



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
"Τεχνολογίες Προστασίας Περιβάλλοντος"**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε μνημεία:
Εφαρμογή στα ιστορικά τείχη του Ηρακλείου Κρήτης**

Παναγιώτης Κ. Νικολιδάκης

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Κανακίδου Μαρία

Ηράκλειο 2011

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη εκπονήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του μεταπτυχιακού προγράμματος «Τεχνολογίες Προστασίας Περιβάλλοντος» που πραγματοποιήθηκε από τον Τομέα Περιβαλλοντικής & Αναλυτικής Χημείας του Τμήματος Χημείας, Πανεπιστημίου Κρήτης, με Επιβλέπουσα και Επιστημονικά Υπεύθυνη την Καθ. Μ. Κανακίδου, και αφορά την αποτίμηση των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων στα Ιστορικά Τείχη του Ηρακλείου Κρήτης βάσει της Τεχνικής της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας. Μέσω της εφαρμογής των μη καταστρεπτικών μεθόδων κατέστη δυνατή η επιλογή χαρακτηριστικών και αντιπροσωπευτικών επιφανειών του συνόλου για την χαρτογράφηση της φθοράς με χρήση της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας.

Η απόδοση των σημείων των φωτογραφικών αποτυπώσεων, δεδομένης κλίμακας με συντελεστές, η ποσοτικοποίηση των χωρικών δειγμάτων στο δυαδικό σύστημα, η αναπαράστασή τους σε μια ορισμένη κλίμακα με ενδεικτικές τιμές του βαθμού φωτεινότητας, οδήγησε: (α) στην κατάλληλη απόδοση του βαθμού φωτεινότητας με ψευδή χρώματα (γίνεται χρήση χρωμάτων προκειμένου να αποδοθεί η ένταση και ο τύπος της φθοράς), (β) στη συσχέτιση της διακριτικής ικανότητας των χρωμάτων με τους διάφορους τύπους φθοράς και (γ) βάσει των κωδικών ερμηνείας της εικόνας, στην ποσοτικοποίηση των τύπων φθοράς των εξεταζόμενων τοιχοποιιών.

Τα αποτελέσματα των μη καταστρεπτικών μετρήσεων καταγράφηκαν και εκτιμήθηκαν, βάσει φυσικοχημικών κριτηρίων. Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις στις εξεταζόμενες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών (χαρτογράφηση της φθοράς) εκτιμήθηκαν με την τεχνική της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων. Πρόθεση μας είναι η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, όσον αφορά στο στρατηγικό σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης. Η ανάλυση των σχετικών δεδομένων έγινε με σκοπό τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων του φυσικού και του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος στα Ιστορικά Τείχη του Ηρακλείου Κρήτης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω φθορά, ενώ παράλληλα να διατηρηθεί το επιθυμητό επίπεδο συντήρησης και προστασίας με πρωταρχικό στόχο αυτόν της επανάχρησης (αποκατάσταση και επανένταξη του χώρου και η αποφυγή της τμηματικής αποδέσμευσης και του κατατεμαχισμού των διατεθειμένων χώρων, η συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, καθώς και η εθελοντική συνεισφορά του κοινού στη διαχείριση. Όσον αφορά την κατοικία, η ένταξη της σε ένα υπάρχον κέλυφος, το οποίο εμπεριείχε μια διαφορετική λειτουργία.).

Summary

The present study has been performed in the frame of a master thesis on Environmental technologies” conducted in the division of Environmental and Analytical Chemistry of the Chemistry Department by the University of Crete, Supervised by Prof Mrs. M.Kanakidou. The present study concerns the assessment of Environmental Repercussions on the Historical Walls of Heraklion in Crete based on the Technique of Digital Treatment of image. The choice of characteristic and representative surfaces for the entire wall, for the mapping of deterioration with the use of digital treatment of picture, was possible through the application of non-destructive methods.

The spatial attribution of photographic imprints, the quantification of territorial samples in the binary system, their representation in a scale with indicative levels of brightness.

This levels have led to: (a) suitable attribution of degree of brightness with false colours, (b) correlation of discreet faculty of colours with the various types of deterioration and (c) quantification of the types of deterioration of examined walls, based on codes of interpretation of these pictures.

The results of these non-destructive measurements were recorded and evaluated based on physicochemical criteria. The environmental impacts on the examined architectural surfaces and the mapping of deterioration, estimated by the use of digital treatment of images. The desired outcome of this analysis is robust conclusions to be used in the strategic planning of maintenance actions, but also in the overall environmental planning. The data have been analysed aiming at the reduction of negative impacts of the natural and anthropogenic environment on the Historical Walls of Heraklion of Crete, to avoid the further deterioration, and at the maintenance of the desirable level of preservation and protection with the main logic of reused (Integration in an existing form, which included a different operation).

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
SUMMARY	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	6
1.2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	7
2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΤΑ ΤΕΙΧΗ ΤΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ.....	11
2.1.1. Σύγχρονες Παρεμβάσεις.....	16
2.1.2. Προμαχόνες & ενθύγραμμα τμήματα.....	17
2.1.3. Υφιστάμενες διαμορφώσεις.....	18
2.2. ΘΕΣΜΟΘΕΤΗΜΕΝΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ	20
2.3. ΜΗ ΘΕΣΜΟΘΕΤΗΜΕΝΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΧΡΗΣΕΩΝ.....	21
2.3.1. Σύμφωνα με τη μελέτη προστασίας και ανάδειξης της παλιάς πόλης προτείνονται:	21
2.3.2. Άλλες Προτάσεις.....	21
2.3.3. Επιμέρους αποφάσεις του ΥΠΠΟ που αφορούν την ενετική οχύρωση Ηρακλείου.....	22
3. ΑΙΤΙΑ, ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ.....	23
3.1. ΈΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ.....	23
ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΚΑ	23
3.1.1. Γεωτεχνικό Πλαίσιο Θεμελίωσης.....	24
3.1.2. Δομικά υλικά – Ανισότροπα Πορώδη Μέσα.....	25
3.2. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ, ΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΦΘΟΡΑΣ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ.....	26
3.2.1. Γυψοποίηση	27
3.2.2. Ανακρυστάλλωση ανθρακικού ασβεστίου – Όξινη ανθρακική κρούστα.....	28
3.2.3. Επίδραση του νερού – Σχηματισμός παγετού	28
3.2.4. Κρυστάλλωση αλάτων – Κυψέλωση.....	29
3.2.5. Αποσάθρωση Κονιομάτων	33
3.2.6. Ασύμβατα Υλικά.....	35
3.2.7. Θερμοκρασιακές μεταβολές – Πυρκαγιές.....	35
3.2.8. Διαστολή και διάβρωση μεταλλικών συνδέσμων.....	37
3.2.9. Σεισμικές δονήσεις.....	37
3.2.10. Βιολογικές Διεργασίες	38
3.2.11. Αέριοι ρύποι - Όξινη βροχή.....	41
3.2.12. Ανάπτυξη επιφανειακής κρούστας λόγω ατμοσφαιρικών αιωρημάτων και ολικών αποθέσεων	42
3.2.13. Σχηματισμός κρούστας – Χρωματική αλλοίωση	42
4. ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	45
4.1. ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ	45
4.2. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	46
4.3. ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ, ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	46
4.4. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ.....	49
4.5. ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΈΡΕΥΝΑ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΟΥΣ	49
4.6. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ	49
4.7. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΕΝΔΟΓΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΓΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ ΜΝΗΜΕΙΟΥ	50
4.8. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΙΤΙΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ	50
4.9. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.....	50
4.10. ΔΙΑΓΝΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	51
5. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ	56
5.1. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	59
5.1.1. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	60

5.1.2.	<i>Μικροσκοπία Οπτικών Ινών</i>	60
5.1.3.	<i>Υπέρηχοι</i>	60
5.1.4.	<i>Υπέρυθρη Θερμογραφία</i>	61
5.1.5.	<i>Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας</i>	62
6.	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ	65
6.1.	ΤΟ ΦΩΣ ΚΑΙ ΤΟ ΧΡΩΜΑ.....	65
6.2.	ΤΟ ΜΑΤΙ ΚΑΙ ΤΑ ΧΡΩΜΑΤΑ.....	66
6.3.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ	67
6.4.	ΤΡΙΧΡΩΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ, ΑΠΟΧΡΩΣΗ, ΚΟΡΕΣΜΟΣ	68
6.5.	Η ΜΙΞΗ ΤΩΝ ΧΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ	70
6.6.	ΧΡΩΜΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	72
6.7.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ	72
6.8.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΨΕΥΔΟΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	79
7.	ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΣΤΑ ΤΕΙΧΗ ΤΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ	84
7.1.	ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ	84
7.1.1.	<i>Ομάδα υψηλής φωτεινότητας</i>	85
7.1.2.	<i>Ομάδα χαμηλής φωτεινότητας</i>	91
8.	ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΦΘΟΡΑΣ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΜΕ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ	99
9.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	104
9.1.	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	104
9.2.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	106
10.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	108
10.1.	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	108
10.2.	ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΣΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ, ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΩΝ ΕΝΕΤΙΚΩΝ ΤΕΙΧΩΝ ΤΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ.....	109
10.2.1.	<i>Επιλογή θέσεων εφαρμογής</i>	109
10.2.2.	<i>Εργαστηριακές εφαρμογές υλικών στερέωσης</i>	109
10.2.3.	<i>Επιτόπου εφαρμογή υλικών στερέωσης</i>	111
10.3.	ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΝΕΤΙΚΑ ΤΕΙΧΗ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	111
10.4.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.....	112
11.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	117

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός της Μεταπτυχιακής Εργασίας

Η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς πρέπει να εφαρμόζεται βάσει ενός ολοκληρωμένου στρατηγικού σχεδιασμού, ο οποίος να περιλαμβάνει τις κατάλληλες επεμβάσεις συντήρησης και να θέτει τα κριτήρια της περιβαλλοντικής διαχείρισης.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες μη καταστρεπτικές τεχνικές, οι οποίες καταγράφουν και αποτιμούν την περιβαλλοντική επίδραση στις ιστορικές τοιχοποιίες (κεφ.4) σύμφωνα με φυσικοχημικά κριτήρια (μικροδομή, υφή και σύσταση), χαρτογραφώντας τη φθορά τους (τύπο και βαθμό φθοράς), σε μικρο και μακρο κλίμακα. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκαν για τη διάγνωση και χαρτογράφηση της φθοράς στα Ενετικά Τείχη του Ηρακλείου, οι εξής μη καταστρεπτικές μέθοδοι: Υπέρυθρη Θερμογραφία (IR-Thermo), και Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (DIP).

Η παρούσα μελέτη εκπονήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του μεταπτυχιακού προγράμματος «Τεχνολογίες Προστασίας Περιβάλλοντος» που πραγματοποιήθηκε από τον Τομέα Περιβαλλοντικής & Αναλυτικής Χημείας του Τμήματος Χημείας, Πανεπιστημίου Κρήτης, με Επιβλέπουσα και Επιστημονικά Υπεύθυνη την Καθ. Μ. Κανακίδου, και αφορά την αποτίμηση των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων στα Ιστορικά Τείχη του Ηρακλείου Κρήτης βάσει της Τεχνικής της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας (κεφ.6), καθώς και της τεχνικής με Υπέρυθρη Θερμογραφία (IR-Thermo). Μέσω της εφαρμογής των δύο αυτών μη καταστρεπτικών μεθόδων κατέστη δυνατή η επιλογή χαρακτηριστικών και αντιπροσωπευτικών επιφανειών του συνόλου για την χαρτογράφηση της φθοράς.

Κρίθηκε αναγκαίο πριν την ανάλυση των μη καταστρεπτικών μεθόδων (κεφ.5) να προχωρήσουμε στην ιστορική ανάλυση και τεκμηρίωση της κατασκευής των τειχών (κεφ.2) καθώς και στην περιγραφή επεμβάσεων που έγιναν στο παρελθόν.

Η απόδοση των σημείων των φωτογραφικών αποτυπώσεων (κεφ.7), δεδομένης κλίμακας με συντελεστές, η ποσοτικοποίηση των χωρικών δειγμάτων στο δυαδικό σύστημα, η αναπαράστασή τους σε μια ορισμένη κλίμακα με ενδεικτικές τιμές του βαθμού φωτεινότητας, οδήγησε: (α) στην κατάλληλη απόδοση του βαθμού φωτεινότητας με ψευδή χρώματα (γίνεται χρήση χρωμάτων προκειμένου να αποδοθεί η ένταση και ο τύπος της φθοράς), (β) στη συσχέτιση της διακριτικής ικανότητας των χρωμάτων με τους διάφορους τύπους φθοράς και (γ) βάσει των κωδικών ερμηνείας της εικόνας, στην ποσοτικοποίηση των τύπων φθοράς των εξεταζόμενων τοιχοποιιών.

Η διάγνωση της φθοράς των τειχών, σε σχέση με την παραμένουσα υγρασία, έγινε με χρήση Υπέρυθρης Θερμογραφίας (κεφ.8). Η διαφορετική θερμοκρασιακή κατανομή ανάμεσα στα υλικά της τοιχοποιίας υποδηλώνει διαφορετική κατανομή υγρασίας και αποδεικνύει την ασυμβατότητα των ιστορικών δομικών υλικών με τα τσιμεντιτικά κονιάματα αποκατάστασης. Η ασυμβατότητα τους συνίσταται στους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής, στις διαφορετικές μηχανικές αντοχές και κυρίως στη διαφορετική τους μικροδομή (συνολικό και ενεργό πορώδες, κατανομή μεγέθους πόρων), γεγονός που συνεπάγεται διαφορετικούς συντελεστές διαπερατότητας ατμών και συντελεστές

υδατοαπορρόφησης. Συνεπώς, η πιθανότητα ανάπτυξης των κρυστάλλων των αλάτων στους πόρους της πέτρας που μπορεί να οδηγήσει στην διάρρηξη των τοιχωμάτων των πόρων, αυξάνεται (σε συνδυασμό πάντα με τους ρυθμούς εξάτμισης και συμπύκνωσης).

Τα αποτελέσματα των μη καταστρεπτικών μετρήσεων (κεφ.9), καταγράφηκαν και εκτιμήθηκαν, βάσει φυσικοχημικών κριτηρίων. Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις στις εξεταζόμενες αρχιτεκτονικές επιφάνειες, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών (χαρτογράφηση της φθοράς) εκτιμήθηκαν με την τεχνική των προαναφερόμενων μεθόδων. Πρόθεση μας είναι η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, όσον αφορά στο στρατηγικό σχεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης. Η ανάλυση των σχετικών δεδομένων (κεφ. 10) έγινε με σκοπό τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων του φυσικού και του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος στα Ιστορικά Τείχη του Ηρακλείου Κρήτης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω φθορά, ενώ παράλληλα να διατηρηθεί το επιθυμητό επίπεδο συντήρησης και προστασίας με πρωταρχικό στόχο αυτόν της επανάχρησης (αποκατάσταση και επανένταξη του χώρου και η αποφυγή της τμηματικής αποδέσμευσης και του κατατεμαχισμού των διατεθειμένων χώρων, η συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, καθώς και η εθελοντική συνεισφορά του κοινού στη διαχείριση. Όσον αφορά την κατοικία, η ένταξη της σε ένα υπάρχον κέλυφος, το οποίο εμπεριείχε μια διαφορετική λειτουργία.).

Έτσι, είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν τα ιστορικά κέντρα των πόλεων και να αναβαθμιστεί ο ρόλος τους, αφού τα κτιριακά τους συγκροτήματα μέσω σχεδιαζόμενων επαναχρήσεων αποκτούν σημαντικό κοινωνικό χαρακτήρα αλλά και εναρμονίζεται στις οδηγίες νομικό πλαίσιο που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση.

1.2. Γενικά Στοιχεία

Η ιστορία μιας χώρας, προσδιορίζεται από το χρόνο και τον τόπο που έλαβαν χώρα τα διάφορα γεγονότα (πολεμικά, θρησκευτικά, αρχιτεκτονικά, κοινωνικά, καλλιτεχνικά κ.α.), που αποδεικνύονται από χειροπιαστά ανθρώπινα δημιουργήματα (κτίσματα, έργα τέχνης κ.τ.λ.).

Τα μνημεία αποτελούν αποδεικτικά στοιχεία της ιστορίας και του πολιτισμού. Η ζωντανή ιστορία μιας χώρας είναι κυρίως τα αρχαιολογικά μνημεία αυτής, τα αρχαιολογικά ευρήματα, οι ενεπίγραφες πλάκες, τα έργα τέχνης της κάθε εποχής που διατηρήθηκαν ή ήλθαν στην επιφάνεια.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η προστασία των μνημείων μας δεν αποτελεί μόνο επιτακτική ανάγκη αλλά εθνικό χρέος και ένδειξη σεβασμού της ιστορίας μας. Η αποτελεσματική προστασία ενός μνημείου αρχαιολογικής ή ιστορικής σημασίας που βρίσκεται εκτεθειμένο στις καιρικές και μη συνθήκες του περιβάλλοντος, είναι ένα πολύπλοκο και δύσκολο πρόβλημα.

Στην επιφάνεια της γης όλα τα δομικά υλικά υφίστανται φθορές λόγω των διαθρωτικών επιπτώσεων της ατμόσφαιρας, βιόσφαιρας και υδρόσφαιρας. Η φθορά των μνημείων προέρχεται τόσο από φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα συνεχώς και σε πολλές περιπτώσεις επιτείνονται λόγω της περιβαλλοντικής ανθρωπογενούς μόλυνσης, εξαιτίας της αύξησης της συγκέντρωσης των όξινων ρύπων, οι οποίοι κατά κύριο λόγο προέρχονται από την βιομηχανική δραστηριότητα.

Ατμοσφαιρική ρύπανση ονομάζεται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ρύπων δηλαδή κάθε είδους ουσιών, θορύβου, ακτινοβολίας ή άλλων μορφών ενέργειας σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα και γενικά να καταστήσουν το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του.

Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι:

- ✓ Το Διοξείδιο του Θείου (SO_2)
- ✓ Το Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)
- ✓ Το Διοξείδιο του Αζώτου (NO_2)
- ✓ Το Όζον (O_3)
- ✓ Τα Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)
- ✓ Το Βενζόλιο (C_6H_6)
- ✓ Ο Μόλυβδος (Pb)

Αντίθετα με την κοινή αντίληψη, το μεγαλύτερο ποσοστό των παραγόμενων αέριων ρύπων προέρχεται από καθαρά φυσικές πηγές. Με τον όρο φυσικές πηγές αναφερόμαστε στις πηγές εκπομπών αερίων ρύπων που δεν οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Παρ' όλα αυτά οι ανθρωπογενείς εκπομπές είναι κυρίως υπεύθυνες για τα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα που εμφανίστηκαν. Αυτό οφείλεται βεβαίως στην ανατροπή της φυσικής ισορροπίας αλλά επίσης και στην μεγάλη πυκνότητα των ανθρωπογενών εκπομπών, οι οποίες συγκεντρώνονται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές (κυρίως αστικές περιοχές και βιομηχανικές ζώνες). Αντίθετα, η καλή διασπορά των φυσικών πηγών ανά την υφήλιο προσφέρει τη δυνατότητα καλύτερης ανάμιξης των ρύπων με τον αέρα. Κατά συνέπεια, με μικρές εξαιρέσεις, οι εκπομπές αερίων ρύπων από φυσικές πηγές από μόνες τους δεν οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει μεγάλες επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο. Όσον αφορά τα υλικά, τα οποία αποτελούν και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να διαβρώσει τα υλικά και να καταστρέψει ιστορικά αλλά και σύγχρονα κτίρια και μνημεία. Κύρια υπεύθυνη για αυτές τις καταστροφές είναι κυρίως η όξινη βροχή, η οποία οφείλεται στην όξυνση του νερού της βροχής λόγω διάλυσης στις σταγόνες ενώσεων του θείου και το αζώτου. Και η φυσική βροχή είναι ελαφρά όξινη λόγω του διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα αλλά η παρουσία των προαναφερθέντων ρύπων επιδεινώνει την κατάσταση.

Από τα υλικά κατασκευής των μνημείων, ο λίθος ήταν αυτό που χρησιμοποιήθηκε σε μεγαλύτερη κλίμακα, γι' αυτό στην συγκεκριμένη εργασία γίνεται μελέτη του μηχανισμού διάλυσής του, ώστε να διεξαχθούν συμπεράσματα για την προστασία του. Σκοπός της εργασίας είναι η οριστικοποίηση ως ένα βαθμό, των όρων που μπορούμε να χρησιμοποιούμε στην συντήρηση του λίθου, για ν' αποδώσουμε την φθορά, την αντίστοιχη επέμβαση και τέλος μία επαρκή τεκμηρίωση. Η εργασία βασίστηκε κυρίως σε προσωπική εμπειρία κι όχι τόσο σε βιβλιογραφική έρευνα, δεδομένου ότι υπάρχει ένα σημαντικό κενό στον τομέα αυτό, στην διεθνή βιβλιογραφία.

Η αναγνώριση της φθοράς και κατά συνέπεια η σωστή ονομασία της, συνδέεται απόλυτα:

- ✓ με την διάγνωση των αιτιών φθοράς (των φθοροποιών παραγόντων δηλαδή που δρουν στο συγκεκριμένο περιβάλλον),
- ✓ με το είδος του λίθου,
- ✓ με την επεξεργασία του,
- ✓ με την ιστορία και την διαδρομή του μνημείου.

Για παράδειγμα η ζαχαροποίηση που είναι αποτέλεσμα όξινης προσβολής, σε ένα η αστικό περιβάλλον ή η επικάθιση αιθάλης σε ένα μνημείο στην ύπαιθρο πολλές φορές συγχέονται μεταξύ τους. Κατά κύριο λόγο (υπάρχουν όμως και ιδιαίτερες περιπτώσεις) η μαύρη επικάθιση που παρατηρούμε σε ένα μνημείο στην ύπαιθρο, οφείλεται σε βιολογικούς παράγοντες όσο κι αν μοιάζει με επικάθιση αιθάλης. Ακόμη δεν μπορούμε να μιλάμε για ασβεστοποίηση χωρίς να έχουν υπάρξει συνθήκες φωτιάς κατά την ιστορική διαδρομή του μνημείου κλπ. Η στοιχειακή ανάλυση, τόσο του υλικού όσο και των προϊόντων διάβρωσης είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για τον σωστή απόδοση της φθοράς.

Επίσης είναι μεγάλη η σημασία της ιστορίας των φάσεων δόμησης και των προηγούμενων επεμβάσεων του μνημείου. Η γνώση αυτών των στοιχείων μας δίνει το μεγαλύτερο ποσοστό των αιτιών φθοράς, μας δίνει δηλαδή όλα εκείνα τα αίτια φθοράς που δεν οφείλονται στο περιβάλλον.

Σε πολλές περιπτώσεις κι όταν δρουν περισσότεροι από ένας φθοροποιοί παράγοντες, παρατηρείται συνδυασμός φθορών. Στις περιπτώσεις αυτές γίνεται κατανοητό ότι χρειάζεται συνδυασμός επεμβάσεων. Η σειρά που θα εκτελεστούν είναι σε κάθε περίπτωση απόφαση των υπευθύνων συντηρητών του έργου. Θα πρέπει να προσμετρηθούν οι δυνατότητες, η επικινδυνότητα, και γενικώς πολλοί παράγοντες που θα οδηγήσουν στην αποτελεσματικότερη μέθοδο, χωρίς ή με το μικρότερο κόστος.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφοροι τύποι φθοράς απόρεια της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (κατά κύριο λόγο), οι κυριότεροι των οποίων θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια. Αναφέρονται όροι φθοράς βασιζόμενοι στην μορφολογία:

- ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ: Πρόκειται για τμήμα της επιφάνειας που αποχωρίζεται από τον υπόλοιπο όγκο εξαιτίας ρωγμής ή ρωγμών.
- ΑΠΟΛΕΠΙΣΗ: Πρόκειται για σχηματισμό απολεπισμάτων - λεπτών φλοιδών στην επιφάνεια του λίθου.
- ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ: Πρόκειται για διακοπή της συνέχειας του ιστού του λίθου κάθετα ή οριζόντια.
- ΘΡΑΥΣΗ - ΕΤΟΙΜΟΡΡΟΠΙΑ - ΔΙΑΡΡΗΞΗ : Ονομάζεται η διακοπή του ιστού και ο διαχωρισμός - κατάτμηση σε θραύσματα μεγάλα ή μικρότερα ή και σε ρήγματα.
- ΜΑΥΡΗ ΚΡΟΥΣΤΑ Ή ΓΥΨΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ: Πρόκειται για την φυσικοχημική μετατροπή του λίθου σε γύψο και λαμβάνει χώρα σε ρυπασμένο περιβάλλον.
- ΖΑΧΑΡΟΠΟΙΗΣΗ Ή ΖΑΧΑΡΟΕΙΔΗΣ ΦΘΟΡΑ: Ονομάζεται η απώλεια συνοχής των επιφανειακών κρυστάλλων του λίθου με συνέπεια την συνεχή πτώση τους υπό μορφή ζάχαρης.
- ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ: Ονομάζουμε την απώλεια συνοχής του λίθου σε βάθος. Ο όρος αποσάθρωση συνδυάζει την περικρυσταλλική αποσάθρωση (ο ιστός του λίθου έχει μετατραπεί σε σκόνη που προχωρά σε βάθος), το πλέγμα ρωγμών και τις απολεπίσεις.
- ΚΥΨΕΛΩΣΗ Ή ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗΣ ΦΘΟΡΑ: Ονομάζεται η εμφάνιση μικρών οπών σποραδικά ή σε συστάδες και είναι αποτέλεσμα συνήθως βιολογικής δράσης που δεν είναι πλέον ενεργή.
- ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ: Ονομάζεται η άμβλυνση των γλυπτών λεπτομερειών που προκαλείται συνήθως από όξινη προσβολή.

- ΑΠΟΠΛΥΣΗ: Αναφέρονται συνήθως ως περιοχές απόπλυσης. Πρόκειται για περιοχές εκτεθειμένες σε τρεχούμενο νερό όξινης βροχής. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν απομείωση και λόγω αυτής διαφορετικότητα στο χρώμα, παρουσιάζονται δηλαδή ανοιχτόχρωμες, σε σχέση με τον υπόλοιπο όγκο του λίθου.
- ΒΙΟΔΙΑΒΡΩΣΗ: Πρόκειται για την κάθε μορφή φθοράς (κυψέλωση, αποσάθρωση κ.λ.π) που μπορεί να παρουσιαστεί κάτω από μία επικάλυψη - κρούστα βιολογικής προέλευσης και έχει προκληθεί από την δράση των μικροοργανισμών, συνήθως από την φυσικοχημική τους δράση ή τη μηχανική καταπόνηση που επιφέρουν στο λίθο.
- ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ: Πρόκειται για φυσικοχημική μετατροπή, δηλαδή τη διαλυτοποίηση και ανακρυστάλλωση του μαρμάρου σε άλλη κρυσταλλική μορφή (συνήθως σε αραγωνίτη).
- ΑΣΒΕΣΤΟΠΟΙΗΣΗ: Πρόκειται για φυσικοχημική μετατροπή του λίθου. Συμβαίνει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και με διάρκεια επί του λίθου. Ο λίθος αλλάζει μορφή και υφή, «ασβεστοποιείται», χάνει δηλαδή την διαύγεια και την κρυσταλλικότητα του.
- ΕΠΙΚΑΘΙΣΗ: Ονομάζεται κάθε στρώμα που επικάθεται και δύναται να αφαιρεθεί χωρίς να επιφέρει βλάβη στο λίθινο υπόστρωμα. Η επικάλυψη είναι «επίστρωση» δηλαδή κάποιο επιπλέον στρώμα και σε καμία περίπτωση δεν συνδέεται με μετατροπή του λίθινου υποστρώματος (π.χ γυψοποίηση, ανακρυστάλλωση).

Η επέμβαση τώρα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι συνέπεια των ιδιαιτεροτήτων της φθοράς, του υλικού κατασκευής, της τεχνοτροπίας του μνημείου, της ηλικίας του μνημείου και ακόμη του επιθυμητού βαθμού αποκατάστασης του. Για τους λόγους αυτούς, ο τρόπος με τον οποίο θα επέμβουμε είναι απόφαση πολλών ειδικοτήτων. Για παράδειγμα όταν πρόκειται για ένα ρήγμα η αντίστοιχη αποδοτικότερη επέμβαση είναι η πλήρωση του με ενέματα. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι στατικής επάρκειας, ή γεωμετρικής δυσχέρειας, ή αδυναμίας εκτέλεσης λόγω τεχνικών προβλημάτων που δημιουργεί η ίδια η κατασκευή του μνημείου, τότε θα πρέπει ο λίθος να αποσυναρμολογηθεί στα τμήματα που ορίζει το ρήγμα τα οποία και θα συγκολληθούν κατόπιν. Γίνεται αντιληπτό, ότι η απόφαση απορρέει από την συνεργασία πολλών ειδικοτήτων (αρχιτέκτονα μηχανικού, στατικού μηχανικού, συντηρητή).

Στην παρούσα εργασία δίνεται η κύρια επέμβαση. Ωστόσο είναι αντιληπτό ότι πρέπει να προηγηθούν ή να ακολουθήσουν κι άλλες εργασίες για την σωστή εκτέλεση και ολοκλήρωση μιας επέμβασης(πχ πριν την πλήρωση προηγείται ο καθαρισμός της επιφάνειας).

Τέλος η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς απαιτεί ένα ολοκληρωμένο στρατηγικό σχεδιασμό, ο οποίος να περιλαμβάνει τις κατάλληλες επεμβάσεις συντήρησης και να θέτει τα κριτήρια της περιβαλλοντικής διαχείρισης.

Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται διάφορες μη καταστρεπτικές τεχνικές, οι οποίες καταγράφουν και αποτιμούν την περιβαλλοντική επίδραση στα μνημεία σύμφωνα με φυσικοχημικά κριτήρια (μικροδομή, υφή και σύσταση), χαρτογραφώντας τη φθορά τους (τύπο και βαθμό φθοράς), σε μικρο και μακρο κλίμακα. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκε για τη διάγνωση και χαρτογράφηση της φθοράς στα Ενετικά Τείχη του Ηρακλείου, η Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (DIP).

Τα αποτελέσματα της μη καταστρεπτικής αυτής μεθόδου καθώς και πολλών άλλων (Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (FOM), Υπερηχοσκόπηση (US), Υπέρυθρη Θερμογραφία, IR-Thermo) .

Η εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων απαιτεί τον συνδυασμό μετρήσεων διαφόρων φυσικοχημικών παραμέτρων και επομένως την χρήση των παρακάτω εργαστηριακών μεθόδων: Διαφορική θερμική Ανάλυση (DTA) και Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (TG), Μετρήσεις Υγρασίας, Μετρήσεις Διαλυτών Αλάτων, καθώς και μετρήσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Προκειμένου για την ολοκληρωμένη διαχείριση των μνημείων και οικιστικών συνόλων πολιτιστικής κληρονομιάς, τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων (εργαστηριακών και μη καταστρεπτικών) αποτελούν την τράπεζα δεδομένων, την οποία θα πρέπει να διαχειρίζεται ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Η χρήση ενός τέτοιου συστήματος συμβάλει στην επίτευξη: (α) ενός ολοκληρωμένου σχεδιασμού περιβαλλοντικής διαχείρισης, ο οποίος έχει σαν σκοπό του την μείωση της αρνητικής επίδρασης του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος σε ιστορικά κτίρια και σύνολα, καθώς και (β) του στρατηγικού σχεδιασμού των επεμβάσεων συντήρησης αυτών των ιστορικών κτιρίων και συνόλων.

Τέλος παρά την απαραίτητη χρήση διαφόρων τεχνικών χαρτογράφησης φθοράς εργαστηριακών και μη, προκειμένου για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων, επειδή η παρούσα εργασία, εκπονείται στα πλαίσια μεταπτυχιακής εργασίας με θέμα τα Ιστορικά Τείχη του Ηρακλείου, γίνεται χρήση μόνο της Τεχνικής της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας. Όλες οι εξεταζόμενες επιφάνειες τοιχοποιίας είναι διαστάσεων 1 x 2 μέτρα.

2. Ιστορικά Στοιχεία – Τα τείχη του Ηρακλείου

Γαληνότητα Πρίγκιπα, Εκλαμπρότατοι και Εξοχότατοι Κύριοι

Στο νέο περίβολο που ενώνει το Βούργο (προάστεια) της πόλης του Χάντακα επεκράτησε όπως καθαρά φαίνεται, η σκέψη να περιοριστούν μάλλον τα έξοδα της Γαληνότητας σας παρά να εξασφαλιστεί η άμυνα της πολιτείας, αφού άφηκαν έξω από τα τείχη μερικά υψώματα και θέσεις πολύ επικίνδυνες. Αντίθετα περιβάλαν μέσα στα τείχη μερικές λακκούβες που δεν έχουν καμία σημασία και, αν έμεναν έξω από τα τείχη θα απομάκρυναν από το μέρος εκείνο τις εχθρικές επιθέσεις. Γι' αυτό είναι ανάγκη σήμερα να κτίζονται προμαχώνες και να υψώνονται αναχώματα απέναντι στα μέρη εκείνα πράγμα που στοιχίζει στη Γαληνότητα σας περισσότερο από ότι οφελήθηκε, θεμελιώνοντας τα καινούργια τείχη πάνω σε παλιά μουράγια γιατί και οι δαπάνες των οχυρωματικών έργων αυξάνονται και οι δαπάνες για τη συντήρηση της φρουράς επειδή μεγαλώνει η περιφέρεια των τειχών. Έτσι η πολιτεία απόκτησε επτά προμαχώνες και μια πλατεία που αγκαλιάζουν όλη τη πλευρά προς την ξηρά.

FILIPPO PASQUALIGO, RELAZIONE LETTA NELL' ECCELLENTISSIMO SENATO, 1594,
Μετάφραση Στέργιου Γ. Σπανάκη, *MNHMEIA THΣ KPHTIKHΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ, Τόμος III,* σελ. 1-2,
ΒΙΚΕΛΑΙΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ 1953

Τα ενετικά τείχη αποτελούν το κυρίαρχο μνημείο το οποίο οριοθετεί την Παλιά πόλη του Ηρακλείου. Καταλαμβάνουν μια έκταση περίπου 350 στρεμ. και έχουν ανάπτυγμα, 4.630 μ.

Το μήκος του παραλιακού τμήματος των τειχών ανέρχεται στα 1.950 μ. Η κατασκευή των τειχών άρχισε από τα μέσα του 16ου αιώνα και ολοκληρώθηκε το 17ο αι. Το ογκώδες οχυρωματικό αυτό έργο καταλαμβάνει έκταση περίπου 350.000 μ². (περίβολος και τάφος).

Η πλεονεκτική θέση, που κατείχε ο Χάνδακας στη Μεσόγειο, έγινε η αιτία συχνών επιδρομών από λαούς που επιδίωκαν να διαδραματίσουν πρωτεύοντα ρόλο στο χώρο της Ανατολικής Μεσογείου.

Η οχύρωση του «Rabd el Khandak» δηλ. του "Φρουρίου της Τάφρου" των Αράβων, του Κάστρου των Βυζαντινών και της Candia (Κάντια) των Ενετών εκφράζει την ταυτότητα του κατακτητή, την εξέλιξη της πολεμικής τεχνικής και της οχυρωματικής τέχνης της εποχής εκείνης, ενώ συγχρόνως καλείται να καλύψει τις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες μιας πόλης που επεκτείνεται.

Η επέκταση της πόλης έξω από τα παλαιοενετικά τείχη, από τον 15ο αι., σε συνδυασμό με την οθωμανική απειλή, δημιούργησε επιτακτική ανάγκη για τη δημιουργία μιας νέας ισχυρής οχύρωσης που θα περιελάμβανε και τα προάστια. Έτσι, κατά το έτος 1462 η Βενετία προχώρησε στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός μεγαλειώδους έργου, του νέου οχυρωματικού περιβόλου της Candia, που πραγματοποιήθηκε σε διάφορες φάσεις και κράτησε σχεδόν δύο αιώνες. Ο οχυρωματικός περίβολος του Χάνδακα αποτελείται από επτά επιβλητικούς, ισχυρούς στην κατασκευή τους προμαχώνες, που ενώνονται μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα. Πρόκειται λοιπόν για μια προμαχωνική οχύρωση με μια ευρύτατη περιμετρική τάφρο.

Τα τείχη έχουν σχήμα πολυγωνικό. Ξεκινούν από το λιμάνι, από όπου ανατολικά άρχιζε το ευθύγραμμο τμήμα (cortina) των Συμβούλων και έφτανε στον προμαχώνα Sabbionara. Στη συνέχεια το τείχος στρεφόταν προς νότο με μία αναδίπλωση πριν τον επόμενο προμαχώνα Vitturi στα ανατολικά. Μετά ακολουθεί ο προμαχώνας Ιησού ενώ στο νοτιότερο άκρο της οχύρωσης βρίσκεται ο προμαχώνας Martinengo που στην ουσία αποτελεί και την κορυφή ενός υποτιθέμενου τριγώνου που βάση του έχει το θαλάσσιο τείχος. Στη δυτική πλευρά των τειχών σχηματίζονται ο προμαχώνας Βηθλεέμ, στη συνέχεια αυτός του Παντοκράτορα και στο βορειοδυτικό άκρο ο προμαχώνας του Αγ. Ανδρέα (ή του Αγ. Πνεύματος). Στη βόρεια παραλιακή πλευρά το τείχος μικρότερο σε πλάτος ακολουθούσε την ακτή με διάφορες προεξοχές και έφτανε στον κόλπο του Δερματά για να συναντήσει το παλιό Βυζαντινό τείχος.

Οι προμαχώνες ενώνονται μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα (cortine), τα μεταπρομαχώνια, που αποτελούνται εσωτερικά από ισχυρή επιχωμάτωση και εξωτερικά από λίθινη τοιχοποιία με έντονη κλίση (scarpa).



Εικόνα 2.1: Σχεδιαστική αναπαράσταση του οχυρωματικού περιβάλλου (2004 Αντ. Κατζουράκης)

Χαρακτηριστικό στοιχείο του προμαχώνα αποτελεί η «χαμηλή πλατεία» (piazza bassa), μια κατασκευή που διαμορφώνεται στο σημείο ένωσης του προμαχώνα με το ευθύγραμμο τμήμα και σε επίπεδο χαμηλότερο από αυτό του προμαχώνα και ψηλότερο από αυτό της τάφρου. Σε κάθε χαμηλή πλατεία κατασκευάζονται από χώμα και επενδύονται με ισχυρή τοιχοποιία τα merloni, τα παραπέτα των χαμηλών πλατειών, στα οποία ανοίγονται δύο κτιστές κανονιοθυρίδες για την τοποθέτηση των κανονιών που προστάτευαν το ευθύγραμμο τμήμα με την τάφρο και τον απέναντι προμαχώνα. Η επικοινωνία των στρατιωτών με την πόλη και την τάφρο γινόταν μέσα από λιθόστρωτους θολοσκεπείς διαδρόμους (sortite), που είχαν ανοιχθεί κάτω από τις επιχωματώσεις των προμαχώνων.



Εικόνα 2.2: Ευθύγραμμο τμήμα από προμαχώνα Παντοκράτορα προς προμ. Βηθλεέμ και τμήμα χαμηλής πλατείας (2004, φωτ. Β.Κοζωνάκης)

Για την καλύτερη επόπτευση της περιοχής, κυρίως πέρα από την τάφρο, οι Βενετοί σχεδίασαν και κατασκεύασαν πρόσθετα οχυρωματικά έργα, μικρής κλίμακας, πάνω στα ευθύγραμμα τμήματα αρχικά και αργότερα πάνω ή κοντά στους προμαχώνες, γνωστά ως επιπρομαχώνες (cavalieri). Στον οχυρωματικό περίβολο του Χάνδακα κατασκευάστηκαν τέσσερις επιπρομαχώνες: ο επιπρομαχώνας Ζάνε, ο επιπρομαχώνας Βιττούρι, ο επιπρομαχώνας Μαρτινέγκο και ο επιπρομαχώνας Αγ. Ανδρέα που προστέθηκε από τους Οθωμανούς κατά τις εργασίες ανακατασκευής του ομώνυμου προμαχώνα.



Εικόνα 2.3: Προμαχώνας και επιπρομαχώνας Μαρτινέγκο
(Κ. Παπανικολάου)

Αναπόσπαστο στοιχείο του οχυρού περιβόλου της Candia αποτελούσε η τάφρος που διαμορφωνόταν γύρω και έξω από αυτόν. Σκοπός της ήταν να κρατάει τον εχθρό, όσο γίνεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το φρούριο, εμποδίζοντάς τον να το προσεγγίσει. Στην περίπτωση του Χάνδακα η τάφρος ήταν πάντοτε ξηρή και σε περιόδους ειρήνης χρησιμοποιούνταν για καλλιέργειες καθώς και για την εκτροφή αλόγων του ιππικού. Στο μέσον της τάφρου κατασκευαζόταν αγωγός, ανοικτή μικρή τάφρος, η cunetta για τα όμβρια.



Εικόνα 2.4: Κηποθέατρο Ν. Καζαντζάκη σε τμήμα της τάφρου
(2004, Β. Κοζωνάκης)

Κύριες και βοηθητικές πύλες ή πύλες αποκλειστικά στρατιωτικού χαρακτήρα εξυπηρετούσαν στη διακίνηση του πληθυσμού, των προϊόντων και των στρατιωτών. Σε κάθε

περίπτωση, ένας μακρύς θολοσκεπής διάδρομος οδηγούσε από την πόλη προς την ύπαιθρο ή προς το χώρο των χαμηλών πλατειών και από εκεί στην τάφρο. Οι κύριες πύλες:

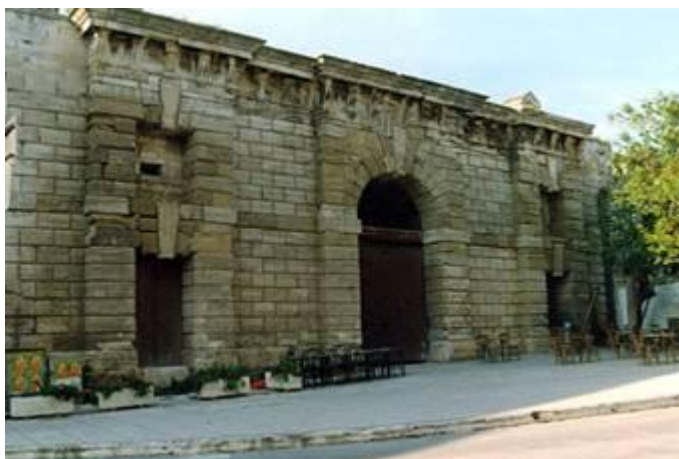
Η πύλη του Αγίου Γεωργίου, επίσης γνωστή ως Πύλη του Μαρουλά ή του Λαζαρέτο, οδηγούσε προς τις ανατολικές επαρχίες της πόλης, το προάστιο του Μαρουλά και το Λοιμοκαθατήριο (Λαζαρέτο).

Η πύλη Ιησού, γνωστή και σαν Καινούργια Πόρτα, οδηγούσε προς τις νότιες επαρχίες και σε αυτήν κατέληγε ο νότιος οδικός άξονας της πόλης, η σημερινή οδός Έβανς.

Η πύλη Παντοκράτορα οδηγούσε, μέσα από δύο θολοσκεπείς διαβάσεις, στις δυτικές επαρχίες και τα Χανιά (ονομαζόταν και Χανιόπορτα = Porta Canea) η μία και στη νότια χαμηλή πλατεία η άλλη.

Οι παράκτιες πύλες ήταν:

Η πύλη του Μόλου, η πύλη των Νεωρίων, η πύλη του Δερματά, η πύλη του Αγ. Ανδρέα, η πύλη της Σαμπιονάρα. Από αυτές σώζονται: η έξοδος της πύλης Δερματά προς τη θάλασσα, κάτω από τη σημερινή παραλιακή λεωφόρο Σοφ. Βενιζέλου, το νότιο τμήμα της καμάρας της πύλης του Αγ. Ανδρέα, στο δυτικό τμήμα της παραλιακής λεωφόρου και η πύλη Σαμπιονάρα, στην οδό Δ. Μποφώρ.



Εικόνα 2.5: Πύλη Ιησού (2000, Δ.Η.)

Εκτός από τις κύριες πύλες του οχυρωματικού περιβόλου, υπήρχαν και οι βοηθητικές ή πύλες με στρατιωτικό χαρακτήρα που χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά από τους στρατιώτες προκειμένου να εισέλθουν στο χώρο της χαμηλής πλατείας όπου ήταν κτισμένες οι κανονιοθυρίδες και να προωθηθούν μέσα από άλλη βοηθητική πύλη – sortita στην τάφρο.

Στις οχυρώσεις βλέπει κανένας, ότι η τέχνη χρησιμοποίησε με αξιοθαύμαστο τρόπο κάθε δυνατότητα για να κάμει ένα φημισμένο Κάστρο. Επτά είναι οι μεγαλοπρεπείς προμαχώνες που περιβάλλουν το Κάστρο. Ο πρώτος απ' αυτούς αρχίζοντας από το λιμάνι ονομάζεται Αμμουδιά και διαδοχικά ακολουθώντας προς το μέρος της ξηράς, Βιτούρι, Ιησού, Μαρτινέγκο, Βηθλεέμ, Παντοκράτορα και Αγ. Ανδρέα. Το υπόλοιπο τμήμα προστατεύεται από τη θάλασσα. Και οι προμαχώνες αυτοί προστατεύονται από την τάφρο που περιβάλλει σε συνεχή γραμμή τα τείχη.

Πάνω στο χείλος της τάφρου υπάρχουν πολλά έργα ουσιωδέστατα, που από κάθε άποψη πιστοποιούν ότι το φρούριο είναι απόρθητο.

