτόμες μέθοδοι για την αφαίρεση των κρούστων με σύγχρονες μεθόδους υπέρυθρης και υπεριώδους ακτινοβολίας [29] και για τη χρήση ακτίνων X για τον χαρακτηρισμό πέτρινων και ξύλινων υλικών [30].

Η χρήση των μηχανημάτων Laser για την διάγνωση των ευπαθών και κατεστραμμένων τμημάτων μιας τοιχογραφίας και μιας νωπογραφίας ειδικότερα είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο διερεύνησης, εξαιτίας της δυσκολίας μεταφοράς του εξοπλισμού και του υψηλού κόστους του. Παρόλα αυτά, μπορεί να προσφέρει πολλές δυνατότητες στην ανίχνευση κρυμμένων

βλαβών σε επίπεδα κάτω από την επιφάνεια του έργου, που είναι αδύνατο να προσεγγιστεί με διαφορετικό τρόπο.

Τρισδιάστατη σάρωση – 3DScanning [31]

Η τεκμηρίωση των έργων τέχνης με τη βοήθεια οπτικών τεχνικών βασίζεται κατά κύριο λόγο στις καταγραφές του ανακλώμενου φωτός από το αντικείμενο, χωρίς να παίζει σημασία εάν φωτίζεται από το φως του ήλιου ή από φως από κάμερα. Το είδος των δεδομένων καταγραφής εξαρτάται από τον τύπο του αισθητήρα που χρησιμοποιείται από τη μηχανή καταγραφής, όπου η μόνη πληροφορία μπορεί να είναι η ένταση του φωτός που λαμβάνεται κάθε φορά από το αντικείμενο. Η τυχαία φύση των συνηθισμένων πηγών φωτός που χρησιμοποιούνται για αυτές τις τεχνικές παρέχουν συνήθως δισδιάστατες απεικονίσεις των αντικειμένων. Η φωτογραμμετρία θα μπορούσε να θεωρηθεί εξαίρεση καθώς επιτρέπει την κατασκευή μη επίπεδων εγγραφών των εικόνων, όμως η φωτογραμμετρία βασίζεται στην λήψη δεδομένων από διάφορες οπτικές γωνίες και η μετέπειτα επεξεργασία και ο συνδυασμός αυτών των δισδιάστατων εγγραφών επιτρέπουν τη λήψη ογκομετρικών πληροφοριών για το αντικείμενο.

Η Τρισδιάστατη Σάρωση με Laser (3D Laser Scanning) είναι μια τεχνική που εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες συνοχής του φωτός του laser, που αποτελείται από πολύ καθαρό χρώμα και ισχυρή κατευθυντήρια δέσμη φωτός ώστε να προκύψουν και να αποθηκευτούν τρισδιάστατες εικόνες και πληροφορίες για το αντικείμενο με μεγάλες δυνατότητες επεξεργασίας με τη χρήση δέσμης φωτός laser χαμηλού επιπέδου ενέργειας ως πηγή φωτός και εντοπίζοντας το ανακλώμενο φως που εκπέμπεται από την επιφάνεια του αντικειμένου με ιδιαίτερα ευαίσθητους αισθητήρες.

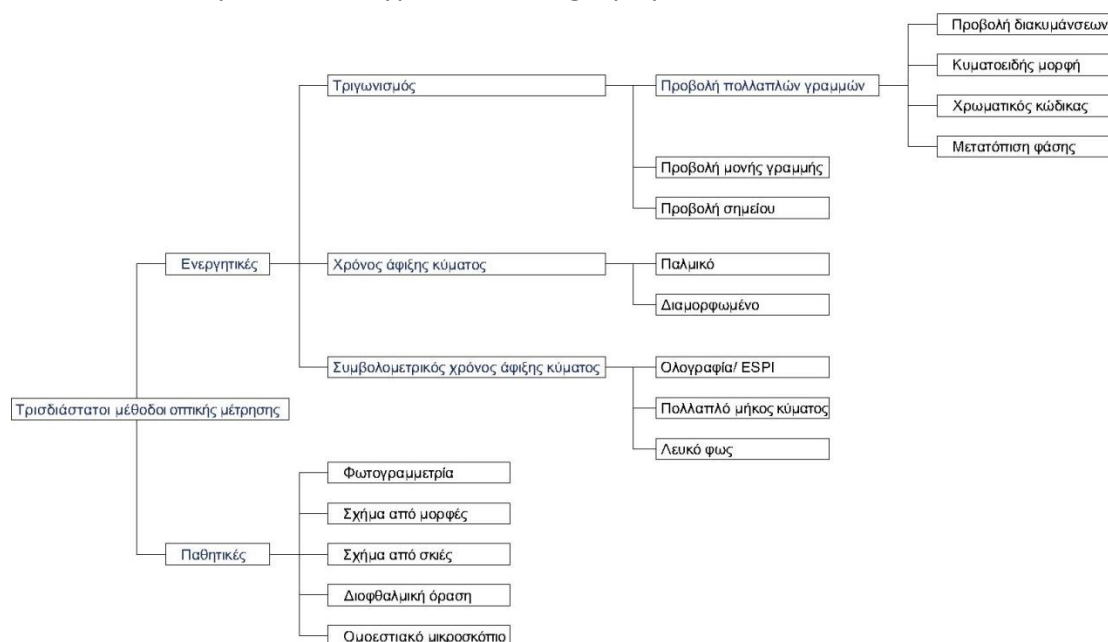
Τα μηχανήματα σάρωσης με laser παρέχουν τη δυνατότητα συγκέντρωσης πληροφοριών με υψηλή ανάλυση και ακρίβεια. Ο εξοπλισμός είναι ελαφρύς και μεταφερόμενος στο πεδίο και καθότι δεν προκαλεί κάποια αλλαγή στο αντικείμενο εξαιτίας της ικανότητας λειτουργίας χωρίς επαφή με αυτό, αποτελεί ένα πολύ καλό εργαλείο για την τεκμηρίωση, τη μελέτη, την επίδειξη και αναπαραγωγή ακόμα και εύθραυστων αντικειμένων με διάφορα μεγέθη και σχήματα, από απόσταση.

Οι οπτικές τεχνικές παίζουν σημαντικό ρόλο στον τομέα της διάγνωσης των έργων της πολιτιστικής κληρονομιάς, χάρη στην ασφάλεια και την αποτελεσματικότητά τους. Ανάμεσά τους, οι τεχνικές τρισδιάστατης σάρωσης έχουν βρει το δρόμο τους τελευταία σε πληθώρα σχετικών εφαρμογών. Προς το παρόν χρησιμοποιούνται για μετρήσεις κτιρίων. Αγαλμάτων, νομισμάτων, επιγραφών ακόμα και πινάκων, των οποίων η σχετική επιπεδότητά τους έχει

συγκεντρώσει μικρό ενδιαφέρον των πρωτοπόρων των τρισδιάστατων τεχνικών μέτρησης. Η διαρκώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία των μηχανημάτων που στηρίζονται στο laser έχουν ανοίξει μια νέα εποχή στην τρισδιάστατη έρευνα, δίνοντας τη δυνατότητα σχεδιασμού οργάνων ακριβείας και συγκέντρωσης πυκνού δείγματος με υψηλό ποσοστό απόκρισης γνώσεων.

Οποιαδήποτε αλλαγή που μπορεί να προκύψει από την προτεινόμενη θεραπεία αποκατάστασης μπορεί να οπτικοποιηθεί καθώς και οι προτεινόμενες ανακατασκευές απωλειών που μπορούν να εκτιμηθούν οπτικά. Επιπλέον, μετρώντας το σχήμα σε βάθος χρόνου είναι δυνατή η διατήρηση δεδομένων σχετικά με τις διαφοροποιήσεις των αντικειμένων. Κάτι τέτοιο επιτρέπει τον χαρακτηρισμό των μηχανικών τάσεων, τον ποσοτικό προσδιορισμό των επιπτώσεων των μικροκλιματικών διαφοροποιήσεων, τη μέτρηση των επιφανειακών διαφοροποιήσεων και την παρακολούθηση των εναλλαγών σχήματος που παράγονται από τη διαδικασία αποκατάστασης.

Κάθε τεχνική τρισδιάστατης σάρωσης βασίζεται σε διαφορετικές αρχές και αποδίδουν διαφορετικές πληροφορίες. Η πιο κοινή τεχνική είναι ο οπτικός τριγωνισμός (optical triangulation), που περιλαμβάνεται στα περισσότερα συστήματα τρισδιάστατης μέτρησης, και ο χρόνος ταξιδιού (time-of-flight). Όμως χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές όπως η συμβολομετρία (interferometry) και η ολογραφία (holography).



Σχήμα 11 : Κατάταξη των οπτικών τεχνικών τρισδιάστατης μέτρησης [32]

Στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 11) γίνεται η κατηγοριοποίηση των μεθόδων σε active και passive (ενεργές και παθητικές) όπου ενεργές σημαίνει αυτές όπου το αντικείμενο θα πρέπει να φωτιστεί ενεργά ενώ οι παθητικές μέθοδοι λειτουργούν με το φυσικό φως του περιβάλλοντος.

Μια ακόμα χρήσιμο κατηγοριοποίηση μπορεί να βασιστεί στην κλίμακα του αντικειμένου, καθώς δεν μπορούν όλες οι τεχνικές να χρησιμοποιηθούν

σε όλα τα αντικείμενα για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι που βασίζονται στο χρόνο ταξιδιού είναι κατάλληλες σε περιπτώσεις μεγάλων και απομακρυσμένων αντικειμένων όπως αρχιτεκτονήματα και εδάφη, για μέτριας κλίμακας αντικείμενα όπως αγάλματα, βάζα προτιμούνται μέθοδοι βασισμένες σε single-line laser scanning, ενώ για ιδιαίτερα λεπτομερή σχεδόν επίπεδες επιφάνειες είτε μικρού είτε μεγάλου μεγέθους προτιμάται η μικρο-προφίλομετρηση (micro-profilometry).

Ο σαρωτής γραμμικού laser (laser-line scanner) είναι μια συσκευή για τρισδιάστατες μετρήσεις βασισμένες στον οπτικό τριγωνισμό μέσω μιας μονής γραμμικής προβολής laser. Συνδυάζει ανάλυση με ευελιξία, καθιστώντας τη μέθοδο αυτή κατάλληλη για επί τόπου εφαρμογές κάτω από ανεπαρκή φωτισμό και σε όλα τα περιβάλλοντα.

Το πρωτότυπο συντίθεται από έναν προβολέα laser που εκπέμπει κόκκινο φως ($\lambda=670\text{nm}$) διαμορφωμένο σε ένα ελαφρύ φύλλο από οπτικό στοιχείο (πρίσμα) και μια κάμερα HRESCCD (1300X1030pixel) τοποθετημένη σε ορισμένη, γνωστή γωνία σε σχέση με την πηγή laser. Η κάμερα είναι εξοπλισμένη με έναν φακό 16mm και ένα ειδικό φίλτρο για να ταιριάζουν με το μήκος κύματος του laser, προκειμένου να επαλειφθούν τα προβλήματα που σχετίζονται με το φυσικό φως του περιβάλλοντος χώρου. Ένα μηχανοκίνητο σημείο επιτρέπει τη σάρωση των αντικειμένων και αποκτώνται κοντινής απόστασης παράλληλα προφίλ.

Η συσκευή που βασίζεται στη μικροπροφίλομετρία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση αποστάσεων σε μικρομετρικό εύρος και είναι κατάλληλη για να αποκαλύψει ακόμα και τις πιο λεπτές λεπτομέρειες στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Το πρωτότυπο όργανο χρησιμοποιεί ένα αποστασιόμετρο βασισμένο στην τεχνική της συμβολομετρίας (conoscopic holography). Αυτή η μέθοδος συνδυάζει τα οφέλη της εργασίας σε πολλαπλά υλικά, της μέτρησης επιφανειών με ανακλαστικές και διαχεόμενες ιδιότητες και να μένει ανεπηρέαστο από τις αλλαγές των χρωμάτων.

Συμβολομετρία (Interferometry)

Οι διαφοροποιήσεις στη κατασκευαστικές και μηχανικές ιδιότητες των έργων τέχνης είναι ένας σημαντικός παράγοντας αλλοίωσης που προκαλεί αργή αλλά σταθερή αποσύνθεση των φυσικών χαρακτηριστικών. Οι επιπτώσεις των θερμικών διαδικασιών και της υγρασίας, της μεταφοράς και του χειρισμού, των διαφόρων ενεργειών συντήρησης και αποκατάστασης καθώς επίσης και η έκθεση του έργου μπορεί να επηρεάσουν συστηματικά ή ραγδαία την κατάσταση του αντικειμένου προς μελέτη, μνημειακού χαρακτήρα ή αρχαιότητα. Τα μηχανήματα laser που στηρίζονται στις αρχές της ολογραφίας και της ολογραφικής συμβολομετρίας αποτελούν ένα

σημαντικό εργαλείο, αρωγό των ερευνητών και των συντηρητών να οπτικοποιήσουν την μη ορατή αλλά διαρκώς επεκτεινόμενη αποσύνθεση.

Η οπτικοποίηση μικρών ή έμφυτων ασυνεχειών στον όγκο και οι συνέπειες στην μηχανική αστάθεια της δομής του έργου μπορούν να οριστούν οπτικά και ψηφιακά. Η τεχνολογία της ολογραφίας δεν χρησιμοποιεί τη διείσδυση της ακτινοβολίας. Αντιθέτως, βασίζεται στην αντανάκλαση της επιφάνειας ασφαλώς διαχεόμενων ακτινών laser. Η ολογραφία που εμπλέκεται στη διαγνωστική διαδικασία μιας κατασκευής και οι σχετιζόμενες τεχνικές δεν απαιτούν την παραμικρή αφαίρεση δείγματος ή καμία προετοιμασία της επιφάνειας και είναι ασφαλής για τα βερνίκια και τα χρώματα. Για τους παραπάνω λόγους, η τεχνική της ολογραφίας κατατάσσεται στις μη καταστροφικές, ανέπαφες και μη παρεμβατικές μεθόδους.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται βασίζεται στη διαφορική μετατόπιση που προκαλείται στο χρόνο από δύο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις των αντανακλώμενων επιφανειών ενδιαφέροντος. Οι προκαλούμενες μετατοπίσεις τονίζουν τη σχετική μεταβολή της οπτικής διαδρομής στις αντανακλώμενες ακτίνες που μετατρέπονται σε ορατό ή ψηφιακό σήμα με φωτεινά και μη φωτεινά διαμορφωμένα περιγράμματα. Τα λαμβανόμενα μοτίβα αποτελούν την κωδικοποιημένη απόκριση του εξεταζόμενου έργου, ειδοποιώντας, μέσω των φωτεινών και σκούρων ομοιόμορφων ή μη κατανομών, για την συντηρούμενη κατάσταση.

Η ολογραφική συμβολομετρία χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για την ανίχνευση φθορών κάτω από την επιφάνεια στο άγαλμα του Donatello στη Βενετία και σε πίνακα του 15ου αιώνα, εισάγοντας τη μέτρηση της συνεκτικής οπτικής παρεμβολής ως νέα και εναλλακτική πηγή πληροφοριών για την ανάλυση της δομικής κατάστασης. Οι πληροφορίες για τη δομή της υποκείμενης επιφάνειας μπορούν να παραχθούν από πολύπλοκες επιφάνειες και τρισδιάστατα σχήματα. Οι περιοχές με βλάβη αποκαλύπτονται ως απομονωμένες ασυνεχείς περιοχές σε αντίθεση με τη συνολική συνεχή κατανομή του συστήματος και στη συνέχεια μπορούν να χωροθετηθούν με ακρίβεια και να οριστεί το μέγεθός τους σε κλίμακα ένα προς ένα και να αποκατασταθούν.

Η δυνατότητα που παρέχουν οι ολογραφικές τεχνικές να απεικονίσουν τις ανωμαλίες της υποκείμενης επιφάνειας και των επιδράσεών τους στη δομική ακεραιότητα από τις πληροφορίες της επιφάνειας χωρίς τη χρήση καμίας διεισδυτικής ακτινοβολίας είναι από τις κυρίαρχες δυνατότητες της μεθόδου και βασίζεται στη μοναδική ιδιότητα της ολογραφίας να παράγει ένα αρχείο της κατανομής της φάσης από την αντανακλώμενη ακτίνα της επιφάνειας.

Η φάση είναι βασική ιδιότητα του φωτός όπως η ένταση, η πολικότητα και το μήκος κύματος. Παρόλα αυτά είναι μια ιδιότητα που, εξαιτίας των υψηλών συχνοτήτων του φωτός, μπορεί να συλληφθεί μόνο με τη χρήση δύο συνεκτικών και ταυτόσημων στο χώρο και το χρόνο δεσμών laser, οι οποίες είναι ικανές να παράγουν μικρές αλλαγές φάσης της τάξης των κλασμάτων

του μήκους κύματός τους, τα επιθυμητά αποτελέσματα παρεμβολής. Τα αποτελέσματα είναι καταγραφές υψηλής συγκέντρωσης σε τριαξονικό σύστημα συντεταγμένων με διακριτές ιδιότητες, με ισχυρότερο παράγοντα σε αυτή την εφαρμογή τη θέση παρατήρησης, όπου παρατηρείται μια τρισδιάστατη σκηνή αλλάζοντας τη θέση αυτή σε πλήρη οριζόντια και κάθετη θέση και σε κλίμακα ένα προς ένα για παράθεση εικόνας- αντικειμένου. Εάν η καταγραφή επαναληφθεί μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ενώ το αντικείμενο μεταβληθεί, για παράδειγμα εξαιτίας μιας χρονικής αύξησης της θερμοκρασίας του, τα χαρακτηριστικά του μεταβάλλονται ελαφρώς επηρεάζοντας την αντανακλώμενη μεταφερόμενη ακτίνα. Όταν οι δύο καταγραφές ανακατασκευαστούν και επικαλύπτονται χωρικά, όλες οι μικρές μεταβολές φάσης διαβάζονται με την μορφή των κατανομών έντασης, όπως τα γνωστά φωτεινά και σκοτεινά peak του φαινομένου των παρεμβολών.

Αυτή είναι η τεχνική της ολογραφικής συμβολομετρίας η οποία χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της δομικής κατάστασης ενός έργου. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό όταν μια υπάρχουσα ανωμαλία κάτω από την επιφάνεια ή μια περιοχή που είναι υπό μηχανική τάση ανταποκρίνεται διαφορετικά σε θερμικές μεταβολές από το υπόλοιπο αντικείμενο. Αυτή η διαφορά στην απόκριση γίνεται ορατή καθώς μια εντοπισμένη ανώμαλη κατανομή των peak συμβολής δημιουργεί τη δική της εικόνα peak συμβολής. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των εντοπισμένων peak που βρέθηκαν σε μια ολογραφική παρεμβολή αποτελεί μια μέτρηση των ελαττωμάτων του αντικειμένου. Μια ομοιόμορφη κατανομή των peak αντιπροσωπεύει μια ικανοποιητική κατάσταση διατήρησης, ενώ μια διακοπτόμενη αντιπροσωπεύει μια κατάσταση αποσύνθεσης σχετική με την ποσότητα των ελαττωμάτων του αντικειμένου.

Η ολογραφική απεικόνιση είναι μια τεχνική αναπαραγωγής κυμάτων φωτός και το σήμα που ζητείται βρίσκεται στο κύμα του αντικειμένου καθώς μεταφέρει όλες τις πληροφορίες για το ίδιο το αντικείμενο. Επιπλέον, μια δεύτερη ακτίνα καταγράφεται συγχρόνως για να διαπιστωθεί η επιρροή της παρεμβολής που ονομάζεται ακτίνα αναφοράς, μιας και είναι η πρότυπη ακτίνα από την πηγή χωρίς καμία αλλοίωση. Το αποτέλεσμα είναι να ενταθεί η ποικιλία των φωτεινών και σκοτεινών peak.

Η διαδικασία καταγραφής της ολογραφίας ξεκινάει η καταγραφή με την πρώτη λήψη του αρχικού αντικειμένου σε φυσική κατάσταση. Κατόπιν, εισάγεται μια διέγερση όπου, στην προκειμένη περίπτωση των έργων τέχνης, χρησιμοποιείται η πρόκληση θερμικών μεταβολών που επιτρέπει τον καλύτερο προσδιορισμό των ελαττωματικών περιοχών. Μετά την εφαρμογή της διέγερσης, ακολουθεί μια δεύτερη έκθεση του αντικειμένου με ίδια χρονική διάρκεια με την πρότυπη με το ίδιο φωτοευαίσθητο μέσο. Το ολογραφικό γράφημα συμβολομετρίας καταγράφεται και ακολουθεί η χημική ανάπτυξη.

Σε αντίθεση με την τεχνική ανίχνευσης βλαβών με τη χρήση ακτινών Χ, με την οποία μπορούν να εντοπιστούν ελαττώματα όπως καρφιά, ρωγμές και τρύπες, με την ολογραφική συμβολομετρία είναι δυνατή η λεπτομερής χαρτογράφηση και άλλων ατελειών που προκύπτουν από αποκολλήσεις μεταξύ των στρωμάτων, από κενά σε στέρεα υλικά, από απώλεια υλικού, ή την ύπαρξη ζωντανών οργανισμών και ρωγμών, που παραμένουν “κρυμμένα” από τις ακτίνες Χ.

Η ολογραφική συμβολομετρία μπορεί να αξιοποιηθεί και σε εξωτερικούς χώρους χάρη στην εξέλιξη τεχνικών όπως η Σημειακή Ολογραφική Συμβολομετρία (Speckle Holographic Interferometry), όπου χρησιμοποιείται ως φωτοευαίσθητο μέσο καταγραφικό μέσο CCD αντί για φιλμ.

Τομογραφία (Shearography)

Η Ψηφιακή Σημειακή Τομογραφία (Digital Speckle Shearography) είναι μια διαγνωστική τεχνική ανέπαφη, μη επεμβατική, βασισμένη σε laser που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν οι δομικές ατέλειες όπως αποκολλήσεις και εγκλεισμοί που είναι κρυμμένες κάτω από την επιφάνεια.

Η ψηφιακή σημειακή τομογραφία (Digital Speckle Shearography) είναι μια μέθοδος που βασίζεται στην αυτό-αναφορά από δύο παρεμβαλλόμενα μέτωπα κύματος ανάκλασης από το ίδιο αντικείμενο. Χρησιμοποιείται για μη καταστρεπτικό έλεγχο των τεχνικών μερών σχετικά με τις ατέλειες του υλικού και τις κατασκευαστικές ατέλειες. Οι περιοχές ελέγχου για αυτή τη μέθοδο laser έχουν εύρος από αρκετά τετραγωνικά χιλιοστά μέχρι μερικά τετραγωνικά μέτρα. Το υπό εξέταση αντικείμενο φωτίζεται από μια διευρυμένη δέσμη laser. Το σύστημα λειτουργεί χωρίς κάποιο μηχανικά κινούμενο μέρος.

Ένα βασικό προαπαιτούμενο στην Ψηφιακή Σημειακή Τομογραφία είναι ότι αυτές οι κρυμμένες προβληματικές περιοχές προκαλούν σημειακή παραμόρφωση της επιφάνειας εάν το αντικείμενο δεχθεί θερμικό ή μηχανικό φορτίο. Ένα σύστημα με τυπικό θερμικό φορτίο, για παράδειγμα, αποτελείται από μια υπέρυθρη λάμπα που χρησιμεύει για να αυξήσει την θερμοκρασία της εξεταζόμενης επιφάνειας κατά μερικούς βαθμούς Κέλβιν. Τα προκύπτοντα μεγέθη των παραμορφώσεων της επιφάνειας απόκρισης εκτείνονται σε εύρος μερικών μικρών και γι αυτό δεν μπορούν να αναγνωριστούν από το γυμνό ανθρώπινο μάτι. Παρόλα αυτά, στη σημειακή τομογραφία χρησιμοποιούνται οι συναφείς ιδιότητες του φωτός του laser για να δημιουργηθούν οι μικρές μετατοπίσεις και να είναι ορατές ώστε να εντοπιστούν οι υποκείμενες ατέλειες. Το μέγεθος της μετρήσιμης επιφάνειας εξαρτάται από τη δύναμη της πηγής φωτός και της ανακλαστικότητας του αντικειμένου υπό εξέταση.

Καθότι το κρυμμένο ελάττωμα μέσα στο υλικό προκαλεί σημειακή παραμόρφωση της επιφάνειας εξαιτίας της κατάστασης φόρτισης, η εφαρμογή της σημειακής τομογραφίας εξαρτάται τόσο στον τύπο του υλικού και από την υφή της επιφάνειας.

Η διαδικασία χωρίζεται σε πέντε στάδια, ξεκινώντας με τη ρύθμιση των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος. Το εύρος του φακού εστίασης πρέπει να επιλεγθεί σύμφωνα με το επιθυμητό πεδίο δράσης. Κατόπιν, λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση, κατά την οποία προκύπτουν τέσσερις εικόνες με τη μετατοπισμένη φάση για συνεχόμενα καρέ. Το επόμενο βήμα είναι η επιφόρτιση του αντικειμένου είτε με μηχανικά μέσα είτε προσθέτοντας θερμικό φορτίο. Μια τυπική θερμική φόρτιση αυξάνει ομαλά την θερμοκρασία στην επιφάνεια με $\Delta T=5K$. Μετά την επιβολή του φορτίου, καταγράφεται η δεύτερη μέτρηση με τη λήψη ενός ακόμη σετ των τεσσάρων καρέ. Στην τελική φάση, η κατανομή των παραμορφώσεων μπορεί να υπολογιστεί από τις δύο μετρήσεις κι οι διαγνωστικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναγνωρίσουν εγκλείσματα ή αποκολλήσεις. Οι δομικές ατέλειες καταδεικνύονται συνήθως από αισθητές αλλαγές στην παραμόρφωση.

Οι περιορισμοί στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η διαφάνεια των υλικών, όπως για παράδειγμα του μαρμάρου καθώς επίσης από το μέγεθος και τη θέση της ατέλειας. Το τελευταίο, δηλαδή η θέση της εκάστοτε ατέλειας, είναι σημαντικό, καθώς, για να μπορέσει να εντοπιστεί θα πρέπει να προκαλέσει μια τοπική παραμόρφωση της επιφάνειας του υλικού εξαιτίας της θέρμανσής του. Έτσι, το μέγιστο βάθος και το ελάχιστο μέγεθος των ανιχνεύσιμων ελαττωματικών περιοχών είναι μέρος των ιδιοτήτων του υλικού όπως η θερμική του αγωγιμότητα.

2.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Στο διεθνές συνέδριο LACONAV που πραγματοποιήθηκε το 2003 στο Osnabrueck της Γερμανίας, το Ινστιτούτο INOA (Istituto Nazionale di Ottica Applicata) παρουσίασε την εφαρμογή της IR Reflectography (οπτική τεχνική για μη καταστρεπτικό έλεγχο πινάκων και αποκαλύπτει τα υποκείμενα στρώματα που συνθέτουν το ζωγραφικό έργο) , του υπεριώδους φθορισμού (με την υπεριώδη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια του πίνακα υπολογίζονται οι φθορές και οι ρετουσαρισμένες περιοχές) και της τρισδιάστατης μικροπροφίλομετρίας στον πίνακα του Leonardo da Vinci "Madonna dei Fusi", όπου ανιχνεύτηκαν τα ρετουσαρίσματα και οι επεμβάσεις στον αρχικό καμβά [33].

Στα πρακτικά του ίδιου συνεδρίου παρουσιάστηκαν καινοτόμες τεχνικές και συστήματα με εφαρμογή στα έργα συντήρησης.

Στο Διεθνές Workshop Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων (6th NDT in Progress 2001) στην Πράγα το 2011 και συγκεκριμένα στην παρουσίαση με θέμα “Non-Destructive Testing (NDT) Methods used for the Study of Stone Frescoes” εξετάστηκε η εφαρμογή οπτικών, υπέρυθρων και υπερηχητικών τεχνικών, όπως η τομογραφία, η ολογραφική συμβολομετρία, ο έλεγχος με υπερήχους και η ψηφιακή σημειακή φωτογραφία, που αρχικά αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία, στις διαδικασίες συντήρησης. Η εφαρμογή έγινε σε τεχνητή τοιχογραφία, όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώσεις κονιάματος σε λίθινο υπόβαθρο, περιέχοντας τεχνητές φθορές και διαφορετικές αποχρώσεις για την προσομοίωση μιας νωπογραφίας. Το πείραμα έδειξε ότι, κάθε μέθοδος μπορεί να ανιχνεύσει συγκεκριμένες βλάβες, ανάλογα την περίοδο ωρίμανσης της δείγματος, το μέγεθός του και τη θέση του. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος των υπερήχων δεν μπορεί να προσδιορίσει ρωγμές με μικρό πάχος και βάθος, ενώ με την τομογραφία δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της μιας βλάβης, καθώς το υλικό ωρίμασε με την πάροδο του χρόνου [34].

Στην εργασία των D.Ambrosini, D. Paoletti, R. Quaresima, G. Galli με θέμα “Frescoes Diagnostics: An integrated approach and a case study” [35] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης και του συνδυασμού παραδοσιακών και νέων μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου στη νωπογραφία “Incoronazione e Assunzione dell’ Assunta” στην εκκλησία Santa Maria di Collemaggio, με τις βασικές αιτίες φθορών την ανερχόμενη υγρασία, την διαρροή από την οροφή και την θραύση των υπόσκαφων υδρορροών. Οι τεχνικές που δοκιμάστηκαν είναι η παραδοσιακή μέθοδος του χτυπήματος από τον συντηρητή, η σημειακή αποσυσχέτιση (Speckle decorrelation), η θερμογραφία και η ηλεκτρονική σημειακή συμβολομετρία (Electronic Speckle Pattern Interferometry ESPI). Η μέθοδος ESPI είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη και συνήθως έχει εφαρμογή σε μικρές περιοχές μιας νωπογραφίας. Αυτό το μειονέκτημα της μεθόδου μπορεί να μετριαστεί με τη χρήση της θερμογραφίας, που μπορεί να βρει εφαρμογή σε μεγάλες περιοχές. Η σημειακή αποσυσχέτιση είναι απλούστερη και λιγότερο ευαίσθητη μέθοδος από την ESPI όμως μπορεί να εντοπίσει τις διαφορετικές μετατοπίσεις στην επιφάνεια, καταλήγοντας ότι, μόνο ολοκληρωμένες διαγνωστικές προσεγγίσεις που βασίζονται στον μη καταστρεπτικό έλεγχο NDT και ιδίως στον συνδυασμό πολλών διαφορετικών τεχνικών εξαλείφοντας τα μειονεκτήματα κάθε τεχνικής, μπορούν να εφαρμόζονται στις νωπογραφίες.

