



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ



**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων»**

Διπλωματική Εργασία

Η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Η περίπτωση του Λευκού Πύργου Θεσσαλονίκης.

**Κατερίνα Μαρινέλλου
Πολιτικός Μηχανικός Έργων Υποδομής**

**Σίνδος Θεσσαλονίκης
Ιούλιος 2020**



Λευκός Πύργος, Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2020, εν μέσω πανδημίας COVID-19. (Φωτ.: Φ. Παλαιολόγος)



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ



Η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Η περίπτωση του Λευκού Πύργου Θεσσαλονίκης.

Κατερίνα Μαρινέλλου
Πολιτικός Μηχανικός Έργων Υποδομής

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος της Σχολής Μηχανικών του ΔΙΠΑΕ στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων»

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 22/08/2020

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή
Δρ. Παπαδημητρίου Χρυσή, Επιβλέπουσα
Δρ. Γαληνού-Μητσούδη Σοφία, Καθηγήτρια
Δρ. Αναγνωστόπουλος Κωνσταντίνος, Καθηγητής

Σίνδος Θεσσαλονίκης
Ιούλιος 2020

Copyright © Κατερίνα Μαρνέλλου, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΜΝΗΜΕΙΑ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ.
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΛΕΥΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ.**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος (ΔΙ.ΠΑ.Ε.).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	2
2.1	Η Πολιτιστική Κληρονομιά και η προστασία της	2
2.2	Τα δομικά υλικά των μνημείων	11
2.2.1	Αναφορά στην ιστορική εξέλιξη των δομικών υλικών	11
2.2.2	Ιδιότητες δομικών υλικών	28
2.2.2.1	Φυσικές Ιδιότητες	29
2.2.2.2	Μηχανικές Ιδιότητες.....	33
2.2.3	Κατηγορίες δομικών υλικών των μνημείων	37
2.3	Η φθορά των δομικών υλικών στα μνημεία.....	67
2.3.1	Ρύπανση και πολιτιστική κληρονομιά.....	67
2.3.2	Φθορά και παράγοντες διάβρωσης των δομικών υλικών των μνημείων.....	72
2.3.3	Επιδράσεις των περιβαλλοντικών παραγόντων και φαινόμενα διάβρωσης	75
2.3.3.1	Η επίδραση της θερμοκρασίας, της ακτινοβολίας και του ανέμου	75
2.3.3.2	Η επίδραση της ατμόσφαιρας	76
2.3.3.3	Η επίδραση ζώντων οργανισμών	87
2.3.3.4	Η επίδραση του νερού.....	88
2.3.4	Είδη και μορφές διάβρωσης των υλικών των μνημείων.....	98
2.4	Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι χαρακτηρισμού και διάγνωσης της φθοράς των δομικών υλικών σε μνημεία.....	107
2.4.1	Γενικά.....	107
2.4.2	Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι	109
2.4.2.1	Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection).....	109
2.4.2.2	Υπέρυθρη Θερμογραφία (Infrared Thermography - IRT)	110
2.4.2.3	Υπερηχοσκόπηση (Ultrasonic testing - UST)	113
2.4.2.4	Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)	119
2.4.2.5	Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (Digital Image Processing - DIP).....	123
2.4.2.6	Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (Fiber Optics Microscopy – FOM)	131

2.4.2.7	Κρουσιμετρία με σφύρα Schmidt (Schmidt Rebound Hammer - SH)	135
2.4.2.8	Άλλες ΜΚ μέθοδοι χαρακτηρισμού και διάγνωσης της φθοράς	137
3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ	140
3.1	Γενικά.....	140
3.2	Το υπό εξέταση μνημείο, ο Λευκός Πύργος της Θεσσαλονίκης.....	141
3.2.1	Ιστορικά στοιχεία	141
3.2.2	Δομικά & Αρχιτεκτονικά στοιχεία	142
3.2.3	Στοιχεία επεμβάσεων	145
3.2.4	Γεωλογικά και Γεωτεχνικά στοιχεία	147
3.2.5	Το περιβάλλον του μνημείου.....	149
3.2.5.1	Κλιματολογικές συνθήκες.....	149
3.2.5.2	Ατμοσφαιρική Ρύπανση.....	152
3.3	Μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν.....	153
3.3.1	Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection).....	153
3.3.2	Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (Digital Image Processing).....	154
3.3.3	Κρουσιμέτρηση Schmidt (Schmidt Rebound Hammer).....	159
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	164
4.1	Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection)	164
4.2	Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (Digital Image Processing)	173
4.3	Κρουσιμετρία Schmidt (Schmidt Rebound Hammer)	182
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	193
5.1	Συμπεράσματα.....	193
5.2	Προοπτικές.....	194
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	196
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	209
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	212

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1. Θεσμικά Κείμενα για την Πολιτιστική Κληρονομιά. (Πηγή: Φωτοπούλου, 2020)	9
Εικόνα 2. Η έννοια της Πολιτισμικής Διαχείρισης (Πηγή: Πούλιος, 2010)	10
Εικόνα 3. Göbekli Tere, μεγαλιθικά ιερά, βόρεια όψη. (Πηγή: Schmidt, 2003).....	12
Εικόνα 4. Ιεριχώ, τμήμα του λίθινου οχυρωματικού τείχους. (Πηγή: Kenyon, 1960).....	13
Εικόνα 5. Ιεριχώ, ωμόπλινθος (Πηγή: Παπαϊωάννου, 2005)	13
Εικόνα 6. Ξήρανση ωμοπλίνθων, σύγχρονη εποχή. (Πηγή: Μοροπούλου, 2014)	14
Εικόνα 7. Ιράν, ζιγκουράτ Chogha Zanbil. (Πηγή: Niroum&, 2012)	15
Εικόνα 8. Αχίλλειο Θεσσαλίας, αναπαράσταση πασσαλόπηκτης οικίας. (Πηγή: Winn et al., 1989)	15
Εικόνα 9. Κνωσός Κρήτη, ξύλινα φέροντα στοιχεία από κέδρο και κυπαρίσσι. (Πηγή: Κακαράς, 2014)	16
Εικόνα 10. Σερβία, Lepenski Vir, τσιμεντιτικό δάπεδο οικίας, 6000π.Χ. (Πηγή: Dragoslav Srejonić, 1972)	16
Εικόνα 11. Αναπαράσταση ανυψωτικής μηχανής μαρμάρινων όγκων. (Πηγή: Κορρές, 1994) .	18
Εικόνα 12. Κάμρος Ρόδου, δεξαμενή θηραϊκού σκυροδέματος. (Πηγή: ΥΠΠΟ, 2012)	19
Εικόνα 13. Μεικτή ρωμαϊκή τοιχοποιία με πυρήνα ρωμαϊκού σκυροδέματος. (Πηγή: Kourkoulis, 2006)	20
Εικόνα 14. Ρώμη, Πάνθεον, θόλος από ρωμαϊκό σκυρόδεμα. (Πηγή: Mark & Hutchinson, 1983)	21
Εικόνα 15. Μικρογραφία από εικονογραφημένο Ψαλτήριο, Οικοδόμοι επί τω έργω. (Πηγή: Walter, 1994).....	22
Εικόνα 16. Τρόποι δομής οπτοπλίνθων βυζαντινών ναών περιοχής Θεσσαλονίκης (από αριστερά: Αγ.Αικατερίνη, Άγ.Απόστολοι, Πρ.Ηλίας). (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2018)	23
Εικόνα 17. Αγγλία, η πρώτη μεταλλική γέφυρα στο Coalbrookdale (1775-1779). (Πηγή: Trinder, 1979)	25
Εικόνα 18. Παρίσι, οικία Francois Coignot, 1853. (Πηγή: Jacques Mossot, 2009)	26
Εικόνα 19. Σχέδια ευρεσιτεχνίας Coignot. (Πηγή: structurae.net).....	26
Εικόνα 20. Λονδίνο, Crystal Palace, 1851, σχέδιο πρότασης του J.Paxton. (Πηγή: Schoenefeldt, 2008)	27

Εικόνα 21. Διάγραμμα χρήσης υλικών (σε εκ.τόνους) στις ΗΠΑ μεταξύ 1900-2000. (Πηγή: Fern&ez, 2006)	27
Εικόνα 22. Κυτταρική δομή του ξύλου. (Πηγή: Καλογεράς <i>et al.</i> , 1999)	48
Εικόνα 23. Εγκάρσια τομή ξύλου. (Πηγή: Καλογεράς <i>et al.</i> , 1999)	49
Εικόνα 24. Μηχανικές αντοχές ξύλου σε σχέση με τις ίνες του. (Πηγή: Καλογεράς <i>et al.</i> , 1999)	51
Εικόνα 25. Αρχαίοι πόλοι και εμπόλια από τα μνημεία της Αθηναϊκής Ακρόπολης.	52
Εικόνα 26. Τύποι παραδοσιακών ιστορικών οπτοπλίνθων (συμπαγής και με σκάφη). (Πηγή: Μοροπούλου, 2014)	56
Εικόνα 27. Ισομετρική απεικόνιση στέγης αρχαϊκού ναού Ηραίου Ολυμπίας. (Πηγή: Sapirstein, 2016)	59
Εικόνα 28. Ισομετρική απεικόνιση στέγης με βυζαντινού τύπου κεραμίδια. (Πηγή: Λεγάκις, 1997)	59
Εικόνα 29. Η ίδια Καρυάτιδα το 1955 (αριστερά) και το 1965 (δεξιά). (Πηγή: Σκουλικίδης, 2000)	69
Εικόνα 30. Τάσεις εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων από το 1990 στην ΕΕ. (Πηγή: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, 2018)	70
Εικόνα 31. Παγκόσμιες εκπομπές SO _x από ανθρωπογενείς πηγές. (Πηγή: Smith <i>et al.</i> , 2004)	78
Εικόνα 32. Εικόνες SEM από διάφορους τύπους κρυστάλλων αλάτων. (Πηγή: Arnold & Zehnder, 1989)	92
Εικόνα 33. Ανάπτυξη κρυστάλλων σε διαφορετικής μικροδομής υλικά. (Πηγή: Μοροπούλου <i>et al.</i> , 2014).....	93
Εικόνα 34. Ζώνες εξάτμισης. (Πηγή: Arnold & Zehnder, 1989).....	95
Εικόνα 35. Φυλλόμορφη δομή και διόγκωση αργίλου. (Πηγή: Torracca, 1986).....	95
Εικόνα 36. Οξειδωμένοι μεταλλικοί σύνδεσμοι από την Ακρόπολη. (Πηγή: Σκουλικίδης, 2000)	96
Εικόνα 37. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Υπέρυθρη περιοχή 0,7-1000μm. (Πηγή: Ματίκας <i>et al.</i> , 2015).....	110
Εικόνα 38. Αρχή της Θερμογραφίας Υπερύθρου (Πηγή: Ματίκας <i>et al.</i> , 2015)	111
Εικόνα 39. Τμήμα λιθοδομής από τα Ενετικά Τείχη του Ηρακλείου Κρήτης (αριστερά: φυσική φωτογραφία, δεξιά: θερμογράφημα). (Πηγή: Μοροπούλου <i>et al.</i> , 2013)	111

Εικόνα 40. Ιδιότητες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τον ΜΚΕ υλικών με τη μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας. (Πηγή: Αβδελίδης, 2002).....	112
Εικόνα 41. Διάταξη εξοπλισμού ενεργητικής θερμογραφίας (Επάνω: Σχηματική απεικόνιση, κάτω: Μελέτη εφαρμογής, Μονή Μολυβδοσκεπάστου. (Πηγές: Κουή <i>et al.</i> , 2015; Kordatos <i>et al.</i> , 2013).....	113
Εικόνα 42. Το φάσμα του ήχου. (Πηγή: Ματίκας <i>et al.</i> , 2015)	114
Εικόνα 43. Διάταξη υπερηχοσκόπησης. Καταγραφή σήματος σε παλμογράφο. (Πηγή: https://www.tec-science.com/)	115
Εικόνα 44. Συσχέτιση χρόνου παλμού – θέσης ατέλειας στο παλμογράφημα. (Πηγή: https://www.sciencedirect.com).....	116
Εικόνα 45. Διατάξεις εφαρμογής υπερηχοσκόπησης διέλευσης. (Πηγή: Κουή <i>et al.</i> , 2015) ...	116
Εικόνα 46. Υπολογισμός βάθους φθοράς με υπερηχοσκόπηση διέλευσης. (Πηγή: Μοροπούλου, 2005)	117
Εικόνα 47. Διάγραμμα Συσχέτισης Ταχύτητας Υπερήχων-Θλιπτικής Αντοχής για προϊόντα τσιμέντου. (Πηγή: Sturup <i>et al.</i> , 1984)	118
Εικόνα 48. Υπερηχοσκόπηση στη Ροτόντα Θεσσαλονίκης. (Πηγή: Penelis, 1982)	118
Εικόνα 49. Διάταξη γεωραντάρ και αρχή λειτουργίας του. (Πηγή: Μοροπούλου <i>et al.</i> , 2005)	120
Εικόνα 50. Δισδιάστατη τομή γεωραντάρ (αριστερά) και απεικόνιση της τομής σε κλίμακα διαβαθμίσεων του γκρίζου (ραδιόγραμμα) (δεξιά). (Πηγή: Κουή <i>et al.</i> , 2015).....	121
Εικόνα 51.Μελέτη με GPR τοιχοποιίας μνημείου Urla, Σμύρνη. (Πηγή: Kilic, 2015)	122
Εικόνα 52. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μεγέθυνση του ορατού τμήματος (400-700 nm). (Πηγή: www.splinglearning.com)	123
Εικόνα 53. Τομή του ανθρώπινου οφθαλμού. (Πηγή: Γαλιατσάτος, 2015)	124
Εικόνα 54. Αντιστοίχιση μερών ανθρώπινου οφθαλμού και φωτογραφικής μηχανής. (Πηγή: Παπαρρηγόπουλος, 2014)	124
Εικόνα 55. Διάγραμμα ευαισθησίας των τριών τύπων κωνίων στα μήκη κύματος του ορατού φάσματος. (Πηγή: Stockman <i>et al.</i> , 1993)	125
Εικόνα 56. Αριστερά: Προσθετική μέθοδος μίξης χρωμάτων (RGB). (Πηγή: Imbraheem <i>et al.</i> , 2012)	126
Εικόνα 57. Έγχρωμη εικόνα και τα gray-level κανάλια της σε RGB. (Πηγή: Gonzalez & Woods, 2008)	128

Εικόνα 58. Επάνω: Παράδειγμα διαδικασίας ψηφιοποίησης εικόνας. (α) Συνεχής φυσική εικόνα (β) Συνεχής γραμμή σάρωσης στην τομή AB (γ) Δειγματοληψία και κβάντιση στην τομή AB. Κάτω (δ): Φυσική εικόνα και τελική κβαντισμένη μορφή. (Πηγή: Gonzalez & Woods, 2008)	129
Εικόνα 59. Επεξεργασμένες εικόνες με ψευδοχρώματα που αντιστοιχίζονται σε μορφές φθοράς και τα ποσοστά αυτών, από προσόψεις μνημείων της Ισπανίας. (Πηγή: Ortiz <i>et al.</i> , 2017)	131
Εικόνα 60. Η δομή της οπτικής ίνας. (Πηγή: Keiser <i>et al.</i> , 2014)	132
Εικόνα 61. Διάδοση φωτεινής ακτίνας κατά μήκος οπτικής ίνας. (Πηγή: Kitayama, 2014)	132
Εικόνα 62. Τύποι οπτικών ινών και μονοπάτια διάδοσης φωτός. (Πηγή: Keiser <i>et al.</i> , 2014)	133
Εικόνα 63. Διάταξη FOM για έλεγχο σε σιδηροτροχιά. (Πηγή: Μοροπούλου, 2014)	134
Εικόνα 64. Εικόνες FOM από βιογενή διάβρωση σε ασβεστόλιθο, Ρόδος. (Πηγή: Μοροπούλου <i>et al.</i> , 2013)	135
Εικόνα 65. Κρουσίμετρο Schmidt τύπου N. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)	136
Εικόνα 66. Κλίμακα τιμών αναπήδησης R. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)	136
Εικόνα 67. Διάγραμμα συσχέτισης αναπήδησης (R) – θλιπτικής αντοχής (UCS) κρουσιμέτρου Original Schmidt της Proceq. (Πηγή: Punurai, n.d.)	137
Εικόνα 68. Η υπέρθυρη επιγραφή του Λευκού Πύργου. (Φωτ.: A.Struck, Πηγή: Kiel, 1973)	141
Εικόνα 69. Δορυφορική εικόνα της πλατείας Λ.Πύργου σήμερα. (Πηγή: Google Earth, 2019)	142
Εικόνα 70. Ο Λευκός Πύργος με το περιτείχισμά του, πριν το 1911. (Φωτ.: W.V.Hallwyl, 1896, Πηγή: Κέντρο Ιστορίας Θεσ/νίκης)	143
Εικόνα 71. Τομή (αριστερά) και κατόψεις ορόφων (δεξιά) του Λ.Πύργου. (Πηγή: Κλημεντίδου-Παπαδάμου <i>et al.</i> , 1993)	144
Εικόνα 72. Λεπτομέρεια Γεωλογικού Χάρτη περιοχής Θεσ/νίκης. (Πηγή: Ζερβοπούλου, 2010)	148
Εικόνα 73. Στρωματογραφία περιβάλλοντος χώρου Λ.Πύργου. (Πηγή: Τσότσος <i>et al.</i> , 1992)	149
Εικόνα 74. Κλιματολογικά διαγράμματα Θεσ/νίκης. (α) Θερμοκρασία, (β) Κατακρηνίσματα, (γ) Ηλιοφάνεια. (Πηγή: Meteororm, 2020 [Περίοδος Αναφοράς 2000-2009])	151
Εικόνα 75. Κλιματολογικά διαγράμματα Θεσ/νίκης. (α) Άνεμοι, (β) Σχετική Υγρασία. (Πηγή: EMY, 2020)	151
Εικόνα 76. Διάγραμμα Ατμοσφαιρικών Ρύπων Θεσ/νίκης έτους 2019. (Πηγή: ΠΚΜ, 2020)	152

Εικόνα 77. Κάμερα, φακοί και πυξίδα που χρησιμοποιήθηκαν στην τεκμηρίωση. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)	154
Εικόνα 78. Grayscale εικόνα και οι ψευδοχρωματικές της με διαφορετικούς LUTs. (Πηγή: Russ, 2011)	155
Εικόνα 79. Αποτίμηση πορώδους και βαθμού συντήρησης υλικού, βάσει ενεργειακού περιεχομένου (θέσης και εύρους γκρίζων τονικοτήτων) ιστογραμμάτων. (Πηγή: Zezza, 2010)	157
Εικόνα 80. Παράδειγμα υπολογισμού πορώδους με τη μέθοδο DIP. Από αριστερά προς δεξιά: Φυσική grayscale εικόνα SEM. Εικόνα SEM επεξεργασμένη με ψευδοχρώματα. Διάγραμμα κατανομής πόρων. (Πηγή: Μοροπούλου, 2014)	157
Εικόνα 81. Παράδειγμα αποτίμησης επέμβασης, Βασιλική Βαρί, Ιταλία. (a) Πριν τη συντήρηση, 1986. (b) Μετά τη συντήρηση, 1986. (c) 6 χρόνια μετά τη συντήρηση, 1992. (Πηγή: Zezza, 2010)	158
Εικόνα 82. Η πλατφόρμα του προγράμματος Image-Pro για τη μέθοδο DIP. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)	158
Εικόνα 83. Φάσεις δοκιμής κρουσιμετρίας. (Πηγή: Pereira & de Medeiros, 2012, απόδοση Μαρνέλλου, 2020)	160
Εικόνα 84. Διάγραμμα αναγωγής τιμών αναπήδησης στην οριζόντια διεύθυνση. (Πηγή: Aydin & Basu, 2005)	161
Εικόνα 85. Κρουσίμετρο και σήμανση θέσεων δοκιμής στη ΒΔ όψη του Λ.Πύργου. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)	163
Εικόνα 86. Λιθότυποι εξωτερικής τοιχοποιίας Λ.Πύργου. Κάτω δεξιά spolia και πλίνθοι-συνδετικό κονίαμα.	164
Εικόνα 87. Δείγμα πλίνθου παραλιακής όψης.....	165
Εικόνα 88. Δείγμα κονιάματος παραλιακής όψης.	165
Εικόνα 89. Υπολείμματα παλιών επιχρισμάτων.....	165
Εικόνα 90. ΒΑ όψη: είσοδος Πύργου, εξανθήσεις αλάτων.....	166
Εικόνα 91. Α-ΒΑ όψη: Μαύρη πάτινα, βιογενής κρούστα.....	167
Εικόνα 92. Ν-ΝΑ όψη: Υπολείμματα επιχρισμάτων, λευκή κρούστα.....	167
Εικόνα 93. Δ-ΝΔ όψη: Νέα υλικά. Απόσπαση κόκκων κονιάματος, οπισθοχώρηση επιφάνειας, απόξεση πλίνθων.....	168

Εικόνα 94. Δ όψη: Κεραμικός Διάκοσμος. Απόσπαση κόκκων, οπισθοχώρηση επιφάνειας, επικαθίσεις στις πλίνθους.....	168
Εικόνα 95. Δ-ΒΔ όψη (291 ^ο): Γυψοποίηση και μαύρη κρούστα στα φουρούσια.	169
Εικόνα 96. Β όψη: Μαύρες χαλαρές αποθέσεις.	169
Εικόνα 97. Πυργίσκος: Γυψοποίηση και μαύρη κρούστα σε φουρούσια και γείσο.	170
Εικόνα 98. Σταδιακή απαλοιφή λιθωσώματος φουρουσιού.....	170
Εικόνα 99. Επάλξεις: Βιογενείς κρούστες (λειχήνες, άλγη, μύκητες).....	170
Εικόνα 100. Μακροφωτογραφίες λιθοτύπων: (α) Βελονοειδής διάβρωση. (β) Ρωγμές & επικαθίσεις αλάτων. (γ) Υπολείμματα επιχρισμάτων. (δ) Επικαθίσεις αλάτων. (ε) Μαύρες αποθέσεις. (στ) Αρχή κυψέλωσης.	171
Εικόνα 101. Χάρτης παρατηρούμενων μορφών διάβρωσης.	172
Εικόνα 102. ΒΑ όψη: είσοδος Πύργου. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.	173
Εικόνα 103. Α-ΒΑ όψη: Μαύρη πάτινα, βιογενής κρούστα. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.	173
Εικόνα 104. Υπολείμματα παλιών επιχρισμάτων, λευκή κρούστα. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.....	174
Εικόνα 105. Δ-ΝΔ όψη: Απόσπαση κόκκων κονιάματος, οπισθοχώρηση επιφάνειας, επικαθίσεις αλάτων. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.	174
Εικόνα 106. Δ όψη: Οπισθοχώρηση επιφάνειας, επικαθίσεις. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.....	174
Εικόνα 107. Δ-ΒΔ όψη: Μαύρες κρούστες, δημιουργία κρατήρων, αρχή κυψελώσεων. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.	174
Εικόνα 108. Β όψη: Μαύρες χαλαρές αποθέσεις, αρχή κυψελώσεων. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.....	175
Εικόνα 109. Γυψοποιημένη επιφάνεια (λευκή κρούστα) με μαύρη κρούστα, δημιουργία κρατήρων. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.	175
Εικόνα 110. Υπολείμματα επιχρισμάτων - Λευκή κρούστα. 47,10%.....	176
Εικόνα 111. Εξανθήσεις αλάτων στο υπέρθυρο τόξο. 17,89% της επιφάνειας της τσιμεντοκονίας.	177
Εικόνα 112. Γυψοποίηση – Μαύρη κρούστα. 34,36% της βάσης του φουρουσιού.	177

Εικόνα 113. Μαύρη πάτινα - Βιογενής κρούστα. 19,14% της εικονιζόμενης επιφάνειας της τοιχοποιίας.	178
Εικόνα 114. Αρχή κυψελώσεων – Δημιουργία Κρατήρων. 19,38% της αποτυπωμένης επιφάνειας του λίθου.	178
Εικόνα 115. Επικαθίσεις αλάτων. 12,01% της αποτυπωμένης επιφάνειας του λίθου.	179
Εικόνα 116. Επικαθίσεις αλάτων. 30,81% της αποτυπωμένης επιφάνειας του λίθου.	179
Εικόνα 117. Μικτή διάβρωση. Βελονοειδής φθορά/αρχή κυψελώσεων – Επικαθίσεις αλάτων. 15,44% και 4,06% αντίστοιχα της συνολικής απεικονιζόμενης επιφάνειας.	180
Εικόνα 118. Μακροφωτογραφίες και ιστογράμματα grayscale εικόνων.	181
Εικόνα 119. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης λίθων αυνολικά.	182
Εικόνα 120. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης λίθων ανά περιοχή μέτρησης.	183
Εικόνα 121. Καμπύλη R_N -UCS για τους λίθους της περιοχής του μετώπου κυκλοφορίας.	184
Εικόνα 122. Καμπύλη R_N -UCS για τους λίθους της περιοχής του θαλάσσιου μετώπου.	184
Εικόνα 123. Καμπύλη R_N -UCS για τους λίθους της περιοχής της ανατολικής όψης.	185
Εικόνα 124. Καμπύλη R_N -UCS για το σύνολο των λίθων του μνημείου.	185
Εικόνα 125. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης πλίνθων συνολικά.	187
Εικόνα 126. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης πλίνθων ανά περιοχή μέτρησης.	187
Εικόνα 127. Καμπύλη R_N -UCS για τις πλίνθους της περιοχής του μετώπου κυκλοφορίας.	188
Εικόνα 128. Καμπύλη R_N -UCS για τις πλίνθους της περιοχής του θαλασσίου μετώπου.	189
Εικόνα 129. Καμπύλη R_N -UCS για τις πλίνθους της ανατολικής όψης.	189
Εικόνα 130. Καμπύλη R_N -UCS για το σύνολο των πλίνθων του μνημείου.	190
Εικόνα 131. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης κονιαμάτων συνολικά.	191
Εικόνα 132. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης κονιαμάτων ανά περιοχή μέτρησης.	191

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Χρονολογική εξέλιξη ορισμού και διάκρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς, μέσα από διεθνή συνέδρια και συνθήκες. (Πηγή: Vecco,2010).....	5
Πίνακας 2. Κύρια χαρακτηριστικά πυριγενών πετρωμάτων που συναντώνται σε μνημεία (Πηγή: Αραβαντινός, 2000 ; Μπεάζη-Κατσιώτη, 2015; www.geo.auth.gr ; απόδοση Μαρνέλλου, 2020).	44
Πίνακας 3. Κύρια χαρακτηριστικά ιζηματογενών πετρωμάτων που συναντώνται σε μνημεία (Πηγή: Αραβαντινός, 2000 ; Μπεάζη-Κατσιώτη, 2015; www.geo.auth.gr ; απόδοση Μαρνέλλου, 2020).	45
Πίνακας 4. Κύρια χαρακτηριστικά μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων που συναντώνται σε μνημεία (Πηγή: Αραβαντινός, 2000 ; Μπεάζη-Κατσιώτη, 2015; www.geo.auth.gr ; απόδοση Μαρνέλλου, 2020).....	46
Πίνακας 5. Μέση φαινόμενη πυκνότητα ευρωπαϊκών ξύλων. (Πηγή: Χατήρης <i>et al.</i> , 2007)	50
Πίνακας 6. Κατηγορία ξύλου βάσει πυκνότητας, με περιεχόμενη υγρασία 12%. (Πηγή: Βουλγαρίδης, 2006).....	50
Πίνακας 7. Τυπικές τιμές φαινομένου ειδικού βάρους οπτοπλίνθων από μνημεία διαφόρων περιοχών της νότιας Ευρώπης. (Πηγή: Fernandes <i>et al.</i> , 2010; απόδοση Μαρνέλλου, 2020)..	57
Πίνακας 8. Κυριότερα φυσικά & μηχανικά χαρακτηριστικά ρωμαϊκών οπτόπλινθων από περιοχές της βόρειας Ελλάδας. (Πηγή: Stefanidou <i>et al.</i> , 2014).....	58
Πίνακας 9. Κυριότερα φυσικά & μηχανικά χαρακτηριστικά βυζαντινών οπτόπλινθων από την περιοχή της Θεσσαλονίκης. (Πηγή: Stefanidou <i>et al.</i> , 2014)	58
Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά κονιαμάτων δόμησης από μνημεία του ελλαδικού χώρου, ανά ιστορική περίοδο. (Πηγή: Pachta & Paragianni, 2014)	66
Πίνακας 11. Επιθυμητές τιμές κύριων ρυπαντών, σύμφωνα με τον ΠΟΥ και τιμές που ισχύουν για την Ελλάδα. (Πηγή: Σκουλικίδης, 2000).....	71
Πίνακας 12. Ιδιότητες και σύσταση ατμοσφαιρικών σωματιδίων. (Πηγή: Γρηγοράτος, 2012) .	86
Πίνακας 13. Κυριότερα άλατα που κρυσταλλώνονται σε πορώδη υλικά, μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης. (Πηγή: Σκουλικίδης, 2000)	91
Πίνακας 14. Κυριότερες μορφές διάβρωσης υλικών των μνημείων - Αίτια και μηχανισμοί - Ενδεικτικές εικόνες.	100
Πίνακας 15. Συσχέτιση βάθους χρώματος και αποτελέσματος οπτικής εικόνας. (Πηγή: Μουστάκας <i>et al.</i> , 2015)	127

Πίνακας 16. Αναφορές και εξισώσεις συσχέτισης σκληρότητας Schmidt με διάφορες μηχανικές ιδιότητες. (Πηγή: Jamshidi et al., 2016)	163
Πίνακας 17. Ερμηνεία συστήματος ψευδοχρωμάτων για τη χαρτογράφηση της φθοράς.	175
Πίνακας 18. Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές R_N και UCS λίθων ανά περιοχή μέτρησης και συνολικά.....	183
Πίνακας 19. Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές R_N και UCS πλίνθων ανά περιοχή μέτρησης και συνολικά.....	188
Πίνακας 20. Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές R_N κονιαμάτων ανά περιοχή μέτρησης και συνολικά.....	192

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «*Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων*» του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος και αποτελεί μια ελάχιστη συμβολή στην ώριμη πλέον, αλλά πάντα επίκαιρη περιοχή της προστασίας των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς, ως κομμάτι κι αυτό της ευρύτερης προσπάθειας της εποχής για μια βιώσιμη διαχείριση του περιβάλλοντος.

Η εκπόνηση της εργασίας αυτής σχετίζεται με την νέα αντίληψη που έχει εδώ και λίγα χρόνια παγιωθεί στη συντήρηση των μνημείων, αυτήν της διαχείρισης των περιβαλλοντικών παραγόντων που οδηγούν στη φθορά των υλικών των ιστορικών κτηρίων, με σκοπό την παρακολούθηση, την πρόληψη και τη θεραπεία των επιπτώσεών τους σε πραγματική κλίμακα.

Το θέμα της εργασίας συνδέεται με την εφαρμογή Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων Ελέγχου της υφιστάμενης κατάστασης του Λευκού Πύργου της Θεσσαλονίκης, ο οποίος υφίσταται τις επιπτώσεις ενός συνδυασμένου αστικού και θαλάσσιου περιβάλλοντος. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν συνιστούν μια πρωτόλεια μόνο προσπάθεια για την αποτίμηση των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών συνθηκών στο μνημείο–τοπόσημο της πόλης, με την πίστη ότι θα αποτελέσουν πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω συνέχιση, προς την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου, επιστημονικού εργαλείου για τη συντήρηση και διαφύλαξή του.

Ολοκληρώνοντας την εργασία αυτήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της. Πρωτίστως, την Επιβλέπουσα Καθηγήτριά μου, Δρ.Χρύσα Παπαδημητρίου, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, την καθοδήγηση και την ενθάρρυνση σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Την Καθηγήτρια και Διευθύντρια του ΠΜΣ, κα Σοφία Γαληνού-Μητσούδη για τη λαμπρή ιδέα στην επιλογή του υπό μελέτη μνημείου. Τον Καθηγητή του ΠΜΣ, κo Κωνσταντίνο Αναγνωστόπουλο για τη συμμετοχή του στην Τριμελή Συμβουλευτική επιτροπή, καθώς και όλους τους καθηγητές του ΠΜΣ «*Σχεδιασμός και Κατασκευή Τεχνικών Έργων*», για το μερίδιο που αναλογεί στον καθένα τους, της νέας αυτής προσπάθειας για αναβάθμιση του ιστορικού Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ του ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, που έχει πλέον επανιδρυθεί ως Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες στην Εφορεία Αρχαιοτήτων Πόλης Θεσσαλονίκης, ιδιαίτερα στην Αρχαιολόγο κα Σταυρούλα Τζεβρένη, με την οποία υπήρξε άψογη συνεργασία για την αδειοδότηση και τις εργασίες επί τόπου του μνημείου, την κα Μαρία Κυρανούδη,

Προϊσταμένη του Τμήματος Συντήρησης της Εφορείας, καθώς και όλους τους εργαζόμενους στο μνημείο. Ακόμη, ευχαριστίες οφείλω στους κυρίους Γιάννη Δεληγιάννη από το Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας του Ιονίου Πανεπιστημίου και Γιώργο Μεταξιώτη από το Τμήμα Επικοινωνίας & Ψηφιακών Μέσων του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, για την προσπάθειά τους στην υλοποίηση του βίντεο παρουσίασης της εργασίας και στο επικείμενο εγχείρημα ανάπτυξης μιας διαδραστικής εφαρμογής επαυξημένης πραγματικότητας, με σκοπό την ενημέρωση και αφύπνιση του κοινού στο ζήτημα των επιπτώσεων του ρυπασμένου περιβάλλοντος στην πολιτιστική κληρονομιά.

Τέλος, αλλά περισσότερο από όλους, ευχαριστώ από καρδιάς τους δικούς μου ανθρώπους, που, ηθικά και υλικά, πάντα με στηρίζουν στις προσπάθειές μου.

Κατερίνα Μαρνέλλου, Ιούλιος 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σημαντικός παράγοντας υποβάθμισης των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί η ποιότητα του περιβάλλοντος. Διάφορα περιβαλλοντικά φορτία, φυσικά ή ανθρωπογενή, μπορούν να διαβρώσουν τα δομικά υλικά των ιστορικών κατασκευών, έχοντας άμεση επίδραση στα ποιοτικά, μηχανικά και αισθητικά χαρακτηριστικά των μνημείων. Η ατμοσφαιρική ρύπανση συνιστά έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες, καθώς οι ρύποι μπορούν να προκαλέσουν επικαθίσεις, αλλαγή χρώματος και σύστασης υλικών, καθώς και άλλες φυσικοχημικές διεργασίες. Επιπλέον των ατμοσφαιρικών ρύπων, τα γεωκλιματικά στοιχεία κάθε περιοχής (εγγύτητα σε θαλάσσιο περιβάλλον, κυκλοφορία αέρα και ρευμάτων, όξινη βροχή, θερμοκρασιακές μεταβολές, γεωλογικά και γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά κ.ά.), σε συνάρτηση με τα πολεοδομικά της χαρακτηριστικά, αλλά και με τις ιδιότητες των ίδιων των δομικών υλικών των κατασκευών, αποτελούν παραμέτρους αναπόφευκτης φθοράς. Η ορθολογική διαχείριση των ανθρωπογενών ρύπων μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στη μείωση της λειτουργικής και αισθητικής υποβάθμισης μνημείων και ιστορικών κτηρίων, συμβάλλοντας στην προστασία και διαφύλαξή τους.

Στον ελλαδικό χώρο υπάρχει πληθώρα σπουδαίων μνημείων και ιστορικών κτηρίων διαφόρων ιστορικών περιόδων, τα όποια αποτελούν σημεία πολιτιστικής κληρονομιάς παγκοσμίου ενδιαφέροντος. Η προστασία αυτών θα πρέπει να αποτελέσει μια από τις προτεραιότητες των προγραμμάτων της αειφορικής διαχείρισης, γι' αυτό και πολλές από τις μελέτες που έχουν καταγραφεί τα τελευταία χρόνια, στρέφονται πλέον προς την ανάπτυξη ολοκληρωμένου, επιστημονικών μεθοδολογιών, οι οποίες, σε βάθος χρόνου, θα οδηγούν στη βιώσιμη ανάπτυξη της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιείται μια πρώτη προσπάθεια προσέγγισης της αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο μνημείο του Λευκού Πύργου, το οποίο και αποτελεί σύμβολο της πόλης της Θεσσαλονίκης. Στόχος της εργασίας είναι η αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης με Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους και η σύγκρισή της με παρελθοντικά δεδομένα, όπου αυτό είναι δυνατόν, σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τέλος, θα γίνει προσπάθεια, η παρούσα εργασία να αποτελέσει τη βάση για το ξεκίνημα εγχειρήματος δημιουργίας μιας διαδραστικής εφαρμογής, προσβάσιμης με ψηφιακά μέσα στο κοινό της Θεσσαλονίκης, με την οποία θα παρουσιάζονται οι επιπτώσεις και οι κίνδυνοι της υποβάθμισης του μνημείου από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, για πολλές από τις οποίες ευθυνόμαστε όλοι.

SUMMARY

'Impacts of environmental conditions on monuments of cultural heritage. The case of the White Tower of Thessaloniki.'

The quality of the environment constitutes an important factor in the degradation of cultural heritage monuments. Various environmental loads, natural or anthropogenic, affect the quality, the mechanical & aesthetic characteristics of monuments, leading to erosion of the building materials of historical structures. Air pollution is a determining factor, as pollutants can cause deposits, color & composition change & other physicochemical processes on materials. In addition to air pollutants, geology & climate of each region (proximity to marine environment, air circulation, acid rain, temperature changes, geotechnical characteristics, etc.), along with its urban characteristics & the construction & materials' properties, are parameters of inevitable deterioration. A sustainable management of anthropogenic pollutants can help significantly in reducing functional & aesthetic degradation of monuments & historical buildings & can contribute to their protection & preservation.

In Greece, many important monuments & historical buildings of various historical periods constitute points of universal interest cultural heritage. Protecting them should be one of the priorities of a worldwide strategic, which is why many of the studies recorded in recent years are orientated towards an integrated, scientific development of methodologies which, over time, will lead to the sustainable development of cultural heritage.

The current thesis is a first attempt made to assess the environmental impacts on the monument of the White Tower, a landmark of the city of Thessaloniki. The aim of the work is to examine the existing situation of the monument with Non-Destructive Methods & compare it, where possible, with past data, in relation to environmental conditions.

Finally, an effort will be made to launch an interactive application, accessible digitally to the public of Thessaloniki, presenting the effects & risks of the degradation of the monument by environmental conditions, for many of which we are all responsible.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φθορά των μνημείων είναι αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα δομικά υλικά τους. Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή διερευνάται η φθορά των υλικών στον Λευκό Πύργο της Θεσσαλονίκης, σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στη θέση του μνημείου.

Το περιεχόμενο της εργασίας αναλύεται ανά κεφάλαιο ως ακολούθως:

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση, έτσι ώστε να αναλυθεί το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στην επίδραση του περιβάλλοντος στα μνημεία. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στο θεσμικό πλαίσιο της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, παρουσιάζονται τα δομικά υλικά των μνημείων και οι ιδιότητές τους και αναλύονται οι μηχανισμοί με τους οποίους οι διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες επιδρούν στα υλικά και οι διάφορες μορφές φθοράς, ως αποτέλεσμα των μηχανισμών αυτών. Επίσης, περιγράφονται συνοπτικά οι Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι που επιτρέπουν τη διάγνωση, αποτύπωση και χαρτογράφηση των μορφών διάβρωσης.

Στο Κεφάλαιο 3 δίνεται έμφαση στις μεθόδους που εφαρμόστηκαν στην εργασία αυτήν, δηλαδή στον Οπτικό Έλεγχο, την Κρουσιμέτρηση και την Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας, ενώ παρουσιάζονται η αρχαική έρευνα για το ίδιο το μνημείο, σε ιστορικό, αρχιτεκτονικό επίπεδο και επίπεδο επεμβάσεων συντήρησης, καθώς και τα κλιματολογικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της θέσης και της ευρύτερης περιοχής του Λευκού Πύργου.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα της μελέτης, με τη σχετική φωτογραφική τεκμηρίωσή τους και τα ανάλογα διαγράμματα.

Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη, καθώς και προτάσεις-προοπτικές για περαιτέρω συνέχιση και ενσωμάτωση της εργασίας στον σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού εργαλείου για την παρακολούθηση και τη διαχείριση της φθοράς του Λευκού Πύργου και άλλων μνημείων της πόλης.

Τέλος, παρουσιάζεται η βιβλιογραφία της εργασίας και, σε παράρτημα, οι μετρήσεις από τη δοκιμή της Κρουσιμέτρησης και οι σημαντικότερες από τις διεθνείς Συμβάσεις και Χάρτες για την προστασία και διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Η Πολιτιστική Κληρονομιά και η προστασία της

«Η λέξη στον τίτλο μας 'πολιτιστικός' (ενν. Οργανισμός) χρησιμοποιείται με μια ευρεία έννοια. Πρωτίστως αγκαλιάζει όλους τους τομείς της δημιουργικής τέχνης, συμπεριλαμβανομένης της λογοτεχνίας και της αρχιτεκτονικής, καθώς και της μουσικής και του χορού, της ζωγραφικής και των άλλων εικαστικών τεχνών. Ακόμα, τις εφαρμογές της τέχνης, με τη μορφή της διακόσμησης, του βιομηχανικού σχεδιασμού, ορισμένες πτυχές πολεοδομικού σχεδιασμού και σχεδιασμού τοπίου και ούτω καθεξής. Στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την έννοια της καλλιέργειας του μυαλού, προς την ανάπτυξη των συμφερόντων και των ικανοτήτων του, τη γνωριμία με τα καλλιτεχνικά και πνευματικά επιτεύγματα τόσο της δικής μας όσο και προηγούμενων εποχών, τη γνώση της ιστορίας, την εξοικείωση με συγκεκριμένες ιδέες, την απόκτηση κριτικής και ανεξάρτητης σκέψης. Με αυτήν την οπτική, μπορούμε να μιλάμε για υψηλό ή χαμηλό επίπεδο πολιτισμού σε μια κοινότητα. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την καθ' όλα ευρύτερη έννοια, αυτήν δηλαδή της ανθρωπολογικής ή κοινωνιολογικής διάστασης, ως ένδειξη των υλικών και πνευματικών μηχανισμών, χαρακτηριστικών μιας συγκεκριμένης κοινωνίας...» (Huxley, 1945). Με αυτά τα λόγια, στο προοίμιο της ιδρυτικής διακήρυξής του, το 1945, ο πρώτος Διευθυντής της UNESCO (United Nations' Educational Scientific & Cultural Organization - Εκπαιδευτικός, Επιστημονικός και Πολιτιστικός Οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών), Julian Huxley, αποτυπώνει τη διαχρονική αγωνία για έναν σαφή ορισμό της ιδέας της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Με τη σύγχρονη σημασία του, ο όρος 'εθνική κληρονομιά' χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1790, σε υπόμνημα του François Pouthod de Maisongroue προς τη Συντακτική Συνέλευση της Γαλλίας, με το οποίο παρότρυνε τη μεταναστευτική κοινότητα στη Γαλλία να μετασχηματίσει την οικογενειακή κληρονομιά σε εθνική. Μετά τη Γαλλική Επανάσταση, ο όρος αποκτά και νομική σημασία, με την έννοια μιας κοινής εθνικής κληρονομιάς. Η πολιτιστική διάσταση της εθνικής κληρονομιάς, συμπεριλαμβανομένης και της καλλιτεχνικής έκφασής της και οι πρώτοι προβληματισμοί για τις αρχές που πρέπει να διέπουν την προστασία και διαφύλαξή της τέθηκαν, ταυτόχρονα σχεδόν, σε Γαλλία και Αγγλία στα μέσα του 19^{ου} αιώνα (~1840), από τους Viollet-le-Duc και John Ruskin αντίστοιχα. Ακολούθησε η περίφημη διατύπωση των οκτώ (8) σημείων-θέσεων του Ιταλού Αρχιτέκτονα Camillo Boito, που αποτελεί τη βάση του πλαισίου συμπεριφοράς προς τα μνημεία. Οι θέσεις αυτές παγιώθηκαν με τη σύνταξη του Α' Διεθνούς Χάρτη για την Προστασία των Μνημείων, στη

Διεθνή Διάσκεψη για την Προστασία και Συντήρηση των Καλλιτεχνικών Μνημείων των Αθηνών, το 1931, από τον Ευριπίδη Φουντουκίδη, Γενικό Γραμματέα τότε του Διεθνούς Οργανισμού Μουσείων (Organization of International Museums) και του Διεθνούς Ινστιτούτου Πνευματικής Συνεργασίας (International Institute of Intellectual Cooperation, IIIC) (Vecco, 2010).

Αρχικά, η έννοια και το περιεχόμενο της πολιτιστικής κληρονομιάς ταυτίστηκε με μεμονωμένα κτίσματα ή το σύνολο των αρχιτεκτονημάτων ενός τόπου, σημειολογικών για τη μνήμη μιας κοινότητας, μιας πολιτείας ή ενός ιστορικού γεγονότος, προσδίδοντας σε αυτά έναν όγκο επιβλητικότητας και εντυπωσιασμού, με άλλα λόγια μνημειακότητας. Η λέξη μνημείο προέρχεται από το ομηρικό ρήμα «μνάομαι – μνώμαι» και το ύστερο «μιμνήσκω – μιμνήσκομαι» ή, στα λατινικά, το ρήμα «monere», εξ ου και «monumentum» (Πίττας, 1994). Με αυτήν την έννοια, μνημείο σημαίνει οτιδήποτε ανακαλεί στη μνήμη ή υπενθυμίζει κάτι και αφήνει παρακαταθήκη στους συγχρόνους ή τους μεταγενέστερους (Μαλλούχου-Tufano, 2016).

Σταδιακά, από τον 19^ο αιώνα μέχρι και σήμερα, η έννοια του όρου «μνημείο» έχει διευρυνθεί σημαντικά, από το μεμονωμένο μνημείο, σημείο σταθερό και με ιστορική σημασία, σε ένα ευρύτερο πολιτιστικό αγαθό, ανθρωπογενές ή φυσικό έως και, στις μέρες μας του 21^{ου} αιώνα, στην έννοια της ψηφιακής πολιτιστικής κληρονομιάς (Μαλλούχου-Tufano, 2016), περικλείοντας πλέον όλα τα στοιχεία της ανθρώπινης δημιουργικότητας και έκφρασης, τα οποία συναντώνται σε υλική ή άυλη μορφή.

Ως πολιτιστικό αγαθό λοιπόν, νοείται πλέον κάθε κατάλοιπο του ανθρώπου, που στο παρελθόν μπορεί να είχε είτε χρηστική αξία (σκεύη οικιακής χρήσης, εργαλεία, κοσμήματα, όπλα κτλ.), ή συμβολική λειτουργία (λατρευτικά αντικείμενα, εθνικά σύμβολα, οικογενειακά κειμήλια κτλ.), ή μια πνευματική αποστολή και καλλιτεχνική αξία (ποιητική δημιουργία, ιστορικά συγγράμματα, φιλοσοφικά κείμενα, επιστημονικές διατριβές κτλ.), το οποίο σήμερα αποτελεί ένα τεκμήριο πολιτισμού που έχει διασωθεί και μας παραπέμπει στις αντιλήψεις, τις ανθρώπινες δοξασίες, τα επιτεύγματα και τον τρόπο ζωής του παρελθόντος (Καραλή, 1998) και που η διαφύλαξή του είναι απαραίτητη για την πολιτισμική ταυτότητα των σημερινών ανθρώπων και των μελλοντικών γενεών.

Το σύνολο των πολιτιστικών αγαθών που αναφέρονται σε έναν τόπο συγκροτούν την πολιτιστική κληρονομιά του, με την έννοια ότι αυτή περιέχει τα στοιχεία που απαρτίζουν την ιστορική μνήμη του λαού ή της κοινωνίας των ανθρώπων που τον κατοικούν, δηλαδή οτιδήποτε δημιουργήθηκε στο παρελθόν και σχετίζεται με την ιστορική του διαδρομή

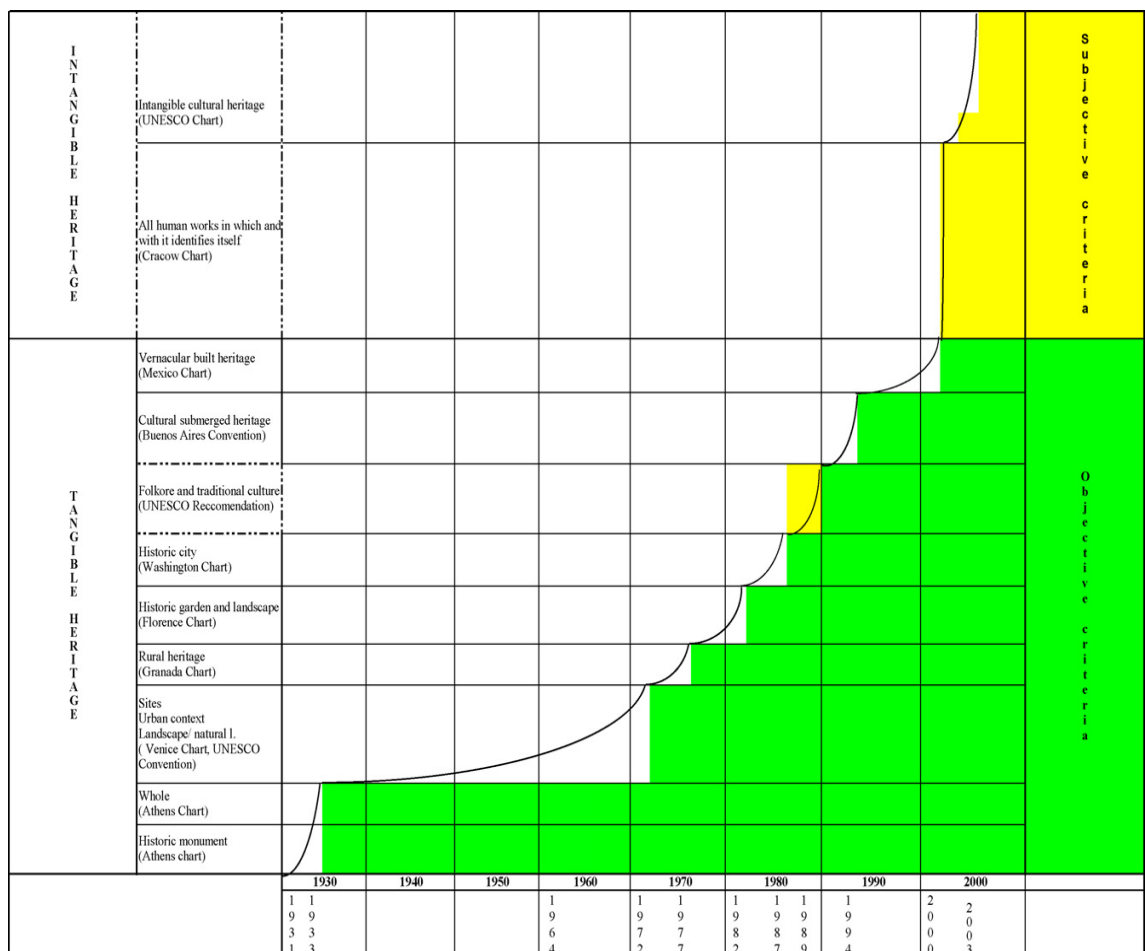
(Καραλή, 1998). Επιπρόσθετα, η πολιτιστική κληρονομιά υπονοεί ένα κοινωνικό δέσιμο ανάμεσα στα άτομα που συνιστούν την κοινότητα στην οποία ανήκει ο πλούτος αυτός, που αντιπροσωπεύει την ιστορία, την κουλτούρα, την ταυτότητα και συνδέει το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον του κάθε μέλους της κοινότητας (Franchi, 2015).

Η πολιτιστική κληρονομιά σχετίζεται άμεσα και σχεδόν πάντα με την έννοια της «αίσθησης του τόπου», τόσο ως γεωγραφικού χώρου, φυσικού και δομημένου, αλλά και ως μιας ευρύτερης πολιτισμικής ενότητας (Elmeligy, 2014). Αποτελεί θεμελιώδη λίθο για κάθε κοινότητα η δυνατότητα να αυτοπροσδιορίζεται και να διατηρεί εκείνα τα χαρακτηριστικά που αντανakλούν τόσο την ταυτότητα του τόπου της, όσο και τη διαφοροποίησή της. Ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η πολιτιστική κληρονομιά (Antrop, 2004). Ιδιαίτερος δε, τα ιστορικά κτήρια και τοπία φέρουν ακριβώς τα στοιχεία αυτά που διαμορφώνουν την αίσθηση του «ανήκειν», αυτό που, ο Νορβηγός αρχιτέκτονας και θεωρητικός της Αρχιτεκτονικής, Norberg-Schulz, ονομάζει «genius loci», «το πνεύμα του τόπου» (Norberg-Schulz, 2009).

Σήμερα, η πολιτιστική κληρονομιά έχει ξεπεράσει τα όρια της εθνικής κληρονομιάς και το «πνεύμα του τόπου» αποκτά οικουμενικές διαστάσεις, όταν πρόκειται για μνημεία υψίστης σπουδαιότητας για τη διεθνή κοινότητα ως σύνολο, αυτά που η UNESCO χαρακτηρίζει ως Εξέχουσας Οικουμενικής Αξίας (EOA) (Καρετανονιά, 2016). Όπως σημειώνεται στο ενημερωτικό φυλλάδιο του Κέντρου Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO (UNESCO World Heritage Centre) του 2008, «[...] η κληρονομιά μας είναι ένα κληροδότημα του παρελθόντος, με το οποίο ζούμε στο παρόν, και το οποίο μεταφέρουμε και στις μελλοντικές γενιές. Η πολιτιστική και φυσική μας κληρονομιά αποτελούν αναντικατάστατες πηγές ζωής και έμπνευσης που μας καθορίζουν, λειτουργούν ως σημεία αναφοράς, διαμορφώνουν την ταυτότητά μας. Αυτό που κάνει μοναδική την έννοια της Παγκόσμιας Κληρονομιάς είναι η καθολική της εφαρμογή. Τα Μνημεία Παγκόσμιας Κληρονομιάς ανήκουν σε όλους τους λαούς του κόσμου, σε όποιο σημείο της γης και αν βρίσκονται [...]» (UNESCO World Heritage Centre, 2008).

Η πολιτιστική κληρονομιά διακρίνεται στην υλική και στην άυλη (**Πίνακας 1**). Η διάκριση αυτή αποτελεί προϊόν του συνεδρίου του ICOMOS (1999) (International Council on Monuments & Sites - Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τοποθεσιών), στο οποίο αναγνωρίζεται η ικανότητα του ατόμου να αντιλαμβάνεται την αισθητική, ιστορική, επιστημονική και κοινωνική αξία ενός έργου, ενώ παράλληλα η ανάγκη του για παραπάνω αναγνώριση μαρτυρά μεταξύ άλλων, πως εκτός από την υλική του υπόσταση, ένα αγαθό πολιτιστικής κληρονομιάς κρύβει περαιτέρω μηνύματα, μη απτά, άυλα (Vecco, 2010).

Πίνακας 1. Χρονολογική εξέλιξη ορισμού και διάκρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς, μέσα από διεθνή συνέδρια και συνθήκες. (Πηγή: Vecco,2010)



Έτσι λοιπόν, ως υλική πολιτιστική κληρονομιά, σύμφωνα και με την περιγραφή του Χάρτη της Βενετίας (1964), λαμβάνονται σήμερα πλέον, πλην του μεμονωμένου αρχιτεκτονικού ή καλλιτεχνικού έργου, ιστάμενου (ακίνητου) ή κινητού, η βιομηχανική κληρονομιά και οι δημιουργίες του Κινήματος της Μοντέρνας και Σύγχρονης Αρχιτεκτονικής, οι αρχαιολογικοί χώροι, τα οικιστικά σύνολα παραδοσιακής αρχιτεκτονικής, τα ιστορικά κέντρα των πόλεων, οι ιστορικοί τόποι, οι χώροι με ισχυρό θρησκευτικό και πνευματικό περιεχόμενο, οι χώροι μνήμης γεγονότων της ανθρώπινης ιστορίας (Μαλλούχου-Tufano, 2016), όλοι δηλαδή οι αστικοί ή και αγροτικοί χώροι που μαρτυρούν έναν ιδιαίτερο πολιτισμό, μια ενδεικτική εξέλιξη ή ένα ιστορικό γεγονός (Χάρτης της Βενετίας, 1964).

Ως μνημεία της άυλης πολιτιστικής κληρονομιάς νοούνται κοινωνικές πρακτικές, προφορικές παραδόσεις και εκφράσεις, λατρευτικές τελετουργίες, γιορτές, γνώσεις και δεξιότητες, παραδοσιακές χειροποίητες τέχνες και τεχνικές, που προσφέρουν στον άνθρωπο

μια αίσθηση ταυτότητας και συνέχειας, ενώ προωθούν τον σεβασμό για την πολυπολιτισμικότητα και την ανθρώπινη δημιουργικότητα (Μαλλούχου-Tufano, 2016).

Ως μνημεία της ψηφιακής πολιτιστικής κληρονομιάς νοούνται οι καταγραφές σημαντικών πληροφοριών από παντός είδους πηγές, που διατηρούν ζωντανή τη μνήμη της ανθρωπότητας (Μαλλούχου-Tufano, 2016).

Τέλος, ως μνημεία της φυσικής πολιτιστικής κληρονομιάς νοούνται φυσικοί, βιολογικοί ή γεωλογικοί σχηματισμοί ή βιότοποι ειδών με ιδιαίτερη σημασία, αισθητική ή επιστημονική, τοπική, εθνική ή οικουμενική, των οποίων η προστασία και διάσωση εξασφαλίζει την πνευματική και ψυχική ισορροπία, καθώς και την ποιότητα ζωής σύγχρονων και επιγόνων (Μαλλούχου-Tufano, 2016).

Προκειμένου η πολιτιστική κληρονομιά, εθνική και παγκόσμια, να παραμείνει ζωντανή και να παραδοθεί όσο το δυνατόν αλώβητη στις επόμενες γενιές, κρίνεται απαραίτητη η κατάλληλη διαχείρισή της, με απώτερο στόχο τη διατήρηση και την προστασία της. Η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας, καθώς αντιπροσωπεύει, σε επίπεδο πολιτισμού, το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον των πολιτών ανά τον κόσμο (Tuani & Navrud, 2008).

Το ζήτημα της προστασίας των μνημείων δεν είναι προϊόν του σύγχρονου κόσμου. Ήδη από την αρχαιότητα διαφαίνεται η ανάγκη διατήρησης των καταλοίπων του παρελθόντος, κυρίως για λόγους ωφελιμιστικούς, μέσω της χρησιμότητάς τους, είτε ιδεολογικούς, με σκοπό την καταξίωση επιδιώξεων της εποχής, καθώς και για λόγους ιστορικής συνέχειας. Όμως, σημερινές έννοιες συνυφασμένες με τη διαχείριση των πολιτιστικών αγαθών, όπως η άμεση σύνδεσή τους με την ιστορία, την πολιτισμική ταυτότητα και την παράδοση των λαών, ο παγκόσμιος χαρακτήρας τους, οι πανανθρώπινες αισθητικές, επιστημονικές και περιβαλλοντικές αξίες που αυτά φέρουν, είναι αποτέλεσμα μιας σταδιακής πολιτιστικής ωρίμανσης της ανθρωπότητας και αναδύονται ως ιδέες στο τέλος του 18^{ου} αιώνα στην Ευρώπη (Μαλλούχου-Tufano, 2016). Η σύγχρονη αυτή αντίληψη για τη μνημειακή προστασία συνοψίζεται στην Εισαγωγή του Χάρτη της Βενετίας (1964): *«Φορτισμένα με το πνευματικό μήνυμα του παρελθόντος τα μνημειακά έργα των λαών στέκονται σήμερα σαν ζωντανές μαρτυρίες της μακρόχρονης παραδόσεώς τους. Η ανθρωπότητα, που αποκτά όλο και μεγαλύτερη συνείδηση της ενότητας των ανθρώπινων αξιών, τα θεωρεί σαν κοινή κληρονομιά. Απέναντι στις μελλοντικές γενεές νοιώθει υπεύθυνη για τη διάσωσή τους και έχει χρέος να τα παραδώσει σ' αυτές με όλο τον πλούτο και την αυθεντικότητά τους.»* (Χάρτης της Βενετίας, 1964).

Ο Χάρτης της Βενετίας (1964), ο οποίος συνιστά έως και σήμερα το κατεξοχήν πλαίσιο των αρχών της μνημειακής προστασίας, ήταν το αποτέλεσμα της ανάγκης, που ανέκυψε με τη λήξη του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, για τη χάραξη και εφαρμογή μιας διεθνούς στρατηγικής για τη συντήρηση και διάσωση της πολιτιστικής κληρονομιάς, ιδιαιτέρως δε της υλικής, όταν η κατεστραμμένη Ευρώπη κλήθηκε να αντιμετωπίσει, με συντονισμένες δράσεις, την ανοικοδόμηση πολλών από τις μεγάλες πόλεις της και την αποκατάσταση της ιστορικής φυσιογνωμίας τους. Η έντονη δραστηριότητα των μεταπολεμικών χρόνων στο πεδίο της μνημειακής ανάταξης οδήγησε, το 1964, στον πρώτο αυτό διεθνή (υπό την έννοια της συμμετοχής στην ψήφισή του και χωρών εκτός Ευρώπης) Χάρτη Αποκαταστάσεως Μνημείων και Τόπων (Μαλλούχου-Τufano, 2016).

Μερικά χρόνια πριν, αμέσως μετά το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, τον Νοέμβριο του 1945, είχε ήδη ιδρυθεί ο Εκπαιδευτικός, Επιστημονικός και Πολιτιστικός Οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών (UNESCO), ο οποίος αποτελεί τον κυριότερο έως και σήμερα σε διεθνές επίπεδο, πόλο παραγωγής θεσμικών κειμένων για το ζήτημα της προστασίας των πολιτιστικών αγαθών. Το 1972, τονίζοντας πάντα την προώθηση μιας διεθνούς συνεργασίας, διαμέσου της εκπαίδευσης, της επιστήμης και του πολιτισμού, η UNESCO υιοθέτησε τη Σύμβαση για την Παγκόσμια Πολιτιστική και Φυσική Κληρονομιά, που συνιστά σταθμό στην εξέλιξη του ζητήματος (Ζερβάκη, 2015) και παραμένει έως και σήμερα το κείμενο με το υψηλότερο κύρος σε ό,τι αφορά την πολιτιστική κληρονομιά (Φωτοπούλου, 2020) **(Εικόνα 1)**.

Στα μεταπολεμικά χρόνια, στη διάρκεια των οποίων η ιδέα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς ολοένα και εμβαθύνεται, ιδρύονται πολλοί διεθνείς οργανισμοί που δραστηριοποιούνται έως και σήμερα στην προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς. Ενδεικτικά αναφέρονται, εκτός της UNESCO, το Διεθνές Συμβούλιο Μουσείων (International Council of Museums – ICOM, 1946), το Συμβούλιο της Ευρώπης (Council of Europe, 1949), το Διεθνές Κέντρο Μελέτης για τη Διατήρηση και την Αποκατάσταση των Πολιτιστικών Αγαθών (International Centre for the Study of the Preservation & the Restoration of Cultural Property – ICCROM, 1956), το Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τοποθεσιών (International Council of Monuments & Sites – ICOMOS, 1965), το Παγκόσμιο Ταμείο Μνημείων (World Monuments Fund – WMF, 1965), η Πανευρωπαϊκή Ομοσπονδία για την Κληρονομιά EUROPA NOSTRA, ο Οργανισμός Πόλεων Πολιτιστικής Κληρονομιάς (Organization of World Heritage Cities – OWHC, 1993), καθώς και η Παγκόσμια Ένωση για την Προστασία της Φύσης και των Φυσικών

Πόρων (International Union for the Conservation of Nature & Natural Resources – IUCN, 1948) (Μαλλούχου-Tufano, 2016).

Οι οργανισμοί αυτοί, καθώς και οι πρακτικές που ακολουθήθηκαν είχαν και συνεχίζουν να έχουν ως κυρίαρχο στόχο τη διαφύλαξη της πολιτιστικής κληρονομιάς και την προστασία της από την ύπαρξη οποιασδήποτε αρνητικής επίπτωσης, εξαιτίας της ανθρώπινης, μαζικής και μη ελεγχόμενης χρήσης της (Αυγερινού-Κολώνια, 1995), αλλά και από φυσικούς παράγοντες, ανθρωπογενείς ή μη.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο και σε ό,τι αφορά σε θέματα πολιτισμού εν γένει, η Ευρωπαϊκή Ένωση διαπνέεται από τη λεγόμενη Αρχή της Επικουρικότητας. Αυτό σημαίνει ότι δεν παρεμβαίνει με άμεσες ρυθμίσεις, όπως κάνει σε άλλα θέματα, αλλά αναγνωρίζει τον πολιτισμό ως το βασικό στοιχείο που ενώνει τους λαούς της Ένωσης, σεβόμενη την εθνική και περιφερειακή ποικιλομορφία τους και συμβάλλει στην ανάπτυξη του πολιτισμού των κρατών-μελών, εάν και μόνο αυτό της ζητηθεί (Φωτοπούλου, 2020).

Σε εθνικό επίπεδο, με το ελληνικό Σύνταγμα του 1975 κατοχυρώνεται, για πρώτη φορά ρητά, η προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος ως υποχρέωση του κράτους, στο άρθρο 24, το οποίο ξεκινά με την εμβληματική διατύπωση *«Η προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος αποτελεί υποχρέωση του Κράτους και δικαίωμα του καθενός.»* (Σύνταγμα της Ελλάδας, 1975), η οποία ανάγει το δικαίωμα στο περιβάλλον ως συνταγματικό δικαίωμα. Με τη συνταγματική αναθεώρηση του 2001, τονίζεται η ανάγκη για διαρκή προστασία του περιβάλλοντος, με στόχο την παγίωση του χαρακτήρα των πολιτιστικών αγαθών και τη διαφύλαξή τους στις επερχόμενες γενιές, εισάγοντας την έννοια της αρχής της αειφορίας (Φωτοπούλου, 2020).

Το εθνικό πλαίσιο προστασίας των Αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς περιγράφει ο Νόμος 3028/2002. Σύμφωνα με αυτόν, η πολιτιστική κληρονομιά της χώρας περιλαμβάνει τα υλικά και άυλα πολιτιστικά αγαθά, που βρίσκονται εντός των ορίων της ελληνικής επικράτειας, συμπεριλαμβανομένων των χωρικών υδάτων και των υπόλοιπων θαλάσσιων ζωνών, στις οποίες η Ελλάδα έχει, σύμφωνα με το διεθνές δίκαιο, το δικαίωμα άσκησης σχετικής δικαιοδοσίας (Γραμματικάκη-Αλεξίου, 2002), (Ν.3028/2002, 2002). Οριοθετείται επίσης το πλαίσιο των ενεργειών για τις επεμβάσεις σε ακίνητα μνημεία και το περιβάλλον τους, τις εργασίες προστασίας τους, καθώς και το πλαίσιο κατοχής και κυριότητας κινητών μνημείων και πολιτιστικών αγαθών (Ν.3028/2002, 2002) (**Εικόνα 1**).

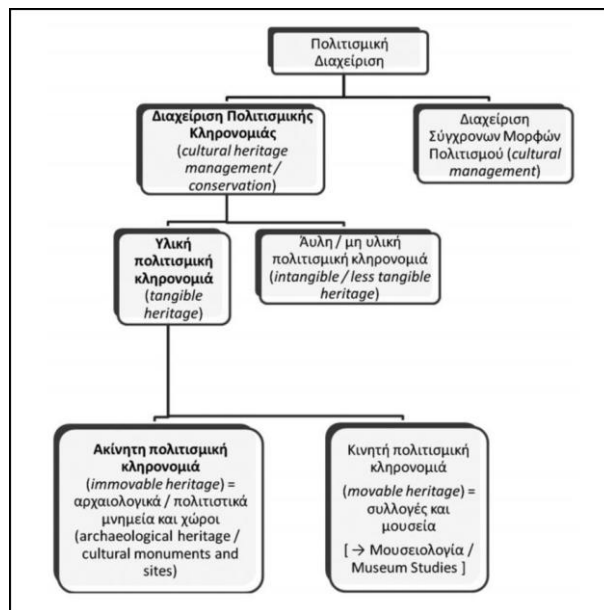
Η μέριμνα για την προστασία της μνημειακής κληρονομιάς στην Ελλάδα ασκείται από την Κεντρική και τις Περιφερειακές Αρχαιολογικές Υπηρεσίες του Υπουργείου Πολιτισμού, το

Κεντρικό Αρχαιολογικό Συμβούλιο και τα Τοπικά Συμβούλια Μνημείων, με συναρμόδιο το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, στις περιπτώσεις ιστορικών οικισμών και ιστορικών κέντρων πόλεων, καθώς και τοπίων φυσικού κάλλους (Γεωργιάδου, 2016; Μαλλούχου-Tufano, 2016).



Εικόνα 1. Θεσμικά Κείμενα για την Πολιτιστική Κληρονομιά. (Πηγή: Φωτοπούλου, 2020)

Η έννοια της προστασίας εμπεριέχει ένα ευρύ φάσμα πρακτικών επέμβασης στα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως η συντήρηση, η αναστήλωση, η αναπαλαίωση, η αποκατάσταση κ.ά. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει υιοθετηθεί ο όρος «ολοκληρωμένη προστασία – διαχείριση», που εισάγεται με τον Διεθνή Χάρτη για την Προστασία και τη Διαχείριση της Αρχαιολογικής Κληρονομιάς της Λωζάννης, το 1990. Η ολοκληρωμένη προστασία αποτελεί μια δυναμική μορφή προστασίας και είναι η πρώτη φορά που συνδέεται άμεσα και αποτελεί συστατικό των πολιτικών ανάπτυξης και σχεδιασμού, καθώς και πολιτιστικών και εκπαιδευτικών πολιτικών (Καραδήμου, 2018). Ως όρος, αλλά και ως ξεχωριστό επιστημονικό πεδίο, η διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς εμφανίστηκε στη δεκαετία του 1980 και περιλαμβάνει το σύνολο ενεργειών που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν, από το αρχικό στάδιο ακόμη της έρευνας έως και την τελική ανάδειξη και χρήση, ώστε να εξασφαλιστεί η διαφύλαξη των υλικών και άυλων αξιών που είναι συνυφασμένες με αυτήν. Η πολιτισμική διαχείριση (Εικόνα 2) είναι, όπως και η ολοκληρωμένη προστασία, μια δυναμική διαδικασία, που προϋποθέτει τη διεπιστημονική συνεργασία ειδικών επιστημόνων και εμπλεκόμενων φορέων και εντάσσει τα πολιτιστικά αγαθά, ως εν δυνάμει παραγωγικό και κοινωνικό κεφάλαιο, στους σημαντικούς παράγοντες της, απαιτούμενης από την εποχή, βιώσιμης ανάπτυξης (Μαλλούχου-Tufano, 2016).



Εικόνα 2. Η έννοια της Πολιτισμικής Διαχείρισης (Πηγή: Πούλιος, 2010)

Για τη διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς με σημερινά δεδομένα, οι περισσότερες από τις βασικές αρχές έχουν ήδη ενσωματωθεί σε διεθνώς αναγνωρισμένες προσεγγίσεις και γνώσεις. Μερικά από τα κύρια ζητήματα περιλαμβάνονται σε ένα από τα πιο πρόσφατα έγγραφα που έχουν εκπονήσει οι οργανισμοί UNESCO, ICCROM, ICOMOS, IUCN, το Εγχειρίδιο του 2013 «Managing Cultural World Heritage» (Karpetanović, 2016; UNESCO *et al.*, 2013).

Στο κείμενο αυτό, δίνονται τα βασικά σημεία εκκίνησης για τη διαχείριση των Μνημείων Παγκόσμιας Κληρονομιάς, όπως η διευρυνόμενη έννοια της κληρονομιάς και η σχέση της με το φυσικό και κοινωνικό πλαίσιο στο οποίο ενυπάρχουν, η ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης μέσω της αξιοκεντρικής προσέγγισης, η διαχείριση των μεταβολών του ιστορικού περιβάλλοντος, καθώς και η προώθηση μιας ολοκληρωμένης – συμμετοχικής διαχείρισης, με τη δέσμευση των τοπικών κοινωνιών σε αυτήν (Karpetanović, 2016). Όλα τα βασικά αυτά σημεία συντάσσονται μέσα από το πρίσμα της βιώσιμης ανάπτυξης, που αποτελεί το πλέον καίριο ζήτημα της εποχής σε όλους τους τομείς. Ο όρος «βιώσιμη διαχείριση» έχει ήδη, από το 2005, συμπεριληφθεί στις Επιχειρησιακές Κατευθυντήριες γραμμές για την Υλοποίηση της Σύμβασης για την Παγκόσμια Κληρονομιά (*Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention*), ως οδηγός για τη διαχείριση της πολιτιστικής, αλλά και της Παγκόσμιας Κληρονομιάς (Karpetanović, 2016).

Η πολιτισμική διαχείριση στο σύνολό της, λογίζεται πλέον ως ένας τέταρτος πυλώνας στη βιώσιμη ανάπτυξη και μπορεί να παίξει ένα σημαντικό και ενεργό ρόλο για αυτήν, καθώς σχετίζεται με πολλούς κλάδους της κοινωνίας και της οικονομίας, όπως ο τουρισμός, η αστική διαχείριση και προβολή (branding), η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και η υλοποίηση αναπτυξιακών και ενεργειακών έργων (Πούλιος *et al.*, 2015).

2.2 Τα δομικά υλικά των μνημείων

2.2.1 Αναφορά στην ιστορική εξέλιξη των δομικών υλικών

Με τον όρο δομικά υλικά νοείται το σύνολο των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ένα τεχνικό έργο για την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρησή του (Λεγάκις, 1997α). Ο όρος «δομικός» προέρχεται από τη λέξη «δομή», η οποία με τη σειρά της έχει ρίζα στο αρχαίο «δέμω», που ερμηνεύεται ως «χτίζω, οικοδομώ». Κατά το αρχαιοελληνικό *δόμος* και το λατινικό *domus* (οίκος), η λέξη «δομή» συμβόλιζε αρχικά το κτίσμα, το οικοδόμημα, ενώ η σύγχρονη σημασία του είναι η διάρθρωση ενός συνόλου από επιμέρους στοιχεία (Μπαμπινιώτης, 2009). Ο όρος «δομικός» λοιπόν, ενσωματώνει την έννοια της τάξης με την οποία απαιτείται να τοποθετηθούν κάποια υλικά, ώστε να προκύψει ένα κατασκεύασμα ορισμένης μορφής και διαστάσεων (Λεγάκις, 1997α).

Η εξέλιξη των δομικών υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξέλιξη του ανθρώπου (Λεγάκις, 1997α). Η ανάπτυξη και η πρόοδος της ανθρώπινης κοινωνίας συνδέθηκε με τη δυνατότητα επεξεργασίας των πρώτων υλών και την παρασκευή υλικών υψηλών προδιαγραφών, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Οι ιστορικές περιόδους χαρακτηρίστηκαν από τα κυρίαρχα υλικά που παρήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο. Έτσι, ονομάστηκαν αντίστοιχα Εποχή του Λίθου, Εποχή του Χαλκού και του Ορείχαλκου, Εποχή του Σιδήρου (Γεωργιάδου, 2016).

Η ιστορία των δομικών υλικών ξεκινά ήδη από την Παλαιολιθική εποχή (έως το 10000 π.Χ.) (ΥΠΠΟ Ανδρεαδάκη-Βλαζάκη, 2012), την περίοδο του ανθρώπου-κυνηγού και τροφουσλλέκτη. Είναι η εποχή της λάξευσης της πέτρας. Για τον άνθρωπο της εποχής αυτής, η μετακίνηση για αναζήτηση τροφής καθίσταται ανάγκη πρωταρχικής σημασίας. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι, από τις πρώτες φάσεις αυτής της περιόδου εκλείπει η οικοδομική δραστηριότητα (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014) και η όποια προσπάθεια του παλαιολιθικού κόσμου να στεγάσει τους ανθρώπους του, περιορίζεται σε προσωρινά, υποτυπώδη καταλύματα σε φυσικά σπήλαια, που προκύπτουν από κάποιες πρώτες

απόπειρες διανοίξεων σε αυτά, με λάξευση των πετρωμάτων (Széchy, 1970). Ευρήματα από υπολείμματα οστών και εργαλείων που χρονολογούνται από το 460000 έως το 230000 π.Χ., στην εποχή του *Homo erectus* ακόμη, τεκμηριώνουν την κατοίκηση του σπηλαίου Zhoukoudian στην Κίνα και τη χρησιμοποίηση ξύλινων εργαλείων για διεύρυνση των φυσικών κοιλοτήτων του σπηλαίου (Waldmann, 2005).

Προς το τέλος της Ανώτερης Παλαιολιθικής περιόδου, της φάσης που ονομάζεται Επιπαλαιολιθική (αναφερόμενη άλλοτε και ως Μεσολιθική περίοδος), η οποία εκτείνεται χρονικά από το 18000 π.Χ. έως περίπου το 10000 π.Χ. (Shea, 2013) και παρά την απουσία, στα αμέσως προηγούμενα χρόνια, οικοδομικής δραστηριότητας, διαφαίνονται οι πρώτες προσπάθειες δόμησης λίθινων κτισμάτων για τελετουργικούς κυρίως σκοπούς, από ημινομαδικά φύλα τροφосуλλεκτών ακόμη. Μοναδικό παράδειγμα της εποχής αποτελούν τα περίφημα μεγαλιθικά ιερά στο Göbekli Tepe (Εικόνα 3) της σημερινής Τουρκίας, η πρωιμότερη φάση των οποίων χρονολογείται γύρω στο 11500 π.Χ. και που πρόσφατα έχουν χαρακτηριστεί ως Μνημείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς, Εξέχουσας Οικουμενικής Αξίας από την UNESCO (Schmidt, 2012). Η αρχέτυπη μορφή της οικιστικής τοιχοποιίας, αντίθετα με τα μεγαλιθικά λατρευτικά οικοδομήματα, αποτελούνταν από πλέγμα κορμών και κλαδιών, το οποίο πληρώνονταν στις πλευρές του με στρώμα πεταχτής λάσπης (Παπαϊωάννου, 2005).

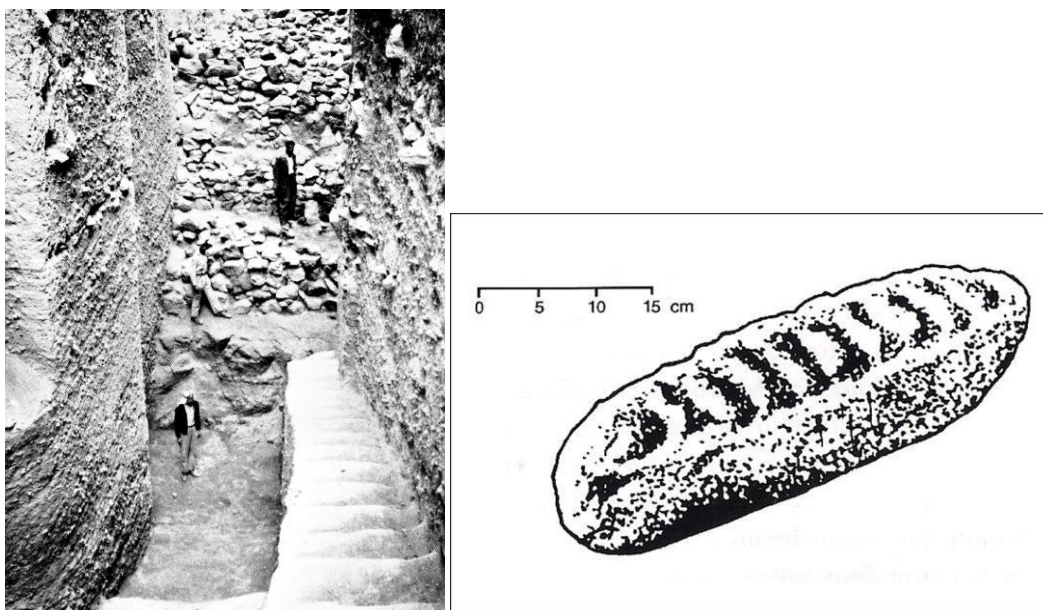


Εικόνα 3. Göbekli Tepe, μεγαλιθικά ιερά, βόρεια όψη. (Πηγή: Schmidt, 2003)

Η περίοδος που ακολουθεί της Παλαιολιθικής, η Προκεραμική Νεολιθική (10.000-6.500 π.Χ.), σηματοδοτείται από την πρώτη μεγάλη τομή στην ιστορία της ανθρωπότητας, τη Γεωργική Επανάσταση και την εμφάνιση, κατά συνέπεια, των πρώτων αγροτικών οικισμών. Ο άνθρωπος-γεωργός, ο οποίος διαδέχεται τον τροφосуλλέκτη άνθρωπο-κυνηγό, γίνεται έτσι ο δημιουργός της αρχιτεκτονικής και της οικοδομικής τεχνολογίας και οργανώνει στο εξής τη

ζωή του, κατασκευάζοντας ο ίδιος το κέλυφος της μόνιμης πλέον διαβίωσής του (Λάββας, 2002). Τα πρώτα τεκμήρια της περιόδου αυτής του πολιτισμού του μόνιμου κατοίκου, ήρθαν στο φως με την αποκάλυψη σε διαφορετικά σημεία της Εγγύς και Μέσης Ανατολής μόνιμων οικήσεων, στην Ιεριχώ και στο Nahal Oren της Παλαιστίνης, στο Mureybat της Συρίας, στο Catalhöyük, το Cayönü και το Göbekli Tepe της Μικράς Ασίας, το GanjDareh της Περσίας, καθώς και σε αρκετές ακόμη περιοχές της Γόνιμης Ημισελήνου (Λάββας, 2002).

Η θεωρούμενη έως σήμερα πρώτη γνωστή πόλη στην ιστορία, η Ιεριχώ της Παλαιστίνης, που χρονολογείται γύρω στο 8000π.Χ., έχει να παρουσιάσει τα πρώτα γνωστά τεχνικά έργα, ένα επιβλητικό λιθόκτιστο τείχος, οχυρωματικό της πόλης (**Εικόνα 4**) καθώς και συμπλέγματα κατοικιών, καμπυλόγραμμης ή και κυκλικής κάτοψης, κατασκευασμένα από ωμές πλίνθους (Kenyon, 1960). Η πλίνθος είναι το αρχαιότερο χειροποίητο τεχνητό δομικό υλικό. Στις ανασκαφές της αρχαίας Ιεριχούς ανακαλύφθηκαν ωμόπλινθοι σε μέγεθος και σχήμα μακρόστενου ψωμιού (**Εικόνα 5**) (Παπαϊωάννου, 2005).



Εικόνα 4. Ιεριχώ, τμήμα του λίθινου οχυρωματικού τείχους. (Πηγή: Kenyon, 1960)

Εικόνα 5. Ιεριχώ, ωμόπλινθος (Πηγή: Παπαϊωάννου, 2005)

Στο σύνολό της, η Νεολιθική περίοδος, που εκτείνεται χρονικά από το 10.000-3.000π.Χ. περίπου, ιδιαιτέρως από την 8^η χιλιετία και έπειτα, παρουσιάζει ένα προηγμένο στάδιο οικοδομικής τεχνολογίας και εκμετάλλευσης των φυσικών υλικών. Κατάλοιπα σε πολλές νεολιθικές θέσεις μαρτυρούν την εξέλιξη αυτή. Κύριο δομικό συστατικό αποτελεί ο πηλός, ο οποίος αφού πλαστεί και γίνει πλίνθος, στεγνώνει στον ήλιο (**Εικόνα 6**) και

τοποθετείται σε λίθινη βάση (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014). Ως ωμή πλίνθος, ιδίως όπου σπάνιζαν οι λίθοι, ο πηλός παρέμεινε για πολλούς αιώνες το σπουδαιότερο δομικό υλικό, ιδιαιτέρως δε μετά και την ανάμιξή του με άχυρα, κοπριά και μικρά κλαδιά, που αύξησαν την αντοχή και τη σκληρότητά του. Αργότερα, με κατάλληλη επεξεργασία βελτιώθηκε ποιοτικά και τέλος, με το ψήσιμό του (όπτηση) επιτεύχθηκε η παρασκευή υλικών ανώτερης ποιότητας, τα οποία χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα σε πολλές εφαρμογές (ως π.χ. οπτόπλινθοι (τούβλα), κεραμίδια, πλάκες, γυαλί κ.ά.) (Λεγάκις, 1997α). Σταθμούς στην κεραμική τεχνολογία αποτελεί η εμφάνιση, γύρω στο 4000π.Χ. των πρώτων ψημένων κεραμιδιών, πλακιδίων και αργότερα πλίνθων σε Αίγυπτο, Μεσοποταμία και Βαβυλώνα, η χρήση κεραμικών αγωγών ύδρευσης και αποχέτευσης ήδη από το 3000π.Χ. και αρκετά αργότερα, η παραγωγή και εφαρμογή του γυαλιού, σε θύρες και παράθυρα (Μοροπούλου *et al.*, 2014).



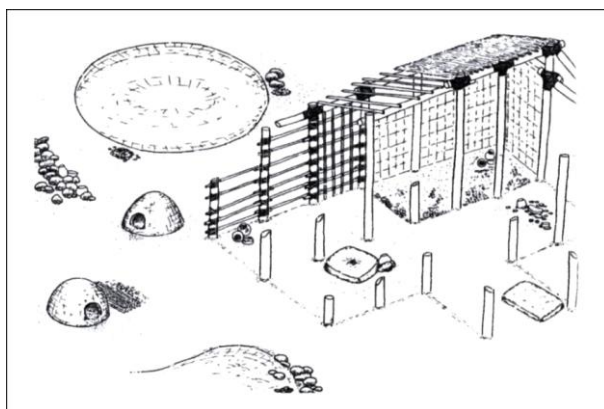
Εικόνα 6. Ξήρανση ωμοπλίνθων, σύγχρονη εποχή. (Πηγή: Μοροπούλου, 2014)

Τόσο από ωμόπλινθους, όσο και από οπτές πλίνθους έχει κατασκευαστεί πλήθος από μνημειακά τεχνικά έργα, όπως οχυρώσεις, ανάκτορα και ναοί, κυρίως σε περιοχές της Εγγύς Ανατολής, από τις οποίες εξέλειπαν οι φυσικοί λίθοι. Χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικά δείγματα τέτοιων κατασκευών αποτελούν τα ζιγκουράτ, πυραμιδοειδή τέμπλα, σε περιοχές κυρίως της Μεσοποταμίας και του Ιράν. Το καλύτερα έως σήμερα σωζόμενο ζιγκουράτ είναι το Chonga Zanbil (**Εικόνα 7**) στο Ιράν, το οποίο ανασκάφηκε στη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 και είναι χτισμένο από ωμή πλινθοδομή, επενδεδυμένη με οπτές πλίνθους (Sümmengen-Berker, 2015).

