



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών

και Βιώσιμου Σχεδιασμού

ΠΜΣ Αποτύπωση και Τεκμηρίωση Μνημείων και

Αρχαιολογικών Χώρων

Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία

«Μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις επιφάνειες
μνημείων: Αρχαιομετρικές προσεγγίσεις με στόχο τη συντήρηση
και αποκατάσταση- Η περίπτωση του Μινωικού Ανακτόρου της
Κνωσού»

Μαρία Ζάχου

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Αικατερίνη Θεοδωρακοπούλου

Πάτρα, Ιούνιος, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις επιφάνειες
μνημείων: Αρχαιομετρικές προσεγγίσεις με στόχο τη συντήρηση
και αποκατάσταση - Η περίπτωση του Μινωικού Ανακτόρου της
Κνωσού

Μαρία Ζάχου

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Αικατερίνη Θεοδωρακοπούλου

Μέλος ΣΕΠ-Συντονίστρια ΑΤΜ-61
(Αρχαιομετρία) Ελληνικό Ανοικτό
Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Μουλλού Δωρίνα

Μέλος ΣΕΠ Ελληνικό Ανοικτό
Πανεπιστήμιο

Πάτρα, Ιούνιος, 2026

«Θα ήθελα να εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου κ. Αικατερίνη Θεοδωρακοπούλου για την αμέριστη υποστήριξη, την άμεση απόκριση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Η καθοδήγησή της υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω από καρδιάς τον σύζυγό μου Θανάση για την συμπαράσταση, την υπομονή και την κατανόηση. Η διαρκής στήριξή του και η πίστη του σε εμένα αποτέλεσαν πολύτιμο στήριγμα σε κάθε δυσκολία και πρόκληση αυτής της διαδρομής

Τέλος, αφιερώνω την εργασία αυτή στις κόρες μου Δήμητρα και Σοφία. Αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή έμπνευσης και το ισχυρότερο κίνητρο σε κάθε μου προσπάθεια »

Περίληψη

Η φθορά των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί σύνθετη διεργασία, η οποία προκύπτει από την αλληλεπίδραση των δομικών υλικών με το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διατήρηση των μνημείων είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών συντήρησης και αποκατάστασης. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις επιφάνειες των μνημείων και η ανάδειξη της συμβολής των αρχαιομετρικών προσεγγίσεων στη μελέτη των μηχανισμών φθοράς, με έμφαση στην περίπτωση του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού.

Αρχικά εξετάζονται οι κυριότεροι φυσικοί, χημικοί, βιολογικοί και ανθρωπογενείς παράγοντες που συμβάλλουν στην υποβάθμιση των δομικών υλικών. Παράλληλα, παρουσιάζονται ενδεικτικές μελέτες φθοράς από σημαντικά μνημεία του ελλαδικού χώρου, όπως η Ακρόπολη των Αθηνών, η Δήλος και η Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου, αναδεικνύοντας τις επιπτώσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών και τη συμβολή των αναλυτικών τεχνικών στη διερεύνησή τους.

Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση του Ανακτόρου της Κνωσού, με έμφαση στα δομικά υλικά του μνημείου, στα κλιματολογικά και φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής και στους κυριότερους μηχανισμούς φθοράς που επηρεάζουν τη διατήρησή του. Παρουσιάζονται επίσης οι βασικές αρχαιομετρικές μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί για τον χαρακτηρισμό των υλικών και των προϊόντων διάβρωσης, συμβάλλοντας στην κατανόηση της παθολογίας τους και στην επιλογή συμβατών επεμβάσεων συντήρησης.

Η μελέτη καταδεικνύει ότι η φθορά του μνημείου οφείλεται στη συνδυασμένη δράση πολλαπλών παραγόντων και επιβεβαιώνει τη σημασία των αρχαιομετρικών μεθόδων ως βασικών εργαλείων τεκμηρίωσης.

Λέξεις – Κλειδιά: Αρχαιομετρία, φθορά μνημείων, πολιτιστική κληρονομιά, συντήρηση, αποκατάσταση, Μινωικό Ανάκτορο Κνωσού.

Environmental Impacts on Monument Surfaces: Archaeometric Approaches to Conservation and Restoration – A Case Study of the Minoan Palace of Knossos

Maria Zachou

Abstract

The deterioration of cultural heritage monuments is a complex process resulting from the interaction between building materials and their natural and anthropogenic environment. Understanding the factors that affect the preservation of monuments is essential for the development of effective conservation and restoration strategies. The aim of this dissertation is to investigate the environmental impacts on monument surfaces and to highlight the contribution of archaeometric approaches to the study of deterioration mechanisms, with particular emphasis on the Minoan Palace of Knossos.

The study initially examines the main physical, chemical, biological, and anthropogenic factors contributing to the degradation of building materials. In addition, representative deterioration studies from important Greek monuments, such as the Acropolis of Athens, Delos, and the Medieval City of Rhodes, are presented, highlighting the effects of environmental conditions and the contribution of analytical techniques to their investigation. The case of Knossos is then examined, focusing on the monument's building materials, the climatic and physiographic characteristics of the area, and the principal deterioration mechanisms affecting its preservation. Particular attention is given to the archaeometric methods applied for the characterization of materials and deterioration products, contributing to the understanding of material decay and to the selection of compatible conservation interventions.

The study demonstrates that the deterioration of the monument results from the combined action of multiple factors and confirms the importance of archaeometric methods as fundamental tools for documentation and assessment.

Keywords: Archaeometry, monument deterioration, cultural heritage, conservation, restoration, Minoan Palace of Knossos.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	xi
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xii
Εισαγωγή.....	1
1. Περιβαλλοντικοί παράγοντες φθοράς μνημείων.....	4
1.1 Θερμοκρασιακές μεταβολές	5
1.1.1 Θερμική διαστολή και συστολή.....	6
1.2 Επίδραση του νερού	7
1.2.1 Τριχοειδής αναρρίχηση και μεταφορά υγρασίας	7
1.2.2 Επίδραση υγρασίας σε φυσικοχημικούς και βιολογικούς μηχανισμούς φθοράς.....	9
1.3 Διαλυτά άλατα	11
1.3.1 Θαλάσσια επίδραση	12
1.3.2 Νερά υπεδάφους.....	13
1.4 Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	13
1.5 Σεισμικότητα και σεισμική καταπόνηση μνημείων	16
1.6 Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στα μνημεία.....	18
2. Ανασκόπηση μελετών φθοράς στον ελλαδικό χώρο	20
2.1 Ακρόπολη Αθηνών.....	20
2.2 Αρχαιολογικός χώρος Δήλου	23
2.3 Μεσαιωνική Πόλη Ρόδου.....	26
3. Η περίπτωση του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού.....	30
3.1 Ιστορική εξέλιξη και οικοδομικές φάσεις του Ανακτόρου της Κνωσού	30
3.2 Αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά	33
3.3 Τα δομικά υλικά του Ανακτόρου της Κνωσού	34
3.4 Αναστηλωτικές επεμβάσεις του Arthur Evans και οι επιπτώσεις τους	39
3.5 Κλιματολογικά και φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά Κνωσού.....	42
3.6 Έκλιμα της ευρύτερης περιοχής	42
3.7 Μικροκλιματικές συνηθίες.....	43
3.8 Σεισμική δραστηριότητα	46
4. Φθορές δομικών υλικών.....	48
4.1 Μορφές φθοράς των δομικών υλικών του Ανακτόρου της Κνωσού.....	48
4.1.1 Φθορά γυψόλιθου και λίθινων δομικών στοιχείων.....	49
4.1.2 Φθορά πηλοκοκκιομαμάτων, ασβεστοκοκκιομαμάτων και επιχρισμάτων	51
4.1.3 Φθορά νεότερων τσιμεντοειδών υλικών και ασυμβατότητα επεμβάσεων	52
4.2 Βιολογική φθορά και επιφανειακές επικαθίσεις	53
4.3 Περιβαλλοντικές επικαθίσεις και προϊόντα διάβρωσης.....	54
5. Αρχαιομετρικές προσεγγίσεις στην Κνωσό	57
5.1 Μακροσκοπική παρατήρηση και τεκμηρίωση φθορών	57
5.2 Οπτική μικροσκοπία και πετρογραφική ανάλυση.....	58
5.3 Περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD)	59
5.4 Φασματοσκοπία υπερύθρου (FTIR).....	59
5.5 Φθορισμός ακτίνων X (XRF).....	60

5.6 Raman και LIBS φασματοσκοπία.....	61
5.7 Θερμικές αναλύσεις (TG-DTA).....	62
6. Ερευνητικά προγράμματα και εφαρμογές.....	63
6.1 Το πρόγραμμα Heracles και η εφαρμογή του στην Κνωσό	64
6.2 Έρευνες για τα κονιάματα και τα υλικά αποκατάστασης	65
6.3 Συμβολή του ΙΤΕ και διεπιστημονική προσέγγιση	66
7. Επεμβάσεις συντήρησης	67
7.1 Επεμβάσεις στα πηλοκονιάματα και στα επιχρίσματα	69
7.2 Επεμβάσεις στον γυψόλιθο και στα λίθινα δομικά στοιχεία	70
7.3 Ασυμβατότητα παλαιότερων επεμβάσεων και ανάγκη επαναξιολόγησης	70
8. Συμπεράσματα	72
8.1 Μελλοντικές προοπτικές για την παρακολούθηση και διαχείριση του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού.....	74
Βιβλιογραφία.....	78

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 Φθορές λόγω ατμοσφαιρικής ρύπανσης	21
Εικόνα 2 Θραύση αρχιτεκτονικού μέλους λόγω οξείδωσης μεταλλικών συνδέσμων.....	22
Εικόνα 3 Μεταβολές της στάθμης της Θάλασσας στη Δήλο και Μύκονο	25
Εικόνα 4 Φθορά λίθου λόγω μηχανισμού αλατονέφωσης.....	27
Εικόνα 5 Κάτοψη Ανακτόρου Κνωσού	31
Εικόνα 6 Γυψόλιθος που έχει υποστεί αποσάρθρωση	35
Εικόνα 7 Χρήση γυψόλιθου στην αίθουσα του θρόνου.....	36
Εικόνα 8 Αναστηλωτικές εργασίες από τον Evans	40
Εικόνα 9 Η βόρεια είσοδος του Ανακτόρου της Κνωσού.....	41
Εικόνα 10 Μηνιαία διακύμανσης συγκέντρωσης Pm10.....	45
Εικόνα 11 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας.....	46
Εικόνα 12 Διάβρωση Γυψόλιθου	50
Εικόνα 13 Τσιμεντοκονίαμα τοιχοποιίας από το Μέγαρο του Βασιλιά	52
Εικόνα 14 Κυκλοφορία παγωνιού στο Ανάκτορο της Κνωσού.....	54
Εικόνα 15 Μαύρες κρούστες. Εικόνες από μικροσκόπιο	58
Εικόνα 16 Αποτελέσματα φασματοσκοπίας FTIR-ATR	60
Εικόνα 17 Μαύρες κρούστες από το Ανάκτορο της Κνωσού.....	61
Εικόνα 18 Μέγαρο Βασιλέως φθορές σε δομή από οπλισμένο σκυρόδεμα	67
Εικόνα 19 Μέγαρο Βασιλέως αποκατάσταση λιθοδομής με συμβατά υλικά.....	71

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1 Χημική σύσταση κονιαμάτων WDXRF	65
---	----

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GIS	Geographic Information System
GSD	Ground Sampling Distance
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
OM	Optical Microscopy
RH	Relative Humidity
SEM	Scanning Electron Microscopy
SEM-EDS	Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy
XRF	X-ray Fluorescence
TG-DTA	Thermogravimetric Analysis – Differential Thermal Analysis
ΥΣΜΑ	Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης

Εισαγωγή

Η πολιτιστική κληρονομιά αποτελεί πολύτιμη παρακαταθήκη της ανθρώπινης ιστορίας και θεμελιώδες στοιχείο της συλλογικής μνήμης των κοινωνιών. Τα μνημεία, πέρα από την αισθητική και ιστορική τους αξία, διατηρούν πολύτιμες πληροφορίες για τις κατασκευαστικές τεχνικές, τα υλικά και τις τεχνολογικές γνώσεις κάθε εποχής. Η διατήρησή τους αποτελεί διαχρονική πρόκληση, καθώς βρίσκονται σε συνεχή αλληλεπίδραση με το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη σύνθετων μηχανισμών φθοράς οι οποίοι μεταβάλλουν σταδιακά τη δομή και τις ιδιότητες των δομικών υλικών.

Η υποβάθμιση των μνημείων οφείλεται στη συνδυασμένη δράση περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως οι θερμοκρασιακές μεταβολές, η υγρασία, τα διαλυτά άλατα, η ατμοσφαιρική ρύπανση, οι βιολογικοί οργανισμοί, η σεισμική δραστηριότητα και, τα τελευταία χρόνια, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, σε αρκετές περιπτώσεις σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και παλαιότερες επεμβάσεις αποκατάστασης, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με υλικά ή τεχνικές που δεν ήταν πάντοτε συμβατές με τα αρχικά δομικά υλικά των μνημείων. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης των παραγόντων αυτών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων στρατηγικών προστασίας, συντήρησης και αποκατάστασης.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η αρχαιομετρία έχει αναδειχθεί σε έναν από τους σημαντικότερους επιστημονικούς κλάδους που υποστηρίζουν τη μελέτη και διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η εφαρμογή σύγχρονων αναλυτικών τεχνικών επιτρέπει τον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών, την αναγνώριση των προϊόντων φθοράς, τη διερεύνηση των μηχανισμών υποβάθμισης και την αξιολόγηση της συμβατότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται στις επεμβάσεις συντήρησης. Η διεπιστημονική συνεργασία αρχαιολόγων, συντηρητών, μηχανικών, γεωεπιστημόνων, χημικών και επιστημόνων υλικών έχει συμβάλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη τεκμηριωμένων προσεγγίσεων για την προστασία των μνημείων.

Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο αυτό και εξετάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις επιφάνειες των μνημείων, αναδεικνύοντας τον καθοριστικό ρόλο των

αρχαιομετρικών μεθόδων στη μελέτη των μηχανισμών φθοράς και στην υποστήριξη των επεμβάσεων συντήρησης. Ως κύρια μελέτη περίπτωσης επιλέγεται το Μινωικό Ανάκτορο της Κνωσού, ένα μνημείο ιδιαίτερης ιστορικής και αρχαιολογικής σημασίας, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της πολυπλοκότητας των δομικών υλικών του, των ιδιαίτερων περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες εκτίθεται, αλλά και των εκτεταμένων αναστηλωτικών επεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά τον 20ό αιώνα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των κυριότερων περιβαλλοντικών παραγόντων που επηρεάζουν τη διατήρηση των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς και η ανάδειξη της συμβολής των αρχαιομετρικών προσεγγίσεων στην κατανόηση των μηχανισμών φθοράς, στον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών και στην υποστήριξη των επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης. Παράλληλα, μέσω της μελέτης του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού επιχειρείται η σύνδεση της θεωρητικής γνώσης με μία χαρακτηριστική εφαρμογή στον ελληνικό χώρο, όπου συνυπάρχουν φυσικοί, ανθρωπογενείς και ιστορικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση διατήρησης του μνημείου.

Η εργασία επιχειρεί να απαντήσει σε μια σειρά ερευνητικών ερωτημάτων που αφορούν τους κυριότερους περιβαλλοντικούς μηχανισμούς φθοράς των μνημείων, τις αρχαιομετρικές τεχνικές που εφαρμόζονται για τη διερεύνησή τους, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο τα αποτελέσματα των αναλύσεων συμβάλλουν στον σχεδιασμό κατάλληλων στρατηγικών συντήρησης και αποκατάστασης. Παράλληλα, διερευνάται η εφαρμογή των μεθόδων αυτών στην περίπτωση του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού και η συμβολή τους στην κατανόηση των προβλημάτων διατήρησης του μνημείου.

Η παρούσα μελέτη βασίζεται αποκλειστικά στη συστηματική ανασκόπηση της διαθέσιμης επιστημονικής βιβλιογραφίας και δεν περιλαμβάνει πρωτογενή δειγματοληψία ή εργαστηριακές αναλύσεις. Επιπλέον, παρότι για μεγάλο αριθμό ελληνικών μνημείων υπάρχει εκτενής ιστορική και αρχαιολογική τεκμηρίωση, οι δημοσιευμένες αρχαιομετρικές έρευνες με αναλυτικά εργαστηριακά αποτελέσματα παραμένουν περιορισμένες για αρκετές περιπτώσεις. Παράλληλα, σημαντικό μέρος των αναλύσεων που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο έργων συντήρησης δεν δημοσιεύεται πάντοτε στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, αλλά παραμένει ενσωματωμένο σε τεχνικές εκθέσεις

και αρχειακό υλικό, περιορίζοντας τις δυνατότητες ευρύτερης συγκριτικής αξιολόγησης. Επιπρόσθετα, η ποικιλία των δομικών υλικών, των περιβαλλοντικών συνθηκών και του ιστορικού επεμβάσεων των μνημείων που εξετάζονται δεν επιτρέπει την άμεση γενίκευση των συμπερασμάτων, καθώς κάθε μνημείο παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και απαιτεί εξατομικευμένη προσέγγιση. Ωστόσο, η σύνθεση και η κριτική αξιολόγηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας επιτρέπουν την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τους βασικούς μηχανισμούς φθοράς και τη συμβολή των αρχαιομετρικών μεθόδων στη διερεύνηση και αντιμετώπισή τους.

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε οκτώ κεφάλαια. Αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο των περιβαλλοντικών, φυσικοχημικών, βιολογικών και ανθρωπογενών παραγόντων που επηρεάζουν τη διατήρηση των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς. Στη συνέχεια εξετάζονται αντιπροσωπευτικές μελέτες περίπτωσης από τον ελλαδικό χώρο, με στόχο την ανάδειξη διαφορετικών μηχανισμών φθοράς και της συμβολής των αρχαιομετρικών μεθόδων στη διερεύνησή τους. Τα επόμενα κεφάλαια επικεντρώνονται στο Μινωικό Ανάκτορο της Κνωσού, παρουσιάζοντας το ιστορικό και αρχαιολογικό πλαίσιο, τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά, τα δομικά υλικά, τις αναστηλωτικές επεμβάσεις, τα κλιματολογικά και φυσικογεωγραφικά δεδομένα, καθώς και τις μορφές φθοράς που επηρεάζουν τη διατήρηση του μνημείου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις αρχαιομετρικές τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί για τον χαρακτηρισμό των υλικών και των προϊόντων διάβρωσης, καθώς και στη συμβολή τους στην επιλογή συμβατών επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης.

Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με τη σύνθεση των βασικών συμπερασμάτων και τη διατύπωση προτάσεων για τη μελλοντική παρακολούθηση, διαχείριση και προστασία του μνημείου, με έμφαση στην προληπτική συντήρηση, την εκτίμηση κινδύνου και τη διεπιστημονική προσέγγιση.

1. Περιβαλλοντικοί παράγοντες φθοράς μνημείων

Τα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελούν πολύτιμες μαρτυρίες της ιστορικής και πολιτισμικής εξέλιξης των κοινωνιών, διατηρώντας πληροφορίες για τις τεχνολογίες, τα υλικά και τις κατασκευαστικές πρακτικές του παρελθόντος. Η διατήρησή τους αποτελεί διαχρονική πρόκληση, καθώς εκτίθενται σε ποικίλους φυσικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση διατήρησής τους και οδηγούν στην εκδήλωση φαινομένων φθοράς. Η κατανόηση των διεργασιών που αναπτύσσονται μεταξύ των δομικών υλικών και του περιβάλλοντος αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών προστασίας, συντήρησης και αποκατάστασης.

Η διάβρωση των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο σχετίζεται άμεσα με την αλληλεπίδραση των ιδιοτήτων των δομικών υλικών και των περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες αυτά εκτίθενται. Οι μηχανισμοί υποβάθμισης δεν οφείλονται συνήθως σε έναν μόνο παράγοντα, αλλά προκύπτουν από τη συνδυαστική δράση φυσικών, χημικών, βιολογικών και ανθρωπογενών διεργασιών, οι οποίες συχνά λειτουργούν συνεργατικά και επιταχύνουν τη φθορά των μνημείων (Varotsos & Theodorakopoulou, 2001; Moropoulou et al., 1995). Η συμπεριφορά των υλικών επηρεάζεται από παραμέτρους όπως οι θερμοκρασιακές μεταβολές, η παρουσία υγρασίας, τα διαλυτά άλατα, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η βιολογική δραστηριότητα, παράγοντες που δρουν με διαφορετική ένταση ανάλογα με το μικροκλίμα και τα χαρακτηριστικά του κάθε μνημείου.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν σήμερα οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, καθώς η μεταβολή των θερμοκρασιακών και των υδρολογικών συνθηκών επηρεάζει άμεσα τους μηχανισμούς αποσάθρωσης των δομικών υλικών. Η αύξηση της θερμοκρασίας, η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, οι μεταβολές της σχετικής υγρασίας και η ενίσχυση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δημιουργούν ένα περισσότερο επιθετικό περιβάλλον για τα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, ιδιαίτερα στις παράκτιες και μεσογειακές περιοχές. Οι συνθήκες αυτές επιδρούν τόσο στη φυσική συνοχή των υλικών όσο και στις χημικές διεργασίες διάβρωσης, επηρεάζοντας τη μακροχρόνια διατήρηση των μνημείων. (Kapsomenakis et al., 2023; Brimblecombe, 2016).

Η κατανόηση των παραγόντων και των μηχανισμών φθοράς αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μελέτη, την προστασία και τη συντήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η διερεύνηση των αιτιών υποβάθμισης επιτρέπει την ορθότερη αξιολόγηση της παθολογίας των υλικών και τον σχεδιασμό στοχευόμενων επεμβάσεων συντήρησης, προσαρμοσμένων στις ιδιαιτερότητες κάθε μνημείου. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι κυριότεροι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα δομικά υλικά των μνημείων, καθώς και οι βασικοί μηχανισμοί αλλοίωσης που συνδέονται με αυτούς.

1.1 Θερμοκρασιακές μεταβολές

Η επίδραση της θερμότητας στα δομικά υλικά των μνημείων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους μηχανισμούς φυσικής φθοράς, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονες ημερήσιες και εποχικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Η συνεχής εναλλαγή μεταξύ θέρμανσης και ψύξης προκαλεί επαναλαμβανόμενους κύκλους διαστολής και συστολής στα υλικά, με αποτέλεσμα τη σταδιακή ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και μικρορωγμών που αποδυναμώνουν τη συνοχή τους (Σκουλικίδης, 2000). Τα φαινόμενα αυτά είναι ιδιαίτερα έντονα σε μνημεία που παραμένουν εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία και στις απότομες μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως συμβαίνει συχνά στον μεσογειακό χώρο.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι εξωτερικές επιφάνειες των λίθων θερμαίνονται ταχύτερα σε σχέση με το εσωτερικό τους, ενώ κατά τη νύχτα η ψύξη πραγματοποιείται επίσης με διαφορετικό ρυθμό. Η διαφοροποίηση αυτή δημιουργεί θερμικές κλίσεις μεταξύ των επιφανειακών και εσωτερικών τμημάτων του υλικού, προκαλώντας ανομοιόμορφες παραμορφώσεις και την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων που ευνοούν τη δημιουργία μικρορηγματώσεων και φαινομένων αποσάθρωσης. Η ένταση της θερμικής καταπόνησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά των υλικών, όπως το πορώδες, η ορυκτολογική σύσταση, η υδροαπορροφητικότητα και η παρουσία προϋπαρχουσών ασυνεχειών ή ρωγμών (Camuffo, 1993).

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η συνύπαρξη διαφορετικών υλικών στα μνημεία, όπως φυσικών λίθων, παραδοσιακών κονιαμάτων και νεότερων υλικών επεμβάσεων όπως

το τσιμέντο. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής και ανταποκρίνονται με διαφορετικό τρόπο στις θερμοκρασιακές μεταβολές, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει ασυμβατότητες, τοπικές ρηγματώσεις και αποκολλήσεις στις επιφάνειες επαφής (Varotsos & Theodorakopoulou, 2001).

Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά και στη μετακίνηση της υγρασίας μέσα στο πορώδες δίκτυο των υλικών, επιταχύνοντας τις διαδικασίες εξάτμισης και κρυστάλλωσης των αλάτων. Οι μηχανισμοί αυτοί δημιουργούν πρόσθετες πιέσεις στο εσωτερικό των πόρων και συμβάλλουν στη σταδιακή αποδιοργάνωση των επιφανειακών στρωμάτων (Charola, 2000).

Σε αρκετές περιπτώσεις οι θερμικές καταπονήσεις λειτουργώντας συνδυαστικά με άλλους παράγοντες φθοράς, όπως η υγρασία και τα διαλυτά άλατα, ενισχύουν την αποσάθρωση των δομικών υλικών.

1.1.1 Θερμική διαστολή και συστολή

Η θερμική διαστολή και συστολή αποτελεί βασικό μηχανισμό μηχανικής καταπόνησης των δομικών υλικών. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας προκαλούν αλλαγές στον όγκο των υλικών, οι οποίες, όταν επαναλαμβάνονται σε μεγάλο χρονικό διάστημα, οδηγούν στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και μικρορηγματώσεων. Η ένταση του φαινομένου εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα, το πορώδες και την ορυκτολογική σύσταση κάθε υλικού, καθώς και από τη συνύπαρξη υλικών με διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής (Σκουλικίδης, 2000). Στα πετρώματα, οι διαφορετικοί ορυκτοί κόκκοι εμφανίζουν διαφορετική θερμική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τοπικών τάσεων στα όρια των κρυστάλλων και τη σταδιακή αποδιοργάνωση της μικροδομής των επιφανειών. Παρότι οι θερμικοί κύκλοι δεν οδηγούν πάντοτε σε άμεσα ορατές βλάβες, συμβάλλουν σημαντικά στη μακροχρόνια εξασθένηση των υλικών και αυξάνουν την ευαισθησία τους απέναντι σε άλλους μηχανισμούς φθοράς, όπως η υγρασία και η αλατοδιάβρωση (Camuffo, 1993; Σκουλικίδης, 2000).

1.2 Επίδραση του νερού

Η παρουσία νερού αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους και πλέον καθοριστικούς παράγοντες φθοράς των δομικών υλικών των μνημείων, καθώς συμμετέχει άμεσα σε ένα ευρύ φάσμα φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών διάβρωσης. Το νερό δρα όχι μόνο ως μέσο μεταφοράς διαλυτών ουσιών και ατμοσφαιρικών ρύπων, αλλά και ως ενεργός παράγοντας μεταβολής της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Η επίδρασή του εξαρτάται από παραμέτρους όπως το πορώδες, η διαπερατότητα, η υδροαπορροφητικότητα και η ορυκτολογική σύσταση των υλικών, καθώς και από τις μικροκλιματικές συνθήκες στις οποίες αυτά εκτίθενται (Θεουλάκης, 1994α; Λαμπρόπουλος, 1993).

Η κυκλοφορία του νερού στο εσωτερικό των δομικών υλικών πραγματοποιείται μέσω σύνθετων μηχανισμών μεταφοράς, όπως η τριχοειδής άνοδος, η απορρόφηση βρόχινου νερού, η διάχυση υδρατμών και η συμπύκνωση της ατμοσφαιρικής υγρασίας στους πόρους των επιφανειών. Σε πορώδη υλικά, όπως οι ασβεστόλιθοι, οι πωρόλιθοι και τα κονιάματα, το δίκτυο των πόρων λειτουργεί ως σύστημα κυκλοφορίας υγρασίας, επιτρέποντας τη μεταφορά διαλυτών αλάτων και ρύπων σε σημαντικό βάθος. Η κατανομή του μεγέθους των πόρων και ο βαθμός διασύνδεσης τους επηρεάζουν άμεσα τον ρυθμό απορρόφησης και εξάτμισης του νερού, καθορίζοντας τη συμπεριφορά του υλικού απέναντι στους μηχανισμούς φθοράς (Charola, 2000· Moropoulou et al., 1995).