Οι D. Dirksen, B. Kemper, A. Guttzeit, G. Bischoff, και G. von Bally συνδύασαν την ηλεκτρονική σημειακή συμβολομετρία (ESPI), ως τεχνική παρακολούθησης των επιφανειακών μεταβολών, με την φωτογραμμετρία (Optical Topometry ή αλλιώς –Topometric ESPI), για την απόκτηση οπτικών εικόνων σε τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων από τουλάχιστον δύο

κάμερες από διαφορετικά σημεία λήψης [36]. Το εξεταζόμενο μέσο τέθηκε υπό θέρμανση για μερικά δευτερόλεπτα. Ο συνδυασμός των μεθόδων οδηγεί στην εξαγωγή συσχετισμών ψηφιακής σημειακής συμβολομετρίας με εικόνες που υποδεικνύουν τις μεταμορφώσεις ή μετακινήσεις στο αντικείμενο σε κλίμακα κάτω του μικρομέτρου, με τοπομετρικές πληροφορίες για τη γεωμετρία του. Η έρευνα καταλήγει λέγοντας πως, καθώς τα ανεπτυγμένα φωτομετρικά συστήματα δεν απαιτούν περαιτέρω πληροφορίες για τους αισθητήρες ή τις συσκευές απεικόνισης, είναι εφαρμόσιμα σε μια ευρεία γκάμα απεικονιστικών συστημάτων.

Στην εργασία με θέμα “A nondestructive, contactless technique for the health monitoring of ancient frescoes” από τον L. Collini [37] και παρουσιάστηκε στο IMACXXVIII στις ΗΠΑ, πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές τεχνικές διάγνωσης, μια με ένα ειδικό σφυρί Bruel&Kjoer 8202 με ενσωματωμένο αισθητήρα και μια ακουστική με μεγάφωνο δύο κατευθύνσεων σε ένα τεχνητό πάνελ κατασκευασμένο με τον παραδοσιακό τρόπο παρασκευής των ιστορικών νωπογραφιών και ενσωματωμένες ατέλειες. Ένα οπτικό laser χρησιμοποιείται για να μετρηθούν οι επιφανειακές δονήσεις της νωπογραφίας. Οι μετρήσεις με το σφυρί ενίσχυσαν τη θεωρία ότι οι επιφανειακές ταλαντώσεις για τα υγιή και μη σημεία ανταποκρίνονται στις υποκρυπτόμενες περιοχές βλάβης. Η επιφανειακή κινητικότητα καταδεικνύει την απόσπαση του κονιάματος από την υποδομή. Το σχήμα του φάσματος που προκύπτει από τις μετρήσεις εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για το κενό. Η μέγιστη τιμή της κινητικότητας δεν είναι άμεσα ανάλογη του πάχους του ατέλειας. Η ακουστική μέθοδος επαλήθευσε τα αποτελέσματα από το σφυρί. Οι ουσιαστικές διαφορές των υγιών και μη περιοχών μιας νωπογραφίας μπορούν να επισημανθούν από την ανάλυση του συντελεστή της φαινομενικής ακουστικής απορρόφησης. Ο περιορισμός έγκειται στο ότι δεν παρέχονται έγκυρες πληροφορίες για την έκταση και των βάθος των φθορών των αποκολλημένων ζωνών.

Οι Giovanni M. Carlomagno και Carosena Meola, σε κείμενο για το NDT&E International, αναφέρθηκαν στη χρήση θερμογραφικών τεχνικών για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο των νωπογραφιών [38]. Κατασκεύασαν τρία δείγματα προσομοιώνοντας μια νωπογραφία, με ενσωματωμένες σακούλες αέρα ή φελλό για τη αναπαράσταση ατελειών. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν θερμαντικές πηγές και μια υπέρυθη κάμερα. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές θερμογραφικές τεχνικές, η παλμική θερμογραφία (pulse thermography- PT), η διαμορφωμένη θερμογραφία (modulated thermography- MT) και η pulse phase θερμογραφία (PPT). Στο παραπάνω πείραμα, επισημάνθηκε η σημασία των τελειωμάτων της επιφάνειας του έργου καθώς και των ιδιοτήτων του υλικού και η επιρροή τους στην εξαγωγή

αποτελεσμάτων. Στην πρώτη περίπτωση, τα αποτελέσματα λαμβάνονται μετά τη θέρμανση του έργου κατά 3,7 βαθμούς Κελσίου και με την απότομη ψύξη του, ώστε να ενταθούν οι διαφορές στα peak, δίνοντας πληροφορίες για το μέγεθος, το βάθος και τη θερμική αντίσταση των ατελειών. Στη δεύτερη περίπτωση, το σύστημα είναι συνδεδεμένο με μια πηγή θερμικών κυμάτων, το οποίο λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει μια διαφοροποιημένη ημιτονοειδής θερμοκρασία. Οι πληροφορίες για τις περιοχές βλάβης επιτεύχθηκαν χωρίς την ανάγκη για μετέπειτα επεξεργασία. Κατέστη δυνατό να αναγνωριστούν οι διαφορές ανάμεσα στις στρώσεις χρώματος, κονιάματος και υποδομής που κατασκευάστηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στην PPT θερμογραφία, που συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα των άλλων δύο μεθόδων, η επιφάνεια θερμαίνεται από ένα ορθογωνικό παλμό, με αποτέλεσμα η συχνότητες που εκτοξεύονται προς το δείγμα να μην έχουν σταθερό πλάτος. Ο βασικός περιορισμός αυτής της μεθόδου είναι η αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του αντικειμένου, που δεν μπορεί να είναι χαμηλή όπως στην MT θερμογραφία, καθώς κάθε συχνότητα εξετάζεται σε ένα παροδικό καθεστώς και σε συγκεκριμένη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών εικόνων, καταλήγοντας πως η πιο κατάλληλη μέθοδος εκ των τριών είναι η modulated thermography.

Επίσης, υπάρχει μια ακόμα εργασία στον τομέα της διάγνωσης της ακεραιότητας των νωπογραφιών και είναι αυτή των G. Schirripa Spagnolo, D. Paoletti, D. Ambrosini και G. Guattari [39]. Ο σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η δημιουργία ενός συστήματος βασισμένο στην ψηφιακή σημειακή συσχέτιση (digital speckle correlation), εύκολου στη χρήση και στη μεταφορά, για ελέγχους ρουτίνας των νωπογραφιών. Επέλεξαν τη μέθοδο ESPI, όπου μπλοκάροντας την ακτίνα αναφοράς, μπορούν να πραγματοποιηθούν έλεγχοι των τοπικών συσχετισμών, με εφαρμογή πάνω σε δείγμα σοβατισμένου κονιάματος που υποβάλλεται σε θερμικές τάσεις. Η μέθοδος μπορεί πρακτικά να αποδώσει τις μικρές αλλαγές στη δομή των λείων επιφανειών και ιδίως όταν δεν υπάρχουν τραχύτητες.

Μια ακόμα εφαρμογή θερμογραφικών μεθόδων, είναι αυτή της μερικής θερμογραφίας ελαχίστων τετραγώνων (Partial Least Squares Thermography PLST) [40] σε τοιχογραφίες στην εκκλησία San Gottardo της Ιταλίας, όπου πραγματοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές θερμογραφίας, διαφέροντας κυρίως στον τρόπο της μετέπειτα επεξεργασίας των δεδομένων και ιδίως στον αλγόριθμο που εφαρμόζουν. Όλοι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν τόνισαν διαφορετικές ευρύτερες περιοχές των πιθανών αποκολλήσεων αλλά όλες εστιασμένες στα ίδια σημεία.

Η προσομοιωμένη υπέρυθρη θερμογραφία (Stimulated Infrared Thermography) αποτελεί μια ακόμα εκδοχή των τεχνικών επιβολής

θερμοκρασιακών μεταβολών σε ένα έργο για τον υπολογισμό των περιοχών βλάβης. Αυτή η μη καταστρεπτική και ανέπαφη τεχνική, λειτουργεί ως μέθοδος θερμοφυσικής ανάλυσης λεπτών υλικών. Έχει ενεργήσει ως εργαλείο για τον χαρακτηρισμό διαφόρων τύπων ατελειών (αποκολλήσεις, ρωγμές, εγκλεισμάτων), σε αρκετούς τύπους υλικών, σε περιορισμένη και ευρύτερη περιοχή. Με την εργασία των J.C. Candore, J.L. Bodnar, V. Detalle και P. Grossel [41], εξετάστηκε η περίπτωση του Saint Christopher από την συλλογή Campana του Λούβρου, οι τοιχογραφίες στην εκκλησία Saint Florentin de Bonnet, τα ζωγραφισμένα ταβάνια του αβαείου Saint Savin sur Gartempe και των νωπογραφιών Cocteau του θόλου Saint Pierre of Ville franche sur Mer. Η υπέρυθρη φωτοθερμική αυτή μέθοδος μπόρεσε να εντοπίσει τις δομικές ατέλειες των εξεταζόμενων έργων *in situ*, δείχνοντας και τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων με αυτά από την ακουστική ανάλυση. Επίσης, συγκριτικά με την ακουστική μέθοδο, επιτρέπει τον ακριβέστερο, γρηγορότερο και πιο αντικειμενικό προσδιορισμό αυτών των ανωμαλιών, ακόμα και σε πραγματικές συνθήκες αποκατάστασης.

Η ολογραφική συμβολομετρία (holographic Interferometry) βρίσκει εφαρμογή και σε άλλες μορφές έργων τέχνης, όπως οι ζωγραφικοί πίνακες σε καμβά. Μια τέτοια εφαρμογή έγινε σε πίνακα του El Greco με τίτλο "Adoration of magi" που ανήκει στο Μουσείο Μπενάκη. Τα τεστ πραγματοποιήθηκαν από τους Β. Τορνάρη, Α. Μπονάρου, Β. Ζαφειρόπουλος, Κ. Φωτάκης, Ν. Σμυρνάκη και Σ. Στασινόπουλο για το Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας του Ηρακλείου Κρήτης [42] σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους, πριν και μετά την αποκατάσταση, αποδεικνύοντας την ανάγκη των νέων εξελιγμένων τεχνικών στη διάγνωση ελαττωμάτων στα έργα τέχνης πάσης φύσεως.

2.3 ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ LASER

Οι φυσικοχημικές διαγνωστικές μέθοδοι έχουν εξελιχθεί ιδιαίτερα για την ανάλυση της σύνθεσης των υλικών. Η χρωματογραφία με αέριο, η φασματοσκοπία μάζας, η ατομική απορρόφηση Mossbauer είναι μερικές από τις πιο συνήθεις διαγνωστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται καθημερινά στα κέντρα συντήρησης έργων τέχνης. Μερικές τεχνικές βασίζονται στην πυρηνική φυσική και την φυσική των σωματιδίων, όπως η περιθλασιμετρία με ακτίνες Χ (X-Ray Diffractometry, η ανάλυση Auger (Auger analysis), κ.α. . Ένας σημαντικός παράγοντας στη έρευνα της κατάστασης του έργου είναι η μικροσκοπία, με τα Scanning Selection Microscope SEM, τα Tunneling

Electron Microscope TEM και τα Atomic Force Microscope AFM, πέραν των βασικών μικροσκοπίων. Μετά την κλασική φωτογραφία έχουν αναπτυχθεί οι οπτικές και οπτοηλεκτρονικές προσεγγίσεις, αρχικά ως μέσα για την τεκμηρίωση, όπως η φωτογραμμετρική ανάλυση (Photogrammetric analysis). Μια σειρά από οπτικές μεθόδους έχουν διαμορφωθεί όπως η Ολογραφία (Holography), η απεικόνιση φθορισμού (Fluorescence Imaging), η Συμβολομετρία με laser (Laser Interferometry), η τρισδιάστατη απεικόνιση (3D Laser Scanning), κ.α. με κάθε μια να απευθύνεται σε ειδικά διαγνωστικά προβλήματα.

Παρακολούθηση ρύπων και αποσύνθεσης σε πραγματικό χρόνο (Real time monitoring of pollutants and deterioration)

Η έρευνα των διαδικασιών αλλοίωσης προϋποθέτει την διάθεση μοντέλων που να προσομοιώνουν τη αλλοίωση των δυναμικών χαρακτηριστικών, οργάνων ικανών να αποδώσουν τις παραμέτρους στο πεδίο και τον ενσωμάτωση των θεωρίας και των φυσικών δεδομένων σε ένα προγνωστικό σύστημα. Τα συστήματα laser και γενικότερα οι οπτικές τεχνολογίες παρέχουν πολλές δυνατότητες στην παρακολούθηση των κατασκευών και των έργων τέχνης σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τους ρύπους και τη διαδικασία υποβάθμισης της κατάστασής τους και πλέον αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στον έλεγχο μετά τις εργασίες αποκατάστασης.

Καθαρισμός με lasers (Laser cleaning)

Ο καθαρισμός με τη βοήθεια μηχανημάτων laser είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τους συντηρητές για την απομάκρυνση των αλλοιωμένων στρώσεων που δεν μπορούν να αφαιρεθούν με συμβατικές μεθόδους καθαρισμού. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα είναι ότι δεν απαιτείται η χρήση χημικών καθαριστικών, μπορεί να γίνει επιλεκτική αφαίρεση των αλλοιωμένων στρώσεων ή των υλικών και επιτρέπει τον απόλυτο έλεγχο της ποσότητας των αφαιρούμενων στοιχείων. Αυτά τα συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλο εύρος υλικών έργων τέχνης όπως η πέτρα, ο χαλκός, οι πίνακες, το χαρτί, η τερακότα, το ξύλο, τα υφάσματα, τα επιχρυσωμένα, τα γύψινα και τις περγαμηνές.

Η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος εξαρτάται από το ποιος μηχανισμός αφαίρεσης αποδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα καθαρισμού, επιλέγοντας προσεκτικά το μήκος κύματος της ακτίνας, την ένταση της ενέργειας και τη διάρκεια του παλμού. Η χρήση του σε λίθινα στοιχεία είναι η πιο εξελιγμένη. Τα laser Q-switch Nd:YAG έχουν χρησιμοποιηθεί για προσόψεις σε κτίρια και εκκλησίες καθώς και σε κλασικά αναγεννησιακά αγάλματα.

Στη συνέχεια αυτής της εργασίας, παρουσιάζεται αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο και κατόπιν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντός του εργαστηρίου καθώς και σε μια πραγματική νωπογραφία (fresco). Εντός του εργαστηρίου διενεργήθηκαν πειράματα με διάφορες διατάξεις και εναλλακτικές ώστε να προσδιοριστούν οι δυνατότητες και οι ιδιαιτερότητες της μεθόδου ώστε να γίνει η κατάλληλη προετοιμασία πριν την εφαρμογή των διαγνωστικών ελέγχων στην πραγματική τοιχογραφία.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι, μέσα από μια τεκμηριωμένη μεθοδολογία και αρκετούς πειραματισμούς, να παρουσιαστούν μετρήσιμα και αξιόπιστα αποτελέσματα που να σηματοδοτούν την αξιοπιστία και τη σπουδαιότητα ενός μηχανήματος Scanning Laser Doppler Vibrometer στη διάγνωση και ανίχνευση βλαβών σε ιδιαίτερες κατασκευές όπως οι νωπογραφίες. Ο συνδυασμός πολλών εξελιγμένων τεχνικών και φαινομένων παρέχει μέσω της εφαρμογής τη διενέργεια μη καταστρεπτικών, ανέπαφων και απομακρυσμένων ελέγχων περί της δομικής ακεραιότητας μιας τοιχογραφίας με μετρήσιμα, συγκρίσιμα και αξιόπιστα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Περί κυμάτων

Ως κύμα ορίζεται μια διαταραχή στο χώρο και το χρόνο, με σταθερή ταχύτητα, που μεταφέρει ενέργεια και ορμή, χωρίς να μεταφέρει ύλη. Αυτή η μεταφορά γίνεται δια μέσου των υλικών ως παλμική κίνηση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου ή του κενού. Είναι περιοδικό φαινόμενο, δηλαδή επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν ένα κύμα είναι τα παρακάτω.

α) Η περίοδος του κύματος, που ορίζεται ως το χρονικό διάστημα δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών, ή της διέλευσης δύο διαδοχικών χαρακτηριστικών της διαταραχής και μετريέται σε δευτερόλεπτα (μονάδα χρόνου). Εάν η περίοδος ορίζεται ως T , τότε $T = \Delta t / N$, όπου N είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα Δt .

β) Η συχνότητα του κύματος και ορίζεται ως ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν σε ένα συγκεκριμένο σημείο ανά μονάδες χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των διαταραχών δια του χρονικού διαστήματος. Συμβολίζεται με f και συνήθως μετρίεται σε Hz και ισχύει ότι $f = N / \Delta t$, όπου N ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα Δt .

γ) Το πλάτος κύματος, που είναι η απόλυτη τιμή της μέγιστης τιμής (που ισούται με την ελάχιστη τιμή) ενός περιοδικού φαινομένου αν θεωρηθεί ως μηδέν το μέσο της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής. Μετρίεται σε μονάδες μήκους, δεν είναι πάντα σταθερό και έχει άμεση σχέση με το ενέργεια του κύματος.

δ) Το μήκος κύματος. Ως μήκος κύματος ορίζεται η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου. Είναι ουσιαστικά η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων ενός κύματος. Μετρίεται σε μονάδες μήκους και είναι ίσο με την ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ δύο διαφορετικών συμφασικών σημείων. Είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι όσο μικρότερη είναι η συχνότητα ενός κύματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του. Η σχέση που συνδέει τη συχνότητα f με το μήκος του κύματος λ είναι $f = u / \lambda$, όπου u είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

ε) Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα διαταραχής κατά τη μετάδοση του κύματος στο χώρο ονομάζεται ταχύτητα του κύματος. Για ένα ελαστικό ομογενές και ισότροπο μέσο, ισχύει $u = \chi / t$, όπου χ είναι η απόσταση που διατρέχει το κύμα κατά μήκος μιας ευθείας διάδοσής του και t ο χρόνος που χρειάζεται για αυτό. Από τα παραπάνω, προκύπτει επίσης ότι, $u = \lambda f$ και

αποτελεί τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής και ισχύει σε όλα τα κύματα. Κάθε υλικό και μέσο διάδοσης έχει τη χαρακτηριστική του ταχύτητα [43].

Οποιαδήποτε αλλαγή των παραπάνω χαρακτηριστικών μεγεθών ενός κύματος μπορεί να δώσει πολλές πληροφορίες για την κατάσταση που βρίσκεται μια κατασκευή ή ένα υλικό. Σε αυτά τα χαρακτηριστικά βασίζονται οι περισσότερες μέθοδοι ανίχνευσης βλαβών στις κατασκευές και τα έργα τέχνης.

Το φαινόμενο Doppler

Φαινόμενο Doppler ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν ένας παρατηρητής και μια πηγή κυμάτων βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, τότε η συχνότητα του κύματος που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής δεν είναι ίδια με τη συχνότητα που εκπέμπει η πηγή. Πήρε το όνομά του από τον Αυστριακό φυσικό Christian Doppler το 1842. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε όλα τα αρμονικά κύματα, τόσο στα μηχανικά όσο και στα ηλεκτρομαγνητικά. Χρησιμοποιεί σε μια ευρεία κλίμακα τεχνικών και επιστημονικών εφαρμογών για τη μέτρηση της ταχύτητας κινούμενων αντικειμένων, είτε αυτά είναι μόρια είτε αντικείμενα του γαλαξία.

Οι τύποι των εξισώσεων που χαρακτηρίζουν την ταχύτητα του κύματος που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής καθώς και όλες οι ιδιότητές του εξαρτώνται από τις θέσεις της πηγής και του παρατηρητή. Για κύματα, όπως τα ηχητικά, που διαδίδονται μέσα σε κάποιο υλικό μέσο, η ταχύτητα του παρατηρητή όσο και της πηγής πρέπει να προσδιορίζεται σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να προκύψει από την κίνηση του παρατηρητή, από την κίνηση της πηγής και από την κίνηση του μέσου διάδοσης.

Α)Κινούμενη πηγή και στάσιμος παρατηρητής

Θεωρείται ότι η πηγή S εκπέμπει αρμονικό κύμα με μια συχνότητα ν στο σύστημα αναφοράς το συνδεδεμένο με την πηγή ("σύστημα ηρεμίας" της πηγής). Η πηγή κινείται με σταθερή ταχύτητα u στη θετική διεύθυνση και ένας παρατηρητής A βρίσκεται πάνω στον άξονα των x . Επίσης, θεωρείται ότι η πηγή ήταν στη θέση $x=0$ για $t=0$ έτσι ώστε η θέση της πηγής είναι $x=ut$.

Το μέτωπο του κύματος που εκπέμφθηκε τη στιγμή $t=0$ θα είναι στη θέση $x=uT$ μετά από μια περίοδο, όπου u είναι η ταχύτητα του κύματος ως προς το μέσον. Αυτή τη χρονική στιγμή η πηγή είναι στη θέση $x=uT$ και αρχίζει να εκπέμπει την επόμενη περίοδο κύματος. (Η απόσταση μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου μετώπου κύματος είναι τότε $(u-u)T$, η οποία είναι το μήκος κύματος).

Τα μέτωπα εκπέμπονται στη διεύθυνση κίνησης της πηγής και το μήκος κύματος ελαττώνεται ως αποτέλεσμα της κίνησης της πηγής. Εάν τα μέτωπα

εκπέμπονταν στην αντίθετη διεύθυνση της κίνησης της πηγής, το μήκος κύματος θα αυξανόταν ως αποτέλεσμα της κίνησης. Καθώς η ταχύτητα της πηγής πλησιάζει την ταχύτητα του κύματος, η παρατηρούμενη συχνότητα τείνει στο άπειρο, διότι η πηγή πλησιάζει πάντα τα μέτωπα κύματος, έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ αυτών να μηδενίζεται. Θα πρέπει να τονιστεί ότι, για τα κύματα που διαδίδονται στην αρνητική διεύθυνση του x , η συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης είναι $-u$, το μήκος κύματος αυξάνεται και η μετατοπισμένη κατά Doppler συχνότητα ελαττώνεται.

Β) Στάσιμη πηγή και κινούμενος παρατηρητής

Ο παρατηρητής κινείται στη θετική διεύθυνση του x με μια ταχύτητα u_o . Με ακίνητη την πηγή, η απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων κύματος που εκπέμπονται σε ένα χρονικό διάστημα T θα είναι uT . Αυτά τα δύο μέτωπα κινούνται προς τα εμπρός με ταχύτητα $(u-u_o)$ ως προς τον παρατηρητή. Εάν ο παρατηρητής κινείται με την ταχύτητα του κύματος στη θετική διεύθυνση του x , η παρατηρούμενη συχνότητα θα είναι μηδέν. Η κίνηση προς την πηγή με την ταχύτητα του κύματος δίνει για την παρατηρούμενη συχνότητα 2ν .

Γ) Πηγή και παρατηρητής εν κινήσει

Θεωρούνται ως ταχύτητες της πηγής και του παρατηρητή u και u_o . Η απόσταση μεταξύ δύο μετώπων κύματος, που εκπέμπονται με χρονική διαφορά T , θα είναι $(u-u)T$. Τα δύο μέτωπα ταξιδεύουν με την ταχύτητα $(u-u_o)$ ως προς τον παρατηρητή, και ο χρόνος που χρειάζονται τα δύο μέτωπα να περάσουν από τον Α είναι $T' = (u-u)T / (u-u_o)$ [44].

Αν κινούνται τόσο η πηγή όσο και ο παρατηρητής σε σχέση με τον αέρα ή γενικά το μέσο διάδοσης, τότε η σχέση που μας δίνει τη συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής δίνεται από τη σχέση :

$$f_A = (u \pm u_o / u \pm u_s) f_s.$$

Στην ουσία, ο παρατηρητής λαμβάνει σήμα με μεγαλύτερη συχνότητα από εκείνο που εκπέμπει η πηγή όταν η απόσταση μεταξύ τους μειώνεται και με μικρότερη συχνότητα όταν η απόσταση μεταξύ τους αυξάνεται. Η παραπάνω εξίσωση αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου η πηγή πλησιάζει είτε απομακρύνεται από τον παρατηρητή. Εάν η απόσταση μεταξύ τους μειώνεται υπό γωνία η παρατηρούμενη συχνότητα που λαμβάνεται πρώτη είναι υψηλότερη από την εκπεμπόμενη από την πηγή συχνότητα.

Το Laser Doppler Vibrometer (LDV) είναι μια ανέπαφη μέθοδος ανίχνευσης δονήσεων, όπου η ακτίνα του laser από το LDV κατευθύνεται προς την επιφάνεια ενδιαφέροντος και το πλάτος της ταλάντωσης και η συχνότητα εξάγονται από τη μετατόπιση Doppler της συχνότητας της δέσμης laser λόγω της κίνησης της επιφάνειας [45].

Ένας μνημονικός κανόνας είναι ο εξής. Η μείωση της απόστασης μεταξύ του παρατηρητή και της πηγής έχει την τάση να αυξήσει την συχνότητα, ενώ η απομάκρυνση των δύο έχει την τάση να μειώσει την συχνότητα, με τη φορά των κινήσεων να λαμβάνεται σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Πρέπει να

τονιστεί ότι μπορεί για παράδειγμα η φορά της κίνησης του παρατηρητή να είναι προς την πηγή, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι πλησιάζει, καθώς μπορεί η πηγή να απομακρύνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν αλλάζει η συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος, αλλά η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής (δηλαδή η συχνότητα με την οποία καταφθάνουν σε αυτόν τα μέτωπα του κύματος).

Το φαινόμενο Doppler βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε πολλά επιστημονικά πεδία και κλάδους, όπως σε ραντάρ ταχύτητας της αστυνομίας, στην αστρονομία, σε ιατρικές συσκευές, κ.α. .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΣΑΡΩΣΗ ΜΕ LASER DOPPLER ΔΟΝΗΣΙΟΜΕΤΡΟ {Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV)}

Η βασική αρχή πίσω από την ανάπτυξη του LDV είναι να αντικατασταθούν οι ανθρώπινες αισθήσεις και οι αισθητήρες επαφής με συστήματα μέτρησης ικανά να παρέχουν απομακρυσμένη βοήθεια και πληροφορίες. Οι επιφάνειες ταλαντώνονται ελαφρώς με μηχανικά και ακουστικά μέσα ενώ το LDV σαρώνει το αντικείμενο, μετρώντας τις επιφανειακές ταχύτητες και εξάγοντας δισδιάστατους και τρισδιάστατους χάρτες. Στις νωπογραφίες, οι περιοχές όπου εμφανίζεται κάποιο κάποια ατέλεια η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από τις γειτονικές περιοχές και έτσι οι ελαττωματικές περιοχές μπορούν να εντοπιστούν εύκολα. Το μηχάνημα μπορεί να αναγνωρίσει και τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, οδηγώντας σε έναν πλήρη χαρακτηρισμό αυτών των περιοχών, με εφαρμογή ακόμα και σε μεγάλες κατασκευές, όπως πύργοι, κτίρια και εκκλησίες.

Το LDV έχει βρει εφαρμογή σε διάφορους τύπους κινητών ή διακοσμητικών έργων τέχνης, όπως οι νωπογραφίες, οι εικόνες, τα μωσαϊκά, τα κεραμικά, έργα σε ξύλο [46], με διαφορετικό βαθμό επιτυχίας αλλά επιδεικνύοντας μια λίστα από πλεονεκτήματα, όπως η μη διεισδυτικότητα, ο απομακρυσμένος έλεγχος, η υψηλή ευαισθησία, η φορητότητα και η μεγάλη απόκριση συχνότητας. Επίσης, όλα τα συστήματα είναι διαχειρίσιμα με ηλεκτρονικούς υπολογιστές και επιτρέπουν την αποθήκευση δεδομένων και την εύκολη μεταφορά τους σε άλλες εφαρμογές για περαιτέρω επεξεργασία.

Φυσικά υπάρχει πάντα η δυσκολία οι επιφάνειες των εξεταζόμενων κατασκευών να μην είναι οπτικά "συνεργάσιμες" και η ανάγκη εργασίας από μεγάλη απόσταση για τη λήψη δεδομένων που να είναι αντιπροσωπευτικά της κατάστασης του αντικειμένου. Επιπλέον, υπάρχει η δυσκολία της απομόνωσης του εξοπλισμού από τις εδαφικές δονήσεις και η υλοποίηση ειδικών τεχνικών διέγερσης, που όμως το LDV έχει τη δυνατότητα να τις

αντιμετωπίσει. Η απλή παρακολούθηση σημαντικών παραγόντων σχετικών με την κατάσταση της συντήρησης των μεγάλων αντικειμένων, όπως οι συχνότητες συντονισμού, είναι εφικτή χωρίς εξωτερική παρέμβαση στην κατασκευή και μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μικρό χρονικό διάστημα και με μεγάλο βαθμό ακρίβειας.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του LDV είναι η ικανότητά του να προσδιορίσει με ταχύτητα και ακρίβεια τη θέση του κάθε σημείου που αντανakλά την συγκεντρωμένη ακτίνα laser στην επιθυμητή κατεύθυνση και η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου και μετρήσεων από μεγάλη απόσταση και με ακρίβεια με μη καταστρεπτικό έλεγχο. Η ευκολία του χειρισμού της δέσμης laser στην επιθυμητή διεύθυνση, καθιστά το LDV κατάλληλο και για μετρήσεις σε κινούμενα ή περιστρεφόμενα αντικείμενα. Επίσης, επιτρέπει τη γρήγορη μέτρηση πολλών βαθμών ελευθερίας, μετακινώντας τη δέσμη του laser στα επιθυμητά σημεία. Η σχέση μεταξύ των γωνιών σάρωσης και των χωρικών συντεταγμένων είναι εξισώσεις μη γραμμικών συστημάτων, η επίλυση των οποίων γίνεται με τη μέθοδο παλινδρόμησης των ελαχίστων τετραγώνων.