Ο προμαχώνας του Αγ. Ανδρέα έχει απέναντί του ένα μικρό οχύρωμα Του Παντοκράτορα έχει ένα οχυρό κέρατο, που πήρε το όνομά του από τον ίδιο προμαχώνα. Ο προμαχώνας Βηθλεέμ έχει ένα μισοφέγγαρο που λέγεται Μοκιενίγκα. Ο προμαχώνας Μαρτινέγκο έχει ένα οχυρό κέρατο που λέγεται της Παναγίας. Ο προμαχώνας του Ιησού έχει άλλο οχυρό κέρατο που λέγεται της Βαγιάς. Του Βιτούρι έχει το οχυρό Κρεπακουόρε (κρεπάρισμα της καρδιάς) με το μεγάλος φρούριο του Αγ. Δημητρίου, που με τις γραμμές του και το οχυρό Μολίνα καλύπτει σχεδόν τον βασιλικό προμαχώνα της Σαμπιονέρα.

Αυτά είναι τα εξωτερικά οχυρά, που βρίσκονται απέναντι από τους κυρίως προμαχώνες που ανέφερα. Οι προμαχώνες αυτοί ενισχύονται από πέντε σημαντικά οχυρά ρεβελίνι, που λέγονται Αγ. Πνεύμα, Παντοκράτορας, Βηθλεέμ, Αγ. Νικόλαος και Πρίουλι.

ANTONIO PRIULI - ANTONIO BARBARO, RELAZIONI, I RELAZIONE DI ANTONIO PRIULI Provveditor Generale delle Armi in Candia, 30 Martzo 1667, II RELAZIONE DI ANTONIO BARBARO Provveditor Generale delle Armi in Candia, 24 Febraro 1667, Μετάφραση Στέργιου Γ. Σπανάκη, ΜΝΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΙΚΗΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ, Τόμος VI, σελ. 87-89, ΒΙΚΕΛΑΙΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ 1976

2.1.1. Σύγχρονες Παρεμβάσεις

Η χρήση των προμαχόνων, της τάφρου αλλά και των πυλών, συνολικά δηλαδή του οχυρωματικού περιβάλλοντος αλλάζει από εποχή σε εποχή, ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν κάθε φορά. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι την περίοδο της Κρητικής Πολιτείας οι προμαχώνες και η τάφος χρησίμευσαν για τη στρατοπέδευση των στρατευμάτων των ξένων δυνάμεων.

Στις αρχές του 20ού αι. με την εμφάνιση του αυτοκινήτου, δημιουργούνται ρήγματα σε τμήματα του τείχους δίπλα στις υπάρχουσες, αλλά εν αχρηστία πια βενετσιάνικες πύλες και πάνω στους ίδιους οδικούς άξονες. Έτσι, ανατολικά της πύλης Ιησού δημιουργείται το ρήγμα, γνωστό ως Καινούρια Πόρτα, που θα γεφυρωθεί τη δεκαετία του 1970. Ανατολικά της πύλης του Παντοκράτορα, δημιουργείται άλλο ρήγμα - άνοιγμα γνωστό ως Χανιώπορτα, που γεφυρώνεται το 1915. Βόρεια του προμαχώνα και της πύλης του Αγ. Ανδρέα δημιουργείται νέο ρήγμα, που δεν προβλέπει όμως τη διατήρηση της βενετσιάνικης πύλης.

Τέλος, το ρήγμα γνωστό ως «Κομμένο Μπεντένι» που δημιουργείται στο ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ προμαχώνα Μαρτινέγκο και Βηθλεέμ, γεφυρώνεται κατά τη δεκαετία του 1960.



Εικόνα 2.6: Η νέα Χανιώπορτα (2004, Β.Κοζωνάκης)

Σήμερα, με την αποκατάσταση του συνόλου του οχυρωματικού περιβόλου, το μνημείο αποκτά σύγχρονη ταυτότητα και φιλοξενεί νέες χρήσεις, άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο συμβατές στο χαρακτήρα του μνημείου. Ωστόσο συνολικά το μνημείο ακόμη δεν έχει αποκτήσει μια ταυτότητα τέτοια που να προσιδιάζει στο χαρακτήρα του αφενός αλλά και στις ανάγκες μιας σύγχρονης πόλης αφετέρου.

Το 1977 εκπονείται για λογαριασμό του ΕΟΤ η μελέτη αξιοποίησης των ενετικών τειχών από την αρχιτέκτονα Χρ. Τζομπανάκη που εγκρίθηκε από το ΚΑΣ το 1978.

Το 1984 παραχωρείται στο Δήμο Ηρακλείου η χρήση των ενετικών τειχών και αναλαμβάνει ο Δήμος ως υπεύθυνος την προώθηση και εκτέλεση των έργων αξιοποίησής τους μέσα στα πλαίσια ειδικής Προγραμματικής Σύμβασης μεταξύ ΥΠ.ΠΟ ΤΑΠΑ και Δήμου Ηρακλείου με αντικείμενο την αναστήλωση και αξιοποίηση των ενετικών τειχών με βάση την εγκεκριμένη μελέτη της. Με βάση την επικαιροποιημένη, ανά τμήματα, μελέτη, λόγω παρέλευσης μεγάλου χρόνου μέχρι την υλοποίησή της, αρχίζουν οι εργασίες αξιοποίησης του ενετικού οχυρωματικού περιβόλου και της τάφρου υπό την επίβλεψη ειδικού γραφείου που δημιουργείται για το σκοπό αυτό και την επιστημονική παρακολούθηση της επιτροπής της Προγραμματικής Σύμβασης. Το 1989 ξεκινούν οι εργασίες από τα δυτικά προς τα ανατολικά, δηλαδή από τον προμαχώνα Αγ. Ανδρέα και αφορούν στη στερέωση, συντήρηση και αποκατάσταση λιθοδομών όπως και την αξιοποίηση χώρων της τάφρου, των προμαχόνων αλλά και των χαμηλών πλατειών αλλά και εργασίες καταγραφής αποτυπώσεων και ιστορικής έρευνας.

2.1.2. Προμαχώνες & ευθύγραμμα τμήματα

Τα διασωζόμενα τμήματα του επιπέδου των προμαχόνων και των ευθυγράμμων τμημάτων, σήμερα παρέχουν τη δυνατότητα για ένα συνεχή περίπατο, σε ένα επίπεδο υψηλότερο από αυτό

της πόλης, ο οποίος ξεκινά από τον προμαχώνα του Αγ. Ανδρέα δυτικά και αφού διασχίσει τους προμαχώνες Παντοκράτορα, Βηθλεέμ, Μαρτινέγκο και Ιησού, καταλήγει στον προμαχώνα Βιτούρι, όπου διακόπτεται η συνέχεια του τείχους προς τον προμαχώνα της Σαμπιονάρα και το ενετικό λιμάνι. Η γενική διαμόρφωση περιλαμβάνει φύτευση από ιθαγενή φυτά στα οποία έχουν κατά καιρούς έχουν προστεθεί και άλλα καλλωπιστικά φυτά δενδρώδους, θαμνώδους ή χαμηλής βλάστησης. Γενικώς στον περίβολο των τειχών και το πρηνές προς την παλιά πόλη υπάρχει χαμηλή βλάστηση, είτε από χλοοτάπητα είτε από χαμερπείς φυτεύσεις.

2.1.3. Υφιστάμενες διαμορφώσεις

Προμαχώνες - Επιπρομαχώνες:

- Στο επίπεδο του προμαχώνα Παντοκράτορα έχει κατασκευαστεί αναψυκτήριο το οποίο όμως δε λειτουργεί σήμερα. Ο ίδιος χώρος είχε στο παρελθόν και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για μεγάλες ανοικτές συναυλίες προσελκύοντας πλήθος κόσμου.
- Το επίπεδο του προμαχώνα Μαρτινέγκο έχει καταληφθεί στο μεγαλύτερο τμήμα του από τις εγκαταστάσεις της Πρότυπης Ακαδημίας Ποδοσφαίρου: «Ο ΕΡΓΟΤΕΛΗΣ». Οι κερκίδες, οι μόνιμες βοηθητικές εγκαταστάσεις, οι χώροι στάθμευσης και προσπέλασης του γηπέδου ποδοσφαίρου έχουν αλλοιώσει μορφολογικά και επιβαρύνουν στατικά τον προμαχώνα του ενετικού οχυρού 1.
- Στον επιπρομαχώνα του ίδιου προμαχώνα βρίσκεται ο τάφος του Ν. Καζαντζάκη και της συζύγου του Ελένης στο νότιο δυτικό τμήμα του.
- Στο ευθύγραμμο τμήμα του προμαχώνα Βιτούρι έχει διαμορφωθεί υπαίθριος δημοτικός χώρος στάθμευσης αυτοκινήτων, μεταξύ του Προμαχώνα Βιτούρι και της Πύλης Ιησού, χωρίς τη συναίνεση της αρμόδιας υπηρεσίας του Δήμου και του ΥΠΠΟ.
- Στο επίπεδο τμήμα του προμαχώνα Σαμπιονάρα λειτουργεί το 6ο Γυμνάσιο Ηρακλείου. Επίσης σε τμήμα του ίδιου προμαχώνα υπάρχουν κτηριακές και άλλες εγκαταστάσεις του Ομίλου Αντισφαίρισης το «ΗΡΑΚΛΕΙΟ».
- Απέναντι από το υπό ανέγερση πολιτιστικό κέντρο Ηρακλείου έχει διαμορφωθεί η πλατεία της Φανερωμένης. Ο χώρος του προμαχώνα Μαρτινέγκο και του Πολιτιστικού κέντρου συνδέονται μεταξύ τους με πεζογέφυρα.
- Ο επιπρομαχώνας Βιτούρι χρησιμοποιείται επί δεκαετίες από το σώμα Ελλήνων Προσκόπων. Οι εγκαταστάσεις έχουν αποκλείσει τη δημόσια πρόσβαση από τον προμαχώνα στον επιπρομαχώνα.

¹ Έχουν γίνει ενέργειες απομάκρυνσης του γηπέδου από το ΥΠΠΟ και το Δήμο. Στην παραχώρηση των τειχών στο Δήμο είναι όρος η απομάκρυνση του γηπέδου.

Χαμηλές πλατείες:

- Στη βόρεια στοά του προμαχώνα Βηθλεέμ και την αντίστοιχη σορτίτα λειτουργεί με προσωρινή έγκριση η έκθεση: «Γκρέκο, επιστροφή στην πατρίδα»,
- Στη νότια χαμηλή πλατεία του ίδιου προμαχώνα λειτουργεί υπαίθριος δημοτικός κινηματογράφος.
- Στη νότια στοά του προμαχώνα Μαρτινέγκο – Μακάσι, σε μήκος 40 μέτρων από την εσωτερική πύλη έχει διαμορφωθεί χώρος μνήμης για τους φυλακισμένους στη στοά κατά το Β παγκόσμιο πόλεμο. Πρόσφατα έχει αποχωματωθεί και το υπόλοιπο μέρος της στοάς, της χαμηλής πλατείας και της αντίστοιχης σορτίτα που είχαν επιχωθεί από τις εγκαταστάσεις της Πρότυπης Ακαδημίας «Ο ΕΡΓΟΤΕΛΗΣ».
- Στη βόρεια χαμηλή πλατεία του Προμαχώνα Ιησού λειτουργεί το μικρό κηποθέατρο «Μάνος Χατζιδάκις», με πρόσβαση από τη σορτίτα της τάφρου, ενώ η σορτίτα προς το εσωτερικό της πόλης παραμένει κλειστή.
- Η βόρεια στρατιωτική πυλίδα του ίδιου προμαχώνα χρησιμοποιείται ως αποθηκευτικός χώρος της 13ης Εφορείας Βυζαντινών Αρχαιοτήτων.

Πύλες:

- Πύλη Αγ. Γεωργίου: η πύλη αυτή ήδη αναστηλωμένη ενώνει ως είσοδος - έξοδος την τάφρο της Λ. Ικάρου με την πλ. Ελευθερίας. Παράλληλα στο εσωτερικό της γίνονται περιοδικά εκθέσεις καλλιτεχνών.
- Πύλη Ιησού: η πύλη αυτή δεν έχει ακόμη αναστηλωθεί, έχει εγκριθεί η προμελέτη από το ΥΠ.ΠΟ όπου περιλαμβάνεται αρχιτεκτονική πρόταση. Επίσης έχει εγκριθεί και η προμελέτη για την επανάχρηση της Πύλης με τη δημιουργία εκθεσιακού χώρου σχετικά με τη ζωή και το έργο του Ν. Καζαντζάκη.
- Πύλη Παντοκράτορα: η πύλη αυτή δεν έχει ακόμη αναστηλωθεί, έχει όμως εγκριθεί η οριστική μελέτη για την στατική και αρχιτεκτονικής της αποκατάσταση από τον ΥΠ.ΠΟ. Δεν έχει ακόμη μελετηθεί η χρήση της.
- Πύλη Δερματά: από την πύλη σώζεται μονάχα τμήμα της προς το εσωτερικό της πόλης. Έχει αναστηλωθεί, αλλά δεν έχει κάποια συγκεκριμένη χρήση. Η πύλη προβλέπεται να διανοιχθεί προς τη θάλασσα με βάση εγκεκριμένη μελέτη.
- Πύλη Σαμπιονάρα (πύλη της Άμμου): έχει διανοιχθεί και εγκριθεί η σχετική μελέτη στο ΥΠΠΟ.

Τάφος:

- Στη δυτική τάφο λειτουργεί γήπεδο καλαθοσφαίρισης του Αθλητικού Σωματείου ΟΦΗ καθώς και δημοτική παιδική χαρά και γήπεδα καλαθοσφαίρισης. Μετά το σημείο αυτό η τάφος διακόπτεται και παρεμβάλλεται ο χώρος στάσης και στάθμευσης του υπεραστικού ΚΤΕΛ προς τη Μεσαρά.
- Η τάφος κάτω από τον προμαχώνα Βηθλεέμ χρησιμοποιείται από τις εγκαταστάσεις του Σταδίου Ελευθερίας, (Εθνικό Στάδιο) ενώ στη συνέχειά της έχουν διαμορφωθεί χώροι παιδικής χαράς. Στο σημείο αυτό η τάφος διακόπτεται (Κομμένο Μπεντένι).
- Στην τάφο κάτω από τον Προμαχώνα Μαρτινέγκο έχει διαμορφωθεί χώρος περιπάτου και αναψυχής (ψηλοί ευκάλυπτοι μαζί με χαμηλή βλάστηση), Παιδική Χαρά, το φυτώριο του Δήμου – Γεωπονικός Κήπος- μαζί με γραφεία (Τμήμα Πρασίνου).
- Στην τάφο μεταξύ των προμαχόνων Μαρτινέγκο - Ιησού έχει διαμορφωθεί το μεγάλο Κηποθέατρο «Νίκος Καζαντζάκης».
- Η τάφος μεταξύ των προμαχόνων Ιησού - Βιτούρι έχει διαμορφωθεί σε δημοτικό χώρο στάθμευσης, ενώ στην ανατολική πλευρά η τάφος έχει επιχωματωθεί με τη δημιουργία του Πάρκου Γεωργιάδη.
- Τέλος στην ανατολική τάφο σήμερα υπάρχουν διαμορφωμένοι χώροι πρασίνου και περιπάτου, το Πάρκο Νεολαίας ενώ σε μεγάλο τμήμα της και γήπεδα αντισφαίρισης από το αθλητικό Σωματείο «ΤΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟ».

2.2. Θεσμοθετημένες χρήσεις

- Σύμφωνα με το εγκεκριμένο Γ.Π.Σ. που εγκρίθηκε με την υπ' αριθμό 26882/3-7-2003 (Φ.Ε.Κ. 696/8-7-2003) απόφαση Υπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. ο οχυρωματικός περίβολος χαρακτηρίζεται ως χώρος αστικού πρασίνου.
- Η ζώνη των τειχών εντάσσεται στην περιοχή ανάπλασης της παλιάς πόλης που εγκρίθηκε με την υπ' αριθμό 9582/1877/7-4-2000 (Φ.Ε.Κ. 236/12-4-2000) απόφαση Υπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
- Έγκριση προκαταρκτικής πρότασης ανάπλασης της Παλαιάς Πόλης του Δήμου Ηρακλείου που εγκρίθηκε με την υπ' αριθμό 45145/36/ (Φ.Ε.Κ. 89/12/02/201) απόφαση Υπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
- Πρόγραμμα Ανάπλασης Απόφαση Δημοτικού Συμβουλίου 391/2001
- Master plan μελέτης Στρατή Απόφαση Υπουργού Πολιτισμού
- Υπόγειος χώρος Στάθμευσης στη Λεωφ. Δημοκρατίας ΥΠΠΟ/ΓΔΑ/ΑΡΧ/Β1/Φ38/29369/1120/18-7-2002
- Αναδιοργάνωση χρήσεων στο Πάρκο Γεωργιάδη.

2.3. Μη θεσμοθετημένες προτάσεις χρήσεων

2.3.1. Σύμφωνα με τη μελέτη προστασίας και ανάδειξης της παλιάς πόλης προτείνονται:

- Η δημιουργία ιστορικού, αρχαιολογικού, περιηγητικού, φυσιολατρικού και αθλητικού περιπάτου στα τείχη και στους προμαχώνες.
- Η ανάδειξη και λειτουργική αξιοποίηση των χαμηλών πλατειών και η σύνδεση μέσω αυτού του συστήματος, των τειχών και της τάφρου, με την εντός και εκτός των τειχών πόλη.
- Η αξιοποίηση της τάφρου με τη δημιουργία χώρων πρασίνου, πάρκων κ.α.
- Η δημιουργία στον προμαχώνα του Αγ. Ανδρέα πάρκου για παιδιά, με θέμα τα οχυρωματικά έργα και την τέχνη της πολιορκίας.
- Η ανάδειξη των εσωτερικών χώρων του τείχους και της δομής του στον προμαχώνα στην πύλη Παντοκράτορα
- Η επανάχρηση των βιομηχανικών κτηρίων των αποθηκών στον προμαχώνα του Παντοκράτορα
- Η διάνοιξη της Πύλης Sabionara² και η απομάκρυνση κτισμάτων και σύνδεση του προμαχώνα με το Πάρκο Νεολαίας.
- Η οργανική σύνδεση του Τείχους και του ιστού της παλιάς πόλης.
- Πολιτιστικές διαδρομές - λειτουργική ένταξη στη πόλη του χώρου των ενετικών τειχών.
- Επιμέρους χρήσεις για τη λειτουργική ένταξη στην Παλιά Πόλη των χώρων των Ενετικών Τειχών.
- Βίγλα - Πεδιάδος πρόταση Μελέτης Παλιάς Πόλης.
- Προμαχώνας Αγίου Δημητρίου.

2.3.2. Άλλες Προτάσεις

- Δημιουργία Φωτοθήκης στην Πύλη του Παντοκράτορα
- Δημιουργία πάρκου μεσογειακής χλωρίδας στη χερσαία ζώνη του περιβόλου.
- Δημιουργία Βυζαντινού Μουσείου στην Πύλη του Παντοκράτορα

² Η διάνοιξη και η απομάκρυνση έχουν πραγματοποιηθεί.

2.3.3. Επιμέρους αποφάσεις του ΥΠΠΟ που αφορούν την ενετική οχύρωση Ηρακλείου

- «Έγκριση ή μη: α) Παραχώρησης χρήσης της στοάς Μακάσι των ενετικών τειχών Ηρακλείου ως χώρου Ιστορίας και Μνήμης της πόλης του Ηρακλείου» ΥΠΠΟ/ΓΔΑΠΚ/ΑΡΧ/Β1/Φ38/273/10/29-12-2006.
- Έγκριση ή μη ανανέωσης παραχώρησης των Ενετικών Τειχών, της Τάφρου και των Νεωρίων στο Δήμο Ηρακλείου, αρ. πρωτ. ΥΠΠΟ/ΓΔΑΠΚ/ΑΡΧ/Β1/Φ38/45768/1944/20-05-2009.
- Έγκριση οριστικής μελέτης «Στερέωση και στατική αποκατάσταση του παραθαλασσιού τμήματος των ενετικών τειχών Ηρακλείου», αρ. πρωτ. ΥΠΠΟ/ΔΑΒΜΜ/91954/3206 π.ε./07-07-2009.
- Έγκριση αρχιτεκτονικής και στατικής προμελέτης του έργου «Στερέωση, αποκατάσταση και ανάδειξη Πύλης Ιησού των Ενετικών Τειχών Ηρακλείου Κρήτης» ΥΠΠΟ/ΔΑΒΜΜ/26581 π.π.ε/1059 π.π.ε./07-07-2009.
- «Έγκριση μελέτης αναστήλωσης Πύλης Παντοκράτορα-μετώπου προς την πόλη των Ενετικών Τειχών Ηρακλείου Κρήτης» ΥΠΠΟ/ΔΑΒΜΜ/5357 π.ε./174 π.ε 10-07-2009.
- «Έγκριση οριστικής μελέτης Στερέωσης και Αποκατάστασης του ευθυγράμμου τμήματος Μπέμπο-Αγ. Φραγκίσκου και του καμπύλου τμήματος- Ορεκίονε Προμαχώνα Σαμπιονάρα, Ενετικών Τειχών Ηρακλείου Κρήτης» ΥΠΠΟ/ΔΑΒΜΜ/82334/1620 π.ε./21-07-2009.
- Έγκριση μελέτης μεταλλικού φορέα προσωρινής αντιστήριξης μετώπου Πύλης Παντοκράτορα των Ενετικών Τειχών Ηρακλείου Κρήτης και εκτέλεσης των σχετικών εργασιών» ΥΠΠΟΤ/ΔΑΒΜΜ/39561/1035/27-04-2010.
- «Έγκριση ή μη μελέτης εφαρμογής της αναστήλωσης Πύλης Παντοκράτορα των Ενετικών Τειχών Ηρακλείου Κρήτης» ΥΠΠΟΤ/ΓΔΑΠΚ/ΑΡΧ/Β1/Φ38/28272/1550/30-04-2010.

3. Αίτια, Φαινόμενα και Μηχανισμοί της Φθοράς

3.1. Έννοια της φθοράς

Φθορά είναι η απομείωση με τη πάροδο του χρόνου των ιδιοτήτων (φυσικών, χημικών, μηχανικών) και των χαρακτηριστικών (ορυκτολογικών, υφής) των υλικών που οδηγεί στην αποσάθρωση τους. Τα φαινόμενα φθοράς εκδηλώνονται στις διεπιφάνειες υλικού με περιβάλλον ή υλικού με υλικό και είναι συνάρτηση πολλαπλών ενδογενών και εξωγενών παραγόντων, όπως απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα. Η φθορά μελετάται σε δύο επίπεδα περιλαμβάνοντας αφενός την μελέτη σε μακροκλίμακα όπου διερευνάται το είδος και η μορφολογία της διάβρωσης και αφετέρου την μελέτη σε μικροκλίμακα, εστιάζοντας στην κινητική και στη θερμοδυναμική του φαινομένου.

Πίνακας 3.1. Ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες διάβρωσης

Ενδογενείς Παράγοντες		Εξωγενείς Παράγοντες	
Είδος Δομικών Υλικών	<ul style="list-style-type: none"> • ΠΕΤΡΕΣ (ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ) • ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ (ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ - ΣΥΝΘΕΤΑ) • ΚΕΡΑΜΙΚΑ/ ΓΥΑΛΙΑ (ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ -ΣΥΝΘΕΤΑ) • ΜΕΤΑΛΛΑ (ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ) • ΞΥΛΟ (ΦΥΣΙΚΟ ΥΛΙΚΟ - ΣΥΝΘΕΤΟ) • ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΥΛΙΚΑ (ΠΟΛΥΜΕΡΗ, ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΑ, ΙΝΩΔΗ Ή ΦΥΛΛΩΔΗ ΣΥΝΘΕΤΑ) 	Γενικά χαρακτηριστικά κλίματος	<ul style="list-style-type: none"> ○ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ○ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ○ ΕΝΤΑΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ (T°C, Η%, W.R)
Ιδιότητες Δομικών Υλικών	<ul style="list-style-type: none"> • ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ • ΦΥΣΙΚΕΣ • ΦΥΣΙΚΟ-ΧΗΜΙΚΕΣ • ΧΗΜΙΚΕΣ • ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ 	Μικροκλίμακα	<ul style="list-style-type: none"> ○ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ○ ΙΔΙΑΙΤΕΡΗ ΘΕΣΗ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΟ ○ ΜΕΓΕΘΟΣ (ΚΛΙΜΑΚΑ) ○ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ○ ΤΡΟΠΟΣ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΑΠΟ ΒΡΟΧΗ
Κατανομή στη Μάζα	<ul style="list-style-type: none"> • ΜΑΚΡΟΔΟΜΗ • ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ 	Ατμόσφαιρα	<ul style="list-style-type: none"> ○ ΡΥΠΑΣΜΕΝΗ ○ ΘΑΛΑΣΣΙΝΗ κ.ά.
Πρόελευση και Απόληψη		Νερό	<ul style="list-style-type: none"> ○ ΑΕΡΟΖΟΛ ○ ΒΡΟΧΗ ○ ΑΝΕΡΧΟΜΕΝΗ (ΤΡΙΧΟΕΙΔΗΣ) ΥΓΡΑΣΙΑ ○ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ○ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΑΛΑΤΩΝ
Τεχνική και Τεχνολογία Παραγωγής – Διαμόρφωσης - Κατασκευής		Βιολογικοί παράγοντες	<ul style="list-style-type: none"> ○ ΜΙΚΡΟΠΑΝΙΔΑ ○ ΦΥΤΑ ○ ΠΤΗΝΑ

Ιστορία των Δομικών Υλικών στην Κατασκευή	<ul style="list-style-type: none"> • ΦΑΣΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ • ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ / ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ 	Συνθήκες χρήσης	<ul style="list-style-type: none"> ○ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ○ ΧΩΡΟΤΑΞΙΚΕΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΕΣ, ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ○ ΔΟΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ○ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ○ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ
Συμβατότητα μεταξύ των Δομικών Υλικών στην Εγκατάσταση ή Κατασκευή		Μηχανικές φορτίσεις	<ul style="list-style-type: none"> ○ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ○ ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ○ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ ΑΛΑΤΩΝ ○ ΠΑΓΕΤΟΣ ○ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΟΝΗΣΕΙΣ ○ ΕΚΤΡΙΒΗ

3.1.1. Γεωτεχνικό Πλαίσιο Θεμελίωσης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των δομικών υλικών είναι πολλοί, με αποτέλεσμα το φαινόμενο της διάβρωσης να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο. Έτσι ο τρόπος θεώρησης της συμπεριφοράς των υλικών στο περιβάλλον δεν είναι γενικευμένος. Κάθε συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να μελετάται στην κατεύθυνση της αποκάλυψης του συγκεκριμένου μηχανισμού που επιδρά κάθε φορά. Η αποτίμηση του μεγέθους της φθοράς περιγράφεται από την παρακάτω σχέση :

$$\mathbf{m} = \mathbf{f}(\mathbf{i}, \mathbf{e}) \quad \text{όπου,}$$

m: ιδιοτιμή που χαρακτηρίζει κάθε υλικό σε κάθε κατάσταση φθοράς σε διάφορα περιβάλλοντα

i: ενδογενείς παράμετροι υλικού όπου,

$$\mathbf{i} = \mathbf{f}(\mathbf{n}, \mathbf{s}, \mathbf{T})$$

n: ορυκτολογική σύνθεση υλικού

s: ενεργός επιφάνεια επαφής με τους παράγοντες φθοράς. Συναρτάται από το πορώδες, τη διαπερατότητα και την υφή του υλικού

e: Εξωγενείς παράμετροι υλικού $e = f(\theta, H_r, p, p_H, E_h, I, G_m, b \dots)$

θ : θερμοκρασία ατμόσφαιρας

H_r : υγρασία ατμόσφαιρας

p : ατμοσφαιρική πίεση

E_h : οξειδοαναγωγικό δυναμικό

I : συγκεντρώσεις ιόντων

Gm: χημική ενεργότητα

b: βιοχημική και βιοφυσική ενεργότητα

3.1.2. Δομικά υλικά – Ανισότροπα Πορώδη Μέσα

Ο δείκτης αποσάθρωσης δομικών υλικών K' είναι

$$K' = (1 + g_j) K' \text{ min:}$$

$K' \text{ min:}$ παράγοντας ορυκτολογικής επίδρασης

$g_j:$ παράγοντας επίδρασης μικροδομής

Ο συντελεστής ορυκτολογικής ποιότητας K , δίνεται από την σχέση:

$$mi = dK / dt$$

t:: χρόνος ζωής κτιρίου ή μνημείου

Η μικροπετρογραφική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποδοθεί ο συντελεστής K ως:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_i}{\sum_{j=1}^m P_j y_j}$$

Όπου:

$x_i:$ ποσοστά συστατικών των φάσεων που συντελούν στη μηχανική αντοχή του υλικού

$y_j:$ ποσοστά διαβρωμένων φάσεων, κενών και μικρορηγματώσεων

3.2. Διεργασίες, Δράσεις και Φαινόμενα φθοράς – Ταξινόμηση

Με τον όρο φθορά (διάβρωση) εννοείται κάθε αυθόρμητη είτε και εκβιασμένη διεργασία , φυσικοχημικής, ηλεκτροχημικής, μηχανικής, βιολογικής φύσης είτε και συνδυασμού αυτών που επιφέρει την αλλοίωση των δομικών υλικών. Τα είδη των διεργασιών, αναφορικά με την φύση τους καθώς και οι μηχανισμοί με τους οποίους δρουν στα δομικά υλικά συγκεντρωτικά παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα ενώ αναλύονται λεπτομερώς παρακάτω.

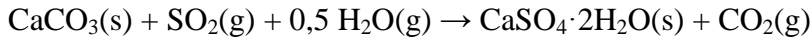
Πίνακας 3.2. Ταξινόμηση των διεργασιών φθοράς, βάσει της φύσης τους και της αλλοίωσης που προκαλούν

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΦΘΟΡΑΣ	ΔΡΑΣΕΙΣ	ΚΥΡΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΦΘΟΡΑΣ
ΚΥΚΛΟΙ ΥΓΡΑΝΣΗΣ -ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΟΚ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ κ.ά.	ΦΥΣΙΚΕΣ	ΑΠΟΣΠΑΣΗ ΚΟΚΚΩΝ, ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΕΚΤΡΙΒΗΣ, ΡΗΞΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ, ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ, κ.ά.
ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ ΑΛΑΤΩΝ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ ΘΕΙΩΣΗ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΕΝ ΞΗΡΩ)	ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ (ΠΙΕΣΕΙΣ ΟΣΜΩΤΙΚΕΣ, ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗΣ, ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΡΟΧΗΜΙΚΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ)	ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ, ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΣΥΝΔΕΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ κ.ά. ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ
ΥΔΡΟΛΥΣΗ ΔΙΑΛΥΣΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΧΗΛΙΚΗ ΣΥΜΠΛΟΚΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΙΩΣΗ κ.ά.	ΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΧΗΜΙΚΕΣ	ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ, ΔΙΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΑΛΛΟΙΩΣΗ ΣΥΝΔΕΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, ΚΡΟΥΣΤΕΣ, ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ ΜΕΤΩΠΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (ΓΕΝΙΚΑ Ή ΕΚΛΕΚΤΙΚΑ)

Οι αιτίες φθοράς των δομικών υλικών είναι ποικίλες και συχνά αλληλοεξαρτώμενες. Στις περισσότερες περιπτώσεις η φθορά ενός κτίσματος/μνημείου αποτελεί αποτέλεσμα της συνεργίας διάφορων διεργασιών που οφείλονται σε παραπάνω από μια αιτία. Συνήθως όμως προέρχονται από κακοτεχνίες, υγρασία, διαλυτά άλατα, παγετό, ρύπανση, υπέρβαση του ορίου μηχανικής αντοχής, φωτιά, βιολογικές επιδράσεις κ.α.

3.2.1. Γυψοποίηση

Η γυψοποίηση είναι η πιο καταστρεπτική διαβρωτική διαδικασία που μπορεί να υποστεί ένα ανθρακικό υλικό. Αφορά την επίδραση του ατμοσφαιρικού ρυπαντή SO_x με υγρασία σε ανθρακικά πετρώματα και μάρμαρα κυρίως και περιγράφεται από την παρακάτω χημική αντίδραση:

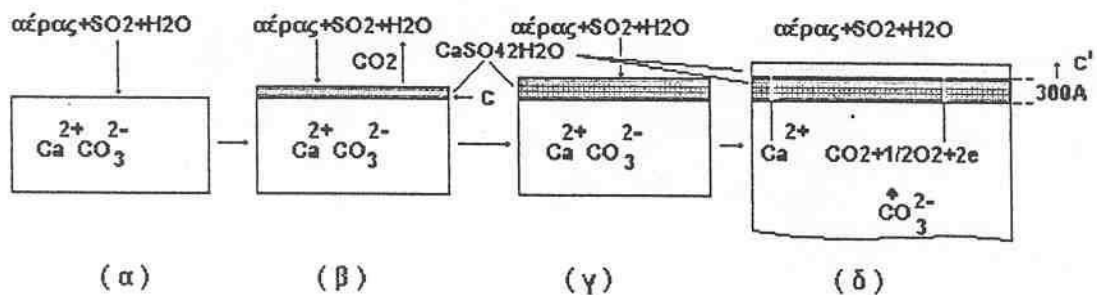


Δεδομένου ότι ο σχηματιζόμενος γύψος είναι διαλυτός και κατά την έκθεση του στο νερό αποβάλλεται, πραγματοποιείται συνεχής αποφλοιώση της φθαρμένης επιφάνειας η οποία με τη σειρά της εκτίθεται στη διεργασία της γυψοποίησης, με αποτέλεσμα την εξέλιξη του φαινομένου της φθοράς σε βάθος. Η γυψοποίηση έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή απαλοιφή των λεπτομερειών της επιφάνειας, προκαλώντας σημαντικότερη φθορά σε ιστορικά μνημεία κυρίως από αισθητικής άποψης.



Εικόνα 3.2: Αλλοίωση χαρακτηριστικών στο πρόσωπο Καρυάτιδας, λόγω γυψοποίησης

Επιπροσθέτως, η διεργασία της γυψοποίησης είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί εν ξηρώ, σύμφωνα με το παρακάτω μοντέλο.



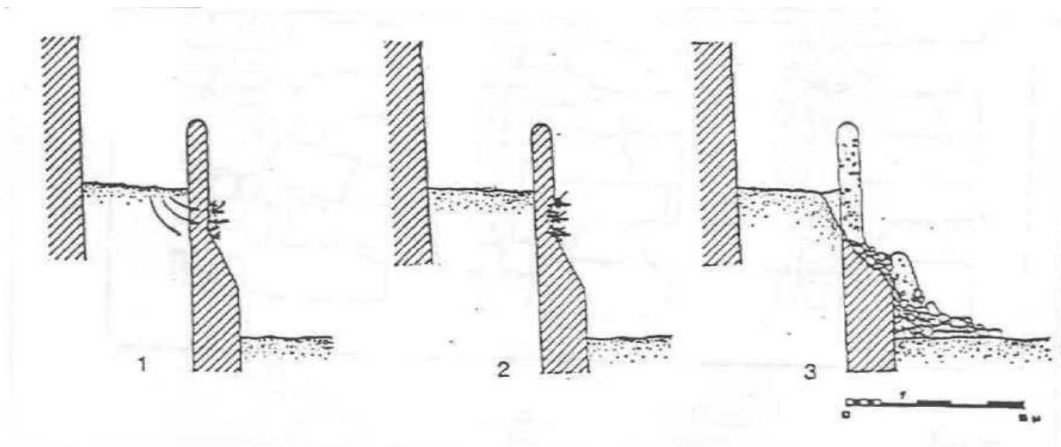
Εικόνα 3.3: Προτεινόμενο μοντέλο γυψοποίησης του ανθρακικού ασβεστίου και των μαρμάρων γενικότερα με βάση τη θεωρία του wagner (ηλεκτροχημικό δυναμικό).

3.2.2. Ανακρυστάλλωση ανθρακικού ασβεστίου – Όξινη ανθρακική κρούστα

Το νερό της βροχής οξινισμένο από το CO_2 της ατμόσφαιρας προκαλεί τη μετατροπή του ασβεστιτικού υλικού στο διαλυτό $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ το οποίο μετά την εξάτμιση του νερού μετασχηματίζεται σε ανακρυσταλλωμένο CaCO_3 .



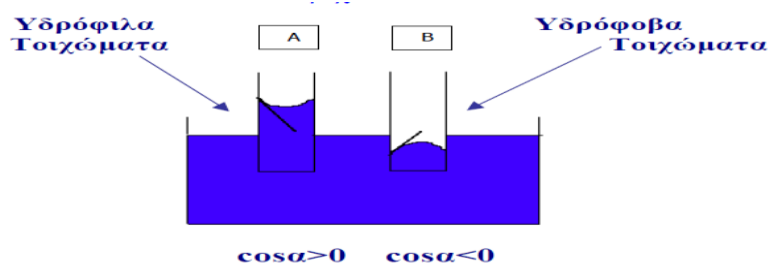
Οι κρύσταλλοι που δημιουργούνται με την παραπάνω χημική αντίδραση είναι χονδροειδείς και δεν έχουν μεγάλη συνάφεια με το υπόστρωμα, με αποτέλεσμα η σχηματιζόμενη όξινη ανθρακική κρούστα παρότι είναι επιφανειακά σκληρή, σε συνεργεία με τη βιολογική κρούστα, τη χαλάρωση των αρμών και την ανάπτυξη φυτών αλλά και την χαλάρωση των υποκειμένων στρωμάτων, να προκαλεί τοπικές καταρρεύσεις της τοιχοποιίας.



Εικόνα 3.4: Σταδιακή κατάρρευση τοιχοποιίας λόγω σχηματισμού όξινης ανθρακικής κρούστας (Ποζιόπουλος, 1992)

3.2.3. Επίδραση του νερού – Σχηματισμός παγετού

Το νερό που απορροφάται από τα δομικά υλικά προέρχεται είτε από άμεση επαφή λόγω συμπύκνωσης της ατμοσφαιρικής υγρασίας, βροχής, μεταφοράς σταγονιδίων από τη θάλασσα, διαρροής δικτύου ύδρευσης και αποχέτευσης, κ.α., είτε από την τριχοειδή αναρρίχηση του εδαφικού νερού. Η τριχοειδής αναρρίχηση σχετίζεται μόνο με μικρής διαμέτρου διαμερείς πόρους (μικροπόροι ή μικροί μεσοπόροι) και δεν πρέπει να συγχέεται με την απορρόφηση του νερού που λαμβάνει χώρα στους μακροπόρους.



Εικόνα 3.5: Ηλεκτραρνητική έλξη του νερού από τα τοιχώματα των τριχοειδών

Η ταχύτητα τριχοειδούς αναρρίχησης της υγρασίας δίνεται από το νόμο του Jurin :

$$u=dx/dt=r^2/8nx=pgxc\cos\alpha+2g/r$$

όπου :

u : η ταχύτητα ανύψωσης

n : το ιξώδες του υγρού

x : το ύψος αναρρίχησης

ρ : η πυκνότητα του υγρού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

r : η μέση ακτίνα των τριχοειδών

γ : η επιφανειακή τάση του νερού

α: η γωνία του τριχοειδούς με την κατακόρυφο

Η οριζόντια μετακίνηση του νερού δίνεται από τον τύπο :

$$x = A\sqrt{t}$$

όπου

x : η οριζόντια μετακίνηση του νερού

A : η διαπερατότητα του υλικού στο υγρό

t : ο χρόνος μέτρησης

Το νερό κατά την κίνηση του μέσα στα δομικά υλικά και σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα που το περιβάλλει, ελέγχει την ενυδάτωση, μεταφορά, κρυστάλλωση και ανακρυστάλλωση των αλάτων τα οποία μπορεί να προκαλέσουν την δημιουργία στεγανών στρωμάτων στην επιφάνεια με δυσμενή αποτελέσματα . Επιπλέον οι αέριοι ρύποι μεταφέρονται στο νερό με τη βροχή ή με συμπύκνωση για να σχηματίσουν όξινα διαλύματα ιδιαίτερα καταστρεπτικά, ενώ το σύνολο σχεδόν των διαβρωτικών βιολογικών διεργασιών συμβαίνει μονό παρουσία υγρασίας . Τέλος, το απορροφημένο νερό, υπό ιδανικές θερμοκρασιακές συνθήκες, σχηματίζει πάγο με αποτέλεσμα τη διόγκωση του και την ανάπτυξη πιέσεων στα τοιχώματα των πόρων που επιφέρει τη ρηγμάτωση των πορωδών δομικών υλικών, όταν η μηχανική τους αντοχή υπερνικάται.

3.2.4. Κρυστάλλωση αλάτων – Κυψέλωση

Μια παρόμοια διεργασία είναι η ανάπτυξη κρυστάλλων αλάτων από αλατούχα διαλύματα κατά τις αυξομειώσεις θερμοκρασίας και υγρασίας. Όταν η υγρασία μειώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου της υδατικής φάσης, στο εσωτερικό των πόρων καταβυθίζονται κρύσταλλοι

οι οποίοι ασκούν τάσεις στα τοιχώματα. Οι κύριες πηγές αλάτων σε τοιχοποιίες είναι η τριχοειδής αναρρίχηση (από το έδαφος), τα γειτονικά υλικά όπως το τσιμέντο, και συχνά το ίδιο το συνδετικό κονίαμα. Συμβαίνει λόγω δημιουργίας υπέρκορων διαλυμάτων και καθίζησης αλάτων στο εσωτερικό της πέτρας κατά τη φάση της ξήρανσης. Η αναγκαία συνθήκη για κορεσμό ή υπερεκορεσμό του διαλύματος του άλατος δίνεται από τη σχέση:

$$RH < R_{Heq}$$

Επομένως προκύπτει ότι ένα άλας μπορεί να κρυσταλλωθεί μόνο όταν ο περιβάλλον αέρας έχει τιμή σχετικής υγρασίας μικρότερη από αυτή του κορεσμένου διαλύματος του άλατος. Η ανάπτυξη κρυστάλλων στο εσωτερικό των πόρων περιλαμβάνει αρχικά την μεταφορά ιόντων στην επιφάνεια του κρυστάλλου και έπειτα την πραγματοποίηση διάφορων επιφανειακών αντιδράσεων όπως ρόφηση, επιφανειακή πυρήνωση, επιφανειακή διάχυση, αφυδάτωση, ιοντοανταλλαγή και άλλες που οδηγούν στην ενσωμάτωση του ιόντος στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Η κρυστάλλωση αλάτων συνιστά τη μηχανική φθορά των πορωδών λίθων και δομικών υλικών, μέσω της ανάπτυξης μηχανικών τάσεων στο εσωτερικό των υλικών (πόρους) από κρυστάλλους αλάτων και διάρρηξη της συνέχειας του υλικού όταν οι τάσεις ξεπεράσουν την αντοχή του. Ο μηχανισμός κρυστάλλωσης των αλάτων μέσω της άσκησης πίεσης κρυστάλλωσης ισχύει και στην περίπτωση του παγετού.

Οι πιέσεις που ασκούνται στα περιοριστικά τοιχώματα των πόρων, λόγω ανάπτυξης και ενσωμάτωσης των κρυστάλλων του άλατος, περιγράφονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_i = 2\sigma V r_i / V_R (1/r_i - 1/R)$$

σ : διεπιφανειακή τάση μεταξύ κρυστάλλου άλατος και διαλύματος

r : ακτίνα μικρού πόρου

R : ακτίνα μεγάλου πόρου

$V r_i$: ο επί τοις εκατό όγκος των πόρων ακτίνας r_i

V_R : ο επί τοις εκατό όγκος των πόρων μεγαλύτερης ακτίνας.