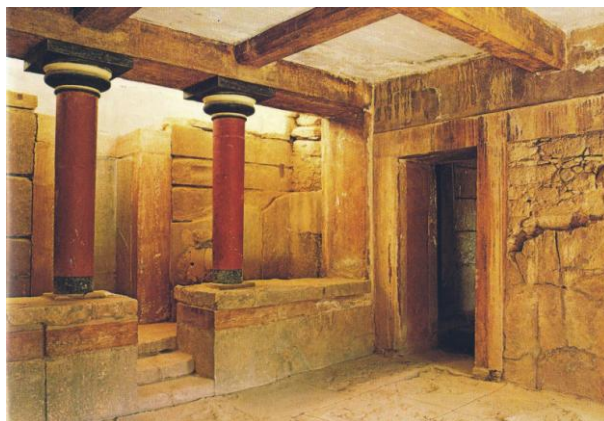


Εικόνα 7. Ιράν, ζιγκουράτ Chogha Zanbil. (Πηγή: Niroum&, 2012)

Ευρεία χρήση αυτήν την περίοδο έχει και το ξύλο. Σε πολλές νεολιθικές θέσεις έχουν βρεθεί ίχνη από πασσαλόπηκτες οικίες (Εικόνα 8) με ξύλινο σκελετό πακτωμένο στο έδαφος και ξύλινη στέγη (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014). Η χρήση του ξύλου θα διευρυνθεί ιδιαίτερος κατά τους μεταγενέστερους χρόνους, οπότε και θα χρησιμοποιηθεί εντατικά σε πλίνθινα ή λίθινα κτίσματα, κυρίως για την κατασκευή της στέγης οικιών και ναών, σε κιονοστοιχίες, ξυλοδεσιές, δάπεδα και θύρες, αλλά και εξ ολοκλήρου ως φέρων οργανισμός σε ανάκτορα, όπως αυτά της Κνωσού στη μινωική Κρήτη (Εικόνα 9), σε κατασκευές στοών, μικρών γεφυρών και οδοστρωμάτων. Από αυτήν την εποχή ελάχιστες ξύλινες κατασκευές έχουν διατηρηθεί αυτούσιες έως σήμερα, κυρίως λόγω της μικρής αντοχής τους στις περιβαλλοντικές επιδράσεις (Λεγάκις, 1997α).



Εικόνα 8. Αχίλλειο Θεσσαλίας, αναπαράσταση πασσαλόπηκτης οικίας. (Πηγή: Winn et al., 1989)



Εικόνα 9. Κνωσός Κρήτη, ξύλινα φέροντα στοιχεία από κέδρο και κυπαρίσσι. (Πηγή: Κακαράς, 2014)

Στους νεολιθικούς χρόνους επίσης, μέσα στην 6^η χιλιετία, κάνει την εμφάνισή του για πρώτη φορά ως δομικό υλικό και το σκυρόδεμα, ενώ ήδη, από την προηγούμενη χιλιετία, είναι γνωστά τα πρώτα κονιάματα από μίγμα ασβέστη και λίθινων μικρών τεμαχίων. Η αρχαιότερη γνωστή χρήση ασβεστιτικού σκυροδέματος χρονολογείται γύρω στο 7000 π.Χ. και αποκαλύφθηκε στο Ισραήλ το 1985, κατά τη διάνοιξη δρόμου, ενώ η ιστορία του τσιμεντιτικού σκυροδέματος ξεκινά γύρω στο 5600 π.Χ., ως υλικό του δαπέδου προϊστορικής οικίας στις όχθες του Δούναβη, στη θέση Lepenski Vir της σημερινής Σερβίας (**Εικόνα 10**). Ευρύτερη και περισσότερο επιτηδευμένη χρήση τσιμέντου και σκυροδέματος καταγράφεται από την 3η χιλιετία και έπειτα στις περιοχές της Αιγύπτου, της Ασσυρίας, στη Βαβυλώνα και την Κίνα (Brueckner & Lambert, 2013).



Εικόνα 10. Σερβία, Lepenski Vir, τσιμεντιτικό δάπεδο οικίας, 6000π.Χ. (Πηγή: Dragoslav Srejonić, 1972)

Η χρήση των μετάλλων σηματοδοτεί μια νέα περίοδο στην ιστορία των δομικών υλικών. Ο χαλκός και ο σίδηρος ονοματίζουν τις επόμενες πολιτιστικές φάσεις της ανθρωπότητας και η Νεολιθική εποχή δίνει σταδιακά τη θέση της στην περίοδο των μετάλλων. Έτσι, τόσο η Εποχή του Χαλκού (~3000-1000 π.Χ.), όσο και η Εποχή του Σιδήρου (~1600 π.Χ. – σήμερα), ακολουθούν την παράδοση των προηγούμενων χρόνων σε ό,τι αφορά τα είδη των υλικών, συνεχίζεται δηλαδή η κατασκευή δομημάτων από λίθο, πηλό και ξύλο, εισάγοντας επιπλέον τα νέα μεταλλικά υλικά, τον χαλκό, τον ορείχαλκο και τον σίδηρο, υλικά που θα χρησιμοποιηθούν σε άπειρες παραλλαγές και μίξεις στις επόμενες χιλιετίες έως και σήμερα (Λάββας, 2002).

Εκτός από τη χρήση τους ως δομικά υλικά, τα μέταλλα προσέφεραν και τη δημιουργία νέων εργαλείων, που επέτρεψαν μια περισσότερο επιτηδευμένη επεξεργασία των υλικών, ιδιαιτέρως του λίθου, η χρήση του οποίου φαίνεται ότι προτιμάται και παραμένει το κυρίαρχο δομικό υλικό, κυρίως για μνημειακές κατασκευές (Λεγάκις, 1997a). Όμως, μέχρι και το τέλος της Εποχής του Χαλκού, η οικοδομική τεχνολογία δεν παρουσίασε εντυπωσιακή βελτίωση (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014).

Αντίθετα, σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία των δομικών υλικών, τόσο όσον αφορά την παραγωγή, αλλά και την επεξεργασία τους, άρα και τις ιδιότητές τους, παρατηρείται στους αιώνες που ακολουθούν, της Αρχαϊκής και Κλασικής Αρχαιότητας (~10^{ος} αι. π.Χ. – 3^{ος} αι. π.Χ.). Είναι οι εποχές που τέθηκαν οι βάσεις της τεχνολογίας από τους Έλληνες, οι εποχές σπουδαίων μηχανικών επινοήσεων, με ταχεία εξέλιξη στις τεχνικές λατόμευσης και επεξεργασίας των πετρωμάτων, οι εποχές των νόμων της αρμονίας, της οικοδόμησης των μεγάλων ναών στον ελλαδικό χώρο. Χαρακτηριστικά, για την τεχνολογική πρόοδο αυτής της εποχής αναφέρονται, η ανακάλυψη της συγκόλλησης του σιδήρου από τον Γλαύκο τον Χίο και η εμφάνιση, γύρω στο 515 π.Χ. των πρώτων ανυψωτικών μηχανών (**Εικόνα 11**). Όσον αφορά τη μεταλλουργία, αναφέρεται ακόμα ότι, οι τεχνίτες της εποχής του Παρθενώνα γνώριζαν, σε αντίθεση με τους συναδέλφους τους των προηγούμενων χρόνων, τη διαδικασία της παραγωγής μαλακού καθαρού σιδήρου και χωριστά του σκληρού χάλυβα, με μικρές δηλαδή προσμίξεις άνθρακα (Ραφαηλίδου, 2012).

Στα αρχαϊκά χρόνια επίσης, ξεκινά να διαδίδεται η χρήση της θηραϊκής γης, ως κονίας, που όταν αναμιγνύεται με ασβέστη έχει τη δυνατότητα να πήζει και να σκληραίνει μέσα στο νερό, χωρίς να διαλύεται όπως τα μέχρι τότε διαδεδομένα ασβεστοκονιάματα. Το μίγμα ασβέστη και ηφαιστειακής γης θα μπορούσε να θεωρηθεί ως πρόδρομο υλικό του σημερινού τσιμέντου. Τέτοιο μίγμα φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή υδατοστεγούς δεξαμενής στην αρχαία Κάμιρο της Ρόδου, χωρητικότητας ~600 m³ (Εικόνα 12), καθώς και στην κατασκευή του λιμανιού του Πειραιά στη Ζέα (Μαρινάκη, 2004).

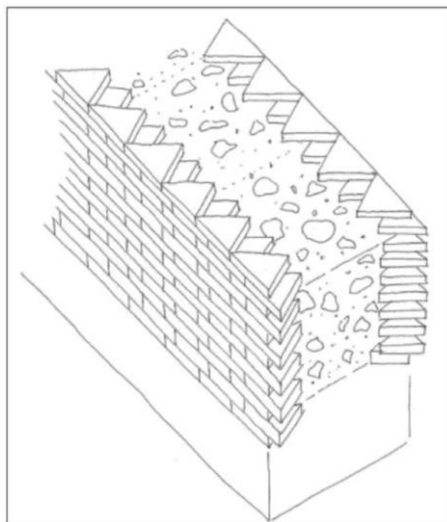


Εικόνα 12. Κάμιρος Ρόδου, δεξαμενή θηραϊκού σκυροδέματος. (Πηγή: ΥΠΠΟ, 2012)

Η πλέον γενικευμένη χρήση κονιαμάτων εφαρμόζεται στη μετέπειτα Ρωμαϊκή εποχή (~30 π.Χ.-395 μ.Χ.), για τη σύνδεση των δομικών υλικών. Τα κονιάματα της περιόδου είναι κυρίως κονιάματα θραυσμένου κεραμικού (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014), όμως την τεχνολογική επανάσταση της εποχής θα αποτελέσει αναμφισβήτητα η ανακάλυψη του ρωμαϊκού σκυροδέματος, το γνωστό στη λατινική ως *opus caementicium*, που θα παίξει σπουδαίο ρόλο στην ανάπτυξη της φέρουσας τοιχοποιίας, ως κύριου δομικού στοιχείου για τους επόμενους είκοσι αιώνες (Παπαϊωάννου, 2005). Κατά τη διάρκεια του 2^{ου} π.Χ. αιώνα, οι Ρωμαίοι ανακάλυψαν ότι, κατά ανάλογο τρόπο με τη θηραϊκή γη, αναμιγνύοντας άσβεστο, θραύσματα πλίνθων και ηφαιστειακή στάχτη από τη μικρή πόλη Pozzuoli κοντά στο ηφαίστειο Βεζούβιος της Ιταλίας, αποκτούσαν μία εξαιρετική συνδετική ύλη, αλλά και ένα υλικό πολύ σκληρότερο, ποιοτικά καλύτερο και φθηνότερο από το μάρμαρο ή τον πωρόλιθο, το οποίο σκληραίνει στον αέρα, αλλά και κάτω από το νερό και που θα μπορούσε εύκολα να δουλευτεί και για τα φέροντα στοιχεία των κατασκευών (Μαρινάκη, 2004).

Η ποζολάνη, όπως ονομάστηκε από την πόλη προέλευσής της, έχει την ιδιότητα να αντιδρά με την άσβεστο ανεξάρτητα από την ατμόσφαιρα και να προσδίδει μεγάλες αντοχές

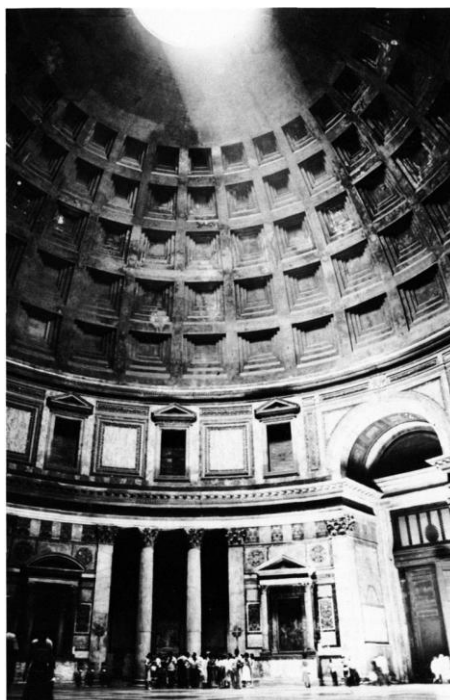
στο τελικό υλικό. Ο Ρωμαίος αρχιτέκτονας και συγγραφέας Βιτρούβιος χρησιμοποιεί την ελληνική λέξη «έμπλεκτον» για να περιγράψει το συγγενές στο σύγχρονο, ρωμαϊκό σκυρόδεμα, που αποτελείται από ένα ποζολανικό κονίαμα, στο οποίο αναμιγνύονται μικρά τεμάχια λίθων και πλίνθων (Brueckner & Lambert, 2013).



Εικόνα 13. Μεικτή ρωμαϊκή τοιχοποιία με πυρήνα ρωμαϊκού σκυροδέματος. (Πηγή: Kourkoulis, 2006)

Το ρωμαϊκό σκυρόδεμα αποτέλεσε σημαντική παράμετρο για την εισαγωγή στην οικοδομική, της τεχνικής της θολοδομίας, η οποία χωρίς να είναι εφεύρεση της ρωμαϊκής αρχιτεκτονικής, αποτελεί νεωτερισμό των ρωμαϊκών χρόνων και εξελίσσει την κατασκευαστική τεχνολογία, επιτρέποντας την υπέρβαση των ανθρωπίνων διαστάσεων και τη γεφύρωση, με τα ρωμαϊκά τόξα και καμάρες, μεγαλύτερων χώρων (Conti *et al.*, 2009) (Λάββας, 2002). Η μέθοδος της λεγόμενης χυτής τοιχοδομίας ευνόησε ιδιαίτερα την κατασκευή οικοδομημάτων με μεγάλα κενά, ικανών να κρατούν τις πιέσεις. Οι τοίχοι που κατασκευάζονταν με τη μέθοδο αυτή είχαν συμπαγή πυρήνα από ρωμαϊκό σκυρόδεμα και επενδύονταν εξωτερικά με λίθους ή πλίνθους σε διάφορα σχήματα (*opus latericium*) (Εικόνα 13) (Kourkoulis, 2006).

Η πιο διάσημη ιστορικά κατασκευή από ρωμαϊκό σκυρόδεμα βρίσκεται στο Πάνθεον της Ρώμης, το οποίο περατώθηκε το 126 μ.Χ. και έχει τον μεγαλύτερο θόλο από άοπλο σκυρόδεμα που κατασκευάστηκε ποτέ (Εικόνα 14) (Brueckner & Lambert, 2013).



Εικόνα 14. Ρώμη, Πάνθεον, θόλος από ρωμαϊκό σκυρόδεμα. (Πηγή: Mark & Hutchinson, 1983)

Με τη διάδοση και επικράτηση του χριστιανισμού στον 4^ο μ.Χ. αιώνα, αρχίζει μια νέα περίοδος στην ιστορία εν γένει και της αρχιτεκτονικής και οικοδομικής τεχνολογίας ειδικότερα. Η χριστιανική αντίληψη της εξαΰλωσης και της ανάτασης, που επηρεάζει όλη την τέχνη, επιδρά και στην αρχιτεκτονική (Λάββας, 2002). Έτσι, στην περίοδο αυτήν δίνεται έμφαση κυρίως στη θρησκευτική αρχιτεκτονική και οι ναοί αποτελούν μνημεία που κατασκευάζονται για να μείνουν. Στην αχανή βυζαντινή αυτοκρατορία παρουσιάζεται βέβαια πληθώρα κατασκευών όλων των τύπων, ωστόσο οι περισσότεροι από τους τύπους δεν σώζονται. Εκτός από τους ναούς, βυζαντινά μνημεία που έχουν καταφέρει να διασωθούν, είναι κυρίως οχυρωματικά έργα και κοσμικά έργα δημόσιας χρήσης, ενώ σπάνια έως καθόλου συναντώνται διατηρημένες οικίες (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014).

Το ζητούμενο για τους μηχανικούς της βυζαντινής εποχής είναι να μεταφράσουν το νέο σύστημα αντίληψης και αξιών, με τα συνήθη απλά δομικά, αλλά και τα πολύτιμα επενδυτικά και διακοσμητικά υλικά, σε αρχιτεκτονήματα που θα διακρίνονται για την πνευματικοποίηση του χώρου και την αντοχή στον χρόνο (Λάββας, 2002). Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις βυζαντινές κατασκευές παρέμειναν τα ίδια με αυτά των προηγούμενων αιώνων και για πολλούς ακόμη και ήταν κυρίως τα κατά τόπους παραγόμενα υλικά: λίθοι, οπτόπλινθοι και άλλα κεραμικά υλικά, ξύλο και μέταλλα, γυαλί. Ενώ τα βασικά

υλικά παρέμειναν ίδια, οι μέθοδοι παραγωγής τους και περισσότερο οι τρόποι δόμησης, παρουσίασαν εντυπωσιακή εξέλιξη και ποικιλομορφία (Εικόνα 15) (Τρυψιάνη-Ομήρου, 2012).



Εικόνα 15. Μικρογραφία από εικονογραφημένο Ψαλτήριο, Οικοδόμοι επί τω έργω. (Πηγή: Walter, 1994)

Οι λιθοδομές στην περίοδο του Βυζαντίου περιορίζονταν σε περιοχές της αυτοκρατορίας, στις οποίες υπήρχαν τα κατάλληλα υλικά και όπου είχε ήδη διαμορφωθεί οικοδομική παράδοση κατασκευών από λαξευτούς λίθους. Σε αρκετές περιοχές μάλιστα της αυτοκρατορίας, διατηρήθηκε η εν ξηρώ λαξευτή λιθοδομή (Μαμαλούκος, 2014). Εκτεταμένη όμως χρήση μαρμάρων και γρανιτών, έγινε σε όλη τη βυζαντινή επικράτεια για την κατασκευή κιώνων, οι οποίοι ήταν σχεδόν πάντοτε ολόσωμοι, από τα παραπάνω πετρώματα. Στην ύστερη βυζαντινή περίοδο, όταν πλέον τα περισσότερα λατομεία φαίνεται να μην λειτουργούσαν, γενικεύθηκε το γνωστό και από παλιότερα φαινόμενο της επανάχρησης αρχαιότερου οικοδομικού υλικού (*spolia*), αρχιτεκτονικών μελών, κυρίως κιώνων, αλλά και διακοσμητικών στοιχείων (Τρυψιάνη-Ομήρου, 2012).

Το ξύλο είχε περιορισμένη χρήση, κυρίως στην κατασκευή ξυλοσκεπών, καθώς και για την κατασκευή βοηθητικών ξυλοτύπων, κουφωμάτων και εφελκυστικών στοιχείων, (ξυλοδεσιές και ξύλινοι ελκυστήρες), ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συχνή στη Μικρά Ασία και στη βόρεια Ελλάδα ξύλινη ενίσχυση των θεμελιώσεων (Μαμαλούκος, 2014). Τα μέταλλα είχαν και αυτά μειωμένη συμμετοχή στις βυζαντινές κατασκευές, κυρίως ως επενδυτικό στοιχείο σε ξύλινα κουφώματα ή σε μορφή φύλλων (κυρίως μολυβδόφυλλων) για την κάλυψη των θολοσκεπών ναών (Τρυψιάνη-Ομήρου, 2012). Η χρήση του γυαλιού ήταν επίσης ελάχιστη, ενώ υπάρχουν ενδείξεις ότι σε υψηλών προθέσεων βυζαντινούς ναούς

υπήρχαν υαλογραφήματα (βιτρώ), παρόμοια με αυτά που γνωρίζουμε από την αρχιτεκτονική της Δυτικής Ευρώπης (Μαμαλούκος, 2014).

Η Βυζαντινή περίοδος όμως, περισσότερο από τη Ρωμαϊκή, αλλά και από κάθε άλλη που προηγήθηκε, αποτελεί αναμφίβολα, από πλευράς υλικών, την εποχή του οπτόπλινθου. Τα τούβλα της βυζαντινής περιόδου διακρίνονται για την υψηλού βαθμού προτυποποίησή τους, ως προς τη σταθερότητα των διαστάσεων, τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες και αντοχές τους, αλλά και για την καινοτομία και ποικιλία των τρόπων δομής τους στις τοιχοποιίες (**Εικόνα 16**) (Παπαϊωάννου, 2005). Για την κατασκευή των βυζαντινών τούβλων υπήρχε μεγάλη παράδοση, η οποία καθόριζε, από τους κανόνες εξόρυξης της αργιλώδους γης, μέχρι και την προετοιμασία και το ψήσιμο των τούβλων στους κλιβάνους. Είναι χαρακτηριστική η ονομασία περιοχής της Θεσσαλονίκης, έξω από τα δυτικά τείχη, που της είχε δοθεί η ονομασία Κεραμήσιος κάμπος, στην οποία φαίνεται ότι επί αιώνες πριν και σε όλη τη διάρκεια των βυζαντινών χρόνων, λειτουργούσαν κεραμικά εργαστήρια, αγγειοπλαστεία και πλινθοκεραμεία (Τρυψιάνη-Ομήρου, 2012).



Εικόνα 16. Τρόποι δομής οπτοπλίνθων βυζαντινών ναών περιοχής Θεσσαλονίκης (από αριστερά: Αγ.Αικατερίνη, Αγ.Απόστολοι, Πρ.Ηλίας). (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2018)

Τα κονιάματα, τέλος, είχαν ήδη από τη ρωμαϊκή περίοδο, όπως προαναφέρθηκε, αναχθεί σε μεγάλη τέχνη, διότι μόνο με ισχυρά και ταχύπηκτα κονιάματα μπορούσε να γίνει δυνατή η κατασκευή θόλων χωρίς ξυλότυπο, ενώ η ποιότητα του κονιάματος ήταν αποφασιστικής σημασίας για τη φέρουσα ικανότητα των κτιρίων και τη διάρκεια ζωής τους (Τρυψιάνη-Ομήρου, 2012).

Η πορεία της κατασκευαστικής τεχνολογίας φτάνει προοδευτικά μέχρι την Αναγέννηση, κατά την εποχή της οποίας απορρίπτονται προηγούμενες τεχνотροπίες, γεννημένες από την υπερβολή του θρησκευτικού αισθήματος. Η νέα βασική έννοια που κυριαρχεί είναι ο ουμανισμός, που απελευθερώνει τον άνθρωπο από τις μεσαιωνικές

ιδεοληψίες και καλλιεργεί τον ορθολογισμό και την ατομική πρωτοβουλία. Η παραγωγή των υλικών περνάει τώρα στα χέρια μεμονωμένων ατόμων και επαγγελματικών συντεχνιών, που κάνουν την εμφάνισή τους για πρώτη φορά στην ιστορία (Λάββας, 2002).

Με πρότυπα που πηγάζουν κυρίως από τον ελληνορωμαϊκό πολιτισμό και λιγότερο από τη γοτθική παράδοση του βορρά ή τη βυζαντινή της ανατολής, η Αναγέννηση προάγει τη μηχανική σε επιστημονικό πλέον πεδίο, μαθηματικής και καλλιτεχνικής σκέψης και γνώσης. Δομικές τεχνικές από τους ρωμαϊκούς χρόνους αναβιώνουν, με υλικά που μέχρι πριν δεν βρισκόταν σε πρώτη χρήση, όπως το ξύλο, με το οποίο κατασκευάζονται πλέον τεράστια δικτυώματα, που μάλιστα συνδέονται στους κόμβους τους με χυτοσιδηρά μπουλόνια. Το γυαλί είναι επίσης ένα υλικό που εξελίσσεται ιδιαίτερα στην αναγεννησιακή περίοδο, καθώς το φως είναι μια από τις παραμέτρους με τις οποίες ο αρχιτέκτονας-μηχανικός της εποχής προσπαθεί να επιτύχει την εξεζητημένη ευρυθμία και το γυαλί αποτελεί το μέσον του για τον σκοπό αυτόν (Κουρουτάκη, 2018).

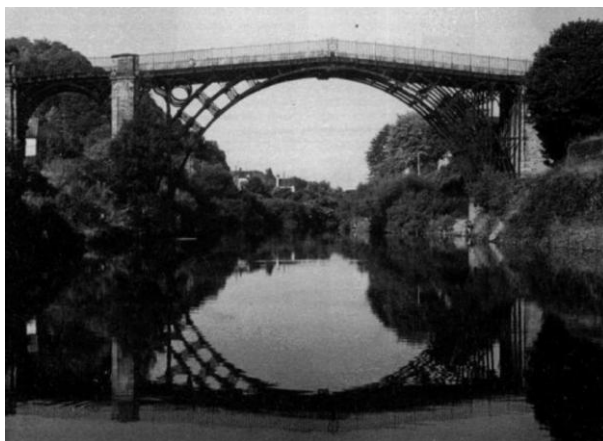
Μέχρι και τα μέσα περίπου του 18^{ου} αιώνα, τα είδη των υλικών που ο άνθρωπος χρησιμοποιεί στις κατασκευές από την προϊστορία ακόμη, δεν θα αλλάξουν. Ο λίθος, το ξύλο και η οπτή άργιλος αποτελούν τα πρωτόλεια δομικά υλικά, με άλλοτε σταδιακή, άλλοτε αλματώδη βελτίωση σε ό,τι αφορά τον τρόπο παραγωγής και τη σύστασή τους, άρα τις ιδιότητές τους και, κατά συνέπεια, στους τρόπους δόμησής τους.

Γύρω στο 1750 μ.Χ. όμως, η δεύτερη μεγάλη τομή στην ιστορία του ανθρώπου θα εισβάλει ως Βιομηχανική Επανάσταση, με τη σταδιακή μετάβαση από το πλαίσιο δράσης του ανθρώπου-γεωργού σε εκείνο του ανθρώπου-μηχανικού και με βαθιές επιδράσεις της μηχανικής και της απρόσκοπτα εξελισσόμενης, με επαναστατικούς πλέον ρυθμούς, τεχνολογίας στη μορφή της ζωής. Η δημογραφική έκρηξη που συνόδευσε τη Βιομηχανική Επανάσταση έφερε άμεσες συνέπειες στην οργάνωση της ζωής, κυρίως των πόλεων και η οικοδομική παραγωγή προσανατολίστηκε στην κατασκευή νέων τύπων κτιρίων, βιομηχανικών, δημοσίων, αλλά περισσότερο οικιστικών, για τις ανάγκες στέγασης των αυξανόμενων πληθυσμών (Λάββας, 2002).

Λόγω της ανακάλυψης νέων πηγών ενέργειας (άνθρακας-ατμός, ηλεκτρική ενέργεια, πετρέλαιο κλπ.), παράγονται καινοτόμα δομικά υλικά, όχι πρωτοεμφανιζόμενα ως προς την πρώτη ύλη τους και χρήση, αλλά επεξεργασμένα με τις νέες μεθόδους που προσφέρει η βιομηχανική παραγωγή και που οδηγούν στην εκτεταμένη εφαρμογή τους (Λάββας, 2002).

Ο σίδηρος, αρχικά με τη μορφή χυτοσιδήρου, αργότερα ως χάλυβας και ως χάλυβας υψηλής αντοχής, παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες, καθώς αναπτύσσονται νέες τεχνικές για

την τήξη και τον διαχωρισμό του και επιτρέπουν την κατασκευή μικτών ή μεταλλικών εξ ολοκλήρου τεχνικών έργων. Τα πρώτα σιδηρά οικοδομικά έργα, είναι οι γέφυρες (**Εικόνα 17**), που εμφανίζονται στην Αγγλία, στο δεύτερο μισό του 18^{ου} αιώνα, με το ξεκίνημα της βιομηχανικής πλέον εποχής. Η χρήση του σιδήρου διαδόθηκε σύντομα σε Ευρώπη και Αμερική, οι μέθοδοι τελειοποιήθηκαν και με τον καιρό, έδωσαν τολμηρές μηχανικές λύσεις στις κατασκευές (Λάββας, 2002).



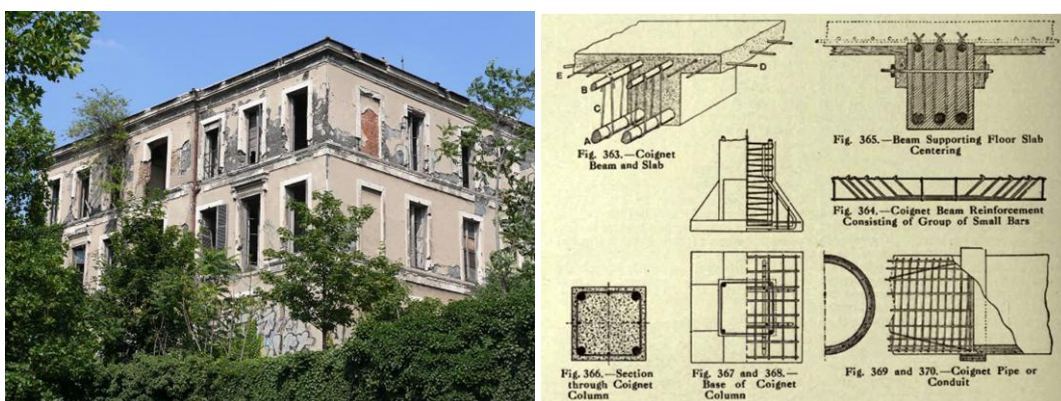
Εικόνα 17. Αγγλία, η πρώτη μεταλλική γέφυρα στο Coalbrookdale (1775-1779). (Πηγή: Trinder, 1979)

Ως χάλυβας, ο σίδηρος ενσωματώθηκε και στο επανεμφανιζόμενο τσιμέντο, το σύγχρονο τσιμέντο Portland, η ανακάλυψη του οποίου από τον Άγγλο Joseph Aspdin το 1824, ξεκινά μια νέα εποχή, μετατοπίζοντας την αρχιτεκτονική και την οικοδομική τεχνολογία προς το σκυρόδεμα, άοπλο, αλλά κυρίως οπλισμένο, που παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες για πληθώρα κατασκευών και ιδιαίτερα για υψηλά κτίρια (Παπαϊωάννου, 2005). Ως ασβεστολιθική-αγγλική υδραυλική κονία, δηλαδή που πήζει και σκληραίνει με την παρουσία νερού, το τσιμέντο Portland παρουσίασε μεγάλη βελτίωση και αντικατέστησε σταδιακά το ρωμαϊκό τσιμέντο, ιδιαίτερα μετά την προσθήκη σε αυτό αδρανών υλικών –προϊόντων λίθων– και την καθιέρωσή του ως σκυροδέματος (Wang, 2013).

Το πρώτο κτίριο που κατασκευάστηκε από οπλισμένο σκυρόδεμα ήταν η τετραώροφη οικία του Γάλλου μηχανικού και βιομηχάνου François Coignet (**Εικόνα 18**), στο Παρίσι της δεκαετίας του 1850, το οποίο, παρόλο που στερείται συντήρησης, βρίσκεται ακόμη και σήμερα σε αρκετά καλή στατική κατάσταση. Ο Coignet κατοχύρωσε την ευρεσιτεχνία του οπλισμένου με χαλύβδινες ράβδους σκυροδέματος (**Εικόνα 19**) το 1855, τονίζοντας, απευθυνόμενος προς τους συναδέλφους σύγχρονούς του μηχανικούς, ότι τοιχοποιείες από

οπλισμένο σκυρόδεμα δεν απαιτούν κανενός είδους επένδυση, από λίθο, πλίνθο ή οποιοδήποτε άλλο υλικό (Wang, 2013).

Η σπουδαιότητα του τσιμέντου ως δομικό υλικό είναι εμφανής στην νεώτερη και σύγχρονη καθημερινή ζωή, αποτελώντας με τα προϊόντα του –σκυρόδεμα, επιχρίσματα κλπ.– τον δείκτη της τεχνολογικής ανάπτυξης της εποχής, παράλληλα με την κατανάλωση των προϊόντων του χάλυβα. Για τους δύο τελευταίους αιώνες σχεδόν, το άοπλο και το οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν αποτελέσει και συνεχίζουν να αποτελούν το κατ' εξοχήν δομικό υλικό σε όλα τα είδη των τεχνικών έργων (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014), προάγοντας την τεχνολογία των υλικών των κατασκευών και οδηγώντας σε νέα οικονομικότερα συστήματα, μέσα και από την επιστημονική πλέον έρευνα για τη στατική συμπεριφορά της νέας σκυρόδετης ύλης (Παπαϊωάννου, 2005).



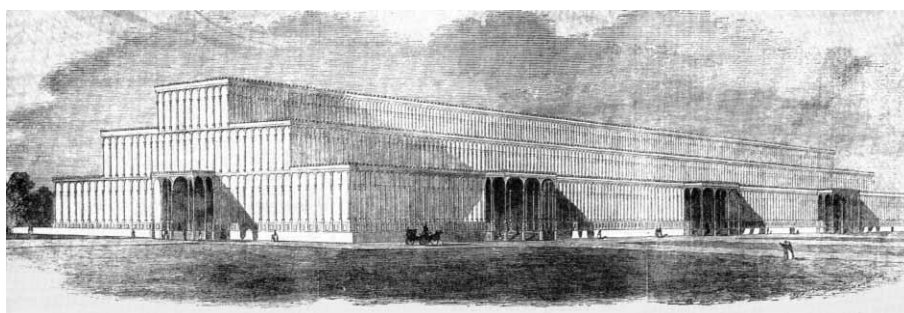
Εικόνα 18. Παρίσι, οικία Francois Coignet, 1853. (Πηγή: Jacques Mossot, 2009)

Εικόνα 19. Σχέδια ευρεσιτεχνίας Coignet. (Πηγή: structurae.net)

Ακόμη μία καινοτομία στο ξεκίνημα της βιομηχανικής εποχής, ήταν αυτή του συνδυασμού υλικών για την παραγωγή προκατασκευασμένων στοιχείων, με τα οποία μειωνόταν δραματικά το κόστος των έργων και το χρονικό διάστημα της κατασκευής τους. Η τελειοποίηση της επεξεργασίας των μεταλλικών υλικών και του γυαλιού επέτρεψε τέτοιου είδους νέα στοιχεία να κάνουν την εμφάνισή τους, όπως χαρακτηριστικά συνέβη στην περίπτωση της κατασκευής του Crystal Palace (Εικόνα 20) του Λονδίνου, το οποίο προοριζόταν για τις ανάγκες της πρώτης Διεθνούς Έκθεσης, το 1851. Οι Διεθνείς Εκθέσεις είναι γέννημα ακριβώς αυτής της εποχής, καθώς ξεδιπλώνεται η ανάγκη της διάδοσης στη διεθνή πλέον αγορά, των νέων βιομηχανικών προϊόντων, αλλά και εν γένει όλων των επιτευγμάτων της δημιουργίας του βιομηχανικού πολιτισμού. Με το «Κρυστάλλινο Παλάτι» πραγματοποιείται μια νέα οικοδομική σκέψη, για την οποία δεν υπήρχε ιστορικό

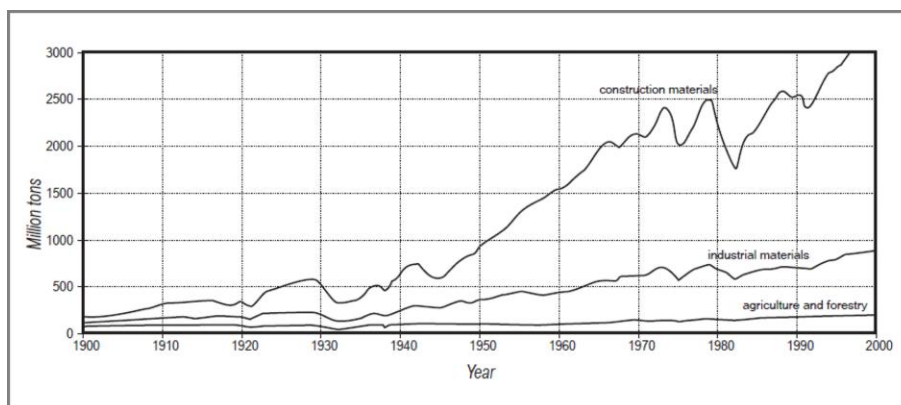
κατασκευαστικό πρότυπο, αυτήν του προκατασκευασμένου μεταλλικού σκελετού με γυάλινο κέλυφος, επίσης σε προκατασκευασμένα τμήματα (Λάββας, 2002).

Η έννοια της διαφάνειας στην αρχιτεκτονική, που είναι συνυφασμένη με την ιδιότητα των υλικών να επιτρέπουν τη διάχυση του φωτός και να παρουσιάζονται οπτικά ελαφρύτερα, είναι το κοινό γνώρισμα στο πέρασμα της οικοδομικής τεχνολογίας από τον 19^ο στον 20^ο αιώνα, με τη διάδοση της χρήσης του συνδυασμού μεταλλικών υλικών και γυαλιού (Λάββας, 2002).



Εικόνα 20. Λονδίνο, Crystal Palace, 1851, σχέδιο πρότασης του J.Paxton. (Πηγή: Schoenefeldt, 2008)

Στον 20^ο πλέον αιώνα οι μεταλλικές κατασκευές πληθαίνουν, το μπετόν εδραιώνεται, ενώ εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται και τα διαχρονικά δομικά υλικά (λίθοι, ξύλο, τούβλα). Όλα συνδυάζονται μεταξύ τους κατά τόσους πολλούς τρόπους, ώστε εμφανίζεται στην αγορά πλήθος υλικών, των οποίων η ζήτηση διαρκώς αυξάνεται (Λεγάκις, 1997α). Είναι χαρακτηριστική, στον αιώνα μεταξύ 1900 και 2000 η κατακόρυφη σχεδόν άνοδος στη χρήση υλικών για τον τομέα των κατασκευών, σε σχέση με άλλους τομείς της σύγχρονης οικονομίας (Εικόνα 21) (Fernandez, 2006).



Εικόνα 21. Διάγραμμα χρήσης υλικών (σε εκ.τόνους) στις ΗΠΑ μεταξύ 1900-2000. (Πηγή: Fernandez, 2006)

Τα νεότερα από τα δομικά υλικά, τα πολυμερή και όλα τα προϊόντα τους, κάνουν την εμφάνισή τους επίσης στον 20^ο αιώνα. Είναι προϊόντα της χημικής βιομηχανίας και οι δυνατότητές τους στο πεδίο της δομικής φαίνεται ότι είναι απεριόριστες (Λεγάκις, 1997a), ειδικά όταν ενισχύονται με ίνες ή σκόνες ή φύλλα διαφόρων ουσιών, όπως ίνες γυαλιού, γραφίτη, άνθρακα κ.ά., που τους προσδίδουν ιδιαίτερες ιδιότητες και αντοχές (Σκουλικίδης, 2000).

Η σημερινή εποχή, της υψηλής τεχνολογίας, χαρακτηρίζεται από πλήθος νέων εξειδικευμένων υλικών, αμιγών ή σύνθετων. Με την ανάπτυξη της επιστήμης των υλικών τα τελευταία χρόνια, αποκτήθηκαν πολύτιμες γνώσεις για τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η δομή με τις ιδιότητες των υλικών. Αυτό επέτρεψε την παραγωγή πολλών νέων υλικών, με ειδικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες, τέτοια που να ικανοποιούν τις ανάγκες της σύγχρονης τεχνολογίας. Τα σύγχρονα υλικά που σχεδιάζονται και παράγονται, οφείλουν να είναι, ταυτόχρονα, οικονομικώς προσιτά και φιλικά προς το περιβάλλον –ανακυκλώσιμα και βιοαποικοδομήσιμα– έτσι, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ευρύτερες κοινωνικές ομάδες και παράλληλα να μην προκαλούν προβλήματα ρύπανσης στο περιβάλλον (Γεωργιάδου, 2016).

Η ιστορία της κατασκευαστικής τεχνολογίας και των υλικών της και η συνεχιζόμενη εξέλιξή της από τις παρούσες γενιές, αποτελούν κρίσιμες πτυχές της γνωστικής πολιτιστικής κληρονομιάς που θα κληροδοτηθεί στους μελλοντικούς μηχανικούς και επιστήμονες των υλικών. Για τον λόγο αυτό και στο πλαίσιο της σύγχρονης έννοιας της αειφορίας και της βιώσιμης ανάπτυξης, υφίσταται το χρέος οι επιλογές που λαμβάνονται στη δόμηση του σήμερα, να μην υπονομεύουν τις αντίστοιχες που θα έχουν δικαίωμα να πραγματοποιήσουν οι μέλλουσες γενιές για να δομήσουν το αύριο (Fernandez, 2006).

2.2.2 Ιδιότητες δομικών υλικών

Τα δομικά υλικά, όπως και κάθε άλλο υλικό, έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά, τα οποία προσδιορίζουν γενικά τη φύση του και ορισμένες ικανότητες, που τους επιτρέπουν να αντιστέκονται στις εξωτερικές επιδράσεις. Τα χαρακτηριστικά και οι ικανότητες αυτές καλούνται από κοινού ιδιότητες, ο βαθμός εκδήλωσης των οποίων δεν είναι ίδιος στα διάφορα υλικά (Λεγάκις, 1997a).

Οι ιδιότητες των υλικών αποτελούν συνάρτηση της δομής τους. Μεγάλη σημασία για τον καθορισμό όλων των κατηγοριών των ιδιοτήτων των υλικών, έχουν το είδος και η ισχύς των χημικών δεσμών που αναπτύσσονται μεταξύ των δομικών στοιχείων τους και ο τρόπος που αυτά είναι διατεταγμένα στο χώρο. Πολλές ιδιότητες εξαρτώνται επίσης και από άλλα χαρακτηριστικά της δομής των υλικών, όπως το μέγεθος των κρυστάλλων, οι ατέλειες της δομής τους, οι προσμίξεις κ.ά. (Γεωργιάδου, 2016). Οι ιδιότητες των στερεών δομικών υλικών διακρίνονται σε φυσικές και μηχανικές, χημικές, τεχνικές (Λεγάκις, 1997α).

2.2.2.1 Φυσικές Ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες των υλικών αναφέρονται σε εκείνα τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, που περιγράφουν τη συμπεριφορά των υλικών σε εξωτερικές επιδράσεις, οι οποίες δεν προκαλούν αλλοίωση στη δομή ή τη σύστασή τους. Η επιστήμη της τεχνολογίας των υλικών επιβάλλει και τη διάκριση των φυσικών ιδιοτήτων σε επιμέρους ομάδες, τις οπτικές, τις ηλεκτρικές και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών, η οποία διευκολύνει τη σε βάθος μελέτη τους (Fernandez, 2006).

Οι σπουδαιότερες από τις φυσικές ιδιότητες των στερεών υλικών, περιγράφονται συνοπτικά ως εξής:

- *Πορώδες (porosity)*. Ο όγκος ενός σώματος συνίσταται από τον όγκο της στερεάς ύλης και από τον όγκο των κενών που παρεμβάλλονται μεταξύ των κόκκων της ύλης αυτής. Τα κενά αυτά πορεί να είναι ορατά με γυμνό οφθαλμό, ή τριχοειδείς και υποτριχοειδείς πόροι, ορατοί μόνο με μικροσκόπιο (Λεγάκις, 1997α). Ως πορώδες ορίζεται το ποσοστό του όγκου του υλικού που καταλαμβάνεται από κενά και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n = \frac{V_v}{V}, \text{ όπου}$$

V_v – ο όγκος των κενών (void Volume)

V – ο συνολικός (φαινόμενος) όγκος του σώματος.

Ως κλάσμα επί του συνολικού όγκου, το πορώδες λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1, είτε εκφρασμένο με ποσοστό επί τοις εκατό (%).

Σχετικός με το πορώδες είναι και ο λόγος κενών (void ratio), που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών συστατικών του υλικού.

$$e = \frac{V_v}{V_s}, \text{ όπου}$$

V_v – ο όγκος των κενών (void Volume)

V_s – ο όγκος των στερεών συστατικών (solid Volume) (Νομικός, 2015).

Ο ορισμός του πορώδους περιλαμβάνει πάσης φύσης κενά των υλικών, ανεξαρτήτως μορφής και τυχόν διασυνδεσιμότητάς τους και συχνά αναφέρεται ως ολικό πορώδες (total porosity). Ως ενεργό πορώδες (effective porosity) χαρακτηρίζεται το ποσοστό του όγκου των διασυνδεδεμένων κενών, τα οποία είναι προσβάσιμα από ρευστά, προς τον συνολικό όγκο του υλικού (Νομικός, 2015). Ιδιαίτερως σε ό,τι αφορά τα υλικά των ιστορικών κτηρίων, η πλειοψηφία των οποίων δομείται κατά κύριο λόγο από πετρώματα, το ενεργό πορώδες αποτελεί σημαντικό δείκτη στη μελέτη της διάβρωσής τους από περιβαλλοντικούς παράγοντες, εφόσον συνιστά την οδό για την κίνηση, στο εσωτερικό των υλικών, τόσο του ατμοσφαιρικού αέρα, όσο και εδαφικού και όμβριου νερού με όλα τα συστατικά αυτού, φυσικά και ρυπαντικά.

Το πορώδες είναι θεμελιώδης φυσική ιδιότητα, καθώς επηρεάζει τις περισσότερες από τις λοιπές φυσικές, αλλά και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Ένα μεγάλο πορώδες έχει συνήθως δυσμενή επίδραση στα χαρακτηριστικά των υλικών και γενικά, η αντοχή των υλικών μειώνεται με την αύξηση του πορώδους (Νομικός, 2015).

- *Πυκνότητα (density)*. Είναι η μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου. Εκφράζεται σε kg/m^3 στο μετρικό σύστημα και δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{M}{V}, \text{ όπου}$$

M – η μάζα του υλικού

V – ο όγκος του.

- *Ειδικό βάρος (specific weight)*. Είναι το βάρος της μάζας που περιέχεται στη μονάδα του όγκου του υλικού. Συνήθως χρησιμοποιείται το φαινόμενο βάρος, εφόσον τις περισσότερες φορές, για τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους γίνεται η σύγκριση με τον φαινόμενο όγκο του υλικού. Εκφράζεται σε kp/m^3 , tn/m^3 ή N/m^3 . Το ειδικό βάρος γ σχετίζεται με την πυκνότητα ρ με τη σχέση:

$\gamma = \rho \cdot g$, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας (Λεγάκις, 1997α; Νομικός, 2015).

- *Υδατοπερατότητα (permeability)*. Είναι η αντίσταση που προβάλλουν τα υλικά κατά τη διέλευση νερού μέσα από τη μάζα τους. Ως προς την υδατοπερατότητα, τα υλικά

διακρίνονται σε υδατοπερατά και μη υδατοπερατά ή υδατοστεγανά. Η υδατοπερατότητα εξαρτάται από την υδροστατική πίεση, το πορώδες, τη διάταξη και τον βαθμό επικοινωνίας των πόρων, καθώς και τη διάμετρο των τριχοειδών αγγείων (Λεγάκις, 1997a).

- *Υδροαπορροφητικότητα (absorbency)*. Είναι η ικανότητα των υλικών να απορροφούν κάποιο ρευστό, συνήθως νερό και είναι ανάλογη του πορώδους. Εκφράζεται με τον συντελεστή υδροαπορροφητικότητας, ως εκατοστιαία αναλογία και δίνεται από τη σχέση:

$$W_w = \frac{W_s - W_d}{W_d}, \text{ όπου}$$

W_s – το βάρος του κορεσμένου σε νερό δοκιμίου του υλικού

W_d – το βάρος του ξηρού δοκιμίου.

Η υδροαπορροφητικότητα και η *υγροσκοπικότητα (hygroscopicity)* είναι ανάλογες ιδιότητες των υλικών, με τη διαφορά ότι η υγροσκοπικότητα αναφέρεται στην υγρασία που απορροφούν τα υλικά από την ατμόσφαιρα, όταν η σχετική υγρασία αυτής είναι δεδομένη. Η παραμένουσα υγρασία σε ένα υλικό μετά την εξισορρόπηση με την υγρασία του περιβάλλοντος καλείται υγρασία ισορροπίας. Από όποια πηγή και αν προέρχεται η *περιεκτικότητα σε νερό (υγρασία)* ενός υλικού, που αφορά διαφόρων βαθμών κορεσμού δοκίμια υλικών, προκύπτει από την ίδια, παραπάνω σχέση (Τασσογιαννόπουλος, 1986).

- *Θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity)*. Είναι η ιδιότητα των υλικών να επιτρέπουν τη διάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της μάζας τους. Η φυσική ερμηνεία του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αναφέρεται στον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, η οποία διαπερνά την επιφάνεια ενός κυβικού δοκιμίου του υλικού ακμής 1cm σε χρόνο 1sec, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά των απέναντι εδρών του είναι 1°C. Περιγράφεται με τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ , ο οποίος εκφράζεται σε kcal/m·h·°C (Λεγάκις, 1997a). Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία κατά τρόπο που ελέγχεται από τη δομή του υλικού. Στα κρυσταλλικά υλικά η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ αντίθετα στα άμορφα υλικά μειώνεται. Επίσης, μειώνεται με την αύξηση του πορώδους και αυξάνεται με την αύξηση του βαθμού κορεσμού (Νομικός, 2015).

- *Θερμική διαστολή – συστολή (thermal expansion – contraction)*. Όλα τα υλικά όταν ανταλλάσσουν θερμότητα με το περιβάλλον τους, αυξάνουν ή μειώνουν τον όγκο τους. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη διαφοροποίηση της εσωτερικής ενεργειακής κατάστασης των μορίων του υλικού, τα οποία απαιτούν διαφορετικό χώρο στις νέες θερμοκρασιακές συνθήκες. Η ιδιότητα αυτή των υλικών να αυξάνουν ή να μειώνουν τις διαστάσεις τους με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ονομάζεται θερμική διαστολή ή θερμική συστολή, αντίστοιχα. Για σώματα στα οποία το εμβαδόν της διατομής τους είναι αρκετά μικρό, ώστε να θεωρείται αμελητέο (π.χ. ράβδοι, σύρματα, νήματα κ.ά.), στην πράξη εμφανίζεται μεταβολή μόνο του μήκους τους, οπότε και η διαστολή ή συστολή αναφέρεται ως γραμμική θερμική διαστολή ή συστολή. Όταν και οι τρεις διαστάσεις των στερεών σωμάτων είναι σημαντικές, τότε κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας αλλάζει ο συνολικός όγκος του σώματος (Γεωργιάδου, 2016).

- *Θερμοχωρητικότητα (thermal capacity)*. Είναι η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία της μονάδας μάζας του υλικού κατά έναν (1)°C. Η θερμοχωρητικότητα ενός υλικού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C = \frac{Q}{T_2 - T_1}, \text{ όπου}$$

Q – το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για αύξηση της θερμοκρασίας ορισμένης μάζας του υλικού από T₁ σε T₂ και μετριέται σε J/kg·K ή σε cal/gr·°C (Γεωργιάδου, 2016).

- *Θερμική Αντοχή (thermal resistance)*. Είναι η αντοχή των υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες επιδρούν δυσμενώς στα υλικά. Σε θερμοκρασίες αρκετά χαμηλότερες από το σημείο τήξης τους, τα υλικά αστοχούν, εξαιτίας αιφνίδιας (π.χ. από πυρκαγιά) ή σταδιακής (από συνεχιζόμενη έκθεση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες) ελάττωσης των μηχανικών αντοχών τους. Κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική θερμική αντοχή, που εξαρτάται από τη φύση της ύλης, τη δομή του ιστού του, καθώς και σε άλλους παράγοντες. Από τα ανθεκτικότερα δομικά υλικά είναι το γυαλί, τα κεραμικά, ακολουθούν οι λίθοι, το σκυρόδεμα, τα μέταλλα και τέλος, το ξύλο και τα περισσότερα πλαστικά, ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον κατασκευαστικό και όχι μόνο, κλάδο, παρουσιάζουν τα πυρίμαχα υλικά, που εμφανίζουν ικανοποιητική θερμική αντίσταση σε θερμοκρασίες άνω των 1000°C (Λεγάκις, 1997a).

Στη θερμική αντοχή πρέπει να συμπεριλαμβάνεται και η έννοια της αντοχής σε πυρκαγιά, για υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, ακριβώς για αυτόν τον σκοπό, για να εμποδίζουν δηλαδή τη μετάδοση της φωτιάς και της θερμότητας που τη συνοδεύει, αλλά και για να αντιστέκονται στην απότομη πτώση της θερμοκρασίας, όταν πέσει επάνω τους ψυχρό νερό της πυρόσβεσης (Λεγάκις, 1997a).

- *Αντοχή στον παγετό (frost resistance)*. Είναι η ικανότητα ενός υλικού να υπόκειται σε διαδοχικούς κύκλους τήξης-πήξης του νερού που περιέχεται στη δομή του, χωρίς να μεταβάλλονται σημαντικά οι διαστάσεις του και να μειώνονται οι μηχανικές αντοχές του. Εξαρτάται άμεσα από την υδροαπορροφητικότητα, την υγροσκοπικότητα, το πορώδες και τη μικροδομή των πόρων. Ένα υλικό θεωρείται ανθεκτικό στον παγετό, όταν μετά μια δοκιμή σε κύκλο τήξης-πήξης του νερού, η απώλεια της αντοχής του δεν ξεπερνά το 25% της αρχικής και η απώλεια του βάρους του δεν ξεπερνά το 5% του αρχικού. Έχει επίσης εξακριβωθεί ότι, υλικά με μεγάλους και ευθύγραμμους πόρους ή με κενά μεμονωμένα μεταξύ τους και γεμάτα αέρα, αντέχουν στον παγετό περισσότερο από αυτά με μικρούς δαιδαλώδεις πόρους (Λεγάκις, 1997a).
- *Αντοχή στη διάβρωση (corrosion resistance)*. Με τον όρο αντοχή στη διάβρωση, αποδίδεται η ικανότητα των υλικών να ανθίστανται στη διαβρωτική ενέργεια των εξωτερικών παραγόντων (ατμοσφαιρικός αέρας, θερμότητα, υγρασία, οξέα ατμόσφαιρας, άλατα θάλασσας, μύκητες κλπ.) που επιδρούν στις επιφάνειες και το εσωτερικό τους. Αποτελεί σημαντική ιδιότητα στη μελέτη των επιδράσεων των περιβαλλοντικών παραγόντων στα δομικά υλικά, τόσο σύγχρονων, όσο και ιστορικών κατασκευών και λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στη σύγχρονη κατασκευαστική ως βασικό κριτήριο για την επιλογή ενός υλικού (Λεγάκις, 1997a).

2.2.2.2 Μηχανικές Ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού αναφέρονται στα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας και στη συμπεριφορά του, κατά τη διάρκεια διαφορετικών καταστάσεων εξωτερικών φορτίσεων (Fern&ez, 2006). Τα περισσότερα δομικά υλικά, στον κύκλο της ζωής τους, βρίσκονται υπό την επίδραση διαφόρων δυνάμεων, εξαιτίας των οποίων είναι δυνατόν να παραμορφωθούν ή να αστοχήσουν (Γεωργιάδου, 2016).

Οι σημαντικότερες από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών περιγράφονται συνοπτικά ως εξής:

- *Ελαστικότητα και Πλαστικότητα (elasticity – plasticity)*. Είναι η ιδιότητα των υλικών να επανέρχονται στην αρχική τους μορφή, μετά την απομάκρυνση της δύναμης που προκάλεσε την παραμόρφωσή τους. Οι παραμορφώσεις αυτής της μορφής ονομάζονται ελαστικές. Αν η δύναμη η οποία ασκείται συνεχίσει να αυξάνεται, τότε τα υλικά δεν επανέρχονται πλήρως στις αρχικές τους διαστάσεις μετά την αποφόρτίσή τους. Η παραμένουσα παραμόρφωση ονομάζεται μόνιμη ή πλαστική και η ικανότητα των υλικών να αναπτύσσουν τέτοιου είδους παραμορφώσεις, χωρίς να θραύονται, ονομάζεται πλαστικότητα (Βουθούνης, 1999; Γεωργιάδου, 2016; Λεγάκις, 1997a).

Τα υλικά που υφίστανται ελαστικές παραμορφώσεις κάτω από την επίδραση ακόμα και μεγάλων σχετικά δυνάμεων, ονομάζονται ελαστικά. Ενώ τα υλικά που υφίστανται πλαστικές παραμορφώσεις, ακόμα και υπό την επίδραση ασθενών σχετικά δυνάμεων, ονομάζονται ελαστοπλαστικά. Τα δομικά υλικά είναι κυρίως ελαστοπλαστικά και το επιθυμητό είναι η καταπόνησή τους να οδηγεί σε ελαστικές παραμορφώσεις, δηλαδή οι παραμορφώσεις να μην υπερβαίνουν το όριο που ονομάζεται όριο ελαστικότητας. Εάν η ασκούμενη δύναμη ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο, το υλικό αστοχεί, δηλαδή υφίσταται θραύση. Το όριο αυτό ονομάζεται όριο θραύσης και είναι χαρακτηριστικό για κάθε υλικό. Μεταξύ του ορίου ελαστικότητας και του ορίου θραύσης, βρίσκεται το όριο διαρροής, πέραν του οποίου και μέχρι το όριο θραύσης, οι παραμορφώσεις του υλικού κατά την αποφόρτιση είναι πλαστικές, χωρίς όμως το υλικό να αστοχεί (Γεωργιάδου, 2016).

- *Αντοχή σε θραύση (failure strength)*. Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται στην ικανότητα των υλικών να αντιστέκονται σε εξωτερικές στατικές φορτίσεις, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων στο εσωτερικό τους και να μεταφέρουν τα φορτία αυτά, χωρίς να θραύονται. Το υλικό αστοχεί όταν οι τάσεις (ή οι παραμορφώσεις) φτάσουν μερικές κρίσιμες (οριακές) τιμές, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές για κάθε υλικό και τύπο φόρτισης (Γεωργιάδου, 2016; Λεγάκις, 1997a).

Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των διαφόρων υλικών στα διάφορα είδη καταπόνησης (θλίψη, εφελκυσμό, κάμψη, διάτμηση κλπ) γίνεται με τη διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών. Σε μια τέτοια δοκιμή, τα μετρούμενα μεγέθη είναι το επιβαλλόμενο φορτίο και η αξονική ή/και πλευρική παραμόρφωση του δοκιμίου του

υλικού. Από τις μετρήσεις αυτές κατασκευάζονται τα διαγράμματα τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης (μεταβολή μιας γραμμικής διάστασης του υλικού ως προς την αρχική του) (stress-strain diagrams), που περιγράφουν σχηματικά τη συμπεριφορά των υλικών και από τα οποία λαμβάνονται συμπεράσματα για την εκάστοτε εξεταζόμενη μηχανική ιδιότητα. Μονάδα μέτρησης της αντοχής σε θραύση αποτελεί το MPa (N/mm²) (Παπαμίχος & Χαραλαμπάκης, 2006).

Τα σημαντικότερα είδη αντοχής σε θραύση, ανάλογα με τον τύπο της επιβαλλόμενης φόρτισης και τον τρόπο της παραμόρφωσης του υλικού, είναι:

α) *Αντοχή σε θλίψη (compression strength)*. Είναι η μέγιστη θλιπτική τάση που μπορεί να αναλάβει ένα υλικό και πέραν της οποίας το υλικό θραύεται. Η αντοχή σε θλίψη αποτελεί βασική μηχανική ιδιότητα κάθε δομικού υλικού, με ιδιαίτερη σημασία όταν αυτό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως φέρον στοιχείο. Η αύξηση του πορώδους και της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος στο οποίο θα τοποθετηθεί, προκαλούν μείωση της αντοχής σε θλίψη, σε αντίθεση με τη θερμοκρασία, κατά την αύξηση της οποίας συνήθως παρατηρείται και αύξηση της θλιπτικής αντοχής (Τασσογιαννόπουλος, 1986).

β) *Αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength)*. Είναι το όριο των εφελκυστικών τάσεων, πέραν του οποίου το υλικό θραύεται. Η αντοχή σε εφελκυσμό των υλικών επηρεάζεται από τους ίδιους σχεδόν παράγοντες που επηρεάζεται και η αντοχή σε θλίψη.

γ) *Αντοχή σε κάμψη (flexural strength)*. Είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση που υπολογίζεται σε δοκίμιο υπό κάμψη, κατά τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου.

δ) *Αντοχή σε διάτμηση (shear strength)*. Είναι το όριο των διατμητικών τάσεων που, όταν ξεπεραστεί, το υλικό θραύεται.

Υπάρχουν και άλλα είδη αντοχής, για σύνθετες περιπτώσεις εντατικής κατάστασης (π.χ. στρέψη και σύγχρονες καταπονήσεις πολλαπλών ειδών φόρτισης).

- *Ολκιμότητα και ψαθυρότητα*. Η ολκιμότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να υπόκειται σε μεγάλες και μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση του. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως τα μεταλλικά υλικά. Αντίθετα, η ψαθυρότητα αναφέρεται στην αδυναμία πολλών υλικών να εμφανίσουν μεγάλες παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση τους, τα οποία και θραύονται χωρίς να έχουν προηγουμένως διαρρεύσει. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το σκυρόδεμα, το μάρμαρο, ο χυτοσίδηρος κ.ά (Βουθούνης, 1999; Γεωργιάδου, 2016).

- *Δυναμική αντοχή (dynamic/impact strength)*. Η δυναμική αντοχή είναι η αντοχή που παρουσιάζει το υλικό όταν ενεργεί επάνω του μια δυναμική φόρτιση (π.χ. σεισμός, υπόγεια έκρηξη κ.ά.). Σε αυτού του είδους τη φόρτιση η αντοχή του υλικού είναι πάντα μικρότερη από ότι στη στατική φόρτιση με το ίδιο μέτρο (Λεγάκις, 1997a).
- *Αντοχή στην τριβή – Σκληρότητα (hardness)*. Ως σκληρότητα χαρακτηρίζεται η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό, όταν κάποιο άλλο σκληρότερο, τείνει να διεισδύσει μέσα σε αυτό ή απλά να το χαράξει. Ο προσδιορισμός της σκληρότητας ενός υλικού γίνεται πειραματικά με απλή διάταξη, με τη χρήση της οποίας εφαρμόζεται ορισμένη δύναμη στην επιφάνεια του προς μέτρηση υλικού και μετράται το εμβαδόν του αποτυπώματος ή το βάθος διείσδυσης που επιφέρει το σκληρότερο υλικό. Η σκληρότητα αποτελεί μια βασική ιδιότητα των υλικών, καθώς προσφέρει, γρήγορα και με σχετική ακρίβεια, εκτιμήσεις για άλλες μηχανικές ιδιότητες (π.χ. αντοχή σε θλίψη) (Βουθούνης, 1999).
- *Αντοχή σε κρούση – Δυσθραυστότητα (toughness)*. Εκφράζει την ευαισθησία του υλικού στην ψαθυρή θραύση, την ανθεκτικότητά του δηλαδή, έναντι ταχέως επιβαλλόμενου τοπικού φορτίου και σχετίζεται με τη δυνατότητα απορρόφησης από αυτό της κινητικής ενέργειας της κρούσης. Όσο πιο όλκιμα συμπεριφέρεται ένα υλικό, τόσο πιο δύσθραυστο είναι. Η δυσθραυστότητα ποσοτικοποιείται υπολογίζοντας το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείεται από την καμπύλη τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης (σ - ϵ). Τόσο η μεγάλη δυσθραυστότητα όσο και η μεγάλη πλαστιμότητα είναι ιδιαίτερα επιθυμητές ιδιότητες των υλικών, καθώς σχετίζονται με την ικανότητά τους να απορροφούν ενέργεια κατά τη διάρκεια έντονης καταπόνησης (Βουθούνης, 1999; Γεωργιάδου, 2016; Τασσογιαννόπουλος, 1986).
- *Ερπυσμός (creep)*. Ο ερπυσμός αφορά στην ευαισθησία ενός υλικού σε παραμόρφωση, υπό την επίδραση παρατεταμένης σε χρονική διάρκεια σταθερής τάσης, ακόμη και αρκετά μικρότερης του ορίου διαρροής το υλικού. Η μελέτη του φαινομένου του ερπυσμού σε υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλες εφαρμοζόμενες τάσεις είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό του χρόνου ζωής κατά τη λειτουργία των υλικών. Ο ερπυσμός εμφανίζεται στα μέταλλα, στα πολυμερή, στο σκυρόδεμα, ενώ είναι ασήμαντος στα κεραμικά, με εξαίρεση το γυαλί (Βουθούνης, 1999; Γεωργιάδου, 2016).

2.2.3 Κατηγορίες δομικών υλικών των μνημείων

Τα ιστορικά κτήρια είναι από τα σημαντικότερα κατάλοιπα, ικανά να περιγράψουν την ιστορία μιας κοινωνίας. Τα δομικά υλικά από τα οποία αυτά είναι κατασκευασμένα και η συμπεριφορά τους έναντι των πιέσεων του περιβάλλοντος στο οποίο είναι ενταγμένα, συνιστούν βασικό αντικείμενο της μηχανικής. Ιδιαιτέρως δε, η μελέτη των ιδιοτήτων και των μηχανισμών φθοράς των δομικών υλικών των ιστορικών κατασκευών, αποτελεί ένα από τα πλέον δημοφιλή θέματα των τελευταίων δεκαετιών σε διεθνές επίπεδο και αναπόσπαστο μέρος της μελέτης για την αξιολόγηση των ιστορικών δομών. Δεδομένου ότι οι περισσότερες ιστορικές κατασκευές υφίστανται εδώ και εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια, το ζήτημα της διατήρησής τους για τις μελλοντικές γενιές, παραμένει διαχρονικό (Döndüren & Sışik, 2017; Χοΐδης, 2019).

Η γνώση του είδους των υλικών κατασκευής των μνημείων, συμπεριλαμβανομένων των συνδετικών υλικών (από την κατασκευή τους ή και από επεμβάσεις, παλιότερες ή νεώτερες), οι τρόποι παρασκευής και οι ιδιότητές τους είναι πολύτιμα πρωταρχικά στοιχεία, που παίζουν σημαντικό ρόλο για τη συντήρησή τους. Έχοντας αυτήν τη γνώση, μπορούν να διαγνωστούν πιο εύκολα τα είδη της φθοράς που έχουν υποστεί τα δομικά υλικά και, με βάση αυτά, να προβλεφθούν, να σχεδιαστούν και να επιλεγούν οι μέθοδοι και τα υλικά συντήρησης των αρχιτεκτονικών επιφανειών των μνημείων (Σκουλικίδης, 2000).

Στο παρόν πόνημα, σε ό,τι αφορά στις κατηγορίες των δομικών υλικών των μνημείων, ακολουθείται η γενική διάκριση του Καθηγητή Δρ. Θ.Ν. Σκουλικίδη (Σκουλικίδης, 2000), που χρησιμοποιεί ως βασικό κριτήριο διαχωρισμού την επεξεργασία της μητρικής ύλης από την οποία προήλθαν τα υλικά και τον βαθμό αλλοίωσης της χημικής σύστασής της. Τονίζεται δε, ότι τα δομικά υλικά είναι μόνο στερεά σώματα ή σώματα που στερεοποιούνται.

Διακρίνονται έτσι, τρεις γενικές κατηγορίες δομικών υλικών των μνημείων, είτε αυτά έχουν προκύψει στη φάση της κατασκευής τους, είτε σε ενδεχόμενες επεμβάσεις συντήρησης:

A) ΦΥΣΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Πρόκειται για δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται χωρίς να αλλοιωθεί η χημική και κρυσταλλική σύσταση ή η δομή της αντίστοιχης πρώτης ύλης από την οποία προήλθαν. Τέτοια υλικά είναι οι **λίθοι** (πετρώματα), που αποτελούν τα κύρια δομικά υλικά των μνημείων και τα οποία προήλθαν από μηχανική μόνο επεξεργασία (σχηματοουργία) της αντίστοιχης μητρικής ύλης (πέτρωμα, ορυκτό υλικό).

Στην ίδια κατηγορία, των υλικών που διατηρούν σε γενικές γραμμές την αρχική χημική σύσταση και δομή τους, υπάγονται το **ξύλο**, που αποτέλεσε μαζί με την πέτρα τα πρώτα δομικά υλικά του ανθρώπου, καθώς και το δέρμα και το ύφασμα, τα οποία όμως συναντώνται κυρίως σε ταφικά ευρήματα και όχι ως κατασκευαστικά υλικά των μνημείων (Σκουλικίδης, 2000).

Β) ΤΕΧΝΗΤΑ ΥΛΙΚΑ Ι

Είναι δομικά υλικά για των οποίων την παρασκευή, οι αντίστοιχες πρώτες ύλες τους έχουν υποστεί από τον άνθρωπο σημαντικές αλλοιώσεις της χημικής και κρυσταλλικής σύστασής τους και της δομής των μορίων τους. Τέτοια υλικά είναι τα **μέταλλα** και τα κράματα, τα οποία προέρχονται από μεταλλεύματα, καθώς και ο **ασβέστης** ($\text{CaO} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$) και ο **γύψος** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Σκουλικίδης, 2000).

Γ) ΤΕΧΝΗΤΑ ΥΛΙΚΑ ΙΙ

Ισχύει ό,τι και για τα τεχνητά υλικά Ι, με μόνη διαφορά ότι τα υλικά αυτά δεν προέρχονται από ένα μόνο συγκεκριμένο πέτρωμα, μέταλλευμα ή ορυκτό, αλλά αποτελούνται από πολλές πρώτες ύλες. Τέτοια υλικά είναι τα **κονιάματα** εν γένει, μεταξύ των οποίων τα **τσιμέντα** και το **σκυρόδεμα**, τα **γυαλιά**, τα **κεραμικά υλικά** και τα **πολυμερή** (πλαστικά) (Σκουλικίδης, 2000).

Πέρα από τα κύρια υλικά της παραπάνω ταξινόμησης που συναντούμε στα μνημεία, είτε από την κατασκευή τους, είτε μετά από συντήρηση, υπάρχουν περιπτώσεις διαφόρων ουσιών, κυρίως φυσικών, που βρίσκονται αρκετές φορές, εξαλλοιωμένες βέβαια, στις ιστορικές τοιχοποιίες, όπως γαλακτώματα, ασπράδι αβγού, λινέλαιο, κόλλες φυτικής ή ζωικής προέλευσης, φυσικές ρητίνες, αλλά και κάποιες χημικές ενώσεις, όπως η υδρύαλος (δισπαρμένο οξείδιο του πυριτίου SiO_2 σε καυστικό νάτριο NaOH ή κάλιο KOH), οξείδια του πυριτίου και φθοριοπυριτικές ενώσεις, το γνωστό κουρασάνι (μίγμα τριμμένων κεραμικών και ασβέστη), το γαλλικό χρώμα (πυριτικό αργίλιο – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_3$) και άλλα ανόργανα χρώματα (Σκουλικίδης, 2000).

Τα περισσότερα από τα μνημεία υπόκεινται κυρίως σε θλιπτικά φορτία, έχουν χαρακτηριστικά λιθοδομικών κατασκευών και τα δομικά τους στοιχεία αποτελούνται από τοίχους, στήλες, αντηρίδες, τόξα και θόλους. Έτσι, στον φέροντα οργανισμό των ιστορικών κτηρίων συναντώνται κυρίως λίθοι, φυσικοί ή λαξευτοί, οπτόπλινθοι ή άλλα εναλλακτικά υλικά, ενώ τα εφελκυστικά φορτία παραλαμβάνονται από ξύλινα στοιχεία ή μεταλλικούς (συνήθως χαλύβδινους) εντατήρες. Ως συνδετικά στοιχεία παρατηρούνται η σκόνη από κεραμικά υλικά και άλλα κονιάματα, ανάλογα με την τεχνολογική εξέλιξη της εκάστοτε εποχής (Döndüren & Sığık, 2017).

Από τα υλικά των παραπάνω τριών κατηγοριών, ως ιστορικά δομικά υλικά μελετώνται, κατά κανόνα, οι δομικοί **λίθοι** (πετρώματα), το **ξύλο**, τα **κεραμικά** και τα **κονιάματα**, που είναι τα υλικά τα οποία κυρίως συναντώνται στις ιστορικές κατασκευές και τα μνημεία (Χοϊδης, 2019).

ΦΥΣΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, η χρήση του λίθου στην παραγωγική διαδικασία υπήρξε αδιάλειπτη μέχρι και τα μέσα του 19ου αιώνα, ενώ ο ρόλος του στην αρχιτεκτονική είναι κυρίαρχος ακόμη και σήμερα, παρόλο που η σύγχρονη οικοδομική τεχνολογία έχει πλέον αντικαταστήσει σχεδόν τη μαζική χρήση του με τα νεώτερα υψηλής αντοχής σκυροδέματα. Τη σύνθετη αυτή σχέση λίθου και εξέλιξης του πολιτισμού αντανακλά η διαίρεση σε Παλαιολιθική, Μεσολιθική και Νεολιθική Εποχή, που συνολικά καταλαμβάνουν περισσότερο από το 90% της παρουσίας του γένους *Homo* στον πλανήτη γη (Χιώτης & Χιώτη, 2010).

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί τον λίθο σε ποικίλες εφαρμογές από τα πρώτα του βήματα μέχρι σήμερα. Στη μνημειώδη αρχιτεκτονική, ο λίθος χρησιμοποιήθηκε από την Νεολιθική Εποχή έως και σήμερα. Κατά τους ιστορικούς χρόνους διευρύνθηκε η κλίμακα χρήσης του, ενώ βελτιώθηκαν η τεχνική και τα εργαλεία της λιθοτεχνίας. Κατασκευάστηκαν έτσι κτήρια μεγαλύτερου μεγέθους και αυξήθηκαν οι αποστάσεις μεταφοράς της πρώτης ύλης και της ποικιλίας των πετρωμάτων σε χρήση. Γι' αυτό, ο λίθος θεωρείται ως το καταλληλότερο υλικό για να σκιαγραφήσει διαχρονικά την εξέλιξη του πολιτισμού (Χιώτης & Χιώτη, 2010).

Οι λίθοι προκύπτουν από την ανθρώπινη μηχανική κατεργασία των πετρωμάτων, τα οποία είναι υλικά του στερεού φλοιού της γης, προϊόντα γεωλογικών διεργασιών. Τα πετρώματα αποτελούνται από ορυκτά, των οποίων οι ιδιότητες καθορίζουν και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των λίθων και διαχωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, με βάση τη γεωλογική διεργασία από την οποία δημιουργούνται: τα **πυριγενή**, τα **ιζηματογενή** και τα **μεταμορφωσιγενή** ή μεταμορφωμένα (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Τα **πυριγενή πετρώματα** είναι πετρώματα τα οποία δημιουργήθηκαν μετά από στερεοποίηση του τηγμένου φλοιού της γης, του μάγματος και χαρακτηρίζονται ως «πρωτογενή πετρώματα». Σύμφωνα με τον χρόνο και το βάθος στερεοποίησης του μάγματος διακρίνονται σε:

- *βαθυγενή ή πλουτωνίτες*, όταν η στερεοποίηση του μάγματος λαμβάνει χώρα με αργό ρυθμό και σε μεγάλο βάθος μέσα στον φλοιό της γης. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χονδρόκοκκων κρυστάλλων, συχνά ορατών με γυμνό μάτι.
- *ηφαιστίτες ή εκρηξιγενή*, όταν η στερεοποίηση του μάγματος λαμβάνει χώρα απότομα στην επιφάνεια του φλοιού της γης. Οι μάζες που σχηματίζονται είναι μικροκρυσταλλικές ή υαλώδους μορφής.

Από χημική άποψη, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε πυριτία (SiO_2), χαρακτηρίζονται ως:

- *όξινα*, για περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 66% SiO_2 , και
- *βασικά*, για περιεκτικότητα μικρότερη από 52% (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010) (Σκουλικίδης, 2000).

Ως χαρακτηριστικά πυριγενή πετρώματα αναφέρονται: οι γρανίτες, που είναι όξινα πλουτωνικά πετρώματα ποικίλου χρώματος και οι βασάλτες, που είναι εκρηξιγενή πετρώματα. Τα κύρια πετρογενετικά ορυκτά των πυριγενών πετρωμάτων είναι ο χαλαζίας, οι άστριοι (ορθόκλαστα, πλαγιόκλαστα), οι μαρμαρυγίες, οι αμφίβολοι, οι πυρόξενοι, ο ολιβίνης κ.ά. (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010) (Σκουλικίδης, 2000).

Τα **ιζηματογενή πετρώματα** σχηματίστηκαν από τη διάβρωση και εξαλλοίωση των πυριγενών πετρωμάτων και γι' αυτό ονομάζονται επίσης «δευτερογενή πετρώματα». Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι η διαστρωμάτωση των υλικών και τα απολιθώματα που βρίσκονται μέσα στα ιζήματα. Ανάλογα με τον τρόπο που πραγματοποιείται η διαδικασία δημιουργίας τους, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τα *μηχανικά ή κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα*, που προκύπτουν από απόθεση υλικών αποσάθρωσης διαφόρων μεγεθών, σχημάτων και σύνθεσης, που αιωρούνται στο νερό ή στον αέρα. Τυπικά παραδείγματα μηχανικών ιζημάτων είναι ο ψαμμίτης, ο πηλόλιθος, η άργιλος, τα λατυποπαγή και τα κροκαλοπαγή, οι μάργες κ.ά.
- Τα *χημικά ιζηματογενή πετρώματα*, που προκύπτουν με καταβύθιση και απόθεση ορυκτών από υδατικά διαλύματα με ανόργανες χημικές διαδικασίες. Τυπικά παραδείγματα χημικών ιζημάτων αποτελούν ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης, ο τραβερτίνης, ο όνυχας κ.ά.
- Τα *οργανικά ή βιογενή ιζηματογενή πετρώματα*, που είναι αποτέλεσμα συσσώρευσης και κατακάθισης οργανικής ύλης, προερχόμενης από φυτικούς ή ζωικούς οργανισμούς (θαλάσσιοι μικροοργανισμοί, φυτά, μαλακόστρακα). Τυπικά παραδείγματα οργανικών

ιζημάτων είναι οι κοραλλιογενείς και οι βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι, καθώς και οι ορυκτοί άνθρακες, όπως η τύρφη, ο λιγνίτης και ο ανθρακίτης (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010) (Σκουλικίδης, 2000).

Τα **μεταμορφωσιγενή πετρώματα** είναι πετρώματα τα οποία προέρχονται από άλλα προϋπάρχοντα, ιζηματογενή ή πυριγενή, μετά από ιστολογικές, ορυκτολογικές και χημικές μεταβολές που συμβαίνουν στα βαθύτερα τμήματα του φλοιού της γης, σε πιέσεις και θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες από τις επιφανειακές, χωρίς όμως να υποστούν τήξη. Το είδος των μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων εξαρτάται από τη σύσταση του αρχικού πετρώματος, αλλά και από τις θερμοκρασίες και πιέσεις που επικράτησαν κατά τον σχηματισμό τους. Χαρακτηριστικά μεταμορφωσιγενή πετρώματα είναι οι σχιστόλιθοι, τα μάρμαρα, οι γνεύσοι και οι χαλαζίτες (Χοϊδης, 2019) (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010) (Σκουλικίδης, 2000).

Το κυριότερο μεταμορφωμένο πέτρωμα, σε μεγάλο μάλιστα εύρος χρήσης, όταν πρόκειται για την περίπτωση των μνημείων και των ιστορικών κατασκευών, είναι το μάρμαρο. Τα μάρμαρα έχουν προκύψει από τη μεταμόρφωση ασβεστόλιθων ή δολομιτών, είναι κρυσταλλικά και έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Το χρώμα τους ποικίλει και μπορεί να είναι λευκό, γκρι, ροζ ή πράσινο, με διάφορες φλέβες. Στον ελληνικό χώρο, το πιο γνωστό μάρμαρο είναι αυτό της Πάρου (κατάλευκο μάρμαρο, χωρίς στίγματα ή φλέβες), το οποίο παρουσιάζει μεγάλη διαφάνεια και θεωρείται το καλύτερο μάρμαρο του κόσμου, που μάλιστα χρησιμοποιήθηκε ευρέως κατά την αρχαιότητα, καθώς και το πεντελικό μάρμαρο (λευκό που διασχίζεται από κυανίζουσες ή υπότεφρες γραμμές), που περιέχει μικρή αναλογία οξειδίων, στα οποία οφείλεται και το χρώμα της σκουριάς που αποκτά, όταν εκτεθεί στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Στην ιστορία των κατασκευών οι λίθοι εμφανίζονται με διάφορες μορφές κατεργασίας, ο βαθμός και η ποιότητα της οποίας εξαρτάται από τη χρονική περίοδο της κάθε κατασκευής, κυρίως όμως από τον σκοπό της χρήσης της. Ο λίθος χρησιμοποιήθηκε ακατέργαστος ή κατεργασμένος, άλλοτε με προσθήκη κονιάματος και άλλοτε με εν ξηρώ δόμηση. Ανάλογα με τον βαθμό κατεργασίας τους, οι δομικοί λίθοι διακρίνονται σε αργούς, ημιλαξευτούς, λαξευτούς, ογκόλιθους και πλάκες (Πινέλη, 2003).

Οι **αργοί λίθοι** είναι κοινοί λίθοι δόμησης, που χρησιμοποιούνται ακατέργαστοι, όπως εξορύσσονται στα λατομεία, με μια πρόχειρη, κάποιες φορές επεξεργασία κατά την τοποθέτησή τους, για την καλύτερη προσαρμογή τους στις κατασκευές. Η λιθοδομή από αργούς λίθους, με παρεμβολή συνδετικού υλικού μεταξύ των λίθων, είναι η συνηθέστερη

περίπτωση τοιχοποιίας, που συναντάται από την προϊστορική εποχή μέχρι και τον προηγούμενο αιώνα και αποτελούν την πλειονότητα των ιστορικών κατασκευών στον ελλαδικό χώρο. Επίσης συχνές είναι οι ξερολιθοδομές, κατασκευές από αργούς λίθους εν ξηρώ, με απουσία δηλαδή κονιάματος ή άλλου συνδετικού υλικού, όπως είναι οι τοίχοι αντιστήριξης της ελληνικής υπαίθρου, καθώς και πέτρινα σπίτια που απαντώνται σε πολλές χρονικές περιόδους (Ζάμπας, 2001; Ηλιόπουλος, 2013; Πινέλη, 2003).

Οι **ημιλαξευτοί** λίθοι συναντώνται επίσης από τους προϊστορικούς χρόνους μέχρι και σήμερα και πρόκειται για λίθους που έχουν υποστεί κατεργασία μόνο στην εμφανή μετά τη δόμηση επιφάνειά τους. Χρησιμοποιούνται σε όψεις λιθοδομών και σε γωνιόλιθους διασταυρώσεων τοίχων (Ηλιόπουλος, 2013; Πινέλη, 2003).

Οι **λαξευτοί** λίθοι είναι λίθοι με πολύ επιμελημένη λάξευση στο εργοτάξιο, ώστε όλες οι επίπεδες επιφάνειες τους να είναι ομαλοποιημένες. Οι κατασκευές με λαξευτούς λίθους είναι πολυτελέστερες και ανθεκτικότερες και γι' αυτόν τον λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε μεγάλα μνημειακά κτήρια, αλλά και σε περιπτώσεις κατασκευών, στις οποίες για λόγους αισθητικής υπαγορεύτηκε αποφυγή επιχρίσματος. Στον ελλαδικό χώρο, λιθοδομές με λαξευτούς λίθους απαντώνται για πρώτη φορά σε μυκηναϊκά ταφικά μνημεία και τοίχους (16^{ος}-11^{ος} αι. π.Χ.), ενώ κατά τους κλασικούς χρόνους (5^{ος}-4^{ος} αι. π.Χ.), η εφαρμογή των λαξευτών λίθων στην ελληνική αρχιτεκτονική τελειοποιήθηκε και έδωσε κάποια από τα ωραιότερα και γνωστότερα ελληνικά μνημεία παγκόσμιας κληρονομιάς, όπως τα κλασικά αριστουργήματα της Ακρόπολης των Αθηνών (Παρθενώνας, Προπύλαια, Ερέχθειο, Ναός Αθηνάς Νίκης) και ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσεις της αρκαδικής Φιγαλείας (Ηλιόπουλος, 2013; Πινέλη, 2003).

Οι **πλάκες** είναι λίθοι των οποίων οι δύο διαστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από το πάχος τους και οι οποίες προέρχονται από σχιστολιθικά πετρώματα με φυσικές ή με μηχανικά μέσα επιφάνειες σχισμού. Ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε πλάκες επένδυσης, πλάκες επίστρωσης, στέγασης ή διακοσμητικές. Σε ιστορικά κτήρια συναντώνται συνήθως σε στεγάσεις και σε επιστρώσεις δρόμων. Σήμερα η χρήση τους περιορίζεται πλέον σε διακοσμητικό χαρακτήρα (Ηλιόπουλος, 2013; Πινέλη, 2003).

Οι σημαντικότεροι φυσικοί λίθοι που συναντώνται σε μνημειακές κατασκευές της ελληνικής αρχιτεκτονικής είναι πολλά είδη πωρόλιθων, διάφορα είδη ασβεστόλιθων, ψαμμίτες, σχιστόλιθοι, βασάλτης και βεβαίως μάρμαρα διαφόρων περιοχών και χρωματισμών. Πατέρας της επιστήμης των λίθων είναι ο Θεόφραστος, ο οποίος στο έργο του «Περί Λίθων» αναπτύσσει τις γνώσεις της εποχής γύρω από τα ορυκτά, τα πετρώματα και τη







χρησιμότητα τους και σύμφωνα με τον οποίο, οι λίθοι –στους οποίους συμπεριλαμβάνει και τα μέταλλα– έχουν χαρακτηριστικές ιδιότητες, όπως χρώμα, λάμψη, σκληρότητα, ομοιογένεια, διαφάνεια, θραυσμό, αντοχή κ.ά., (Βαρτή-Ματαράγκα, 2001).