Το πρώτο βήμα για την ρύθμιση του τρόπου ελέγχου, είναι η ρύθμιση του σαρωτή, όπου γίνεται προσδιορισμός των παραγόντων μετατροπής μεταξύ των οπτικών γωνιών και των τάσεων, των οποίων η αντίστοιχη τρέχουσα τιμή είναι το γαλβανομετρικό σήμα εντολών. Η αρχική ρύθμιση περιλαμβάνει τον καθορισμό της θέσης της κεφαλής του LDV, του προσανατολισμού του και των μητρών μετασχηματισμού μεταξύ του laser και του παγκοσμίου συστήματος συντεταγμένων. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται τοποθετώντας την ακτίνα σε τρία ή περισσότερα σημεία, ώστε το μετρικό σύστημα να καταγράψει τις γωνίες σάρωσης από την ακτίνα laser, σημαδεύοντας κάθε σημείο. Κατόπιν, πραγματοποιείται η εξαγωγή των μητρών μετασχηματισμού με τη βοήθεια αλγορίθμων [47].

Κατά τη πρώτη φάση της διέγερσης, πραγματοποιείται μέτρηση σε κάνναβο σημείων με λευκό θόρυβο, χωρίς την ύπαρξη εξωτερικού διεγέρτη. Το αποτέλεσμα είναι ένα χάρτης σημείων με τις επιφανειακές ταχύτητες. Οι αποκολλημένες περιοχές εμφανίζονται ως περιοχές με μεγαλύτερη ταχύτητα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι σημαντικό να παρατηρηθεί το φάσμα του σήματος για την ύπαρξη μεγάλης έντασης δομικών ταλαντώσεων που μπορούν να επικαλύψουν το χρήσιμο μέρος των δεδομένων και έχουν να κάνουν με την τοιχοποιία και όχι την επιφάνειά της. Οι επιφανειακές ταλαντώσεις που εμφανίζονται ως μικρού πλάτους/μεγάλης συχνότητας καταδεικνύουν κάποιο ελάττωμα ή κενό (σε αντίθεση με τα σήματα χαμηλής συχνότητας/μεγάλου πλάτους που προκαλούνται από γειτονικούς θορύβους από την κυκλοφορία των αυτοκινήτων σε κοντινό δρόμο).

“Οπτικοί αισθητήρες” είναι μια τεράστια ποικιλία από όργανα, συσκευές και συστήματα. Πολλά διαφορετικά συστήματα χρησιμοποιούν ‘optical sensors’, όπως οι υπέρυθρες θερμικές κάμερες ή τους αισθητήρες Bragg. Η χρήση τους γίνεται και για τη μέτρηση ταλαντώσεων με διαφορετικές λύσεις, βασισμένες στην τεχνολογία LED και αισθητήρες που βασίζονται στις ίνες, με τους αισθητήρες να έχουν μεγάλη τάξη μεγεθών από τη μικρή κλίμακα, με τα οπτικά MEMS επιταχυνσιόμετρα, μέχρι τα σχετικά μεγάλα LDV.

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών αισθητήρων είναι εξαιρετικά και η χρήση τους γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες οπτικής ίνας με τον σχεδιασμό τους είναι ανθεκτικοί σε δονήσεις, δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και, καθώς η πηγή φωτός μπορεί να βρίσκεται αρκετά μακριά από εκρηκτικά υλικά, δεν διατρέχεται ο κίνδυνος ανάφλεξης. Επίσης, προσφέρουν πολύπλοκες δυνατότητες, χάρη στην ιδιότητά τους να δεχτούν πολλαπλούς αισθητήρες σε μονή γραμμή ίνας. Επιπλέον, οι αισθητήρες οπτικής ίνας διαχωρίζονται σε πολλούς τύπους αισθητήρες όπως χημικούς, θερμοκρασίας, τάσης, βιοιατρικούς, ηλεκτρικούς και μαγνητικούς, περιστροφής, ταλάντωσης, μετατόπισης, πίεσης και ροής. Τέτοιοι αισθητήρες είναι πολύ αποτελεσματικοί για την ανάπτυξη εξυπνότερων δομών. Παρόλα αυτά, οι αισθητήρες οπτικής ίνας πρέπει να τοποθετούνται σε επαφή ή πολύ κοντά στο μετρούμενο αντικείμενο και για αυτό δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές περιπτώσεις, όπου το αντικείμενο υπό εξέταση δεν είναι προσβάσιμο ή δεν μπορεί να τροποποιηθεί, όπως μια νωπογραφία σε μια εκκλησία.

Για τις περιπτώσεις σαν αυτή, η χρήση οργάνων που βασίζονται σε δέσμη laser θεωρείται καταλληλότερη. Τα πλεονεκτήματα αυτών των οργάνων έγκειται όχι μόνο στην μη επεμβατική φύση τους αλλά και στην υψηλή ευαισθησία τους και την ιδιότητά τους να παρέχουν λεπτομερή δεδομένα σύμφωνα με το χώρο, τον χρόνο και την συχνότητα. Αρκετά από αυτά τα συστήματα έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος, όμως η συνεισφορά τους στην επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού, παραγωγικής διαδικασίας ή ελέγχου ποιότητας είναι ανεκτίμητης αξίας.

Η συσκευή σάρωσης του LDV μπορεί να μετρήσει αυτόματα και με ακρίβεια τις ταχύτητες επιφάνειας point to point με τη χρήση συμβολομετρικών τεχνικών και με μερικά γαλβανομετρικά κάτοπτρα που χειρίζονται τη δέσμη του laser. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η σάρωση ενός καννάβου σημείων λαμβάνοντας φάσματα απόκρισης και χρονοιστορίες της ταχύτητας κάθε σημείου. Αυτά τα δεδομένα δέχονται, στη συνέχεια, επιπλέον επεξεργασία και παρουσιάζονται σε έγχρωμους χάρτες δύο ή τριών διαστάσεων. Τα σύγχρονα μηχανήματα SLDV μπορούν να σαρώσουν 100 σημεία το δευτερόλεπτο για ένα σύνολο πάνω από 100,000 σημείων, με μέγιστη συχνότητα μερικές δεκάδες MHz, και με χαμηλότερο όριο λιγότερο από 1 Hertz.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η vibrometry ανοίγει νέους ορίζοντες σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές επαφής (για παράδειγμα επιταχυνσιόμετρα, μετρητές τάσης) και τις ανέπαφες τεχνικές (όπως αισθητήρες τριγωνισμού ή ανάκλασης, αισθητήρες εγγύτητας). Το κλασικό όργανο Laser Doppler Vibrometer είναι μια συσκευή ανέπαφης μετάδοσης ταχυτήτων που δουλεύει πάνω στην αρχή μέτρησης της συχνότητας Doppler μιας ακτίνας laser που διασπάται από έναν κινούμενο στόχο με τα μέσα της συμβολομετρίας (Interferometry). Τα εγκατεστημένα ηλεκτρονικά συστήματα μετατρέπουν το σήμα Doppler σε αναλογική τάση ανάλογη της στιγμιαίας ταχύτητας του στόχου.

Ο συνδυασμός του συμβολόμετρου (interferometer) και των δύο κινούμενων κατόπτρων, κατευθυνόμενοι από γαλβανομετρικούς κινητήρες δίνει τη δυνατότητα να κατευθυνθεί η ακτίνα του laser στο επιθυμητό σημείο μέτρησης. Ένα τέτοιο όργανο μέτρηση ονομάζεται Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV) και μπορεί να πραγματοποιεί μια σειρά από μετρήσεις ταχυτήτων πάνω σε έναν κάρναβο σημείων στην κατασκευή που εξετάζεται. Αυτές οι τεχνικές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στον δυναμικό έλεγχο των κατασκευών, στην κλινική και βιολογική διάγνωση, στην αλληλεπίδραση υγρών- κατασκευών, στον online έλεγχο βιομηχανικών φυτών, στην ακουστική, και στη ανίχνευση σφαλμάτων, είναι μόνο μερικές από τις περιπτώσεις που μπορεί να έχει εφαρμογή η συγκεκριμένη συσκευή.

Όπως αναφέρει και το όνομα της συσκευής μέτρησης, αυτός ο τύπος Vibrometer χρησιμοποιεί το φαινόμενο Doppler για να αποκτήσει τα δεδομένα των ταχυτήτων ταλάντωσης από απόσταση. Οι δονήσεις της επιφάνειας προκαλούν μετατόπιση της συχνότητας Doppler στην προσπίπτουσα ακτίνα laser. Αυτή η μετατόπιση είναι γραμμικά συνδεδεμένη με την συνιστώσα της ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ακτίνας laser. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια γραμμική σύνδεση μεταξύ των εναλλαγών συχνότητας της ακτίνας laser και των τιμών της ταχύτητας. Το πρόβλημα με αυτές τις μετατοπίσεις της συχνότητας Doppler είναι πως συνήθως είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τη βασική συχνότητα της ακτίνας. Ο μόνος τρόπος για να εκτιμηθούν τόσο μικρές ποσότητες είναι να χρησιμοποιηθεί η συμβολομετρία, ώστε να συνδυαστούν οι ταλαντώσεις των συχνοτήτων και να μειωθούν αρκετά και να μπορούν να καταστούν διαχειρίσιμες από πρότυπα ηλεκτρονικά συστήματα.

Το LDV παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης των επιφανειακών ταλαντώσεων από σχετικά μεγάλη απόσταση με αναλογικό σήμα αντίστοιχο των επιφανειακών ταχυτήτων. Για τη διέγερση της επιφάνειας θα πρέπει να εφαρμοστεί μια τέτοια δύναμη που να είναι ελεγχόμενη ώστε να μην επιφέρει μεγαλύτερα προβλήματα, καθώς ταξιδεύει μέσα στο σώμα της κατασκευής. Η ταλάντωση της επιφάνειας σε κάθε σημείο εξαρτάται από την

κατασκευή της τοιχοποιίας σε κάθε σημείο, καθώς επίσης και από το επίπεδο της διέγερσης στο σημείο αυτό [48].

Το φως από το laser διαχωρίζεται σε μια ακτίνα αναφοράς και σε μια ακτίνα μέτρησης από ένα splitter δέσμης (1) Η ακτίνα μέτρησης περνάει μέσα από δεύτερο splitter ακτίνας (3) και έτσι επικεντρώνεται από τον φακό σε ένα σημείο πάνω στο αντικείμενο που ταλαντώνεται. Το φως που σκεδάζεται και επιστρέφει, εκτρέπεται από το splitter (3) προς το splitter ακτίνας (2). Σε αυτό το σημείο, η σκεδαζόμενη ακτίνα αναμειγνύεται με την ακτίνα αναφοράς με τη μετατοπισμένη συχνότητα. Η διαδικασία ανάμειξης, χάρη στο φαινόμενο Doppler, εμφανίζει όλες τις διαφορές στην συχνότητα μεταξύ της ακτίνας αναφοράς και της ακτίνας μέτρησης ως διαφοροποιήσεις της έντασης στο splitter ακτίνας (2). Τέλος, το σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα μέσω φωτοανιχνευτών. Η χρήση των φωτοανιχνευτών συμβάλει στη μείωση του θορύβου και της μετατόπισης.

Τα πιο διαδεδομένα SLDV έχουν μέγιστο εύρος ταχύτητας 10m/s, με ανώτατο όριο συχνότητας τα 200KHz, ανάλυση περίπου 1μm/s και ακρίβεια της τάξης του 1%-2%. Η ισχύς του laser είναι λιγότερη από 1 mW, ώστε να μην απαιτούνται ιδιαίτερα μέτρα ασφαλείας, αλλά ακόμα και με τόσο χαμηλά επίπεδα ενέργειας η επεξεργασία από απόσταση μερικών δεκάδων μέτρων είναι δυνατή με χωρική ανάλυση 1mm. Όλα τα συστήματα SLDV διέπονται από έναν υπολογιστή όπου τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ψηφιακή μορφή. Επιπλέον, τα αποτελέσματα μπορεί να εμφανίζονται σε εικόνες της κατασκευής που καταγράφονται από μια εσωτερική CCD κάμερα που τα συνοδεύει.

Η εφαρμογή του SLDV για την ανίχνευση κατασκευαστικών βλαβών βασίζεται στην καλά τεκμηριωμένη αρχή ότι είναι δυνατό να εκτιμηθεί η δομική κατάσταση ενός αντικειμένου από την εξέταση των ταλαντώσεών της. Η διαδικασία αναγνώρισης των περιοχών βλάβης είναι ουσιαστικά βασισμένη στην ανάλυση των σημάτων που συλλέγονται από την πρόσοψη του δείγματος. Με την ανάλυση RMS (Root Mean Square) παρέχονται μέσες τιμές της επιφανειακής ταχύτητας για κάθε σημείο του αντικειμένου, ενώ με την ανάλυση Fourier (FFT) δίνονται πληροφορίες φάσματος για κάθε σημείο. Υπάρχει μια επιπλέον προσέγγιση, αυτή της αποκαλούμενης Lock-in (ή αλλιώς FastScan), όπου χορηγείται μια μονή συχνότητα διέγερσης και λαμβάνονται αμέσως χάρτες με τα αποτελέσματα των δονήσεων σε σχέση με το εύρος και τη φάση. Αυτή η προσέγγιση συνήθως συνδυάζεται με ανάλυση RMS και FFT για να προκύψουν πιο λεπτομερείς χάρτες. Η διέγερση της κατασκευής γίνεται με πολλούς τρόπους και συμπεριλαμβάνει ηχητικά κύματα, δονητές, σφυριά, περιβαλλοντικές πηγές (αέρας, κυκλοφοριακή κίνηση, μικροσεισμοί).

4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Οι πιο συνηθισμένες συσκευές που μπορούν να παράγουν τεχνητή διέγερση είναι α)τα συνήθη μεγάφωνα, β)τα μεγάφωνα σταθερής κατεύθυνσης ήχου, γ)τα ελλειπτικά ακουστικά κάτοπτρα και δ)οι πιεζο-ενεργοποιητές και ε)οι γεννήτριες μηχανικών ταλαντώσεων.

Στην περίπτωση (α), ο εξοπλισμός είναι χαμηλού κόστους και έχει πολυάριθμα μοντέλα. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η χαμηλή αποδοτικότητά τους. Παρόλα αυτά, είναι έτοιμα για χρήση και χρήσιμα σε προκαταρκτικές μετρήσεις. Η (β) περίπτωση, πρόκειται για ηχεία που λειτουργούν σε επίπεδα πάνω από τα 100dB/1W/1m, επιτρέποντας την χρήση ενισχυτών χαμηλής ενέργειας. Είναι ιδανικά για τη διέγερση μεγάλων επιφανειών σε μεγάλες αποστάσεις. Η (γ) περίπτωση αντιπροσωπεύει την τάση να ξεπεραστούν οι ελλείψεις των συνηθισμένων ηχείων, διατηρώντας παράλληλα τα βασικά τους πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα την απομακρυσμένη διέγερση. Η βασική ιδέα είναι η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων εστίασης των ελλειπτικών κατόπτρων για τη συγκέντρωση της ακουστικής ενέργειας σε μια μικρή περιοχή του αντικειμένου αντί να διασκορπίζεται παντού. Η (δ) περίπτωση αφορά τους διεγέρτες που αναπτύχθηκαν επειδή υπάρχει ένα φυσικό όριο στην ακουστική διέγερση, για παράδειγμα η μεγάλη αντιστοιχία μεταξύ των ακουστικών κυμάτων και της αντίστασης του δείγματος. Η μετάδοση ενέργειας είναι πολύ χαμηλή και μόνο η υψηλή ευαισθησία του SLDV μπορεί να δώσει καλές μετρήσεις.

Μια άλλη κατηγορία διεγερτών είναι οι φυσικοί διεγέρτες όπου σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται τα χτυπήματα στις επιφάνειες (μέθοδος ανίχνευσης βλαβών με σφυρί), τα πλήθη και η ζωντανή μουσική.

Διέγερση με ηχητικά μέσα

Ο βασικός στόχος είναι να επιτευχθεί η ταλάντωση του έργου τέχνης. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι χρησιμοποιώντας ακουστικά κύματα που εκπέμπονται από μεγάφωνα. Τα εισαγόμενα επίπεδα δόνησης είναι πολύ χαμηλά συγκριτικά με εκείνα που συναντώνται συνήθως σε εκκλησίες και μουσεία και κατά πολύ χαμηλότερα από αυτά που παράγονται από το χτύπημα του συντηρητή. Ο συνδυασμός του SLDV και μιας ακουστικής διέγερσης παράγει ένα πλήρες μη επεμβατικό σύστημα μέτρησης, ικανό να λάβει απομακρυσμένες πληροφορίες που είναι δυνατό να μεταφερθεί για μετρήσεις στο πεδίο. Τα προβλήματα με τα επιταχυνσιόμετρα που προαναφέρθηκαν επιλύονται με τη παραπάνω εφαρμογή μιας και δεν είναι απαραίτητα η επαφή με το έργο τέχνης και η επίδραση της ακτίνας laser είναι εντελώς αμελητέα.

Η ακουστική διέγερση προσφέρει τη δυνατότητα να ξεπεραστεί η ανάγκη για φυσική πρόσβαση στο μετρήσιμο σημείο. Για την ακρίβεια, ο ήχος που εκπέμπεται από ένα τηλεχειριζόμενο μεγάφωνο μπορεί να διοχετευτεί ταλαντώσεις σε κάθε σημείο μιας νωπογραφίας, εάν μεταφερθεί η κατάλληλη ενέργεια από τον αέρα στον τοίχο.

Τα ηχητικά κύματα μπορούν να δώσουν φάσματα υψηλής συχνότητας, έτσι ώστε να προκληθεί ο συντονισμός με την αποκολλημένη περιοχή του πίνακα. Η χρήση μιας μονής συχνότητας για την ηχητική διέγερση επιτρέπει την μείωση της έντασης του ήχου που απαιτείται, συγκριτικά με ένα σήμα λευκού θορύβου. Εάν το σύστημα διακατέχεται από μια μονή συχνότητα, όλη η διαθέσιμη ενέργεια θα διοχετευτεί σε αυτή τη συχνότητα. Εάν εισαχθεί στο σύστημα μια ευρύτερη μπάντα ήχου, το επίπεδο ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας θα μειωθεί και μπορεί να μην είναι αρκετό να δώσει μετρήσιμα μεγέθη.

Για πολύ μεγάλες κατασκευές είναι πιθανό να μη έχει εφαρμογή η ακουστική διέγερση και γι αυτό να απαιτούνται άλλες συσκευές που να μπορούν να παράγουν μεγαλύτερα επίπεδα διέγερσης. Μια τέτοια συσκευή είναι οι συμπιεστές οδοστρώματος που μπορούν να βρεθούν σε κάθε εργοτάξιο, είναι χαμηλού κόστους, εύκολοι στον χειρισμό και κυρίως μπορούν να παράγουν επαναλαμβανόμενη παλμική εισαχθείσα δύναμη.

Από την άλλη, μικρά αντικείμενα δεν μπορούν να διεγερθούν κατάλληλα από μεγάφωνα καθώς οι πολύ μικρές περιοχές με ατέλειες μπορεί να μην διεγερθούν από τα σχετικά μεγάλα μήκη κύματος των ακουστικών κυμάτων. Στις περιπτώσεις αυτές κρίνεται καταλληλότερη η χρήση πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών.

Παρόμοιας τεχνολογίας με τους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές αλλά όμως υπακούοντας στο αντίθετο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, όπως για παράδειγμα τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα τύπου PCB. Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για μετρήσεις σε μηχανήματα και άλλες κατασκευές. Σχεδιάστηκαν για να καλύψουν την ανάγκη για επιταχυνσιόμετρα χαμηλής μάζας με υψηλή ευαισθησία και διευρυμένη απόκριση συχνοτήτων. Η ιδιότητα να μεταφέρει τα δεδομένα της επιτάχυνσης της ταλάντωσης και της κίνησης σε σήμα υψηλής τάσης, χαμηλής αντίστασης συμβατό με συστήματα ανάγνωσης με signal analysis.

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι μια απλή συσκευή που γενικά βασίζεται σε πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους που μετρούν τις δονήσεις του σώματος στο οποίο είναι προσκολλημένοι. Τα μειονεκτήματα μιας τέτοιας προσέγγισης είναι εμφανή. Τα μοντέρνα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να είναι μικρότερα από 0,5cm³ και να ζυγίζουν λιγότερο από 0,5gr όμως μπορούν να

αλλοιώνουν τις μικρές μετακινήσεις του αντικειμένου. Επιπλέον, ορισμένες φορές είναι δύσκολη η εφαρμογή ή η κόλληση αυτών των μικρών στοιχείων στο εξεταζόμενο αντικείμενο για πολλούς λόγους, όπως υψηλές θερμοκρασίες, η υψηλή αξία των αντικειμένων, η ευαισθησία τους και τα εχθρικά περιβάλλοντα.

Το LDV μπορεί να αξιοποιηθεί για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, στοχεύοντας με το laser μια νωπογραφία, προκαλώντας παράλληλα την ταλάντωση του πίνακα. Ο χάρτης που προκύπτει καταδεικνύει αμέσως τις περιοχές όπου η νωπογραφία καταρρέει προς το πάτωμα. Ο λόγος είναι ότι οι περιοχές όπου έχει αποκολληθεί ο ζωγραφικός πίνακας από το σταθερό υπόβαθρο θα ταλαντώνονται περισσότερο από τα σημεία που είναι καλά προσκολλημένα στην τοιχοποιία. Η ακτίνα του laser θα μετρήσει σε αυτές τις περιοχές υψηλές ταχύτητες οι οποίες θα είναι καταφανείς στους εξερχόμενους χάρτες. Η ίδια αρχή μπορεί να εφαρμοστεί και σε εικόνες και άλλα είδη έργων τέχνης.

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός LaserDopplerVibrometer στη συντήρηση, την έρευνα και εφαρμογή είναι :

- ο μη καταστρεπτικός χαρακτήρας του,
- η ασφαλής πηγή ακτινοβολίας,
- ασφαλές επίπεδο ενέργειας της δέσμης,
- η ανέπαφη εφαρμογή,
- η μη επεμβατική λειτουργία,
- η έλλειψη ανάγκης λήψης δείγματος,
- το γεγονός ότι δεν απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας,
- η φορητότητα,
- ο χαρακτήρας φιλικός προς χρήση,
- η δυνατότητα εφαρμογής σε ανώμαλες επιφάνειες,
- η μη εξάρτηση από το μέγεθος του έργου
- η καταλληλότητα προς χρήση σε σταθερά και κινητά στοιχεία και
- οι απαιτήσεις διέγερσης που κινούνται μέσα στα πλαίσια ασφαλείας .

4.3 ΝΩΠΟΓΡΑΦΙΕΣ (FRESCOES) ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΕΣ

Οι νωπογραφίες και οι εικόνες παρουσιάζουν ανάλογες ιδιότητες σχετικά με τις βλάβες, καθώς και οι δύο εμφανίζουν στρωματογραφικές αποσπάσεις και αποκολλήσεις και επιφανειακές ρωγμές.

Μέχρι τώρα, η διάγνωση της δομικής κατάστασης αυτών των έργων βασιζόταν κατά κύριο λόγο στην εμπειρία και τεχνογνωσία του συντηρητή και η τυπική διαγνωστική διαδικασία επιτυγχάνεται κυρίως μέσω χειροκίνητων και οπτικών ελέγχων της επιφάνειας του αντικειμένου, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια. Το χτύπημα του συντηρητή με τη βοήθεια ενός σφυριού δημιουργεί ταλάντωση της επιφάνειας και εξάγει συμπεράσματα για τις βλάβες ανάλογα με τον λαμβανόμενο ήχο.

Οι πρώτες προσπάθειες για μεταφορά αυτής της μεθόδου σε μια πιο συστηματική προσέγγιση οδήγησαν στην σύσταση του LDV, έχοντας ως βασική αρχή ότι οι περιοχές βλάβης αναγνωρίζονται ως οι περιοχές με μεγάλη κινητικότητα σε συγκεκριμένες συχνότητες. Οι αρθρώσεις των χεριών του συντηρητή αντικαθίστανται από σφυριά και τα δάχτυλά του από τα επιταχυνσιόμετρα. Ο χαρακτηρισμός των ελαττωματικών περιοχών μπορεί να γίνει με την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων των αντίστοιχων μοντέλων. Ο Esposito εισήγαγε ακουστική διέγερση σε κατασκευές ως ένα πρώτο βήμα προς την απομακρυσμένη μέτρηση, οι Castellini, Paone και Tomasini παρουσίασαν το Laser Doppler Vibrometer ως μια τηλεχειριζόμενη συσκευή που αντικαθιστά τα επιταχυνσιόμετρα. Αυτή η διαδικασία έχει το πλεονέκτημα ότι είναι επαναλαμβανόμενη, μη επεμβατική παρέχοντας απομακρυσμένο έλεγχο της κατασκευής.

Η βασική μεθοδολογία αποτελείται από δύο στάδια για την αναγνώριση και τον χαρακτηρισμό των ελαττωματικών περιοχών. Αρχικά γίνεται η σάρωση του έργου τέχνης με διέγερση με λευκό θόρυβο όπου μετράται η ταλάντωση της επιφάνειας από το Laser Doppler Vibrometer. Το αποτέλεσμα είναι ένας χάρτης σημείων με τις επιφανειακές ταχύτητές τους. Η διαδικασία έχει μικρή χρονική διάρκεια και οι αποκολλημένες περιοχές εμφανίζονται ως περιοχές με μεγαλύτερη ταχύτητα. Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να παρατηρηθεί το φάσμα του σήματος για να σημειωθεί η παρουσία μεγάλου εύρους κατασκευαστικών ταλαντώσεων που μπορεί να υπερκαλύψει τα χρήσιμα μέρη του σήματος, όπως για παράδειγμα μικρούς εύρους-μεγάλης συχνότητας τοπικές επιφανειακές ταλαντώσεις που παράγονται από μια ατέλεια (πχ ένα υποκείμενο κενό). Γενικά, το σήμα από την συσκευή του laser θα πρέπει να φιλτραριστεί καταλλήλως ώστε περιπτώσεις όπως πολύ χαμηλές συχνότητες/μεγάλου εύρους ταλαντώσεις που παράγονται από γειτονικούς δρόμους για παράδειγμα, να απαλειφθεί. Σε μερικές ιδιαίτερα δύσκολες περιπτώσεις απαιτείται ειδικό φίλτρο ώστε να ελαχιστοποιηθούν πολύ μεγάλου εύρους μικρής μπάντας παρεμβάλλοντα σήματα.

Μετά την χωροθέτηση των ανωμαλιών, μπορεί να ερευνηθεί το σχετικό φάσμα σηματοδοτώντας με το laser στο κέντρο των αποκολλημένων περιοχών. Χρησιμοποιώντας τον Γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT) μπορούν να αναγνωριστούν οι συχνότητες συντονισμού, εξετάζοντας το αποκτηθέν φάσμα συχνοτήτων και τις επόμενες σαρώσεις που εκτελούνται κοιτάζοντας τις επιφανειακές δονήσεις στις ίδιες συχνότητες. Οι συχνότητες συντονισμού είναι εκείνες οι συχνότητες όπου η απόκριση του συστήματος λαμβάνει τις μέγιστες τιμές και χρειάζονται για την εξέταση του μοντέλου ενός έργου τέχνης με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Τα συστήματα SLDV μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παρακολούθηση των έργων, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα πριν και μετά από μια αποκατάσταση [49].

4.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ LASERDOPPLERVIBROMETER

Οι L.Collini και R.Garziera εφήρμοσαν ανέπαφο διαγνωστικό σύστημα σε νωπογραφίες χρησιμοποιώντας ακουστική διέγερση και ακουστική απόκριση, αντικαθιστώντας τον μετρητή laser με ακουστικό μετρητή [50]. Με την αντικατάσταση του laser, ακολουθείται η αρχή "ακουστικής διέγερσης-ακουστική απόκριση". Το κόστος της συσκευής Laser Doppler Vibrometer είναι συγκριτικά μεγάλο σε σχέση με τους ακουστικούς αισθητήρες, που είναι χαμηλή χρηματικής αξίας και ευρέως διαθέσιμοι. Για τη σύγκριση, διενεργήθηκαν έλεγχοι στο εργαστήριο σε τεχνητά δείγματα αναπαράστασης τοιχογραφίας με δομικές ανωμαλίες, καθώς και στο εσωτερικό ενός τρούλου του 15ου αιώνα στην πόλη Πάρμα. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις διέγερσης με σφυρί και LDV αισθητήρα, ακουστικής διέγερσης και LDV αισθητήρα και της ακουστικής διέγερσης ακουστικού αισθητήρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, η τελευταία μέθοδος, μπορεί να είναι χαμηλότερου κόστους από αυτές που απαιτούν το LDV, παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία, επιτρέποντας στον χρήστη να εντοπίσει μεγαλύτερες ατέλειες. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα με το LDV είναι μεγαλύτερης ακρίβειας και τα δεδομένα έχουν μεγαλύτερη συνοχή.

Με σκοπό την ανάπτυξη μιας ανέπαφης διαδικασίας για τη διάγνωση των βλαβών στις νωπογραφίες, οι P.Castellini και N. Paone εργάστηκαν στην ακουστική, ερευνώντας την πιθανότητα παραγωγής σημάτων λευκού θορύβου, έτσι ώστε το εισαγόμενο σήμα να διεγείρει τον τοίχο σε συντονισμένη ταλάντωση, εάν υφίσταται βλάβη [51]. Μια τέτοια τεχνική, συνδυασμένη με ένα Laser Doppler Vibrometer για τις επιφανειακές ταχύτητες, επιτρέπει την ανάπτυξη μιας προσεγγιστικής διαδικασίας που ικανοποιεί τις ανάγκες για ανέπαφη και απομακρυσμένη μέτρηση. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα Laser Doppler Vibrometer της Polytec και

μεγάφωνο με ισχύ 60W σε απόσταση 1-2 μέτρα από μια πειραματική επιφάνεια, για την ανάλυση μιας περιοχής 1 τετρ.μέτρου. Το πείραμα έδειξε ότι είναι εφικτός ο προσδιορισμός των θέσεων των ατελειών σε μια νωπογραφία. Κρίνεται σημαντικό να καθοριστεί το κατώτατο όριο προκειμένου να φιλτραριστούν τα πλάτη των δονήσεων του τμήματος του τοίχου χωρίς βλάβες, που μπορεί να θεωρηθεί ως θόρυβος του υπόβαθρου σε αυτή τη διαδικασία μέτρησης. Το σχήμα της αποκόλλησης είναι ορισμένο με μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με τη μέτρηση της θέσης του. Αυτό οφείλεται στη μείωση του εύρους της ταχύτητας ταλάντωσης στην ακμή κάθε ελαττώματος, όπου είναι μικρότερη από το κατώτατο όριο. Αυτό το γεγονός περιορίζει τη δυνατότητα να προσδιοριστεί το σχήμα των ατελειών. Για την επίλυση του προβλήματος, συστήνεται η χρήση τεχνικών φιλτραρίσματος και μορφολογικών αλγορίθμων για να βελτιωθεί η μέτρηση του σχήματος των αποσπασμένων τμημάτων.