- **Θερμοδυναμική θεώρηση του φαινόμενου της διάβρωσης**

Η ενέργεια σχηματισμού ενός κρυστάλλου, δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta G_n = \Delta G_{bulk} + \Delta G_{interf}$$

όπου ΔG_n είναι η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του κρυστάλλου, και τα “bulk” and “interf” αναφέρονται στα ποσοστά που αντιστοιχούν στη μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας μάζας και στη μεταβολή ελεύθερης ενέργειας της επιφάνειας, αντίστοιχα. Οι εναλλακτικοί τρόποι εξέλιξης κρυστάλλωσης μετά την πλήρωση των μεγάλων πόρων είναι:

i. Ρήξη τοιχωμάτων πόρων

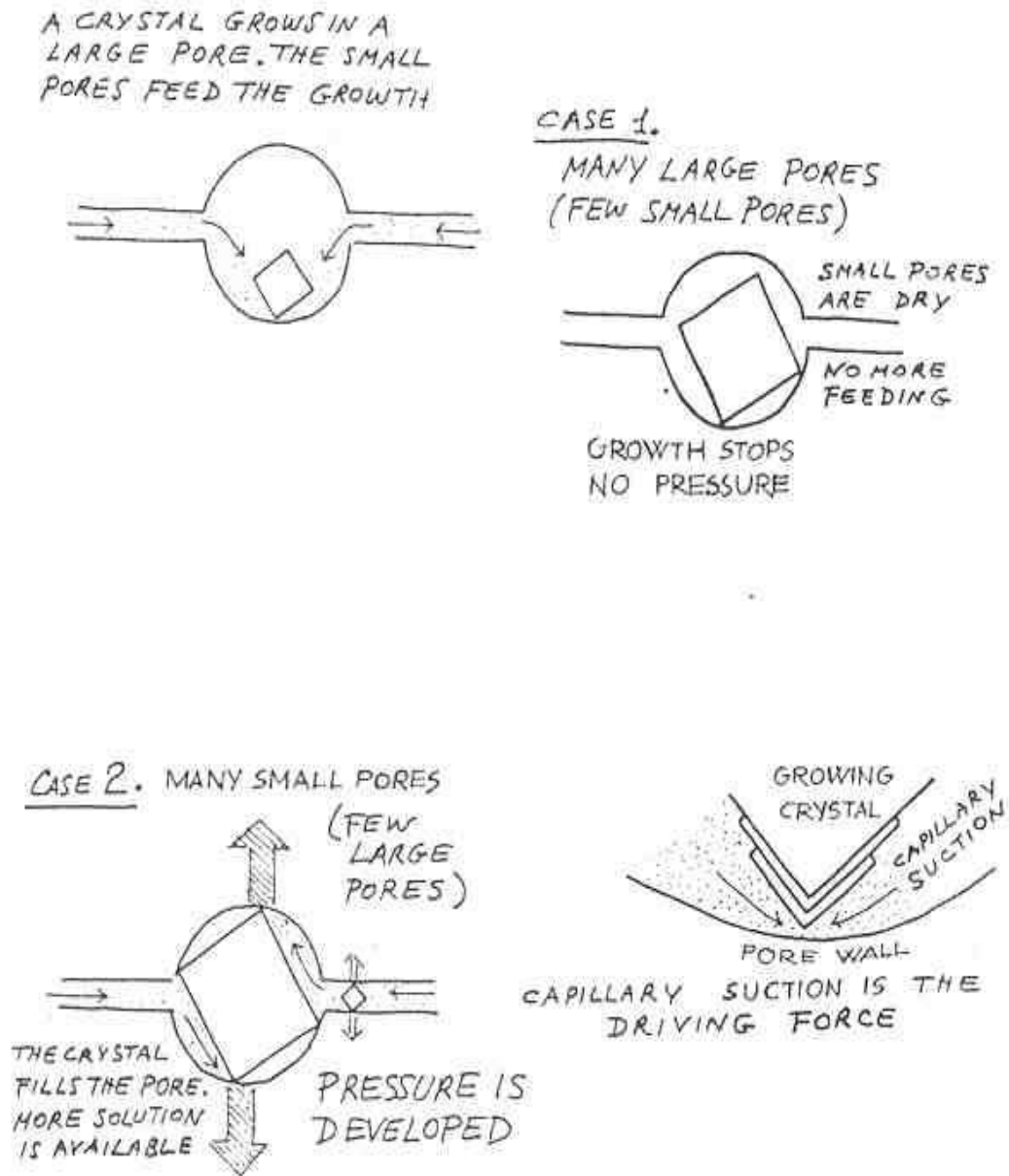
$$\Delta G_1 = \Delta G_{\text{bulk}} + \Delta W$$

ΔW = το απαιτούμενο έργο για τη διάρρηξη των τοιχωμάτων των πόρων.

ii. Διαδοχική πλήρωση μικρότερων πόρων

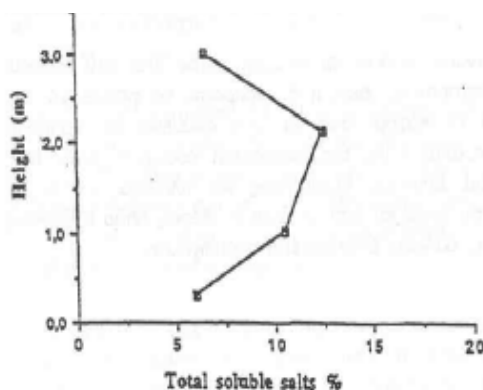
$$\Delta G_2 = \Delta G_{\text{bulk}} + \Delta G_{\text{surf}}$$

Όταν η πίεση κρυστάλλωσης υπερβεί την θλιπτική αντοχή του πορώδους υλικού, το αποτέλεσμα είναι η διάρρηξη αυτού. Επιπρόσθετα, όταν $\Delta W < \Delta G_{\text{surf}}$ (που σημαίνει $\Delta G_1 < \Delta G_2$) η ανάπτυξη της μάζας κρυστάλλων NaCl και η επακόλουθη θραύση του υλικού είναι η θερμοδυναμικώς προτιμητέα διαδικασία.



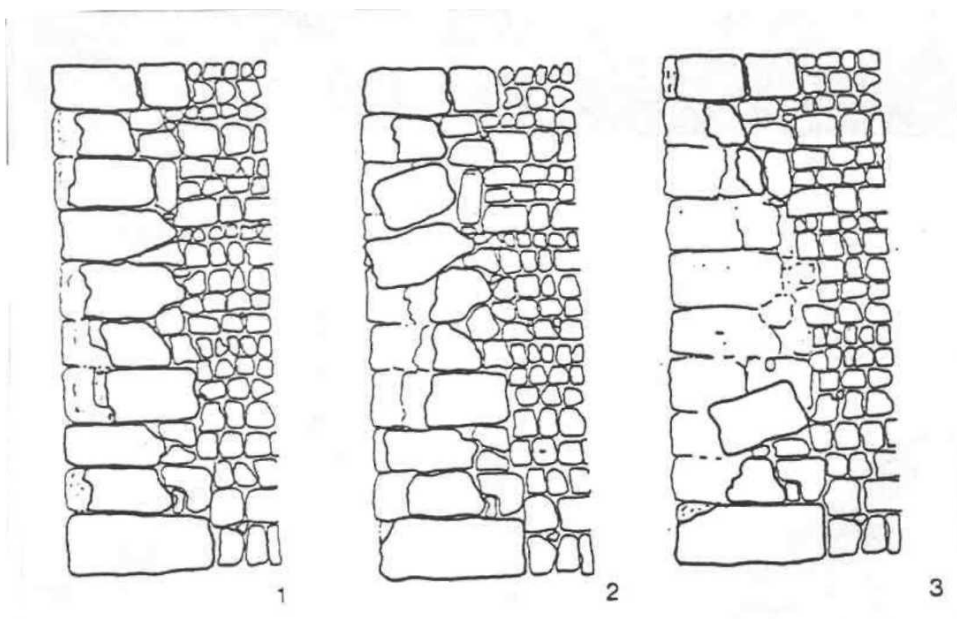
Εικόνα 3.6: Πιθανοί τρόποι ανάπτυξης κρυστάλλων στο εσωτερικό των πόρων

Το ισοζύγιο ενυδάτωσης - εξάτμισης οδηγεί σε μέγιστες τιμές της συγκέντρωσης των διαλυτών αλάτων, περίπου στο 1/2 με 1/3 του ύψους τοιχοποιίας, ανάλογα με τις συνθήκες.



Εικόνα 3.7: Τάση εξέλιξης διαλυτών αλάτων (%) σε συνάρτηση με το ύψος τοιχοποιιών

Αν η εξάτμιση λάβει χώρα στο εσωτερικό της μάζας του υλικού, ο τύπος αυτός της φθοράς εμφανίζεται μακροσκοπικά με την μορφή της κυψέλωσης. Η φθορά του πωρόλιθου από την κρυστάλλωση των αλάτων έχει τη μορφή της κυψελώδους και μπορεί κατά την εξέλιξη της να προκαλέσει σημαντική ζημία στην τοιχοποιία.



Εικόνα 3.8: Μηχανισμός κυψέλωσης σε τοιχοποιία (Γοζιόπουλος, 1992)



Εικόνα 3.9: Εμφάνιση κυψέλωσης στο τείχος της Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου.

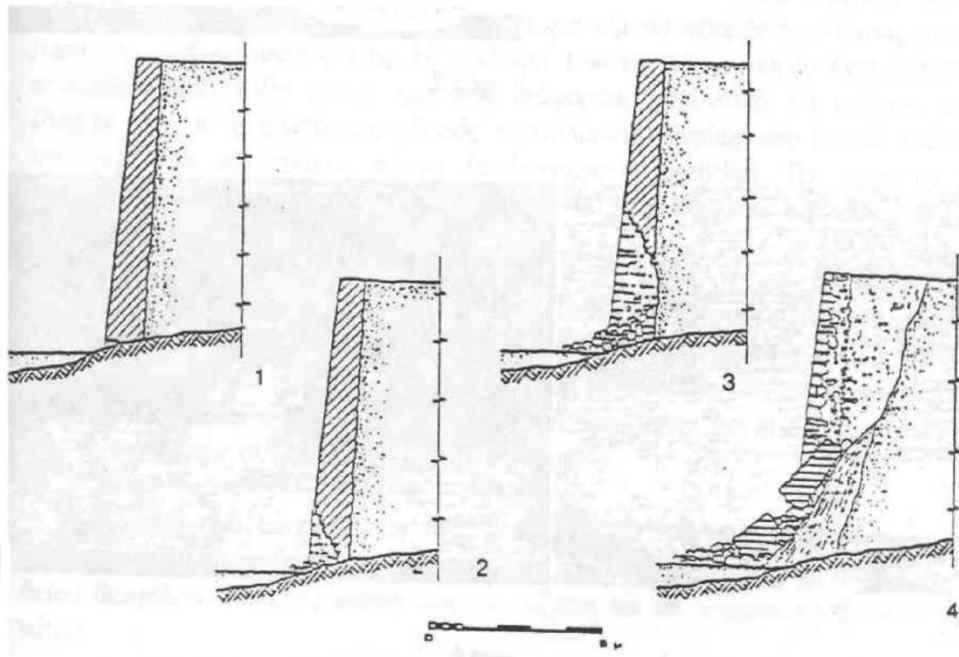


Εικόνα 3.10: Εμφανή τμήματα με κυψέλωση στο τείχος του Εθνικού Σταδίου Ηρακλείου

3.2.5. Αποσάθρωση Κονιωματών

Μια πολύ σημαντική μορφή φθοράς των μνημείων είναι η αποσάθρωση, ο βαθμιαίος, δηλαδή, θρυμματισμός του υλικού. Το φαινόμενο αυτό έχει συνδεθεί με την ανισότροπη θερμική διαστολή του ασβεστίτη, και τη δημιουργία διάκενων ανάμεσα στους κόκκους, με αποτέλεσμα την απώλεια της συνοχής του υλικού. Η αποσάθρωση που μπορεί να οδηγήσει και σε ολική κατάρρευση του μνημείου είναι η μόνη μορφή φθοράς που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του υλικού χωρίς κατ' ανάγκη την εμφάνιση εξωτερικών στοιχείων φθοράς.

Μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση της τοιχοποιίας σε συνδυασμό με πλάγιες ωθήσεις. έμφαση δίνεται στο 1/3 του ύψους της τοιχοποιίας όπου εντοπίζεται το μέγιστο ποσοστό υγρασίας και άρα διαλυτών αλάτων.



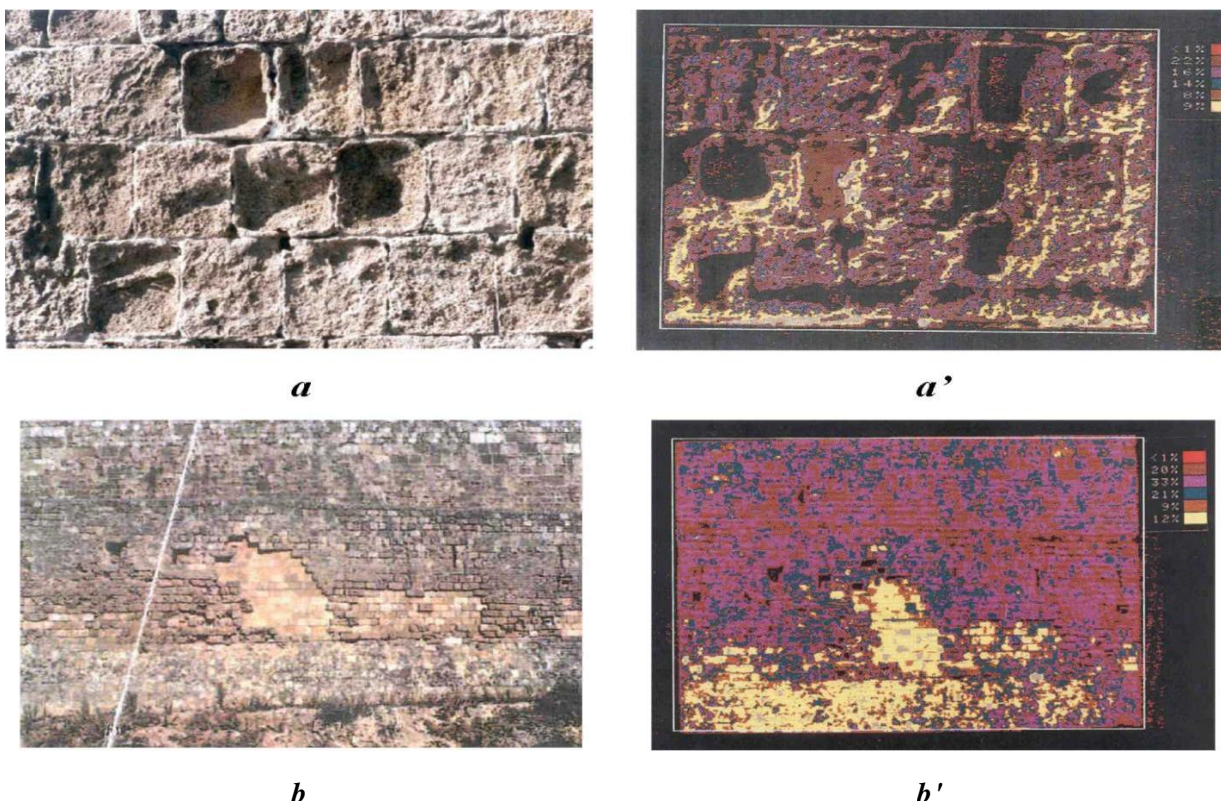
Εικόνα 3.11: Στάδια της διεργασίας της αποσάθρωσης: 1) υγιές τμήμα τοιχοποιίας, 2) έναρξη αποσάθρωσης σε μικρό τμήμα της τοιχοποιίας, 3) μετάδοση της διεργασίας της αποσάθρωσης σε μεγαλύτερο τμήμα της τοιχοποιίας και εμφάνιση ρωγμής, 4) γενικευμένη αποκόλληση υλικού που οδηγεί σε κατάρρευση της τοιχοποιίας



Εικόνα 3.12: Αποσάθρωση Κονιαμάτων, Μεσαιωνική Πόλη της Ρόδου

3.2.6. Ασύμβατα Υλικά

Η χρήση του τσιμέντου ως υλικού αποκατάστασης διαταράσσει την μηχανική συμπεριφορά, στατική και δυναμική, της τοιχοποιίας, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης διαφορικών φορτίσεων σε τμήματα της δομής που μπορεί να οδηγήσει στη ρηγμάτωση της. Σε κύκλους θέρμανσης - ψύξης, επειδή το τσιμέντο έχει σχεδόν διπλάσιο συντελεστή θερμικής διαστολής σε σύγκριση με τη πέτρα, επιφέρει την ανάπτυξη μηχανικών τάσεων στα υλικά της τοιχοποιίας, συμβάλλοντας στη φθορά της. Επιπρόσθετα, το τσιμέντο αποτελεί φορέα διαλυτών αλάτων ευνοώντας την φθορά των υπαρχουσών δομικών υλικών, λόγω εμφάνισης της διεργασίας της κυψέλωσης. Η χρήση τσιμέντου ως συνδετικού υλικού στη μεσαιωνική πόλη της ρόδου (εικ. 3.12a) προκάλεσε εντεινόμενη κυψελώση του αυθεντικού υλικού (πωρόλιθος), έως και τη δημιουργία μεγάλων κρατήρων (εικ. 3.12a') λόγω της ασυμβατότητας των δυο υλικών στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή. Η αντικατάσταση και συμπλήρωση φθαρμένων λιθοσωμάτων από συμπαγέστερους και μικρότερου πορώδους υγιείς λίθους (εικ. 3.12b), οδηγεί σε ένταση των φαινομένων της φθοράς στη επιφάνεια παλαιού - νέου υλικού (εικ. 3.12b').



Εικόνα 3.13: Αποτίμηση φθοράς από μη συμβατά κονιάματα αποκατάστασης σε τοιχοποιίες με εφαρμογή υπέρυθρης θερμογραφίας

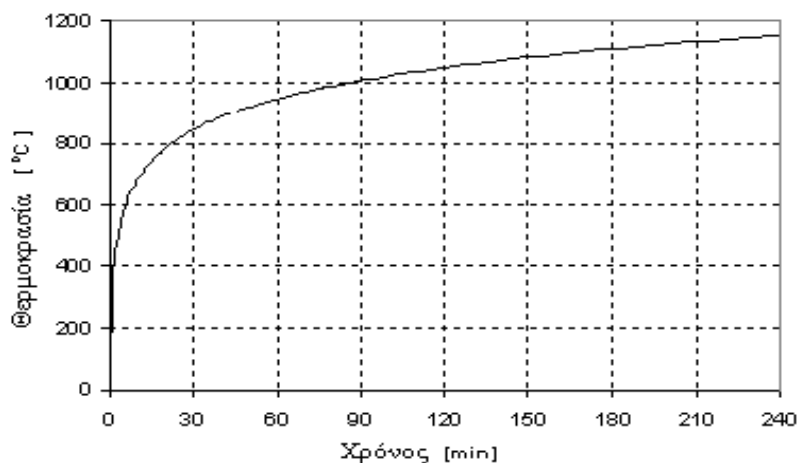
3.2.7. Θερμοκρασιακές μεταβολές – Πυρκαγιές

Κατά την διάρκεια πυρκαγιάς, ως αποτέλεσμα της διακύμανσης της θερμοκρασίας παρατηρείται ανάπτυξη μηχανικών τάσεων μέσα στο δομικό υλικό, λόγω του διαφορετικού

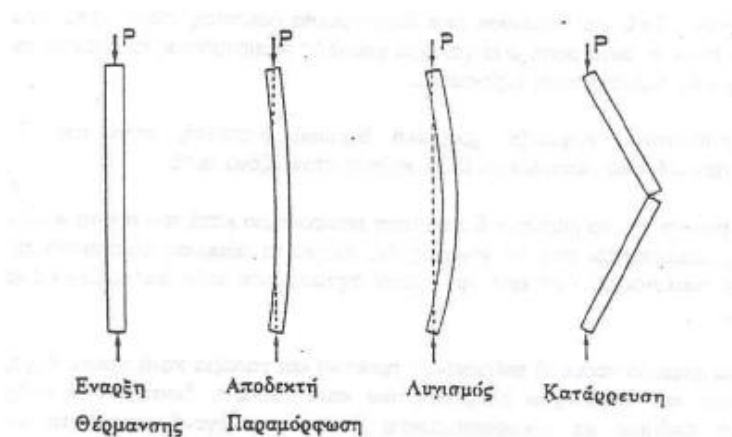
βαθμού και ταχύτητας διαστολής και συστολής των διαφορετικών συστατικών του. Η συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε πυρκαγιά είναι συνάρτηση κυρίως:

- Της ταχύτητας επιφανειακής εξάπλωσης της φλόγας .
- Της ποσότητας θερμότητας που εκλύεται κατά τη διάρκεια της καύσης των δομικών υλικών, καθώς και της θερμικής συμπεριφοράς τους κατά τη διάρκεια των σταδίων μιας πυρκαγιάς σε κλειστό χώρο. Πειραματικά αποτελέσματα επιτραπών τον καθορισμό του δείκτη πυραντίστασης των τοιχοποιιών .
- Της ποσότητας και της τοξικότητας των καυσαερίων που εκλύονται από την καύση των δομικών υλικών.

Ο σχεδιασμός δομικών μελών έναντι πυρκαγιάς βάσει των κανονισμών των περισσότερων κρατών, έχει στηριχθεί σε πειραματικά αποτελέσματα ανθεκτικότητας σε μια πρότυπη πυρκαγιά. Από τις διάφορες πειραματικές καμπύλες υπολογισμού μιας πρότυπης πυρκαγιάς που υπάρχουν η συχνότερα χρησιμοποιούμενη σήμερα είναι η ISO P834, η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



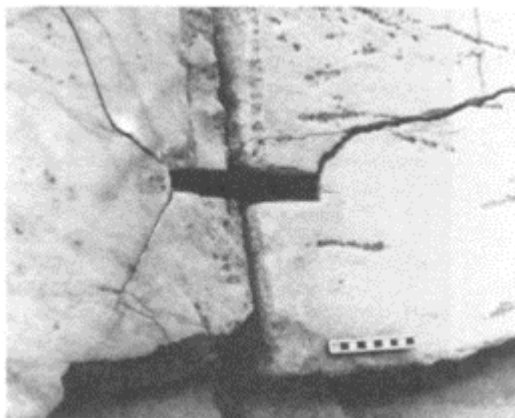
Εικόνα 3.14: Καμπύλη Υπολογισμού Πρότυπης Πυρκαγιάς-ISO P834(ISO, 1999)



Εικόνα 3.15: Σταδιακή επίδραση της φωτιάς σε τοιχοποιία

3.2.8. Διαστολή και διάβρωση μεταλλικών συνδέσμων

Τα προϊόντα της οξείδωσης που δημιουργούνται στην επιφάνεια των μεταλλικών συνδέσμων, που έχουν τοποθετηθεί στα διάφορα οικοδομήματα είτε κατά την αρχική κατασκευή τους είτε κατά την συντήρησή τους, αυξάνουν σημαντικά τον όγκο του συστήματος. Η διόγκωση αυτή προκαλεί την ανάπτυξη ισχυρότατων μηχανικών τάσεων μεταξύ των συνδετικών είτε δομικών υλικών, που οδηγούν στη ρήξη του υλικού όταν υπερβούν την αντοχή του.



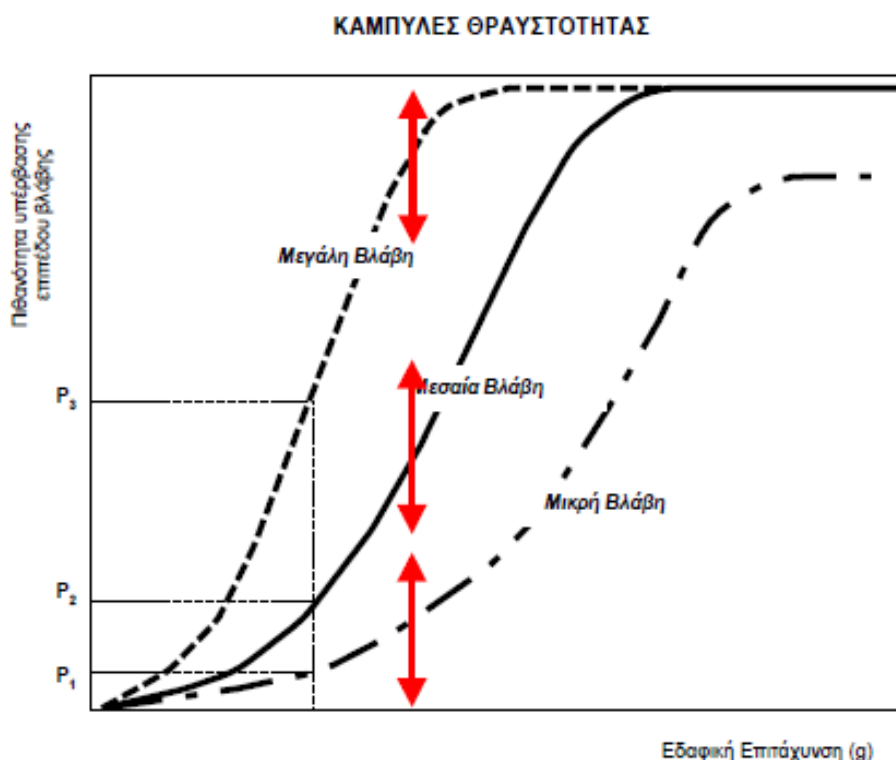
Εικόνα 3.16: Ρηγμάτωση μαρμάρου εξαιτίας της διάβρωσης συνδέσμου στον Παρθενώνα (Θ.Σκουλικίδης,2000)

3.2.9. Σεισμικές δονήσεις

Η δυναμική καταπόνηση των κτιρίων μπορεί να προκαλέσει βλάβες όταν οι συχνότητες αυτής κυμαίνονται μεταξύ 8-80 hz, ανάλογα με τις μέγιστες ταχύτητες που παρουσιάζονται (din 4150 - 1978). οι βλάβες παρουσιάζονται συνήθως για $v_{max} > 10\text{mm/s}$. συνήθως η ένταση της βλάβης αποτιμάται κατά τα πρότυπα ISO/Tc 108/Esi-2.

Τα φέροντα στοιχεία παρουσιάζουν ρηγματώσεις για τιμές $30 > v_{max} > 5\text{ mm/s}$. η πρόβλεψη κατά din για τις βλάβες σε κτίρια είναι ότι μονό ισχυρά κτίρια μπορούν να αντέξουν ταχύτητες μεταξύ 10 και 40 mm/s, ενώ ιστορικά κτίρια και κτίρια με ήδη υπάρχουσες βλάβες παρουσιάζουν οριακές αντοχές μεταξύ 2 και 5 mm/s.

Όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη θραυστότητας, για συγκεκριμένη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης (g), η αύξηση του μεγέθους βλάβης των κτιρίων σχετίζεται ανάλογα με την πιθανότητα υπέρβασης επιπέδου βλάβης (P). Δηλαδή τα κτίρια που έχουν ήδη υποστεί μεγάλες βλάβες ή φθορές θα παρουσιάσουν μεγαλύτερη πιθανότητα υπέρβασης δεδομένου επιπέδου βλάβης που μπορεί να οδηγήσει σε μερική ή ολική κατάρρευση τους.



Εικόνα 3.17: Καμπύλες θραυστότητας για κτίρια με διαφορετικό βαθμό βλάβης

3.2.10. Βιολογικές Διεργασίες

Υπό κατάλληλες συνθήκες υγρασίας, φωτός και θερμοκρασίας, φυτικοί και ζωικοί οργανισμοί αποικοούν τα διάφορα δομικά υλικά, επιφέροντας τη διάβρωση τους. Η φθορά μπορεί να είναι μηχανική (ρηγματώση, αποκόλληση), χημική (οξείδωση αέριων ρύπων), φυσική καθώς και αισθητική (χρωματισμός επιφάνειας). Υπεύθυνα για τη διάβρωση θεωρούνται αυτοτροφικά και ετεροτροφικά βακτήρια, φύκη, μύκητες, λειχήνες, κ.α., δρώντας απευθείας στα δομικά υλικά ή χρησιμεύοντας ως τροφή άλλων καταστρεπτικών μικροοργανισμών.

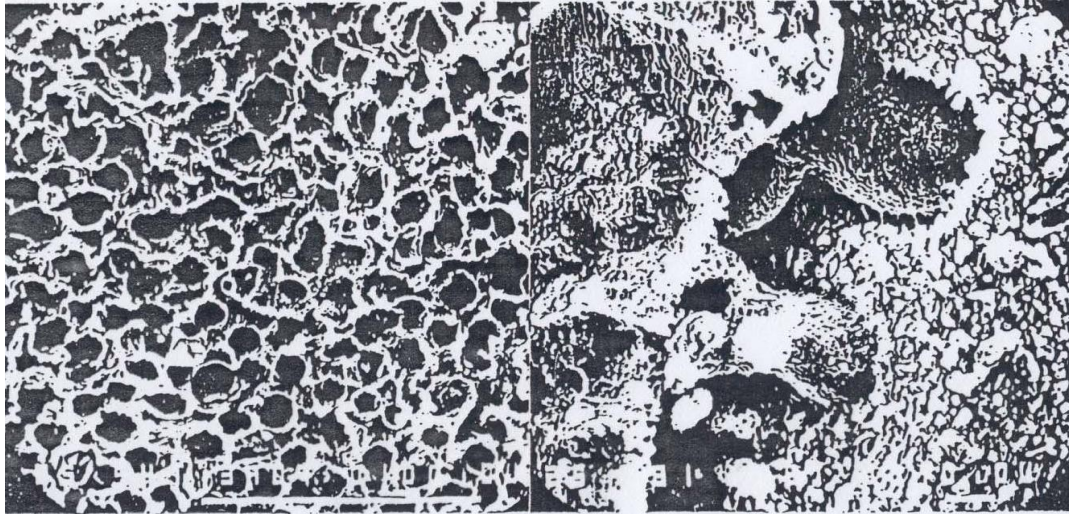
Πίνακας 3.3. Διάκριση των μικροοργανισμών σε σχέση με τον μηχανισμό διάβρωσης και το προσβεβλημένο δομικό υλικό

ΟΡΥΚΤΕΣ ΦΑΣΕΙΣ	ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ
ΠΥΡΙΤΙΚΑ	ΜΥΚΗΤΕΣ	ΦΙΑΜ ΝΕΡΟΥ (ΥΔΡΟΛΥΣΗ)
ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ	ΒΑΚΤΗΡΙΑ ΧΗΜΟΟΡΓΑΝΟΤΡΟΠΑ	ΟΞΙΝΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΜΠΛΟΚΩΝ
ΑΛΛΕΣ ΟΡΥΚΤΕΣ ΦΑΣΕΙΣ	ΧΗΜΟΛΙΘΟΤΡΟΠΑ ΒΑΚΤΗΡΙΑ ΦΩΤΟΤΡΟΦΙΚΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ	ΙΟΝΟΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΓΕΝΗΣ ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΙΟΝΤΩΝ

Η παραπάνω κωδικοποίηση έγινε βάσει της διατύπωση των ιταλικών προτύπων (normal

standards), καθώς και των συμπερασμάτων της σχετικής επιτροπής του ICOSOS.

Αξιοσημείωτη είναι η συνεργία της βιολογικής διεργασίας με άλλες διεργασίες διάβρωσης, όπως π.χ η οξείδωση του SO_2 σε SO_3 , από τα χημολιθοτροφικά βακτήρια (γυψοποίηση) καθώς επίσης και η οξείδωση της αμμωνίας, από νιτροοξειδωτικά βακτήρια, σε NO_2 το οποίο μετατρέπεται με την βροχή σε νιτρικό οξύ και διαβρώνει κυρίως τα ασβεστίτικα πετρώματα με τη μορφή βελονισμών.



Εικόνα 3.18: Έντονη βελονοειδής διάβρωση της επιφάνειας των λιθωμάτων από νιτροοξειδωτικά κυανοβακτήρια και χλωρόφυτα (κλίμακα 100-1μ.)



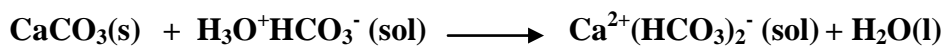
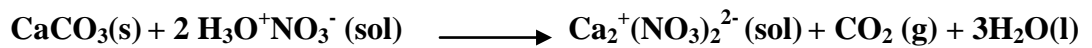
Εικόνα 3.19: Ανάπτυξη βιολογικής κρούστας με μαύρο και γκριζο χρώμα, σε τοίχος της Μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου



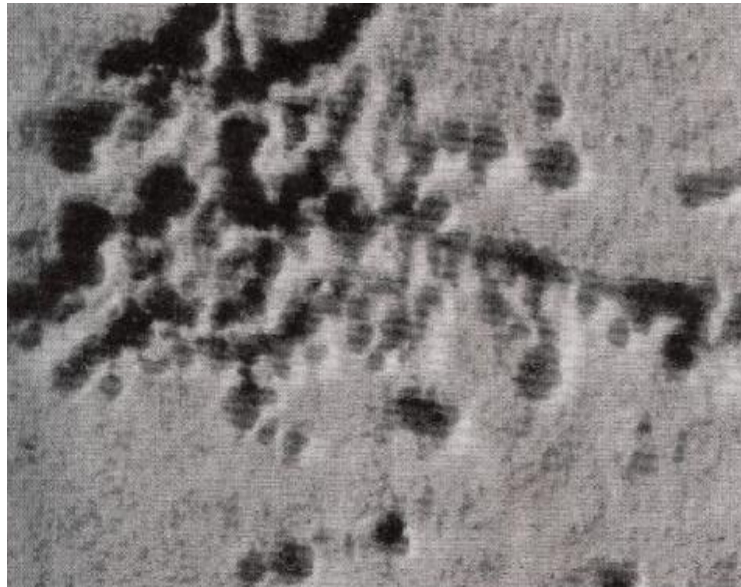
Εικόνα 3.20: Μικροβιακή προσβολή μνημείου, με αποτέλεσμα την αποκόλληση τμήματος αυτού

3.2.11. Αέριοι ρύποι - Όξινη βροχή

Η διάβρωση από αέριους ρύπους συνιστάται στην ξηρή ή υγρή κατακάθιση των ρυπαντών πάνω στα δομικά υλικά. Κατά την ξηρή κατακάθιση, οι αέριοι ρύποι απορροφώνται απευθείας από τις επιφάνειες των υλικών και τις προσβάλλουν. Η υγρή κατακάθιση είναι εντονότερη και ταχύτερη διεργασία διάβρωσης, σε σχέση με τη ξηρή. Οι ρυπαντές SO_x , NO_x και CO_2 διαλύονται στο νερό της βροχής και σχηματίζουν τα αντίστοιχα οξέα $\text{H}_3\text{O}^+\text{HSO}_4^-$, $\text{H}_3\text{O}^+\text{NO}_3^-$, $\text{H}_3\text{O}^+\text{HCO}_3^-$, δηλαδή την όξινη βροχή η οποία έχει καταστρεπτική επίδραση. Η δράση της δεν περιορίζεται στην επιφάνεια του υλικού, το οποίο εκτίθεται άμεσα σε αυτή αλλά εισχωρεί και στο εσωτερικό του, λόγω εδαφικής τριχοειδής αναρρίχησης αλλά και απορρόφησης από το πορώδες σύστημα του υλικού. Μεταξύ ανθρακικών υλικών και οξέων που περιέχονται στην όξινη βροχή, συντελούνται οι εξής αντιδράσεις:



Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το διοξείδιο του θείου (SO_2) παρουσία υγρασίας διαβρώνει τα πετρώματα με το μηχανισμό της γυψοποίησης αλλά διαλυμένο στο νερό της βροχής τα προσβάλλει με ταχύτητα δεκαπλάσια.



Εικόνα 3.21: Διάβρωση πετρώματος από όξινη βροχή

3.2.12. Ανάπτυξη επιφανειακής κρούστας λόγω ατμοσφαιρικών αιωρημάτων και ολικών αποθέσεων

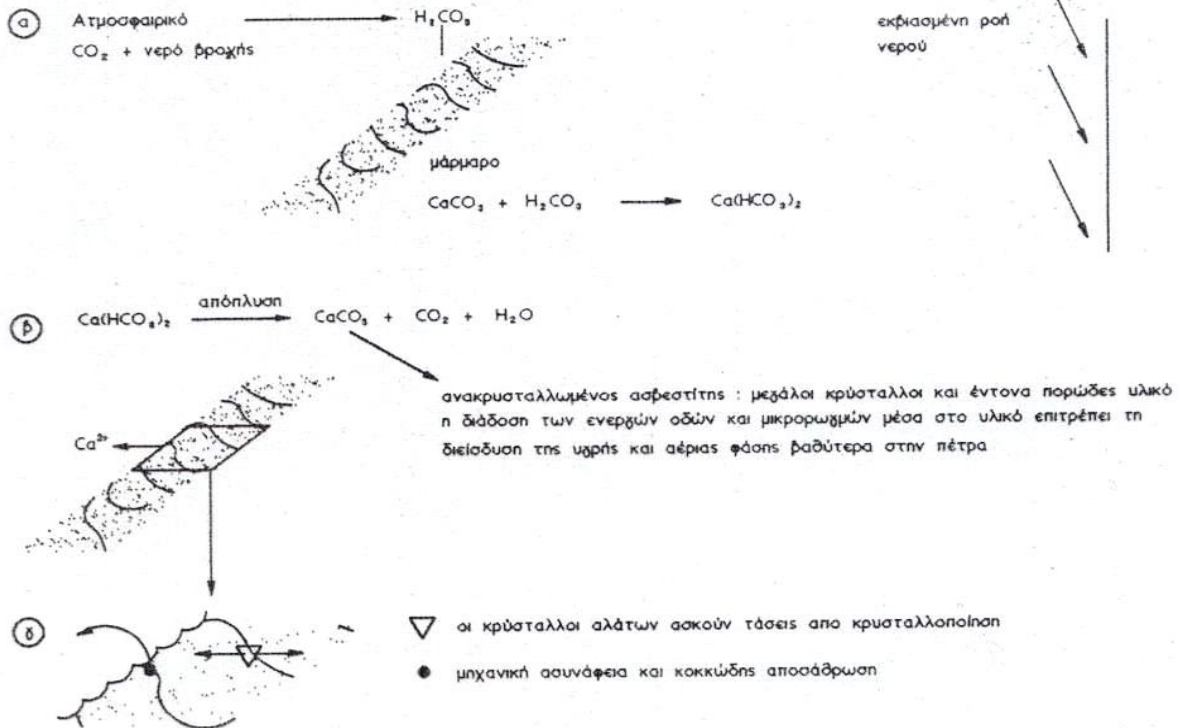
Με τον όρο αιωρούμενα σωματίδια, χαρακτηρίζουμε τα, υγρά ή στερεά, σωματίδια που βρίσκονται σε ελεύθερη μορφή στον αέρα και έχουν κατάλληλες διαστάσεις και ειδικό βάρος που τους επιτρέπουν να παραμένουν σε αιώρηση για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το μέγεθός τους (διάμετρος) κυμαίνεται από 0,01 μm ως 500 μm ενώ η χημική τους σύσταση ποικίλει και αντανακλά την πηγή από την οποία προέρχονται. Κύριες ανθρωπογενείς πηγές τους είναι οι βιομηχανικές δραστηριότητες και ειδικά η παραγωγή τσιμέντου και γύψου, τα χυτήρια μεταλλευμάτων, οι κατασκευές και οι αγροτικές δραστηριότητες. Το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως στα υλικά, που παραμένουν στεγασμένα από το νερό της βροχής και οι επικαθίσεις αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, όπως η αιθάλη, οι υδρογονάνθρακες, τα οξείδια μετάλλων προκαλούν τη χρωματική αλλοίωση της επιφάνειας. Η επάλληλη εναπόθεση γύψου, επικαθίσεων και ανακρυσταλλωμένου ανθρακικού ασβεστίου σχηματίζει μαύρες κρούστες.

3.2.13. Σχηματισμός κρούστας – Χρωματική αλλοίωση

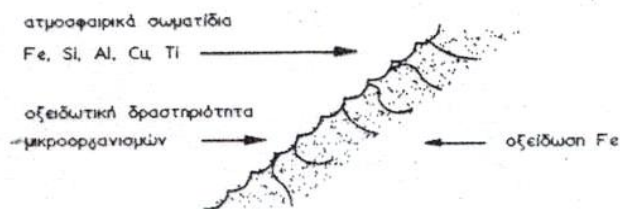
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχηματισμός κρούστας στις επιφάνειες, ο οποίος συνήθως συνοδεύεται από χρωματική αλλοίωση. Η εμφάνιση τους είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης πολλών παραγόντων, γεγονός που καθιστά την κατηγοριοποίηση τους αδύνατη. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την χαρακτηριστική τους όψη καθώς και την αιτία εμφάνισης τους, διακρίνουμε τις παρακάτω χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

- i. (Αποπλυμένες επιφάνειες). Κοκκώδης αποσύνθεση και αποκόλληση καθώς και πατίνες στο χρώμα της σκουριάς – διακρυσταλλική ρήξη της συνάφειας.
- ii. (Κιτρινόχρωμες κρούστες οξειδωσης). Πατίνες στο κίτρινο της σκουριάς σε εκπλυμένες επιφάνειες όπου συμβαίνει αναπήδηση του νερού.
- iii. (Τσιμεντιτικές κρούστες). Εκλεκτική διάβρωση των επιφανειών που καλύπτονται από τσιμεντένιες κρούστες. στο εξωτερικό τμήμα εμφανίζονται γκρίζες κρούστες - πατίνες στο κίτρινο της σκουριάς
- iv. (Μαύρες χαλαρές αποθέσεις). Μαύρες κρούστες με τη μορφή χαλαρών αποθέσεων που δημιουργούνται σε επιφάνειες προφυλαγμένες από το νερό
- v. (Φαιό-μαύρες κρούστες). Μαύρες – γκρίζες κρούστες “θωρακισμένες” από δευτερογενώς ανακρυσταλλωμένο ασβεστίτη που συνδέονται σταθερά με την επιφάνεια του μαρμάρου

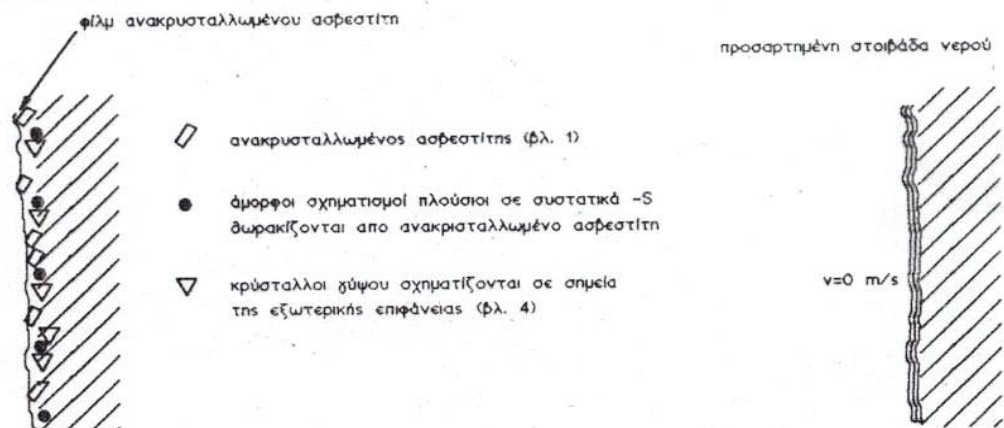
1. αποπλυμένη επιφάνεια



2. κίτρινες κρούστες (πάτινες)



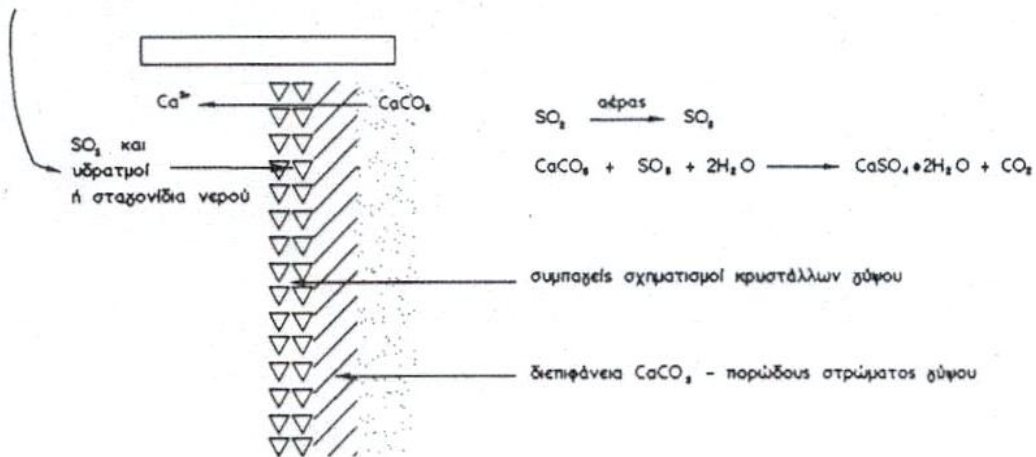
3. γκριζόμαυρες κρούστες



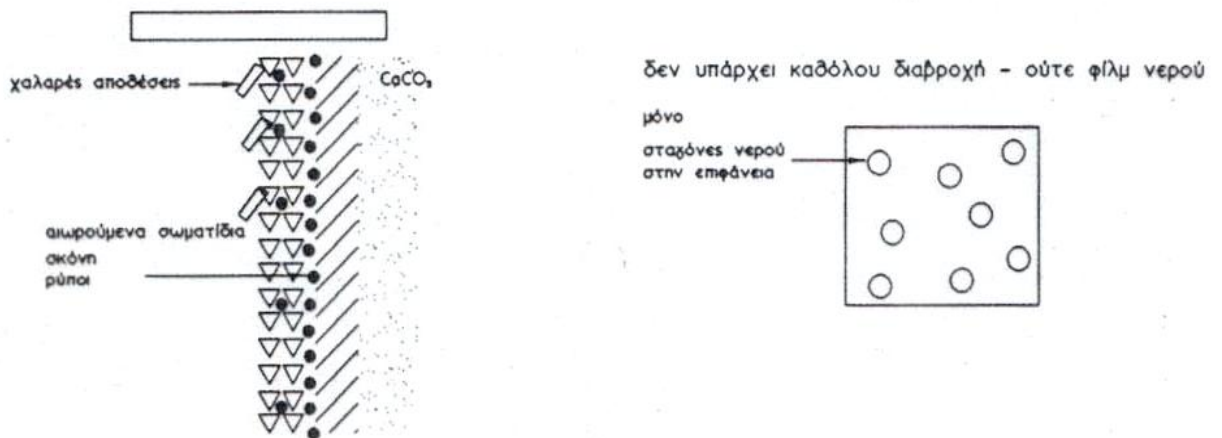
Εικόνα 3.22: Σχηματισμός κρούστας στην επιφάνεια δομικών υλικών

4. σχηματισμοί γύψου : χαλαρές αποθέσεις

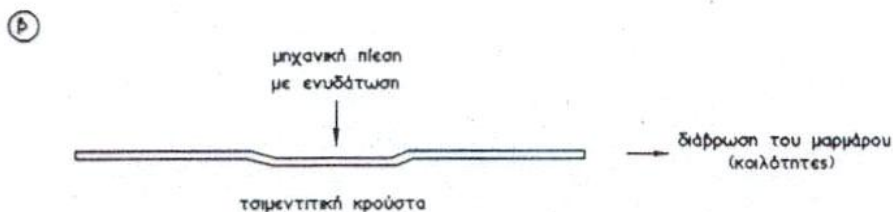
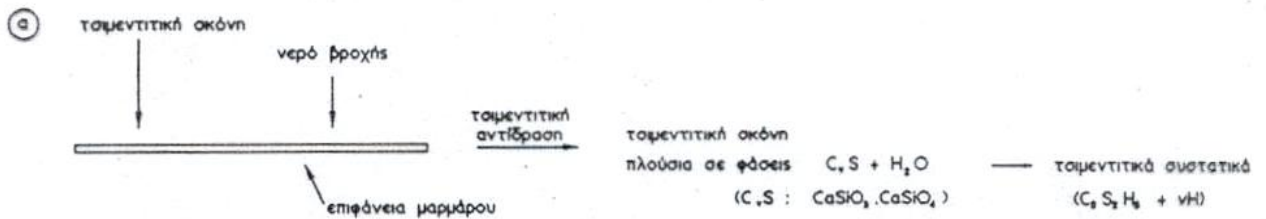
α) αντίδραση στη διεπιφάνεια ατμόσφαιρας - μαρμάρου



β) δημιουργία κρούστας



5. τσιμεντιτικές επικαλύψεις



Εικόνα 3.23: Σχηματισμός κρούστας στην επιφάνεια δομικών υλικών

4. Διαγνωστική Μελέτη - Μεθοδολογία Διαγνωστικής Μελέτης

Η επιλογή ενός ορθολογικού σχήματος επέμβασης σε υφιστάμενο δόμημα που έχει υποστεί φθορά προϋποθέτει μια σειρά από ερευνητικές εργασίες και συνεκτίμηση πολλών παραμέτρων, έχοντας ως προτεραιότητα τη διαγνωστική μελέτη της φθοράς. Η ανάλυση της φθοράς ενός κτιρίου, περιλαμβάνει τα παρακάτω 10 τμήματα:

- ο Τεκμηρίωση
- ο Επί τόπου Μακροσκοπικές Παρατηρήσεις για την κατάσταση των Υλικών
- ο Παρακολούθηση και Μέτρηση Περιβαλλοντικών Παραμέτρων
- ο Επί τόπου Μη Καταστρεπτικές Μετρήσεις – Χαρτογράφηση της Φθοράς
- ο Ταυτοποίηση των Δομικών Υλικών και Έρευνα Προέλευσής τους
- ο Μελέτη της Φθοράς στο Εργαστήριο
- ο Συσχέτιση Ενδογενών και Εξωγενών Παραγόντων της Φθοράς στην Κλίμακα του Μνημείου
- ο Εκτίμηση Αιτίων και Μηχανισμών των Φαινομένων της Φθοράς
- ο Παραμετρική Ανάλυση – Προσομοίωση των Φαινομένων στο Εργαστήριο σε συνθήκες Επιταχυνόμενης Γήρανσης
- ο Διάγνωση - Συμπεράσματα

Στη συνέχεια περιγράφεται το περιεχόμενο κάθε τμήματος της μελέτης.

