

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΟΙ ΞΥΛΙΝΕΣ ΘΥΡΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ:  
ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ  
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ**

ΕΛΛΗ ΦΡΑΓΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ  
ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΠΟΥΡΝΟΥ

**ΑΘΗΝΑ 2023**



UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
SCHOOL OF APPLIED ARTS AND CULTURE  
DEPARTMENT OF CONSERVATION OF ANTIQUITIES  
AND WORKS OF ART

DIPLOMA THESIS

**THE WOODEN DOORS OF THE MEDIEVAL CITY OF RHODES:  
A PRELIMINARY STUDY FOR ASSESING THEIR  
STATE OF PRESERVATION**

**ELLI PELAGIA FRAGKI**

Supervisor:

**ANASTASIA POURNOU**

**ATHENS, SEPTEMBER 2023**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ**  
**ΤΜΗΜΑ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΣ**

**Τίτλος εργασίας:** Οι ξύλινες θύρες της μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου: προκαταρκτική μελέτη αξιολόγησης της κατάστασης διατήρησης

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένης και της Εισηγήτριας**

Η πτυχιακή εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Αναστασία Πούρνου	Καθηγήτρια/ Επιβλέπουσα Καθηγήτρια	
2	Σταμάτιος Μπογιατζής	Καθηγητής/ Μέλος εξεταστικής επιτροπής	
3	Αλέξιος Στεφανής	Επίκουρος καθηγητής/ Μέλος εξεταστικής επιτροπής	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Έλλη Πελαγία Φραγκή του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 52016013 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Τεχνών και Πολιτισμού του Τμήματος Συντήρησης Αρχαιοτήτων και Έργων Τέχνης, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Η Δηλούσα



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τελειώνοντας την πτυχιακή μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Τον κ. Α. Σαμπατάκο για την πολύτιμη βοήθεια στην δημιουργία των δοκιμίων, την άμεση ανταπόκριση να μου παραχωρήσει ξύλο φτελιάς, αλλά και για την προθυμία του να μου παρέχει κάθε είδους πληροφορία.

Τον κ. Σ. Μπογιατζή, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε παραχωρώντας μου πρόσβαση στο FTIR, αλλά κυρίως για την πολύτιμη συμβολή του στην ερμηνεία των φασμάτων.

Την κα Μ. Χατζηδάκη για την παραχώρηση της θερμοκάμερας, για την ενθάρρυνση και για όλες τις υπέροχες συμβουλές της.

Τον κ. Α. Στεφανή που μου επέτρεψε την πρόσβαση στο θάλαμο κλιματισμού, για την καθοδήγηση και την υπομονή που έδειξε όλο το διάστημα της έρευνάς μου.

Τον φίλο μου και ξυλουργό Αποστόλη Περδίκη για το κομμάτι μουριάς που μου παραχώρησε.

Τον κ. Φ. Σιδηρόπουλο, συντηρητή της ΕΦΑ Δωδεκανήσου, για την έμπρακτη βοήθεια και συνεισφορά του στις *in situ* μετρήσεις, όπως και τον κ. Σ. Πατατούκο για την παραχώρηση του εξοπλισμού από την ΕΦΑ.

Τον κ. Α. Καραμπότσο για την άδεια χρήσης του εργαστηριακού χώρου του SEM για τις πειραματικές μου μετρήσεις.

Κυρίως όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Α. Πούρνου, επιβλέπουσα καθηγήτρια της εργασίας μου, για την απίστευτη στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη στιγμή που της πρότεινα το θέμα και καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου. Για τη βοήθεια, την έμπνευση, την καθοδήγηση, την υπομονή, τη γενναιοδωρία, τη συνεχή της παρουσία και την κάθε στιγμή που έκανε ό,τι περνούσε απ' το χέρι της για να προχωρήσει και να τελειώσει αυτή η εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους αγαπημένους μου ανθρώπους που με τον έναν ή τον άλλο τρόπο με βοήθησαν και με στήριξαν όλο αυτό το διάστημα.

**ΟΙ ΞΥΛΙΝΕΣ ΘΥΡΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ: ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ  
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ**

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ .....	2
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>7</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Η ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗ ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ .....	10
1.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	10
1.1.2 ΡΥΜΟΤΟΜΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ.....	11
1.1.3 ΟΧΥΡΩΣΗ .....	13
1.1.4 ΠΥΛΕΣ ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΗΣ .....	15
1.2 ΕΚΘΕΣΗ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	22
1.2.1 ΦΩΤΟ-ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ (UV).....	22
1.2.2 ΥΓΡΑΣΙΑ .....	23
1.2.3 ΒΙΟΑΛΛΟΙΩΣΗ.....	26
1.2.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ.....	28
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ - (Non-Destructive Testing, NDT) .....	28
1.4 ΣΚΟΠΟΙ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ .....	29
<b>2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ.....</b>	<b>30</b>
2.1 ΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΛΙΚΟ.....	30
2.1.1 ΟΙ ΘΥΡΕΣ ΤΩΝ ΠΥΛΩΝ ΑΓΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΚΑΙ ΑΡΝΑΛΔΟΥ.....	30
2.1.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΞΥΛΟΥ.....	38
2.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΔΑΣΟΠΟΝΙΚΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΞΥΛΟΥ .....	40
2.2.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ.....	40
2.2.2 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ .....	41
2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ .....	42
2.3.1 ΘΥΡΕΣ.....	42
2.3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ .....	47
2.3.3 ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ .....	47
2.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ .....	47
2.4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	48
2.4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΘΥΡΩΝ .....	50

2.5	ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ .....	51
2.5.1	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ .....	52
2.5.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΣΤΙΣ ΘΥΡΕΣ .....	54
2.6	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER (FTIR).....	54
2.6.1	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ – FTIR ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ .....	55
2.6.2	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ – FTIR ΣΤΙΣ ΘΥΡΕΣ .....	58
2.7	ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ .....	59
2.7.1	ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	60
2.7.2	ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΘΥΡΩΝ.....	61
<b>3</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>62</b>
3.1	ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΔΑΣΟΠΟΝΙΚΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΞΥΛΟΥ .....	62
3.1.1	ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ.....	62
3.1.2	ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΞΥΛΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	64
3.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ .....	67
3.2.1	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	67
3.2.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΘΥΡΩΝ .....	70
3.3	ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ .....	73
3.3.1	ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ.....	73
3.3.2	ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΣΤΙΣ ΘΥΡΕΣ.....	75
3.4	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER (FTIR).....	77
3.4.1	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ FTIR ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ.....	77
3.4.2	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ FTIR ΣΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΘΥΡΕΣ .....	82
3.5	ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ .....	94
3.5.1	ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	94
3.5.2	ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΘΥΡΩΝ.....	95
3.6	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	97
3.6.1	ΔΟΚΙΜΙΑ .....	97
3.6.2	ΘΥΡΕΣ.....	98
<b>4</b>	<b>ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>100</b>
4.1	ΔΟΚΙΜΙΑ .....	100
4.1.1	ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ.....	100
4.1.2	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	100
4.2	ΠΟΡΤΕΣ ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΗΣ ΡΟΔΟΥ .....	105
4.2.1	ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ.....	105
4.2.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ .....	105
4.2.3	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΘΥΡΩΝ .....	109

4.3	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	111
<b>5</b>	<b>ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>113</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΦΙΑ .....</b>	<b>114</b>



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την προκαταρκτική αξιολόγηση με μη καταστρεπτικές τεχνικές, της κατάστασης διατήρησης δύο ξύλινων θυρών της Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου. Οι θύρες, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από ξύλο μουριάς (*Morus spp.*) ή/και φτελιάς (*Ulmus spp.*), ανήκουν στις δύο πύλες «Αγίου Αθανασίου» και «Αρνάλδου».

Η αξιολόγηση έγινε *in situ* και περιλάμβανε τη χρήση φασματοσκοπίας υπερύθρου (FTIR), ηλεκτρικών υγρόμετρων διηλεκτρικής σταθεράς και ηλεκτρικής αντίστασης, θερμογραφία υπερύθρου, όπως και χρωματομετρία. Η εφαρμογή των μεθόδων έγινε σε επιλεγμένα σημεία των θυρών τα οποία ανταποκρίνονταν σε χαρακτηριστικά διαφορετικές μακροσκοπικά, εικόνες διατήρησης. Με βάση τα αποτελέσματα, επιχειρήθηκε να συσχετιστεί η μακροσκοπική εικόνα της κατάστασης διατήρησης του ξύλου με την εναπομείνουσα χημική του σύσταση, την περιεχόμενη υγρασία του, την θερμική του εικόνα και το χρώμα του.

Για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων, οι ίδιες μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε σομφό και σε εγκάρδιο ξύλο υγιών δοκιμίων *Morus spp.* τα οποία υποβλήθηκαν σε ισόθερμη προσρόφηση υγρασίας (23 °C και 0%, 25%, 50%, 75%, 94% RH), ώστε να διαπιστωθεί το εάν και πώς αυτές οι μέθοδοι ανταποκρίνονται στις διαφορετικές τιμές περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου στο κάθε στάδιο προσρόφησης.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή των μεθόδων στα δοκίμια, απέδειξαν ότι όλες οι μέθοδοι μπορούν αξιόπιστα να αποτυπώσουν και να εκτιμήσουν τις αλλαγές στην περιεχόμενη υγρασία του ξύλου. Ιδιαίτερα, με το FTIR ήταν δυνατόν να παρακολουθηθεί η σταδιακή χημική δέσμευση των μορίων του νερού στο ξύλο.

Τα αποτελέσματα αξιολόγησης της κατάστασης διατήρησης των δύο θυρών, έδειξαν ότι υπάρχει θετικός συσχετισμός της αλλοίωσης των χημικών συστατικών του ξύλου με την μακροσκοπική εικόνα του. Οι τιμές περιεχόμενης υγρασίας και η χρωματική αλλοίωση του ξύλου έδειξαν να συσχετίζονται με την κατάσταση διατήρησής του όταν αυτή ήταν μέτρια (π.χ. θύρα «Αρνάλδου») και όχι όταν ήταν κακή (π.χ. θύρα «Αγίου Αθανασίου»). Η θερμική εικόνα του ξύλου εμφανίστηκε να επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις συνθήκες μέτρησης, και δεν θεωρείται ότι μπορεί να αποτυπώσει και να εκτιμήσει αξιόπιστα την εικόνα της περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου ή της κατάστασης διατήρησής του σε εξωτερικό περιβάλλον.

Ως εκ τούτου, η φασματοσκοπία υπερύθρου σε συνδυασμό με τη χρήση χρωματομετρίας και ηλεκτρικών υγρόμετρων μπορούν να αποτυπώσουν και να εκτιμήσουν την κατάσταση διατήρησης ενός ξύλινου αντικειμένου. Εάν υπάρχουν δε, δεδομένα μετρήσεων αναφοράς, αυτές οι τεχνικές μπορούν να ελέγχουν και να παρακολουθούν την κατάσταση διατήρησής του, και στην πάροδο του χρόνου.

Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, συνέβαλαν στην κατανόηση των μηχανισμών αλλοίωσης των υπό μελέτη θυρών καθώς και στην τεχνολογία κατασκευής τους και δημιούργησαν δεδομένα αναφοράς απαραίτητα για την μελλοντική προληπτική ή/και ενεργητική τους συντήρηση.

**Λέξεις κλειδιά:** Ξύλινες πόρτες, Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου, μη καταστρεπτικές τεχνικές, φασματοσκοπία υπερύθρου (FTIR), θερμογραφία υπερύθρου, ισόθερμη προσρόφηση υγρασίας, ηλεκτρικά υγρόμετρα, χρωματομετρία, περιεχόμενη υγρασία

## ABSTRACT

This dissertation deals with a preliminary assessment of the state of preservation of two wooden doors of the Medieval City of Rhodes, with non-destructive techniques (NDT). The doors, which are made of mulberry (*Morus* spp.) and/or elm (*Ulmus* spp.) wood, belong to the two gates of "Agios Athanasios" and "Arnaldos".

The assessment was implemented *in situ* and included the use of infrared spectroscopy (FTIR), electrical hygrometers of dielectric constant and electrical resistance, infrared thermography, as well as colorimetry. All methods were applied to selected points of the doors which corresponded to characteristically different macroscopic condition. Based on the results, it was attempted to correlate this macroscopic image of the wood's state of preservation, with its residual chemical composition, its moisture content, its thermal image and its color.

For the proper interpretation of the results, the same techniques were applied to the sapwood and heartwood of sound wood samples of *Morus* spp. which were conditioned isothermally at 23°C with relative humidity steps of 0%, 25%, 50%, 75%, 94%, in order to establish whether and how these techniques respond at the different moisture content values of wood in each absorption step.

Results obtained from the application of the NDT techniques to the *Morus* spp. samples proved that all techniques can reliably record and assess the changes in the moisture content of wood. In particular, with FTIR it was possible to monitor the gradual chemical binding of water molecules to wood.

The assessment of the condition of the two doors with the NDT techniques used, showed that there is a positive correlation between the alteration of the wood chemistry with its macroscopic appearance. Wood moisture content values and color alteration were shown to correlate with a moderate state of preservation (i.e. "Arnaldos" door), whilst, they were not shown to correlate with a poor state of preservation (i.e. "Agios Athanasios" door). The thermal image of wood appeared to be highly biased by the experimental conditions, and thus it is considered that infrared thermography cannot reliably record and estimate the wood moisture content or its state of preservation in outdoor environments.

Consequently, it appears that infrared spectroscopy combined with colorimetry and the use of electrical hygrometers can record and assess the state of preservation of a wooden object. Furthermore, if reference data are available, these techniques can check and monitor the state of preservation over time as well.

Finally, the results of this work contributed to the understanding of the deterioration mechanisms of the doors under study as well as their manufacturing technology, and produced reference data required for their future preventive and/or remedial conservation.

**Key words:** Wooden doors, Medieval City of Rhodes, non-destructive techniques, infrared spectroscopy (FTIR), infrared thermography, isotherm, electric hygrometers, colorimetry, wood moisture content

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Η ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗ ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ

### 1.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η καίρια γεωγραφική θέση της Ρόδου στο πέρασμα από την νοτιοανατολική Μεσόγειο στο Αιγαίο Πέλαγος και τη Δύση, το ήπιο κλίμα και η εύφορη γη, συνέβαλαν ώστε το νησί να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό εμπορικό κέντρο με πλούσια ιστορία. Ταυτόχρονα, η γεωπολιτική σημασία της Ρόδου την κατέστησε ανέκαθεν ελκυστική σε κατακτητές (Ζυμή *et al.*, 2015).

Σύμφωνα με τα αρχαιολογικά δεδομένα, η Ρόδος κατοικούνταν ήδη από την νεολιθική εποχή. Από τη Μεσοελλαδική περίοδο (1900-1600 π.Χ.), στο νησί αποδεικνύεται ότι είχαν εγκατασταθεί Έλληνες. Κατά τους μυκηναϊκούς χρόνους, τα πλούσια ευρήματα από τα νεκροταφεία διαφόρων πόλεων της Ρόδου φανερώνουν ότι το νησί ακμάζει. Μετά την άφιξη των Δωριέων στη Ρόδο όμως, τρεις πόλεις φαίνεται να ευημερούν ιδιαίτερα, η Ιαλυσός, η Λίνδος και η Κάμιρος. Οι τρεις αυτές πόλεις φαίνεται ότι μεταξύ τους ζούσαν ειρηνικά και αναπτύχθηκαν οικονομικά μέχρι τον 5<sup>ο</sup> αι. π.Χ., όταν η κυριαρχία των περσικών δυνάμεων ανέκοψε την ανάπτυξή τους. Η Ρόδος έγινε μέλος της Αθηναϊκής Συμμαχίας στα μέσα του ίδιου αιώνα, μετά τη ναυμαχία της Σαλαμίνας. Τις τελευταίες δεκαετίες του 5<sup>ου</sup> αι. π.Χ., ο Ιαλύσιος Δωριεύς, έπεισε τους Ρόδιους να κτίσουν μια μεγάλη και σύγχρονη πόλη και να «συνοικισθούν» εκεί οι πολίτες και των τριών πόλεων του νησιού (Ζυμή *et al.*, 2015). Έτσι, το 408 π.Χ. πρωτοδημιουργήθηκε η αρχαία πόλη στο βόρειο άκρο του νησιού και ονομάστηκε Ρόδος. Στα κατάλοιπα αυτής της πόλης, με συνεχή κατοίκηση της περιοχής, “πατάει” και σήμερα η σύγχρονη πόλη της Ρόδου (ΔΠΜΠ, 2003, Μανούσου-Ντέλλα, 2000).

Το 305/4 π.Χ. ο Δημήτριος Πολιορκητής επιχειρεί ανεπιτυχώς να πολιορκήσει την πόλη της Ρόδου (Παπαχριστοδούλου, 1994). Κατά τα επόμενα ελληνιστικά χρόνια, η Ρόδος καθίσταται μια λαμπρή πολιτεία με στρατηγική σημασία και ισχυρή δύναμη, αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους οικισμούς στο Αιγαίο (Μανούσου-Ντέλλα, 2001). Ωστόσο αργότερα, κατά τα παλαιοχριστιανικά και βυζαντινά χρόνια παύει να είναι τόσο ισχυρή. Το 653 μ.Χ. κατακτιέται από τους Άραβες και το 1204 περιέρχεται στην κατοχή του ανεξάρτητου άρχοντα Λέοντα Γαβαλά. Λίγα χρόνια μετά, το 1233, πολιορκείται από το βυζαντινό αυτοκράτορα Ιωάννη Βατάτζη. Στη συνέχεια, το 1248, αναφέρεται ότι οι Γενουάτες βρήκαν αφρούρητο το κάστρο της Ρόδου και το κατέλαβαν για μικρό χρονικό διάστημα αφού το 1249 πολιορκήθηκε εκ νέου από το Δούκα Ιωάννη Καντακουζηνό (Ζυμή *et al.*, 2015).

Το 1309 η Ρόδος κατακτήθηκε από τους Ιππότες του Τάγματος του Αγίου Ιωάννη της Ιερουσαλήμ. Τα επόμενα 200 χρόνια αποτέλεσαν σταθμό για την ιστορία του νησιού. Με έδρα τη Ρόδο,

οι ισχυροί πλέον πολιτικά και στρατιωτικά Ιωαννίτες, κυριάρχησαν στους εμπορικούς δρόμους Ανατολής-Δύσης (Ζυμή *et al.*, 2015). Την περίοδο της ιπποτοκρατίας η Ρόδος απέκτησε ξανά σημαντική θέση, όντας το πέρασμα της Ευρώπης προς την Ανατολή και αντίστροφα, στις εμπορικές συναλλαγές και τις πολιτισμικές επιρροές. Παράλληλα, το νησί αναπτύχθηκε σημαντικά σε όλους τους τομείς μέσω των σχέσεων με την Δυτική Ευρώπη: γράμματα, τέχνες, βιοτεχνία, τραπεζικές ενασχολήσεις κ.ά., φέροντας την ανάλογη οικονομική, κοινωνική και πολιτιστική ανάπτυξη (ΔΠΜΠ, 2003, Μανούσου-Ντέλλα, 2001).

Η πρώτη μεγάλη τουρκική πολιορκία της Ρόδου πραγματοποιήθηκε το 1480 με επικεφαλής τον Μεσίχιν Πασά Παλαιολόγο. Η άλωση της Ρόδου από τους Οθωμανούς Τούρκους όμως, έγινε αργότερα με την αιματηρή πολιορκία που έληξε τον Δεκέμβριο του 1522 υπό τον Σουλεϊμάν τον Μεγαλοπρεπή. Τότε, πολλοί αστοί αποχώρησαν μαζί με τους ιππότες ακολουθώντας τους στη Μάλτα, την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 1523 (Παπαχριστοδούλου, 1994). Κατά την περίοδο της Τουρκοκρατίας από το 1523 έως το 1912 με την κατάληψη της Ρόδου από τους Ιταλούς, το νησί έπαψε να αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα λιμάνια-σταθμούς και μετατράπηκε σε μια επαρχιακή πόλη (Μανούσου-Ντέλλα, 2001).

Η περίοδος από την Ιταλική κατάληψη της Δωδεκανήσου το 1912 και μέχρι την αποχώρησή τους από το νησί το 1945, ήταν μια περίοδος γεμάτη έργα που καθόρισαν την σημερινή εικόνα του νησιού. Οι Ιταλοί κατά την παραμονή τους στη Ρόδο προχώρησαν σε σημαντική επιστημονική και αρχαιολογική έρευνα, σε εκτεταμένα έργα αποκατάστασης και πολεοδομικές επεμβάσεις. Το 1920 κήρυξαν «μνημειακή ζώνη» τη μεσαιωνική πόλη και άλλα σημεία του νησιού, τα οποία προστάτευσαν και ανάδειξαν (Κόλλιας, 2001). Τα χρόνια 1945-1947 η Ρόδος πέρασε σε Αγγλική και στη συνέχεια σε Ελληνική Στρατιωτική διοίκηση. Η ενσωμάτωση της Δωδεκανήσου στην Ελλάδα έγινε το 1947 (Παπαχριστοδούλου, 1994). Τη χρονιά αυτή, η Ρόδος και η μεσαιωνική πόλη βρέθηκαν ερειπωμένες λόγω των βομβαρδισμών και των λεηλασιών του Β' Παγκοσμίου πολέμου (Κόλλιας, 2001). Τα χρόνια που ακολούθησαν μέχρι και σήμερα, η Αρχαιολογική Υπηρεσία έχει προβεί σε συστηματικά έργα συντήρησης και αποκατάστασης. Τέλος, από το 1988 η μεσαιωνική πόλη της Ρόδου ανήκει στη λίστα των μνημείων παγκόσμιας κληρονομιάς της Unesco (Unesco, 2023).

### **1.1.2 ΡΥΜΟΤΟΜΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ**

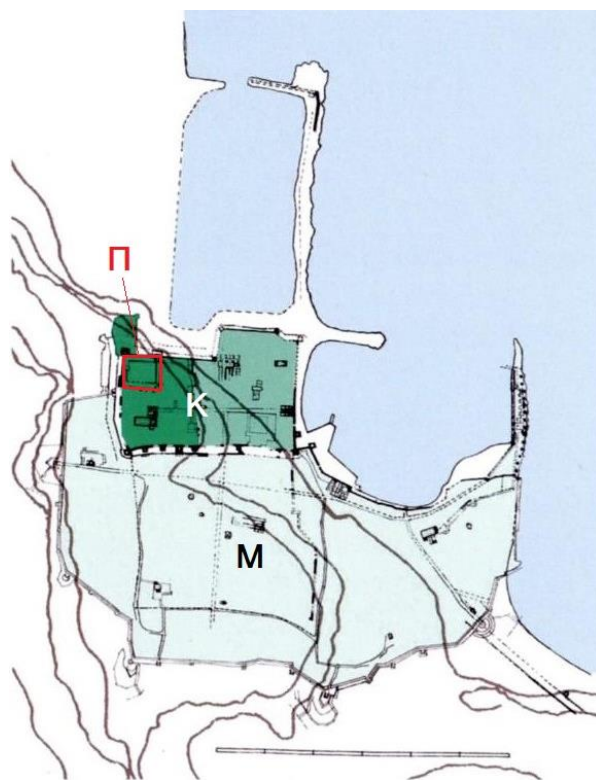
Η μεσαιωνική πόλη κατά την Βυζαντινή περίοδο, και ειδικότερα από το τελευταίο τέταρτο του 7<sup>ου</sup> αι. μ.Χ. έως το 1309, άρχισε να διαμορφώνεται πάνω στα ερείπια του προγενέστερου ελληνιστικού οικισμού, χωρίς να ακολουθεί το «Ιπποδάμειο<sup>1</sup>» ρυμοτομικό σύστημα που τηρούνταν από το 408 π.Χ.

---

<sup>1</sup> Πολεοδομικό σύστημα με κάθετες μεταξύ τους οδούς που σχηματίζουν οικοδομικά τετράγωνα (ΔΠΜΠ, 2003)

(Μανούσου-Ντέλλα, 2000). Για την κατασκευή των κτηρίων χρησιμοποιήθηκαν οικοδομικά υλικά από παλαιότερα κτίσματα της ελληνιστικής και παλαιοχριστιανικής πόλης. Κατά τον 11<sup>ο</sup> και 12<sup>ο</sup> αι., η πόλη έλαβε ως προς την αμυντική της οργάνωση την τυπική μορφή των βυζαντινών και δυτικοευρωπαϊκών πόλεων (Κόλλιας, 2001) και χωρίστηκε σε τρεις αμυντικές ζώνες που περιλαμβάναν i) το «Φρούριο» ή κάστρο, ii) την «Ακρόπολη» και iii) τη «Χώρα» ή Κάτω Πόλη. Η Ακρόπολη ήταν τμήμα του ΒΔ πρωτοβυζαντινού Φρουρίου το οποίο είχε διάταξη χαρακτηριστικής πομπικής μέσης οδού (στη θέση της σημερινής οδού Ιπποτών<sup>2</sup>) και συνέδεε την Ακρόπολη με την Παναγιά του Κάστρου καταλήγοντας στην πύλη της θάλασσας. Η Χώρα βρισκόταν νότια από το Φρούριο και τειχίστηκε σε δεύτερη φάση (Μανούσου-Ντέλλα, 2001, Κόλλιας, 2001).

Από τις αρχές του 15<sup>ου</sup> αι. η ιπποτική πόλη οργανώνεται σε δύο ενότητες, το Κολλάκιο και το Μπούργκο (εικ. 1.1) (Μανούσου-Ντέλλα, 2001). Το Κολλάκιο (προγενέστερο Φρούριο) είχε αυτόνομη οχύρωση που περιλάμβανε το παλάτι του Μεγάλου Μαγίστρου (ταυτίζεται με την θέση της Ακρόπολης), τα καταλύματα των «γλωσσών» των ιπποτών του Τάγματος, την καθολική εκκλησία του αγίου Ιωάννη, το Οπλοστάσιο και το Νοσοκομείο. Το Μπούργκο το οποίο ήταν η περιοχή κατοικίας των αστών (Ελλήνων και Λατίνων) και το εμπορικό κέντρο. Το Μπούργκο αποτελούσε το νότιο και μεγαλύτερο τμήμα της πόλης και συνεχώς μεγάλωνε όσο αυξανόταν ο πληθυσμός με επέκταση της οχύρωσης προς συνοικίες που πριν ήταν εκτός των τειχών (ΔΠΜΠ, 2003, Μανούσου-Ντέλλα, 2000).