Ένα casestudy με χρήση ενός Scanning Laser Doppler Vibrometer πραγματοποιήθηκε στο Καπιτώλιο των ΗΠΑ, καθώς εμπεριέχει πολλούς διακοσμητικούς πίνακες και νωπογραφίες που έχουν γίνει πάνω στον αρχικό σοβά. Οι G.Adams, J.Bucaro, E.Esposito, A.J.Kurdila, B.Marchetti, E.P.Tomasini και J.F.Vignola διενήργησαν τεστ με ένα SLDV για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα του μηχανήματος στην ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των ελαττωμάτων στον σοβά πίσω από τα έργα [52]. Η μελέτη επικεντρώθηκε στους διαδρόμους Brumidi και στην προεδρική αίθουσα. Τα πρωταρχικά αποτελέσματα έδειξαν την αποτελεσματικότητα του συστήματος στον εντοπισμό των περιοχών βλάβης.

Οι P.Castellini, N.Paone και E.Tomasini έχουν πραγματοποιήσει δοκιμές με το Laser Doppler Vibrometer στο εργαστήριο, κατασκευάζοντας έναν πειραματικό τοίχο που περιέχει αρκετά σημεία φθοράς σε γνωστές θέσεις. Διενεργήθηκαν μετρήσεις με δύο διαφορετικούς διεγέρτες, ένα σφυρί κρούσης και μια με ακουστικές τεχνικές.

Οι αποκολλήσεις στις νωπογραφίες, όπως προαναφέρθηκε, προκαλούν αλλαγές στα δυναμικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του τοίχου όταν υποβάλλεται σε ταλάντωση, καθώς η ταλάντωση σε κάθε σημείο εξαρτάται από τη δομή του τοίχου στο σημείο αυτό. Παραδοσιακά, οι συντηρητές χτυπούσαν τον τοίχο και αναγνώριζαν τις αποκολλήσεις από τη διαφορετική συχνότητα του εκπεμπόμενου ήχου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, έγινε η αναλογία αυτής της μεθοδολογίας, αντικαθιστώντας το δάχτυλο του χεριού με ένα σφυρί κρούσης, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της κινητικότητας σε μηχανικές κατασκευές. Προσφέρει τη δυνατότητα να εισαχθεί δύναμη με ευρυζωνικό φάσμα συχνοτήτων, εξαρτώμενο από τη διάρκεια και το σχήμα της επιβληθείσας δύναμης, ελεγχόμενο πάντα από έναν χειριστή και με προσοχή στη μαλακή επιφάνεια της τοιχογραφίας. Οι

επιφανειακές ταχύτητες μετρήθηκαν σε κάθε σημεία από ένα Laser Doppler Vibrometer. Σε κάθε περιοχή φθοράς παρουσιάστηκαν μεγάλες κορυφές συντονισμού, που όμως η κινητικότητα άλλαζε σημαντικά από τη μια ατέλεια στην άλλη. Παρατηρήθηκε ότι οι αλλαγές μέσα στο ίδιο ελάττωμα προκαλούν διαφορετικά μεγέθη στις κορυφές συντονισμού, ενώ αλλαγές μεταξύ διαφορετικών ατελειών περιλαμβάνουν διαφορετικά περιεχόμενα συχνότητας των λειτουργιών κινητικότητας. Επίσης, έγιναν μετρήσεις με τοποθέτηση του LDV σε διάφορες αποστάσεις από τον τοίχο, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά του σε διάφορες θέσεις.

Η δεύτερη διέγερση έγινε με τη βοήθεια ακουστικών κυμάτων. Εξετάστηκε η πιθανότητα να εισαχθεί σήμα λευκού θορύβου από ένα μεγάφωνο ώστε το εισαχθέν σήμα να προκαλέσει συντονισμένη ταλάντωση κατά την παρουσία ατέλειας. Ο συνδυασμός αυτής της διέγερσης με το LDV για τις επιφανειακές ταχύτητες, έδειξε πως τα ηχητικά κύματα μπορούν να προκαλέσουν συντονισμένη ταλάντωση και να αναγνωριστούν οι αποκολλήσεις. Το αποτέλεσμα είναι μια ψευδο- εικόνα των αποκολλημένων περιοχών στην επιφάνεια του τοίχου, βρίσκοντας εφαρμογή ακόμα και όταν δεν είναι γνωστές οι περιοχές αυτές *a priori*. Το μέγεθος των ελαττωμάτων δεν κατέστη δυνατό να προσδιοριστεί σωστά, καθώς απαιτείται να αφαιρεθεί ο θόρυβος του υπόβαθρου, που όμως μπορεί να διορθωθεί με τη χρήση των κατάλληλων αλγορίθμων. Στα πλαίσια της ίδια εργασίας, η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και σε πραγματική νωπογραφία μιας εκκλησίας, καταλήγοντας στα ίδια συμπεράσματα [53].

Οι S. G. Tavares, A. Agnani, E. Esposito, M. Feligiotti, S. Rocchi, R. M. De Andrade παρουσίασαν μια συγκριτική έρευνα μεταξύ ενός Laser Doppler Vibrometer και ενώ μηχανήματος υπέρυθρης θερμογραφίας (IRT) [54]. Η μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο Mechanical and Thermal Measurements Laboratory στο Universita Politecnica delle Marche της Ιταλίας σε δείγμα κατασκευασμένο με κενά. Για τη θερμογραφία, χρειάστηκαν τέσσερις λάμπες που ισοδυναμούν με 1000W και μεταξύ των λαμπών και του δείγματος παρεμβλήθηκε μια θερμική κάμερα. Η ανάλυση έγινε με δύο τρόπους, την παλμική θερμογραφία (pulsed thermography), βασισμένη στον προσδιορισμό των μέγιστων θερμικών αντιθέσεων, και την διαμορφωμένη θερμογραφία (modulated thermography), με τη χρήση των αρχικών τιμών υψηλών συχνοτήτων, που επιτρέπει την ανάλυση των πιο επιφανειακών στιβάδων του δείγματος (αυτή η συχνότητα σταδιακά ελαττώθηκε για να αναλυθεί το δείγμα σε όλο το πάχος).

Οι μετρήσεις με το LDV έγιναν με την βοήθεια ενός μεγαφώνου ως πηγή σήματος, λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή των διαφόρων χρωμάτων της νωπογραφίας στην αλλοίωση των αποτελεσμάτων, μιας και το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε απαιτεί συγκεκριμένη ποσότητα φωτός laser να αντανakλάται προς την κεφαλή του laser, που επηρεάζεται από την αδρότητα

της επιφάνειας, τον τύπο των τελειωμάτων και των χρωστικών στην επιφάνεια του έργου. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ταυτίστηκαν. Στις θερμικές διεργασίες, τονίστηκε η σημασία της σωστής επιλογής της θερμοκρασίας διέγερσης καθώς μπορεί να μην είναι εφικτό να εντοπιστεί και να προσδιοριστεί η ατέλεια. Το LDV απέδειξε και σε αυτή την εφαρμογή πως μπορεί να αναγνωρίσει τις ενδεχόμενες φθορές και ατέλειες μιας τοιχογραφίας.

Στο έργο των Martarelli M, Castellini P., Quagliarini E., Seri E., Lenci S, Tomasini E.P. [55], επιχειρήθηκε μια νέα εφαρμογή ενός SLDV (Scanning Laser Doppler Vibrometer), για να ερευνηθούν οι ιστορικοί σοβάδες που κρέμονται από λεπτούς θόλους κατασκευασμένους από γύψο και καλάμια πάνω σε ξύλινα τόξα, που συχνά αποτελούν τον καμβά για τοιχογραφίες και έργα υψηλής ιστορικής, καλλιτεχνικής και αρχιτεκτονικής αξίας. Οι περισσότεροι θόλοι εμφανίζουν ρωγμές και καθιζήσεις στο χαμηλότερο σημείο της επιφάνειας. Συνήθως, οι ενέργειες αποκατάστασης περιλαμβάνουν την ανύψωση των κατώτερων τμημάτων των θόλων, με αποτέλεσμα να κινδυνεύει να σπάσει ο σοβάς σε κομμάτια και να χαθούν έργα μεγάλης αξίας. Για τις ανάγκες της εργασίας, κατασκευάστηκε ένα υπόδειγμα με ξύλινες στηρίξεις και σύμφωνα με τους παραδοσιακούς τρόπους δόμησης. Το δείγμα υποβλήθηκε σε ταλάντωση με τη βοήθεια ενός αυτόματου σφυριού κρούσης συνδεδεμένο με μια κινούμενη πλατφόρμα ενός ηλεκτροδυναμικού δονητή, τοποθετημένο σε τέσσερις διαφορετικές θέσεις. Σε όλες τις μετρήσεις, παρουσιάστηκε υψηλή απόσβεση του συντονισμού και όλες οι αποσβέσεις αυξάνονται όταν η δύναμη δίνεται στον γύψο και το καλάμι (στο σοβά). Εξαιτίας της μηχανικής διέγερσης εμφανίζεται ένα υψηλότερο επίπεδο θορύβου. Επίσης, η έλλειψη συνοχής μεταξύ του γύψου και των καλαμιών οδηγεί σε ενεργοποίηση δονήσεων υψηλής συχνότητας, εξαιτίας των μικρο-συγκρούσεων μεταξύ καλαμιών και σοβά. Το βασικότερο συμπέρασμα που εξήχθη από την πειραματική εργασία είναι πως η διαμήκης ρωγή παράγει μια σαφή ασυνέχεια στο δείγμα (που παρατηρείται σε χαμηλές συχνότητες) και είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό για διαγνωστικούς σκοπούς και τον εντοπισμό των φθορών.

Για την καλύτερη δυνατή εξερεύνηση των ασυνεχειών και των γενικότερων προβλημάτων μια τοιχογραφίας ή ενός έργου, θεωρείται σκόπιμος ο συνδυασμός διαφόρων μεθόδων ελέγχου και διάγνωσης των κατασκευών, ώστε να μπορούν να καθοριστούν όλοι οι παράγοντες που μπορούν να συντελέσουν σε μια αστοχία.

Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το έργο του Enrico Esposito αναφορικά με τη χρήση του Laser Doppler Vibrometer, του Ground Penetrating Radar και της υπέρυθρης θερμογραφίας (Infrared Thermography). Οι παραπάνω μέθοδοι αξιοποιήθηκαν για τον εντοπισμό βλαβών σε ιστορικά έργα στην

εκκλησία Ballinesti, στο μοναστήρι Popauti και την εκκλησία Sucevita της Ιταλίας [56].

Οι P. Castellini, Enrico Esposito, V. Legoux, N. Paone, M. Stefanaggi, E.P. Tomasini, στα πλαίσια του προγράμματος LASERART, συνέταξαν μια εργασία σχετικά με την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας ενός μη επεμβατικού scanning laser Doppler Vibrometer στη διάγνωση βλαβών [57]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τοίχους που κατασκευάστηκαν 20 χρόνια πριν τη δοκιμή, οι οποίοι αφέθηκαν να ωριμάσουν σε φυσικό περιβάλλον ώστε να προσομοιάζεται μια αρχαία τοιχογραφία. Για τη δημιουργία εξαναγκασμένης ταλάντωσης χρησιμοποιήθηκαν ακουστικά, όπου σε συνδυασμό με το SLDV, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της τεχνικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση των έργων τέχνης ποικίλουν: οι περιβαλλοντικοί παράγοντες (εναλλαγές θερμοκρασίας και υγρασίας), τα ρυπογόνα (επιφανειακή εναπόθεση ρύπων, χημικές αποθέσεις και βιολογικοί παράγοντες), οι φυσικοί παράγοντες (καθίζηση κτιρίου, σεισμικές δονήσεις) η γεωλογική κατάσταση του εδάφους, η ποιότητα των υλικών και ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται μια τοιχογραφία συμβάλουν στην αλλοίωση της τελικής εικόνας του αντικειμένου. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν στην επιφάνεια διάφορες παθολογίες, όπως αποκολλήσεις, αποσαθρώσεις αλάτων, υποκείμενες αποσαθρώσεις, διαχωρισμούς, λεκέδες, κονιορτοποίηση. Ειδικότερα, οι παθολογίες από αποκολλήσεις, λεκέδες, υποκείμενες αποσαθρώσεις οδηγούν σε έλλειψη συνάφειας που επικεντρώνεται στις υποκείμενες στρώσεις του κονιάματος. Η παρουσία αέρα, η υγρασία και τα άλατα μεταξύ των στρώσεων προκαλούν το διαχωρισμό και την πτώση του κονιάματος και του έργου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κύρια αιτία της αλλοίωσης είναι η παρουσία υπερβολική υγρασίας στο περιβάλλον που είναι εκτεθειμένη η τοιχογραφία. Εάν υπάρχουν οι συνθήκες που ευνοούν την επιδείνωση των αποκολλήσεων, προκύπτουν συνήθως αποκολλήσεις μεταξύ του arriccio και της υποκείμενης τοιχοποιίας ή μεταξύ του intonachino και του arriccio. Η έλλειψη έγκαιρης και κατάλληλης αποκατάστασης μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω ζημιές, όπως ρωγμές στο σύνολο της τοιχογραφίας ακόμα και ολική απόσπαση μέρους της βαμμένης επιφάνειας.

Κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή μεθόδων και τεχνικών που να μπορούν να ανιχνεύσουν την παραμικρή βλάβη που μπορεί να υποκρύπτεται πίσω από τα στρώματα μιας νωπογραφίας. Σε αυτή την εργασία γίνεται αναφορά στη χρήση ενός LDV σε τμήμα μιας νωπογραφίας στο παλιό Καθολικό της Ιεράς Μονής Οδηγήτριας Γωνιάς Χανίων, για την ανίχνευση των προβληματικών περιοχών της τοιχογραφίας.

Μετρήσεις στο εργαστήριο

Πριν την διενέργεια των μετρήσεων στο πεδίο, κρίθηκε αναγκαίος ο έλεγχος και η εφαρμοσιμότητα του συστήματος διάγνωσης στο εργαστήριο, ώστε να προσδιοριστούν οι δυσκολίες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, να αναζητηθούν οι πιθανές συχνότητες διέγερσης μια τοιχογραφίας και να οριστεί η μέθοδος προσέγγισης και μετρήσεων.

Για τις ανάγκες του πειράματος, έγιναν προσπάθειες κατασκευής δειγμάτων που να προσομοιάζουν μια νωπογραφία fresco και να έχουν ανάλογες ιδιότητες και τρόπο συμπεριφοράς με αυτές μιας πραγματικής τοιχογραφίας, έχοντας ως άξονα ότι το χαρακτηριστικό γνώρισμα μιας νωπογραφίας είναι η ανάπτυξή της σε στρώσεις (στρωματογραφία). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι νωπογραφίες είναι ζωγραφικά έργα που εφαρμόζονται σε νωπό κονίαμα που προσκολλάται σε μια τοιχοποιία. Στο εργαστήριο Applied Mechanics Laboratory του Πολυτεχνείου Κρήτης, κατασκευάστηκαν τέσσερα διαφορετικά δείγματα για τη διενέργεια μετρήσεων με το Scanning Laser Doppler Vibrometer.

Πείραμα 1

Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν σε έναν τοίχο του εργαστηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα όπου κολλήθηκαν πάνω φύλλα τρία χαρτιού αρχικά με ταινία διπλής όψης και κατόπιν με κόλλα αφισοκόλλησης. Ανάμεσα στα φύλλα χαρτιού δημιουργήθηκαν κενά με αέρα ώστε να μην είναι σε απόλυτη επαφή.

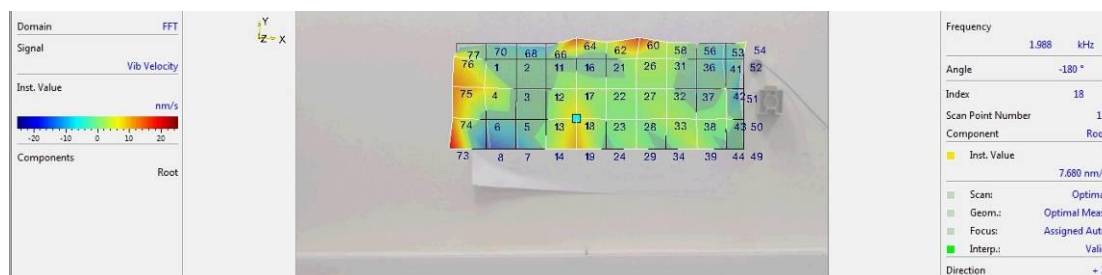


Σχήμα 12 : Εφαρμογή στρώσεων χαρτιού πάνω σε τοίχο

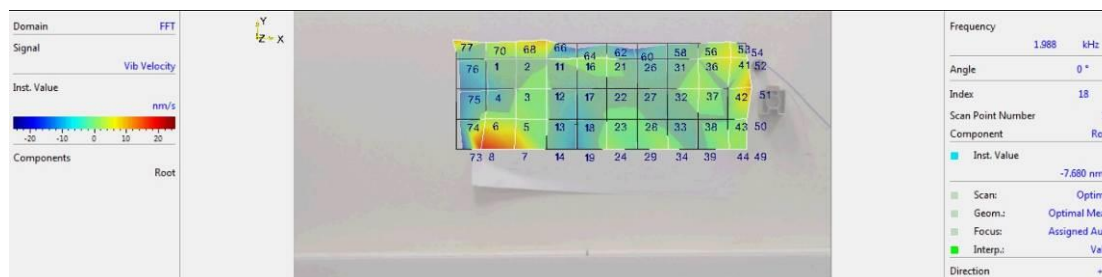
Σκοπός αυτής της εφαρμογής ήταν να παρασκευαστούν πολύ λεπτές στρώσεις χαρτιού με κενά ανάμεσά τους. Για την δημιουργία ταλαντώσεων των στιβάδων αέρα και χαρτιού χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι διέγερσης, ένας πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης και μια γεννήτρια μηχανικών ταλαντώσεων. Στην πρώτη περίπτωση, τοποθετήθηκε, πάνω στην επιφάνεια του τοίχου,

πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας/διεγέρτης της PICERAMIC Spic255 pzt, ο οποίος προσκολλήθηκε με ενισχυμένη κολλητική ταινία πάνω στον τοίχο σε μικρή απόσταση από τα φύλλα χαρτιού, ο αισθητήρας PCB352A78 της εταιρίας PCBPIEZOTRONICS και η γεννήτρια μηχανικών ταλαντώσεων της Vibration Research(ή αλλιώς ηλεκτρομηχανικός δονητής ή διεγέρτης μηχανικών ταλαντώσεων) τοποθετήθηκε στη βάση του τοίχου σε απόσταση 1,5 μ. από το εξεταζόμενο στοιχείο. Η κεφαλή Laser Doppler Vibrometer τοποθετήθηκε σε απόσταση 2 μέτρων από την επιφάνεια του τοίχου. Και οι δύο διεγέρτες ρυθμίστηκαν σε διάφορες συχνότητες ταλάντωσης, όμως δεν κατέστη δυνατή η ταλάντωση των φύλλων χαρτιού στο μέσον τους. Οι περιοχές με τη μεγαλύτερη ταχύτητα είναι αυτές με το σκούρο κόκκινο χρώμα.

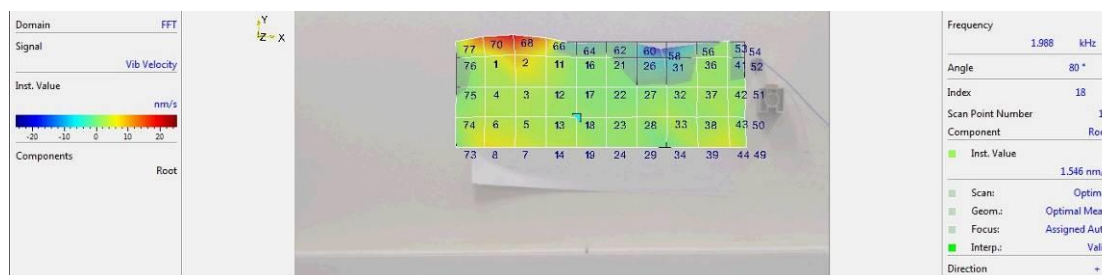
Τα μόνα σημεία που μπόρεσαν να ενεργοποιηθούν, με συχνότητα διέγερσης 2kHz από τη γεννήτρια μηχανικών ταλαντώσεων, ήταν κυρίως αυτά κοντά στις άκρες του αντικειμένου, που είχαν μεγαλύτερη συνάφεια με την τοιχοποιία και όχι το μέσο, όπου είχε δημιουργηθεί η τεχνητή ανωμαλία. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι η μάζα του χαρτιού είναι πολύ μικρή και μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν δισδιάστατο υλικό, με αποτέλεσμα αυτές οι μέθοδοι να μην μπορούν να ενεργοποιήσουν τις συχνότητες συντονισμού και να δώσουν μετρήσιμα αποτελέσματα για το χαρτί. Επιπλέον, το χαρτί, ως εύκαμπτος φορέας, δεν επιδέχεται τάνυσμα με έναν τέτοιο διεγέρτη. Καταλληλότερος τρόπος διέγερσης, σε αυτή την περίπτωση, θα ήταν με τη χρήση ηχητικών μέσων με ηχητικά κύματα σταθερού σήματος, που να μπορούν να ταλαντώσουν την επιφάνεια του χαρτιού.



Σχήμα 13: Εικόνα από την ταλάντωση της επιφάνειας για συχνότητα διέγερσης 2KHz



Σχήμα 14: Εικόνα από την ταλάντωση της επιφάνειας για συχνότητα διέγερσης 2KHz



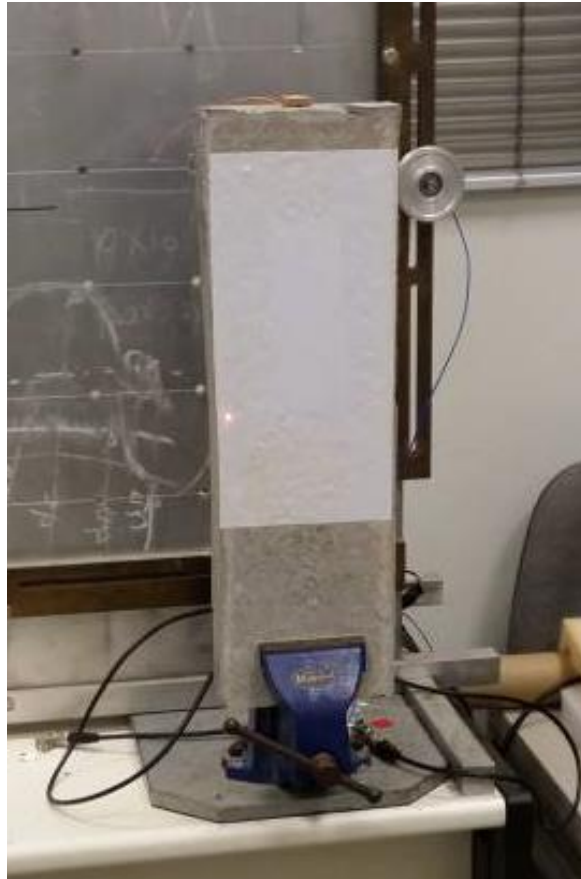
Σχήμα 15: Εικόνα από την ταλάντωση της επιφάνειας σε συχνότητα διέγερσης 2KHz

Σκοπός του πρώτου πειράματος ήταν η μελέτη της ευαισθησίας της μεθόδου και στην εφαρμογή διαφόρων συχνοτήτων διέγερσης για τη διέγερση της στήριξης και του αντικειμένου. Οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από την περιορισμένη βιβλιογραφία και ήταν της τάξης του 1 KHz και άνω. Το αποτέλεσμα ήταν να διεγερθεί η επιφάνεια στις περιοχές στήριξης όπου είχε γίνει η κόλληση, όμως όχι και η επιφάνεια του χαρτιού στα σημεία χωρίς επαφή. Επίσης, φάνηκε ότι η μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας του κύματος καταναλώθηκε στη στήριξη και δεν κατέστη δυνατή η διοχέτευσή του στο πολύ λεπτό επιφανειακό στρώμα.

Πείραμα 2

Παρόμοια αποτελέσματα είχε και η κόλληση φύλλου χαρτιού σε ένα ελεύθερο στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα, στηριγμένο στο κάτω μέρος του. Σε αυτή την εκδοχή, οι διεγέρτες τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος της κατασκευής και το πιεζοηλεκτρικό στο πάνω μέρος αυτής. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές, σε διάφορες συχνότητες, όπου παρατηρήθηκε συγχρονισμένη ταλάντωση των αποκολλημένων περιοχών του χαρτιού σε ορισμένες από αυτές, δίνοντας ενδείξεις για το κατά πόσο μπορεί να εντοπιστεί μια πιθανή αποκόλληση ακόμα και σε πολύ λεπτά στρώματα υλικού.

Στο σχήμα 16 (πειραματική διάταξη 2α) φαίνεται στο κέντρο η περιοχή που δεν έχει εφαρμοστεί κόλλα για την προσκόλληση του χαρτιού πάνω στο σκυρόδεμα. Η περιοχή αυτή αναμένεται να δώσει και τις μεγαλύτερες επιφανειακές ταχύτητες για ορισμένες συχνότητες διέγερσης, ενώ στα σχήματα 18 και 19 (πειραματική διάταξη 2β) έχει τοποθετηθεί κολλητική ταινία σε συγκεκριμένες περιοχές με ορισμένα σημεία αποκόλλησης και επαφής. Σκοπός αυτής της φάσης πειραματισμών ήταν να εξεταστεί η ευαισθησία του μηχανήματος σε διαφορετικές συνθήκες στήριξης, καθώς και να εξετασθούν οι συχνότητες συντονισμού της βιβλιογραφίας όταν επιβάλλονται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο στο πάνω μέρος της δοκού. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω έχουν προκύψει από την επιβολή διέγερσης από τον ηλεκτροδυναμικό δονητή στο πίσω μέρος της δοκού.



Σχήμα 16: πειραματική διάταξη 2α χαρτιού σε δοκό οπλισμένου σκυροδέματος

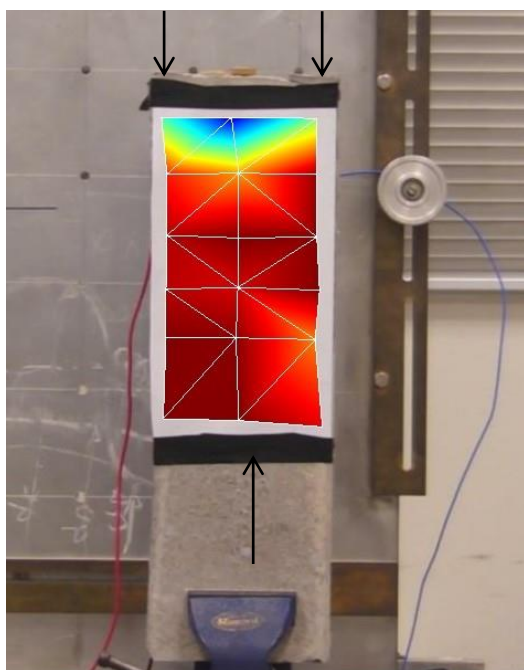


Σχήμα 17: Χρωματικός χάρτης συχνотικού φαινομένου πειράματος 2 σε συχνότητα διέγερσης 500Hz

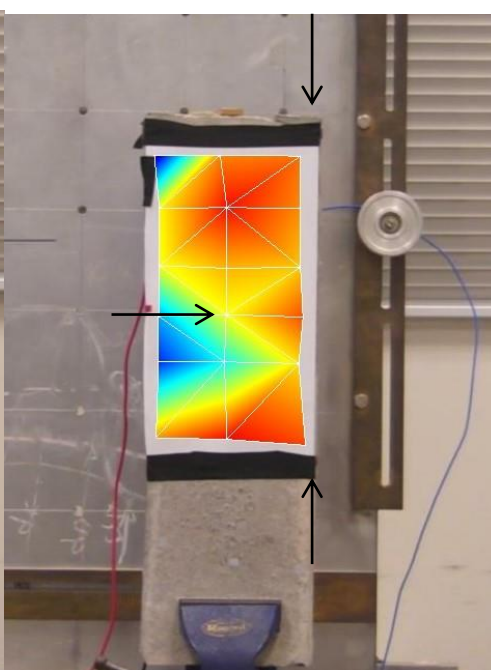
Τα αποτελέσματα δείχνουν μια ξεκάθαρη περιοχή με μεγαλύτερες ταλαντώσεις σε διάφορες συχνότητες συντονισμού, που ταυτίζονται με την τεχνητή βλάβη που έχει δημιουργηθεί στο κέντρο του χαρτιού, με μεγαλύτερο εύρος στο σημείο 11 στο μέσο της βλάβης (Σχήμα 17).

Πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές ως προς τον τρόπο κόλλησης του χαρτιού πάνω στη δοκό ώστε να εξεταστούν, κατά το δυνατόν, οι δυνατότητες της προτεινόμενης εφαρμογής. Στην περίπτωση της τοποθέτησης του χαρτιού με τη βοήθεια κολλητικής ταινίας σε διάφορα σημεία προέκυψαν τα σχήματα 18 και 19, όπου ανάλογα με τον τρόπο προσάρτησης του χαρτιού στη δοκό, προέκυπταν και οι αντίστοιχοι χάρτες του συχνοτικού φαινομένου με ένταση χρώματος στα σημεία με την μεγαλύτερη ταλάντωση.

Στο σχήμα 18, η επιβαλλόμενη συχνότητα δεν μπόρεσε να διεγείρει μεμονωμένα την επιφάνεια του χαρτιού αλλά ολόκληρη τη δοκό. Το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στο σχήμα αυτό δείχνει τη συμπεριφορά της δοκού ως ελεύθερο άκρο. Στο σχήμα 19, όπου κολλήθηκε μια μικρή ταινία στο αριστερό μέσο του χαρτιού, χρησιμοποιήθηκε μικρότερη συχνότητα από την προηγούμενη περίπτωση, επιτυγχάνοντας τη διέγερση του χαρτιού και την απεικόνιση των περιοχών με μεγαλύτερη ταλάντωση στα μέσα των διαστημάτων εκατέρωθεν της κολλητικής ταινίας, ως τα μόνα αποκολλημένα από το υπόστρωμα.



