



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Μηχανικών - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

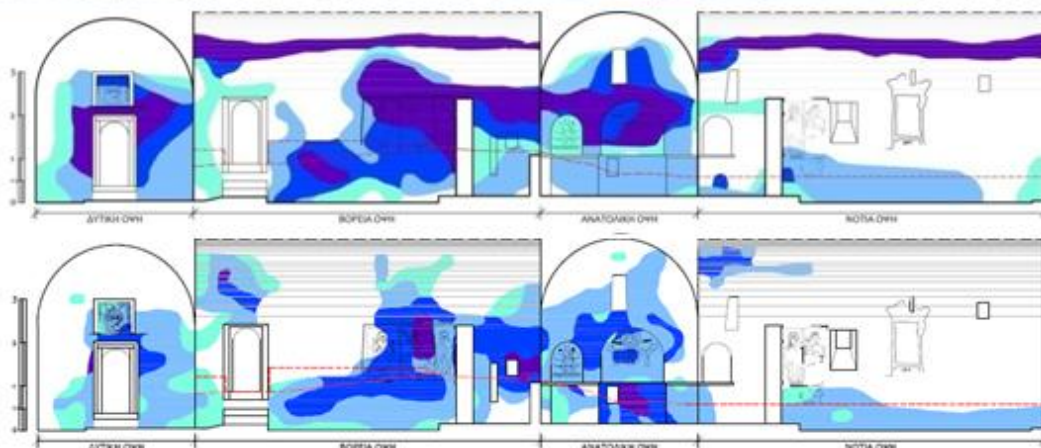
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Αρχιτεκτονική και Δομοστατική Αποκατάσταση
Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων (MSc)



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διαχείριση της υγρασίας σε τοιχογραφημένα μνημεία

Μελέτη περίπτωσης: Ο ναός του Αη Μιχάλη στον Αρίλλα Θεσπρωτίας



Αργύριος Κονιδισιώτης (ΑΜ: 7) - Ευτυχία Παπαδοπούλου (ΑΜ: 15)

Συντηρητές Αρχαιοτήτων και Έργων Τέχνης

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Δρ. Κοσμάς Καββαδίας
Μηχανολόγος Μηχανικός

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Δρ. Αφροδίτη Πασαλή
Αρχιτέκτων Μηχανικός

Αθήνα, Νοέμβριος 2021



University of West Attica
School of Engineering - Dept. of Civil Engineering

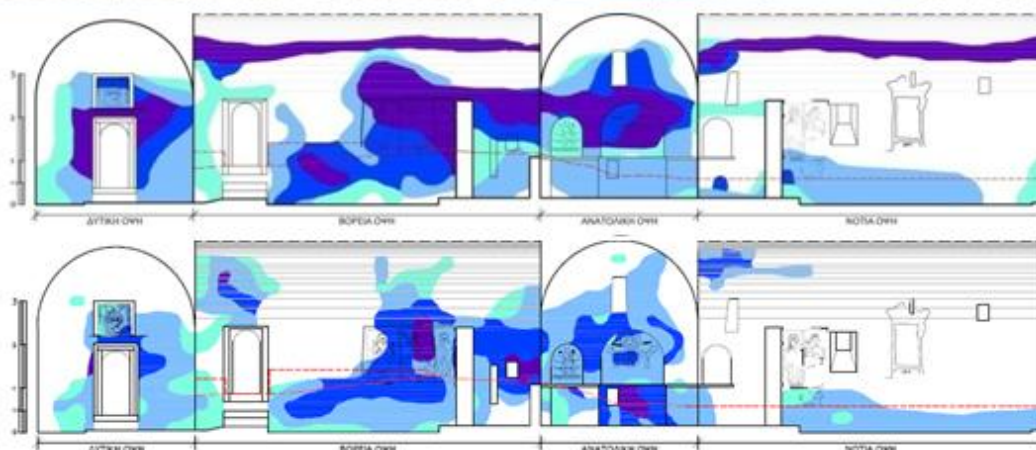
Postgraduate Study Programme
Architectural and Structural Restoration
of Historic Buildings and Ensembles (MSc)



DIPLOMA THESIS

Moisture management of wall painted monuments.

Case study: the church of Saint Michael in Arillas Thesprotia



Argyrios Koniditsiotis (Reg.N: 7) - Eftychia Papadopoulou (Reg.N: 15)

Conservators-Restorers of Antiquities and Works of Art

SUPERVISOR

Dr. Kosmas Kavvadias
Mechanical Engineer

CO-SUPERVISOR

Dr. Afrodite Pasali
Architect

Athens, November 2021



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Μηχανικών - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Αρχιτεκτονική και Δομοστατική Αποκατάσταση
Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων (MSc)



Τίτλος εργασίας

Διαχείριση της υγρασίας σε τοιχογραφημένα μνημεία.

Μελέτη περίπτωσης: Ο ναός του Αη Μιχάλη στον Αρίλλα Θεσπρωτίας

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

- 1) Δρ. Κοσμάς Καββαδίας, Μηχανολόγος Μηχανικός
- 2) Δρ. Γεώργιος Βαρελίδης, Αρχιτέκτων Μηχανικός ΕΜΠ
- 3) Δρ. Ισαάκ Βρυζίδης, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Κοσμάς Καββαδίας	Επίκουρος καθηγητής, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός	
2	Γεώργιος Βαρελίδης	Καθηγητής, Δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός ΕΜΠ	
3	Ισαάκ Βρυζίδης	Επίκουρος καθηγητής, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αργύριος Κονιδιτσιώτης του Βασιλείου, με ΑΜ: 7, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Αρχιτεκτονική και Δομοστατική Αποκατάσταση Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής 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 και τη συνυπογράφουσα Ευτυχία Παπαδοπούλου 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».

Ο Δηλών



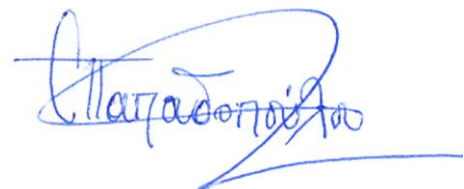
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ευτυχία Παπαδοπούλου του Δημητρίου, με ΑΜ: 15, φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Αρχιτεκτονική και Δομοστατική Αποκατάσταση Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής 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 και τον συνυπογράφοντα Αργύριο Κονιδιτσιώτη 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



Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε και συγχαίρουμε θερμά όλους τους συντελεστές του ΠΜΣ ΑΔΟΑΠ και όλως ιδιαίτέρως την ψυχή του, καθηγήτρια Δρα Αφροδίτη Πασαλή, για τη δημιουργία και εδραίωση του Προγράμματος.

Ευχαριστούμε επίσης

Τον επίκουρο καθηγητή Δρα Κοσμά Καββαδία, που μας εισήγαγε σε ζητήματα ενεργειακής απόδοσης κτηρίων, βιοκλιματικού σχεδιασμού και κλιματικής αλλαγής.

Τον Προϊστάμενο της Εφορείας Αρχαιοτήτων Θεσπρωτίας Δρα Ιωάννη Χουλιαρά, για τη συνολική στήριξή του στην προσπάθειά μας και τη μέχρι σήμερα συνεργασία μας.

Τέλος, τον τ. Προϊστάμενο του Τμήματος Συντήρησης Βυζαντινών και Μεταβυζαντινών Αρχαιοτήτων της Διεύθυνσης Συντήρησης Αρχαίων και Νεώτερων Μνημείων του Υπουργείου Πολιτισμού, Χάρη Λιωνή, ο οποίος όχι απλώς μας εισήγαγε στις λεπτές ισορροπίες του μικροκλίματος των μνημείων, αλλά και συντέλεσε καθοριστικά στη διαμόρφωση της σύγχρονης αντίληψης για τη μελέτη συντήρησης στην Ελλάδα.

Περίληψη

Η διαχείριση της υγρασίας των μνημείων είναι κομβική για τη διατήρηση των τοιχογραφιών, αφού το νερό στις διάφορες μορφές του αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα αλλοίωσής τους. Η συνολική αντιμετώπιση του φαινομένου δεν εξαντλείται στη μελέτη, τον εντοπισμό των αιτίων και την άρση τους. Οφείλει μεσοπρόθεσμα μεν να προχωρά στη διαχείριση της περιόδου ξήρανσης, για την αποτροπή της περαιτέρω απόθεσης διαλυτών αλάτων και της εμφάνισης νέων κύκλων διάλυσης - κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης, ενώ μακροπρόθεσμα να προσδιορίζει και να επιτυγχάνει το επιθυμητό για τη διατήρηση των τοιχογραφιών μικροκλίμα.

Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε στο μεταβυζαντινό ναό του Άη Μιχάλη στον Αρίλλα Θεσπρωτίας. Το μικροκλίμα του μνημείου παρακολουθείται επί τρία χρόνια. Στο διάστημα αυτό εκπονήθηκε μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών, προσδιορίστηκαν τα αίτια της υγρασίας και αντιμετωπίστηκαν με την κατασκευή τάφρου αποστράγγισης - εξαερισμού. Καταγράφηκαν ως θετικά αποτελέσματα η μικρή αύξηση του μέσου όρου της θερμοκρασίας κατά $0,32^{\circ}\text{C}$ και η σημαντική πτώση κατά $5,99\%$ του μέσου όρου της σχετικής υγρασίας, ενώ, ως ιδιαίτερα αρνητικό, η αύξηση του εύρους των ημερήσιων μεταβολών της από $14,35\%$ σε $17,88\%$. Αποδείχθηκε ότι η ξήρανση των τοίχων οδηγεί σε αύξηση του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων όταν οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές, ερμηνεύοντας έτσι τη συχνά παρατηρημένη επιδείνωση της κατάστασης των τοιχογραφιών μετά από επιτυχείς επεμβάσεις αντιμετώπισης της υγρασίας. Το γεγονός αυτό επέβαλε νέες, μικρής κλίμακας παρεμβάσεις στα ανοίγματα του κτηρίου για τον περιορισμό των ρευμάτων αέρα με άμεσα θετικά αποτελέσματα.

Το πεδίο για περαιτέρω έρευνα είναι ανεξάντλητο. Ως ιδιαίτερα ενδιαφέροντα θέματα ξεχωρίζουν η πιθανή αξιοποίηση υπεραπορροφητικών πολυμερών στις διαδικασίες ελέγχου της σχετικής υγρασίας και αφαλάτωσης και η εξέταση του βαθμού επιρροής των μεταβολών της σχετικής υγρασίας στην περιεχόμενη ως συνάρτηση του βάθους.

Η διαφαινόμενη βελτίωση του συνόλου των περιβαλλοντικών παραμέτρων καταδεικνύει ότι, σε περιπτώσεις μνημείων με τα χαρακτηριστικά του Άη Μιχάλη, ήπιες παρεμβάσεις μικρής κλίμακας, χαμηλού κόστους και μηδενικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος στο κτηριακό κέλυφος και τον περιβάλλοντα χώρο, όπως η ξήρανση των τοίχων με την κατασκευή τάφρου αποστράγγισης - εξαερισμού, η κοπή ενός δένδρου που σκιάζει τους τοίχους και ο περιορισμός των ρευμάτων αέρα, μπορεί να

είναι απολύτως επαρκείς για την εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών διατήρησης των τοιχογραφιών, ακόμη δε και για κάποια βελτίωση της θερμικής άνεσης των χρηστών.

Λέξεις κλειδιά

Συντήρηση και αποκατάσταση τοιχογραφιών, αντιμετώπιση υγρασίας, μελέτη και έλεγχος περιβαλλοντικών παραμέτρων, διαλυτά άλατα, ιστορικό κλίμα, περίοδος ξήρανσης, αφαλάτωση τοιχογραφιών.

Abstract

Moisture management of monuments is crucial for the preservation of wall paintings, since water in its various forms is the most important cause of their deterioration. The comprehensive therapy of the phenomenon cannot be limited to the study, the determination of the causes and their treatment. In the medium term it should manage the drying period, to prevent further deposition of soluble salts and the repetition of cycles of dissolution - crystallization - hydration, while in the long run to determine and achieve the climate - target for the preservation of the wall paintings.

This methodology was applied in the post-Byzantine church of Ai Michalis in Arillas, Thesprotia. The microclimate of Ai Michalis has been monitored for three years. During this period, a study for the conservation-restoration of wall paintings was carried out, the causes of humidity were determined and they were dealt with by the construction of a drainage-ventilation trench. As positive results were documented the small increase of the average temperature by 0,32°C and the significant drop of the average of the relative humidity by 5.99% and as negative the increase of the range of its daily fluctuations from 14.35% to 17.88%. Drying of the walls has been shown to increase the range of daily fluctuations when the other parameters remain constant, thus interpreting the often observed deterioration of the wall paintings after successful moisture treatment interventions. This fact imposed new, small-scale interventions in the openings of the building to reduce airflow with immediate positive results.

The field for further research is inexhaustible. Particularly interesting topics are the possible utilization of superabsorbent polymers in both the relative humidity control and desalination processes as well as the study of the influence of the relative humidity changes on the water content as a function of depth.

The apparent improvement of all the environmental parameters shows that in cases of monuments with the characteristics of «Ai Michalis», moderate interventions of small-scale, low cost and zero environmental footprint in the building shell and the surrounding area, such as drying of the walls with the construction of a drainage - ventilation trench, cutting down a tree shading the walls and the reduction of air currents, can be fully sufficient to ensure the proper preservation conditions of the wall paintings, as well as for some improvement of the thermal comfort of the users.

Keywords

Wall paintings conservation-restoration, moisture treatment, humidity, monitoring of environmental conditions, climate control, soluble salts, historic climate, drying period, desalination of wall paintings.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

I.	ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ	18
	Κατάλογος εικόνων	18
	Κατάλογος σχεδίων	22
	Κατάλογος πινάκων.....	23
	Κατάλογος γραφημάτων	24
	Κατάλογος σχημάτων.....	26
II.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	28
III.	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ.....	32
	ΜΕΡΟΣ Α: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΟΙΩΣΗΣ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΗΜΕΝΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ.....	33
1.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΩΝ	34
1.1	Οι τοιχογραφίες ως αναπόσπαστο τμήμα του αρχιτεκτονήματος	34
1.2	Η στρωματογραφία των τοιχογραφιών	34
1.3	Πορώδες και διαπερατότητα	38
1.4	Υγροσκοπικότητα	42
2.	Η ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ, ΤΑ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	43
3.	ΠΗΓΕΣ, ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΑΙΤΙΑ Ή ΤΥΠΟΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	46
3.1	Εισαγωγή και αποσαφήνιση όρων.....	46
3.2	Πηγές υγρασίας	46
3.3	Μορφές υγρασίας.....	47
3.3.1.	Στερεή μορφή.....	48
3.3.2.	Υγρή μορφή	48
3.3.3.	Αέρια μορφή	49
3.4.	Τύποι, είδη ή αίτια υγρασίας.....	50
3.4.1.	Τύποι υγρασίας σε υγρή μορφή.....	50
3.4.1.1.	Βροχή.....	50

3.4.1.2.	Ανερχόμενη υγρασία από επιφανειακά νερά ή από τον υδροφόρο ορίζοντα	51
3.4.1.3.	Υγρασία από πλευρική διείσδυση	54
3.4.1.4.	Υγρασία από κακές πρακτικές χρήσης	55
3.4.1.5.	Υγρασία από κατασκευαστικές ατέλειες, αστοχία ή φθορά δικτύων, ή πλημμελή συντήρηση	55
3.4.1.6.	Υγρασία από επεμβάσεις κτηριακής αποκατάστασης και συντήρησης διακόσμου	55
3.4.2.	Τύποι υγρασίας σε μορφή υδρατμών.....	55
3.4.2.1.	Υγρασία λόγω της φυσικής υγροσκοπικότητας των υλικών κατασκευής	56
3.4.2.2.	Υγρασία από συμπύκνωση	57
4.	ΦΘΟΡΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΩΝ	61
4.1.	Τύποι φθορών	61
4.2.	Μηχανισμοί αλλοίωσης λόγω της αλληλεπίδρασης υγρασίας - αλάτων	63
4.2.1.	Τα άλατα	63
4.2.2.	Διαλυτά και αδιάλυτα άλατα	63
4.2.3.	Προέλευση των αλάτων	65
4.2.4.	Κίνηση των υδατικών διαλυμάτων αλάτων στους τοίχους	66
4.2.5.	Μηχανισμοί φθοράς	74
5.	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑ	78
5.1.	Υπόγεια μνημεία	78
5.2.	Τοιχογραφημένα σπήλαια και μεικτές κατασκευές.....	80
5.3.	Θολοσκεπείς κατασκευές	80
5.4.	Ξυλόστεγες κατασκευές.....	81
5.5.	Υπαίθριοι ανασκαφικοί χώροι	81
6.	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	84
ΜΕΡΟΣ Β: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΗΜΕΝΑ ΜΝΗΜΕΙΑ		89

7.	ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ, ΜΟΡΦΩΝ ΚΑΙ ΑΙΤΙΩΝ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	90
7.1.	Εισαγωγή.....	90
7.2.	Αναγκαία δεδομένα	90
7.2.1.	Κλιματικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής	90
7.2.2.	Θέση και περιβάλλον χώρος του μνημείου.....	91
7.2.3.	Αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.....	92
7.2.4.	Παθολογία του κτηρίου.....	94
7.2.5.	Χρήση του μνημείου.....	94
7.2.6.	Η παθολογία των τοιχογραφιών	95
7.2.7.	Μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας.....	95
7.2.8.	Καταγραφή του μικροκλίματος του μνημείου	95
7.2.9.	Μετρήσεις θερμοκρασίας εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών	96
7.3.	Μεθοδολογία συλλογής δεδομένων.....	96
7.3.1.	Πηγές λήψης πληροφορίας	96
7.3.2.	Μετρώμενα μεγέθη	97
7.3.2.1.	Σχετική υγρασία	98
7.3.2.2.	Περιεχόμενη υγρασία	99
7.4.	Διάρκεια και περίοδοι μέτρησης	100
7.5.	Όργανα και διαδικασίες μέτρησης.....	101
7.5.1.	Θερμοκρασία και σχετική υγρασία ατμόσφαιρας.....	101
7.5.2.	Περιεχόμενη υγρασία (Moisture Content, MC% ή Water Content).....	105
7.5.3.	Θερμοκρασία επιφανειών	109
7.5.4.	Άλατα	112
7.6.	Επεξεργασία και ερμηνεία δεδομένων	114
7.6.1.	Εισαγωγή.....	114
7.6.2.	Σύγκριση εξωτερικού μικροκλίματος του μνημείου με το κλίμα της ευρύτερης περιοχής.....	116
7.6.3.	Μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος	117

7.6.4.	Ερμηνεία χαρτών περιεχόμενης υγρασίας	119
7.6.5.	Χαρτογράφηση θερμοκρασίας εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών 120	
7.6.6.	Συνεκτίμηση δεδομένων διαφορετικών μεθόδων	121
7.7.	Συμπεράσματα και πρόταση	121
7.7.1.	Ο προσδιορισμός των επιθυμητών τιμών	122
7.7.1.1.	Το θερμοδυναμικό μοντέλο του Price	123
7.7.1.2.	Η εισαγωγή της έννοιας του «ιστορικού κλίματος».....	126
8.	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	132
8.1.	Εισαγωγή - γενικές αρχές προσέγγισης τοιχογραφημένων μνημείων	132
8.2.	Μέθοδοι αντιμετώπισης των αιτιών και καταλληλότητα τεχνικών λύσεων 135	
8.2.1.	Υγρασία σε υγρή μορφή.....	135
8.2.1.1.	Βροχή.....	135
8.2.1.2.	Ανερχόμενη υγρασία από επιφανειακά νερά και πλευρική διείσδυση 137	
8.2.1.3.	Υγρασία ανερχόμενη από τον υδροφόρο ορίζοντα	139
8.2.1.4.	Υγρασία από κακές πρακτικές χρήσης	142
8.2.1.5.	Υγρασία από κατασκευαστικές ατέλειες, αστοχία ή φθορά δικτύων ή πλημμελή συντήρηση	142
8.2.1.6.	Υγρασία από επεμβάσεις κτηριακής αποκατάστασης και συντήρησης διακόσμου142	
8.2.2.	Υγρασία από νερό σε μορφή υδρατμών	143
8.2.2.1.	Υγρασία λόγω της φυσικής υγροσκοπικότητας των υλικών κατασκευής	143
8.2.2.2.	Υγρασία λόγω διάχυσης υδρατμών	144
8.2.2.3.	Αντιμετώπιση έντονων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας.....	144
9.	ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΞΗΡΑΝΣΗΣ.....	147
9.1.	Εισαγωγή.....	147
9.2.	Διάρκεια της ξήρανσης	148

9.3.	Ενέργειες για τη διατήρηση των τοιχογραφιών κατά και μετά την περίοδο ξήρανσης.....	149
9.3.1.	Έλεγχος περιβαλλοντικών παραμέτρων κατά την περίοδο ξήρανσης	150
9.3.2.	Αφαλάτωση	150
9.3.2.1.	Μέθοδοι βασισμένες στη διάχυση	155
9.3.2.2.	Μέθοδοι βασισμένες στη μεταγωγή (advection)	156
9.3.2.3.	Θετικά και αρνητικά των μεθόδων διάχυσης - οριζόντιας μεταφοράς 158	
9.3.2.3.1.	Διάχυση	158
9.3.2.3.2.	Μεταγωγή.....	158
9.3.2.4.	Παρατηρήσεις στα συμπεράσματα του προγράμματος«Desalination» 160	
9.4.	Σύνοψη	161
ΜΕΡΟΣ Γ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΑΗ ΜΙΧΑΛΗ ΣΤΟΝ ΑΡΙΛΛΑ ΘΕΣΠΡΩΤΙΑΣ.....		
		163
10.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	164
10.1.	Αιτιολόγηση της επιλογής.....	164
10.2.	Σύντομο ιστορικό και διοικητική διαδικασία	165
11.	Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΑΗ ΜΙΧΑΛΗ.....	167
11.1.	Σύντομα ιστορικά στοιχεία και αρχιτεκτονική περιγραφή.....	167
11.2.	Οι τοιχογραφίες του ναού.....	174
11.2.1.	Περιγραφή και στοιχεία εικονογραφικού προγράμματος.....	174
11.2.2.	Τεχνολογία κατασκευής των τοιχογραφιών	180
12.	ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ, ΜΟΡΦΩΝ ΚΑΙ ΑΙΤΙΩΝ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ..	186
12.1.	Εισαγωγή και μεθοδολογία	186
12.2.	Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής.....	186
12.3.	Η θέση του ναού.....	188
12.4.	Αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά στοιχεία. Παθολογία του κτηρίου σχετική με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους.....	189

12.5.	Παθολογία των τοιχογραφιών - διαλυτά άλατα	193
12.6.	Καταγραφές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας	197
12.7.	Σύγκριση των καταγραφών του εξωτερικού περιβάλλοντος με τα δεδομένα της ευρύτερης περιοχής.....	199
12.8.	Καταγραφές εξωτερικού περιβάλλοντος.....	199
12.9.	Καταγραφές εσωτερικού περιβάλλοντος	202
12.10.	Επίδραση θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό	205
12.11.	Επίδραση σχετικής υγρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό	206
12.12.	Θερμογραφική επιθεώρηση	207
12.13.	Μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας τοιχογραφιών και επιχρισμάτων	208
12.14.	Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις.....	217
13.	ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ, ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΞΗΡΑΝΣΗΣ.....	221
13.1.	Εισαγωγή.....	221
13.2.	Αντιμετώπιση της υγρασίας σε υγρή μορφή.....	222
13.3.	Παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας και των συνεπειών της επέμβασης.....	227
13.3.1.	Εισαγωγή	227
13.3.2.	Αποτελέσματα από την κατασκευή της τάφρου στην περιεχομένη υγρασία τοιχογραφιών και επιχρισμάτων	228
13.3.3.	Αποτελέσματα από την κατασκευή της τάφρου στη θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος	231
13.3.4.	Αποτελέσματα από την κατασκευή της τάφρου στη σχετική υγρασία εσωτερικού περιβάλλοντος	234
13.3.5.	Συμπεράσματα	241
13.4.	Μέτρα για τον περιορισμό των ρευμάτων αέρα.....	241
13.5.	Αποτελέσματα των μέτρων	242

13.6.	Προσδιορισμός μεσοπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος περιόδου ξήρανσης	243
13.7.	Επεμβάσεις αφαλάτωσης.....	244
13.8.	Προσδιορισμός μακροπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος.....	250
14.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	253
15.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	257

I. ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

Κατάλογος εικόνων

Εικ. 1: Τοιχογραφία αρχών 20 ^{ου} αι. Αριστερά, το 2014. Δεξιά, το 2020.	28
Εικ. 2: Στρωματογραφία τοιχογραφίας	35
Εικ. 3: Πολύ συχνά η στρωματογραφία γίνεται πιο σύνθετη,	35
Εικ. 4: Ασβεστοκονίαμα με φυτικές ίνες	36
Εικ. 5: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), κρύσταλλοι ασβεστίτη και γύψου σε ασβεστογυψοκονίαμα (Παπαδοπούλου, κ.ά., 2008)	36
Εικ. 6: Ποικιλία αλλοιώσεων λόγω υγρασίας	62
Εικ. 7: Αποσάθρωση και έκπλυση υποστρώματος,	62
Εικ. 8: Προβλέψεις για τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής (Bertolin, κ.ά., 2014)...	87
Εικ. 9: Προβλέψεις για τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής (Leissner, κ.ά., 2015) ..	87
Εικ. 10: Όπως παραπάνω (Leissner, κ.ά., 2015)	88
Εικ. 11: Παράδειγμα χάρτη κατανομής περιεχόμενης υγρασίας (Κονιδιτσιώτης, 2019)	109
Εικ. 12: Κόγχες σε τοιχοποιία μεταβυζαντινού ναού. Επανάληψη του ελέγχου και σύγκριση των θερμοεικόνων διαφορετικών περιόδων. Αριστερά: λήψη 30 Ιουλίου 2016, δεξιά: 29 Νοεμβρίου 2016. Οι εξωτερικές συνθήκες επηρεάζουν έντονα τις περιοχές της τοιχοποιίας με το μικρότερο πάχος, όπως οι κόγχες (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2017b).	111
Εικ. 13: Ψύξη των παραστάδων(λαμπάδων) και του ανωφλιού.....	112
Εικ. 14: Διαφοροποίηση θερμοκρασίας επιφανειών ανάλογα με τη θέση και το δομικό υλικό.	112
Εικ. 15: Θερμοεικόνα (αριστερά) και χάρτης κατανομής περιεχόμενης υγρασίας (δεξιά)	121
Εικ. 16: Θραύση κεραμιδιών από παγετό (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2016)...	135
Εικ. 17: Από αριστερά προς τα δεξιά: Ατμοδιαπερατό υλικό υδροφοβίωσης,	137
Εικ. 18: Αη Μιχάλης στον Αρίλλα Θεσπρωτίας. Άποψη από Β	167
Εικ. 19: Η Πέρδικα Θεσπρωτίας (Google Earth)	168

Εικ. 20: Αη Μιχάλης στον Αρίλλα Θεσπρωτίας. Άποψη από Ν.	168
Εικ. 21: Εγχάρακτη επιγραφή στο νότιο τοίχο	169
Εικ. 22: Αφιερωματική επιγραφή στην παράσταση του Βορείου τοίχου	170
Εικ. 23: Δίπτυχα πρόθεσης	170
Εικ. 24: Άποψη του ναού από ψηλά. Δορυφορική λήψη (Google Earth)	171
Εικ. 25: Ανατολική όψη: εμφανής η κατωφέρεια, η ημικυκλική αψίδα του ιερού,	172
Εικ. 26: Το γείσο στη στέψη της τοικοποιίας.....	173
Εικ. 27: Ο νεώτερος, κτιστός πάγκος	173
Εικ. 28: Ο νεώτερος νάρθηκας στα δυτικά	173
Εικ. 29: Βόρεια είσοδος εξωτερικά και κτιστή κλίμακα της ίδιας εισόδου στο εσωτερικό	174
Εικ. 30: Οι τοιχογραφίες του ναού	174
Εικ. 31: Κόγχη του ιερού. Πλατυτέρα	176
Εικ. 32: Κόγχη της πρόθεσης. Άκρα Ταπείνωση	176
Εικ. 33: Τέμπλο. Ανώτερη ζώνη	176
Εικ. 34: Τέμπλο. Αρχάγγελος Μιχαήλ	177
Εικ. 35: Τέμπλο. Μήτηρ Θεού	177
Εικ. 36: Τέμπλο. Ιησούς Χριστός και ο Άγιος Ιωάννης ο Πρόδρομος	177
Εικ. 37: Φυτικός διάκοσμος στα εσωρράχια των εισόδων προς το ιερό	178
Εικ. 38: Τέμπλο. Γραμμικός διάκοσμος	178
Εικ. 39: Σταυροί εμπίεστοι ή χαραγμένοι	178
Εικ. 40: Βόρειος τοίχος. Άγιος Νικόλαος, Άγιος Γεώργιος έφιππος.....	179
Εικ. 41: Νότιος τοίχος. Άγιος Βασίλειος και Άγιος Δημήτριος έφιππος	180
Εικ. 42: Δυτικός τοίχος. Κοίμηση της Θεοτόκου	180
Εικ. 43: Η επιφάνεια.....	180
Εικ. 44: Η δομή του	180
Εικ. 45: Η στρωματογραφία όπως αποκαλύπτεται σε περιοχές απωλειών.	181
Εικ. 46: Το λεπτόκοκκο στρώμα επιχρίσματος σε πάχος ελάχιστων χιλιοστών	181

Εικ. 47: Χάραξη του προσχεδίου σε νωπό κονίαμα	182
Εικ. 48: Πλατυτέρα. Αριστερά, λήψη στο ορατό, δεξιά ψευδοχρωματική υπερύθρου. 183	
Εικ. 49: Τέμπλο, ζώνη αποστολικού. Ό.π.	183
Εικ. 50: Η θέση του Αη Μιχάλη (Google Earth).....	188
Εικ. 51:Υψομετρική διαφορά μεταξύ δυτικού τοίχου του κυρίως ναού και νεώτερου νάρθηκα	189
Εικ. 52:Θερμογραφική απεικόνιση του δυτικού τοίχου από το εσωτερικό.	190
Εικ. 53: Ιερό, βόρειος τοίχος. Η ψυχρή ζώνη χαμηλά αντιστοιχεί περίπου στην περιοχή του τοίχου που βρίσκεται χαμηλότερα από τη στάθμη του εδάφους με αποτέλεσμα τον περιορισμό της επίδρασης του θερμού εξωτερικού περιβάλλοντος, αλλά την εμφάνιση υγρασίας από πλευρική διείσδυση, η εξάτμιση της οποίας ψύχει περαιτέρω την επιφάνεια.	191
Εικ. 54: Ρωγμή μεταξύ κτιστού πάγκου και βόρειου τοίχου	192
Εικ. 55: Η νεώτερη στέγη	192
Εικ. 56: Εσωτερική διαμόρφωση παραθύρων.....	193
Εικ. 57: Τοποθέτηση διαφανών πετασμάτων εξωτερικά	193
Εικ. 58: Αποκολλήσεις και απώλειες υποστρώματος	194
Εικ. 59: Αποκολλήσεις, απώλειες, αποσάθρωση, παραμόρφωση, πλήρης αποδιοργάνωση επιφανειακού υποστρώματος και χρωματικού στρώματος	195
Εικ. 60: Ολική απώλεια επιφανειακού στρώματος επιχρίσματος	195
Εικ. 61: Απώλειες χρωματικού στρώματος και αποσάθρωση, μερική ή και ολική απώλεια επιφανειακού στρώματος επιχρίσματος, εξανθήσεις αλάτων. Η δέσμη ινών στο μέσον της εικόνας δεν είναι οργανικές ίνες που είχαν προστεθεί στη δομή του κονιάματος, αλλά εξανθήσεις αλάτων.	196
Εικ. 62: Πλήρης αποδιοργάνωση υποστρώματος και χρωματικού στρώματος,	196
Εικ. 63: Παράσταση Αγ. Δημητρίου, δοκιμές αφαίρεσης πέπλων αλάτων	197
Εικ. 64: Τοποθέτηση καταγραφικού στο εσωτερικό του μνημείου	198
Εικ. 65: Το στέγαστρο κάτω από το οποίο τοποθετήθηκε αρχικά το καταγραφικό. ..	201
Εικ. 66: Θερμογραφική απεικόνιση, 15/7/2018, 14:22. Ηλιοφάνεια. Εξωτερική θερμοκρασία: 33,6°C. Η πυράκτωση του στεγάστρου από ελενίτ οδηγεί στη θέρμανση	

λόγω ακτινοβολίας της περιοχής κάτω απ' αυτό, ακόμη και της τοικοποιίας, αλλά και στην αλλοίωση των μετρήσεων.	202
Εικ. 67: Βόρειος τοίχος, κατώτερη ζώνη, θερμογραφική απεικόνιση.	208
Εικ. 68: Κτιστό τέμπλο, βόρειο τμήμα. Δεξιά, απεικόνιση στο ορατό.	208
Εικ. 69: Ιερό, νότιος τοίχος, άνω ζώνη. Θερμογραφική απεικόνιση υπερύθρου: Συνθήκες λήψης: T=15,5°C, RH=70%.	212
Εικ. 70: Κυρίως ναός, βόρειος τοίχος, άνω ζώνη. Θερμογραφική απεικόνιση υπερύθρου: Συνθήκες λήψης: T=15,5°C, RH=70%.	212
Εικ. 71: Αποσάθρωση ξύλινου κασσώματος.....	213
Εικ. 72: Τεταρτοσφαίριο αφίδας και προστατευτικό πέτασμα ανατολικού παραθύρου	214
Εικ. 73: Ανατολική όψη. Κατακόρυφοι αεραγωγοί για τον έλεγχο του εξαερισμού της τάφρου	225
Εικ. 74: Λεπτομέρεια ΝΑ γωνίας	226
Εικ. 75: ΒΔ πλευρά. Περιμετρικό δίκτυο στράγγισης και κατακόρυφος αεραγωγός..	226
Εικ. 76: Λεπτομέρεια ΒΔ γωνίας	227
Εικ. 77: Ιερό, βόρειος τοίχος (ΒΑ).	248
Εικ. 78: Αριστερά (16-06-2020): Χάρτης κατανομής περιεχόμενης υγρασίας. Στο κέντρο (30-06-2020): Επίθεμα αφαλάτωσης. Δεξιά (31-08-2020): Χάρτης κατανομής περιεχόμενης υγρασίας	249
Εικ. 79: Εμφάνιση εξανθήσεων αλάτων δύομισι μήνες μετά τις επεμβάσεις αφαλάτωσης	250

Κατάλογος σχεδίων

Σχέδιο 1: Κάτοψη	171
Σχέδιο 2: Κάτοψη: θέσεις τοιχογραφιών	175
Σχέδιο 3: Νότιος τοίχος, χάρτης κατανομής υγρασίας.....	210
Σχέδιο 4: Δυτικός τοίχος, χάρτης κατανομής υγρασίας	212
Σχέδιο 5: Ιερό, ανατολικός τοίχος, χάρτης κατανομής υγρασίας	214
Σχέδιο 6: Τμήμα του Βόρειου τοίχου, χάρτης κατανομής υγρασίας.....	215
Σχέδιο 7: Κτιστό τέμπλο,	215
Σχέδιο 8: Βόρειος τοίχος, χάρτης κατανομής υγρασίας. Με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή δηλώνεται η θέση του κτιστού πεζουλιού και η στάθμη του εδάφους.....	216
Σχέδιο 9: Χάρτης περιεχόμενης υγρασίας από μετρήσεις της 31-10-2018	230
Σχέδιο 10: Χάρτης περιεχόμενης υγρασίας από μετρήσεις της 16-07-2019	230
Σχέδιο 11: Χάρτης περιεχόμενης υγρασίας από μετρήσεις της 08-11-2019	230
Σχέδιο 12: Χάρτης περιεχόμενης υγρασίας περιόδου 16-06-2020	230
Σχέδιο 13: Κάτοψη. Τα ανοίγματα του κυρίως ναού	242

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Συσχέτιση θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και σημείου δρόσου (Allerton, 2020)	58
Πίνακας 2: Πίνακας διαλυτότητας αλάτων (Ο Θαυμαστός Κόσμος της Χημείας)	64
Πίνακας 3: Αναγκαία δεδομένα θερμογραφικής επιθεώρησης τοιχογραφημένου μνημείου (Παπαδοπούλου και Κονιδιτσιώτης 2020)	111
Πίνακας 4: Πίνακας εβδομαδιαίων διακυμάνσεων και μέγιστων ημερήσιων διαφορών (Παπαβρανούση-Λιωνή, 2010)	116
Πίνακας 5: Βασικά μεγέθη μιας περιόδου καταγραφής.....	116
Πίνακας 6: Θερμοκρασίες της ευρύτερης περιοχής	187
Πίνακας 7: Ετήσιες συχνότητες ανέμου. Δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Κέρκυρας. Πηγή: ΕΜΥ.....	187
Πίνακας 8: Περίοδος καταγραφής δεδομένων θερμοκρασίας κα σχετικής υγρασίας και χρονική τοποθέτηση εργασιών - σταθμών.....	228
Πίνακας 9: Δεδομένα συσχέτισης περιεχόμενης υγρασίας με τη σχετική υγρασία του προηγούμενου διαστήματος	229
Πίνακας 10: Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι θερμοκρασίας εσωτερικού	232
Πίνακας 11: Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι θερμοκρασίας εσωτερικού	233
Πίνακας 12: Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος περιόδου καταγραφής 2019	235
Πίνακας 13: Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος περιόδου καταγραφής 2020	236
Πίνακας 14: Εύρος ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας	243

Κατάλογος γραφημάτων

Γράφημα 1: Μεταβολή της διαλυτότητας του νιτρικού καλίου	65
Γράφημα 2: Περίπτωση μνημείου με πολλά ελεύθερα ανοίγματα.....	93
Γράφημα 3: Μνημείο με αεροστεγή ανοίγματα.....	93
Γράφημα 4: Επίδραση της θέρμανσης στη σταθερότητα της θερμοκρασίας.....	94
Γράφημα 5: Υγρομετρικός χάρτης (Λαμπρόπουλος, 2003).....	98
Γράφημα 6: Αλλοίωση δεδομένων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας λόγω εσφαλμένης τοποθέτησης συσκευής και απευθείας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας.	102
Γράφημα 7: Δυσλειτουργία συσκευής καταγραφής σχετικής υγρασίας λόγω συμπύκνωσης. (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2020).....	104
Γράφημα 8: Λειτουργία θερμαινόμενης συσκευής καταγραφής σχετικής υγρασίας. DP: σημείο δρόσου. SH: στιγμιαία θέρμανση. SC: σταδιακή ψύξη. TM: Λήψη μέτρησης (Camuffo, 2019).	104
Γράφημα 9: Διάγραμμα σύγκρισης καμπυλών θερμοκρασίας εσωτερικού (κόκκινη) .	118
Γράφημα 10: Διασπορά τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.....	119
Γράφημα 11: Οι δύο τρόποι υπολογισμού του κυλιόμενου μέσου όρου. Γαλάζια καμπύλη:	130
Γράφημα 12: Υπολογισμός των ορίων των αποδεκτών ημερήσιων αποκλίσεων με βάση τον ΚΜΟ των προηγούμενων τριάντα ημερών. Γαλάζια καμπύλη: Οι ημερήσιοι μέσοι όροι. Κόκκινη στικτή καμπύλη: Ο ΚΜΟ των προηγούμενων 30 ημερών. Άνω και κάτω στικτή καμπύλη: τα αποδεκτά όρια των διακυμάνσεων υπολογισμένων με βάση τον ΚΜΟ των προηγούμενων τριάντα ημερών.	130
Γράφημα 13: Υπολογισμός των ορίων των αποδεκτών ημερήσιων αποκλίσεων με βάση τον ΚΜΟ των προηγούμενων και επόμενων δεκαπέντε ημερών.....	131
Γράφημα 14: Περιορισμός ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας	146
Γράφημα 15: Καμπύλη ανάκλασης πράσινου verdigris	184
Γράφημα 16: Καμπύλη ανάκλασης μπλε ultramarin	185
Γράφημα 17: Καμπύλες ανάκλασης κόκκινων χρωστικών.	185
Γράφημα 18: Διακυμάνσεις θερμοκρασίας (κόκκινη καμπύλη) και σχετικής υγρασίας	199

Γράφημα 19: Θερμοκρασία (κόκκινη καμπύλη) και σχετική υγρασία εξωτερικού	201
Γράφημα 20: Θερμοκρασία και σχετική υγρασία εσωτερικού περιβάλλοντος	202
Γράφημα 21: «Ανορθόδοξη», παράλληλη κίνηση καμπυλών θερμοκρασίας (κόκκινη)	204
Γράφημα 22: Προφανής επίδραση της σχετικής υγρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος.....	204
Γράφημα 23: Καμπύλες θερμοκρασίας εσωτερικού (κόκκινη) - εξωτερικού περιβάλλοντος. Εντυπωσιακή σταθερότητα του πρώτου, αλλά και σαφής εξάρτησή του από το δεύτερο.	205
Γράφημα 24: Καμπύλες σχετικής υγρασίας εξωτερικού (γαλάζια) - εσωτερικού (μπλε) περιβάλλοντος για όλο το διάστημα της καταγραφής.	206
Γράφημα 25:Θερμοκρασίες εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος	234
Γράφημα 26: Σχετική υγρασία εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος.....	237
Γράφημα 27: Σύγκριση μέσων όρων μέγιστων ημερήσιων διακυμάνσεων.....	238
Γράφημα 28: Διασπορά τιμών μέγιστης ημερήσιας διακύμανσης σχετικής	238
Γράφημα 29: Διασπορά τιμών μέγιστης ημερήσιας διακύμανσης σχετικής	239
Γράφημα 30: Διασπορά τιμών ελάχιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας	240
Γράφημα 31: Διασπορά τιμών ελάχιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας	240
Γράφημα 32: Εύρος ημερήσιων διακυμάνσεων	243
Γράφημα 33: Εξομαλυμένη καμπύλη μετρήσεων αγωγιμότητας	246
Γράφημα 34: Προσδιορισμός μακροπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος	251
Γράφημα 35: Προσδιορισμός των επιθυμητών ορίων του εύρους των ημερήσιων.....	252

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Το ολικό πορώδες (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2019)	39
Σχήμα 2: Μέγεθος πόρων κατά IUPAC 1972 (Thomson, κ.ά. 2004)	39
Σχήμα 3: Ζώνες κατανομής αλάτων	68
Σχήμα 4: Μορφές εξανθήσεων αλάτων (Arnold & Zehnder, 1991)	73
Σχήμα 5: Τάφροι αποστράγγισης σε επαφή με την τοιχοποιία (Αραβαντινός, 2004) ..	138
Σχήμα 6: Τάφρος αποστράγγισης σε απόσταση από την τοιχοποιία (Αραβαντινός, 2004)	139
Σχήμα 7: Εργασίες προστασίας του κτηρίου από την υγρασία (Αραβαντινός, 2004) ..	140

*«Μη βασίζεστε στην κοινή λογική.
Η υγρασία μπορεί και πρέπει να μετράται»
(Massari&Massari, 1993)*

*«Η θεραπεία πρέπει να αντιμετωπίζει
τα αίτια των βλαβών και της φθοράς και όχι τα συμπτώματα.
Η καλύτερη θεραπεία είναι η προληπτική συντήρηση.»
(ISCARSAH - ICOMOS, 2003)*

II. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τοιχογραφικός διάκοσμος των μνημείων συνιστά ένα εξαιρετικά σημαντικό τμήμα της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς. Μεταξύ των παραγόντων φθοράς τους, η υγρασία είναι ο σοβαρότερος. Για το λόγο αυτό, η διαχείριση της υγρασίας σε τοιχογραφημένα μνημεία αποκτά ιδιαίτερη σπουδαιότητα.



Εικ. 1: Τοιχογραφία αρχών 20^{ου} αι. Αριστερά, το 2014. Δεξιά, το 2020. Ολοκληρωτική καταστροφή σε έξι μόλις χρόνια υπό την επίδραση της υγρασίας.

Το ζήτημα της υγρασίας στα κτήρια αποτελεί διαρκή πρόκληση, για λόγους διατήρησης των δομικών υλικών, μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, θερμικής άνεσης των χρηστών, αποφυγής δαπανηρών και συχνά αναποτελεσματικών ή και επιζήμιων επεμβάσεων. Πρόκειται για θέμα εκτενώς μελετημένο, με σημαντική αρθρογραφία και εκδόσεις. Η ιδιαιτερότητα της παρούσας εργασίας έγκειται στην προσέγγιση του θέματος από την οπτική της διατήρησης του τοιχογραφικού διακόσμου των μνημείων, του οποίου η υγρασία αποτελεί τη συχνότερη αιτία αλλοίωσης. Από αυτή την άποψη, το πρόβλημα της υγρασίας δεν εξαντλείται στη μελέτη, τον εντοπισμό των αιτιών και την αντιμετώπισή τους, αλλά προχωρά στη διαχείριση της περιόδου και της διαδικασίας της αποβολής του νερού, με κύριο στόχο την αποτροπή της απόθεσης διαλυτών αλάτων και της επανάληψης νέων κύκλων διάλυσης - κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης. Η οπτική αυτή πρέπει να καθορίζει τον τρόπο αντιμετώπισης των αιτιών, αλλά και επιβάλλει, πέραν

των πιθανών εργασιών μηχανικού επί του κτηριακού κελύφους και του περιβάλλοντος χώρου, μια σειρά από ενέργειες του συντηρητή αρχαιοτήτων και έργων τέχνης, που πρέπει να αφορούν τόσο στον κατά περίπτωση προσδιορισμό και έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων, όσο και σε επεμβάσεις επί των τοιχογραφιών.

Η αντιμετώπιση της υγρασίας επομένως, από την άποψη της διατήρησης των τοιχογραφιών δεν εξαντλείται σε οικοδομικές εργασίες ή σε ηλεκτρομηχανολογικές παρεμβάσεις, αλλά επιβάλλει:

- συνέχιση της παρακολούθησης των περιβαλλοντικών παραμέτρων
- μικρής κλίμακας, ήπιες επεμβάσεις παθητικού κυρίως χαρακτήρα για τον έλεγχο του μικροκλίματος και
- επεμβάσεις επί των τοιχογραφιών με κύριο στόχο την αφαλάτωση.

Σε αντίθετη περίπτωση, ακόμη και εάν τα αίτια της υγρασίας διαγνωσθούν και αντιμετωπιστούν ορθά, είναι πιθανόν να προκληθούν σοβαρές, μη αντιστρεπτές αλλοιώσεις στον τοιχογραφικό διάκοσμο.

Στο πλαίσιο αυτό, η προσέγγιση των περιβαλλοντικών παραμέτρων των μνημείων πρέπει να γίνεται κυρίως με όρους διατήρησης του δημόσιου πολιτιστικού αγαθού και μόνο δευτερευόντως με όρους θερμικής άνεσης των χρηστών ή κατανάλωσης ενέργειας.

Μεταξύ των ερωτημάτων που επιχειρείται να τεθούν, είναι και το εάν ελάχιστες, ήπιες παρεμβάσεις επί του κτηρίου και του άμεσου περιβάλλοντός του είναι δυνατόν να συμβάλλουν ευνοϊκά στον έλεγχο των συνθηκών διατήρησης, αφού οι δραστικότερες κτηριακές επεμβάσεις και ιδίως οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις συνήθως αλλοιώνουν σοβαρά την αυθεντικότητα και την αισθητική του μνημείου, είναι λιγότερο ή περισσότερο ενεργοβόρες, και κυρίως αποδεικνύονται βραχύβιες, καθώς, η συντήρησή τους, ιδίως σε απομακρυσμένα μνημεία, αποδεικνύεται συνήθως ανέφικτη.

Η υγρασία αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα αλλοίωσης των τοιχογραφιών, είτε άμεσα, είτε, κυρίως, μέσω της ενεργοποίησης άλλων μηχανισμών αλλοίωσης, μεταξύ των οποίων οι καταστροφικότεροι είναι οι αλληπάλληλοι κύκλοι διάλυσης - κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης των διαλυτών αλάτων. Η σύνθεση των τάσεων της διεθνούς βιβλιογραφίας των τελευταίων δεκαετιών οδηγεί σε ένα μοντέλο αντιμετώπισης του προβλήματος που περιλαμβάνει συστηματική μελέτη για την

κατανόηση των ζητημάτων μικροκλίματος του κάθε συγκεκριμένου μνημείου, επεμβάσεις μηχανικού για την άρση των αιτιών της υγρασίας, συνεχή παρακολούθηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων για την αξιολόγηση της επιτυχίας των επεμβάσεων, εστιασμένες ενέργειες αφαλάτωσης επί των τοιχογραφιών, για τη μείωση των περιεχόμενων διαλυτών αλάτων και μακροπρόθεσμο έλεγχο του περιβάλλοντος για τον περιορισμό των κύκλων κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης των διαλυτών αλάτων. Ενώ η μεθοδολογία αυτή συνθέτει τις σύγχρονες τάσεις της έρευνας, από την ελληνική βιβλιογραφία απουσιάζει μια εργασία που να εξετάζει κατά τρόπο ολοκληρωμένο ένα μνημείο πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τις επεμβάσεις αντιμετώπισης της υγρασίας. Πολύ περισσότερο, οι μελέτες συντήρησης τοιχογραφημένων μνημείων κατά κανόνα είτε παραλείπουν ολοκληρωτικά το ζήτημα, είτε το αντιπαρέχονται με την παράθεση γενικοτήτων, όπως η αναφορά θεωρητικά επιθυμητών τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Αυτά συμβαίνουν ενώ:

- οι περιβαλλοντικές συνθήκες αναγνωρίζονται ως η σοβαρότερη αιτία αλλοίωσης των τοιχογραφιών,
- οι κατάλληλες συνθήκες περιβάλλοντος πρέπει να εξειδικεύονται και να προσαρμόζονται ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του κάθε μνημείου,
- υπάρχουν στην ελληνική βιβλιογραφία, ήδη από τρεις δεκαετίες αλλά ακόμη επίκαιρες, μελέτες - σταθμοί, οι οποίες θα έπρεπε να αξιοποιούνται ως πρότυπα για την εξέταση και θεραπεία προβλημάτων υγρασίας τοιχογραφημένων μνημείων¹.

Σημειώνεται ότι είναι αναγκαίο η παρακολούθηση και ο έλεγχος των περιβαλλοντικών παραμέτρων των τοιχογραφημένων μνημείων να είναι όχι απλώς μακροχρόνια αλλά διαρκή.

Με αυτά τα δεδομένα, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιδιώκεται η ανάδειξη του εύρους και της πολυπλοκότητας του ζητήματος και συγκεκριμένα:

- Στο πρώτο μέρος επιχειρείται η θεωρητική προσέγγιση των σχετικών με την υγρασία μηχανισμών αλλοίωσης των τοιχογραφιών. Εξετάζονται η τεχνολογία κατασκευής των τοιχογραφιών, η κίνηση του νερού στην τοιχοποιία, ζητήματα

¹Λιωνής, 1992

ορολογίας και διάκρισης των πηγών, μορφών και αιτίων υγρασίας, η σχετική παθολογία, οι μηχανισμοί κρυστάλλωσης και ενυδάτωσης των διαλυτών αλάτων, η σχέση αρχιτεκτονικού τύπου - υγρασίας, καθώς και συναφή θέματα κλιματικής αλλαγής..

- Στο δεύτερο μέρος εξετάζεται η μεθοδολογία μελέτης της υγρασίας σε τοιχογραφημένα μνημεία, η αντιμετώπισή της και η διαχείριση της περιόδου ξήρανσης, με έμφαση στον έλεγχο του περιβάλλοντος και σε ζητήματα αφαλάτωσης και ο προσδιορισμός του μακροπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος
- Στο τρίτο μέρος παρατίθεται η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας στο ναό του Αη Μιχάλη στον Αρίλλα Θεσπρωτίας ως μελέτη περίπτωσης, η οποία ενέχει χαρακτηριστικά πληρότητας, τουλάχιστον ως προς την τήρηση των βασικών σταδίων²: Παρουσιάζεται η διοικητική διαδικασία, η μελέτη περιβαλλοντικών παραμέτρων και ο προσδιορισμός των αιτίων υγρασίας, η πρόταση και αντιμετώπιση του αιτίου, η παρακολούθηση των συνεπειών της επέμβασης. Περιγράφονται οι επεμβάσεις αφαλάτωσης που πραγματοποιήθηκαν όταν τεκμηριώθηκε η έναρξη της περιόδου ξήρανσης και η διαδικασία προσδιορισμού του μακροπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι το μνημείο παρακολουθείται για περισσότερο από τρία συνεχή έτη.

²Οι συντάκτες της εργασίας δεν έχουν εντοπίσει σχετική δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη μελέτη για μνημείο του ελλαδικού χώρου, στην οποία να εξετάζεται η αποτελεσματικότητα και ιδίως οι συνέπειες των παρεμβάσεων αντιμετώπισης της υγρασίας.

III. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ

Στη χώρα μας, η συντριπτική πλειοψηφία των τοιχογραφημένων μνημείων που αντιμετωπίζουν στο πεδίο οι συντηρητές τοιχογραφιών είναι βυζαντινά και μεταβυζαντινά εκκλησιαστικά μνημεία. Για το λόγο αυτό και η παρούσα εργασία προσανατολίζεται κυρίως προς αυτή την κατεύθυνση, εστιάζοντας σε ιστάμενους βυζαντινούς και μεταβυζαντινούς ναούς. Για λόγους πληρότητας γίνεται συνοπτική αναφορά και σε υπαίθριους ανασκαφικούς χώρους, υπόγεια ταφικά μνημεία της αρχαιότητας και σπηλαιώδεις τοιχογραφημένους χώρους.

Η πολυπληθής κατηγορία των νεώτερων, αστικών κυρίως «νεοκλασικών» και «εκλεκτικιστικών» τοιχογραφημένων κτηρίων δεν εξετάζεται. Η εξαίρεση αυτή σε ένα βαθμό οφείλεται στις διαφορές στα υλικά και τις μεθόδους κατασκευής σε σχέση με προγενέστερα κτήρια, όπως η σταδιακή εισαγωγή του τσιμέντου και μεταλλικών δομικών στοιχείων. Κυρίως όμως συμβαίνει διότι τα κτήρια αυτά, τόσο λόγω του σημερινού ιδιοκτησιακού τους καθεστώτος (συνήθως ιδιωτικά), όσο και μιας «χαλαρότητας» που χαρακτηρίζει το βαθμό προστασίας τους, συχνά αντιμετωπίζονται ως κελύφη και η διατήρησή τους περιλαμβάνει μόνο τις όψεις τους. Οι τεχνικοί και θεσμικοί αυτοί λόγοι, σε συνδυασμό με την έλλειψη κουλτούρας διατήρησης που χαρακτηρίζει τη νεοελληνική κοινωνία, το εξαιρετικά υψηλό κόστος των σχετικών εργασιών και την πλήρη απουσία δημόσιας χρηματοδότησης και κινήτρων, καθιστά μια συστηματική προσέγγιση των περιβαλλοντικών παραμέτρων και των επιπτώσεών τους επί των δομικών υλικών και του διακόσμου τους εκτός πραγματικότητας.

ΜΕΡΟΣ Α: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΟΙΩΣΗΣ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΗΜΕΝΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

*«Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρήθηκε ότι συχνά οι τοιχογραφίες αλλοιώνονται ταχύτερα μετά τη συντήρησή³.
[...] Κυρίαρχο αίτιο αποτελεί η δράση των διαλυτών αλάτων.»*
(Arnold & Zehnder, 1991)

³Από τα συμφραζόμενα του άρθρου συνάγεται ότι ο όρος αναφέρεται εξίσου σε επεμβάσεις συντήρησης επί του κτηριακού κελύφους και του διακόσμου.

1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΩΝ

1.1 Οι τοιχογραφίες ως αναπόσπαστο τμήμα του αρχιτεκτονήματος

Η κατάσταση διατήρησης των τοιχογραφιών καθορίζεται από την αλληλεπίδραση του ανθρωπογενούς και φυσικού περιβάλλοντός τους, με την τεχνολογία κατασκευής τους, δηλαδή τα υλικών και τις μεθόδους κατασκευής.

Βασικό χαρακτηριστικό τους αποτελεί το γεγονός ότι συνιστούν, τεχνικά και εννοιολογικά, αναπόσπαστο τμήμα των αρχιτεκτονημάτων τα οποία κοσμούν⁴. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ευαίσθητη φύση τους, τις καθιστά ευάλωτες καταρχήν σε κάθε μεταβολή του ίδιου του κτηρίου, το οποίο είναι το υποστήριγμά τους. Εύλογα έχει ειπωθεί ότι οι τοιχογραφίες αντανακλούν την κατάσταση διατήρησης ενός μνημείου (Λιωνής, 1999) αφού η παθολογία του κτηριακού κελύφους αποτυπώνεται άμεσα επάνω τους.

Περαιτέρω, λόγω της θέσης τους, αποτελούν τη διεπιφάνεια μεταξύ του κτηρίου και του εσωτερικού (σπανιότερα και του εξωτερικού) περιβάλλοντός του, και επομένως τον τόπο όπου συντελούνται όλες οι σχετικές με την κίνηση του νερού εξισορροπητικές διαδικασίες (μεταβολές θερμοκρασίας, εξάτμιση, κύκλοι αλάτων, ρόφηση και αποβολή υγρασκοπικής υγρασίας, συγκέντρωση και εξάτμιση υγρασίας από συμπύκνωση).

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά ζητήματα τεχνολογίας κατασκευής των τοιχογραφιών, ενώ αναπτύσσονται κάποια που σχετίζονται πιο άμεσα με ζητήματα υγρασίας.

1.2 Η στρωματογραφία των τοιχογραφιών

Προϋπόθεση για την προσέγγιση των τοιχογραφιών, αποτελεί η κατανόηση του γεγονότος ότι αποτελούν ένα σύνθετο στρωματογραφικά σύστημα που αναλύεται σε υποστήριγμα, υπόστρωμα και χρωματικό στρώμα.

⁴«Τα γλυπτικά, ζωγραφικά ή διακοσμητικά στοιχεία που είναι αναπόσπαστα δεμένα με το μνημείο, δεν μπορούν να διαχωριστούν παρά μόνο αν το μέτρο αυτό είναι η μοναδική διέξοδος για να εξασφαλισθεί η διάσωσή τους», Χάρτα της Βενετίας (1964), παρ. 8.



Εικ. 2: Στρωματογραφία τοιχογραφίας



Εικ. 3: Πολύ συχνά η στρωματογραφία γίνεται πιο σύνθετη, όταν καταγράφονται περισσότερες από μία φάσεις τοιχογράφησης

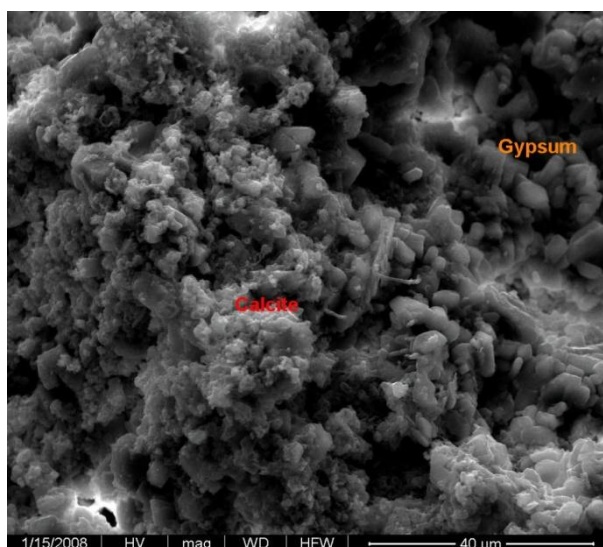
Υποστήριγμά τους αποτελούν οι ίδιες οι επιφάνειες του κτηρίου, οι οποίες κατά κανόνα είναι φέρουσες τοιχοποιίες. Αποτελούνται κυρίως από τοπικούς λίθους, κατεργασμένους ή μη, και συχνά πλίνθους (οπτοπλίνθους και ωμοπλίνθους), το συνδετικό υλικό των οποίων αποτελούν ισχυρά ή ασθενέστερα ασβεστοκονιάματα ή ασβεστοπηλοκονιάματα, χωρίς να απουσιάζουν εντελώς και αμιγή πηλοκονιάματα. Στη σύσταση των κονιαμάτων συμμετέχουν ενίοτε και ποζολανικά υλικά, ιδίως κατά τη ρωμαϊκή και παλαιοχριστιανική περίοδο. Προϊόντος του χρόνου, εμφανίζονται όλο και συχνότερα μικτές κατασκευές στις οποίες συμμετέχει περισσότερο το ξύλο, είτε με τη μορφή της ξυλοδεσιάς είτε ως ξυλόπηκτη τοιχοποιία. Ας σημειωθεί ότι οι φέρουσες

τοιχοποιίες στα πλείστα μνημεία του ελλαδικού χώρου συντίθενται από διπλή καθ' ύψος λιθοδομή έσω - έξω, με το μεσοδιάστημα να πληρώνεται συνήθως με πιο ασθενή υλικά, όπως πηλοκονιάματα με ή χωρίς μικρή ποσότητα ασβέστη και λατύπες.

Το υπόστρωμα των τοιχογραφιών αποτελείται συνήθως από δύο ή τρία στρώματα επιχρίσματος, διαφοροποιούμενα ως προς την κοκκομετρία και τη σχέση κονιάς - αδρανών, με τα πιο λεπτόκοκκα να βρίσκονται προς την επιφάνεια. Τα επιχρίσματα αυτά είναι επίσης στην συντριπτική τους πλειοψηφία ασβεστοκονιάματα και σπανιότερα ασβεστοπηλοκονιάματα. Σε νεώτερα μνημεία (19^{ος} αι) έχουν εντοπιστεί και σύνθετα ασβεστογυψοκονιάματα, ιδίως σε περιπτώσεις στις οποίες η θέση του επιχρίσματος καθιστούσε αναγκαία την ταχύτερη πήξη του, όπως συμβαίνει σε καμάρες και οροφές (Παπαδοπούλου, κ.ά., 2008). Η χρήση οργανικών ινών, φυτικών ή ζωικών καταγράφεται διαχρονικά.



Εικ. 4: Ασβεστοκονιάμα με φυτικές ίνες



Εικ. 5: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), κρύσταλλοι ασβεστίτη και γύψου σε ασβεστογυψοκονιάμα (Παπαδοπούλου, κ.ά., 2008)

Τελικό στρώμα προς την επιφάνεια αποτελεί κατά κανόνα το **χρωματικό στρώμα**⁵, το οποίο συνθέτουν ανόργανες χρωστικές ή και οργανικές βαφές, και οργανικά συνδετικά. Οι περιπτώσεις στις οποίες το συνδετικό υλικό είναι ανόργανο, έχει εφαρμοστεί δηλαδή η τεχνική της νωπογραφίας με συνδετικό υλικό τον ασβέστη του υποστρώματος είναι ελάχιστες, ενώ κάπως συχνότερη είναι η χρήση μικτής τεχνικής νωπογραφίας - ξηρογραφίας, κατά την οποία τα υποκείμενα χρωματικά στρώματα μπορεί να αξιοποιούν ως συνδετικό τον ασβέστη του υποστρώματος, ενώ για τα υπερκείμενα χρώματα και τις τελικές λεπτομέρειες χρησιμοποιείται οργανικό συνδετικό.

Βασικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά των τοιχογραφιών επομένως αποτελούν:

- Η άμεση εξάρτησή τους από το κτήριο και το περιβάλλον του.
- Η σύνθετη, πολυστρωματική κατασκευή τους.
- Ο πορώδης χαρακτήρας τους.
- Η υγροσκοπικότητα των υλικών τους.

Από την άποψη της επίδρασης του νερού στις τοιχογραφίες, η πολυστρωματικότητα σχετίζεται ιδιαίτερα με το γεγονός ότι, κενά μεταξύ των επάλληλων στρωμάτων που έχουν προκύψει είτε ως ατέλειες της κατασκευής, είτε ως μεταγενέστερες διαστρωματικές αποκολλήσεις, λειτουργούν ως υδραυλικές ασυνέχειες, θέσεις δηλαδή στις οποίες το νερό δεν μπορεί να κινηθεί σε υγρή, παρά μόνο σε εξατμισμένη μορφή, και επομένως θέσεις στις οποίες συχνά συμβαίνει κρυστάλλωση των αλάτων⁶. Αποτέλεσμα είναι η άσκηση ισχυρών πιέσεων και η περαιτέρω αποκόλληση, η οποία αποτελεί μια από τις σοβαρότερες, αν και μη ορατές, φθορές των τοιχογραφιών, οδηγώντας κατά την εξέλιξή της σε τοπική ή πλήρη κατάρρευση.

Στον πορώδη και υγροσκοπικό χαρακτήρα των υλικών κατασκευής των τοιχογραφιών οφείλεται τόσο η ευπάθειά τους στην υγρασία, όσο όμως και ο ρόλος «ρυθμιστή» της

⁵Με τη σπανιότατη εξαίρεση κάποιων μεταβυζαντινών μνημείων που φέρουν από κατασκευής και στρώμα οργανικού βερνικιού.

⁶Υδραυλική ασυνέχεια μπορεί να προκύψει όχι μόνο λόγω ασυνεχειών δομής, αλλά και λόγω του διαφορετικού πορώδους μεταξύ των στρωμάτων (Πρόκος, 2012).

σχετικής υγρασίας τον οποίο επιτελούν, συμβάλλοντας στη σταθερότητα της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού των μνημείων.

1.3 Πορώδες και διαπερατότητα

Ο ορισμός ενός πορώδους υλικού είναι πολύ απλός. Είναι μια στερεή δομή διάσπαρτη από κενά. Όταν τα κενά διασυνδέονται σε κάποιο βαθμό, πράγμα που συμβαίνει σε όλα σχεδόν τα πορώδη υλικά, μπορούν να σχηματιστούν διαδρομές για τη μεταφορά μιας υγρής φάσης και τότε το υλικό χαρακτηρίζεται διαπερατό (Pender, 2004).

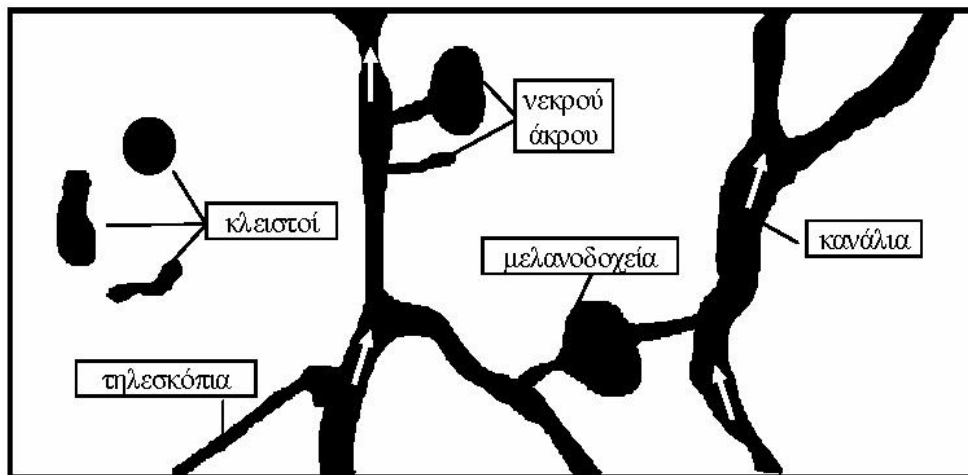
Το πορώδες ως στοιχείο τεχνολογίας κατασκευής, καθορίζει τόσο την κίνηση του νερού στη δομή των τοιχογραφιών, όσο και την παθολογία που θα εκδηλωθεί. Οι τρεις θεμελιώδεις παράμετροι για την περιγραφή των πορώδων υλικών είναι το ολικό πορώδες, η κατανομή μεγέθους των πόρων και η ειδική τους επιφάνεια.

Ως **ολικό πορώδες** ορίζεται το μέρος του συνολικού όγκου του υλικού που καταλαμβάνεται από πόρους ως ποσοστό επί του συνόλου του όγκου του υλικού.

Η **κατανομή μεγέθους πόρων** μπορεί να οριστεί ως η σχετική συχνότητα εμφάνισης κάθε μεγέθους πόρων του ολικού πορώδους ενός υλικού με κριτήριο τη διάμετρό τους.

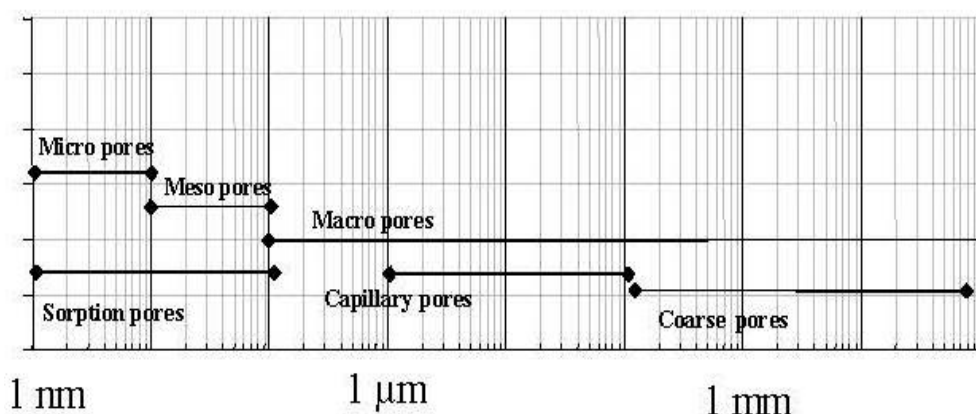
Ως **ειδική επιφάνεια** ορίζεται η προσβάσιμη επιφάνεια που περιέχεται στη μονάδα όγκου ενός υλικού. Υπολογίζεται με βάση το ολικό πορώδες και την κατανομή του μεγέθους των πόρων.

Το ολικό πορώδες κατανέμεται σε ανοικτό ή κλειστό. Το ανοικτό μέρος του πορώδους διακρίνεται σε πόρους νεκρού άκρου και σε διαμπερείς, οι οποίοι με τη σειρά τους, ανάλογα με το σχήμα τους, χαρακτηρίζονται ως «μελανοδοχεία», «κανάλια» ή «τηλεσκόπια». Στην κίνηση του νερού συμμετέχει μόνο το ανοικτό πορώδες.



Σχήμα 1: Το ολικό πορώδες (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2019)

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η διάκριση των πόρων σε μικροπόρους, μεσοπόρους και μακροπόρους ανάλογα με τη διάμετρό τους. Φαίνεται επίσης η σχέση του μεγέθους των πόρων με τους μηχανισμούς μεταφοράς της υγρασίας. Οι μικροπόροι και οι μεσοπόροι (1nm - 100nm) συμβάλλουν στην κίνηση μόνο μέσω μηχανισμών ρόφησης. Στην τριχοειδή κίνηση συμβάλλουν οι τριχοειδείς πόροι μεγέθους 100nm έως 100μm. Τέλος, πόροι μεγαλύτεροι των 100μm σχετίζονται με τη διαπερατότητα λόγω βαρύτητας (διήθηση) ή την είσοδο του νερού λόγω ανεμοπίεσης.⁷



Σχήμα 2: Μέγεθος πόρων κατά IUPAC 1972 (Thomson, κ.ά. 2004)

Για τη μελέτη των πορωδών υλικών εφαρμόζεται η παραδοχή ότι οι πόροι έχουν κυλινδρικό σχήμα (Λαμπρόπουλος, 2003).

⁷Η παράγραφος αποδίδει ελεύθερα στα Ελληνικά απόσπασμα από άρθρο του Thomson (2004).

Με κριτήριο το μηχανισμό της δημιουργίας τους στα κονιάματα, οι πόροι διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Οι πρώτοι προκύπτουν ως αποτέλεσμα της τεχνολογίας κατασκευής, ενώ οι δεύτεροι ως αποτέλεσμα της διάβρωσης. Από τους πρωτογενείς, οι πόροι μεγέθους 1nm - 100nm χαρακτηρίζουν τα υδραυλικά κονιάματα, ενώ είναι σπανιότεροι σε ασβεστοκονιάματα. Οι τριχοειδείς προκύπτουν λόγω της κίνησης του νερού του νωπού κονιάματος είτε μέσω απορρόφησης από την τοιχοποιία που τα περιβάλλει, είτε λόγω της εξάτμισης προς τον αέρα. Οι πόροι αυτοί επικοινωνούν έντονα μεταξύ τους και επιτρέπουν την τριχοειδή κίνηση. Το ολικό πορώδες επηρεάζεται επίσης από την ενανθράκωση του υδροξειδίου του ασβεστίου προς ανθρακικό ασβέστιο, που συνεπάγεται μια αύξηση όγκου της τάξης του 10% (Thomson, κ.ά. 2004). Η προσαρμογή στη μεταβολή του όγκου συμβαίνει μέσω μείωσης του συνολικού πορώδους, αλλά χωρίς σημαντική αλλαγή στην κατανομή του μεγέθους των πόρων (Parayianni & Stefanidou, 2001). Η ενανθράκωση είναι διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει χρόνια. Στη δημιουργία του πρωτογενούς πορώδους συμβάλλει και η ενυδάτωση των υδραυλικών φάσεων των υδραυλικών κονιαμάτων. Ο λόγος νερού / συνδετικού και συνδετικού / αδρανούς καθορίζει επίσης το τριχοειδές πορώδες, αφού μια αυξημένη ποσότητα νερού και μια μειωμένη ποσότητα άμμου οδηγεί σε υψηλότερο ολικό πορώδες. Ο όγκος του νερού που καθορίζει το πορώδες είναι τόσο ο αρχικός, όσο και αυτός που προκύπτει στην πράξη μετά την εφαρμογή του κονιάματος λόγω της απορρόφησης του νερού από την τοιχοποιία. Μεταξύ κονιαμάτων με ίδια αρχική ποσότητα νερού, αυτό που θα εφαρμοστεί σε τοιχοποιία με υψηλή απορροφητικότητα τείνει να εμφανίσει χαμηλότερο συνολικό πορώδες (Thomson, κ.ά. 2004).

Οι πόροι μεγέθους μεγαλύτερου των τριχοειδών (>100μm) προκύπτουν είτε από παγιδευμένο κατά την ανάδευση αέρα, είτε από μικρορρωγμές που εμφανίζονται κατά τη συρρίκνωση που συμβαίνει στο στάδιο της ξήρανσης. Οι πόροι από αέρα είναι ακανόνιστου μεγέθους και κατανομής, μπορεί να αποτελούν έως και το 8% του συνολικού πορώδους, η δε ύπαρξή τους καθορίζεται από την ποσότητα νερού του κονιάματος και τον τρόπο εφαρμογής του. Κονιάματα με λίγο νερό στη σύστασή τους τείνουν να παγιδεύσουν περισσότερο αέρα, ενώ επίμονη επεξεργασία και πίεση του κονιάματος κατά την εφαρμογή μειώνει τον αέρα που έχει παγιδευτεί κοντά στην επιφάνεια. Ως προς τους πόρους λόγω συρρίκνωσης κατά την ξήρανση, αυξάνονται όσο αυξάνεται η ποσότητα νερού του κονιάματος και ο ρυθμός εξάτμισής του.

Το δευτερογενές πορώδες προκύπτει μετά την ξήρανση του κονιάματος, λόγω των χημικών ή μηχανικών αλλοιώσεων που προκαλεί η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Πρόκειται τόσο για διαδικασίες διάλυσης - ανακρυστάλλωσης, όσο και όξινης έκπλυσης.

Στην πρώτη περίπτωση, είτε τα διαλυμένα ιόντα που μεταφέρονται από το νερό ανακρυσταλλώνονται σε υπέρκορα διαλύματα, είτε ιόντα ασβεστίου αντιδρούν με διοξείδιο του άνθρακα και καθιζάνουν. Αποθέσεις ασβεστίτη μορφής δακτυλίου είναι συνήθεις, είτε σε μεγαλύτερα κενά στη δομή των κονιαμάτων, είτε στην εξωτερική τους επιφάνεια και σχετίζονται με μηχανισμούς διάλυσης - ανακρυστάλλωσης. Με την ανακρυστάλλωση του ασβεστίτη είναι πιθανό και να «θεραπευθούν» μικρές ρωγμές, φαινόμενο που ονομάζεται αυτοϊαση. Η επίδραση της διαδικασίας αυτής δεν είναι προβλέψιμη. Είναι προφανές ότι η διάλυση αυξάνει το πορώδες, ενώ η εκ νέου απόθεσή του, ενδεχομένως σε άλλη θέση, το μειώνει. Εάν η απόθεση συμβεί στην επιφάνεια, καταγράφεται απώλεια μάζας στη δομή, και μείωση της διαπερατότητας της επιφάνειας (Thomson, κ.ά. 2004). Εάν τα ιόντα που συμμετέχουν προέρχονται από το κονίαμα, συμβαίνει κυρίως τοπική ανακατανομή, παρά συνολική μεταβολή. Εάν όμως πρόκειται για ιόντα που μεταφέρονται διαλυμένα στο νερό και προέρχονται από το έδαφος ή την τοικοποιία, αποτίθεται νέο υλικό με αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους.

Μεταβολή του πορώδους μπορεί να συμβεί και λόγω όξινης έκπλυσης. Το όξινο περιβάλλον δεν είναι σπάνιο σε ιστορικά κονιάματα, και μπορεί να προέρχεται από χουμικά οξέα του εδάφους ή των λειχήνων, είτε από ξηρές αποθέσεις θειϊκών και νιτρικών στην επιφάνεια της τοικοποιίας (Charola, 2000). Η διαλυτότητα του ασβεστίτη είναι πολύ μικρή (0,014g/l στους 25°C). Αυξάνει όμως όσο μειώνεται το pH στο κονίαμα, δηλαδή σε όξινο περιβάλλον. Μια τέτοια διάλυση σπάνια οδηγεί σε ανακρυστάλλωση.

Ρωγμές από μηχανικά αίτια συμβαίνουν κάθε φορά που οι ασκούμενες τάσεις υπερβαίνουν τις αντοχές του υλικού. Οι ρωγμές είναι μεγέθους τριχοειδούς ή μεγαλύτερου. Οι ρωγμές από παγετό ή κρυστάλλωση αλάτων αποτελούν ειδικές περιπτώσεις μηχανικής δράσης.

Σημαντικό ρόλο στην πορώδη δομή των κονιαμάτων μπορεί να παίξει και ο δευτερογενής σχηματισμός ανόργανων ενώσεων. Είναι το αποτέλεσμα της διάλυσης

του συνδετικού του κονιάματος και του σχηματισμού νέων ανόργανων ενώσεων που δεν περιλαμβάνουν ασβεστίτη.

1.4 Υγροσκοπικότητα

Υγροσκοπικότητα καλείται η ιδιότητα των υλικών να έλκουν και να συγκρατούν μόρια νερού σε ελεύθερη ή δεσμευμένη μορφή, μέσω διαδικασιών ρόφησης (απορρόφησης ή προσρόφησης)⁸. Η συνολική ποσότητα νερού που μπορεί να προσλάβει ένα υγροσκοπικό υλικό είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας που το περιβάλλει και τελικά καθορίζεται από την ισόθερμο γραμμή ρόφησης του συστήματος. Ο ρυθμός πρόσληψης υγρασίας μειώνεται σταδιακά όσο προσεγγίζεται η υγρασία ισορροπίας, διότι η συνολική αντίσταση στη μεταφορά μάζας αυξάνεται, καθώς τα πιο προσβάσιμα στοιχεία της επιφάνειας φτάνουν στην υγρασία ισορροπίας, με αποτέλεσμα, σε ένα πορώδες στερεό, οι ατμοί να πρέπει να διαχυθούν σε πιο απομακρυσμένους πόρους. Ένα ιδιαίτερο παράδειγμα υγροσκοπικής συμπεριφοράς είναι η υγροποίηση (deliquescence) την οποία επιδεικνύουν πολλά υδατοδιαλυτά στερεά, περιλαμβανομένων των ανόργανων αλάτων. Πρόκειται για τη διαδικασία κατά την οποία το στερεό προσλαμβάνει υγρασία μέχρις ότου διαλυθεί το ίδιο. Ακόμη και σε μορφή διαλύματος, είναι δυνατόν να συνεχίσει να προσλαμβάνει νερό, μέχρις ότου η τάση ατμών του εξισωθεί με τη μερική τάση ατμών της ατμόσφαιρας στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, του σχηματισμού της υγρής φάσης μπορεί να προηγηθεί ο σχηματισμός ένυδρων ή υψηλότερων ένυδρων αλάτων (Richardson, 2011).

⁸Κατά την απορρόφηση (absorption) το ροφώμενο υλικό διαπερνά τη μάζα του ροφητικού, ενώ κατά την προσρόφηση (adsorption) το ροφώμενο υλικό σχηματίζει δεσμούς επιφανείας με το ροφητικό.

2. Η ΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟΥΣ ΤΟΙΧΟΥΣ, ΤΑ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΕΣ

Η διείσδυση και κίνηση του νερού στη μάζα ενός σώματος προϋποθέτει υλικά πορώδη, διαπερατά και υγροσκοπικά. Τα υλικά κατασκευής των τοιχογραφιών, από την τοιχοποιία και τα επιχρίσματα μέχρι το χρωματικό στρώμα ικανοποιούν αυτές τις συνθήκες.

Η κίνηση του νερού εντός της δομής των τοιχογραφιών, σε υγρή ή αέρια μορφή, συμβαίνει προς όλες τις κατευθύνσεις και ερμηνεύεται από τα εξής φαινόμενα:

Βαρυτική κίνηση (ροή και διήθηση): Πρόκειται για την πλέον εύληπτη, καθοδική κίνηση του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας, είτε υπό τον τύπο της ελεύθερης ροής στις επιφάνειες και τα μεγάλα κενά της δομής της τοιχοποιίας, είτε υπό τον τύπο της διήθησης μέσω υδατοδιαπερατών υλικών. Η διήθηση προϋποθέτει πόρους μεγαλύτερους των 100μm.

Τριχοειδής αναρρίχηση: Πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο το νερό μέσα σε υδρόφιλα, πορώδη υλικά, αντί να κινείται καθοδικά λόγω της βαρύτητας, κινείται προς τα πάνω, μέσω των τριχοειδών πόρων των υλικών, λόγω του ότι οι δυνάμεις συνάφειας μεταξύ των μορίων του νερού και των τοιχωμάτων των πόρων είναι ισχυρότερες από αυτές των μορίων του νερού μεταξύ τους.

Στην τριχοειδή κίνηση συμβάλλουν οι τριχοειδείς πόροι μεγέθους 1 έως 100μm (Thomson, κ.ά. 2004). Τα υδρόφιλα υλικά, ροφούν το νερό στο εσωτερικό των τριχοειδών με δύναμη αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου των πόρων. Στην τριχοειδή κίνηση συμβάλλουν και ασθενείς ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των διπόλων του νερού και των πολωμένων τοιχωμάτων των πόρων (Λαμπρόπουλος, 2003).

Στην περίπτωση των κτηρίων, για την εμφάνιση του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης, απαιτείται το σύστημα τοιχοποιία - νερό να έχει τα χαρακτηριστικά τριχοειδούς στήλης με τη βάση της βυθισμένη σε νερό. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το νερό θα κινείται καθοδικά (Massari & Massari, 1993). Με άλλα λόγια, το νερό θα κινηθεί τριχοειδώς προς τα πάνω μόνον όταν η κίνηση προς όλες τις άλλες κατευθύνσεις έχει αποκλειστεί, εξ αιτίας του κορεσμού των πόρων με νερό.

Για την διαμόρφωση μιας αντίληψης ποσοτήτων, οι Massari (1993) δίνουν το εξής παράδειγμα: σε πλινθότοιχο, στον οποίο η περιεχόμενη υγρασία μετρήθηκε στο 30%, ένα κυβικό μέτρο τοικοποιίας συγκρατεί, ενάντια στη βαρύτητα, τριακόσια κιλά νερού⁹. Στην περίπτωση του Palazzo Corsini στη Ρώμη, υπολογίστηκε ότι τριακόσιοι τόνοι νερού βρίσκονταν πάνω από τη στάθμη του εδάφους. Το μέγιστο ύψος του μετώπου του νερού στον τοίχο είναι $x_{max} = \frac{15 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2}{r}$, όπου r είναι η ακτίνα των τριχοειδών πόρων (Λαμπρόπουλος, 2003).

Στην πράξη, το πραγματικό ύψος της ανερχόμενης υγρασίας είναι σημαντικά χαμηλότερο, λόγω της εξάτμισης. Συνήθως καταγράφονται ύψη έως 1,5 - 2 μέτρα (ό.π.), έχουν όμως παρατηρηθεί και περιπτώσεις στις οποίες η τριχοειδής αναρρίχηση έφτασε μέχρι και πάνω από τα πέντε μέτρα (Massari & Massari, 1993). Παρατηρήθηκε ότι άνοδος σε τόσο μεγάλα ύψη προϋποθέτει τόσο το μεγάλο πάχος τοικοποιίας¹⁰ όσο και μεγάλη παλαιότητα του τοίχου¹¹. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται από την ισχυρή έλξη των μορίων του νερού από διαλύματα αλάτων υψηλής συγκέντρωσης. Όταν το ύψος του νερού σταθεροποιηθεί, έχει αποκατασταθεί μια ισορροπία μεταξύ της ποσότητας του νερού που εισέρχεται στον τοίχο μέσω ρόφησης και του νερού που εξέρχεται λόγω εξάτμισης. Αν η επιφάνεια εξάτμισης μειωθεί, θα αυξηθεί το ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης.

Οριζόντια τριχοειδής κίνηση: Η τριχοειδής κίνηση συμβαίνει και προς την οριζόντια διεύθυνση, και περιγράφεται από τη σχέση $x = A * \sqrt{t}$, όπου x είναι η μετατόπιση του νερού σε χρόνο t , και A μια σταθερά διαφορετική για κάθε υλικό η οποία υπολογίζεται πειραματικά (Massari & Massari, 1993). Πρέπει να σημειωθεί ότι η οριζόντια τριχοειδής κίνηση συμβαίνει από περιοχές ή δομικά στοιχεία με μεγάλο μέγεθος πόρων προς δομικά στοιχεία με μικρότερο μέγεθος πόρων. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς:

- Ερμηνεύει ζητήματα παθολογίας, όπως το φαινόμενο κατά το οποίο, εάν δεν επιδρούν ισχυρά άλλες παράμετροι (θερμοκρασία - σχετική υγρασία - ατμοσφαιρική

⁹Πρέπει να σημειωθεί ότι οι Massari υπολογίζουν την περιεχόμενη υγρασία ως σχέση βάρους νερού προς όγκο δοκιμίου, και όχι ως βάρος νερού / βάρος ξηρού δοκιμίου.

¹⁰Βλ. και την ενότητα «ανερχόμενη υγρασία».

¹¹Η παλαιότητα σχετίζεται με τις αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων που στην πορεία του χρόνου συγκεντρώνονται στη μάζα του τοίχου.

πίεση - ρεύματα αέρα), η υγρασία τείνει να κινείται από τη δομή του τοίχου προς το εσωτερικό του κτηρίου, όπου βρίσκονται τα πιο λεπτόκοκκα –και επομένως με μικρότερους πόρους– στρώματα επιχρισμάτων και οι τοιχογραφίες, μεταφέροντας αντίστοιχα άλατα προς τις ευαίσθητες αυτές περιοχές.

- Αξιοποιείται ιδιαίτερα στην επιλογή των υλικών των επιθεμάτων αφαλάτωσης, η σύσταση των οποίων πρέπει να είναι τέτοια που να οδηγεί σε πορώδες μικρότερο από του αντικειμένου, ώστε η κίνηση του αλάτινου διαλύματος να κατευθύνεται προς το επίθεμα, όπου θα συμβαίνει και η απόθεση των διαλυτών αλάτων.

Ώσμωση: Το νερό κινείται από περιοχές μικρής συγκέντρωσης ιόντων προς περιοχές με μεγαλύτερη συγκέντρωση (Λαμπρόπουλος, 2003).