**Εικόνα 1.1** Σχέδιο της οργάνωσης της Ιπποτικής Πόλης, (Π): Παλάτι Μεγάλου Μαγίστρου, (Κ): Κολλάκιο, (Μ): Μπούργκο (βασισμένο στην Μανούσου-Ντέλλα, 2010).

Η εποχή της Τουρκοκρατίας 1523 έως το 1912 υπήρξε μια μακρά περίοδος συντήρησης των μεσαιωνικών κτισμάτων και οχυρώσεων. Μικρές μετατροπές έλαβαν μέρος στα δημόσια κτήρια για να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες της Οθωμανικής Διοίκησης (Μανούσου-Ντέλλα, 2001). Το Παλάτι του Μεγάλου Μαγίστρου μετατράπηκε σε φυλακές, ενώ το Νοσοκομείο διατήρησε την χρήση του μέχρι τον

<sup>2</sup> Η οδός Ιπποτών ήταν η κύρια οδός των μεσαιωνικών χρόνων όπου ήταν χτισμένα τα καταλύματα των Γλωσσών (Ζυμή *et al.*, 2015), σήμερα αποτελεί σημαντικό τουριστικό προορισμό.

19<sup>ο</sup> αι., οι εκκλησίες εντός των τειχών μετατράπηκαν σε μουσουλμανικά τεμéné, ενώ ταυτόχρονα, οικοδομήθηκαν επιπλέον μεγαλοπρεπή τεμéné και συγκροτήματα κτιρίων κοινής ωφέλειας.

Μεγάλες καταστροφές στην τειχισμένη πόλη έλαβαν χώρα το δεύτερο μισό του 19<sup>ου</sup> αι. από μια περίοδο ισχυρών σεισμών και μια έκρηξη πυρίτιδας στον ναό του Αγίου Ιωάννη στην ζώνη του Κολλακίου το 1856. Η έκρηξη αφάνισε το κέντρο της ιπποτικής πόλης σε ακτίνα 300 μ. και επιπλέον την μοναστηριακή εκκλησία του Τάγματος μαζί με όλα τα κειμήλια που διατηρούνταν στο εσωτερικό της (Μανούσου-Ντέλλα, 2001).

Αργότερα, κατά την περίοδο της Ιταλοκρατίας από το 1912 τέθηκαν οι βάσεις για τη σύγχρονη διαμόρφωση του αστικού ιστού. Έγινε μετασχηματισμός του δομημένου περιβάλλοντος και έντονες πολεοδομικές παρεμβάσεις με εκτέλεση μεγαλόπνων δημόσιων έργων, ίδρυση σημαντικών βιομηχανικών μονάδων, ανάδειξη αρχαιολογικών χώρων και φυσικών τοπίων ιδιαίτερου κάλλους (Μανούσου-Ντέλλα, 2001). Οι Ιταλοί μετέφεραν το διοικητικό κέντρο της πόλης εκτός των τειχών. Προχώρησαν στην ανάπτυξη ελεύθερων χώρων και της οδού Ιπποτών, στην ανακατασκευή του παλατιού του Μεγάλου Μαγίστρου, στην κατεδάφιση ολόκληρων οικοδομικών τετραγώνων. Στα αναστηλωμένα ιστορικά κτίσματα δόθηκαν νέες χρήσεις, έγιναν εργασίες στερέωσης και αποκατάσταση των τειχών, διαμορφώθηκε ζώνη πρασίνου περιμετρικά της παλιά πόλης. Ωστόσο, το 1944 η πόλη της Ρόδου υπέστη ξανά σημαντικές αλλοιώσεις μετά από τον βομβαρδισμό της, από την αγγλική αεροπορία.

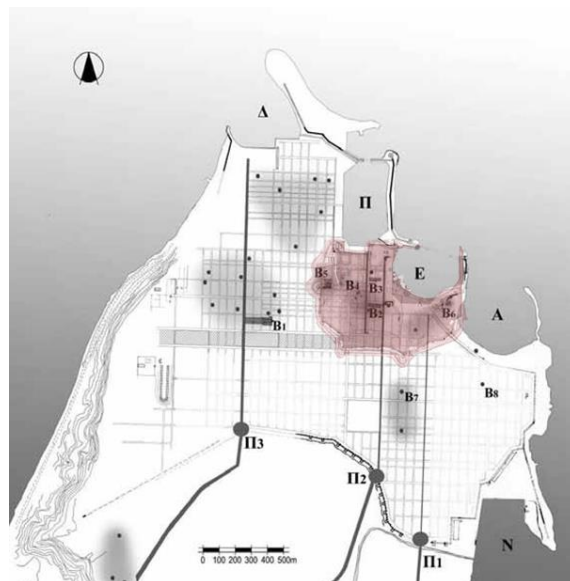
Οι ιταλικές παρεμβάσεις μεταξύ 1912 και 1948 υπήρξαν πολύ σημαντικές βγάζοντας την Ρόδο από την στασιμότητα της εποχής της Τουρκοκρατίας και παράλληλα καθοριστικές για την σημερινή εικόνα της. Στα πλαίσια των εκτεταμένων κατεδαφίσεων και αναστηλώσεων υπερτονίστηκαν σύγχρονα στοιχεία, ξένα προς τον χαρακτήρα της μεσαιωνικής πόλης, ενώ παράλληλα σημαντικά αρχαιολογικά στοιχεία χάθηκαν λόγω της έλλειψης τεκμηρίωσης (Μανούσου-Ντέλλα, 2001, Παπαχριστοδούλου, 1994).

### **1.1.3 ΟΧΥΡΩΣΗ**

Η ελληνιστική πόλη της Ρόδου εκτεινόταν ανάμεσα σε 5 λιμάνια (εικ. 1.2) και περιβάλλονταν με περίφημες οχυρώσεις για την εποχή τους. Τα τρία κεντρικά λιμάνια ταυτίζονται με τον σημερινό εμπορικό λιμένα στο κέντρο, το Μαντράκι στα βορειοδυτικά και το λιμένα της Ακαντιάς στα ανατολικά. Η οχύρωση αυτή διατηρήθηκε και επισκευάστηκε κατά τα ρωμαϊκά χρόνια μέχρι τα μέσα του 2<sup>ου</sup> αι. μ.Χ. (Μανούσου-Ντέλλα, 2000).



Για την μεσαιωνική πόλη, πολύ σημαντικό ρόλο είχαν επίσης τα λιμάνια. Από τον 7<sup>ο</sup> αι. η πόλη οργανώθηκε με βάση τον κεντρικό λιμάνι και η *Ακρόπολη* στο πρωτοβυζαντινό κάστρο χτίστηκε στο φυσικό έξαρμα του εδάφους που δεσπόζει των δύο κεντρικών λιμανιών. Η οχύρωση της πρωτοβυζαντινής περιόδου καταπάτησε προγενέστερα κτίσματα και τροποποίησε την δομή του αστικού ιστού σηματοδοτώντας τη μετάβαση από την αρχαία στην μεσαιωνική εποχή. Ήδη από τα τέλη του 7<sup>ου</sup> αιώνα, το *Φρουρίο* της πόλης ήταν οχυρωμένο, η πρώιμη αυτή οχύρωση αποτέλεσε τον πυρήνα από τον οποίο αναπτύχθηκαν τα υπόλοιπα οχυρωματικά έργα του μεσαίωνα (Μανούσου-Ντέλλα, 2013). Ταυτόχρονα, οι οχυρωματικοί περίβολοι αξιοποίησαν τους αρχαίους οδικούς άξονες και οι πύλες μετακινήθηκαν κατά μήκος αυτών των αξόνων, διατηρώντας όμως παράλληλα μια αντιστοιχία από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα (Μανούσου-Ντέλλα, 2000). Κατά τον 12<sup>ο</sup> με 13<sup>ο</sup> αι., η οχύρωση της πόλης επεκτάθηκε προς τα νότια συμπεριλαμβάνοντας την περιοχή της αρχαίας Αγοράς. Η διπλή αυτή οχύρωση του *Φρουρίου* και της *Κάτω Πόλης* αποτέλεσε την αφετηρία που σταδιακά επέκτειναν οι ιππότες (Μανούσου-Ντέλλα, 2013).



**Εικόνα 1.2** Σχηματική απεικόνιση της θέσης της τειχισμένης πόλης με τα 5 λιμάνια: (Δ) Δυτικός λιμένας, (Π) Πολεμικός, (Ε) Εμπορικός, (Α) Όρμος Ακαντιάς, (Ν) Νότιος λιμένας. Με σομόν χρώμα σημειώνεται η μεταγενέστερη-μεσαιωνική πόλη. (Βασισμένο στην Μανούσου – Ντέλλα, 2013)

Από τα πρώτα χρόνια της εγκατάστασης του Τάγματος του Αγίου Ιωάννη της Ιερουσαλήμ το 1309, έγιναν προσπάθειες ενίσχυσης και επέκτασης των παλαιών οχυρώσεων. Τα τείχη χτίστηκαν από έμπειρους τεχνίτες οι οποίοι αξιοποίησαν τόσο τη δική τους τεχνογνωσία όσο και πρότυπα οχυρώσεων από σημαντικά κέντρα της δυτικής Ευρώπης. Για την οικοδόμηση των οχυρωματικών έργων έγινε χρήση οικοδομικών υλικών από παλαιότερες κατασκευές και στη συνέχεια εντατικοποιήθηκε η λατόμηση<sup>3</sup> υλικού από την ευρύτερη περιοχή της πόλης αλλά και από άλλες περιοχές του νησιού (Μανούσου-Ντέλλα, 2001).

Από την οχύρωση της βυζαντινής περιόδου, διατηρήθηκε σταθερό το βόρειο όριο της τειχισμένης πόλης και πιθανών και το νότιο, ενώ η πόλη σταδιακά επεκτάθηκε προς τα δυτικά και κυρίως προς τα ανατολικά μέχρι τον ανατολικό μόλο του μεγάλου λιμένος (Μανούσου-Ντέλλα, 2013). Το τελικό μέγεθος που διατηρεί μέχρι και σήμερα η τειχισμένη πόλη είναι περίπου 420 στρέμματα και

<sup>3</sup> Η συστηματική λατόμηση του φυσικού βράχου συνδυάστηκε με την σταδιακή διάνοιξη και διεύρυνση της τάφρου (Μανούσου-Ντέλλα, 2000).

διαμορφώθηκε γύρω στο 1465 (Μανούσου-Ντέλλα, 2001). Διακριτό χρονολογικό όριο στην εξέλιξη των οχυρωματικών έργων και τον μετασχηματισμό της πόλης υπήρξε το 1480/1481 όταν έγινε η πρώτη πολιορκία από τους Οθωμανούς Τούρκους. Μετά την πολιορκία, ακολούθησε μια περίοδος ισχυρών σεισμών την οποία συνόδευσε, μέχρι την τελική άλωση της πόλης το 1522, ο σχεδόν πλήρης μετασχηματισμός της πόλης και η ενίσχυση των οχυρωματικών κατασκευών ώστε να ανταπεξέλθουν στους σεισμούς και στην νέα πολεμική τεχνική των κανονιών (Μανούσου-Ντέλλα, 2001).

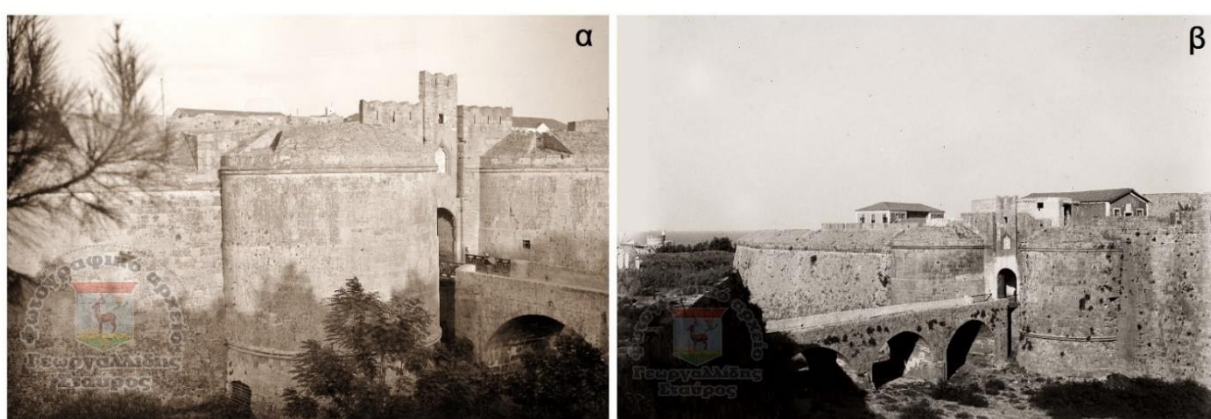
Όπως προαναφέρθηκε, η περίοδος της Τουρκοκρατίας από το 1523 έως το 1912 ήταν μία περίοδος κατά την οποία δεν συνέβησαν σημαντικές ρυμοτομικές και οχυρωματικές αλλαγές στην τειχισμένη πόλη της Ρόδου. Ωστόσο, το πάγωμα αυτό στις μνημειακές κατασκευές, με εξαίρεση τις εκτεταμένες επισκευές που ακολούθησαν την πολιορκία, έκανε την μεσαιωνική πόλη της Ρόδου ένα μοναδικό μνημείο της Ευρώπης, το οποίο διατηρεί την μεσαιωνική οχύρωση της πρώιμης μεταβατικής περιόδου προς την εποχή της πυρίτιδας και προσφέρει τη δυνατότητα για μελέτη των πειραματισμών στη στρατιωτική οχύρωση (Μανούσου-Ντέλλα, 2001).

Κατά την περίοδο της Ιταλοκρατίας έγινε διάνοιξη νέων πυλών στα τείχη της παλαιάς πόλης και παράλληλα τροποποίηση παλαιότερων. Τα χρόνια διοίκησης του Μάριο Λάγκο, 1924-1936, έγινε η αναστήλωση ορισμένων τμημάτων των τειχών και ανοίχτηκαν νέες πύλες ώστε να διευκολυνθεί η επικοινωνία της πόλης με το κάστρο και η διόδος των αυτοκινήτων (Παπαχριστοδούλου, 1994). Πλήθος συστηματικών έργων αποκατάστασης των μνημείων της μεσαιωνικής πόλης έλαβαν χώρα παράλληλα με την αρχαιολογική έρευνα τα επόμενα χρόνια που η Ρόδος πέρασε στην ελληνική διοίκηση και ιδιαίτερα από το 1985 και έκτοτε από την Αρχαιολογική Υπηρεσία.

#### **1.1.4 ΠΥΛΕΣ ΜΕΣΑΙΩΝΙΚΗΣ ΠΟΛΗΣ**

Σήμερα οι εξωτερικές πύλες της παλιάς πόλης είναι δέκα και ονομάζονται Ντ' Αμπουάζ, Αγίου Αθανασίου, Αγίου Ιωάννη, Αγίας Αικατερίνης, Θαλασσινή Πύλη, Αρνάλδου, Ακαντιάς, Πύλη Παναγίας, Πύλη Ταρσανά και Πύλη Ελευθερίας. Ορισμένες από τις πύλες αυτές, βρίσκονται σε θέσεις όπου υπάρχει πολλαπλή οχύρωση, περιλαμβάνοντας επιμέρους μικρότερες πύλες στο εσωτερικό τους. Κάποιες από αυτές, διέθεταν ξύλινες θύρες. Συγκεκριμένα, η πύλη Ντ' Αμπουάζ διαθέτει τρεις επιμέρους πύλες και οδηγεί στην εσωτερική πύλη του Αγίου Αντωνίου. Από αυτές, ξύλινες πόρτες διατηρούνται στην εξωτερική πύλη (ξύλινη πόρτα που φέρει μεταλλική επένδυση) (εικ. 1.3, 1.4.α) και την εσωτερική πύλη, στην περιοχή «Ζωγράφους» (εικ. 1.4.β, 1.5). Επιπλέον, η ενδιάμεση πύλη Ντ' Αμπουάζ διατηρούσε την ξύλινη υπέρθυρη δοκό όπως διακρίνεται σε παλαιότερες φωτογραφίες (εικ. 1.5), ενώ η πύλη του Αγίου Αντωνίου φαίνεται επίσης ότι είχε πόρτα (εικ. 1.6) που όμως σήμερα δεν

διατηρείται. Η πύλη του Αγίου Αθανασίου διαθέτει επίσης τρεις επιμέρους πύλες εκ των οποίων μόνο η εξωτερική διατηρεί ξύλινη θύρα (εικ. 1.7, 1.12.β). Η πύλη του Αγίου Ιωάννη αποτελείται από τρεις επιμέρους πύλες, την εξωτερική «Κόκκινη Πόρτα», η οποία διατηρεί ξύλινη θύρα με μεταλλική επένδυση (εικ. 1.8, 1.10.β), την ενδιάμεση πύλη, όπου διατηρείται ξύλινο υπέρθυρο δοκάρι (εικ. 1.9.α, 1.10.β) και την εσωτερική πύλη η οποία στο παρελθόν εμφανίζεται με το ένα φύλλο της (εικ. 1.9.β) και σήμερα δεν διατηρείται (εικ. 1.10.γ). Η Θαλασσινή πύλη διαθέτει ξύλινη πόρτα όπως φαίνεται από σχέδιο του 1828 από τον Bernard Eugène Antoine Rottiers (εικ. 1.11.α), σήμερα διατηρεί μόνο το επάνω ξύλινο υπέρθυρο δοκάρι (εικ. 1.11.β). Τέλος, η πύλη Αρνάλδου έχει δύο εξόδους, η πόρτα διατηρείται στην Β έξοδο της πύλης (εικ. 1.14, εικ. 2.8).



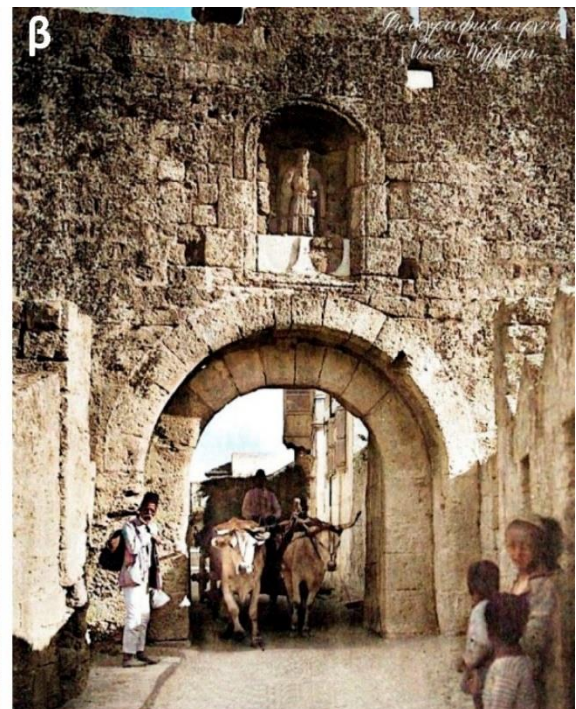
**Εικόνα 1.3** Εξωτερική πύλη Ντ' Αμπουάζ γενική άποψη με πόρτα που φέρει μεταλλική επένδυση, διακρίνονται: α) το δεξί φύλλο της πόρτας περί το 1908, β): το αριστερό φύλλο περί το 1920. (Γεωργαλλίδης, 2023)



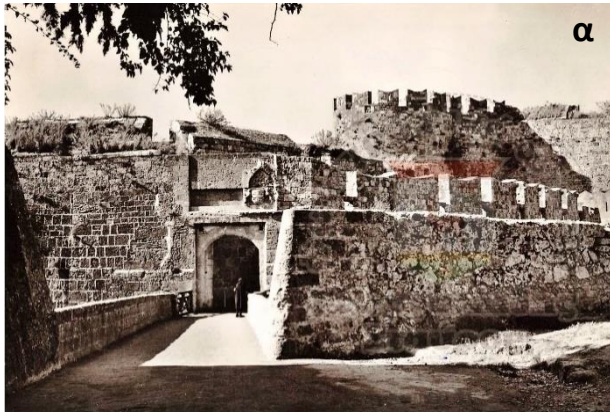
**Εικόνα 1.4** Ξύλινες πόρτες με τα υπέρθυρα δοκάρια τους από την πύλη Ντ' Αμπουάζ: α) με μεταλλική επένδυση από την εξωτερική πύλη, β) από την εσωτερική πύλη (ζωγράφος).



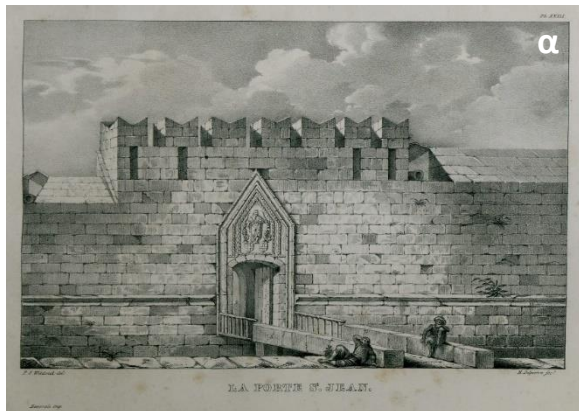
**Εικόνα 1.5** Η ξύλινη πόρτα από την εσωτερική πύλη Ντ' Αμπουάζ (ζωγράφει), στο βάθος διακρίνεται η υπέρθυρη δοκός από την ενδιάμεση πύλη: α) περί το 1912 (Γεωργαλλίδης, 2023), β) από την δεκαετία του 50' (Κολλίγρης, 2023).



**Εικόνα 1.6** Η ξύλινη πόρτα της πύλης Αγίου Αντωνίου η οποία δεν διατηρείται σήμερα: α) κλειστό το αριστερό φύλλο της πόρτας, περί το 1912 (Γεωργαλλίδης, 2023), β) διακρίνεται το δεξί φύλλο της πόρτας, περί το 1922 (Κολλίγρης, 2023).



**Εικόνα 1.7** Η εξωτερική πύλη Αγίου Αθανασίου: α) εξωτερική όψη, διακρίνεται το ξύλινο φύλλο της πόρτας, περί το 1936 (Γεωργαλλίδης, 2023), β) εσωτερική άποψη της πύλης σήμερα, με ξύλινη πόρτα που διατηρεί το ένα φύλλο και την υπέρθυρη δοκό.



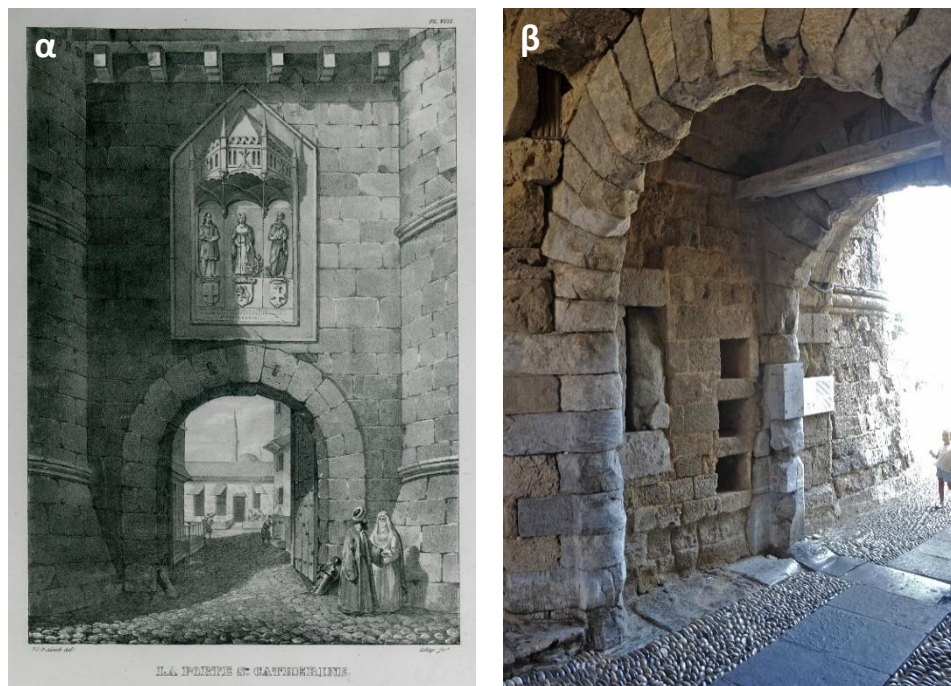
**Εικόνα 1.8** Εξωτερική πόρτα τις πύλης Αγίου Ιωάννη (Κόκκινη Πόρτα): α) σχέδιο του 1828 από τον Bernard Eugène Antoine Rottiers, διακρίνεται το δεξί φύλλο πόρτας (Λασκαρίδη, 2022), β) Ιταλοί στρατιώτες φυλάνε την πύλη, δεξιά φαίνεται το δεύτερο φύλλο της πόρτας που σήμερα δεν διατηρείται, 1912-1945 (Γεωργαλλίδη, 2023).



**Εικόνα 1.9** Πύλη Αγίου Ιωάννη: α) ενδιάμεση πύλη η οποία διατηρεί ξύλινη υπέρθυρη δοκό, περί το 1912 (Γεωργαλλίδης, 2023), β) εσωτερική πύλη στο βάθος διακρίνεται το δεξί φύλλο κάποιας πόρτας, περί το 1935 (Κολλίγρης, 2023).



**Εικόνα 1.10** Οι τρεις επιμέρους πύλες του Αγίου Ιωάννη όπως διατηρούνται σήμερα: α) εξωτερική πύλη (*Κόκκινη Πόρτα*) διατηρείται το ένα φύλλο της ξύλινης πόρτας με μεταλλική επένδυση και υπέρθυρη δοκό, μόνο η ξύλινη υπέρθυρη δοκός διατηρείται στην β) ενδιάμεση και γ) εσωτερική πύλη.