Σχήμα 18: Χρωματικός χάρτης συχνοτικού φαινομένου για το χαρτί επί δοκού/ πείραμα 2 (πειραματική διάταξη 2β) για συχνότητα διέγερσης 3,2KHz

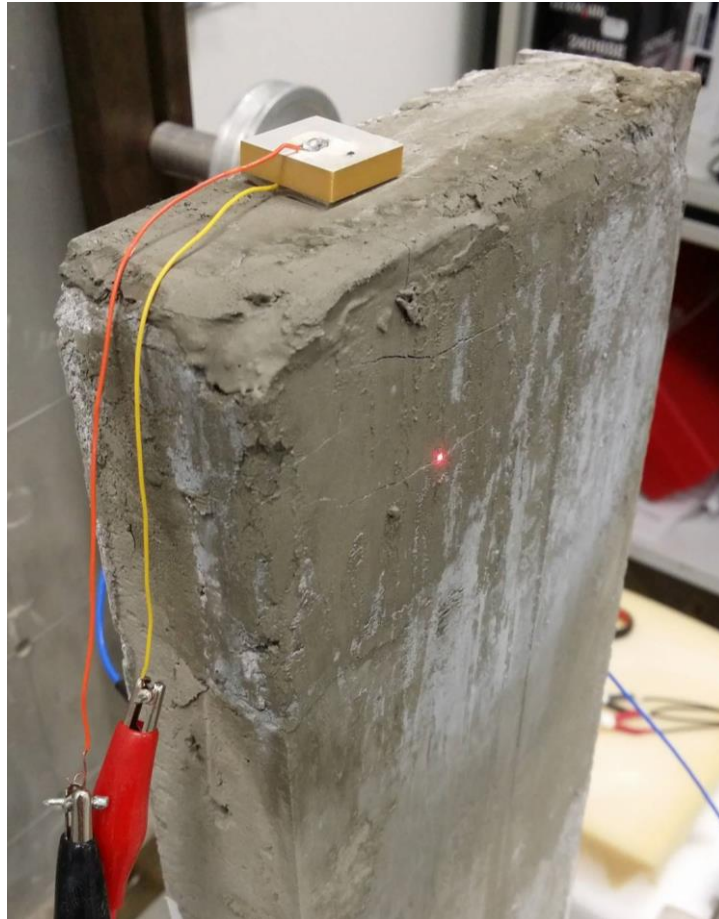


Σχήμα 19: Χρωματικός χάρτης συχνοτικού φαινομένου για το χαρτί επί δοκού/ πείραμα 2 (πειραματική διάταξη 2β) για συχνότητα διέγερσης 1KHz

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε δυνατή η διέγερση των επιβλαβών περιοχών σε διαφορετικές συχνότητες από αυτές του πρώτου πειράματος. Οι συχνότητες που αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία έδωσαν μετρήσιμα αποτελέσματα και μπόρεσαν να προσδιορίσουν τις περιοχές όπου υπήρχαν διαφορετικές συνθήκες επαφής με το υπόστρωμα. Επίσης, με το συγκεκριμένο πείραμα διαπιστώθηκε η αδυναμία του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη να ενεργοποιήσει τα λεπτά στρώματα χαρτιού σε μια τέτοια εφαρμογή, γι αυτό και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διέγερσης από τον ηλεκτροδυναμικό δονητή.

Πείραμα 3

Για το τρίτο πείραμα, έγινε προσπάθεια να προσεγγιστεί περισσότερο η στρωματογραφική φύση μιας νωπογραφίας. Σε ένα κομμάτι από οπλισμένο σκυρόδεμα διαστάσεων 50X20X5 είχε αποσπαστεί ένα κομμάτι από το υλικό στο ένα άκρο του και παρουσίαζε ρηγμάτωση στην περιβάλλουσα περιοχή. Το απολεσθέν τμήμα συμπληρώθηκε και γέμισε με κονίαμα αποτελούμενο από δύο μέρη τσιμέντο δύο μέρη άμμου και νερό. Η σύνθεση του υλικού πλήρωσης ήταν σχετικά υδαρή ώστε, με την ανάλογη πίεση, να μπορέσει να διεισδύσει στο εσωτερικό των ρωγμών και των κενών, χωρίς όμως να προσδώσει ιδιαίτερη συνάφεια ώστε να γίνουν οι απαραίτητες δοκιμές. Για να επιτευχθεί καλύτερη συνοχή του νέου υλικού με το παλιό απαιτείται διαφορετική σύσταση, για παράδειγμα με ινοπλισμό, που να μπορέσει να επαναφέρει τη συνοχή στο δοκίμιο και να δώσει άλλες τιμές ταχυτήτων με μικρότερη διαβάθμιση ανά περιοχή. Το δείγμα παρέμεινε σε συνθήκες περιβάλλοντος να ξηρανθεί για 3 μέρες. Κατόπιν, μεταφέρθηκε στο εργαστήριο για να γίνουν οι απαιτούμενες μετρήσεις, όπου στερεώθηκε σε μια βάση στο κάτω άκρο. Στο πάνω μέρος του σκυροδέματος τοποθετήθηκε ο πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης, για να δέσει ταλάντωση εγκάρσια στο επίπεδο της επιφάνειας, και στο μπροστά μέρος η γεννήτρια μηχανικών ταλαντώσεων, συνδεδεμένα με γεννήτρια συχνοτήτων. Το SLDV εγκαταστάθηκε σε απόσταση 2 μέτρων από την εξεταζόμενη επιφάνεια.



Σχήμα 20: Η περιοχή εφαρμογής κονιάματος στην επιβλαβή περιοχή – πείραμα 3



Σχήμα 21: Απεικόνιση της διάταξης του πειράματος 3 της προτεινόμενης εφαρμογής με μέρος του εξοπλισμού διέγερσης

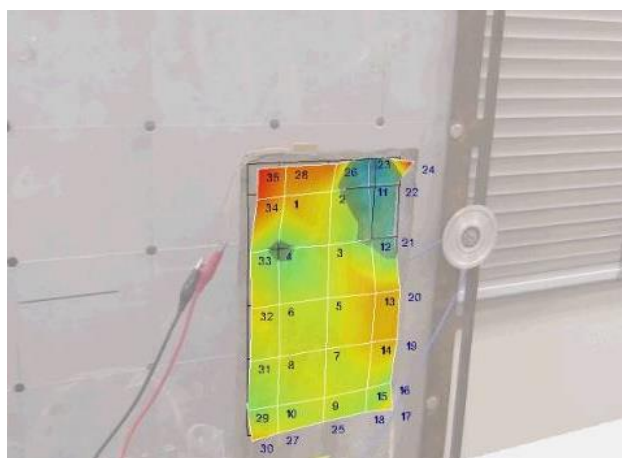
Διενεργήθηκαν μετρήσεις και με τους δύο διεγέρτες σε διάφορες συχνότητες.

Ο πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης δεν μπόρεσε να ενεργοποιήσει τις συχνότητες συντονισμού της επιφάνειας της δοκού, παρά μόνο της συνολικής μάζας του αντικειμένου, προκαλώντας ταλάντωσή του ως πρόβολος, γι αυτό και δεν παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

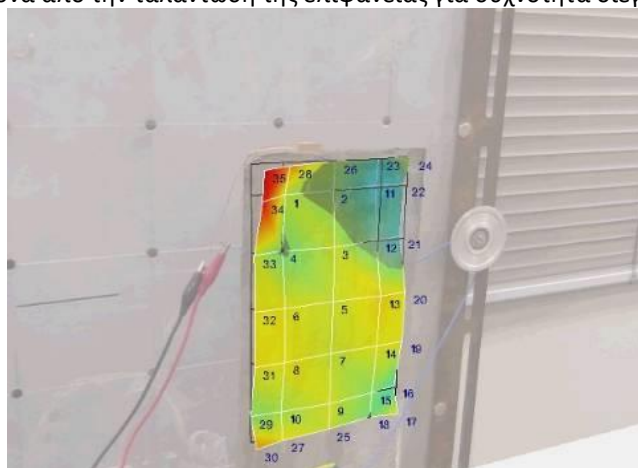
Στην δεύτερη εκδοχή, ο ηλεκτροδυναμικός δονητής ρυθμίστηκε να λειτουργεί σε διάφορες συχνότητες, μέχρι να εντοπιστούν οι συχνότητες που θα μπορούσαν να υποβάλουν την επιφάνεια σε εξαναγκασμένη ταλάντωση. Αρχικά, η ρύθμιση έγινε σε συχνότητες των 1.000, 2.000, 5.000 Hz. Σε συχνότητες των παρουσιάστηκε συντονισμός του προβόλου.

Η συχνότητα μειώθηκε σε επίπεδο κάτω των 1000Hz προσπαθώντας να προκληθεί ταλάντωση μόνο των επιφανειακών στρωμάτων του στοιχείου και όχι του συνόλου. Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα ταλάντωσης για ορισμένες συχνότητες διέγερσης.

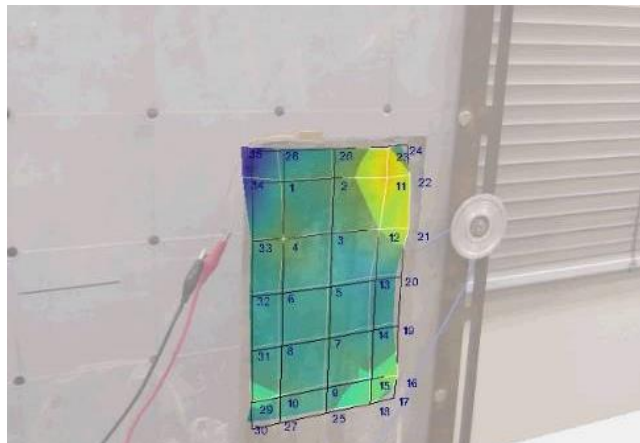
Για συχνότητα 127,5Hz παρουσιάζονται τα παρακάτω σχήματα (σχήμα 22, 23, 24) της ταλάντωσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, όπου οι περιοχές με έντονο κόκκινο χρώμα ταυτίζονται με αυτές όπου έχει γίνει η τοποθέτηση του μεγαλύτερου μέρους του επισκευαστικού υλικού.



Σχήμα 22: Εικόνα από την ταλάντωση της επιφάνειας για συχνότητα διέγερσης 127,5 Hz

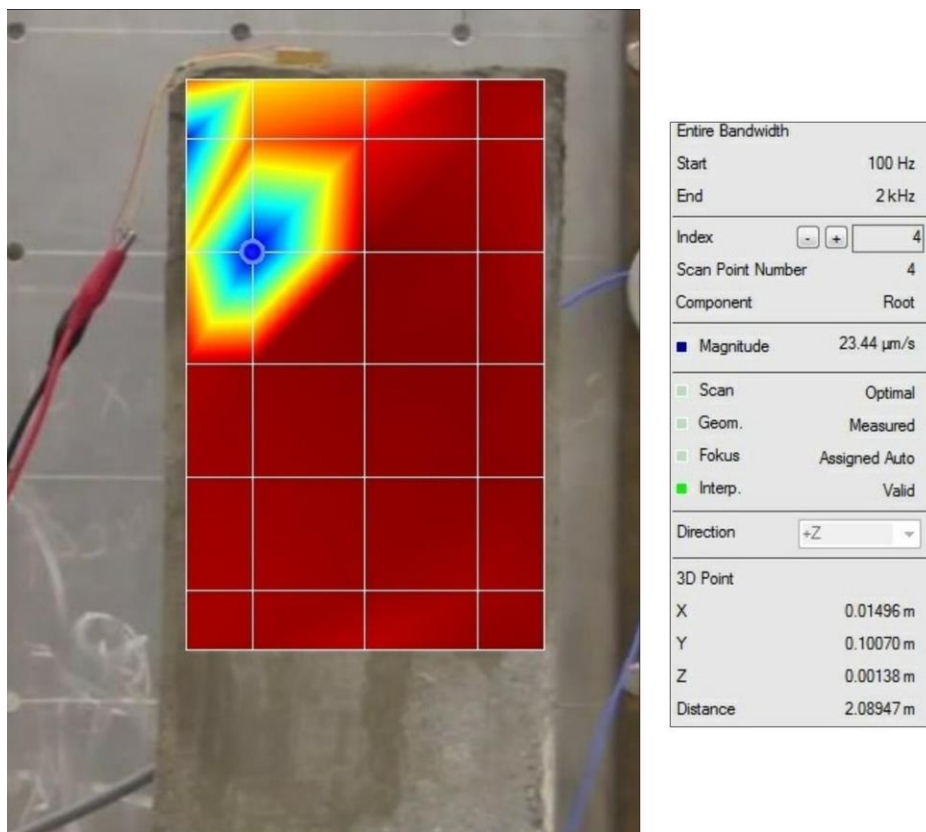


Σχήμα 23: Εικόνα από την ταλάντωση της επιφάνειας για συχνότητα διέγερσης 127,5Hz

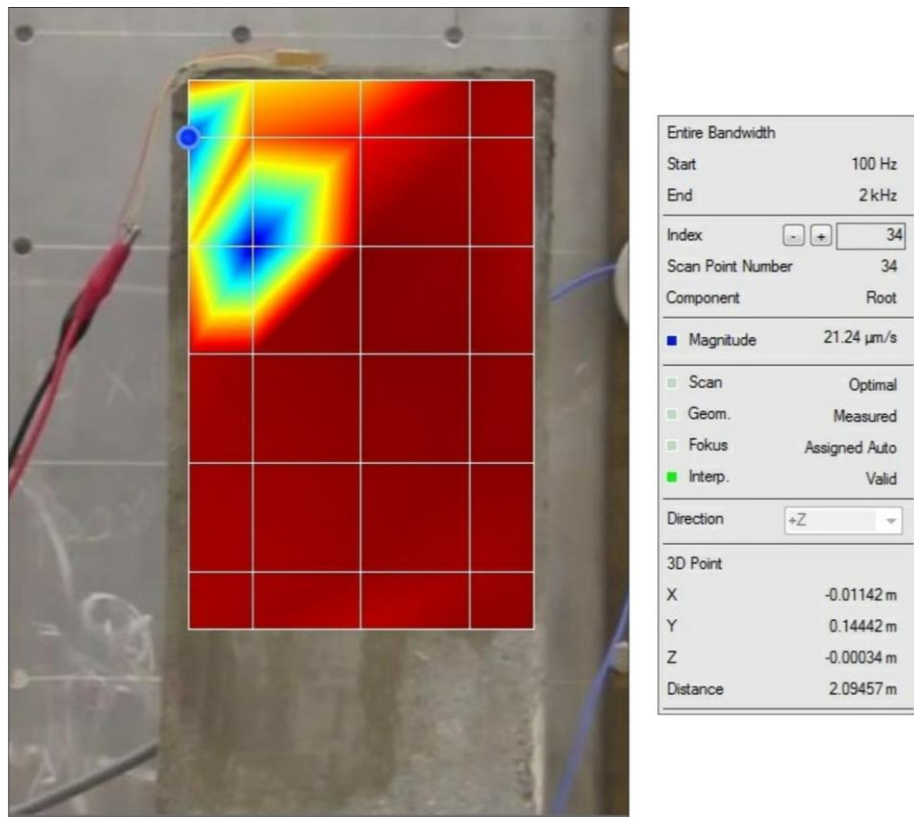


Σχήμα 24: Εικόνα από την ταλάντωση της επιφάνειας σε συχνότητα 127,5 Hz

Στα σχήματα 25 και 26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μέσων τιμών επιφανειακών ταχυτήτων για την επιφάνεια της δοκού σε συχνότητα διέγερσης 250Hz. Η περιοχή με την έντονη χρωματική διαφορά στο άνω αριστερό μέρος είναι εκείνη όπου έχει εφαρμοστεί το επισκευαστικό υλικό και παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες μέσες τιμές ταχυτήτων για τα δεδομένα σημεία του καννάβου με γαλάζιο και σκούρο μπλε χρώμα.



Σχήμα 25: Χρωματική απεικόνιση των μέσων τιμών επιφανειακής ταχύτητας- σημείο 4 για συχνότητα διέγερσης 250Hz



Σχήμα 26: Χρωματική απεικόνιση των μέσων τιμών επιφανειακής ταχύτητας- σημείο 34 για συχνότητα διέγερσης 250Hz

Τα δύο σχήματα δείχνουν ταυτόχρονα και τις μέγιστες τιμές σχετικής μετατόπισης του κάθε σημείου σε σχέση με την αρχική του θέση που έχει προκύψει μέσω του προκαταρκτικού ελέγχου της μικροτοπογραφίας της επιφάνειας που διενεργείται από τη συσκευή SLDV.



Σχήμα 27: Χρωματικός χάρτης μέσης τιμής ταχυτήτων επιφάνειας για συχνότητα διέγερσης 500Hz

Για συχνότητα διέγερσης 500Hz (σχήμα 27) παρατηρείται η μέγιστη τιμή στο άκρο της δοκού, όπου είναι το σημείο με το μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης καθώς και στην περιοχή όπου τελειώνει το επισκευαστικό κονίαμα και συνδέεται με το “παλιό” υλικό. Οι περιοχές αυτές εμφανίζονται με διαφορετικές αποχρώσεις του μπλε.

Παρατηρώντας τη χρωματική διαβάθμιση τα σχήματα 25 και 26, οι περιοχές με σκούρο μπλε απόχρωση και γαλάζιο, είναι αυτές που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες επιφανειακές ταχύτητες. Οι περιοχές αυτές ταυτίζονται απόλυτα με εκείνες όπου, πριν την επάλειψη με κονίαμα, παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αποκόλληση τμημάτων και ρωγμών. Αυτές οι περιοχές είναι επίσης αυτές που τοποθετήθηκε η μεγαλύτερη ποσότητα κονιάματος και από ότι φαίνεται δεν παρουσιάζει καλή πρόσφυση με το παλαιωμένο σκυρόδεμα. Επίσης, αυτές οι τιμές δείχνουν ότι οι ρωγμές που καλύφθηκαν με κονίαμα, δεν γέμισαν επαρκώς με αποτέλεσμα τα κενά και η κακή συνάφεια υποστρώματος και κονιάματος να εμφανίζεται ως βλάβη με μεγαλύτερες ταχύτητες επιφανείας. Στο σχήμα 25, παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη τιμή επιφανειακής ταχύτητας είναι στο σημείο 4, που έχει οριστεί ως το σημείο ελέγχου πάνω στην κρυμμένη ρωγμή, και η γειτνιάζουσα περιοχή εμφανίζει αντίστοιχη συμπεριφορά. Για να καταστεί δυνατό να οριστεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η βλάβη θα έπρεπε να οριστεί ένας πιο πυκνός κάρναβος σημείων στην εξεταζόμενη περιοχή, που όμως δεν κρίθηκε απαραίτητο καθώς δεν αποτελεί το κύριο αντικείμενο του συγκεκριμένου πειράματος.

Πείραμα 4 και 5

Το τέταρτο εν συνεχεία πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος (δοκίμια 4 και 5), οι οποίες έχουν περάσει από δοκιμές θλίψης, με επιβολή θλιπτικών φορτίων στο κέντρο τους. Τα στοιχεία σκυροδέματος έχουν διαστάσεις 10X14,5X100 εκατοστά.

Οι περιοχές με έντονη ρηγμάτωση του δοκιμίου 4 δεν έχουν αποκολληθεί από το υπόλοιπο σώμα του δοκιμίου, καθώς συγκρατούνται από τον οπλισμό στο εσωτερικό της δοκού οπλισμένου σκυροδέματος. Επίσης, πρέπει να τονιστεί πως υπάρχουν περιοχές με κρυμμένες βλάβες που δεν μπορούν να προσδιοριστούν με γυμνό μάτι.

Το πείραμα αυτό έχει ως στόχο να προσεγγιστεί κατά το δυνατόν η στρωματογραφική φύση μιας νωπογραφίας με στρώσεις κονιάματος, διαφορετικής σύστασης μεν από τα ιστορικά, όμως με προσομοιάζουσες στρωματογραφικές ιδιότητες, ώστε να ελεγχθούν ποιες συχνότητες μπορούν να προκαλέσουν μεμονωμένη ταλάντωση της επιφάνειας και να διαπιστωθεί εάν είναι δυνατή η ανίχνευση βλαβών με ορισμένη θέση και μέγεθος.



Σχήμα 28: Το δοκίμιο 4 πριν την επικάλυψη με το υλικό πλήρωσης/επικάλυψης



Σχήμα 29: Εστίαση στην περιοχή αστοχίας του δοκιμίου 4 πριν την τοποθέτηση υλικού πλήρωσης/επικάλυψης

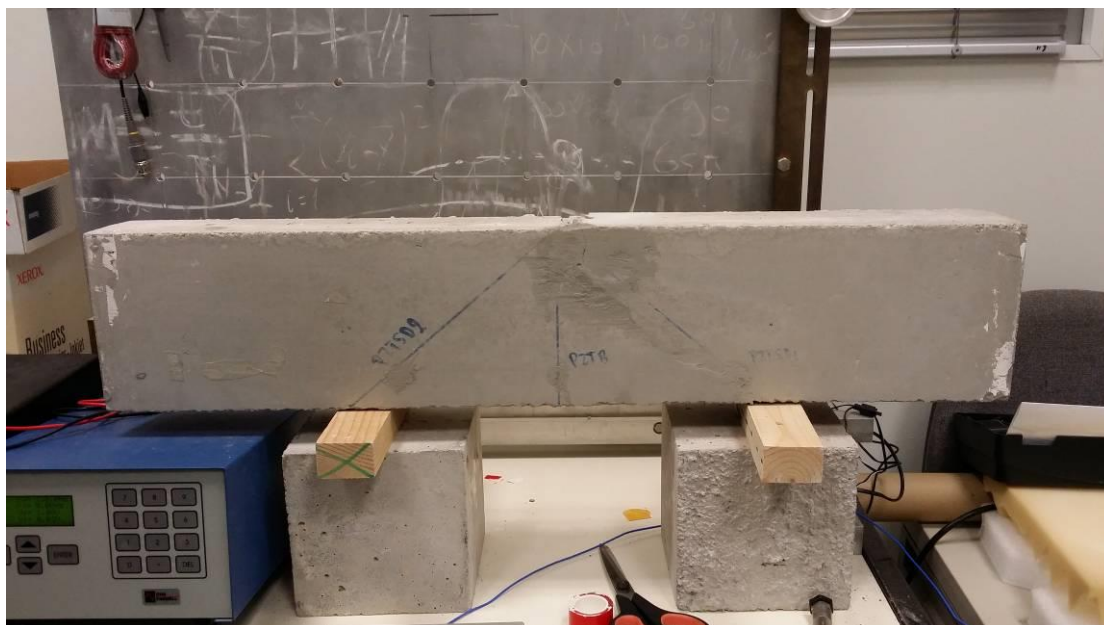


Σχήμα 30: Το δοκίμιο 4 μετά την τοποθέτηση υλικού πλήρωσης/επικάλυψης

Η σύνθεση του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για να “αποκατασταθεί” η βλάβη στα δοκίμια ήταν τέτοια ώστε, με την ανάλογη πίεση, να μπορέσει να διεισδύσει στο εσωτερικό των ρωγμών και των κενών, χωρίς όμως να προσδώσει μερική συνάφεια ώστε να γίνουν οι απαραίτητες δοκιμές. Η αναλογία των υλικών που εμπεριέχονται στο υλικό πλήρωσης είναι τέτοια ώστε να στεγνώσει σε μικρό χρονικό διάστημα και η κοκκομετρία τέτοια ώστε να διεισδύσει στα κενά και να τα καλύψει πλήρως. Επίσης, ως υλικό επικάλυψης που εφαρμόζεται μετά την ωρίμανση των δοκιμίων, θα είναι κατάλληλο για να ελεγχθούν και οι άγνωστες περιοχές βλάβης και να διαπιστωθεί η λειτουργία του συστήματος σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 31: Εστιασμένη εικόνα στο πάνω μέρος του δοκιμίου 4 με εμφανή διαφορά στην περιοχή πλήρωσης και του πάχους της επίστρωσης



Σχήμα 32: Το δοκίμιο 5 μετά την τοποθέτηση υλικού πλήρωσης/επικάλυψης μόνο στην περιοχή αστοχίας

Ο αισθητήρας επιτάχυνσης και ο ηλεκτροδυναμικός δονητής τοποθετήθηκαν σε μικρή απόσταση από την εξεταζόμενη περιοχή και στις δύο εκδοχές.

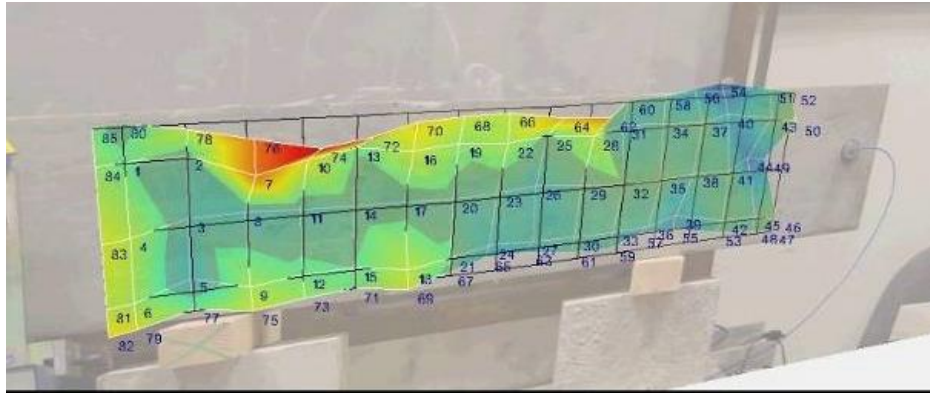
Πείραμα 4 (Δοκίμιο 4)

Το συγκεκριμένο δείγμα, πριν την “αποκατάσταση” παρουσίαζε μια μεγάλη περιοχή βλάβης, όπου παρατηρήθηκε μια σχεδόν διαμπερής ρωγμή και μικρότερες ρηγματώσεις στην περιβάλλουσα περιοχή. Το υλικό επικάλυψης έχει πάχος μερικών χιλιοστών, έγινε σε δύο στρώσεις και σαν εφαρμογή παρομοιάζει τις συνθήκες μιας αγιογραφίας.

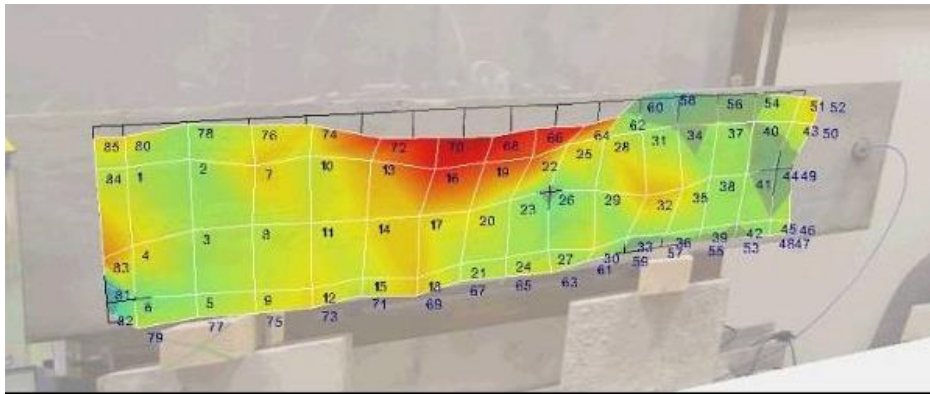
Το SLDV χωροθετήθηκε σε απόσταση περίπου δύο μέτρων από την επιφάνεια της δοκού. Ο αισθητήρας PCB και οι διεγέρτες τοποθετήθηκαν πάνω στην επιφάνεια της δοκού σε μικρή απόσταση από την περιοχή που ορίστηκε ο κάνναβος των σημείων ελέγχου, η οποία περιορίστηκε στην περιοχή γύρω από την αποκατεστημένη βλάβη.

Σαν εναλλακτική λύση διέγερσης, προτιμήθηκε ο ηλεκτροδυναμικός δονητής, ο οποίος μπορεί να αποδώσει μετρήσιμα αποτελέσματα σε διάφορες συχνότητες για τη συγκεκριμένη δοκό.

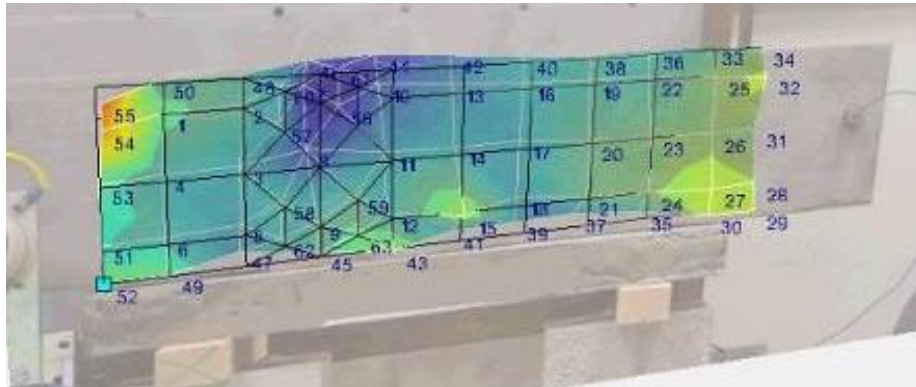
Οι συχνότητες στις οποίες ρυθμίστηκε ο ηλεκτροδυναμικός δονητής ήταν των 125,200,250,400,500,1000 Hz καθώς και σε άλλες κάτω των 2.000Hz. Οι χαμηλότερες συχνότητες έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα απεικόνισης των βλαβών με τις μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας.