Στους παρακάτω πίνακες (**Πίνακας 2; Πίνακας 3; Πίνακας 4**) καταγράφονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που απαντώνται σε μνημεία του ελλαδικού χώρου, κατηγοριοποιημένα με βάση τον τρόπο σχηματισμού τους (πυριγενή, ιζηματογενή, μεταμορφωσιγενή).







Δεν είναι υπερβολή να θεωρηθεί ότι ο δομικός λίθος είναι ο υλικός φορέας της αρχιτεκτονικής πολιτιστικής κληρονομιάς. Η σχέση της Γεωλογίας με τον δομικό λίθο και εξ αυτού με την ανάδειξη και προστασία των μνημείων είναι θεμελιώδης, δεδομένου ότι η πλειοψηφία των μνημείων είναι κατασκευασμένα από πληθώρα διαφορετικών κάθε φορά πετρωμάτων (Βαρτή-Ματαράγκα, 2001).

Ο λίθος έχει μια μακρόχρονη διαδικασία γένεσης, ιδιαίτερως σε σύγκριση με τα τεχνητά δομικά υλικά (κονιάματα, μέταλλα κλπ) που έχουν χρησιμοποιηθεί στις ιστορικές κατασκευές ή χρησιμοποιούμε σήμερα για την αποκατάσταση των μνημείων. Επομένως, η καλή γνώση των γεωλογικών συνθηκών γένεσης, της ηλικίας και των ιδιοτήτων των δομικών λίθων, είναι αναγκαία στοιχεία για τη σωστή διαχείριση και την προστασία τους (Ζάμπας, 2001).




Πίνακας 2. Κύρια χαρακτηριστικά πυριγενών πετρωμάτων που συναντώνται σε μνημεία (Πηγή: Αραβαντινός, 2000 ; Μπεάζη-Κασιώτη, 2015; www.geo.auth.gr; απόδοση Μαρνέλλου, 2020).

ΥΛΙΚΟ	Τυπική Φωτογραφία	Φαινόμενο ειδικό βάρος	Πορώδες	Υδατο-απορροφητικότητα	Αντοχή σε θλίψη	Συντελεστής κορεσμού
		[kg/m ³]	[% κ.ό.]	[% κ.ό.]	[MPa]	[-]
Πυριγενή Πετρώματα						
Γρανίτης		2600-2800	0,4-1,5	0,2-0,5	157-235	0,9-1,0
Συηνίτης		2600-2800	0,4-1,5	0,2-0,5	157-235	0,9-1,0
Διορίτης		2800-3000	0,5-1,2	0,2-0,4	167-294	0,9-1,0
Γάββρος		2800-3000	0,5-1,2	0,2-0,4	167-294	0,9-1,0
Βασάλτης		2950-3000	0,2-0,9	0,1-0,3	245-392	0,9-1,0
Διαβάσης		2800-2900	0,3-1,1	0,1-0,4	176-245	0,9-1,0

Πίνακας 3. Κύρια χαρακτηριστικά ιζηματογενών πετρωμάτων που συναντώνται σε μνημεία (Πηγή: Αραβαντινός, 2000 ; Μπεάζη-Κατσιώτη, 2015; www.geo.auth.gr; απόδοση Μαρινέλλου, 2020).

ΥΛΙΚΟ	Τυπική Φωτογραφία	Φαινόμενο ειδικό βάρος	Πορώδες	Υδατο-απορροφητικότητα	Αντοχή σε θλίψη	Συντελεστής κορεσμού
		[kg/m ³]	[% κ.ό.]	[% κ.ό.]	[MPa]	[-]
Ιζηματογενή Πετρώματα						
Χαλαζιακοί Ψαμμίτες		2600-2650	0,4-2,0	0,2-0,5	118-196	0,7-1,0
Διάφοροι Ψαμμίτες		2000-2651	0,5-25,0	0,2-9,0	29-176	0,9-1,0
Ηφαιστειακοί Τόφφοι		1800-2000	20,0-30,0	6,0-15,0	24-68	0,6-0,8
Συμπαγείς Ασβεστόλιθοι		2650-2850	0,2-2,0	0,2-0,6	78-176	0,7-0,9
Διάφοροι Ασβεστόλιθοι		1700-2600	0,5-30,0	0,2-10,0	20-88	0,8-1,0
Τραβερτίνης		2400-2500	5,0-12,0	2,0-5,0	20-59	0,8-0,9

Πίνακας 4. Κύρια χαρακτηριστικά μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων που συναντώνται σε μνημεία (Πηγή: Αραβαντινός, 2000 ; Μπεάζη-Κατσιώτη, 2015; www.geo.auth.gr; απόδοση Μαρινέλλου, 2020).

ΥΛΙΚΟ	Τυπική Φωτογραφία	Φαινόμενο ειδικό βάρος	Πορώδες	Υδατο-απορροφητικότητα	Αντοχή σε θλίψη	Συντελεστής κορεσμού
		[kg/m ³]	[% κ.ό.]	[% κ.ό.]	[MPa]	[-]
Μεταμορφωσιγενή Πετρώματα						
Χαλαζίτης		2600-2650	0,4-2,0	0,2-0,5	147-294	0,7-1,0
Αργιλικός Σχιστόλιθος		2700-2800	1,6-2,5	0,5-0,6	27-55	0,7-0,9
Μάρμαρο		2650-2850	0,5-2,0	0,2-0,6	50-250	0,8-0,9
Γνεύσιος		2650-3000	0,4-2,0	0,1-0,6	157-274	0,8-0,9
Σερπεντίνης		2600-2750	0,3-2,0	0,1-0,7	137-245	0,8-0,9

ΦΥΣΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – ΞΥΛΟ

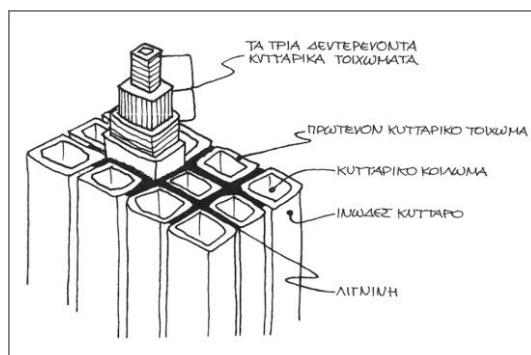
Το ξύλο, μαζί με τον λίθο, αποτελούν τα πρώτα και κατ' εξοχήν διαχρονικά φυσικά δομικά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο, έχοντας συντελέσει αποφασιστικά στην επιβίωσή του και την ανάπτυξη του πολιτισμού. Από τις απαρχές της οικοδομικής δραστηριότητας στη Νεολιθική Εποχή ακόμη, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το ξύλο είναι το δομικό υλικό που επιστρατεύτηκε σε πολλές κοινωνίες ως δομικό στοιχείο σε διάφορες κατασκευές, κυρίως γιατί δεν απαιτεί ιδιαίτερη επεξεργασία, μια που η φύση το προσφέρει έτοιμο σχεδόν για χρήση και συγχρόνως φροντίζει μόνη της για την ανανέωση της πρώτης ύλης, δηλαδή των δέντρων (Καλογεράς *et al.*, 1999).

Τα δέντρα από τα οποία παράγεται η δομική ξυλεία διαιρούνται σε δύο κατηγορίες: α) τα πλατύφυλλα (φυλλοβόλα, αγγειόσπερμα), με τυπικά είδη τη δρυ, την οξιά και την καστανιά, τα οποία παράγουν τη λεγόμενη «σκληρή ξυλεία», και β) τα κωνοφόρα (αιθαλή, γυμνόσπερμα), με τυπικά είδη την πεύκη, την ελάτη και το κυπαρίσσι, που παράγουν τη «μαλακή ξυλεία», χωρίς οι ονομασίες αυτές της ξυλείας να συνεπάγονται πραγματική αντιστοιχία σκληρότητας. Τα περισσότερα είδη δέντρων είναι τα πλατύφυλλα, αλλά η πιο διαδεδομένη χρήση δομικής ξυλείας προέρχεται από τα κωνοφόρα. Τα κυριότερα είδη δέντρων παραγωγής ελληνικής δομικής ξυλείας είναι η μαύρη πεύκη, η ελάτη, η οξιά, η δρυς και δευτερευόντως άλλα είδη πεύκης, το κυπαρίσσι, η καστανιά, ο πλάτανος, η καρυδιά και η λεύκη (Μερκουρέα & Παχή, 2013).

Η χημική σύνθεση του ξύλου συνίσταται κυρίως, σε πολυσακχαρίτες, κατά 65-75%, ο κυριότερος εκ των οποίων είναι η κυτταρίνη (~45%) και σε φαινολικές ουσίες, με σημαντικότερη τη λιγνίνη (17-35%). Η κυτταρίνη αποτελεί το σπουδαιότερο συστατικό του ξύλου και σχηματίζει σειρές σωληνωτών κυττάρων, τις ίνες, κατά μήκος του κορμού των δέντρων. Η λιγνίνη είναι κολλώδης ουσία που συγκεντρώνεται κυρίως στη μεσοκυττάρια στρώση, αποτελεί το συνδετικό υλικό αυτών των ινών και προάγει τη διαδικασία της ξυλοποίησης. Ανάλογα με την προέλευσή του, το ξύλο περιέχει ακόμη ρητίνες, σάκχαρα, άμυλο, ανόργανα άλατα ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου κ.ά. Το κάθε κυτταρικό στοιχείο λειτουργεί σαν σωληνώδες υποστύλωμα, με πλευρική ενίσχυση εξασφαλισμένη από τη συνεργασία με τα όμορα κυτταρικά στοιχεία, διαμέσου της λιγνίνης (**Εικόνα 22**) (Χατήρης *et al.*, 2007; Σκουλικίδης, 2000; Καλογεράς *et al.*, 1999; Μαντάνης, n.d.).

Οι περισσότερες ίνες είναι προσανατολισμένες παράλληλα προς τον διαμήκη άξονα του κορμού του δέντρου και γι' αυτόν τον λόγο, το ξύλο παρουσιάζει μεγάλη αντοχή κατά

διεύθυνση παράλληλη προς τον προσανατολισμό αυτών των μακρομορίων του, των ινών του (Χατήρης *et al.*, 2007; Σκουλικίδης, 2000; Καλογεράς *et al.*, 1999; Μαντάνης, n.d.).



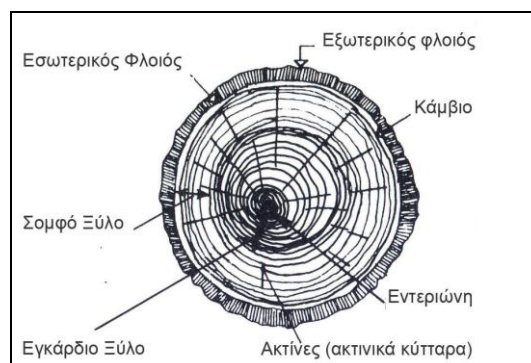
Εικόνα 22. Κυτταρική δομή του ξύλου. (Πηγή: Καλογεράς *et al.*, 1999)

Η γνώση της δομής του ξύλου, εξηγεί την συμπεριφορά του ως υλικού, επιτρέπει την επιλογή του κατάλληλου είδους για κάθε χρήση και συντελεί στη βελτίωση του ξύλου που παράγεται στο δάσος. Τα μέρη της δομής του ξύλου εγκάρσια στον κορμό του (Εικόνα 23), που διακρίνονται μακροσκοπικά, από το κέντρο προς την περιφέρεια είναι:

- η εντεριώνη, ο κεντρικός πυρήνας του δένδρου γύρω από τον οποίο αναπτύσσονται οι αυξητικοί δακτύλιοι. Οι αυξητικοί ή ετήσιοι δακτύλιοι διαμορφώνονται από τον τρόπο που μεγαλώνουν τα δένδρα και η διάκρισή τους κάνει αναγνώσιμη την ηλικία του δέντρου και προσφέρει πληροφορίες για τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής.
- το εγκάρδιο ξύλο, που αποτελεί το παλαιότερο εσωτερικό τμήμα του κορμού, συνήθως με σκουρότερο χρώμα και βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά.
- το σομφό ξύλο είναι το περιφερειακό, νεώτερο μέρος του κορμού, με χρώμα συνήθως ανοιχτότερο του εγκαρδίου, μέσω του οποίου διαχέονται οι χυμοί από τις ρίζες σε όλο το δέντρο.
- το κάμβιο, ένα ενδιάμεσο αναπτυσσόμενο στρώμα ζωντανών κυττάρων, που παράγει τον εσωτερικό φλοιό προς τα έξω και το σομφό ξύλο προς τα μέσα, που όμως δύσκολα διακρίνεται μακροσκοπικά.
- ο φλοιός (εσωτερικός και εξωτερικός), που συνιστά τον προστατευτικό μανδύα του δένδρου (Καλογεράς *et al.*, 1999) (Τουλιάτος *et al.*, n.d.).

Η ξυλεία που προορίζεται για τη δόμηση, παράγεται άμεσα, μετά την αποφλοιώση των κορμών της πρώτης ύλης, με μικρότερη ή μεγαλύτερη επεξεργασία και διακρίνεται, ανάλογα με το μέσο κοπής σε:

- **στρογγυλή**, που προκύπτει από στοιχειώδη επεξεργασία ευθύγραμμων κορμών και χρησιμοποιείται κυρίως για στύλους ηλεκτροφωτισμού και προσωρινές υποστυλώσεις ή πασσαλώσεις.
- **πελεκητή**, που προκύπτει από ορθογωνισμένους με πέλεκυ κορμούς και συναντάται συχνά σε παραδοσιακές κατασκευές της λαϊκής Αρχιτεκτονικής και στην επιπλοποιία, και
- **πριστή**, που παράγεται από τον τεμαχισμό σε γραμμικά μέλη ορθογωνικής διατομής (πρίση) των κορμών με μηχανικά μέσα, η οποία έχει ποικίλες χρήσεις στην οικοδομική τεχνολογία, τόσο στον φέροντα οργανισμό ξύλινων κατασκευών και σε επικαλύψεις (δάπεδα, στεγάσεις), όσο και σε άλλα κατασκευαστικά στοιχεία, όπως κουφώματα, μόρφωση και επένδυση επιφανειών, καθώς επίσης και σε βιομηχανικά προϊόντα. Η πριστή ξυλεία προσφέρεται σήμερα στο εμπόριο σε τυποποιημένες διατομές με αντίστοιχες ονομασίες, όπως καδρόνια, σανίδες, πηχοσανίδες κλπ. (Καλογεράς *et al.*, 1999).



Εικόνα 23. Εγκάρσια τομή ξύλου. (Πηγή: Καλογεράς *et al.*, 1999)

Η χημική σύνθεση και η δομή του ξύλου, ανάλογα και με τον τρόπο κοπής του, καθορίζουν τις ιδιότητές του. Το ξύλο είναι ένα ελαφρύ υλικό, ανανεώσιμο, που κατεργάζεται εύκολα και διαθέτει σημαντικές αντοχές και εξαιρετική αντισεισμική συμπεριφορά. Η φαινόμενη πυκνότητα του ξηρού ξύλου αποτελεί το σημαντικότερο φυσικό χαρακτηριστικό του και δείκτη της ποιότητας και της μηχανικής αντοχής του. Κυμαίνεται, για τα ξύλα της Ευρώπης, από $\sim 100 \text{ kg/m}^3$ μέχρι $\sim 1300 \text{ kg/m}^3$ (στα ελληνικά ξύλα $300\text{--}900 \text{ kg/m}^3$) (Πίνακας 5) και διαφέρει, τόσο μεταξύ διαφορετικών δασοπονικών ειδών, όσο και μεταξύ δέντρων του ίδιου είδους, ακόμα και στο ίδιο δέντρο σε κατακόρυφη ή οριζόντια διεύθυνση. Ανάλογα με

την πυκνότητά του, το ξύλο διακρίνεται σε έξι κατηγορίες (από (1): πολύ ελαφρύ έως (6): εξαιρετικά βαρύ) (Πίνακας 6) (Βουλγαρίδης, 2015).

Πίνακας 5. Μέση φαινόμενη πυκνότητα ευρωπαϊκών ξύλων. (Πηγή: Χατήρης *et al.*, 2007)

Μέση φαινόμενη πυκνότητα ευρωπαϊκών ξύλων			
Είδος ξύλου	kg/m ³	Είδος ξύλου	kg/m ³
έλατο	450	σημύδα	650
κυπαρίσσι	470	καρυδιά	660
πεύκο	520	μελιά	690
κλήθρα	530	δρυς	690
λάρτζινο	590	κόκκινη οξυά	720
σφένδαμος	630	λευκή οξυά	830

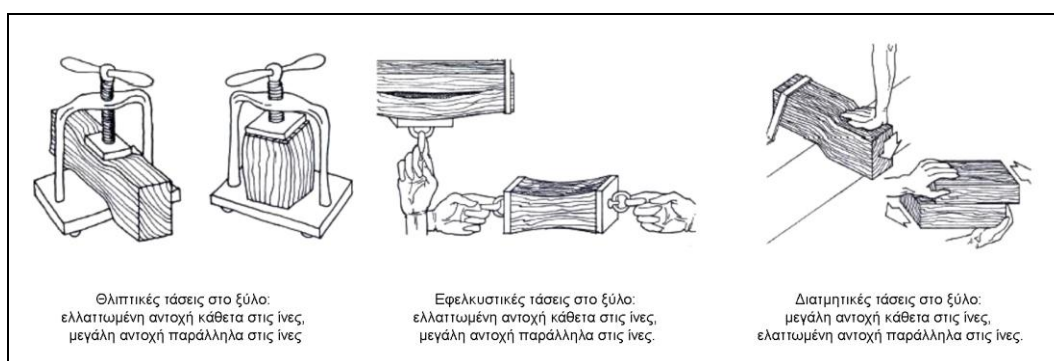
Πίνακας 6. Κατηγορία ξύλου βάσει πυκνότητας, με περιεχόμενη υγρασία 12%. (Πηγή: Βουλγαρίδης, 2006)

Κατηγορία Ξύλου	Πυκνότητα (kg/m ³)
Πολύ ελαφρύ (1)	<320
Ελαφρύ (2)	320-450
Μέτριο (3)	450-650
Βαρύ (4)	650-800
Πολύ βαρύ (5)	800-1.000
Εξαιρετικά βαρύ (6)	>1.000

Πλην των βασικών ιδιοτήτων που κατέχει ως στερεό υλικό, ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ξύλου είναι η υγροσκοπικότητά του, η ιδιότητά του δηλαδή να αποβάλλει ή να προσλαμβάνει υγρασία, ανάλογα με τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ώσπου να φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Η υγροσκοπικότητα συνεπάγεται ρίκνωση και διόγκωση του ξύλου, μεταβολές δηλαδή των διαστάσεων και ακολούθως του όγκου του. Λόγω της μικροδομής του και αναλόγως και με το είδος κοπής των ξυλοτεμαχίων, το μέγεθος των διαστασιακών αυτών μεταβολών διαφέρει μεταξύ ακτινικής, εφαπτομενικής και αξονικής κατεύθυνσης και έτσι το ξύλο παρουσιάζεται ως ένα ιδιαίτερα ανισότροπο υλικό (Βουλγαρίδης, 2015).

Η υγροσκοπικότητα του ξύλου και η, επαγόμενη από αυτήν, αλλά και από την ιδιάζουσα δομή του, ανισοτροπία, είναι καθοριστικές παράμετροι για τις μηχανικές αντοχές του. Το ξύλο συνεπώς, είναι πολύ ισχυρότερο στην παράλληλη στις ίνες του κατεύθυνση, παρά κάθετα προς αυτές. Αυτό σημαίνει ότι παρουσιάζει σημαντική αντοχή σε εφελκυστικές δυνάμεις παράλληλες προς τις ίνες, αλλά σχεδόν μηδενική σε εφελκυστικές δυνάμεις που

εφαρμόζονται κάθετα στις ίνες. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση των θλιπτικών δυνάμεων, με τη θλιπτική αντοχή όμως κάθετα στις ίνες, να είναι αρκετά μικρότερη. Στη διάτμηση, η αντοχή του ξύλου είναι μεγαλύτερη, όταν η διατμητική ένταση αναπτύσσεται κάθετα στις ίνες (Εικόνα 24). Εκτός από τη διεύθυνση των εξωτερικών δυνάμεων, οι μηχανικές αντοχές του ξύλου εξαρτώνται και από το είδος της μητρικής ύλης, την περιεχόμενη υγρασία, καθώς και την παρουσία ελαττωμάτων στη δομή του ξύλου, όπως είναι οι ρόζοι, οι ρωγμές στο εγκάρδιο, η εκκεντρική ανάπτυξη, οι θύλακες ρητίνης κ.ά. (Καλογεράς *et al.*, 1999; Λεγάκις, 1997b).



Εικόνα 24. Μηχανικές αντοχές ξύλου σε σχέση με τις ίνες του. (Πηγή: Καλογεράς *et al.*, 1999)

Παρά τα βασικά πλεονεκτήματά του ως προς την εργασιμότητα και τις αντοχές του, το ξύλο είναι ένα υλικό κατ' εξοχήν ευπαθές, με συνέπεια να έχει μικρή σχετικά διάρκεια ζωής και μεγάλες μεταβολές στην εκδήλωση των ιδιοτήτων του. Τα διάφορα ξύλα αλλοιώνονται κατά τη διάρκεια χρήσεώς τους, από βιολογικούς και αβιοτικούς παράγοντες. Οι κυριότεροι εξωγενείς παράγοντες που επιδρούν δυσμενώς στο ξύλο είναι οι σηπτικοί μικροοργανισμοί και τα ξυλοφάγα έντομα, καθώς επίσης ο παγετός και φυσικά η φωτιά. Πλην του κινδύνου της πυρκαγιάς, όλοι οι υπόλοιποι επιβλαβείς παράγοντες μπορούν να προληφθούν και είναι, σε κάποιο επίπεδο, αναστρέψιμοι, με τα κατάλληλα προστατευτικά μέτρα και την έγκαιρη και συστηματική συντήρηση (Βουλγαρίδης, 2015; Λεγάκις, 1997b).

Ως δομικό υλικό στα ιστορικά κτήρια του ελλαδικού χώρου, το ξύλο έπαιξε σπουδαίο ρόλο σε πολλές περιόδους, παρόλο που τα σωζόμενα λείψανα προβάλλουν κυρίως τον λίθινο χαρακτήρα της ελληνικής μνημειακής αρχιτεκτονικής, λόγω και της έλλειψης επαρκούς αριθμού σωζόμενων ξύλινων τεκμηρίων. Το ξύλο, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, εμφανίζεται σε πρωτόγονες κατασκευές της νεολιθικής περιόδου σε πασσαλόπηκτες οικίες, ως ξυλοδεσιά αργότερα σε τοίχους από ωμόπλινθους ή/και ακατέργαστους λίθους,

αλλά και σε μεγαλύτερα οικοδομήματα μεταγενέστερα, είτε με τη μορφή μπόλων και εμπολίων για τη σύνδεση κιόνων (**Εικόνα 25**), είτε ως φέρων σκελετός. Ακόμη και σε περιόδους αποκλειστικής σχεδόν χρήσης του λίθου, το ξύλο παρέμενε ένα σημαντικό δομικό υλικό (Λαδά, 2009).



Εικόνα 25. Αρχαίοι πόλοι και εμπολία από τα μνημεία της Αθηναϊκής Ακρόπολης.

Από αρχαίους συγγραφείς, κυρίως από τον Θεόφραστο, τον Πλίνιο και τον Βιτρούβιο, μάς γίνεται γνωστό ότι στην ελληνική οικοδομική τεχνολογία χρησιμοποιούνταν ποικιλία ειδών ξυλείας, τα ίδια ουσιαστικά με αυτά που υπάρχουν ακόμη και σήμερα σε αυτόν τον τόπο. Από τα κωνοφόρα, συναντώνται η ελάτη και η πεύκη, το κυπαρίσσι, ο κέδρος και ο άρκευθος, ενώ από τα φυλλοβόλα δένδρα κύριο ρόλο έπαιζαν η δρυς και η λεύκη και σε περιορισμένη χρήση η μελιά, η οξυά, η ελιά, καθώς και η πιο σπάνια εισαγόμενη ξυλεία, έβενος, ακακία και λεμονιά (Κακαράς, 2017).

Αναφέρεται δε μάλιστα, ότι, κατά τους αρχαίους, αλλά ιδιαιτέρως κατά τους κλασσικούς και τους μετέπειτα χρόνους, ήταν γνωστές οι διαφορές στις ιδιότητες ανάμεσα στα είδη των ξύλων, ως προς τη σκληρότητα, τη διάρκεια στον χρόνο, την υγροσκοπικότητα, και κάποιες από τις μηχανικές αντοχές τους, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει η τυποποίηση της πελεκητής και της πριστής ξυλείας σε συγκεκριμένα μήκη και διατομές. Από συγγράμματα και ενεπίγραφες στήλες, μαθαίνουμε επίσης πρακτικές που ακολουθούνταν για την προστασία των δομικών ξύλων από τη σήψη, όπως η επάλειψή τους με πίσσα, κιννάβαρι (θειούχος χαλκός), θαλασσινό νερό, ή με την πολύ συχνά ρητά αναφερόμενη κεδρία, το ελαιώδες έγχυμα από το εγκάρδιο του κέδρου (Κακαράς, 2014).

ΤΕΧΝΗΤΑ ΥΛΙΚΑ – ΚΕΡΑΜΙΚΑ

Η ιστορία των κεραμικών ακολουθεί, όπως και αυτή του λίθου, την ιστορία του ανθρώπου. Από τις πρώτες κατασκευές αγγείων από άργιλο, μέχρι τη σημερινή παραγωγή

οπτικών ινών για γρήγορες επικοινωνίες, οι κοινωνίες όλων των εποχών και η τεχνολογία τους επηρεάστηκαν με πολλούς τρόπους από τα κεραμικά υλικά.

Ιστορικά, η λέξη «κεραμικά» προέρχεται από το ελληνικό ρήμα «κεράννυμι», που σημαίνει «αναμιγνύω». Σύμφωνα με άλλες πηγές, επίσης πιθανή προέλευση της λέξης είναι το λατινικό ρήμα «creto» που σημαίνει «ψήνω», ενώ οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν τη λέξη «κέραμος», για να περιγράψουν προϊόντα που παράγονταν από την ανάμιξη και έψηση υλικών με κύριο συστατικό την άργιλο (Φτίκος, 2015).

Ο επικρατέστερος γενικός ορισμός για τα κεραμικά έχει δοθεί από τον Kingery (Kingery *et al.*, 2006) και συνοψίζεται στο εξής: «κεραμικό είναι ένα μη μεταλλικό ανόργανο στερεό». Κεραμικό υλικό λοιπόν, είναι κάθε μη μεταλλικό ανόργανο στερεό υλικό, με κρυσταλλική ή άμορφη δομή, το οποίο έχει υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (~1000°C), είτε κατά το στάδιο της επεξεργασίας του, είτε κατά το στάδιο της εφαρμογής του. Η πλειονότητα των κεραμικών προκύπτει από διάφορους συνδυασμούς μετάλλων και αμετάλλων ή μη-μεταλλικών στερεών και είναι συνήθως οξειδία, νιτρίδια και καρβίδια (Μοροπούλου *et al.*, 2014; Φτίκος, 2015).

Τα κεραμικά υλικά ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα **παραδοσιακά** και τα **προηγμένα** κεραμικά. Τα παραδοσιακά κεραμικά περιλαμβάνουν προϊόντα πηλών, όπως τούβλα, κεραμίδια και πλακίδια, αλλά και σκεύη εστίασης, πορσελάνες, πυρίμαχα κεραμικά, είδη υγιεινής, γυάλινα προϊόντα κ.ά., ενώ τα προηγμένα κεραμικά είναι υλικά νεώτερης τεχνολογίας, όπως κεραμικά για ηλεκτρονικές εφαρμογές, laser και οπτικές ίνες, για βιολογικές εφαρμογές, πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, ημιαγωγοί και υπεραγωγοί κ.ά., τα οποία παράγονται συνήθως σε μικρότερες ποσότητες και υψηλές τιμές (Φτίκος, 2015).

Τα κεραμικά χρησιμοποιήθηκαν από τους προϊστορικούς χρόνους ακόμη, κατά την Παλαιολιθική περίοδο, αρχικά για την κατασκευή λατρευτικών και διακοσμητικών μικροαντικειμένων, εργαλείων και οικιακών ή αποθηκευτικών σκευών και αρκετά αργότερα ως υλικά αστικών δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης και ως υλικά της οικοδομικής τεχνολογίας. Τα αρχαιότερα ευρήματα κεραμικών που έχουν ανακαλυφθεί χρονολογούνται γύρω στο 24000 π.Χ. και αποτελούν συμβολικές μικρογραφίες ανθρώπων και ζώων, χωρίς χρηστική αξία. Τα πρώτα χρηστικά κεραμικά σκεύη, για μαγειρική ή για αποθήκευση τροφίμων, προέρχονται από την ανατολική Ασία και υπολογίζονται γύρω στο 18000 π.Χ., ενώ αντίστοιχα σκεύη της περιοχής γύρω από τη Μεσόγειο εμφανίστηκαν αρκετά αργότερα, με την εμφάνιση των πρώτων αγροτικών νεολιθικών οικισμών. Ως δομικά υλικά στην αρχιτεκτονική, πρωτοεμφανίστηκαν και εφαρμόστηκαν με τη μορφή ωμών και ψημένων

πλίνθων από τους Ασύριους και τους Βαβυλώνιους, γύρω στο 4000 π.Χ. (Καραγιάννης, 2017; Μοροπούλου *et al.*, 2014).

Τα δομικά κεραμικά, εκτός του γυαλιού, παρασκευάζονται από φυσικές πρώτες ύλες, κατεργάζονται εύκολα και είναι ευρείας χρήσης στην καθημερινή ζωή. Ως πρώτη ύλη για την παρασκευή τους χρησιμοποιούνται αργιλώδη και αργιλοπηλώδη εδάφη, που αποτελούνται κυρίως από ένυδρο πυριτικό αργίλιο ($\text{Al}_2(\text{SiO}_2)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) και από προσμείξεις οξειδίων σιδήρου (κυρίως Fe_2O_3), ασβεστίτη (CaCO_3) και μαγνησίτη (MgCO_3) και από τα οποία λαμβάνεται η πηλοκονία, η πρώτη κονία που χρησιμοποιήθηκε στην ιστορία των κατασκευών. Η καθαρότερη μορφή αργίλου αποτελείται από καολινίτη ($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8\text{O}$). Επιπλέον συστατικά για τη δημιουργία του πηλοκονιάματος, είναι βεβαίως το νερό και η άμμος, κυρίως χαλαζιακής προέλευσης, η οποία είναι καθοριστική για την πλαστικότητα και την εργασιμότητα του τελικού υλικού. Η αναλογία του μίγματος σε καθαρή άργιλο και πυριτική ή χαλαζιακή άμμο, η διάμετρος των κόκκων και η θερμοκρασία όπτησης καθορίζουν το είδος του τελικού προϊόντος (πορσελάνη, πλίνθοι, κ.ά.) (Λεγάκις, 1997a; Σκουλικίδης, 2000).

Η διαδικασία παρασκευής ενός κλασικού, ιστορικού κεραμικού δομικού στοιχείου περιελάμβανε τα ακόλουθα στάδια:

- Εκσκαφή της αργιλώδους γης και έκθεση στον ατμοσφαιρικό αέρα για κάποιο χρονικό διάστημα.
- Καθαρισμός και καθίζηση του πηλού.
- Ανάμιξη με νερό και άμμο και προεργασία του πηλοκονιάματος, σύμφωνα με τη χρήση για την οποία προορίζεται και με την επιθυμητή ποιότητα του αντικειμένου παρασκευής.
- Εμπλουτισμός ή απίσχναση του πηλοκονιάματος, δηλαδή αύξηση ή ελάττωση αντίστοιχα του ποσοστού της αργίλου στο πηλοκονίαμα, αναλόγως πάντα με το επιδιωκόμενο τελικό προϊόν. Ο εμπλουτισμός γινόταν συνήθως με αφαίρεση άμμου, ενώ η απίσχναση με πρόσθεση άμμου, αλεύρων από πετρώματα ή ακόμη και ξύλου σε πριονίδια.
- Μάλαξη του πηλοκονιάματος και αφαίρεση τυχόν λίθων που περιέχει.
- Μόρφωση του αντικειμένου με τα χέρια, τον κεραμευτικό τροχό ή με πλήρωση τύπων.
- Ξήρανση, φυσική ή τεχνητή και βαθμιαία, ώστε να μην προκαλούνται ρηγματώσεις ή παραμορφώσεις των αντικειμένων πριν την έψηση.
- Όπτηση σε φούρνο με την κατάλληλη ατμόσφαιρα και θερμοκρασία, ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του αντικειμένου (Λεγάκις, 1997a; Μοροπούλου *et al.*, 2014; Τρυψιάνη-Ομήρου, 2012).

Για την παρασκευή του γυαλιού, που ανήκει στα άμορφα παραδοσιακά κεραμικά, χρησιμοποιείται πυριτική άμμος (SiO_2), ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3), ασβεστόλιθος (CaCO_3), δολομίτης και διάφορα οξείδια, όπως φωσφόρου, βαρίου, ψευδαργύρου κ.ά. Οι πρώτες ύλες πυρώνονται στους $\sim 1500^\circ\text{C}$ και η τήξη τους οδηγεί, μετά από ταχεία ψύξη μέχρι τους 1000°C , στο κοινό γυαλί σε ρευστή μορφή, το οποίο υποβάλλεται ακολούθως σε αργή ψύξη (ανόπτηση) μέχρι θερμοκρασίας περιβάλλοντος και στερεοποίησης, ώστε να μην δημιουργούνται τοπικές κρυσταλλώσεις στη μάζα του, που θα οδηγούσαν σε απώλεια διαφάνειας και μηχανικής αντοχής (Σκουλικίδης, 2000).

Οι **πλίνθοι** (τούβλα) οπτές κυρίως, αλλά και ωμές, τα **κεραμίδια**, τα επιτοιχία και επιδαπέδια **πλακίδια** και το **γυαλί** είναι τα κατεξοχήν δομικά κεραμικά υλικά στο πέρασμα των αιώνων. Προϊόντα κεραμικών αποτελούν επίσης το τσιμέντο και διάφορα άλλα είδη κονιαμάτων, που προστέθηκαν σταδιακά στην ιστορία της οικοδομικής τεχνολογίας (Μοροπούλου *et al.*, 2014). Τα κλασικά δομικά κεραμικά είναι ελαφριά υλικά, ψαθυρά, με διαφορετικούς βαθμούς σκληρότητας, υψηλούς στην πλειονότητά τους, υψηλό σημείο τήξης και χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Η συμπεριφορά τους έναντι στην τριβή, τη διάβρωση και τις μεταβολές της θερμοκρασίας είναι καλή, παρά το γεγονός ότι οι ρωγμές διαδίδονται εύκολα στη μάζα τους. Εμφανίζουν μέτρια έως καλή θλιπτική αντοχή, αλλά μικρή έναντι εφελκυσμού, ενώ η ιδιαίτερα πορώδης μικροδομή τους επιδρά έντονα στις μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες (Χοϊδης, 2019).

Το γυαλί μπορεί να είναι διαφανές, διαπερατό ή μη στο φως και οποιουδήποτε χρώματος. Είναι πολύ σκληρό υλικό, ψαθυρό με τέλεια ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση του, έχει μεγάλη ηλεκτρική και μικρή σχετικά θερμική αγωγιμότητα. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε χημικές επιδράσεις, εκτός του υδροφθορικού οξέος (HF), το οποίο περιέχεται σε αλκαλικά διαλύματα, όπως το ασβεστόνερο και σε μακροχρόνια υγρασία. Η μέση φαινόμενη πυκνότητά του κυμαίνεται γύρω στα 2500 kg/m^3 , ενώ η αντοχή του σε θλίψη γύρω στα 900 MPa (Χατήρης *et al.*, 2007).

Ο γεωγραφικός προσδιορισμός της κάθε περιοχής, για τη διαμόρφωση κτισμάτων αποτελεί καθοριστικό ρόλο στη χρήση δομικών υλικών και τεχνικών δόμησης που διαθέτει. Έτσι, τα τεχνητά κεραμικά δομικά υλικά αναπτύχθηκαν σε περιοχές όπου εξέλειπαν οι φυσικοί λίθοι και το ξύλο ή υπήρχε δυσκολία στην εξόρυξη και μεταφορά τους. Πρωτοεμφανίστηκαν και εφαρμόστηκαν στην ευρύτερη ζώνη της Μεσοποταμίας και της Αιγύπτου, γύρω στο 4000 π.Χ. Σε περιοχές με αφθονία φυσικών λίθων, όπως ο αρχαίος ελλαδικός χώρος, η κεραμική αναπτύχθηκε αρχικά περισσότερο για την κατασκευή οικιακών

σκευών, δοχείων αποθήκευσης τροφίμων και διακοσμητικών στοιχείων και λιγότερο για δομικά στοιχεία (κυρίως για κεραμίδια και ακροκέραμα, είτε για σωλήνες ύδρευσης – αποχέτευσης) (Μοροπούλου *et al.*, 2014).

Οι **οπτόπλινθοι** σε συνδυασμό με τα κονιάματα ως κύριο δομικό υλικό, αλλά και τα κεραμίδια χρησιμοποιήθηκαν ευρέως με την περαιτέρω ανάπτυξη της οικοδομικής τεχνολογίας, κατά τη Ρωμαϊκή και Βυζαντινή περίοδο. Ο ελλαδικός χώρος, αλλά και περιοχές των Βαλκανίων και της Μικράς Ασίας, που αποτελούσαν τον πυρήνα του Βυζαντίου, είναι οι κατεξοχήν χώροι από τους οποίους λαμβάνεται πλήθος τεκμηρίων για την οικοδομική τεχνολογία και τα μνημεία αυτής της περιόδου. Μάλιστα, στις περιοχές αυτές, για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμη και μετά την επικράτηση της οθωμανικής κυριαρχίας, παρέμειναν αρχιτεκτονικές παραδόσεις με δομικά και διακοσμητικά τούβλα και στέγες με ρωμαϊκού και βυζαντινού τύπου κεραμίδια (Λουκμά, 2019).

Η μορφή των πλίνθων στα ιστορικά κτήρια είναι πρισματική και κατά πλειονότητα συμπαγής (**Εικόνα 26**). Συναντώνται επίσης αρκετά συχνά τα συμπαγή τούβλα με κοιλότητα (σκάφη) στην επιφάνεια έδρασής τους (**Εικόνα 26**), προκειμένου για την αποτελεσματικότερη εμπλοκή και σύνδεση κατά τη δόμηση φερόντων στοιχείων. Το χρώμα τους εξαρτάται από τη σύσταση της πρώτης ύλης, κυρίως από την περιεκτικότητα σε οξείδια του σιδήρου. Στα μνημεία του ελλαδικού χώρου είναι συνήθως κόκκινες και σπανιότερα υποκίτρινες ή υπόλευκες. Η χρήση τους έχει περιοριστεί στη σύγχρονη οικοδομική ως κύριο δομικό στοιχείο, καθώς έχουν αντικατασταθεί από το οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα διάτρητα τούβλα που μας είναι γνωστά σήμερα, εμφανίστηκαν στη νεώτερη αρχιτεκτονική των πόλεων και δεν χρησιμοποιούνται σε φέροντα στοιχεία. (Λεγάκις, 1997a; Παπαϊωάννου, 2005).



Εικόνα 26. Τύποι παραδοσιακών ιστορικών οπτοπλίνθων (συμπαγής και με σκάφη). (Πηγή: Μοροπούλου, 2014)

Στον Πίνακα 7 καταγράφονται αναφορές για το φαινόμενο βάρους οπτοπλίνθων από διάφορες τοποθεσίες της νότιας Ευρώπης, ενώ στους Πίνακες 8,9 καταγράφονται τα

κυριότερα χαρακτηριστικά οπτόπλινθων που απαντώνται σε ρωμαϊκά και βυζαντινά μνημεία του βόρειου ελλαδικού χώρου.

Πίνακας 7. Τυπικές τιμές φαινόμενου ειδικού βάρους οπτοπλίνθων από μνημεία διαφόρων περιοχών της νότιας Ευρώπης. (Πηγή: Fernandes et al., 2010; απόδοση Μαρνέλλου, 2020)

Χρονική περίοδος (αιώνας)	Μνημείο και τοποθεσία	Φαινόμενο ειδικό βάρος (kg /m ³)	Αναφορές
1 ^{ος} – 5 ^{ος}	Τοιχοποιίες, υποστυλώματα, θόλοι κτηρίων	1400-1900	Papayianni & Stefanidou (2000)
3 ^{ος} – 4 ^{ος}	Ναός S.Lorenzo, Μιλάνο, Ιταλία	1550-1650	Baronio et al. (1985) Baronio & Binda (1985)
6 ^{ος}	Βασιλική Αγίας Σοφίας, Κωνσταντινούπολη, Τουρκία	1600-2000	Livingston (1993)
9 ^{ος} – 10 ^{ος}	Πλίνθοι Ναού S.Maria Rossa, Ιταλία	1600	Maierhofer et al. (1998)
12 ^{ος} – 13 ^{ος}	Πλίνθοι από την πόλη Τολέδο, Ισπανία	1600	López-Arce et al. (2003)
13 ^{ος}	Πλίνθοι Ναού S.Maria Rossa, Ιταλία	1830	Maierhofer et al. (1998)
13 ^{ος} – 14 ^{ος}	Πλίνθοι από την πόλη Τολέδο, Ισπανία	1510	López-Arce et al. (2003)
12 ^{ος} – 16 ^{ος}	Μονή Rombeiro, Πορτογαλία	1680-1840	Fernandes (2006)
12 ^{ος} – 17 ^{ος}	Μονή São João de Tarouca, Πορτογαλία	1710-1820	Fernandes (2006)
15 ^{ος} – 16 ^{ος}	Ναός S.Maria Incoronata, Μιλάνο, Ιταλία	1550-1850	Baronio & Binda (1985)
16 ^{ος}	Αργιλικοί πλίνθοι από ιταλικά κτήρια	1550	Bati & Ranocchiali (1994)
17 ^{ος}	Ναός στο Outeiro, Πορτογαλία	1700-1780	Fernandes (2006)
17 ^{ος}	Μονή S.Martin Tibães, Πορτογαλία	1680-1790	Fernandes (2006)
17 ^{ος} – 18 ^{ος}	Μονή S.Eustorgio, Μιλάνο, Ιταλία	1650	Baronio & Binda (1985)
18 ^{ος}	Μονή S.Maria de Salzedas, Πορτογαλία	1550-1870	Fernandes (2006) Lourenco et al. (2000)
18 ^{ος}	Μονή του Χριστού, Tomar, Πορτογαλία	1560-1800	Fernandes (2006)

Πίνακας 8. Κυριότερα φυσικά & μηχανικά χαρακτηριστικά ρωμαϊκών οπτόπλινθων από περιοχές της βόρειας Ελλάδας. (Πηγή: Stefanidou *et al.*, 2014)

Μνημείο/ Χρονική περίοδος (αιώνας)	Φαινόμενο Ειδικό Βάρος	Υδατοαπορροφητικότητα	Θλιπτική Αντοχή	Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας
	Μέση Τιμή (kg/m^3)	Μέση Τιμή (%)	Μέση Τιμή (MPa)	Μέση Τιμή (GPa)
Φίλιπποι / 2 ^{ος} αι. μ.Χ.	1678	22,02	18,78	4,76
Ρωμαϊκή Αγορά Θεσσαλονίκης / 3 ^{ος} – 4 ^{ος} αι. μ.Χ.	1846	14,28	10,00	3,88
Ανάκτορο Γαλέριου Θεσσαλονίκη / 4 ^{ος} αι. μ.Χ.	1756	15,78	19,80	5,20
Δίον, Πιερία / 4 ^{ος} αι. μ.Χ.	1638	22,38	4,62	2,78

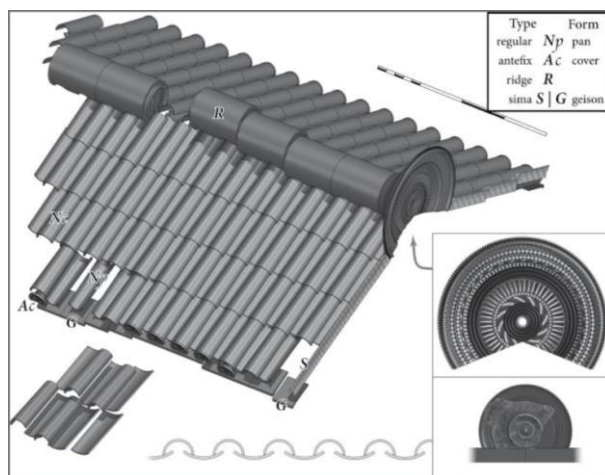
Πίνακας 9. Κυριότερα φυσικά & μηχανικά χαρακτηριστικά βυζαντινών οπτόπλινθων από την περιοχή της Θεσσαλονίκης. (Πηγή: Stefanidou *et al.*, 2014)

Μνημείο/ Χρονική περίοδος (αιώνας)	Φαινόμενο Ειδικό Βάρος	Υδατοαπορροφητικότητα	Θλιπτική Αντοχή	Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας
	Μέση Τιμή (kg/m^3)	Μέση Τιμή (%)	Μέση Τιμή (MPa)	Μέση Τιμή (GPa)
Παναγία Αχειροποίητος / 7 ^{ος} αι. μ.Χ.	1764	18,16	16,08	7,06
Αγία Σοφία / 8 ^{ος} αι. μ.Χ.	1840	16,02	14,08	9,2
Παναγία Χαλκέων / 11 ^{ος} αι. μ.Χ.	1464	16,06	8,08	3,98
Αγία Αικατερίνη / 14 ^{ος} αι. μ.Χ.	1684	29,8	4,50	2,90
Άγιος Παντελεήμων / 14 ^{ος} – 15 ^{ος} αι. μ.Χ.	1518	27,4	5,20	2,86

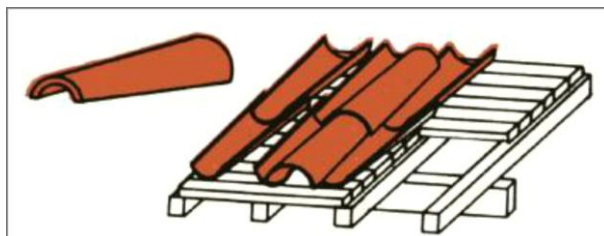
Τα **κεραμίδια** συναντώνται στις επιστεγάσεις επίσης από την αρχαιότητα, σε πληθώρα τύπων, διαστάσεων και μεθόδων συναρμογής, με τεκμήρια στον ελλαδικό χώρο από την αρχαϊκή ακόμη αρχιτεκτονική (**Εικόνα 27**). Η μεγαλύτερη όμως εφαρμογή τους έγινε, όπως ισχύει και με τους οπτόπλινθους, στα ρωμαϊκά και βυζαντινά χρόνια, οπότε και ξεκίνησε η συστηματική προτυποποίησή τους. Τα κυρτά κεραμίδια μάλιστα, καθώς έγινε ευρύτατη χρήση τους στην αρχιτεκτονική των βυζαντινών ναών, που συναντώνται συχνότατα στον ελληνικό χώρο, παρέμειναν ως ξεχωριστή κατηγορία με την ονομασία «βυζαντινά» (**Εικόνα 28**), ενώ ο πτυχωτός και ο πλακοειδής τύπος εμφανίζονται σε νεώτερης εποχής ιστορικά κτήρια (Λεγάκις, 1997α).

Τα **κεραμικά πλακίδια** αποτελούν έναν ξεχωριστό κλάδο στην ιστορία της δομικής κεραμικής. Χρησιμοποιούνται από τα τελευταία προϊστορικά χρόνια έως και σήμερα, ως επενδυτικά στοιχεία δαπέδων, τοίχων και οροφών, κυρίως ως διακοσμητικά στοιχεία, αλλά

και για την προστασία των τοιχοδομών από τη διάβρωση. Επιφάνειες επιστρωμένες με κεραμικά πλακίδια συναντώνται ήδη από την 4^η χιλιετία στη Μεσοποταμία, αλλά και στην Αίγυπτο της ίδιας περίπου περιόδου, όπου εφευρέθηκε και η φαγεντιανή, ένα ιδιαίτερο κεραμικό υλικό, που συναντάται σε διακοσμητικά πλακίδια και μικροαντικείμενα σε μνημεία και της μινωικής Κρήτης.



Εικόνα 27. Ισομετρική απεικόνιση στέγης αρχαϊκού ναού Ηραίου Ολυμπίας. (Πηγή: Sapirstein, 2016)



Εικόνα 28. Ισομετρική απεικόνιση στέγης με βυζαντινού τύπου κεραμίδια. (Πηγή: Λεγάκις, 1997)

Η ιδιαίτερη τεχνολογία της εφυάλωσης των κεραμικών πλακιδίων, που αναπτύχθηκε αρκετά νωρίς και εξελίχθηκε ιδιαίτερα μετά τον 9^ο αιώνα, στις περιοχές όπου κυριαρχούσε το Ισλάμ, βελτίωνε τις ιδιότητες του κεραμικού, επέτρεπε την προσθήκη χρώματος και έδωσε μοναδικής ομορφιάς επενδύσεις σε αραβικά και ισλαμικά μνημεία. Στον ελλαδικό χώρο, λόγω της αφθονίας τους, προτιμήθηκαν ως επικαλύψεις δαπέδων και εσωτερικών τοίχων μάρμαρα, γρανίτες και άλλα πολυτελή πετρώματα. Η χρήση των κεραμικών στην αρχιτεκτονική περιορίστηκε στις επιστεγάσεις με κεραμίδια, όπως αναλύθηκε παραπάνω, ενώ υπήρξε και κάποια παραγωγή μικρού αριθμού ψηφίδων, οι οποίες χρησιμοποιούνταν ως συμπληρωματικά υλικά στην κατασκευή των εξαιρετικής αισθητικής επιδαπέδων και

επιτοίχιων ψηφιδωτών, κυρίως της ελληνιστικής και μακεδονικής περιόδου (Van Lemmen, 2013).

Το **γυαλί**, ανήκει και αυτό, όπως προαναφέρθηκε, στα παραδοσιακά κεραμικά υλικά και ήταν και αυτό από τα πρώτα τεχνητά υλικά που κατασκεύασε ο άνθρωπος. Σε σχέση με άλλα δομικά υλικά, η χρήση του στην αρχιτεκτονική μέχρι και σήμερα είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής του. Πρώτοι, κατά παράδοση, που κατασκεύασαν αντικείμενα από γυαλί ήταν οι Φοίνικες και στη συνέχεια οι Αιγύπτιοι, κυρίως για λατρευτικούς ή διακοσμητικούς σκοπούς και ήδη από το 1500 π.Χ. αναφέρεται ότι οι δεξιότητες για την επεξεργασία του είχαν περάσει στον ευρωπαϊκό χώρο. Μια πρώτη ώθηση στην τεχνολογία του γυαλιού ως δομικού υλικού, ήρθε κατά τη ρωμαϊκή περίοδο, όμως η μεγάλη εξέλιξη στη χημεία του επίπεδου γυαλιού είναι συνυφασμένη με τη γοτθική αρχιτεκτονική, που χαρακτηρίζεται ως η πρώιμη ηλικία της αρχιτεκτονικής του γυαλιού και η οποία εκφράστηκε με το δραματικό φως των περίφημων υαλογραφιών (βιτρώ) των ναών του βορρά. Η σημαντική άνθιση της επεξεργασίας του γυαλιού άρχισε μετά τον 16^ο αιώνα στην Αγγλία και ουσιαστικά προς το τέλος του 19^{ου} αιώνα, με την βιομηχανοποίησή του ως δομικό υλικό, που οδήγησε την αρχιτεκτονική σε εξελικτικά άλματα (Γαβρηλίδης, 2018; Λεγάκις, 1997b). Στον ελλαδικό χώρο, το γυαλί συναντάται σε βυζαντινά μνημεία, ως διακοσμητικό στοιχείο στα εξαιρετικής αισθητικής μωσαϊκά με γυάλινες ψηφίδες, ενώ πιο σπάνια με τη μορφή βιτρώ, σε πολυτελείς μόνο ναούς (James, 2006). Σε νεώτερης εποχής ιστορικά κτήρια, το βρίσκουμε στη λειτουργική του έκφραση, στα δομικά στοιχεία των κουφωμάτων, ως τεχνική απάντηση στην ανάγκη ταυτόχρονης προστασίας και οπτικής άνεσης.

ΤΕΧΝΗΤΑ ΥΛΙΚΑ – ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Τα **κονιάματα** αποτελούν βασικό δομικό υλικό των κατασκευών από την προϊστορία ακόμη, όταν χρησιμοποιούνταν από τον άνθρωπο ως μέσον συγκράτησης κλαδιών, ξύλων και άλλων υλικών, προκειμένου να διαμορφώσει το κέλυφος ενός κλειστού χώρου που χρησίμευε ως κατοικία του.

Αφορούν σε μίγματα από συνδετική ύλη (κονία), λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα αδρανή, νερό επεξεργασίας και, κατά περίπτωση, κάποια πρόσθετα πρόσμικτα, ανόργανης ή οργανικής φύσης. Έχουν τη βασική ιδιότητα να σκληρύνονται με τον χρόνο και να φέρουν φορτία, ενώ κατά τη διάρκεια της δόμησης έχουν ρευστή μορφή και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη σύνδεση των δομικών στοιχείων μεταξύ τους, αλλά και ως επιχρίσματα για επικάλυψεις και επιστρώσεις δαπέδων. Αν και αντιστοιχούν σε μια αναλογία ~7% του

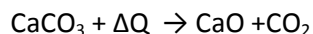
συνολικού όγκου στις τοιχοδομές, η λειτουργία που επιτελούν δεν περιορίζεται στον συνδετικό τους μόνο ρόλο, αλλά παράλληλα και σε βάθος χρόνου συμβάλλουν στη συνολική αντίσταση της κατασκευής έναντι των περιβαλλοντικών συνθηκών, διασφαλίζοντας έτσι, μια ισχυρή και ανθεκτική αρχιτεκτονική δομή (Hughes & Valek, 2003; Παπαϊωάννου, 2005).

Οι κόνιες, που αποτελούν το κύριο συστατικό των κονιαμάτων, είναι στερεά υλικά, σε μορφή σκόνης ή υγρά σε μορφή διαλύματος ή αιωρήματος, τα οποία όταν κατεργαστούν με ένα ρευστό μέσο (συνήθως νερό), γίνονται εύπλαστα και αποκτούν συγκολλητικές ιδιότητες. Η πήξη της κόνιας, που συνίσταται στη μεταβολή του ιξώδους της και στη μετάπτωση από μια ημίρρευστη σε στερεή κατάσταση, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των μηχανικών αντοχών, η οποία ολοκληρώνεται με την πάροδο του χρόνου και την επίδραση διαφόρων φυσικοχημικών φαινομένων. Ανάλογα με την προέλευσή τους, οι κόνιες διαχωρίζονται σε φυσικές, που βρίσκονται ελεύθερες στη φύση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς ιδιαίτερη κατεργασία, σε αντίθεση με τις τεχνητές, για των οποίων την παρασκευή απαιτείται επεξεργασία με φυσικές ή χημικές μεθόδους. Με κριτήριο τον τρόπο πήξης τους, διακρίνονται σε **αερικές** κόνιες, δηλαδή που υφίστανται πήξη και σκλήρυνση στον ατμοσφαιρικό αέρα και σε **υδραυλικές**, οι οποίες πήζουν και σκληρύνονται σε υγρό περιβάλλον, συνήθως νερό και παραμένουν σκληρές ακόμα και κάτω από αυτό (Λεγάκις, 1997α; Παπαϊωάννου, 2005).

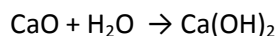
Το αργιλικό χώμα αποτέλεσε την πρώτη συνδετική κόνια που χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο για την παρασκευή κονιαμάτων, την πηλοκονία, η οποία αποτελεί την πρώτη ύλη και για τα κεραμικά προϊόντα, γι' αυτό και σε μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας, κάποια κονιάματα ταξινομούνται ως ιδιαίτερη κατηγορία των κεραμικών υλικών. Τα πηλοκονιάματα χρησιμοποιήθηκαν συστηματικά από τη Νεολιθική περίοδο, κυρίως λόγω της αφθονίας τους ως πρώτη ύλη και της εύκολης παρασκευής και εφαρμογής τους, ενώ συναντώνται ακόμη και σε περιπτώσεις λαϊκής αρχιτεκτονικής των αρχών του 20^{ου} αιώνα. Η πηλοκονία έχει ασθενείς συγκολλητικές ιδιότητες, τις οποίες χάνει όταν βραχεί ξανά, γεγονός που φαίνεται να οδήγησε στην αναζήτηση και ανακάλυψη ισχυρότερων συνδετικών υλών, όπως ο γύψος, ο ασβέστης, το τσιμέντο και τα ασφαλτικά υλικά (Λεγάκις, 1997α). Ωστόσο, μια από τις πρώτες μελέτες αναφορικά με ιστορικά κονιάματα, αυτή των Gourdin & Kingery (1975), έδειξε ότι, αν και τα πηλοκονιάματα κυριάρχησαν στις προϊστορικές κατασκευές, η τεχνολογία παραγωγής ασβέστου και ασβεστοκονιαμάτων προϋπήρξε της τεχνολογίας κατασκευής των κεραμικών (Gourdin & Kingery, 1975).

Η **άσβεστος**, περισσότερο η αερική, αλλά και η υδραυλική, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες κόνιες που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική μέχρι και σήμερα και έχει πλήθος εφαρμογών με άριστες ιδιότητες και αποτελέσματα.

Η αερική άσβεστος παράγεται με όπτηση του ασβεστόλιθου, καθαρού (CaCO_3) ή δολομιτικού ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), μεταξύ 900 και 1300°C. Προϊόν της θέρμανσης του ασβεστόλιθου είναι ο κοινός (άνυδρος) ασβέστης (CaO), ο οποίος έχει τη μορφή και το μέγεθος των λίθων από τους οποίους προήλθε και χρώμα λευκό.



Όταν το οξείδιο του ασβεστίου αναμιχθεί με νερό, πραγματοποιείται το λεγόμενο σβήσιμο του ασβέστη, από το οποίο προκύπτει ο ένυδρος ασβέστης ή υδράσβεστος ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).



Παρουσία του διοξειδίου της ατμόσφαιρας (CO_2) και αποβάλλοντας νερό, η υδράσβεστος σκληραίνει και μετατρέπεται και πάλι σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), το οποίο είναι αυτό που συναντάται κατά κύριο λόγο στα μνημεία, είτε από την κατασκευή τους, είτε από επεμβάσεις συντήρησης ή από ανακρυστάλλωση (Λεγάκις, 1997a; Σκουλικίδης, 2000).

Η υδραυλική άσβεστος παράγεται από όπτηση μαργαϊκών ασβεστολίθων, ένα μίγμα ανθρακικού ασβεστίου και πυριτικής αργίλου (μάρμες), σε θερμοκρασία περίπου 900-950°C. Από την όπτηση προκύπτει άνυδρος ασβέστης με περιεκτικότητα περίπου 10-20% σε οξείδια αργίλου, πυριτίου ή σπανιότερα σιδήρου ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ή $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ή $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Κατά τη διαδικασία της σβέσης, οι αργιλοπυριτικές ενώσεις ενυδατώνονται και παράγονται αφενός, η υδράσβεστος ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) από τον άνυδρο ασβέστη και ένυδρο πυριτικό ασβέστιο ή αργίλιο ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, C-S-H ή C-A-H), ενώ ακολουθεί η ενανθράκωση και σκλήρυνση της υδρασβέστου σε υγρό περιβάλλον ή και αέρα (Λεγάκις, 1997a; Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014). Η υδραυλική άσβεστος συναντάται σε ιστορικές κατασκευές, ως υλικό συντήρησης, αφού χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε ελληνικό μνημείο το 1872, στη συντήρηση της Ακρόπολης από τον Martinelli και έκτοτε έχει παραμείνει με την ονομασία «γαλλικό χρώμα». Σήμερα, η υδραυλική άσβεστος έχει εξ ολοκλήρου σχεδόν αντικατασταθεί από το τσιμέντο, το οποίο διαθέτει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό την ιδιότητα της πήξης μέσα σε νερό (Σκουλικίδης, 2000).

Ο **γύψος** αποτελεί μια επίσης αρκετά συχνή κόνια σε ιστορικές κατασκευές, γνωστός ήδη από την προϊστορική αρχιτεκτονική, με παλαιότερα ευρήματα κυρίως από την Πρώιμη Δυναστική περίοδο της Αιγύπτου, στα χρόνια της οποίας (>3η χιλιετία π.Χ.) τα κονιάματα με βάση τον γύψο αποτελούσαν το χαρακτηριστικό επίχρισμα στις εσωτερικές τοιχοποιίες των

κατασκευών (Gourdin & Kingery, 1975). Ως πρώτη ύλη για την παραγωγή γύψου χρησιμοποιείται το θειικό ασβέστιο, είτε στην άνυδρη (CaSO_4), είτε στη φυσική ορυκτή μορφή του ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Με θέρμανση στους $\sim 130^\circ\text{C}$ ο ένυδρος γύψος, χάνει ενάμισο μόριο νερού και μετατρέπεται σε ημιυδρικό γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), μορφή με την οποία χρησιμοποιείται κατά τη δόμηση. Λόγω της ταχύτατης πήξης του, ο ημιυδρικός γύψος αναμιγνύεται συχνά με ασβέστη ή με άμμο. Ο φυσικός ορυκτός γύψος συναντάται και ως πρόσμιξη στο τσιμέντο, ως διακοσμητικό υλικό, αλλά και πολύ συχνά σε μνημεία και ιστορικά κτήρια ως προϊόν επίδρασης του ατμοσφαιρικών οξειδίων του θείου (SO_x), κυρίως σε ασβεστόλιθους και μάρμαρα (Σκουλικίδης, 2000; Χατήρης *et al.*, 2007).

Ο όρος **τσιμέντο** προσδιορίζει μια μεγάλη κατηγορία υδραυλικών κονιών, με κοινή προέλευση από μίγματα ασβεστολιθικών (CaCO_3) και αργιλοπυριτικών ($\text{Al}_2(\text{SiO}_2)_3$) πετρωμάτων και ορυκτών του σιδήρου (Fe_2O_3). Για κάθε είδος τσιμέντου χρησιμοποιούνται με διαφορετική αναλογία των συστατικών τους τα μίγματα αυτά, τα οποία με σταδιακή θέρμανση σε θερμοκρασίες $1400\text{-}1450^\circ\text{C}$, παράγουν το λεγόμενο «clinker» (εκβολάδα), που αναμιγνύεται με διάφορα πρόσθετα και στη συνέχεια αλέθεται για να παράγει την τελική λεπτόκοκκη κονία (τσιμέντο). Κύριος αντιπρόσωπος των τσιμεντών είναι το τσιμέντο Portl&, η ανακάλυψη του οποίου το 1824, ξεκίνησε μια νέα εποχή στην οικοδομική τεχνολογία και του οποίου τα κύρια συστατικά είναι το πυριτικό διασβέστιο ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) και τριασβέστιο ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), το αργιλικό τριασβέστιο ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) και το αργιλικό τετρασβέστιο φερρίτης ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Πρόδρομες τσιμεντιτικές κονίες που χρησιμοποιήθηκαν από τα αρχαϊκά χρόνια, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, είναι οι ποζολάνες, εκ των οποίων και η θηραϊκή γη στον ελληνικό χώρο, που προέρχονται από ηφαιστειακή τέφρα και περιέχουν αργιλοπυριτικές ενώσεις (Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014; Σκουλικίδης, 2000).

Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κονία, τα κονιάματα που παρασκευάζονται διακρίνονται σε:

- α) **αερικά** κονιάματα (ασβεστοκονίαμα, πηλοκονίαμα, μαρμαροκονίαμα κ.ά.)
- β) **υδραυλικά** κονιάματα (τσιμεντιτικής βάσης)
- γ) **οργανικά** κονιάματα (πλαστικά κονιάματα) και
- δ) **ειδικά** κονιάματα (κόλλες).

Από αυτά, τα πλέον συνήθη στο μεγαλύτερο μέρος των κατασκευών της ιστορικής κληρονομιάς, είναι τα **ασβεστοκονιάματα**, τα **τσιμεντοκονιάματα**, τα **τσιμεντο-ασβεστοκονιάματα** και, πιο σπάνια για αισθητικούς περισσότερους λόγους, τα μαρμαροκονιάματα (Μαρινάκη, 2004; Παπαϊωάννου, 2005).

Ανάλογα με τη λειτουργία τους στην κατασκευή, τα ιστορικά κονιάματα κατατάσσονται σε:

- κονιάματα δόμησης (αρμολογήματα)
- κονιάματα υποστρωμάτων (δαπέδων, ψηφιδωτών, μωσαϊκών, τοιχογραφιών)
- επιχρίσματα (εσωτερικά, εξωτερικά)
- κονιάματα οροφών ή επικάλυψης στεγών
- κονιάματα αρχιτεκτονικών μελών (Groot et al., 2004; Pachta & Paragianni, 2014).

Τα **ασβεστοκονιάματα** είναι μίγματα υδρασβέστου, νερού και άμμου, με καλή εργασιμότητα, μικρές μηχανικές αντοχές (<1,5MPa σε θλίψη, <0,35MPa σε εφελκυσμό), υψηλή υδατοπερατότητα και μετρίως καλή συμπεριφορά σε κύκλους ψύξης-θέρμανσης, ενώ το ειδικό βάρος των τυπικών ασβεστιτικών κυμαίνεται μεταξύ 1500kg/m³ και 1800 kg/m³ και το πορώδες τους μεταξύ 30 και 35% (Λεγάκις, 1997a; Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014).

Η χρήση των ασβεστοκονιαμάτων σε επιχρίσματα ανιχνεύθηκε αρκετά νωρίς, γύρω στην 8^η π.Χ. χιλιετία σε νεολιθικές κατασκευές, όμως η χρήση τους σε αρμολογήματα συστηματοποιήθηκε πολύ αργότερα και προσέφερε νέες προοπτικές στους μικτούς τρόπους δόμησης. Στον ελλαδικό χώρο ασβεστοκονιάματα συναντώνται από τη μινωική και κυκλαδική εποχή, κυρίως ως επιχρίσματα, ενώ ως κονιάματα δόμησης τα βρίσκουμε συχνά σε βυζαντινά μνημεία, σε μίγμα υδρασβέστου και αδρανών από άμμο, κεραμάλευρο και θραυστό κεραμικό, κονίαμα που έχει μείνει γνωστό ως «cocciopesto» ή «κουρασάνι» και παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στην υγρασία, σε σχέση με τα αμιγή ασβεστοκονιάματα (Πάχτα, 2011; Σκουλικίδης, 2000).

Τα **τσιμεντοκονιάματα** είναι μίγματα τσιμέντου, νερού και άμμου ή/και άλλων αδρανών. Το ειδικό τους βάρος, όπως και άλλες φυσικές τους ιδιότητες (όπως το πορώδες, η υδατοπερατότητα κλπ) ποικίλουν, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε τσιμεντοκονία ανά m³ κονιάματος (από 200-250 kg τσιμέντου για ισχνά κονιάματα έως και 900kg τσιμέντου για πολύ ισχυρά). Βασικά πλεονέκτηματά τους είναι η γρήγορη σχετικά σκλήρυνση, η σταθερότητα του όγκου τους και η καλή συμπεριφορά έναντι χημικής διάβρωσης. Η πιο σημαντική όμως ιδιότητα των τσιμεντοκονιαμάτων, που καθιέρωσε την ευρεία χρήση τους από τις αρχές του 19^{ου} στη νεώτερη και σύγχρονη κατασκευαστική, είναι η μεγάλη τους αντοχή σε θλίψη (>30MPa και μέχρι ~60MPa), που τα κάνει κατάλληλα όχι μόνο για κονιάματα δόμησης και επιχρισμάτων, αλλά και για κατασκευή φερόντων στοιχείων. Το γνωστότερο και πλέον χρησιμοποιούμενο τσιμεντοκονίαμα με τσιμέντο τύπου Portl&, είναι το σύγχρονο σκυρόδεμα, μίγμα τσιμέντου, άμμου και χονδρόκοκκων αδρανών, με πλήρως

ελεγχόμενες φυσικομηχανικές ιδιότητες, που συναντάται σε νεώτερα ιστορικά κτήρια μετά τον 19^ο αιώνα και στην Ελλάδα (Λεγάκις, 1997α; Μοροπούλου & Μπακόλας, 2014).

Τα **ασβεστοτσιμεντοκονιάματα** είναι μίγματα υδρασβέστου, τσιμεντιτικής κονιάς, αδρανών και νερού και είναι από τα πλέον συχνά συναντώμενα κονιάματα σε μνημεία, ιδιαίτερα από τον 2^ο π.Χ. αιώνα και μετά, ενώ ήταν ήδη γνωστά στον ελλαδικό χώρο από την αρχαϊκή εποχή. Η κατηγορία αυτή των κονιαμάτων συνδυάζει τις ιδιότητες και το μικρότερο κόστος του ασβεστοκονιάματος, με τις δύο βασικές ιδιότητες του τσιμεντοκονιάματος, την αυξημένη δηλαδή θλιπτική αντοχή και την ταχεία σκλήρυνση και πήξη μέσα στο νερό (Λεγάκις, 1997α; Μοροπούλου *et al.*, 2014).

Οι λεγόμενες ποζολάνες, πρόδρομες τσιμεντιτικές κονίες, όπως η θηραϊκή και η μηλαϊκή γη, χρησιμοποιούνταν ήδη από τον 6^ο π.Χ. αιώνα στον ελλαδικό χώρο, σε κονιάματα με βάση την άσβεστο, μεγάλη περιεκτικότητα σε χονδρόκοκα αδρανή και κεραμάλευρα, για ιστορικές κατασκευές στις οποίες ήταν απαραίτητη η υδατοστεγανότητα, όπως δεξαμενές (π.χ. Κάμιρος Ρόδου, Λαύριο, Μέγαρο κ.ά.), λιμενικά έργα, αλλά και σε οικιστικές εφαρμογές (π.χ. συγκρότημα Ολύμθου). Τα κονιάματα αυτά παρουσίαζαν ισχυρό υδραυλικό χαρακτήρα, υψηλή συμπίκνωση, μηχανική αντοχή και ανθεκτικότητα στον χρόνο.

Από τον 2^ο π.Χ. αιώνα και έπειτα, οπότε και συστηματοποιήθηκε από τους Ρωμαίους η χρήση της ποζολάνης, ως τσιμεντιτικής κονιάς με υδραυλικές ιδιότητες, τα ασβεστοτσιμεντιτικά κονιάματα κυριαρχούν στις κατασκευές. Οι Lechtman & Hobbs (1987) περιγράφουν πώς η έλευση του «ρωμαϊκού σκυροδέματος» έφερε μια αρχιτεκτονική επανάσταση, καθώς επέτρεψε τη σχηματοποίηση και δόμηση μονολιθικών σκυροδέτων κατασκευών από ασβεστοποζολανικά κονιάματα με χονδρόκοκα αδρανή (Hughes & Valek, 2003). Στον ελλαδικό χώρο τα ασβεστοτσιμεντιτικά κονιάματα, με υδράσβεστο, ποζολανική θηραϊκή γη και θραυστά κεραμικά απαντώνται συχνά σε ελληνοιστικά και ρωμαϊκά κυρίως μνημεία, καθώς στις μετέπειτα περιόδους του Βυζαντίου και την οθωμανική, η παράδοση των κονιαμάτων άλλαξε και προτιμήθηκαν κυρίως ασβεστοκονιάματα με θραυστά κεραμικά (Κυροπούλου, 2016).

Βάσει του τύπου και της αναλογίας των συστατικών τους, τα κονιάματα παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις φυσικομηχανικές και χημικές ιδιότητές τους, ενώ κοινό χαρακτηριστικό των κονιαμάτων στις κατασκευές είναι ότι συμμετέχουν στο σχηματισμό δι- και τριεπιφανειών, δηλαδή επιφανειών στις οποίες συναντώνται δύο ή τρία διαφορετικά υλικά (π.χ. λίθος-κονίαμα-έδαφος ή λίθος-κονίαμα-αέρας). Οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε περιβαλλοντικούς παράγοντες και για τον λόγο

αυτόν τα κονιάματα προσελκύουν το επιστημονικό ενδιαφέρον σε περιπτώσεις συντηρήσεων και αποκαταστάσεων μνημείων (Χοϊδης, 2019).

Στον πίνακα που ακολουθεί (**Πίνακας 10**) καταγράφονται χαρακτηριστικά κονιαμάτων δόμησης που απαντώνται σε μνημεία του ελλαδικού χώρου διαφόρων εποχών.

Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά κονιαμάτων δόμησης από μνημεία του ελλαδικού χώρου, ανά ιστορική περίοδο. (Πηγή: Pacht & Papagianni, 2014)

Ιστορική περίοδος (αιώνας)	Μνημείο/ Χρονολογία	Φωτογραφία μακροσκοπική	Σύστημα κονιών	Λόγος Κονιάς/ Αδρανών	Τύπος Αδρανών / Κοκκομετρία (mm)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Πορώδες (%)
			Π: πηλός Υ: υδράσβεστος Πζ: ποζολάνη Κ: κεραμάλευρο				
Νεολιθική	Τούμπα Θεσσαλονίκη / ~1200π.Χ.		Π	1/1	Φυσικής προέλευσης / 0-4	–	–
Ελληνιστική	Αρχαίο Θέατρο Άργος / 3 ^{ος} αι. π.Χ.		Υ-Πζ	1/2	Φυσικής προέλευσης / 0-4 έως 0-8	0,5-1,3	16-19
Ρωμαϊκή	Γαλεριανό Συγκρότημα Θεσσαλονίκη / 3 ^{ος} αι. μ.Χ.		Υ-Πζ-Κ	1/2	Φυσικής προέλευσης + Θραυστά κεραμικά / 0-8 έως 0-16	1,2-2,2	22-25
Βυζαντινή	Παλαιοχριστιανική Βασιλική Φιλίππων / 6 ^{ος} αι. μ.Χ.		Υ-Κ	1/2 έως 1/3	Φυσικής προέλευσης + Θραυστά κεραμικά / 0-6 έως 0-8	1,4-2,8	17-23
Οθωμανική	Παζάρ Χαμάμ / Θεσσαλονίκη 1500		Υ	1/2	Φυσικής προέλευσης / 0-8	0,7-2,4	19-23
Σύγχρονη 19 ^{ος} -20 ^{ός} αι.	Κολλιγόσπιτα Ζωγράφου Χαλκιδική / 1845		Π	1/1,5	Φυσικής προέλευσης / 0-8	0,6	23
	Κτήριο Διοίκησης Μύλων Αλλατίνι Θεσσαλονίκη / 1879		Υ-Πζ	1/2	Φυσικής προέλευσης / 0-8	1,2	21

2.3 Η φθορά των δομικών υλικών στα μνημεία

2.3.1 Ρύπανση και πολιτιστική κληρονομιά

Το ζήτημα της προστασίας των μνημείων δεν είναι προϊόν του σύγχρονου κόσμου. Ήδη από την αρχαιότητα διεφάνη η ανάγκη διατήρησης των καταλοίπων του παρελθόντος, όμως οι τελευταίες δεκαετίες έχουν φέρει βαθιές αλλαγές στις πολιτικές που ακολουθούνται για τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Μαλλούχου-Tufano, 2016). Οι αλλαγές αυτές δεν περιορίζονται μόνο σε ποσοτικές πρακτικές, αλλά έχουν πλέον και ποιοτικό χαρακτήρα, που υπαγορεύεται από περιβαλλοντικές έννοιες και ιδέες. Η αυξημένη ευαισθητοποίηση πάνω στην αξία της πολιτιστικής κληρονομιάς έχει βεβαίως γίνει ευπρόσδεκτη από εμπλεκόμενους φορείς και πολίτες, όμως η νέα φιλοσοφία της βιωσιμότητας έφερε συγκεκριμένες αλλαγές στη διαχείριση του πολιτιστικού κεφαλαίου και στην ένταξή του στη γενικότερη κοινωνικο-οικονομική ανάπτυξη (Brimblecombe, 2000).

Στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης της πολιτιστικής κληρονομιάς, ένα τεράστιο μέρος της οποίας λαμβάνουν μνημεία και ιστορικά κτήρια, έχει προωθηθεί διεθνώς μια ιδιαίτερη ατζέντα, με ιδέες που πηγάζουν από μια αυθεντική επιθυμία για τη διατήρησή της (Brimblecombe, 2000). Η διάσωση αυτή της υλικής πολιτιστικής κληρονομιάς από τους κινδύνους που την απειλούν είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο έργο, η πολυπλοκότητα του οποίου αντικατοπτρίζεται στο πλήθος των διαφορετικών τύπων μνημείων, τόσο από άποψη αρχιτεκτονικής δομής, ηλικίας και υλικών κατασκευής, όσο και από της ιδιαιτερότητας του εκάστοτε περιβάλλοντος στο οποίο ανήκουν. (Watt *et al.*, 2009)

Η αρτιότητα της οικοδομικής τέχνης κάθε εποχής εξασφάλισε, για τα υψηλής αξίας αρχιτεκτονήματά της, εξαιρετική αντοχή στις φυσικές δράσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα. Και ενώ η φθορά των μνημείων που, μοιραία, έρχεται φυσιολογικά και δίνει συχνά την αίσθηση μιας γαλήνιας ιστορικότητας, θεμελιώδους του τρόπου με τον οποίο εκτιμούμε τα μνημεία μας, η ανθρώπινη δραστηριότητα διατάραξε την ισορροπία τους, καθιστώντας τα ιστορικά κτήρια περισσότερο ευάλωτα στη φθορά από φυσικά αίτια και αβοήθητα, μέχρι πρότινος, έναντι των ρυπαντικών φορτίων του νεώτερου και σύγχρονου φυσικού και αστικού περιβάλλοντος (Watt *et al.*, 2009).

Ως ρυπαντικά φορτία ή ρυπαντές νοούνται ανόργανες ή μη έμβιες οργανικές ουσίες, είτε νέες, που προστέθηκαν δηλαδή στη φύση από ανθρώπινες δραστηριότητες, είτε προϋπάρχουσες, των οποίων η συγκέντρωση αυξήθηκε από τις δραστηριότητες αυτές. Μπορούμε να μιλάμε, κατά περίπτωση, για ρύπανση του εδάφους, των υδάτων (θάλασσας,

ποταμών ή λιμνών) και φυσικά του αέρα, την «ατμοσφαιρική ρύπανση», η οποία ενδιαφέρει ιδιαίτερα στο ζήτημα της φθοράς κτηρίων και μνημείων (Σκουλικίδης, 2000).

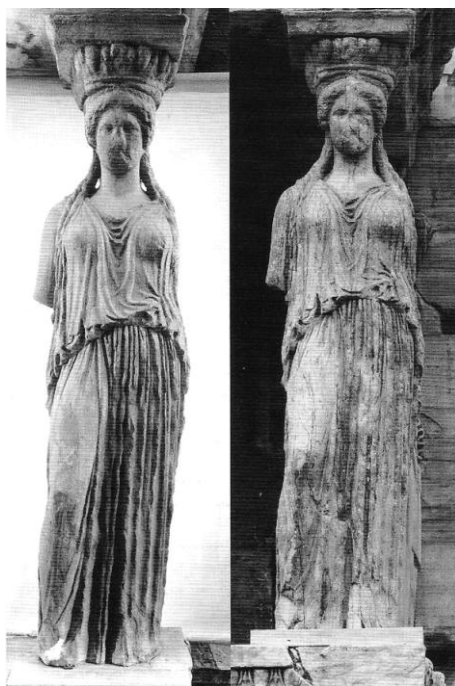
Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένας μόνο από τους παράγοντες που απειλούν την υλική πολιτιστική κληρονομιά και συχνά δεν αποτελεί καν τον πιο επιβαρυντικό (Watt *et al.*, 2009). Ιστορικά, η ρύπανση της ατμόσφαιρας ξεκίνησε ήδη με την ανακάλυψη της φωτιάς (Brimblecombe, 2011). Τα προϊόντα καύσης του ξύλου (CO₂, CO, H₂S, SO₂, NO_x, αιθάλη κλπ), για θέρμανση ή για την προετοιμασία του φαγητού, άρχισαν να διασκορπίζονται στην ατμόσφαιρα, οδηγώντας σταδιακά σε τοπική αύξηση της συγκέντρωσής τους σε αυτήν, μέχρι και τα χρόνια του Μεσαίωνα, οπότε και η καύσιμη ύλη μετατοπίστηκε από το εξαντλητικά χρησιμοποιούμενο ξύλο στον άνθρακα. Η χρήση του κάρβουνου από τις πρώτες βιοτεχνίες έφερε νέας μορφής αέριους ρυπαντές, οι οποίοι μάλιστα ήδη από τον 13^ο αιώνα, αν και δεν λογίζονταν ως διαβρωτική απειλή για τα κτήρια, κρίνονταν ενστικτωδώς επικίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία (Brimblecombe, 2000).

Με την έναρξη της εκβιομηχάνισης του κόσμου, στα τέλη του 18^{ου} αιώνα και την έντονη αστικοποίηση που τη συνόδευσε, σημειώθηκε ραγδαία αύξηση της ρύπανσης, με ιδιαίτερα μεγάλες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων και αιθάλης (Σκουλικίδης, 2000). Και ενώ η φθορά των υλικών κτηρίων και μνημείων ως αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών παραμέτρων, ήταν ήδη γνωστή από την εποχή του Ρωμαίου αρχιτέκτονα Βιτρούβιου (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010), είναι χαρακτηριστική για τη συσχέτιση φθοράς υλικών και περιβάλλοντος, η αναφορά του Brimblecombe στην προσπάθεια των αρχιτεκτόνων της εποχής του 1830, να εξασφαλίσουν εκ των προτέρων από τη φάση του σχεδιασμού, την αντοχή των κατασκευών έναντι των διαβρωτικών παραγόντων της ρυπασμένης ατμόσφαιρας (Brimblecombe *et al.*, 2010).

Ο εικοστός αιώνας, με τη μετάβαση στα υγρά καύσιμα, την έλευση του ιδιωτικού αυτοκινήτου και την ίδρυση μεγάλου αριθμού εξαιρετικά ρυπογόνων βιομηχανιών στη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, που συνέχισαν να λειτουργούν και μετά το τέλος του, άλλαξε τη χημεία της σύγχρονης αστικής ατμόσφαιρας (Brimblecombe, 2011). Τα νέα χαρακτηριστικά της σύγχρονης ρύπανσης, εκτός από την αυξημένη συγκέντρωση όλων των ειδών των ρυπαντών, ήταν μια ιδιαίτερη αύξηση των προϊόντων καύσης του θείου (SO₂, SO₃), λόγω της χρήσης καυσίμων κατώτερης ποιότητας (Σκουλικίδης, 2000), καθώς και το πρωτοεμφανιζόμενο, γύρω στο 1950, φωτοχημικό νέφος, λόγω της σημαντικής πτητικότητας των αερίων των υγρών καυσίμων σε σχέση με αυτή των στερεών. Σε μεγαλύτερη ακόμα κλίμακα μελέτης μετά το 1970, οι αέριοι ρυπαντές και η διαβρωτική τους δράση σε όλους

τους τομείς του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης και της υλικής πολιτιστικής κληρονομιάς, συνδέθηκαν με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, την όξινη βροχή και τη μεταφορά των ρυπαντών σε μεγάλες αποστάσεις (Brimblecombe, 2000; Χρέμου, 2013) .

Στην Ελλάδα, και κυρίως στην Αθήνα και σε άλλα μεγάλα αστικά κέντρα, η έντονη εκβιομηχάνιση και η επακόλουθη φθορά των δομικών υλικών των μνημείων ξεκίνησε μετά το 1950, με αιχμή στη διάβρωση το χρονικό διάστημα μεταξύ των ετών 1955-1965 (**Εικόνα 29**) (Σκουλικίδης, 2000).



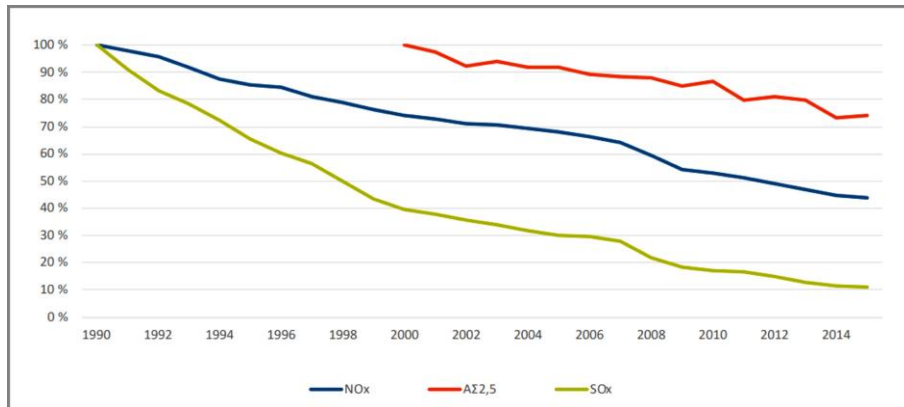
Εικόνα 29. Η ίδια Καρυάτιδα το 1955 (αριστερά) και το 1965 (δεξιά). (Πηγή: Σκουλικίδης, 2000)

Σήμερα, παρά τη μερική ανακούφιση στο πρόβλημα της ρύπανσης που έχει προσφέρει η περιορισμένη ακόμη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκά κύτταρα, γεωθερμίες, μη ορυκτά καύσιμα κ.ά.), οι συγκεντρώσεις πολλών από τους ρυπαντές, αν και μειωμένες τα τελευταία χρόνια (**Εικόνα 30**), παραμένουν ακόμη σε κρίσιμα επίπεδα (Χρέμου, 2013).

Κατά συνέπεια των παραπάνω, κύριες πηγές ρύπανσης της σύγχρονης ατμόσφαιρας αποτελούν:

- οι βιομηχανίες
- οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής
- η οικιακή θέρμανση

- τα αυτοκίνητα
- τα αεροπλάνα, και
- η μεταφερόμενη από άλλες περιοχές ρύπανση (Σκουλικίδης, 2000).