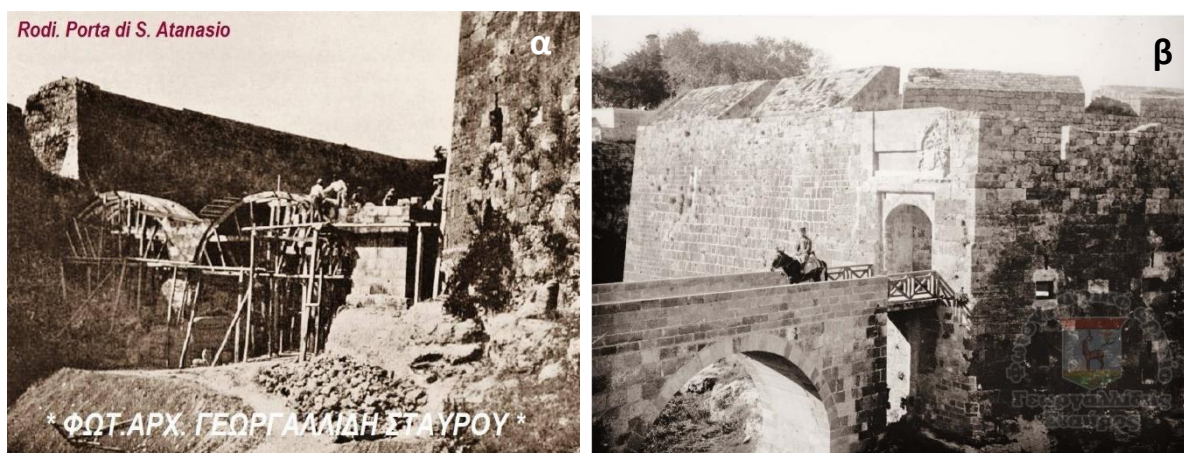


**Εικόνα 1.11** Θαλασινή πύλη: α) σχέδιο του 1828 από τον Bernard Eugène Antoine Rottiers που απεικονίζει το δεξιό φύλλο ξύλινης πόρτας (Λασκαρίδη, 2022), β) ξύλινο υπέρθυρο δοκάρι.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν ορισμένα ιστορικά στοιχεία για τις δύο πόρτες της Πύλης Αρνάλδου και της Πύλης Αγίου Αθανασίου, οι οποίες αποτελούν και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Χάριν ευκολίας, οι πόρτες των πυλών Αγίου Αθανασίου και Αρνάλδου, αναφέρονται ως πόρτα ή θύρα Αγίου Αθανασίου και Αρνάλδου αντίστοιχα.

## Πύλη Αγίου Αθανασίου

Σύμφωνα με την τουρκική παράδοση, ο κατακτητής της Ρόδου Σουλεϊμάν ο Μεγαλοπρεπής εισήλθε στην τειχισμένη πόλη από την πύλη του Αγίου Αθανασίου. Μετά την κατάκτηση της πόλης, έδωσε εντολή η πύλη αυτή να κλείσει ώστε να μην περάσει άλλος κατακτητής μετά από αυτόν, είναι όμως πιθανό η πύλη αυτή να είχε κλείσει, ήδη από την εποχή της Ιπποτοκρατίας για λόγους ασφάλειας<sup>4</sup> (Μανούσου-Ντέλλα, 2001). Το 1922, τέσσερις αιώνες μετά την τουρκική άλωση, οι Ιταλοί υπό την διοίκηση του Alessandro De Bosdari, άνοιξαν ξανά την πύλη του Αγίου Αθανασίου και αποκατέστησαν την πέτρινη εξωτερική γέφυρα που οδηγούσε στην ύπαιθρο (εικ. 1.12) (Μανούσου-Ντέλλα, 2001, Παπαχριστοδούλου, 1994). Το έργο αυτό είχε τόσο πρακτικό, όσο και συμβολικό χαρακτήρα, επικυρώνοντας την παρουσία των Ιταλών στο νησί. Μετά την αποκατάσταση, στην πύλη τοποθετήθηκε μια σχετική μαρμάρινη επιγραφή στα λατινικά (εικ. 1.13) η οποία εξυμνεί την αναστήλωση από τον Ιταλό διοικητή Alessandro De Bosdari το 1922 (Παπαχριστοδούλου, 1994).



**Εικόνα 1.12** Η εξωτερική πύλη Αγίου Αθανασίου (Γεωργαλλίδης, 2023): α) εργασίες αναστήλωσης στην πύλη υπό τον διοικητή Alessandro De Bosdari το 1922, β) μετά τις εργασίες, διακρίνεται το ξύλινο φύλλο της πόρτας, περί το 1922.

<sup>4</sup> Με βάση τα κοινά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας κατασκευής μεταξύ των ξύλινων θυρών της μεσαιωνικής πόλης και τις επιγραφές με οθωμανικό τούρκικο αλφάβητο που διατηρούνται σε ορισμένες από τις υπέρθυρες δοκούς, δημιουργούνται νέα δεδομένα για την χρονολογία κατασκευής των θυρών.



α

β

PRO-SALVTE  
 VICTORIS-EMANVELIS-III-ITALIAE-REGIS  
 ANNVM-PRINCIPATVS-XXII-FELICITER-AGENTIS  
 ALEXANDER-DE-BOSDARI-COMES  
 RHODI-CASTRI-RHODI-ET-DVODECIM-INSVLARVM-RECTOR  
 PONTE-A-FVNDAMENTIS-RENOVATO  
 PORTAM-ANGLIAE-PROFVGNACVLI  
 QVAM-SOLEIMANVS-IMPERATOR-MVRO-OBGLVSERAT  
 AD-PVBLICVM-COMMEANTIVM-VSVM  
 ANNO-M-C-M-XX-II-AB-OBSIDIONE-VREIS-O-C-C-C  
 RESTITVIT

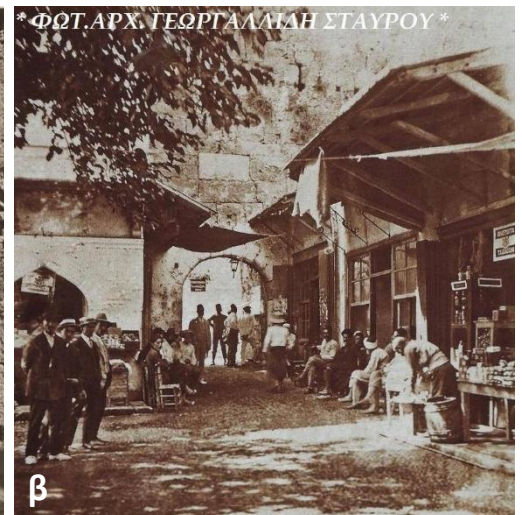
**Εικόνα 1.13** α) Μαρμάρινη υπέρυθρη επιγραφή που είναι τοποθετημένη στην ενδιάμεση πύλη Αγίου Αθανασίου, β) λεπτομέρεια του κειμένου της επιγραφής.

Πύλη Αρνάλδου:

Για την πύλη Αρνάλδου (εικ. 1.14), δεν βρέθηκαν στη σχετική βιβλιογραφία πληροφορίες για την ιστορική της εξέλιξη. Ωστόσο, έξω από την πύλη Αρνάλδου, στην περιοχή της Σκάλας υπήρχαν κτήρια και μαγαζιά για τα οποία επί Ιταλοκρατίας, μεταξύ 1924 και 1936, δόθηκε εντολή να κατεδαφιστούν (εικ. 1.15) (Παπαχριστοδούλου, 1994).



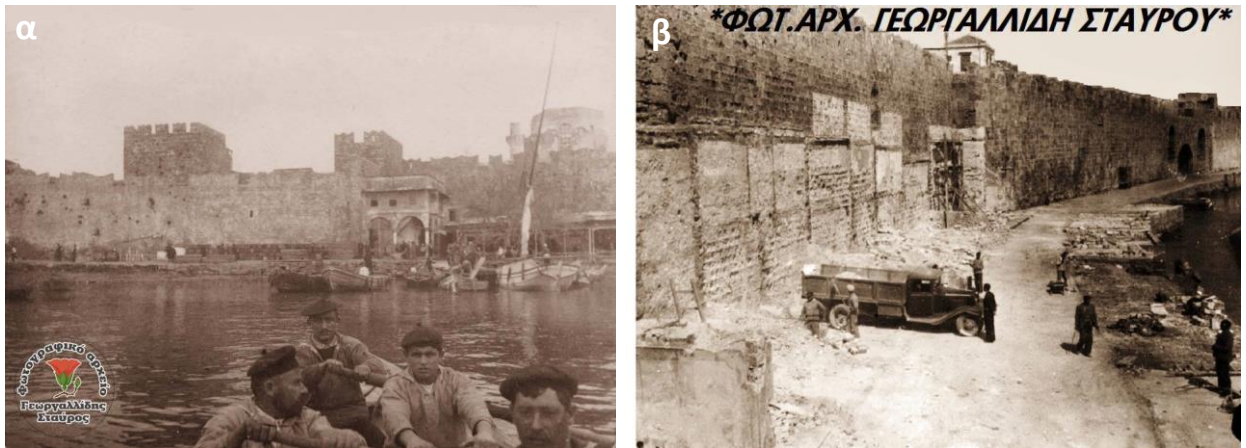
α



β

**Εικόνα 1.14** Η πύλη Αρνάλδου που οδηγούσε στα μαγαζιά της Σκάλας (Γεωργαλλίδης, 2023): α) η ξύλινη πόρτα στην πύλη Αρνάλδου περί το 1920 όταν διατηρούσε και τα δύο φύλα της, β) τα μαγαζιά στη Σκάλα έξω από την πύλη Αρνάλδου, στο βάθος διακρίνεται το δεξί φύλλο της πόρτας, περί το 1912.





**Εικόνα 1.15** Η παραθαλάσσια περιοχή της Σκάλας έξω από την πύλη Αρνάλδου (Γεωργαλλίδης, 2023): α) άποψη από την θάλασσα περί το 1889, β) εργασίες κατεδάφισης των κτισμάτων της Σκάλας.

## 1.2 ΕΚΘΕΣΗ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το ξύλο όταν εκτίθεται σε εξωτερικό περιβάλλον αλλοιώνεται υπό την επίδραση αβιοτικών και βιοτικών παραγόντων. Η αλλοίωση αυτή επηρεάζει τα μακροσκοπικά φυσικά χαρακτηριστικά του ξύλου όπως το χρώμα, τη στιλπνότητα και την υφή, τα δομικά μορφολογικά του χαρακτηριστικά, αλλά και τη χημική του σύσταση. Στους βιοτικούς παράγοντες φθοράς περιλαμβάνονται τα βακτήρια, οι μύκητες, και τα έντομα. Στους αβιοτικούς περιλαμβάνονται το φως, οι μεταβολές της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας, οι μηχανικές καταπονήσεις, διάφορα στοιχεία της ατμόσφαιρας (οξυγόνο, όζον, οξείδια του άνθρακα και του αζώτου κ.α.) που μπορεί να έχουν επιβλαβή δράση αλλά και άλλοι χημικοί παράγοντες όπως η ρύπανση της ατμόσφαιρας (Τσουμής, 2009, Βουλγαρίδης, 2015). Από τους σημαντικότερους παράγοντες της αβιοτικής γήρανσης (weathering), θεωρείται ότι είναι η υπεριώδης ακτινοβολία και η υγρασία. Η αβιοτική γήρανση είναι μια αρκετά αργή και αρκετά επιφανειακή διαδικασία, είναι χαρακτηριστικό ότι στην διάρκεια ενός αιώνα, το ξύλο μπορεί να προσβληθεί μόνο σε βάθος 5-12 mm (Chang *et al.*, 1982, Derbyshire and Miller, 1981, Βουλγαρίδης, 2015).

### 1.2.1 ΦΩΤΟ-ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ (UV)

Τα χημικά συστατικά του ξύλου, όπως η λιγνίνη, η κυτταρίνη, οι ημικυτταρίνες και τα εκχυλίσματα, απορροφούν εύκολα την ακτινοβολία του φωτός και αλλοιώνονται από αυτήν (Chang *et al.*, 1982). Η φωτο-υποβάθμιση (photodegradation) του ξύλου προκαλείται κυρίως από το υπεριώδες (UV) αλλά και από το ορατό (VIS) φάσμα της ακτινοβολίας και πρόκειται για μια επιφανειακή αλλοίωση η οποία όμως μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στην μικρομορφολογία και την μακροσκοπική εμφάνιση

του ξύλου. Πιο συγκεκριμένα, οι φυσικοχημικές αλλαγές που προέρχονται από την υπεριώδη ακτινοβολία δημιουργούν στο ξύλο χρωματική αλλοίωση (γκριζάρισμα), μειωμένη μηχανική αντοχή, ραγαδώσεις, αλλοιώσεις στην επιφάνεια (περισσότερο πορώδη και ινώδη όψη) και στη χημική σύσταση (Derbyshire and Miller, 1981, Τσουμής, 2009).

Κατά την φωτο-υποβάθμιση του ξύλου, αλλοιώνονται όλα τα κύρια χημικά του συστατικά όπως η λιγνίνη, η κυτταρίνη και οι ημικυτταρίνες (Derbyshire and Miller, 1981, Chang *et al.*, 1982). Παρά ταύτα η λιγνίνη απορροφά και αλλοιώνεται περισσότερο από την υπεριώδη ακτινοβολία σε σχέση με τα υπόλοιπα χημικά συστατικά του ξύλου και ταυτόχρονα αυτή η αλλοίωση μπορεί να λειτουργήσει «προστατευτικά» για την αποφυγή αποικοδόμησης της κυτταρίνης (Chang *et al.*, 1982). Οι τρεις ομάδες της λιγνίνης που απορροφούν την ακτινοβολία είναι η αρωματική α-καρβονυλομάδα (aromatic α-carbonyl group), οι συζευγμένοι με δακτύλιο διπλοί δεσμοί άνθρακα (ring-conjugated carbon-carbon double bonds) και οι δομές διφαινυλίου (biphenyl structures). Η φωτοοξειδωση της λιγνίνης προκαλεί σπάσιμο χημικών δεσμών, έκλυση χημικών ουσιών και δημιουργία ελεύθερων ριζών που αποπολυμερίζουν την κυτταρίνη (ελάττωση του βαθμού πολυμερισμού) και αλλοιώνουν τις ημικυτταρίνες (Chang *et al.*, 2010, Derbyshire and Miller, 1981, Τσουμής, 2009).

Τέλος, η παρουσία εκχυλισμάτων στο ξύλο λειτουργεί επίσης προστατευτικά ως προς την φωτο-υποβάθμισή του, καθώς τα εκχυλίσματα αποικοδομούνται απορροφώντας την ενέργεια του φωτός και επιβραδύνουν την αποδόμηση της λιγνίνης (Chang *et al.*, 2010).

### 1.2.2 ΥΓΡΑΣΙΑ

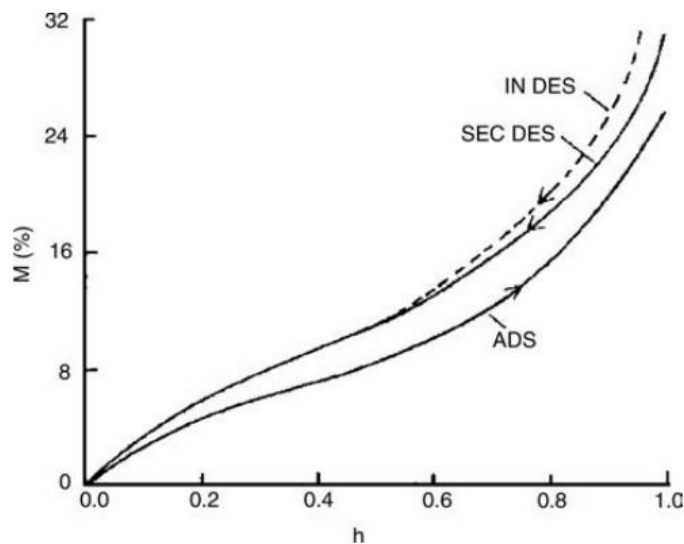
Το ξύλο ως υλικό είναι υγροσκοπικό, δηλαδή προσλαμβάνει και αποβάλλει υγρασία ανάλογα με την σχετική υγρασία του περιβάλλοντος που βρίσκεται, ή/και όταν έρχεται σε άμεση επαφή με πηγές υγρασίας. Το νερό μέσα στο ξύλο βρίσκεται σε δύο μορφές, δεσμευμένο χημικά στα κυτταρικά τοιχώματα ή και ελεύθερο στις κυτταρικές κοιλότητες. Μια σημαντική κατάσταση περιεχόμενης υγρασίας (Π.Υ.) του ξύλου, είναι το σημείο ινοκόρου (Σ.Ι.) (Fiber Saturation Point – FSP) διότι κάτω από αυτό το σημείο αλλάζουν οι διαστάσεις αλλά και πολλές ιδιότητες του ξύλου (μηχανική αντοχή, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες) (Τσουμής, 2009, Siau, 1984). Το Σ.Ι. είναι μία θεωρητική κατάσταση κατά την οποία τα κυτταρικά τοιχώματα είναι κορεσμένα από νερό ενώ οι κυτταρικές κοιλότητες παραμένουν άδειες (Rowell, 2005). Το σημείο ινοκόρου διαφέρει σε κάθε είδος ξύλου και κυμαίνεται περίπου στο 20-40% της περιεχόμενης υγρασίας (Moisture content – MC) του ξύλου (Τσουμής, 2009). Τέλος, η περιεχόμενη υγρασία του ξύλου όταν σταθεροποιηθεί σε σταθερές συνθήκες σχετικής

υγρασίας - θερμοκρασίας, ονομάζεται ισοδύναμη υγρασία ή υγρασία ισορροπίας (Equilibrium Moisture Content - EMC).

Η υγροσκοπικότητα του ξύλου είναι μια ιδιότητα που οφείλεται στην έλξη μορίων νερού από τα υδροξύλια κυρίως της κυτταρίνης. Σύμφωνα με τους Τσουμή (2009) και Bader *et al.* (2020) η προσρόφηση του νερού μπορεί να θεωρηθεί μια σύνθετη διαδικασία τριών σταδίων, των οποίων τα όρια δεν είναι τόσο διακριτά στην πραγματικότητα. Στο αρχικό στάδιο της προσρόφησης δημιουργείται ένα μονομοριακό στρώμα νερού πάνω στις αλυσίδες κυτταρίνης το οποίο συγκρατείται με ισχυρούς δεσμούς (γέφυρες) υδρογόνου. Βαθμιαία, το μονομοριακό στρώμα συγκρατεί επιπλέον νερό δημιουργώντας ένα πολυμοριακό στρώμα το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια (συγκρατούνται μέχρι 6 μόρια νερού). Στο πολυμοριακό αυτό στρώμα, το νερό δεσμεύεται πιο χαλαρά με ηλεκτροστατικές δυνάμεις Van der Waals. Στη συνέχεια, στο τρίτο στάδιο γίνεται τριχοειδής συμπύκνωση υδατμών νερού σε κενά που υπάρχουν στην επιφάνεια του κυτταρικού τοιχώματος, σε ανοίγματα μεμβρανών βοθρίων και στα μικρά στόμια των βοθρίων (Τσουμής, 2009). Όταν κορεστούν τα κυτταρικά τοιχώματα (στο σημείο ινοκόρου), επιπλέον νερό εισέρχεται σε υγρή μορφή στις κυτταρικές κοιλότητες.

Για ξύλα των οποίων το σημείο ινοκόρου βρίσκεται κοντά στο 30% της περιεχόμενης υγρασίας τους, το πρώτο μονομοριακό στρώμα νερού σχηματίζεται για τιμές Π.Υ. περίπου ~0-6%, το δεύτερο στάδιο πολυμοριακού στρώματος συμβαίνει όταν η Π.Υ. κυμαίνεται περίπου στο ~6-15%, ενώ το τρίτο στάδιο προσρόφησης συμβαίνει στο εύρος από 15% μέχρι το σημείο ινοκόρου (Bader *et al.*, 2020).

Για τις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες σχετικής υγρασίας-θερμοκρασίας, η τιμή της υγρασίας ισορροπίας του ξύλου όταν αυτό προσροφά υγρασία διαφέρει από την τιμή όταν αυτό αποβάλλει υγρασία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση και το ξύλο σταθεροποιείται σε μεγαλύτερη περιεχόμενη υγρασία όταν αποβάλλει υγρασία σε σχέση με όταν προσροφά. Επίσης, η πρώτη καμπύλη εκρόφησης υγρασίας ενός φρέσκου ξύλου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα (εικ. 1.16), είναι διαφορετική από την δεύτερη καμπύλη εκρόφησης, γεγονός που υποδεικνύει ότι υπάρχει μια αρχική, μη αναστρέψιμη απώλεια υγροσκοπικότητας μετά την αρχική ξήρανση ενός ξύλου (Skaar, 1988). Σε κάθε άλλη ανταλλαγή υγρασίας, όταν το ξύλο είναι εκτεθειμένο σε μη ελεγχόμενες συνθήκες, η διαφορά της Π.Υ. λόγω του φαινομένου της υστέρησης παραμένει σχεδόν σταθερή (εικ. 1.16) (Rowell, 2005). Τέλος πέρα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και το ιστορικό ξήρανσης του ξύλου, η ισοδύναμη υγρασία επηρεάζεται από την μηχανική καταπόνηση, το είδος και το ειδικό βάρος του ξύλου και τα εκχυλίσματα που περιέχει (Siau, 1984, Rowell, 2005).



**Εικόνα 1.16** Ισόθερμη καμπύλη ξύλου. Αρχική εκρόφηση: (IN DES), δεύτερη εκρόφηση: (SEC DES), προσρόφηση: (ADS) (Rowell, 2005).

Η ρίκνωση και η διόγκωση του ξύλου είναι ανάλογες των διακυμάνσεων της περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου μέχρι το σημείο ισοκόρου. Πάνω από το σημείο ισοκόρου το νερό δεν δεσμεύεται με χημικούς δεσμούς με τα κυτταρικά τοιχώματα αφού αυτά είναι ήδη κορεσμένα με νερό, ως εκ τούτου, το νερό δεν μπορεί να προκαλέσει ρίκνωση ή διόγκωση των κυτταρικών τοιχωμάτων και κατ' επέκταση του ξύλου και να επηρεάσει άλλες φυσικές ιδιότητές του (μηχανική αντοχή, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες) (Siau, 1984).

Για μεταβολές περιεχόμενης υγρασίας κάτω από το σημείο ισοκόρου, όπου το ξύλο ρικνώνεται και διογκώνεται, οι αλλαγές των διαστάσεων στις τρεις διευθύνσεις του (εφαπτομενική, ακτινική, αξονική) διαφέρουν για την ίδια μεταβολή υγρασίας (ανισοτροπία ρίκνωσης-διόγκωσης). Το ξύλο παρουσιάζει ελάχιστες -σχεδόν μηδενικές- διακυμάνσεις στην αξονική διεύθυνση (παράλληλα με τον άξονα του κορμού), πολύ μεγαλύτερες στην ακτινική (διεύθυνση εντεριώνης – φλοιού) και ακόμα περισσότερες -σχεδόν τις διπλάσιες από την ακτινική- στην εφαπτομενική (εφαπτομενικά των δακτυλίων) (Τσουμής, 2009, Siau, 1984, Rowell, 2005, Kollman and Cote, 1968). Οι παραμορφώσεις αυτές σχετίζονται με την υγρασία αλλά επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες (διεύθυνση της επιφάνειας, μέσος όρος γωνίας μικροϊνιδίων, βαθμός λιγνοποίησης των κυτταρικών τοιχωμάτων, δομή-διαφορές πυκνότητας) (Kollman and Cote, 1968). Η ρίκνωση και η διόγκωση που προκαλούνται στα ξύλα οποιωνδήποτε κατασκευών και έργων πολιτιστικής κληρονομιάς μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα καθώς είναι πιθανό να προκύψουν στρεβλώσεις, ραγαδώσεις, μεταβολές στο σχήμα, προβλήματα σε αρμούς (σφήνωμα ή άνοιγμα), ελαττώματα στο εσωτερικό της δομής του ξύλου (κυψελίδωση, κελύφωση), τα οποία δεν διακρίνονται στην επιφάνεια και κατάρρευση (Τσουμής, 2009). Σε συνεχείς κύκλους ρίκνωσης-διόγκωσης, λόγω της αποδόμησης και της εκχύλισης των ημικυτταρινών

και των εκχυλισμάτων που λαμβάνουν χώρα, αυξάνεται ο ρυθμός και ο βαθμός της διόγκωσης του ξύλου με αποτέλεσμα μια ελαφρά αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας σε κάθε κύκλο (Rowell, 2005).

Επιπλέον, η αυξημένη υγρασία ευνοεί την ανάπτυξη μικροοργανισμών οι οποίοι την χρειάζονται για την επιβίωσή τους (Nilsson and Rowell, 2012) και αυξάνει την ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα του ξύλου η οποία είναι χαμηλή για μικρές τιμές EMC (Rowell, 2005).

Τέλος, το χρώμα της επιφάνειας του ίδιου ξύλου διαφοροποιείται σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία του, το υγρό ξύλο έχει σχετικά σκουρότερο χρώμα από το ξηρό, ωστόσο, αυτές οι διαφοροποιήσεις στο χρώμα μπορεί να είναι πολύ μικρές κάτω από το σημείο ινοκόρου (Yeo *et al.*, 2002).

Όπως γίνεται αντιληπτό, η περιεχόμενη υγρασία του ξύλου επηρεάζει πάρα πολλές από τις ιδιότητες του ξύλου, ως εκ τούτου, ο προσδιορισμός της περιεχόμενης υγρασίας ενός ξύλινου αντικειμένου πολιτισμικής κληρονομιάς είναι πολλές φορές κρίσιμος παράγοντας για τον κατάλληλο χειρισμό του. Επιπλέον, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον σχεδιασμό της κατάλληλης μεθοδολογίας συντήρησης και τον καθορισμό των βέλτιστων συνθηκών διατήρησης του αντικειμένου. Ο προσδιορισμός της υγρασίας του ξύλου μπορεί να γίνει με άμεσες ή έμμεσες μεθόδους. Οι άμεσες μέθοδοι είναι η βαρυμετρική και η απόσταξη, η οποίες είναι καταστρεπτικές μέθοδοι (Τσουμής, 2009). Η χρήση μη καταστρεπτικών μεθόδων στα πλαίσια της συντήρησης είναι πάντα προτιμότερες, ως εκ τούτου, για τον προσδιορισμό της Π.Υ. συχνά χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά υγρόμετρα. Τα ηλεκτρικά υγρόμετρα βασίζονται στη μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του ξύλου (επηρεάζονται από την Π.Υ.). Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ηλεκτρικών υγρόμετρων: τα υγρόμετρα διηλεκτρικής σταθεράς που εκμεταλλεύονται την επίδραση εναλλασσόμενου ρεύματος, και τα υγρόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης που χρησιμοποιούν δίοδο συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος (James, 1988, Skaar, 1988).