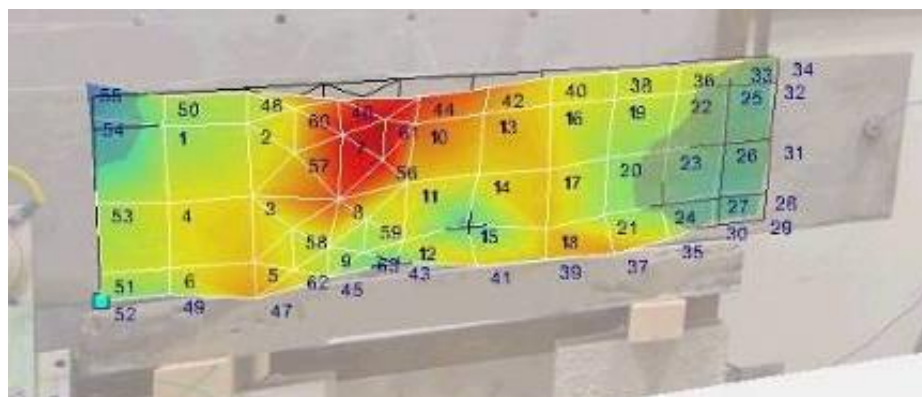
Σχήμα 33: Εικόνα από την ταλάντωση της επιφάνειας για συχνότητα διέγερσης 357,5 Hz



Σχήμα 34: Εικόνα από το βίντεο της ταλάντωσης της επιφάνειας για συχνότητα 357,5Hz

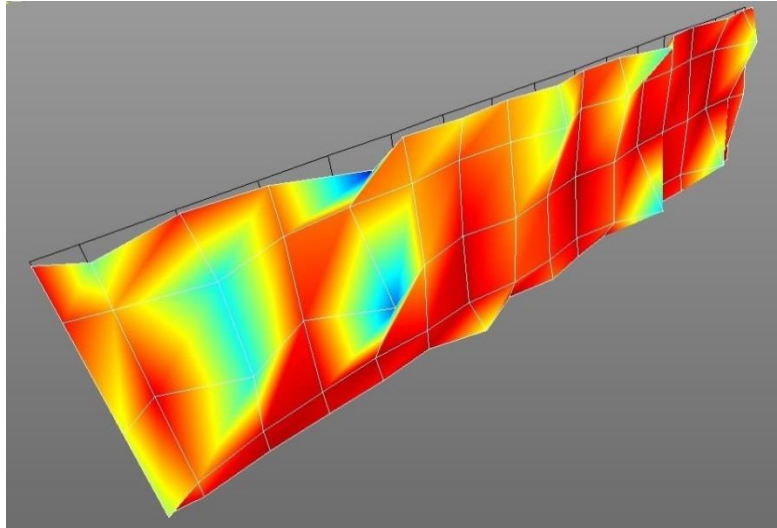


Σχήμα 35: Εικόνα από την ταλάντωση της επιφάνειας για συχνότητα διέγερσης 392,5 Hz

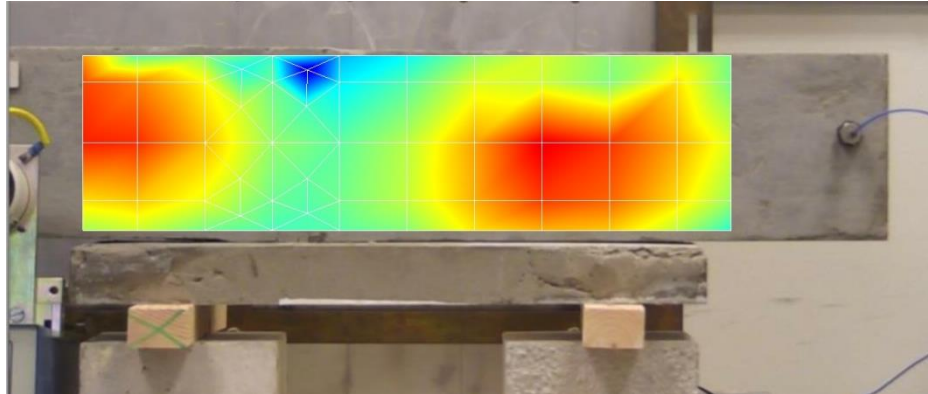


Σχήμα 36: Εικόνα από το βίντεο της ταλάντωσης της επιφάνειας για συχνότητα 392,5Hz

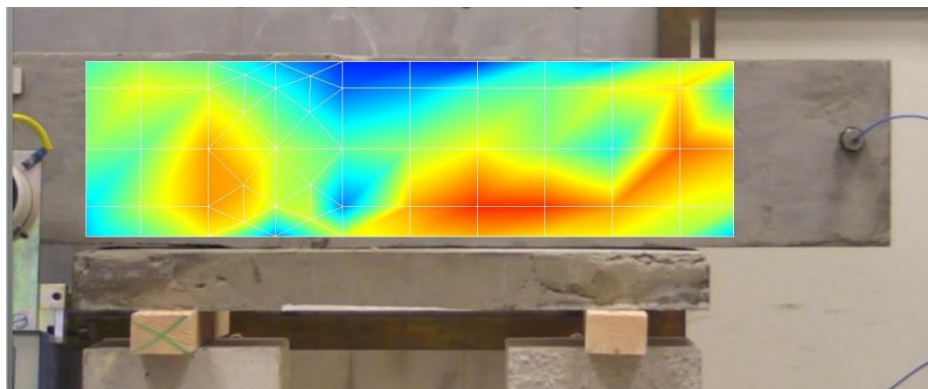
Η περιοχές με τις μεγαλύτερες ταλάντωση των επιφανειακών σημείων, στα σχήματα 33,34,35 και 36 , είναι αυτές με το σκούρο κόκκινο και σκούρο μπλε και ταυτίζονται με εκείνες που έχουν αποκατασταθεί με το υλικό πλήρωσης/επικάλυψης, το οποίο ναί μεν συμπλήρωσε τις κατεστραμμένες περιοχές αλλά ταυτόχρονα λειτούργησε ως ξένο υλικό χωρίς συνάφεια με το παλιό.



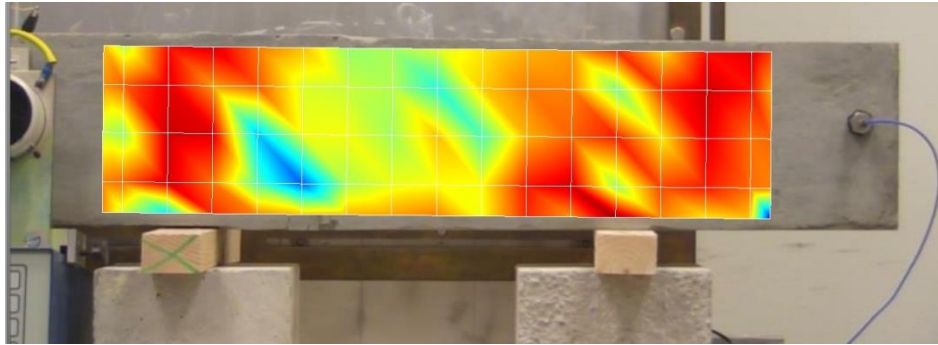
Σχήμα 37: Τρισδιάστατη σχηματική απεικόνιση των μέσων τιμών των επιφανειακών ταχυτήτων του δοκιμίου 4 για συχνότητα διέγερσης 125Hz



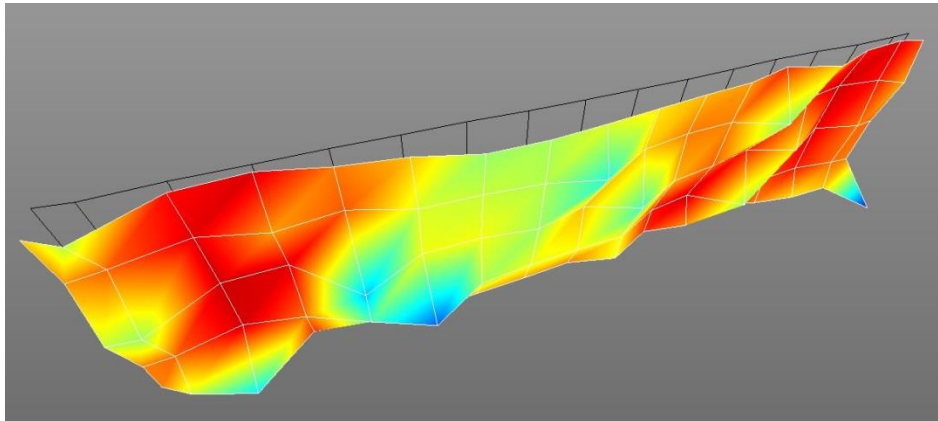
Σχήμα 38: Χρωματικός χάρτης των μέσων επιφανειακών ταχυτήτων για συχνότητα διέγερσης 125 Hz



Σχήμα 39: Χρωματικός χάρτης των μέσων επιφανειακών ταχυτήτων για συχνότητα διέγερσης 200 Hz



Σχήμα 40: Χρωματικός χάρτης των μέσων επιφανειακών ταχυτήτων για συχνότητα διέγερσης 225 Hz



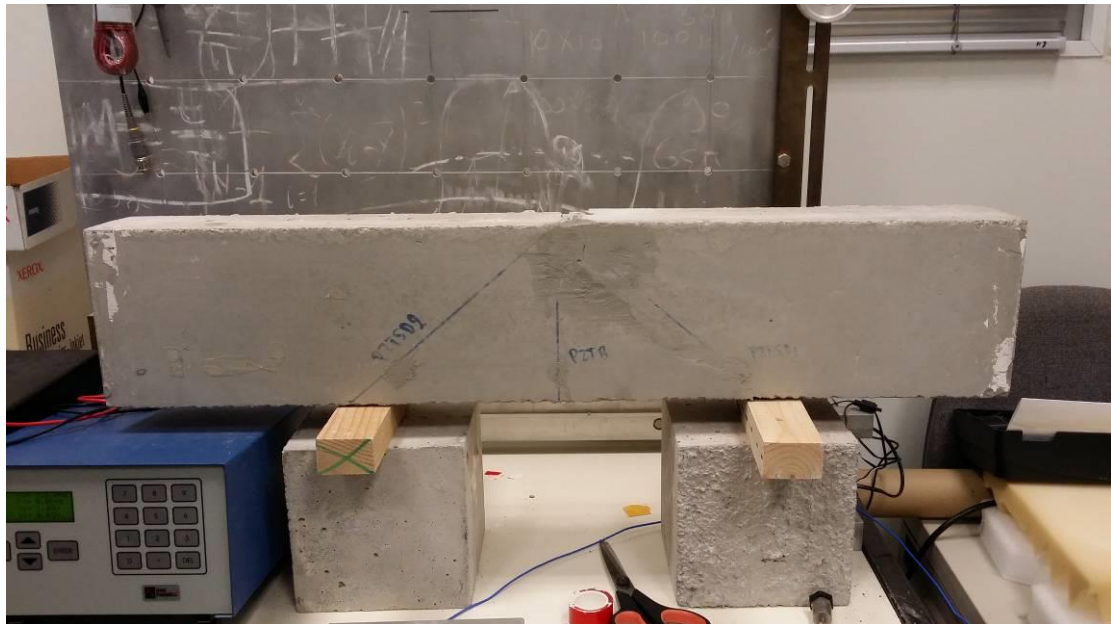
Σχήμα 41: Χρωματικός χάρτης των μέσων επιφανειακών ταχυτήτων για συχνότητα διέγερσης 225 Hz

Στα σχήματα 38, 39 και 40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μέσων τιμών επιφανειακών ταχυτήτων για το δοκίμιο 4 σε διαφορετικές συχνότητες διέγερσης. Εδώ, οι περιοχές με τις μεγαλύτερες επιφανειακές ταχύτητες που αντιστοιχούν με εκείνες με τη μεγαλύτερη βλάβη είναι αυτές με σκούρο μπλε και ανοιχτό μπλε χρώμα. Οι συχνότητες 125Hz και 200Hz ήταν αυτές που μπόρεσαν να δώσουν ευκρινέστερα στοιχεία για τις υποκρύπτουσες βλάβες του δοκιμίου σε επίπεδο επιφάνειας και ταυτίζονται με τις αρχικές παραδοχές. Στη συχνότητα 225Hz κατέστη, επίσης, δυνατός ο γενικός προσδιορισμός της περιοχής βλάβης.

Πείραμα 5 (Δοκίμιο 5)

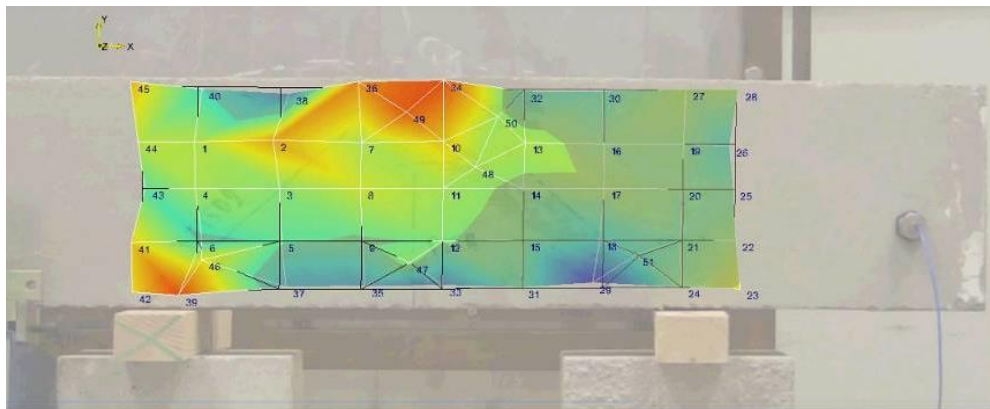
Το δοκίμιο 5, πριν την αποκατάσταση, εμφάνιζε μερική ρηγμάτωση στο μέσο του, κατά μήκος των σημειωμένων γραμμών στη επιφάνειά του καθώς και μερική απόσπαση μικρών τμημάτων υλικού. Εφαρμόστηκε το ίδιο κονίαμα με αυτό στο δοκίμιο 4, αλλά η εφαρμογή του έγινε μόνο για την συμπλήρωση των κενών, χωρίς να επικαλυφθεί η επιφάνεια του δοκιμίου. Το δοκίμιο 5, ομοίως με το δοκίμιο 4, υποβλήθηκε σε δοκιμές σε διάφορες συχνότητες κάτω των 2.000Hz, με τη βοήθεια τα γεννήτριας μηχανικών ταλαντώσεων, μέχρις ότου να βρεθούν οι συχνότητες διέγερσης επιφανείας.

Οι μετρήσεις που έδωσαν αποτελέσματα για την επιφάνεια της δοκού έγιναν για τις συχνότητες διέγερσης των 125, 150, 175, 200 και 225 Hz.

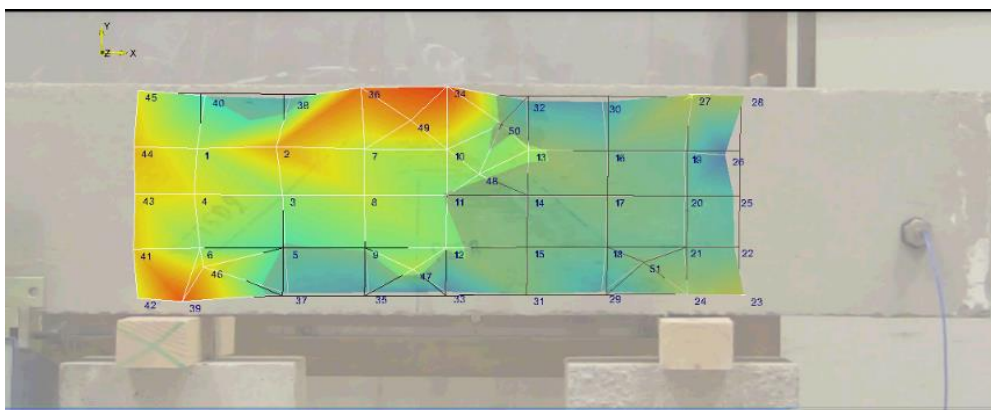


Σχήμα 42: Το δοκίμιο 5 μετά την εφαρμογή του επισκευαστικού υλικού

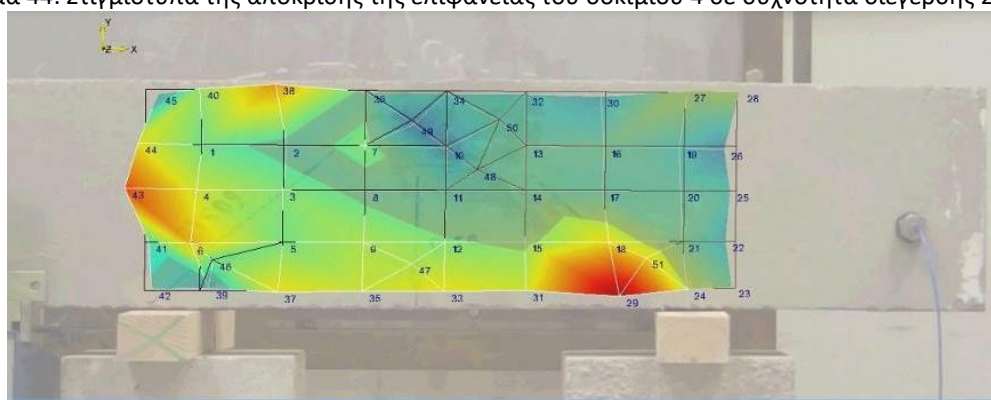
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διάφορες συχνότητες του φάσματος συχνοτήτων. Στα σχήματα 43,44,45,46 και 47 οι περιοχές με τη μεγαλύτερη ταλάντωση είναι όσες εμφανίζονται με έντονο κόκκινο χρώμα.



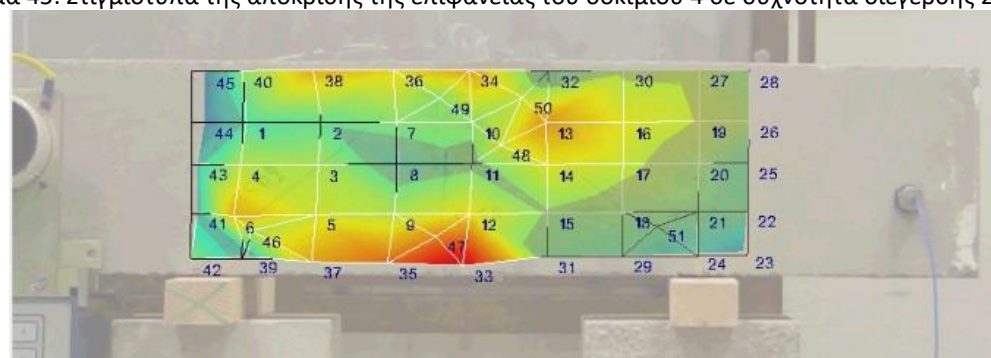
Σχήμα 43: Στιγμιότυπα της απόκρισης της επιφάνειας του δοκιμίου 4 σε συχνότητα διέγερσης 250 Hz



Σχήμα 44: Στιγμιότυπα της απόκρισης της επιφάνειας του δοκιμίου 4 σε συχνότητα διέγερσης 250 Hz



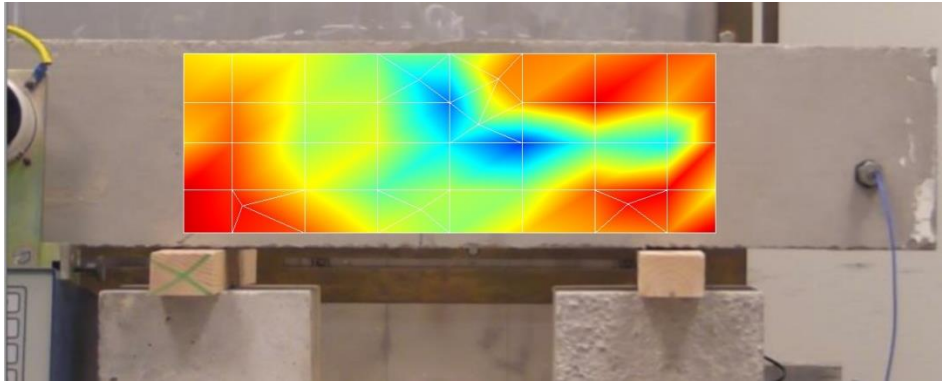
Σχήμα 45: Στιγμιότυπα της απόκρισης της επιφάνειας του δοκιμίου 4 σε συχνότητα διέγερσης 250 Hz



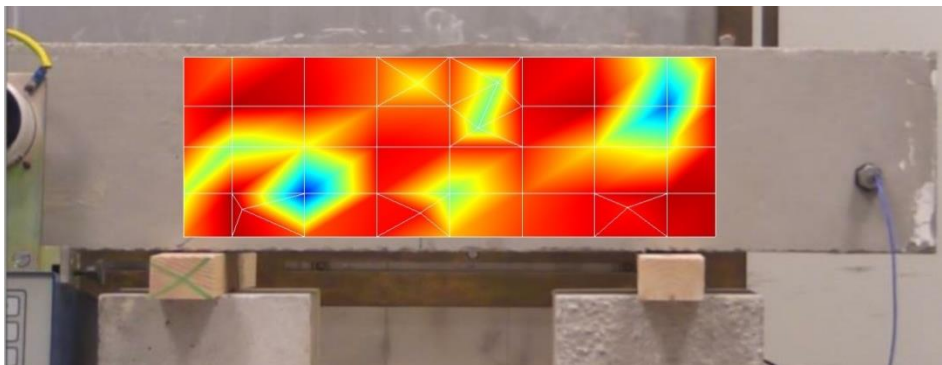
Σχήμα 46: Στιγμιότυπα της απόκρισης της επιφάνειας του δοκιμίου 4 σε συχνότητα διέγερσης 250 Hz



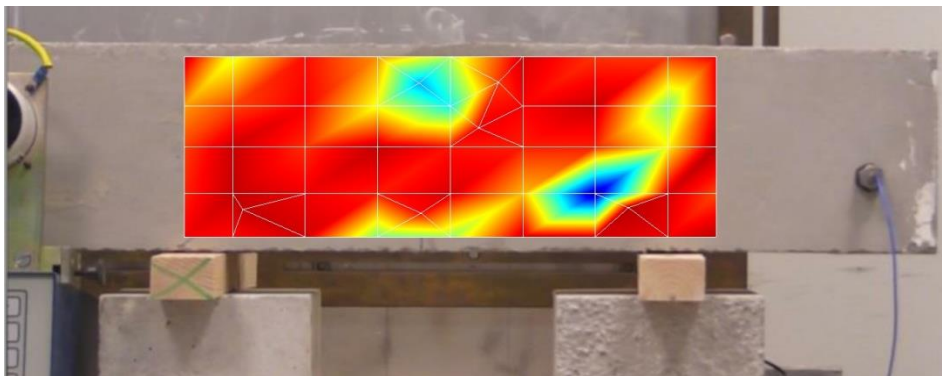
Σχήμα 47: Στιγμιότυπα της απόκρισης της επιφάνειας για το δοκίμιο 4 σε συχνότητα διέγερσης 250Hz



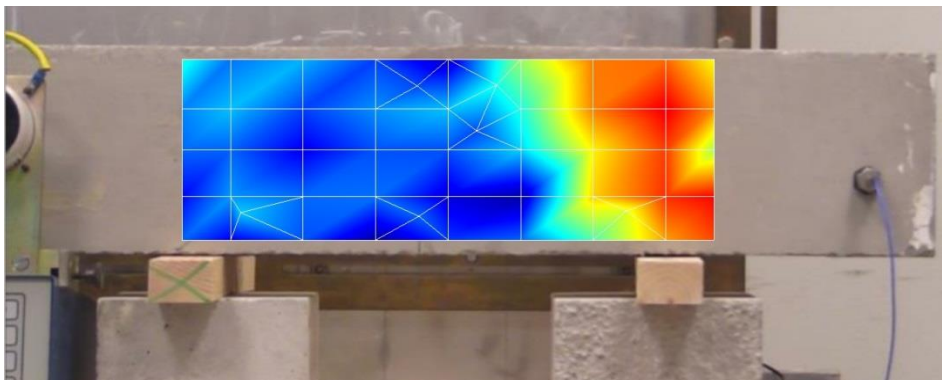
Σχήμα 48: Χρωματικός χάρτης των μέσων επιφανειακών ταχυτήτων για συχνότητα διέγερσης 125Hz



Σχήμα 49: Χρωματικός χάρτης των μέσων επιφανειακών ταχυτήτων για συχνότητα διέγερσης 150Hz



Σχήμα 50: Χρωματικός χάρτης των μέσων επιφανειακών ταχυτήτων για συχνότητα διέγερσης 175Hz



Σχήμα 51: Χρωματικός χάρτης των μέσων επιφανειακών ταχυτήτων για συχνότητα διέγερσης 200Hz

Για τις συχνότητες διέγερσης των 125, 150, 175 Hz είναι αναγνωρίσιμες οι περιοχές βλάβης και σηματοδοτούνται με σκούρο μπλε χρώμα (Σχήμα 48,49 και 50). Για τη συχνότητα διέγερσης 200Hz παρατηρήθηκε ο συντονισμός της δοκού, οπότε δεν έδωσε αποτελέσματα περιορισμένα στην επιφάνεια.

Οι περιοχές με τις μεγαλύτερες ταχύτητες ταυτίζονται με τις περιοχές βλάβης, αποδεικνύοντας πως ακόμα και αν καλυφθούν με ένα υλικό που μπορεί να γεμίσει τα κενά, η κακή σύνδεση μεταξύ τους καθώς και η ίδια η βλάβη εμφανίζονται με έντονες χρωματικές αντιθέσεις. Επίσης, σε ορισμένα σημεία στα άκρα του πλέγματος σημείων παρουσιάζονται ορισμένες υψηλές τιμές που όμως δικαιολογούνται από το γεγονός ότι υπολογίζονται ως ελεύθερα άκρα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνέχεια της δοκού προς τις άλλες κατευθύνσεις.

Για να καταστεί εφικτός ο σαφέστερος προσδιορισμός των περιοχών βλάβης απαιτείται η δημιουργία ενός πυκνότερου καννάβου σημείων ελέγχου, που όμως δεν αποτελεί τον πρωταρχικό σκοπό των πειραμάτων. Βασική προτεραιότητα ήταν ο γενικότερος προσδιορισμός των περιοχών βλάβης σε πολλές διαφορετικές συχνότητες διέγερσης και όχι η ακριβής προσδιορισμός του μεγέθους και της έκτασής τους.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι το SLDV είναι ικανό να εντοπίσει τις περιοχές με βλάβη ακόμα και σε μικρές συχνότητες διέγερσης. Επίσης, η ικανότητα του συστήματος να καταγράφει ταχύτητες της τάξης των mm/sec, δείχνει ότι είναι το καταλληλότερο σύστημα απομακρυσμένης διάγνωσης ακόμα και για πολύ μικρές ταλαντώσεις των μικρομορίων της επιφάνειας. Επίσης, τα αποτελέσματα έδωσαν μια κατεύθυνση για τον τρόπο δράσης στο πεδίο μιας πραγματικής νωπογραφίας σχετικά με τις συχνότητες που μπορούν να εισαχθούν από τα προτεινόμενα συστήματα διέγερσης και να δώσουν μετρήσιμα αποτελέσματα, καθώς και με θέματα φωτισμού του χώρου για καλύτερη απόδοση του LDV.

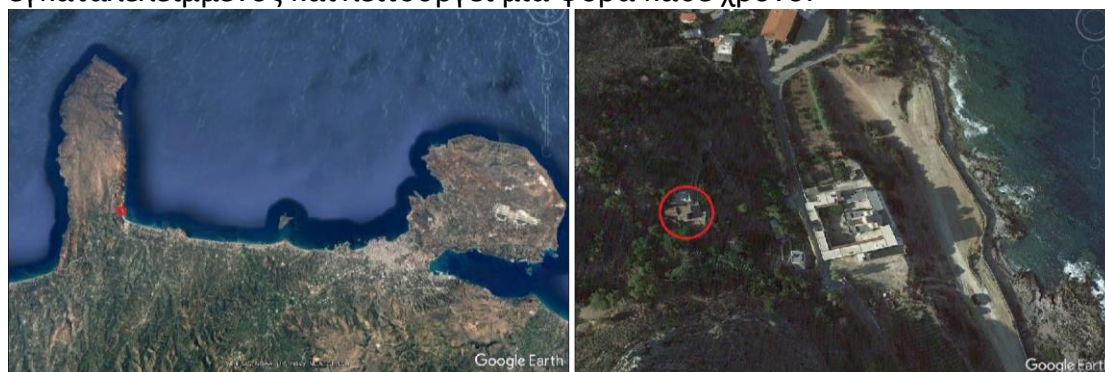
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 ΕΠΙΤΟΠΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΕΣ

Διάγνωση βλαβών νωπογραφίας στο παλιό Καθολικό της Ιεράς Μονής Παναγίας Οδηγήτριας Γωνιάς Χανίων

Το παλιό καθολικό της Ιεράς Μονής Παναγίας Οδηγήτριας Γωνιάς στο Κολυμπάρι Χανίων, κτίστηκε διαδοχικά σε τρεις φάσεις, τον 14ο, τον 15ο και 16ο αιώνα. Βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κύριο συγκρότημα της Μονής Γωνιάς σε χώρο με πανοραμική θέα στο Κρητικό πέλαγος. Η ονομασία «Καθολικό» απηχεί την ιδιαίτερη σημασία που είχε για τους μοναχούς της περιοχής. Η τοποθεσία ονομάζεται Καβούσι εξαιτίας των δύο πηγών και κρηνών που υπάρχουν στην απέναντι πλευρά του χειμάρρου και νότια από το παλιό Καθολικό, από όπου υδρευόταν οι μοναχοί που έμενα στο Καθολικό.

Στα μέσα του 14ου αιώνα κτίσθηκε ο πρώτος ναός τοιχογραφημένος, τον 15ο επεκτάθηκε προς τα δυτικά και τον 16ο αιώνα προστέθηκε και το δεύτερο κλίτος [58]. Αξιοσημείωτο είναι ότι υπάρχει υπόγεια καταπακτή στο μικρό κλίτος του ναού με άγνωστη χρήση. Ο ναός είναι όλος τοιχογραφημένος εσωτερικά και εξωτερικά σε ορισμένα σημεία. Ο ναός είναι εγκαταλελειμμένος και λειτουργεί μια φορά κάθε χρόνο.



Σχήμα 52 και σχήμα 53: Η θέση του Παλιού Καθολικού

Ο ναός είναι έρμαιο των καιρικών συνθηκών εξαιτίας της θέσης του σε επίπεδο αρκετά πάνω από τη θάλασσα. Η έλλειψη παραθύρων και πόρτας, συνετέλεσε στην εντονότερη επίδραση των καιρικών συνθηκών στην κατάσταση των τοιχογραφιών στο εσωτερικό του ναού. Το νότιο κλίτος έχει υποστεί μεγάλες φθορές καθώς ένα κομμάτι της οροφής έχει υποστεί μερική κατάρρευση (Σχήμα 54), έντονη ρηγμάτωση, αποκόλληση των σοβάδων και ο νότιος τοίχος έχει αποκολληθεί μερικώς από την υπόλοιπη κατασκευή (Σχήμα 55).