4.1. Τεκμηρίωση

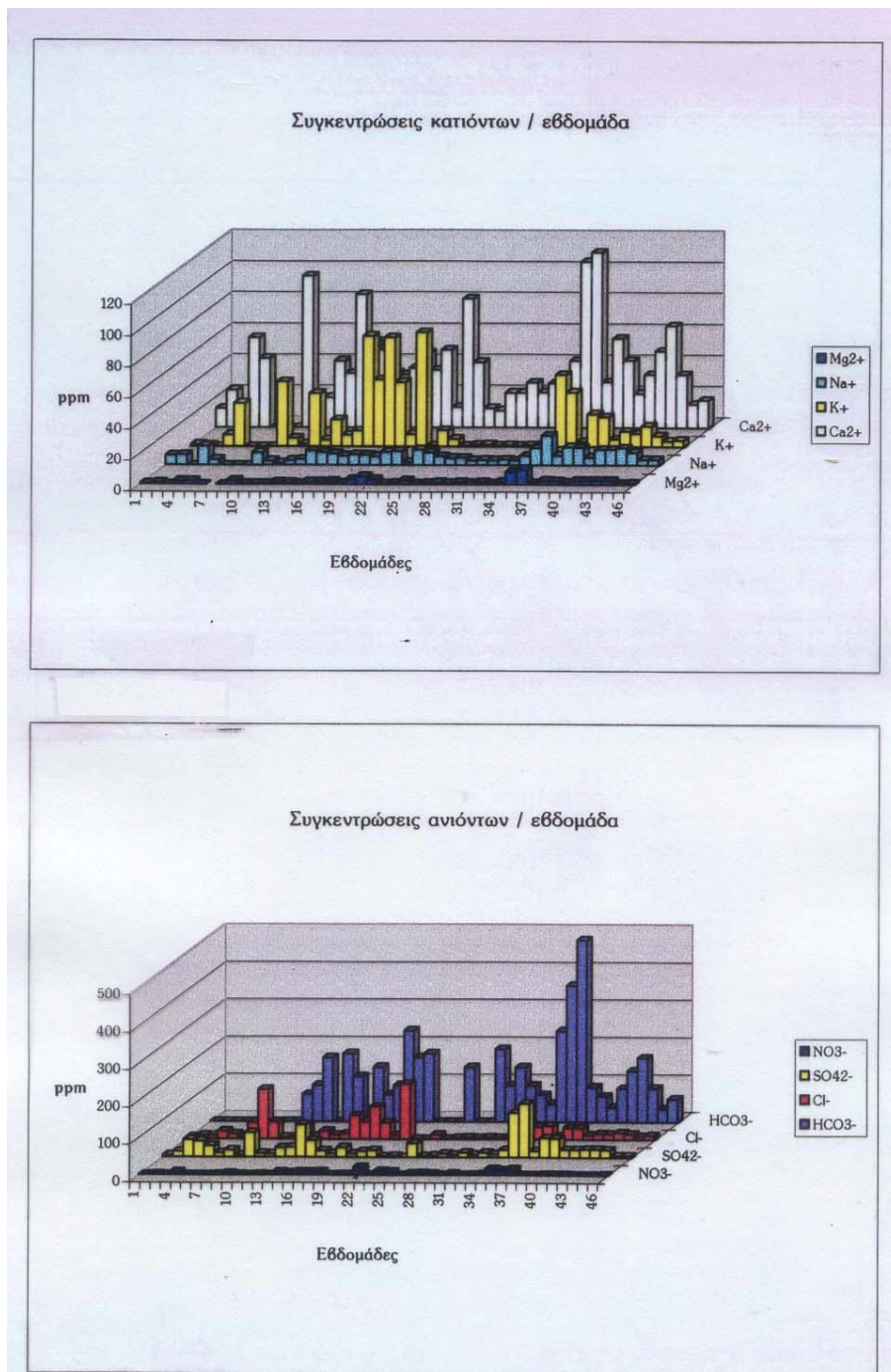
- ο Ιστορική Τεκμηρίωση.
 1. Ιστορία της κατασκευής και των επεμβάσεων των δομικών υλικών απαραίτητα στοιχεία για την κατανόηση της συμπεριφοράς του μνημείου.
 2. Ιστορία του Μνημείου / Συνόλου. Μελέτη ιστορικών αρχείων και σύγκριση παλαιότερων φωτογραφιών.
- ο Τοπογραφική Αποτύπωση
- ο Αρχιτεκτονική Αποτύπωση
- ο Καταγραφή και Αποτύπωση των Υλικών

4.2. Επί τόπου Μακροσκοπικές παρατηρήσεις της κατάστασης των υλικών

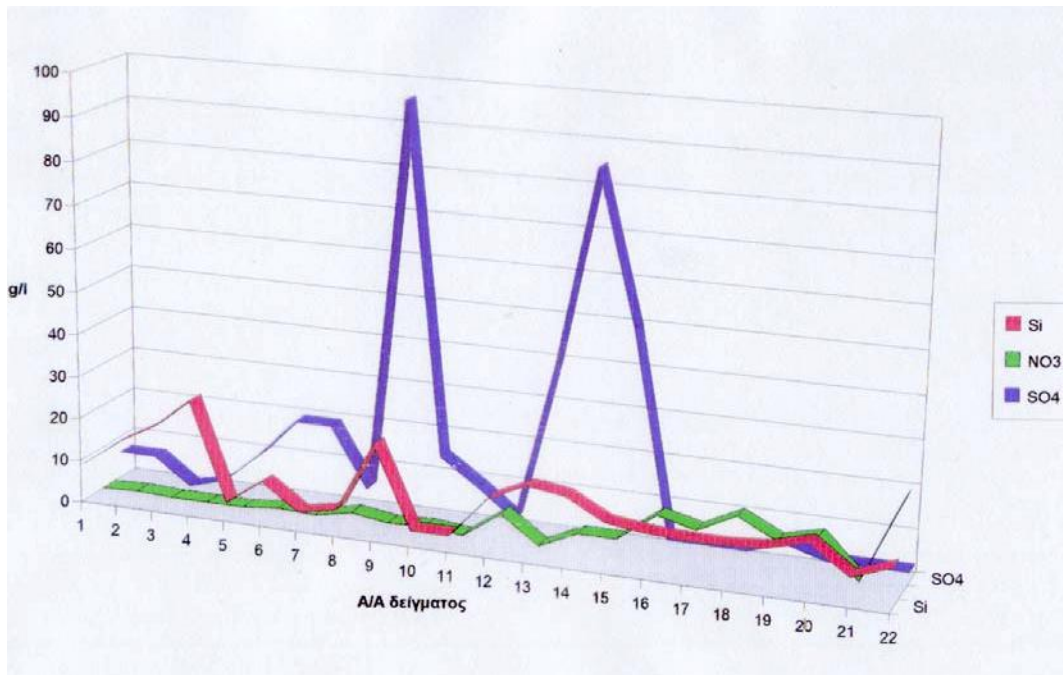
- Κατάσταση των υλικών
- Τυπολογία των φαινομένων της φθοράς
- Καταγραφή τυχόν επεμβάσεων

4.3. Τεκμηρίωση, Παρακολούθηση και μέτρηση Περιβαλλοντικών Παραμέτρων

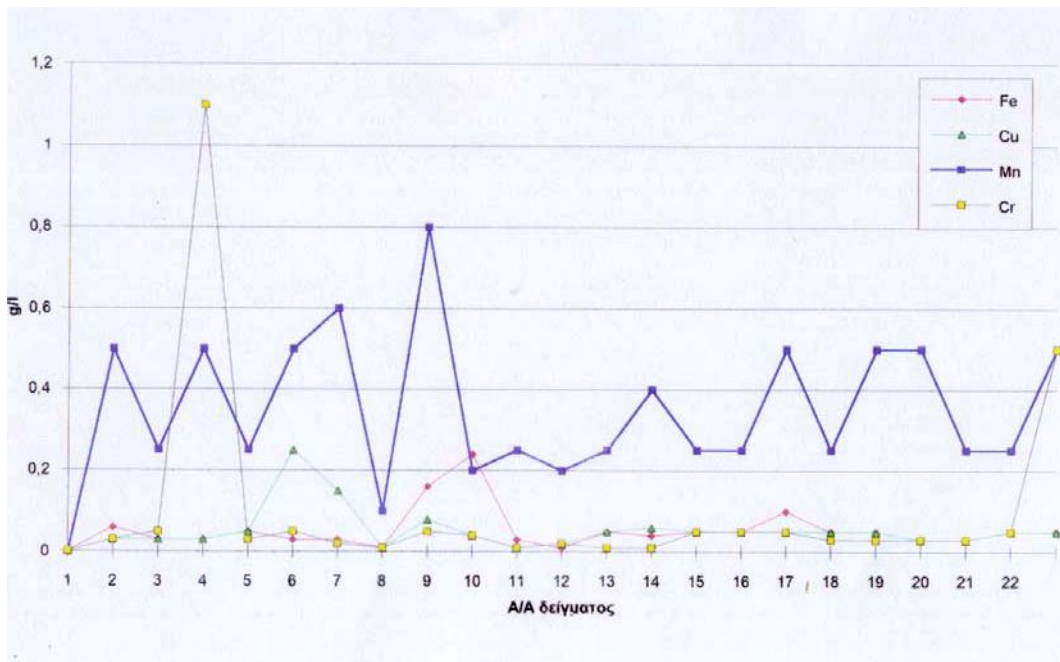
- Μικροκλίμα (θερμοκρασία, υγρασία, βροχοπτώσεις, ταχύτητα / συχνότητα ανέμων κ.ά)
- Ρύποι (στερεολύματα, υδρολύματα, αερολύματα)
- Χημική ανάλυση εδάφους και παρακολούθηση ανερχόμενης υγρασίας
- Άλατα σε υγρή ή στερεά φάση



Εικόνα 4.1: Παρακολούθηση της μεταβολής των συγκεντρώσεων ανιόντων και κατιόντων , στην ατμόσφαιρα (Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας-ΥΠΕΚΑ).



Εικόνα 4.2: Μέτρηση της συγκεντρώσεως Si, NO₃, SO₄ σε δείγματα δομικού υλικού (Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας-ΥΠΕΚΑ)



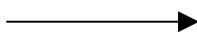
Εικόνα 4.3: Καταγραφή συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων σε δείγματα δομικού υλικού (Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας-ΥΠΕΚΑ)

4.4. Επί τόπου Μη Καταστρεπτικές Μετρήσεις – Χαρτογράφηση της Φθοράς

- Χαρτογράφηση των υλικών
- Χαρτογράφηση της Φθοράς.
- Αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

4.5. Ταυτοποίηση των Δομικών Υλικών και Έρευνα Προέλευσης τους

- Πετρογραφική
- Ορυκτολογική
- Φυσική
- Χημική
- Φυσικοχημική
- Μηχανική
- Νετρονική Ενεργοποίηση (Ανάλυση Διάκρισης)



Μελέτη/ Δείγματα από το Μνημείο και Δείγματα Λατομείων Περιοχής βάσει Γεωλογικού Χάρτη

4.6. Μελέτη της Φθοράς στο Εργαστήριο

- Συστηματική αντιπροσωπευτική δειγματοληψία όλων των μορφών φθοράς από χαρακτηριστικά σημεία του μνημείου.
- Μελέτη ιδιοτήτων των φθαρμένων υλικών (ορυκτολογική, φυσική, φυσικοχημική, χημική, μηχανική)
- Μελέτη των προϊόντων της φθοράς (ορυκτολογική, χημική)
- Σύγκριση αποτελεσμάτων υγιών και φθαρμένων υλικών με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για:
 - Το είδος και το βαθμό διάβρωσης
 - Την κατάσταση των προϊόντων διάβρωσης
 - Τη φυσική κατάσταση της διαβρωμένης πέτρας
 - Τα αίτια

4.7. Συσχέτιση Ενδογενών και Εξωγενών Παραγόντων της Φθοράς στο Επίπεδο του Μνημείου

- Στοχαστική συσχέτιση περιβαλλοντικών παραγόντων και των δεδομένων της φθοράς των υλικών με πολυκριτηριακή ανάλυση
- Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες

Δύο ομάδες μεταβλητών: Ενδογενείς & Εξωγενείς

- Γραφική παράσταση του συνόλου των δεδομένων σε δυσδιάστατο διάγραμμα
- Εκτίμηση ρόλου και ειδικού βάρους κάθε μεταβλητής στις διαφορετικές ομάδες
- Ανάλυση διάκρισης
 1. Πλήρης εικόνα του διαχωρισμού των δεδομένων σε ομάδες και καταγραφή των συναρτήσεων διάκρισης
 2. Πρόβλεψη σε ποια ομάδα κατατάσσεται μία νέα περίπτωση

Το στατιστικό πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από τα δεδομένα της χημικής ανάλυσης για διαλυτά άλατα και από την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων του μικροκλίματος.

4.8. Εκτίμηση Αιτιών και Μηχανισμών των Φαινομένων της Φθοράς

- Αξιολόγηση εργαστηριακών δεδομένων
- Αξιολόγηση δεδομένων από τα αποτελέσματα των επί τόπου μη καταστρεπτικών μετρήσεων
- Συμπεράσματα

4.9. Παραμετρική Ανάλυση – Προσομοίωση των Φαινομένων στο Εργαστήριο σε Συνθήκες Επιταχυνόμενης Γήρανσης

- Παράγοντες που επηρεάζουν τα φαινόμενα
- Προσομοίωση συνθηκών στο εργαστήριο
- Δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης

- Θάλαμος αλατονέφωσης
 - Θάλαμος Kosternich
 - Κύκλοι εμβάπτισης – ξήρανσης κ.α.
- ο Επιβεβαίωση της εκτίμησης για τα αίτια και τους μηχανισμούς της φθοράς

4.10. ΔΙΑΓΝΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

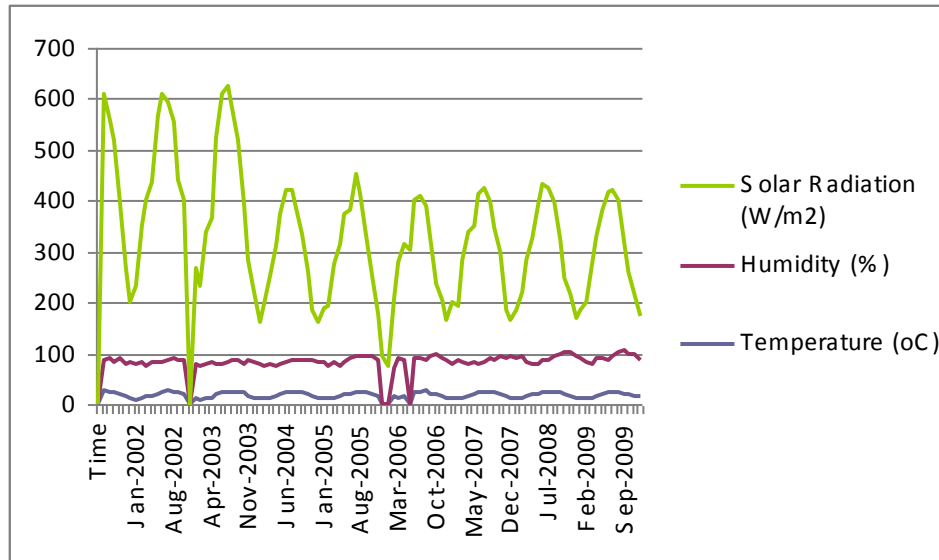
Ποιότητα της Ατμόσφαιρας της Πόλης του Ηρακλείου

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που διαμορφώνονται στις περισσότερες μεγαλουπόλεις συντελούν στη σταδιακή καταστροφή των μνημείων. Για την ολοκληρωμένη αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα Ενετικά τείχη του Ηρακλείου και συνεπώς τη σύνδεση των παρουσιαζόμενων τύπων φθοράς με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των δεδομένων για τις περιεκτικότητες των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων από τις μετρήσεις του σταθμού της Φινοκαλιάς, του ΕΠΕΧΗΔΙ του Πανεπιστημίου Κρήτης(<http://finokalia.chemistry.uoc.gr>).

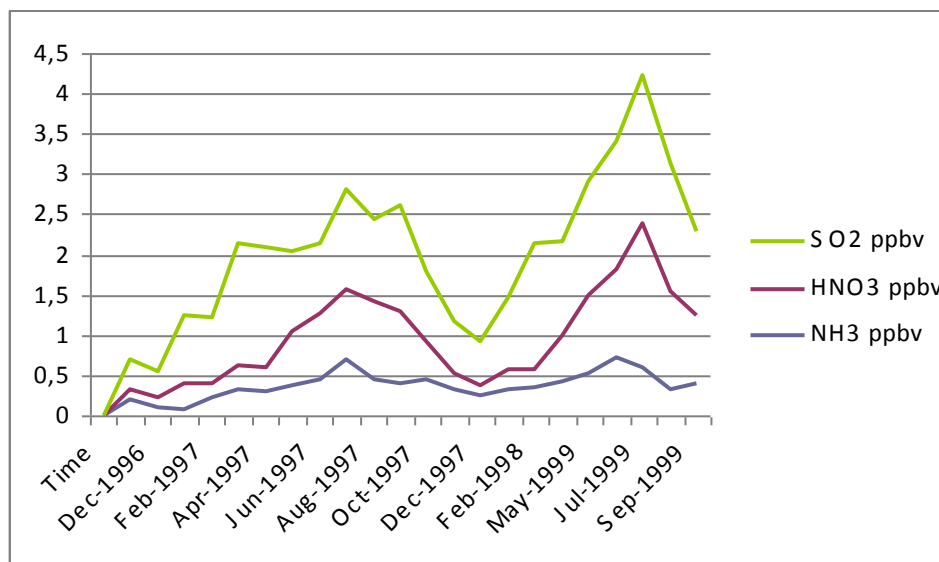
Οι ρύποι οι οποίοι καταγράφηκαν από το σταθμό Φινοκαλιάς, δίνοντας χρήσιμες πληροφορίες για την ποιότητα της ατμόσφαιρας, είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) σε, το όζον (O₃), το διοξείδιο του αζώτου (NO₂), το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του θείου (SO₂) και η επεξεργασία των δεδομένων αυτών, βασίστηκε στον υπολογισμό των μέσων όρων τους.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις, ο ρύπος με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση είναι το CO, ενώ ακολουθούν το όζον, το διοξείδιο του αζώτου, το μονοξείδιο του αζώτου και τέλος το διοξείδιο του θείου. Από τους μέσους όρους των περιεκτικότητων του κάθε ρύπου για τα εξεταζόμενα έτη συμπεραίνουμε τη σταθερή μείωση του μονοξειδίου του άνθρακα, την αύξηση του όζοντος ιδιαίτερα κατά το έτος 2007, τις περίπου σταθερές τιμές των οξειδίων του αζώτου με υψηλότερη αυτή του 1999, τον τετραπλασιασμό σχεδόν του διοξειδίου του αζώτου το 2003 και τέλος την ανοδική πορεία των τιμών του διοξειδίου του θείου με υψηλότερο ρυθμό αύξησης το 2004.

Αξίζει να αναφέρουμε πάντως ότι οι περιεκτικότητες όλων των ρύπων βρίσκονται κάτω από τα όρια προειδοποίησης, γεγονός που υποδηλώνει τα σχετικά χαμηλά επίπεδα ρύπανσης της πόλης του Ηρακλείου.



Εικόνα 4.4: Καταγραφή Μέσων τιμών Θερμοκρασίας, Υγρασίας, Ηλιακής Ακτινοβολίας (ΕΠΕΧΗΔΙ-σταθμός Φινοκαλιάς)

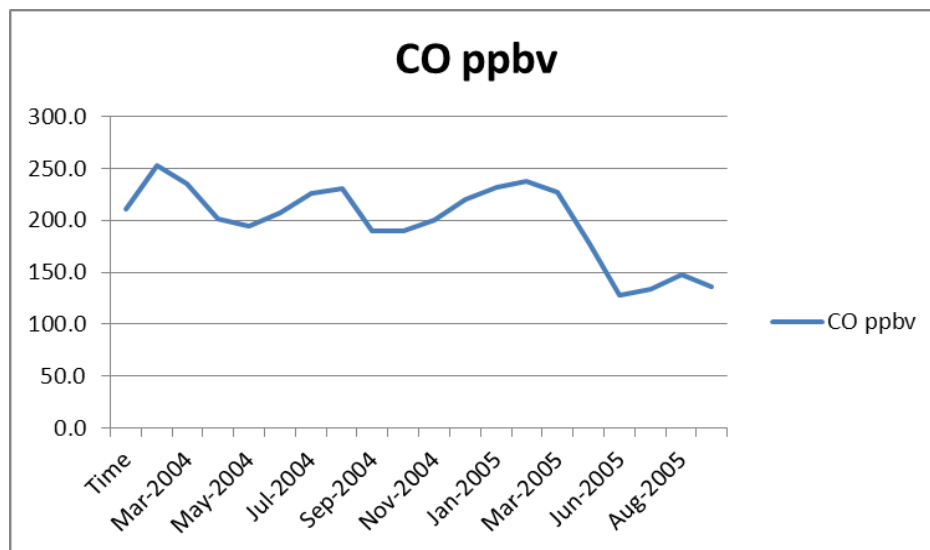


Εικόνα 4.5: Μέτρηση μέσω τιμών εκπομπής των αερίων SO₂, HNO₃ και NH₃ (ppbv) (ΕΠΕΧΗΔΙ-σταθμός Φινοκαλιάς)

Όμως, ακόμα και για αυτά τα σχετικά χαμηλά επίπεδα ρύπανσης, οι παραπάνω ρύποι παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία των διαφόρων τύπων φθοράς στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες, των Ενετικών τειχών. Πιο συγκεκριμένα:

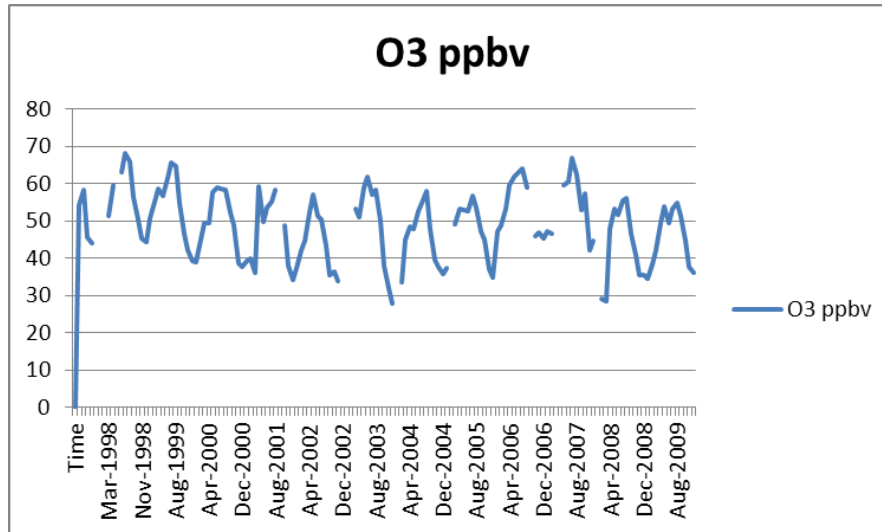
CO: Είναι ιδιαίτερα τοξικό αέριο και προκύπτει από την ατελή καύση των fossil fuels ή οργανικών υλικών. Δεν προκαλεί άμεση φθορά και διάβρωση στα δομικά υλικά αλλά όταν αντιδρά με ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου μετατρέπεται σε CO₂, το οποίο διαλυμένο στο νερό της βροχής (όξινη βροχή) μετατρέπεται σε ανθρακικό οξύ που είτε διαλύει τα

ασβεστιτικής σύστασης δομικά υλικά (όπως αυτά του Ενετικού τείχους του Ηρακλείου) με αποτέλεσμα την απόπλυση και συνεπώς την απώλεια του αυθεντικού υλικού ή σχηματίζει σκληρές ανθρακικές κρούστες, ανάλογα με τη θερμοκρασία, την πίεση και τη σχετική υγρασία, κ.α.



Εικόνα 4.6: Καταγραφή μέσης τιμής της συγκεντρώσεως του CO (ppbv) (ΕΠΕΧΗΔΙ-σταθμός Φινοκαλιάς)

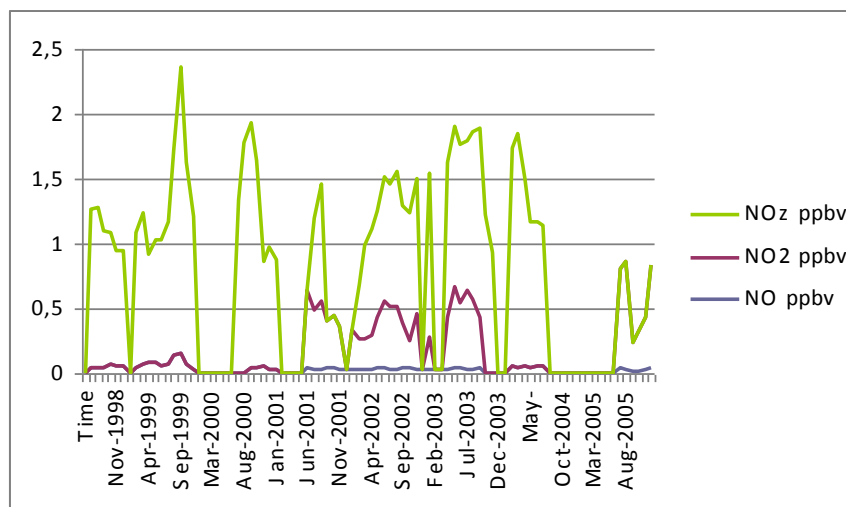
O₃: Πρόκειται για δευτερογενή ρυπαντή, ο οποίος δημιουργείται κατά τη φωτοχημική οξείδωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και απαιτεί την παρουσία των NO₂ και NO, που δρουν σαν καταλύτες για την αντίδραση σχηματισμού του. Δεν προκαλεί άμεσα φθορά και διάβρωση στα ασβεστιτικά δομικά υλικά, αλλά μπορεί να οξειδώσει στην υγρή φάση της ατμόσφαιρας το διοξείδιο του θείου σε θειικό οξύ (η ταχύτητα αυτής της αντίδρασης είναι κατά 1000 φορές μεγαλύτερη από την οξείδωση του SO₂ με τις ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου (OH)). Το O₃ προκαλεί όμως άμεση φθορά σε οργανικά δομικά υλικά όπως το ξύλο, καθώς και σε υλικά προστασίας των λίθων (οργανικά στερεωτικά –τα οποία χρησιμοποιήθηκαν παλαιότερα- ή υδροφοβιωτικά), λόγω της έντονης οξειδωτικής του δράσης.



Εικόνα 4.7: Καταγραφή μέσης τιμής της συγκέντρωσης του O_3 (ppbv) (ΕΠΕΧΗΔΙ-σταθμός Φινοκαλίας)

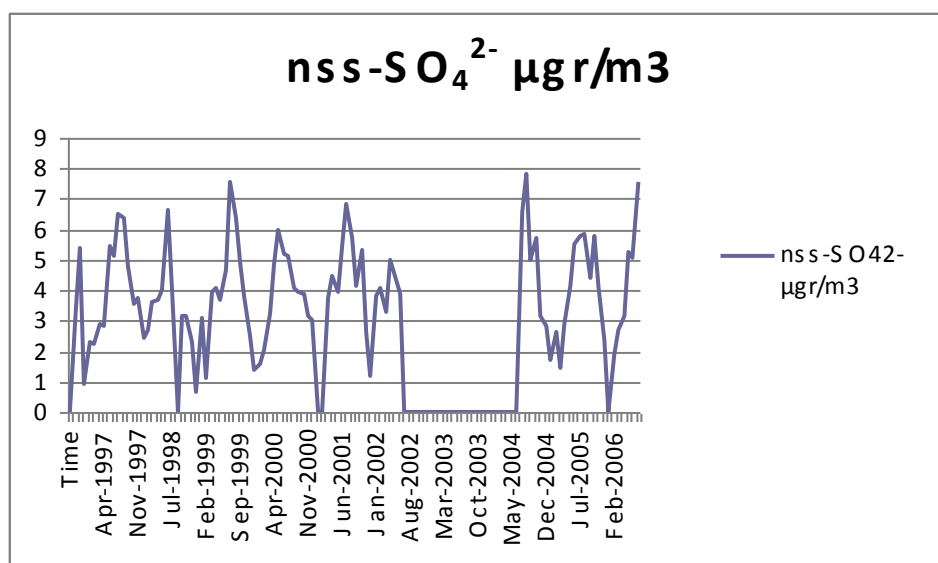
NO₂: Τοξικό αέριο και δευτερογενής ρυπαντής που προκύπτει από την οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου. Παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις στα κέντρα των πόλεων και σε κεντρικούς δρόμους μεγάλης κυκλοφορίας. Κατά την οξείδωσή του, από το όζον κυρίως, προκύπτει το νιτρικό οξύ, το οποίο με παρατεταμένη συσσώρευση μετατρέπει τα ασβεστίδια δομικά υλικά στα ευδιάλυτα νιτρικά άλατα του ασβεστίου, προκαλώντας έτσι απώλεια αυθεντικού υλικού. Άλλη επίδραση του NO₂ είναι η καταλυτική του δράση στην οξείδωση του διοξειδίου του θείου σε τριοξείδιο του θείου, από το οποίο προκύπτει όπως αναφέρεται πιο κάτω το θειικό οξύ.

NO: Πρωτογενής ρύπος όπου κυρίως εκπέμπεται από αυτοκίνητα, βιομηχανίες και εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαβρωτική του δράση είναι έμμεση και προκύπτει με την μετατροπή του σε NO₂ και κατόπιν σε HNO₃.



Εικόνα 4.8: Μέτρηση μέσων τιμών εκπομπής των αερίων NO, NO₂ και NO_x (ppbv) (ΕΠΕΧΗΔΙ-σταθμός Φινοκαλίας)

SO₂: Πρόκειται για άχρωμο τοξικό αέριο το οποίο προέρχεται κατά 41% από φυσικές πηγές εκπομπής π.χ. θάλασσα και κατά 59% από ανθρωπογενείς εκπομπές, όπως από μηχανές εσωτερικής καύσης, βιομηχανίες, εργοστάσια παραγωγής ρεύματος κ.α. Στις ατμοσφαιρικές συνθήκες συνήθως ευνοείται η οξειδωσή του σε SO₃, είτε από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, είτε από το NO₂, (υπάρχει βέβαια και η περίπτωση της οξειδωσης σεθεικό οξύ, που καταλύεται με την παρουσία όζοντος ή σωματιδίων μετάλλων). Το SO₃ είναι εξαιρετικά υγροσκοπικό αέριο και έτσι μετατρέπεται γρήγορα σεθεικό οξύ, το οποίο είτε με τη μορφή σωματιδίων που απορροφούν νερό (rain out), είτε με το νερό της βροχής - όξινη βροχή (wash out), ξεκινά τη διαβρωτική του δράση στα ασβεστιτικά δομικά υλικά. Οι ασβεστόλιθοι ανάλογα με το μηχανισμό της απόθεσης μετατρέπονται σε γύψο (εν ξηρώ απόθεση – θείωση), ή αποπλένονται με αποτέλεσμα την απώλεια αυθεντικού υλικού (όξινη προσβολή). Η όξινη προσβολή τωνθεικών επιδρά και στα κονιάματα (ιστορικά ή αποκατάστασης) με το σχηματισμό γύψου στα ασβεστιτικά, καθώς και ενώσεων μεγάλου μοριακού βάρους όπως ο εντριγκίτης (3CaO Al₂O₃ 3CaSO₄ 32H₂O), ή ο θωμασίτης (CaSiO₃ CaSO₄ CaCO₃ 15H₂O), στα τσιμεντιτικά και υδραυλικά ασβεστοκονιάματα.



Εικόνα 4.9: Μέτρηση μέσης τιμής εκπομπής του αερίου SO₄ (µgr/m³) (ΕΠΕΧΗΔΙ-σταθμός Φινοκαλιάς)

5. Τεχνικές και Μεθοδολογία Αποτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων στα Υλικά

Η πολιτιστική κληρονομιά της Ελλάδας και κυρίως αυτή που σχετίζεται με αρχιτεκτονικά έργα (κάστρα, μνημεία, οικήματα, εκκλησίες, κ.λπ.) απειλείται από το περιβάλλον. Με το πέρασμα του χρόνου τα οικοδομικά υλικά, όπως η πέτρα, τα κονιάματα, τα κεραμικά κ.α, φθείρονται φυσιολογικά από τις συνήθεις καιρικές μεταβολές (υγρασία, θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, κ.λπ.). Επί πλέον η φθορά των υλικών αυτών επιβαρύνεται ολοένα και περισσότερο από ανθρωπογενείς παράγοντες όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η αστικοποίηση, η βιομηχανία, ο τουρισμός, αλλά και από ακατάλληλες μεθόδους συντήρησης που ενδεχομένως να είχαν εφαρμοστεί στο παρελθόν.

Η διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι ένα αναδυόμενο αυτόνομο επιστημονικό πεδίο στην Ευρώπη το οποίο συνδυάζει διαγνωστικές μεθόδους για την κατανόηση των αιτιών της φθοράς, μεθόδους παρακολούθησης (monitoring) του περιβάλλοντος του μνημείου, καθώς και στρατηγικές επιλογής κατάλληλων μεθόδων και υλικών συντήρησης.

Στην προσπάθεια της διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς χρησιμοποιούνται οι μη καταστρεπτικές τεχνικές, οι οποίες εφαρμοζόμενες επί τόπου, αποτελούν το εργαλείο καταγραφής και εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με κριτήριο τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υλικών. Πρόκειται για τεχνικές που δίδουν αναλυτικές πληροφορίες για τις αρχιτεκτονικές επιφάνειες χωρίς να απαιτούνται καταστρεπτικές επεμβάσεις στο μνημείο.

Παράλληλα, η κατανομή της υγρασίας και των διαλυτών αλάτων στην τοιχοποιία, σε συνδυασμό με τις περιεκτικότητες των ατμοσφαιρικών ρύπων, είναι κύριοι παράγοντες της φθοράς και αποτελούν κριτήρια για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Οι διάφορες τεχνικές Αποτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων στα Υλικά που εφαρμόζονται είναι:

Μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM). Η μέθοδος αυτή, δίνει σημαντικές πληροφορίες κατά την επί τόπου εξέταση των τοιχοποιιών, σχετικά με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιφανειών, όπως την ύψη, τους διάφορους τύπους φθοράς (εξανθήσεις, κρούστες κλπ), ακόμη και την μικροδομή.

Υπερηχοσκόπηση (US), Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας της διάδοσης των υπερήχων στα διάφορα υλικά και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του πάχους της ζώνης φθοράς των εξεταζόμενων δομικών υλικών, του βάθους των ορατών ρωγμών αλλά και τον προσδιορισμό των ρωγμών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας.

Υπέρυθρη Θερμογραφία (IR-Thermo), Συμβάλει στη διάγνωση της φθοράς των αρχιτεκτονικών επιφανειών όπως ρωγμών, κυψελώσεων, κρουστών κ.α., Επίσης,

χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας στη διαπερατότητα υγρών και ατμών, στη συμβατότητα των τριχοειδών συστημάτων των διαφόρων υλικών της, μεαποτέλεσμα την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ανερχόμενη και παραμένουσα υγρασία και τελικώς στον έλεγχο της συμβατότητας των αυθεντικών δομικών υλικών με τα υλικά αποκατάστασης και τις επεμβάσεις συντήρησης.

Αυτές οι επί τόπου μη καταστρεπτικές τεχνικές επιβεβαιώνονται από εργαστηριακές μελέτες και αναπτύσσουν μία ολοκληρωμένη μέθοδο ερμηνείας της συμβατότητας ή της ασυμβατότητας των υλικών μιας τοιχοποιίας, σχετικά με τα φαινόμενα εξάτμισης - συμπύκνωσης και την κυκλοφορία του νερού και των διαλυτών αλάτων (φαινόμενα μεταφοράς-Υπέρυθρη-Θερμογραφία), σχετικά με την ορυκτολογική σύσταση και υφή, τους τύπους φθοράς και τη μικροδομή (Μικροσκοπία Οπτικών Ινών), καθώς και το πάχος της διαβρωμένης ζώνης των υπό εξέταση υλικών (Υπερηχοσκόπηση).

Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (DIP) για τη χαρτογράφηση των παρουσιαζόμενων λιθοτύπων και τύπων φθοράς στις εξεταζόμενες τοιχοποιίες. Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας που λαμβάνεται από την φωτογράφιση της φθαρμένης επιφάνειας του μνημείου ή του ιστορικού συνόλου είναι μια σχετικά καινούργια και πειραματική μη-καταστρεπτική μέθοδος χαρτογράφησης της λιθοτύπων και φθοράς, όπου χρησιμοποιείται η ενεργειακή κατανομή της φωτεινότητας στις διάφορες αποχρώσεις του γκριζου (ιστογράμματα φωτεινότητας).

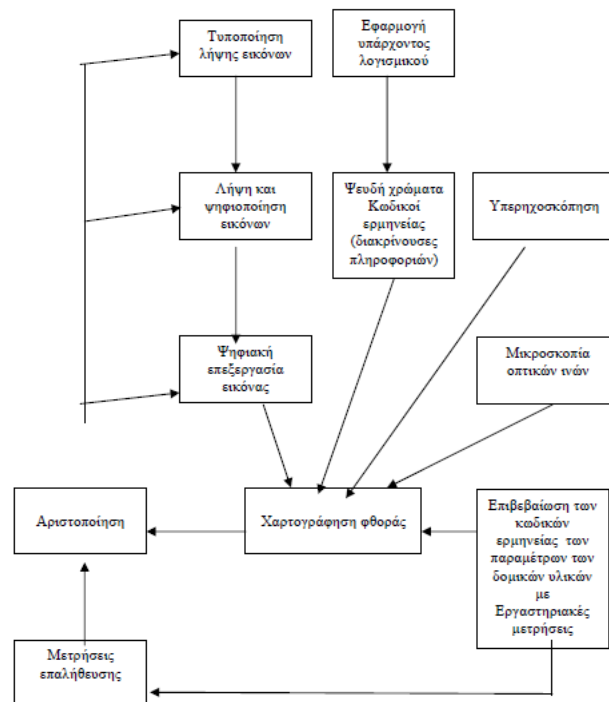
Συνεπώς λαμβάνονται οι πρώτες πληροφορίες για τον τύπο και την ένταση της φθοράς. Για παράδειγμα η σταδιακή μετακίνηση του ενεργειακού δυναμικού της φωτεινότητας προς τις σκούρες αποχρώσεις του γκριζου αντιστοιχεί σε εικόνες διαβρωμένου λίθου, ενώ η διασπορά του επιπέδου φωτεινότητας αντιστοιχεί στην παρουσία στοιχείων οργανικής ή ανόργανης προέλευσης.

Ωστόσο τα ιστογράμματα που περιγράφουν τις παραπάνω παραμέτρους είναι ένα μόνο από τα χαρακτηριστικά της εικόνας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτίμηση της φθοράς. Το ζητούμενο από τη ψηφιακή επεξεργασία εικόνας είναι η ταξινόμηση της φθοράς στα διάφορα σημεία της εικόνας που αντιστοιχούν σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του μνημείου και η ανάθεση χρωματικών κωδικών σε κάθε διαφορετικό είδος φθοράς και τύπο υλικού.

Ανεξάρτητα από τα παραπάνω, το αποτέλεσμα είναι ένας χρωματικός χάρτης φθοράς του μνημείου ή του ιστορικού συνόλου το οποίο σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των άλλων μη καταστρεπτικών τεχνικών, καθώς και με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις θερμικές αναλύσεις (DTA/TG), τις μετρήσεις υγρασίας, τις μετρήσεις διαλυτών αλάτων (συγκεντρώσεις ανιόντων με Ion Chromatography (IC)), την επεξεργασία των μετρήσεων ατμοσφαιρικών ρύπων, σχηματίζουν μια πλούσια τράπεζα δεδομένων η οποία, όταν εισαχθεί σε ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών GIS, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην οργάνωση των λαμβανόμενων

πληροφοριών για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την περιβαλλοντική διαχείριση και το στρατηγικό χεδιασμό των επεμβάσεων συντήρησης.

Μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία μη καταστρεπτικής αποτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ιστορικές τοιχοποιίες, δίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της μεθοδολογίας αποτίμησης περιβαλλοντικής φθοράς

Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS)

Το GIS (Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών-Geographic Information System) είναι μια τεχνολογία πληροφοριών η οποία αποθηκεύει, αναλύει και απεικονίζει, χωρικά και μη, δεδομένα.

Στη διατύπωση αυτή ο όρος «χωρικά» είναι ταυτόσημος του «γεωγραφικά». Τα γεωγραφικά δεδομένα αποτελούν και το σύστημα αναφοράς για τα μη-χωρικά δεδομένα. Αντίθετα τα «μη-χωρικά» δεδομένα ταυτίζονται με τον όρο "attributes" - ιδιότητες που χαρακτηρίζουν κάθε στοιχείο στο χώρο.

Ιδιαίτερα χρήσιμο γίνεται το GIS, όταν η ποσότητα της υπάρχουσας πληροφορίας καθιστά την διαχείριση της δύσκολη. Συνδυάζει δε κάθε τύπου πληροφορία σε μια δυναμική βάση δεδομένων, επιτρέποντας στον χρήστη να συνδυάζει φαινόμενα και καταστάσεις, για να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Τα GIS καλύπτουν ταυτόχρονα τις ανάγκες της χαρτογράφησης, της πρόσβασης σε βάσεις δεδομένων και της χωρικής ανάλυσης απαντώντας σε ποικίλα ερωτήματα ενός ευρέως πεδίου έρευνας:

Τοποθέτηση	Που βρίσκεται
Συνθήκες	Τι βρίσκεται
Τάση	Τι έχει αλλάξει
Διαδρομή	Ποιος ο καλύτερος δρόμος
Τύπος	Ποιος ο τύπος (χαρακτήρας)
Προτυποποίηση	Τι θα γινόταν αν

Οι εφαρμογές του συστήματος είναι διάφορες:

- Συσχετισμός παραμέτρων, διαφορετικού τύπου.
- Δυναμική ανανέωση στοιχείων, για να αντικατοπτρίζονται πρόσφατες αλλαγές και να γίνονται συγκρίσεις με παλαιότερα δεδομένα.
- Διαχείριση Δημοτικών Υπηρεσιών, όπως προγραμματισμός συντήρησης, ενημέρωση πολιτών για περιβαλλοντικές αλλαγές, έως και διευθέτηση αστυνόμευσης.

Ο αριθμός των εφαρμογών αυξάνει κατ' αναλογία με την αύξηση της βάσης δεδομένων. Καθιστά, έτσι, εφικτή την απεικόνιση των χωρικών δεδομένων, την κατανόηση της φύσης τους και τη μετέπειτα λήψη αποφάσεων.