### **1.2.3 ΒΙΟΑΛΛΟΙΩΣΗ**

#### **1.2.3.1 ΒΑΚΤΗΡΙΑ**

Τα βακτήρια εμφανίζονται ως οι πρώτοι έποικοι του ξύλου τόσο στα υδάτινα όσο και στα χερσαία οικοσυστήματα και έχουν την ικανότητα να αναπτύσσονται σε ανοξικές ή και σε αναερόβιες συνθήκες. Η κατηγοριοποίηση των βακτηριών που προσβάλλουν το ξύλο γίνεται με βάση τους ανατομικούς ιστούς που προσβάλλουν και την μικρομορφολογία της προσβολής. Υπάρχουν τα βακτήρια που προσβάλλουν τις μεμβράνες των βοθρίων και τα βακτήρια που αποικοδομούν τα κυτταρικά τοιχώματα (βακτήρια διάβρωσης-erosion, σηράγγων-tunnelling και κοιλοτήτων-cavitation

bacteria) (Pournou, 2020). Γενικά προκαλούν αύξηση της διαπερατότητας του ξύλου και ελάττωση της μηχανικής του αντοχής. Σε βακτήρια, έχουν επιπλέον αποδοθεί επίσης μεταχρωματισμοί του ξύλου, μαλάκωμα της επιφάνειάς του και υψηλή ρίκνωση (Τσουμής, 2009).

### 1.2.3.2 ΜΥΚΗΤΕΣ

Οι μύκητες που εποικούν το ξύλο μπορεί να είναι είτε χρωστικοί είτε σηπτικοί. Οι χρωστικοί μύκητες προσβάλλουν κυρίως ξυλεία από κωνοφόρα και σπανιότερα από πλατύφυλλα δέντρα προσβάλλοντας κατά κύριο λόγο το σομφό τμήμα. Η προσβολή ευνοείται σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και υψηλές τιμές περιεχόμενης υγρασίας. Οι μύκητες αυτοί τρέφονται από τα εκχυλίσματα του ξύλου και μπορεί να αλλάζουν το χρώμα του ξύλου σε βάθος (κυάνωση), ή να προκαλούν ευρωτίαση (μούχλα), ωστόσο δεν αποικοδομούν τα δομικά χημικά συστατικά των ιστών του (Τσουμής, 2009, Pournou, 2020).

Οι σηπτικοί μύκητες σε χερσαίο περιβάλλον μπορούν να προκαλέσουν σήψη κυρίως δύο τύπων, την λευκή και την καστανή σήψη, οι οποίες προσβάλλουν το ξύλο τόσο μορφολογικά όσο και χημικά. Ξύλο που διαβρέχεται σποραδικά με νερό σε ένα χερσαίο περιβάλλον, μπορεί επίσης να προσβληθεί και από ένα τρίτο τύπο σήψης, την μαλακή σήψη, η οποία συναντάται κυρίως σε υδάτινα περιβάλλοντα (Pournou, 2020).

Για να προσβληθεί ένα ξύλο από μύκητες πρέπει να υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες για αυτούς, όπως τροφή, υψηλές τιμές περιεχόμενης υγρασίας (για την ανάπτυξη των σπορίων), αέρας και θερμότητα (Τσουμής, 2009, Pournou, 2020). Οι μύκητες λευκής σήψης χρειάζονται την λιγότερη περιεχόμενη υγρασία για να μπορέσουν να προσβάλουν το ξύλο σε σχέση με τους μύκητες καστανής, και μαλακής σήψης που απαιτούν περισσότερη. Ωστόσο και τα τρία είδη μυκήτων συνήθως διαβρώνουν το ξύλο σε περιεχόμενες υγρασίες κοντά στο σημείο ινοκόρου (Rowell, 2005).

Οι σηπτικοί μύκητες, αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες μείωσης της αντοχής του ξύλου στο χρόνο. «Τρέφονται» με τα δομικά χημικά συστατικά των κυτταρικών τοιχωμάτων εκκρίνοντας ιδιαίτερα εξειδικευμένα ένζυμα (Τσουμής, 2009, Pournou, 2020). Ξυλεία με μεγάλη περιεκτικότητα σε «τοξικά» εκχυλίσματα (π.χ. ταννίνες), τα οποία συνήθως βρίσκονται σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα στο εγκάρδιο τμήμα του ξύλου, έχει μεγαλύτερη αντοχή στους μύκητες (Τσουμής, 2009).

Οι σηπτικοί μύκητες προσβάλλουν τόσο τα ζωντανά δέντρα όσο και την ξηρή ξυλεία (seasoned wood), αλλάζοντας σημαντικά τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητές του ξύλου (Τσουμής, 2009, Pournou, 2020).

### 1.2.3.3 ΞΥΛΟΦΑΓΑ ΕΝΤΟΜΑ

Ένας από τους καταστροφικότερους βιοτικούς παράγοντες αλλοίωσης του ξύλου είναι τα ξυλοφάγα έντομα, τα οποία το χρησιμοποιούν τόσο ως τροφή όσο και ως καταφύγιο, δημιουργώντας στοές στο εσωτερικό του και αποδομώντας το ολοκληρωτικά. Οι δύο κύριες τάξεις εντόμων που προσβάλλουν το ξύλο είναι τα κολεόπτερα (*Coleoptera* - σκαθάρια) και τα βλαπτοειδή (*Blattodea* – κατσαρίδες και τερμίτες). Τα υμενόπτερα (*Hymenoptera* – μυρμήγκια-μέλισσες-σφήκες) αν και είναι μια βασική τάξη ξυλοφάγων εντόμων, συνήθως δεν προσβάλλουν την ξηρή ξυλεία (*seasoned wood*) που χρησιμοποιείται στα τέχνηρα πολιτιστικής κληρονομιάς, (Ρουμπου, 2020). Η ανάπτυξη όλων των εντόμων ευνοείται συνήθως σε υψηλές τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (Τσουμής, 2009). Τέλος, τα ξυλοφάγα έντομα συνήθως δεν έχουν την δυνατότητα αυτόνομης πέψης του ξύλου, γι' αυτό συνεργούν συχνά με πρωτόζωα, βακτήρια ή/και μύκητες.

### 1.2.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Η μηχανική καταπόνηση σχετίζεται με το είδος, την επαναληψιμότητα και την διάρκεια της μηχανικής φόρτισης αλλά και με την αντοχή του ίδιου του ξύλου (πυκνότητα, σκληρότητα, αντοχή σε θλίψη - διάτμηση). Η μηχανική καταπόνηση επιβαρύνεται με την βιοπροσβολή. Γενικά, τη μεγαλύτερη αντοχή σε μηχανική καταπόνηση παρουσιάζουν οι εγκάρσιες επιφάνειες, ενώ από τις αξονικές οι ακτινικές έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τις εφαπτομενικές (Τσουμής, 2009).

## 1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ - (Non-Destructive Testing, NDT)

Η επιστήμη μεθόδων μη καταστρεπτικού ελέγχου (Non-Destructive Testing – NDT) για την εξέταση υλικών είναι ένας κλάδος που έχει μεγάλη εφαρμογή στον τομέα της συντήρησης καθώς τα πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι πολλά. Το σημαντικότερο είναι ότι αυτές οι μέθοδοι είναι μη επεμβατικές και ως εκ τούτου αβλαβείς για το εξεταζόμενο αντικείμενο. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατ' επανάληψη, συνήθως έχουν φορητό εξοπλισμό και μπορούν να πραγματοποιηθούν *in situ* δίνοντας αρκετά αξιόπιστες πληροφορίες του υλικού εκείνη την δεδομένη στιγμή (Κουή *et al.*, 2015).

Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της συντήρησης ενός ξύλινου αντικειμένου, συχνά χρησιμοποιείται μη καταστρεπτικός έλεγχος ώστε να γίνει αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησής του και τελικά να παρθούν οι κατάλληλες αποφάσεις για την συντήρηση, την ενίσχυση ή την αντικατάσταση των φθαρμένων τμημάτων του. Ωστόσο, τα αποτελέσματα μιας μεθόδου NDT στηρίζονται σε έμμεσο

προσδιορισμό των ιδιοτήτων του ξύλου και μπορεί να επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, η ανομοιογένεια στη δομή και στην αλλοίωση του ξύλου αλλά και οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την διάρκεια του ελέγχου είναι μερικοί από τους παράγοντες που καθιστούν την ερμηνεία των μετρήσεων περίπλοκη. Επιπλέον, τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία και την ικανότητα του μελετητή, που πρέπει να είναι σε θέση να αξιολογήσει τα αποτελέσματα εντός ενός λογικού αναμενόμενου εύρους.

Τέλος, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από μία NDT μέθοδο, σπάνια συσχετίζονται με τη μακροσκοπική κατάσταση διατήρησης του ξύλου ή με τα αποτελέσματα μιας καταστρεπτικής μεθοδολογίας. Επίσης οι NDT μέθοδοι δεν επαρκούν πάντα στο να ληφθούν ασφαλή συμπεράσματα, και ως εκ τούτου συχνά απαιτείται η χρήση πάνω από μία NDT ή μη τεχνικής (Anagnostopoulou & Rournou, 2013, Κουή *et al.*, 2015).

#### **1.4 ΣΚΟΠΟΙ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αξιολογήσει σε προκαταρκτικό επίπεδο με μη καταστρεπτικό τρόπο, την κατάσταση διατήρησης δύο ξύλινων θυρών που βρίσκονται στη Μεσαιωνική πόλη της Ρόδου και ειδικότερα στην πύλη Αγίου Αθανασίου και στην πύλη Αρνάλδου. Ταυτόχρονα, θα επιχειρήσει να συσχετίσει τη μακροσκοπική εικόνα της κατάστασης διατήρησης του ξύλου με την περιεχόμενη υγρασία και την εναπομείνασα χημική σύσταση αποκλειστικά με μεθόδους μη καταστρεπτικού ελέγχου όπως υγρόμετρα διηλεκτρικής σταθεράς και ηλεκτρικής αντίστασης, φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR), θερμογραφία υπερύθρου και χρωματομετρία.

Η εργασία έχει επίσης ως στόχο, να αξιολογήσει ποιες από τις NDT τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να δώσουν μια αξιόπιστη εικόνα της κατάστασης διατήρησης του αντικειμένου και να τις συσχετίσει μεταξύ τους. Επιπλέον, στοχεύει να δημιουργήσει δεδομένα αναφοράς (baseline condition) της κατάστασης διατήρησης των δύο θυρών που θα επιτρέψουν την μελέτη τους στο μέλλον.

Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναμένεται να συμβάλουν στην κατανόηση των μηχανισμών αλλοίωσης των θυρών καθώς και στην τεχνολογία κατασκευής και ως εκ τούτου, να βοηθήσουν στο σχεδιασμό δράσεων προληπτικής και θεραπευτικής συντήρησης, αλλά και στην αρχαιολογική έρευνα.



## 2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

### 2.1 ΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΛΙΚΟ

#### 2.1.1 ΟΙ ΘΥΡΕΣ ΤΩΝ ΠΥΛΩΝ ΑΓΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΚΑΙ ΑΡΝΑΛΔΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε, στις πύλες της Μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου διατηρούνται πλέον πέντε ξύλινες πόρτες. Όλες οι πόρτες αποτελούνταν από δύο φύλλα και μερικές έφεραν μεταλλική επένδυση. Σήμερα, υπάρχουν δύο πόρτες στην πύλη Ντ' Αμπουάζ και από μία στις πύλες Αρνάλδου, Αγίου Ιωάννη (Κόκκινη Πόρτα) και Αγίου Αθανασίου. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν δύο από τις πέντε πόρτες, αυτές στις πύλες Αγίου Αθανασίου και Αρνάλδου, οι οποίες έχουν μεταξύ τους διαφορετικό προσανατολισμό, διατηρούν το ένα φύλο τους και δεν φέρουν μεταλλική επένδυση.

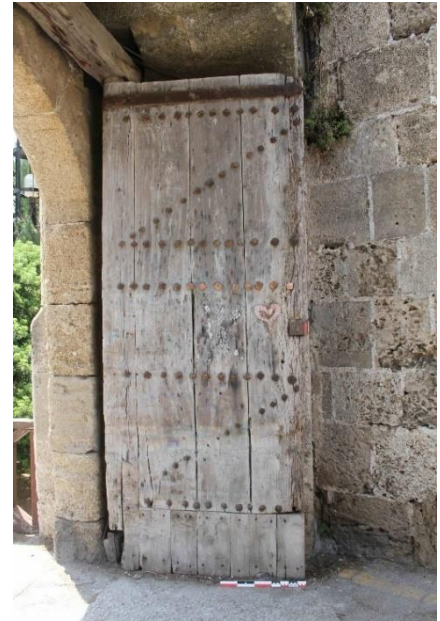
##### 2.1.1.1 Η ΠΟΡΤΑ ΤΗΣ ΠΥΛΗΣ «ΑΓΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ»

Η πύλη του Αγίου Αθανασίου με την πόρτα, βρίσκεται στα τείχη της εξωτερικής τάφρου της Μεσαιωνικής πόλης (εικ. 1.7.β, 1.12, 2.1-2.3) και έχει ΝΑ προσανατολισμό (160° από τον Β). Η πόρτα της πύλης έχει διαστάσεις επιφάνειας 300 x 120 cm ενώ το πάχος της είναι ~20 cm (με τραβέρσες πάχους 10 cm). Η πόρτα καλύπτεται σχεδόν ολόκληρη από μία λίθινη καμάρα και σήμερα είναι μόνιμα ανοιχτή και αγκυρωμένη στον τοίχο με τη βοήθεια μεταλλικού ελάσματος (εικ. 2.4.α). Στο κάτω μέρος, το νεότερο τσιμεντένιο δάπεδο είναι τοποθετημένο 1-2 cm πάνω από το κατώτερο τμήμα της πόρτας, εγκιβωτίζοντάς την μερικώς στο σημείο που έρχεται σε επαφή με το έδαφος (εικ. 2.4.β). Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια της πόρτας για αρκετές ώρες τις ημέρας ανάλογα με την εποχή.



**Εικόνα 2.1** Ξύλινη πόρτα εξωτερικής πύλης Αγίου Αθανασίου, γενική άποψη, διατηρείται το ένα φύλλο και η ξύλινη υπέρθυρη δοκός.

Η πόρτα είναι κατασκευασμένη από τέσσερις σανίδες αξονικής διεύθυνσης πλάτους 22 cm, 34,5 cm, 30,5 cm και 32,5 cm αντίστοιχα και πάχους 10 cm. Η ακριανή σανίδα, προς την πλευρά του κουφώματος έχει στρογγυλεμένη την εξωτερική της πλευρά διευκολύνοντας την περιστροφή του φύλλου (εικ. 2.5.α) επιπλέον, στο άνω τμήμα της φέρει κυλινδρική προεξοχή (πίρο). Οι σανίδες συνδέονται μεταξύ τους στο πίσω μέρος με 8 τραβέρσες που σχηματίζουν Z και στερεώνουν τις σανίδες με μεταλλικά καρφιά («γυφτόκαρφα<sup>5</sup>») (εικ. 2.2, 2.3). Στην εμπρός όψη, οι σχεδόν τετράγωνες κεφαλές (πλευράς 2,5-4 cm) των σφυρήλατων καρφιών αποτυπώνουν τις θέσεις των τραβερσών (εικ. 2.4.γ). Επιπλέον, την σύνδεση των σανίδων ενισχύει στην ίδια όψη του επάνω μέρους, σφυρήλατο μεταλλικό στοιχείο συγκράτησης στερεωμένο και αυτό με αντίστοιχα καρφιά (εικ. 2.3, 2.5.β).



**Εικόνα 2.2** Το ξύλινο φύλλο από την πόρτα της πύλης Αγίου Αθανασίου.

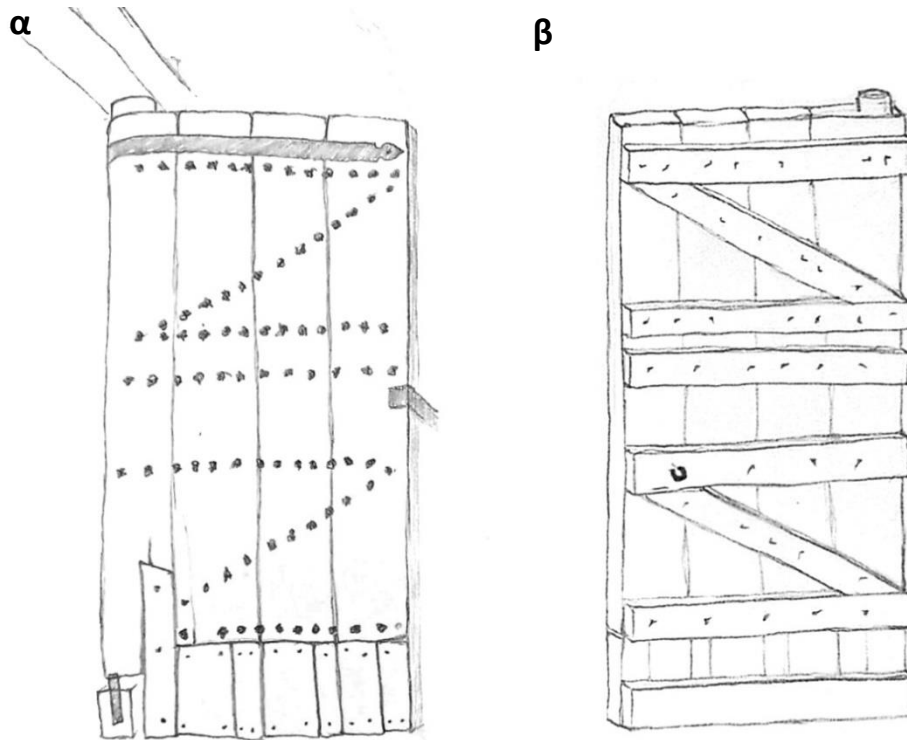
Η περιστροφή του φύλλου γινόταν στον άξονα του κυλινδρικού πίρου που βρίσκεται στο πάνω μέρος της πόρτας, ο οποίος εισέρχεται σε κυλινδρική οπή της ξύλινης υπέρθυρης δοκού. Αντίστοιχη οπή εντοπίζεται και στην άλλη πλευρά του υπέρθυρου δοκαριού που αντιστοιχούσε στο άλλο φύλλο (εικ. 2.5.β). Τα δύο φύλλα πιθανά έκλειναν μεταξύ τους με σύρτη που βρισκόταν τοποθετημένος στο φύλλο που δεν διατηρείται, και ασφάλιζε σε μεταλλικό γάντζο που βρίσκεται σε τραβέρσα του υπάρχοντος φύλλου (εικ. 2.3).

Επιπλέον, διακρίνονται υπολείμματα ροζ χρώματος πάνω στα κεφάλια κάποιων μεταλλικών καρφιών της τρίτης από πάνω οριζόντιας τραβέρσας (εικ. 2.4.γ), όπως επίσης και υπολείμματα κάποιου επιχρίσματος στην επιφάνεια του ξύλου (εικ. 2.6).

Η ξυλεία που έχει χρησιμοποιηθεί, μακροσκοπικά, φαίνεται να είναι η ίδια σε όλα τα ξύλινα μέρη της πόρτας (σανίδες και τραβέρσες). Ρόζοι υπάρχουν διάσπαρτοι σε όλα τα τμήματα.

---

<sup>5</sup> Τα πλατυκέφαλα γυφτόκαρφα στην κατασκευή των θυρών χρησιμοποιούνται τόσο για διακοσμητικούς λόγους όσο και για λόγους ασφαλείας, δυσκολεύοντας την αποσυναρμολόγηση του φύλλου από την εξωτερική πλευρά. Επιπλέον, όταν μεταξύ των σανιδιών και των γυφτόκαρφων παρεμβάλλεται μεταλλική λάμα, όπως άρχισε να γίνεται ήδη από τα τέλη του 18ου αι., η αποσυναρμολόγηση καθίσταται αδύνατη (Μαϊστρου, 2016).



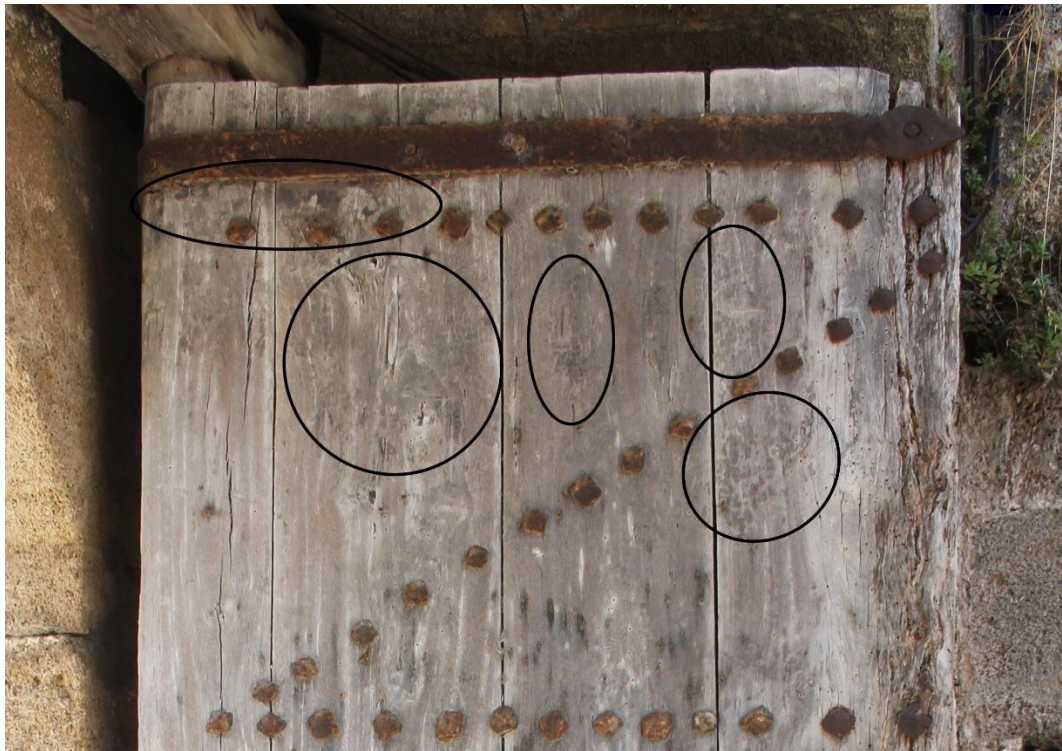
**Εικόνα 2.3** Σκαρίφημα της εμπρός (α) και πίσω (β) όψης της θύρας στην Πύλη Αγίου Αθανασίου. Στην μπροστά όψη διακρίνονται τα τέσσερα κατακόρυφα σανίδια, τα 8 νεότερα τμήματα της συμπλήρωσης στο κάτω μέρος της, τα γυφτόκαρφα, το μεταλλικό στοιχείο συγκράτησης στο επάνω μέρος και ο σύνδεσμος με την υπέρθυρη δοκό. Στην πίσω όψη αποτυπώνονται οι 8 τραβέρσες με τα γυρισμένα καρφιά και ο μεταλλικός γάντζος.



**Εικόνα 2.4** Λεπτομέρειες από την πόρτα Αγ. Αθανασίου: α) το μεταλλικό έλασμα που συγκρατεί το φύλλο ανοιχτό, β) κάτω τμήμα της πόρτας με συμπλήρωση νεότερων τμημάτων και τραβέρσας, και το ανασηκωμένο επίπεδο του δαπέδου που εγκιβωτίζει την πόρτα, γ) κεφαλές από μεταλλικά γυφτόκαρφα, στην κάτω σειρά διακρίνονται υπολείμματα επιχρίσματος.



**Εικόνα 2.5** Λεπτομέρειες της πόρτας Αγ. Αθανασίου: α) η στρογγυλεμένη πλευρά της πόρτας, β) το μεταλλικό στοιχείο συγκράτησης στο επάνω μέρος του φύλλου και ο μηχανισμός περιστροφής με ξύλινο πύρο που εισέρχεται σε κυλινδρική οπή της οριζόντιας υπέρθυρης δοκού.



**Εικόνα 2.6** Υπολείμματα επιχρίσματος στο επάνω μέρος της θύρας Αγίου Αθανασίου.

Η κατάσταση διατήρησης του φύλλου κρίνεται μέτρια καθώς εντοπίζονται διάφορες φθορές. Ειδικότερα στο κάτω μέρος υπάρχει απώλεια του αυθεντικού ξύλου και συμπλήρωση. Στο σημείο της απώλειας, οι 4 αυθεντικές σανίδες του φύλλου της πόρτας έχουν κοπεί εγκάρσια με πριόνι και τα σημεία έχουν συμπληρωθεί με 8 ανισοπαγή τμήματα και μία νέα τραβέρσα. Όλα τα νεότερα τμήματα συμπλήρωσης, παρουσιάζεται μακροσκοπικά να είναι από διαφορετικό είδος ξύλου σε σχέση με το

αυθεντικό (εικ. 2.7.α). Τα 8 τμήματα της συμπλήρωσης έχουν αξονική διεύθυνση, το επάνω τμήμα τους στερεώνεται με καρφιά στην πρώτη από κάτω αυθεντική οριζόντια τραβέρσα, ενώ το κάτω μέρος, στη νεότερη τραβέρσα που βρίσκεται στο επίπεδο της ποδιάς (εικ. 2.4.β). Το ακραίο τμήμα της συμπλήρωσης προς το κούφωμα έχει αποκολληθεί (εικ. 2.7.α). Επιπλέον στο κάτω μέρος της πόρτας, πάνω από την συμπλήρωση, διακρίνονται δύο έντονες οριζόντιες διαμήκεις αυλακώσεις που έχουν προκληθεί μηχανικά (εικ. 2.7.β). Παρατηρείται επίσης, απώλεια συνοχής της κατασκευής (άνοιγμα των ενώσεων), ρωγματώσεις, επιζωγραφίσεις με σπρέι και μαρκαδόρους, εκδορές, πινέζες και σύρραπτρα στην επιφάνεια, προϊόντα διάβρωσης από οξειδωμένα μεταλλικά στοιχεία (ιδιαίτερα γύρω από τις πινέζες και τα σύρραπτρα), υπολείμματα από κολλημένο χαρτί (βλ. εικ. 2.18 λεπτομέρεια σημείου ελέγχου 5), ρύποι και επικαθήσεις.

Οι μεταβολές υγρασίας και οι υπόλοιποι κλιματικοί παράγοντες έχουν προκαλέσει στην επιφάνεια γήρανση (weathering), γκριζάρισμα και δυσχρωματισμούς. Οι παράγοντες αυτοί έχουν συμβάλει στη δημιουργία ραγαδώσεων στο ξύλο, στο άνοιγμα των ενώσεων και σε αρκετές φθορές που έχουν προκληθεί λόγω της ρίκνωσης και της διόγκωσης του ξύλου. Τέλος, το ξύλο της πόρτας έχει προσβληθεί από ξυλοφάγα έντομα, τα οποία έχουν προκαλέσει αποσάθρωση του υλικού, και οπές στην επιφάνεια. Υπάρχουν επίσης ενδείξεις πιθανής προσβολής του ξύλου από μύκητες (εικ. 2.7.γ).