1.2.1 Τριχοειδής αναρρίχηση και μεταφορά υγρασίας

Το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης αποτελεί βασικό μηχανισμό μετακίνησης νερού στα πορώδη δομικά υλικά των μνημείων. Εκδηλώνεται όταν το νερό, κυρίως από το έδαφος ή από ζώνες παρατεταμένης διαβροχής, ανέρχεται μέσω των πόρων, των τριχοειδών αγωγών και των μικρορωγμών των λίθων και των κονιαμάτων. Η ένταση και το ύψος της ανόδου εξαρτώνται από τη διάμετρο και τη συνδεσιμότητα των πόρων, τη διαπερατότητα του υλικού, τον βαθμό κορεσμού, καθώς και τις συνθήκες εξάτμισης στην επιφάνεια. Όσο λεπτότερο και περισσότερο συνδεδεμένο είναι το πορώδες

δίκτυο, τόσο ευκολότερη είναι η μεταφορά υγρασίας στο εσωτερικό του υλικού (Θεουλάκης, 1994α; Camuffo, 2019).

Σε πορώδη πετρώματα και κονιάματα, η κυκλοφορία της υγρασίας δεν αποτελεί απλώς φυσική μετακίνηση νερού, αλλά συνδέεται με τη μεταφορά διαλυμένων ιόντων, αλάτων και ρύπων. Κατά την εξάτμιση, τα διαλυτά άλατα συγκεντρώνονται και κρυσταλλώνονται είτε στην επιφάνεια είτε στο εσωτερικό των πόρων, προκαλώντας μηχανικές πιέσεις και σταδιακή αποδιοργάνωση της μικροδομής. Η θέση της κρυστάλλωσης εξαρτάται από τον ρυθμό εξάτμισης και από την κατανομή του νερού στο πορώδες σύστημα: όταν η εξάτμιση είναι ταχεία, τα άλατα εμφανίζονται συχνά ως επιφανειακές εξανθήσεις, ενώ όταν πραγματοποιείται βαθύτερα στο υλικό μπορεί να προκληθούν πιο σοβαρές εσωτερικές φθορές, όπως απολέπιση, αποκόλληση και κοκκοποίηση (Charola, 2000; Moropoulou et al., 1995).

Η τριχοειδής μεταφορά υγρασίας είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στα κατώτερα τμήματα τοιχοποιιών, δαπέδων και βάσεων μνημείων, όπου η επαφή με το έδαφος ή με ζώνες ανεπαρκούς αποστράγγισης μπορεί να δημιουργήσει σταθερή πηγή υγρασίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η φθορά εξελίσσεται συχνά σταδιακά και δεν γίνεται άμεσα αντιληπτή, καθώς οι μεταβολές της συνοχής και της μηχανικής αντοχής προηγούνται των ορατών βλαβών. Επιπλέον, η παρουσία παλαιότερων ή ασύμβατων υλικών αποκατάστασης, όπως πυκνά τσιμεντοκονιάματα χαμηλής διαπνοής, μπορεί να παρεμποδίσει τη φυσική εξάτμιση, να εγκλωβίσει υγρασία και να μεταφέρει τη ζώνη φθοράς σε γειτονικά, πιο ευπαθή υλικά (Λαμπρόπουλος, 1993; Moropoulou et al., 1995).

Η κατανόηση της τριχοειδούς ανόδου και της μεταφοράς υγρασίας είναι απαραίτητη για τη διάγνωση της παθολογίας των μνημείων και την επιλογή κατάλληλων επεμβάσεων συντήρησης. Η χαρτογράφηση της υγρασίας, ο εντοπισμός πηγών νερού και η μελέτη της κατανομής των αλάτων συμβάλλουν στον σχεδιασμό μέτρων που περιορίζουν την εισροή νερού, βελτιώνουν την αποστράγγιση και αποτρέπουν τη συσσώρευση αλάτων στις επιφάνειες των υλικών. Με τον τρόπο αυτό, η αντιμετώπιση της υγρασίας δεν αφορά μόνο την απομάκρυνση του νερού, αλλά και τον έλεγχο των δευτερογενών διεργασιών φθοράς που ενεργοποιούνται μέσω αυτού (Charola, 2000).

1.2.2 Επίδραση της υγρασίας σε φυσικοχημικούς και βιολογικούς μηχανισμούς φθοράς

Σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες, το νερό συμμετέχει και στους μηχανισμούς πήξης-τήξης, οι οποίοι αποτελούν σημαντικό παράγοντα μηχανικής φθοράς. Όταν το νερό που βρίσκεται στους πόρους και στις μικρορωγμές παγώνει, αυξάνει τον όγκο του περίπου κατά 9%, δημιουργώντας σημαντικές εσωτερικές πιέσεις στο πορώδες δίκτυο και μπορεί να υπερβεί την αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό, προκαλώντας διεύρυνση ρωγμών, αποκόλληση κόκκων και σταδιακή αποσάθρωση της επιφάνειας (Hall & Thorn, 2014). Η επαναλαμβανόμενη δράση των κύκλων πήξης-τήξης (δράση παγετού) οδηγεί σε διεύρυνση των ρωγμών, αποκόλληση κόκκων και σταδιακή αποδιοργάνωση της μικροδομής των επιφανειών (Λαμπρόπουλος, 1993).

Η ευπάθεια ενός υλικού στους κύκλους πήξης-τήξης εξαρτάται κυρίως από τον βαθμό κορεσμού του, την κατανομή του πορώδους, τη δυνατότητα αποστράγγισης του νερού και τη μηχανική αντοχή της μάζας του. Υλικά με υψηλή υδροαπορροφητικότητα και μεγάλο ποσοστό συνδεδεμένων πόρων εμφανίζουν αυξημένη πιθανότητα φθοράς, επειδή επιτρέπουν την είσοδο και συγκράτηση μεγαλύτερης ποσότητας νερού. Αντίθετα, υλικά με περιορισμένη απορρόφηση ή καλύτερη δυνατότητα αποβολής της υγρασίας παρουσιάζουν συνήθως μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Η ύπαρξη ρωγμών ενισχύει σημαντικά το φαινόμενο, καθώς οι ασυνέχειες λειτουργούν ως θέσεις συγκέντρωσης νερού και ανάπτυξης πιέσεων κατά την πήξη. Η φθορά που προκαλείται από τους κύκλους πήξης-τήξης δεν εκδηλώνεται πάντα άμεσα, αλλά αναπτύσσεται σωρευτικά (Camuffo, 2019; Hall & Thorn, 2014).

Με την επανάληψη των κύκλων, οι μικρορωγμές διευρύνονται, η συνοχή των επιφανειακών στρωμάτων μειώνεται και το υλικό γίνεται πιο ευάλωτο σε άλλες διεργασίες, όπως η αλατοκρυστάλλωση και η θερμική καταπόνηση. Οι μορφές φθοράς που συνδέονται με το φαινόμενο περιλαμβάνουν απολέπιση, θραύση ακμών, αποκόλληση επιφανειακών στρωμάτων και γενικευμένη μηχανική αποσάθρωση. Αν και οι κύκλοι πήξης-τήξης είναι συχνότεροι σε ψυχρά ή ορεινά περιβάλλοντα, μπορούν να επηρεάσουν και μεσογειακά μνημεία σε περιοχές όπου συνδυάζονται υψηλή υγρασία, νυχτερινή

πτώση της θερμοκρασίας και εκτεθειμένες πορώδεις επιφάνειες (Camuffo, 2019; Hall & Thorn, 2014).

Ιδιαίτερα ευπαθή εμφανίζονται τα μνημεία που βρίσκονται σε παράκτιες περιοχές ή σε περιβάλλοντα με υψηλή συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων. Στις περιπτώσεις αυτές, το νερό λειτουργεί ως φορέας χλωριούχων, θεικών και νιτρικών ιόντων, τα οποία μεταφέρονται μέσω των θαλάσσιων αερολυμάτων ή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και εναποτίθενται στις επιφάνειες των μνημείων. Η επαναλαμβανόμενη διάλυση και ανακρυστάλλωση των αλάτων προκαλεί σοβαρή εσωτερική καταπόνηση των πορωδών υλικών και επιταχύνει τους μηχανισμούς αποσάθρωσης (Moropoulou et al., 1995). Παράλληλα, σε ανθρακικά πετρώματα το νερό συμμετέχει σε αντιδράσεις διάλυσης του ανθρακικού ασβεστίου, ιδιαίτερα όταν περιέχει διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα ή όξινους ατμοσφαιρικούς ρύπους, οδηγώντας σε σταδιακή χημική διάβρωση των επιφανειών (Λαμπρόπουλος, 1993).

Η παρουσία υγρασίας σχετίζεται επίσης με την ανάπτυξη βιολογικών επικαθίσεων και μικροοργανισμών στις επιφάνειες των μνημείων. Λειχήνες, φύκη, βακτήρια και άλλοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται ευκολότερα σε επιφάνειες με αυξημένη υγρασία και σκίαση, δημιουργώντας βιοϋμένια (biofilms) που μεταβάλλουν τις συνθήκες του μικροπεριβάλλοντος στην επιφάνεια των υλικών. Η βιολογική δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει τόσο μηχανική καταπόνηση όσο και χημική αλλοίωση μέσω της παραγωγής οργανικών οξέων και μεταβολικών προϊόντων που αλληλεπιδρούν με τα ορυκτά συστατικά των λίθων και των κονιαμάτων (Camuffo, 1993).

Η συνεχής παρουσία υγρασίας συμβάλλει στην ανάπτυξη φυσικοχημικών διεργασιών που οδηγούν σε σταδιακή αποδιοργάνωση της μικροδομής των υλικών. Κατά τους κύκλους ύγρυνσης και ξήρανσης μεταβάλλεται η εσωτερική κατανομή της υγρασίας στους πόρους, γεγονός που προκαλεί τοπικές μεταβολές τάσεων και προοδευτική εξασθένηση της συνοχής των επιφανειακών στρωμάτων. Παράλληλα, η εξάτμιση του νερού από τις επιφάνειες των υλικών ευνοεί την κρυστάλλωση διαλυτών αλάτων στους πόρους και στις μικρορωγμές, προκαλώντας πιέσεις κρυστάλλωσης που συχνά υπερβαίνουν τη μηχανική αντοχή των λίθων και των κονιαμάτων. Οι πιέσεις αυτές

οδηγούν σε απολέπιση, απώλεια συνοχής μεταξύ των κόκκων, αποσάθρωση και αποκόλληση επιφανειακών στρωμάτων (Charola, 2000; Θεουλάκης, 1994α).

Η κατανόηση του ρόλου του νερού στους μηχανισμούς φθοράς των μνημείων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μελέτη της παθολογίας των δομικών υλικών και τον σχεδιασμό κατάλληλων στρατηγικών προστασίας και συντήρησης. Η διερεύνηση της μετακίνησης της υγρασίας, της αλληλεπίδρασής της με τα διαλυτά άλατα και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, καθώς και της επίδρασής της στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών, συμβάλλει ουσιαστικά στην αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησης των μνημείων και στην πρόληψη μελλοντικών φαινομένων φθοράς (Charola, 2000; Moropoulou et al., 1995).

1.3 Διαλυτά άλατα

Οι μηχανισμοί αλατοδιάβρωσης συγκαταλέγονται στις σημαντικότερες αιτίες φθοράς των δομικών υλικών των μνημείων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για πορώδεις λίθους και κονιάματα. Τα διαλυτά άλατα μεταφέρονται μέσω της υγρασίας στο εσωτερικό των υλικών και συγκεντρώνονται στους πόρους και στις μικρορωγμές, όπου υπό συγκεκριμένες θερμοϋγρομετρικές συνθήκες κρυσταλλώνονται ή ανακρυσταλλώνονται. Οι διεργασίες αυτές προκαλούν εσωτερικές πιέσεις που συχνά υπερβαίνουν τη μηχανική αντοχή των υλικών, οδηγώντας σε απολέπιση, κοκκοποίηση, αποσάθρωση και απώλεια επιφανειακών στρωμάτων (Charola, 2000; Θεουλάκης, 1994α).

Το μέγεθος της φθοράς εξαρτάται τόσο από τη χημική σύσταση και τη διαλυτότητα των αλάτων, όσο και από τα χαρακτηριστικά του πορώδους δικτύου των υλικών. Ιδιαίτερα επιθετικά θεωρούνται τα χλωριούχα και θειικά άλατα, καθώς εμφανίζουν υψηλή κινητικότητα και έντονη ικανότητα κρυστάλλωσης. Οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι διάλυσης και ανακρυστάλλωσης, που σχετίζονται με μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, οδηγούν σταδιακά σε αποδιοργάνωση της μικροδομής και μείωση της συνοχής των επιφανειών (Λαμπρόπουλος, 1993; Charola, 2000). Η προέλευση των αλάτων μπορεί να σχετίζεται με

το έδαφος, τα υπόγεια νερά, τα θαλάσσια αερολύματα, την ατμοσφαιρική ρύπανση ή ακόμη και με ασύμβατα υλικά παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης (Moropoulou et al., 1995).

1.3.1 Θαλάσσια επίδραση

Η εγγύτητα των μνημείων στη θάλασσα δημιουργεί ιδιαίτερα επιβαρυνμένες συνθήκες φθοράς λόγω της συνεχούς μεταφοράς θαλάσσιων αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα. Μέσω των ανέμων και της θαλάσσιας υγρασίας μεταφέρονται μικροσταγονίδια πλούσια σε χλωριούχα άλατα, τα οποία εναποτίθενται στις επιφάνειες των δομικών υλικών. Η διαδικασία αυτή είναι εντονότερη σε παράκτιες περιοχές με υψηλή σχετική υγρασία και αυξημένη έκθεση σε θαλάσσιους ανέμους (Moropoulou et al., 1995). Τα χλωριούχα άλατα χαρακτηρίζονται από υψηλή υγροσκοπικότητα, γεγονός που ευνοεί τη συγκράτηση υγρασίας στους πόρους των υλικών και ενισχύει τους κύκλους διάλυσης και ανακρυστάλλωσης. Οι πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την κρυστάλλωση οδηγούν προοδευτικά σε μικρορηγματώσεις, απολέπιση και αποσάθρωση των επιφανειών (Charola, 2000; Λαμπρόπουλος, 1993).

Η δράση των θαλάσσιων αερολυμάτων είναι ιδιαίτερα έντονη σε πορώδη ανθρακικά πετρώματα και ιστορικά κονιάματα, όπου η αυξημένη απορροφητικότητα επιτρέπει βαθύτερη διείσδυση των αλάτων. Σε περιβάλλοντα όπου συνυπάρχουν θαλάσσια υγρασία και ατμοσφαιρικοί ρύποι, παρατηρείται συχνά σχηματισμός δευτερογενών θεικών ενώσεων και μαύρων κρουστών στις επιφάνειες των μνημείων. Οι διεργασίες αυτές επιταχύνουν τη χημική και μηχανική φθορά των υλικών, ιδιαίτερα σε αστικά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα της Μεσογείου (Comite et al., 2021; La Russa et al., 2017). Η συνεχής μεταφορά και εναπόθεση χλωριόντων αποτελεί επομένως κρίσιμο παράγοντα για τη μακροχρόνια διατήρηση των μνημείων σε παράκτιες περιοχές (Brimblecombe, 2016).

1.3.2 Νερά υπεδάφους

Σημαντική πηγή διαλυτών αλάτων αποτελούν και τα υπόγεια ή υπεδάφια νερά, ιδιαίτερα σε μνημεία με άμεση επαφή με το έδαφος ή ανεπαρκή αποστράγγιση. Μέσω της τριχοειδούς ανόδου, το νερό μεταφέρει διαλυμένα άλατα από το υπεδάφος προς τα ανώτερα τμήματα των δομικών υλικών, όπου κατά την εξάτμιση πραγματοποιείται η συγκέντρωση και κρυστάλλωσή τους στους πόρους και στις επιφάνειες. Τα άλατα που προέρχονται από το έδαφος περιλαμβάνουν κυρίως θειικά, χλωριούχα και νιτρικά άλατα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν έντονη εσωτερική καταπόνηση των υλικών. Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία διάλυσης και ανακρυστάλλωσης οδηγεί σε απολέπιση, αποσάθρωση και σταδιακή αποδιοργάνωση της μικροδομής των λίθων και των κονιαμάτων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με αυξημένες διακυμάνσεις υγρασίας (Charola, 2000).

Η ένταση της φθοράς επηρεάζεται από το πορώδες και τη διαπνοή των υλικών, αλλά και από την παρουσία ασύμβατων επεμβάσεων αποκατάστασης. Πυκνά τσιμεντοκονιάματα ή υλικά χαμηλής διαπερατότητας μπορούν να παρεμποδίσουν τη φυσική εξάτμιση της υγρασίας, οδηγώντας σε εγκλωβισμό νερού και μεταφορά της ζώνης κρυστάλλωσης βαθύτερα στο εσωτερικό των δομών, γεγονός που επιταχύνει τη φθορά των γειτονικών πορωδών υλικών (Λαμπρόπουλος, 1993; Θεουλάκης, 1994α).

1.4 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Πέρα από τους φυσικούς και μικροκλιματικούς παράγοντες που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, σημαντική συμβολή στη φθορά των μνημείων έχει και η ατμοσφαιρική ρύπανση. Η συνεχής έκθεση των δομικών υλικών σε αέριους ρύπους και αιωρούμενα σωματίδια προκαλεί μια σειρά φυσικοχημικών διεργασιών που επηρεάζουν τη χημική σύσταση, τη μικροδομή και τη μηχανική αντοχή των επιφανειών. Η ένταση των φαινομένων εξαρτάται από τη σύσταση της ατμόσφαιρας, τις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας, καθώς και από τα χαρακτηριστικά των ίδιων των υλικών (Brimblecombe, 2016).

Ιδιαίτερα επιβαρυντικοί θεωρούνται ρύποι όπως το διοξείδιο του θείου (SO_2), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το όζον (O_3) και τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} και $\text{PM}_{2.5}$. Οι ενώσεις αυτές αλληλεπιδρούν με τις επιφάνειες των μνημείων μέσω ενός λεπτού υδάτινου φιλμ που σχηματίζεται παρουσία ατμοσφαιρικής υγρασίας. Μέσα σε αυτό το περιβάλλον λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις οξείδωσης και διάλυσης, οι οποίες οδηγούν στον σχηματισμό δευτερογενών προϊόντων διάβρωσης. Στα ανθρακικά πετρώματα, όπως τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι, το SO_2 μετατρέπεται σταδιακά σε θειικά ιόντα, τα οποία αντιδρούν με το ανθρακικό ασβέστιο σχηματίζοντας γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Η ανάπτυξη αυτών των θεικών φάσεων μεταβάλλει τη μικροδομή των επιφανειακών στρωμάτων και συμβάλλει στη σταδιακή αποσάθρωση των υλικών (Fassina et al., 2002; La Russa et al., 2017).

Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι ιδιαίτερα εμφανής στα ανθρακικά δομικά υλικά μέσω του σχηματισμού μαύρων κρουστών, μιας από τις χαρακτηριστικότερες μορφές φθοράς των ιστορικών μνημείων. Οι κρούστες αυτές αποτελούνται κυρίως από γύψο, μέσα στον οποίο εγκλωβίζονται αιωρούμενα σωματίδια, βαρέα μέταλλα και προϊόντα καύσης προερχόμενα από την κυκλοφορία οχημάτων, τη βιομηχανική δραστηριότητα και τα συστήματα θέρμανσης. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν ο στοιχειακός άνθρακας (Elemental Carbon – EC) και ο οργανικός άνθρακας (Organic Carbon – OC), οι οποίοι αποτελούν βασικά συστατικά του ατμοσφαιρικού αιωρούμενου υλικού και προσδίδουν στις κρούστες το χαρακτηριστικό σκούρο χρώμα τους (Comite et al., 2021). Παράλληλα, μεταλλικά στοιχεία και καταλυτικά σωματίδια μπορούν να επιταχύνουν τις αντιδράσεις οξείδωσης του SO_2 , ενισχύοντας περαιτέρω τη διαδικασία θείωσης των ανθρακικών επιφανειών (La Russa et al., 2017).

Η σύνθεση των μαύρων κρουστών αποτελεί πολύτιμη πηγή πληροφοριών για τις πηγές ρύπανσης που δρουν σε ένα μνημείο. Μελέτες σε ιστορικά μνημεία της Αθήνας έδειξαν ότι στις κρούστες ενσωματώνονται ανθρακούχα σωματίδια από πετρελαιοκίνητα οχήματα, σωματίδια πυριτικών ορυκτών από την κυκλοφορία και τη σκόνη του περιβάλλοντος, καθώς και μεταλλικά σωματίδια που συνδέονται με καύσεις και αστικές δραστηριότητες (Mitsos et al., 2022). Η χημική και ορυκτολογική τους διερεύνηση

επιτρέπει επομένως όχι μόνο την κατανόηση των μηχανισμών φθοράς αλλά και την αναγνώριση των κυριότερων πηγών ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης.

Παρότι κατά τις τελευταίες δεκαετίες οι συγκεντρώσεις ορισμένων ρύπων, όπως το διοξείδιο του θείου, έχουν μειωθεί σημαντικά σε πολλές ευρωπαϊκές πόλεις, η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα μνημεία εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό ζήτημα. Σύγχρονες έρευνες υποδεικνύουν ότι τα οξείδια του αζώτου, το όζον και τα λεπτόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια διατηρούν ενεργό τον μηχανισμό διάβρωσης των υλικών, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα με υψηλή κυκλοφοριακή επιβάρυνση (Tzanis et al., 2011). Επιπλέον, η συνδυασμένη δράση ατμοσφαιρικών ρύπων, υγρασίας και θερμοκρασιακών μεταβολών δημιουργεί συνθήκες συνεργιστικής φθοράς, οι οποίες συχνά επιταχύνουν την υποβάθμιση των δομικών υλικών περισσότερο από ό,τι κάθε παράγοντας μεμονωμένα. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελεί πλέον αναπόσπαστο τμήμα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η εφαρμογή προγραμμάτων περιβαλλοντικής παρακολούθησης, η μέτρηση αέριων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς και η περιοδική ανάλυση των προϊόντων διάβρωσης στις επιφάνειες των μνημείων επιτρέπουν την αξιολόγηση της εξέλιξης της φθοράς και συμβάλλουν στον σχεδιασμό αποτελεσματικότερων στρατηγικών συντήρησης και διαχείρισης (Brimblecombe, 2016; Sakka et al., 2020).

Στο μεσογειακό περιβάλλον, η φθορά των μνημείων επηρεάζεται επιπλέον από τη συνδυασμένη δράση θαλάσσιων αερολυμάτων, βιομηχανικής ρύπανσης και μικροκλιματικών μεταβολών. Μελέτες στον ελλαδικό χώρο έχουν δείξει ότι η ατμοσφαιρική απόθεση θεικών ενώσεων, χλωριόντων και αιωρούμενων σωματιδίων συμβάλλει καθοριστικά στη δημιουργία κρουστών, στην ανάπτυξη αλάτων και στην επιτάχυνση των φαινομένων διάβρωσης σε μνημεία εκτεθειμένα τόσο σε αστικό όσο και σε θαλάσσιο περιβάλλον. Παράλληλα, η ταυτόχρονη δράση ατμοσφαιρικής ρύπανσης και θαλάσσιου αερολύματος ενισχύει τους μηχανισμούς επιφανειακής αποσάθρωσης και αποδιοργάνωσης της μικροδομής των λίθων (Varotsos & Theodorakopoulou, 2001).

Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο στη σημερινή κατάσταση διατήρησης πολλών μνημείων διαδραματίζουν οι προηγούμενες επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης. Σε πολλές περιπτώσεις, η χρήση ασύμβατων υλικών, όπως τσιμεντοκονιάματα, μεταλλικά

στοιχεία και συνθετικά υλικά, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη δευτερογενών μορφών φθοράς, εξαιτίας διαφορών στις φυσικομηχανικές και υδροσκοπικές ιδιότητες των υλικών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Ανάκτορο της Κνωσού, όπου οι επεμβάσεις αποκατάστασης δημιούργησαν ένα σύνθετο σύστημα παλαιών και νέων υλικών με διαφορετική συμπεριφορά ως προς την υγρασία, τη θερμική καταπόνηση και τη δράση των αλάτων. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις συντήρησης βασίζονται πλέον στις αρχές της συμβατότητας των υλικών, της ελάχιστης επέμβασης και της αξιοποίησης πολυαναλυτικών και αρχαιομετρικών μεθόδων για τη διερεύνηση των φαινομένων φθοράς και την αξιολόγηση των παλαιότερων επεμβάσεων (Moropoulou et al., 2013).

1.5 Σεισμικότητα και σεισμική καταπόνηση των μνημείων

Πέρα από τις φυσικοχημικές διεργασίες που επιδρούν σταδιακά στα δομικά υλικά, σημαντικό παράγοντα κινδύνου για τη διατήρηση των μνημείων αποτελεί και η σεισμική δραστηριότητα. Η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις πλέον σεισμογενείς περιοχές της Ευρώπης, παρουσιάζοντας το υψηλότερο επίπεδο σεισμικού κινδύνου μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών. Η έντονη σεισμική δραστηριότητα που χαρακτηρίζει τον ελλαδικό χώρο έχει επηρεάσει διαχρονικά τη διατήρηση αρχαιολογικών χώρων και ιστορικών μνημείων, καθιστώντας τη σεισμική καταπόνηση έναν από τους σημαντικότερους φυσικούς παράγοντες κινδύνου για την πολιτιστική κληρονομιά. Η ιδιαίτερη γεωτεκτονική θέση της χώρας, στο όριο σύγκλισης της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας, ευνοεί την εκδήλωση συχνών και ισχυρών σεισμικών γεγονότων, τα οποία έχουν επηρεάσει επανειλημμένα τον δομημένο και μνημειακό πλούτο του ελλαδικού χώρου (Pitilakis et al., 2024; Tsapanos, 2008).

Η απόκριση ενός μνημείου στη σεισμική δράση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η γεωμετρία της κατασκευής, η ποιότητα των υλικών, η κατάσταση διατήρησης, καθώς και η ύπαρξη προηγούμενων φθορών ή επεμβάσεων. Ιδιαίτερα ευάλωτες εμφανίζονται οι ιστορικές κατασκευές από λιθοδομή, καθώς τα υλικά που τις συγκροτούν χαρακτηρίζονται από χαμηλή εφελκυστική αντοχή και περιορισμένη ικανότητα παραμόρφωσης πριν από τη θραύση. Παράλληλα, η συμπεριφορά τους

επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη συνοχή των κονιαμάτων και τον βαθμό σύνδεσης των επιμέρους δομικών στοιχείων, στοιχεία που συχνά έχουν ήδη υποβαθμιστεί λόγω γήρανσης ή προηγούμενων μηχανισμών φθοράς (Lourenço & Karanikoloudis, 2018).

Οι βλάβες που προκαλούνται από σεισμικά γεγονότα εκδηλώνονται συνήθως με τη μορφή ρηγματώσεων, αποκολλήσεων, μετατοπίσεων δομικών μελών και τοπικών καταρρεύσεων. Ωστόσο, η επίδραση της σεισμικής δράσης δεν περιορίζεται μόνο στις άμεσες συνέπειες ενός μεμονωμένου γεγονότος. Στην περίπτωση των ιστορικών μνημείων, οι σεισμοί συχνά δρουν αθροιστικά, καθώς η επαναλαμβανόμενη καταπόνηση από διαδοχικά σεισμικά γεγονότα οδηγεί στη σταδιακή διεύρυνση υφιστάμενων ρωγμών, στη μείωση της συνοχής των υλικών και στην αποδυνάμωση των συνδέσεων μεταξύ των δομικών στοιχείων. Η σωρευτική αυτή επίδραση μπορεί να μην είναι άμεσα ορατή, επηρεάζει όμως σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά και τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα των κατασκευών (Lourenço & Karanikoloudis, 2018).

Παράλληλα, οι ρωγμές και οι ασυνέχειες που δημιουργούνται από τη σεισμική δράση διευκολύνουν τη διείσδυση νερού, ατμοσφαιρικών ρύπων και διαλυτών αλάτων στο εσωτερικό των υλικών. Με τον τρόπο αυτό, η σεισμική καταπόνηση συνδέεται έμμεσα με άλλους μηχανισμούς φθοράς, όπως η αλατοκρυστάλλωση, οι κύκλοι πήξης-τήξης και η χημική διάβρωση, επιταχύνοντας την εξέλιξη προϋπαρχουσών βλαβών. Η αλληλεπίδραση αυτή καθιστά τη σεισμικότητα όχι μόνο παράγοντα άμεσης καταστροφής αλλά και παράγοντα που μπορεί να ενισχύσει τη μακροχρόνια υποβάθμιση των μνημείων. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της σεισμικής τρωτότητας αποτελεί σήμερα βασικό στοιχείο της προστασίας και διαχείρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς των ιστορικών κατασκευών συμβάλλει τόσο στην ερμηνεία των υφιστάμενων φθορών όσο και στον σχεδιασμό κατάλληλων επεμβάσεων συντήρησης και ενίσχυσης, με στόχο τη διατήρηση της αυθεντικότητας και της δομικής ακεραιότητας των μνημείων (Lourenço & Karanikoloudis, 2018).