Εικόνα 30. Τάσεις εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων από το 1990 στην ΕΕ. (Πηγή: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, 2018)

Ανάμεσα στις εκατοντάδες ουσίες που έχουν αναγνωρισθεί, οι κυριότεροι ρυπαντές που καθορίζουν την αστική και βιομηχανική ατμόσφαιρα, είναι:

- οξείδια του θείου (SO_x)
- οξείδια του αζώτου (NO_x)
- το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO_2 & CO)
- το υδρόθειο (H_2S)
- το υδροχλώριο (HCl)
- το θειικό οξύ (H_2SO_4)
- το νιτρικό οξύ (HNO_3)
- το όζον (O_3)
- το χλωριούχο νάτριο ($NaCl$)
- αιωρούμενα σωματίδια (PM – Particulate Matter) (αιθάλη, ιπτάμενη τέφρα, χώμα κ.ά.)
- οι φθορο-χλωρο-βρωμο-υδρογονάνθρακες (CFCs - ChloroFluoroCarbons)
- πτητικές οργανικές ουσίες (VOCs – Volatile Organic Compounds)
- νιτρικά υπεροξυ-ακετύλια (PANs – Peroxy-Aketyl-Nitrates)
- βαρέα μέταλλα (Pb, Ni, Cd κ.ά.)

και άλλοι ρυπαντές, οι οποίοι αποκλειστικά ή σε συνέργεια, άμεσα ή έμμεσα και με τη βοήθεια της θερμοκρασιακής αναστροφής και της υπεριώδους ακτινοβολίας, συμμετέχουν

στη δημιουργία βλαβών, τόσο στην ανθρώπινη υγεία και σε έμβιους φυτικούς ή ζωικούς οργανισμούς, όσο και στο δομημένο περιβάλλον, σύγχρονο και ιστορικό (Σκουλικίδης, 2000).

Ως πρωτογενείς ρυπαντές (π.χ. SO₂, CO, NO) χαρακτηρίζονται αυτοί που εκπέμπονται απευθείας από φυσικές ή ανθρώπινες πηγές, ενώ δευτερογενείς ρυπαντές (π.χ. O₃, NO₂, PANs) είναι εκείνοι που παράγονται από χημικές αντιδράσεις αερίων φάσεων. Η συγκέντρωση των αερίων ρυπαντών στην ατμόσφαιρα εκφράζεται σε µg/m³ ή σε ppm (parts per million) και ppb (parts per billion) κατ'όγκο (δηλαδή 1 ppm αντιστοιχεί σε 1cm³ ρυπαντικής ένωσης σε 10⁶cm³ ατμοσφαιρικού αέρα) (Γεωργιάδου, 2016; Σκουλικίδης, 2000).

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ.) (World Health Organization) έχει καθορίσει οριακές τιμές συγκέντρωσης για κάθε ρυπαντή, κάτω από τις οποίες δεν αποτελεί κίνδυνο για την υγεία, καθώς και επιθυμητές (Πίνακας 11) και ανεκτές τιμές, υψηλότερες από τις οριακές, που όμως προκαλούν κάποιες βλάβες στον άνθρωπο, σε ζώα και φυτά, ενώ η διάβρωση των μνημείων (κυρίως από SO₂, PM και NO_x), πραγματοποιείται και με αρκετά μικρότερες από τις επιθυμητές, τιμές ρυπαντών (Σκουλικίδης, 2000).

Πίνακας 11. Επιθυμητές τιμές κύριων ρυπαντών, σύμφωνα με τον ΠΟΥ και τιμές που ισχύουν για την Ελλάδα. (Πηγή: Σκουλικίδης, 2000)

Ρυπαντές	Οριακές τιμές (µg/m ³)	Ελλάδα (µg/m ³)
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	Μέση ετήσια οριακή τιμή 60 3 φορές το χρόνο 200	200 24ωρη τιμή
Λιωρούμενα σωματίδια	Μέση ετήσια οριακή τιμή 40 3 φορές το χρόνο 120	200 24ωρη τιμή
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Μέση οριακή τιμή οκταώρου 10 Κατά τη διάρκεια μιας από τις ώρες αυτές 40	5 (mg/m ³) 8ωρη τιμή
Φωτοχημικά οξειδωτικά (O ₃ , PAN' s)	Μέση οριακή τιμή οκταώρου 60 Κατά τη διάρκεια μιας από τις ώρες αυτές 120	180 ωριαία τιμή
NO _x	Μέση οριακή τιμή οκταώρου 80 Κατά τη διάρκεια μιας από τις ώρες αυτές 120	200 ωριαία τιμή

Τα κτήρια διαβρώνονται μεν και στο φυσικό περιβάλλον, όμως η ρύπανση προσθέτει μια επιπλέον διάσταση στη φθορά (Brimblecombe, 2003). Επομένως, για τα προβλήματα διάβρωσης και προστασίας των μνημείων είναι ορθότερο να συμπεριλαμβάνονται στην κατηγορία των ρυπαντών, αυτά τα συστατικά της ατμόσφαιρας που προκαλούν φθορά, ανεξάρτητα από την προέλευση τους (φυσική διεργασία ή ανθρώπινη δραστηριότητα) (Θεουλάκης, 1993).

Το ζήτημα της συντήρησης των μνημείων, προκειμένου να υπάρξει μια αποδοτική προστασία και διαφύλαξή τους, προϋποθέτει την ενδελεχή μελέτη των βασικών αυτών ρυπαντικών παραμέτρων που, σε συνδυασμό με τα φυσικά κλιματολογικά φαινόμενα, δημιουργούν τους μηχανισμούς διάβρωσης των ιστορικών υλικών και επιδρούν στον βαθμό και τον ρυθμό της φθοράς τους (Camuffo, 1986; Watt *et al.*, 2009).

2.3.2 Φθορά και παράγοντες διάβρωσης των δομικών υλικών των μνημείων

Στη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχει μια συγκεχυμένη ακόμη χρήση των όρων που αφορούν στα φαινόμενα της απομείωσης των υλικών των ιστορικών κτηρίων. Έτσι χρησιμοποιούνται με σχεδόν συνώνυμο τρόπο όροι όπως φθορά (weathering, decay), διάβρωση (corrosion), βλάβη (damage), αλλοίωση (deterioration), αποδόμηση (degradation), μεταβολή (alteration) κ.ά..

Ο όρος «φθορά» περιγράφει την εν γένει απομείωση, με την πάροδο του χρόνου, των ιδιοτήτων των υλικών, την αλλοίωση των χαρακτηριστικών, της συνοχής, των διαστάσεων και την υποβάθμιση της αισθητικής τους (Γεωργιάδου, 2016; Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010), χωρίς να συμπεριλαμβάνονται στον ορισμό τα περιβαλλοντικά αίτια και οι μηχανισμοί που οδηγούν σε αυτήν.

Ο όρος «βλάβη» περιορίζεται τις περισσότερες φορές στο να περιγράψει μεταβολές γεωμετρικών μεγεθών των υλικών (π.χ. ρηγμάτωση, απόκλιση, αποκόλληση, αποφλοιώση κλπ) και απώλεια της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής, που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία και κατάρρευση, με αίτια κυρίως μηχανικά και χωρίς τη δημιουργία νέων ουσιών με διαφορετικές ιδιότητες (Crocì, 1998).

Όλα τα παραπάνω φαίνεται να συνοψίζονται στον επικρατέστερο πλέον, διεθνώς, όρο «διάβρωση». Ο γενικός ορισμός της διάβρωσης, τόσο για τα φυσικά, όσο και για τα τεχνητά ιστορικά υλικά, όπως αυτά αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα και όπως προκύπτει από τον συνδυασμό των ορισμών που δόθηκαν από φορείς και οργανισμούς που εμπλέκονται με την επιστήμη των υλικών και την πολιτιστική κληρονομιά¹, είναι ο εξής: «*Διάβρωση είναι*

¹ Φορείς που συμμετείχαν στη διατύπωση του όρου: Διεθνές Συμβούλιο για τη Διάβρωση (International Corrosion Council), Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης (European Federation of Corrosion), RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages), ICOMOS (International Council of Monuments & Sites), UNESCO, IPAC (Interactions pour le Patrimoine Architectural Communautaire), COIPM (Comité International de la Préservation des Matériaux en Milieu Marin).

κάθε αυθόρμητη, ακόμη και εκβιασμένη, χημικής, ηλεκτροχημικής, φυσικής, μηχανικής, βιολογικής φύσης διεργασία αλλοίωσης της επιφάνειας (εξωτερικής και εσωτερικής) των υλικών που οδηγεί σε απώλεια υλικού» (Σκουλικίδης, 2000).

Τα φαινόμενα της διάβρωσης των ιστορικών υλικών εκδηλώνονται στις δι- ή τρι-επιφάνειες μεταξύ περιβάλλοντος και υλικού, είτε μεταξύ περιβάλλοντος και υλικών που εφάπτονται και αποτελούν συνάρτηση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Ενδογενείς παράγοντες θεωρούνται τα χαρακτηριστικά των ίδιων των δομικών υλικών, δηλαδή:

- Το είδος του υλικού (λίθοι, ξύλο, κεραμικά, κονιάματα, μέταλλα, σύγχρονα υλικά κλπ.)
- Οι ιδιότητες του υλικού κατά περίπτωση (ορυκτολογικές, φυσικές, φυσικοχημικές, χημικές, μηχανικές)
- Η μακρο- και μικρο- δομή του υλικού (επιφανειακές ανωμαλίες, ανομοιογένεια μάζας, πορώδες κ.ά.)
- Η προέλευση και η τεχνολογία παραγωγής, διαμόρφωσης και κατασκευής του υλικού
- Το ιστορικό των υλικών (αρχικά υλικά, ανακατασκευές με νέα υλικά ή επεμβάσεις συντήρησης κ.ά.)
- Η συμβατότητα ή μη μεταξύ των δομικών υλικών (από κατασκευής ή από επεμβάσεις συντήρησης) (Γεωργιάδου, 2016).

Εξωγενείς παράγοντες θεωρούνται οι γενικότεροι περιβαλλοντικοί παράγοντες και φορτίσεις, όπως:

- Τα γενικά χαρακτηριστικά του κλίματος (θερμοκρασία, υγρασία, κατακρημνίσεις, άνεμος, ακτινοβολία)
- Η ατμόσφαιρα (αγροτική, αστική, θαλασσινή, βιομηχανική, είδος και συγκέντρωση ρυπαντών κ.ά.)
- Το μικροκλίμα (προσανατολισμός, μορφολογία επιφάνειας, ιδιαίτερη θέση υλικού στο κτίριο)
- Το νερό (βροχή, διαρροές από δίκτυα κτηρίου, ανερχόμενη υγρασία, αερολύματα, διαλύματα αλάτων)
- Βιολογικοί παράγοντες (μικροοργανισμοί, φυτά, πτηνά)
- Οι συνθήκες λειτουργίας και χρήσης (λειτουργικές συνθήκες εσωτερικού χώρου, πολεοδομικές συνθήκες, κυκλοφοριακές ρυθμίσεις)

- Οι κάθε είδους μηχανικές φορτίσεις (διόγκωση μεταλλικών συνδέσμων, θερμοκρασιακές μεταβολές, κρυστάλλωση αλάτων, παγετός, πυρκαγιές)
- Το γεωτεχνικό και γεωδυναμικό υπόβαθρο στην περιοχή της κατασκευής (κατολισθήσεις, καθιζήσεις, σεισμοί)
- Οι εναλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών (Γεωργιάδου, 2016) (Σκουλικίδης, 2000).

Καθένας από τους παραπάνω παράγοντες μπορεί να δράσει είτε μεμονωμένα (σπάνια έως ποτέ σχεδόν), είτε συνεργιστικά με άλλους, δημιουργώντας διαφορετικούς κάθε φορά μηχανισμούς, χημικής–ηλεκτροχημικής, φυσικής–μηχανικής ή βιολογικής φύσης. Ο όρος συνεργιστική επίδραση αναφέρεται στη διαβρωτική προσβολή ενός υλικού που εκτίθεται σε συνδυασμό διαβρωτικών παραγόντων, η οποία είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα της μεμονωμένης έκθεσης σε κάθε παράγοντα ξεχωριστά.

Η ανάπτυξη, η εξέλιξη και ο βαθμός κάθε μηχανισμού διάβρωσης διαφέρει σε κάθε υλικό και είναι συνάρτηση των ενδογενών παραγόντων του για υλικά του ίδιου περιβάλλοντος. Λόγω της μικρότερης επεξεργασίας των μητρικών πρώτων υλών τους, τα φυσικά δομικά υλικά των μνημείων (πετρώματα, ξύλο) διαβρώνονται βραδύτερα από τα τεχνητά υλικά (κεραμικά, κονιάματα) (Σκουλικίδης, 2000), αλλά είναι επιδεκτικότερα στη φθορά σε συνθήκες ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Venkat Rao *et al.*, 2014).

Στα πετρώματα διάβρωση προκαλούν όλοι οι μηχανισμοί (χημικοί–ηλεκτροχημικοί, φυσικομηχανικοί ή βιολογικοί), όμως διάβρωση σε εντονότερο βαθμό προκαλείται από χημικές δράσεις, οι οποίες σχετίζονται με την ανθρωπογενή ατμοσφαιρική ρύπανση. Το ξύλο φθείρεται κατά κύριο λόγο από βιολογικούς παράγοντες (μύκητες και βακτήρια) και σε μικρότερο βαθμό από χημικούς και μηχανικούς. Στα κεραμικά υλικά η διάβρωση οφείλεται κατά κανόνα σε χημικές δράσεις και σε μικρότερο βαθμό σε μηχανικές ή βιολογικές, ενώ τα κονιάματα φθείρονται κυρίως από χημικούς και βιολογικούς παράγοντες (Σκουλικίδης, 2000).

Είναι βασικό να σημειωθεί ότι, πρακτικά, δεν υπάρχει υλικό που να μην διαβρώνεται. Η διάβρωση πραγματοποιείται σε οποιοδήποτε περιβάλλον, ακόμη και χωρίς άμεση επαφή των υλικών με τα συστατικά του περιβάλλοντος, του οποίου οι παράγοντες επιδρούν ποσοτικά στα διαβρωτικά φαινόμενα, δηλαδή την ταχύτητα και το είδος των προϊόντων διάβρωσης (Σκουλικίδης, 2000).

2.3.3 Επιδράσεις των περιβαλλοντικών παραγόντων και φαινόμενα διάβρωσης

2.3.3.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας, της ακτινοβολίας και του ανέμου

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος των κατασκευών μεταβάλλεται, τόσο μεταξύ ημέρας και νύχτας, όσο και μεταξύ των εποχών, δημιουργώντας κύκλους θέρμανσης-ψύξης και, κατά συνέπεια, συστολής-διαστολής των υλικών. Τόσο οι λίθοι, όσο και τεχνητά υλικά των κατασκευών, όπως οι πλίνθοι και τα κονιάματα, λόγω της ανισοτροπίας των συστατικών τους, τα οποία εμφανίζουν διαφορές στις θερμικές ιδιότητές τους και, κατά συνέπεια, συστέλλονται και διαστέλλονται σε διαφορετικό βαθμό, οδηγούνται σε κόπωση, λόγω της ανάπτυξης ισχυρών μηχανικών τάσεων στο εσωτερικό τους (Gurta, 2013).

Σε συνδυασμό με το νερό, η θερμοκρασία έχει πρώτιστο ρόλο στους κύκλους πήξης-τήξης του νερού, που όπως προαναφέρθηκε, στερεοποιείται μέσα στους πόρους ή στις ρωγμές των υλικών, προκαλώντας, σε βάθος χρόνου, το ίδιο αποτέλεσμα, την κόπωση δηλαδή και την απομείωση των μηχανικών αντοχών των πορωδών δομικών υλικών και των συνδετικών κονιαμάτων τους. Ανάλογες επιπτώσεις έχει η θερμοκρασία και στους κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης των επιφανειών των υλικών (Gurta, 2013; Powers, 1955). Υψηλές τιμές της θερμοκρασίας επιταχύνουν τα φαινόμενα διάβρωσης στην επιφάνεια των υλικών, ενώ προάγουν και το φαινόμενο του ερπυσμού στα υλικά, μειώνοντας τον χρόνο ζωής τους (Γεωργιάδου, 2016).

Η ηλιακή ακτινοβολία, κυρίως το υπεριώδες τμήμα της, αλλά και άλλες ακτινοβολίες υψηλής ενέργειας, ενδέχεται να λειτουργούν ως παράγοντας μεταβολής της κρυσταλλικής ή μοριακής δομής των υλικών και να οδηγήσουν σε θρυμματισμό, εμφάνιση ρωγμών ή και σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους (Γεωργιάδου, 2016). Μέσω της θερμικής ενέργειας που προσφέρει στα υλικά, η μεγάλου μήκους ηλιακή ακτινοβολία ευνοεί επίσης την εξάτμιση του νερού της επιφάνειας και των πόρων των υλικών, ακόμη και σε βαθύτερα στρώματα, προκαλώντας από χρωματικές αλλαγές μέχρι και μηχανικές βλάβες (Camuffo, 1986).

Ο άνεμος είναι υπεύθυνος για αρκετές επιδράσεις σε ένα μνημείο. Μπορεί να επηρεάσει τη θερμοκρασιακή κατανομή στις εξωτερικές επιφάνειες των υλικών, την ταχύτητα και διεύθυνση των κατακρημνίσεων, καθώς και τη ροή του επιφανειακού νερού, δημιουργώντας «μονοπάτια έκπλυσης» πάνω στα διαφορετικά υλικά. Έντονα φθοροποιό για τα μνημεία δράση του ανέμου, αποτελεί η ικανότητά του να μεταφέρει αιωρούμενα σωματίδια, που ενεργούν αποξεστικά σε αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες και στη ζώνη της επαφής του κτηρίου με το έδαφος, αλλά και βιολογικά υλικά, που πολλές φορές έχουν ως

αποτέλεσμα την ανάπτυξη φυτών σε προσόψεις μνημείων, ακόμη και σε μεγάλα ύψη. Επιπροσθέτως, ένας ισχυρός άνεμος είναι δυνατόν να υποκινήσει την απόσπαση κόκκων ή τεμαχίων υλικών που έχουν ρηγματωθεί από άλλους μηχανισμούς (Camuffo, 1986; Gupta, 2013).

2.3.3.2 Η επίδραση της ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα, με τα συστατικά της, αποτελεί σημαντικό παράγοντα επίδρασης στα υλικά των κατασκευών, σύγχρονων και ιστορικών, ανεξαρτήτως της φύσης του περιβάλλοντος στο οποίο αυτές εντάσσονται (φυσικό, αστικό, βιομηχανικό) (Brimblecombe, 2003). Πολλές από τις ενώσεις που χαρακτηρίζονται ως ρυπαντές, είναι παρούσες και στον «καθαρό» αέρα, όμως η συγκέντρωσή τους αυξάνει σημαντικά εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας (αστικής, βιομηχανικής). Άλλωστε, η ρύπανση της ατμόσφαιρας, όπως προαναφέρθηκε, συνίσταται αφενός μεν στην παρουσία μη φυσιολογικών προσμείξεων, αφετέρου όμως και στην αυξημένη, μη φυσιολογική συγκέντρωση εγγενών στην ατμόσφαιρα προσμείξεων (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Σε ό,τι αφορά επομένως, τα ζητήματα διάβρωσης των υλικών των μνημείων, στην κατηγορία των ρυπαντών πρέπει να συμπεριλαμβάνονται τα συστατικά εκείνα της ατμόσφαιρας που προκαλούν φθορά, ανεξάρτητα από την προέλευση τους (φυσική διεργασία ή ανθρώπινη δραστηριότητα) (Θεουλάκης, 1993).

Από τους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν παραπάνω, οι κυριότεροι που συμμετέχουν σε μηχανισμούς διάβρωσης των υλικών των μνημείων είναι, από τους αέριους ρυπαντές, το διοξείδιο του θείου (SO_2), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) (κυρίως το μονοξείδιο NO), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), έμμεσα το όζον (O_3), το οποίο οξειδώνει τα SO_2 και NO προς SO_3 και NO_x αντίστοιχα, καθώς επίσης και οι σωματιδιακοί ρυπαντές (αιωρούμενα σωματίδια (PM) και αερολύματα) (Σκουλικίδης, 2000). Η φθορά των υλικών που οφείλεται στην ατμόσφαιρα, είναι αποτέλεσμα συνεργιστικής δράσης των παραπάνω ρυπαντών, γι' αυτό είναι πολλές φορές δύσκολο να γίνει διάκριση στις επιμέρους επιδράσεις, αφού μεσολαβούν διάφορες φυσικές και χημικές διεργασίες, που οδηγούν στην παραγωγή δευτερογενών ρυπαντών (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Η απομάκρυνση από την ατμόσφαιρα των αέριων ρυπαντών και, κατά συνέπεια η μείωση της συγκέντρωσής τους σε αυτήν, αποτελεί αυτόματη διαδικασία και διαχωρίζεται στην υγρή και ξηρή κατακάθιση ή απόθεση. Η υγρή απόθεση αφορά τη μεταφορά, στις

επιφάνειες των υλικών, των ρυπαντών (κυρίως SO₂, NO και CO₂), μέσω της διάλυσής τους στο νερό της βροχής, σε περιοχές δρόσου, σε αιωρούμενα σωματίδια που παρασύρονται από σταγονίδια της βροχής, ή μέσω των κύκλων συμπύκνωσης – εξάτμισης της υγρασίας των πόρων στην επιφάνεια των υλικών. Οι ρυπαντές, κατά την υγρή φάση, οξειδώνονται προς τα αντίστοιχα οξέα τους (H₂SO₄, HNO₃ και H₂CO₃) και σχηματίζουν τη λεγόμενη «όξινη βροχή», που αποτελεί ιδιαίτερα επιβαρυντικό διαβρωτικό παράγοντα (όξινη προσβολή) των δομικών υλικών των μνημείων, αν και δείχνει να ευνοεί την ανθρώπινη υγεία, καθώς ελαττώνει τους ρυπαντές στην αέρια φάση τους (Johnson et al., 1996; Σκουλικίδης, 2000).

Κατά την ξηρή απόθεση, οι αέριοι ρυπαντές εναποτίθενται απευθείας στην επιφάνεια των υλικών, μέσω αφενός, της μοριακής διάχυσης, της τυρβώδους ροής της ατμόσφαιρας και της βαρύτητας και αφετέρου της φυσικής ή χημικής κατακράτησής τους από τις διάφορες επιφάνειες. Η διεργασία αυτή λαμβάνει χώρα συνεχώς και δεν προϋποθέτει την παρουσία κατακρημνισμάτων (Θεουλιάκης, 1993; Όρκουλα, 2000).

- **Διοξείδιο του θείου (SO₂)**

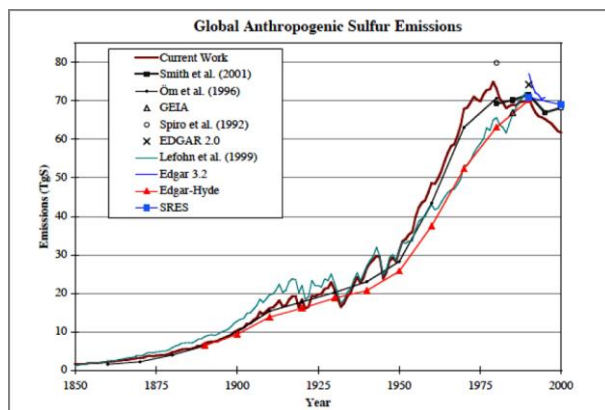
Το διοξείδιο του θείου (SO₂) είναι ένας από τους χαρακτηριστικούς ρυπαντές που εμφανίζονται τόσο σε φυσικό, όσο και σε αστικό περιβάλλον και ένας από τους σημαντικότερους σε ό,τι αφορά στην επίδραση στα υλικά των μνημείων.

Η κυριότερη φυσική πηγή SO₂ (και άλλων θειωδών ενώσεων) είναι τα ηφαιίστεια, τόσο τα ενεργά, όσο και τα σβησμένα, που συνεισφέρουν περίπου το 20% στην παγκόσμια εκπομπή του SO₂. Άλλες φυσικές πηγές παραγωγής SO₂ είναι οι πυρκαγιές και η σκόνη από απογυμνωμένο έδαφος. Παρά το αρκετά μεγάλο ποσοστό εκπομπής από φυσικές πηγές, σε αστικές περιοχές αναπτυσσόμενων και αναπτυσσόμενων χωρών, οι εκπομπές του SO₂ που προέρχονται από την καύση (S + O₂ → SO₂), κυρίως από τη βαριά βιομηχανία, στερεών ή υγρών καυσίμων με μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο, είναι πρώτιστης σημασίας και μέριμνας (Watt et al., 2009; Μουστρής, 2015).

Διαχρονικές έρευνες (**Εικόνα 31**) έχουν δείξει ότι, σε παγκόσμιο επίπεδο, οι εκπομπές του SO₂ εμφανίζουν μια αυξητική πορεία από το 1850 μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980 (ιδιαίτερως μεταξύ των ετών 1950 και 1980), με μια σταδιακή μικρή υποχώρηση κατά τις τελευταίες δεκαετίες (Smith et al., 2004).

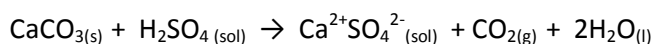
Οι συγκεντρώσεις του SO₂ στην ατμόσφαιρα εμφανίζουν επίσης εποχικό κύκλο, με εκείνες του χειμώνα να είναι σχεδόν μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες θερινές (Μουστρής, 2015), γεγονός που καθιστά τον χειμώνα πιο ευνοϊκή, για τη διάβρωση

των μνημείων, εποχή (Fassina, 1978). Η ημερήσια οριακή τιμή που έχει καθοριστεί από τον Π.Ο.Υ., είναι $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$, των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερο από τρεις (3) φορές ανά ημερολογιακό έτος (Μουστρής, 2015).



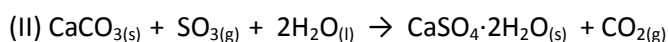
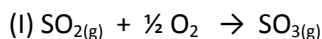
Εικόνα 31. Παγκόσμιες εκπομπές SO_x από ανθρωπογενείς πηγές. (Πηγή: Smith et al., 2004)

Το SO₂ διαλύεται στο νερό των μετεωρικών κατακρημνισμάτων ή σε αιωρούμενα σωματίδια παρουσία νερού, σχηματίζοντας θειώδες οξύ (H₂SO₃) και μετατρέπεται τελικά σε θειικό οξύ (H₂SO₄), που είναι το κύριο συστατικό της όξινης βροχής και το οποίο δρα διαλυτικά με εξαιρετική ταχύτητα σε ανθρακικά υλικά (ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, ασβεστιτικά κονιάματα κ.ά.) και μικρότερη σε πυριτικά, στα τμήματα των μνημείων που βρέχονται, σχηματίζοντας ευδιάλυτη γύψο στην επιφάνειά τους, σύμφωνα με την αντίδραση:



Ο γύψος που σχηματίζεται είναι διαλυτός στο όξινο νερό της βροχής και αποπλένεται, αποκαλύπτοντας υγιές στρώμα υλικού και, εξελίσσοντας έτσι, το φαινόμενο της διάβρωσης σε βάθος (Θεουλιάκης, 1993; Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010; Σκουλικίδης, 2000).

Στα προφυλαγμένα από τα κατακρημνίσματα τμήματα των μνημείων, κατά την ξηρή δηλαδή απόθεσή του, το SO₂ ροφάται από τα ανθρακικής σύστασης υλικά των μνημείων και οξειδώνεται στην επιφάνειά τους, προς τριοξείδιο του θείου (SO₃) (αντίδραση (I)). Παρουσία του συμπυκνωμένου νερού των πόρων των υλικών, το SO₃, σύμφωνα με την αντίδραση (II), γυψοποιείται, σχηματίζει δηλαδή στρώμα γύψου, το οποίο, καθώς δεν αποπλένεται, αυξάνει διαρκώς σε πάχος (Θεουλιάκης, 1993; Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010; Σκουλικίδης, 2000).



Σε κάποιες περιπτώσεις, λόγω μηχανικών τάσεων που αναπτύσσονται από τους κρυστάλλους του γύψου και με τη δράση και άλλων παραγόντων, κυρίως κλιματολογικών, το στρώμα του γύψου τελικά ρηγματώνεται, αποσπάται και μαζί του αποκολλάται και μέρος του υποστρώματος του υλικού (Ορκουλα, 2000).

Η ταχύτητα διάλυσης των ανθρακικών υλικών από την όξινη βροχή είναι μεγαλύτερη από αυτήν της μετατροπής τους σε γύψο, οπότε ως φαινόμενο η όξινη προσβολή είναι πολύ πιο καταστρεπτική από τη γυψοποίηση. Η σημαντική διαφορά μεταξύ όξινης προσβολής και γυψοποίησης, είναι ότι κατά την πρώτη, εξαλείφονται εντελώς αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες, ενώ στη δεύτερη διασώζονται, υπό την αίρεση δημιουργίας μικρού πάχους στρώματος γύψου (Σκουλικίδης, 2000).

- **Οξειδία του αζώτου (NO_x)**

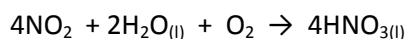
Στον ατμοσφαιρικό αέρα υπάρχει πλήθος οξειδίων του αζώτου (NO_x), όμως το κυριότερο ενδιαφέρον ως ρυπαντής, με δυσμενείς επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία και με διαβρωτικές ιδιότητες για τα υλικά, παρουσιάζει το διοξείδιο του αζώτου (NO₂). Άλλα, όπως το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), έχουν κάποιο ενδιαφέρον σαν αέρια του θερμοκηπίου (Watt et al., 2009).

Το οξείδιο που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα στη μεγαλύτερη ποσότητα, είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO), ένα αέριο άχρωμο, άοσμο και σχετικά αβλαβές αυτό καθαυτό, που όμως, με ένα μεγάλο κλάσμα του να οξειδώνεται ταχύτατα από το όζον (O₃) ($NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$), αποτελεί την άμεση πηγή του διοξειδίου του αζώτου (NO₂). Ιδιαίτερα σε περιοχές με βαριά τροχαία κυκλοφορία, όπου οι συγκεντρώσεις του NO είναι μεγάλες, η αντίδραση οξείδωσης του NO προς NO₂ δεν διαρκεί περισσότερο από ένα λεπτό της ώρας (Watt et al., 2009). Η κύρια πηγή μονοξειδίου του αζώτου (NO) είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων, και ακολουθούν όλων των τύπων οι καυστήρες (βιομηχανικοί, κεντρικής θέρμανσης, ηλεκτροπαραγωγοί κλπ.), στους οποίους καίγονται ορυκτά καύσιμα (Brimblecombe, 2000; Μουστρής, 2015).

Το διοξείδιο του αζώτου (NO₂), σε αντίθεση με το μονοξείδιο του αζώτου (NO), έχει έντονη οσμή και ένα καφεδίζον χρώμα, το οποίο μειώνει τη φωτεινότητα, απορροφώντας συγκεκριμένα μήκη κύματος του ορατού φάσματος και συμβάλλει στη δημιουργία της φωτοχημικής αιθαλομίχλης (νέφους). Η συμμετοχή των οξειδίων του αζώτου στη δημιουργία νέφους, προωθείται και από τις υψηλές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα υδρογονανθράκων, που αποτελούν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ξεχωριστή ομάδα ατμοσφαιρικών ρυπαντών

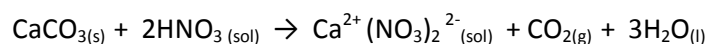
και οι οποίοι συμβάλλουν σημαντικά στον φωτολυτικό κύκλο των οξειδίων του αζώτου, λειτουργώντας καταλυτικά στην διαδικασία οξείδωσης του NO σε NO₂ (Brimblecombe, 2000).

Η απομάκρυνση του NO₂ από την ατμόσφαιρα συμβάλλει δραστικά, όπως και του SO₂, στο οξίνισμα των κατακρημνισμάτων, καθώς διαλύεται στο νερό της βροχής, σύμφωνα με την αντίδραση



αν και τα νιτρικά που υπάρχουν στο νερό της βροχής αποδίδονται περισσότερο στην αφομοίωση και ενυδάτωση σωματιδίων που περιέχουν νιτρικά και λιγότερο στην απευθείας διάλυση και οξείδωση του NO₂, αφού αυτό έχει μικρή διαλυτότητα στο νερό (Θεουλάκης, 1993).

Γενικά, όλες οι αντιδράσεις των οξειδίων του αζώτου (NO_x) έχουν τελικά ως αποτέλεσμα την παραγωγή νιτρικού οξέος (HNO₃), που προσβάλλει απευθείας τα υλικά των μνημείων, ιδιαιτέρως τα ανθρακικά, σε αντιστοιχία με το θειικό οξύ (Θεουλάκης, 1993).



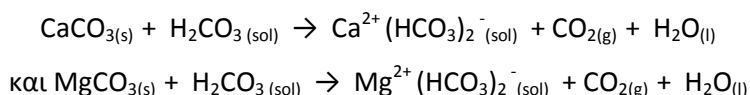
Τέλος, τα οξείδια του αζώτου συμμετέχουν στην οξείδωση του SO₂ σε H₂SO₄, με όλες τις επιπτώσεις που αναλύθηκαν παραπάνω.

- **Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)**

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι ένα από τα πρώτα αέρια που μελετήθηκαν ως συστατικό του ατμοσφαιρικού αέρα. Είναι ένα άχρωμο και, σε μικρές συγκεντρώσεις, άοσμο αέριο. Η παρουσία και οι διακυμάνσεις της συγκέντρωσής του στην ατμόσφαιρα ελέγχονται από τον βιοσφαιρικό κύκλο (κύκλος του άνθρακα) αφενός και αφετέρου από τη βιομηχανική δραστηριότητα, που αποτελεί τη σοβαρότερη πηγή CO₂ σε αστικό περιβάλλον και τις καύσεις στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων, κυρίως κατά τη λειτουργία των μηχανών εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων. Από το ανθρωπογενές CO₂ που εκπέμπεται από τα ορυκτά καύσιμα, περίπου το 50% διαλύεται στους ωκεανούς και απορροφάται από τα επίγεια οικοσυστήματα, ενώ το υπόλοιπο ~50% διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα (Μουστρής, 2015).

Οφείλεται να σημειωθεί επίσης, ότι το CO₂ αποτελεί το βασικότερο αέριο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς απορροφά μεγάλο μέρος από το υπέρυθρο τμήμα του φάσματος, ενώ επιτρέπει τη διέλευση της υπεριώδους ακτινοβολίας, με τα γνωστά αποτελέσματα της υπερθέρμανσης, που επιδρούν εκτός των άλλων και στους φθοροποιούς μηχανισμούς των υλικών των κατασκευών, ιστορικών και σύγχρονων, επιταχύνοντας τις χημικές αντιδράσεις (Θεουλάκης, 1993; Σκουλικίδης, 2000).

Το CO₂ είναι από τους ρυπαντές που συμμετέχουν (μαζί με τα SO_x και NO_x) στον σχηματισμό της όξινης βροχής, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν ήδη περιγραφεί ως προς την όξινη προσβολή των υλικών των μνημείων. Καθώς διαλύεται δηλαδή, στο βρόχινο νερό, το CO₂ δίνει το αντίστοιχο οξύ (H₂CO₃), το οποίο διαλύει το ανθρακικό ασβέστιο και ανθρακικό μαγνήσιο που υπάρχουν σε ασβεστόλιθους, δολομιτικά μάρμαρα, ασβεστοκονιάματα και επιχρίσματα με ασβέστη.

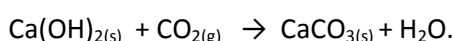


Κατά τη διάλυση των ανθρακικών υλικών, ανάλογα με την ταχύτητα διάλυσης, η οποία εξαρτάται από παράγοντες όπως η οξύτητα (pH) και η θερμοκρασία του νερού, η εγγύτητα σε θάλασσα κ.ά., συχνά παρατηρείται η αντίστροφη δράση, ανακρυστάλλωση δηλαδή του όξινου ανθρακικού ασβεστίου.



Ο ασβεστίτης που παράγεται χαρακτηρίζεται από μεγάλους κρυστάλλους σε σχέση με τον αρχικό του υλικό, που είναι μικροκρυσταλλικός και μη πορώδης. Η αύξηση του πορώδους που συμβαίνει με την ανακρυστάλλωση, επιτρέπει σε όξινα διαλύματα με θειικά και χλωρίδια να εισέλθουν βαθύτερα στο υλικό, σχηματίζοντας έτσι μια λευκή, σκληρή όξινη ανθρακική κρούστα. Το στρώμα αυτό πολλές φορές δεν έχει καλή συνοχή με το υποκείμενο ανθρακικό ασβέστιο της κύριας μάζας του υλικού, οπότε οδηγείται σε χαλάρωση, αποκόλληση και τοπικές καταρρεύσεις, προάγοντας την εξέλιξη του φαινομένου σε βάθος, προκαλώντας έτσι περαιτέρω, σπηλαιώδους είδους διάβρωση (Fassina, 1978). Ιδιαίτερα στα μάρμαρα, το φαινόμενο της ανακρυστάλλωσης οδηγεί σε εκλεκτική αποκόλληση κόκκων, μεταβάλλοντας την υφή της επιφάνειάς τους, με αποτέλεσμα να προσομοιάζει με μορφή ζάχαρης, γι'αυτό και έχει ονομαστεί «ζαχαροποίηση» ή «ζαχαροειδής» φθορά (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Επίσης, είναι απαραίτητο να σημειωθεί, αναφορικά με τα νεώτερα μνημεία, αλλά και τις σύγχρονες κατασκευές από σκυρόδεμα με μεταλλικούς οπλισμούς, ότι το CO₂ της ατμόσφαιρας είναι υπεύθυνο για την επιλεγόμενη ενανθράκωση του σκυροδέματος, δηλαδή την αντίδραση του CO₂ με την υδράσβεστο Ca(OH)₂ του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, παρουσία του νερού των πόρων, σύμφωνα με την εξίσωση:



Η ενανθράκωση του τσιμέντου, παρόλο που μειώνει το πορώδες του, προσφέροντάς του, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αύξηση των μηχανικών αντοχών του, μειώνει το pH του,

περιβάλλοντος τον οπλισμό, σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9 (εννέα), προκαλώντας την αποπαθητικοποίηση των στοιχείων του οπλισμού και την έναρξη της διάβρωσης, με αποτέλεσμα τη διόγκωσή τους και τελικά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος (Παπαδάκης, 1990).

- **Όζον (O₃)**

Το όζον (O₃) είναι ένα αέριο σχετικά ασταθές, άχρωμο, ισχυρά οξειδωτικό και τοξικό, με χαρακτηριστική οσμή και κυανό χρώμα και αποτελεί το χαρακτηριστικότερο συστατικό του σύγχρονου αστικού φωτοχημικού νέφους. Στην ανώτερη ατμόσφαιρα (στρατόσφαιρα) το όζον είναι ευεργετικό για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, καθώς λειτουργεί απορροφητικά για το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας. Στην κατώτερη ατμόσφαιρα (τροπόσφαιρα) και κυρίως στο ύψος όπου ζει και κινείται ο άνθρωπος, το όζον προέρχεται από αντιδράσεις μεταξύ πρωτογενών ρυπαντών, κυρίως από τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και του οξυγόνου της ατμόσφαιρας, με τη συμβολή της ηλιακής ακτινοβολίας και ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου συνυπάρχουν άκαυστοι υδρογονάνθρακες (RCH₃) και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) (Μουστρής, 2015).

Αν και δεν ενέχεται άμεσα στα φαινόμενα διάβρωσης, σε μεγάλες συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα αποτελεί ταχύτατο οξειδωτικό μέσο για το SO₂, προσβάλλοντας κυρίως τους ασβεστολιθικούς λίθους των μνημείων, τόσο κατά την ξηρή, όσο και κατά την υγρή φάση (Massey, 1999). Επίσης, μπορεί να προκαλέσει φθορά –αποχρωματισμούς, ρηγματώσεις (ozone crackings)– σε νεώτερα κατασκευαστικά υλικά, κυρίως πολυμερή και ελαστομερή, που ενδεχομένως χρησιμοποιούνται σε επεμβάσεις συντήρησης (Μουστρής, 2015).

- **Αιωρούμενα σωματίδια (PM – Particulate Matter)**

Ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια (Suspended Particulate Matter – SPM) αποκαλούνται τα μικρά τεμάχια της ύλης (σε στερεή ή υγρή κατάσταση), που βρίσκονται σε διασπορά στην ατμόσφαιρα με τη μορφή σκόνης ή σταγονιδίων. Το μέγεθός τους ποικίλει και κυμαίνεται από 0,2 nm έως 500 μm. Η μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος, αλλά και στη χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων οφείλεται στο πλήθος των πηγών από τις οποίες προέρχονται, που είναι είτε φυσικές, είτε ανθρωπογενείς (Μουστρής, 2015).

Στις φυσικές πηγές περιλαμβάνεται κυρίως το έδαφος, από το οποίο, με την επίδραση του ανέμου, δημιουργούνται σημαντικές ποσότητες γαιωδών αιωρημάτων. Άλλες φυσικές πηγές είναι η εξάτμιση στην επιφάνεια ωκεανών και θαλασσών (θαλάσσια αερολύματα), οι

ηφαιστειακές εκρήξεις και οι πυρκαγιές, οι ακτές με άμμο, βιολογικοί μολυντές κ.ά. (Γεωργιάδου, 2016; Θεουλάκης, 1993; Μπισμπίκου, 1997).

Στις ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνονται οι εκπομπές πρωτογενούς σωματιδιακής ύλης από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως τσιμεντοβιομηχανίες, λατομεία, οικοδομικές εργασίες, οι διάφορες εστίες καύσεις αέριων ή στερεών καυσίμων (ιπτάμενη τέφρα και σωματίδια άνθρακα) η μεταλλουργία (οξειδία και άλατα μετάλλων), τα διυλιστήρια, η αστική κυκλοφορία, οι κεντρικές θερμάνσεις κ.ά. (Γεωργιάδου, 2016; Θεουλάκης, 1993; Μπισμπίκου, 1997).

Γενικά, οι διεργασίες που προκαλούν την πρωτογενή εκπομπή σωματιδίων είναι η καύση, η τριβή, η διάβρωση και ο κατακερματισμός. Εκτός όμως από τον πρωτογενή σχηματισμό, ιδιαίτερη σημασία έχει ο δευτερογενής σχηματισμός των σωματιδίων, που γίνεται μέσω χημικών αντιδράσεων με μόρια της αέριας φάσης (ελεύθερα, προσροφημένα ή διαλυμένα αέρια), καταλήγοντας έτσι, είτε σε νέα σωματίδια, είτε στην προσθήκη σωματιδιακής ύλης στα ήδη υπάρχοντα. Οι μηχανισμοί που οδηγούν στον σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων είναι η πυρήνωση (nucleation) και η συμπύκνωση (condensation) από αέρια χαμηλής τάσης ατμών, καθώς και η συσσωμάτωση (coagulation) μικρότερων σωματιδίων σε μεγαλύτερα, με τελικό αποτέλεσμα όλων την κατακρήμιση των προϊόντων σωματιδίων λόγω βαρύτητας, ή την ενσωμάτωσή τους σε ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (Παπαζάχου, 2012).

Ανάλογα με το μέγεθός τους, τα αιωρούμενα σωματίδια, διακρίνονται σε:

- νανοσωματίδια, μικρότερα από 50 nm
- εξαιρετικά λεπτά (ultrafine particles) ή σωματίδια Aitken, μικρότερα από 100 nm,
- λεπτά σωματίδια (fine particles), μεγέθους μεταξύ 100-2500 nm και
- χονδροειδή σωματίδια (coarse particles), μεγαλύτερα από 2500 nm (Μπισμπίκου, 1997).

Ανάλογα με τον χρόνο αιώρησης στον ατμοσφαιρικό αέρα, που εξαρτάται και από το μέγεθός τους, διακρίνονται σε:

- ανάπιπτα ή σκόνη (dust fall), στερεά σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 10 μm, με μικρό χρόνο αιώρησης και μεγάλη ταχύτητα καθίζησης,
- αιωρούμενα σωματίδια (suspended particles), στερεά ή υγρά ή μίγμα στερεών και υγρών σωματιδίων με μεγάλο χρόνο αιώρησης και μέγεθος μεταξύ 1-10 μm και
- καπνό (smoke), σωματίδια σε κολλοειδή διασπορά, μεγέθους 5-50 nm, με κύρια συστατικά τον άνθρακα και άλλα υπολείμματα καυσίμων υλών, μαύρου χρώματος, που προέρχονται από ατελείς καύσεις οργανικών ενώσεων (Μπισμπίκου, 1997).

Τα αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 μm σχηματίζουν τα λεγόμενα αερολύματα (aerosols), συστήματα δηλαδή διασποράς στερεού σε αέριο ή υγρού σε αέριο. Τα αερολύματα που προκαλούν φθορά στις κατασκευές και, κατ' επέκταση, στα μνημεία, είναι, είτε φυσικής προέλευσης από θαλάσσιες και ηπειρωτικές πηγές (π.χ. το θαλάσσιο αερόλυμα που περιέχει σταγονίδια NaCl), είτε ανθρωπογενούς προέλευσης από αερολύματα που δημιουργούνται ως απόβλητα βιομηχανικής δράσης (Γεωργιάδου, 2016).

Η συμπεριφορά των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται τόσο από τη χημική τους σύνθεση, όσο και από το μέγεθός τους, ενώ η παρουσία τους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό των νεφών και των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, στη ρύθμιση του ισοζυγίου ακτινοβολίας, μέσω αντανάκλασης, διάχυσης και απορρόφησης μέρους του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, καθώς και στην έναρξη και εξέλιξη ορισμένων χημικών δράσεων (όπως π.χ. η οξείδωση του SO₂) (Θεουλιάκης, 1993).

Η χημική σύσταση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (**Πίνακας 12**) αποτελείται από δύο φάσεις, μία ανόργανη (στερεό ανόργανο υλικό, υδατοδιαλυτά ανόργανα άλατα κ.ά.) και μία οργανική (οργανικός άνθρακας). Η αναλογία οργανικού και ανόργανου υλικού στη συνολική μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως την προέλευσή τους, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και το μέγεθός τους (Chrysikou *et al.*, 2008).

Έτσι, σε ρυπασμένες αστικές περιοχές, τα μικρά σωματίδια (<2,5 μm) μπορεί να περιέχουν μέχρι και 40 % άνθρακα (C), θειικά (SO₄²⁻) και νιτρικά άλατα (NO₃⁻), αμμώνιο (NH₄⁺), μόλυβδο (Pb), βρώμιο (Br), και μεγαλομοριακές οργανικές ενώσεις. Τα μεγάλα σωματίδια (>2,5 μm) είναι κυρίως ανόργανα, εδαφικής προέλευσης (από αποσάθρωση πετρωμάτων) και αποτελούνται από οξείδια αργιλίου (Al), πυριτίου (Si), ασβεστίου (Ca), σιδήρου (Fe) και άλλων μετάλλων. Επίσης, τα θαλάσσια αεροζόλ περιέχουν άλατα χλωριούχου νατρίου (NaCl) και θειικού αμμωνίου ((NH₄)₂SO₄) (Chrysikou *et al.*, 2008; Θεουλιάκης, 1993).

Τα αιωρούμενα σωματίδια, ιδιαιτέρως τα μικρά, έχουν μεγάλη ενεργό επιφάνεια, που ευνοεί την προσρόφηση ρυπαντών της αέριας φάσης, λειτουργώντας έτσι ως πυρήνες συμπύκνωσης, τόσο για τα αέρια αυτά, όσο και για την ατμοσφαιρική υγρασία (Nava *et al.*, 2010), αυξάνοντας παράλληλα την επικινδυνότητά τους και καθιστώντας τα έναν από τους πιο διαβρωτικούς παράγοντες για τα υλικά των μνημείων (Chrysikou *et al.*, 2008), χωρίς συνήθως άμεση επίδραση στην υλική φθορά με την έννοια της απώλειας του υλικού. Η δράση τους, όμως, είναι σημαντικά καταλυτική και δρουν ως ενδιάμεσο στρώμα απόθεσης των ατμοσφαιρικών ρύπων, που λειτουργεί ως υπόβαθρο χημικών μετατροπών (McAlister *et al.*, 2006).

Στα προστατευμένα ή ημι-προστατευμένα τμήματα ενός μνημείου, που δεν αποπλένονται από τη βροχή, τα αποτιθέμενα σωματίδια δημιουργούν μαύρες αποθέσεις (κρούστες), με κύριο συστατικό τον στοιχειακό άνθρακα, επάνω σε γυψοποιημένες επιφάνειες, όμως εξυπηρετούν και ως καταλύτες στην ίδια τη διαδικασία μετατροπής των ασβεστιτικών στοιχείων των υλικών σε γύψο (Kucera & Fitz, 1995) (Rodriguez-Navarro & Sebastian, 1996).

Σωματίδια με μεταλλικά στοιχεία, όπως Fe, Al, Cu, Ti, Mn κ.ά. χρωματίζουν τις επιφάνειες κυρίως των μαρμάρων, δημιουργώντας καστανέρυθρες πάτινες, λόγω της οξείδωσης των συστατικών τους (Μοροπούλου *et al.*, 2014), ενώ τα σωματίδια σκόνης, πολλές φορές περιέχουν και οργανική ύλη, η οποία δυνητικά αποτελεί ξεχωριστό παράγοντα διάβρωσης, βιογενούς προέλευσης.

Τέλος, μια ακόμη δράση φθοράς των υλικών των μνημείων, που οφείλεται σε αιωρούμενα σωματίδια, μηχανικής φύσης, είναι η ψηγματοβολή, η βολή δηλαδή, από τους ανέμους, των σωματιδίων διαμέτρου πάνω από 500 nm, επάνω σε αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες των επιφανειών, των οποίων προκαλούν αποξέσεις, ομαλοποιήσεις έως και εξάλειψη (Σκουλικίδης, 2000).

Πίνακας 12. Ιδιότητες και σύσταση ατμοσφαιρικών σωματιδίων. (Πηγή: Γρηγοράτος, 2012)

	Μικρά σωματίδια		Μεγάλα σωματίδια
	Υπέρμικρα σωματίδια	Περιοχή συσσώρευσης	
Διεργασίες παραγωγής	Καύσεις		Διασπάσεις μεγάλων σωματιδίων
	Διεργασίες σε υψηλές θερμοκρασίες		
	Χημικές αντιδράσεις		
Σχηματισμός	Πυρήνωση	Συμπύκνωση	Μηχανικές διασπάσεις
	Συμπύκνωση	Συσσωμάτωση	Εξάτμιση σπρέι
	Συσσωμάτωση	Χημικές αντιδράσεις αερίων μέσα και πάνω στα σωματίδια	Αιώρηση σκόνης
			Αντιδράσεις αερίων μέσα και πάνω στα σωματίδια
Χημική σύσταση	Θείο	S, N ₂ , NH ₄ ⁺ , H ⁺	Επαναιωρούμενη σκόνη δρόμου
	Στοιχειακός άνθρακας	Στοιχειακός άνθρακας	Ιπτάμενη τέφρα από ατελείς καύσεις
	Μέταλλα	Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe	Νιτρικά και χλωριούχα
	VOCs	Νερό	Οξείδια μετάλλων (Si, Al, Ti, Fe) CaCO ₃ , NaCl, σταγόνες, υπολείμματα ελαστικών
Διαλυτότητα	Ισχυρώς διαλυτά	Λιγότερο διαλυτά και υγροσκοπικά	Μη υγροσκοπικά και αδιάλυτα
Χρόνος παραμονής	Λίγα λεπτά έως ώρες	Μέρες έως εβδομάδες	Λίγα λεπτά έως μερικές ώρες
Διεργασίες απομάκρυνσης	Ανάπτυξη, διάχυση σε σταγόνες βροχής	Δημιουργία σύννεφου, υγρή και ξηρή απόθεση	Ξηρή και υγρή απόθεση
Απόσταση μεταφοράς	<1km έως μερικά km	100km έως και 1000km	<1km έως μερικές δεκάδες km

2.3.3.3 Η επίδραση ζώντων οργανισμών

Η συμβολή του βιολογικού παράγοντα στη φθορά των μνημείων είναι σημαντική. Μικροοργανισμοί, φυτά και ζώα μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες φθορές χημικής και μηχανικής φύσης στα υλικά των ιστορικών κτηρίων.

Η επίδραση των διαφόρων οργανισμών στις επιφάνειες των κατασκευών είναι παρόμοια με τις φυσικές και χημικές δράσεις που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση. Γι'αυτό, όπως τονίζει ο Krumbeln (2002), για πολλά χρόνια επικρατούσε η θεώρηση ότι οι χρωματικές αλλοιώσεις στις επιφάνειες των υλικών των μνημείων, ιδιαίτερα των λίθων (κυρίως μαρμάρων και ασβεστόλιθων), ήταν είτε το αποτέλεσμα φυσικοχημικών διεργασιών από κλιματικούς παράγοντες και ανόργανους ρυπαντές, είτε υπολείμματα χρωμάτων και άλλων υλικών από εργασίες παλαιότερων επεμβάσεων (Krumbeln, 2002). Τα τελευταία χρόνια όμως, έχει γίνει ευρέως αποδεκτό ότι οι λίθινες και άλλες ανόργανης φύσης επιφάνειες των μνημείων αποτελούν κοινά ενδιαίτηματα για ένα μεγάλο εύρος από οικογένειες μικροοργανισμών, όπως χημειοοργανότροφα, χημειολιθότροφα και φωτοτροφικά βακτήρια, ακτινομύκητες, κυανοβακτήρια, φύκη, βρυόφυτα και λειχήνες (Gorbushina, 2007; Krumbeln, 2002).

Η δράση των μικροοργανισμών αυτών ευνοεί τη διάβρωση υλικών των μνημείων, μέσω της ανάλωσης χημικών συστατικών τους, απαραίτητων για τις οργανικές διεργασίες τους ή μέσω προϊόντων του μεταβολισμού τους, που δρουν ως καταλύτες στην εξέλιξη της φθοράς (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Τα πρώτα δείγματα βιολογικής δραστηριότητας στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό των υλικών των μνημείων, κυρίως των λίθων, είναι η χρωματική αλλοίωση της επιφάνειάς τους, με παράλληλη δημιουργία έγχρωμης πάτινας. Οι πλέον συναντώμενες είναι οι μαύρες, οι καστανέρυθρες και οι πράσινες πάτινες. Οι μαύρες πάτινες οφείλουν τον χρωματισμό τους στην έκκριση μελανίνης κυρίως από ακτινομύκητες, ενώ οι καστανέρυθρες αποχρώσεις προέρχονται συνήθως από την οξείδωση του σιδήρου και του μαγγανίου των υλικών από μύκητες. Οι πράσινες πάτινες προκύπτουν από διάφορες φωτοσυνθετικές χρωστικές από φύκη, κυανοβακτήρια και βρυόφυτα (Krumbeln, 2002). Επίσης έχουν μελετηθεί και οι, αναφερόμενες στη βιβλιογραφία με τον όρο *scialbatura*, πάτινες, με υπόλευκη έως ροδόχρωμη εμφάνιση και παράλληλη παρουσία βελονοειδούς διάβρωσης, που αποδίδονται κυρίως στη διαδοχική βιοχημική δράση λειχηνών και μυκηλίων (Del Monte & Sabbioni, 1987).

Αποτέλεσμα της δράσης των μικροοργανισμών, εκτός από τη χημική διάλυση, είναι και η ανάπτυξη μηχανικών τάσεων στο εσωτερικό των υλικών, λόγω της διαρκούς εξάπλωσης

της αποικίας της βιομάζας, καθώς και η εμφάνιση δευτερογενούς αυξανόμενου πορώδους, που συμβάλλει σε μηχανισμούς και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων (βροχή, κρυστάλλωση αλάτων κλπ.) (Όρκουλα, 2000).

Η παρουσία μικροοργανισμών αποτελεί βιοδείκτη για τις μεταβολές της ατμόσφαιρας και των κλιματικών συνθηκών του περιβάλλοντος των μνημείων και επηρεάζουν την ατμοσφαιρική σύσταση μέσω των μεταβολικών διεργασιών, πολλές φορές ακόμη και μέσω της ίδιας της βιογενούς διάβρωσης στα υλικά των μνημείων (Gorbushina, 2007).

Επιπλέον των μικροοργανισμών, φυτά και ζώα συμμετέχουν στη φθορά των υλικών των μνημείων. Όπως σημειώθηκε παραπάνω, κυρίως με τη δράση του ανέμου, μεταφέρονται βιολογικά υλικά σε ρωγμές, αρμούς και αρχιτεκτονικές εσοχές των μνημείων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη φυτών στις προσόψεις τους, ακόμη και σε μεγάλα ύψη. Οι ρίζες των φυτών προκαλούν βλάβες με τις μηχανικές τάσεις που ασκούν, ενώ η κατακράτηση υγρασίας και η έκκριση οξέων επιταχύνουν τη χημική διάβρωση και την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Στέγη σε αρχιτεκτονικές εσοχές των μνημείων, βρίσκουν και ζώα, σε αστικό περιβάλλον περισσότερο πτηνά, των οποίων τα περιττώματα, εκτός από αισθητική υποβάθμιση, προκαλούν και χημικού τύπου διάβρωση, καθώς αποτελούν σημαντικές πηγές φωσφορικού (H_3PO_4) και νιτρικού οξέος (HNO_3), που αντιδρούν με τα ανθρακικά στοιχεία των υλικών, κυρίως των λίθων και δίνουν τα αντίστοιχα άλατα του ασβεστίου (Θεουλιάκης, 1993; Χοϊδής, 2019).

Είναι αξιοσημείωτο ότι κάποιες από τις βιολογικές μεταβολές που συμβαίνουν στις επιφάνειες των μνημείων, ενδεχομένως και υπό κατάλληλες συνθήκες, να έχουν προστατευτικό χαρακτήρα για τα υλικά. Έτσι, στο πλαίσιο των επεμβάσεων συντήρησης, πρέπει να λαμβάνεται υπ'όψιν και η παράμετρος αυτή, καθώς και η ιστορικότητα που προσδίδουν οι πάτινες, μαρτυρώντας το πέρασμα του χρόνου επάνω στα μνημεία (Krumbein, 2002).

2.3.3.4 Η επίδραση του νερού

Το νερό, σε όλες του τις φυσικές καταστάσεις, αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα φθοράς των δομικών υλικών και συμμετέχει άμεσα ή έμμεσα σε διεργασίες μηχανικής, χημικής και βιολογικής διάβρωσης. Ενεργώντας παράλληλα με τη θερμοκρασία, τους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές και άλλους εξωγενείς και ενδογενείς παράγοντες, μπορεί να προκαλέσει μέχρι και την κατάρρευση ενός μνημείου (Watt *et al.*, 2009).

Σε στερεά κατάσταση το νερό επιδρά ως πάγος, ενώ ως υγρό, είτε με τη μορφή κατακρημνίσματος (κυρίως βροχή, χαλάζι), είτε μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης από εδαφικά και υπόγεια νερά, επιδρά μεταφέροντας αέριους ρύπους, άλατα και άλλα διαβρωτικά στοιχεία. Στην αέρια μορφή του, το νερό αυξάνει τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, συμπυκνώνεται στην επιφάνεια και το εσωτερικό των υλικών, δημιουργώντας έτσι συνθήκες για αλληπάλληλες κυκλικές μεταβολές στην περιεχόμενη στη μάζα των υλικών υγρασία, που αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους για τα μνημεία, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για υλικά με υψηλή περιεκτικότητα αλάτων, που εύκολα υδατοδιαλυτά, ή αργιλοπυριτικά στοιχεία που διογκώνονται με την παρουσία νερού. Επιπροσθέτως, το σύνολο σχεδόν των βιολογικών δράσεων στις επιφάνειες και το εσωτερικό των υλικών των ιστορικών κατασκευών, όπως αυτές περιγράφηκαν προηγουμένως, πραγματοποιείται παρουσία υγρασίας (Watt *et al.*, 2009).

Πηγές υγρασίας στα δομικά υλικά των κατασκευών, εκτός των κατακρημνισμάτων, της τριχοειδούς αναρρίχησης και της συμπύκνωσης, αποτελούν επίσης, η απευθείας μεταφορά σταγονιδίων από τη θάλασσα (αλατονέφωση), που είναι αρκετά σημαντική στον ελλαδικό χώρο, τυχόν διαρροές από δίκτυα παροχέτευσης και αποχέτευσης νερού, καθώς και οι διάφορες επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης (χρήση μεγάλης ποσότητας νερού καθαρισμού, αποβολή νερού κατά την πήξη κονιαμάτων αποκατάστασης κ.ά.) (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Παρακάτω περιγράφονται οι κυριότεροι μηχανισμοί φθοράς των υλικών μιας τοιχοποιίας λόγω της επίδρασης του νερού.

- **Κύκλοι πήξης-τήξης νερού (παγοπληξία)**

Η πήξη του νερού αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μηχανικές δράσεις διάβρωσης των υλικών, σε περιοχές με ψυχρό κλίμα και ιδιαίτερα σε τμήματα των μνημείων που δέχονται σημαντικές ποσότητες κατακρημνισμάτων και λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία. Το νερό που απορροφάται από τα υλικά, ανεξάρτητα της προέλευσής του (υδάτινα μετέωρα, τριχοειδής αναρρίχηση κλπ), φτάνοντας σε θερμοκρασία πήξης, ανάλογα και με τα περιεχόμενα σε αυτό άλατα (ακόμη και για το καθαρό νερό αυτή είναι κάτω από 0°C), παγοποιείται. Η στερεοποίηση αυτή του νερού μέσα στους πόρους των υλικών, προκαλεί τη διόγκωσή του μέχρι και 9-10% σε σχέση με τον αρχικό όγκο του, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρών μηχανικών τάσεων στα τοιχώματα των πόρων, αλλά και σε ήδη υπάρχουσες ρωγμές, της οποίας η μέγιστη τιμή παρατηρείται γύρω στους -22°C και φτάνει μέχρι τα 212MPa, τιμή

πολύ μεγαλύτερη από τις μηχανικές αντοχές πολλών δομικών υλικών, φυσικών και τεχνητών (Σκουλικίδης, 2000).

Η επίδραση του φαινομένου εντείνεται όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα που νερού που έχει μεταφερθεί στους πόρους των υλικών και εξαρτάται τόσο από το ολικό πορώδες, όσο και από τη μικροδομή των πόρων (σχήμα, μέγεθος και κατανομή) (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010). Κρίσιμη θεωρείται η κατάσταση κατά την οποία έχει πληρωθεί με νερό πάνω από το 60% των πόρων, καθώς, λόγω της πήξης του νερού, σφραγίζονται τα στόμια των πόρων προς την ατμόσφαιρα και ξεκινούν να ασκούνται μεγαλύτερες τάσεις (Σκουλικίδης, 2000).

Συνέπεια των τάσεων αυτών είναι οι ρηγματώσεις των πορωδών υλικών και των συνδετικών κονιαμάτων τους, ανάλογα και με τη σύνθεση και το πορώδες τους, ενώ η τήξη του νερού που ακολουθεί με την άνοδο της θερμοκρασίας, επανακινεί τη ροή του νερού μέσα στους πόρους, διευρύνοντάς τους μέσω όξινης διάλυσης και δημιουργώντας καρστικά φαινόμενα στο εσωτερικό των υλικών. Σε βάθος χρόνου, οι διαδοχικοί αυτοί κύκλοι πήξης-τήξης του νερού οδηγούν τα υλικά σε απομείωση των αντοχών τους, κόπωση και ακολουθία εμφανών ρηγματώσεων, συνοδευόμενων από απολεπίσεις της επιφάνειας των υλικών και αποκόλληση τεμαχίων (Ghobadi & Torabi-Kaveh, 2014).

- **Μεταφορά & κρυστάλλωση αλάτων**

Η διάβρωση των υλικών από άλατα αφορά όλα τα πορώδη υλικά των κατασκευών και μάλιστα αναγνωρίζεται ως το πιο συχνά συναντώμενο και επιδραστικό φαινόμενο φθοράς των μνημείων, άμεσα συνυφασμένο με την επίδραση του νερού (Arnold & Zehnder, 1989).

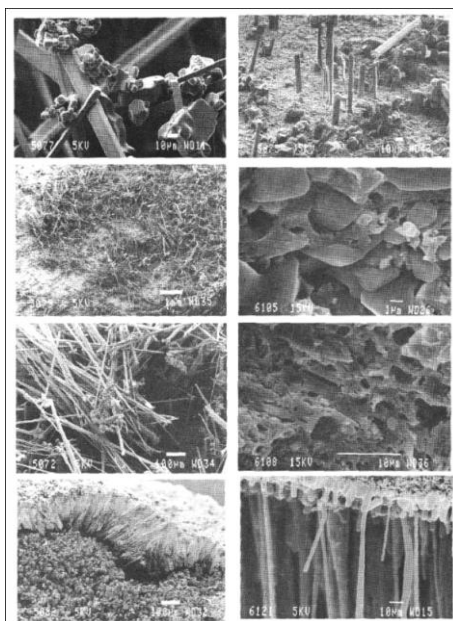
Τα άλατα είναι διαλυτά στο νερό και καθώς αυτό μεταφέρεται στο εσωτερικό των πορωδών υλικών με μηχανισμούς μεταφοράς και διάχυσης της υγρασίας, τα άλατα φτάνουν συχνά σε αρκετό βάθος. Αυτά που συχνότερα ανιχνεύονται σε τοιχοποιίες μνημείων είναι χλωριδία (Cl^-), θειικά (SO_4^{2-}) και νιτρικά (NO_3^-) άλατα νατρίου (Na^+), μαγνησίου (Mg^{2+}), ασβεστίου (Ca^{2+}) και καλίου (K^+) (Πίνακας 13), κύριες πηγές των οποίων αποτελούν τα υπόγεια νερά και το έδαφος μέσω της τριχοειδούς αναρρίχησης των διαλυμάτων τους, η μεταφορά σταγονιδίων από τη θάλασσα, που φτάνει μέχρι και τα 500 km στο ηπειρωτικό εσωτερικό, καθώς και η διάλυση ασβεστιτικών κονιαμάτων, τσιμέντου, σκυροδέματος και επιχρισμάτων από ατμοσφαιρικούς ρυπαντές (SO_x , NO_x , CO_2), που σχηματίζουν όξινα κατακρημνίσματα (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Πίνακας 13. Κυριότερα άλατα που κρυσταλλώνονται σε πορώδη υλικά, μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης. (Πηγή: Σκουλικίδης, 2000)

Χημικός Τύπος	Όνομασία
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	Βασσανίτης
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Γύψος
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Νιτράσβεστος
$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Συγγενίτης
$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Πολυαλίτης
K_2SO_4	Αρκανίτης
KNO_3	Νίτρο
KCl	Συλβίνης
$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Κιζερίτης
MgCO_3	Μαγνησίτης
$\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Νεσκεονίτης
NaCl	Αλίτης
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Θερμονατρίτης
Na_2SO_4	Τεναρδίτης
NaNO_3	Νίτρο της Χιλής

Δευτερεύουσες πηγές αλάτων αποτελούν, η χρήση στερεωτικών υλικών, των οποίων συστατικά, κατά τη διαδικασία σκλήρυνσής τους, μετατρέπονται σε θειικά ή ανθρακικά άλατα, η χρήση αλάτων αποπαγοποίησης σε πεζοδρόμια και δρόμους, που πλήττει τα χαμηλά κυρίως επίπεδα των κατασκευών, καθώς και οι μεταβολικές διεργασίες αποικιών μικροοργανισμών στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες (Arnold & Zehnder, 1989).

Η διαδικασία κρυστάλλωσης των αλάτων ξεκινά με την εξάτμιση του νερού των πόρων, αλλά παρατηρείται και στις περιπτώσεις μείωσης της σχετικής υγρασίας της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας, ενώ επηρεάζεται άμεσα και από τη θερμοκρασία, γεγονός που δείχνει ότι οι συνθήκες του μικροκλίματος των κατασκευών συνεισφέρουν ουσιαστικά στη διαβρωτική δράση των διαλυτών αλάτων (Arnold & Zehnder, 1989; Theoulakis & Moropoulou, 1999). Όταν λόγω της εξάτμισης απομακρύνεται ποσότητα νερού από το πορώδες σύστημα του υλικού και το εναπομείναν διάλυμα υπερκορεστεί σε άλατα, ευνοείται η ανάπτυξη κρυστάλλων στους πόρους, η μορφολογία (ισομετρική, κιονοειδής, βελονοειδής κλπ) (**Εικόνα 32**) των οποίων καθορίζεται από εσωτερικούς δομικούς παράγοντες, όπως το κρυσταλλικό πλέγμα και από εξωτερικούς, όπως η σύσταση του διαλύματος (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).



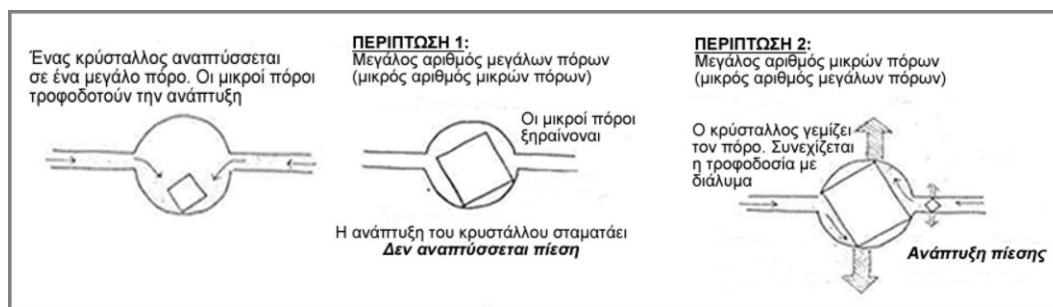
Εικόνα 32. Εικόνες SEM από διάφορους τύπους κρυστάλλων αλάτων. (Πηγή: Arnold & Zehnder, 1989)

Η διαβρωτική δράση των διαλυτών αλάτων συνίσταται στην ανάπτυξη ισχυρών πιέσεων στους πόρους ενός υλικού όχι μόνο λόγω κρυστάλλωσης, αλλά και εξαιτίας της ενυδάτωσής τους, της διαφορικής θερμικής διόγκωσής τους και της συμμετοχής τους στο φαινόμενο της όσμωσης (Μοροπούλου *et al.*, 2014).

Οι μηχανισμοί κατά τους οποίους αναπτύσσονται πιέσεις στα τοιχώματα των πόρων των υλικών, όπου κρυσταλλώνονται τα, μεταφερόμενα με την υγρασία, άλατα, έχουν ευρέως μελετηθεί αρκετά νωρίς (Correns, 1926; Correns & Steinborn 1939; Correns 1949 κ.ά.). Οι περισσότερες από τις μελέτες αυτές προσανατολίζονται στους μηχανισμούς της κρυστάλλωσης και της υδρόλυσης των αλάτων και στην εξάρτησή τους περισσότερο από τον βαθμό κορεσμού των διαλυμάτων, αργότερα ωστόσο, ερευνήθηκε ξεχωριστά και η επίδραση της μικροδομής των πορωδών υλικών (Charola, 2000). Ο Steiger (2005) περιγράφει ως καθοριστικό παράγοντα πίεσης λόγω κρυστάλλωσης τη γεωμετρία της ανάπτυξης των κρυστάλλων, καθώς και το μέγεθος των πόρων στους οποίους αυτή συμβαίνει. Τονίζει επίσης, ότι προϋπόθεση της ανάπτυξης των κρυστάλλων, άρα και της ανάπτυξης τάσεων, είναι η ύπαρξη ενός φιλμ υπέρκορου διαλύματος ανάμεσα στα τοιχώματα κρυστάλλων και πόρων, το οποίο λειτουργεί ως μονοπάτι διάχυσης ιόντων από το διάλυμα προς τον κρύσταλλο (Steiger, 2005).

Οι κρύσταλλοι των αλάτων φαίνεται να προτιμούν για την ανάπτυξή τους μεγαλύτερους πόρους, μετά την πλήρωση των οποίων, η κρυστάλλωση συνεχίζεται στους μικρότερους, όπου, φυσιολογικά, η πίεση που αναπτύσσεται είναι μεγαλύτερη. Έτσι, οι

υψηλές τιμές πίεσης λόγω κρυστάλλωσης συνδέονται με υλικά που περιλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό μικρότερων πόρων, σε σχέση με άλλα, των οποίων το ενεργό πορώδες αποτελείται κυρίως από περισσότερους πόρους μεγαλύτερης διαμέτρου (**Εικόνα 33**) (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).



Εικόνα 33. Ανάπτυξη κρυστάλλων σε διαφορετικής μικροδομής υλικά. (Πηγή: Μοροπούλου *et al.*, 2014)

Σε κάθε περίπτωση, η πίεση κρυστάλλωσης που αναπτύσσεται, όταν αυτή ξεπερνά τη θλιπτική αντοχή του υλικού, είναι πιθανό να οδηγήσει σε ρήξη των τοιχωμάτων των πόρων και εμφάνιση διαφόρων μορφών διάβρωσης στο εσωτερικό και την επιφάνεια του υλικού (Μοροπούλου *et al.*, 2014).

Τα σημεία της τοιχοποιίας στα οποία είναι πιθανόν να αναπτυχθούν κρύσταλλοι αλάτων, είναι συνάρτηση τόσο των ατμοσφαιρικών συνθηκών και του μικροκλίματος του εκάστοτε μνημείου, της μικροδομής των υλικών, όσο και της διαλυτότητας των αλάτων, ανάλογα με την οποία, αυτά εναποτίθενται καθ' ύψος των επιφανειών (Charola, 2000). Έτσι, έχει παρατηρηθεί και διατυπωθεί (Arnold, 1982; Arnold & Zehnder, 1989) ότι, η κρυστάλλωση των αλάτων που οφείλεται στην τριχοειδή αναρρίχηση της υγρασίας, εμφανίζεται σε τέσσερις διαδοχικές ζώνες (ζώνες εξάτμισης), από το έδαφος και προς τα επάνω:

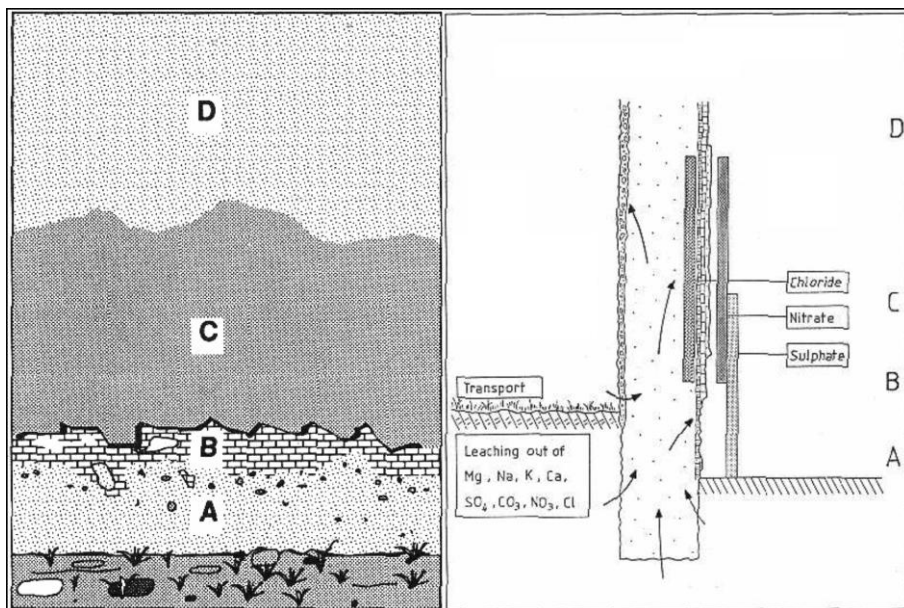
- Στη ζώνη Α, κοντά στο επίπεδο του εδάφους, κρυσταλλώνονται άλατα με χαμηλή διαλυτότητα, όπως ο γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) και τα ανθρακικά ασβέστιο και μαγνήσιο (CaCO_3 , MgCO_3). Παρουσιάζει τον μικρότερο βαθμό φθοράς, με πιο συνηθισμένες μορφές διάβρωσης τις απολεπίσεις.
- Η ζώνη Β, ψηλότερα από την Α, εμφανίζει την πιο σημαντική φθορά, από εξανθήσεις και κρούστες, έως αποσάθρωση, κυψελώσεις και απομείωση φυσικών και τεχνητών υλικών. Τα κυρίαρχα άλατα που ανιχνεύονται είναι τα νιτρικά, ιδίως νιτρικό κάλιο (KNO_3), αλλά και θειικό μαγνήσιο και νάτριο (MgSO_4 , Na_2SO_4).

- Η τρίτη ζώνη C, χαρακτηρίζεται από την παρουσία αλάτων με υψηλή διαλυτότητα και υγροσκοπικότητα, κυρίως νιτρικού νατρίου (NaNO_3) και χλωριδίων (KCl και NaCl), τα οποία μάλιστα, συχνά, με εξαίρεση τις συνθήκες ακραίας ατμοσφαιρικής ξηρότητας, παραμένουν σε διάλυση, σχηματίζοντας σκούρες υγρές ζώνες, που υποδεικνύουν, όταν είναι διακριτό, το ανώτατο όριο της αναρρίχησης της υγρασίας, καθώς και διάφορες κηλίδες, που υποδηλώνει ανομοιογενή κατανομή των αλάτων.
- Η ανώτερη ζώνη D, φαίνεται να περιλαμβάνει υγιή υλικά, που δεν έχουν υποστεί διάβρωση από την ανερχόμενη υγρασία (**Εικόνα 34**) (Arnold, 1982; Arnold & Zehnder, 1989).

Η φθορά από την ανάπτυξη των πιέσεων της κρυστάλλωσης των αλάτων εκδηλώνεται με την απολέπιση, την αποφλοίωση, την αποσάρθρωση και τη ρηγμάτωση των υλικών, καθώς και με τη μορφή εξανθήσεων ή κρυπτοεξανθήσεων (Arnold & Zehnder, 1989).

Ως εξανθήσεις αναφέρονται η ανάπτυξη και απόθεση των κρυστάλλων στην εξωτερική επιφάνεια του πορώδους υλικού. Το φαινόμενο αυτό εξελίσσεται όταν ο ρυθμός μεταφοράς του διαλύματος αλάτων από το εσωτερικό προς το εξωτερικό της τοιχοποιίας υπερβαίνει τον ρυθμό ξήρανσης στην εξωτερική επιφάνεια. Οι τυπικές εξανθήσεις υποβαθμίζουν την αισθητική των μνημείων, χωρίς όμως να επιφέρουν σοβαρές επιπλοκές στη μηχανική σταθερότητα της επιφάνειας των υλικών. Κύριο συστατικό τους είναι το NaCl , με μικρά ποσοστά και άλλων αλάτων (Μοροπούλου *et al.*, 2014).

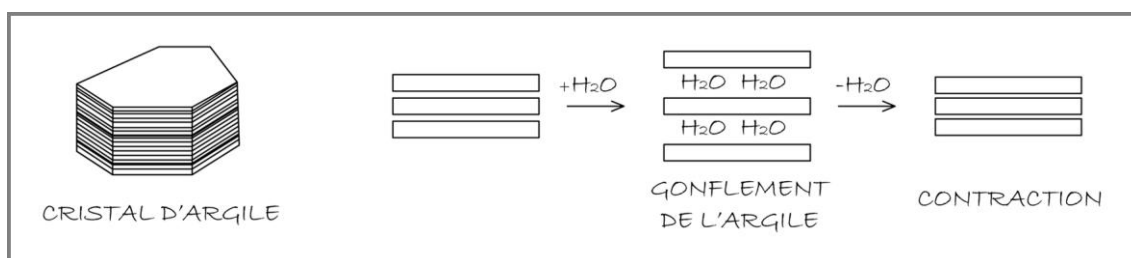
Στην περίπτωση της εκδήλωσης κρυπτο-εξανθήσεων, η ανάπτυξη των κρυστάλλων πραγματοποιείται στο εσωτερικό του υλικού, με ταυτόχρονη απόθεση του διαλύματος αλάτων εντός των πόρων. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, η μορφή των κρυπτο-εξανθήσεων παρατηρείται, όταν ο ρυθμός μεταφοράς του διαλύματος άλατος στην επιφάνεια είναι μικρότερος από τον ρυθμό εξάτμισης. Η κρυστάλλωση με τη μορφή κρυπτο-εξανθήσεων συμβαίνει συνήθως πίσω από την επιφανειακή κρούστα του υλικού, με αποτέλεσμα, η συνεχής ανάπτυξη κρυστάλλων να οδηγεί σε απώλεια της συνοχής του υλικού και αποκόλληση, με παράλληλη αποκάλυψη υγιούς υλικού και εκκίνηση νέου κύκλου φθοράς. Ο τύπος αυτός της επαναλαμβανόμενης φθοράς εμφανίζεται μακροσκοπικά και δημιουργεί τη λεγόμενη κυψέλωση, ασύμμετρες δηλαδή οπές και κοιλάτες στην επιφάνεια της τοιχοποιίας, που πολλές φορές οδηγούν σε σπηλαιώδεις καταστάσεις και απώλεια σε βάθος του υλικού, με μακροπρόθεσμες σημαντικές μηχανικές βλάβες, που φτάνουν έως και κατάρρευση (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).



Εικόνα 34. Ζώνες εξάτμισης. (Πηγή: Arnold & Zehnder, 1989)

- **Διόγκωση αργιλοπυριτικών υλικών**

Το νερό παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στη διάβρωση των υλικών με αργιλοπυριτικά συστατικά (πλίνθοι, τσιμέντο, κονιάματα και εν γένει προϊόντα πηλού), τα οποία έχουν, κατά κανόνα, φυλλόμορφη δομή και την ιδιότητα να προσροφούν νερό σε διαπλεγματικές θέσεις, με αποτέλεσμα τη διόγκωσή τους, καθώς τα μόρια του νερού εγκλωβίζονται στα κενά ανάμεσα στα αργιλικά ορυκτά και αυξάνουν την απόσταση μεταξύ των φύλλων της κρυσταλλικής δομής (Εικόνα 35). Κατά την ξήρανση, το νερό εξατμίζεται και οι ενώσεις μετατρέπονται σε σκόνη, ενώ όταν η ατμοσφαιρική υγρασία αυξηθεί ή όταν βρέξει, απορροφούν και πάλι το νερό που έχασαν και διογκώνονται κατά 0,03% - 0,3%. Αυτοί οι κύκλοι αυξομείωσης του όγκου τους, οδηγεί σε κόπωση τα υλικά που περιέχουν αργιλοπυριτικές φλέβες, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρηγματώσεων και την αποσάθρωσή τους (Σκουλικίδης, 2000; Φτίκος, 2015).



Εικόνα 35. Φυλλόμορφη δομή και διόγκωση αργίλου. (Πηγή: Torraca, 1986)

- **Οξείδωση και διόγκωση μεταλλικών συνδέσμων και σκελετών**

Σε πολλά μνημεία του ελλαδικού χώρου, για τη σύνδεση των διαφόρων αρχιτεκτονικών στοιχείων, έχουν χρησιμοποιηθεί μεταλλικοί σύνδεσμοι από χάλυβα, χαλκό ή ορείχαλκο. Η ύπαρξη υγρασίας μέσα στα πορώδη υλικά των μνημείων, οδηγεί σε οξείδωση τους μεταλλικούς συνδέσμους (Εικόνα 36), κυρίως όταν αυτοί δεν είναι βυθισμένοι σε μόλυβδο (μολυβδοχόηση). Τα προϊόντα της οξείδωσης, κυρίως οξείδια του σιδήρου ή ανθρακικά άλατα χαλκού, τα οποία δημιουργούνται στην επιφάνεια των συνδέσμων, αυξάνουν σημαντικά τον συνολικό τους όγκο. Η διόγκωση αυτή των εγκιβωτισμένων συνδέσμων προκαλεί την ανάπτυξη ισχυρότατων μηχανικών τάσεων, που οδηγούν στη ρήξη του ίδιου του μεταλλικού υλικού, αλλά και των περιβαλλόντων υλικών, όταν υπερβούν τις αντοχές τους (Σκουλικίδης, 2000; Χοΐδης, 2019).



Εικόνα 36. Οξειδωμένοι μεταλλικοί σύνδεσμοι από την Ακρόπολη. (Πηγή: Σκουλικίδης, 2000)

Η διόγκωση των μεταλλικών συνδέσμων και των οπλισμών σε νεώτερα μνημεία επιταχύνεται σε ρυπασμένο αστικό περιβάλλον, με την παρουσία στην ατμόσφαιρα CO₂, το οποίο, με την παρουσία του νερού των πόρων στο σκυρόδεμα και όπως περιγράφηκε παραπάνω, είναι υπεύθυνο για την ενανθράκωση του τσιμέντου και τη διάβρωση συνδέσμων και οπλισμών, με το ίδιο τελικό αποτέλεσμα, τη ρηγμάτωση δηλαδή των περιβαλλόντων υλικών (Παπαδάκης, 1990).

Οι επιδράσεις των περιβαλλοντικών παραγόντων που αναλύθηκαν παραπάνω και τα φαινόμενα που τις συνοδεύουν, αποτελούν τις βασικότερες και πιο κρίσιμες φορτίσεις για τα μνημεία, σε φυσικό, αλλά κυρίως σε ρυπασμένο περιβάλλον, όπου και γεννιούνται νέες

διεργασίες φθοράς και επιβαρύνονται όλες οι προϋπάρχουσες (Camuffo, 1992). Σε κρίσιμους παράγοντες, με τις ανάλογες επιδράσεις στη φθορά των μνημείων, κυρίως λόγω του βίαιου χαρακτήρα τους, ανάγονται και οφείλουν να προστεθούν οι καταπονήσεις από φυσικές καταστροφές, κυρίως από σεισμικές δονήσεις, πυρκαγιές και απρόβλεπτους κατακλυσμούς με συνοδές καθιζήσεις, αλλά και καταστροφές απευθείας από τον άνθρωπο, όπως βανδαλισμοί, ανεπιτυχείς επεμβάσεις συντήρησης και βλάβες από πολεμικές συρράξεις.

Επίσης, όπως γίνεται αντιληπτό, από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επιδρούν στα υλικά των μνημείων, σχεδόν κανένας, εάν εξαιρέσουμε τις αιφνίδιες καταστροφές (φυσικές και ανθρωπογενείς), δεν δρα μεμονωμένα, με το νερό, σε όλες του τις μορφές, να αποτελεί τον πλέον καθοριστικό από αυτούς, καθώς συμμετέχει στους περισσότερους μηχανισμούς φθοράς, τόσο των σύγχρονων δομικών υλικών, όσο και των υλικών των ιστορικών κατασκευών (Σκουλικίδης, 2000).