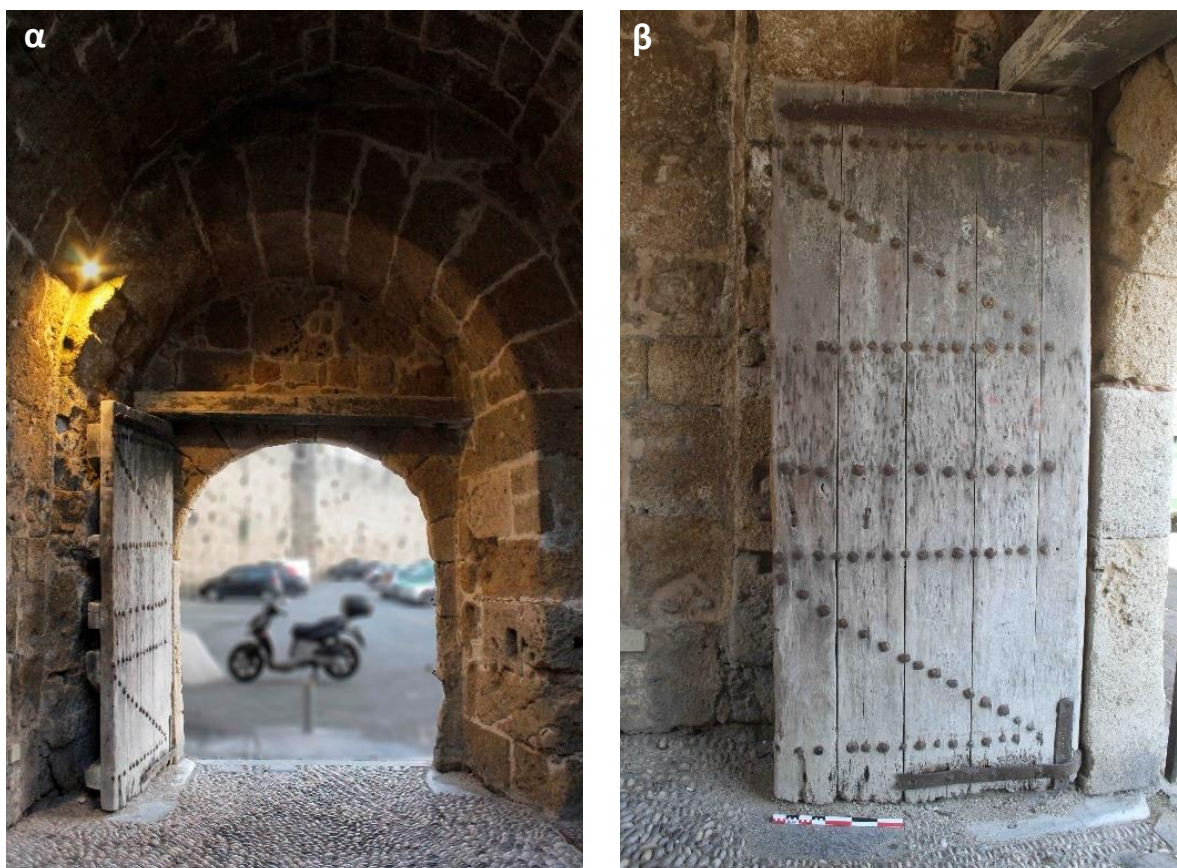


**Εικόνα 2.7** Λεπτομέρειες της κατάστασης διατήρησης της πόρτας Αγ. Αθανασίου: α) η συμπλήρωση στο κάτω τμήμα της πόρτας με 8 ξύλινα τμήματα, το αριστερά έχει αποσπαστεί εκ νέου, β) οι δύο οριζόντιες αυλακώσεις, γ) πλάγια και πίσω όψη της πόρτας όπου παρουσιάζεται η φθορά από αβιοτικούς και βιοτικούς παράγοντες της εγκάρσιας πλευράς της τραβέρσας και της αξονικής πλευράς του ακριανού σανιδιού.

#### 2.1.1.2 Η ΠΟΡΤΑ ΤΗΣ ΠΥΛΗΣ «ΑΡΝΑΛΔΟΥ»

Η πύλη Αρνάλδου που διατηρεί πόρτα, έχει βόρειο προσανατολισμό (357°), βρίσκεται στα εξωτερικά τείχη της Μεσαιωνικής πόλης 30 m μακριά από την θάλασσα και οδηγεί στην παραθαλάσσια περιοχή της Σκάλας (Κολώνα). Η πόρτα της πύλης καλύπτεται εξ ολοκλήρου από λίθινη καμάρα,

διατηρεί την ξύλινη οριζόντια υπέρθυρη δοκό και μόνο το ένα φύλλο της, το οποίο είναι αγκυρωμένο ανοιχτό (εικ. 2.8). Οι διαστάσεις του φύλλου είναι 277 x 124 cm και το πάχος των σανίδων της είναι ~ 8,5 cm. Η πόρτα, αν και βρίσκεται εξ ολοκλήρου κάτω από την λίθινη καμάρα της πύλης, κάποιους μήνες του χρόνου κατά την διάρκεια της ημέρας έρχεται σε άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία.



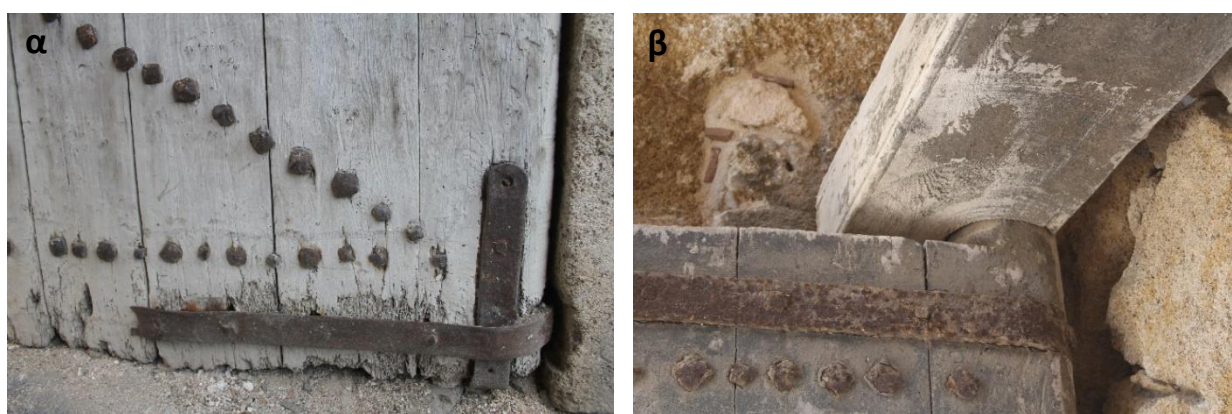
**Εικόνα 2.8** Η ξύλινη πόρτα της Β πύλης Αρνάλδου: α) γενική άποψη – η πόρτα διατηρεί το ένα φύλλο της και την οριζόντια υπέρθυρη δοκό και βρίσκεται εξ ολοκλήρου καλυμμένη από λίθινη καμάρα, β) το φύλλο της πόρτας.

Η τεχνολογία κατασκευής της πόρτας Αρνάλδου είναι πολύ παρόμοια με της πόρτας Αγίου Αθανασίου. Η συγκεκριμένη, αποτελείται από πέντε σανίδες αξονικής διεύθυνσης οι οποίες είναι καρφωμένες με 7 ξύλινες τραβέρσες. Οι τραβέρσες είναι τοποθετημένες με τρόπο που σχηματίζουν δύο Ζ, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται μία οριζόντια τραβέρσα (εικ. 2.8). Οι σανίδες με τις τραβέρσες έχουν καρφωθεί με μεταλλικά γυφτόκαρφα των οποίων η κεφαλή (2,5-4 cm) βρίσκεται στην μπροστινή όψη της πόρτας, ενώ η απόληξή τους γυρίζει στο πίσω μέρος. Επιπλέον, οι σανίδες σταθεροποιούνται με ένα μεταλλικό καρφωτό οριζόντιο στοιχείο συγκράτησης στο επάνω μέρος της πόρτας (εικ. 2.10.β), και δύο μεταλλικά στοιχεία που σχηματίζουν γωνία στο κάτω δεξί άκρο της (εικ. 2.8.β, 2.9.α).

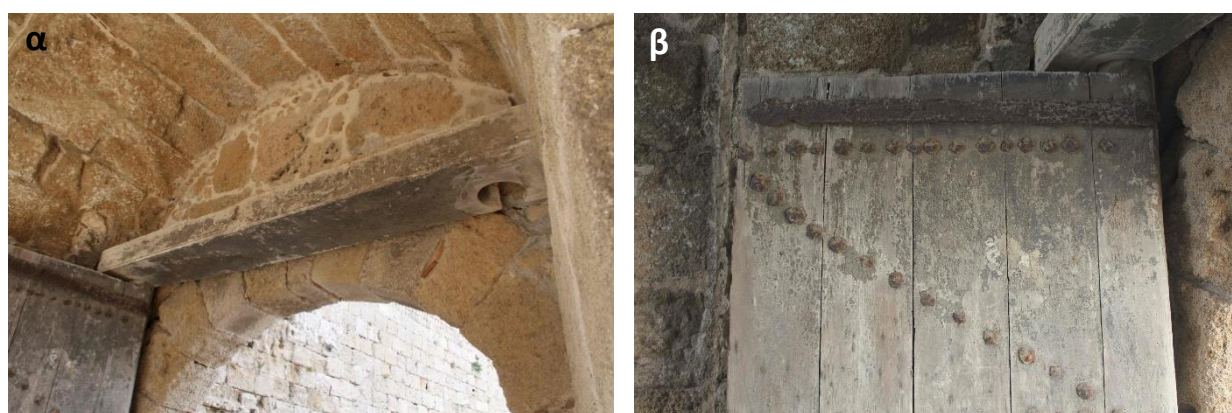
Ο μηχανισμός περιστροφής του φύλλου (εικ. 2.9.β, 2.10.α) είναι πανομοιότυπος με αυτόν της πόρτας του Αγ. Αθανασίου. Η εξωτερική σανίδα προς την πλευρά του κουφώματος έχει κοίλη την

εξωτερική αξονική πλευρά ώστε να διευκολύνει την περιστροφή του φύλλου και φέρει κυλινδρικό πύρο στο άνω τμήμα της. Η ξύλινη υπέρθυρη δοκός έχει στις δύο άκρες της σπές για να εισέρχονται οι ξύλινοι πύροι των δύο φύλλων (εικ. 2.10.α) και φέρει σκαλιστό διακοσμητικό κορδόνι (νυχιά) στην κάτω ακμή (εικ. 2.9.β). Στην πίσω όψη υπάρχουν δύο μεταλλικοί σύρτες (εικ. 2.11), και ένα νεότερο μεταλλικό έλασμα που συγκρατεί την πόρτα ανοιχτή στον τοίχο, ο οριζόντιος σύρτης στερεώνεται με μεταλλικά στοιχεία τα οποία διαπερνούν το φύλλο και ασφαλίζουν από την μπροστά όψη (εικ. 2.11.γ). Επιπλέον, διακρίνονται ίχνη επιχρίσματος (πιθανά λευκού που έχει μεταχρωματιστεί σε μαύρο-γκρι από τις επικαθήσεις), εντοπίζεται στο άνω τμήμα της πόρτας, στο μεταλλικό στοιχείο συγκράτησης, στο υπέρθυρο δοκάρι αλλά και στις τραβέρσες (εικ. 2.9.β, 2,10).

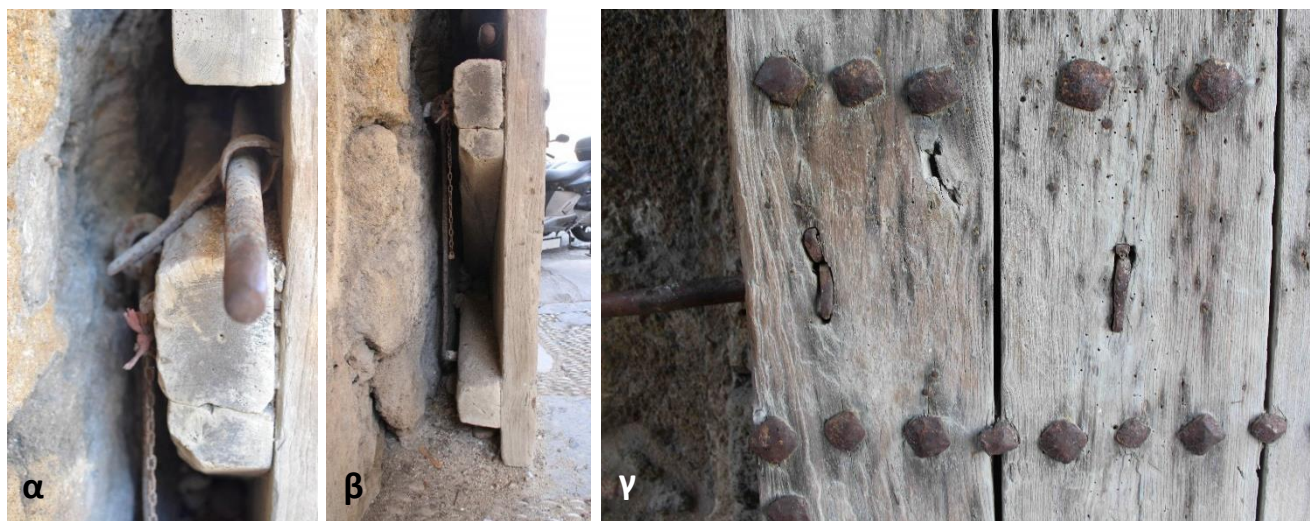
Το ξύλο που έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της πόρτας, για τις τραβέρσες και την υπέρθυρη δοκό φαίνεται μακροσκοπικά να είναι από το ίδιο είδος ξύλου. Μικροί ρόζοι υπάρχουν σε όλα τα ξύλινα τμήματα.



**Εικόνα 2.9** Λεπτομέρειες από την πόρτα Αρνάλδου: α) οι δύο μεταλλικές λάμες που σχηματίζουν γωνία, διακρίνεται απώλεια μέρους της οριζόντιας λάμρας και απώλειες ξύλλου, β) ο μηχανισμός περιστροφής του φύλλου, διακρίνεται λευκό επίχρισμα στα ξύλα και τα μεταλλικά στοιχεία.



**Εικόνα 2.10** Επίχρισμα με στρώμα επικαθήσεων στην πόρτας Αρνάλδου: α) η ξύλινη υπέρθυρη δοκός και η δεύτερη κυλινδρική σπή που αντιστοιχούσε στο δεύτερο φύλλο που δεν διατηρείται, β) υπολείμματα επιχρίσματος στο πάνω μέρος του φύλλου και του μεταλλικού οριζόντιου στοιχείου συγκράτησης.



**Εικόνα 2.11** Μεταλλικοί σύρτες στην πόρτα Αρνάλδου: α) ο οριζόντιος σύρτης που στερεώνεται από την μπροστά όψη, β) μακρόστενος σύρτης που πιθανά "έδενε" στο άλλο φύλλο της πόρτας, γ) το «γύρισμα» των μεταλλικών στοιχείων του σύρτη α στην μπροστά όψη.

Μακροσκοπικά η κατάσταση διατήρησης του ξύλου της πόρτας είναι καλή. Στο κάτω μέρος υπάρχουν μικρές απώλειες και μια οριζόντια εκδορά (πάνω από τον άξονα που σχηματίζουν τα καρφιά της χαμηλότερης τραβέρσας (εικ. 2.9.α). Ρύποι και επικαθίσεις υπάρχουν σε όλη την επιφάνεια και φαίνονται ιδιαίτερα έντονα πάνω στα υπολείμματα των επιχρισμάτων. Από μεταγενέστερες επεμβάσεις και βανδαλισμούς υπάρχουν πλήθος από καρφάκια και πινέζες στην επιφάνεια της πόρτας όπως και υπολείμματα από σπρέι κόκκινου χρώματος. Περιμετρικά των μεταλλικών οξειδωμένων στοιχείων (ιδίως των μεταγενέστερων) υπάρχουν προϊόντα διάβρωσης πάνω στο ξύλο (εικ. 2.12). Επιπλέον, υπάρχει απώλεια στο κάτω οριζόντιο μεταλλικό στοιχείο συγκράτησης το οποίο ταυτόχρονα είναι μερικώς αποσυνδεδεμένο από την επιφάνεια της πόρτας (εικ. 2.9.α). Τέλος, σε λίγα σημεία διακρίνεται στρώμα με τραχιά υφή το οποίο έχει μπεζ χρώμα και παραπέμπει σε πλαστικό (εικ. 2.12).

Οι κλιματικοί παράγοντες έχουν επιδράσει στην πόρτα προκαλώντας διόγκωση και ρίκνωση του ξύλου, γήρανση (weathering) της επιφάνειας και δυσχρωματισμούς που δημιουργούν μεγάλη διαφορά χρώματος μεταξύ του κάτω και του πάνω μέρους της πόρτας. Υπάρχουν επίσης μικρές ρωγμές και σε ορισμένα σημεία άνοιγμα στο σημείο επαφής των σανίδων.

Η πόρτα παρουσιάζει επιπλέον ενδείξεις αλλοίωσης από τη δράση ξυλοφάγων εντόμων, ενώ πιθανή είναι και η αλλοίωση από μύκητες. Τα ξυλοφάγα έντομα έχουν προσβάλει κυρίως το κάτω τμήμα της πόρτας το οποίο είναι περισσότερο εκτεθειμένο στην υγρασία, καθιστώντας το πολύ σαθρό. Η προσβολή επεκτείνεται και προς το άνω τμήματα της θύρας, και ιδιαίτερα στην τελευταία σανίδα (προς την πλευρά του κουφώματος).





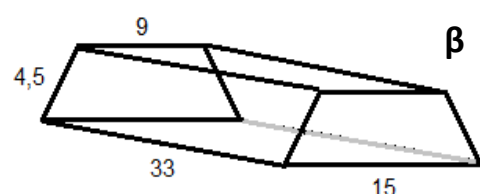
**Εικόνα 2.12** Προϊόντα οξείδωσης από νεότερα μεταλλικά καρφάλια κ.ά., διακρίνονται υπολείμματα κόκκινου σπρέι και στρώμα που παραπέμπει σε πλαστικό (έλλειψη).

### 2.1.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΞΥΛΟΥ

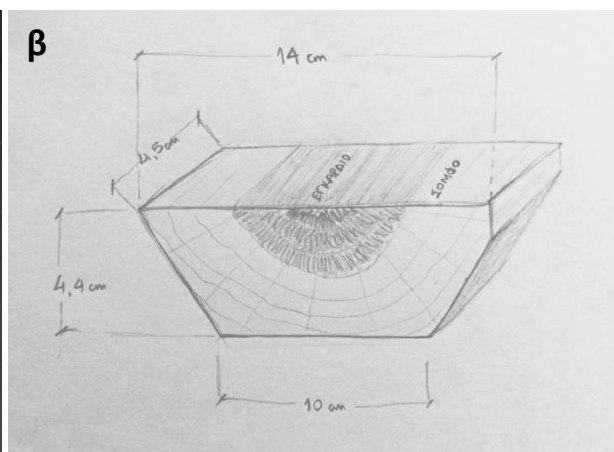
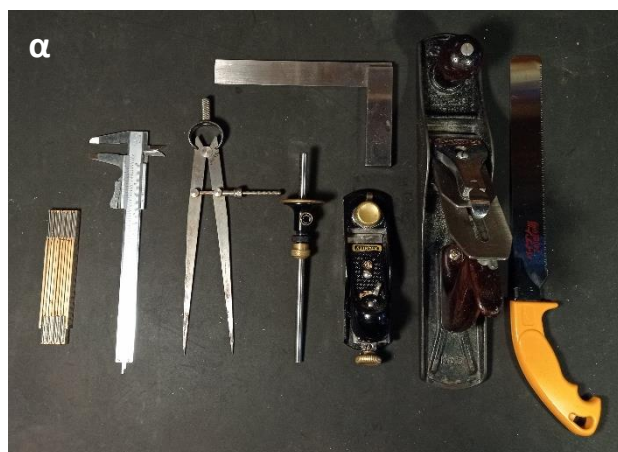
Το είδος ξύλου για την δημιουργία των πειραματικών δοκιμών, επιλέχθηκε με βάση τα αποτελέσματα της μακροσκοπικής αναγνώρισης του ξύλου των θυρών (βλ. § 2.2.1). Ειδικότερα το ξύλο των θυρών μακροσκοπικά παρουσιάζει ανατομικά χαρακτηριστικά που έχουν τα γένη *Morus* spp. (μουριά) και *Ulmus* spp. (φτελιά) (βλ. § 3.1.1, 4.2.1). Λόγω κυρίως διαθεσιμότητας, όπως επίσης και λόγω των πολλαπλών χρήσεων της μουριάς ως είδος (από μεγάλες κατασκευές έως και μουσικά όργανα) (Βουλγαρίδης, 2015), επιλέχθηκε να δημιουργηθούν τα δοκίμια από ξύλο λευκής μουριάς (*Morus alba* L.).

Χρησιμοποιήθηκε ένα κομμάτι από τμήμα κορμού 33x 4,5x 15 cm (εικ. 2.13). Από το τμήμα του κορμού, απομακρύνθηκε ο φλοιός με την βοήθεια σκαρπέλου. Το σχήμα του ξύλου κανονικοποιήθηκε με την βοήθεια πλάνης χειρός και γωνίας. Κόπηκε με ιαπωνικό πριόνι (φύρα 2mm) και τη βοήθεια σημαδούρας (εικ. 2.14.α) από όπου προέκυψαν 6 παραλληλεπίπεδα δοκίμια (Δ1, Δ2, Δ3, Δ4, Δ5, Δ6) διαστάσεων: 14 x 4,5 x 4,4 cm, τα οποία περιλάμβαναν εγκάρδιο και σομφό ξύλο (εικ. 2.14.β, 2.15). Στη συνέχεια όλα τα δοκίμια πλανίστηκαν με πλάνη χειρός σε όλες τις πλευρές τους ώστε η κατεργασία όλων των επιφανειών να είναι κοινή και να μην επηρεάσει με διαφορετικό τρόπο την συμπεριφορά σε σχέση με την προσρόφηση υγρασίας. Η κατεργασία των δοκιμών έγινε με την πολύτιμη βοήθεια του κ. Α. Σαμπατάκου.

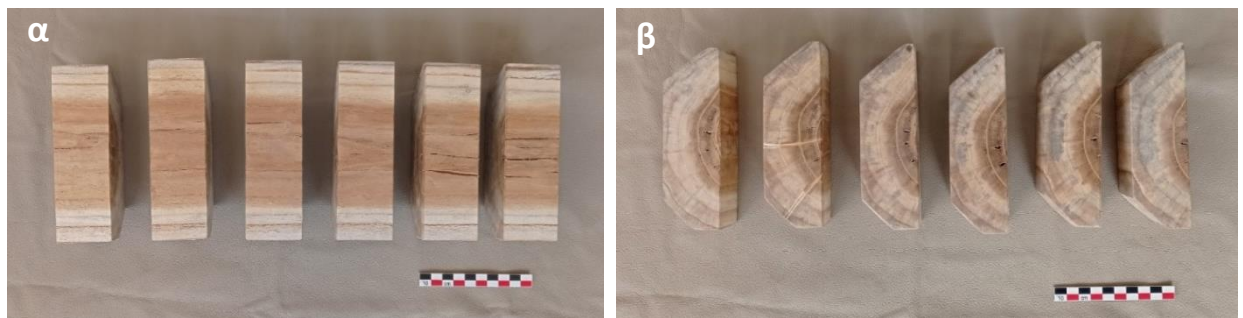
Τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε ζυγό ADAM Highland HCB602H 2 δεκαδικών ψηφίων, μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους, και έγινε η απαραίτητη σήμανση με χάραξη ώστε οι μετρήσεις που θα ακολουθούσαν να πραγματοποιούνται στα ίδια σημεία και να διασφαλίζεται μια αξιόπιστη επαναληψιμότητα.



**Εικόνα 2.13** α) Αρχικό κομμάτι από τμήμα κορμού λευκής μουριάς από το οποίο μορφοποιήθηκαν τα δοκίμια, β) σχηματοποιημένη μορφή.



**Εικόνα 2.14** α) Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην διαμόρφωση των δοκιμών: μέτρο, παχύμετρο, διαβήτη, σημαδούρα, πλάνες, ιαπωνικό πριόνι, γωνία. β) Σχέδιο τελικού δοκιμίου με διαστάσεις και κατανομή εγκάρδιου-σομφού.



**Εικόνα 2.15** Εφαπτομενική (α) και εγκάρσια (β) επιφάνεια των δοκιμίων, από αριστερά: Δ1, Δ2, Δ3, Δ4, Δ5, Δ6.

## 2.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΔΑΣΟΠΟΝΙΚΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΞΥΛΟΥ

### 2.2.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ

Η μακροσκοπική αναγνώριση του δασοπονικού είδους του ξύλου των δύο θυρών από τις πύλες Αγίου Αθανασίου και Αρνάλδου έγινε σε τμήματα από τις τραβέρσες όπως και από το κάτω αριστερά τμήμα της πόρτας Αγ. Αθανασίου, τα οποία επέτρεπαν την παρατήρηση των εγκάρσιων επιφανειών (εικ. 2.16). Πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση την μακροσκοπική εικόνα των δομικών μελών των θυρών, γίνεται η παραδοχή ότι είναι κατασκευασμένα από το ίδιο είδος ξύλου.



**Εικόνα 2.16** Σημεία μακροσκοπικής εξέτασης ξύλου από εγκάρσιες επιφάνειες αυθεντικών τμημάτων της κάθε πόρτας, α), β) πόρτα Αγ. Αθανασίου τρεις τραβέρσες και το κάτω αριστερά σημείο της πόρτας που υπάρχει απώλεια, γ) τρεις από τις τραβέρσες της πόρτας Αρνάλδου.