1.6 Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στα μνημεία

Η κατάσταση διατήρησης των μνημείων συνδέεται άμεσα με το περιβάλλον στο οποίο αυτά βρίσκονται και με της μεταβολές που αυτό υφίσταται διαχρονικά. Στο πλαίσιο αυτό, η κλιματική αλλαγή αναγνωρίζεται πλέον ως της από της σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την πολιτιστική κληρονομιά, καθώς τροποποιεί της συνθήκες έκθεσης των μνημείων και ενισχύει την εκδήλωση φυσικών και φυσικοχημικών μηχανισμών φθοράς. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, οι μεταβολές στα πρότυπα βροχόπτωσης, η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας αποτελούν εξελίξεις που μπορούν να επιταχύνουν την υποβάθμιση ιστορικών κατασκευών και αρχαιολογικών χώρων. Οι επιπτώσεις αυτές αναμένεται να είναι ιδιαίτερα έντονες στη Μεσόγειο, η οποία συγκαταλέγεται της περιοχές που θεωρούνται περισσότερο ευάλωτες της συνέπειες της κλιματικής αλλαγής (Kapsomenakis et al., 2023).

Μεταξύ των σημαντικότερων απειλών για τα παράκτια μνημεία συγκαταλέγεται η άνοδος της στάθμης της θάλασσας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει κατάκλυση χαμηλών παράκτιων ζωνών, υποχώρηση και διάβρωση των ακτών (coastal erosion), καθώς και σταδιακή απώλεια του εδάφους που περιβάλλει αρχαιολογικούς χώρους και ιστορικές κατασκευές. Παράλληλα, η διείσδυση θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς και στα δομικά υλικά αυξάνει τη συγκέντρωση διαλυτών αλάτων, ενισχύοντας της μηχανισμούς αλατοκρυστάλλωσης που ευθύνονται για τη φθορά πορωδών λίθων, κονιαμάτων και άλλων δομικών υλικών. Επιπλέον, η αυξημένη μεταφορά θαλάσσιων αερολυμάτων και η εντονότερη δράση των κυματισμών συμβάλλουν στην επιτάχυνση των διεργασιών διάβρωσης και αποσάθρωσης των επιφανειών (UNESCO, 2023; Kapsomenakis et al., 2023).

Εξίσου σημαντικές είναι οι επιπτώσεις που σχετίζονται με την αύξηση της συχνότητας και της έντασης ακραίων υδρομετεωρολογικών φαινομένων. Οι ισχυρές καταιγίδες, οι έντονες βροχοπτώσεις και τα πλημμυρικά επεισόδια αυξάνουν τη διάρκεια και την ένταση της διαβροχής των μνημείων, διευκολύνοντας τη διείσδυση νερού στο εσωτερικό των υλικών. Η διαδικασία αυτή επιταχύνει τη μεταφορά αλάτων και ρύπων, ενισχύει της φυσικοχημικές διεργασίες φθοράς και μπορεί να προκαλέσει έκπλυση

κονιαμάτων, αποσταθεροποίηση επιφανειακών στρωμάτων και διάβρωση του περιβάλλοντος εδάφους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αυξημένη επιφανειακή απορροή και τα πλημμυρικά φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν ακόμη και τη στατική επάρκεια των κατασκευών μέσω της υποσκαφής θεμελιώσεων και της αποσταθεροποίησης πρανών (Nastou & Zerefos., 2024; Kapsomenakis et al., 2023).

Οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής δεν λειτουργούν μεμονωμένα, αλλά αλληλεπιδρούν με προϋπάρχοντες μηχανισμούς φθοράς, της η θερμική καταπόνηση, η υγρασία, η αλατοδιάβρωση και η βιολογική ανάπτυξη. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται συνθήκες που μπορούν να επιταχύνουν τη γήρανση των υλικών και να αυξήσουν την τρωτότητα των μνημείων απέναντι σε φυσικούς και ανθρωπογενείς κινδύνους. Για τον λόγο αυτό, η κλιματική αλλαγή αποτελεί πλέον κρίσιμο παράγοντα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό στρατηγικών παρακολούθησης, συντήρησης και διαχείρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς (UNESCO, 2023; Nastou & Zerefos., 2024).

2. Ανασκόπηση μελετών φθοράς στον ελλαδικό χώρο

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικές μελέτες που αφορούν τη φθορά μνημείων στον ελλαδικό χώρο και τη συμβολή των αρχαιομετρικών μεθόδων στη διερεύνησή της. Η εξέταση αντίστοιχων περιπτώσεων παρέχει χρήσιμα στοιχεία για την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διατήρηση των ιστορικών υλικών και αναδεικνύει τις διαφορετικές μορφές υποβάθμισης που παρατηρούνται σε μνημεία με ιδιαίτερα περιβαλλοντικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Σημαντικοί αρχαιολογικοί χώροι και μνημεία, όπως η Ακρόπολη των Αθηνών, η Δήλος και η Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου, έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης επιστημονικής έρευνας, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για τη διερεύνηση των φαινομένων φθοράς και την ανάπτυξη κατάλληλων πρακτικών συντήρησης.

2.1 Ακρόπολη Αθηνών

Η μελέτη της φθοράς των μνημείων στον ελλαδικό χώρο συνδέεται άμεσα με την έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στα μνημεία της Ακρόπολης των Αθηνών. Η ιδιαίτερη ιστορική, αρχιτεκτονική και συμβολική σημασία του μνημειακού συνόλου, σε συνδυασμό με τη θέση του στο κέντρο της έντονα αστικοποιημένου περιβάλλοντος, οδήγησαν στην ανάπτυξη εκτεταμένων διεπιστημονικών ερευνητικών προγραμμάτων με αντικείμενο τη διερεύνηση των μηχανισμών φθοράς και τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων στρατηγικών συντήρησης και προστασίας των μνημείων (Varotsos, Tzanis, & Cracknell, 2009).

Κεντρικό αντικείμενο των σχετικών ερευνών αποτέλεσε το πεντελικό μάρμαρο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως κύριο δομικό υλικό στα κλασικά μνημεία της Ακρόπολης. Η μακροχρόνια έκθεσή του στους ατμοσφαιρικούς ρύπους της Αθήνας, ιδιαίτερα κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα, συνέβαλε στην ανάπτυξη εκτεταμένων φαινομένων χημικής διάβρωσης. Η παρουσία διοξειδίου του θείου (SO_2), σε συνδυασμό με την υγρασία και τους οξειδωτικούς παράγοντες της ατμόσφαιρας, οδήγησε στη σταδιακή μετατροπή του ανθρακικού ασβεστίου σε θειικό ασβέστιο (γύψο), προκαλώντας μεταβολές στη μικροδομή των επιφανειακών στρωμάτων του μαρμάρου και σχηματισμό

προϊόντων θείωσης που αποτελούν χαρακτηριστική μορφή φθοράς των μνημείων της Ακρόπολης (Moropoulou, Bisbikou, & Torfs, 1998).

Ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης είναι ο σχηματισμός μαύρων κρουστών στις προστατευμένες επιφάνειες των μνημείων (εικόνα 1). Οι κρούστες αυτές αποτελούνται κυρίως από γύψο, μέσα στον οποίο παγιδεύονται αιωρούμενα σωματίδια, ανθρακούχες ενώσεις και κατάλοιπα καύσεων που προέρχονται από την κυκλοφορία οχημάτων και τις αστικές δραστηριότητες. Η ανάπτυξη της συνδέεται όχι μόνο με αισθητική αλλοίωση των επιφανειών αλλά και με φαινόμενα απολέπισης και απώλειας υλικού, καθώς η διαφοροποίηση των φυσικών ιδιοτήτων μεταξύ της κρούστας και του υποκείμενου μαρμάρου δημιουργεί συνθήκες μηχανικής αστάθειας (Maravelaki-Kalaitzaki, 2005).



Εικόνα 1 Φθορές λόγω ατμοσφαιρικής ρύπανσης (www.visma.gr).

Πέρα από της περιβαλλοντικούς παράγοντες, σημαντικό μέρος των προβλημάτων διατήρησης των μνημείων συνδέεται και με παλαιότερες επεμβάσεις αναστήλωσης. Οι εργασίες του Νικολάου Μπαλάνου κατά της πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, αν και υπήρξαν καθοριστικές για τη διάσωση των μνημείων, βασίστηκαν στη χρήση σιδερένιων συνδέσμων, μεταλλικών στοιχείων αγκύρωσης και τσιμεντοκονιαμάτων, υλικά που αποδείχθηκαν ασύμβατα με το πεντελικό μάρμαρο. Η οξείδωση των μεταλλικών στοιχείων προκάλεσε διόγκωση του όγκου, ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και εκτεταμένες ρηγματώσεις, θραύσεις και μετατοπίσεις μαρμάρινων μελών (εικόνα 2). Παράλληλα, τα τσιμεντοκονιάματα, λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής, της χαμηλότερης διαπερατότητας και της διαφορετικής φυσικοχημικής συμπεριφοράς της σε

σχέση με το μάρμαρο, παρεμπόδιζαν την ομαλή διακίνηση της υγρασίας και ευνοούσαν τη συγκέντρωση αλάτων και την ανάπτυξη τοπικών τάσεων της επιφάνειας επαφής. Η ασυμβατότητα αυτή συνέβαλε στην επιτάχυνση φαινομένων ρηγμάτωσης και αποσάθρωσης σε ορισμένα σημεία των μνημείων. Η διαπίστωση των προβλημάτων αυτών οδήγησε στον επανασχεδιασμό των επεμβάσεων αποκατάστασης από την Επιτροπή Συντήρησης Μνημείων Ακροπόλεως (ΕΣΜΑ), με την απομάκρυνση των διαβρωμένων μεταλλικών στοιχείων και την αντικατάστασή της από συνδέσμους τιτανίου και συμβατά υλικά στερέωσης (Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης [ΥΣΜΑ], 2024).



Εικόνα 2 Θραύση αρχιτεκτονικού μέλους λόγω οξείδωσης μεταλλικών συνδέσμων (www.ysma.gr).

Η κατανόηση των παραπάνω μορφών φθοράς κατέστη δυνατή μέσω της εφαρμογής σύγχρονων αρχαιομετρικών και αναλυτικών τεχνικών. Μέθοδοι όπως η φασματοσκοπία υπερύθρου (FTIR), η περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD) και η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων X (SEM-EDS) επέτρεψαν τον χαρακτηρισμό των προϊόντων διάβρωσης και τη μελέτη των μεταβολών που προκαλεί η ατμοσφαιρική ρύπανση στα μάρμαρα της Ακρόπολης. Χαρακτηριστική είναι η εργασία των Anastassopoulou et al. (1997), η οποία τεκμηρίωσε την παρουσία θεικών ενώσεων και ατμοσφαιρικών επικαθίσεων της επιφάνειας των μαρμάρων.

Παράλληλα, η περιοχή της Ακρόπολης αποτέλεσε πεδίο εφαρμογής προγραμμάτων περιβαλλοντικής παρακολούθησης, της το MULTI-ASSESS και το ICPMaterials. Μέσω της συστηματικής καταγραφής ατμοσφαιρικών ρύπων και

κλιματικών παραμέτρων κατέστη δυνατή η αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ περιβάλλοντος και ρυθμών φθοράς των υλικών. Τα αποτελέσματα των προγραμμάτων αυτών έδειξαν ότι ρύποι όπως το νιτρικό οξύ, τα οξειδία του αζώτου, το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια επιταχύνουν σημαντικά τη διάβρωση των λίθινων επιφανειών σε σχέση με τη φυσική αποσάθρωση (Varotsos et al., 2009).

Η συσσωρευμένη γνώση που προέκυψε από τις μελέτες αυτές αξιοποιήθηκε άμεσα στον σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης της Υπηρεσίας Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης (ΥΣΜΑ). Παράλληλα, η Ακρόπολη αποτέλεσε πρότυπο εφαρμογής διεπιστημονικής έρευνας στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη διαμόρφωση σύγχρονων μεθοδολογιών παρακολούθησης, διάγνωσης και αξιολόγησης της φθοράς ιστορικών υλικών. Για τον λόγο αυτό, εξακολουθεί να αποτελεί μία από της σημαντικότερες και πληρέστερα τεκμηριωμένες περιπτώσεις μελέτης της αλληλεπίδρασης μεταξύ ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος και πολιτιστικής κληρονομιάς.

2.2 Αρχαιολογικός χώρος Δήλου

Σε αντίθεση με την Ακρόπολη των Αθηνών, όπου η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα μαρμάρινα μνημεία, η Δήλος προσφέρει ένα διαφορετικό ερευνητικό πεδίο, στο οποίο κυριαρχεί η επίδραση του θαλάσσιου περιβάλλοντος στα δομικά υλικά. Η θέση του νησιού στο κεντρικό Αιγαίο, η απουσία φυσικής προστασίας από τους ισχυρούς ανέμους και η συνεχής έκθεση των μνημείων σε θαλάσσια αερολύματα καθώς και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας δημιουργούν συνθήκες έντονης περιβαλλοντικής καταπόνησης (Sylaiou et al., 2025). Για τον λόγο αυτό, ο αρχαιολογικός χώρος έχει αποτελέσει αντικείμενο πολυάριθμων γεωλογικών και αρχαιομετρικών ερευνών, οι οποίες επικεντρώνονται στη μελέτη των δομικών υλικών, στην αναγνώριση των προϊόντων φθοράς και στη διερεύνηση των μηχανισμών αποσάθρωσης που αναπτύσσονται σε παράκτια μνημεία της Μεσογείου (Prokos, 2005).

Η έρευνα στη Δήλο επικεντρώθηκε αρχικά στον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αρχαιότητα. Μέσω γεωλογικών, πετρογραφικών και ορυκτολογικών αναλύσεων τεκμηριώθηκε η χρήση τοπικών μαρμάρων, γρανιτοειδών πετρωμάτων και πωρόλιθων, τα οποία προέρχονταν από οργανωμένα λατομεία του νησιού. Η αναγνώριση των πετρωμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πετρογραφικών λεπτών τομών, αναλύσεων αδιάλυτου υπολείμματος και περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD), επιτρέποντας τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής της σύστασης και τη συσχέτισή της με τη συμπεριφορά της απέναντι της μηχανισμούς φθοράς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μικροδομή, η κατανομή του πορώδους και η ορυκτολογική σύσταση των λίθων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την ανθεκτικότητά της στο θαλάσσιο περιβάλλον (Vettor et al., 2022).

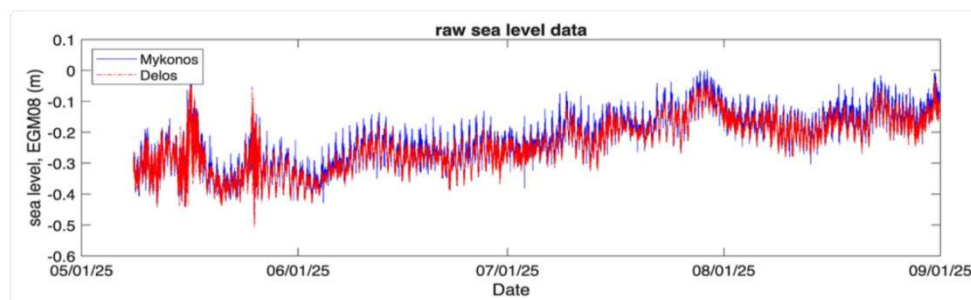
Σημαντικό μέρος των ερευνών αφιερώθηκε στη μελέτη των προϊόντων φθοράς και ιδιαίτερα των αλάτων που αναπτύσσονται στις επιφάνειες και στο εσωτερικό των λίθων. Η συνεχής μεταφορά χλωριούχων και θεικών ενώσεων μέσω των θαλάσσιων αερολυμάτων οδηγεί στη διεύθυνσή τους στο πορώδες δίκτυο των υλικών. Η επαναλαμβανόμενη εναλλαγή συνθηκών ύγρανσης και ξήρανσης προκαλεί κύκλους διάλυσης και ανακρυστάλλωσης, οι οποίοι δημιουργούν πιέσεις κρυστάλλωσης στο εσωτερικό των πόρων. Η διεργασία αυτή συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη μικρορηγματώσεων, την αποδιοργάνωση της μικροδομής και την προοδευτική αποσάθρωση των επιφανειακών στρωμάτων (Chabas & Jeannette, 2001).

Η διερεύνηση των μηχανισμών αυτών βασίστηκε σε συνδυασμό αρχαιομετρικών τεχνικών και μικροσκοπικών παρατηρήσεων. Οι αναλύσεις κατέδειξαν ότι τα μάρμαρα της Δήλου εμφανίζουν έντονα φαινόμενα κοκκοποίησης (granulardisintegration), κατά τα οποία αποδυναμώνονται οι δεσμοί μεταξύ των κρυστάλλων ασβεστίτη, οδηγώντας σε σταδιακή απώλεια υλικού από την επιφάνεια των λίθων. Αντίστοιχα, στους πορώδεις λίθους παρατηρήθηκαν απολεπίσεις, αποκολλήσεις επιφανειακών στρωμάτων και τοπικές συγκεντρώσεις αλάτων, φαινόμενα που σχετίζονται άμεσα με τη μεταφορά υγρασίας και τις πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την κρυστάλλωση των αλάτων (Chabas & Jeannette, 2001).

Παράλληλα, η συστηματική παρακολούθηση των μικροκλιματικών συνθηκών του αρχαιολογικού χώρου επέτρεψε τη συσχέτιση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τις πραγματικές συνθήκες έκθεσης των μνημείων. Μετρήσεις σχετικής υγρασίας, θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής απόθεσης αλάτων έδειξαν ότι η ένταση των φαινομένων φθοράς εξαρτάται όχι μόνο από τη συγκέντρωση των αλάτων αλλά και από τη συχνότητα των κύκλων ύγρανσης – ξήρανσης και την ένταση της ανεμογενούς μεταφοράς θαλάσσιων αερολυμάτων (Prokos, 2005).

Πέρα από τους μηχανισμούς φθοράς που σχετίζονται με το θαλάσσιο περιβάλλον και την αλατοδιάβρωση, η Δήλος καλείται σήμερα να αντιμετωπίσει και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, οι οποίες αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τη μελλοντική διατήρηση του αρχαιολογικού χώρου. Η γεωμορφολογία του νησιού, σε συνδυασμό με το χαμηλό υψόμετρο μεγάλου μέρους της αρχαίας πόλης και την άμεση γειτνίαση των μνημείων με τη θάλασσα, καθιστούν τη Δήλο ιδιαίτερα ευάλωτη στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας, στην παράκτια διάβρωση και στην αυξανόμενη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων (Mourtzas & Kolaiti, 2024).

Η σημασία των κινδύνων αυτών έχει αναδειχθεί μέσα από το ερευνητικό πρόγραμμα **DELOS** της Ακαδημίας Αθηνών, το οποίο επικεντρώνεται στην τεκμηρίωση, παρακολούθηση και αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στον αρχαιολογικό χώρο. Στο πλαίσιο του προγράμματος εφαρμόζονται σύγχρονες μέθοδοι γεωχωρικής τεκμηρίωσης, τρισδιάστατης αποτύπωσης, περιβαλλοντικής παρακολούθησης και ανάλυσης κινδύνου, με στόχο την καταγραφή των μεταβολών που υφίστανται τα μνημεία και την ανάπτυξη στρατηγικών προστασίας και προσαρμογής της μελλοντικής κλιματικής συνθήκης (Academy of Athens, 2024).



Εικόνα 3 Μεταβολές της στάθμης της θάλασσας στη Δήλο και τη Μύκονο (www.Delos.academyofathens.gr/).

Πρόσφατες γεωαρχαιολογικές και γεωμορφολογικές έρευνες έδειξαν ότι η παράκτια ζώνη της αρχαίας πόλης έχει ήδη επηρεαστεί από τη σχετική άνοδο της στάθμης της θάλασσας, με αποτέλεσμα την υποχώρηση της ακτογραμμής, την κατάκλυση χαμηλών τμημάτων του αρχαιολογικού χώρου και την επιτάχυνση των φαινομένων διάβρωσης των παράκτιων κατασκευών. Σύμφωνα με τα σενάρια που βασίζονται σε προβολές της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), η σχετική στάθμη της θάλασσας στην περιοχή της Δήλου ενδέχεται να αυξηθεί κατά 0,87 έως 1,48 m έως το έτος 2150, γεγονός που αναμένεται να οδηγήσει σε περαιτέρω απώλεια παράκτιων εκτάσεων και σε αυξημένη έκθεση των μνημείων στη δράση των θαλάσσιων αερολυμάτων και των διαλυτών αλάτων (Mourtzas, 2024).

Οι εξελίξεις αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για τη διατήρηση των αρχαιοτήτων της Δήλου, καθώς η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και η εντατικοποίηση των ακραίων καιρικών φαινομένων λειτουργούν συμπληρωματικά στους ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς αλατοδιάβρωσης και αποσάθρωσης που έχουν καταγραφεί στον αρχαιολογικό χώρο. Ως εκ τούτου, η κλιματική αλλαγή δεν αποτελεί πλέον έναν μελλοντικό κίνδυνο, αλλά έναν παράγοντα που επηρεάζει ήδη τη διατήρηση του μνημειακού συνόλου και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό των στρατηγικών προστασίας και διαχείρισής του (Academy of Athens, 2024· Mourtzas, 2024).

2.3 Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου

Μετά τις περιπτώσεις της Ακρόπολης των Αθηνών και της Δήλου, η Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου προσφέρει ένα διαφορετικό αλλά εξίσου σημαντικό παράδειγμα μελέτης της φθοράς ιστορικών δομικών υλικών στον ελλαδικό χώρο. Σε αντίθεση με την Ακρόπολη, όπου κυριαρχεί η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Moropoulou, Bisbikou, & Torfs, 1998), και τη Δήλο, όπου οι μηχανισμοί αλατοδιάβρωσης συνδέονται κυρίως με την έκθεση σε θαλάσσια αερολύματα (Vettor et al., 2022), στη Ρόδο η φθορά διαμορφώνεται από τη συνδυασμένη δράση της υγρασίας, των διαλυτών αλάτων και των βιολογικών επικαθίσεων (εικόνα 3). Η διαχρονική κατοίκηση της πόλης, η πολυφασική οικοδομική της ιστορία και η άμεση γειννίαση με το θαλάσσιο περιβάλλον έχουν

δημιουργήσει ένα σύνθετο μνημειακό σύνολο, στο οποίο οι μηχανισμοί αποσάθρωσης αλληλεπιδρούν με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δομικών υλικών και των κατασκευών (Zarifis et al., 1989).



Εικόνα 4 Φαινόμενα φθοράς λίθου λόγω μηχανισμού αλατονέφωσης (Stefanis, et.al, 2009).

Η διερεύνηση των φαινομένων φθοράς στη Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου αποτέλεσε αντικείμενο εκτεταμένων αρχαιομετρικών και περιβαλλοντικών ερευνών ήδη από τη δεκαετία του 1990. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η μελέτη του τοπικού βιοκλαστικού ασβεστόλιθου (biocalcarene), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ευρέως της οχυρώσεις και στα κτήρια της πόλης. Οι πετρογραφικές αναλύσεις έδειξαν ότι πρόκειται για υλικό με υψηλό πορώδες, έντονη ετερογένεια και αυξημένη ικανότητα απορρόφησης υγρασίας, χαρακτηριστικά που ευνοούν τη μεταφορά και συσσώρευση διαλυτών αλάτων στο εσωτερικό του. Η μικροδομή του πετρώματος, σε συνδυασμό με τη χαμηλή μηχανική αντοχή των συγκολλητικών φάσεων, καθιστά τον λίθο ιδιαίτερα ευάλωτο σε φαινόμενα αλατοκρυστάλλωσης και κοκκώδους αποσάθρωσης (Stefanis, Theoulakis, & Pilinis, 2009).

Η κατανόηση των μηχανισμών αυτών βασίστηκε στην εφαρμογή συνδυασμού αρχαιομετρικών τεχνικών, όπως η πετρογραφική μικροσκοπία λεπτών τομών, η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων X (SEM-EDS), οι χημικές αναλύσεις χλωριόντων και η συστηματική περιβαλλοντική παρακολούθηση. Μέσω των

αναλύσεων SEM–EDS αναγνωρίστηκαν κρύσταλλοι αλογονίτη (NaCl), θεικών αλάτων και προϊόντα αλληλεπίδρασης μεταξύ θαλάσσιων αερολυμάτων και ανθρακικών δομικών υλικών. Παράλληλα, η ανάλυση της χημικής σύστασης των επικαθίσεων κατέδειξε ότι σημαντικό ποσοστό των αποτιθέμενων σωματιδίων προέρχεται από το θαλάσσιο περιβάλλον, επιβεβαιώνοντας τον καθοριστικό ρόλο των αερομεταφερόμενων αλάτων στη διαμόρφωση των φαινομένων φθοράς (Stefanis et al., 2009).

Σημαντικά συμπεράσματα προέκυψαν από τη συσχέτιση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τις μικροκλιματικές συνθήκες του μνημειακού συνόλου. Οι μετρήσεις σχετικής υγρασίας έδειξαν ότι οι τιμές της ατμόσφαιρας της πόλης κυμαίνονται συχνά κοντά στο σημείο ισορροπίας του αλογονίτη, ευνοώντας διαδοχικούς κύκλους διάλυσης και ανακρυστάλλωσης. Οι κύκλοι αυτοί προκαλούν την ανάπτυξη πιέσεων κρυστάλλωσης στο εσωτερικό του πορώδους δικτύου, οδηγώντας σε κοκκώδη αποσάθρωση, απολέπιση και προοδευτική απώλεια υλικού. Η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης χλωριόντων και απώλειας μάζας δοκιμίων επιβεβαίωσε ότι η αλατοκρυστάλλωση αποτελεί τον κυριότερο μηχανισμό υποβάθμισης των λίθινων κατασκευών της Μεσαιωνικής Πόλης (Moropoulou & Theoulakis, 1991; Stefanis et al., 2009).

Πέρα από την αλατοδιάβρωση, η αυξημένη υγρασία ευνοεί την ανάπτυξη βιολογικών επικαθίσεων στις επιφάνειες των μνημείων. Βιοϋμένια (biofilms), φύκη, λειχήνες και μικροοργανισμοί εγκαθίστανται σε περιοχές με παρατεταμένη διαβροχή, μεταβάλλοντας τις συνθήκες του μικροπεριβάλλοντος και επηρεάζοντας τη συμπεριφορά των υλικών. Σύμφωνα με τη σύγχρονη έρευνα, η βιολογική δραστηριότητα μπορεί να συμβάλει τόσο σε μηχανικές όσο και σε χημικές διεργασίες φθοράς, μέσω της συγκράτησης υγρασίας, της παραγωγής οργανικών οξέων και της αλληλεπίδρασης με τα ορυκτολογικά συστατικά των λίθων. Παράλληλα, οι βιολογικές επικαθίσεις λειτουργούν συχνά ως επιφάνειες συγκέντρωσης αλάτων και ατμοσφαιρικών ρύπων, ενισχύοντας έμμεσα τους μηχανισμούς αποσάθρωσης (Pinna, 2014).

Η επιστημονική τεκμηρίωση των παραπάνω φαινομένων αποτέλεσε τη βάση για τις εκτεταμένες επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης που πραγματοποιήθηκαν στη Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου της τελευταίες δεκαετίες. Οι επεμβάσεις συνοδεύτηκαν από αναλύσεις ιστορικών κονιαμάτων με χρήση περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD),

θερμικών αναλύσεων (TG-DTA), πετρογραφικής μικροσκοπίας και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, με στόχο τον προσδιορισμό της σύστασης και των τεχνολογικών χαρακτηριστικών της. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στην επιλογή συμβατών υλικών αποκατάστασης και στην αντικατάσταση ασύμβατων τσιμεντοκονιαμάτων από παραδοσιακά ασβεστοκονιάματα και κονιάματα κουρασανίου, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της συμπεριφοράς των κατασκευών απέναντι στην υγρασία και στα διαλυτά άλατα (Moropoulou et al., 2000; Zarifis et al., 1989).