Διάχυση υδρατμών: Όταν σε δύο χώρους που χωρίζονται από ένα ατμοδιαπερατό δομικό στοιχείο παρουσιάζονται διαφορετικές συγκεντρώσεις μορίων υδρατμού από κάθε πλευρά, αυτές τείνουν να εξισωθούν. Αναπτύσσεται τότε μια ροή των μορίων υδρατμού μέσω του δομικού στοιχείου, καθώς και μέσω ανοιγμάτων ή αρμών. Η ροή αυτή οφείλεται στη διαφορετική πίεση των υδρατμών που ασκείται στις δύο όψεις του δομικού στοιχείου λόγω της διαφορετικής συγκέντρωσης, και στην τάση τους να διαφύγουν από τις περιοχές υψηλής πίεσης (συγκέντρωσης) στις θέσεις χαμηλής πίεσης. Έτσι, η ροή των υδρατμών έχει κατεύθυνση από την περιοχή με την υψηλότερη πίεση προς την περιοχή με τη χαμηλότερη. Ταυτόχρονα προς την αντίθετη κατεύθυνση αναπτύσσεται μια ροή μορίων αέρα. Το εξισωτικό αυτό φαινόμενο ονομάζεται διάχυση υδρατμών (Αραβαντινός, 1988).

Διείσδυση μέσω ανεμοπίεσης: Η διείσδυση νερού στη δομή των κονιαμάτων λόγω ανεμοπίεσης προϋποθέτει πόρους μεγαλύτερους των 100μm.

Κίνηση μέσω μηχανισμών ρόφησης: Οι μηχανισμοί ρόφησης σχετίζονται με την κίνηση του νερού μέσω μικροπόρων και μακροπόρων, μεγέθους 1nm - 100nm (Thomson, κ.ά., 2004).

3. ΠΗΓΕΣ, ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΑΙΤΙΑ Ή ΤΥΠΟΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή και αποσαφήνιση όρων

Στην παρούσα εργασία ως **υγρασία ορίζεται** η παρουσία νερού σε υγρή ή αέρια φάση στη μάζα ή την επιφάνεια ενός στερεού ή τη μάζα ενός αέριου υλικού.

Το φαινόμενο της υγρασίας στα κτήρια οφείλεται σε ποικίλα αίτια που κατά κανόνα δεν συμβαίνουν μεμονωμένα αλλά συνυπάρχουν. Αποτελεί δε κοινό τόπο ότι πρόκειται για φαινόμενο σύνθετο, η αντιμετώπιση του οποίου δεν μπορεί να στηρίζεται στην κοινή λογική (Massari & Massari, 1993).

Από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας διαπιστώνεται μια σύγχυση μεταξύ βασικών εννοιών. Ο όρος «πηγή» συγχέεται ή εναλλάσσεται αδιακρίτως με τους όρους «είδος», «μορφή», «αίτιο», «τύπος» της υγρασίας ή με τις θέσεις εισόδου, τις διαδρομές και τους μηχανισμούς μεταφοράς της. Πολλοί συγγραφείς επισημαίνουν ορθά ότι η κάθε απόφαση για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υγρασίας οφείλει να στηρίζεται σε μια καλή διάγνωση και επισήμανση της πραγματικής πηγής της υγρασίας και όχι της φαινομενικής (ενδεικτικά, βλ. (Αραβαντινός, 2018)). Και είναι προφανές ότι, στο πλαίσιο του υδρολογικού κύκλου, πηγές / μορφές / τύποι / είδη και αίτια συνυπάρχουν, συσχετίζονται, αλληλοεπηρεάζονται και αλληλοτροφοδοτούνται. Παρά ταύτα, φαίνεται να απουσιάζει μια προσπάθεια για αποσαφήνιση και «προτυποποίηση» των χρησιμοποιούμενων όρων, η οποία θα αποτελούσε, εάν μη τι άλλο, προϋπόθεση συνεννόησης.

Για τους παραπάνω λόγους, στην εργασία αυτή θα επιχειρηθεί μια διαφοροποίηση και συνεπής χρήση των παραπάνω όρων.

3.2 Πηγές υγρασίας

Ο όρος **πηγή** θα αναφέρεται αποκλειστικά στην «**άμεση χωρική προέλευση**» του νερού που αλληλεπιδρά με τις τοιχοποιίες, τα επιχρίσματα και το χρωματικό στρώμα ενός τοιχογραφημένου μνημείου. Ως **πηγές** επομένως καταγράφονται η **ατμόσφαιρα** και το **έδαφος**. Κατ' εξαίρεση, σε κτήρια με φορτία νερού στους τοίχους και αυξημένη σχετική υγρασία εσωτερικού περιβάλλοντος, μεταξύ των άμεσων πηγών της σχετικής υγρασίας της εσωτερικής ατμόσφαιρας θα πρέπει να συγκαταλεχθεί και το ίδιο το **κέλυφος**. Σε χώρους με υψηλή επισκεψιμότητα, ως πηγή της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού

περιβάλλοντος θα πρέπει να λογίζεται και οι επισκέπτες, με την αναπνοή και την εφίδρωσή τους.

Ο όρος **μορφή** θα αναφέρεται στη **στερεή, υγρή ή αέρια φάση** υπό την οποία το νερό υφίσταται και δρα στο περιβάλλον, την επιφάνεια ή τη δομή των υλικών.

Οι όροι **τύπος, είδος και αίτιο** θα αναφέρονται στο λόγο της ύπαρξης νερού κάθε μορφής σε συγκεκριμένη θέση, συσχετισμένοι άλλοτε με τη θέση προσβολής και άλλοτε με το μηχανισμό μεταφοράς του. Ενδεικτικά, μπορεί να γίνεται λόγος για υγρασία από υλικά κατασκευής, συντήρησης ή αποκατάστασης του κελύφους ή του διακόσμου, υγρασία από τη χρήση του μνημείου με την έννοια της ύδρευσης, άρδευσης, καθαριότητας και επισκεψιμότητας, από κατασκευαστικές ατέλειες ή φθορές του κτηριακού κελύφους ή των δικτύων, από απευθείας ή πλάγια πρόσπτωση ή αναπήδηση βροχής, για υγρασία ανερχόμενη, από πλευρική διείσδυση, από ροή ή διήθηση εντός της δομής της τοικοποιίας, από διάχυση υδρατμών, από συμπύκνωση υδρατμών στην επιφάνεια ή τη δομή των υλικών, ή λόγω της υγροσκοπικότητας των υλικών κατασκευής,

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ενδεικτικά, το νερό με πηγή την ατμόσφαιρα, σε μορφή στερεή προσβάλλει τα κτήρια ως χιόνι, χαλάζι ή πάγος. Σε μορφή υγρή, ως βροχή, και σε αέρια ως υδρατμοί.

Αντίστοιχα, το νερό με πηγή το έδαφος σε μορφή υγρή, προσβάλλει τα κτήρια υπό τον τύπο της ανερχόμενης υγρασίας (από επιφανειακά νερά ή από τον υδροφόρο ορίζοντα), ή από πλευρική διείσδυση. Με τη σειρά της, η εξάτμιση της υγρασίας του κελύφους προς το εσωτερικό του μνημείου τροφοδοτεί τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας. Σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής, η προσβολή των μνημείων από νερό σε υγρή μορφή υπό τον τύπο έκτακτων ή παγιωμένων πλημμυρικών φαινομένων θα αντιμετωπίζεται όλο και συχνότερα.

3.3 Μορφές υγρασίας

Το νερό στη δομή ή την επιφάνεια των τοιχογραφιών των μνημείων μπορεί να υφίσταται και να επιδρά σε μορφή στερεή, υγρή ή αέρια.

3.3.1. Στερεή μορφή

Στη στερεή μορφή του μπορεί να απαντάται ως χαλάζι, χιόνι, πάγος, κρυσταλλικό νερό¹² ή χημικά δεσμευμένο νερό.

Ως χαλάζι το νερό είναι δυνατό να επιφέρει φθορές μηχανικής φύσης. Περαιτέρω, όταν συσσωρευθεί, όπως και το χιόνι, ψύχει τις εξωτερικές επιφάνειες του κτηριακού κελύφους δημιουργώντας προϋποθέσεις εμφάνισης υγρασίας από συμπύκνωση. Μετά την τήξη τους, προσβάλλουν το κτήριο με διάφορους τρόπους σε υγρή πλέον μορφή.

Εντός της δομής των πορωδών υλικών κατασκευής, εάν το νερό υπό την επίδραση του ψύχους γίνει πάγος, υφίσταται αύξηση του όγκου του της τάξης του 9% (Στεφανίδου, 2018) ασκώντας ισχυρές τάσεις στα τοιχώματα των πόρων και οδηγώντας στην αποδιοργάνωση της δομής των υλικών.

Εξαιρετικά ισχυρές τάσεις στα τοιχώματα των πόρων, με επίσης καταστρεπτικά αποτελέσματα, ασκούνται και κατά τη διαδικασία ενυδάτωσης ορισμένων αλάτων, πρόσληψης δηλαδή κρυσταλλικού νερού. Ως κρυσταλλικό χαρακτηρίζεται το νερό που απελευθερώνεται σε θερμοκρασίες κάτω των 103°C, οπότε τα ένυδρα άλατα μεταπίπτουν στην άνυδρη μορφή τους.

Ως χημικά δεσμευμένο, αντίθετα, ορίζεται το νερό που δεν απελευθερώνεται σε θερμοκρασίες κάτω των 103°C (prEN 16682/2017). Το χημικά δεσμευμένο νερό δεν προκαλεί αλλοιώσεις. Αντίστροφα όμως, όταν λόγω ακραίων αυξήσεων της θερμοκρασίας, όπως σε περίπτωση πυρκαγιάς, το νερό που βρίσκεται χημικά δεσμευμένο σε συστατικά στοιχεία μιας τοιχογραφίας απελευθερώνεται, συμβαίνουν σοβαρές και μη αντιστρεπτές αλλοιώσεις. Παράδειγμα αποτελεί η μετατροπή κάποιων χρωστικών από ένυδρα σε άνυδρα οξειδία του σιδήρου.

3.3.2. Υγρή μορφή

Το νερό στην υγρή του μορφή πλήττει τα μνημεία

- υπό τη μορφή βροχής,
- ως το προϊόν της τήξης χιονιού χαλαζιού ή πάγου

¹²Μόρια νερού που συγκρατούνται από ενώσεις όπως τα ένυδρα άλατα για το σχηματισμό του κρυσταλλικού τους πλέγματος.

- ως το προϊόν της συμπύκνωσης της υγρασίας της ατμόσφαιρας,

Βρίσκεται και κινείται τόσο στις επιφάνειες, όσο και στη μάζα των πορωδών υλικών των μνημείων.

Το νερό που περιέχεται στα πορώδη υλικά περιγράφεται μέσω του μεγέθους της περιεχόμενης υγρασίας (Moisture Content %, MC%) και υπολογίζεται είτε ως βάρος νερού προς το βάρος του ξηρού δοκιμίου, είτε, σπανιότερα πλέον, ως βάρος νερού προς όγκο δοκιμίου.

Το νερό κινείται στη δομή και την επιφάνεια των πορωδών υλικών κατασκευής των τοίχων και των τοιχογραφιών, διαλύοντας, μεταφέροντας και αποθέτοντας διαλυτά άλατα. Οι κύκλοι διάλυσης - κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης των αλάτων αποτελούν ίσως τη σοβαρότερη αιτία αλλοίωσης των τοιχογραφιών υπό την επίδραση του νερού, αλλά όχι τη μόνη. Πρέπει να προστεθούν ενδεικτικά και η έκπλυση των χρωστικών λόγω της μηχανικής επίδρασης του νερού, η διάλυση οργανικών συνδετικών, η υδρόλυση υλικών κατασκευής, η χημική αλλοίωσή τους λόγω της αλληλεπίδρασής του νερού με ατμοσφαιρικούς ρύπους σε αστικά περιβάλλοντα, όπως και ανάπτυξη βιολογικών παραγόντων που καταστρέφουν μηχανικά και χημικά και αλλοιώνουν αισθητικά τις τοιχογραφίες.

Στη δυσμενή επίδραση του νερού πρέπει να προστεθεί και η άρση των θερμομονωτικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας¹³ σε περίπτωση ύγρασής της, με αποτέλεσμα τη λειτουργία των υγρών όγκων ως θερμογεφυρών, τις απώλειες θερμότητας, την ψύξη των εσωτερικών επιφανειών με συνέπεια τη δημιουργία προϋποθέσεων συμπύκνωσης και τελικά την αύξηση της επίδρασης του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό και επομένως της ένταση των διακυμάνσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, που επίσης αποτελούν σοβαρό παράγοντα αλλοίωσης.

3.3.3. Αέρια μορφή

Ο αέρας της ατμόσφαιρας περιέχει υγρασία σε αέρια μορφή, υδρατμών, η οποία περιγράφεται μέσω των εννοιών της απόλυτης (AH) και της σχετικής υγρασίας (RH%).

¹³Τα θερμομονωτικά υλικά οφείλουν τις ιδιότητές τους στον εγκλωβισμένο αέρα μέσα στους πόρους της μάζας τους. Όταν ο αέρας εκτοπίζεται από το νερό, οι ιδιότητες αυτές χάνονται. Ας ληφθεί υπόψη ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τού νερού λ είναι περίπου 24 φορές μεγαλύτερος αυτού τού αέρα. (Αραβαντινός, 2004) (Παπαδόπουλος, 1984).

Οι υδρατμοί έρχονται σε επαφή με τα υλικά κατασκευής των τοιχογραφιών είτε μέσω της φυσικής υγροσκοπικότητας των δεύτερων, είτε λόγω των αποθέσεων υγροσκοπικών αλάτων, είτε μέσω του φαινομένου της συμπύκνωσης, το οποίο μπορεί να λάβει χώρα στην επιφάνεια ή τη δομή των υλικών. Οι υδρατμοί δεν μεταφέρουν ιόντα αλάτων, συμμετέχουν όμως στην αλλοίωση των υλικών των τοιχογραφιών ενεργοποιώντας μηχανισμούς ενυδάτωσης και διάλυσης των από κατασκευής υπαρχόντων ή εκ των υστέρων αποτεθειμένων αλάτων.

3.4. Τύποι, είδη ή αίτια υγρασίας

3.4.1. Τύποι υγρασίας σε υγρή μορφή

Οι τύποι, τα είδη και τα αίτια της υγρασίας στα μνημεία διακρίνονται σε φυσικά και ανθρωπογενή.

3.4.1.1. Βροχή

Η απευθείας ή πλάγια πρόσπτωση της βροχής μπορεί να προσβάλλει τα τοιχογραφημένα μνημεία μηχανικά, όταν αυτά είναι εκτεθειμένα, οδηγώντας στην έκπλυση χρωστικών, συνδετικών και υλικών του υποστρώματος και του υποστηρίγματος, όπως στις περιπτώσεις των ανασκαφικών χώρων. Το νερό της βροχής δεν μεταφέρει άλατα, μπορεί όμως αφενός να ενεργοποιήσει τα υφιστάμενα, είτε, σε επιβαρυμένα περιβάλλοντα, να μεταφέρει ρύπους, οδηγώντας σε χημικές αλλοιώσεις.

Περαιτέρω, επιδρά δια της διείσδυσης, ροής και διήθησης μέσω ατελειών της στέγης και της τοιχοποιίας ή οριζόντιων επιφανειών όπως τα πρεβάζια των παραθύρων.

Στις περιπτώσεις αυτές η σχέση αιτίου - αποτελέσματος είναι κατά κανόνα αρκετά προφανής μετά από σχολαστική παρατήρηση και χαρτογράφηση της περιεχόμενης υγρασίας στις τοιχοποιίες, καθώς το νερό του τοίχου είτε εντοπίζεται κοντά στις θέσεις εισόδου, είτε η παρακολούθηση της διαδρομής του, και πάλι με μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας, οδηγεί προς αυτές. Το νερό από τέτοια αιτιολογία κινείται προς τα κάτω, υπό την επίδραση της βαρύτητας, και σε μικρότερο βαθμό οριζόντια, λόγω οριζόντιας τριχοειδούς κίνησης.

Περαιτέρω, το νερό της βροχής αναπηδά στο έδαφος, υγραίνοντας εξωτερικά την τοιχοποιία και μεταφέροντας ρύπους σε μια ζώνη ύψους ίσως λίγο μεγαλύτερου του μισού μέτρου. Η όψη του τοίχου στην περίπτωση αυτή μπορεί να παρασύρει τον

παρατηρητή σε εσφαλμένο χαρακτηρισμό του φαινομένου ως ανερχόμενης υγρασίας. Η διαφοροποίηση είναι ότι η παρουσία του νερού στις θέσεις αυτές είναι παροδική, επομένως μια παρατήρηση όχι στιγμιαία αλλά με στοιχειώδη διάρκεια αρκεί για το χαρακτηρισμό του τύπου. Επίσης, μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας σε αντίστοιχες θέσεις της τοιχοποιίας στο εσωτερικό του κτηρίου κατά κανόνα θα άρουν τη σύγχυση.

Τέλος, το νερό της βροχής μπορεί να συσσωρεύεται κοντά στα θεμέλια και τη βάση των τοίχων, διεισδύοντας πλευρικά, κινούμενο κατ' αρχήν καθοδικά και οριζόντια, μέχρι του κορεσμού της συγκεκριμένης θέσης, και στη συνέχεια ανοδικά, μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε υγιή κτηριακά κελύφη, χωρίς ρωγμές, οπές ή άλλες ατέλειες, όπως κακή επιλογή των δομικών λίθων, το νερό της βροχής σε υγρή μορφή δεν πρόκειται ποτέ να διεισδύσει μέσω των πόρων των υλικών και να φτάσει στις εσωτερικές επιφάνειες (Massari & Massari, 1993), ακόμη και σε ηπειρωτικά περιβάλλοντα, πολύ πιο υγρά από το ελληνικό, γεγονός πάντως που δεν αποκλείει την κίνηση μέσω διάχυσης υδρατμών. Αναφέρεται επίσης ότι η διείσδυση νερού στη δομή ενός κονιάματος μέσω διήθησης ή λόγω ανεμοπίεσης είναι εφικτή μόνο μέσω πόρων μεγαλύτερων των 100μm (Thomson, κ.ά., 2004).

Η διείσδυση πάντως του βρόχινου νερού σε κάποιο, έστω μικρό βάθος της τοιχοποιίας οδηγεί στην άρση των θερμομονωτικών ιδιοτήτων των συγκεκριμένων περιοχών επιταχύνοντας την ψύξη των θέσεων αυτών και δημιουργώντας προϋποθέσεις συμπύκνωσης.

3.4.1.2. Ανερχόμενη υγρασία από επιφανειακά νερά ή από τον υδροφόρο ορίζοντα

Η ανερχόμενη υγρασία αποτελεί **τύπο** που συναντάται με μεγάλη συχνότητα σε τοιχογραφημένα μνημεία. Κατ' αυτήν, το νερό του εδάφους, είτε προέρχεται από τον υδροφόρο ορίζοντα, είτε από επιφανειακά νερά, εισέρχεται μέσω των θεμελίων και κινείται ανοδικά μέσω των τριχοειδών πόρων των υλικών της τοιχοποιίας, λόγω του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης¹⁴. Βασική προϋπόθεση κατανόησης του

¹⁴ Πέραν του νερού που κινείται σε υγρή μορφή μέσω των τοίχων, η υγρασία του εδάφους εμπλουτίζει και την ατμόσφαιρα των εσωτερικών χώρων μέσω των δαπέδων, εφόσον αυτά είναι διαπερατά, αυξάνοντας τη σχετική υγρασία του χώρου. Όταν τα δάπεδα δεν είναι διαπερατά, το νερό κινείται αποκλειστικά μέσω των τοίχων, αυξάνοντας το ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης.

φαινομένου αποτελεί το ότι το νερό ανέρχεται μέσω όλων των πορωδών και διαπερατών στοιχείων της τοικοποιίας, και όχι μόνο μέσω των επιχρισμάτων. Για το λόγο αυτό, η συνήθης πρακτική της καθαίρεσης μιας στενής ή και πλατύτερης ζώνης επιχρισμάτων με την ελπίδα της αποκοπής της υγρασίας είναι απολύτως εσφαλμένη, καθώς όχι απλώς δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα, αλλά αντιθέτως μπορεί να το επιτείνει, αφού μειώνει την επιφάνεια εξάτμισης. Η διαφοροποίηση της προέλευσης της ανερχόμενης υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα ή από επιφανειακά νερά είναι ζωτικής σημασίας, καθώς η κάθε περίπτωση επιβάλλει διαφορετική αντιμετώπιση.

Από το έργο των G. και I. Massari «Dump Buildings old and new» (1993), το οποίο παραμένει βασικό σημείο εκκίνησης για ζητήματα υγρασίας σε μνημεία, μεταφέρονται ελεύθερα οι βασικές εμπειρικές αρχές διάκρισης των δύο πιο πάνω τύπων ανερχόμενης υγρασίας. Σύμφωνα μ' αυτές, η υγρασία που προέρχεται από επιφανειακά νερά:

- Εκδηλώνεται έντονα, αλλά συνήθως εμφανίζεται τοπικά, σε μια μόνο πλευρά ή ένα τμήμα του κτηρίου.
- Συχνά εμφανίζει διακυμάνσεις ως προς το ύψος εντός του έτους.
- Συνήθως προέρχεται από ακατάλληλη αποστράγγιση του νερού της βροχής, διαρροές σε πηγάδια, στέρνες και υπονόμους, και γενικά από κάθε παράγοντα που μπορεί να προκαλέσει τοπική ύγρανση του εδάφους σε επαφή με τη θεμελίωση.

Αντίθετα, η υγρασία που προέρχεται από τον υδροφόρο ορίζοντα:

- Πλήττει το κτήριο με σχεδόν τέλεια ομοιομορφία, εμφανίζεται δηλαδή σε όλες τις πλευρές του, εφόσον δεν υπάρχουν διαφοροποιήσεις δομικών στοιχείων.
- Εμφανίζεται σε όλα τα κτήρια που είναι χτισμένα στην ίδια περιοχή με παρόμοια υλικά.
- Φτάνει στο μέγιστο ύψος στη βόρεια - βορειοανατολική πλευρά, και στο ελάχιστο στις πλευρές που εκτίθενται στον ήλιο¹⁵.
- Δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις εντός του έτους. Η ετήσια αυξομείωση του ύψους του υδροφόρου επηρεάζει ελάχιστα τη στάθμη της ανερχόμενης υγρασίας σε ήδη

¹⁵Η παρατήρηση ισχύει προφανώς για το βόρειο ημισφαίριο, ενώ θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η παρουσία ρευμάτων.

κορεσμένους τοίχους. Έτσι, ίχνη ορίων εξάτμισης σε διαφορετικά ύψη σημαίνουν διαφοροποίηση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα, όχι όμως σε ετήσια βάση, αλλά σε βάθος χρόνου, είτε, το πιθανότερο, υγρασία από επιφανειακά νερά.

Ασχέτως τώρα του τύπου της ανερχόμενης υγρασίας (από επιφανειακά νερά ή τον υδροφόρο ορίζοντα), από το ίδιο έργο (Massari & Massari, 1993), αντλούνται και αποδίδονται ελεύθερα σημαντικά χαρακτηριστικά της ανερχόμενης υγρασίας.

Προϋποθέτει συνεχή τροφοδοσία νερού από το έδαφος προς τον τοίχο (πλίνθοι, λίθοι, κ.ο.κ.), και υψηλή δύναμη ρόφησης των δομικών υλικών που περιβάλλονται από κονίαμα. Εάν τα δομικά αυτά στοιχεία δεν ευνοούν την τριχοειδή αναρρίχηση, τα κονιάματα, είτε ως αρμοί, είτε ως επιχρίσματα δεν αρκούν για να εμφανιστεί ανερχόμενη υγρασία σε σημαντικό ύψος. Η συνολική δύναμη ρόφησης μιας τοιχοποιίας τείνει να γίνει όμοια με τη δύναμη ρόφησης του βασικού δομικού υλικού, ιδίως όταν οι αρμοί είναι λεπτοί και κανονικοί.

Το έδαφος παίζει καθοριστικό ρόλο στη μεταφορά της υγρασίας προς το κτήριο. Η ανερχόμενη υγρασία δεν μεταφέρεται σε εδάφη από χαλίκι, μεταφέρεται λίγο σε αμμώδη εδάφη και πολύ σε εδάφη με πηλό¹⁶.

Η ανερχόμενη υγρασία φτάνει στο ίδιο ύψος και από τις δύο πλευρές του τοίχου, με μικρές μόνο, τοπικές αυξομειώσεις.

Όταν το βασικό δομικό υλικό είναι υδατοδιαπερατό, όπως οι πλίνθοι ή οι πωρόλιθοι, το νερό προχωρά μέσω ολόκληρης της μάζας του τοίχου με μεγάλη ταχύτητα. Όταν το υλικό αυτό εμφανίζει μικρή ή καθόλου διαπερατότητα, όπως ο γρανίτης, ο βασάλτης, ή οι συμπαγείς ασβεστόλιθοι, η κίνηση είναι εφικτή μόνο μέσω του κονιάματος των αρμών, και επομένως η ταχύτητα είναι πολύ περιορισμένη.

Το ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης είναι μεγαλύτερο σε ψυχρούς, βόρειους¹⁷ τοίχους, λόγω της μικρότερης εξάτμισης, ενώ η υγρασία φτάνει στο μέγιστο ύψος της όταν η ατμόσφαιρα είναι κορεσμένη από υδρατμούς, και επομένως δεν συμβαίνει εξάτμιση. Τότε η άνοδος εξαρτάται αποκλειστικά από τα δομικά χαρακτηριστικά του τοίχου και το υλικό.

¹⁶Επίσης δεν μεταφέρεται σε εδάφη από πυκνό, μη πορώδη και διαπερατό βράχο.

¹⁷Στο βόρειο ημισφαίριο.

Η επιφάνεια ρόφησης¹⁸ παρατηρείται εμπειρικά ότι εμφανίζει μια αναλογική σχέση με την επιφάνεια εξάτμισης, ανάλογα με τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του δομικού στοιχείου. Η δεύτερη μπορεί να είναι 2-10 φορές μεγαλύτερη της πρώτης. Συγκεκριμένα, η σχέση επιφάνεια εξάτμισης / επιφάνεια ρόφησης βρέθηκε να ισούται με: 2-3 σε ελεύθερους πεσσούς, 3-8 σε τοίχους με μια εξωτερική πλευρά και 4-10 σε εσωτερικούς φέροντες τοίχους¹⁹.

Αντίστοιχη σχέση διαπιστώνεται μεταξύ του μέγιστου ύψους της τριχοειδούς αναρρίχησης και του πάχους του τοίχου. Ανάλογα με τον τύπο του αρχιτεκτονικού στοιχείου και τις συνθήκες, το ύψος μπορεί να είναι από ίσο έως πέντε φορές μεγαλύτερο. Ο λόγος ύψους - πάχους, βρέθηκε να ισούται με 1 σε ελεύθερους πεσσούς με όλες τις πλευρές εκτεθειμένες σε εξαερισμό, με 1,5-4 σε τοίχους με μια εξωτερική πλευρά και με 2-5 σε εσωτερικούς φέροντες τοίχους.

Όταν η παροχή νερού είναι συνεχής, εάν ο ρυθμός εξάτμισης αυξηθεί, αυξάνεται και ο ρυθμός ρόφησης. Συνάγεται επομένως ότι ο εξαερισμός και η θέρμανση δεν λύνουν, αλλά αντίθετα επιτείνουν το πρόβλημα της ανερχόμενης υγρασίας.

Το στέγνωμα του τοίχου ξεκινά από την ανώτερη στάθμη των υγρών περιοχών.

3.4.1.3. Υγρασία από πλευρική διείσδυση

Δεν είναι σπάνιο, είτε από κατασκευής, είτε λόγω μεταγενέστερων επιχώσεων, η εξωτερική στάθμη του εδάφους να είναι λίγο ή και σημαντικά υψηλότερη από τη στάθμη του δαπέδου του μνημείου. Στις περιπτώσεις αυτές, η συγκέντρωση και διήθηση επιφανειακών υδάτων στους χωμάτινους όγκους του εδάφους οδηγεί αρχικά σε πλευρική διείσδυση του νερού, εν συνεχεία σε διήθησή του και τέλος, όταν η θέση κορεσθεί, σε τριχοειδή αναρρίχηση.

Η υγρασία από πλευρική διείσδυση είναι δυνατόν να εντοπιστεί ακόμη και σε στοιχεία της τοικοποιίας τοποθετημένα εγκάρσια στους εξωτερικούς τοίχους, όπως

¹⁸Δηλ. πρακτικά η επιφάνεια της οριζόντιας τομής του τοίχου.

¹⁹Στη σχέση αυτή στηρίζουν οι Massari και Massari (1993) τη λύση του περιορισμού της επιφάνειας ρόφησης με αποκοπή τμημάτων του τοίχου. Η Pender (2004) όμως, παρατηρεί ότι αυτή η πρόταση προδίδει σύγχυση μεταξύ του μεταβατικού σταδίου και της τελικής κατάστασης ισορροπίας, αφού για παράδειγμα η αποκοπή τμήματος του τοίχου ασφαλώς θα επιβραδύνει την άνοδο της υγρασίας, αλλά, εφόσον η παροχή του νερού παραμείνει σταθερή το τελικό ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης θα παραμείνει το ίδιο.

διαχωριστικοί τοίχοι, ενισχυτικοί πεσσοί σε επαφή με την εξωτερική τοιχοποιία ή κτιστά τέμπλα, προχωρώντας μάλιστα σε αρκετή απόσταση μέσω οριζόντιας τριχοειδούς κίνησης.

3.4.1.4. Υγρασία από κακές πρακτικές χρήσης

Συνήθη κακή πρακτική αποτελεί η φύτευση και άρδευση σε επαφή με τις τοιχοποιίες, καθώς και οι υπερβολές στη χρήση νερού κατά την καθαριότητα. Στην πρώτη περίπτωση, τα παρτέρια, εκτός του όγκου του νερού που δέχονται κατά την άρδευση, αποτελούν ιδανικές θέσεις για τη συσσώρευση επιφανειακών υδάτων, απ' όπου το νερό διεισδύει πλευρικά στην τοιχοποιία για να συνεχίσει την πορεία του όπως περιγράφεται παραπάνω.

3.4.1.5. Υγρασία από κατασκευαστικές ατέλειες, αστοχία ή φθορά δικτύων, ή πλημμελή συντήρηση

Πρόκειται κυρίως για απουσία ή αστοχία στη διαμόρφωση κατάλληλων ρύσεων στον περιβάλλοντα χώρο και στα οριζόντια στοιχεία της κατασκευής, αστοχία ή έλλειψη συντήρησης στα δίκτυα απορροής, αστοχία ή γήρανση των στεγών και εσφαλμένη επιλογή δομικών υλικών, όπως η χρήση άμμου θαλάσσης, ή τσιμέντου, ασθενών κεραμιδιών σε περιοχές με παγετό ή υλικών σε δεύτερη χρήση, κορεσμένων σε άλατα.

Συχνή είναι και η αστοχία νεώτερων υδραυλικών δικτύων. Στην περίπτωση αυτή ο προσδιορισμός του αιτίου είναι συνήθως εύκολος και η εκδήλωση του φαινομένου σχετικά σημειακή.

3.4.1.6. Υγρασία από επεμβάσεις κτηριακής αποκατάστασης και συντήρησης διακόσμου

Κατά τις επεμβάσεις κτηριακής αποκατάστασης μνημείων γίνεται κατά κόρον χρήση ή και κατάχρηση νερού, για την πλύση επιφανειών ή αρμών, σε εργασίες διάτρησης ή αδιατάρακτης κοπής, ως προεργασία στην εφαρμογή ενεμάτων, ή στη σύσταση ενεμάτων και κονιαμάτων αρμολογήματος ή επίχρισης, καθώς και κατά τις εργασίες καθαρισμού και αφαλάτωσης τοιχογραφιών και επιχρισμάτων.

3.4.2. Τύποι υγρασίας σε μορφή υδρατμών

Η υγρασία της ατμόσφαιρας του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός μνημείου επηρεάζει έντονα τη διατήρηση των τοιχογραφιών, καθώς καθορίζει ένα σύνολο μηχανισμών, από

την εξάτμιση της περιεχόμενης υγρασίας και επομένως το ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης, έως την κρυστάλλωση και ενυδάτωση των αλάτων, τον αριθμό και τη συχνότητα εμφάνισης αυτών των κύκλων, τη θέση απόθεσης των αλάτων, την κρυσταλλική μορφή των αλάτων που θα αποτεθούν. Το μέγεθος που ενδιαφέρει στην περίπτωση αυτή δεν είναι η απόλυτη, αλλά η σχετική υγρασία (RH%), καθώς είναι αυτή που καθορίζει την εμφάνιση και εξέλιξη των πιο πάνω μηχανισμών.

Η σχετική υγρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός μνημείου καθορίζεται από:

- Τη σχετική υγρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, που επηρεάζει κυρίως δια των ανοιγμάτων και των ρευμάτων του κτηρίου και, δευτερευόντως, μέσω διαδικασιών διάχυσης υδρατμών.
- Τη θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος και τις διακυμάνσεις της.
- Την εξάτμιση πιθανών φορτίων νερού από το κτηριακό κέλυφος.
- Τις καλές ή κακές πρακτικές χρήσης του μνημείου και ιδίως την επισκεψιμότητα του, μέσω τόσο των υδρατμών που απελευθερώνουν οι επισκέπτες από την αναπνοή και εφίδρωση τους²⁰, όσο και της ψύξης ή θέρμανσης που κατά κανόνα περιορίζεται στις ώρες λειτουργίας του χώρου.

Η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας επιδρά στα υλικά των τοιχογραφημένων μνημείων μέσω:

- Της υγροσκοπικότητας τόσο των αυθεντικών υλικών κατασκευής, όσο και των αποθέσεων υγροσκοπικών αλάτων.
- Του φαινομένου της συμπύκνωσης.

3.4.2.1. Υγρασία λόγω της φυσικής υγροσκοπικότητας των υλικών κατασκευής

Ως υγροσκοπικότητα ορίζεται η ιδιότητα των υλικών να προσλαμβάνουν και να κατακρατούν υγρασία. Επομένως, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος, στα

²⁰Αναφέρεται ενδεικτικά ότι ένας άνθρωπος παράγει μεταξύ 50 και 100 λίτρων υδρατμών ανά ώρα (Λιωνής, 1992).

δομικά υλικά των τοιχογραφημένων μνημείων, υπάρχει ένα ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας που ποικίλει ανάλογα με το υλικό, το οποίο δεν αποτελεί δείκτη παθογένειας.

Αντίθετα μάλιστα, δεδομένου του ότι ο συγκριτικά πιο εφικτός στόχος στις περιπτώσεις των τοιχογραφημένων μνημείων είναι μάλλον η επίτευξη σχετικά σταθερών, παρά ιδανικών τιμών σχετικής υγρασίας, αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι η φυσική υγροσκοπικότητα των παραδοσιακών υλικών κατασκευής ευνοεί εξαιρετικά αυτή τη σταθερότητα, αφού τα υγροσκοπικά υλικά λειτουργούν ως «ρυθμιστές» (buffers) της σχετικής υγρασίας, απορροφώντας υδρατμούς όταν στην ατμόσφαιρα υπάρχει περίσσεια και απελευθερώνοντάς τους όταν στην ατμόσφαιρα υπάρχει έλλειψη. Αναφορές στην ιδιότητα των πορωδών υγροσκοπικών υλικών ως «ρυθμιστών» της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας (buffering effect) κάνουν ενδεικτικά ο Camuffo (2010) και οι Massari (1993).

3.4.2.2. Υγρασία από συμπύκνωση

Ο αέρας σε κάθε θερμοκρασία μπορεί να συγκρατήσει μια συγκεκριμένη μέγιστη ποσότητα υδρατμών. Όταν η σχετική υγρασία στον αέρα είναι 100%, συγκρατείται από τον αέρα η μέγιστη δυνατή ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατηθεί, η οποία καλείται ποσότητα κορεσμού, ενώ η θερμοκρασία στην οποία συγκρατείται αυτή η μέγιστη ποσότητα καλείται θερμοκρασία δρόσου, ή σημείο δρόσου, ή θερμοκρασία κορεσμού, ή σημείο κορεσμού (Αραβαντινός, 2018).

Η σχετική υγρασία του αέρα συνήθως δεν βρίσκεται στο 100%. Εάν όμως οι εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων βρίσκονται σε θερμοκρασία ίση ή χαμηλότερη της θερμοκρασίας δρόσου, τα στρώματα του αέρα σε επαφή με αυτές θα βρεθούν σε κατάσταση κορεσμού, θα αποβάλλουν μέρος των υδρατμών τους και θα αποθέσουν νερό σε υγρή μορφή στις ψυχρές επιφάνειες των τοίχων.

Το φαινόμενο της συμπύκνωσης, επομένως, θα εμφανίζεται σε κάθε περίπτωση κατά την οποία η θερμοκρασία των τοίχων είναι χαμηλότερη από το σημείο δρόσου του ατμοσφαιρικού αέρα.

Σε συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος αρκεί μια πολύ μικρή διαφορά θερμοκρασίας τοίχου - αέρα για να εμφανιστεί συμπύκνωση.

Ας σημειωθεί ότι, καθώς οι υδρατμοί κινούνται και εντός των πόρων των υλικών, συμπύκνωση μπορεί να εμφανιστεί όχι μόνο στην επιφάνεια των τοίχων, αλλά και σε οποιοδήποτε βάθος η θερμοκρασία καταστεί χαμηλότερη του σημείου δρόσου.

Χαρακτηριστικό της συμπύκνωσης είναι ότι πρόκειται για φαινόμενο διακοπτόμενο και όχι συνεχές (Massari & Massari, 1993). Για το λόγο αυτό, η έρευνα για υγρασία από συμπύκνωση δεν πρέπει να είναι στιγμιαία, αλλά επαναλαμβανόμενη, και να αναζητούνται όχι μόνο ενδείξεις για παρουσία του φαινομένου, αλλά μάλλον οι προϋποθέσεις εμφάνισής του, που είναι ιδίως η υψηλή σχετική υγρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος και η μεγάλη θερμική αδράνεια συγκεκριμένων αρχιτεκτονικών τύπων.

Πίνακας 1: Συσχέτιση θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και σημείου δρόσου (Allerton, 2020)

		DEW POINT INDEX													
		Relative Humidity (%)													
		30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Room Temperature (°C)	30	10.5	12.9	14.9	16.8	18.4	20.0	21.4	22.7	23.9	25.1	26.2	27.2	28.2	29.1
	29	9.7	12.0	14.0	15.9	17.5	19.0	20.4	21.7	23.0	24.1	25.2	26.2	27.2	28.1
	28	8.8	11.1	13.1	15.0	16.6	18.1	18.1	19.5	20.8	22.0	23.2	24.2	25.2	26.2
	27	8.0	10.2	12.2	14.1	15.7	17.2	18.6	19.9	21.1	22.2	23.3	24.3	25.2	26.1
	26	7.1	9.4	11.4	13.2	14.8	16.3	17.6	18.9	20.1	21.2	22.3	23.3	24.2	25.1
	25	6.2	8.5	10.5	12.2	13.9	15.3	16.7	18.0	19.1	20.3	21.3	22.3	23.2	24.1
	24	5.4	7.6	9.6	11.3	12.9	14.4	15.8	17.0	18.2	19.3	20.3	21.3	22.3	23.2
	23	4.5	6.7	8.7	10.4	12.0	13.5	14.8	16.1	17.2	18.3	19.4	20.3	21.3	22.2
	22	3.6	5.9	7.8	9.5	11.1	12.5	13.9	15.1	16.3	17.4	18.4	19.4	20.3	21.2
	21	2.8	5.0	6.9	8.6	10.2	11.6	12.9	14.2	15.3	16.4	17.4	18.4	19.3	20.2
	20	1.9	4.1	6.0	7.7	9.3	10.7	12.0	13.2	14.4	15.4	16.5	17.4	18.3	19.2
	19	1.0	3.2	5.1	6.8	8.3	9.8	11.1	12.3	13.4	14.5	15.5	16.4	17.3	18.2
	18	0.2	2.3	4.2	5.9	7.4	8.8	10.1	11.3	12.5	13.5	14.5	15.4	16.3	17.2
	17	-0.6	1.4	3.3	5.0	6.5	7.9	9.2	10.4	11.5	12.5	13.5	14.5	15.4	16.2
16	-1.4	0.3	2.4	4.1	5.6	7.0	8.3	9.4	10.5	11.6	12.6	13.5	14.4	15.2	

Από τη μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτει μια χρήσιμη εμπειρική παρατήρηση: Για κάθε μείωση του ποσοστού σχετικής υγρασίας κατά 5%, η αναγκαία διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ατμόσφαιρας και τοίχου για την εμφάνιση του φαινομένου της συμπύκνωσης αυξάνεται κατά περίπου 1°C. Έτσι, σε συνθήκες πολύ ψηλής σχετικής υγρασίας, έστω 90%, αρκεί μια διαφορά μόλις 2°C για την εμφάνιση συμπύκνωσης. Σε τέτοιες συνθήκες, η εμφάνιση του φαινομένου είναι πολύ πιθανή. Με σχετική υγρασία όμως στο 60%, η πιθανότητα μειώνεται σημαντικά, αφού απαιτείται διαφορά θερμοκρασίας πάνω από 8°C.

Περαιτέρω, κάποιοι αρχιτεκτονικοί τύποι κτηρίων ή θέσεις στα κτήρια με μεγάλη θερμική αδράνεια, κατά την εαρινή ή την πρώιμη θερινή περίοδο, όταν ακόμη οι θερμικά αδρανείς όγκοι δεν έχουν θερμανθεί, ευνοούν τη συμπύκνωση σε συνθήκες σχετικά θερμότερου και υγρού αέρα

Σε χειμερινές περιόδους, κτήρια μη επαρκώς μονωμένα, με ψυχρές επιφάνειες, είναι ιδιαίτερα πιθανό να εμφανίσουν συμπύκνωση. Την ίδια περίοδο, προϋποθέσεις συμπύκνωσης δημιουργεί και η ύπαρξη στην τοιχοποιία συμπαγών, υψηλού ειδικού βάρους υλικών, που λειτουργούν ως θερμογέφυρες (μάρμαρα, πυκνοί ασβεστόλιθοι κ.α.).

Σε θερινές περιόδους, είναι πιθανό να εμφανιστεί συμπύκνωση και στη χαμηλότερη ζώνη των τοίχων, η οποία είναι δυνατόν να ερμηνευθεί εσφαλμένα ως ανερχόμενη, λόγω των απωλειών θερμότητας του τοίχου προς το ψυχρότερο έδαφος (Massari & Massari, 1993).

Κτήρια επομένως με συνεπτυγμένους, πυκνούς αρχιτεκτονικούς όγκους και θέσεις μεγάλου πάχους είναι επιρρεπή σε εαρινή και θερινή συμπύκνωση, ενώ κτήρια με ανεπτυγμένους όγκους ή θερμογέφυρες σε χειμερινή. Αντίστοιχα, τοίχοι με βόρειο προσανατολισμό ή σκιασμένοι ή εκτεθειμένοι στη βροχή και ψυχρούς ανέμους δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη του φαινομένου.

Η ασφαλής απόδοση της υγρασίας συγκεκριμένων περιοχών σε συμπύκνωση είναι δυνατόν να αποτρέψει περιττές και πολυέξοδες κτιριακές επεμβάσεις, όπως αντικαταστάσεις στεγών κ.ο.κ., στρέφοντας συγχρόνως την προσοχή στον έλεγχο του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Τα μέσα για την αντιμετώπιση συμπύκνωσης είναι η μείωση της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος, η αύξηση της θερμοκρασίας του και η αύξηση της θερμοκρασίας των επιφανειών των τοίχων. Η λήψη παρόμοιων μέτρων όμως πρέπει να γίνεται μετά από μελέτη και επίσκεψη, καθώς αυτά είναι δυνατόν να ανατρέψουν άλλες ισορροπίες, να ευνοήσουν για παράδειγμα την κίνηση του νερού που ενδεχομένως περιέχεται στις τοιχοποιίες, και επομένως και υδροσκοπικών αλάτων, προς τις εσωτερικές επιφάνειες, δηλ τις τοιχογραφίες.

Καθώς τα αίτια συχνά αλληλεπιδρούν, πρέπει να διατηρείται η επιφύλαξη και να ελέγχεται η πιθανότητα της «δευτερογενούς συμπύκνωσης», της πιθανότητας δηλαδή, μια περιοχή να έχει πρωτογενώς ψυχθεί λόγω υγρασίας από άλλη αιτία (εξάτμιση ή

απώλεια θερμομονωτικών ιδιοτήτων) και στη συνέχεια, λόγω της ψύξης, να προκαλούνται δευτερογενώς φαινόμενα συμπύκνωσης, εφόσον οι εσωτερικές περιβαλλοντικές παράμετροι το ευνοούν (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2015). Η τεκμηρίωση συμπύκνωσης σε συγκεκριμένη θέση επομένως δεν αποκλείει ταυτόχρονη προσβολή από άλλο τύπο υγρασίας.

Το φαινόμενο της συμπύκνωσης μπορεί να εκδηλώνεται οπτικά με τη μορφή σταγονιδίων ή και ροής νερού σε στιλπνές, μη απορροφητικές επιφάνειες, είτε με τη μορφή κηλίδων υγρασίας σε απορροφητικότερες. Το βάθος της διείσδυσης του νερού από συμπύκνωση στη δομή των τοιχογραφιών και των επιχρισμάτων είναι συνάρτηση της διάρκειας και της συχνότητας του φαινομένου, κατά κανόνα πάντως είναι μικρό. Αυτός είναι ένας από τους βασικότερους λόγους για τους οποίους πολλοί συγγραφείς συνιστούν καταστρεπτική δειγματοληψία σε διαφορετικά βάθη για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας και την ασφαλή ερμηνεία της αιτίας της παρουσίας νερού σε συγκεκριμένες θέσεις. Από την οπτική της συντήρησης πάντως, εφόσον σε επίπεδο αρχής η καταστρεπτική δειγματοληψία δεν μπορεί να γίνεται αποδεκτή, ο προσδιορισμός του τύπου της υγρασίας μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων μέτρησης της περιεχόμενης υγρασίας σε διαφορετικά βάθη, παρά τον ενίοτε σχετικό χαρακτήρα αυτού του τύπου μετρήσεων, κυρίως δε με διαρκέστερη παρακολούθηση του μνημείου και επανάληψη των μετρήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες.

4. ΦΘΟΡΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΩΝ

4.1. Τύποι φθορών

Μεταξύ των αιτιών φθοράς των τοιχογραφιών η υγρασία αποτελεί τον απόλυτο κυρίαρχο. Με την εξαίρεση των φθορών που προκαλούνται από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και έκτακτα περιστατικά, όπως σεισμούς και πυρκαγιές, ελάχιστοι τύποι φθοράς και μηχανισμοί αλλοίωσης δεν σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα μ' αυτήν. Επιδρά μέσω μηχανισμών φυσικών, χημικών, βιολογικών, αλλά και συνδυασμών τους. Κατά τον Price (1996), οι σημαντικότεροι μηχανισμοί φθοράς των τοιχογραφιών είναι: η μηχανική φθορά από τάσεις που ασκούνται στα τοιχώματα των πόρων κατά την κρυστάλλωση αλάτων από ένα διάλυμα, η χημική φθορά από όξινα διαλύματα προερχόμενα κυρίως από ρύπους και υλικά συντήρησης και η βιολογική φθορά (η οποία κατά κύριο λόγο εκδηλώνεται μέσω του μεταβολισμού και καταλήγει στους δύο προηγούμενους μηχανισμούς) (Πρόκος, 2012).

Η απαρίθμηση των σχετιζόμενων με την υγρασία τύπων φθοράς που ακολουθεί δεν είναι εξαντλητική.

- Αποσάθρωση της τοιχοποιίας (υποστήριγμα των τοιχογραφιών)
- Αποσάθρωση των επιχρισμάτων (υπόστρωμα των τοιχογραφιών)
- Ρωγμές στα επιχρίσματα (υπόστρωμα)
- Αποκολλήσεις είτε μεταξύ της τοιχοποιίας και των επιχρισμάτων, είτε μεταξύ των στρωμάτων επιχρισμάτων (διαστρωματικές), είτε μεταξύ των επιχρισμάτων και του χρωματικού στρώματος που οδηγούν σε μερική ή ολική απώλεια.
- Κονιοποίηση, απολέπιση, αποφλοιώση και έκπλυση του χρωματικού στρώματος
- Οπτική ή και χημική αλλοίωση του χρωματικού στρώματος με χρωματικές ή τονικές μεταβολές
- Διόγκωση, διάλυση ή χημική αλλοίωση των οργανικών συνδετικών
- Πέπλα αδιάλυτων αλάτων στην επιφάνεια των τοιχογραφιών
- Σταθεροποίηση ρύπων στην επιφάνεια και τους πόρους των υλικών

- Βιολογική προσβολή και ανάπτυξη βλάστησης
- Άρση των θερμομονωτικών ιδιοτήτων των υλικών με αποτέλεσμα δευτερογενείς αλλοιώσεις



Εικ. 6: Ποικιλία αλλοιώσεων λόγω υγρασίας



Εικ. 7: Αποσάθρωση και έκπλυση υποστρώματος, απώλειες χρωματικού στρώματος, κρούστα αλάτων και ανάπτυξη Βρύων

Η υγρασία επιδρά με διαφορετικούς τρόπους στο κάθε υλικό κατασκευής. Ενδεικτικά, η παρατεταμένη παραμονή σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας προκαλεί χημικές μεταβολές στις χρωστικές μέσω διαδικασιών υδρόλυσης ή ενυδάτωσης. Για παράδειγμα ο

αιματίτης υπό την επίδραση υγρασίας μπορεί να ενυδατωθεί και να μετατραπεί σε λειμωνίτη με αποτέλεσμα τη μεταβολή του χρώματος της χρωστικής από κόκκινο σε κίτρινο. Χημική διαδικασία που ενεργοποιείται με την παρουσία νερού στα υλικά κατασκευής είναι και η ιονεναλλακτική εξαλλοίωση (Λαμπρόπουλος, 2003).

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες μεταξύ των υλικών κατασκευής περιλαμβάνονται άργιλοι, είναι δυνατή η εμφάνιση του φαινομένου της θιξοτροπίας. Οι περισσότερες άργιλοι έχουν θιξοτροπικές ιδιότητες, που εκδηλώνονται με διαστολή κατά την ύγρανση και έχουν σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή τους σε λεπτή σκόνη κατά την ξήρανση. Οι διογκώσεις των αργίλων κυμαίνονται από 0,03% - 0,3% κατά την ενυδάτωσή τους, που αντιστοιχούν σε θερμική διαστολή με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 200 - 300°C. (ό.π.).

Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι και η δράση του παγετού. Κατά την πήξη του νερού συμβαίνει μεταβολή του όγκου του κατά περίπου 9%. Οι κίνδυνοι καταστροφής από διόγκωση εμφανίζονται για τιμή πληρότητας των κενών των πόρων σε νερό πάνω από 60% (ό.π.).

4.2. Μηχανισμοί αλλοίωσης λόγω της αλληλεπίδρασης υγρασίας - αλάτων

4.2.1. Τα άλατα

Τα άλατα είναι ουσίες ευρύτατα διαδεδομένες στη φύση. Άλας ονομάζεται κάθε χημική ένωση που αποτελείται από ιόντα και προκύπτει από την αντίδραση ενός οξέος με μία βάση. Τα άλατα είναι ετεροπολικές (ιοντικές) ενώσεις και σ' αυτά το κατιόν μπορεί να είναι μέταλλο ή θετικό πολυατομικό ιόν (π.χ. αμμώνιο NH_4^+) ενώ το ανιόν είναι αμέταλλο (εκτός του O^{2-} και του O_2^{2-}) ή πολυατομικό αρνητικό εκτός του OH^- . (Wikipedia, 2020)

4.2.2. Διαλυτά και αδιάλυτα άλατα

Η βασική διάκριση μεταξύ των αλάτων που καθορίζει την επίδρασή τους στα τοιχογραφημένα μνημεία είναι αυτή σε διαλυτά και αδιάλυτα, ή ευδιάλυτα και δυσδιάλυτα. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι παράγοντα που απειλεί τη διατήρηση των τοιχογραφιών αποτελούν τα διαλυτά ή ευδιάλυτα άλατα. Αντίθετα, τα αδιάλυτα ή δυσδιάλυτα, τις περισσότερες περιπτώσεις δεν προκαλούν περαιτέρω φθορά πέραν της οπτικής αλλοίωσης. Αντίθετα, αφενός αποτελούν βασικά συστατικά των ίδιων των υλικών κατασκευής των τοιχογραφιών, όπως το ανθρακικό ασβέστιο, και αφετέρου

είναι δυνατόν να λειτουργούν σταθεροποιώντας σαθρά υποστρώματα ή χρωματικά στρώματα, μέσω, π.χ., διαδικασιών «αυτοΐασης».

Στα ασβεστοκονιάματα, παράδειγμα αποτελεί η μεταφορά από το νερό μη ενανθρακωμένου υδροξειδίου του ασβεστίου του υποστρώματος προς την επιφάνεια, όπου τελικά αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας παράγοντας ανθρακικό ασβέστιο, δημιουργώντας με την πάροδο του χρόνου και ανάλογα με τις συνθήκες απόθεσης μια εξαιρετικά σκληρή, αδιαφανή κρούστα.

Τα άλατα διακρίνονται σε ευδιάλυτα και δυσδιάλυτα ανάλογα με τη διαλυτότητα τους στο νερό. Ως διαλυτότητα μιας ουσίας, ορίζεται η μέγιστη δυνατή ποσότητα της ουσίας που μπορεί για ορισμένη θερμοκρασία να διαλυθεί σε ορισμένη ποσότητα διαλύτη. Συνήθης διαλύτης είναι το νερό. Οι διαλυτότητα εκφράζεται ως γραμμάρια του άλατος που μπορούν να διαλυθούν σε 100 γραμμάρια νερού στους 25°C. Οι διαλυτότητες μερικών αλάτων δίνονται στο πίνακα που ακολουθεί.

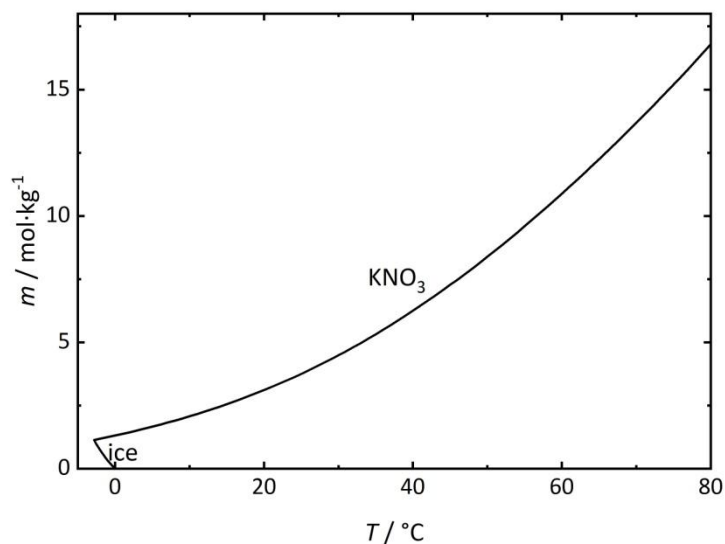
Πίνακας 2: Πίνακας διαλυτότητας αλάτων (Ο Θαυμαστός Κόσμος της Χημείας)

Άλας	Χημικός τύπος	Διαλυτότητα (gr άλατος/100gr νερού)
Νιτρικός άργυρος	AgNO ₃	245
Χλωριούχο νάτριο	NaCl	36
Θειικό ασβέστιο	CaSO ₄	Δυσδιάλυτο (0,21)
Ανθρακικό ασβέστιο	CaCO ₃	Σε ίχνη διαλυτό (0,0013)

Η διαλυτότητα των αλάτων στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της διαλυτότητας. Αντίστροφα, ο κορεσμός των διαλυμάτων δεν συμβαίνει μόνο δια της εξάτμισης, ή του εμπλουτισμού τους με ιόντα, αλλά και δια της μείωσης της θερμοκρασίας του συστήματος. Το γεγονός αυτό καθιστά και για έναν επιπλέον λόγο προφανή τη σημασία της σταθερότητας της θερμοκρασίας των μνημείων, αφού αρκεί η μείωση της θερμοκρασίας για να καταστήσει ένα αλάτινο διάλυμα υπέρκορο, οδηγώντας στην κρυστάλλωση αλάτων.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνεται η μεταβολή της διαλυτότητας νιτρικού καλίου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Σε θερμοκρασία 5°C, η διαλυτότητα είναι 30 mol/kg, ενώ στους 17°C γίνεται 80 mol/kg, περίπου τριπλάσια.

Η μεταφορά της παρατήρησης αυτής στις πρακτικές των επεμβάσεων αφαλάτωσης μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους, με την αξιοποίηση των θερμότερων δυνατών συνθηκών για την εφαρμογή τους.



Γράφημα 1: Μεταβολή της διαλυτότητας του νιτρικού καλίου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (Salzwiki, 2019)

4.2.3. Προέλευση των αλάτων

Όσα από τα δυσδιάλυτα και αδιάλυτα άλατα που απαντώνται σε τοιχογραφίες δεν αποτελούν υλικά κατασκευής, προκύπτουν είτε μετά από μακροχρόνιες διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης εξαιρετικά μικρών ποσοτήτων, είτε από χημικές αντιδράσεις μετατροπής ιόντων ευδιάλυτων αλάτων σε αδιάλυτα.

Τα διαλυτά άλατα προέρχονται από τα ίδια τα υλικά κατασκευής του κτηρίου και των τοιχογραφιών, το έδαφος, την ανθρώπινη δραστηριότητα (περιλαμβανομένων των αδόκιμων επεμβάσεων κτηριακής αποκατάστασης και συντήρησης των τοιχογραφιών), από υλικά αποπάγωσης των δρόμων, καθαριστικά υλικά. Σε τόπους όπως η Ελλάδα, η μεταφορά θαλασσίων αερολυμάτων μέσω του ανέμου πρέπει να λαμβάνεται συνεχώς υπόψη. Άλλη οδό μεταφοράς αποτελεί η διείδυση θαλάσσιου νερού στον υδροφόρο ορίζοντα, φαινόμενο που σε πολλές περιοχές θα επιδεινώνεται όσο εξελίσσεται η κλιματική αλλαγή και η υπεράντληση υπογείων υδάτων.

Μια από τις πιο ύπουλες πηγές είναι η αντίδραση μεταξύ όξινων ατμοσφαιρικών ρύπων και ασβεστιτικών υλικών όπως ο ασβεστόλιθος και το μάρμαρο, που οδηγεί, για παράδειγμα, στο σχηματισμό θειικού ασβεστίου (Price, 2000).

Υλικά κατασκευής: Λίθοι και κονιάματα μπορεί να περιέχουν σημαντικές ποσότητες αλάτων. Σε πολλές περιοχές, τα ασβεστοκονιάματα φτιάχνονταν από δολομιτικό ασβέστη, τα συστατικά του οποίου αντιδρούν με θειικά ιόντα του νερού και σχηματίζουν θειικό μαγνήσιο (Arnold & Zehnder, 1991). Επίσης, υλικά κατασκευής σε δεύτερη χρήση, όπως παλαιές πλίνθοι, μπορεί να φέρουν πολύ σημαντικό φορτίο αλάτων (Massari & Massari, 1993). Εξίσου άστοχη είναι η χρήση άμμου θαλάσσης.

Υλικά κτηριακής αποκατάστασης και συντήρησης τοιχογραφιών: Όξινα και αλκαλικά διαλύματα, τασιενεργά, τσιμέντο Portland, προϊόντα υδρύαλου και άλλα υλικά επεμβάσεων επιτείνουν την αλλοίωση από άλατα. Οι πιο σοβαρές φθορές έχουν προκληθεί από τη χρήση τσιμέντου Portland (παραγωγή νατρίτη και μιραμπιλίτη) και προϊόντων υδρύαλου. Η υδρύαλος, μετά την αντίδραση, μπορεί να παράγει έως και 30% του βάρους της ανθρακικό νάτριο και έως 20% ανθρακικό κάλιο. Αναφέρεται συχνά ότι το ανθρακικό κάλιο είναι ακίνδυνο διότι είναι τόσο υγροσκοπικό που δεν μπορεί να κρυσταλλωθεί. Αυτό δεν είναι αληθές, διότι αφενός σχηματίζει μαύρα στίγματα στις τοιχογραφίες, και αφετέρου, μετά από αντίδραση με άλατα αλκαλικών γαιών μετατρέπεται σε θειικό, χλωριούχο ή νιτρικό κάλιο, τα οποία είναι λιγότερο υγροσκοπικά και κρυσταλλώνονται υπό «κανονικές» συνθήκες. Επομένως τα αλκαλικά υλικά όχι μόνο αποτελούν πηγή αλάτων, αλλά και μετατρέπουν κάποια σχετικά ακίνδυνα άλατα σε πιο επικίνδυνα (Arnold & Zehnder, 1991).

Η χρήση κάποιων από τα παραπάνω υλικά, όπως του δισανθρακικού νατρίου και αμμωνίου σε επιθέματα αφαίρεσης αδιάλυτων αλάτων από την επιφάνεια των τοιχογραφιών δεν είναι απαραίτητη εσφαλμένη, αλλά πρέπει να γίνεται με επίγνωση των πιθανών παρενεργειών και να λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα για την αποφυγή τους. Στην περίπτωση χρήσης των πιο πάνω υλικών (δισανθρακικού νατρίου και αμμωνίου) σε επιθέματα δεν αρκεί η σχολαστική έκπλυση, αλλά απαιτείται και η εφαρμογή επιθεμάτων απιονισμένου νερού.

Το νερό της βροχής, τέλος, δεν αποτελεί πηγή διαλυτών αλάτων, διαλύει όμως και μεταφέρει άλατα άλλης προέλευσης που ήδη βρίσκονται στο έδαφος, τις επιφάνειες και τη δομή του κτηρίου.

4.2.4. Κίνηση των υδατικών διαλυμάτων αλάτων στους τοίχους

Άσχετα από την πηγή των αλάτων, η κίνησή τους και η ενεργοποίηση των διαδικασιών αλλοίωσης γίνεται μέσω του νερού. Η μεταφορά τους συμβαίνει κυρίως μέσω

διαδικασιών μεταγωγής (advection), δηλαδή μεταφοράς μάζας μέσω ενός κινούμενου ρευστού, που σ' αυτήν την περίπτωση είναι το νερό σε υγρή μορφή. Οι διάφοροι τύποι κίνησης του νερού σε υγρή μορφή εξετάστηκαν στη σχετική ενότητα. Το νερό σε εξατμισμένη μορφή δεν καθορίζει άμεσα την κίνηση των αλάτων, με την έννοια ότι δεν τα μεταφέρει το ίδιο, επιδρά όμως καθοριστικά στους μηχανισμούς αλλοίωσης.

Η ενότητα που ακολουθεί αποτελεί ελεύθερη απόδοση από το άρθρο των Arnold και Zehnder (1991), περιγράφει δε κατά τρόπο εξαιρετικό τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την κίνηση αλάτινων διαλυμάτων στους τοίχους..

Μεταφορά, συσσώρευση, αύξηση της συγκέντρωσης, καθίζηση, κλασματοποίηση και τοπική συγκέντρωση: Τα άλατα που συμβάλλουν στην αλλοίωση των τοιχογραφιών είναι προϊόντα χημικής και βιογενούς αλλοίωσης λίθων και άλλων υλικών στη φύση ή στα κτήρια, και της ανθρώπινης δραστηριότητας. Το νερό που βρίσκεται σε υγρή μορφή στους τοίχους αποτελεί πάντα, λίγο - πολύ, ένα αραιό διάλυμα αλάτων.

Στη φύση, άλατα που εκπλένονται από το έδαφος ή τη διάβρωση των λίθων, μεταφέρονται από επιφανειακά και υπόγεια νερά στις λίμνες και τη θάλασσα (μεταφορά). Εκεί τα άλατα παρέχονται διαρκώς και συσσωρεύονται (συσσώρευση). Όταν εξατμίζεται το νερό, η συγκέντρωση των διαλυμένων στοιχείων διαρκώς αυξάνεται (αύξηση της συγκέντρωσης). Όπου και όταν μια συγκεκριμένη αλάτινη φάση του συστήματος καταστεί υπέρκορη, καθιζάνει (καθίζηση). Σε σύνθετα διαλύματα, οι διάφορες αλάτινες φάσεις καθιζάνουν διαδοχικά, σύμφωνα με τη διαλυτότητα και την ιοντική κινητικότητα (ion activity). Το σύστημα κλασματοποιείται (κλασματοποίηση). Όταν η κλασματοποίηση συμβαίνει σε ένα στατικό διάλυμα (λίμνη), η μια αλάτινη φάση μετά την άλλη καθιζάνει στην ίδια θέση, σχηματίζοντας μια χρονική ακολουθία. Αν όμως το διάλυμα κινείται, οι αλάτινες φάσεις αποτίθενται σε διαφορετικές θέσεις, δημιουργώντας μια χωρική ακολουθία (τοπική συγκέντρωση).

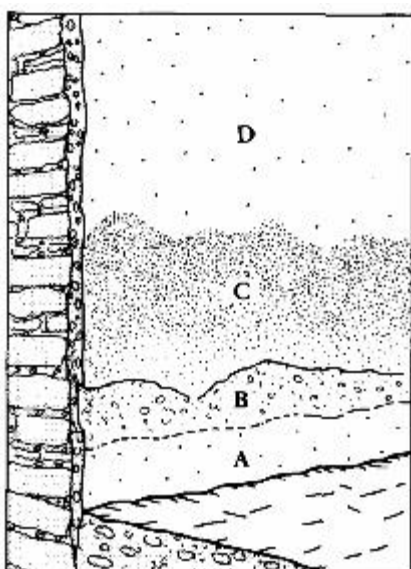
Η παραπάνω διαδικασία συμβαίνει και στα κτήρια, και μπορεί να περιγραφεί με τους ίδιους όρους. Ιόντα αλάτων που εκπλύθηκαν από το έδαφος, από δομικά υλικά, από αποθέσεις ατμοσφαιρικών ρύπων και από προϊόντα μεταβολισμού βιολογικών παραγόντων κινούνται σε υδατικά διαλύματα μέσα στους τοίχους και τα πορώδη υλικά. Όπου το νερό εξατμίζεται, τα διαλυτά στοιχεία συσσωρεύονται και αυξάνεται η συγκέντρωσή τους. Όπου και όταν το διάλυμα καταστεί υπέρκορο, οι διαφορετικές φάσεις σύνθετων συστημάτων καθιζάνουν και κλασματοποιούνται, σχηματίζοντας

συνήθως τοπικές ακολουθίες διαφορετικών αλάτων. Συγκεντρώνονται τοπικά είτε ως εξανθήσεις στις επιφάνειες των πορωδών υλικών, είτε ως υποεπιφανειακές αποθέσεις.

Με την εξαίρεση πολύ μικρών μετατοπίσεων αλάτων που «έρπουν» εξαιτίας του τριχοειδούς φαινομένου μεμβρανών νερού σε επιφάνειες αλάτων, όλα τα άλατα μεταφέρονται σε υδατικά διαλύματα. Το νερό που μεταφέρει τα ιόντα, είτε προέρχεται από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, επιφανειακά ή υπόγεια νερά ή συμπύκνωση, ρέει στην επιφάνεια των τοίχων ή διεισδύει και διηθείται μέσω κάθε διαπερατού υλικού. Τα άλατα επομένως κινητοποιούνται από κάθε προέλευσης νερό σε υγρή μορφή. Η τριχοειδής αναρρίχηση μπορεί να χρησιμεύσει ως παράδειγμα για την ανάπτυξη ενός αλάτινου συστήματος στους τοίχους.

Οι διαδικασίες έκπλυσης, μεταφοράς, συσσώρευσης, αυξημένης συγκέντρωσης, καθίζησης, κλασματοποίησης και τοπικής συγκέντρωσης συμβαίνουν κατά την τριχοειδή αναρρίχηση στους τοίχους και χαρακτηρίζουν τις περισσότερες συγκεντρώσεις αλάτων. Πρακτικά, όλα τα ιστορικά κτήρια και μνημεία εμφανίζουν, λιγότερο ή περισσότερο έντονες φθορές στη βάση των τοίχων τους από επιφανειακά και υπόγεια νερά. Όταν στις ζώνες αυτές υπάρχουν τοιχογραφίες, πολύ συχνά υπάρχει φθορά ή και πλήρης καταστροφή.

Από ενδελεχείς παρατηρήσεις προκύπτει ότι σε ζώνες με ανερχόμενη υγρασία καταγράφεται η ακολουθία του σχήματος που ακολουθεί:



Σχήμα 3: Ζώνες κατανομής αλάτων στις τοιχογραφίες (Arnold & Zehnder, 1991)

Στη ζώνη Α, αμέσως πάνω από το δάπεδο, παρατηρείται σαφώς λιγότερη φθορά από ότι στη ζώνη Β. Στη ζώνη Β, όπου οι περισσότερες τοιχογραφίες, επιχρίσματα και λίθοι εμφανίζουν κονιοποίηση, αποσάθρωση και απολεπίσεις, καταγράφονται οι περισσότερες εξανθήσεις αλάτων. Πρόκειται κυρίως για θειικό νάτριο, θειικό μαγνήσιο, θειικό ασβέστιο και νιτρικό κάλιο, αλλά και ανθρακικό νάτριο. Έτσι, μια συγκεκριμένη ομάδα αλάτων, ασθενώς ή μετρίως διαλυτών, έχουν προκαλέσει τη φθορά στη ζώνη Β. Πιο πάνω αναπτύσσεται καθαρά στους τοίχους των μνημείων η ηπιότερα αλλοιωμένη ζώνη C, με γενική εμφάνιση σκούρα και υγρή. Αυτή η ζώνη μπορεί να έχει ύψος από λίγα εκατοστά έως κάποια μέτρα.

Οι αναλύσεις δείχνουν ότι σ' αυτή τη ζώνη είναι τοπικά συσσωρευμένα χλωριούχα και νιτρικά άλατα. Φυσικά η ακολουθία των ζωνών δεν παρουσιάζεται πάντα πλήρης. Όταν η φθορά είναι προχωρημένη, μπορεί και η ζώνη Α να έχει πλήρως καταστραφεί, ενώ η ζώνη C μπορεί να απουσιάζει ή να είναι μόλις ορατή.

Η κατανομή των ιόντων στις ζώνες αυτές μπορεί να μελετηθεί με χημικές αναλύσεις υδατικών διαλυμάτων δειγμάτων κονιαμάτων και επιθεμάτων κυτταρίνης που έχουν ληφθεί καθ' όλο το ύψος της ζώνης της ανερχόμενης υγρασίας και επομένως αποκαλύπτουν ολόκληρη την ακολουθία από την Α στη C.

Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον ότι ο μεγαλύτερος βαθμός αλλοίωσης δεν καταγράφεται εκεί που βρίσκονται τα περισσότερα ιόντα. Επειδή τα μείγματα ιόντων της ζώνης C είναι εξαιρετικά υγροσκοπικά, τα άλατα υπό συνήθεις συνθήκες δεν κρυσταλλώνονται στα κλίματα της ηπειρωτικής Ευρώπης²¹.

Στο πλαίσιο αυτών των τοπικών συγκεντρώσεων, τα ιόντα αλάτων εμφανίζουν διαφορετικές κατανομές αλλά παρόμοιες ακολουθίες σε όλα τα μνημεία. Τα θειικά βρίσκονται στις ζώνες Α και Β, ενώ τα νιτρικά και τα χλωριούχα κυρίως στη ζώνη C.

Πώς εξηγείται αυτή η κατανομή; Αιτία της υγρασίας που κινείται τριχοειδώς αποτελούν τα νερά της επιφάνειας και του υπεδάφους που συγκεντρώνονται στη βάση των τοίχων. Το νερό του εδάφους είναι ένα αραιό διάλυμα ιόντων καλίου, νατρίου, μαγνησίου και ασβεστίου ως κυρίων κατιόντων και νιτρικών, χλωριούχων, θειικών και ανθρακικών ως κύριων ανιόντων.

²¹Αντίθετα, κρυσταλλώνονται συχνά σε θερμότερα και ξηρότερα κλίματα.

Η εξάτμιση αρχίζει εξωτερικά αμέσως επάνω από το επίπεδο του εδάφους, ενώ εσωτερικά πάνω από το επίπεδο του δαπέδου. Η υγρασία ανέρχεται μέχρι μια στάθμη ισορροπίας μεταξύ της παροχής νερού και της εξάτμισης. Το ύψος της ανόδου ποικίλει. Εάν τα ιόντα ήταν μόνο ενός είδους, θα συγκεντρώνονταν και θα κρυσταλλώνονταν τοπικά σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πάνω από το έδαφος, όπου η εξάτμιση θα είχε προχωρήσει μέχρι το διάλυμα να καταστεί υπέρκορο. Στην πράξη όμως τα συστήματα αλάτων αποτελούνται από διάφορα ιόντα. Κατά την εξάτμιση, καθίστανται υπέρκορα πρώτα τα διαλύματα αλάτων με χαμηλή διαλυτότητα και τα άλατα κρυσταλλώνονται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, ενώ τα πιο ευδιάλυτα προχωρούν ψηλότερα. Έτσι, τα άλατα διαχωρίζονται και τα διαλύματα υφίστανται κλασματοποίηση καθ' ύψος. Παρατηρήσεις και αναλύσεις δείχνουν ότι τα λιγότερο διαλυτά ανθρακικά και θειικά κρυσταλλώνονται στις ζώνες Α και Β, ενώ τα χλωριούχα και νιτρικά προχωρούν περισσότερο και συσσωρεύονται στη ζώνη C.

Σε υγρά, ήπια κλίματα, τα ανθρακικά και θειικά άλατα υπό κανονικές εξωτερικές συνθήκες προκαλούν τις κύριες αλλοιώσεις στις ζώνες Α και Β, ενώ στη ζώνη C σημειώνεται λιγότερη φθορά. Τα χλωριούχα και νιτρικά που συσσωρεύονται στη ζώνη C σχηματίζουν ένα υγροσκοπικό διάλυμα από το οποίο σε συνήθεις συνθήκες μόνο το νιτρικό κάλιο θα κρυσταλλωθεί, αν και το χλωριούχο νάτριο και το νιτρικό νάτριο μπορεί να κρυσταλλωθούν αν το περιβάλλον γίνει εξαιρετικά ξηρό²². Όμως τα περισσότερα διαλυτά στη ζώνη C θα παραμείνουν σε διάλυση.

Αυτές οι ακολουθίες σχηματίζονται όχι μόνο στις ανώτερες ζώνες της ανερχόμενης υγρασίας, αλλά και σε νερό που ρέει σε μια επιφάνεια, σε νερό από διήθηση κ.ά. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαλυτότητα ενός άλατος, τόσο μεγαλύτερη απόσταση θα διανύσει από την αφετηρία του.

Προϋποθέσεις κρυστάλλωσης: Προϋπόθεση καθίζησης και κρυστάλλωσης αποτελεί η ύπαρξη υπέρκορου διαλύματος. Συνθήκες που μπορεί να οδηγήσουν σε κρυστάλλωση επομένως είναι:

- Ο εμπλουτισμός του διαλύματος σε άλατα, που μπορεί να συμβεί όσο το διάλυμα κινείται στον τοίχο, φτάνοντας σε νέες θέσεις και διαλύοντας άλατα που συναντά εκεί.

²²Βλ. προηγούμενη σημείωση.

- Με την αύξηση της συγκέντρωσης σε διαλυτά δια της εξάτμισης νερού του διαλύματος, που καθορίζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (T, RH, ρεύματα).
- Με την πτώση της θερμοκρασίας του συστήματος. Η ίδια ποσότητα διαλυτών και η ίδια ποσότητα διαλύτη σε διαφορετικές θερμοκρασίες μπορεί να συνιστούν μη κορεσμένο, κορεσμένο ή υπέρκορο διάλυμα.

Στις συνθήκες ενός μνημείου, απαντώνται πολύ μικρές ποσότητες αλάτων στις τοιχοποιίες και μεγάλες μάζες υγρού αέρα. Εάν ο αέρας κινείται, τότε η μάζα αέρα που επηρεάζει το συγκεκριμένο σύστημα αλάτων - διαλύματος - ατμών είναι πρακτικά απεριόριστη. Στην περίπτωση αυτή, ισχύει ότι η υγρασία του αέρα θα καθορίσει την κατάσταση του διαλύματος, ελέγχοντας την καθίζηση και τη διάλυση. Επομένως, υπερκορεσμός και καθίζηση θα συμβαίνουν κάθε φορά που η σχετική υγρασία του αέρα θα είναι μικρότερη από την σχετική υγρασία ισορροπίας του συγκεκριμένου κορεσμένου διαλύματος ($RH \leq RH_{eq}$). Επομένως, η σχετική υγρασία του αέρα θα καθορίσει εάν ένα άλας θα κρυσταλλωθεί αλλοιώνοντας μια τοιχογραφία. Όσο αυτή παραμένει ψηλότερα από την υγρασία ισορροπίας ενός δεδομένου κορεσμένου αλάτινου διαλύματος, οι διαλυμένες ουσίες θα παραμένουν σε διάλυση, ή, αν είχαν κρυσταλλωθεί, θα διαλυθούν. Επομένως, οι μεταβολές της σχετικής υγρασίας παράγουν κύκλους κρυστάλλωσης.

Αρχές που ισχύουν κατά τους Arnold και Zehnder (1991):

- Υπάρχει σαφής σχέση μεταξύ των μεταβολών της σχετικής υγρασίας ενός χώρου και την κρυστάλλωση και διάλυση των αλάτων στον τοίχο.
- Όσο η σχετική υγρασία μειώνεται, αυξάνεται η κρυστάλλωση των αλάτων.
- Όταν η σχετική υγρασία αυξάνεται, τα κρυσταλλωμένα άλατα ξαναδιαλύονται.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κύκλοι που περιγράφονται πιο πάνω μπορεί να ενεργοποιούνται άλλοτε σε έκτακτες περιπτώσεις, άλλοτε με ετήσια περιοδικότητα και άλλοτε, σε περιπτώσεις έντονων διακυμάνσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, ακόμη και σε ημερήσια βάση. Η τελευταία περίπτωση μπορεί να ισχύει σε υπαίθριους χώρους, σε μνημεία που θερμαίνονται με αδόκιμο τρόπο, σε κλειστούς χώρους με υψηλή επισκεψιμότητα, αλλά και σε εσωτερικά περιβάλλοντα που δέχονται ισχυρή επιρροή του εξωτερικού περιβάλλοντος, λόγω περιορισμένων θερμομονωτικών ιδιοτήτων του κελύφους ή έντονων ρευμάτων.

Θέση κρυστάλλωσης - κρυσταλλικές μορφές: Η καθ' ύψος θέση της κρυστάλλωσης των αλάτων περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα από τους Arnold και Zehnder (1991) με ιδιαίτερη καθαρότητα. Ως προς τη θέση κρυστάλλωσης στο οριζόντιο επίπεδο, ο Price (2000) θεωρεί εντυπωσιακό το ότι γνωρίζουμε τόσο λίγα σχετικά με το γιατί κάποιοι κρύσταλλοι αναπτύσσονται στην επιφάνεια, ενώ άλλοι αναπτύσσονται εντός της πορώδους δομής, δημιουργώντας προϋποθέσεις για πολύ μεγαλύτερες φθορές.

Κατ' άλλους συγγραφείς (Arnold & Zehnder, 1991) (Massari & Massari, 1993), το εάν η κρυστάλλωση θα συμβεί στην επιφάνειά του πορώδους υλικού ή εντός της δομής του, αποτελεί συνάρτηση κυρίως του ρυθμού και της κανονικότητας της τροφοδοσίας με υδατικό διάλυμα αλάτων και της εξάτμισης.

Σε κάθε περίπτωση, η θέση της απόθεσης αποτελεί εξαιρετικά κρίσιμο ζήτημα. Εάν συμβεί στην επιφάνεια ως εξάνθηση (efflorescence) προκαλεί κυρίως ζητήματα οπτικής αλλοίωσης των τοιχογραφιών, κατά κανόνα όμως όχι προβλήματα διατήρησης.

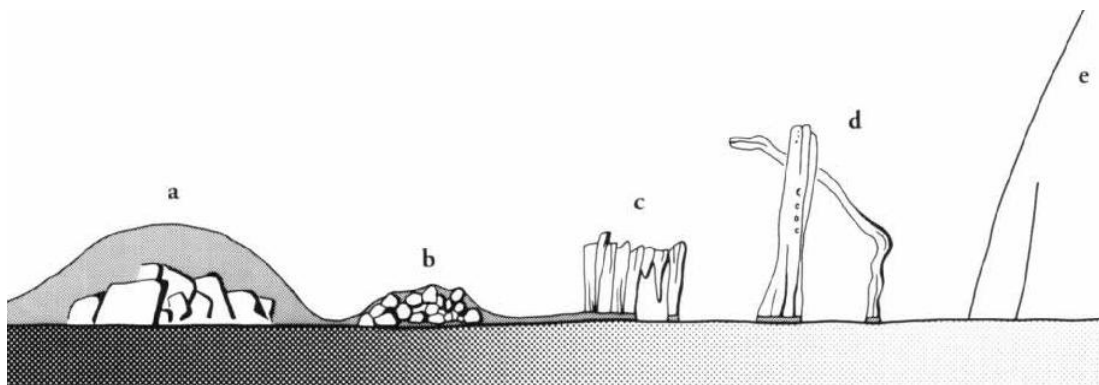
Εάν όμως συμβεί εντός της δομής της τοικοποιίας, των επιχρισμάτων ή του χρωματικού στρώματος, ή και στις μεταξύ τους διεπιφάνειες, είναι απολύτως καταστρεπτική, καθώς προκαλεί αποσάθρωση, αποδιοργάνωση του πορώδους ιστού, κονιοποίηση και επικίνδυνες διαστρωματικές αποκολλήσεις που οδηγούν σε ολοκληρωτική απώλεια των τοιχογραφιών.

Όταν ο ρυθμός μεταφοράς του αλάτινου διαλύματος προς την επιφάνεια είναι υψηλότερος από το ρυθμό εξάτμισης, η απόθεση και κρυστάλλωση των αλάτων γίνεται στην επιφάνεια. Εάν ο ρυθμός εξάτμισης είναι μεγαλύτερος του ρυθμού μεταφοράς, η απόθεση και κρυστάλλωση συμβαίνει υποεπιφανειακά, με αποτέλεσμα την άσκηση ισχυρών πιέσεων στα τοιχώματα των πόρων, τις άλλες κοιλότητες ή τις διεπιφάνειες του συστήματος.

Όπως εξηγούν οι Arnold και Zehnder (1991), από τις συνθήκες τροφοδοσίας και εξάτμισης (σχετική υγρασία και θερμοκρασία), δηλαδή τελικά από την υγρασία του υποστρώματος, καθορίζεται όχι μόνο η θέση της κρυστάλλωσης, αλλά και η κρυσταλλική μορφή των αλάτων και το είδος των συσσωματώσεών τους. Σύμφωνα μ' αυτούς, οι πιο κοινές μορφές πρόσφατων εξανθήσεων είναι πρισματικές, βελονοειδείς και τριχοειδείς. Διαμορφώνονται είτε ανεξάρτητοι κρύσταλλοι, είτε χαλαρά σύνολα με μορφή χνουδιού. Όλα τα άλατα πάντως, ιδίως τα λιγότερο διαλυτά, μπορεί να

σχηματίσουν και κρούστες συμπαγών συνόλων βελονοειδών, κιονοειδών ή ισομετρικών κρυστάλλων.

Το ίδιο άλας μπορεί να σχηματίσει συμπαγή κρούστα ή χαλαρές εξανθήσεις, σε διαφορετικές θέσεις του ίδιου τοίχου ή στην ίδια θέση υπό διαφορετικές συνθήκες. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις ανερχόμενης υγρασίας, ένα άλας μπορεί να σχηματίσει κρούστα στις χαμηλές, πιο υγρές περιοχές, ενώ στις ψηλότερες και λιγότερο υγρές περιοχές να σχηματίσει χαλαρά σύνολα. Ένα τέτοιο χαλαρό σύνολο, σε συνθήκες αυξανόμενης υγρασίας, μπορεί να μετασχηματιστεί σε κρούστα με ανακρυστάλλωση.



Σχήμα 4: Μορφές εξανθήσεων αλάτων (Arnold & Zehnder, 1991)

Εκτός της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, σημαντικότερος εξωτερικός παράγοντας που καθορίζει το σχήμα των κρυστάλλων είναι η υγρασία του υποστρώματος.

Στην πιο πάνω εικόνα, στην περίπτωση (a), μεγάλοι κρύσταλλοι, στην τυπική μορφή ειδικής ισορροπίας τους, εμφανίζονται πλήρως βυθισμένοι σε μια μεμβράνη διαλύματος πάνω σε υγρό υπόστρωμα. Στην περίπτωση (b), σε υγρό υπόστρωμα αλλά χωρίς πλήρη εμβάπτιση, σχηματίζεται κοκκώδης κρούστα μικρότερων, ισομετρικών κρυστάλλων. Στην περίπτωση (c), αναπτύσσεται στον αέρα ινώδης κρούστα από μια επιφάνεια υποστρώματος που καλύπτεται από μεμβράνη διαλύματος. Στην περίπτωση (d), αναπτύσσονται παχείς, κιονοειδείς κρύσταλλοι από ελαφρά υγρό υπόστρωμα. Η μεμβράνη διαλύματος σχηματίζει ακόμη σημειακές κηλίδες. Τέλος, στην περίπτωση (e), πολύ λεπτοί, τριχοειδείς κρύσταλλοι αναπτύσσονται προς τον αέρα από μια σχεδόν ξηρή επιφάνεια με σημειακή μόνο παροχή διαλύματος.

Οι κρύσταλλοι που αναπτύσσονται υποεπιφανειακά, εντός των πόρων, και επομένως προκαλούν διάρρηξη της δομής, εμφανίζουν μάλλον συμπαγείς μορφές. Η μορφολογία

τους, παρόμοια με αυτή των κρυστάλλων που σχηματίζουν κρούστες στην επιφάνεια, υποδεικνύει ότι αναπτύσσονται μέσα σε μεμβράνη διαλύματος.

4.2.5. Μηχανισμοί φθοράς

Δεδομένης της σοβαρότητας του προβλήματος, προκαλεί απορία ότι ο μηχανισμός της φθοράς από άλατα δεν έχει προς το παρόν πλήρως κατανοηθεί. Αυτό που δύσκολα αμφισβητείται είναι ότι η κινητήριος δύναμη πίσω από τις φθορές λόγω κρυστάλλωσης είναι η ελεύθερη ενέργεια που σχετίζεται με ένα υπέρκορο διάλυμα. Είναι αυτή η ενέργεια που κατά την κρυστάλλωση παρέχει δυνάμεις επαρκούς μεγέθους ακόμη και για να θραύσουν λίθους και σκυρόδεμα (Price, 2000).

Τα κρυσταλλωμένα άλατα έχουν καταστρεπτική επίδραση. Αν και αυτό είναι αποδεδειγμένο, γνωρίζουμε λίγα για το μηχανισμό. Ο Evans (1970) κάνει μια πλήρη ανασκόπηση των διαδικασιών κρυστάλλωσης των αλάτων και των φθορών που προκαλούν, καλύπτοντας και θεωρίες σχετικές με την πίεση από την ανάπτυξη (growth pressure) των κρυστάλλων. Η πίεση μπορεί να προκαλείται από την ανάπτυξη των κρυστάλλων, ιδίως τη γραμμική, από την ενυδάτωση ή από θερμική διαστολή (Arnold & Zehnder, 1991)²³.

Οι βασικές παραδοχές είναι ότι:

- Οι φθορές από κρυστάλλωση και ενυδάτωση οφείλονται στην αντίστοιχη αύξηση του όγκου των κρυστάλλων.
- Ο βαθμός υπερκορεσμού των αλάτινων διαλυμάτων κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης αποτελεί προς το παρόν το μόνο μέτρο της έντασης του φαινομένου. (Πρόκος, 2010) (Steiger, 2005).
- Η τάση ατμών των υδατικών διαλυμάτων αποτελεί βασικό μέγεθος για την κατανόηση του μηχανισμού φθοράς.

²³Οι δύο αυτοί συγγραφείς κατά παραδοχή τους εξετάζουν εμπειρικά τις συνθήκες ανάπτυξης των διαλυτών αλάτων και τις αλλοιώσεις που προκαλούν σε μνημεία. Αντίθετα, ο Price (2000) αναπτύσσει ένα υπολογιστικό εργαλείο για την πρόγνωση των περιβαλλοντικών συνθηκών που απαιτούνται για την αποφυγή φθορών από διαλυτά άλατα, το οποίο εξετάζεται σε επόμενη ενότητα.