Σχήμα 54: Το νότιο κλίτος του ναού



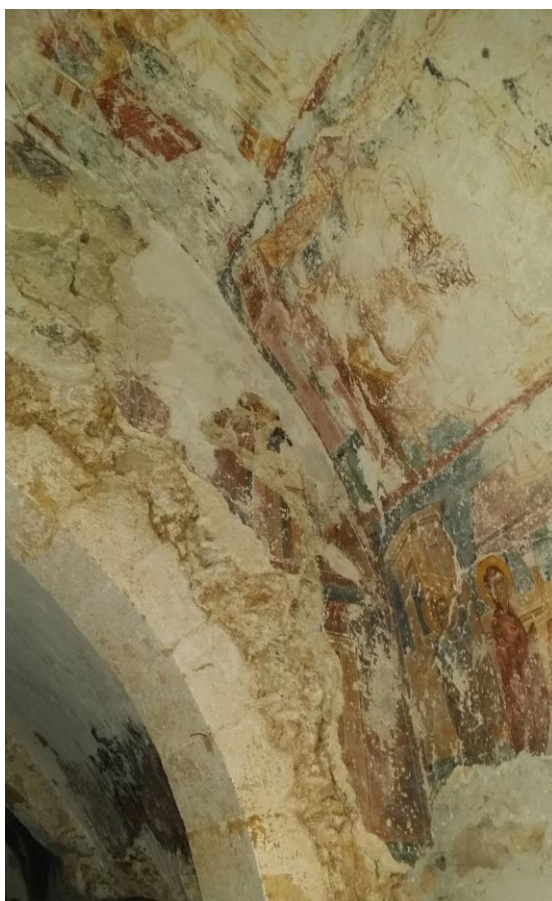
Σχήμα 55: Εξωτερική όψη του ναού με εμφανή την αποκόλληση του νότιου τοίχου του νότιου κλίτους



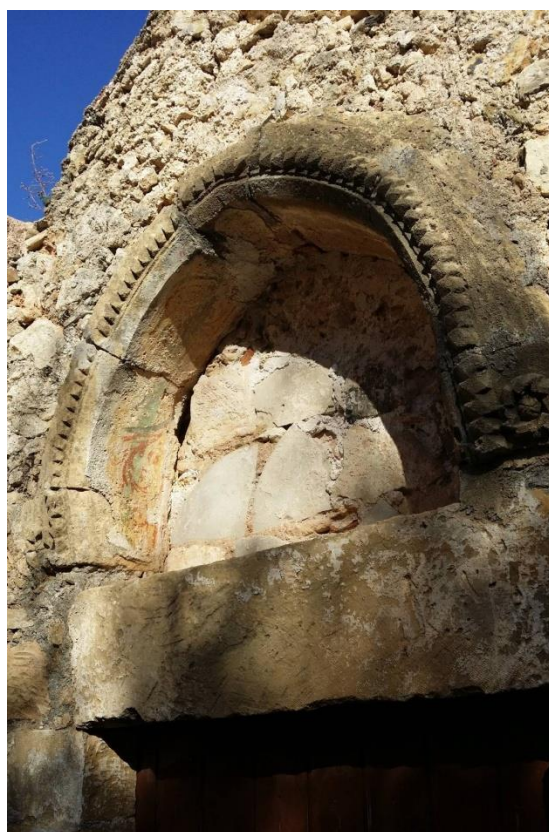
Σχήμα 56: Εσωτερική καμάρα με μερική καθίζηση και αποκολλημένα τμήματα της τοιχογραφίας



Σχήμα 57: Άποψη του δυτικού τοίχου του βόρειου κλίτους με εμφανές ρωγμές, υγρασία και αλλοιωμένες νωπογραφίες



Σχήμα 58: Εκτεταμένες βλάβες στις τοιχογραφίες του ναού



Σχήμα 59: Καμάρα εισόδου του νότιου κλίτους με τοιχογραφία

Η τοιχογραφία που επιλέχθηκε για τη διενέργεια των δοκιμών με το Scanning Laser Doppler Vibrometer (τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος περιγράφονται στα σχήματα 60, 61, 62) είναι αυτή στο βορειο-δυτικό τμήμα του Καθολικού (Σχήματα 63, 64, 65). Κάνοντας έναν πρώτο οπτικό έλεγχο, παρατηρήθηκαν τα εμφανή επιφανειακά προβλήματα της τοιχογραφίας. Οπές, ρηγματώσεις, μερική απόσπαση ολόκληρου τμήματος και αποκόλληση ορισμένων τμημάτων. Το κάτω μέρος της αγιογραφίας έχει καταρρεύσει εντελώς. Στα ανώτερα σημεία έχουν γίνει κάποιες εργασίες συντήρησης και συγκράτησης. Το μεγαλύτερο μέρος του ναού έχει προσβληθεί από την υγρασία και τις ειδικές κλιματολογικές συνθήκες που υπάρχουν μέσα στο ναό. Οι παραπάνω βλάβες οφείλονται κατά κύριο λόγο σε εξωγενείς παράγοντες όπως είναι ο άνθρωπος, ενώ οι ρωγμές και οι αποκολλήσεις σε έναν συνδυασμό παραγόντων όπως η υγρασία και η αστοχία του φορέα μετά την προσάρτηση του νότιου κλίτους. Στο δυτικό τμήμα του παλιού κλίτους υπάρχει μεγάλη ρωγμή κατά τον κατακόρυφο άξονα, που σε συνδυασμό με μια μερική καθίζηση ενός τμήματος της μιας καμάρας (στην περιοχή που ενώνεται το παλιότερο με το νέο τμήμα) και της γενικότερης εικόνας του ναού, καταδεικνύουν την ανάγκη για αναστήλωση και συντήρηση.

Metrological Specifications							
Model	Decoder	# of ranges	Full scale m/s (peak)	Decoder frequency range	Resolution ² ($\mu\text{m/s}$) / $\sqrt{\text{Hz}}$	# of reference channels	# of signal generator channels ³
PSV-500-B Standard	DV-01	7	0.1 ... 10	0 Hz ... 50 kHz	0.04 ... 0.5	1	1 (option)
PSV-500-B Enhanced	DV-02	10	0.01 ... 10	0 Hz ... 50 kHz	0.02 ... 0.5	1	1 (option)
PSV-500-H	DV-03	13	0.001 ... 10	0 Hz ... 100 kHz	0.01 ... 0.5	4 (8)	4
PSV-500-M	DV-04	13	0.001 ... 10	0 Hz ... 1(2) MHz	0.01 ... 2.5	3	1

Compliance with Standards	
Electrical safety	IEC/EN 61010-1:2011-07
	IEC/EN 61326-1:2006-10; Emission: FCC Class B, IEC/EN 61000-3-2 and 61000-3-3 Immunity: IEC/EN 61000-4-2 to 61000-4-6 and IEC/EN 61000-4-11
Laser safety	IEC/EN 60825-1 (2008) (CFR 1040.10, CFR 1040.11)

(Σχήμα 60, Πηγή : www.polytec.com)

PSV-500-B and PSV-500-H Standard Components

Vibrometer system & data acquisition	PSV-I-500 Scanning Head with high precision scanner and HD video 20x zoom camera; PSV-F-500 Front-End with digital broadband decoder; PSV-C-510 main cable, 10 m
Computer	PSV-W-500-HB Data Management System: 19" Industrial PC; Windows® 7 64-bit for "embedded systems" and PSV Software preinstalled
Accessories	VIB-A-T02 Tripod with tip-tilt head; PSV-A-535 Storage Case for scanning head; headphones; hardware manual, software manual, and theory manual

PSV-500-M Standard Components

Vibrometer system	PSV-I-500 Scanning Head with high precision scanner and HD video 20x zoom camera; PSV-F-500 Front-End with digital broadband decoder; PSV-C-510 main cable, 10 m
Computer & data acquisition	PSV-W-500-M Data Management System: 19" Industrial PC with data acquisition and signal generator board installed; Windows® 7 64-bit for "embedded systems" and PSV Software preinstalled
Accessories	VIB-A-T02 Tripod with tip-tilt head; PSV-A-535 Storage Case for Scanning Head; Hardware manual, software manual, and theory manual

PSV-I-500 Scanning Head

Dimensions [W x L x H]	189 x 370 x 177 mm (74.4 x 145.7 x 69.7 in)
Weight	9 kg (19.8 lbs); 9.2 kg with PSV-G-500 Geometry Scan Unit ¹
Laser type, vibrometer	HeNe Laser (633 nm)
Laser type, PSV-G-500 Geometry Scan Unit ¹	Diode laser (660 – 680 nm)
Laser safety class	Class 2 (<1 mW visible output)
Working distance	125 mm ... ~100 m (PSV-G-500 Geometry Scan Unit ¹ : 250 mm ... 30 m)
Scan angle [h x v]	50° x 40°
Scanner properties	Angular resolution <0.002°, Angular stability <0.001°/h, max. 30 scan points/s
Sample size	From a few mm ² up to several m ²
Camera	HD format, 20x optical zoom, max. field of view [h x v] 55° x 32°
Interfaces, electrical	Multi-pin bayonet connector, DIN plug for pan/tilt head control or external scanner control
Interfaces, mechanical	Hexagon type tripod adapter for VIB-A-T02, 2x M6 thread

PSV-F-500 Front-End

Dimensions [W x D x H]	485 x 380 x 150 mm (19", 84HP/3U)
Weight	~10 kg (~22 lbs)
Protection class	IP-20
Interfaces, electrical	Front: BNC connectors for reference channels, signal generator, trigger; Rear: multi-pin bayonet connector, main cable, monitor velocity output, RJ45 Ethernet to computer
Interfaces, mechanical	19" Rack mount adapters

General Specifications

Power	100 VAC...240 VAC ±10%, 50/60 Hz; overall max. 600 VA
Environmental conditions	Operating temperature: +5 °C ... +40 °C (41 °F ... 104 °F); Storage temperature: -10 °C ... +65 °C (14 °F ... 149 °F); Relative humidity: max. 80%, non-condensing
Calibration	Recommended every 24 months (shorter re-calibration intervals available upon request)

(Σχήμα 61, Πηγή : www.polytec.com)

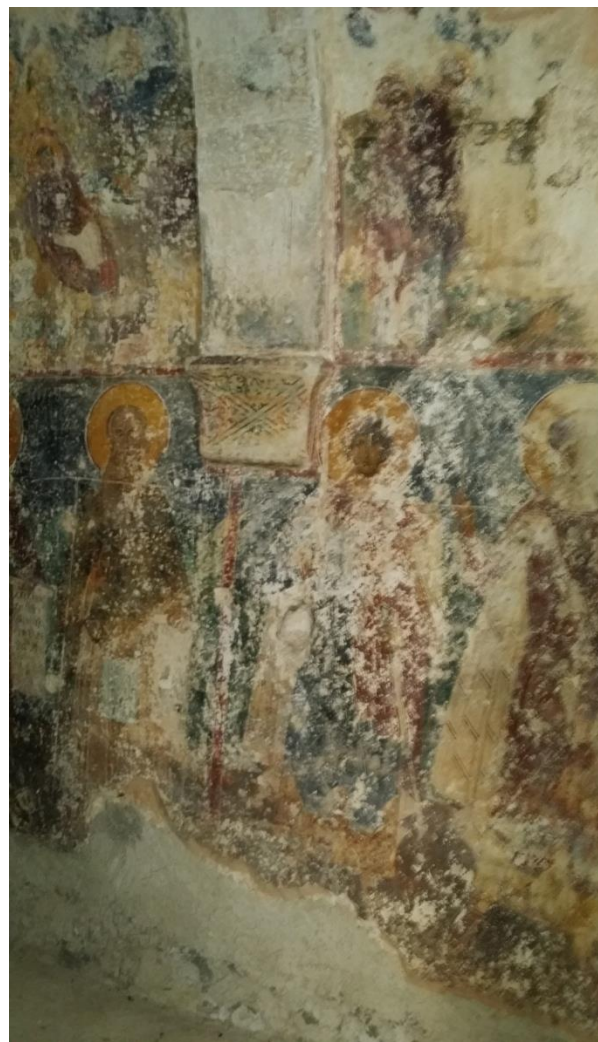
Software Options

Model	PSV-500 Scanning Vibrometer	-B	-H	-M
Preparation				
APS Professional	For arbitrary definition of measurement points and individual object properties	O	\$	\$
Geometry Data Import	Geometry module for importing geometry data to the PSV software for defining the scan points	O	O	O
VideoTriangulation*	Image processing for enhanced automatic alignment of the laser spot with the grid points	O	O	O
Signal Generator	Internal arbitrary signal generator for vibration excitation	O	\$	\$
Measurement				
High Resolution Scan	Up to 512 x 512 scan point density for higher spatial resolution	O	\$	\$
FastScan	Fast scan routine for analyzing the response of structures at a single frequency	O	\$	\$
Time Domain Animation	Time domain data are acquired while scanning. Allows for "slow motion" animation e.g. of surface waves propagation or switches.	O	O	O
Extended FFT Lines	Various options to extend the number of FFT lines up to 819,200	O	O	O
Multi Frame	For triggered measurements on combustion engines and brakes	–	O	–
Bandwidth Extension	Extends the acquisition bandwidth to 2 MHz	–	–	O
Gate Input	Allows gated measurements with external TTL signal	O	\$	\$
Analysis & Interfaces				
SignalProcessor	The user interface to the math library included in the PSV software, designed as an easy-to-use spreadsheet	O	\$	\$
UFF Interface	Universal File Format data conversion from and to major modal analysis and Finite Element packages	\$	\$	\$
PCA	Principal Component Analysis. For MIMO measurements in experimental modal analysis.	–	O	–
MEscope Modal Software	Software package for modal analysis. Including data interface.	O	O	O
Data Export to MEscope	Data export to Vibrant's MEscope modal analysis software	O	O	O
ASAM ODS	Import and export of data in ASAM ODS 5.2.0 ATFX standard	O	O	O
Audio Analysis	Makes vibration data audible. Allows listening to live and stored vibration signals.	\$	O	O
Desktop Analysis Version	Desktop version of PSV Software for offline post processing and presentation of measurement results	O	O	O
Automation and programming interface				
Macro Programming	WinWrap® Basic Engine: Visual Basic® for Applications (VBA) compatible. Allows automation of test routines.	\$	\$	\$
Polytec File Access	API for retrieval of Polytec data via external applications supporting Microsoft's Component Object Model (COM), e.g. Visual Basic .NET®, C#, MATLAB®, LabVIEW™	\$	\$	\$
Maintenance package				
Software Maintenance Basic	Basic software maintenance. Free PSV Software updates for a period of 1 year.	\$	\$	\$
Extended Software Maintenance	Entitles for software updates for an additional period. Available in 12 month increments.	O	O	O
University Program	Lifetime update license for universities and education (terms and conditions apply)	O	O	O

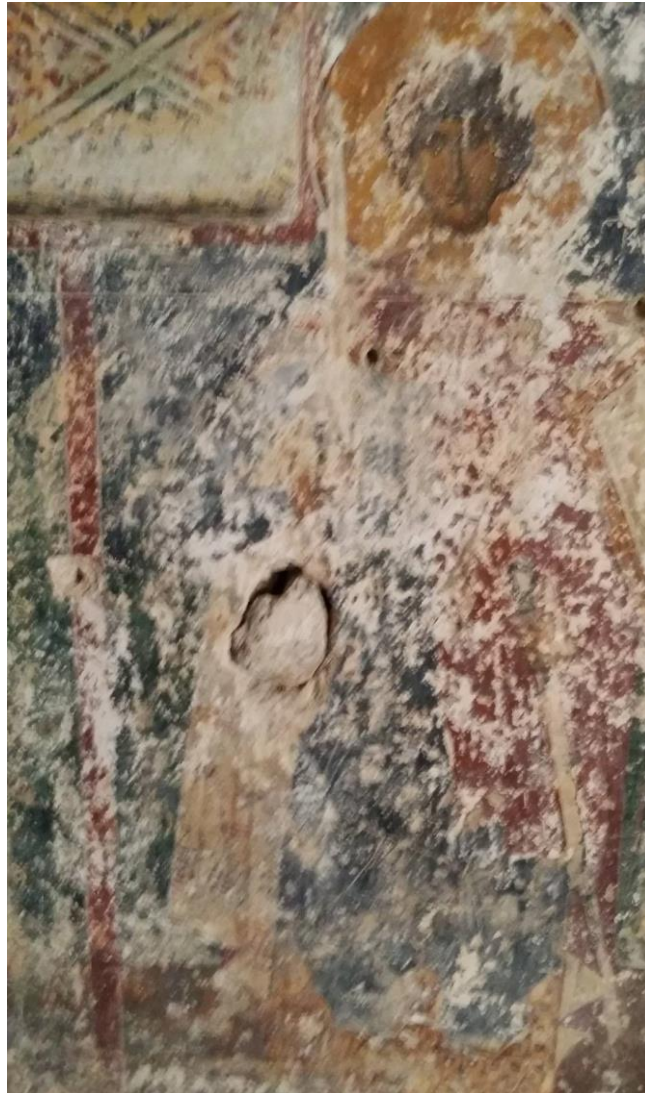
(Σχήμα 62, Πηγή : www.polytec.com)



Σχήμα 63: Τμήμα της εξεταζόμενης
νωπογραφίας



Σχήμα 64: Τμήμα της εξεταζόμενης
νωπογραφίας



Σχήμα 65: Εστιασμένη εικόνα στην εξεταζόμενη αγιογραφία

Η επιλογή της συγκεκριμένης αγιογραφίας έγινε ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί το SLDV σε κατάλληλη απόσταση για τη λήψη των μετρήσεων, να περιέχει τμήματα με εμφανή προβλήματα που θα δώσουν υψηλές επιφανειακές ταχύτητες για την ταυτοποίηση των μετρήσεων και να είναι προσβάσιμη η επιφάνεια της αγιογραφίας για επαλήθευση των αποτελεσμάτων και με την παραδοσιακή μέθοδο του χτυπήματος με το χέρι.

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιήθηκε δοκιμή διάγνωσης των ελαττωματικών περιοχών χτυπώντας ελαφρά τον τοίχο με το χέρι, εκτιμώντας την υποκρυπτόμενη κατάσταση από τον αντίστοιχο εκπεμπόμενο ήχο. Αυτός ο έλεγχος έδωσε μια πρώτη εικόνα χαρτογράφησης των περιοχών με πιθανή βλάβη (Σχήμα 66).

Σε επόμενο στάδιο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το μηχάνημα Scanning Laser Doppler Vibrometer PSV500H της εταιρίας Polytec. Τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος παραθέτονται παρακάτω.

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων είναι το PSV Scanning Vibrometer Software, το Scan Viewer

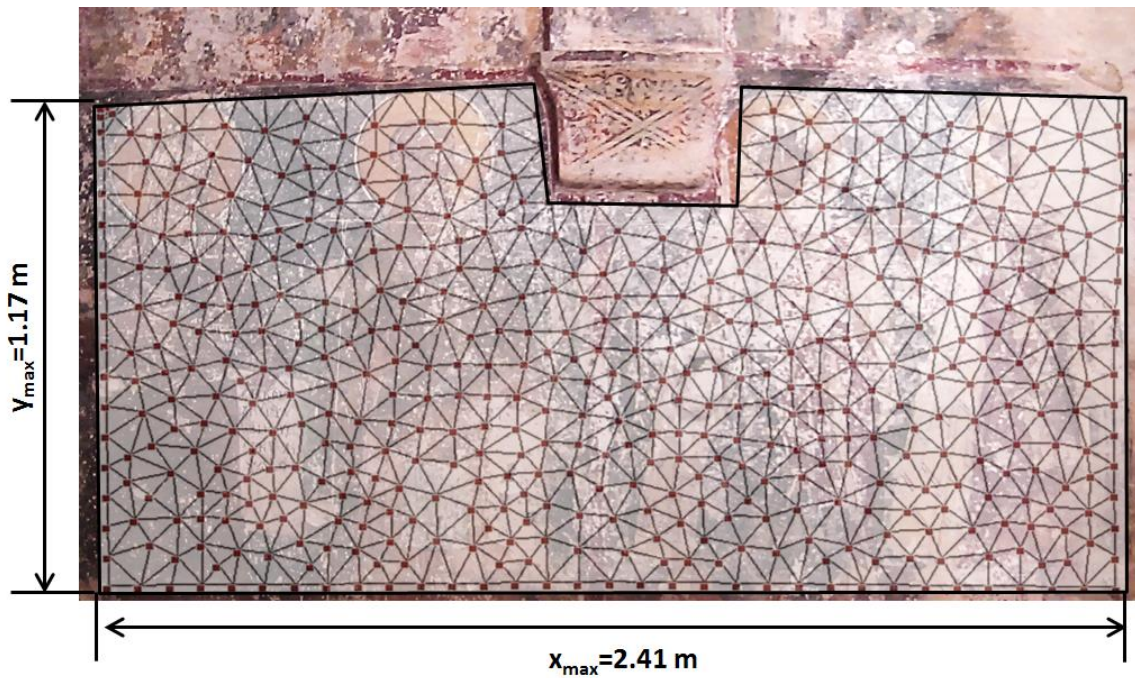
Software και MatLab. Οι μετρήσεις έγιναν τον Μάρτιο του 2016, πριν ξεκινήσουν οι διαδικασίες συντήρησης του καθολικού.



Σχήμα 66: Απεικόνιση των πιθανών περιοχών βλάβης σύμφωνα με την παραδοσιακή τεχνική διάγνωση βλαβών

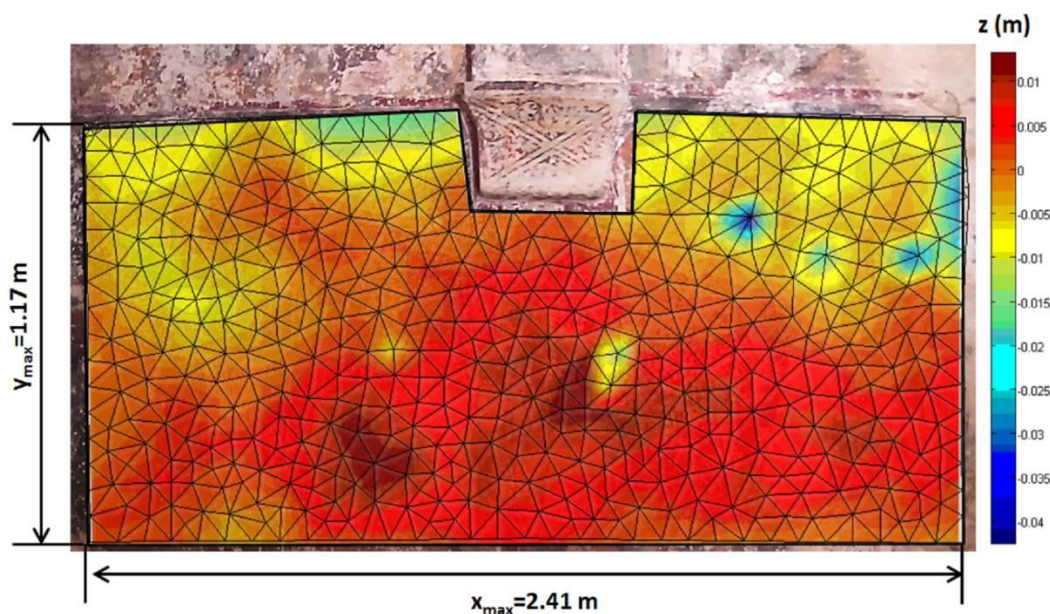
Οι μετρήσεις με το SLDV πραγματοποιήθηκαν χωρίς τη βοήθεια επιπλέον διεγέρτη και αισθητήρα, καθώς δεν κατέστη δυνατό να προσκολληθούν πάνω στην επιφάνεια της νωπογραφίας. Επιπλέον, σκοπός της εφαρμογής ήταν να εξακριβωθεί εάν μπορούν να γίνουν μετρήσεις χωρίς να υπάρξει επαφή με την επιφάνεια και να αποδειχτεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ακόμα όταν υπάρχει δυσκολία πρόσβασης. Τέλος, δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια συσκευή παραγωγής ηχητικών κυμάτων, ώστε να αποδειχτεί ή όχι η αξιοπιστία του μηχανήματος σε περιπτώσεις απομακρυσμένων αντικειμένων.

Η περιοχή μελέτης είναι διαστάσεων 1,17X2,41 μέτρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 67. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, έγινε ορισμός ενός καννάβου και διακριτοποίηση της επιφάνειας σε σημεία σε κατάλληλες θέσεις που να περιβάλλουν τις επαληθευμένες περιοχές προβλημάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται το πλέγμα σάρωσης πάνω στο οποίο διεξήχθησαν οι μετρήσεις.



Σχήμα 67: Σημεία σάρωσης αγιογραφίας

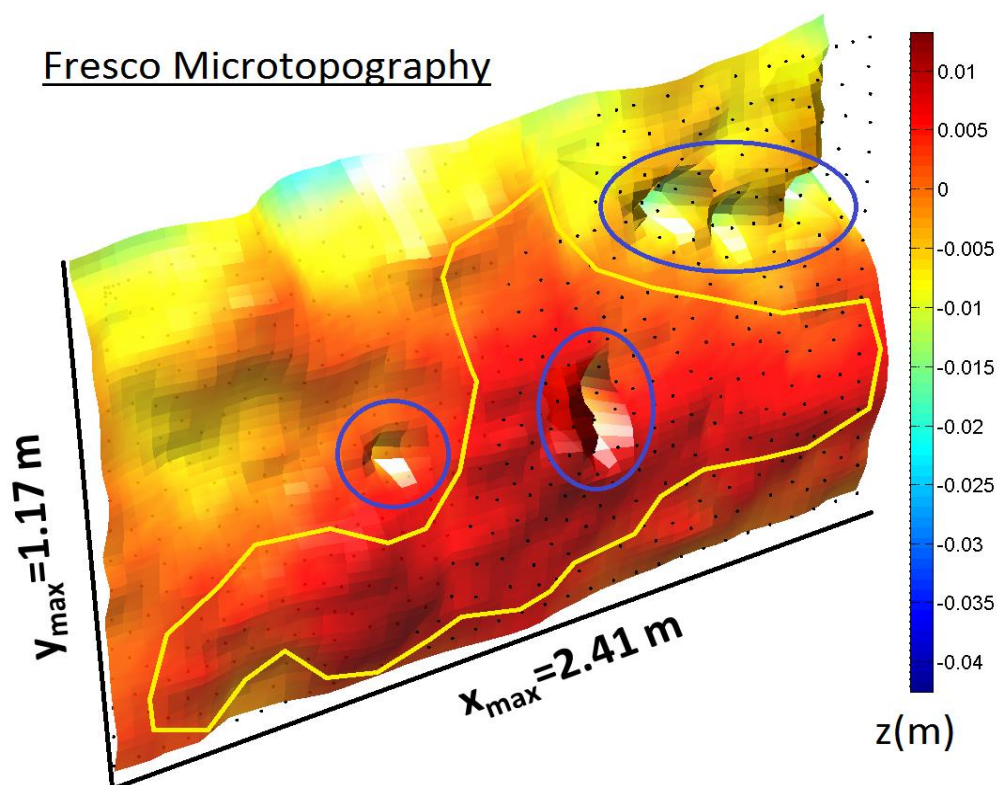
Από το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, εξάγεται ένα πλέγμα με την κατανομή των μικρό-μετακινήσεων της επιφάνειας σε επίπεδο κάθετο στην επιφάνεια του τοίχου (Σχήμα 68). Στο σχήμα 68 παρατηρούνται ορισμένες περιοχές με σκούρο κόκκινο χρώμα, που λαμβάνουν θετικές τιμές μετατοπίσεων και με βαθύ μπλε χρώμα, με αρνητικές τιμές μετατόπισης. Οι ζώνες με τις θετικές τιμές δείχνουν την τάση της επιφάνειας να διευρυνθεί/επεκταθεί. Κάτι τέτοιο μπορεί να συνδέεται με μια πιθανή αποκολλημένη ζώνη. Οι περιοχές με τις αρνητικές τιμές μετατόπισης αντιστοιχούν σε αυτές με, εμφανή ή μη, προβλήματα βλάβης, αποκολλημένα τμήματα, μεγάλες τρύπες ή ρηγματώσεις.



Σχήμα 68: Μικροτοπογραφία της επιφάνειας της νωπογραφίας

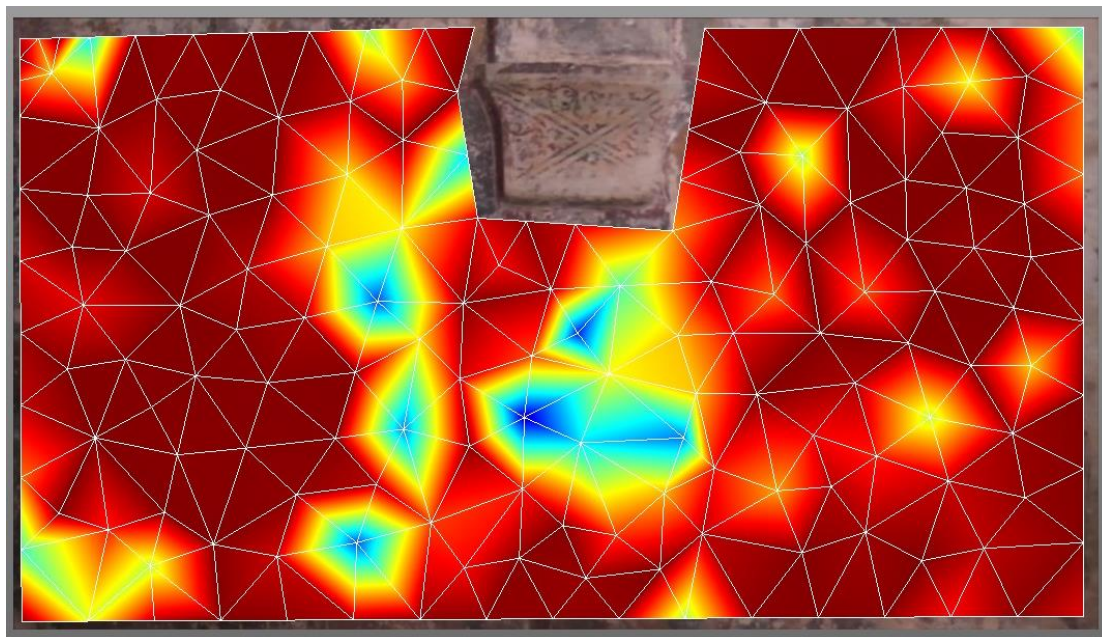
Στην μικροτοπογραφία της νωπογραφίας που φαίνεται στα Σχήματα 68 και 69, παρουσιάζεται η απεικόνιση των επιφανειακών αλλοιώσεων της νωπογραφίας σε επίπεδο επιφάνειας, με τα κενά που είναι εμφανή με γυμνό μάτι, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω, να εμφανίζουν αρνητικές τιμές. Σε αυτό το πρώτο στάδιο σάρωσης της τοιχογραφίας μπορεί να παρατηρηθεί μια γενικότερη και εκτεταμένη βλάβη που υποκρύπτεται κάτω από τα στρώματα του κονιάματος. Η ζώνη που περιβάλλεται από την κίτρινη γραμμή εμφανίζει τις υψηλότερες θετικές τιμές, προειδοποιώντας για τις πιθανές τάσεις αποκόλλησης μεγάλου μέρους της επιφάνειας, που πιθανότατα να οφείλεται στην απόσπαση ολόκληρου του κάτω μέρους της τοιχογραφίας που εξετάζεται σε συνδυασμό με τις συνθήκες περιβάλλοντος.