Η αναγνώριση έγινε με βάση τις κλείδες μακροσκοπικής παρατήρησης του Βουλγαρίδη (2000, 2015) και του Μαντάνη (2019) που στηρίζονται στην παρατήρηση μακροσκοπικών και φυσικών χαρακτηριστικών του ξύλου όπως φαίνονται στον πίνακα 2.2. Σημειώνεται ότι παρατηρήθηκαν μόνο τα

χαρακτηριστικά του ξύλου που ήταν ευδιάκριτα, καθώς ο βαθμός αλλοίωσης του ξύλου από βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες δυσχέρανε την μακροσκοπική παρατήρηση. Επιπρόσθετα, η συνδεσμολογία των επιμέρους τμημάτων των θυρών αλλά και το γεγονός ότι αυτές έχουν μόνιμα στερεωθεί στον τοίχο, έκαναν ακόμα δυσκολότερη την παρατήρηση, μην αφήνοντας ορατές αρκετές επιφάνειες που θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες για την μακροσκοπική αναγνώριση.

**Πίνακας 2.2** Μακροσκοπικά και φυσικά χαρακτηριστικά ξύλου (Βουλγαρίδης, 2000, Μαντάνης, 2019)

<b>Μακροσκοπικά Χαρακτηριστικά</b>	<b>Φυσικά Χαρακτηριστικά</b>
Πόροι ή αγγεία (μέγεθος, αριθμός, διάταξη, κατανομή, τυλώσεις, σχεδίαση)	Χρώμα
Αξονικοί ρητινοφόροι αγωγοί (αριθμός, μέγεθος, διάταξη)	Σχεδίαση
Χρώμα και πυκνότητα πρώιμου – όψιμου ξύλου	Υφή
Ακτίνες (πλάτος, ύψος, εμφάνιση- ευκρίνεια)	Πυκνότητα
Εμφάνιση αξονικού παρεγχύματος	Σκληρότητα
Χρώμα εγκάρδιου και σομφού ξύλου	Φυσική στιλπνότητα
Σχήμα και μέγεθος της εντεριώνης	Οσμή και γεύση
Αυξητικοί δακτύλιοι (εμφάνιση ψευδών ή ασυνεχών)	

## **2.2.2 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ**

### **ΔΟΚΙΜΙΑ**

Από τον κορμό που δημιουργήθηκαν τα δοκίμια, ελήφθησαν λεπτές τομές στην εγκάρσια, ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση του ξύλου με την βοήθεια ξυραφιού διπλής κόψης τύπου ASTOR. Οι τομές τοποθετήθηκαν σε αντικειμενοφόρο πλάκα, εμποτίστηκαν με μικρή ποσότητα διαλύματος γλυκερίνης 50% σε νερό και καλύφθηκαν με καλυπτρίδα. Στη συνέχεια παρατηρήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτισμού Olympus OPTIKA CX41RF σε 3 μεγεθύνσεις (x10, x20, x40), και φωτογραφήθηκαν με κάμερα Olympus Camedia C-5050 Zoom, η οποία ήταν προσαρμοσμένη στο μικροσκόπιο. Η αναγνώριση του δείγματος σε επίπεδο είδους έγινε με βάση τα ανατομικά μικροσκοπικά χαρακτηριστικά της δομής του ξύλου και τις κλείδες Brazier και Franklin (1961), Philips (1979) και Schweingruber (1978), τα διαγνωστικά στοιχεία της International Association of Wood Anatomist, IAWA (1989) και τέλος τις διαδραστικές κλείδες Intkey (Dallwitz, *et al.*, 2000) και Inside Wood (2004).

## 2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα πειραματικό πρωτόκολλο, ώστε η χρήση των μη καταστρεπτικών μεθόδων να γίνει με αμερόληπτο, επαναλήψιμο και αξιόπιστο τρόπο. Το πρωτόκολλο εφαρμόστηκε τόσο *in situ* στις δύο επιλεγμένες θύρες της Μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου όσο και στα δοκίμια από υγιές ξύλο μουριάς (*Morus alba*), στο εργαστήριο.

### 2.3.1 ΘΥΡΕΣ

Για τις δύο θύρες το πρωτόκολλο περιλάμβανε φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR), θερμογραφία υπερύθρου, υγραμέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου και χρωματομέτρηση της επιφάνειας.

Για την εφαρμογή του έγινε αρχικά επιλογή των σημείων ανάλυσης, ώστε αυτά να αντιστοιχούν σε διαφορετικές, τουλάχιστον μακροσκοπικά, καταστάσεις διατήρησης του ξύλου. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν κάποια προκαταρκτικά θερμογραφήματα (πρωινών και βραδινών ωρών) ώστε να επιβεβαιωθεί ότι τα σημεία αντιπροσωπεύουν διαφορετικές καταστάσεις. Έτσι επιλέχθηκαν 10 σημεία για την πόρτα της πύλης Αγίου Αθανασίου (εικ. 2.18) και 8 (εικ. 2.19) για την πόρτα της πύλης Αρνάλδου (§2.3.1.1 και §2.3.1.2). Στην συνέχεια επιλέχθηκαν οι συνθήκες μέτρησης (απογευματινές ώρες μεταξύ 16.15 και 18.00) ώστε να μην υπάρχει άμεση επίδραση από την ηλιακή ακτινοβολία. Για κάθε σημείο γινόταν i) φωτογράφιση, ii) θερμογραφία υπερύθρου, iii) μέτρηση περιεχόμενης υγρασίας με υγρόμετρο με αισθητήρα διηλεκτρικής σταθεράς και αισθητήρα ηλεκτρικής αντίστασης. Η φασματοσκοπία υπερύθρου FTIR και η χρωματομετρία έγιναν κατά την διάρκεια πρωινών ωρών μεταξύ 11.00 και 12.00 και στις δύο πόρτες. Η σήμανση των σημείων, έγινε με την χρήση διαφανούς πλαστικής μεμβράνης που έφερε οπή  $\varnothing$  2 cm ώστε να επιτρέπεται η λήψη μετρήσεων στο ίδιο πάντα σημείο. Οι διαφάνειες στερεώνονταν πάντα στα ίδια σημεία της πόρτας με μη επεμβατικό τρόπο με τη βοήθεια καρφίτσων χρησιμοποιώντας υπάρχουσες οπές της πόρτας από ξυλοφάγα έντομα (εικ. 2.17).



**Εικόνα 2.17** Σήμανση σημείου v.1 στην πόρτα του Αγίου Αθανασίου με πλαστικό εξώφυλλο βιβλιοδεσίας και καρφίτσες σε υπάρχουσες οπές από ξυλοφάγα έντομα.

Οι μετρήσεις στην πόρτα Αγίου Αθανασίου υλοποιήθηκαν στις 22/2/2023 με θερμοκρασία T= 16°-14,5°C και σχετική υγρασία RH= 70-78,4%, κατά την διάρκεια των λήψεων επικρατούσε αραιή συννεφιά. Στην πόρτα Αρνάλδου οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 21/2/2023 με θερμοκρασία T= 18,2°-17,4°C, σχετική υγρασία RH= 62-69,4% και αίθριο καιρό.

### 2.3.1.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΠΟΡΤΑΣ ΑΓΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Η μακροσκοπική εικόνα των 10 επιλεγμένων σημείων ελέγχου στην πόρτα της πύλης Αγίου Αθανασίου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.18. **Το σημείο 1** βρίσκεται στο πάνω δεξί τμήμα του φύλλου και παρουσιάζει εκτεταμένη φθορά από ξυλοφάγα έντομα. Το χρώμα του σημείου 1 είναι πιο σκούρο, πιθανών λόγω παρουσίας προϊόντων οξείδωσης των μεταλλικών καρφιών. **Το σημείο 2** βρίσκεται επίσης κάτω από μεταλλικό καρφί, έχει ανοιχτό τόνο χρώματος με κιτρινωπή απόχρωση, σε αντίθεση με την ευρύτερη γύρω περιοχή. **Το σημείο 3** έχει ανοιχτό λευκό-γκρι χρώμα πιθανών λόγω weathering, βρίσκεται μακριά από μεταλλικά στοιχεία είναι στην ακριανή σανίδα της πόρτας προς το κούφωμα. Το σημείο αυτό είναι άμεσα εκτεθειμένο και για μεγάλη διάρκεια στην ηλιακή ακτινοβολία. **Το σημείο 4** φαίνεται να μην είναι τόσο αλλοιωμένο όσο αφορά το χρώμα του ξύλου, σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές της πόρτας και θεωρείται το πιο υγιές. Έχει τραχιά επιφάνεια και περιμετρικά του παρατηρούνται υπολείμματα πιθανά από επίχρισμα. **Στο σημείο 5** το οποίο έχει επίσης τραχιά επιφάνεια και σκούρο χρώμα, οι πόροι του ξύλου που διακρίνονται έχουν μαύρο χρώμα υποδεικνύοντας ότι πιθανών ο δυσχρωματισμός να οφείλεται σε εμποτισμό του ξύλου από κάποιο υλικό. **Το σημείο 6** είναι πάνω στη νοητή κατακόρυφη ευθεία που βρίσκεται και το σημείο 2, έχει επίσης κιτρινωπή απόχρωση αλλά σκουρότερο τόνο από το 2, πιθανά το χρώμα αυτό να οφείλεται σε εμποτισμό του ξύλου από προϊόντα οξείδωσης των μεταλλικών στοιχείων. **Τα σημεία 7 και 9** έχουν επιλεχθεί πάνω στην οριζόντια διαμήκης αυλάκωση (εικ.2.7.β). Το σημείο 7 έχει ελαφρά λευκότερη απόχρωση από το φυσικό χρώμα (σημείο ελέγχου 4) παραπέμποντας σε weathering, στην ευρύτερη περιοχή διακρίνονται υπολείμματα από σπρέι μπλε και πράσινου χρώματος. Το σημείο 9 έχει έντονη αλλοίωση του χρώματος που παρουσιάζεται λευκό-γκρι, και δεξιά του παρατηρείται εκτεταμένη προσβολή από ξυλοφάγα έντομα. **Το σημείο 8** βρίσκεται στο πάνω τμήμα της συμπλήρωσης (εικ. 2.7.α), και έχει επιφάνεια με ανοιχτό τόνο λόγω weathering. Τέλος, στο **σημείο 10** παρατηρούνται δυσχρωματισμοί σκούρου- σχεδόν μαύρου χρώματος ιδιαίτερα στους πόρους του ξύλου, που πιθανών να οφείλονται σε υπολείμματα κόλλας από κολλημένο χαρτί, αφού το χρώμα της γύρω περιοχής είναι ανοιχτόχρωμο λόγω weathering.



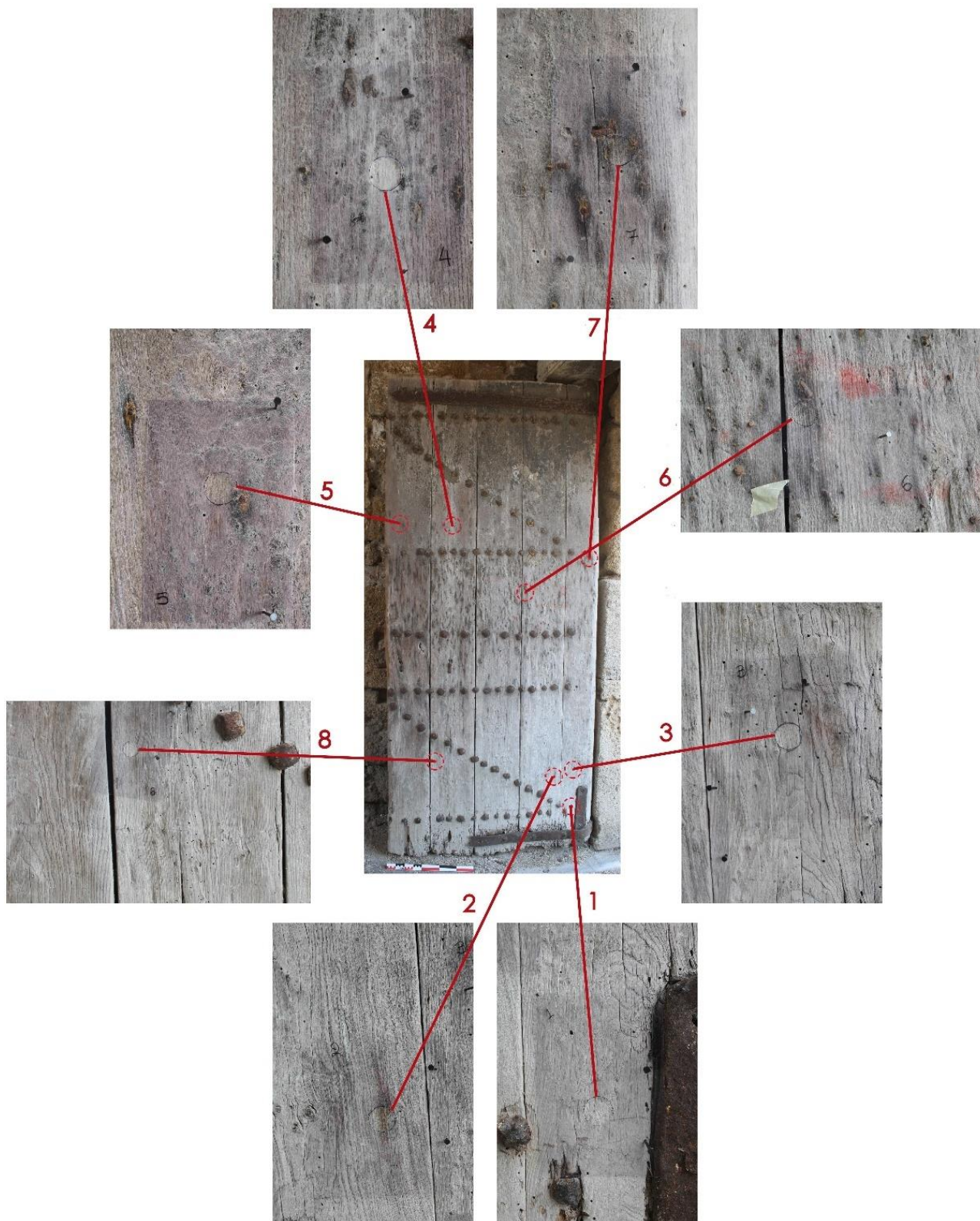
**Εικόνα 2.18** Τα 10 επιλεγμένα σημεία εξέτασης στην πόρτα της πύλης Αγ. Αθανασίου και λεπτομέρεια του κάθε σημείου.

### 2.3.1.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΡΤΑΣ ΑΡΝΑΛΔΟΥ

Παρακάτω παρουσιάζεται η μακροσκοπική κατάσταση των 8 επιλεγμένων σημείων ελέγχου στην πόρτα της πύλης Αρνάλδου (εικ. 2.19). **Το σημείο 1** βρίσκεται σε περιοχή με εκτεταμένη προσβολή από ξυλοφάγα έντομα και πολύ κοντά σε μεταλλικά στοιχεία, αντιπροσωπεύει το ανοιχτότερο χρώμα στην επιφάνεια της πόρτας και η κατάσταση διατήρησής του κρίνεται κακή σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία ελέγχου. **Το σημείο 2**, βρίσκεται σε σημείο σκούρου χρώματος, πιθανά το χρώμα να προέρχεται από κάποιο άλλο υλικό που έχει απορροφήσει το ξύλο σημειακά. **Το σημείο 3** έχει γκριζαρισμένο

χρώμα, ενώ η εικόνα της κατάστασης διατήρησής του παρουσιάζεται ως καλή. **Το σημείο 4** βρίσκεται και αυτό σε μια ζώνη ανοιχτότερου χρώματος στην οποία υπάρχουν υπολείμματα επιχρίσματος. Το **σημείο 5** αποτυπώνει την υγιέστερη κατάσταση διατήρησης στην πόρτα, βρίσκεται σε μία ευρύτερη περιοχή με οξειδωμένα μεταλλικά στοιχεία και σκουρότερο χρώμα το οποίο φαίνεται να είναι μην είναι ιδιαίτερα αλλοιωμένο σε σχέση με το χρώμα υγιούς ξύλου. **Το σημείο 6** έχει σκούρο – μαύρο χρώμα από την διάβρωση μεταλλικού καρφιού, αλλά κατά τα άλλα διακρίνεται και η λευκασμένη επιφάνεια λόγω weathering. **Το σημείο 7** είναι σε επιφάνεια με προϊόντα οξείδωσης, και χρώμα αρκετά κοντά σε αυτό του σημείου 5. Τέλος, **το σημείο 8** έχει χρώμα που παραπέμπει σε μέτρια κατάσταση διατήρησης, δηλαδή ούτε έντονο weathering, αλλά ούτε κοντινό στο υγιές χρώμα, η επιφάνεια δε του σημείου είναι τραχιά.





**Εικόνα 2.19** Τα 8 επιλεγμένα σημεία εξέτασης στην πόρτα της πύλης Αρνάλδου και λεπτομέρεια του κάθε σημείου.

### 2.3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ

Όσον αφορά στα δοκίμια, το πρωτόκολλο περιλάμβανε την εφαρμογή των ιδίων μεθόδων μη καταστρεπτικού ελέγχου σε ελεγχόμενες συνθήκες. Ειδικότερα η εφαρμογή έγινε σε συγκεκριμένες τιμές περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου, οι οποίες δημιουργήθηκαν σε σταθερή θερμοκρασία  $T = 23^{\circ}\text{C}$  και σχετική υγρασία ( $\text{RH} = 0\%, 25\%, 50\%, 75\%$  και  $94\%$ ), σε κλιματικό θάλαμο γήρανσης (βλ. § 2.4.1.1). Οι μετρήσεις επίσης πραγματοποιήθηκαν σε χώρο σταθερών συνθηκών με μέσο όρο θερμοκρασίας  $T \approx 23^{\circ}\text{C}$  ( $T = 22,6^{\circ}\text{C}, \pm 1,2^{\circ}\text{C}$ ) και σχετικής υγρασίας  $\text{RH} = 50,45\%$  ( $\pm 11\% \text{RH}$ ). Η σειρά των μετρήσεων είχε την ακόλουθη σειρά: i) ζύγιση, ii) θερμογραφία υπερύθρου, iii) μέτρηση Π.Υ. με υγρόμετρο διηλεκτρικής αντίστασης, iv) φασματοσκοπία FTIR, v) χρωματομετρία.

Η εφαρμογή των μεθόδων σε υγιή δοκίμια ξύλου, στόχευε στον συσχετισμό της περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου, με την θερμογραφική εικόνα του αλλά και με τη χημική του σύσταση, με σκοπό την δημιουργία μίας *in situ* μη καταστρεπτική προσέγγισης για τον προσδιορισμό της κατάστασης διατήρησης ξύλινων μνημείων και αντικειμένων που δεν μπορούν να μεταφερθούν στο εργαστήριο.

### 2.3.3 ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για το πειραματικό μέρος της εργασίας και ειδικότερα το φασματόμετρο Bruker Alpha II FT-IR, το υγρόμετρο Trotec T650, η θερμοκάμερα FLIR E76, ο ζυγός ADAM Highland HCB602H, ο κλιματικός θάλαμος ATLAS SC340 MHG Solar Simulator, το πυραντήριο Memmert UM500 και το καταγραφικό Data Logger Trotec BL30 ανήκουν στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής. Το FTIR Agilent 4300 Handheld και το υγρόμετρο Trotec T2000 ανήκουν στην Εφορεία Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου και παραχωρήθηκαν ευγενικά για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας από τους κ.κ. Φ. Σιδηρόπουλο και Σ. Πατατούκο.

## 2.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

### 2.4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την εκτίμηση της περιεχόμενης υγρασίας (Π.Υ.) των δύο θυρών με μη καταστρεπτικό τρόπο, χρησιμοποιήθηκε ένα υγρόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης και δύο υγρόμετρα διηλεκτρικής σταθεράς. Λόγω του ότι οι μετρήσεις στο πεδίο επηρεάζονται άμεσα από τις εξωτερικές συνθήκες, για τον έλεγχο της ορθότητας των *in situ* μετρήσεων των θυρών κρίθηκε σκόπιμο οι ίδιες μέθοδοι να εφαρμοστούν σε υγιή δοκίμια του ίδιου δασοπονικού είδους σε ελεγχόμενες συνθήκες έτσι ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των οργάνων και των ληφθέντων αποτελεσμάτων.

Ως εκ τούτου πέντε δοκίμια (Δ1, Δ2, Δ3, Δ4, Δ5) κλιματίστηκαν σε διαφορετικές τιμές σχετικής υγρασίας RH= 0%, 25%, 50%, 75%, 94% ακολουθώντας τη διαδικασία δημιουργίας μιας ισόθερμης καμπύλης (βλ. § 2.4.1.1). Ένα δοκίμιο, το Δ6, δεν υποβλήθηκε σε κανένα κλιματισμό και χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας.

#### **2.4.1.1 ΙΣΟΘΕΡΜΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ**

Η δημιουργία της ισόθερμης καμπύλης προσρόφησης υγρασίας έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 12571:2013 (2013). Τα πέντε δοκίμια μωριάς (Δ1, Δ2, Δ3, Δ4, Δ5) τοποθετήθηκαν αρχικά σε πυραντήριο Memmert UM500 (1993) σε θερμοκρασία  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα με silica gel μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $23^{\circ}\text{C}$ ) και ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας δύο δεκαδικών ADAM Highland HCB602H (Max: 600g x 0,1g). Η διαδικασία επαναλήφθηκε ανά 24 ώρες μέχρι να προκύψουν τρεις διαδοχικές ίδιες μετρήσεις βάρους, για κάθε δοκίμιο. Η ξήρανση αυτή των δοκιμίων διήρκησε συνολικά 9 ημέρες.

Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν σε κλιματικό θάλαμο ATLAS SC340 MHG Solar Simulator (2007)<sup>6</sup> σε σταθερή θερμοκρασία  $23^{\circ}\text{C}$  και σε τέσσερα στάδια σχετικής υγρασίας (RH): 25%, 50%, 75%, 94%. Για την καταγραφή της θερμοκρασίας και της υγρασίας εντός του κλιματικού θαλάμου και του εργαστηριακού χώρου, χρησιμοποιήθηκε Data Logger Trotec BL30 με ακρίβεια καταγραφής σχετικής υγρασίας  $\pm 3,5\%$  RH και θερμοκρασίας  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Τα δοκίμια παρέμειναν στο θάλαμο σε κάθε στάδιο RH μέχρις ότου ισορροπήσει το βάρος τους, δηλαδή βάσει του πρότυπου ISO 12571:2013, όταν μεταξύ 24<sup>ωv</sup> ωρών, προέκυπταν 3 διαδοχικές μετρήσεις οι οποίες διέφεραν λιγότερο από 0,1% του συνολικού βάρους του κάθε δοκιμίου.

Για την μεταφορά των δοκιμίων από τον κλιματικό θάλαμο στον εργαστηριακό χώρο όπου γινόταν η ζύγιση αλλά και κατά την διάρκεια μεταξύ των διάφορων μετρήσεων, τα δοκίμια τοποθετούνταν σε πλαστικό δοχείο που έκλεινε ερμητικά με καπάκι. Το δοχείο ήταν επιπλέον τοποθετημένο μέσα σε κουτί διογκωμένου πολυστυρένιου (EPS – φελιζόλ) ώστε τα δοκίμια να μην αλληλοεπιδρούν με την θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος.

---

<sup>6</sup> Με βάση τα χαρακτηριστικά του θαλάμου σε λειτουργία απενεργοποιημένης ακτινοβολίας, η θερμοκρασία μένει σταθερή με απόκλιση από  $\pm 0,1$  έως  $\pm 0,3$  K και η σχετική υγρασία με απόκλιση  $\pm 1$  έως  $\pm 3$  % RH.

#### 2.4.1.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

Για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας (Π.Υ.) των δοκιμίων σε κάθε στάδιο της ισόθερμης προσρόφησης υγρασίας, τα δοκίμια μεταφέρονταν από το θάλαμο και ζυγίζονταν σε ζυγό αε ADAM Highland HCB602H δύο δεκαδικών. Στην συνέχεια με βάση το μαθηματικό τύπο 1 γινόταν ο υπολογισμός της Π.Υ.:

$$\text{Π.Υ \%} = (\text{B}-\text{Bξ}) * 100 / \text{Bξ} \quad (\text{Τύπος 1})$$

Όπου: B = βάρος σε κάθε στάδιο κλιματισμού  
Bξ = ξηρό βάρος (πυριαντηρίου, 105° C ±2°)

#### 2.4.1.3 ΥΓΡΟΜΕΤΡΟ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ

Για τη μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας των δοκιμίων Δ1-Δ6 με υγρόμετρο διηλεκτρικής σταθεράς χρησιμοποιήθηκε όργανο Trotec T650. Το όργανο αυτό με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή εντοπίζει υγρασία σε βάθος 20-40 mm. Η ψηφιακή αριθμητική τιμή που δίνει εκφράζει την διηλεκτρική σταθερά ε του υλικού και προκύπτει από αυτόματη μεταβολή που συμβαίνει στο ηλεκτρικό πεδίο το οποίο δημιουργεί η σφαιρική κεφαλή – πυκνωτής. Τα δοκίμια, μετά από το κλιματισμό τους και άρα την σταθεροποίηση τους σε συγκεκριμένα ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας μεταφέρονταν σε εργαστηριακό χώρο με ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας: T≈23°C, μέσος όρος RH≈ 50%.

Στη συνέχεια, οι μετρήσεις γίνονταν πάνω σε πάγκο εργασίας από μελαμίνη, πάχους περίπου 2 cm και σε απόσταση τουλάχιστον 10 cm από κάποιο άλλο αντικείμενο ή τοίχο. Το υγρόμετρο τοποθετούταν κάθετα προς την μετρούμενη επιφάνεια του ξύλου καλύπτοντας με συνεχόμενη επαφή την εγκάρδια ή σομφή περιοχή της κάθε τομής για 20" (εικ. 2.20). Μετρήσεις έγιναν στην επαπτομενική και εγκάρσια διεύθυνση κάθε δοκιμίου.



Ειδικότερα και για το εγκάρδιο και το σομφό τμήμα κάθε δοκιμίου μετρήθηκε η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή περιεχόμενης υγρασίας σε επαπτομενική και εγκάρσια πλευρά. Χρησιμοποιήθηκαν οι λειτουργίες του υγρόμετρου Max και Min όπου καταγράφουν αντίστοιχα την υψηλότερη και χαμηλότερη τιμή περιεχόμενης υγρασίας για το χρονικό διάστημα

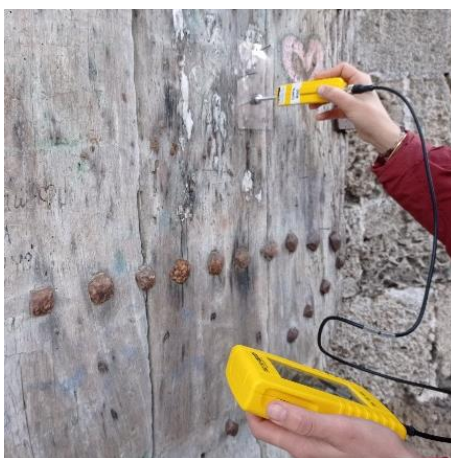
**Εικόνα 2.20** Υγρομέτρηση εγκάρδιου τμήματος δοκιμίου από την εγκάρσια πλευρά, με υγρόμετρο διηλεκτρικής σταθεράς T650, κάθετα τοποθετημένο προς την μετρούμενη επιφάνεια.