Η τάση ατμών των υδατικών διαλυμάτων²⁴: Όταν ένα άλας διαλύεται σε νερό, η τάση ατμών του νερού μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι η σχετική υγρασία του αέρα που βρίσκεται σε ισορροπία (equilibrium) με το διάλυμα μειώνεται αντίστοιχα, αφού η σχετική υγρασία ορίζεται από τη σχέση $RH = p / p_0 \times 100\%$, όπου p είναι η τάση ατμών του διαλύματος και p_0 είναι η τάση ατμών του καθαρού νερού στην ίδια θερμοκρασία. Η μείωση της τάσης ατμών οφείλεται κατ' αρχήν στη μείωση της αναλογίας του νερού στο διάλυμα, κυρίως όμως στο ότι τα μόρια του νερού είναι πολικά και έλκονται από το ηλεκτρικό φορτίο των ιόντων. Τείνουν επομένως λιγότερο να διαφύγουν από την επιφάνεια, αφού τα συγκρατεί η παρουσία των ιόντων.

Η μείωση της τιμής της τάσης ατμών που καταγράφεται όταν ένα μεμονωμένο άλας διαλύεται σε νερό είναι σχετικά εύκολο να περιγραφεί. Όσο υψηλότερη η συγκέντρωση του άλατος, τόσο χαμηλότερη η τάση ατμών του διαλύματος, και επομένως τόσο χαμηλότερη η σχετική υγρασία του αέρα σε ισορροπία με το συγκεκριμένο διάλυμα. Υπάρχει όμως όριο στην ποσότητα ενός άλατος που μπορεί να διαλυθεί μέχρι το διάλυμα να καταστεί κορεσμένο. Αντίστοιχο όριο υπάρχει και για τη μείωση της τάσης ατμών και ένα κορεσμένο διάλυμα έχει μια χαρακτηριστική τάση ατμών ανεξάρτητη με την περίσσεια αδιάλυτου άλατος που μπορεί να περιέχεται στο διάλυμα. Η σχετική υγρασία ισορροπίας συνήθως αναφέρεται ως ισοδύναμη σχετική υγρασία (Equilibrium RH, ERH). Ως γενική αρχή μπορεί να αναμένεται τα δυσδιάλυτα άλατα (όπως το θειικό ασβέστιο) να έχουν υψηλή ισοδύναμη υγρασία, ενώ τα ευδιάλυτα χαμηλή. Στην περίπτωση των φθορών από άλατα, η μειωμένη τάση ατμών των διαλυμάτων μπορεί να προσεγγιστεί από την οπτική όχι του νερού αλλά του άλατος. Ας εξεταστεί μια ποσότητα καθαρού άλατος εκτεθειμένη σε συνθήκες κυμαινόμενης σχετικής υγρασίας. Εάν η σχετική υγρασία είναι πάνω από την ισοδύναμη, το άλας θα προσλαμβάνει νερό από την ατμόσφαιρα μέχρι να διαλυθεί. Εάν δοθεί επαρκής χρόνος, κατά τον οποίο δεν θα είναι κορεσμένο, θα έρθει σε ισορροπία με τη συγκεκριμένη σχετική υγρασία. Εάν τώρα η σχετική υγρασία σημειώσει πτώση, το νερό θα εξατμίζεται μέχρι να επιτευχθεί και πάλι ισορροπία. Αν η σχετική υγρασία μειωθεί μέχρι να φτάσει την ισοδύναμη, θα έχει εξατμιστεί αρκετό νερό ώστε το διάλυμα να καταστεί κορεσμένο. Κάθε περαιτέρω πτώση της σχετικής υγρασίας θα οδηγήσει στην απώλεια όλου του νερού, και ολόκληρη η ποσότητα του άλατος θα κρυσταλλωθεί. Σε όλες τις σχετικές υγρασίες κάτω από την ισοδύναμη, είναι το στερεό άλας που υφίσταται σε ισορροπία. Εάν η

²⁴Η ενότητα αποτελεί ελεύθερη απόδοση αποσπάσματος από το έργο του Price (2000).

σχετική υγρασία φτάσει ξανά την ισοδύναμη, το άλας θα προσλαμβάνει νερό, μέχρι να σχηματιστεί ένα κορεσμένο διάλυμα.

Η κατάσταση είναι λίγο πιο σύνθετη αν το άλας μπορεί να υπάρχει σε ένυδρες και άνυδρες μορφές. Αν ένα τέτοιο άλας εκτεθεί σε συνθήκες σταδιακά αυξανόμενης σχετικής υγρασίας, η μετατροπή του σε ένυδρο θα συμβεί σε συγκεκριμένη σχετική υγρασία, με την προσρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας νερού. Δεν θα συμβεί άλλη προσρόφηση, μέχρι η σχετική υγρασία να φτάσει την ισοδύναμη του ένυδρου άλατος. Στο σημείο αυτό το ένυδρο άλας θα αρχίσει να διαλύεται.

Είναι επομένως σαφές τι πρέπει να συμβεί για να αποφευχθεί η φθορά από άλατα. Εάν η σχετική υγρασία διατηρείται σταθερά πάνω ή κάτω από την ισοδύναμη, το άλας θα είναι αντίστοιχα σταθερά στερεό ή σταθερά σε διάλυση.

Ομοίως, αν η σχετική υγρασία βρίσκεται σε τιμές εκτός αυτών που αντιστοιχούν στην ένυδρη φάση, δεν θα συμβαίνει ενυδάτωση.

Μακάρι να ήταν τόσο απλό. Η προσβολή από μεμονωμένα άλατα είναι σπάνια, η συνήθης κατάσταση είναι μίγματα αλάτων. Η δε πρόγνωση της συμπεριφοράς μιγμάτων αλάτων είναι πολύ πιο δύσκολη.

Κρυστάλλωση και ενυδάτωση: Η κρυστάλλωση συμβαίνει σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο, από τα στοιχειώδη δομικά στοιχεία του κρυστάλλου που βρίσκονται διαλυμένα στο διάλυμα σχηματίζονται οι πρώτοι κρύσταλλοι (πυρηνογένεση²⁵). Κατά το δεύτερο στάδιο ο κρύσταλλος αναπτύσσεται, καθώς πάνω στον πυρήνα προστίθενται νέα δομικά στοιχεία. Και τα δύο αυτά στάδια συμβαίνουν μέσα σε υπέρκορα διαλύματα.

Μέσα στη μάζα των δομικών στοιχείων των τοιχογραφιών, ή στη διεπιφάνεια μεταξύ στρωμάτων επιχρίσματος ή επιχρίσματος - χρωματικού στρώματος, ή και εντός της δομής του χρωματικού στρώματος, οι κρύσταλλοι κατά το στάδιο της ανάπτυξής τους ασκούν πίεση στα τοιχώματα των πόρων, η οποία είναι υπεύθυνη για την αποδιοργάνωση της δομής των πορωδών υλικών.

²⁵Αναγνωρίζονται διαφορετικοί τύποι πυρηνογένεσης. Στην ετερογενή πυρηνογένεση, η ταχύτητα πυρηνογένεσης σε ένα διάλυμα ή τήγμα μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την παρουσία διαφόρων μολύνσεων. Οι μολύνσεις αυτές μπορεί να παρεμποδίζουν την πυρηνογένεση σε κάποιο σύστημα ενώ παράλληλα να την επιταχύνουν σε ένα άλλο (Τσακίρη, 2006).

Ενυδάτωση καλείται η μετατροπή μιας άνυδρης ουσίας σε ένυδρη με πρόσληψη νερού από το περιβάλλον και ενσωμάτωσή της στο κρυσταλλικό πλέγμα του άνυδρου κρυστάλλου.

Τα περισσότερα άλατα μπορεί να υπάρχουν σε διάφορες καταστάσεις ενυδάτωσης, και κάθε φάση έχει ένα πεδίο σταθερότητας που καθορίζεται από ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας πίεσης, και υγρασίας. Κάθε φάση ενυδάτωσης προκαλεί διαφορετική αύξηση του όγκου. Το θειικό νάτριο παρουσιάζει αύξηση όγκου της τάξης του 308%, ενώ το θειικό μαγνήσιο στις διάφορες ένυδρες μορφές του παρουσιάζει μέγιστη αύξηση περίπου 170% (Λαμπρόπουλος, 2003).

Με τα δεδομένα αυτά, και κατά την ενυδάτωση των αλάτων ασκούνται ισχυρές πιέσεις στα τοιχώματα των πόρων, οι οποίες, εάν υπερβαίνουν τις μηχανικές αντοχές τους, οδηγούν σε νέες φθορές (ρωγμές, αποσάθρωση, κ.ο.κ.).

5. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑ

5.1. Υπόγεια μνημεία

Στον ελλαδικό χώρο τα υπόγεια μνημεία είναι κατά κανόνα ταφικά, όπως οι κατακόμβες και κυρίως τα ταφικά μνημεία κάτω από τύμβο, κατά τον τύπο των μακεδονικών τάφων. Όταν είναι αδιατάρακτα χαρακτηρίζονται ιδίως από:

- τη θηριώδη θερμική αδράνεια των όγκων τους
- την εξαιρετικά περιορισμένη επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος
- τη μοναδική σταθερότητα των περιβαλλοντικών παραμέτρων του εσωτερικού τους.

Από το τελευταίο χαρακτηριστικό προκύπτει η εμπειρική διαπίστωση ότι οι σταθερές συνθήκες, ακόμη και όταν είναι κακές, ευνοούν περισσότερο τη διατήρηση από ότι οι μεταβαλλόμενες, ακόμη κι αν αυτές βρίσκονται πιο κοντά στα όρια των θεωρητικά επιθυμητών τιμών. Η παρατήρηση, που αφορά σε δραματικό βαθμό τα οργανικά υλικά, ισχύει και για τα ανόργανα στην πλειοψηφία τους υλικά κατασκευής των τοιχογραφιών.

Η απομάκρυνση των χωμάτινων όγκων των τύμβων αποτελεί κατά κανόνα κάκιστη πρακτική. Αυτό συμβαίνει και διότι οι ίδιοι οι τύμβοι αποτελούν μέρος του μνημείου, διασώζοντας και αποκαλύπτοντας εξαιρετικά χαρακτηριστικά τεχνολογικής γνώσης των δημιουργών τους, όσο και διότι άμεση συνέπεια είναι η δραματική μεταβολή των περιβαλλοντικών παραμέτρων στο εσωτερικό του ταφικού μνημείου²⁶.

Ως προς τη μεταβολή των περιβαλλοντικών παραμέτρων μετά από ανασκαφή, αποδεικνύεται ότι η θέση του κάθε τάφου σε σχέση με τον τύμβο που τον καλύπτει και

²⁶«Ο τύμβος αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στοιχείο των Μακεδονικών τάφων και τεράστιο τεχνικό δημιούργημα για την εποχή του. Μέχρι σήμερα δεν έχει ερευνηθεί συστηματικά ο τρόπος κατασκευής του και η σημασία ύπαρξης και διατήρησής του. Παρατηρήσεις πάνω στον τρόπο κατασκευής του τύμβου δείχνουν ότι αποτελεί σωστά σχεδιασμένο έργο με κατασκευαστική συνοχή και διαστρωμάτωση με εναλλαγή διαδοχικών στρώσεων ψιλόκοκκου και χονδρόκοκκου υλικού ώστε να εξασφαλίζει απορροή των υδάτων προς την περιφέρειά του και να επιτυγχάνεται η ελάχιστη εισροή προς το μνημείο. Επιπλέον, ο όγκος του συσσωρευμένου χώματος με την τεράστια θερμοχωρητικότητά του, εξασφαλίζει σταθερότητα μικροκλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό του μνημειακού τάφου, προστατεύοντάς το έτσι από τη φθορά» (Κυριακού, 2007).

το μέγεθος του τύμβου δεν αποτελούν στοιχεία που καθορίζουν το μικροκλίμα, ενώ καθοριστικό στοιχείο αποτελεί ο τρόπος αποχωμάτωσης του τύμβου γύρω από την κατασκευή (Κυριακού, 2007).

Πολύ πιο σύνθετο πρόβλημα αποτελεί η διαμόρφωση προϋποθέσεων για την εξασφάλιση της επισκεψιμότητας. Παρά τη θεμελιώδη αρχή ότι στόχος των ειδικών είναι η απόδοση του δημόσιου πολιτιστικού αγαθού στην κοινωνία, οι έννοιες διατήρηση και επισκεψιμότητα παραμένουν ανταγωνιστικές. Εδώ ας αναφερθεί απλώς η εμπειρική παρατήρηση ότι είναι πιθανό σύγχρονες, υπερμεγέθεις κατασκευές προστασίας και ανάδειξης και ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις βιομηχανικής κλίμακας για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων ταφικών μνημείων να αποδεικνύονται λιγότερο αποτελεσματικές από καλομελετημένες, ήπιες παρεμβάσεις μικρής κλίμακας.

Στις συνέπειες της επισκεψιμότητας δεν περιλαμβάνονται τόσο μεταβολές στη θερμοκρασία, όσο στη σχετική υγρασία, ιδίως λόγω των ρευμάτων που προκαλούνται κατά τον εξαερισμό του χώρου, αλλά και της αναπνοής και εφίδρωσης των επισκεπτών. Μεταβολές στη θερμοκρασία σημειώνονται όταν το περιβάλλον ελέγχεται για λόγους θερμικής άνεσης των επισκεπτών. Καταγράφονται επίσης αυξημένες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα, παράμετρος που πρέπει απαραίτητα να παρακολουθείται στις περιπτώσεις υπόγειων μνημείων (Maekawa, 1993).

Ο υπόγειος χαρακτήρας των ταφικών μνημείων κάποτε συνεπάγεται πλημμυρικά φαινόμενα, είτε λόγω εκτάκτων περιστατικών, είτε λόγω της ανύψωσης του υδροφόρου ορίζοντα μετά την περίοδο της αρχικής κατασκευής, είτε λόγω της διατάραξης της τοπικής ισορροπίας λόγω της ίδιας της ανασκαφής και της έλλειψης μέτρων, ή της λήψης ακατάλληλων μέτρων, ή και λόγω της αδυναμίας συντήρησης παλαιών έργων. Ανάλογα με την αιτιολογία του προβλήματος και μόνο μετά από ενδελεχή μελέτη, είναι δυνατόν υπό προϋποθέσεις να προταθεί ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα με περιμετρικές γεωτρήσεις. Σε παρόμοια πρόταση για την αποστράγγιση μακεδονικών τάφων στα Λευκάδια Ημαθίας καταλήγουν οι Μαριολάκος κ.ά. (1999). Στην ίδια δημοσίευση προτείνονται εναλλακτικά και άλλες μέθοδοι (αποστραγγιστική τάφος με στεγανή πλευρά προς τον τάφο και στεγανοποίηση με τσιμεντενέσεις), ενδεχομένως αποτελεσματικές για την αντιμετώπιση του φαινομένου, των οποίων όμως η συμβατότητα με τοιχογραφημένα μνημεία είναι αμφίβολη.

5.2. Τοιχογραφημένα σπήλαια και μεικτές²⁷ κατασκευές

Κέλυφος των μνημείων αυτών αποτελεί ο ίδιος ο όγκος του βράχου που τα περιβάλλει. Χαρακτηριστικό και σ' αυτές τις περιπτώσεις αποτελεί η τεράστια θερμική αδράνεια των τοιχωμάτων. Το εσωτερικό περιβάλλον συνδιαμορφώνεται από το χαρακτηριστικό αυτό και τα ρεύματα αέρα. Τέτοιες συνθήκες είναι ιδανικές για την εμφάνιση υγρασίας από συμπύκνωση, η οποία αποτελεί πάγιο φαινόμενο σε σπηλαιώδη τοιχογραφημένα μνημεία. Άλλο πάγιο πρόβλημα είναι η βαρυτική κίνηση νερού, είτε από διήθηση μέσω πορωδών πετρωμάτων, είτε ως ροή μέσω μεγαλύτερων ανοιγμάτων, ρωγμών του βράχου κ.ο.κ. Το νερό ακολουθεί της φυσικές ή τεχνητές καμπύλες της οροφής και στη συνέχεια ρέει στους τοίχους, εκπλένοντας υλικά κατασκευής και αποθέτοντας κρούστα αλάτων μεγάλου πάχους, συχνά ανθρακικών.

Η παρουσία αλάτων και βιολογικών παραγόντων αλλοίωσης σε τέτοια περιβάλλοντα αποτελεί τον κανόνα.

Στις περιπτώσεις τοιχογραφημένων σπηλαίων, οι δυνατότητες παρέμβασης στο κέλυφος είναι εντελώς περιορισμένες. Μπορεί να εξαντλούνται σε σφράγιση κάποιων κοντινών εξωτερικών ρωγμών του βράχου και κυρίως σε παρεμβάσεις για τον περιορισμό των ρευμάτων. Απαιτείται πάντως εξαιρετική προσοχή και περίσκεψη πριν τη λήψη μέτρων, με μελέτη από διεπιστημονικές ομάδες, καθώς η κίνηση των αερίων ρευστών, όπως και η πρόγνωση των συνεπειών κάθε παρέμβασης υπερβαίνουν την «κοινή» λογική. Ενδεικτικά, η εξάλειψη των ρευμάτων μπορεί να περιορίσει τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αλλά να ευνοήσει την ανάπτυξη βιολογικών παραγόντων.

5.3. Θολοσκεπείς κατασκευές

Οι θολοσκεπείς κατασκευές, καμαροσκεπείς ή τρουλλαίες, χαρακτηρίζονται από τα σημαντικά φορτία της ανωδομής τους, και τη συνακόλουθη μεγέθυνση του πάχους των τοιχοποιιών και των κοίλων σημείων μετάβασης από τους θόλους προς την τοιχοποιία προκειμένου αυτά τα φορτία να μεταφερθούν με επιτυχία στο έδαφος. Τοιχοποιίες πάχους ενός μέτρου και δομικά στοιχεία συνολικού πάχους πολύ μεγαλύτερου

²⁷Ως μεικτές κατασκευές νοούνται είτε κτήρια εντός σπηλαίων που αξιοποιούν μέρος του βράχου στην κατασκευή τους, είτε κτήρια εκτός σπηλαίων, των οποίων πλευρά ή πλευρές αποτελούνται από βράχο.

(αθροίσματα τοιχοποιίας και εσωτερικών σφενδονίων ή εξωτερικών αντηρίδων) δεν είναι καθόλου σπάνια. Οι αρχιτεκτονικοί όγκοι είναι συνεπτυγμένοι. Η φύση των δομικών υλικών και το μεγάλο πάχος του κελύφους συνεπάγονται αυξημένη θερμική αδράνεια, η οποία αφενός αποτελεί συνθήκη θερμοκρασιακής σταθερότητας, αλλά και συγχρόνως συνθήκη συμπίκνωσης. Στις θέσεις με τα μεγαλύτερα πάχη, όπως είναι αυτές που αναφέρθηκαν πιο πάνω και σημεία λίγο πάνω από τις γενέσεις των θόλων, η εμφάνιση του φαινομένου είναι πιθανότερη, όπως και στις ανώτερες ζώνες των τοίχων, όπου η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό είναι υψηλότερη. Κατά τη θερινή περίοδο όμως η συμπίκνωση δεν αποκλείεται και στις βάσεις των τοίχων, οι οποίες ψύχονται λόγω των απωλειών θερμικής ενέργειας προς το έδαφος.

Τέλος, τα μεγάλα πάχη της τοιχοποιίας συνδέονται και με αύξηση του ύψους της τριχοειδούς αναρρίχησης.

5.4. Ξυλόστεγες κατασκευές

Η απαιτήσις από την τοιχοποιία για μεταφορά φορτίων στο έδαφος είναι μειωμένες σε σχέση με τον προηγούμενο τύπο, καθώς τα φορτία της ανωδομής είναι μικρότερα. Οι αρχιτεκτονικοί όγκοι είναι πιο ανεπτυγμένοι, προβάλλουν μεγαλύτερο μέτωπο στο εξωτερικό περιβάλλον και γι' αυτό το μικροκλίμα του εσωτερικού εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία και ταχύτερη ανταπόκριση στις μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών. Παρά ταύτα, οι τοιχοποιίες παραμένουν φέρουσες και πάχη 60-80cm είναι συνηθισμένα. Και εδώ επομένως η θερμική αδράνεια είναι μεγάλη. Σημαντικό ρόλο όμως στη σταθερότητα του μικροκλίματος του εσωτερικού παίζει το διάστημα μεταξύ στέγης και καμπύλων ή επίπεδων ψευδοροφών, καθώς οι θερμομονωτικές ιδιότητες του αέρα που το καταλαμβάνει είναι εξαιρετικές. Η θέση αυτή αποτελεί και πρόσφορο σημείο επέμβασης για την τοποθέτηση θερμομονωτικών υλικών για την περαιτέρω βελτίωση των συνθηκών.

5.5. Υπαίθριοι ανασκαφικοί χώροι

Οι υπαίθριοι ανασκαφικοί χώροι ασφαλώς δεν συνιστούν αρχιτεκτονικό τύπο, αποτελούν όμως μια ιδιαίτερη κατηγορία υλικών καταλοίπων του παρελθόντος, καθώς παρουσιάζουν κοινά γνωρίσματα ως προς τον τρόπο και την ένταση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραμέτρων και κυρίως της υγρασίας.

Σε υπαίθριους ανασκαφικούς χώρους απαντώνται ιδίως τα εξής χαρακτηριστικά:

- Φιλοξενούν κτήρια ή σύνολα σε περιορισμένο ύψος διατήρησης, επομένως χωρίς τα μέτρα προστασίας που έφεραν από κατασκευής, όπως στέγες.
- Τα υλικά κατασκευής των κτηρίων έχουν κατά κανόνα υποστεί αιώνες κατάκωσης αλλά και την απότομη μεταβολή των συνθηκών κατά την αποκάλυψή τους, είναι επομένως και εξ αυτού του λόγου εξασθενημένα.
- Συχνά, ως προϊόντα ανασκαφής, βρίσκονται σε στάθμη χαμηλότερη από τον περιβάλλοντα χώρο τους.
- Εκτίθενται συνήθως απευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία και τα κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, χαλάζι), την πάχνη και τον παγετό, τα ρεύματα αέρα και τα αερολύματα (θαλάσσια ή αστικούς και βιομηχανικούς ρύπους).
- Οι ημερήσιες διακυμάνσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας είναι, όπως και τα ρεύματα, εξαιρετικά εντονότερα σε σύγκριση με προστατευμένους χώρους, επομένως οι κύκλοι διάλυσης - κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης είναι πολύ συχνότεροι.
- Η ένταση και η συχνότητα των διακυμάνσεων των περιβαλλοντικών παραμέτρων ευνοεί την αποσάθρωση των υλικών και η βροχή την έκπλυσή τους.
- Οι συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη βλάστησης.

Συνήθη μέτρα προστασίας αποτελούν:

- Η κατάκωση των ευρημάτων μετά από έρευνα και τεκμηρίωση, με παρεμβολή γεωϋφασμάτων για την εξασφάλιση της αμφίδρομης κίνησης της υγρασίας.
- Η διατήρηση στις παρειές των τοίχων, ιδίως εφόσον σώζουν τοιχογραφίες, όγκων χώματος, προκειμένου να προστατευθούν μερικώς από την απευθείας έκθεση στο περιβάλλον, τουλάχιστον μέχρι τη συστηματική συντήρησή τους. Η πρακτική αυτή μπορεί να λειτουργήσει κάποτε ευνοϊκά, συμβάλλοντας πρώτα στη στήριξη τους και εν συνεχεία στην υπό προϋποθέσεις μεταφορά και απόθεση διαλυτών αλάτων στο χωμάτινο όγκο αντί στη δομή και την επιφάνεια της τοιχογραφίας. Άλλοτε όμως, εφόσον μεταξύ επιφάνειας τοιχογραφίας και χώματος υπάρχει υδραυλική ασυνέχεια, είτε λόγω δομικών ασυνεχειών, είτε λόγω διαφορετικού πορώδους, υπάρχει ο κίνδυνος της δημιουργίας εξαιρετικά σκληρής κρούστας αλάτων στην επιφάνεια και τη δομή του χρωματικού στρώματος, με αποτέλεσμα αντίστοιχα την οπτική αλλοίωση και τη σταθεροποίηση ρύπων ή την αποσάθρωση.

- Η τοποθέτηση στεγάστρων, που σε ένα βαθμό μπορεί να προστατεύουν από την ηλιακή ακτινοβολία και μερικώς από τα κατακρημνίσματα και τα αερολύματα, αλλοιώνουν όμως σοβαρά το αρχιτεκτονικό τοπίο και κάποτε εντείνουν τα ρεύματα.
- Η περισυλλογή και κατάλληλη παροχέτευση των ομβρίων, τόσο της ίδιας της θέσης, όσο και του χώρου που την περιβάλλει. Απλά, χαμηλά αναχώματα μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικά. Δεν είναι σπάνια και η άντληση νερού, τόσο από όμβρια, όσο και σε τόπους με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα.
- Η εφαρμογή θυσιαζόμενων κονιαμάτων στη στέψη των τοιχοποιιών, για την προστασία από τα κατακρημνίσματα και την ηλιακή ακτινοβολία.
- Υπό προϋποθέσεις, η φύτευση στην περίμετρο για τον περιορισμό των ρευμάτων και την ανακοπή αερολυμάτων, και πάλι με την επιφύλαξη της οπτικής όχλησης και της αλλοίωσης του τοπίου.

6. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

Η κλιματική αλλαγή διακρίνεται σε φυσική και ανθρωπογενή. Για τις κατά περιόδους εμφανιζόμενες φυσικές μεταβολές, όπως οι περίοδοι των παγετώνων, δεν υπάρχουν αμφισβητήσεις, αλλά και η ανθρωπογενούς αιτιολογίας κλιματική αλλαγή συνιστά γεγονός που αναγνωρίζεται όλο και ευρύτερα και μάλιστα όχι ως μελλοντικό άλλα ως ήδη παρόν. Σχετίζεται με τις αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με τη WWF Ελλάς (2009), οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής δεν θα είναι δραματικές μόνο για το φυσικό περιβάλλον. Η επερχόμενη αλλαγή του κλίματος θα έχει αισθητό αντίκτυπο στα αποθέματα νερού, καθώς έως 3 δις άνθρωποι δεν θα έχουν ικανοποιητική πρόσβαση σε νερό, η γεωργία θα αντιμετωπίσει μεγάλο πρόβλημα φέρνοντας στα πρόθυρα της λιμοκτονίας έως 120 εκ. ανθρώπους, ενώ το κόστος της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην παγκόσμια οικονομία μπορεί να φτάσει το 20% του παγκόσμιου ΑΕΠ, αν δεν ληφθούν εγκαίρως μέτρα. Επιπλέον, σχεδόν 250 εκατομμύρια άνθρωποι θα αναγκαστούν να μεταναστεύσουν εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.

Σύμφωνα με τον οργανισμό διαΝΕΟσις (2017), οι αλλαγές στο κλίμα της Ελλάδας (2046-2065) εκτιμάται ότι θα είναι οι εξής:

- 1) Η θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί κατά μέσο όρο κατά **2,5 βαθμούς Κελσίου** σε σχέση με το διάστημα 1961-1990. Κατά τόπους η αύξηση θα φτάσει τους 3,8 βαθμούς τους θερινούς μήνες. Η αύξηση θα είναι μεγαλύτερη στη Βόρεια Ελλάδα και μικρότερη στη νότια Πελοπόννησο, στα νησιά του νότιου Αιγαίου και την Κρήτη. Αυτή η αύξηση αναμένεται να έχει δραματικές συνέπειες κυρίως στις πόλεις, αλλά και στις δασικές εκτάσεις.
- 2) Οι ημέρες με καύσωνα (θερμοκρασία άνω των 35 βαθμών Κελσίου) αναμένεται να αυξηθούν κατά **15-20 ετησίως** μέχρι το 2050. Μέχρι το τέλος του αιώνα στις περισσότερες περιοχές της χώρας οι “τροπικές ημέρες” (ημέρες με θερμοκρασία άνω των 35 βαθμών Κελσίου την ημέρα και άνω των 20 βαθμών τη νύχτα) αναμένεται να είναι **περισσότερες από 50 το χρόνο**.
- 3) Αντίθετα, οι ημέρες με νυκτερινό παγετό θα μειωθούν σημαντικά, ιδίως στη Βόρεια Ελλάδα (έως και κατά 40 ημέρες ετησίως).

- 4) Ταυτόχρονα εκτιμάται ότι η βροχόπτωση θα μειωθεί κατά 12% κατά μέσο όρο (κατά 20-30% τους θερινούς μήνες, κυρίως στα νότια, και κατά 10% τους χειμερινούς).
- 5) Η στάθμη της θάλασσας, δε, εκτιμάται ότι θα ανέβει κατά 20 ως 59 εκατοστά, σύμφωνα με τα εναλλακτικά σενάρια.
- 6) Τα ακραία καιρικά φαινόμενα θα είναι πολύ πιο συχνά.
- 7) Οι περισσότερες περιφέρειες της Ελλάδας θα αντιμετωπίσουν αρνητικές επιπτώσεις, αλλά όχι με την ίδια ένταση. Τα μεγαλύτερα προβλήματα θα αντιμετωπίσουν η Κεντρική Μακεδονία, η Θεσσαλία, η Δυτική Πελοπόννησος και η Αττική.

Είναι επομένως προφανές ότι η κλιματική αλλαγή ως φαινόμενο θα έχει συγκλονιστικές συνέπειες, που υπερβαίνουν κατά πολύ τις επιπτώσεις στα μνημεία, η συγκεκριμένη εργασία όμως, λόγω της θεματικής της, οφείλει να εστιάσει εκεί.

Οι κύριες παράμετροι που είναι αναγκαίο να εξετάζονται σε σχέση με τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα μνημεία είναι η συχνότητα επανάληψης των κύκλων παγετού - τήξης και κρυστάλλωσης αλάτων, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, ο αριθμός ξηρών ημερών, υγρών ημερών, «τροπικών» ημερών, ημερών έντονης βροχόπτωσης και ημερών με παγετό (Leissner, κ.ά., 2015).

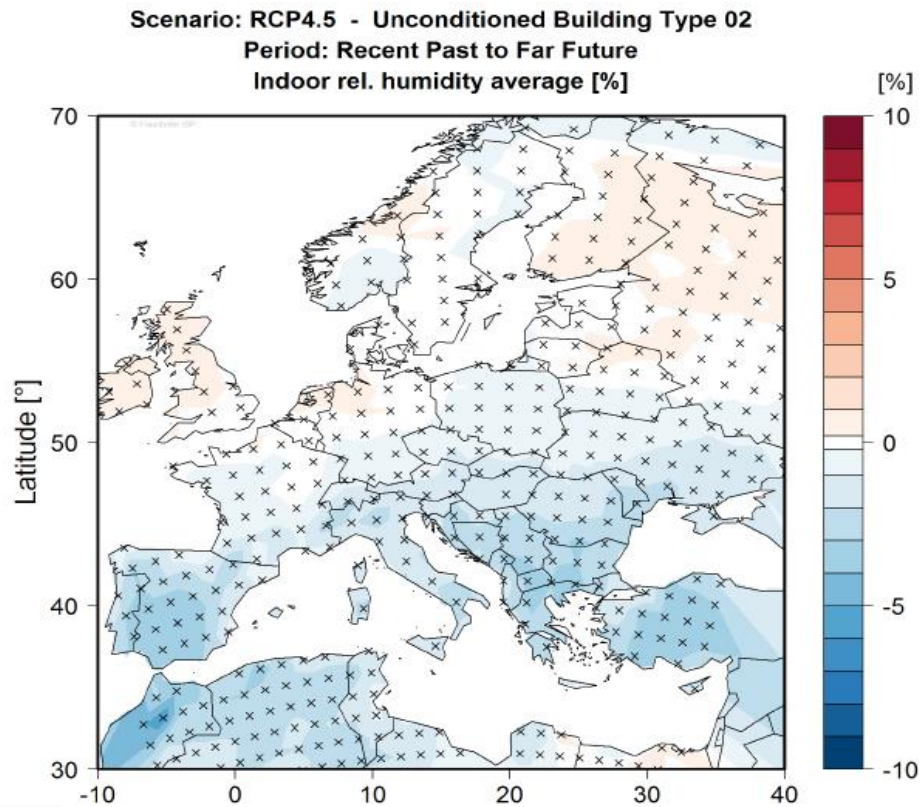
Δεδομένης της εξάρτησης της διατήρησης των μνημείων από τη σταθερότητα των περιβαλλοντικών παραμέτρων, η κλιματική αλλαγή αποτελεί κατ' αρχήν αρνητική εξέλιξη. Αν και οι συνέπειές της θα είναι κατ' εξοχήν τοπικές, με την έννοια ότι η επίπτωση σε κάθε τοπικό μικροκλίμα θα είναι διαφορετική, οι συνέπειες για το κλίμα του ελλαδικού χώρου και των μνημείων του συνοψίζονται στις εξής:

- Άνοδος της στάθμης της θάλασσας, με συνέπεια τη διάβρωση εδαφών, την καταβύθιση ή την άμεση προσβολή μνημείων σε παράλιες ζώνες και τη διείσδυση θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα με συνέπεια τη μεταφορά αλάτων.
- Καταγραφή φαινομένων ερημοποίησης, τα οποία συνεπάγονται εντονότερες ημερήσιες διακυμάνσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.
- Εντονότερα καιρικά φαινόμενα (καύσωνες, πλημμύρες).

- Οι χώρες της νότιας και κεντρικής Ευρώπης πλήττονται όλο και πιο συχνά από κύματα καύσωνα, δασικές πυρκαγιές και ξηρασίες, ενώ η λειψυδρία στις περιοχές της Μεσογείου αυξάνεται συνεχώς με αποτέλεσμα να μεγαλώνουν οι κίνδυνοι ξηρασίας και ανεξέλεγκτων πυρκαγιών (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, [x.x.]).
- Μέχρι το 2100 ο κίνδυνος πλημμυρών στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου μπορεί να αυξηθεί έως και κατά 50%, ενώ ο κίνδυνος διάβρωσης κατά 13%. Ο αυξημένος κίνδυνος πλημμυρών και διάβρωσης των ακτών δεν σημαίνει ότι θα αφανιστούν ολόκληρες πόλεις. Ενδεχομένως όμως να καθούν κάτω από τη θάλασσα κομμάτια των μνημείων. Στην Ελλάδα υψηλό βαθμό επικινδυνότητας εμφανίζουν η Δήλος, η παλιά πόλη της Κέρκυρας αλλά και η μεσαιωνική πόλη της Ρόδου (Energypress, 2018).

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του ευρωπαϊκού προγράμματος «Climate for Culture», οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής για τη διατήρηση των μνημείων μπορεί να είναι αρνητικές, ουδέτερες ή και θετικές. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο γεγονός ότι, παρά τις γενικεύσεις που διατυπώνονται και οδηγούν στη σύνταξη χαρτών εκτίμησης κινδύνου με διαφορετικά σενάρια μεταβολών, οι συνέπειες θα έχουν έντονα τοπικό χαρακτήρα και θα αποτελούν συνάρτηση των ιδιαιτεροτήτων του κάθε κτηρίου.

Στους χάρτες που ακολουθούν αποτυπώνονται ενδεικτικά οι προβλέψεις για τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στις παραμέτρους της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού των μνημείων, στον αριθμό των κύκλων κρυστάλλωσης αλάτων και στην πιθανότητα προσβολής από μύκητες. Με τις επιφυλάξεις που αναφέρονται πιο πάνω περί τοπικότητας, σημειώνεται ότι κάποια από τα σενάρια πρόγνωσης είναι ευνοϊκά από την άποψη της διατήρησης των τοιχογραφημένων μνημείων του ελλαδικού χώρου.



Εικ. 8: Προβλέψεις για τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής (Bertolin, κ.ά., 2014)

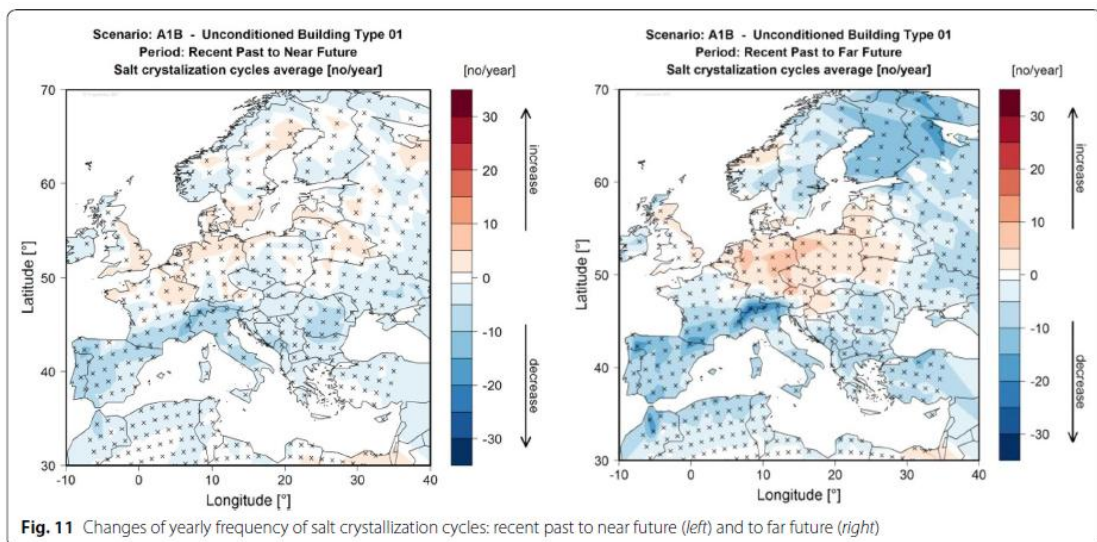
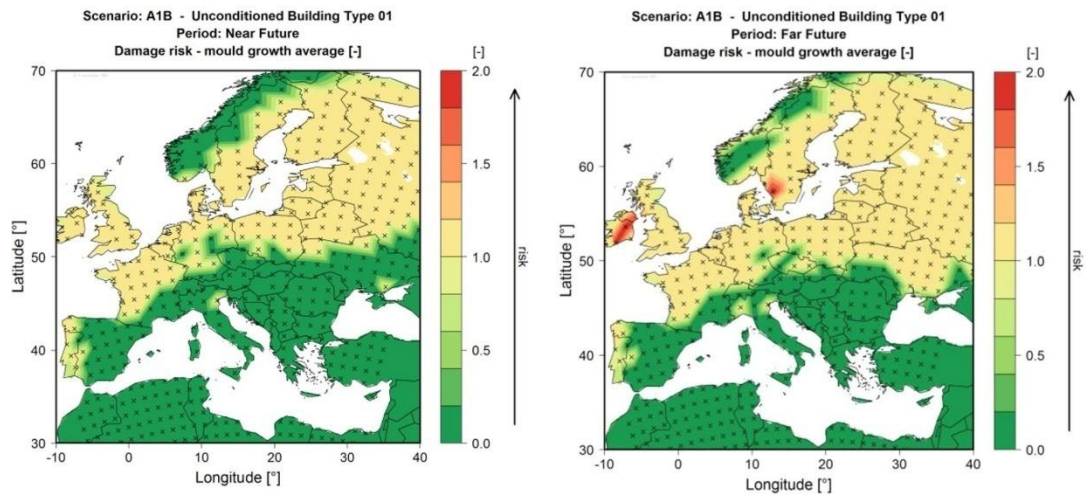


Fig. 11 Changes of yearly frequency of salt crystallization cycles: recent past to near future (left) and to far future (right)

Εικ. 9: Προβλέψεις για τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής (Leissner, κ.ά., 2015)



Εικ. 10: Όπως παραπάνω (Leissner, κ.ά., 2015)

ΜΕΡΟΣ Β: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΗΜΕΝΑ ΜΝΗΜΕΙΑ

*«Η ιδιαιτερότητα των ιστορικών κατασκευών,
με την σύνθετη οικοδομική τους ιστορία,
απαιτεί την εκπόνηση μελετών και προτάσεων, σε καθορισμένα στάδια,
παρόμοια με αυτά που εφαρμόζονται στην Ιατρική Επιστήμη.
Το ιστορικό, η διάγνωση, η θεραπεία και οι έλεγχοι
αντιστοιχούν κατ' αναλογία στις έρευνες
για σημαντικά ιστορικά δεδομένα και πληροφορίες,
στην αναγνώριση των αιτιών των βλαβών και φθορών,
στην επιλογή των κατάλληλων μέτρων αποκατάστασης
καθώς και στον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων.»
(ISCARSAH - ICOMOS, 2003)*

7. ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ, ΜΟΡΦΩΝ ΚΑΙ ΑΙΤΙΩΝ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

7.1. Εισαγωγή

Η μελέτη προσδιορισμού των πηγών, μορφών και αιτιών της υγρασίας και των συναφών μεγεθών, ιδίως δηλαδή της θερμοκρασίας και των ρευμάτων αέρα, αποτελεί μόνο μια από τις ενότητες μιας πλήρους μελέτης συντήρησης τοιχογραφημένου μνημείου, αλλά ίσως την κρισιμότερη. Από την αρτιότητά της θα καθοριστεί το εάν θα προσδιοριστούν σωστά τα αίτια των αλλοιώσεων, εάν θα αποφευχθούν περιττές ή και επιζήμιες κτηριακές παρεμβάσεις και τελικά η διατήρηση ή μη των τοιχογραφιών.

Η βασική αρχή η οποία πρέπει να διέπει μια μελέτη περιβαλλοντικών παραμέτρων έχει τεθεί από τους Massari (1993): *«Μη στηρίζετε στην κοινή λογική. Η υγρασία μπορεί και πρέπει να μετράται»*.

Δεκαετίες μετά, και ενώ στο οπλοστάσιο των ειδικών έχουν προστεθεί πλήθος τεχνικά μέσα, μετρητικά όργανα και υπολογιστικά ή στατιστικά εργαλεία ερμηνείας των δεδομένων, μια ακόμη αρχή που θα πρέπει διαρκώς να υπενθυμίζεται είναι **«να μην αγνοείται το προφανές»**, με την έννοια ότι η μελέτη θα πρέπει να εκκινά από τη σχολαστική εμπειρική - βιωματική παρατήρηση του μνημείου και του περιβάλλοντος χώρου του και να μην εγκλωβίζεται σε μια αποκλειστικά θεωρητική προσέγγιση των ζητημάτων.

7.2. Αναγκαία δεδομένα

Σύμφωνα με τις παραπάνω αρχές, η μελέτη θα πρέπει να εξετάζει ένα σύνολο χαρακτηριστικών, κινούμενη από το γενικό προς το ειδικό, ξεκινώντας από το κλίμα της ευρύτερης περιοχής, τη θέση και το άμεσο περιβάλλον του μνημείου, τα αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και την παθολογία του, για να προχωρήσει στην καταγραφή του εξωτερικού και εσωτερικού μικροκλίματος, την περιεχόμενη υγρασία και την παθολογία των τοιχογραφιών. Τα αναγκαία δεδομένα αναπτύσσονται στις ενότητες που ακολουθούν.

7.2.1. Κλιματικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής

Τα κλιματικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής δίνουν έναν αρχικό προσανατολισμό για το ευρύτερο περιβάλλον που καθορίζει το μικροκλίμα του

μνημείου. Θεμελιώδη μεγέθη αποτελούν οι μέσοι όροι αλλά και οι διακυμάνσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας καθώς και τα δεδομένα για το ύψος βροχόπτωσης. Η κατεύθυνση και η ένταση των ανέμων αποτελούν στοιχεία εντελώς καθοριστικά, κυρίως για τους υπαίθριους αρχαιολογικούς χώρους αλλά και για ιστάμενα μνημεία, καθώς σχετίζονται με την κλίση της κατευθυνόμενης βροχής, τη μεταφορά αερολυμάτων, τις συνθήκες εξάτμισης και το ύψος της ανερχόμενης υγρασίας,

7.2.2. Θέση και περιβάλλον χώρος του μνημείου

Το **υψόμετρο** του μνημείου σχετίζεται με την ένταση των διακυμάνσεων των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Μεγάλο υψόμετρο προϋποθέτει για έντονες ημερήσιες διακυμάνσεις αλλά και για ακραίες τιμές με πιθανότητες παγετού. Η θέση του κτηρίου σε σχέση με φυσικά εμπόδια, όπως πλαγιές βουνών, με γειτονικά κτίσματα και με τη βλάστηση του άμεσου περιβάλλοντος, θα καθορίσει την προστασία του από ανέμους υπό συγκεκριμένη κατεύθυνση, αλλά και τα ηλιακά κέρδη. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι ρύσεις του περιβάλλοντος χώρου.

Η **απόσταση από τη θάλασσα** είναι επίσης καθοριστική. Η μικρή απόσταση από τη θάλασσα, λόγω της τεράστιας θερμοχωρητικότητάς της, ενδεχομένως εγγυάται ηπιότερες ημερήσιες διακυμάνσεις, αποτελεί όμως και συνθήκη αλατονέφωσης.

Ο **τύπος της περιοχής** (αστική, βιομηχανική, γεωργική) παρέχει ενδείξεις σχετικά με ρύπους και άλατα που, αλληλεπιδρώντας με την υγρασία, θα καθορίσουν την παθολογία του κτηρίου.

Δεδομένα για το υδρογραφικό δίκτυο, το ύψος υδροφόρου ορίζοντα, πιθανά κοντινά πηγάδια αλλά και τον **τύπο του εδάφους** θα συμβάλλουν στην ορθή ερμηνεία φαινομένων ανερχόμενης υγρασίας, διαφοροποιώντας την ανερχόμενη από επιφανειακά νερά από την ανερχόμενη από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Ο **προσανατολισμός** του κτηρίου καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο εκτίθεται στη βροχή, τον ήλιο και τους ανέμους και επομένως την εξάτμιση, ερμηνεύοντας μεταξύ άλλων διαφοροποιήσεις στη στάθμη της ανερχόμενης υγρασίας.

Εξαιρετικά σημαντικές είναι οι **ρύσεις του εδάφους**, αλλά και η **στάθμη του** σε σχέση με τη στάθμη του δαπέδου του κτηρίου, που μπορεί να οδηγήσουν σε ανερχόμενη υγρασία από επιφανειακά νερά ή σε πλευρική διείσδυση νερού στις τοιχοποιίες.

7.2.3. Αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

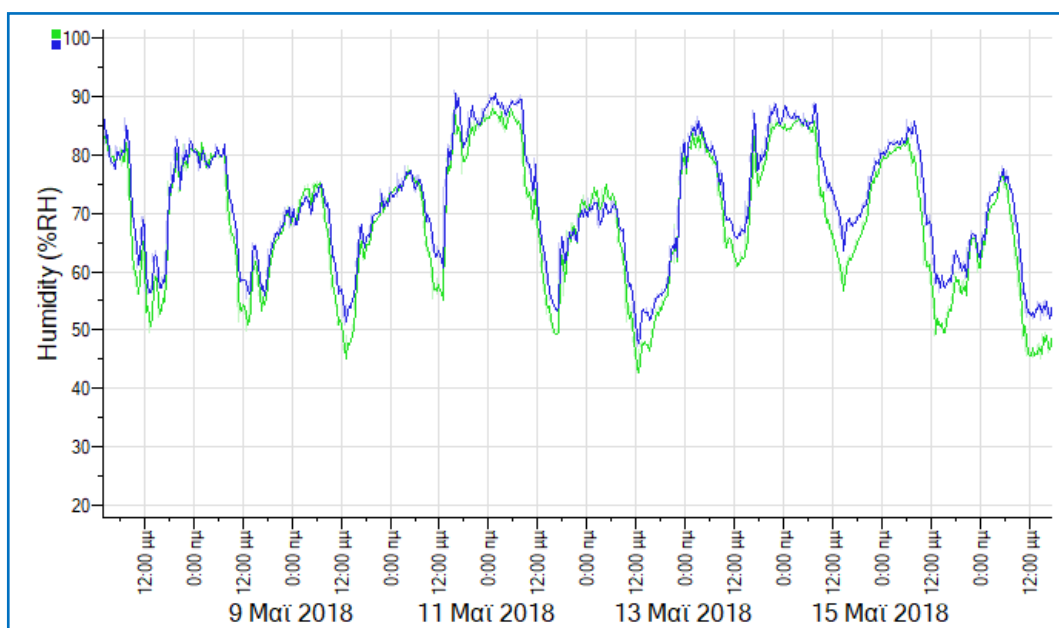
Αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά σχετικά με την υγρασία και τη θερμομόνωση του κτηρίου, όπως ο **τύπος των όγκων** («πυκνοί» ή «ανεπτυγμένοι»), το **πάχος της τοιχοποιίας**, τα **δομικά υλικά** σε σχέση με το πορώδες και την υγροσκοπικότητά τους, η **ύπαρξη ή μη εξωτερικών επιχρισμάτων**, ο **τρόπος στέγασης** (ξυλόστεγος ή θολοσκεπής) σχετίζονται άμεσα με τα θερμομονωτικά χαρακτηριστικά του κτηρίου και τη θερμική του αδράνεια, τη σταθερότητα της θερμοκρασίας αλλά και την πιθανότητα εμφάνισης υγρασίας από συμπύκνωση. Αρχιτεκτονικά στοιχεία κατά κανόνα μεταγενέστερα της αρχικής κατασκευής, όπως **προσκτίσματα**, **αντηρίδες** και **εξωτερικοί κτιστοί πάγκοι** επίσης καθορίζουν το περιβάλλον, καθώς οι κατασκευαστικοί αρμοί συνήθως αστοχούν, με αποτέλεσμα να καθίστανται σημεία εισόδου νερού στο κέλυφος του κτηρίου. Κτιστοί πάγκοι και αντηρίδες, με την τοπική αύξηση του πάχους της τοιχοποιίας οδηγούν σε τοπικές διαφοροποιήσεις της θερμικής αδράνειας ερμηνεύοντας τοπικά φαινόμενα συμπύκνωσης. Αντίθετα, η ύπαρξη προσκτισμάτων ευνοεί τη σταθερότητα της θερμοκρασίας περιορίζοντας την επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό μικροκλίμα.

Μονολιθικά δομικά στοιχεία από πυκνά υλικά υψηλού ειδικού βάρους, όπως το μάρμαρο ή άλλοι πυκνοί ασβεστόλιθοι, αποτελούν τυπικές θερμογέφυρες και ευνοούν τη συμπύκνωση.

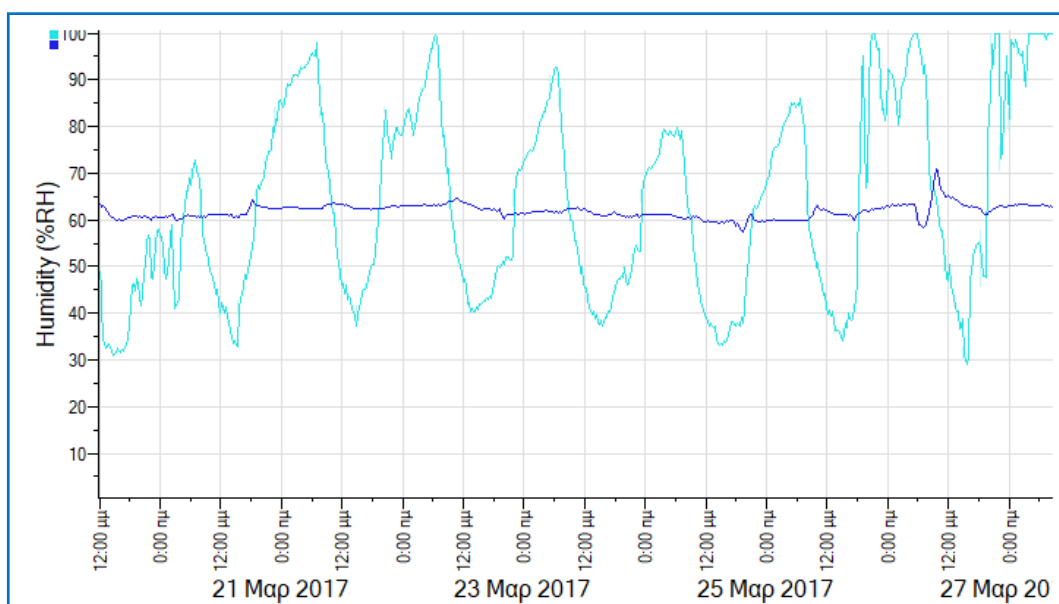
Πιθανές **υδραυλικές εγκαταστάσεις**, **υδρορροές** και **δίκτυα απορροής των ομβρίων** πρέπει να ελέγχονται σχολαστικά.

Τέλος, ο αριθμός, η επιφάνεια και κυρίως η **αεροστεγανότητα των ανοιγμάτων** αποτελούν παράγοντες με έντονη επίδραση στο εσωτερικό περιβάλλον των μνημείων. Δεδομένων των αξιολογών θερμομονωτικών χαρακτηριστικών των διατηρητέων κτηρίων και της συγκριτικά μικρής επιφάνειας των ανοιγμάτων σε σχέση με τη συνολική επιφάνεια τους, τα ανοίγματα καθορίζουν σε το περιβάλλον κυρίως δια της συμμετοχής τους στη δημιουργία ρευμάτων αέρα. Τα διαγράμματα που ακολουθούν είναι χαρακτηριστικά. Στο μνημείο του γραφήματος 2, παρά το μεγάλο πάχος της τοιχοποιίας και τις θερμομονωτικές ιδιότητες των δομικών υλικών, ο μεγάλος αριθμός των παραθύρων και η απουσία πετασμάτων δημιουργούν στο εσωτερικό συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, τόσο ως προς τις τιμές, όσο και ως προς το χρόνο απόκρισης. Αντίθετα, σε περιπτώσεις μνημείων με αεροστεγανά ανοίγματα, όπως στην

περίπτωση του γραφήματος 3, παρατηρείται εξαιρετική σταθερότητα σχετικής υγρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος (μπλε καμπύλη). Ημερήσιες μεταβολές της σχετικής υγρασίας στο εξωτερικό της τάξης του 65% προκαλούν μεταβολές στο εσωτερικό μόλις 2%, λόγω των αεροστεγών ανοιγμάτων. Μικρές αυξομειώσεις στο εσωτερικό σχετίζονται με τη λειτουργία του ναού (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2017c).



Γράφημα 2: Περίπτωση μνημείου με πολλά ελεύθερα ανοίγματα. Σύγκριση σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος.



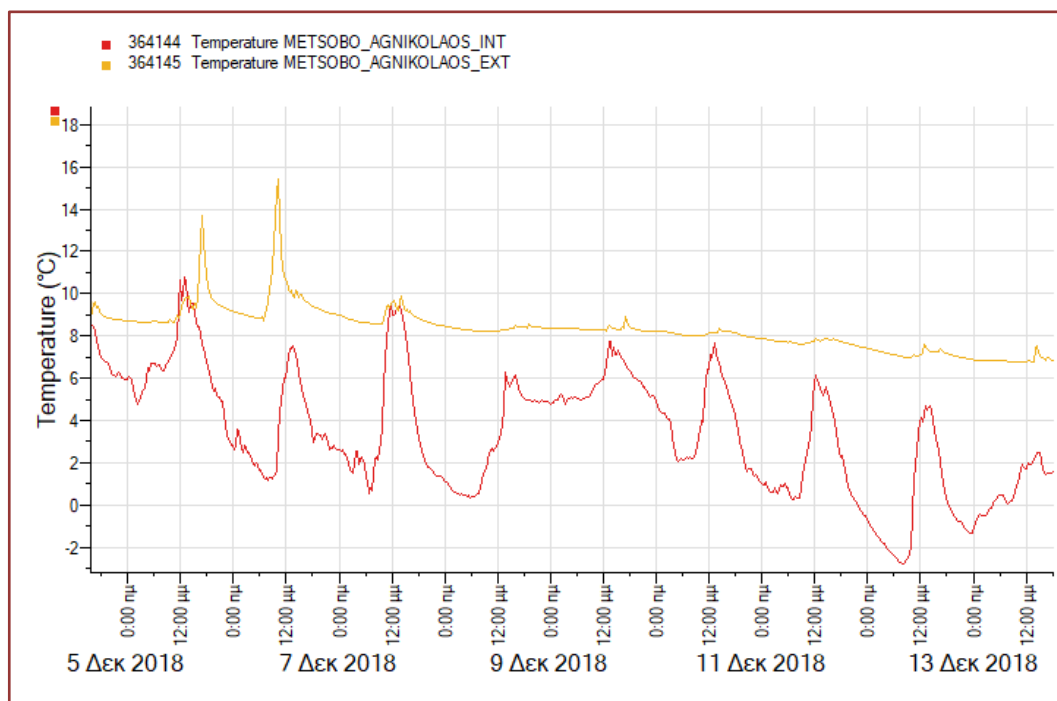
Γράφημα 3: Μνημείο με αεροστεγή ανοίγματα

7.2.4. Παθολογία του κτηρίου

Ο έλεγχος της παθολογίας του κτηρίου αποτελεί την επόμενη ενότητα της μελέτης. Κρίσιμα σημεία που πρέπει να ελέγχονται αποτελούν η στεγανότητα της στέγης και των παραθύρων, πιθανές ρωγμές, η κατάσταση των αρμών, οι ρύσεις των οριζόντιων επιφανειών, πιθανές επιχώσεις, αδόκιμες νεώτερες επεμβάσεις.

7.2.5. Χρήση του μνημείου

Η ενότητα πρέπει να περιλαμβάνει δεδομένα για τη χρήση και την επισκεψιμότητα του μνημείου (τακτική, περιστασιακή, σε εγκατάλειψη). Αποτελεί πλέον κοινό τόπο ότι η λελογισμένη και υπό όρους χρήση των μνημείων αποτελεί συνθήκη διατήρησης. Αντίθετα όμως, η κακή και απροϋπόθετη χρήση οδηγεί σε ρυθμούς αλλοίωσης ταχύτερους από τους φυσικούς. Σε μνημεία σε χρήση, από τις καθοριστικότερες παραμέτρους για το μικροκλίμα του εσωτερικού αποτελούν οι υφιστάμενες επιλογές και πρακτικές ψύξης - θέρμανσης, οι οποίες στο πλαίσιο της μελέτης θα πρέπει να αξιολογούνται σχολαστικά ως προς την καταλληλότητά τους. Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνεται πώς η εξαιρετική σταθερότητα της θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος διαταράσσεται κατά τις ώρες των λειτουργιών, λόγω της θέρμανσης



Γράφημα 4: Επίδραση της θέρμανσης στη σταθερότητα της θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος

7.2.6. Η παθολογία των τοιχογραφιών

Όπως αναφέρθηκε, η κατάσταση διατήρησης των τοιχογραφιών αποτελεί δείκτη της κατάστασης διατήρησης του μνημείου. Στην επιφάνεια και τη δομή των τοιχογραφιών αποτυπώνονται οι φθορές του κτηρίου και οι συνθήκες υγρασίας. Όμως, κατά τη εξαγωγή συμπερασμάτων από την παθολογία των τοιχογραφιών απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη διαφοροποίηση παλαιών διαδικασιών αλλοίωσης από ενεργές, καθώς οι παρατηρούμενες φθορές είναι πιθανόν να οφείλονται σε προσβολή από υγρασία που σημειώθηκε σε κάποια φάση της ιστορίας του μνημείου και δεν υφίσταται πλέον. Παρά το γεγονός όμως ότι το αρχικό αίτιο είναι ανενεργό, οι αποθέσεις αλάτων σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον συνεχίζουν να αποτελούν παράγοντα παθολογίας. Ιδιαίτερα σημαντική θεωρείται και η μελέτη του είδους των αλάτων και της θέσης απόθεσής τους, τόσο σε ύψος όσο και σε βάθος.

7.2.7. Μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας

Η διαδικασία περιλαμβάνει μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας σε πυκνό κάρναβο στην επιφάνεια των τοιχογραφιών και σε βάθος, με στόχο τη χαρτογράφηση της κατανομής της. Επισημαίνεται με έμφαση ότι το ζητούμενο δεν είναι οι απόλυτες τιμές αλλά η κατανομή στις επιφάνειες και οι σχέσεις, από τις οποίες μπορεί να προκύψουν ενδείξεις για τις θέσεις εισόδου του νερού, τη διαδρομή του στη δομή της τοιχοποιίας και, σε συνδυασμό με τις μετρήσεις της επόμενης παραγράφου, την ορθή ερμηνεία των αιτιών. Δεδομένου του ότι η κάθε χαρτογράφηση αποτελεί καταγραφή ενός απλού στιγμιότυπου της δυναμικής υδρομετρικής κατάστασης του μνημείου, είναι σημαντικό οι μετρήσεις να επαναλαμβάνονται σε διαφορετικές εποχές του χρόνου, ώστε να εκτιμάται η επιρροή των διαφορετικών συνθηκών στις τιμές της περιεχόμενης υγρασίας.

7.2.8. Καταγραφή του μικροκλίματος του μνημείου

Περιλαμβάνει κατ' ελάχιστον μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας στο εσωτερικό και άμεσο εξωτερικό περιβάλλον. Σημαντικά είναι και τα δεδομένα που αφορούν στην ένταση και κατεύθυνση των ανέμων του εξωτερικού περιβάλλοντος και στα ρεύματα αέρα του εσωτερικού. Από την επεξεργασία και ερμηνεία των καταγραφών προκύπτουν συμπεράσματα για την καθημερινή εξέλιξη των τιμών, για τους ετήσιους, εποχικούς, μηνιαίους εβδομαδιαίους και ημερήσιους μέσους όρους, αλλά και τις διακυμάνσεις των κρίσιμων μεγεθών, όπως το εύρος των

ημερήσιων διακυμάνσεων, οι οποίες σε μεγάλο βαθμό καθορίζουν την παθολογία, συμβάλλουν στον προσδιορισμό των πηγών και των τύπων της υγρασίας, ενώ αποτελούν και δείκτη της παρουσίας φορτίων νερού στο κτηριακό κέλυφος. Επίσης, οι καταγραφές των περιβαλλοντικών παραμέτρων, εκτός από τη γενική εικόνα των συνθηκών διατήρησης, παρέχουν πολύτιμα δεδομένα που αφορούν στην κίνηση και τον τρόπο εξάτμισης της υγρασίας, στα θερμομονωτικά χαρακτηριστικά του κτιρίου και στην επιλογή των περιόδων επέμβασης (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2017b).

7.2.9. Μετρήσεις θερμοκρασίας εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών

Από την επεξεργασία τους προκύπτουν στοιχεία για την κατεύθυνση της ροής της θερμικής ενέργειας, το βαθμό επιρροής του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό, ενώ επισημαίνονται θέσεις ενδιαφέροντος που αξίζει να εξεταστούν και με άλλα μέσα, όπως πιθανές υγρές περιοχές, σημεία εισόδου ρευμάτων, θερμογέφυρες, θέσεις ύποπτες για συμπύκνωση.

7.3. Μεθοδολογία συλλογής δεδομένων

7.3.1. Πηγές λήψης πληροφορίας

Για ζητήματα κλιματικών δεδομένων πολύτιμη πηγή πληροφορίας αποτελεί η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, οι σταθμοί της οποίας καλύπτουν όλο το εύρος του Ελλαδικού χώρου. Οι πληροφορίες που παρέχονται αφορούν ετήσιους, μηνιαίους και εβδομαδιαίους μέσους όρους θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ύψους βροχοπτώσεων, καθώς και δεδομένα για την κατεύθυνση των ανέμων, έχουν δε και χρονικό βάθος. Για συγκεκριμένους σταθμούς είναι δυνατή η απευθείας και δωρεάν άντληση δεδομένων, ενώ για άλλους απαιτείται παραγγελία έναντι μικρού αντιτίμου.

Δεδομένα για το υδρογραφικό δίκτυο και τα υπόγεια ύδατα μπορούν να αναζητηθούν στον ιστότοπο <http://geodata.gov.gr/maps/?locale=el> (Geodata, 2020) του Υπουργείου Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας (σήμερα Περιβάλλοντος και Ενέργειας), καθώς και στις κατά τόπους Περιφέρειες.

Η θέση και ο ακριβής προσανατολισμός των κτηρίων μπορεί να αναζητηθεί στην Υπηρεσία Θέασης Ορθοφωτοχαρτών, στον ιστότοπο <http://gis.ktimanet.gr/wms/ktbasemap/default.aspx> (Εθνικό Κτηματολόγιο, 2015-2016). Από τους χάρτες προκύπτουν και χρήσιμα στοιχεία για το ανάγλυφο της περιοχής, τη βλάστηση, την απόσταση από τη θάλασσα κ.ά.

Πληροφορίες για τις **πρακτικές λειτουργίας και χρήσης** των μνημείων, καθώς και για παλαιότερες επεμβάσεις, πρέπει να αναζητούνται από τους φορείς διαχείρισης και προστασίας καθώς και από τους χρήστες. Φορέα προστασίας όλων των διατηρητέων Μνημείων αποτελεί το Υπουργείο Πολιτισμού και οι κατά τόπους Περιφερειακές Υπηρεσίες του (Εφορείες Αρχαιοτήτων και Υπηρεσίες Νεωτέρων Μνημείων).

7.3.2. Μετρώμενα μεγέθη

Ένα από τα σοβαρά προβλήματα στην εκπόνηση μιας μελέτης περιβαλλοντικών παραμέτρων αποτελεί το γεγονός ότι απουσιάζει μια μεθοδολογία μετρήσεων και ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο²⁸. Σύμφωνα με τον Πρόκο (2012) αυτό καθορίζεται θεωρητικά από το ίδιο το πρόβλημα. *«Η διάγνωση που αποτελεί το στόχο των μετρήσεων, προϋποθέτει το σαφή ορισμό του ίδιου του προβλήματος, της ερώτησης δηλαδή που καλούμαστε να απαντήσουμε μέσω των μετρήσεων. Η ερώτηση καθορίζει το τι μετράμε, πώς το μετράμε, για πόσο και πού. Κάθε μέτρηση είναι στην ουσία η λήψη ενός δείγματος και ως δειγματοληπτική διαδικασία εμπίπτει σε στατιστικούς κανόνες. Βασικό στάδιο στην κατάρτιση μιας δειγματοληπτικής στρατηγικής είναι ο ορισμός των μεταβλητών και οι μεταβλητές να υπακούουν σε συγκεκριμένες υποθέσεις. Για παράδειγμα, υποθέτουμε ότι η θερμοκρασία μεταβάλλεται καθ' ύψος και η μεταβολή αυτή είναι αναγκαία για την κατανόηση του μηχανισμού φθοράς. Το ύψος λοιπόν αποτελεί μια μεταβλητή που καθορίζει ότι χρειαζόμαστε τουλάχιστον δύο μετρήσεις (ψηλά - χαμηλά)».*

Η έρευνα και η συλλογή δεδομένων επομένως πρέπει να σχετίζεται με τα συγκεκριμένα ερωτήματα και τις βασικές υποθέσεις που διαμορφώνονται κατά περίπτωση, σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες του κάθε μνημείου. Ανάλογα με το στόχο, μπορεί να αποτελούν ένα πλήρες και εκτεταμένο ερευνητικό πρόγραμμα, με απαιτήσεις που στο πλαίσιο μιας τυπικής μελέτης συντήρησης μπορεί να φαντάζουν και να είναι μαξιμαλιστικές [(βλ. ενδεικτικά (Camuffo, κ.ά., 2010)]. Σε κάθε περίπτωση όμως, όταν εντοπίζεται παθολογία που θεωρητικά σχετίζεται με την παρουσία υγρασίας, υπάρχουν βασικά μεγέθη που πρέπει πάντα να μετρούνται. Έτσι, κατά τον Λιωνή (1999) *«κάθε πρόβλημα υγρασίας πρέπει πρώτα απ' όλα να προσδιοριστεί αριθμητικά μέσω μιας σειράς μετρήσεων. Τρεις απ' αυτές θεωρούνται αποφασιστικής σπουδαιότητας. (1)*

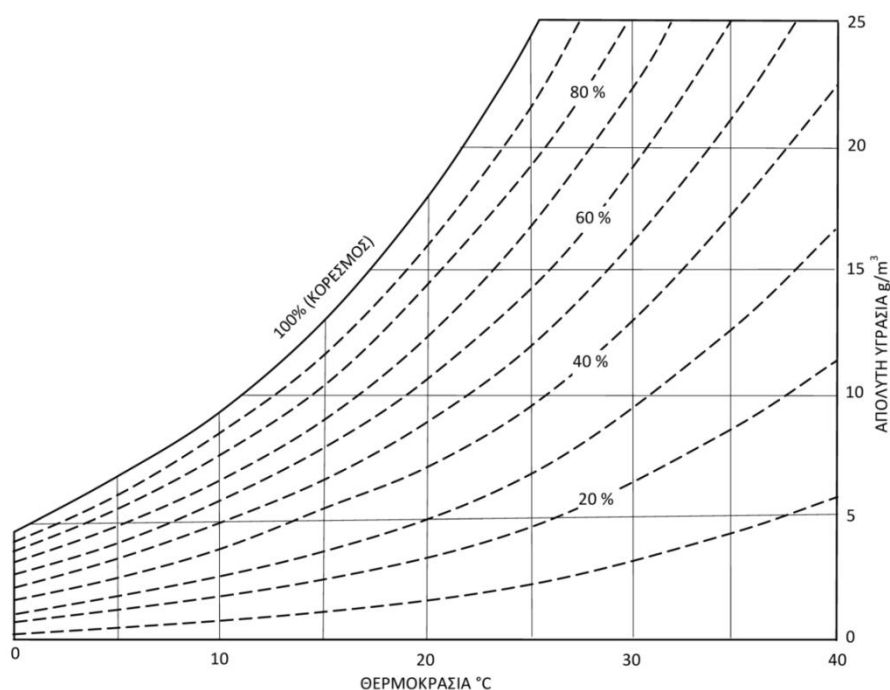
²⁸Ο Zehnder (2006) συνοψίζει κάποιες γενικές κατευθύνσεις, γεγονός πάντως που δεν ανατρέπει την πιο πάνω παρατήρηση.

Υγροθερμικές μετρήσεις (θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα). (2) Μετρήσεις της υγρασίας που περιέχεται στην κατασκευή (τοιχοποιία). (3) Μετρήσεις της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της θερμοκρασίας της κατασκευής και του αέρα». Ανάλογα με το στόχο, οι βασικές αυτές μετρήσεις μπορεί να επεκτείνονται, περιλαμβάνοντας δεδομένα για την ύπαρξη διοξειδίου του άνθρακα, την κατανομή των αλάτων σε ύψος και σε βάθος, κ.ά.

Τα μεγέθη της σχετικής και της περιεχόμενης υγρασίας είναι ιδιαίτερα κρίσιμα, απαιτείται επομένως μια σχετική ανάπτυξη.

7.3.2.1. Σχετική υγρασία

Σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH) ή υγρομετρική κατάσταση της ατμόσφαιρας, καλείται ο επί τοις εκατό λόγος της πραγματικής ποσότητας υγρασίας σε εξατμισμένη μορφή που περιέχει ο αέρας σε μια θερμοκρασία, προς τη μέγιστη ποσότητα που θα μπορούσε να περιέχει στην ίδια θερμοκρασία.



Γράφημα 5: Ψυχομετρικός χάρτης (Λαμπρόπουλος, 2003)

Ο αέρας της ατμόσφαιρας περιέχει πάντοτε νερό σε εξατμισμένη μορφή. Η πραγματική ποσότητα νερού που περιέχεται σε δεδομένο όγκο αέρα και συγκεκριμένη θερμοκρασία καλείται **απόλυτη υγρασία**. Μπορεί να μετράται σε γραμμάρια νερού ανά κυβικό μέτρο

ή ανά κιλό αέρα. Για κάθε θερμοκρασία, υπάρχει μια μέγιστη ποσότητα εξατμισμένου νερού που μπορεί να περιέχεται στον αέρα. Όσο η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η μέγιστη ποσότητα του εξατμισμένου νερού που μπορεί να συγκρατήσει. Στους 0°C ο αέρας συγκρατεί 4,85 γραμμάρια, στους 20°C 17,11 γραμμάρια και στους 40°C 50,80 γραμμάρια. Όταν η συγκέντρωση του νερού υπερβεί αυτήν την ποσότητα, το διάλυμα γίνεται υπέρκορο και συμβαίνει συμπύκνωση, υγραποίηση δηλαδή της περισσειας.

Η σχετική υγρασία μπορεί επίσης να υπολογιστεί και ως ο λόγος των αντίστοιχων ατμοσφαιρικών πιέσεων, δηλαδή, για κάθε θερμοκρασία, της πραγματικής προς τη μέγιστη δυνατή (Massari & Massari, 1993).

Θα ανέμενε κανείς ότι το καθοριστικό και πιο ενδιαφέρον μέγεθος για τη διατήρηση των τοιχογραφιών είναι η απόλυτη υγρασία, η πραγματική ποσότητα υγρασίας που περιέχεται στον αέρα σε μια δεδομένη στιγμή. Είναι όμως η σχετική υγρασία που επιδρά καθοριστικότερα στους μηχανισμούς αλλοίωσης, καθώς σχετίζεται με την ανταλλαγή υγρασίας μεταξύ τοίχου και περιβάλλοντος, την εξάτμιση, την κατεύθυνσή της, το βαθμό κορεσμού των αλάτινων διαλυμάτων, τη θέση κρυστάλλωσης και την κρυσταλλική μορφή των αλάτων, την ενυδάτωσή τους, το σημείο δρόσου.

Σημειώνεται ότι οι παράμετροι αυτές δεν καθορίζονται από τη γενική σχετική υγρασία του χώρου, αλλά από αυτή του στρώματος αέρα που βρίσκεται σε άμεση επαφή με κάθε σημείο ενδιαφέροντος της τοιχοποιίας, η οποία διαφοροποιείται σημαντικά, καθώς καθορίζεται ιδίως από τη θερμοκρασία του τοίχου.

7.3.2.2. Περιεχόμενη υγρασία

Πρόκειται για το νερό που βρίσκεται στη δομή των υλικών σε ελεύθερη, μη χημικά δεσμευμένη μορφή. Ορίζεται ως **το βάρος του νερού που εξάγεται από ένα δείγμα μετά από συγκεκριμένη διαδικασία όπτησης, διαιρεμένο προς το ξηρό βάρος του δείγματος** και εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό επί του ξηρού βάρους²⁹. Είναι δυνατόν να έχει εισέλθει στη δομή των υλικών μέσω διαφορετικών οδών και μηχανισμών (απευθείας πρόσπτωση βροχής, υγρασία ανερχόμενη μέσω τριχοειδών φαινομένων, κατιούσα λόγω βαρυτικής κίνησης, υγρασία από συμπύκνωση, ρόφηση

²⁹ prEN16682:2013 (Conservation of Cultural Heritage - Guide to the measurements of moisture content in materials constituting movable and immovable cultural heritage).

υγρασίας από την ατμόσφαιρα κ.ο.κ). Η ποσότητα καθορίζεται από τη διαθεσιμότητα του νερού στο περιβάλλον και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του αντικειμένου (θέσεις προσβολής, υγροσκοπικότητα, πορώδες).

Αποτελεί παράγοντα που συμβάλλει καθοριστικά στην ενεργοποίηση των μηχανισμών μεταβολής των τοιχογραφιών μέσω της μεταφοράς διαλυτών αλάτων αλλά και την αλληλεπίδρασή της με ήδη αποτεθειμένα.

Η μέτρηση και χαρτογράφηση της κατανομής της περιεχόμενης υγρασίας μιας τοιχογραφημένης επιφάνειας αποτελούν από τους βασικότερους δείκτες της υγείας της και, σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία της επιφάνειας και η θερμοκρασία και σχετική υγρασία του περιβάλλοντος, απόλυτη προϋπόθεση για την κατανόηση των μηχανισμών αλλοίωσης, την ερμηνεία της κατάστασης διατήρησης, τον προσδιορισμό των πηγών και των αιτίων της υγρασίας και τελικά την ορθή διαχείρισή της.

Οι τοιχογραφίες, λόγω της υγροσκοπικότητας των υλικών που τις συνθέτουν, ακόμη και αν δεν υπάρχουν άλλα αίτια παρουσίας νερού σε υγρή μορφή, περιέχουν πάντοτε κάποια ποσότητα υγρασίας, την οποία έχουν προσροφήσει από την ατμόσφαιρα. Η υγρασία αυτή, που ονομάζεται **υγροσκοπική** (hygroscopic humidity), δεν αποτελεί απαραίτητα παράγοντα αλλοίωσης. Η περιεχόμενη υγρασία ενός υγρόφιλου αντικειμένου το οποίο θα παραμείνει για αρκετό διάστημα σε σταθερές συνθήκες σχετικής υγρασίας, θα φτάσει σε μια σταθερή, μέγιστη τιμή, η οποία ονομάζεται υγρασία ισορροπίας ή ισοδύναμη υγρασία (equilibrium moisture content).

Οι μεταβολές της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας παύουν να επηρεάζουν την περιεχόμενη υγρασία της τοιχοποιίας σε βάθος 15-20cm από την επιφάνεια (Massari & Massari, 1993) (Bianchini, 1906).

7.4. Διάρκεια και περίοδοι μέτρησης

Η βασική παραδοχή είναι ότι οι μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα πρέπει να καλύπτουν τουλάχιστον έναν ετήσιο κύκλο (Maekawa, 1993) (Garcia-Diego, κ.ά. 2016). Αρκετοί συγγραφείς αυξάνουν την ελάχιστη αναγκαία διάρκεια στα τρία έτη, προκειμένου να αποφεύγεται η παραπλάνηση από έκτακτα κλιματικά περιστατικά. Σε κάθε περίπτωση, κάποια συμπεράσματα σχετικά με τη θερμομονωτική λειτουργία του κελύφους, τους ρυθμούς επίδρασης του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό κ.ά. είναι δυνατόν να προκύψουν και από μικρότερα διαστήματα

καταγραφών. Στο βαθμό του εφικτού όμως, θα πρέπει στα μικρότερα αυτά διαστήματα να περιλαμβάνεται τουλάχιστον μια μεταβατική περίοδος, και μάλιστα αυτή από την άνοιξη προς το καλοκαίρι, όπου οι πιθανότητες για φαινόμενα συμπύκνωσης είναι αυξημένες. Απαιτείται πάντως ιδιαίτερη επιφυλακτικότητα απέναντι σε συμπεράσματα που προκύπτουν από μικρές περιόδους καταγραφής. Σύμφωνα με πιο πρόσφατο πρότυπο³⁰, όταν ο στόχος είναι ο προσδιορισμός του μακροπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος, απαιτείται ελάχιστη περίοδος καταγραφής 13 μηνών, για τον υπολογισμό ενός ετήσιου κυλιόμενου μέσου όρου και των αποδεκτών αποκλίσεων.

Ως προς τη χαρτογράφηση της θερμοκρασίας και της περιεχόμενης υγρασίας στους τοίχους, αναφέρθηκε ήδη πως είναι σκόπιμο να επαναλαμβάνονται στη διάρκεια της χρονιάς περισσότερες από μια φορές υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι μεταβατικές περίοδοι είναι και σ' αυτήν την περίπτωση πιο κρίσιμες.

Διευκρινίζεται ότι η διάρκεια και οι περίοδοι των καταγραφών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας ατμόσφαιρας και των μετρήσεων περιεχόμενης υγρασίας και θερμοκρασίας της τοιχοποιίας που αναφέρονται εδώ, σχετίζονται αποκλειστικά με το στάδιο της μελέτης. Είναι όμως αναγκαία η συνέχιση των καταγραφών και η περιοδική επανάληψη των μετρήσεων για την αξιολόγηση των επεμβάσεων αντιμετώπισης της υγρασίας και των πιθανών συνεπειών τους στο μικροκλίμα και την κατάσταση διατήρησης των τοιχογραφιών.

7.5. Όργανα και διαδικασίες μέτρησης

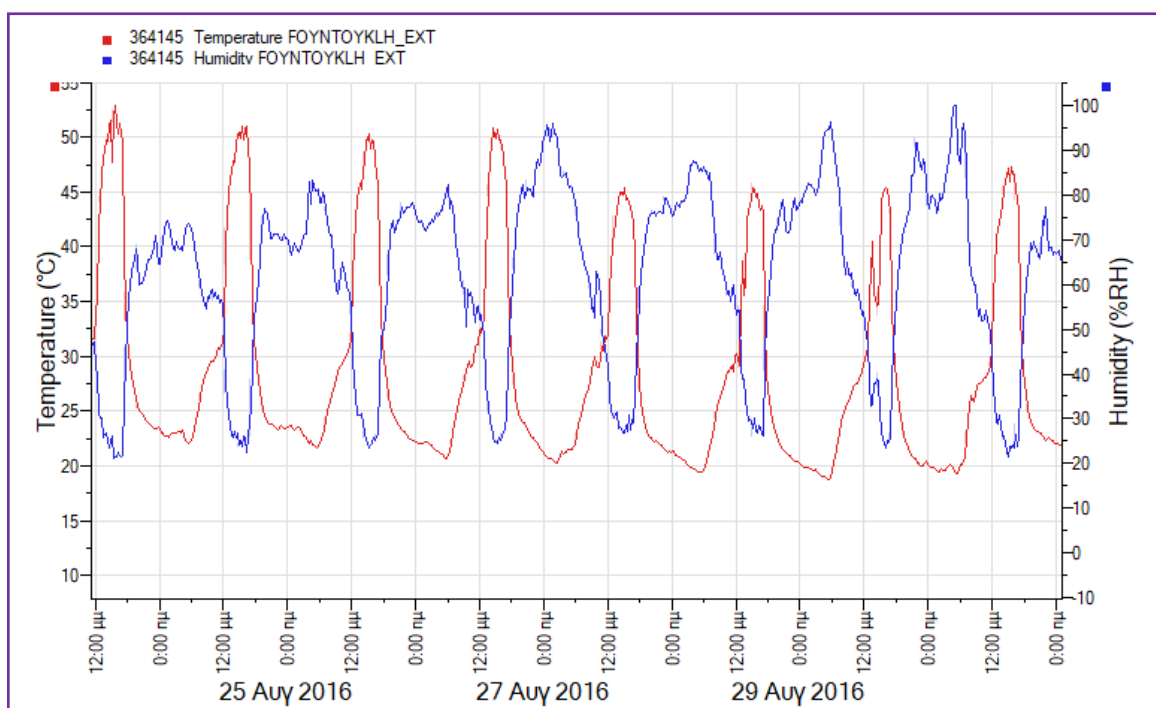
7.5.1. Θερμοκρασία και σχετική υγρασία ατμόσφαιρας

Κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας τα δεδομένα συνήθως συλλέγονται και καταγράφονται από φορητές συσκευές διπλής λειτουργίας. Πρέπει να τοποθετείται τουλάχιστον μία στο εξωτερικό περιβάλλον του μνημείου και τουλάχιστον μία στο εσωτερικό.

Η συσκευή του εξωτερικού πρέπει να τοποθετείται σε θέση προστατευμένη από βροχή και απευθείας πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Στους ναούς, που κατά κανόνα έχουν το ιερό τους προς την ανατολή, κατάλληλη είναι μια θέση στη βόρεια πλευρά, κάτω από προεξοχή της στέγης ή εντός της κάτοψης ανοίγματος, αλλά όχι σε επαφή με

³⁰ EN15757:2010-12 (Conservation of cultural property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials)

δομικά στοιχεία. Πριν την τοποθέτηση, θα πρέπει οπωσδήποτε να επιβεβαιώνεται ο ακριβής προσανατολισμός του μνημείου. Απόκλιση του άξονα ανατολής - δύσης προς βορρά συνεπάγεται απευθείας έκθεση της συσκευής στην ηλιακή ακτινοβολία κατά τις απογευματινές ώρες, και απόκλιση προς το νότο κατά τις πρωινές. Στις περιπτώσεις αυτές τα δεδομένα αλλοιώνονται και καθίστανται παραπλανητικά και άχρηστα. Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας αλλοίωσης. Οι μέγιστες καταγραφές θερμοκρασίας κατά τις ώρες της απευθείας πρόσπτωσης πλησιάζουν ή υπερβαίνουν τους 50°C, αλλοιώνοντας αντίστοιχα τη σχετική υγρασία (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2017d).

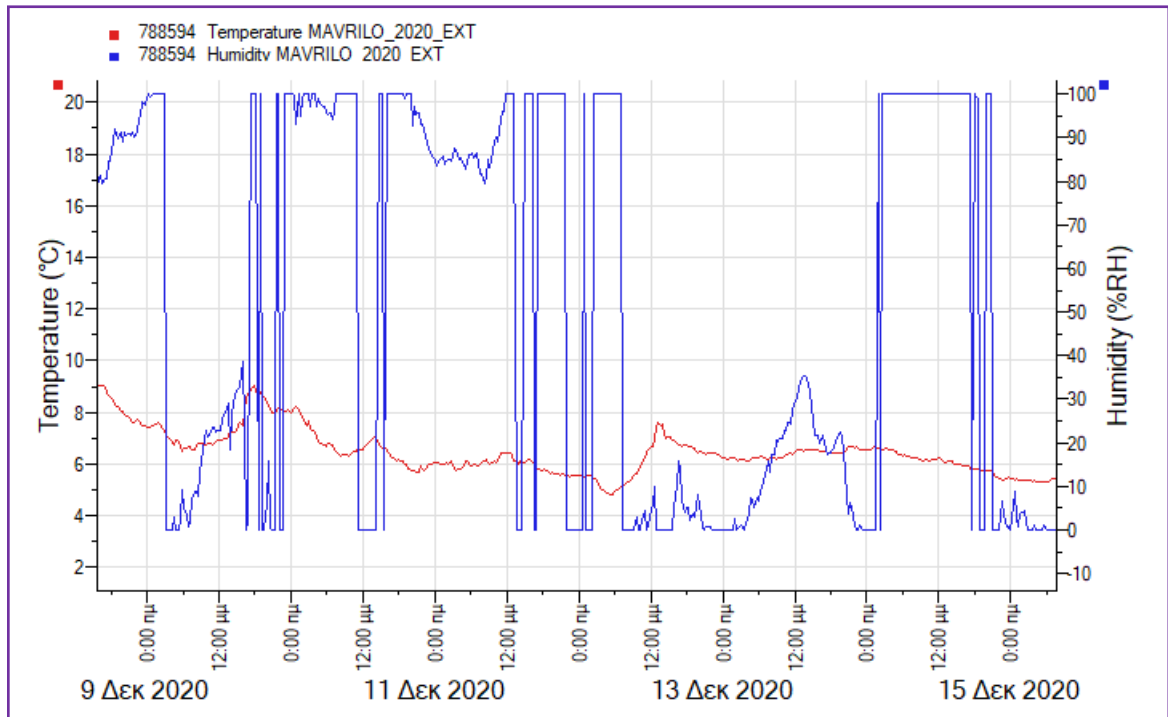


Γράφημα 6: Αλλοίωση δεδομένων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας λόγω εσφαλμένης τοποθέτησης συσκευής και απευθείας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η συσκευή του εσωτερικού τοποθετείται στο μέσο του χώρου και σε μέση στάθμη. Εάν παρατηρείται έντονη διαμερισματοποίηση του κτηρίου με σοβαρές διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους του μικροκλίματος ή στην παθολογία των τοιχογραφιών, είναι σκόπιμη η τοποθέτηση δεύτερου καταγραφικού. Οι τιμές που λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο τοποθέτησης θα απηχούν ένα μέσο όρο του χώρου, αποκλίνοντας από τις πραγματικές τιμές στρωμάτων αέρα σε επαφή με τους τοίχους και από τις κατά χώρο ή καθ' ύψος διαφοροποιήσεις.

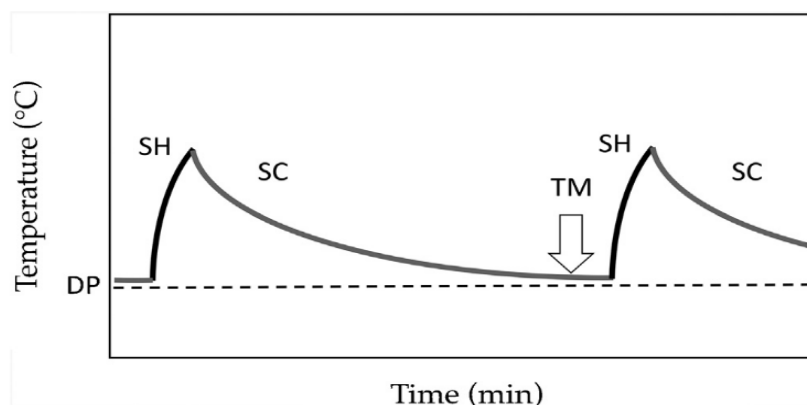
Η συχνότητα λήψης μετρήσεων συσχετίζεται με τους στόχους της καταγραφής. Για την παρακολούθηση των συνθηκών αρκούν ωριαίες καταγραφές, εάν όμως στους στόχους περιλαμβάνεται και η παρακολούθηση του ρυθμού απόκρισης των παραμέτρων του εσωτερικού περιβάλλοντος στις μεταβολές του εξωτερικού, απαιτούνται πυκνότερες μετρήσεις, της τάξης τουλάχιστον των 15 λεπτών. Η συχνότητα λήψης μέτρησης είναι συνάρτηση και της χωρητικότητας της μνήμης της συσκευής. Τα δεδομένα πρέπει να αντλούνται εγκαίρως και οι συσκευές να προγραμματίζονται και να τοποθετούνται εκ νέου, προκειμένου να μην σημειώνονται κενά στην καταγραφή. Κάποιες συσκευές διαθέτουν δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων εφόσον διατίθεται διαδίκτυο, πράγμα όμως που δεν είναι καθόλου αυτονόητο στην πλειονότητα των απομακρυσμένων μνημείων.