Στην πράξη, η τελική φθορά των δομικών υλικών ενός μνημείου είναι αποτέλεσμα πολλών φαινομένων που δρουν ταυτόχρονα και συνεργιστικά (Camuffo, 1986; Fassina, 1978). Υπενθυμίζεται ότι, ο όρος συνεργιστική επίδραση αναφέρεται στη διαβρωτική προσβολή ενός υλικού από συνδυασμό διαβρωτικών παραγόντων, η οποία τελικά καταλήγει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα της μεμονωμένης έκθεσης σε κάθε παράγοντα ξεχωριστά.

Για παράδειγμα, οι ρηγματώσεις και μια ενδεχόμενη επακόλουθη απόσπαση τεμαχίων από το υλικό ενός μνημείου, είναι το τελικό αποτέλεσμα της παράλληλης δράσης των τάσεων που δημιουργούνται, από πιθανούς συνδυασμούς διαφόρων φαινομένων, όπως η ανισότροπη θερμική διαστολή, η ενδεχόμενη κρυστάλλωση αλάτων, οι κύκλοι ύγρυνσης-ξήρανσης, η δημιουργία πάγου μέσα στους πόρους, η οξείδωση μεταλλικών στοιχείων, η ανάπτυξη φυτών κ.ά..

Κατά συνέπεια, για κάθε μορφή διάβρωσης που παρατηρείται κατά τη μακροσκοπική μελέτη διάγνωσης της φθοράς σε ένα μνημείο και προκειμένου για την αποτελεσματική επέμβαση αποκατάστασης των διαβρώσεων, αλλά και μείωσης των παραγόντων φθοράς, θα πρέπει να εξετάζονται όλα τα πιθανά αίτια-παράγοντες που έχουν επιδράσει σε αυτό, καθώς και ενδεχόμενοι συνδυασμοί τους.

2.3.4 Είδη και μορφές διάβρωσης των υλικών των μνημείων

Ανεξάρτητα από τη φύση της διεργασίας που τα προκάλεσε (φυσική, μηχανική, χημική, ηλεκτροχημική, βιολογική), όλες οι μορφές με τις οποίες εκδηλώνεται η διάβρωση στα διάφορα δομικά υλικά, ανάγονται στα εξής βασικά είδη:

- *Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση* παρατηρείται όταν στην επιφάνεια του υλικού δημιουργείται ένα ομοιόμορφο στρώμα του προϊόντος διάβρωσης ή όταν πραγματοποιείται ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας.
- *Διάβρωση με βελονισμούς* παρατηρείται όταν το προϊόν της διάβρωσης σχηματίζεται τοπικά στην επιφάνεια του υλικού, ή όταν πραγματοποιείται εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας.
- *Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση*, που οδηγεί σε ψαθυρή θραύση πραγματοποιείται με συνύπαρξη ή μη και άλλων ειδών διάβρωσης, όταν, από διάφορους παράγοντες, δημιουργούνται εσοχές στη μάζα μεγάλου τμήματος της κατασκευής που μπορεί να οδηγήσουν σε θραύση, ακόμη και με πολύ μικρό φορτίο σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές του υλικού. Παραλλαγή αυτού του επιβλαβούς είδους διάβρωσης είναι η κόπωση των υλικών, εξαιτίας εναλλασσόμενων φορτίσεων.
- *Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση* παρατηρείται όταν, από τοπική εξάχνωση υλικού λόγω ροής ρευστού, δημιουργούνται εσοχές, σπήλαια ή κρατήρες στην επιφάνειά του, που μπορεί να οδηγήσουν σε κατάρρευση (Σκουλικίδης, 2000).

Η διαβρωτική δράση των διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων που πλήττουν τα ιστορικά υλικά των μνημείων εκδηλώνονται με την εμφάνιση μεγάλης ποικιλίας μορφών διάβρωσης, ανάλογα με τα δεδομένα του μικροκλίματος και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε υλικού. Οι πιο συνήθεις μορφές που συναντώνται στις επιφάνειες των υλικών των μνημείων και οι οποίες προκύπτουν από μηχανισμούς που περιγράφηκαν παραπάνω, μεμονωμένους ή σε συνδυασμό, είναι:





- Μαύρες, φαιό-μαυρες και γκρίζες κρούστες, χαλαρές αποθέσεις
- Λευκές κρούστες – αποπλυμένες επιφάνειες
- Ζαχαροποίηση
- Βιογενείς κρούστες
- Καστανέρυθρες πάτινες
- Πράσινες πάτινες
- Υπόλευκες – ροδόχρωμες πάτινες (*scialbatura*)

- Βελονοειδής διάβρωση
- Εξανθήσεις αλάτων διαφόρων τύπων (χαλαρές, σκληρές, φλύκταινες κ.ά.) και Κρυπτοεξανθήσεις
- Οπισθοχώρηση αρχικής επιφάνειας - Απόξεση
- Αποφλοιώσεις – Απολεπίσεις – Απόσπαση τεμαχίων
- Διάθρυψη – Κοκκώδης διαχωρισμός
- Τριχοειδείς Ρωγμές – Ρηγμάτωση – Θραύση
- Διόγκωση
- Κυψέλωση
- Κατάρρευση



Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωμένες σε πίνακα (**Πίνακας 14**) οι κυριότερες από τις μορφές αυτές φθοράς, συνοδευόμενες από ενδεικτικές εικόνες, χαρακτηριστικές της κάθε μορφής, καθώς και από συνοπτική περιγραφή των αιτιών και μηχανισμών που τις δημιουργούν.




Πίνακας 14. Κυριότερες μορφές διάβρωσης υλικών των μνημείων - Αίτια και μηχανισμοί - Ενδεικτικές εικόνες.





Μορφή εκδηλούμενης φθοράς	Αίτια – Μηχανισμός	Ενδεικτικές Εικόνες
<p>Μαύρες κρούστες – Φαιόμαυρες και γκρίζες κρούστες – Χαλαρές αποθέσεις</p>	<p>Όξινη βροχή. Αιωρούμενα σωματίδια επάνω σε γυψοποιημένη επιφάνεια. Χαλαρές επικαθίσεις αιωρούμενων σωματιδίων. Μεταβολικά προϊόντα βιολογικού παράγοντα (μελανίνη μυκήτων κ.ά.).</p>	 <p>Πηγή: Fitzner and Heinrichs, 2004</p> <p>Πηγή: Camuffo, 2013</p> <p>Πηγή: Delgado-Rodrigues, 2015</p>
<p>Λευκές κρούστες – αποπλυμένες επιφάνειες</p>	<p>Όξινη βροχή. Όξινες ανθρακικές κρούστες από ανακρυστάλλωση. Μετατροπή του ασβεστίτη σε γύψο που εκπλένεται από τη βροχή. Μεταβολικά προϊόντα ζώων.</p>	 <p>Πηγή: Camuffo, 2013</p>


Μορφή εκδηλούμενης φθοράς	Αίτια – Μηχανισμός	Ενδεικτικές Εικόνες
Ζαχαροποίηση	Περικρυσταλλική προσβολή σε βάθος, λόγω ανακρυστάλλωσης. Κυρίως σε μάρμαρα.	 <p data-bbox="991 786 1305 813">Πηγή: Sassoni and Franzoni, 2014</p>
Βιογενείς κρούστες	Αποικίες και μεταβολικά προϊόντα μικροοργανισμών, φυτών και ζώων (βακτήρια, φύκη, μύκητες, λειχήνες, βρυόφυτα, όξινες κρούστες περιττωμάτων πτηνών.)	 <p data-bbox="991 1039 1305 1066">Πηγή: Albertano, 2012</p>  <p data-bbox="991 1532 1305 1559">Πηγή: Cuzman, 2011</p>  <p data-bbox="991 1778 1305 1805">Πηγή: Mason and Maker, 2017</p>

Μορφή εκδηλούμενης φθοράς	Αίτια – Μηχανισμός	Ενδεικτικές Εικόνες
Καστανέρυθρες πάτινες	<p>Οξειδωση μεταλλικών δομικών στοιχείων (συνδέσμων) στο εσωτερικό τοιχοποιιών. Οξειδωση μεταλλικών συστατικών αιωρούμενων σωματιδίων (Fe, Al, Cu, Ti, Mn κ.ά.). Βιογενής οξειδωση μεταλλικών συστατικών λίθων.</p>	 <p>Πηγή: Krumbein, 2000</p> <p>Πηγή: Ruffolo, 2012</p>
Πράσινες πάτινες	<p>Βιολογικός παράγοντας – Φωτοσυνθετικές χρωστικές (φύκη, κυανοβακτήρια, βρυόφυτα κ.ά.).</p>	 <p>Πηγή: Smith et al, 2010</p>
Υπόλευκες έως ροδόχρωμες πάτινες (scialbatura)	<p>Βιολογικός παράγοντας – Μεταβολικά προϊόντα λειχηνών και μυκηλίων.</p>	 <p>Πηγή: Del Monte and Sabbioni, 1987</p>
Βελονοειδής διάβρωση	<p>Ψηγματοβολή. Βιολογικός παράγοντας (μύκητες, λειχήνες, βρυόφυτα κ.ά.).</p>	 <p>Πηγή: Fitzner and Heinrichs, 2004</p> <p>Πηγή: Martinez-Martinez et al, 2018</p>

Μορφή εκδηλούμενης φθοράς	Αίτια – Μηχανισμός	Ενδεικτικές Εικόνες
<p>Εξανθήσεις αλάτων διαφόρων τύπων (χαλαρές, σκληρές, φλύκταινες κ.ά.) και Κρυπτοεξανθήσεις</p>	<p>Τριχοειδής αναρρίχηση εδαφικού νερού και συμπύκνωση ατμοσφαιρικής υγρασίας – Κρυστάλλωση αλάτων.</p>	 <p>Πηγή: Fitzner and Heinrichs, 2004</p> <p>Πηγή: Siedel, 2018</p> <p>Πηγή: Fitzner and Heinrichs, 2004</p> <p>Πηγή: Bracciale et al, 2020</p>
<p>Οπισθοχώρηση αρχικής επιφάνειας – Απόξεση</p>	<p>Ανθρωπογενής τριβή. Ψηματοβολή. Θαλάσσιο αερόλυμα.</p>	 <p>Πηγή: Μαρινέλλου, 2020</p>

Μορφή εκδηλούμενης φθοράς	Αίτια – Μηχανισμός	Ενδεικτικές Εικόνες
<p>Αποφλοιώσεις – Απολεπίσεις – Απόσπαση τεμαχίων</p>	<p>Τριχοειδής αναρρίχηση εδαφικού νερού και συμπύκνωση ατμοσφαιρικής υγρασίας – Κρυστάλλωση αλάτων. Παγοπληξία – Περιοδικές Θερμοκρασιακές διακυμάνσεις – Θερμική ανισοτροπία υλικών. Ζαχαροποίηση. Βιολογικός παράγοντας. Σεισμικές δονήσεις. Ασύμβατα υλικά επεμβάσεων.</p>	 <p>Πηγή: De Kock et al, 2013</p>  <p>Πηγή: Rodrigues, 2014</p>  <p>Πηγή: Camuffo, 2013</p>
<p>Διάθρυψη – Κοκκώδης διαχωρισμός</p>	<p>Θερμοκρασιακές διακυμάνσεις – Θερμική ανισοτροπία υλικών. Κύκλοι ψύξης – τήξης νερού (περάσματα από το σημείο 0°C). Ζαχαροποίηση μαρμάρου. Θιξοτροπία αργιλοπυριτικών υλικών. Βιολογικός παράγοντας (αυτότροφα βακτήρια).</p>	 <p>Πηγή: Fitzner and Heinrichs, 2004</p>  <p>Πηγή: Angeli, 2007</p>

Μορφή εκδηλούμενης φθοράς	Αίτια – Μηχανισμός	Ενδεικτικές Εικόνες
<p>Τριχοειδείς Ρωγμώσεις – Ρηγμάτωση – Θραύση</p>	<p>Δονήσεις (σεισμικές, τροχαίας κυκλοφορίας). Παγοπληξία –Περιοδικές Θερμοκρασιακές διακυμάνσεις – Θερμική ανισοτροπία υλικών. Οξείδωση μεταλλικών δομικών στοιχείων (συνδέσμων) στο εσωτερικό τοιχοποιιών. Τριχοειδής αναρρίχηση εδαφικού νερού και ατμοσφαιρικής υγρασίας – Κρυστάλλωση αλάτων (κρυπτοεξανθήσεις). Μηχανική δράση φυτών (ανάπτυξη ριζών).</p>	 <p>Πηγή: Van Hees et al, 2004</p>  <p>Πηγή: Fitzner and Heinrichs, 2004</p>  <p>Πηγή: Angeli, 2007</p>  <p>Πηγή: Carlton and LaBonté, 2017</p>

Μορφή εκδηλούμενης φθοράς	Αίτια – Μηχανισμός	Ενδεικτικές Εικόνες
Κυψέλωση	<p>Ψηγματοβολή. Τριχοειδής αναρρίχηση εδαφικού νερού και ατμοσφαιρικής υγρασίας – Κρυστάλλωση αλάτων – Κρυπτοεξανθήσεις. Θαλασσινό αερόλυμα – Επικαθίσεις αλάτων. Βιοδιάβρωση.</p>	 <p>Πηγή: Ludovico-Marques & Chastre 2014</p> <p>Πηγή: Simple, 2009</p> <p>Sierra-Fernandez, 2017</p>
Κατάρρευση	<p>Τελικό στάδιο. Σηλαιώσεις – Κυψελώσεις. Ευρείες ρηγματώσεις από διάφορους παράγοντες.</p>	 <p>Πηγή: Poziopoulos, 1992</p>

2.4 Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι χαρακτηρισμού και διάγνωσης της φθοράς των δομικών υλικών σε μνημεία

2.4.1 Γενικά

Η μελέτη της φθοράς των μνημείων και η αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα υλικά τους διεξάγεται, κατά κανόνα, σε δύο επίπεδα, αφενός σε μακροσκοπικό, στην κλίμακα του κτηρίου, η οποία αφορά τη διάγνωση, τυποποίηση και μορφολογία της φθοράς, αφετέρου δε, σε μικροσκοπικό επίπεδο, κατά το οποίο γίνεται ενδελεχής παρακολούθηση της ταχύτητας εξέλιξης των μηχανισμών και των φαινομένων της διάβρωσης. Σε όλα τα στάδια της μελέτης εφαρμόζονται συμπληρωματικά μεταξύ τους, μη καταστρεπτικές τεχνικές και ενόργανες μέθοδοι για τον χαρακτηρισμό των υλικών και της φθοράς τους (Γεωργιάδου, 2016; Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Η διάγνωση της φθοράς, σε συνδυασμό με την αποτίμηση των επεμβάσεων συντήρησης αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη μιας ενιαίας διεπιστημονικής μεθοδολογίας στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διαφύλαξη και την εκτίμηση της αειφορίας των ιστορικών κατασκευών (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2015).

Μια ιδανική μέθοδος χαρακτηρισμού πρέπει να παρέχει στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με τη μικροδομή και τη μακροδομή του, χωρίς την ανάγκη τεμαχισμού της δομής. Τέτοιου είδους δεδομένα μπορούν να ληφθούν μόνο χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου (ΜΚΕ) (Ματίκας & Αγγέλης, 2015).

Ο Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος (ΜΚΕ) (Non Destructive Testing - NDT) αποτελεί μία καινοτόμα μεθοδολογία που συμβάλλει στην αύξηση της αειφορίας υλικών και κατασκευών, επιτρέποντας την επί τόπου εξέτασή τους, με διασφάλιση μάλιστα της ακεραιότητας της εξεταζόμενης δομής, αλλά και την παροχή άμεσων αποτελεσμάτων (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2015). Συμπεριλαμβάνει μια κατηγορία τεχνικών ανάλυσης με ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή σε πολλούς τομείς των μηχανικών επιστημών, μεταξύ των οποίων και στην προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς, προκειμένου για την αποτίμηση της φθοράς και την ακόλουθη λήψη αποφάσεων σε ό,τι αφορά ενδεχόμενες επεμβάσεις και στρατηγικές διαχείρισης των μνημείων. Σύμφωνα με την Αμερικανική Εταιρεία Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου (American Society for Nondestructive Testing, ASNT), ο γενικός όρος του Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου αναφέρεται στην εξέταση ενός αντικειμένου, με τεχνολογίες οι οποίες δεν επηρεάζουν τη μελλοντική χρησιμότητά του και χωρίς να μεταβάλλεται η

υπάρχουσα κατάστασή του (Κουή *et al.*, 2015), που υποδηλώνει την απουσία ανάγκης για λήψη δειγμάτων.

Η χρήση των Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών για τον έλεγχο των υλικών κερδίζει ολοένα και περισσότερους υποστηρικτές τα τελευταία χρόνια. Η εδραίωσή τους, ως μιας αξιόπιστης τεχνολογίας εξέτασης υλικών των κατασκευών, οφείλεται σε μια σειρά βασικών πλεονεκτημάτων, ανάμεσα στα οποία είναι:

- Η δυνατότητα της επί τόπου επιθεώρησης
- Η διατήρηση της ακεραιότητας και της λειτουργίας της εξεταζόμενης δομής
- Η λήψη αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο και συνθήκες λειτουργίας
- Η παροχή τόσο ποιοτικών, αλλά και ποσοτικών αποτελεσμάτων (Μοροπούλου *et al.*, 2005).

Οι Μη Καταστρεπτικές Τεχνικές, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, έχουν και περιορισμούς, των οποίων ο μελετητής οφείλει να έχει γνώση πριν την εφαρμογή μιας δοκιμής (Κουή *et al.*, 2015). Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, από κατασκευαστικές παραμέτρους μέχρι τη σκοπιμότητα της κάθε δοκιμής και το κόστος προμήθειας του εξοπλισμού της. Παρόλο που τέτοιου είδους θεωρήσεις είναι μεγάλης σημασίας για την τελική επιλογή των μεθόδων αποτίμησης της φθοράς σε μια κατασκευή, όταν πρόκειται για ιστορικά μνημεία, ο καθοριστικός παράγοντας για την αυτή επιλογή είναι η διατήρηση, όσο αυτό είναι δυνατόν, αλώβητων των αυθεντικών υλικών, χωρίς φυσικά να υποτιμάται η σημασία και των λοιπών παραμέτρων (Hussain & Akhtar, 2017).

Ο ρόλος του μηχανικού που θα διεξάγει μια ΜΚΕ τεχνική είναι ακριβώς η ικανότητα αναγνώρισης της κατάλληλης μεθόδου που θα διευκολύνει με γρήγορο, αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο την παρακολούθηση της εξεταζόμενης δομής. Για την επίτευξη του στόχου αυτού πρέπει να λαμβάνονται υπ'όψιν, τόσο οι αρχές λειτουργίας και εφαρμογής της κάθε τεχνικής, όσο και η φύση του υπό διερεύνηση προβλήματος (Hussain & Akhtar, 2017; Κουή *et al.*, 2015).

Οι Μη Καταστρεπτικές μέθοδοι δεν χρησιμοποιούνται σε υποκατάσταση των παραδοσιακών εργαστηριακών αναλύσεων για την ταυτοποίηση των υλικών και τη μελέτη των μηχανισμών, αλλά αποτελούν εξαιρετικό εργαλείο για τη χαρτογράφηση της φθοράς και της καταγραφής των μικροκλιματικών και τοπικοχημικών επιπτώσεων του περιβάλλοντος στην πραγματική κλίμακα των επιφανειών (Christaras, 1996). Παράλληλα, παρέχουν τη δυνατότητα καταγραφής και επεξεργασίας οπτικών πληροφοριών βάσει φυσικοχημικών

κριτηρίων και καθιστούν εφικτή την παρακολούθηση και τον έλεγχο της φθοράς, αλλά και της αποτελεσματικότητας της προστασίας των υλικών και της διαχείρισης των περιβαλλοντικών παραγόντων (Κούρτελη, 2001).

Τέλος, στη σημερινή ψηφιακή Νέα Εποχή και Κοινωνία της Πληροφορίας, οι Μη Καταστρεπτικές μέθοδοι αποτελούν καίριο πεδίο ερευνητικών εφαρμογών συνδυάζοντας τόσο τη γνώση όσο και τον βιώσιμο χαρακτήρα της Μηχανικής: τεχνολογική πρόβλεψη έναντι της εκ των υστέρων θεραπείας (Κατσιώτης, 2015).

Οι κυριότερες και πλέον συνήθεις από τις Μη Καταστρεπτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα για την αποτίμηση της διάβρωσης στις επιφάνειες των υλικών σύγχρονων κατασκευών και μνημείων, περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

2.4.2 Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι

2.4.2.1 Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection)

Η μέθοδος του Οπτικού Ελέγχου είναι η παλαιότερη μέθοδος που χρησιμοποιείται στις Μη Καταστρεπτικές δοκιμές, η οποία προηγείται και συνοδεύει όλες τις άλλες μεθόδους ελέγχου (Αναστασιάδης, 2016).

Η συγκεκριμένη μέθοδος, χρησιμοποιώντας σαν βασικό εργαλείο το ανθρώπινο μάτι και σε συνδυασμό με έναν βασικό εξοπλισμό (πυξίδα, αλφάδι, μετρητικές ταινίες και αποστασιόμετρα, μεγεθυντικούς φακούς, ρωγμόμετρα) και βασικά οπτικά μέσα για την τεκμηρίωση (φωτογραφικές κάμερες), αποτελεί μια από τις χρησιμότερες διαδικασίες ελέγχου, που αποσκοπεί σε μία αρχική εκτίμηση των φθορών που υπάρχουν στην επιφάνεια ενός υφιστάμενου κτηρίου, σύγχρονου ή ιστορικού, ή ακόμη και μιας υπό ανέγερση κατασκευής (Αναστασιάδης, 2016).

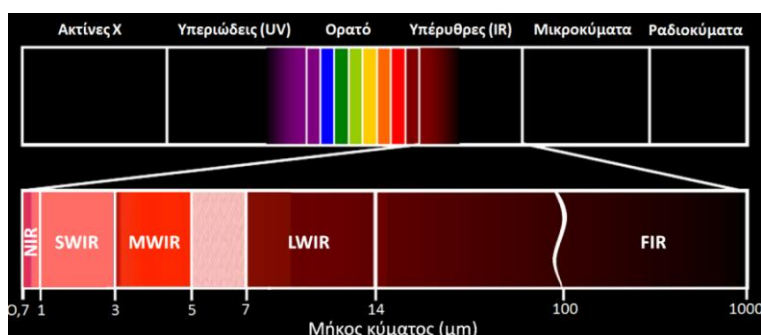
Ο οπτικός έλεγχος συνίσταται στον εντοπισμό και στην άμεση καταγραφή, σε σκαριφήματα, των εμφανών φθορών – βλαβών που παρουσιάζει μία κατασκευή, όπως ρωγμές και ρηγματώσεις (θέση και εύρος), διαβρωμένοι οπλισμοί, προβλήματα ανερχόμενης ή κατερχόμενης υγρασίας, απολεπίσεις-αποφλοιώσεις ή απόσπαση τεμαχίων, ίχνη ή κηλίδες σκουριάς, διάφορες χρωματικές αλλοιώσεις, απογυμνωμένοι ή θραυσμένοι οπλισμοί, πάτινες και αποθέσεις κάθε είδους κ.ά. (Αναστασιάδης, 2016).

Αν και παρουσιάζει μειονεκτήματα ως μέθοδος, όπως ο περιορισμός της επιθεώρησης – εξέτασης στην επιφάνεια των υλικών, η υποκειμενικότητα των αποτελεσμάτων και η ανάγκη εμπειρίας του μελετητή, η αξία του Πρωτογενούς Οπτικού

Ελέγχου για την αποτίμηση της κατάστασης μιας κατασκευής δεν μειώνεται, καθώς είναι απλή και γρήγορη στην εφαρμογή, με χαμηλό κόστος, εφαρμόζεται σε όλα τα υλικά και τα ευρήματά της μπορούν να καταγραφούν σε μόνιμο αρχείο και να αποτελέσουν βασικό οδηγό για τις μεθόδους Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, αλλά και για τις θέσεις διεξαγωγής τους (Αναστασιάδης, 2016; Κουή et al., 2015).

2.4.2.2 Υπέρυθρη Θερμογραφία (Infrared Thermography - IRT)

Η υπέρυθρη ακτινοβολία, όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, το ορατό φως, ή η ακτινοβολία με ακτίνες X και γ, δεν είναι τίποτα άλλο από μεταφορά ενέργειας, μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Εικόνα 37). Όλα τα υλικά σώματα σε μια θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν, κατά την πρόσπτωση ακτινοβολίας επάνω στην επιφάνειά τους, ανακλούν ένα μέρος της, ένα δεύτερο μέρος το απορροφούν, ενώ ένα μέρος διαπερνά το σώμα. Το μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που ανακλάται από το σώμα γίνεται αντιληπτό ως θερμική ενέργεια και είναι αυτό που αποτελεί τη βασική αρχή της θερμογραφίας (Κουή et al., 2015).

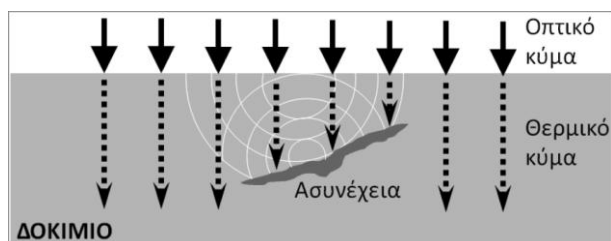


Εικόνα 37. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Υπέρυθρη περιοχή 0,7-1000μm. (Πηγή: Ματίκας et al., 2015)

Η υπέρυθρη θερμογραφία (Infrared Thermography – IRT) είναι μια Μη Καταστρεπτική μέθοδος με φορητό εξοπλισμό, που εφαρμόζεται in situ, χωρίς επαφή με το εξεταζόμενο υλικό, έχει σχετικά χαμηλό κόστος και δυνατότητα ποιοτικής και ποσοτικής πληροφόρησης σε πραγματικό χρόνο και μεγάλες επιφάνειες (Kordatos et al., 2013).

Οι υποεπιφανειακές ασυνέχειες σε ένα υλικό οδηγούν στη δημιουργία τοπικών διαφορών στην επιφανειακή θερμοκρασία του υλικού. Οι διαφορές αυτές προκαλούνται από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις περιοχές όπου υπάρχουν ασυνέχειες οποιασδήποτε προέλευσης (ρωγμές, διεπιφάνειες υλικών, διαφορετική πυκνότητα υλικού,

πορώδες, ροή υγρών και αερίων κλπ) (**Εικόνα 38**). Η θερμογραφία ανιχνεύει τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια του υλικού στην υπέρυθη περιοχή (700-1400nm) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και καταγράφει το θερμικό σήμα σε μια οπτική εικόνα, το θερμογράφημα (**Εικόνα 39**) (Ματίκας & Αγγέλης, 2015).



Εικόνα 38. Αρχή της Θερμογραφίας Υπερύθρου (Πηγή: Ματίκας *et al.*, 2015)

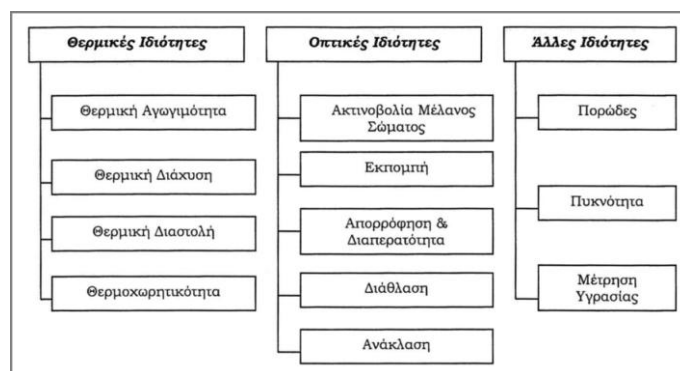


Εικόνα 39. Τμήμα λιθοδομής από τα Ενετικά Τείχη του Ηρακλείου Κρήτης (αριστερά: φυσική φωτογραφία, δεξιά: θερμογράφημα). (Πηγή: Μοροπούλου *et al.*, 2013)

Η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία εξαρτάται από το είδος και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού που καθορίζουν τους μηχανισμούς διάδοσης της θερμότητας στη μάζα του, όπως η ειδική θερμότητα (ποσότητα θερμότητας που απορροφάται από την μάζα του υλικού για δεδομένο εύρος θερμοκρασίας), η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (μέτρο ανταλλαγής της θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και μιας ροής υγρού ή αερίου), η εκπεμπτικότητα (αποδοτικότητα μιας επιφάνειας ως θερμαντικό σώμα), καθώς επίσης και από τη μικροδομή του υλικού και την κατάσταση της φθοράς του, χαρακτηριστικά τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπ'όψιν κατά τον μη καταστροφικό έλεγχο (**Εικόνα 40**) (Κουή *et al.*, 2015; Μοροπούλου *et al.*, 2005).

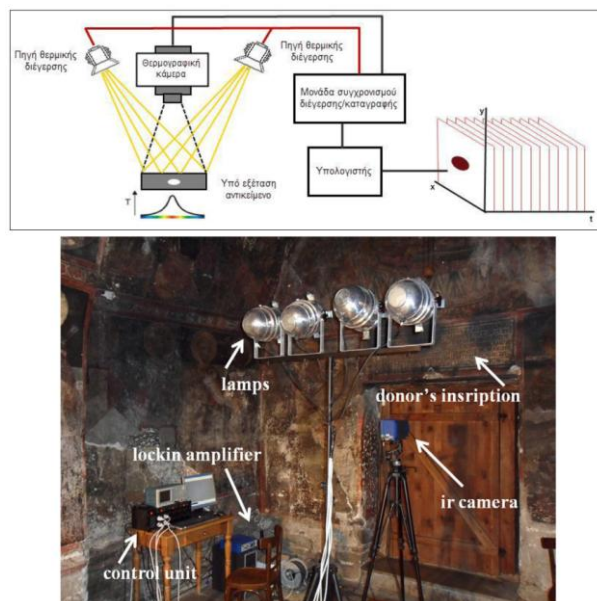
Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις – μεθοδολογίες για την εκτίμηση ενός υλικού ή μιας κατασκευής με τη χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας, η παθητική (passive) και η ενεργητική (active) (Kordatos *et al.*, 2013; Αβδελίδης, 2002).

Η παθητική θερμογραφία (passive thermography) αναφέρεται στην τεχνική θερμογραφίας για τον έλεγχο υλικών και δομών, που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασιακή κλίμακα από το περιβάλλον τους, ώστε να είναι ανιχνεύσιμη η θερμική αντίθεση από έναν αισθητήρα υπέρυθρων. Κατά τη μέθοδο αυτή, καταγράφεται η εκπεμπόμενη από το σώμα υπέρυθρη ακτινοβολία, χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής θερμότητας (Αβδελίδης, 2002; Ματίκας & Αγγέλης, 2015). Η παθητική προσέγγιση χρησιμοποιείται και για τις αρχιτεκτονικές επιφάνειες, όπου τα επιθεωρούμενα υλικά εξετάζονται κυρίως σε ποιοτικό επίπεδο, όπως για παράδειγμα για ανίχνευση ασυνεχειών, διεπιφανειών, κενών, υγρασίας κλπ (Μοροπούλου *et al.*, 2013).



Εικόνα 40. Ιδιότητες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον ΜΚΕ υλικών με τη μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας. (Πηγή: Αβδελίδης, 2002)

Στις περιπτώσεις που το ενδιαφερόμενο προς εξέταση υλικό είναι σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του και, κατά συνέπεια, είναι δύσκολο να διαφοροποιηθεί από αυτό, εφαρμόζεται η ενεργητική θερμογραφία, η οποία βασίζεται στη θερμική διέγερση του επιθεωρούμενου δοκιμίου, ώστε αυτό να παρουσιάσει αξιοσημείωτες διαφορές θερμοκρασίας, που να μαρτυρούν υποεπιφανειακές ασυνέχειες (Εικόνα 41) (Kordatos *et al.*, 2013; Μοροπούλου *et al.*, 2013). Ανάλογα με τον τρόπο της θερμικής διέγερσης του υπό εξέταση υλικού, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, όπως η παλμική (Pulsed Thermography), η διαμορφωμένη (Lock-in ή Modulated Thermography), θερμογραφία σταδιακής θέρμανσης (Step Heating Thermography), θερμογραφία δονήσεων (Vibrothermography), θερμογραφία δινορρευμάτων (Eddy Current Thermography), που συνοδεύονται από εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας του θερμογραφικού σήματος (Κουή *et al.*, 2015).



Εικόνα 41. Διάταξη εξοπλισμού ενεργητικής θερμογραφίας (Επάνω: Σχηματική απεικόνιση, κάτω: Μελέτη εφαρμογής, Μονή Μολυβδοσκεπέαστου. (Πηγές: Κουή *et al.*, 2015; Kordatos *et al.*, 2013)

Η χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας ως εργαλείο χαρακτηρισμού και διάγνωσης της φθοράς των δομικών υλικών χρησιμοποιείται για την ανίχνευση επιφανειακών φθορών, αποκάλυψη αποφλοιώσης χρωμάτων και επικαλύψεων σε κτήρια και μνημεία, έλεγχο ατελειών και ρωγμών, αποκάλυψη ανερχόμενης και παραμένουσας υγρασίας και συμπύκνωσης σε τοιχοποιίες, καθώς και για την αποτίμηση της συμβατότητας μεταξύ αυθεντικών υλικών και επεμβάσεων συντήρησης (καθαρισμοί επιφανειών, στερέωση ή αντικατάσταση λίθων κ.ά) (Αβδελίδης, 2002; Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

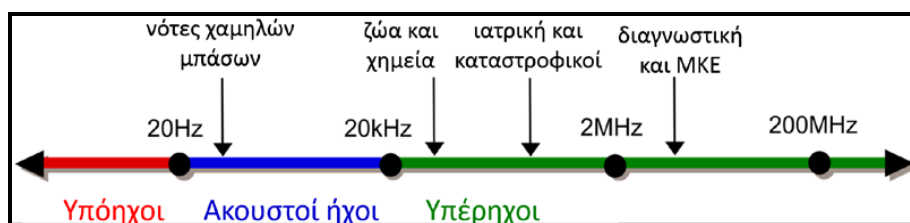
Ωστόσο η ερμηνεία των θερμογραφημάτων των αρχιτεκτονικών επιφανειών των ιστορικών κτηρίων είναι εξαιρετικά σύνθετη και δύσκολη, δεδομένου ότι το μνημείο και το περιβάλλον του αποτελούν ένα δυναμικό και σύνθετο σύστημα. Για την ορθή ερμηνεία των θερμογραφημάτων απαιτούνται ειδικές γνώσεις, σχετικά με τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας μεταξύ περιβάλλοντος – υλικών τοιχοποιίας, που συνδέονται με τις φυσικοχημικές και τις θερμικές ιδιότητες των δομικών υλικών και τη μικροδομή τους (Αβδελίδης, 2002).

2.4.2.3 Υπερηχοσκόπηση (Ultrasonic testing - UST)

Η χρήση των ακουστικών μεθόδων για τον έλεγχο υλικών, όπως τα κεραμικά, το γυαλί και τα μέταλλα είναι αρχαιότατη, με ρίζες στην εποχή που ο άνθρωπος προσπαθούσε να

ελέγξει εμπειρικά την ποιότητα των υλικών κρούοντάς τα με κατάλληλο σφυρί και εξετάζοντας την ηχώ που δημιουργούνται (Πινέλη, 2003). Στα νεώτερα χρόνια, οι πρώτες προσπάθειες επιστημονικής αξιοποίησης των ακουστικών μεθόδων στον Μη Καταστρεπτικό Έλεγχο των υλικών χρονολογούνται στο 1928-29, όταν ο Ρώσος Sergei Sokolon πρότεινε τη χρήση ηχητικών κυμάτων με συχνότητες πάνω από το επίπεδο του φάσματος της ανθρώπινης ακοής, των υπερήχων, για την ανίχνευση εσωτερικών ατελειών στα μέταλλα, πραγματοποιώντας ανάλογες δοκιμές στο Ηλεκτροτεχνικό Ινστιτούτο του Λένινγκραντ (Ensminger & Leonard, 2012). Τον Sokolon ακολούθησαν μια σειρά σημαντικών επιστημόνων σε Ευρώπη και Αμερική, μεταξύ των οποίων ο Firestone, που ανέπτυξε την τεχνική της παλμοηχούς για την ανίχνευση λεπτών ρωγμών σε μεταλλικά υλικά. Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, αναπτύχθηκαν πολλές σημαντικές εφαρμογές των υπερήχων σε αναδυόμενους υψηλής τεχνολογίας τομείς της βιομηχανίας, όπως στον τομέα της αεροναυπηγικής, της άμυνας και της πυρηνικής ενέργειας, καθώς και στην ιατρική επιστήμη. Στον τομέα της επιστήμης των υλικών, οι δοκιμές που είχαν αρχικά εφαρμοστεί σε μέταλλα, επεκτάθηκαν και σε τεχνητά υλικά, κυρίως σε όσα χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια και ανισοτροπία (Ensminger & Leonard, 2012).

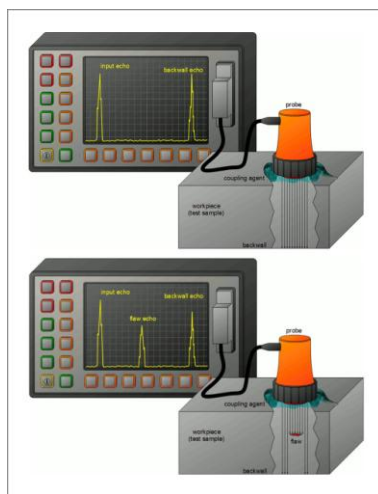
Η αρχή λειτουργίας της υπερηχοσκόπησης βασίζεται στο γεγονός ότι τα ηχητικά κύματα, μεταξύ των οποίων και οι υπέρηχοι, διαδίδονται σε ρευστό ή στερεό μέσο ως μια ακολουθία από μηχανικές δονήσεις, οι οποίες παράγουν στο υλικό μικρομετατοπίσεις των μορίων του στην ελαστική περιοχή. Η ταχύτητα των τασικών αυτών κυμάτων στο εσωτερικό του υλικού εξαρτάται από την πυκνότητα και από τις ελαστικές ιδιότητές του (ελαστικές σταθερές) (Ματίκας & Αγγέλης, 2015). Τα ηχητικά κύματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις περιοχές ανάλογα με τη συχνότητά τους: την «υποηχητική» περιοχή για εύρος συχνοτήτων μικρότερο των 16 Hz, την «ακουστική» περιοχή για συχνότητες μεταξύ 16 Hz και 20 kHz, οι οποίες είναι αντιληπτές από το ανθρώπινο αυτί, και την «υπερηχητική» περιοχή για συχνότητες μεγαλύτερες των 20 kHz (**Εικόνα 42**) (Κουή *et al.*, 2015).



Εικόνα 42. Το φάσμα του ήχου. (Πηγή: Ματίκας *et al.*, 2015)

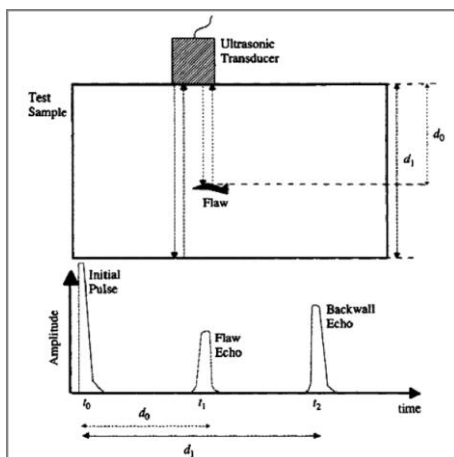
Για τον έλεγχο με υπερήχους, χρησιμοποιείται ένας μορφοτροπέας (ultrasound transducer) για τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε δέσμη υπερηχητικών κυμάτων και το αντίστροφο. Ένας τέτοιος αισθητήρας υπερήχων είναι μια συσκευή ικανή να παράγει και να λαμβάνει τις υπερηχητικές δονήσεις και αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, συνήθως κρύσταλλο. Η λειτουργία του μορφοτροπέα ως πομπού βασίζεται στην εφαρμογή στον κρύσταλλο μιας υψηλής τάσης και ηλεκτρικής εκκένωσης μικρής διάρκειας, προκαλώντας ραγδαία αλλαγή του σχήματός του, με αποτέλεσμα να εκπέμπει έναν ακουστικό παλμό. Όταν ο μορφοτροπέας τοποθετηθεί στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού, ο ακουστικός αυτός παλμός διαδίδεται στο εσωτερικό του υλικού, όπου, εάν το υπερηχητικό κύμα συναντήσει κάποια ανομοιογένεια, προκύπτουν κύματα ανάκλασης και μετάδοσης, τα οποία ανιχνεύονται από τον αισθητήρα ως δέκτη, παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα που ενισχύεται και καταγράφεται ως ηλεκτρικό σήμα, με τη μορφή παλμογραφήματος, για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Ο ανακλώμενος αυτός υπερηχητικός παλμός καλείται ηχώ, στην οποία και αποδίδεται η ονομασία της αντίστοιχης μεθόδου της παλμοηχούς. (Μογορούλι & Λαβρούλιος, 2015; Κουή *et al.*, 2015; Ματίκας & Αγγέλης, 2015).

Στην περίπτωση ύπαρξης ατέλειας στο υλικό, εμφανίζονται στην οθόνη καταγραφής (στο παλμογράφημα) τρεις παλμοί με διαφορετικό εύρος, εκ των οποίων ο πρώτος είναι ο αρχικός παλμός, ενώ ο δεύτερος και ο τρίτος είναι η πρώτη και η δεύτερη ηχώ. Πιο συγκεκριμένα, ο δεύτερος παλμός ονομάζεται ενδιάμεση ηχώ και οφείλεται στη μερική ανάκλαση του ηχητικού παλμού στην ατέλεια του δοκιμίου, ενώ ο τρίτος προκαλείται από την ανάκλαση του ηχητικού παλμού στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου (**Εικόνα 43**) (Πινέλη, 2003).



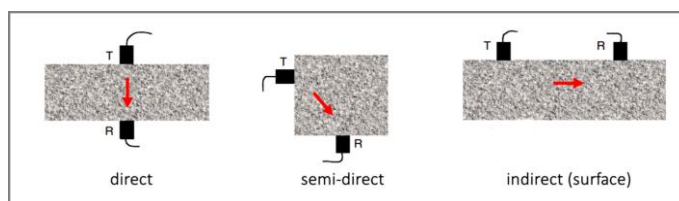
Εικόνα 43. Διάταξη υπερηχοσκόπησης. Καταγραφή σήματος σε παλμογράφο. (Πηγή: <https://www.tec-science.com/>)

Η θέση, αλλά και η γεωμετρία της ατέλειας/ανομοιογένειας στο υλικό υπολογίζεται με μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται ο υπερηχητικός παλμός να διαδοθεί στο σώμα του υλικού, να ανακλαστεί στην ανομοιογένεια και να επιστρέψει στον δέκτη, όπου και ανιχνεύεται (**Εικόνα 44**) (Mororoulou & Labropoulos, 2015).



Εικόνα 44. Συσχέτιση χρόνου παλμού – θέσης ατέλειας στο παλμογράφημα. (Πηγή: <https://www.sciencedirect.com>)

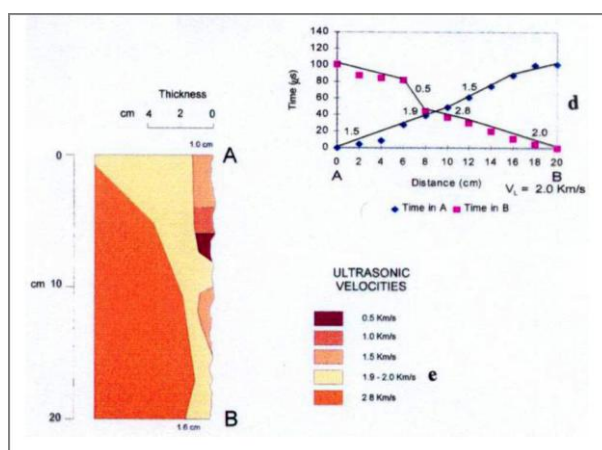
Όταν ο δέκτης της ηχούς είναι ξεχωριστός κρύσταλλος, τότε έχουμε διπλό κρύσταλλο ή μορφοτροπέα TR (Transmitter-Receiver), διαφορετικές δηλαδή κεφαλές αισθητήρων, μία για την παραγωγή των υπερηχητικών παλμών ενέργειας που διαδίδονται στο υλικό και μία για την καταγραφή των λαμβανόμενων σημάτων. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μέθοδος διέλευσης, με τρεις βασικές πιθανές διατάξεις εφαρμογής, την άμεση, την ημι-άμεση και την έμμεση (**Εικόνα 45**).



Εικόνα 45. Διατάξεις εφαρμογής υπερηχοσκοπησης διέλευσης. (Πηγή: Κούη *et al.*, 2015)

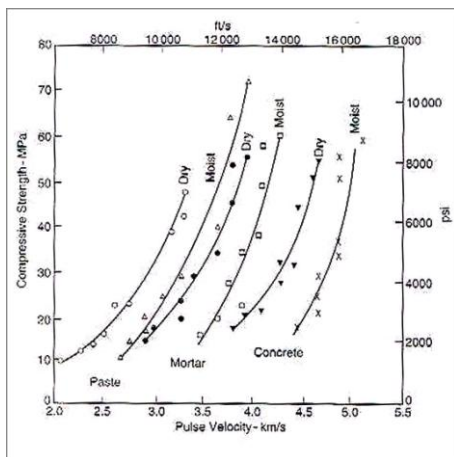
Η άμεση διάταξη δίνει τα πιο ακριβή αποτελέσματα, καθώς με την τοποθέτηση των αισθητήρων αντιδιαμετρικά στις δύο πλευρές του υπό εξέταση υλικού, επιτυγχάνεται η μεταφορά της μέγιστης ενέργειας από τον πομπό στον δέκτη (Κούη *et al.*, 2015). Η μέθοδος της διέλευσης, συχνά συμπληρώνει τη μέθοδο της παλμοχούς, κυρίως όταν πρόκειται για

την εκτίμηση του βάθους φθοράς του υλικού. Ειδικότερα, με μετατόπιση του δέκτη σε σχέση με τον πομπό, αποτιμάται το βάθος της διαβρωμένης ζώνης, καθώς ο όγκος του υλικού που έχει υποστεί διάβρωση (π.χ. αποσάθρωση υλικού ή πλήρωση των πόρων από διαλυτά άλατα) παρουσιάζει διαφορετική ταχύτητα διάδοσης υπερήχων σε σχέση με το υγιές υλικό. Αντίστοιχα, εκτιμάται και το βάθος διεύθυνσης υλικών στερέωσης ή επιφανειακής προστασίας λίθων, για περιπτώσεις προγενέστερων επεμβάσεων συντήρησης (**Εικόνα 46**) (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).



Εικόνα 46. Υπολογισμός βάθους φθοράς με υπερηχοσκόπηση διέλευσης. (Πηγή: Μοροπούλου, 2005)

Η χρήση της υπερηχοσκόπησης έχει τυποποιηθεί για τα σύγχρονα δομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα και αποτελεί πρότυπη μέθοδο εκτίμησης των ιδιοτήτων τους, καθώς η ταχύτητα των υπερήχων σχετίζεται με τις ελαστικές ιδιότητες των υλικών. Έτσι, εκτός από την ανίχνευση επιφανειακών και εσωτερικών ατελειών, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν και ιδιότητες, όπως το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus), ο λόγος Poisson, το μέτρο διάτμησης, η σκληρότητα, η αντοχή σε θλίψη (**Εικόνα 47**) κ.ά. (Christaras, 1996). Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων προσφέρεται με την υπερηχοσκόπηση και για τα παραδοσιακά υλικά των ιστορικών κτηρίων (**Εικόνα 48**), όπως λίθοι και πλίνθοι, μέσω σύγκρισης των πειραματικών τιμών ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων με πρότυπα διαγράμματα ταχύτητας, από μετρήσεις σε υλικά ίδιου τύπου (Μοροπούλου *et al.*, 2013).



Εικόνα 47. Διάγραμμα Συσχέτισης Ταχύτητας Υπερήχων-Ολιπτικής Αντοχής για προϊόντα τσιμέντου. (Πηγή: Sturru et al., 1984)

Η Μη Καταστρεπτική μέθοδος ελέγχου της υπερηχοσκόπησης παρουσιάζει πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους ελέγχου, ακόμη και Μη Καταστρεπτικές, όπως η απλότητα στη χρήση, ο χαμηλός σχετικά κόστος και βάρους φορητός εξοπλισμός, η μη απαίτηση αναλωσίμων, η μεγάλη διεισδυτική ικανότητα και ευαισθησία, που επιτρέπει την ανίχνευση ακόμη και πολύ μικρών ατελειών σε μεγάλο βάθος, η ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης και της γεωμετρίας των ατελειών/ανομοιογενειών, η ανάγκη πρόσβασης σε μία μόνο επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού, η αμεσότητα των αποτελεσμάτων μέσω αυτοματοποιημένης απεικόνισής τους και η δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας τους και κυρίως η ασφάλεια για την υγεία των χειριστών (Ματίκας & Αγγέλης, 2015; Πινέλη, 2003).



Εικόνα 48. Υπερηχοσκόπηση στη Ροτόντα Θεσσαλονίκης. (Πηγή: Penelis, 1982)

Σε ό,τι αφορά τους περιορισμούς της μεθόδου, αναφέρονται η ανάγκη ειδικών γνώσεων για την ερμηνεία και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, η δυσκολία εξέτασης αντικειμένων με τραχεία επιφάνεια, καθώς και η απαίτηση προτύπων αναφοράς για τον χαρακτηρισμό των ατελειών (Ματίκας & Αγγέλης, 2015).

2.4.2.4 Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)

Η τεχνική του γεωραντάρ, που είναι γνωστή και ως μέθοδος Ραντάρ Εδαφικής Εισχώρησης (Ground Penetrating Radar – GPR) αποτελεί μία σύγχρονη ακουστική τεχνική στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς, που έχει υιοθετηθεί από τον χώρο των γεωφυσικών διασκοπήσεων, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεγάλο αριθμό επιτόπου εφαρμογών στο πεδίο. Είναι μια καθιερωμένη Μη Καταστρεπτική μέθοδος, που εκμεταλλεύεται τον κυματικό χαρακτήρα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και βασίζεται στη διάδοση και ανάλυση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για την απεικόνιση της εξεταζόμενης επιφάνειας (Menéndez, 2016).

Αντικείμενο του ελέγχου με γεωραντάρ είναι ο υποεπιφανειακός εντοπισμός διεπιφανειών μεταξύ υλικών με διαφορετικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες. Η δυνατότητα διάκρισης μεταξύ υλικών και η χαρτογράφηση διεπιφανειών εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διαφορά ηλεκτρικής αγωγιμότητας (electrical conductivity) και διαπερατότητας (dielectric permittivity) μεταξύ των υλικών που αποτελούν την εξεταζόμενη δομή (Κουή *et al.*, 2015).

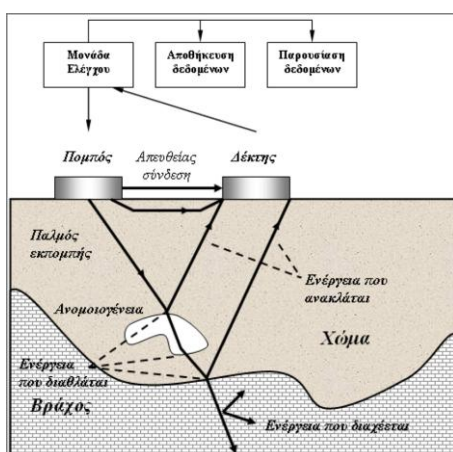
Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου του γεωραντάρ βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία και στις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη. Το γεωραντάρ χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς υψηλής συχνότητας (10–10.000 MHz) και μικρής διάρκειας (μερικών nsec), που διοχετεύονται στο έδαφος, το οποίο επηρεάζεται τόσο από τα υλικά που το συνιστούν, όσο και από τις ιδιότητες των περιβαλλόντων υλικών. (Κουή *et al.*, 2015).

Ένα τυπικό σύστημα γεωραντάρ αποτελείται από μία κεραία εκπομπής (transmitting antenna), η οποία μετασχηματίζει τα ηλεκτρικής τάσης σήματα σε εξωτερικά διαδιδόμενη ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ραδιοκύματα), μία κεραία δέκτη (receiving antenna), που ανιχνεύει τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά σήματα και τα μετασχηματίζει σε ηλεκτρική τάση που μπορεί να καταγραφεί και να αποτελέσει αντικείμενο επεξεργασίας και μία μονάδα

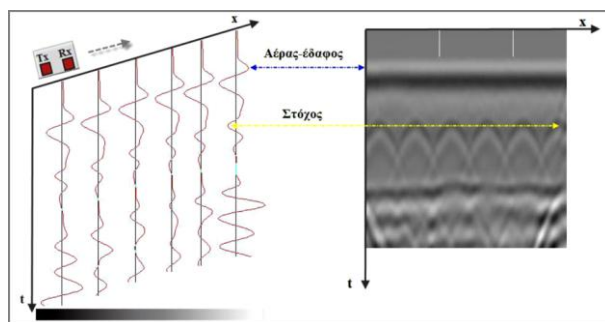
ελέγχου, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων με δυνατότητες γραφικής απεικόνισης (Κουή *et al.*, 2015).

Η κεραία–πομπός παράγει παλμικά ραδιοκύματα, τα οποία διαδίδονται με ταχύτητα $\sim 0,3\text{m/nsec}$ στον αέρα και σαφώς μικρότερη στο υπέδαφος, εξαρτώμενη από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού. Το ηλεκτρομαγνητικό σήμα διαδίδεται στο υπέδαφος και όταν συναντήσει μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ υλικών με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, τότε ένα μέρος της ενέργειάς του ανακλάται πίσω προς την επιφάνεια του εδάφους, ένα μέρος διαθλάται και η υπολειπόμενη ενέργεια του παλμού διέρχεται από τη διεπιφάνεια προς βαθύτερα στρώματα, στα οποία η διαδικασία αυτή δύναται να επαναληφθεί. Το μέρος του κύματος που ανακλάται από κάποια διεπιφάνεια επιστρέφει στην επιφάνεια του εδάφους όπου ανιχνεύεται και καταγράφεται στην κεραία–δέκτη (Μοροπούλου & Labropoulos, 2015; Κουή *et al.*, 2015) (Εικόνα 49).

Οι επισκοπήσεις με ραντάρ συνήθως διεξάγονται κατά μήκος γραμμικών προφίλ στην επιφάνεια του εδάφους ή του υλικού που εξετάζεται και τα ανακτώμενα δεδομένα μπορούν να απεικονιστούν ως εικόνα δύο διαστάσεων, μέσω της χρήσης μίας προκαθορισμένης χρωματικής κλίμακας (συνήθως διαβαθμίσεων του γκριζου). Η εικόνα αυτή, που ονομάζεται δισδιάστατο (2D) προφίλ σάρωσης ή αλλιώς ραδιόγραμμα, αναπαριστά μία κάθετη διατομή στο έδαφος ή την επιφάνεια που ελέγχεται, με τον οριζόντιο άξονα να αντιστοιχεί στη θέση της κεραίας κατά μήκος της σάρωσης και τον κατακόρυφο άξονα στον χρόνο της διπλής διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, που αντιστοιχεί στο βάθος (Εικόνα 50).



Εικόνα 49. Διάταξη γεωραντάρ και αρχή λειτουργίας του. (Πηγή: Μοροπούλου *et al.*, 2005)



Εικόνα 50. Δισδιάστατη τομή γεωραντάρ (αριστερά) και απεικόνιση της τομής σε κλίμακα διαβαθμίσεων του γκριζου (ραδιογράμμα) (δεξιά). (Πηγή: Κουή *et al.*, 2015)

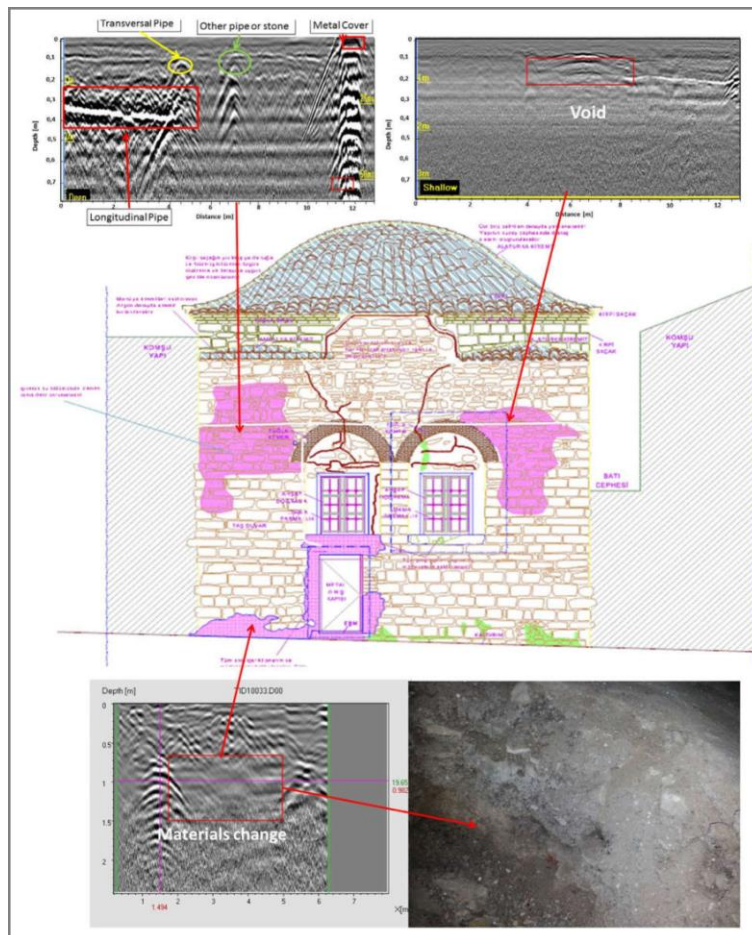
Για την ερμηνεία του ραδιογράμματος απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς συχνά η εικόνα ενός προφίλ σάρωσης προσεγγίζεται λανθασμένα, ως απεικόνιση του πραγματικού εσωτερικού του υλικού που εξετάζεται, ενώ αναπαριστά τις ανακλάσεις των διεπιφανειών μεταξύ υλικών με διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές (Μογορούλου & Λαβρούλους, 2015).

Η μέθοδος του γεωραντάρ βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς των γεωφυσικών επιστημών, όπως σε γεωλογικές και περιβαλλοντικές μελέτες, για τη χαρτογράφηση γεωλογικών δομών, κοιτασμάτων, την ανίχνευση διαρροών αερίων και ρυπασμένων υπεδαφικών ζωνών κ.ά. Ιδιαίτερης σπουδαιότητας είναι η εκτεταμένη εφαρμογή στον έλεγχο της κατάστασης και αποτίμησης της δομικής αριότητας διαφόρων κατασκευών όπως οδοστρωμάτων, επενδύσεων σηράγγων, τοιχοποιιών, γεφυρών κλπ., κατά τον οποίο μπορεί να παρασχεθούν πληροφορίες σχετικά με τη θέση και τη διάταξη σπλισμών σε σκυρόδεμα, αστοχιών και ρηγματώσεων, το πάχος επένδυσης σηράγγων, την εσωτερική δομή τοιχοποιιών κ.ά. (Κουή *et al.*, 2015).

Η ικανότητα της μεθόδου του γεωραντάρ να οπτικοποιεί το εσωτερικό μιας κατασκευής, επιτρέπει τη χρήση της μεθόδου και στην αποτίμηση της κατάστασης ιστορικών κατασκευών (Εικόνα 51). Η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιείται στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς για την παρουσίαση της εσωτερικής δομής τοιχοποιιών και άλλων δομικών στοιχείων μιας ιστορικής κατασκευής, όπως πολύ συχνά των δαπέδων των μνημείων, με αποκάλυψη της υποεπιφανειακής και εσωτερικής μορφολογίας και με παράλληλη ταυτοποίηση της ύπαρξης και της θέσης κενών, ασυνεχειών, ρωγμών και άλλων προϊόντων διάβρωσης, στο πλαίσιο μάλιστα της εκτίμησης –μέσω αναλυτικών τεχνικών– της πραγματικής φέρουσας ικανότητας των εξεταζόμενων δομικών στοιχείων (Arias *et al.*, 2007; Binda *et al.*, 1998). Επίσης, μέσω της μεθόδου του γεωραντάρ μπορεί να γίνει μια πρώτη αποτίμηση της επιτελεστικότητας των υλικών των επεμβάσεων συντήρησης, δείχνοντας την

πραγματική έκταση της εφαρμογής (π.χ. το βάθος διείσδυσης των ενεμάτων) (Binda *et al.*, 2005).

Είναι σημαντικό, για την εφαρμογή της μεθόδου του γεωραντάρ στην προστασία των μνημείων, να υπάρχει μια βασική γνώση των δομικών χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης δομής (δομικές τεχνικές, αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες και φάσεις κλπ), καθώς και των υλικών (αρχικών και υλικών επεμβάσεων), για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων από τα παρατηρούμενα στοιχεία του ραδιογράμματος (Mororouliou & Labropoulos, 2015). Με βάση την ενδελεχή μελέτη της κατασκευής, από ιστορική και αρχιτεκτονική σκοπιά επιλέγονται εκ των προτέρων οι θέσει και οι διαδρομές που θα ακολουθήσει το ραντάρ, λαμβάνοντας υπόψιν περιορισμούς, όπως το προσβάσιμο, η γεωμετρία της επιφάνειας (τοιχοποιίας ή δαπέδου), οι θέσεις στις οποίες η τοιχοποιία είναι εμφανής, χωρίς επίχρισμα ή διάκοσμο, ώστε να επιτρέπεται η κίνηση της κεραίας σε επίπεδη επιφάνεια κ.ά. (Παλιεράκη *et al.*, 2015).

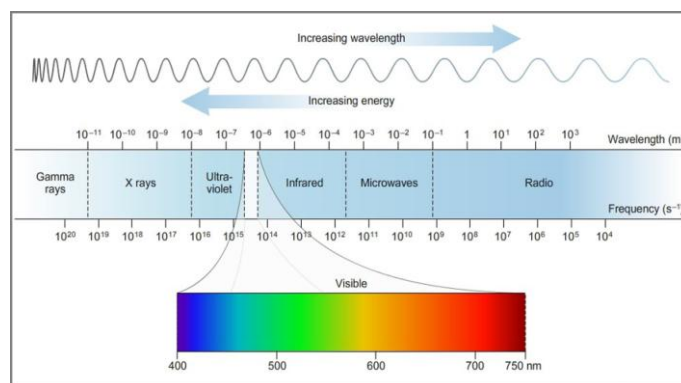


Εικόνα 51. Μελέτη με GPR τοιχοποιίας μνημείου Urla, Σμύρνη. (Πηγή: Kilic, 2015)

2.4.2.5 Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (Digital Image Processing - DIP)

Η Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων (Digital Image Processing) αποτελεί μια κατηγορία επεξεργασίας ψηφιακού σήματος και είναι ήδη μια εδραιωμένη επιστημονική περιοχή. Με την έλευση μάλιστα, της ψηφιακής φωτογραφίας, η ψηφιακή εικόνα αποτελεί πλέον κτήμα του ευρέως κοινού (Τζιρίτας, 2016). Αντικείμενο της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνων είναι η ανάλυση μιας δισδιάστατης εικόνας οποιασδήποτε προέλευσης, μέσω της χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών, που αποσκοπεί στη λήψη είτε περισσότερης (ποσοτικά), είτε ποιοτικότερης πληροφορίας (Κατσιώτης, 2015).

Σήμερα, δεν υπάρχει σχεδόν κανένα πεδίο, τεχνικό ή επιστημονικό, που να μην υποβοηθάται, με κάποιον τρόπο, από την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας. Η έκταση που έχουν λάβει οι εφαρμογές της επεξεργασίας εικόνας είναι τεράστια, ιδιαίτερος αν λάβει κανείς υπόψιν την πληθώρα των πηγών προέλευσης των εικόνων (π.χ. ορατό φάσμα, ακτίνες X, ραδιοκύματα, ακουστικό και υπερηχητικό φάσμα κλπ). Η κύρια ενεργειακή πηγή προέλευσης των εικόνων που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (electromagnetic spectrum) (**Εικόνα 52**), με το τμήμα των ακτίνων X ($\lambda=10 \text{ pm}-10 \text{ nm}$) και την ορατή ζώνη του φάσματος ($\lambda=400-700 \text{ nm}$) να υπερτερούν έναντι όλων των υπολοίπων σε εύρος εφαρμογών (Gonzalez & Woods, 2008).

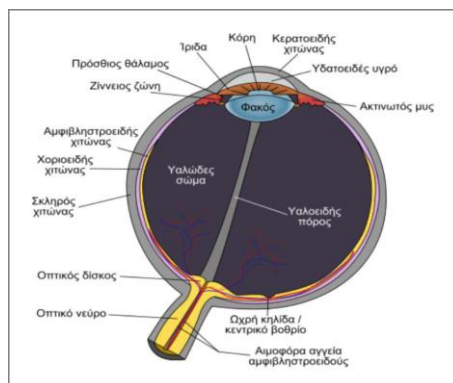


Εικόνα 52. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μεγέθυνση του ορατού τμήματος (400-700 nm). (Πηγή: www.splintlearning.com)

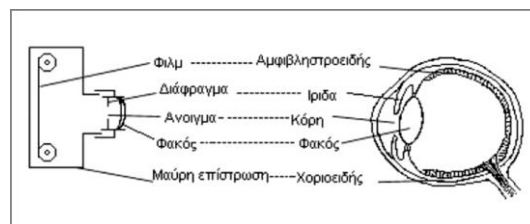
Το ορατό τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που αποτελεί ένα μικρό μόνο κομμάτι του φάσματος ($\lambda=400-700 \text{ nm}$) και στο οποίο ανήκει η πλειοψηφία των ψηφιακών εικόνων και των εφαρμογών επεξεργασίας τους, γίνεται αντιληπτό στον άνθρωπο ως φως, τόσο με την αίσθηση της έντασης του φωτός, όσο και με τη μορφή του χρώματος (απόχρωσης). Από την άποψη των φυσικών ιδιοτήτων του φωτός, μπορούμε να

διαχωρίσουμε: α) τη συχνότητά του σε Hz (ή το μήκος κύματος σε nm), β) την ακτινοβολία του (radiance) ως την ενέργεια που εκπέμπεται από τη φωτεινή πηγή σε Watts, γ) τη φωτεινότητα (luminance), δηλαδή την ενέργεια της ακτινοβολίας από τη θέση του παρατηρητή σε lumens (lm) και δ) τη λαμπρότητά του (brightness) ως εκτίμηση της φωτεινότητας. Το χρώμα, όμως, είναι υποκειμενικό στον τρόπο που προσλαμβάνεται και ερμηνεύεται από τον άνθρωπο, γι' αυτό και ένα μοντέλο με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του ορατού φάσματος δεν θα εξυπηρετούσε τις ανάγκες της ψηφιακής επεξεργασίας. (Παπαρρηγόπουλος, 2014).

Είναι σημαντικό, λοιπόν, για κάποιον που χειρίζεται μεθόδους επεξεργασίας εικόνας, να υπάρχει μια στοιχειώδης γνώση επάνω στις βασικές αρχές και τα χαρακτηριστικά του φωτός, αλλά και της ανθρώπινη οπτικής, ώστε να κατανοούνται οι μηχανισμοί που σχετίζονται με τον σχηματισμό και την αντίληψη των εικόνων. Πολλοί, άλλωστε, από τους φυσικούς παράγοντες της ανθρώπινης όρασης, χρησιμοποιούνται και κατά την εργασία με ψηφιακές εικόνες (Gonzalez & Woods, 2008).



Εικόνα 53. Τομή του ανθρώπινου οφθαλμού. (Πηγή: Γαλιατσάτος, 2015)

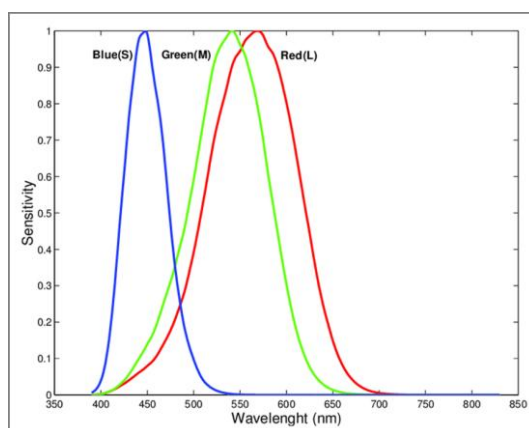


Εικόνα 54. Αντιστοίχιση μερών ανθρώπινου οφθαλμού και φωτογραφικής μηχανής. (Πηγή: Παπαρρηγόπουλος, 2014)

Ο ανθρώπινος οφθαλμός (Εικόνα 53) έχει σχήμα περίπου σφαιρικό, με μέση διάμετρο 20 mm και το τοίχωμά του αποτελείται από τρεις ομόκεντρους χιτώνες, τον κερατοειδή, τον χοριοειδή και τον αμφιβληστροειδή (Gonzalez & Woods, 2008). Για να παράγει τις οπτικές

εικόνας, ο οφθαλμός έχει πολλά από τα χαρακτηριστικά μίας φωτογραφικής μηχανής (**Εικόνα 54**), ξεκινώντας με τη χρήση ενός κρυσταλλοειδούς φακού, μέσω του οποίου συλλέγει το φως. Η ποσότητα του φωτός ελέγχεται από την κόρη, που είναι ανάλογη του διαφράγματος ενός φωτογραφικού φακού, ενώ την οπτική πληροφορία υποδέχεται, στο οπίσθιο μέρος του ματιού, ο αμφιβληστροειδής χιτώνας, στον οποίο και ξεκινά η οπτική επεξεργασία της εικόνας, με το σχηματιζόμενο οπτικό είδωλο (Παπαρρηγόπουλος, 2014).

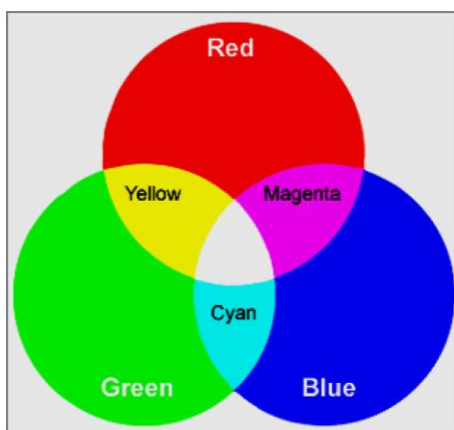
Ο αμφιβληστροειδής, που παίζει τον ρόλο του φωτοευαίσθητου φωτογραφικού υλικού (φιλμ ή ψηφιακού αισθητήρα), συνδέεται με το οπτικό νεύρο και μεταφέρει τον οπτικό ερεθισμό στον εγκέφαλο. Αποτελείται από τρεις κατηγορίες κυττάρων, εκ των οποίων οι φωτοϋποδοχείς είναι τα ραβδία και τα κωνία. Τα ραβδία είναι τα κυρίως υπεύθυνα για την σκοτοπική όραση κύτταρα, δηλαδή την όραση σε χαμηλό φωτισμό. Αντίθετα, κατά τη φωτοπική όραση, δηλαδή σε συνθήκες άπλετου φωτισμού (φως ημέρας ή έντονος τεχνητός φωτισμός), τον κύριο ρόλο παίζουν τα κωνία. Τα κωνία χωρίζονται σε τρεις τύπους με διαφορετικές φωτοχρωστικές, καθένας από τους οποίους είναι περισσότερο ευαίσθητος σε κάποιο συγκεκριμένο μήκος κύματος στο ορατό φάσμα (**Εικόνα 55**). Ο ένας τύπος είναι ευαίσθητος στα βραχέα μήκη κύματος (S-κωνία, S=slow) που αντιστοιχούν στο μπλε, ο δεύτερος αντιδρά στα μεσαία μήκη κύματος (M-κωνία, M=medium) που αντιστοιχούν στο πράσινο και ο τρίτος στα μακρά μήκη κύματος (L-κωνία, L=long), τα οποία αντιστοιχούν στο κόκκινο φως. Έτσι, η όραση των χρωμάτων βασίζεται σε τρία συστατικά του αμφιβληστροειδούς, τα οποία είναι ευαίσθητα το καθένα σε κάποιο από τα βασικά χρώματα του φάσματος (κόκκινο – RED, πράσινο – GREEN, μπλε – BLUE) (Καλδούδη & Ελευθεριάδης, 2015; Κούρτελη, 2001; Παπαρρηγόπουλος, 2014).



Εικόνα 55. Διάγραμμα ευαισθησίας των τριών τύπων κωνίων στα μήκη κύματος του ορατού φάσματος. (Πηγή: Stockman *et al.*, 1993)

Στη θεωρία αυτήν της τριχρωματικής όρασης, η οποία εξηγεί από άποψη φυσιολογίας την ικανότητα του ανθρώπου να διακρίνει τα χρώματα, βασίζονται τα σύγχρονα συστήματα λήψης και επεξεργασίας εικόνας, τα οποία χρησιμοποιούν για την αναπαραγωγή έγχρωμων εικόνων το χρωματικό μοντέλο RGB (Red-Green-Blue).

Τα διάφορα χρωματικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να γίνει δυνατή η περιγραφή των χρωμάτων με μαθηματική μορφή, κατάλληλη για την επεξεργασία τους από ψηφιακά μέσα. Η αρχή πίσω από κάθε χρωματικό μοντέλο είναι η ανάλυση του κάθε χρώματος σε βασικά και η ποσοτικοποίηση της συμμετοχής κάθε βασικού χρώματος στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Το μοντέλο RGB ακολουθεί την προσθετική μίξη των χρωμάτων (**Εικόνα 56**), σύμφωνα με την οποία, είναι δυνατόν να αναπαρασταθούν όλες οι αποχρώσεις του ορατού φάσματος, με συνδυασμό των τριών βασικών χρωμάτων κόκκινο-πράσινο-μπλε (RGB), σε διαφορετικές κάθε φορά αναλογίες. (Ibraheem *et al.*, 2012).



Εικόνα 56. Αριστερά: Προσθετική μέθοδος μίξης χρωμάτων (RGB). (Πηγή: Ibraheem *et al.*, 2012)

Στον αναλογικό κόσμο, οι πραγματικές εικόνες για την ανθρώπινη οπτική αντίληψη εμφανίζονται έγχρωμες. Η μετάβαση μιας εικόνας από τον αναλογικό στον ψηφιακό κόσμο γίνεται με τη μορφή διακεκριμένου σήματος, σε ψηφιακούς πίνακες, όπου το χαρακτηριστικό του χρώματος αποδίδεται με αριθμητικές τιμές σε καθένα από το πεπερασμένο πλήθος στοιχείων από τα οποία αποτελείται η εικόνα, των εικονοστοιχείων (picture elements – pixels). Η χρωματική πληροφορία που μεταφέρει κάθε εικονοστοιχείο εξαρτάται από το πλήθος των bits (της στοιχειώδους μονάδας πληροφορίας) που το αποτελούν και είναι αυτό που τελικά καθορίζει το πλήθος των χρωμάτων που μπορούν να αποδοθούν σε κάθε ψηφιακή εικόνα. Το πλήθος των bits που απαρτίζουν ένα εικονοστοιχείο είναι γνωστό ως βάθος χρώματος (color depth) (Russ, 2011; Μουστάκας *et al.*, 2015). Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος

χρώματος, τόσο περισσότερα χρώματα αποδίδονται σε μια ψηφιακή εικόνα (Πίνακας 15). Έτσι, μια ψηφιακή εικόνα μπορεί να είναι, είτε δυαδική (binary image), είτε μονοχρωματική αποχρώσεων του γκριζου (graylevel ή grayscale image), είτε έγχρωμη (color image) (Μουστάκας *et al.*, 2015; Σκόδρας & Αναστασόπουλος, 2003).

Η δυαδική είναι η απλούστερη μορφή μιας ψηφιακής εικόνας, που διαθέτει μόνο δύο στάθμες φωτεινότητας, συνήθως λευκό και μαύρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές σημαντικές εφαρμογές της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας, όπως είναι η οπτική αναγνώριση χαρακτήρων, η αναγνώριση υπογραφής και αποτυπωμάτων, γίνονται με τη χρήση δυαδικών εικόνων (Σκόδρας & Αναστασόπουλος, 2003).

Πίνακας 15. Συσχέτιση βάθους χρώματος και αποτελέσματος οπτικής εικόνας. (Πηγή: Μουστάκας *et al.*, 2015)

Βάθος χρώματος	Αριθμός χρωμάτων	Αποτέλεσμα
1 bit	$2^1 = 2$	Ασπρόμαυρη εικόνα (χωρίς διαβαθμίσεις γκριζου).
8 bit	$2^8 = 256$	Αποχρώσεις του γκριζου.
16 bit	$2^{16} = 65.536$	Το βάθος χρώματος αυτό αναφέρεται και ως High Color.
24 bit	$2^{24} = 16.777.216$	Το βάθος χρώματος αυτό αναφέρεται και ως True Color.
32 bit		Το βάθος χρώματος αυτό αναφέρεται και ως Deep Color. Αποτελεί αντίγραφο του 24 bit με τη διαφορά ότι υπάρχουν 8 επιπρόσθετα bit ανά εικονοστοιχείο (μη χρησιμοποιούμενα).
48 bit	$2^{48} = 281474976710656$	Αποτελεί βάθος χρώματος τύπου Deep Color αλλά με δυνατότητες που υπερβαίνουν τη διακριτική ικανότητα του ματιού. Για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιείται από τους σαρωτές οι οποίοι αποδίδουν 16 bits ανά βασικό χρώμα.

Μια grayscale εικόνα μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνεχής δισδιάστατη συνάρτηση $f(x,y)$, με τα x,y να αποτελούν χωρικές συντεταγμένες. Κάθε ζεύγος των x,y δίνει μια συγκεκριμένη τιμή του f , το σύνολο των σημείων της εκφράζει την ένταση ή το επίπεδο γκριζου της εικόνας σε κάθε θέση (x,y) , δηλαδή σε κάθε εικονοστοιχείο (Gonzalez & Woods, 2008; Σκόδρας & Αναστασόπουλος, 2003). Συνήθως, οι grayscale εικόνες έχουν βάθος χρώματος 8 bit, αποδίδουν δηλαδή $2^8=256$ τονικές διαβαθμίσεις του γκριζου σε κάθε εικονοστοιχείο, έτσι ώστε καθένα από αυτά μπορεί να λάβει μια τιμή ανάμεσα στο 0 (μαύρο) και στο 255 (άσπρο) (Μοροπούλου *et al.*, 2005).

Η χρήση του χρώματος ξεκινάει από μεγαλύτερα βάθη χρώματος όπου το κάθε εικονοστοιχείο αναπαρίσταται από ανάλογες διαβαθμίσεις των τριών χρωμάτων σύμφωνα με

το χρησιμοποιούμενο μοντέλο. Μια έγχρωμη ψηφιακή εικόνα δηλαδή, αποτελείται από τρεις gray-level εικόνες, μία για κάθε κανάλι από τα τρία των βασικών χρωμάτων κόκκινο-πράσινο-μπλε, για το χρωματικό μοντέλο RGB. Δηλαδή, σε κάθε θέση (εικονοστοιχείο) (n_1, n_2) , η f έχει τρεις συνιστώσες, που αντιστοιχούν στις τρεις γκρίζες τονικότητες των αντίστοιχων εικονοστοιχείων των τριών γκρι εικόνων των βασικών χρωμάτων. Η υπέρθεση των τριών gray-level εικόνων δίνει την έγχρωμη εικόνα (**Εικόνα 57**). Το συνηθέστερο βάθος χρώματος για μια RGB εικόνα είναι 24bit, που αποδίδει περισσότερα από 16 εκατομμύρια αποχρώσεις (2^8 για κάθε κανάλι, άρα $2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 16.777.216$). Εικόνες με βάθος χρώματος μεγαλύτερο από 24 bit δεν προσφέρουν ουσιαστικά κάτι περισσότερο, διότι η διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου οπτικού συστήματος είναι της στάθμης των 24 bit (True Color) (Μουστάκας *et al.*, 2015).



Εικόνα 57. Έγχρωμη εικόνα και τα gray-level κανάλια της σε RGB. (Πηγή: Gonzalez & Woods, 2008)

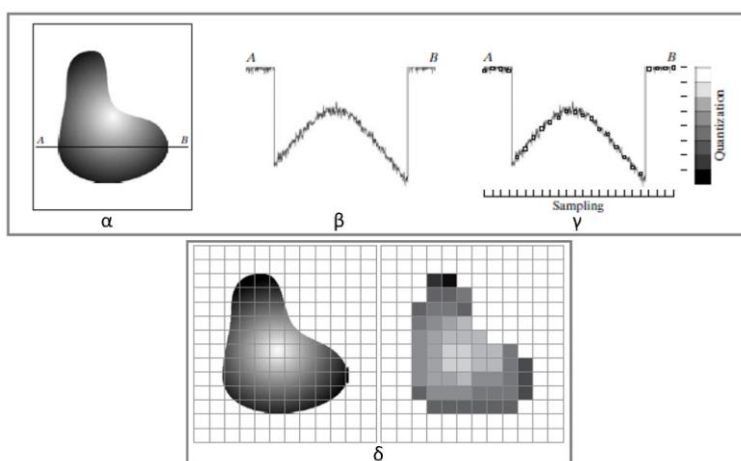
Μια ψηφιακή εικόνα μπορεί να ληφθεί από ένα σύστημα απόκτησης ψηφιακής εικόνας (image acquisition system), είτε μέσω αναλογικών εικόνων με ψηφιοποίηση, είτε απευθείας από ένα μέσο ψηφιακής λήψης εικόνων. Στην πρώτη περίπτωση, η αναλογική εικόνα, προκειμένου να υποστεί ψηφιακή επεξεργασία, πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή, με τη βοήθεια κάποιου «μετατροπέα αναλογικού-σε-ψηφιακό» (analog-to-digital converter, ADC), όπως ονομάζεται οποιοδήποτε κύκλωμα που μετατρέπει ένα αναλογικό σήμα, συμπεριλαμβανομένων και των οπτικών σημάτων, σε ψηφιακό. Για την περίπτωση της μετατροπής αναλογικών εικόνων σε ψηφιακές, ο συνηθέστερος μετατροπέας είναι ένας σαρωτής εικόνας (scanner) (Σκόδρας & Αναστασόπουλος, 2003).

Η διαδικασία της ψηφιοποίησης μιας αναλογικής εικόνας (**Εικόνα 58**), όπως ακριβώς και οποιουδήποτε αναλογικού σήματος, ακολουθεί τρία στάδια:

1. Τη δειγματοληψία (sampling), που είναι η διαδικασία λήψης του αναλογικού σήματος σε διακριτές στιγμές του χρόνου.
2. Την κβαντοποίηση ή κβάντιση (quantization), που είναι η διαδικασία μετατροπής του σήματος διακριτού χρόνου σε ψηφιακό σήμα, εκφράζοντας την τιμή κάθε δείγματος ως έναν αριθμό με πεπερασμένο πλήθος ψηφίων.

3. Την κωδικοποίηση (coding), που είναι η διαδικασία εκχώρησης ενός μοναδικού δυαδικού αριθμού σε κάθε επίπεδο κβάντισης (Gonzalez & Woods, 2008; Σκόδρας & Αναστασόπουλος, 2003).

Στην περίπτωση των οπτικών σημάτων, δηλαδή μια αναλογικής εικόνας, η παραπάνω διαδικασία ξεκινά με τη συσκευή εισόδου (scanner), η οποία σαρώνει σταδιακά την εικόνα, λαμβάνοντας ισαπέχοντα δείγματα της συνάρτησης $f(x,y)$ στις διευθύνσεις x και y . Η πυκνότητα των δειγμάτων είναι τέτοια, ώστε να λαμβάνονται όσο το δυνατόν περισσότερες εναλλαγές της αμαύρωσης της εικόνας, δηλαδή των τιμών f . Σε κάθε δείγμα αποθηκεύεται η αντίστοιχη τιμή του χρώματος, εκφρασμένη σε τιμές 2^n τόνων του γκριζου (φωτεινότητας) για καθένα από τα τρία κανάλια χρώματος (RGB). Το σύνολο των κβαντισμένων και κωδικοποιημένων δειγμάτων αποτελεί τελικά το ψηφιακό «μωσαϊκό» της εικόνας (**Εικόνα 58δ**) (Κούρτελη, 2001; Σκόδρας & Αναστασόπουλος, 2003).



Εικόνα 58. Επάνω: Παράδειγμα διαδικασίας ψηφιοποίησης εικόνας. (α) Συνεχής φυσική εικόνα (β) Συνεχής γραμμή σάρωσης στην τομή AB (γ) Δειγματοληψία και κβάντιση στην τομή AB. Κάτω (δ): Φυσική εικόνα και τελική κβαντισμένη μορφή. (Πηγή: Gonzalez & Woods, 2008)

Τα συστήματα απευθείας λήψης ψηφιακής εικόνας έχουν ήδη αναπτυχθεί και η τεχνολογία τους συνεχίζει να βρίσκεται σε εξέλιξη. Έτσι οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, έχουν ενσωματωμένη μνήμη και δισκέτα για καταχώρηση της πληροφορίας. Το είδωλο της εικόνας δεν καταγράφεται πάνω σε φιλμ, αλλά σε μία μήτρα στοιχειωδών φωτο-ανιχνευτών (αισθητήρων), το σήμα των οποίων κβαντίζεται και καταχωρείται στη μνήμη της μηχανής. Οι εικόνες αυτές έχουν φθάσει σχεδόν την ποιότητα της κλασικής αναλογικής φωτογραφίας, αφού η ανάλυσή τους, το πλήθος δηλαδή των εικονοστοιχείων τους στις γραμμικές

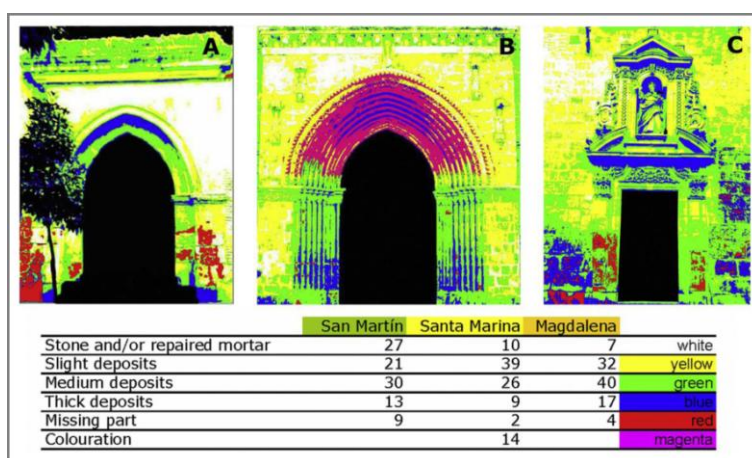
διαστάσεις του αισθητήρα, έχει αυξηθεί εξαιρετικά, με αποτέλεσμα να μειώνεται, κατά την κβάντιση, η απώλεια οπτικής πληροφορίας της πραγματικής εικόνας. Το κυριότερο πλεονέκτημα των ψηφιακών συστημάτων είναι ότι παρέχουν την πληροφορία σε ψηφιακή μορφή, που μπορεί εύκολα να αντιγραφεί, να διαμορφωθεί και κυρίως να παραμείνει αναλλοίωτη στον χρόνο (Σκόδρας & Αναστασόπουλος, 2003).