Η περίπτωση της Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου αναδεικνύει τη σημασία της συνδυασμένης εφαρμογής αρχαιομετρικών, περιβαλλοντικών και τεχνολογικών προσεγγίσεων στη μελέτη της φθοράς ιστορικών δομικών υλικών. Μέσα από τη συστηματική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ μικροδομής, πορώδους, υγρασίας, αλάτων και βιολογικών παραγόντων κατέστη δυνατή η κατανόηση των κυριότερων μηχανισμών αποσάθρωσης και η ανάπτυξη τεκμηριωμένων στρατηγικών προστασίας για ένα από τα σημαντικότερα μνημειακά σύνολα της Μεσογείου.

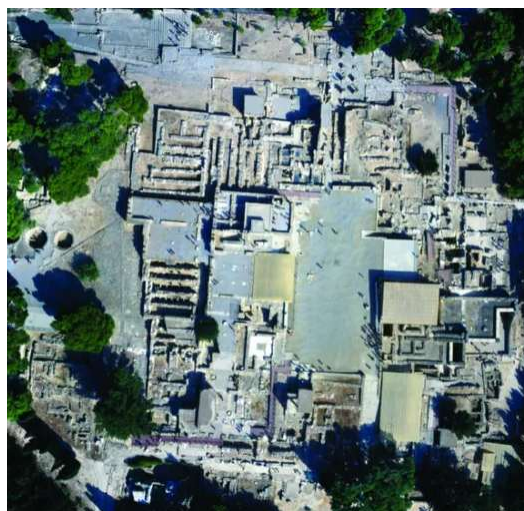
3. Η περίπτωση του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού

Το Ανάκτορο της Κνωσού κατέχει εξέχουσα θέση στην αρχαιολογία του Αιγαίου, καθώς συνδέεται με την ανάπτυξη και την ακμή του μινωικού πολιτισμού. Η πολύπλοκη αρχιτεκτονική του, οι διαδοχικές φάσεις κατασκευής και ανακατασκευής, καθώς και η μακρά ιστορία του, αποτυπώνουν την εξέλιξη μιας από της σημαντικότερες προϊστορικές κοινωνίες της ανατολικής Μεσογείου. Παράλληλα, οι ανασκαφικές έρευνες και οι επεμβάσεις που ακολούθησαν κατά τον 20^ο αιώνα διαμόρφωσαν τη σημερινή εικόνα του μνημείου, προσδίδοντάς του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Για τον λόγο αυτό, η Κνωσός αποτελεί ένα σύνθετο πεδίο μελέτης, στο οποίο συνυπάρχουν στοιχεία διαφορετικών ιστορικών περιόδων, κατασκευαστικών πρακτικών και υλικών. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά το ιστορικό και αρχαιολογικό πλαίσιο του μνημείου, οι κύριες οικοδομικές φάσεις και τα αρχιτεκτονικά του χαρακτηριστικά, τα βασικά δομικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του, οι σημαντικότερες επεμβάσεις συντήρησης, αποκατάστασης και ανάδειξης που επηρέασαν τη σημερινή του μορφή, καθώς και τα αποτελέσματα αρχαιομετρικών ερευνών που συνέβαλαν στην κατανόηση της σύστασης, της τεχνολογίας κατασκευής και της κατάστασης διατήρησης των υλικών του.

3.1 Ιστορική εξέλιξη και οικοδομικές φάσεις του Ανακτόρου της Κνωσού

Η Κνωσός συγκαταλέγεται στις αρχαιότερες θέσεις συνεχούς κατοίκησης στον αιγαιακό χώρο και θεωρείται η πρωιμότερη μέχρι σήμερα γνωστή εγκατάσταση στην Κρήτη. Ο Νεολιθικός οικισμός ιδρύθηκε ήδη από την 7^η χιλιετία π.Χ. στον λόφο της Κεφάλας, όπου αναπτύχθηκε σταδιακά εκτεταμένος οικιστικός πυρήνας με συνεχείς φάσεις κατοίκησης. Η μακροχρόνια αυτή εγκατάσταση οδήγησε στη δημιουργία εκτεταμένων επιχώσεων από επάλληλα στρώματα κατοίκησης, πάχους έως και δέκα μέτρων. Κατά την Προανακτορική περίοδο (3100-1900 π.Χ.) ο οικισμός επεκτάθηκε σημαντικά γύρω από τον λόφο, ενώ ήδη από τη φάση αυτή διαμορφώνονται οργανωμένα οικοδομικά σύνολα και σημαντικά τεχνικά έργα (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008).

Το Ανάκτορο της Κνωσού είναι το μεγαλύτερο από τα κέντρα της μινωικής εξουσίας και το σημαντικότερο ανακτορικό συγκρότημα της προϊστορικής Κρήτης (Evans, 1921; Hood, 2005). Πρόκειται για ένα κτιριακό σύνολο που αναπτύσσεται σε έκταση περίπου 22.000 τ.μ. και οργανώνεται γύρω από μία μεγάλη κεντρική αυλή με σύνθετη αρχιτεκτονική διάταξη. Χτισμένο σε μεγάλο βαθμό πάνω σε τεχνητά διαμορφωμένο λόφο, αποτέλεσε το διοικητικό, οικονομικό και θρησκευτικό κέντρο της μινωικής Κνωσού, η οποία βρίσκεται περίπου 5 χλμ. νοτιοανατολικά του σημερινού Ηρακλείου (Preziosi & Hitchcock, 1999). Το πρώτο ανακτορικό συγκρότημα ιδρύθηκε περίπου το 1900 π.Χ., σηματοδοτώντας την απαρχή της Παλαιοανακτορικής περιόδου. Σύμφωνα με τη μεταγενέστερη μυθολογική παράδοση, το ανάκτορο αποτέλεσε την έδρα του βασιλιά Μίνωα και συνδέθηκε με τον μύθο του Λαβυρίνθου και του Μινώταυρου (Castleden, 2012). Η πρώτη ανακτορική εγκατάσταση υπέστη διαδοχικές καταστροφές και τελικά κατέρρευσε γύρω στο 1700 π.Χ. πιθανότατα εξαιτίας σεισμικών φαινομένων (Driessen & Macdonald, 1997). Στην ίδια θέση ανοικοδομήθηκε αμέσως μετά το νεότερο ανακτορικό συγκρότημα, το οποίο αντιπροσωπεύει τη φάση μέγιστης ακμής της Κνωσού κατά τη Νεοανακτορική περίοδο. Το συγκρότημα αναπτύχθηκε σε μεγάλη έκταση με ιδιαίτερα πολυεπίπεδη οργάνωση χώρων, πολυώροφες κατασκευές, εκτεταμένους αποθηκευτικούς χώρους, εργαστήρια, ιερά και πολυτελείς κατοικίες (Evans, 1930) Η πόλη επεκτάθηκε περιμετρικά του ανακτόρου και συνοδεύτηκε από οργανωμένα νεκροταφεία και μνημειακά ταφικά σύνολα (Hood, 2005). Παρά τις επιμέρους καταστροφές που προκάλεσαν σεισμοί κατά τον 16^ο και 15^ο αιώνα π.Χ., το ανάκτορο διατηρήθηκε έως την τελική καταστροφή του γύρω στο 1400 π.Χ. (Driessen & Macdonald, 1997).



Εικόνα 5 Κάτοψη του Ανακτόρου της Κνωσού (www.knossosdocumenta.gr)

Μετά την οριστική καταστροφή του ανακτόρου, η Κνωσός συνέχισε να κατοικείται και να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο κατά τους ιστορικούς χρόνους. Κατά τη Γεωμετρική και Αρχαϊκή περίοδο ο χώρος του ανακτόρου απέκτησε έντονο λατρευτικό χαρακτήρα, ενώ κατά την Κλασική και Ελληνιστική εποχή η Κνωσός εξελίχθηκε σε σημαντικό αστικό και θρησκευτικό κέντρο της Κρήτης (Coldstream et al., 2001). Στη Ρωμαϊκή περίοδο η πόλη γνώρισε νέα οικοδομική ανάπτυξη με δημόσια κτίρια, υδραγωγεία, λουτρά και πολυτελείς επαύλεις, πολλά από τα οποία αναπτύχθηκαν περιμετρικά του μινωικού ανακτόρου (Hood & Smyth, 1981). Η κατοίκηση συνεχίστηκε και κατά την Πρώιμη Βυζαντινή περίοδο, ωστόσο μετά την αραβική κατάκτηση της Κρήτης τον 9^ο αιώνα μ.Χ. η Κνωσός εγκαταλείφθηκε σταδιακά. Κατά της μεταγενέστερους αιώνες σημαντικό μέρος του αρχαίου οικοδομικού υλικού αφαιρέθηκε και επαναχρησιμοποιήθηκε από Ενετούς και Οθωμανούς, προκαλώντας εκτεταμένες απώλειες στο μνημειακό σύνολο (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008)

Οι πρώτες ανασκαφικές έρευνες στον χώρο της Κνωσού πραγματοποιήθηκαν το 1878 από τον Ηρακλειώτη έμπορο Μίνωα Καλοκαιρινό, ο οποίος αποκάλυψε τμήματα της δυτικής πτέρυγας του ανακτόρου (MacGillivray, 2000). Στη συνέχεια το ενδιαφέρον για τον χώρο προσέλκυσε σημαντικούς αρχαιολόγους της εποχής, όπως ο Heinrich Schliemann, χωρίς ωστόσο να καταστεί δυνατή η εξαγορά της περιοχής κατά την οθωμανική περίοδο. Μετά την ίδρυση της Κρητικής Πολιτείας το 1898 και τη θέσπιση νομοθεσίας προστασίας των αρχαιοτήτων, ο Arthur Evans ξεκίνησε το 1900 της συστηματικές ανασκαφές, οι οποίες συνεχίστηκαν έως το 1931 με μικρές διακοπές (Evans, 1921–1935). Οι ανασκαφές του Evans αποκάλυψαν το μεγαλύτερο μέρος του ανακτορικού συγκροτήματος και συνέβαλαν καθοριστικά στη διαμόρφωση της σύγχρονης γνώσης για τον Μινωικό πολιτισμό, παράλληλα συνδέθηκαν και με εκτεταμένες αναστηλωτικές επεμβάσεις που επηρεάζουν έως σήμερα τη μορφή και τη διατήρηση του μνημείου (Momigliano, 2007).

Τα αρχαία λείψανα της Κνωσού, διάσπαρτα στην ευρύτερη περιοχή, μαρτυρούν τη διαχρονική σημασία του χώρου. Τα σωζόμενα μνημειακά συγκροτήματα ανάγονται κυρίως στη Νεοανακτορική περίοδο, ενώ η παρουσία μεταγενέστερων μνημείων και νεκροταφείων διαφορετικών περιόδων επιβεβαιώνει τη συνεχή κατοίκηση της περιοχής. (Οδυσσέας ΥΠΠΟΑ, 2012)

3.2 Αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά

Η αρχιτεκτονική του μνημείου χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα πολύπλοκη χωρική διάρθρωση, ανάπτυξη σε πολλαπλά επίπεδα και ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών κατασκευής, συστήματα φωτισμού, αερισμού και αποχέτευσης. Η διάρθρωση των χώρων γύρω από την κεντρική αυλή, η παρουσία αποθηκών, εργαστηρίων, τελετουργικών χώρων και βασιλικών διαμερισμάτων καταδεικνύει τον πολυλειτουργικό χαρακτήρα του συγκροτήματος ως διοικητικού, οικονομικού και θρησκευτικού κέντρου της μινωικής κοινωνίας (Κνωσός Documenta ΥΠΠΟΑ, 2015). Το Ανάκτορο της Κνωσού αποτελεί το σημαντικότερο αρχιτεκτονικό συγκρότημα του Μινωικού πολιτισμού και συνδέεται άμεσα με τη διαμόρφωση ισχυρής κεντρικής εξουσίας στην Κρήτη κατά τη 2^η χιλιετία π.Χ. Η ίδρυσή του αντανάκλα τις βαθιές πολιτικές, κοινωνικές και οικονομικές μεταβολές που οδήγησαν στη συγκρότηση ανακτορικών κέντρων με διοικητικές, οικονομικές και θρησκευτικές λειτουργίες. Το ανάκτορο λειτουργούσε ως έδρα της πολιτικής εξουσίας, αλλά ταυτόχρονα συγκέντρωνε λατρευτικές δραστηριότητες, αποθηκευτικές εγκαταστάσεις, εργαστήρια, χώρους τελετουργιών και διοικητικά αρχεία, στοιχεία που υποδηλώνουν τον πολύπλοκο χαρακτήρα του μινωικού ανακτορικού συστήματος (McEnroe, 2010).

Η αρχιτεκτονική σύνθεση του συγκροτήματος βασίστηκε σε ενιαίο και οργανωμένο σχεδιασμό, προσαρμοσμένο στη γεωμορφολογία του λόφου της Κεφάλας και τις λειτουργικές ανάγκες του ανακτόρου. Για την οικοδόμησή του πραγματοποιήθηκαν τεχνικές παρεμβάσεις, όπως η ισοπέδωση της κορυφής του λόφου και η διαμόρφωση της ανατολικής πλαγιάς για την ανέγερση των βασιλικών διαμερισμάτων. Η ανάπτυξη του κτηριακού συγκροτήματος σε πολλά επίπεδα αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά γνωρίσματα της μινωικής αρχιτεκτονικής. Η Δυτική πτέρυγα εκτιμάται ότι έφθανε τους τρεις ορόφους, ενώ η Ανατολική πιθανώς αναπτυσσόταν σε ακόμη μεγαλύτερο ύψος, γεγονός που υποδηλώνει ιδιαίτερα προηγμένες γνώσεις στατικής και οικοδομικής τεχνολογίας (Shaw, 2009).

Κεντρικό οργανωτικό στοιχείο του ανακτόρου αποτελεί η μεγάλη ορθογώνια Κεντρική Αυλή με προσανατολισμό βορρά–νότου, γύρω από την οποία αναπτύσσονται οι κύριες πτέρυγες και οι επιμέρους λειτουργικοί χώροι. Η Δυτική πτέρυγα συγκέντρωνε

κυρίως διοικητικές, αποθηκευτικές και λατρευτικές λειτουργίες, περιλαμβάνοντας τις μεγάλες αποθήκες, τα αρχαιοφυλάκια, τα θησαυροφυλάκια και την Αίθουσα του Θρόνου. Αντίστοιχα, η Ανατολική πτέρυγα περιλάμβανε τα βασιλικά διαμερίσματα, εργαστηριακούς χώρους και σύνθετα συστήματα επικοινωνίας μέσω κλιμακοστασίων, διαδρόμων και στοών. Η λειτουργικότητα των χώρων ενισχυόταν από την παρουσία φωταγωγών και του συστήματος των πολυθύρων, μέσω των οποίων επιτυγχανόταν φυσικός φωτισμός, αερισμός και ευέλικτη οργάνωση του εσωτερικού χώρου. Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται ιδιαίτερα καινοτόμα για την εποχή και αντανακλούν την προσαρμογή της μινωικής αρχιτεκτονικής της κλιματικές συνθήκες και της ανάγκης καθημερινής χρήσης των χώρων (McEnroe, 2010).

Οι όψεις του ανακτόρου χαρακτηρίζονταν από μνημειακότητα και σπουδαία μορφολογική οργάνωση, με εναλλαγές εσοχών και εξοχών, μεγάλους ορθοστάτες και διαφοροποιήσεις στο ύψος των επιμέρους κτηριακών όγκων, δημιουργώντας έντονες αντιθέσεις φωτός και σκιάς (Preziosi & Hitchcock, 1999; Shaw, 1973). Ιδιαίτερη σημασία είχαν η Κεντρική και η Δυτική Αυλή, οι οποίες λειτουργούσαν ως χώροι κυκλοφορίας, φωτισμού και τελετουργικών δραστηριοτήτων. Οι πομπικοί δρόμοι, τα πρόπυλα και οι διαμορφωμένες είσοδοι υπογραμμίζουν τον τελετουργικό και συμβολικό χαρακτήρα της μινωικής αρχιτεκτονικής, η οποία συνδύαζε λειτουργικότητα, αισθητική και προβολή της ανακτορικής εξουσίας (Hood, 2005).

3.3 Τα Δομικά υλικά του Ανακτόρου της Κνωσού

Η κατασκευή του Ανακτόρου της Κνωσού βασίστηκε σε εκτεταμένη χρήση τοπικών πρώτων υλών, οι οποίες επιλέχθηκαν με βάση τόσο των ιδιοτήτων του; όσο και των ιδιαίτερων απαιτήσεων της μινωικής αρχιτεκτονικής. Η επιλογή των δομικών υλικών συνδεόταν άμεσα με τη γεωλογία της ευρύτερης περιοχής καθώς και με την καταλληλότητά τους όσον αφορά την αντοχή, την κατεργασιμότητα και τη λειτουργική τους εφαρμογή στις επιμέρους κατασκευές. Η αξιοποίηση διαφορετικών τύπων λίθων, κονιαμάτων και επιχρισμάτων αντανακλά υψηλό επίπεδο τεχνογνωσίας και ουσιαστική

γνώση της συμπεριφοράς των υλικών κατά την κατασκευή και τη μακροχρόνια χρήση της (Σκουλικίδης, 2000; Shaw, 1973).

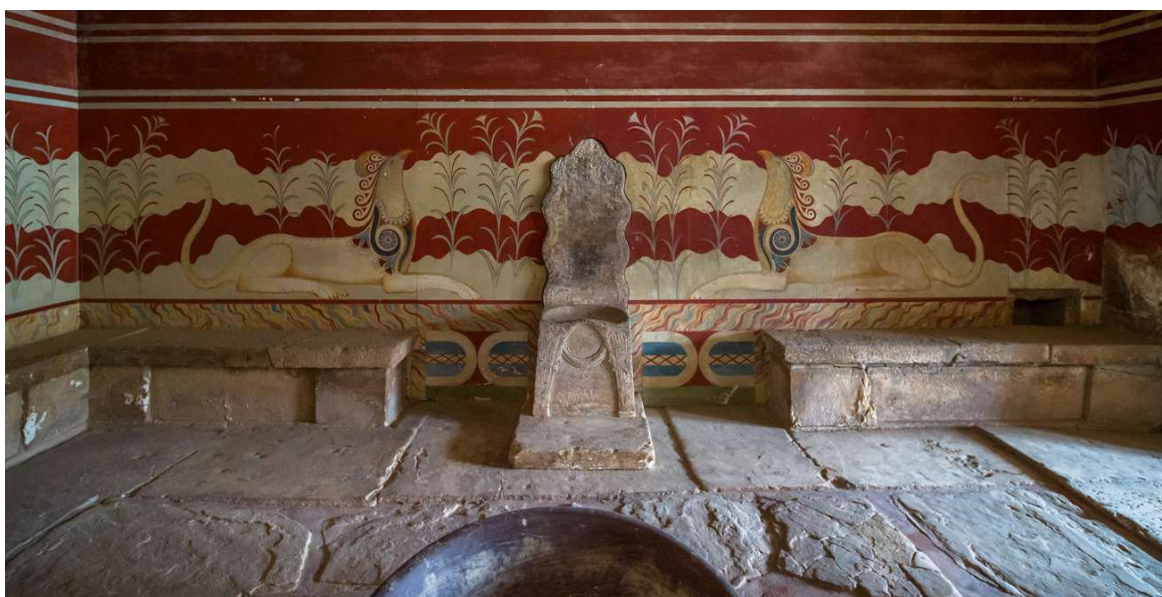
Λίθος: Βασικό δομικό υλικό του ανακτόρου υπήρξε ο γυψόλιθος και ο ασβεστόλιθος, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην τοιχοποιία όσο και σε αρχιτεκτονικά μέλη της όπως δάπεδα, κλίμακες και επενδύσεις. Οι εξωτερικοί και εσωτερικοί τοίχοι κατασκευάζονταν συνήθως από αργούς λίθους, ενώ σε ορισμένα τμήματα εφαρμόστηκε λαξευτή τοιχοποιία υψηλής επιμέλειας. Η λιθοδομή του Ανακτόρου της Κνωσού βασίστηκε κυρίως στη χρήση τοπικών πετρωμάτων, τα οποία επιλέχθηκαν τόσο με κριτήρια διαθεσιμότητας όσο και με βάση της μηχανικές και αισθητικές της ιδιότητες (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008).

Κυρίαρχο υλικό στην αρχιτεκτονική του ανακτόρου υπήρξε ο γυψόλιθος, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε σε επενδύσεις τοίχων, ορθοστάτες, κλίμακες, βάσεις κιόνων και αρχιτεκτονικά διακοσμητικά στοιχεία. Ο γυψόλιθος αποτελεί ιζηματογενές πέτρωμα με κύριο ορυκτολογικό συστατικό τον γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), παρουσιάζοντας λεπτοκρυσταλλική δομή, σχετικά χαμηλή σκληρότητα (2 κατά την κλίμακα Mohs) και ευκολία στην κατεργασία. Τα χαρακτηριστικά αυτά τον καθιστούσαν ιδιαίτερα κατάλληλο για λαξευτές διαμορφώσεις και λεπτομερή αρχιτεκτονική επεξεργασία. Παράλληλα, η υψηλή υδατοδιαλυτότητα του ορυκτού και η αυξημένη πορώδης δομή του τον καθιστούν ιδιαίτερα ευάλωτο σε φαινόμενα αποσάθρωσης που σχετίζονται με την υγρασία και την κρυστάλλωση αλάτων (Λαμπρόπουλος, 1993; Σκουλικίδης, 2000).



Εικόνα 6 Χαρακτηριστική εικόνα γυψόλιθου που έχει υποστεί αποσάθρωση. Πλευρική διάβρωση (αυλάκια και κοιλότητες) (www.knossosdocumenta.gr)

Η μικροκρυσταλλική του δομή και η υψηλή πορώδης συμπεριφορά επηρεάζουν σημαντικά τη μηχανική αντοχή και τη συμπεριφορά του έναντι των περιβαλλοντικών παραγόντων. Η υψηλή του ευαισθησία στο νερό και οι διακυμάνσεις της υγρασίας συνέβαλαν στη μετέπειτα φθορά πολλών επιφανειών του μνημείου (Shaw, 1973; Momigliano, 2014). Ο γυψόλιθος που χρησιμοποιήθηκε στο ανάκτορο της Κνωσού προερχόταν από το κοντινό λατομείο στον λόφο των Γυψάδων, σε απόσταση μικρότερη του χιλιομέτρου νοτιοδυτικά του ανακτόρου. Η εξόρυξη και μεταφορά του υλικού ήταν ιδιαίτερα εύκολη χάρη στην άμεση γειννίαση του λατομείου με το οικοδομικό συγκρότημα, γεγονός που επέτρεψε την εκτεταμένη χρήση του σε περίοπτες θέσεις, όπως η δυτική πρόσοψη και η αίθουσα του θρόνου (Chlouveraki, S.2006).



Εικόνα 7 Η αίθουσα του θρόνου στην οποία έχει γίνει εκτεταμένη χρήση γυψόλιθου (www.knossospalace.gr)

Παράλληλα, σημαντική ήταν η χρήση ασβεστολιθικών πετρωμάτων, κυρίως σε στοιχεία αυξημένων μηχανικών απαιτήσεων, όπως βάσεις τοιχοποιιών, κατώφλια και δομικά μέλη που έπρεπε να παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε φορτία και καταπονήσεις (Hood, 2005). Οι ασβεστόλιθοι είναι ιζηματογενή πετρώματα, αποτελούνται κυρίως από ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), υπό μορφή ασβεστίτη, και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη μηχανική αντοχή σε σχέση με τον γυψόλιθο. Ως προς τη σκληρότητα με βάση την κλίμακα Mohs ο ασβεστίτης είναι στην κλίμακα 3. Ωστόσο, η ανθρακική της σύσταση ευνοεί διαδικασίες χημικής διάβρωσης μέσω διάλυσης, ιδιαίτερα

σε περιβάλλοντα με παρουσία όξινων ρύπων ή αυξημένης υγρασίας (Λαμπρόπουλος, 1993; Charola, 2000).

Ιδιαίτερη θέση κατέχει ο πωρόλιθος, υλικό σχετικά εύκολο στην επεξεργασία, που εφαρμόστηκε κυρίως σε εξωτερικές προσόψεις και σε δομικά στοιχεία που απαιτούσαν λεπτομερή κατεργασία, λόγω της σχετικά χαμηλής πυκνότητας και της αυξημένης κατεργασιμότητάς του (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008). Στο ανάκτορο χρησιμοποιήθηκαν της κροκαλοπαγή πετρώματα και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, κυρίως σε τοιχοποιίες και λιθοδομές πλήρωσης. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό πορώδους, υδροαπορροφητικότητας και συνεκτικότητας, παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά τους απέναντι στους μηχανισμούς φθοράς (Σκουλικίδης, 2000; Moropoulou et al., 1995).

Κονιάματα: Σημαντικό ρόλο στην κατασκευή του ανακτόρου είχαν τα κονιάματα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τόσο ως συνδετικά υλικά της τοιχοποιίας όσο και ως επιχρίσματα και υποστρώματα τοιχογραφιών. Τα ασβεστοκονιάματα αποτελούνταν κυρίως από ασβέστη, πυριτική άμμο και νερό, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις εντοπίζονται λεπτόκοκκα αδρανή ή κεραμικές προσμίξεις. Η πήξη τους βασίζεται στη διαδικασία της ενανθράκωσης, κατά την οποία το υδροξείδιο του ασβεστίου αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και μετατρέπεται εκ νέου σε ανθρακικό ασβέστιο. Η πορώδης μικροδομή των ασβεστοκονιαμάτων επιτρέπει τη διαπνοή των δομικών στοιχείων και συμβάλλει στη ρύθμιση της υγρασίας, ωστόσο τα καθιστά παράλληλα ευάλωτα στη μεταφορά νερού και διαλυτών αλάτων στο εσωτερικό της (Carvalho et al., 2021). Αρχαιομετρικές αναλύσεις έχουν δείξει ότι τα μινωικά κονιάματα της Κνωσού παρουσιάζουν σημαντική τεχνολογική διαφοροποίηση ανάλογα με τη χρήση και τη θέση εφαρμογής της, γεγονός που υποδηλώνει εμπειρική γνώση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των υλικών (Carvalho et al., 2021).

Εκτός από τα ασβεστοκονιάματα, εκτεταμένη υπήρξε και η χρήση πηλοκονιαμάτων, σε δάπεδα, εσωτερικές επιφάνειες και δευτερεύουσες τοιχοποιίες του ανακτόρου (Hood, 2005). Τα πηλοκονιάματα αποτελούνται κυρίως από αργιλικά ορυκτά, λεπτόκοκκα ιζήματα και οργανικές προσμίξεις, παρουσιάζοντας υψηλή πλαστικότητα και ικανοποιητική θερμική συμπεριφορά. Η σύστασή τους βασίζεται συνήθως σε μίγματα

αργίλου, άμμου και φυτικών ινών ή άλλων οργανικών υλικών, τα οποία βελτίωναν τη συνοχή και περιόριζαν τη δημιουργία ρηγματώσεων κατά την ξήρανση (Λαμπρόπουλος, 1993). Παρότι τα υλικά αυτά διευκόλυναν την κατασκευή και την προσαρμογή των επιφανειών, η αυξημένη ευαισθησία τους στην παρουσία νερού και τις μεταβολές της υγρασίας περιορίζει σημαντικά τη μηχανική τους αντοχή και ευνοεί φαινόμενα αποσάθρωσης, απολέπισης και απώλειας συνοχής (Σκουλικίδης, 2000; Moropoulou et al., 1995). Οι νεότερες αρχαιομετρικές έρευνες στην Κνωσό έδειξαν ότι η μικροδομή και η πορώδης φύση των πηλοκονιαμάτων επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά τους απέναντι στους κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης και στη μεταφορά διαλυτών αλάτων (Carvalho et al., 2023).