Δεδομένης της καθοριστικής επιρροής της σχετικής υγρασίας στην κατάσταση διατήρησης, την ερμηνεία της και τον προγραμματισμό των κατάλληλων ενεργειών, καθίσταται προφανής η αναγκαιότητα για ακριβείς μετρήσεις, οι οποίες εξαρτώνται τόσο από τις συσκευές καταγραφής, όσο και από τον τρόπο χρήσης τους και τοποθέτησής τους στο χώρο. Μια συνήθης δυσλειτουργία των καταγραφικών συσκευών που μπορεί να αλλοιώσει καταγραφές μεγάλης περιόδου, είναι τα βραχυκυκλώματα λόγω συμπύκνωσης σε συνθήκες πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας. Στις περιπτώσεις αυτές η συσκευή «καταρρέει» και η σχετική υγρασία παύει να καταγράφεται για σημαντικά διαστήματα (γράφημα 7).



Γράφημα 7: Δυσλειτουργία συσκευής καταγραφής σχετικής υγρασίας λόγω συμπύκνωσης. (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2020)

Ευρηματική λύση στο πρόβλημα έχει δοθεί από συσκευή καταγραφής η οποία, στο μεσοδιάστημα μεταξύ δύο μετρήσεων θερμαίνεται, με αποτέλεσμα την εξάτμιση της συμπυκνωμένης υγρασίας. Μέχρι την επόμενη μέτρηση, η συσκευή έχει ανακτήσει την κανονική της θερμοκρασία και έτσι η μέτρηση δεν αλλοιώνεται (Camuffo, 2019).



Γράφημα 8: Λειτουργία θερμαινόμενης συσκευής καταγραφής σχετικής υγρασίας. DP: σημείο δρόσου. SH: στιγμιαία θέρμανση. SC: σταδιακή ψύξη. TM: λήψη μέτρησης (Camuffo, 2019).

7.5.2. Περιεχόμενη υγρασία (Moisture Content, MC% ή Water Content)

Ως προς τις μεθόδους προσδιορισμού της περιεχόμενης υγρασίας, πρέπει να αναφερθεί ότι η μοναδική μέθοδος που δίνει αξιόπιστα ποσοτικά αποτελέσματα είναι η βαρυμετρική, η οποία όμως, ως καταστρεπτική μέθοδος που απαιτεί δειγματοληψία, είναι μη αποδεκτή στις περιπτώσεις των τοιχογραφημένων μνημείων. Το σύνολο των υπολοίπων μεθόδων προσδιορισμού της περιεχόμενης υγρασίας, είτε είναι μικροκαταστρεπτικές (όπως η μέθοδος της μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με όργανα ακίδων), είτε μη καταστρεπτικές, (όπως οι διάφορες παραλλαγές της διηλεκτρικής μεθόδου), δεν μετρούν απευθείας την περιεχόμενη υγρασία, αλλά ανάγονται σ' αυτήν μετά από μέτρηση ενός άλλου μεγέθους και σχετική βαθμονόμηση. Το δε σημαντικότερο είναι ότι οι μετρήσεις τους δεν περιγράφουν την πραγματική ποσότητα νερού της περιοχής που μετριέται, αλλά αποκλειστικά σχέσεις «λιγότερου - περισσότερου». Δεδομένου όμως του ότι το ζητούμενο είναι η χαρτογράφηση της κατανομής της περιεχόμενης υγρασίας σε ένα τοίχο και όχι οι ακριβείς ποσότητες, η σχετικότητα αυτή δεν αποτελεί πρόβλημα.

Πρόβλημα αποτελεί το γεγονός ότι η ερμηνεία της προέλευσης της υγρασίας μιας συγκεκριμένης θέσης απαιτεί μετρήσεις σε διαφορετικά βάθη, καθώς αυτή κατά κανόνα δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στη μάζα του υλικού. Ενδεικτικά, η υγρασία που προέρχεται από επιφανειακά ή υπόγεια νερά μέσω τριχοειδών δυνάμεων κατανέμεται όχι μόνο στη δομή ή τις επιφάνειες των επιχρισμάτων, αλλά σε ολόκληρο το πάχος της τοιχοποιίας. Αντίστροφα, σε περιπτώσεις υγρασίας από συμπύκνωση, από παλαιότερες επιφανειακές αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων ή και από απλή ανταλλαγή με την ατμόσφαιρα, η κατανομή του νερού στην επιφάνεια και σε μεγαλύτερα βάθη είναι εντελώς διαφορετική. Η δε αξιόπιστη μέτρηση σε βάθος είναι εφικτή και πάλι μόνο με καταστρεπτικές μεθόδους που προϋποθέτουν δειγματοληψία. Κάποια όργανα που αξιοποιούν μη καταστρεπτικές μεθόδους δίνουν δεδομένα (επίσης σε σχετική κλίμακα) μεγαλύτερα βάθη (ενδεικτικά 19, 40 έως και 300mm, και η συγκριτική τους παράθεση μπορεί να έχει ενδιαφέρον. Οι μετρήσεις τους όμως επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από το νερό των επιφανειακών στρωμάτων και άλλους παράγοντες, επομένως πρέπει να ερμηνεύονται με επιφύλαξη.

Έχοντας κανείς απορρίψει για δεοντολογικούς λόγους τις καταστρεπτικές και μικροκαταστρεπτικές³¹ μεθόδους, τουλάχιστον σε επίπεδο καθημερινής πρακτικής, οφείλει πλέον να εργαστεί αποκλειστικά με τις μη καταστρεπτικές.

Η σχετική φύση των μετρήσεων με μη καταστρεπτικές μεθόδους δεν αναιρεί την αξία τους. Είναι όμως αναγκαίο σε κάθε στάδιο της διαδικασίας να κρατά κανείς υπόψη τη σχετικότητα και τους περιορισμούς τους, και, στο βαθμό του εφικτού, να αναπληρώνει τις ελλείψεις των μεθόδων και να συμπληρώνει την ερμηνεία του με εφαρμογή μετρήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες ή και άλλων τεχνικών, όπως η λήψη μετρήσεων περιεχόμενης υγρασίας υπό διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος και οι μετρήσεις θερμοκρασίας των επιφανειών στις περιπτώσεις της υγρασίας από συμπύκνωση, ή ο μη καταστρεπτικός έλεγχος της παρουσίας αλάτων, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η αυξημένες μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας ερμηνεύονται ως αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων.

Αξίζει να αναφερθεί η ανάπτυξη σε ερευνητικό επίπεδο μιας μη καταστρεπτικής μεθόδου που υπόσχεται όχι απλώς ακριβή ποσοτικό προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας αλλά και της περιεκτικότητας σε άλατα. Η συσκευή (SUSI) δεν είναι ακόμη εμπορικά διαθέσιμη (Marie-Victoire, κ.ά., 2015).

Οι περιορισμοί και η εξάρτηση των μετρήσεων από παράγοντες όπως η ύπαρξη αλάτων, ασυνεχειών, διαφοροποιήσεων στα υλικά κατασκευής και διαφόρων φθορών, όπως και από το χειρισμό του οργάνου κατά τη μέτρηση, καθώς και η πληθώρα των οργάνων, των μεθόδων και των αρχών μέσω των οποίων έχει επιχειρηθεί ο ποσοτικός προσδιορισμός της περιεχόμενης υγρασίας, σε συνδυασμό με τη σχετική τους αξία, δημιουργούν μια σοβαρή σύγχυση γύρω από το φαινόμενο και μια σοβαρή αμηχανία στο συντηρητή που μπαίνει ενσυνείδητα στη διαδικασία μέτρησης.

Προς την κατεύθυνση της άρσης της σύγχυσης συμβάλλει σημαντικά το πρόσφατο πρότυπο EN 16682, το οποίο έχει χαρακτηριστικά τόσο κανονιστικά, όσο και ενημερωτικά.

³¹Η μέθοδος μέτρησης της αγωγιμότητας με όργανα ακίδων, πέραν του γεγονότος ότι η ακρίβεια των μετρήσεων επηρεάζεται δραματικά από την παρουσία αλάτων, μόνον καταχρηστικά μπορεί να χαρακτηριστεί «μικρο-καταστρεπτική». Η διαδικασία χαρτογράφησης μιας τοιχογραφημένης επιφάνειας 4m x 10m με κάνναβο ανά 20cm, συνεπάγεται πρόκληση 2.000 μικροσπών, οι οποίες, πέραν της άμεσης βλάβης, μεσοπρόθεσμα μπορεί να λειτουργήσουν ως εστίες νέας παθολογίας.

Το πρότυπο εξετάζει συγκριτικά το σύνολο των υφισταμένων μεθόδων μέτρησης της περιεχόμενης υγρασίας και των αρχών λειτουργίας τους, ως προς την καταλληλότητά τους για εφαρμογή σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς, τις δυνατότητες και τους περιορισμούς τους, καθώς και τις προϋποθέσεις εφαρμογής τους. Από την αρμόδια επιτροπή παράχθηκαν συγκεκριμένα πρότυπα για μετρήσεις επί πολιτιστικών αγαθών, με σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων μέτρησης επί γηρασμένων και φθαρμένων αντικειμένων με επιστημονική ακρίβεια και σεβασμό στην ασφάλειά τους. Στο κανονιστικό σκέλος του, το πρότυπο καθορίζει ότι όλες οι μέθοδοι απόλυτης μέτρησης πρέπει να εκφράζονται στην ίδια μονάδα, δηλαδή % επί του ξηρού δείγματος. Επίσης ότι μετρήσεις που εκφράζονται στις ίδιες τιμές αλλά έχουν ληφθεί με διαφορετικές μεθόδους δεν πρέπει να συγκρίνονται μεταξύ τους³².

Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μέτρησης είναι:

Η μέθοδος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας: Αναφέρθηκαν ήδη οι επιφυλάξεις για τον καταστρεπτικό τους χαρακτήρα και την αναξιοπιστία των αυξημένων τιμών παρουσία αλάτων. Οι Massari (1993) όμως μας υπενθυμίζουν ότι τα όργανα ακίδων είναι πάντα αξιόπιστα όταν δίνουν την ένδειξη «ξηρό», αφού τα άλατα απουσία νερού δεν επηρεάζουν την αγωγιμότητα .

Η διηλεκτρική μέθοδος³³ με τις διάφορες παραλλαγές της είναι μεταξύ των πιο διαδεδομένων μη καταστρεπτικών μεθόδων προσέγγισης της περιεχόμενης υγρασίας. Πρόκειται για σχετική μέθοδο, η οποία δεν καταγράφει ποσότητες αλλά σχέσεις «περισσότερου - λιγότερου», και έμμεση, εφόσον ανάγεται σε ποσοτικές σχέσεις όχι άμεσα αλλά μέσω του υπολογισμού άλλων μεγεθών. Βασίζεται στις διηλεκτρικές ιδιότητες του νερού, τα μόρια του οποίου υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου ευθυγραμμίζονται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, ή αλλιώς πολώνονται. Εάν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, τα μόρια αρχίζουν να περιστρέφονται με τη συχνότητα του πεδίου (πόλωση προσανατολισμού). Σε μακροσκοπικό επίπεδο αυτή η επίδραση ταυτίζεται με το φαινόμενο της διηλεκτρικής σταθεράς. Το διηλεκτρικό φαινόμενο στο νερό είναι τόσο έντονο που η διηλεκτρική

³²Ελεύθερη απόδοση στα ελληνικά από το (Camuffo, Standardization activity in the evaluation of moisture content, 2018)

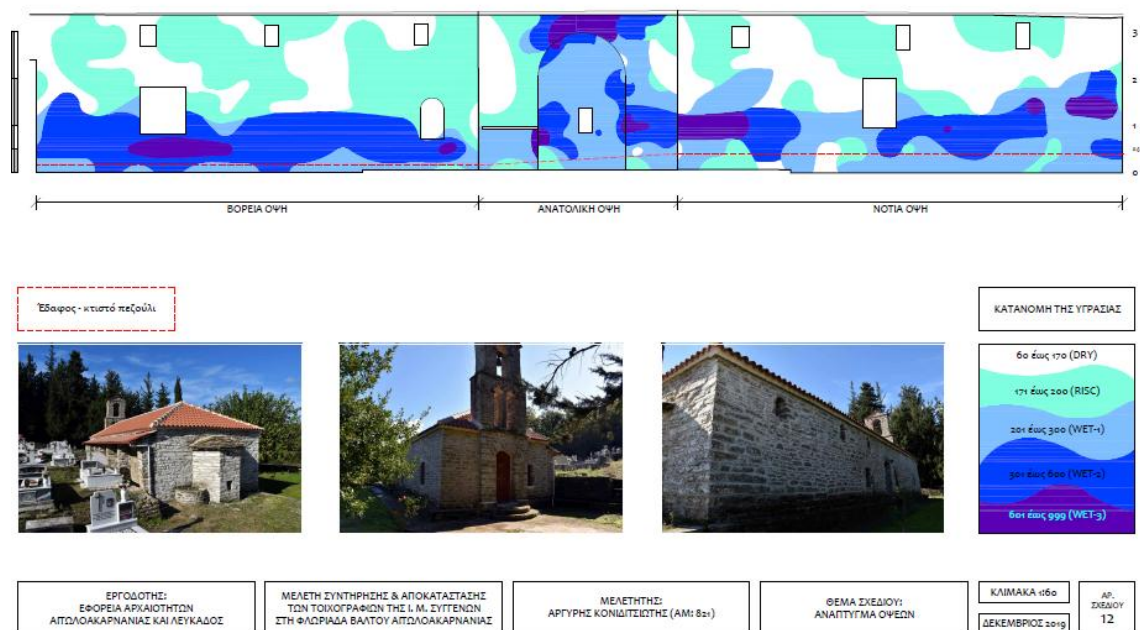
³³Η ενότητα αποτελεί ελεύθερη απόδοση στα ελληνικά από το Trotec T600 Operating Manual (TROTEC, 2020).

σταθερά του έχει τιμή περίπου 80. Η αντίστοιχη των περισσότερων στερεών, περιλαμβανομένων και των δομικών υλικών, είναι μεταξύ 2-10, συχνότερα δε 3-6. Τα όργανα τελικά μετρούν τη διαφορά μεταξύ της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού και αυτής του δομικού υλικού.

Κατά τη χρήση της μεθόδου, χάρη στην οποία επιτυγχάνονται μετρήσεις σε σημαντικό βάθος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής περιορισμοί: Όταν το υλικό είναι κορεσμένο με νερό στις περιοχές κοντά στην επιφάνεια, το βάθος μέτρησης μειώνεται σοβαρά. Επίσης, ο βαθμός συνεισφοράς της περιεχόμενης υγρασίας κάθε επιπέδου στη διαμόρφωση της τελικής τιμής μειώνεται, όσο αυξάνεται το βάθος. Η υγρασία επομένως των βαθύτερων στρωμάτων επηρεάζει τη μέτρηση αναλογικά λιγότερο από αυτές κοντά στην επιφάνεια.

Χαρτογράφηση περιεχόμενης υγρασίας: Οι μετρήσεις λαμβάνονται σε πυκνό κάνναβο, 20 x 20 έως 50 x 50cm και οι τιμές τους μεταφέρονται σε σκαρίφημα. Είναι κρίσιμη η επίδειξη ιδιαίτερης προσοχής κατά τη λήψη των μετρήσεων, καθώς η ποιότητα της μέτρησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χειρισμό των συσκευών. Οι τιμές θα πρέπει να καταγράφονται όταν οι ενδείξεις της συσκευής σταθεροποιηθούν, ενώ στην ίδια θέση θα πρέπει να λαμβάνονται περισσότερες από μία μετρήσεις για λόγους επιβεβαίωσης. Ασχέτως του οργάνου και της μεθόδου που θα επιλεγεί τελικά, σε επίπεδο εφαρμογής φαίνεται κρίσιμο οι μετρήσεις στο ίδιο μνημείο να λαμβάνονται από το ίδιο «χέρι», ώστε οι χάρτες που θα προκύψουν να διαθέτουν μια εσωτερική συνέπεια.

Ανεξάρτητα από τις κλίμακες μέτρησης των διαφόρων οργάνων, τα περισσότερα διαθέτουν ενδείξεις όπως «ξηρό», «κίνδυνος υγρασίας» και «υγρό», παράλληλα με τις αριθμητικές τιμές. Οι απαιτήσεις της χαρτογράφησης συνήθως καλύπτονται με μια ομαδοποίηση των τιμών σε πέντε έως έξι υποομάδες. «Ξηρό», «ύποπτο» και τρεις έως τέσσερις διαβαθμίσεις του «υγρού» ανάλογα με την τιμή. Οι υποομάδες αποδίδονται τελικά σε σχέδιο με χρωματική ή τονική διαβάθμιση. Η χαρτογράφηση είναι αναγκαίο να επαναλαμβάνεται σε διαφορετικές περιόδους και συνθήκες. Η ερμηνεία του χάρτη που θα προκύψει προκύπτει από συνεκτίμησή του με άλλα δεδομένα και βρίσκεται σε συνάρτηση με την εποχή και τις συνθήκες της μέτρησης.



Εικ. 11: Παράδειγμα χάρτη κατανομής περιεχόμενης υγρασίας (Κονιδιτσιώτης, 2019)

7.5.3. Θερμοκρασία επιφανειών

Η θερμοκρασία των εσωτερικών και εξωτερικών θερμοκρασιών καταγράφεται με σκοπό επίσης την παραγωγή χαρτών. Οι μετρήσεις λαμβάνονται σημειακά σε συγκεκριμένο κάρναβο και μεταφέρονται σε σκαρίφημα, όπως και στην περίπτωση της περιεχόμενης υγρασίας με θερμομέτρα επιφανειών διαφόρων τύπων. Σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το σχετικά μεγάλο διάστημα που απαιτείται για τη συλλογή των δεδομένων σε μεγάλες επιφάνειες. Στο διάστημα αυτό η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και του τοίχου μπορεί να έχει μεταβληθεί, επομένως οι θερμοκρασίες και οι σχέσεις που θα καταγραφούν θα είναι σε ένα βαθμό πλασματικές. Η εφαρμογή της μεθόδου της θερμογραφίας υπερύθρου (Infrared Thermography, IRT) αποτελεί αξιόπιστη λύση στο πρόβλημα αυτό, αυξάνοντας συγχρόνως σημαντικά την παραγωγή, αφού μια στιγμιαία λήψη αρκεί για την αποτύπωση μεγάλων επιφανειών, ενώ δεν απαιτείται άλλου τύπου επεξεργασία των τιμών για την παραγωγή χάρτη, αφού η θερμοεικόνα καλύπτει τις απαιτήσεις αυτές, με τεράστιο μάλιστα πλήθος σημείων.

«Η χρήση της θερμογραφίας για τον έλεγχο της υγρασίας των κτιρίων είναι γνωστή και πλήρως τεκμηριωμένη από τη βιβλιογραφία (Rosina & Ludwig, 1999) (Rosina, κ.ά., 1998). Έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο οι ενεργητικές, όσο και οι παθητικές τεχνικές, βασισμένες στην αλλαγή των θερμικών παραμέτρων (Grinzato, κ.ά., 1998) ή λαμβάνοντας υπόψη την οπτική εμφάνιση των επιφανειών που έχουν προσβληθεί από

υγρασία (Buscher, κ.ά., 1999). Επίσης, η διείσδυση της υγρασίας, συχνά σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της θερμότητας και της μεταφοράς της, έχουν ένα αποφασιστικό ρόλο στη μεταβολή των υλικών των κτιρίων. Έτσι, η μελέτη του μηχανισμού μεταφοράς της θερμότητας και της υγρασίας (σε υγρή μορφή ή εξατμισμένη) στα υλικά της κατασκευής, μπορεί να συνεισφέρει αποφασιστικά στην κατανόηση του μηχανισμού της μεταβολής (Vos, 1973) (Boekwijt, 1976) (Παπαβρανούση-Λιωνή, 2010).

Η θερμογραφική προσέγγιση δίνει τη δυνατότητα προκαταρκτικής επιθεώρησης μεγάλων επιφανειών, αλλά και περιοχών στις οποίες δεν είναι εφικτή η πρόσβαση. Η άμεση οπτικοποίηση των θερμοκρασιακών δεδομένων είναι σημαντικό πλεονέκτημα. Οι θερμοκρασιακές διαφοροποιήσεις που καταγράφονται μπορεί να παραπέμπουν σε τοπική παρουσία υγρασίας, διαφοροποίηση δομικών στοιχείων ή ασυνέχειες στην τοιχοποιία. Οι πρώτες αυτές παρατηρήσεις υποδεικνύουν σημεία ενδιαφέροντος τα οποία στη συνέχεια εξετάζονται με άλλες τεχνικές (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2015).

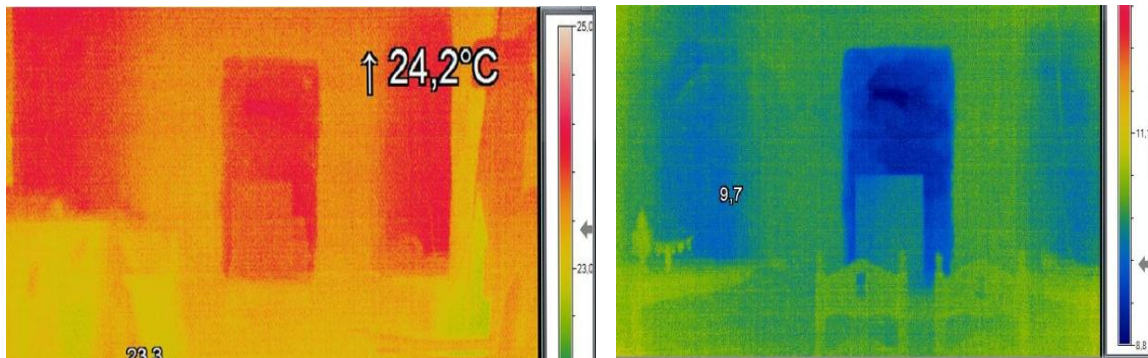
Επιπλέον, με μια λήψη είναι δυνατόν να καταγράφονται οι θερμοκρασίες μεγάλου πλήθους σημείων εκτεταμένων επιφανειών, γεγονός σπουδαίο για τον έλεγχο της υγρασίας από συμπύκνωση. Με γνωστό το σημείο δρόσου (μετά από λήψη τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας), είναι δυνατόν να ορίζονται τιμές - «όρια συναγερμού» που θα υποδεικνύουν σε πραγματικό χρόνο θέσεις στις οποίες συμβαίνει, ή υπάρχει αυξημένη πιθανότητα να συμβεί συμπύκνωση.

Η χρήση της θερμογραφίας σε μνημεία είναι ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, κυρίως διότι τα δομικά υλικά τους έχουν εξαιρετικά κοντινούς συντελεστές εκπομπής (ϵ) και διότι τα κτίρια δεν παράγουν θερμότητα που μπορεί να καταγραφεί, όπως συμβαίνει π.χ. με τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, αλλά απλώς αντιδρούν σε εξωτερικούς παράγοντες θερμότητας, φυσικούς (παθητική μέθοδος) ή τεχνητούς (ενεργητική μέθοδος). Ιδιαίτερη σημασία επομένως για την ερμηνεία και την άντληση συμπερασμάτων έχει η επιλογή των συνθηκών λήψης, όπως η εποχή, η ώρα της ημέρας, οι περιβαλλοντικές παράμετροι εσωτερικού - εξωτερικού. Ο πίνακας που ακολουθεί είναι ενδεικτικός.

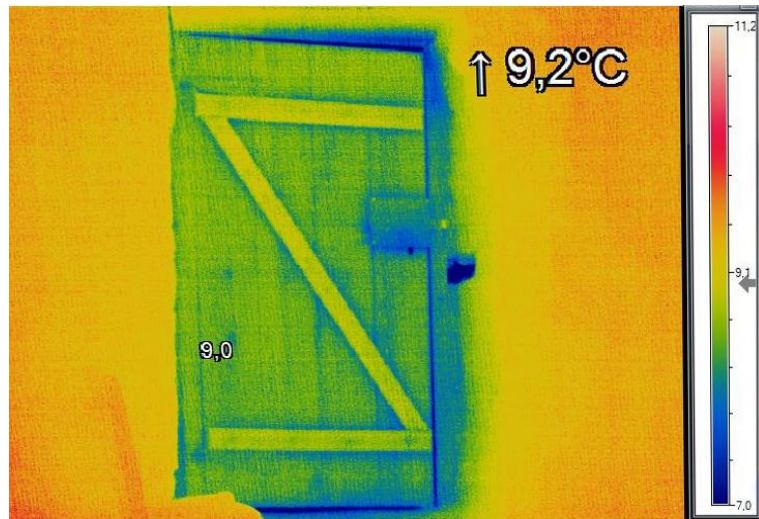
Πίνακας 3: Αναγκαία δεδομένα θερμογραφικής επιθεώρησης τοιχογραφημένου μνημείου (Παπαδοπούλου και Κονιδιτσιώτης 2020)

Μνημείο:	Άγ. Γεώργιος Μαυρίλλου Φθιώτιδας
Ημερομηνία:	02-12-2020
Ώρα:	18:45 - 19:00
Μέθοδος:	Ενεργητική (σόμπες πετρελαίου)
Όργανο:	Optris PI 640
Συνθήκες:	Ομίχλη, ψιλόβροχο
Θερμοκρασία εξωτερικού (T_{ext}):	5,5°C
Θερμοκρασία εσωτερικού (T_{int}):	15°C
Σχετική υγρασία εξωτερικού (RH_{ext}):	100%
Σχετική υγρασία εσωτερικού (RH_{int}):	57%

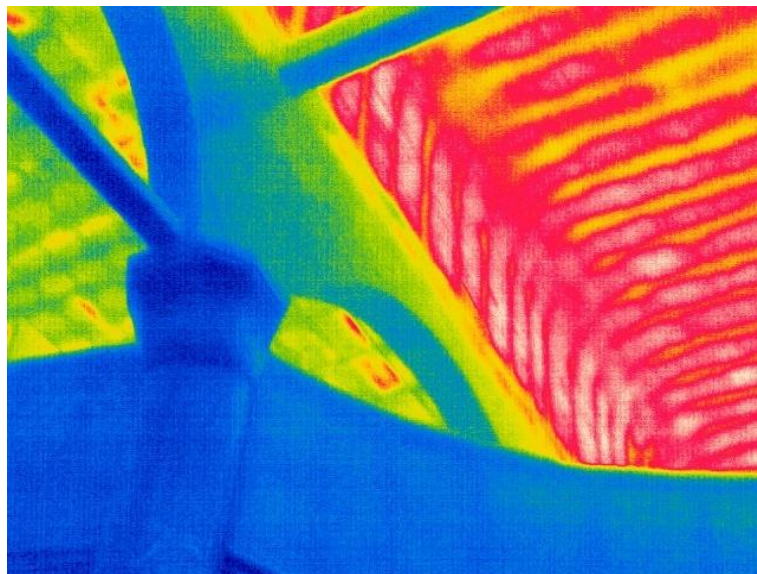
Βασικές αρχές εφαρμογής είναι η προσεκτική εστίαση, η αποφυγή λήψης μετρήσεων σε συνθήκες πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας, ή υπό μεγάλη κλίση. Πρέπει επίσης να αποφεύγεται η επιθεώρηση αμέσως μετά από βροχή ή υπό έντονη ηλιοφάνεια, αφού οι συνθήκες αυτές ομογενοποιούν θερμοκρασιακά τις επιφάνειες (Χριστοδουλίδης, 2016). Είναι σκόπιμο να αποφεύγεται η χρήση απλών οργάνων επιθεώρησης χαμηλής ευαισθησίας και ανάλυσης, ενώ πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί κάθε οργάνου. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικές περιπτώσεις εφαρμογής. Επανάληψη της επιθεώρησης της ίδιας θέσεις σε διαφορετικές εποχές (εικ. 12), τεκμηρίωση της εισόδου ρευμάτων ψυχρού αέρα (εικ. 13), διαφοροποίηση υλικών κατασκευής (εικ. 14).



Εικ. 12: Κόγχες σε τοιχοποιία μεταβυζαντινού ναού. Επανάληψη του ελέγχου και σύγκριση των θερμοεικόνων διαφορετικών περιόδων. Αριστερά: λήψη 30 Ιουλίου 2016, δεξιά: 29 Νοεμβρίου 2016. Οι εξωτερικές συνθήκες επηρεάζουν έντονα τις περιοχές της τοιχοποιίας με το μικρότερο πάχος, όπως οι κόγχες (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2017b).



Εικ. 13: Ψύξη των παραστάδων(λαμπάδων) και του ανωφλιού από είσοδο ψυχρών ρευμάτων (ό.π.)



Εικ. 14: Διαφοροποίηση θερμοκρασίας επιφανειών ανάλογα με τη θέση και το δομικό υλικό. Σε διαφορετικές θέσεις εντός του ίδιου μνημείου συνυπάρχουν πλήθος διαφορετικών θερμοκρασιών που συνεπάγονται διαφορετικούς μηχανισμούς μεταβολής (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2017c).

7.5.4. Άλατα

Το είδος, η θέση και η κατανομή των αλάτων στην επιφάνεια και το βάθος των τοιχοποιιών μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τους μηχανισμούς αλλοίωσης, για την προέλευση των αλάτων, τα αίτια της παρουσίας του νερού στην τοικοποιία και τις διαδρομές του.

Αναφέρθηκε ήδη ότι στα δομικά υλικά των κτηρίων δεν απαντώνται υδατικά διαλύματα ιόντων μεμονωμένων αλάτων, αλλά μείγματα. Ο ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός των ιόντων των μειγμάτων, υπό προϋποθέσεις και με επιφυλάξεις, είναι δυνατόν να οδηγήσει στην περιγραφή των συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας υπό τις οποίες οι μηχανισμοί αλλοίωσης για το συγκεκριμένο μείγμα θα είναι ανενεργοί.

Ως προς τον προσδιορισμό της προέλευσης των αλάτων και επομένως του τύπου της υγρασίας, σύμφωνα με την αρχή που περιγράφουν οι Arnold και Zehnder (1991), όσο πιο ευδιάλυτα είναι τα άλατα, τόσο μεγαλύτερη απόσταση διανύουν εντός της τοικοποιίας από τη θέση εισόδου τους. Έτσι, ο εντοπισμός διαλυτών αλάτων σε χαμηλή στάθμη της τοικοποιίας και όχι σε μεσαία ή υψηλή, προϋδεάζει για υγρασία από διήθηση. Αντίστροφα, ευδιάλυτα άλατα σε υψηλή και μεσαία στάθμη και όχι σε χαμηλή αποτελούν ένδειξη ανερχόμενης υγρασίας.

Επίσης, σε περιπτώσεις υπαίθριων αρχαιολογικών καταλοίπων κοντά στη θάλασσα, η ομοιόμορφη κατανομή αλάτων χλωριούχου νατρίου σε όλη την επιφάνεια μιας τοικοποιίας, ενός επιχρίσματος ή μιας τοιχογραφίας δηλώνει υγρασία και άλατα από αερολύματα και όχι από ανερχόμενη υγρασία (Πρόκος, 2012).

Τέλος, σε περιπτώσεις κατά τις οποίες από τη χαρτογράφηση της περιεχόμενης υγρασίας προκύπτουν δυσερμήνευτες νησίδες νερού σε μέση στάθμη, οι οποίες περιβάλλονται από ξηρές περιοχές και μάλιστα χωρίς εμφανή παθολογία της εξωτερικής παρειάς της τοικοποιίας, η ταυτόχρονη παρουσία αλάτων στην περιοχή των νησίδων ερμηνεύει το φαινόμενο ως υγροσκοπική υγρασία από παλαιότερες αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων.

Ιδιαίτερα σοβαρό είναι το ζήτημα του τρόπου δειγματοληψίας για την τεκμηρίωση της παρουσίας αλάτων ή και τον ποσοτικό και ποιοτικό προσδιορισμό τους. Η διάκριση μεταξύ καταστρεπτικών και μη καταστρεπτικών μεθόδων είναι κομβική. Αρχικά θα πρέπει να γίνει μια βασική διαφοροποίηση μεταξύ καταστρεπτικών μεθόδων δειγματοληψίας και καταστρεπτικών μεθόδων ανάλυσης. Η πρώτη περίπτωση συνεπάγεται καταστροφή –έστω σημειακή– για το αντικείμενο και εγείρει σοβαρές δεοντολογικές επιφυλάξεις από την άποψη της διατήρησης των τοιχογραφιών και επιχρισμάτων, ενώ η δεύτερη σημαίνει καταστροφή του δείγματος κατά την ανάλυσή του, γεγονός που καθιστά αδύνατη την επανάληψη της διαδικασίας.

Πέρα από τις επιφυλάξεις για τις καταστρεπτικές διαδικασίες δειγματοληψίας με διάτρηση, οι οποίες σχετίζονται τόσο με το χειρισμό του μέσου διάτρησης, όσο και με την αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων, το πλεονέκτημα της μεθόδου συνίσταται στη δυνατότητα ποιοτικού και ποσοτικού προσδιορισμού των αλάτων σε συγκεκριμένο βάθος, πληροφορία αναγκαία τόσο για την ερμηνεία της παθολογίας και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων, όσο και για την αξιολόγηση των επεμβάσεων αφαλάτωσης.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, πολλές από τις ανάγκες για τις οποίες η δειγματοληψία καθίσταται αναγκαία, καλύπτονται και με μη καταστρεπτικές μεθόδους δειγματοληψίας, δηλαδή με λήψη δείγματος αλάτων όχι από το αντικείμενο αλλά από επιθέματα.

Ο ακριβής ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός των ιόντων απαιτεί εξεζητημένες και δαπανηρές μεθόδους ποσοτικής ανάλυσης. Όμως, για την τεκμηρίωση της ύπαρξης διαλυτών αλάτων και τον ποσοτικό προσδιορισμό τους³⁴ είναι επαρκής, όσο και εφικτή ακόμη και σε συνθήκες πεδίου, η μέτρηση της αγωγιμότητας υδατικού διαλύματος του δείγματος. Το αποτέλεσμα της μέτρησης σε $\mu\text{S}/\text{cm}$ είναι είτε άμεσα ενδεικτικό και αξιοποιήσιμο, είτε ανάγεται σε βάρος (mg) Ολικών Διαλυτών Στερεών (Total Dissolved Solids, TDS) ανά λίτρο διαλύματος, με απλό πολλαπλασιασμό της αγωγιμότητας επί το συντελεστή συσχέτισης k_e . Η σχέση των TDS και της ειδικής αγωγιμότητας μπορεί να δοθεί προσεγγιστικά από τη σχέση: $TDS = k_e EC$, όπου το TDS εκφράζεται σε mg/L και EC είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε $\mu\text{S}/\text{cm}$ στους 25 °C.

Ο συντελεστής k_e κυμαίνεται μεταξύ 0,55 - 0,75 ανάλογα με τη συγκέντρωση του διαλύματος (Rusydi, 2018).

7.6. Επεξεργασία και ερμηνεία δεδομένων

7.6.1. Εισαγωγή

Κατά την επεξεργασία και την ερμηνεία των πληροφοριών και των δεδομένων που συλλέχθηκαν στο προηγούμενο στάδιο, ιδίως ως προς τα μεγέθη της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, σημειώνεται ότι ενδιαφέρουν οι ακραίες τιμές των μεγεθών, οι ετήσιοι, εποχικοί, μηνιαίοι, εβδομαδιαίοι

³⁴Με απόκλιση της τάξης του 10% (WIKIPEDIA, 2020a)

και ημερήσιοι μέσοι όροι, αλλά και οι αντίστοιχες διακυμάνσεις και το εύρος τους. Κρίσιμες είναι οι συγκρίσεις που αφορούν στο βαθμό επιρροής του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό, όσο και οι συγκρίσεις χαρτών θερμοκρασίας αλλά και περιεχόμενης υγρασίας διαφορετικών περιόδων. Επίσης η σύγκριση εικόνων της παθολογίας με χάρτες θερμοκρασίας και περιεχόμενης υγρασίας της ίδιας θέσης. Τα διαθέσιμα υπολογιστικά και στατιστικά εργαλεία είναι πολλά, και συμβάλλουν από τον απλό υπολογισμό μέσω όρων και την παραγωγή απλών διαγραμμάτων των μεγεθών σε συνάρτηση με το χρόνο, έως τον υπολογισμό κυλιόμενων μέσω όρων και την παραγωγή διαγραμμάτων διασποράς.

«Η ανάλυση στον τομέα της έρευνας στη συντήρηση, παρουσιάζει κάποιες διαφοροποιήσεις από μία τυπική στατιστική μέθοδο, οι οποίες σχετίζονται με τα ειδικά χαρακτηριστικά των υλικών και τη φύση των μεταβολών (Παπαβρανούση-Λιωνή, 2010) (Maekawa, 1993). Αυτές οι διαφοροποιήσεις απαιτούν μία προσεκτική θεώρηση της διαδικασίας που χρησιμοποιείται σε κάθε στάδιο της ανάλυσης, προκειμένου να αποφευχθούν οι πιθανές απλοποιήσεις, τα τυπικά λάθη και οι αποκλίσεις από τα πραγματικά δεδομένα (Reedy & Reedy, 1988). Αντίθετα από μία γενική πεποίθηση που υπάρχει, δεν είναι κυρίως οι απόλυτες τιμές των υγροθερμικών παραμέτρων, αυτές που καθορίζουν τη συμπεριφορά τους ως παραγόντων μεταβολής, αλλά οι διακυμάνσεις και τα όριά αυτών. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας για παράδειγμα, προάγουν στη συνέχεια αντίστροφα επίπεδα στη σχετική υγρασία» (Παπαβρανούση-Λιωνή, 2010).

Ένα κατάλληλο μοντέλο για την ανάλυση των στοιχείων καταγράφει τις εβδομαδιαίες διακυμάνσεις και τις μέγιστες ημερήσιες διαφορές των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Στις αριστερές στήλες σημειώνονται οι μέγιστες και ελάχιστες εβδομαδιαίες τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας και στις δεξιές, καταγράφεται και παρακολουθείται η μέγιστη διαφορά που σημειώνεται ανά εικοσιτετράωρο. Το σύστημα διακρίνεται για την απλότητα και την αποτελεσματικότητά του, καθώς προσφέρει μια εικόνα πολλών μεταβλητών των στοιχείων. Παρέχει επίσης τη δυνατότητα εντοπισμού των σημείων ταύτισης παραμέτρων που σηματοδοτούν μεταβολές και παραπέμπουν σε αναλυτικότερη προσέγγιση (ό.π.).

Πίνακας 4: Πίνακας εβδομαδιαίων διακυμάνσεων και μέγιστων ημερήσιων διαφορών (Παπαβρανούση-Λιωνή, 2010)

ΑΙΣΘΗ- ΤΗΡΑΣ	ΕΛΑΧ.	ΜΕΓ.	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΦΟΡΑ						
			18/7	19/7	20/7	21/7	22/7	23/7	24/76
T °C ΕΞ.	16.5	32.2	1.6	2.8	4.3	5.3	6.8	4.6	0
T °C ΕΣ.	20.5	26.1	2.0	1.7	2.0	2.7	3.4	3.0	0
RH ΕΞ.	27.7	75.4	0.5	14.5	7.8	0	1.6	6.3	4.8
RH ΕΣ.	41.9	68.8	0	9.2	7.2	6.1	5.6	6.1	6.1

Αντίστοιχα, ο επόμενος πίνακας συμπυκνώνει πληροφορίες των βασικών μεγεθών για μια περίοδο καταγραφής.

Πίνακας 5: Βασικά μεγέθη μιας περιόδου καταγραφής (Παπαδοπούλου και Κονιδιτσιώτης 2020)

	Tint (°C)	Text (°C)	RHint (%)	RHext (%)
ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΔΟΥ	11	11,5	77,8	100
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΕΡΙΟΔΟΥ	8,2	3,5	65,9	-
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ	8,9	6,8	74,2	(85?)
ΜΕΓΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ	4,3	4,9	9,3	-
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ	0,1	0,6	0,5	-
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΩΝ	0,47	2,31	2,95	
ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ				
ΜΕΣΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ				
ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ				

Κατά την ερμηνεία και την εξαγωγή συμπερασμάτων, βασική αρχή είναι ότι οι ενδείξεις που παράγονται από μια μέθοδο μέτρησης ενός από τα μεγέθη θα πρέπει να διασταυρώνονται με τα δεδομένα που έχουν αντληθεί από άλλες μεθόδους, και τελικά με την πραγματικότητα του μνημείου, δηλαδή ιδίως την παθολογία του κελύφους και των τοιχογραφιών, τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά και τα δομικά υλικά.

7.6.2. Σύγκριση εξωτερικού μικροκλίματος του μνημείου με το κλίμα της ευρύτερης περιοχής

Από τα δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας διαμορφώνεται μια γενική αίσθηση για το κλίμα της ευρύτερης περιοχής με βάση τη θέση του συγκεκριμένου μετεωρολογικού σταθμού. Όμως, το ανάγλυφο, το υψόμετρο και άλλα χαρακτηριστικά της θέσης του μνημείου μπορεί να διαφοροποιούν σημαντικά το τοπικό μικροκλίμα. Η συγκεκριμένη σύγκριση επομένως αποκαλύπτει τα ιδιαίτερα κλιματικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης θέσης του μνημείου σε σχέση με το ευρύτερο περιβάλλον της.

7.6.3. Μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος

Απόλυτες τιμές: Από τις απόλυτες τιμές που καταγράφονται ενδιαφέρουν κυρίως οι ακραίες, καθώς δίνουν ενδείξεις για πιθανά φαινόμενα παγετού που επηρεάζουν καθοριστικά την παθολογία, ή για συνθήκες καύσωνα που υπό προϋποθέσεις επιταχύνουν την αποβολή υγρασίας.

Μέσοι όροι (ετήσιοι, εποχικοί, μηνιαίοι, εβδομαδιαίοι, ημερήσιοι, κυλιόμενοι): Συμβάλλουν στη διαμόρφωση της γενικής αίσθησης των συνθηκών. Στους κυλιόμενους μέσους όρους στηρίζεται η πρόταση για τα επιθυμητά εύρη τιμών σύμφωνα με την «τάση» του «ιστορικού κλίματος» (βλ. σχετική ενότητα).

Ακόμη, η διαπίστωση σε ένα κλειστό χώρο απόλυτης υγρασίας υψηλότερης από αυτή του εξωτερικού περιβάλλοντος μέσω της παρακολούθησης των μέσων όρων σε ετήσιο κύκλο, αποτελεί δείκτη επιβάρυνσης του εσωτερικού λόγω της ύπαρξης φορτίων υγρασίας στο κτηριακό κέλυφος, ή επισκεψιμότητας.

Διακυμάνσεις: Δίνουν ενδείξεις για τη συχνότητα με την οποία είναι δυνατόν να ενεργοποιούνται κύκλοι κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης - διάλυσης των διαλυτών αλάτων. Από το εύρος και τη συχνότητα των διακυμάνσεων καθορίζεται η ένταση των αντίστοιχων φθορών. Σταθερό περιβάλλον χωρίς διακυμάνσεις ευνοεί τη διατήρηση των υλικών κατασκευής ενώ συνθήκες μεγάλων και συχνών διακυμάνσεων ενεργοποιούν τους μηχανισμούς αλλοίωσης.

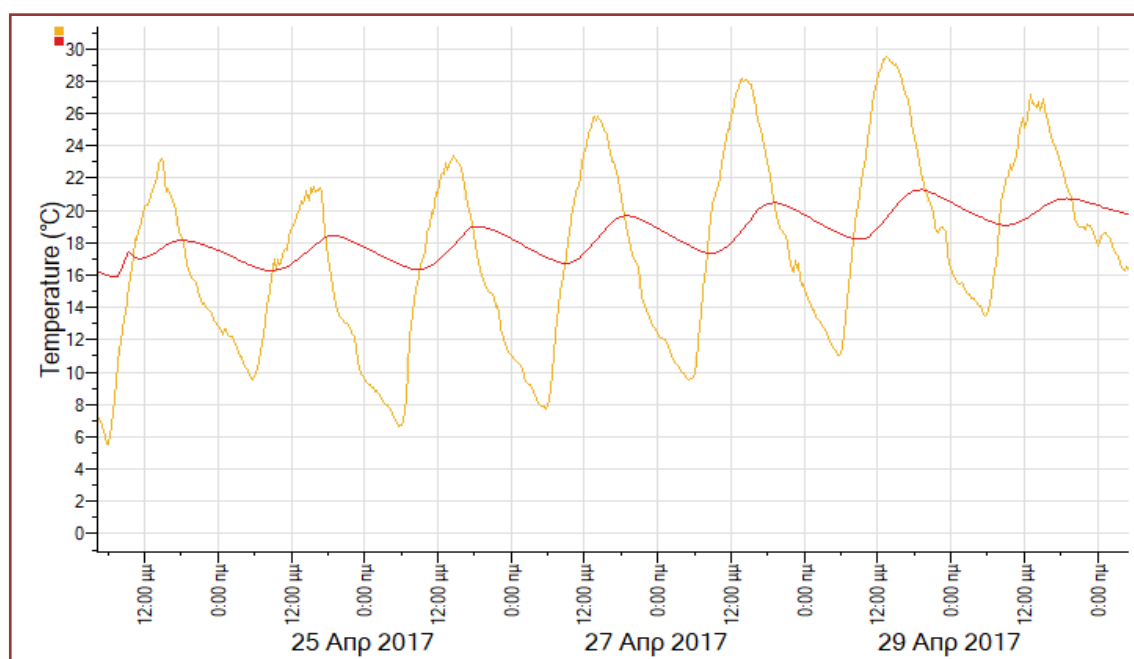
Η αντιστρόφως ανάλογη σχέση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας καθιστά ενδιαφέρουσα τη συνεξέταση των καμπυλών τους. Η διαταραχή της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης σημαίνει επιρροή άλλων παραμέτρων (θέρμανση, επισκεψιμότητα, ρεύματα αέρα), που θα πρέπει να εξεταστούν.

Ρυθμοί μεταβολής: Από τον υπολογισμό των ρυθμών μεταβολής της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, δηλαδή των διακυμάνσεων των μεγεθών συναρτήσει του χρόνου, προκύπτει η ένταση των αντίστοιχων φαινομένων. Τα δομικά υλικά μπορούν μέχρι ενός σημείου να παρακολουθήσουν και να προσαρμοστούν σε μεταβολές³⁵ που συμβαίνουν ομαλά, όμως οι έντονοι ρυθμοί μεταβολής επαναλαμβανόμενοι σε βάθος

³⁵Συστολοδιαστολές λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας και διακυμάνσεων της σχετικής υγρασίας.

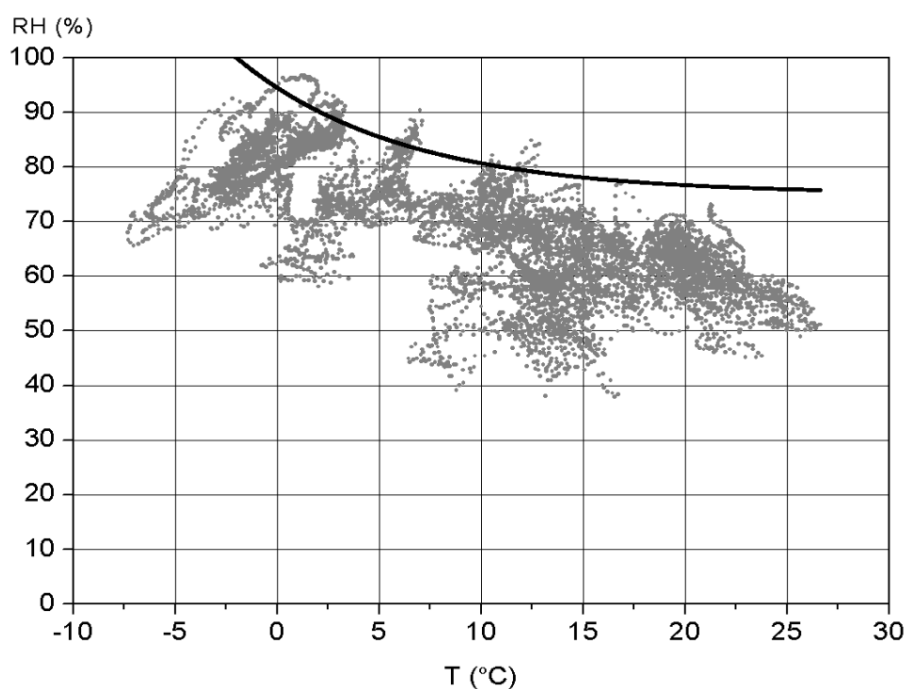
χρόνου οδηγούν κατά κανόνα σε αλλοιώσεις. Ενδεικτικά, ο μέγιστος επιτρεπόμενος ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας σε σχέση με την αντοχή των υλικών των κτιρίων είναι $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ ανά ώρα (Λιωνής, 1992) (Kadijsky, 1981).

Επίδραση εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό και χρόνοι απόκρισης: Από τη σύγκριση των καμπυλών της θερμοκρασίας εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος συνάγονται συμπεράσματα για το βαθμό επίδρασης του πρώτου στο δεύτερο, ή την επιρροή άλλων παραγόντων. Κατά κανόνα, σε μη θερμαινόμενα κτήρια, οι τιμές του εσωτερικού περιβάλλοντος καθορίζονται κυρίως από αυτές του εξωτερικού, παρουσιάζοντας ηπιότερες διακυμάνσεις. Από τους αντίστοιχους χρόνους απόκρισης των μεταβολών του εσωτερικού περιβάλλοντος στις μεταβολές του εξωτερικού, προκύπτουν δεδομένα για τη θερμομονωτική λειτουργία του κελύφους και το αεροστεγές των ανοιγμάτων. Μεγάλοι χρόνοι απόκρισης δηλώνουν υψηλή θερμομονωτική λειτουργία και αποτελούν τεκμήριο απουσίας ρευμάτων, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο όταν η συγκεκριμένη παράμετρος δεν παρακολουθείται ενόργανα (γράφημα 9). Οι χρόνοι απόκρισης των μεταβολών της θερμοκρασίας του εσωτερικού σ' αυτές του εξωτερικού είναι οι μεγαλύτεροι που έχουν καταγράψει οι συντάκτες της εργασίας, μεταξύ τεσσάρων και έξι ωρών (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2017c).



Γράφημα 9: Διάγραμμα σύγκρισης καμπυλών θερμοκρασίας εσωτερικού (κόκκινη) και εξωτερικού (κίτρινη) περιβάλλοντος.

Θερμοκρασία και σχετική υγρασία εσωτερικού περιβάλλοντος: Από τη συνεκτίμηση των καταγραφών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος είναι δυνατόν εξαχθεί πλήθος συμπερασμάτων. Ενδεικτικά μόνο αναφέρονται η εξάρτηση της σχετικής υγρασίας από τρίτους παράγοντες στις περιπτώσεις που δεν διαπιστώνεται η αναμενόμενη αντιστρόφως ανάλογη σχέση, και η παραγωγή διαγραμμάτων διασποράς για την εκτίμηση του κινδύνου από βιολογική προσβολή.



Γράφημα 10: Διασπορά τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.
Η περιοχή πάνω και δεξιά από την καμπύλη αποτελεί την περιοχή τιμών στην οποία υπάρχει κίνδυνος βιολογικής προσβολής (Broström & Leijonhufvud, 2010).

7.6.4. Ερμηνεία χαρτών περιεχόμενης υγρασίας

Η κατανομή της περιεχόμενης υγρασίας στον τοίχο δίνει ενδείξεις για την πιθανή θέση εισόδου και τον τύπο της υγρασίας, πάντοτε σε συνάρτηση με τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του κτηρίου.

Η γενική αρχή είναι ότι η περιεχόμενη υγρασία είναι μεγαλύτερη κοντά στη θέση εισόδου και εξασθενεί όσο απομακρύνεται απ' αυτή.

Από την αποτύπωση της κατανομής της περιεχόμενης υγρασίας στους χάρτες καθίσταται εφικτή η διαφοροποίηση μεταξύ των διαφορετικών τύπων της ανερχόμενης υγρασίας. Στην περίπτωση υγρασίας ανερχόμενης από τον υδροφόρο ορίζοντα η ζώνη εξάτμισης της ανερχόμενης υγρασίας είναι περίπου ομοιόμορφα παράλληλη προς το

έδαφος και, με μικρές διαφοροποιήσεις, σχεδόν στην ίδια στάθμη σε όλους τους εξωτερικούς τοίχους του κτηρίου. Αντίθετα, εάν η ανερχόμενη υγρασία προέρχεται από επιφανειακά νερά, στους χάρτες εμφανίζεται ως τοπική, με ζώνη εξάτμισης ακανόνιστη.

Ομοιόμορφα κατανεμημένες χαμηλές τιμές περιεχόμενης υγρασίας στις επιφάνειες καταγεγραμμένες σε συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας οφείλονται στη φυσική υγροσκοπικότητα των υλικών. Ομοιόμορφα κατανεμημένες υψηλές τιμές μπορεί να οφείλονται σε ακατάλληλα υλικά κατασκευής, όπως η χρήση άμμου θαλάσσης.

Υψηλές τιμές περιεχόμενης υγρασίας σε υψηλή στάθμη και σε θέσεις μεγάλου πάχους δεν συνεπάγονται απαραίτητα προβλήματα στεγανότητας της στέγης, αλλά παρουσία υγρασίας από συμπύκνωση.

Μεμονωμένες κηλίδες περιεχόμενης υγρασίας σε μέση στάθμη μπορεί να οφείλονται σε συμπύκνωση λόγω θερμογεφυρών, αλλά και σε υγροσκοπική υγρασία λόγω αποθέσεων υγροσκοπικών αλάτων.

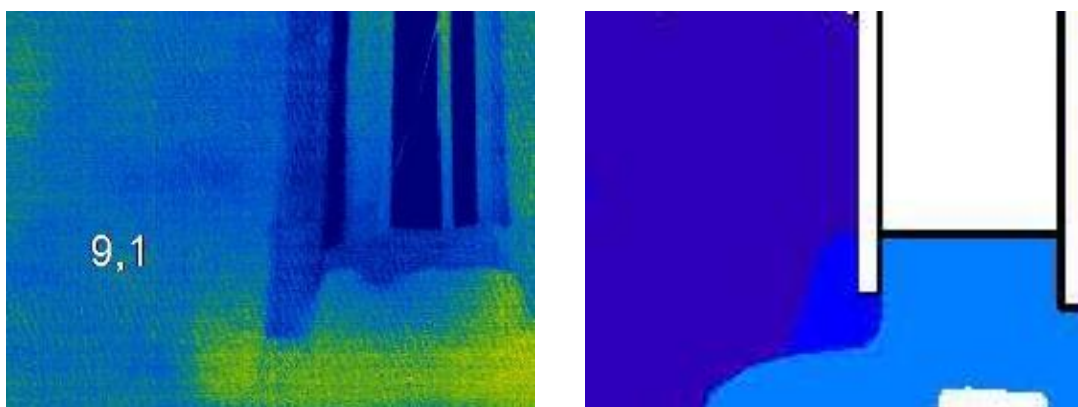
7.6.5. Χαρτογράφηση θερμοκρασίας εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας αναφέρθηκαν ήδη και είναι προφανή. Το πλήθος των εφαρμογών της μεθόδου είναι μεγάλο, όλες όμως οι ενδείξεις πέραν των ίδιων των θερμοκρασιών, πρέπει να αξιολογούνται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους και σε συνδυασμό με τις συνθήκες λήψης. Μια ψυχρή περιοχή που δημιουργεί υπόνοιες υγρασίας θα πρέπει στη συνέχεια να εξετάζεται με όργανα μέτρησης περιεχόμενης υγρασίας. Σε πολλές εφαρμογές τους, και προκειμένου να ερμηνεύονται σωστά, οι θερμοεικόνες είναι αναγκαίο να συνοδεύονται από δεδομένα για τις συνθήκες λήψης, όπως η ώρα, οι συνθήκες ηλιοφάνειας, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ας αναφερθεί ενδεικτικά ότι μια υγρή περιοχή στο εσωτερικό κτηρίου μπορεί να καταγράφεται ως ψυχρότερη από τις γειτονικές της είτε υπό συνθήκες εξάτμισης, είτε σε ψυχρές περιόδους όταν λειτουργεί ως θερμογέφυρα. Εάν η υγρασία της οφείλεται σε αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων είναι δυνατόν να μη διαφοροποιείται θερμοκρασιακά, αφού η τάση ατμών των αλάτινων διαλυμάτων μπορεί να είναι πολύ χαμηλότερη από του νερού και η εξάτμιση εξαιρετικά περιορισμένη. Τέλος, η ίδια υγρή περιοχή μπορεί να εμφανίζεται θερμότερη από τις γύρω της, είτε σε ψυχρές συνθήκες που ακολουθούν

μια θερμή περίοδο, λόγω της αυξημένης θερμοχωρητικότητας του νερού, είτε σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος, λειτουργώντας και πάλι ως θερμογέφυρα.

7.6.6. Συνεκτίμηση δεδομένων διαφορετικών μεθόδων

Ενδεικτικά, θερμοεικόνες ή εικόνες της ορατής παθολογίας είναι σκόπιμο να συγκρίνονται με χάρτες υγρασίας της ίδιας θέσης. Για παράδειγμα, η ψυχρή περιοχή στη θερμοεικόνα 17 οδηγεί στην υπόνοια παρουσίας υγρασίας, η οποία επιβεβαιώνεται με λήψη τιμών περιεχόμενης υγρασίας και χαρτογράφηση της κατανομής της (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2017b). Αντίστοιχα, κατά τη σύγκριση του χάρτη με την παθολογία των τοιχογραφιών, φαίνεται ότι η περιοχή με την έντονη υγρασία συμπίπτει με τους έντονους αποχρωματισμούς της ζωγραφικής επιφάνειας λόγω της δράσης αλάτων (ό.π.).



Εικ. 15: Θερμοεικόνα (αριστερά) και χάρτης κατανομής περιεχόμενης υγρασίας (δεξιά)

7.7. Συμπεράσματα και πρόταση

Από τη συλλογή, επεξεργασία, συνεξέταση και ερμηνεία των παραπάνω δεδομένων εξάγονται συμπεράσματα για τις πηγές και τους τύπους της υγρασίας και διαμορφώνεται η πρόταση για τις αναγκαίες ενέργειες που πρέπει να ακολουθήσουν. Η πρόταση περιλαμβάνει δύο βασικά σκέλη:

Το πρώτο αφορά στην αντιμετώπιση των αιτιών της υγρασίας τα οποία προσδιορίστηκαν κατά τη μελέτη. Η μελέτη και υλοποίηση των τεχνικών λύσεων αποτελεί αποκλειστική αρμοδιότητα εξειδικευμένων μηχανικών. Ο ρόλος του συντηρητή στο σημείο αυτό εξαντλείται στην αξιολόγηση της προτεινόμενης τεχνικής

λύσης όχι ως προς την αντιμετώπιση του αιτίου αλλά υπό το πρίσμα των συνεπειών στη διατήρηση των τοιχογραφιών.

Το δεύτερο σκέλος σχετίζεται με τον έλεγχο του περιβάλλοντος κατά το επόμενο, μεταβατικό στάδιο της ξήρανσης, αλλά και μετά απ' αυτό, κατά τη μακρά περίοδο μετά την εξισορρόπηση. Απόλυτη προϋπόθεση όμως για τον έλεγχο του περιβάλλοντος είναι ο προσδιορισμός του επιθυμητού στόχου. Στο θεμελιώδες αυτό ζήτημα αναφέρεται η ενότητα που ακολουθεί.

7.7.1. Ο προσδιορισμός των επιθυμητών τιμών

Οι διαθέσιμες παθητικές ή ενεργητικές λύσεις για τον έλεγχο του μικροκλίματος είναι πολλές και μπορούν κατά περίπτωση να προσαρμόζονται αξιοποιώντας τις ιδιαιτερότητες κάθε μνημείου. Το κρίσιμο ζητούμενο επομένως δεν είναι τόσο οι τεχνικές λύσεις, όσο ο προσδιορισμός των επιθυμητών επιπέδων τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που θα συμβάλλουν στη διατήρηση του κάθε συγκεκριμένου μνημείου ανακόπτοντας τους μηχανισμούς αλλοίωσης.

Οι προτεινόμενες απαντήσεις στο ερώτημα αυτό κινούνται προς τις εξής τρεις κατευθύνσεις:

- προτάσεις γενικής ισχύος
- προτάσεις εντελώς εστιασμένες στο εκάστοτε συγκεκριμένο μνημείο, που αξιοποιούν υπολογιστικά συστήματα για τον ακριβή υπολογισμό των επιθυμητών τιμών (σύστημα ECOS)
- προτάσεις επίσης εστιασμένες στο εκάστοτε συγκεκριμένο μνημείο, που αποδέχονται όμως ως κατάλληλα μεγαλύτερα εύρη τιμών, με αφετηρία την έννοια του «ιστορικού κλίματος».

Στην πρώτη ομάδα περιλαμβάνονται γενικού χαρακτήρα και ισχύος προτάσεις, ανεξαρτήτως συγκεκριμένων συνθηκών ή ιδιαιτεροτήτων του κάθε μνημείου. Ενδεικτικά, «... το φάσμα της σχετικής υγρασίας στην περίπτωση των τοιχογραφιών είναι 45 - 55% και η θερμοκρασία πρέπει να παρουσιάζει τις τιμές $21 \pm 1,5$ °C» (Λαμπρόπουλος, 2003). Οι διατυπώσεις αυτές είναι χρήσιμες καθώς δίνουν μια πρώτη αίσθηση των επιθυμητών επιπέδων. Είναι κατάλληλες για αποσπασμένες τοιχογραφίες που ενδεχομένως φυλάσσονται ή εκτίθενται στις απολύτως ελεγχόμενες συνθήκες ενός

μουσείου. Η απόπειρα εφαρμογής τους όμως σε μνημεία χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εκάστοτε συγκεκριμένη παθολογία, η παρουσία αλάτων, **ιδίως δε η εκάστοτε συγκεκριμένη φάση της θερμοϋγρομετρικής ιστορίας τους**, μπορεί να καταστεί επικίνδυνη. Για παράδειγμα, η εφαρμογή τέτοιων επιπέδων τιμών κατά την περίοδο ξήρανσης είναι πιθανόν να ευνοήσει την κίνηση του νερού και επομένως την απόθεση των αλάτων προς το εσωτερικό του μνημείου, δηλαδή προς τις τοιχογραφίες. Σε τέτοιες συνθήκες, είναι πιο σκόπιμη η διατήρηση υψηλών τιμών σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό³⁶, προκειμένου να ευνοείται η εξάτμιση από τις εξωτερικές επιφάνειες.

7.7.1.1. Το θερμοδυναμικό μοντέλο του Price

Η **δεύτερη τάση**, σε αντίθεση με την πρώτη, εξετάζει εξαντλητικά το συγκεκριμένο μνημείο και τις ιδιαιτερότητές του, με ιδιαίτερη έμφαση στη δειγματοληψία για τον προσδιορισμό των συγκεκριμένων μιγμάτων διαλυτών αλάτων, στοχεύοντας στον ακριβή προσδιορισμό των επιπέδων τιμών που απαιτούνται για την πρόληψη των φθορών από **άλατα των συγκεκριμένων μιγμάτων**. Βρίσκει την έκφρασή της στην **έκδοση του Price (2000)**³⁷, η οποία αποτελεί την τελική αναφορά στο πλαίσιο των **παραδοτέων του προγράμματος Project ENV4-CT95-0135 (1996-2000)**³⁸.

Η αναφορά συνιστά το αποτέλεσμα μιας σύμβασης που ανατέθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Σκοπός της ήταν η ανάπτυξη ενός θερμοδυναμικού μοντέλου που θα μπορούσε να περιγράψει τη συμπεριφορά υδατικών διαλυμάτων αλάτων σε διάφορα πορώδη υλικά, όπως ο λίθος, οι τοιχογραφίες και τα κεραμικά. Με δεδομένα από την ιοντική ανάλυση των αλάτων, το μοντέλο μπορεί να προβλέψει το συνδυασμό των στερεών που θα υπάρχουν υπό συνθήκες ισορροπίας σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας). Συνδέοντας το αποτέλεσμα με τις πυκνότητες των στερεών, είναι δυνατόν να προβλεφθεί ο συνολικός τους όγκος και έτσι να προβλεφθεί το εύρος τιμών σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας που δεν θα προκαλέσει ξαφνικές μεταβολές όγκου. Διατηρώντας αυτές τις συνθήκες, η φθορά από την ανάπτυξη κρυστάλλων αλάτων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Εξετάζονται υδατικά

³⁶Με διαρκή έλεγχο για την ανάπτυξη βιολογικών παραγόντων αλλοίωσης και συμπτωματική αντιμετώπιση σε περίπτωση εμφάνισής τους.

³⁷ An expert Chemical Model for Determining the Environmental Condition Needed to Prevent Salt Damage in Porous Materials

³⁸Ακολουθεί ελεύθερη απόδοση περικοπών από την παραπάνω έκδοση.

διαλύματα ιόντων των αλάτων που αντιμετωπίζονται συχνότερα στη συντήρηση: Na^+ - K^+ - Mg^{2+} - Ca^{2+} - Cl^- - NO_3^- - SO_4^{2-} - H_2O .

Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι εφικτό να προληφθούν οι φθορές από άλατα με αφαίρεση των επιβλαβών αλάτων. Αυτή η προσέγγιση είναι πιθανότερο να επιτύχει με σχετικά μικρά αντικείμενα τα οποία μπορεί να μεταφερθούν στο εργαστήριο. Ακόμη και σ' αυτήν την περίπτωση όμως μπορεί να μην είναι εφικτή η αφαίρεση των αλάτων χωρίς περαιτέρω επιβάρυνση μιας ήδη εξασθενημένης επιφάνειας ή ενεργοποίηση άλλων μηχανισμών αλλοίωσης, όπως η διαστολή των αργίλων. Σε πολλές άλλες περιπτώσεις όμως η αφαίρεση των αλάτων είναι απολύτως μη προβλέψιμη και η προληπτική συντήρηση μέσω του ελέγχου του περιβάλλοντος αποτελεί τη μόνη βιώσιμη επιλογή.

Η έρευνα που περιγράφεται σ' αυτή την αναφορά βασίζεται στην ευρέως αποδεκτή παραδοχή ότι οι φθορές από κρυστάλλωση και ενυδάτωση οφείλονται στην αντίστοιχη αύξηση του όγκου των κρυστάλλων. Στόχος της έρευνας είναι να προβλέψει των όγκο των κρυστάλλων σε ένα δεδομένο σύστημα υπό δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες και έτσι να προβλέψει «ασφαλείς» συνθήκες υπό τις οποίες θα μπορούσε να ελαχιστοποιηθούν οι αυξήσεις του συνολικού κρυσταλλικού όγκου. Η κατάσταση είναι λίγο πιο σύνθετη αν το άλας μπορεί να υπάρχει σε ένυδρες και άνυδρες μορφές. Αν ένα τέτοιο άλας εκτεθεί σε συνθήκες σταδιακά αυξανόμενης σχετικής υγρασίας, η μετατροπή του σε ένυδρο θα συμβεί σε συγκεκριμένη σχετική υγρασία, με την προσρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας νερού. Δεν θα συμβεί άλλη προσρόφηση, μέχρι η σχετική υγρασία να φτάσει την ισοδύναμη του ένυδρου άλατος. Στο σημείο αυτό το ένυδρο άλας θα αρχίσει να διαλύεται.

Είναι επομένως σαφές τι πρέπει να συμβεί για να αποφευχθεί η φθορά από άλατα. Εάν η σχετική υγρασία διατηρείται σταθερά πάνω ή κάτω από την ισοδύναμη, το άλας θα είναι ή σταθερά στερεό ή σταθερά σε διάλυση. Αντίστοιχα, αν η σχετική υγρασία βρίσκεται σε τιμές εκτός αυτών που αντιστοιχούν στην ένυδρη φάση, δεν θα συμβαίνει ενυδάτωση.

Μακάρι να ήταν τόσο απλό. Η προσβολή από μεμονωμένα άλατα είναι σπάνια, η συνήθης κατάσταση είναι μίγματα αλάτων. Η δε πρόγνωση της συμπεριφοράς μιγμάτων αλάτων είναι πολύ πιο δύσκολη.

Ως προς τους πρακτικούς περιορισμούς του λογισμικού, αυτοί σχετίζονται με την αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων, είτε πρόκειται για δείγματα εξανθήσεων, είτε

από διάτρηση. Ο αριθμός των αναγκαίων δειγμάτων αλάτων προκειμένου το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό είναι ζήτημα στατιστικής φύσης. Προς εξέταση είναι και το πότε, πως και μέχρι πιο βάθος πρέπει να λαμβάνονται τα δείγματα (Price, 2000).

Κατά την αξιολόγηση του παραπάνω μοντέλου μπορεί να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

Αποτελεί πολύ σημαντική συνεισφορά στην κατανόηση των μηχανισμών αλλοίωσης τοιχογραφημένων μνημείων υπό την αλληλεπίδραση διαλυτών αλάτων και περιβαλλοντικών παραμέτρων, ενδεχομένως όμως, σε συνθήκες εφαρμογής, αποτελεί περισσότερο εργαλείο διάγνωσης και ερμηνείας παρά πρόγνωσης και ελέγχου της παθολογίας.

Βασίζεται εξολοκλήρου στον αριθμό και την αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων διαλυτών αλάτων. Τα δείγματα αυτά μπορεί να λαμβάνονται με επιθέματα, με τρόπο δηλαδή μη καταστρεπτικό για το αντικείμενο, στην περίπτωση όμως αυτή η αξία τους σχετικοποιείται. Πραγματικά αξιοποιήσιμα δείγματα είναι αυτά που λαμβάνονται μέσω διάτρησης, με τρόπο δηλαδή καταστρεπτικό, γεγονός που εγείρει ισχυρή επιφύλαξη για την εφαρμογή του μοντέλου σε διατηρητέα μνημεία.

Ως προς την παρατήρηση του Price, ότι η αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων είναι ζήτημα στατιστικής φύσης, θα πρέπει να διατυπωθεί μια επιπλέον επιφύλαξη. Η αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων δεν είναι απλώς στατιστικής φύσης. Ακόμη κι αν ληφθούν όλα τα στατιστικά αναγκαία δείγματα, ή και περισσότερα, οι αναλύσεις τους θα δείξουν ότι στο ίδιο μνημείο, σε διαφορετικές θέσεις, συνυπάρχουν διαφορετικά μίγματα αλάτων, καθένα από τα οποία θα υπαγόρευε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ισχυρό προβληματισμό σε σχέση με τη δυνατότητα μεταφοράς και εφαρμογής του μοντέλου σε συνθήκες πεδίου, εάν δεν τις αποκλείει. Επιπλέον, ας αναφερθεί και ότι, στο ίδιο κτήριο, δεν συνυπάρχουν απλώς διαφορετικά μίγματα αλάτων σε διαφορετικές θέσεις, αλλά και πολλά διαφορετικά μικροκλίματα (σημαντικές διαφοροποιήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας καθ' ύψος ή ανάλογα με τη διαμερισματοποίηση, όπως και διαφορετική θερμοκρασία και περιεχόμενη υγρασία επιφανειών, επίσης ανάλογα με το ύψος ή τον προσανατολισμό). Ο Camuffo (2010) περιγράφει συνθήκες κατά τις οποίες, εντός του ίδιου μνημείου, στην ανώτερη ζώνη συνέβαινε εξάτμιση, ενώ στην κατώτερη συμπύκνωση.

7.7.1.2. Η εισαγωγή της έννοιας του «ιστορικού κλίματος»

Η πιο γενικευμένη τάση είναι η σταδιακή μετάβαση από στόχους ακριβώς προσδιορισμένων τιμών με συντηρητικές αποκλίσεις προς πιο ρεαλιστικές και βασισμένες στην επιστήμη προσεγγίσεις, πιο ανεκτικές στις εποχιακές μεταβολές και σε ευρύτερες βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις (Bratasz, 2013). Σημαντική εξέλιξη των τελευταίων ετών αποτελεί η εισαγωγή στο σχετικό διάλογο της έννοιας του «ιστορικού κλίματος». Ο όρος εισάγεται για να περιγράψει το συγκεκριμένο μικροκλίμα ενός μνημείου στο οποίο τα ακίνητα ή κινητά στοιχεία έχουν προσαρμοστεί μετά τη μακροχρόνια παραμονή τους σ' αυτό, η δε αποδοχή του είναι τόσο ευρεία, που έχει εισαχθεί ακόμη και σε σχετικά πρότυπα, όπως το EN 15757:2010-12³⁹.

Το πρότυπο, στη μορφή του προσχεδίου prEN 15757:2010 αναφέρεται στη διατήρηση οργανικών υλικών και ιδίως ξύλινων, έχει βρει όμως ευρύτατη εφαρμογή και σε μελέτες τοιχογραφημένων μνημείων. Βασικός στόχος της εισαγωγής του όρου, όπως και του προτύπου, είναι να χρησιμεύσει σαν εργαλείο για τον προσδιορισμό του επιθυμητού μικροκλίματος, με εφαρμογή ιδίως σε περιπτώσεις που εξετάζονται ζητήματα επιλογής συστημάτων θέρμανσης μνημείων και μάλιστα ναών⁴⁰. Το σκεπτικό είναι ότι, εφόσον τα διατηρητέα στοιχεία του μνημείου έχουν προσαρμοστεί στο συγκεκριμένο μικροκλίμα και διατηρούνται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση μέχρι σήμερα και, δεδομένου ότι οι μεταβολές είναι δυνατόν, σε βάρος της διατήρησης, να ανατρέψουν την ισορροπία που έχει αποκατασταθεί, ο καθορισμός του στόχου για το επιθυμητό περιβάλλον διατήρησης θα πρέπει να εκκινά από το ιστορικό κλίμα, όπως αυτό θα τεκμηριωθεί μετά από εκτεταμένη και συστηματική παρακολούθηση και καταγραφή, επιδιώκοντας μικρές μόνο μεταβολές που αφορούν στην άρση των ακραίων διακυμάνσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Από το ανωτέρω πρότυπο προκύπτει και η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων για τον καθορισμό του επιθυμητού μικροκλίματος. Το ιστορικό κλίμα μπορεί να αναπαρασταθεί με όρους των τυπικών, συχνότερων επιπέδων και μεταβολών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Όταν προτεραιότητα είναι η σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας,

³⁹ Conservation of cultural property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials.

⁴⁰ Στους σκοπούς εισαγωγής του όρου και του προτύπου περιλαμβάνεται και η μέριμνα για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής, αλλά και για τον περιορισμό του κόστους του ελέγχου του περιβάλλοντος σε βιώσιμα επίπεδα.

επιθυμητός στόχος είναι ο ετήσιος μέσος όρος, όπως προκύπτει μετά από συνεχείς μετρήσεις. Για τον προσδιορισμό του ετήσιου κύκλου της σχετικής υγρασίας υπολογίζεται ένας κινούμενος μέσος όρος (moving average) των προηγούμενων τριάντα ημερών. Το μέγεθος μιας διακύμανσης υπολογίζεται ως η διαφορά εκάστης τιμής σχετικής υγρασίας από την αντίστοιχη, εξομαλυμένη τιμή του κινούμενου μέσου όρου. Τα ανώτερα και κατώτερα όρια του εύρους διακύμανσης που ορίζεται ως στόχος για τις διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας προκύπτουν αφαιρώντας το άνω και κάτω 8%. Το 8° και 92° εκατοστημόριο λαμβάνονται κατατάσσοντας τις διακυμάνσεις κατά το εύρος τους, από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη τιμή και επιλέγοντας ως όριο τις τιμές κάτω από τις οποίες βρίσκεται το 8% και το 92% των παρατηρήσεων αντίστοιχα, Έτσι, το 16%⁴¹ των μεγαλύτερων και πιο επικίνδυνων διακυμάνσεων εξαιρείται (Camuffo, κ.ά., 2010)⁴².

Στο πλαίσιο αυτό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η έννοια της προσαρμογής. Ακόμη και στοιχεία παθολογίας, όπως οι ρωγμές, περιλαμβάνονται στην έννοια της προσαρμογής, με την έννοια ότι, άπαξ και δημιουργήθηκαν, είναι δυνατόν να λειτουργούν ως αρμοί διαστολής, όπου θα εκτονώνονται οι τάσεις των υλικών που προκύπτουν από τις μεταβολές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (Camuffo, κ.ά., 2010)⁴³.

Το ανωτέρω σκεπτικό είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον για πολλούς λόγους, συγχρόνως όμως εγείρει και σημαντικές επιφυλάξεις. Στα θετικά στοιχεία θα πρέπει να περιληφθεί ότι η έννοια του ιστορικού κλίματος και η προτεινόμενη μεθοδολογία θέτουν τα αποδεκτά όρια των διακυμάνσεων αξιοποιώντας μια εύλογη αφετηρία, που είναι το υφιστάμενο μικροκλίμα και ενσωματώνουν την ήδη επικρατούσα αρχή ότι οι μεταβολές στο μικροκλίμα θα πρέπει να είναι μικρής κλίμακας και ήπιες. Συγχρόνως συμβάλλουν στην εμπέδωση της ανάγκης εξισορρόπησης μεταξύ της θερμικής άνεσης των χρηστών των μνημείων και της επίτευξης μικροκλίματος που θα ευνοεί τη διατήρηση. Επίσης,

⁴¹Στην οριστική μορφή του προτύπου (EN 15757:2010-12) τα άνω και κάτω όρια διαμορφώνονται στο 7° και 93° εκατοστημόριο, επομένως εξαιρείται το 14% των ακραίων τιμών.

⁴²Στο πρότυπο αυτό οι Silva και Henriques (2014) εισηγούνται κάποιες προσαρμογές για την εφαρμογή του σε εύκρατα κλίματα, προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο οι βραχυπρόθεσμες, αλλά και οι εποχικές μεταβολές, με την προσθήκη άνω και κάτω ορίων που προκύπτουν όχι από τον κυλιόμενο αλλά από τον ετήσιο μέσο όρο.

⁴³Ελαφρά διαφοροποιημένο σκεπτικό έχει αναπτύξει ο Mickalski. Εκκινώντας με αφετηρία τις μέγιστες διακυμάνσεις του παρελθόντος, υποθέτει ότι, εάν αυτές δεν ξεπεραστούν, οι πιθανότητες για μηχανικές μεταβολές θα είναι εξαιρετικά χαμηλές (Entradas Silva & Henriques, 2014) (Michalski, 2007).

παρέχουν επιτέλους έναν οδηγό, μια γενική κατευθυντήρια γραμμή, η οποία ασφαλώς θα προσαρμόζεται στις ιδιαιτερότητες κάθε μνημείου, αφού η αφετηρία θα είναι το μικροκλίμα του, αλλά θα έχει και μια γενική ισχύ. Διότι πρέπει να σημειωθεί ότι σε επίπεδο εφαρμογής, οι συντηρητές πελαγοδρομούν μεταξύ, αφενός κάποιων θεωρητικών και υποτιθέμενα ιδανικών τιμών διατήρησης, οι οποίες μπορεί να είναι εφικτές μόνο σε μουσειακούς χώρους και όχι σε μνημεία και, αφετέρου, μιας ασαφούς και απροσδιόριστης έννοιας της «κατά περίπτωση αντιμετώπισης» που πράγματι αποτελεί αναπόδραστη αρχή προσέγγισης των μνημείων, αλλά συμβάλλει στη δημιουργία μιας γενικής σύγχυσης και μιας αίσθησης απουσίας κατεύθυνσης.

Ως προς τις επιφυλάξεις, πέρα απ' αυτές που σχετίζονται με την λιγότερο ή περισσότερο επιτυχημένη επιλογή του όρου «ιστορικό κλίμα», αφού ο προσδιορισμός του προκύπτει κυρίως από τη μελέτη και καταγραφή του τρέχοντος ή του πρόσφατου μικροκλίματος, θα πρέπει να σημειωθούν και οι πιο κάτω προβληματισμοί.

Πρώτον, το γεγονός ότι το πρότυπο συντάχθηκε αρχικά για οργανικά υλικά και ιδιαίτερα για ξύλο. Δεύτερον, ότι η εφαρμογή του φαίνεται να έχει νόημα σε μνημεία που βρίσκονται σε ισορροπία. Πρέπει όμως να ειπωθεί ότι, στην περίπτωση των τοιχογραφημένων μνημείων επί των οποίων καλείται να επέμβει ένας συντηρητής, η υπόθεση της προσαρμογής των τοιχογραφιών στο συγκεκριμένο μικροκλίμα είναι συνήθως αναντίστοιχη με την πραγματικότητα. Ο συντηρητής κατά κανόνα καλείται να αντιμετωπίσει μνημεία των οποίων οι φθορές είναι ενεργές και σε εξέλιξη, ενώ σε πλήθος περιπτώσεων σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες διατήρησης. Κατ' αυτήν την έννοια είναι υπό εξέταση εάν το ιστορικό κλίμα όπως ορίστηκε, έστω και ελαφρώς βελτιωμένο, μπορεί να αποτελέσει ασφαλή αφετηρία για τον προσδιορισμό του επιθυμητού μικροκλίματος. Η σκέψη αυτή φαίνεται να ισχύει ακόμη περισσότερο στην περίπτωση κατά την οποία ο συντηρητής έρχεται να διαχειριστεί ακριβώς μια περίοδο μεταβολών σαν αυτές που προκύπτουν μετά από εργασίες αντιμετώπισης των διαφόρων τύπων υγρασίας, την περίοδο ξήρανσης.

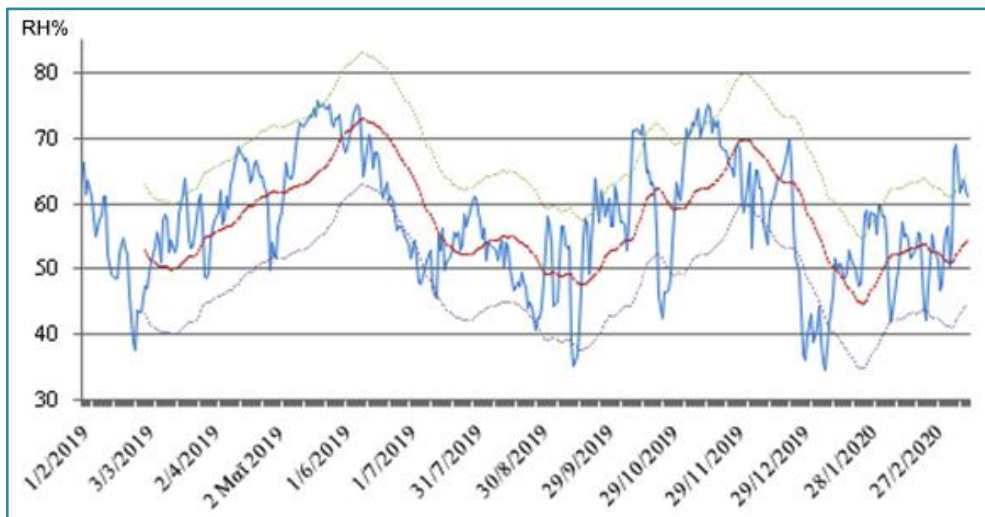
Επιπλέον, τα τοιχογραφημένα μνημεία αποτελούν εξαιρετικά πολυσύνθετα περιβάλλοντα. Εντός του ίδιου μνημείου, καταγράφονται σημαντικές διαφοροποιήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας ανάλογα με το ύψος, ανάλογα με τη διαμερισματοποίηση του χώρου, κ.ά. παραμέτρους. Καταγράφονται διαφοροποιήσεις της περιεχόμενης υγρασίας ανάλογα με τη θέση, το ύψος ή το βάθος στην τοιχοποιία, καθώς και διαφορετικού τύπου, συγκέντρωσης και ανάμειξης μίγματα διαλυτών αλάτων, τα οποία κρυσταλλώνονται ή ενυδατώνονται σε διαφορετικές συνθήκες

σχετικής υγρασίας. Οι πολυπαραγοντικές και διαρκώς μεταβλητές αυτές συνθήκες καθιστούν αναγκαία στον απόλυτο βαθμό την «κατά περίπτωση» διαχείριση, όχι απλώς για κάθε διαφορετικό μνημείο, αλλά για κάθε διαφορετικό τύπο αλλοίωσης σε κάθε διαφορετική θέση κάθε διαφορετικού χώρου του κάθε μνημείου, όπου το ιδανικό μικροκλίμα για μια θέση μπορεί να αποτελεί παράγοντα αλλοίωσης για μια άλλη. Υπό το πρίσμα αυτό, η έννοια του ιστορικού κλίματος συμβάλλει εξίσου στη θεραπεία και τη διατήρηση του μνημείου, όσο και στη θεραπεία της αμχανίας του συντηρητή απέναντι στην πολυσύνθετη και συχνά μη διαχειρίσιμη πραγματικότητα ενός μνημείου, ακόμη δε και απέναντι στο χάσμα θεωρίας και πράξης.

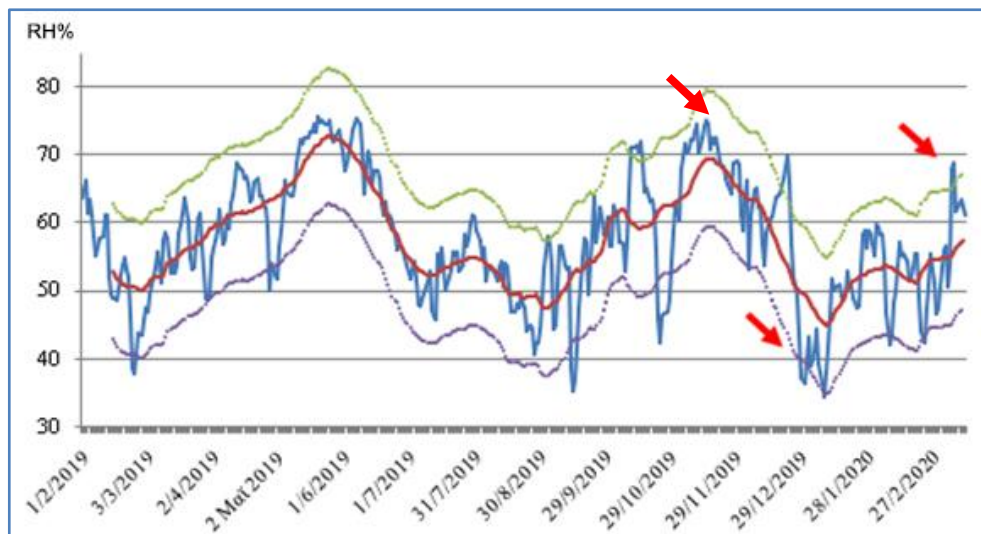
Τέλος, ως προς τον τρόπο προσδιορισμού του επιθυμητού εύρους των διακυμάνσεων με βάση τον κυλιόμενο μέσο όρο των προηγούμενων τριάντα ημερών που προκύπτει ως σύσταση από το προσχέδιο του προτύπου prEN 15757:2010, πρέπει να γίνει η εξής επισήμανση: Η εξομάλυνση των καμπυλών είναι οπωσδήποτε αναγκαία, και το εργαλείο του κυλιόμενου μέσου όρου ευρύτατα αποδεκτό. Η επιλογή όμως των προηγούμενων τριάντα ημερών για τον υπολογισμό του κυλιόμενου μέσου όρου μετακινεί σημαντικά χρονικά την καμπύλη του και, συνεπεία αυτού, οδηγεί σε σύγκριση των πραγματικών ημερήσιων διακυμάνσεων με κινούμενους μέσους όρους διαφορετικής χρονικής περιόδου. Η παραγωγή κυλιόμενου μέσου όρου αποκλειστικά από προηγούμενο διάστημα φαίνεται ακατάλληλη για χρονοσειρές, τα δεδομένα των οποίων επηρεάζονται από την εποχικότητα. Ενδεικτικά, οι διακυμάνσεις της 1^{ης} Αυγούστου συγκρίνονται με ένα μέσο όρο που θα αφορούσε μάλλον την 15^η Ιουλίου. Έτσι, οι περιοχές των διακυμάνσεων που υπερβαίνουν τα αποδεκτά όρια προκύπτουν πλασματικά περισσότερες. Είναι πιθανό ότι η επιλογή των προηγούμενων και επόμενων δεκαπέντε ημερών για τον προσδιορισμό του κυλιόμενου μέσου όρου της ημέρας αναφοράς θα ήταν πιο εύστοχη. Τα γραφήματα που ακολουθούν είναι ενδεικτικά. Στο γράφημα 11, η καμπύλη του ΚΜΟ των προηγούμενων 30 ημερών (κόκκινη) μετατοπίζεται εμφανώς προς τα δεξιά, ενώ η καμπύλη των 15 προηγούμενων και 15 επόμενων ημερών (πράσινη), ενώ εξακολουθεί να εξομαλύνει, ακολουθεί με μεγαλύτερη συνέπεια την καμπύλη των ημερήσιων μέσων όρων. Στα γραφήματα 12 και 13 παρουσιάζονται τα αποδεκτά όρια των ημερήσιων αποκλίσεων με βάση τους δύο τρόπους υπολογισμού. Είναι προφανές ότι στο διάγραμμα 13 περιλαμβάνονται στην περιοχή του αποδεκτού διακυμάνσεις των ημερήσιων μέσων όρων (κόκκινα βέλη) που το μοντέλο υπολογισμού του σχήματος 12 αποκλείει. Αντίθετα, όσες αποκλείονται στο γράφημα 13, προκύπτουν από σύγκριση με όντως συγκρίσιμα μεγέθη.