Η επεξεργασία των, με όποιον τρόπο, λαμβανόμενων ψηφιακών εικόνων (Digital Image Processing) περιλαμβάνει, στη γενικότερη περίπτωση, πολλά και διαφορετικά στάδια, ανάλογα με τη μορφή και την αρχική κατάσταση της ψηφιακής εικόνας, αλλά και το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα. Κυριότεροι στόχοι της είναι η βελτίωση ή η αποκατάστασή τους, η τμηματοποίηση για την ανίχνευση ακμών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών που αντιστοιχούν σε αντικείμενα, οι μετρήσεις φωτεινότητας, η συμπίεση, η επεξεργασία χρώματος κ.ά. (Τζιρίτας, 2016).

Αρχικά, γύρω στα μέσα της δεκαετίας του 1960, οι εφαρμογές της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας προέρχονταν από το πεδίο της Διαστημικής και στη συνέχεια, μετά το 1970, η ζήτηση των μεθόδων της στράφηκε στην ιατρική απεικόνιση. Έκτοτε, οι εφαρμογές βαίνουν αυξανόμενες, με πολύ πιο σύνθετα προβλήματα, αλλά και δυνατότητες. Στον τομέα των κατασκευών και του περιβάλλοντος, η Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων περιλαμβάνει εφαρμογές παρακολούθησης του γήινου περιβάλλοντος μέσω χαρτογράφησης, παρακολούθησης της εξέλιξης της χλωρίδας, των συνεπειών της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον, ή ακόμα και μετεωρολογίας (Τζιρίτας, 2016).

Σε ό,τι αφορά το πεδίο της πολιτιστικής κληρονομιάς, η Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας αποτελεί μια σύγχρονη μεθοδολογική προσέγγιση τεκμηρίωσης, προς την προστασία και τη συντήρηση των δομικών υλικών των κτηρίων και των μνημείων ειδικότερα, η οποία κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος μεταξύ των Μη Καταστρεπτικών τεχνικών. (Vázquez *et al.*, 2011; Zezza, 2010), αφού προσφέρει, σε συνδυασμό και με παραδοσιακές μεθόδους τεκμηρίωσης (τοπογραφική αποτύπωση, φωτογραμμετρία κλπ) μια χαρτογράφηση των τύπων, του βαθμού και της εξέλιξης της φθοράς των εκτεθειμένων επιφανειών των μνημείων (Κούρτελη, 2001). Επιτρέπει δηλαδή, τη διάγνωση και μελέτη χωρικά και χρονικά των μορφών διάβρωσης, καθώς και την παρατήρηση και αποτίμηση των επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης, μέσω της χρωματικής επεξεργασίας φυσικών φωτογραφιών από χαρακτηριστικές θέσεις του υπό εξέταση μνημείου (Moropoulou *et al.*, 2013; Vázquez *et al.*, 2011; Zezza, 2010).

Οι φυσικές εικόνες, εφόσον ψηφιοποιηθούν εάν πρόκειται για αναλογικές, είτε άμεσα από το σύστημα λήψης, εάν πρόκειται για ψηφιακές, εισάγονται σε κατάλληλο πρόγραμμα λογισμικού επεξεργασίας εικόνας, με τη χρήση του οποίου αποδίδονται στις φωτογραφίες αυτές ψευδή χρώματα (pseudocolors) (Εικόνα 59), δηλαδή χρώματα που δεν αντιστοιχούν στα αληθή (true colors) στην ανθρώπινη οπτική αντίληψη, για τα υλικά που εξετάζονται (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010), καθιστώντας έτσι ορατές, πληροφορίες που δεν είναι διαφορετικά αναγνώσιμες και δημιουργώντας ευανάγνωστους «χάρτες» φθοράς (Russ, 2011).



Εικόνα 59. Επεξεργασμένες εικόνες με ψευδοχρώματα που αντιστοιχίζονται σε μορφές φθοράς και τα ποσοστά αυτών, από προσόψεις μνημείων της Ισπανίας. (Πηγή: Ortiz *et al.*, 2017)

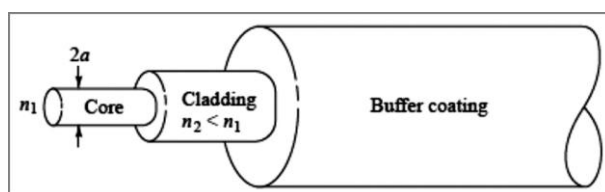
2.4.2.6 Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (Fiber Optics Microscopy – FOM)

Η Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (Fiber Optics Microscopy – FOM) αποτελεί μια καινοτόμα Μη Καταστρεπτική μέθοδο ελέγχου επιφανειών και υλικών των κατασκευών. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την κλασική οπτική μικροσκοπία, καθώς τα μικροσκόπια αυτά είναι φορητά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτόπου, προκειμένου να ληφθούν μεγεθυμένες εικόνες του ορατού φάσματος (Μοροπούλου *et al.*, 2013).

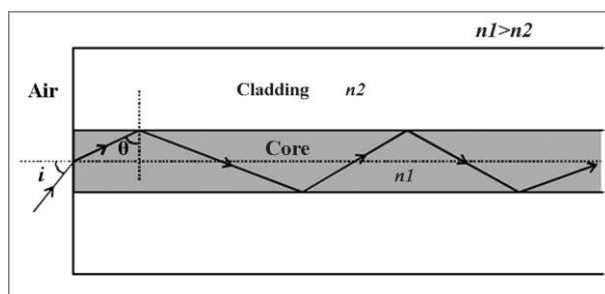
Οι Μη Καταστρεπτικές τεχνολογίες διάγνωσης που βασίζονται στις οπτικές ίνες έχουν προάγει το πεδίο της παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας (instrumentation monitoring system) τόσο των σύγχρονων, όσο και των ιστορικών κατασκευών, καθώς συμμετέχουν στη διαμόρφωση μιας κουλτούρας στην κοινότητα των μηχανικών, για την αξιόπιστη παρακολούθηση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής σε πραγματικό χρόνο. Τα

κύρια συγκριτικά πλεονεκτήματα που καθιστούν τις οπτικές ίνες ως ένα εξαιρετικό εργαλείο για στον Μη Καταστρεπτικό Έλεγχο είναι αφενός, η ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας και, αφετέρου, η δυνατότητά τους να καλύψουν με υψηλή ακρίβεια, ένα μεγάλο εύρος εξειδικευμένων αναγκών παρακολούθησης, χωρίς να εκτίθεται το εξεταζόμενο υλικό σε οποιαδήποτε καταπόνηση ή φθορά λόγω ανάγκης λήψης δείγματος (Κατσιώτης, 2015).

Η οπτική ίνα αποτελείται από έναν κεντρικό υαλώδη πυρήνα (core) από SiO_2 , ο οποίος περιβάλλεται από, επίσης σύνθετη κεραμική, επίστρωση (cladding), που περιέχει πυρίτιο και βόριο (Εικόνα 60). Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα n_1 είναι πάντοτε μεγαλύτερος από αυτόν του περιβλήματος n_2 , ώστε να εξασφαλίζεται ο περιορισμός της φωτεινής ακτίνας στο εσωτερικό του πυρήνα και να μεταδίδεται αυτή κατά μήκος της ίνας, μετά από διαδοχικές ανακλάσεις στη διεπιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος (Εικόνα 61) (Alhaider, 2017).



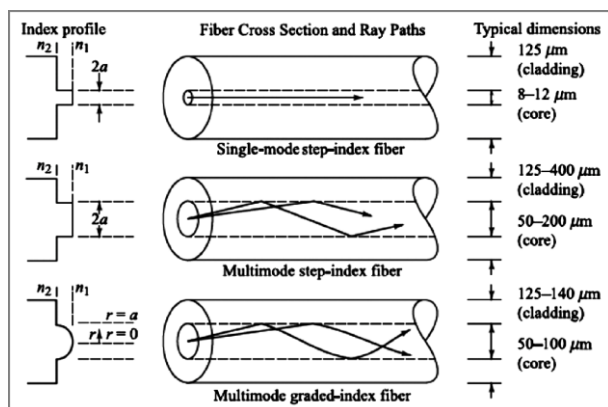
Εικόνα 60. Η δομή της οπτικής ίνας. (Πηγή: Keiser *et al.*, 2014)



Εικόνα 61. Διάδοση φωτεινής ακτίνας κατά μήκος οπτικής ίνας. (Πηγή: Kitayama, 2014)

Ανάλογα με τη σύσταση του υλικού του πυρήνα της ίνας και τον τρόπο διάδοσης του φωτός, διακρίνονται δύο κοινώς χρησιμοποιούμενοι τύποι οπτικών ινών (Εικόνα 62). Στην πρώτη περίπτωση, τον τύπο step-index fiber, ο δείκτης διάθλασης είναι ομοιόμορφος κατά μήκος του πυρήνα και υφίσταται βηματική μεταβολή, μεταβάλλεται δηλαδή απότομα από τον πυρήνα στο περίβλημα. Στον δεύτερο τύπο ίνας, τον graded-index fiber, ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα μειώνεται εκθετικά από το κέντρο προς την περιφέρεια της ίνας. Και οι δύο αυτοί τύποι ινών μπορούν να διακριθούν σε δύο επιμέρους κατηγορίες, τις single-mode και multimode. Όπως υποδηλώνει το όνομα, μια single-mode ίνα (SMF) χρησιμοποιεί

ένα μόνο κύμα (mode) για τη διάδοση της φωτεινής ακτίνας, ενώ η multimode (MMF) περιλαμβάνει πολλαπλά κύματα, με τα οποία το φως διαδίδεται με ολικές ανακλάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος (Keiser *et al.*, 2014).



Εικόνα 62. Τύποι οπτικών ινών και μονοπάτια διάδοσης φωτός. (Πηγή: Keiser *et al.*, 2014)

Το μικροσκόπιο Οπτικών Ινών (Εικόνα 63) είναι ένα φορητό σύστημα μικροσκοπίου με ενσωματωμένο προηγμένο σύστημα οπτικών ινών και ψηφιακών εξαρτημάτων, που χρησιμοποιεί ως κωδικοποιημένη πληροφορία το φως, αντί των ηλεκτρικών σημάτων και ως μέσον μετάδοσης τις οπτικές ίνες, αντί μεταλλικών αγωγών. Το προς μετάδοση σήμα, (π.χ. εικόνα, φωνή, δεδομένα) μετατρέπεται στο ένα άκρο της οπτικής ζεύξης σε ακολουθία ψηφιακών παλμών που διοχετεύονται στην οπτική ίνα, ενώ στο άλλο άκρο της ζεύξης ανιχνεύονται οι παλμοί και μετατρέπονται στο αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα, επιτρέποντας έτσι την επί τόπου υπό μεγέθυνση καταγραφή, σε μορφή εικόνας ή βίντεο, των παρατηρούμενων επιφανειών (Alhaider, 2017; Κατσιώτης, 2015; Κούρτελη, 2001).

Το σημαντικότερο τμήμα του μικροσκοπίου Οπτικών Ινών είναι οι φακοί των οπτικών ινών, καθώς, όπως και το οπτικό μικροσκόπιο, χρησιμοποιεί ως φωτεινή πηγή λευκό φως, συγκεκριμένα λάμπα αλογόνου. Το λευκό φως χαρακτηρίζεται από μήκη κύματος από 400 nm έως 760 nm περίπου. Επειδή τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πλέγματος των κρυστάλλων του προς παρατήρηση υλικού κυμαίνονται συνήθως από 0,15 nm μέχρι 2,0 nm, είναι δηλαδή τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερα, οι κρύσταλλοι φαίνονται σαν συνεχές μέσον όταν φωτίζονται από λευκό φως. Οι οπτικές ιδιότητες των άμορφων και των κρυσταλλικών σωμάτων οφείλονται στην αλληλεπίδρασή τους με το προσπίπτον φως. Τα κύρια φαινόμενα που καθορίζουν αυτή την αλληλεπίδραση είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η απορρόφηση. Στην οπτική μικροσκοπία τα φαινόμενα αυτά αντιμετωπίζονται με βάση τις εξισώσεις του

Maxwell για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Στη μικροσκοπία οπτικών ινών όμως, καθίσταται αδύνατη η ποσοτικοποίηση των συμπερασμάτων που εξάγονται, χωρίς φυσικά να αναιρείται η ποιοτική σημασία των παρατηρήσεων που λαμβάνονται (Κατσιώτης, 2015; Κούρτελη, 2001).



Εικόνα 63. Διάταξη FOM για έλεγχο σε σιδηροτροχιά. (Πηγή: Μοροπούλου, 2014)

Τα κυριότερα τμήματα της συσκευής είναι:

- Η λάμπα αλογόνου (~100 Watt).
- Το σύστημα ελέγχου της έντασης του φωτός. Το μικροσκόπιο αυτόματα προσαρμόζει την ένταση του φωτός της λάμπας, έτσι ώστε να υπάρχει ένα σταθερό επίπεδο φωτεινότητας στη λαμβανόμενη εικόνα, ανάλογα με το υλικό του εξεταζόμενου αντικειμένου.
- Το σύστημα εστίασης.
- Διαφορετικοί αντικειμενικοί φακοί, οι οποίοι συνδέονται στο σύστημα μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει περισσότερους από έναν φακούς για να πάρει εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων. Γενικά, οι αντικειμενικοί φακοί των μικροσκοπίων οπτικών ινών χαρακτηρίζονται από τα ακόλουθα μεγέθη: το άνοιγμα ή διάφραγμα A_n (numerical aperture), τη μικρότερη μετρήσιμη διάσταση μεταξύ δυο σημείων d και το βάθος εστίασης ή βάθος πεδίου, που χαρακτηρίζει την απόσταση μεταξύ σημείων εστίασης, στα οποία η εικόνα εμφανίζει αποδεκτή καθαρότητα (Κατσιώτης, 2015; Κούρτελη, 2001).

Με την τεχνολογία της Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών μπορούν να ληφθούν υψηλής ανάλυσης και μεγέθυνσης (έως 600x) εικόνες της εξεταζόμενης επιφάνειας (Εικόνα 64), οι

οποίες δύνανται να καταγραφούν σε μαγνητικό μέσο και να αναπαραχθούν ανά πάσα στιγμή σε βίντεο, είτε να εισαχθούν σε υπολογιστή και, κατ' επέκταση, σε σύστημα επεξεργασίας εικόνας, παρέχοντας περαιτέρω δυνατότητες επεξεργασίας (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).



Εικόνα 64. Εικόνες FOM από βιογενή διάβρωση σε ασβεστόλιθο, Ρόδος. (Πηγή: Μοροπούλου *et al.*, 2013)

Στο πεδίο της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, η Μικροσκοπία Οπτικών Ινών εφαρμόζεται για διάφορες εργασίες και παρατηρήσεις, όπως ο εντοπισμός διαφορών στην υφή, τη μορφολογία και τη σύσταση των επιφανειών των μνημείων, ο χαρακτηρισμός και η ταξινόμηση υλικών με βάση τη μορφολογία τους, η αναγνώριση και ταξινόμηση των μορφών διάβρωσης πορωδών υλικών, η ανίχνευση ατελειών και ρωγμών, η αποτίμηση επεμβάσεων συντήρησης και συμβατότητας νέων υλικών, ενώ σε συνδυασμό με την Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (Digital Image Processing – DIP), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση προτύπων διάβρωσης στα δομικά υλικά (Μοροπούλου *et al.*, 2013).

2.4.2.7 Κρουσιμετρία με σφύρα Schmidt (Schmidt Rebound Hammer - SH)

Η σκληρότητα είναι μια ιδιότητα που θεωρείται καθοριστικής σημασίας για τον βαθμό συντήρησης των κατασκευαστικών υλικών. Το μέγεθός της, που συνδέεται άμεσα και με άλλες μηχανικές ιδιότητες των υλικών, μετράται συνήθως με το κρουσίμετρο Schmidt ή και με άλλου τύπου σκληρόμετρα (Menéndez, 2016).

Το κρουσίμετρο Schmidt (**Εικόνα 65**) επινοήθηκε το 1948 από τον Ελβετό μηχανικό Ernst Schmidt, αρχικά για τον επιτόπου μη καταστρεπτικό έλεγχο της σκληρότητας του σκυροδέματος (Day, 1980; Goudie, 2006), επεκτάθηκε όμως από τις αρχές της δεκαετίας του 1960 στο πεδίο της Βραχομηχανικής, για την εκτίμηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (Uniaxial Compressive Strength – UCS) και του μέτρου ελαστικότητας (Young's Modulus - E_t) των πετρωμάτων, κατά τη φάση κατασκευής μεγάλων τεχνικών έργων (Aydin & Basu, 2005).

Σήμερα, αποτελεί πλέον την πιο συχνά εφαρμοζόμενη μη καταστρεπτική μέθοδο και σε άλλα υλικά υφιστάμενων κατασκευών εκτός του σκυροδέματος και είναι αρκετά κοινή και στο πεδίο της αρχιτεκτονικής πολιτιστικής κληρονομιάς, ιδιαιτέρως σε λιθόκτιστα μνημεία, που αποτελούν και την πλειονότητα αυτών (Menéndez, 2016; Πανταζοπούλου, 2017).



Εικόνα 65. Κρουσίμετρο Schmidt τύπου N. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)

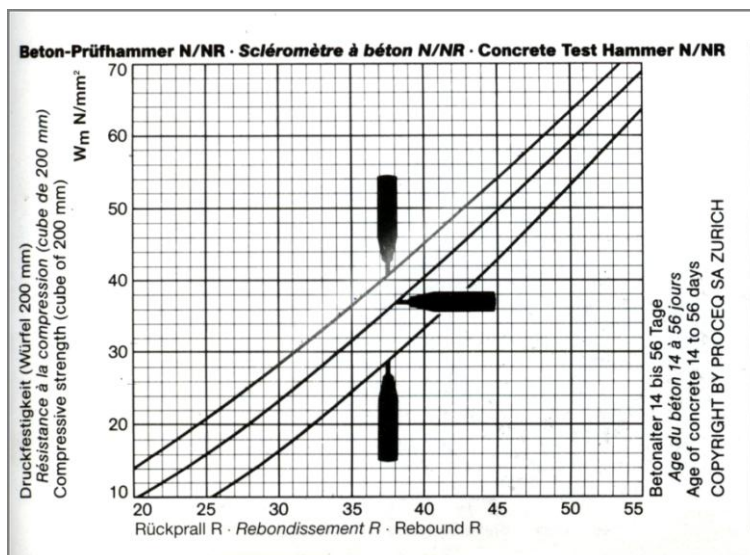
Το κρουσίμετρο είναι εύκολο στη χρήση και η μέθοδος απλή και συγκριτικά αξιόπιστη. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κρουσιμέτρων. Το πλέον χρησιμοποιούμενο σε πετρώματα και λιθοδομές είναι το τύπου «N» κρουσίμετρο, με μέγεθος κρούσης 2,207 Nm, το οποίο μπορεί να δώσει πληροφορίες για ένα εύρος υλικών από ασθενή μέχρι πολύ ισχυρά, με θλιπτική αντοχή που κυμαίνεται μεταξύ ~20-250 MPa. Ένας άλλος τύπος, που χρησιμοποιείται σε ασθενή πετρώματα και λίθους με λεπτές κρούστες διάβρωσης, είναι ο τύπος «L» με μέγεθος κρούσης 0,735 Nm. Ο τύπος «P» προορίζεται για δοκιμές σε υλικά με πολύ χαμηλή σκληρότητα, με θλιπτική αντοχή μικρότερη από 70 kPa (Menéndez, 2016; Viles *et al.*, 2011).



Εικόνα 66. Κλίμακα τιμών αναπήδησης R. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)

Μέσω της μεθόδου της κρουσιμέτρησης, μετράται το ύψος αναπήδησης R (Εικόνα 66), από το οποίο προσδιορίζεται η επιφανειακή σκληρότητα του ελεγχόμενου υλικού και η εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής του (UCS), μέσω των καμπυλών συσχέτισης με την τιμή

αναπήδησης R, που βρίσκονται τυπωμένες επάνω σε κάθε όργανο (Εικόνα 67) (Menéndez, 2016).



Εικόνα 67. Διάγραμμα συσχέτισης αναπήδησης (R) – θλιπτικής αντοχής (UCS) κρουσιμέτρου Original Schmidt της Proceq. (Πηγή: Punurai, n.d.)

Η διαδικασία που προτείνεται για τη δοκιμή διαφοροποιείται από μελετητή σε μελετητή. Όμως, παρά τις αρκετές διαφορετικές προτάσεις μεθόδων και παρόλο που η εκτίμηση της ποιότητας του υλικού περιορίζεται σε μικρό βάθος (2-3cm) και η διασπορά των αποτελεσμάτων κυμαίνεται περίπου στο $\pm 10\%$ -σχετικά υψηλή-, το κρουσίμετρο Schmidt παραμένει μια διαδεδομένη, αξιόπιστη Μη Καταστρεπτική μέθοδος ελέγχου των υλικών των κατασκευών, μεταξύ των οποίων και μνημείων, με αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η φορητότητα, το χαμηλό κόστος, η απλότητα και ευκολία στην εφαρμογή, καθώς και η αμεσότητα στη διάθεση των αποτελεσμάτων (Viles *et al.*, 2011).

2.4.2.8 Άλλες MK μέθοδοι χαρακτηρισμού και διάγνωσης της φθοράς

Εκτός από τις μεθόδους που αναλύθηκαν παραπάνω και οι οποίες είναι οι πιο συχνά εφαρμοζόμενες για τη διάγνωση και αποτίμηση της φθοράς σε κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς, στις μεθόδους Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου συμπεριλαμβάνονται και άλλες τεχνικές, όπως:

- Η Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission)
- Τα Μαγνητικά Σωματίδια (Magnetic Particles Inspection)

- Η Ραδιογραφία Ακτίνων Χ ή Ακτίνων γ (Industrial Radiography)
- Τα Δινορεύματα ή Ρεύματα Foucault (Eddy-Current Testing)
- Τα Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrants)
- Η Εξόλκευση Ήλου ή Πενετρομέτρηση (Nail Pull-Out Test)
- Η Χρωματομετρία (Colorimetry)
- Η Φασματοσκοπία Φθορισμού Ακτίνων Χ (X-Ray Fluorescence)
- Τα Μικροκύματα (Microwaves)
- Η Γαμμαγραφία (Gammagraphy) (Κατσιώτης, 2015).

Παράλληλα με την αποτίμηση της φθοράς επιτόπου στην κλίμακα του εξεταζόμενου μνημείου, με Μη Καταστρεπτικές τεχνικές, πραγματοποιούνται και ενόργανες μέθοδοι χαρακτηρισμού, που απαιτούν πραγματοποίηση δειγματοληψίας και οι οποίες, συνδυαστικά με τις Μη Καταστρεπτικές μεθόδους, οδηγούν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την κατάσταση διάβρωσης του μνημείου.

Από τις ενόργανες μεθόδους ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι τεχνικές αποτίμησης του πορώδους, όπως η Ποροσιμετρία Υδραργύρου (Mercury Porosimetry) και η Προσρόφηση Αερίου (Gas Adsorption Porosimetry), με τις οποίες αποκαλύπτονται χαρακτηριστικά της μικροδομής των υλικών και της επιδεκτικότητάς τους στη φθορά. Άλλες ενόργανες μέθοδοι, όπως η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM), η Φασματοσκοπία Υπερύθρου (Infrared Spectroscopy – IR και Fourier Transform Infrared Spectroscopy – FTIR) παρέχουν πληροφορίες που αφορούν στη μορφολογία και την ταυτοποίηση ενώσεων που περιέχονται στα εξεταζόμενα υλικά, ενώ ο πετρογραφικός έλεγχος και η Περίθλαση Ακτίνων Χ (X-Ray Diffraction – XRD), καθώς και θερμικές μέθοδοι ανάλυσης (Θερμοβαρυμετρική ανάλυση – Thermogravimetric Analysis – TGA, Διαφορική θερμική ανάλυση – Differential Thermal Analysis – DTA, Διαφορική θερμιδομετρίας σάρωσης – Differential Scanning Calorimetry – DSC, Δυναμική μηχανική ανάλυση – Dynamic Mechanical Analysis – DMA κ.ά.) χρησιμοποιούνται για τον ποσοτικό και ποιοτικό χαρακτηρισμό των προϊόντων διάβρωσης των υλικών, καθώς και τη συμπεριφορά τους όταν υπόκεινται σε συγκεκριμένες διαδικασίες περιβαλλοντικής φόρτισης.

Επιπλέον όλων των εργαστηριακών μεθόδων, πληρέστερη εικόνα για την επίδραση των περιβαλλοντικών φορτίων στα υλικά των μνημείων, δίνουν η Δοκιμές Επιταχυνόμενης Γήρανσης, κατά τις οποίες τα υλικά τοποθετούνται σε θαλάμους προσομοίωσης περιβαλλοντικών συνθηκών, όπου υποβάλλονται σε κύκλους εμβάπτισης – ξήρανσης και

θέρμανσης – ψύξης, έκθεση σε πρότυπους αέριους ρύπους, σε αλατονέφωση, σε κ.ά. (Μοροπούλου, 2014; Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

Η διάγνωση και αποτίμηση της φθοράς των δομικών υλικών ενός μνημείου ολοκληρώνεται με τη διαχείριση των δεδομένων από όλες τις ποιοτικές και μετρητικές μεθόδους που εφαρμόζονται, Μη Καταστρεπτικές και Ενόργανες, σε ολοκληρωμένα συστήματα πληροφοριών, προκειμένου για τον στρατηγικό σχεδιασμό της παρακολούθησης της κατάστασης της κατασκευής (condition monitoring) και των επεμβάσεων συντήρησης που ακολουθούν, αλλά και στον έλεγχο των φορτίων του περιβάλλοντος του μνημείου (Μοροπούλου *et al.*, 1997).

Τα συνηθέστερα εργαλεία στρατηγικού σχεδιασμού είναι η διαχείριση με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS Management) και η ηλεκτρονική χαρτογράφηση με σύστημα CAD (AutoCAD Mapping), που επιτρέπουν την αποθήκευση και διαχείριση ποικίλων μορφών δεδομένων, που αντιστοιχίζονται με αρχιτεκτονικές αποτυπώσεις, υποστηρίζοντας έτσι, τη λήψη αποφάσεων για την προστασία και την αειφορία των ιστορικών κατασκευών σε πραγματικό χρόνο και κλίμακα (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

3.1 Γενικά

Η μεθοδολογία διάγνωσης της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών σε ένα κτήριο πολιτιστικής κληρονομιάς και η ακόλουθη λήψη αποφάσεων σε ό,τι αφορά τις απαραίτητες διεργασίες για τη συντήρησή του, περιλαμβάνει χονδρικά τα παρακάτω βήματα:

- Ιστορική & Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση του μνημείου (ηλικία, υλικά, τρόποι δόμησης, επεμβάσεις κλπ)
- Έρευνα, Μελέτη και Παρακολούθηση Περιβαλλοντικών δεδομένων (Γεωλογία περιοχής, κλιματολογικές συνθήκες, ρύπανση κλπ)
- Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος (επιτόπου μακροσκοπικές παρατηρήσεις)
- Αποτύπωση (τοπογραφική, φωτογραμμετρική, αρχιτεκτονική)
- Επιτόπου Μη Καταστρεπτικές Δοκιμές
- Ταυτοποίηση και χαρακτηρισμός δομικών υλικών και έρευνα προέλευσής τους
- Δειγματοληψίες και Αναλύσεις με Ενόργανες Εργαστηριακές Μεθόδους
- Δομοστατική Ανάλυση – Έλεγχος Τρωτότητας
- Χαρτογράφηση Φθοράς και Αποτίμηση Επιπτώσεων
- Παραμετρική Ανάλυση
- Συμπεράσματα και Προτάσεις για τον σχεδιασμό ενδεχόμενων επεμβάσεων ή συστημάτων παρακολούθησης της φθοράς (Κούρτελη, 2001; Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010; Σκουλικίδης, 2000).

Είναι σαφές ότι μια τέτοια, ολοκληρωμένη μεθοδολογία διάγνωσης και αποτίμησης επιτάσσει τη διεπιστημονική συνεργασία πληθώρας ειδικοτήτων και τη σε βάθος χρόνου παρακολούθηση της εξέλιξης των διαβρώσεων, που παρατηρούνται στο εκάστοτε υπό εξέταση μνημείο.

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό μια πρώτη αποτίμηση της φθοράς που παρουσιάζει το μνημείο του Λευκού Πύργου Θεσσαλονίκης. Ειδικότερα, έγινε προσπάθεια διάγνωσης και καταγραφής των μορφών διάβρωσης που εμφανίζονται στις επιφάνειες των υλικών, σε σχέση με τις συνθήκες έκθεσής τους στο περιβάλλον του μνημείου, καθώς και μια εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των διαφορετικών υλικών που δομούν τον Πύργο. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection), η Κρουσιμέτρηση Schmidt (Schmidt Rebound Hammer) και η Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (Digital image Processing), που ανήκουν όλες στην κατηγορία των τεχνικών Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου.

3.2 Το υπό εξέταση μνημείο, ο Λευκός Πύργος της Θεσσαλονίκης.

3.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Ο Λευκός Πύργος, κομμάτι της πολιτιστικής κληρονομιάς και τοπόσημο της Θεσσαλονίκης, βρίσκεται στη συμβολή της παραλιακής λεωφόρου (Λ.Νίκης) και της οδού Εθνικής Αμύνης, εκεί, όπου το νότιο θαλάσσιο τείχος της περιτειχισμένης πόλης συναντούσε το ανατολικό (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993). Ο Λευκός Πύργος αποτελούσε μέρος ενός πλήρους οχυρωματικού συγκροτήματος και εξαιρετικό παράδειγμα αμυντικών έργων της οθωμανικής στρατιωτικής αρχιτεκτονικής (Kiel, 1973). Στη σημερινή θέση του μνημείου φιλοξενήθηκαν κατά καιρούς οικοδομήματα παρόμοιας μορφής, με σκοπό την ενίσχυση της άμυνας της πόλης (Τσιρόγλου, 2000).

Αν και οι απόψεις περί της ακριβούς χρονολογίας οικοδόμησης του Πύργου ακόμη ερίζουν, η πλέον επικρατέστερη, είναι μεταξύ 1535 και 1536, στην εποχή του σουλτάνου Σουλεϊμάν του Μεγαλοπρεπούς, όπως φαίνεται να αναγραφόταν στην υπέρθυρη επιγραφή που υπήρχε μέχρι και λίγο πριν το 1912 (**Εικόνα 68**) (Kiel, 1973).

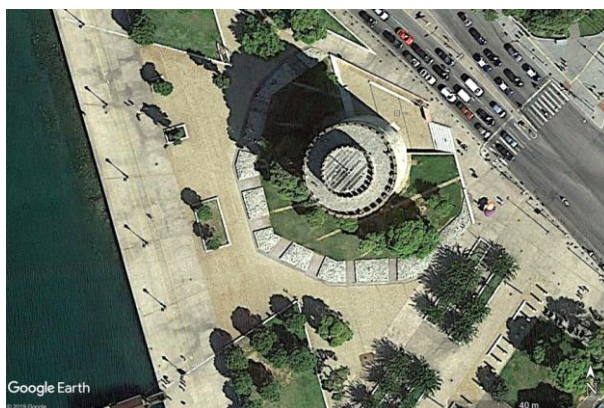


Εικόνα 68. Η υπέρθυρη επιγραφή του Λευκού Πύργου. (Φωτ.: A.Struck, Πηγή: Kiel, 1973)

Στο πέρασμα του χρόνου, το μνημείο αναφέρεται με διάφορες ονομασίες, όπως Πύργος της Σαμάρειας τον 15ο αιώνα, Πύργος του Λέοντος τον 16ο αιώνα, Πύργος της Καλαμαριάς τον 18ο αιώνα. Τον 19ο αιώνα τον βρίσκουμε με δύο ονομασίες, ανάλογα με τη χρήση που είχε: Πύργος των Γενιτσάρων και Πύργος του αίματος (Kanli-Kule), όταν έγινε φυλακή και τόπος εκτέλεσης καταδίκων. Λέγεται ότι, το 1890, ένας από τους φυλακισμένους στον Πύργο, ονόματι Nathan Gueledi, ως τίμημα προκειμένου να επανακτήσει την ελευθερία του, τον άσπρισε με κοινό ασβέστη και από τότε φαίνεται να αναφέρεται σαν Beyaz-Kule, δηλαδή Λευκός Πύργος, αν και υπάρχουν αναφορές του με τον χαρακτηρισμό «Λευκός», ήδη

μερικά χρόνια νωρίτερα, από το 1884 (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993; Τσιρόγλου, 2000).

Μετά την ενσωμάτωση της πόλης, το 1912, στο ελληνικό κράτος, ο Πύργος είχε διάφορες χρήσεις, άλλοτε ως αποθηκευτικός χώρος για τη φύλαξη αρχαιοτήτων, άλλοτε ως χώρος φιλοξενίας διαφόρων φορέων και οργανισμών. Το 1945, μετά και τη γνωμοδότηση του Αρχαιολογικού Συμβουλίου, ο Λευκός Πύργος κηρύχθηκε διατηρητέο ιστορικό μνημείο (ΦΕΚ 45/Β/31-3-1945) και το 1983 παραχωρήθηκε στο Υπουργείο Πολιτισμού, οπότε και ξεκίνησε διαδικασία συντήρησης και αναστήλωσής του, που είχε ως γνώμονα το μικρότερο δυνατό ποσοστό επεμβάσεων, με σκοπό να διατηρηθεί αναλλοίωτο το μνημείο και οι ιστορικές φάσεις του (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993). Το 2006 αποπερατώθηκε και η ανάπλαση του περιβάλλοντος χώρου του Πύργου, με υλικά συμβατά του μνημείου, δημιουργώντας μια τραπεζοειδή τελικά πλατεία, το σχήμα της οποίας ανοίγει προοπτικά προς τη θάλασσα (Εικόνα 69) (Τσιγαρίδα *et al.*, 2003).



Εικόνα 69. Δορυφορική εικόνα της πλατείας Λ.Πύργου σήμερα. (Πηγή: Google Earth, 2019)

Σήμερα, ο Λευκός Πύργος επαναχρησιμοποιείται και είναι ανοιχτός στο κοινό και τους επισκέπτες της Θεσσαλονίκης, τόσο ως μνημείο, αλλά και ως μουσείο, που στεγάζει την νέα, μόνιμη έκθεση που αφορά στην ιστορία της πόλης, από την εποχή της ίδρυσής της, το 316/15 π.Χ., μέχρι τις μέρες μας.

3.2.2 Δομικά & Αρχιτεκτονικά στοιχεία

Ο Λευκός Πύργος είναι πύργος με κάτοψη κυκλική, διαμέτρου 21,70 m και με ύψος 33,90 m. Η μοναδική είσοδος στον Πύργο είναι τοξωτή, έχει ύψος 2,90 m και πλάτος 1,85 m. Βρίσκεται στον ισόγειο όροφο, στη βόρεια πλευρά του Πύργου, σήμερα σε στάθμη -1,30 m

από τον διαμορφωμένο περιβάλλοντα χώρο (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993; Τσιρόγλου, 2000).

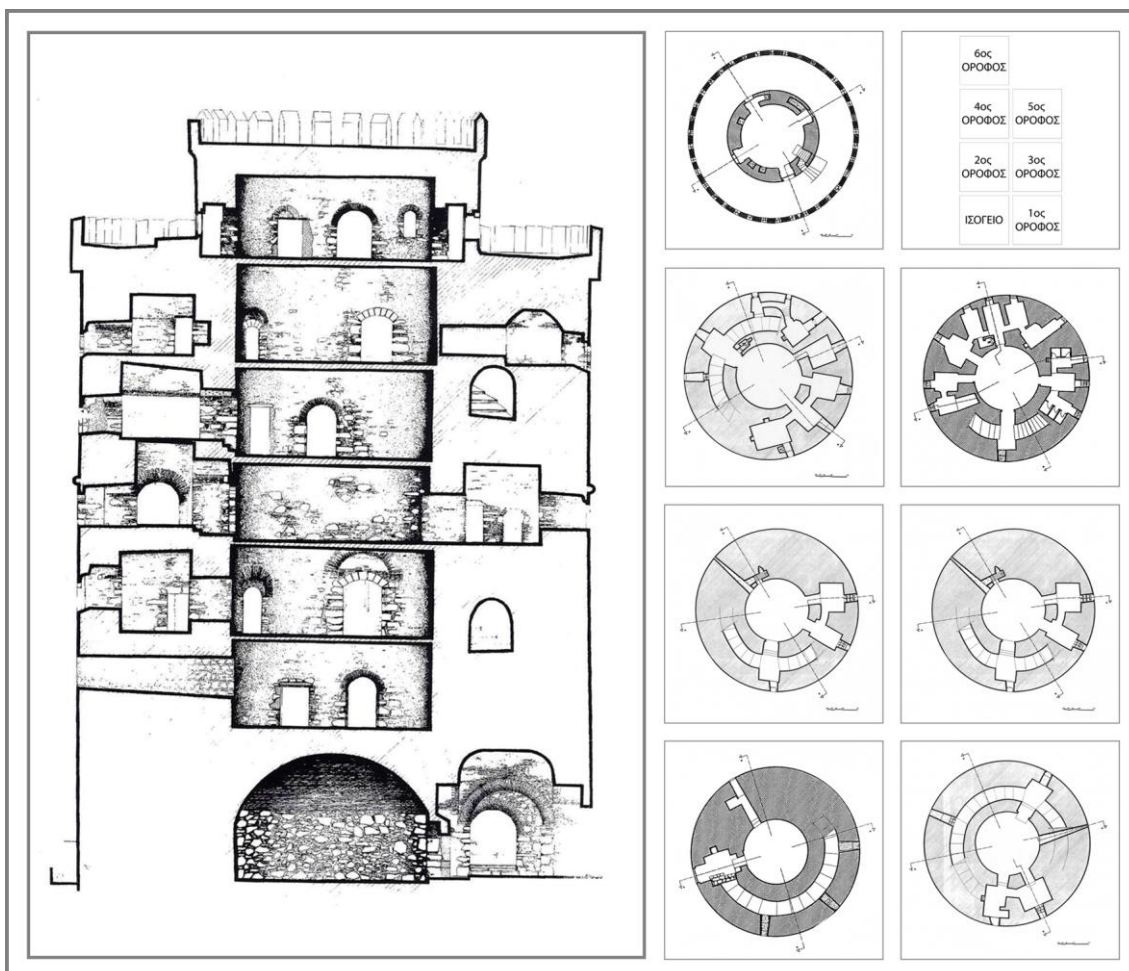
Μέχρι τις αρχές του 20^{ού} αιώνα, ο Πύργος περιβαλλόταν από οκταγωνικό περιτείχισμα (Εικόνα 70) στις κορυφές του οποίου υπήρχαν χαμηλοί πυργίσκοι, επίσης οκταγωνικοί. Το σύμπλεγμα του περιβόλου κατεδαφίστηκε, σύμφωνα με μαρτυρίες και φωτογραφικά τεκμήρια, μάλλον το 1911, πάντως πριν την αναχώρηση των Οθωμανών από την πόλη.



Εικόνα 70. Ο Λευκός Πύργος με το περιτείχισμά του, πριν το 1911. (Φωτ.: W.V.Hallwyl, 1896, Πηγή: Κέντρο Ιστορίας Θεσ/νίκης)

Στο κέντρο του Πύργου διατάσσονται καθ' ύψος επτά κυκλικές αίθουσες διαμέτρου ~8,5m, συμπεριλαμβανομένου και του πυργίσκου στην απόληξή του (Εικόνα 71) . Οι αίθουσες έχουν πρόσβαση από περιμετρική κοχλιωτή σκάλα, με πλάτος ~2m, 95 πλατύσκαλα και μήκος ~120m, η οποία τελικά οδηγεί στον πυργίσκο. Η σκάλα καταλήγει στον τελευταίο όροφο (6^ο), στην αίθουσα του πυργίσκου, η οποία είναι η μόνη που βρέθηκε (το 1983) να στεγάζεται από πλάκα σκυροδέματος (σήμερα σπλισμένου), ενώ, αρχικά, όπως και οι αίθουσες όλων των υπολοίπων ορόφων είχαν ξύλινη οροφή (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993; Τσιρόγλου, 2000).

Ο Πύργος έχει παράθυρα χαμηλού ύψους, συνολικά έντεκα, ασύμμετρα διατεταγμένα στην περιφερειακή τοιχοποιία, κυρίως προοριζόμενα για τον φωτισμό τόσο της σκάλας, όσο και των αιθουσών. Τα πέντε πρώτα από το ισόγειο προς τα πάνω είναι ορθογώνια και μεταγενέστερα ανοιγμένα, όταν ο Πύργος είχε πια πάψει να έχει αμυντικό ρόλο, ενώ τα υπόλοιπα είναι τοξωτά (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993; Τσότσος *et al.*, 1992).



Εικόνα 71. Τομή (αριστερά) και κατόψεις ορόφων (δεξιά) του Λ.Πύργου. (Πηγή: Κλημεντίδου-Παπαδάμου *et al.*, 1993)

Η εξωτερική τοιχοποιία του Λευκού Πύργου είναι ισχυρά δομημένη με μεγάλους λαξευτούς και ημιλαξευτούς λίθους διαφόρων ειδών, κυρίως τραβερτίνης, ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και αργιλικό σχιστόλιθοι, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται οριζόντιες στρώσεις πλίνθων. Σε πολλά σημεία, κυρίως στο κατώτερο τμήμα της, παρατηρούνται και αρκετοί μαρμαρίνοι λίθοι, ενδεχομένως *srolia* (επαναχρησιμοποιούμενα από αρχαιότερα μνημεία δομικά υλικά). Το συνδετικό υλικό δόμησης είναι ασβεστοκονίαμα, ενώ σε κάποια σημεία διατηρείται ακόμη το λεγόμενο *yagli*, επίχρισμα από ασβέστη και χόρτα της αρχικής φάσης οικοδόμησης. Το εμβαδόν της τοιχοποιίας υπολογίζεται γύρω στα 1.750m^2 και το πάχος της ξεκινά στη βάση του Πύργου από 6,0m και μειώνεται σταδιακά προς τα επάνω μέχρι 1,20m. Σε τακτά διαστήματα καθ' ύψος, η τοιχοποιία συνδέεται με πολυγωνικές σε κάτοψη, ομόκεντρες ξυλοδεσιές, ενώ σε ύψος 16,0m από το έδαφος ο Πύργος φέρει δακτύλιο περίσφιξης από πωρόλιθους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικούς συνδέσμους.

Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι, ενσωματωμένο στην τοιχοποιία του Πύργου, ήταν, από κατασκευής του μνημείου, πλήρως οργανωμένο αποχετευτικό δίκτυο, που αποχέτευε κάθε όροφο, με ορθογώνιο κατακόρυφο αγωγό, καθώς και σύστημα θέρμανσης με τζάκια και απαγωγούς με απόληξη στην εξωτερική τοιχοποιία (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993; Τσότσος *et al.*, 1992).

Ο Πύργος επιστέφεται από πενήντα τρία (53) τοξύλια, που εδράζονται σε λίθινους προβόλους, οι οποίοι διευρύνουν την περιφέρεια έδρασης των επάλξεων, εξέχοντας της τοιχοποιίας κατά 0,40-0,50 m. Οι πρόβολοι (φουρούσια) και τα τοξύλια είναι κατασκευασμένα από λαξευτούς λίθους διαφόρων ειδών. Οι επάλξεις του Πύργου είναι τριάντα επτά (37) στον αριθμό, με διαστάσεις 0,65 m πάχος, 1,15 m πλάτος και 1,82 m ύψος και κατασκευασμένες εξολοκλήρου και επικαλυμμένες με πλίνθους. Στην κορυφή του Πύργου υπάρχει πυργίσκος, που επιστέφεται επίσης με είκοσι εννέα (29) πλίνθινες επάλξεις (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993).

3.2.3 Στοιχεία επεμβάσεων

Το ιστορικό των επεμβάσεων στον Λευκό Πύργο μέχρι το 1983, οπότε και παραχωρήθηκε στο Υπουργείο Πολιτισμού, δεν έχει καταστεί ενδελεχώς γνωστό. Οι ελάχιστες πληροφορίες που υπάρχουν, από τις οποίες λίγες τεκμηριώνονται, αφορούν ασπρίσματα της εξωτερικής τοιχοποιίας του Πύργου, καθώς και μικρής κλίμακας επισκευές, με πρώτη μαρτυρούμενη το 1668. Η διάνοιξη των ορθογώνιων παραθύρων από το ισόγειο έως τον 1^ο όροφο έγινε επίσης μέσα στον 17^ο αιώνα, όπως προέκυψε από δενδροχρονολόγηση των ξύλων τους. Χωρίς χρονική τοποθέτηση, πάντως πριν το 1912, παρατηρούνται επεμβάσεις, όπως η θέση απόληξης του κλιμακοστασίου, η αφαίρεση της ξύλινης στέγασης της ταράτσας και το σφράγισμα των τζακιών και των αποχωρητηρίων. Σε ό,τι αφορά τα ασπρίσματα του Πύργου, εκτός από αυτό του 1890, από το οποίο λέγεται ότι επικράτησε και το όνομά του, αναφέρονται ακόμα πέντε, τρία πρωιμότερα, το 1858, το 1878 και το 1883 και δύο αργότερα, το 1896 και το 1911 (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993; Τσιρόγλου, 2000).

Η κύρια συντήρηση και αναστήλωση του μνημείου, με αποτέλεσμα την τελική μορφή του Πύργου, όπως τον γνωρίζουμε σήμερα, έγινε μεταξύ 1983-1985 από τις τοπικές υπηρεσίες του Υπουργείου Πολιτισμού (9^η Εφορεία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων) και με γνώμονα το μικρότερο δυνατό ποσοστό επεμβάσεων, ώστε να διατηρηθεί αναλλοίωτη όλη η ιστορική ζωή του μνημείου και σύμφωνα με τις αρχές του «Χάρτη της Βενετίας» (Κλημεντίδου-

Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993). Κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης αυτής αποκαλύφθηκαν και οι επεμβάσεις του 20^{ου} αιώνα, που αφορούσαν κυρίως αντικατάσταση των ξύλινων οροφών με σκυρόδετες και επικάλυψη των εσωτερικών τοιχοποιιών με νεώτερης τεχνολογίας επιχρίσματα.

Οι κυριότερες εργασίες που έγιναν το διάστημα 1983-1985 αφορούσαν, εσωτερικά, την καθαίρεση όλων των νεωτερικών στοιχείων (επιχρισμάτων, τούβλων κλπ) και αντικατάστασή τους, όπου αυτό ήταν εφικτό, με υλικά συμβατά με τα αυθεντικά του μνημείου, την επισκευή και συντήρηση των ξύλινων δαπέδων που είχαν προσβληθεί από ξυλοσηπτικούς μύκητες και ξυλοφάγα έντομα, την επικάλυψη των σκυρόδετων πλακών με κεραμικά πλακίδια και την αντικατάσταση των ανωφλίων (πρέκια) σε κάποια από τα ανοίγματα, όπου έλειπαν φέροντα στοιχεία (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993).

Στην εξωτερική επιφάνεια του Πύργου, η οποία σε μια ζώνη 5 έως 7 μέτρων κάτω από τις επάλξεις παρουσίαζε κατάσταση σοβαρής διάβρωσης, οι εργασίες αποκατάστασης συμπεριέλαβαν βαθιά αρμολογήματα, καθώς ήταν κατεστραμμένο εντελώς το συνδετικό κονίαμα λίθων και πλίνθων, συμπληρώσεις λίθων και πλίνθων σε αρκετές θέσεις και ανακτήσεις των τοξυλίων (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993).

Οι επάλξεις αντιμετωπίστηκαν ξεχωριστά, καθώς είχαν χάσει τις αρχικές διαστάσεις και τη μορφή τους, από προχωρημένη διάβρωση και κακές προηγούμενες επεμβάσεις. Αντικαταστάθηκαν αρμολογήματα, πλίνθινες επικαλύψεις και πλίνθοι στις βάσεις των επάλξεων, που ήταν βαθιά αποσαθρωμένοι από το νερό της βροχής (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993).

Ειδική διαχείριση στην αποκατάσταση του 1983-1985, είχαν και τα φουρούσια (πρόβολοι) του Πύργου, τα περισσότερα από τα οποία, αποτελούμενα από ασβεστόλιθους και ψαμμίτες, βρέθηκαν στο τελευταίο στάδιο διάβρωσης, παρουσιάζοντας έντονη κυψέλωση σε μεγάλο βάθος, από την επίδραση της θαλάσσιας ατμόσφαιρας και των ανέμων. Αντικαταστάθηκαν οι διαβρωμένοι λίθοι με νέους, που συγκολλήθηκαν με το παλιό τμήμα του φουρουσιού με εποξειδικές ρητίνες και χαλύβδινες ράβδους, ενώ, όπου η διάβρωση δεν ήταν πολύ προχωρημένη, σφραγίστηκαν οι κοιλότητες της κυψέλωσης με κονίαμα από τριμμένη πέτρα, άσβεστο, θηραϊκή γη και λευκό τσιμέντο (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993).

Για την αντιμετώπιση της υγρασίας, που ήταν έντονη, ιδιαίτερα στο ισόγειο του μνημείου, κατασκευάστηκε περιμετρική αεραγωγός τάφρος, για τον περιορισμό της

αναρριχόμενης εδαφικής υγρασίας και της επακόλουθης φθοράς, σε στάθμη -1,80m από το επίπεδο του περιβάλλοντος χώρου, με αναλημματικό τοίχιο σε απόσταση 1,15m από την παρειά της τοιχοποιίας του Πύργου (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993).

Από στατικής άποψης, η κατάσταση του μνημείου παρουσιάστηκε άριστη με την έναρξη των εργασιών του 1983-1985. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποκατάσταση δύο μεγάλου μήκους κατακόρυφων στην τοιχοποιία ρωγμών, στη ΒΔ και Ν όψη του Πύργου. Οι ρωγμές ήταν εμφανείς εξωτερικά, με μέγιστο εύρος γύρω στα 2cm, χωρίς ενδείξεις κάθετης μετακίνησης και πιθανολογείται ότι προϋπήρχαν του μεγάλου σεισμού του 1978 και ότι δεν οφείλονται στη θεμελίωση, αλλά σε κάποιο συστηματικό αίτιο, με ανάπτυξη ισχυρής έντασης, πιθανόν ενός ισχυρού σεισμού (Τσότσος *et al.*, 1992). Οι ρωγμές αντιμετωπίστηκαν με ενέματα μίγματος τσιμέντου, άσβεστου, θηραϊκής γης και άμμου (Κλημεντίδου-Παπαδάμου & Ζόμπου-Ασήμη, 1993).

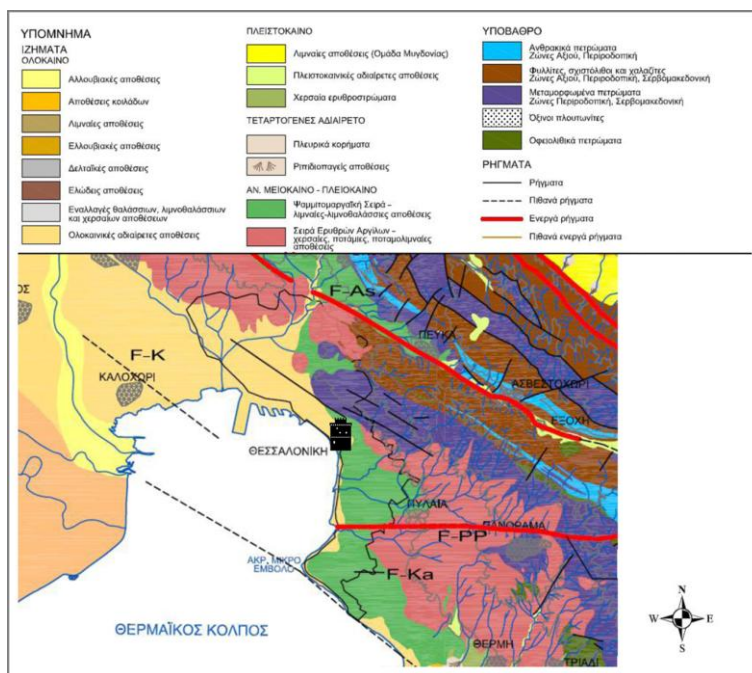
Από το τέλος των εργασιών της αποκατάστασης 1983-1985 και μέχρι σήμερα, ελάχιστες ανάγκες έχουν προκύψει για σημαντικές επεμβάσεις στον Πύργο. Οι περισσότερες περιορίζονται σε εργασίες μικροσυντήρησης, είτε σε μηχανολογικές εγκαταστάσεις που αφορούν στη μουσειακή λειτουργία του μνημείου. Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, το 2006 αποπερατώθηκε και η ανάπλαση του περιβάλλοντος χώρου, με τη διαμόρφωση τραπεζοειδούς πλατείας, με υλικά συμβατά με τα αυθεντικά του Πύργου, όπως μάρμαρο, πωρόλιθο Λακκώματος και ασβεστόλιθους (Τσιγαρίδα *et al.*, 2003).

3.2.4 Γεωλογικά και Γεωτεχνικά στοιχεία

Το πολεοδομικό συγκρότημα και η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης ανήκει γεωλογικά στις γεωτεκτονικές ζώνες Περιοδοπική και Σερβομακεδονική, στις οποίες εμφανίζονται ασβεστόλιθοι, φυλλίτες, γνεύσιοι, μαρμαρυγιακοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι, μάρμαρα και υπερβασικά στρώματα, όπως σερπεντινίτες, διορίτες, γρανίτες, γάββροι κ.ά.. Το μεγαλύτερο μέρος του κέντρου της Θεσσαλονίκης εμφανίζει ολοκαινικές αποθέσεις, που αποτελούνται από παράκτιες άμμους, προσχώσεις πεδιάδων και ερυθρές αργίλους με ασβεστιτικά συγκρίματα (κόκκοι, τρίμματα) (**Εικόνα 72**) (Ζερβοπούλου, 2010).

Ειδικότερα, στην περιοχή του Λευκού Πύργου, όπως και σε ολόκληρο το νότιο ιστορικό κέντρο (κάτω από την Αγ.Δημητρίου), εντός των Βυζαντινών Τειχών και σε επαφή με τη θάλασσα, οι αποθέσεις συνίστανται από ιστορικές επιχωματώσεις (αρχαιολογικό στρώμα), με υλικά από οικιστικά τμήματα και θραύσματα της Ρωμαϊκής, Βυζαντινής και Οθωμανικής

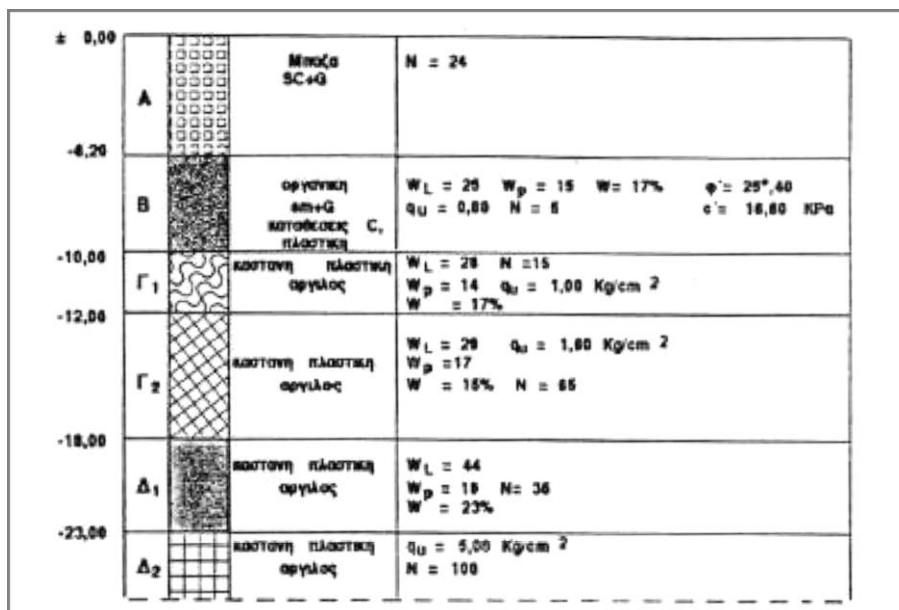
περιόδου, ανάμικτα με τον ιλυώδη ορίζοντα. Το πάχος τους κυμαίνεται από 3,0m έως και 20,0m κατά θέσεις. Από γεωτεχνικής πλευράς αναφέρεται ως αμμώδης – ιλυώδης ορίζοντας, ενώ αποτελεί σχηματισμό μαλακό έως σταθερό, με χαμηλή έως μέτρια υδατοπερατότητα (Ζερβοπούλου, 2010).



Εικόνα 72. Λεπτομέρεια Γεωλογικού Χάρτη περιοχής Θεσ/νίκης. (Πηγή: Ζερβοπούλου, 2010)

Στον περιβάλλοντα τον Λευκό Πύργο χώρο εκτελέστηκαν το 1991 από το Περιφερειακό Εργαστήριο του ΥΠΕΧΩΔΕ, σε συνεργασία με το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής & Θεμελιώσεων του ΑΠΘ (Τσότσος *et al.*, 1992), δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, σε βάθη που έφταναν πάνω από 20,0 m. Από τη σύνθεση των στοιχείων των γεωτρήσεων προέκυψε η στρωματογραφία της **Εικόνας 73** (Τσότσος *et al.*, 1992).

Από την ίδια μελέτη (Τσότσος *et al.*, 1992) και με τα στοιχεία των παραπάνω γεωτρήσεων, υπολογίστηκε η φέρουσα ικανότητα (για πλυστρωματικό έδαφος) ίση με 1080 kN/m², με πιθανολογούμενο βάθος έδρασης στα 3,5 m, αφού ο τύπος και οι διαστάσεις της θεμελίωσης του Λευκού Πύργου παραμένουν άγνωστα. Εκτιμήθηκαν επίσης οι καθιζήσεις, οι οποίες παρόλο που υπολογίστηκαν μεγάλες (συνολική καθίζηση 1,30 m – 2,5 m), η οπτική παρατήρηση και τοπογραφικές μετρήσεις που ακολούθησαν, δεν οδήγησαν σε διαπίστωση κλίσης (Τσότσος *et al.*, 1992).



Εικόνα 73. Στρωματογραφία περιβάλλοντος χώρου Α.Πύργου. (Πηγή: Τσότσος *et al.*, 1992)

3.2.5 Το περιβάλλον του μνημείου

3.2.5.1 Κλιματολογικές συνθήκες

Η πόλη της Θεσσαλονίκης, παρόλο που είναι μια πόλη μεσογειακή, παρουσιάζει ιδιαιτερότητες σε ό,τι αφορά τις κλιματολογικές της συνθήκες. Κύριο χαρακτηριστικό του κλίματός της είναι οι συχνές, σύντομες, αλλά μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις καθ'όλη τη διάρκεια του έτους, ακόμη και το καλοκαίρι, καθώς και οι δριμείς, ξηροί και ψυχροί βορειοδυτικοί άνεμοι του χειμώνα.

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, προέρχονται από δεδομένα του Μετεωρολογικού Σταθμού της ΕΜΥ στο Αεροδρόμιο Μακεδονίας και αντλήθηκαν από το λογισμικό Meteororm και από την ιστοσελίδα της ΕΜΥ για τα κατά τόπους κλιματολογικά δεδομένα. Αναφέρονται δε, σε ένα τυπικό έτος, που προκύπτει βάσει δεδομένων της δεκαετίας 2000 – 2009 και το οποίο είναι ενδεικτικό της υφιστάμενης κατάστασης του κλίματος της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης.

Η μέση θερμοκρασία της Θεσσαλονίκης κυμαίνεται μεταξύ 6,3 °C τους χειμερινούς μήνες 25,8 °C για τους θερινούς, ενώ η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 15,8 °C. Ο πιο κρύος μήνας είναι ο Ιανουάριος, με την ελάχιστη θερμοκρασία να αγγίζει τους -4,5 °C, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφεται είναι 38,7 °C και σημειώνεται τον μήνα Ιούλιο (Εικόνα 74α).

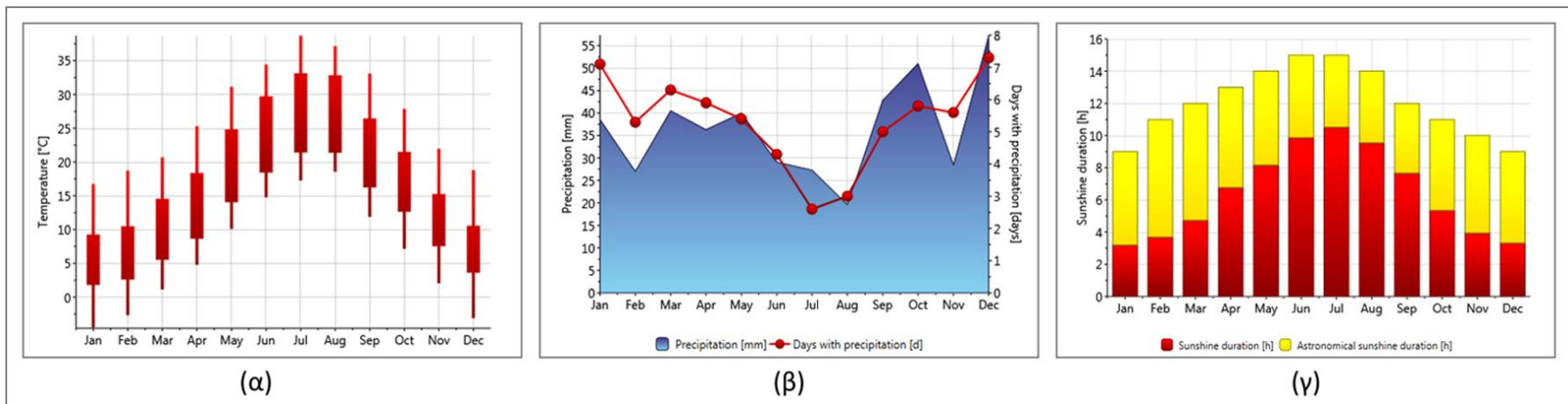
Το μέσο ύψος των συνολικών βροχοπτώσεων που σημειώνονται στη Θεσσαλονίκη ανέρχεται σε 438 mm ετησίως. Περισσότερο υγρός μήνας είναι ο Δεκέμβριος, ο οποίος παρουσιάζει βροχή ύψους 57 mm, ενώ ο πιο ξηρός μήνας είναι ο Αύγουστος με μέσο μηνιαίο ύψος υετού 20 mm. Ο συνολικός αριθμός ημερών βροχής ανέρχεται σε 64 κατά μέσο όρο ετησίως (**Εικόνα 74β**).

Η διάρκεια της ηλιοφάνειας ενός τυπικού έτους αγγίζει τις 2.340 h. Οι θερινοί μήνες χαρακτηρίζονται από έντονη ηλιοφάνεια, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες αυτή περιορίζεται. Ο περισσότερο ηλιόλουστος μήνας είναι ο Ιούλιος με κατά μέσο όρο 10,5 h ημερήσιας ηλιοφάνειας, ενώ ο Ιανουάριος είναι ο μήνας με τη μικρότερη διάρκεια ηλιοφάνειας, με 3,2 h ημερησίως (**Εικόνα 74γ**).

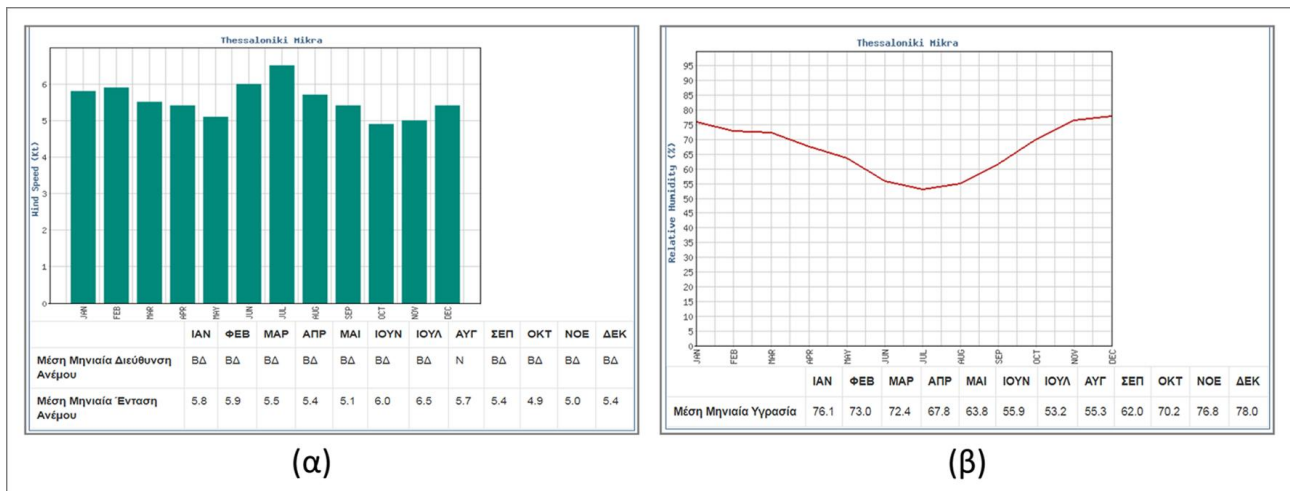
Οι επικρατούντες άνεμοι στη Θεσσαλονίκη είναι κυρίως βορειοδυτικών διευθύνσεων (Βαρδάρης), με εξαίρεση τους νότιους ανέμους (θαλάσσιες αύρες) του Αυγούστου. Η μέση ετήσια ταχύτητα των ανέμων είναι 5,5 knt (=2,85m/s), από 2,4 m/s τον Οκτώβριο μέχρι και 3,2 m/s τον Ιούλιο (**Εικόνα 75α**).

Η μέση ετήσια σχετική υγρασία είναι 67 %, με υψηλότερες τιμές χειμώνα και φθινόπωρο, που φτάνει μέχρι και 78 % (Δεκέμβριος), ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες εμφανίζει τις μικρότερες τιμές της, με ελάχιστη 53,2 % τον Ιούλιο (**Εικόνα 75β**).

Από πλευράς ακραίων καιρικών και κλιματολογικών φαινομένων, στη Θεσσαλονίκη έχει παρατηρηθεί μεγάλος αριθμός ημερών παγετού. Χαρακτηριστικά, στον Μετεωρολογικό Σταθμό του αεροδρομίου Μακεδονία, το έτος 2017, καταγράφηκαν τουλάχιστον 16 ημέρες παγετού, από τις οποίες 5 ήταν ημέρες ολικού παγετού, ενώ ο μέσος αριθμός ημερών παγετού τον μήνα Ιανουάριο (με περίοδο αναφοράς 1971 – 2000) ήταν 11 ημέρες (ΕΥΡΩΤΕΚ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Α.Ε., 2019).



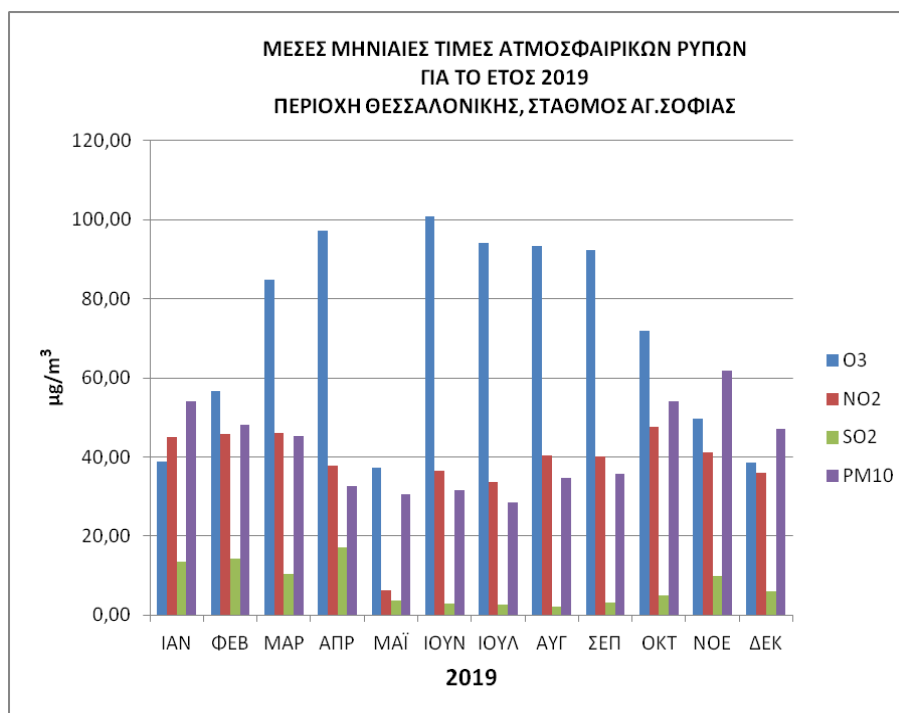
Εικόνα 74. Κλιματολογικά διαγράμματα Θεσ/νίκης. (α) Θερμοκρασία, (β) Κατακρηνίσματα, (γ) Ηλιοφάνεια. (Πηγή: Μετεοποι, 2020 [Περίοδος Αναφοράς 2000-2009])



Εικόνα 75. Κλιματολογικά διαγράμματα Θεσ/νίκης. (α) Άνεμοι, (β) Σχετική Υγρασία. (Πηγή: ΕΜΥ, 2020)

3.2.5.2 Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Περιφερειακή Ενότητα της Θεσσαλονίκης, πραγματοποιείται από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), με αρμόδια για τη λειτουργία των σταθμών μέτρησης υπηρεσία, την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. Το δίκτυο που λειτουργεί στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, αποτελείται από επτά σταθμούς, από τους οποίους οι δύο περιλαμβάνονται στον Δήμο Θεσσαλονίκης, ο σταθμός της πλατείας Αγ.Σοφίας και ο σταθμός του ΑΠΘ. Οι μετρούμενοι ρύποι στον σταθμό Αγ.Σοφίας είναι SO_2 , CO , NO_x , O_3 , PM_{10} και στον σταθμό του ΑΠΘ NO_x , O_3 . Τα στοιχεία που αναφέρονται στην παρούσα εργασία έχουν αντληθεί από την ιστοσελίδα της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας για το έτος 2019, για τον σταθμό της Αγ.Σοφίας, που είναι ο πλησιέστερος στο υπό μελέτη μνημείο (**Εικόνα 76**).



Εικόνα 76. Διάγραμμα Ατμοσφαιρικών Ρύπων Θεσ/νικης έτους 2019. (Πηγή: ΠΚΜ, 2020)

Η μέση ετήσια τιμή του 2019 για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) ήταν $38,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, με επτά (7) μηνιαίες τιμές να ξεπερνούν τα όρια ενημέρωσης και συναγερμού του Π.Ο.Υ. (βλ. Πίνακα 11, σελ.71) και του ΦΕΚ 1652B/08, που αφορά το πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης. Η μέση ετήσια τιμή του 2019 για το διοξείδιο του θείου (SO_2) ήταν $7,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, που δεν ξεπέρασε τα παραπάνω όρια, ενώ η μέση τιμή του 2019 για το όζον (O_3) ήταν $71,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10}) παρουσίασαν μέση τιμή $42,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, με έξι (6)

μηνιαίες τιμές άνω του ορίου ασφαλείας για την υγεία. Σημειώνεται ότι η διάβρωση των μνημείων ξεκινά και με πολύ μικρότερες τιμές ρυπαντών, από τις οριακές για την ασφάλεια της υγείας.

Όπως αναφέρεται στα συμπεράσματα της σχετικής Έκθεσης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013 της Διεύθυνσης Περιβάλλοντος και Χωρικού Σχεδιασμού της ΠΚΜ για την περιοχή της Θεσσαλονίκης, η υιοθέτηση περιβαλλοντικών πολιτικών, σε συνδυασμό με τεχνολογικές εξελίξεις για τις κύριες πηγές εκπομπών (οδικές μεταφορές, βιομηχανία) ρύπων, είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεών τους κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Έτσι, παρατηρείται καθοδική τάση στις εκπομπές των ρύπων (από το 2001 έως το 2013), ειδικότερα στις τιμές του SO₂, του CO, του NO₂ και των PM₁₀. Αντιθέτως, το O₃, που αποτελεί δευτερογενή ρύπο, δεν εμφανίζει σαφή τάση (Παπακώστα *et al.*, 2014).

Από τα παραπάνω στοιχεία για το κλίμα και την ποιότητα της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης και λαμβάνοντας υπόψιν, τη θέση του Λευκού Πύργου, που βρίσκεται σε άμεση έκθεση στο θαλάσσιο περιβάλλον του Θερμαϊκού Κόλπου και στο μέτωπο, από τη ΒΔ όψη του, των επικρατούντων ανέμων και της τροχαίας κυκλοφορίας, καθώς και την αρχιτεκτονική του (κυρίως την κυκλικότητά του και το μεγάλο ύψους του) συνάγεται ότι, το μικροκλίμα που διαμορφώνεται τελικά στην περιοχή του μνημείου είναι ένα συνονθύλευμα περιβαλλοντικών παραμέτρων, με αντικρουόμενα επιμέρους χαρακτηριστικά, που αποτελούν καθοριστικό παράγοντα και μόνιμη απειλή φθοράς, που συναρτάται από την αλληλεπίδραση των υλικών με το περιβάλλον.

3.3 Μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν

3.3.1 Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection)

Η πρώτη ενέργεια που έγινε, πριν ακόμη και τον επιτόπου οπτικό έλεγχο, ήταν η αδειοδότηση πρόσβασης στο μνημείο και στο αρχαιακό υλικό της αρμόδιας Εφορείας Αρχαιοτήτων (Εφορεία Πόλης Θεσσαλονίκης).

Αφού αυτή παραχωρήθηκε, ακολούθησε ο Οπτικός Έλεγχος, η διαδικασία του οποίου συμπεριέλαβε α) την οπτική παρατήρηση και καταγραφή των βλαβών και της φθοράς των δομικών υλικών του κτηρίου και β) τον πιθανό προσδιορισμό των αιτιών των διαφόρων μορφών διάβρωσης.

Η καταγραφή της παθολογίας του Λευκού Πύργου πραγματοποιήθηκε με επιτόπου μακροσκοπικό έλεγχο και φωτογραφική τεκμηρίωση και αφορά στις διαφορετικές μορφές

διάβρωσης που παρατηρήθηκαν στα διάφορα είδη υλικών και αρχιτεκτονικών τμημάτων. Έπειτα, καταρτίστηκε σκαρίφημα επάνω στα σχέδια μιας τυπικής κάτοψης του μνημείου, με σήμανση των θέσεων και ταυτόχρονη παράθεση εικόνων, για τις πιο χαρακτηριστικές από τις μορφές διάβρωσης που διαπιστώθηκαν. Λόγω του μεγάλου ύψους του μνημείου, η αναλυτική αποτύπωση με συμβατικά μέσα (αποστασιόμετρο, μετρητική ταινία κλπ), στάθηκε αδύνατη, για τον λόγο αυτόν οι θέσεις και οι διαστάσεις των παρατηρούμενων φθορών δίνονται προσεγγιστικά, με τη χρήση μόνο ναυτικής πυξίδας για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού τους, συνδυαστικά με τα αρχιτεκτονικά στοιχεία του μνημείου από το αρχαιολογικό υλικό.

Η φωτογραφική τεκμηρίωση έγινε με ψηφιακή SLR (Single-Lens Reflex) φωτογραφική camera και σταθερούς φακούς διαφόρων εστιακών αποστάσεων (20 mm, 50 mm, 300 mm), καθώς και έναν micro φακό 40mm, για την close-up αποτύπωση λεπτομερειών και υψής υλικών και στοιχείων διάβρωσης (π.χ. επικάλυψη αλάτων, φιλμ μικροοργανισμών) (Εικόνα 77).



Εικόνα 77. Κάμερα, φακοί και πυξίδα που χρησιμοποιήθηκαν στην τεκμηρίωση. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)

Η καταγραφή της παθολογίας, ανήκει στην τεκμηρίωση της υφιστάμενης κατάστασης του κάθε μνημείου, αλλά αποτελεί παράλληλα και μια ποιοτική προσέγγιση, πάνω στην οποία βασίζεται η διάγνωση. Με την ολοκλήρωση του οπτικού ελέγχου, οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται συμβάλλουν στην κατανόηση της κατάστασης του μνημείου και του ποσοστού φθοράς του.

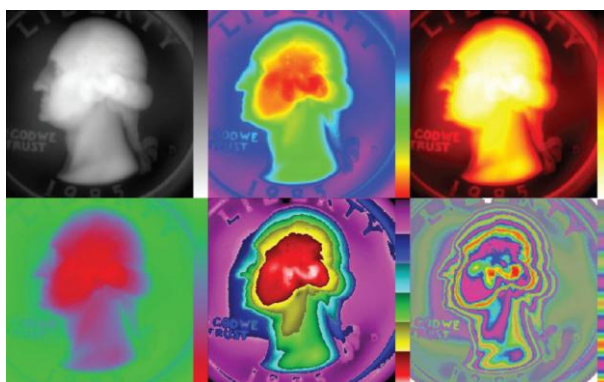
3.3.2 Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (Digital Image Processing)

Στο πεδίο της πολιτιστικής κληρονομιάς, η Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας αποτελεί μια σύγχρονη μεθοδολογική προσέγγιση τεκμηρίωσης, προς την προστασία και τη συντήρηση των δομικών υλικών των ιστορικών κτηρίων, η οποία κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος

μεταξύ των Μη Καταστρεπτικών τεχνικών, αφού, σε συνδυασμό και με άλλες μεθόδους ελέγχου συνεισφέρει στη χαρτογράφηση, των μορφών, του βαθμού και της εξέλιξης στον χρόνο, της διάβρωσης των εκτεθειμένων επιφανειών των μνημείων, καθώς και την παρατήρηση και αποτίμηση των επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης (Μοροπούλου *et al.*, 2013; Vázquez *et al.*, 2011; Zezza, 2010).

Η αρχή της μεθόδου συνίσταται στο διαφορετικό ποσοστό ανάκλασης και απορρόφησης του ορατού φάσματος (φωτός) από την εξεταζόμενη αρχιτεκτονική επιφάνεια ή υλικό, ανάλογα με σύστασή του και την κατάσταση (φθοράς) στην οποία βρίσκεται. Η διαδικασία ξεκινά με την αποτύπωση γενικών όψεων του εξεταζόμενου μνημείου και λεπτομέρειες που αφορούν στα διαφορετικά δομικά υλικά του, σε φυσικές εικόνες πλήρους χρώματος. Γίνεται χρήση φωτογραφιών, μακροφωτογραφιών, μικροφωτογραφιών οπτικής μικροσκοπίας ή ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Έτσι, λαμβάνονται οι πρώτες πληροφορίες για τον τύπο των υλικών και την ένταση της φθοράς (Μοροπούλου & Λαβρούλος, 2015; Κούρτελη, 2001).

Έπειτα, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, οι εικόνες, εφόσον ψηφιοποιηθούν, εισάγονται σε κατάλληλο πρόγραμμα λογισμικού επεξεργασίας εικόνας, με τη χρήση του οποίου αποδίδονται στις φωτογραφίες αυτές ψευδή χρώματα (pseudocolors), δηλαδή χρώματα που δεν αντιστοιχούν στα αληθή (true colors) στην ανθρώπινη οπτική αντίληψη, για τα υλικά που εξετάζονται (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).



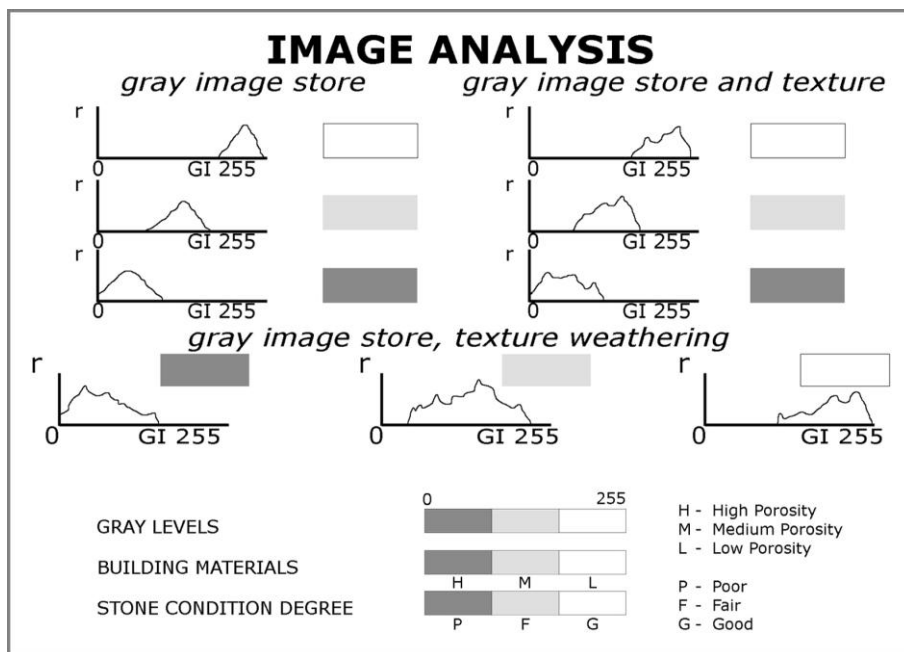
Εικόνα 78. Grayscale εικόνα και οι ψευδοχρωματικές της με διαφορετικούς LUTs. (Πηγή: Russ, 2011)

Μία ψευδοχρωματική εικόνα (pseudo-color ή false-color image) (Εικόνα 78) προκύπτει από μια grayscale εικόνα, αντιστοιχίζοντας κάθε τονική αξία του γκριζου με ένα χρώμα σύμφωνα με κάποιον προσαρμοσμένο πίνακα αναζήτησης (Look-Up Table – LUT), είτε ενσωματωμένο στο λογισμικό επεξεργασίας εικόνας, είτε διαμορφωμένο από τον χρήστη του

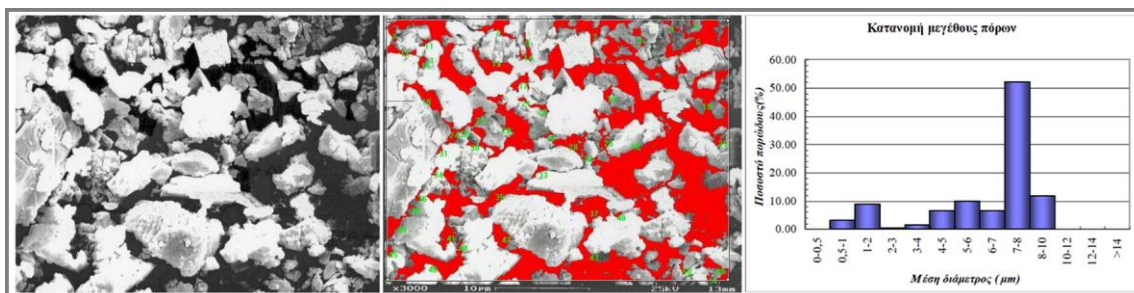
προγράμματος, αναλόγως με τις επιθυμητές πληροφορίες. Εξαιτίας ακριβώς της ανθρώπινης όρασης και της περιορισμένης αντιληπτικής ικανότητας του οφθαλμού να διαχωρίσει λεπτές διαφορές φωτεινότητας (γκρίζου), τα ψευδοχρώματα χρησιμοποιούνται προκειμένου να καταστήσουν ορατές, πληροφορίες που δεν είναι διαφορετικά αναγνώσιμες (Russ, 2011).

Με τον τρόπο αυτόν, η Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας συνιστά σημείο εκκίνησης για τη δημιουργία «χαρτών φθοράς» οποιασδήποτε αρχιτεκτονικής επιφάνειας επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες με διάφορες μορφές διάβρωσης (Vázquez *et al.*, 2011). Τα σημεία που εξετάζονται και από τα οποία λαμβάνονται εικόνες, είναι χαρακτηριστικά των περιβαλλοντικών φορτίων που δέχεται το μνημείο και που συνδέονται με τις επικρατούσες μορφές φθοράς, ανάλογα και με το μικροκλίμα της περιοχής. Έτσι, η πρώτη και πλέον σημαντική από τις εφαρμογές της μεθόδου είναι η κατάταξη και χαρτογράφηση των τύπων διάβρωσης, με αντιστοίχισή τους με τα ψευδοχρώματα, σύμφωνα με τον προηγηθέντα μακροσκοπικό οπτικό έλεγχο και την παθολογία της εξεταζόμενης τοιχοποιίας, επιτρέποντας την αποτίμηση της κατάστασης του μνημείου και υποστηρίζοντας τη λήψη αποφάσεων σχετικών με τις αποτελεσματικότερες επεμβάσεις συντήρησης. Μέσω του ποσοστού με το οποίο συμμετέχει κάθε ψευδοχρώμα στην επεξεργασμένη εικόνα και ανάλογα με τον εκάστοτε LUT που έχει επιλεγεί από τον χρήστη, μπορούν επιπλέον να εξαχθούν ποσοτικές πληροφορίες ξεχωριστά για την κάθε μορφή διάβρωσης (**Εικόνα 59**) (Μοροπούλου *et al.*, 2013; Zezza, 2010; Κούρτελη, 2001; Μοροπούλου, 2014).