Ιδιαίτερη θέση στην αισθητική και την αρχιτεκτονική διαμόρφωση του ανακτόρου κατείχαν οι τοιχογραφίες και τα διακοσμητικά επιχρίσματα, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικά στοιχεία της μινωικής καλλιτεχνικής έκφρασης (Immerwahr, 1990; Hood, 2005). Οι εσωτερικοί χώροι καλύπτονταν από πολλαπλά στρώματα λεπτόκοκκου επιχρίσματος, συνήθως ασβεστιτικής σύστασης, πάνω στα οποία εφαρμόζονταν οι χρωστικές ουσίες με τεχνική νωπογραφίας (fresco), δηλαδή πάνω σε νωπή επιφάνεια κονιάματος. Η τεχνική αυτή επέτρεπε τη σταδιακή ενσωμάτωση των χρωστικών στο ανθρακούμενο στρώμα του ασβέστη, συμβάλλοντας στη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα των ζωγραφικών επιφανειών (Jones, 1986). Οι χρωστικές προέρχονταν κυρίως από φυσικά ορυκτά υλικά, όπως αιματίτης για το κόκκινο, αιγυπτιακό μπλε (τεχνητή χρωστική), άνθρακας ή μαγγανιούχα υλικά για το μαύρο και ασβεστιτικές ενώσεις για το λευκό (Jones et al., 2005). Η επιλογή των υλικών αυτών σχετιζόταν τόσο με τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών όσο και με τη σταθερότητα των χρωμάτων στις περιβαλλοντικές συνθήκες του εσωτερικού χώρου. Η ποιότητα των επιχρισμάτων, η προσεκτική προετοιμασία των υποστρωμάτων και η τεχνολογία των χρωστικών αποδεικνύουν υψηλό επίπεδο τεχνογνωσίας και εξειδίκευσης των μινωικών εργαστηρίων, καθώς και ανεπτυγμένη γνώση των ιδιοτήτων των υλικών και των τεχνικών εφαρμογής τους (Jones, 1986).

Αξίζει να αναφερθούμε στην χρήση του ξύλου ως δομικό υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε δοκούς, υποστυλώματα, πλαίσια ανοιγμάτων, κλιμακοστάσια και ενισχύσεις τοιχοποιίας. Η χρήση ξύλινων στοιχείων στο εσωτερικό των τοιχοποιιών θεωρείται ότι συνέβαλλε ουσιαστικά στη βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς των

κατασκευών, προσδίδοντας μεγαλύτερη ελαστικότητα στο δομικό σύστημα. Η πρακτική αυτή θεωρείται ιδιαίτερα προηγμένη για τα δεδομένα της εποχής και αντανάκλα γνώση της δυναμικής συμπεριφοράς των υλικών υπό σεισμική καταπόνηση (Macdonald, 2005). Ξύλινα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε στέγες, πατώματα, κλίμακες, θύρες και το μινωικό σύστημα κιόνων, όπου οι ξύλινοι κίονες, συνήθως κυπαρισσένιοι, έφεραν χαρακτηριστική ανεστραμμένη μορφή με μεγαλύτερη διάμετρο στο άνω μέρος (Palyvou, 2005). Ωστόσο, λόγω της οργανικής του φύσης, το ξύλο είναι ιδιαίτερα ευάλωτο σε βιολογική αποσύνθεση, προσβολή από μικροοργανισμούς και μεταβολές υγρασίας, γεγονός που εξηγεί τη σποραδική διατήρησή του στο αρχαιολογικό αρχείο.

Η σημερινή κατάσταση των δομικών υλικών της Κνωσού επηρεάζεται όχι μόνο από τη φυσική γήρανση και της περιβαλλοντικούς παράγοντες, αλλά και από τις εκτεταμένες επεμβάσεις αποκατάστασης του Arthur Evans στις αρχές του 20ού αιώνα. Η εκτεταμένη χρήση οπλισμένου σκυροδέματος, σύγχρονων κονιαμάτων και νέων δομικών στοιχείων δημιούργησε ένα σύνθετο υλικό σύστημα, στο οποίο συνυπάρχουν αυθεντικά μινωικά υλικά και μεταγενέστερες επεμβάσεις διαφορετικής σύστασης και συμπεριφοράς. Η συνύπαρξη αρχαίων και σύγχρονων υλικών δημιούργησε ένα σύνθετο δομικό σύστημα με διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες και διαφοροποιημένη συμπεριφορά έναντι των περιβαλλοντικών καταπονήσεων. Το γεγονός αυτό αποτελεί βασικό αντικείμενο σύγχρονων αρχαιομετρικών ερευνών και μελετών συντήρησης και αποκατάστασης, καθώς η ασυμβατότητα μεταξύ παλαιών και νέων υλικών έχει συμβάλει στην ανάπτυξη φαινομένων φθοράς σε αρκετά τμήματα του μνημείου (Carvalho et al., 2023).

3.4 Αναστηλωτικές επεμβάσεις του Arthur Evans και οι επιπτώσεις της στο μνημείο.

Οι επεμβάσεις του Sir Arthur Evans στην Κνωσό κατά το πρώτο μισό του 20ού αιώνα αποτέλεσαν ένα από τα πλέον εμβληματικά αλλά και αμφιλεγόμενα παραδείγματα αναστήλωσης αρχαιολογικού μνημείου σε διεθνές επίπεδο. Στόχος της ήταν αφενός η προστασία των ιδιαίτερα ευάλωτων αρχιτεκτονικών καταλοίπων που αποκαλύφθηκαν κατά την ανασκαφή και αφετέρου η αποκατάσταση της μορφής και της λειτουργίας του

μινωικού ανακτόρου, ώστε να καταστεί κατανοητό και προσβάσιμο στο ευρύ κοινό. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες εργασίες στερέωσης, ανακατασκευής και συμπλήρωσης αρχιτεκτονικών στοιχείων, καθώς και ανασυνθέσεις τοιχογραφικών συνόλων, με τη χρήση σύγχρονων για την εποχή υλικών και τεχνικών (Papadopoulos, 1997).



Εικόνα 8 Αναστηλωτικές εργασίες στο Μέγαλο Κλιμακοστάσιο (Αρχείο Μουσείου Ashmolean)

Ιδιαίτερη σημασία είχε η ευρεία εφαρμογή οπλισμένου σκυροδέματος, μεταλλικών φορέων και νέων δομικών στοιχείων για την ανακατασκευή ορόφων, στεγάστρων, κλιμάκων, κιόνων και άλλων τμημάτων του ανακτόρου. Οι επεμβάσεις αυτές επέτρεψαν τη διατήρηση και ανάδειξη σημαντικών αρχιτεκτονικών ενοτήτων, όπως η Αίθουσα του Θρόνου, το Μέγα Κλιμακοστάσιο και η Αίθουσα των Διπλών Πελέκεων, συμβάλλοντας καθοριστικά στη διαμόρφωση της σημερινής εικόνας του αρχαιολογικού χώρου. Οι επεμβάσεις αυτές βασίστηκαν σε μεγάλο βαθμό στις ερμηνευτικές προσεγγίσεις του Evans σχετικά με τη μορφή της μινωικής αρχιτεκτονικής, γεγονός που προκάλεσε μεταγενέστερες συζητήσεις αναφορικά με την έκταση και την τεκμηρίωση των ανακατασκευών (Papadopoulos, 1997).



Εικόνα 9 Χαρακτηριστική εικόνα της Βόρειας Εισόδου του Ανακτόρου με εκτεταμένη χρήση οπλισμένου σκυροδέματος από της αναστηλώσεις του Α. Evans (Knossos documenta.gr).

Η πάροδος του χρόνου ανέδειξε σημαντικά ζητήματα συμβατότητας μεταξύ των αρχαίων δομικών υλικών και των νεότερων επεμβάσεων. Η γήρανση του οπλισμένου σκυροδέματος, η διάβρωση των μεταλλικών οπλισμών και η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων οδήγησαν σε φαινόμενα ρηγμάτωσης, αποσάθρωσης και τοπικών αστοχιών, τα οποία κατέστησαν αναγκαίες τις νέες εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης. Επιπλέον, η χρήση μόνιμων και μη αναστρέψιμων υλικών περιόρισε σε ορισμένες περιπτώσεις τη δυνατότητα μελλοντικών επεμβάσεων και δυσχέρανε τη σαφή διάκριση μεταξύ αυθεντικών και ανακατασκευασμένων τμημάτων του μνημείου. Όπως επισημαίνει ο Papadopoulos (1997), οι σύγχρονες προσπάθειες συντήρησης στην Κνωσό δεν επικεντρώνονται αποκλειστικά στην προστασία των μινωικών καταλοίπων, αλλά και στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που προέκυψαν από τις επεμβάσεις του Evans.

Παρά τις επιμέρους κριτικές, οι αναστηλωτικές εργασίες του Evans αποτελούν σήμερα αναπόσπαστο τμήμα της ιστορίας του μνημείου και σημαντικό κεφάλαιο στην εξέλιξη της θεωρίας της αποκατάστασης. Η περίπτωση της Κνωσού ανέδειξε με ιδιαίτερα σαφή τρόπο τη σημασία της συμβατότητας των υλικών, της αναστρεψιμότητας των επεμβάσεων και της τεκμηριωμένης αποκατάστασης, αρχές που αποτελούν πλέον θεμελιώδεις κατευθύνσεις στη σύγχρονη πρακτική προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς.

3.5 Κλιματολογικά και φυσικο-γεωγραφικά χαρακτηριστικά της Κνωσού

Η μελέτη των κλιματολογικών και φυσικογεωγραφικών χαρακτηριστικών της Κνωσού αποτελεί βασικό παράγοντα για την κατανόηση του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο διατηρείται και εξελίσσεται το μνημείο. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, των βροχοπτώσεων και της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας επηρεάζουν άμεσα τις φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα δομικά υλικά, ενώ η γεωμορφολογία της περιοχής συμβάλλει στη δημιουργία διαφοροποιημένων μικροκλιματικών συνθηκών στον αρχαιολογικό χώρο (Moropoulou et al., 1995; Varotsos & Theodorakopoulou, 2004). Η Κνωσός βρίσκεται στη βόρεια κεντρική Κρήτη, περίπου 5 km νοτιοανατολικά του Ηρακλείου, σε χαμηλό λοφώδες ανάγλυφο και σε απόσταση μικρότερη των 6 km από τη θάλασσα. Η γεωγραφική αυτή θέση ευνοεί την έντονη θαλάσσια επίδραση στο τοπικό κλίμα, ιδιαίτερα ως προς την σχετική υγρασία και τη μεταφορά αερολυμάτων από το θαλάσσιο περιβάλλον.

3.6 Κλίμα της ευρύτερης περιοχής

Η ευρύτερη περιοχή του Ηρακλείου και της Κνωσού εντάσσεται στον μεσογειακό κλιματικό τύπο Csa κατά την ταξινόμηση Köppen-Geiger, με θερμά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους, υγρούς χειμώνες. Σύμφωνα με διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα, η μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή κυμαίνεται μεταξύ 17,8 και 19 °C, ενώ οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες κατά της θερινούς μήνες φθάνουν συχνά της 30–32 °C, με ακραίες τιμές που υπερβαίνουν τους 35 °C κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα (Karsomenakis et al., 2023; Proutsos et al., 2020). Αντίθετα, οι χειμερινές θερμοκρασίες παραμένουν σχετικά ήπιες, με μέσες τιμές περί τους 10–12 °C τον Ιανουάριο και περιορισμένη εμφάνιση παγετού λόγω της έντονης θαλάσσιας επίδρασης (Efstratiou et al., 2013).

Οι βροχοπτώσεις παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα, χαρακτηριστική των μεσογειακών περιοχών. Περίπου το 70–75 % της ετήσιας βροχόπτωσης καταγράφεται κατά το διάστημα Νοεμβρίου–Μαρτίου, ενώ οι θερινοί μήνες χαρακτηρίζονται από

ιδιαίτερα περιορισμένα ύψη βροχής (Lazaj, 2016). Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή του Ηρακλείου υπολογίζεται μεταξύ 460 και 500 mm, αν και παρουσιάζονται σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ διαφορετικών ετών (Moody, Rackham & Rapp, 1996).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, η οποία στην περιοχή του Ηρακλείου κυμαίνεται ετησίως περίπου στο 63–70 %, επηρεαζόμενη έντονα από την εγγύτητα στη θάλασσα και τους βόρειους θαλάσσιους ανέμους. Κατά τους θερινούς μήνες η σχετική υγρασία μειώνεται σημαντικά κατά τις θερμές ώρες της ημέρας, ενώ αυξάνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας και των χειμερινών περιόδων. Η παρουσία θαλάσσιων αερολυμάτων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για το περιβάλλον της Κνωσού, καθώς οι βόρειοι και βορειοδυτικοί άνεμοι μεταφέρουν σωματίδια θαλάσσιου άλατος της το εσωτερικό της ενδοχώρας (Torfs & Van Grieken, 1997).

Επιπλέον, νεότερες μελέτες σχετικά με την κλιματική μεταβολή στην Ανατολική Μεσόγειο καταδεικνύουν σαφή αύξηση των μέσων θερμοκρασιών στην περιοχή της Κρήτης κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Οι Proutsos et al. (2019) κατέγραψαν σημαντική αύξηση των μέσων και ελάχιστων θερμοκρασιών στο Ηράκλειο κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς και φθινοπωρινούς μήνες. Παράλληλα, οι Kapsomenakis et al. (2023) επισημαίνουν ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη Μεσόγειο αναμένεται να οδηγήσουν σε συχνότερα επεισόδια ακραίας θερμοκρασίας, παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας και αυξημένη ένταση ακραίων καιρικών φαινομένων, συνθήκες που επηρεάζουν άμεσα την προστασία και διατήρηση των αρχαιολογικών χώρων.

3.7 Μικροκλιματικές συνθήκες

Παράλληλα με τα γενικά κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής, στον αρχαιολογικό χώρο της Κνωσού αναπτύσσονται ιδιαίτερες μικροκλιματικές συνθήκες, οι οποίες σχετίζονται με τη γεωμορφολογία του λόφου της Κεφάλας, τον προσανατολισμό των αρχιτεκτονικών καταλοίπων και τη διαφοροποίηση των δομικών υλικών. Η τοπογραφική θέση του ανακτόρου σε ήπιο λοφώδες ανάγλυφο ευνοεί τη διαφοροποίηση της ηλιακής έκθεσης και της κυκλοφορίας του αέρα μεταξύ διαφορετικών σημείων του

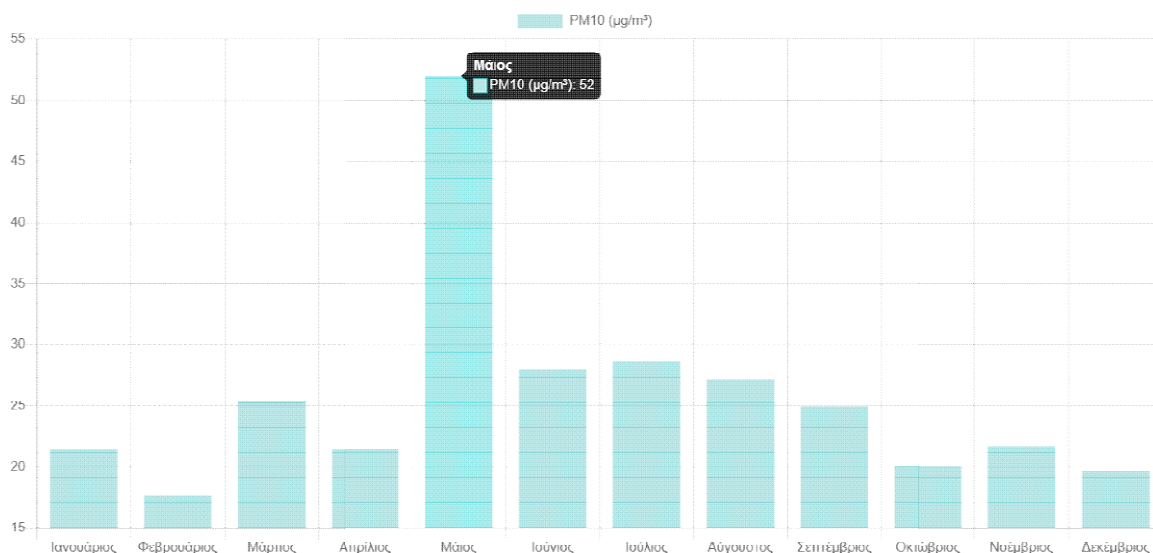
μνημείου. Ως αποτέλεσμα, παρατηρούνται σημαντικές τοπικές διαφοροποιήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας μεταξύ σκιασμένων και άμεσα εκτεθειμένων επιφανειών.

Οι επιφάνειες που εκτίθενται έντονα στην ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζουν υψηλές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή της Κρήτης μπορεί να υπερβαίνει τα 1000 W/m^2 (Stavrakakis et al., 2023). Αντίθετα, σε περιοχές με περιορισμένο αερισμό και σκίαση, όπως εσωτερικοί διάδρομοι, ημιυπαίθριοι χώροι ή τμήματα με πυκνή αρχιτεκτονική δόμηση, η υγρασία διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εμφανίζονται ηπιότερες.

Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του μικροκλίματος διαδραματίζει η ετερογένεια των δομικών υλικών του ανακτόρου. Υλικά όπως ο γυψόλιθος, ο ασβεστόλιθος, τα πηλοκονιάματα και τα σύγχρονα υλικά αποκατάστασης εμφανίζουν διαφορετικές τιμές θερμοχωρητικότητας, πορώδους και υδροαπορροφητικότητας, γεγονός που επηρεάζει την αποθήκευση και αποβολή θερμότητας και υγρασίας από τις επιφάνειες. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οδηγούν στη δημιουργία μικροπεριβαλλοντικών συνθηκών ακόμη και μεταξύ γειτονικών δομικών στοιχείων, με αποτέλεσμα την ανομοιογενή κατανομή φαινομένων φθοράς (Σκουλικίδης, 2000).

Παράλληλα, η αυξημένη επισκεψιμότητα του αρχαιολογικού χώρου επηρεάζει το μικροκλίμα ορισμένων περιοχών, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Η συνεχής παρουσία μεγάλου αριθμού επισκεπτών συμβάλλει στην τοπική αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, ενώ η έντονη κίνηση προκαλεί επαναιώρηση σωματιδίων σκόνης και μεταφορά ρύπων στις επιφάνειες των δομικών υλικών (Brimblecombe, 2016). Οι παράγοντες αυτοί θεωρούνται πλέον κρίσιμοι στη σύγχρονη διαχείριση αρχαιολογικών χώρων μεγάλης επισκεψιμότητας και λαμβάνονται υπόψη σε προγράμματα παρακολούθησης και προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς.

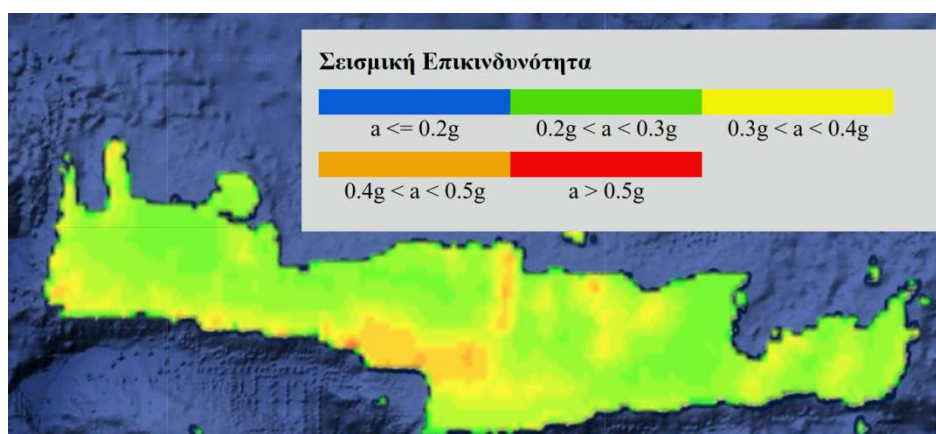
Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί έναν ακόμη περιβαλλοντικό παράγοντα που επηρεάζει της συνθήκες διατήρησης του Ανακτόρου της Κνωσού. Η ευρύτερη περιοχή του Ηρακλείου επηρεάζεται από εκπομπές που προέρχονται από την οδική κυκλοφορία, τη λειτουργία του λιμένα, την αεροπορική δραστηριότητα, καθώς και από τη μεταφορά αέριων μαζών και σωματιδίων σε περιφερειακή κλίμακα. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό έργο HERACLES, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι και τα αιωρούμενα σωματίδια συγκαταλέγονται στους σημαντικότερους παράγοντες υποβάθμισης της πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς συμβάλλουν στον σχηματισμό επιφανειακών επικαθίσεων, μαύρων κρουστών και προϊόντων χημικής διάβρωσης στα δομικά υλικά (HERACLES Project, 2019). Παράλληλα, μετρήσεις στην περιοχή του λιμένα Ηρακλείου έχουν καταδείξει ότι οι ναυτιλιακές δραστηριότητες συμβάλλουν σημαντικά στις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων, ιδιαίτερα κατά τις περιόδους αυξημένης κυκλοφορίας πλοίων (Tzannatos, 2010). Η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την Κνωσό, καθώς η μακροχρόνια έκθεση των δομικών υλικών σε ρυπογόνο περιβάλλον μπορεί να επιταχύνει τους μηχανισμούς φθοράς και να επηρεάσει αρνητικά την κατάσταση διατήρησής της.



Εικόνα 10 Μηνιαία διακύμανση της συγκέντρωσης Pm10 στο κέντρο του Ηρακλείου για το έτος 2025 (<https://airquality.crete.gov.gr/statistics>)

3.8 Σεισμική δραστηριότητα

Εκτός από τις κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν τη διατήρηση του μνημείου, σημαντικό φυσικό παράγοντα για την περιοχή της Κνωσού αποτελεί και η σεισμική δραστηριότητα. Η Κρήτη συγκαταλέγεται στις πλέον σεισμογενείς περιοχές της Μεσογείου, λόγω της θέσης της στο Ελληνικό Τόξο, όπου συγκλίνουν η Αφρικανική και η Ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα. Η έντονη τεκτονική δραστηριότητα της περιοχής συνδέεται με την παρουσία ενεργών ρηγμάτων τόσο στην ξηρά όσο και στον θαλάσσιο χώρο γύρω από το νησί, τα οποία ευθύνονται για την εκδήλωση συχνών και, κατά περιόδους, ισχυρών σεισμών. Η σεισμικότητα έχει διαμορφώσει τη γεωλογική εξέλιξη της Κρήτης και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους φυσικούς παράγοντες που επηρεάζουν διαχρονικά το δομημένο περιβάλλον και τα μνημεία της (Caputo et al, 2010).



Εικόνα 11 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας Κρήτης (<http://www3.gein.noa.gr>)

Η ευρύτερη περιοχή της Κνωσού, η οποία βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα Ηρακλείου, κατατάσσεται στη Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II, με τιμή σχεδιαστικής εδαφικής επιτάχυνσης $0,24 \text{ g}$, σύμφωνα με τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Karsomenakis et al., 2023). Η σεισμική δραστηριότητα έχει διαμορφώσει διαχρονικά τη γεωλογική και ιστορική εξέλιξη της περιοχής, καθώς η Κρήτη έχει επανειλημμένα πληγεί από ισχυρούς σεισμούς που προκάλεσαν σημαντικές καταστροφές σε οικισμούς και μνημεία. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αποτελεί ο σεισμός του 365 μ.Χ., μεγέθους άνω των 8,0, ο οποίος προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές στην Κρήτη και συνοδεύτηκε από ιδιαίτερα ισχυρό τσουνάμι. Αντίστοιχα, οι ισχυροί σεισμοί των ετών

1508 και 1856, με επίκεντρα στην ευρύτερη περιοχή του Ηρακλείου, είχαν ως αποτέλεσμα σοβαρές βλάβες σε ιστορικά κτίρια και μνημεία, επιβεβαιώνοντας τη διαχρονική επίδραση της σεισμικότητας στη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Papadopoulos, 1997).

Για το Ανάκτορο της Κνωσού, η σεισμική δραστηριότητα θεωρείται παράγοντας ιδιαίτερης σημασίας, καθώς έχει συνδεθεί με φάσεις καταστροφής και ανακατασκευής ήδη από τη μινωική εποχή. Αρχαιολογικά και γεωλογικά δεδομένα υποδηλώνουν ότι ισχυρά σεισμικά γεγονότα συνέβαλαν επανειλημμένα στην κατάρρευση ή τη δομική επιβάρυνση τμημάτων του ανακτόρου, επηρεάζοντας τη μακράιωνη ιστορική του πορεία (Caruto et al., 2004). Παράλληλα, η σύγχρονη σεισμική δραστηριότητα εξακολουθεί να αποτελεί παράγοντα κινδύνου για τη διατήρηση των αρχιτεκτονικών καταλοίπων και των δομικών υλικών του μνημείου, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συνεκτίμησή της στον σχεδιασμό και την εφαρμογή μέτρων προστασίας και συντήρησης (Jusseret, 2012).

4. Φθορές δομικών υλικών

Η φθορά των δομικών υλικών στο Ανάκτορο της Κνωσού οφείλεται στη συνδυαστική δράση φυσικών, χημικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η ποικιλία των υλικών, η έκθεσή τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες και οι νεότερες επεμβάσεις αποκατάστασης έχουν διαμορφώσει ένα πολύπλοκο πλαίσιο παθολογίας, στο οποίο η συμπεριφορά των αυθεντικών μινωικών υλικών επηρεάζεται και από τη συνύπαρξή τους με μεταγενέστερα υλικά διαφορετικής σύστασης και μηχανικής συμπεριφοράς.. Σε αυτό το σύστημα συνυπάρχουν αυθεντικά μινωικά στοιχεία και νεότερα υλικά αποκατάστασης διαφορετικής σύστασης και συμπεριφοράς (Carvalho et al., 2021).

Η διερεύνηση των φαινομένων αυτών βασίζεται σε αρχαιομετρικές μεθόδους, οι οποίες συμβάλλουν στον προσδιορισμό της ορυκτολογικής και χημικής σύστασης των υλικών, στην αναγνώριση των προϊόντων αποσάθρωσης και διάβρωσης, καθώς και στην αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησης των δομικών στοιχείων του ανακτόρου (Curulli et al., 2020).

Η εφαρμογή αρχαιομετρικών τεχνικών στην Κνωσό έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια μέσω διεπιστημονικών ερευνητικών προσεγγίσεων και ευρωπαϊκών προγραμμάτων, όπως το HERACLES Project, το οποίο επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης και προστασίας μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς που απειλούνται από την κλιματική αλλαγή και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Στο πλαίσιο των ερευνών αυτών χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές όπως οπτική μικροσκοπία, περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (XRD), φασματοσκοπία υπέρυθρου (FTIR) και χημικές αναλύσεις, προκειμένου να διερευνηθούν τόσο οι μηχανισμοί αποσάθρωσης όσο και η συμπεριφορά των υλικών αποκατάστασης (Carvalho et al., 2023; Curulli et al., 2020).

4.1 Μορφές φθοράς των δομικών υλικών του Ανακτόρου της Κνωσού

Η φθορά των δομικών υλικών του Ανακτόρου της Κνωσού δεν αποτελεί αποτέλεσμα ενός μεμονωμένου παράγοντα, αλλά προϊόν σύνθετης αλληλεπίδρασης

μεταξύ της σύστασης των υλικών, των μικροκλιματικών συνθηκών, της υγρασίας, των διαλυτών αλάτων, της βιολογικής δραστηριότητας και των παλαιότερων επεμβάσεων αποκατάστασης. Παράλληλα, σημαντική επιβάρυνση προκαλεί και η αυξημένη επισκεψιμότητα του αρχαιολογικού χώρου, καθώς η συνεχής ανθρώπινη παρουσία συμβάλλει σε μηχανικές καταπονήσεις των επιφανειών, φθορά δαπέδων και τοπικές μεταβολές των μικροκλιματικών συνθηκών, ιδιαίτερα σε ευπαθείς και εκτεθειμένες περιοχές του μνημείου. Παράλληλα η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής συμβάλλει σημαντικά στην μηχανική καταπόνηση των δομικών υλικών του μνημείου. Η παθολογία του μνημείου διαφοροποιείται ανάλογα με το υλικό, καθώς ο γυψόλιθος, οι ασβεστόλιθοι, τα πηλοκονιάματα, τα ασβεστοκονιάματα και τα νεότερα τσιμεντοειδή υλικά εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά έναντι των περιβαλλοντικών καταπονήσεων (Σκουλικίδης, 2000; Carvalho et al., 2023).