Γράφημα 11: Οι δύο τρόποι υπολογισμού του κυλιόμενου μέσου όρου. Γαλάζια καμπύλη: οι ημερήσιοι μέσοι όροι. Κόκκινη καμπύλη: ΚΜΟ των προηγούμενων 30 ημερών. Πράσινη καμπύλη: ΚΜΟ των 15 προηγούμενων και 15 επόμενων ημερών.



Γράφημα 12: Υπολογισμός των ορίων των αποδεκτών ημερήσιων αποκλίσεων με βάση τον ΚΜΟ των προηγούμενων τριάντα ημερών. Γαλάζια καμπύλη: Οι ημερήσιοι μέσοι όροι. Κόκκινη στικτή καμπύλη: Ο ΚΜΟ των προηγούμενων 30 ημερών. Άνω και κάτω στικτή καμπύλη: τα αποδεκτά όρια των διακυμάνσεων υπολογισμένων με βάση τον ΚΜΟ των προηγούμενων τριάντα ημερών.



Γράφημα 13: Υπολογισμός των ορίων των αποδεκτών ημερήσιων αποκλίσεων με βάση τον ΚΜΟ των προηγούμενων και επόμενων δεκαπέντε ημερών.

Η ανωμαλία αυτή έγινε προφανώς αντιληπτή και στην τρέχουσα μορφή του προτύπου (EN 15757:2010-12) έχει θεραπευτεί, με σύσταση για υπολογισμό του κεντρικού κινούμενου μέσου όρου των προηγούμενων και επόμενων 15 ημερών, εν τω μεταξύ όμως έχει παρερμηνήσει ακόμη και σε αξιόλογες εργασίες.

8. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

8.1. Εισαγωγή - γενικές αρχές προσέγγισης τοιχογραφημένων μνημείων

Δεδομένης της καταστρεπτικής επιρροής του νερού σε υγρή μορφή στα τοιχογραφημένα μνημεία, λόγω της κινητοποίησης και μεταφοράς των διαλυτών αλάτων, καθίσταται προφανές ότι πρώτο και καθοριστικό βήμα στη διαδικασία διαχείρισης της υγρασίας αποτελούν οι επεμβάσεις για τον περιορισμό ή και την εξάλειψη των διαφόρων τύπων υγρασίας σε υγρή μορφή.

Επόμενο βήμα αποτελεί ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό των μνημείων, για την αντιμετώπιση φαινομένων κρυστάλλωσης και ενυδάτωσης αλάτων, υγροσκοπικής υγρασίας και συμπύκνωσης. Λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας στις διαδικασίες εξάτμισης, της άμεσης σχέσης της με τη σχετική υγρασία και της επιρροής της στους κύκλους των αλάτων, στις διαδικασίες ελέγχου της υγρασίας εμπλέκονται και ενέργειες ελέγχου της θερμοκρασίας. Των επεμβάσεων ασφαλώς θα πρέπει να προηγείται συστηματική μελέτη για τον ασφαλή προσδιορισμό τόσο των πηγών και των τύπων της υγρασίας, όσο και του επιθυμητού μικροκλίματος, με τις επιφυλάξεις που διατυπώθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Ακόμη και τότε όμως, οι τεχνικές λύσεις που θα υλοποιηθούν θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την ιδιαιτερότητα του αντικειμένου και τις βασικές αρχές προσέγγισης των μνημείων, όπως προκύπτουν από τις διεθνείς χάρτες και συμβάσεις, τη συνταγματική επιταγή για την πλήρη και αποτελεσματική προστασία του δημόσιου πολιτιστικού αγαθού και τη σχετική νομοθεσία⁴⁴.

Στο δίλημμα περί ενεργητικών ή παθητικών μεθόδων ελέγχου, θέση των συντακτών της εργασίας είναι ότι ελάχιστονες, ήπιες παρεμβάσεις επί του κτηρίου και του άμεσου περιβάλλοντός του συνάδουν περισσότερο τόσο με το διατηρητέο χαρακτήρα των μνημείων, όσο και με τις αρχές προσέγγισής τους. Δεδομένων μάλιστα των εξαιρετικών βιοκλιματικών χαρακτηριστικών των διατηρητέων κτηρίων και του σχετικά ήπιου ελληνικού κλίματος, είναι πιθανό ότι ο παθητικός έλεγχος μπορεί σε μεγάλο βαθμό να

⁴⁴Η εμπέδωση τόσο της αντίληψης της ιδιαιτερότητας των μνημείων, όσο και των αρχών δεοντολογίας που πρέπει να διέπουν τις επεμβάσεις, είναι δυνατόν να επιτευχθούν κυρίως στο πλαίσιο των προπτυχιακών σπουδών.

καλύψει τις ανάγκες τόσο της διατήρησης, όσο και της θερμικής άνεσης των χρηστών, όντας μάλιστα και περιβαλλοντικά φιλικότερος.

Παρόμοιο σκεπτικό συναντάται στο Fabbri κ.α. (2019): «...έγινε δυνατόν να επαληθευτούν οι συνέπειες ενεργειών ελάχιστης έκτασης, όπως το άνοιγμα ενός παραθύρου ή η στέγαση μιας ανοιχτής αυλής. Αυτές οι διαχειριστικού και αρχιτεκτονικού χαρακτήρα παρεμβάσεις έχουν σημαντική επίδραση στο μικροκλίμα του εσωτερικού των κτηρίων και μπορούν να βελτιώσουν την κατάσταση διατήρησής του, ενίοτε σε τέτοια έκταση που καθιστούν περιττές ενέργειες αποκατάστασης πολύ πιο ακριβές και επεμβατικές».

Σε περιπτώσεις τοπικών κλιμάτων λιγότερο ήπιων, είναι δυνατόν να εφαρμοστούν μετά από μελέτη τεχνικές λύσεις που να βελτιώνουν τη θερμική άνεση των χρηστών των μνημείων, διαταράσσοντας σε ελάχιστο βαθμό το μικροκλίμα τους, όπως εξειδικευμένες κατασκευές με χρήση πομπών υπέρυθρης ακτινοβολίας (Camuffo, κ.ά., 2010).

Όταν η χρήση ενεργητικών μεθόδων είναι αναγκαία, είναι σημαντικό να καταστεί συνείδηση των χρηστών ότι η ήπια, συνεχής λειτουργία των συστημάτων συμβάλλει σημαντικά στη διατήρηση σταθερού μικροκλίματος, ενώ είναι και σημαντικά οικονομικότερη από την έντονη και διακοπτόμενη.

Ο διατηρητέος χαρακτήρας των μνημείων επομένως, αποκλείει ένα σύνολο τεχνικών λύσεων για την αντιμετώπιση της υγρασίας, οι οποίες θα ήταν ικανοποιητικές για κοινά κτήρια. Ας προστεθεί ότι το πεδίο της αντιμετώπισης της υγρασίας σε τοιχογραφημένα μνημεία είναι κατ' εξοχήν **διεπιστημονικό**, απαιτεί δε κατ' ελάχιστον τη συνεργασία **εξειδικευμένου μηχανικού** για τις παρεμβάσεις στο κέλυφος και τον περιβάλλοντα χώρο, και **εξειδικευμένου συντηρητή**, για την αρχική μελέτη των πηγών, μορφών και αιτίων υγρασίας, τον προσδιορισμό των επιθυμητών περιβαλλοντικών παραμέτρων διατήρησης σε κάθε στάδιο και την πραγματοποίηση επεμβάσεων κατά τη διάρκεια της περιόδου ξήρανσης.

Οι θεμελιώδεις αρχές που θα πρέπει να διέπουν τις επεμβάσεις αντιμετώπισης της υγρασίας σε μνημεία είναι:

- **Η αρχή της ελάχιστης επέμβασης:** Μεταξύ δύο ισοδύναμων λύσεων, προτιμητέα είναι εκείνη που παρεμβαίνει λιγότερο στην υλική και αισθητική ακεραιότητα του κτηρίου. Αντίστροφα, μια λύση που αλλοιώνει σημαντικά το αρχιτεκτόνημα, ακόμη κι αν είναι αποτελεσματική, θα πρέπει να αποφευχθεί.

- **Η αρχή της συμβατότητας και αντιστρεψιμότητας** των υλικών και των μεθόδων: Ως συμβατή μπορεί να ορίζεται η επέμβαση που δεν θίγει καμία από τις αξίες που αναγνωρίζονται στο διατηρητέο μνημείο, μεταξύ άλλων τεχνολογική, ιστορική ή αισθητική. Η αρχή της αντιστρεψιμότητας των υλικών και των μεθόδων αναφέρεται στη δυνατότητα της αφαίρεσης της παρέμβασης χωρίς να θιγεί η ακεραιότητα του μνημείου⁴⁵.

Οι αρχές αυτές έχουν κανονιστικό χαρακτήρα, αφού περιλαμβάνονται σε διεθνείς συμβάσεις για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς. Αντίστοιχο κανονιστικό χαρακτήρα θα πρέπει να προσλάβει και η πρακτική του **ελέγχου της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων και των πιθανών συνεπειών τους**, ιδίως υπό την έννοια της ανατροπής των λεπτών περιβαλλοντικών ισορροπιών στο μικροκλίμα των μνημείων.

Με την εξαίρεση επεμβάσεων στατικού χαρακτήρα, καθώς και την αντιμετώπιση προφανών θέσεων εισόδου νερού, όπως κατεστραμμένες στέγες, θα ήταν σκόπιμο οι επεμβάσεις ελέγχου της υγρασίας, της θερμοκρασίας και των ρευμάτων να εκτελούνται κατά στάδια, ώστε αφ' ενός να αξιολογείται η αποτελεσματικότητά τους, και αφ' ετέρου οι πιθανές μεταβολές να συσχετίζονται κατά τρόπο ασφαλή με γνωστή αιτία.

Καλή πρακτική επίσης αποτελεί η αξιοποίηση των ιδιαίτερων κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των μνημείων. Ο (Αραβαντινός, 2001) αναφέρει ως παράδειγμα την αξιοποίηση των υπόκαυστων των βυζαντινών ή οθωμανικών λουτρών για την αντιμετώπιση της υγρασίας εδάφους. Άλλο παράδειγμα αποτελεί η αξιοποίηση του διαστήματος μεταξύ στέγης και ψευδοροφής για την τοποθέτηση θερμομονωτικών υλικών σε ξυλόστεγες κατασκευές.

Στην ενότητα που ακολουθεί γίνεται αναφορά σε κάποιες συνήθεις μεθόδους αντιμετώπισης της υγρασίας, οργανωμένες ανάλογα με την υγρή ή αέρια μορφή της.

Όπου είναι δυνατό, γίνονται σύντομες παρατηρήσεις γύρω από την καταλληλότητα της μεθόδου για εφαρμογή σε τοιχογραφημένα μνημεία, τόσο τεχνικά, όσο και από την άποψη των γενικών αρχών που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

⁴⁵Αν και το αίτημα παραμένει ισχυρό, βρίσκει ευκολότερα εφαρμογή σε υλικά και επεμβάσεις στην επιφάνεια των κτηρίων. Στις περιπτώσεις επεμβάσεων που αφορούν στη δομή, όπως ενδεικτικά τα ενέματα, η τήρηση της αρχής δεν είναι εφικτή.

8.2. Μέθοδοι αντιμετώπισης των αιτίων και καταλληλότητα τεχνικών λύσεων

8.2.1. Υγρασία σε υγρή μορφή

8.2.1.1. Βροχή

Πρώτη και αυτονόητη ενέργεια αντιμετώπισης της υγρασίας από βροχή είναι η εξυγίανση των στεγών. Μικρή προέκταση της κεράμωσης, εφόσον συνάδει προς τον αρχιτεκτονικό τύπο και δεν αλλοιώνει τη γενική όψη του αρχιτεκτονικού συνόλου μπορεί να προστατεύσει σημαντικά από την κατευθυνόμενη βροχή. Τα κλιματολογικά δεδομένα της κάθε περιοχής πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την επιλογή των υλικών κεράμωσης, ιδίως αν καταγράφεται παγετός.



Εικ. 16: Θραύση κεραμιδιών από παγετό (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2016)

Εξαιρετικά κρίσιμο είναι και το θέμα της παροχέτευσης και απαγωγής των ομβρίων από τη στέγη, μέσω υδρορροών, με την επιφύλαξη και πάλι της οπτικής αλλοίωσης της όψης του μνημείου.

Εξίσου σημαντική είναι η εξυγίανση ελαττωματικών αρμών και διαμόρφωση κατάλληλων ρύσεων σε επίπεδες επιφάνειες, όπως τα περβάζια των παραθύρων.

Για την περίπτωση του νερού της βροχής που «γλύφει» στην κάτω πλευρά των προεξόντων κεραμιδιών καταλήγοντας στον τοίχο, ιδιαίτερα αποτελεσματική αποδεικνύεται η υδροφοβίωση της πλευράς αυτής. Το νερό, χωρίς πρόσφυση πλέον στο υδρόφοβο κεραμίδι, πέφτει κατευθείαν στη γη αντί να ρέει στον τοίχο.

Για το νερό από αναπήδηση της βροχής, μια μικρή κλίση του εδάφους προς την αντίθετη από τον τοίχο κατεύθυνση, καθοδηγεί μεγάλο μέρος των σταγονιδίων και των ρύπων που μεταφέρουν μακριά από την τοιχοποιία.

Συνήθης κακή πρακτική είναι η βαφή των επιχρισμένων εξωτερικά μνημείων, ή η εφαρμογή μη διαπνεόντων υλικών σε εξωτερικές τοιχοποιίες. Αφενός δεν παρέχουν κάποια προστασία, αφού σε υγιείς τοιχοποιίες το νερό δεν διεισδύει παρά ελάχιστα και στεγνώνει αμέσως. Αφ' ετέρου, δεν επιτρέπουν την εξάτμιση της υγρασίας που περιέχεται στον τοίχο προς τα έξω και μειώνουν την επιφάνεια εξάτμισης, με αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης της ανερχόμενης υγρασίας, καθώς και την αύξηση της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό.

Ως ενδιάμεση λύση έχει προταθεί και εφαρμόζεται ευρέως η χρήση ατμοδιαπερατών υλικών υδροφοβίωσης, όπως προϊόντων νανοपुरιτίου. Πρόκειται για υλικά με εξαιρετικές ιδιότητες για εφαρμογή σε σύγχρονα κτήρια, τα οποία όμως είναι επίσης ακατάλληλα για εφαρμογή σε τοιχογραφημένα μνημεία με περιεχόμενη υγρασία στις τοιχοποιίες. Και αυτά τα υλικά, αν και επιτρέπουν σε κάποιο βαθμό την κίνηση νερού σε εξατμισμένη μορφή προς τα έξω, επιβραδύνουν την προς τα έξω κίνηση, ευνοούν την κίνηση προς το εσωτερικό, ενώ με βεβαιότητα καθιστούν υποχρεωτική την απόθεση των διαλυτών αλάτων εντός της δομής της τοιχοποιίας, και όχι στην εξωτερική επιφάνεια, απ' όπου εύκολα θα μπορούσαν να απομακρυνθούν.

Για την τεκμηρίωση της λειτουργίας τους κατασκευάστηκαν τρία δοκίμια από ασβεστοκονίαμα. Η οπίσθια επιφάνεια του ενός έμεινε ανεπεξέργαστη. Στο δεύτερο εφαρμόστηκε μη διαπερατή ακρυλική ρητίνη, ενώ στο τρίτο ένα διαπνεόν προϊόν νανοपुरιτίου. Η βάση των δοκιμών βυθίστηκε σε κορεσμένο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου, ενώ στην «οπίσθια» όψη των δοκιμών εφαρμοζόταν περιοδικά ρεύμα αέρα, για την υποτυπώδη προσομοίωση συνθηκών εξωτερικής παρειάς τοιχοποιίας.

Όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν, το μη επεξεργασμένο δοκίμιο επέτρεψε την κίνηση νερού και την απόθεση μεγάλης ποσότητας αλάτων στην οπίσθια, «εξωτερική» του επιφάνεια. Τα δύο επεξεργασμένα δοκίμια, ανεξάρτητα από την ατμοδιαπερατότητα ή μη του υλικού που εφαρμόστηκε, λειτούργησαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, αποτρέποντας την απόθεση αλάτων στην οπίσθια, «εξωτερική» όψη. Τα άλατα που δεν κινήθηκαν προς τα έξω, υποχρεωτικά αποτέθηκαν στη δομή ή την «εσωτερική», «γραπτή» επιφάνεια των δοκιμίων.



Εικ. 17: Από αριστερά προς τα δεξιά: Ατμοδιαπερατό υλικό υδροφοβίωσης, μη διαπερατή ακρυλική ρητίνη και μη επεξεργασμένο δοκίμιο

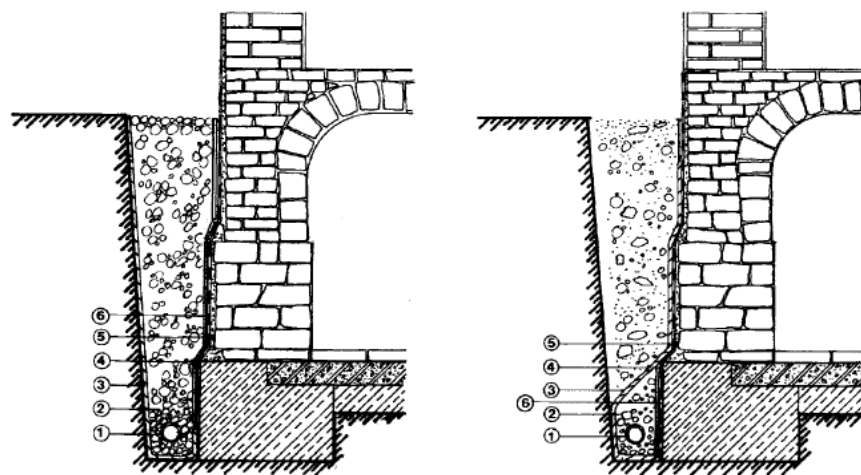
8.2.1.2. Ανερχόμενη υγρασία από επιφανειακά νερά και πλευρική διείσδυση

Η υγρασία που κινείται ανοδικά στις τοιχοποιίες προερχόμενη από επιφανειακά νερά, ιδίως από όμβρια ή το λιώσιμο χιονιού ή και από διαρροές δικτύων και κακές πρακτικές, όπως παρτέρια σε επαφή με τους τοίχους, διεισδύει κατ' αρχήν στον τοίχο πλευρικά, με οριζόντια τριχοειδή κίνηση, και στη συνέχεια κινείται βαρυτικά προς τα κάτω. Όταν το κάτω τμήμα της τοιχοποιίας κορεσθεί, ξεκινά και ανερχόμενη τριχοειδής κίνηση.

Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες υπάρχει διαφορά στάθμης του εξωτερικού εδάφους από το εσωτερικό δάπεδο, ιδίως εάν η επίκωση είναι μεταγενέστερη της κατασκευής, δόκιμη λύση αποτελεί η απομάκρυνση της επίκωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζεται το αίτιο και συγχρόνως αυξάνεται η επιφάνεια εξάτμισης. Τέτοιες λύσεις θα πρέπει προηγουμένως να εξετάζονται από εξειδικευμένο μηχανικό, καθώς ενέχουν τον κίνδυνο της διατάραξης της στατικής ισορροπίας του κτηρίου.

Η διαμόρφωση ρύσεων στον περιβάλλοντα χώρο, οι οποίες, μέσω κατάλληλων δικτύων απογωγής θα απομακρύνουν τα όμβρια από το μνημείο αποτελούν επίσης προφανή λύση.

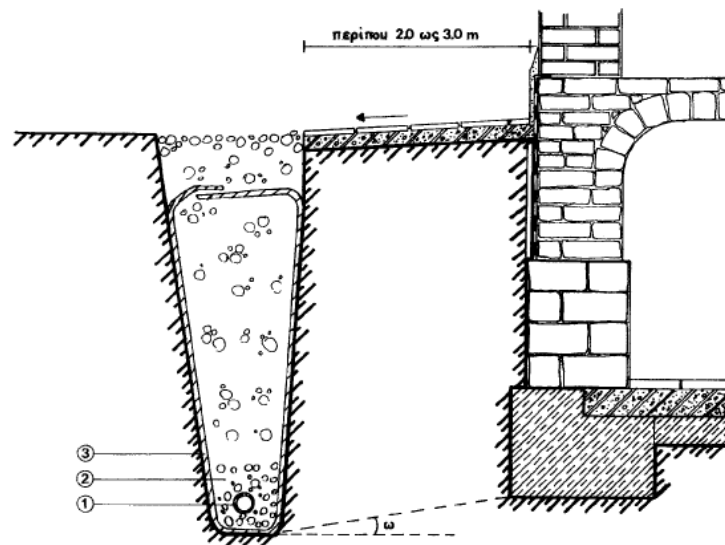
Πολύ συνηθισμένη, αλλά δυστυχώς ακατάλληλη πρακτική για μνημεία, είναι η πλευρική στεγάνωση των τοικοποιιών στη στάθμη κάτω από το έδαφος, και η κατασκευή τάφρου αποστράγγισης, τεχνική η οποία επίσης προϋποθέτει πλευρική στεγάνωση. Κατά τον Αραβαντινό (2004), η πλευρική στεγανωτική στρώση δεν παρεμποδίζει μόνο τη διείσδυση του νερού, αλλά και την - περιορισμένη, έστω - εκτόνωση, με αποτέλεσμα την άνοδο της υγρασίας σε ανώτερα επίπεδα.



- 1 Διάτρητος συλλεκτήριος αγωγός των νερών $\varnothing 100\text{mm}$
- 2 Χαλίκια ως στρώση διήθησης
- 3 Προστατευτικό φίλτρο διύλισης
- 4 Διπλή στεγανωτική στρώση
- 5 Επίχρισμα εξομάλυνσης
- 6 Στρώση προστατευτική τής στεγάνωσης

Σχήμα 5: Τάφροι αποστράγγισης σε επαφή με την τοικοποιία (Αραβαντινός, 2004)

Η λύση της τάφρου αποστράγγισης σε κάποια απόσταση από την τοικοποιία είναι προτιμότερη από τις προηγούμενες, καθώς δεν στεγανοποιεί την παρειά της τοικοποιίας, και είναι λιγότερο πιθανό να δημιουργήσει στατικά ζητήματα.



Κλίση (κατά [26]): $\omega \leq 15\%$ για λεπτά αμμώδη εδάφη
 $\omega \leq 32\%$ για αργιλώδη εδάφη

Σχήμα 6: Τάφρος αποστράγγισης σε απόσταση από την τοικοποιία (Αραβαντινός, 2004)

Καλύτερη λύση αποτελεί η διάνοιξη μια περιμετρικής τάφρου εξαερισμού (όχι αποστραγγιστικής) με υδρατμοδιαπερατά τοιχώματα που επιτρέπουν την πλευρική αναπνοή του τοίχου. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται διπλός στόχος: αφενός αυξάνεται η επιφάνεια εξάτμισης με την απελευθέρωση των πλευρικών τοιχωμάτων από τα χώματα και αφετέρου διακόπτεται η ενδεχόμενη πλευρική διείσδυση της υγρασίας.

Ιδιαίτερα ενδεδειγμένη είναι και η διάνοιξη τάφρου που θα συνδυάζει χαρακτηριστικά αποστράγγισης και εξαερισμού, όπως αυτή που υλοποιήθηκε στη μελέτη περίπτωσης. Συνδυάζει απομάκρυνση των ομβρίων με ταυτόχρονη αύξηση της επιφάνειας εξάτμισης και επιτάχυνση της ξήρανσης από την εξωτερική πλευρά της τοικοποιίας, χάρη στην πρόκληση ελεγχόμενων ρευμάτων. Και στις περιπτώσεις των τάφρων, ο έλεγχος της πρότασης από εξειδικευμένο και έμπειρο στατικό αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση.

8.2.1.3. Υγρασία ανερχόμενη από τον υδροφόρο ορίζοντα

Αποτελεί τον τύπο υγρασίας που είναι ο δυσκολότερα διαχειρίσιμος, αλλά και που όλο και συχνότερα θα αντιμετωπίζουν οι ειδικοί σε μνημεία που θα επηρεαστούν από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

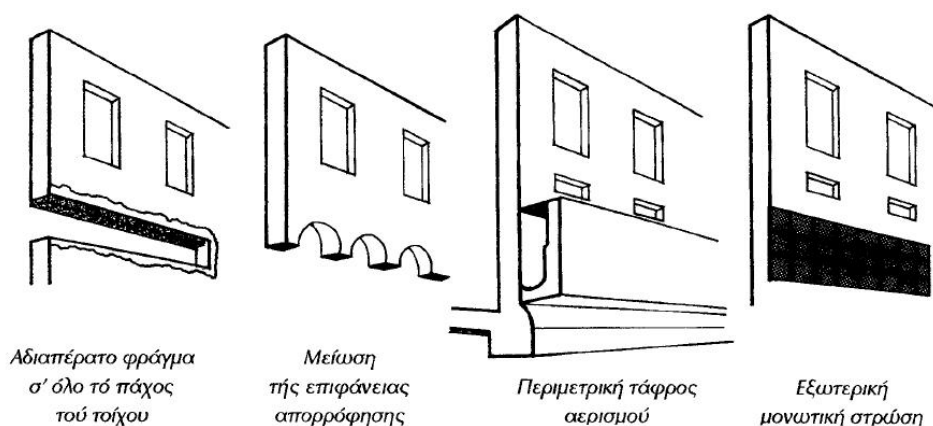
Η πλέον ατελέσφορη και επιβλαβής πρακτική είναι η πλευρική στεγάνωση, αφού όχι απλώς δεν αντιμετωπίζει το αίτιο (το νερό έρχεται από κάτω και όχι πλευρικά) αλλά

και μειώνει την επιφάνεια εξάτμισης. Η πρακτική αυτή δυστυχώς δεν είναι σπάνια και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις άγνοιας ή εσφαλμένης εκτίμησης του αιτίου.

Κακή πρακτική αποτελεί και η χρήση μη διαπερατών υλικών στις κατώτερες ζώνες των τοίχων και τα δάπεδα (πλακάκια, μάρμαρα), αφού έτσι μειώνεται η επιφάνεια εξάτμισης και η ανερχόμενη υγρασία ωθείται σε υψηλότερες στάθμες, προσβάλλοντας νέες περιοχές.

Ο G. Massari προτείνει εργασίες που στόχο έχουν να προστατέψουν το ίδιο το κτίριο από την υγρασία, παρεμποδίζοντας την άνοδο της υγρασίας μέσα στα δομικά στοιχεία του (Αραβαντινός, 2004). Αυτές είναι:

- Τοποθέτηση αδιαπέραστου φράγματος σ' όλο το πάχος του τοίχου.
- Μείωση της επιφάνειας απορρόφησης.
- Κατασκευή αποστραγγιστικής τάφρου και
- Τοποθέτηση εξωτερικής μονωτικής στρώσης (αφορά μόνο σε περιπτώσεις πλευρικής υγρασίας)



Σχήμα 7: Εργασίες προστασίας του κτηρίου από την υγρασία (Αραβαντινός, 2004)

Οι δύο τελευταίες λύσεις έχουν ήδη σχολιαστεί. Η εξωτερική μονωτική στρώση αποκλείεται στις περιπτώσεις υγρασίας ανερχόμενης από τον υδροφόρο ορίζοντα. Αντίστοιχα, η τάφρος εξαερισμού αποτελεί δόκιμη λύση για υγρασία από πλευρική διείσδυση, αλλά στις περιπτώσεις υγρασίας ανερχόμενης από τον υδροφόρο ορίζοντα στην καλύτερη περίπτωση θα μειώσει κατά τι τη στάθμη της ανόδου.

Για τη δεύτερη λύση, τη μείωση της επιφάνειας απορρόφησης, η Pender (2014) παρατηρεί ότι προδίδει σύγχυση μεταξύ του μεταβατικού σταδίου και της τελικής κατάστασης ισορροπίας, αφού για παράδειγμα η αποκοπή τμήματος του τοίχου ασφαλώς θα επιβραδύνει την άνοδο της υγρασίας, αλλά, εφόσον η παροχή του νερού παραμείνει σταθερή, το τελικό ύψος της τριχοειδούς αναρρίχησης θα παραμείνει το ίδιο.

Περαιτέρω, τόσο η λύση της μείωσης της επιφάνειας απορρόφησης, όσο και η πρώτη, του αδιαπέραστου φράγματος, αν και τεχνικά είναι εντυπωσιακές, είναι συγχρόνως αντιπροσωπευτικές της ελευθερίας και της έντασης των επεμβάσεων που χαρακτήριζε την εποχή τους, οι οποίες δεν είναι σήμερα αποδεκτές. Αντιβαίνουν από κάθε άποψη στις αρχές της ελάχιστης επέμβασης και της αντιστρεψιμότητας των μεθόδων.

Ενδιαφέρον εμφανίζουν τεχνικές λύσεις που συνίστανται στην υδροφοβίωση της μάζας του τοίχου σε χαμηλή στάθμη, με τη διάνοιξη οπών και την έγχυση στεγανοποιητικών υλικών με φυσική ροή ή υπό πίεση. Η εξέλιξη της νανοτεχνολογίας μπορεί να συμβάλλει σημαντικά προς αυτήν την κατεύθυνση, πρέπει όμως να δοκιμαστούν για καιρό η χημική σταθερότητα και εν γένει η συμβατότητά τους με τα υλικά κατασκευή πριν εφαρμοστούν επί μνημείων.

Πολυσυζητημένη είναι και η **ηλεκτροοσμωτική μέθοδος**. Ο Αραβαντινός (2004) την περιγράφει ως εξής: «Κατά την άνοδο της υγρασίας μέσω των τριχοειδών αγγείων από το έδαφος στα κατακόρυφα τοιχώματα ενός κτίσματος παρατηρήθηκε ότι παράγεται μία μικρή διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού, της τάξης των μερικών δεκάτων του Volt, δηλαδή ένα ασθενές ηλεκτρικό φορτίο. Ο υγρός τοίχος μαζί με το έδαφος συμπεριφέρεται τότε ως μια ηλεκτρική στήλη, της οποίας την άνοδο (+) αποτελεί το έδαφος και την κάθοδο (-) ο τοίχος. Δημιουργείται επομένως μια υποτυπώδης ροή ρεύματος στην κατεύθυνση της κίνησης των μορίων του νερού. Σ' έναν υγρό τοίχο το κατώτερο σημείο του που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ως θετικός πόλος και το ανώτερο σημείο του ως αρνητικός πόλος. Αν αυτός ο τοίχος συνδεθεί με ένα κύκλωμα συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος με το έδαφος, θα παραχθεί μια κίνηση του νερού προς την κατεύθυνση της πτώσης του δυναμικού, δηλαδή από τα πάνω προς τα κάτω, εμποδίζοντας πλέον την τριχοειδή άνοδο της υγρασίας. Η ηλεκτροοσμωτική μέθοδος εξυγίανσης του κτίσματος συνίσταται σ' αυτό ακριβώς, δηλαδή στο να αντιστρέψει τη φορά του παραγόμενου ρεύματος και κατά συνέπεια να αντιστρέψει την κατεύθυνση του νερού».

Αρνητική παρενέργεια αποτελεί το γεγονός ότι σημειώνονται δραστικές μεταβολές του pH (<3 και >10). Και μόνο αυτή η παρατήρηση καθιστά απαγορευτική τη χρήση της μεθόδου σε τοιχογραφίες, στις οποίες συνήθως καταγράφεται ένα ήπια αλκαλικό pH (Verges - Belmin & Siedel, 2005). Η δραστική μεταβολή σε συνδυασμό με την μακρά διάρκεια της εφαρμογής είναι δυνατόν να επιφέρει σοβαρές αλλοιώσεις στις τοιχογραφίες.

Τέλος, σε αρκετές περιπτώσεις υγρασίας από τον υδροφόρο ορίζοντα, λύση μπορεί να αποτελέσει ένα δίκτυο γεωτρήσεων στην περίμετρο του μνημείου, ενίοτε μάλιστα και η αξιοποίηση υφιστάμενων πηγαδιών σε συνδυασμό με άντληση. Θα πρέπει να προηγείται συστηματικός έλεγχος από γεωτεχνικό, προκειμένου να αξιολογηθεί η πιθανότητα συνεπειών στη σταθερότητα του εδάφους και επομένως στη στατικότητα των κτηρίων.

8.2.1.4. Υγρασία από κακές πρακτικές χρήσης

Λύση αποτελεί η εκπαίδευση των φορέων διαχείρισης και των χρηστών του μνημείου σε ορθές πρακτικές χρήσης.

8.2.1.5. Υγρασία από κατασκευαστικές ατέλειες, αστοχία ή φθορά δικτύων ή πλημμελή συντήρηση

Απαιτείται συστηματικός έλεγχος και άμεση παρέμβαση σε περιπτώσεις βλαβών, με υλικά συμβατά με τα αυθεντικά του κτηρίου και μεθόδους που θα υπακούουν στις αρχές προσέγγισης των τοιχογραφημένων μνημείων που αναφέρθηκαν εισαγωγικά.

8.2.1.6. Υγρασία από επεμβάσεις κτηριακής αποκατάστασης και συντήρησης διακόσμου

Κατά τις επεμβάσεις θα πρέπει να ισχύει ως βασική αρχή η ελαχιστοποίηση του χρησιμοποιούμενου νερού. Ο ξηρός καθαρισμός των δομικών στοιχείων θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να προτιμάται. Θα πρέπει δε η χρήση απιονισμένου νερού, η οποία αποτελεί τον κανόνα στις επεμβάσεις συντήρησης του διακόσμου, να επεκταθεί και στις κτηριακές επεμβάσεις.

8.2.2. Υγρασία από νερό σε μορφή υδρατμών

8.2.2.1. Υγρασία λόγω της φυσικής υγροσκοπικότητας των υλικών κατασκευής

Αναφέρθηκε ήδη ότι σε συνθήκες συνθήκες η φυσική υγροσκοπικότητα των υλικών δεν αποτελεί απαραίτητα δείκτη παθογένειας, αντίθετα μάλιστα μπορεί να λειτουργεί ως σταθεροποιητής της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό μικροκλίμα του μνημείου.

Υγρασία από παλαιότερες αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων: Οι ενέργειες για την αντιμετώπιση αυτού του τύπου υγρασίας είναι αρμοδιότητα συντηρητή και συνίστανται στην πραγματοποίηση επεμβάσεων αφαλάτωσης, υπό τις προϋποθέσεις που αναφέρονται στη σχετική ενότητα.

Υγρασία από συμπύκνωση: Παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις του φαινομένου, (όπως χειμερινή ή εαρινή συμπύκνωση) οι οποίες συχνά επιβάλλουν και διαφορετικές ή αντικρουόμενες λύσεις (Αραβαντινός, 2004) (Massari & Massari, 1993), το φαινόμενο της συμπύκνωσης εμφανίζεται πάντοτε σε συνθήκες κατά τις οποίες η θερμοκρασία των τοίχων είναι ίση χαμηλότερη από το σημείο δρόσου του ατμοσφαιρικού αέρα.

Οι διαθέσιμες λύσεις επομένως μπορεί να στοχεύουν προς τις εξής κατευθύνσεις:

- Την αύξηση της θερμοκρασίας του τοίχου
- Τη μείωση της σχετικής υγρασίας του χώρου, που επιτυγχάνεται είτε με την αντιμετώπιση των αιτίων της (φορτία υγρασίας στο κέλυφος, ρεύματα αέρα, επισκεψιμότητα) είτε με αύξηση της θερμοκρασίας στο χώρο.

Όταν η υγρασία από συμπύκνωση οφείλεται σε αυξημένη σχετική υγρασία λόγω ρευμάτων αέρα, συχνά μπορεί να αρκούν ελάχιστης κλίμακας επεμβάσεις στα ανοίγματα για τον περιορισμό τους.

Ο περιορισμός των θερμικών απωλειών από το κτηριακό κέλυφος με την τοποθέτηση θερμομονωτικών φύλλων, όποτε συνάδει με τις ιδιαιτερότητες του κτηρίου, όπως σε περιπτώσεις ψευδοροφών, συμβάλλει σε περιορισμό της απώλειας θερμικής ενέργειας από τις επιφάνειες και το χώρο.

Αντίστροφα, η αντιμετώπιση των αιτίων που οδηγούν σε φορτία υγρασίας στο κέλυφος, συγχρόνως μειώνει τη σχετική υγρασία του χώρου και συμβάλλει σε κάποια

αύξηση της θερμοκρασίας τόσο του κελύφους, όσο και του αέρα, αφού αντιμετωπίζει συγχρόνως την ψύξη λόγω εξάτμισης και την απώλεια των θερμομονωτικών ιδιοτήτων των τοίχων λόγω του νερού.

Πρέπει να επαναληφθεί εδώ ότι λύσεις που μπορεί να είναι πρόσφορες για κοινά κτήρια είναι απολύτως ακατάλληλες για τοιχογραφημένα μνημεία. Ο εξαερισμός ή η ενεργητική αύξηση της θερμοκρασίας είναι πιθανό να αντιμετωπίσουν το ζήτημα της συμπύκνωσης, ενεργοποιούν όμως άλλους μηχανισμούς αλλοίωσης, επιταχύνοντας την εξάτμιση και την απόθεση αλάτων προς το εσωτερικό. Αυτό συμβαίνει συχνά όταν η λειτουργία των ενεργητικών μεθόδων ελέγχου του περιβάλλοντος δεν είναι συνεχής, αλλά περιορίζεται στις ώρες χρήσης του μνημείου, όπως στις περιπτώσεις θρησκευτικών μνημείων που διατηρούν την αρχική τους χρήση και επισκέψιμων μνημείων με νέα «μουσειακή» χρήση, προκαλώντας έντονες διακυμάνσεις και ενεργοποιώντας κύκλους αλλοίωσης σε ημερήσια βάση. Πριν από κάθε επέμβαση επομένως, απαιτείται συνείδηση των μεταβολών που αυτή ενδέχεται να προκαλέσει σε άλλες παραμέτρους και των συνεπειών τους.

8.2.2.2. Υγρασία λόγω διάχυσης υδρατμών

Από τις μεθόδους περιορισμού του φαινομένου που αναφέρει ο Αραβαντινός (2004), ως συμβατή με τις ιδιαιτερότητες των τοιχογραφημένων μνημείων αναφέρεται η καθαίρεση των εξωτερικών αδιαπέραστων επικαλύψεων (εφόσον πρόκειται για νεώτερες επεμβάσεις) και αντικατάστασή τους με άλλα υδρατμοδιαπερατά. Οι υπόλοιπες λύσεις που αναφέρονται δεν έχουν εφαρμογή σε μνημεία.

8.2.2.3. Αντιμετώπιση έντονων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας

Η σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας αποτελεί ένα από τα συχνότερα ζητούμενα, λόγω της επιρροής της στους κύκλους των αλάτων. Όταν οι διακυμάνσεις αυτές σχετίζονται με αντίστοιχες μεταβολές της θερμοκρασίας, η λύση πρέπει να αναζητηθεί προς την κατεύθυνση της σταθεροποίησης της θερμοκρασίας, με παθητικές ή ενεργητικές μεθόδους συμβατές προς το διατηρητέο χαρακτήρα των μνημείων.

Είναι όμως πολύ συχνό το φαινόμενο, λόγω των συνήθως εξαιρετικών θερμομονωτικών ιδιοτήτων των μνημείων, οι συνθήκες θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος να είναι εξαιρετικά σταθερές, και παρ' όλα αυτά οι διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας πολύ έντονες. Στις περιπτώσεις αυτές, οι διακυμάνσεις σχετίζονται με την παρουσία ρευμάτων και την επισκεψιμότητα του μνημείου.

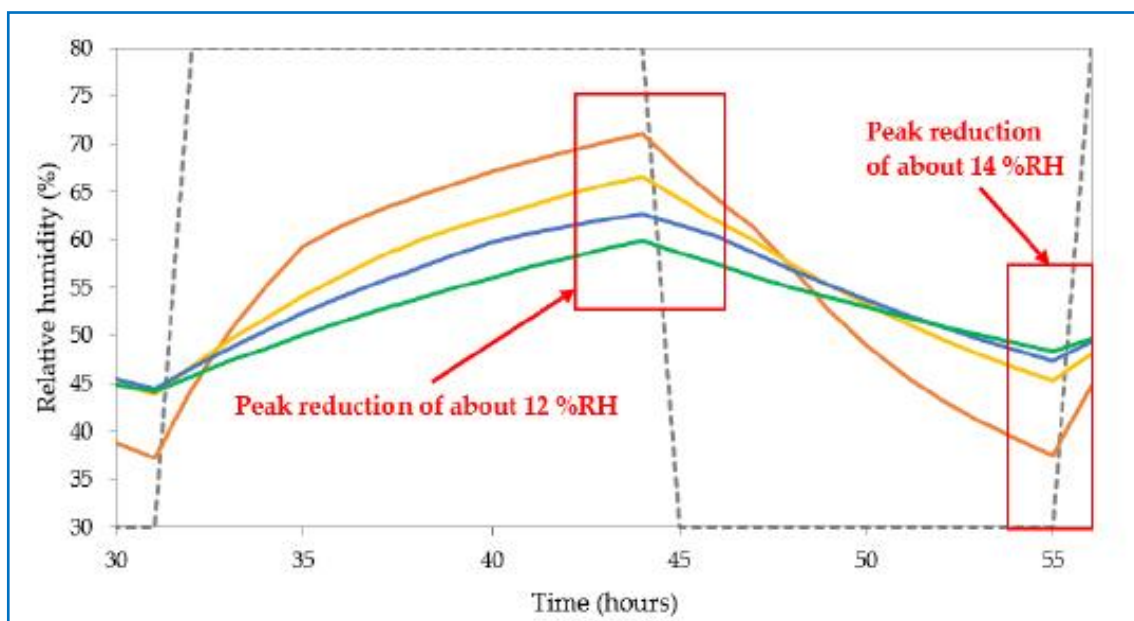
Όταν το πρόβλημα προκύπτει από την επισκεψιμότητα, η λύση πρέπει να αναζητείται προς την κατεύθυνση του ελέγχου της, υπό την έννοια είτε του περιορισμού, είτε της καλύτερης κατανομής στο χρόνο. Όταν δεν υπάρχουν φορτία υγρασίας στο κτηριακό κέλυφος, μπορεί να συμβάλλει θετικά ο ήπιος αερισμός ή και η χρήση συσκευών αφύγρανσης.

Όταν οι διακυμάνσεις σχετίζονται με ρεύματα, οι καμπύλες των γραφημάτων του εσωτερικού περιβάλλοντος βαίνουν παράλληλα με αυτές του εξωτερικού, και μάλιστα με ταχείς ρυθμούς απόκρισης. Λύση στην περίπτωση αυτή αποτελεί ο περιορισμός των ρευμάτων αέρα.

Ασχέτως της αιτιολογίας των έντονων διακυμάνσεων, αξιόλογες λύσεις παθητικού χαρακτήρα για τη σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας αξιοποιούν για τον εξοπλισμό των χώρων υγροσκοπικά υλικά, όπως το γυμνό ξύλο, ως ρυθμιστές (buffers) της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος. Η ίδια η υγροσκοπικότητα των υλικών κατασκευής των μνημείων, όπως των επιχρισμάτων του χώρου συμβάλλει σημαντικά προς αυτήν την κατεύθυνση, γι' αυτό θα πρέπει να αποκλείεται η χρήση μη διαπερατών βαφών σε εσωτερικούς χώρους μνημείων, όπως και η απογύμνωση της τοιχοποιίας από τα επιχρίσματα. Αντίστοιχα θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση μη ατμοδιαπερατών μεμβρανών για τη στεγανοποίηση στεγών. Γενικεύοντας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι με δεδομένο το στόχο για τη μέγιστη δυνατή σταθερότητα της σχετικής υγρασίας, είναι ιδιαίτερα κρίσιμη η αξιοποίηση στο μέγιστο βαθμό όλων των επιφανειών των υλικών κατασκευής που μπορούν να λειτουργούν ως «ρυθμιστές» της σχετικής υγρασίας.

Για την αντιμετώπιση των έντονων διακυμάνσεων της σχετικής υγρασίας παρουσιάζει εξαιρετικό ερευνητικό ενδιαφέρον η εξέταση της καταλληλότητας χρήσης υπερ - απορροφητικών πολυμερών (Super - Absorbent Polymers, SAP) ως πρόσμικτων σε κονιάματα αποκατάστασης αρμών ή επιχρισμάτων. Η εφαρμογή νέων κονιαμάτων στο εσωτερικό των μνημείων είναι συνηθισμένη στο πλαίσιο επεμβάσεων αποκατάστασης, είτε για την αρμολόγηση, είτε για την επίχριση των μη τοιχογραφημένων επιφανειών. Εφόσον εξεταστεί η συμβατότητα των υλικών αυτών με τα αυθεντικά υλικά κατασκευής και αποκλειστούν πιθανοί κίνδυνοι, η προσθήκη τους στα κονιάματα αποκατάστασης μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας. Από την

έρευνα⁴⁶ των Fort κ.ά. (2020) για την επίδραση της χρήσης υπέρ - απορροφητικών πολυμερών για τη σταθεροποίηση της σχετικής υγρασίας σε εσωτερικούς χώρους, προκύπτουν εντυπωσιακά αποτελέσματα. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, η προσθήκη υπέρ - απορροφητικού πολυμερούς 1,5% κ.β. στη σύσταση επιχρίσματος, οδηγεί σε μείωση των ημερήσιων διακυμάνσεων από 35% (στην περίπτωση του κονιάματος αναφοράς χωρίς προσθήκη υπέρ - απορροφητικού πολυμερούς) σε περίπου 10%.



Γράφημα 14: Περιορισμός ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας με προσθήκη υπέρ - απορροφητικών πολυμερών (SAP) σε επιχρίσματα. Η άνω καμπύλη αφορά στο δοκίμιο αναφοράς, ενώ η κίτρινη, μπλε και πράσινη καμπύλη σε δοκίμια με προοδευτική αύξηση της συγκέντρωσης σε SAP (Fort, κ.ά. 2020).

⁴⁶Η συγκεκριμένη έρευνα δεν αφορά εφαρμογή σε μνημεία.

9. ΤΟΙΧΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

9.1. Εισαγωγή

Μετά από επιτυχείς επεμβάσεις για την αντιμετώπιση των αιτίων της υγρασίας, κυρίως σε υγρή αλλά και σε αέρια μορφή, ακολουθεί μια περίοδος ξήρανσης του κτηριακού κελύφους και επομένως και των τοιχογραφιών και επιχρισμάτων. Εφόσον οι πηγές έχουν αντιμετωπιστεί, τα συσσωρευμένα φορτία περιεχόμενης υγρασίας σταδιακά αποβάλλονται προς το περιβάλλον μέσω διαδικασιών εξάτμισης, μέχρις ότου αποκατασταθεί μια νέα ισορροπία της υγρασίας των δομικών στοιχείων με τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας.

Ως ξήρανση επομένως, ελλείπει πιο δόκιμου όρου, μπορεί να οριστεί εδώ η διαδικασία κατά την οποία η περιεχόμενη υγρασία εξατμίζεται μέχρι να περιοριστεί σε μη επιβλαβή επίπεδα και να καθορίζεται πλέον από την υγρασκοπικότητα του υλικού και τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος,

Λόγω της ανατροπής των προηγούμενων ισορροπιών και της ενεργοποίησης ποικίλων κύκλων αλλοίωσης, η περίοδος αυτή μπορεί να εξελιχθεί στην πιο επικίνδυνη για τη διατήρηση του τοιχογραφικού διακόσμου.

Συγκεκριμένο παράδειγμα τέτοιας ανατροπής, το οποίο αναδείχθηκε στο πλαίσιο της Μελέτης Περίπτωσης (μέρος Γ΄ της εργασίας), αποτελεί η σημαντική αύξηση του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας. Λόγω ακριβώς της ξήρανσης του κελύφους, το νερό που υπήρχε ως περιεχόμενη υγρασία στις τοιχοποιίες και λειτουργούσε και ως ρυθμιστής της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος, δεν υφίσταται πλέον για να συνεχίσει να παίζει το ρόλο του. Το γεγονός αυτό φαίνεται να ερμηνεύει σε σημαντικό βαθμό τη συχνά παρατηρημένη επιδείνωση της κατάστασης διατήρησης τοιχογραφιών και επιχρισμάτων μετά από επιτυχείς εργασίες αντιμετώπισης της υγρασίας.

Οι διαδικασίες αλλοίωσης συνίστανται κυρίως στην κρυστάλλωση των διαλυτών αλάτων, όσο αυξάνει ο βαθμός υπερκορεσμού των διαλυμάτων λόγω της εξάτμισης. Αναφέρθηκε ήδη ότι ο βαθμός υπερκορεσμού αποτελεί και μέτρο της πίεσης κρυστάλλωσης, και επομένως του βαθμού αλλοίωσης της πορώδους δομής των υλικών κατασκευής.

Μετά την αποβολή του νερού σε υγρή μορφή, και εφόσον το αρχικό αίτιο έχει επιτυχώς εξαλειφθεί, δεν μεταφέρονται νέα άλατα, ούτε τα ήδη αποθεθειμένα ανακατανέμονται. Από το σημείο αυτό και μετά είναι αποκλειστικά η επίδραση των μεταβολών της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας⁴⁷ του περιβάλλοντος που ενεργοποιεί κύκλους αλλοίωσης. Η αύξηση της σχετικής υγρασίας είναι δυνατόν να οδηγήσει πρώτα σε ενυδάτωση των κρυσταλλωμένων αλάτων, προσθέτοντας νέες πιέσεις και φθορές στα τοιχώματα των τριχοειδών πόρων. Περαιτέρω αύξηση της σχετικής υγρασίας συνεπάγεται σταδιακή διάλυση των κρυστάλλων και πιθανές μικροκινήσεις εντός των πόρων. Νέα πτώση της σχετικής υγρασίας θα σημάνει την εκκίνηση νέου κύκλου.

9.2. Διάρκεια της ξήρανσης

Η διάρκεια της ξήρανσης, ποικίλει ανάλογα με τον τύπο της υγρασίας, τα αποθηκευμένα φορτία νερού, τα δομικά χαρακτηριστικά του κτηρίου (πάχος τοιχοποιίας και υγροσκοπικότητα υλικών κατασκευής) και ασφαλώς τις συνθήκες του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ρεύματα αέρα).

Ταχύτερες, ενδεχομένως και στιγμιαίες, είναι οι μεταβολές της επιφανειακής υγρασίας, υγροσκοπικής ή από συμπύκνωση, κοντά στην επιφάνεια τοιχογραφιών και επιχρισμάτων, υπό την επίδραση πτώσης της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος.

Η αποβολή του νερού που απορροφά η εξωτερική επιφάνεια τοιχοποιίας από βροχή είναι επίσης γρήγορη, της τάξης της μιας ημέρας (Massari & Massari, 1993).

Μεγαλύτερη, αλλά όχι υπερβολική διάρκεια, έχει η περίοδος αποβολής υγρασίας λόγω ατελειών της ανωδομής (στέγες ελαττωματικοί αρμοί), εφόσον το αίτιο αντιμετωπιστεί. Παρόμοια περίπτωση αποτελεί το νερό από κτηριακές επεμβάσεις.

Η μέγιστη διάρκεια καταγράφεται σε περιπτώσεις ανερχόμενης υγρασίας. Είναι της τάξης όχι εβδομάδων ή μηνών, αλλά αρκετών ετών. Σε συγκεκριμένη περίπτωση οι Massari (1993) την υπολόγισαν σε 9 έτη.

Τέλος, η διάρκεια της παρουσίας υγροσκοπικής υγρασίας που οφείλεται σε αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων είναι απεριόριστη, εκτός εάν πραγματοποιηθούν επεμβάσεις αφαλάτωσης ή σημειωθεί μόνιμου χαρακτήρα σημαντική πτώση της σχετικής υγρασίας.

⁴⁷Κυρίως δια της επίδρασης στη σχετική υγρασία.

9.3. Ενέργειες για τη διατήρηση των τοιχογραφιών κατά και μετά την περίοδο ξήρανσης

Οι αναγκαίες ενέργειες συνοψίζονται σε:

- Διαρκή καταγραφή της εξέλιξης της περιεχόμενης υγρασίας, της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, για την αξιολόγηση της επιτυχίας των επεμβάσεων και των συνεπειών τους στο μικροκλίμα του μνημείου, παράλληλα με παρακολούθηση πιθανής εξέλιξης στην παθολογία των τοιχογραφιών.
- Ενέργειες για τον περιορισμό ή την εξάλειψη των παραγόντων φθοράς που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση υγρασίας και αλάτων, δηλαδή ενεργητικός ή παθητικός έλεγχος περιβαλλοντικών παραμέτρων, «αδρανοποίηση» των αλάτων και αφαλάτωση.

Τα ζητήματα που σχετίζονται με τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων και την αφαλάτωση θεωρούνται τόσο θεμελιώδη, που έχουν αποτελέσει αντικείμενο σημαντικών ευρωπαϊκών προγραμμάτων⁴⁸. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται ως αυτοτελή κεφάλαια στις ενότητες που ακολουθούν.

Ως προς την «αδρανοποίηση» των αλάτων, η έρευνα έχει αναζητήσει λύσεις προς διάφορες κατευθύνσεις. Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες είναι αυτή της εφαρμογής αναστολέων κρυστάλλωσης (crystallization inhibitors), οι οποίοι αυξάνουν το σημείο κορεσμού διαλυμάτων, επιβραδύνοντας έτσι την κρυστάλλωση, ευνοώντας την απόθεση στην επιφάνεια αντί στη μάζα των υλικών και οδηγώντας στο σχηματισμό μορφών αλάτων πιο ακίνδυνων για τα υλικά.

Εφόσον αποδειχθούν ακίνδυνοι και κατάλληλοι για χρήση στην συντήρηση, θα συμβάλλουν όχι μόνο μέσω της παρεμπόδισης της κρυστάλλωσης, αλλά και με την χρήση τους σε διαδικασίες αφαλάτωσης (Sawdy & Price, 2004).

Άλλος, έμμεσος τρόπος αδρανοποίησης των κρυσταλλωμένων αλάτων που έχει προταθεί είναι «μόνωση» με την εφαρμογή στρώματος προστασίας (βερνικιού) στην επιφάνεια των τοιχογραφιών, ώστε οι μεταβολές της σχετικής υγρασίας των μνημείων να μην ενεργοποιούν κύκλους αλλοίωσης (Mora, 1974). Η μέθοδος θα είχε ενδιαφέρον

⁴⁸ Project ENV4-CT95-0135 (1996-2000) και THE DESALINATION PROJECT, EC Contract no.: 022714, VII Framework Programme.

εάν ο κίνδυνος προερχόταν μόνο από τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας. Όμως, η παρουσία νερού στη δομή της τοικοποιίας αποτελεί τον κανόνα, και ακόμη κι αν αυτή αντιμετωπιστεί επιτυχώς σε μια δεδομένη ιστορική στιγμή τίποτα δεν διασφαλίζει ότι δεν θα επανακάμψει σε μια επόμενη. Για το λόγο αυτό, η εφαρμογή βερνικιού στην επιφάνεια των τοιχογραφιών έχει αποκλειστεί εντελώς ως επιλογή, κυρίως διότι, απαγορεύοντας την κίνηση του νερού έως την επιφάνεια, οδηγεί σε υποεπιφανειακή κρυστάλλωση των αλάτων, με καταστρεπτικές συνέπειες.

9.3.1. Έλεγχος περιβαλλοντικών παραμέτρων κατά την περίοδο ξήρανσης

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι κατά τη μεταβατική περίοδο της ξήρανσης οι τιμές - στόχοι δεν είναι οι ίδιες με αυτές που θα επιλεγούν για την μακρά περίοδο μετά την εξισορρόπηση, θα πρέπει δε να προσαρμόζονται στη στρατηγική που έχει επιλεγεί για την περίοδο της ξήρανσης. Εάν στόχος είναι η υποβοήθηση της κίνησης του νερού και της απόθεσης των αλάτων προς τα έξω, η σχετική υγρασία θα πρέπει να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Εάν, αντίθετα, έχει επιλεγεί σε κάποιο διάστημα της περιόδου ξήρανσης η πραγματοποίηση επεμβάσεων αφαλάτωσης, θα πρέπει για τη συγκεκριμένη να εξασφαλιστούν υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή σχετική υγρασία και ρεύματα αέρα, προκειμένου να ευνοηθεί η μεταφορά αλάτων στα επιθέματα με διαδικασίες μεταγωγής.

Σημειώνεται επίσης ότι, μετά την περίοδο ξήρανσης, η μετάβαση προς τα επίπεδα τιμών που θα έχουν προσδιοριστεί ως επιθυμητά θα πρέπει να είναι σταδιακή.

Τέλος, ανεξάρτητα από την τάση που θα ακολουθήσει κανείς για τον προσδιορισμό του περιβαλλοντικού στόχου, όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερότητα των κρίσιμων παραμέτρων, τόσο λιγότεροι θα είναι οι κύκλοι κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης - διάλυσης και επομένως τόσο μικρότερη η φθορά.

9.3.2. Αφαλάτωση

Η αφαλάτωση αποτελεί έναν από τους τρεις τρόπους περιορισμού των αλλοιώσεων λόγω της αλληλεπίδρασης αλάτων - περιβάλλοντος. Οι δύο άλλοι που ήδη αναφέρθηκαν είναι η «αδρανοποίηση» των αλάτων και ο έλεγχος των περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Ας διευκρινιστεί εισαγωγικά ότι ο όρος **αφαλάτωση** αναφέρεται στην **αφαίρεση των διαλυτών αλάτων** από την επιφάνεια και ιδίως τη δομή των υλικών και όχι των αδιάλυτων.

Κάποιοι συγγραφείς⁴⁹, προκρίνουν τη χρήση των όρων «επεμβάσεις μείωσης των αλάτων» αντί του «αφαλάτωση», καθώς η αφαλάτωση σε μνημεία και τοιχογραφίες είναι πάντοτε μερική, ποσοτικά και τοπικά, και ποτέ ολοκληρωτική. Στο κείμενο που ακολουθεί, χρησιμοποιείται ο όρος αφαλάτωση με την έννοια της αφαίρεσης διαλυτών αλάτων ασχέτως της πληρότητάς της.

Οι διαδικασίες αφαλάτωσης συνίστανται κατά βάση στην εφαρμογή ενός υγρού επιθέματος στην επιφάνεια των τοιχογραφιών. Το νερό του επιθέματος αρχικά διεισδύει στο αντικείμενο μέχρι κάποιο βάθος και διαλύει μέρος των κρυσταλλωμένων αλάτων, τα οποία στη συνέχεια κινούνται προς το επίθεμα μέσω διαδικασιών διάχυσης ή μεταγωγής.

Η ποσότητα των αλάτων που θα κινητοποιηθούν καθορίζεται από το βάθος της ζώνης στο οποίο η υγρασία του επιθέματος θα διεισδύσει εντός του υλικού. Το νερό που θα διεισδύσει μπορεί να προέρχεται από το επίθεμα, από προκαταρκτική ύγρανση ή από άλλη, εξωτερική προέλευση⁵⁰ (Verges - Belmin & Siedel, 2005).

Άλλες μέθοδοι αφαλάτωσης, όπως η ηλεκτροφόρηση, αν και δείχνουν αποτελέσματα, δεν συνιστώνται, διότι συνοδεύονται από δραστικές μεταβολές του pH (<3 και >10). Αυτή η παρατήρηση καθιστά απαγορευτική τη χρήση της μεθόδου σε τοιχογραφίες, στις οποίες συνήθως καταγράφεται ένα ήπια αλκαλικό pH (ό.π.).

Τα υλικά των επιθεμάτων είναι ποικίλα. Περιλαμβάνουν ιαπωνικό χαρτί ή καρτοβάμβακα, στυπόχαρτο, σπόγγους βισκόζης, καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη, ίνες κυτταρίνης σε διαφορετικά μήκη, αργιλικά ή αργιλοπυριτικά ορυκτά, άμμους διαφορετικών κοκκομετριών και πλήθος συνδυασμών των ανωτέρω.

Είναι απολύτως αναγκαίο να προηγείται συστηματική μελέτη του αντικειμένου και των χαρακτηριστικών του, πριν τη λήψη της απόφασης τόσο για την πραγματοποίηση ή μη

⁴⁹Ενδεικτικά (Pel, A., & Voronina, 2013).

⁵⁰ Νερό από εξωτερική προέλευση μπορεί να αποτελεί και η ήδη περιεχόμενη στις τοιχοποιίες υγρασία. Επομένως, η επιλογή της περιόδου της ξήρανσης για επεμβάσεις αφαλάτωσης δικαιολογείται και για έναν επιπλέον λόγο, την αξιοποίηση δηλαδή της ήδη υφιστάμενης στην τοιχοποιία υγρασίας.

μιας επέμβασης αφαλάτωσης, όσο και την επιλογή των υλικών του επιθέματος. Οι σοβαρότεροι κίνδυνοι συνοψίζονται στην πιθανότητα περαιτέρω αλλοίωσης φθαρμένων τοιχογραφιών λόγω της εφαρμογής ή κατά τη διαδικασία της αφαίρεσης του επιθέματος, στην ευαισθησία πολλών υλικών στην παρατεταμένη επαφή με το νερό του επιθέματος, ή στην ανακατανομή των αλάτων στη μάζα του υλικού αντί της αφαίρεσής τους.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε κάποιες περιπτώσεις τα άλατα κατά τη διαδικασία αφαλάτωσης μπορεί να οδηγηθούν προς το βάθος του αντικειμένου αντί προς τα έξω. Η ύγραση ενός επιθέματος κατά τη φάση του στεγνώματός του πρέπει να αποφεύγεται, διότι ωθεί τα άλατα που έχουν οδηγηθεί στο επίθεμα ξανά προς τα πίσω. Δυστυχώς, οι εμπειρίες σε αυτό το πεδίο βασίζονται κυρίως σε μεμονωμένες μελέτες περίπτωσης παρά σε ένα καλά θεμελιωμένο θεωρητικό μοντέλο (Verges - Belmin & Siedel, 2005).

Παρά την αυξημένη σημασία της για τη διατήρηση των πορωδών υλικών, η αφαλάτωση αποτελεί διαδικασία μη πλήρως προβλέψιμη ως προς την αποτελεσματικότητα και τις συνέπειές της. Προς την κατεύθυνση της κατανόησης των μηχανισμών που τη διέπουν και των ορίων της είναι εξαιρετική η συμβολή του ευρωπαϊκού προγράμματος «The Desalination Project», τα πορίσματα του οποίου συνοψίζονται στην έκδοση των Alison Heritage, Adrian Heritage και Fulvio Zezza «Desalination of Historic Buildings, Stone and Wall Paintings».

Στο κείμενο που ακολουθεί παρατίθενται αποσπάσματα της έκδοσης σε ελεύθερη απόδοση. Κάποια σχόλια στα αποσπάσματα εντάσσονται ως υποσημειώσεις, και ακολουθεί μια ενότητα παρατηρήσεων στα πορίσματα του προγράμματος.

Σύμφωνα με το Zezza (2013), το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Desalination είναι το πρώτο που επιχειρεί να αναλύσει τη σύνθετη σχέση μεταξύ επιθέματος και υποστρώματος (τοιχογραφίας ή επιχρίσματος). Για την αξιολόγηση των μεθόδων αφαλάτωσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη από τη μια το μέγεθος των πόρων και το βάθος της διείσδυσης που επιτυγχάνεται κατά την επέμβαση, και από την άλλη η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ως προς την εξαγωγή αλάτων μέσω των επιθεμάτων. Είναι αναγκαίο να τίθεται το ερώτημα: πότε είναι αναγκαία αυτή η επέμβαση; Τα αποτελέσματα του προγράμματος Asset δείχνουν ότι οι φθορές από άλατα είναι δυνατόν να ενταθούν με την εφαρμογή κάποιων προϊόντων σε επιφάνειες

προσβεβλημένες από άλατα, και ότι η αποτελεσματικότητα μειώνεται δραματικά όταν η επέμβαση αφορά αντικείμενο με υψηλό φορτίο σε χλωριούχα.

Ειδικά ως προς την εφαρμογή επιθεμάτων, υπάρχουν ακόμη πολλές αβεβαιότητες σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους στην αφαίρεση των αλάτων και τη θέση των αλάτων που παραμένουν μετά την επέμβαση, όσο και τα διαφορετικά αποτελέσματα τέτοιων επεμβάσεων. Πολλές από τις αρχές που διέπουν τη λειτουργία των επιθεμάτων δεν έχουν επαρκώς αποσαφηνιστεί, ενώ και ο ρόλος του υποστρώματος δεν λαμβάνεται επαρκώς υπόψη στις εφαρμογές της συντήρησης.

Είναι εξίσου αναγκαίο να αναλυθούν οι σύνθετες σχέσεις επιθέματος - υποστρώματος⁵¹, όπως οι μηχανισμοί μεταφοράς αλάτων / νερού, καθώς και να αναπτυχθούν μεθοδολογίες για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της επέμβασης, όπως μη καταστρεπτικές τεχνικές. Στόχος του προγράμματος είναι η διερεύνηση τόσο των δυνατοτήτων, όσο και των ορίων των επεμβάσεων αφαλάτωσης.

Στο πλαίσιο του αναπτύχθηκε μια καινοτόμα μεθοδολογία για τη μη καταστρεπτική αξιολόγηση τόσο του υποστρώματος πριν και μετά την επέμβαση όσο και των συνεπειών της επέμβασης. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, χρωματομετρική ανάλυση, υπερήχους, υπέρυθρη θερμογραφική ανάλυση και μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης.

Η εφαρμογή υπερήχων δίνει δεδομένα για την κατάσταση διατήρησης του υποστρώματος. Μεταβολές στη θερμοκρασία της τοικοποιίας συσχετίστηκαν με την εξαγωγή αλάτων. Επίσης, μετρήσεις της αντίστασης χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό υποεπιφανειακών αλλαγών σχετικών με την παρουσία υγρασίας / αλάτων. Η μεθοδολογία αυτή, που εφαρμόζεται σε ποικιλία υποστρωμάτων, επέτρεψε να αναδειχθεί ότι η επιτυχία της επέμβασης δε σχετίζεται μόνο με το μέσο, αλλά και με τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος. Η εργασιμότητα των επιθεμάτων με βάση την κυτταρίνη, ορυκτά ή μείγματά τους, εξετάστηκε εργαστηριακά με όρους διείσδυσης και ρευστότητας. Άλλες εξετάσεις κατέδειξαν ότι το μέγεθος και η κατανομή των αδρανών των επιθεμάτων είναι σημαντικά, καθώς καθορίζουν τη διασύνδεση μεταξύ των πόρων. Το σχήμα των πόρων επίσης επηρεάζει τις ροφητικές ιδιότητες των επιθεμάτων.

Αποδείχθηκε επίσης ότι:

⁵¹ Στην τρέχουσα ενότητα ο όρος «υπόστρωμα» αναφέρεται στο εκάστοτε υλικό προς αφαλάτωση.

- Η μεταγωγή (advection), δηλαδή η μεταφορά αλάτινου διαλύματος λόγω διαφορών στην τριχοειδή πίεση οδηγεί σε ταχύτερη εξαγωγή αλάτων σε σχέση με τη μεταφορά που οφείλεται σε διάχυση.
- Για να επιτευχθεί τριχοειδής ροή νερού από το υπόστρωμα στο επίθεμα πρέπει οι πόροι του επιθέματος να είναι μικρότεροι από αυτούς του υποστρώματος. Το μέγεθος των πόρων επομένως είναι σημαντική παράμετρος που καθορίζει τη ροή μεταξύ δύο πορωδών υλικών.

Από τους εργαστηριακούς ελέγχους προέκυψε και ότι σε περιπτώσεις επιθεμάτων δύο συστατικών, αποτελούμενων από καολίνη και άμμο, η αύξηση της περιεκτικότητας σε καολίνη οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό μικρών πόρων (0,3μm), ενώ η αύξηση της κοκκομετρίας της άμμου οδηγεί σε μεγαλύτερου μεγέθους πόρους.

Αποκαλύφθηκαν, τέλος, σημαντικοί περιορισμοί σχετικοί με τα χαρακτηριστικά της σύστασης του υποστρώματος. Στην περίπτωση που το επίχρισμα αποτελείται από μίγμα δολομιτικού ασβέστη και γύψου, η παρουσία του νερού του επιθέματος είναι δυνατόν να δημιουργήσει νέα άλατα θειικού μαγνησίου. Σε παρόμοιες περιπτώσεις, η περιεκτικότητα του επιθέματος σε νερό αλλά και ο χρόνος εφαρμογής πρέπει να μειωθούν στο ελάχιστο.

Στο Heritage 2013 εξετάζονται οι τρέχουσες πρακτικές στη χρήση επιθεμάτων, και σημαντικά θέματα εφαρμογής, όπως τα συνήθη υλικά, η σκοπιμότητα της ύγρανσης της επιφάνειας πριν την τοποθέτηση επιθέματος, ή της διατήρησης του επιθέματος υγρού με παροχή νερού ή με τη χρήση πλαστικών μεμβρανών για την επιβράδυνση της εξάτμισης, καθώς και ο χρόνος εφαρμογής αυτοτελώς ή ως συνάρτηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων και ο αριθμός των επαναλήψεων.

Στο άρθρο των Pel κ.ά. (2013) εξετάζονται οι φυσικές αρχές που καθορίζουν την απόδοση των επεμβάσεων αφαίρεσης αλάτων με επιθέματα. Η μεθοδολογία εφαρμογής των επιθεμάτων είναι σχετικά απλή. Το υγρό επίθεμα εφαρμόζεται στην επιφάνεια του αντικειμένου κα διατηρείται σε επαφή με αυτό για κάποιο διάστημα πριν την αφαίρεσή του. Η επέμβαση αυτή έχει **δύο βασικά στάδια**. Το πρώτο είναι η φάση της **ύγρανσης**. Το νερό μεταφέρεται από το επίθεμα προς το αντικείμενο⁵² όπου ξεκινά να διαλύει τα άλατα. Η δεύτερη φάση είναι αυτή της **εξαγωγής**, κατά την οποία τα διαλυμένα ιόντα

⁵²Το εκάστοτε πορώδες υλικό, όπως τοιχογραφίες, επιχρίσματα, δομικά υλικά κ.ά.

αλάτων κινούνται στη μορφή ενός αλάτινου υδατικού διαλύματος από το αντικείμενο προς το επίθεμα. Αυτή η μεταφορά αλάτων συμβαίνει χάρη σε **δύο διαφορετικές διαδικασίες**. Μπορεί να δημιουργείται είτε χάρη στην ύπαρξη μιας διαβάθμισης συγκεντρώσεων μεταξύ του αντικειμένου και του επιθέματος, περίπτωση κατά την οποία τα ιόντα αλάτων διαχέονται μέσω του διαλύματος (**διάχυση**), είτε από τριχοειδή ροή νερού από το αντικείμενο προς το επίθεμα, λόγω της ξήρανσης (**μεταγωγή**). Οπότε τα ιόντα παρασύρονται, «μετάγονται», μαζί με το διάλυμα.

Κατά την αξιολόγηση της **απόδοσης** (efficiency) ενός επιθέματος στην εξαγωγή αλάτων είναι σημαντικό να συγκρίνεται η ποσότητα αλάτων πριν και μετά την επέμβαση. Η απόδοση της αφαλάτωσης για ένα συγκεκριμένο σύστημα επιθέματος / αντικειμένου, μπορεί να χαρακτηριστεί με μια αδιάστατη τιμή απόδοσης ϵ (-): $\epsilon = \Delta m / m_0 \times 100\%$, όπου Δm (Kg) είναι η διαφορά μάζας των αλάτων πριν και μετά την επέμβαση και m_0 (kg) η αρχική ολική μάζα αλάτων. Η τιμή απόδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της απόδοσης της επέμβασης. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι η απόδοση είναι συνάρτηση της διαλυτότητας των αλάτων και επίσης του βάθους στο οποίο βρίσκονται. Κατά κανόνα η απόδοση κοντά στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από ότι σε μεγαλύτερο βάθος. Έτσι, πρακτικά οι αποδόσεις πρέπει να διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Αυτές που αφορούν στην απόδοση ανά συγκεκριμένα βάθη, και αυτές που αναφέρονται σε ολόκληρο το αντικείμενο. Πρέπει επίσης να διακριθεί η απόδοση της επέμβασης από την αποτελεσματικότητά της. Η αποτελεσματικότητα εξετάζει και τις συνέπειες της επέμβασης σε κάποιο χρονικό βάθος. Έτσι, η απόδοση μιας επέμβασης μπορεί να είναι 100%, αλλά σε βάθος χρόνου η αποτελεσματικότητά της να είναι χαμηλή.

Ο μηχανισμός με τον οποίο επιτυγχάνεται η αφαίρεση των αλάτων κατά την επέμβαση θα καθορίσει σημαντικά την αποτελεσματικότητά της. Επομένως, η κατανόηση των φυσικών αρχών που διέπουν την διαδικασία αφαίρεσης είναι αναγκαία για την βελτίωση της επέμβασης.

9.3.2.1. Μέθοδοι βασισμένες στη διάχυση

Η αφαίρεση αλάτων μέσω διάχυσης προϋποθέτει ότι το αντικείμενο θα έρθει σε επαφή με ένα υδατικό διάλυμα με μικρότερη συγκέντρωση αλάτων, πρακτικά κοντά στο μηδέν.

Ως προς την απόδοση της μεθόδου ως συνάρτηση του βάθους και του χρόνου, σύμφωνα με ένα μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο μάλιστα υποεκτιμά τον πραγματικό χρόνο, για την πλήρη αφαλάτωση τοιχοποιίας πάχους 100mm σε όλο το πάχος της θα απαιτούνταν περισσότερες από 250 ημέρες. Για αφαλάτωση του 80% των πρώτων είκοσι χιλιοστών θα απαιτούνταν δέκα ημέρες, και για τα πρώτα σαράντα χιλιοστά τριάντα ημέρες. Γενικά επομένως, ενώ είναι θεωρητικά εφικτή η πλήρης αφαλάτωση ενός αντικειμένου, η διαδικασία είναι αργή.

9.3.2.2. Μέθοδοι βασισμένες στη μεταγωγή (advection)

Ο όρος «μεταγωγή» αναφέρεται στη μεταφορά μάζας από κινούμενο μέσο, όπως η μεταφορά ρυπαντών από ένα ποτάμι. Μπορεί να συμβαίνει και σε ένα πορώδες υλικό, για παράδειγμα ιόντα διαλυμένων αλάτων μπορεί να μεταφέρονται από τη ροή νερού σε υγρή μορφή. Έτσι, εφόσον συμβαίνει ροή από το υλικό προς το επίθεμα, το αντικείμενο μπορεί να αφαλατωθεί μέσω του μηχανισμού της μεταγωγής. Καθώς ο μηχανισμός αυτός είναι γενικά ταχύτερος από της διάχυσης, οι μέθοδοι που βασίζονται στην οριζόντια μεταφορά μπορεί να είναι αντίστοιχα πολύ ταχύτερες. Υπάρχουν όμως προϋποθέσεις σχετικές με την κατανομή μεγέθους πόρων του πορώδους υλικού και του επιθέματος. Συγκεκριμένα, το επίθεμα πρέπει να διαθέτει σημαντική ποσότητα πόρων που να είναι σημαντικά μικρότεροι από την πλειοψηφία των πόρων του αντικειμένου.

Η ξήρανση ενός ομοιογενούς, ομοιόμορφα υγρού πορώδους υλικού εξελίσσεται σε δύο σαφώς διακριτές φάσεις. Η πρώτη χαρακτηρίζεται από σταθερό ρυθμό ξήρανσης, ενώ κατά τη δεύτερη το μέτωπο της εξάτμισης υποχωρεί. Κατά την πρώτη φάση η μεταφορά νερού είναι γρήγορη, και συμβαίνει αποκλειστικά μέσω του δικτύου του νερού σε υγρή μορφή. Κατά τη δεύτερη, ο τρόπος της κίνησης του νερού καθορίζεται από το πορώδες του υλικού, λόγω των διαφορετικών τριχοειδών δυνάμεων που ασκούνται από πόρους διαφορετικών μεγεθών. Το νερό κινείται κυρίως προς τους μικροπόρους λόγω τριχοειδών δυνάμεων, ενώ οι μακροπόροι της επιφάνειας αρχίζουν να αδειάζουν από νερό σε υγρή μορφή. Επομένως, το νερό κοντά στο μέτωπο ξήρανσης που υποχωρεί αρχίζει να σχηματίζει απομονωμένες συγκεντρώσεις, η τριχοειδής ροή στην περιοχή αυτή καθίσταται ασυνεχής και η κίνηση του νερού γίνεται πλέον μέσω της αέριας φάσης.⁵³ Οι συγκεντρώσεις του νερού στο εξής εξατμίζονται

⁵³Η δεύτερη φάση της ξήρανσης επομένως δεν συμβάλει στη διαδικασία της αφαλάτωσης. Από το γεγονός αυτό προκύπτει ενδεχομένως και το χρονικό σημείο στο οποίο είναι σκόπιμο να διακόπτεται κάθε κύκλος

λόγω της μεγάλης διαφοράς σχετικής υγρασίας μεταξύ του αέρα κοντά σ' αυτές και στην επιφάνεια του υλικού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, κατά την ξήρανση ενός συστήματος «αντικείμενο - επίθεμα» το νερό απομακρύνεται πρώτα από το υλικό με τους μεγαλύτερους πόρους.⁵⁴ Έτσι, εάν το επίθεμα διαθέτει επαρκώς μικρότερους πόρους από το πορώδες υλικό, το αντικείμενο θα στεγνώσει πρώτο, θα υπάρξει ροή νερού προς το επίθεμα και επομένως μεταφορά ιόντων αλάτων από το αντικείμενο προς το επίθεμα. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση της αφαλάτωσης με μεταγωγή, η μεταφορά αλάτων συμβαίνει μόνο στην περιοχή του αντικειμένου που έγινε δυνατόν να καταστεί υγρή. Επίσης, όταν ο ρυθμός εξάτμισης γίνεται πολύ αργός, το φαινόμενο που κυριαρχεί και πάλι είναι όχι η οριζόντια μεταφορά αλλά η διάχυση. Επομένως, όταν η συγκέντρωση αλάτων στο επίθεμα γίνεται πολύ υψηλή και ο ρυθμός εξάτμισης πολύ χαμηλός, η κίνηση των ιόντων θα αντιστραφεί και θα συμβεί επιστροφή από το επίθεμα προς το αντικείμενο.⁵⁵

Αναφέρθηκε ήδη ότι η εξαγωγή των αλάτων συμβαίνει σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο, το νερό κινείται από το επίθεμα προς το αντικείμενο και διαλύει τα άλατα. Κατά το δεύτερο, το υδατικό διάλυμα ιόντων αλάτων μεταφέρεται από το αντικείμενο στο επίθεμα. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι προτιμότερο το δεύτερο στάδιο να βασίζεται στη μεταγωγή και όχι στη διάχυση, καθώς είναι πολύ ταχύτερη. Για να συμβεί αυτό, το στάδιο της ύγρανσης και της αφαλάτωσης προϋποθέτουν εντελώς αντίθετες ιδιότητες του επιθέματος. Για την ύγρανση, απαιτείται το επίθεμα να διαθέτει πόρους πολύ

αφαλάτωσης. Η διακοπή πρέπει να συμβαίνει όταν ο ρυθμός ξήρανσης αρχίζει να επιβραδύνεται, και όχι μετά την πλήρη ξήρανση του επιθέματος.

⁵⁴Από την αρχή αυτή συνάγεται ότι, στην περίπτωση των τοιχογραφιών, στο σύνθετο σύστημα «τοιχοποιία - χονδρόκοκκο επίχρισμα - λεπτόκοκκο επίχρισμα - χρωματικό στρώμα», η κίνηση του νερού, η εξάτμιση και η απόθεση των αλάτων συμβαίνει μάλλον προς την κατεύθυνση της τοιχογραφίας και όχι προς την αντίθετη, εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας, εφόσον κατά το Zezza (2013), η συμμετοχή χονδρόκοκκων αδρανών στα υποκείμενα επιχρίσματα οδηγεί στο σχηματισμό πόρων μεγαλύτερου μεγέθους, ενώ τα λεπτόκοκκα, τελικά επιχρίσματα διαθέτουν μεγάλο αριθμό μικροπόρων. Επομένως, για λόγους τεχνολογίας κατασκευής, όταν οι λοιπές παράμετροι (θερμοκρασία - σχετική υγρασία - πίεση - ρεύματα αέρα) παραμένουν παρόμοιες, η δομή και η επιφάνεια των τοιχογραφιών θα επιβαρύνονται περισσότερο από αποθέσεις αλάτων.

⁵⁵Αυτός είναι ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο ο κάθε κύκλος αφαλάτωσης θα πρέπει να διακόπτεται στο σημείο καμψής της καμπύλης ξήρανσης από την πρώτη προς τη δεύτερη φάση. Κατά την εφαρμογή στην πράξη η εύρεση της ακριβούς χρονικής στιγμής δεν είναι εφικτό να προσδιοριστεί, διότι κάτι τέτοιο θα προϋπέθετε ζύγιση, μπορεί όμως να προσεγγιστεί εμπειρικά.

μεγαλύτερους από του αντικειμένου, ενώ για την αφαλάτωση απαιτείται το επίθεμα να διαθέτει πόρους μικρότερους από του αντικειμένου. Επομένως, προκειμένου το επίθεμα να παίξει διπλό ρόλο, ύγρανσης και αφαλάτωσης, θα πρέπει να διαθέτει μια κατανομή μεγέθους πόρων μεγάλου εύρους, που θα περιλαμβάνει πόρους μεγάλου μεγέθους που θα λειτουργούν ως δοχεία αποθήκευσης νερού για την ύγρανση, και μικρούς πόρους που θα εξασφαλίσουν αφενός κίνηση νερού προς το επίθεμα και αφετέρου ότι το αντικείμενο θα στεγνώσει πριν το επίθεμα.⁵⁶ Σημειώνεται ο σημαντικός ρόλος της καλής πρόσφυσης του επιθέματος στο αντικείμενο. Επίσης, δεδομένου του ότι η ταχύτητα της μεταφοράς της υγρασίας είναι καθοριστική για την επιτυχία της αφαλάτωσης μέσω μεταγωγής, είναι σημαντικός και ο έλεγχος των συνθηκών εξάτμισης.

9.3.2.3. Θετικά και αρνητικά των μεθόδων διάχυσης - οριζόντιας μεταφοράς

9.3.2.3.1. Διάχυση

Θετικά: Εάν υπάρχει επαρκής χρόνος, οι μέθοδοι αυτές μπορεί να έχουν απόδοση 100%. Επίσης, η μέθοδος λειτουργεί ανεξάρτητα του μεγέθους πόρων, επομένως το ίδιο επίθεμα μπορεί να λειτουργήσει σε όλα τα πορώδη υλικά.

Αρνητικά: Είναι εξαιρετικά αργή. Τα επιθέματα πρέπει να αντικαθίστανται τακτικά. Πρέπει να διατηρείται καλή πρόσφυση επιθέματος - αντικειμένου καθ' όλη τη διάρκεια της επέμβασης. Το αντικείμενο πρέπει να παραμένει πλήρως κορεσμένο με νερό για πολύ μεγάλο διάστημα. Αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει περαιτέρω φθορά λόγω διάλυσης των συστατικών του, διόγκωσης των οργανικών ουσιών, χημικής αλλοίωσης χρωστικών και συνδετικών, βιοδιάβρωσης και άλλων διαδικασιών αλλοίωσης σχετικών με το νερό. Κατά το τέλος της διαδικασίας το αντικείμενο παραμένει υγρό και πρέπει να στεγνώσει, επομένως είναι πιθανό άλατα που τυχόν παρέμειναν να μεταφερθούν στην επιφάνεια.

9.3.2.3.2. Μεταγωγή

Θετικά:

⁵⁶Καθώς οι απαιτήσεις αυτές ως προς τις ιδιότητες του επιθέματος είναι όχι μόνο αντίθετες αλλά και ανταγωνιστικές φαίνεται μάλλον προφανές ότι η διαδικασία θα ήταν αποτελεσματικότερη εάν πραγματοποιείτο όχι με έναν αλλά με δύο τύπους επιθεμάτων, έναν για κάθε φάση.

- Είναι γρήγορη μέθοδος, της τάξης κάποιων ημερών.
- Εισάγεται λιγότερη υγρασία στο αντικείμενο.
- Η επιφάνεια του αντικειμένου μετά την αφαλάτωση είναι ξηρή, αν και παραμένουν υπόλοιπα υγρασίας στο βάθος του αντικειμένου, και επομένως είναι πιθανή νέα μεταφορά νερού και αλάτων από το βάθος προς την επιφάνεια⁵⁷.

Αρνητικά⁵⁸:

- Η μέθοδος εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων, επομένως το επίθεμα πρέπει να προσαρμόζεται στις ιδιαιτερότητες του πορώδους κάθε ξεχωριστού αντικειμένου.
- Απαιτείται καλή υδραυλική επαφή μεταξύ αντικειμένου - επιθέματος
- Λόγω της φύσης της μεθόδου, τα άλατα θα αφαιρεθούν μόνο από τα επιφανειακά στρώματα του αντικειμένου.
- Κατά την αφαλάτωση η αυξημένη απόθεση αλάτων στο επίθεμα θα επηρεάσει το ρυθμό ξήρανσης μειώνοντας την τάση ατμών του αλάτινου διαλύματος εντός του επιθέματος, μειώνοντας επομένως και το ρυθμό εξάτμισης. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται και ο ρυθμός της οριζόντιας μεταφοράς. Η αυξημένη συγκέντρωση αλάτων στο επίθεμα επίσης ευνοεί φαινόμενα αντίστροφης διάχυσης. Απαιτείται επομένως αντικατάσταση των επιθεμάτων, η διάρκεια των οποίων πρέπει να προσδιορίζεται με δοκιμές, δηλαδή το επίθεμα δεν πρέπει να αφήνεται πάνω στο αντικείμενο μέχρι να στεγνώσουν πλήρως και τα δύο.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι στην πράξη δεν είναι εφικτή η πλήρης αφαλάτωση ενός μη κινητού αντικειμένου. Είναι μερική, ποσοτικά και τοπικά. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερος ο όρος «επέμβαση μείωσης των αλάτων» αντί του όρου «αφαλάτωση». Εφόσον δεν έχει εξασφαλιστεί η διακοπή της νέας μεταφοράς υγρασίας και αλάτων, οι μέθοδοι θα έχουν περιορισμένη και βραχυχρόνια αποτελεσματικότητα⁵⁹.

⁵⁷Σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας των μεθόδων που αναπτύχθηκαν πιο πάνω, είναι πιθανό να συμβεί κίνηση των τοπικών συγκεντρώσεων νερού με εξάτμιση, όχι όμως και αλάτων.

⁵⁸Πρόκειται μάλλον για προϋποθέσεις επιτυχίας της μεθόδου παρά για αρνητικά χαρακτηριστικά της.

⁵⁹Εάν πρώτα δεν έχει εξασφαλιστεί η αντιμετώπιση των αιτίων μεταφοράς νερού, η διεξαγωγή επεμβάσεων αφαλάτωσης αποτελεί καταφανώς εσφαλμένη επιλογή και όχι μειονέκτημα της μεθόδου.