Στο επόμενο στάδιο διενεργήθηκε μέτρηση με το Scanning Laser Doppler Vibrometer χρησιμοποιώντας τη δονησιομετρία για την μέτρηση των επιφανειακών ταχυτήτων στα σημεία ελέγχου, χωρίς εξωτερικό διεγέρτη πέραν του φυσικού θορύβου. Το παλιό Καθολικό βρίσκεται σε ύψωμα και απομακρυσμένο από τον δρόμο, από όπου θα μπορούσε να επιφέρει ταλάντωση η διέλευση αυτοκινήτων.



Σχήμα 69: Τρισδιάστατη απεικόνιση της μικροτοπογραφίας της επιφάνειας

Η σάρωση του εξεταζόμενου αντικειμένου έδωσε μια χρωματική απεικόνιση βάση των μέσων τιμών ταχύτητας των σημείων (Σχήμα 70).



Σχήμα 70: Χρωματικός χάρτης των επιφανειακών ταχυτήτων

Η μέτρηση που πραγματοποιήθηκε έδωσε ως αποτέλεσμα τον παραπάνω χάρτη (σχήμα 70), στον οποίο καταγράφονται τα σημεία και οι περιοχές με τις αντίστοιχες επιφανειακές ταχύτητες σε ένα πλέγμα συσχετισμένων σημείων. Μπορεί να παρατηρηθεί η ένταση του χρώματος στην θέση της οπής στο μέσο της αιογραφίας και της γύρω περιοχής, όπως ήταν αναμενόμενο καθώς τα τμήματα εκείνα έχουν αποσπαστεί και έχει προκληθεί διάσπαση της συνέχειας της αιογραφίας. Ομοίως και στο άνω δεξί μέρος, όπου επίσης υπάρχει οπή ανιχνεύθηκε αυξημένη κινητικότητα καταδεικνύοντας την ασυνέχεια του υλικού. Επιπλέον, εμφανίζονται και άλλες ζώνες με αυξημένη ταχύτητα συγκριτικά με τις γειτνιαζουσες περιοχές.

6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Συγκρίνοντας τις τιμές των δύο εφαρμοσμένων μεθόδων διάγνωσης, μπορεί να παρατηρηθεί σχετική ταύτιση των αποτελεσμάτων. Τα αρνητικά της παραδοσιακής μεθόδου είναι η πιθανή επιβλαβής επιρροή που μπορεί να έχει μια τέτοια μέθοδος στην δομική ακεραιότητα της νωπογραφίας και το γεγονός ότι τα αποτελέσματα δεν είναι μετρήσιμα, αλλά απλές υποδείξεις για τις περιοχές με υποκρυπτόμενη βλάβη. Το SLDV σαρώνοντας μια πληθώρα σημείων μπορεί να δώσει συγκριτικά και μετρήσιμα στοιχεία για κάθε σημείο ώστε να εκτιμηθεί η γενικότερη κατάσταση της τοιχογραφίας χωρίς να υπάρξει επαφή με αυτήν, από απόσταση.

Η πρωτοτυπία του SLDV είναι πως μπορεί να καταγράψει τη διαφορά φάσης των εξεταζόμενων σημείων σε δυναμική φόρτιση, παρέχοντας τη δυνατότητα καταγραφής των ταχυτήτων των σημείων της επιφάνειας,

απαλείφοντας την ανάγκη επαφής με την αιογραφία. Επίσης, έγκειται και στο γεγονός ότι πρόκειται σε μια μέθοδο όπου χρησιμοποιείται η επιφανειακή ταχύτητα των επιλεγμένων σημείων της επιφάνειας σε συνδυασμό με το φαινόμενο Doppler και τη συμβολομετρία για τον προσδιορισμό των υποκρυπτόμενων βλαβών ενός έργου τέχνης με πολιτιστική και καλλιτεχνική αξία.

Η ανάπτυξη του SLDV έγινε έχοντας ως βάση τις αρχές τις παραδοσιακής μεθόδου, όπου, η εκπεμπόμενη συχνότητα του ήχου που παράγεται από το ελαφρύ χτύπημα της επιφάνειας με το χέρι ή το ειδικό σφυρί μεταφέρει πληροφορίες στον συντηρητή για την κατάσταση της τοιχογραφίας σε στρώματα κάτω από το πρώτο στρώμα του έργου.

Χωρίς να γίνει χρήση κάποιου επιπλέον διεγέρτη ή γεννήτριας ταλαντώσεων, έγινε δυνατή η μέτρηση των επιφανειακών ταχυτήτων της τοιχογραφίας και να προσδιοριστούν οι ελαττωματικές περιοχές. Ο μη επεμβατικός χαρακτήρας της μεθόδου, καθιστά το SLDV ένα αξιόπιστο μηχανισμό ελέγχου και διάγνωσης της ακεραιότητας μιας νωπογραφίας από απόσταση, χωρίς να υπάρχει ενδεχόμενος κίνδυνος από πλευράς χειρισμού.

Η ιδιαιτερότητα του πειράματος βασίζεται στο ότι δεν υπήρχε η παραμικρή επαφή με την επιφάνεια της νωπογραφίας και εξήχθησαν αποτελέσματα από απόσταση, προστατεύοντας επιπροσθέτως το έργο.

Ειδικότερα, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον χρωματικό χάρτη των μέσων τιμών των επιφανειακών ταχυτήτων δίνουν την απαραίτητα πληροφορία για την κατάσταση της αιογραφίας σε επίπεδο κάτω από την ορατή επιφάνεια. Με χρώμα κίτρινο, γαλάζιο και σκούρο μπλε χαρακτηρίζονται οι περιοχές με αποκόλληση ή κάποια σχετική φθορά, που σε συνδυασμό με τον χάρτη της μικροτοπογραφίας με τα θετικά και αρνητικά αποτελέσματα τιμών για την σχετική μετατόπιση των σημείων του καννάβου της επιφάνειας, μπορούν να αξιολογηθεί καταλλήλως η κατάσταση της νωπογραφίας στα σημεία αυτά και την περιοχή που τα περιβάλλει, είτε πρόκειται για αποκόλληση, είτε για τρύπα είτε για οποιοδήποτε άλλο είδος φθοράς.

Η μια περιοχή με το σκούρο μπλε χρώμα ταυτίζεται με τα αυτήν όπου υπάρχει η τρύπα στο κάτω μέσο τμήμα του έργου. Από τον χρωματικό χάρτη φαίνεται επίσης ότι, γύρω από την τρύπα αυτή, υπάρχει μια μεγαλύτερη περιοχή με έντονη χρωματική διαφορά, όπου σηματοδοτεί την ύπαρξη μια γενικότερης φθοράς που απαιτεί την αντίστοιχη φροντίδα και συντήρηση καθώς καταδεικνύει την έκταση του φαινομένου. Αυτή η γενικότερη έκταση της βλάβης, πιθανότατα σε συνδυασμό με κάποιον εξωγενή παράγοντα, οδήγησε πιθανότατα στην απόσπαση τμήματος της νωπογραφίας και τμήματος λιθοδομής. Η απόσπαση αυτού του τμήματος οδήγησε κι αυτή με τη σειρά της και στη δημιουργία ασυνέχειας σε επίπεδο χρωματικής επιφάνειας και στην εξάπλωση της βλάβης σε μεγαλύτερη περιοχή.

Στο υπόλοιπο έργο εμφανίζονται διάφορα σημεία με πιθανή βλάβη που χρήζουν συντήρησης. Συνδυάζοντας όπως προαναφέρθηκε τα αποτελέσματα της μικροτοπογραφίας με τα τελικά αποτελέσματα της μέτρησης με το SLDV μπορούν να προσδιοριστεί η φύση της φθοράς στα σημεία αυτά, καθώς οι αρνητικές τιμές μετατόπισης σε συνδυασμό με υψηλές επιφανειακές ταχύτητες στα εξεταζόμενα σημεία υποδηλώνουν τις αποκολλημένες περιοχές με κενό κάτω από το επίπεδο της εξωτερικής επιφάνειας στο εσωτερικό της στρωματογραφίας, με υποκρύπτουσα ή μη ρηγμάτωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κύριος σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η καταγραφή των δυνατοτήτων ενός μηχανήματος Scanning Laser Doppler Vibrometer στη διαγνωστική διαδικασία της δομικής ακεραιότητας μιας νωπογραφίας, ώστε να εξαχθούν στοιχεία που να τεκμηριώσουν και να αποδείξουν τη σπουδαιότητα μιας τέτοιας εφαρμογής στη διάγνωση βλαβών. Διασχίζοντας μια πορεία πειραματισμών στο εργαστήριο και εφαρμογής στο πεδίο, εξήχθησαν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της μεθοδολογίας.

Η ανάπτυξη του Laser Doppler Δονησιόμετρου βασίστηκε στις θεμελιώδεις αρχές που χρησιμοποιούνται στην παραδοσιακή μέθοδο ανίχνευσης βλαβών, όπου ο συντηρητής χτυπούσε ελαφρώς την επιφάνεια και, στηριζόμενος στη συχνότητα του εκπεμπόμενου ήχου, μπορούσε να προσδιορίσει τις βλάβες της νωπογραφίας. Η ειδοποιός διαφορά είναι πως με τη νέα μέθοδο δεν απαιτείται επαφή με την επιφάνεια του έργου για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, προστατεύοντας το έργο από περαιτέρω αλλοιώσεις.

Τα πειράματα που διενεργήθηκαν στο εργαστήριο στο πρώτο στάδιο αυτής της εργασίας, είχαν ως σκοπό την εξοικείωση με τη μέθοδο σε διάφορες συνθήκες στήριξης και βλαβών. Ειδικότερα, το πρώτο και δεύτερο πείραμα στόχευαν κυρίως στην ανάλυση της ευαισθησίας της μεθόδου στην εφαρμογή της σε αντικείμενα με στρωματογραφική φύση. Τα πειράματα που ακολούθησαν στόχευαν στην διερεύνηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη διέγερση σε διαφορετικές συχνότητες με διάφορους τρόπους διέγερσης, χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων βασισμένες στη βιβλιογραφία και την εφαρμογή αντίστοιχων μεθοδολογιών σε ποικίλα έργα τέχνης και κατασκευές. Οι πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο έδωσαν τη δυνατότητα να οριστούν οι συχνότητες που μπορούν να προκαλέσουν εξαναγκασμένη ταλάντωση σε ένα επιφανειακό στοιχείο όπως μια νωπογραφία (fresco), που η στρωματογραφική της φύση χαρακτηρίζεται από μικρό βάθος συγκριτικά με το βάθος της τοιχοποιίας.

Η εφαρμογή του SLDV σε νωπογραφίες αποτελεί μια ιδιαίτερη μέθοδο ανίχνευσης βλαβών καθώς δεν βασίζεται μόνο στην μικροτοπογραφία της επιφάνειας για τον προσδιορισμό των υποκρυπτόμενων αλλοιώσεων αλλά μπορεί να δώσει μετρήσιμα

αποτελέσματα για την δομική κατάσταση της νωπογραφίας (fresco) με την βοήθεια ενός κατάλληλου διεγέρτη.

Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της μικροτοπογραφίας που εξάγονται στην πρώτη φάση ελέγχου του έργου από το laser με τα αποτελέσματα που δίδονται μετά την επιβολή κάποιας διέγερσης, μπορούν να δώσουν μια αξιόπιστη εικόνα των βλαβών, προσδιορίζοντας της θέση, την έκταση και τη φύση τους.

Η ιδιότητα της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας να δίνει αποτελέσματα χωρίς επαφή με το εξεταζόμενο αντικείμενο καθώς και η μη επεμβατική φύση της, καθιστά το SLDV το καταλληλότερο μηχάνημα για απομακρυσμένο έλεγχο και διάγνωση έργων τέχνης με μεγάλη πολιτιστική αξία.

Οι μετρήσεις στη νωπογραφία του Παλιού Καθολικού της Μονής Παναγιάς Οδηγήτριας Γωνιάς, που αποτελεί έναν ιστορικό ναό του 14^{ου} περίπου αιώνα, καθόρισαν τις περιοχές που θα πρέπει να ελεγχθούν και να αποκατασταθούν.

Για την διενέργεια της διαγνωστικής μεθόδου, έγινε προσπάθεια να ληφθούν μετρήσεις χωρίς τη χρήση οποιουδήποτε εξωτερικού διεγέρτη, χωρίς την επιβολή εξαναγκασμένης ταλάντωσης. Σκοπός αυτής της επιλογής ήταν η εξερεύνηση των δυνατοτήτων του Laser Doppler Δονησιόμετρου Σάρωσης στην περίπτωση που υπάρχει δυσκολία στην προσέγγιση του εξεταζόμενου έργου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως κάτι τέτοιο είναι εφικτό, δίνοντας αξιόλογα αποτελέσματα και μετρήσιμα δεδομένα για την κατάσταση της νωπογραφίας.

Μια διερεύνηση της απόκρισης της κατασκευής στις διάφορες συχνότητες συντονισμού μπορεί να δώσει σαφή στοιχεία ακόμα και για τις μικρότερες αποκολλήσεις των επιφανειακών και μη στρωμάτων της νωπογραφίας. Ο φυσικός θόρυβος παράγει κύματα μεγάλου μήκους με χαμηλή συχνότητα, που ενδείκνυται για την ανίχνευση μεγάλων βλαβών. Για τον προσδιορισμό μικρότερων βλαβών απαιτείται η διερεύνηση των αποτελεσμάτων του φάσματος απόκρισης και σε υψηλότερες συχνότητες.

Επίσης, οι μεγάλες βλάβες παρουσιάζονται ως περιοχές με μεγάλες ταχύτητες και δεσπόζουν στην απεικόνιση των βλαβών, με αποτέλεσμα να εξαλείφονται από τον χρωματικό χάρτη οι μικρότερες βλάβες.

Κατά τη ρύθμιση των παραμέτρων της μεθόδου έγινε αφαίρεση των σημείων όπου η μέτρηση της ταχύτητας δεν ήταν η βέλτιστη (τα σημεία με χαμηλής ποιότητας ανακλώμενο οπτικά σήμα laser). Η επιλογή της συχνότητας του μέσου φάσματος έδωσε μια πρώτη γενική εκτίμηση των βλαβών της νωπογραφίας. Επιπλέον, κρατώντας σταθερό το πλάτος

και αλλάζοντας της συχνότητα στο φάσμα απόκρισης είναι δυνατός ο καθαρισμός της εικόνας στις περιοχές βλάβης, παρέχοντας καλύτερο προσδιορισμό τους.

Ο συνδυασμός της εικόνας από τη σάρωση της μικροτοπογραφίας με τα αποτελέσματα της σάρωσης της επιφάνειας για τον προσδιορισμό των επιφανειακών ταχυτήτων των σημείων του καννάβου σάρωσης μπορεί να δώσει έγκυρα στοιχεία για τη θέση των οπών και των αποκολλήσεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση κατέδειξε τη θέση αυτών των βλαβών εστιασμένων στο κάτω μέρος της νωπογραφίας αλλά και μια γενικότερη φθορά της αγιογραφίας.

Είναι σαφές, ότι με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία προκύπτουν έγκυρα αποτελέσματα περί των βλαβών μιας νωπογραφίας (fresco) που βρίσκονται κάτω από το εξωτερικό στρώμα της χρωματικής επιφάνειας. Μια τροποποίηση ορισμένων δεδομένων και παραγόντων μπορεί να συγκεκριμενοποιήσει τις επιβλαβείς περιοχές και να τις προσδιορίσει με ακρίβεια. Για καλύτερα και πιο σαφή αποτελέσματα, θα πρέπει να γίνει επανασχεδιασμός του καννάβου των σημείων σάρωσης ώστε να προκύψει ένα πιο πυκνό δίκτυο σημείων, εστιασμένων στις περιοχές με ενδείξεις αυξημένης ταχύτητας ταλάντωσης υπό διέγερση. Ο κάνναβος αυτός θα μπορέσει να καθορίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια το μέγεθος των αλλοιωμένων περιοχών και να μειώσει την ανακρίβεια του αποτελέσματος.

Επίσης, θα πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα επιβολής εξαναγκασμένης ταλάντωσης, για παράδειγμα με τη χρήση ενός ακουστικού διεγέρτη για ενίσχυση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Ο ακουστικός διεγέρτης θα μπορέσει να επιβάλει ταλάντωση από απόσταση, διατηρώντας τον ανέπαφο και μη επεμβατικό χαρακτήρα της μεθόδου, ώστε να προκαλέσει την ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων των αποκολλημένων τμημάτων της νωπογραφίας για καλύτερα αποτελέσματα.

Τέλος, στηριζόμενοι στην ιδιότητα του μηχανήματος Scanning Laser Doppler Vibrometer να παρέχει μετρήσιμα και συγκρίσιμα αποτελέσματα, κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθούν μετρήσεις μετά την αποκατάσταση της τοιχογραφίας ώστε να εξακριβωθεί η αποτελεσματικότητα των μεθόδων αποκατάστασης, αξιοποιώντας τα μετρήσιμα αποτελέσματα που εξάγονται από τη μεθοδολογία.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ/ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lascaux,_Megaloceros.jpg#filelinks

[2] Πηγή: By unknown ancient artist - ArtStudy version 2.0 (Saskia Ltd, Thomson Wadsworth), Κοινό Κτήμα, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57630>

[3] <https://olympia.gr/>

[4] Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NAMA_Akrotiri_3.jpg, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license

[5] Πηγή: <http://www.cretanthematicpark.com/gr/minoan-civilization/the-new-palace-period/painting.aspx>

[6] <https://olympia.gr/>

[7] Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Knossos_fresco_women.jpg#/media/File:Knossos_fresco_women.jpg, <http://www.flickr.com/photos/cavorite/98591365/in/set-1011009/>, CC BY-SA 2.0

[8] Πηγή: <http://www.nomika-epilekta.gr/strepsodikopanoyrgia/dokimia/i-texniki-tis-toixografias-ston-mesogeiaiko-xoro>

[9] <http://www.gistor.gr/istoria/60-2008-10-30-10-27-21/148-2008-10-30-10-32-48>

[10] Ευφροσύνη Δοξιάδη, 'Από τα πορτρέτα του Φαγιούμ στις Απαρχές της Τέχνης των Βυζαντινών Εικόνων', Βικελαία Βιβλιοθήκη Δήμου Ηρακλείου, 1998, σελ. 17-26,

[11] Hugh Honour, John Fleming, Ιστορία της Τέχνης, Εκδόσεις Υποδομή

[12] Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lightmatter_Sistine_Chapel_ceiling.jpg, Creative Commons Attribution 2.5 Generic license

[13] Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Creaci%C3%B3n_de_Ad%C3%A1n_\(Miguel_%C3%81ngel\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Creaci%C3%B3n_de_Ad%C3%A1n_(Miguel_%C3%81ngel).jpg)

[14]Πηγή:[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cathedral_\(Parma\)_Assumption_by_Correggio.jpg#/media/File:Cathedral_\(Parma\)_-_Assumption_by_Correggio.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cathedral_(Parma)_Assumption_by_Correggio.jpg#/media/File:Cathedral_(Parma)_-_Assumption_by_Correggio.jpg), CC BY-SA 4.0

[15]Πηγή: <https://commons.wikimedia.org>

[16]Σακελλαρίου, Ελένη Παντελή, Μελέτη των υλικών ζωγραφικής των τοιχογραφιών της Βασιλικής των Τεσσαράκοντα Μαρτύρων (1230μ.Χ.) στο Veliko Turnovo της Βουλγαρίας, , Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής 2009,

[17]Προβιδάκης Κωνσταντίνος (2015), «Μη καταστρεπτικές μέθοδοι», 1η Σειρά διαλέξεων Μαθήματος: Ενόργανη Παρακολούθηση Μνημειακών Κατασκευών, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών Πολυτεχνείου Κρήτης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών,

[18]D.Paoletti, G.Schirripa Spagnolo, The potential of portable TV holography for examining frescoes in situ, στο Studies in Conservation, Vol.40, No. 2, Μάιος 1995, 127-132, Maney Publishing on behalf of the International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works,

[19]Paola Calicchia, Giovanni Bosco Cannelli, Detecting and mapping detachments in mural paintings by non-invasive acoustic technique: measurements in antique sites in Rome and Florence, στο Journal of Cultural Heritage, Vol. 6, Issue 2, Απρίλιος- Ιούνιος 2005, 115-124,

[20]Paola Calicchia, Giovanni Bosco Cannelli, Detecting and mapping detachments in mural paintings by non-invasive acoustic technique: measurements in antique sites in Rome and Florence, στο Journal of Cultural Heritage, Vol. 6, Issue 2, Απρίλιος- Ιούνιος 2005, 115-124,

[21]K. Dickmann, C. Fotakis, J.F. Asmus (Eds.) (2003), Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Εκδόσεις Springer,

[22]H. Scholten, D. Schipper, F.J. Ligterink, J.L. Pedersoli Jr.,P. Rudolph, W. Kautek, J.B.G.A. Havermans, H.A. Aziz, B. vanBeek, M. Kraan, P. van Dalen, V. Quillet, S. Corr, H.Y. Hua-Strofer, Laser Cleaning Investigations of Paper Models and Original Objects with Nd:YAG and KrF Laser Systems, στο Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18

Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 11-18,

[23]E. Pilch, S. Pentzien, H. M'adebach, W. Kautek, Anti-Fungal Laser Treatment of Paper: A Model Study with a Laser Wavelength of 532nm, , στο Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 19-27,

[24]K. Dickmann, J. Hildenhagen, J. Studer, E. Musch, Archaeological Ironwork: Removal of Corrosion Layers by Nd:YAG-Laser , , στο Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 71-77,

[25]Y.S. Koh, I. Sarady, Surface Cleaning of Iron Artefacts by Lasers, , στο Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 95-100,

[26]A. deCruz, M.L. Wolbarsht, R.A. Palmer, S.E. Pierce, E. Adamkiewicz Er:YAG Laser Applications on Marble and Limestone Sculptures with Polychrome and Patina Surfaces, στο Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 113-124,

[27]M. Strzelec, J. Marczak, A. Koss, R. Szambelan Overpaint Removal on a Gilded Wooden Bas-Relief Using a Nd:YAG Laser at 1.064 μm , , στο Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 133-138,

[28]M.Abraham, O. Madden, T. Learner, C. Havlik, Evaluation of the Effects of Laser Irradiation on Modern Organic Pigments , στο Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 263-275,

[29]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, στο Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 311-318

[30] P. Lovoï, J.F. Asmus, An X-Ray Microprobe for In-Situ Stone and Wood Characterization, στο Laser in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Vol 100, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 353-356,

[31]Πηγή: www.science4heritage.org

[32]Πηγή: www.science4heritage.org Αρχική πηγή: Pezzati et al., in Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science

[33]L. Marras, R. Fontana, M.C. Gambino, M. Greco, M. Materazzi, E. Pampaloni, A. Pelagotti, L. Pezzati, and P. Poggi, Integration of Imaging Analysis and 3D Laser Relief of Artworks: A Powerful Diagnostic Tool, στο Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Osnabruck, Germany, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 485-492,

[34]Stefano SFARRA, Philipp HUKÉ, Panagiotis THEODORAKEAS, Domenica PAOLETTI, Nicolas P. AVDELIDIS, Dario AMBROSINI, Reiner KLATTENHOFF, Maria KOUÏ, (2011), Non-Destructive Testing (NDT) Methods used for the Study of Stone Frescoes, στο 6th NDT in Progress 2011 International Workshop of NDT Experts, 10-12 Οκτωβρίου 2011, Πράγα, Τσεχία,

[35]D.Ambrosini, D. Paoletti, R. Quaresima, G. Galli (2006), Frescoes Diagnostics : An integrated approach and a case, στο 1st EVA 2006 Vienna Conference, 27-30 Αυγούστου 2006, Βιέννη, Αυστρία,

[36]D. Dirksen, B. Kemper, A. Guttzeit, G. Bischoff, G. von Bally, Parallel Acquisition of 3-D Surface Coordinates and Deformations by Combining Electronic Speckle Pattern Interferometry and Optical Topometry, , στο Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Osnabruck, Germany, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 493-498,

[37]L. Collini (2011), A non destructive, contactless technique for the health monitoring of ancient frescoes, στο Structural Dynamics, Vol.3, Proceedings of the IMAC XXVIII, μέρος της σειράς Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Φλόριντα, ΗΠΑ,

[38]Giovanni M. Carlomagno, Carosena Meola, Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT, στο NDT & International 35, Δεκέμβριος 2002, 559-565,

[39]G. Schirripa Spagnolo, D. Paoletti, D. Ambrosini, G. Guattari (1997), Electro-optic correlation for in situ diagnostics in mural frescoes, στο Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society, Part A, Vol.6, No.5,

[40] P. Bison, A. Bortolin, G. Cadelano, G. Ferrarini, L. Finesso, F. Lopez, X. Maldague, Evaluation of frescoes detachments by partial least square thermography, 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Μπορντώ, Γαλλία, 7-11 Ιουλίου 2014,

[41]J.C.Candore, J.L.Bodnar, V.Detalle και P.Grossel, Assistance to the restoration of historical frescoes by stimulated infrared thermography, στο 10th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, Κεμπέκ, Καναδάς, 27-30 Ιουλίου 2010,

[42]V. Tornari, A. Bonarou, V. Zafiropulos, C. Fotakis, N. Smyrnakis, S. Stassinopoulos, Comparative Holography in the Conservation Structural Diagnosis: An El Greco Exemplary Exploitation, στο Lasers in the Conservation of Artworks, , στο Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Osnabruck, Germany, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 513-523,

[43]Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki/Κύμα>

[44]Κ. U. Ingard, Κύματα και ταλαντώσεις – Αρχές και Εφαρμογές, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008

[45]Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect

[46]Castellini P., Esposito E., Marchetti B., Paone N., Tomasini E.P, New applications of Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV) to non-destructive diagnostics of artworks: mosaics, ceramics, inlaid wood and easel painting, στο Journal of Cultural Heritage, Vol.4, Supplement 1, Lasers in the Conservation of Artworks- LACONA IV (Σεπτέμβριος 2001), Ιανουάριος 2003, 321-329, Εκδόσεις Elsevier,

[47]M. Martarelli, G.M. Reve(, C. Santolini (1998), On the use of laser Doppler Vibrometer for modal analysis- Analysis of the certainty associated to scanning systems calibration, στο Conference: 1998 IMAC XVI- 16th

International Modal Analysis Conference, Santa Barbara, Καλιφόρνια, 1750-1757,

[48]Paolo Castellini, Nicola Paone & Enrico Primo Tomasini (1994), The Laser Doppler Vibrometer as an Instrument for Nonintrusive Diagnostic of Works of Art: Application to Fresco Paintings, στο Optics and Lasers in Engineering, Vol.25, Issues 4-5, Οκτώβριος- Νοέμβριος 1996, 227-246

[49]Handbook on the use of lasers in conservation and conservation science, www.science4heritage.org

[50]L. Collini, R.Garziera, A contact-less diagnosis system for frescoes. Part two: Acoustic excitation–acoustic response, στο NDT & E International, Vol.56, Ιούνιος 2013, 76-81,

[51]P.Castellini, N.Paone (1995), Development of a measurement procedure for non-invasive detection of frescoes' detachments, στο 1995 IMAC XIII- 13th International Modal Analysis Conference, Nashville, ΗΠΑ, 1210-1213,

[52]G. Adams, J. Bucaro, E. Esposito, A.J. Kurdila, B. MArchetti, E.P. Tomasini, J.F. Vignola, A case study of frescoes Diagnostics by Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV) : The Brumidi Corridors ant the President's Room at the United States Capitol, , στο Lasers in the Conservation of Artworks, , στο Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Osnabruck, Germany, 15-18 Σεπτεμβρίου 2003, Osnabruck, Γερμανία, Springer Proceedings in Physics, 525-528,

[53]Paolo Castellini, Nicola Paone, Enrico Primo Tomasini (1996), The Laser Doppler Vibrometer as an Instrument for Nonintrusive Diagnostic of Works of Art : Application to Fresco Paintings, στο Optics and Laser in Engineering 25, 227-246,

[54]S. G. Tavares, A. Agnani, E. Esposito, M. Feligiotti, S. Rocchi, R. M. de Andrade, Comparative study between infrared thermography and laser Doppler vibrometry applied to frescoes diagnostic, στο 8th Conference on Quantitive Infrared Thermography, 27-30 Ιουνίου 2006, Padova, Ιταλία,

[55]Martarelli M., Castellini P., Quagliarini E. , Seri E., Lenci S., Tomasini E.P., SLDV for Assessing the State of Conservation of Historical Plasters on Historical Thin Vaults, άρθρο στο περιοδικό Research in Nondestructive Evaluation (Journal of the American Society for Nondestructive Testing), Vol.25, Issue 4, Μάρτιος 2014, 218-234,

[56] Enrico Esposito, Report on Measurement Sessions by Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV), Ground Penetrating Radar (GPR) and Infrared Thermography(IR-T), στο Culture 2000 “Saving Sacred Relics of European Medieval Cultural Heritage”, 2006,

[57] P. Castellini, Enrico Esposito, V. Legoux, N. Paone, M. Stefanaggi, E.P. Tomasini, On field validation of non-invasive laser scanning vibrometer measurement of damaged frescoes: experiments on large walls artificially aged, στο Journal of Cultural Heritage, Vol.1, Supplement 1, 1 Αυγούστου 2000, 349-356,

[58] Πηγή: <http://www.monastiria.gr/kriti/nomos-xanion/iera-moni-gonias-xania/>