Κρίνεται αναγκαίος ο καθορισμός των κριτηρίων βάσει των οποίων θα συγκροτηθεί μια πρόταση για τη διατήρηση και επανένταξη του μνημείου στη ζωή της πόλης με την ανανέωση της υποδομής και την εκπόνηση σχεδίων τόσο για τους ελεύθερους χώρους όσο και για συγκεκριμένες θέσεις-κλειδιά. Το GIS αποτελεί το εργαλείο υποστήριξης των αποφάσεων και διασαφηνίζει τις εναλλακτικές τακτικές προκειμένου να αναβιώσει το μνημείο περιλαμβάνοντας τις απαραίτητες λειτουργίες μίας σύγχρονης πόλης διατηρώντας παράλληλα τον ιστορικό του χαρακτήρα.

5.1. Εργαστηριακές Τεχνικές

- Όσον αφορά τις θερμικές αναλύσεις, λαμβάνονται κονιόματα από τις εξεταζόμενες περιοχές και εξετάζονται χρησιμοποιώντας Διαφορική θερμική Ανάλυση (DTA), καθώς και Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (TG).

- Για τις μετρήσεις υγρασίας, λαμβάνονται δείγματα σε διαφορετικό ύψος, καθώς και σε διαφορετικό βάθος: 0-3cm, 3-6cm και 6-9cm. Τα δείγματα ζυγίζονται επί τόπου, ξηραίνονται και συντηρούνται στο εργαστήριο στους 100 - 105OC. Έπειτα ζυγίζονται ξανά και από την επί της εκατό διαφορά βάρους προσδιορίζεται η περιεκτικότητα σε υγρασία.
- Για τις μετρήσεις των διαλυτών αλάτων, λαμβάνονται δείγματα σε διαφορετικό ύψος: 0.5m, 1m, 1.5m και 2m, όπου είναι δυνατό. Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ιόντων, τα δείγματα συνθλίβονται σε ιγδίο αχάτη και 100 mg της προκύπτουσας σκόνης διαλύεται σε 100ml απιονισμένου νερού. Στο προκύπτον διάλυμα, από φιλτράρισμα μέσω ειδικού φίλτρου 0.2μm, εφαρμόζεται ιονική χρωματογραφία με το όργανο Dionex 4000I και προσδιορίζονται οι περιεκτικότητες των χλωριόντων, των νιτρικών ιόντων και των θεικών ιόντων.
- Τέλος είναι απαραίτητη η επεξεργασία μετρήσεων ατμοσφαιρικών ρύπων.

5.1.1. Μη Καταστρεπτικές Τεχνικές

5.1.2. Μικροσκοπία Οπτικών Ινών

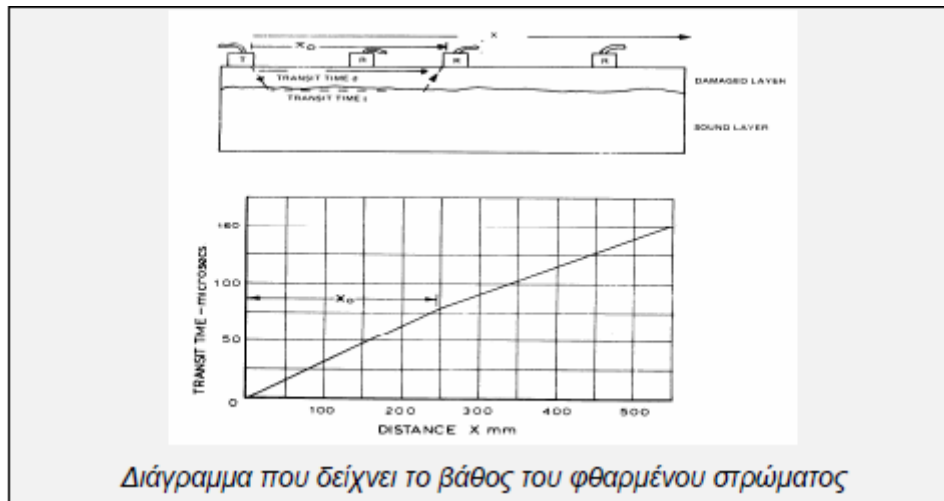
Χρησιμοποιώντας την Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (FOM, Pico Scopeman Moritex), και με την βοήθεια ενός τηλεοπτικού καταγραφέα (Sony video recorder), εικόνες μπορούν να ληφθούν σε διάφορες μεγεθύνσεις, εξετάζοντας επί τόπου τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιφανειών, όπως την ύψη, τους διάφορους τύπους φθοράς (εξανθήσεις, κρούστες κλπ), ακόμη και την μικροδομή.

5.1.3. Υπέρηχοι

Η ταχύτητα των υπερήχων αποτελεί μία πολύ καλή ένδειξη για την ποιοτική ταξινόμηση των λίθων και τον προσδιορισμό του πάχους της διαβρωμένης ζώνης τους.

Το βάθος της αποσάθρωσης στην επιφάνεια ενός υλικού, μπορεί να αποτιμηθεί χρησιμοποιώντας την έμμεση μέθοδο υπερηχοσκόπησης. Στην περίπτωση αυτή, ο πομπός τοποθετείται σε ένα κατάλληλο σημείο της επιφάνειας και ο δέκτης τοποθετείται στην ίδια επιφάνεια σε κατάλληλες θέσεις κατά μήκος μίας συγκεκριμένης γραμμής. Ο χρόνος διέλευσης

σήματος καταγράφεται σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των κεντρικών σημείων του πομπού και του δέκτη (transducers). Μία αλλαγή στην κλίση του διαγράμματος μπορεί να υποδηλώσει ότι η ταχύτητα κοντά στην επιφάνεια είναι πολύ μικρότερη από ότι είναι στο βάθος του εξεταζόμενου υλικού. Συνεπώς καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός του πάχους της διαβρωμένης ζώνης του εξεταζόμενου υλικού.



Εικόνα 5.2

Το πάχος του αποσαθρωμένου επιφανειακού στρώματος υπολογίζεται από

$$D = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}}$$

Όπου, V_s : Η ταχύτητα στον υγιή λίθο (Km/s)

V_d : Η ταχύτητα στον φθαρμένο λίθο (Km/s)

X_0 : Η απόσταση όπου υπάρχει αλλαγή της κλίσης (mm)

D : Το βάθος της αποσάθρωσης (mm)

5.1.4. Υπέρυθρη Θερμογραφία

Η υπέρυθρη θερμογραφία (IR Thermo), καταγράφει την υπέρυθρη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπουν τα δομικά υλικά μίας τοιχοποιίας και αποδίδει με ψευδοχρώματα τις θερμοκρασιακές της διαφορές, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα υγρασίας και φθοράς. Το σύστημα της υπέρυθρης θερμογραφίας αποτελείται από έναν ανιχνευτή υπέρυθρης

ακτινοβολίας (TVS - 2000 MK II LW) και το σύστημα επεξεργασίας (AVIO Thermal Video System). Ο ανιχνευτής υπέρυθρης ακτινοβολίας, χρησιμοποιεί οπτικές ίνες από Γερμάνιο με επίστρωση 10 μ m, κατασκευασμένες από υδράργυρο, κάδμιο και τελλούριο (Hg Cd Te), που επιτρέπει μια φασματική απόκριση μεταξύ των 8 και 12 μm, και απαιτεί ένα σύστημα ψύξης (αέριο He 99,99%). Ο ανιχνευτής υπέρυθρης ακτινοβολίας, συνδέεται με το σύστημα επεξεργασίας που αναγνωρίζει το ηλεκτρονικό σήμα, το αποθηκεύει στη μνήμη του, και το επεξεργάζεται σύμφωνα με κάποιο λογισμικό. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται σε μια οθόνη υγρών κρυστάλλων, με τη μορφή του θερμογραφήματος. Το εύρος θερμοκρασιών του ανιχνευτή βρίσκεται μεταξύ -40°C και 300°C.

Μεγάλη σημασία για την αξιόπιστη ερμηνεία των εξαγόμενων θερμογραφημάτων παίζει ο προσδιορισμός του συντελεστή εκπομπής του εξεταζόμενου υλικού. Ο συντελεστής εκπομπής περιγράφει τις οπτικές ιδιότητες ενός υλικού, καθώς χαρακτηρίζει την εκπεμπόμενη ενέργεια της εξεταζόμενης επιφάνειας σε σχέση με εκείνη του μέλαν σώματος. Εξαρτάται δε από παράγοντες όπως η σύσταση και η μικροδομή του υλικού, η θερμοκρασία, καθώς και το μήκος κύματος.

Επειδή ο προσδιορισμός του συντελεστή εκπομπής κατά την διάρκεια επί τόπου πιλοτικών εφαρμογών δεν είναι εφικτός, δείγματα από το κάθε δομικό υλικό μπορούν να συλλεχθούν και έτσι να προσδιοριστούν οι συντελεστές εκπομπής τους στο εργαστήριο σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E1933-37. Πιο συγκεκριμένα, τουλάχιστον τρία δείγματα τοποθετούνται σε ένα θάλαμο ελεγχόμενων κλιματικών συνθηκών για 24 ώρες, σε θερμοκρασία τουλάχιστον 10°C μεγαλύτερη ή μικρότερη της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Παράλληλα, χρησιμοποιώντας ένα θερμόμετρο, μετριοούνται οι θερμοκρασίες των επιφανειών των εν λόγω δειγμάτων. Τέλος, ρυθμίζεται η κάμερα της υπέρυθρης θερμογραφίας, έτσι ώστε να καταγράψει τις αντίστοιχες θερμοκρασίες και να προσδιοριστούν οι συντελεστές εκπομπής.

5.1.5. Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας

Η συντήρηση των αρχιτεκτονικών επιφανειών των μνημείων και των ιστορικών συνόλων χρήζει τεχνικών ακριβείας, κατάλληλων για την αξιολόγηση της κατάστασης των υλικών τους, προκειμένου να διασφαλισθεί μια ορθή διάγνωση, την οποία θα επακολουθήσει μία αποτελεσματική επέμβαση συντήρησης. Η μηχανική όραση, χρήζει ήδη εκτεταμένης χρήσης στην κατασκευαστική βιομηχανία, εισάγεται ως μια τεχνολογία συντήρησης προκειμένου να καλύψει την ανάγκη αυτή. Ο εκφυλισμός των υλικών αυτοδηλώνεται μέσω των εντοπισμένων διαφοροποιήσεων στην οπτική ανταπόκριση (π.χ χρώμα και ένταση) της προσβεβλημένης επιφάνειας. Μόλις συλληφθεί, μέσω μιας κατάλληλης συσκευής εγγραφής, η εικόνα της επιφάνειας τεκμηριώνεται, τονίζεται, αναλύεται και παρουσιάζεται με τη χρήση τεχνικών

επεξεργασίας της ψηφιακής εικόνας (DIP) .Ο πίνακας της κατάστασης των υλικών της επιφάνειας που προκύπτει είναι ενδεικτικά περιεκτικός, ποσοτικός και ακριβής και η διαδικασία είναι γρήγορη και οικονομική.

Η εργασία αυτή έγινε σε τοιχοποιίες των ιστορικών οχυρώσεων του Ηρακλείου Κρήτης. Η εν λόγω εργασία εστιάζει σε τμήματα των τοιχοποιιών που παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό σπένδ και σπηλαιώσεις, σκληρή επιφανειακή κρούστα ως αποτέλεσμα επικαθήσεων και χημικών διεργασιών στην επιφάνεια του δομικού λίθου και συνύπαρξη παλαιών και νέων κονιαμάτων .

Με τη χρήση της ψηφιακής επεξεργασίας της εικόνας, η κατάσταση των υλικών της επιφάνειας αναπαρίσταται ποιοτικά και ποσοτικά και χαρακτηρίζεται ως προς το μέγεθος και τη χωροταξική κατανομή των φθαρμένων σημείων .

Η συντήρηση μπορεί να θεωρηθεί ως η επιστημονική μέθοδος της παρατήρησης και ανάλυσης της εξέλιξης, της επιδείνωσης και της φροντίδας των κτιρίων και των μνημείων, η διεξαγωγή μη καταστρεπτικών ερευνών για να καθορισθούν τα αίτια, τα αποτελέσματα και η λύση των προβλημάτων και κατ' επέκταση η καθοδήγηση των επεμβάσεων αποκατάστασης που εστιάζουν στη διατήρηση της ποιότητας και της ακεραιότητας των ιστορικών μνημείων .

Είναι αποδεδειγμένο πως η παρατήρηση και η αξιολόγηση αποτελούν την πρωταρχική διαδικαστική μονάδα για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης των υλικών και την έκταση της φθοράς μιας κατασκευής. Το μέγεθος της αποσάθρωσης που εμφανίζεται σε μνημεία από φυσική πέτρα πρέπει να τεκμηριώνεται και να αξιολογείται προκειμένου να καθορισθούν τα αίτια της φθοράς και να εφαρμοσθούν επιτυχή μέτρα συντήρησης.

Οι μέθοδοι παρατήρησης, διερεύνησης και αξιολόγησης, κυρίως αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ελλάδα, έχουν μία σοβαρή έλλειψη, δηλαδή την ποιοτική και υποκειμενική φύση τους .Θα πρέπει να γίνει εφικτή η εκμετάλλευση της σημαντικότητας, της επιτευξιμότητας και των πλεονεκτημάτων της εισαγωγής της "Μηχανικής Οπτικής" στο πρωτόκολλο επιθεώρησης και αξιολόγησης και κατ' αυτό τον τρόπο να αναβαθμιστεί σε μια τυποποιημένη, αντικειμενική, ικανή και επιστημονική μέθοδο.

Παρόλο που η "Μηχανική Οπτική" συχνά συναντάται μόνο σε βιομηχανικό περιβάλλον μπορεί να υιοθετηθεί και σε αρχαιολογικό και σε αρχιτεκτονικό περιβάλλον ως ισάξια της ψηφιακής φωτογραμμετρίας . Στην πράξη κάθε σύστημα μηχανικής οπτικής οικοδομείται γύρω από τις αρχές της επεξεργασίας της ψηφιακής εικόνας .

Η εφαρμογή της ψηφιακής επεξεργασίας της εικόνας απαιτεί τη χρήση ενός κατάλληλου συστήματος λήψεως (φωτογραφική μηχανή), ψηφιοποιητή, ηλεκτρονικό υπολογιστή εφοδιασμένο με το κατάλληλο λογισμικό υλικό (hardware and software) . Το μέσο πληροφόρησης είναι μια ψηφιακή εικόνα του αντικειμένου προς αξιολόγηση π.χ μιας ιστορικής τοιχοποιίας . Στο παράδειγμα της οπτικής του υπολογιστή η εικόνα του προς μελέτη υποκειμένου φαίνεται ως μια συλλογή "αντικειμένων" όπου "αντικείμενο" είναι μια περιοχή

στην εικόνα που διαφέρει από τις υπόλοιπες εξαιτίας της "γκρι κλίμακας" του (διαβάθμιση μεταξύ άσπρου και μαύρου) . Στην ψηφιακή μορφή η εικόνα διασπάται σε ένα μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών κελιών (pixels), καθ' ένα από τα οποία προσδιορίζεται από την κατάλληλη τιμή της γκρι κλίμακας που επιλέγεται από ένα εύρος διακυμάνσεων (τυπικά 256) . Εν συνεχεία, η εικόνα αυτή αποθηκεύεται και διαχειρίζεται, όπως αυτό είναι επιθυμητό, στον ηλεκτρονικό υπολογιστή . Στην πραγματικότητα αυτή είναι η κυρίαρχη αρχή μέσω της οποίας η μέτρηση του αντικειμένου καθίσταται δυνατή . Το μέσο μπορεί επίσης να είναι μια πολύχρωμη εικόνα, αντί της ασπρόμαυρης, ωστόσο δεν έχουν όλα τα συστήματα πολυχρωματικές ικανότητες .

Η επεξεργασία της εικόνας γίνεται σε 5 διαδοχικά στάδια, δηλαδή, λήψη της εικόνας, διόρθωση της εικόνας, απόδοση της εικόνας με ψευδή χρώματα, μέτρηση και ανάλυση της εικόνας . Η απόκτηση της εικόνας περιλαμβάνει λήψη του υποκειμένου σε ψηφιακή εικόνα. Η λήψη της εικόνας μπορεί να γίνει είτε με μια συμβατική φωτογραφία φωτός και μετά να περαστεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μ' ένα ψηφιακό σαρωτή εικόνας, scanner, είτε με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, οπότε μπορεί να εισαχθεί απ' ευθείας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή χωρίς την χρήση scanner κάτι το οποίο έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την χρήση μιας κοινής φωτογραφικής μηχανής ως προς την ποιότητα των πληροφοριών που μια εικόνα προς επεξεργασία μπορεί να δώσει . Οι φωτογραφίες επιλέγονται με κριτήριο την ευκρινή απεικόνιση της φθοράς και των διαφόρων επεμβάσεων, καθώς και την έλλειψη φωτοσκιάσεων που θα οδηγούσαν σε εσφαλμένα συμπεράσματα . Μετά την ψηφιοποίηση κάθε φωτογραφίας ελέγχουμε το ιστογράμμα κάθε εικόνας . Τα ιστογράμματα μετρούν και απεικονίζουν γραφικά τη φωτεινότητα και το κοντράστ μιας εικόνας . Ο οριζόντιος άξονας στα ιστογράμματα παριστάνει τη φωτεινότητα σε κλίμακα από 0 μέχρι 255 και ο κατακόρυφος άξονας τον αριθμό των pixels της εικόνας που έχουν την αντίστοιχη τιμή φωτεινότητας .

Η διόρθωση μιας εικόνας μειώνει τον θόρυβο και τονίζει τις οπτικές διαφορές μεταξύ των αντικειμένων στην εικόνα, διευκολύνοντας κατ' αυτό τον τρόπο την οποιαδήποτε μέτρηση. Αυτό επιτυγχάνεται με το πέρασμα των ψηφιοποιημένων πληροφοριών της φωτογραφίας από ένα σύνολο κατάλληλων ψηφιακών φίλτρων . Τα φίλτρα αυτά μπορούν να μεταβάλλουν την φωτεινότητα και το κοντράστ της εικόνας δίνοντας στον ερευνητή τη δυνατότητα να προβάλλει τα τμήματα της εικόνας που τον ενδιαφέρουν . Η επιλογή του συνόλου και της διαδοχής των φίλτρων γίνεται με βάση την κρίση και την εμπειρία του εκάστοτε ερευνητή βασιζόμενη στο είδος της παρατήρησης που κάθε φορά επιθυμείται .

Στη συνέχεια αποδίδονται στην εικόνα ψευδή χρώματα τα οποία ανταποκρίνονται στις μεταβολές των χαρακτηριστικών της επιφάνειας μιας τοιχοποιίας . Σε κάθε μια προεπιλεγμένη και χαρακτηριστική περιοχή της εικόνας, δεδομένου εύρους αποχρώσεων του γκριζου, αποδίδεται και ένα διαφορετικό ψευδές χρώμα εκμεταλλευόμενοι το γεγονός της αντιστοίχησης διαφορετικών μορφών φθοράς με διαφορετικά εύρη αποχρώσεων του γκριζου. Για τον λόγο

αυτό δίδεται ιδιαίτερη σημασία και επιδιώκεται ο όσο το δυνατόν καλύτερος διαχωρισμός των αποχρώσεων του γκριζου, έτσι ώστε η αντιστοιχία ενός ψευδούς χρώματος με δεδομένο εύρος αποχρώσεων του γκριζου να απεικονίζει με αξιοπιστία τη συγκεκριμένη μορφή φθοράς ή επίπτωσης στην επιφάνεια..

Η μέτρηση της εικόνας περιλαμβάνει τη βαθμονόμηση της χωροταξικής κλίμακας και τη διεξαγωγή μετρητικών εργασιών, όπως η μέτρηση της απόστασης, η μέτρηση της επιφάνειας μιας περιοχής, η μέτρηση της γωνίας κ. τ. λ .

Τέλος η ανάλυση μιας εικόνας χρησιμοποιεί τα στοιχεία των μετρήσεων ως εισαγόμενα δεδομένα και παράγει στατιστικά αποτελέσματα, όπως πυκνότητα και κατανομή της διασποράς των προς εξέταση αντικειμένων .

Η φθορά (εκφυλισμός) των υλικών αυτοαποκαλύπτεται κατά την οπτική καταγραφή εξαιτίας των εντοπισμένων αλλαγών στο χρώμα και τις αντιθέσεις (contrast) στην επιφάνεια μιας τοιχοποιίας. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό ποσοστό ανάκλασης και απορρόφησης του ορατού φάσματος (φωτός) από την εξεταζόμενη επιφάνεια, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία αυτή ευρίσκεται . Μόλις καταγραφεί μια τέτοια εικόνα μπορεί να επεξεργασθεί αποτελεσματικά και να αναλυθεί ψηφιακά χρησιμοποιώντας το λογισμικό (software) ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή όπου η παραγωγή των αποτελεσμάτων είναι γρηγορότερη, πιο πληροφοριακή και πιο αξιόπιστη από τη συμβατική οπτική εκτίμηση (με το μάτι) . Η εργασία αυτή θα εκθέσει τα αποτελέσματα μιας έρευνας όπου χρησιμοποιείται η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας ως τεχνολογία χαρτογράφησης της φθοράς και αποκατάστασης .

6. Εισαγωγικές έννοιες στην επεξεργασία της ψηφιακής εικόνας

6.1. Το φως και το χρώμα

Γνωρίζουμε ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Από όλο το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που υπάρχουν στη φύση, μόνο ένα μικρό τμήμα ανήκει στην ορατή περιοχή. Οι ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις με μήκος κύματος από 380 ως 780 nm (nm = νανόμετρο, 1 nm=10⁻⁹ m), όταν πέφτουν στο μάτι, δημιουργούν την αίσθηση του φωτός.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση των φωτεινών ακτινών που προσβάλλουν το μάτι, τόσο λαμπρότερη μας φαίνεται η πηγή του φωτός. Εκτός όμως από τη διαφορά στη λαμπρότητα, τα κύματα του ορατού φάσματος με διαφορετικό μήκος προκαλούν αίσθηση φωτός με διαφορετικό χρωματισμό. Επομένως, το χρώμα είναι χαρακτηριστικό της οπτικής αντιλήψεως των φωτεινών ακτινών που μας επιτρέπει να τις ξεχωρίζουμε όχι μόνο κατά ένταση, αλλά και κατά φασματική σύνθεση.

Το λευκό φως είναι καθορισμένο μίγμα πολλών διαφορετικών χρωμάτων. Αν εξετάσουμε λεπτομερέστερα το φάσμα των χρωμάτων παρατηρούμε ότι το φάσμα μπορεί να διαιρεθεί σε επτά περιοχές: ιώδη, βαθυγάλανη (μπλε), γαλανή, πράσινη, κίτρινη, πορτοκαλί, κόκκινη. Καθεμιά από τις περιοχές αυτές απασχολεί ορισμένη ζώνη κυμάτων. Με τη συσχέτιση των σχημάτων μπορούμε να δούμε την ανισομερή μεταβολή του χρώματος με το μήκος κύματος.

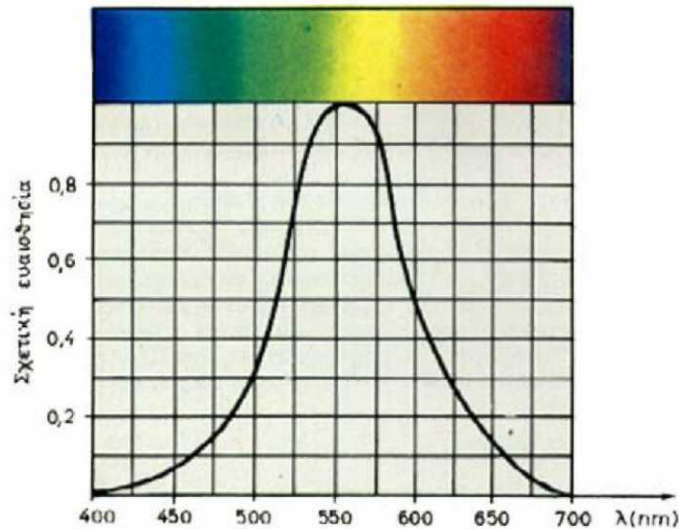
Πρέπει να σημειώσουμε ότι η διαίρεση του ορατού φάσματος σε επτά χρωματικές περιοχές είναι καθαρά συμβατική. Στην πραγματικότητα, η διαδοχή των χρωμάτων του φάσματος είναι συνεχής και κάθε χρώμα περνά στο γειτονικό του ομαλά και βαθμιαία. Πραγματικά, το ανθρώπινο μάτι μπορεί να ξεχωρίσει στο φάσμα 150-200 ενδιάμεσες αποχρώσεις ή, όπως λέμε, χρωματικούς τόνους. Γι' αυτό, όταν παρουσιάζεται η ανάγκη ενός λεπτότερου χαρακτηρισμού κάποιου φασματικού χρώματος, καταφεύγουμε σε διπλή ονομασία, όπως πρασινοκίτρινο ή κιτρινοπράσινο, πρασινογάλανο κλπ. Η αναλυτικότερη διάκριση και διαβάθμιση των χρωμάτων, σε σημαντικό βαθμό, είναι υποκειμενική.

6.2. Το μάτι και τα χρώματα

Το ανθρώπινο μάτι, στη συγκρότησή του, θυμίζει φωτογραφική μηχανή, με μια κάμερα που δεν έχει ορθογώνια μορφή αλλά περίπου σφαιρική. Στο εμπρόσθιο μέρος της βρίσκεται ο κρυσταλλοειδής φακός που παίζει το ρόλο του οπτικού φακού. Ο κρυσταλλοειδής φακός είναι ένα από τα βασικότερα τμήματα του οπτικού συστήματος του ματιού. Με τη βοήθειά του προβάλλονται στο απέναντι «τοίχωμα» της κάμερας οι εικόνες των αντικειμένων. Το τοίχωμα αυτό καλύπτεται εσωτερικά από τον αμφιβληστροειδή χιτώνα που παίζει το ρόλο της φωτοευαίσθητης φωτογραφικής πλάκας. Ο χιτώνας έχει επάνω του πλήθος φωτοευαίσθητων κυττάρων που συνδέονται με τις ίνες του οπτικού νεύρου, μέσα από το οποίο μεταφέρεται ο ερεθισμός στον εγκέφαλο.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι η ευαισθησία του ματιού στις διάφορες ακτινοβολίες του ορατού φάσματος δεν είναι η ίδια. Με πολυάριθμα πειράματα κατορθώθηκε να χαραχθεί η καμπύλη της σχετικής φασματικής ευαισθησίας του ματιού που δείχνει την εξάρτηση της φωτεινής αίσθησης από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (εικ. 6.1). Όταν η ένταση της ακτινοβολίας είναι η ίδια σε όλα τα μήκη κύματος, το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαί-

σθητο γύρω στο πράσινο χρώμα ($\lambda = 550 \text{ nm}$). Για μήκη κύματος μικρότερα ή μεγαλύτερα από το πιο πάνω, η ευαισθησία ελαττώνεται. Π.χ., στα 510 και στα 610 nm είναι κατά 50% περίπου λιγότερη και πέφτει στο μηδέν στις περιοχές των υπέρυθρων και υπεριωδών ακτινών. Η καμπύλη της χρωματικής ευαισθησίας του ματιού παίζει σημαντικό ρόλο στην τεχνική της έγχρωμης αναπαραγωγής εικόνων.



Εικόνα 6.1: Η ευαισθησία του ματιού στις διάφορες ακτινοβολίες.

6.3. Χαρακτηριστικά του φωτός

Για το χαρακτηρισμό των φωτεινών φαινομένων χρησιμοποιούνται ειδικά φωτεινά μεγέθη όπως η φωτεινή ροή, η ένταση του φωτός, η φωτεινότητα κ.ά.

Φωτεινή ροή. Ονομάζεται *φωτεινή ροή* Φ η ενέργεια που μεταφέρεται από ένα φωτεινό κύμα στη μονάδα του χρόνου και που γίνεται αντιληπτή από το μάτι. Δηλαδή η ισχύς της ορατής ακτινοβολίας. Η φωτεινή ροή μετρείται σε lumen (λούμεν, σύμβολο Lm).

$$\Phi = dQ/dt$$

Ένταση φωτός. Ένταση φωτός I μιας πηγής είναι η φωτεινή ροή που ακτινοβολείται προς ορισμένη κατεύθυνση ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Αν στα όρια στερεάς γωνίας $\Delta\Omega$ ακτινοβολείται φωτεινή ροή $\Delta\phi$, η ένταση του φωτός θα είναι:

$$I = \Delta\Phi / \Delta\Omega$$

Μονάδα μετρήσεως της εντάσεως του φωτός, είναι η candela (κηρίο - σύμβολο Cd).

Λαμπρότητα. Ονομάζεται λαμπρότητα B φωτεινής πηγής η ένταση του φωτός που ακτινοβολείται από ένα τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειάς της. Δηλαδή:

$$B = I / S$$

Η λαμπρότητα μετρείται σε nit (νίτ σύμβολο Nt). Η λαμπρότητα φωτεινής πηγής ισούται με 1 Nt, αν κάθε m^2 από την επιφάνειά της δίνει ένταση φωτός 1 Cd (1 Nt = 1 Cd/1 m^2).

Η φωτεινή ροή, η ένταση του φωτός και η λαμπρότητα χαρακτηρίζουν τις φωτεινές πηγές (πρωτογενείς πηγές). Τα περισσότερα όμως από τα αντικείμενα που μας περιβάλλουν δεν είναι πηγές φωτός. Τα αντικείμενα αυτά εκπέμπουν φως και γίνονται ορατά μόνο όταν φωτίζονται από πρωτογενείς πηγές φωτός. Γι' αυτό και ονομάζονται δευτερογενείς πηγές (ετερόφωτα σώματα).

Για το χαρακτηρισμό των τελευταίων αυτών πηγών φωτός χρησιμοποιείται η φωτεινότητα.

Φωτεινότητα. Φωτεινότητα E είναι η φωτεινή ροή που πέφτει κάθετα στη μονάδα φωτιζόμενης επιφάνειας S. Δηλαδή:

$$E = \Phi / S$$

Μονάδα της φωτεινότητας είναι το lux (σύμβολο Lx, 1 Lx = 1 Lm/1 m^2).

Αρκετά όμως ουσιώδες φωτεινό χαρακτηριστικό κάθε αντικειμένου, το οποίο πρέπει κατά το δυνατόν με ακρίβεια να εμφανίζεται στην εικόνα του αντικειμένου, είναι η αντίθεση ή αλλιώς "κοντράστ".

Αντίθεση / Κοντράστ. Αντίθεση K είναι ο λόγος της λαμπρότητας του πιο λευκού στοιχείου ενός αντικειμένου προς τη λαμπρότητα του πιο μαύρου στοιχείου του. Δηλαδή:

$$K = B_{\max} / B_{\min}$$

(Ο αριθμός που εκφράζει το κοντράστ των πιο συνηθισμένων αντικειμένων δεν υπερβαίνει συνήθως το 100)

6.4. Τριχρωμική δράση, απόχρωση, κορεσμός

Η σύνθεση των συγχρόνων συστημάτων επεξεργασίας εικόνας βασίζεται στη θεωρία της τριχρωμικής οράσεως, η οποία εξηγεί από ψυχοφυσιολογική άποψη την ικανότητα του ανθρώπου να διακρίνει τα χρώματα. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού μας υπάρχουν κώνοι τριών τύπων που έχουν διαφορετική φασματική ευαισθησία. Η διέγερση των κώνων του ενός τύπου δίνει την αίσθηση του κόκκινου χρώματος, η διέγερση των κώνων του δεύτερου τύπου την αίσθηση του πράσινου, και η διέγερση των

κώνων του τρίτου τύπου, την αίσθηση του γαλανού χρώματος. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι το πρώτο είδος των κώνων είναι πιο ευαίσθητο στο μακροκυματικά τμήμα του ορατού φάσματος (κόκκινο πορτοκαλί), το δεύτερο στο μεσοκυματικά τμήμα του φάσματος (κιτρινοπράσινο) και το τρίτο στα βρα-χυκυματικά (γαλανά-ιώδες).

Συνήθως η φωτεινή ακτινοβολία διεγείρει ταυτόχρονα και τα τρία είδη των κώνων και το σύνολο των τριών διαφορετικών διεγέρσεων γίνεται αντιληπτό από το μάτι σαν ένα οποιοδήποτε χρώμα. Το όργανο της όρασης αναλύει το φως που το διεγείρει, προσδιορίζοντας συνάμα τη σχετική περιεκτικότητα των διαφόρων ακτινοβολιών, και ύστερα γίνεται στον εγκέφαλο η σύνθεση των τριών διεγέρσεων σε ενιαίο χρώμα. Υπενθυμίζουμε ότι το μάτι ξεχωρίζει τα χρώματα μόνο όταν λειτουργούν οι κώνοι, δηλαδή, όταν η ένταση της ακτινοβολίας ξεπερνά το κατώφλι διεγέρσεως των κώνων. Σε χαμηλές εντάσεις ακτινοβολίας, όταν λειτουργούν μόνο τα ραβδία¹ το ορατό φάσμα γίνεται αντιληπτό από το μάτι ως διαβαθμίσεις του γκριζου.

Τα αντικείμενα που μας περιβάλλουν έχουν διαφορετικές οπτικές ιδιότητες, ως προς το αίσθημα που προκαλούν, και γι' αυτό οι ακτίνες που φθάνουν στο μάτι μας από αυτά, διαφέρουν τόσο στην ισχύ όσο και στη φασματική σύνθεση. Αν οι ακτινοβολίες που δημιουργούν το οπτικό ερέθισμα έχουν την ίδια ισχύ και την ίδια σύνθεση, το μάτι δε βρίσκει καμιά διαφορά μεταξύ τους. Αν, όμως, οι ακτινοβολίες που φθάνουν από δύο αντικείμενα, είναι ίδιες στη σύνθεση αλλά διαφορετικές στην ισχύ, το ένα από τα αντικείμενα θα φαίνεται φωτεινό και το άλλο σκοτεινό. Στην περίπτωση αυτή το μάτι αποκαλύπτει την ποσοτική διαφορά μεταξύ των ακτινοβολιών, η οποία συνήθως ονομάζεται φωτεινή αντίθεση.

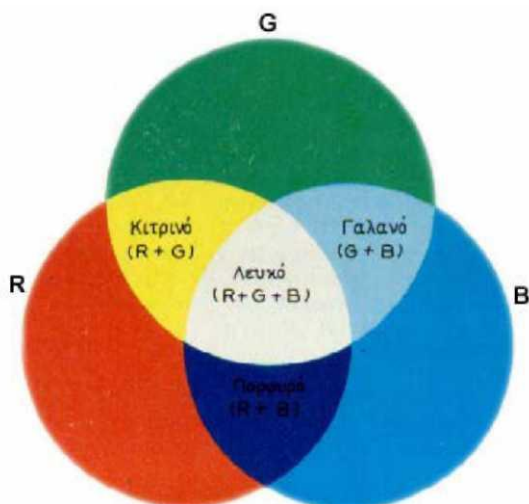
Τέλος, αν οι ακτινοβολίες διαφέρουν τόσο στην ισχύ όσο και στη φασματική σύνθεση, το μάτι θα φανερώσει όχι μόνο την ποσοτική, αλλά και την ποιοτική διαφορά μεταξύ των ακτινών. Η τελευταία αυτή διαφορά ονομάζεται χρωματική αντίθεση. Έτσι, η φωτεινή ακτινοβολία που φθάνει στο μάτι δεν προκαλεί μόνο την αίσθηση της φωτεινότητας (λαμπρότητας) που είναι ανάλογη προς την ισχύ της ακτινοβολίας, αλλά και την αίσθηση του χρώματος ή, όπως λέμε, της αποχρώσεως και του κορεσμού του.

Κάθε χρώμα, λοιπόν, χαρακτηρίζεται από τη φωτεινότητα (ή λαμπρότητα), που εξαρτάται από την ισχύ των φωτεινών ακτινών που φθάνουν στο μάτι μας, από την απόχρωση (ή χροιά, ή τόνο) που καθορίζεται από το μήκος κύματος των ακτινών, και από τον κορεσμό (ή κόρο) που καθορίζεται από το βαθμό αναμίξεως του φασματικού χρώματος με λευκό φως. Δηλαδή, όταν λέμε κόρο, εννοούμε τη διαβάθμιση του τόνου στην έντασή του. Ο κόρος μας δίνει το βαθμό καθαρότητας ενός χρώματος.

Η χρωμοδιαχωριστική ικανότητα του ματιού χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη γωνία οράσεως, με την οποία το μάτι μπορεί ακόμη να ξεχωρίσει χρωματικά δύο στοιχεία που βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο. Πειραματικά βρέθηκε ότι η ελάχιστη χρωμοδιαχωριστική γωνία της οράσεως κυμαίνεται μεταξύ των 610 γωνιακών λεπτών. Κατά την παρατήρηση λεπτών στοιχείων μιας έγχρωμης εικόνας με γωνία μικρότερη από 6', όλα τα χρώματα πρακτικά δε διαφέρουν από το γκριζο. Η ιδιότητα αυτή της χρωμικής οράσεως χρησιμοποιείται πλατιά στη διαχείριση εικόνων στους υπολογιστές. Τέλος, η γωνία με την οποία το μάτι μπορεί ακόμη να ξεχωρίσει δύο γειτονικά στοιχεία ασπρόμαυρης εικόνας είναι 1 γωνιακό λεπτό ή 0,0166°.

6.5. Η μίξη των χρωμάτων και οι νόμοι της

Η δημιουργία των εγχρώμων εικόνων στους υπολογιστές βασίζεται στη μίξη των χρωμάτων. Με τα προβλήματα της μίξεως και της ποσοστιαίας συνθέσεως των διαφόρων χρωμάτων ασχολείται η χρωματομετρία. Η παραγωγή σύνθετου χρώματος στηρίζεται στη θεωρία της τρίχρωμης χρωματομετρίας. Βασική ιδιότητα της τρίχρωμης χρωματομετρίας είναι η δυνατότητα παραγωγής οποιουδήποτε χρώματος με ορισμένη μίξη μόνο τριών φασματικών χρωμάτων. Γι' αυτό το σκοπό, πρέπει να διαλέξουμε τρία χρώματα τέτοια, ώστε με τη μίξη δύο οποιωνδήποτε από αυτά να μην παράγεται το τρίτο. Τον καταλληλότερο συνδυασμό σχηματίζουν το κόκκινο (R = Red), το πράσινο (G = Green) και το βαθυγάλανο (B = Blue) που ονομάζονται βασικά χρώματα. Με τη μίξη τους, σε διάφορες αναλογίες, μπορούμε να πάρουμε μεγάλο αριθμό άλλων χρωμάτων, ακόμη και λευκό. Για την παραγωγή χρωμάτων εφαρμόζονται, γενικά, δύο μέθοδοι: η αφαιρετική και η προσθετική.



Εικόνα 6.2: Προσθετική Μίξη των τριών Βασικών Χρωμάτων -RGB

Με την αφαιρετική μέθοδο, το χρώμα που βλέπουμε ξεχωρίζεται από το φασματικό περιεχόμενο του φωτός. Μια έγχρωμη π.χ. επιφάνεια ανακλά προς το μάτι μας τις ακτίνες

κάποιου τμήματος από το όλο ορατό φάσμα, ενώ απορροφά το υπόλοιπο. Αυτό είναι ένα είδος αφαιρέσεως. Με τον ίδιο τρόπο συμπεριφέρονται και τα διάφορα έγχρωμα φίλτρα που εμποδίζουν τη διέλευση σε ορισμένα μήκη κύματος.

Η προσθετική μέθοδος μπορεί να είναι διαδοχική, ή ταυτόχρονη. Στη σύγχρονη επεξεργασία έγχρωμων εικόνων (υπολογιστές, τηλεόραση, κλπ.) χρησιμοποιείται η ταυτόχρονη προσθετική μέθοδος με τη μίξη του κόκκινου, του πράσινου και του βαθυγάλανου (μπλε). Η προσθετική μέθοδος παραγωγής των διαφόρων χρωμάτων φαίνεται στην εικόνα 6.2. Έτσι, π.χ. το κίτρινο χρώμα παράγεται με τη μίξη του κόκκινου, και του πράσινου, το πορφυρό με τη μίξη του κόκκινου και του βαθυγάλανου, το λευκό με τη μίξη του κόκκινου, του πράσινου και του βαθυγάλανου κλπ. Οι περιοχές, όπου τα βασικά χρώματα δε διασταυρώνονται, διατηρούν τον αρχικό τους χρωματικό τόνο. Πρέπει να σημειώσουμε ότι ο χρωματικός τόνος της τελικής μίξεως εξαρτάται μόνο από τη σχέση των εντάσεων των μιγνυόμενων χρωμάτων. Αν αυξηθεί ή ελαττωθεί η ένταση των αρχικών χρωμάτων κατά το ίδιο ποσοστό, ο χρωματικός τόνος του μίγματος παραμένει αμετάβλητος και μεταβάλλεται μόνο η φωτεινότητά του. Οποιαδήποτε μεταβολή στη σχέση μεταξύ των εντάσεων των μιγνυόμενων χρωμάτων προκαλεί αναπόφευκτα αλλαγή στο χρώμα της τελικής μίξεως.

Ας δώσουμε τώρα, τους βασικούς νόμους της χρωματομετρίας:

- Η συνεχής μεταβολή του μήκους κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας συνεπάγεται συνεχή μεταβολή του χρώματος.
- Η καθορισμένη μίξη τριών ανεξαρτήτων μεταξύ τους χρωμάτων επιτρέπει την παραγωγή πολλών νέων χρωμάτων, ακόμη και του λευκού.
- Η φωτεινότητα (λαμπρότητα) του τελικού μίγματος ισούται με το άθροισμα των φωτεινοτήτων των συνιστωσών που σχηματίζουν το μίγμα.
- Η καθορισμένη μίξη δύο διαφορετικών χρωμάτων επιτρέπει την παραγωγή πολλών νέων, που βρίσκονται στη φασματική κλίμακα μεταξύ αυτών. Έτσι, όπως είδαμε, η μίξη του κόκκινου και του κίτρινου δίνει πορτοκαλί χρώμα, του πράσινου και του βαθυγάλανου δίνει γαλανό κλπ. Ο κορεσμός του μίγματος είναι πάντοτε μικρότερος από τον αντίστοιχο του φασματικού χρώματος. Ακόμη, ο κορεσμός του μίγματος είναι τόσο μικρότερος, όσο πιο απέχουν μεταξύ τους στο φάσμα τα μιγνυόμενα χρώματα. Πρέπει να σημειώσουμε ότι για κάθε φασματικό χρώμα μπορεί να βρεθεί κάποιο άλλο χρώμα, τέτοιο, ώστε η μίξη του με το πρώτο να δώσει ουδέτερο λευκό ή γκρίζο. Τα χρώματα αυτά ονομάζονται συμπληρωματικά. Παραδείγματα τέτοιων συνδυασμών είναι το πορτοκαλί και το γαλανό, το κίτρινο και το βαθυγάλανο κλπ.

- Η μίξη ίδιων στην οπτική αντίληψη χρωμάτων, αλλά διαφορετικών στη σύνθεση τους, παράγει πάντοτε νέο μίγμα του ίδιου χρώματος. Αν π.χ., αναμιχθεί πορτοκαλί φασματικό χρώμα με άλλο πορτοκαλί, ίδιο στην οπτική αντίληψη με το πρώτο, αλλά που προέκυψε με μίξη κόκκινου και κίτρινου, θα παραχθεί νέο μίγμα με χρώμα πορτοκαλί. Οι πιο πάνω νόμοι χρησιμοποιούνται στους υπολογιστές.

6.6. Χρωμικές συντεταγμένες

Είπαμε ότι στην τριχρωμία ένα οποιοδήποτε χρώμα F καθορίζεται από την περιεκτικότητα του σε κόκκινο, πράσινο και βαθυγάλανο (μπλε). Η σχέση που εκφράζει αυτήν την περιεκτικότητα για κάθε χρώμα έχει τη γενική μορφή:

$$F = rR + gG + bB$$

Οι συντελεστές της σχέσεως αυτής, που δίνουν τα ποσοστά των μιγνυομένων χρωμάτων, ονομάζονται τριχρωμικοί συντελεστές και καθορίζουν το χρωμικό τόνο και τον κορεσμό του μίγματος. Η φωτεινότητα του μίγματος εξαρτάται από τη φωτεινότητα των μιγνυομένων χρωμάτων και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο τα χρώματα αυτά είναι εντονότερα.

Για τους τριχρωμικούς συντελεστές ισχύει η ταυτότητα:

$$r+g+b= 1$$

και επομένως

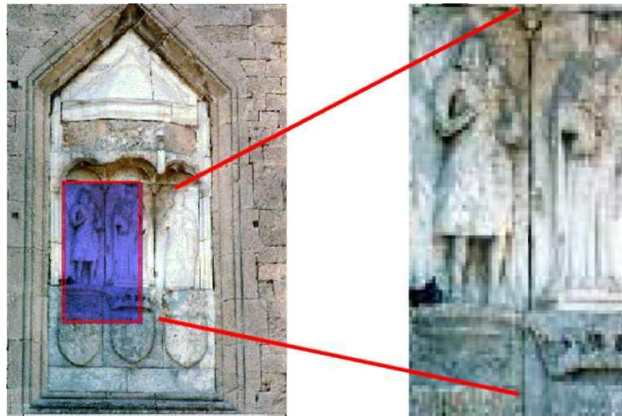
$$b = 1 - (r+g)$$

Αυτό σημαίνει ότι τα δύο χαρακτηριστικά του χρώματος, δηλαδή ο τόνος και ο κόρος, μπορούν να καθοριστούν από τη θέση ενός σημείου στο επίπεδο.