Έτσι, άσχετα από την απόδοση της μεθόδου αμέσως μετά την επέμβαση, η αποτελεσματικότητά της πρέπει να αξιολογείται σε βάθος χρόνου, και ενδεχομένως να επαναλαμβάνεται ή και να εγκαταλείπεται για να υιοθετηθούν εναλλακτικές προσεγγίσεις.

9.3.2.4. Παρατηρήσεις στα συμπεράσματα του προγράμματος «Desalination»

Το πρόγραμμα και τα πορίσματά του είναι εξαιρετικά ενδιαφέροντα, καθώς φωτίζουν τα στάδια της διαδικασίας (ύγρανση πορώδους υλικού - εξαγωγή αλάτινου διαλύματος), τους μηχανισμούς αφαλάτωσης (διάχυση και μεταγωγή), την καταλληλότητα της πρώτης για κινητά αντικείμενα και της δεύτερης για ακίνητα μνημεία και τοιχογραφίες, την αναγκαιότητα της εισαγωγής μη καταστρεπτικών μεθόδων για την αξιολόγηση των επεμβάσεων, καθώς και την απαίτηση για προσαρμογή της σύστασης και ιδίως του πορώδους των επιθεμάτων στις ιδιαιτερότητες του κάθε αντικειμένου. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι η σχέση του πορώδους αντικειμένου - επιθέματος είναι μια μόνο από τις παραμέτρους που καθορίζουν την κατεύθυνση και την ταχύτητα της εξάτμισης και επομένως την επιτυχία της επέμβασης. Εξίσου σημαντικές παράμετροι είναι η σχετική υγρασία, τα ρεύματα αέρα και ιδίως η θερμοκρασία, παράμετροι που δεν τυγχάνουν της προσοχής που τους αναλογεί και συνδυαστικά θα μπορούσαν να αυξήσουν σημαντικά την απόδοση των επεμβάσεων. Θα είχε επομένως ιδιαίτερο ενδιαφέρον έρευνα προς την κατεύθυνση της αύξησης διαλυτότητας των αλάτων μέσω του ελέγχου των συνθηκών κατά την επέμβαση, μέσω προσθέτων στα υδατικά διαλύματα, αλλά και μέσω προσθήκης υπεραπορροφητικών πολυμερών (Super Absorbent Polymers, SAP) στα επιθέματα.

Αναφέρθηκε ήδη στην ενότητα της διαλυτότητας των αλάτων, ότι η αξιοποίηση των θερμότερων δυνατών συνθηκών (ή και η πρόκλησή τους, αφού ληφθούν υπόψη πιθανές ανεπιθύμητες ανατροπές άλλων παραμέτρων) για την εφαρμογή επεμβάσεων αφαλάτωσης, μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητάς τους. Με την επιλογή κατάλληλων συνθηκών για την αφαλάτωση, μπορεί να επιτευχθεί η αφαίρεση πολλαπλάσιας ποσότητας αλάτων από την ίδια ποσότητα νερού, ή, με αντίστροφη διατύπωση, η μείωση της ποσότητας νερού ή και των αναγκαίων κύκλων για την εξαγωγή της ίδιας ποσότητας αλάτων, που επίσης αποτελούν σοβαρά ζητούμενα.

9.4. Σύνοψη

Τόσο ο περιβαλλοντικός έλεγχος, ακόμη και στο επίπεδο του προσδιορισμού του στόχου, όσο και η αφαλάτωση, είναι μερικώς μόνο εφικτά. Έτσι, μετά από σχολαστική μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του κάθε τοιχογραφημένου μνημείου, και εφόσον αυτά το επιτρέπουν, εύλογη λύση για τον περιορισμό της επίδρασης των διαλυτών αλάτων αποτελεί ο συνδυασμός των δύο κατευθύνσεων.

Ας σημειωθεί εδώ ότι το συνήθως περιορισμένο βάθος στο οποίο επιτυγχάνεται αφαλάτωση δεν συνιστά αποτυχία της επέμβασης. **Ο βαθμός επιρροής των μεταβολών των περιβαλλοντικών παραμέτρων στα διαλυτά άλατα που περιέχονται στη δομή των τοιχογραφιών αποτελεί συνάρτηση του χρόνου επιρροής τους και του βάθους.** Η ποσοτικοποίηση της παραπάνω θέσης δεν είναι εύκολη⁶⁰. Είναι όμως βέβαιο ότι οι βραχυπρόθεσμες μεταβολές των περιβαλλοντικών παραμέτρων ενεργοποιούν κύκλους διάλυσης - κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης κυρίως στα επιφανειακά στρώματα, ενώ απαιτούνται πιο μεσομακροπρόθεσμες μεταβολές για να επηρεαστούν τα βαθύτερα στρώματα.

Έτσι, με την επιτυχή αφαλάτωση μιας περιοχής έστω και λίγων εκατοστών από την επιφάνεια, μειώνονται σημαντικά οι επαναλήψεις των κύκλων που οφείλονται σε ημερήσιες διακυμάνσεις, οι οποίες είναι και οι περισσότερες. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με ήπιες, παθητικού χαρακτήρα παρεμβάσεις, που θα συμπιέσουν το εύρος πιο μακροπρόθεσμων διακυμάνσεων, μπορεί να συμβάλλει ευεργετικά στη διατήρηση του αντικειμένου. Τα παραπάνω ισχύουν με δεδομένο ότι οι τύποι υγρασίας σε υγρή μορφή έχουν αντιμετωπιστεί επιτυχώς, και οι κύκλοι ενεργοποιούνται πλέον μόνο μέσω της υγρασίας της ατμόσφαιρας.

⁶⁰Οι σχετικές αναφορές κινούνται μεταξύ της παρατήρησης ότι οι μεταβολές στη σχετική υγρασία του χώρου παύουν να επιδρούν στην περιεχόμενη υγρασία τοιχοποιίας σε βάθος 15-20 εκατοστών από την επιφάνεια (Massari & Massari, 1993)(Bianchini, 1906), ενώ επιδρούν άμεσα στην επιφάνεια. «Οι διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας κυμαίνονται σε ένα εύρος, ακόμη και σε ημερήσια βάση, ικανό για την πραγματοποίηση κύκλων διάλυσης και κρυστάλλωσης των αλάτων» (Πρόκος, 2010)(Πρόκος, 2012). Περαιτέρω, το ζήτημα της μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας ως συνάρτηση του βάθους θίγεται στο De Kock κ.α. 2021.

Για τον ίδιο λόγο υποστηρίζουμε ότι περιορίζεται η αναγκαιότητα καταστρεπτικής δειγματοληψίας για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των αλάτων σε μεγαλύτερα βάθη, ενώ για τον προσδιορισμό των αλάτων από μικρότερα βάθη ενδεχομένως αρκεί η μη καταστρεπτική εξαγωγή δειγμάτων μέσω επιθεμάτων.

**ΜΕΡΟΣ Γ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΑΗ ΜΙΧΑΛΗ ΣΤΟΝ
ΑΡΙΛΛΑ ΘΕΣΠΡΩΤΙΑΣ**

10. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γεγονός ότι ο ναός προστατεύεται από τις διατάξεις της αρχαιολογικής νομοθεσίας κατέστησε αναγκαία την υποβολή αιτήματος⁶¹ προς την Εφορεία Αρχαιοτήτων Θεσπρωτίας για χορήγηση άδειας φωτογράφισης, μελέτης και δημοσίευσης του ναού του Άη Μιχάλη στον Αρίλλα Τ.Κ. Πέρδικας, Π.Ε. Θεσπρωτίας στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η σχετική άδεια χορηγήθηκε από το Τμήμα Εποπτείας Ελληνικών & Αλλοδαπών Επιστημονικών Ιδρυμάτων και Συντονισμού Θεμάτων Διεθνών Συνεργασιών & Οργανισμών της Διεύθυνσης Βυζαντινών και Μεταβυζαντινών Αρχαιοτήτων έπειτα από γνωμοδότηση του Τοπικού Συμβουλίου Μνημείων Ηπείρου (πράξη 3/23-6-2020) (ΥΠΠΟΑ/ΓΔΑΠΚ/ΔΒΜΑ/ΤΕΕΑΕΙ/380224/267159/4522/733/17-09-2020).

10.1. Αιτιολόγηση της επιλογής

Ένα σύνολο χαρακτηριστικών του Αη Μιχάλη καθιστούν το μνημείο κατάλληλο για την αξιοποίησή του ως μελέτης περίπτωσης. Συγκεκριμένα:

- Εμφανίζει παθολογία τοιχογραφιών που συνδέεται ευθέως με τη δυσμενή επίδραση υγρασίας διαφορετικών πηγών, μορφών και τύπων.
- Πρόκειται για σχετικά μικρού μεγέθους, μονόχωρο στην αρχική μορφή του κτήριο, χωρίς σημαντική διαμερισματοποίηση, γεγονός που απλοποιεί τη διαδικασία των μετρήσεων και την ερμηνεία τους.
- Δεν υπάρχει σύστημα ψύξης ή θέρμανσης, επομένως τα θερμοϋγρομετρικά χαρακτηριστικά του μικροκλίματος καθορίζονται αποκλειστικά από το εξωτερικό περιβάλλον, τις ιδιότητες του κελύφους και τη χρήση του.
- Η χρήση του είναι περιστασιακή.

Τα παραπάνω δεδομένα απλοποιούν σε ένα βαθμό, ή έστω καθιστούν πιο διαχειρίσιμο το σύνθετο και πολυπαραγοντικό φαινόμενο της αλληλεπίδρασης της υγρασίας με τα υλικά κατασκευής τοιχογραφημένων μνημείων.

⁶¹Σύμφωνα με την αριθμ. πρωτ. 4473/25-07-2011 εγκύκλιο «Όροι και διαδικασίες για τη χορήγηση άδειας επιστημονικής μελέτης και δημοσίευσης των ιστάμενων μνημείων».

10.2. Σύντομο ιστορικό και διοικητική διαδικασία

Η επαφή μας με το ναό ξεκίνησε το 2017, μετά από πρόσκληση του Εφημερίου για την εκπόνηση μελέτης συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών, στο πλαίσιο της οποίας αναπτύχθηκε η επίδραση των περιβαλλοντικών παραμέτρων στη διατήρηση του διακόσμου.

Η εκπόνηση μελέτης και η έγκρισή της από τα αρμόδια όργανα του Υπουργείου Πολιτισμού αποτελεί διοικητική και ουσιαστική προϋπόθεση για την εκτέλεση εργασιών συντήρησης σύμφωνα με τη σχετική νομοθεσία (Ν. 3028/2002). Ακολουθήθηκαν τα εξής στάδια:

- Αίτημα προς την αρμόδια Εφορεία Αρχαιοτήτων (ΕΦΑ) Θεσπρωτίας για τη χορήγηση άδειας εκπόνησης «μελέτης συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του κοιμητηριακού ναού Αγ. Μιχαήλ στον Αρίλλα Πέρδικας Ν. Θεσπρωτίας» (30-07-2018).
- Χορήγηση της σχετικής άδειας από την ΕΦΑ Θεσπρωτίας (ΥΠΠΟΑ/ΓΔΑΠΚ/ΕΦΑΘΕΣ/373650/267621/2883/02-08-2018).
- Εκπόνηση της «μελέτης συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του κοιμητηριακού ναού Αγ. Μιχαήλ στον Αρίλλα Πέρδικας Ν. Θεσπρωτίας» με την επισήμανση της ανάγκης εκπόνησης μελέτης από εξειδικευμένο μηχανικό για την αντιμετώπιση ορισμένων από τους τύπους υγρασίας που διαπιστώθηκαν κατά τη μελέτη συντήρησης.
- Κατάθεση της «μελέτης συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του κοιμητηριακού ναού Αγ. Μιχαήλ στον Αρίλλα Πέρδικας Ν. Θεσπρωτίας» στην ΕΦΑ Θεσπρωτίας (ΥΠΠΟΑ/ΓΔΑΠΚ/ΕΦΑΘΕΣ/647715/465534/5040/13-12-2018).
- Απόφαση έγκρισης της «μελέτης συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του κοιμητηριακού ναού Αγ. Μιχαήλ στον Αρίλλα Πέρδικας Ν. Θεσπρωτίας» από τη Διεύθυνση Συντήρησης Αρχαίων και Νεώτερων Μνημείων (ΥΠΠΟΑ/ΓΔΑΠΚ/ΔΣΑΝΜ/ΤΜΣΑΝΜ/Φ20/131757/91080/1413/180/20-06-2019), έπειτα από γνωμοδότηση του Τοπικού Συμβουλίου Μνημείων Ηπείρου (πράξη 1/29-01-2019).

- Σύνταξη και κατάθεση «μελέτης λήψης πρόσθετων μέτρων προστασίας αντιμετώπισης των πηγών υγρασίας στον Ιερό Ναό Αγίου Μιχαήλ Αρίλλα Πέρδικας» από τον Πολιτικό Μηχανικό Κωνσταντίνο Ντέλμα.
- Απόφαση έγκρισης της «μελέτης λήψης πρόσθετων μέτρων προστασίας αντιμετώπισης των πηγών υγρασίας στον Ιερό Ναό Αγίου Μιχαήλ Αρίλλα Πέρδικας» από την ΕΦΑ Θεσπρωτίας (ΥΠΠΟΑ/ΓΔΑΠΚ/ΕΦΑΘΕΣ/167285/116756/1158/27-08-2019) έπειτα από γνωμοδότηση του Τοπικού Συμβουλίου Μνημείων Ηπείρου (πράξη 2/2019).
- Εκτέλεση εργασιών κατασκευής τάφρου αποστράγγισης - εξαερισμού (Σεπτέμβριος 2019) υπό την επίβλεψη της ΕΦΑ Θεσπρωτίας
- Κοπή της κόμης ελιάς που σκίαζε ολόκληρη την ανατολική και μέρος της νότιας όψης του ναού (Μάρτιος 2020).
- Παρακολούθηση των αποτελεσμάτων της επέμβασης στην περιεχόμενη υγρασία της τοιχοποιίας και τη σχετική υγρασία και θερμοκρασία του εσωτερικού του ναού.
- Εκτέλεση εργασιών συντήρησης με έμφαση στην αφαλάτωση, όταν οι μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας έδειξαν σταδιακή υποχώρησή της, δηλαδή επιτυχία της αποστραγγιστικής τάφρου και έναρξη της περιόδου ξήρανσης. Η έναρξη των εγκεκριμένων εργασιών έγινε μετά από ενημέρωση προς την ΕΦΑ Θεσπρωτίας.
- Πραγματοποίηση ήπιων παρεμβάσεων στα ανοίγματα του ναού για τον περιορισμό των ρευμάτων αέρα.

11. Ο ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΑΗ ΜΙΧΑΛΗ

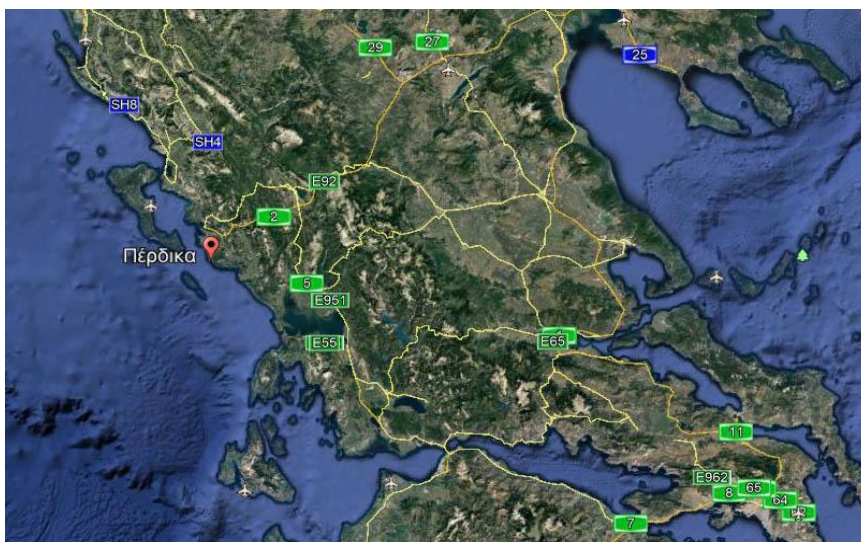
11.1. Σύντομα ιστορικά στοιχεία και αρχιτεκτονική περιγραφή⁶²



Εικ. 18: Αη Μιχάλης στον Αρίλλα Θεσπρωτίας. Άποψη από Β
(Παπαδοπούλου & Κονιδισιώτης, 2018)

Ο οικισμός του Αρίλλα βρίσκεται σε απόσταση περίπου τριών χιλιομέτρων από την Πέρδικα και τριάντα δύο χιλιομέτρων από την Ηγουμενίτσα, σε κατάφυτη πλαγιά με μικρή απόσταση από τη θάλασσα και υψόμετρο λίγων εκατοντάδων μέτρων. Ο ναός του Άη Μιχάλη είναι ο κοιμητηριακός της περιοχής, γεγονός που συνδέεται με το ρόλο του ψυχοπομπού που διατηρεί ο αρχάγγελος Μιχαήλ στην εκκλησιαστική και λαϊκή παράδοση. Κατά την αναζήτηση στο Διαρκή Κατάλογο Κηρυγμένων Μνημείων και Αρχαιολογικών Χώρων δεν διαπιστώθηκε η ύπαρξη διοικητικής πράξης κήρυξης.

⁶²Η ενότητα αντλείται από τη μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του κοιμητηριακού ναού Αγίου Μιχαήλ στον Αρίλλα Πέρδικας Ν. Θεσπρωτίας (Παπαδοπούλου & Κονιδισιώτης, 2018).



Εικ. 19: Η Πέρδικα Θεσπρωτίας (Google Earth)

Η μόνη βιβλιογραφική αναφορά που εντοπίστηκε για το ναό είναι τα στοιχεία που παραθέτει ο εκπαιδευτικός και συγγραφέας Σ. Μουσελίμης (2001). Από τις πληροφορίες του μεταφέρουμε ότι το όνομα του οικισμού σχετίζεται με το Ρωμαίο στρατηγό Αρίλλα, ο ναός κτίστηκε προ του εξισλαμισμού των αρβανιτόφωνων χριστιανών κατοίκων, καθώς και ότι κάτω από τη νότια πλευρά του σώζεται αρχαίο πολυγωνικό τείχος με ογκολίθαρα.



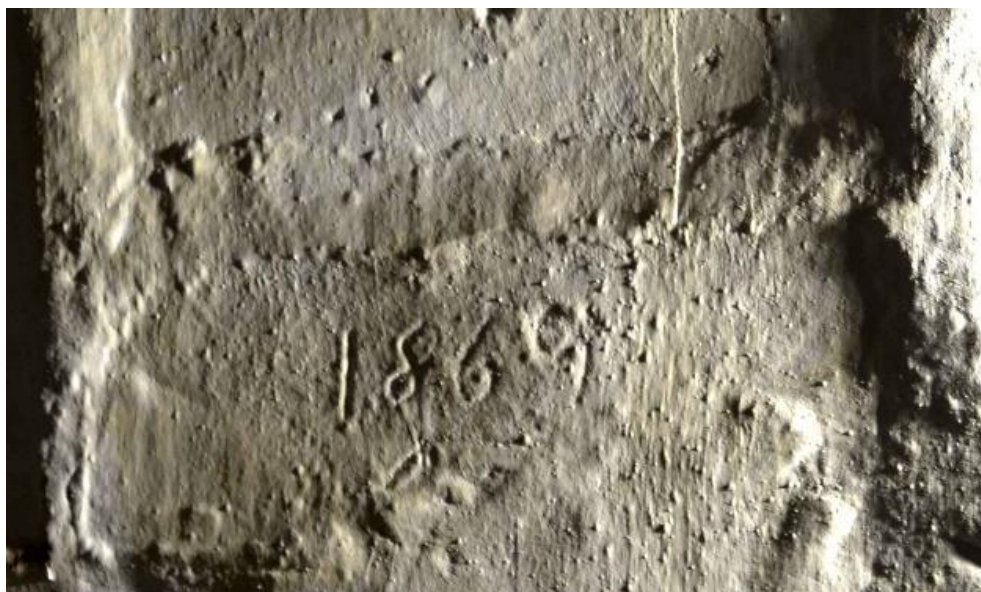
Εικ. 20: Αη Μιχάλης στον Αρίλλα Θεσπρωτίας. Άποψη από Ν.
Αναλημματικός τοίχος που εδράζεται επί τμήματος αρχαίου τείχους

Τέλος, ότι «ενώ όλα τα σπίτια του χωριού ήταν και είναι με κεραμίδια, ο άη Μιχάλης απ' τα παλιά χρόνια είχε στέγη με άσπρες πλάκες μέχρι το 1978, που

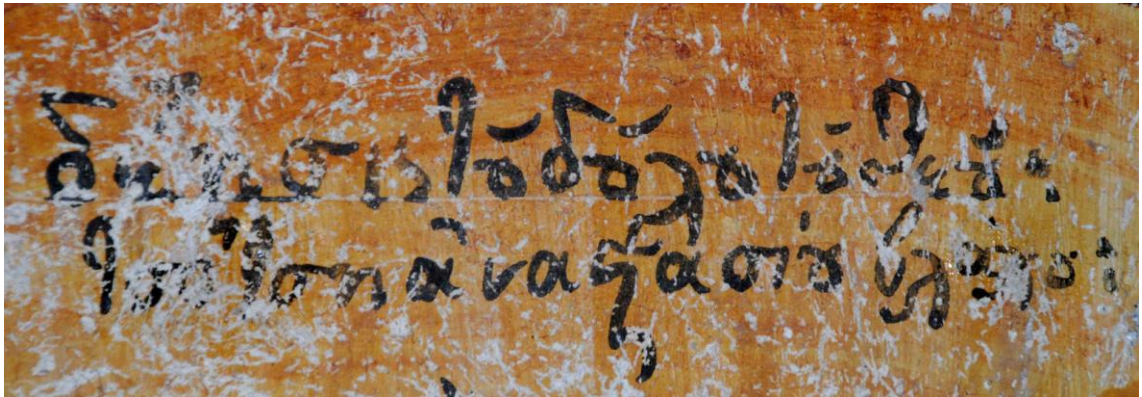
κεραμοσκεπάστηκε χωρίς την άδεια της αρχαιολογικής υπηρεσίας». Άλλες από τις αναφορές του συγγραφέα δεν επιβεβαιώνονται, όπως τα περί ναού «πατόκορφα αγιογραφημένου, σε τοίχους και θόλους», και μάλιστα σε περισσότερες από μία φάσεις, που καλύπτονται από ασβεστώματα.

Άμεσες πληροφορίες προκύπτουν από την παρατήρηση επιγραφών του ναού. Εξωτερικά, πάνω από τη βόρεια είσοδο, τοποθετείται εγχάρακτη λίθινη πλάκα, εξαιρετικά δυσδιάκριτη λόγω των αλλεπάλληλων ασβεστωμάτων. Στο εσωτερικό του ναού, στο νότιο τοίχο, σε επιγραφή εγχάρακτη πάνω σε νωπό κονίαμα, συναντάμε, τη χρονολογία 1869. Στο βόρειο τοίχο, αφιερωματική επιγραφή στην παράσταση του Αγίου Γεωργίου του Νέου, διασώζει το όνομα και τη φυλετική ταυτότητα του δωρητή, συσχετίζοντας το ναό ή τουλάχιστον μέρος των πιστών με τις μετακινήσεις των νομάδων Βλάχων. Ο Μουσελίμης μεταγράφει: «*Δέησις του δούλου του θεού: τάτση αναστασίου βλάχου:*». Προσεκτική παρατήρηση της επιγραφής καθιστά πιθανότερη την ανάγνωση «*τσότση*».

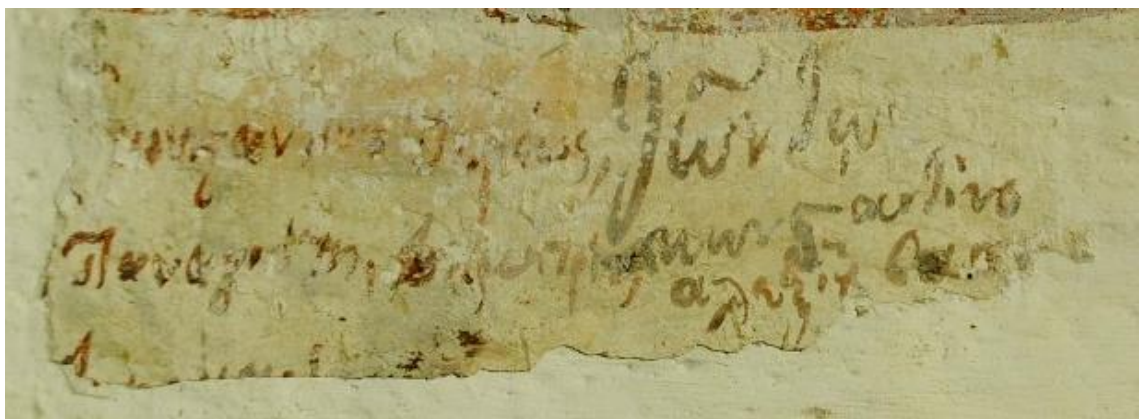
Ονόματα κατοίκων και ιερέων τα οποία σώζονται στα δίπτυχα της κόγχης της πρόθεσης θα αποκαλυφθούν μετά την αφαίρεση των ασβεστοχρισμάτων.



Εικ. 21: Εγχάρακτη επιγραφή στο νότιο τοίχο



Εικ. 22: Αφιερωματική επιγραφή στην παράσταση του βορείου τοίχου

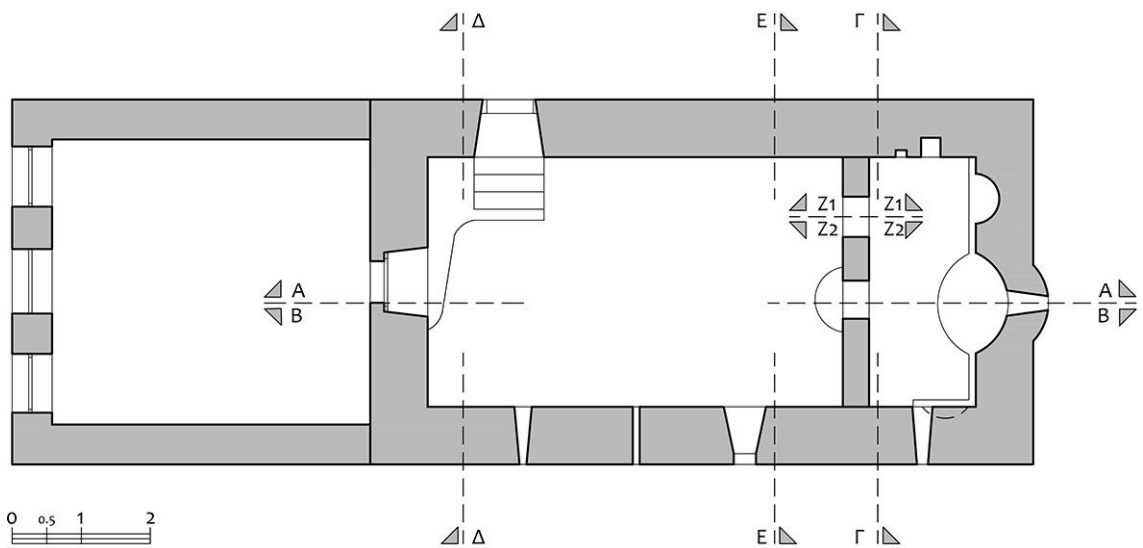


Εικ. 23: Δίπτυχα πρόθεσης

Ο ναός είναι καμαροσκεπής και στην αρχική του μορφή μονόχωρος, με εξέχουσα ημικυκλική κόγχη ιερού, μέγιστων εσωτερικών διαστάσεων 8,40Χ3,60μ. Σε νεώτερη περίοδο προς τα δυτικά προσκολλήθηκε νάρθηκας, με αποτέλεσμα οι μέγιστες εξωτερικές διαστάσεις του συνόλου να διαμορφώνονται σε 15Χ5,26μ. Παλαιότερα, μέχρι και το 1978, καλυπτόταν από λευκές πλάκες, ενώ σήμερα από κεραμοσκεπή, με λοξές αποτμήσεις προς Α και Δ.



Εικ. 24: Άποψη του ναού από ψηλά. Δορυφορική λήψη (Google Earth)



Σχέδιο 1: Κάτοψη

Στη στέψη της τοικοποιίας εξωτερικά, τρεις επάλληλες σειρές εκφορικά τοποθετημένων πλακών διαμορφώνουν γείσο. Η στάθμη του δαπέδου του ναού βρίσκεται χαμηλότερα από του εξωτερικού εδάφους. Η είσοδος σήμερα γίνεται από δύο θύρες, μια στο βόρειο

τοίχο του κυρίως ναού και μια δυτικά στο νάρθηκα. Ο φωτισμός εξασφαλίζεται από τέσσερα ανοίγματα στο νότιο τοίχο και ένα στον ανατολικό. Η κτιστή τοικοποιία είναι σημαντικού πάχους, 80 - 90εκ., προκειμένου να φέρει με επάρκεια τα σημαντικά φορτία και ιδίως τις πλάγιες ωθήσεις της καμάρας. Οι τοίχοι ενισχύονται με ξυλοδεσιές. Σε διάφορες θέσεις εξωτερικά είναι ορατές κυκλικές οπές, που προκύπτουν από την αποσύνθεση των ακατέργαστων εγκάρσιων στοιχείων τους (κλάπες). Εξωτερικά, νεώτερο στοιχείο αποτελεί ο κτιστός πάγκος, που εκτείνεται σε όλο το μήκος του νεώτερου νάρθηκα και σε τμήμα του αρχικού κτηρίου, καθώς και μεταλλικά στέγαστρα, πάνω από τη Β είσοδο και σε όλο το μήκος της δυτικής όψης.



Εικ. 25: Ανατολική όψη: εμφανής η κατωφέρεια, η ημικυκλική αψίδα του ιερού, η λοξή απότμηση στη στέγη και οι οπές της ξυλοδεσιάς



Εικ. 26: Το γείσο στη στέψη της τοικοποιίας



Εικ. 27: Ο νεώτερος, κτιστός πάγκος



Εικ. 28: Ο νεώτερος νάρθηκας στα δυτικά



Εικ. 29: Βόρεια είσοδος εξωτερικά και κτιστή κλίμακα της ίδιας εισόδου στο εσωτερικό

11.2. Οι τοιχογραφίες του ναού

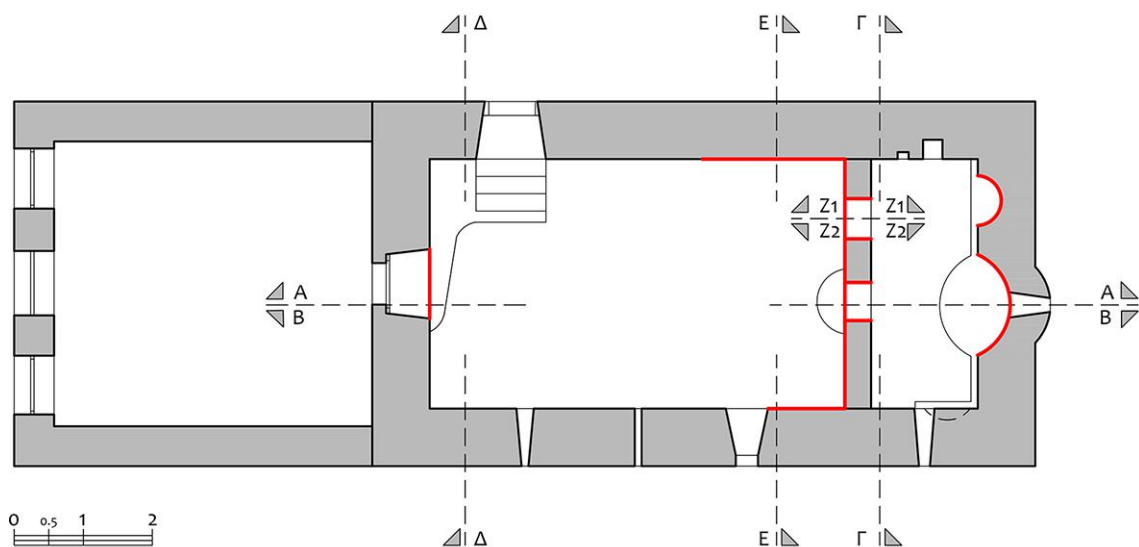
11.2.1. Περιγραφή και στοιχεία εικονογραφικού προγράμματος



Εικ. 30: Οι τοιχογραφίες του ναού

Οι τοιχογραφίες του ναού είναι ζωηρόχρωμα έργα λαϊκού τεχνίτη, με χαρακτηριστικά που τις τοποθετούν χρονολογικά μετά τα μέσα του 19^{ου} αι. Άλλωστε, η περίληψη του Αγίου Γεωργίου του Νέου του εξ Ιωαννίνων στα θέματα του βόρειου τοίχου, σε επίπεδο στρωματογραφικά ενιαίο με τα υπόλοιπα, θέτει σαφές χρονικό όριο post quem το 1838, έτος μαρτυρίου του Αγίου.

Η ζωγραφική καλύπτει μέρος μόνο των εσωτερικών επιφανειών. Όλα τα στοιχεία δείχνουν ότι οι υπόλοιπες περιοχές δεν είχαν αγιογραφηθεί. Δεν μπορεί να γίνει λόγος για πλήρες εικονογραφικό πρόγραμμα, δεδομένου του περιορισμένου αριθμού των παραστάσεων, οι οποίες πάντως τοποθετούνται στις αναμενόμενες θέσεις.



Σχέδιο 2: Κάτοψη: θέσεις τοιχογραφιών

Συγκεκριμένα:

Στις κόγχες του ιερού και της πρόθεσης, η των Ουρανών Πλατυτέρα και η Άκρα Ταπείνωση αντίστοιχα. Η δεύτερη επιγράφεται «η αποκαθήλωσης».



Εικ. 31: Κόγχη του ιερού. Πλατυτέρα



Εικ. 32: Κόγχη της πρόθεσης. Άκρα Ταπείνωση

Στο κτιστό τέμπλο, στην ανώτερη ζώνη του αποστολικού, απεικονίζεται Μεγάλη Δέηση, με τον Ιησού στο μέσον μεταξύ Παναγίας, Προδρόμου και δύο ομάδων Αποστόλων.



Εικ. 33: Τέμπλο. Ανώτερη ζώνη

Στη ζώνη των δεσποτικών εικόνων από Β προς Ν τοποθετούνται ο τιμώμενος Αρχάγγελος Μιχαήλ, η Μήτηρ Θεού στον τύπο της Βρεφοκρατούσας, ο Ιησούς Χριστός και ο Άγιος Ιωάννης ο Πρόδρομος. Στις ποδιές σώζεται γραμμικός διάκοσμος, ενώ στις παραστάδες και τα εσωρράχια των εισόδων προς το ιερό φυτικός. Στην περιοχή του ιερού τέλος, σε κάποιες θέσεις διακρίνονται σταυροί, εμπίεστοι ή χαραγμένοι με το δάχτυλο σε νωπό κονίαμα.



Εικ. 34: Τέμπλο. Αρχάγγελος Μιχαήλ



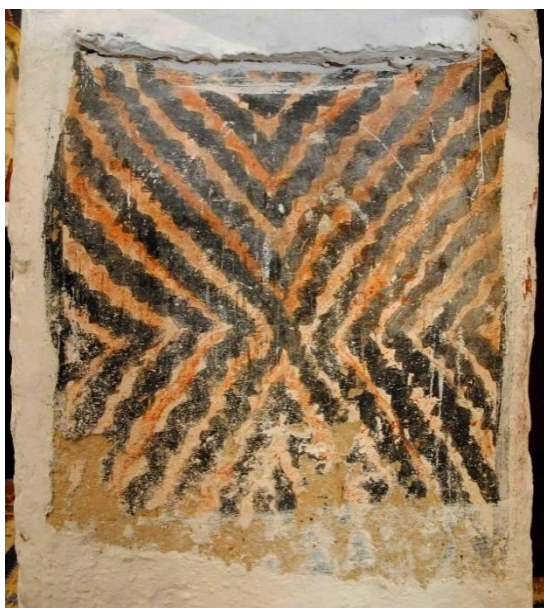
Εικ. 35: Τέμπλο. Μήτηρ Θεού
Βρεφοκρατούσα



Εικ. 36: Τέμπλο. Ιησούς Χριστός και ο Άγιος Ιωάννης ο Πρόδρομος



Εικ. 37: Φυτικός διάκοσμος στα εσωράχια των εισόδων προς το ιερό



Εικ. 38: Τέμπλο. Γραμμικός διάκοσμος στις ποδιές



Εικ. 39: Σταυροί εμπίεστοι ή χαραγμένοι με το δάχτυλο σε νωπό κόνιαμα

Στη μέση και κατώτερη ζώνη του Βόρειου και νότιου τοίχου του κυρίως ναού:

Στο βόρειο τοίχο, από Α προς Δ, μέσα σε πλαίσιο από κονίαμα και σε μικρή υποχώρηση, οι Άγιος Νικόλαος, Άγιος Γεώργιος έφιππος και ο Άγιος Γεώργιος ο Νέος εξ Ιωαννίνων.



Εικ. 40: Βόρειος τοίχος. Άγιος Νικόλαος, Άγιος Γεώργιος έφιππος και ο Άγιος Γεώργιος ο Νέος εξ Ιωαννίνων

Στο νότιο τοίχο, οι Άγιος Βασίλειος και Άγιος Δημήτριος έφιππος. Ο διάκοσμος συνέχιζε και στις ποδιές, καλυμμένος σήμερα λιγότερο ή περισσότερο από ασβεστώματα. Σε εσοχή του δυτικού τοίχου του κυρίως ναού, πάνω από την είσοδο, τοποθετείται παράσταση της Κοίμησης της Θεοτόκου.



Εικ. 41: Νότιος τοίχος. Άγιος Βασίλειος και Άγιος Δημήτριος έφιππος



Εικ. 42: Δυτικός τοίχος. Κοίμηση της Θεοτόκου

11.2.2. Τεχνολογία κατασκευής των τοιχογραφιών

Επί της λιθοδομής εφαρμόζεται ένα πρώτο, υπόλευκο, θερμού τόνου στρώμα επιχρίσματος, το κονίαμα εξομάλυνσης, πάχους 15-30mm, με εξαιρετικά χαρακτηριστικά ως προς τις μηχανικές ιδιότητες και τη διατήρησή του. Πρόκειται για ασβεστοκονίαμα ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τους αρμούς, με αδρανή μικρού και μέτριου μεγέθους, διαβαθμισμένης κοκκομετρίας, μεταξύ των οποίων διακρίνονται και κόκκοι θραυσμένων κεραμικών. Το γεγονός ότι τοπικά διακρίνονται σβώλοι αδιάλυτου ασβέστη δεν φαίνεται να έχει επηρεάσει την αντοχή του επιχρίσματος.



Εικ. 43: Η επιφάνεια του κονιάματος εξομάλυνσης

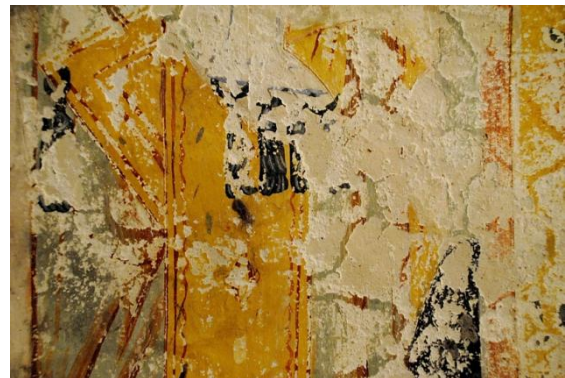


Εικ. 44: Η δομή του κονιάματος εξομάλυνσης

Το πάχος του δεύτερου στρώματος, επί του οποίου εκτελείται η ζωγραφική, κυμαίνεται από 2 έως 10mm. Πρόκειται επίσης για ασβεστοκονίαμα, λευκού τόνου, αποτελούμενο είτε αποκλειστικά από ασβέστη, είτε από ασβέστη και εξαιρετικά λεπτόκοκκα λευκά αδρανή (παιπάλη μαρμάρου). Το κονίαμα εξομάλυνσης συναντάται σε όλες τις εσωτερικές επιφάνειες του ναού, ενώ το δεύτερο στρώμα μόνο στις τοιχογραφημένες. Για το λόγο αυτό οι τοιχογραφίες εξέχουν κατά τι από τις υπόλοιπες, ασβεστωμένες επιφάνειες, δίνοντας την εντύπωση ότι καλύπτουν παλαιότερο στρώμα ζωγραφικής.



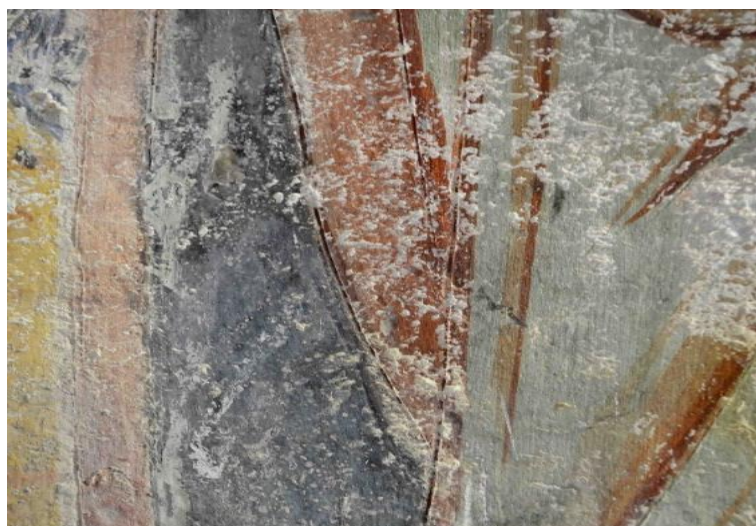
Εικ. 45: Η στρωματογραφία όπως αποκαλύπτεται σε περιοχές απωλειών. Περιοχή με το λεπτόκοκκο στρώμα επιχρίσματος σε ικανό πάχος (10mm)



Εικ. 46: Το λεπτόκοκκο στρώμα επιχρίσματος σε πάχος ελάχιστων χιλιοστών

Πριν την εφαρμογή του χρωματικού στρώματος, το προσχέδιο έχει χαραχθεί όσο το υπόστρωμα ήταν νωπό. Σε νωπό κονίαμα έχει εφαρμοστεί και μέρος του χρωματικού στρώματος (μονόχρωμες επιφάνειες και χρωματικό βάθος). Στην περίπτωση αυτή ως συνδετικό λειτουργεί ο ασβέστης του υποστρώματος.

Αντίθετα, οι λεπτομέρειες έχουν εφαρμοστεί σε δεύτερο χρόνο, με συνδετικό κάποιο οργανικό υλικό (μικτή τεχνική νωπογραφίας - ξηρογραφίας).



Εικ. 47: Χάραξη του προσχεδίου σε νωπό κονίαμα

Οι χρωστικές που χρησιμοποιήθηκαν είναι ανόργανες, φυσικές και τεχνητές. Κίτρινα και κόκκινα οξειδία του σιδήρου, σιέννες, όμπρες, ενώ αναγνωρίστηκαν και πράσινο verdigris, κόκκινο κιννάβαρης, κόκκινο μίγμα κιννάβαρης και κόκκινου μολύβδου, μπλε αζουρίτη και μπλε ultramarin. Για τον προσδιορισμό της φύσης τους εφαρμόστηκαν και ερμηνεύθηκαν συγκριτικά ψευδοχρωματική απεικόνιση υπερύθρου (Infrared False Color, IRFC) και φασματοσκοπία ανάκλασης οπτικών ινών (Fiber Optics Reflectance Spectroscopy, FORS).

Με ψευδοχρωματική απεικόνιση υπερύθρου έγινε μια πρώτη εκτίμηση: η πράσινη χρωστική που παράγει μπλε ψευδόχρωμα μπορεί να προσδιοριστεί ως μαλαχίτης ή verdigris και μία από τις μπλε, που επίσης παράγει βαθύ μπλε ψευδόχρωμα, ως αζουρίτης. Μια δεύτερη μπλε χρωστική που παράγει κόκκινο ψευδόχρωμα φαίνεται να είναι τεχνητή (τεχνητό ultramarin ή μπλε κοβαλτίου). Η πιθανότητα του φυσικού ultramarine φαίνεται να αποκλείεται στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω του εξαιρετικά υψηλού κόστους του. Και οι δύο πιο πάνω τεχνητές μπλε χρωστικές παράγονται και διατίθενται εμπορικά κατά το πρώτο ήμισυ του 19^{ου} αι., θα μπορούσαν επομένως κάλλιστα να έχουν χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση του Αη Μιχάλη (1869).



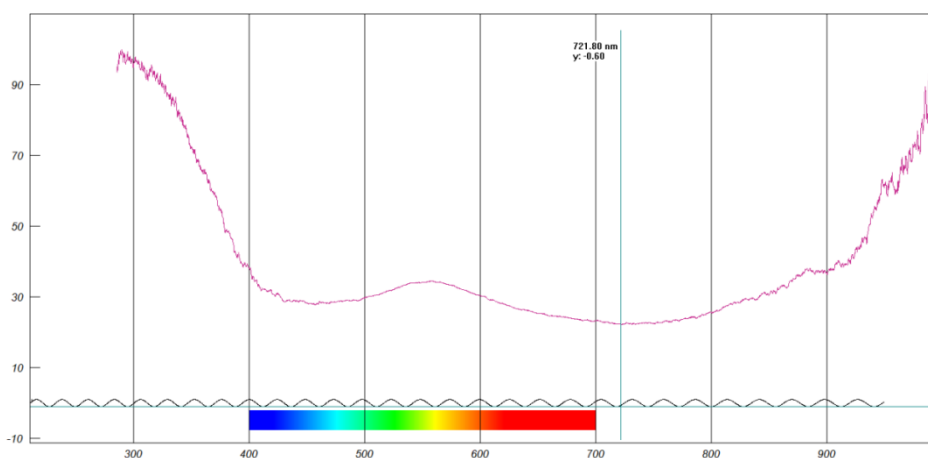
Εικ. 48: Πλατυτέρα. Αριστερά, λήψη στο ορατό, δεξιά ψευδοχρωματική υπέρυθρου. Οι μπλε χρωστικές του φόντου και του ενδύματος της Παναγίας παράγουν σκούρο μπλε ψευδόχρωμα, παραπέμποντας σε χρήση αζουρίτη. Η πράσινη χρωστική του μεταλλίου του Χριστού παράγει μπλε ψευδόχρωμα, που αντιστοιχεί σε verdigris ή μαλαχίτη. Αντίθετα, οι μπλε πτυχώσεις στο ιμάτιο του Χριστού δίνουν κόκκινο ψευδόχρωμα, παραπέμποντας σε τεχνητό ultramarine ή μπλε κοβαλτίου.



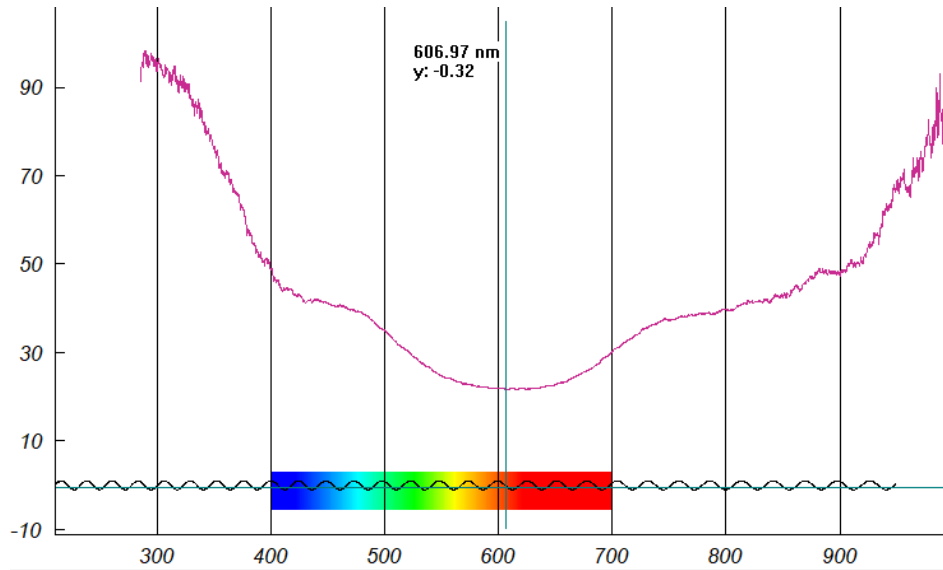
Εικ. 49: Τέμπλο, ζώνη αποστολικού. Ό.π.

Ο συνδυασμός της ψευδοχρωματικής απεικόνισης (IRFC) με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ανάκλασης οπτικών ινών (FORS) συνέβαλε περαιτέρω στην αναγνώριση των χρωστικών.

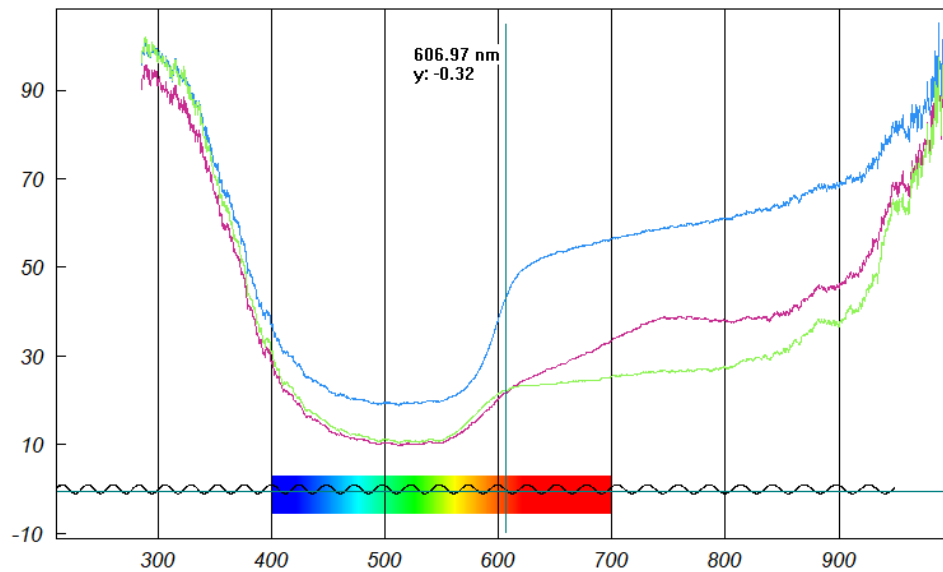
- Το πράσινο ταυτοποιήθηκε ως verdigris, χάρη στο ελάχιστο απορρόφησης που εμφανίζει κοντά στα 720nm (Γράφημα 15).
- Το γαλάζιο προσδιορίστηκε ως μείγμα λευκής χρωστικής και μπλε ultramarin, προφανώς τεχνητού, χάρη στο ελάχιστο απορρόφησης κοντά στα 600nm (Γράφημα 16).
- Το σκούρο μπλε ως αζουρίτης, σε ανάμειξη προφανώς με μαύρη χρωστική, χάρη στο ελάχιστο απορρόφησης κοντά στα 640nm.
- Οι κίτρινες χρωστικές ταυτοποιήθηκαν ως κίτρινα οξειδία του σιδήρου (κίτρινη ώχρα) χάρη στη γενική σιγμοειδή μορφή της καμπύλης, και τη χαρακτηριστική μικρή κορυφή στα 450nm.
- Οι κόκκινες χρωστικές (Γράφημα17) αναγνωρίστηκαν ως:
 - Κόκκινο οξείδιο του σιδήρου (κόκκινη ώχρα) χάρη στη σιγμοειδή μορφή και το σημείο καμψής (inflection point) στα 580nm.
 - Κόκκινο κιννάβαρης, χάρη στο σημείο καμψής κοντά στα 600nm
 - Κόκκινο μίγμα κιννάβαρης και κόκκινου του μολύβδου (μίνιου), λόγω της μετατόπισης του σημείου καμψής στα 585nm.



Γράφημα 15: Καμπύλη ανάκλασης πράσινου verdigris



Γράφημα 16: Καμπύλη ανάκλασης μπλε ultramarin



Γράφημα 17: Καμπύλες ανάκλασης κόκκινων χρωστικών.
Μωβ καμπύλη: κόκκινο οξειδίο σιδήρου. Γαλάζια καμπύλη: Κιννάβαρη.
Πράσινη καμπύλη: μείγμα κιννάβαρης και κόκκινου του μολύβδου

12. ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ, ΜΟΡΦΩΝ ΚΑΙ ΑΙΤΙΩΝ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

12.1. Εισαγωγή και μεθοδολογία

Η μελέτη προσδιορισμού των πηγών, μορφών και αιτιών της υγρασίας πραγματοποιήθηκε κατά τα έτη 2016-2018, στο πλαίσιο της εκπόνησης της μελέτης συντήρησης των τοιχογραφιών. Η μελέτη ως προς τις παραμέτρους της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος στηρίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα μιας σύντομης περιόδου, από 15/7 έως 11/8 του 2018 λόγω απώλειας των δεδομένων της περιόδου 2016-2018, μετά από κλοπή υπολογιστή και ψηφιακών μέσων αποθήκευσης. Τα δεδομένα συμπληρώνονται με καταγραφές από τις 19/03/2019 οι οποίες συνεχίζονται. Παρατηρήσεις που έγιναν εκ των υστέρων στα συμπεράσματα της μελέτης και την ερμηνεία τους παρατίθενται ως υποσημειώσεις.

Στο πλαίσιο της μελέτης συντήρησης ακολουθήθηκε μεθοδολογία που συνεξετάζει:

- Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής.
- Τη θέση του μνημείου.
- Τα αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτηρίου και την παθολογία του, σε σχέση με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους.
- Την παθολογία των τοιχογραφιών
- Καταγραφές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό και το εξωτερικό του ναού, και συγκριτική εξέτασή τους.
- Θερμογραφική επιθεώρηση του κτηρίου.
- Μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας σε τοιχογραφίες και επιχρίσματα.

12.2. Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής

Το κλίμα θεωρείται μεσογειακό στα παράκτια μέρη ενώ καθώς προχωράμε στο εσωτερικό γίνεται όλο και πιο ηπειρωτικό. Το γεγονός ότι η περιοχή μελέτης είναι παραθαλάσσια, αν και ημιορεινή, ασκεί μετριαστική επίδραση στο κλίμα της.

Πίνακας 6: Θερμοκρασίες της ευρύτερης περιοχής

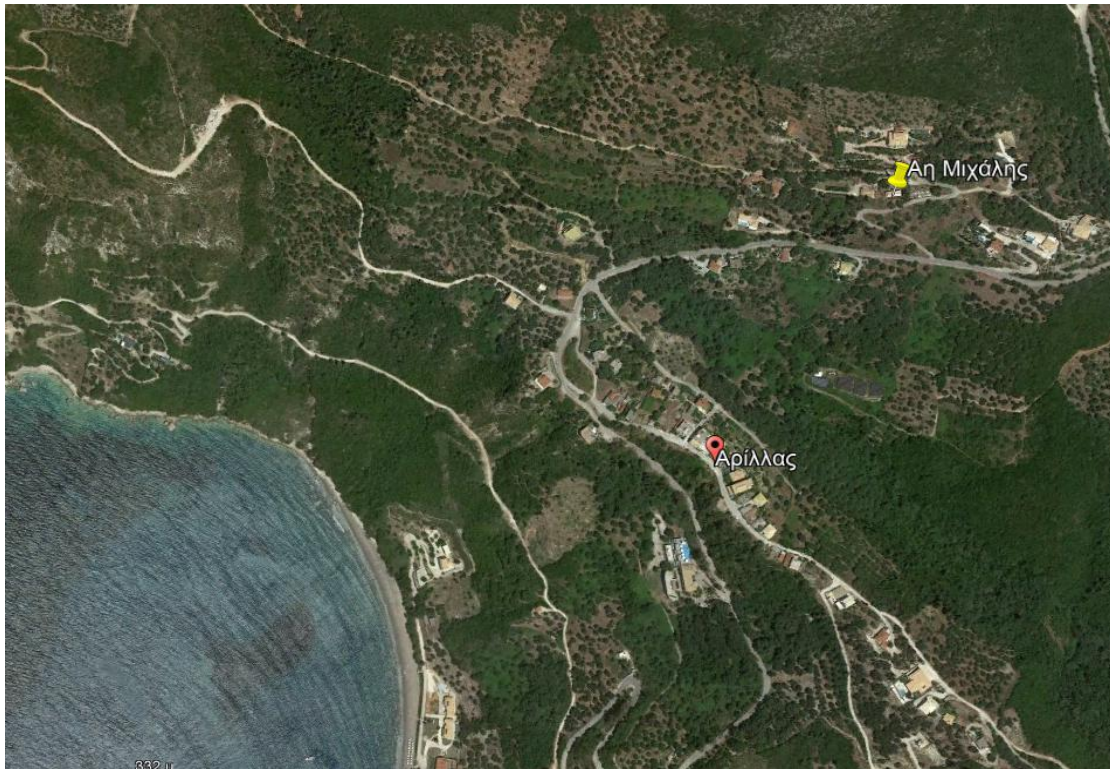
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	5.3	5.7	7.1	9.6	13.3	16.9	18.9	19.3	16.8	13.7	10.2	7.0
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	9.8	10.2	12.1	15.2	19.9	24.2	26.7	26.6	22.7	18.5	14.4	11.2
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	13.9	14.1	16.0	19.1	24.0	28.2	31.2	31.5	27.5	23.2	18.7	15.2

Τα δεδομένα θερμοκρασίας και συχνοτήτων ανέμων καταγράφονται στον Μετεωρολογικό Σταθμό της Κέρκυρας. Επικρατούν οι Νότιοι και Νοτιοανατολικοί άνεμοι και ακολουθούν οι Ανατολικοί και οι Δυτικοί. Η συχνότητα εμφάνισης νηνεμίας σε ετήσια βάση υπερβαίνει το 47%.

Πίνακας 7: Ετήσιες συχνότητες ανέμου. Δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Κέρκυρας. Πηγή: ΕΜΥ

	ΑΠΝ/ΜΕΤ	ΒΔ	Δ	ΝΔ	Ν	ΝΑ	Α	ΒΑ	Β
■ Απνοια	47.16								
■ 1b	0.00	0.41	1.17	0.29	0.87	0.52	1.49	0.28	0.55
■ 2b	0	1.92	3.40	1.27	3.09	3.53	3.75	0.99	1.67
■ 3b	0	1.87	2.53	0.86	2.96	3.26	1.75	0.31	1.46
■ 4b	0	1.25	0.97	0.38	2.47	2.12	0.72	0.06	1.15
■ 5b	0	0.25	0.15	0.11	0.97	0.60	0.16	0.00	0.25
■ 6b	0	0.06	0.05	0.05	0.38	0.20	0.04	0.00	0.04
■ 7b	0	0.01	0.01	0.01	0.09	0.04	0.01	0	0.00
■ 8b	0	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0	0.00
■ >=9b	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0	0	0

12.3. Η θέση του ναού



Εικ. 50: Η θέση του Αη Μιχάλη (Google Earth)

Ο ναός βρίσκεται σε πλαγιά, σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από ήπια τουριστική και αγροτοκτηνοτροφική ανάπτυξη σε υψόμετρο περίπου εκατό μέτρων. Η μικρή του απόσταση από τη θάλασσα (μόλις επτακόσια μέτρα) αποτελεί συνθήκη ήπιου κλίματος αλλά και αλατονέφωσης.

Ο άξονας του επιμήκους κτηρίου συμπίπτει με τον άξονα Ανατολής - Δύσης, με ελάχιστη απόκλιση ΒΑ - ΝΔ.

Το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο σημείο δεν είναι γνωστό, παράμετρος που θα ήταν κρίσιμη μόνο εφόσον από την παθολογία των τοιχογραφιών και τις μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας είχαν εντοπιστεί ενδείξεις υγρασίας ανερχόμενης από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Ο περιβάλλον χώρος εμφανίζει έντονη ρύση προς το κτήριο, ιδίως τη βόρεια πλευρά του, ενώ το τείχος κατά μήκος της νότιας πλευράς του, κτισμένο χωρίς συνδετικό κονίαμα, ευνοεί την αποστράγγιση του εδάφους.

Τα δένδρα στην ανατολική πλευρά του μειώνουν τα ηλιακά κέρδη, δημιουργώντας έτσι προϋποθέσεις συμπύκνωσης, ενώ η βόρεια πλευρά του, λόγω του επικλινούς του εδάφους, των αιθαλών δένδρων και του μαντρότοιχου είναι σχετικά προστατευμένη από βόρειους ανέμους.

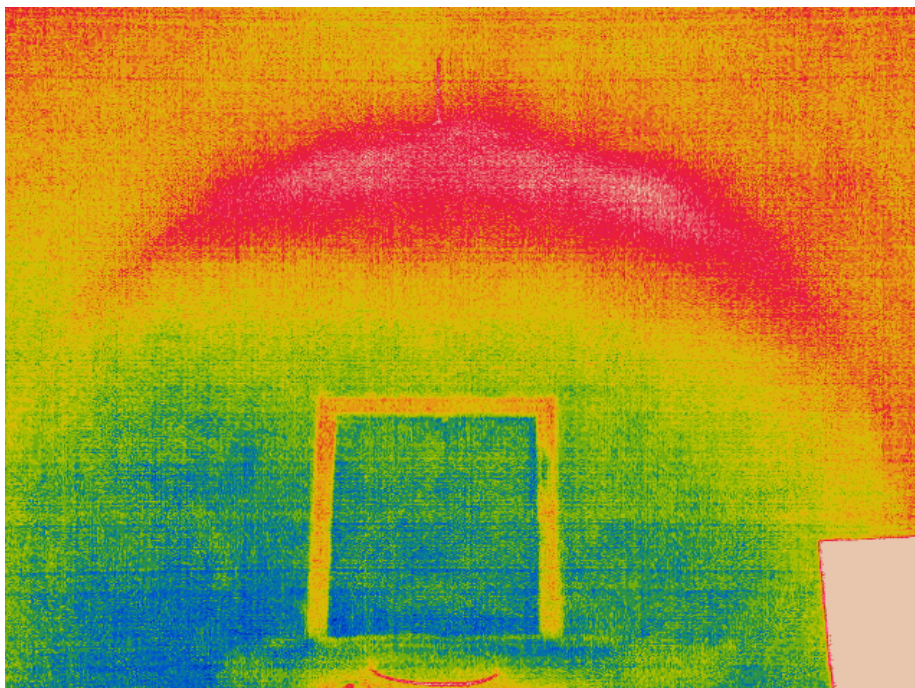
12.4. Αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά στοιχεία. Παθολογία του κτηρίου σχετική με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους

Από τα αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτηρίου επισημαίνεται το σημαντικό πάχος της τοιχοποιίας, που συνεπάγεται αυξημένη θερμική αδράνεια, γεγονός σημαντικό για τη σταθερότητα της θερμοκρασίας του εσωτερικού, αλλά αρνητικό από την άποψη ότι αποτελεί συνθήκη για εμφάνιση υγρασίας από συμπύκνωση. Το μεγαλύτερο πάχος της τοιχοποιίας σε ναούς καμαροσκεπείς όπως αυτός, σημειώνεται στη στάθμη της στέψης της εξωτερικής τοιχοποιίας, ενώ το ελάχιστο στην κορυφή της καμάρας.

Η ύπαρξη του νεώτερου νάρθηκα στα δυτικά λειτουργεί επίσης σταθεροποιητικά, προστατεύοντας από την άμεση επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος. Το γεγονός αυτό γίνεται άμεσα αντιληπτό μέσω της θερμογραφικής απεικόνισης υπερύθρου. Ο νάρθηκας είναι λίγο χαμηλότερος από το δυτικό τοίχο του κυρίως ναού. Στο μικρό ύψος κατά το οποίο η δυτική πλευρά του κυρίως ναού εκτίθεται άμεσα στις εξωτερικές συνθήκες, διαφοροποιείται έντονα θερμοκρασιακά.

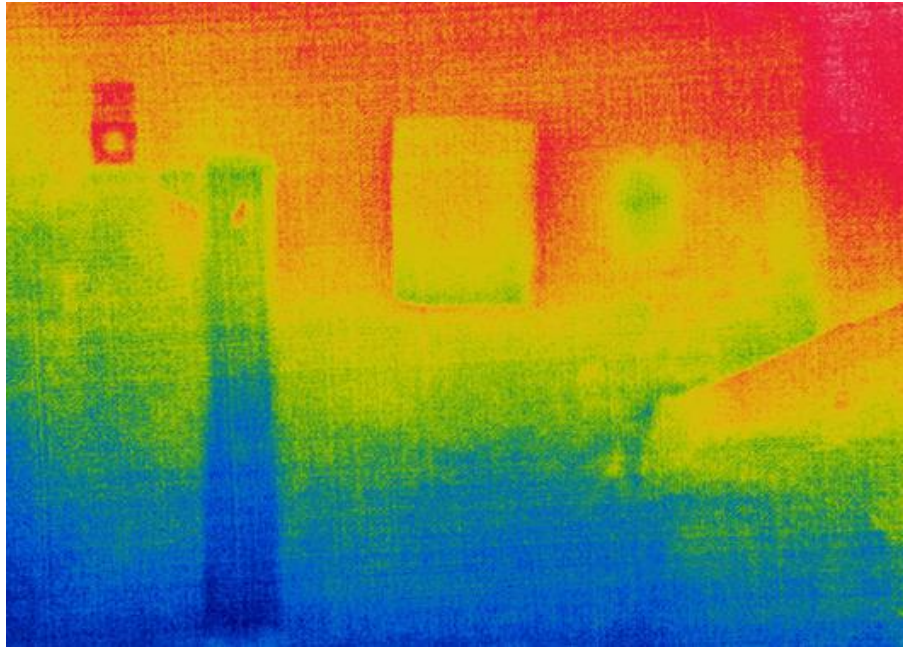


Εικ. 51:Υψομετρική διαφορά μεταξύ δυτικού τοίχου του κυρίως ναού και νεώτερου νάρθηκα



Εικ. 52:Θερμογραφική απεικόνιση του δυτικού τοίχου από το εσωτερικό.
Η θερμή περιοχή στην κορυφή της καμάρας αποκαλύπτει την επίδραση
του θερμού εξωτερικού περιβάλλοντος στο ακάλυπτο τμήμα.

Καθοριστικό για τις συνθήκες του μνημείου είναι το γεγονός ότι το δάπεδό του βρίσκεται χαμηλότερα από την εξωτερική στάθμη του εδάφους, με αποτέλεσμα τμήμα της τοιχοποιίας, ιδίως της βόρειας, να βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σχεδόν κατά ένα μέτρο. Αυτό συμβάλλει μεν στη σταθερότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, δημιουργεί όμως και συνθήκες για παρουσία υγρασίας από πλευρική διείσδυση, ενώ συμβάλλει και στην ανύψωση της ανερχόμενης υγρασίας σε υψηλότερη στάθμη, λόγω του περιορισμού της επιφάνειας εξάτμισης.



Εικ. 53: Ιερό, Βόρειος τοίχος. Η ψυχρή ζώνη χαμηλά αντιστοιχεί περίπου στην περιοχή του τοίχου που βρίσκεται χαμηλότερα από τη στάθμη του εδάφους με αποτέλεσμα τον περιορισμό της επίδρασης του θερμού εξωτερικού περιβάλλοντος, αλλά την εμφάνιση υγρασίας από πλευρική διείσδυση, η εξάτμιση της οποίας ψύχει περαιτέρω την επιφάνεια.

Κατά τον ίδιο τρόπο λειτουργεί και ο νεώτερος κτιστός πάγκος που βρίσκεται εξωτερικά κατά μήκος του βόρειου τοίχου. Η ρωγμή μεταξύ πάγκου και βόρειου τοίχου, καθώς και η μη επιστρωμένη επιφάνεια εδάφους από το μέσον του βόρειου τοίχου μέχρι το ανατολικό άκρο του, αποτελούν σαφείς θέσεις εισροής και διήθησης επιφανειακών νερών, τα οποία στη συνέχεια εισέρχονται στην τοικοποιία μέσω πλευρικής διείσδυσης.



Εικ. 54: Ρωγμή μεταξύ κτιστού πάγκου και βόρειου τοίχου
Η σχεδόν σύγχρονη κεράμωση είναι κατασκευαστικά άρτια και δεν εμφανίζει αστοχίες.



Εικ. 55: Η νεώτερη στέγη

Στην περιβαλλοντική σταθερότητα του ναού, τέλος, συμβάλλουν τα μικρά και περιορισμένα σε αριθμό ανοίγματα. Η τραπεζοειδής τομή τους, δηλ. η αύξηση της επιφάνειάς τους προς το εσωτερικό, εξασφαλίζει αύξηση του φωτός και των ηλιακών κερδών, με ταυτόχρονη μείωση της επίδρασης των λοιπών παραμέτρων του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό. Επίσης, ο μικρός αριθμός των παραθύρων και η τοποθέτησή τους μόνο σε δύο από τους τέσσερεις τοίχους (Α και Ν) δεν ευνοεί την ισχυρή επίδραση ρευμάτων. Σε αυτό συντελούν και τα διαφανή πετάσματα που έχουν τοποθετηθεί εξωτερικά, επιτρέποντας μεν κάποιο αερισμό, αλλά περιορίζοντας συγχρόνως τα ρεύματα και αποτρέποντας την απευθείας διείσδυση του νερού σε συνθήκες βροχής και πλάγιων ανέμων.



Εικ. 56: Εσωτερική διαμόρφωση παραθύρων



Εικ. 57: Τοποθέτηση διαφανών πετασμάτων εξωτερικά

Στην παθολογία του κτηρίου θα πρέπει να προστεθεί και η παρουσία οπών διαμέτρου περίπου 5 εκατοστών στην εξωτερική παρειά της τοικοποιίας, σε διάφορες στάθμες. Πρόκειται για κενά που δημιουργήθηκαν μετά την αποσάθρωση των εγκάρσια τοποθετημένων στοιχείων της ξυλοδεσιάς (κλάπες). Οι οπές αυτές αποτελούν πιθανές θέσεις εισόδου ομβρίων υπό συνθήκες κατευθυνόμενης βροχής.

12.5. Παθολογία των τοιχογραφιών - διαλυτά άλατα

Το σύνολο της μη ανθρωπογενούς παθολογίας των τοιχογραφιών που καταγράφεται στο μνημείο αποδίδεται στην παρουσία και την κίνηση της υγρασίας, ιδίως μέσω των διαδικασιών της μεταφοράς και απόθεσης διαλυτών αλάτων. Η περίπτωση των τοιχογραφιών του Άη Μιχάλη αποτελεί ένα μάθημα παθολογίας, καθώς παρουσιάζει τους περισσότερους από τους τύπους αλλοίωσης που οφείλονται στη δράση του νερού. Στο σύνολο σχεδόν των επιφανειών εντοπίζονται αποσάθρωση του υποστρώματος, αποκολλήσεις μεταξύ των στρωμάτων του υποστρώματος, μερική ή ολική απώλεια υποστρώματος, αποκολλήσεις χρωματικού στρώματος, κονιοποίηση και μερική ή ολική απώλεια χρωματικού στρώματος, εξανθήσεις αλάτων, πέπλα αλάτων.

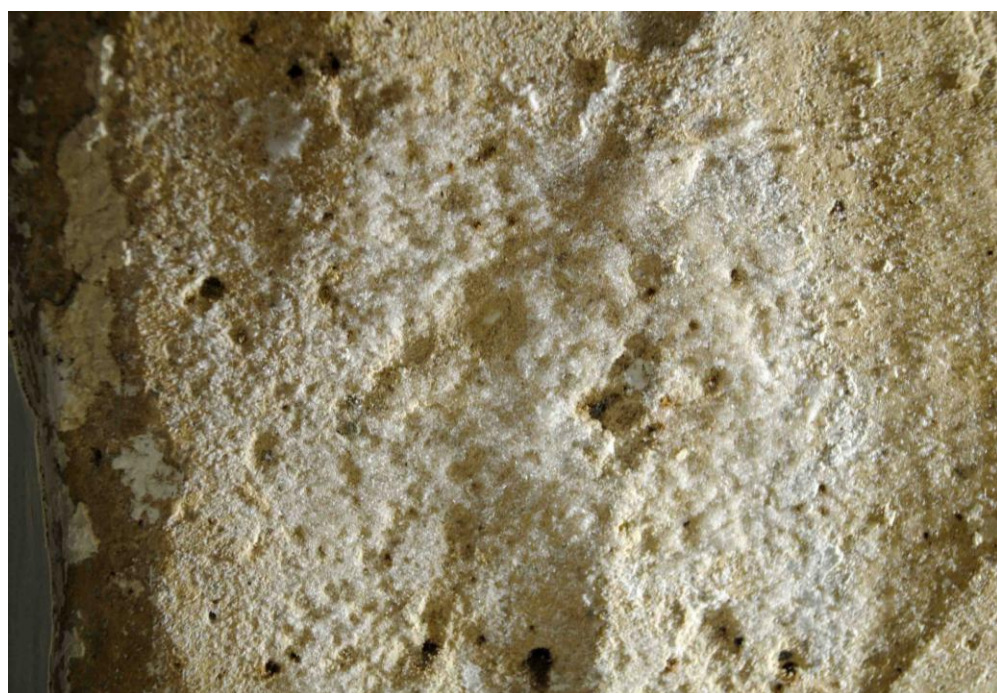
Από τις παραπάνω φθορές, οι διαστρωματικές αποκολλήσεις, η αποσάθρωση του υποστρώματος και οι εξανθήσεις αλάτων εντοπίζονται κυρίως στις κατώτερες ζώνες, ενώ μερική απώλεια υποστρώματος, απώλειες χρωματικού στρώματος και πέπλα αλάτων απαντώνται στο σύνολο των επιφανειών αλλά κυρίως ψηλότερα. Το πρόβλημα είναι οξύ, καθώς, εκτός των διαλυτών αλάτων από το έδαφος και τα δομικά υλικά του κτηρίου, διαπιστώθηκε και η ύπαρξη αλάτων χλωριούχου νατρίου από αλατονέφωση.



Εικ. 58: Αποκολλήσεις και απώλειες υποστρώματος



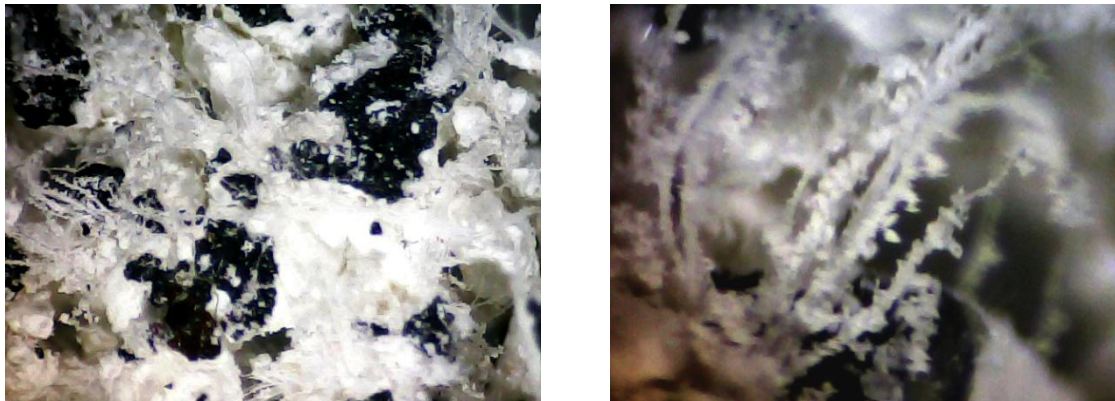
Εικ. 59: Αποκολλήσεις, απώλειες, αποσάθρωση, παραμόρφωση, πλήρης αποδιοργάνωση επιφανειακού υποστρώματος και χρωματικού στρώματος



Εικ. 60: Ολική απώλεια επιφανειακού στρώματος επιχρίσματος και εξανθήσεις αλάτων κλωριούχου νατρίου



Εικ. 61: Απώλειες χρωματικού στρώματος και αποσάθρωση, μερική ή και ολική απώλεια επιφανειακού στρώματος επιχρίσματος, εξανθήσεις αλάτων. Η δέσμη ινών στο μέσον της εικόνας δεν είναι οργανικές ίνες που είχαν προστεθεί στη δομή του κονιάματος, αλλά εξανθήσεις αλάτων.



Εικ. 62: Πλήρης αποδιοργάνωση υποστρώματος και χρωματικού στρώματος, εξανθήσεις αλάτων. Φωτογραφική λήψη in situ με ψηφιακό μικροσκόπιο, μεγέθυνση 20X (αριστερά) και 80X δεξιά



Εικ. 63: Παράσταση Αγ. Δημητρίου, δοκιμές αφαίρεσης πέπλων αλάτων

Στην υγρασία και τη συνακόλουθη ανάπτυξη μυκήτων αποδίδεται και η πλήρης αποσάθρωση εγκάρσιων στοιχείων της ξυλοδεσιάς, που παρατηρείται στο εσωτερικό και το εξωτερικό του μνημείου.

12.6. Καταγραφές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

Λόγω της απώλειας προηγούμενων δεδομένων οι καταγραφές στο πλαίσιο της αρχικής μελέτης προσδιορισμού των πηγών, μορφών και αιτιών της υγρασίας περιορίζονται κατά το διάστημα από 13 Ιουλίου έως 11 Αυγούστου 2018. Αν και δεν καλύπτουν τη στοιχειώδη απαίτηση για ένα πλήρη ετήσιο κύκλο, θεωρούνται αξιοποιήσιμες, καθώς αποκαλύπτουν γενικές τάσεις, στοιχεία αλληλεπίδρασης εσωτερικού - εξωτερικού περιβάλλοντος, θερμικά χαρακτηριστικά του κελύφους, ρυθμούς μεταβολής κ.ο.κ. Χρησιμοποιήθηκαν καταγραφικά θερμοκρασίας - σχετικής υγρασίας Tinytag Plus 2. Το ένα τοποθετήθηκε εξωτερικά, στη βόρεια πλευρά του ναού, σε θέση που δεν θα δεχόταν βροχή ή απευθείας πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, και το δεύτερο εσωτερικά, στον κυρίως ναό και σε μέσο ύψος.

Η συχνότητα λήψης μέτρησης ορίστηκε στα 10 λεπτά, προκειμένου να εξυπηρετηθεί ο σκοπός της παρακολούθησης του χρόνου απόκρισης των παραμέτρων του εσωτερικού περιβάλλοντος στις μεταβολές του εξωτερικού.



Εικ. 64: Τοποθέτηση καταγραφικού στο εσωτερικό του μνημείου

Τα χαρακτηριστικά των καταγραφικών σύμφωνα με το τεχνικό δελτίο τους⁶³ είναι τα εξής:

Θερμοκρασία

Reading Range

-25 °C to +85 °C (-13 °F to +185 °F)

Sensor Type

10KNTC Thermistor (Internally mounted)

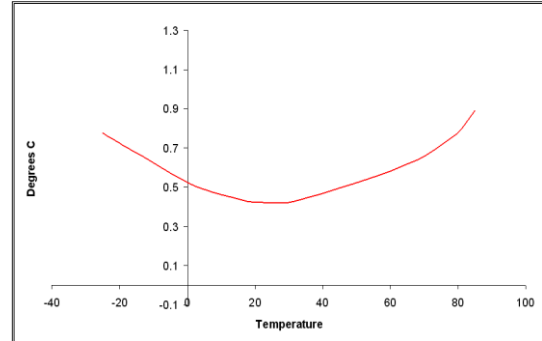
Response Time

25 min to 90% FSD in moving air

Reading Resolution

0.01 °C or better

Accuracy



Σχετική Υγρασία

Reading Range

0% to 100% RH

Sensor Type

Capacitive

Accuracy

±3.0% RH at 25 °C / 77 °F

Reading Resolution

Better than 0.3% RH

Sensor Location

Externally mounted

Response Time

40 seconds to 90% FSD (current data loggers, from SN 613165)

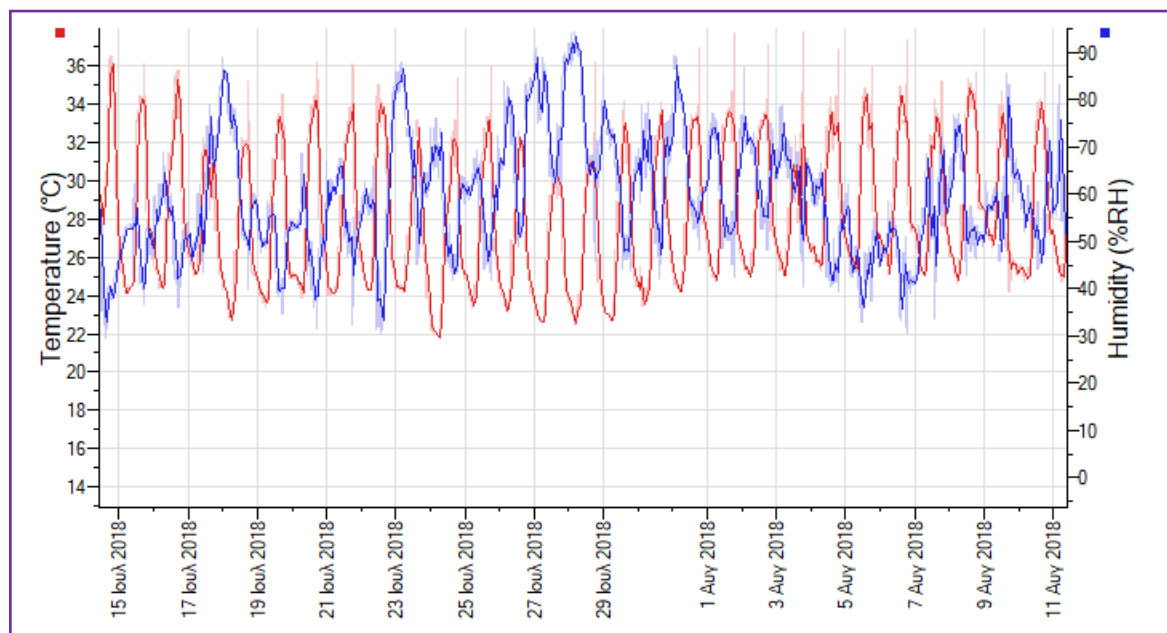
⁶³ Gemini Data Loggers, Data Sheet, Tinytag Plus 2 Dual Channel Temperature/Relative Humidity. TGP-4500, Issue 10, 21st April 2011 (Gemini Data Loggers, 2020).

12.7. Σύγκριση των καταγραφών του εξωτερικού περιβάλλοντος με τα δεδομένα της ευρύτερης περιοχής

	ΙΟΥΛΙΟΣ		ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	
	ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
T (°C)	26,4	27,6	26,3	28,9
RH %	59,8	60,9	61,8	56,9

Οι τιμές του εξωτερικού περιβάλλοντος του μηνιού είναι πράγματι συγκρίσιμες με τα δεδομένα της ευρύτερης περιοχής. Μικρές διαφοροποιήσεις αποδίδονται στο θερμό καλοκαίρι του 2018, στην αναμενόμενη διαφοροποίηση του μικροκλίματος του άμεσου περιβάλλοντος του ναού από το κλίμα της ευρύτερης περιοχής, καθώς και σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της θέσης τοποθέτησης του καταγραφικού που θα αναλυθούν παρακάτω.

12.8. Καταγραφές εξωτερικού περιβάλλοντος



Γράφημα 18: Διακυμάνσεις θερμοκρασίας (κόκκινη καμπύλη) και σχετικής υγρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος για το σύνολο της περιόδου καταγραφής

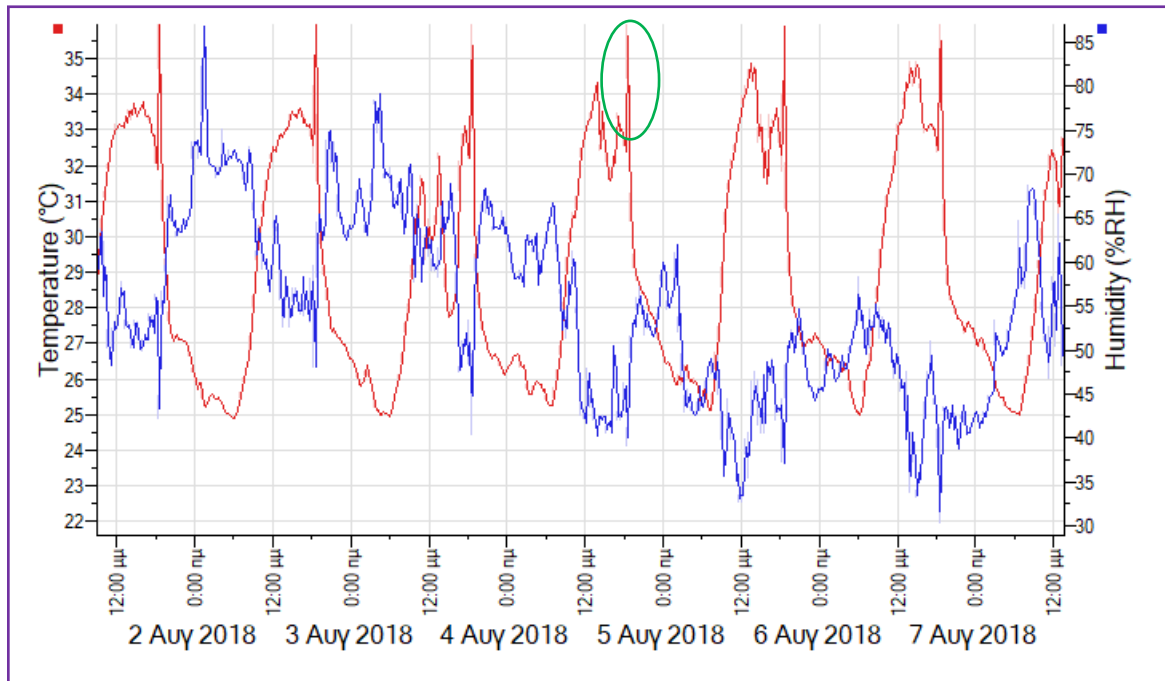
Από τη γενική εικόνα του γραφήματος προκύπτει η ένταση των διακυμάνσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, αλλά και η άμεση εξάρτηση της δεύτερης από την πρώτη.

Η ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας για το διάστημα της καταγραφής ήταν 21,7°C, η μέγιστη 36,5°C και ο μέσος όρος 28,1°C. Η μέση ημερήσια μεταβολή ήταν 11,45°C. Η μέγιστη που κατεγράφη ήταν 13,7 °C, δηλ. όχι ιδιαίτερα, υψηλή, ενώ συνέβη μέσα σε 10 ώρες, δίνοντας μέγιστο ημερήσιο ρυθμό μεταβολής 1,37°C/h, που χαρακτηρίζεται ήπιος για εξωτερικό περιβάλλον. Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, ο μέγιστος επιτρεπόμενος ρυθμός μεταβολής σε σχέση με την αντοχή των υλικών των κτιρίων είναι $\pm 1,5^\circ\text{C}/\text{h}$ (Λιωνής, 1992) (Kadijsky, 1981).

Για τη σχετική υγρασία καταγράφηκε ελάχιστη τιμή 29,2%, μέγιστη 94,4% και μέσος όρος 59,4%.

Όπως φαίνεται και στο πιο πάνω γράφημα, η σχέση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας είναι σχεδόν ομαλά αντιστρόφως ανάλογη. Μικρές ανωμαλίες αποδίδονται στην πνοή ανέμων.