Μια ακόμη από τις σχετικές εφαρμογές της μεθόδου Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας είναι η αποτίμηση του πορώδους και του βαθμού φθοράς των υλικών, ιδιαιτέρως των λίθων. Προφίλ προερχόμενα από τα ιστογράμματα των grayscale μακρο- και μικρο- φωτογραφιών, δίνουν μια πρώτη ένδειξη για τον χαρακτηρισμό του πορώδους, σύμφωνα με την Εικόνα 80 (**Εικόνα 79**) (Zezza, 2010), που έχει προκύψει από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα διαφόρων μελετών περίπτωσης σε ιστορικά κτήρια της Μεσογείου. Η θέση των προφίλ στον άξονα των τετμημένων καθορίζεται από το χρώμα του υλικού, ενώ το εύρος των διαστημάτων των επιπέδων του γκρίζου (στον οριζόντιο άξονα) μπορεί να συσχετιστεί με τα χαρακτηριστικά και την κατάσταση του υλικού (Κούρτελη, 2001). Έπειτα, μικροσκοπικές εικόνες (π.χ. φωτογραφίες SEM) επεξεργάζονται και πάλι με ψευδοχρώματα, επιτρέποντας τον υπολογισμό του πορώδους και των παραμέτρων του, όπως την κατανομή του μεγέθους και της κυκλικότητας των πόρων (**Εικόνα 80**) (Zezza, 2010; Μοροπούλου, 2014).

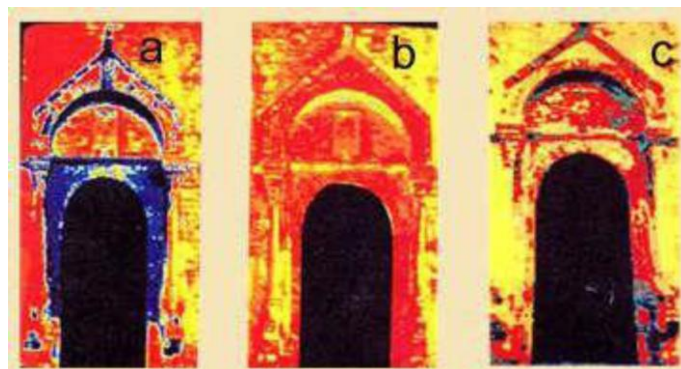


Εικόνα 79. Αποτίμηση πορώδους και βαθμού συντήρησης υλικού, βάσει ενεργειακού περιεχομένου (θέσης και εύρους γκριζων τονικοτήτων) ιστογραμμάτων. (Πηγή: Zezza, 2010)



Εικόνα 80. Παράδειγμα υπολογισμού πορώδους με τη μέθοδο DIP. Από αριστερά προς δεξιά: Φυσική grayscale εικόνα SEM. Εικόνα SEM επεξεργασμένη με ψευδοχρώματα. Διάγραμμα κατανομής πόρων. (Πηγή: Μοροπούλου, 2014)

Επιπροσθέτως, η μέθοδος χρησιμοποιείται και για την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας επεμβάσεων συντήρησης, όπου αποδίδονται με ψευδή χρώματα οι μεταβολές των χαρακτηριστικών της επιφάνειας πριν και μετά την εφαρμογή των επεμβάσεων συντήρησης (Εικόνα 81) (Μοροπούλου & Λαμπρόπουλος, 2010).



Εικόνα 81. Παράδειγμα αποτίμησης επέμβασης, Βασιλική Bari, Ιταλία. (a) Πριν τη συντήρηση, 1986. (b) Μετά τη συντήρηση, 1986. (c) 6 χρόνια μετά τη συντήρηση, 1992. (Πηγή: Zezza, 2010)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η εφαρμογή της μεθόδου της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Image Pro (Εικόνα 82), το οποίο περιέχει ένα σύνολο εντολών, που ομαδοποιούνται σε ενότητες επιλογών, ανάλογα με την επιθυμητή εργασία (π.χ. βελτίωση, η τμηματοποίηση, μετρήσεις φωτεινότητας, συμπίεση, επεξεργασία χρώματος κλπ).



Εικόνα 82. Η πλατφόρμα του προγράμματος Image-Pro για τη μέθοδο DIP. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)

Με βάση και προηγούμενες εργασίες (Κούρτελη, 2001; Μοροπούλου *et al.*, 2001; Μοροπούλου *et al.*, 1999; Ortiz *et al.*, 2017; Vazquez *et al.*, 2010; Zezza 2010), οι εικόνες που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν για ψηφιακή επεξεργασία, ήταν φωτογραφίες από την τεκμηρίωση του Πρωτογενούς Οπτικού Ελέγχου, χαρακτηριστικές των περιβαλλοντικών παραγόντων που συνδέονται με τις επικρατούσες μορφές διάβρωσης που προκαλούν. Στη συνέχεια, οι εικόνες των αρχιτεκτονικών επιφανειών, εισήχθησαν στο πρόγραμμα και αφού πρώτα μετατράπηκαν σε grayscale εικόνες, επεξεργάστηκαν με ψευδοχρώματα, με την παλέτα (LUT) ψευδών χρωμάτων «Spectrum Blue-Red», η οποία είναι ενσωματωμένη στο

λογισμικό και παρέχει τη δυνατότητα επισήμανσης και οπτικής αύξησης των διαφορετικών εντάσεων του γκριζου, ώστε να γίνουν διακριτές οι διαφορετικές υφές και μορφές φθοράς των υλικών. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν και χειροκίνητοι LUTs, δύο και τριών χρωμάτων, προκειμένου για τη μέτρηση περιοχών ενδιαφέροντος (ROI – Region Of Interest), αναλόγως με τη μορφή διάβρωσης, με την επιλογή Measure/Count Size, η οποία δίνει πληροφορίες για το εμβαδόν των περιοχών ως ποσοστό της συνολικής επιφάνειας της εικόνας, το οποίο μπορεί να αναχθεί σε πραγματική κλίμακα, εάν είναι γνωστές οι πραγματικές διαστάσεις του απεικονιζόμενου υλικού.

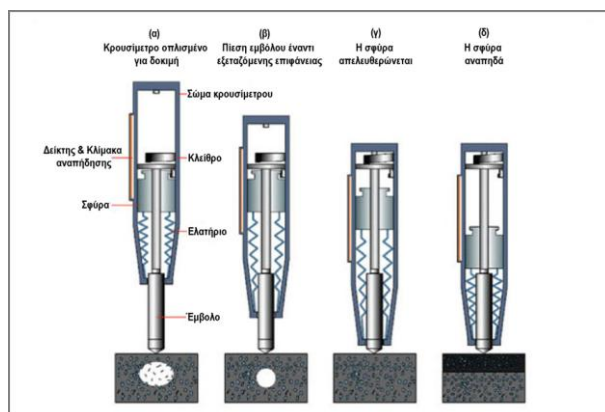
Επιπλέον των γενικών εικόνων για την ταξινόμηση των φθορών, με το πρόγραμμα επεξεργάστηκαν και μακροφωτογραφίες διαφόρων λιθοτύπων, από τους οποίους δομείται ο Λευκός Πύργος, με σκοπό έναν ενδεικτικό χαρακτηρισμό του πορώδους τους, βάσει του διαγράμματος της Εικόνας 81, το οποίο έχει προκύψει από παρόμοιες μελέτες και χρησιμοποιείται εκτενώς (Zezza, 2010; Κούρτελη, 2001; Μοροπούλου, 2014). Παρόλο που η αποτίμηση του πορώδους μέσω της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας γίνεται συνήθως με εικόνες μεγαλύτερης μεγέθυνσης (π.χ. εικόνες SEM), ώστε να διακρίνεται η δομή του υλικού, εφόσον υπήρχε η τεχνογνωσία και ο εξοπλισμός για λήψη φωτογραφιών με κάποιου βαθμού μεγέθυνση (όχι μικροσκοπικές), επιλέχθηκε να εφαρμοστεί και αυτή η δυνατότητα της μεθόδου.

3.3.3 Κρουσιμέτρηση Schmidt (Schmidt Rebound Hammer)

Η κρουσιμέτρηση, όπως περιγράφηκε συνοπτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί μία από τις Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους ελέγχου των κατασκευών.

Βασική αρχή της κρουσιμετρίας είναι η αναπήδηση μάζας. Η διαδικασία περιλαμβάνει πρωτίστως την επιλογή και σήμανση των θέσεων της δοκιμής και την ελαφριά λείανση της επιφάνειας των σημείων με τη σμυριδόπετρα, για την εξομάλυνση τυχόν ανωμαλιών. Έπειτα, το έμβολο του κρουσιμέτρου, μέσω των ελατηρίων στα οποία αυτό στηρίζεται, πιέζεται έναντι της επιφάνειας του υλικού που εξετάζεται και η σφύρα στο εσωτερικό του αυτόματα απελευθερώνεται και προκαλείται η αναπήδησή της (**Εικόνα 83**). Η δύναμη με την οποία το ελατήριο ωθεί το έμβολο είναι σταθερή και ανεξάρτητη της αντίστασης της επιφάνειας και της ταχύτητας με την οποία εκτελείται η μέτρηση. Μέρος της ενέργειας κρούσης απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα και ήχο, ενώ η υπολειπόμενη ενέργεια αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη διείσδυση από την κρούση, δηλαδή τη σκληρότητα του

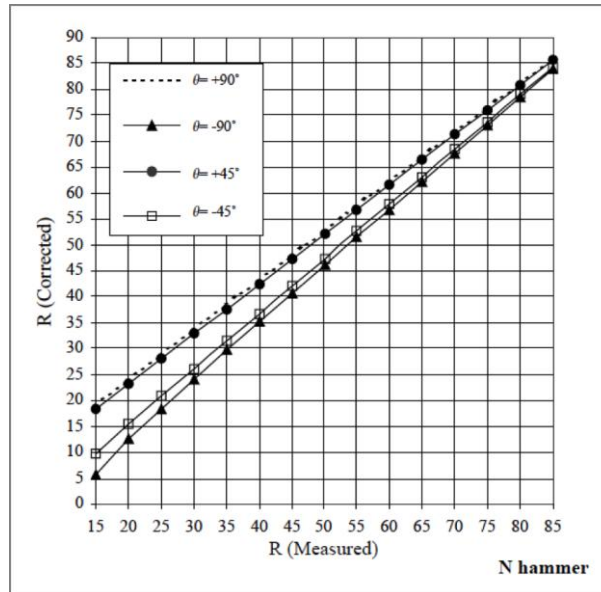
υλικού (Viles et al., 2011). Η απόσταση που διανύει το έμβολο μετά την κρούση είναι η τιμή αναπήδησης R, η οποία είναι ανάλογη με τη σκληρότητα του υλικού και καταδεικνύεται με δείκτη σε διαβαθμισμένη κλίμακα προσαρτημένη στο κρουσίμετρο, με εύρος 10-100 (**Εικόνα 66**) (Aydin & Basu, 2005).



Εικόνα 83. Φάσεις δοκιμής κρουσιμετρίας. (Πηγή: Pereira & de Medeiros, 2012, απόδοση Μαρινέλλου, 2020)

Επειδή η τιμή της αναπήδησης R επηρεάζεται από τις βαρυτικές δυνάμεις, οι τιμές που προκύπτουν από μη οριζόντιες κρούσεις, πρέπει να κανονικοποιούνται αναφορικά με την οριζόντια διεύθυνση, με τη χρήση των καμπυλών διόρθωσης που δίνονται από τον κατασκευαστή του κάθε οργάνου (Aydin, 2008; Aydin & Basu, 2005; Basu & Aydin, 2004; Kolaiti & Papadopoulos, 1993), συμπέρασμα στο οποίο συγκλίνουν αμφότερες και οι εταιρίες ISRM (International Society for Rock Mechanics – Διεθνής Εταιρία Βραχομηχανικής) και ASTM (American Society for Testing & Materials – Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών) (**Εικόνα 84**).

Βέβαια, οι καμπύλες αυτές δεν είναι πάντα ακριβείς για όλες τις επιφάνειες των λίθων και συχνά περιορίζονται σε δύο ή τέσσερις διευθύνσεις ($\pm 45^\circ$ & $\pm 90^\circ$), ενώ σε επιτόπου συνθήκες η διεύθυνση εφαρμογής μπορεί να ποικίλλει (Aydin, 2008; Basu & Aydin, 2004). Πάνω σε αυτό ο Aydin (Aydin, 2008) τονίζει επίσης ότι, ανεξαρτήτως της διεύθυνσης της κρούσης, το έμβολο πρέπει να παραμένει όσο το δυνατόν κάθετο στην εξεταζόμενη επιφάνεια, ώστε να εφάπτεται εξ ολοκλήρου στο υλικό, διαφορετικά υπάρχει η πιθανότητα ολίσθησης του άκρου του και ο κίνδυνος τμηματικής αποκόλλησης του υλικού (Aydin, 2008).



Εικόνα 84. Διάγραμμα αναγωγής τιμών αναπήδησης στην οριζόντια διεύθυνση. (Πηγή: Aydin & Basu, 2005)

Μέσω της μεθόδου της κρουσιμέτρησης εκτιμάται, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS) του εξεταζόμενου υλικού, μέσω των καμπυλών συσχέτισης με την τιμή αναπήδησης R , που βρίσκονται τυπωμένες επάνω σε κάθε όργανο (Εικόνα 67) (Menéndez, 2016). Η συσχέτιση της τιμής αναπήδησης με διάφορες ιδιότητες των πετρωμάτων (θλιπτική αντοχή, εφελκυστική αντοχή, δείκτη σημειακής φόρτισης, ταχύτητα υπερήχων κλπ) έχει ερευνηθεί σε πολλές μελέτες (π.χ. Kahraman, 2001; Yilmaz & Sendir, 2002; Yaşar & Erdoğlan, 2004; Aydin & Basu, 2005) (Πίνακας 16) που έχουν πλέον καταστήσει αξιόπιστη τη μέθοδο Schmidt (Niedzielski *et al.*, 2009), στις οποίες όμως επιπλέον τονίζεται ότι απαιτείται εξαιρετική προσοχή σε παράγοντες, από τους οποίους εξαρτάται η σχέση αυτή, σχετικούς με την ποιότητα της επιφάνειας του υλικού, όπως είναι η συμπύκνωση, η υγρασία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Σπανός *et al.*, 2001). Ιδιαίτερη προσοχή εφιστάται επίσης σε τυχόν διαβρώσεις των επιφανειών, καθώς η σκληρότητα πολλών υλικών διαφοροποιείται αρκετά λόγω γυψοποίησης και ανάπτυξης ανθρακικών και άλλων κρουστών (Viles *et al.*, 2011).

Για τον λόγο αυτόν, από τους περισσότερους μελετητές, προτείνεται οι δοκιμές με κρουσίμετρο Schmidt να διεξάγονται με ιδιαίτερη επιμέλεια και προδιαγραφές, που περιλαμβάνουν καθαρισμό της υπό εξέταση επιφάνειας, αποφυγή καλυμμένων από βιογενείς ή άλλων ειδών κρούστες επιφανειών, επαρκή απόσταση από ρηγματώσεις και αποφυγή ημερών με μεγάλη σχετική υγρασία ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (Aydin, 2008).

Για τον απαιτούμενο αριθμό κρούσεων ανά θέση και τις γεωμετρικές προδιαγραφές της επιφάνειας του εξεταζόμενου υλικού, έχει διεξαχθεί πλήθος μελετών, με διαφορετικές συστάσεις και συμπεράσματα κάθε φορά (Niedzielski *et al.*, 2009). Ο Aydin (2008) προτείνει μια μέθοδο, εγκεκριμένη από την ISRM, με είκοσι (20) κρούσεις σε κάθε θέση και διαφορά απόστασης μεταξύ των κρούσεων τουλάχιστον ίση του πλάτους του εμβόλου. Συστήνει επίσης την συμπερίληψη όλων των μετρήσεων στον στατιστικό υπολογισμό, χωρίς να απορρίπτονται τιμές πολύ χαμηλότερες ή πολύ υψηλότερες του μέσου όρου. Άλλες μελέτες προασπίζονται διαφορετικές μεθόδους, όπως αυτή του Yanuz *et al.* (Yanuz *et al.*, 2006), που λαμβάνει είκοσι (20) μετρήσεις και χρησιμοποιεί στον υπολογισμό τις δέκα (10) υψηλότερες, ενώ ο Gurta (Gurta, 2009) λαμβάνει πενήντα (50) τιμές αναπήδησης σε κάθε θέση, από τις οποίες απορρίπτει τις δέκα (10) υψηλότερες και δέκα (10) χαμηλότερες (Viles *et al.*, 2011). Άλλη μία συχνά αναφερόμενη πηγή για τη διαδικασία της κρουσιμέτρησης είναι αυτή του Selby (Selby, 1980), στην οποία προτείνεται ο αριθμός των μετρήσεων να κυμαίνεται μεταξύ δεκαπέντε (15) και εικοσιπέντε (25), αλλά επιπλέον τονίζεται ότι, πιο αξιόπιστα αποτελέσματα λαμβάνονται όταν αποκλείεται το 20% από τις υψηλότερες και χαμηλότερες τιμές και ταυτόχρονα η απόκλιση των υπολοίπων από τον μέσο όρο δεν ξεπερνά τις 3 μονάδες (Niedzielski *et al.*, 2009).

Προδιαγραφές για τη διαδικασία της κρουσιμέτρησης ορίζονται από πρότυπο prEN 12504-2 (Testing concrete in structures Part 2: Non-destructive testing — Determination of rebound number).

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, η μέθοδος της κρουσιμετρίας πραγματοποιήθηκε με κρουσίμετρο PROCEQ τύπου «N», περιμετρικά της εξωτερικής τοιχοποιίας του Λευκού Πύργου και σε ύψος μέχρι ~1,50m από τη βάση του στο επίπεδο της πλατείας, καθώς και στην εξωτερική τοιχοποιία του πυργίσκου, σε ύψος μέχρι ~0,80m από το δάπεδο του περιδρόμου (**Εικόνα 85**).

Οι περιοχές των θέσεων της δοκιμής καθορίστηκαν από τον πρωτογενή οπτικό έλεγχο, σύμφωνα με τα διαφορετικά ρυπαντικά φορτία κάθε είδους και τον βαθμό που αυτά προσβάλλουν τις επιφάνειες των όψεων του μνημείου. Επιλέχθηκαν έτσι τρεις διαφορετικές περιοχές, μία στη ΒΔ όψη, έναντι του μετώπου της τροχαίας κυκλοφορίας και των ανέμων, μία στη Δ-ΝΔ όψη, έναντι του μετώπου της θάλασσας και μία ΝΑ.

Πίνακας 16. Αναφορές και εξισώσεις συσχέτισης σκληρότητας Schmidt με διάφορες μηχανικές ιδιότητες. (Πηγή: Jamshidi et al., 2016)

References	Rock type	Equation	R or R ²
Aufmuth (1973)	25 lithologic types	$UCS = 6.9 \times 10^{[1.348 \log(H_R \times \rho) - 1.325]}$	NA
Singh et al. (1983)	30 Sedimentary unit	$UCS = 2 H_R$	R = 0.72
Haramy and DeMarco (1985)	10 different US locations	$UCS = 0.994H_R - 0.383$	R ² = 0.70
Cargill and Shakoor (1990)	Carbonate	$UCS = 1.8 \times 10^{-2} (H_R \times \rho_d) + 2.9$	NA
Kahraman (2001)	48 different rocks	$UCS = 6.97e^{0.014 H_R \times \rho}$	R = 0.78
Yılmaz and Sendir (2002)	Gypsum	$UCS = \exp.(0.818 + 0.059H_R)$	R = 0.98
Yasar and Erdogan (2004b)	Limestone, marble, basalt, and sandstone	$UCS = 4 \times 10^{-6} (H_R)^{4.2917}$	R = 0.89
Kilic and Teymen (2008)	Sedimentary, metamorphic and igneous	$UCS = 0.0137H_R^{2.2721}$	R ² = 0.94
Cobanoglu and Celik (2008)	Sandstone, limestone and cement mortar	$UCS = 6.59H_R - 212.63$	R ² = 0.65
Bell and Lindsay (1999)	Sandstones	BTS and H _R	R = 0.58
Bell (1978)	Sandstones	BTS and H _R	R = 0.72
Bell (1994)	Anhydrite and gypsum	BTS and H _R	R = 0.80
Bell and Lindsay (1999)	Sandstones	I _S and H _R	R = 0.69
Bell (1978)	Sandstones	I _S and H _R	R = 0.68
Bell (1994)	Anhydrite and gypsum	I _S and H _R	R = 0.92

H_R Schmidt hardness, UCS unconfined compressive strength, BTS Brazilian tensile strength, I_S Point load strength, R² Determination coefficient, R Regression coefficient, NA not available



Εικόνα 85. Κρουσιμέτρο και σήμανση θέσεων δοκιμής στη ΒΔ όψη του Α.Πύργου. (Φωτ.: Μαρνέλλου, 2020)

Οι θέσεις των κρούσεων μοιράστηκαν εξίσου στις τρεις βασικές κατηγορίες υλικών του Πύργου, ήτοι: λίθοι, πλίνθοι και κονιάματα, με επτά (7) θέσεις ανά υλικό και ανά περιοχή δοκιμής και πέντε (5) κρούσεις ανά θέση, ενώ στον Πυργίσκο έγιναν μετρήσεις στη ΒΔ και στη Δ-ΝΔ περιοχή, με τέσσερις (4) θέσεις ανά υλικό και πέντε (5) κρούσεις ανά θέση. Ενδεικτικά, λήφθηκε μέτρηση και από την εσωτερική πλευρά μίας εκ των επάλξεων στη ΝΔ πλευρά, με (4) θέσεις και πέντε (5) κρούσεις ανά θέση. Συνολικά, λήφθηκαν εκατόν εξήντα πέντε (165) μετρήσεις ανά κατηγορία υλικού, από τις εξωτερικές τοιχοποιίες. Οι κρούσεις ήταν στο σύνολό τους οριζόντιες, συνεπώς δεν υπέστη ανάγκη κανονικοποίησης των τιμών αναπήδησης R που μετρήθηκαν, ενώ για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής (UCS) των υλικών που μετρήθηκαν, ακολουθήθηκε το νομογράφημα του κρουσιμέτρου.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

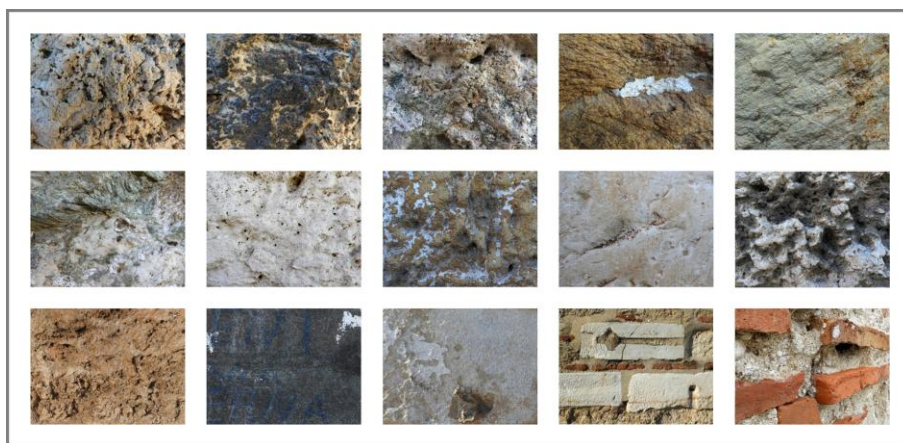
4.1 Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection)

Από τον Οπτικό Έλεγχο, προέκυψε η διάγνωση και καταγραφή των διαφόρων μορφών φθοράς των δομικών υλικών του Λευκού Πύργου, με επιτόπου μακροσκοπικό έλεγχο και φωτογραφική τεκμηρίωση. Εξετάστηκε η εξωτερική τοιχοποιία του μνημείου σε ολόκληρη την περιφέρειά του, συμπεριλαμβανομένου και του πυργίσκου και σε ύψος που ήταν εφικτό με τα διατιθέμενα μέσα, με έμφαση σε σημεία χαρακτηριστικά των περιβαλλοντικών φορτίων που συνδέονται με τα πιθανά αίτια των διαφόρων μορφών διάβρωσης.

Έτσι, παρατηρήθηκαν και καταγράφηκαν τα εξής:

- Τα διάφορα δομικά υλικά του μνημείου, τα οποία ομαδοποιήθηκαν σε τρεις βασικές κατηγορίες, που αποτελούν και τις κυριότερες των ιστορικών υλικών, δηλαδή:
 - Λίθοι
 - Πλίνθοι
 - Κονιάματα

Είναι αξιοσημείωτη η μεγάλη ποικιλία λιθοτύπων (), για την αναγνώριση και ταξινόμηση των οποίων απαιτείται περαιτέρω ορυκτολογική διερεύνηση. Σε ορισμένα σημεία, ελάχιστα στο σύνολο του μνημείου και μόνο στην Β-ΒΑ όψη, όπου βρίσκεται και η είσοδος, παρατηρήθηκαν σχηματισμένοι λίθοι, κυρίως μάρμαρα, οι οποίοι φαίνεται να είναι επαναχρησιμοποιημένα υλικά (*spolia*) (Εικόνα 86).



Εικόνα 86. Λιθότυποι εξωτερικής τοιχοποιίας Λ.Πύργου. Κάτω δεξιά *spolia* και πλίνθοι-συνδετικό κονίαμα.

Από τις πλίνθους, κάποιες της περιφερειακής τοιχοποιίας είναι νέα υλικά από την αποκατάσταση του 1983-1985, ενώ οι πλίνθοι της επικάλυψης των επάλξεων είναι στο σύνολό τους νέα υλικά (Εικόνα 87).



Εικόνα 87. Δείγμα πλίνθου παραλιακής όψης.

Τα συνδετικά κονιάματα είναι σε μεγάλο μέρος της τοιχοποιίας νέα τσιμεντο-ασβεστοκονιάματα (Εικόνα 88), ενώ σε μεγάλο μέρος της επιφάνειας διακρίνονται παλιότερα ασβεστίτικα επιχρίσματα (Εικόνα 89).



Εικόνα 88. Δείγμα κονιάματος παραλιακής όψης.



Εικόνα 89. Υπολείμματα παλιών επιχρισμάτων.

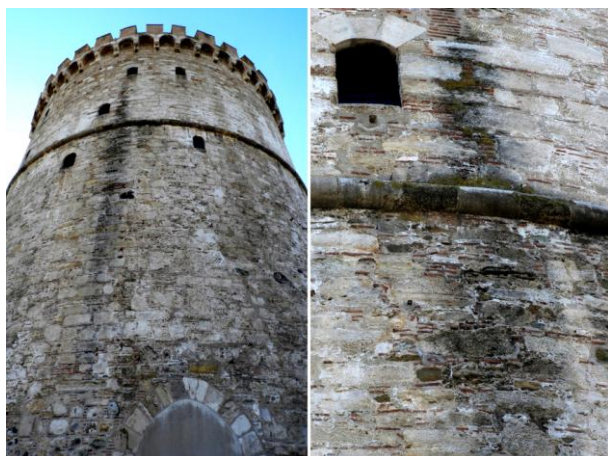
Επίσης παρατηρήθηκαν, σε συγκεκριμένα σημεία της τοιχοποιίας μεταλλικοί σύνδεσμοι, πιθανόν ελκυστήρες και σκυρόδεμα στα πρέκια των ορθογώνιων παραθύρων και στο δάπεδο του πυργίσκου.

➤ Στη ΒΑ (34^ο) πλευρά του Λευκού Πύργου, βρίσκεται η μοναδική είσοδος του Πύργου, στο υπέρθυρο τόξο της οποίας, όπως προαναφέρθηκε, υπήρχε επιγραφή που, μετά την απομάκρυνσή της, έχει αντικατασταθεί από τσιμεντοκονία. Στην επιφάνεια του κονιάματος εμφανίζονται τριχοειδείς ρωγμώσεις, οι οποίες μπορεί να οφείλονται είτε σε θερμοκρασιακές μεταβολές, λόγω της κρυστάλλωσης του νερού των πόρων του τσιμέντου σε περάσματα από τους 0^οC, είτε στη συστολή ξήρανσής του. Εγκάρσια στη διεπιφάνεια μεταξύ κονιάματος και λίθων, εμφανίζονται εξανθήσεις αλάτων, πιθανόν από απόπλυση των συστατικών της τσιμεντόπαστας, είτε από μετατροπή του ασβεστιτικού υλικού των υπερκείμενων λίθων, αλλά και του τσιμέντου, σε ανακρυσταλλωμένο ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃), υπό την επίδραση του, οξεισμένου από το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), νερού της βροχής (**Εικόνα 90**).



Εικόνα 90. ΒΑ όψη: είσοδος Πύργου, εξανθήσεις αλάτων.

➤ Στην Α-ΒΑ (70^ο) πλευρά του Λευκού Πύργου, παρατηρείται από το ύψος του 5^{ου} ορόφου κατακόρυφα προς τα κάτω, μαύρη πάτινα, με την ανάλογη χρωματική μεταβολή, στην οποία έχει αναπτυχθεί βιογενής κρούστα (**Εικόνα 91**), που μαρτυρεί τη ροή ενδογενούς στην τοιχοποιία υγρασίας. Η μαύρη πάτινα ενδεχομένως να οφείλεται στη βιολογική δραστηριότητα των οργανισμών που φαίνεται καθαρά ότι έχουν αποικήσει το τμήμα αυτό της τοιχοποιίας, όμως υπάρχει και η πιθανότητα να έχει σχηματιστεί από χαλαρές αποθέσεις αέριων ρύπων, αστικών και κυκλοφοριακών, είτε και από συνδυασμό των δύο μηχανισμών. Ίδιας μορφής πάτινες παρατηρήθηκαν και σε άλλα σημεία του μνημείου (NNA-N 171^ο), κατακόρυφα από το ύψος των φουρουσιών.



Εικόνα 91. Α-ΒΑ όψη: Μαύρη πάτινα, βιογενής κρούστα.

➤ Στην Ν-ΝΑ (150°) και Ν-ΝΔ (198°) πλευρά του Λευκού Πύργου, παρατηρούνται σε όλο σχεδόν το ύψος της τοιχοποιίας, διάσπαρτοι μεγάλοι σχηματισμοί λευκής κρούστας. Είναι βέβαιο ότι πρόκειται για υπολείμματα παλαιότερων επιχρισμάτων του Πύργου, μένει όμως να διερευνηθεί η πιθανότητα, είτε γυψοποίησης τους και απόπλυσης με το νερό της βροχής, είτε οξίνισής τους σε σκληρή ανθρακική κρούστα, υπό την επίδραση των αέριων ρύπων SO_2 και CO_2 αντίστοιχα (Εικόνα 92).



Εικόνα 92. Ν-ΝΑ όψη: Υπολείμματα επιχρισμάτων, λευκή κρούστα.

➤ Στη Δ-ΝΔ (250°) πλευρά του Λευκού Πύργου είναι εμφανή τα νέα υλικά που έχουν συμπληρώσει την τοιχοποιία μετά την καθαίρεση του οικίσκου (φυλάκιο ή παρεκκλήσι) που υπήρχε μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Τα νέα υλικά εμφανίζουν επικαθίσεις αλάτων, κυρίως λίθι, ενώ στις πλίνθους παρατηρείται απόξεση και

απόσπαση μικροτεμαχίων. Η επιφάνεια του συνδετικού κονιάματος έχει οπισθοχωρήσει αρκετά, είτε από ανθρώπινη παρέμβαση, είτε από την επίδραση του θαλάσσιου αερολύματος (**Εικόνα 93**). Την ίδια εικόνα παρουσιάζει και στη Δ (272^ο) πλευρά του Λευκού Πύργου το τμήμα με τον κεραμικό διάκοσμο και πέριξ αυτού (**Εικόνα 94**).



Εικόνα 93. Δ-ΝΔ όψη: Νέα υλικά. Απόσπαση κόκκων κονιάματος, οπισθοχώρηση επιφάνειας, απόξεση πλίνθων.



Εικόνα 94. Δ όψη: Κεραμικός Διάκοσμος. Απόσπαση κόκκων, οπισθοχώρηση επιφάνειας, επικαθίσεις στις πλίνθους.

➤ Στη Δ-ΒΔ πλευρά κυρίως, αλλά και σε άλλες πλευρές του μνημείου, στις προστατευμένες από τη βροχή επιφάνειες του συνόλου των φουρουσιών και των τοξυλίων, παρατηρούνται μαύρες αποθέσεις και κρούστες, από αέριους ρύπους και αιωρούμενα σωματίδια. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα φουρούσια, στο σύνολό τους σχεδόν, όπως έχει προαναφερθεί, είναι νέα λιθοσώματα από την επέμβαση του 1983-1985 (**Εικόνα 95**).



Εικόνα 95. Δ-ΒΔ όψη (291^ο): Γυψοποίηση και μαύρη κρούστα στα φουρούσια.

➤ Στη Β (353^ο) πλευρά του Λευκού Πύργου, έναντι του μετώπου της τροχαίας κυκλοφορίας και στη ροή των επικρατέστερων ανέμων της περιοχής, παρατηρείται ζώνη με μαύρες αποθέσεις, από αέριους ρύπους και αιωρούμενα σωματίδια. Η ζώνη δείχνει να εξελίσσεται περιμετρικά, καθώς παρατηρείται γύρω της μεταβολή του χρώματος της αρχιτεκτονικής επιφάνειας (Εικόνα 96).



Εικόνα 96. Β όψη: Μαύρες χαλαρές αποθέσεις.

➤ Στην εξωτερική τοιχοποιία του πυργίσκου (6^{ος} όροφος) μπορούν να εξεταστούν εγγύτερα οι επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων και της όξινης βροχής, που έχουν γυψοποιήσει τα ασβεστιτικά πετρώματα των φουρουσιών και του γείσου του πυργίσκου. Στα προστατευμένα από την έκπλυση της βροχής τμήματα, φαίνονται καθαρά οι σχηματισμοί γύψου και μαύρης κρούστας και η σταδιακή απαλοιφή της αρχιτεκτονικής των λίθων των φουρουσιών (Εικόνα 97; Εικόνα 98).

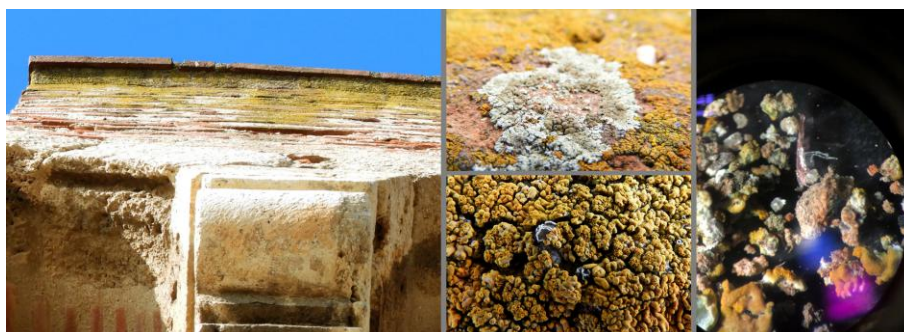


Εικόνα 97. Πυργίσκος: Γυψοποίηση και μαύρη κρούστα σε φουρούσια και γείσο.



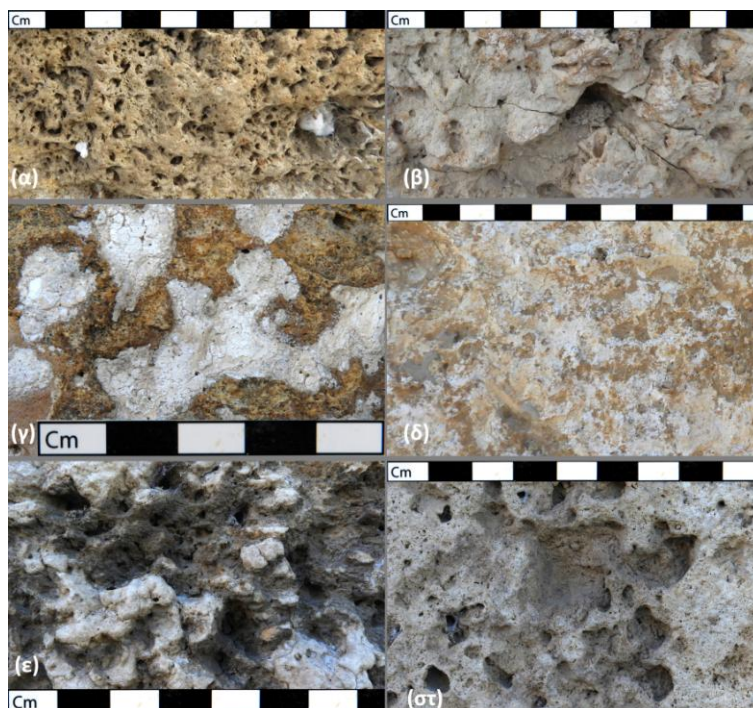
Εικόνα 98. Σταδιακή απαλοιφή λιθώματος φουρουσιού.

➤ Το σύνολο σχεδόν των επάλξεων, οι περισσότερες από τις οποίες έχουν μεγάλο βαθμό έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, τόσο στη βάση τους, όσο και στη στέψη, είναι επικαλυμμένες με βιογενή κρούστα. Η εξέταση σε στερεοσκόπιο έδειξε ότι πρόκειται πιθανόν για επιλιθικό αποικισμό κρουστωδών λειχήνων (crustose lichen), αφού παρουσιάζουν την τυπική μορφολογική δομή των λειχήνων, δηλαδή ενός συμβιωτικού οργανισμού που αποτελείται από ένα φωτοσυνθετικό στοιχείο (πράσινα φύκη ή κυανοβακτήρια) και ένα μυκητιώδες στοιχείο (συνήθως νηματοειδείς μύκητες) και είναι σταθερά συνδεδεμένο με το υπόστρωμα του δομικού υλικού (Nash, 1996). Στη στερεοσκοπική παρατήρηση εντοπίστηκαν επίσης πιθανά ίχνη πρωτοζώων (Εικόνα 99).



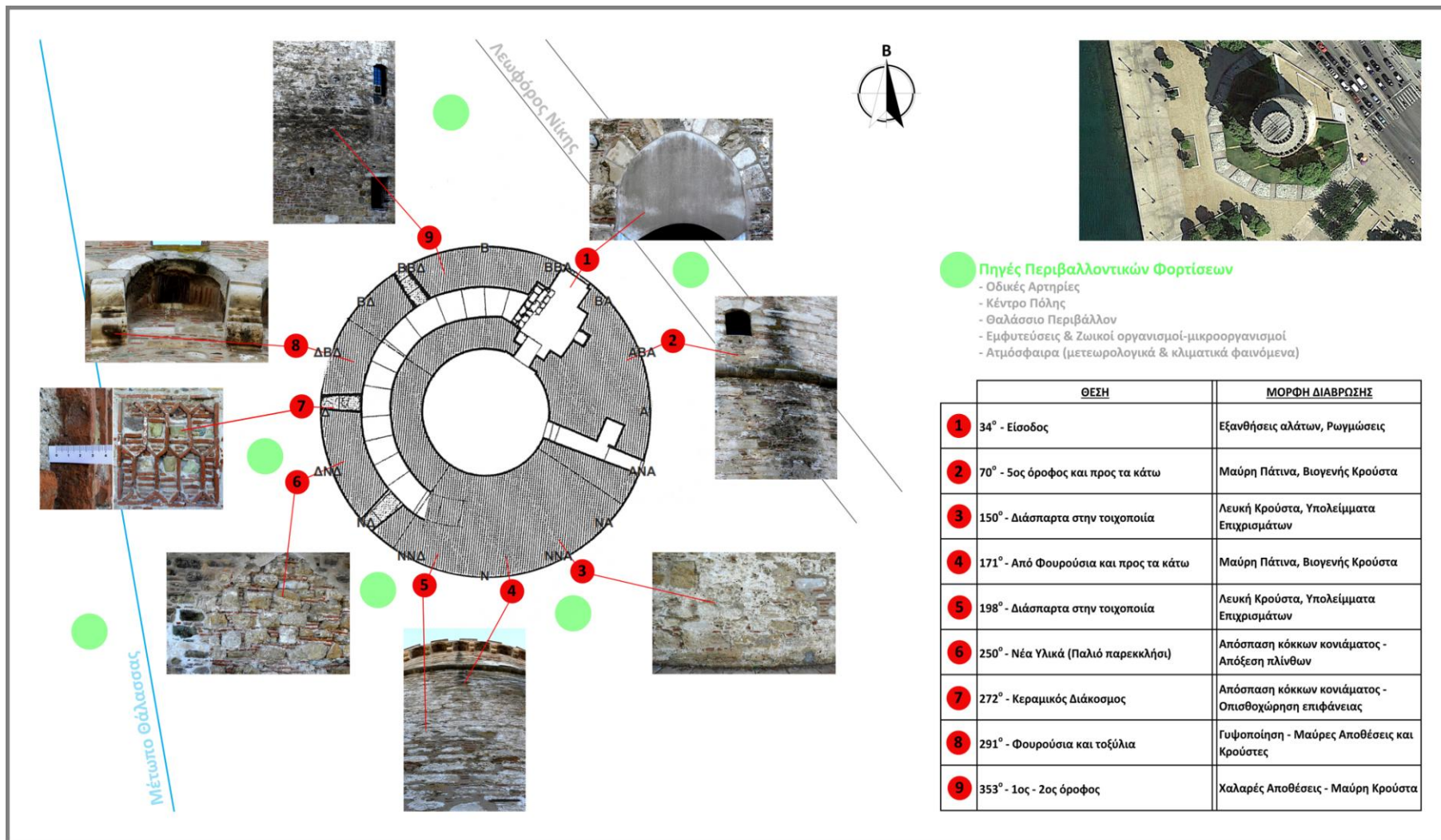
Εικόνα 99. Επάλξεις: Βιογενείς κρούστες (λειχήνες, άλγη, μύκητες).

➤ Μακροφωτογραφίες από διάφορους δομικούς λίθους του Λ.Πύργου έδειξαν σε μεγέθυνση τις κυριότερες από τις μορφές φθοράς που εντοπίστηκαν στο μνημείο (Εικόνα 100).



Εικόνα 100. Μακροφωτογραφίες λιθοτύπων: (α) Βελονοειδής διάβρωση. (β) Ρωγμώσεις & επικαθίσεις αλάτων. (γ) Υπολείμματα επιχρισμάτων. (δ) Επικαθίσεις αλάτων. (ε) Μαύρες αποθέσεις. (στ) Αρχή κυψέλωσης.

Πρέπει τέλος, να σημειωθεί ότι, πέρα από τις ρωγμώσεις που παρατηρήθηκαν στο υπέρθυρο τόξο της εισόδου και αποσπασματικές μικρορηγματώσεις σε λίθους σε τυχαίες θέσεις, το μνημείο δεν παρουσιάζει κανένα δείγμα εμφανών σοβαρών ρωγμών, ούτε και είναι πλέον εμφανείς οι αποκατεστημένες, στις εργασίες του 1983-1985, διαμήκεις ρωγμές της ΒΔ και Ν όψης του Πύργου.

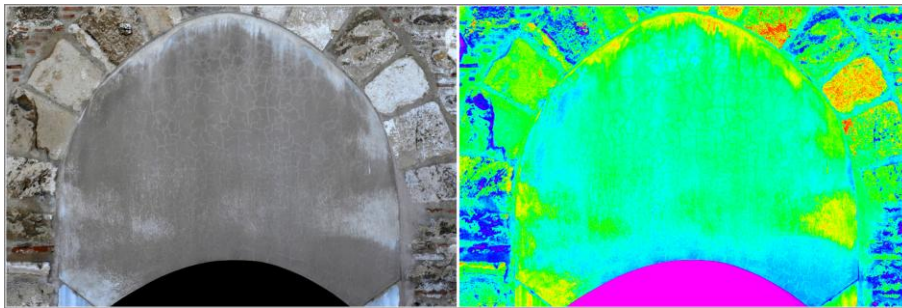


Εικόνα 101. Χάρτης παρατηρούμενων μορφών διάβρωσης.

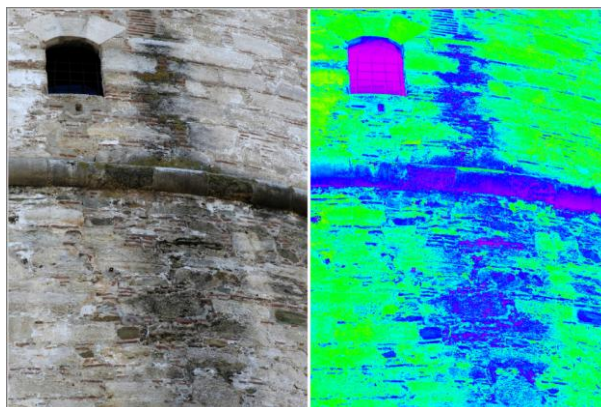
4.2 Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας (Digital Image Processing)

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας επιλέχθηκαν, για τη μέθοδο της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας, φωτογραφίες από την τεκμηρίωση του Πρωτογενούς Οπτικού Ελέγχου, χαρακτηριστικές των περιβαλλοντικών παραγόντων που συνδέονται με τις επικρατούσες μορφές διάβρωσης που προκαλούν. Επιλέχθηκε το καταλληλότερο από τα διατιθέμενα συστήματα (LUTs) ψευδών χρωμάτων, ώστε το ίδιο χρώμα να αποδίδει τον ίδιο τύπο φθοράς σε όλες τις εικόνες.

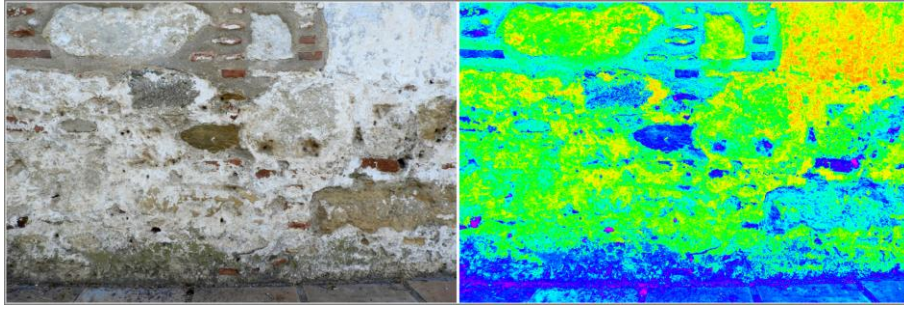
Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 102; Εικόνα 103; Εικόνα 104; Εικόνα 105; Εικόνα 106; Εικόνα 107; Εικόνα 108; Εικόνα 109**) παρουσιάζεται η γενική χαρτογράφηση φθοράς των επιφανειών βάσει ψηφιακής επεξεργασίας, σε σύγκριση με τις φυσικές φωτογραφίες. Η ερμηνεία των ψευδών χρωμάτων που εισάγονται για να αποδώσουν τις μορφές της φθοράς, παρουσιάζονται στον Πίνακα 17 (**Πίνακας 17**).



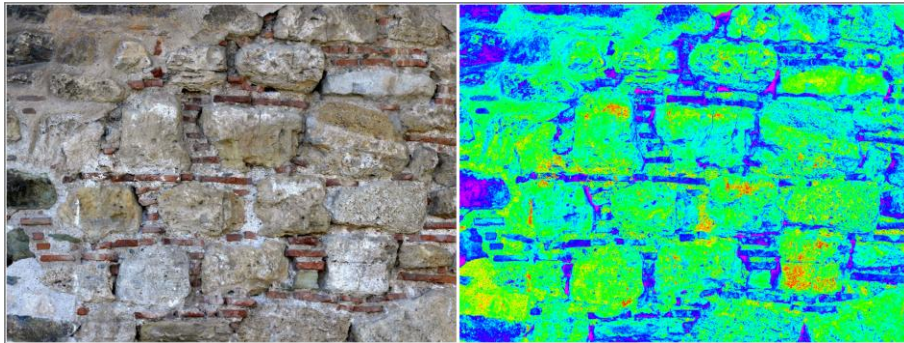
Εικόνα 102. ΒΑ όψη: είσοδος Πύργου. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.



Εικόνα 103. Α-ΒΑ όψη: Μαύρη πάτινα, βιογενής κρούστα. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.



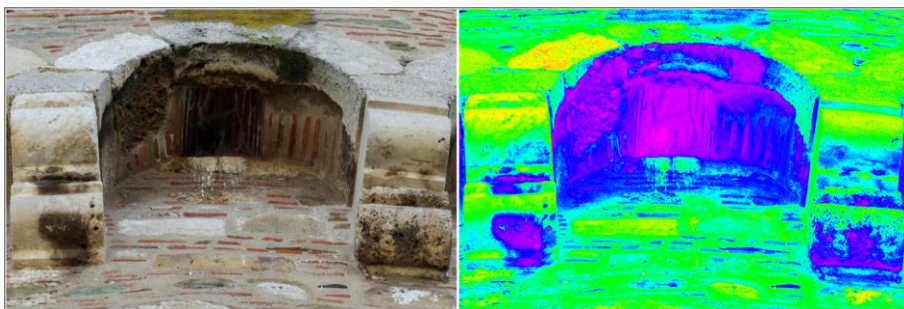
Εικόνα 104. Υπολείμματα παλιών επιχρισμάτων, λευκή κρούστα. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.



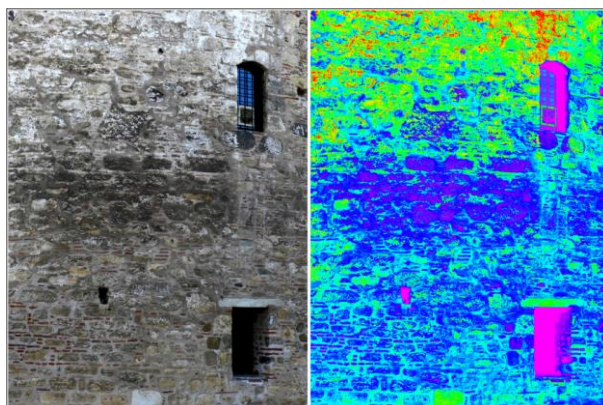
Εικόνα 105. Δ-ΝΔ όψη: Απόσπαση κόκκων κονιάματος, οπισθοχώρηση επιφάνειας, επικαθίσεις αλάτων. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.



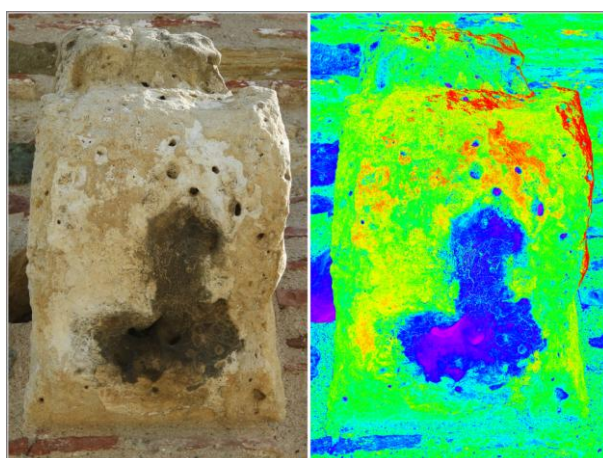
Εικόνα 106. Δ όψη: Οπισθοχώρηση επιφάνειας, επικαθίσεις. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.



Εικόνα 107. Δ-ΒΔ όψη: Μαύρες κρούστες, δημιουργία κρατήρων, αρχή κυψελώσεων. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.



Εικόνα 108. Β όψη: Μαύρες χαλαρές αποθέσεις, αρχή κυψελώσεων. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.

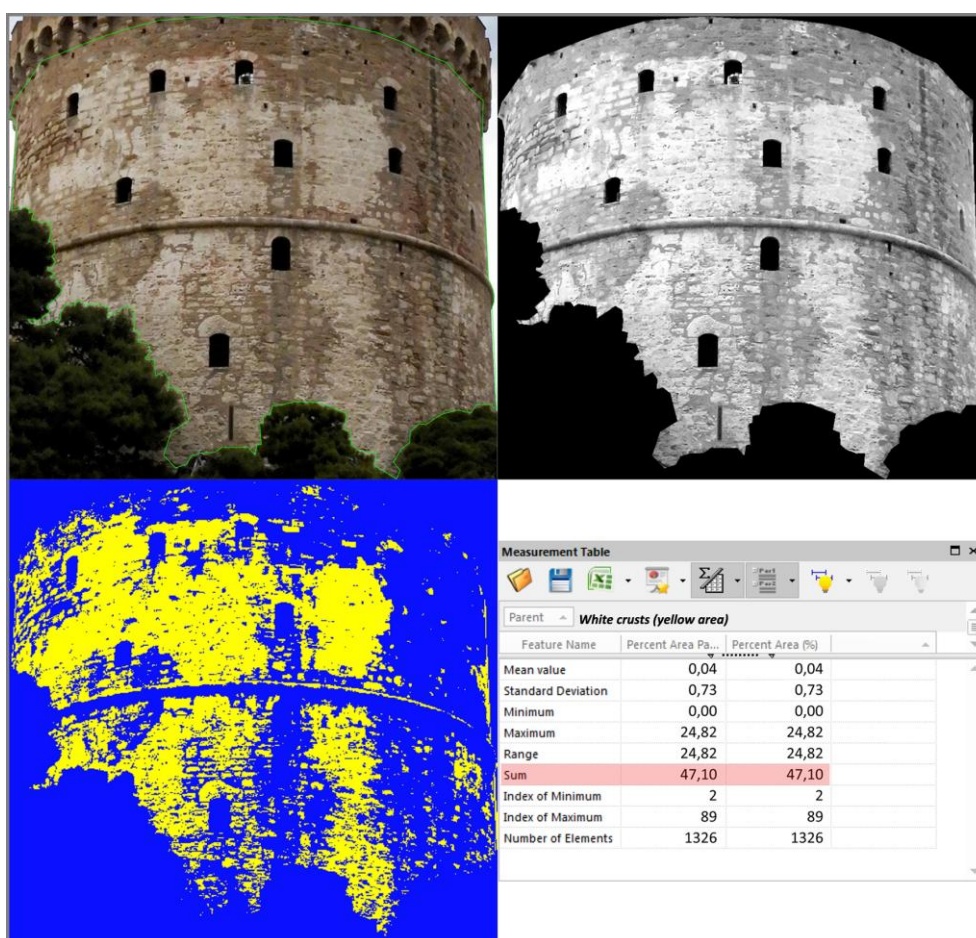


Εικόνα 109. Γυψοποιημένη επιφάνεια (λευκή κρούστα) με μαύρη κρούστα, δημιουργία κρατήρων. Φυσική & επεξεργασμένη εικόνα.

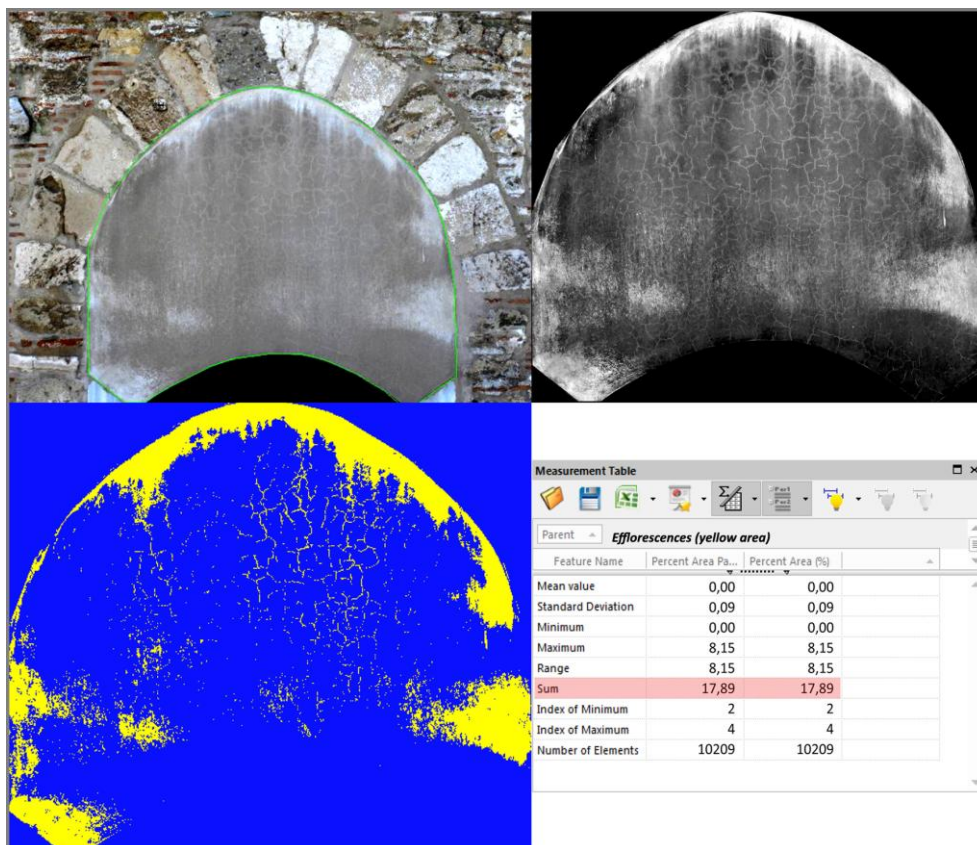
Πίνακας 17. Ερμηνεία συστήματος ψευδοχρωμάτων για τη χαρτογράφηση της φθοράς.

Ερμηνεία Συστήματος Χρωμάτων	Επίπεδο Γκρίζου (περιεχόμενη ενέργεια) στη φωτογραφία	Χρώμα	Τύπος Φθοράς
	Προς το μαύρο	Προς το μαύρο	Βιολετί
Μπλε			Βιογενείς και Μαύρες κρούστες Χαλαρές Αποθέσεις
Κυανό			Γκρίζες Κρούστες Χρωματικές αλλοιώσεις
Προς το λευκό		Κίτρινο	Εξανθήσεις αλάτων Αποπλυμένες επιφάνειες
		Πορτοκαλί	Λευκές κρούστες Επικαθίσεις αλάτων

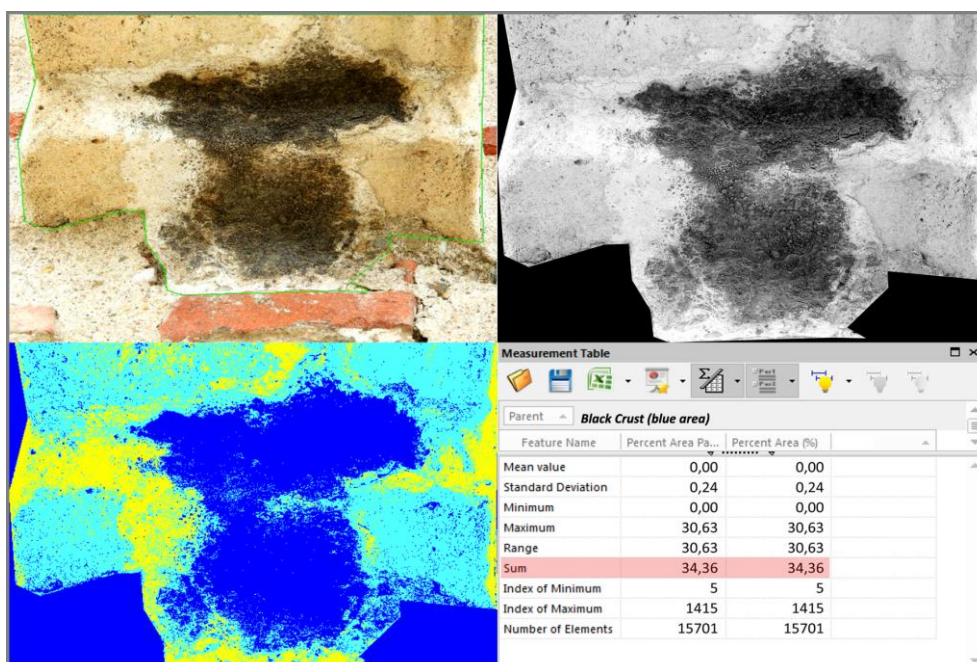
Για την αποτίμηση της έκτασης της φθοράς, ανάλογα με τη μορφή, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των διαβρωμένων επιφανειών, με τη σχετική επιλογή του λογισμικού, μέσω ολοκλήρωσης των ψευδοχρωματισμένων επιφανειών, σε εικόνες που επεξεργάστηκαν με χειροκίνητα συστήματα δύο ή τριών ψευδών χρωμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται σε εικόνες (Εικόνα 110; Εικόνα 111; Εικόνα 112; Εικόνα 113; Εικόνα 114; Εικόνα 115; Εικόνα 116; Εικόνα 117) τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ως ποσοστό της συνολικής αποτυπωμένης επιφάνειας. Γνωρίζοντας τις πραγματικές διαστάσεις της απεικονιζόμενης επιφάνειας, μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η αντίστοιχη μορφή διάβρωσης.



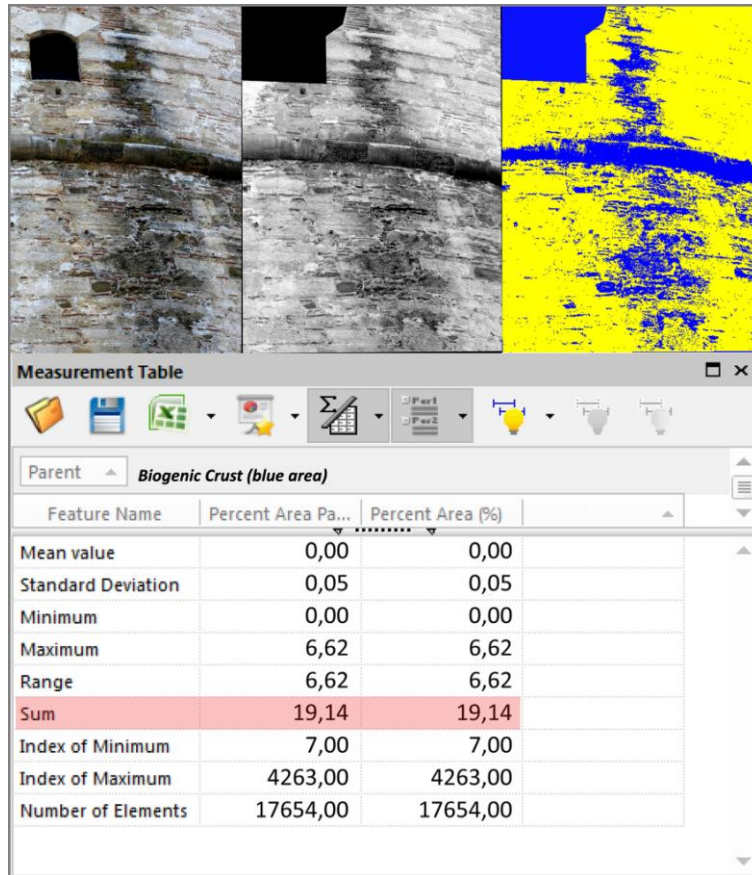
Εικόνα 110. Υπολείμματα επιχρισμάτων - Λευκή κρούστα. 47,10%.



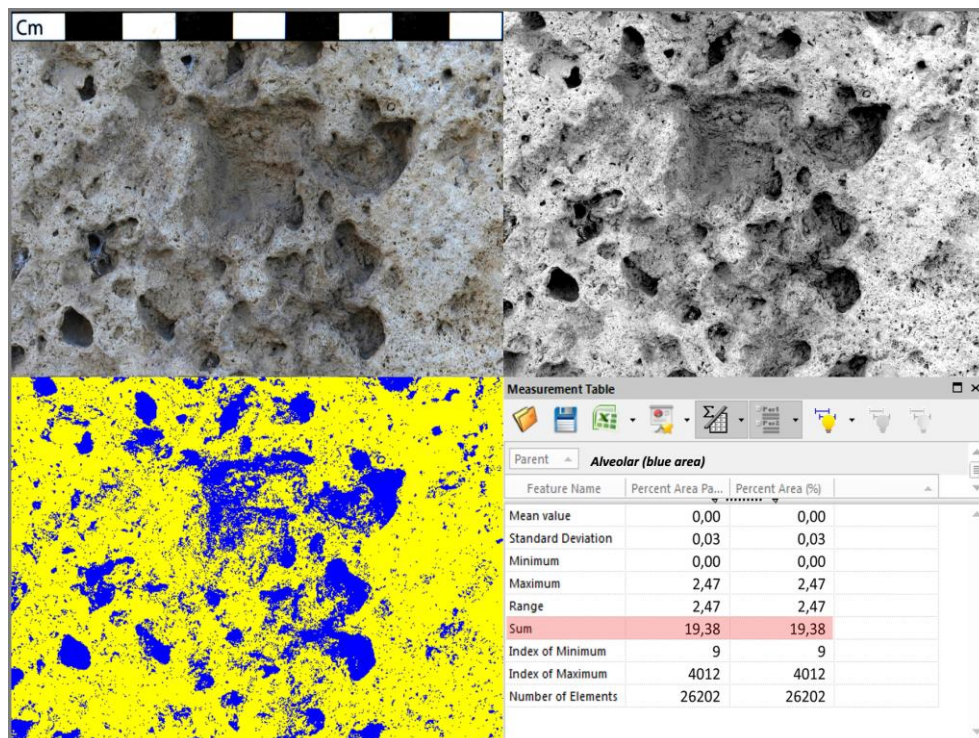
Εικόνα 111. Εξανθήσεις αλάτων στο υπέρθυρο τόξο. 17,89% της επιφάνειας τηςτσιμεντοκονίας.



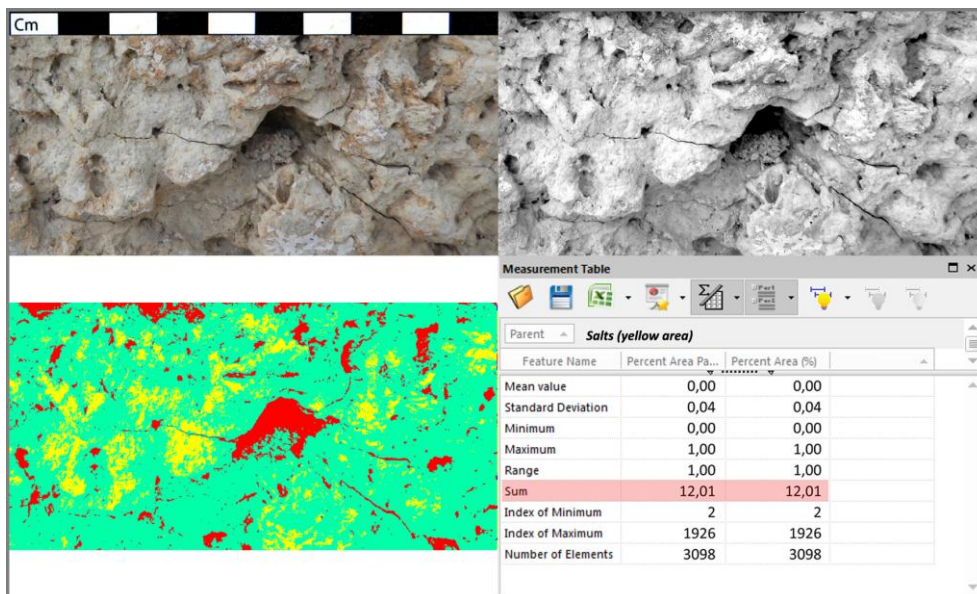
Εικόνα 112. Γυψοποίηση – Μαύρη κρούστα. 34,36% της βάσης του φουρουσιού.



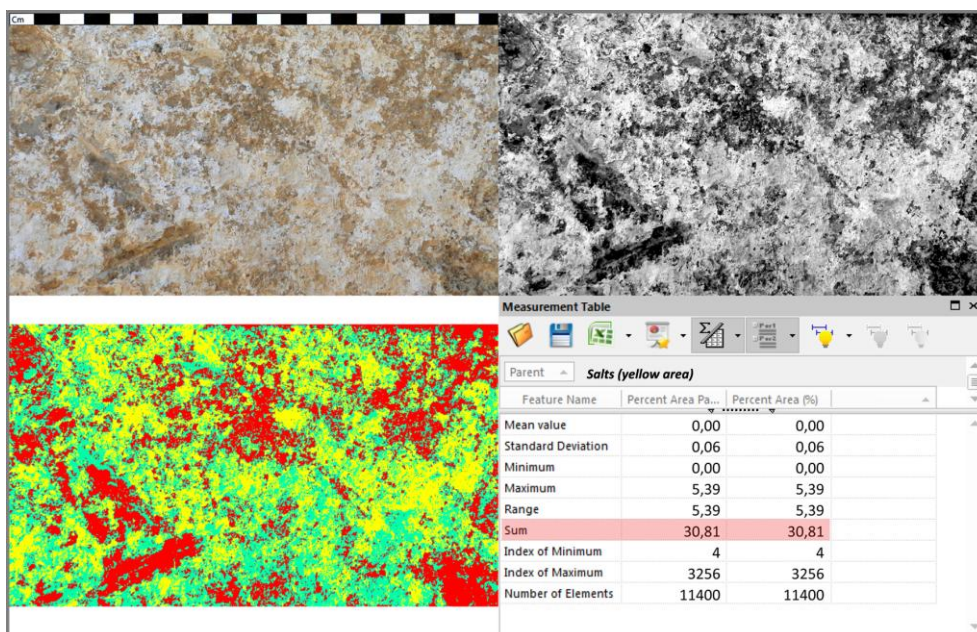
Εικόνα 113. Μαύρη πάτινα - Βιογενής κρούστα. 19,14% της εικονιζόμενης επιφάνειας της τοιχοποιίας.



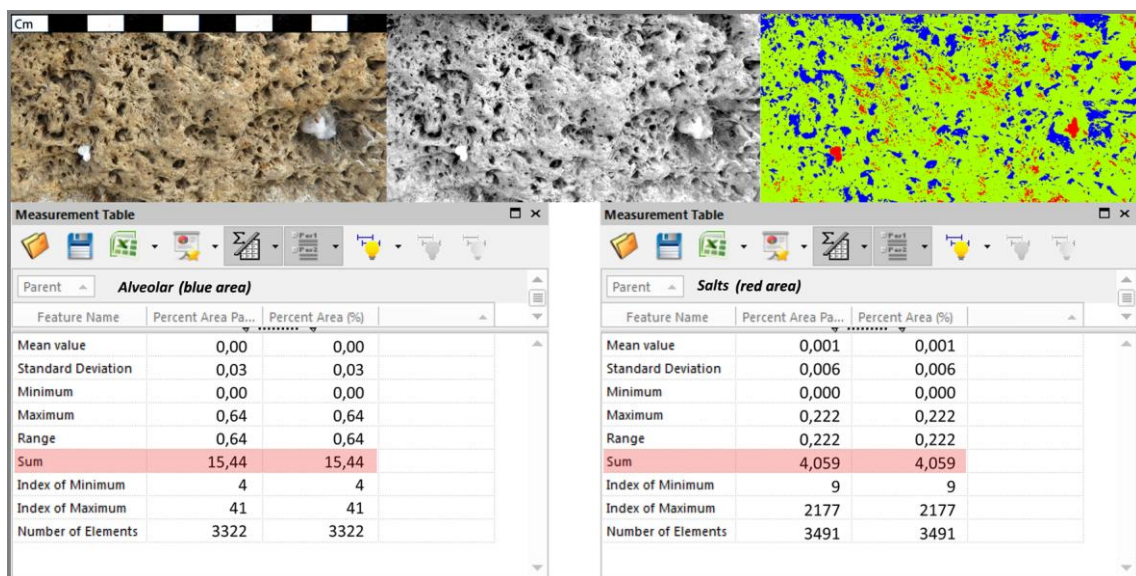
Εικόνα 114. Αρχή κυψελώσεων – Δημιουργία Κρατήρων. 19,38% της αποτυπωμένης επιφάνειας του λίθου.



Εικόνα 115. Επικαθίσεις αλάτων. 12,01% της αποτυπωμένης επιφάνειας του λίθου.

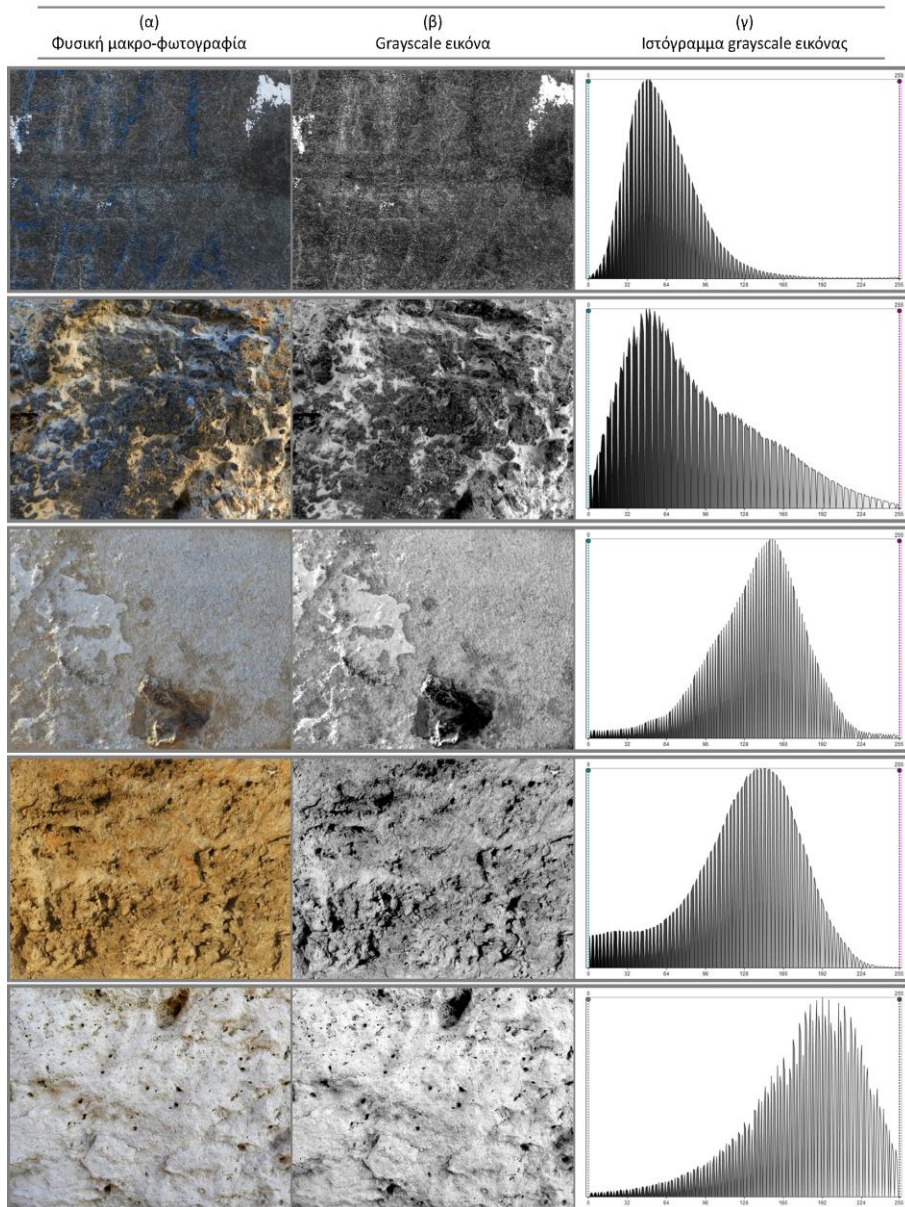


Εικόνα 116. Επικαθίσεις αλάτων. 30,81% της αποτυπωμένης επιφάνειας του λίθου.



Εικόνα 117. Μικτή διάβρωση. Βελονοειδής φθορά/αρχή κυψελώσεων – Επικαθίσεις αλάτων. 15,44% και 4,06% αντίστοιχα της συνολικής απεικονιζόμενης επιφάνειας.

Για τον ενδεικτικό χαρακτηρισμό του πορώδους των διαφόρων λιθοτύπων που παρατηρούνται στη δομή του Λευκού Πύργου, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία μακροφωτογραφιών των λιθοτύπων σε grayscale εικόνες, των οποίων εξήχθησαν τα ιστογράμματα και μελετήθηκαν συγκριτικά με το διάγραμμα της **Εικόνας 79** (βλ.ΚΕΦ.3.3.2, σελ.157) (Zezza, 2010; Κούρτελη, 2001; Μοροπούλου, 2014), που χρησιμοποιείται εκτενώς για την αποτίμηση του πορώδους. Παρακάτω παρουσιάζονται σε εικόνες (**Εικόνα 118**) τα αποτελέσματα από διάφορους δομικούς λίθους του μνημείου.



Εικόνα 118. Μακροφωτογραφίες και ιστογράμμοτα grayscale εικόνων.

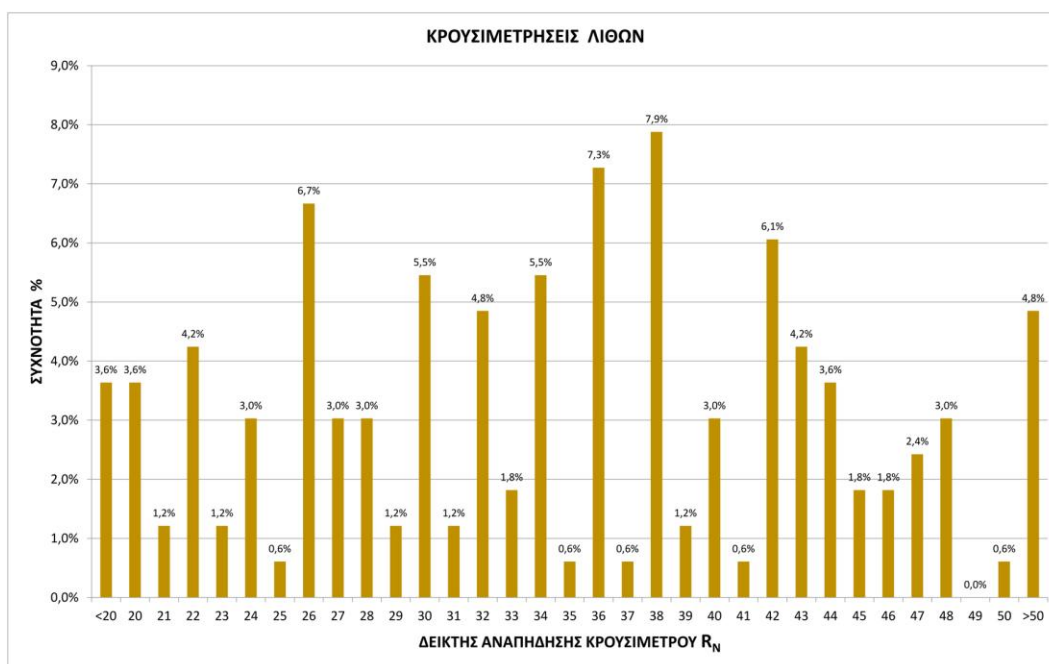
Όπως είχε γίνει φανερό ήδη από τον μακροσκοπικό έλεγχο, η τοιχοποιία του Λευκού Πύργου δεν είναι ομοιογενής ως προς τον τύπο των λίθων που τη δομούν, συνεπώς και το πορώδες, ως φυσική ιδιότητα, παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία, ακολουθώντας τα είδη των λιθοτύπων. Οι εικόνες που επιλέχθηκαν αποτυπώνουν το εύρος αυτό του πορώδους, από υψηλό (πρώτο από επάνω προς τα κάτω στην **Εικόνα 121**), σε μέτριο και χαμηλό. Προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση, είτε με FOM, είτε με καταστρεπτικές ενόργανες μεθόδους για τον ακριβή προσδιορισμό του πορώδους λιθοτύπων σε χαρακτηριστικές θέσεις, ανάλογα με τα περιβαλλοντικά φορτία και με τη μορφή φθοράς που αυτοί παρουσιάζουν.

4.3 Κρουσιμετρία Schmidt (Schmidt Rebound Hammer)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της κρουσιμέτρησης περιμετρικά της εξωτερικής τοιχοποιίας του Λευκού Πύργου, ανά κατηγορία υλικού (λίθοι, πλίνθοι, κονιάματα).

ΛΙΘΟΙ

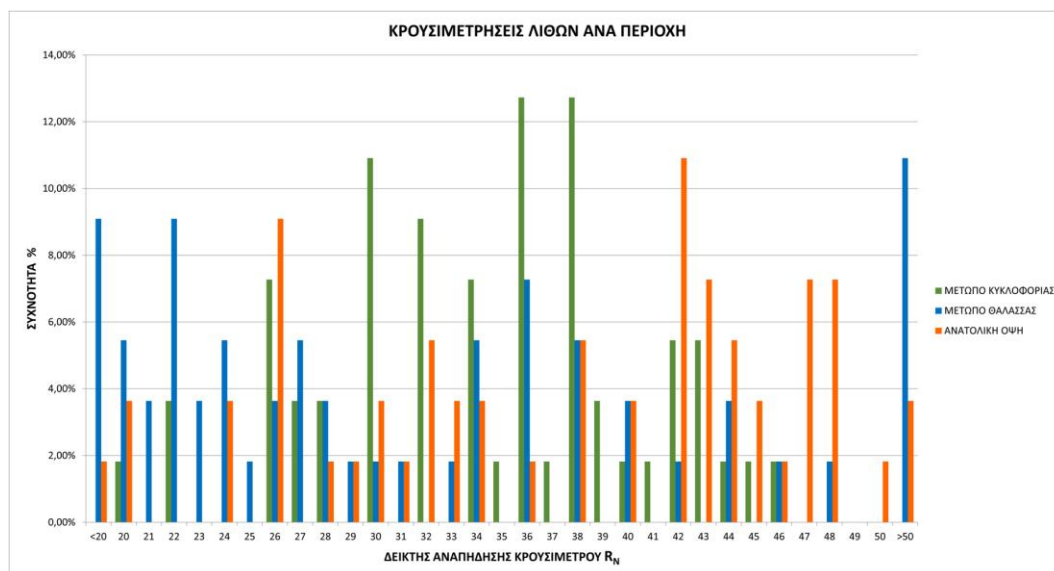
Από τις μετρήσεις στους διάφορους δομικούς **λίθους** του μνημείου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνα 119**, η συχνότερη τιμή του δείκτη αναπήδησης R_N είναι ίση με **$R_N=38$** , με συχνότητα 7,9% επί του συνόλου των μετρήσεων, που αντιστοιχεί σε θλιπτική αντοχή (Uniaxial Compressive Strength) **UCS=37 MPa**, σύμφωνα με τις καμπύλες του κρουσίμετρου που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή. Πάνω από 60% του συνόλου των λίθων που μετρήθηκαν δίνουν δείκτη αναπήδησης μεγαλύτερο του 30, συνεπώς τιμή θλιπτικής αντοχής μεγαλύτερη των 23 MPa, που εμπίπτει στο εύρος των θλιπτικών αντοχών των πετρωμάτων από τα οποία κυρίως δομείται ο Πύργος, δηλαδή διάφορους ασβεστόλιθους, τραβερτίνη, διάφορους ψαμμίτες και αργιλικούς σχιστόλιθους (βλ.Πίνακες 3, 4, ΚΕΦ.2.2.3, σελ.45-46), στα κατώτερα κυρίως όριά τους.



Εικόνα 119. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης λίθων αυολικά.

Στο διάγραμμα της **Εικόνα 120** διακρίνεται ότι η περιοχή έναντι του μετώπου της θάλασσας, δίνει μεγαλύτερο ποσοστό σε μικρότερες τιμές αναπήδησης, άρα και μειωμένες τιμές θλιπτικής αντοχής, που σχετίζεται πιθανόν με την επιφανειακή διάβρωση των λίθων

κυρίως από το θαλάσσιο αερόλυμα, ενώ η πλευρά του μετώπου της κυκλοφορίας και η ανατολική όψη διατηρούν μεγαλύτερο ποσοστό των μετρήσεων σε τιμές αναπήδησης άνω του 30.



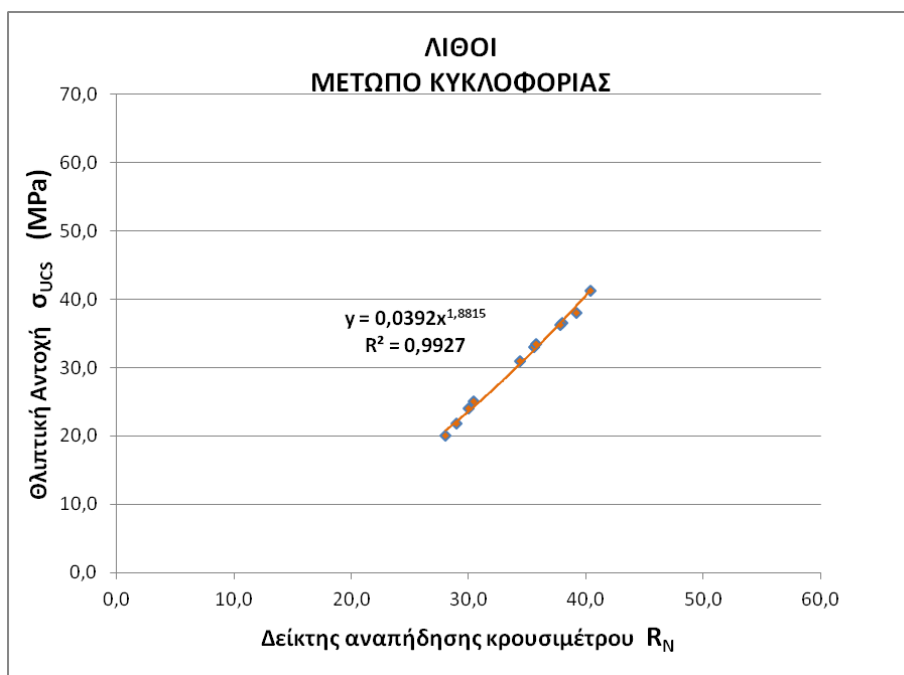
Εικόνα 120. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης λίθων ανά περιοχή μέτρησης.

Οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές που προέκυψαν για κάθε περιοχή μέτρησης και συνολικά, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 18). Η μέση εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή που προκύπτει για το σύνολο των λίθων είναι ίση με **UCS=31,6 MPa** με τυπική απόκλιση **14,1 MPa**.