6.7. Ανάλυση με επεξεργασία εικόνας

Όσον αφορά στην ανάλυση με επεξεργασία της εικόνας, μία μαυρόασπρη εικόνα μπορεί να θεωρηθεί ως συνεχής δυσδιάστατη συνάρτηση (x,y) , που παρέχει αντιπροσωπευτικές τιμές της φωτεινότητας για κάθε ζεύγος συντεταγμένων. Συνεπώς, κάθε επεξεργασία εικόνας μπορεί να θεωρηθεί ως μαθηματική επεξεργασία της συνάρτησης $f(x,y)$. Στην πραγματικότητα γίνεται επεξεργασία της συνάρτησης των x,y , με αποτέλεσμα ορισμένο αριθμό τιμών σε σχέση με δοθείσα κλίμακα του γκρίζου. Αν και η βασική εικόνα μπορεί να παρουσιαστεί με μια συνεχή συνάρτηση, αυτό καταγράφεται με το σύστημα της ανάλυσης ως μήτρα δεδομένων. Κάθε σημείο, ή καλύτερα κάθε στοιχείο (pixel), συνεισφέρει, μέσω του διαφορετικού επιπέδου του γκρίζου που αντιστοιχεί, στο σχηματισμό της ψηφιακής εικόνας.

Η ψηφιακή εικόνα είναι πιο ακριβής από την πραγματική, όσο μικρότερη είναι η παραμόρφωση του συστήματος και όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των pixel για κάθε μονάδα επιφάνειας που χρησιμοποιείται για την ανάλυση.



Εικόνα 6.3: Μια φωτογραφία ανάλυσης 238 X 351 pixels και η μεγέθυνσή της μεγέθους 67 X 121

Η διαδικασία της μετατροπής της φωτογραφικής εικόνας σε ψηφιακή συνίσταται κατ' αρχήν στην απόδοση τιμών στη συνάρτηση $f(x,y)$ σύμφωνα με μια τετραγωνική μήτρα και διαδοχικές ποσοτικοποιήσεις των χωρικών δειγμάτων κωδικοποιημένων σε δυαδικό σύστημα. Τα ανεξάρτητα χωρικά δείγματα (pixels) αντιπροσωπεύονται από μια ολοκληρωμένη τιμή η οποία δείχνει το βαθμό της φωτεινότητας σε σχέση με μια κατάλληλη κλίμακα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε αυτή την έρευνα πρέπει να επιτρέπει την διάκριση 256 (2^8) διαβαθμίσεων της κλίμακας του γκρι, έτσι ώστε κάθε στοιχείο που δημιουργεί την εικόνα μπορεί να πάρει μια τιμή ανάμεσα στο 0 (μαύρο) και στο 255 (άσπρο). Η μετατροπή της φωτογραφικής εικόνας σε ψηφιακή διεξάγεται από μια συσκευή εισόδου, όπως πχ. τηλεκάμερα ή σαρωτή. Όμως, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι διαδικασίες της μετατροπής παράγουν ένα ορισμένο αριθμό σφαλμάτων που οφείλονται στα χαρακτηριστικά της ίδιας της συσκευής.

Η διαδικασία λοιπόν της ψηφιοποίησης ανάγεται στη μετατροπή μιας φυσικής φωτογραφίας, σε πίνακα διακριτών τιμών, αποτελούμενο από στοιχειώδη στοιχεία εικόνας, τα καλούμενα Pixel. Συγκριτικά μια φυσική (ή πιο σωστά, χημική) φωτογραφία είναι η αποτύπωση μια φυσικής παράστασης, με χημικά μέσα πάνω σε ειδικό φωτογραφικό χαρτί. Προς αυτό το σκοπό η εκτύπωση γίνεται με πολύ μικρούς κόκκους χρώματος, αναπαράγοντας έτσι την αίσθηση της φυσικής κατάστασης. Να σημειωθεί ότι οι εκτυπώσεις και οι εκτυπωτές γενικά, δε χρησιμοποιούν το χρωματικό σύστημα RGB, αλλά το πρότυπο CMYK, με βασικά χρώματα το κυανό (C, cyan), το ροζ (M, magenta), κίτρινο (Y, yellow) και το μαύρο (K, black). Η ψηφιοποίηση μια τέτοιας εικόνας, ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί στον υπολογιστή, ακολουθεί τη διαδικασία της δυαδικής μετατροπής. Τα στάδια που ακολουθούνται είναι:

α) Δειγματοληψία

Εδώ η συσκευή εισόδου, συνήθως ένας σαρωτής (scanner) ή μια τηλεκάμερα, διακρίνει τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη φωτογραφία, όπως μέγεθος, ποιότητα, και βάθος χρώματος (δηλ. αριθμός και είδος χρώματος) και σαρώνει σταδιακά την εικόνα.

β) Κβαντοποίηση

Η εικόνα διαιρείται σε στοιχειώδη τμήματα, που όλα μαζί αποτελούν το ψηφιακό "μωσαϊκό" της εικόνας. Σε κάθε pixel αποθηκεύεται η αντίστοιχη τιμή του χρώματος, εκφρασμένη σε τιμές 2^n αποχρώσεων του γκριζου (δηλ. φωτεινότητας) για κάθε ένα από τα τρία κανάλια χρώματος (RGB). Για άριστη αναπαραγωγή της εικόνας κάθε pixel λαμβάνει τιμές των 8bit (δηλ. ο δυαδικός κώδικας έχει μήκος 8 στοιχείων 0 ή 1). Ο αριθμός των pixel στην οριζόντια ανάλυση (x) και στην κάθετη ανάλυση (y), παράλληλα με την τιμή του n, για τις τιμές των 2^n αποχρώσεων γκριζου (n), προσδιορίζει την ανάλυση της εικόνας.

Π.χ. εικόνα 640 x 480 x 24bit, σημαίνει οριζόντια ανάλυση 640 pixel, κάθετη ανάλυση 480 pixel και βάθος χρώματος 24bit, δηλ. παλέτα περίπου 16 εκατ. χρωμάτων. Η τελευταία τιμή προκύπτει με χρήση $2^8=256$ αποχρώσεων του γκριζου (για την ακρίβεια πρόκειται για τιμές φωτεινότητας) για κάθε κανάλι χρώματος RGB, άρα $2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 2^{24} = 16672216$ χρώματα. Σχετικά λοιπόν με την κλίμακα του τόνου χρωμάτων που αποδίδεται σε εικόνες επεξεργασμένες με ψευδή χρώματα, οι 256 διαβαθμίσεις του γκριζου επιτρέπουν στα τρία βασικά χρώματα (κόκκινο, μπλε και πράσινο) να αποδίδονται σε πρακτικά άπειρο αριθμό συνδυασμών.

γ) Αποθήκευση

Η ψηφιοποιημένη εικόνα, αποθηκεύεται με μια επιλεγμένη μορφή αρχείου.

Η αριθμητική επέκταση της κλίμακας αποχρώσεων του γκριζου εξαρτάται λοιπόν από τον αριθμό των σημείων (8 στο χρησιμοποιούμενο σύστημα) που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της τιμής της φωτεινότητας σε αντιστοιχία με ένα ορισμένο χωρικό σημείο. Η ψηφιακή εικόνα απομνημονεύεται και μπορεί να περιγραφεί συνθετικά από:

$$f(x, y) = \int \int h(u, v, x, y) \cdot f(x, y) \cdot dudv$$

όπου :

u, v οι χωρικές συντεταγμένες της πραγματικής εικόνας $h(u, v, x, y)$: συνάρτηση που επιτρέπει να διορθωθούν οι παραμορφώσεις που παράγονται από την συσκευή μετατροπής κατά την διαδικασία παραγωγής της εικόνας.

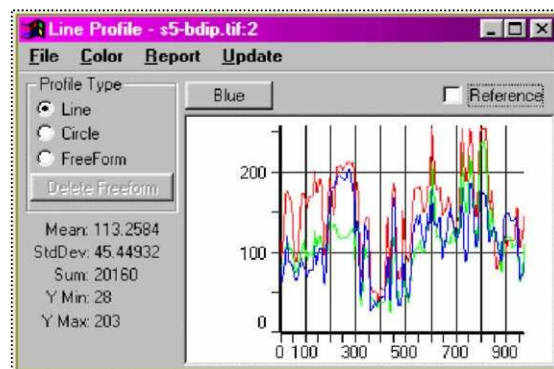
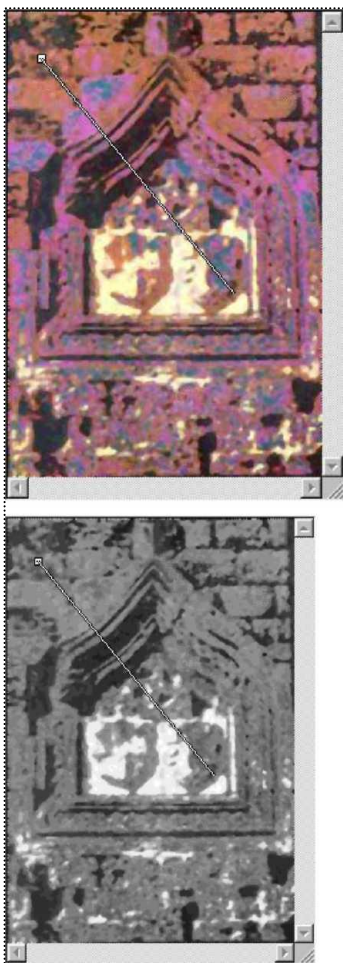
Χρησιμοποιώντας κατάλληλη επεξεργασία, η γνώση της συνάρτησης (u, v, x, y), η οποία μπορεί να ορισθεί σαν μια αυθόρμητη ανταπόκριση του φωτογραφικού συστήματος, επιτρέπει την μείωση των παραμορφώσεων. Οι τεχνικές της "Επεξεργασίας Εικόνας" κατά τις οποίες εικόνες μετατρέπονται σε σύνθετο σύνολο αριθμητικών δεδομένων, απαιτούν για την εφαρμογή

τους μονάδα συστήματος ανάλυσης και υπολογισμού (επεξεργαστής εικόνας), μονάδα εισαγωγής δεδομένων (input) και μονάδα λήψης αποτελεσμάτων (output). Για το σκοπό αυτό, οι επεξεργαστές αυτοί διαθέτουν ειδικά χαρακτηριστικά.

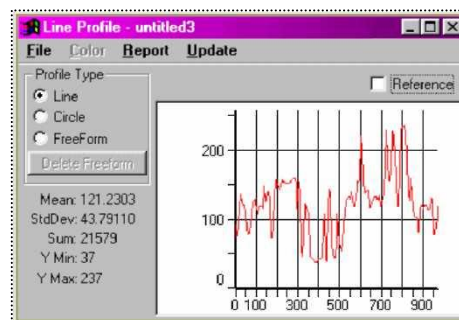
Η αυτοματοποιημένη αναγνώριση φθορών ή μεταβολών στη σύσταση και φυσική συμπεριφορά του λίθου με βάση την ψηφιακή επεξεργασία, στηρίζεται στην διαφορική ανάκλαση φωτός από την επιφάνειά του, ανάλογα με το επίπεδο φθοράς. Επομένως, η αρχική ανάλυση της εικόνας σκοπεύει στην αναγνώριση των χρωματικών παραλλαγών της δομής και του υλικού της πέτρας.

Στην παρακάτω ασπρόμαυρη φωτογραφία, δίδονται τα ιστογράμματα των επιπέδων του γκριζου με βάση την παραμόρφωση της ενέργειας του φωτός, η οποία καθορίζεται όχι μόνο από τις χρωματικές παραλλαγές του υλικού, αλλά και το είδος του, τις κατεργασίες που έχει υποστεί του και την κατάσταση φθοράς του. Ο άξονας των X παριστά την χωρική κλίμακα (pixels - ή άλλη αναλογική μονάδα ορισμένη από τον χρήστη) και ο άξονας των Y μετρά την ένταση (αναλογικά τον αριθμό των pixels στην αντίστοιχη απόσταση).

Όσον αφορά την έγχρωμη φωτογραφία (απόδοση RGB), το προφίλ έχει τρεις συνιστώσες, μια για κάθε χρώμα.



Γραμμικό προφίλ (επάνω) της φωτογραφίας αριστερά, κατά μήκος της γραμμής. Σύστημα RGB.

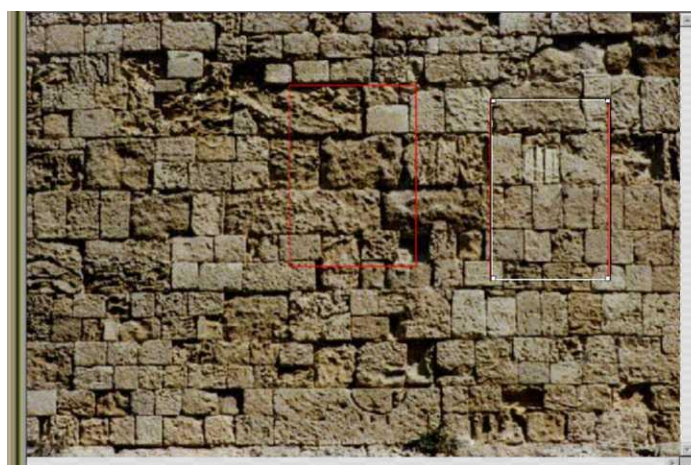


Γραμμικό προφίλ (επάνω) της φωτογραφίας αριστερά, κατά μήκος της γραμμής σε Grey scale.

Εικόνα 6.4

Οι μεταβολές της φωτεινότητας που καταγράφονται σε εικόνες λιθοτύπων διαφορετικού χρώματος, σύνθεσης και κατάστασης φθοράς, μπορούν να αναλυθούν σε ιστογράμματα, στα οποία μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

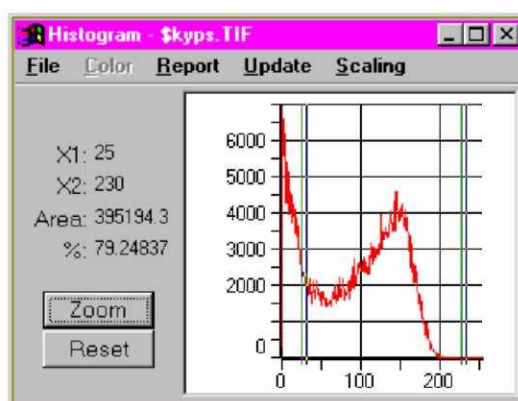
1. Σταδιακή μετακίνηση προς την αρχή του άξονα των τετμημένων, δηλαδή προς τις σκούρες αποχρώσεις του γκριζου, των ευρέων διαστημάτων που αντιστοιχούν σε εικόνες νέας ή διαβρωμένου λίθου.
2. Αύξηση της διασποράς των επιπέδων φωτεινότητας που συνοδεύεται από παρουσία ευρύτερων διαστημάτων αποχρώσεων του γκριζου, στα οποία συμπεριλαμβάνονται το είδος πέτρας με σοβαρή διάβρωση μαζί με αυτά τμημάτων που έχουν παραμείνει σχετικά ανέπαφα.



Περιοχές ανάλυσης



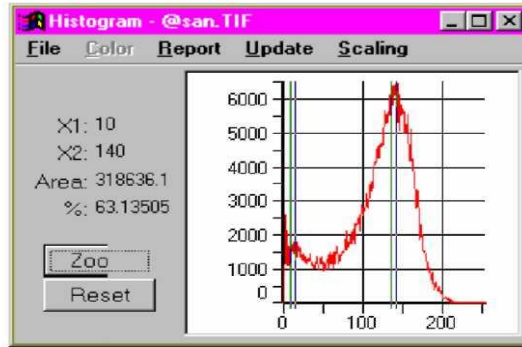
Κυψελωμένη



Εικόνα 6.5: Ιστόγραμμα καταγραφής της μεταβολής της φωτεινότητας, λόγω φαινομένων κυψελώσης



Υγιής



Εικόνα 6.6: Παράδειγμα μεταβολής του ενεργειακού περιεχομένου των επιπέδων του γκρίζου. Η θέση των προφίλ στον άξονα των τεμημένων καθορίζεται από το χρώμα του υλικού, η διασπορά των τιμών μπορεί να συσχετιστεί με τα χαρακτηριστικά του υλικού και το βαθμό φθοράς του. Η κατάσταση του υλικού αποδίδεται από το εύρος των διαστημάτων των επιπέδων του γκρίζου (στον οριζόντιο άξονα). Το εύρος αυξάνεται με τον βαθμό φθοράς. Το *max* μετατοπίζεται προς τα αριστερά.

Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορούμε να αποκτήσουμε εικόνες με ψευδή χρώματα οι οποίες, με ειδική αναφορά στην φύση των εξεταζόμενων λιθοτύπων, καθιστούν δυνατή, σαν πρώτο βήμα, την διάκριση της επιφανειακής υφής, δομής και χημικό - ορυκτολογικής σύστασης των εξεταζόμενων λίθων.

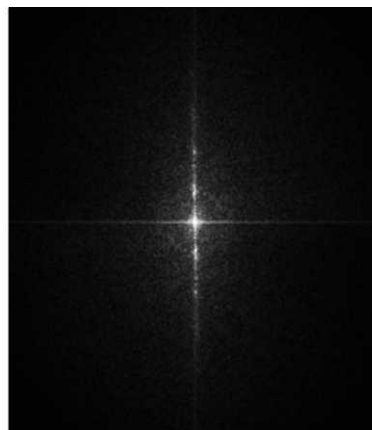
Όσον αφορά την μεθοδολογία για την απόδοση ψευδοχρωμάτων στις εικόνες, τα παρακάτω στάδια κρίνονται απαραίτητα:

Απόδοση Ψευδοχρωμάτων

1. Υφή

Σκοπός της εφαρμογής ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας στην επιλεγμένη ομάδα φωτογραφιών είναι η χαρτογράφηση φθορών σε τοιχοποιίες και η ποσοτική εκτίμηση της έκτασής τους.

Μια τέτοια χαρτογράφηση αρχικά θα έπρεπε να εξετάσει τα χαρακτηριστικά υφής των εξεταζόμενων επιφανειών. Γενικά η υφή είναι μέτρο της τραχύτητας, ομαλότητας και κανονικότητας της εικόνας, γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρέως για την κατάτμηση της εικόνας. Επιπροσθέτως από τις τρεις κατηγορίες τεχνικών περιγραφής της υφής, μόνο οι στατιστικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση μας, λόγω των πολύ μικρών κανονικοτήτων που εμφανίζουν οι υπό εξέταση τοιχοποιίες.



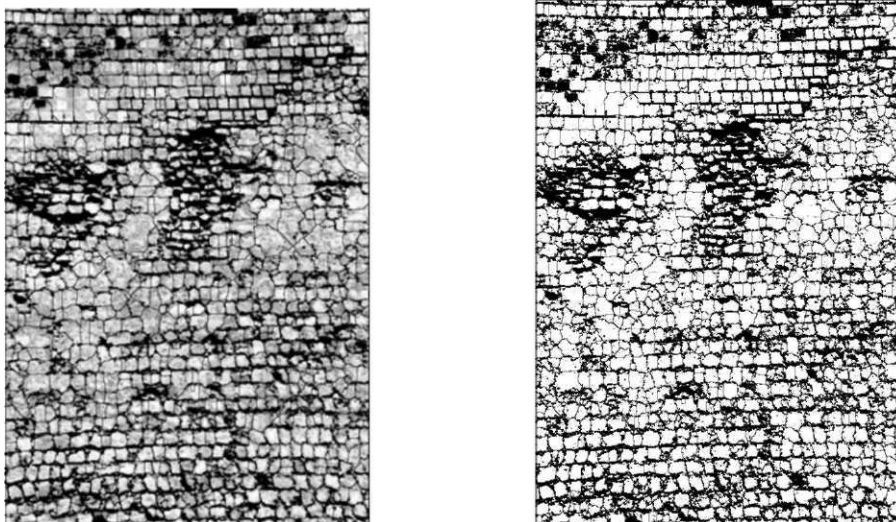
Εικόνα 6.7: Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT)

Έτσι για παράδειγμα, στην παραπάνω εικόνα ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier δεν εμφανίζει σημαντικά διαφοροποιημένες κορυφές συχνότητας που να αντιστοιχούν σε περιοδικότητες της τοιχοποιίας, γεγονός που οφείλεται στην ανομοιόμορφη και αποτελούμενη από διαφορετικά δομικά υλικά μορφή της τοιχοποιίας.

2. Μετασχηματισμός Watershed

Αντίθετα, μια χρήσιμη για την χαρτογράφηση μέθοδος είναι η προτεινόμενη από τους Wiedelmann & Rodehorst, δηλαδή η χρήση του φίλτρου watershed, μετά από γκαουσιανή μείωση του θορύβου. Ο μετασχηματισμός watershed διαιρεί την εικόνα βασισμένος στην τοπολογία των επίπεδων του γκρι. Σκοπός του μετασχηματισμού είναι η εύρεση του τόπου μέγιστου μέτρου της βαθμίδας της εικόνας, που χωρίζει μεταξύ τους περιοχές ελαχίστου, κάτι αντίστοιχο δηλαδή με τις ισοϋψείς καμπύλες σε έναν χάρτη, όπου περισσότερο γκριζό σημαίνει μικρότερο υψόμετρο.

Στο λογισμικό του προγράμματος επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας Image Pro, ο ακολουθούμενος αλγόριθμος είναι μια διαδοχή των φίλτρων erode και dilate: η εικόνα πρώτα υπόκειται σε 'διάβρωση' (erode), μέχρι οι περιοχές 'μεγάλου υψομέτρου' να φτάσουν στο ελάχιστο (που προκαθορίζεται με βάση το ιστόγραμμα) και κατόπιν 'φουσκώνει' (dilates) ξανά, χωρίς όμως να φτάσουν στο προηγούμενο ύψος τους. Το αποτέλεσμα είναι ένας χάρτης των λιθοτύπων της τοιχοποιίας.



Εικόνα 6.8:

Αριστερά: εφαρμογή γκαουσιανού φίλτρου μονού περάσματος σε παράθυρο 3X3 και κατόπιν watershed με κατώφλι 45%.

Δεξιά: Μετατροπή σε bilevel με κατώφλι φωτεινότητας την ένταση 30/255.

Όμως, οι προς εξέταση επιφάνειες παρουσιάζουν σχετική ομοιογένεια όσον αφορά στο λιθότυπο και συνεπώς το ενδιαφέρον μας στρέφεται στη χαρτογράφηση των τύπων φθοράς τους, βάσει των περιοχών του ιστογράμματός τους και της αντιστοίχησης που μπορεί να γίνει μεταξύ των τύπων φθοράς και της έντασης των pixels, όπως αυτή ταξινομείται στα αντίστοιχα ιστογράμματα.

6.8. Χαρακτηριστικές περιοχές φθοράς και ψευδοχρωματισμός

Τα δομικά υλικά (λίθοι και κονιάματα) των υπό χαρτογράφηση τοιχοποιιών παρουσιάζουν τέσσερις χαρακτηριστικές περιοχές της ενεργειακής τους κατάστασης άρα και των επιπέδων φθοράς τους, οι οποίες αποτελούν τους κωδικούς ερμηνείας που αποδίδονται από τα ψευδή χρώματα. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για τις:

- περιοχές υγιούς λίθου
- περιοχές κρουστών
- περιοχές περιορισμένου βαθμού διάβρωσης (εν δυνάμει διάβρωση)
- περιοχές έντονης διάβρωσης

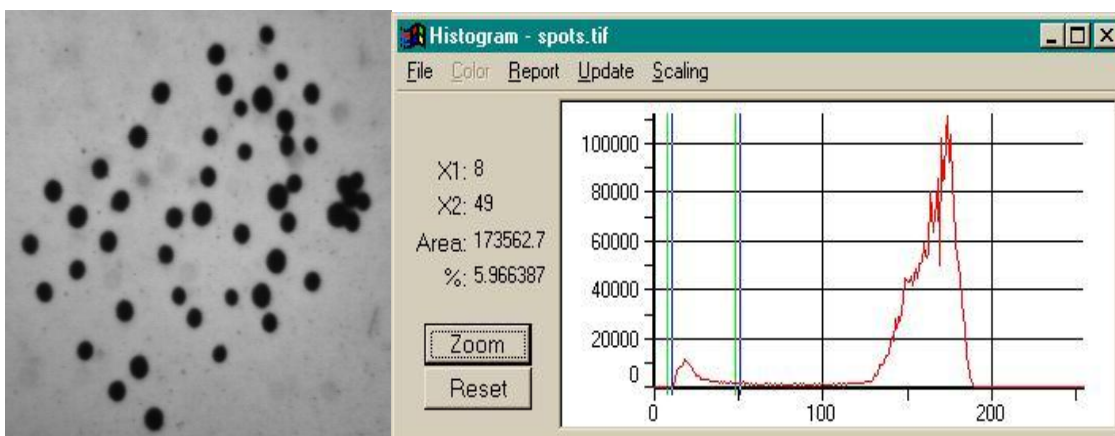
Η χαρτογράφηση, δηλαδή η απόδοση ψευδοχρωμάτων στις περιοχές αυτές, έχει κυρίως ποιοτικά χαρακτηριστικά. Η αυτοματοποίηση και η ακρίβεια της διαδικασίας της ψηφιοποίησης εξαρτάται από:

- την υψηλή διακριτική ικανότητα, δηλαδή να αποτυπωθεί με απόλυτη ακρίβεια

(σημείο προς σημείο) στη φωτογραφία η διαφορά περιοχών κοντά στη μετάβαση λ.χ. από υγιή πέτρα σε περιοχή κρούστας.

- την ανομοιογένεια του πρωτογενούς φωτογραφικού υλικού και πιο συγκεκριμένα:
 - τις συγκεκριμένες συνθήκες φωτογράφισης (φωτισμός, γωνία και απόσταση λήψης, κ.λπ.),
 - τον φωτογραφικό εξοπλισμό (ψηφιακό ή αναλογικό μέσο αποθήκευσης,
 - ευαισθησία κ.λπ.)
 - το ίδιο το υλικό και την ευκρίνεια με την οποία μπορούν να καταγραφούν οι φθορές του (για παράδειγμα μαύρες κρούστες σε λευκό μάρμαρο σε αντίθεση με γκρίζες κρούστες σε γκρίζο ασβεστόλιθο).

Για τους παραπάνω λόγους, η διαδικασία ψηφιακής επεξεργασίας εφαρμόστηκε αρχικά σε ένα σχετικά ομογενές σύνολο φωτογραφιών από τα τείχη, όσον αφορά στα παραπάνω χαρακτηριστικά, ώστε να περιοριστούν οι έντονες διαφοροποιήσεις. Παρ' όλη τη χρήση ομοιογενούς συνόλου φωτογραφιών, η απόκλιση στις μέσες τιμές φωτεινότητας ακόμα και σε συγγενικές περιοχές της τοιχοποιίας δεν αποφεύγονται. Ομως η ομαδοποίηση σε δύο κατηγορίες μέσης φωτεινότητας επιτρέπει την κατά ομάδες επεξεργασία και τελική εξαγωγή κοινών συμπερασμάτων. Η επιλογή των ορίων φωτεινότητας για κάθε ψευδοχρωματική περιοχή και για κάθε ομάδα μπορεί να γίνει μόνο με μια διαδικασία δοκιμής – λάθους, όπου κριτήρια επιτυχίας είναι τόσο η οπτική επαλήθευση (κάλυψη των σωστών περιοχών), όσο και η στατιστική ανάλυση (παρόμοια ποσοστιαία αποτελέσματα για παρόμοιες τοιχοποιίες σε διαφορετική ομάδα φωτεινότητας). Μια πρόσθετη δυσκολία είναι ότι τα ιστογράμματα των φωτογραφιών αυτών δεν ξεχωρίζουν αυτόματα μία περιοχή φωτεινότητας με καθαρό τρόπο, όπως στο παρακάτω παράδειγμα (εικόνα 6.9) όπου τα μαύρα στίγματα ξεχωρίζουν πολύ καθαρά από το φωτεινότερο φόντο:



Εικόνα 6.9: Ιστόγραμμα καταγραφής της μεταβολής της φωτεινότητας της φωτογραφίας

Είναι εμφανής ο διαχωρισμός στο ιστόγραμμα αυτό της περιοχής 8 έως 49 που αντιπροσωπεύει τις σκοτεινόχρωμες κηλίδες της φωτογραφίας. Δυστυχώς εικόνες τέτοιας ευκρινούς, μεταξύ γειτονικών περιοχών, αντίθεσης δεν μπορούμε συνήθως να έχουμε από

τοιχοποιίες.

Ψευδοχρωματισμός

Γενικά ως διαδικασία ψευδοχρωματισμού (pseudocoloring) εννοούμε την κωδικοποίηση της έντασης φωτεινότητας της ασπρόμαυρης εικόνας με χρήση πληροφορίας χρώματος. Αν $f(x,y)$ είναι μια ασπρόμαυρη εικόνα και $c(x,y)$ μια έγχρωμη, τότε ως ψευδοχρωματισμός μπορεί να οριστεί ένας μετασχηματισμός

$$T: f \rightarrow c.$$

Η c είναι ανυσματική συνάρτηση των τριών συνιστωσών [R,G,B]. η μορφή του T μπορεί να οριστεί με δύο τρόπους: είτε με φιλτράρισμα συχνοτήτων, ή με διακριτοποίηση της έντασης φωτεινότητας. Επειδή ο δεύτερος τρόπος δίνει έμφαση στο διαχωρισμό περιγραμμάτων και ομοιογενών περιοχών, προτιμήθηκε ο πρώτος. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, η συνάρτηση που περιγράφει τον ψευδοχρωματισμό με N χρώματα είναι η:

$$T(f(k,l)) = \begin{cases} c_0, 0 \leq G(f(k,l)) \leq f_1 \\ c_i, f_i \leq G(f(k,l)) \leq f_{i+1}, 1 \leq i \leq N-2, \\ c_{N-1}, f_{N-1} \leq G(f(k,l)) \leq L \end{cases}$$

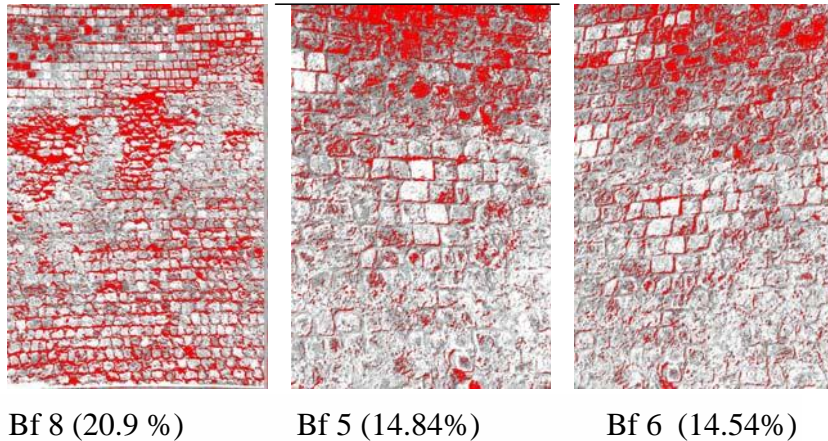
Όπου G η συνάρτηση ισοστάθμισης του ιστογράμματος, L ο αριθμός των διαφορετικών επιπέδων του γκρι που αναγνωρίζονται και f_i , $i = 1, \dots, N-1$ το σύνολο των αυθαίρετων κατωφλίων έντασης για κάθε χρώμα.

Προφανώς η T είναι εντελώς μη γραμμική και μη αντιστρέψιμη (από την ψευδοχρωματισμένη εικόνα δεν μπορούμε να πάρουμε την αρχική ασπρόμαυρη εικόνα).

Ο ακριβής τρόπος επιλογής των κατωφλίων έντασης f_i που θα χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή της έντασης και των τύπων φθοράς, με βάση τις τέσσερις περιοχές που εκτέθηκαν πιο πάνω αναπτύσσεται στην επόμενη παράγραφο.

i. Ομάδα υψηλής φωτεινότητας.

Οι έντονα διαβρωμένες περιοχές, οι οποίες προκύπτουν είτε από απώλεια αυθεντικών δομικών υλικών, είτε από σχηματισμό κρουστών, μπορούν να περιγραφούν σε αυτή την ομάδα από τα pixel φωτεινότητας 0-108. Για παράδειγμα (σε παρένθεση το ποσοστό της ψευδοχρωματισμένης επιφάνειας):



Εικόνα 6.10: Πρώτη ομάδα φωτεινότητας

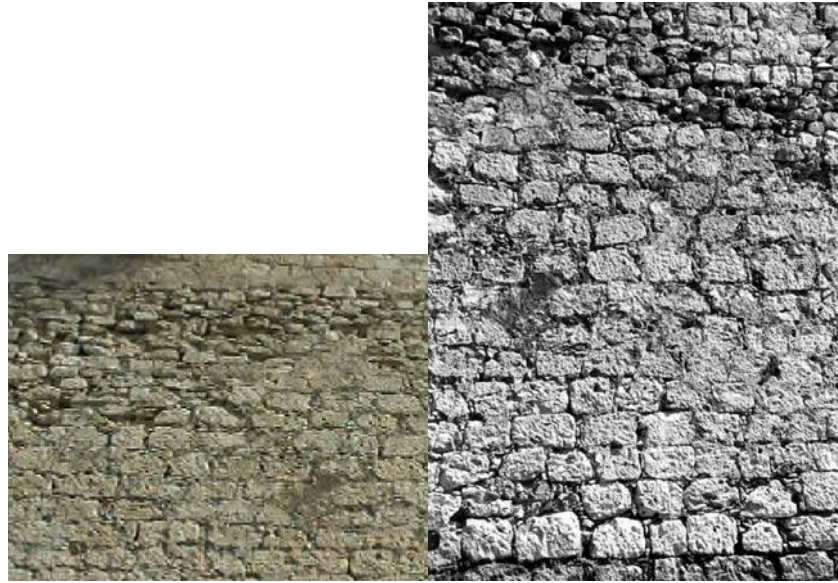
ii. **Ομάδα χαμηλής φωτεινότητας**

Η διαφορά της μέσης φωτεινότητας μεταξύ των δύο ομάδων είναι της τάξης του 20%. Μια τέτοιας τάξης μείωση σημαίνει ότι το εύρος ψευδοχρωματισμού για την ομάδα χαμηλής φωτεινότητας θα πρέπει να είναι κατά την ίδια τάξη μεγέθους μειωμένο, δηλ. περίπου από 0 έως 90 (σε σχέση με 0 – 108 της πρώτης ομάδας).

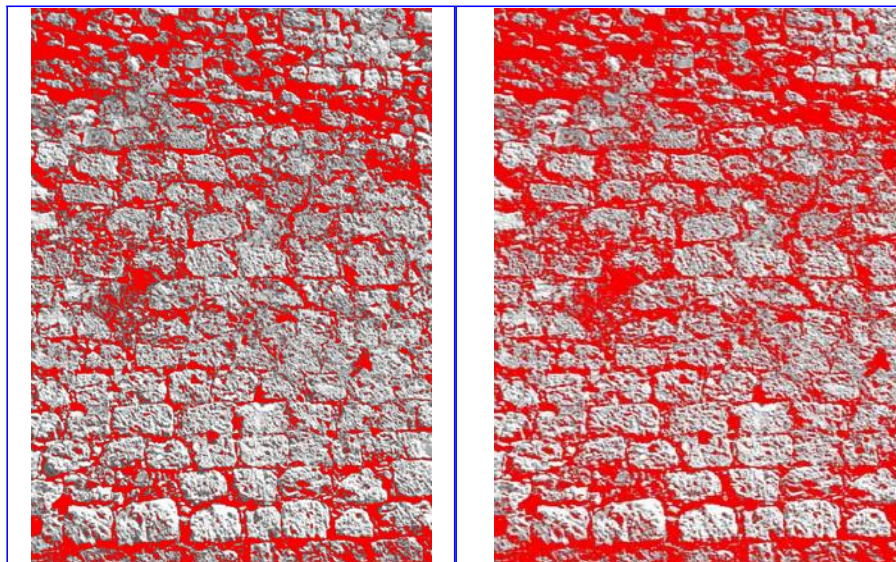
Η εφαρμογή μάσκας ψευδοχρωματισμού στις σκοτεινές περιοχές (έντονα διαβρωμένα τμήματα των τοιχοποιιών), στην περιοχή φωτεινότητας 0-99 έδωσε τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα

Τα παραπάνω φαίνονται για παράδειγμα στην Bf 1 (βλ. Εικόνες 6.11, 6.12):

Η μάσκα που επιλέχθηκε για την πρώτη ομάδα φωτεινότητας (κάλυψη φωτεινότητας 0-108, βλ. Εικ 6.12, BF1-a) καλύπτει ακόμα και περιοχές κρούστας, μη αναπαράγοντας σωστά τις περιοχές υψηλών εντάσεων φθοράς, ενώ η καινούργια μάσκα (Bf 1-b, κάλυψη φωτεινότητας 0-99) δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στην απόδοση των έντονα διαβρωμένων περιοχών της τοιχοποιίας.



Εικόνα 6.11: *BF1-BF2*



Εικόνα 6.12: Αριστερά *BF1-b 27%*, Δεξιά *Bf 1-a 38.7%*.

Εντελώς παράλληλη είναι η διαδικασία επιλογής κατωφλίων έντασης για τα υπόλοιπα ψευδοχρώματα, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στους επόμενους πίνακες. Πιο συγκεκριμένα:

1. η απόδοση ψευδοχρώματος ανά κατηγορία (division) χρώματος (κόκκινο, πράσινο, μπλε, κίτρινο), μαζί με τα αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία (συνολική επιφάνεια, απόλυτη έκταση ψευδοχρωματισμένης περιοχής, ποσοστό της τελευταίας ως προς συνολική επιφάνεια),
2. η μέση φωτεινότητα κάθε φωτογραφίας καθώς και η μέση φωτεινότητα κάθε μιας από τις δύο ομάδες φωτεινότητας,
και

3. αποδίδονται με όλα τα ψευδοχρώματά τους οι εικόνες της ομάδας υψηλής φωτεινότητας και αντίστοιχα η ομάδα χαμηλής φωτεινότητας.

7. Διάγνωση και χαρτογράφηση της φθοράς στα τείχη του Ηρακλείου με Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας

7.1. Χαρτογράφηση της Φθοράς με Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας



Εικόνα 7.1: Χάρτης προτεινόμενων θέσεων

7.1.1. Ομάδα υψηλής φωτεινότητας

Γενικά αυτή η ομάδα εικόνων χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλο ποσοστό pixels με μεγάλες τιμές φωτεινότητας, ενώ τα στατιστικά τους στοιχεία παρουσιάζουν σχετική ομοιογένεια και προέρχονται από δύο διαφορετικές υπό εξέταση θέσεις, **τη θέση 3: Επιπρομαχώνας Βιττούρι και τη θέση 1: Επιπρομαχώνας Μαρτινένγκο.**

Οι κωδικοί ερμηνείας, δηλαδή τα ψευδή χρώματα που αποδίδουν τους τύπους φθοράς των δομικών υλικών (λίθων και κονιαμάτων), των υπό χαρτογράφηση τοιχοποιιών, εμφανίζουν τις παρακάτω διακρίνουσες πληροφορίες:

Με **κόκκινο χρώμα** αποδίδονται οι έντονα διαβρωμένες περιοχές των δομικών υλικών της τοιχοποιίας, δηλαδή:

- (α) λίθοι που πάσχουν από κυψέλωση, φθορά που οδηγεί στην απώλεια των υλικού με αποτέλεσμα το σχηματισμό έντονων σπηλαιώσεων και κρατήρων,
- (β) κονιάματα (ιστορικά-αποκατάστασης) τα οποία έχουν αποσαθρωθεί, εξαιτίας της συνδυαστικής δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης και διαβρωτικής δράσης των αερίων ρυπαντών, σε τέτοιο βαθμό που τα αρμολογήματα έχουν καταστραφεί και παρουσιάζονται σαν οπές περιμετρικά των λίθων και
- (γ) τμήματα των λίθων με έντονους σχηματισμούς κρουστών, οι οποίες προκύπτουν από τη διαβρωτική δράση των ατμοσφαιρικών ρύπων και βιολογικών παραγόντων.

Με **μπλε χρώμα** αποδίδονται οι κρούστες που είναι χαλαρά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα και σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών της τοιχοποιίας (λίθων και κονιαμάτων ιστορικών- αποκατάστασης), εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τους αέριους ρυπαντές.

Με **πράσινο χρώμα** αποδίδεται:

1. η μικρή αλλά δεδομένη τραχύτητα των λίθων και των κονιαμάτων από τις συνεχόμενες αποπλύσεις τους, καθώς και
2. οι μικρού βάθους κρατήρες και οπές που παρουσιάζονται στους λίθους και στα κονιάματα από την εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης.

Με **κίτρινο χρώμα** αποδίδονται οι υγιείς περιοχές του λιθοτύπου, στις οποίες δεν παρουσιάζεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού.

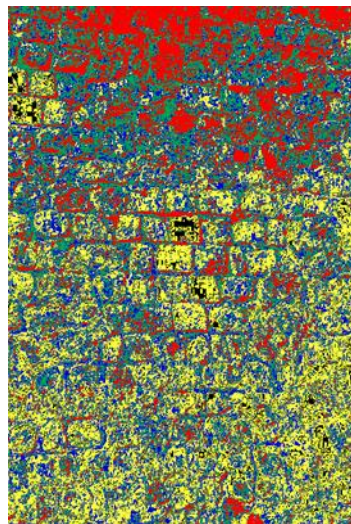
Θέση 3: Επιπρομαχώνας Βιττούρι



Εικόνα 7.2:

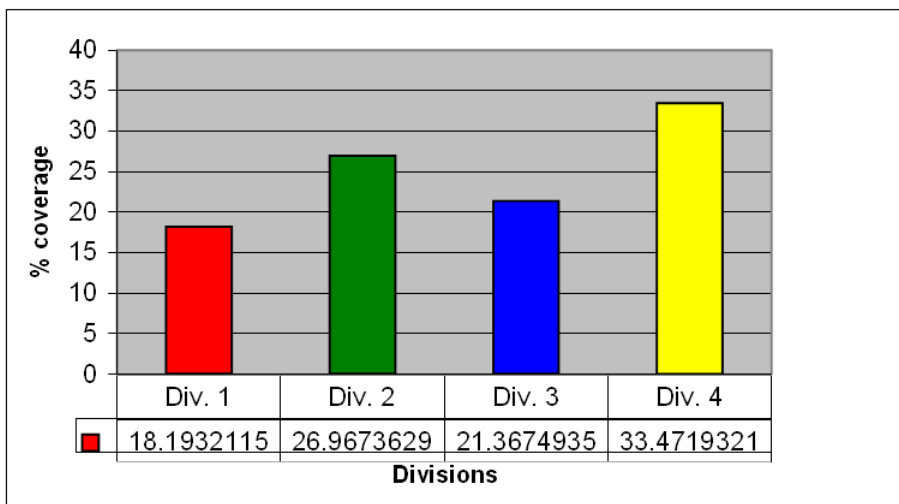
Αρχική Εικόνα

Gray scale



Εικόνα 7.3:

Ψευδή χρώματα



Εικόνα 7.4:

Διάγραμμα 2.5

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2.5 (εικόνα 7.4) καθίσταται σαφές ότι: **οι έντονα διαβρωμένες περιοχές** των δομικών υλικών της τοιχοποιίας, δηλαδή: (α) κονιάματα (ιστορικά-αποκατάστασης) τα οποία έχουν αποσαθρωθεί, εξαιτίας της συνδυαστικής δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης και της διαβρωτικής δράσης των αερίων ρυπαντών, σε τέτοιο βαθμό που τα αρμολογήματα έχουν καταστραφεί και παρουσιάζονται σαν οπές περιμετρικά των λίθων και (β) τμήματα των λίθων με έντονους σχηματισμούς κρουστών, οι οποίες προκύπτουν από τη διαβρωτική δράση των ατμοσφαιρικών ρύπων και βιολογικών παραγόντων, καταλαμβάνουν ~ 18% της συνολικής επιφάνειας της υπό εξέταση θέσης 3, (απόδοση με **κόκκινο χρώμα**).

Οι **υγιείς περιοχές του λιθοτύπου**, στις οποίες δεν παρουσιάζεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, καταλαμβάνουν το 33.5% της υπό εξέτασης τοιχοποιίας (απόδοση με **κίτρινο χρώμα**), γεγονός που πιστοποιεί τη σχετικά καλή της κατάσταση.