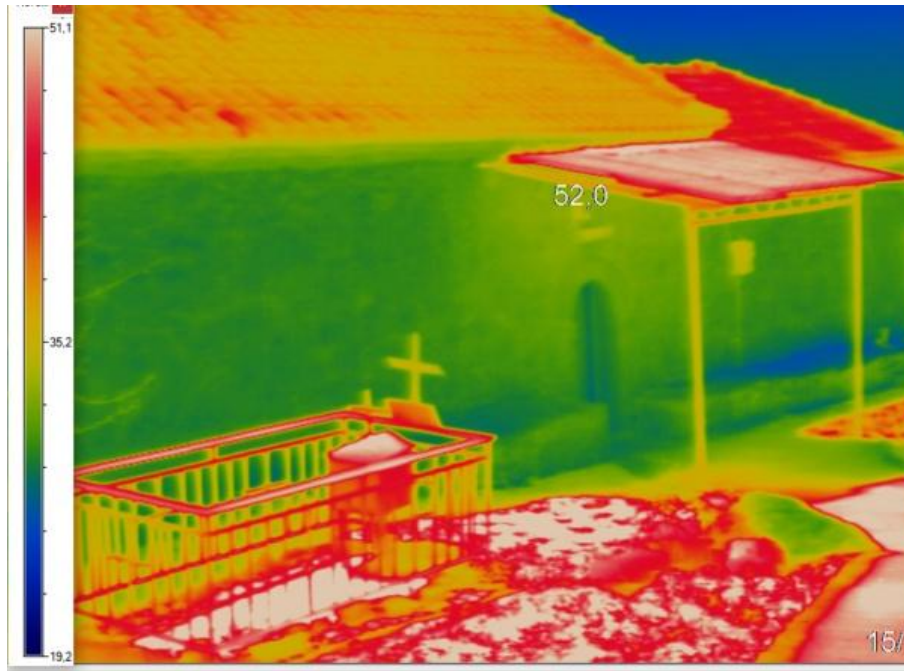
Ενδιαφέρον παρουσιάζει μια ανωμαλία που παρατηρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια των καταγραφών του Αυγούστου (Γράφημα 19) Την περίοδο αυτή, ενώ η ημερήσια διακύμανση ήταν σχετικά ομαλή και η θερμοκρασία άρχιζε να πέφτει μετά τις 16:00, το απόγευμα σημειωνόταν μια απότομη και απροσδόκητη κορυφή, οπότε και καταγραφόταν η μέγιστη ημερήσια τιμή, με ρυθμό μεταβολής περίπου 15 °C/h. Η ερμηνεία προέκυψε από τη θέση της τοποθέτησης του καταγραφικού, κάτω από στέγαστρο ελενίτ. Η τοποθέτηση στη βόρεια πλευρά εξασφάλιζε μεν την προστασία από απευθείας πρόσπτωση ηλιακού φωτός και βροχής, όμως τις απογευματινές ώρες, ο ήλιος από τα δυτικά πυράκτωνε το στέγαστρο, λόγω και της μικρής στροφής του άξονα του ναού προς ΒΑ - ΝΔ, με αποτέλεσμα το πιο πάνω φαινόμενο. Για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένες μέγιστες τιμές είναι πλασματικές και δεν λαμβάνονται υπόψη. Παράλληλα όμως, έχουν αλλοιώσει σε κάποιο βαθμό τους μέσους όρους της περιόδου.



Γράφημα 19: Θερμοκρασία (κόκκινη καμπύλη) και σχετική υγρασία εξωτερικού περιβάλλοντος έξι ημερών. Χαρακτηριστική ανωμαλία στην καταγραφή

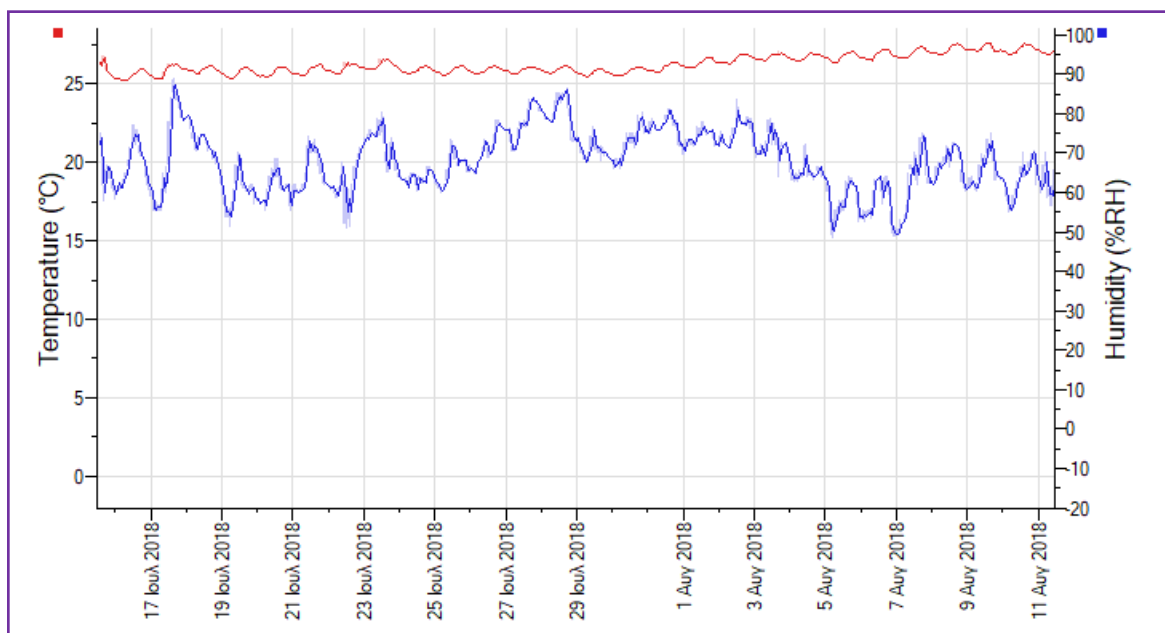


Εικ. 65: Το στέγαστρο κάτω από το οποίο τοποθετήθηκε αρχικά το καταγραφικό.



Εικ. 66: Θερμογραφική απεικόνιση, 15/7/2018, 14:22. Ηλιοφάνεια. Εξωτερική θερμοκρασία: 33,6°C. Η πυράκτωση του στεγάστρου από ελενίτ οδηγεί στη θέρμανση λόγω ακτινοβολίας της περιοχής κάτω απ' αυτό, ακόμη και της τοικοποιίας, αλλά και στην αλλοίωση των μετρήσεων.

12.9. Καταγραφές εσωτερικού περιβάλλοντος



Γράφημα 20: Θερμοκρασία και σχετική υγρασία εσωτερικού περιβάλλοντος για όλη την περίοδο καταγραφής. Εξαιρετική σταθερότητα της θερμοκρασίας.

Θερμοκρασία

Η ελάχιστη θερμοκρασία είναι 25,2°C, η μέγιστη 27,7°C και ο μέσος όρος 26,2°C. Η μέση μέγιστη ημερήσια μεταβολή είναι 0,68°C σε διάστημα περίπου 11 ωρών, δηλ. ο μέσος ημερήσιος ρυθμός μεταβολής είναι 0,062, ο οποίος είναι πάρα πολύ χαμηλός και δείχνει τα εξαιρετικά θερμομονωτικά χαρακτηριστικά του κτηρίου. Ακόμη και οι μέγιστες ημερήσιες μεταβολές που παρατηρήθηκαν είναι της τάξης του 1°C, ενώ σημειώθηκαν σε διάστημα 6,5 ωρών δίνοντας ρυθμό μεταβολής 00,15°C/h, ο οποίος είναι επίσης εξαιρετικά ήπιος. Το σύνολο των στοιχείων αυτών είναι τα ηπιότερα που έχουν καταγραφεί από τους γράφοντες, κατά τη μελέτη ενός σύνολο τουλάχιστον 20 μνημείων.

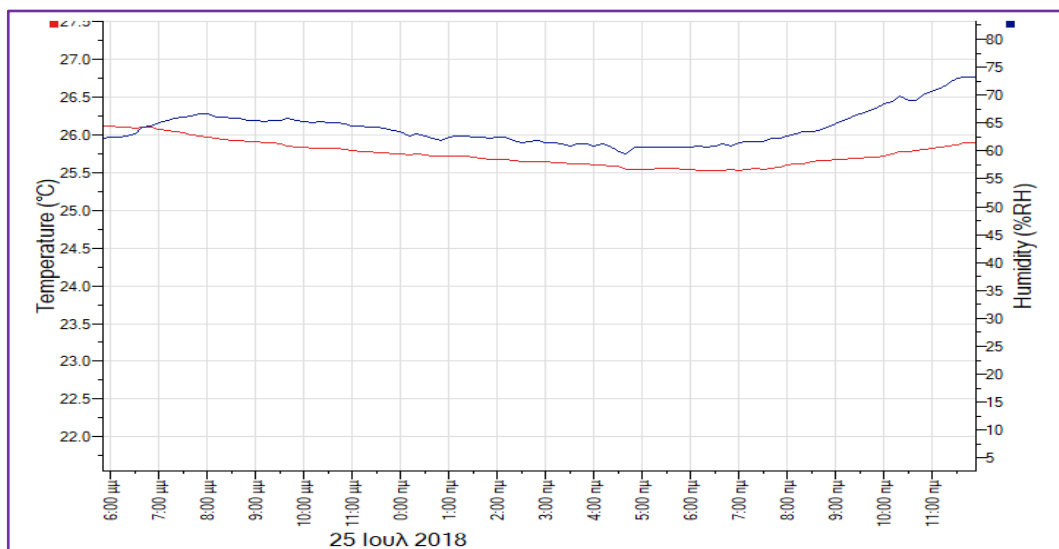
Σχετική υγρασία

Οι ίδιες παρατηρήσεις, δηλαδή σχετικά μικρές ημερήσιες διακυμάνσεις και σχετικά ήπιοι ρυθμοί μεταβολής καταγράφονται και για τη σχετική υγρασία, όχι όμως στο βαθμό που καταγράφονται για τη θερμοκρασία. Η ελάχιστη σχετική υγρασία που καταγράφεται είναι 48,2%, η μέγιστη 88,7% και ο μέσος όρος 67,9 που χαρακτηρίζεται υψηλός για την εποχή. Οι ημερήσιες διακυμάνσεις είναι κατά κανόνα σχετικά ήπιες. Ακόμη και η μέγιστη ημερήσια μεταβολή (7/8/2018), η οποία είναι 25%, συμβαίνει σε διάστημα περίπου 11 ωρών, δίνοντας ρυθμό μεταβολής μόλις 2,27%/h, που χαρακτηρίζεται επίσης σχετικά ήπιος. Παρά ταύτα, είναι θεωρητικά δυνατό να ενεργοποιηθεί μεταβολές (κρυστάλλωση - ενυδάτωση) σε άλατα αποθεθειμένα στην επιφάνεια ή πολύ κοντά σ' αυτήν.

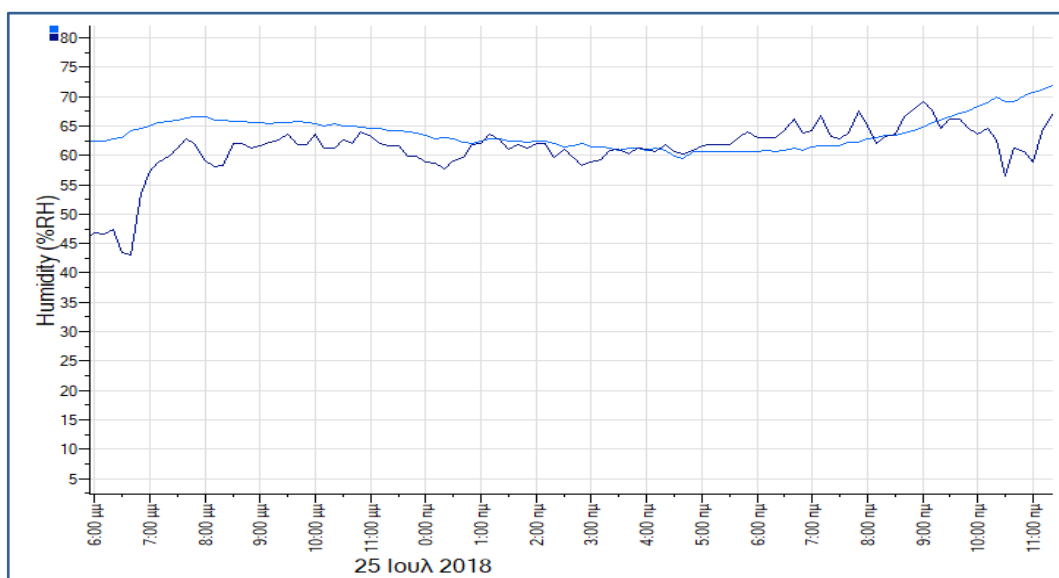
Το εξαιρετικά εντυπωσιακό χαρακτηριστικό όμως του εσωτερικού περιβάλλοντος του μνημείου, είναι η σχέση θερμοκρασίας - σχετικής υγρασίας. Η αναμενόμενη αντιστρόφως ανάλογη σχέση ανατρέπεται περίπου πλήρως. Οι καμπύλες όχι μόνο δεν κινούνται αντίστροφα, αλλά για μεγάλο μέρος της περιόδου καταγραφής κινούνται αλλοπρόσαλλα ή και παράλληλα.

Μέρος του φαινομένου θα μπορούσε να ερμηνεύεται από την υπόθεση ότι η σχετική υγρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος ασκεί στη σχετική υγρασία του εσωτερικού ισχυρότερη επιρροή από ότι η εσωτερική θερμοκρασία. Κάποια σημεία των γραφημάτων φαίνεται να στηρίζουν αυτήν την υπόθεση, που όμως θα συνεπαγόταν

ταυτόχρονα την παρουσία ρευμάτων, πράγμα που δεν συνάδει με τις παρατηρήσεις για τα ανοίγματα του ναού⁶⁴.



Γράφημα 21: «Ανορθόδοξη», παράλληλη κίνηση καμπυλών θερμοκρασίας (κόκκινη) - σχετικής υγρασίας (μπλε) εσωτερικού περιβάλλοντος

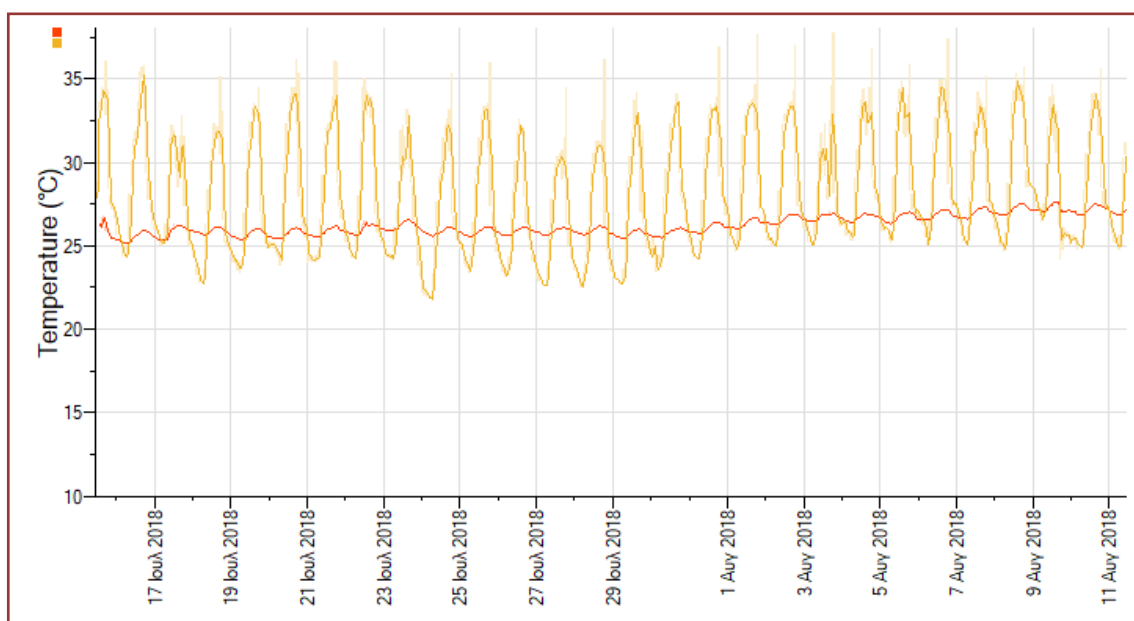


Γράφημα 22: Προφανής επίδραση της σχετικής υγρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος (μπλε καμπύλη) σ' αυτή του εσωτερικού (γαλάζια καμπύλη)

⁶⁴Εκ των υστέρων αποδεικνύεται ότι ο ρόλος των ανοιγμάτων δεν είχε αξιολογηθεί σωστά κατά τη μελέτη. Τα ανοίγματα, παρά το ότι είναι λίγα, μικρά και εν μέρει προστατευμένα με πετάσματα, επιτρέπουν την ανάπτυξη ρευμάτων αέρα ικανών να προκαλέσουν έντονες διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Άλλη ερμηνεία θα μπορούσε να σχετίζεται με την ανταλλαγή υγρασίας μεταξύ της ατμόσφαιρας και των δομικών υλικών του εσωτερικού του μνημείου. Στην περίπτωση αυτή, η αύξηση της θερμοκρασίας του εσωτερικού ενδεχομένως θα προκαλούσε σημαντική εξάτμιση της περιεχόμενης στα δομικά υλικά υγρασίας, και τελικά αύξηση της σχετικής υγρασίας του χώρου⁶⁵.

12.10. Επίδραση θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό



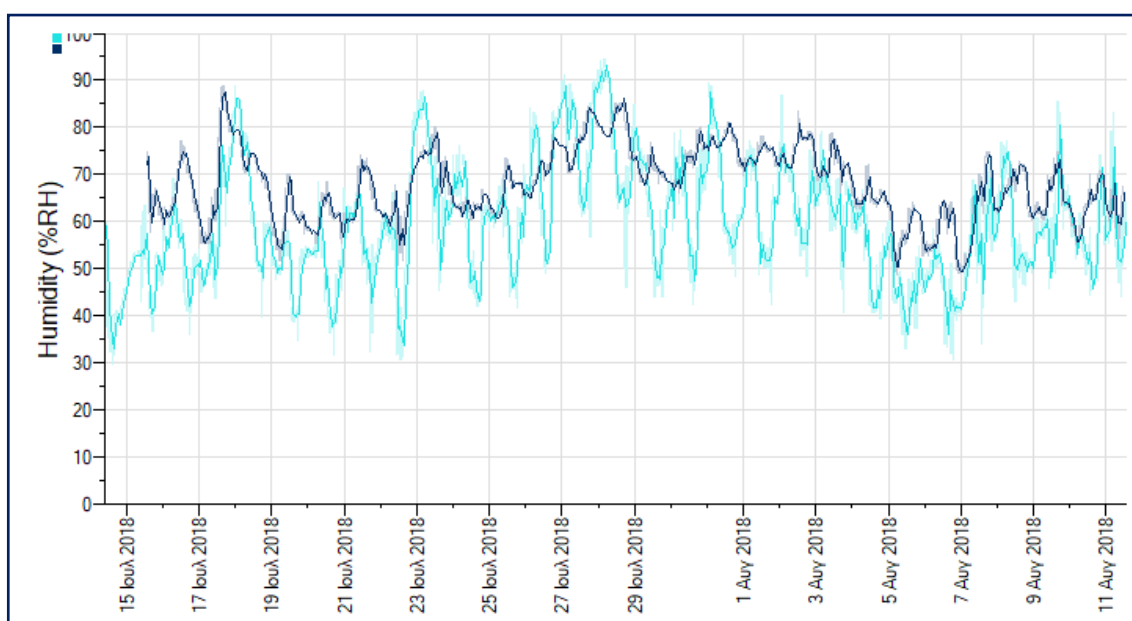
Γράφημα 23: Καμπύλες θερμοκρασίας εσωτερικού (κόκκινη) - εξωτερικού περιβάλλοντος. Εντυπωσιακή σταθερότητα του πρώτου, αλλά και σαφής εξάρτησή του από το δεύτερο.

Από το γράφημα καθίσταται προφανές ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος καθορίζεται μονοσήμαντα από αυτήν του εξωτερικού, είναι όμως σημαντικά σταθερότερη, χάρη στα θερμομονωτικά χαρακτηριστικά του κελύφους. Και στο σημείο αυτό όμως καταγράφεται ένα παράδοξο φαινόμενο. Κατά κανόνα, τα καλά θερμομονωτικά χαρακτηριστικά του κελύφους, εκτός από περιορισμό της επίδρασης του εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό και ήπιους ρυθμούς μεταβολής, συνεπάγονται και αργούς χρόνους απόκρισης της θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος στις μεταβολές του εξωτερικού. Ενδεικτικά, σε κτήρια με καλά

⁶⁵Και αυτή η ερμηνεία, η οποία δόθηκε στο πλαίσιο της μελέτης, ελέγχεται.. Η περιεχόμενη υγρασία στις τοικοποιίες και τα άλλα υγροσκοπικά στοιχεία του ναού μπορεί πράγματι να λειτουργήσει ως «ρυθμιστής» της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας του εσωτερικού, αλλά σε πιο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα.

χαρακτηριστικά μόνωσης έχουν καταγραφεί χρόνοι απόκρισης 180-360min. (Κονιδισιώτης & Παπαδοπούλου2018). Στην περίπτωση του Αη Μιχάλη, και αυτή η κανονικότητα ανατρέπεται πλήρως, καθώς οι χρόνοι απόκρισης που καταγράφονται κυμαίνονται μεταξύ 0 και 120 min, με συχνότερη εμφάνιση των 30min! Το διάστημα κρίνεται ιδιαίτερα μικρό. Παρόμοια διαστήματα έχουν καταγραφεί μόνο σε μνημεία με πλήθος μεγάλων ανοιγμάτων και χωρίς κουφώματα. Και αυτή η παρατήρηση θα μπορούσε να ερμηνευθεί από παρουσία ρευμάτων αέρα.

12.11. Επίδραση σχετικής υγρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό



Γράφημα 24: Καμπύλες σχετικής υγρασίας εξωτερικού (γαλάζια) - εσωτερικού (μπλε) περιβάλλοντος για όλο το διάστημα της καταγραφής.

Οι πρώτες παρατηρήσεις που προκύπτουν από τη μελέτη του γραφήματος, είναι ότι οι μεν μεταβολές στο εξωτερικό είναι πολύ πιο έντονες, η σχετική υγρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος όμως είναι υψηλότερη από του εξωτερικού. Πράγματι, η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας του εξωτερικού για την περίοδο καταγραφής είναι 59,9%, ενώ στο εσωτερικό 67,9%. Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι στο εσωτερικό υπάρχουν είτε ενεργοί τύποι υγρασίας είτε συσσωρευμένα στα δομικά υλικά φορτία υγρασίας, η εξάτμιση των οποίων αυξάνει τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας⁶⁶. Πέρα

⁶⁶Εκ των υστέρων πρέπει να παρατηρηθεί ότι ο ισχυρισμός ισχύει για το μέγεθος όχι της σχετικής αλλά της απόλυτης υγρασίας (Bichlmair και Kilian 2011),

από την ερμηνεία του, το φαινόμενο της υψηλής σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος αποτελεί συνθήκη εμφάνισης υγρασίας από συμπύκνωση.

Κατά τα λοιπά, το γράφημα αποκαλύπτει τόσο περιόδους παράλληλης κίνησης των μεγεθών, όσο και περιόδους πλήρους αποσύνδεσής τους.

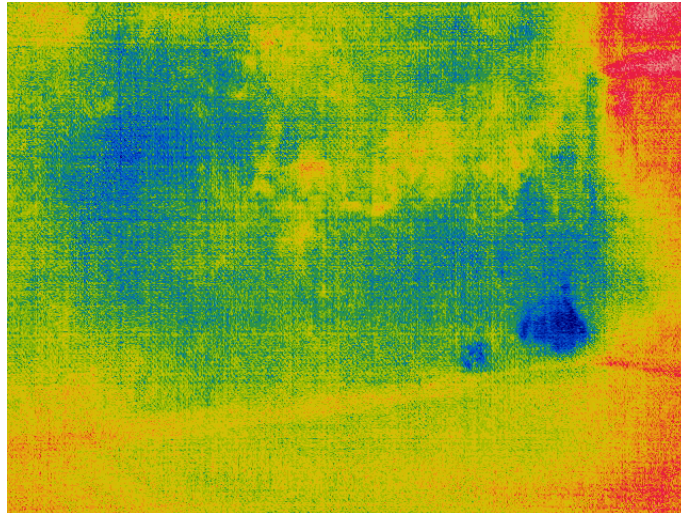
12.12. Θερμογραφική επιθεώρηση

Η θερμογραφική επιθεώρηση πραγματοποιήθηκε με θερμοκάμερα OPTRIS PI 640 και παθητική τεχνική. Τα χαρακτηριστικά της κάμερας, σύμφωνα με το τεχνικό δελτίο της⁶⁷ είναι τα εξής:

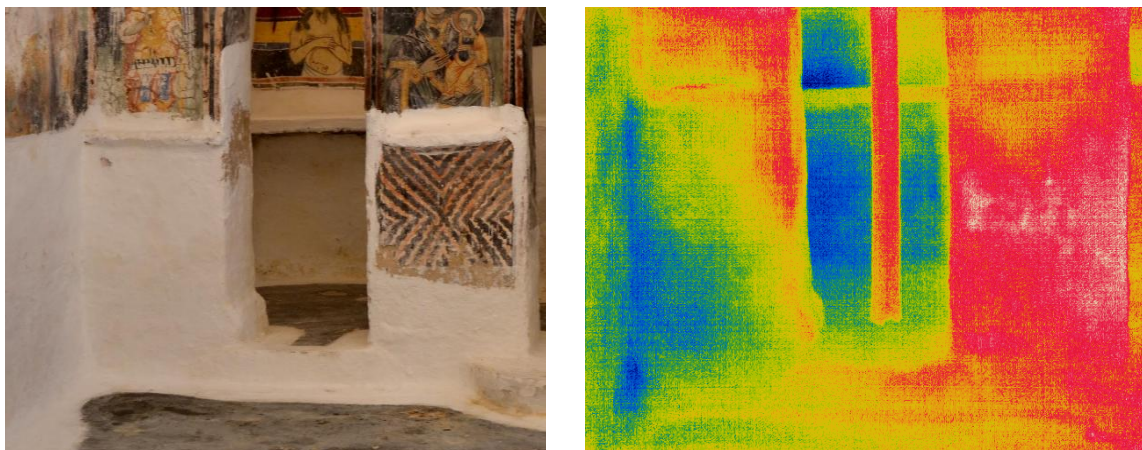
Optical resolution	640 x 480 pixels
Detector	FPA, uncooled (17 μm x 17 μm)
Spectral range	7.5 - 13 μm
Temperature ranges	-20 ... 100 °C
Frame rate	32 Hz / 125 Hz @ 640 x 120 pixels
Thermal sensitivity	(NETD) 75 mK
Accuracy	±2 °C or ±2 %, whichever is greater
Relative humidity	20 - 80 %, non-condensing

Από τη θερμογραφική επιθεώρηση προέκυψαν σημαντικές ενδείξεις για τα θερμοϋγρομετρικά χαρακτηριστικά του κτηρίου. Τεκμηριώθηκε η καλή θερμομονωτική λειτουργία του κελύφους, ο σταθεροποιητικός ρόλος του νεώτερου νάρθηκα στα δυτικά, ενώ αποτυπώθηκαν στοιχεία που αφορούν σε υγρασία από πλευρική διείσδυση μέσω του εδάφους αλλά και από κατασκευαστικές ατέλειες στο βόρειο τοίχο (αρμός μεταξύ εξωτερικού κτιστού πάγκου και παρειάς βορείου τοίχου). Οι ενδείξεις αυτές επιβεβαιώθηκαν με μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας. Επίσης, από την καταγραφή της θερμοκρασίας των επιφανειών, ερμηνεύθηκαν δεδομένα που αντλήθηκαν κατά τη χαρτογράφηση της περιεχόμενης υγρασίας στις τοιχοποιίες και αναπτύσσονται στη σχετική ενότητα.

⁶⁷ (Optris Infrared Measurements, 2019).



Εικ. 67: Βόρειος τοίχος, κατώτερη ζώνη, θερμογραφική απεικόνιση. Ψυχρές περιοχές από πλευρική διείσδυση υγρασίας



Εικ. 68: Κτιστό τέμπλο, βόρειο τμήμα. Δεξιά, απεικόνιση στο ορατό. Αριστερά, θερμογραφική απεικόνιση. Η υγρασία της τοικοποιίας διαχέεται με οριζόντια τριχοειδή κίνηση και στη δομή του κτιστού τέμπλου

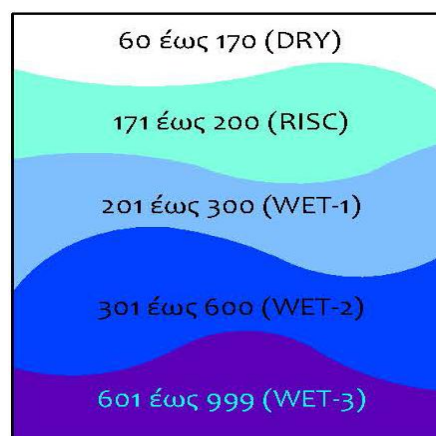
12.13. Μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας τοιχογραφιών και επιχρισμάτων

Οι ενδείξεις που προέκυψαν κατά τη θερμογραφική επιθεώρηση, όσο και το σαφές ιστορικό υγρασίας που διηγείται η παθολογία των τοιχογραφιών και των επιχρισμάτων του ναού, κατέστησαν αναγκαία τη συστηματική καταγραφή των τιμών περιεχόμενης υγρασίας στις τοικοποιίες. Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών οδηγεί σε χάρτες κατανομής της υγρασίας, από τους οποίους βγαίνουν πολύτιμα συμπεράσματα για τα αίτια της υγρασίας και την κίνηση του νερού. Σημειώνεται ότι στις καταγραφές αυτού

του τύπου δεν ενδιαφέρει κυρίως η πραγματική συγκέντρωση νερού σε κάθε θέση, όσο η κατανομή και οι διαβαθμίσεις στις επιφάνειες.

Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε με συσκευή GE Protimeter MMS 2. Το όργανο δίνει δεδομένα για την επιφανειακή υγρασία αλλά και την περιεχόμενη σε βάθος έως 20mm. Επελέγη διηλεκτρική λειτουργία (ραδιοσυχνοτήτων) και όχι ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ακίδων). Η χρήση των ακίδων αποφεύχθηκε καθώς δημιουργεί φθορές στην επιφάνεια των τοιχογραφιών, ενώ οι μετρήσεις επηρεάζονται έντονα από την παρουσία αλάτων. Οι μετρήσεις ελήφθησαν σε κάναβο 30x30cm. Στόχος είναι η δημιουργία χαρτών στους οποίους θα αποτυπώνεται χρωματικά η διαβάθμιση των τιμών της περιεχόμενης υγρασίας, με αποτέλεσμα την αποκάλυψη της διαδρομής της εντός της τοικοποιίας και ενδεχομένως τον προσδιορισμό των πηγών της. Ας σημειωθεί όμως ότι και αυτοί οι χάρτες, αν και συχνά είναι εξαιρετικά αποκαλυπτικοί, πάντοτε χρήζουν ερμηνείας, κατά κανόνα σε συνάρτηση με μετρήσεις και ελέγχους άλλου τύπου (μετρήσεις στο βάθος της τοικοποιίας, χάρτες θερμοκρασίας των επιφανειών, χάρτες κατανομής των αλάτων, ιδίως δε συνεκτίμηση με περιβαλλοντικές παραμέτρους εσωτερικού και εξωτερικού χώρου).

Η κλίμακα των μετρήσεων είναι 60-999. Τιμές από 60-170 χαρακτηρίζουν ξηρές περιοχές, που εμφανίζονται στους χάρτες ως λευκές. Από 170-200, «ύποπτες» για υγρασία. Όπως φαίνεται στο υπόμνημα, η περιοχή 201-999 που αντιστοιχεί σε υγρές θέσεις, έχει διαιρεθεί σε τρεις επιμέρους ομάδες.

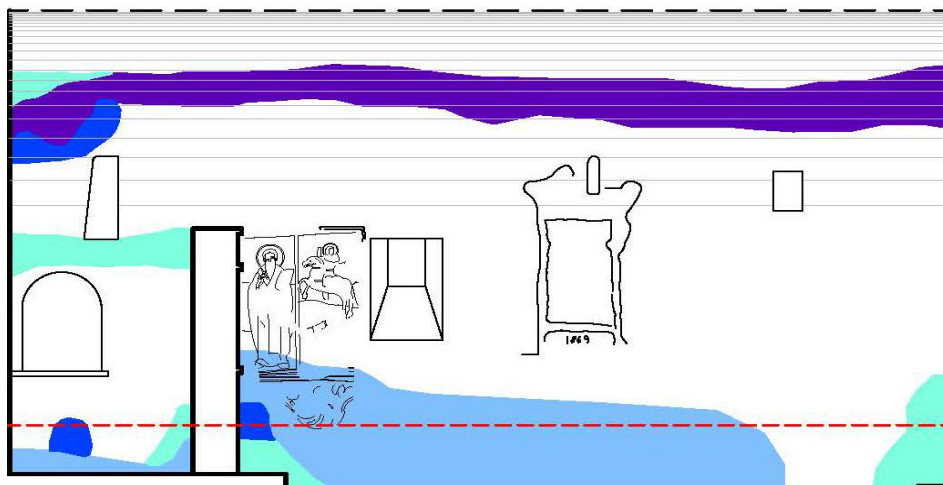


Από τη μελέτη των χαρτών, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

Ως προς τη συνολική εικόνα, παρατηρείται αρχικά ότι το φαινόμενο της υγρασίας είναι εκτεταμένο. Επίσης, ότι η υγρασία δεν ανέρχεται ομοιόμορφα στις τοικοποιίες. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, διότι αποκλείει την περίπτωση υγρασίας

ανερχόμενης από τον υδροφόρο ορίζοντα⁶⁸, η οποία είναι και η πιο δύσκολα αντιμετωπίσιμη.

Στο νότιο τοίχο καταγράφονται πολύ χαμηλές τιμές, με εξαίρεση μια ανομοιόμορφη ζώνη κοντά στη βάση του δαπέδου, η οποία αγγίζει υψηλές τιμές μόνο σημειακά. Στη συνέχεια η υγρασία διακόπτεται, για να εμφανιστεί ξανά σε πολύ ψηλότερη στάθμη.



Σχέδιο 3: Νότιος τοίχος, χάρτης κατανομής υγρασίας.
Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει την εξωτερική στάθμη του εδάφους

Ως προς την υγρασία της κατώτερης ζώνης, από τη θέση, την ανομοιομορφία της κατανομής και κυρίως τη στάθμη των δύο θέσεων στις οποίες καταγράφονται υψηλές τιμές, η οποία συμπίπτει με την εξωτερική στάθμη του εδάφους στο νότιο τοίχο, προκύπτει ότι πρόκειται για πλευρική διείσδυση επιφανειακών υδάτων, είτε από σημεία πιθανών ατελειών της τοικοποιίας, είτε από το νερό που διηθείται στο έδαφος και στη συνέχεια διεισδύει και διαχέεται στη μάζα του τοίχου. Η ένταση του φαινομένου είναι χαμηλή, και η αντιμετώπιση απλή.

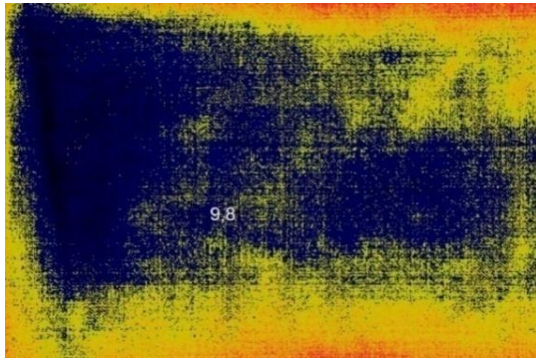
Η περίπτωση της ανώτερης ζώνης είναι πιο σύνθετη. Η διακοπή που σημειώνεται στη μέση ζώνη, καθώς και το ύψος επανεμφάνισης της υγρασίας (πάνω από τα τρία μέτρα) αποκλείουν τον προσδιορισμό της ως ανερχόμενης. Στη συγκεκριμένη θέση, θα ήταν αναμενόμενο να πρόκειται για υγρασία από διήθηση λόγω αστοχίας της στέγης. Όμως, ένα σύνολο δεδομένων οδηγεί προς άλλη κατεύθυνση:

⁶⁸Στις περιπτώσεις ανερχόμενης υγρασίας που προέρχεται από τον υδροφόρο ορίζοντα, στις καταγραφές προκύπτει μια ζώνη που φτάνει σε ύψος περίπου παρόμοιο σε όλους τους τοίχους του κτηρίου (Massari & Massari, 1993).

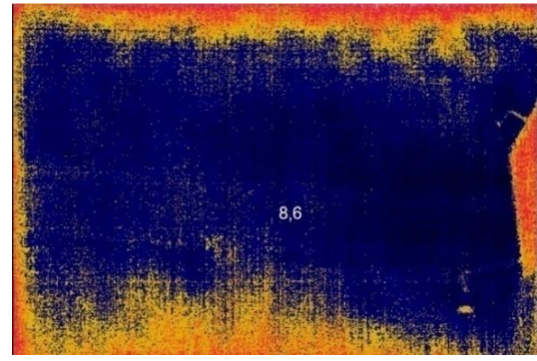
- η άρτια κατασκευή της νέας στέγης,
- η εξάπλωση της υγρασίας σε όλο το μήκος του νότιου τοίχου και η εμφάνιση του ίδιου φαινομένου στην ίδια θέση και εξάπλωση και στο βόρειο τοίχο,
- η στάθμη της εμφάνισης σε σχέση με τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του ναού, στη θέση δηλαδή με το μεγαλύτερο πάχος τοιχοποιίας,
- οι συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του ναού και οι χαμηλές θερμοκρασίες στο εξωτερικό κατά τις ημέρες πριν την καταγραφή.

Όλα παραπάνω χαρακτηριστικά οδηγούν στην πιθανότητα εμφάνισης υγρασίας από συμπύκνωση. Για το λόγο αυτό, οι συγκεκριμένες θέσεις ελέγχθηκαν θερμογραφικά (εικ. 69, 70) για να διαπιστωθεί εάν η θερμοκρασία των περιοχών βρισκόταν κοντά ή κάτω από το σημείο δρόσου, υπόθεση που επιβεβαιώθηκε.

Με θερμοκρασία αέρα στους 15,5°C και σχετική υγρασία στο 69%, όλες οι περιοχές της επιφάνειας με θερμοκρασία κάτω από τους 10°C εμφανίζουν υγρασία από συμπύκνωση. Με κατάλληλη ρύθμιση του οργάνου, όλες οι περιοχές με θερμοκρασία κάτω από το σημείο δρόσου (10°C) αποδίδονται με το χαρακτηριστικό μπλε και σκούρο μπλε των πιο κάτω εικόνων, αποκαλύπτοντας τις θέσεις στις οποίες καταγράφεται συμπύκνωση. Το φαινόμενο είναι πιο εκτεταμένο και έντονο στο βόρειο τοίχο (δεξιά), λόγω της συνολικά χαμηλότερης θερμοκρασίας του. Η δε διαφοροποίηση των θερμοκρασιών οφείλεται στο μεγαλύτερο πάχος της τοιχοποιίας στη συγκεκριμένη θέση, και επομένως στη μεγαλύτερη θερμική της αδράνεια, με αποτέλεσμα τη διατήρηση της «μνήμης» των χαμηλών θερμοκρασιών που είχαν καταγραφεί τις προηγούμενες ημέρες για μεγαλύτερο διάστημα από τα μικρότερου πάχους σημεία της τοιχοποιίας. Οι περιοχές ψηλότερα και χαμηλότερα, είναι μικρότερου πάχους και επομένως θερμότερες.

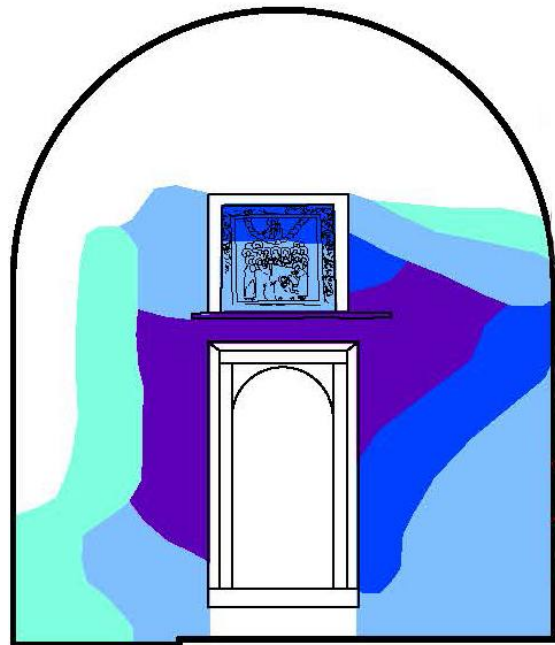


Εικ. 69: Ιερό, νότιος τοίχος, άνω ζώνη. Θερμογραφική απεικόνιση υπερύθρου: Συνθήκες λήψης: T=15,5°C, RH=70%.



Εικ. 70: Κυρίως ναός, βόρειος τοίχος, άνω ζώνη. Θερμογραφική απεικόνιση υπερύθρου: Συνθήκες λήψης: T=15,5°C, RH=70%.

Στο δυτικό τοίχο, η εικόνα είναι διαφορετική. Καταγράφεται υγρασία σε μεγάλο μέρος τις επιφάνειας, όμως οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται σε μια μέση στάθμη. Γενική αρχή ερμηνείας των χαρτών υγρασίας είναι ότι οι πιο υγρές περιοχές βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή. Μια περιοχή όμως από μέση στάθμη δεν μπορεί να αποτελεί θέση εισόδου, ούτε ανερχόμενης υγρασίας, ούτε υγρασίας από διήθηση. Εξετάστηκε θερμογραφικά η πιθανότητα συμπύκνωσης και αποκλείστηκε. Μόνη πιθανή εξήγηση που απομένει, είναι η παλαιότερη απόθεση υγροσκοπικών αλάτων από αιτιολογία που δεν είναι πλέον ενεργή, τα οποία προσροφούν υγρασία από την ατμόσφαιρα.



Σχέδιο 4: Δυτικός τοίχος, χάρτης κατανομής υγρασίας

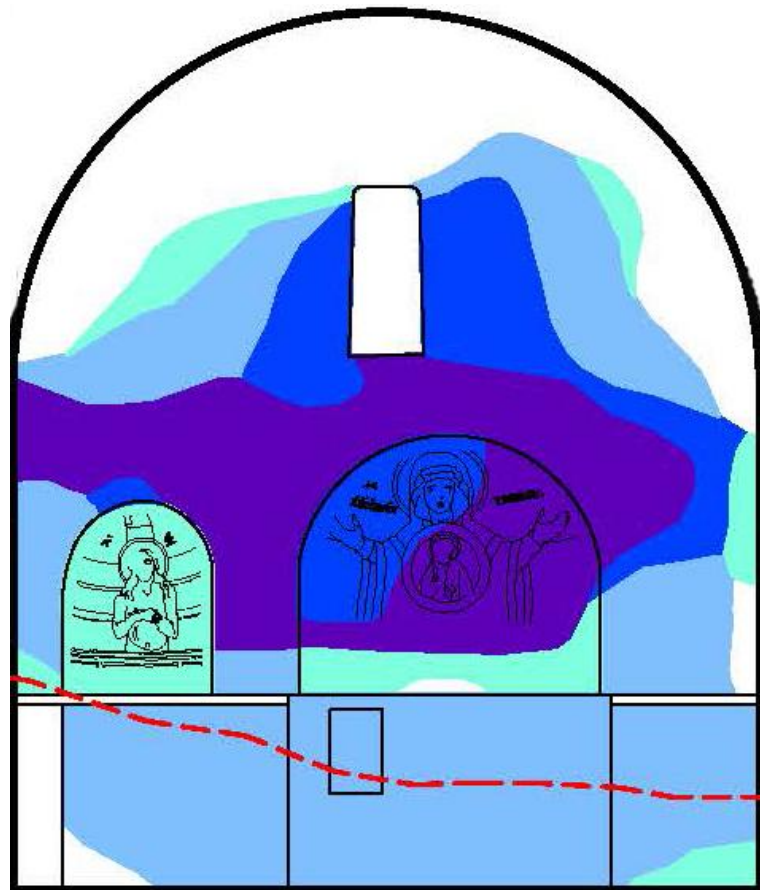
Στη δυτική πλευρά επομένως, θα πρέπει να υπήρχε εισροή νερού πριν την αλλαγή της στέγης, το οποίο θα μετέφερε και απέθετε για χρόνια τόσο διαλυτά άλατα από τα δομικά υλικά της τοικοποιίας, όσο και άλατα χλωριούχου νατρίου λόγω της μικρής απόστασης από τη θάλασσα και της αλατονέφωσης που αυτή συνεπάγεται.

Πράγματι, στη συγκεκριμένη θέση εντοπίστηκαν εμπειρικά άλατα χλωριούχου νατρίου, ενώ η πλήρης αποσάθρωση των ξύλινων στοιχείων στην άνω πλευρά του κασσώματος της πόρτας μαρτυρά παλαιότερη διήθηση νερού από επάνω.



Εικ. 71: Αποσάθρωση ξύλινου κασσώματος

Η ίδια εικόνα επαναλαμβάνεται και στον ανατολικό τοίχο. Ενώ καταγράφεται και μια χαμηλής έντασης υγρασία από πλευρική διείσδυση επιφανειακών υδάτων, ειδικά στο βόρειο τμήμα της ανατολικού τοίχου που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, η έξαρση του φαινομένου εντοπίζεται στη μέση ζώνη και ερμηνεύεται ως προσρόφηση υγρασίας της ατμόσφαιρας από υγροσκοπικά άλατα που έχουν αποτεθεί στο παρελθόν, λόγω εισροής νερού από τη στέγη, από κατασκευαστικές ατέλειες της κάλυψης της κόγχης του ιερού, είτε από το ανατολικό παράθυρο πριν την τοποθέτηση του προστατευτικού πετάσματος.

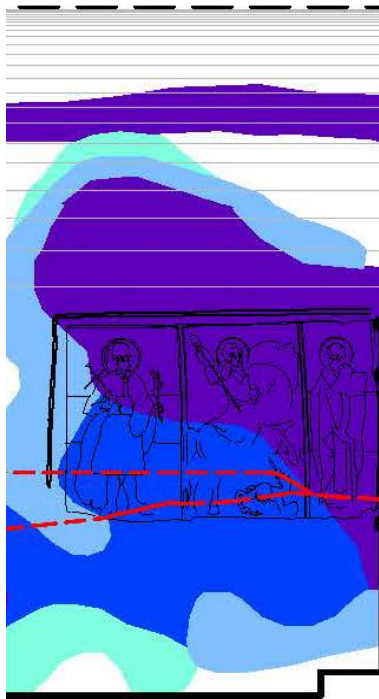


Σχέδιο 5: Ιερό, ανατολικός τοίχος, χάρτης κατανομής υγρασίας

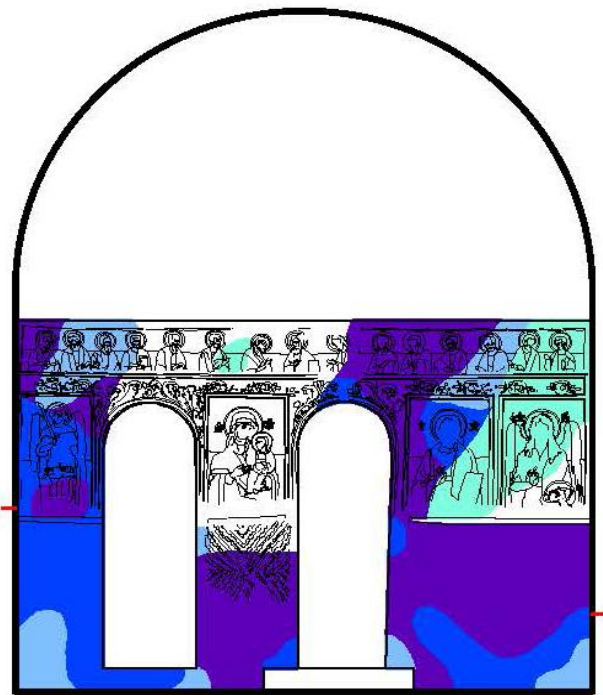


Εικ. 72: Τεταρτοσφαίριο αψίδας και προστατευτικό πέτασμα ανατολικού παραθύρου

Παρόμοια ερμηνεία δίνεται και στην έντονη παρουσία υγρασίας στο τέμπλο. Και εδώ η υγρασία παρουσιάζεται αυξημένη, αλλά με τρόπο ακατάστατο. Παρατηρείται δηλαδή αυξημένη συγκέντρωση σε μέση και υψηλή στάθμη και χαμηλότερες τιμές στη στάθμη του εδάφους. Η πιθανότερη εξήγηση είναι οι αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων από παλαιότερη δράση υγρασίας, ενδεχομένως από εισροή από ψηλά. Διαφοροποίηση υπάρχει στο βόρειο τμήμα, όπου οι υψηλές τιμές ερμηνεύονται ομαλά ως διάχυση της υγρασίας του βορείου τοίχου.

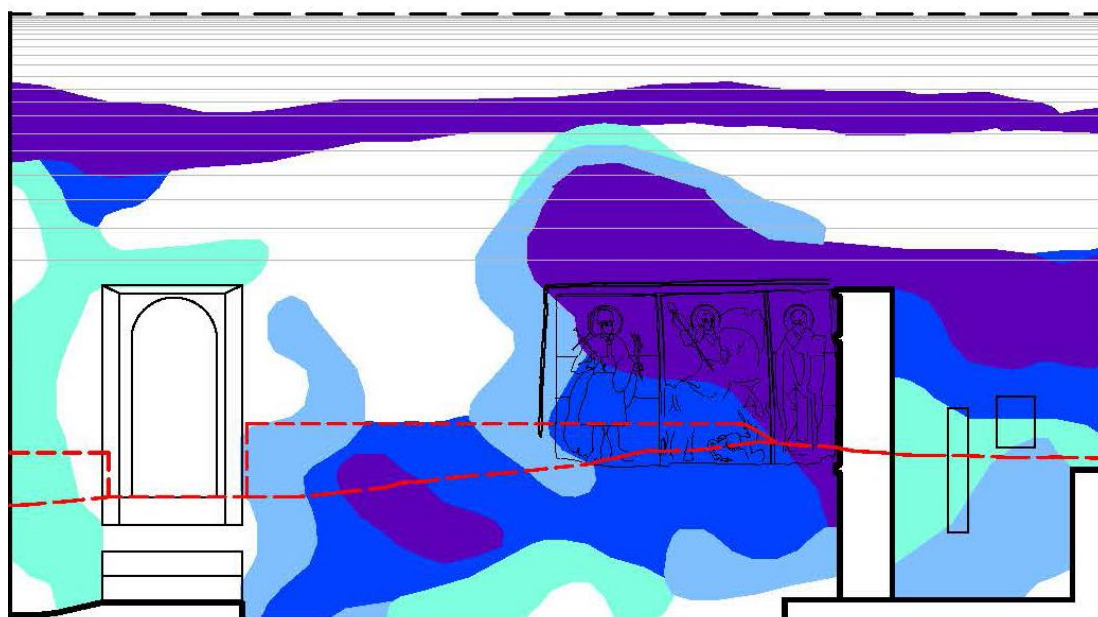


Σχέδιο 6: Τμήμα του βόρειου τοίχου, χάρτης κατανομής υγρασίας



Σχέδιο 7: Κτιστό τέμπλο, χάρτης κατανομής υγρασίας

Τέλος, στο βόρειο τοίχο εμφανίζεται η πιο σύνθετη εικόνα.



Σχέδιο 8: Βόρειος τοίχος, χάρτης κατανομής υγρασίας. Με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή δηλώνεται η θέση του κτιστού πεζουλιού και η στάθμη του εδάφους

Στην ανώτερη ζώνη καταγράφεται λωρίδα υγρασίας σε όλο το μήκος του ναού, που τεκμηριωμένα οφείλεται σε συμπύκνωση. Στην κατώτερη, καταγράφονται επίσης φαινόμενα υγρασίας, αλλά χαμηλότερης έντασης. Στη μέση στάθμη, εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές, σε θέσεις που αντιστοιχούν στην εξωτερική στάθμη του εδάφους και το κτιστό πεζούλι. Οι θέσεις αυτές στην προκειμένη περίπτωση ταυτίζονται με τις θέσεις εισόδου της υγρασίας, που στη συνέχεια διαχέεται στην τοικοποιία. Οι υψηλές τιμές στην περιοχή πάνω από τις τρεις παραστάσεις, εκτός από ανερχόμενη, είναι δυνατόν να ερμηνευτεί συμπληρωματικά και από την παρουσία παλαιότερων αποθέσεων υγροσκοπικών αλάτων. Τέλος, η υγρασία των επιφανειών από άλλες πηγές σε διάφορες θέσεις, είναι δυνατόν λόγω της ψύξης από την εξάτμιση υπό τις παρούσες συνθήκες να οδηγήσει σε φαινόμενα δευτερογενούς συμπύκνωσης (Παπαδοπούλου & Κονιδιτσιώτης, 2015).

12.14. Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις

Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής είναι υγρό, ενώ η μικρή απόσταση του ναού από τη θάλασσα ερμηνεύει τη μεταφορά θαλάσσιων αερολυμάτων. Η ύπαρξη του αρχαίου τείχους στην κατωφέρεια κοντά στη νότια πλευρά του ναού ευνοεί την αποστράγγιση του εδάφους. Τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του ναού εγγυώνται καλή θερμομονωτική λειτουργία, όπως και η ύπαρξη του νεώτερου νάρθηκα στα δυτικά, πράγμα που επιβεβαιώνεται από την εξαιρετική σταθερότητα και τους ήπιους ρυθμούς μεταβολής του εσωτερικού περιβάλλοντος. Το μεγάλο πάχος της τοικοποιίας όμως στην ανώτερη ζώνη ευθύνεται για φαινόμενα συμπύκνωσης. Καθοριστικό για την είσοδο και τη διάδοση της υγρασίας είναι το γεγονός ότι η στάθμη του εσωτερικού δαπέδου είναι σημαντικά χαμηλότερη από του εδάφους στο εξωτερικό. Επίσης, το νεώτερο κτιστό πεζούλι, αυξάνοντας το πάχος της τοικοποιίας στη συγκεκριμένη θέση και μειώνοντας την επιφάνεια εξάτμισης, ευθύνεται για την υψηλότερη στάθμη της ανερχόμενης υγρασίας στη συγκεκριμένη θέση, ενώ ο αρμός μεταξύ αυτού και του τοίχου ευνοεί τη διείσδυση νερού.

Η νεώτερη στέγη φαίνεται κατασκευαστικά άρτια, αποκλείοντας την πιθανότητα εισροής από τις ανώτερες ζώνες και διήθησής της στην τοικοποιία.

Αν και η περίοδος της καταγραφής δεδομένων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας είναι «ξηρή», επισημαίνεται ως κρίσιμο το γεγονός ότι οι μέσοι όροι της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό είναι υψηλότεροι από του εξωτερικού, γεγονός που δηλώνει ενεργές πηγές ή συσσωρευμένα φορτία υγρασίας⁶⁹. Ένα σύνολο αξιοπρόσεκτων χαρακτηριστικών, όπως ο πολύ μικρός χρόνος απόκρισης των εσωτερικών θερμοκρασιών στις μεταβολές του εξωτερικού αλλά και οι διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος κατά τρόπο απολύτως ανεξάρτητο από τη θερμοκρασία, θα μπορούσαν να ερμηνεύονται μόνο από την ύπαρξη ρευμάτων, που όμως δεν φαίνεται να υφίστανται⁷⁰. Αν και οι πηγές της υγρασίας έχουν εντοπιστεί και είναι αντιμετωπίσιμες, το θέμα αξίζει περαιτέρω διερεύνησης.

Από τις καταγραφές περιεχόμενης υγρασίας, σε συνάρτηση με τις μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και το

⁶⁹Βλ. υποσημείωση 65.

⁷⁰Εκ των υστέρων αποδεικνύεται ότι υφίστανται.

θερμογραφικό έλεγχο, προκύπτει ότι η υγρασία στο ναό είναι έντονη. Τα αίτια της προσδιορίζονται ως εξής:

1. Εισροή νερού από ρωγμές μεταξύ του κτιστού πεζουλιού και της τοιχοποιίας στο βόρειο τοίχο.
2. Διήθηση επιφανειακών νερών στο έδαφος και στη συνέχεια πλευρική διείσδυση στο βόρειο, ανατολικό και νότιο τοίχο. Η σχετικά χαμηλή ένταση του φαινομένου στις χαμηλές ζώνες μπορεί να οφείλεται εν μέρει και στην ξηρότητα της περιόδου καταγραφής.
3. Υγρασία από συμπύκνωση στις υψηλότερες, παχύτερες και επομένως θερμικά αδρανέστερες ζώνες. Πρόκειται για ιδανικές συνθήκες για την εμφάνιση εαρινής συμπύκνωσης.
4. Τεκμηριωμένο ιστορικό παλαιότερης διείσδυσης νερού από τη στέγη σε πλήθος θέσεων (βόρειος τοίχος, ανατολικός τοίχος, δυτικός τοίχος, τέμπλο).
5. Αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων στη μέση ζώνη.
6. Δευτερογενής συμπύκνωση.

Το σύνολο των παραπάνω δεδομένων οδηγεί στην απαίτηση για σύνταξη μελέτης από εξειδικευμένο μηχανικό για τις αναγκαίες εργασίες αντιμετώπισης του νερού σε υγρή μορφή, τουλάχιστον στις τρεις πλευρές του ναού, αλλά και στη λήψη ιδιαίτερων μέτρων για τον έλεγχο της διαδικασίας της ξήρανσης, που μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστρεπτική για τις τοιχογραφίες. Σχετικές προτάσεις περιλαμβάνονται στην ενότητα που ακολουθεί.

Προτεινόμενες ενέργειες για την αντιμετώπιση της υγρασίας και τη διαχείριση της περιόδου ξήρανσης

Η έντονη παρουσία υγρασίας στο μνημείο και οι εκτεταμένες αλλοιώσεις από τη δράση αλάτων επιβάλλουν, πριν την πραγματοποίηση των συστηματικών επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης, ένα σύνολο ενεργειών αρμοδιότητας μηχανικού και συντηρητή.

Στις αρμοδιότητες μηχανικού περιλαμβάνονται: Σύνταξη μελέτης για την πραγματοποίηση επεμβάσεων μικρής κλίμακας που αφορούν στην προστασία του ναού

από το νερό από βορρά, ανατολή και νότο στις θέσεις επαφής της τοιχοποιίας με το έδαφος, στην περισυλλογή και απομάκρυνση των ομβρίων της στέγης, καθώς και την αποξήλωση του νεώτερου κτιστού πεζουλιού της βόρειας πλευράς, τουλάχιστον στο τμήμα του ανατολικά της θύρας.

Στις αρμοδιότητες συντηρητή είναι η παρακολούθηση και ο έλεγχος του περιβάλλοντος πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τις επεμβάσεις στεγανοποίησης, προκειμένου να ελεγχθούν οι συνέπειες του εξαιρετικά κρίσιμου μεταβατικού σταδίου της ξήρανσης, να απομακρυνθούν οι υφιστάμενες αποθέσεις υγροσκοπικών διαλυτών αλάτων και να εμποδιστεί η απόθεση νέων.

Συγκεκριμένα απαιτούνται:

1. Καταγραφή περιβαλλοντικών παραμέτρων και νέα χαρτογράφηση περιεχόμενης υγρασίας πριν τις επεμβάσεις στεγανοποίησης.
2. Συνέχιση της παρακολούθησης μετά τις ανωτέρω επεμβάσεις, με διατήρηση της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος σε υψηλά επίπεδα, προκειμένου να αποτραπεί στο βαθμό του εφικτού η εξάτμιση από το εσωτερικό, η οποία θα οδηγούσε σε νέες αποθέσεις αλάτων. Εφόσον κατά το προσωρινό αυτό στάδιο της διαδικασίας εντοπιστεί ανάπτυξη βιολογικών παραγόντων, προτείνεται συμπτωματική θεραπεία με βιοκτόνα.
3. Με τις πρώτες ενδείξεις πτώσης των τιμών περιεχόμενης υγρασίας, εκκίνηση επεμβάσεων αφαίρεσης των υφιστάμενων και των πιθανών νέων αποθέσεων διαλυτών αλάτων, με αλληπάλληλους κύκλους εφαρμογής επιθεμάτων απιονισμένου νερού, λήψη δειγμάτων αλάτων από διάφορες στάθμες και με διαρκή παρακολούθηση των τιμών συγκέντρωσης των αλάτων, οι οποίες πρέπει να είναι φθίνουσες. Κατά το στάδιο αυτό μπορεί να ενθαρρύνεται η εξάτμιση προς το εσωτερικό με δημιουργία ρευμάτων και αύξηση της θερμοκρασίας, αφού οι αποθέσεις θα γίνονται όχι στη δομή ή την επιφάνεια των τοιχογραφιών αλλά στα επιθέματα. Τα επιθέματα θα πρέπει να αφαιρούνται πριν το πλήρες στέγνωμά τους, προκειμένου να αποφευχθεί η ενεργοποίηση νέων κύκλων ξήρανσης - ενυδάτωσης - διόγκωσης⁷¹.

⁷¹Επίσης, για την αποφυγή αντίστροφης διάχυσης.

Με τις παραπάνω ενέργειες, θεωρείται ότι θα έχουν αντιμετωπιστεί σε σημαντικό βαθμό οι μορφές υγρασίας που σχετίζονται με την πλευρική διείσδυση επιφανειακών νερών και με παλαιότερες αποθέσεις υγροσκοπικών διαλυτών αλάτων, ενώ θα έχει αποφευχθεί σε ένα βαθμό και η απόθεση νέων. Παράλληλα, θα έχουν αρθεί οι προϋποθέσεις εμφάνισης υγρασίας από δευτερογενή συμπύκνωση.

Θα εκκρεμεί επομένως η αντιμετώπιση του φαινομένου της πρωτογενούς συμπύκνωσης, η οποία μάλιστα στην περίπτωση του Άη Μιχάλη δεν είναι ζωτικής σημασίας, καθώς καταγράφεται σε μη τοιχογραφημένες περιοχές. Ακόμη και έτσι πάντως, οι επεμβάσεις που περιγράφονται παραπάνω, σε συνδυασμό με πολύ μικρής κλίμακας εργασίες στο κέλυφος και τον περιβάλλοντα χώρο, θα μειώσουν σημαντικά τις πιθανότητες συμπύκνωσης.

Προϋπόθεση για την εμφάνιση της συμπύκνωσης είναι η ταυτόχρονη παρουσία υψηλής σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό και τοίχων με θερμοκρασία επιφάνειας χαμηλότερη από αυτή του εσωτερικού αέρα. Οι λύσεις επομένως αναζητώνται προς την κατεύθυνση της αύξησης της θερμοκρασίας των τοίχων, ταυτόχρονα με τη μείωση της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού. Όσο τα διάφορα αίτια της υγρασίας σε υγρή μορφή δεν έχουν αντιμετωπιστεί και οι τοίχοι παραμένουν κορεσμένοι, η μείωση της σχετικής υγρασίας όχι απλώς δεν είναι σκόπιμο να επιδιώκεται τεχνητά, για παράδειγμα με χρήση αφυγραντήρων ή δημιουργία ρευμάτων, αλλά αποτελεί τυπικό σφάλμα. Σε αντίθετη περίπτωση θα προκαλείται εξάτμιση προς το εσωτερικό και απόθεση διαλυτών αλάτων στη δομή και την επιφάνεια των τοιχογραφιών. Υπάρχουν παραδείγματα κατά τα οποία παρατηρήθηκε η χρήση τέτοιων μέσων επέφερε ένταση της παθολογίας, με νέες αποθέσεις αλάτων, αποκολλήσεις, αποσάθρωση επιχρισμάτων κ.ο.κ.

Οι εξωτερικές εργασίες αφορούν σε απομάκρυνση της χαμηλής βλάστησης στη νότια πλευρά του ναού και τη μείωση της κόμης της ελιάς στα ανατολικά, προκειμένου να αυξηθούν τα ηλιακά κέρδη και επομένως να αυξηθεί έστω και λίγο η θερμοκρασία των τοιχοποιιών. Παράλληλα, το ίδιο αποτέλεσμα θα επιτευχθεί με το στέγνωμα των τοίχων, οι οποίοι όσο παραμένουν υγροί χάνουν τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες και μετατρέπονται σε θερμογέφυρες, μεταφέροντας το εξωτερικό ψύχος στις εσωτερικές επιφάνειες της τοιχοποιίας.

Επίσης, η αντιμετώπιση των αιτιών της υγρασίας και η σταδιακή αποβολή των υφισταμένων φορτίων θα οδηγήσει σε αισθητά χαμηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό, μειώνοντας ακόμη περισσότερο τις πιθανότητες συμπύκνωσης.

13. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ, ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

13.1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με τα οριζόμενα στο μέρος Β της εργασίας, το στάδιο της μελέτης ακολουθούν οι επεμβάσεις για την αντιμετώπιση των διαφόρων τύπων της υγρασίας, με σημείο εκκίνησης την αντιμετώπιση της υγρασίας σε υγρή μορφή, ενώ παράλληλα συνεχίζεται η καταγραφή των περιβαλλοντικών παραμέτρων για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων τους. Την ίδια περίοδο πρέπει να προσδιοριστούν οι μεσοπρόθεσμα επιθυμητοί στόχοι θερμοκρασίας - σχετικής υγρασίας για την περίοδο της ξήρανσης, οι μακροπρόθεσμοι στόχοι για τις ίδιες παραμέτρους, καθώς και να εκτελεστούν επεμβάσεις αφαλάτωσης.

Από τη μελέτη προσδιορίστηκαν οι εξής στόχοι:

- Αντιμετώπιση της υγρασίας σε υγρή μορφή, που προκύπτει από πλευρική διείσδυση και καταγράφεται ως περιεχόμενη σε τοιχογραφίες και επιχρίσματα. Προϋποθέτει μελέτη και επεμβάσεις μηχανικού.
- Αντιμετώπιση της υγροσκοπικής περιεχόμενης υγρασίας που σχετίζεται με αποθέσεις αλάτων. Προϋποθέτει μείωση της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος και επεμβάσεις αφαλάτωσης.
- Ήπια αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου και της επιφάνειας των τοίχων, που αναμένεται λόγω της ξήρανσης των τοίχων και της κοπής της κόμης της ελιάς στα ανατολικά.
- Αντιμετώπιση της υγρασίας από συμπύκνωση. Προϋποθέτει μείωση της σχετικής υγρασίας του χώρου μέσω της μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας του κελύφους και της αύξησης της εσωτερικής θερμοκρασίας, καθώς και αύξηση της θερμοκρασίας των τοίχων.

Είναι σκόπιμο, η επίτευξη των παραπάνω στόχων να επιδιώκεται και να παρακολουθείται ξεχωριστά, είναι όμως προφανής η αλληλεξάρτηση των σχετικών παραμέτρων. Ενδεικτικά, ο υγρός τοίχος μετά την ξήρασή του θα πάψει να λειτουργεί ως θερμογέφυρα, επομένως αναμένεται ο περιορισμός της απώλειας θερμικής ενέργειας κατά τη χειμερινή περίοδο. Δηλαδή, η αντιμετώπιση της υγρασίας σε υγρή

μορφή αναμένεται να επηρεάσει θετικά τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία και να περιορίσει τη συχνότητα των φαινομένων συμπύκνωσης. Αντίστροφα, η μείωση της σχετικής υγρασίας και η αύξηση της θερμοκρασίας αναμένεται να περιορίσει την υγροσκοπική υγρασία.

13.2. Αντιμετώπιση της υγρασίας σε υγρή μορφή

Σύμφωνα με τις προτάσεις της μελέτης συντήρησης, συντάχθηκε «μελέτη λήψης πρόσθετων μέτρων προστασίας αντιμετώπισης των πηγών υγρασίας στον Ιερό Ναό Αγίου Μιχαήλ Αρίλλα Πέρδικας» από τον πολιτικό μηχανικό Κωνσταντίνο Ντέλμα.

Η πρόταση (Ντέλμας, 2019) χαρακτηρίζεται από αντίληψη των ιδιαιτεροτήτων των τοιχογραφημένων μνημείων και συνοψίζεται στα εξής:

«Πρόταση λήψης μέτρων στράγγισης-ξήρανσης: Η άρση των αιτίων της υγρασίας απαιτεί την κατασκευή περιμετρικού δικτύου στράγγισης με σημείο απαγωγής την κατώτερη στάθμη του περιβάλλοντα χώρου που βρίσκεται στην Νοτιοανατολική γωνία του ναού. Στην θέση αυτή και σε ικανή απόσταση από τον τοίχο θα τοποθετηθεί το υπόσκαφο φρεάτιο συλλογής και ελέγχου του δικτύου. Το φρεάτιο αυτό θα αποτελεί την αφετηρία των δύο υπόγειων κλάδων προσαγωγής του δικτύου οι οποίοι θα τοποθετηθούν εντός ορύγματος που θα ακολουθεί τις κλίσεις του φυσικού και διαμορφωμένου εδάφους σε όλο το ανάπτυγμα της περιμέτρου του ναού.

Από το φρεάτιο συλλογής θα άρχεται ο σωλήνας απαγωγής των στραγγισμάτων που θα οδεύει στην νοτιοανατολικότερη και υψομετρικά κατώτερη θέση του οικοπέδου.

Ο πρώτος και βραχύτερος κλάδος του δικτύου στράγγισης θα καλύπτει το Ανατολικό ανάπτυγμα του δικτύου και θα καταλήγει στην Βορειοανατολική γωνία του ορύγματος και του ναού που αποτελεί την υψομετρικά ανώτερη στάθμη του δικτύου. Στην θέση αυτή θα τοποθετηθεί το δεύτερο υπόσκαφο φρεάτιο ελέγχου του δικτύου.

Ο δεύτερος κλάδος του δικτύου θα καλύψει την Νότια πλευρά του κυρίως ναού και του νάρθηκα, την Δυτική πλευρά του νάρθηκα και την Βόρεια πλευρά του νάρθηκα και του κυρίως ναού για να καταλήξει στο φρεάτιο ελέγχου (υψομετρικά ανώτερη στάθμη) στην Βορειοανατολική γωνία του ορύγματος.

Όλο το δίκτυο θα έχει διττή λειτουργία. Πέραν της στράγγισης θα λειτουργεί και ως αεραγωγός για την σταθεροποίηση και επιτάχυνση-επιβράδυνση της ξήρανσης με φυσική ροή αέρα εντός του σωλήνα που καθορίζεται από την θερμοκρασιακή διαφορά

εδάφους-αέρα και θερμοκρασίας αέρα στο κατώτερο σημείο εισροής και ανώτερο σημείο απαγωγής. Προκειμένου να επιτευχθεί η λειτουργία αυτή θα πρέπει να φέρει τα εξής λειτουργικά εξαρτήματα:

1. Από μία αντεπίστροφη βαλβίδα στο υψομετρικά κατώτερο σημείο κάθε κλάδου λίγο πριν την προσαγωγή του στο φρεάτιο συλλογής στην Νοτιοανατολική γωνία Η βαλβίδα αυτή τοποθετείται για να παραμένει κλειστός ο αγωγός κάθε κλάδου έναντι εισροής αέρα από το φρεάτιο.
2. Από ένα κατακόρυφο αεραγωγό που τοποθετείται επί του στραγγιστικού σωλήνα κάθε κλάδου πριν την αντεπίστροφη βαλβίδα (στραγγιστικός-αεραγωγός - αντεπίστροφη -φρεάτιο). Ο αεραγωγός αυτός θα εκτείνεται κατά 15cm εκτός του εδάφους που θα αποτελεί το ορατό του τμήμα. και θα φέρει στρόφιγγα ρύθμισης της εισροής του αέρα στην κεφαλή του.
3. Από ένα κατακόρυφο αεραγωγό που τοποθετείται επί του στραγγιστικού σωλήνα κάθε κλάδου εντός του ανώτερου φρεατίου ελέγχου στην ανώτερη υψομετρικά θέση. Ο αεραγωγός αυτός όπως και ο κατώτερος του ιδίου κλάδου θα εκτείνεται κατά 15cm εκτός του εδάφους και θα φέρει στρόφιγγα ρύθμισης της απαγωγής του αέρα στην κεφαλή του.
4. Ένας κατακόρυφος αεραγωγός που τοποθετείται επί του στραγγιστικού σωλήνα του μεγαλύτερου κλάδου στην Βορειοδυτική γωνία του ναού. Ο αεραγωγός θα εκτείνεται κατά 15cm εκτός του εδάφους και θα φέρει στρόφιγγα ρύθμισης της απαγωγής και εισροής του αέρα στην κεφαλή του. Ο αεραγωγός αυτός τοποθετείται για να μπορεί να επιταχύνει την ξήρανση εισάγοντας αέρα σε όλο το μήκος του Βόρειου ορύγματος όταν δεν απαιτείται περαιτέρω ξήρανση στο Νότιο και Δυτικό τμήμα του ορύγματος.

Το προαναφερθέν σύστημα αποτελείται από δύο κλάδους στραγγιστικού δικτύου και τρεις κλάδους ξήρανσης μέσω απαγωγής αέρα. Οι τρεις κλάδοι ξήρανσης- ο Ανατολικός- ο Νοτιοδυτικός και ο Βόρειος- μπορούν να λειτουργούν καθ ένας ανεξάρτητα ή από κοινού με διαφορετική απαγωγή αέρα έκαστος που ρυθμίζεται από τις στρόφιγγες. Άρα και μεταβαλλόμενο ρυθμό και επίπεδο ξήρανσης κατά περιοχή που καλύπτουν, ανάλογα με τις ανάγκες που θα προκύψουν από τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της υγρασίας σε κάθε τοίχο του ναού.

Μετά την τοποθέτηση του δικτύου θα διενεργηθούν επαναλαμβανόμενοι πυκνοί έλεγχοι μέτρησης της υγρασίας σε κάθε περιοχή και τοίχο ώστε να ρυθμιστούν οι στρόφιγγες κατά τρόπο που να αποφευχθεί η υπερβολική ξήρανση των τοίχων.

Πριν την διάνοιξη του ορύγματος του στραγγιστικού δικτύου θα διενεργηθούν ενδεικτικές τομές στο έδαφος για τον εντοπισμό του ημίβραχου για τον προσδιορισμό ισοβαθούς κατά το δυνατόν ομαλής κλίσης του επιπέδου του πυθμένα του ορύγματος σύμφωνα με τις κλίσεις του περιβάλλοντα χώρου. Στοιχείο που διασφαλίζει την ομαλή διττή λειτουργία του δικτύου. Παράλληλα θα καταστεί δυνατός ο εντοπισμός των θεμελίων του κυρίως ναού και του νεότερου νάρθηκα. Ο εντοπισμός του βάθους και η κατάσταση των θεμελίων θα ορίσουν την απόσταση από αυτά που θα διανοιχτεί το όρυγμα καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.

Κατά την διάνοιξη του ορύγματος στην Ανατολική και Βόρεια πλευρά αυτού θα βρεθεί τμήμα του ριζικού συστήματος των παρακείμενων δένδρων το οποίο θα αποκοπεί. Πριν την τοποθέτηση του στραγγιστικού δικτύου θα κατασκευαστεί επί του πυθμένα ταινία αλκαλικού φοβισμού των ριζών των δένδρων. Η ταινία αυτή είναι κλειστή στρώση ξηρού μείγματος ορυκτής άμμου 50% , υδράσβεστου 45% και ατταπουλγίτη 5%. Το πάχος της στρώσης θα είναι 10cm και πλάτος της θα είναι 40cm. Η στρώση αυτή θα περιβάλλεται εξολοκλήρου από γαιοϋφασμα και καλό είναι να αναπτυχθεί σε όλο το μήκος του πυθμένα του ορύγματος.

Το όρυγμα μετά την ενσωμάτωση της όλης κατασκευής θα επιχωθεί με στρώσεις διαβαθμισμένου χαλικιού καθ ύψος. Στην ανώτερη στάθμη της πλήρωσης του ορύγματος θα αποκατασταθούν οι θιγόμενες κατασκευές και υλικά όπως αυτά υφίστανται σήμερα.

Το προτεινόμενο δίκτυο αναμένεται να επιφέρει τα κάτωθι αποτελέσματα:

- α. ελεγχόμενη στράγγιση σε όλο το ανάπτυγμα των θεμελίων των περιμετρικών τοίχων του ναού και καθήλωση της ανοδικής υγρασίας.
- β. προσαρμόσιμη ξήρανση στις ανάγκες προστασίας και συντήρησης των τοιχογραφιών στον Βόρειο και Νότιο τοίχο του κυρίως ναού.
- γ. ξήρανση του δαπέδου του ναού και μείωση στα επιθυμητά επίπεδα της δευτερογενούς συμπύκνωσης στις θέσεις της καθ ύψος μεταβολής της μάζας των λιθοσωμάτων καθώς και στο κτιστό τέμπλο. Αναμονή μείωσης των αποθέσεων των υγροσκοπικών αλάτων στην μέση ζώνη των τοίχων.

δ. σημαντική ανακούφιση των λιθοσωμάτων των θεμελίων (Ανατολική και Βόρεια πλευρά) έναντι όξινης προσβολής και υποσκαφής από το ριζικό σύστημα των δένδρων».

Η παραπάνω πρόταση ικανοποίησε τις απαιτήσεις που τέθηκαν ως προς την αντιμετώπιση της υγρασίας σε τοιχογραφημένα μνημεία, ιδίως διότι αποφεύγει τη στεγανοποίηση της εξωτερικής παρειάς της τοικοποιίας, ενώ επιτυγχάνει την αύξηση της επιφάνειας εξάτμισης, διασφαλίζοντας συγχρόνως τον εξαερισμό της ίδιας περιοχής.

Η πρόταση συντάχθηκε και εγκρίθηκε το 2019, ενώ το Σεπτέμβριο του ίδιου έτους πραγματοποιήθηκαν και οι σχετικές εργασίες.



Εικ. 73: Ανατολική όψη. Κατακόρυφοι αεραγωγοί για τον έλεγχο του εξαερισμού της τάφρου



Εικ. 74: Λεπτομέρεια ΝΑ γωνίας



Εικ. 75: ΒΔ πλευρά. Περιμετρικό δίκτυο στράγγισης και κατακόρυφος αεραγωγός



Εικ. 76: Λεπτομέρεια ΒΔ γωνίας

13.3. Παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας και των συνεπειών της επέμβασης

13.3.1. Εισαγωγή

Για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων της κατασκευής της τάφρου αποστράγγισης - εξαερισμού, συνεχίστηκε η καταγραφή της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ πραγματοποιούνταν περιοδικά μετρήσεις περιεχόμενης υγρασίας και θερμογραφική επιθεώρηση.

Ως προς τις μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, η διαδικασία συνεχίστηκε όπως περιγράφεται στη σχετική ενότητα της μελέτης, με μόνη διαφορά την αλλαγή της θέσης του καταγραφικού εξωτερικά του ναού, προκειμένου να αποφευχθεί η αλλοίωση των τιμών από την πυράκτωση του στεγάστρου κατά τις απογευματινές ώρες.

Η περίοδος που καλύπτεται από τις καταγραφές φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, μαζί με τις εργασίες - σταθμούς, οι οποίες μετέβαλαν τη θερμοϋγρομετρική κατάσταση του μνημείου.

Πίνακας 8: Περίοδος καταγραφής δεδομένων θερμοκρασίας κα σχετικής υγρασίας και χρονική τοποθέτηση εργασιών - σταθμών

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
2018												
2019									i			
2020			ii			iii		iv				

(i)Κατασκευή τάφρου (ii) Κοπή κόμης ελιάς (iii) Συντήρηση, αφαλάτωση, περιορισμός ανοιγμάτων (iv) Ολοκλήρωση περιορισμού ανοιγμάτων

Ενδεικτικά, μέχρι και τις 16-06-2020, είχαν καταγραφεί συνολικά 150.000 μετρήσεις, δηλαδή:

- 37.500 μετρήσεις τιμών θερμοκρασίας για το εσωτερικό, και ο ίδιος αριθμός για το εξωτερικό περιβάλλον.
- Ο ίδιος αριθμός μετρήσεων σχετικής υγρασίας για το εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον.

Οι μετρήσεις εσωτερικού περιβάλλοντος της περιόδου 15-30 Ιουνίου 2020 είναι σκόπιμο να αξιοποιούνται με επιφύλαξη, καθώς αλλοιώνονται σε ένα βαθμό από την εκτέλεση εργασιών αφαλάτωσης και συντήρησης των τοιχογραφιών.

13.3.2. Αποτελέσματα από την κατασκευή της τάφρου στην περιεχομένη υγρασία τοιχογραφιών και επιχρισμάτων

Η παρακολούθηση της εξέλιξης της περιεχόμενης υγρασίας των τοιχοποιιών έγινε με μετρήσεις σε τέσσερις φάσεις⁷²:

- Μία κατά την εκπόνηση της μελέτης συντήρησης (31 Οκτωβρίου2018) (σχέδιο 12).
- Μία δεύτερη μετά τη μελέτη και πριν την κατασκευή της τάφρου αποστράγγισης - εξαερισμού (16 Ιουλίου 2019) (σχέδιο 13),ώστε να υπάρχουν δεδομένα σύγκρισης από διαφορετικές εποχές του έτους και να εκτιμηθεί η επιρροή της εποχής στην περιεχόμενη υγρασία.

⁷²Στην επιτόπου συλλογή των στοιχείων συμμετείχαν οι συνάδελφοι (αλφαβητικά): Κατερίνα Αγγελίδη, Άννα Καρούντζου, Νίκος Κοκύλης και Μυρτώ Ραφελέτου.

- Η τρίτη, δύο μήνες μετά την κατασκευή της τάφρου (8 Νοεμβρίου 2020) (σχέδιο 14).
- Η τέταρτη εννέα μήνες μετά την κατασκευή της τάφρου (16 Ιουνίου 2020) (σχέδιο 15).

Από τη συγκριτική εξέταση των χαρτών περιεχόμενης υγρασίας προκύπτουν συμπεράσματα τόσο για το ρυθμό προόδου της ξήρανσης, όσο και για την επιρροή των συνθηκών της περιόδου μέτρησης στην περιεχόμενη υγρασία των τοίχων.

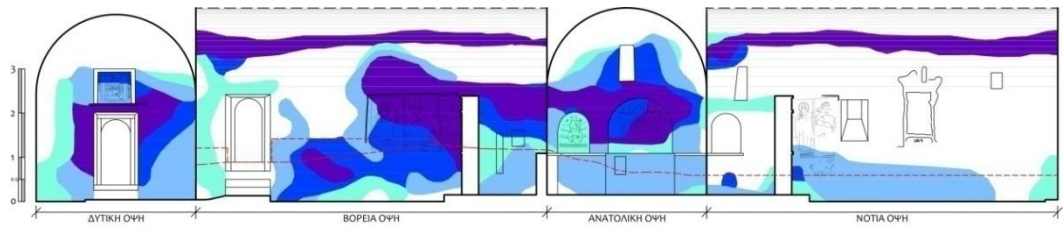
Η περίοδος μέτρησής της καθορίζει την περιεχόμενη υγρασία λόγω:

- της υγρασίας σε υγρή μορφή από βροχοπτώσεις που βρίσκει το δρόμο της προς την τοιχοποιία,
- της διαφορετικής σχετικής υγρασίας του αέρα μεταξύ υγρών και ξηρών περιόδων που επηρεάζει την υγροσκοπική υγρασία των τοίχων αλλά και την πιθανότητα εμφάνισης συμπύκνωσης.

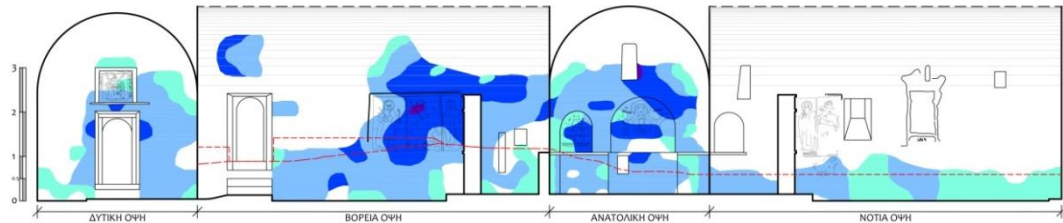
Δεδομένου του ότι στο πλαίσιο της μελέτης συντήρησης η υγρασία αρκετών επιφανειών ερμηνεύθηκε ως υγροσκοπική ή από συμπύκνωση, με πηγή δηλαδή τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, η εικόνα των χαρτών αναμενόταν να καθορίζεται σημαντικά από τους μέσους όρους της σχετικής υγρασίας ενός σχετικά βραχυπρόθεσμου διαστήματος πριν τη λήψη των μετρήσεων. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και διότι το όργανο μέτρησης δίνει δεδομένα για την περιεχόμενη υγρασία των επιφανειακών στρωμάτων τοιχογραφιών και επιχρισμάτων (έως 19mm). Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται δεδομένα συσχέτισης καθενός από τους χάρτες με το μέσο όρο σχετική υγρασίας του εσωτερικού, κατά την εβδομάδα και την ημέρα πριν τη λήψη των μετρήσεων.

Πίνακας 9: Δεδομένα συσχέτισης περιεχόμενης υγρασίας με τη σχετική υγρασία του προηγούμενου διαστήματος

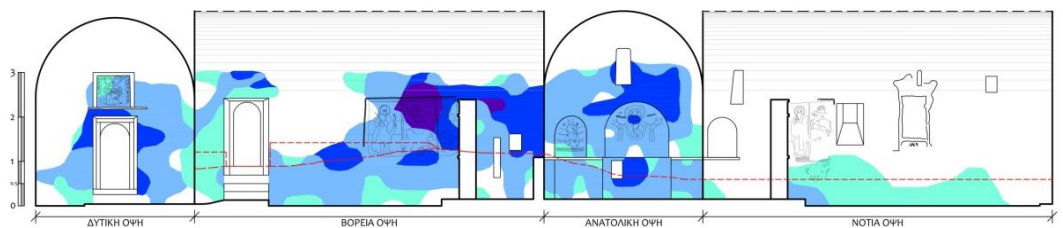
ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	Μ.Ο. RH% ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗΣ ΕΒΔΟΜΑΔΑΣ	Μ.Ο. RH% ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗΣ ΗΜΕΡΑΣ
31/10/2018	61,69 (Αναπληρώνεται από δεδομένα του 2019)	66,6 (Αναπληρώνεται από δεδομένα του 2019)
16/7/2019	66,83	69,3
8/11/2019	76,21	81,9
16/6/2020	82,64	80



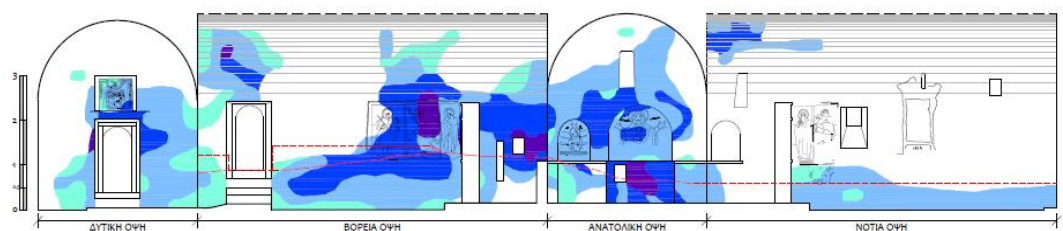
Σχέδιο 9: Χάρτης περιεχόμενης υγρασίας από μετρήσεις της 31-10-2018



Σχέδιο 10: Χάρτης περιεχόμενης υγρασίας από μετρήσεις της 16-07-2019



Σχέδιο 11: Χάρτης περιεχόμενης υγρασίας από μετρήσεις της 08-11-2019



Σχέδιο 12: Χάρτης περιεχόμενης υγρασίας περιόδου 16-06-2020

Από τη σύγκριση του πρώτου με τον τελευταίο χάρτη είναι προφανής ο περιορισμός της περιεχόμενης υγρασίας ιδίως στο βόρειο τοίχο, χάρη στην κατασκευή της τάφρου. Η βελτίωση είναι σημαντική και συμβαίνει μέσα σε συγκριτικά μικρό χρονικό διάστημα (εννέα μήνες). Συγχρόνως σημειώνεται περιορισμός της περιεχόμενης υγρασίας σε

θέσεις που δεν σχετίζονται με την υγρασία από πλευρική διείσδυση που αντιμετώπισε η τάφος. Σε περιορισμένο αριθμό θέσεων παρατηρήθηκε αύξηση των τιμών περιεχόμενης υγρασίας, η οποία φαίνεται να σχετίζεται με την ιδιαίτερα αυξημένη σχετική υγρασία του διαστήματος πριν τις μετρήσεις, χωρίς να παραγνωρίζεται και η εξάρτηση της αξιοπιστίας των τιμών από το χειρισμό του οργάνου κατά τη μέτρηση. Ο ρόλος των συνθηκών της περιόδου σε περιπτώσεις μνημείων όπου η περιεχόμενη υγρασία καθορίζεται από τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας αποτυπώνεται emphaticά στη σύγκριση του πρώτου με το δεύτερο χάρτη, ο οποίος είναι ο «ξηρότερος» από τους τέσσερεις, ενώ αφορά σε περίοδο πριν την κατασκευή της αποστραγγιστικής τάφρου. Με την ίδια ευκρίνεια αναδεικνύεται και η ανάγκη επανάληψης των μετρήσεων περιεχόμενης υγρασίας σε διαφορετικές περιόδους και υπό διαφορετικές συνθήκες. Στον πρώτο χάρτη η εικόνα καθορίζεται έντονα από τη συμπύκνωση στην ανώτερη ζώνη, η οποία συγκυριακά εξαφανίζεται στο δεύτερο και τον τρίτο χάρτη και επανεμφανίζεται μερικώς στον τέταρτο, που προκύπτει από μετρήσεις σε συνθήκες παρόμοιες με αυτές του πρώτου.