4.1.1 Φθορά γυψολίθου και λίθινων δομικών στοιχείων

Ο γυψόλιθος, και ειδικότερα ο σεληνίτης, αποτελεί όπως έχει αναφερθεί και σε άλλα σημεία του κειμένου, ένα από τα σημαντικότερα δομικά υλικά του Ανακτόρου της Κνωσού, με εκτεταμένη χρήση σε δάπεδα, κατώφλια, επενδύσεις τοίχων, βάσεις κιόνων και αρχιτεκτονικά μέλη. Η ιδιαίτερη σημασία του υλικού συνδέεται τόσο με τις αισθητικές του ιδιότητες όσο και με τη δυνατότητα εύκολης κατεργασίας του (Κνωσός Documenta ΥΠΠΟΑ, 2015). Ωστόσο, ο γυψόλιθος αποτελεί υλικό ιδιαίτερα ευπαθές στην παρουσία νερού, καθώς ο γύψος εμφανίζει σημαντικά υψηλότερη διαλυτότητα σε σύγκριση με τα ανθρακικά πετρώματα. Οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ύγρυνσης και ξήρανσης προκαλούν σταδιακή διάλυση της επιφάνειας, μεταβολές στη μικροδομή και μείωση της μηχανικής συνοχής του υλικού (Σκουλικίδης, 2000).



Εικόνα 12 Κυψελοειδής διάβρωση γυψόλιθου (προσωπικό αρχείο Ζάχου Μ.)

Στις γυψολιθικές επιφάνειες του Ανακτόρου της Κνωσού έχουν καταγραφεί εκτεταμένες μορφές φθοράς, όπως απολέπιση, αποσάθρωση, ρηγματώσεις, κυψελοειδής διάβρωση και απώλεια υλικού, ιδιαίτερα σε μη στεγασμένους χώρους όπου η επίδραση της υγρασίας είναι εντονότερη. Η μακροχρόνια έκθεση στο νερό έχει οδηγήσει σε αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του γυψόλιθου, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρούνται βιολογικές επικαθίσεις και αποκόλληση επιφανειακών στρωμάτων (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008). Παράλληλα, σημαντική επιβάρυνση προκάλεσαν η αυξημένη επισκεψιμότητα του μνημείου και οι παλαιότερες αναστηλωτικές επεμβάσεις του Evans, οι οποίες επέφεραν πρόσθετες μηχανικές φορτίσεις και παραμορφώσεις στους γυψολιθικούς όγκους. Το σοβαρό πρόβλημα της ταχείας φθοράς του υλικού αντιμετωπίστηκε μέσω ερευνητικών και συντηρητικών προγραμμάτων σε συνεργασία με το Κέντρο Λίθου και τη Διεύθυνση Συντήρησης του Υπουργείου Πολιτισμού, με στόχο τη μελέτη των μηχανισμών διάβρωσης, την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων συντήρησης και την προστασία των γυψολιθικών επιφανειών του μνημείου (Κνωσός Documenta ΥΠΠΟΑ, 2015).

Η παρουσία διαλυτών αλάτων αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα φθοράς. Η μεταφορά αλάτων μέσω των πόρων των λίθων και η επανακρυστάλλωσή τους προκαλούν εσωτερικές πιέσεις, οι οποίες οδηγούν σε μικρορωγμές και αποσύνθεση της δομής του

λίθου. Ο Charola (2000) επισημαίνει ότι οι κύκλοι διάλυσης και ανακρυστάλλωσης των αλάτων αποτελούν έναν από τους βασικότερους μηχανισμούς αποσάθρωσης των πορώδων υλικών πολιτιστικής κληρονομιάς. Στην περίπτωση της Κνωσού, η διαδικασία αυτή επιτείνεται από τις κλιματικές συνθήκες της Κρήτης, όπου οι έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και οι εναλλαγές ξηρών και υγρών περιόδων δημιουργούν συνθήκες ενεργοποίησης των αλάτων.

Παράλληλα, στα ασβεστολιθικά στοιχεία του ανακτόρου παρατηρούνται φαινόμενα χημικής διάβρωσης που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση και την όξινη απόθεση. Οι ανθρακικές επιφάνειες αντιδρούν με θειούχες ενώσεις της ατμόσφαιρας, οδηγώντας στον σχηματισμό δευτερογενούς γύψου και μαύρων κρουστών (Comite et al., 2021). Οι κρούστες αυτές αποτελούνται κυρίως από γύψο, αιθάλη και σωματιδιακούς ρύπους και παρατηρούνται κυρίως σε προστατευμένες επιφάνειες όπου η βροχή δεν μπορεί να απομακρύνει τα προϊόντα της διάβρωσης.

4.1.2 Φθορά πηλοκονιαμάτων, ασβεστοκονιαμάτων και επιχρισμάτων

Τα πηλοκονιάματα και τα ασβεστοκονιάματα της Κνωσού αποτελούν υλικά υψηλής πορώδους και αυξημένης ευαισθησίας στην υγρασία. Η φθορά τους εκδηλώνεται με απώλεια συνοχής, αποκόλληση, ρηγματώσεις και αποσύνθεση της συνδετικής φάσης. Οι αλλοιώσεις αυτές επηρεάζουν άμεσα και τη διατήρηση των τοιχογραφιών και των επιχρισμάτων, καθώς τα ζωγραφικά στρώματα εξαρτώνται από τη σταθερότητα του υποκείμενου κονιάματος (Moropoulou et al., 2005).

Στις Δυτικές Αποθήκες της Κνωσού καταγράφηκαν εκτεταμένες φθορές πηλοκονιαμάτων και ασβεστοκονιαμάτων, με έντονη αποδιοργάνωση της μάζας τους και ανάπτυξη βιολογικών επικαθίσεων (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008). Η συνεχής διείσδυση νερού είχε ως αποτέλεσμα τη διόγκωση των αργιλικών φάσεων των πηλοκονιαμάτων, οδηγώντας σε αποδυνάμωση και τελικά σε απώλεια υλικού. Αντίστοιχα, στα ασβεστοκονιάματα η κρυστάλλωση αλάτων στο εσωτερικό των πόρων προκαλεί μηχανικές τάσεις και σταδιακή αποσύνθεση του υλικού.

Η μελέτη των κονιαμάτων της Κνωσού από τους Carvalho et al. (2023) έδειξε ότι τα αρχαία κονιάματα αποτελούνται κυρίως από ασβεστιτική συνδετική ύλη με προσμίξεις πυριτικών αδρανών, θηραϊκής γης και φυσικών ποζολανικών συστατικών. Η χρήση ποζολανικών υλικών προσέδιδε αυξημένες υδραυλικές ιδιότητες στα κονιάματα, ωστόσο η μακροχρόνια έκθεση σε υγρασία και άλατα έχει οδηγήσει σε σημαντική αποδιοργάνωση της μικροδομής τους.

4.1.3 Φθορά νεότερων τσιμεντοειδών υλικών και ασυμβατότητα επεμβάσεων

Σημαντικό μέρος της σημερινής παθολογίας του ανακτόρου συνδέεται με τις επεμβάσεις αποκατάστασης που πραγματοποιήθηκαν κυρίως κατά την περίοδο του Arthur Evans, στις αρχές του 20ού αιώνα. Στο πλαίσιο αυτών των εργασιών χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα τσιμεντοκονιάματα, στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος και νεότερα δομικά υλικά, τα οποία παρουσίασαν διαφορετική φυσικοχημική συμπεριφορά σε σχέση με τα αρχαία υλικά του μνημείου (Karetsou 2004).



Εικόνα 13 Αποδιοργανωμένο τσιμεντοκονίαμα με εμφανή συγκέντρωση αδιάλυτων αλάτων από τοιχοποιία του Μεγάρου του Βασιλέως (προσωπικό αρχείο Ζάχου Μ.)

Η χρήση τσιμέντου σε επαφή με πορώδη και διαπνέοντα υλικά, όπως ο γυψόλιθος και τα πηλοκονιάματα, είχε ως αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό υγρασίας και την ανάπτυξη μηχανικών τάσεων λόγω διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής. Η

ασυμβατότητα αυτή οδήγησε σε ρηγματώσεις, αποκολλήσεις και επιτάχυνση της φθοράς των γειτονικών αρχαίων υλικών (Moropoulou et al., 2005).

Η έρευνα των Carvalho et al. (2023) για τα προϊόντα διάβρωσης των ιστορικών τσιμεντών της Κνωσού έδειξε ότι στις επιφάνειες των νεότερων επεμβάσεων αναπτύσσονται μαύρες κρούστες, αλατούχες επικαθίσεις και προϊόντα θεικής διάβρωσης. Μέσω αναλύσεων XRD, FTIR και μικροσκοπίας SEM-EDS διαπιστώθηκε η παρουσία γύψου, ανθρακούχων σωματιδίων και προϊόντων αποσάθρωσης που σχετίζονται με τη μακροχρόνια αλληλεπίδραση του τσιμέντου με την υγρασία και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους.

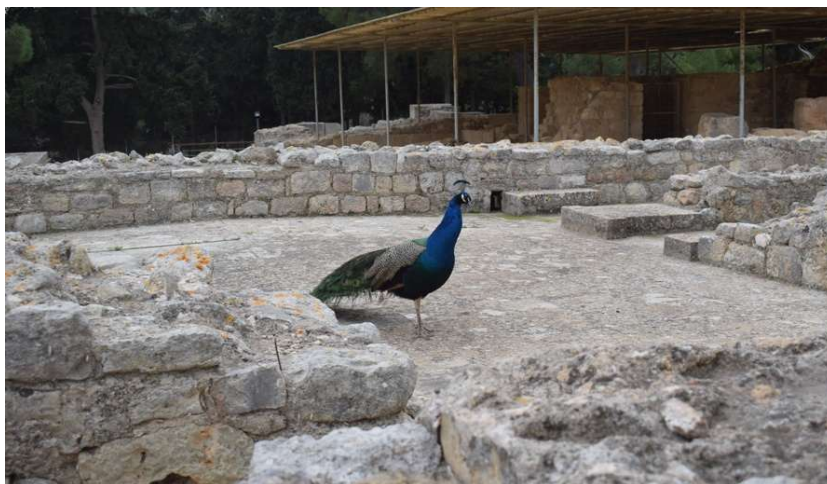
Οι εργασίες συντήρησης του Υπουργείου Πολιτισμού κατέδειξαν επίσης ότι σε πολλές περιπτώσεις είχαν εφαρμοστεί επάλληλες στρώσεις κονιαμάτων διαφορετικής σύστασης χωρίς απομάκρυνση των προηγούμενων επεμβάσεων. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία στρωματογραφίας υλικών με διαφορετική μηχανική συμπεριφορά, γεγονός που ευνόησε την αποκόλληση και τη συγκέντρωση υγρασίας στο εσωτερικό των τοιχοποιιών (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008).

4.2 Βιολογική φθορά και επιφανειακές επικαθίσεις

Η βιολογική φθορά αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα αλλοίωσης των δομικών υλικών της Κνωσού. Η ανάπτυξη μικροοργανισμών, λειχήνων και ανώτερης βλάστησης στις επιφάνειες των λίθων και των κονιαμάτων δημιουργεί συνθήκες αυξημένης συγκράτησης υγρασίας και επιταχύνει τη χημική και μηχανική αποσάθρωση των υλικών. Τα φαινόμενα αυτά καταγράφονται κυρίως σε σκιασμένες και ευπαθείς περιοχές του μνημείου, όπου οι μικροκλιματικές συνθήκες ευνοούν τη βιολογική αποίκιση (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008; Kalokairinou, 2018).

Ένας επιπλέον επιβαρυντικός παράγοντας επιβάρυνσης των δομικών υλικών του μνημείου είναι η παρουσία πτηνών και άλλων βιολογικών οργανισμών στον αρχαιολογικό χώρο της Κνωσού. Η δράση περιστερών, νυχτερίδων και άλλων πτηνών συνδέεται με τη συσσώρευση οργανικών αποθέσεων και περιττωμάτων, τα οποία ευνοούν την ανάπτυξη

μικροοργανισμών και δημιουργούν τοπικά επιθετικό χημικό περιβάλλον στις επιφάνειες των λίθων και των κονιαμάτων. Παράλληλα, η παρουσία τρωκτικών μπορεί να προκαλέσει μικροδιαταραχές και φθορές σε ευπαθή δομικά στοιχεία. Επιπλέον, ο μεγάλος πληθυσμός παγωνιών που κινείται ελεύθερα στον αρχαιολογικό χώρο συμβάλλει σε τοπικές μηχανικές καταπονήσεις, ιδιαίτερα σε χαμηλά δομικά μέλη και ευαίσθητες επιφάνειες όπως οι γυψόλιθοι.



Εικόνα 14 Ελεύθερη κίνηση παγωνιών στο Ανάκτορο Κνωσού (προσωπικό αρχείο Ζάχου Μ.)

Τα παραπάνω φαινόμενα επιβεβαιώνονται και μέσω της επιτόπιας παρατήρησης της γράφουσας, η οποία, λόγω της πολυετούς εργασίας και της καθημερινής παρουσίας στον χώρο, είχε τη δυνατότητα συστηματικής καταγραφής της αλληλεπίδρασης των οργανισμών αυτών με το μνημειακό περιβάλλον. Αν και οι παράγοντες αυτοί δεν αποτελούν τον κυρίαρχο μηχανισμό φθοράς της Κνωσού, λειτουργούν επιβαρυντικά σε συνδυασμό με την υγρασία και τη βιολογική αποίκιση των επιφανειών (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008).

4.3 Περιβαλλοντικές επικαθίσεις και προϊόντα διάβρωσης

Σύμφωνα με τη μελέτη της Kalokairinou (2018), η ανάπτυξη περιβαλλοντικών επικαθίσεων και προϊόντων διάβρωσης στα μνημεία της ευρύτερης περιοχής του

Ηρακλείου, συμπεριλαμβανομένου του Ανακτόρου της Κνωσού, αποτελεί αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης φυσικών, χημικών και βιολογικών παραγόντων. Η εγγύτητα στη θάλασσα ευνοεί τη μεταφορά θαλάσσιων αερολυμάτων πλούσιων σε χλωριούχα άλατα, ενώ η ατμοσφαιρική ρύπανση και οι αυξημένες τιμές σχετικής υγρασίας δημιουργούν συνθήκες που επιταχύνουν τις διεργασίες αποσάθρωσης και χημικής αλλοίωσης των δομικών υλικών. Παράλληλα, η εγκατάσταση και ανάπτυξη βιολογικών οργανισμών στις επιφάνειες των μνημείων συμβάλλει περαιτέρω στη μεταβολή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους.

Για τη διερεύνηση των φαινομένων αυτών εφαρμόστηκαν οι τεχνικές micro-Raman και LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), οι οποίες επέτρεψαν τον χαρακτηρισμό των επιφανειακών αποθέσεων και των προϊόντων φθοράς. Μέσω των αναλύσεων αναγνωρίστηκαν θειικά και χλωριούχα άλατα, βιολογικές επικαθίσεις καθώς και επιφανειακές κρούστες διαφορετικής σύστασης. Η παρουσία των ενώσεων αυτών συνδέεται άμεσα με μηχανισμούς φθοράς, όπως η κρυστάλλωση αλάτων, οι χημικές αντιδράσεις με τους ατμοσφαιρικούς ρύπους και οι βιολογικές διεργασίες, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε αποσάθρωση, απώλεια υλικού και σταδιακή υποβάθμιση των ιστορικών επιφανειών. Τα αποτελέσματα της έρευνας αναδεικνύουν τη σημασία της συστηματικής παρακολούθησης των περιβαλλοντικών παραγόντων και της εφαρμογής κατάλληλων μέτρων προστασίας για τη μακροχρόνια διατήρηση των μνημείων της πολιτιστικής κληρονομιάς (Kalokairinou, 2018).

Συνολικά, οι μορφές φθοράς στο Ανάκτορο της Κνωσού είναι αποτέλεσμα πολυπαραγοντικών διεργασιών που επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο κάθε κατηγορία υλικού. Η κατανόηση των μηχανισμών αυτών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών συντήρησης και για την επιλογή συμβατών υλικών αποκατάστασης.

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι αρχαιομετρικές προσεγγίσεις, οι οποίες παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη σύσταση, τη μικροδομή και την κατάσταση διατήρησης των υλικών του μνημείου. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες αναλυτικές τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί στην Κνωσό, καθώς και η

συμβολή τους στην τεκμηρίωση των μηχανισμών φθοράς και στον σχεδιασμό αποτελεσματικών επεμβάσεων συντήρησης.

5. Αρχαιομετρικές προσεγγίσεις στην Κνωσό

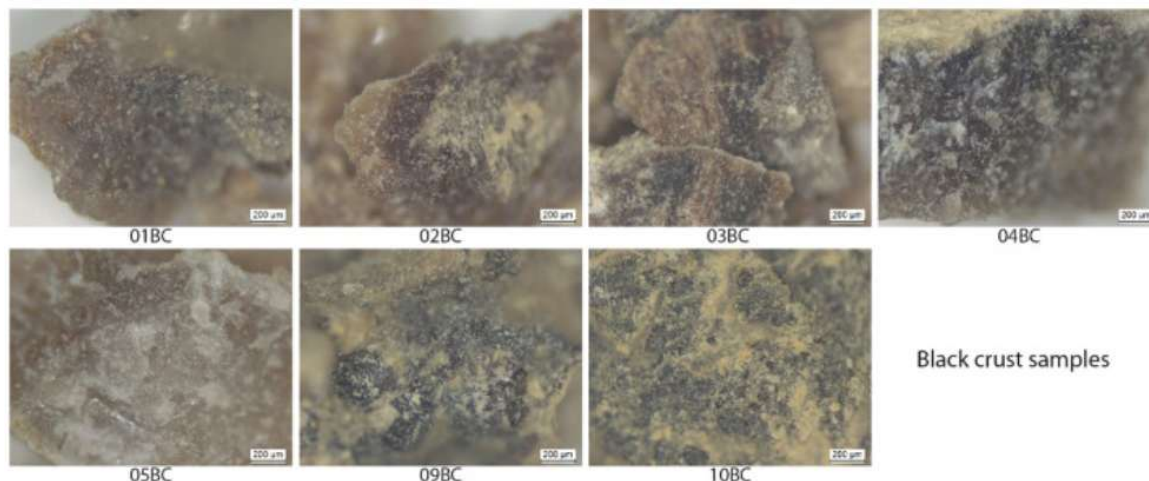
Η μελέτη των δομικών υλικών και των μηχανισμών φθοράς στο ανάκτορο της Κνωσού βασίζεται σε ένα ευρύ φάσμα αρχαιομετρικών μεθόδων, οι οποίες επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό της ορυκτολογικής και χημικής σύστασης των υλικών, τη διερεύνηση της μικροδομής τους, καθώς και την αναγνώριση των προϊόντων διάβρωσης. Η εφαρμογή αναλυτικών προσεγγίσεων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση της Κνωσού, καθώς το μνημείο αποτελεί ένα σύνθετο δομικό σύνολο με διαφορετικά υλικά κατασκευής, επάλληλες οικοδομικές φάσεις και εκτεταμένες νεότερες επεμβάσεις (Karetsou, 2004; Kavoulaki et al., 2020). Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στην Κνωσό επικεντρώνονται κυρίως στον χαρακτηρισμό των κονιαμάτων και των επιχρισμάτων, στη μελέτη του γυψολίθου και των λίθινων δομικών στοιχείων, στην αναγνώριση προϊόντων διάβρωσης και αλάτων, καθώς και στην αξιολόγηση των παλαιών και νεότερων υλικών αποκατάστασης.

5.1 Μακροσκοπική παρατήρηση και τεκμηρίωση φθορών

Το πρώτο στάδιο διερεύνησης της παθολογίας των υλικών περιλαμβάνει τη μακροσκοπική παρατήρηση και τη συστηματική τεκμηρίωση των μορφών φθοράς. Στην Κνωσό πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες εργασίες φωτογραφικής αποτύπωσης, σχεδιαστικής τεκμηρίωσης και χαρτογράφησης των αλλοιώσεων, ιδιαίτερα στις Δυτικές Αποθήκες και στα πηλοκονιάματα των τοιχοποιιών (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008). Μέσω της διαδικασίας αυτής καταγράφηκαν ρηγματώσεις, απολεπίσεις, αποκολλήσεις, αλατούχες επικαθίσεις, βιολογικές προσβολές και περιοχές όπου είχαν εφαρμοστεί παλαιότερες επεμβάσεις με τσιμεντοκονίες. Η χαρτογράφηση των φθορών αποτελεί βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησης και τον σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης.

5.2 Οπτική μικροσκοπία και πετρογραφική ανάλυση

Η οπτική μικροσκοπία και η πετρογραφική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της μικροδομής των λίθων, των κονιαμάτων και των επιχρισμάτων.



Εικόνα 15 Εικόνες από μικροσκόπιο που παρουσιάζουν δείγματα μαύρης κρούστας (Carvalho et al, 2023)

Η πετρογραφική ανάλυση αποτελεί μία από τις βασικές αναλύσεις στόχος της οποίας είναι η κατανόηση της ορυκτολογικής σύστασης του δείγματος, της τεχνολογίας κατασκευής και της προέλευσης των υλικών μέσω της παρατήρησης λεπτών τομών. Με τη χρήση της τεχνικής αυτής, κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της κοκκομετρίας των αδρανών, της μορφολογίας των πόρων και της κατανομής της συνδετικής ύλης, καθώς και η αναγνώριση της σχέσης μεταξύ αρχαίων και νεότερων υλικών. Οι Carvalho et al. (2023), μελετώντας τα κονιάματα της Κνωσού, διαπίστωσαν ότι τα περισσότερα δείγματα αποτελούνται από ασβεστιτική συνδετική ύλη με πυριτικά αδρανή, θηραϊκή γη και φυσικά ποζολανικά συστατικά.

Η μικροσκοπική παρατήρηση επέτρεψε επίσης την αναγνώριση μικρορηγματώσεων, προϊόντων αλατοκρυστάλλωσης και αλλοιώσεων που σχετίζονται με την υγρασία και τις περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Η πετρογραφική ανάλυση συνέβαλε παράλληλα στην κατανόηση της τεχνολογίας παραγωγής των αρχαίων κονιαμάτων και της επιλογής πρώτων υλών, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για την ανάπτυξη συμβατών υλικών αποκατάστασης.

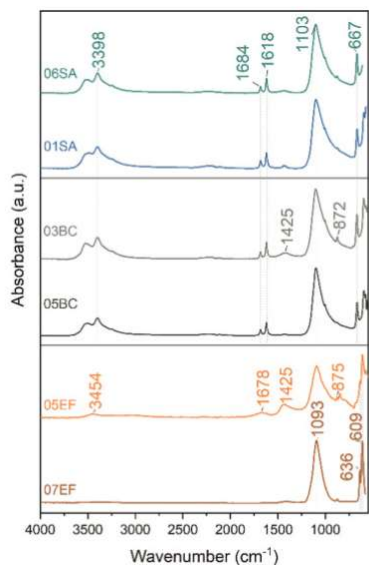
5.3 Περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD)

Η περιθλασιμετρία ακτίνων X (X-RayDiffraction – XRD) αποτελεί μία από τις βασικότερες μεθόδους ορυκτολογικού χαρακτηρισμού υλικών πολιτιστικής κληρονομιάς, η οποία βασίζεται στην περίθλαση των ακτίνων X και εφαρμόστηκε στην Κνωσό για τη διερεύνηση της σύστασης κονιαμάτων, λίθων, ιστορικών τσιμέντων και προϊόντων διάβρωσης. Μέσω της τεχνικής αναγνωρίστηκαν κύριες και δευτερογενείς ορυκτολογικές φάσεις, όπως ασβεστίτης, γύψος, χαλαζίας, άστριοι και αργιλικά ορυκτά, ενώ εντοπίστηκαν επίσης θειικά και χλωριούχα άλατα που σχετίζονται με φαινόμενα αλατοδιάβρωσης και υγρασίας (Carvalho et al., 2021; Carvalho et al., 2023).

Η παρουσία δευτερογενούς γύψου στις επιφάνειες των λίθων και των ιστορικών τσιμέντων συνδέεται με διεργασίες θείωσης και ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ενώ η ανίχνευση χλωριούχων και θεικών αλάτων τεκμηριώνει τη δράση της υγρασίας και των θαλάσσιων αερολυμάτων (Torfs & Van Grieken, 1997; Moropoulou et al., 1995).

5.4 Φασματοσκοπία υπερύθρου (FTIR)

Η φασματοσκοπία υπερύθρου μετασχηματισμού Fourier (FTIR) χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη οργανικών και ανόργανων συστατικών των κονιαμάτων και των προϊόντων φθοράς. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό, τον ποσοτικό προσδιορισμό και την ανάλυση της δομής οργανικών και ανόργανων χημικών ενώσεων, επιτρέποντας την αναγνώριση χαρακτηριστικών χημικών δεσμών και τη διερεύνηση της χημικής σύστασης των υλικών. Στην περίπτωση της Κνωσού, η FTIR συνέβαλε στην αναγνώριση ανθρακικών ενώσεων, στον εντοπισμό γύψου και αργιλικών φάσεων, καθώς και στη μελέτη προϊόντων αποσάθρωσης ιστορικών τσιμέντων (Carvalho et al., 2023). Η μέθοδος θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διερεύνηση της αλλοίωσης της συνδετικής φάσης των κονιαμάτων και της αλληλεπίδρασής της με την υγρασία και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους.



Εικόνα 16 Κύρια αποτελέσματα της φασματοσκοπίας FTIR-ATR για κάθε κατηγορία δειγμάτων, όπου στις μαύρες και λευκές κρούστες ταυτοποιήθηκε γύψος, ενώ στα δείγματα εξανθήσεων αλάτων ταυτοποιήθηκε θειικό νάτριο (thenardite)(Carvalho et al., 2023)

5.5 Φθορισμός ακτίνων X (XRF)

Η φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X (X-ray Fluorescence – XRF) αποτελεί μία μη καταστροφική αρχαιομετρική τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της στοιχειακής και χημικής σύστασης των υλικών. Η μέθοδος βασίζεται στην εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων X από τα στοιχεία ενός δείγματος μετά από διέγερσή τους με πρωτογενή ακτινοβολία, επιτρέποντας τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των κύριων και δευτερευόντων χημικών στοιχείων (Quinn, 2013).

Στη μελέτη των κονιαμάτων του Ανακτόρου της Κνωσού, οι Carvalho et al. (2023) εφάρμοσαν φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X διασποράς μήκους κύματος (WDXRF) για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν ως ποσοστά των κυριότερων οξειδίων (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_3 κ.ά.), επιτρέποντας τη σύγκριση των κονιαμάτων από διαφορετικά τμήματα του μνημείου και την αναγνώριση διαφοροποιήσεων στη σύσταση των συνδετικών υλών και των αδρανών (πίνακας 1). Η ανάλυση ανέδειξε την επικράτηση ασβεστιτικών κονιαμάτων, καθώς και σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των κονιαμάτων της Δυτικής Πτέρυγας και της Ανατολικής Πτέρυγας, συμβάλλοντας στην ερμηνεία των διαφορετικών κατασκευαστικών φάσεων και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο ανάκτορο.

5.6 Raman και LIBS φασματοσκοπία

Στο πλαίσιο σύγχρονων ερευνητικών εφαρμογών στην Κνωσό χρησιμοποιήθηκαν επίσης φορητές φασματοσκοπικές τεχνικές, όπως η Raman spectroscopy και η Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Η Φασματοσκοπία Raman είναι μια αναλυτική, μη καταστρεπτική τεχνική που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό χημικών ενώσεων και τη μελέτη της δομής τους. Βασίζεται στη σκέδαση φωτός λέιζερ από τα μόρια ενός δείγματος και προσφέρει ένα μοναδικό "χημικό αποτύπωμα". Η Laser Induced Breakdown Spectroscopy αποτελεί μια ελάχιστα καταστρεπτική τεχνική ταχείας στοιχειακής ανάλυσης που προσδιορίζει τη χημική σύσταση ενός υλικού μέσω πλάσματος που δημιουργείται από λέιζερ.



Εικόνα 17 Μαύρες κρούστες από το Ανάκτορο της Κνωσού. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα micro-Raman, τα δείγματα περιέχουν γύψο, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ανιχνεύθηκε και άμορφος άνθρακας (Kalokairinou, 2018).