μέτρησης που επιλέγεται. Στη συνέχεια υπολογίστηκε για κάθε δοκίμιο η μέση τιμή περιεχόμενης υγρασίας για το εγκάρδιο και το σομφό τμήμα (λαμβάνοντας τις τιμές και από τις δύο διευθύνσεις κοπής). Τέλος, υπολογίστηκε η συνολική μέση τιμή περιεχόμενης υγρασίας για κάθε ένα από τα δοκίμια σε όλα τα στάδια κλιματισμού.

## 2.4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΘΥΡΩΝ

### 2.4.2.1 ΥΓΡΟΜΕΤΡΑ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ

Οι μετρήσεις έγιναν για κάθε σημείο των δύο θυρών όπως και του δοκιμίου αναφοράς Δ6 για τις ίδιες συνθήκες όπως αυτές περιγράφονται για κάθε πόρτα στο §2.3.1. Η μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας πραγματοποιήθηκε με τα όργανα διηλεκτρικής σταθεράς Trotec T650 και T2000 με αισθητήρα TS 300 SDI. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε με τον ίδιο τρόπο όπως και στα δοκίμια (βλ. § 2.4.1.3), κάθετα στην επιφάνεια της πόρτας, σε σταθερή θέση, για διάρκεια 20'' (εικ. 2.21). Για κάθε σημείο καταγράφηκε η μέγιστη (max) και η ελάχιστη (min) τιμή υγρασίας και στην συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή.



**Εικόνα 2.21** Υγρομέτρηση σημείων στην πόρτα Αγ. Αθανασίου με υγρόμετρο T2000, με αισθητήρα διηλεκτρικής σταθεράς TS 300 SDI.

### 2.4.2.2 ΥΓΡΟΜΕΤΡΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Για τη μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου των θυρών στα επιλεγμένα σημεία και στο δοκίμιο μάρτυρα Δ6, έγινε επίσης χρήση υγρόμετρου ηλεκτρικής αντίστασης (ακίδας). Χρησιμοποιήθηκε το όργανο Trotec T2000 με ενσωματωμένο τον αισθητήρα διείσδυσης (insertion electrodes) TS 50. Το εν λόγω υγρόμετρο, με βάση τις προδιαγραφές του, έχει ακρίβεια μέτρησης για

περιεχόμενες υγρασίες ξύλου εύρους 6 με 28%. Οι μετρήσεις έγιναν επιφανειακά, ώστε να μην εισέρχονται στη δομή του ξύλου προκαλώντας φθορά (εικ. 2.22). Για κάθε σημείο η τιμή της Π.Υ. μετρήθηκε με τον αισθητήρα σε ορθή γωνία (εγκάρσια) με την επιφάνεια της πόρτας και τις ακίδες (ηλεκτρόδια) τοποθετημένες παράλληλα, αλλά και κάθετα στα νερά του ξύλου.



**Εικόνα 2.22** Υγρομέτρηση σημείων στην πόρτα Αγ. Αθανασίου με υγρόμετρο T2000, με αισθητήρα ηλεκτρικής αντίστασης TS 50.

## 2.5 ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η υπέρυθρη θερμογραφία πραγματοποιήθηκε με χρήση υπέρυθρης θερμικής κάμερας FLIR E76 με προσαρμοσμένο ευρυγώνιο φακό 42°. Η κάμερα λειτουργεί στην LWIR περιοχή του φάσματος (7,5-14 μm), με οπτικό πεδίο 42° x 32° και ανάλυση 320 x 240 pixels. Έχει δυνατότητα καταγραφής εύρους θερμοκρασιών από -20° C έως 120° C και από 0° C έως 650° C, αυτόματη διόρθωση ή χειροκίνητη επιλογή συντελεστή εκπομπής (ε) με μεταβλητές ε από 0,01 έως 1,0. Τα χαρακτηριστικά της κάμερας παρουσιάζονται αναλυτικότερα στον πίνακα 2.3.

**Πίνακας 2.3** Τεχνικά χαρακτηριστικά της υπέρυθρης θερμικής κάμερας FLIR E76 που χρησιμοποιήθηκε.

Χαρακτηριστικό	Τιμή/μονάδες
Υπέρυθρη Ανάλυση	320 x 240 pixels
Ανάλυση με βελτιστοποίηση Ultra Max	307,200 pixels
Θορυβο-ισοδύναμη θερμοκρασιακή διαφορά – Θερμική ευαισθησία (NETD)	<30 mK στους +30° C
Οπτικό πεδίο	42° x 32°
Χωρική ανάλυση (IFOV)	2,41 mrad/pixel

Συστοιχία εστιακού επιπέδου/ Εύρος φάσματος	LWIR 7,5-14 μm
Εύρος θερμοκρασιών αντικειμένων και ακρίβεια (σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος 15 έως 35°C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εύρος θερμοκρασιών –20 έως 120°C: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ -20 έως 100°C: ±2°C</li> <li>◦ 100 έως 120°C: ±2%</li> </ul> </li> <li>• Εύρος θερμοκρασιών 0 έως 650°C: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 0 έως 100°C: ±2°C</li> <li>◦ 100 έως 650°C: ±2%</li> </ul> </li> <li>• Προαιρετικό εύρος 300 έως 1000°C: ±2%</li> </ul>
Συντελεστής εκπομπής (Emissivity - ε)	0,01 – 1,0 (με διόρθωση ή επιλογή από τη λίστα υλικών της FLIR (2019))

Η επεξεργασία όλων των θερμικών εικόνων έγινε στο πρόγραμμα FLIR Tools (έκδοση: 6.4.17317.1002) και περιλάμβανε κατά περίπτωση την τροποποίηση του θερμοκρασιακού εύρους της θερμικής κλίμακας, ορισμό πεδίου με ένδειξη μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας (στις πόρτες, βλ. § 3.3.2) και σημειακό προσδιορισμό θερμοκρασίας (σημεία Sp1, Sp2) (στα δοκίμια, βλ. § 3.3.1).

### 2.5.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ

Οι θερμικές εικόνες στα δοκίμια ελήφθησαν επίσης με την θερμική κάμερα FLIR E76 για τις πέντε διαφορετικές τιμές περιεχόμενης υγρασίας του ξύλου που μελετήθηκαν. Οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά την ζύγιση των δοκιμίων ώστε να υπάρξει η μικρότερη δυνατή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Η υπέρυθρη απεικόνιση έγινε σε σκοτεινό χώρο με σταθερή θερμοκρασία  $T \approx 23^\circ \text{C}$ , και σχετική υγρασία κατά μέσο όρο  $RH \approx 50\%$ . Για να μην επηρεάζεται η εικόνα από την θερμοκρασία της επιφάνειας έδρασης των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε πλαστικό υπόστρωμα γκρι χρώματος το οποίο είχε σχεδόν ενιαία θερμική εικόνα<sup>7</sup>. Κάθε λήψη ελήφθη πάντα σε αντιπαραβολή με το δοκίμιο αναφοράς Δ6, το οποίο διατηρούνταν κλιματισμένο στις συνθήκες του εργαστηρίου ( $T \approx 23^\circ \text{C}$ ,  $RH \approx 50\%$ ) καθ' όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Ο χειρισμός των δοκιμίων πριν και κατά την διάρκεια λήψης των θερμικών εικόνων γινόταν με πλαστική λαβίδα ώστε να μην προκαλούνται μεταβολές στις θερμικές εικόνες λόγω του χειρισμού (εικ. 2.23).

<sup>7</sup> Η ενιαία θερμική εικόνα προκύπτει όταν το αντικείμενο είναι ένα ομοιογενές μέσο όπου η διάχυση της θερμότητας γίνεται με σταθερό ρυθμό. Όταν το αντικείμενο στις φυσιολογικές συνθήκες χρήσης και λειτουργίας του βρίσκεται σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας, είτε δεν παρουσιάζει επιφανειακές θερμοκρασιακές μεταβολές, είτε αυτές είναι πολύ μικρές, με αποτέλεσμα να μην εντοπίζονται εύκολα με παθητική θερμογραφία (χωρίς χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας) (Κουή, et al., 2015).



**Εικόνα 2.23** Θερμική κάμερα υπερύθρου με δοκίμια Δ1-Δ6 και πλαστική λαβίδα σε γκρι πλαστικό υπόστρωμα.

Οι ρυθμίσεις του οργάνου ήταν κοινές σε όλα τα στάδια που ελήφθησαν οι θερμικές εικόνες των δοκιμίων, με εξαίρεση την σχετική υγρασία του χώρου, και παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4. Το θερμοκρασιακό εύρος της κλίμακας των χρωμάτων της κάμερας, προσαρμοζόταν στις φαινομενικές<sup>8</sup> θερμοκρασίες του κάδρου, ενώ η ακριβής ρύθμιση της τιμής της RH του χώρου επιλεγόταν ανάλογα με την ένδειξη καταγραφικού (Data Logger Trotec BL30) που ήταν τοποθετημένο στο χώρο λήψης των εικόνων.

**Πίνακας 2.4** Ρυθμίσεις θερμογραφικής κάμερας υπερύθρου

Χρωματική παλέτα	Ουράνιο τόξο υψηλής αντίθεσης
Αντίσταση εξωτερικού παραθύρου	Απενεργοποιημένη
Απόσταση αντικειμένου	1 m (και χειροκίνητη εστίαση)
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	23°C
Θερμοκρασία ανάκλασης	21°C
Συντελεστής εκπομπής ε	0,80

<sup>8</sup>Όλα τα αντικείμενα που απεικονίζονται στα θερμογραφήματα ήταν κλιματισμένα στις σταθερές συνθήκες του εργαστηριακού χώρου που πραγματοποιούνταν οι λήψεις και άρα βρίσκονταν σε θερμική ισορροπία. Ωστόσο οι εικόνες παρουσιάζουν ένα εύρος στις θερμοκρασίες που σχετίζεται με διαφορετικούς παράγοντες όπως η περιεχόμενη υγρασία αλλά και ο σταθερός συντελεστής εκπομπής.



## 2.5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΣΤΙΣ ΘΥΡΕΣ

Η εφαρμογή της θερμογραφίας υπερύθρου στις θύρες των πυλών Αγίου Αθανασίου και Αρνάλδου έγινε επίσης με την θερμική κάμερα FLIR E76. Πριν τις λήψεις των θερμικών εικόνων, έγιναν σε προκαταρκτικό επίπεδο, κάποιες δοκιμαστικές λήψεις κατά τις πρωινές και βραδινές ώρες ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο διαφοροποιείται η θερμική εικόνα του ξύλου σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας, ηλιοφάνειας κλπ., κατά την διάρκεια της ημέρας. Οι δοκιμαστικές θερμικές εικόνες αποσκοπούσαν στο να αναδείξουν ποια τμήματα των θυρών επηρεάζονται άμεσα από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές μεταβολές και ποια από πιο εγγενή χαρακτηριστικά, όπως η τεχνολογία κατασκευής ή οι φυσικές ιδιότητες του ξύλου (περιεχόμενη υγρασία, πυκνότητα, ανωμαλίες δομής όπως ρόζοι κλπ.). Με βάση τις εν λόγω ενδείξεις έγινε και η επιλογή των σημείων συστηματικής εξέτασης των θυρών με τις μεθόδους μη καταστρεπτικού ελέγχου (§2.3.1.1 και §2.3.1.2).

Για τον θερμογραφικό έλεγχο κρίθηκε καταλληλότερο οι λήψεις να πραγματοποιηθούν κατά την διάρκεια ωρών που οι ακτίνες του ήλιου δεν προσέπιπταν άμεσα ή και 2 ώρες πριν, στην επιφάνεια της πόρτας ή στον εγγύς περιβάλλοντα χώρο. Η ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί μεγάλη θερμική αντίθεση στην επιφάνεια η οποία αλλοιώνει τη θερμική εικόνα και ως εκ τούτου αυτό που αποτυπώνεται δε σχετίζεται με τις φυσικές ιδιότητες του ξύλου.

Οι ρυθμίσεις λήψης θερμικών εικόνων διέφεραν, καθώς διέφεραν οι συνθήκες του περιβάλλοντος, οι οποίες μεταβάλλονται τόσο από ώρα σε ώρα όσο και μεταξύ των θυρών. Η απόσταση λήψης προσαρμόστηκε ανάλογα με την θέση της θερμοκάμερας σε σχέση με την πόρτα ( $\approx 4 - 1$  m). Για όλες τις θερμικές εικόνες η χρωματική παλέτα παρέμεινε κοινή (ουράνιο τόξο υψηλής αντίθεσης), η αντίσταση εξωτερικού παραθύρου απενεργοποιημένη και ο συντελεστής εκπομπής<sup>9</sup> κοινός ( $\epsilon = 0,80$ ). Η λήψη θερμικών εικόνων ακολουθούνταν από μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας με ηλεκτρικά υγρόμετρα (§2.4.2) ώστε να επιχειρηθεί η μεταξύ τους συσχέτιση. Η καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούσαν, έγινε με τη χρήση καταγραφικού Data Logger Trotec BL30, άλλα και μέσω της εφαρμογής freemeteo (2019).

---

<sup>9</sup> Ο συντελεστής εκπομπής (emissivity) εκφράζει την ανακλαστικότητα του υλικού (υψηλή τιμή συντελεστή εκπομπής σημαίνει χαμηλή ανακλαστικότητα) (Ματίκας, Αγγέλης, 2015).

## 2.6 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER (FTIR)

Ο φυσικοχημικός διαγνωστικός έλεγχος με FTIR πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγηση κάποιων φυσικοχημικών ιδιοτήτων του ξύλου των θυρών, όπως η εναπομείνασα χημική του σύσταση και η δέσμευση της περιεχόμενης υγρασίας του. Για συγκριτικούς λόγους και την διευκόλυνση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων των *in situ* μετρήσεων των θυρών, ελήφθησαν φάσματα στο σομφό και εγκάρδιο τμήμα δειγμάτων αναφοράς υγιούς ξύλου μουριάς (*Morus spp.*), με γνωστή Π.Υ. (όπως υπολογίστηκε βαρυμετρικά, βλ. § 2.4.1.2), αλλά και φτελιάς (*Ulmus spp.*).

Η τεχνική φασματοσκοπίας υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR) εφαρμόστηκε με δύο διαφορετικά όργανα. Το πρώτο, ένα Agilent 4300 Handheld FTIR Spectrometer, που όπως προαναφέρθηκε ανήκε στην Εφορεία Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου, χρησιμοποιήθηκε για την φασματοσκοπία των δύο θυρών και των δειγμάτων αναφοράς μουριάς και φτελιάς. Το δεύτερο ήταν ένα Bruker Alpha II FT-IR το οποίο ανήκει στο ΠΑΔΑ και χρησιμοποιήθηκε για την φασματοσκοπία των δοκιμίων μουριάς. Πριν την λήψη των φασμάτων του ξύλου ελήφθησαν φάσματα υποβάθρου (background spectra) στις ίδιες συνθήκες. Η επεξεργασία των φασμάτων έγινε στο λογισμικό Bruker OPUS v.8.5 και στο Spectragryph v.1.2.16.1.

### 2.6.1 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ – FTIR ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Για τη λήψη των φασμάτων FTIR με τη μέθοδο External Reflectance στα δοκίμια μουριάς έγινε χρήση του φασματόμετρου Bruker Alpha II FT-IR εξοπλισμένο με αισθητήρα QuickSnap External reflection modules. Τα φάσματα ελήφθησαν στην περιοχή του μέσου υπέρυθρου φάσματος, με εύρος συχνοτήτων  $4000-350\text{ cm}^{-1}$  (εικ. 2.24). Η κάθε λήψη προέκυψε από 24 σαρώσεις με διακριτική ικανότητα  $4\text{ cm}^{-1}$ . Όλα τα φάσματα που ελήφθησαν είναι φάσματα εκπομπής.

Οι λήψεις των φασμάτων έγιναν στην εφαπτομενική πλευρά, με οδηγό σημάνσεις που είχαν γίνει πάνω στα δοκίμια ώστε να διασφαλίζεται ότι οι λήψεις πραγματοποιούνται κάθε φορά στα ίδια σημεία. Για τα δοκίμια Δ1-Δ6 ελήφθησαν δύο φάσματα από εγκάρδιο και δύο από σομφό τμήμα του ξύλου.

Φάσματα FTIR ελήφθησαν για κάθε στάδιο κλιματισμού των δοκιμίων (Δ1-Δ5). Σημειώνεται ότι για το δοκίμιο μάρτυρα Δ6 ελήφθησαν επιπλέον φάσματα υπερύθρου με το φορητό φασματόμετρο Agilent 4300 Handheld FTIR Spectrometer.



**Εικόνα 2.24** Λήψη εγκάρδιου φάσματος στο εγκάρδιο τμήμα της εφαπτομενικής διεύθυνσης δοκιμίου με φασματόμετρο Bruker Alpha II FTIR.

Η επεξεργασία των φασμάτων έγινε στα προγράμματα Spectrgrph και OPUS. Σε κάθε στάδιο, για κάθε δοκίμιο ελήφθησαν 2 φάσματα (επαναλήψεις) για το εγκάρδιο, και 2 επαναλήψεις για το σομφό τμήμα. Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν τα κατά μέσο όρο φάσματα εγκάρδιου και σομφού ξύλου κάθε σταδίου Π.Υ. (προέκυψαν από τον μέσο όρο των επαναλήψεων όλων των δοκιμίων). Τα κατά μέσο όρο φάσματα αξιοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της Π.Υ. η οποία εξετάστηκε σε δύο περιοχές των φασμάτων: (α) περιοχή  $\sim 3700-3100\text{ cm}^{-1}$  (δονήσεις έκτασης O-H) και (β) περιοχή  $1670-1640\text{ cm}^{-1}$  (δονήσεις κάμψης H-O-H) σε σχέση με τα φάσματα της ξηρής κατάστασης των δοκιμίων (RH= 0%).

Για την αξιολόγηση στην *πρώτη περιοχή* ακολούθησε διόρθωση της γραμμής βάσης (baseline correction) στο αριστερό και δεξιό όριο της περιοχής, ακολουθούμενη από κανονικοποίηση (normalization) των 5 φασμάτων στην κορυφή της λιγνίνης ( $1510\text{ cm}^{-1}$ ) βάσει της υπόθεσης ότι αυτή παραμένει σταθερή κατά την ισόθερμη προσρόφηση. Στη συνέχεια συγκρίθηκε το εμβαδόν κάθε φάσματος κάτω από την κορυφή στην πρώτη περιοχή  $3700-3100\text{ cm}^{-1}$ .

Στην *δεύτερη περιοχή*, η ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας παρακολούθηθηκε μέσω της αύξησης του μεγίστου της κορυφής στα  $1658\text{ cm}^{-1}$  σε σύγκριση με την τιμή στη θέση  $1610\text{ cm}^{-1}$  (αρωματικός δακτύλιος λιγνίνης). Το παραπάνω επιτεύχθηκε αφού έγινε διόρθωση της γραμμής βάσης (baseline correction) στο αριστερό και δεξιό όριο μιας ευρύτερης περιοχής  $1800-950\text{ cm}^{-1}$ , ακολουθούμενη, και εδώ, από κανονικοποίηση των 5 φασμάτων στην κορυφή της λιγνίνης ( $1510\text{ cm}^{-1}$ ) (Schwanninger *et al*, 2004).

Στη συνέχεια, έγινε απόπειρα να υπολογιστεί η απορροφητικότητα και η % αύξησή της, στις δυο περιοχές ( $3700-3100\text{ cm}^{-1}$  και  $1670-1640\text{ cm}^{-1}$ ), αλλά και στο μέγιστο ύψος της δεύτερης περιοχής στα

1659  $\text{cm}^{-1}$  (πίν. 3.5, 3.6). Στην *πρώτη περιοχή* (3700-3100  $\text{cm}^{-1}$ ) υπολογίστηκε μόνο το εμβαδόν (λόγω του διαφορετικού εύρους της κορυφής). Στη *δεύτερη περιοχή* και ιδιαίτερα στο εύρος 1680-1580  $\text{cm}^{-1}$  η ποσότητα της Π.Υ. παρακολουθήθηκε από την αύξηση του μεγίστου της κορυφής στα 1658  $\text{cm}^{-1}$  σε σύγκριση με την τιμή στη θέση 1610  $\text{cm}^{-1}$  (αρωματικός δακτύλιος λιγνίνης). Το παραπάνω επιτεύχθηκε μετά την επεξεργασία των φασμάτων υπολογίζοντας το ύψος των κορυφών στα 1659  $\text{cm}^{-1}$ . Η απόπειρα να υπολογιστεί η ποσότητα του περιεχόμενου νερού έγινε επιπλέον βάσει της αύξησης των εμβαδών μεταξύ των ορίων 1690 και 1580  $\text{cm}^{-1}$ .

#### Ερμηνευτικό θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο στηρίχθηκαν οι αναλύσεις

Οι δονήσεις έκτασης O-H και οι δονήσεις κάμψης H-O-H αποτυπώνονται στις περιοχές του φάσματος FTIR 3700-3100  $\text{cm}^{-1}$  και 1660-1650  $\text{cm}^{-1}$  αντίστοιχα. Ο υπολογισμός της απορροφητικότητας σε αυτά τα δύο εύρη του φάσματος θεωρείται ότι αποτυπώνει την Π.Υ. στο ξύλο. Αναλυτικότερα:

#### **(α) δονήσεις έκτασης O-H**

Αυτές αποτυπώνονται ως μια ευρεία, ισχυρή κορυφή στα ~3700-3100  $\text{cm}^{-1}$  η οποία οφείλεται στις δονήσεις έκτασης των δεσμών O-H του μορίου του νερού (ασκούνται με τη μορφή: O-Hδ+ ••• δ-:O-).

Η *θέση του μεγίστου* της κορυφής για τη συγκεκριμένη δόνηση εξαρτάται σε τεράστιο βαθμό από το άμεσο περιβάλλον, και πιο συγκεκριμένα από τους δεσμούς υδρογόνου που ασκούνται προς τα μόρια του νερού από αυτό και κυμαίνεται από τα ~3900 έως και <3000  $\text{cm}^{-1}$  ανάλογα με την ένταση των δεσμών υδρογόνου. Όσο πιο έντονοι είναι οι δεσμοί υδρογόνου των μορίων, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της κορυφής της δόνησης νO-H, ενώ το μέγιστό της ταυτόχρονα μετατοπίζεται σε μικρότερες τιμές κυματαριθμών ( $\text{cm}^{-1}$ ), δηλαδή, δεξιότερα στο φάσμα (Arunan *et al.*, 2011; Boyatzis, 2022; Mayo *et al.*, 2004).

Στο περιβάλλον του ξύλου το οποίο περιέχει εξαιρετικά πολικές πολυσακχαριτικές αλυσίδες κυτταρίνης, αναμένεται η παρουσία ισχυρά συνδεδεμένου νερού και άρα το μέγιστο της δόνησης έκτασης του θα βρίσκεται στο δεξί όριο (3300-3100  $\text{cm}^{-1}$ ). Η υπερδομή του ξύλου, έχει τη δυνατότητα να υποδεχθεί επιπλέον ποσότητες νερού σε θέσεις που αυτό θα είναι πιο χαλαρά συνδεδεμένο. Όσο πιο χαλαρά συνδεδεμένο είναι το νερό στο περιβάλλον του ξύλου, τόσο πιο μεγάλες είναι οι τιμές της δόνησης νO-H (δηλαδή οι κορυφές βρίσκονται πιο αριστερά). Με βάση την παραπάνω αρχή, γίνεται η αξιολόγηση του συγκρατούμενου-περιεχόμενου νερού στα ξύλινα δοκίμια.

## (β) δόνηση κάμψης H-O-H

Αποτυπώνονται ως μια σχετικά στενή, μέτριας έντασης κορυφή στα  $1670-1640\text{ cm}^{-1}$  που οφείλεται στις δονήσεις κάμψεις της γωνίας των 2 δεσμών H-O-H. Οι κορυφές λόγω αυτής της δόνησης είναι πολύ χαρακτηριστικές, αλλά συχνά υπάρχει το μειονέκτημα επικάλυψης με άλλες κορυφές του δείγματος (π.χ. με τις γειτονικές κορυφές των ημικυτταρινών ( $1740\text{ cm}^{-1}$ ) και της λιγνίνης ( $1510\text{ cm}^{-1}$ ), καθώς και με τις διάφορες κορυφές δονήσεων κάμψης (H-C-H) και έκτασης C-O που απαντώνται στο κυτταρινικό και λιγνινικό κλάσμα του ξύλου). Η αύξηση της Π.Υ. μπορεί να παρακολουθηθεί από την αύξηση του μεγίστου της κορυφής στα  $1658\text{ cm}^{-1}$ .

Τόσο η δόνηση αυτή, όπως και η προηγούμενη, επηρεάζεται από την ισχύ των δεσμών υδρογόνου λόγω του περιβάλλοντος που ασκούνται στο μόριο του νερού, αλλά όμως δεν έχουν γίνει αρκετές μελέτες σχετικά.

## Ποσοτική εκτίμηση του περιεχόμενου νερού βάσει των φασμάτων FTIR

Βάσει των παραπάνω, η απορροφητικότητα  $A$ , δηλ. η ένταση των κορυφών στις περιοχές  $3700-3100\text{ cm}^{-1}$  και  $1660-1650\text{ cm}^{-1}$ , η οποία είναι ανάλογη της ποσότητας των δεσμών σε κάθε στάδιο ενυδάτωσης των δοκιμίων, μπορεί να δώσει μια εκτίμηση της Π.Υ. Υπολογίζοντας δηλαδή το εμβαδόν στις περιοχές i)  $3700-3100\text{ cm}^{-1}$  και ii)  $1680-1580\text{ cm}^{-1}$  αλλά και iii) το ύψος του μεγίστου της δεύτερης κορυφής στα  $1659\text{ cm}^{-1}$  γίνεται μια ημιποσοτική εκτίμηση της ποσότητας του περιεχόμενου νερού (δηλαδή συγκριτική, και όχι απόλυτη).