Το κύριο συμπέρασμα από τη συγκριτική μελέτη των χαρτών είναι ότι η περίοδος ξήρανσης βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη, γεγονός που αφενός επιβάλλει ενέργειες προσδιορισμού του επιθυμητού μικροκλίματος και αφετέρου καθιστά την περίοδο κατάλληλη για την πραγματοποίηση επεμβάσεων αφαλάτωσης.

13.3.3. Αποτελέσματα από την κατασκευή της τάφρου στη θερμοκρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος

Κατά τη σύγκριση των τιμών θερμοκρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος πριν και μετά την κατασκευή της περιμετρικής τάφρου (Σεπτέμβριος 2019), καταγράφεται επίσης βελτίωση προς την κατεύθυνση του επιθυμητού στόχου, δηλαδή ήπια αύξηση της θερμοκρασίας. Στο αποτέλεσμα αυτό όμως, πέραν της προοδευτικής ξήρανσης του βόρειου τοίχου είναι δυνατόν να έχει συμβάλει και η κοπή της κόμης της ελιάς (Φεβρουάριος 2020) στα ανατολικά του ναού. Ο βαθμός συμβολής της κάθε ενέργειας στο αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας δεν είναι γνωστός.

Με δεδομένη την εξέλιξη των καταγραφών, όπως αποτυπώθηκε στον πίνακα 7, τα συγκρίσιμα διαστήματα προσδιορίζονται στις περιόδους 9/3-16/6/2019 και 9/3-16/6/2020.

Για τα διαστήματα αυτά εξετάζονται οι εβδομαδιαίοι μέσοι όροι θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος.

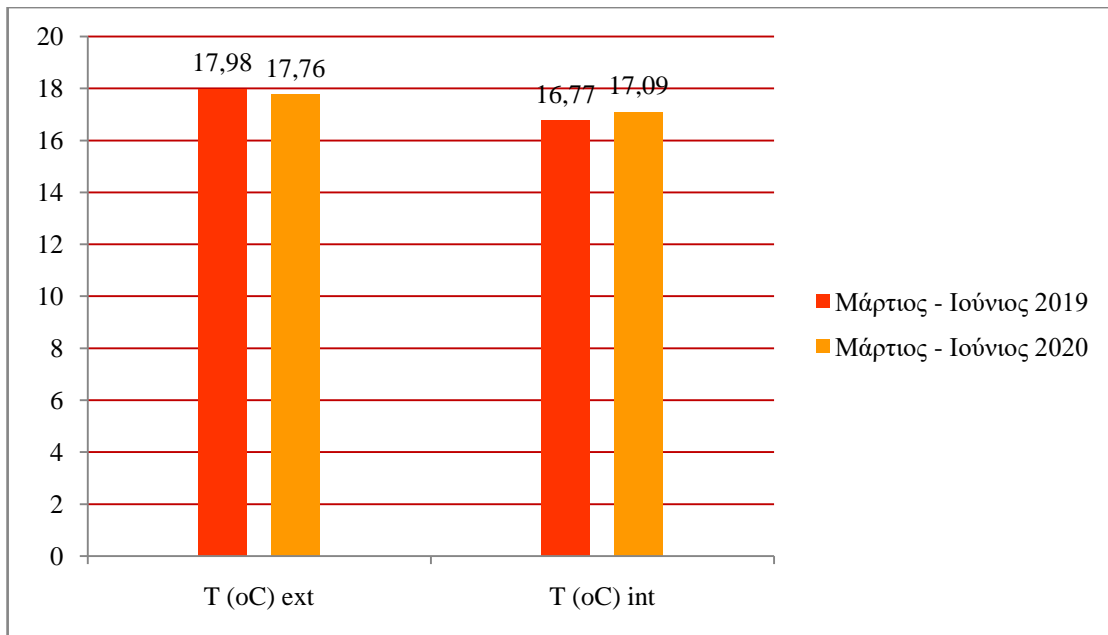
Πίνακας 10: Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος περιόδου καταγραφής 2019

ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	T (°C) EXT 2019 ΕΒΔ. Μ.Ο.	T (°C) INT 2019 ΕΒΔ. Μ.Ο.
2019	9-16/3	11,9	13,3
2019	16-23/3	14,8	13,3
2019	23-30/3	14,5	14,6
2019	30/3-4/6	15,1	14,2
2019	6-13/4	14,7	14,4
2019	13-20/4	14,9	14,3
2019	20-27/4	18,5	15,9
2019	27/4-4/5	17,3	17,3
2019	4-11/5	15,7	15,8
2019	11-18/5	16,8	15,7
2019	18-25/5	19,4	17,4
2019	25/5-1/6	20,7	18,9
2019	1-8/6	20,3	19,0
2019	8-15/6	27,4	22,5
2019	15-22/6	27,7	25,0
Μ.Ο.		17,98	16,77

Πίνακας 11: Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος περιόδου καταγραφής 2020

ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	Τ (°C) EXT 2020 ΕΒΔ. Μ.Ο.	Τ (°C) INT 2020 ΕΒΔ Μ.Ο.
2020	7-14/3	13,2	13,1
2020	14-21/3	13,7	14,1
2020	21-28/3	12,3	13,6
2020	28/3-4/4	12,3	12,9
2020	4-11/4	14,5	13
2020	11-18/4	16,5	15,7
2020	18-25/4	15,8	15,9
2020	25/4-3/5	17,2	16,1
2020	2-9/5	18,1	17,2
2020	9-16/5	23,1	19,5
2020	16-23/5	25,7	23,6
2020	23-30/5	20,3	21,3
2020	30/5-6/6	19,8	19,3
2020	6-13/6	20,7	20
2020	13-16/6	23,2	21,1
Μ.Ο.		17,76	17,09

Το συμπέρασμα είναι ότι, ενώ οι θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος για τα διαστήματα αυτά ήταν παρόμοιες, και μάλιστα αυτές του 2020 κατά τι χαμηλότερες, η θερμοκρασία του εσωτερικού για την ίδια περίοδο εμφανίζονται αυξημένη.



Γράφημα 25:Θερμοκρασίες εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος περιόδου καταγραφής 2019 και 2020

Συνοψίζοντας, ενώ η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος το 2020 ήταν μειωμένη κατά 0,22 °C σε σχέση με την ίδια περίοδο του 2019, η θερμοκρασία του εσωτερικού ήταν αυξημένη κατά 0,32 °C.

13.3.4. Αποτελέσματα από την κατασκευή της τάφρου στη σχετική υγρασία εσωτερικού περιβάλλοντος

Τα ευρήματα που αφορούν στις μεταβολές στο μέγεθος της σχετικής υγρασίας προκύπτουν από τη σύγκριση των ίδιων περιόδων (9/3-16/6/2019 και 9/3-16/6/2020) και είναι μάλλον τα πιο ενδιαφέροντα στη μελέτη περίπτωσης. Συνάγονται δύο συμπεράσματα.

Πρώτον, η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του ναού εμφανίζεται μειωμένη το 2020, σύμφωνα με το στόχο που είχε τεθεί. Η μείωση σχετίζεται σε ένα μικρό βαθμό με την αντίστοιχα μικρή αύξηση της θερμοκρασίας που σημειώθηκε⁷³, κυρίως όμως με τον περιορισμό της τροφοδοσίας της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας από την πηγή της

⁷³ Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0,32 °C, με σταθερή απόλυτη υγρασία και πίεση, θα οδηγούσε σε μείωση της σχετικής υγρασίας κατά 1,49%.

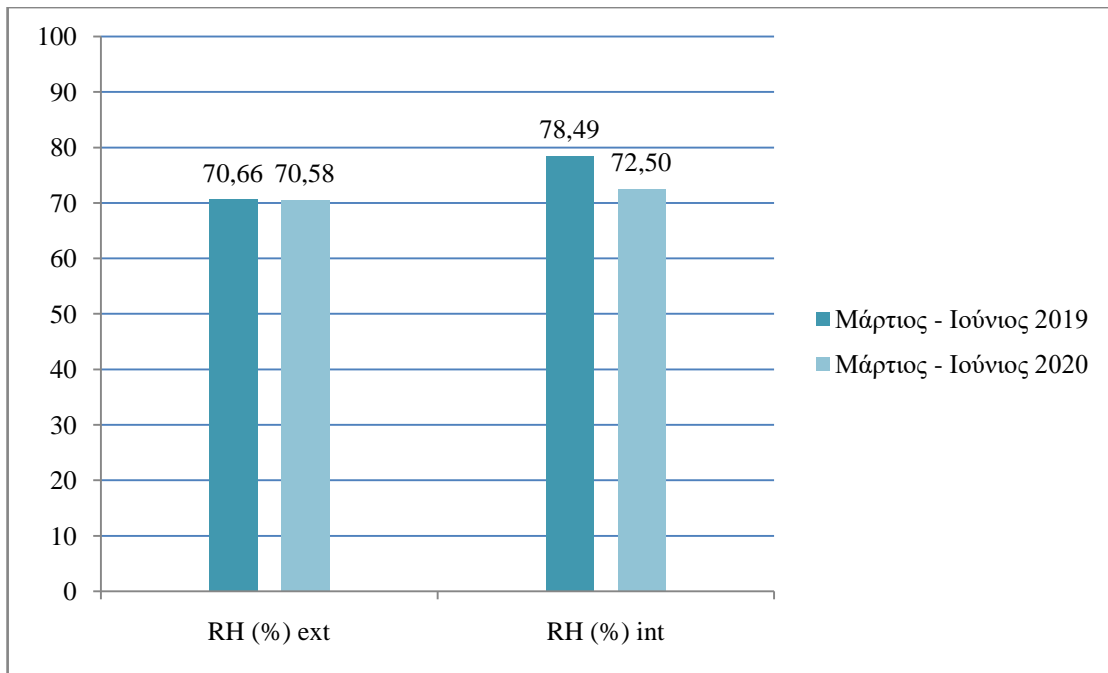
περιεχόμενης στο κτηριακό κέλυφος υγρασίας. Η επιλογή της κατασκευής της τάφρου αποστράγγισης - εξαερισμού ήταν και ως προς αυτό το στόχο επιτυχής.

Πίνακας 12: Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος περιόδου καταγραφής 2019

ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	RH% EXT 2019 ΕΒΔ. Μ.Ο.	RH% INT 2019 ΕΒΔ Μ.Ο.
2019	9-16/3	76,2	73,2
2019	16-23/3	69	78,4
2019	23-30/3	63,6	68,3
2019	30/3-4/6	67,7	72,4
2019	6-13/4	80,5	82
2019	13-20/4	73,8	80,7
2019	20-27/4	60,7	72,5
2019	27/4-4/5	66	69,6
2019	4-11/5	76,4	77,4
2019	11-18/5	79,5	85,3
2019	18-25/5	71,2	83,3
2019	25/5-1/6	70,7	82,6
2019	1-8/6	80,9	88,1
2019	8-15/6	57	81,5
2019	15-22/6	66,7	82
Μ.Ο.		70,66	78,49

Πίνακας 13: Εβδομαδιαίοι μέσοι όροι σχετικής υγρασίας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος περιόδου καταγραφής 2020

ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	RH% EXT 2020 ΕΒΔ. Μ.Ο.	RH% INT 2020 ΕΒΔ Μ.Ο.
2020	9-16/3	81,1	82,4
2020	16-23/3	72,3	73,3
2020	23-30/3	69,3	65,9
2020	30/3-4/6	82,2	77,8
2020	6-13/4	59,3	66,7
2020	13-20/4	68,1	70,6
2020	20-27/4	82,3	80,2
2020	27/4-4/5	83,2	87
2020	4-11/5	69,5	75,3
2020	11-18/5	52,8	62,7
2020	18-25/5	50,8	53,9
2020	25/5-1/6	65	60,2
2020	1-8/6	70,5	69
2020	8-15/6	84,1	85
2020	15-22/6	68,2	77,5
Μ.Ο.		70,58	72,5



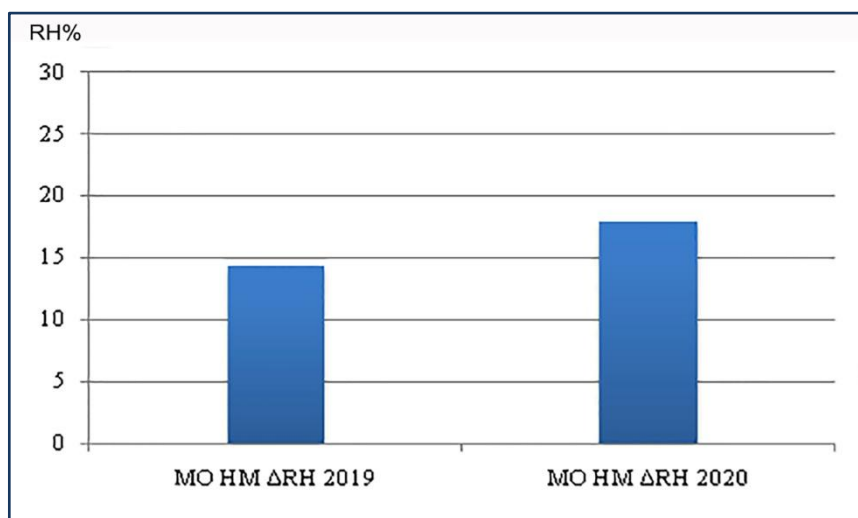
Γράφημα 26: Σχετική υγρασία εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος περιόδου καταγραφής 2019 και 2020

Συμπερασματικά, ενώ οι τιμές σχετικής υγρασίας των δύο περιόδων καταγραφής για το εξωτερικό περιβάλλον είναι περίπου πανομοιότυπες (0,08% χαμηλότερη το 2020), η σχετική υγρασία του εσωτερικού περιβάλλοντος για το 2020 είναι μειωμένη σημαντικά, κατά 5,99%.

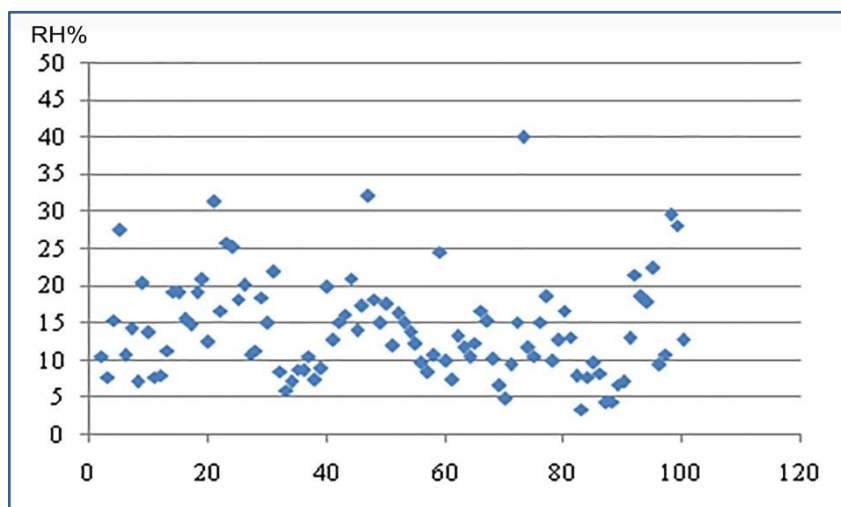
Η δεύτερη και πιο σημαντική παρατήρηση αφορά όχι σε βελτίωση αλλά σε επιδείνωση ενός κρίσιμου μεγέθους, του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος, μιας παραμέτρου δηλαδή που είναι σημαντικότερη από τους μέσους όρους, αφού είναι δυνατόν να καθορίσει τη συχνότητα εμφάνισης κύκλων κρυστάλλωσης και ενυδάτωσης των διαλυτών αλάτων.

Η ερμηνεία της δυσμενούς αυτής μεταβολής έγκειται στο ότι, το νερό που βρισκόταν αποθηκευμένο στις τοιχοποιίες, πέραν της κύριας, αρνητικής του διάστασης, λειτουργούσε και θετικά για τη διατήρηση των τοιχογραφιών, ως ρυθμιστικός και σταθεροποιητικός παράγοντας της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος. Όταν η σχετική υγρασία έπεφτε, η εξάτμιση του νερού του τοίχου εξισορροπούσε σε κάποιο βαθμό την πτώση. Με την προοδευτική ξήρανση του τοίχου, ο ρυθμιστικός αυτός παράγοντας εξέλιπε, με αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους των μέγιστων

ημερήσιων διακυμάνσεων⁷⁴. Σε επίπεδο μέσων όρων για τις υπό εξέταση περιόδους, ο ΜΟ του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων για το 2019 ήταν 14,35%, ενώ για το 2020 17,88%. Η επιδείνωση είναι σημαντική.

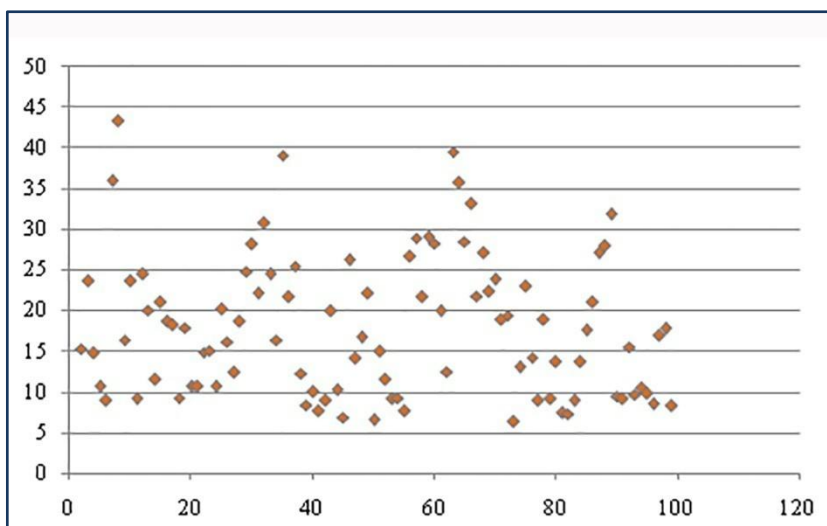


Γράφημα 27: Σύγκριση μέσων όρων μέγιστων ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας περιόδων καταγραφής 2019 - 2020



Γράφημα 28: Διασπορά τιμών μέγιστης ημερήσιας διακύμανσης σχετικής υγρασίας περιόδου καταγραφής 2019. Ελάχιστη τιμή: 3,5. Μέγιστη τιμή: 40,1. Η πλειοψηφία των τιμών διασπείρεται μεταξύ 5% και 20%

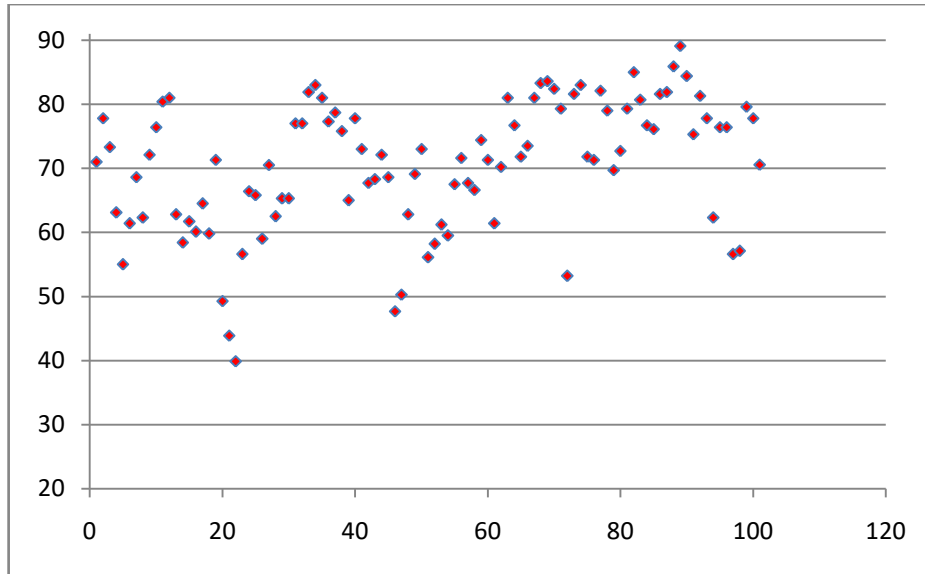
⁷⁴ Προκύπτει ως η διαφορά της μέγιστης ημερήσιας τιμής από την ελάχιστη ημερήσια τιμή.



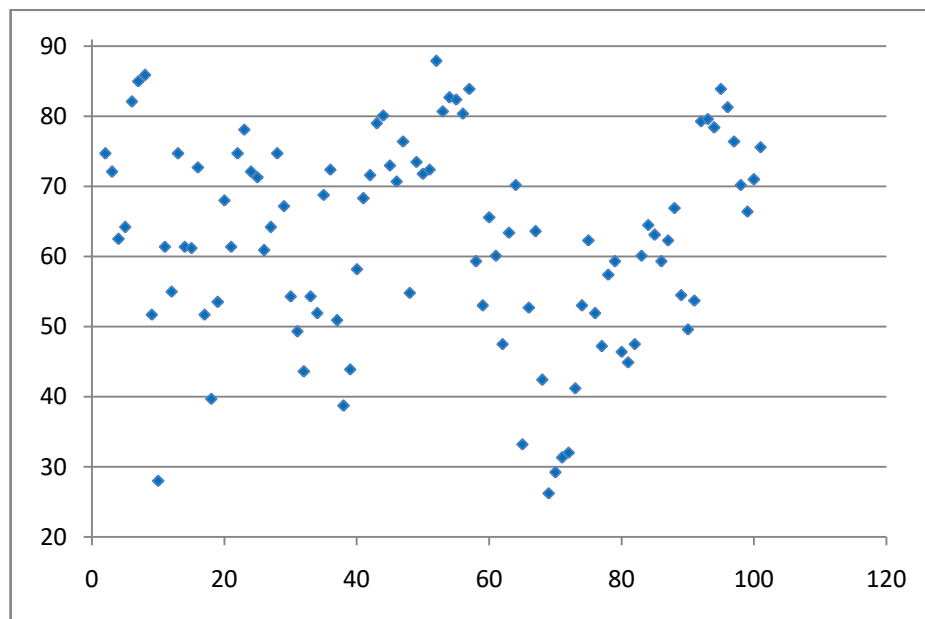
Γράφημα 29: Διασπορά τιμών μέγιστης ημερήσιας διακύμανσης σχετικής Υγρασίας περιόδου καταγραφής 2020. Ελάχιστη τιμή: 6,3. Μέγιστη τιμή: 43,3.
 Η πλειοψηφία των τιμών διασπείρεται μεταξύ 5% και 30%

Για να είναι ορθή η ερμηνεία της παρατήρησης, η απόδοση δηλαδή της αύξησης του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας στην ξήρανση των τοίχων, θα πρέπει κατά την περίοδο μετά την ξήρανση να καταγράφεται αύξηση του πλήθους των καταγεγραμμένων χαμηλών τιμών ελάχιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας.

Πράγματι, κατά τη σύγκριση δύο τρίμηνων περιόδων πριν και μετά την ξήρανση (9/3/ - 16/6/2019 και 9/3/ - 16/6/2020) καταγράφεται τόσο μείωση του μ.ο. των ελάχιστων ημερήσιων τιμών κατά περίπου 8% (70,57% για την πρώτη περίοδο και 62,43% για τη δεύτερη), όσο και αύξηση του πλήθους των χαμηλών τιμών της ημερήσιας ελάχιστης σχετικής υγρασίας, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα διασποράς που ακολουθούν.



Γράφημα 30: Διασπορά τιμών ελάχιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας περιόδου 9/3/- 16/6/2019. Μ.Ο. = 70,57%, πλήθος τιμών < 60% = 16.



Γράφημα 31: Διασπορά τιμών ελάχιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας περιόδου 9/3/ - 16/6/2020. Μ.Ο. = 62,43%, πλήθος τιμών < 60% = 38.

Η παρατήρηση αυτή έστρεψε την προσοχή και σε μια άλλη παράμετρο η οποία κατά την εκπόνηση της αρχικής μελέτης είχε υποεκτιμηθεί. Σε ένα κτήριο με εξαιρετική σταθερότητα θερμοκρασίας, χωρίς τεχνητό έλεγχο του περιβάλλοντος και με ήπια, περιστασιακή χρήση, η αύξηση του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων μπορεί να σχετίζεται μόνο με την ύπαρξη ρευμάτων αέρα, τα οποία, υπό προϋποθέσεις, επηρεάζουν εντονότερα τη σχετική υγρασία από όσο τη θερμοκρασία.

13.3.5. Συμπεράσματα

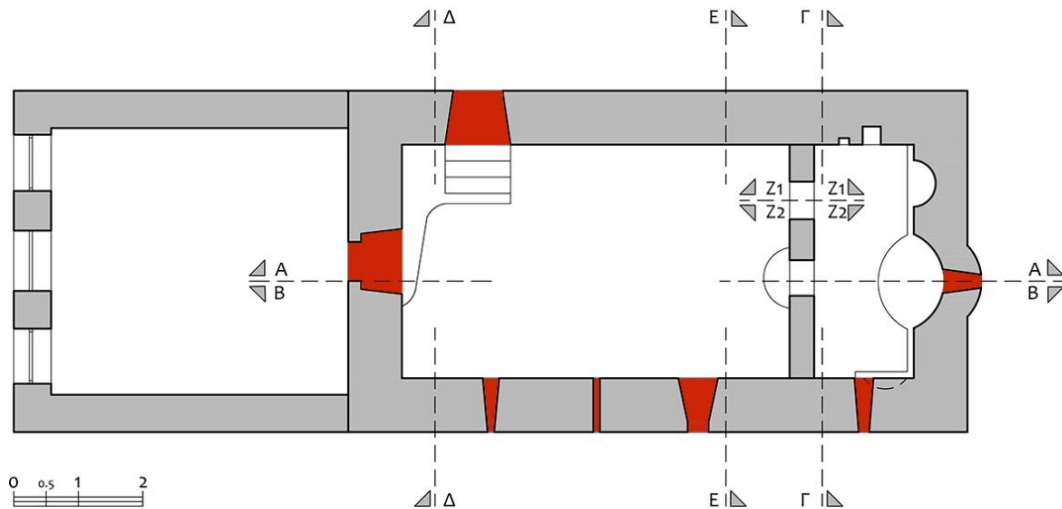
Στο πλαίσιο της μελέτης συντήρησης, και παρά τις κάποιες επιφυλάξεις και ενδείξεις περί του αντιθέτου, είχε διατυπωθεί η εκτίμηση ότι ο μικρός αριθμός των ανοιγμάτων, το επίσης μικρό τους μέγεθος και η κάποια προστασία που παρείχαν τα εξωτερικά πετάσματα, συνέτεινε στη μειωμένη επίδραση των ανέμων και στον περιορισμό των ρευμάτων αέρα στο εσωτερικό. Η επιδείνωση όμως των διακυμάνσεων της σχετικής υγρασίας ανατρέπει αυτήν την εκτίμηση και υποδεικνύει ως αναγκαιότητα τον περιορισμό των ρευμάτων. Το πρόβλημα δεν θα είχε προκύψει εάν στο σχεδιασμό της μελέτης συντήρησης είχε περιληφθεί και η παρακολούθηση της συγκεκριμένης παραμέτρου.

13.4. Μέτρα για τον περιορισμό των ρευμάτων αέρα

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων μέχρι και τις 15-06-2020, κρίθηκαν αναγκαίες ήπιες ενέργειες για το σταδιακό περιορισμό των ρευμάτων αέρα στο εσωτερικό του ναού. Ο φυσικός αερισμός δεν είναι σκόπιμο να διακοπεί πλήρως, προκειμένου να μην ευνοηθεί η ανάπτυξη βιολογικών παραγόντων.

Αναφέρθηκε ήδη ότι τα ανοίγματα του κυρίως ναού είναι:

- Η θύρα του βόρειου τοίχου. Μεταξύ του κάτω μέρους της και του εδάφους μεσολαβούσε κενό αρκετών εκατοστών
- Ένα μικρό παράθυρο στην άνω ζώνη του ανατολικού τοίχου, με προστατευτικό πέτασμα εξωτερικά.-
- Τρία μικρά παράθυρα στην ανώτερη ζώνη του νότιου τοίχου, επίσης μερικώς προστατευμένα από εξωτερικά πετάσματα.
- Ένα μεγάλο παράθυρο στη μέση ζώνη του νότιου τοίχου, αεροστεγώς σφραγισμένο.
- Η μονίμως ανοικτή θύρα στο δυτικό τοίχο προς το νεώτερο νάρθηκα, ο οποίος κλείνει με νεωτερική πόρτα αλουμινίου.



Σχέδιο 13: Κάτοψη. Τα ανοίγματα του κυρίως ναού

Ως πρώτο στάδιο παρέμβασης, έγιναν οι εξής ενέργειες:

- Μηδενίστηκε το κενό στην βάση της βόρειας θύρας.
- Στα τέσσερα μικρά παράθυρα της άνω ζώνης του ανατολικού και νότιου τοίχου, προστέθηκαν εξωτερικά, μεταξύ τοικοποιίας και πετάσματος, ξύλινα τελάρα με σίτες. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αφ' ενός θα αποτραπεί η είσοδος στο χώρο πτηνών, τρωκτικών και εντόμων, και αφ' ετέρου το κενό μεταξύ τοίχων και πετασμάτων εξωτερικά μειώνεται από περίπου 5 σε 3εκ. Το κενό στην πόρτα κλείστηκε στις 15/6/2020, ενώ οι εργασίες στα παράθυρα έγιναν γύρω στις 15/07/2020. Δυστυχώς, για ένα διάστημα της ίδιας περιόδου το μεγαλύτερο παράθυρο του νότιου τοίχου παρέμεινε ακάλυπτο, ενώ κλείστηκε πρόχειρα την 31/08/2020.

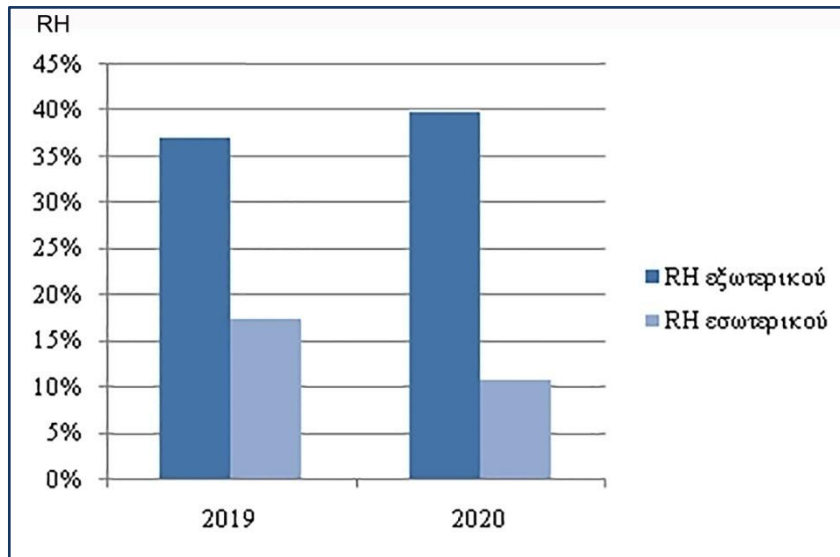
13.5. Αποτελέσματα των μέτρων

Για την εκτίμηση του αποτελέσματος της επέμβασης διατίθενται δεδομένα μιας μικρής μόνο περιόδου, που όμως είναι ενδεικτική. Συγκρίνεται το εύρος των ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος δύο περιόδων, μιας προ των επεμβάσεων περιορισμού των ρευμάτων και μιας μετά. Πρόκειται για τα διαστήματα 16/7-16/8/2019 και 16/7-16/8/2020.

Κατά την πρώτη περίοδο ο μέσος όρος των μέγιστων ημερήσιων αποκλίσεων ήταν 17,48%, ενώ κατά τη δεύτερη 10,95%. Η μεταβολή είναι εξαιρετικά σημαντική. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέσοι όροι διακυμάνσεων του εξωτερικού περιβάλλοντος των ίδιων περιόδων για μεν το 2019 ήταν 37,21% ενώ για το 2020 39,94%.

Πίνακας 14: Εύρος ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας

Έτος	RH εξωτερικού	RH εσωτερικού
2019	37,21%	17,48%
2020	39,94%	10,95%



Γράφημα 32: Εύρος ημερήσιων διακυμάνσεων

Συμπερασματικά, οι ήπιες επεμβάσεις στα ανοίγματα για τον περιορισμό των ρευμάτων αποδείχθηκαν εξαιρετικά αποτελεσματικές για τη μείωση του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων της σχετικής υγρασίας του εσωτερικού. Μένει να εξεταστεί η πιθανότητα ανάπτυξης βιολογικών παραγόντων λόγω του περιορισμού των ρευμάτων.

13.6. Προσδιορισμός μεσοπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος περιόδου ξήρανσης

Ο βασικός στόχος που τέθηκε για την περίοδο ξήρανσης ήταν η κατά το δυνατόν ήπια και σταδιακή μεταβολή των παραμέτρων του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Ως προς τη θερμοκρασία, τα εξαιρετικά θερμομονωτικά χαρακτηριστικά του κτηρίου εξυπηρετούν εξαιρετικά το στόχο.

Ως προς τη σχετική υγρασία, η οποία σε όλη τη διάρκεια των καταγραφών ήταν υψηλότερη από αυτή του εξωτερικού περιβάλλοντος, τέθηκε ο στόχος να παραμείνει υψηλά προκειμένου να ευνοηθεί η εξάτμιση και επομένως η κίνηση και απόθεση των

αλάτων προς την εξωτερική πλευρά. Οι δύο αυτοί στόχοι εξυπηρετούνται χωρίς να απαιτούνται ενέργειες.

Για τη συγκεκριμένη περίοδο των επεμβάσεων αφαλάτωσης, επιδιώχθηκε τοπικά, δηλαδή στις εκάστοτε θέσεις των επεμβάσεων, η επιτάχυνση της εξάτμισης με εξαναγκασμένα ρεύματα αέρα προκειμένου να ευνοηθεί η κίνηση του νερού και η απόθεση των αλάτων στα επιθέματα.

13.7. Επεμβάσεις αφαλάτωσης

Οι επεμβάσεις αφαλάτωσης πραγματοποιήθηκαν με διαφορετικά μέσα και μεθόδους και για διαφορετικούς σκοπούς. Αναλυτικότερα:

- Αφαιρέθηκαν με μαλακό πινέλο «χαλαρές» εξανθήσεις αλάτων από την επιφάνεια των τοιχογραφιών
- Οι επεμβάσεις αφαλάτωσης που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της εξελισσόμενης περιόδου ξήρανσης, συνέπεσαν με προγραμματισμένες επεμβάσεις συστηματικής συντήρησης των τοιχογραφιών. Για το λόγο αυτό, σε όλες τις τοιχογραφημένες επιφάνειες εκτελέστηκαν επεμβάσεις αφαλάτωσης με απιονισμένο νερό σε υπόστρωμα λεπτών επιθεμάτων χαρτοβάμβακα και σε δύο έως τρεις κύκλους ανά θέση, προκειμένου, η αφαίρεση των αλάτων από τα εντελώς επιφανειακά στρώματα των τοιχογραφιών να επιτρέψει εργασίες προκαταρκτικής στερέωσης του κονιοποιημένου και απολεπισμένου χρωματικού στρώματος.
- Μετά την προκαταρκτική στερέωση, σε επιλεγμένες θέσεις, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αφαλάτωσης σε μεγαλύτερο βάθος, με επιθέματα μεγαλύτερου πάχους, μίγματα ινών κυτταρίνης, αργίλων και απιονισμένου νερού.
- Σε μη τοιχογραφημένα επιχρίσματα, σε θέση που κατά τη μελέτη η έντονη περιεχόμενη υγρασία είχε χαρακτηριστεί ως υγροσκοπική και αποδοθεί σε αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων, πραγματοποιήθηκαν επίσης επεμβάσεις αφαλάτωσης με μείγματα μεγαλύτερου πάχους, προκειμένου να εξεταστεί εάν μετά την αφαλάτωση (και την αποβολή του νερού της διαδικασίας) θα καταγραφόταν μείωση της περιεχόμενης υγρασίας, και επομένως να εξεταστεί η ορθότητα της αρχικής ερμηνείας. Στις θέσεις αυτές, η αφαλάτωση, πέραν της προφανούς συμβολής της στη διατήρηση των επιχρισμάτων έχει και το χαρακτήρα της άρσης του αιτίου της υγρασίας. Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι, δεδομένων των

ρυθμιστικών ιδιοτήτων των διαλυτών αλάτων ως σταθεροποιητών της σχετικής υγρασίας, μετά από επιτυχημένες επεμβάσεις αφαλάτωσης μεγάλων επιφανειών θα πρέπει να αναμένεται αύξηση του εύρους των διακυμάνσεων της σχετικής υγρασίας, οι οποίες όμως θα είναι λιγότερο επιβλαβείς, αφού σημαντικό μέρος των αλάτων θα έχει αφαιρεθεί.

Κατά τις πιο πάνω επεμβάσεις, πραγματοποιούνταν διαρκώς μετρήσεις με μη καταστρεπτικές για τις τοιχογραφίες μεθόδους, προκειμένου να παρακολουθείται η πρόοδος της διαδικασίας της αφαλάτωσης και να γίνουν κάποιες συγκριτικές παρατηρήσεις επί των διαφορετικών μέσων. Οι μετρήσεις αγωγιμότητας υδατικών διαλυμάτων αλάτων που εξάγονται από τα επιθέματα παρέχουν ικανοποιητικές ενδείξεις ποσοτικού χαρακτήρα, είτε απευθείας, είτε με αναγωγή των τιμών σε Ολικά Διαλυτά Στερεά (TDS).

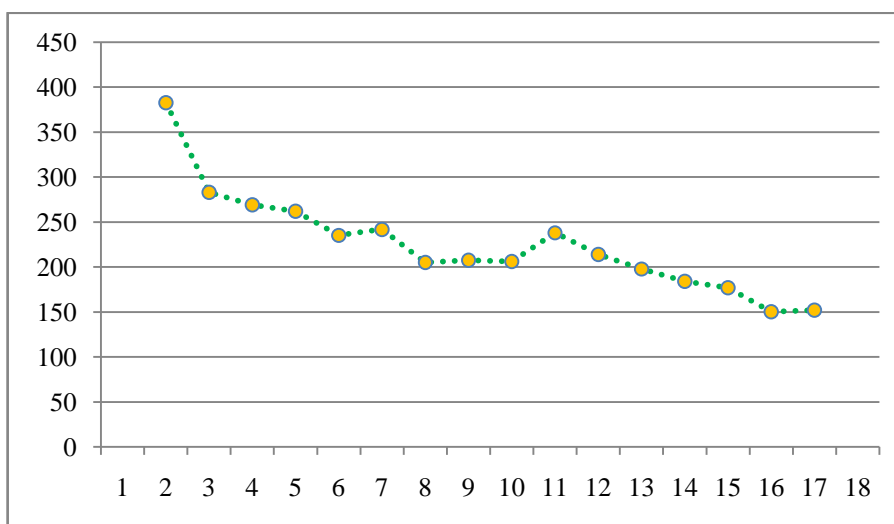
Δεν πραγματοποιήθηκε ποιοτική ανάλυση, αφενός λόγω του υψηλού κόστους και αφετέρου διότι, όπως θα αναπτυχθεί και στη σχετική ενότητα, για τον προσδιορισμό του επιθυμητού μικροκλίματος υιοθετήθηκε το μοντέλο του «ιστορικού κλίματος» και όχι το μοντέλο του Price, το οποίο στηρίζεται σε ενδελεχή μελέτη και εκτεταμένες ποσοτικές και ποιοτικές αναλύσεις των μειγμάτων αλάτων. Σε κάθε περίπτωση, έχουν συλλεγεί δείγματα επιθεμάτων για πιθανή μελλοντική ποιοτική ανάλυση.

Όλες οι επεμβάσεις αφαλάτωσης βασίστηκαν στη μέθοδο της μεταγωγής, δηλαδή της μεταφοράς των αλάτων από το υλικό στο επίθεμα μέσω της οριζόντιας τριχοειδούς κίνησης του αλάτινου διαλύματος, και όχι της διάχυσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, η διαδικασία υποβοηθήθηκε με εξαναγκασμένα ρεύματα αέρα για την επιτάχυνση της εξάτμισης. Επιδιώχθηκε η πραγματοποίησή τους σε θερμή περίοδο (15-30/06/2020), προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση του κάθε κύκλου, δεδομένης της εξάρτησης της διαλυτότητας των αλάτων από τη θερμοκρασία.

Δοκιμές, παρατηρήσεις και συμπεράσματα από τις επεμβάσεις αφαλάτωσης

Σε θωράκιο του νότιου τμήματος του κτιστού τέμπλου, πραγματοποιήθηκαν 17 κύκλοι αφαλάτωσης με ψεκασμό απιονισμένου νερού σε λεπτά επιθέματα χαρτιού τύπου «Eltoline», συνολικής διάρκειας 142 ωρών (περίπου έξι ημερών). Μετά την εξάτμιση του μεγαλύτερου μέρους του νερού τους, τα επιθέματα σταδιακά έχαναν την πρόσφυσή τους. Σ' αυτή τη φάση αφαιρούνταν και λαμβάνονταν δύο δείγματα διαστάσεων 10x10cm, ένα από το επάνω και ένα από το κάτω τμήμα του επιθέματος. Το κάθε δείγμα εμβαπτιζόνταν σε δεδομένη ποσότητα απιονισμένου νερού και αναδεύονταν,

μέχρι να σταματήσει να αυξάνεται η αγωγιμότητα του υδατικού διαλύματος. Η τελική τιμή αγωγιμότητας του συγκεκριμένου κύκλου προέκυψε μετά από εξαγωγή του μέσου όρου της αγωγιμότητας του άνω και κάτω δείγματος κάθε κύκλου. Αυτή η τελική τιμή καταγραφόταν ως χαρακτηριστική του συγκεκριμένου κύκλου. Στο γράφημα που ακολουθεί, στο οποίο έχει εφαρμοστεί εξομάλυνση με εφαρμογή κεντρικού κινούμενου μέσου όρου τριών τιμών, αποτυπώνεται η πορεία της διαδικασίας.



Γράφημα 33: Εξομαλυμένη καμπύλη μετρήσεων αγωγιμότητας (μS/cm²) δοκιμών από 18 κύκλους επιθεμάτων αφαλάτωσης

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αγωγιμότητα των δειγμάτων των πρώτων κύκλων μετριόταν γύρω στα 300μS/cm², για να καταλήξει προς τους τελευταίους γύρω στο 130μS/cm². Με αναγωγή της αγωγιμότητας σε Ολικά Διαλυτά Στερεά⁷⁵, από μια θέση 10x10cm έχουν εξαχθεί 2.349,32mg/L αλάτων, με 18 κύκλους επιθεμάτων συνολικής διάρκειας εφαρμογής περίπου έξι ημερών.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια διαφορετική δοκιμή. Όπως αναπτύχθηκε στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, η επικρατούσα τάση στο πεδίο της αφαλάτωσης εξετάζει έντονα τη σχέση πορώδους υλικού - πορώδους επιθέματος, και προκρίνει επιθέματα με μεγάλο εύρος πορώδους, από τα οποία υπάρχει διπλή απαίτηση. Αφ' ενός να έχουν επαρκείς πόρους μεγάλου μεγέθους προκειμένου να τροφοδοτούν με νερό το προς αφαλάτωση υλικό, και αφετέρου να έχουν συγχρόνως πολλούς μικρούς πόρους, ώστε στη συνέχεια το νερό και τα διαλυμένα άλατα να έλκονται από

⁷⁵Με συντελεστή συσχέτισης 0,55

τριχοειδείς δυνάμεις προς το επίθεμα. Ο συνδυασμός αυτός επιτυγχάνεται με μίγματα ινών κυτταρίνης και εξαιρετικά λεπτόκοκκων ορυκτών. Οι ίνες κυτταρίνης καλύπτουν κατά βάση την απαίτηση για μεγάλες πορώδεις, ενώ τα λεπτόκοκκα ορυκτά συστατικά την απαίτηση για μικρούς πόρους. Στη σχετική ενότητα είχε διατυπωθεί η σκέψη ότι οι δύο απαιτήσεις είναι μεταξύ τους ανταγωνιστικές, με αποτέλεσμα ενδεχομένως να μειώνεται η απόδοση της επέμβασης, καθώς και ότι θα είχε νόημα δοκιμή της εφαρμογής με δύο διαφορετικά υλικά σε δύο φάσεις. Το πρώτο θα εξασφαλίζει την ύγρανση, αποτελούμενο ενδεχομένως και αποκλειστικά από ίνες κυτταρίνης, και το δεύτερο, αποτελούμενο κυρίως από κατάλληλο λεπτόκοκκο ορυκτό θα εξασφαλίζει την έλξη του αλάτινου διαλύματος από το προς αφαλάτωση υλικό, έχοντας στη σύστασή του την ελάχιστη δυνατή ποσότητα νερού που είναι αναγκαία για την πρόσφυση του επιθέματος στο αντικείμενο. Σε κάθε περίπτωση, το σκεπτικό συνίσταται στη διαφοροποίηση του μέσου ύγρανσης από το μέσο αφύγρανσης.

Προκειμένου να διερευνηθεί αυτή η σκέψη, ένα εξειδικευμένο μίγμα επιθέματος αφαλάτωσης, έτοιμο προς εφαρμογή, το οποίο διατίθεται εμπορικά⁷⁶, διαμορφώθηκε σε πάχος ενός εκατοστού και αφέθηκε να στεγνώσει. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε στην ίδια θέση με τα επιθέματα Eltoline, σε θωράκιο του νότιου τμήματος του κτιστού τέμπλου, αμέσως μετά την ολοκλήρωση του προηγούμενου κύκλου δοκιμών, αφού προηγουμένως η τοιχογραφημένη επιφάνεια και το ξηρό επίθεμα υγράθηκαν με ψεκασμό ενός λίτρου απιονισμένου νερού, προκειμένου να εξασφαλιστεί πρόσφυση.

Το επίθεμα έχασε την πρόσφυσή του με την επιφάνεια μετά από περίπου 15 ώρες. Λήφθηκαν τρία δοκίμια διαστάσεων 10x10cm και μετρήθηκε η αγωγιμότητά τους. Προέκυψε μέσος όρος 4.136 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$. Με αναγωγή της αγωγιμότητας σε Ολικά Διαλυτά Στερεά, από μια θέση 10x10cm έχουν εξαχθεί 2.274,8 mg/L. Δηλαδή η διαδικασία αυτή απέδωσε με μία μόνο εφαρμογή και σε δεκαπέντε ώρες όσο σχεδόν απέδωσε η μέθοδος των λεπτών επιθεμάτων μετά από 18 κύκλους και περίπου έξι μέρες.

Το εύρημα είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον, τόσο ως προς την απόδοση της δεύτερης διαδικασίας, όσο και ως προς τη μείωση του χρόνου εφαρμογής, που είναι εξαιρετικά σημαντικό ζητούμενο, και αξίζει να μελετηθεί περαιτέρω. Η αξία του όμως είναι περιορισμένη, καθώς η δεύτερη διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε συνέχεια μιας

⁷⁶Cocoon της εταιρίας Westox, μίγμα οργανικών ινών και εξαιρετικά λεπτόκοκκων, υγροσκοπικών ορυκτών.

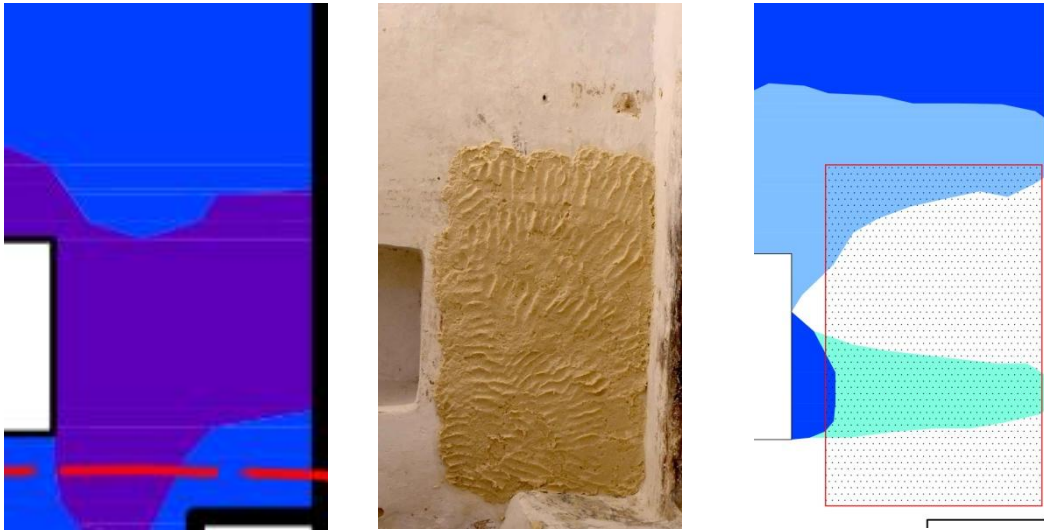
προηγούμενης, που είχε ήδη υγράνει την περιοχή και είχε κινητοποιήσει κατά μη γνωστό τρόπο τα άλατά της.

Τέλος, στο ανατολικότερο τμήμα του βορείου τοίχου του ιερού, σε περιοχή επιφάνειας $0,5\text{m}^2$ με αυξημένη περιεχόμενη υγρασία η οποία είχε αποδοθεί σε αποθέσεις υγροσκοπικών αλάτων, πραγματοποιήθηκαν τρεις κύκλοι αφαλάτωσης με έτοιμο επίθεμα «Cocoop», υγρού βάρους ανά επίθεμα $1,5\text{kg}$. Οι μετρήσεις αγωγιμότητας έδειξαν προοδευτική μείωσή της.



Εικ. 77: Ιερό, βόρειος τοίχος (BA).
Η θέση της εφαρμογής επιθέματος

Δύο πλήρεις μήνες μετά, διάστημα που κρίθηκε αναγκαίο για την πλήρη αποβολή της υγρασίας που διοχετεύθηκε στον τοίχο μέσω των επιθεμάτων, επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικ. 78: Αριστερά (16-06-2020): Χάρτης κατανομής περιεχόμενης υγρασίας. Στο κέντρο (30-06-2020): Επίθεμα αφαλάτωσης. Δεξιά (31-08-2020): Χάρτης κατανομής περιεχόμενης υγρασίας.

Από τους δύο χάρτες προκύπτει η σημαντική μείωση της περιεχόμενης υγρασίας μετά τις επεμβάσεις αφαλάτωσης και επιβεβαιώνεται ο προσδιορισμός της υγρασίας της συγκεκριμένης θέσης ως υγροσκοπικής, όπως διατυπώθηκε στο πλαίσιο της μελέτης συντήρησης.

Δυόμισι μήνες μετά την ολοκλήρωση των επεμβάσεων αφαλάτωσης και συντήρησης, πραγματοποιήθηκε νέα αυτοψία στο μνημείο, προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων. Παρατηρήθηκε ότι σε αρκετές από τις περιοχές όπου είχαν πραγματοποιηθεί επεμβάσεις αφαλάτωσης με λεπτά επιθέματα σε μόλις δύο έως τρεις κύκλους επαναλήψεων προκειμένου να γίνουν εφικτές επεμβάσεις στερέωσης του χρωματικού στρώματος, είχαν επανεμφανιστεί «χαλαρές» εξανθήσεις αλάτων⁷⁷. Αντίθετα, όπου είχαν εφαρμοστεί περισσότερες επαναλήψεις ή παχύτερα επιθέματα οργανικών ινών / ορυκτών, δεν υπήρχε καμία σχετική ένδειξη.

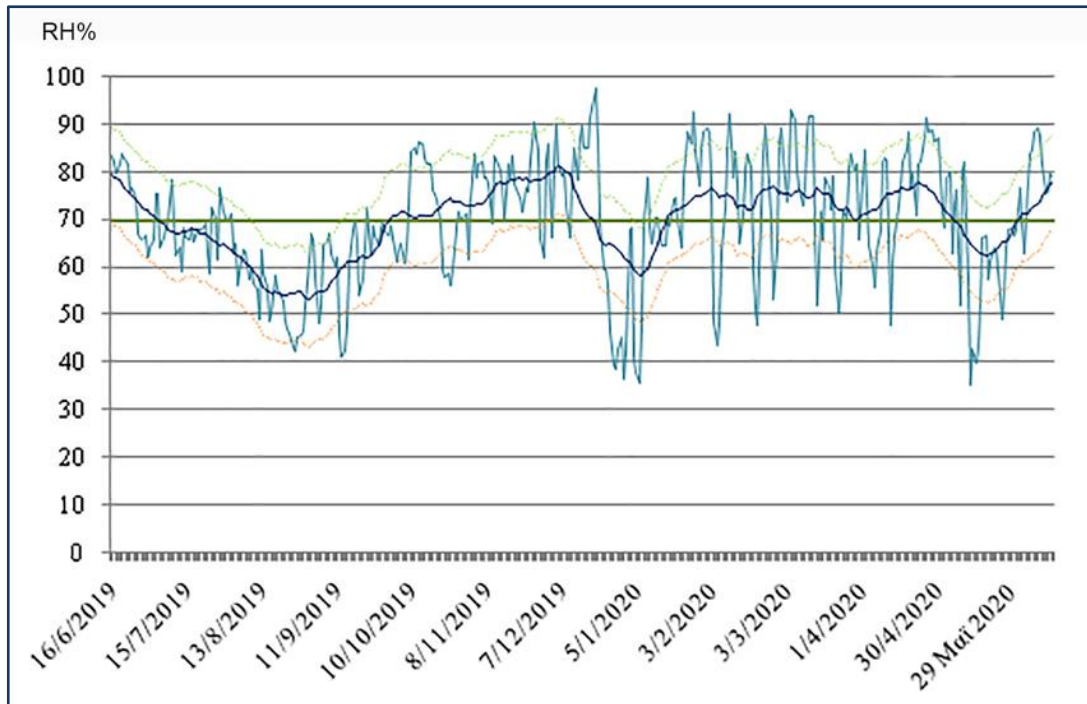
⁷⁷Ο τύπος αυτός των εξανθήσεων σχετίζεται με περιορισμένη τροφοδοσία σε υγρασία και αποδίδεται στο νερό των επεμβάσεων συντήρησης και αφαλάτωσης.



Εικ. 79: Εμφάνιση εξανθήσεων αλάτων δύομισι μήνες μετά τις επεμβάσεις αφαλάτωσης

13.8. Προσδιορισμός μακροπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος

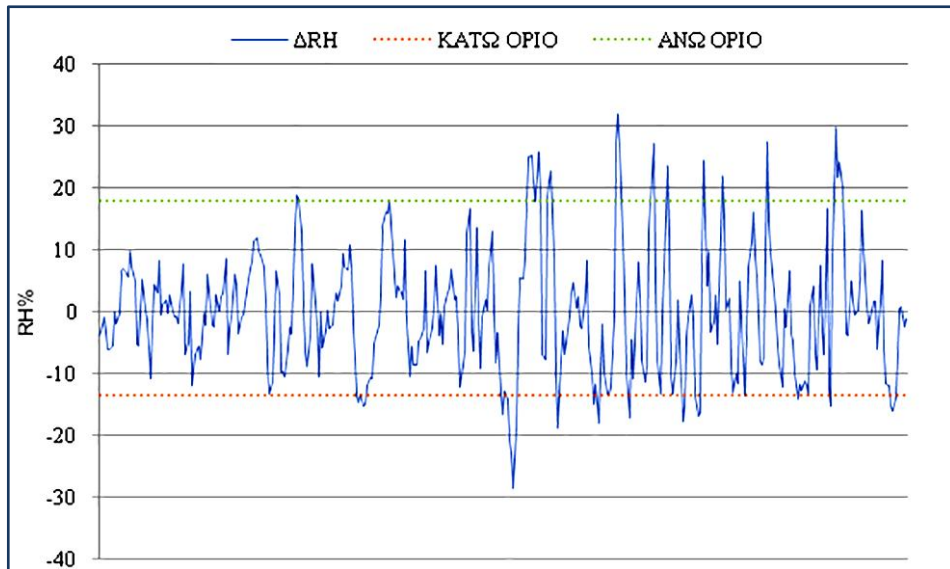
Δεδομένου του ήπιου κλίματος της περιοχής, των εξαιρετικών θερμομονωτικών ιδιοτήτων του κτηριακού κελύφους και των συνακόλουθων ιδιαίτερα ήπιων μεταβολών της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ναού, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των επιθυμητών ορίων διακύμανσης της σχετικής υγρασίας. Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας εξετάστηκαν οι διαφορετικές τάσεις που επικρατούν στην επιστημονική κοινότητα σχετικά με το θέμα, και, παρά τις επιφυλάξεις που διατυπώθηκαν για την κάθε μια, προκρίθηκε το μοντέλο του «ιστορικού κλίματος». Στο διάγραμμα που ακολουθεί, το οποίο περιλαμβάνει μετρήσεις σχετικής υγρασίας του εσωτερικού του ναού για ένα πλήρη ετήσιο κύκλο, αποτυπώνονται οι ημερήσιοι μέσοι όροι (γαλάζια γραμμή), ο εξομαλυμένος κεντρικός κινούμενος μέσος όρος τους (σκούρα μπλε γραμμή), ο ετήσιος μέσος όρος (συμπαγής πράσινη γραμμή), και τα άνω (πράσινη διακεκομμένη) και κάτω (πορτοκαλί διακεκομμένη) όρια των αποδεκτών διακυμάνσεων σύμφωνα με το πρότυπο EN 15757:2010-12 του «ιστορικού κλίματος».



Γράφημα 34: Προσδιορισμός μακροπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος (ημερήσιων μέσων όρων) βάσει του προτύπου EN 15757:2010-12

Παρατηρείται ότι σημαντικό μέρος των καταγραφών της θερινής και φθινοπωρινής περιόδου βρίσκεται εντός του επιθυμητού εύρους, ενώ μεγαλύτερες και συχνότερες υπερβάσεις συμβαίνουν κατά τη χειμερινή και εαρινή περίοδο.

Στο επόμενο διάγραμμα αποτυπώνονται το εύρος των ημερήσιων διακυμάνσεων και τα επιθυμητά όρια ως προς το μέγεθος αυτό, πάντα με βάση το πρότυπο του «ιστορικού κλίματος». Είναι και πάλι εμφανής και η ένταση των αποκλίσεων τη χειμερινή και εαρινή περίοδο.



Γράφημα 35: Προσδιορισμός των επιθυμητών ορίων του εύρους των ημερήσιων μεταβολών σχετικής υγρασίας κατά το πρότυπο EN 15757:2010-12

Τα δύο ανωτέρω διαγράμματα θέτουν τα όρια εντός των οποίων είναι σκόπιμο να περιοριστούν μακροπρόθεσμα οι διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας κατά το πρότυπο EN 15757:2010-12. Οι καταγραφές των περιβαλλοντικών παραμέτρων που συνεχίζονται στο μνημείο θα επιτρέψουν την εκτίμηση του βαθμού επίτευξης του στόχου μετά τις παρεμβάσεις.

14. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάπτυξη των μηχανισμών φθοράς και των διαδικασιών μελέτης και αντιμετώπισης των αιτίων, καθίσταται προφανής ο ρόλος των περιβαλλοντικών παραμέτρων στη διατήρηση των τοιχογραφιών, αφού αυτές καθορίζουν την κίνηση των αλάτινων διαλυμάτων, την εξάτμιση, τον υπερκορεσμό, την κρυστάλλωση και την ενυδάτωση των αλάτων, τη θέση στην οποία αυτές θα συμβούν, ακόμη και τη μορφή των κρυστάλλων.

Η αλληλουχία των μηχανισμών αλλοίωσης αποτελεί μια αλυσίδα, κάθε κρίκος της οποίας συνιστά και ένα πιθανό σημείο επέμβασης για την άρση του αιτίου της φθοράς. Τα κρισιμότερα σημεία παρέμβασης συνοψίζονται στα εξής:

- Διακοπή της εισόδου στο μνημείο νερού σε υγρή μορφή, ασχέτως τύπου και θέσης εισόδου, αφού το νερό σε υγρή μορφή και μεταφέρει νέα άλατα, και κινητοποιεί τα υφιστάμενα, προκαλώντας κύκλους κρυστάλλωσης.
- Προσδιορισμός του μεσοπρόθεσμα επιθυμητού μικροκλίματος για την περίοδο ξήρανσης, ανάλογα με τη στρατηγική που έχει επιλεγεί.
- Επεμβάσεις επί των αλάτων, είτε για την αφαίρεση (αφαλάτωση) είτε για την αδρανοποίησή τους (αναστολείς κρυστάλλωσης).
- Προσδιορισμός και επίτευξη των μακροπρόθεσμα επιθυμητών περιβαλλοντικών παραμέτρων για τον περιορισμό ή τη διακοπή των κύκλων κρυστάλλωσης - ενυδάτωσης - διάλυσης που οφείλονται στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Ο πρώτος στόχος, η διακοπή της εισόδου του νερού σε υγρή μορφή, αποτελεί ενδεχομένως τη μόνη γενίκευση που μπορεί να διατυπωθεί. Όλες οι άλλες παρεμβάσεις αποτελούν συνάρτηση των ιδιαιτεροτήτων όχι απλώς του κάθε μνημείου, αλλά και της κάθε θέσης εντός του ίδιου μνημείου. Διότι η κατανόηση και ανάλυση των επιμέρους μηχανισμών υποδεικνύει μεν τις πιθανές εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση του καθενός απ' αυτούς, ταυτόχρονα όμως υπογραμμίζει τη σημασία του γεγονότος ότι, κατά την παρέμβαση σε μια τόσο πολυσύνθετη και πολυπαραγοντική διαδικασία λεπτών ισορροπιών, η θετική ανατροπή κάθε μιας παραμέτρου μπορεί να επηρεάσει αρνητικά μια άλλη.

Στο πλαίσιο της μελέτης περίπτωσης, αφού εξετάστηκε το μνημείο ως προς τη θέση του, το μικροκλίμα του, τα σχετικά με τις θερμοϋγρομετρικές ιδιότητες και την παθολογία του κελύφους χαρακτηριστικά του και την κατάσταση διατήρησης των τοιχογραφιών, εντοπίστηκαν συγκεκριμένες πηγές, μορφές και τύποι υγρασίας. Μέρος τους αντιμετωπίστηκε με μικρής κλίμακας παρεμβάσεις στον περιβάλλοντα χώρο του κτηρίου, δηλαδή με την κατασκευή τάφρου αποστράγγισης - εξαερισμού, και την κοπή της κόμης ελιάς που σκίαζε το ανατολικό και μέρος του νοτίου τοίχου του. Συνεχίστηκε η παρακολούθηση του μικροκλίματος και της περιεχόμενης υγρασίας στους τοίχους και τα επιχρίσματα. Χάρη στην παρακολούθηση, διαπιστώθηκε ότι οι παρεμβάσεις αντιμετώπισαν επιτυχώς κάποια από τα αίτια της υγρασίας σε υγρή μορφή και το μνημείο είχε ήδη μπει στη φάση της ξήρανσης. Ως επιπλέον θετική επίπτωση των παρεμβάσεων σημειώθηκε η μικρή αύξηση του μέσου όρου της θερμοκρασίας κατά 0,32°C και η σημαντική πτώση του μέσου όρου της σχετικής υγρασίας κατά 5,99%, ενώ, ως ιδιαίτερα αρνητική, η αύξηση του εύρους των ημερήσιων μεταβολών της από 14,35% σε 17,88% που, δεδομένης της ύπαρξης διαλυτών αλάτων, αποτελεί το σοβαρότερο παράγοντα αλλοίωσης τοιχογραφιών και επιχρισμάτων. Η παρατήρηση αυτή έστρεψε την προσοχή στο ρόλο των ρευμάτων αέρα, ο οποίος είχε υποεκτιμηθεί στο πλαίσιο της αρχικής μελέτης συντήρησης. Ακολούθησαν νέες, μικρής κλίμακας παρεμβάσεις στα ανοίγματα του κτηρίου με στόχο τον περιορισμό των ρευμάτων. Αποτέλεσμα ήταν η σημαντική μείωση του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας.

Προφανή συμπεράσματα αποτελούν η απόλυτη αναγκαιότητα για:

- Εμπειριστατωμένη μελέτη περιβαλλοντικών παραμέτρων πριν τη λήψη οποιουδήποτε μέτρου.
- Διεπιστημονική συνεργασία εξειδικευμένων συντηρητών αρχαιοτήτων και μηχανικών για την άρση των αιτίων της υγρασίας.
- Συνέχιση της παρακολούθησης των περιβαλλοντικών παραμέτρων και της περιεχόμενης υγρασίας μετά τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης της υγρασίας σε υγρή μορφή, τόσο για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας, όσο και των συνεπειών τους στο μικροκλίμα του μνημείου.
- Διορθωτικές κινήσεις για την άρση πιθανών δυσμενών συνεπειών.

Επίσης:

- Επιβεβαιώθηκε η θεωρητικά γνωστή, αλλά και αρκετά αόριστη αρχή, ότι η θετική μεταβολή μιας παραμέτρου είναι δυνατόν να οδηγεί στην επιδείνωση μιας άλλης. Στην περίπτωση του Αη Μιχάλη, η επιθυμητή μείωση της περιεχόμενης υγρασίας του τοίχου, οδήγησε στην αύξηση του εύρους των ημερήσιων διακυμάνσεων.
- Έγινε emphaticά αντιληπτός ο ρόλος της υγρασίας που περιέχεται στα δομικά υλικά ως ρυθμιστικού παράγοντα της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας.
- Αναδείχθηκε ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο η περίοδος της ξήρανσης μετά από επιτυχείς επεμβάσεις αντιμετώπισης της υγρασίας σε υγρή μορφή είναι ιδιαίτερα καθοριστική για τη διατήρηση των τοιχογραφιών. Κατέστη σαφές ότι η ξήρανση των τοίχων οδηγεί σε αύξηση των ημερήσιων διακυμάνσεων σχετικής υγρασίας όταν οι άλλες παράμετροι (όπως τα ρεύματα) παραμένουν σταθερές, ερμηνεύοντας έτσι τη συχνά παρατηρημένη επιδείνωση της κατάστασης των τοιχογραφιών μετά από κατά τα άλλα επιτυχείς επεμβάσεις στο κτηριακό κέλυφος.
- Αναδείχθηκε ο ρόλος του τύπου του επιθέματος τόσο για την απόδοση, όσο και για την κομβικής σημασίας διάρκεια των επεμβάσεων αφαλάτωσης, ενώ εξετάστηκε η εφαρμογή ενός συστήματος επιθεμάτων διαφορετικών ιδιοτήτων σε δύο διακριτά στάδια (ύγρανση - μεταγωγή).

Τέλος, η διαφαινόμενη βελτίωση του συνόλου των περιβαλλοντικών παραμέτρων καταδεικνύει ότι, σε περιπτώσεις μνημείων με τα χαρακτηριστικά του Αη Μιχάλη, ήπιες παρεμβάσεις μικρής κλίμακας, χαμηλού κόστους και μηδενικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος στο κτηριακό κέλυφος και τον περιβάλλοντα χώρο, όπως η ξήρανση των τοίχων με την κατασκευή τάφρου αποστράγγισης - εξαερισμού, η κοπή ενός δένδρου που σκιάζει τους τοίχους και ο περιορισμός των ρευμάτων αέρα, μπορεί να είναι απολύτως επαρκείς για την εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών διατήρησης των τοιχογραφιών, ακόμη δε και για κάποια βελτίωση της θερμικής άνεσης των χρηστών.

Το περιβάλλον του Αη Μιχάλη συνεχίζει να παρακολουθείται και να καταγράφεται. Δεδομένης της σημαντικής βελτίωσης που παρατηρείται στο εσωτερικό του ναού μετά τον μερικό περιορισμό των ρευμάτων, αναμένεται ότι η συντριπτική πλειοψηφία των μετρήσεων για τον επόμενο αντίστοιχο ετήσιο κύκλο θα είναι εντός των επιθυμητών ορίων. Εφόσον η υπόθεση επαληθευθεί, θα έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί σε σημαντικό βάθος χρόνου εάν η επίτευξη των επιθυμητών στόχων για το μικροκλίμα του

εσωτερικού θα σημαίνει και εξάλειψη ή σημαντικό περιορισμό των αλλοιώσεων στις τοιχογραφίες του μνημείου. Θα πρόκειται επομένως για έναν σοβαρό έλεγχο του μοντέλου του ιστορικού κλίματος στην πράξη.

Ως ενδιαφέροντα πεδία περαιτέρω έρευνας προβάλλουν η εξέταση του βαθμού επιρροής των μεταβολών της σχετικής υγρασίας στην περιεχόμενη, ως συνάρτηση του βάθους, καθώς και η πιθανή αξιοποίηση υπεραπορροφητικών πολυμερών στις διαδικασίες αφαλάτωσης, ελέγχου της σχετικής υγρασίας, αλλά και επιτάχυνσης της ξήρανσης υγρών τοίχων.

15. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

Allerton, 2020. Allerton. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <https://www.alldamp.co.uk/condensation> [Πρόσβαση 20 Απριλίου 2020].

Arnold, A. & Zehnder, K., 1991. Monitoring Wall Paintings Affected by soluble Salts. Στο: S. Cather (επιμ.) *The Conservation of Wall Paintings, Proceedings of a symposium organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, July 13-16, 1987*. Marina del Rey, CA: Getty Conservation Institute, σσ. 103-136.

Bertolin, C. Camuffo, D., Leissner, J., Antretter, F., Winkler, M., van Schijndel, A. W. M., Schellen, H. L., Kotova, L., Mikolajewicz, U., Brostrom, T., Leijonhufvud, G., & Ashley-Smith, J., 2014. Results of the EU project Climate for Culture: future climate-induced risks to historic buildings and their interior. Στο: *2nd Annual SISC Conference, Venice 29-30 September 2014*. Venice, Italy, σσ. 923-943.

Bianchini, R., 1906. Intorno all' umidità di tipi differenti di muri. *Rivista d' igiene e sanita pubblica*, Τόμος 74.

Bichlmair, S. & Kilian, R., 2011. *Room Climate in Linderhof Palace, Impact of ambient climate and visitors on room climate with a special focus on the bedchamber of King Ludwig II*. Στο: *Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the International Conference "Climatization of Historic Buildings, State of the Art"*, December 2, 2010, Linderhof Palace, σσ. 53-59.

Boekwijt, W., 1976. The Effect of Heating on the Surface Moisture Content of Plaster in Churches. *Lithoclastia*, Τόμος 1, σσ. 9-22.

Bratasz, L., 2013. Allowable microclimatic variations for painted wood. *Studies in Conservation*, Τόμος 58, σσ. 65-79.

Broström, T. & Leijonhufvud, G., 2010. The Indoor Climate in Skokloster Castle. D. Στο: Del Curto (επιμ.) *Historical buildings as museums: Systems for climate control and heritage preservation*. Firenze: Nardini Editore, σσ. 84-93.

Buscher, K., Wigggenhauser, H. & Wild, W., 1999. Moisture measurements in building materials by amplitude-densitive modulation thermography. *Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications*, Τόμος 3827, σσ. 34-43.

Camuffo, D. Pagana, E., Rissanenb, S., Brataszc, Ł., Kozłowskic, R., Camuffo, M. & Della Vallea, A., 2010. An advanced church heating system favourable to artworks: a contribution to European standardization. *Journal of Cultural Heritage*, 11(2), σσ. 205-219.

Camuffo, D., 2018. Standardization activity in the evaluation of moisture content. *Journal of Cultural Heritage*, Τόμος 31, σσ. 10-14.

Camuffo, D., 2019. A method to obtain precise determinations of relative humidity using thin film capacitive sensors under normal or extreme humidity conditions. *Journal of Cultural Heritage*, Τόμος 37, σσ. 166-169.

Camuffo, D., 2019. *Microclimate for Cultural Heritage*. 3^η έκδ. Amsterdam: Elsevier.

Charola, A., 2000. Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39(3), σσ. 327-343.

De Kock, T., Orr, S., Guilbert, D., Godts, S., Caluwaerts, S., Cnudde, V., Desarnaud, J., 2021. Implications of using meteorological records to assess the environmental risk of salt crystallization cycles in stone, στο Lubelli, B., Kamat, A. A., & Quist, W. J. (επιμελητές), *Proceedings of SWBSS 2021: Fifth International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures*. TU Delft Open, διαθέσιμο στο <https://books.bk.tudelft.nl/press/catalog/book/791>

Energypress, 2018. Energypress. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <https://energypress.gr/news/i-klimatiki-allagi-apeilei-mesogeia-ka-mnimeia> [Πρόσβαση 2 Ιουλίου 2020].

Entradas Silva, H. & Henriques, F., 2014. Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates. *Building and Environment*, Τόμος 82, σσ. 381-387.

EN 15757:2010-12. *Conservation of cultural property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

Fabbri, K., Pretelli, M. & Bonora, A., 2019. The Study of Historical Indoor Microclimate (HIM) to Contribute towards Heritage Buildings Preservation. *Heritage*, 2(3), σσ. 2287-2297.

Fort, J., Koci, J., Pokorny, J. & Cerny, R., 2020. Influence of Superabsorbent Polymers on Moisture Control in Building Interiors. *Energies*, 13(8):2009.

Garcia-Diego, F., Verticchio, E., Beltr?n, P. & Siani, A., 2016. Assessment of the Minimum Sampling Frequency to Avoid Measurement Redundancy in Microclimate Field Surveys in Museum Buildings. *Sensors*, 16(8):1291.

Gemini Data Loggers, 2020. geminidataloggers.com. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <https://www.geminidataloggers.com/data-loggers/tinytag-plus-2/tgp-4500> [Πρόσβαση 6 Ιουλίου 2020].

Geodata, 2020. [Geodata.gov.gr](http://geodata.gov.gr). [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <http://geodata.gov.gr/maps/?locale=el> [Πρόσβαση 19 Ιουλίου 2020].

Grinzato, E., Vavilov, V. & Kauppinen, T., 1998. Quantitative Infrared Thermography in Buildings. *Energy and Buildings*, 29(1):19.

Heritage, A., Heritage A. & Zezza, F., 2013. Current use of poultices in the conservation of Monuments. Στο: Heritage, A., Heritage, A., Zezza, F. (επιμ.) *Desalination of Historic Buildings, Stone and Wall Paintings*. London: Archetype Publications Ltd., σσ. 8-13.

Kadijsky, C., 1981. Microclimate for Murals. Στο: *International Council of Museums - Committee for Conservation (ICOM-CC), 6th Tiennial Meeting, Ottawa, 21 - 25 September*. Ottawa: Preprints.

Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L., Jacob, D., Mikolajewicz, U., Brostr?m, T., Ashley-Smith, J., Schellen, H., Martens, M., Van Schijndel, J., Antretter, F., Winkler, M., Bertolin, C., Camuffo, D., Simeunovic G., & Vyhldal, T., 2015. Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. Στο *Heritage Science*, 3(38).

Maekawa, S., 1993. Environmental Monitoring at the Tomb of Nefertari. Στο: M. Corzo & Mahasti Z. (επιμ.) *Art and Eternity: The Nefertari Wall Paintings Conservation*

Project, 1986-1992. Santa Monica CA; Cairo: Getty Conservation Institute; Egyptian Antiquities Organization.

Marie-Victoire, E. Bouichou, M., Jourdan, H., Thauvin, B., Queguigner, R., Olmi, R. & Riminesi, C. 2015. *Moisture and salt ingress monitoring in concrete by resistivity and evanescent field dielectrometry techniques*. Berlin, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 2015), 15-17 Sep 2015, Berlin, Germany (NDTCE 2015).

Massari, G. & Massari, I., 1993. *Damp Buildings - old and new*, Rome: International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (ICCROM).

Michalski, S., 2007. The ideal climate, risk management, the ASHRAE chapter, proofed fluctuations, and towards a full risk analysis model. Στο: *Experts Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, σσ. 1-19.

Mora, P., 1974. *Causes of deterioration of mural paintings*. Rome: International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property (ICCROM).

Optris Infrared Measurements, 2019. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <https://www.optris.global/downloads-infrared-cameras> [Πρόσβαση 24 Αυγούστου 2020].

Papayianni, I. & Stefanidou, M., 2001. The evolution of porosity in lime-based mortars. Στο: *Proc. 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, Athens, σσ. 451-497.

Pel, L., A., H. & Voronina, V., 2013. Physical principles affecting the efficiency of salt extraction by poulticing. Στο: Heritage, A., Heritage, A., Zezza, F. (επιμ.) *Desalination of Historic Buildings, Stone and Wall Paintings*. London: Archetype Publications Lbd., σσ. 21-29.

Pender, R., 2004. The behaviour of water in porous building materials and structures. *Studies in Conservation*, 49(1), σσ. 49-62.

prEN 16682:2013. *Conservation of Cultural Heritage - Guide to the measurements of moisture content in materials constituting movable and immovable cultural heritage*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

Price, C., 2000. *An expert Chemical Model for Determining the Environmental Condition Needed to Prevent Salt Damage in Porous Materials*, London: Archetype Publications Ltd.

Reedy, C. & Reedy, T., 1988. *Statistical Analysis in Art Conservation Research*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

Richardson, J., 2011. Thermopedia. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <http://thermopedia.com/cn/content/869> [Πρόσβαση 10 Ιούλιος 2020].

Rosina, E. & Ludwig, N., 1999. Optimal thermographic procedures for moisture analysis in building materials. *Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications*, Τόμος 3827.

Rosina, E., Lenzi, G. & Rosi, L., 1998. *Thermography and Georadar Integration for Moisture Analysis in Ancient Walls. A case of study on the Malpaga Castle*. Copenhagen, 7th European Conference on Non-destructive Testing (ECNDT), Copenhagen, 26-29 May 1998.

Rusydi, A., 2018. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *Earth and Environmental Science*, Τόμος 118.

Salzwiki, 2019. [salzwiki.de](https://www.salzwiki.de). [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: https://www.salzwiki.de/index.php/Datei:KNO3_Loeslichkeit.jpg [Πρόσβαση 28 Ιουλίου 2019].

Sawdy, A. & Price, C., 2004. Novel approaches to the control of salt damage. *Archaeology International*, Τόμος 8, σσ. 56-58.

Thomson, M., Lindqvist, J.-E., Elsen, J. & Groot, C., 2004. Porosity of Historic Mortars. Στο: Martens, DRW & Vermeltoort, AT (επιμ.), *Proceedings of the 13th international brick/block masonry conference, Amsterdam, July 4-7, 2004*. IB2MaC : international brick/block masonry conference, vol. 13, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.

Tiano P., Matteini M., Cianchetti R., Zeno L., Schonhaut G., (x.x.) Trials of soluble salts removal from porous materials by means of extraction poultices.

TROTEC, 2020. Operating Manual Trotec T600 (Trotec 2020). [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: https://uk.trotec.com/fileadmin/user_upload/transferdata/BA-DFI-02-INT.pdf [Πρόσβαση 25 Απριλίου 2020].

Verges - Belmin, V. & Siedel, H., 2005. Desalination of Masonries and Monumental Sculptures by Poulticing: A Review. *Restoration of Buildings and Monuments*, 11(6), σσ. 391-408.

Vos, B., 1973. *Moisture in Monuments. Boston, Application of Science in Examination of Works of Art: Proceedings of a Seminar 14-19 June 1970*, Museum of Fine Arts, Boston, σσ. 147-153.

Vos, B., 1988. Fundamentals of Heat and Moisture Transfer. Στο: *The Deterioration and Conservation of Stone, Notes from the International Venetian Courses on Stone Restoration (1975-1987)*, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO), σσ. 67-88.

Wikipedia, 2020. Wikipedia.org. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%86%CE%BB%CE%B1%CF%82> [Πρόσβαση 16 Ιουλίου 2020].

Ελληνική

Αραβαντινός, Δ., 1988. *Αριθμητική Προσέγγιση του Φαινομένου της Διάχυσης των Υδρατμών στα Εξωτερικά Δομικά Στοιχεία των Κατασκευών υπό την Επίδραση των Ελληνικών Κλιματικών Συνθηκών*, Διδακτορική διατριβή: Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Αραβαντινός, Δ., 2001. Η φιλοσοφία των επεμβάσεων για την αντιμετώπιση της υγρασίας σε ιστορικά κτίρια και μνημεία. Στο: *Πρακτικά 1ου Εθνικού Συνεδρίου «Ήπιες επεμβάσεις και προστασία ιστορικών κατασκευών»*, 23-25 Νοεμβρίου 2000. Θεσσαλονίκη: Υπουργείο Πολιτισμού, 2001, σσ. 117-128.

Αραβαντινός, Δ., 2004. *Προβλήματα υγρασίας σε ιστορικά κτίρια και μνημεία και τρόποι αντιμετώπισής τους*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Αραβαντινός, Δ., 2018. Η υγρασία στο εσωτερικό των κτηρίων λόγω της επιφανειακής συμπύκνωσης των υδρατμών. Στο: Αραβαντινός, Δ. (επιμ.) *Υγρασία στα κτίρια*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Κτίριο.

Βερροϊόπουλος, Ι. & Παναγιωτόπουλος, Β., 2013. *Μελέτη συντήρησης των τοιχογραφιών του Ι. Ναού Αγίου Γεωργίου στον Αρχαιολογικό χώρο Βραυρώνας*, Αθήνα: 1η Εφορεία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων: Δημοσίευτη μελέτη.

Καρτάλης, Κ. Κοκκώσης, Χ., Οικονόμου, Δ., Σανταμούρης, Μ., Αγαθαγγελίδης, Η. & Πολύδωρος Α., 2017. *Οι Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Ανάπτυξη*. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: https://www.dianeosis.org/wp-content/uploads/2017/06/executive-summary_climate_change.pdf [Πρόσβαση 11 Σεπτεμβρίου 2020].

Κονιδιτσιώτης, Α. & Παπαδοπούλου, Ε., 2018. *Μελέτη συντήρησης για τα διακοσμητικά στοιχεία και επικαιροποίηση εγκεκριμένης τεχνικής έκθεσης ξυλόγλυπτου τέμπλου του Ι. Ν. Κοιμήσεως Θεοτόκου Λαφιώνας Λέσβου*, Αθήνα: Δημοσίευτη μελέτη.

Κονιδιτσιώτης, Α., 2019. *Μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών της Ιεράς Μονής Συγγενών Φλωριάδας Βάλτου Αιτωλοακαρνανίας*, Αθήνα: Δημοσίευτη μελέτη.

Κυριακού, Β., 2007. Διαμόρφωση μικροκλιματικών συνθηκών σε μνημεία κάτω από επίκωση. Η περίπτωση του Μακεδονικού Τύμβου. *Τεχνικά Χρονικά*, 1(1-2), σσ. 61-70.

Λαμπρόπουλος, Β., 2003. *Περιβάλλον μουσείων, μνημείων και αρχαιολογικών χώρων*. Αθήνα.

Λιωνής, Χ., 1992. *Νησί Ιωαννίνων, Ι. Μονή Ελεούσας, Περιβαλλοντική μελέτη, Ανάλυση των συνθηκών του μικροκλίματος που επικρατεί στο μνημείο*, Αθήνα: Διεύθυνση Συντήρησης Αρχαιοτήτων: Δημοσίευτη μελέτη.

Μοροπούλου, Α. & Μπακόλας, Α., 2019. *Ποροσιμετρία υδραργύρου, στο Επιστήμη και τεχνική των υλικών*, Σημειώσεις στο 5ο εξαμηνο Χ-Μ ΕΜΠ, Εργαστηριακός οδηγός, ΕΜΠ 2019. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <https://courses.chemeng.ntua.gr/downloads/3209> [Πρόσβαση 20 Αυγούστου 2020].

Ντέλμας, Κ., 2019. *Μελέτη λήψης πρόσθετων μέτρων προστασίας αντιμετώπισης των πηγών υγρασίας στον Ιερό Ναό Αγίου Μιχαήλ Αρίλλα Πέρδικας*, Κοζάνη: Αδημοσίευτη μελέτη.

Ο Θαυμαστός Κόσμος της Χημείας, *Ευδιάλυτα και δυσδιάλυτα άλατα*. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <http://molwave.chem.auth.gr/fabchem/?q=node/66> [Πρόσβαση 25 Μαρτίου 2020].

Παπαβρανούση-Λιωνή, Α., 2010. *Μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης τοιχογραφιών Ιερού Ναού Αγίου Δημητρίου στο Μαυρίλο Φθιώτιδας*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδόπουλος, Μ., 1984. *Θερμομόνωση κτιρίων*. Θεσσαλονίκη: χ.ε.

Παπαδοπούλου, Ε., Κονιδιτσιώτης, Α. & Καραχάλιος, Α., 2008. *Μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης Ι. Ν. Αγ. Γεωργίου Γουμένισσας*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδοπούλου, Ε. & Κονιδιτσιώτης, Α., 2015. *Μελέτη συντήρησης τοιχογραφιών και επιχρισμάτων του Καθολικού της Ι. Μ. Αγ. Ανδρέα Περιστεράς Ν. Θεσσαλονίκης*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδοπούλου, Ε. & Κονιδιτσιώτης, Α., 2016. *Μελέτη συντήρησης τοιχογραφιών του Καθολικού της Ι. Μ. Ασώματος Μιχαήλ στη Βαυκερή Λευκάδας*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδοπούλου, Ε. & Κονιδιτσιώτης, Α., 2017α. *Μελέτη περιβαλλοντικών παραμέτρων για τον προσδιορισμό των πηγών της υγρασίας των τοιχογραφιών του Ι. Ν. Αγ. Γεωργίου στον αρχαιολογικό χώρο Βραυρώνος*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδοπούλου, Ε. & Κονιδιτσιώτης, Α., 2017β. *Μελέτη περιβαλλοντικών παραμέτρων των τοιχογραφιών του Καθολικού της Μονής Βουτσά Περιφέρειας Ηπείρου*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδοπούλου, Ε. & Κονιδιτσιώτης, Α., 2017γ. *Μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του Ι. Ν. Αγ. Αναργύρων Σερρών*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδοπούλου, Ε. & Κονιδιτσιώτης, Α., 2017δ. *Μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του Ι. Ν. Αγ. Νικολάου στο Φουντουκλί Ρόδου*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδοπούλου, Ε. & Κονιδιτσιώτης, Α., 2018. *Μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του κοιμητηριακού ναού Αγίου Μιχαήλ στην Αρίλλα Πέρδικας Ν. Θεσπρωτίας*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Παπαδοπούλου, Ε. & Κονιδιτσιώτης, Α., 2020. *Επικαιροποίηση της μελέτης με τίτλο «Μελέτη συντήρησης και αποκατάστασης των τοιχογραφιών του ιερού ναού Αγίου Δημητρίου στο Μαυρίλο Φθιώτιδας»*, Αθήνα: Αδημοσίευτη μελέτη.

Πρόκος, Π., 2010. Περιβαλλοντικές συνθήκες στη Δήλο και η επίδρασή τους στα μνημεία. Στο: *Οι Λέοντες της Δήλου, από τον αρχαιολογικό χώρο στο Μουσείο*. Αθήνα: Υπουργείο Πολιτισμού και Τουρισμού, Γενική Διεύθυνση Αρχαιοτήτων και Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Διεύθυνση Συντήρησης Αρχαίων και Νεωτέρων Μνημείων.

Πρόκος, Π., 2012. *Η συμβολή των περιβαλλοντικών παραμέτρων στη διάγνωση και τη πρόβλεψη φθοράς από άλατα στις τοιχογραφίες μέσω ενός θερμοδυναμικού μοντέλου*. Αθήνα, Ετήσια Ημερίδα της Πανελληνίας Ένωσης Συντηρητών Αρχαιοτήτων (ΠΕΣΑ), 1 Δεκεμβρίου 2012.

Στεφανίδου, Μ., 2018. Η επίδραση της υγρασίας στα δομικά υλικά. Στο: Δ. Αραβαντινός (επιμ.) *Υγρασία στα κτίρια*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Κτίριο, σσ. 20-29.

Τσακίρη, Α., 2006. *Ανάκτηση φωσφόρου με εφαρμογές στη σταθεροποίηση εδαφών υψηλής διαπερατότητας σε υγρά*, Πάτρα.

Χριστοδουλίδης, Α., 2016. *Διαγνωστική θερμογραφία κτηριακών εγκαταστάσεων*, Σημειώσεις σεμιναρίου, Θεσσαλονίκη.