Οι τεχνικές αυτές εφαρμόστηκαν κυρίως στο πλαίσιο του HERACLES Project και των ερευνών του ΙΤΕ/ΙΗΔΛ, με στόχο τη μη καταστροφική ανάλυση επιφανειακών επικαθίσεων και προϊόντων φθοράς (Kalokairinou, 2018). Η Raman spectroscopy επέτρεψε την αναγνώριση γύψου, ανθρακικών φάσεων, βιολογικών επικαθίσεων και αλάτων, ενώ η LIBS χρησιμοποιήθηκε για τον στοιχειακό χαρακτηρισμό των επιφανειών και τον εντοπισμό στοιχείων που σχετίζονται με περιβαλλοντικές επικαθίσεις και θαλάσσια αερολύματα. Η σημασία των φορητών αυτών τεχνικών έγκειται στο γεγονός ότι επιτρέπουν επιτόπιες αναλύσεις χωρίς ανάγκη εκτεταμένης δειγματοληψίας, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για μνημεία μεγάλης αρχαιολογικής αξίας όπως η Κνωσός.

5.7 Θερμικές αναλύσεις (TG-DTA)

Θερμικές αναλύσεις TG-DTA (Thermogravimetric Analysis – Differential Thermal Analysis) χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς των κονιαμάτων και των προϊόντων φθοράς. Οι εν λόγω μέθοδοι καταγράφουν τις μεταβολές μάζας και τις θερμικές αντιδράσεις ενός υλικού κατά τη θέρμανση, παρέχοντας πληροφορίες για τη σύσταση και τα προϊόντα αποσύνθεσής του. Μέσω των αναλύσεων αυτών κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε ανθρακικά, της παρουσίας υδραυλικών φάσεων και της αποσύνθεσης αλάτων και οργανικών ενώσεων. Η εφαρμογή των θερμικών αναλύσεων στα κονιάματα της Κνωσού συνέβαλε στην κατανόηση της τεχνολογίας παραγωγής τους και στην αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησής τους (Carvalho et al., 2023).

Συνολικά, η εφαρμογή των αρχαιομετρικών τεχνικών στην Κνωσό επέτρεψε τη συστηματική διερεύνηση της παθολογίας των δομικών υλικών και την κατανόηση των μηχανισμών φθοράς του μνημείου. Η συνδυαστική χρήση μικροσκοπικών, ορυκτολογικών, χημικών και φασματοσκοπικών μεθόδων συνέβαλε τόσο στην τεκμηρίωση της κατάστασης διατήρησης όσο και στην ανάπτυξη συμβατών στρατηγικών συντήρησης και αποκατάστασης.

6 Ερευνητικά προγράμματα και εφαρμογές

Η μελέτη και προστασία του Ανακτόρου της Κνωσού τα τελευταία χρόνια έχει ενισχυθεί σημαντικά μέσω της ανάπτυξης διεπιστημονικών ερευνητικών προγραμμάτων, τα οποία συνδυάζουν αρχαιομετρικές μεθόδους, τεχνολογίες περιβαλλοντικής παρακολούθησης και σύγχρονες πρακτικές συντήρησης. Η ανάγκη για συστηματική διερεύνηση των μηχανισμών φθοράς του μνημείου προέκυψε τόσο από τη συνεχιζόμενη περιβαλλοντική καταπόνηση των δομικών υλικών όσο και από τα προβλήματα που δημιούργησαν παλαιότερες επεμβάσεις αποκατάστασης με ασύμβατα υλικά, όπως το τσιμέντο (Karetsou, 2004).

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε η συμβολή ερευνητικών φορέων όπως το Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ/ΙΗΔΛ), το Κέντρο Λίθου, καθώς και διεθνών συνεργασιών που επικεντρώθηκαν στη μελέτη της παθολογίας των δομικών υλικών της Κνωσού. Οι έρευνες αυτές συνέβαλαν ουσιαστικά στην κατανόηση της σύστασης των κονιαμάτων, των προϊόντων διάβρωσης και των μηχανισμών αλατοδιάβρωσης και διάβρωσης από βιολογικούς παράγοντες που αναπτύσσονται στο μνημείο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, στο πλαίσιο των εργασιών αποκατάστασης και ανάδειξης του μνημείου της Κνωσού, οι οποίες υλοποιούνται συχνά μέσω συγχρηματοδοτούμενων προγραμμάτων, πραγματοποιούνται συστηματικά αναλύσεις κονιαμάτων και άλλων δομικών υλικών. Οι έρευνες αυτές αποσκοπούν στον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών και στην επιλογή συμβατών υλικών συντήρησης, με στόχο την τεκμηριωμένη και επιστημονικά ορθή εφαρμογή επεμβάσεων. Ωστόσο, τα αποτελέσματα των σχετικών αναλύσεων δεν δημοσιοποιούνται πάντοτε στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς σημαντικό μέρος τους παραμένει ενσωματωμένο στην τεχνική τεκμηρίωση και στα αρχεία των επιμέρους έργων συντήρησης.

6.1 Το πρόγραμμα HERACLES και η εφαρμογή του στην Κνωσό

Ιδιαίτερη σημασία για τη μελέτη και προστασία της Κνωσού είχε το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα HERACLES (Heritage Resilience Against Climate Events on Site), το οποίο υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος Horizon 2020 της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στόχος του προγράμματος ήταν η ανάπτυξη ολοκληρωμένων στρατηγικών προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των ακραίων περιβαλλοντικών φαινομένων (HERACLES Project, n.d.).

Η Κνωσός αποτέλεσε μία από τις βασικές πιλοτικές θέσεις εφαρμογής του προγράμματος, λόγω της ιδιαίτερης αρχαιολογικής της σημασίας αλλά και της ευαισθησίας των δομικών της υλικών στις περιβαλλοντικές μεταβολές. Στο πλαίσιο του HERACLES εφαρμόστηκαν τεχνολογίες περιβαλλοντικής παρακολούθησης, μη καταστροφικές τεχνικές ανάλυσης και μέθοδοι καταγραφής των φθορών, με στόχο την αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησης του μνημείου και την ανάπτυξη στρατηγικών πρόληψης. Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες καταπόνησης των υλικών της Κνωσού είναι οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, οι κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης, η ανερχόμενη υγρασία, η παρουσία διαλυτών αλάτων και η βιολογική δραστηριότητα (Kavoulaki et al., 2020). Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι η πορώδης φύση του γυψολίθου και των κονιαμάτων ευνοεί τη μεταφορά νερού και αλάτων στο εσωτερικό των υλικών, οδηγώντας σε φαινόμενα αποσάθρωσης και απώλειας συνοχής.

Στο πλαίσιο του προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν φορητές φασματοσκοπικές τεχνικές, όπως Raman spectroscopy και Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), XRF οι οποίες επέτρεψαν τη μη καταστροφική μελέτη επικαθίσεων, αλάτων και προϊόντων διάβρωσης απευθείας πάνω στις επιφάνειες του μνημείου. Η εφαρμογή των τεχνικών αυτών κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντική, καθώς κατέστη δυνατή η επιτόπια ανάλυση χωρίς την ανάγκη εκτεταμένης δειγματοληψίας, στοιχείο κρίσιμο για την προστασία ενός μνημείου μεγάλης αρχαιολογικής αξίας (Kalokairinou, 2018).

Η διπλωματική εργασία της Καλοκαιρινού (2021), επικεντρώθηκε στη μελέτη και παρακολούθηση επικαθήσεων και διαβρωτικών προϊόντων σε μνημεία του Ηρακλείου, συμπεριλαμβανομένης της Κνωσού. Μέσω εφαρμογής micro-Raman και LIBS αναγνωρίστηκαν θειικά και χλωριούχα άλατα, προϊόντα ατμοσφαιρικής ρύπανσης και βιολογικές επικαθίσεις, επιβεβαιώνοντας τον καθοριστικό ρόλο της υγρασίας και των θαλάσσιων αερολυμάτων στην εξέλιξη των φαινομένων φθοράς.

6.2 Έρευνες για τα κονιάματα και τα υλικά αποκατάστασης

Σημαντική κατεύθυνση της έρευνας στην Κνωσό αφορά τη μελέτη των αρχαίων κονιαμάτων και των μεταγενέστερων υλικών αποκατάστασης. Οι Carvalho et al. (2022), στο πλαίσιο μελέτης των κονιαμάτων του ανακτόρου, χρησιμοποίησαν οπτική μικροσκοπία, XRD, XRF, FTIR και θερμικές αναλύσεις TG-DTA για τον προσδιορισμό της σύστασης και της τεχνολογίας παραγωγής των υλικών. Η έρευνα έδειξε ότι τα αρχαία κονιάματα αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη συνδετική ύλη με προσμίξεις πυριτικών αδρανών, θηραϊκής γης και φυσικών ποζολανικών συστατικών, τα οποία προσέδιδαν υδραυλικές ιδιότητες στα κονιάματα.

	Samples	Function	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	Cl	SrO	MnO
West Magazine	KN-BM1A	Bedding	53.39	29.15	7.27	4.94	2.16	1.26	-	0.57	0.62	0.41	0.06	0.08	0.08
	KN-BM2A		51.29	28.45	7.11	6.21	2.19	1.32	1.24	0.64	0.66	0.59	0.14	0.08	0.07
	KN-CM1A		48.97	32.34	7.95	5.34	1.65	1.24	-	0.79	0.68	0.54	0.21	0.11	0.09
	KN-CM2A		45.97	36.06	8.32	5.24	1.54	1.17	-	0.46	0.60	0.36	0.09	0.08	0.11
	KN-PI1A	Renders	86.02	7.25	2.05	1.02	1.46	0.32	-	-	0.19	0.46	1.14	0.06	0.04
	KN-PI2A		53.47	23.83	6.61	3.93	2.12	1.19	-	0.13	0.51	8.04	0.04	0.07	0.07
East Wing	KN-BM3A	Bedding	48.76	28.74	7.55	4.79	2.41	1.56	-	0.77	0.59	4.41	0.27	0.07	0.07
	KN-CM3A		43.79	13.20	2.97	2.06	1.61	1.49	-	0.24	0.21	33.60	0.47	0.32	0.04
	KN-CM4A		39.19	36.49	7.72	3.21	2.28	0.61	6.29	-	0.46	2.87	0.78	0.04	0.07
	KN-PI3A	Render	64.12	18.21	4.89	2.39	3.44	1.01	1.37	-	0.27	4.04	0.15	0.06	0.05

Πίνακας 1 Χημική σύσταση κονιαμάτων από το Ανάκτορο της Κνωσού, όπως προσδιορίστηκε με WDXRF (% κ.β.). Το σύμβολο «-» δηλώνει ότι το στοιχείο δεν ανιχνεύθηκε (Carvalho et al. 2022).

Παράλληλα, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μελέτη των ιστορικών τσιμέντων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις επεμβάσεις του Arthur Evans. Η έρευνα των Carvalho et al. (2023) έδειξε ότι τα υλικά αυτά παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα φθοράς, όπως ανάπτυξη μαύρων κρουστών, θεικών αλάτων και επιφανειακών επικαθίσεων. Μέσω

αναλύσεων XRD, XRF και FTIR διαπιστώθηκε ότι τα προϊόντα διάβρωσης σχετίζονται με τη δράση της υγρασίας, των ατμοσφαιρικών ρύπων και της αλληλεπίδρασης των τσιμεντοειδών υλικών με τα αυθεντικά πορώδη δομικά στοιχεία.

Η κατανόηση της σύστασης των αυθεντικών υλικών είναι καθοριστική για την ανάπτυξη νέων συμβατών κονιαμάτων συντήρησης. Σύμφωνα με τις εργασίες του Υπουργείου Πολιτισμού στις Δυτικές Αποθήκες της Κνωσού, πριν από την εφαρμογή νέων κονιαμάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σύνθεσης και χρωματικής συμβατότητας, ώστε τα νέα υλικά να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις φυσικοχημικές ιδιότητες των αρχαίων πηλοκονιαμάτων και επιχρισμάτων (ΥΠΠΟΤ.Δ.Π.Ε.Α.Ε, 2008).

6.3 Συμβολή του ΙΤΕ και διεπιστημονική προσέγγιση

Το Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λέιζερ (ΙΗΔΛ) του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και εφαρμογή μη καταστροφικών τεχνικών ανάλυσης για τη μελέτη των υλικών της Κνωσού. Η χρήση φορητών φασματοσκοπικών συστημάτων, τεχνολογιών laser και μεθόδων περιβαλλοντικής παρακολούθησης επέτρεψε τη συνεχή καταγραφή παραμέτρων που επηρεάζουν τη διατήρηση του μνημείου, καθώς και τον επιτόπιο χαρακτηρισμό προϊόντων διάβρωσης και επιφανειακών επικαθίσεων χωρίς εκτεταμένη δειγματοληψία (Kavoulaki et al., 2020; Kalokairinou, 2018).

Η διεπιστημονική προσέγγιση που ακολουθείται στην Κνωσό συνδυάζει αρχαιολογικά, γεωλογικά, χημικά και φυσικοχημικά δεδομένα, επιτρέποντας τη συνολική κατανόηση της παθολογίας των δομικών υλικών. Η συνεργασία αρχαιολόγων, συντηρητών, χημικών μηχανικών, φυσικών και γεωλόγων θεωρείται πλέον απαραίτητη για τη διαμόρφωση ολοκληρωμένων στρατηγικών προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, ιδιαίτερα σε μνημεία με τόσο σύνθετη δομή και ιστορία επεμβάσεων όπως η Κνωσός.

7 Επεμβάσεις συντήρησης

Οι επεμβάσεις συντήρησης στο Ανάκτορο της Κνωσού αποτελούν ένα ιδιαίτερα σύνθετο και απαιτητικό πεδίο διαχείρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς, καθώς το μνημείο φέρει τόσο τις επιπτώσεις της μακροχρόνιας περιβαλλοντικής καταπόνησης όσο και τα ίχνη προηγούμενων αναστηλωτικών πρακτικών. Η ιστορία της αποκατάστασης της Κνωσού συνδέεται άμεσα με τις εκτεταμένες επεμβάσεις του Arthur Evans στις αρχές του 20ού αιώνα, κατά τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν οπλισμένο σκυρόδεμα, τσιμεντοκονιάματα και νέες αρχιτεκτονικές συμπληρώσεις με στόχο την ανακατασκευή και ανάδειξη του ανακτόρου. Παρά τη συμβολή τους στη διάσωση και προβολή του μνημείου, οι επεμβάσεις αυτές δημιούργησαν σημαντικά προβλήματα συμβατότητας μεταξύ των αυθεντικών και των νεότερων υλικών, οδηγώντας με την πάροδο του χρόνου σε φαινόμενα εγκλωβισμού υγρασίας, ανάπτυξης αλάτων, ρηγματώσεων και αποσαθρώσεων (Karetsou, 2004; Carvalho et al., 2023).



Εικόνα 18 Μέγαρο Βασιλέως: Απορροές ομβρίων υδάτων, εξανθήσεις αλάτων, λευκές συγκεντρώσεις αλάτων και φαινόμενα βιολογικής φθοράς στις αναστηλώσεις των πολύθυρων από οπλισμένο σκυρόδεμα (προσωπικό αρχείο Ζάχου Μ.)

Τα τσιμεντοκονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώιμες επεμβάσεις παρουσιάζουν σήμερα έντονες ρηγματώσεις, αποκολλήσεις και ανάπτυξη διαβρωτικών προϊόντων. Η αυξημένη σκληρότητα και η περιορισμένη διαπνοή των τσιμεντοειδών υλικών σε σχέση με τους αρχαίους πορώδεις λίθους και τα ασβεστοκονιάματα οδήγησαν

σε εγκλωβισμό υγρασίας και επιτάχυνση φαινομένων αλατοδιάβρωσης στις γειτονικές επιφάνειες. Οι έρευνες των Carvalho et al. (2023) έδειξαν ότι στα ιστορικά τσιμέντα της Κνωσού παρατηρούνται θευικά προϊόντα διάβρωσης, μικρορωγμές και αποσάθρωση, κυρίως λόγω της αλληλεπίδρασης των υλικών με την υγρασία και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Οι νεότερες εργασίες συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν από το Υπουργείο Πολιτισμού, ιδιαίτερα από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 και έπειτα, στο πλαίσιο εθνικών και συγχρηματοδοτούμενων προγραμμάτων — μεταξύ αυτών και έργων ενταγμένων σε χρηματοδοτικά εργαλεία του ΕΣΠΑ — βασίστηκαν σε μία διαφορετική φιλοσοφία προσέγγισης σε σχέση με τις παλαιότερες αναστηλωτικές πρακτικές. Η σύγχρονη προσέγγιση στην Κνωσό δίνει έμφαση στις αρχές της ελάχιστης επέμβασης, της συμβατότητας των υλικών, της αναστρεψιμότητας όπου αυτό είναι εφικτό, καθώς και του σαφούς διαχωρισμού μεταξύ αυθεντικών και νέων προσθηκών, σύμφωνα με τις αρχές που διατυπώνονται σε διεθνείς χάρτες προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως ο Χάρτης της Βενετίας του 1964 (www.charta-von-venedig.de) και τα κείμενα της ICOMOS. Παράλληλα, οι επεμβάσεις συνδέθηκαν άμεσα με συστηματική επιστημονική έρευνα, αρχαιομετρικές αναλύσεις και προγράμματα παρακολούθησης της συμπεριφοράς των δομικών υλικών.

Στο πλαίσιο αυτό, η συντήρηση στην Κνωσό δεν περιορίζεται πλέον στην αποκατάσταση μεμονωμένων φθορών, αλλά αντιμετωπίζει το μνημείο ως ένα σύνθετο σύστημα αυθεντικών και μεταγενέστερων υλικών με διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες και διαφορετική συμπεριφορά απέναντι στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Η εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας ήταν εμφανής τόσο στις εργασίες συντήρησης των Δυτικών Αποθηκών και των πηλοκονιαμάτων όσο και στις επεμβάσεις στερέωσης και διαχείρισης των φθορών του γυψολίθου και των ιστορικών τσιμέντων (ΥΠΠΟΤ.Δ.Π.Ε.Α.Ε, 2008). Παράλληλα, ιδιαίτερη πρόκληση για τη διατήρηση του μνημείου αποτελεί η αυξημένη επισκεψιμότητα του αρχαιολογικού χώρου, καθώς η συνεχής παρουσία μεγάλου αριθμού επισκεπτών επιβαρύνει τις ευπαθείς επιφάνειες μέσω μηχανικών καταπονήσεων, μεταφοράς σωματιδίων και τοπικών μεταβολών των μικροκλιματικών συνθηκών.

7.1 Επεμβάσεις στα πηλοκονιάματα και στα επιχρίσματα

Ένα από τα σημαντικότερα πεδία συντήρησης στην Κνωσό αφορά τα πηλοκονιάματα και τα ασβεστοκονιάματα των τοιχοποιιών και των αποθηκών του ανακτόρου. Οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στις Δυτικές Αποθήκες III–VII έδειξαν ότι τα κονιάματα παρουσίαζαν έντονη αποσάθρωση, αποκολλήσεις, ρηγματώσεις και απώλεια συνοχής λόγω της υγρασίας, των αλάτων, της βιολογικής δραστηριότητας και των παλαιότερων επεμβάσεων με τσιμεντοκονίες (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008).

Οι εργασίες συντήρησης περιλάμβαναν αρχικά αναλυτική φωτογραφική τεκμηρίωση και χαρτογράφηση των φθορών, προκειμένου να αξιολογηθεί η κατάσταση διατήρησης των αυθεντικών επιφανειών. Ακολούθησαν στερεώσεις σαθρών περιοχών, συγκολλήσεις αποκολλημένων τμημάτων και εφαρμογή ενεμάτων σε περιοχές με εσωτερικά κενά. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην ανάπτυξη συμβατών υλικών αποκατάστασης, μέσω μελέτης της σύστασης των αυθεντικών κονιαμάτων.

Οι Carvalho et al. (2023), μέσω πετρογραφικής ανάλυσης, περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD), φασματοσκοπίας FTIR και θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (TG/DTG), διαπίστωσαν ότι τα αρχαία κονιάματα της Κνωσού αποτελούνται κυρίως από ασβεστιτική συνδετική ύλη με πυριτικά αδρανή, θηραϊκή γη και φυσικά ποζολανικά συστατικά. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιήθηκαν για την παρασκευή νέων κονιαμάτων υψηλής συμβατότητας τόσο ως προς τις φυσικοχημικές ιδιότητες όσο και ως προς τη χρωματική τους ένταξη στο μνημείο (Carvalho et al., 2023). Σύμφωνα με τις τεχνικές εκθέσεις του ΥΠΠΟΑ, πριν από την εφαρμογή των νέων κονιαμάτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σύνθεσης και χρωματικής προσαρμογής, ώστε να εξασφαλιστεί η οπτική και τεχνολογική συμβατότητα των επεμβάσεων (ΥΠΠΟΤ.Δ.Π.Ε.Α.Ε., 2008). Για εργασίες συμπλήρωσης και σφράγισης εφαρμόστηκαν κονιάματα με χαλαζιακή άμμο, *chauxblanche* (φυσική υδραυλική άσβεστος- υψηλής λευκότητας) και θηραϊκή γη, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν κονιάματα με περιορισμένη προσθήκη λευκού τσιμέντου για τη βελτίωση της μηχανικής αντοχής.

7.2 Επεμβάσεις στον γυψόλιθο και στα λίθινα δομικά στοιχεία

Ιδιαίτερα απαιτητικές υπήρξαν οι εργασίες συντήρησης στον γυψόλιθο. Η υψηλή πορώδης δομή και η ευαισθησία του υλικού στην υγρασία οδηγούν σε φαινόμενα διάλυσης, απολέπισης, αποσάθρωσης και απώλειας υλικού, ιδιαίτερα σε εκτεθειμένες επιφάνειες όπως δάπεδα, κατώφλια και επενδύσεις τοίχων.

Οι επεμβάσεις περιλάμβαναν καθαρισμούς επιφανειών, απομάκρυνση βιολογικών επικαθίσεων, στερεώσεις σαθρών τμημάτων και συγκολλήσεις αποκολλημένων στοιχείων. Σε αρκετές περιπτώσεις κρίθηκε απαραίτητη η απομάκρυνση παλαιών τσιμεντοκονιών που βρίσκονταν σε άμεση επαφή με τον γυψόλιθο, καθώς η μειωμένη διαπνοή των υλικών αυτών προκαλούσε εγκλωβισμό υγρασίας και επιτάχυνε τα φαινόμενα φθοράς (ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε, 2008).

Παράλληλα, εφαρμόστηκαν υλικά στερέωσης υψηλής διαπνοής και χαμηλής περιεκτικότητας σε άλατα, ώστε να περιοριστεί η ανάπτυξη νέων φαινομένων αλατοδιάβρωσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις ενέσεων και τοπικών στερεώσεων σε γυψολιθικά μέλη, με στόχο τη βελτίωση της συνοχής και της μηχανικής αντοχής τους. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε επίσης στη διαχείριση της υγρασίας μέσω εργασιών αποστράγγισης, καθαρισμού αγωγών και βελτίωσης της απορροής των ομβρίων, καθώς η συσσώρευση νερού αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες φθοράς των λίθων και των κονιαμάτων στην Κνωσό.

7.3 Ασυμβατότητα παλαιότερων επεμβάσεων και ανάγκη επαναξιολόγησης

Η παρουσία εκτεταμένων παλαιότερων επεμβάσεων με τσιμεντοειδή υλικά αποτέλεσε ένα από τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν στις νεότερες εργασίες συντήρησης. Οι επεμβάσεις αυτές δημιούργησαν ένα σύνθετο σύστημα

αυθεντικών και νεότερων δομικών στοιχείων με διαφορετική μηχανική και φυσικοχημική συμπεριφορά.

Η μελέτη των Carvalho et al. (2023) για τα ιστορικά τσιμέντα της Κνωσού έδειξε ότι τα υλικά αυτά παρουσιάζουν προϊόντα διάβρωσης όπως μαύρες κρούστες, θειικά άλατα και επιφανειακές επικαθίσεις. Μέσω αναλύσεων αναλυτικών μεθόδων διαπιστώθηκε ότι οι φθορές σχετίζονται με τη δράση της υγρασίας, των ατμοσφαιρικών ρύπων και της αλληλεπίδρασης των τσιμεντοειδών υλικών με τα πορώδη αρχαία δομικά στοιχεία.



Εικόνα 19 Μέγαρο Βασιλέως: Αποκατάσταση λιθοδομής με την εφαρμογή συμβατών υλικών (προσωπικό αρχείο Ζάχου Μ)

Για τον λόγο αυτό, σε αρκετές περιοχές πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις απομάκρυνσης ή περιορισμού των ασύμβατων προσθηκών και αντικατάστασής τους με νέα υλικά συμβατής συμπεριφοράς. Η διαδικασία αυτή συνοδεύτηκε από εκτεταμένες αρχαιομετρικές αναλύσεις και εργαστηριακές δοκιμές, ώστε να διασφαλιστεί η τεχνολογική συμβατότητα των νέων υλικών αποκατάστασης.

8 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση των περιβαλλοντικών παραγόντων που επηρεάζουν τη διατήρηση των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς και στη συμβολή των αρχαιομετρικών προσεγγίσεων στην κατανόηση των μηχανισμών φθοράς και στον σχεδιασμό κατάλληλων επεμβάσεων συντήρησης. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τη μελέτη της περίπτωσης του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού αναδείχθηκε ο πολυπαραγοντικός χαρακτήρας των διεργασιών υποβάθμισης των δομικών υλικών, καθώς η φθορά προκύπτει από τη συνδυασμένη δράση φυσικών, χημικών, βιολογικών και ανθρωπογενών παραγόντων.

Η εξέταση αντιπροσωπευτικών παραδειγμάτων από τον ελλαδικό χώρο, όπως η Ακρόπολη των Αθηνών, η Δήλος και η Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου, κατέδειξε ότι παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με τα υλικά κατασκευής και τις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες, ορισμένοι μηχανισμοί φθοράς εμφανίζονται με συστηματικό τρόπο. Η ατμοσφαιρική ρύπανση, η δράση των διαλυτών αλάτων, οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας, καθώς και η βιολογική δραστηριότητα αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν καθοριστικά τη μακροχρόνια συμπεριφορά των υλικών και τη διατήρηση των μνημείων.

Η περίπτωση της Κνωσού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς πρόκειται για ένα μνημειακό σύνολο με σύνθετη οικοδομική ιστορία, ποικιλία δομικών υλικών και εκτεταμένες επεμβάσεις αποκατάστασης κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα. Η εγγύτητα στη θάλασσα, οι σχετικά υψηλές τιμές ατμοσφαιρικής υγρασίας, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, η σεισμικότητα της περιοχής και οι ανθρωπογενείς πιέσεις διαμορφώνουν ένα περιβάλλον το οποίο ευνοεί την ανάπτυξη ποικίλων φαινομένων φθοράς. Η επίδραση των παραγόντων αυτών δεν είναι ανεξάρτητη, αλλά εκδηλώνεται μέσω σύνθετων αλληλεπιδράσεων που επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο κάθε κατηγορία υλικού.

Ιδιαίτερη σημασία για την κατανόηση της παθολογίας του μνημείου έχει η μελέτη των δομικών υλικών και των προϊόντων φθοράς μέσω αρχαιομετρικών τεχνικών. Οι αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στην Κνωσό κατέδειξαν ότι η συνδυαστική εφαρμογή ορυκτολογικών, χημικών, μικροσκοπικών και φασματοσκοπικών μεθόδων

παρέχει ουσιαστικές πληροφορίες για τη σύσταση, τη μικροδομή και την κατάσταση διατήρησης των υλικών. Παράλληλα, οι σχετικές έρευνες συνέβαλαν στην αναγνώριση των μηχανισμών αλλοίωσης και στην αξιολόγηση της συμβατότητας μεταξύ των αρχικών υλικών και των νεότερων επεμβάσεων αποκατάστασης.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη της Κνωσού είναι ότι η αποτελεσματική προστασία του μνημείου δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στην αντιμετώπιση μεμονωμένων προβλημάτων φθοράς. Αντίθετα, απαιτείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, η οποία θα συνδυάζει τη συστηματική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, τη συνεχή αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησης των υλικών και την εφαρμογή συμβατών επεμβάσεων συντήρησης. Στο πλαίσιο αυτό, η αρχαιομετρία αποτελεί βασικό εργαλείο τεκμηρίωσης και λήψης αποφάσεων, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση των παρατηρούμενων φαινομένων φθοράς με τα χαρακτηριστικά των υλικών και τις συνθήκες έκθεσής τους.