Οι περιοχές των **κρουστών** που είναι χαλαρά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα, και σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών της τοιχοποιίας (λίθων και κονιαμάτων) εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τους αέριους ρυπαντές, εκτείνονται σε ποσοστό επιφάνειας ~21.4% (απόδοση με **μπλε χρώμα**), γεγονός που καθιστά το συγκεκριμένο τύπο φθοράς σημαντικό για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

Τέλος, το ~27% της συνολικής επιφάνειας χαρακτηρίζεται από **μικρού βάθους κρατήρες και οπές** που παρουσιάζονται στους λίθους και στα κονιάματα από την εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης, καθώς και από **μικρής έντασης τραχύτητα**, εξαιτίας των συνεχόμενων αποπλύσεων των αρχιτεκτονικών τοιχοποιιών από τα όμβρια ύδατα, (απόδοση με **πράσινο χρώμα**), γεγονός που καθιστά τους παραπάνω τύπους φθοράς, κύριους για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

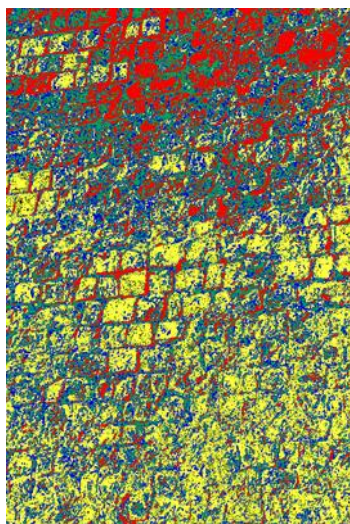
Θέση 3: Επιπρομαχώνας Βιττούρι



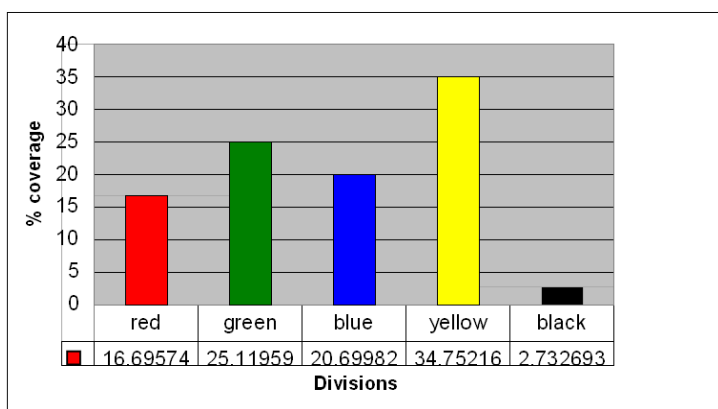
Εικόνα 7.5:

Γήπεδο Μπάσκετ

Gray scale



Εικόνα 7.6: Ψευδή Χρώματα



Εικόνα 7.7: Διάγραμμα 2.6

Τα στατιστικά στοιχεία της χαρτογράφησης της φθοράς που προκύπτουν από αυτό το τμήμα της υπό εξέταση τοιχοποιίας, είναι παρόμοια με εκείνα της εικόνας 7.4 (Διάγραμμα 2.5). Πιο συγκεκριμένα:

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2.6 (εικόνα 7.7) καθίσταται σαφές ότι: **οι έντονα διαβρωμένες περιοχές** των δομικών υλικών της τοιχοποιίας, δηλαδή: (α) κονιάματα (ιστορικά-αποκατάστασης) τα οποία έχουν αποσαθρωθεί, εξαιτίας της συνδυαστικής δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης και της διαβρωτικής δράσης των αερίων ρυπαντών, σε τέτοιο βαθμό που τα αρμολογήματα έχουν καταστραφεί και παρουσιάζονται σαν οπές περιμετρικά των λίθων και (β) τμήματα των λίθων με έντονους σχηματισμούς κρουστών, οι οποίες προκύπτουν από τη διαβρωτική δράση των ατμοσφαιρικών ρύπων και βιολογικών παραγόντων, καταλαμβάνουν ~ 17% της συνολικής επιφάνειας της υπό εξέταση θέσης 3, (απόδοση με **κόκκινο χρώμα**).

Οι **υγιείς περιοχές του λίθου**, στις οποίες δεν παρουσιάζεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, καταλαμβάνουν το 35% της υπό εξέτασης τοιχοποιίας (απόδοση με **κίτρινο χρώμα**), γεγονός που πιστοποιεί τη σχετικά καλή της κατάσταση.

Οι περιοχές των **κρουστών** που είναι χαλαρά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα και σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών της τοιχοποιίας (λίθων και κονιαμάτων) εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τους αέριους ρυπαντές, εκτείνονται σε ποσοστό επιφάνειας ~20.7% (απόδοση με **μπλε χρώμα**), γεγονός που καθιστά το συγκεκριμένο τύπο φθοράς σημαντικό για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

Τέλος, το ~25% της συνολικής επιφάνειας χαρακτηρίζεται από **μικρού βάθους κρατήρες και οπές** που παρουσιάζονται στους λίθους και στα κονιάματα από την εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης, καθώς και από **μικρής έντασης τραχύτητα**, εξαιτίας των συνεχόμενων αποπλύσεων των αρχιτεκτονικών επιφανειών από τα όμβρια ύδατα, (απόδοση με **πράσινο χρώμα**), γεγονός που καθιστά τους παραπάνω τύπους φθοράς, κύριους για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

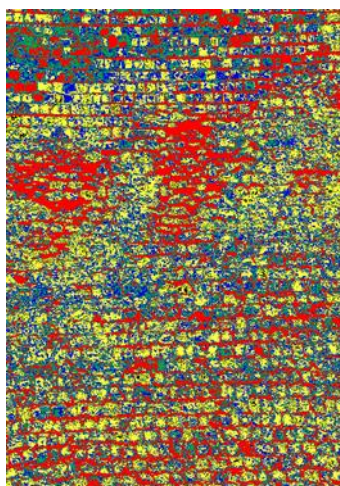
Θέση 1: Επιπρομαχώνας Μαρτινένγκο



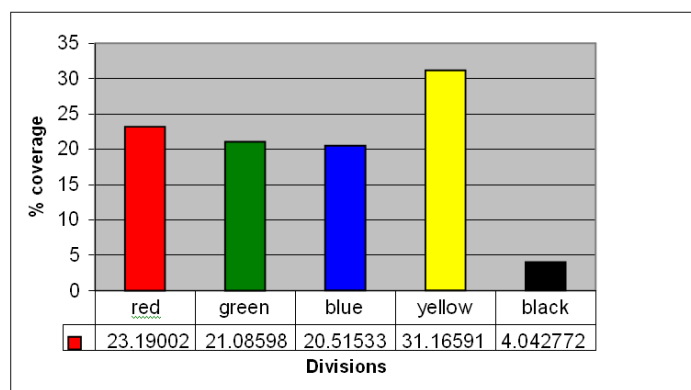
Εικόνα 7.8:

Αρχική Φωτογραφία

Gray Scale



Εικόνα 7.9: Ψευδοχρωματισμένη



Εικόνα 7.10: Διάγραμμα 2.8

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι:

Οι έντονα διαβρωμένες περιοχές των δομικών υλικών της τοιχοποιίας, δηλαδή: (α) λίθοι που πάσχουν από κυψέλωση, φθορά που οδηγεί στην απώλεια των υλικού με αποτέλεσμα το σχηματισμό έντονων σπηλαιώσεων και κρατήρων, (β) κονιάματα (ιστορικά-αποκατάστασης) τα οποία έχουν αποσαθρωθεί, εξαιτίας της συνδυαστικής δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης και της διαβρωτικής δράσης των αερίων ρυπαντών, σε τέτοιο βαθμό που τα αρμολογήματα έχουν καταστραφεί και παρουσιάζονται σαν οπές περιμετρικά των λίθων και (γ) τμήματα των λίθων με έντονους σχηματισμούς κρουστών, οι οποίες προκύπτουν από τη διαβρωτική δράση των ατμοσφαιρικών ρύπων και βιολογικών παραγόντων, καταλαμβάνουν ~23% της συνολικής επιφάνειας της υπό εξέταση θέσης, (απόδοση με **κόκκινο χρώμα**), καθιστώντας τους παραπάνω τύπους φθοράς τους σημαντικότερους για τη θέση 1: Επιπρομαχώνας Μαρτινεγκο.

Οι υγιείς περιοχές του λιθοτύπου, στις οποίες δεν παρουσιάζεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, καταλαμβάνουν το 31% της υπό εξέτασης τοιχοποιίας (απόδοση με **κίτρινο χρώμα**), γεγονός που πιστοποιεί ότι σημαντικό τμήμα της βρίσκεται σε σχετικά καλή κατάσταση.

Οι περιοχές των κρουστών που είναι χαλαρά συνδεδεμένες με το υπόστρωμα και σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών της τοιχοποιίας (λίθων και κονιαμάτων) εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τους αέριους ρυπαντές, εκτείνονται σε ποσοστό επιφάνειας ~20.5% (απόδοση με **μπλε χρώμα**), γεγονός που καθιστά το συγκεκριμένο τύπο φθοράς σημαντικό για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

Τέλος, το ~21% της συνολικής επιφάνειας χαρακτηρίζεται από **μικρού βάθους κρατήρες και οπές** που παρουσιάζονται στους λίθους και στα κονιάματα από την εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης, καθώς και από **μικρής έντασης τραχύτητα**, εξαιτίας των συνεχόμενων αποπλύσεων των αρχιτεκτονικών τοιχοποιιών από τα όμβρια ύδατα, (απόδοση με

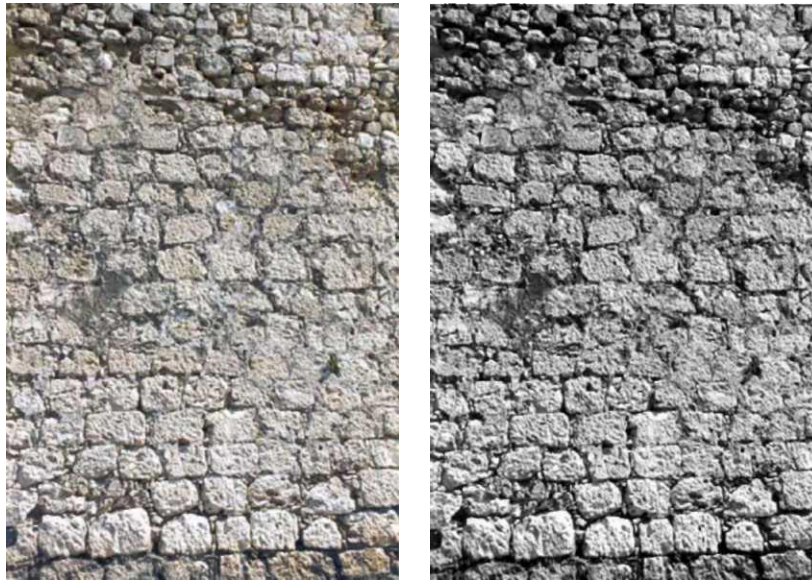
πράσινο χρώμα), γεγονός που καθιστά τους παραπάνω τύπους φθοράς, σημαντικούς για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

7.1.2. Ομάδα χαμηλής φωτεινότητας

Γενικά αυτή η ομάδα χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο ποσοστό pixels με μικρές τιμές φωτεινότητας, εξαιτίας της παρουσίας έντονα διαβρωμένων τμημάτων στις τοιχοποιίες που εξετάζονται. Όλες οι εικόνες αυτής της ομάδας προέρχονται από την υπό εξέταση θέση Πύλη Ιησού και τα στατιστικά τους στοιχεία παρουσιάζουν σχετική ομοιογένεια. Οι κωδικοί ερμηνείας, δηλαδή τα ψευδή χρώματα που αποδίδουν τους τύπους φθοράς των δομικών υλικών (λίθων και κονιαμάτων), των υπό χαρτογράφηση τοιχοποιιών, εμφανίζουν τις παρακάτω διακρίνουσες πληροφορίες:

- ✓ Με **κόκκινο χρώμα** αποδίδονται:
 1. οι έντονα διαβρωμένες περιοχές των δομικών υλικών της τοιχοποιίας, δηλαδή (α) λίθοι που πάσχουν από κυψέλωση, φθορά που οδηγεί στην απώλεια των υλικού με αποτέλεσμα το σχηματισμό έντονων σπηλαιώσεων και κρατήρων, (β) κονιάματα (ιστορικά-αποκατάστασης) τα οποία έχουν αποσαθρωθεί, εξαιτίας της συνδυαστικής δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης και της διαβρωτικής δράσης των αερίων ρυπαντών, σε τέτοιο βαθμό που τα αρμολογήματα έχουν καταστραφεί και παρουσιάζονται σαν οπές περιμετρικά των λίθων, καθώς και
 2. οι έντονες σπηλαιώσεις λίθων που συμπληρώθηκαν από κονιάματα αποκατάστασης με υψηλή αναλογία τσιμέντου στη συνδετική ύλη.
- ✓ Με **μπλε χρώμα** αποδίδονται οι περιοχές των κρουστών που σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών της τοιχοποιίας (λίθων και κονιαμάτων ιστορικών-αποκατάστασης), εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τους αέριους ρυπαντές.
- ✓ Με **πράσινο χρώμα** αποδίδεται:
 1. η μικρή αλλά δεδομένη τραχύτητα των λίθων και των κονιαμάτων από τις συνεχόμενες αποπλύσεις τους, καθώς και
 2. οι μικρού βάθους κρατήρες και οπές που παρουσιάζονται στους λίθους και στα κονιάματα από την εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης.
- ✓ Με **κίτρινο χρώμα** αποδίδονται οι υγιείς περιοχές του λιθοτύπου, στις οποίες δεν παρουσιάζεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού.

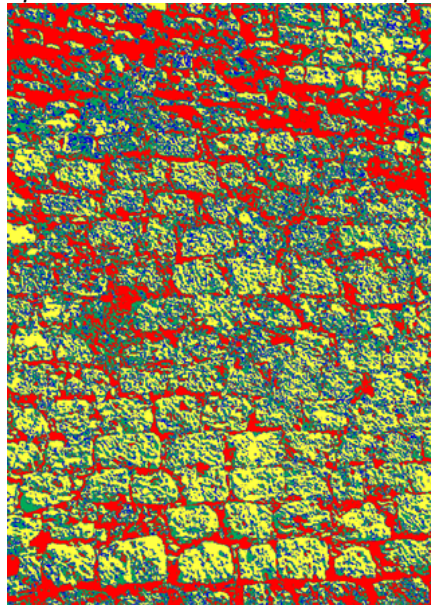
ΘΕΣΗ Πύλη Ιησού



Εικόνα 7.11:

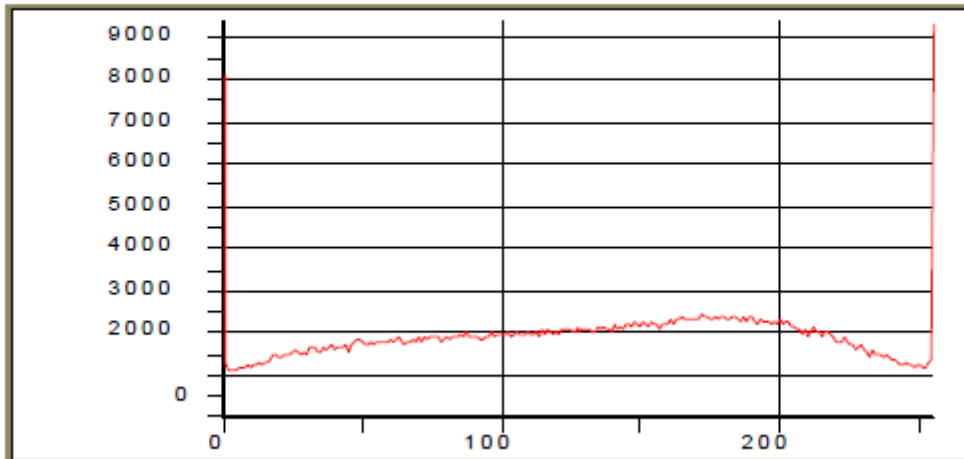
Αρχική Κατάσταση

Προσαρμογή Best Fit

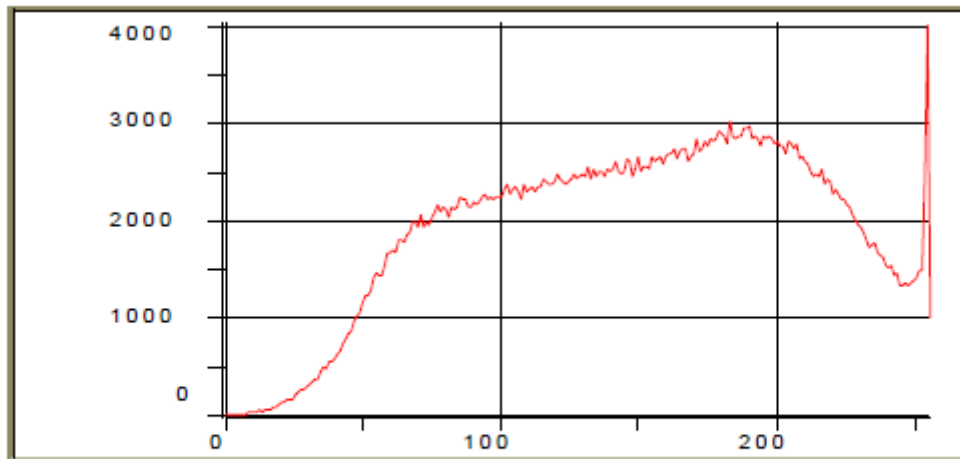


Εικόνα 7.12: Ψευδοχρωματισμένη

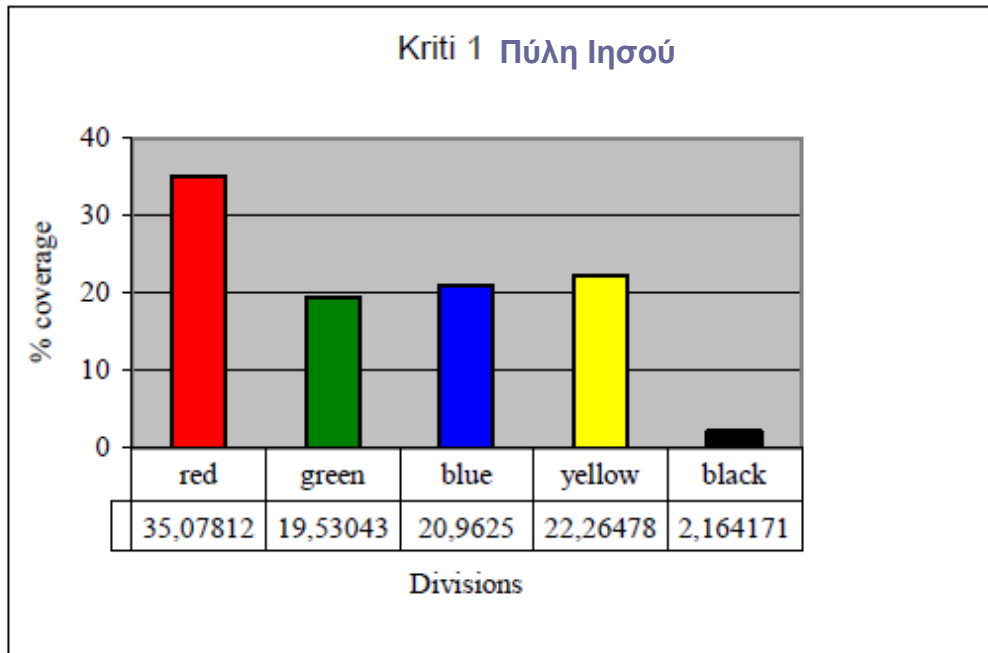
Τα ιστογράμματα της Προσαρμογής και της αρχικής ασπρόμαυρης φωτογραφίας δίνονται στα διαγράμματα 1.1a (εικόνα 7.13) και 1.1b (εικόνα 7.14) αντίστοιχα. Η τυπική απόδοση ψευδοχρωμάτων για αυτήν την ομάδα φωτεινότητας δίνει τα στατιστικά αποτελέσματα του πίνακα Πύλη Ιησού.



Εικόνα 7.13: Ιστόγραμμα Προσαρμογής (Διάγραμμα 1.1.a best fit)



Εικόνα 7.14: Ιστόγραμμα αρχικής εικόνας (Διάγραμμα 1.1b)



Εικόνα 7.15: Διάγραμμα 1.1

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι φανερό ότι: **οι έντονα διαβρωμένες περιοχές** των δομικών υλικών της τοιχοποιίας, δηλαδή (α) λίθοι που πάσχουν από κυψέλωση, φθορά που οδηγεί στην απώλεια υλικού με αποτέλεσμα το σχηματισμό έντονων σπηλαιώσεων και κρατήρων, (β) κονιάματα (ιστορικά-αποκατάστασης) τα οποία έχουν αποσαθρωθεί, εξαιτίας της συνδυαστικής δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης και της διαβρωτικής δράσης των αερίων ρυπαντών, σε τέτοιο βαθμό που τα αρμολογήματα έχουν καταστραφεί και παρουσιάζονται σαν οπές περιμετρικά των λίθων, καθώς και (γ) οι έντονες σπηλαιώσεις λίθων που συμπληρώθηκαν από κονιάματα αποκατάστασης με υψηλή αναλογία τσιμέντου στη συνδετική ύλη, καταλαμβάνουν ~ 35% (απόδοση με **κόκκινο χρώμα**), αποτελώντας τους κύριους τύπους φθοράς της υπό εξέταση τοιχοποιίας.

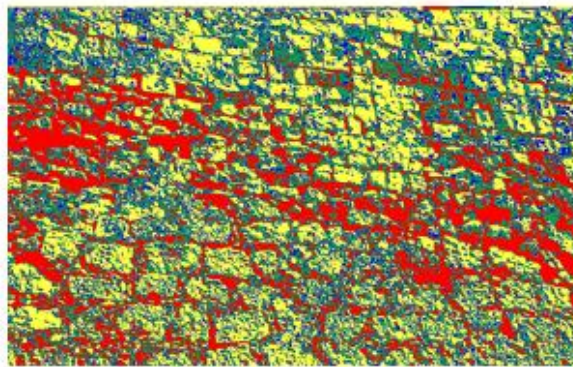
Οι **υγιείς περιοχές του λιθοτύπου**, στις οποίες δεν παρουσιάζεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, καταλαμβάνουν το 22.3% της υπό εξέταση τοιχοποιίας (απόδοση με **κίτρινο χρώμα**), ενώ οι περιοχές των **κρουστών** που σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών της τοιχοποιίας (λίθων και κονιαμάτων) εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τους αέριους ρυπαντές, εκτείνονται σε ποσοστό επιφανείας ~21% (απόδοση με **μπλε χρώμα**), γεγονός που καθιστά το συγκεκριμένο τύπο φθοράς σημαντικό για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

Τέλος, το 19.5% της συνολικής επιφάνειας χαρακτηρίζεται από **μικρού βόθους κρατήρες και οπές** που παρουσιάζονται στους λίθους και στα κονιάματα από την εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης, καθώς και από **μικρής έντασης τραχύτητα**, εξαιτίας των συνεχόμενων αποπλύσεων των αρχιτεκτονικών επιφανειών από τα όμβρια ύδατα, (απόδοση με **πράσινο χρώμα**).

ΘΕΣΗ 2 Πύλη Ιησού

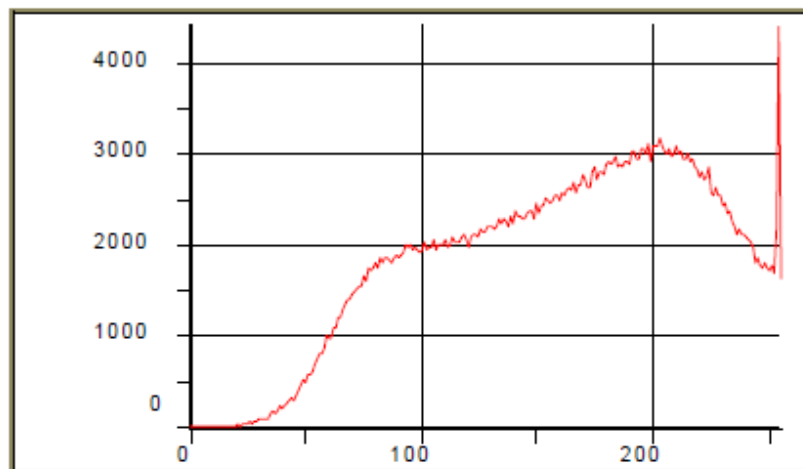


Εικόνα 7.16: Αρχική Φωτογραφία Gray Scale

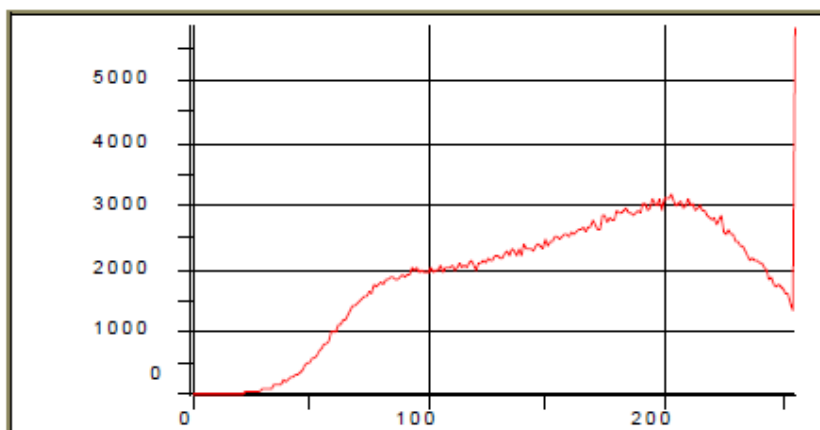


Εικόνα 7.17: Ψευδοχρωματισμένη

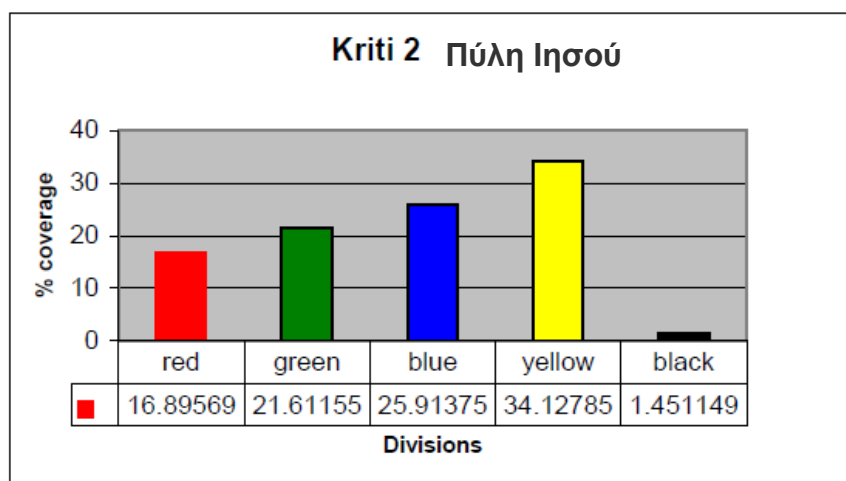
Από τις φωτογραφίες αυτής της ομάδας, η 'Κρήτη 2' παρουσιάζει την μεγαλύτερη απόκλιση από τους μέσους όρους των υπολοίπων. Τα ιστογράμματα της Best fit και της αρχικής ασπρόμαυρης φωτογραφίας δίνονται στα διαγράμματα 1.2a και 1.2b. Η τυπική απόδοση ψευδοχρωμάτων για αυτήν την ομάδα φωτεινότητας δίνει τα στατιστικά αποτελέσματα του πίνακα 2 ΠΥΛΗ ΙΗΣΟΥ.



Εικόνα 7.18: Ιστόγραμμα Προσαρμογής (Διάγραμμα 1.2a best fit)



Εικόνα 7.19: Εικόνα 7.14: Ιστόγραμμα αρχικής εικόνας (Διάγραμμα 1.2b)



Εικόνα 7.20: Διάγραμμα 1.2

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 1.2 (εικόνα 7.20) είναι φανερό ότι: **οι έντονα διαβρωμένες περιοχές** των δομικών υλικών της τοιχοποιίας, δηλαδή (α) λίθοι που πάσχουν από κυψέλωση, φθορά που οδηγεί στην απώλεια υλικού με αποτέλεσμα το σχηματισμό έντονων σπηλαιώσεων και κρατήρων, (β) κονιάματα (ιστορικά-αποκατάστασης) τα οποία έχουν αποσθρωθεί, εξαιτίας της συνδυαστικής δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης και της διαβρωτικής δράσης των αερίων ρυπαντών, σε τέτοιο βαθμό που τα αρμολογήματα έχουν καταστραφεί και παρουσιάζονται σαν οπές περιμετρικά των λίθων, καταλαμβάνουν ~ 17% της συνολικής επιφάνειας του συγκεκριμένου τμήματος της τοιχοποιίας (απόδοση με **κόκκινο χρώμα**).

Οι **υγιείς περιοχές του λιθοτύπου**, στις οποίες δεν παρουσιάζεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό (34.1%) της υπό εξέταση τοιχοποιίας (απόδοση με **κίτρινο χρώμα**), ενώ οι περιοχές των **κρουστών** που σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών της τοιχοποιίας (λίθων και κονιαμάτων) εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τους αέριους ρυπαντές, εκτείνονται σε ποσοστό επιφανείας ~26% (απόδοση με **μπλε χρώμα**), γεγονός που καθιστά το συγκεκριμένο τύπο φθοράς το πιο σημαντικό για το υπό εξέταση τμήμα της τοιχοποιίας.

Τέλος, το 21.6% της συνολικής επιφάνειας χαρακτηρίζεται από **μικρού βάθους κρατήρες και οπές** που παρουσιάζονται στους λίθους και στα κονιάματα από την εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης, καθώς και από **μικρής έντασης τραχύτητα**, εξαιτίας των συνεχόμενων αποπλύσεων των αρχιτεκτονικών τοιχοποιιών από τα όμβρια ύδατα, (απόδοση **με πράσινο χρώμα**), γεγονός που καθιστά τους συγκεκριμένους τύπους φθοράς σημαντικούς για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

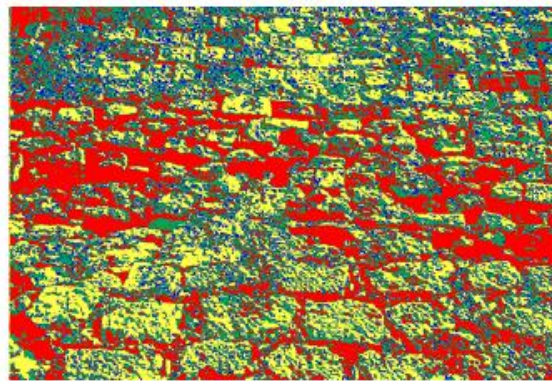
ΘΕΣΗ 3 Πύλη Ιησού



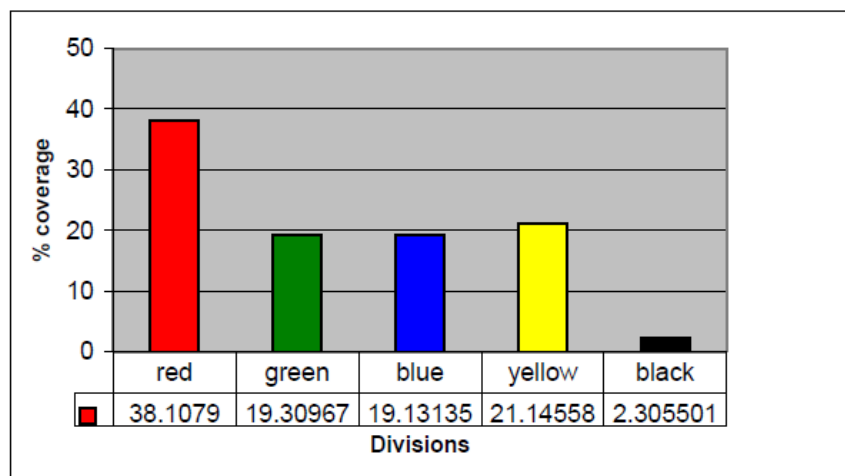
Εικόνα 7.21:

Αρχική Φωτογραφία

Gray Scale



Εικόνα 7.22: Ψευδοχρωματισμένη



Εικόνα 7.23: Διάγραμμα 1.3

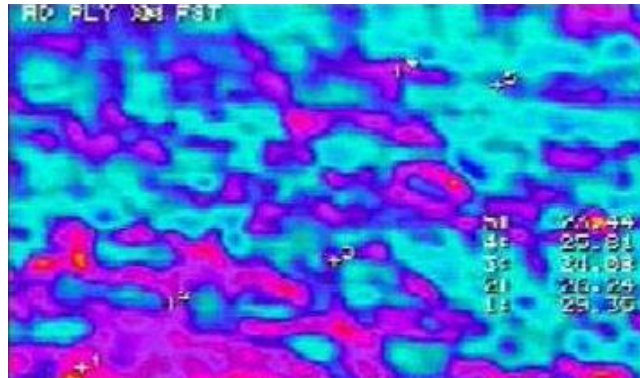
Σύμφωνα με το Διάγραμμα 1.3 (εικόνα 7.23) είναι φανερό ότι: οι έντονα διαβρωμένες περιοχές των δομικών υλικών της τοιχοποιίας, δηλαδή (α) λίθοι που πάσχουν από κυψέλωση, φθορά που οδηγεί στην απώλεια υλικού με αποτέλεσμα το σχηματισμό έντονων σπηλαιώσεων και κρατήρων, (β) κονιάματα (ιστορικά-αποκατάστασης) τα οποία έχουν αποσαθρωθεί, εξαιτίας της συνδυαστικής δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης και της διαβρωτικής δράσης των αερίων ρυπαντών, σε τέτοιο βαθμό που τα αρμολογήματα έχουν καταστραφεί και παρουσιάζονται σαν οπές περιμετρικά των λίθων, καταλαμβάνουν ~ 38% της συνολικής επιφάνειας του συγκεκριμένου τμήματος της τοιχοποιίας (απόδοση με κόκκινο χρώμα), αποτελώντας τον κύριο τύπο φθοράς της.

Οι **υγιείς περιοχές του λιθοτύπου**, στις οποίες δεν παρουσιάζεται σημαντική απώλεια αυθεντικού υλικού, καταλαμβάνουν το 21% της υπό εξέταση τοιχοποιίας (απόδοση με **κίτρινο χρώμα**), ενώ οι περιοχές των **κρουστών** που σχηματίζονται στην επιφάνεια των δομικών υλικών της τοιχοποιίας (λίθων και κονιαμάτων) εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τους αέριους ρυπαντές, εκτείνονται σε ποσοστό επιφανείας ~19% (απόδοση με **μπλε χρώμα**), γεγονός που καθιστά το συγκεκριμένο τύπο φθοράς σημαντικό για το υπό εξέταση τμήμα της τοιχοποιίας.

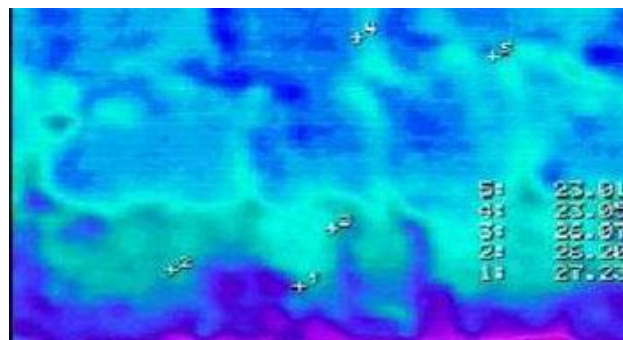
Τέλος, το 19.3% της συνολικής επιφάνειας χαρακτηρίζεται από **μικρού βάθους κρατήρες και οπές** που παρουσιάζονται στους λίθους και στα κονιάματα από την εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης, καθώς και από **μικρής έντασης τραχύτητα**, εξαιτίας των συνεχόμενων αποπλύσεων των αρχιτεκτονικών τοιχοποιιών από τα όμβρια ύδατα, (απόδοση με **πράσινο χρώμα**), γεγονός που καθιστά τους συγκεκριμένους τύπους φθοράς εξίσου σημαντικούς για την υπό εξέταση τοιχοποιία.

8. Διάγνωση Φθοράς, Έλεγχος Συμβατότητας Αρχικών Υλικών και Επεμβάσεων Αποκατάστασης στην Τοιχοποιία με Υπέρυθρη Θερμογραφία

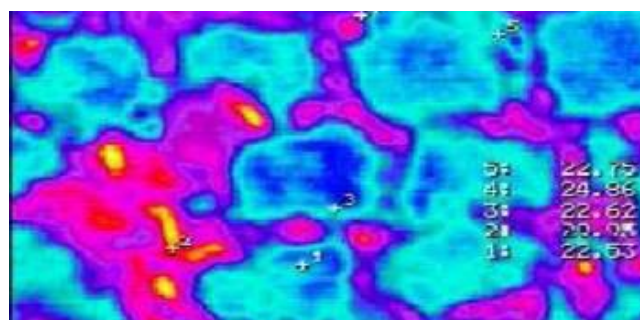
Η διάγνωση της φθοράς των τειχών, σε σχέση με την παραμένουσα υγρασία, έγινε με χρήση Υπέρυθρης Θερμογραφίας (θερμική κάμερα FLIR τύπου ThermoCAM). Στην οθόνη εμφανίζονται οι θερμικές εικόνες για τη υπό εξέταση θέση των Ενετικών Οχυρώσεων **θέση 1**: Επιπρομαχώνας Μαρτινένγκο.



Εικόνα 8.1



Εικόνα 8.2



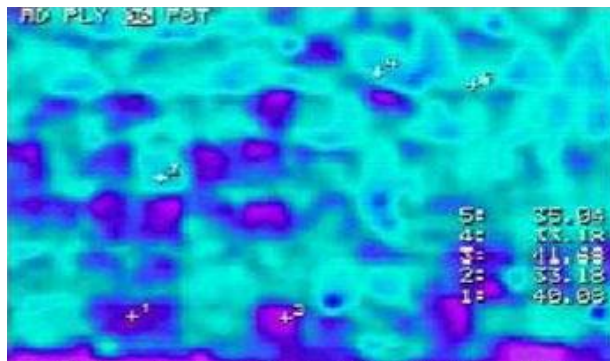
Εικόνα 8.3

Εικόνα 8.1, 8.2 και 8.3 : Θερμικές εικόνες Επιπρομαχώνας Μαρτινένγκο

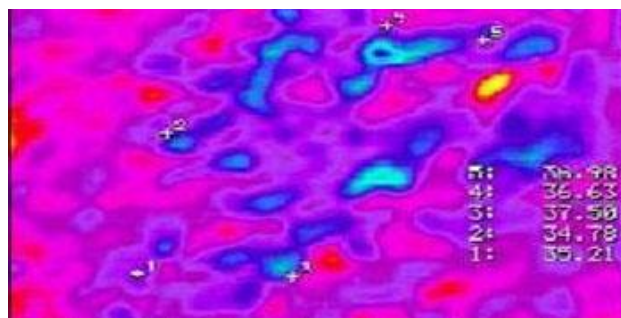


Εικόνα 8.4: Θερμική κλίμακα

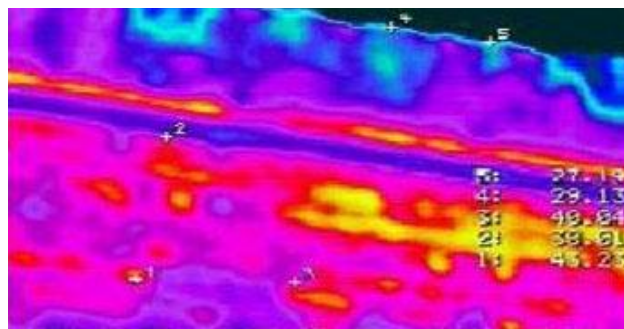
Στην οθόνη εμφανίζονται οι θερμικές εικόνες για τη υπό εξέταση θέση των Ενεντικών Οχυρώσεων **Θέση 2** Πύλη Ιησού.



Εικόνα 8.5



Εικόνα 8.6



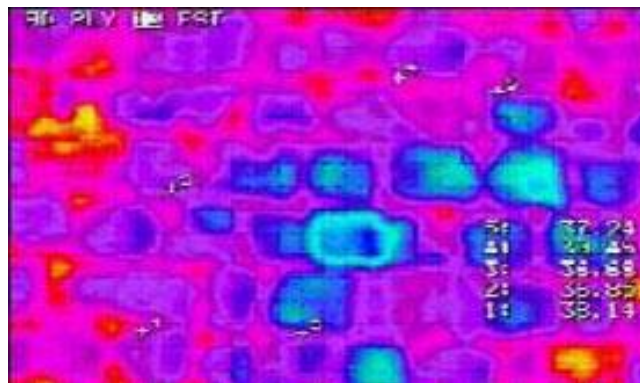
Εικόνα 8.7

Εικόνα 8.5, 8.6 και 8.7: θερμικές εικόνες Θέση 2 Πύλη Ιησού

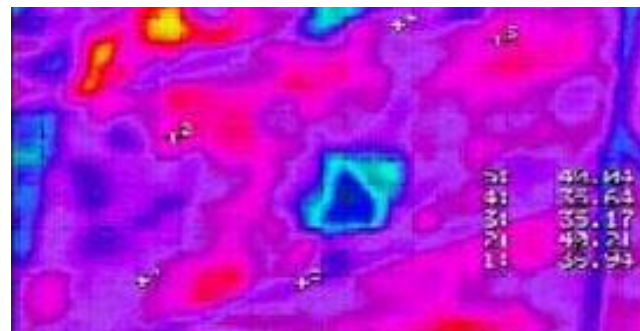


Εικόνα 8.8: Θερμική κλίμακα

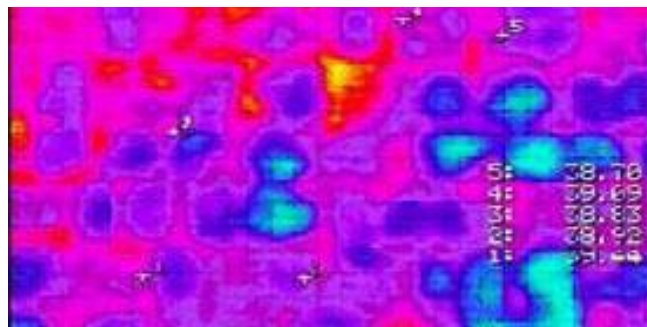
Στην οθόνη εμφανίζονται οι θερμικές εικόνες για τη υπό εξέταση θέση των Ενετικών Οχυρώσεων **Θέση 3: Επιπρομαχώνας Βιττούρι**.



Εικόνα 8.9



Εικόνα 8.10



Εικόνα 8.11

Εικόνα 8.9, 8.10 και 8.11: Θερμικές εικόνες Θέση 3: Επιπρομαχώνας Βιττούρι



Εικόνα 8.12:Θερμική κλίμακα

Όσον αφορά στα θερμογραφήματα που προκύπτουν από την εξέταση της τοιχοποιίας της **Πύλης Ιησού (Θέση 2)**, παρατηρούμε ότι τα τσιμεντιτικά κονιάματα αποκατάστασης, καθώς και τα σημεία εκείνα όπου υπάρχει απόσπαση αυθεντικού υλικού, λόγω της έντονης δράσης του φαινομένου της κυψέλωσης, απεικονίζονται με «θερμά» χρώματα (αποχρώσεις του κόκκινου και κίτρινου), τα οποία και αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες θερμοκρασιακές τιμές. Παράλληλα, οι λίθοι της υπό εξέταση τοιχοποιίας απεικονίζονται με ψυχρότερα χρώματα (αποχρώσεις του μπλε), γεγονός που υποδηλώνει τις χαμηλότερες θερμοκρασιακές τους τιμές, .

Η διαφορετική θερμοκρασιακή κατανομή ανάμεσα στα υλικά της τοιχοποιίας υποδηλώνει διαφορετική κατανομή υγρασίας και αποδεικνύει την **ασυμβατότητα** των ιστορικών δομικών υλικών με τα τσιμεντιτικά κονιάματα αποκατάστασης.

Η ασυμβατότητα τους συνίσταται στους **διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής**, στις **διαφορετικές μηχανικές αντοχές** και κυρίως στη διαφορετική τους **μικροδομή** (συνολικό και ενεργό πορώδες, κατανομή μεγέθους πόρων), γεγονός που συνεπάγεται **διαφορετικούς συντελεστές διαπερατότητας ατμών και συντελεστές υδατοαπορρόφησης**.

Πιο συγκεκριμένα το τσιμέντο, λόγω του χαμηλού του πορώδους «σπρώχνει» τα υδατικά διαλύματα των αλάτων (προερχόμενα από την τριχοειδή αναρρίχηση, την αλατονέφωση, αλλά και από το ίδιο το τσιμέντο, το οποίο αποτελεί σημαντική πηγή αλάτων λόγω της χημικής του σύστασης), στα αυθεντικά υλικά της τοιχοποιίας (λίθους και ιστορικά κονιάματα), που είναι περισσότερο πορώδη υλικά.

Συνεπώς, η πιθανότητα **ανάπτυξης των κρυστάλλων** των αλάτων στους πόρους της πέτρας που μπορεί να οδηγήσει στην διάρρηξη των τοιχωμάτων των πόρων, αυξάνεται (σε συνδυασμό πάντα με τους ρυθμούς εξάτμισης και συμπύκνωσης). Έτσι με την αύξηση της πίεσης κρυστάλλωσης στα τοιχώματα των πόρων από τους αναπτυσσόμενους κρυστάλλους, πραγματοποιείται **ρήξη της συνοχής του συνδετικού υλικού** των κόκκων του πετρώματος με αποτέλεσμα την απόσπαση των κόκκων αυτών.

Η αναπτυσσόμενη πίεση κρυστάλλωσης από τους **αναπτυσσόμενους κρυστάλλους** στα τοιχώματα των πόρων δρα αθροιστικά ως **εφελκυστική τάση** κάθετη στην επιφάνεια της τοιχοποιίας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση ολόκληρων τμημάτων.

Το παραπάνω φαινόμενο σε συνδυασμό με την αιολική δράση περιγράφει τον τύπο φθοράς της **κυψέλωσης**, ο οποίος υφίσταται ούτως ή άλλως σε μια τοιχοποιία αλλά εντείνεται λόγω της **φυσικοχημικής ασυμβατότητας του τσιμέντου**, που έχει χρησιμοποιηθεί ως υλικό αποκατάστασης.

Τα θερμογραφήματα που προκύπτουν από την επί τόπου εξέταση της **θέσεως 1** (τοιχοποιία Επιπρομαχώνας Μαρτινένγκο), απεικονίζουν τα αυθεντικά δομικά υλικά της τοιχοποιίας με σκούρα μπλε χρώματα (χαμηλές θερμοκρασιακές τιμές), ενώ με «θερμότερα» χρώματα (αποχρώσεις του κόκκινου, υψηλές θερμοκρασιακές τιμές) παρουσιάζονται οι αποσαθρωμένες (αποτέλεσμα του φαινομένου της κυψέλωσης), περιοχές,

περίπου στο κέντρο της τοιχοποιίας. Παράλληλα, πολύ θερμές περιοχές παρατηρούνται και στο πάνω δεξί τμήμα της τοιχοποιίας (αποχρώσεις του κίτρινου), γεγονός που οφείλεται στην παρουσία τσιμεντιτικών κονιαμάτων αποκατάστασης ή/και συμπληρώσεων από τσιμέντο, αποδεικνύοντας έτσι για μία ακόμα φορά την ασυμβατότητα μεταξύ του τσιμέντου και των παραδοσιακών δομικών υλικών.