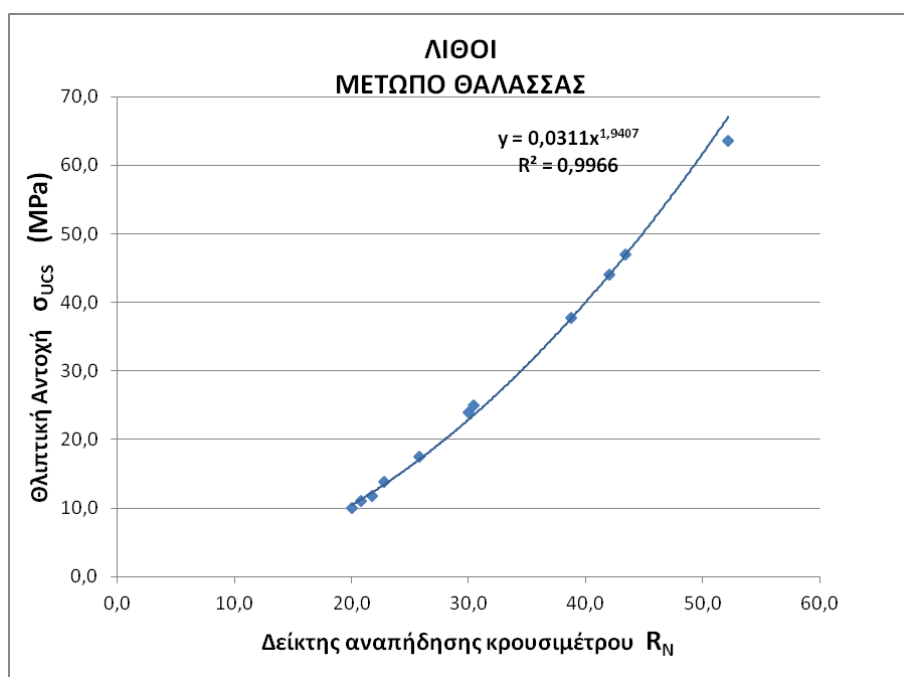
Πίνακας 18. Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές R_N και UCS λίθων ανά περιοχή μέτρησης και συνολικά.

Περιοχή μνημείου	R_N		μέση τιμή		τυπική απόκλιση		UCS (MPa)	
	min	max	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	min	max	μέση τιμή	τυπική απόκλιση
Μέτωπο Κυκλοφορίας	20,0	46,0	34,4	4,4	20,0	41,3	30,9	7,2
Μέτωπο Θάλασσας	16,0	56,0	31,6	10,9	10,0	63,5	27,8	17,8
Ανατολική Όψη	18,0	52,0	37,6	8,9	13,8	53,5	36,2	15,0
Συνολικά	16,0	56,0	34,6	8,6	10,0	41,3	31,6	14,1

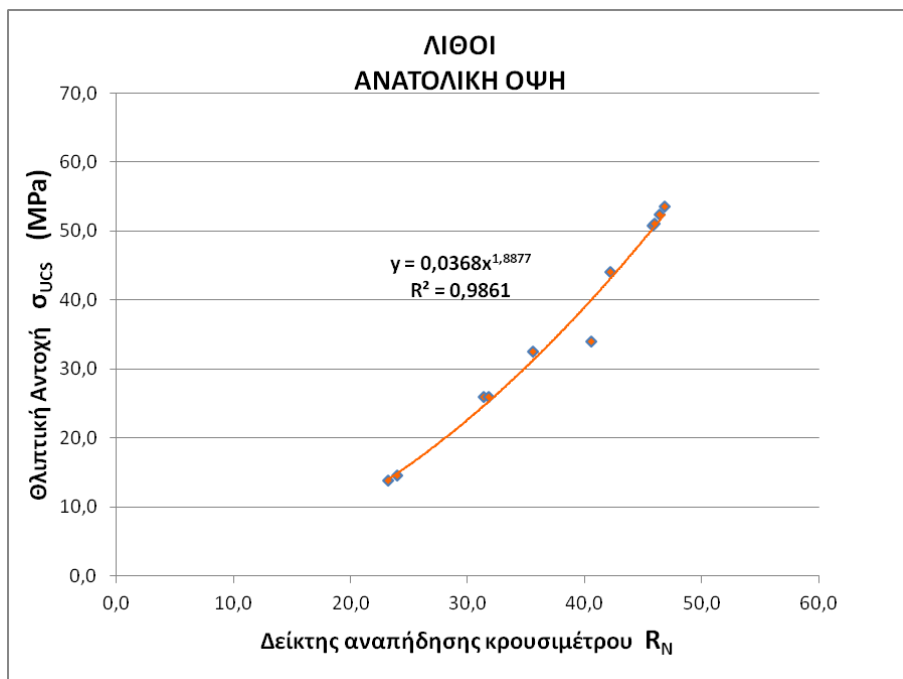
Για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής (UCS) ακολουθήθηκε, όπως προαναφέρθηκε, το νομογράφημα του κρουσιμέτρου, από το οποίο προέκυψαν οι καμπύλες των **Εικόνα 121, 122** και **123** για τις τρεις περιοχές της δοκιμής (μέτωπο κυκλοφορίας, μέτωπο θάλασσας, ανατολικά).



Εικόνα 121. Καμπύλη R_N -UCS για τους λίθους της περιοχής του μετώπου κυκλοφορίας.

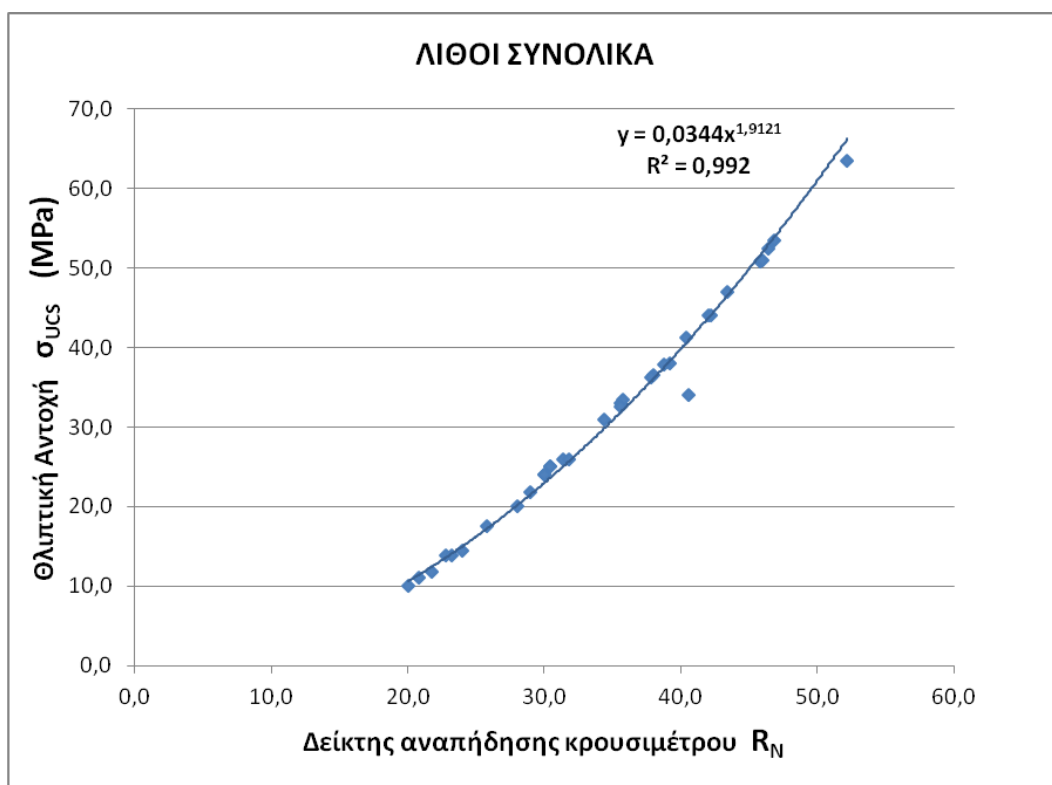


Εικόνα 122. Καμπύλη R_N -UCS για τους λίθους της περιοχής του θαλάσσιου μετώπου.



Εικόνα 123. Καμπύλη R_N -UCS για τους λίθους της περιοχής της ανατολικής όψης.

Για το σύνολο των μετρήσεων στους λίθους του μνημείου, ανεξαρτήτως προσανατολισμού, προέκυψε η καμπύλη της Εικόνα 130, με εξίσωση $UCS=0,0344 \cdot R_N^{1,9121}$.



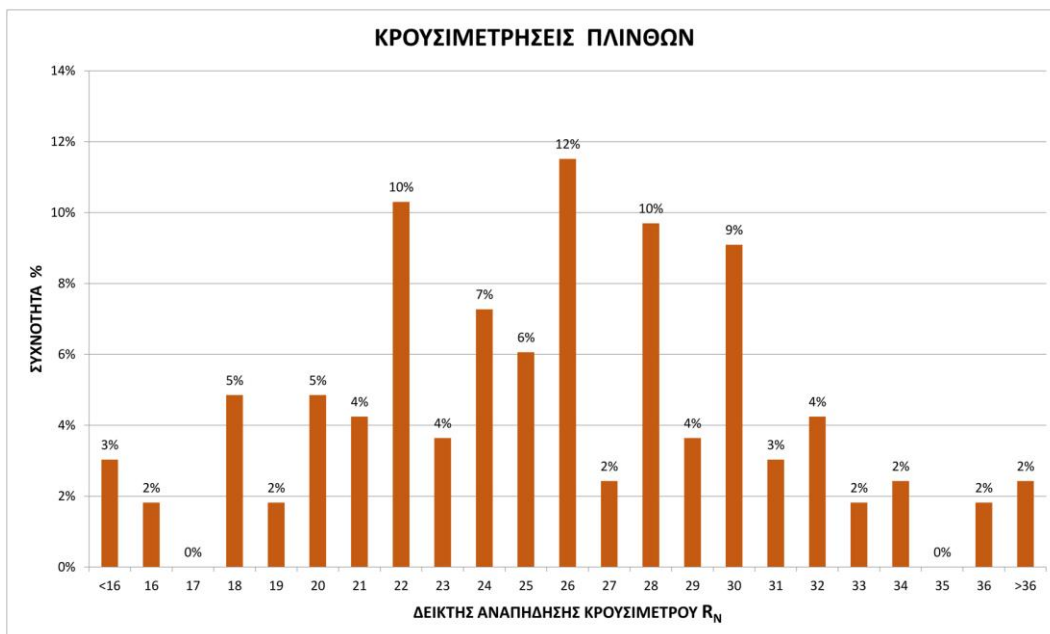
Εικόνα 124. Καμπύλη R_N -UCS για το σύνολο των λίθων του μνημείου.

Στο Παράρτημα Ι της εργασίας παρουσιάζονται συγκριτικά, για τη θλιπτική αντοχή των λίθων του μνημείου, οι τιμές που προέκυψαν σε συνάρτηση με τον δείκτη αναπήδησης, σύμφωνα με σχέσεις που προτείνονται από διάφορους ερευνητές (Haramy & DeMarco, 1985; Yilmaz & Sendir, 2002; Yasar & Erdogan, 2004; Kilic & Teymen, 2008). Πλησιέστερα στις τιμές που μετρήθηκαν επί του συνόλου των λίθων, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, είναι η σχέση που προτείνεται από τους Haramy & DeMarco (βλ. Πίνακα 16, ΚΕΦ.3.3.3, σελ.163).

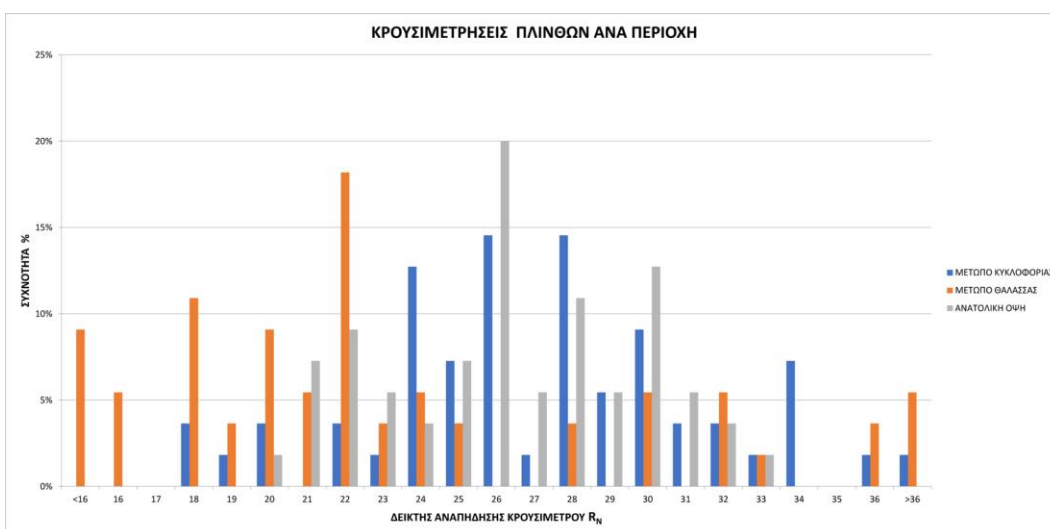
ΠΛΙΝΘΟΙ

Από τις μετρήσεις στις **οπτοπλίνθους** του μνημείου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνα 125**, η συχνότερη τιμή του δείκτη αναπήδησης R_N είναι ίση με **$R_N=26$** , με συχνότητα 12% επί του συνόλου των μετρήσεων, που αντιστοιχεί σε θλιπτική αντοχή (Uniaxial Compressive Strength) **$UCS=17,5$ MPa**, σύμφωνα με το νομογράφημα του κρουσίμετρου που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή. Πάνω από 60% του συνόλου των λίθων που μετρήθηκαν δίνουν δείκτη αναπήδησης μεταξύ 22 και 30, συνεπώς τιμή θλιπτικής αντοχής μεταξύ 16,8 και 23,5 MPa.

Όπως και στην περίπτωση των λίθων, ομοίως και για τις πλίνθους, η περιοχή έναντι του μετώπου της θάλασσας, δίνει σαφώς μεγαλύτερο ποσοστό σε μικρότερες τιμές αναπήδησης, άρα και μειωμένες τιμές θλιπτικής αντοχής, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνα 126**. Είναι αξιοσημείωτο ότι στη δοκιμή σε πλίνθους έναντι του θαλάσσιου μετώπου υπήρχαν και μετρήσεις εκτός εμβέλειας του οργάνου κατά την ελάχιστη τιμή, καθώς και θραύσεις πλίνθων στη στιγμή της αναπήδησης μάζας, που μαρτυρούν τη διάβρωση της επιφάνειας των υλικών, πιθανόν λόγω αλάτων του θαλάσσιου αερολύματος. Η πλευρά του μετώπου της κυκλοφορίας και η ανατολική όψη διατηρούν μεγαλύτερο ποσοστό των μετρήσεων σε τιμές αναπήδησης μεταξύ 22 και 30.



Εικόνα 125. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης πλίνθων συνολικά.



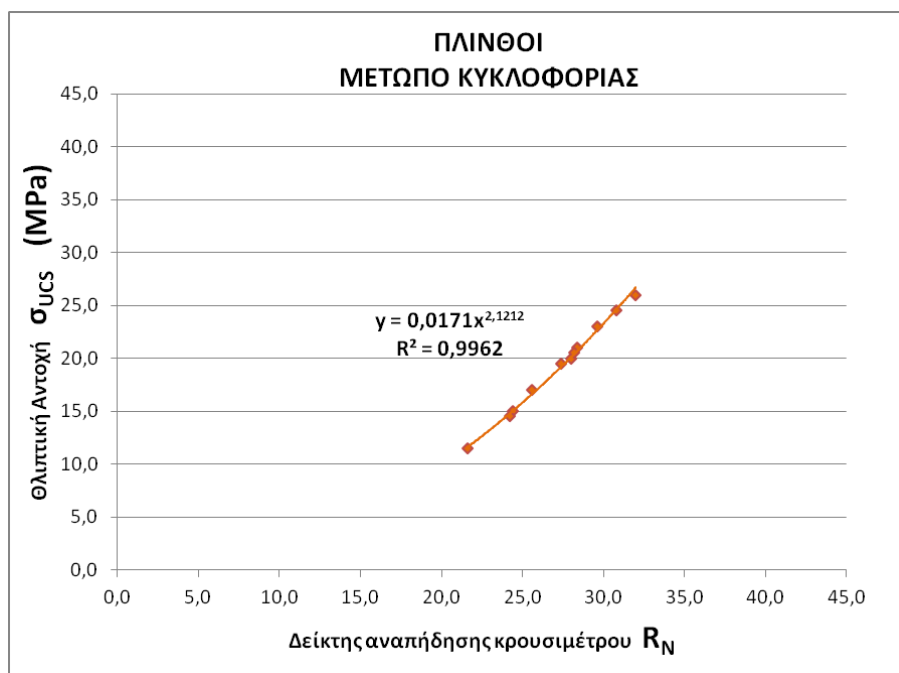
Εικόνα 126. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης πλίνθων ανά περιοχή μέτρησης.

Οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές που προέκυψαν για κάθε περιοχή μέτρησης και συνολικά, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 19). Η μέση εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή που προκύπτει για το σύνολο των πλίνθων του μνημείου είναι ίση με **UCS=18,7 MPa** με τυπική απόκλιση **6,2 MPa**.

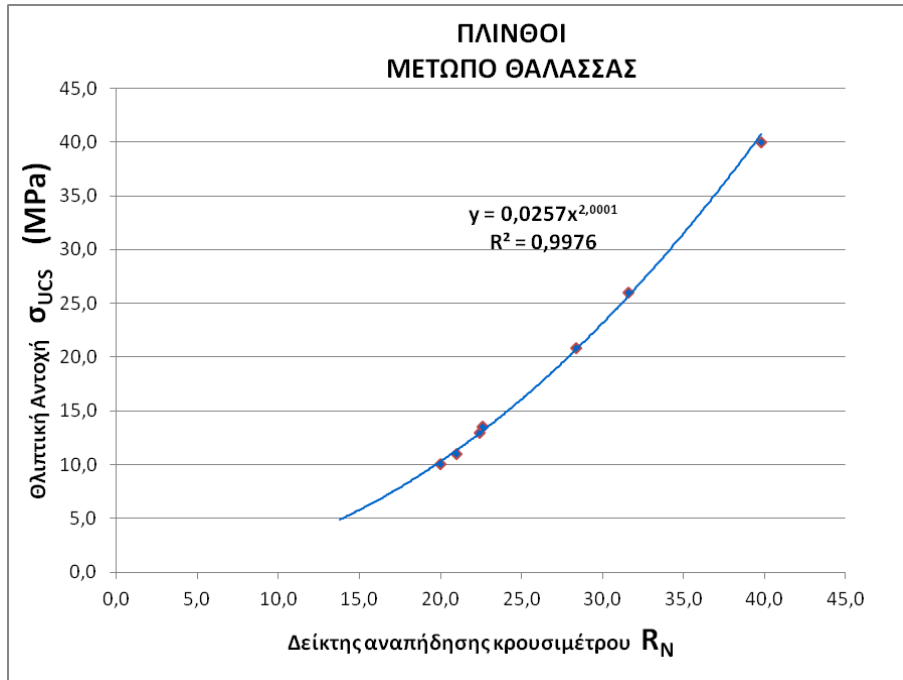
Πίνακας 19. Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές R_N και UCS πλίνθων ανά περιοχή μέτρησης και συνολικά.

Περιοχή μνημείου	R_N				UCS (MPa)			
	min	max	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	min	max	μέση τιμή	τυπική απόκλιση
Μέτωπο Κυκλοφορίας	18,0	44,0	27,3	3,1	11,5	26,0	19,3	4,5
Μέτωπο Θάλασσας	11,0	44,0	23,4	7,4	10,0	40,0	18,5	10,2
Ανατολική Όψη	20,0	33,0	26,4	3,0	12,0	24,0	18,2	4,2
Συνολικά	11,0	44,0	25,7	5,0	10,0	40,0	18,7	6,2

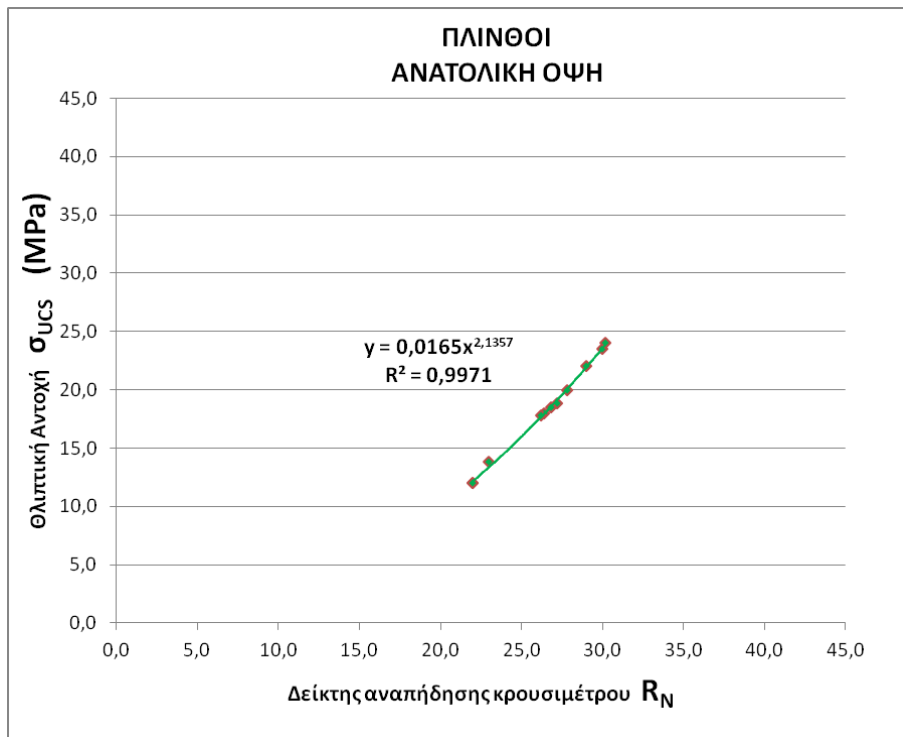
Από τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής (UCS) βάσει του νομογραφήματος του κρουσιμέτρου, προέκυψαν οι καμπύλες των **Εικόνα 127**, **128** και **129** για τις τρεις περιοχές της δοκιμής (μέτωπο κυκλοφορίας, μέτωπο θάλασσας, ανατολικά).



Εικόνα 127. Καμπύλη R_N -UCS για τις πλίνθους της περιοχής του μετώπου κυκλοφορίας.



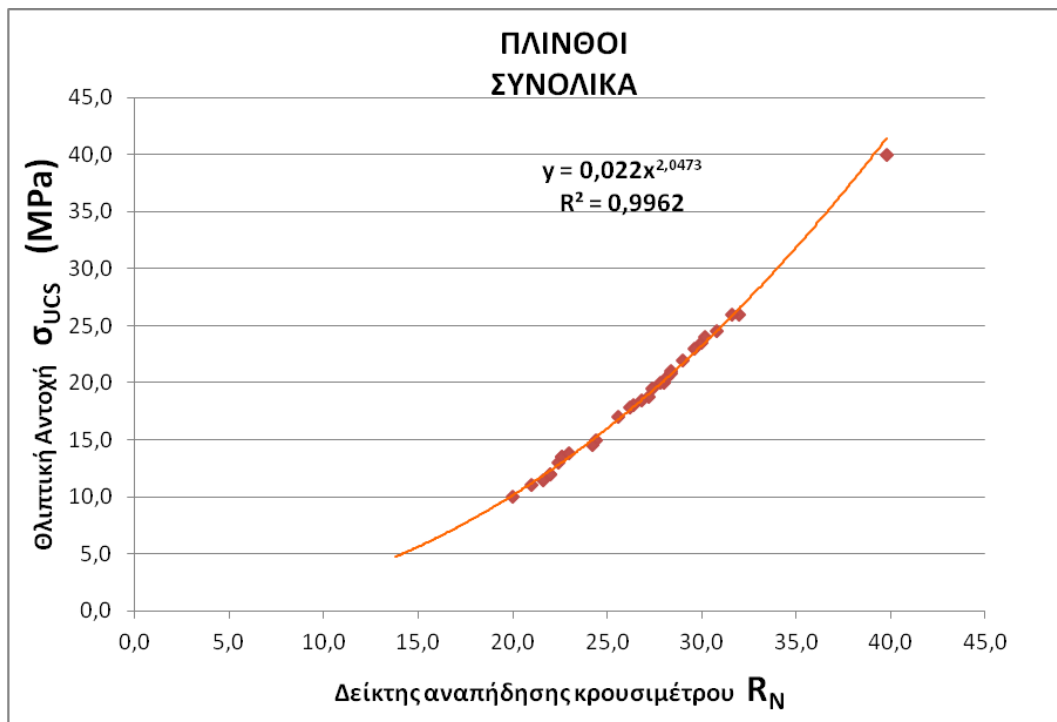
Εικόνα 128. Καμπύλη R_N -UCS για τις πλίνθους της περιοχής του θαλασσίου μετώπου.



Εικόνα 129. Καμπύλη R_N -UCS για τις πλίνθους της ανατολικής όψης.

Για το σύνολο των μετρήσεων στις πλίνθους του μνημείου ανεξαρτήτως προσανατολισμού, προέκυψε η καμπύλη της **Εικόνα 130**, με σχέση $UCS=0,022 \cdot R_N^{2,0473}$.

Στο Παράρτημα Ι της εργασίας παρουσιάζονται, συγκριτικά για τη θλιπτική αντοχή, οι τιμές που προέκυψαν σε συνάρτηση με τον δείκτη αναπήδησης, σύμφωνα με τη γραμμική σχέση που προτείνεται από τον Roknuzzaman *et al.* (Roknuzzaman *et al.*, 2017), η οποία προσεγγίζει, με ελάχιστη διαφορά, τις τιμές που μετρήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 130. Καμπύλη R_N -UCS για το σύνολο των πλίνθων του μνημείου.

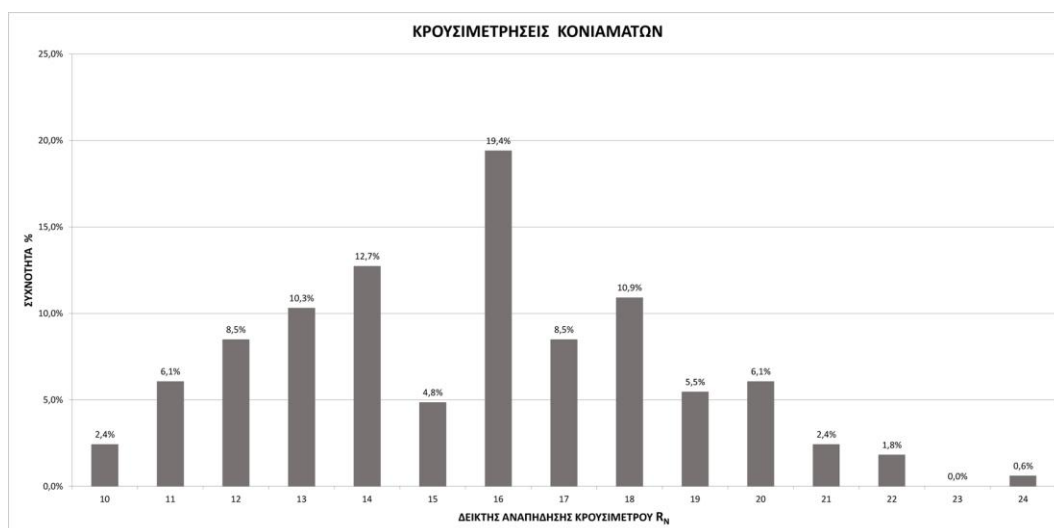
Συγκριτικά με μελέτες σε πλίνθους μνημείων της περιοχής της Θεσσαλονίκης της βυζαντινής περιόδου (7^{ος} -14^{ος} αι.) (Stefanidou *et al.*, 2015), η μέση θλιπτική αντοχή των πλίνθων του Λευκού Πύργου παρουσιάζεται σαφώς μεγαλύτερη (18,7 MPa έναντι 4,5-16,08 MPa). Αντιθέτως, σε σχέση με πλίνθους μνημείων άλλων περιοχών της Μεσογείου, της ίδιας εποχής με αυτήν της ανέγερσης του Λευκού Πύργου (χονδρικά 15^{ος} -16^{ος} αι.) (Fernandes *et al.*, 2010; Barbi *et al.*, 2002; Barrios *et al.*, 2000), οι πλίνθοι του Πύργου παρουσιάζουν χαμηλή μέση θλιπτική αντοχή.

ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

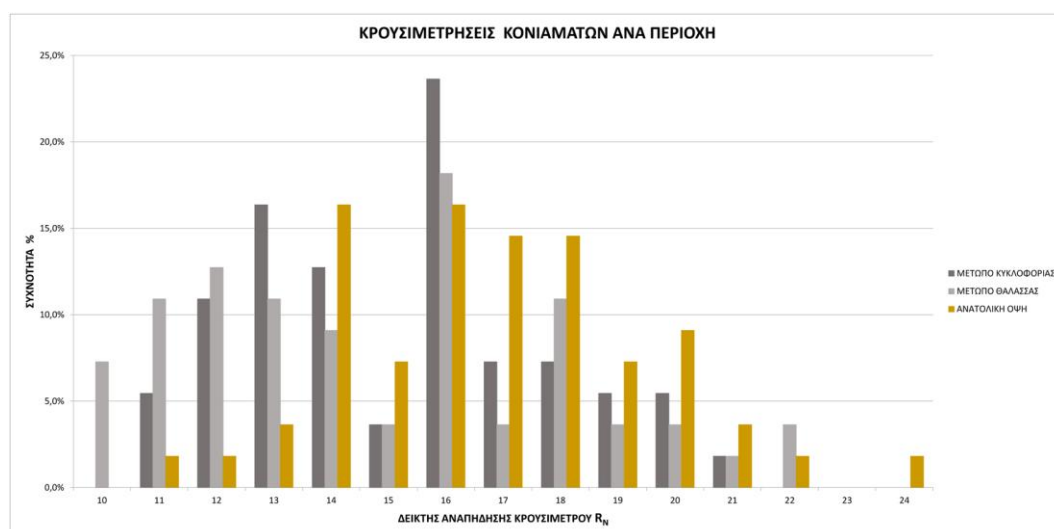
Από τις μετρήσεις στα **κονιάματα** του μνημείου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνα 131**, η συχνότερη τιμή του δείκτη αναπήδησης R_N είναι ίση με **$R_N=16$** , με συχνότητα

19,4% επί του συνόλου των μετρήσεων, ενώ **άνω του 80% του συνόλου** των σημείων με κονίαμα που μετρήθηκαν, δίνουν δείκτη αναπήδησης **μικρότερο του 18**.

Όπως και στην περίπτωση των άλλων υλικών, ομοίως και για τα κονιάματα, η περιοχή έναντι του μετώπου της θάλασσας, δίνει σαφώς μεγαλύτερο ποσοστό σε μικρότερες τιμές αναπήδησης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνα 132**, ενώ και η πλευρά του μετώπου της κυκλοφορίας παρουσιάζει επίσης μεγάλο ποσοστό σε μικρότερες τιμές αναπήδησης, άρα και μειωμένες τιμές θλιπτικής αντοχής. Όπως συνέβη και με κάποιες από τις πλίνθους στην όψη του θαλάσσιου μετώπου, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, σε κάποιες από τις θέσεις μέτρησης των κονιαμάτων, υπήρχε έντονη απόσπαση κόκκων και τεμαχίων.



Εικόνα 131. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης κονιαμάτων συνολικά.



Εικόνα 132. Διάγραμμα Κατανομής τιμών δείκτη αναπήδησης κρουσιμέτρησης κονιαμάτων ανά περιοχή μέτρησης.

Οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές του δείκτη αναπήδησης που προέκυψαν για κάθε περιοχή μέτρησης και συνολικά για τα κονιάματα, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 20).

Πίνακας 20. Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές R_N κονιαμάτων ανά περιοχή μέτρησης και συνολικά.

<i>Περιοχή μνημείου</i>	R_N			
	min	max	μέση τιμή	τυπική απόκλιση
Μέτωπο Κυκλοφορίας	11	21	15,2	1,9
Μέτωπο Θάλασσας	10	22	14,8	2,8
Ανατολική Όψη	11	24	16,8	2,0
Συνολικά	10	24	15,6	2,4

Ο υπολογισμός και η παραγωγή καμπύλης για τη θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων του Πύργου δεν ήταν δυνατά, καθώς ελάχιστες από τις τιμές αναπήδησης βρέθηκαν μεγαλύτερες από 20, που είναι η ελάχιστη αναγραφόμενη τιμή αναπήδησης στο νομογράφημα του οργάνου και η οποία αντιστοιχεί σε τιμή θλιπτικής αντοχής **UCS=10 MPa**.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

5.1 Συμπεράσματα

Για την προστασία της Πολιτιστικής Κληρονομιάς, η εφαρμογή Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων συμβάλλει στην ανάπτυξη μιας επιστημονικής μεθοδολογίας για την αποτίμηση των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών συνθηκών στην πραγματική κλίμακα μνημείων και ιστορικών συνόλων.

Η τεχνική της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας, σε ακολουθία με τον μακροσκοπικό Οπτικό Έλεγχο, επιτρέπει την κατανομή και χαρτογράφηση της παθολογίας των υλικών των ιστορικών κτηρίων, καθώς και την ποσοτικοποίηση των μορφών φθοράς, σε συνδυασμό και με άλλες μεθόδους αποτύπωσης. Εφαρμοζόμενη σε βάθος χρόνου, μπορεί να παράσχει μια σαφή εικόνα, τόσο της εξέλιξης της διάβρωσης των αρχιτεκτονικών επιφανειών, όσο και των αποτελεσμάτων των επεμβάσεων συντήρησης του μνημείου.

Παραδείγματα ερευνητικών δραστηριοτήτων για τη συντήρηση, αποκατάσταση και προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς με εφαρμογή της μεθόδου Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνας που βρίσκουμε στη διεθνή βιβλιογραφία, αφορούν κυρίως μνημεία του Μεσογειακού κόσμου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν, η εφαρμογή της μεθόδου στο πλαίσιο ενός ολοκληρωμένου στρατηγικού σχεδίου για τη συντήρηση και διάσωση του Κάστρου και της Μεσαιωνικής Πόλης της Ρόδου (Μοροπούλου *et al.*), η παρακολούθηση της κατάστασης της Βασιλικής στο Bari της Ιταλίας πριν και μετά από επεμβάσεις συντήρησης (Zezza, 1996), η χαρτογράφηση της φθοράς σε ναούς του ιστορικού κέντρου της Σεβίλλης (Ortiz *et al.*, 2017), η κατανομή και ποσοτικοποίηση των εξανθήσεων και κρυπτο-εξανθήσεων στο παρεκκλήσι Falla του Καθεδρικού Ναού στο Cadiz της Ισπανίας (Vazquez *et al.*, 2010), καθώς και αρκετές άλλες μελέτες, που δεν περιορίζονται σε αρχιτεκτονικά μνημεία, αλλά προχωρούν και σε περιπτώσεις έργων τέχνης, γλυπτικής, σπηλαιογραφιών, τοιχογραφιών, ψηφιδωτών κ.ά..

Τα αποτελέσματα της μεθόδου στο μνημείο του Λευκού Πύργου Θεσσαλονίκης, συνιστούν μια πρώτη προσπάθεια κατανομής της φθοράς, σε σχέση με τα περιβαλλοντικά φορτία που δέχεται το μνημείο. Οι κυριότερες μορφές φθοράς που παρουσιάζει το μνημείο και οι οποίες αποδόθηκαν με ψευδή χρώματα της μεθόδου, είναι η διάβρωση λόγω ατμοσφαιρικών αστικών ρυπαντών (γυψοποίηση – μαύρες κρούστες και χαλαρές αποθέσεις σωματιδίων), οι επικαθίσεις αλάτων του θαλάσσιου αερολύματος, καθώς και η βιογενής προσβολή. Η πρώτη αυτή χαρτογράφηση, με την αντίστοιχη ποσοτικοποίησή της, μπορεί να

αποτελέσει οδηγό για συγκριτικές μελέτες που θα ακολουθήσουν και εργαλείο στη λήψη αποφάσεων εκ μέρους όλων των φορέων που εμπλέκονται στη συντήρηση και προστασία του μνημείου.

Σε ό,τι αφορά τη μέθοδο της κρουσιμέτρησης, αυτή αποτελεί πάγια τεχνική για μια πρώτη εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών κάθε κτηρίου, ιστορικού ή σύγχρονου. Στην περίπτωση του Λευκού Πύργου, η δυσκολία στην εξαγωγή συμπερασμάτων έγκειται στη μεγάλη ποικιλία των πετρωμάτων, τα οποία συνιστούν το κυρίως δομικό υλικό του μνημείου. Συγκριτικά πάντως, με τιμές θλιπτικής αντοχής που έχουν μετρηθεί, είτε με τη μέθοδο της κρουσιμετρίας, είτε με άλλες μεθόδους, σε ιστορικά κτήρια με παρόμοια προέλευσης δομικά υλικά, τα αποτελέσματα του Λευκού Πύργου φαίνονται να βρίσκονται μέσα στο αναμενόμενο εύρος, με εξαίρεση κάποιες απομειωμένες τιμές στα υλικά της όψης έναντι του θαλάσσιου μετώπου, που μαρτυρούν σαφώς επιφανειακές αλλοιώσεις λόγω της άμεσης έκθεσης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η πρώτη αυτή εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των υλικών του μνημείου, μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω μελέτη, ως παράμετρος μιας τυπικής δομοστατικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό της τρωτότητας του μνημείου, σε συνδυασμό με εργαστηριακές μεθόδους προσδιορισμού και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών του Πύργου.

5.2 Προοπτικές

Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, συνιστούν ένα ξεκίνημα μόνο προς τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης διαγνωστικής μεθοδολογίας, με σκοπό τη διαμόρφωση ενός στρατηγικού σχεδίου παρακολούθησης της κατάστασης και προστασίας του μνημείου, που θα αποσκοπεί στην αειφόρο διαχείρισή του, όπως αυτή υπαγορεύεται από τις σύγχρονες αντιλήψεις περί ηθικής στη συντήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Δεδομένου ότι το μνημείο και το σύνθετο περιβάλλον στο οποίο αυτό είναι ενταγμένο, αποτελούν ένα δυναμικό σύστημα, για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μεθόδων που εφαρμόστηκαν, αλλά και όσων ενδεχομένως ακολουθήσουν, απαιτούνται γνώσεις και πληροφορίες, που συνδέονται, τόσο με τις ιδιότητες των δομικών υλικών και της μικροδομής τους, όσο και με τα χαρακτηριστικά του ίδιου του περιβάλλοντος και του μικροκλίματος του μνημείου.

Προτείνεται έτσι, για την ολοκλήρωση της διαγνωστικής μελέτης, η εφαρμογή εργαστηριακών και άλλων ΜΚ μεθόδων (υπερύθρη θερμογραφία, υπερηχοσκόπηση κλπ.) για την ποσοτική αποτίμηση του βάθους των μορφών φθοράς που εντοπίστηκαν και τη στοιχειομετρική ανάλυση δειγμάτων της φθοράς, ο προγραμματισμός και η διεξαγωγή φωτογραμμετρικής αποτύπωσης του μνημείου, για την ολοκλήρωση της ακριβούς χωρικής χαρτογράφησης της φθοράς, η εκπόνηση μελέτης ταυτοποίησης των υλικών και έρευνας της προέλευσής τους, καθώς και η εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης εκπομπών ρύπων επί τόπου του μνημείου, για μια ακριβέστερη εκτίμηση των παραμέτρων του μικροκλίματος του Λευκού Πύργου.

Επίσης, θα μπορούσε, σε δεύτερο χρόνο, να διεξαχθεί μια επανεκτίμηση των έργων ανάπλασης και περιβαλλοντικής διαχείρισης (υποδομή, φυτεύσεις, δίκτυα νερού) ως θετικές ή αρνητικές παρεμβάσεις, καθώς και η διαχείριση των αποτελεσμάτων σε συστήματα λήψης αποφάσεων της διεθνούς βιβλιογραφίας, που αφορούν στη συντήρηση κτηρίων, όπως το Prodomea Project, το Masonry Damage Diagnostic System (MDDS), το Monuments Integrated Management System (MIMS), το Spatial Decision Support System (SDSS) και το Building Envelope Life Cycle Asset Management (BELCAM).

Πάντως, ό,τι ενδεχομένως ακολουθήσει του παρόντος πονήματος, οφείλει να έχει ως μέλημα και στόχο, την εναρμόνιση με τις βασικές αρχές που διέπουν τη διαχείριση και προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως αυτές έχουν διατυπωθεί και συμφωνηθεί στις σημαντικότερες διεθνείς διακηρύξεις και αποφάσεις του σύγχρονου κόσμου της ιστορικής Αρχιτεκτονικής, από τον 19^ο αιώνα μέχρι και σήμερα (βλ.ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Alhaider, M., 2017. Optical Fibre Communications. Notion Press, Chennai, India.
- Antrop, M., 2004. Landscape change & the urbanization process in Europe. *Landscape & Urban Planning* 67, 9–26.
- Arias, P., Armesto, J., Di-Capua, D., González-Drigo, R., Lorenzo, H., Pérez-Gracia, V., 2007. Digital photogrammetry, GPR & computational analysis of structural damages in a mediaeval bridge. *Engineering Failure Analysis* 14, 1444–1457.
- Arnold, A., 1982. Rising damp & saline minerals, in: *Proceedings of the 4th International Congress on the Deterioration & Preservation of Stone Objects*. Presented at the 4th International Congress on the deterioration & preservation of stone objects, K.L.Gauri & J.A.Gwinn, Louisville, pp. 11–28.
- Arnold, A., Zehnder, K., 1989. Salt Weathering on Monuments. Presented at the I Simposio Internazionale “La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo,” Bari, Italia, pp. 31–58.
- Aydin, A., 2008. ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version, in: Ulusay, R. (Ed.), *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing & Monitoring: 2007-2014*. Springer International Publishing, Cham, pp. 25–33.
- Aydin, A., Basu, A., 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology* 81, 1–14.
- Basu, A., Aydin, A., 2004. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41, 1211–1214. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.05.001>
- Binda, L., Lenzi, G., Saisi, A., 1998. NDE of masonry structures: use of radar tests for the characterisation of stone masonries. *NDT & E International* 31, 411–419.
- Binda, L., Zanzi, L., Lualdi, M., Condoleo, P., 2005. The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy. *NDT & E International* 38, 171–179.
- Brimblecombe, P., 2011. *The Big Smoke. A history of air pollution in London since medieval times*. Routledge - Taylor & Francis Group, Abingdon, Engl&.
- Brimblecombe, P., 2003. *The Effects of Air Pollution on the Built Environment*. Imperial College Press, UK.

- Brimblecombe, P., 2000. Air Pollution & Architecture: Past, Present & Future. *Journal of Architectural Conservation* 6, 30–46.
- Brimblecombe, P., Grossi, C.M., Harris, I., 2010. Climate Change Critical to Cultural Heritage, in: Gökçekus, H., Türker, U., LaMoreaux, J.W. (Eds.), *Survival & Sustainability*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 195–205.
- Brueckner, R., Lambert, P., 2013. Assessment of historic concrete structures, in: *Structural Studies, Repairs & Maintenance of Heritage Architecture XIII*. WIT Press, Wessex, UK, pp. 75–86.
- Camuffo, D., 1992. Acid rain & deterioration of monuments: How old is the phenomenon? *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere* 26, 241–247.
- Camuffo, D., 1986. Deterioration Processes of Historical Monuments, in: *Studies in Environmental Science*. Elsevier, pp. 189–221.
- Charola, A.E., 2000. Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview. *Journal of the American Institute for Conservation* 39, 327.
- Chararas, B., 1996. Non destructive methods for investigation of some mechanical properties of natural stones in the protection of monuments. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 54, 59–63.
- Chrysikou, L., Vavatzanidis, A., Nikolaou, K., Samara, C., Sofoniou, M., Kouras, A., Terzi, E., Flarountzou, A., Argyropoulos, G., 2008. PM2.5 & PM10 in the atmosphere of Thessaloniki: Concentration levels-Chemical composition. Presented at the 3rd Environmental Conference of Macedonia, Thessaloniki.
- Conti, C., Martines, G., Sinopoli, A., 2009. Constructions Techniques of Roman Vaults: Opus Caementicium & the Octagonal Dome of the Domus Aurea. Presented at the 3rd International Congress on Construction History, NEUNPLUS1, Berlin, Germany, pp. 401–408.
- Croci, G., 1998. *The Conservation & Structural Restoration of Architectural Heritage*. WIT Press, Southampton, UK.
- Day, M.J., 1980. Rock Hardness: field assessment & geomorphic importance. *The Professional Geographer* 32, 72–81.
- Del Monte, M., Sabbioni, C., 1987. A study of the patina called 'scialbatura' on imperial Roman marbles. *Studies in Conservation* 32, 114–121.

- Döndüren, M.S., Sişik, O., 2017. Materials, used in historical buildings, analysis methods & solutions proposals. Presented at the International Conference Energy, Environment & Material System, Polanica-Zdrój, Pol&.
- Elmeligy, D., 2014. Innovative Sustainable Technologies in Heritage Revival. *International Journal of Contemporary Erchitecture "The New ARCH" 1*, 101–111.
- Ensminger, D., Leonard, B., 2012. *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, & Applications*, 3rd ed. CRC Press Taylor & Francis Group, New York USA.
- Fassina, V., 1978. A survey on air pollution & deterioration of stonework in Venice. *Atmospheric Environment (1967) 12*, 2205–2211.
- Fernandes, F.M., Lourenço, P.B., Castro, F., 2010. Ancient Clay Bricks: Manufacture & Properties, in: Dan, M.B., Přikryl, R., Török, Á. (Eds.), *Materials, Technologies & Practice in Historic Heritage Structures*. Springer Netherl&s, Dordrecht, pp. 29–48.
- Fernandez, J., 2006. *Material Architecture. Emergent Materials for Innovative Buildings & Ecological Construction*. Elsevier Ltd, Burlington, USA.
- Franchi, E., 2015. What is cultural heritage? [www Document]. Khan Academy. URL: <https://www.khanacademy.org/humanities/art-history-basics/beginners-arthistory/a/what-is-cultural-heritage> (accessed 8.12.19).
- Ghobadi, M.H., Torabi-Kaveh, M., 2014. Assessing the potential for deterioration of limestones forming Taq-e Bostan monuments under freeze–thaw weathering & karst development. *Environ Earth Sci 72*, 5035–5047.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., 2008. *Digital Image Processing*, 3rd ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Gorbushina, A., 2007. Life on the rocks. *Environmental Microbiology 9*, 1613–1631.
- Goudie, A.S., 2006. The Schmidt Hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography: Earth & Environment 30*, 703–718.
- Gourdin, W.H., Kingery, W.D., 1975. The Beginnings of Pyrotechnology: Neolithic & Egyptian Lime Plaster. *Journal of Field Archaeology 2*, 133–150.
- Groot, C., Ashall, G., Hughes, J., 2004. Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair - Final Report of RILEM TC 167-COM. RILEM Publications SARL, Bagneux, France.
- Gupta, S.P., 2013. Climate Change & its Impact on Monumental & Historical buildings with reference to Monuments in Chhattisgarh. *European Chemical Bulletin 2*, 576–579.
- Hughes, J.J., Valek, J., 2003. *Mortars in Historic Buildings*. Historic Scotl&, Edinburgh.

- Hussain, A., Akhtar, S., 2017. Review of Non-Destructive Tests for Evaluation of Historic Masonry & Concrete Structures. *Arab J Sci Eng* 42, 925–940.
- Huxley, J., 1945. UNESCO, Its Purpose & Its Philosophy.
- Ibraheem, N.A., Hasan, M.M., Khan, R.Z., Mishra, P.K., 2012. Underst&ing Color Models: A Review. *ARNP Journal of Science & Technology* 265–275.
- James, L., 2006. Byzantine glass mosaic tesserae: some material considerations. *Byz. mod. Greek stud.* 30, 29–47.
- Johnson, J.B., Montgomery, M., Thompson, G.E., Wood, G.C., Sage, P.W., Cooke, M.J., 1996. The influence of combustion-derived pollutants on limestone deterioration: 2. The wet deposition of pollutant species. *Corrosion Science* 38, 267–278.
- Kapetanović, A., 2016. Σχεδιασμός της Διαχείρισης των Μνημείων Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO, Κέντρο Συντήρησης και Αρχαιολογίας του Μαυροβουνίου. ed. EX.PO. AUS, Podgorica.
- Keiser, G., Xiong, F., Cui, Y., Shum, P.P., 2014. Review of diverse optical fibers used in biomedical research & clinical practice. *J. Biomed. Opt* 19, 080902.
- Kenyon, K.M., 1960. Excavations at Jericho, 1957–58. *Palestine Exploration Quarterly* 92, 88–113.
- Kiel, M., 1973. A note on the exact date of construction of the White Tower of Thessaloniki. *Balkan Studies* 14, 352–357.
- Kingery, W.D., Uhlman, D.R., Bowen, H.K., 2006. *Introduction to Ceramics*, 2nd ed, Science & Technology of Materials. Wiley.
- Kolaiti, E., Papadopoulos, Z., 1993. Evaluation of Schmidt rebound hammer testing: A critical approach. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 48, 69–76.
- Kordatos, E.Z., Exarchos, D.A., Stavrakos, C., Moropoulou, A., Matikas, T.E., 2013. Infrared thermographic inspection of murals & characterization of degradation in historic monuments. *Construction & Building Materials* 48, 1261–1265.
- Kourkoulis, S., 2006. *Fracture & Failure of Natural Building Stones. Application in the Restoration of Ancient Monuments*. Springer, Netherl&s.
- Krumbein, W., 2002. Patina & cultural heritage – a geomicrobiologist’s perspective. Presented at the 5th European Commission Conference. *Cultural heritage Research: a Paneuropean Challenge*.
- Kucera, V., Fitz, S., 1995. Direct & indirect air pollution effects on materials including cultural monuments. *Water Air Soil Pollut* 85, 153–165.

- Massey, S.W., 1999. The effects of ozone & NO_x on the deterioration of calcareous stone. *Science of The Total Environment* 227, 109–121.
- McAlister, J.J., Smith, B.J., Török, A., 2006. Element partitioning & potential mobility within surface dusts on buildings in a polluted urban environment, Budapest. *Atmospheric Environment* 40, 6780–6790.
- Menéndez, B., 2016. Non-Destructive Techniques Applied to Monumental Stone Conservation, in: Garcia Marquez, F.P., Papaelias, M., Zaman, N. (Eds.), *Non-Destructive Testing. InTech*.
- Moropoulou, A. et al., 1997. Techniques & methodology for the preservation & environmental management of historic complexes - The case of the medieval city of Rhodes, in: Νέες Αντιλήψεις, Τεχνολογίες Και Υλικά Για Τη Συντήρηση Και Διαχείριση Ιστορικών Πόλεων Και Συνόλων. Αθήνα, pp. 603–634.
- Moropoulou, A., Labropoulos, K.C., 2015. Non-Destructive Testing for Assessing Structural Damage & Interventions Effectiveness for Built Cultural Heritage Protection, in: *Handbook of Research on Seismic Assessment & Rehabilitation of Historic Structures*. IGI Global, Pennsylvania, USA, pp. 448–499.
- Moropoulou, A., Labropoulos, K.C., Delegou, E.T., Karoglou, M., Bakolas, A., 2013. Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction & Building Materials* 48, 1222–1239.
- Nash, T., 1996. *Lichen Biology*, 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Nava, S., Becherini, F., Bernardi, A., Bonazza, A., Chiari, M., García-Orellana, I., Lucarelli, F., Ludwig, N., Migliori, A., Sabbioni, C., Udisti, R., Valli, G., Vecchi, R., 2010. An integrated approach to assess air pollution threats to cultural heritage in a semi-confined environment: The case study of Michelozzo's Courtyard in Florence (Italy). *Science of The Total Environment* 408, 1403–1413.
- Niedzielski, T., Migoń, P., Placek, A., 2009. A minimum sample size required from Schmidt hammer measurements. *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 1713–1725.
- Norberg-Schulz, C., 2009. *Genius Loci; Για μια φαινομενολογία της Αρχιτεκτονικής*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π. ed. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Papayianni, I., Stefanidou, M., 1997. Repair mortars suitable for interventions of Ottoman monuments, in: *Proceedings of International Conference on Studies in Ancient Structures, Istanbul*, 255-264

- Pachta, V., Papayianni, I., 2014. Εξέλιξη τεχνολογίας κονιαμάτων δόμησης, in: *Evolution of Constructional Materials & Techniques in Historic Structures*. Presented at the *Ιστορία Δομικών Κατασκευών, Ξάνθη*, pp. 1–12.
- Powers, T.C., 1955. Basic Considerations Pertaining to Freezing-&-Thawing Tests, in: *ASTM Proceedings*. American Society for Testing & Materials, pp. 1132–1155.
- Rodriguez-Navarro, C., Sebastian, E., 1996. Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation. *Science of The Total Environment* 187, 79–91.
- Russ, J., 2011. *Image Processing*. Taylor & Francis Group, USA.
- Schmidt, K., 2012. *Göbekli Tepe: A Neolithic Site in Southeastern Anatolia*. Oxford University Press
- Shea, J.J., 2013. *Stone Tools in the Paleolithic & Neolithic Near East: A Guide*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Smith, S.J., &res, R., Conception, E., Lurz, J., 2004. Historical Sulfur Dioxide Emissions 1850-2000: Methods & Results (No. PNNL-14537, 15020102).
- Stefanidou, M., Papayianni, I., Pachta, V., 2015. Analysis & characterization of Roman & Byzantine fired bricks from Greece. *Mater Struct* 48, 2251–2260.
- Steiger, M., 2005. Crystal growth in porous materials—II: Influence of crystal size on the crystallization pressure. *Journal of Crystal Growth* 282, 470–481.
- Sümengen-Berker, O., 2015. *Architecture & Ceramics*. *Procedia - Social & Behavioral Sciences* 191, 291–295.
- Széchy, K., 1970. *Traité de construction des tunnels*, Dunod. ed. Paris.
- Theoulakis, P., Moropoulou, A., 1999. Salt Crystal Growth as Weathering Mechanism of Porous Stone on Historic Masonry. *Journal of Porous Materials* 6, 345–358.
- Tuan, T.H., Navrud, S., 2008. Capturing the benefits of preserving cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage* 9, 326–337.
- UNESCO, ICCROM, ICOMOS, IUCN, World Heritage Convention, 2013. *Managing Cultural World Heritage - Resource Manual*. Paris.
- UNESCO World Heritage Centre, 2008. *World Heritage Information Kit 2008*. World Heritage 32.
- Van Lemmen, H., 2013. *5000 years of tiles*. Smithsonian Books, Washington DC.

- Vázquez, M.A., Galán, E., Guerrero, M.A., Ortiz, P., 2011. Digital image processing of weathered stone caused by efflorescences: A tool for mapping & evaluation of stone decay. *Construction & Building Materials* 25, 1603–1611.
- Vecco, M., 2010. A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible. *Journal of Cultural Heritage* 11, 321–324.
- Venkat Rao, N., Rajasekhar, M., Rao, G.C., 2014. Detrimental effect of Air pollution, Corrosion on Building Materials & Historical Structures. *American Journal of Engineering Research (AJER)* 03, 359–364.
- Viles, H., Goudie, A., Grab, S., Lalley, J., 2011. The use of the Schmidt Hammer & Equotip for rock hardness assessment in geomorphology & heritage science: a comparative analysis. *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 320–333.
- Waldmann, R., 2005. L'histoire des tunnels. *Tunnels et ouvrages souterrains* 188, 81–88.
- Wang, F., 2013. The Birth & Use of Concrete & Reinforced Concrete. *AMR* 712–715, 955–960.
- Watt, J., Tidblad, J., Kucera, V., Hamilton, R., 2009. *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*. Springer, New York USA.
- Zeza, F., 2010. Digital Image Processing in Weathering Damage Analysis & Recovery Treatments Monitoring, in: Ioannides, M., Hadjimitsis, D., Georgopoulos, A., Fellner, D. (Eds.), *Digital Heritage*. Presented at the Third International Euro-Mediterranean Conference, EuroMed 2010, Lemesos, Cyprus, pp. 71–84.
- Αβδελίδης, Ν., 2002. Εφαρμογές της Υπέρυθρης θερμογραφίας για τον Έλεγχο Υλικών σε Κατασκευές. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Αναστασιάδης, Γ., 2016. Πρωτογενής Οπτικός Έλεγχος.
- Αυγερινού-Κολώνια, Σ., 1995. Πολιτιστικές τουριστικές διαδρομές, δρόμοι διαλόγου και ανάπτυξης. *Σύγχρονα Θέματα* 104–111.
- Βαρτή-Ματαράγκα, Μ., 2001. Η Μελέτη του Δομικού Λίθου: Διάγνωση - Φθορά - Προέλευση. Presented at the Ο Δομικός Λίθος στα μνημεία, ΙΓΜΕ, Αθήνα, pp. 77–97.
- Βουθούνης, Π., 1999. Αντοχή των Υλικών, Ε'. ed. Ιδιωτική Έκδοση του Συγγραφέα, Αθήνα.
- Βουλγαρίδης, Η., 2015. Ποιότητα και Χρήσεις του Ξύλου. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Αθήνα.
- Γαβρηλίδης, Δ., 2018. Το Γυαλί στην Αρχιτεκτονική. Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Γεωργιάδου, Τ., 2016. Προστατεύουμε την Πολιτιστική μας Κληρονομιά, *Philosophia Ancilla/ Academica*. Εκδόσεις Σαΐτα, Καβάλα.

- Γραμματικάκη-Αλεξίου, Α., 2002. Διεθνής διακίνηση πολιτιστικών αγαθών και ιδιωτικό διεθνές δίκαιο, Εκδόσεις Σάκκουλα Α.Ε. ed. Εκδόσεις Σάκκουλα Α.Ε., Θεσσαλονίκη.
- ΕΥΡΩΤΕΚ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ Α.Ε., 2019. Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το Έργο "Ειδικό Χωρικό Σχέδιο για το Εκθεσιακό Κέντρο της Θεσσαλονίκης.
- Ζάμπας, Κ., 2001. Ο Λίθινος Φέρων Οργανισμός στα Ιστορικά Κτήρια. Presented at the Ο Δομικός Λίθος στα μνημεία, ΙΓΜΕ, Αθήνα, pp. 163–185.
- Ζερβάκη, Α., 2015. Πολιτισμός και βιωσιμότητα: μια ακόμη πρόκληση για τα Ηνωμένα Έθνη;
- Ζερβοπούλου, Ά., 2010. Νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης σε σχέση με τα εδάφη θεμελίωσης. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Ηλιόπουλος, Ι., 2013. Δομικοί λίθοι. Σημειώσεις Μαθήματος “Υλικά της Γης”, Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Θεουλάκης, Π., 1993. Μελέτη των αιτιών και των μηχανισμών διάβρωσης του ψαμμίτη του κάστρου και της μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κακαράς, Ι., 2017. Η Ξύλινη Πολιτιστική Κληρονομιά στη χώρα μας. Ενέργειες για τη διάσωσή της. URL http://kakarasioannis.blogspot.com/2017/01/blog-post_8.html (accessed 3.25.20).
- Κακαράς, Ι., 2014. Τεχνολογία Ξύλινων Δομικών Κατασκευών. Εκδοτικός Όμιλος ΙΩΝ, Αθήνα.
- Καλδούδη, Ε., Ελευθεριάδης, Χ., 2015. Η Φυσική της Ζωής. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Αθήνα.
- Καλογεράς, Ν., Κιρποτίν, Χ., Μακρής, Γ., Παπαϊωάννου, Ι., 1999. Θέματα Οικοδομικής. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Καραγιάννης, Ν., 2017. Η Μικροδομή ως κρίσιμος παράγοντας της υδροθερμικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Καραδήμου, Α., 2018. Η προστασία των χώρων και των ακίνητων μνημείων στα ευρωπαϊκά και διεθνή κείμενα προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς. [www Document]. Νόμος και Φύση. URL: <https://nomosphysis.org.gr/18675/i-prostasia-ton-xoron-kai-ton-akiniton-mnimeion-sta-eyropaika-kai-diethni-keimena-prostasias-tis-politistikis-klironomias/> (accessed 12.9.19).
- Καραλή, Λ., 1998. Λεξικό Αρχαιολογικών - Περιβαλλοντικών Όρων. Λεξικό Αρχαιολογικών - Περιβαλλοντικών Όρων.
- Κατσιώτης, Ν., 2015. Διερεύνηση Δυνατοτήτων Συμβολής Μεθόδων Μη Καταστρεπτικού Ελέγχου στη Διάγνωση και στον Έλεγχο Ποιότητας Δομικών Υλικών με Έμφαση στην Αειφόρο Κατασκευή. ΕΜΠ, Αθήνα.

- Κλημεντίδου-Παπαδάμου, Ά., Ζόμπου-Ασήμη, Ά., 1993. Λευκός Πύργος Θεσσαλονίκης. Αναστήλωση - Συντήρηση - Προστασία Μνημείων και Συνόλων Γ', 138–152.
- Κουή, Μ., Χειλάκου, Ε., Θεοδωρακάς, Π., Δρίτσα, Β., Άβδελίδης, Ν., 2015. Μη Καταστρεπτικές και Φασματοσκοπικές Μέθοδοι Εξέτασης των Υλικών: Θεωρία, Τεχνικές και Εφαρμογές. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Αθήνα.
- Κουρουτάκη, Α., 2018. Σημειώσεις Μαθήματος “Αρχιτεκτονική Τεχνολογία - Εισαγωγή στην Οικοδομική” της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Πολυτεχνείου Κρήτης.
- Κούρτελη, Χ., 2001. Αποτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων στα Δομικά Υλικά των μνημείων. Διαχείριση Περιβαλλοντικών Παραγόντων Φθοράς. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κυροπούλου, Δ., 2016. Τεχνολογική εξέλιξη και παθογένειες ιστορικών κονιαμάτων. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Λάββας, Γ., 2002. Επίτομη Ιστορία της Αρχιτεκτονικής. UNIVERSITY STUDIO PRESS A.E., Θεσσαλονίκη.
- Λαδά, Θ.-Ν., 2009. Εφαρμογές Ξύλου σε Κατασκευές με Αρχαιολογική Αξία. Τ.Ε.Ι. Λάρισας, Λάρισα.
- Λεγάκις, Α., 1997a. Δομικά Υλικά τ.Α'. Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα.
- Λεγάκις, Α., 1997b. Δομικά Υλικά τ.Β'. Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα.
- Λουκμά, Μ., 2019. Τεχνολογία, υλικά δόμησης και παθολογία σε θρησκευτικά κτήρια της οθωμανικής περιόδου. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Μαλλούχου-Tufano, Φ., 2016. Προστασία και Διαχείριση Μνημείων.
- Μαμαλούκος, Σ., 2014. Σημειώσεις Μαθήματος “Βυζαντινή, Μεσαιωνική και Μεταβυζαντινή Αρχιτεκτονική και Πολεοδομία” του Δ.Π.Μ.Σ. “Αρχαιολογία, Πόλη και Αρχιτεκτονική” Ε.Μ.Π.
- Μανιάτης, Γ., 2004. Το Μάρμαρο σαν Υλικό για την Λατρεία, την Τέχνη και την Αρχιτεκτονική: από την Προϊστορική Ελλάδα ως την Σύγχρονη Δύση. Presented at the Η επίδραση του Ολυμπιακού Πνεύματος στην ανθρώπινη πρόοδο, Ινστιτούτο Διεθνούς Συνεργασίας Ελλήνων Επιστημόνων, Θεσσαλονίκη, pp. 232–249.
- Μαντάνης, Γ., n.d. Σημειώσεις Μαθήματος “Δομή Ξύλου” Τμήματος Σχεδιασμού και Τεχνολογίας Ξύλου & Επίπλου Τ.Ε.Ι. Λάρισας.
- Μαρινάκη, Α., 2004. Αξιολόγηση πρώτων υλών και κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται σε εργασίες συντήρησης και αναστήλωσης. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Ματίκας, Θ., Αγγέλης, Δ., 2015. Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Αθήνα.

- Μερκουρέα, Ά., Παχή, Μ., 2013. Το ξύλο ως δομικό στοιχείο στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μοροπούλου, Α., 2014. Σημειώσεις “Μη Καταστρεπτικές & Ενόργανες Μέθοδοι Χαρακτηρισμού & Διάγνωσης της φθοράς και Ελέγχου Υλικών και Επεμβάσεων Στητήρησης” Δ.Π.Μ.Σ. “Προστασία Μνημείων” Ε.Μ.Π.
- Μοροπούλου, Α., Καρόγλου, Μ., Μούνδουλας, Π., 2014. Σημειώσεις Μαθήματος “Εισαγωγή στην Παθολογία και Αποκατάσταση Μνημείων και Υλικών” Δ.Π.Μ.Σ. “Προστασία Μνημείων” Ε.Μ.Π.
- Μοροπούλου, Α., Λαμπρόπουλος, Κ., 2010. Χαρακτηρισμός δομικών λίθων και διάγνωση της φθοράς τους στα μνημεία του πολιτισμού, in: Αρχαιο-Υλικά: Αρχαιολογικές, Αρχαιομετρικές Και Πολιτισμικές Προσεγγίσεις. Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, pp. 255–291.
- Μοροπούλου, Α., Μπακόλας, Α., 2014. Σημειώσεις Μαθήματος “Δομικά Υλικά” 9ου Εξαμήνου Τμήματος Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Μοροπούλου, Α., Τογκαλίδου, Τ., Αβδελίδης, Ν., Καρόγλου, Μ., Λαμπρόπουλος, Κ., Μουνδούλας, Π., Μπακόλας, Α., Χανδακάς, Β., 2005. Πρότυπα, Μεθοδολογία και Τεχνικές για τον Ολικό Έλεγχο Ποιότητας στις Κατασκευές και τα Έργα Υποδομών με Μη Καταστρεπτικές Μεθόδους. Presented at the Συνέδριο ΤΕΕ “Δημόσια Έργα,” ΤΕΕ, Αθήνα, pp. 91–128.
- Μουστάκας, Κ., Παλιόκας, Ι., Τζοβάρας, Δ., Τσακίρης, Α., 2015. Γραφικά και Εικονική Πραγματικότητα. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Αθήνα.
- Μουστρής, Κ., 2015. Σημειώσεις Μαθήματος “Τεχνολογία Περιβαλλοντικών Μετρήσεων” Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ, ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ.
- Μπαμπινιώτης, Γ., 2009. Ετυμολογικό Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας. Ετυμολογικό Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας.
- Μπισμπίκου, Α., 1997. Μελέτη -αίτια και μηχανισμοί- της φθοράς των δομικών υλικών του αρχαιολογικού χώρου της Ελευσίνας σε σχέση με την ατμοσφαιρική ρύπανση. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Ν.3028/2002, 2002. Για την προστασία των Αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς.
- Νομικός, Π., 2015. Εισαγωγή στη Μηχανική Πετρωμάτων. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Αθήνα.

- Όρκουλα, Μ., 2000. Μηχανισμοί διάλυσης ασβεστολιθικών δομικών υλικών. Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Παλιεράκη, Β., Βιντζηλαίου, Ε., Μανωλεδάκη, Α.-Α., Αδάμη, Χ.-Ε., Νικολοπούλου, Β., 2015. Οι μέθοδοι του ραντάρ και της ενδοσκόπησης. Εφαρμογή σε Βυζαντινά και Νεώτερα μνημεία. Πολυτεχνειακά Νέα 1, 3–20.
- Πανταζοπούλου, Ζ., 2017. Τεχνικογεωλογική θεώρηση για την ευστάθεια των βραχωδών υπόγειων και επιφανειακών εκσκαφών, καθώς και χαρακτηρισμός των λατομικών υλικών του αρχαιολογικού χώρου των «Τάφων των Βασιλέων» στην Πάφο, Κύπρος. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Παπαδάκης, Β., 1990. Μελέτη των Φυσικοχημικών Διεργασιών του Σκληρυμένου Τσιμεντοπολτού και των Επιπτώσεων στην Ανθεκτικότητα σε Διάρκεια του Οπλισμένου Σκυροδέματος. Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Παπαζάχου, Ν., 2012. Προσδιορισμός οργανικών και ανόργανων ανιόντων στα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας και στην αποτιθέμενη σκόνη των μνημείων. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Παπαϊωάννου, Κ., 2005. Η τεχνολογία της τοιχοποιίας, 2nd ed. UNIVERSITY STUDIO PRESS A.E., Θεσσαλονίκη.
- Παπακώστα, Ε., Συμεωνίδης, Θ., Τσαγκαρλής, Γ., 2014. Έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013. Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας - Διεύθυνση Περιβάλλοντος και Χωρικού Σχεδιασμού, Θεσσαλονίκη.
- Παπαμίχος, Ε., Χαραλαμπίδης, Ν., 2006. Αντοχή των Υλικών. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Παπαρρηγόπουλος, Θ. (Ed.), 2014. Σημειώσεις Σεμιναρίου “Αντίληψη και Τέχνη: Εφαρμογές στη Φωτογραφία.” Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Πάχτα, Β., 2011. Μελέτη Εξέλιξης Τεχνολογίας Κονιαμάτων. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Πινέλη, Τ., 2003. Συσχέτιση αποτελεσμάτων δοκιμών υπερηχοσκόπησης, μηχανικών αντοχών και χαρακτηριστικών μικροδομής δομικών λίθων ιστορικών τοιχοποιιών. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Πίττας, Σ., 1994. Προσέγγιση δόκιμου Ελληνικού γλωσσάριου για τον προσδιορισμό εννοιών σχετικών με τη φροντίδα των μνημείων. Μνημείο και Περιβάλλον.
- Πούλιος, Ι., Αλιβιζάτου, Μ., Αραμπατζής, Γ., Γιαννακίδης, Α., Καραχάλης, Ν.Γ., 2015. Πολιτισμική Διαχείριση, Τοπική Κοινωνία και Βιώσιμη Ανάπτυξη. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.

- Ραφαηλίδου, Σ., 2012. Η εξέλιξη της τεχνολογίας του μαρμάρου και οι εφαρμογές της στην αρχιτεκτονική από τη Αρχαϊκή έως την Ελληνιστική εποχή στη Μακεδονία και τη Θράκη. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Σκόδρας, Α., Αναστασόπουλος, Β., 2003. Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων και Σημάτων. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.
- Σκουλικίδης, Θ., 2000. Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης. ed. Ηράκλειο Κρήτης.
- Σπανός, Χ. et al., Πρακτικά - Διδακτικά Εγχειρίδια. Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών., in: Αντισεισμική Θωράκιση Υφιστάμενων Κατασκευών. Ομάδα Εργασίας II-3. ΤΕΕ, Αθήνα, pp. 53–76.
- Σύνταγμα της Ελλάδας, 1975. Σύνταγμα της Ελλάδας, Άρθρο 24, ΦΕΚ 187/Α'/28.11.2019.
- Τασσογιαννόπουλος, Α., 1986. Συμβολή στη μελέτη των ιδιοτήτων δομικών φυσικών λίθων της Ελλάδας. ΕΚΠΑ, Αθήνα.
- Τζιρίτας, Γ., 2016. Σημειώσεις “Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων” Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- Τουλιάτος, Π. et al., n.d. Το Ξύλο ως Δομικό Υλικό [www Document]. URL: http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES (accessed 3.20.20).
- Τρυσιάνη-Ομήρου, Σ.Ρ., 2012. Υλικά και τρόποι Δομής στα Βυζαντινά μνημεία της Θεσσαλονίκης. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Τσιγαρίδα, Κ., Τάγκος, Χ., Κόταρης, Γ., 2003. Περιγραφή Αρχιτεκτονικής Μελέτης για την Ανάπλαση της Πλατείας του Λευκού Πύργου.
- Τσιρόγλου, Δ., 2000. Ο Λευκός Πύργος. Εκδόσεις Σαββάλα, Αθήνα.
- Τσότσος, Σ., Ζόμπου-Ασήμη, Α., Κλημεντίδου-Παπαδάμου, Α., Μάνου-Ανδρεάδου, Α.-Μ., 1992. Λευκός Πύργος: Γεωτεχνική θεώρηση και έρευνα της θεμελίωσης του μνημείου. Presented at the 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Θεσσαλονίκη, pp. 365–372.
- ΥΠΠΟ Ανδρεαδάκη-Βλαζάκη, Μ., 2012. Από το ανασκαφικό έργο των Εφορειών Αρχαιοτήτων, 2000-2010. ΥΠΠΟ - Γενική Διεύθυνση Αρχαιοτήτων και Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Αθήνα.
- Φτίκος, Χ., 2015. Παραδοσιακά Κεραμικά. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ.
- Φωτοπούλου, Σ.-Β., 2020. Διεθνείς και ευρωπαϊκές ρυθμίσεις για την πολιτιστική κληρονομιά και εφαρμογές υλοποίησής τους σε εθνικό επίπεδο.

- Χάρτης της Βενετίας, 1964. Χάρτης της Βενετίας.
- Χατήρης, Ι., Βελαώρας, Ι., Μηλιωρίτσας, Ε., Μουρελάτου, Ζ., 2007. Στοιχεία Υλικών Κατασκευών. Εκδοτικός Όμιλος ΙΩΝ, Αθήνα.
- Χιώτης, Ε., Χιώτη, Λ., 2010. Ο ρόλος του λίθου κατά την εξέλιξη του πολιτισμού, in: Αρχαιο-Υλικά: Αρχαιολογικές, Αρχαιομετρικές Και Πολιτισμικές Προσεγγίσεις. Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, pp. 201–253.
- Χοϊδης, Π., 2019. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα δομικά υλικά των ιστορικών κατασκευών. ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Χρέμου, Ε., 2013. Μακροχρόνιες μεταβολές στις εκπομπές των αέριων ρύπων στην Ελλάδα». ΕΜΠ - Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΛΙΘΟΙ

Τμήμα μνημείου	Sp.No					R _N					St.Dev.	UCS (MPa)	KΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟΥ	Haramy & DeMarco, 1985	Yilmaz & Sendir, 2002	Yasar & Erdogan, 2004	Kilic & Teymen, 2008
	1	2	3	4	5	Mean	1	2	3	4							
Μέτωπο Κυκλοφορίας	1	20	32	28	34	38	30,4	6,84	25,0	29,8	13,6	9,2	32,1				
	2	38	26	38	34	42	35,6	6,07	33,0	35,0	18,2	18,5	45,9				
	3	22	22	36	30	30	28,0	6,00	20,0	27,4	11,8	6,5	26,6				
	4	32	30	26	30	32	30,0	2,45	24,0	29,4	13,3	8,7	31,1				
	5	39	42	38	36	41	39,2	2,39	38,0	38,6	22,9	27,5	57,1				
	6	32	27	43	43	45	38,0	8,00	36,5	37,4	21,3	24,1	53,2				
	7	26	36	37	35	38	34,4	4,83	31,0	33,8	17,2	15,7	42,5				
	8	38	32	36	39	34	35,8	2,86	33,5	35,2	18,7	18,7	46,5				
	9	46	40	36	44	36	40,4	4,56	41,3	39,8	24,6	31,3	61,2				
	10	36	38	30	42	43	37,8	5,22	36,3	37,2	21,1	23,6	52,6				
Μέτωπο Θάλασσας	11	26	27	28	30	34	29,0	3,16	21,8	28,4	12,5	7,6	28,8				
	12	21	17	20	20	22	20,0	1,87	10,0	19,5	7,4	1,5	12,4				
	13	28	27	27	36	34	30,4	4,28	25,0	29,8	13,6	9,2	32,1				
	14	18	22	24	26	24	22,8	3,03	13,8	22,3	8,7	2,7	16,7				
	15	46	40	42	38	44	42,0	3,16	44,0	41,4	27,0	37,0	66,8				
	16	36	40	44	36	38	38,8	3,35	37,8	38,2	22,4	26,4	55,8				
	17	20	22	18	26	23	21,8	3,03	11,8	21,3	8,2	2,2	15,1				
	18	56	48	51	51	55	52,2	3,27	63,5	51,5	49,3	94,1	109,5				
	19	56	53	34	36	38	43,4	10,29	47,0	42,8	29,3	42,6	72,0				
	20	27	31	30	29	33	30,0	2,24	24,0	29,4	13,3	8,7	31,1				
Ανατολική Όψη	21	16	25	23	22	18	20,8	3,70	11,0	20,3	7,7	1,8	13,5				
	22	34	22	21	24	28	25,8	5,31	17,5	25,3	10,4	4,6	22,1				
	23	48	40	48	50	46	46,4	3,85	52,4	45,7	35,0	56,8	83,8				
	24	42	42	43	38	38	40,6	2,41	34,0	40,0	24,9	32,0	61,9				
	25	42	40	43	44	42	42,2	1,48	44,1	41,6	27,3	37,8	67,5				
	26	20	24	20	26	26	23,2	3,03	13,8	22,7	8,9	2,9	17,3				
	27	33	33	32	28	31	31,4	2,07	26,0	30,8	14,4	10,6	34,5				
	28	47	48	44	47	43	45,8	2,17	50,8	45,1	33,8	53,7	81,4				
	29	34	30	29	36	30	31,8	3,03	26,0	31,2	14,8	11,2	35,5				
	30	26	26	24	26	18	24,0	3,46	14,5	23,5	9,3	3,4	18,7				
	31	38	42	32	34	32	35,6	4,34	32,5	35,0	18,5	18,2	45,9				
	32	47	45	52	44	42	46,0	3,81	51,0	45,3	34,2	54,7	82,2				
	33	51	48	45	47	43	46,8	3,03	53,5	46,1	35,8	58,9	85,4				

ΠΛΙΝΓΟΙ

Τμήμα μνημείου	Sp.No	R _N					R _N Mean	St.Dev.	UCS (MPa)	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟΥ	Roknuzzaman, 2017
		1	2	3	4	5					
Μέτωπο Κυκλοφορίας	1	31	33	36	30	30	32,0	2,55	26,0		23,7
	2	22	24	18	19	25	21,6	3,05	11,5		11,9
	3	24	28	24	34	30	28,0	4,24	20,0		19,2
	4	30	32	26	26	28	28,4	2,61	21,0		19,6
	5	34	28	26	34	32	30,8	3,63	24,5		22,4
	6	26	26	24	24	22	24,4	1,67	15,0		15,1
	7	25	26	28	30	28	27,4	1,95	19,5		18,5
	8	44	24	18	27	28	28,2	9,65	20,5		19,4
	9	34	28	26	29	31	29,6	3,05	23,0		21,0
	10	20	26	23	28	24	24,2	3,03	14,5		14,8
	11	20	25	29	25	29	25,6	3,71	17,0		16,4
	12	22	20	22	24	24	22,4	1,67	13,0		12,8
	13	16	14	13	11	15	13,8	1,92	under detection		3,0
	14	22	18	20	18	22	20,0	2,00	10,0		10,0
	15	22	28	30	30	32	28,4	3,85	20,8		19,6
	16	23	25	22	20	23	22,6	1,82	13,5		13,0
	17	21	21	25	24	22	22,6	1,82	13,5		13,0
18	16	18	19	18	19	18,0	1,22	under detection		7,8	
19	20	21	22	20	22	21,0	1,00	11,0		11,2	
20	42	44	36	33	44	39,8	5,02	40,0		32,6	
21	36	32	32	28	30	31,6	2,97	26,0		23,3	
22	18	22	16	12	18	17,2	3,63	under detection		6,8	
23	23	27	26	30	30	27,2	2,95	18,8		18,2	
24	32	30	31	28	29	30,0	1,58	23,5		21,4	
25	28	27	26	26	27	26,8	0,84	18,5		17,8	
26	22	22	22	22	22	22,0	0,00	12,0		12,3	
27	24	26	30	32	33	29,0	3,87	22,0		20,3	
28	29	30	26	28	26	27,8	1,79	20,0		18,9	
29	30	30	31	29	31	30,2	0,84	24,0		21,7	
30	28	28	25	26	25	26,4	1,52	18,0		17,3	
31	20	21	25	23	21	22,0	2,00	12,0		12,3	
32	21	23	26	21	24	23,0	2,12	13,8		13,5	
33	26	26	28	26	25	26,2	1,10	17,8		17,1	
Μέτωπο Θάλασσας											
	Ανατολική Όψη										

ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Τμήμα μνημείου	Sp.No	R_N					R_N		UCS (MPa) ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟΥ
		1	2	3	4	5	Mean	St.Dev.	
Μέτωπο Κυκλοφορίας	1	14	19	13	20	18	16,8	3,11	under detection
	2	13	14	12	13	11	12,6	1,14	under detection
	3	14	16	12	16	16	14,8	1,79	under detection
	4	12	14	14	18	16	14,8	2,28	under detection
	5	14	13	16	17	13	14,6	1,82	under detection
	6	13	13	12	16	14	13,6	1,52	under detection
	7	13	13	11	11	12	12,0	1,00	under detection
	8	16	18	19	20	16	17,8	1,79	under detection
	9	16	19	16	15	18	16,8	1,64	under detection
	10	16	16	15	20	17	16,8	1,92	under detection
Μέτωπο Θάλασσας	11	12	16	17	17	21	16,6	3,21	under detection
	12	18	18	20	22	22	20,0	2,00	10,0
	13	11	16	14	16	18	15,0	2,65	under detection
	14	10	11	10	11	12	10,8	0,84	under detection
	15	14	18	17	18	19	17,2	1,92	under detection
	16	11	16	12	16	19	14,8	3,27	under detection
	17	16	14	12	12	12	13,2	1,79	under detection
	18	20	16	18	21	17	18,4	2,07	under detection
	19	13	12	12	14	13	12,8	0,84	under detection
	20	16	16	16	11	14	14,6	2,19	under detection
Ανατολική Όψη	21	10	11	10	13	16	12,0	2,55	under detection
	22	13	15	15	13	13	13,8	1,10	under detection
	23	22	18	18	21	17	19,2	2,17	under detection
	24	16	20	18	15	15	16,8	2,17	under detection
	25	17	17	14	16	14	15,6	1,52	under detection
	26	16	14	14	12	14	14,0	1,41	under detection
	27	14	16	16	20	14	16,0	2,45	under detection
	28	18	16	21	17	18	18,0	1,87	under detection
	29	19	20	18	19	17	18,6	1,14	under detection
	30	16	13	11	13	17	14,0	2,45	under detection
	31	20	20	18	24	18	20,0	2,45	10,0
	32	17	14	19	19	17	17,2	2,05	under detection
	33	15	15	16	16	14	15,2	0,84	under detection

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Κυριότερες Διεθνείς Συμβάσεις και Χάρτες για την προστασία της Πολιτιστικής Κληρονομιάς

(<http://www.arch.ntua.gr/resource/5141>)

- 1877, Διακήρυξη αρχών της Κοινότητας για την Προστασία των Αρχαίων Κτηρίων (Manifesto of SPAB), Αγγλία.
- 1883, Ψήφισμα 3ου Εθνικού Συνεδρίου Αρχιτεκτόνων και Μηχανικών, Ρώμη.
- 1931, Χάρτης των Αθηνών (του Διεθνούς Συμβουλίου Μουσείων της Κοινωνίας των Εθνών).
- 1933, Χάρτης Αθηνών (του Διεθνούς Συνεδρίου Μοντέρνας Αρχιτεκτονικής CIAM).
- 1954, Σύμβαση για την προστασία της Πολιτιστικής Ιδιοκτησίας σε περίπτωση Ένοπλης Σύρραξης, Χάγη.
- 1964, Διεθνής Χάρτης για τη Συντήρηση και Αποκατάσταση των Μνημείων και Τόπων, (του 2ου Διεθνούς Συνεδρίου Αρχιτεκτόνων και Τεχνικών Ιστορικών Μνημείων), Βενετία.
- 1972, Σύμβαση (της UNESCO) για την Προστασία της Παγκόσμιας Πολιτιστικής και Φυσικής Κληρονομιάς, Παρίσι.
- 1975, Ευρωπαϊκός Χάρτης της Αρχιτεκτονικής Κληρονομιάς (του Συμβουλίου της Ευρώπης), Άμστερνταμ.
- 1976, Χάρτης του Πολιτιστικού Τουρισμού (του ICOMOS), Βρυξέλλες.
- 1978, Πρότυπα και Οδηγίες για Αποκατάσταση, Η.Π.Α.
- 1981, Χάρτης Burra για τη Διατήρηση Τόπων πολιτιστικής Σημασίας, Αυστραλία.
- 1982, Χάρτης Φλωρεντίας για τη Διατήρηση των Ιστορικών Κήπων (ICOMOS), Φλωρεντία.
- 1982, Διακήρυξη Deschambault, Χάρτης για τη διατήρηση της Κληρονομιάς (ICOMOS Καναδά), Κεμπέκ.
- 1983, Χάρτης Άπλετον, για την Προστασία και τον Τόνωση του Δομημένου Περιβάλλοντος, (ICOMOS Καναδά), Καναδάς.

- 1987, Χάρτης της Πετρούπολης για τη Διατήρηση και Αναβίωση των Ιστορικών Κέντρων, (ICOMOS), Βραζιλία.
- 1985, Σύμβαση για την Προστασία της Αρχιτεκτονικής Κληρονομιάς της Ευρώπης, (του Συμβουλίου της Ευρώπης), Γρανάδα.
- 1987, Χάρτα για τη Διατήρηση των Ιστορικών Πόλεων και των Αστικών Περιοχών, (ICOMOS) Ουάσιγκτον.
- 1993, Χάρτης για τη διατήρηση Τόπων με αξία Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Νέα Ζηλανδία.
- 1993, Οδηγίες για την Εκπαίδευση στη Διατήρηση των Μνημείων, Συνόλων και Τοποθεσιών (ICOMOS), Κολόμπο.
- 1994, Τεκμήριο Αυθεντικότητας (ICOMOS, ICCROM, UNESCO), Νάρα.
- 2000, Σύμβαση της Φλωρεντίας για το Τοπίο (Συμβούλιο της Ευρώπης), Φλωρεντία
- 2003, Χάρτα του Νίζνυ Ταγκίλ για τη Βιομηχανική Κληρονομιά, Νίζνυ Ταγκίλ
- 2009, Κατάλογος της Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς (UNESCO)
- 2010, Αρχές της Βαλέτας για τις Ιστορικές Πόλεις, Βαλέτα
- 2011, Αρχές του Δουβλίνου για τη διατήρηση της Βιομηχανικής Κληρονομιάς (ICOMOS – TICCIH), Δουβλίνο

Ειδικά για την προστασία αρχαιοτήτων:

- 1956, Συστάσεις για τις Διεθνείς Αρχές που πρέπει να εφαρμόζονται στις αρχαιολογικές ανασκαφές (UNESCO), Νέο Δελχί.
- 1990, Χάρτης για την Προστασία και τη Διαχείριση της Αρχαιολογικής Κληρονομιάς, (ICOMOS), Λωζάννη.
- 1992, Ευρωπαϊκή Σύμβαση για την Προστασία της Αρχαιολογικής Κληρονομιάς (του Συμβουλίου της Ευρώπης), Βαλέτα.
- 1996, Χάρτης για την Προστασία και τη Διαχείριση της Υποβρύχιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Σόφια.



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