Συνολικά, η μελέτη ανέδειξε ότι η διατήρηση του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού αποτελεί ένα σύνθετο και διαρκές εγχείρημα, το οποίο δεν περιορίζεται στην αντιμετώπιση των ορατών εκδηλώσεων φθοράς, αλλά προϋποθέτει την εις βάθος κατανόηση των μηχανισμών που τις προκαλούν. Η αποτελεσματική προστασία και αποκατάσταση των μνημείων απαιτεί τη συστηματική αξιοποίηση αρχαιομετρικών μεθόδων, οι οποίες παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα για τη σύσταση, τη μικροδομή, την παθολογία και τη συμπεριφορά των υλικών στο χρόνο. Παράλληλα, καθίσταται αναγκαία η υιοθέτηση μιας διεπιστημονικής προσέγγισης, η οποία συνδυάζει γνώσεις από την αρχαιολογία, τη συντήρηση, τη χημεία, τη γεωλογία, την επιστήμη των υλικών, τη μηχανική και τις περιβαλλοντικές επιστήμες. Η συνεργασία των διαφορετικών αυτών επιστημονικών πεδίων επιτρέπει την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των παραγόντων φθοράς και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για την επιλογή συμβατών υλικών και κατάλληλων επεμβάσεων. Στο πλαίσιο αυτό, η αρχαιομετρία δεν αποτελεί απλώς ένα υποστηρικτικό ερευνητικό εργαλείο, αλλά βασικό άξονα για τη σύγχρονη διαχείριση, συντήρηση και αποκατάσταση της πολιτιστικής κληρονομιάς, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μακροχρόνια διατήρηση μνημείων ιδιαίτερης ιστορικής και πολιτιστικής αξίας, όπως το Ανάκτορο της Κνωσού

8.1 Μελλοντικές προοπτικές για την παρακολούθηση και διαχείριση του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού

Η μακροχρόνια προστασία ενός μνημείου παγκόσμιας πολιτιστικής αξίας, όπως το Μινωικό Ανάκτορο της Κνωσού, δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στην αντιμετώπιση των ήδη εκδηλωμένων φθορών, αλλά απαιτεί την υιοθέτηση μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής προληπτικής διατήρησης. Οι περιβαλλοντικές μεταβολές, η σεισμικότητα, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και η αυξημένη επισκεψιμότητα του αρχαιολογικού χώρου συνιστούν δυναμικούς παράγοντες, οι οποίοι επιβάλλουν τη συνεχή αξιολόγηση της κατάστασης διατήρησης του μνημείου και την έγκαιρη λήψη τεκμηριωμένων μέτρων προστασίας.

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη βαρύτητα θα πρέπει να δοθεί στην περαιτέρω ενσωμάτωση διαδικασιών **εκτίμησης και διαχείρισης κινδύνου (Risk Assessment and Management)** στον σχεδιασμό και την εφαρμογή των επεμβάσεων συντήρησης. Η συστηματική αξιολόγηση της τρωτότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων, σε συνδυασμό με την καταγραφή των περιβαλλοντικών και ανθρωπογενών πιέσεων, μπορεί να συμβάλει στην ιεράρχηση των αναγκών προστασίας και στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Η προσέγγιση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε μνημεία μεγάλης έκτασης και πολυπλοκότητας, όπως η Κνωσός, όπου οι συνθήκες διατήρησης διαφοροποιούνται σημαντικά από σημείο σε σημείο του ανακτόρου.

Εξίσου σημαντική είναι η διατήρηση και η περαιτέρω ενίσχυση των προγραμμάτων **περιβαλλοντικής παρακολούθησης (monitoring)** που εφαρμόζονται κατά διαστήματα στον αρχαιολογικό χώρο. Η συνεχής και συστηματική καταγραφή παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η αλατότητα και οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την εξέλιξη των μηχανισμών φθοράς και να επιτρέπει την έγκαιρη λήψη προληπτικών μέτρων πριν από την εκδήλωση μη αναστρέψιμων βλαβών. Η αξιοποίηση των δεδομένων αυτών αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία υπό το πρίσμα των μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών.

Παράλληλα, κρίνεται σκόπιμη η συνέχιση και η συστηματική επικαιροποίηση της ψηφιακής τεκμηρίωσης του μνημείου μέσω σύγχρονων τεχνολογιών αποτύπωσης, όπως η

φωτογραμμετρία, η επίγεια σάρωση laser και τα γεωχωρικά συστήματα πληροφοριών (GIS). Οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται ήδη στο Ανάκτορο της Κνωσού στο πλαίσιο ερευνητικών και τεκμηριωτικών δράσεων, ωστόσο η τακτική ενημέρωση των ψηφιακών δεδομένων μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην παρακολούθηση της εξέλιξης των φθορών, στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων συντήρησης και στον καλύτερο σχεδιασμό μελλοντικών δράσεων προστασίας.

Η περιοδική εφαρμογή αρχαιομετρικών αναλύσεων αποτελεί επίσης βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική διαχείριση του μνημείου. Η επανάληψη αναλύσεων με τεχνικές όπως η XRD, η FTIR, η μ-Raman, η WDXRF η SEM-EDS και οι θερμικές αναλύσεις σε επιλεγμένα σημεία του αρχαιολογικού χώρου θα επιτρέψει την παρακολούθηση της εξέλιξης των προϊόντων διάβρωσης, την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των υλικών συντήρησης και την έγκαιρη αναγνώριση νέων μηχανισμών υποβάθμισης. Παράλληλα, η δημιουργία και η συνεχής ενημέρωση μίας ενιαίας βάσης δεδομένων, στην οποία θα καταγράφονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, οι μορφές φθοράς και το ιστορικό των επεμβάσεων, θα αποτελούσε ένα πολύτιμο εργαλείο για τη μακροχρόνια διαχείριση του μνημείου.

Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να αποδοθεί και στη διαχείριση της επισκεψιμότητας. Η διαρκής άνοδος του πολιτιστικού τουρισμού στην Ελλάδα αποτυπώνεται χαρακτηριστικά και στο Μινωικό Ανάκτορο της Κνωσού, έναν από τους σημαντικότερους αρχαιολογικούς χώρους της χώρας. Σύμφωνα με τα πλέον πρόσφατα διαθέσιμα στοιχεία, ο αρχαιολογικός χώρος δέχθηκε 943.869 επισκέπτες το 2023, ενώ το 2024 ο αριθμός αυτός ξεπέρασε για πρώτη φορά το ένα εκατομμύριο (1.010.006 επισκέπτες), παρουσιάζοντας περαιτέρω αύξηση της επισκεψιμότητας. Η συνεχής αυτή ανοδική πορεία καταδεικνύει τη διεθνή απήχηση του μνημείου, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει σημαντικά τις πιέσεις που ασκούνται στην υλική του υπόσταση και δημιουργεί νέες προκλήσεις για τη διαχείριση και την προστασία του.

Κατά τη διάρκεια της συμμετοχής της συγγραφέως σε εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης στο Ανάκτορο της Κνωσού πραγματοποιήθηκαν παρατηρήσεις πεδίου, οι οποίες, παρότι δεν αποτελούν αντικείμενο συστηματικής πρωτογενούς έρευνας, επιβεβαιώνουν στην πράξη τις πιέσεις που μπορεί να ασκήσει η αυξημένη

επισκεψιμότητα στη διατήρηση του μνημείου. Διαπιστώθηκαν επανειλημμένα περιπτώσεις απομάκρυνσης επισκεπτών από τις προκαθορισμένες διαδρομές, βάδισης επάνω σε αρχαία δομικά στοιχεία και ευπαθείς επιφάνειες, καθώς και περιστατικά αποκόλλησης μικρών τεμαχίων γυψολίθου, λόγω της χαρακτηριστικής κρυσταλλικής και ημιδιαφανούς εμφάνισής του, η οποία τον καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό στους επισκέπτες. Παράλληλα, η συνεχής μηχανική καταπόνηση που προκαλείται από τη διέλευση ιδιαίτερα μεγάλου αριθμού επισκεπτών επιβαρύνει ευαίσθητα δομικά υλικά και επιταχύνει τη φθορά τους, αυξάνοντας τις ανάγκες για συχνότερες επεμβάσεις συντήρησης.

Οι διαπιστώσεις αυτές υπογραμμίζουν ότι η αποτελεσματική προστασία του μνημείου δεν εξαρτάται μόνο από την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών παραγόντων φθοράς, αλλά και από την ορθολογική διαχείριση της ανθρώπινης παρουσίας. Για τον λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω ενίσχυση των μέτρων διαχείρισης της επισκεψιμότητας, όπως ο καθορισμός ανώτατου ημερήσιου αριθμού επισκεπτών σύμφωνα με τη φέρουσα ικανότητα του μνημείου, η αυστηρότερη τήρηση των προκαθορισμένων διαδρομών, η ενίσχυση της επιτήρησης στα πλέον ευάλωτα σημεία, η συστηματική ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των επισκεπτών σχετικά με την ευπάθεια των δομικών υλικών, καθώς και η συνεχής παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησης των επιφανειών μέσω προληπτικής συντήρησης και τακτικής τεκμηρίωσης. Η εφαρμογή των μέτρων αυτών μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση της ανθρωπογενούς φθοράς και στη μακροχρόνια διατήρηση της αυθεντικότητας και της υλικής υπόστασης του μνημείου. Οι παρατηρήσεις πεδίου που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών αποκατάστασης καταδεικνύουν ότι η συστηματική παρακολούθηση της επίδρασης της επισκεψιμότητας θα πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής διεπιστημονικής έρευνας, συνδυάζοντας αρχαιομετρικές τεχνικές, μελέτες συμπεριφοράς των επισκεπτών και σύγχρονα συστήματα διαχείρισης πολιτιστικής κληρονομιάς.

Συνολικά, η αποτελεσματική προστασία του Μινωικού Ανακτόρου της Κνωσού προϋποθέτει τη μετάβαση από μία πρακτική που επικεντρώνεται κυρίως στην αποκατάσταση των φθορών σε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προληπτικής διαχείρισης, όπου η συστηματική παρακολούθηση, η αρχαιομετρική τεκμηρίωση, η εκτίμηση κινδύνου και η διεπιστημονική συνεργασία αποτελούν βασικούς άξονες λήψης αποφάσεων. Η στενή συνεργασία αρχαιολόγων, συντηρητών, μηχανικών, γεωεπιστημόνων, χημικών και

επιστημόνων υλικών, σε συνδυασμό με την αξιοποίηση των σύγχρονων επιστημονικών και τεχνολογικών εργαλείων, μπορεί να διασφαλίσει την αποτελεσματικότερη προστασία του μνημείου απέναντι στις σύγχρονες περιβαλλοντικές και ανθρωπογενείς προκλήσεις, συμβάλλοντας στη διατήρηση της αυθεντικότητας και της ιστορικής του αξίας για τις επόμενες γενιές.

Βιβλιογραφία

1. Anastassopoulou, J., Delly, G., &Theologitis, T. (1997). Analysis of damaged marble surfaces from the Acropolis monuments by Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Molecular Structure*, 408–409, 251–254.
2. Brimblecombe, P. (2016). Past, present and future damage to materials and building surfaces in the polluted urban environment. In P. Brimblecombe (Ed.), *Urban pollution and changes to materials and building surfaces* (pp. 1–18). Imperial College Press.https://doi.org/10.1142/9781783268863_0001
3. Camuffo, D. (2019). *Microclimate for cultural heritage: Measurement, risk assessment, conservation, restoration, and maintenance of indoor and outdoor monuments*. Elsevier. DOI: 10.1016/C2017-0-02191-2
4. Carvalho, F., Lima, M. M. R. A., Kavoulaki, E., Leal, N., Simão, J., Galhano, C., Águas, H., Padeletti, G., &Veiga, J. P. (2023). Decay products of historical cements from the Palace of Knossos, Crete, Greece. *Journal of Cultural Heritage*, 64, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.007>
5. Carvalho, F., Sousa, P., Leal, N., Simão, J., Kavoulaki, E., Lima, da Silva, T., Aguas, H., Padeletti, G., &Veiga, P., (2021). Mortars from the Palace of Knossos in Crete, Greece: A multi-analytical approach. *Minerals*, 12(1), 30. <https://doi.org/10.3390/min12010030>
6. Castleden, R. (2012). *The Knossos Labyrinth: A New View of the Palace of Minos' at Knossos*. Routledge.
7. Caputo, R., Catalano, S., Monaco, C., Romagnoli, G., Tortorici, G., & Tortorici, L. (2010). Active faulting on the island of Crete (Greece). *Geophysical Journal International*, 183(1), 111–126. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04749.x>
8. Caputo, R. (2004). Ground effects of large morphogenic earthquakes. *Journal of Geodynamics*, 40(2-3), 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.07.001>
9. Chabas, A., & Jeannette, D. (2001). *Weathering of marbles and granites in marine environment: Petrophysical properties and special role of atmospheric salts*. *Mineralogy and Petrology*, 72(1–3), 283–297. <https://doi.org/10.1007/s007100170038>

10. Charola, A. E. (2000). Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the American institute for conservation*, 39(3), 327-343.
<https://doi.org/10.1179/019713600806113176>
11. Chlouveraki, S. (2006). *Gypsum in Minoan architecture: Exploitation, utilisation and weathering of a prestige stone*. University of London, University College London (United Kingdom).
12. Coldstream, J. N., Eiring, L. J., & Forster, G. (2001). The late Archaic and Classical periods. *Knossos Pottery Handbook: Greek and Roman*, 7, 77.
13. Comite, V., Miani, A., Ricca, M., La Russa, M. F., Pulimeno, M., & Fermo, P. (2021). The impact of atmospheric pollution on outdoor cultural heritage: An analytic methodology for the characterization of the carbonaceous fraction in black crusts present on stone surfaces. *Environmental Research*, 201, 111565.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111565>
14. Comite, V., Ricca, M., Ruffolo, S. A., La Russa, M. F., & Belfiore, C. M. (2021). Black crusts on architectural stone surfaces: A review of the evolution of scientific research and current challenges. *Journal of Cultural Heritage*, 52, 252–264.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.09.007>
15. Curulli, A., Montesperelli, G., Ronca, S., Carvalho, F., Veiga, J.P., Cavalangi N., Ubertini, F., Aguas, H., Kavoulaki, E., & Padeletti, G., (2020). A multi-disciplinary materials study as a contribution to evaluate degradation issues of monuments and archaeological sites towards their preservation. *EGU General Assembly Proceedings*.
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2020EGUGA..22.7010C/doi:10.5194/egusph-ere-egu2020-7010
16. Driessen, J., & Macdonald, C. F. (1997). *The troubled island: Minoan Crete before and after the Santorini eruption* (Aegaeum 17). Université de Liège, Histoire de l'Art et Archéologie de la Grèce Antique; University of Texas at Austin, Program in Aegean Scripts and Prehistory.
17. Efstratiou, N., Karetsou, A., & Ntinou, M. (2013). *Knossos and the surrounding landscape*. INSTAP Academic Press, Philadelphia, PA.
https://www.researchgate.net/publication/273128399_The_Neolithic_Settlement_of_Knossos_in_Crete_The_Knossos_fauna_and_the_Beginning_of_the_Neolithic_in_the_Mediterranean_Island

18. Evans, A. (1921). *The Palace of Minos at Knossos* (Vol. I). London: Macmillan.
<https://archive.org/details/in.gov.ignca.6667>
19. Evans, A. (1930). *The Palace of Minos at Knossos* (Vol. III). London: Macmillan.
<https://archive.org/details/in.gov.ignca.6670>
20. Fassina, V., Favaro, M., Crivellari, F., & Naccari, A. (2001). The stone decay of monuments in relation to atmospheric environment. *Annali di chimica*, 91(11-12), 767-774.
21. Jones, R. E. (1986). *Greek and Cypriot Pottery: A Review of Scientific Studies*. Series: Fitch Laboratory occasional paper, 1. British School at Athens: Athens. <https://archive.org/details/greekcypriotpott0000jone>
22. Jones, R. E., & Photos-Jones, E. (2005). Technical studies of Aegean Bronze Age wall painting: methods, results and future prospects. *British School at Athens Studies*, 13, 199-228.
23. Jusseret, S. (2012). Cretan Offerings, Studies in Honour of Peter Warren (BSA Studies, 18).
24. Hall, K., & Thorn, C. E. (2014). Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: An attempt to unravel the geomorphic processes and products. *Geomorphology*, 206, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.022>
25. Hood, S. (2005). Dating the Knossos frescoes. *British School at Athens Studies*, 13, 45-81.
26. Hood, S., & Smyth, D. (1981). Archaeological survey of the Knossos Area. *The British School at Athens. Supplementary Volumes*, (14), i-69.
27. Immerwahr (1990). *Aegean Painting in the Bronze Age*. University Park et Londres, The Pennsylvania State University Press,. 1990. 1 vol. 22 X 28,5 cm, xxiv-240 pp.
28. Kalokairinou, E., (2018). A thesis for the Degree Master in: Protection, Conservation and Restoration of Cultural Monuments, Works of Art and Mechanisms of artistic or historic value. Aristotle University of Thessaloniki.
29. Kapsomenakis, J., Douvis, C., Poupkou, A., Zerefos, S., Solomos, S., Stavraka, T., Melas, D., Koutavas, A., Giannaros, T. M., Tselioudis, G., & Zerefos, C. (2023). Climate change threats to cultural and natural heritage UNESCO sites in the Mediterranean. *Environment, Development and Sustainability*, 25(12), 14519–14544.
<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02677-w>

30. Karetsou, A. (2004). Knossos after Evans: past interventions, present state and future solutions. *British School at Athens Studies*, 547-555.
31. Kavoulaki, E., Carvalho, F., & Veiga, J. P. (2020). Environmental monitoring and decay assessment at the archaeological site of Knossos. Στο *Proceedings of the International Conference on Cultural Heritage and New Technologies* (σσ. 115–128).
32. Lazaj, L. (2016). *Bioclimatic Classification in Heraklion, Greece*. Mediterranean Agronomic Institute of Chania. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32936.16646>
33. La Russa, M. F., Fermo, P., Comite, V., Belfiore, C. M., Barca, D., Cerioni, A., De Santis, M., Barone, G., Mazzoleni, P., Pezzino, A., & Ruffolo, S. A. (2017). The Oceanus statue of the Fontana di Trevi (Rome): The analysis of black crust as a tool to investigate urban air pollution and its impact on stone degradation. *Science of the Total Environment*, 593–594, 297–309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.185>
34. Lourenço, P., & Karanikoloudis, G. (2018). Seismic behavior and assessment of masonry heritage structures. Needs in engineering judgement and education. *RILEM Technical Letters*, 3, 114-120.
35. Macdonald, C. F. (2005). *Knossos*. *British School at Athens Studies* (Vol. 12). British School at Athens.
36. MacGillivray, J. A. (2000). *Minotaur: Sir Arthur Evans and the archaeology of the Minoan myth*. Hill and Wang.
37. Maravelaki-Kalaitzaki, P. (2005). Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens): Characterization and origin. *Analytica Chimica Acta*, 532(2), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.10.081>
38. McEnroe, J. C. (2010). *Architecture of Minoan Crete: Constructing identity in the Aegean Bronze Age*. University of Texas Press.
39. Mitsos, D., Kantarelou, V., Palamara, E., Karydas, A. G., Zacharias, N., & Gerasopoulos, E. (2022). Characterization of black crust on archaeological marble from the Library of Hadrian in Athens and inferences about contributing pollution sources. *Journal of Cultural Heritage*, 53, 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.12.003>
40. Momigliano, N. (2014). *In Search of the Labyrinth: The Cultural Legacy of Minoan Crete*. London: Bloomsbury Academic.

41. Momigliano, N. (2007). *Knossos Pottery Handbook: Neolithic and Bronze Age (Minoan)*. British School at Athens.
42. Moody, J., Rackham, O., & Rapp, G. (1996). Environmental archaeology of prehistoric NW Crete. *Journal of Field Archaeology*, 23(3), 273-297.
43. Moropoulou, A., Labropoulos, K. C., Delegou, E. T., Karoglou, M., & Bakolas, A. (2013). Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48, 1222-1239.
44. Moropoulou, A., Bakolas, A., & Anagnostopoulou, S. (2005). Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 295–300.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.018>
45. Moropoulou, A., Koui, M., Kourteli, C., & Theoulakis, P. (2001). *Integrated methodology for measuring and monitoring salt decay in the Medieval City of Rhodes porous stone*. *Mediterranean Archaeology & Archaeometry*, 1(1), 59–68.
46. Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., & Theoulakis, P. (2000). *Investigation of the technology of historic mortars*. *Journal of Cultural Heritage*, 1(1), 45–58.
[https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(99\)00118-1](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(99)00118-1)
47. Moropoulou, A., Bisbikou, K., & Torfs, K. (1998). Origin and growth of weathering crusts on Pentelic marble, Acropolis, Athens. *Atmospheric Environment*, 32(6), 967–982.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00372-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00372-3)
48. Moropoulou, A., Theoulakis, P., Tsiourva, T., Kourteli, C., & Labropoulos, K. (1995). Salt and humidity impact on porous stone masonries in marine environment. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 352, 893.
49. Moropoulou, A., & Theoulakis, P. (1991, November). Conditions causing destructive NaCl crystallization into the porous sandstone, building material of the medieval city of Rhodes. In *La conservation des monuments dans le bassin méditerranéen: actes du 2ème symposium international* (pp. 493-499).
50. Mourtzas, N., & Kolaiti, E. (2024). Past and future impacts of the relative sea level rise on the seafront of ancient Delos (Cyclades, Greece) and flooding scenarios by 2150. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 870.
51. Nastou, M. P. P., & Zerefos, S. C. (2024). Effects of climate change on open air heritage: a review and the situation in the region of Mediterranean. *Heritage Science*, 12(1).

52. Palyvou, C. (2005). *Akrotiri, Thera: An Architecture of Affluence 3,500 Years Old*. Philadelphia: INSTAP Academic Press.
53. Papadopoulos, J.(1997). The Conservation of Archaeological Sites in the Mediterranean Region. The Getty Conservation Institute, Los Angeles.
54. Pinna, D. (2014). Biofilms and lichens on stone monuments: Do they damage or protect? *Frontiers in Microbiology*, 5, 133.<https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00133>
55. Preziosi, D., & Hitchcock, L. (1999). Aegean art and architecture.
56. Pitilakis, K., Fotopoulou, S., Manakou, M., Karafagka, S., Petridis, C., Pitilakis, D., & Raptakis, D. (2024). Towards seismic risk reduction of critical facilities combining earthquake early warning and structural monitoring: a demonstration study. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(14), 6893-6927.
57. Prokos, S. (2005). *Salt weathering in the coastal environment: The deterioration of wall paintings at Delos, Greece* (Doctoral dissertation, University College London).
<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1445018/>
58. Proutsos, N., Korakaki, E., Bourletsikas, A., Kaoukis, K., &Georgiadis, C. (2019, January). Analyzing temperature attributes for the last half century in Heraklion–Crete, Greece. In *11th World Congress on Water Resources and Environment: Managing Water Resources for a Sustainable Future-EWRA 2019. Proceedings* (pp. 477-478).
59. Quinn, P. S. (2013). Ceramic petrography: the interpretation of archaeological pottery & related artefacts in thin section.
60. Sakka, A., Gerasopoulos, E., Liakakou, E., Keramitsoglou, I., & Zacharias, N. (2020). Spatial variability of aerosols over Greek archaeological sites using Space-Borne Remote Sensing. *Journal of Cultural Heritage*, 46, 207-217.
61. Shaw, J. W. (1973). Minoan Architecture: Materials and Techniques. *Anatolian Studies*, 23, 145–158. Shaw, J. W. (2009). Minoan architecture: Materials and techniques. In C. Shelmerdine (Ed.), *The Cambridge Companion to the Aegean Bronze Age* (pp. 210–230). Cambridge University Press.
62. Shaw, J. W. (2009). Minoan architecture: Materials and techniques. In C. Shelmerdine (Ed.), *The Cambridge Companion to the Aegean Bronze Age* (pp. 210–230). Cambridge University Press.

63. Stavrakakis, G. M., Katsaprakakis, D. A., & Braimakis, K. (2023). A computational fluid dynamics modelling approach for the numerical verification of the bioclimatic design of a public urban area in Greece. *Sustainability*, 15(15), 11642
64. Stefanis, C., Theoulakis, P., & Pilinis, C. (2009). Dry deposition effect of marine aerosol to the building stone of the Medieval City of Rhodes, Greece. *Building and Environment*, 44(12), 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.001>
65. Sylaiou, S., Stylianidis, E., Antoniou, A., Evangelidis, K., Tsifodimou, Z. E., Tavantzis, I., & Stamou, K. (2025). Preserving Delos: 3D Documentation and Reconstruction for Cultural Heritage and Accessibility. Διαθέσιμο σε: https://www.researchgate.net/publication/397989793_Preserving_Delos_3D_Documentation_and_Reconstruction_for_Cultural_Heritage_and_Accessibility
66. Torfs, K., & Van Grieken, R. (1997). Chemical relations between atmospheric aerosols, deposition and stone decay layers on historic buildings at the Mediterranean coast. *Atmospheric Environment*, 31(15), 2179–2192.
67. Tsapanos, T. M. (2008). Seismicity and seismic hazard assessment in Greece. In *Earthquake monitoring and seismic hazard mitigation in Balkan countries* (pp. 253–270). Dordrecht: Springer Netherlands.
68. Tzanis, C., Varotsos, C., Ferm, M., Christodoulakis, J., Assimakopoulos, M. N., & Efthymiou, C. (2011). Nitric acid and particulate matter measurements at Athens, Greece, in connection with corrosion and soiling of materials. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(3), 1201–1212. <https://doi.org/10.5194/acp-9-8309-2009>
69. Varotsos, C., & Theodorakopoulou, K. (2001). State-of-the Art in the Research of Environmental and Operational Influences on Degradation Cultural Heritage in Greece.
70. Varotsos, C., Tzanis, C., & Cracknell, A. P. (2009). The enhanced deterioration of the cultural heritage monuments due to air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(5), 590–592. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0131-7>
71. Vettor, T., Sautter, V., Jolivet, L., Moretti, J. C., & Pont, S. (2022). Marble quarries in Delos Island (Greece): a geological characterization. *BSGF-Earth Sciences Bulletin*, 193(1), 16. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2022014>
72. Zarifis, N., Manoussou-Della, K., Dellas, G., Papatheodorou, P., Paraskevopoulou, A., Anapolitanos, Th. & Lazaridou-Koliadi, D. (1989). *Medieval Town of Rhodes: Restoration and its problems*. Structural Conservation of Stone Masonry.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Θεουλάκης, Π. (1994α). *Συντήρηση Πέτρας Ι*. Αθήνα: ΑΤΕΙ Αθήνας.
2. Λαμπρόπουλος, Β. Ν. (1993). *Διάβρωση και συντήρηση της πέτρας*. Αθήνα: Ιδιωτική έκδοση.
3. Σκουλικίδης, Θ. Ν. (2000). *Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
4. ΥΠΠΟ Τ.Δ.Π.Ε.Α.Ε (2008). *Κνωσός: Συντήρηση και ανάδειξη του αρχαιολογικού χώρου 2000–2008*. Επιστημονική Επιτροπή Κνωσού.

Διαδικτυακές πηγές

1. Οδυσσέας ΥΠΠΟΑ, Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού. (2012) *Κνωσός*. Οδυσσεύς. http://odysseus.culture.gr/h/3/gh351.jsp?obj_id=2369
2. Κνωσός Documenta ΥΠΠΟΑ, Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού. (2015) *Κνωσός Documenta*. Εφορεία Αρχαιοτήτων Ηρακλείου. Επιστημονική Επιτροπή Κνωσού. <https://knossosdocumenta.gr/>
3. Χάρτα της Βενετίας. www.charta-von-venedig.de
4. HERACLES Project. (n.d.). *Heritage resilience against climate events on site*. <https://www.heracles-project.eu>
5. International Technical Conference, Athens, 31X – 3.XI.1989. Διαθέσιμο σε: https://www.academia.edu/2454830/Medieval_town_of_Rhodes_Restoration_and_its_problems
6. Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης [ΥΣΜΑ] (2024). *Αποκατάσταση των μνημείων της Ακρόπολης*. Υπουργείο Πολιτισμού. <https://www.ysma.gr>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.