Τέλος, στο πάνω μέρος, κατά μήκος της τοιχοποιίας, διακρίνεται μία σκούρα μπλε – ψυχρή περιοχή, λόγω της παρουσίας φυτικών οργανισμών, που υποδηλώνει την ύπαρξη σημαντικής πηγής υγρασίας.

Τα θερμογραφήματα της επί τόπου πιλοτικής εφαρμογής στην τοιχοποιία του **(Θέση 3)** Επιπρομαχώνας Βιτούρι αποδίδουν και πάλι τα τσιμεντιτικά κονιάματα αποκατάστασης με «θερμότερα» χρώματα (αποχρώσεις του κόκκινου και κίτρινου), σε σχέση με τους λίθους, όπου παρουσιάζονται με πιο σκούρα – «ψυχρά» χρώματα (αποχρώσεις του μπλε και μωβ). Για μία φορά ακόμα, παρατηρείται η ασυμβατότητα του τσιμέντου με τα υπόλοιπα δομικά υλικά της τοιχοποιίας, αφού παρεμποδίζει την «αναπνοή» της τοιχοποιίας, δηλαδή την ελεύθερη μεταφορά ατμών.

Στα θερμογραφήματα με «θερμά» χρώματα (υψηλές θερμοκρασίες), αποδίδονται οι περιοχές των αποσαθρωμένων δομικών υλικών. Η έντονη αιολική δράση, λόγω του προσανατολισμού των τοιχοποιιών του προμαχώνα, καθώς και η διαβροχή τους από τα θαλάσσια αερολύματα (αλατονέφωση), ευνοεί την έντονη ανάπτυξη της φθοράς της κυψέλωσης και συνεπώς την απομείωση του αυθεντικού υλικού και το σχηματισμό κρατήρων και σπηλαιώσεων.

Μέσω αλατονέφωσης διαλυτά άλατα όπως γλωριούχο νάτριο και θειικό νάτριο μεταφέρονται στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, όπου αποτίθενται και τελικά ανάλογα με τα φαινόμενα συμπύκνωσης και εξάτμισης κρυσταλλώνονται. Κατά την αύξηση του μεγέθους των κρυστάλλων των αλάτων, αναπτύσσονται ισχυρές πιέσεις στα τοιχώματα των πόρων (συνολικά εφελκιστικές τάσεις κάθετες στην επιφάνεια της πέτρας), που οδηγούν στη διάρρηξη της πέτρας. Τέλος, με μπλε χρώμα (ψυχρότερες περιοχές – χαμηλότερες θερμοκρασίες), παρατηρούνται τα λιγότερο αποσαθρωμένα τμήματα της εξεταζόμενης τοιχοποιίας.

9. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται στην περίπτωση της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας (DIP) και πριν το σχολιασμό τους, αναπτύσσεται δε όλη η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ακριβέστερη χαρτογράφηση της φθοράς από την ψηφιοποίηση των φωτογραφιών των εξεταζόμενων θέσεων.

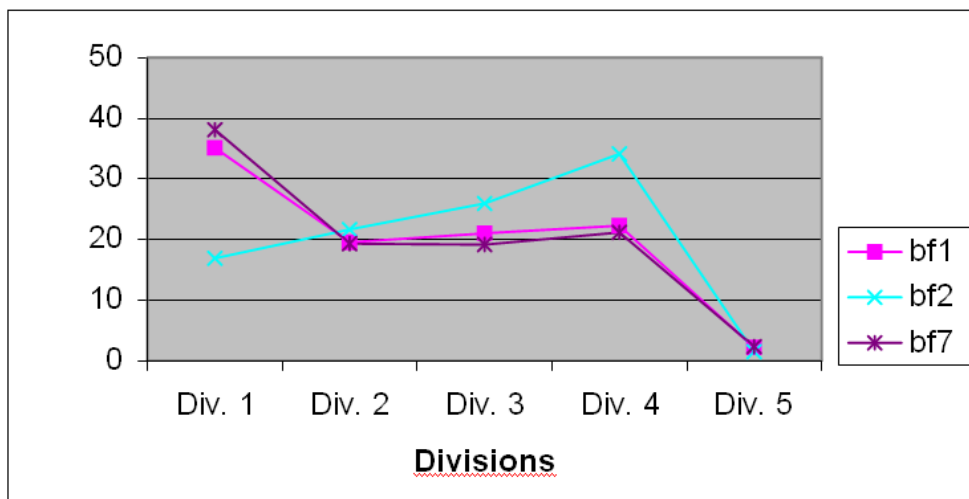
Ακολουθεί σύντομη ανάλυση των αποτελεσμάτων των αντίστοιχων μετρήσεων για κάθε εξεταζόμενη θέση, σε συνδυασμό πάντα με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την χρήση θερμικής κάμερας.

9.1. Συγκριτική εξέταση αποτελεσμάτων

Η ως τώρα επεξεργασία των δεδομένων με βάση τις υπάρχουσες φωτογραφίες δίνει τη δυνατότητα για σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους καθώς και εκτιμά την αξιοπιστία της μεθόδου σε σχέση με τα ήδη γνωστά από προηγούμενες μελέτες χαρακτηριστικά των τοιχοποιιών. Τα συμπεράσματα έχουν ως εξής:

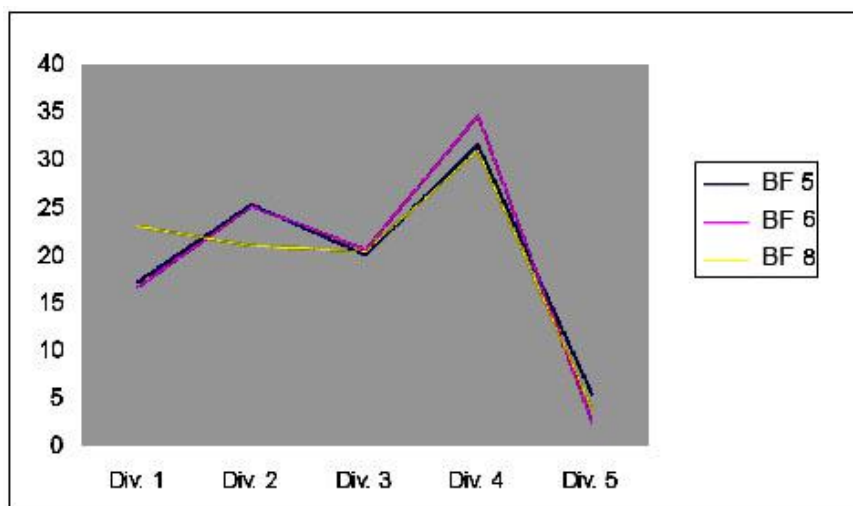
Η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, όπως αυτή εφαρμόστηκε, ομαδοποίησε σαφώς τις φωτογραφίες σύμφωνα με την περιοχή προέλευσής τους, όπως είναι φανερό από τα συγκριτικά διαγράμματα ποσοστών κάλυψης ανά χρώμα. Με άλλα λόγια, τοιχοποιίες με κοινά χαρακτηριστικά έχουν και παρόμοιο στατιστικό ανάπτυγμα ως προς τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν.

Έτσι, ήδη η αρχική ομαδοποίηση, με βάση την μέση φωτεινότητα best fit, τις χώρισε όπως είδαμε στις κατηγορίες της χαμηλής και υψηλής φωτεινότητας. Οι φωτογραφίες της πρώτης ομάδας, προέρχονται όλες από τοιχοποιία της Πύλης Ιησού. Τα ποσοστά κάλυψης για κάθε ψευδοχρώμα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου διαφαίνεται ο σχηματισμός δυάδας συσχετισμού για τις bf1 (Εικόνες 6.11& 6.12) ενώ η bf2 αποκλίνει από τις μέσες για την ομάδα τιμές, ιδίως όσον αφορά στα ποσοστά του κόκκινου χρώματος (έντονα διαβρωμένες περιοχές) και του κίτρινου χρώματος (υγιείς περιοχές του λίθου). (βλ. Εικόνα 9.1 Διάγραμμα1.4).



Εικόνα 9.1: Διάγραμμα 1.4 Επί τοις εκατό κάλυψη ανά ψευδόχρωμα (division) για τις φωτογραφίες της ομάδας χαμηλής φωτεινότητας.

Σχετικά με την ομάδα υψηλής φωτεινότητας δυαδική συσχέτιση σχηματίζουν οι bf5 και bf6 (Εικόνες 6.10), οι οποίες και προέρχονται από τη θέση 3: Επιπρομαχώνας Βιττούρι οσον αφορά στη bf8, που προέρχεται από τη θέση εξέτασης Επιπρομαχώνας Μαρτινένγκο, παρατηρούμε μεγάλες αποκλίσεις από τις μέσες για την ομάδα τιμές, στα ποσοστά του κόκκινου χρώματος (έντονα διαβρωμένες περιοχές) και μικρότερες στα ποσοστά του πράσινου χρώματος, ενώ για το κίτρινο και μπλε παρατηρείται τριαδική συσχέτιση για τις bf5, bf6 και bf8 (βλ. Εικόνα 9.2, Διάγραμμα2.4).



Εικόνα 9.2: Διάγραμμα 2.4 Επί τοις εκατό κάλυψη ανά ψευδόχρωμα (division) για τις φωτογραφίες της ομάδας υψηλής φωτεινότητας

9.2. Συμπεράσματα

Συνεπώς από την προκύπτουσα χαρτογράφηση της υπό εξέταση **Θέση 2: Πύλη Ιησού**, μέσω ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας προκύπτει ότι σημαντικότερος τύπος φθοράς των δομικών υλικών της συγκεκριμένης τοιχοποιίας είναι η κυψέλωση, ενώ δεν πρέπει να αγνοηθεί η εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης (πράσινο χρώμα), του οποίου η διαβρωτική δράση πρέπει να περιοριστεί σημαντικά, αφού η πλήρης ανατροπή του δεν είναι εφικτή.

Σχετικά με τμήματα της τοιχοποιίας όπου το ποσοστό των υγιών λίθων είναι σημαντικό (Εικόνα 8.1-8.11) σπουδαιότερος τύπος φθοράς καθίσταται η φαιόμαυρη κρούστα (μπλέ χρώμα), ενώ και πάλι δεν πρέπει να αγνοηθεί η εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης.

Για την υπό εξέταση Θέση 1: Επιπρομαχώνας Μαρτινένγκο προκύπτει ότι η κυψέλωση (εν δυνάμει ή πλήρως ανεπτυγμένη), αποτελεί τον κυριότερο φθοράς, ενώ οφείλουμε να λάβουμε σοβαρά υπόψη τους σχηματισμούς κρουστών οι οποίοι στο άμεσο μέλλον μπορεί να μετατραπούν σε πρωτεύον παράγοντα φθοράς.

Επίσης, για την υπό εξέταση **Θέση 3: Επιπρομαχώνας Βιττούρι**, η οποία βρίσκεται σε σχετικά καλύτερη κατάσταση από τις υπόλοιπες θέσεις εξέτασης, σημαντικότερος τύπος φθοράς είναι η εν δυνάμει ανάπτυξη του φαινομένου της κυψέλωσης (πράσινο χρώμα), το οποίο προκαλείται λόγω φυσικοχημικής ασυμβατότητας τσιμεντιτικών κονιαμάτων αποκατάστασης και αυθεντικών δομικών υλικών. Τέλος, λόγω του υψηλού ενεργειακού περιεχομένου της συγκεκριμένης τοιχοποιίας (το υγιές τμήμα της αποδίδεται με 33.5%) οι σχηματισμοί κρουστών καθίστανται σε σημαντικούς διαβρωτικούς παράγοντες για το μέλλον, γι' αυτό και θα πρέπει να αντιμετωπιστούν άμεσα.

Άρα, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων είναι μια καινούργια και γρήγορα εξελισσόμενη μέθοδος για την επεξεργασία δεδομένων που αφορούν στην συντήρηση και διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Ήδη, στα πλαίσια της παρούσας πιλοτικής εφαρμογής, παρουσιάζει μια σειρά από δυσαναπλήρωτα πλεονεκτήματα:

- Γρήγορη εκτίμηση των ποσοστών της επιφάνειας που υπόκεινται σε συγκεκριμένους τύπους φθοράς.
- Ακρίβεια στην αναπαράσταση με ψευδοχρώματα των φθαρμένων τμημάτων της υπό εξέταση επιφάνειας, η οποία δύσκολα θα μπορούσε να αναπαραχθεί με το χέρι στον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας.
- Κατ' αρχήν δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασης και της έκτασης των φθορών μιας αρχιτεκτονικής επιφάνειας με ελάχιστο αρχικό κόστος και σχεδόν σε πραγματικό χρόνο.
- Δυνατότητα ποσοτικής σύγκρισης τοιχοποιιών ή/και αρχιτεκτονικών επιφανειών απομακρυσμένων χωρικά, με σκοπό την εκτίμηση των περιβαλλοντικών ή

ανθρωπογενών αιτίων των φθορών ανά περιοχή. Φυσικά, αυτή η δυνατότητα συνδέεται με την ύπαρξη ή τη δημιουργία και μιας κατάλληλης βάσης δεδομένων.

Με βάση τα ποσοστά που έχουν εξαχθεί για κάθε τύπο φθοράς, θα μπορούσε να γίνει μια πρώτη εκτίμηση του κόστους συντήρησης, συνυπολογίζοντας το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας, σε σχέση με τους τύπους φθοράς και το κόστος των προτεινόμενων υλικών και επεμβάσεων συντήρησης για κάθε έναν από αυτούς.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

10.1. Στρατηγικός Σχεδιασμός Επεμβάσεων Συντήρησης

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και με κύριο γνώμονα την ποσοτικοποίηση του κάθε τύπου φθοράς για κάθε μία από τις υπό εξέταση επιφάνειες, όπως αυτή προέκυψε από τη χαρτογράφηση φθοράς μέσω της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας, συμπεραίνουμε ότι ο κύριος τύπος φθοράς των Ενετικών Οχυρώσεων της πόλης του Ηρακλείου, που πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα, είναι η κυψέλωση.

Είτε σε πλήρη ανάπτυξη, (εμφάνιση κρατήρων, σπηλαιώσεων, οπών, κ.λπ.), είτε εν δυνάμει, η κυψέλωση προκαλείται αναπόφευκτα από την κρυστάλλωση των διαλυτών αλάτων.

Αυτά προέρχονται από το θαλάσσιο περιβάλλον, την τριχοειδή αναρρίχηση αλλά και από τα τσιμεντιτικά κονιάματα αποκατάστασης, τα οποία αποτελούν σημαντική πηγή διαλυτών αλάτων λόγω της χημικής τους σύστασης.

Είναι λοιπόν προφανές ότι για να αποκατασταθεί η ανθεκτικότητα των δομικών υλικών των τοιχοποιιών πρέπει να λάβουν χώρα:

- Επεμβάσεις στερέωσης με υλικά συμβατά, όσον αφορά στα φυσικά χαρακτηριστικά, τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των λίθων

και

- Εφαρμογή νέων κονιαμάτων αποκατάστασης πλήρως συμβατών με τα ιστορικά δομικά υλικά της τοιχοποιίας (λίθοι – κονιάματα).

Πιο συγκεκριμένα, οι **επεμβάσεις στερέωσης** αποσκοπούν στην αποκατάσταση της συνοχής μεταξύ των κόκκων των διαβρωμένων λίθων, στην αύξηση της φυσικοχημικής ανθεκτικότητάς τους σε αίτια φθοράς, τα οποία σχετίζονται άμεσα με την κρυστάλλωση αλάτων στο εσωτερικό του λίθου (οι εφαρμογές στοχεύουν σε κατάλληλες τροποποιήσεις της μικροδομής του λίθου, έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση της επιδεκτικότητας στα συγκεκριμένα αίτια φθοράς), καθώς και στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των λίθων.

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανεξέλεγκτη και αρκετά εκτεταμένη χρήση του τσιμέντου, δεν έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω της περιορισμένης συμβατότητάς του με τα αυθεντικά υλικά των λιθοδομών και της υψηλής περιεκτικότητας του σε ευδιάλυτα άλατα, θα πρέπει να αναζητηθούν **νέα κονιάματα αποκατάστασης** με χαρακτηριστικά και ιδιότητες κατά το δυνατόν όμοιες με αυτές των υλικών που θα αντικατασταθούν, θα συμπληρωθούν και θα αποκατασταθούν.

Συνεπώς, κρίνονται απαραίτητες:

1. **Μια ολοκληρωμένη πρόταση εφαρμογής υλικών στερέωσης πιλοτικής κλίμακας, σε επιλεγμένες περιοχές των Ενετικών Τειχών του Ηρακλείου.**
2. **Μια ολοκληρωμένη πρόταση σύνθεσης και εφαρμογής κονιαμάτων αποκατάστασης για τα Ενετικά Τείχη του Ηρακλείου**

10.2. Πρόταση εφαρμογής υλικών στερέωσης πιλοτικής κλίμακας, σε επιλεγμένες περιοχές των Ενετικών Τειχών του Ηρακλείου

Οι εφαρμογές υλικών στερέωσης προτείνεται να πραγματοποιηθούν σε επιλεγμένες - λόγω των έντονων προβλημάτων κυψέλωσης που παρουσιάζουν- περιοχές των Ενετικών Τειχών της πόλης του Ηρακλείου. Οι επεμβάσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν μετά από εργαστηριακές εξετάσεις και εφαρμογές, οι οποίες θα βοηθήσουν σε μεγάλο βαθμό τις μετέπειτα εφαρμογές πεδίου, όσον αφορά την επιλογή των θέσεων εφαρμογής, των πλέον κατάλληλων υλικών στερέωσης καθώς και της βέλτιστης τεχνικής εφαρμογής των υλικών. Αμέσως παρακάτω, παρατίθενται η μεθοδολογία της επίτευξης των εφαρμογών υλικών στερέωσης.

10.2.1. Επιλογή θέσεων εφαρμογής

Οι επεμβάσεις στερέωσης πρόκειται να πραγματοποιηθούν σε περιοχές των τειχών, όπου έχει διαπιστωθεί με εξέταση δειγμάτων ή με τη χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών εξέτασης των υλικών, ότι υπάρχουν σαφή προβλήματα διάβρωσης όπως π.χ. Πύλη Ιησού, Επιπρομαχώνας Βιττούρι, Επιπρομαχώνας Σαμπιονάρα, ή/και σε άλλες αντιπροσωπευτικές επιφάνειες.

10.2.2. Εργαστηριακές εφαρμογές υλικών στερέωσης

Κατά την πρώτη φάση πραγματοποιείται εφαρμογή υλικών στερέωσης σε εργαστηριακή κλίμακα. Οι εφαρμογές αυτές προτείνεται να γίνουν σε κυβικά δοκίμια (π.χ. 5x5x5 cm) προερχόμενα από καταρρεύσεις της τοιχοποιίας.

Οι τεχνικές εφαρμογής που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι η τριχοειδής αναρρίχηση (η

μεταφορά των διαλυμάτων γίνεται μέσω των τριχοειδών πόρων του λίθου) και η εμβάπτιση δοκιμίων σε διάλυμα του υλικού στερέωσης.

Υλικά στερέωσης

Τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εργαστηριακή κλίμακα θα είναι δύο κατηγοριών:

- Υλικά που έχουν κατά κόρον χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε επεμβάσεις στερέωσης. Οι **πυριτικοί αιθυλεστέρες** π.χ. παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία συνοψίζονται στη συμβατότητα που παρουσιάζουν με συγκεκριμένα είδη λίθων και στην ικανότητα που διαθέτουν να διεισδύουν σε βάθος (η χημική σταθερότητα που παρουσιάζουν μετά την εφαρμογή τους σε λίθους πηγάζει από τους δεσμούς Si-O-Si). Επίσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και κάποιες “ήπιες” μορφές **ρητινών** (π.χ. ακρυλο-σιλικονική ρητίνη), έτσι ώστε να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα αυτών (όπως αύξηση μηχανικών αντοχών του λίθου) και συγχρόνως να αποφευχθούν –αν αυτό είναι δυνατό– τα ιδιαίτερης σημασίας προβλήματα που παρουσιάζουν (το σημαντικότερο από τα οποία είναι οι συνθήκες ασυμβατότητας που επιφέρουν στο σύνθετο υλικό λίθος-υλικό στερέωσης).
- **Προηγμένα υλικά στερέωσης.** Αυτή η κατηγορία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού εδώ κατατάσσονται ορισμένα από τα πλέον εξελιγμένα υλικά στερέωσης. Τα υλικά αυτά επικεντρώνουν τα χαρακτηριστικά τους στο ότι παράγονται έχοντας ως συστατικό βάση την πυριτία, καθώς και στο ότι χαρακτηρίζονται από το σχηματισμό μιας άμορφης φάσης πυριτίας μετά την εφαρμογή τους στο λίθο.
Τα πλέον σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν συνοψίζονται στη συμβατότητά τους, στην ανθεκτικότητά τους και στο ικανοποιητικό βάθος διείσδυσης. Σημαντικό δε στοιχείο, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τα παραπάνω πλεονεκτήματα, θεωρείται το ότι ακολουθούν το μηχανισμό απόθεσης στα τοιχώματα των πόρων και όχι το φιλμογενή μηχανισμό, ο οποίος οδηγεί στον επιφανειακό σχηματισμό φιλμ φράζοντας πόρους και μη επιτρέποντας έτσι στο λίθο να «αναπνέει».

Η επιτελεστικότητα των υλικών στερέωσης που εφαρμόστηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα, στη συνέχεια εξετάζεται με διάφορες τεχνικές και μεθόδους. Οι κυριότερες απ’ αυτές είναι η Ποροσιμετρία Υδραργύρου, η Φασματοσκοπία Υπερύθρου Μετασχηματισμού Fourier, η εξέταση στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, ο υπολογισμός του Συντελεστή Υδατοαπορρόφησης, ο υπολογισμός του Συντελεστή Θερμικής Διαστολής (Θερμομηχανική ανάλυση).

10.2.3. Επιτόπου εφαρμογή υλικών στερέωσης

Έχοντας επιλέξει τις αντιπροσωπευτικές -λόγω μικροκλιματικών συνθηκών και τύπων φθοράς- θέσεις εφαρμογών πεδίου, θα πραγματοποιηθούν οι in situ επεμβάσεις στερέωσης.

Οι εργαστηριακές εφαρμογές και τα πορίσματα αυτών πρόκειται να κατευθύνουν τις επιτόπου εφαρμογές, όσον αφορά την επιλογή του πλέον κατάλληλου υλικού στερέωσης, καθώς και την επιλογή της τεχνικής εφαρμογής του (ο ψεκασμός θεωρείται από τις πλέον κατάλληλες τεχνικές εφαρμογής σε ανάλογες επεμβάσεις πεδίου).

Μετά την ολοκλήρωση των εφαρμογών, σπουδαιότατο και αναπόσπαστο κομμάτι της επέμβασης στερέωσης αποτελεί η παρακολούθηση της επέμβασης στο χρόνο και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την αποτελεσματικότητά της. Η αποτίμηση των εφαρμογών πραγματοποιείται βάσει μη καταστρεπτικών τεχνικών εξέτασης (Θερμογραφία Υπερύθρου, Μικροσκοπία ΟπτικώνΙνών, Υπερηχοσκόπηση, Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας), καθώς και εξέταση δειγμάτων στο εργαστήριο (Ποροσιμετρία Υδραργύρου, Φασματοσκοπία ΥπερύθρουΜετασχηματισμού Fourier, Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης).

10.3. Πρόταση για τη σύνθεση και εφαρμογή κονιαμάτων αποκατάστασης για τα Ενετικά Τείχη της πόλης του Ηρακλείου

Ένα τέτοιο πρόγραμμα έρευνας – μελέτης στοχεύει στη σύνθεση και στον έλεγχο κονιαμάτων και επιχρισμάτων αποκατάστασης συμβατών με τα πορώδη δομικά υλικά των λιθοδομών των ενετικών οχυρώσεων της πόλης του Ηρακλείου, τα οποία να μοιάζουν με τα παλιά παραδοσιακά κονιάματα και να τα βελτιώνουν, ώστε να ανταποκρίνονται στις έντονες περιβαλλοντικές δράσεις και στις υψηλές μηχανικές καταπονήσεις. Η σκοπιμότητά του απορρέει από το γεγονός ότι τα αυθεντικά κονιάματα, επιχρίσματα, τα οποία έχουν διαβρωθεί λόγω φυσικών περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως κρυστάλλωση διαλυτών αλάτων και όξινη προσβολή από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, πρέπει να αντικατασταθούν.

Στην Ελλάδα (Κρήτη, Κέρκυρα, Ρόδος, Άθως κ.λπ.), όπου η τέχνη δόμησης και παρασκευής κονιαμάτων άνθισε από την αρχαιότητα (Κλασική Περίοδος, Ρωμαϊκή, Ελληνιστική έως Βυζαντινή, Ενετική και Μεσαιωνική), έχει βρεθεί και μελετηθεί μία μεγάλη ποικιλία ιστορικών κονιαμάτων που αντιμετωπίζουν τα παραπάνω προβλήματα, επιδεικνύοντας αξιοσημείωτες αντοχές (μηχανικές και φυσικοχημικές) οπότε και καθίσταται δυνατή η αποτίμηση των παραδοσιακών κονιαμάτων (ασβεστιτικών ή από υδραυλική άσβεστο και ενεργά αδρανή, όπως τα θραύσματα κεραμικού υλικού, ποζολανικά – ηφαιστιογενή πρόσθετα κ.λπ.), και η βελτίωση τους.

Με βάση τα δεδομένα της μέχρι στιγμής ανάλυσης παραδοσιακών κονιαμάτων από τις

Ενετικές Οχυρώσεις του Ηρακλείου και άλλα ιστορικά κτίρια της Κρήτης, που αναφέρονται στη σύσταση, αναλογίες των πρώτων υλών, στον προσδιορισμό και αποτίμηση των χημικών και φυσικο-χημικών χαρακτηριστικών καθώς και στην συμπεριφορά τους σχετικά με τη διαβρωτική-περιβαλλοντική δράση, οι στόχοι και τα αναμενόμενα αποτελέσματα του προγράμματος είναι:

- Η δοκιμή συνθέσεων νέων υλικών αποκατάστασης, που να προσομοιώνουν τα παραδοσιακά, να είναι συμβατά προς τις φέρουσες τοιχοποιίες και να ανταποκρίνονται θετικά στις περιβαλλοντικές φθορές και στις μηχανικές καταπονήσεις.
- Η ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθόδου, όσον αφορά τα υλικά και την τεχνολογία παρασκευής τους και η προτυποποίηση, αλλά και ο έλεγχος τους.
- Η παραγωγή τους σε ημι-βιομηχανική κλίμακα και η πιλοτική εφαρμογή τους στις οχυρώσεις των Ενετικών Τειχών στην Πόλη του Ηρακλείου, έτσι ώστε να συγκεντρωθούν με την πάροδο του χρόνου και μετά από διαρκή έλεγχο πρόσθετες τεχνικές παρατηρήσεις.

Η επιστημονική μεθοδολογία που προτείνεται που προτείνεται συνίσταται στα ακόλουθα στάδια:

- Σύνθεση διαφόρων κονιαμάτων αποκατάστασης και μέτρηση των θεμελιωδών τεχνικών χαρακτηριστικών τους με βάση τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα των μελετών των κονιαμάτων από τα Ενετικά Τείχη του Ηρακλείου.
- Αποτίμηση της συμπεριφοράς των κονιαμάτων αποκατάστασης, με τη μέθοδο της προσομοίωσης στο εργαστήριο.
- Αποτίμηση της συμπεριφοράς των κονιαμάτων επί τόπου.
- Σύνθεση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων, αξιολόγηση και επιλογή των υλικών και της τεχνολογίας των κονιαμάτων αποκατάστασης.
- Συσχέτιση των φυσικών, ορυκτολογικών, μηχανικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών μικροδομής, σχετικά με τη συνάφειά τους, την αντοχή τους στην περιβαλλοντική διάβρωση και τις μηχανικές καταπονήσεις.

Τα στάδια που απαιτούνται για την σύνθεση των βέλτιστων κονιαμάτων αποκατάστασης, περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

10.4. Δοκιμές Επιταχυνόμενης Γήρανσης

Τέλος, όσον αφορά στους **σηματισμούς των κρουστών**, που στο μέλλον μπορεί να αποτελέσουν κυρίαρχους παράγοντες φθοράς λόγω της αυξανόμενης ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αυτοί πρέπει να απομακρυνθούν.

Η απομάκρυνσή τους καθίσταται αναγκαία για αισθητικούς, φυσικούς και φυσικοχημικούς λόγους, για την ανάδειξη και προβολή της καλλιτεχνικής αξίας του μνημειακού συνόλου, καθώς και για να επιτελεστεί ενεργειακή αναβάθμιση στη φθαρμένη επιφάνεια, με τη

μικρότερη όμως δυνατή τραχύτητα, (και συνεπώς με τη μικρότερη δυνατή ειδική επιφάνεια) και άρα τη μικρότερη δυνατή επιδεκτικότητα στις νέες διεργασίες φθοράς.

Συνεπώς προτείνεται η πραγματοποίηση:

Επεμβάσεων καθαρισμού με υλικά και μεθόδους συμβατές με τα δομικά υλικά της τοιχοποιίας βάσει δεδομένων κριτηρίων εφαρμογής και επιλογής των κατάλληλων μεθόδων. Η γενική μεθοδολογία και τα κριτήρια εφαρμογής των επεμβάσεων καθαρισμού τα οποία θα πρέπει να ακολουθηθούν και στην περίπτωση των Ενετικών Τειχών του Ηρακλείου συνίστανται στα εξής:

1. Οι επεμβάσεις καθαρισμού δεν πρέπει να προκαλούν άμεσες ή έμμεσες φθορές στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες, αλλά να τις καθιστούν καθαρές και λείες (δηλαδή να επιφέρουν όσο το δυνατό μικρότερη τραχύτητα, άρα η καθαρισμένη επιφάνεια θα διαθέτει τη μικρότερη δυνατή ειδική επιφάνεια και άρα τη μικρότερη δυνατή επιδεκτικότητα στη φθορά), χωρίς τρύπες και ρωγμές, ενώ παράλληλα να μην προκαλούν διεύρυνση των ήδη υπάρχουσων ρωγμών ή απώλεια του αυθεντικού υλικού.
2. Πρέπει να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ισορροπία ανάμεσα στην ηθική της αισθητικής σύμφωνα με τους διεθνείς χάρτες (Αθήνα, Βενετία) και την επιστημονική προσέγγιση που αποβλέπει στη μείωση της ταχύτητας της φθοράς επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την καλύτερη δυνατή διατήρηση της αυθεντικής πάτινας και των πολυχρωμιών.
3. Δεν πρέπει να ευνοούν τη δημιουργία επιβλαβών παραπροϊόντων - υπολειμμάτων (π.χ. διαλυτά άλατα), τα οποία μπορεί να επηρεάσουν τις περαιτέρω επεμβάσεις συντήρησης, ή/και να αποτελέσουν ενεργά κέντρα νέας φθοράς.
4. Πρέπει να διαθέτουν ελεγχόμενη ταχύτητα δράσης, έτσι ώστε ο συντηρητής να μπορεί να ελέγξει, να προσαρμόσει ή να διακόψει την επέμβαση καθαρισμού άμεσα και έγκαιρα.
5. Πρέπει να εφαρμόζονται από έμπειρο και καλά εκπαιδευμένο προσωπικό (συντηρητές).
6. Πρέπει η επιλογή της ή των κατάλληλων μεθόδων καθαρισμού (ανάλογα με το λιθότυπο και τους τύπους φθοράς) να γίνεται μετά από πιλοτική εφαρμογή κάποιων μεθόδων καθαρισμού και προσεκτικής αποτίμησης τους.
7. Στις έντονα διαβρωμένες επιφάνειες πριν την πραγματοποίηση των επεμβάσεων καθαρισμού, κρίνονται αναγκαίες οι επεμβάσεις προστερέωσης.

Επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

1. Η χημική και ορυκτολογική δομή του υλικού.
2. Το πορώδες.
3. Ο τύπος και η ένταση της φθοράς.

4. Το είδος των αποθέσεων που πρέπει να απομακρυνθούν.
5. Το είδος της επιφάνειας (ανάγλυφη, με γλυπτούς διακόσμους, επίπεδη, πολυχρωμίες, κ.α.)
6. Το ιστορικό και καλλιτεχνικό ενδιαφέρον της κατασκευής.
7. Το κόστος και η διάρκεια της επέμβασης του καθαρισμού, καθώς και η εποχή του χρόνου κατά την οποία πραγματοποιούνται. Είναι προφανές ότι η παράμετρος (7) είναι άμεσα συνυφασμένη με την προηγούμενη (6).

11. Βιβλιογραφία

1. Kanakidou M. and F. Dulac, 1990-1995 air-flow climatology at the sampling station of Finokalia, Crete, Technical report to UE DGXII Environment and Climate 1994-1998 Programme, contract No. ENV4-CT95-0036 (Centre des Faibles Radioactivités, Gif-Sur-Yvette) December 1996.
2. Gonzalez, Rafael C. «Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας», Εκδόσεις Τζιολα 2010
3. Horie, C. V., Materials for conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings, Architectural press, Gr. Britain 1998.
4. “Stone Decay and Conservation”, G. Amoroso and V. Fassina, Elsevier Science, Amsterdam, 1983.
5. “The Deterioration of Monuments”, Special Issue, The Science of the Total Environment, vol. 167, 1995.
6. Moropoulou, A., Kouï, M., Kourteli, Ch., Papasotiriou, D., Theoulakis, P., Tsiourva, Th., Achilleopoulos, N., Karakantas, Ch., Romanos, A., Tokatlidou, K., Koliadis, Th., Zarifis, N., Van Grieken, R., Delalieux, F., Silva, B., Molina, E., Vicente, M.A., Vicente, S., Macri, F., Zezza, F., “Techniques and methodology for the preservation and environmental management of historic complexes - The case of the Medieval City of Rhodes”, in Proc. 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, ed. A. Moropoulou, F. Zezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Vol. 4 (1997) pp. 603-634.
7. “Key Action “City of Tomorrow and Cultural Heritage”, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Βρυξέλλες, 19 Απριλίου (1999).
8. Paleni A., Curri S.B., "Attapulcus clay on cleaning, biological aggression control, desalination of stone", Πρακτικά "2ου διεθνούς συμποσίου επί της καταστροφής των λίθων εις κατασκευάς", Αθήνα, Σεπτέμβρης 1976.
9. Moropoulou, A., Kouï, M., Kourteli, Ch., Achilleopoulos, N., Zezza, F., “Digital image processing and integrated computerised analysis for weathering on planning conservation interventions on historic structures and architectural complexes”, in Proc. EURISCON Conference on European Robotics, Intelligent Systems and Control, Publ. International Association for Mathematics and Computers in Simulation (1999), in press.
10. Μοροπούλου, Α., Κουή, Μ., Αβδελίδης, Ν.Π., Μπακόλας, Α., Τσιούρβα, Θ., Χρηστάρας, Β., Στραταριδάκης, Κ., Μπισμπίκου, Α., Πρεβεζάνος, Δ., «Αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα ιστορικά κέντρα και μνημειακά σύνολα βάσει της τεχνικής της επεξεργασίας της εικόνας και μη καταστρεπτικών μετρήσεων – υπόβαθρα διαχείρισης πολιτιστικού και κτισμένου περιβάλλοντος», Τεχνική Έκθεση – Φάση Α, ΕΜΠ, Απρίλιος 1999.
11. Τζομπανάκη Χρυσούλα, « Χάνδακας ημερολόγιο 2009». Εκδόσεις Δοκιμάκης.
12. Αλεξίου Στυλιανός, «Το Κάστρο της Κρήτης και η ζωή του στον ΙΣΤ και ΙΖ αιώνα», Κρητικά Χρονικά ΙΘ (1965), σ.146-178. «Το Δούκιον ανάκτορον του Χάνδακος», Κρητικά Χρονικά ΙΔ(1960), σ.102-108 (πιν.Α-Β).
13. Δημακόπουλος Ιορδάνης, «Η Πύλη του Ιησού των Βενετσιάνικων οχυρώσεων του Χάνδακα», Φρουριακά Χρονικά, 1, 1973, σ. 175-194.
14. Ξανθουδίδης Στέφανος, Η Ενετοκρατία εν Κρήτη και οι κατά των Ενετών αγώνες των Κρητών, Αθήναι 1939. Χάνδαξ- Ηράκλειον, επιμέλεια και σχόλια του Στυλ. Αλεξίου, Ηράκλειο 1964(α΄ έκδοση 1927).
15. Παναγιωτάκης Γεώργιος, Κρήτη ιστορία- Εικόνες, Ηράκλειο 1990.

16. Πλάτων Νικόλαος, «Τα τείχη του Χάνδακος κατά τη β'βυζαντινή περίοδο», Κρητικά Χρονικά Α' (1947, σ. 239-248 «Και πάλιν περί των βυζαντινών τειχών του Χάνδακος», Κρητικά Χρονικά, Δ' Π (1950), Σ. 353-360. «Νέα στοιχεία δια τη μελέτην των βυζαντινών τειχών του Χάνδακος», Κρητικά Χρονικά ΣΤ III 1952, σ. 439-459.
17. Πρακτικίδης Ζαχαρίας, Χωρογραφία της Κρήτης συνταχθείσα τω 1818. Νέα έκδοση του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Τμήματος Ανατολικής Κρήτης, Ηράκλειο 1983.
18. Σπανάκης Στέργιος, Μνημεία της Κρητικής Ιστορίας, τόμοι 1-6, Ηράκλειο 1940-1969. «Η Λότζια Ηρακλείου», Κρητικές σελίδες 3 (1938-1939), σ. 437-452 και 686-729. Κρήτη, τόμοι Α' και Β' Ηράκλειο. Η ύδρευση του Ηρακλείου 828-1939, Ηράκλειο 1981. Το Ηράκλειο στο πέρασμα των αιώνων, Ηράκλειο 1990.
19. Σταυρινίδης Νικόλαος, Μεταφράσεις τουρκικών ιστορικών εγγράφων αφορώντων εις την ιστορία της Κρήτης, τόμοι 5, 1975-1985.
20. Στεριώτου Ιωάννα, «Αρχές χαράξεων και κατασκευής των οχυρώσεων του Χάνδακα», Πεπραγμένα Δ' Διεθνούς Κρητολογικού Συνεδρίου, τ.2, Αθήνα 1981, σ. 449-475. Οι βενετικές οχυρώσεις του Ρεθύμνου (1540-1646). Συμβολή στη φρουριακή αρχιτεκτονική του 16ου και 17ου αιώνα, β' έκδοση από Ταμείο Αρχαιολογικών πόρων και Απαλλοτριώσεων του ΥΠ.ΠΟ τόμοι Α και Β, Αθήνα 1992, όπου και εκτενής βιβλιογραφία. Τα Βενετικά Τείχη του Χάνδακα (τον 16ο και τον 17ο αιώνα) (το ιστορικό της κατασκευής τους σύμφωνα με βενετικές αρχαιακές πηγές), Βικελαία Βιβλιοθήκη Δήμου Ηρακλείου, Ηράκλειο 1998, όπου και σχετική βιβλιογραφία.
21. Τζομπανάκη Χρυσούλα, «Τα τείχη του Χάνδακα», Ταυ, μηνιαία έκδοση του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος Τμήματος Ανατολικής Κρήτης, τεύχος 18-19, Ηράκλειο 1993, σ. 66-76.
22. Χάνδακας: Η πόλη και τα Τείχη, Εταιρία Κρητικών Ιστορικών Μελετών, 1996, εκδοτική φροντίδα Βικελαία Δημοτική Βιβλιοθήκη, όπου και εκτενής βιβλιογραφία.
23. Gerola Giuseppe, Βενετικά Μνημεία της Κρήτης (Εκκλησίες), μετάφραση Στέργιος Σπανάκης, εκδοτική φροντίδα «Βικελαία Δημοτική Βιβλιοθήκη», Σύνδεσμος Τοπικών Ενώσεων Δήμων και Κοινοτήτων Κρήτης, Κρήτη 1993.
24. Monumenti Veneti nell' isola de Creta, vol. I-IV, Venezia 1905, 1932. Curuni Spir.-Donati Luc., Creta Veneziana. L' Instituto Veneto e la missione cretese di Giuseppe Gerola. Collezione fotografica, 1900-1902, Venezia 1988.
25. Θ.Ν. Σκουλικίδης. Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2000.
26. ISO P834 Fire resistance tests - Elements of building construction Part 1: General requirements, International Organization for Standardization (ISO), 1999.
27. Μηχανισμός. κατάρρευσης. τοιχοποιίας λόγω κυψέλωσης. Α. Ποζιόπουλος, 1992.
28. Συλλογή φωτογραφιών παλιάς πόλης Ηρακλείου (Χάνδακα): Κοζωνάκης Βασίλης 2004.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Σύνθεση βέλτιστων κονιαμάτων αποκατάστασης

➤ *Ανάλυση διαφόρων φάσεων*

Φάση 1

Έρευνα – Προμήθεια - Έλεγχος πρώτων υλών.

Φάση 2

- A. Δοκιμαστικές συνθέσεις με διάφορες περιεκτικότητες σε νερό και έλεγχος με το κριτήριο της εργασιμότητας, αναλόγως της χρήσης των κονιαμάτων.
- B. Μετρήσεις νωπών κονιαμάτων, βαθμονομήσεις.

Φάση 3

- A. Παρασκευή τελικών δοκιμίων
 - A₁. Συντήρηση δοκιμίων σε συνθήκες εν ξηρώ
 - A₂. Συντήρηση δοκιμίων σε συνθήκες εν υγρώ
- B. Μετρήσεις κατά την πήξη και σκλήρυνση

Φάση 4

Αξιολόγηση αποτελεσμάτων δοκιμίων, κριτική ανασκόπηση

Φάση 5

- A. Δοκιμαστικές εφαρμογές επί τόπου
- B. Έλεγχος με συνδυασμό μεθόδων επί τόπου

Φάση 6

Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για την παρασκευή και χρήση κονιαμάτων, για τον έλεγχό τους και για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς τους με την πάροδο του χρόνου.

➤ *Προτεινόμενες Συνθέσεις κονιαμάτων βάσει μελέτης των ιστορικών κονιαμάτων των Ενετικών Οχυρώσεων του Ηρακλείου*

Σύνθεση 1

Υδράσβεστος + Άμμος ποταμού (4:6)

Σύνθεση 2

Υδραυλικός Ασβέστης + Άμμος ποταμού (3:7)

Σύνθεση 3

Υδραυλικός Ασβέστης + Άμμος ποταμού + Σπασμένο Κεραμίδι (3:4:3)

Σύνθεση 4

Υδράσβεστος + Κεραμάλευρο + Άμμος ποταμού + Σπασμένο Κεραμίδι (2:2:3:3)

Σύνθεση 5

Υδράσβεστος + Ποζολάνη + Άμμος ποταμού + Σπασμένο Κεραμίδι (2:2:3:3)

Οι αναλογίες των συστατικών είναι κατά βάρος

Πρώτες ύλες:

- Η άμμος ποταμού θα είναι λεπτόκοκκη έως μεσόκοκκη
- Η κοκκομετρία του σπασμένου κεραμιδιού αποφασίζεται σε συνάρτηση με την κοκκομετρία της άμμου.

➤ Εργασίες ανά φάση (για τις φάσεις 2 και 3)

ί. Κατά τη φάση των νωπών κονιαμάτων γίνονται οι παρακάτω εργασίες:

A. Έλεγχος εργασιμότητας

Στον έλεγχο εργασιμότητας γίνονται δοκιμές, για τον έλεγχο και την αξιολόγηση για το απαιτούμενο νερό. Για την καταγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων γίνονται οι παρακάτω μετρήσεις:

- Δοκιμή εξάπλωσης
- Μέτρηση συγκρατούμενου νερού
- Μέτρηση ειδικού βάρους νωπού κονιάματος
- Μέτρηση συνολικού απαιτούμενου νερού

B. Παρασκευές δοκιμίων για έλεγχο συνάφειας εν ξηρώ και εν υγρώ

ii. Κατά την φάση της πήξης και της σκλήρυνσης γίνονται οι παρακάτω δοκιμές:

A. Ορυκτολογικές φυσικές και χημικές

1. Μετρήσεις Οπτικής Μικροσκοπίας (OM).
2. Μετρήσεις Περίθλασης Ακτινών – X (XRD).
3. Μετρήσεις Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM – EDX).
4. Μετρήσεις Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης (DTA).
5. Μετρήσεις Θερμοβαρυμετρικής Ανάλυσης (TG).
6. Μέτρηση συντελεστή υδατοαπορρόφησης.
7. Μέτρηση διαπερατότητας σε υγρό/ ατμούς.
8. Προσδιορισμός μικροδομής. Στις δοκιμές μικροδομής περιλαμβάνονται οι παρακάτω μετρήσεις:
Ολικό Πορώδες (P %), Μέση Ακτίνα Πόρων, Μέτρηση Ειδικής Επιφάνειας, Μέτρηση Φαινόμενης Πυκνότητας και Συνολικός Αθροιστικός Όγκος.

B. Μηχανικές Δοκιμές

1. Μέτρηση Φαινόμενου Βάρους.
2. Μέτρηση αντοχής σε Κάμψη
3. Μέτρηση αντοχής σε θλίψη
4. Μέτρηση μέτρου Ελαστικότητας
5. Μέτρηση λόγου Poisson
6. Μέτρηση αντοχής σε εφελκυσμό