Η ανάλυση όλων των φασμάτων έγινε την βοήθεια και την αμέριστη υποστήριξη του κ. Σ. Μπογιατζή.

### 2.6.2 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ – FTIR ΣΤΙΣ ΘΥΡΕΣ

Για τη λήψη των φασμάτων FTIR στις δύο πόρτες αλλά και σε υγιή δείγματα αναφοράς μουριάς (*Morus alba*, δοκίμιο Δ6) και φτελιάς<sup>10</sup> (*Ulmus*) έγινε χρήση του φορητού φασματόμετρου Agilent 4300 Handheld FTIR Spectrometer (εικ. 2.25). Τα φάσματα ελήφθησαν με την τεχνική External Reflectance χρησιμοποιώντας την



**Εικόνα 2.25** Φασματοσκοπία FTIR με το φασματόμετρο Agilent 4300 Handheld FTIR Spectrometer, στην πόρτα της πύλης Αρνάλδου, σημείο ελέγχου 1.

<sup>10</sup> Ως δείγμα αναφοράς φτελιάς, χρησιμοποιήθηκε φύλλο καπλαμά του οποίου το εξωτερικό επιφανειακό στρώμα αφαιρέθηκε μηχανικά με νυστέρι.

κεφαλή External Reflectance Sample Interface (P/N: G8180-68003). Χρησιμοποιήθηκε μέσο υπέρυθρο φάσμα με εύρος συχνοτήτων 4000-650  $\text{cm}^{-1}$ , η κάθε λήψη προέκυψε από 4 σαρώσεις της επιφάνειας με διακριτική ικανότητα 8  $\text{cm}^{-1}$ , apodization: Happ-Genzel. Η φασματομετρία έγινε με την βοήθεια και την καθοδήγηση του συντηρητή της Εφορείας Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου, Φ. Σιδηρόπουλο.

Η επεξεργασία των φασμάτων έγινε στο πρόγραμμα Spectrgryph και περιέλαβε τη δημιουργία των κατά μέσο όρο φασμάτων που προέκυψαν από τον μέσο όρο τριών επαναληπτικών λήψεων για κάθε σημείο ελέγχου και από το μέσο όρο τεσσάρων επαναλήψεων για τους δύο μάρτυρες. Για την αξιολόγηση της χημικής αλλοίωσης, δεν έλαβε μέρος καμία περαιτέρω διόρθωση (διόρθωση γραμμής βάσης ή/και κανονικοποίηση) των φασμάτων και τα φάσματα από τις δύο πόρτες συγκρίθηκαν ποιοτικά με τα φάσματα των δύο δειγμάτων αναφοράς στην περιοχή κυματαριθμών: 1800-850  $\text{cm}^{-1}$ . Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι λόγοι των εμβαδών από τις κορυφές του αρωματικού δακτυλίου της λιγνίνης στα 1510  $\text{cm}^{-1}$ , προς αυτών της κυτταρίνης-λιγνίνης στα 1461  $\text{cm}^{-1}$  και 1425  $\text{cm}^{-1}$  όπως επίσης και των ημικυτταρινών-κυτταρίνης στα 1375  $\text{cm}^{-1}$  προς την κορυφή της κυτταρίνης στα 898  $\text{cm}^{-1}$  (πίν. 3.11), η οποία είναι παρούσα σε όλα τα φάσματα του ξύλου των δύο θυρών και δείχνει να είναι λιγότερο αλλοιωμένη σε σχέση με άλλα χημικά συστατικά. Για τον υπολογισμό του εμβαδού στη κάθε επιλεγμένη κορυφή, χρησιμοποιήθηκε μεμονωμένη γραμμή βάσης (individual baseline) που ένωνε τα χαμηλότερα σημεία της κάθε πλευράς της κορυφής και υπολογίστηκε το εμβαδόν στην περιοχή που σχηματίστηκε (Pandey & Pitman, 2003).

Για την αξιολόγηση της περιεχόμενης υγρασίας των σημείων, έγινε επεξεργασία των φασμάτων στις δύο πόρτες όμοια με αυτήν που ακολουθήθηκε για την περιεχόμενη υγρασία των δοκιμίων (βλ. §2.6.1).

## 2.7 ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ

Για την καταγραφή του χρώματος χρησιμοποιήθηκε φορητό φασματοφωτόμετρο «σφαίρας» Lovibond X-Rite Sp60 Series, το οποίο λειτουργεί στο ορατό φάσμα (μήκη κύματος 400-700 nm) και τα χαρακτηριστικά του περιγράφονται στον πίνακα 2.5. Το συγκεκριμένο όργανο χρησιμοποιεί τις τρεις παραμέτρους  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  του καρτεσιανού τρισδιάστατου συστήματος CIELAB που προσδιορίζει το χρωματικό χώρο. Η τιμή  $L^*$  αντιστοιχεί στον κάθετο άξονα του συστήματος και εκφράζει τη φωτεινότητα, παίρνει τιμές από 0 (μαύρο) έως 100 (λευκό). Οι τιμές της παράμετρου  $a^*$  αντιστοιχούν σε κόκκινο χρώμα για θετικές τιμές και σε πράσινο για αρνητικές. Η παράμετρος  $b^*$  εκφράζει κίτρινο χρώμα για θετικές τιμές και μπλε για αρνητικές (Breckner, 2016).

**Πίνακας 2.5** Τεχνικά χαρακτηριστικά χρωματόμετρου Lovibond X-Rite Sp60 Series

Measuring Geometrics	d/8°, DRS spectral engine, σταθερό διάφραγμα: 8mm περιοχή μέτρησης 14mm άνοιγμα στόχου
Πηγή Φωτός	Λάμπα βολφραμίου με αέριο (Gas-filled tungsten lamp)
Illuminant Types	C, D50, D65, D75, A, F2, F7, F11 & F12
Standard Observers	2° & 10°
Δέκτης - Receiver	Blue-enhanced φωτοдиодοι πυριτίου
Εύρος Φάσματος	400 – 700nm
Spectral Interval	10nm – measured 10nm – output
Εύρος μέτρησης	Ανακλαστικότητα 0 - 200%
Χρόνος μέτρησης	Περίπου 2''
Display	128 x 256 pixel graphical LCD
Εύρος λειτουργίας σε θερμοκρασία και σχετική υγρασία	10° - 40°C Μέγιστη σχετική υγρασία χωρίς συμπύκνωση: 85%

### 2.7.1 ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η χρωματομέτρηση των δοκιμών Δ1-Δ5, έγινε για κάθε τιμή υγρασίας ισορροπίας. Σε κάθε δοκίμιο χρωματομετρήθηκε ένα σημείο του εγκάρδιου και ένα σημείο σομφού ξύλου σε εφαπτομενική πλευρά. Τα εν λόγω σημεία, συνέπυπταν με εκείνα της λήψης των φασμάτων FTIR ώστε να επιχειρηθεί μετέπειτα η συσχέτιση της χημικής εικόνας του νερού στο ξύλο και του χρώματος. Η διαδικασία της χρωματομέτρησης έγινε σε εσωτερικό εργαστηριακό με ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας (T=23° C, RH≈50,5%). Πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις ανά δοκίμιο για το εγκάρδιο και τρεις για το σομφό και υπολογίστηκε ο μέσος όρος κάθε συντεταγμένης (L\*, a\*, b\*). Η μεταβολή του χρώματος κάθε δοκιμίου (ΔE\*) υπολογίστηκε για το κάθε διαφορετικό επίπεδο κλιματισμού στις σχετικές υγρασίες 25%, 50%, 75%, 94% σε σχέση με την ξηρή του κατάσταση (0%) σύμφωνα με το πρότυπο EN 15886 με βάση τον τύπο (2).

$$\Delta E^*_{1,2} = \sqrt{(\Delta L^*{}^2 + \Delta a^*{}^2 + \Delta b^*{}^2)} \quad (\text{Τύπος 2})$$

Τύπος (2): Μαθηματικός υπολογισμός της μεταβολής του χρώματος ΔE\* (EN 15886, 2008)

Όπου  $\Delta L = L_2^* - L_1^*$  η διαφορά της φωτεινότητας,  $\Delta a = a_2^* - a_1^*$  η διαφορά των αποχρώσεων του κόκκινου/πράσινου και  $\Delta b = b_2^* - b_1^*$  η διαφορά των αποχρώσεων του κίτρινου/μπλε. Οι συντεταγμένες

$L_1^*$ ,  $a_1^*$ ,  $b_1^*$  αντιστοιχούν στον μέσο όρο για τους μάρτυρες, ενώ οι  $L_2^*$ ,  $a_2^*$ ,  $b_2^*$  στον μέσο όρο της εκάστοτε Π.Υ.

## 2.7.2 ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ ΘΥΡΩΝ

Η χρωματομέτρηση των δύο θυρών έγινε στα επιλεγμένα σημεία κάθε πόρτας. Οι μετρήσεις έγιναν κατά την διάρκεια της ημέρας, μαζί με τις υπόλοιπες διαγνωστικές τεχνικές. Όμοια με την διαδικασία που ακολουθήθηκε στα δοκίμια, έγιναν τρεις μετρήσεις σε κάθε σημείο (εικ. 2.26) και καταγράφηκε ο μέσος όρος για την κάθε συντεταγμένη ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ). Στη συνέχεια υπολογίστηκε για κάθε σημείο η διαφορά του χρώματος




**Εικόνα 2.26** Χρωματομέτρηση σημείου 1 στην πόρτα Αρνάλδου.

$\Delta E^*$  σε σχέση με ένα σταθερό χρώμα (χρώμα αναφοράς), ώστε να παρατηρηθεί συγκριτικά μεταξύ των σημείων ελέγχου η χρωματική τους διαφοροποίηση. Το χρώμα αναφοράς ήταν αυθαίρετο και σε καμία περίπτωση δεν θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύει την υγιή κατάσταση του ξύλου των θυρών. Ωστόσο για να υπάρχει κάποια σχέση με το χρώμα του ξύλου, υπολογίστηκε και χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος χρώματος του σομφού τμήματος των δοκιμών κλιματισμένων σε RH=50% και 75% (πίν. 2.6, εικ.2.27).

**Πίνακας 2.6** Συντεταγμένες χρώματος ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) του σομφού τμήματος των δοκιμών Δ1-Δ5 κλιματισμένα σε RH= 50%, 75%. Ο μέσος όρος των συντεταγμένων:  $L^*$ : 76,30 ,  $a^*$ : 3,45,  $b^*$ : 20,47, αποτελεί το χρώμα αναφοράς. Οι τιμές που αναγράφονται στα δύο στάδια κάθε δοκιμίου, έχουν προκύψει από τον μέσο όρο τριών επαναλήψεων.

Δοκίμια Χρώμα	Δ1		Δ2		Δ3		Δ4		Δ5		Μ.Ο.
	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%	
<b>L *</b>	73,86	39,71	78,26	41,52	77,22	40,74	76,10	39,96	73,82	39,54	<b>76,30</b>
<b>a *</b>	4,34	2,83	2,76	2,11	3,60	2,63	3,43	2,45	2,97	2,27	<b>3,45</b>
<b>b *</b>	20,19	12,32	21,64	12,55	21,40	12,65	20,68	12,36	17,87	11,28	<b>20,47</b>



Input	Output
L (0 to 100) <input type="text" value="76.30"/>	RGB (0 to 255): 205 185 150
a (-128 to 128) <input type="text" value="3.45"/>	HEX (#): CDB996
b (-128 to 128) <input type="text" value="20.47"/>	CMYK (0% to 100%): 20% 24% 43% 0%
	CIELAB (0 to 100, -128 to 128, -128 to 128): 76.30 3.45 20.47
	XYZ (0 to 0.9642, 0 to 1.0000, 0 to 0.8252): 0.4985 0.5038 0.2750
	
	Settings
Input system	<input type="text" value="CIELAB"/>
Illuminant and reference angle for input values	<input type="text" value="D50 2°"/>
Illuminant and reference angle for output values	<input type="text" value="D50 2°"/>
XYZ range 0 to 1 if checked <input checked="" type="checkbox"/>	

**Εικόνα 2.247** Το χρώμα που χρησιμοποιήθηκε ως χρώμα αναφοράς για την συγκριτική αξιολόγηση του χρώματος των σημείων ελέγχου των θυρών (Nix color sensor, online: <https://www.nixsensor.com/free-color-converter/>).

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anagnostopoulou, V., Pournou, A, (2013), Correlating visual grading with NTD methods for assessing timber condition in historic buildings, *In: Advanced Materials Research Vol. 778*, Trans Tech Publications, Switzerland, 273-280
- Arunan, E., Desiraju, G.R., Klein, R.A., Sadlej, J., Scheiner, S., Alkorta, I., Clary, D.C., Crabtree, R.H., Dannenberg, J.J., Hobza, P., Kjaergaard, H.G., Legon, A.C., Mennucci, B., Nesbitt, D.J., (2011), Defining the hydrogen bond: An account (IUPAC Technical Report), *Pure Appl. Chem.* 83, 1619–1636
- Bader, M., Nemeth, R., Sandak, J., Sandak, A., (2020) FTIR analysis of chemical changes in wood induced by steaming and longitudinal compression, *Cellulose* 27, Springer, 6811–6829
- Bahar, R., Azzouz, S., Remond, R., Ouertani, S., Elaieb, M. T., Cafci, M.A.E., (2017), *Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of Oak wood (Quercus robur and Quercus canariensis): optimization of the processing parameters*, Heat Mass Transfer 53, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1541-1552
- Becker, D., (2016), *Color Trends and Selection for Product Design*, Elsevier, 179-182
- Betak, A., Zach, J., Misak, P., Vanerek, J., (2023), Comparison of Wood Moisture Meters Operating on Different Principles of Measurement, *In: Buildings* 2023, 13, 531.
- Boyatzis, S.C., (2022), *Materials in Art and Archaeology through Their Infrared Spectra*, Nova Science Publishers, New York
- Brazier, J.D., Franklin, G.L., (1961) *Identification of Hardwoods: A Microscope Key*, Forest Products Research Laboratory, Bulletin No 46, HMSO, London
- Bratasz, L., Kozłowska, A., Kozłowski, R., (2012), Analysis of water adsorption by wood using the Guggenheim-Andersen-de Boer equation, *European Journals of Wood and Wood Products*, 70, 445-451.
- Chang, S.T., Hon, D.N.S., Feist, W.C. (1982), Photodegradation and photoprotection of wood surfaces, *In: Wood and Fiber* 14, 104-117
- Chang, T.C., Chang, H.T., Wu, C.L., Chang, S.T. (2010), Influences of extractives on the photodegradation of wood, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 95, Issue 4, 516-521
- Dallwitz, M.J., Paine, T.A., Zurcher, E.J., (2000) onwards, Principles of interactive keys, <https://www.delta-intkey.com>

- Derbyshire, H., Miller, E.R., (1981), *The photodegradation of wood during solar irradiation*, Holz als Roh- und Werkstoff 39, 341–350
- EN 15886:2008, (2008), *Conservation of cultural property - Test methods – Colour measurement of surfaces*, European Comitee for Standarization Cen, Brussels
- FLIR, (2019), *Reference documentation Thermography*, FLIR Systems, Inc.
- Freemeteo, (2023), *Ο καιρός*, [online], διαθέσιμο στο: <https://freemeteo.gr>
- High, K.E., Penkman K.E.H., (2020), A review of analytical methods for assessing preservation in waterlogged archaeological wood and their application in practice, *Heritage Science* 8, 83, Springer Nature
- IAWA (1989), *IAWA Bulletin Journal*, Volume 10, International Association of Wood Anatomist, Rijksherbarlum, Leiden
- InsideWood, (2004-onwards), Published on the Internet, [online], διαθέσιμο στο: <https://insidewood.lib.ncsu.edu/search?2>
- ISO 12571:2013, (2013), *Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of hygroscopic sorption properties*, International Organization for Standardization, Switzerland
- James, W., L., (1988) *Electric Moisture Meters for Wood, General Technical Report FPL-GTR6*, U.S. Department of Agriculture - Forest Service - Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin
- Kollman, F.F.P., Cote, W.A.Jr., (1968), *Principles of wood science and technology I solid wood*, Springer-Verlag, New York
- Kupczak, A., Bratasz, L., Krysciak-Czerwenka, J., Kozlowski, R., (2018), *Moisture sorption and diffusion in historical cellulose-based materials*, Cellulose 25, Springer Nature, 2873-2884.
- Mayo, D., Miller, F., Hannah, R., (2004), *Course Notes on the Interpretation of Infrared and Raman Spectra*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA
- Mvondo, R.R.N., Meukam, P., Jeong, J., Meneses, D.D.S., Nkeng, E.G., (2017), Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species, In: *Results in Physics*, Volume 7, Elsevier, 2096-2103
- Nilsson, T., Rowell, R., (2012), Historical wood – structure and properties, *Journal of Cultural Heritage* 13S, Elsevier, S5–S9

- Pandey, K.K., (1999), A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy, In: *Journal of Applied Polymer Science, Vol. 71*, John Wiley & Sons, 1969-1975
- Pandey, K.K., Pitman, A.J., (2003), FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi, In: *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volume 52, Issue 3, 151-160
- Pandey, K.K., Theagarajan, K.S., (1997), Analysis of wood surfaces and ground wood by diffuse reflectance (DRIFT) and photoacoustic (PAS) Fourier transform infrared spectroscopic techniques, In: *Holz als Roh und Werkstoff 55*, Springer-Verlag, 383-390
- Philips, E. W. J., (1979), *Identification of softwoods by their microscopic structure*, Forest Products Research Laboratory, Bulletin 22, London
- Pournou, A., (2020), *Biodeterioration of wooden cultural heritage – Organisms and decay mechanisms in aquatic and terrestrial ecosystems*, Springer, Switzerland, 345-516
- Popescu, C.M., Vasile, C., Popescu, M.C., Singurel, G., (2006), Degradation of lime wood painting supports II. Spectral characterization, In: *Cellulose chemistry and technology*, Volume 40 (8), 649-658
- Popescu, C.M., Popescu, M.C., Sigurel, G., Vasile, C., Argyropoulos, D.S., Willfor, S., (2007), Spectral Characterization of Eucalyptus Wood, In: *Applied Spectroscopy*, Volume 61, no 11, 1168-1177
- Rowell, R., M., (2005), Moisture Properties. In: *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, CRC Press, Boca Raton, 77-98
- Schwanninger, M., Rodrigues, J.C., Pereira, H., Hinterstoisser, B., (2004), Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose, *Vibrational Spectroscopy*, Volume 36 (1), 23-40
- Schweingruber, F. H. (1978), *Microscopic Wood Anatomy*, Swiss Federal Institute for forestry research, Zurcher AG, Zug
- Siau, J.F., (1984), Basic wood-moisture relationships, In: *Transport Processes in Wood*, Springer Berlin, Heidelberg, 1-34
- Simpson, W., (1980), Sorption Isotherm Applied to Wood, In: *Wood and Fiber*, 12 (3), Society of Wood Science and Technology, 183-195.
- Skaar, C., (1988) Electrical Properties of Wood. In: *Wood-Water Relations*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 207-262

Strømdahl, K., (2000), *Water Sorption in Wood and Plant Fibres*, Technical University of Denmark, Danmarks Tekniske Universitet. Institut for Baerende Konstruktioner og Materiale, Serie R

Unesco World Heritage Convention, (2023), *Medieval City of Rhodes*, [online], Διαθέσιμο στο: <https://whc.unesco.org/en/list/493/> , [πρόσβαση: 17/7/2023].

Yeo, H., Smith, W.B., Hanna, R.B., (2002), Determination of surface moisture content of wood utilizing a colorimetric technique, In: *Wood and fiber science*, Volume 34, Issue 3, 419-424

*1984-2003 19 Χρόνια Παρουσίας στην Παλαιά Πόλη της Ρόδου*, (2003), Κατάλογος Έργων, Δήμος Ροδίων Δ/ση Προστασίας Μεσαιωνικής Πόλης Προγραμματική σύμβαση ΥΠΠΟ-ΤΑΠΑ Δήμου Ροδίων 2003, Ρόδος.

Αδαμόπουλος, Σ., (2013) Δομή Ξύλου, ΤΕΙ Θεσσαλίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα σχεδιασμού και τεχνολογίας ξύλου και επίπλου, Καρδίτσα.

Βουλγαρίδης, Η.Β., (2015), *Ποιότητα και χρήσεις του ξύλου*, Κάλλιπος ελληνικά ακαδημαϊκά ηλεκτρονικά συγγράμματα και βοηθήματα, Αθήνα

Βουλγαρίδης, Η.Β., Πασιαλης, Κ., Βασιλείου, Β. (2000), *Αναγνώριση Ξύλου – Πανεπιστημιακές Παραδόσεις*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιακό τυπογραφείο, Θεσσαλονίκη.

Γεωργαλλίδης, Σ., (2023), *Γεωργαλλίδης Σταύρος η Ρόδος του χθες*, [facebook], Διαθέσιμο στο: [https://www.facebook.com/rodostoyxtes/?locale=el\\_GR](https://www.facebook.com/rodostoyxtes/?locale=el_GR), [πρόσβαση: 6/7/2023].

Ζύμη, Ε., Λαμπρόπουλος Β., Ξανθοπούλου, Μ., Παναγιάρης, Γ., Γιακουμάτου, Ι., Καραντώνη, Ε., Μαλέα, Α., Μπάικα, Κ., Ράπτη, Σ., Ρετσίλα-Αντζουλάτου, Ε., Πούρνου, Α. (επιστήμ. Υπεύθυνη), (2015), *Παραδοτέο 7.2 Μουσειολογική ανάδειξη των κινητών ευρημάτων του ναυαγίου της Ρόδου*, [Αδημοσίευτη Μελέτη], Θαλής MIS: 375692 Δράση 7 «Αρχαιολογική τεκμηρίωση και ανάδειξη κινητών ευρημάτων του ναυαγίου της Ρόδου», ΤΕΙ Αθήνας Τμήμα Συντήρησης Αρχαιοτήτων και Έργων Τέχνης, Αθήνα.

Ίδρυμα Αικατερίνη Λασκαρίδη, (2022), Places-Monuments-People, [online], Διαθέσιμο στα: <http://eng.travelogues.gr>, <https://eng.travelogues.gr/item.php?view=49695>, (πρόσβαση: 6/7/2023)

Κολλίγρης, Ν. (2023), «προσωπική σελίδα στο facebook: *Nikos Kolligris*», [online], Διαθέσιμο στο: <https://www.facebook.com/nikos.kolligris/>, (πρόσβαση: 7/9/2023)

Κόλλιας. Η.Ε., (2001) Εισαγωγή στο βιβλίο της Μανούσου-Ντέλλα, Κ., *Μεσαιωνική πόλη Ρόδου Έργα αποκατάστασης (1985-2000)*, Υπουργείο Πολιτισμού Ταμείο Διαχείρισης Πιστώσεων για την Εκτέλεση Αρχαιολογικών Έργων, Ρόδος

Κουή, Μ., Αβδελίδης, Ν., Θεοδωρακέας, Π., Χειλάκου, Ε., (2015), *Μη καταστρεπτικές και φασματοσκοπικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών*, Κάλλιπος Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, Αθήνα

Μαϊστρου, Ε., (ακαδημαϊκή υπεύθυνη), (2016) *Πόρτες Βυζίτσα*, [online], Διαθέσιμο στο: <http://5a.arch.ntua.gr/project/5291/6426>, (πρόσβαση: 21/9/2023).

Μανούσου-Ντέλλα Κ., (2000), Ρόδος. Στοιχεία πολεοδομικής ανάλυσης μιας μεσαιωνικής οχυρωμένης πόλης, *Δελτίον της Χριστιανικής και Αρχαιολογικής Εταιρείας*, Περίοδος Δ', Τόμος ΚΑ', Αθήνα, σελ. 27-42

Μανούσου-Ντέλλα Κ., (2001), *Μεσαιωνική πόλη Ρόδου Έργα αποκατάστασης (1985-2000)*, Υπουργείο Πολιτισμού Ταμείο Διαχείρισης Πιστώσεων για την Εκτέλεση Αρχαιολογικών Έργων, Ρόδος

Μανούσου-Ντέλλα, Κ., (2010), Το παλάτι του μεγάλου μαγίστρου και οι μεσαιωνικές οχυρώσεις της Ρόδου, *Rhodes & Les "Chevaliers de Rhodes" 1310-2010*, Academie historique de l' Orde de Malte, [online], Διαθέσιμο στο: [https://www.academia.edu/4871469/Το\\_Παλάτι\\_του\\_μεγάλου\\_μαγίστρου\\_και\\_οι\\_μεσαιωνικές\\_οχυρώσεις\\_της\\_Ρόδου](https://www.academia.edu/4871469/Το_Παλάτι_του_μεγάλου_μαγίστρου_και_οι_μεσαιωνικές_οχυρώσεις_της_Ρόδου)

Μανούσου-Ντέλλα Κ., (2013), *Η Πόλη της Ρόδου Κατά τους Μεσαιωνικούς Χρόνους – Ο Μετασχηματισμός των Οχυρώσεων από την Ύστερη Αρχαιότητα έως την Ιπποτική Οχυρωμένη Πόλη (7<sup>ος</sup> αι.-1480)*, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μαντάνης, Γ., Ι., (2019), *Αναγνώριση Ξύλου Προέλευση - Ονοματολογία – Ταυτοποίηση*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Θεσσαλία.

Μαντάνης, Γ., Ι., (2019), *Δομή Ξύλου*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Τμήμα Δασολογίας Επιστημών Ξύλου και Σχεδιασμού, Θεσσαλία.

Ματίκας, Θ., Αγγέλης, Δ., (2015), *Μη καταστροφικοί έλεγχοι* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο], Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Παπαχριστοδούλου, Χ., Ι., (1994), *Ιστορία της Ρόδου από τους προϊστορικούς χρόνους έως την ενσωμάτωση της Δωδεκανήσου (1948)*, Β' Έκδοση συμπληρωμένη, Δήμος Ρόδου-Στέγη Γραμμάτων και Τεχνών Δωδεκανήσου, Αθήνα.

Πούρνου, Α., (2004), *Δομή, χημική σύσταση και ιδιότητες του ξύλου – Συντήρηση ξύλινων τεχνουργημάτων μέρος 1<sup>ο</sup>*, ΤΕΙ Αθήνας Τμήμα Συντήρησης Αρχαιοτήτων και Έργων Τέχνης, Αθήνα.

Τσουμής Γ. Θ., (2009), *Επιστήμη και Τεχνολογία του ξύλου, Τόμος Α' Δομή και Ιδιότητες*, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη.