ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΨΗΦΙΔΩΤΩΝ

ΦΤΙΚΟΥ Χ. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ - ΖΩΗ
ΠΕ ΣΥΝΤΗΡΗΤΡΙΑ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΜΑΡΙΑ ΚΟΥΗ

ΑΘΗΝΑ 2016

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

- Μ. Κουή, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π (Επιβλέπουσα)
- Σ. Τσίμας, Καθηγητής Ε.Μ.Π
- Α. Γεωργιάδης, σ. Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

- Μ. Κουή, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π, (Επιβλέπουσα)
- Δ. Δημοτίκαλη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π
- Γ. Κακάλη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π
- Σ. Χ. Καραγιάννη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π
- Σ. Τσίμας, Καθηγητής Ε.Μ.Π
- Α. Γεωργιάδης, σ. Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π
- Α. Καραγιάννης-Μπακόλας, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα
(Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)

Πίνακας Περιεχομένων			**Σελίδες**
Πρόλογος			VII
Περίληψη			IX
Summary			XII
Εισαγωγή			XV
	Μέρος Α – Θεωρητικό		
1	Ιστορική επισκόπηση των ψηφιδωτών δαπέδων - Τεχνολογία κατασκευής		1
1.1	Ιστορική εξέλιξη της τέχνης του ψηφιδωτού		1
	1.1.1	Βοτσαλωτά δάπεδα	1
	1.1.2	Ψηφιδωτά δάπεδα κυβικών ψηφίδων (Opus Tessellatum)	2
	1.1.3	Δάπεδα από μαρμάρινα ή λίθινα πλακίδια με ασύμμετρο σχήμα	5
1.2	Υλικά και τεχνικές κατασκευής ψηφιδωτών δαπέδων		5
	1.2.1	Υπόστρωμα ψηφιδωτών δαπέδων	5
	1.2.2	Υλικά κατασκευής ψηφιδωτών δαπέδων	8
	1.2.2.1	Κονιάματα	8
	1.2.2.2	Ψηφίδες	10
	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1		11
	Κατάλογος Εικόνων Κεφαλαίου 1		14
2	Φθορά και συντήρηση των ψηφιδωτών δαπέδου		15
2.1	Φθορά των υλικών του υποστρώματος		15
	2.1.1	Παράγοντες φθοράς	15
	2.1.2	Η δράση του νερού	15
	2.1.3	Φθορά από άλατα	16
	2.1.4	Επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών	17
	2.1.5	Επίδραση των ατμοσφαιρικών ρύπων	18
	2.1.6	Βιολογικοί παράγοντες φθοράς	19
	2.1.7	Ανθρώπινη δραστηριότητα	20

	2.1.8	Φθορά από ακραία καιρικά φαινόμενα και φυσικές καταστροφές		20
	2.1.9	Επιπτώσεις μηχανισμών φθοράς σε ψηφιδωτά δάπεδα		21
2.2	Μέθοδοι και υλικά συντήρησης ψηφιδωτών δαπέδων			23
	2.2.1	Διάγνωση και τεκμηρίωση		24
	2.2.2	Προληπτική συντήρηση		25
	2.2.3	Επεμβάσεις συντήρησης		25
		2.2.3.1	Απόσπαση ψηφιδωτού δαπέδου	27
		2.2.3.2	Επανατοποθέτηση του ψηφιδωτού δαπέδου	28
	2.2.4	Υλικά και τεχνικές συντήρησης		29
		2.2.4.1	Υλικά στερέωσης και αποκατάστασης του υποστρώματος	29
2.3	Σημερινή κατάσταση διατήρησης και διαχείρισης των ψηφιδωτών δαπέδων στην Ελλάδα			30
	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2			31
	Κατάλογος Εικόνων Κεφαλαίου 2			36
3	Μη καταστρεπτικός έλεγχος (NDT) ψηφιδωτών δαπέδων, τεχνικές και μεθοδολογία εξέτασης			37
3.1	Μη καταστρεπτικός έλεγχος με τη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρου (IRT)			37
	3.1.1	Έλεγχος με θερμογραφία υπερύθρου (IRT)		38
	3.1.2	Εφαρμογή της θερμογραφίας υπερύθρου σε μνημεία		40
3.2	Μη καταστρεπτικός έλεγχος με τη χρήση του γεωραντάρ (GPR)			42
	3.2.1	Βασικές αρχές λειτουργίας		42
	3.2.2	Τεχνική λειτουργίας του γεωραντάρ – Επεξεργασία ανακτώμενων από το πεδίο δεδομένων		43
	3.2.3	Έλεγχος δομών με γεωραντάρ - Δυσδιάστατες τομές (B-scan) - Ερμηνεία ανακλάσεων από διεπιφάνειες υλικών και περιθλάσεων από σημειακούς σκεδαστές		47
	3.2.4	Εφαρμογή της τεχνικής του γεωραντάρ (GPR) σε δάπεδα μνημείων		49
3.3	Μη καταστρεπτικός έλεγχος με τη μέθοδο των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της Ηχούς από Κρούση (SASW, Impact Echo)			50
	3.3.1	Τεχνική λειτουργίας της μεθόδου των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της		50

		Ηχούς από Κρούση		
	3.3.2	Εφαρμογή της μεθόδου Μικροσεισμικών Κυμάτων στην εξέταση δαπέδων		54
	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3			55
	Κατάλογος Εικόνων Κεφαλαίου 3			63
4	Δειγματοληπτικός έλεγχος ψηφιδωτών δαπέδων στο εργαστήριο			64
4.1	Διερεύνηση των κονιαμάτων αρχαίων μνημείων			65
4.2	Ψηφιακό μικροσκόπιο (Digital Microscopy, DM)			66
4.3	Ηλεκρονιακό μικροσκόπιο σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων-Χ (SEM/EDX)			67
4.4	Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)			69
4.5	Μελέτη με θερμοβαρυμετρία (TG-DTG)			70
	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4			72
	Κατάλογος Εικόνων Κεφαλαίου 4			75
	Μέρος Β - Πειραματικό			
	Εισαγωγή			76
1.	**Ψηφιδωτά δάπεδα Εθνικού Κήπου**			82
1.1	Περιγραφικά στοιχεία ψηφιδωτού του δαπέδου στο χώρο α΄			83
	1.1.2	Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης		83
		1.1.2.1	Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης	84
	1.1.3	Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο α΄		85
		1.1.3.1	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)	85
		1.1.3.2	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Γεωραντάρ (GPR)	88
1.2	Περιγραφικά στοιχεία ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο γ΄			91
	1.2.1	Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης		92
		1.2.1.1	Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης	92
	1.2.2	Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο β΄		93
		1.2.2.1	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας	93

			Υπερύθρου (IRT)	
		1.2.2.2	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Γεωραντάρ (GPR)	95
1.3	Περιγραφικά στοιχεία ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο β΄			100
	1.3.1	Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης		101
	1.3.2	Μεθοδολογία διερεύνησης του ψηφιδωτού δαπέδου του χώρου β΄		101
		1.3.2.1	Μακροσκοπική παρατήρηση δειγμάτων	102
		1.3.2.2	Μελέτη με Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM)	104
		1.3.2.3	Μελέτη με Ηλεκρονιακό Μικροσκόπιο-Μικροαναλυτή (SEM-EDX)	105
		1.3.2.4	Μελέτη με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)	109
		1.3.2.5	Μελέτη με Θερμική Ανάλυση (TG-DTG)	111
1.4	Συμπεράσματα από τη μελέτη των ψηφιδωτών δαπέδων της Ρωμαϊκής οικίας του Εθνικού κήπου			115
	1.4.1	Συμπεράσματα από την εξέταση του ψηφιδωτού δαπέδου του χώρου α΄ με την εφαρμογή των τεχνικών IRT και GPR		115
	1.4.2	Συμπεράσματα από τη μελέτη του κονιάματος του ψηφιδωτού δαπέδου του χώρου γ΄ με τη χρήση των τεχνικών IRT και GPR		116
	1.4.3	Συμπεράσματα από τη μελέτη του κονιάματος του δαπέδου στο χώρο β΄ του Εθνικού Κήπου		116
2.	**Ψηφιδωτό δάπεδο αρχαίας οικίας στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld"**			119
2.1	Περιγραφικά στοιχεία αντικειμένου			119
2.2	Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης			119
	2.2.1	Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης		120
2.3	Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου του ψηφιδωτού δαπέδου αρχαίας οικίας "ανασκαφών Dörpfeld"			120
	2.3.1	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)		120
	2.3.2	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Γεωραντάρ (GPR)		122
2.4	Συμπεράσματα από τη μελέτη του δαπέδου στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld"			126
3.	**Ψηφιδωτό δάπεδο στο 'σπήλαιο του Πανός', Πνύκα**			127

3.1	Περιγραφικά στοιχεία αντικειμένου		127
3.2	Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης		127
	3.2.1	Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης	128
3.3	Μεθοδολογία διερεύνησης του ψηφιδωτού δαπέδου στο σπήλαιο του Πανός στο λόφο της Πνύκας		128
	3.3.1	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)	128
	3.3.2	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Γεωραντάρ (GPR)	131
	3.3.3	Μακροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων	133
	3.3.4	Μελέτη με φορητό Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM)	134
	3.3.5	Μελέτη με Ηλεκρονιακό Μικροσκόπιο-Μικροαναλυτή (SEM-EDX)	135
	3.3.6	Μελέτη του δείγματος με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)	137
	3.3.7	Μελέτη του δείγματος με Θερμική Ανάλυση (TG-DTG)	138
3.4	Συμπεράσματα από τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου στο σπήλαιο του Πανός στην Πνύκα		140
4.	**Ψηφιδωτό δάπεδο στην Κρήνη 'Καλλιρρόη' στο λόφο της Πνύκας**		142
4.1	Περιγραφικά στοιχεία αντικειμένου		142
4.2	Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης		143
	4.2.1	Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης	143
4.3	Μεθοδολογία διερεύνησης του ψηφιδωτού δαπέδου στην Κρήνη 'Καλλιρρόη' στην Πνύκα		143
	4.3.1	Μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου με την τεχνική των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση (SASW - Impact Echo)	144
	4.3.2	Μακροσκοπική παρατήρηση δειγμάτων	148
	4.3.3	Μελέτη των δειγμάτων με φορητό Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM)	149
	4.3.4	Μελέτη των δειγμάτων με Ηλεκρονιακό Μικροσκόπιο Σάρωσης-Μικροαναλυτή (SEM-EDX)	150
	4.3.5	Μελέτη με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)	155

	4.3.6	Μελέτη με θερμική ανάλυση (TG-DTG)	156
4.4	Συμπεράσματα από τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου της Κρήνης Καλλιρρόης στην Πνύκα		159
5	**Ψηφιδωτό δάπεδο στο Νέο Μουσείο Δελφών**		162
5.1	**Περιγραφικά στοιχεία ψηφιδωτού δαπέδου στο Νέο Μουσείο Δελφών**		162
	5.1.1	Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης	163
	5.1.2	Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης	163
5.2	Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου του ψηφιδωτού δαπέδου στο Νέο Μουσείο Δελφών		164
	5.2.1	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)	164
5.3	Συμπεράσματα από τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου στο νέο μουσείο των Δελφών		167
6.	**Ψηφιδωτό δάπεδο της ανασκαφής στην οδό Ακάμαντος 24, στο Θησείο**		168
6.1	Περιγραφικά στοιχεία αντικειμένου		168
6.2	Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης		168
6.3	Μεθοδολογία διερεύνησης της ανασκαφής Ακάμαντος στο Θησείο		169
	6.3.1	Μακροσκοπική παρατήρηση δειγμάτων	169
	6.3.2	Μελέτη των δειγμάτων με φορητό Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM)	171
	6.3.3	Μελέτη με Ηλεκρονιακό Μικροσκόπιο (SEM-EDX).	172
	6.3.4	Μελέτη με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)	176
	6.3.5	Μελέτη με Θερμική Ανάλυση (DTG-TG)	178
6.4	Συμπεράσματα από τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου από την ανασκαφή Ακάμαντος στο Θησείο		181
	Βιβλιογραφία Πειραματικού Μέρους		183
	Γενικά Συμπεράσματα – Προοπτικές		186
	Βιογραφικό Σημείωμα		190

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ανατέθηκε από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, μετά από εισήγηση της Καθηγήτριας κ. Μαρίας Κουή, η οποία ήταν και επιβλέπουσα με συμβουλευτικά μέλη τους κ. Σταμάτη Τσίμα Καθηγητή ΕΜΠ και κ. Ανδρέα Γεωργιάδη Επίκουρο Καθηγητή και εκπονήθηκε, κυρίως, στα Εργαστήρια μη Καταστρεπτικού Έλεγχου (NDT-Lab) του Τομέα ΙΙΙ, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Η διδακτορική διατριβή εντάχθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα: "ΘΑΛΗΣ- ΕΜΠ – Ανάπτυξη Ολοκληρωμένου Περιβάλλοντος Αποτίμησης και Τεκμηρίωσης των Επεμβάσεων Συντήρησης Πολιτισμικών Έργων με μη Καταστρεπτικές Μεθόδους" στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα "Εκπαίδευση και δια Βίου Μάθηση" με επιστημονική υπεύθυνο την Καθηγήτρια ΕΜΠ κ. Μαρία Κουή.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που μου στάθηκαν και που συνέβαλαν σημαντικά στην προσπάθειά μου για την ολοκλήρωση της διατριβής.

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Επιβλέπουσα Καθηγήτρια ΕΜΠ Μαρία Κουή, για την ανάθεση του θέματος, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την πολύτιμη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής αυτής της διατριβής. Με καθοδήγησε σε όλα τα στάδια, από την αρχή μέχρι το τέλος της ερευνητικής μου προσπάθειας, με συνέπεια και κατανόηση, προσφέροντάς μου παράλληλα τις πολύτιμες επιστημονικές γνώσεις και υποδείξεις της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, Καθηγητή ΕΜΠ Σταμάτη Τσίμα και Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ Ανδρέα Γεωργιάδη, για την επιστημονική υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Εκφράζω ιδιαίτερα τις ευχαριστίες μου στον Δρ. Γεώργιο Παπαβασιλείου Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας (ΙΝΝ) του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, για την δυνατότητα που μου έδωσε να εφαρμοστεί στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής η τεχνική SASW, για πρώτη φορά στη διερεύνηση των μνημείων και για τη συμβολή του και την επιστημονική υποστήριξη στη διεξαγωγή των μετρήσεων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην Καθηγήτρια ΕΜΠ Γλυκερία Κακάλη για τις πολύτιμες συμβουλές στις μετρήσεις με την τεχνική XRD.

Επιπλέον θα ήθελα να αποδώσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στους συνεργάτες του εργαστηρίου, Παναγιώτη Θεοδωρακέα Δρ. ΕΜΠ και Ελένη Χειλάκου Δρ. ΕΜΠ, για την υποστήριξη τους και την πολύτιμη βοήθειά που μου πρόσφεραν στη διεξαγωγή των μετρήσεων με τις τεχνικές IRT και GPR. Και οι δυο ήταν πάντα πολύ φιλικοί και υποδειγματικά πρόθυμοι στο να με βοηθήσουν και να μου προσφέρουν πολύτιμες συμβουλές σχετικά με την εφαρμογή και την αξιολόγηση των παραπάνω NDT τεχνικών.

Συνεχίζοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Πέτρο Σχοινά και την Δρ. Βασιλική Δρίτσα, για την πολύτιμη βοήθειά τους στη μελέτη των δειγμάτων με το SEM-EDX και την Δρ. Κατερίνα Μικέδη για τις συμβουλές της στην εκτέλεση των μετρήσεων με την TG-DTG.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπητή συνάδελφο Δρ. Χριστίνα Μαργαρίτη ΠΕ Συντηρήτρια ανασκαφικών ευρημάτων και υφάσματος, για την επαγγελματική μας συνεργασία και τις επιστημονικές μας συζητήσεις στη μη καταστρεπτική διαχείριση των αρχαιολογικών δειγμάτων.
Τελειώνοντας, ευχαριστώ τους γονείς μου Χρήστο και Ευαγγελία και τον αδερφό μου Παναγιώτη για την απέραντη αγάπη, την κατανόηση και τη βοήθεια που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Περίληψη

Οι σύγχρονες αρχές και η φιλοσοφία της συντήρησης και προστασίας των μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς απαιτούν μια ολοκληρωμένη γνώση και τεκμηρίωση των δομικών στοιχείων τους και της φθοράς που παρουσιάζουν. Αφού διαγνωστούν οι φθορές και οι αιτίες που τις προκάλεσαν, κατόπιν, το ενδιαφέρον εστιάζεται στο να διασωθεί η αρχική όψη και ποιότητα του μνημείου, εάν είναι δυνατό με την αρχική τεχνολογία κατασκευής του, ώστε να εξασφαλιστεί η συνέχεια με το παρελθόν. Επομένως, η προστασία και συντήρηση των αρχαίων κονιαμάτων αποτελούν τις έννοιες κλειδί για τη σωστή πρακτική της κατασκευής και της αποκατάστασης των μνημείων. Οι σωστές εργασίες συντήρησης, πρέπει να εξασφαλίζουν τη φυσική-χημική και μηχανική συμβατότητα μεταξύ των κονιαμάτων αποκατάστασης και των αρχαίων κονιαμάτων. Ακόμη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η νέα ολοκλήρωση πρέπει να είναι αναστρέψιμη και εύκολα αναγνωρίσιμη.

Σκοπός, επομένως, της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι να διαγνώσει τα φαινόμενα φθοράς των αρχαίων ψηφιδωτών δαπέδου και να διερευνήσει την τεχνολογία κατασκευής των αρχικών υλικών του υποστρώματός τους. Ο στόχος είναι να αποκτηθεί το αναγκαίο επιστημονικό υπόβαθρο το οποίο θα οδηγήσει στη διαμόρφωση κριτηρίων για την επιλογή των κατάλληλων υλικών και μεθοδολογιών, που να εξασφαλίζουν τη επιτυχή συντήρηση και αποκατάσταση του υποστρώματος των ψηφιδωτών δαπέδου.

Η επίτευξη του στόχου αυτού πραγματοποιείται με τη έρευνα που διεξάγεται στην παρούσα διατριβή. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται, κατ' αρχήν, μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος και καταγράφονται τα δεδομένα που υπάρχουν. Κατόπιν, επιλέγονται να εξεταστούν διαφορετικές περιπτώσεις ψηφιδωτών δαπέδων που βρίσκονται κατά χώραν στη ρωμαϊκή οικία στον Εθνικό Κήπο της Αθήνας, στο "σπήλαιο του Πανός", στην Κρήνη 'Καλλιρρόη' και στην οικία των ανασκαφών "Dörpfeld" στην περιοχή της Πνύκας. Καθώς, επίσης, το ψηφιδωτό δάπεδο σε εξωτερικό χώρο έκθεσης στο Νέο Μουσείο των Δελφών και το αποσπασμένο ψηφιδωτό δάπεδο οικίας από την ανασκαφή της οδού Ακάμαντος 24, στο Θησείο.

Ακολουθεί η ολοκληρωμένη ερευνητική προσέγγιση, που περιλαμβάνει δύο στάδια. Το πρώτο, αφορά στην επιτόπου διερεύνηση των ψηφιδωτών δαπέδων με τις μη καταστρεπτικές μεθόδους της θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT), του Γεωραντάρ (GPR) και των Μικροσεισμικών Επιφανειακών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση (SASW-Impact Echo). Η τεχνική της Θερμογραφίας Υπερύθρου σε συνδυασμό με λεπτομερή μακροσκοπική παρατήρηση του ψηφιδωτού στον Εθνικό κήπο (χώροι α΄ και γ) και στο λόφο της Πνύκας (σπήλαιο του Πανός) συνέβαλε στην ανίχνευση υγρασίας στην επιφάνεια του ψηφιδωτού, η οποία συνοδευόταν από τη δράση βιολογικών παραγόντων φθοράς. Στο ψηφιδωτό δάπεδο της οικίας "ανασκαφών Dörpfeld" στην Πνύκα, ανιχνεύτηκαν επιφανειακές ρωγμές και απώλειες στο ψηφιδωτό, οι οποίες δεν ήταν εμφανείς με μακροσκοπική παρατήρηση.

Ακολούθησε η αξιολόγηση παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης που είχαν πραγματοποιηθεί στα ψηφιδωτά δάπεδα του Εθνικού κήπου (χώροι α΄ και γ΄), της Πνύκας (σπήλαιο του Πανός) και στο Μουσείο Δελφών, ως προς την συμβατότητα των υλικών συντήρησης και την καταλληλότητα της τεχνικής/κατασκευής

επανατοποθέτησης του ψηφιδωτού. Συγκεκριμένα, στον Εθνικό κήπο εντοπίστηκε υγρασία στη διεπιφάνεια των επανατοποθετημένων τμημάτων του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο α΄, που είχε συντηρηθεί με τη μέθοδο των φορητών υποδομών.

Η τεχνική του Γεωραντάρ (GPR), παρείχε πληροφορίες για την τεχνολογία κατασκευής της στρωματογραφίας του ψηφιδωτού δαπέδου (Εθνικός κήπος χώροι γ΄, Σπήλαιο του Πανός, Οικία "ανασκαφών Dörpfeld"). Συνέβαλε στην αποτίμηση της κατάστασης και της δομικής ακεραιότητας των υποκείμενων στρωμάτων, καθώς και στον έλεγχο της κατάστασης του εδάφους (Εθνικός κήπος χώροι α΄ και γ΄, Σπήλαιο του Πανός, Οικία "ανασκαφών Dörpfeld").

Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε μνημεία, η τεχνική των Μικροσεισμικών Επιφανειακών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση (SASW-Impact Echo), με την οποία διερευνήθηκε η υποδομή του ψηφιδωτού δαπέδου στον υπόσκαφο χώρο τη κρήνης στην Πνύκα. Στην περίπτωση αυτή, δεν υπήρχε δυνατότητα μέτρησης με την τεχνική του Γεωραντάρ (GPR) λόγω της έγκλεισης υπογείων υδάτων. Με την τεχνική SASW εντοπίστηκε η στρωματογραφία του ψηφιδωτού δαπέδου, οι αποσαθρωμένες περιοχές και οι δομικές αστοχίες στην υποδομή του ψηφιδωτού.

Στη συνέχεια, όπου αυτό ήταν δυνατό, έγινε δειγματοληψία των αρχαίων κονιαμάτων, τα οποία μελετήθηκαν στο εργαστήριο με τις εξελιγμένες μεθόδους Ψηφιακής Μικροσκοπίας (DM), Ηλεκρονιακής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροαναλυτή (SEM-EDX), Περίθλασης Ακτίνων-Χ (XRD) και Θερμικής-Βαρυμετρικής Ανάλυσης (TG-DTG). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εργαστηριακή μελέτη των κονιαμάτων του υποστρώματος των ψηφιδωτών δαπέδων, με τη συνδυαστική χρήση των μεθόδων ανάλυσης (DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG) οδήγησε σε αξιόλογα συμπεράσματα, όσον αφορά στη μορφολογία, τη μικροδομή και τη σύνθεσή τους.

Συνδυάζοντας τις παρατηρήσεις από την εξέταση των δειγμάτων με τη μέθοδο DM και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν από την επί τόπου εξέταση των δαπέδων με την τεχνική GPR, διαπιστώθηκε η διαστρωματική δομή των ψηφιδωτών opus tessellatum. Αυτή εμφανίζει τρεις στρώσεις κονιάματος και μία στρώση υποδομής, η οποία αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά. Το πάχος των στρώσεων, καθώς και το μέγεθος των αδρανών μειώνεται στις ανώτερες στρώσεις, ενώ ο λόγος συνδετικής κονίας αδρανών αυξάνεται.

Από τη μελέτη της μικροδομής των αρχαίων κονιαμάτων και τη στοιχειακή χημική ανάλυση των επιφανειών με τη μέθοδο SEM-EDX διαπιστώθηκε, σε όλα τα κονιάματα, η παρουσία υδραυλικών ενώσεων, δηλαδή, ένυδρων άσβεστο-αργιλο-πυριτικών ενώσεων, του τύπου CSH, CASH, οι οποίες εδράζονται, κυρίως, πάνω σε κόκκους αργιλοπυριτικού υλικού. Η παρουσία και η θέση αυτών των ενώσεων, αποδίδεται, εμφανώς, σε αντίδραση της υδρασβέστου με ποζολανικό υλικό. Ακόμα, βρέθηκαν βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη ($CA\overline{C}H$) και ετρινγκίτη ($CA\overline{S}H$) που αποτελούν προϊόντα προσβολής των ένυδρων ενώσεων (CAH) από CO_2 και SO_4^{-2} ιόντα, αντίστοιχα. Επίσης, υπολογίστηκαν οι δείκτες υδραυλικότητας (CI) και (HI) με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της χημικής ανάλυσης EDX, όπως αυτοί θεσπίστηκαν από τους (Eckel, 1922, Boynton, 1980). Τα κονιάματα των στρωμάτων της υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου παρουσίασαν μέτρια έως πολύ καλή υδραυλικότητα.

Με τη μέθοδο XRD διαπιστώθηκε ότι τα κύρια συστατικά των κονιαμάτων είναι ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας. Ακόμα, σε μικρά ποσοστά παρατηρήθηκε η παρουσία τομασίτη ($CA\overline{C}H$), ετρινγκίτη ($CA\overline{S}H$) και γύψου $C\overline{S}H$), η οποία αποτελεί σοβαρή ένδειξη ότι έχει λάβει χώρα αντίδραση αργιλοπυριτικών ενώσεων με την υδράσβεστο, δηλαδή, δηλώνουν προϊόντα ποζολανικής δράσης.

Η εξέταση των κονιαμάτων με τη μέθοδο θερμικής ανάλυσης (TG-DTG) εστιάστηκε, κυρίως, στον προσδιορισμό της απώλειας μάζας του δείγματος σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές περιοχές. από τις τιμές της οποίας υπολογίστηκε ο λόγος υδραυλικότητας (Hr) του CO_2 προς το κρυσταλλικό και χημικά ενωμένο H_2O, ο οποίος αντανακλά τον υδραυλικό χαρακτήρα των κονιαμάτων. Από τον υπολογισμό των τιμών του λόγου υδραυλικότητας (Hr) για τα κονιάματα των εξεταζόμενων ψηφιδωτών δαπέδων προέκυψε ότι όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν καλή υδραυλικότητα, η οποία αποδίδεται στην αντίδραση υδρασβέστου και φυσικής ποζολάνης. Επίσης, από τον υπολογισμό του ποσοστού του $CaCO_3$ και τη μετατροπή του στο ισοδύναμο ποσοστό υδρασβέστου από την οποία προήλθε, προσδιορίστηκε η αναλογία υδρασβέστου/πρόσμικτα (ποζολανικά υλικά) στα στρώματα των κονιαμάτων.

Συμπερασματικά, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα που διεξήχθη στην παρούσα διδακτορική διατριβή, αποκομίζεται η ολοκληρωμένη και τεκμηριωμένη γνώση των δομικών στοιχείων του υποστρώματος των ψηφιδωτών δαπέδων, της τεχνολογίας κατασκευής τους και της φθοράς που παρουσιάζουν. Το επιστημονικό υπόβαθρο που επιτεύχθηκε αποτελεί το κλειδί για τη σωστή πρακτική της αποκατάστασης και διατήρησης των μνημείων. Τέλος, οδηγεί στην υπόδειξη για την κατάλληλη επέμβαση συντήρησης με την επιλογή συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης, εξασφαλίζοντας, στην επιστήμη και τεχνική της συντήρησης, την επιτυχή και μακρόχρονη αποκατάσταση των ιστορικών ψηφιδωτών μνημείων.

Summary

The current principles and philosophy for the maintenance and restoration of the cultural heritage monuments require an intergraded and documented knowledge for their constructive constituents, as well as for the damages they present. Since the damages and the reasons caused them are well recognized, then the main concern is to preserve the original aspect and the quality of the monument. This is done, if possible, with the use of the original technology, in order to assure the continuity with the past. Thus, the maintenance and restoration of the old mortars is one of the key aspects for correct construction and rehabilitation practice. In order to ensure correct restoration practice it is necessary to guarantee the physical, chemical and mechanical compatibility between rehabilitation mortars and the old mortars, regarding the original aspect, taking also into account the need for the reintegration to be reversible and easily recognized.

The present PhD thesis, aiming to contribute in this concern, is focused to diagnose the damage phenomena appeared in ancient mosaic pavements, as well as to research on the original materials and technology used for their substrate construction. The target is to obtain the fundamental scientific data leading to development of criteria to be applied for the selection of the appropriate materials and methodology, ensuring the correct restoration and rehabilitation of the mosaic substrates.

The approach of this target is accomplished by the research conducted in the present thesis. Firstly, the relative scientific literature was thoroughly reviewed. Then eight representative mosaic pavements were selected from the following six Greek archaeological sites, used as case studies:

1. Roman residence or public building (mosaic pavements α, β, γ) in the National Garden of Athens.
2. Ancient residence, in the area of "Dörpfeld excavations", on the slopes of Pnyx at the east side of the pedestrian street of Apostolou Pavlou.
3. "Panas cave", on the Pnyx slopes northwest of Acropolis.
4. "Kalliroe Fountain", rock-carved cistern, on Apostolou Pavlou pedestrian street, on the lower slopes of the Pnyx, just beyond the sanctuary of Pan.
5. Mosaic pavement of a triple aisle early Christian basilica exhibited in the museum of Delphi.
6. Mosaic pavement from an ancient residence excavation on Akamantos street at Thissio.

Subsequently, the integrated research is escalated in two steps. At first, the mosaic pavements were examined in situ by means of Non Destructive Techniques (NDTs) namely, Infra red Thermo (IRT), Ground Penetrating Radar (GPR) and Spectral Analysis of Surface Waves (SASW-Impact Echo).

Results obtained by the examination of the National Garden (α, γ) and the "Panas Cave" mosaic pavements by means of the IR-Thermo technique suggest existence of areas on the surface of the mosaics suffering from high moisture, combined with damages of biological activity origin. In addition, microcracks, not macroscopically visible, were detected in the mosaic pavement of the residence at Pnyx in "Dörpfeld excavation" area. Furthermore, past restoration actions been performed on the mosaic pavements of the

National Garden (α, γ), "Panas Cave" and Delphi Museum, were intensely evaluated regarding the compatibility of restoration materials and the applicability of the technique/construction used to reset the mosaic. Specifically, in the case of the National Garden mosaic pavement in room (α), which had been maintained with an indirect method, high moisture was detected in the interface of the reset sections. Conclusively, the IR-Thermo technique contributed to elucidate the current condition of the mosaic pavements and the environmental origin damages which are not macroscopically visible.
Data collected from the 2D profiles of the GPR network scattering reveal the stromatography of the mosaic pavement substrates (cases of the National Garden (γ), the "Panas Cave" and the residence of "Dörpfeld excavation"). These data contributed to evaluate the condition and the structural integrity of the pavement substrates, as well as, to survey the state of the bearing territory (cases of the National Garden (α, γ), "Panas Cave" and the residence of "Dörpfeld excavation").
The SASW-Impact Echo technique, used in this thesis, was applied for the first time on monuments, in order to examine the mosaic pavement substrate of "Kalliroe Fountain". In this case, GPR technique could not be used, due to inclusions of underground water. Data derived by the SASW-Impact Echo technique measurements contributed to detect the mode of the stromatography, as well as degraded areas and structural failures within mosaic pavement substrate. Thus, this NDT method is a potential powerful tool for the maintenance and restoration of the cultural heritage.
In the second step followed, mortar samples were collected from the mosaic substrates, wherever permitted, and investigated in the laboratory combining several analytical methods, such as (Digital Microscopy (DM), Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-rays Analysis (SEM-EDX), X-Ray Diffraction (XRD) and Thermogravimetry (TG-DTG). The results obtained by instrumental analysis led to significant conclusions regarding the morphology, microstructure and the composition of the mosaic substrate mortars.
The observations derived from the examination of the mortar specimens by means of DM method combined to the results obtained from the measurements performed in situ by means of the GPR technique, revealed that the mosaic layer structure is "opus tessellatum" type. This structure consists of three layers of mortars, and one infrastructure layer containing coarse aggregates. The thickness of the layers, as well as the aggregate sizes decreases towards the upper layers while the ratio of bonding slurry to aggregates increases.
The study of the microstructure of the original mortars curried out by SEM-EDX method showed that all the mortars examined contain hydraulic compounds, namely, calcium-aluminum-silicate hydrates of the formulas CSH, CASH, which are deposited, mainly upon aluminosilicate grains. The presence as well as the position of these compounds is strong evidence that they result as products of lime and pozzolanic materials reaction. Needles of tomasite ($CA\overline{C}H$) and ettringite ($CA\overline{S}H$) found, were attributed to chemical attack of the hydrates (CAH) by CO_2 and SO_4^{2-}, respectively. In addition, by processing the results obtained by EDX analysis, the hydraulic indexes (CI) and (HI) were calculated, as they are set down by (Eckel, 1922, Boynton, 1980). These indexes show

that the layers of the mosaic pavement substrates have hydraulic properties escalated from medium to high.

The main constituents determined in the mortars by means of XRD analysis were calcite ($CaCO_3$) and α-quartz (SiO_2). Gypsum ($C\bar{S}H$), tomasite ($CA\bar{C}H$) and ettringite ($CA\bar{S}H$) were, also, found as secondary constituents. The formation of tomasite and ettringite verifies the pozzolanic action.

Analysis of the mortars by the (TG-DTG) method was focused mainly on the calculation of mass reduction percentages of the specimens within two thermal regions of 200-600 °C and 600-1000 °C. The first is attributed to loss of crystal and chemical bonded H_2O from the hydraulic compounds and the second to loss of CO_2 due to $CaCO_3$ decomposition. The calculated percentages were used to determine the hydraulic ratio (Hr = CO_2/crystal and chemical bonded H_2O), which reflects the hydraulic character of the mortar. The values of the hydraulic ratios (Hr) determined showed that all the mosaic pavement mortars examined, present good hydraulic properties, suggesting compositions resulted by lime and pozzolan reactions. Furthermore, from the calculation of the $CaCO_3$ percentage expressed as the equivalent percentage of lime, the ratio lime/pozzolan was estimated for the mortars of each layer of the mosaic pavement substrates.

Conclusively, evaluating results derived from the research carried out in the present PhD thesis, an integrated and documented knowledge is achieved for the structural elements of mortars pavement substrates, revealing their original construction technique and the damages occurred. The scientific background obtained constitutes the key for the correct construction and rehabilitation practice. Finally, development of this background leads to the choice of the appropriate technique to maintain conservation practice and to select compatible restoration mortars, ensuring, a successful and sustainable restoration of the mosaic monuments.

Εισαγωγή

Οι σύγχρονες αρχές και η φιλοσοφία της συντήρησης και προστασίας, απαιτούν ολοκληρωμένη γνώση και τεκμηρίωση των ιδιοτήτων των δομικών υλικών και της φθοράς που παρουσιάζουν. Τα δεδομένα αυτά είναι αναγκαία στοιχεία, για τον προγραμματισμό και την υλοποίηση όλων των επεμβάσεων προστασίας σε ιστορικά μνημεία, όπως είναι τα ψηφιδωτά δαπέδου. Επίσης, η αποτίμηση διαφορετικών επεμβάσεων συντήρησης που έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα, είναι θεμελιώδους σημασίας, καθώς, μέσω αυτής της διεργασίας, είναι εφικτή η επιλογή των κατάλληλων μεθόδων που θα διατηρήσουν το μνημείο στο χρόνο. Επιπροσθέτως, με αυτό τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα, να οριοθετηθούν πλήρως, οι παράμετροι που διέπουν την επιτυχημένη εφαρμογή μιας μεθόδου συντήρησης στα ψηφιδωτά δαπέδου.

Επομένως, η εύρεση κατάλληλων μεθόδων εξέτασης των ψηφιδωτών δαπέδου και ανάλυσης των υλικών κατασκευής τους είναι μείζονος σημασίας για την αναγνώριση του μνημείου και τη διερεύνηση των φθορών που έχει υποστεί. Επειδή, όμως τα αρχαία ψηφιδωτά δαπέδου, αποτελούν έργα μεγάλης πολιτιστικής αξίας και η δειγματοληψία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι περιορισμένη ή/και απαγορευτική, οι τεχνικές και η μεθοδολογία που θα επιλεγεί θα πρέπει να μην είναι επεμβατικές και να μην αλλοιώνουν την αρχική του εικόνα, δηλαδή να μην είναι καταστρεπτικές. Τα τελευταία χρόνια το επιστημονικό ενδιαφέρον για τη συντήρηση των μνημείων έχει στραφεί στην εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων (Non Destructive Techniques, NDTs) για την εξέτασή τους. Όμως, επειδή εφαρμογή των μεθόδων αυτών στα έργα πολιτισμού, είναι σχετικά πρόσφατη και βρίσκεται υπό συνεχή έρευνα, δεν έχουν αναπτυχθεί, ακόμη, τα κριτήρια εφαρμογής τους με αποτέλεσμα ο τομέας της συντήρησης να μην τις αξιοποιεί πλήρως.

Η προσέγγιση αυτή επιχειρείται για πρώτη φορά, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Στόχος είναι η διερεύνηση της φθοράς των αρχαίων ψηφιδωτών δαπέδων και η ανάκτηση πληροφοριών, όσον αφορά στην τεχνολογία κατασκευής των υλικών του υποστρώματός τους, θέτοντας τα αναγκαία κριτήρια για την επιλογή των κατάλληλων υλικών και μεθόδων για την αποκατάσταση τους.

Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος που παρατίθεται στο θεωρητικό μέρος της διατριβής. Έτσι, στο πρώτο Κεφάλαιο αναφέρεται η ιστορική εξέλιξη της θεματολογίας των ψηφιδωτών δαπέδου και η τεχνολογία κατασκευής τους. Κατόπιν, στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι μορφές φθοράς, που παρουσιάζουν, κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και οι μέθοδοι συντήρησης τους. Στη συνέχεια, στα Κεφάλαια 3 και 4 γίνεται μια ανασκόπηση των μη καταστρεπτικών μεθόδων και των εργαστηριακών μεθόδων ανάλυσης, αντίστοιχα, που εφαρμόζονται στην παρούσα διατριβή και δίνονται τα απαραίτητα θεωρητικά στοιχεία λειτουργίας τους.

Ακολουθεί το δεύτερο μέρος της διατριβής, που αναφέρεται στην πειραματική έρευνα που διεξήχθη. Εξετάστηκαν διαφορετικές αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις ψηφιδωτών δαπέδων με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Την τεχνική κατασκευής τους να είναι αυτή της κυβικής ψηφίδας ‘opus tessellatum’.

- Να αποτελούν αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις, όσον αφορά στις επεμβάσεις και τα υλικά που εφαρμόζονται στη συντήρηση των ψηφιδωτών δαπέδων.
- Να παρέχεται δυνατότητα άδειας μελέτης και δειγματοληψίας από τον αρμόδιο φορέα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, επελέγη να εξεταστούν οι ακόλουθες έξη διαφορετικές περιπτώσεις ψηφιδωτών δαπέδων, που περιγράφονται αναλυτικά στα αντίστοιχα Κεφάλαια του πειραματικού μέρους:

1. *Τα ψηφιδωτά δάπεδα σε Ρωμαϊκή οικία ή δημόσιο κτίριο (χώροι α, β, γ), στον Εθνικό Κήπο της Αθήνας.*
   Το δάπεδο στο χώρο *α΄* έχει συντηρηθεί και επανατοποθετηθεί σε νέο υπόστρωμα. Στο χώρο *β΄* το ψηφιδωτό έχει αποσπαστεί στο μεγαλύτερο μέρος του, με ένα μικρό τμήμα να έχει παραμείνει στο αρχαίο υπόστρωμα, από όπου ήταν δυνατή η λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων κονιάματος από όλα τα στρώματα της υποδομής του. Στο χώρο *γ΄* το ψηφιδωτό έχει συντηρηθεί στο αρχικό του υπόστρωμα.
2. *Το ψηφιδωτό δάπεδο οικίας στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld" στα ανατολικά της οδού Αποστόλου Παύλου στο λόφο της Πνύκας.*
   Το δάπεδο έχει συντηρηθεί στο αρχικό του αρχαίο υπόστρωμα.
3. *Το ψηφιδωτό δάπεδο στο σπήλαιο του Πανός στην βορειοδυτική πλευρά του βράχου της Ακροπόλεως στο λόφο της Πνύκας.*
   Το δάπεδο έχει συντηρηθεί στο αρχικό του υπόστρωμα με ένα μικρό τμήμα του να έχει αποκολληθεί και επανατοποθετηθεί σε νέο κονίαμα.
4. *Το ψηφιδωτό δάπεδο σε υπόσκαφο χώρο Κρήνης 'Καλλιρρόη' επί της οδού Αποστόλου Παύλου στην Πνύκα.* Έχουν πραγματοποιηθεί σωστικές εργασίες συντήρησης στην επιφάνεια του ψηφιδωτού.
5. *Το ψηφιδωτό δάπεδο σε εξωτερικό χώρο έκθεσης στο Νέο Μουσείο των Δελφών.* Προέρχεται από τρίκλιτη παλαιοχριστιανική εκκλησία και έχει αποσπαστεί και επανατοποθετηθεί σε νέα υποδομή δυο φορές κατά το παρελθόν.
6. *Το ψηφιδωτό δάπεδο οικίας από την ανασκαφή της οδού Ακάμαντος 24, στο Θησείο.* Το ψηφιδωτό δάπεδο έχει αποσπαστεί τμηματικά και φυλάσσεται σε ειδικά διαμορφωμένο αποθηκευτικό χώρο στην ΕΦΑ Αθηνών.

Κατ΄ αρχήν, γίνεται μια ανασκόπηση στο αρχειακό υλικό, όσον αφορά στη συντήρηση των ψηφιδωτών δαπέδων, και διερευνάται, μακροσκοπικά, η παρούσα κατάσταση διατήρησης τους. Οι παρατηρήσεις που καταγράφηκαν για κάθε ψηφιδωτό δάπεδο περιγράφονται αναλυτικά στα αντίστοιχα Κεφάλαια 1-6 του πειραματικού μέρους.
Στη συνέχεια, με τη χρήση μη καταστρεπτικών μεθόδων ανάλυσης εντοπίζονται με ακρίβεια οι προβληματικές περιοχές και η έκταση της φθοράς στο υπόστρωμα κάθε ψηφιδωτού δαπέδου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές της Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT) και Γεωραντάρ (GPR) για τη εξέταση ψηφιδωτών δαπέδων των χώρων α΄ και γ΄ στον Εθνικό Κήπο της Αθήνας, στην σπηλιά του Πανός στην περιοχή της Πνύκας, στην οικία των ανασκαφών "Dörpfeld" και στο Νέο Μουσείο των Δελφών. Η διερεύνηση του ψηφιδωτού δαπέδου στην Κρήνη "Καλλιρρόη" της Πνύκας,

πραγματοποιήθηκε, επί τόπου, με τη χρήση της NDT τεχνικής Μικροσεισμικών Κυμάτων (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW) και της ηχούς από κρούση (Impact Echo). Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται πιλοτικά, για πρώτη φορά σε μνημεία, στην παρούσα εργασία.

Ακόμα, έγινε δειγματοληψία, όπου αυτό ήταν εφικτό, για να διερευνηθεί και να αναγνωριστεί η τεχνολογία κατασκευής των αρχικών κονιαμάτων. Τα δείγματα κονιαμάτων μελετήθηκαν με τις ακόλουθες τεχνικές: Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM), Ηλεκτρονιακό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Μικροανάλυση (Scanning Electron Microscopy –Energy Despersive X-ray Analysis, SEM-EDX), Περίθλαση Ακτίνων Χ (X-Ray Diffraction, XRD) και Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (Thermogravimetry, Differential Thermogravimetry, TG-DTG).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή όλων των παραπάνω τεχνικών, συγκροτούν την εξαγωγή αξιόλογων συμπερασμάτων όσον αφορά στην τεχνολογία κατασκευής του υποστρώματος των ψηφιδωτών δαπέδων. Ακόμη, θέτουν τα βασικά κριτήρια για την αποτίμηση της φθοράς και των επεμβάσεων συντήρησης τους.

Κεφάλαιο 1

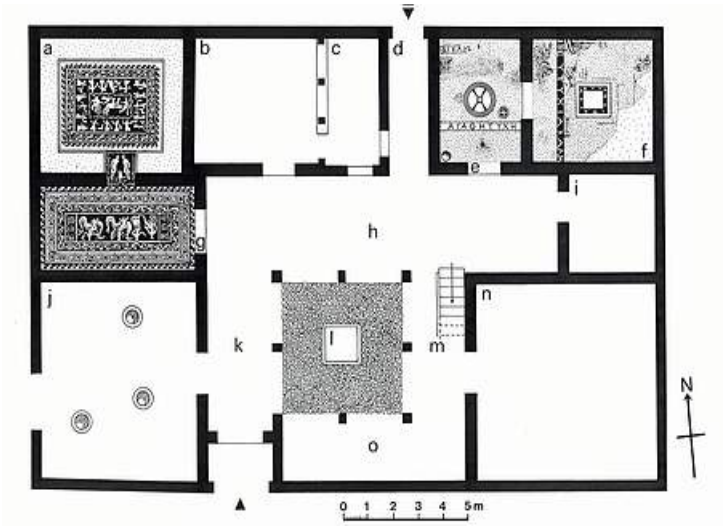
Ιστορική επισκόπηση των ψηφιδωτών δαπέδων - Τεχνολογία κατασκευής

1.1 Ιστορική εξέλιξη της τέχνης του ψηφιδωτού

Με τον όρο ψηφιδωτό εννοείται ένα διακοσμητικό στρώμα αποτελούμενο από ψηφίδες, το οποίο διακοσμεί, συνήθως, μια αρχιτεκτονική επιφάνεια, δάπεδο, τοίχο, ή οροφή. Οι ψηφίδες μπορεί να συνίστανται από φυσικά ή τεχνητά υλικά και είναι στερεωμένες πάνω στην επιφάνεια που διακοσμούν με συνδετικό κονίαμα. Το ψηφιδωτό δάπεδο στα αρχαία κείμενα αναφέρεται ως «λιθόστρωτο», που σημαίνει δάπεδο με πετρώδες υλικό. Στα λατινικά (mosaic) λέγεται επίσης και «μωσαϊκό», ή «ψηφίδωμα» ή «ψηφοθέτημα». Ο όρος μωσαϊκό, συναντάται για πρώτη φορά στη Ρωμαϊκή λογοτεχνία και πιο συγκεκριμένα στο «Scriptores Historiae Augustae» από τον ιστορικό Sparzianus [1].

1.1.1 Βοτσαλωτά δάπεδα

Στα Μάλια της Κρήτης και στην Τίρυνθα έχουν ανασκαφεί τα πρωιμότερα βοτσαλωτά δάπεδα και χρονολογούνται στην Μυκηναϊκή εποχή. Είναι κατασκευασμένα από μικρά βότσαλα, τα οποία απεικονίζουν με υποτυπώδη τρόπο απλά γεωμετρικά σχέδια και έχουν μια σαφή διακοσμητική πρόθεση [2].
Στα τέλη του 5ου και στις αρχές του 4ου αιώνα π.Χ. η τέχνη του βοτσαλωτού ψηφιδωτού εμφανίζεται ολοκληρωμένη σε μεγάλο αριθμό πόλεων και μνημείων στον Ελλαδικό χώρο. Το ψηφιδωτό του κλασικού κόσμου κοσμούσε συνήθως οικίες, δημόσια κτήρια και σε πολύ λίγες περιπτώσεις τάφους. Στην οικία, τα βοτσαλωτά δάπεδα υπάρχουν, κυρίως, στον ανδρώνα, στο κατώφλι της εισόδου του και στους προθάλαμούς του, ενώ λιγότερο συχνά κοσμούν άλλους χώρους, όπως τις αυλές (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Ένα από τα πιο σημαντικά σύνολα βοτσαλωτών δαπέδων που αποκαλύφθηκε στην Όλυνθο, η "Έπαυλη της Αγαθής Τύχης", που χρονολογούνται στο Α΄ ήμισυ του 4ου αιώνα π.Χ. Κάτοψη με τα ψηφιδωτά δάπεδα.

Ο ρόλος των δαπέδων εκτός από διακοσμητικός, ήταν και πρακτικός, καθώς τέτοιου είδους επένδυση στεγανοποιεί το δάπεδο [3]. Τα πλέον πρώιμα βοτσαλωτά δάπεδα, με εικονιστικές παραστάσεις, προέρχονται από την Κόρινθο, τη Σικυώνα, τα Μέγαρα και την Όλυνθο και χρονολογούνται στα τέλη του 5ου και στις αρχές του 4ου αιώνα π.Χ. [4, 5, 6]. Το 348 π.Χ., πιθανώς, τα εργαστήρια των ψηφιδωτών μεταφέρονται σε δύο πρωτεύουσες του Μακεδονικού κράτους, τις Αίγες και αργότερα στην Πέλλα, όπου εμφανίζονται δάπεδα εξαιρετικής τεχνικής [7]. Στην τέχνη των δαπέδων αυτών, για πρώτη φορά, χρησιμοποιούνται νέα υλικά, όπως ημιπολύτιμοι λίθοι, ή ψηφίδες από υαλόμαζα, δίνοντας έμφαση στις λεπτομέρειες. Μολύβδινα ελάσματα και ταινίες από ψημένο πηλό βοηθούν στην υπογράμμιση των περιγραμμάτων [8].
Οι τεχνικές καινοτομίες των ψηφιδωτών δαπέδων μέχρι το τέλος του 4ου αιώνα π.Χ., παρέχουν μια σαφή ένδειξη ότι οι καλλιτέχνες είχαν κατακτήσει ένα υψηλό επίπεδο εμπειρίας και ήταν ικανοί να παράγουν με κομμάτια από πέτρα το είδος των αναπαραστάσεων που οι καλλιτέχνες τοιχογραφίας παρήγαγαν με χρώμα. Οι προσπάθειές τους να το επιτύχουν, ωστόσο, εμποδίζονταν από το γεγονός ότι τα φυσικά βότσαλα, λόγω του σχήματός τους, δεν μπορούσαν να ενωθούν μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν μια λεία επιφάνεια [2]. Αυτό το γεγονός, πιθανώς, αποτέλεσε και το βασική αιτία της απαρχής του τέλους στην παράδοση του βοτσαλωτού ψηφιδωτού κατά τον 3ο αι. π.Χ.. Παρόλα αυτά, βοτσαλωτά ψηφιδωτά συναντάμε στον ελλαδικό χώρο μέχρι την ύστερη ελλαδική περίοδο. Τα βοτσαλωτά αυτά, όμως, έχουν πλέον μια εμφανή στιλιστική αλλαγή στην σκίαση, τη σύνθετη πολυχρωμία και την προοπτική στην εικόνα που τείνουν να αντικατασταθούν από δίχρωμα σχέδια [2].

1.1.2 Ψηφιδωτά δάπεδα κυβικών ψηφίδων (Opus Tessellatum)

Τον 3ο αιώνα π.Χ. αρχίζουν να χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ψηφιδωτών οι κυβικές ψηφίδες (opus tessellatum). Αρχικά, μια πολυάριθμη ομάδα ψηφιδωτών, ετερογενών σε τεχνοτροπία και τεχνική, μαρτυρά την κατασκευή ψηφιδωτών, είτε με ταυτόχρονη χρήση βότσαλων και ψηφίδων (μεικτή τεχνική) είτε με τη χρήση πολυγωνικών ψηφίδων.
Την ίδια εποχή το ψηφιδωτό καταλαμβάνει τη θέση του ανάμεσα στις άλλες τέχνες και οι καλλιτέχνες αρχίζουν να υπογράφουν τα έργα τους. Σημαντικά κέντρα ψηφοθέτησης του ελληνικού κόσμου είναι η Όλυνθος, η Κρήτη, η Δήλος και η Πέργαμος. Η νέα τεχνική (opus tesselatum) αποδεσμεύει τους ψηφοθέτες από τους περιορισμούς που τους επιβάλλει το φυσικό υλικό, ως προς το σχήμα και το χρώμα, με σκοπό να φέρουν το ψηφιδωτό πλησιέστερα προς τις λεπτές διακυμάνσεις της ζωγραφικής. Όσες αλλαγές συντελέστηκαν μετέπειτα στην τέχνη του ψηφιδωτού σχετίζονται με τις διάφορες αντιλήψεις που εμφανίζονται σε συγκεκριμένα χρονικά, γεωγραφικά και ιδεολογικά πλαίσια [2, 9].
Τα αρχαιότερα γνωστά opus tessellatum ψηφιδωτά προέρχονται από οικίες στην Μοργκαντίνα, τη Δήλο και τη Σάμο. Αυτά τα δάπεδα χρονολογούνται από τα μέσα του 2ου, ή τις αρχές του 1ου αιώνα π.Χ. και είναι κατασκευασμένα με παρόμοιο τρόπο. Στο μεγαλύτερο μέρος τους είναι κατασκευασμένα από opus tesselatum, χρησιμοποιώντας

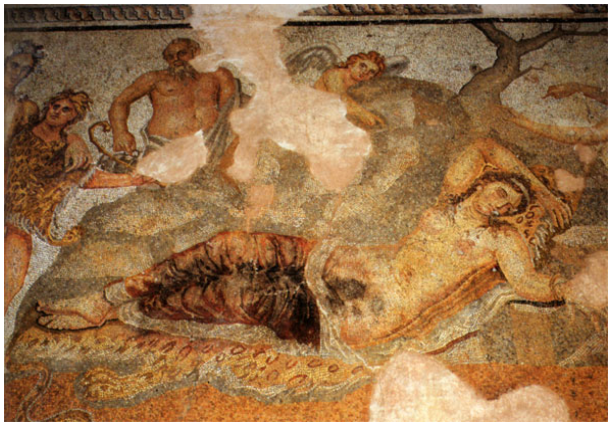
διάφορα μεγέθη ψηφίδων, ενώ ένα μικρότερο μέρος τους είναι κατασκευασμένο με την τεχνική opus vermiculatum*[6,10]. Ιδιαίτερα αρεστή, κατά τους ελληνιστικούς χρόνους, είναι η τεχνική του εμβλήματος, όπου το κύριο ζητούμενο είναι η ανάδειξη ενός ορισμένου κεντρικού σημείου της διακόσμησης. Στο σημείο ακριβώς αυτό υπήρχε ένας εμβαλλόμενος πίνακας (έμβλημα) ο οποίος διακρίνεται, λόγω της τεχνικής του εκτέλεσης, από το λιτό διάκοσμο (opus tessellatum) που συνήθως το περιέβαλλε (Εικόνα 1.2) [2]. Τα εμβλήματα ήταν φορητά και κατασκευάζονταν στο εργαστήριο, πάνω σε κάποιο λείο φέροντα οργανισμό και στη συνέχεια τοποθετούνταν στο δάπεδο [11].

Εικόνα 1.2: Νησιά Αιγαίου, Ρόδος, οικία (2ος αι. π.Χ.), Αρχαιολογικό Μουσείο. Έμβλημα σε opus vermiculatum με παράσταση προσωπείου Νέας Κωμωδίας.

Τον 2ο και το πρώτο μισό του 1ου αιώνα π.Χ., η ανώτερη τάξη της Ρώμης συνέβαλε κατά πολύ στην εξέλιξη της τεχνικής του ψηφιδωτού και της διάδοσης του, από τη Βρετανία έως την Ασία και τη Β. Αφρική. Οι ψηφιδωτές παραστάσεις στον ελλαδικό χώρο προέρχονται κυρίως από οικίες και λιγότερο από δημόσια κτήρια (λουτρά, παλαίστρες, γυμνάσια, λατρευτικά κτήρια κτλ.) [2].

Από τον 1ο αιώνα μ.Χ., άρχισαν να εφαρμόζουν την τεχνική της πολυχρωμίας σε δημόσια κτίρια, ενώ στα ιδιωτικά επικρατεί η ασπρόμαυρη τεχνική [12]. Αυτό δεν ισχύει απαραίτητα στα ελλαδικά ρωμαϊκά δάπεδα (Σπάρτη, Άργος, Πάτρα, Θεσσαλονίκη κ.α.) [2]. Τα γεωμετρικά σχέδια αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα διακόσμησης των ψηφιδωτών σε όλη την Ρωμαϊκή αυτοκρατορία. Όσον αφορά στις εικονιστικές παραστάσεις, μέχρι τουλάχιστον τις αρχές του 3ου αι. μ.Χ., πολλές προέρχονται από μυθολογικές σκηνές που συναντώνται σε ψηφιδωτά των ελληνιστικών χρόνων. Παράλληλα, στις αρχές του 2ου αι. μ.Χ., έκαναν την εμφάνισή τους στα ελλαδικά δάπεδα οι παραστάσεις καθημερινής ζωής, ενώ έως τα τέλη του 3ου αι. και τις αρχές του 4ου αι. μ.Χ. σταδιακά αυξάνεται η ποικιλία των θεμάτων. Ως προς την τεχνική εκτέλεσης, οι καλλιτέχνες προσπαθούν να αντιγράψουν ζωγραφικά έργα από παλαιότερες περιόδους, δίνοντας προσοχή στην τρισδιάστατη απόδοση των εικόνων και στην πλαστικότητα της κίνησης (Εικόνα 1.3) [13].

* Η τεχνική opus vermiculatum, στην οποία τοποθετούνταν μικροσκοπικές ψηφίδες σε κυρτές σειρές για να δημιουργήσουν λεπτά περιγράμματα και επιφάνειες



Εικόνα 1.3: Μεγάλη ψηφιδωτή σύνθεση με την Αριάδνη στη α' ήμισυ του 3ου αι. μ.Χ., Αρχαιολογικό Μουσείο Θεσσαλονίκης.

Στο μεταίχμιο του 3ου προς τον 4ο αιώνα μ.Χ., η τεχνική του ασπρόμαυρου ψηφιδωτού εξαφανίζεται και οι μορφές αποδίδονται αποκλειστικά με δισδιάστατο τρόπο, χάνοντας την πλαστικότητα τους. Εκείνη την εποχή (313 μ.Χ.), γεννήθηκαν οι ανάγκες για τη δημιουργία μιας νέας τέχνης, που αρχικά είχε ως στόχο να καταστήσει κατανοητά τα δόγματα του χριστιανισμού [14]. Η απόδοση των μορφών απλοποιείται, οι γυμνές μορφές περιορίζονται και οι χιτώνες αντικαθιστώνται από ενδυμασίες της εποχής. Στον ελλαδικό χώρο η απόδοση των εικονιστικών παραστάσεων παραμένει συνδεδεμένη με την παλαιότερη παράδοση, μέχρι την ύστερη ρωμαϊκή εποχή [15]. Τυπικές μορφές της ύστερης ρωμαϊκής περιόδου έχουν βρεθεί σε ψηφιδωτά που υπάρχουν στην Κόρινθο και στη Σπάρτη, τα οποία χρονολογούνται στα τέλη του 4ου αι. μ.Χ.. Τον 5ο και τον 6ο αιώνα μ.Χ., στον ελλαδικό χώρο και γενικότερα στις περιοχές του Ανατολικού Ιλλυρικού, μεγάλος αριθμός παλαιοχριστιανικών εκκλησιών και κοσμικών κτιρίων κοσμείται με ψηφιδωτά δάπεδα. Υιοθετώντας την τεχνική και συχνά την θεματολογία της ύστερης ρωμαϊκής τέχνης, διατηρούνται αρκετά μυθολογικά θέματα, ή διακοσμητικά στοιχεία από τον κόσμο της στεριάς και της θάλασσας, που αποκτούν, όμως, τώρα νέο χριστιανικό συμβολισμό [15]. Οι βυζαντινοί απέφευγαν, πλέον, να απεικονίζουν θέματα της βίβλου στα ψηφιδωτά δαπέδου, επειδή, κατά τη χρήση τους επρόκειτο να πατηθούν, έτσι εκφράζονταν, κυρίως, με αλληγορίες [16].

Η κατασκευή των ψηφιδωτών γίνεται από τοπικά εργαστήρια, που γνωρίζουν ιδιαίτερη διάδοση στο πρώτο μισό του 6ου μ.Χ. αιώνα. Τα εργαστήρια αυτά εντοπίζονται στις επαρχίες του Ανατολικού Ιλλυρικού από το τελευταίο τέταρτο του 4ου μέχρι τον 6ο μ.Χ. αιώνα και τα ψηφιδωτά που παράγουν έχουν συγκεκριμένα εικονογραφικά χαρακτηριστικά. Τέτοιου είδους εργαστήρια εντοπίζονται στον ελλαδικό χώρο στην Άμφισσα (τέλη 4ου - αρχές 5ου αι.), στην Αθήνα (α΄ ήμισυ 5ου αι.), στο Άργος (τέλη 5ου - α΄ ήμισυ 6ου αι.), στην Επίδαυρο (α΄ ήμισυ 5ου αι.), στο Άργος (τέλη 5ου και 6ο αι.), στην Κρήτη (Κνωσό) και την Ήλιδα (β΄ ήμισυ 5ου και 6ο αι.), στην Υπάτη, τη Θήβα και τους Δελφούς (α΄ ήμισυ 6ου αι.), στην Κρήτη και την Ερμιόνη (β΄ ήμισυ 6ου αι.). Από τα μέσα του 5ου αι., πληθαίνουν οι συμβολικές απεικονίσεις, και προστίθενται νέα εικονογραφικά στοιχεία από το ζωικό και φυτικό διάκοσμο στις παραστάσεις (Εικόνα 1.4) [15].

Εικόνα 1.4: Μακεδονία, Δράμα, πηγές Βοϊράνης (β΄ ήμισυ του 5ου αι. μ.Χ.). Αρχαιολογικό Μουσείο Φιλίππων, ψηφιδωτό με πλούσιο διάκοσμο.

Επίσης, από τον 6ο και τις αρχές του 7ου αι., πολλά ψηφιδωτά δάπεδα φέρουν, κυρίως, επιγραφές, οι οποίες στο μεγαλύτερο μέρος τους είναι αφιερωματικές και αποτελούν ιστορικά τεκμήρια. Στα τέλη του 6ου αι. μ.Χ. και αρχές του 7ου αι., η κατασκευή ψηφιδωτών δαπέδων σταμάτησε σχεδόν ολοκληρωτικά στον ελλαδικό χώρο. Ως αιτίες μπορούν να θεωρηθούν οι καταστροφικές βαρβαρικές επιδρομές, καθώς και η παρακμή της βυζαντινής αυτοκρατορίας [17].

1.1.3 Δάπεδα από μαρμάρινα ή λίθινα πλακίδια με ασύμμετρο σχήμα

Τα δάπεδα με ψηφίδες κομμένες ασύμμετρα είναι γνωστά σε πολλές περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου από τον 3^{ο} αι. π.Χ., ενώ στην Κάτω Ιταλία και τη Σικελία είναι γνωστά από πολύ πιο νωρίς (4^{ο} – 3^{ο} αι. π.Χ.). Αυτά εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται και κατά την όψιμη ελληνιστική περίοδο. Καθ΄ όλη τη διάρκεια της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, η κατασκευή ψηφιδωτών με ασύμμετρες ψηφίδες αναπτύσσεται σε όλο τον ελλαδικό χώρο. Τα πιο πρώιμα παραδείγματα προέρχονται από τη νότια Πελοπόννησο (Σπάρτη, Γύθειο, Πλύτρα), χρονολογούνται ανάμεσα στα τέλη του 1ου και τις αρχές του 2ου αι. μ.Χ. και είναι προϊόντα τοπικών εργαστηρίων. Οι ψηφίδες τους είναι αρκετά μικρές (3-5 cm), τα χρώματα λίγα και ο σχεδιασμός τους λιτός. Όμως, το χρησιμοποιούμενο από τους ψηφοθέτες θεματολόγιο είναι πλούσιο, με παραστάσεις, κυρίως, γεωμετρικές, αλλά και εικονιστικές [17].

1.2 Υλικά και τεχνικές κατασκευής ψηφιδωτών δαπέδων

1.2.1 Υπόστρωμα ψηφιδωτών δαπέδων

Γραπτές μαρτυρίες του Πλίνιου του Πρεσβύτερου και του Βιτρούβιου παρέχουν λεπτομερείς περιγραφές, όσον αφορά στην κατασκευή των ψηφιδωτών δαπέδων. Ο Βιτρούβιος αναφέρει, ότι η κατασκευή τους γινόταν με τον ακόλουθο τρόπο. Ξεκινούσε με την εκσκαφή του εδάφους σε βάθος από 0,50 ως 1 m, ακολουθούσε βρέξιμο, χτύπημα, και αλφάδιασμα της επιφάνειας. Στη συνέχεια γινόταν επίστρωση από χοντρές πέτρες, ή βότσαλα, γνωστή ως πρώτη στρώση (statumen) και ακολουθούσε η

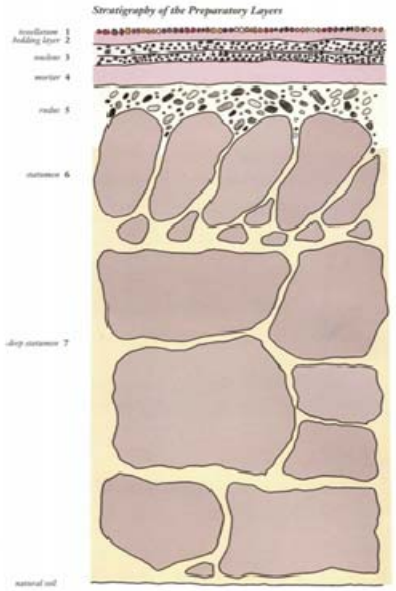
τοποθέτηση μιας σειράς στρώσεων από κονιάματα. Έτσι, το δεύτερο στρώμα (rubus) που κυμαίνεται από 7 έως 8 cm, συνίστατο από σπασμένο χοντρό κεραμίδι και μείγμα ασβέστη-φυσικής ποζολάνης, το τρίτο στρώμα (nucleus) πάχους 2-5 cm αποτελείτο από ασβέστη-μαρμαρόσκονη-φυσική ή τεχνητή ποζολάνη, και το τέταρτο στρώμα (supra nucleus) πάχους 5-12 cm γινόταν από κονίαμα που περιείχε ¼ ασβέστη - ¾ ψιλό κεραμίδι. Τέλος, γινόταν η επίστρωση του πέμπτου στρώματος, πάχους 2-3 cm, που συνίστατο από κονίαμα με λεπτή άμμο-ασβέστη-μαρμαρόσκονη και στο οποίο τοποθετούνταν οι ψηφίδες (Εικόνα 1.5). Επιπροσθέτως, ο Βιτρούβιος αναφέρει ότι σε κάποιες περιπτώσεις το τρίτο στρώμα τοποθετούταν δύο φορές, για την καλύτερη προστασία του δαπέδου από την υγρασία [18, 19].

Εικόνα 1.5: Συνήθης στρωματογραφία ψηφιδωτού: 1. statumen 2. rubus 3. nucleus 4. supra nucleus.

Η παραπάνω στρωματογραφία των ψηφιδωτών δαπέδων διαφοροποιείται, ανάλογα με την εποχή κατασκευής τους, τις σχολές, τα εργαστήρια, τους ψηφοθέτες και τις περιοχές από όπου προέρχονται. Στον ελλαδικό χώρο, μια τυπική κλασσική διαστρωμάτωση παρουσιάζουν τα ψηφιδωτά δάπεδα της Ολύνθου, όπου το έδαφος έχει σκαφτεί σε βάθος 1m και το πατημένο χώμα έχει πάχος 8 cm. Το πρώτο στρώμα, πάχους 15 cm, αποτελείται από πέτρες και έχει ύψος 5 cm, το επόμενο στρώμα από κονίαμα που συνίσταται από ασβέστη, θηραϊκή γη, χονδρόκοκκα αδρανή και συχνά στάχτη. Σε κάποιες περιπτώσεις, το δεύτερο στρώμα αποτελείται από καμπυλόσχημα κεραμίδια. Σε οικία της Μαρωνείας (νομός Ροδόπης) που ανήκει στην υστεροκλασσική περίοδο, το ψηφιδωτό δάπεδο του ανδρώνα αποτελείται από τρία στρώματα τοποθετημένα πάνω σε καλά πατημένο χώμα. Το πρώτο στρώμα έχει πάχος 5 cm και αποτελείται από συμπυκνωμένο κοκκινόχωμα, το δεύτερο, πάχους 3-5 cm έχει λίθους και το τελευταίο στρώμα πάχους 3,5 cm αποτελείται από ισχυρό υδραυλικό κονίαμα, πάνω στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι ψηφίδες. Οι αρμοί της ψηφοθετημένης επιφάνειας έχουν καλυφθεί με ερυθρό κονίαμα [20].

Τα ελληνιστικά ψηφιδωτά ακολουθούν την τεχνική κατασκευής των κλασσικών χρόνων. Υπάρχουν, όμως, πολλές περιπτώσεις όπου το υπόστρωμα ενισχύεται με περισσότερα στρώματα. Για παράδειγμα, τα ψηφιδωτά της Πέλλας αποτελούνται από έξι στρώματα. Το πρώτο στρώμα αποτελείται από άμμο σε βάθος που κυμαίνεται από 1-2 m, το

δεύτερο στρώμα συνίσταται από ασβέστη - άμμο - θηραϊκή γη και μικρά ποταμίσια βότσαλα, ή θαλασσινά χαλίκια, ή θρυμματισμένες πέτρες, το τρίτο στρώμα αποτελείται από καμπυλόσχημα κεραμίδια, το τέταρτο στρώμα από κάρβουνο, το πέμπτο στρώμα από κονίαμα πάχους 15 cm περίπου, που συντίθεται από ασβέστη – ποταμίσια άμμο - στάχτη, και το έκτο στρώμα από ασβέστη - ποταμίσια άμμο - θηραϊκή γη [21].



Εικόνα 1.6: Στρωματογραφία ψηφιδωτού, οικία του Ορφέα, 2°-3° αιώνα μ.Χ , Κύπρος.

Μια τυπική παράσταση της στρωματογραφίας που ακολουθείται στο 2ο - 3ο μ.Χ. αιώνα παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.6. Από τον 2ο αιώνα π.Χ. μέσα στο κονίαμα προστίθενται τρίμματα από κεραμίδια, ή τούβλα στα πρώτα στρώματα και σε σκόνη (παιπάλη) στο στρώμα ψηφοθέτησης. Έτσι, το κονίαμα αποκτά μεγαλύτερη σκληρότητα. Τα υποστρώματα, συνήθως, είναι τρία. Το πρώτο αποτελείται από φυσικές πέτρες, ή επιμήκη κομμάτια από σπασμένες πέτρες, ή σπασμένα κεραμικά, ή κεραμικά όστρακα, ή βότσαλα, ή λαβές από αμφορείς. Το δεύτερο στρώμα συνίσταται από άμμο, ασβέστη, θηραϊκή γη, τρίμματα από κεραμίδι και το τρίτο από άμμο, σκόνη κεραμιδιού, ασβέστη, ενώ εγκιβωτίζονται κάθετα στο κονίαμα φύλλα μολύβδου. Τη ρωμαϊκή περίοδο, τα περισσότερα ψηφιδωτά αποτελούνται από τέσσερα στρώματα, το πρώτο στρώμα (statumen) πάχους 15-30 cm, αποτελείται από τούβλα τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο, ή πέτρες στη φυσική τους μορφή, ή πέτρες θρυμματισμένες, το δεύτερο στρώμα (rudus) πάχους 8-15 cm, συνίσταται από ασβέστη-άμμο-βότσαλα-ελαφρόπετρα, ή διάφορες ποζολάνες. Το τρίτο στρώμα (nucleus) πάχους 2-5 cm, συντίθεται από ασβέστη-άμμο-ποζολάνη-θρυμματισμένο χονδρόκοκκο τούβλο και το τέταρτο στρώμα (supra nucleus) πάχους 0,5-2 cm, αποτελείται από ασβέστη-άμμο- λεπτόκοκκη ποζολάνη, μαρμαρόσκονη-κεραμάλευρο, ή μόνο με ασβέστη και άμμο, ή σκέτη γύψο[22].

Τα ψηφιδωτά δάπεδα των χριστιανικών χρόνων ακολουθούν την παράδοση της διαστρωμάτωσης των ρωμαϊκών χρόνων. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι αρμοί της

ψηφοθετημένης επιφάνειας χρωματίζονταν με κεραμικό κονίαμα, ή έγχρωμο γύψο για να φαίνεται η επιφάνεια ενιαία [23].

1.2.2 Υλικά κατασκευής ψηφιδωτών δαπέδων

1.2.2.1 Κονιάματα

Οι αρχαίοι Έλληνες ονόμαζαν "κονία" ("καμένη σκόνη") τα λεπτοαλεσμένα προϊόντα, που παράγονταν από την έψηση ασβεστόλιθων [23]. Αυτό αποτελεί μια ένδειξη, ότι στα μέσα του 4ου αιώνα π.Χ γνώριζαν πώς να παράγουν ασβέστη από το κατάλληλο υλικό. Η ανάμειξη αυτής της κονίας με κόκκους άμμου, κισσήρεως, ή μαρμάρου και την προσθήκη νερού, οδηγούσε στην παρασκευή ενός πολτώδους υλικού με συνδετικές ιδιότητες κατά την σκλήρυνση του, που ονομάζεται, μέχρι και σήμερα, κονίαμα. Επομένως, τα κονιάματα είναι σύνθετα υλικά, που συνίστανται από ένα συνδετικό υλικό (ή μίγμα συνδετικών υλικών), από διάφορα αδρανή υλικά (μίγμα από ανόργανα υλικά, όχι πάντα κρυσταλλικής φύσης) και από μερικά πρόσθετα υλικά (συχνά οργανικής φύσεως). Αυτό το σύνθετο υλικό όταν αναμιγνύεται με νερό, σχηματίζει ένα πολτό με συνδετικές ιδιότητες, ο οποίος κατά την πήξη του σκληραίνει και αναπτύσσει μηχανικές αντοχές. Τα κονιάματα, κατά την αρχαιότητα, δεν χρησιμοποιούνταν μόνο ως συνδετικό για τα υλικά δόμησης (κυρίως από τους Ρωμαίους), αλλά και για την επίχριση επιφανειών (δαπέδων, τοίχων και οροφών) οικιών, δεξαμενών ή θαλάσσιων κατασκευών [22]. Η ιστορία των κονιαμάτων συνδέεται με την ανακάλυψη και τη χρήση της ασβέστου, καθώς η τελευταία αποτελεί το βασικό συστατικό του ομώνυμου κονιάματος.
Τα πρώτα κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν για δομικούς σκοπούς ήταν τα πηλοκονιάματα. Κατά την περίοδο 4000-2000 π.Χ. άρχισαν να παρασκευάζονται κονιάματα από μεγάλους ασβεστόλιθους και άσβεστο μαζί με γύψο. Αμέσως μετά την εφαρμογή τους στις κατασκευές, η τεχνολογία των κονιαμάτων διαδόθηκε σε νεώτερους πολιτισμούς, όπως των Ελλήνων και των Ρωμαίων [6, 22].
Οι Έλληνες και αργότερα οι Ρωμαίοι ανέπτυξαν περισσότερο από οποιονδήποτε άλλον τη χρήση των κονιαμάτων για κατασκευαστικούς σκοπούς. Οι Έλληνες χρησιμοποίησαν κυρίως τα ποζολανικά κονιάματα, τα οποία σε μερικές εφαρμογές μπορούν να θεωρηθούν ως μία πρώιμη μορφή σκυροδέματος [24]. Αργότερα οι Ρωμαίοι διέδωσαν αυτήν την τεχνολογία σε κάθε μεριά της αυτοκρατορίας. Η συνδετική ύλη εκείνη την εποχή μπορεί να ήταν είτε αερική (γύψος, αερική άσβεστος) ή υδραυλική κονία (υδραυλική άσβεστος). Οι αερικές κονίες πήζουν και σκληρύνονται στον αέρα. Η αερική άσβεστος παραγόταν, όπως και σήμερα, με την έψηση ασβεστολιθικών ($CaCO_3$) ή δολομιτικών ($CaCO_3.MgCO_3$) πετρωμάτων, σε θερμοκρασίες περίπου 900˚C, με μεγάλο χρόνο έψησης μέσα σε αρχαίους κλιβάνους με καύσιμα ξύλο, τύρφη και ξυλοκάρβουνο. Το αποτέλεσμα της έψησης είναι η παραγωγή ενός μικροκρυσταλλικού ασβέστη (CaO), με αυξημένο πορώδες, μεγάλη ειδική επιφάνεια και δραστικότητα. Η ανάμειξη του CaO με νερό (H_2O) (σβέση) οδηγούσε στην παραγωγή της υδρασβέστου ($Ca(OH)_2$ (ασβεστοπολτού) και γινόταν σε μεγάλους τάφρους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Όταν η υδράσβεστος εκτεθεί στην ατμόσφαιρα αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) με

αποτέλεσμα το σχηματισμό $CaCO_3$, που οδηγεί στην πήξη, σκλήρυνση και την ανάπτυξη μηχανικών αντοχών [25, 26, 27].
Σε αντίθεση με τις αερικές, οι υδραυλικές κονίες έχουν την ικανότητα να πήζουν και να σκληραίνουν και μέσα στο νερό. Η παραγωγή της υδραυλικής άσβεστου γινόταν με την έψηση μαργαϊκών ασβεστόλιθων, οι οποίοι αποτελούνται από ένα μίγμα ανθρακικού ασβεστίου και αργίλου (μάργες) σε θερμοκρασία περίπου 900-950˚C. Κατά την έψηση ένα μέρος της ασβέστου (CaO) αντιδρά με τα οξείδια του αργιλίου (Al_2O_3) του σιδήρου (Fe_2O_3) και του πυριτίου (SiO_2) που περιέχονται στην άργιλο, σχηματίζοντας ασβεσταργιλικές (CA)* και ασβεστοπυριτικές ενώσεις (CS) που έχουν υδραυλικές ιδιότητες. Η πήξη και η σκλήρυνση των υδραυλικών κονιών περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, τα προϊόντα έψησης (CaO, CA, CS) αντιδρούν με το νερό (H) και σχηματίζουν CH, CAH, CSH (Στάδιο 1). Κατά το δεύτερο στάδιο, οι αργιλοπυριτικές ενώσεις αντιδρούν με την υδράσβεστο παρουσία νερού, σχηματίζοντας, επιπλέον ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (CSH) και ένυδρο πυριτικό αργίλιο (CAH) (Στάδιο 2). Οι ενώσεις αυτές έχουν υδραυλικές ιδιότητες, δηλαδή, είναι αδιάλυτες στο νερό και έχουν συγκολλητικές ιδιότητες. Έτσι, προκαλούν γρήγορη σκλήρυνση του κονιάματος και ανάπτυξη μηχανικών αντοχών, ακόμα και μέσα στο νερό, σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις (1.1) [25, 26]:

Στάδιο 1: $C + H \rightarrow CH$

$$CA + CS + H \rightarrow CAH + CSH \qquad (1.1)$$

Στάδιο 2: $A + S + CH + H \rightarrow CSH + CAH$

<u>*Αδρανή υλικά*</u>, είναι λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα υλικά, που δημιουργούν το σκελετό του κονιάματος και δεν συμμετέχουν, συνήθως, στις αντιδράσεις. Στα λεπτόκοκκα υλικά περιλαμβάνονται η άμμος (θαλασσινή, ποταμίσια ή λατομείου, ασβεστολιθικής, ή χαλαζιακής σύστασης,). Τα χονδρόκοκκα είναι συνήθως θραύσματα πετρωμάτων (ασβεστολιθικά, γρανίτες, δολομιτικά, ή χαλαζιακά), θραύσματα κεραμικού ή κίσσηρης κ.α. [25].
<u>*Πρόσθετα υλικά*</u>, είναι, συνήθως, δραστικά υλικά, ανόργανης ή/και οργανικής φύσης, τα οποία χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τις ιδιότητες των κονιαμάτων. Στα ανόργανα πρόσθετα υλικά περιλαμβάνονται, κυρίως, οι ποζολάνες, που διακρίνονται σε φυσικές ή τεχνητές. Οι φυσικές είναι ηφαιστειακής προέλευσης και είναι γνωστές από αρχαιοτάτων χρόνων, όπως η Θηραϊκή και Μηλαϊκή γη, οι Ιταλικοί ποζολανικοί τόφοι και οι διατομίτες). Στις τεχνιτές ταξινομούνται τα θραυσμένα κεραμικά, πλίνθοι, κ.α). Ως ποζολάνη ορίζεται το αργιλοπυριτικό υλικό, το οποίο από μόνο του δεν έχει υδραυλικές ιδιότητες, όμως, σε λεπτοαλεσμένη μορφή αντιδρά με το $Ca(OH)_2$ παρουσία ύδατος και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, και σχηματίζει ενώσεις με υδραυλικές ιδιότητες. Η δραστικότητα της ποζολάνης οφείλεται, κυρίως, στην παρουσία της υαλώδους φάσης στο υλικό, η μικροδομή της οποίας εξαρτάται από την αρχική

* Στην ορολογία των υδραυλικών κονιών και κονιαμάτων χρησιμοποιείται ο ακόλουθος συμβολισμός για τα διάφορα οξείδια: C: CaO, S: SiO_2,A: Al_2O_3,F: Fe_2O_3, M:MgO, H: H_2O, $\overline{S}$: SiO_2, $\overline{C}$: CO_2, N: NaO, K: K_2O, ***κλπ.***

σύνθεση του αργιλοπυριτικού υλικού, την υψηλή θερμοκρασία που έχει εκτεθεί και τον τρόπο ψύξης του [28, 29, 30].
Ως πρόσθετα, οργανικής φύσεως υλικά, έχουν χρησιμοποιηθεί στα ιστορικά κονιάματα, κυρίως, η βύνη, μπύρα, δέρμα ζώων, ασπράδι ή κρόκος αυγού, λίπη, κερί, κόλλα, αραβική κόμμι, ζάχαρη, χυμοί φρούτων, γλουτένη, ρύζι, αλευρόκολλα, κερατίνη, κολλαγόνο, καζεΐνη, φυτικές ρητίνες, ακόμα και αίμα. Τα παραπάνω υλικά συμβάλανε στη βελτίωση των διαφόρων χαρακτηριστικών των κονιαμάτων [31]. Παρόλα αυτά, με το πέρασμα των χρόνων, τα υλικά αυτά αποδείχθηκαν επιδεκτικά στην φθορά, κυρίως από βιολογικούς παράγοντες, καθώς αποτελούν πόλο έλξης σε έντομα και μικροοργανισμούς.

1.2.2.2 Ψηφίδες

Στα Ελληνιστικά δάπεδα, η επίστρωση του τελευταίου στρώματος της υποδομής γινόταν στις περισσότερες περιπτώσεις με πέτρα στη φυσική της κατάσταση από θαλάσσιο ή ποταμίσιο βότσαλο. Ακολουθεί η εξέλιξη των δαπέδων σε ψηφιδωτά τα οποία κατασκευάζονται με τη χρήση της κομμένης ψηφίδας, η οποία κατασκευάζεται από μάρμαρα, ή φυσικά πετρώματα της κάθε περιοχής. Όταν τα φυσικά πετρώματα δεν πρόσφεραν τα απαιτούμενα χρώματα, κατέφευγαν στον τεχνικό χρωματισμό τους. Γνωρίζοντας τις οξειδώσεις που προκαλούνταν στα πετρώματα από την υψηλή θερμοκρασία, κατάφερναν να φτιάχνουν διάφορα χρώματα και αποχρώσεις. Άλλες μέθοδοι τεχνητού χρωματισμού ήταν η εμβάπτιση ψηφίδων από λευκά μάρμαρα σε βραστά ελαιώδη υγρά με χρώμα. Οι περίτεχνες συνθέσεις περιείχαν συχνά ημιπολύτιμους λίθους, όπως φίλντισι, κοράλλι και άλλα υλικά [32].

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1

1. Δ. Ι. Πάλλας, *Ψηφιδωτά,* Θρησκευτική και Ηθική Εγκυκλοπαίδεια Τόμος Β', Εκδότης Αθ. Μαρτίνος, Αθήνα, (1968), σ. 1071-1089.

2. Π. Ασημακοπούλου-Ατζακά, *Ψηφιδωτά Δάπεδα: Προσέγγιση στην Τέχνη του Αρχαίου Ψηφιδωτού (έξι κείμενα)*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, (2003), σ. 11-63.

3. R. C. Westgate, *Hellenistic mosaics*, in D. Ogden (ed.), The Hellenistic World: New Perspectives, Duckworth/Classical Press of Wales, London, (2002), p. 221–251

4. Ν. Μ. Πουλακάκης, *Ψηφιδωτά δάπεδα στη Μακεδονία κατά την Κλασική και Ελληνιστική Εποχή*, μελετήματα Ημαθίας, Έτος Η' Τόμος 1, Ε.Μ.Ι.Π.Η. Βέροια (2010). σ. 29.

5. K. M. D. Dunbabin, *Mosaics of the Greek and Roman World*, Cambridge University Press, Cambridge (1999), p. 5-6, 279-284.

6. D. M. Robinson, *Mosaics from Olynthos*, American Journal of Archaeology, Vol. 36, Archaeological Institute of America (1932), p. 16-24.

7. J. J. Pollitt, *Art in the Hellenistic Age*, Cambridge University Press (1986), p. 210-216.

8. R. C. Westgate, *Space and decoration in Hellenistic houses*, Annual of the British School at Athens 95, (2000), p. 391–426.

9. M. Robertson, *Greek Mosaics*, The Journal of Hellenic Studies, Vol. 85, the Society for the Promotion of Hellenic Studies (1965), p. 72-89.

10. Π. Ι. Χατσιδάκης, *Δήλος*, Όμιλος Λάτση (1997). σ. 392-.393.

11. W. Alexander, *The Third Season of Excavation at Antioch-on-the-Orontes Campbell Source*, American Journal of Archaeology, Vol. 40, No. 1, Archaeological Institute of America, (1936), p. 1-10.

12. R. Ling, *The Seasons in Romano-British Mosaic Pavements,* Britannia, Vol. 14, Society for the Promotion of Roman Studies (1983), p. 13-22.

13. S. E. Waywell, *Roman Mosaics in Greece*, American Journal of Archaeology, Vol. 83, No. 3 (1979), p. 293-321.

14. J. M. C. Toynbee, *Apollo, Beasts and Seasons: Some Thoughts on the Littlecote Mosaic*, Britannia, Vol. 12, Society for the Promotion of Roman Studies, (1981), p. 1-5.

15. Π. Ασημακοπούλου-Ατζακά, *Σύνταγμα των παλαιοχριστιανικών ψηφιδωτών δαπέδων ΙΙ: Πελοπόννησος – Στερεά Ελλάδα*, Κέντρο Βυζαντινών Ερευνών, Θεσσαλονίκη (1987). σ. 7-23.

16. Σ. Πελεκανίδη, *Σύνταγμα των παλαιοχριστιανικών ψηφιδωτών δαπέδων Ι: Νησιωτική Ελλάδα.*, Κέντρο Βυζαντινών Ερευνών, Θεσσαλονίκη (1974). σ. 15-39.

17. Π. Ασημακοπούλου-Ατζακά, *Σύνταγμα των παλαιοχριστιανικών ψηφιδωτών δαπέδων ΙΙΙ :Μακεδονία – Θράκη 1. Τα ψηφιδωτά δάπεδα της Θεσσαλονίκης*, Κέντρο Βυζαντινών Ερευνών, Θεσσαλονίκη (1987), σ. 158-178.

18. L. B Alberti, *Of Pavements according to the Opinion of Pliny and Vitruvius, and the Works of the Ancients*, in Ten Books on Architecture, translated by J. Leoni, London, (1965), p. 61-63.

19. The Getty Conservation Institute and the Israel Antiquities Authorities, *Mosaics In Situ Project – Illustrated Glossary,* The Getty Conservation Institute, Los Angeles, (2003), p. 3.

20. Β. Πάχτα, *Μελέτη εξέλιξης τεχνολογίας κονιαμάτων*, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, (2011), σ. 6-8, 68-70.

21. Δ. Χρυσόπουλος, *Το ψηφιδωτό*, Τμήμα Συντήρησης Έργων Τέχνης και Αρχαιοτήτων, Τ.Ε.Ι Αθήνας, (2000), σ. 29.

22. I. Papayianni, V. Pachta, *Technology of mortars Used for the Substratum of Mosaics*, in Proceedings of the 2th International Conference on ancient Greek technology, Proceedings, Athens, (2006), p. 165-171.

23. Σ. Πελεκανίδη, *Σύνταγμα των παλαιοχριστιανικών ψηφιδωτών δαπέδων Ι : Νησιωτική Ελλάδα.*, Κέντρο Βυζαντινών Ερευνών, Θεσσαλονίκη, (1974), σ. 39-40.

24. M. Koui and Ch. Ftikos, *The ancient Kamirian water storage tank: A proof of concrete technology and durability for tree millenniums*, Materials and Structures, Vol. 31, (1998), p. 623 – 627.

25. Σ. Τσίμας, *Δομικά υλικά (Τσιμέντο - Ασβέστης - Σκυρόδεμα – Κονιάματα)*, ΕΜΠ, Αθήνα, (2001).

26. Σ. Τσίμας , *Επιστήμη και Τεχνολογία Ασβέστη*, ΕΜΠ, Αθήνα, (2007).

27. D. Carrington, P. Swallow, Limes and *lime mortars: part two*, Journal of architectural conservation, no.1 (1996), p. 7-22.

28. Α. Γεωργιάδης και άλλοι, *Μελέτη της επίδρασης της κοκκομετρίας και των αερακτικών προσμίκτων στις ιδιότητες των κονιαμάτων*, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου, (2008).

29. R. Cerny, A. Kunca, V. Tydlitat, J. Drchalova, P. Rovnanıkova, *Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters*, Construction and Building Materials, ScienceDirect (2006), p. 849–857.

30. R. Cerny, A. Kunca, V. Tydlitat, J. Drchalova, P. Rovnanıkova, *Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters*, Construction and Building Materials, ScienceDirect, (2006), p. 849–857.

31. L. B Sickels, *Organic Additives in Mortars*, Ediburg Architecture Research Vol. 8, Ediburge, (1981), p. 9-10.

32. K. M. D., Dunbabin, *Techniques and materials of Hellenistic mosaics*, American Journal of Archaeology 83, (1979), p. 265-277.

Κατάλογος Εικόνων Κεφαλαίου 1

Εικόνα 1.1: K.M.D. Dunbabin, Mosaics of the Greek and Roman World, Cambridge University Press, Cambridge (1999), p. 7.

Εικόνα 1.2: Π. Ασημακοπούλου-Ατζακά, Ψηφιδωτά Δάπεδα: Προσέγγιση στην Τέχνη του Αρχαίου Ψηφιδωτού (έξι κείμενα), Θεσσαλονίκη: University Studio Press, (2003), σ. 29.

Εικόνα 1.3: ΟΔΥΣΣΕΥΣ, Μόνιμη έκθεση Αρχαιολογικού Μουσείου Θεσσαλονίκης, ψηφιδωτό δάπεδο Αριάδνης στη Νάξο, odysseus.culture.gr: 18/6/2011

Εικόνα 1.4: Π. Ασημακοπούλου-Ατζακά, Ψηφιδωτά Δάπεδα: Προσέγγιση στην Τέχνη του Αρχαίου Ψηφιδωτού (έξι κείμενα), Θεσσαλονίκη: University Studio Press, (2003), σ. 114

Εικόνα 1.5: The Getty Conservation Institute and the Israel Antiquities Authorities, Mosaics In Situ Project – Illustrated Glossary, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, (2003), p. 3.

Εικόνα 1.6: The Getty Conservation Institute, The Conservation of the Orpheus mosaic at Paphos, (1991), ISBN 0-89236-188-3.

Κεφάλαιο 2

Φθορά και συντήρηση των ψηφιδωτών δαπέδου

2.1 Φθορά των υλικών του υποστρώματος

Στα φαινόμενα φθοράς περιλαμβάνονται όλες εκείνες οι διαδικασίες, που οδηγούν στην αλλοίωση της συνοχής, της εμφάνισης και της χημικής σύστασης του υλικού της κατασκευής. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ψηφιδωτό είναι ένα πολυσύνθετο υλικό, με ανομοιογενή συστατικά, γίνεται αντιληπτό ότι η διάβρωση του μπορεί να αρχίζει από τη στιγμή που δημιουργείται και να συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του.

2.1.1 Παράγοντες φθοράς

Το φαινόμενο της φθοράς των υλικών είναι πολυσύνθετο και αποτελεί συνάρτηση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Οι ενδογενείς παράγοντες σχετίζονται με τη δομή και τις ιδιότητες των ίδιων των υλικών κατασκευής ενός ψηφιδωτού, δηλαδή, τη ψηφίδα και το κονίαμα, ενώ οι εξωγενείς σχετίζονται με το περιβάλλον τόσο στο επίπεδο του γενικού περιβάλλοντος, όσο και του μικροκλίματος [1].
Η αρχή της φθοράς κάθε υλικού, που είναι εκτεθειμένο σε ένα ορισμένο περιβάλλον, ξεκινά από το γεγονός ότι το υλικό τείνει να ισορροπήσει με τις διάφορες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται. Οι συνεχόμενες μεταβολές των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών του υλικού οδηγούν στην φθορά του. Η γνώση των αιτιών και, κατ' επέκταση, των μηχανισμών φθοράς, αποτελούν τη βάση για τη διατύπωση προτάσεων συντήρησης, που θα επιβραδύνουν τη δράση τους. Η διάβρωση ανόργανων και ιδιαίτερα σύνθετων υλικών, όπως είναι τα κονιάματα, αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο, όπου συνυπάρχουν περισσότεροι από ένας μηχανισμοί με διαφορετικό χαρακτήρα [1, 2]. Σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του υλικού, επικρατεί ο ένας, ή ο άλλος μηχανισμός. Για παράδειγμα, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας επιδρούν δυσμενώς στη συνοχή μεταξύ των κρυστάλλων του ασβεστίτη (φυσική δράση), διευκολύνοντας την προσβολή του από όξινα διαλύματα (χημική δράση), ενώ συγχρόνως μπορεί να υπάρχει προσβολή σε ξηρά κατάσταση από το SO_2 της ρυπασμένης ατμόσφαιρας (ηλεκτροχημική δράση). Οι καιρικές συνθήκες σε συνδυασμό με τη θέση του ψηφιδωτού παίζουν, επίσης, καθοριστικό ρόλο για το ποιος από τους δύο τελευταίους μηχανισμούς φθοράς θα επικρατήσει [1, 3]. Οι κυριότεροι από τους παράγοντες φθοράς και οι επιπτώσεις τους αναφέρονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.1.2 Η δράση του νερού

Η παρουσία του νερού αποτελεί την κυριότερη αιτία για τις περισσότερες φυσικές και χημικές μεταβολές που υφίσταται ένα ψηφιδωτό. Το νερό μπορεί να εισχωρήσει στα υλικά με τη συμπύκνωση των υδρατμών του αέρα, με τη διείσδυση του νερού της βροχής, αλλά και με τη διαδικασία της τριχοειδούς αναρρίχησης. Το μέγεθος της

απορρόφησης και η κυκλοφορία του νερού μέσα στο υλικό καθορίζεται από το πορώδες και την υγροσκοπικότητα των υλικών. Το νερό συμμετέχει στους μηχανισμούς φθοράς, είτε άμεσα, ή και έμμεσα. Η δράση του μπορεί να είναι φυσική, χημική, ή ακόμη και συνδυαστική. Ελέγχει τη μεταφορά, την κρυστάλλωση, την αποκρυστάλλωση και την ενυδάτωση των αλάτων στο υλικό. Η διαφορά του συντελεστή διαστολής του, από την υγρή στη στέρεα κατάσταση (πάγος) το καθιστά υπεύθυνο για την εισαγωγή εσωτερικών μηχανικών τάσεων στο υλικό, που μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και στην κατάρρευσή του [1, 2]. Το νερό συμμετέχει, επίσης, ενεργά στις χημικές αντιδράσεις με τους ρύπους της ατμόσφαιρας. Ακόμη, δρα ως ενεργός παράγοντας στην οξειδωτική δράση του οξυγόνου. Τέλος, επιδρά άμεσα στις αλλοιώσεις που οφείλονται σε βιολογικούς παράγοντες, ως κύριο συστατικό των φυτικών και ζωικών τροφών. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι οι περισσότερες μεταβολές αναπτύσσονται κατά την εξάτμιση του νερού [4]. Η εξάτμιση από την επιφάνεια, ενός πορώδους υλικού, εξαρτάται κυρίως από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, και πιο συγκεκριμένα, τη θερμοκρασία, την σχετική υγρασία, αλλά και την ταχύτητα του αέρα που περνά από την επιφάνεια [5]. Έτσι, ανάλογα με τις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών το νερό μετακινείται γρήγορα, ή αργά προς την επιφάνεια, προκαλώντας αύξηση ή μείωση του ποσοστού εξάτμισης.

2.1.3 Φθορά από άλατα

Τα άλατα που εντοπίζονται, συνήθως, μέσα στις διάφορες κατασκευές με δομικά υλικά, είναι κυρίως με τη μορφή των θειικών, νιτρικών, ανθρακικών και χλωριούχα αλκαλίων ή αλκαλικών γαιών [2]. Η προέλευσή τους μπορεί να αποδοθεί στο υπέδαφος, σε υπόγεια νερά, ή και στο θαλασσινό νερό (π.χ., NaCl, Na_2SO_4). Η μεταφορά τους γίνεται, με τη μορφή ιόντων, μέσω του υδροφόρου ορίζοντα ή/και με τη βοήθεια του ανέμου (salt spray) από όξινους ατμοσφαιρικούς ρύπους (SO_x, NO_x, HCl) ή ακόμη και από βιολογικούς παράγοντες φθοράς. Τα ιόντα των αλάτων αυτών, σχηματίζουν τα αντίστοιχα άλατα του ασβεστίου και προσβάλλουν απευθείας τα κονιάματα με διάφορους φυσικούς ή/και χημικούς μηχανισμούς [1, 6].

Ένα κλασσικό παράδειγμα των φυσικών μηχανισμών αποτελεί η μεταφορά αλάτων με το νερό που εισχωρεί στο εσωτερικό των κονιαμάτων, είτε με το φαινόμενο της τριχοειδούς αναρρίχησης, είτε από συμπύκνωση της υγρασίας. Τα άλατα αυτά (ανθρακικά, θειικά, χλωριούχα) εισχωρούν και εγκλείονται μέσα στους εσωτερικούς πόρους των κονιαμάτων. Ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας αναπτύσσονται σε κρυσταλλικές ενώσεις, ο όγκος των οποίων οδηγεί στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων ή/και μικρορωγμών, με συνέπεια την απώλεια των μηχανικών αντοχών του κονιάματος, που μπορεί να οδηγήσει μέχρι και στην κατάρρευσή του [1, 6, 7]. Επίσης, η παρουσία έγκλειστων διαλυτών αλάτων μέσα στους πόρους, με την αύξηση της θερμοκρασίας, μπορεί να οδηγήσει στη μεταφορά τους με το νερό, διαμέσου των ανοικτών πόρων, από το επίπεδο της υποδομής των ψηφιδωτών προς την επιφάνεια τους, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση αλάτων σε αυτήν και την κρυστάλλωση τους [8]. Η εναπόθεση των αλάτων στην επιφάνεια οδηγεί στο

σχηματισμό σκληρών κρουστών, ή εξανθημάτων αλάτων στις ψηφίδες και τους αρμούς [1].

Από την άλλη μεριά, η διείσδυση νερού με την μεταφορά ορισμένων ιόντων, ιδιαίτερα Cl^-, SO_4^{2-}, Mg^{2+} και αλκαλίων (K^+, Na^+) στα κονιάματα μπορεί να οδηγήσει στην αποδόμησή τους με χημικούς μηχανισμούς. Για παράδειγμα, τα θειικά ιόντα (SO_4^{2-}) παρουσία υγρασίας, αντιδρούν με την υδράσβεστο (CH) και σχηματίζουν γύψο ($C\hat{S}H_2$). Στη συνέχεια η γύψος αντιδρά με τις υδραυλικές ενώσεις του κονιάματος, δηλαδή, τις ένυδρες ασβεσταργιλικές ενώσεις (CAH), για να σχηματίσουν ετρινγκίτη ($C_6A\hat{S}_3H_{32}$) ή/και μονοθειικό άλας ($C_6A\hat{S}_3H_{12}$) σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις [9]:

$$CH + (\hat{S})\ SO_4^{2-} + H \rightarrow C\hat{S}H_2$$
$$C_3AH_6 + 3C\hat{S}H_2 + 20H \rightarrow C_6A\hat{S}_3H_{32}$$
$$C_3AH_6 + 3C\hat{S}H_2 + 6H \rightarrow C_6A\hat{S}_3H_{12}$$

Οι ενώσεις αυτές εξασθενούν τις συνδετικές (υδραυλικές) ιδιότητες του κονιάματος, και επιπλέον, η κρυστάλλωση των μεγάλου όγκου ένυδρων ασβεστο-θειο-αργιλικών ενώσεων (ετρινγκίτης, μονοθειικό άλας,) μέσα στο ήδη σκληρό κονίαμα δημιουργεί εσωτερικές τάσεις που μπορεί να ρηγματώσουν το υλικό [10].

Από όσα αναφέρθηκαν, παραπάνω, είναι κατανοητό, ότι η ευαισθησία του κονιάματος στην κρυστάλλωση αλάτων είναι συνάρτηση των μηχανικών και των δομικών του παραμέτρων, δηλαδή, της αντοχή του σε θλίψη, το μέτρο συμπιεστότητας, το πορώδες και της κατανομή μεγέθους των πόρων του [1].

2.1.4 Επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών

Τα κονιάματα, από τη σύνθεσή τους, είναι σύνθετα υλικά, ενώ, από μηχανική άποψη ανήκουν στην κατηγορία των ψαθυρών υλικών, δηλαδή στερούνται ελαστικότητας. Τα χαρακτηριστικά αυτά κάνουν τα κονιάματα αρκετά ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Η ευαισθησία αυτή οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος αναφέρεται στο διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής που μπορεί να έχουν τα επί μέρους υλικά, ή τα στρώματα που συνθέτουν τα κονιάματα. Ο δεύτερος αφορά στις χημικές μεταβολές που μπορεί να λαμβάνουν χώρα στα προϊόντα ενυδάτωσης ή/και ανακρυστάλλωσή τους, οι οποίες οδηγούν σε μεταβολές όγκου [1, 2]. Για παράδειγμα, στη θερμοκρασία των 60 °C, περίπου, ο ετρινγκίτης μετατρέπεται σε μονοθειικό άλας, μια αντιστρεπτή μεταβολή, που συνεπάγεται μεταβολή όγκου. Τα φαινόμενα αυτά συνεπάγονται τη δημιουργία και ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων στο ήδη σκληρυσμένο κονίαμα, που είναι υλικό με ψαθυρά χαρακτηριστικά. Είναι αυτονόητο, ότι εάν το υλικό εκτεθεί σε επαναλαμβανόμενους θερμοκρασιακούς κύκλους, τα παραπάνω φαινόμενα εντείνονται και αναπτύσσονται δυνάμεις εσωτερικής θραύσης, που τελικά μπορεί να φθάσουν μέχρι την πλήρη αστοχία του. Ιδιαίτερα, σοβαρό ρόλο διαδραματίζει η συχνότητα και η ταχύτητα των θερμοκρασιακών μεταβολών και όχι τόσο η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής θερμοκρασίας [11]. Σε περιπτώσεις απότομων θερμοκρασιακών αλλαγών, όπως π.χ. οι πυρκαγιές, οι ρηγματώσεις εκδηλώνονται στο όριο μεταξύ θερμού και ψυχρού στρώματος, ενώ, οι ήπιοι κύκλοι, σε ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος, προκαλούν χαλάρωση στο εξωτερικό στρώμα του υλικού [12].

2.1.5 Επίδραση των ατμοσφαιρικών ρύπων

Σε περίπτωση ατμοσφαιρικής ρύπανσης το νερό της ατμόσφαιρας είναι συνήθως όξινο και αντιδρά με τα ανθρακικά άλατα που περιέχονται στα κονιάματα και στις ψηφίδες, σχηματίζοντας ευδιάλυτες ενώσεις. Ειδικότερα, η παρουσία του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), βοηθά στο σχηματισμό $Ca(HCO_3)_2$, προϊόν σχετικά ευδιάλυτο, το οποίο αποπλένεται εύκολα με το νερό της βροχής, με αποτέλεσμα τη σταδιακή αποικοδόμηση των κονιαμάτων. Επίσης, οι υδραυλικές ενώσεις όταν έρχονται σε επαφή με το CO_2 αποικοδομούνται με μία πολύ αργή κινητική, που μπορεί να κρατήσει και αρκετά χρόνια, σύμφωνα με την αντίδραση : $CSH + CO_2 \leftrightarrow CaCO_3 + SiO_2 + H_2O$ [1, 2, 12].
Τα οξείδια του αζώτου (NO_χ) οδηγούν στο σχηματισμό $Ca(NO_3)_2$ που είναι αρκετά ευδιάλυτο προϊόν. Η παρουσία SO_2 στην ατμόσφαιρα με τη βοήθεια των υδρατμών συμβάλλει στη δημιουργία θειικού οξέος, το οποίο με τη σειρά του επιδρά στις ανθρακικές, πυριτικές, και αργιλικές ενώσεις, και οδηγεί στο σχηματισμό ετρινγκίτη και γύψου ($CaSO_4.2H_2O$) [12, 13]. Οι ενώσεις αυτές καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο από τις αρχικές ένυδρες ασβεστοπυριτικές και ασβεσταργιλικές ενώσεις, με συνέπεια να εισάγονται εσωτερικές τάσεις που μπορεί να προκαλέσουν ρηγματώσεις. Επιπλέον, η γύψος είναι πιο ευδιάλυτη από το ανθρακικό ασβέστιο και αποπλένεται σταδιακά από το κονίαμα και τις ψηφίδες, αυξάνοντας το πορώδες και μειώνοντας, τελικά, την ανθεκτικότητα των υλικών [14]. Παρόμοια με τη δράση των θειικών ιόντων είναι η προσβολή των κονιαμάτων από τα χλωριόντα Cl^-. Η παρουσία τους συνεπάγεται τη δημιουργία χλωριούχων αλάτων αντίστοιχων του μονοθειικού άλατος αλλά, και τη διαλυτική δράση τους στο ανθρακικό ασβέστιο. Άλλοι παράγοντες χημικής φθοράς είναι η αλκαλική προσβολή των αδρανών, (alkali aggregate reaction) [2]. Στην περίπτωση αυτή, τα ιόντα νατρίου (Na^+), και καλίου (K^+) τα οποία βρίσκονται σαν προσμείξεις στα υδραυλικά κονιάματα, ή κυρίως στα αδρανή, αντιδρούν στο αλκαλικό (OH^-) περιβάλλον των μικροπόρων του κονιάματος με το οξείδιο του πυριτίου (πλίνθοι της τοιχοποιίας ή αδρανή του κονιάματος) σύμφωνα με τις ακόλουθες αντιδράσεις [1]:

$$Na_2O + SiO_2 + H_2O \leftrightarrow x\ Na_2O.ySiO_2.\ zH_2O$$
$$K_2O + SiO_2 + H_2O \leftrightarrow x\ K_2O.\ ySiO_2.\ zH_2O$$

Προϊόντα των αντιδράσεων αυτών είναι τα ευδιάλυτα πυριτικά άλατα των αλκαλίων (υδρύαλος), τα οποία αποπλένονται και οδηγούν διαχρονικά στην αποσάθρωση του κονιάματος [12, 14, 15].
Στην ατμόσφαιρα των πόλεων, εκτός από τους παραπάνω αέριους ρύπους, αιωρούνται σε κολλοειδή διασπορά στερεά σωματίδια, όπως αιθάλη, οξείδια μετάλλων, άργιλοι, γύψος, τσιμέντο, άμμος που μεταφέρονται εύκολα από τον αέρα σαν σκόνη, ή σαν καπνός. Αυτά τα σωματίδια έχουν την τάση να επικάθονται στην επιφάνεια των μνημείων μεταφέροντας παράλληλα τους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές [1, 12]. Έτσι εκτός από τη διάβρωση προκαλούν και άσχημο αισθητικό αποτέλεσμα.

2.1.6 Βιολογικοί παράγοντες φθοράς

Οι κυριότεροι βιολογικοί παράγοντες που επιδρούν στη φθορά των ψηφιδωτών κατασκευών μπορούν να συνοψισθούν στους ακόλουθους: τα άλγη, οι λειχήνες, τα βακτήρια και οι μύκητες. Το περιβάλλον που ευνοεί την ανάπτυξή τους είναι η παρουσία υγρασίας, οργανικών ουσιών, ανόργανων αλάτων, φωτός και η μέτρια θερμοκρασία.
Η δράσης τους εστιάζεται στις όξινες, ή αλκαλικές εκκρίσεις που δημιουργούνται, οι οποίες σε συνδυασμό με τους άλλους παράγοντες φθοράς, οδηγούν στο σχηματισμό ευδιάλυτων ενώσεων. Η απομάκρυνση των ευδιάλυτων αυτών ενώσεων συνεπάγεται την αύξηση του πορώδους, τη μείωση της ανθεκτικότητας και σε μεγαλύτερο βαθμό τη διάβρωση των υλικών κατασκευής. Στη διάβρωση από βιολογικούς παράγοντες περιλαμβάνονται, επίσης, οι χημικές και μηχανικές αλλοιώσεις που προκαλούνται από έντομα, πουλιά και από την ανάπτυξη διαφόρων φυτών. Η τοπική προσβολή των μνημείων από άλγη κατά κανόνα υποδηλώνει υψηλή περιεκτικότητα υγρασίας στο υπόστρωμα και εντοπίζεται συχνά σε τμήματα τα οποία υγραίνονται μέσω του μηχανισμού της τριχοειδούς αναρρίχησης του νερού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διάβρωση εμφανίζεται κυρίως ως αποτέλεσμα των συχνών κύκλων ύγρανσης - ξήρανσης. Στα σημεία που καλύπτονται από άλγη, η τιμή της υγρασίας εμφανίζεται συχνά πάνω από την κρίσιμη. Τα άλγη που παρατηρούνται συνήθως πάνω σε πέτρες, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, είναι τα κυανά άλγη ή κυανοφύκη, τα πράσινα άλγη ή χλωροφύκη και η ερυθρά φύκη [1, 16].
Τα περισσότερα είδη μυκήτων εκκρίνουν σημαντικές ποσότητες οργανικών οξέων, κυρίως κιτρικό και οξαλικό οξύ. Η δράση των οξέων αυτών, σε αρκετά ορυκτά, οδηγεί στην απομάκρυνση των ιόντων Al^{3+} , Mg^{2+} , Si^{4+} [2]. Οι λειχήνες σχηματίζονται από τη συμβίωση αλγών και μυκήτων. Εμφανίζονται σαν λεκέδες με χρώμα πορτοκαλί, κίτρινο καφετί, ώχρα ή άσπρο. Οι άσπρες λειχήνες εκτείνονται μέχρι και μερικά χιλιοστά του μέτρου μέσα στο υλικό. Σε ρυπασμένο περιβάλλον, αναπτύσσονται μόνο σε βασικά υλικά (λίθους ανθρακικής σύστασης), που μπορούν, δηλαδή, να εξουδετερώσουν το SO_2 [12]. Λόγω της σπογγώδους υφής τους, κατακρατούν νερό, γεγονός που διατηρεί την επιφάνεια υγρή για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επίσης, η διόγκωση που υφίστανται κατά την απορρόφηση υγρασίας (ένυδρη - άνυδρη μορφή), δημιουργεί τις προϋποθέσεις για μηχανική φθορά, ιδιαίτερα, όταν βρίσκονται μέσα σε ρωγμές. Χημική φθορά μπορεί να προκληθεί, επίσης, από την έκκριση οργανικών οξέων και άλλων ουσιών που σχηματίζουν χημικά σύμπλοκα (τρυγικά, κιτρικά, σαλικυλικά, γλυκονικά) με τα κατιόντα της πέτρας. Κατά τη διαδικασία αυτή υπάρχει εναλλαγή ιόντων ανάμεσα στα ιόντα H^+, που παράγονται στο ρίζωμα λειχήνων, με τα κατιόντα Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+ ορισμένων αργιλοπυριτικών ενώσεων [1]. Έχει αποδειχθεί ότι ο ασβεστίτης διαλύεται σε υδατικό διάλυμα αιθυλενο-διαμινο-τετρα-οξικού νατρίου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία συμπλόκου και τη μεταφορά του Ca^{2+} στο διάλυμα, το pH του οποίου μπορεί να είναι εξαιρετικά αλκαλικό [1, 17, 18].
Τα βακτήρια διακρίνονται σε αυτότροφα και ετερότροφα. Οι αντιδράσεις των αυτότροφων παράγουν, μερικές φορές, ως προϊόντα οξέα, άλλοτε ισχυρά και άλλοτε ασθενή, τα οποία μπορούν να διαβρώσουν τα δομικά υλικά, που είναι ευαίσθητα στα οξέα. Τα περιττώματα των πουλιών είναι σημαντικές πηγές φωσφορικού και νιτρικού

οξέος, που αντιδρούν με τα ασβεστολιθικά υλικά για να δώσουν τα φωσφορικά και νιτρικά άλατα του ασβεστίου [1, 19].
Τα δέντρα και τα φυτά που αναπτύσσονται σε μνημεία, υποδηλώνουν, γενικά, μεγάλο ποσοστό υγρασίας στην περιοχή. Τα προβλήματα που επιφέρουν, κυρίως, αφορούν στη δράση των ριζών τους, που έχουν την ιδιότητα να αποσυνθέτουν ορυκτά μέσω αντιδράσεων ιονεναλλαγγής με έκκριση οξέων και άλλων χημικών ουσιών. Ακόμα, οι μηχανικές τάσεις που ασκούν, μπορεί να είναι αξονικές και ακτινικές, επιταχύνουν τη μηχανική διάβρωση [1, 12].

2.1.7 Ανθρώπινη δραστηριότητα

Εκτός από τους φυσικούς παράγοντες φθοράς που προαναφέρθηκαν, φθορά σε ένα μνημείο μπορεί να προκληθεί και από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτή μπορεί να αφορά σε παρεμβάσεις στο χώρο και λανθασμένες επεμβάσεις για τη συντήρηση του. Η υποβάθμιση, ή ακόμη, η εγκατάλειψη ενός μνημείου οδηγεί στη σταδιακή καταστροφή του. Η εφαρμογή ακατάλληλων μεθόδων και υλικών συντήρησης, καθώς και η μη πρόληψη των απαραίτητων μέτρων για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραγόντων φθοράς, οδηγεί στην επιτάχυνση των φαινομένων φθοράς και κατά συνέπεια στην απομείωση του αρχαίου υλικού. Ειδικότερα, η χρήση ακατάλληλων υλικών στη συντήρηση των μνημείων, όπως μεταλλικοί σύνδεσμοι, τσιμέντο, διάφορα υλικά στερέωσης και καθαρισμού, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές φθορές/βλαβες στο αρχέτυπο υλικό, λόγω της διαφορετικής μηχανικής και φυσικοχημικής συμπεριφοράς τους [1]. Ακόμα, η φθορά που προκαλείται από τους επισκέπτες, όταν υπάρχει ανεπαρκής φύλαξη, δεν είναι καθόλου αμελητέα και πρέπει να λαμβάνονται προληπτικά μέτρα. Σημαντική παράμετρος, που πρέπει να ελέγχεται στους εκθεσιακούς χώρους και σε χώρους μνημείων, είναι, ακόμη, η στάθμη θορύβου, που αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την ασφάλεια των αντικειμένων. Σε περιπτώσεις ύπαρξης μιας ηχητικής πηγής υψηλών συχνοτήτων, τα υλικά του μνημείου μπορεί να τεθούν σε συντονισμό, που μπορεί να επιφέρει σημαντικές φθορές, έως και καταστροφή. Βλαβερή ηχητική πηγή μπορεί να αποτελεί η πυκνή κυκλοφορία αυτοκινήτων, η ύπαρξη αεροδρομίου πλησίον μνημείων και οι οικοδομικές εργασίες [20].

2.1.8 Φθορά από ακραία καιρικά φαινόμενα και φυσικές καταστροφές

Μετατοπίσεις και καταρρεύσεις μπορεί να προκληθούν από έντονα καιρικά φαινόμενα, ή φυσικές καταστροφές, όπως π.χ. σεισμούς, πλημμύρες κ.α.. Στα έντονα καιρικά φαινόμενα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ένταση των ανέμων και η περιεκτικότητά τους σε φερτά υλικά, που είναι πάνω από τις κολλοειδείς διαστάσεις (>500 μm). Η πρόσκρουση των υλικών αυτών στην επιφάνεια των μνημείων (ένα είδος αμμοβολής) δημιουργεί τοπικές αποξέσεις. Φθορές, επίσης, προκαλούνται από τις έντονες βροχοπτώσεις και πλημμύρες, όπου η φθοροποιός δράση του νερού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί το κυριότερο αίτιο των περισσότερων φυσικών και χημικών μεταβολών στα υλικά (παρ. 2.1.1) [21]. Μέγιστης σημασίας είναι η οργάνωση ενός σχεδίου αντιμετώπισης καταστροφών, λόγω της σεισμικότητας του Ελλαδικού χώρου.

Τα περισσότερα μνημεία, καθώς και η φέρουσα διακόσμηση τους, όπως οι τοιχογραφίες και τα ψηφιδωτά, είναι κατασκευασμένα από ανομοιογενή υλικά, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά στις μηχανικές φορτίσεις ανάλογα με το μέτρο ελαστικότητάς τους και τις αντοχές τους. Σε περιπτώσεις σεισμού η αστοχία στα κονιάματα είναι πολύ πιθανή, καθώς είναι κατ' εξοχήν ψαθυρά και έχουν μειωμένες αντοχές σε σχέση με τα άλλα δομικά υλικά. Έχει παρατηρηθεί ότι ακόμα και σε μικρής έντασης σεισμούς, έχουν προκληθεί σημαντικές φθορές στα διακοσμητικά στοιχεία ενός μνημείου, χωρίς να επηρεαστεί ο φέρον οργανισμός [22].

2.1.9 Επιπτώσεις μηχανισμών φθοράς σε ψηφιδωτά δάπεδα

Η επίδραση των διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων φθοράς που αναφέρθηκαν και οι χημικές δράσεις που συνεπάγονται, συντελούν στη φθορά του κονιάματος και στην απώλεια συνοχής της στρωματογραφίας των ψηφιδωτών. Ειδικότερα, η άργιλος, που μπορεί να περιέχεται στα κονιάματα, απορροφά υγρασία και διογκώνεται ασκώντας μηχανικές τάσεις στα περιφερειακά της υλικά. Η γύψος και η υδράσβεστος αλλοιώνονται, ενώ στα ασβεστοκονιάματα – γυψοκονιάματα, που έγινε επί τόπου σβέση, μπορεί να έχει παραμείνει οξείδιο του ασβεστίου, εάν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, το οποίο μετατρέπεται σε $Ca(OH)_2$ ή $CaCO_3$, αφού έχει σκληρυνθεί το κονίαμα, με συνέπεια την εισαγωγή εσωτερικών τάσεων [1]. Επίσης, η παρουσία υγρασίας και το αλκαλικό περιβάλλον που επικρατεί στους πόρους του κονιάματος, συντελούν στη σήψη των οργανικών ινών και του άχυρου που, σε πολλές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνταν ως οπλισμός ενίσχυσης στα αρχαία κονιάματα, με άμεση επίδραση στην ανθεκτικότητά τους. Η προσβολή του πλέγματος του γυαλιού των ψηφίδων, δημιουργεί μικρορωγμές, ρηγματώσεις, χρωματική αλλοίωση, εκδήλωση βελονισμών κ.α. [1]. Συμπερασματικά, η δράση της υγρασίας σε συνάρτηση με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες οδηγεί στην απομείωση των υλικών στο χρόνο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών στο υπόστρωμα, εξάρσεων ή/και καθιζήσεων της ψηφιδωτής επιφάνειας, την αποκόλληση ψηφίδων, ή και ολόκληρων τμημάτων της ψηφιδωτής επιφάνειας, όπως φαίνεται στη Εικόνα 2.1 [23].

Ακόμα, στους παράγοντες που συμμετέχουν στη φθορά των ψηφιδωτών θα πρέπει να συμπεριληφθούν οι λανθασμένες επεμβάσεις συντήρησης. Για παράδειγμα, στο παρελθόν σε πολλές επεμβάσεις συντήρησης ψηφιδωτών δαπέδων έχει χρησιμοποιηθεί τσιμεντοκονίαμα και μεταλλικοί οπλισμοί [1]. Η χρήση τσιμέντου ως υλικό αποκατάστασης ζημιών διαταράσσει τη μηχανική συμπεριφορά των ιστορικών δομικών υλικών, με κίνδυνο εμφάνισης διαφορετικών φορτίσεων σε τμήματα της δομής τους, που συνεπάγονται τελικά αστοχία της κατασκευής. Ειδικότερα, τα κονιάματα τσιμέντου παρουσιάζουν διαφορετικές φυσικο-μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα ιστορικά κονιάματα. Έχουν μεγαλύτερη συνεκτικότητα και θλιπτική αντοχή, γεγονός που τα καθιστά ισχυρά στη συνδετική τους ικανότητα και είναι άκαμπτα. Παρουσιάζουν, επίσης, συρρίκνωση κατά την πήξη και σκλήρυνσή τους, συμβάλλοντας στην αύξηση του πορώδους και έχουν, διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής. Όλες αυτές οι διαφοροποιήσεις έχουν ως αποτέλεσμα να ασκούνται μηχανικές τάσεις στα αρχικά υλικά, που είναι ιδιαίτερα έντονες σε κύκλους θέρμανσης–ψύξης και μπορεί να

οδηγήσουν σε ρηγματώσεις και σταδιακά σε κατάρρευση της κατασκευής. Επίσης, η χρήση μεταλλικών οπλισμών ενίσχυσης στα υποστρώματα των ψηφιδωτών έχουν προκαλέσει σημαντικές φθορές στα ιστορικά κονιάματα και στις ψηφίδες (Εικόνα 2.2) [24]. Τα μέταλλα και ιδιαίτερα ο χάλυβας οξειδώνονται διαχρονικά, καθώς το pH του κονιάματος μειώνεται σταδιακά κάτω από 10, εξ αιτίας της απόπλυσης του. Τα προϊόντα οξείδωσης που δημιουργούνται στην επιφάνεια του μέταλλου έχουν πολύ μεγαλύτερο όγκο, με συνέπεια να προκαλούν ισχυρές μηχανικές τάσεις στα γειτονικά υλικά με αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση τους. Τα προϊόντα της οξειδωμένης επιφάνειας μεταφέρονται, επίσης, μέσω της υγρασίας στην ψηφιδωτή επιφάνεια και προκαλούν χρωματικές αλλοιώσεις [12, 24].

(α)

(β)

Εικόνα 2.1: Απώλειες και εξάρσεις της ψηφιδωτής επιφάνειας (α) και (β). Τα κενά μεταξύ των στρωμάτων του ψηφιδωτού δεν είναι πάντα ορατά στην επιφάνεια του.

Εικόνα 2.2: Φθαρμένος μεταλλικός οπλισμός που φέρει η νέα υποδομή του ψηφιδωτού.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι μηχανισμοί φθοράς μπορεί να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις τόσο στην δομική κατασκευή ενός ψηφιδωτού δαπέδου (υπόστρωμα) όσο και στην ψηφοθετημένη επιφάνεια. Και στις δύο περιπτώσεις, οι επιπτώσεις έχουν άμεσο αντίκτυπο στην αισθητική αλλοίωση του μνημείου, αλλά και στην επιτάχυνση της καταστροφής του. Οι συνήθεις επιπτώσεις φθοράς συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Διάλυση, μεταφορά, ενυδάτωση και απόθεση των διαλυτών αλάτων στο υλικό, με αποτέλεσμα την μείωση της αισθητικής αξίας της ψηφιδωτής επιφανείας.

- Η πήξη του νερού, όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 0°C, οδηγεί σε δημιουργία εσωτερικών τάσεων, ρηγματώσεων και αποσάθρωση των υλικών.
- Ανάπτυξη βιο-διάβρωσης από τους ανώτερους φυτικούς οργανισμούς, που προσβάλλει τα κονιάματα προκαλώντας χημικές μετατροπές, και άσκηση μηχανικών τάσεων.
- Οι κύκλοι ύγρανσης – ξήρανσης προκαλούν διαστολή-συστολή και η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων οδηγεί σε ρηγματώσεις και πιθανή αποκόλληση, ή υποχώρηση τμημάτων της ψηφιδωτής επιφάνειας.
- Η υγρασία συμμετέχει στις διάφορες χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού, επιτείνοντας τα φαινόμενα φθοράς.

2.2 Μέθοδοι και υλικά συντήρησης ψηφιδωτών δαπέδων

Τα ψηφιδωτά κατά την αρχαιότητα εκτός από διακοσμητικό είχαν και χρηστικό ρόλο, καθώς αποτελούσαν τμήματα ενός αρχιτεκτονικού πλαισίου. Η καθημερινή χρήση τους οδηγούσε σε μικρής ή μεγάλης έκτασης φθορές. Επομένως, η έναρξη της συντήρησης τους τοποθετείται στους αρχαίους χρόνους. Παρά το γεγονός ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί μεγάλης έκτασης έρευνα όσον αφορά στην συντήρηση των ψηφιδωτών κατά την αρχαιότητα, έχουν παρουσιαστεί παραδείγματα επεμβάσεων σε μεγάλα ψηφιδωτά σύνολα, όπως στη Δήλο, στην Αντιόχεια, στην Τυνησία, στην Ιορδανία και στην Κύπρο. Εκτενής μελέτη των παραπάνω ψηφιδωτών συνόλων έδειξε, ότι οι αρχαίες επεμβάσεις ποίκιλλαν όσον αφορά στον χαρακτήρα τους. Αυτές διαχωρίζονται συνοπτικά σε επεμβάσεις με χαρακτήρα επιδιορθωτικό, διακοσμητικό και ιδεολογικό [25].

Η συντήρηση αρχαιοτήτων και έργων τέχνης, όπως επίσης, η οριοθέτηση των αρχών και των μεθόδων συντήρησης αποτελεί ένα σχετικά νέο διεπιστημονικό πεδίο. Αυτό έχει ως συνέπεια, τα τελευταία 100 χρόνια να έχουν γίνει διάφορες αυθαιρεσίες, όσον αφορά στα υλικά και στις μεθόδους συντήρησης των μνημείων και, στην προκειμένη περίπτωση, των ψηφιδωτών δαπέδων. Πολλά ψηφιδωτά δάπεδα έχουν αρθεί και τοποθετηθεί σε νέα υποστρώματα, που, συνήθως, είναι κατασκευασμένα με ακατάλληλα υλικά και έχουν μεταφερθεί σε νέες τοποθεσίες και χώρους αποθήκευσης (Εικόνα 2.3) [26].

Εικόνα 2.3: Αποσπασμένα τμήματα ψηφιδωτού δαπέδου σε αποθηκευτικό χώρο.

Τέτοιες συλλογές δεν έχουν πλήρως απογραφεί στον ελλαδικό χώρο. Η έλλειψη της κατάλληλης τεκμηρίωσης και συχνά οι ακατάλληλες συνθήκες έκθεσης επιφέρουν την επιτάχυνση των διαδικασιών φθοράς, η οποία οδηγεί σταδιακά στην απώλεια τους
Σήμερα, οι βασικές διαδικασίες συντήρησης καθορίζονται από διεθνείς οργανισμούς, όπως International Council of Museums (ICOM), International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (IIC), American Institute for Conservation (AIC), Canadian Institute for Conservation (CIC) κ.ά.. Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν την τεχνική εξέταση, τη συντήρηση και την αποκατάσταση. Η συντήρηση μπορεί να διαχωριστεί σε προληπτική και επεμβατική. Αυτή αποσκοπεί στον περιορισμό των εξωτερικών περιβαλλοντικών παραγόντων φθοράς και στην εξυγίανση των διαβρωμένων τμημάτων, με σκοπό την επιβράδυνση της εξέλιξης του φαινομένου της φθοράς. Η οποιαδήποτε επέμβαση πρέπει να συμβαδίζει με τη γενικότερη δεοντολογία των επεμβάσεων συντήρησης, όπως αυτή διαμορφώθηκε μέσω των διεθνών Χαρτών και Συμβάσεων και τροποποιήθηκε μέσα από διεθνή συνέδρια και συναντήσεις [27, 28].

2.2.1 Διάγνωση και τεκμηρίωση

Το πρώτο στάδιο συντήρησης είναι αυτό της διάγνωσης, που περιλαμβάνει την τεκμηρίωση της τεχνολογίας και της τεχνικής κατασκευής του ψηφιδωτού και της υφιστάμενης κατάστασής του. Η μελέτη των ιστορικών αρχείων προσφέρει σημαντικές πληροφορίες, όσον αφορά στην προέλευση των υλικών και των τεχνικών κατασκευής, καθώς και των προγενέστερων επεμβάσεων συντήρησης. Ακολουθεί η επί τόπου παρατήρηση, όπου στο στάδιο αυτό επιχειρείται η καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών, της φθοράς των υλικών και η συσχέτισή της με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Τα στοιχεία αυτά συλλέγονται με μακροσκοπικές παρατηρήσεις, επιτόπιες μετρήσεις των φαινομένων διάβρωσης στο μνημείο και στην ευρύτερη περιοχή του και καταγράφονται με φωτογραφικά, γραφικά, ή και οπτικοακουστικά μέσα [29, 30].
Η εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων ανάλυσης, που πραγματοποιούν εξέταση των επιφανειών επί τόπου χωρίς τη λήψη δειγμάτων, αποτελεί το μοναδικό και απαραίτητο εργαλείο για την χαρτογράφηση των μικροκλιματικών και τοποχημικών επιπτώσεων του περιβάλλοντος στην πραγματική κλίμακα της εξεταζόμενης επιφάνειας. Η τεχνικές αυτές παρέχουν τη δυνατότητα καταγραφής και επεξεργασίας οπτικών πληροφοριών που λαμβάνονται από το μνημείο, και τη μετατροπή τους βάσει φυσικοχημικών κριτηρίων. Έτσι, καθίσταται εφικτή η παρακολούθηση και ο έλεγχος της φθοράς, αλλά και της αποτελεσματικότητας της προστασίας των υλικών, και της κατάλληλης διαχείρισης του περιβάλλοντος στο χρόνο. Κάποιες από τις μη καταστρεπτικές μεθόδους, που είναι κατάλληλες για την παρατήρηση μνημείων είναι η Θερμογραφία Υπερύθρου (IRT) η Υπερηχοσκόπηση (US) και το Γεωραντάρ (GPR) [31, 32, 33, 34].
Όταν απαιτείται διεύρυνση των ερευνητικών αναγκών, ακολουθεί η λήψη δειγμάτων και η μελέτη τους στο εργαστήριο με αναλυτικές μεθόδους, οι οποίες παρέχουν ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, που θα εφαρμοστεί, εξαρτάται από τις πληροφορίες στις οποίες αποσκοπεί η διερεύνηση. Έτσι, κατάλληλες μέθοδοι που παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την ορυκτολογική σύνθεση, τη μορφολογία, την κρυσταλλογραφία και τη μικροδομή στα κονιάματα των ψηφιδωτών

είναι το Οπτικό Μικροσκόπιο (ΟΜ), η Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD), η Φασματοσκοπία Υπέρυθρης Ακτινοβολίας με Μετασχηματισμό Fourier (FTIR), η Ηλεκτρονιακή Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) και η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διαπερατότητας (TEM). Συμπληρωματικά, χρήσιμα ποσοτικά δεδομένα μπορεί να ληφθούν από τις Θερμικές Μεθόδους Ανάλυσης (DTA/TG, TG/DTG, DSC, TMA), όπως επίσης και από τις κλασσικές μεθόδους χημικής ανάλυσης [35].
Αφού συγκεντρωθούν τα απαραίτητα δεδομένα από τις μετρήσεις σχετικά με τα υλικά του μνημείου και τη φθορά τους, ακολουθεί συσχέτιση τους με τα δεδομένα του περιβάλλοντος. Η συσχέτιση αυτή δίνει τα πλήρη στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να σχεδιαστεί η εκάστοτε πλέον κατάλληλη επέμβαση συντήρησης.

2.2.2 Προληπτική συντήρηση

Η προληπτική συντήρηση συνίσταται σε έμμεσες επεμβάσεις, όπως η επίτευξη των βέλτιστων περιβαλλοντικών συνθηκών, και αποσκοπεί στην επιβράδυνση και πρόληψη των φθορών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί στα ψηφιδωτά δάπεδα, ανάλογα με την περίπτωση, με περιμετρικά έργα αποστράγγισης των υδάτων, κατασκευή αγωγών απορροής, στέγαση του χώρου, ορθή διαχείριση της επισκεψιμότητας, κ.α. [36]. Όταν δεν είναι δυνατή η λήψη των κατάλληλων μέτρων, προτείνεται η κατάχωση του ψηφιδωτού ως προσωρινή λύση (Εικόνα 2.4) [37, 38].

Εικόνα 2.4: Κατάχωση ψηφιδωτών δαπέδων στον αρχαιολογικό χώρο.

2.2.3 Επεμβάσεις συντήρησης

Οι επεμβάσεις συντήρησης που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ένα ψηφιδωτό δάπεδο, διακρίνονται σε αυτές που γίνονται επί τόπου (in situ) και σε εκείνες που γίνονται στο εργαστήριο, όταν το ψηφιδωτό αποσπαστεί με σκοπό να τοποθετηθεί σε νέο υπόστρωμα. Αφού τα ψηφιδωτά αποτελούν μέρος της αρχιτεκτονικής δομής ενός κτηρίου, είναι προτιμότερο να συντηρούνται στη θέση τους και να αποφεύγεται η απόσπαση και μεταφορά τους. Μόνο όταν αυτό δεν είναι δυνατόν, επιλέγεται η μέθοδος της πλήρους απομάκρυνσής τους, αποκατάστασης του κονιάματος και επανατοποθέτησης τους. Οι επεμβάσεις που μπορεί να πραγματοποιηθούν σε ένα ψηφιδωτό (in situ) είναι επεμβάσεις σωστικού χαρακτήρα, όπως, ο καθαρισμός, η στερέωση και ενίσχυση της επιφάνειας και της δομής του υποστρώματος και η αισθητική αποκατάσταση. Αναλυτικότερα, οι επεμβάσεις σωστικού χαρακτήρα,

περιλαμβάνουν την προστερέωση χαλαρών τμημάτων, ώστε να αποφεύγεται η απώλεια αυθεντικού υλικού ή/και απόσπαση ετοιμόρροπων τμημάτων [39, 40].
Ο καθαρισμός της επιφάνειας αποσκοπεί στην απομάκρυνση των επιφανειακών επικαθίσεων και άλλων προϊόντων φθοράς. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι μηχανικοί, φυσικοί ή χημικοί. Τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή τους, είναι να μην προκαλούν άμεση ή έμμεση φθορά στα υλικά κατασκευής των ψηφίδων, να μην δημιουργούν επιβλαβή παραπροϊόντα και να είναι ελεγχόμενες οι ταχύτητές τους [12]. Στο τελικό αποτέλεσμα, πρέπει να διατηρείται η αυθεντική πατίνα της επιφάνειας. Η επέμβαση της στερέωσης, αναφέρεται στην επιφάνεια ή/και στο υπόστρωμα του ψηφιδωτού. Αυτή αποσκοπεί στην αποκατάσταση της συνοχής των σωματιδίων του διαβρωμένου υλικού, στην ενίσχυση της δομής του και στην περιμετρική στήριξη του (Εικόνα 2.5) [40].

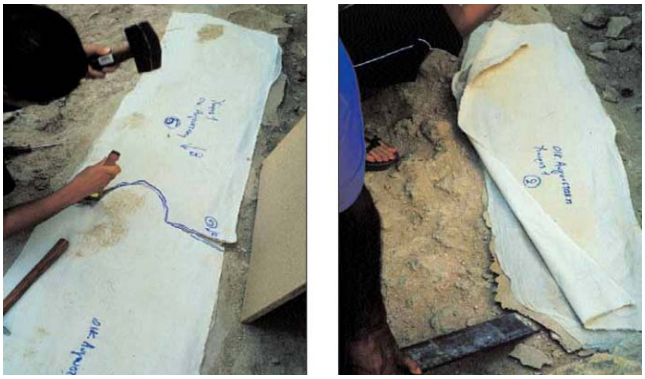
Εικόνα 2.5: Επέμβαση μηχανικού καθαρισμού επιφάνειας του ψηφιδωτού δαπέδου.

Για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επέμβασης, θα πρέπει να μελετηθεί ο μηχανισμός δράσης του κάθε παράγοντα φθοράς και οι ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Στο παρελθόν είχαν χρησιμοποιηθεί πλήθος διαφορετικών μεθόδων και υλικών για την στερέωση τόσο της επιφάνειας, όσο και του υποστρώματος ψηφιδωτών δαπέδων. Σήμερα πλέον, προτείνεται η εφαρμογή κονιαμάτων αποκατάστασης για την επανατοποθέτηση των αποσπασμένων ψηφίδων της επιφάνειας, την πλήρωση ρωγμών και κενών, καθώς και για την ενίσχυση του υποστρώματος (Εικόνα 2.6) Ωστόσο, συχνά η ελλιπής διερεύνηση των ιδιοτήτων του αρχαίου υλικού κατασκευής έχει ως αποτέλεσμα την παρασκευή συνθέσεων κονιαμάτων, που δεν πληρούν τις προδιαγραφές και, κατά συνέπεια, η εφαρμογή τους μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία τόσο το νέου, όσο και του ιστορικού κονιάματος [40].

Εικόνα 2.6: Ενίσχυση-στερέωση, περιμετρικά των ακμών του ψηφιδωτού με κονίαμα.

2.2.3.1 Απόσπαση ψηφιδωτού δαπέδου

Το ψηφιδωτό δάπεδο μπορεί να αποσπαστεί είτε τμηματικά, ή ολόκληρο ως ενιαία επιφάνεια. Η πρώτη περίπτωση, είναι η επικρατέστερη σήμερα, καθώς είναι πιο ελεγχόμενη και ασφαλέστερη σε σχέση με την δεύτερη. Κατά τη διαδικασία αυτή, αρχικά, πραγματοποιείται πλήρης τεκμηρίωση της επιφάνειας και της θέσης του ψηφιδωτού. Ακολουθεί ο προγραμματισμός του διαχωρισμού του σε τμήματα, ο οποίος αποτυπώνεται σχεδιαστικά. Η επιφάνεια καθαρίζεται και στερεώνονται οι σαθρές περιοχές προς αποφυγή απώλειας ιστορικού υλικού. Ακολουθεί η προστασία των παρυφών των αρμών με επικόλληση γάζας, επικόλληση υφασμάτων (τουλπάνι, καμπότο) στην επιφάνεια, σημείωση των σημείων επαφής και των αποστάσεων σε κάθε τεμάχιο, αρίθμηση των τεμαχίων και αποκόλληση με τη χρήση εργαλείων (Εικόνα 2.7) [40].



Εικόνα 2.7: Άποψη τμηματικής απόσπασης ψηφιδωτού δαπέδου.

Τέλος, τα τμήματα του ψηφιδωτού τοποθετούνται σε ξύλινες επιφάνειες οι οποίες αριθμούνται. Στην δεύτερη περίπτωση, το ψηφιδωτό αποσπάται ενιαία (Εικόνα 2.8). Η προετοιμασία της επιφάνειας είναι ίδια με την πρώτη περίπτωση. Η απόσπαση γίνεται με τη χρήση ξύλινου κυλίνδρου. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά δύσκολη και πολλές φορές μη πρακτική, αφού απαιτούνται κατάλληλα διαμορφωμένοι χώροι εργασίας για την υλοποίησή της [41, 42, 43].

Εικόνα 2.8: Άποψη ενιαίας απόσπασης ψηφιδωτού δαπέδου με τη χρήση κυλίνδρου.

2.2.3.2 Επανατοποθέτηση του ψηφιδωτού δαπέδου

Τα αποσπασμένα ψηφιδωτά, συνήθως, φυλάσσονται προσωρινά σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους και επανατοποθετούνται σε νέο υπόστρωμα, είτε στην αρχική τους θέση, ή σε εξωτερικό χώρο έκθεσης, είτε εντός του Μουσείου (Εικόνα 2.9). Η επανατοποθέτηση του ψηφιδωτού σε εξωτερικό χώρο μπορεί να γίνει απευθείας στη νέα υποδομή, ή τα τμήματα να τοποθετηθούν σε φορητές κατασκευές, οι οποίες κατόπιν θα τοποθετηθούν επί τόπου (in situ).

Εικόνα 2.9: Άποψή ψηφιδωτών δαπέδου στο Νέο Αρχαιολογικό Μουσείο Πατρών.

Ειδικότερα, η απευθείας επανατοποθέτηση περιλαμβάνει τις ακόλουθες, κατά σειρά, διαδικασίες: καθαρισμό της πίσω πλευράς των αποσπασμένων τμημάτων στο εργαστήριο, κατασκευή του υποστρώματος, τοποθέτηση των αριθμημένων τεμαχίων πάνω σε νέο κονίαμα, αφαίρεση των υφασμάτων επικάλυψης, επανατοποθέτηση των αρμών τεμαχισμού και συντήρηση της επιφάνειας. Η κατασκευή του κονιάματος υποδομής πρέπει να βασίζεται σε σχεδιασμό, που θα γίνει μετά από τη μελέτη του αρχικού κονιάματος της στρωματογραφίας του ψηφιδωτού, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του περιβάλλοντος έκθεσης του. Η τοποθέτηση των ψηφιδωτών τμημάτων σε φορητές κατασκευές γίνεται στο εργαστήριο. Τα υλικά και οι μέθοδοι ποικίλουν, όμως, η πιο συνηθισμένη είναι η χρήση πλαισίων αλουμινίου (Εικόνα 2.10), πλέγματος αλουμινίου, ή πάνελ από κυψέλες αλουμινίου με κονίαμα [44, 45, 46]. Η συμπεριφορά των κατασκευών σε εξωτερικούς χώρους, όπου οι συνθήκες περιβάλλοντος δεν είναι ελεγχόμενες, δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς μέχρι σήμερα [47].

Εικόνα 2.10: Μεθοδολογία κατασκευής φορητού πλαισίου υποδοχής ψηφιδωτού με αλουμίνιο και κονίαμα.

2.2.4 Υλικά και τεχνικές συντήρησης

Η επιλογή των υλικών συντήρησης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του διαβρωμένου ιστορικού υλικού, ο βαθμός διάβρωσής του, το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται, η έκταση που θα πρέπει να συντηρηθεί και τέλος, η ιστορική και καλλιτεχνική του αξία. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη συντήρηση των ψηφιδωτών δαπέδων έχουν διερευνηθεί, κυρίως, για να εφαρμοστούν στη συντήρηση λίθινων δομικών στοιχείων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ψηφιδωτό δάπεδο αποτελεί μια σύνθετη κατασκευή, όπου το μεγαλύτερο μέρος της βρίσκεται στο έδαφος, κρίνεται απαραίτητη η θέσπιση κριτηρίων επιλογής υλικών και μεθόδων συντήρησης, που θα αφορούν αποκλειστικά στη συντήρηση του. Στις παραγράφους που ακολουθούν, αναφέρονται τα υλικά που εφαρμόζονται στη στερέωση και την αποκατάσταση του υποστρώματος των ψηφιδωτών.

2.2.4.1 Υλικά στερέωσης και αποκατάστασης του υποστρώματος

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη στερέωση λίθινων επιφανειών έχουν εφαρμοστεί κατά περίπτωση και στη στερέωση της επιφάνειας των δαπέδων. Είναι κυρίως υλικά με βάση το υδροξείδιο του ασβεστίου ($Ca(OH)_2$), με βάση το πυρίτιο (πυριτικοί εστέρες και σιλάνια) και ακρυλικές ρητίνες. Η δράση των προαναφερθέντων στερεωτικών έχει επαρκώς διερευνηθεί στις λίθινες επιφάνειες [1, 48], ωστόσο, στην περίπτωση στερέωσης της επιφάνειας του κονιάματος των ψηφιδωτών δαπέδων, δεν έχει αποτιμηθεί και καταγραφεί σε βάθος χρόνου η συμπεριφορά τους.
Η επέμβαση της στερέωσης είναι μια διαδικασία μη αναστρέψιμη, για αυτό το λόγο, προτείνεται να αποφεύγεται σε περιπτώσεις μνημείων που εκτίθενται σε εξωτερικό χώρο. Στην περίπτωση που κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή της επέμβασης, θα πρέπει να γίνεται αφού το υλικό έχει διερευνηθεί στο εργαστήριο, εφαρμοστεί πιλοτικά στο μνημείο και έχει αποτιμηθεί περιοδικά σε βάθος χρόνου.
Οι τεχνικές επεμβάσεων αποκατάστασης του υποστρώματος των ψηφιδωτών δαπέδων μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Η διάκριση γίνεται ανάλογα με το ποσοστό ενσωμάτωσης του υλικού αποκατάστασης στο ιστορικό και την ευκολία, ή δυσκολία αφαίρεσής του από αυτό. Ήπιες επεμβάσεις χαρακτηρίζονται εκείνες που μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν. Αυτές είναι η περιμετρική στερέωση των ακμών του δαπέδου, η σφράγιση ρωγμών και η πλήρωση επιφανειακών κενών. Δραστικές χαρακτηρίζονται οι επεμβάσεις με υψηλό ποσοστό ενσωμάτωσης στον υφιστάμενο φορέα, όπως η επανατοποθέτηση τμημάτων, ή ολόκληρου του ψηφιδωτού σε νέο κονίαμα και η πλήρωση εσωτερικών κενών με λεπτόρρευστο κονίαμα (ένεμα).
Για την στερέωση του υποστρώματος των ψηφιδωτών τα υλικά που είχαν χρησιμοποιηθεί μέχρι το 1990 ήταν ρητίνες (εποξιδικές, ακρυλικές και βινυλικές) και κονιάματα με βάση το τσιμέντο [49]. Τα υλικά αυτά θεωρούνται πλέον ακατάλληλα, καθώς οι φυσικοχημικές και μηχανικές τους ιδιότητες είναι πολύ διαφορετικές από εκείνες των ιστορικών κονιαμάτων. Τώρα πλέον, στην συντήρηση μνημείων εφαρμόζονται κυρίως κονιάματα με βάση την υδράσβεστο, ή την υδραυλική άσβεστο.

Η παρασκευή και εφαρμογή κονιαμάτων για την επισκευή και ενίσχυση κενών και ρωγμών στα ψηφιδωτά δάπεδα, θα πρέπει να πληροί τις κατάλληλες προδιαγραφές ως προς τα φυσικοχημικά, μηχανικά, αισθητικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Δηλαδή, να επιτυγχάνεται η στερέωση της πάσχουσας περιοχής, χωρίς να δημιουργεί δευτερογενείς βλαπτικές επιπτώσεις στη συνολική συμπεριφορά της, εξασφαλίζοντας, έτσι, την αρχή της επανεπεμβασιμότητας. Για την ταυτόχρονη ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων είναι αναγκαία η συνολική θεώρηση του προβλήματος της φθοράς του υλικού, ώστε να γίνει η επιλογή των βέλτιστων συνθέσεων κονιαμάτων για την κάθε εφαρμογή λαμβάνοντας υπόψη τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την συμπεριφορά του κονιάματος, όπως είναι η φύση των πρώτων υλών (χημική σύσταση κοκκομετρία κτλ), οι φυσικοχημικές και μηχανικές του ιδιότητες [1, 50].

2.3 Σημερινή κατάσταση διατήρησης και διαχείρισης των ψηφιδωτών δαπέδων στην Ελλάδα

Κατά το παρελθόν, σε αρκετές περιπτώσεις ψηφιδωτών δαπέδων, απουσιάζει από τη μεθοδολογία συντήρησής τους ο περιοδικός έλεγχος και η τεκμηρίωση της φθοράς του υποστρώματός τους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, συχνά, η φθορά να αντιμετωπίζεται με δραστικές επεμβάσεις συντηρήσεις όταν πλέον είχε φτάσει σε προχωρημένο στάδιο. Έτσι, ένα μεγάλο μέρος των ιστορικών κονιαμάτων έχει χαθεί μέσω της τμηματικής ή/και καθολικής απόσπασης των ψηφιδωτών. Λόγω του μεγάλου κόστους της επέμβασης αποκατάστασης του νέου υποστρώματος, ένας μεγάλος αριθμός ψηφιδωτών δαπέδων έχει αρθεί και μεταφερθεί σε αποθηκευτικούς χώρους όπου και παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτές οι συλλογές ψηφιδωτών δεν έχουν απογραφεί πλήρως στον ελλαδικό χώρο [51]. Η έλλειψη της κατάλληλης τεκμηρίωσης και συχνά οι ακατάλληλες συνθήκες φύλαξης επιτείνουν τις διαδικασίες φθοράς και οδηγούν σταδιακά στην απώλεια τους.

Από τις παραπάνω παρατηρήσεις συνάγεται, ότι η μεθοδολογία συντήρησης των ψηφιδωτών δαπέδων που ακολουθήθηκε κατά το παρελθόν, δηλαδή, η απόσπασή τους με σκοπό τη συντήρηση και επανατοποθέτησή τους σε νέο υπόστρωμα πρέπει να επανεξεταστεί. Επομένως, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη προστασίας των ψηφιδωτών επί τόπου, με στόχο να προλαμβάνεται η φθορά τους, όταν αυτή βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο. Αυτό επιτυγχάνεται με την πραγματοποίηση συστηματικού ελέγχου στον χώρο του ψηφιδωτού δαπέδου, με τις κατάλληλες μεθόδους διάγνωσης της φθοράς. Η πρόληψη και αντιμετώπιση της φθοράς πρέπει να αποσκοπεί στον περιορισμό του εκάστοτε παράγοντα φθοράς τους και να γίνεται με μικρής έκτασης επεμβάσεις συντήρησης, με υλικά που να προσομοιάζουν στα αυθεντικά. Η απόσπαση και μεταφορά του ψηφιδωτού δαπέδου θα πρέπει να αποτελεί, πλέον, την έσχατη λύση.

Όσον αφορά στις περιπτώσεις αποσπασμένων ψηφιδωτών, που το αυθεντικό τους υπόστρωμα έχει καταστραφεί, πρέπει να διερευνάται η σύνθεση του κονιάματος ψηφιδωτών δαπέδων που ανήκουν στην ίδια εποχή και περιοχή, ώστε να παρασκευάζεται υπόστρωμα με υλικά παρόμοια με αυτά του αρχικού τους.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2

1. Θ. Ν. Σκουλικίδης, *Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων,* Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο (2000).

2. K. V. Balen, E. E Toumbakari, M. T. Blanco-Varela, *Environmental deterioration of ancient and modern hydraulic mortars EDAMM*, European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Research report No 15 Project No ENV4-CT95-0096, Brussels, (2002), p. 1-30.

3. M. Menicou, C. Fiori, M. Macciarola, *Examples of deterioration following preservation works on mosaics in situ* , in Mosaics make a site: the conservation in situ of mosaics on archaeological sites: VIth conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, Nicosia, Cyprus, 24-28 October 1996 Michaelides D. (ed.), International Committee for the Conservation of Mosaics, Rome (2003), p. 225-233.

4. E**.** Bernard, G. H William, *Evaluating Mortar Deterioration*, APT Bulletin Vol. 19, No. 4, Association for Preservation Technology International (APT), (1987), p. 8-10.

5. A. Moncmanova, *Environmental Deterioration of Materials*, WIT Press, England, (2007), p. 1- 21.

6. E. Doehne and E. Sebastian, *How does sodium sulfate crystallize. Imlication for the decay and testing of building materials*, Cem Concr Res, 30, (2000). p. 1527-1534.

7. Zezza, F., Koui, M., Cheilakou, E. *Sea salt dispersion in stream valleys and stone decay.* In Proc. the 7th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Orléans, France, (2007), p. 373-384.

8. A. Arnoldm and K. Zehnder, *Salt weathering on monuments*. Advanced workshop. Analytical Methodologies for the Investigation of damaged stones. Pavia (Italy), (1990), p. 14-21.

9. Σ. Τσίμας, *Δομικά υλικά (Τσιμέντο - Ασβέστης - Σκυρόδεμα - Κονιάματα)*, ΕΜΠ, Αθήνα, (2001).

10. H. Kollman, G. Strübel and F. Trost, *Reaction mechanisms in the formation of expansion nuclei in lime-gypsum plasters by ettringite and thaumasite,* Zement-Kalk-Gips, 30, (1977), p. 224-228.

11. T. Ramlochan, P. Zacarias, M.D.A Thomas, R.D. Hooton, *The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature: Part I: Expansive behaviour*, Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 6, (2003), p. 807–814.

12. Θ. Σκουλικίδης, Φθορά κα Προστασία Μαρμάρου και Δομικής Πέτρας Αρχαίων Μνημείων, 3η έκδοση, Αθήνα (1992).

13. M. T. Blanco-Varela, J. Aguilera, F. Puertas, A. Palomo, C. Sabbioni, C. Riontino, G. Zappia, O. Favoni, K. Van Balen, E. E. Toumbakari, *Environmental Effects of SO2 on Hydraulic Mortars*, Proceeding of the International Workshop on Historic Mortars:

Characteristics and tests. Rilem Technical Commitie. University of Paisley, Scotland, (1999), p. 149-159.

14. M. Del Monte and P. Rossi, *Fog and Gypsum crystals on Building Materials*, Atmospheric Environment, 31, (1997), p. 1637-1646.

15. M. T. Blanco-Varela, J. Aguilera, F. Puertas, A. Palomo, C. Sabbioni, C. Riontino, G. Zappia, O. Favoni, K. Van Balen, E. E. Toumbakari, *Thaumasite formation in hydraulic mortars by atmospheric SO2 deposition*, Materiales de Construcción nº 263-264, (2001), p. 109-126.

16. E. P. Burford, M. Fomina and G. M. Gadd., *Fungal involvement in bioweathering and biotransformation of rocks and minerals,* Mineralogical Magazine, V. 67, p. 1127-1155.

17. P. L. Nimis, *Artistic and Historical Monuments: Threatened Ecosystems*, Journal: Frontiers of Life, Part V.IV, Italy, (2001), p. 557-565.

18. X. Ariño, C. Saiz-Jiménez, *Lichen deterioration of consolidants used in the conservation of stone monuments,* Lichenologist 28, (1996), p. 391-394.

19. C. A Crispim, C. C. Gaylarde, *Cyanobacteria and Biodeterioration of Cultural Heritage: A Review*, Microbial Ecology, Volume 49, Issue 1, (2005), p. 1-9.

20. A. B. Abed, M. Demas and T. Roby, *Lessons Learned: Reflecting on the Theory and Practice of Mosaic Conservation,* Proceedings of the 9th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, Hammamet, Tunisia, November 29- December 2005, J. Paul Getty Trust, (2008), p. 9-57, 139-165.

21. C. A. Fletcher, T. Spencer, *Flooding and Environmental Challenges for Venice and its Lagoon State of Knowledge Description*, University of Cambridge, Cambridge, (2009), p. 178-197.

22. Σ. Γκιώση, Μ. Κρινή, Θ. Μαραγκού, Π. Πρόκος, *Σεισμοί και αρχαιότητες, Προληπτικά και πρώτα σωστικά μέτρα*, Διεύθυνση Συντήρησης Αρχαίων και Νεωτέρων μνημείων Υπουργείο Πολιτισμού Γενική Διεύθυνση Αρχαιοτήτων, Αθήνα, (2000), σ. 25-27.

23. The Getty Conservation Institute and the Israel Antiquities Authorities, Mosaics In Situ Project – Illustrated Glossary, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, (2003), p. 5-8.

24. P. Bonicatti, V. Demaret, G. Guichen, S. Inman, P. Johnson, C. Rockwell, F. Selvig, (eds.), *Mosaics No. 1: Deterioration and Conservation*, Proceedings of the 1st Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, 2–5 November 1977, ICCROM, Rome, (1978), p. 3-104.

25. Κ. Μαυρομιχάλη, *Αρχαίες Επεμβάσεις σε Ψηφιδωτά*, Proceedings of the 8th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, 30 October – 3 November Thessalonica 2002, European Centre of Byzantine and Post-Byzantine Monuments, Ephoreia of Byzantine Antiquities of Thessalonica, Thessalonica, (2005), p. 111 - 125.

26. T. Roby, *Overcoming the Crisis in Mosaic Conservation,* Archaeological institute of America, (2010). https://archaeological.org/news/hca/73: 16/9/2014.

27. Commentary on the ICOM-CC Resolution on Terminology for Conservation, Rome, 7-8 March 2008, pp.1-2, http://www.icom-cc.org/54/document/icom-cc-resolution-on-terminology :20/06/2012.

28. J. Jokilehto, *A History of Architectural Conservation*, Butterworth-Heinemann, Oxford, (1999), p. 174-175.

29. C. H. Bakirdsis (Ed.), *Wall and Floor mosaics: Conservation, Maintenance, Presentation*, Proceedings of the 8th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, 30 October – 3 November Thessalonica 2002, European Centre of Byzantine and Post-Byzantine Monuments, Ephoreia of Byzantine Antiquities of Thessalonica, Thessalonica, (2005), p. 187-359.

30. D. Michaelides, *Mosaic No.6: Mosaics make a site' The Conservation in situ of Mosaics on Archaeological Sites'*, Proceedings of the VIth Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, Nicosia Cuprous 1996, ICCM Italy, (2003), p. 123-129.

31. S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, P. Theodorakeas, N.P. Avdelidis, S. Perilli, D. Ambrosini, M. Koui, X. Maldague. *Numerical simulations and advanced thermographic signal processing for the evaluation of the state of conservation of mosaics – First part.* In J. of Engineering Thermophysics, accepted for publication, (2016).

32. S. Sfarra, P. Theodorakeas, C. Ibarra-Castanedo, N. P. Avdelidis, A. Paoletti, D. Paoletti, K. Hrissagis, A. Bendada, M. Koui, X. Maldague, *Importance of integrated results of different non-destructive techniques in order to evaluate defects in panel paintings: the contribution of infrared, optical and ultrasonic techniques*. In Proc. of SPIE 8084, O3A: Optics for Art, Architecture and Archaeology III, 25-26 May 2011, Münich, Germany, art. no. 80840R (2011).

33. S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, P. Theodorakeas, N.P. Avdelidis, A. Paoletti, D. Paoletti, K. Hrissagis, A. Bendada, M. Koui, X. Maldague, *Holographic Interferometry (HI), Active Infrared Thermography (IRT) and Ultrasound Testing (UT) for the nondestructive assessment of esteemed hand-painted ceramic sample panels*. In Proc. of the 6th International Workshop NDT in progress 2011, 10-12 October 2011 Prague,Czech Republic, (2011) CD ROM.

34. . Sfarra, P. Huke, P. Theodorakeas, D. Paoletti, N.P. Avdelidis, D. Ambrosini, R. Klattenhoff, M. Koui, R. B. Bergmann (2011). *Non-Destructive Testing (NDT) Methods used for the Study of Stone Frescoes.* In Proc. of the 6th International Workshop NDT in progress 2011, 10-12 October 2011, Prague, Czech Republic, (2011), CD ROM.

35. Μ. Κουή, *Μέθοδοι και Τεχνικές Ανάλυσης και Χαρακτηρισμού των Υλικών*, σημειώσεις Δ.Π.Μ.Σ ΕΜΠ 'Προστασία Μνημείων', Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Αθήνα, (2005), CD-ROM.

36. S. Michalski, An overall framework for preventive conservation and remedial conservation, ICOM Committee for Conservation 9th Triennial Meeting, Dresden, (1990), p. 589-591.

37. T. Roby, The reburial of mosaics: an overview of materials and practice, in Conservation and Management of Archaeological Sites 6, no 3-4, (2004), p. 229-236.

38. J. Podany, N. Agnew, M. Demas, Preservation of excavated mosaics by reburial: evaluation of some traditional and newly developed materials and techniques, in Fifth conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics: Proceedings, Actas, Faro e Conimbriga 1993, Instituto Português de Museus, (1994), p. 1-19.

39. C. Beloto, Mosaics No. 5 / Mosaicos n ° 5: conservación in situ, Proceedings of the VIth Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, Nicosia Cuprous 1996, ICCM Italy, (2003), p. 123-129.

40. F. Piqué, R. Burch, T. Roby and M. Demas, Learning from the Literature: A Review of Published Works on Mosaic Deterioration and Conservation Treatments, Proceedings of the 9th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics: Lessons Learned: Reflecting on the Theory and Practice of Mosaic Conservation. Hammamet, Tunisia, November 29- December 2005, J. Paul Getty Trust, (2008), p.33-40.

41. Ε. Τερεζάκη, Π. Τριανταφυλλίδης, *Το χρονικό μίας σωστικής ανασκαφής, εργασίες αποκόλλησης ψηφιδωτών δαπέδων οικίας ρωμαϊκών χρόνων στην πόλη της Ρόδου*, Τχ. 106 Αρχαιολογία & Τέχνες, (2008), σ. 96-106.

42. J. M. Cronyn, *The Elements of Archaeological Conservation*, Routledge, Taylor and Francis, London UK, (1990), ed. 2001, p. 124-126.

43. N. Stanley Price (ed.), *Conservation of the Orpheus Mosaic at Paphos, Cyprus*, J. Paul Getty Trust, California (1991), p. 29-35.

44. B. D. Petriaggi, C. D'Angelo, D. Gennari, V. A. Latini, A.E. Turki, M. L. Santarelli, F. Bontempi, S. Arangio, G. Quattrociocchi, M. Zuena, *Innovative materials to restore mosaic pavements of the Roman villa of Silin (Lepcis Magna-Libya)* 12th conference of ICCM October 2014 Sardinia, Italy, At Sardinia, Italy. *(in press)*

45. M. Frankovigny, P. Blanc, M.L. Courboules, *La de-restauration des mosaics de la collection del'antiquite tardive au Musee National de la Belgrade une cooperation Franc'Serbe*, Proceedings of the 10th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics (ICCM) in Palermo (Italy), October 20-26, Regionale Sicilliana, Italy, (2008), p. 681-687.

46. D. Chrysopoulos, E. Anamaterou, *Επανατοποθέτηση Ψηφιδωτού In Situ με τη Μεθοδολογία Φορητών κατασκευών σε Οπλισμένο Κονίαμα,* Proceedings of the 8th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, 30 October - 3 November Thessalonica 2002, European Centre of Byzantine and Post-Byzantine Monuments, Ephoreia of Byzantine Antiquities of Thessalonica, Thessalonica, (2005), p. 203-208.

47. Αικ. Φτίκου, Ν. Τόλης, Ε. Αναματερού, Μ. Δεληπρίμη, *Αποτίμηση υλικών υποστρώματος ψηφιδωτών σε φορητές κατασκευές*, Ημερίδα ΠΕΣΑ 2015, 12 Δεκεμβρίου 2015, CD ROM.

48. M. Favaro, R. Mendichi, F. Ossola, S. Simon, P. Tomasin, P.A. Vigato, Evaluation of

polymers for conservative treatments of outdoor exposed stone monuments. Part II: Photo-oxidative and salt-induced weathering of acrylic-silicone mixtures, Polymer Degradation and stability 92 (2007), p. 335-351.

49. Δ. Χρυσόπουλος, *Το Ψηφιδωτό*, διδακτικές σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος η συντήρηση του ψηφιδωτού, Τμήμα συντήρησης Αρχαιοτήτων και Έργων Τέχνης, ΤΕΙ Αθήνας, σ. 70.

50. K. Van Balen, I. Papayianni, R. Van Hees, L. Binda, A. Wandum, *Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars, Characterization of old mortars with respect to their repair*, Materials and Structures 38, (2005), p. 781-785.

51. S. Chlouveraki, M. Krini, E. Anamaterou, *Surveying as means for the development of a national strategy for the conservation and management of the mosaics of Greece,* ICCM, Morocco 2011, (in press).

Κατάλογος Εικόνων Κεφαλαίου 2

Εικόνα 2.1: A. Livia, E. Bourguignon, and T. Roby, *Technician Training for the Maintenance of in Situ Mosaics* 2011, ed. Los Angeles, CA, Tunis: Getty Conservation Institute, Institut National du Patrimoine, (2013), p. 37. http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/tech_training_english

Εικόνα 2.2: A. Livia, E. Bourguignon, and T. Roby, *Technician Training for the Maintenance of in Situ Mosaics* 2011, ed. Los Angeles, CA, Tunis: Getty Conservation Institute, Institut National du Patrimoine, (2013), p. 52. http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/tech_training_english

Εικόνα 2.3: T. Roby, Overcoming the Crisis in Mosaic Conservation, Archaeological institute of America, (2010). https://archaeological.org/news/hca/73: 16/9/2014.

Εικόνα 2.4: T. Roby, Overcoming the Crisis in Mosaic Conservation, Archaeological institute of America, (2010). https://archaeological.org/news/hca/73: 16/9/2014.

Εικόνα 2.5: 2003 Preliminary Report, Conservation, Consolidation, and the Site at Isthmia: Protection of the Roman Bath. https://isthmia.osu.edu/reports/2003: 17/09/2014

Εικόνα 2.6: The Getty Conservation Institute and the Israel Antiquities Authorities, Mosaics In Situ Project – Illustrated Glossary, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, (2003), p. 5.

Εικόνα 2.7: Ε. Τερεζάκη, Π. Τριανταφυλλίδης, Το χρονικό μίας σωστικής ανασκαφής, εργασίες αποκόλλησης ψηφιδωτών δαπέδων οικίας ρωμαϊκών χρόνων στην πόλη της Ρόδου, Τχ. 106 Αρχαιολογία & Τέχνες, (2008) , σ. 100.

Εικόνα 2.8: The Lod Mosaic at the Met, http://www.archaeology.org.il/news73.html: 17/09/2014

Εικόνα 2.9: Ψηφιδωτά του Νέου Αρχαιολογικού Μουσείου Πατρών, http://www.archaiologia.gr: 17/09/2014

Εικόνα 2.10: Ν. Τόλης, Α. Φτίκου, Ε. Αναματερού, Μ. Δεληπριμη, *Αποτίμηση υλικών υποστρώματος ψηφιδωτών σε φορητές κατασκευές*, Ημερίδα ΠΕΣΑ 2015, (2014), *(προς δημοσίευση)*.

Κεφάλαιο 3

Μη καταστρεπτικός έλεγχος (NDT) ψηφιδωτών δαπέδων, τεχνικές και μεθοδολογία εξέτασης

Μη καταστρεπτικός, ονομάζεται ο έλεγχος που πραγματοποιείται άμεσα (in situ) σε μια επιφάνεια χωρίς να είναι απαραίτητη η λήψη δείγματος. Οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι αποτελούν μέρος του ευρύτερου τεχνικού πεδίου των ποιοτικών ελέγχων, με καθοριστική συμβολή στη διασφάλιση της ποιότητας των υλικών. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται παρέχουν τη δυνατότητα καταγραφής και επεξεργασίας διαφόρων φυσικοχημικών παραμέτρων, μέσω των οποίων επιτρέπουν τον εντοπισμό και παρακολούθηση της φθοράς των υλικών στην πραγματική κλίμακα των αρχιτεκτονικών επιφανειών και, κατ' επέκταση, την αποτελεσματικότερη προστασία και διαχείριση του μνημείου και του περιβάλλοντα χώρου του [1, 2].
Η εφαρμογή των μη καταστρεπτικών τεχνικών σε έργα μεγάλης πολιτιστικής αξίας αποτελεί πολύτιμη λύση για την εξέταση τους, δεδομένου ότι η δειγματοληψία, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι περιορισμένη, ή απαγορευτική. Οι σύγχρονες αρχές και η φιλοσοφία της συντήρησης και προστασίας, απαιτούν ολοκληρωμένη γνώση και τεκμηρίωση των ιδιοτήτων των δομικών υλικών και της φθοράς που παρουσιάζουν [3]. Τα δεδομένα αυτά είναι αναγκαία στοιχεία, για τον προγραμματισμό και την υλοποίηση όλων των επεμβάσεων προστασίας στα ιστορικά μνημεία. Επιπροσθέτως, με την εφαρμογή μη καταστρεπτικών τεχνικών επιτυγχάνεται η εκτίμηση των επιπτώσεων του περιβάλλοντος στα μνημεία, η διαχείριση και ο έλεγχος του οποίου αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στη διατήρηση τους στο χρόνο. Τα συμπεράσματα που εξάγονται σε μία εξέταση είναι συνδυαστικά και προκύπτουν τόσο μεταξύ της εφαρμογής των διαφορετικών μεθόδων, όσο και με την παρατήρηση έμπειρου και επιστημονικά καταρτισμένου προσωπικού [2].
Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές της Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT), του Γεωραντάρ (GPR) και των Μικροσεισμικών Κυμάτων - Ηχούς από Κρούση (Impact Echo), με στόχο τη διερεύνηση εφαρμογής τους σε αρχαία ψηφιδωτά δάπεδα. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο, στις παραγράφους που ακολουθούν, να αναφερθούν ορισμένα βασικά θεωρητικά δεδομένα για τις μεθόδους αυτές.

3.1 Μη καταστρεπτικός έλεγχος με τη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρου (IRT)

Η τεχνική της υπέρυθρης θερμογραφίας μετρά και καταγράφει διαφοροποιήσεις στην εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια ενός σώματος, στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (750 nm έως 1 mm). Το ανακτώμενο αποτέλεσμα από τέτοιου είδους ελέγχων είναι μια θερμική εικόνα (ή θερμογράφημα) σε έγχρωμη ή ασπρόμαυρη μορφή, η οποία αποτυπώνει τυχόν χωρικές μεταβολές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του υπό εξέταση σώματος με διαφορετικές χρωματικές διαβαθμίσεις. Με άλλα λόγια, η ονομασία της θερμογραφίας υπερύθρου φανερώνει ότι η τεχνική αυτή χαρτογραφεί την κατανομή (κατάληξη *–γραφία*) της θερμοκρασίας (πρόθεμα *θερμο*-) στην επιφάνεια του υπό εξέταση στόχου, καθιστώντας έτσι δυνατό τον εντοπισμό μη φυσιολογικών θερμοκρασιακών βαθμίδων, που με τη σειρά τους

αποκαλύπτουν την ύπαρξη επιφανειακών ή/και υποεπιφανειακών ανωμαλιών [4, 5, 6, 7].

Η ευκολία εκτέλεσης ενός θερμογραφικού ελέγχου και η ανάκτηση αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο έχουν καθιερώσει την τεχνική αυτή ως ένα χρήσιμο εργαλείο στους NDT ελέγχούς με βασικά πλεονεκτήματα την εφαρμογή του χωρίς να απαιτείται επαφή με την υπό εξέταση επιφάνεια, τη γρήγορη επιθεώρηση μεγάλων επιφανειών και την αξιοποίησή του σε περιπτώσεις που άλλες NDT τεχνικές δεν μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα, όπως ο εντοπισμός θερμικών γεφυρών σε κτηριακές εγκαταστάσεις [6, 8]. Οι δύο βασικές προσεγγίσεις του θερμογραφικού ελέγχου είναι αυτές της παθητικής και ενεργητικής προσέγγισης αντίστοιχα, των οποίων η μεθοδολογία εκτέλεσης και κάποιες πρακτικές εφαρμογές παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. Στον θερμογραφικό έλεγχο, η γνώση του συντελεστή εκπομπής (ε)[1] ενός υλικού, είναι απαραίτητη όταν στόχος είναι η ανάκτηση δεδομένων θερμοκρασίας από μία μέτρηση. Η ικανότητα των υλικών να εκπέμπουν ακτινοβολία, εξαρτάται από το μήκος κύματος και τη διεύθυνση εκπομπής της ακτινοβολίας. Άλλοι παράγοντες που επίσης επηρεάζουν τον συντελεστή εκπομπής μιας επιφάνειας είναι: η θερμοκρασία του σώματος, η χημική του σύνθεση, η γεωμετρία, και η τραχύτητα της επιφάνειας. Για τον σκοπό αυτό, τιμές του συντελεστή εκπομπής για διαφορετικά σώματα έχουν προσδιοριστεί και μπορούν να ανακτηθούν από τη βιβλιογραφία, ενώ παράλληλα έχουν προταθεί και εφαρμόζονται πειραματικές διαδικασίες προσδιορισμού αυτού στην περίπτωση επιφανειών με άγνωστο συντελεστή [5, 6, 9].

3.1.1 Έλεγχος με θερμογραφία υπερύθρου (IRT)

Ο θερμογραφικός έλεγχος σε μια επιφάνεια είναι δυνατό να γίνει με την παθητική προσέγγιση (passive thermography) ή/και την ενεργητική προσέγγιση (active thermography) [4-6].

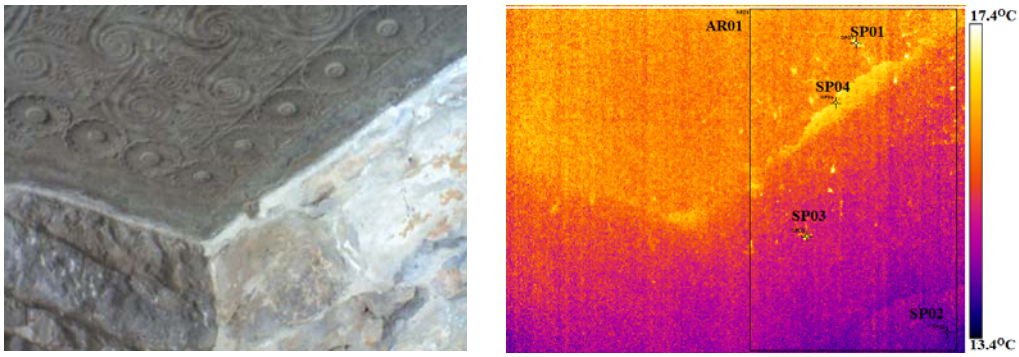
Ο παθητικός θερμογραφικός έλεγχος χρησιμοποιείται ως τεχνική μη επεμβατικού ελέγχου, καταγράφοντας την εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία από την επιφάνεια ενός σώματος, το οποίο βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες χρήσης ή λειτουργίας. Αποσκοπεί, στον εντοπισμό επιφανειακών ή/και υποεπιφανειακών περιοχών ενδιαφέροντος, μέσω των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιακών διαφορών (ΔT) που παρατηρούνται –με τη χρήση μιας θερμογραφικής κάμερας- στην επιφάνεια του υπό εξέταση στόχου. Η παθητική προσέγγιση θερμογραφικού ελέγχου εφαρμόζεται συνήθως σε περιπτώσεις που το εξεταζόμενο σώμα, λόγω ενδογενούς παραγωγής θερμικής ενέργειας, βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία από το περιβάλλον (συνήθως υψηλότερη) και σε περιπτώσεις που η μέτρηση της θερμοκρασίας αποτελεί παράμετρο για την αξιολόγηση της υπάρχουσας κατάστασης ή/και της σωστής λειτουργίας ενός αντικειμένου. Έτσι, η καταγραφή μη φυσιολογικών θερμοκρασιακών κατανομών στην επιφάνεια δύναται να εντοπίσει δυνάμει προβλήματα, αξιολογώντας τη μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας σε σχέση με μια θερμοκρασία αναφοράς [6].

---

[1] Ο λόγος της εκπομπόμενης θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια ενός σώματος προς τη θερμική ακτινοβολία του μελανού σώματος (0-1).

Πλεονέκτημα της εφαρμογής της παθητικής θερμογραφίας στην εξέταση των κατασκευών, αποτελεί η έγκαιρη διάγνωση πιθανών προβλημάτων, με όφελος τη λήψη προληπτικών μέτρων συντήρησης, που, κατά συνέπεια, περιορίζει την επέμβαση και το κόστος επισκευής τους. Επιπλέον, η ανάκτηση των πληροφοριών γίνεται σε πραγματικό χρόνο, επί τόπου χωρίς να απαιτείται επαφή μεταξύ της υπό εξέτασης επιφάνειας και του εξοπλισμού μέτρησης [10]. Αντίθετα, στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται η επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών, οι οποίες πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη και ειδικότερα κατά την εκτέλεση μετρήσεων σε εξωτερικούς χώρους. Για παράδειγμα, βροχή ή υγρασία στην ατμόσφαιρα μπορούν να οδηγήσουν σε πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας του εξεταζόμενου στόχου, επισκιάζοντας έτσι το επιφανειακό θερμοκρασιακό «αποτύπωμα» υποεπιφανειακών ανωμαλιών [11]. Επίσης, η εφαρμογή της παθητικής προσέγγισης παρουσιάζει περιορισμούς σε περιπτώσεις θερμογράφησης επιφανειών αποτελούμενες από υλικά με διαφορετικούς συντελεστές εκπομπής, ενώ η αδυναμία ανάπτυξης θερμοκρασιακών διαφορών κάτω από κανονικές συνθήκες καθιστά τον παθητικό θερμογραφικό έλεγχο ως μια ακατάλληλη τεχνική ελέγχου [4-6].

Η παθητική θερμογραφία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές που η μέτρηση της θερμοκρασίας αποτελεί πληροφοριακή παράμετρο αξιολόγησης της σωστής λειτουργίας του υπό εξέταση στόχου. Ενδεικτικά, η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση βιομηχανικών διεργασιών και στην εξέταση ηλεκτρολογικού και μηχανολογικού εξοπλισμού, αφού σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η χρήση μιας θερμογραφικής κάμερας μπορεί να εντοπίσει μη φυσιολογικές θερμοκρασίες και υπερθερμάνσεις, αποκαλύπτοντας έτσι την ύπαρξη κάποιου προβλήματος. Μία ακόμη εφαρμογή του παθητικού θερμογραφικού ελέγχου είναι αυτή της κτηριακής θερμογραφίας, μέσω της οποίας είναι δυνατός ο εντοπισμός θερμικών γεφυρών, περιοχών με ελλιπή ή κατεστραμμένη μόνωση, ο εντοπισμός περιοχών με υγρασία κ.α..



(α) (β)

Εικόνα 3.1: Εφαρμογή παθητικού θερμογραφικού ελέγχου για τον εντοπισμό υγρασίας σε οροφή ταφικού μνημείου. (α) άποψη εξεταζόμενης περιοχής, (β) αντίστοιχο θερμογράφημα.

Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις μπορούν εύκολα να ανιχνευθούν με την θερμογραφία υπερύθρου αφού είτε αλλάζει τοπικά ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του κελύφους, είτε μεταβάλλεται ο συντελεστής θερμικής αδράνειας (π.χ. με την παρουσία

υγρασίας), συντελώντας στην ανάπτυξη θερμοκρασιακών διαφορών στην επιφάνεια του εξεταζόμενου στοιχείου (Εικόνα 3.1) [6].

Ο ενεργητικός θερμογραφικός έλεγχος, απαιτεί τη χρήση μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας μέσω της οποίας διεγείρεται θερμικά ο υπό εξέταση στόχος. Η ενεργητική προσέγγιση εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που το εξεταζόμενο αντικείμενο βρίσκεται σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας και είτε δεν παρουσιάζει επιφανειακές θερμοκρασιακές μεταβολές στις φυσιολογικές συνθήκες χρήσης και λειτουργίας του, ή αν παρουσιάζει αυτές είναι τόσο μικρές που δεν είναι δυνατό να εντοπιστούν με τον κλασσικό παθητικό έλεγχο. Η αρχή λειτουργίας του ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου βασίζεται στην εφαρμογή μιας διαδικασίας θερμικής διέγερσης για την δημιουργία ενός θερμοκρασιακού δυναμικού, το οποίο με τη σειρά του συμβάλει στη διάχυση της θερμότητας στο εσωτερικό του υπό εξέταση σώματος [5, 6, 12]. Στην περίπτωση ενός ομοιογενούς μέσου η διάχυση της θερμότητας έχει σταθερό ρυθμό, ενώ στην περίπτωση ύπαρξης μιας εσωτερικής ατέλειας, οι διαφορετικές θερμικές της ιδιότητες μπορούν να επιβραδύνουν ή να επιταχύνουν τη διάχυση με αποτέλεσμα την τοπική μεταβολή του αντίστοιχου ρυθμού και την ταυτόχρονη ανάπτυξη θερμοκρασιακών μεταβολών στην επιφάνεια [6].

Βασική προϋπόθεση για την επιτυχή εκτέλεση ενός ενεργητικού θερμογραφικού ελέγχου, είναι η δημιουργία ενός περιβάλλοντος ομοιόμορφης θερμικής διέγερσης για την αποφυγή ανάπτυξης θερμοκρασιακών διαφορών που οφείλονται στην εναπόθεση διαφορετικών ποσών ενέργειας στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Για τον σκοπό αυτό, έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται διαφορετικά μέσα παραγωγής ενέργειας όπως οπτικά μέσα (π.χ. φωτογραφικά φλας, λάμπες υπερύθρου, λάμπες αλογόνου), πηγές διάδοσης μηχανικής ενέργειας (π.χ. διατάξεις εκπομπής ηχητικών ή υπερηχητικών κυμάτων), πηγές ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης (π.χ. επαγωγικά πηνία παραγωγής δινορρευμάτων), ή άλλα μέσα όπως διατάξεις διάχυσης ζεστού ή κρύου αέρα [6].

Με βάση το είδος της πηγής και τον τρόπο που αυτή διεγείρει θερμικά το υπό εξέταση αντικείμενο, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, όπως η θερμογραφία παλμού (PT), βηματικής θέρμανσης (SH), θερμογραφία ασφαλείας (LT) και θερμογραφία ταλαντώσεων (VT) [4-6].

Όσον αφορά στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου στον έλεγχο μνημείων, προηγουμένως, θα πρέπει να έχει αποκλειστεί το ενδεχόμενο πρόκλησης περεταίρω φθοράς από τη διαδικασία θερμικής διέγερσης [6].

3.1.2 Εφαρμογή της θερμογραφίας υπερύθρου σε μνημεία

Η θερμογραφία υπερύθρου εφαρμόζεται σε μνημεία και ιστορικά κτίρια, από την δεκαετία του 70, κυρίως, για τον έλεγχο της υγρασίας. Ιστορικά, πρώτοι οι Ιταλοί ερευνητές Accardo G. et al. (1979), ξεκίνησαν αυτό το εγχείρημα σε μια μικρή εκκλησία "Scrovegni chapel" στην περιοχή της Πάντοβα στην Ιταλία. Στη συνέχεια, οι ίδιοι εφάρμοσαν την τεχνική αυτή για τον ψηφιδωτό διάκοσμο και την τοιχοποιία βασιλικής εκκλησίας στο νησί Τορτσέλο της Ιταλίας, "basilica on Torcello island" [13, 14]. Από εκείνη την εποχή και έπειτα σημειώνεται μεγάλη πρόοδος στη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρου σε μνημεία και ιστορικά σύνολα.

Στην βιβλιογραφία, αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις μνημείων και ιστορικών συνόλων της Μεσογείου, στα οποία έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις με τη χρήση της θερμογραφίας υπερύθρου. Μερικές από τις πλέον αξιόλογες, αφορούν σε εκκλησίες και ιστορικά κτίρια στην Ιταλία, όπου έχουν ελεγχθεί, κυρίως, τοιχογραφίες φρέσκο και τοιχοποιίες [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 35]. Στις περιπτώσεις αυτές, ανιχνεύθηκε με επιτυχία η ύπαρξη υγρασίας στην τοιχοποιία με τη μέθοδο της παθητικής θερμογραφίας, όπως επίσης, ρωγμές και κενά στο εσωτερικό της, με τη μέθοδο της ενεργητικής θερμογραφίας. Εφαρμογή της μεθόδου, έχει πραγματοποιηθεί σε μνημεία και ιστορικά κτίρια και στην Ελλάδα. Κάποια παραδείγματα αφορούν σε χαρτογράφηση της φθοράς και την αξιολόγηση προγενέστερων υλικών και επεμβάσεων συντήρησης, στις ενετικές οχυρώσεις του Ηρακλείου στην Κρήτη [25, 26], σε μνημεία της Μεσαιωνικής πόλης της Ρόδου [27], σε προσόψεις ιστορικών κτιρίων [28, 29], σε ταφικά μνημεία [30] και σε άλλα αρχαιολογικά σύνολα [31, 32]. Στην Ισπανία, αναφερόντα παραδείγματα χρήσης της μεθόδου, σε μνημεία, για την ανίχνευση των φάσεων κατασκευής τους και τον εντοπισμό θέσεων ανοιγμάτων (παράθυρα, πόρτες από προηγούμενες κατασκευαστικές φάσεις) [28, 33]. Άλλες περιοχές, όπου υπάρχουν αξιόλογες αναφορές της χρήσης της μεθόδου σε μνημεία, είναι στην Τουρκία [34, 35], στη Σλοβενία [36] και στην Ιορδανία [37].

Στη συντήρηση ψηφιδωτών, η θερμογραφία υπερύθρου έχει εφαρμοστεί, κυρίως, για την εξέταση επιτοίχιων ψηφιδωτών. Η εφαρμογή της αφορά στη χαρτογράφηση της φθοράς, καθώς και για τον εντοπισμό επιχρισμένων ψηφιδωτών επιφανειών [38, 39, 40, 41, 42, 43]. Από την αναζήτηση στην διεθνή βιβλιογραφία περιορισμένες μελέτες βρέθηκαν που να αφορούν τη χρήση της μεθόδου για την εξέταση ψηφιδωτών δαπέδου. Ωστόσο, τα αποτελέσματα των θερμογραφικών μετρήσεων από άλλα αρχιτεκτονικά σύνολα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η ανάπτυξη μία ολοκληρωμένη μεθοδολογίας εφαρμογής της και σε ψηφιδωτά δαπέδου, στοχεύοντας στην ανίχνευση και στη χαρτογράφηση της υγρασίας, στην επί τόπου διερεύνηση της συμβατότητας των υλικών συντήρησης - αποκατάστασης του υποστρώματος και στην διερεύνηση ρωγμών και κενών των υποκείμενων στρωμάτων.

Από τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, καταφαίνεται ότι η θερμογραφία υπερύθρου, είναι ένα σύγχρονο μη καταστρεπτικό εργαλείο, που μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των αρχιτεκτονικών επιφανειών, την επί τόπου παρακολούθηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών στα μνημεία, την αποτίμηση επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης. Ακόμη, παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης επιφανειακών και υποεπιφανειακών ατελειών, καθώς και επικαλυμμένων υλικών μέσω διαφορετικών θερμογραφικών προσεγγίσεων [39]. Τέλος, η χρήση άλλων μη καταστρεπτικών μεθόδων, όπως για παράδειγμα, η μικροσκοπία οπτικών ινών, η υπερηχοσκόπηση, το γεωραντάρ κ.α., μπορούν να δώσουν συμπληρωματικές πληροφορίες για να τεκμηριώσουν τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με την τεχνική της θερμογραφίας [38, 44, 45, 46, 47, 48].

3.2 Μη καταστρεπτικός έλεγχος με τη χρήση του γεωραντάρ (GPR)

Η μέθοδος του γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar) είναι μια ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική τεχνική διασκοπήσεων, που χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών. 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 στο υπέδαφος εξαρτάται κύρια από την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη διαφορά ηλεκτρικής αγωγιμότητας και διαπερατότητας μεταξύ των υλικών που το αποτελούν [6, 49, 50].

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην παραγωγή παλμικών ραδιοκυμάτων από έναν πομπό τα οποία διαδίδονται ως ευρεία δέσμη στο εξεταζόμενο μέσο, 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, ένα μέρος διαθλάται, και η υπολειπόμενη ενέργεια του παλμού διέρχεται από την διεπιφάνεια προς βαθύτερους ορίζοντες, στους οποίους η διαδικασία αυτή δύναται να επαναληφθεί. Το μέρος του κύματος που ανακλάται από κάποια διεπιφάνεια, επιστρέφει στην επιφάνεια του εδάφους όπου ανιχνεύεται και καταγράφεται από τον δέκτη [6].

Το γεωραντάρ χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς υψηλής συχνότητας (10 – 10000 MHz) και μικρής διάρκειας (μερικών nsec). Η επιλογή της συχνότητας εξαρτάται από τη ζητούμενη εφαρμογή [51, 52].

3.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

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. Στις πρακτικές εφαρμογές με την τεχνική του γεωραντάρ οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα ε και αγωγιμότητα σ, συχνά αναφερόμενες και ως "διηλεκτρικές ιδιότητες" των υλικών. Η ηλεκτρική διαπερατότητα ε (dielectric permittivity) αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα του κάθε διηλεκτρικού μέσου η οποία εκφράζει την ικανότητα του να αποθηκεύει και να απελευθερώνει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρικού φορτίου ή εναλλακτικά περιγράφει το βαθμό της ηλεκτρικής πόλωσης ενός υλικού υπό την επίδραση εφαρμοζόμενου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Η ηλεκτρική διαπερατότητα επηρεάζει σε πολύ σημαντικό βαθμό τη διάδοση του η/μ κύματος από την άποψη της ταχύτητας, της ενδογενούς εμπέδησης και της ανακλαστικότητας. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά αποτελεί χαρακτηριστική σταθερά του κάθε μέσου που μπορεί να μεταβάλλεται από 1 για την περίπτωση αέρα μέχρι 81 στην περίπτωση ύπαρξης νερού. Η παρουσία περιεχόμενης υγρασίας (ελεύθερου και δεσμευμένου νερού) μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά την ηλεκτρική διαπερατότητα και επομένως τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ενός υπεδαφικού μέσου [6, 49, 50, 53].

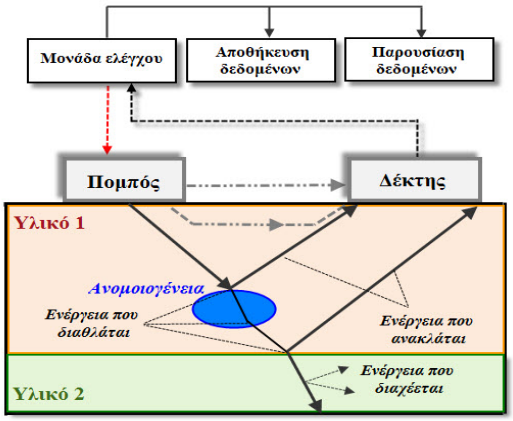
Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η μέθοδος του γεωραντάρ μετράει και καταγράφει το χρόνο διαδρομής (σε nsec) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και την ισχύ του ανακλώμενου σήματος που επιστρέφει στον δέκτη. Το βάθος μιας ανακλαστικής διεπιφάνειας, μπορεί να υπολογιστεί με βάση το χρόνο διπλής διαδρομής (two-way travel time) του ηλεκτρομαγνητικού σήματος από και προς τον πομποδέκτη, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση [6]:

$$D = v \times 2WTT/2 \qquad (3.1)$$

όπου D είναι το βάθος στο οποίο βρίσκεται η ανακλαστική επιφάνεια (ή στόχος), v η ταχύτατα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο υλικό, και 2WTT ο χρόνος διπλής διαδρομής.
Το εύρος των τιμών της σχετικής διαπερατότητας er για διάφορους τύπους υλικών, κυμαίνεται από 1 (αέρας) έως 81 (νερό). Τιμές από 3 έως 12 είναι τυπικές για δομικά υλικά και αντιστοιχούν σε ταχύτητες η/μ παλμού περίπου από 0,17 έως 0,08 m/ns, αντίστοιχα [6].

3.2.2 Τεχνική λειτουργίας του γεωραντάρ – Επεξεργασία ανακτώμενων από το πεδίο δεδομένων

Ένα τυπικό σύστημα γεωραντάρ αποτελείται από μία κεραία εκπομπής (transmitting antenna- Tx), μια κεραία δέκτη (receiving antenna- Rx) και μια μονάδα ελέγχου, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων με δυνατότητες γραφικής απεικόνισης. Μια τυπική διάταξη λειτουργίας ενός συστήματος γεωραντάρ παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ. Η τυπική διάταξη λειτουργίας για τη συλλογή δεδομένων γεωραντάρ είναι αυτή της σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη ή ανάκλασης (Common Offset, CO), κατά την οποία ο πομπός και ο δέκτης σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους, μετακινούνται κατά μήκος μιας γραμμής σάρωσης στην επιφάνεια του εδάφους, συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα.

Τα συστήματα γεωραντάρ διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες που περιλαμβάνουν αυτά που λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου (time domain) και στο πεδίο συχνοτήτων (frequency domain). Η πλειοψηφία των συστημάτων γεωραντάρ ανήκει στην πρώτη

κατηγορία, όπου η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην μετάδοση διακριτών παλμών μικρής χρονικής διάρκειας (της τάξης των nsec) από έναν πομπό με μία δεδομένη περιοδικότητα ή συχνότητα επανάληψης παλμών (pulse repetition frequency, RPF) και καταγραφή του επιστρέφοντος σήματος από το δέκτη συναρτήσει του χρόνου καθυστέρησης [6, 49, 50].

Επιπλέον, εκτός από το πεδίο λειτουργίας τους, τα συστήματα γεωραντάρ ανάλογα με τη διάταξη της κεραίας πομπού/δέκτη που χρησιμοποιούν διακρίνονται σε κλασσικά μονοστατικά (monostatic) και διστατικά (bistatic). Τα μονοστατικά συστήματα χρησιμοποιούν μόνο μία κεραία η οποία χρησιμεύει ταυτόχρονα ως πομπός και δέκτης. Μονοστατικά θεωρούνται, επίσης, τα συστήματα που χρησιμοποιούν κεραία εκπομπής και κεραία λήψης οι οποίες βρίσκονται έγκλειστες μέσα στο ίδιο περίβλημα (κουτί) σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους (antenna separation ή offset). Τα συστήματα αυτά πραγματοποιούν μετρήσεις κατά μήκος μίας γραμμής σάρωσης παρέχοντας συνεχή και ταχεία λήψη δεδομένων με μικρό διάστημα δειγματοληψίας (χρονικό διάστημα μεταξύ δύο καταγραφών). Στα διστατικά συστήματα ο πομπός και ο δέκτης είναι διαφορετικές κεραίες. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων επιλέγεται συνήθως να είναι μεγάλη, το οποίο συνεπάγεται μείωση της διακριτικής ικανότητας κατά την πλευρική έννοια [6, 49, 50].

Η κεραία αποτελεί το βασικότερο στοιχείο ενός συστήματος γεωραντάρ. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κεραιών, οι πιο διαδεδομένες είναι οι διπολικές (bowtie dipoles). Η διάρκεια και κυματομορφή του πηγαίου παλμού που παράγεται από τον πομπό εξαρτάται από την κεντρική συχνότητα λειτουργίας της κεραίας. Η συχνότητα εκπομπής της κεραίας επηρεάζει τη διακριτική ικανότητα (resolution), η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού σήματος. Επιπλέον το βάθος διασκόπησης επηρεάζεται και αυτό από τη συχνότητα εκπομπής και είναι αντιστρόφως ανάλογο της διακριτικής ικανότητας. Συγκριμένα, όσο υψηλότερη είναι η κεντρική συχνότητα λειτουργίας της χρησιμοποιούμενης κεραίας, τόσο βραχύτερης διάρκειας και στενότερου εύρους είναι ο παλμός παρέχοντας υψηλότερη διακριτική ικανότητα ανίχνευσης με μικρότερο, όμως, βάθος διασκόπησης. Το αντίθετο συμβαίνει όταν χρησιμοποιείται κεραία χαμηλότερης κεντρικής συχνότητας [6, 49, 50].

Η τυπική διάταξη λειτουργίας για τη συλλογή δεδομένων γεωραντάρ είναι αυτή της σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη ή ανάκλασης (Common Offset, CO), κατά την οποία ο πομπός και ο δέκτης σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους, μετακινούνται κατά μήκος μιας γραμμής σάρωσης στην επιφάνεια του εδάφους, συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την καταγραφή συνεχόμενων ανακλάσεων κατά μήκος του γραμμικού προφίλ. Η μέθοδος αυτή χρησιμεύει κυρίως στην χαρτογράφηση του υπεδάφους και χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των συστημάτων γεωραντάρ. Αν είναι γνωστή η ηλεκτρική διαπερατότητα (σχετική διηλεκτρική σταθερά) του υπεδάφους τότε μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων [6, 49, 50].

Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση της Common Offset διάταξης ενός μονοστατικού συστήματος γεωραντάρ. Η καταγραφή του ανακτώμενου σήματος περιλαμβάνει: τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ανακλώνται (reflected wave)

από μια διεπιφάνεια υλικών με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, τα απευθείας κύματα αέρα (direct air wave) που μεταδίδονται από τον πομπό στο δέκτη μέσω του αέρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους με την ταχύτητα του φωτός (0.3 m/(nsec), τα απευθείας κύματα εδάφους (direct ground wave) που μεταδίδονται, χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια, από τον πομπό στο δέκτη μέσω του υπεδάφους και τα πλευρικά κύματα (refracted reflection ή lateral wave) που μπορεί να προκύπτουν από μικρού βάθους ανακλάσεις που προσεγγίζουν την επιφάνεια και διαθλώνται υπό κατάλληλη κρίσιμη γωνία κατά μήκος της διεπιφάνειας αέρα-εδάφους [6].

Σε μία common-offset διάταξη γεωραντάρ, οι βασικότερες παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι οι εξής [6]:

- Η συχνότητα εκπομπής (operating frequency). Το βάθος διασκόπησης και η διακριτική ικανότητα συνδέεται με τη συχνότητα εκπομπής και είναι αντιστρόφως ανάλογα.
- Ο αριθμός σημείων (samples) από τον οποίο αποτελείται η κάθε καμπύλη που καταγράφεται (scan). Μεγαλύτερος αριθμός σημείων ανά σάρωση (samples/scan) συνεπάγεται ομαλότερη καμπύλη και μεγαλύτερη ανάλυση κατά την κατακόρυφη έννοια (αλλά και μεγαλύτερο αρχείο).
- Το χρονικό παράθυρο (time window, nsec) το οποίο ορίζεται από τα χρονικά όρια καταγραφής δεδομένων και εξαρτάται από το μέγιστο βάθος διείσδυσης του κύματος στο υπέδαφος και την ταχύτητα διάδοσης. Μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης. Επιπλέον επισημαίνεται ότι μεγάλος χρόνος διαδρομής του η/μ κύματος από και προς τον πομποδέκτη μπορεί να απαιτεί μεγάλο αριθμό σημείων ανά σάρωση προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική ανάλυση δεδομένων.
- Η χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (temporal sampling interval) η οποία, κατά το κριτήριο Nyquist, δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό της περιόδου που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη συχνότητα του μετρούμενου σήματος.
- Η επιλογή του διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων (spatial sampling interval) και της πυκνότητας των σαρώσεων (αριθμός σαρώσεων ανά μονάδα μήκους οριζόντιας απόστασης) που συνδέεται κυρίως με την κεντρική συχνότητα της κεραίας.

Τα δεδομένα που καταγράφονται από τη μέτρηση μπορούν να παρουσιαστούν σε μονοδιάστατα ίχνη (1D), δυσδιάστατες τομές (2D) και τρισδιάστατες αναπαραστάσεις (3D). Τα μονοδιάστατα ίχνη αφορούν στην ανίχνευση του παλμού από ένα σημείο της επιφάνειας. Οι δυσδιάστατες (2D) τομές μπορούν να δημιουργηθούν μέσω της υπέρθεσης των μονοδιάστατων ιχνών κατά μήκος μίας γραμμής σάρωσης για μία σειρά σημείων που ισαπέχουν μεταξύ τους. Τα τρισδιάστατα (3D) ραδιογραματα είναι επέκταση των δυσδιάστατων, με οριζόντια σάρωση στο XY άξονα και μπορούν να παρουσιαστούν με διάφορους τρόπους, είτε σαν συμπαγείς όγκοι, είτε σαν τομές ανά καθορισμένα χρονικά εύροι [6, 49, 50].

Η επεξεργασία των ανακτώμενων από το πεδίο δεδομένων, περιλαμβάνει, μια σειρά από διαδικασίες που αποσκοπούν στην ανάδειξη των πληροφοριών που αφορούν στο στόχο της έρευνας. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν την ενίσχυσή του σήματος (gain) με βάση

τη συχνότητα ή το χρόνο διαδρομής και την εφαρμογή διορθωτικών φίλτρων. Η τεχνική ενίσχυσης του σήματος εφαρμόζεται προκείμενου να υπάρχουν αναγνώσιμες ενδείξεις από μεγαλύτερα βάθη στα οποία το η/μ κύμα είναι ασθενές. Η ρύθμιση της ενίσχυσης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή από το χρήστη, καθώς η υπερενίσχυση του σήματος μπορεί να δημιουργήσει ψευδή δεδομένα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η μείωση του μπορεί να εξαφανίσει χρήσιμα δεδομένα [6, 54].

Τα φίλτρα που μπορούν να εφαρμοστούν στην επεξεργασία των δεδομένων είναι τα εξής [6, 54]:

- Φίλτρα αποκοπής δεδομένων με βάση τη συχνότητα (Low/High pass filters)

Συνήθως εφαρμόζονται στα δεδομένα τα κατακόρυφα και οριζόντια φίλτρα αποκοπής χαμηλών (high pass) ή υψηλών (low pass) συχνοτήτων. Το φίλτρο διόδου χαμηλών συχνοτήτων δίνει τη δυνατότητα περιορισμού του υψίσυχνου θορύβου, το αντίθετο μπορεί να συμβεί κατά την εφαρμογή φίλτρου διόδου υψηλών συχνοτήτων. Τα κατακόρυφα φίλτρα (vertical filters) εφαρμόζονται με βάση το χρόνο διαδρομής σε κάθε scan, ενώ στην εφαρμογή των οριζόντιων φίλτρων η σημαντική παράμετρος είναι το πλάτος (σε scans) του στόχου της έρευνας. Όταν εφαρμόζονται ταυτόχρονα αφήνουν να διατηρηθεί ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων των δεδομένων ενώ απορρίπτουν τα υπόλοιπα (band pass filtering).

- Φίλτρων επανατοποθέτησης ιχνών (Migration)

Με την εφαρμογή του φίλτρου migration απεικονίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η θέση των στόχων ή δομών του υπεδάφους, μέσω της απομάκρυνσης ανεπιθύμητων ανακλάσεων. Συγκεκριμένα η εφαρμογή της τεχνικής αυτής έχει σαν αποτέλεσμα την διαγραφή των ανακλώμενων η/μ κυμάτων υπερβολικής μορφής και την ανάδειξη των σημειακών τους πηγών.

- Φίλτρων αποσυνέλιξης δεδομένων (Deconvolution)

Με στόχο τη βελτίωση των δεδομένων των καταγραφών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τύποι φίλτρων οι οποίοι περιλαμβάνουν αποσυνέλιξη δεδομένων (deconvolution) για τον περιορισμό των επαναλαμβανόμενων ανακλάσεων και του θορύβου που συνήθως εμφανίζεται στα βαθύτερα σημεία της διασκόπησης (antenna ringing).

- Μετασχηματισμού HILBERT

Συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του καταγεγραμμένου ανακλώμενου η/μ κύματος που αφορούν στο συχνοτικό του περιεχόμενο ή την ισχύ του, μπορούν να αναδειχθούν μέσω της συγκεκριμένης επεξεργασίας.

- Φίλτρων σωρείασης (Stacking) και απομάκρυνσης υπόβαθρου θορύβου (Background Removal)

Ένα Infinite Impulse Response (IIR) φίλτρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την οριζόντια έννοια, για μείωση του υψίσυχνου θορύβου stacking. Η εφαρμογή του φίλτρου background removal μειώνει το θόρυβο χαμηλής συχνότητας, απομακρύνοντας τον θόρυβο που προκαλείται από επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις του σήματος (antenna ringing) στη στρωματογραφία του μέσου.

3.2.3 Έλεγχος δομών με γεωραντάρ - Δυσδιάστατες τομές (B-scan) - Ερμηνεία ανακλάσεων από διεπιφάνειες υλικών και περιθλάσεων από σημειακούς σκεδαστές

Πραγματοποιώντας μία οριζόντια σάρωση με την τεχνική του γεωραντάρ, κατά μήκος ενός γραμμικού προφίλ στον άξονα *x,* τα ανακτώμενα δεδομένα που προκύπτουν από τα επιμέρους μονοδιάστατα ίχνη (*A-scans*) μπορούν να απεικονιστούν ως εικόνα δύο διαστάσεων. Η εικόνα αυτή αναφέρεται ως 2*D* προφίλ σάρωσης ή αλλιώς ραδιόγραμμα και αναπαριστά μία κάθετη διατομή στο έδαφος (*B-Scan*) όπου ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στη θέση της κεραίας κατά μήκος της σάρωσης και ο κατακόρυφος άξονας στο χρόνο διπλής του διαδρομής ηλεκτρομαγνητικού κύματος που αντιστοιχεί σε βάθος. Η παρουσίαση των δεδομένων γίνεται μέσω της χρήσης μίας προκαθορισμένης χρωματικής κλίμακας ή παλέτας (συνήθως διαβαθμίσεων του γκρίζου), αντιστοιχώντας την ισχύ (εύρος) του καταγεγραμμένου σήματος με συγκεκριμένη απόχρωση (φωτεινότητα) της παλέτας που έχει επιλεγεί [6, 55].

Οι ανακλάσεις που προέρχονται από μικρούς η σημειακούς σκεδαστές που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, εμφανίζονται στο ραδιόγραμμα ως περιθλάσεις υπερβολικής μορφής (diffraction hyperbolas) (Εικόνα 3.4α). Αυτό οφείλεται, στην ευρεία κωνική μορφή της δέσμης των η/μ κυμάτων που εκπέμπεται από την μονοστατική κεραία και που έχει σαν αποτέλεσμα τα ανακλώμενα σήματα να λαμβάνονται από το δέκτη, πριν και μετά από τη θέση του στόχου. Το σχήμα της ανακτώμενης υπερβολής εξαρτάται από τη διάταξη της κεραίας, το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο σημειακός σκεδαστής, την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος καθώς και το διάστημα μεταξύ των σαρώσεων (scan spacing) που επιλέγεται από τον χειριστή. Το σχήμα της υπερβολής εξαρτάται από την απόσταση σάρωσης και την ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όσο μικρότερο είναι το διάστημα επιλογής μεταξύ των σαρώσεων (που ισοδυναμεί με μεγαλύτερο αριθμό σαρώσεων ανά μονάδα μήκους οριζόντιας απόστασης), τόσο ευρύτερες είναι οι υπερβολές που καταγράφονται από τους σημειακούς στόχους. Επίσης, υψηλότερη ταχύτητα η/μ κυμάτων (χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά), παράγει ευρύτερες υπερβολές και αντίστροφα. Η ανάκλαση προέρχεται πάντα από την κορυφή του σημειακού στόχου και το μέγιστο (κορυφή) της καταγεγραμμένης καμπύλης υπερβολής αντιστοιχεί ακριβώς στη θέση στην οποία βρίσκεται ο στόχος [6, 49, 50].

Όταν η κεραία διασχίζει έναν υπεδαφικό γραμμικό στόχο σωληνοειδούς μορφής (π.χ. αγωγό, καλώδιο, μεταλλική ράβδο οπλισμού) κάθετα ως προς τον κατά μήκος άξονα του, τότε η ανάκλαση που καταγράφεται θα εμφανίζει υπερβολική μορφή, όπως στους σημειακούς σκεδαστές. Στην περίπτωση που η κεραία κινείται κατά μήκος του στόχου τότε η ανάκλαση θα εμφανίζεται ως συνεχής ευθεία γραμμή, εφόσον η απόσταση της κεραίας από τον υπεδαφικό στόχο παραμένει σταθερή [6].

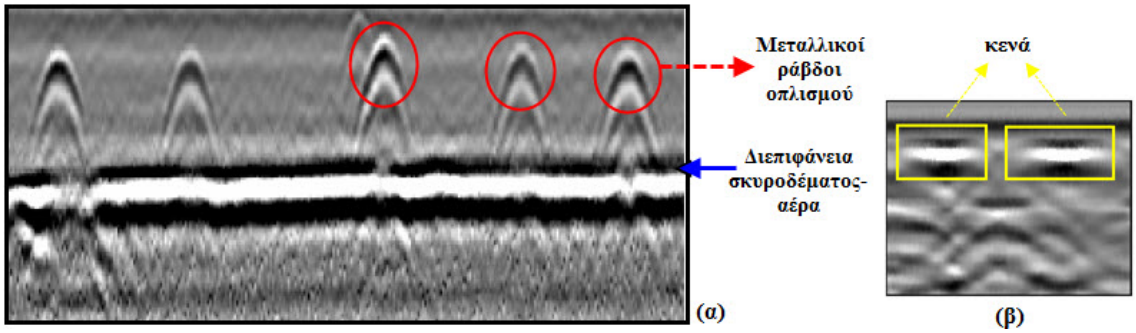
Επιπλέον, η λαμπρότητα (brightness) ή ισχύς μίας αντανάκλασης εξαρτάται από την διαφορά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ του μέσου και του στόχου. Κατά γενικό κανόνα, η λαμπρότητα μίας ανάκλασης που παράγεται από μία διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές διηλεκτρικές ιδιότητες είναι ανάλογη προς τη διηλεκτρική αντίθεση (dielectric contrast) μεταξύ των δύο υλικών, που σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αντίθεση αυτή τόσο πιο ισχυρή θα είναι η παραγόμενη ανάκλαση [6]. Σχετικά

παραδείγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί. Μεταλλικοί στόχοι, εμφανίζουν πολύ φωτεινές αντανακλάσεις, επειδή είναι αγώγιμα υλικά [56]. Μεταλλικά πλέγματα, ακόμα και μικρών διαστάσεων (5 x 5 cm) λειτουργούν σαν πλήρη κάτοπτρα της ενέργειας και είναι αδιαπέραστα, με αποτέλεσμα οι στόχοι κάτω από αυτά να μην είναι ανιχνεύσιμοι. Οι μη αγώγιμοι στόχοι θα επιστρέψουν μόνο την ενέργεια που ανακλάται. Κατά τη σάρωση με γεωραντάρ πάνω από μία συνεχή συνοριακή στιβάδα (όπως άσφαλτος-σκυρόδεμα, σκυρόδεμα-υπέδαφος) η κεραία λαμβάνει συνεχόμενες ανακλάσεις από τα τμήματα του εν λόγω συνόρου, οι οποίες εμφανίζονται στο ραδιόγραμμα υπό της μορφή ενός συνεχούς στρώματος ανάκλασης (Εικόνα 3.3α). Οι διάφορες υπεδαφικές ανομοιογένειες όπως τα κενά (με αέρα ή νερό) παράγουν ισχυρές ανακλάσεις χωρίς συγκεκριμένο σχήμα [55]. Ένα παράδειγμα κενού με αέρα σε σκυρόδεμα σημειώνεται με κίτρινο χρώμα στην Εικόνα 3.4β [6].

Πίνακας 3.1: Παραδείγματα φωτεινότητας ανακλάσεων από την διεπιφάνεια υλικών.

Διεπιφάνεια υλικών	**Διηλεκτρική σταθερά**	**Φωτεινότητα ανάκλασης**
Άσφαλτος/τσιμέντο	Μέτρια	Μέτρια
Σκυρόδεμα/άμμος	Χαμηλή	Αδύναμη
Σκυρόδεμα/μέταλλο	Υψηλή	Δυνατή
Σκυρόδεμα/νερό	Υψηλή	Δυνατή
Σκυρόδεμα/αέρας	Υψηλή, αντίστροφης φάσης	Δυνατή

Η πολικότητα του ανακλώμενου σήματος (reflection polarity), μπορεί επίσης, να παρέχει σημαντικές πληροφορίες. Σε όλες τις κεραίες γεωραντάρ, ο παλμός μεταδόσεως έχει μια ορισμένη αλληλουχία στην πολικότητα: θετική κορυφή πρώτα, κατόπιν μια αρνητική κορυφή (πιθανώς ακολουθούμενη από μια δεύτερη θετική) [54]. Σε ένα ραδιόγραμα, σε κλίμακα του γκρίζων διαβαθμίσεων, αυτό φαίνεται με μια λευκή - μαύρη - λευκή ακολουθία χρωμάτων, απροσδιορίστου σχήματος. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα, σε μια διεπιφάνεια σκυροδέματος–αέρα, μπορεί να γίνει μια αναστροφή φάσης. Η αντιστροφή φάσης είναι μια ξαφνική αλλαγή (flip-flopping) της κανονικής αλληλουχίας πολικότητας [6]. Η παρουσία διαφόρων υπεδαφικών ασυνεχειών όπως μεγάλων κενών ή ρωγμών ανιχνεύονται υπό τη μορφή ισχυρών ανακλάσεων ανεστραμμένης φάσης με μαύρη - λευκή - μαύρη ακολουθία χρωμάτων (Εικόνα 3.3β). Στην περίπτωση αποσαθρωμένων περιοχών με υψηλά περιεχόμενα ποσοστά υγρασίας ή έγκλειστου νερού, τότε οι παραγόμενες ανακλάσεις θα είναι μεν ισχυρές, ωστόσο όμως θα εμφανίζουν την κανονική αλληλουχία πολικότητας (λευκή – μαύρη – λευκή), το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την αναγνώριση και διαφοροποίηση μεταξύ των συγκριμένων τύπων φθοράς κατά την ερμηνεία των ραδιογραμμάτων [55, 57, 58, 59].



Εικόνα 3.3: 2D προφίλ σάρωσης γεωραντάρ (ραδιόγραμμα) τσιμεντιτικής πλάκας με μεταλλικό οπλισμό - απεικόνιση των ανακλάσεων που προέρχονται από το κάτω μέρος της πλάκας (διεπιφάνεια σκυροδέματος - αέρα) και τις ράβδους οπλισμού (α). Παράδειγμα ανίχνευσης κενού σε τσιμέντο (β). Σκυρόδεμα με κενό γεμάτο αέρα.

Επιπλέον, οι ανακλάσεις αυτές είναι συνήθως πιο ισχυρές και πιο ευδιάκριτες εν συγκρίσει με τις προαναφερθείσες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, αν για παράδειγμα θεωρήσουμε μία δομή σκυροδέματος, η διηλεκτρική αντίθεση μεταξύ του μέσου διάδοσης (σχετική διηλεκτρική σταθερά ξηρού τσιμέντου, $\varepsilon_r \approx 6$) και του νερού ($\varepsilon_r = 81$) είναι πολύ υψηλότερη σε σχέση με τη διηλεκτρική αντίθεση μεταξύ του σκυροδέματος και του αέρα (ε_r,air=1) [6].

3.2.4 Εφαρμογή της τεχνικής του γεωραντάρ (GPR) σε δάπεδα μνημείων

Η τεχνική GPR αποτελεί μία από τις πιο κατάλληλες NDTs τεχνολογίες για τη γρήγορη επιθεώρηση και εκτίμηση της ακεραιότητας μεγάλων κατασκευών από σκυρόδεμα όπως γεφυρών και οδοστρωμάτων. Η τεχνική αυτή παρέχει την δυνατότητα απεικόνισης οποιασδήποτε υπό-επιφανειακής δομής και παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου, όπως υψηλή διακριτική ικανότητα και ταχεία λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67].
Στο πλαίσιο αρχαιολογικών ερευνών, η τεχνική του γεωραντάρ έχει εφαρμοστεί, κυρίως, σε δάπεδα μνημείων και για τον εντοπισμό υποκείμενων αρχαίων καταλοίπων [68]. Η βιβλιογραφία, σχετικά, με τη χρήση της τεχνικής του γεωραντάρ για τη διερεύνηση του πάχους της στρωματογραφίας αρχαίων δαπέδων, ή διαφορετικών υλικών (μεταλλικοί οπλισμοί) ή φθορών (κενά, ρωγμές) στην υποδομή τους είναι περιορισμένη [69]. Ακόμα πιο λίγες είναι οι αναφορές που υπάρχουν για μετρήσεις διασκόπησης ψηφιδωτών δαπέδων σε αρχαιολογικούς χώρους.
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε ορισμένα ψηφιδωτά δάπεδα στην Ιταλία, από τους ερευνητές A. Calia et al. (2012), στην εκκλησία ”St. Nicholas” στην πόλη Μπάρι της Ιταλίας. Στα οποία, με τη χρήση GPR, ανιχνεύθηκαν περιοχές που σχετίζονται με υπόγεια αίθουσα παλαιότερης οικοδομικής φάσης [70]. Επιπλέον εξετάστηκε η κατάσταση διατήρησης του υποστρώματός τους, καθώς επίσης και η στρωματογραφία της υποδομής των δαπέδων. εντοπίστηκαν

ανακλάσεις του σήματος, οι οποίες σχετίστηκαν με την ύπαρξη ρωγμών και κενών στο υπόστρωμα του ψηφιδωτού [71].
Μετρήσεις με γεωραντάρ έχουν γίνει, επίσης, στην Αγγλία, σε ψηφιδωτά δάπεδα ρωμαϊκής βίλας στο "West Sussex". Στην παραπάνω έρευνα, εντοπίστηκαν με επιτυχία υποκείμενα αρχαία κατάλοιπα και υποδείχτηκαν οι περιοχές όπου υπάρχει φθορά του κονιάματος του υποστρώματος [72].
Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω συμπεραίνεται, ότι η διερεύνηση του υποστρώματος ψηφιδωτών δαπέδων με τη χρήση του γεωραντάρ είναι ένα πεδίο σχετικά καινούριο στην επιστήμη της συντήρησης μνημείων. Οι εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί είναι περιορισμένες, χωρίς να έχουν συσταθεί, ακόμη, πρότυπα εφαρμογής. Όμως, από τα περιορισμένα αυτά δεδομένα, διαφαίνεται ότι η μέθοδος του γεωραντάρ μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη σωστή συντήρηση των μνημείων. Τέτοιες πληροφορίες είναι η ύπαρξη διαφορετικών οικοδομικών φάσεων κάτω από το ψηφιδωτό δάπεδο, η ανίχνευση κενών και ρωγμών, καθώς και ο εντοπισμός αποσαθρωμένων περιοχών του υποστρώματος. Έτσι, η τεχνική αυτή δείχνει να αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τους συντηρητές. Για την αξιοποίηση της, όμως, στη συντήρηση μνημείων, χρειάζεται η συλλογή ικανών δεδομένων, που θα δώσουν τη δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων της τεχνικής για τις διαφορετικές περιπτώσεις ψηφιδωτών δαπέδων. Έτσι, θα καταστεί δυνατό να συσταθούν τα αναγκαία πρότυπα εφαρμογής για την σωστή ερμηνεία των διαγραμμάτων.

3.3 Μη καταστρεπτικός έλεγχος με τη μέθοδο των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της Ηχούς από Κρούση (SASW, Impact Echo)

Η μέθοδος των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της Ηχούς από Κρούση (Spectral Analysis of Surface Waves, Impact Echo) από, είναι μια επιτόπια, μη καταστρεπτική σεισμική μέθοδος, που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών διαστρωματωμένων συστημάτων, όπως τα γεωτεχνικά συστήματα, οδοστρώματα, πεζοδρόμια και δομικά συστήματα. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ιδιότητα της διασποράς επιφανειακών κυμάτων σε ένα διαστρωματωμένο μέσο. Από τη μεταβολή της ταχύτητας τους στο μέσο, μπορεί να αξιολογηθούν οι φυσικές ιδιότητες των δομών, όπως είναι η συνοχή, η πυκνότητα και η αντοχή τους [73, 74]. Η μέθοδος αυτή πρωτοεμφανίστηκε κατά τη δεκαετία του '80 και τυγχάνει ευρείας αποδοχής ως εργαλείο για τον ταχύ και χαμηλού κόστους έλεγχο της ποιότητας των κατασκευών. Επίσης, έχει αποτελέσει το αντικείμενο εντατικής έρευνας κατά την τελευταία εικοσαετία, η οποία εστιάζεται τόσο στη φάση συλλογής των μετρήσεων πεδίου, όσο και στη φάση επεξεργασίας τους.

3.3.1 Τεχνική λειτουργίας της μεθόδου των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της Ηχούς από Κρούση (SASW- Impact Echo)

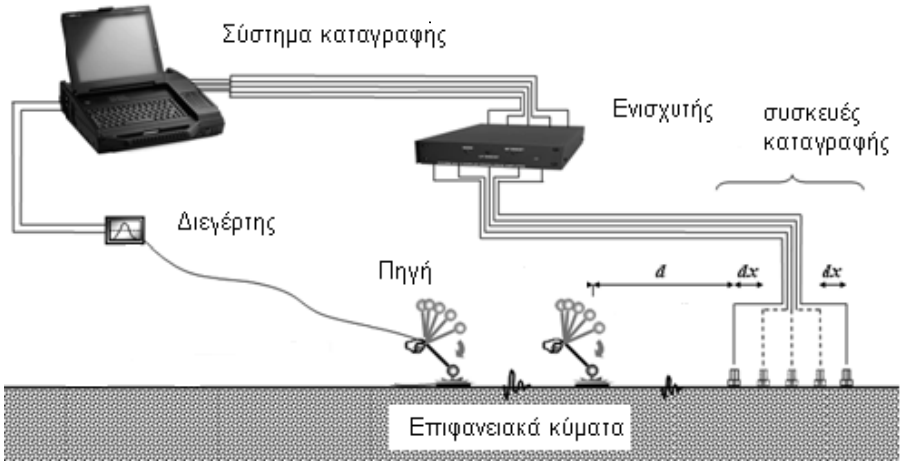
Η μέθοδος των επιφανειακών κυμάτων (SASW) βασίζεται στην δημιουργία, διάδοση και ανίχνευση ελαστικών κυμάτων που παράγονται με σφυρί είτε πιεζοηλεκτρικά στοιχεία στην επιφάνεια κατασκευών σκυροδέματος είτε μετάλλου) [75, 76]. Τα παραγόμενα ελαστικά κύματα έχουν ευρεία ζώνη συχνοτήτων, και ανάλογα με την

συχνότητα διαδίδονται σε διαφορετικό βάθος, παρέχοντας πληροφορίες των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής σε μη προσβάσιμες θέσεις. Παρά τις εντατικές προσπάθειες, η χρήση της SASW σε πραγματικές κατασκευές δεν υπήρξε αρχικά επιτυχής [77, 78] λόγω του ότι η πολύπλοκη γεωμετρία των περισσότερων κατασκευών προκαλεί μέσω πολλαπλών ανακλάσεων την δημιουργία πολλών διαφορετικών και αλληλεπικαλυπτόμενων τρόπων διάδοσης των κυμάτων. Αυτό καθιστά πρακτικά αδύνατη την απευθείας συσχέτιση των ιδιοτήτων των κυμάτων με τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκε πρόσφατα μια πρωτοποριακή και εύχρηστη μεθοδολογία μικροσεισμικών κυμάτων, η οποία καταγράφει την συνεισφορά όλων των τρόπων διάδοσης των παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων (Lamb και Rayleigh) στο διάγραμμα φασικής ταχύτητας - συχνότητας (Σχέση διασποράς), και τον προσδιορισμό από αυτό το διάγραμμα των μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρο ελαστικότητας, διαμήκης και εγκάρσια ταχύτητα ελαστικών κυμάτων, λόγος Poisson, κλπ) [79, 80].

Τα κύματα Lamb είναι ελαστικά κύματα που διαδίδονται παράλληλα στη διεύθυνση των επιφανειών του υλικού (με τον όρο επιφάνειες νοούνται οι εξωτερικές επιφάνειες του υπό μελέτη τμήματος κατασκευής). Τα κύματα αυτά δημιουργούνται από την συμβολή πολλαπλών ανακλάσεων και διαθλάσεων των κυμάτων από τις επιφάνειες και διεπιφάνειες της κατασκευής, και διαδίδονται με πολλούς τρόπους που κατηγοριοποιούνται σε συμμετρικούς και αντισυμμετρικούς. Η φασική ταχύτητά τους εξαρτάται από το πάχος και το μέτρο Poisson του υλικού, καθώς και από την συχνότητα εκπομπής [81].

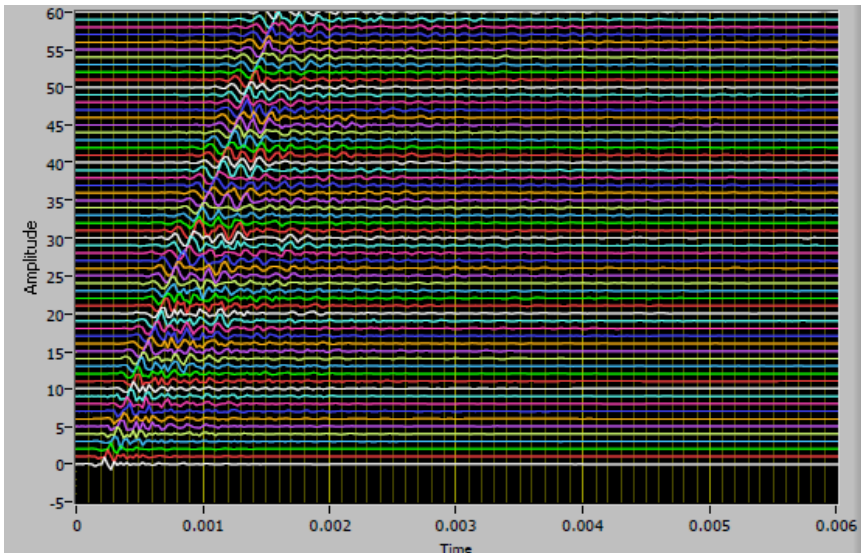
Τα επιφανειακά κύματα Rayleigh είναι ελαστικές διαταραχές που διαδίδονται κατά μήκος της διεπιφάνειας αέρα-στερεού στο στερεό μέσο διάδοσης. Τα υλικά σωματίδια στην επιφάνεια κινούνται ελλειπτικά με το κάθετο επίπεδο να περιέχει την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η διάδοση με ένα βασικό τρόπο κατά τον οποίο το πλάτος της κίνησης των υλικών σωματιδίων ελαττώνεται εκθετικά σε σχέση με το βάθος, και πρακτικά αποσβένονται σε βάθος ίσο με δύο μήκη κύματος. Τα κύματα αυτά παρουσιάζουν ισχυρή διασπορά (η φασική ταχύτητα εξαρτάται από την συχνότητα), και είναι επίσης ισχυρώς περιθλαστικά καθόσον κύματα διαφορετικής συχνότητας διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα ανάλογα με το μέτρο Poisson και την πυκνότητα των διαφορετικών στρωμάτων του υλικού [81].

Η χρήση των κυμάτων Lamb και Rayleigh επιτρέπει τον γενικό χαρακτηρισμό του υλικού (κύματα Lamb) και την εξακρίβωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος συναρτήσει του βάθους (κύματα Rayleigh). Τα κύματα παράγονται με κρούση και τα σήματα καταγράφονται από μία σειρά αισθητήρων σε διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή των κυμάτων. Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται για διαφορετικές θέσεις πηγής d, και αποστάσεις αισθητήρων dx, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4 [81].



Εικόνα 3.4: Η μέθοδος των Επιφανειακών Κυμάτων.

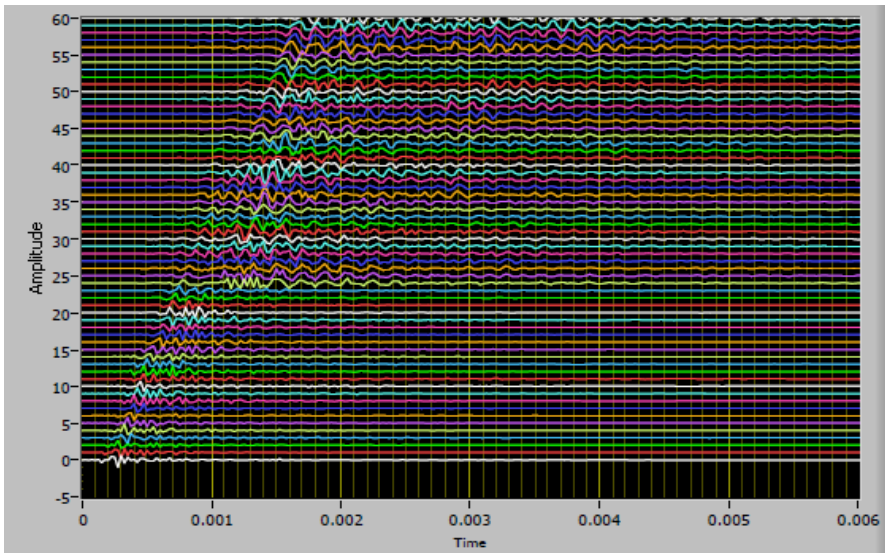
Με τον τρόπο αυτό παράγεται ένα δισδιάστατο σεισμογράφημα του υλικού του οποίου ο x-άξονας είναι η χρονική εξέλιξη των σημάτων στις διαφορετικές θέσεις, και ο y-άξονας αντιστοιχεί στις διαφορετικές θέσεις των αισθητήρων. Τα σήματα αυτά αναλύονται με ένα δισδιάστατο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (2D FFT), ώστε τα δεδομένα να μετασχηματιστούν από τους άξονες t-x (χρόνος– απόσταση) σε άξονες f-k (συχνότητα-κυματαριθμός). Η παραπάνω ανάλυση επιτρέπει με την βοήθεια καταλλήλων αλγορίθμων την καταγραφή της ενεργειακής κατανομής των παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων, καθώς και της φασικής τους ταχύτητας συναρτήσει της συχνότητας (Εικόνα 3.5) [81].
Η όλη διαδικασία και το προκύπτον διάγραμμα φασικής ταχύτητας – συχνότητας εμφανίζεται στα παρακάτω χαρακτηριστικά σχήματα.



Εικόνα 3.5: Κύματα Lamb τα οποία διαδίδονται μέσα σε επίπεδη πλάκα σκυροδέματος. Ο άξονας του χρόνου είναι σε sec.

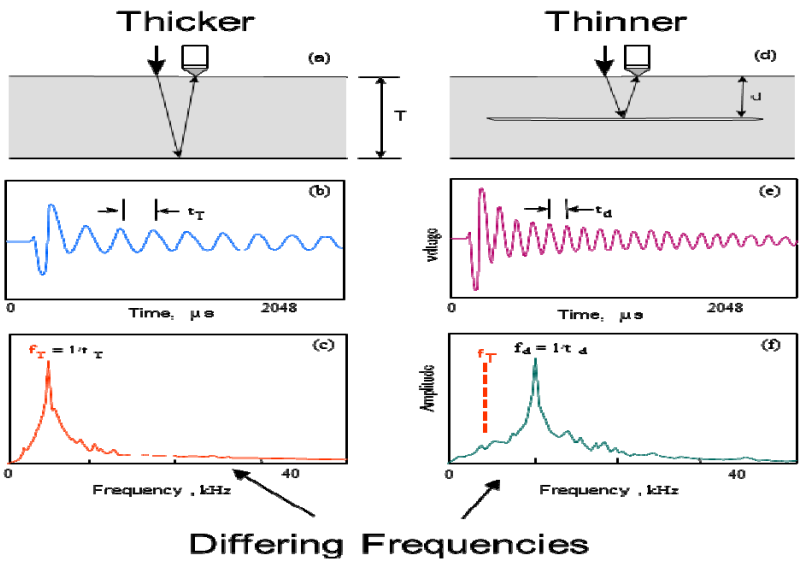
Στη συνέχεια επιλύεται το αντίστροφο πρόβλημα τόσο για τα κύματα Lamb όσο και για τα κύματα Rayleigh, για τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών του υλικού (στη περίπτωση της Εικόνας 3.5 που εξετάζεται πλάκα σκυροδέματος) συναρτήσει του

βάθους του υλικού, ώστε οι θεωρητικές καμπύλες να προσομοιάζουν τα πειραματικά δεδομένα. Η διαδικασία επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος εκτελείται μέχρι τα πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα (μηχανικές ιδιότητες και πάχος υλικού) να ταυτιστούν [82]. Η τεχνική έχει ήδη εφαρμοστεί πιλοτικά σε ελέγχους των στοιχείων σκυροδέματος (στρωτήρες – δάπεδο σκυροδέματος) στο ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ [81].
Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται μια περίπτωση εξέτασης πλάκας από σκυρόδεμα, κατά την οποία υφίσταται μεγάλος αριθμός ατελειών (cracks) είτε κέντρων σκέδασης (χαλίκια σε σκυρόδεμα). Παρατηρείται μεγάλη διασπορά των επιφανειακών κυμάτων στις θέσεις υψηλής σκέδασης, όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα το οποίο παρουσιάζει μετρήσεις ΜΕΚ σε πλάκα σκυροδέματος με σημαντικές φθορές [81].



Εικόνα 3.6:. Κύματα Lamb σε πλάκα σκυροδέματος με μεγάλες φθορές. Ο άξονας του χρόνου είναι σε sec.

Στην συνέχεια για να καταστεί δυνατή η εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων σχετικά με τη διαστρωμάτωση της δομής, αναλύονται τα σήματα πλησίον του σημείου κρούσης με το σφυρί, με τη μέθοδο της ακουστικής ηχούς μετά από κρούση (impact echo). Με τη μέθοδο αυτή καταγράφονται οι διαδοχικές ανακλάσεις των κυμάτων κάθετα προς την επιφάνεια κρούσης και το καταγραφόμενο σήμα αναλύεται κατά Fourier. Το βάθος της ανάκλασης δίνεται από την σχέση d=v/2f (όπου v η ταχύτητα του κύματος και f η συχνότητα). Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του σήματος πολλαπλών ανακλάσεων, τόσο πλησιέστερα ευρίσκεται η επιφάνεια ανάκλασης στην εξωτερική επιφάνεια. Η αρχή της μεθόδου impact echo παρουσιάζεται παραστατικά στην Εικόνα 3.6 [81].



Εικόνα 3.7:. Σχηματική παράσταση της αρχής της μεθόδου ακουστικής ηχούς μετά από κρούση (impact echo), όπου καταγράφονται οι διαδοχικές ανακλάσεις των κυμάτων κάθετα προς την επιφάνεια κρούσης και το καταγραφόμενο σήμα αναλύεται κατά Fourier.

3.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου Μικροσεισμικών Κυμάτων στην εξέταση δαπέδων

Τα δεδομένα που υπάρχουν από τη συστηματική έρευνα της μεθόδου Μικροσεισμικών Κυμάτων, τη δεκαετία του ΄80 έως και σήμερα, εντοπίζονται στο συσχετισμό της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων με τη ακαμψία των διακριτών στρώσεων ενός πολυστρωματικού μέσου. Οι Newcomb and Birgisson [83] αναφέρουν, ότι το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα εκτίμησης των μηχανικών αντοχών, χωρίς να υπάρχουν ακριβείς πληροφορίες για τα πάχη των υποστρωμάτων, ή των ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών [84, 85, 86, 87, 88, 89].

Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική διερεύνηση, μέχρι του παρόντος, δεν υπάρχουν δεδομένα για την εφαρμογή της μεθόδου SASW σε μνημεία και κυρίως για τη διαστρωμάτωση ψηφιδωτών δαπέδων. Στην παρούσα διατριβή, γίνεται, για πρώτη φορά, μια προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου SASW στην εξέταση αρχαίων δαπέδων. Ο στόχος είναι να συσταθεί η κατάλληλη μεθοδολογία για τη χρήση της τεχνικής αυτής στη διερεύνηση της στρωματογραφίας αρχαίων δαπέδων και στην ανίχνευση πιθανών αποσαθρωμένων περιοχών.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3

1. R. Halmshaw, (1994), *Non- Destructive Testing*, Edward Arnold, London, (1994), p. 1-5, 296-302.

2. S. Sfarra, E. Cheilakou, P. Theodorakeas, D. Paoletti, M. Koui, *An eye to the future, an eye to the past, thinking to a full-scale restoration process: Physical and chemical NDT analysis in cooperation.* In Proc. of 13th International Workshop on Advanced Infrared Technology & Applications (AITA 2015), September 29- October 2, 2015, Pisa, Italy, (2015), p. 296-299.

3. M. Petzet, J. Ziesemer (eds.), *Heritage at Risk, ICOMOS World Report 2006/2007, Monuments and Sites in Danger,* E. Reinhold-Verlag, Altenburg, Germany, (2008), p. 9-11, 200-203.

4. X. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing*, John-Wiley & Sons, New York, USA, (2001).

5. M. Vollmer, K. P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, John Wiley & Sons, Germany, (2011), p. 35-44.

6. Μ. Κουή, Ε. Χειλάκου, Π. Θεοδωρακέας, Β. Δρίτσα, Ν. Αβδελίδης, *Μη Καταστρεπτικές και Φασματοσκοπικές Μέθοδοι Εξέτασης Των Υλικών*, ISBN 978-960-603-498-5, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: http://hdl.handle.net/11419/6168

7. P. Theodorakeas, C. Ibarra-Castanedo, S. Sfarra, N. P. Avdelidis, M. Koui, X. Maldague, D. Paoletti, D. Ambrosini *NDT, inspection of plastered mosaics by means of Transient Thermography and Holographic Interferometry*. In J. NDT&E International, Vol. 47, (2012), p. 150-156.

8. R. Plesu, G. Teodoriu, G. Taranu, *Infrared applications for building investigation*, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi - Construction & A, Vol. 62 Issue 1, (2012), p. 158-167.

9. N. P. Avdelidis, A. Moropoulou, *Emissivity considerations in building Thermography*, Energy & Buildings 35 (7), (2003), p. 663-667.

10. V. Vavilov, V. Demin, *Infrared Thermographic Inspections of Operating Smokestacks*, Infrared Physics & Technology, Vol. 43 (3-5), (2002), p. 229-232.

11. P. Theodorakeas, E. Cheilakou, M. Koui (2014). *Quantitative Infrared Thermography for the inspection of plastered mosaics: comparison of experimental results and numerical modelling.* In Proc. of the 9th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin -Monubasin 9, 3-5 June, 2014, Ankara, Turkey. *(article in press)*

12. D. J. Titman, *Applications of Thermography in Non-Destructive Testing of Structures*, NDT&E International, Vol. 34, (2001), p. 149-154.

13. G. Accardo, D. Camuffo, G. Ferrari, *A micrometeorological study of the air inside the Scrovegni Chapel in Padua [in:] Deterioramento e Conservatione della Pietra*, 3 Congresso Int., Venezia, (1979), p. 665-676.

14. G. Accardo and V. Fassina, *On the Deterioration of the 11th and 12th Century Mosaics of the Basilica of Torcello: Proposal of a non Destructive Test to Evaluate the Moisture of a Wall*, In 6th Triennial Meeting /ICOM Committee for Conservation , Comité de l'ICOM pour la Conservation, Ottawa, 21-25 September, (1981), LRMH : CON-ICOM-OTTAWA-81/3.

15. G. M. Carlomagno and C. Meola, *Infrared thermography in the restoration of cultural properties*, in Thermosense XXIII, vol. 4360 of Proceedings of SPIE, USA, (2001), p. 203–216.

16. G. M. Carlomagno and C. Meola, *Recent advances in the use of infrared thermography*, Institute of Physics Publishing Measurement Science and Technology, Sci. Technol. 15 R27–R58, (2004), stacks.iop.org/MST/15/R27: 15/10/2014

17. E. Grinzato, C. Bressan, S. Marinetti, P. G. Bison, C. Bonacina, *Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared*, Infrared Phys Amp Technol, 43(3–5), (2002), p. 165–9.

18. E. Grinzato, *Thermography in cultural heritage conservation*, in Recent Advances in non Destructive Inspection, Meola C. (ed.), chapter 5, Nova Science Publisher, New York, NY, USA, (2010), p. 125–160.

19. A. Bianco and V. Ceradini, *The Church of S. Eusanio, Damaged by the April 6 2009 L' Aquika Earthquake: In situ Diagnostic Investigations as Confirmation of Historical Research and Aimed at Restoration Plan,* Proc. in the 14th Europ. Conf. on Earthquake Engineering, Ohrid, Republic of Macedonia, (2010), p. 1-6.

20. B. Wiecek and M. Poksinska, *Passive and Active Thermography Application for Architectural Monuments,* Proc. in the 8th Conf. on Quantitative Infrared Thermography, Padova, Italy, (2007), p. 1-10.

21. C. A. Brebbia (ed.), *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XIII*, WIT Transactions on the Built Environmental, Vol. 131, UK, (2013), p. 100-111.

22. D. Paoletti, D. Ambrosini, S. Sfarra, F. Bisegna, *Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation*, Journal of Cultural Heritage, Volume 14, Issue 2, (2013), p. 116-121.

23. E. Grinzato, *IR Thermography applied to historical buildings*, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa, (2012).

http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/598_wcndtfinal00597.pdf: 10/6/2014

24. S. Imposa, *Infrared thermography and Georadar techniques applied to the ''Sala delle Nicchie'' (Niches Hall) of Palazzo Pitti*, Florence (Italy), J Cultural Heritage 11, (2010), p. 259–64.

25. A. Moropoulou, M. Koui, P. Moundoulas, N.P. Avdelidis, *In situ non destructive evaluation of compatibility of repair mortars to the historic masonries validated by thermal analysis*, in Proc. 4th Mediterranean Conference on Calorimetry and Thermal analysis, G. C. Papanicolaou, G. Parisakis (eds.), Patra, Greece, (1999), p. 171-178.

26. A. Moropoulou, N. P. Avdelidis, P. Theoulakis, M. Koui, *Thermography as an evaluation tool for studing the movement of water through various porous materials, capillary rise evaporation*, Thrmosense XXIII, eds: A.E. Rozlosnik, R.B. Dinwiddie, Vol. 4306, SPIE Publ., (2001), p. 229-235.

27. A. Moropoulou, Th. Tsiourva, P. Theoulakis, B. Christaras, M. Koui, *Non destructive evaluation of pilot scale treatments for porous stone consolidation in the Medieval City of Rhodes,* PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology, Vol. 56, (1998), p. 259-278.

28. N. P. Avdelidis and A. Moropoulou, *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures,* Journal of Cultural Heritage, 5, (2004), p. 119-127,

29. A. Moropoulou, N. P. Avdelidi, M. Koui, *IR thermography for the assessment and monitoring of historic materials and structures,* 3rd International Conference on Non Destructive Testing of the Hellinic Society for NDT, Chania, Greece, (2003), p. 315-319.

30. E. Ftikou, E. Cheilakou, P. Theodorakeas, N.P. Avdelidis, K. Roumpopoulos, M. Koui, *The Mycenaean tomb 'Treasury of Minyas: Conservation problems and evaluation of deterioration phenomena*, In Proc. of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin- MONUBASIN8, 31 May- 2 June Patras, Vol. 1, Greece, (2010), p 207-222.

31. S. Sfarra, P. Huke, P. Theodorakeas, D. Paoletti, N.P. Avdelidis, D. Ambrosini, R. Klattenhoff, M. Koui, R. B. Bergmann (2011). *Non-Destructive Testing (NDT) Methods used for the Study of Stone Frescoes.* In Proc. of the 6th International Workshop NDT in progress 2011, 10-12 October, 2011, Prague, Czech Republic, CD ROM..

32. P. Theodorakeas, S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, N.P. Avdelidis, M. Koui, X.P.V. Maldague, D. Ambrosini, D. Paoletti (2013). *The use of Pulsed Thermography for the investigation of art and cultural heritage objects.* In Proc. of the 5th International Conference on NDT of Hellenic Society of NDT- IC MINDT 2013, 20-22 May, 2013, Athens, Greece, art. no. P.2.5, (2013) CD ROM.

33. L. Palaia , R. Sánchez , V. López , L. Gil , J. Monfort , S. Tormo , P. Navarro , M. Ángeles Álvarez, *Procedure for NDT and Traditional Methods of Ancient Building Diagnosis, by Using Thermograph, Digital Images and other instruments data Analysis*, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct, Shanghai, China, (2008), p. 25-28.

34. A. Tavukçuoğlua, A. Düzgüneşb, E. N. Caner-Saltıkc, S. Demircid, *Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building*, NDT & E International Volume 38, Issue 5, Ağzıkarahan (Aksaray), Turkey, (2005), p. 402–410.

35. N. Yastikli and E. Gulter, *Performance Evaluation of Thermographic Cameras for Photometric Documentation of Historical Buildings*, BCG - Boletim de Ciências Geodésicas, V. 19, no 4, (2013), p. 711-728.

36. Ch. Maierhofer, M. Roellig, *Active Thermography for the Characterization of Surfaces and Interfaces of Historic Masonry Structures*, Non-Destr. Testing in Civil Engng., Nantes, France, (2009), p. 1-6.

37. M. Cabrelles, S. Galcerá, S. Navarro, J. L. Lerma, T. Akasheh, N. Haddad, *Integration of 3D Laser Scanning, Photogrammetry and Thermography to record architectural monuments*, 22nd CIPA Symposium, October 11-15, Kyoto, Japan, (2009), 6 p. http://cipa.icomos.org 10/5/2015

38. P. Theodorakeas , C. Ibarra-Castanedo, S. Sfarra, N. P. Avdelidis, M. Koui, X. Maldague, D. Paoletti, D. Ambrosini., *NDT inspection of plastered mosaics by means of Transient Thermography and Holographic Interferometry*, in J. NDT&E International, Vol. 47, (2012), p. 150-156.

39. P. Theodorakeas, N. P. Avdelidis, M. Koui, C. Ibarra – Castanedo, E. Cheilakou, A. Bendada, K. Ftikou, X. P. V. Maldague, (2010), *Active thermographic NDT approaches for the assessment of plastered mosaics*, In Proc. of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin- MONUBASIN8, Patras, Greece, 31 May- 2 June (2010), Vol. 2, p. 442-456.

40. N. P. Avdelidis, M. Koui, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, *Thermographic studies of plastered mosaics,* J. Infrared Physics & Technology, Issue 3, (SPEC. ISS.), (2007), p. 254-256.

41. E. Cheilakou, N. P. Avdelidis, C. Ibarra – Castanedo, M. Koui, A. H. Bendada, X. P. V. Maldague, *Non destructive study of plastered mosaics with the use of active thermograph*, In proc. of SPIE- The International Society for Optical Engineering, Orlando, Florida, USA, 5-9 April (2010) Thermosense XXXII p.76610F-1-76610F-8.

42. P. Theodorakeas, E. Cheilakou, E. Ftikou, M. Koui (2015). *Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures.* In Proc. of 33rd UIT Heat Transfer Conference, 22-24 June, 2015, L'Aquila, Italy, (2015)CD ROM..

43. A. Moropoulou, M. Koui, N. P. Avdelidis, E. T. Delegou, E. Aggelakopoulou, M. Karoglou, P. Karmis, A. Aggelopoulos, S. Griniezakis, E. A Karagianni, N. K. Uzunoglou, *Investigation for the compatibility of conservation interventions on Hagia Sophia mosaics using NDT techniques*, PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology, 59, (2000), p. 103-120.

44. G. M. Carlomagno, R. Maio, C. Meola, N. Roberti, *Infrared thermography and geophysical techniques in cultural heritage conservation*, Quantitative Infra Red Thermography Journal, vol. 2, (2005), p. 5–24.

45. A. Moropoulou, N. P. Avdelidis, M. Koui, E. T. Delegou, Th. Tsiourva, *Infrared thermographic assessment of materials and techniques for the protection of cultural heritage*, Multispectral and hyperspectral image acquisition and processing, Q. Tong, Y. Zhu, Z. Zhu (eds.), Vol. 4548, SPIE Publ., (2001), p. 313-318.

46. E. Grinzato, G. Cadelano, P. Bison, A. Petracca, *Seismic risk evaluation aided by IR thermography*, Proc. SPIE 7299, Thermosense XXXI, 72990C (2009), 12 p., doi:10.1117/12.818610.

47. L. Binda, L. Cantini, M. Cucchi, *Thermovision: Applications in Conservation Field to Detect Hidden Characteristics of Building Structures,* 11th North Amer. Masonry Conf., Minneapolis, USA, (2011), p.1-12.

48. E. Grinzato, P. G. Bison, S. *Marinetti, Monitoring of ancient buildings by the thermal method Journal of Cultural Heritage*, Elsevier, vol.3, (2002), p. 21-29.

49. M. Jol. Harry, Ground Penetrating Radar Theory, and Applications, Elsevier, (2008), 544 p.

50. D. J. Daniels (ed.), *Ground Penetrating Radar – 2nd Edition*, Publ. The Institution of Electrical Engineers (2004), p. 353-656.

51. J. S. Mellett, *Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management and geology,* in J. Appl. Geophysics, 33 [1-3], (1995), p. 157-166.

52. L. B. Conyers, *Ground-penetrating radar for anthropological research*, Antiquity, v. 84, n. 323, (2010), p 175-184.

53. P. M. Reppert, F. D. Morgan, and M. N. Tosoz., *Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficient*, Journal of Applied Geophysics, vol.43, (2000), p. 189-197.

54. GSSI, Handbook for Radar Inspection of Concrete, Geophysical Survey Systems, Inc., (2001), p. 6-15.

55. Ch. Maierhofer, A. Brink, M.Rollig and H. Wiggenhauser, *Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar*, Journal of NDT & E International, 36, (2003), p. 257-263.

56. E. Cheilakou, P. Theodorakeas, M. Koui, S. Moustakidis, C. Zeris (2013). *Determination of reinforcement and tendon ducts positions on pre-stressed concrete bridges by means of Ground Penetrating Radar (GPR).* In Proc. of the 5th International Conference on NDT of HSNT- IC MINDT 2013, Athens, Greece, art. no P.10.5, (2013), CD ROM.

57. C. Maierhofer, *Nondestructive Evaluation of Concrete Infrastructure with Ground Penetrating Radar*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Volume 15, Issue 3, (2003), p. 287-297.

58. Z. Zhao and J.P. Mohsen, *Using Ground Penetrating Radar Technology To Locate Subsurface Voids Below Pavements,* International Journal of Pavements, IJP 2005, Volume 4 Number 1-2, (2005), pp. 63-71.

59. W. Uddin and W.R. Hudson, *Evaluation of NDT Equipment for Measuring Voids under Concrete Pavements*, ASTM STP 1198,Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli (Second Volume), Philadelphia, USA, (1994), p. 488-502.

60. A. K. Wells and R.L. Lytton, *Ground Penetrating Radar For Measuring Pavement Layer Composition And Void Detection,* Proceedings of the Second International Symposium On Maintenance And Rehabilitation Of Pavements And Technological Control, Auburn, Alabama, USA, 2001, p. 141-156.

61. L. Krysiński and J. Sudyka, *GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks,* Journal of Applied Geophysics 97 (2013) 27–36

62. P. C. Sirles, *Use of Geophysics for Transportation Projects,* NCHRP Synthesis of Highway Practice 357, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D. C., USA, (2006), p. 13-18.

63. M. O. Gordon, K. Broughton and M. S. A. Hardy, *The assessment of the value of GPR imaging of flexible pavements*, NDT Group, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Edinburgh, Crew Building, King's Buildings, Edinburgh EH9 3JN, UK, (1999), p. 11. http://dx.doi.org/10.1155/2011/989136 : 26/10/2014

64. C. Fauchard, X. Derobert, and P. Cote, *GPR performances on a road test site*, In Proc. SPIE Vol. 4084, Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, D. A. Noon, G. F. Stickley, D. Longstaff, (eds.), (2000), p. 421-426.

65. G. R. Olhoeft, *Maximizing the information from ground penetrating radar,* Journal of Applied Geophysics, Vol. 43, (2000), p. 174-187.

66. D. A. Willett, K. C. Mahboub, and B. Rister, *Accuracy of ground-penetrating radar for pavement-layer thickness analysis*, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 132, n 1, (2006), p. 96-103.

67. K. R Maser, T. J. Holland, R. Roberts, and J. Popovics, *NDE methods for quality assurance of new pavement thickness,* International Journal of Pavement Engineering, v 7, n 1, March, (2006), p. 1-10.

68. M. Bini, A. Fornaciari, A. Ribolini, A. Bianchi, S. Sartini, F. Coschino, *Medieval phases of settlement at Benabbio castle, Apennine mountains Italy: evidence from Ground Penetrating Radar survey,* Journal of Archaeological Science 37, Elsevier, (2010), p. 3059-3067.

69. L. Orlando, E. Slob, *Using multicomponent GPR to monitor cracks in a historical building*, Journal of Applied Geophysics 67, Elsevier, (2009), p. 327–334

70. A. Calia, G. Leucci, N. Masini, L. Matera, R. Persico and M. Sileo, *Integrated prospecting in the crypt of the Basilica of Saint Nicholas in Bari, Italy,* J. Geophys. Eng. 9 IOP, (2012), p. 271–281.

71. A. Calia, M. Lettieri, G. Leucci, L. Matera, R. Persico, M. Sileo, *The mosaic of the crypt of St. Nicholas in Bari (Italy): integrated GPR and laboratory diagnostic study*, Journal of Archaeological Science 40, Elsevier, (2013), p. 4162-4169.

72. N. Linford, *Lullingstone Roman Villa, Eynsford, Kent, Report on Geological survey, January 2011,* Research Department Report Series 62-2011, English Heritage, ISSN, (2011), p. 1749-8775.

73. A. C. Tsitos and G. A. Athanasopoulos, *Inversion of Field Data of the SASW Method – Numerical Simulation and Investigation of the Influence of Soil Conditions*, Proceedings (in Greek) of 5th Hellenic Conference on Geotechnical and Geoenviromental Engineering, Xanthi, May-June, 2006, Vol. 2, (2006), p. 465-472.

74. S. Piccoli, B. A. Luke, K. H. II. Stokoe, *In Situ Shear Wave Velocities from SCPT and SASW Measurements,* in Proceedings of 10th European Conference on Earthquake Engineering, EAEE. Vienna, Austria, Vol. II, (1994), p. 337-342.

75. S. Nazarian, *In-Situ Determination of Elastic Moduli of Soil Deposits and Pavement Systems by Spectral Analysis of Surface Waves Method*, PhD thesis, University of Texas at Austin, Austin, Tex., 1984, 453 pp.

76. K. H. Stokoe, S. G. Wright, J. A. Bay and J. M. Roesset, *Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method*, Proceedings of the Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee 10, New Delhi, (1994), p. 15-25.

77. Y. S. Cho, *NDT Response of Spectral Analysis of Surface Wave Method to Multi Layer Thin High*-Strength Concrete Structures, Ultrasonics, V. 40, (2002), p. 227-230.

78. M. E. Kalinski, *Measurements of Intact and Cracked Concrete Structural Elements by the SASW Method,* master's thesis, University of Texas at Austin, Austin, Tex., 1994.

79. M. Karray and G. Lefebvre, *Identification and Isolation of Multiple Modes in Rayleigh Waves Testing Methods*, Proceedings of the Use of Geophysical Methods in Construction, ASCE, Denver, Colo., Aug. (2000), p. 80-94.

80. K. Tokimatsu, S. Tamura and H. Kojima, *Effects of Multiple Modes on Rayleigh Wave Dispersion*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, V. 118, No. 10, (1992), p. 1529-1543.

81. Γ. Παπαβασιλείου, *Μετρήσεις με τη μέθοδο των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση*, Εργαστήριο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, Αθήνα (2014), 11σ.

82. R. Al Wardany, G. Ballivy, J. L. Gallias, K. Saleh, and J. Rhazi, *Assessment of Concrete Slab Quality and Layering by Guided and Surface Wave Testing*, *ACI Materials Journal*, 104, No. 3, 2007, 268.

83. D. E Newcomb and B. Birgisson, *Measuring in situ mechanical properties of pavement subgrade soils,* National Cooperative Highway Research Program, National Research Council (U.S.) Transportation Research Board Washington, DC National Academy Press, (19990, p. 6-48.

84. G. Hévin, O. Abraham, H. A. Pedersen and M. Campillo, *Characterization of surface cracks with Rayleigh waves: a numerical model*, NDT&E International, Vol. 31, No. 4, (1998), p. 289-297.

85. D. R. Hiltunen and R. D. Woods, *Variables affecting the testing of pavements by the surface wave method,* Transp. Res. Rec., 1260, (1990), p. 42-52.

86. N. Gucunski, V. Krstic and M. H. Maher, Backcalculation of pavement profiles from the SASW test by neural networks, Chapter 8 in Artificial Neural Networks for Civil Engineers: Advanced Features and Applications, I. Flood and N. Kartam (eds.), ASCE, (1998), p. 191-222.

87. B. Birgisson, J. Ovik, and D. E. Newcomb, *Analytical Predictions of Seasonal Variations in Flexible Pavements at the MnRoad Site,* Transportation Research Record No. 1730, Transportation Research Board, (2000), p. 81-90.

88. U. Ekdahl, P. E. Bengtsson, and N. Ryden, *A new framework for analytical pavement design based on systematic control during construction work*, Proceedings of the 14th Nordic Geotechnical Meeting (NGM 2004), Ystad, Sweden, (2004), p. 26. http://www.researchgate.net/publication/22886125 :20/08/2015.

89. C. P. Abbis, *Deformation of landfill from measurements of shear wave velocity and damping*, Geotechnique, Vol. 51, No. 6, (2001), p. 483-494.

Κατάλογος Εικόνων Κεφαλαίου 3

Εικόνα 3.1: E. Ftikou, E. Cheilakou, P. Theodorakeas, N.P. Avdelidis, K. Roumpopoulos, M. Koui, *The Mycenaean tomb 'Treasury of Minyas: Conservation problems and evaluation of deterioration phenomena*, In Proc. of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin-MONUBASIN8, 31 May- 2 June Patras, Vol. 1, Greece, (2010), p 207-222.

Εικόνα 3.2: Μ. Κουή, Ε. Χειλάκου, Π. Θεοδωρακέας, Β. Δρίτσα, Ν. Αβδελίδης, *Μη Καταστρεπτικές και Φασματοσκοπικές Μέθοδοι Εξέτασης Των Υλικών*, ISBN 978-960-603-498-5, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: http://hdl.handle.net/11419/6168, (2015), σελ. 102-125.

Εικόνα 3.3: Μ. Κουή, Ε. Χειλάκου, Π. Θεοδωρακέας, Β. Δρίτσα, Ν. Αβδελίδης, *Μη Καταστρεπτικές και Φασματοσκοπικές Μέθοδοι Εξέτασης Των Υλικών*, ISBN 978-960-603-498-5, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: http://hdl.handle.net/11419/6168, (2015), σελ. 102-125.

Εικόνα 3.4: Γ. Παπαβασιλείου, *Μετρήσεις με τη μέθοδο των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση*, Εργαστήριο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, Αθήνα (2014), 11σ.

Εικόνα 3.5: Γ. Παπαβασιλείου, *Μετρήσεις με τη μέθοδο των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση*, Εργαστήριο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, Αθήνα (2014), 11σ.

Εικόνα 3.6: Γ. Παπαβασιλείου, *Μετρήσεις με τη μέθοδο των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση*, Εργαστήριο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, Αθήνα (2014), 11σ.

Εικόνα 3.7: Γ. Παπαβασιλείου, *Μετρήσεις με τη μέθοδο των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση*, Εργαστήριο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, Αθήνα (2014), 11σ.

Κεφάλαιο 4

Δειγματοληπτικός έλεγχος ψηφιδωτών δαπέδων στο εργαστήριο

Οι σύγχρονες αρχές και η φιλοσοφία συντήρησης και προστασίας των μνημείων, απαιτούν μια ολοκληρωμένη γνώση και τεκμηρίωση των ιδιοτήτων των δομικών υλικών τους και της φθοράς που παρουσιάζουν. Όμως, η ανεκτίμητη πολιτισμική αξία των αρχαίων μνημείων απαιτεί μια προσεκτική, μη επεμβατική, προσέγγιση της μελέτης τους. Έτσι, μια πρώτη προσέγγιση για τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου και του υποστρώματος του είναι η επί τόπου εξέτασή του με την εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων. Σε δεύτερη φάση, προκειμένου να γίνει ορθή επιλογή της τεχνικής και των κατάλληλων υλικών συντήρησης του υποστρώματος, είναι απαραίτητη η διερεύνηση των φυσικοχημικών, ορυκτολογικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των δομικών υλικών της κατασκευής του. Χρειάζεται, επομένως, η προσεκτική λήψη μικρών ποσοτήτων αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, χωρίς να αλλοιώνεται η αισθητική όψη του μνημείου και η μελέτη τους στο εργαστήριο. Η μελέτη αυτή θα πραγματοποιηθεί με εξελιγμένες μεθόδους, ικανές να δώσουν τις απαραίτητες πληροφορίες, όσον αφορά στη χημική και ορυκτολογική σύσταση των κονιαμάτων.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο (3) αναφέρθηκαν τα απαραίτητα θεωρητικά και βιβλιογραφικά δεδομένα για την εφαρμογή των μη καταστρεπτικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται, κατά την πρώτη προσέγγιση, στη μελέτη των ψηφιδωτών δαπέδων της παρούσας διατριβής. Προκειμένου να διαμορφωθεί, όμως, μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης των ψηφιδωτών δαπέδων, ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη τεχνική συντήρησης, απαιτείται η πλήρης γνώση και τεκμηρίωση των ιδιοτήτων των δομικών υλικών τους και της φθοράς που παρουσιάζουν.

Στο πλαίσιο αυτό, διερευνάται, στο δεύτερο στάδιο της παρούσας διατριβής, η εφαρμογή κατάλληλων αναλυτικών μεθόδων σε συγκεκριμένες κατηγορίες ιστορικών ψηφιδωτών. Στα κριτήρια επιλογής των μεθόδων λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η απαιτούμενη ποσότητα του προς ανάλυση δείγματος να είναι ελάχιστη και να απαιτείται η ελάχιστη δυνατή επεξεργασία. δεδομένου, ότι η λήψη δείγματος από αρχαία μνημεία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εξαιρετικά περιορισμένη έως και απαγορευτική. Έτσι, το ενδιαφέρον εστιάστηκε στη χρήση των μεθόδων του ψηφιακού μικροσκοπίου (DM), της ηλεκτρονιακής μικροσκοπίας σάρωσης με μικροαναλυτή ακτίνων-Χ (SEM-EDX), της περίθλασης ακτίνων-Χ (XRD) και της θερμικής βαρυμετρικής ανάλυσης (TG/DTG). Ο στόχος είναι, με τη συνδυαστική προσέγγιση αυτών των μεθόδων, να εξαχθούν συμπεράσματα για την ανάπτυξη της κατάλληλης μεθοδολογίας για τη διάγνωση και αποτίμηση των κονιαμάτων κατασκευής του υποστρώματος των αρχαίων ψηφιδωτών δαπέδων.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στην ερευνητική αυτή περιοχή και δίνονται τα απαραίτητα θεωρητικά στοιχεία για τις αναλυτικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.

4.1 Διερεύνηση των κονιαμάτων αρχαίων μνημείων

Η συστηματική έρευνα των ιστορικών κονιαμάτων από τα μνημεία της λεκάνης της Μεσογείου, πραγματοποιείται από τη δεκαετία του ΄90 [1, 2, 3, 4]. Το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων, που έχουν διερευνηθεί, αφορά σε κονιάματα δόμησης, κυρίως, της ρωμαϊκής, της βυζαντινής και της μέσο-βυζαντινής περιόδου [5]. Ακολουθούν τα κονιάματα επιχρισμάτων, τοιχογραφιών, επιτοίχιων ψηφιδωτών και ψηφιδωτών δαπέδου. Στην διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχει μεγάλος αριθμός αναφορών, που αφορούν στη διερεύνηση της τεχνολογίας κατασκευής των ιστορικών κονιαμάτων και στη φθορά που έχουν υποστεί. Οι έρευνες αποσκοπούν στην προστασία και διατήρησή τους [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, , 14, 15, 16, 17, 18].

Η μεθοδολογία εξέτασης των δειγμάτων, διαφέρει κατά περίπτωση. Οι εξελιγμένες μέθοδοι ανάλυσης που εφαρμόζονται συνοψίζονται στις ακόλουθες. Για τη μελέτη της μορφολογίας της επιφάνειας χρησιμοποιείται, κυρίως, το οπτικό, ή πολωτικό μικροσκόπιο [19, 20]. Η μελέτη της μικροδομής και η διασπορά των διαφόρων χημικών στοιχείων στη σύσταση των δειγμάτων και των προϊόντων φθοράς πραγματοποιείται με το ηλεκρονιακό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και τη μικροανάλυση (EDX). Για την κρυσταλλογραφική και ορυκτολογική μελέτη των δειγμάτων χρησιμοποιείται η περίθλαση ακτίνων X (XRD). Η διαφορική θερμική και βαρυμετρική ανάλυση (DTA/TG), εφαρμόζεται, κυρίως, για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό της σύστασης των κονιαμάτων [21, 22]. Ακόμη, η κλασική χημική ανάλυση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των χημικών συστατικών του κονιάματος [23, 24, 25, 26]. Τέλος, οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες προσδιορίζονται, αντίστοιχα, με κοκκομετρική ανάλυση, την ποροσιμετρία (Hg) ή (N_2) για τον έλεγχο του πορώδους και με τη μέτρηση των θλιπτικών αντοχών [27].

Οι αναφορές που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία, σχετικά, με τη διερεύνηση κονιαμάτων υποδομής αρχαίων ψηφιδωτών δαπέδων είναι περιορισμένες [28, 29, 30, 31, 32]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ερευνητική εργασία των (V. Starinieri & I. Papagianni et al., 2008), που αναφέρεται στη διερεύνηση της τεχνολογίας της κατασκευής του υποστρώματος ψηφιδωτών δαπέδων σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις στην Ιταλία και την Ελλάδα. Η μεθοδολογία που ακολούθησε, περιλαμβάνει χημική ανάλυση, προσδιορισμό του πορώδους και κοκοδιαβάθμηση μέσω της θλιπτικής αντοχής τους [27]. Τα συμπεράσματα της μελέτης των παραπάνω ερευνητών αναφέρονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 1. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, παρέχει αρκετές πληροφορίες ως προς την τεχνολογία κατασκευής των κονιαμάτων δόμησης των ψηφιδωτών δαπέδων, όμως, απαιτεί την καθολική καταστροφή του εξεταζόμενου δείγματος. Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, ο στόχος της παρούσας έρευνας είναι η εξέταση πολύ μικρών ποσοτήτων δειγμάτων με τη μικρότερη δυνατή επεξεργασία τους. Αξιολογώντας τα δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία και λαμβάνοντας υπόψη το στόχο που τέθηκε στην παρούσα μελέτη, επιλέγηκαν οι ακόλουθες μέθοδοι ανάλυσης για τη διερεύνηση του κονιάματος στα δείγματα επιλεγμένων ψηφιδωτών:

- Ψηφιακό μικροσκόπιο (DM): για την μορφολογική μελέτη της επιφάνειάς.

- Ηλεκρονιακό μικροσκόπιο σάρωσης με μικροανάλυση (SEM- EDX): για τη μελέτη της μικροδομής και τον προσδιορισμό των χημικών στοιχείων στη σύσταση της.
- Περίθλαση ακτίνων X (XRD): για την κρυσταλλογραφική και ορυκτολογική μελέτη των δειγμάτων.
- Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG/DTG): για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των συστατικών των κονιαμάτων.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων, θα αξιολογηθούν συνδυαστικά, ώστε να εξαχθούν τεκμηριωμένα συμπεράσματα, σχετικά με τη σύσταση, την τεχνολογία κατασκευής των υλικών της στρωματογραφίας των ψηφιδωτών δαπέδων και των φαινομένων φθοράς τους.
Στο πλαίσιο αυτό, κρίνεται σκόπιμο, στις παραγράφους που ακολουθούν, να δοθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο και οι αρχές λειτουργίας των παραπάνω μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των δειγμάτων.

4.2 Ψηφιακό μικροσκόπιο (Digital Microscopy, DM)

Στην παρούσα εργασία, το ψηφιακό μικροσκόπιο (DM) που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μορφολογίας στην επιφάνεια των κονιαμάτων είναι του τύπου, AM3113T Dino-Lite Premier. Ο τύπος αυτός του οργάνου κρίνεται, ιδιαίτερα, κατάλληλος για την επί τόπου μη καταστρεπτική εξέταση δομικών επιφανειών σε μνημεία και ιστορικά κτίρια. Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να εξεταστούν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας, χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη κατεργασία, ή αλλοίωση των υλικών. Πρόκειται για ένα φορητό μικροσκόπιο, τα κυριότερα τμήματα του οποίου περιγράφονται συνοπτικά ως ακολούθως:

- Το USB μικροσκόπιο, με οχτώ διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) προσαρμοσμένες κυκλικά γύρω από τον αισθητήρα.
- Το σύστημα εστίασης, το οποίο, κατά τη διάρκεια της εφαρμογής, μπορεί να αλλάξει περισσότερους φακούς για να ληφθούν εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων (x25, x50, x100, x200). Η μικρότερη μετρήσιμη διάσταση μεταξύ δυο σημείων d μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση του Abbe για τη διακριτική ικανότητα : $d=k\lambda/An$, όπου το k είναι σταθερά. Το βάθος εστίασης δίνεται από τη σχέση του Rayleigh: $\Delta z=\lambda/n\sin^2\theta$ και χαρακτηρίζει την απόσταση μεταξύ σημείων εστίασης, στα οποία η εικόνα παρουσιάζει αποδεκτή καθαρότητα.
- Το video monitor, με τη βοήθεια του οποίου καταγράφονται οι εικόνες ψηφιακά και μπορούν να εισαχθούν στον υπολογιστή και, ακολούθως, σε σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία τους (η ψηφιακή ανάλυση εικόνας Pal είναι 640x480 pixel).

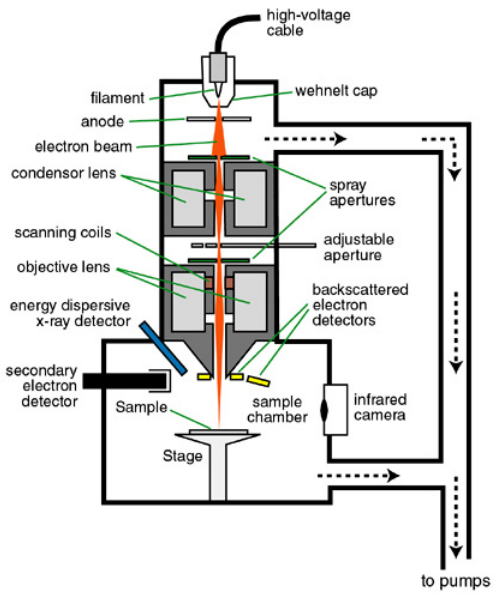
Κατά τη διαδικασία της μικροσκοπικής εξέτασης το φως πρέπει να πέφτει κατακόρυφα στην επιφάνεια του δείγματος και να ανακλάται επιστρέφοντας διαμέσου των αντικειμενικών φακών. Συνεπώς, σημαντικό είναι το γεγονός της μορφής της

εξεταζόμενης επιφάνειας, καθώς και του βαθμού τραχύτητας της, αφού σε μία επίπεδη επιφάνεια ο φακός του μικροσκοπίου προσαρμόζεται πολύ καλύτερα, με αποτέλεσμα οι εικόνες που λαμβάνονται να είναι καλύτερης ποιότητας.
Η παραπάνω τεχνική εφαρμόστηκε επί τόπου σε σπαράγματα του υποστρώματος των ψηφιδωτών δαπέδου, καθώς και στα αποσπασμένα δείγματα στο εργαστήριο.

4.3 Ηλεκρονιακό μικροσκόπιο σάρωσης με μικροανάλυση ακτίνων-Χ (SEM/EDX)

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα αναλυτικού ηλεκρονιακού μικροσκοπίου, περιλαμβάνει το ηλεκρονιακό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) με δυνατότητα μεγέθυνσης από 10 μέχρι 300.000 φορές, με ενσωματωμένο τον μικροαναλυτή. Αυτό επιτρέπει τη μελέτη της μικροδομής σε μια ποικιλία υλικών, τόσο αγώγιμων, όσο και μη αγώγιμων, ενώ, ταυτοχρόνως, παρέχει τη δυνατότητα στοιχειακής χημικής ανάλυσης, μέσω του φασματόμετρου διασπειρόμενης ενέργειας ακτίνων Χ (Energy Dispersive X-ray analysis, EDX), επιτρέποντας τη στοιχειακή ποιοτική και ποσοτική χαρτογράφηση (element mapping) της επιφάνειας [33].
Ένα ηλεκρονιακό μικροσκόπιο σάρωσης (Εικόνα 4.1) αποτελείται, συνήθως, από τα παρακάτω τέσσερα συστήματα [33]:

- Το σύστημα φωτισμού και κατεύθυνσης της ακτινοβολίας, που παράγει την δέσμη ηλεκτρονίων και την κατευθύνει πάνω στο δείγμα.
- Το σύστημα πληροφοριών, ανιχνευτές, που λαμβάνει τη συλλογή των δεδομένων που εκπέμπονται από το δείγμα κατά τον βομβαρδισμό του από τα ηλεκτρόνια και τους αισθητήρες που διαχωρίζουν και αναλύουν αυτά τα πληροφοριακά σήματα.
- Το σύστημα παρουσίασης που αποτελείται από έναν ή δύο καθοδικούς σωλήνες ακτίνων-Χ, για την παρατήρηση και φωτογράφηση της επιφάνειας.
- Το σύστημα κενού που απομακρύνει τα αέρια από την στήλη.



Εικόνα 4.1: Σχηματική παράσταση λειτουργίας SEM/EDX.

Η ηλεκτρονική οπτική κολόνα περιέχει το θάλαμο ηλεκρονιακού πιστολιού (electron gun) όπου γεννιέται η δέσμη ηλεκτρονίων και την περιοχή των ηλεκτρομαγνητικών φακών, οι οποίοι εστιάζουν τη δέσμη σε ένα πάρα πολύ μικρό σημείο (ή δέσμη) (beam-spot, probe) με όσο το δυνατό μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρονίων. Η ταχύτητα των ηλεκτρονίων ρυθμίζεται με τη μεταβολή του δυναμικού επιτάχυνσης στο ηλεκρονιακό πιστόλι. Η εστιασμένη ηλεκτρονική δέσμη προσπίπτει στην επιφάνεια του δοκιμίου, που δημιουργεί εκπομπές ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού στο σημείο πρόσπτωσης. Επί πλέον, η δέσμη σαρώνει την επιφάνεια του δοκιμίου σε παράλληλες ευθείες γραμμές μέσα σε ένα πάρα πολύ μικρό τετράγωνο. Με την πρόσπτωση της δέσμης στην επιφάνεια του δοκιμίου, παράγεται μία πληθώρα εκπομπών (signals), που είναι χαρακτηριστικές των τοπογραφικών και υλικών ιδιοτήτων του σώματος σε συνάρτηση με την ταχύτητα των ηλεκτρονίων [33].

Τέσσερα είναι τα κύρια είδη τέτοιων εκπομπών που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση και ανάλυση του δοκιμίου, σημείο προς σημείο, κατά την διάρκεια της σάρωσης και δημιουργίας του ειδώλου, ή των φασματογραφημάτων. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές αυτές είναι τα επανασκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (backscattered electrons, BSED), τα δευτερογενή ηλεκτρόνια (secondary electrons, SED), οι ακτίνες Χ και η καθοδοφωτοβολία (cathodoluminscence, CL). Υπάρχουν επίσης και μερικές υποκατηγορίες όπως τα ηλεκτρόνια auger και τα φιλτραρισμένα, ή ανακλώμενα. Τα επανασκεδαζόμενα και τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, όπως επίσης και η εκπεμπόμενη ακτινοβολία Χ, οι εκπομπές που χρησιμοποιούνται, κυρίως για την απεικόνιση και μελέτη της στοιχειακής σύστασης της μικροδομής [33].

Τα δευτερογενή (SED) είναι χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια που προκύπτουν από την μη ελαστική κρούση των πρωτογενών ηλεκτρονίων της δέσμης με κάποιο ηλεκτρόνιο των ατόμων του δείγματος. Λόγω της χαμηλής ενέργειάς τους απορροφώνται γρήγορα και ξεφεύγουν μόνο αυτά που παράγονται κοντά στην επιφάνεια, δημιουργώντας μια εικόνα της τοπογραφίας της. Η φαινόμενη σκίαση στην επιφάνεια είναι αποτέλεσμα της απορρόφησης των δευτερογενών ηλεκτρονίων μέσα σε διάφορα μέρη του δοκιμίου. Συμπερασματικά, η εικόνα από δευτερογενή ηλεκτρόνια συστήνεται, κυρίως, σε μεγάλες μεγεθύνσεις και δείχνει περισσότερες λεπτομέρειες των χαρακτηριστικών της μικροδομής. Τα επανασκεδαζόμενα (BSED) είναι υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια της δέσμης που σκεδάζονται από το δοκίμιο. Οι αντιθέσεις στην εικόνα δημιουργούνται από τις διαφορετικές συνθέσεις των φάσεων και σχετίζονται με τον ατομικό αριθμό των στοιχείων, εμφανίζοντας τις διαφορετικές φωτεινές περιοχές της εικόνας. Η ανάλυση με SEM-EDX με τη χρήση των BSED ηλεκτρονίων απαιτεί πολύ λείες επιφάνειες για επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Υπάρχει, ακόμα, η δυνατότητα της ψηφιακής μείξης των δύο παραπάνω εικόνων (MIX) [33].

Η μικροανάλυση με ακτίνες Χ βασίζεται στην ακτινοβολία Χ που εκπέμπεται από τα στοιχεία του δείγματος όταν αυτά βομβαρδίζονται από την υψηλής ενέργειας δέσμη των ηλεκτρονίων. Τα συστήματα μικροανάλυσης χρησιμοποιούν, έναν ανιχνευτή διασποράς ενέργειας (energy-dispersive detector, EDX) ή κάποιο ανιχνευτή μηκών κύματος. Οι EDX ανιχνευτές έχουν το πλεονέκτημα ότι συλλέγουν όλο το φάσμα συγχρόνως, ενώ, οι ανιχνευτές μήκους κύματος τα ανιχνεύουν διαδοχικά. Η απόκριση των ανιχνευτών

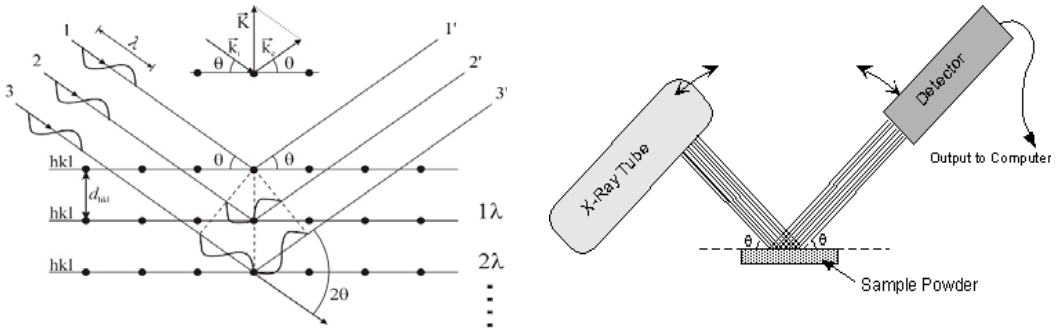
εμφανίζεται σε ένα ακτινογράφημα με κορυφές, η θέση των οποίων αντιστοιχεί σε κάποιο στοιχείο και η έντασή τους εκφράζει την ποσοτική παρουσία του. Η στοιχειακή χημική μικροανάλυση μπορεί να γίνει σε κάποιο σημείο της μικροδομής (spot) η στην παρατηρούμενη επιφάνεια της εικόνας (map) [33].

4.4 Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)

Η περίθλαση ακτίνων Χ (περιθλασιμετρία) χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με την κρυσταλλογραφική μελέτη και την ορυκτολογική σύσταση των υλικών. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας Χ, γνωστού μήκους κύματος (λ) στα εσωτερικά διαστήματα (d) μεταξύ των επιπέδων των κρυστάλλων, όταν το (λ) και (d) είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, που οδηγεί, ανάλογα με τις συνθήκες, σε συμβολή (ενίσχυση) ή σε απόσβεση της ακτινοβολίας [34].
Σύμφωνα με το νόμο των Η. και L. Braggs, συμβολή με ενίσχυση προκύπτει κάθε φορά που η διαφορά της διαδρομής των ακτίνων που περιθλώνται στα διάφορα κρυσταλλικά επίπεδα είναι ίση με το ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ των ακτίνων Χ (Εικόνα 4.2α) που εκφράζεται από την ομώνυμη σχέση [34]:

$$n\lambda = 2d\eta\mu\theta \qquad (4.1)$$

Όπου
n = (ακέραιος αριθμός) 1,2,3,…,n (τάξη ανάκλασης)
λ = το μήκος κύματος της μονοχρωματικής ακτινοβολίας
d= η απόσταση μεταξύ δύο εσωτερικών επιπέδων του κρυστάλλου (κρυσταλλικά διαστήματα)
θ= γωνία πρόσπτωσης και (2dημθ= διαφορά διαδρομής ακτινών).

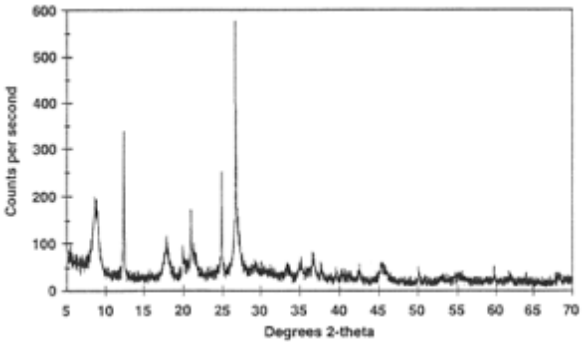


(α) (β)

Εικόνα 4.2: (α) Σχηματική παράσταση περίθλασης ακτίνων Χ στα επίπεδα των κρυστάλλων. (β) Σχηματική διάταξη του περιθλασίμετρου ακτίνων Χ.

Το περιθλασίμετρο ακτίνων Χ αποτελείται από τη λυχνία ακτίνων-Χ και το μονοχρωμάτορα, ώστε να παράγεται μονοχρωματική ακτινοβολία. Το όλο σύστημα είναι ενσωματωμένο πάνω στο γωνιόμετρο, το οποίο περιστρέφεται γύρω από το δείγμα με γωνία θ°, από 0 έως 90°. Στο δειγματοφορέα τοποθετείται το δείγμα σε μορφή σκόνης, που ακτινοβολείται. Η περιθλόμενη ακτινοβολία οδηγείται στον ανιχνευτή, ο οποίος περιστρέφεται με γωνία 2θ° από 0 έως 90ο (Εικόνα 4.2β). Κατά τη σάρωση του δείγματος η ένταση της ακτινοβολίας που ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή, οδηγείται στον

υπολογιστή και καταγράφεται στο διάγραμμα (ακτινογράφημα) σε συνάρτηση με τη γωνία, συνήθως (2θ°) (Εικόνα 4.3). Από τη θέση (2θ°) των κορυφών στο ακτινογράφημα υπολογίζεται το διάστημα (d) χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Braggs (4.1). Στη συνέχεια, γίνεται η ταυτοποίηση των κρυσταλλικών ενώσεων, ή η μελέτη του κρυσταλλικού πλέγματος με το κατάλληλο λογισμικό και τη βάση δεδομένων, που διαθέτουν οι ενσωματωμένοι υπολογιστές. Τέλος, από την ένταση (ύψος) των κορυφών μπορεί να γίνει μια ποσοτική εκτίμηση της κρυσταλλικής ένωσης που περιέχεται.



Εικόνα 4.3: Παράσταση ακτινοδιαγράμματος XRD.

Από όσα αναφέρθηκαν γίνεται φανερό ότι η μέθοδος ανάλυσης με περίθλαση ακτίνων X (XRD) είναι μια δυναμική μέθοδος για το επιστημονικό πεδίο της συντήρησης μνημείων και μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη διαδικασία αποτίμησης των επεμβάσεων συντήρησης [34].

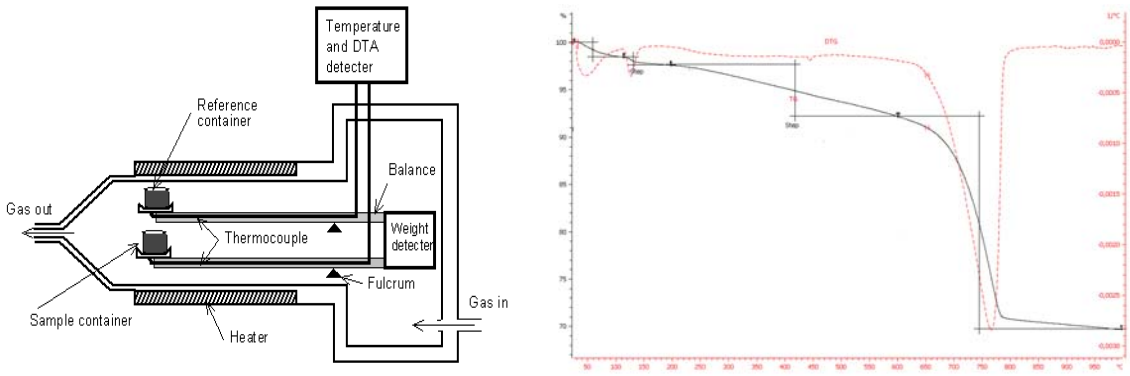
4.5 Μελέτη με θερμοβαρυμετρία (TG-DTG)

Οι θερμικές μέθοδοι ανάλυσης περιλαμβάνουν τεχνικές, όπως η διαφορική θερμική ανάλυση (DTA), η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG-DTG), η θερμομηχανική ανάλυση (TMA), η διαφορική θερμιδομετρική ανάλυση (DSC), η δυναμική μηχανική ανάλυση (DMA) κ.α.. Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν τη συνεχή καταγραφή δεδομένων με τη μορφή θερμικών διαγραμμάτων. Τα θερμογραφήματα χαρακτηρίζουν ένα απλό, ή σύνθετο σύστημα υλικών με βάση τις θερμοδυναμικές του μεταβολές, που είναι αποτέλεσμα των αλλαγών στις φυσική, ή χημική, ή δομική, ή μηχανική του κατάσταση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία [35].

Από τις παραπάνω θερμικές μεθόδους, η τεχνική που ήταν διαθέσιμη στο εργαστήριο ήταν η θερμοβαρυμετρική (TG-DTG) (Εικόνα 4.4α). Έτσι, κρίνεται σκόπιμο να δοθούν, παρακάτω, ορισμένα βασικά θεωρητικά στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία της μεθόδου. Η θερμοβαρυμετρία, εκμεταλλευόμενη τις θερμικές μεταβολές που υφίσταται το υλικό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμού των συστατικών του, αλλά και για τον ποσοτικό προσδιορισμό τους. Βασίζεται στην απώλεια μάζας που υφίσταται μια χημική ένωση κατά την προγραμματισμένη μεταβολή της θερμοκρασίας, συνήθως με σταθερό ρυθμό, και καταγράφεται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Η ατμόσφαιρα στην οποία συμβαίνει η μεταβολή παίζει σημαντικό ρόλο στις μετρήσεις της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης και μπορεί να είναι η ατμοσφαιρική και αδρανής, ή δραστική (reactive). Το

μέγεθος του δείγματος είναι μικρό για να αποφευχθούν σφάλματα λόγω θερμικών συνιστωσών [35].

Οι μετρήσεις θερμοβαρυμετρίας εκτελούνται με τη βοήθεια μικροζυγού ακριβείας, σε κλίβανο, όπου η άνοδος της θερμοκρασίας μπορεί να προγραμματιστεί και να ελεγχθεί απόλυτα. Η τεχνική TG αποδίδει τα αποτελέσματα σε γραμμική συνάρτηση της απώλειας μάζας με τη θερμοκρασία, ενώ, η διαφορική θερμοβαρυματρική διαφορίζοντας, λαμβάνει την πρώτη παράγωγο της TG, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα με τη μορφή καμπυλών η θέση των κορυφών των οποίων είναι χαρακτηριστική της ένωσης (ποιοτική ανάλυση). Το διάγραμμα που λαμβάνεται ονομάζεται θερμογράφημα. (Εικόνα 4.4β) [35].



(α) (β)

Εικόνα 4.4: (α) Σχηματικό διάγραμμα TG-DTG. (β) Τυπικό θερμογράφημα TG-DTG.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4

1. E. Goins, *A new protocol for the analysis of historic cementitious materials, PRO 12, historic mortars: characteristics and tests*, Proceedings of the international RILEM workshop, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, (1999), p. 71–79.

2. M. Koui and Ch. Ftikos, *The ancient Kamirian water storage tank: A proof of concrete technology and durability for tree millenniums*, Materials and Structures, Vol. 31, (1998), p. 623 - 627)

3. I. Papayianni, *Technology of mortars and bricks used in Ottoman Monuments of Thessaloniki*, in: G. Özşen (ed.), Proceedings of Conference on Studies in Ancient Structures, Yıldız Technical University, Istanbul, (1997), p. 245–253.

4. I. Papayianni, *Durability Lessons from the Study of Old Mortars and Concretes*, Lecture presented at ACI P.K. Mehta Symposium on Durability of Concrete, Nice France, (1994), p. 1-20.

5. I. Papayianni, V. Pachta, K. Iliadou, *A data base system for managing information concerning historical mortars*, 14th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia VSMM (2008),10 p.. www.researchgate.com/publication/265914799.

6. A. C. Antunes, J. Coroado, M. C. Sequeira, J. Bolton, F. Rocha, *Characterization of ancient mortars: present methodology and future perspectives,* International Journal of Conservation Science, Volume 4, Special Issue, 2013, p. 515-524.

7. I. Papayianni, *The longevity of old mortars*, Applied Physics A', (2006), Volume 83, Issue 4, p. 685-688.

8. B. Middendorf, J. J. Hughes, K. Callebaut , G. Baronio, I. Papayianni, *Investigative methods for the characterisation of historic mortars- Part 1: Mineralogical characterization*, RILEM TC 167-COM: 'Characterization of Old Mortars with Respect to their Repair, Materials and Structures 38, (2005), p. 761-769.

9. A. L. Velosa, J. Coroado, M. R. Veiga, F. Rocha, *Characterization of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair,* Materials Characterization 58(11–12), (2007), p. 1208–1216.

10. A.L. Velosa, J. Coroado, M.R. Veiga, F. Rocha, *Characterisation of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair*, Materials Characterization 58, (2007), p. 1208–1216.

11. C. Genestar, C. Pons, A. Mas, *Analytical characterisation of ancient mortars from the archaeological Roman city of Pollentia (Balearic Islands, Spain)*, Analytica Chimica Acta 557, (2006), p. 373–379.

12. D. A. Silva, H. R. Wenk, P. J. M. Monteiro, *Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern*, Thermochimica Acta 438, (2005), p. 35-40.

13. D.A. Silva, H.R. Wenk, P. J. M. Monteiro, *Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern*, Elsevier, Thermochimica Acta 438 (2005), p. 35–40.

14. C. Genestar and C. Pons, *Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain), Analytical characterization*, Journal of Cultural Heritage 4, (2003), p. 291–298.

15. C. Montoya, J. Lanas, M. Arandigoyen, I. Navarro, P. J. G. Casado, J. I. Alvarez, *Study of ancient dolomitic mortars of the church of Santa Marıa de Zamarce in Navarra (Spain): comparison with simulated standard*, Elsevier, Thermochimica Acta 398, (2003), p. 107–122.

16. P. Degryse, J. Elsen, M. Waelkens, *Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation*, Cem. Concr. Res. 32, (2002), p. 1457–1463.

17. J. I. Alvarez, I. Navarro, A. Martin, P. J. Garcia Casado, *A study of the ancient mortars in the north tower of Pamplona's San Cernin Church,* Cement and Concrete Research 30, (2000), p. 1413–1419.

18. A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou, *Investigation of the technology of historic mortars*, Journal of Cultural Heritage 1, (2000), p. 45–58.

19. J. Elsen, *Microscopy of historic mortars a review*, Cement and Concrete Research 36, (2006), p. 1416–1424.

20. A. Gulec, T. Tulun, *Physico-chemical and petrographical studies of old mortars and plasters of Anatolia,* Cement and Concrete Research, 27, (1997), p. 227–234.

21. J. Pires1, A. J. Cruz, *Techniques of thermal analysis applied to the study of cultural heritage*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 87, (2007), p. 411–415.

22. J. I. Alvarez, I. Navarro, P. J. G. Casado, *Thermal, mineralogical and chemical studies of the mortars used in the Cathedral of Pamplona (Spain),* Thermochimica Acta 365, (2000), p. 177-187.

23. G. Bianchini, E. Marrocchino, C. Vaccaro, *Chemical and mineralogical characterisation of historic mortars in Ferrara (northeast Italy),* Cement and Concrete Research. 34, (2004), p. 1471–1475.

24. B. Middendorf, J. J. Hughes, K. Callebaut, G. Baronio, I. Papayianni, *Investigative methods for the characterisation of historic mortars – Part 2: Chemical characterisation*, in Report rep028: Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair - Final Report of RILEM TC 167-COM, C. Groot, G. Ashall and J. Hughes (eds.), (2004), p. 771-780.

25. P. Bruno, D. Calabrese, M. Di Pierro, A. Genga, C. Laganara, D. A. P. Manigrassi, A. Traini, P. Ubbríaco, *Chemicalphysical and mineralogical investigation on ancient mortars from the archaeological site of Monte Sannace (Bari – Southern Italy),* Thermochimica Acta 418, (2004), p. 131-141.

26. C. Dossi, D. Monticelli, A. Pozzi, L. Rampazzi, L. Toniolo, R. Verga, *Chemical characterisation of ancient and new mortars for conservation,* Third International Congress on 'Science and Technology for the safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin', Alcalá de Henares, Spain, (2001).

27. I. Papayianni, M. Stefanidou, *Strength–porosity relationships in lime–pozzolan mortars*, Construction and Building Materials 20, (2006), p. 700–705.

28. F. Puertas, M. T. Blanco-Varela, A. Palomo, X. Ariño, J. J. Ortega-Calvo, C. SaizJimenez, *Characterization of mortars from the mosaics of Italica: causes of deterioration*, in III International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Venice, 22-25 June 1994, V. Fassina, H. Ott and F. Zezza (eds.), Venice, (1994), p. 577-583.

29. I. Papayianni and V. Pachta, *Technology of mortars Used for the Substratum of Mosaics*, in Proceedings of the 4th Symposium of the Hellenic Society for Archaeometry, Athens, 28-31 May 2003, Y. Facorellis, N. Zacharias, K. Polikreti (eds.), (2003), p. 437-440.

30. I. Karatasios, P. Theoulakis, V. Kilikoglou, B. Colston, D. Watt, and V. Lampropoulos, *Analytical and Microscopic Techniques for the Study of Mortars from the Floor Mosaics of Theva, Greece*, Proceedings: VIII Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, Thessaloniki 29 Oct. -5 Nov. (ed.), (2002), p. 209-222.

31. V. Starinieri, I. Papayianni, M. Stefanidou, *Study of materials and technology of ancient floor mosaics substrate*, Conservar Património 7, (2008), p. 29-34.

32. C. Fiori, M. Vandini, S. Prati, G. Chiavari, *Vaterite in the mortars of mosaic in the Saint Peter basilica, Vatican (Rome)*, J. Cult. Herit. 10, (2009), p. 248-257.

33. D. A. Skoog, F. J. Holler, T. A. Nieman, *Αρχές της ενόργανης ανάλυσης*, (μετ.) Μ. Καραγιάννης, Κ. Ευσταθίου, Ν. Χανιωτάκης, Εκδόσεις Κωσταράκης, Αθήνα (2002), σ. 633-638.

34. D. A. Skoog, F. J. Holler, T. A. Nieman, *Αρχές της ενόργανης ανάλυσης*, (μετ.) Μ. Καραγιάννης, Κ. Ευσταθίου, Ν. Χανιωτάκης, Εκδόσεις Κωσταράκης, Αθήνα, (2002), σ. 325-328.

35. P. Gabbott (ed.), *Principles and applications of thermal analysis*, Blackwell publishing, UK, (2008), p. 87-118.

Κατάλογος Εικόνων Κεφαλαίου 4

Εικόνα 4.1: ELECTRON MICROPROBE LABORATORY, http://nau.edu/cefns/labs/electron-microprobe/glg-510-class-notes/instrumentation: 20/08/2015

Εικόνα 4.2: X-ray diffraction, https://fys.kuleuven.be/iks/nvsf/experimental-facilities/x-ray-diffraction-2013-bruker-d8-discover: 08/2015

Εικόνα 4.3: Geochemical Instrumentation and Analysis, X-ray Powder Diffraction http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html: 08/2015

Εικόνα 4.4: N. Murasawa, H. Koseki, X. R. Li, Y. Iwata, T. Sakamoto, http://article.sapub.org/10.5923.j.ijee.20120205.08.html: 06/2015

ΜΕΡΟΣ Β΄ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

Παρουσίαση περιπτώσεων των ψηφιδωτών δαπέδων και της μεθοδολογίας διερεύνησής τους

Β.1 Εισαγωγή

Η έρευνα που διεξάγεται στην παρούσα διατριβή αποσκοπεί στη θέσπιση κριτηρίων για την επιλογή υλικών και μεθόδων συντήρησης σε ψηφιδωτά δάπεδα. Για το σκοπό αυτό, εξετάστηκαν διαφορετικές αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις, η επιλογή των οποίων βασίστηκε στα παρακάτω κριτήρια:

- Η τεχνική κατασκευής να είναι της κυβικής ψηφίδας 'opus tessellatum'.
- Να αποτελούν αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις, όσον αφορά τις επεμβάσεις και τα υλικά που εφαρμόστηκαν στη συντήρηση των ψηφιδωτών δαπέδων.
- Να παρέχεται δυνατότητα άδειας μελέτης και δειγματοληψίας από τον αρμόδιο φορέα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, οι προς διερεύνηση περιπτώσεις που επιλέχθηκαν είναι οι ακόλουθες:

1. Τα ψηφιδωτά δάπεδα σε Ρωμαϊκή οικία ή δημόσιο κτίριο (χώροι α, β, γ), στον Εθνικό Κήπο της Αθήνας.
2. Το ψηφιδωτό δάπεδο αρχαίας οικίας στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld" στα ανατολικά της οδού Αποστόλου Παύλου στο λόφο της Πνύκας.
3. Το ψηφιδωτό δάπεδο στο σπήλαιο του Πανός στη βορειοδυτική πλευρά του βράχου της Ακροπόλεως στο λόφο της Πνύκας.
4. Το ψηφιδωτό δάπεδο σε υπόσκαφο χώρο της Κρήνης "Καλλιρρόη" επί της οδού Αποστόλου Παύλου στην Πνύκα.
5. Το ψηφιδωτό δάπεδο παλαιοχριστιανικής εκκλησίας, η σημερινή θέση του οποίου, είναι σε εξωτερικό χώρο του Νέου Μουσείου των Δελφών.
6. Το ψηφιδωτό δάπεδο οικίας στην ανασκαφή της οδού Ακάμαντος 24, στο Θησείο.

Η ανασκόπηση στο αρχειακό υλικό για την ανάκτηση πληροφοριών όσον αφορά τη συντήρηση των παραπάνω ψηφιδωτών δαπέδων (περιγράφεται αναλυτικά στα αντίστοιχα κεφάλαια) οδήγησε στις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Σε όλες τις περιπτώσεις η τεκμηρίωση των περιπτώσεων φθοράς και των παραγόντων που τις προκαλούν, είχε βασιστεί αποκλειστικά σε μακροσκοπικές παρατηρήσεις.
- Η εκτέλεση επεμβάσεων συντήρησης και η επιλογή των μεθόδων αποκατάστασης έλαβαν χώρα εμπειρικά, χωρίς να έχει προηγηθεί η επί τόπου αποτίμησή τους μέσω πιλοτικών εφαρμογών.

- Οι προγενέστερες επεμβάσεις συντήρησης στα επιλεγμένα ψηφιδωτά δάπεδα έλαβαν χώρα χωρίς τη σχεδίαση απαραίτητων μέτρων προστασίας από τους εξωτερικούς παράγοντες φθοράς, όπως για παράδειγμα τη δημιουργία αποστραγγιστικών έργων, στεγάστρων κλπ.
- Στις περιπτώσεις επεμβάσεων απόσπασης ψηφιδωτών τμημάτων για τη συντήρηση τους, το αρχαίο κονίαμα του υποστρώματος απομακρυνόταν στο μεγαλύτερο μέρος του. Στη συνέχεια, η επανατοποθέτηση τους γινόταν σε νέο υπόστρωμα, το οποίο αποτελείται συνήθως από κονίαμα οπλισμένο με μεταλλικά στοιχεία.

Όσον αφορά τη μεθοδολογία διερεύνησης των παραπάνω περιπτώσεων, αυτή αρχικά βασίστηκε σε λεπτομερή μακροσκοπικό έλεγχο. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις οπτικές παρατηρήσεις περιγράφονται αναλυτικά στις αντίστοιχες παραγράφους των κεφαλαίων που ακολουθούν, ενώ από την συλλογή οπτικών πληροφοριών διαπιστώθηκε ότι οι περιπτώσεις που επιλέχθηκαν, αποτελούν το κατάλληλο υλικό έρευνας προκειμένου να θεσπιστούν κριτήρια επιλογής κατάλληλης μεθοδολογίας και υλικών για την συντήρηση ψηφιδωτών δαπέδων.

Ο σχεδιασμός της μεθοδολογίας προσέγγισης για την εξέταση των επιλεγμένων επιδαπέδιων ψηφιδωτών απαιτεί την εκτέλεση μετρήσεων σε δύο στάδια:

- Το πρώτο στάδιο αφορά την εφαρμογή τεχνικών μη καταστρεπτικού ελέγχου για την επιτόπου διάγνωση της φθοράς και την αποτίμηση των διαφορετικών επεμβάσεων συντήρησης. Σκοπός των επιτόπου διερευνήσεων είναι ο εντοπισμός προβληματικών περιοχών και η εκτίμηση της έκτασης της φθοράς στο υπόστρωμα του ψηφιδωτού δαπέδου, τα οποία μελετήθηκαν με τη χρήση των τεχνικών της Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT), του Γεωραντάρ (GPR) και των Μικροσεισμικών Κυμάτων και της Ηχούς από Κρούση (SASW, Impact Echo).
- Το δεύτερο στάδιο της μεθοδολογίας αποσκοπεί στον χαρακτηρισμό των υλικών και της τεχνολογίας κατασκευής των αρχαίων κονιαμάτων και στη μελέτη της χημικής επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων σε χαρακτηριστικές περιπτώσεις φθοράς. Η παραπάνω διερεύνηση έλαβε χώρα μετά τη λήψη δειγμάτων από τα κονιάματα υποδομής, τα οποία μελετήθηκαν στο εργαστήριο με τη συνδυαστική χρήση των ακόλουθων αναλυτικών τεχνικών: Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM), Ηλεκτρονιακό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Μικροανάλυση (Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray Analysis, SEM-EDX), Περίθλαση Ακτίνων X (X-Ray Diffraction, XRD) και Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (Thermogravimetry, Differential Thermogravimetry, TG-DTG). Εδώ είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι η παραπάνω διαδικασία διερεύνησης εφαρμόστηκε στις περιπτώσεις που ήταν δυνατή η δειγματοληψία από το υπό εξέταση ψηφιδωτό, μετά από έγκριση της αρμόδιας αρχαιολογικής υπηρεσίας. Η ονοματολογία που ακολουθήθηκε στα δείγματα, βασίζεται στην περιγραφή της στρωματογραφίας των Ρωμαϊκών ψηφιδωτών δαπέδων όπως ορίζεται στο '*Mosaics In Situ Project – Illustrated Glossary, The Getty Conservation Institute' (Κεφάλαιο:1, Θεωρητικό Μέρος).*

Η διαδικασία ελέγχου που εφαρμόστηκε σε κάθε μία από τις περιπτώσεις των παραπάνω ψηφιδωτών δαπέδων, περιγράφεται ως ακολούθως:

1. Ρωμαϊκή οικία, στον Εθνικό Κήπο της Αθήνας:

Η ρωμαϊκή οικία αποτελείται από διάφορους χώρους με ψηφιδωτά δάπεδα της ίδιας κατασκευαστικής τεχνικής και με διαφορετικές επεμβάσεις συντήρησης. Από αυτά εξετάστηκαν επιτόπου τα δύο δάπεδα στους χώρους *α΄* και *γ'*, με τις τεχνικές IRT και GPR. Στόχος ήταν η διερεύνηση δυο διαφορετικών περιπτώσεων, αρχαίας και νέας υποδομής, στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Όσον αφορά την εξέταση των αρχαίων κονιαμάτων της υποδομής, αυτό έγινε με τη λήψη δειγμάτων από το αποσπασμένο ψηφιδωτό δάπεδο του χώρου *β΄*, τα οποία μελετήθηκαν με τις αναλυτικές τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα αρχαία κονιάματα του χώρου *β΄* θεωρούνται αντιπροσωπευτικά για τα κονιάματα του υποστρώματος όλων των χώρων της οικίας, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα παρασκευής κονιαμάτων συντήρησης για το σύνολο των ψηφιδωτών δαπέδων του μνημείου.

2. Αρχαία οικία στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld" Πνύκα:

Το συγκεκριμένο ψηφιδωτό δάπεδο εξετάστηκε επί τόπου με τις τεχνικές IRT και GPR. Σκοπός της διερεύνησης ήταν η ανάκτηση πληροφοριών για τον εντοπισμό του υποκείμενου ελληνιστικού δαπέδου, της πρώτης κατασκευαστικής φάσης του μνημείου και η εξέταση για τον εντοπισμό πιθανών κενών και αποσαθρωμένων περιοχών στο υπόστρωμα. Η λήψη χαρακτηριστικών δειγμάτων από το κονιάμα δεν ήταν εφικτή σε αυτήν την περίπτωση, καθώς δεν υπήρχαν περιοχές στις οποίες να αποκαλύπτεται το υπόστρωμα.

3. Σπήλαιο του Πανός στην Πνύκα:

Η μελέτη του συγκεκριμένου ψηφιδωτού δαπέδου περιελάμβανε αρχικά την επί τόπου εξέταση με τις τεχνικές IRT και GPR, με σκοπό την αποτίμηση της κατάστασης διατήρησης του υποστρώματος και την αξιολόγηση προγενέστερης επέμβασης συντήρησης και επανατοποθέτησης τμημάτων του ψηφιδωτού. Στην περίπτωση αυτή, η λήψη δειγμάτων κονιάματος από το υπόστρωμα του ψηφιδωτού (από μέρη τα οποία είχαν αποσπαστεί κατά τις προηγούμενες επεμβάσεις συντήρησης) έδωσε τη δυνατότητα της εκτέλεσης μετρήσεων για το χαρακτηρισμό των υλικών του υποστρώματος με τις αναλυτικές τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

4. Υπόσκαφος χώρος Κρήνης "Καλλιρρόη" στην Πνύκα:

Η διερεύνηση του ψηφιδωτού δαπέδου στην Κρήνη 'Καλλιρρόη' στην Πνύκα, πραγματοποιήθηκε, επί τόπου, με τη χρήση της τεχνικής SASW, Impact Echo. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται πιλοτικά στην παρούσα εργασία με σκοπό τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητάς της σε περιπτώσεις μνημείων και ψηφιδωτών δαπέδων. Η επιλογή της παραπάνω μη καταστρεπτικής τεχνικής έγινε λαμβάνοντας υπόψη την αδυναμία εφαρμογής των τεχνικών IRT και GPR στην προκειμένη περίπτωση, λόγω των υψηλών ποσοστών υγρασίας στο μνημείο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Παράλληλα με τις επιτόπου διερευνήσεις, στην περίπτωση αυτή πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία από το

αρχαίο κονίαμα, το οποίο μελετήθηκε στο εργαστήριο με τις παραπάνω αναλυτικές μεθόδους.

5. Νέο Μουσείο Δελφών:

Το ψηφιδωτό δάπεδο έχει αποσπαστεί δύο φορές και η σημερινή του θέση είναι σε εξωτερικό χώρο του Νέου Μουσείου των Δελφών. Πραγματοποιήθηκε εξέταση με IRT για των εντοπισμό της υγρασίας και των πιθανών περιοχών εισροής όμβριων υδάτων στο υπόστρωμα του δαπέδου. Η τεχνική GPR δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί λόγω της επέμβασης συντήρησης που λάμβανε χώρα στο δάπεδο (τοποθέτησης σωληνίσκων εκτόνωσης της υγρασίας). Επίσης, δεν πραγματοποιήθηκε μελέτη του κονιάματος, γιατί δεν έχει διασωθεί αρχαίο κονίαμα από το υπόστρωμα του ψηφιδωτού.

6. Οικία στην ανασκαφή της οδού Ακάμαντος 24, στο Θησείο:

Το ψηφιδωτό δάπεδο έχει αποσπαστεί τμηματικά και φυλάσσεται σε ειδικά διαμορφωμένο αποθηκευτικό χώρο στην ΕΦΑ Αθηνών. Επομένως, δεν ήταν δυνατή η επί τόπου διερεύνηση του με NDT τεχνικές. Βέβαια, η καθολική απόσπασή του παρείχε τη δυνατότητα μελέτης μεγάλων περιοχών του υποστρώματος. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από τα διαφορετικά στρώματα υποδομής που παρουσιάζουν τα ρωμαϊκά ψηφιδωτά δάπεδα και η εξέταση των δειγμάτων έγινε με τις αναλυτικές τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Στον **Πίνακα Β.1** παρουσιάζεται ο μετρητικός εξοπλισμός και συνοψίζονται οι πειραματικές παράμετροι που επιλέχθηκαν σε κάθε μία από τις επιμέρους μετρήσεις. Σε κάθε ένα από τα παρακάτω κεφάλαια Στα παρακάτω κεφάλαια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μελέτη των επιλεγμένων ψηφιδωτών δαπέδων. Αρχικά, γίνεται εκτενής περιγραφή για την υφιστάμενη κατάσταση διατήρησης του υπό διερεύνηση ψηφιδωτού και συνοψίζονται οι πληροφορίες για παλαιότερες επεμβάσεις συντήρησης που έχουν πραγματοποιηθεί. Ακολουθούν οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν και τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για κάθε μία από τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν.

Πίνακας Β.1: Εργαστηριακός εξοπλισμός και συνθήκες μετρήσεων.

Θερμογραφική κάμερα (IRT): Μοντέλο: ThermaCAM SC640
Φασματικό εύρος λειτουργίας: 7.5 – 13 μm.
Αισθητήρας: FPA (Focal Plane Array).
Ανάλυση εικόνας: 640 x 680 pixels (0.65m rad).
Θερμική ευαισθησία: 60 Mkt στους 30°C.
Λογισμικό επεξεργασίας: ThermaCAM Researcher Pro 2.8-SR3.

Θερμογραφική κάμερα ThermaCAM SC640.

<u>Γεωραντάρ (GPR)</u>: Σύστημα TerraSIRch SIR-3000
Συχνότητα κεραίας, MHZ: 1600
Σχετική διηλεκτρική σταθερά: 16
Αριθμός σημείων ανά σάρωση (Samples/ scan): 512
Ανάλυση (bits/ sample): 16
Χρονικό παράθυρο καταγραφής (Range, nsec): 12
Αριθμός σαρώσεων ανά δευτερόλεπτο (Rate ή scans/sec): 64
Αριθμός σαρώσεων ανά μονάδα μήκους οριζόντιας απόστασης (Scan/ unit): 4
Αριθμός σημείων ενίσχυσης (gain points, dB): 5
Συχνότητα εκπομπής σήματος, KHz (Transmit Rate): 100
Κατακόρυφο φίλτρο High Pass (IIR), MHz: 75
Κατακόρυφο φίλτρο Low Pass (IIR), MHz: 700
Λογισμικό: RADAN 7 της εταιρίας GSSI

Σύστημα γεωραντάρ της εταιρίας GSSI TerraSIRch SIR-3000 ονομαστικής συχνότητας 1.6 GHz

<u>Τεχνική Μικροσεισμικών Κυμάτων</u>: Σύστημα: FK microseismic device A/D converter
Υπολογιστής (PC): τύπου National Instrument PC σε PXI-1002 μαζί με τη μικροσεισμική κάρτα.
Επιταχυνσιόμετρα: τύπου PCB Piezotronics με συντονισμό συχνοτήτων μέχρι 50 kHz.
Ενισχυτής (PreAmplifier)
Εξωτερικό ερέθισμα (External Trigger): σφυρί κρούσεως

Η φορητή συσκευή FK microseismicμ συνδεδεμένη με πέντε επιταχυνσιόμετρα και σφυρί κρούσης.

<u>Ψηφιακό Φορητό Μικροσκόπιο (DM)</u>: Μοντέλο: Dino-Lite, AM211
Ρυθμιζόμενη εστίαση και μεγέθυνση: ×10 ~ ×200.

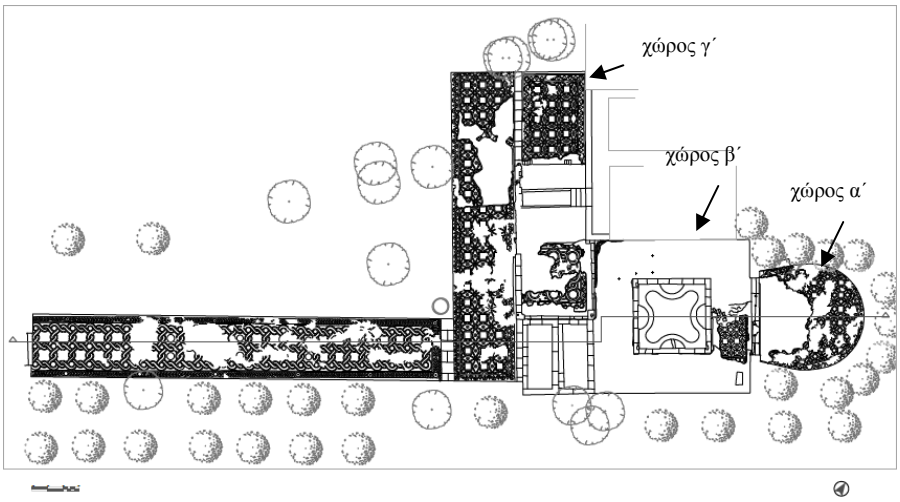
<u>Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης - με Μικροαναλυτή (SEM- EDX)</u>:
Μοντέλο: Quanta 200 της εταιρείας FEI συνδυασμένο με φασματόμετρο ακτίνων X ενεργειακής διασποράς (energy dispersive X-ray analyser – EDAX).
Συνθήκες:
Πηγή ηλεκτρονίων: Νήμα βολφραμίου
Υψηλού κενού (High Vacum ≈ 2▪e-3 Pa)
Τάση: 25 kV

<u>Περιθλασιόμετρο Ακτίνων Χ (XRD)</u>: Μοντέλο: Siemens D5000. Διαδικασία μετρήσεων: Λειοτρίβηση των δειγμάτων και ξήρανση, για περισσότερο από δύο ώρες στους 60 °C, ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία. Συνθήκες: Λυχνία: Cu με μονοχρωμάτορα γραφίτη. Ακτινοβολία: Cu_{Ka1}, μήκος κύματος λ=1.5405 Å. Τάση: 40 kV. Ένταση: 30 mA. Ταχύτητα: 0,050 step/sec. Διάστημα σάρωσης: 10–70 ($2\theta^o$).
<u>Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG-DTG)</u>: Μοντέλο: Mettler Toledo τύπου TGA/SDTA 851. Διαδικασία μετρήσεων: Λειοτρίβηση των δειγμάτων και ξήρανση, για περισσότερο από δύο ώρες στους 60 °C, ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία. Υποδοχέας: α-Al_2O_3. Ποσότητα δείγματος: Ζύγιση ακριβούς ποσότητας ~100 mg. Θερμικό πρόγραμμα: Θερμοκρασιακό εύρος από 25 - 1000 °C, Ταχύτητα θέρμανσης: 10 °C/min. Περιβάλλον: Αέρας, σε ατμοσφαιρική πίεση.

Κεφάλαιο 1

Ψηφιδωτά δάπεδα Εθνικού Κήπου

Ανάμεσα στα αρχαιολογικά ευρήματα που έχουν καταγραφεί στο χώρο του Εθνικού Κήπου βρίσκεται ρωμαϊκή οικία ή δημόσιο κτήριο με ψηφιδωτά δάπεδα, η κάτοψη του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Το κτήριο ανασκάφηκε από Γερμανούς αρχαιολόγους λίγο πριν από τα μέσα του περασμένου αιώνα, κατά τις εργασίες δενδροφύτευσης από τη Βασίλισσα Αμαλία. Ο J. P. Sodini το χρονολογεί στις αρχές του 5ου αι., ο M. Spiro στο β΄ μισό του 5ου αι. [1]. Αποτελείται από επτά χώρους και βρίσκεται στη βορειοανατολική πλευρά του κήπου, κοντά στην είσοδο της λεωφόρου Βασιλίσσης Σοφίας.



Εικόνα 1.1: Κάτοψη ρωμαικής οικίας με τα ψηφιδωτά δάπεδα, επισημαίνονται με βέλος οι χώροι α΄, β΄ και γ΄ που εξετάστηκαν [2].

Τα ψηφιδωτά του Εθνικού κήπου έχουν συντηρηθεί κατά το παρελθόν, όμως, η μόνη γραπτή αναφορά σε επεμβάσεις συντήρησης αναφέρεται στο 1981, χωρίς να υπάρχει ιστορικό της συντήρησης και φωτογραφικό υλικό. Η ανάκτηση πληροφοριών όσον αφορά τις προηγούμενες επεμβάσεις βασίστηκε, κυρίως σε οπτικές παρατηρήσεις, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι για τη συμπλήρωση των κενών έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως τσιμεντοκονίαμα, ενώ ασβεστοκονίαμα έχει χρησιμοποιηθεί για μικρές συμπληρώσεις και στεφανώματα των παρυφών του ψηφιδωτού. Την περίοδο 2003 έως 2009 πραγματοποιήθηκαν σωστικές επεμβάσεις στο σύνολο των ψηφιδωτών δαπέδων του χώρου. Οι επεμβάσεις αυτές περιλάμβαναν στερέωση της ψηφιδωτής επιφάνειας, αντικατάσταση των τσιμεντοκονιαμάτων στο μεγαλύτερο μέρος τους, κάλυψη των απωλειών με νέα κονιάματα, αντιμετώπιση εξάρσεων και καθιζήσεων, συντήρηση και δημιουργία φερόμενων κατασκευών των αποσπώμενων ψηφιδωτών τεμαχίων και επανατοποθέτηση τους σε νέα υποδομή [3, 4].

Από το 2010 και μετά, οι εργασίες συντήρησης συνεχίζονται, καθώς δεν έχουν επανατοποθετηθεί τμήματα των ψηφιδωτών του χώρου β΄. Ωστόσο, η κατάσταση

διατήρησης των συντηρημένων ψηφιδωτών δεν είναι η αναμενόμενη, καθώς εμφανίζουν ακόμη σημαντικές φθορές.

1.1 Περιγραφικά στοιχεία ψηφιδωτού του δαπέδου στο χώρο α΄

Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται η περιοχή του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο α΄ μετά την επέμβαση συντήρησης σε νέο υπόστρωμα και την συμπλήρωση των κενών περιοχών με κονίαμα [4].

Εικόνα 1.2: Ψηφιδωτό δάπεδο του χώρου α΄ μετά την επέμβαση συντήρησης και αποκατάστασης των απωλειών με κονίαμα (έτος 2006) [4].

Το ιστορικό ψηφιδωτό κατασκευάστηκε από λίθινες ψηφίδες, το σχεδιαστικό πλαίσιο του οποίου αποτελείται από ελισσόμενο βλαστό με φύλλα κισσού, ενώ το κυρίως θέμα περιλαμβάνει αστεροειδή κοσμήματα, σχηματιζόμενα από πλάγια παραλληλόγραμμα, και ανάμεσά τους εναλλάξ ορθά και κατά κορυφή τετράγωνα [1].

1.1.2 Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης

Το έτος 2003, κρίθηκε απαραίτητη η συντήρηση της υποδομής του δαπέδου, καθώς παρουσίαζε έντονη αποσάθρωση του κονιάματος κατασκευής του. Η επέμβαση συντήρησης που εφαρμόστηκε στο δάπεδο, είναι αυτή της καθολικής απόσπασης και επανατοποθέτησής του, με τη μέθοδο της φορητής υποδομής (Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Μέρος). Ειδικότερα, κατά τη συντήρηση των αποσπασμένων ψηφιδωτών τμημάτων, πραγματοποιήθηκε μηχανικός καθαρισμός του αρχικού κονιάματος, μέχρις ότου αποκαλύφθηκαν οι αρμοί μεταξύ των ψηφίδων. Ακολούθως, τα ψηφιδωτά τμήματα τοποθετήθηκαν σε κονίαμα ενισχυμένο με ανοξείδωτο πλέγμα (φορητές υποδομές). Η σύσταση του κονιάματος αποτελείται από τα εξής υλικά: ασβέστης : τσιμέντο λευκό : άμμος λατομείου : σκόνη από κεραμίδι : θηραϊκή γη : νερό, σε αναλογίες: 1 : 1/4 : 3 : 2: 1 αντίστοιχα [3].
Κατά την επανατοποθέτησή τους στο χώρο, κατασκευάστηκε αρχικά νέα υποδομή υποστρώματος, η οποία αποτελείται από μια στρώση πάχους 10 cm με χονδρόκοκκο

χαλίκι, και ένα στρώμα κονιάματος πάχους 10 cm και ίδιας σύστασης με αυτό των φορητών κατασκευών αλλά με μεγαλύτερη κοκκομετρία αδρανών. Τα στάδια αποκατάστασης της υποδομής του δαπέδου παρουσιάζονται στις Εικόνες 1.3α και 1.3β. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι πριν τις επεμβάσεις συντήρησης, εντοπίστηκαν τα τέσσερα κατασκευαστικά στρώματα που συναντώνται, συνήθως, στη στρωματογραφία των ρωμαϊκών ψηφιδωτών δαπέδων και είναι τα εξής: statumen, rudus, nucleus και supra nucleus [3].

(α) (β)

Εικόνα 1.3: Αποκατάσταση της υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου (έτος 2005) με (α) στρώση από χονδρόκοκκο χαλίκι και (β) στρώση χονδρόκκοκου κονιάματος [3].

Περιμετρικά της αψίδας, στα σημεία που αυτή εφάπτεται με την τοιχοποιία, πραγματοποιήθηκε διάνοιξη αύλακος πλάτους 5 cm και ύψους 10 cm, στην οποία τοποθετήθηκε αφρώδες υλικό. Επίσης, διανοίχθηκαν πέντε οπές σε απόσταση πενήντα περίπου εκατοστών από την περίμετρο της αψίδας, με διατομή και ύψος 10 cm για την ομαλή εκτόνωση της ανερχόμενης υγρασίας. Μετά την επανατοποθέτηση των ψηφιδωτών τμημάτων, οι απώλειες συμπληρώθηκαν με κονίαμα πάχους 5 cm (Εικόνα 1.4β) [3].

(α) (β)

Εικόνα 1.4: Αποκατάσταση (έτος 2005) με (α) επανατοποθέτηση φορητών τμημάτων στο χώρο και (β) συμπλήρωση των απωλειών με κονίαμα πάχους 5 cm [3].

1.1.2.1 Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης

Το ψηφιδωτό δάπεδο εξετάστηκε μετά από έγκριση της αρμόδιας υπηρεσίας του ΥΠΠΟΑ, κατά το έτος 2014. Από το μακροσκοπικό έλεγχο της κατάστασης του

ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο α', παρατηρείται έντονη δράση βιολογικών παραγόντων φθοράς, ρηγματώσεις στην επιφάνεια του νέου κονιάματος, αποχρωματισμός της ψηφιδωτής επιφάνειας και μικρής έκτασης απώλειες. Οι παραπάνω χαρακτηριστικές περιπτώσεις φθοράς παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.5.

(α)

(β)

Εικόνα 1.5: Μακροσκοπικός έλεγχος ψηφιδωτού δαπέδου (έτος 2014) με (α) ύπαρξη επικαθήσεων και βιολογικών παραγόντων φθοράς και (β) δημιουργίας ρηγματώσεων στο κονίαμα συμπλήρωσης.

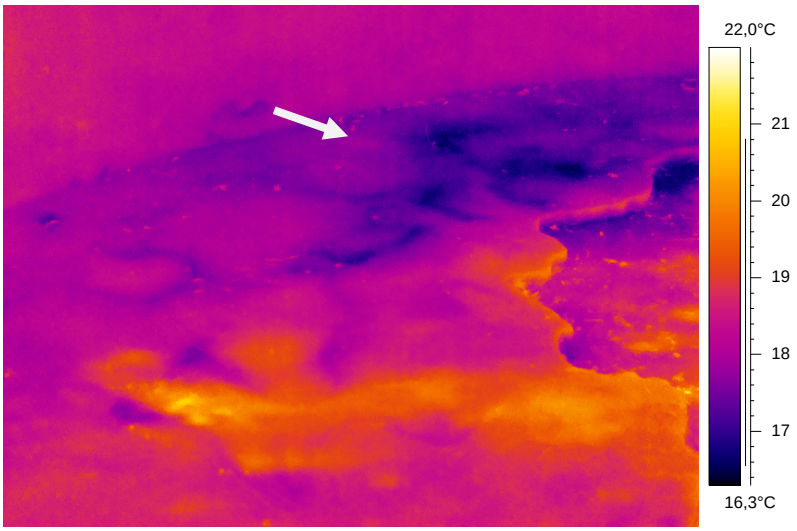
1.1.3 Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο α΄

Για την εξέταση του ψηφιδωτού δαπέδου και την αποτίμηση της επέμβασης συντήρησης, εφαρμόστηκαν οι μη καταστρεπτικές τεχνικές της Θερμογραφίας Υπερύθρου και του Γεωραντάρ. Ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και οι πειραματικές παράμετροι που επιλέχθηκαν για την εξέταση της ψηφιδωτής επιφάνειας, αναφέρονται στον Πίνακα Β.1, ενώ στις παρακάτω ενότητες γίνεται συζήτηση των αποτελεσμάτων που ανακτήθηκαν από τις παραπάνω μεθόδους.

1.1.3.1 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)

Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον θερμογραφικό έλεγχο της ψηφιδωτής επιφάνειας του χώρου α'.

(α)



(β)

Εικόνα 1.6: Εξέταση της νότιας περιοχής του δαπέδου με την τεχνική της θερμογραφίας υπερύθρου με (α) εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας και (β) αντίστοιχη θερμική εικόνα, η οποία αποκάλυψε την ύπαρξη υγρασίας, όπως επισημάνεται με το λευκό βέλος.

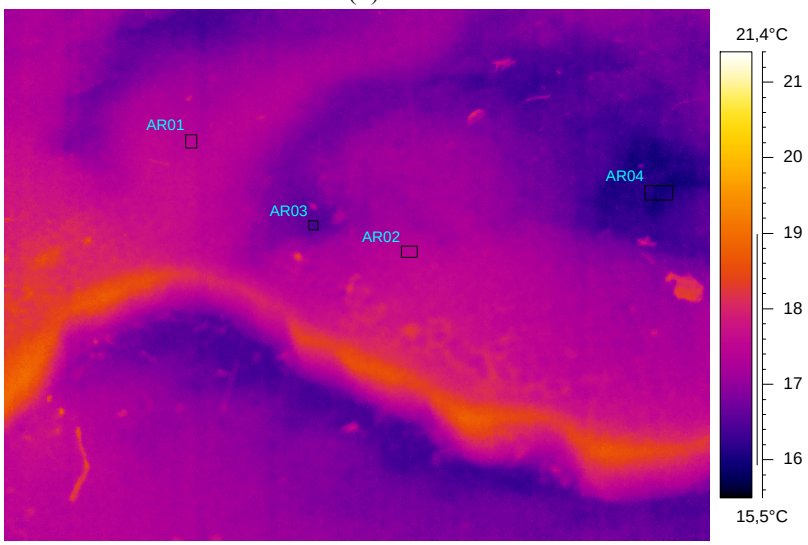
Όπως μπορεί να φανεί από το θερμογράφημα της Εικόνας 1.6β, ψυχρές περιοχές (περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας) εντοπίστηκαν στη νότια περιοχή του ψηφιδωτού δαπέδου όπως επισημάνεται με το λευκό βέλος. Η καταγραφή διαφορετικών θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων στην περιοχή αυτή, μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη υγρασίας, κάτι το οποίο ενισχύεται και από τον εντοπισμό βιολογικών επικαθήσεων κυρίως στην επιφάνεια του κονιάματος στο δάπεδο.

Στην Εικόνα 1.7 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα θερμογραφικού ελέγχου στην περιοχή της Εικόνας 1.6 που εντοπίστηκε έντονη παρουσία υγρασίας. Όπως μπορεί να φανεί από την Εικόνα 1.7α, δράση βιολογικών παραγόντων παρατηρείται στην επιφάνεια, ενώ από την αντίστοιχη θερμική εικόνα (Εικόνα 1.7β), επιβεβαιώνεται η ύπαρξη υγρασίας η οποία φαίνεται να είναι έντονη στην διεπιφάνεια κονιάματος συμπλήρωσης και ψηφιδωτού τμήματος.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές τιμές σε χαρακτηριστικές περιοχές στην επιφάνεια του ψηφιδωτού. Συγκεκριμένα, η μέση φαινόμενη θερμοκρασία στην επιφάνεια του κονιάματος και στην ψηφοθετημένη επιφάνεια μετρήθηκε να είναι 17.4°C, όπως φαίνεται από τις τιμές στις περιοχές AR01 και AR02 αντίστοιχα. Η παραπάνω θερμοκρασιακή ομοιομορφία αποδεικνύει την παρόμοια θερμική συμπεριφορά των νέων υλικών κατασκευής και των ιστορικών ψηφίδων.

Αντίστοιχα, στην διεπιφάνεια κονιάματος συμπλήρωσης και ιστορικού ψηφιδωτού, η μέση φαινόμενη θερμοκρασία μετρήθηκε να είναι γύρω στους 16 °C, όπως μπορεί να φανεί από τα αποτελέσματα των περιοχών AR03 και AR04 (Πίνακας 1.1). Η παραπάνω θερμοκρασιακή διαφορά, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αποδίδεται στην ύπαρξη υγρασίας στις συγκεκριμένες περιοχές του δαπέδου.

(α)



(β)

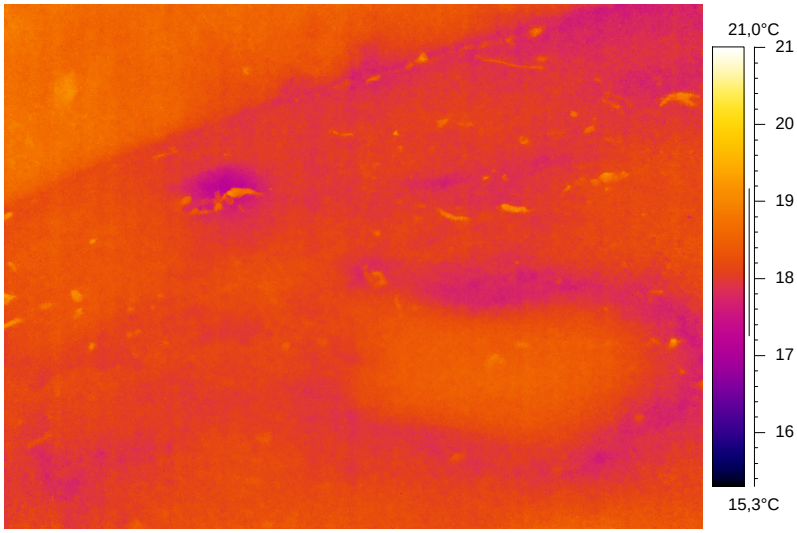
Εικόνα 1.7: Θερμογραφικός έλεγχος της νότιας περιοχής του ψηφιδωτού δαπέδου με (α) εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας και (β) αντίστοιχη θερμική εικόνα, η οποία αποκάλυψε την ύπαρξη υγρασίας, η παρουσία της οποίας ήταν έντονη στη διεπιφάνεια κονιάματος συμπλήρωσης και ψηφιδωτού.

Πίνακας 1.1: Θερμοκρασιακά δεδομένα από τις επιλεγμένες περιοχές εξέτασης στην επιφάνεια του δαπέδου.

Περιοχές ελέγχου	**Min.** [°C]	**Max.** [°C]	**Δ(Max-Min)**	**Μέση τιμή**
AR01	17,3	17,6	0,3	17,4
AR02	17,3	17,6	0,3	17,4
AR03	16,3	16,6	0,3	16,5
AR04	15,9	16,3	0,4	16,1

Η παραπάνω συμπεριφερά του συστήματος κονίαμα συμπλήρωσης- επανατοποθετημένο ψηφιδωτό εντοπίστηκε και σε διαφορετικές περιοχές του δαπέδου. Χαρακτηριστικά, όπως μπορεί να φανεί από το αποτέλεσμα της Εικόνας 1.8, υγρασία εντοπίζεται στην διεπιφάνεια του κονιάματος συμπλήρωσης και των ψηφιδωτών τμημάτων του δαπέδου, ενώ η δράση βιολογικών παραγώντων φθοράς είναι, και εδώ εμφανής.

(α)

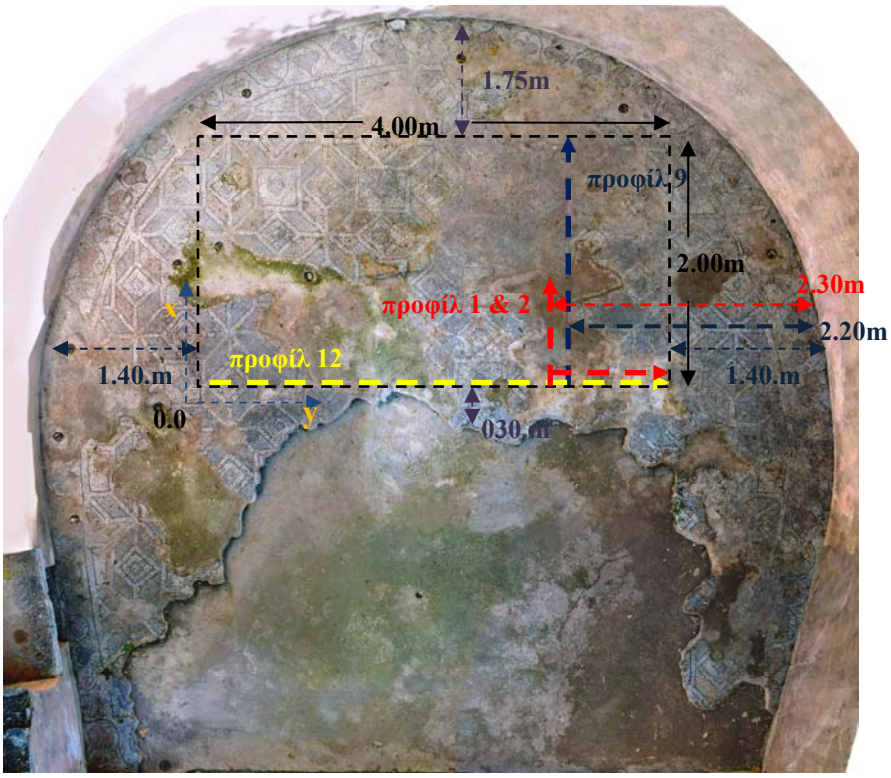


(β)

Εικόνα 1.8: Θερμογραφικός έλεγχος στην ανατολική περιοχή του ψηφιδωτού δαπέδου με (α) εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας και (β) αντίστοιχη θερμική εικόνα, η οποία αποκάλυψε την ύπαρξη υγρασίας, η παρουσία της οποίας ήταν έντονη στη διεπιφάνεια κονιάματος συμπλήρωσης και ψηφιδωτού.

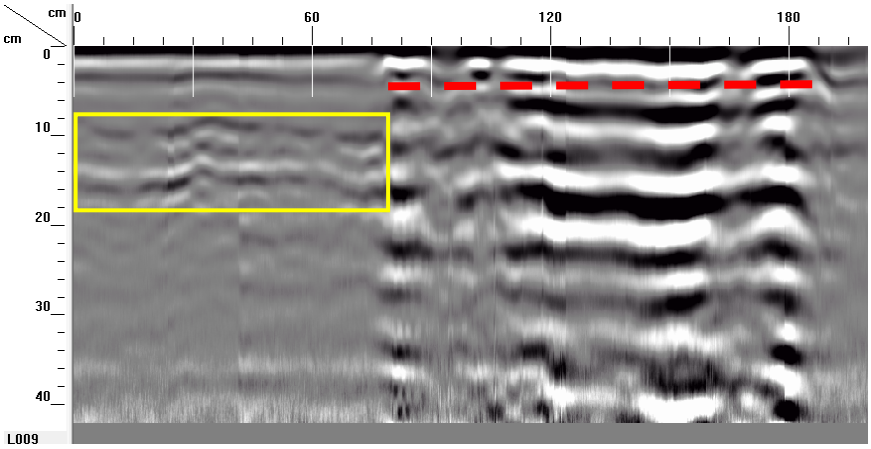
1.1.3.2 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Γεωραντάρ (GPR)

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα TerraSIRch SIR-3000 συχνότητας λειτουργίας 1.6 GHz. Οι πειραματικές παράμετροι που επιλέχθηκαν για την εξέταση του ψηφιδωτού δαπέδου, περιγράφονται στον Πίνακα Β.1. Όπως φαίνεται από σχέδιο της Εικόνας 1.9, η περιοχή του ψηφιδωτού που μετρήθηκε ήταν διαστάσεων 2.00 m x 4.00 m, ενώ και η συλλογή των 2D δεδομένων έγινε εκτελώντας παράλληλες οριζόντιες (κατά μήκος του άξονα x) και κάθετες (κατά μήκος του άξονα y) σαρώσεις. Το βήμα καταγραφής των επιμέρους γειτονικών σαρώσεων ορίστηκε στα 40 cm.



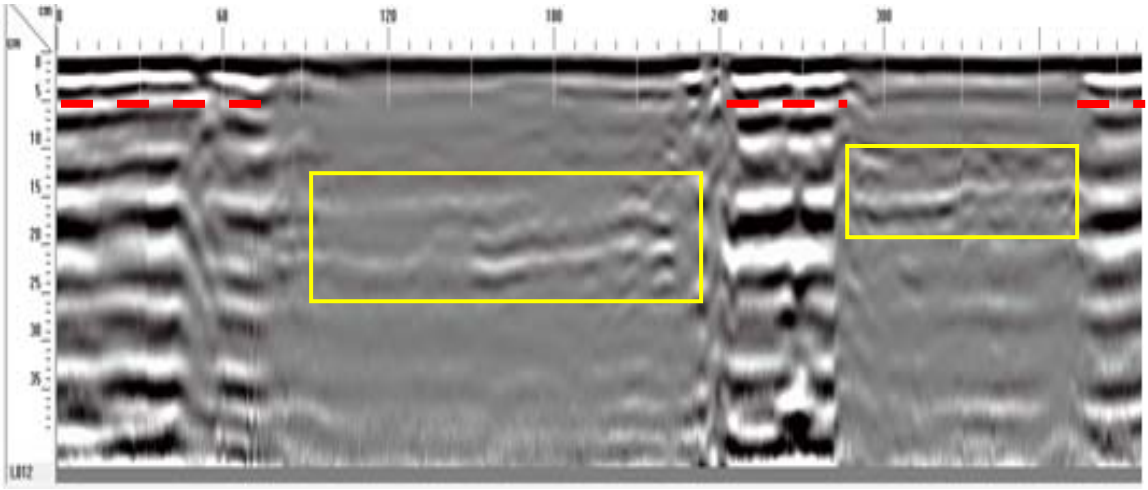
Εικόνα 1.9: Περιγραφικό σχέδιο συλλογής *2D* μετρήσεων σε οριζόντιες και κάθετες σαρώσεις κατά μήκος του άξονα x και y [2].

Στην Εικόνα 1.10 παρουσιάζεται το 2*D* προφίλ σάρωσης που ανακτήθηκε κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης 9 στον άξονα *x* (Εικόνα 1.9). Ο οριζόντιος άξονας εκφράζει την απόσταση που διανύει η κεραία κατά μήκος της γραμμής σάρωσης και ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η μετατροπή της κατακόρυφης κλίμακας του χρόνου (ns) σε κλίμακα βάθους (cm) έγινε ορίζοντας τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ίση με 12, που αντιστοιχεί σε ταχύτητα διάδοσης του σήματος στο μέσο ίση με 0.09 m/ns. Όπως φαίνεται στο ραδιόγραμμα, μεταβολές του σήματος παρατηρήθηκαν σε διάστημα από τα 0.78 m έως τα 1.88 m κατά μήκος του άξονα x, οι οποίες αντιστοιχούν στο επανατοποθετημένο τμήμα ψηφιδωτού σε υπόστρωμα κονιάματος ενισχυμένο με μεταλλικό πλέγμα (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή). Συγκεκριμένα, το μεταλλικό πλέγμα λόγω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του λειτουργεί σαν κάτοπτρο στην διάδοση του η/μ παλμού με αποτέλεσμα να προκαλεί ανεπιθύμητες συνεχείς ανακλάσεις, οι οποίες εμφανίζονται στο ραδιόγραμμα με τη μορφή θορύβου. Επίσης, από την αρχή της μέτρησης έως τα 0.78 m κατά μήκος του άξονα x και σε βάθος από περίπου 0.08 m έως και 0.16 m (περιοχή στο κίτρινο πλαίσιο), παρατηρήθηκαν μεταβολές του σήματος οι οποίες εκτιμάται ότι αντιστοιχούν στο πρώτο στρώμα από χονδρόκοκκο χαλίκι της νέας υποδομής.



Εικόνα 1.10: Αποτέλεσμα γεωραντάρ από τη σάρωση κατά μήκος της γραμμής 9 του άξονα x. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αφορά περιοχή επανατοποθετημένου ψηφιδωτού τμήματος και η περιοχή στο κίτρινο πλαίσιο αφορά το υποκείμενο στρώμα από χονδρόκοκκο χαλίκι.

Στην Εικόνα 1.11 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα γεωραντάρ από τη γραμμή σάρωσης 12 κατά μήκος του άξονα y. Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, κατά την έναρξη της καταγραφής αλλά και σε διαστήματα κατά μήκος της γραμμής εντοπίστηκαν οι περιοχές των επανατοποθετημένων ψηφιδωτών τμημάτων, μέσω των ισχυρών ανακλάσεων (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές).

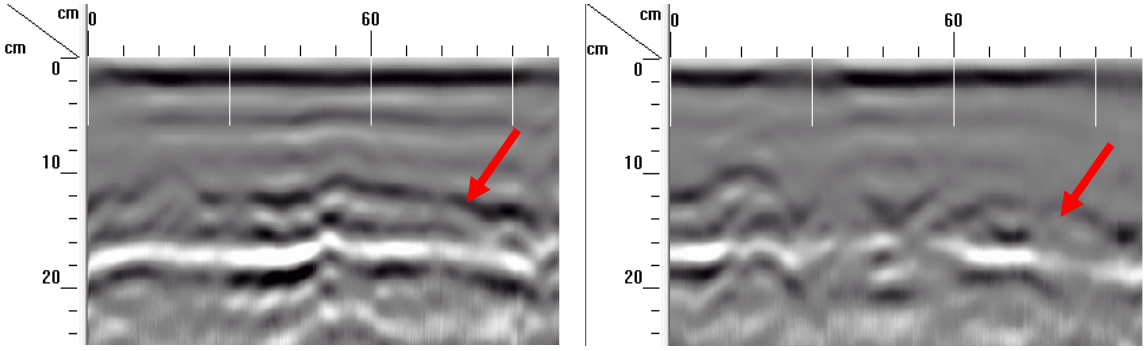


Εικόνα 1.11: Αποτέλεσμα γεωραντάρ από τη σάρωση κατά μήκος της γραμμής 12 του άξονα y. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αφορούν περιοχές επανατοποθετημένων ψηφιδωτών τμημάτων, οι περιοχές στα κίτρινα πλαίσια αφορούν το υποκείμενο στρώμα από χονδρόκοκκο χαλίκι.

Επίσης, στο ίδιο ραδιόγραμμα, επισημαίνεται με κίτρινο πλαίσιο το κατώτερο όριο του στρώματος από χονδρόκοκκο χαλίκι, το οποίο ανιχνεύεται σε βάθος 0.23 m και 0.16 m, αντίστοιχα (Εικόνα 1.11). Αυτή η διαφορά βάθους, εκτιμάται ότι οφείλεται σε μη εξομάλυνση του εδάφους κατά την κατασκευή της υποδομής ή/και τμηματική καθίζηση του.

Με στόχο την άντληση περισσότερων πληροφοριών, σχετικά με την κατάσταση διατήρησης της υποδομής, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην κεντρική περιοχή του δαπέδου, που είχε συμπληρωθεί μόνο με κονίαμα. Εκτελέστηκαν κάθετες και οριζόντιες σαρώσεις, οι θέσεις των οποίων, παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.9 με κόκκινη

διακεκομμένη γραμμή. Η μετατροπή της κατακόρυφης κλίμακας του χρόνου (ns) σε κλίμακα βάθους (cm) έγινε ορίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του σήματος στο μέσο ίση με 0.10 m/ns. Στην Εικόνα 1.12 παρουσιάζονται ενδεικτικά δυο προφίλ σάρωσης στον κάθετο (α) και τον οριζόντιο (β) άξονα, η μεταβολή του σήματος σε βάθος περίπου 0.20 m, εκτιμάται ότι αντιστοιχεί στο κατώτερο όριο του στρώματος της υποδομής από χονδρόκοκκο χαλίκι.



(α) (β)

Εικόνα 1.12: Αποτέλεσμα γεωραντάρ από τη σάρωση στην κεντρική περιοχή του δαπέδου κατά μήκος (α) της γραμμής 1 του άξονα x και (β) της γραμμής 2 του άξονα y. Η μεταβολή του σήματος που επισημαίνεται με κόκκινο βέλος αντιστοιχεί στο κατώτερο όριο της υποδομής του ψηφιδωτού.

1.2 Περιγραφικά στοιχεία ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο γ΄

Άποψη του ψηφιδωτού δαπέδου του χώρου γ΄ παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.13. Το ψηφιδωτό δάπεδο συνίσταται από το κονίαμα του υποστρώματος και λίθινες ψηφίδες.

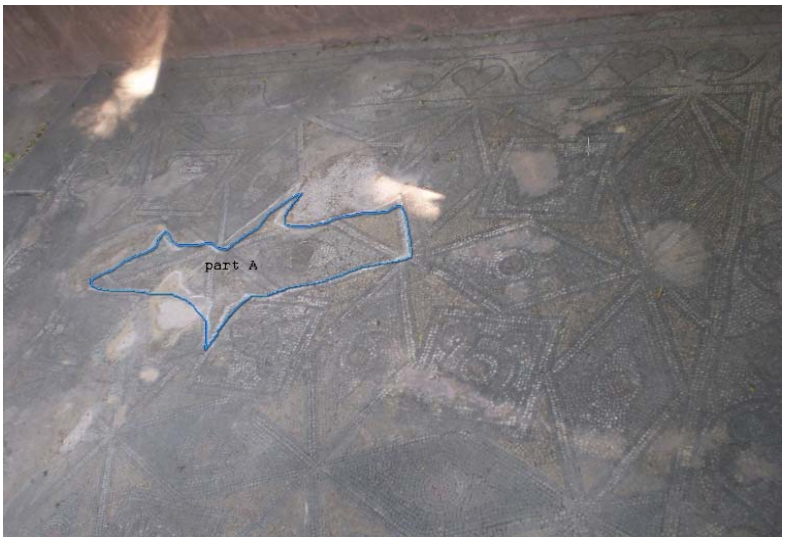
Εικόνα 1.13: Άποψη του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο γ΄ (έτος 2006) [4].

Οι διαστάσεις του δαπέδου είναι 5,64 m x 4,10 m. Το σχεδιαστικό πλαίσιο του ψηφιδωτού αποτελείται από ελισσόμενο βλαστό με φύλλα κισσού. Στη βόρεια πλευρά του υπάρχει άλλο ένα πλαίσιο με συνεχόμενους σταυρούς που σχηματίζονται από

ρόμβους. Ανάμεσα στις κεραίες των σταυρών σχεδιάζονται τετράγωνα όρθια που περιέχουν πτηνά και κόμβους [1].

1.2.1 Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης

Τη δεκαετία του 80', πραγματοποιήθηκαν συμπληρώσεις των κενών στο ψηφιδωτό δάπεδο με τσιμέντο. Η επόμενη συντήρηση του δαπέδου έγινε το διάστημα 2003-2009, κατά το οποίο πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις καθαρισμού στην επιφάνεια και στερέωση των ψηφίδων με ακρυλική ρητίνη. Επίσης, αφαιρέθηκαν τα παλαιότερα τσιμεντοκονιάματα και αντικαταστάθηκαν από κονιάματα με βάση το λευκό τσιμέντο. Ακόμα, πραγματοποιήθηκε η επανατοποθέτηση ενός τμήματος του ψηφιδωτού σε νέο υπόστρωμα (Εικόνα 1.14) [4, 5]. Η σύσταση του κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε είναι παρόμοια με αυτή του χώρου α΄ (Παράγραφος 1.1.2) [5]. Δεν έχουν αναφερθεί προηγούμενες αναλύσεις του κονιάματος του υποστρώματος.



Εικόνα 1.14: Το τμήμα του ψηφιδωτού που βρίσκεται σε νέο υπόστρωμα, επισημαίνεται με μπλε περίγραμμα (έτος 2014).

1.2.1.1 Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης

Το ψηφιδωτό δάπεδο εξετάστηκε μετά από έγκριση της αρμόδιας υπηρεσίας, το έτος 2014. Όσον αφορά στην κατάσταση διατήρησής του, παρατηρείται αστοχία στο κονίαμα συμπλήρωσης απωλειών, η οποία εντοπίζεται στο πλέγμα ρωγμών που έχουν δημιουργηθεί στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του, με απόσπαση υλικού κατά τόπους (Εικόνα 1.15α).

(α)

(β)

Εικόνα 1.15: Μακροσκοπικός έλεγχος ψηφιδωτού δαπέδου (έτος 2014) με (α) αστοχία του κονιάματος συμπλήρωσης, (β) απόσπαση ψηφίδων στην επιφάνεια του δαπέδου.

Η μεγαλύτερη φθορά παρατηρείται περιμετρικά στην διεπιφάνεια νέου/αρχαίου υλικού. Ακόμα, εντοπίστηκαν επιφανειακές ρωγμές στο στρώμα ψηφοθέτησης με μερική απόσπαση και απώλεια ψηφίδων (Εικόνα 1.15β) και εξάρσεις/καθιζήσεις του ψηφιδωτού στρώματος. Υπάρχουν, επίσης, επικαθίσεις, πιθανότατα βιολογικής προέλευσης και εξανθήσεις αλάτων. Βασικές αιτίες για τη δημιουργία των εν λόγω φθορών αποτελούν η άμεση έκθεσή του στις καιρικές συνθήκες και η έλλειψη συστήματος απορροής των όμβριων υδάτων.

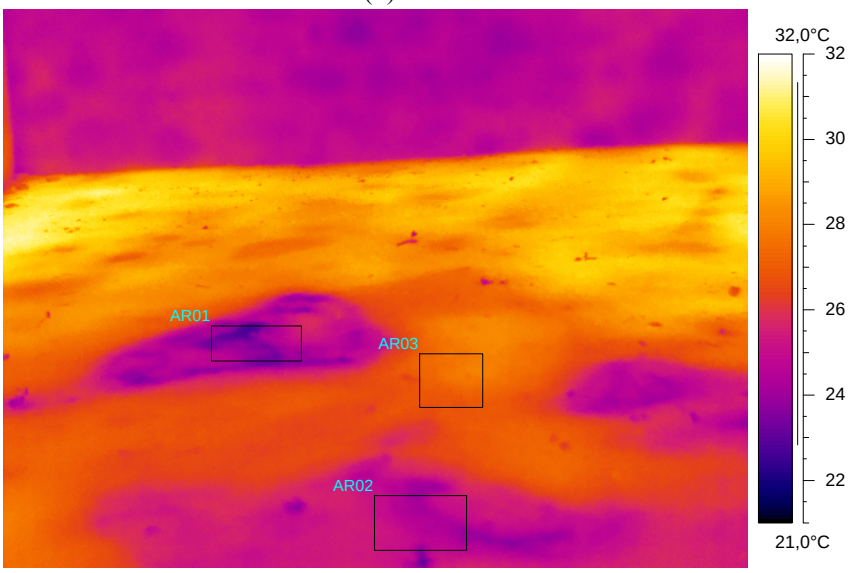
1.2.2 Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο γ΄

Για τη διάγνωση της φθοράς και την αποτίμηση των διαφορετικών επεμβάσεων συντήρησης, χρησιμοποιήθηκαν, και σε αυτή την περίπτωση οι τεχνικές της Θερμογραφίας Υπερύθρου και του Γεωραντάρ.

1.2.2.1 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)

Στην Εικόνα 1.16α παρουσιάζεται η περιοχή που εξετάστηκε με τη θερμογραφία υπερύθρου και στην Εικόνα 1.16β η αντίστοιχη θερμική εικόνα. Όπως μπορεί να φανεί από το θερμογράφημα, ψυχρές περιοχές (περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας) εντοπίστηκαν στην επιφάνεια του ψηφιδωτού δαπέδου, οι οποίες επισημαίνονται στην Εικόνα 1.16α με πορτοκαλί πλαίσιο. Η καταγραφή διαφορετικών θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων στην περιοχή αυτή, μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη υγρασίας στις συγκεκριμένες περιοχές, στις οποίες παρατηρήθηκε διαφορά θερμοκρασίας της τάξης των 3°C, περίπου. Συγκεκριμένα, όπως μπορεί να φανεί από τα αποτελέσματα του Πίνακα 1.2, η μέση φαινόμενη θερμοκρασία στις περιοχές του κονιάματος (AR01 και AR02 στην αντίστοιχη θερμική εικόνα) μετρήθηκε να είναι περίπου 24.5°C. Αντίθετα, στην περιοχή της ψηφιδωτής επιφάνειας (AR03), η μέση θερμοκρασία μετρήθηκε να είναι 27.4°C. Η παραπάνω θερμοκρασιακή διαφορά, όπως συζητήθηκε προηγουμένως μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη υγρασίας στην επιφάνεια του ψηφιδωτού, η παρουσία της οποίας ενισχύεται λόγω της ασυμβατότητα των τσιμεντιτικών κονιαμάτων συμπλήρωσης με τα υλικά της αρχαίας υποδομής.

(α)



(β)

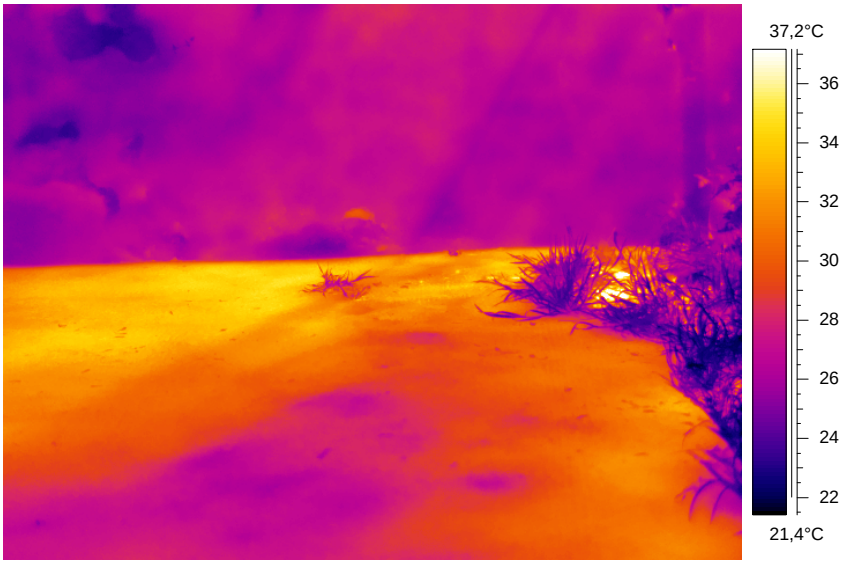
Εικόνα 1.16: Θερμογραφικός έλεγχος στη βόρεια περιοχή του ψηφιδωτού δαπέδου με (α) εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας και (β) αντίστοιχη θερμική εικόνα, η οποία αποκάλυψε την ύπαρξη υγρασίας, στις περιοχές των συμπληρώσεων με κονίαμα.

Πίνακας 1.2: Θερμοκρασιακά δεδομένα από τις επιλεγμένες περιοχές εξέτασης στην επιφάνεια του δαπέδου.

Περιοχές ελέγχου	**Min. [°C]**	**Max. [°C]**	**Δ(Max-Min)**	**Μέση τιμή**
AR01	22,7	25,7	3,0	24,0
AR02	23,7	25,6	1,9	24,8
AR03	26,7	28,2	1,6	27,4

Υγρασία εντοπίστηκε και στην νοτιοδυτική πλευρά της ψηφοθετημένης επιφάνειας όπως μπορεί να φανεί από το θερμογράφημα της Εικόνας 1.17β, στην οποία ωστόσο δεν είχε εφαρμοστεί κάποια επέμβαση συντήρησης με κονίαμα αποκατάστασης.

(α)



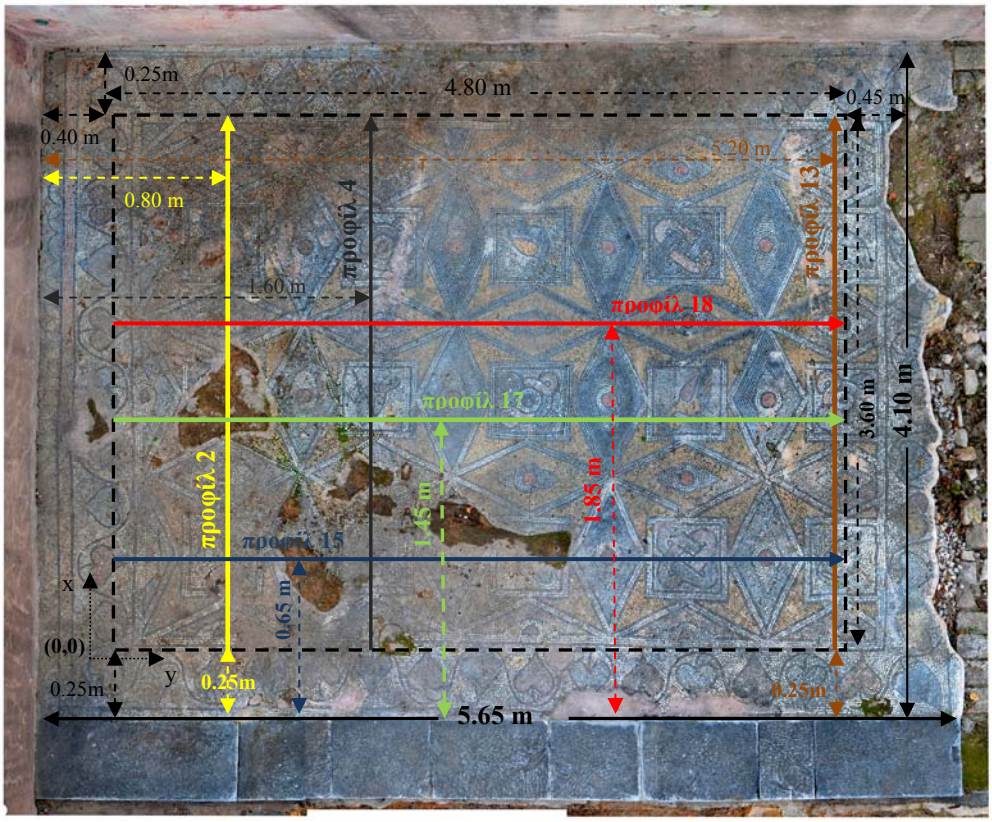
(β)

Εικόνα 1.17: : Θερμογραφικός έλεγχος στη νότια περιοχή του ψηφιδωτού δαπέδου με (α) εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας και (β) αντίστοιχη θερμική εικόνα, η οποία αποκάλυψε την ύπαρξη υγρασίας, σε διάφορες περιοχές του δαπέδου.

1.2.2.2 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Γεωραντάρ (GPR)

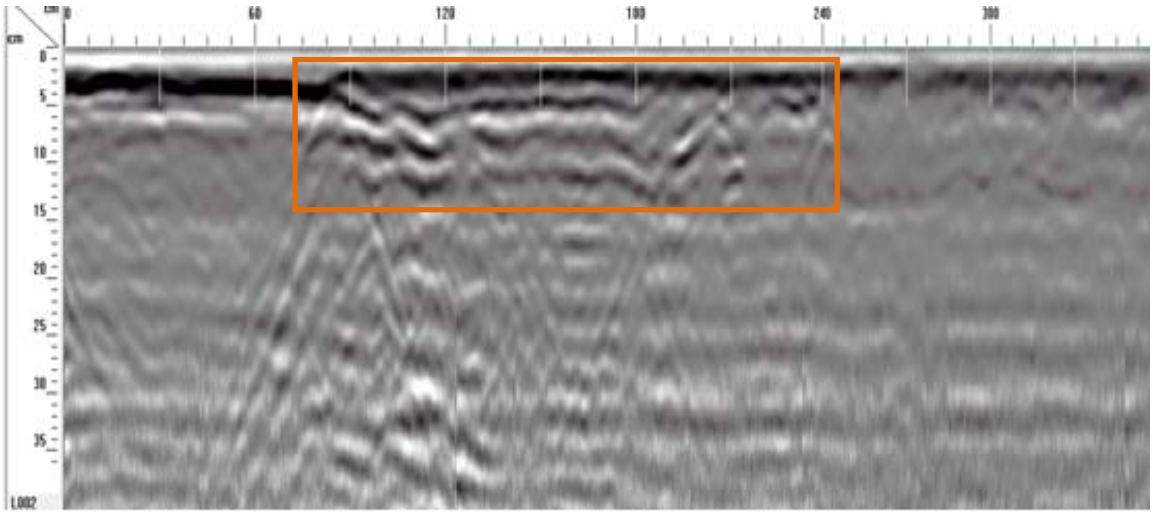
Η περιοχή του ψηφιδωτού δαπέδου που διερευνήθηκε ήταν διαστάσεων 3.60 m x 4.80 m. Η συλλογή των δισδιάστατων προφίλ σάρωσης έγινε εκτελώντας λήψεις σε 13 οριζόντιες (κατά μήκος του άξονα x) και 10 κάθετες (κατά μήκος του άξονα y) γραμμές σάρωσης με βήμα καταγραφής 0.40 m. Η μετατροπή της κατακόρυφης κλίμακας του χρόνου (ns) σε κλίμακα βάθους (cm) έγινε ορίζοντας τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ίση με 16 που αντιστοιχεί σε ταχύτητα διάδοσης του σήματος στο μέσο ίση με 0.07 m/ns.

Στην Εικόνα 1.18 παρουσιάζεται η περιοχή του ψηφιδωτού που διερευνήθηκε με την τεχνική του γεωραντάρ και οι αντίστοιχες γραμμές σάρωσης.



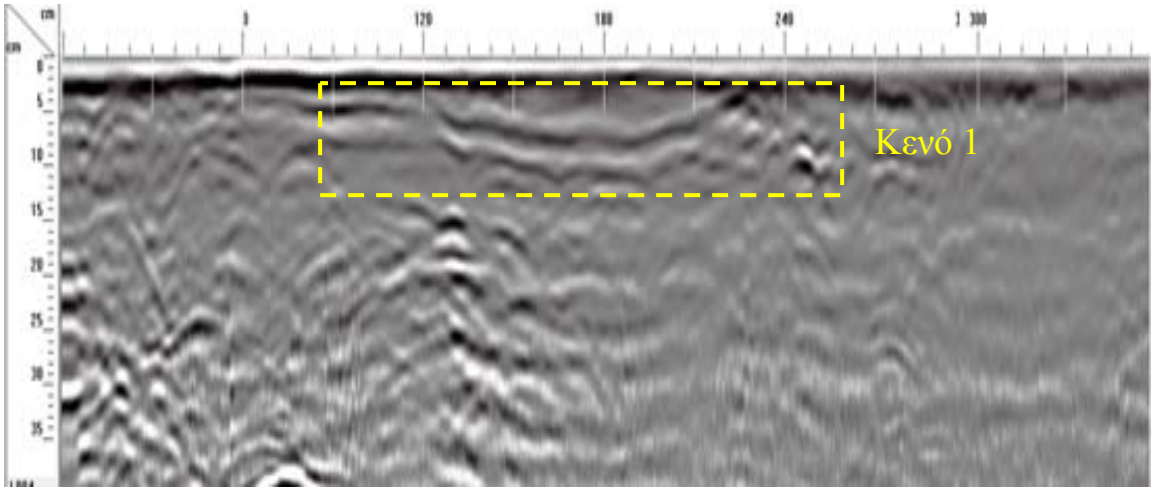
Εικόνα 1.18: Συλλογή *2D* μετρήσεων κατά μήκος του άξονα x και y, στο ψηφιδωτό του χώρου γ΄ [2].

Στην Εικόνα 1.19 παρουσιάζεται το προφίλ σάρωσης από τη γραμμή 2 κατά μήκος του άξονα x. Οι ισχυρότερες μεταβολές του ανακλώμενου σήματος, ξεκινούν από τα 0.80 m και επεκτείνονται ως τα 2.10 m κατά μήκος του οριζόντιου άξονα, με βάθος περίπου 0.10 m από την επιφάνεια της μέτρησης (πορτοκαλί πλαίσιο). Σε αυτή την περιοχή του δαπέδου εκτιμάται ότι ανιχνεύεται το κονίαμα πλήρωσης κενού στην υποδομή του ψηφιδωτού από παλαιότερη επέμβαση συντήρησης.

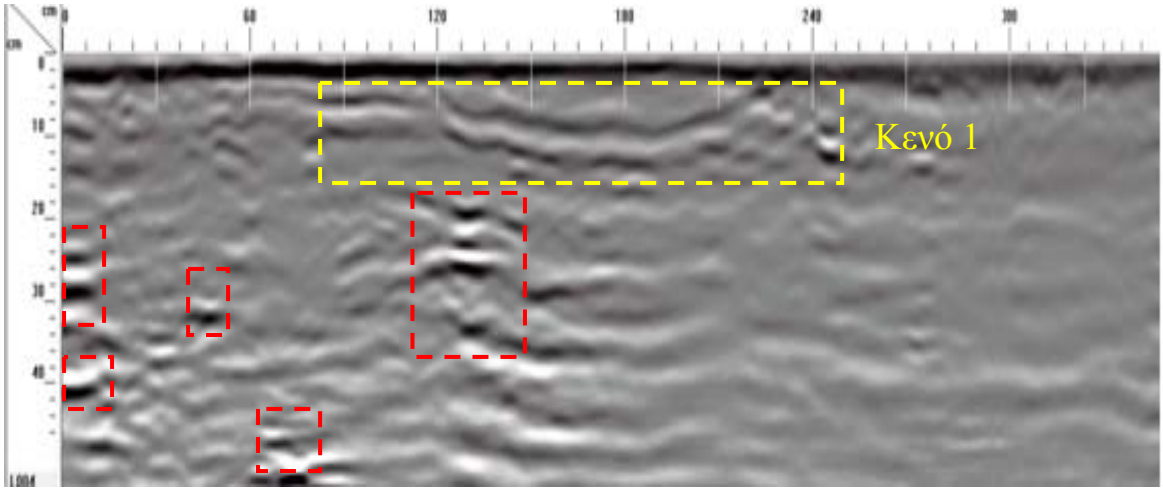


Εικόνα 1.19: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 2 του άξονα x, με επεξεργασία migration. Με πορτοκαλί πλαίσιο επισημαίνεται το κονίαμα αποκατάστασης του υποστρώματος που εφαρμόστηκε σε παλαιότερη επέμβαση συντήρησης

Στην Εικόνα 1.20α παρουσιάζεται το 2*D* προφίλ σάρωσης που ανακτήθηκε κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης 4 στον άξονα x. Στο ραδιόγραμμα παρατηρούνται ανακλάσεις ανεστραμμένης φάσης από τα 0.8 m ως τα 2.20 m κατά μήκος του οριζόντιου άξονα, σε βάθος περίπου από 0.05 m έως 0.10 m από την επιφάνεια. Η ένδειξη αυτή αποδίδεται στην ύπαρξη υποκείμενου κενού χώρου (κενό 1) στη διεπιφάνεια μεταξύ του ψηφιδωτού δαπέδου και του υποστρώματος. Παράλληλα, μέσω της επεξεργασία του 2*D* προφίλ σάρωσης με την τεχνική migration, ανακτήθηκαν αποτελέσματα μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας, αποκαλύπτοντας ασυνέχειες σε διάφορες θέσεις και μεγαλύτερα βάθη (κόκκινα πλαίσια, Εικόνα 1.20β) που πιθανόν αποδίδονται σε κενά ή/και αποσαθρωμένες περιοχές του εδάφους με υψηλά ποσοστά υγρασίας.



(α)

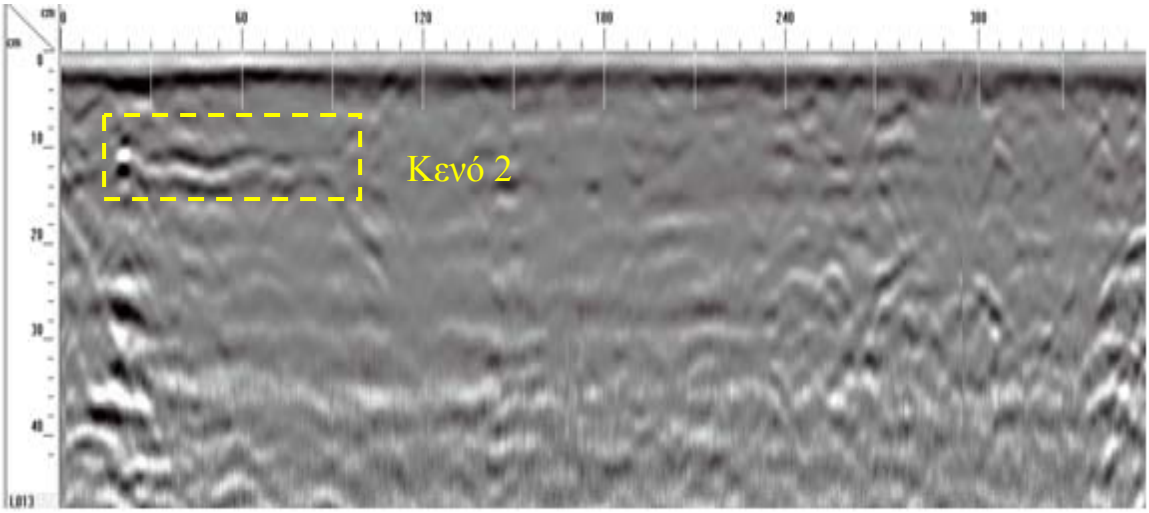


(β)

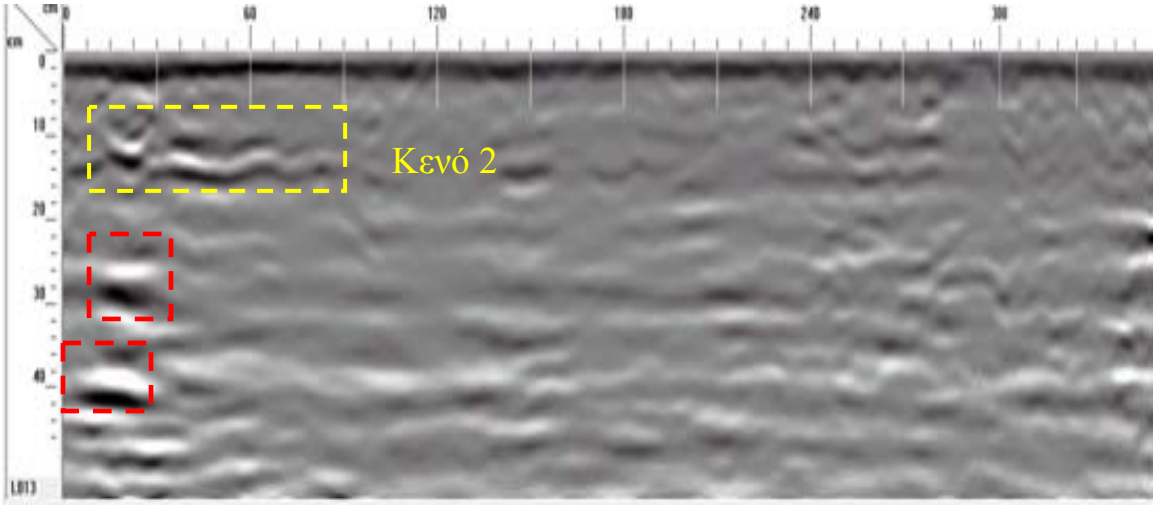
Εικόνα 1.20: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 4 του άξονα x (α) και (β) μετά από επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική migration. Τα κίτρινα διακεκομμένα πλαίσια αφορούν σε κενό στην υποδομή του ψηφιδωτού, οι περιοχές στα κόκκινα πλαίσια αφορούν σε κενά ή/και αποσαθρωμένες περιοχές του εδάφους με υψηλά ποσοστά υγρασίας.

Στην εξέταση του 2*D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης 13 στον άξονα x, επίσης παρατηρούνται, ανακλάσεις με μαύρη-λευκή-μαύρη αλληλουχία πολικότητας (Εικόνα 1.21α) [6]. Η θέση τους ανιχνεύεται περίπου από τα 0.25 m έως τα 0.75 m κατά τον οριζόντιο άξονα της απόστασης σε βάθος περίπου 0.1 m κάτω από την

επιφάνεια. Αυτές, εκτιμάται ότι οφείλονται στην παρουσία υποκείμενης κενής περιοχής στο υπόστρωμα (κενό 2).
Τα ισχυρά ανακλώμενα σήματα που παρατηρούνται στα μεγαλύτερα βάθη περίπου στα 0.22 m και 0.30 m, διακρίνονται καλύτερα στο επεξεργασμένο, με την τεχνική migration, προφίλ σάρωσης (κόκκινα πλαίσια, Εικόνα 1.21β). Λαμβάνοντας υπόψη την λευκή-μαύρη-λευκή αλληλουχία της πολικότητας του σήματος, οι ανακλάσεις αυτές θα μπορούσαν να αποδοθούν στην παρουσία αποσαθρωμένων περιοχών με υψηλά ποσοστά υγρασίας ή έγκλειστου νερού στο έδαφος.



(α)

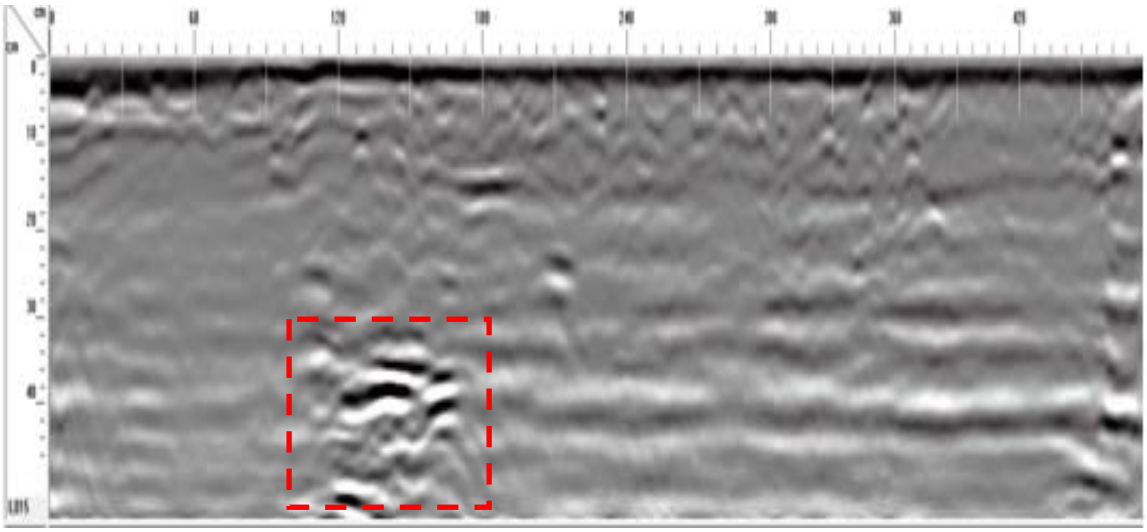


(β)

Εικόνα 1.21: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 13 του άξονα x (α), (β) μετά από επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με επεξεργασία migration. Τα κίτρινα διακεκομμένα πλαίσια αφορούν σε κενό στην υποδομή του ψηφιδωτού, οι περιοχές στα κόκκινα πλαίσια αφορούν σε αποσαθρωμένες περιοχές του εδάφους με υψηλά ποσοστά υγρασίας.

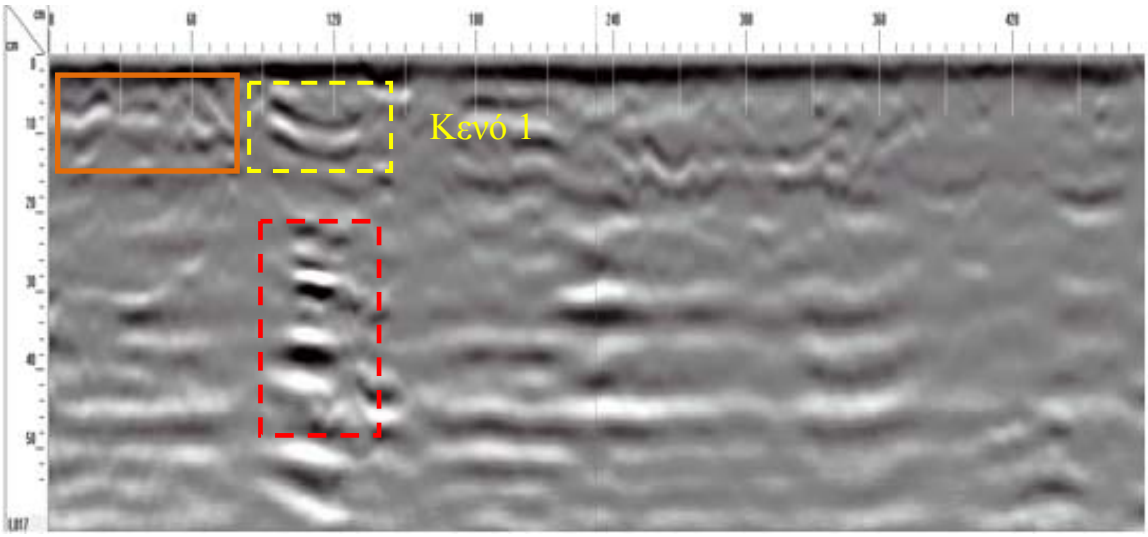
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται, ενδεικτικά, τα 2*D* προφίλ σάρωσης από τις μετρήσεις που εκτελέστηκαν κατά μήκος του άξονα y, από τα ραδιογράμματα των οποίων, εντοπίστηκε η θέση των κενών και των αποσαθρωμένων περιοχών. Στο 2*D* προφίλ σάρωσης της γραμμής 15 στον άξονα y ανιχνεύεται ασυνέχεια στο μέσο από τα

1.27 m έως τα 1.75 m κατά μήκος του οριζόντιου άξονα, σε βάθος κυμαινόμενο μεταξύ 0.25 - 0.35 m (κόκκινο πλαίσιο, Εικόνα 1.22). Με την επεξεργασία των δεδομένων με την τεχνική migration, η αλληλουχία της πολικότητας του σήματος είναι πιο ευκρινής, βάσει της οποίας, η ασυνέχεια αυτή, αποδίδεται σε αποσαθρωμένη περιοχή με υψηλά ποσοστά υγρασίας ή έγκλειση νερού στο έδαφος.

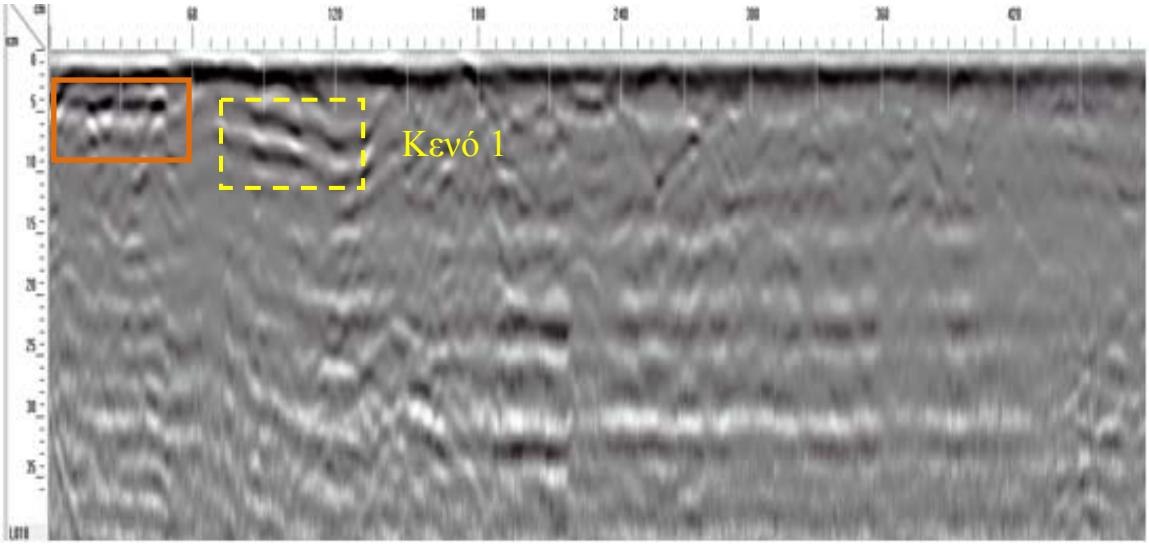


Εικόνα 1.22: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 15 του άξονα y (α), (β) επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με επεξεργασία migration. Το κόκκινο διακεκομμένο πλαίσιο αφορά σε αποσαθρωμένη περιοχές του εδάφους με υψηλά ποσοστά υγρασίας.

Στα 2*D* προφίλ σάρωσης των γραμμών διασκόπησης 17 και 18, ανιχνεύτηκαν κατά μήκος του κάθετου άξονα, η θέση του συντηρημένου ψηφιδωτού τμήματος με κονίαμα αποκατάστασης και η υπό-επιφανειακή κενή περιοχή 1. Αυτές, επισημαίνονται με πορτοκαλί και κίτρινο πλαίσιο στις Εικόνες 1.23 και 1.24, αντίστοιχα. Επίσης, οι ισχυρές ανακλάσεις που παρατηρούνται στην επεξεργασμένη με την μέθοδο *migration* δυσδιάστατη τομή της Εικόνας 1.23β σε βάθος κυμαινόμενο μεταξύ 0.15-0.30 m, αποδίδονται σε ασυνέχειες που σχετίζονται με αυτές που ανιχνεύτηκαν στο προφίλ σάρωσης της γραμμής 4 (κόκκινο πλαίσιο, Εικόνα 1.20(β)).



Εικόνα 1.23: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 17 του άξονα y (α), (β) επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με migration. Το κίτρινο διακεκομμένο πλαίσιο αφορά σε κενό στην υποδομή του ψηφιδωτού, το πορτοκαλί σε παλαιότερη επέμβαση με κονίαμα αποκατάστασης και το κόκκινο διακεκομμένο σε αποσαθρωμένη περιοχή του εδάφους με υψηλά ποσοστά υγρασίας.



Εικόνα 1.24: 2D προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 18 του άξονα y (α), (β) επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με επεξεργασία migration. Το κίτρινο διακεκομμένο πλαίσιο αφορά σε κενό στην υποδομή του ψηφιδωτού, το πορτοκαλί σε παλαιότερη επέμβαση με κονίαμα

1.3 Περιγραφικά στοιχεία ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο β΄

Το ψηφιδωτό δάπεδο συνίσταται από το κονίαμα του υποστρώματος και λίθινες ψηφίδες. Οι διαστάσεις του είναι 10,07 x 9,83 m. Το θέμα του πλαισίου του αποτελείται από ριπιδιόμορφο πλοχμό. Στο ανατολικό και το δυτικό διάχωρο το θέμα αποτελείται από αστεροειδή κοσμήματα, σχηματιζόμενα από πλάγια παραλληλόγραμμα, και ανάμεσά τους εναλλάξ ορθά και κατά κορυφή τετράγωνα [1]. Στην Εικόνα 1.25 παρουσιάζεται η περιοχή του ψηφιδωτού δαπέδου στο ανατολικό διάχωρο, πριν την επέμβαση της απόσπασής του [4].

Εικόνα 1.25: Άποψη του ανατολικού διάχωρου του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο β΄, πριν την επέμβαση της απόσπασης του (έτος 2006) [4].

1.3.1 Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης

Το βόρειο, νότιο και δυτικό διάχωρο του ψηφιδωτού δαπέδου, αποκολλήθηκε κατά το έτος 2003. Έχουν συντηρηθεί δυο τμήματα του, τα οποία έχουν τοποθετηθεί σε φορητή κατασκευή με τη μεθοδολογία συντήρησης των τμημάτων, όπως αναφέρεται στην περίπτωση του ψηφιδωτού στο χώρο α΄ [3]. Τα υπόλοιπα τμήματα φυλάσσονται σε αποθήκη της ΕΦΑ Αθηνών. Στο αρχικό υπόστρωμα παραμένει ένα μικρό τμήμα του ψηφιδωτού στο ανατολικό διάχωρο. Δεν έχουν αναφερθεί προηγούμενες εργαστηριακές αναλύσεις των υλικών.

1.3.2 Μεθοδολογία διερεύνησης του ψηφιδωτού δαπέδου του χώρου β΄

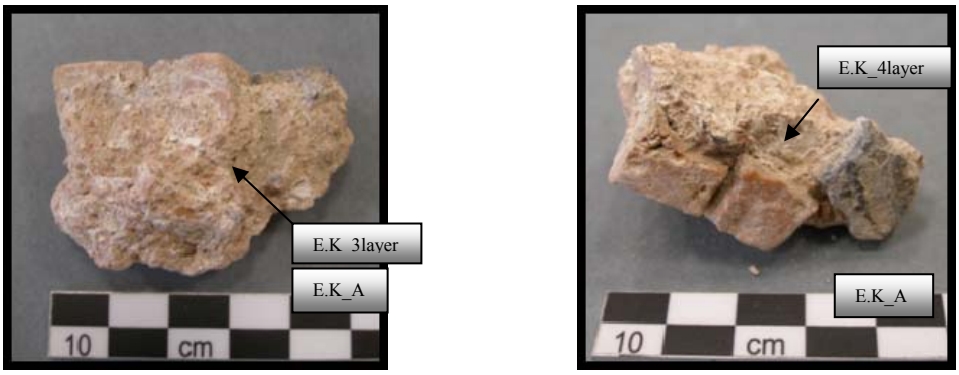
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το αρχαίο ψηφιδωτό δάπεδο του χώρου β΄ έχει αποσπαστεί για συντήρηση. Για το λόγο αυτό δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν στο δάπεδο επί τόπου μετρήσεις με τις μη καταστρεπτικές τεχνικές IRT και GPR, που χρησιμοποιήθηκαν για τα προηγούμενα δάπεδα των χώρων α΄ και γ΄.
Στην προκειμένη περίπτωση, αποσπάστηκαν, με μηχανικό τρόπο, δείγματα από σπαράγματα του αποκολλημένου υποστρώματος του ψηφιδωτού δαπέδου. Τα δείγματα αυτά θεωρούνται αντιπροσωπευτικά και για τα κονιάματα του υποστρώματος των χώρων α΄ και γ΄, δεδομένου ότι αναφέρονται στο ενιαίο χώρο του Εθνικού κήπου. Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζεται η ταξινόμηση, με το πρόθεμα "ΕΚ", και ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων που λήφθηκαν από το ψηφιδωτό του χώρου β΄, δίνοντας αναλυτικά τις διαστάσεις και την περιγραφή τους.
Η μελέτη και ανάλυση των δειγμάτων του αρχαίου κονιάματος υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου του χώρου β΄, πραγματοποιήθηκε συνδυαστικά με τη χρήση των τεχνικών DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά, για κάθε μία τεχνική, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε και τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 1.3: Ταξινόμηση και περιγραφή των δειγμάτων

Δείγματα	**Διαστάσεις (cm)**	**Περιγραφή**
E.K_A	μήκος→ 4,10 πλάτος→ 3,15 ύψος→ 3,10 ύψος 3ου στρ.→ 2,50 ύψος ψηφίδα→ 0,71	Δοκίμιο από το στρώμα της υποδομής, το οποίο έχει ληφθεί από αποσπασμένη περιοχή του ψηφιδωτού στο χώρο β΄. Φέρει τρία στρώματα κονιάματος και τρεις ψηφίδες, μία μπλε και δυο κόκκινου χρώματος.
E.K_B	μήκος→ 4,31 πλάτος→ 2,00 ύψος→ 3,10 ύψος ψηφίδα→ 0,70	Δοκίμιο από το στρώμα της υποδομής, το οποίο έχει ληφθεί από αποσπασμένη περιοχή του ψηφιδωτού στο χώρο β΄. Φέρει δυο στρώματα κονιάματος.
E.K_2layer	μήκος→ 1,20 πλάτος→ 1,50 ύψος→ 0,45	Δείγμα κονιάματος που αντιστοιχεί στο δεύτερο στρώμα της υποδομής. (rudus)
E.K_3layer	μήκος→ 1,12 πλάτος→ 1,20 ύψος→ 0,48	Δείγμα κονιάματος που αντιστοιχεί στο τρίτο στρώμα της υποδομής. (nucleus)
E.K_4layer	μήκος→ 0,30 πλάτος→ 0,92 ύψος→ 0,20	Δείγμα κονιάματος που αντιστοιχεί στο πρώτο στρώμα ψηφοθέτησης. (supra nucleus)

1.3.2.1 Μακροσκοπική παρατήρηση δειγμάτων

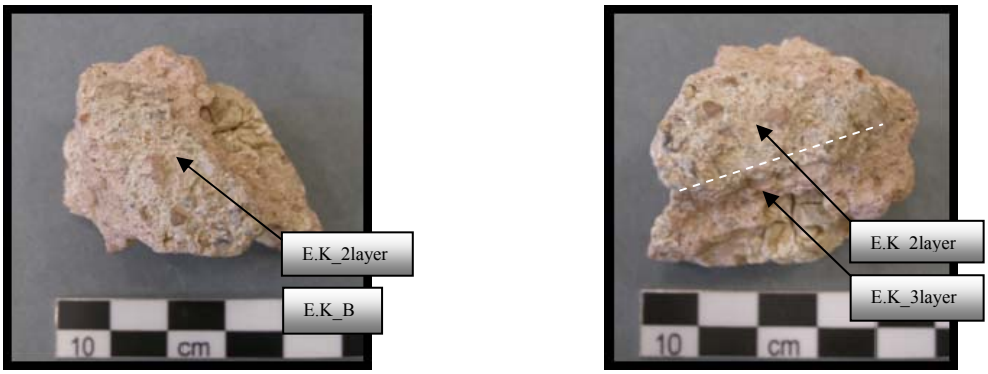
Το δείγμα E.K_A αφορά σε αποσπασμένο τμήμα του υποστρώματος του ψηφιδωτού, το οποίο περιλαμβάνει και ένα μέρος του στρώματος ψηφοθέτησης (Εικόνα 1.26α,β). Το πάχος του υπόλευκου κονιάματος ψηφοθέτησης είναι περίπου 0.20 cm και το ύψος των ψηφίδων 0.70 cm (Εικόνα 1.26β). Το υποκείμενο στρώμα φαίνεται κατασκευασμένο με αδρανή από κεραμικό και γκρι λίθο και έχει ένα ερυθρό ανοιχτό χρώμα, εκτιμάται ότι αντιστοιχεί στο τρίτο στρώμα κατασκευής των ψηφιδωτών (nucleus).



(α) (β)

Εικόνα 1.26: Τμήμα του ψηφιδωτού E.K_A που λήφθηκαν τα δείγματα εξέτασης των υποστρωμάτων (α) άποψη του τρίτου στρώματος της υποδομής και (β) άποψη του τρίτου και του στρώματος ψηφοθέτησης με τρεις λίθινες ψηφίδες. Με μαύρο βέλος επισημαίνονται οι περιοχές λήψης των δειγμάτων E.K_3layer και E.K_4layer.

Από τη μακροσκοπική παρατήρηση είναι εμφανής η διαφορά στο χρώμα και την υφή των δύο στρωμάτων. Για την εργαστηριακή εξέταση των στρωμάτων αποσπάστηκαν ένα δείγμα από το στρώμα ψηφοθετήσεις (E.K_4layer) και ένα από το υποκείμενο στρώμα κονιάματος (E.K_3layer) οι διαστάσεις των οποίων περιγράφονται στον Πίνακα 1.4.



(α) (β)

Εικόνα 1.27: Τμήμα ψηφιδωτού EK_B που λήφθηκαν τα δείγματα εξέτασης των υποστρωμάτων (α) άποψη του δεύτερου στρώματος της υποδομής και (β) άποψη του δεύτερου και τρίτου στρώματος της υποδομής. Με μαύρο βέλος επισημαίνονται οι περιοχές λήψης των δειγμάτων E.K_2layer και E.K_3layer.

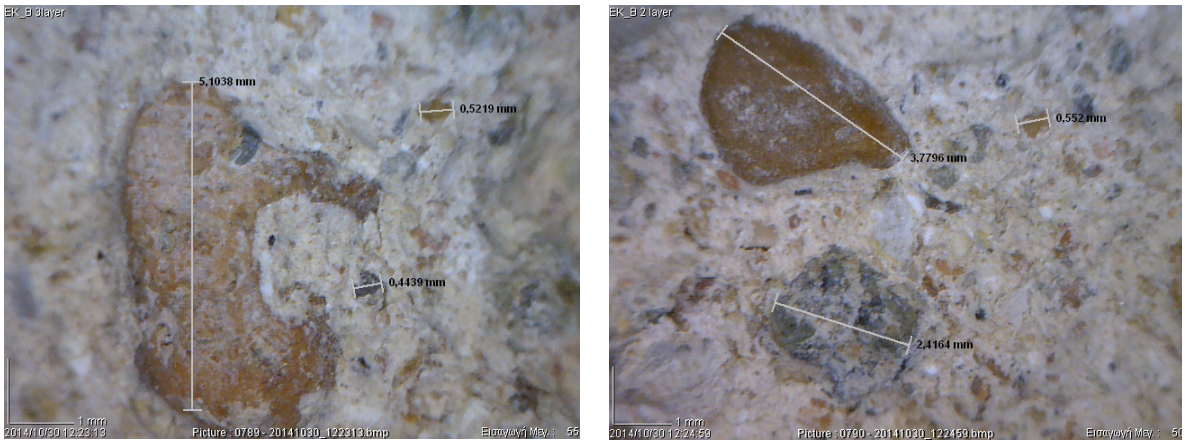
Το δείγμα E.K_B παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.27α,β και αφορά σε τμήμα κονιάματος του υποστρώματος που περιλαμβάνει δυο διαφορετικές στρώσεις κονιαμάτων. Αυτές εκτιμάται ότι αντιστοιχούν στο τρίτο (nucleus) και στο δεύτερο (rudus) στρώμα υποδομής του ψηφιδωτού (Εικόνα 1.27β). Το πάχος του στρώματος (nucleus) που μπόρεσε να μετρηθεί είναι 2.50 cm. Για την εργαστηριακή εξέταση αποσπάστηκε ένα δείγμα (E.K_2layer) από το δεύτερο στρώμα (Εικόνα 1.27α), οι διαστάσεις του οποίου περιγράφονται στον Πίνακα 1.4.

Οι παρατηρήσεις που εξάγονται από τη μακροσκοπική εξέταση των δειγμάτων συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Το σωζόμενο υπόστρωμα του ψηφιδωτού αποτελείται από τρία στρώματα κονιάματος, τα οποία αντιστοιχούν στο τέταρτο στρώμα (supra nucleus), τρίτο στρώμα (nucleus) και στο δεύτερο στρώμα (rudus) των Ρωμαϊκών ψηφιδωτών. Παρατηρείται διαφορά μεταξύ τους ως προς το χρώμα, τη σύνθεση της κοκκομετρίας και την υφή.
- Το στρώμα ψηφοθέτησης (supra nucleus) αποτελείται από λεπτόκοκκο κονίαμα υπόλευκου χρώματος και έχει πάχος 0.20 cm. Το υποκείμενο στρώμα (nucleus) έχει πάχος 2.50 cm και εκτιμάται ότι περιέχει αργυλοπυριτικά αδρανή, στα οποία οφείλεται το κοκκινωπό χρώμα του. Με τα ίδια αδρανή υλικά σε μεγαλύτερη κοκκομετρία, εκτιμάται ότι έχει κατασκευαστεί και το δεύτερο στρώμα της υποδομής (rudus).
- Παρατηρήθηκε ισχυρή συνάφεια μεταξύ των στρωμάτων, καθώς χρειάστηκε άσκηση μεγάλης πίεσης με μηχανικό τρόπο για την αφαίρεση των δειγμάτων.

1.3.2.2 Μελέτη με Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM)

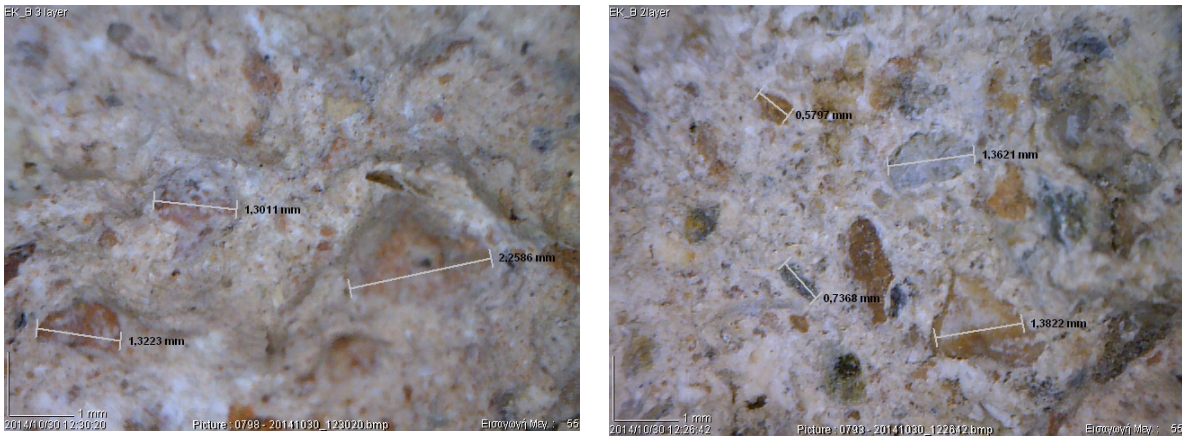
Η μορφολογία της επιφάνειας των δειγμάτων Ε.Κ_Α και Ε.Κ_Β μελετήθηκε αρχικά με τη χρήση φορητού ψηφιακού μικροσκοπίου DM. Στην Εικόνα 1.28α,β εμφανίζονται δυο φωτογραφίες από διαφορετικές περιοχές του δεύτερου στρώματος (rudus) του δείγματος ΕΚ_Β. Κατά την εξέταση των περιοχών του κονιάματος που αντιστοιχεί στο δεύτερο στρώμα (rudus) εντοπίστηκαν κοκκινωπά και γκρι αδρανή υλικά, το μήκος των οποίων κυμαίνεται από 0.5 mm – 5.1 mm (Εικόνα 1.28α,β).



X55 (α) **X50** (β)

Εικόνα 1.28: Μικροφωτογραφίες από τη μελέτη με DM της επιφάνειας που αντιστοιχεί στο δεύτερο στρώμα υποδομής του δείγματος ΕΚ_Β. Στις εξεταζόμενες περιοχές (α) και (β), εντοπίστηκαν κοκκινωπά και γκρι αδρανή υλικά, το μήκος των οποίων κυμαίνεται από 0.5 mm – 5.1 mm

Στην Εικόνα 1.29α,β εμφανίζονται δυο φωτογραφίες από διαφορετικές περιοχές του τρίτου στρώματος (nucleus) του δείγματος ΕΚ_Β. Παρατηρούνται, επίσης, αδρανή ίδιου χρώματος και μορφολογίας, το μήκος των κόκκων τους κυμαίνεται από 0.15 mm - 2.25mm. Επίσης, παρατηρήθηκε, ομοιόμορφα κατανεμημένη, άφθονη σκόνη κεραμικού.



X55 (α) **X55** (β)

Εικόνα 1.29: Μικροσκοπική άποψη της επιφάνειας του δείγματος ΕΚ_Β που αντιστοιχεί στο τρίτο στρώμα υποδομής. Στις εξεταζόμενες περιοχές (α) και (β), εντοπίστηκαν κοκκινωπά και γκρι αδρανή υλικά, το μήκος των οποίων κυμαίνεται από 0.15 mm – 2.25 mm.

Η εξέταση του τέταρτου στρώματος ψηφοθέτησης (supra nucleus) έγινε στο δείγμα ΕΚ_Α, επειδή υπήρχαν υπολείμματα του σε αυτό το δείγμα και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.30α,β. Σε αμφότερες τις περιοχές του στρώματος παρατηρείται πλούσια περιεκτικότητα σε ασβέστη με πολύ λεπτόκοκκα αδρανή κεραμικών.

X220

(α)

X220

(β)

Εικόνα 1.30: Μικροσκοπική άποψη της επιφάνειας του δείγματος ΕΚ_Α, που αντιστοιχεί στο τέταρτο στρώμα ψηφοθέτησης. Στις εξεταζόμενες περιοχές (α) και (β), παρατηρείται πλούσια περιεκτικότητα σε ασβέστη με πολύ λεπτόκοκκα αδρανή κεραμικών.

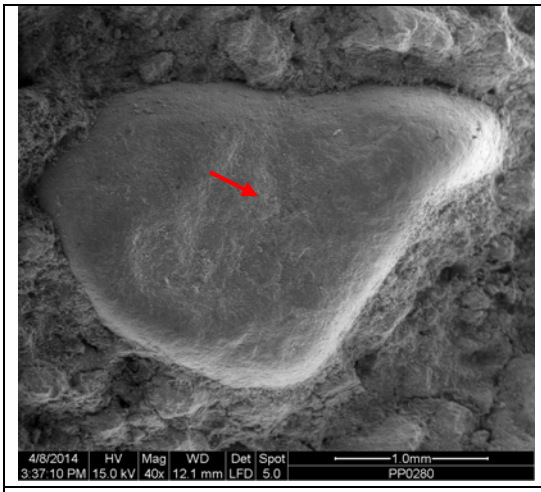
1.3.2.3 Μελέτη με Ηλεκτρονιακό Μικροσκόπιο-Μικροαναλυτή (SEM-EDX)

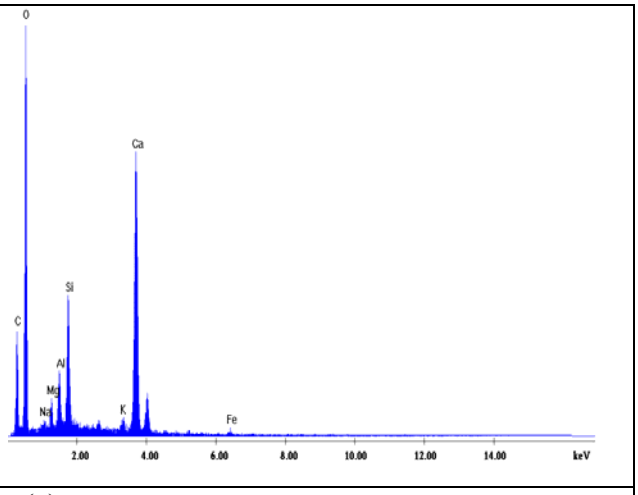
Ακολούθησε λεπτομερής διερεύνηση της μικροδομής των κονιαμάτων από τα τρία στρώματα της υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου του Εθνικού Κήπου με το Ηλεκρονιακό μικροσκόπιο (SEM-EDX). Κατά την εξέτασή των δειγμάτων στο SEM έγινε στοιχειακή χημική ανάλυση, είτε σε επιλεγμένα σημεία, ή στην επιφάνεια της μικροδομής, με την ενσωματωμένη τεχνική μικροαναλυτή EDX, για να διερευνηθεί η σύσταση των υλικών. Στην Εικόνα 1.31α,β,γ παρουσιάζονται τρεις αντιπροσωπευτικές μικροφωτογραφίες SEM, που αφορούν στο κονίαμα του δεύτερου στρώματος της υποδομής (rudus) με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις στοιχείων που προσδιορίστηκαν από το EDX. Τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων εκφράζονται, επίσης, με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων.

Στην τελευταία περίπτωση, παρατηρείται ότι ένα αποτέλεσμα υπολειπόμενου O_2, το οποίο έχει θετική ή αρνητική τιμή. Εκτιμάται ότι στην περίπτωση θετικής τιμής το οξυγόνο αυτό μπορεί να βρίσκεται δεσμευμένο με τη μορφή του H_2O. Όμως, δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα, γιατί το H_2 δεν ανιχνεύεται με το EDX. Αντίθετα, όταν η τιμή του υπολειπόμενου O_2 είναι αρνητική, εκτιμάται ότι αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός, ότι μερικά στοιχεία, αντικαθιστούν άλληλα στο πλέγμα όπως, π.χ. στην περίπτωση Al και Si, ή ότι υπεισέρχεται υψηλό ποσοστό άνθρακα, είτε από τη ρύπανση ή τη μήτρα του δοκιμίου [7].

Στην Εικόνα 1.31 παρατηρείται (α) ένας κόκκος αδρανούς ασβεστολιθικής σύστασης με προϊόντα ενυδάτωσης πάνω και γύρω από αυτόν. Αξιοπρόσεκτη είναι η καλή πρόσφυση

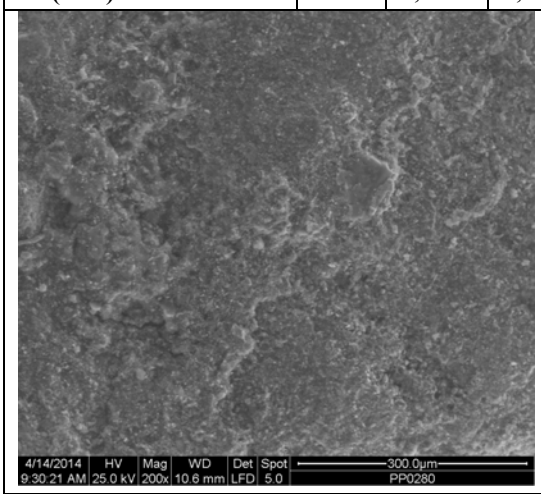
του κόκκου με τα προϊόντα ενυδάτωσης. Η μικροφωτογραφία (β) εστιάζεται στα προϊόντα ενυδάτωσης, η σύσταση των οποίων προσδιορίζει την παρουσία ένυδρων ασβεστο-αργιλο-πυριτικών ενώσεων (CASH). Πράγματι, στην εικόνα (γ) όπου εστιάζεται στα προϊόντα ενυδάτωσης με μεγαλύτερη μεγέθυνση, παρατηρούνται χαρακτηριστικοί πλακοειδείς κρύσταλλοι (CASH) ανάμεσα σε ένυδρες ασβετο-πυριτικές ενώσεις (CSH).

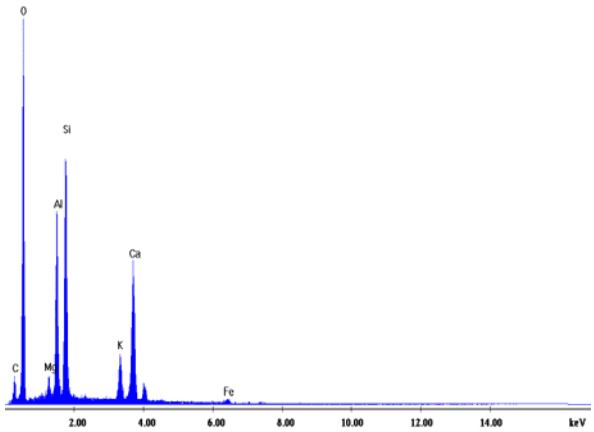




(α)

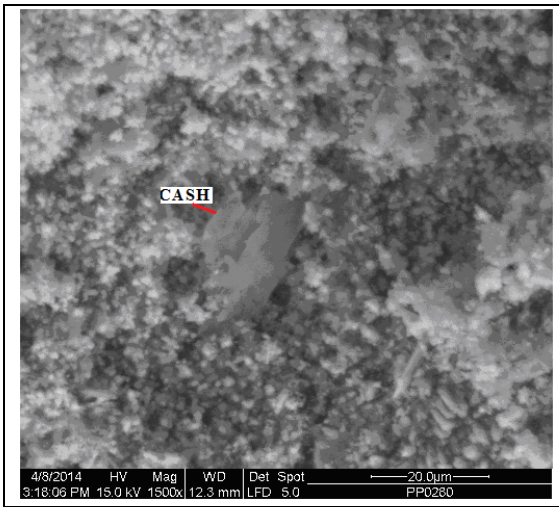
Στοιχεία	**C**	**O**	**Na**	**Mg**	**Al**	**Si**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	10,47	49,54	0,39	1,22	2,01	5,79	1,08	26,71	1,66
Οξείδια	**CO_2**	**Υπολ. O_2***	**Na_2O**	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)	38.39	0,66	0,52	2,02	3,80	12,41	1,30	37,39	2,37

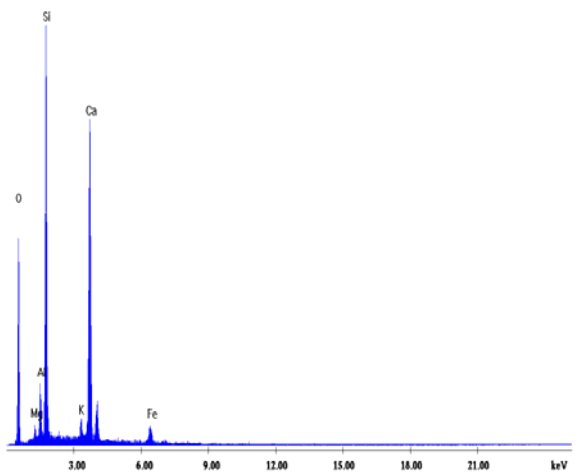




(β)

Στοιχεία	**C**	**O**	**Mg**	**Al**	**Si**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	4,83	48,44	1,01	8,50	14,71	4,50	16,12	1,90
Οξείδια	**CO_2**	**Υπολ. O_2***	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)	17,71	2,34	1,68	16,06	31,52	5,42	22,57	2,72





(γ)

Στοιχεία	**C**	**O**	**Mg**	**Al**	**Si**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	-	51,48	1,05	2,70	19,61	1,27	21,04	2,85
Οξείδια		**Υπολ. O_2***	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)		16,08	1,74	5,10	42,02	1,52	29,46	4,07

*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

Εικόνα 1.31: Μικροφωτογραφίες (SEM) με την άποψη της μικροδομής και τη χημική ανάλυση (EDX) για το κονίαμα του δεύτερου στρώματος (rudus) του ψηφιδωτού δαπέδου. Στις εικόνες παρατηρείται (α) κόκκος αδρανούς, (β) προϊόντα ενυδάτωσης ασβεστο-αργιλο-πυριτικών ενώσεων (CASH) και (γ) λεπτομέρεια ένυδρων προϊόντων (κρύσταλλοι CSAH). Στον πίνακα που ακολουθεί εκφράζονται με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων.

Από τη χημική σύσταση, εκφρασμένη σε οξείδια, της εικόνας (β), επιχειρείται να προσδιοριστούν, ενδεικτικά, οι δείκτες υδραυλικότητας (Cementitious Index, CI ή Hydraulic Index, HI), όπως αυτοί θεσπίστηκαν από τον (Eckel, 1922) και αργότερα καθόρισε ο (Boynton, 1980) με τους παρακάτω τύπους (1) και (2) [8, 9]:

$$CI = 2.8\%SiO_2 + 1.1\%Al_2O_3 + 0.7\%Fe_2O_3 / \%CaO + 1.4\%MgO \qquad (1)$$

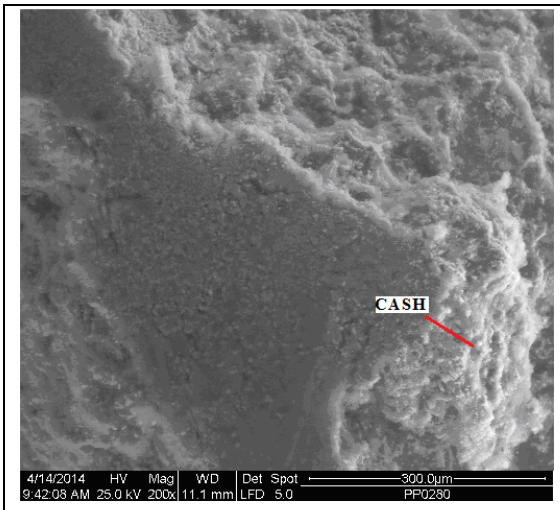
$$HI = \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 + \%SiO_2 / \%CaO + \%MgO \qquad (2)$$

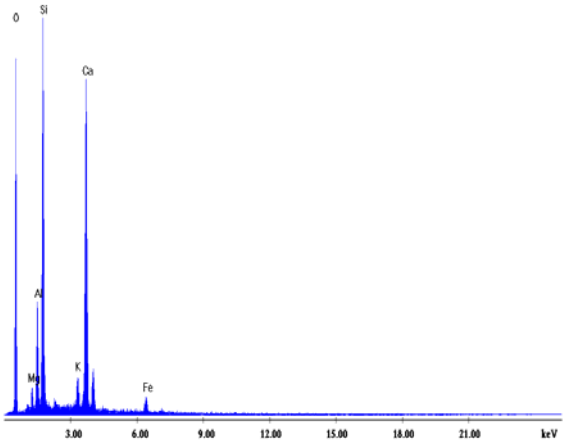
Σύμφωνα με τους δείκτες αυτούς για να χαρακτηριστεί το συνδετικό υλικό που συνθέτει ένα κονίαμα υδραυλικό θα πρέπει να έχει δείκτη υδραυλικότητας (CI ή HI) μεγαλύτερο από 0,30.

Οι δείκτες (CI) και (HI) που υπολογίζονται για το κονίαμα του δεύτερου στρώματος είναι 4,33 και 2,07, αντίστοιχα. Από την τιμή των δεικτών αυτών εκτιμάται ότι το συνδετικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για το κονίαμα του στρώματος αυτού είχε καλές υδραυλικές ιδιότητες.

Η Εικόνα 1.32 παρουσιάζει αντιπροσωπευτική μικροφωτογραφία SEM, από τη μελέτη του κονιάματος του τρίτου στρώματος της υποδομής (nucleus) με τη στοιχειακή χημική ανάλυση στην επιφάνεια, που πραγματοποιήθηκε με την τεχνική EDX. Τα αποτελέσματα εκφράζονται, επίσης, με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων. Η άποψη

της μικροφωτογραφίας αφορά στη μικροδομή των προϊόντων που συνθέτουν την επιφάνεια του δοκιμίου του κονιάματος που μελετήθηκε.





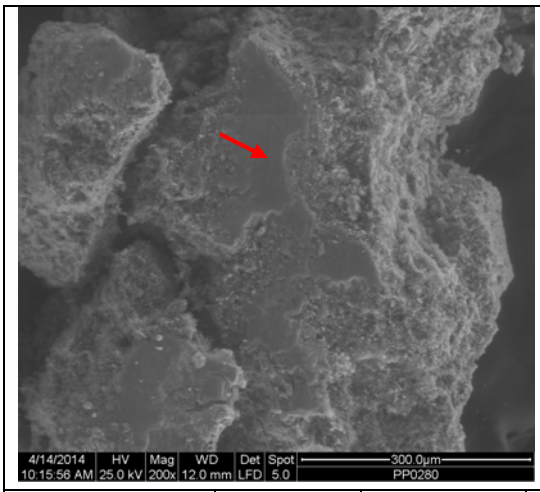
Στοιχεία	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
% (w/w)	-	57,92	1,27	4,15	16,19	1,51	17,08	1,88
Οξείδια		**Υπολ. O_2***	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)		26,94	2,11	7,84	34,69	1,81	23,91	2,69

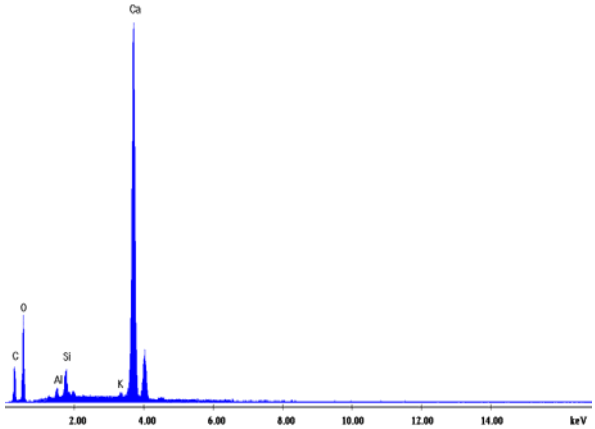
*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

Εικόνα 1.32: Μικροφωτογραφία (SEM) με την άποψη της μικροδομής και τη χημική ανάλυση (EDX) για το κονίαμα του τρίτου στρώματος (nucleus) του ψηφιδωτού δαπέδου. Από τα οξείδια που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί, προσδιορίζεται ότι πρόκειται για προϊόντα ενυδάτωσης ασβεστο-αργιλοπυριτικής σύστασης (CASH). Με κόκκινο βέλος επισημαίνεται λεπτομέρεια ένυδρων προϊόντων (κρύσταλλοι CASH).

Από τη μικροδομή της προϊόντων, αλλά και τη χημική τους σύσταση, από τα οξείδια που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί, προσδιορίζεται ότι πρόκειται για προϊόντα ενυδάτωσης ασβεστο-αργιλοπυριτικής σύστασης (CASH). Επιχειρείται και στην προκειμένη περίπτωση η προσέγγιση με τον υπολογισμό των δεικτών υδραυλικότητας (CI) και (HI). Από τον προσδιορισμό των δεικτών αυτών, οι οποίοι βρέθηκαν 4,01 και 1,74, αντίστοιχα, εκτιμάται ότι και για το κονίαμα του τρίτου στρώματος χρησιμοποιήθηκε υδραυλική κονία, δηλαδή το κονίαμα παρουσιάζει καλή υδραυλικότητα.

Στην Εικόνα 1.33 παρουσιάζεται μια άλλη αντιπροσωπευτική μικροφωτογραφία SEM, από τη μελέτη του κονιάματος του τέταρτου στρώματος (supra nucleus) του ψηφιδωτού δαπέδου, με την αντίστοιχη χημική ανάλυση (EDX) σε στοιχεία και οξείδια. Όπως παρατηρείται από τη μικροδομή, αλλά και τη σύσταση των οξειδίων, εκτιμάται ότι πρόκειται για κονίαμα με αυξημένα ποσοστά ασβεστίτη ($CaCO_3$) με διεσπαρμένα προϊόντα ενυδάτωσης, ασβεστοπυριτικής σύνθεσης (CSH). Από τον υπολογισμό των δεικτών υδραυλικότητας (CI) και (HI), οι οποίοι βρέθηκαν 0,31 και 0,13, αντίστοιχα, εκτιμάται ότι για το κονίαμα του τέταρτου στρώματος χρησιμοποιήθηκε κονία με υψηλά ποσοστά υδρασβέστου και το κονίαμα παρουσιάζει μέτρια υδραυλικότητα.





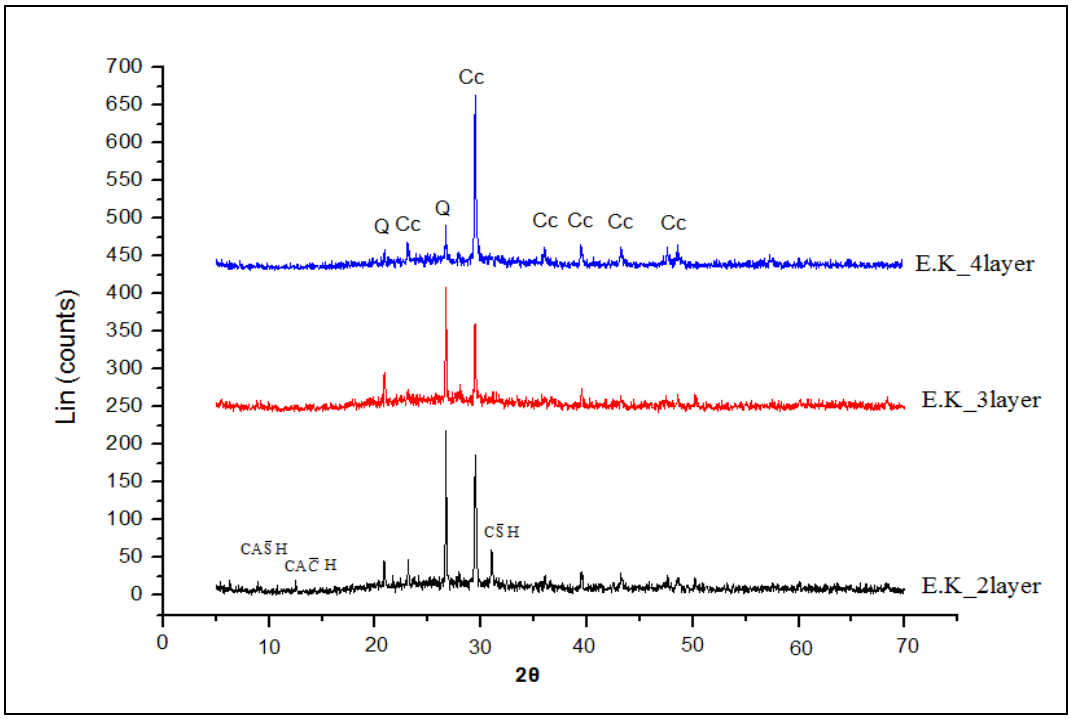
Στοιχεία	**C**	**O**	**Mg**	**Al**	**Si**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	11,50	44,88	-	0,91	2,58	0,51	39,62	-
Οξείδια	**CO_2**	**Υπολ. O_2***	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)	42,17	-5,50	-	1,72	5,53	0,61	55,47	

*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

Εικόνα 1.33: Μικροφωτογραφία (SEM) με την άποψη της μικροδομής για το κονίαμα του τέταρτου στρώματος (supra nucleus) του ψηφιδωτού δαπέδου. Με κόκκινο βέλος επισημαίνεται το σημείο χημικής ανάλυσης (EDX) του δείγματος. Στον πίνακα που ακολουθεί εκφράζονται με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης.

1.3.2.4 Μελέτη με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

Η κρυσταλλογραφική ανάλυση των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων Χ (XRD). Στόχος της μελέτης αυτής ήταν να διερευνηθούν τα ορυκτολογικά συστατικά που περιέχονται στα κονιάματα, ώστε να αναγνωριστεί η σύνθεση τους. Από την αναγνώριση της θέσης (2θ) των κορυφών στα ακτινογραφήματα των τριών δειγμάτων (E.K_4layer, E.K_3layer, E.K_2layer) που παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.34, προσδιορίστηκαν οι πλεγματικοί παράμετροι (d) και, ακολούθως, έγινε η ποιοτική αναγνώριση των ορυκτολογικών συστατικών (Πίνακας 1.4).



Εικόνα 1.34: Ακτινογραφήματα XRD από την εξέταση των δειγμάτων E.K_4layer, E.K_3layer, E.K_2layer. Οι κορυφές που παρουσιάζονται στο ακτινογράφημα αντιστοιχούν σε ασβεστίτη (Cc), χαλαζία (Q), τομασίτη ($CA\overline{C}H$), ετρινγκίτη ($CA\overline{S}H$), γύψο ($C\overline{S}H$).

Πίνακας 1.4: Αποτελέσματα από τη μελέτη των ακτινογραφημάτων XRD

Δείγμα	**Σύσταση (ορυκτολογικά συστατικά)**
E.K_4layer	Ασβεστίτης (Cc, $CaCO_3$), Χαλαζίας (α-Quartz, Q, SiO_2)
E.K_3layer	Ασβεστίτης, Χαλαζίας, Τομασίτης (Taumasite, $Ca_3Si(OH)_6(CO_3)\cdot 12H_2O$, $CA\overline{C}H$), Ετρινγκίτης (Ettringite, $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}\cdot 26H2O$, $CA\overline{S}H$)
E.K_2layer	Ασβεστίτης, Χαλαζίας, Τομασίτης, Ετρινγκίτης, Γύψος (Gypsum, $CaSO_4.2H_2O$, $C\overline{S}H$)

Η περαιτέρω μελέτη και σύγκριση των εντάσεων των κορυφών που παρουσιάζονται στα ακτινογραφήματα XRD, μπορεί να οδηγήσει σε μια ημιποσοτική εκτίμηση, σχετικά με την περιεκτικότητα των ορυκτολογικών συστατικών που εντοπίστηκαν στα δείγματα που εξετάστηκαν. Έτσι, σύμφωνα με τις εντάσεις των κορυφών που παρατηρούνται στα ακτινογραφήματα, εκτιμάται ότι και τα τρία κονιάματα συνίστανται κυρίως από ασβεστίτη ($CaCO_3$). Η παρουσία του ασβεστίτη αποδίδεται, κυρίως, στο συνδετικό συστατικό του κονιάματος, υδράσβεστο και προέρχεται κυρίως από τη διαχρονική ενανθράκωση της ($Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$), ενώ ένα μέρος του ασβεστίτη μπορεί να προέρχεται από την πιθανή παρουσία αδρανών ασβεστολιθικής σύστασης.

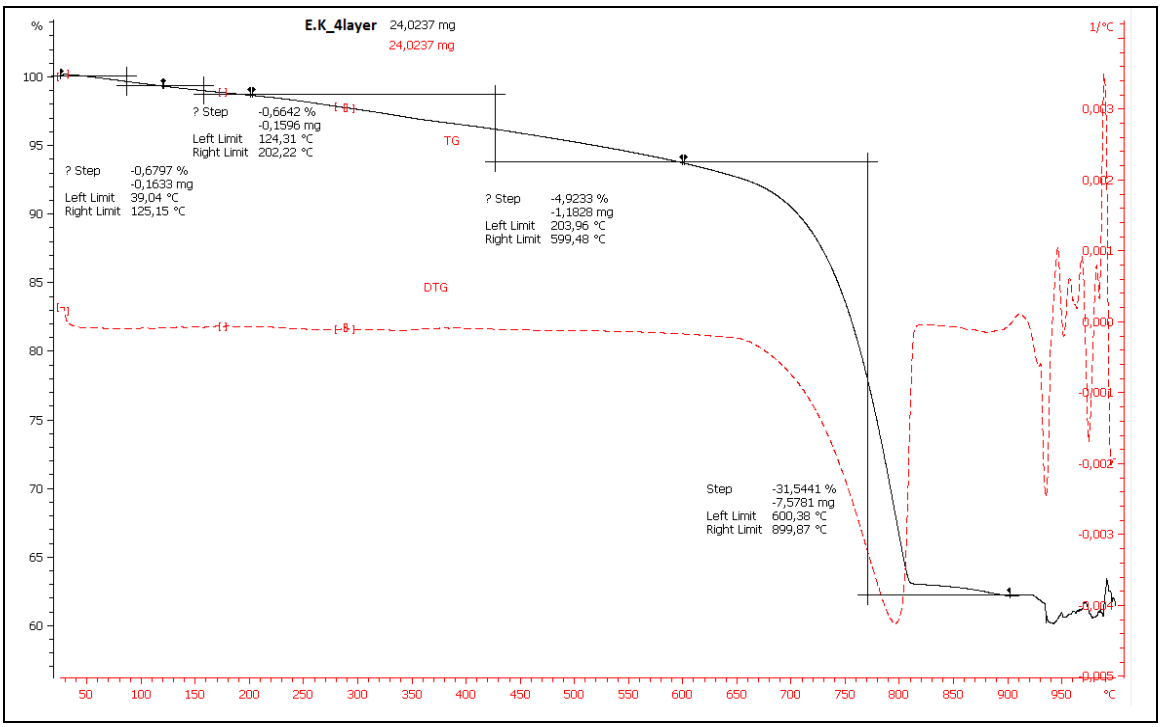
Ακόμη, ως δευτερεύουσα ορυκτολογική φάση παρατηρείται ο χαλαζίας και στα τρία κονιάματα. Η παρουσία χαλαζία (α-Quartz) οφείλεται στην κρυσταλλική πυριτία (SiO_2) που περιεχόταν στα κεραμικά κλάσματα ή/και στην άμμο και η οποία δεν έχει αντιδράσει με την υδράσβεστο. Στο κονίαμα του στρώματος ψηφοθέτησης (E.K_4layer)

παρατηρείται ως κύριο συστατικό ο ασβεστίτης, στον οποίο οφείλει και το υπόλευκο χρώμα του, ενώ ο χαλαζίας εμφανίζεται σε μικρά ποσοστά.
Τα κονιάματα του υποστρώματος, (E.K_2layer και E.K_3layer) συνίστανται, κυρίως, από ασβεστίτη και χαλαζία, ενώ παρατηρείται η παρουσία μικρών ποσοτήτων ετρινγκίτη και τομασίτη. Η παρουσία των δύο τελευταίων συστατικών αποδίδεται στην προσβολή των ένυδρων ασβεστο-αργιλο-πυριτικών ενώσεων (CASH) που σχηματίστηκαν κατά την ενυδάτωση του κονιάματος με το CO_2 και θειικά τα άλατα. Ο σχηματισμός των υδραυλικών αυτών ενώσεων (CASH) κατά την ενυδάτωση των συστατικών του κονιάματος, αποτελεί σοβαρή ένδειξη ότι πρόκειται για προϊόντα ποζολανικής δράσης, δεδομένου, ότι την περίοδο εκείνη δεν υπήρχε τσιμεντοκονία. Η παρουσία των θειικών, με τη μορφή της γύψου, ανιχνεύθηκε, επίσης, στο κονίαμα E.K_2layer σε πολύ μικρά ποσοστά. Η παρουσία των θειικών οφείλεται κυρίως στις δράσεις περιβαλλοντικών παραγόντων στην ασβεστιτική φάση του κονιάματος. Είναι γνωστό το φαινόμενο του σχηματισμού γύψου ($CaSO_4.2H_2O$), εξαιτίας της θειικής προσβολής του κονιάματος, παρουσία νερού [10].

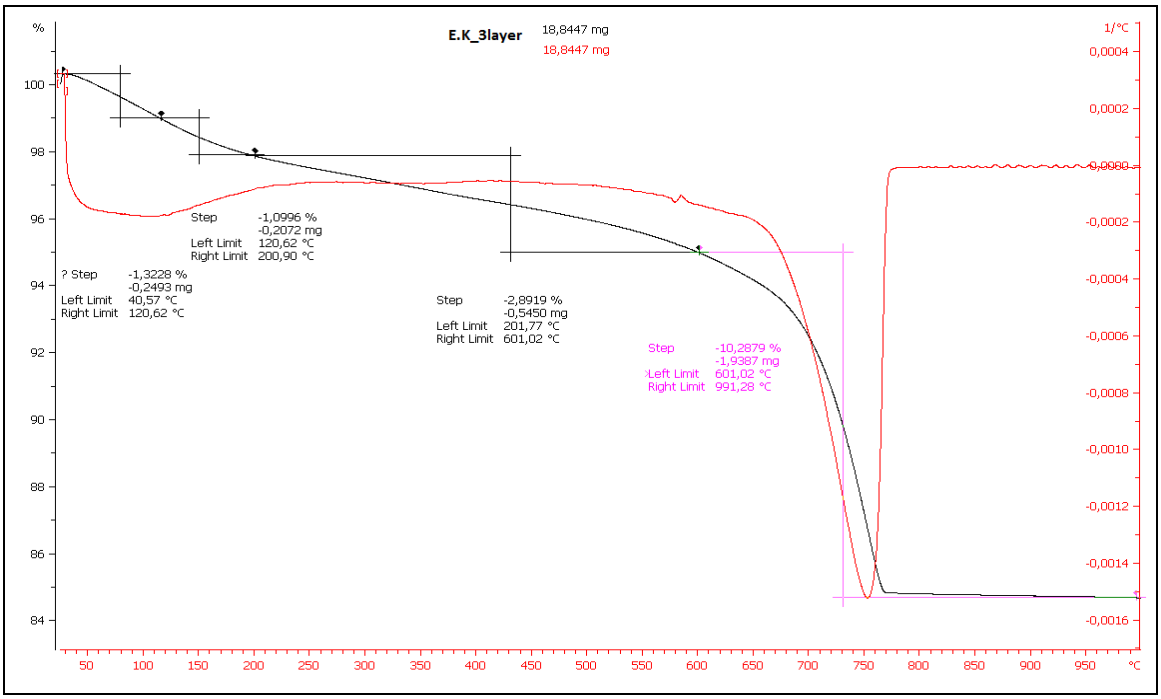
1.3.2.5 Μελέτη με Θερμική Ανάλυση (TG-DTG)

Η μελέτη με τη μέθοδο θερμικής ανάλυσης αποσκοπεί στον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των διαφόρων συστατικών των κονιαμάτων και την ανίχνευση ενδεχόμενων προϊόντων φθοράς. Ακόμη, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός του κρυσταλλικού και χημικά ενωμένου νερού, το οποίο αντανακλά τον υδραυλικό χαρακτήρα των κονιαμάτων.
Ο θερμοζυγός που χρησιμοποιήθηκε, η διαδικασία που ακολουθήθηκε και οι συνθήκες των μετρήσεων ήταν αυτές που αναφέρονται στον Πίνακα Β.1.
Οι μεταβολές βάρους (TG) και οι αντίστοιχες διαφορικές μεταβολές βάρους (DTG) καταγράφονταν στο θερμικό διάγραμμα σε συνάρτηση με την άνοδο της θερμοκρασίας. Έτσι, από την αντιστοίχηση της θερμοκρασιακής θέσης των κορυφών της καμπύλης DTG, είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι ενώσεις που υπάρχουν στο δείγμα, ενώ από την απώλεια βάρους στην αντίστοιχη θέση γίνεται ο ποσοτικός προσδιορισμός της ένωσης. Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάστηκε στις θερμοκρασιακές περιοχές του διαγράμματος της θερμικής καμπύλης TG κάτω από 120 °C, μεταξύ 120-200 °C, μεταξύ 200-600 °C και άνω των 600 °C, όπου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα κονιάματα. Συγκεκριμένα, η απώλεια βάρους σε θερμοκρασία κάτω από 120 °C οφείλεται στην απώλεια νερού, κυρίως, λόγω υγρασίας, μεταξύ 120-200 °C συνδέεται με την απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού από ένυδρα άλατα (γύψος κτλ.) ενώ η απώλεια του χημικά δεσμευμένου νερού εμφανίζεται, κυρίως, μεταξύ 200-600 °C. Απώλεια χημικά δεσμευμένου νερού μπορεί να εμφανιστεί και σε υψηλότερες θερμοκρασίες, όταν είναι ισχυρά δεσμευμένο σε υδραυλικές ενώσεις, όπως για παράδειγμα στο CSH στα τσιμεντοκονιάματα. Τέλος, από το λόγο της απώλειας βάρους του χημικά δεσμευμένου H_2O (200-600 °C) και του CO_2 που προέρχεται από τη διάσπαση του $CaCO_3$ (>600 °C) μπορεί να εκτιμηθεί η υδραυλικότητα του κονιάματος, που είναι αντιστρόφως ανάλογη του λόγου CO_2/χημικά δεσμευμένο νερό.

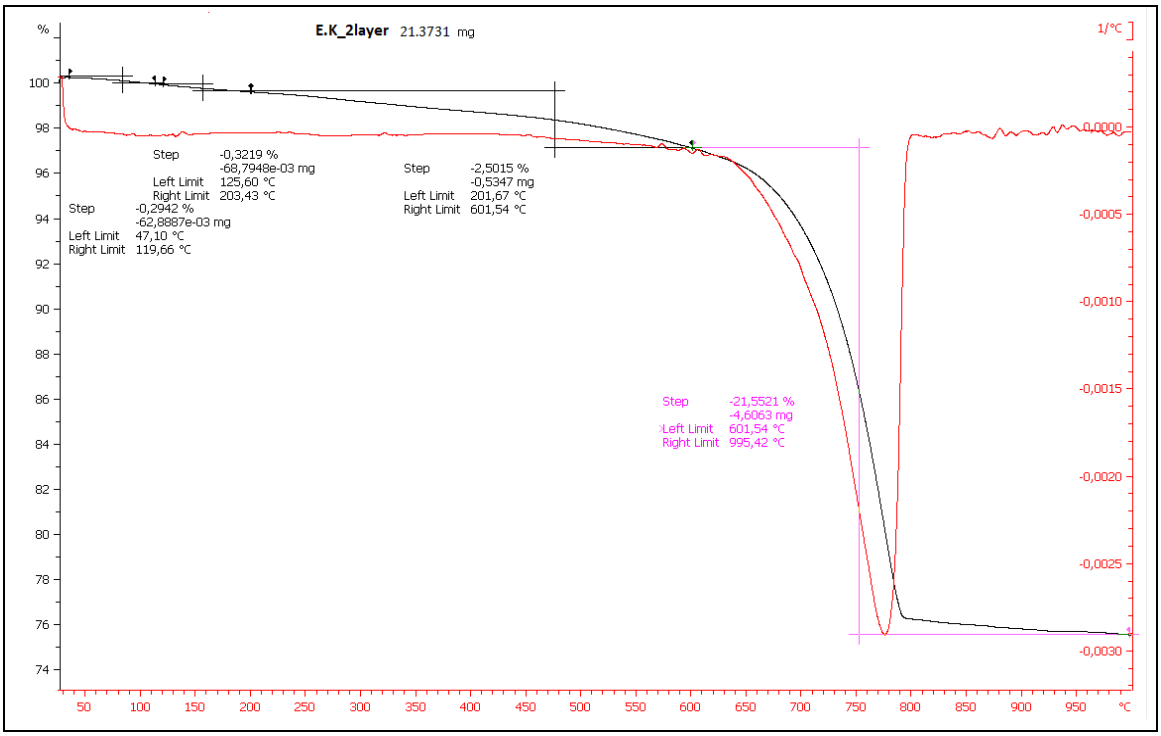
Στις Εικόνες 1.35, 1.36 και 1.37 παρουσιάζονται τα θερμικά διαγράμματα TG-DTG για τα δείγματα E.K_4layer, E.K_3layer και E.K_2layer, αντίστοιχα.



Εικόνα 1.35: Θερμοδιάγραμμα TG-DTG από την εξέταση του δείγματος E.K_4layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό.



Εικόνα 1.36: Θερμοδιάγραμμα TG-DTG από την εξέταση του δείγματος E.K_3layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό εύρος.



Εικόνα 1.37: Θερμοδιάγραμμα TG-DTG από την εξέταση του δείγματος E.K_2layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό εύρος.

Στον Πίνακα 1.5 δίνονται τα αποτελέσματα της απώλειας βάρους που προσδιορίστηκαν ανά θερμοκρασιακό εύρος, καθώς και ο λόγος CO_2/χημικά δεσμευμένου νερού, που υπολογίζεται, αντιστοίχως, από τις απώλειες βάρους στα θερμοκρασιακά διαστήματα >600 °C και 200-600 °C.

Πίνακας 1.5: Αποτελέσματα TG ανάλυσης για τα δείγματα που εξετάστηκαν.

Δείγματα	**(%) Απώλεια βάρους για κάθε θερμοκρασιακή περιοχή (°C)**				**CO_2/H_2O**
	<120	**120-200**	**200-600**	**>600**	
E.K_4layer	0.68	0.66	4.92	31.54	6.41
E.K_3layer	1.32	1.09	2.89	10.28	3.55
E.K_2layer	0.29	0.32	2.50	21.55	8.62

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 1.6, η απώλεια βάρους στο θερμοκρασιακό εύρος από 120-200 °C που αποδίδεται στο κρυσταλλικό νερό των ένυδρων αλάτων είναι σχετικά μικρή. Στην προκειμένη περίπτωση η απώλεια στην περιοχή αυτή αποδίδεται κυρίως στην παρουσία της γύψου και η μεγαλύτερη τιμή (1,09 %) εμφανίζεται στο δείγμα E.K_3layer. Στο θερμοκρασιακό εύρος από 200-600 °C η μεγαλύτερη απώλεια βάρους (4.92%) παρατηρείται στο κονίαμα ψηφοθέτησης (E.K_4layer). Η απώλεια αυτή μπορεί να αποδοθεί στο κρυσταλλικό νερό, κυρίως, των ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων του ασβεστίου (CASH), τα οποία είναι προϊόντα ποζολανικής αντίδρασης. Στα

δύο υποκείμενα στρώματα κονιάματος E.K_2layer και E.K_3layer, η απώλεια βάρους σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος είναι παραπλήσια, 2.50 και 2.89 %, αντίστοιχα.
Στο θερμοκρασιακό εύρος από 600-1000 °C, η μεταβολή του βάρους αποτυπώνεται από την μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης TG που αποδίδεται με την χαρακτηριστική κορυφή DTG στους 810 και 842 °C, η οποία αντιστοιχεί στη διάσπαση του ασβεστίτη ($CaCO_3$). Από τις απώλειες βάρους του Πίνακα 1.5 στη θερμοκρασιακή αυτή περιοχή υπολογίζονται στα τρία δείγματα κονιαμάτων η περιεκτικότητα του ασβεστίτη ($CaCO_3$) και της ισοδύναμης υδρασβέστου ($Ca(OH)_2$) από την οποία προήλθε (Πίνακας 1.6).
Με βάση την απώλεια βάρους (%) στις θερμοκρασιακές περιοχές 200-600 ˚C και > 600˚C, αντίστοιχα, προσδιορίζεται ο λόγος CO_2/H_2O, που ορίζεται ως λόγος υδραυλικότητας (Hr) και παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την υδραυλική φύση της κονίας, δεδομένου, ότι σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με την υδραυλικότητα του εξεταζόμενου κονιάματος. Ειδικότερα, έχει διατυπωθεί η ακόλουθη κατάταξη, ανάλογα με τις τιμές του δείκτη Hr για το χαρακτηρισμό των κονιαμάτων ασβέστου που δεν περιέχουν ασβεστολιθικά αδρανή [11-17].

(i) Hr >10, χαρακτηρίζει κονιάματα αερικής ασβέστου,
(ii) Hr = 4-9, αντιστοιχεί σε κονιάματα με ασθενή υδραυλικό χαρακτήρα.
(iii) Μετρίως υδραυλικά κονιάματα (π.χ., κονιάματα που περιέχουν τρίματα από αργιλικά τούβλα, κεραμίδια κλπ.) παρουσιάζουν τιμές Hr = 3-6.
(iv) Hr < 3 χαρακτηρίζει κονιάματα με ισχυρό υδραυλικό χαρακτήρα (κονιάματα που συντίθενται από φυσική ποζολάνη ή υλικά που βασίζονται στο τσιμέντο).

Από τους λόγους που αναφέρονται στον Πίνακα 1.5, εκτιμάται ότι και τα τρία δείγματα στα στρώματα της υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου συνίστανται από υδραυλικά κονιάματα.

Πίνακας 1.6: Υπολογιζόμενη περιεκτικότητα $CaCO_3$ και ισοδύναμου $Ca(OH)_2$ στα κονιάματα εξετάστηκαν.

Στρώμα Κονιάματος	**$CaCO_3$ (%)**	**Ισοδύναμο $Ca(OH)_2$ (%)**
E.K_4layer (στρώμα ψηφοθέτησης)	71,68	52,99
E.K_3layer (ενδιάμεσο στρώμα υποδομής)	23,37	17,27
E.K_2layer (δεύτερο στρώμα της υποδομής)	48,98	36,20

Από τις τιμές του Πίνακα 1.6 παρατηρείται μια σημαντική διαφοροποίηση στην περιεκτικότητα του ασβεστίτη και της ισοδύναμης υδρασβέστου στα τρία δείγματα των κονιαμάτων υποδομής. Η διαφοροποίηση αυτή αντανακλά την τεχνική παρασκευής των κονιαμάτων.
Ειδικότερα, παρατηρείται ότι το στρώμα ψηφοθέτησης (E.K_4layer) περιέχει το υψηλότερο ποσοστό ασβεστίτη 71,68 % που αντιστοιχεί σε $Ca(OH)_2$ 53 %. Συνεπώς, στο στρώμα αυτό το κονίαμα περιείχε τα υψηλότερα ποσοστά υδρασβέστου. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, κατά τη μελέτη των κονιαμάτων με τις μεθόδους DM, SEM-EDX και XRD, όπου διαπιστώθηκε η λεπτότερη κοκκομετρική διαβάθμιση και η ποζολανική φύση των πρόσθετων υλικών. Το υψηλότερο ποσοστό $Ca(OH)_2$ και η λεπτότερη

κατανομή των ποζολανικών υλικών συμβάλλει στην καλύτερη πλαστικότητα (εργασιμότητα) του κονιάματος που διευκολύνει την επίστρωση του και την υποδοχή των ψηφίδων. Από το ποσοστό της ισοδύναμης $Ca(OH)_2$, εκτιμάται ότι η αναλογία $Ca(OH)_2$/ποζολανικό υλικό του κονιάματος ήταν της τάξης 1/1.
Στο ενδιάμεσο (τρίτο) στρώμα (E.K_3layer), παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα του ασβεστίτη είναι 23,37 % που αντιστοιχεί σε $Ca(OH)_2$ 17,27 %. Από την περιεκτικότητα της υδρασβέστου εκτιμάται ότι η αναλογία $Ca(OH)_2$/ποζολανικό υλικό του κονιάματος ήταν της τάξης 1/4. Στο στρώμα αυτό το κονίαμα περιείχε τα υψηλότερα ποσοστά ποζολανικών υλικών και παρουσιάζει τη μεγαλύτερη υδραυλικότητα (Πίνακας 1.6) ώστε να υποστηρίζει επαρκώς το στρώμα ψηφοθέτησης. Προχωρώντας, στο δεύτερο στρώμα της υποδομής (E.K_3layer) παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα του ασβεστίτη είναι 48,98 % που αντιστοιχεί σε $Ca(OH)_2$ 36,20 %. Το ποσοστό αυτό της υδρασβέστου οδηγεί σε μια αναλογία $Ca(OH)_2$/ποζολανικό υλικό του κονιάματος της τάξης 1/2. Στο στρώμα αυτό το κονίαμα περιείχε υψηλά ποσοστά ποζολανικών υλικών, ώστε να εξασφαλίζει επαρκή υδραυλικότητά, αλλά και ικανή ποσότητα υδρασβέστου για να έχει καλύτερη πλαστικότητα, ώστε να εισχωρεί και να εξασφαλίζει καλύτερη πρόσφυση στα πλέον χονδρόκοκκα αδρανή αυτού του υποστρώματος.

1.4 Συμπεράσματα από τη μελέτη των ψηφιδωτών δαπέδων της Ρωμαϊκής οικίας του Εθνικού κήπου

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους η μελέτη των ψηφιδωτών δαπέδων του Εθνικού κήπου περιελάμβανε την εξέταση των ψηφιδωτών σε τρεις διακριτούς χώρους, α΄, β΄ και γ΄. Η διερεύνηση των δαπέδων των χώρων α΄ και γ΄ πραγματοποιήθηκε συνδυαστικά με τις τεχνικές της θερμογραφίας υπερύθρου και του γεωραντάρ. Στο ψηφιδωτό δάπεδο του χώρου β΄, λόγω του ότι τα περισσότερα τμήματα του έχουν αποσπαστεί για συντήρηση, μελετήθηκε η σύνθεση των κονιαμάτων της υποδομής του, με τη συνδυαστική χρήση των τεχνικών DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG. Παρακάτω, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των ψηφιδωτών δαπέδων στους τρεις αναφερόμενους χώρους.

1.4.1 Συμπεράσματα από την εξέταση του ψηφιδωτού δαπέδου του χώρου α΄ με την εφαρμογή των τεχνικών IRT και GPR

Με την τεχνική IRT, προσδιορίστηκαν οι περιοχές ύπαρξης υγρασίας, οι οποίες εντοπίζονται, κυρίως, στη διεπιφάνεια κονιάματος συμπλήρωσης και επανατοποθετημένων ψηφιδωτών τμημάτων. Οι περιοχές αυτές, στις περισσότερες περιπτώσεις, συνοδεύονταν από τη δράση βιολογικών παραγόντων φθοράς, όπως προέκυψε από τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις.
Με την εφαρμογή της τεχνικής GPR αποτιμήθηκε η κατάσταση διατήρησης της νέας υποδομής του ψηφιδωτού, η οποία κρίνεται ικανοποιητική καθώς δεν ανιχνεύθηκαν κενά και αποσαθρωμένες περιοχές στο κονίαμα. Ωστόσο, στις περιοχές του ψηφιδωτού που έχουν ενισχυθεί με μεταλλικό πλέγμα, η δομή των υποκείμενων στρωμάτων δεν

είναι διακριτή λόγω του αυξημένου θορύβου που παρουσιάζεται στα αποτελέσματα των μέτρησεων.

1.4.2 Συμπεράσματα από τη μελέτη του κονιάματος του ψηφιδωτού δαπέδου του χώρου γ΄ με τη χρήση των τεχνικών IRT και GPR

Η διερεύνηση του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο γ΄ με την τεχνική IRT, οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Εντοπίστηκε η ύπαρξη υγρασίας στις περιοχές συμπλήρωσης της επιφάνειας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συγκεκριμένες συμπληρώσεις εκτελέστηκαν με τη χρήση τσιμεντιτικού κονιάματος, η ανίχνευση υγρασίας μπορεί να αποδοθεί στην ασυμβατότητα του υλικού αποκατάστασης και του ιστορικού υλικού.
- Η υγρασία που ανιχνεύθηκε στην δυτική επιφάνεια του ψηφιδωτού μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη έντονης παρουσίας υγρασίας στο υποκείμενο εδαφικό υλικό, όπως διαπιστώθηκε με την χρήση της τεχνικής του γεωραντάρ.

Με την εφαρμογή της τεχνικής GPR προσδιορίστηκαν:

- Η θέση και η έκταση των παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης με τσιμεντιτικά κονιάματα αποκατάστασης.
- Υπό-επιφανειακά κενά στην υποδομή του ψηφιδωτού.
- Περιοχές στο εδαφικό υλικό με έντονη αποσάθρωση και παρουσία υψηλών ποσοστών υγρασίας.

1.4.3 Συμπεράσματα από τη μελέτη του κονιάματος του δαπέδου στο χώρο β΄ του Εθνικού Κήπου

Στην παρούσα παράγραφο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη συζήτηση των αποτελεσμάτων και παρατηρήσεων, κατά τη συνδυαστική μελέτη των κονιαμάτων της υποδομής του χώρου β΄ με τις τεχνικές DM, SEM-EDX, XRD και TG-DTG.
Στο πλαίσιο αυτό, από τη μελέτη των δειγμάτων των κονιαμάτων με το ψηφιακό μικροσκόπιο, καταγράφονται οι ακόλουθες σημαντικές παρατηρήσεις:

- Τα υλικά κατασκευής των διαφορετικών στρωμάτων κονιάματος παρουσιάζουν σαφή ομοιότητα. Η άφθονη παρουσία κεραμικού υλικού παραπέμπει σε κονιάματα ασβέστου-ποζολανικού υλικού.
- Τα αδρανή, κεραμικής σύνθεσης ως επί το πλείστον, παρουσιάζουν πολύ καλή πρόσφυση στην ασβεστιτική μήτρα.
- Το πάχος των στρώσεων, καθώς και το μέγεθος των αδρανών, μειώνεται στις ανώτερες στρώσεις της υποδομής, ενώ ο λόγος της συνδετικής κονίας αδρανών αυξάνεται.

Η αξιολόγηση των παρατηρήσεων που εξήχθησαν από τη μελέτη της μικροδομής των κονιαμάτων με το Ηλεκρονιακό μικροσκόπιο SEM-EDX και η συζήτηση των αποτελεσμάτων που ακολούθησε οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Εμφανίζονται υδραυλικές ενώσεων, δηλαδή, ένυδρες ασβεστο-αργιλοπυριτικές ενώσεις, του τύπου CSH, CASH, οι οποίες εδράζονται, κυρίως, πάνω σε κόκκους αργιλοπυριτικού υλικού.
- Βρέθηκαν κρύσταλλοι τομασίτη ($CA\overline{C}H$) και ετρινγκίτη ($CA\overline{S}H$) που αποτελούν προϊόντα προσβολής των ένυδρων ενώσεων του τύπου (CAH) από CO_2 και SO_4^{-2} ιόντα, αντίστοιχα. Η παρουσία και η θέση αυτών των ένυδρων ασβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, αποδίδεται, εμφανώς, σε αντίδραση της υδρασβέστου με ποζολανικό υλικό, δεδομένου ότι την περίοδο κατασκευής των κονιαμάτων ήταν άγνωστη η τσιμεντοκονία.
- Η εκτίμηση που προκύπτει από τον υπολογισμό των δεικτών υδραυλικότητας (CI) (HI), όπως αυτοί θεσπίστηκαν από τους (Eckel, 1922, Boynton, 1980)[8,9], από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης EDX, είναι ότι τα κονιάματα του δεύτερου (rudus) και τρίτου (nucleus) στρώματος της υποδομής παρουσιάζουν καλή υδραυλικότητα, ενώ το κονίαμα του τέταρτου στρώματος (supra nucleus) εμφανίζει μέτρια υδραυλικότητα.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξάγονται από τη μελέτη της ορυκτολογικής σύνθεσης των κονιαμάτων με την τεχνική XRD και τη συζήτηση των αποτελεσμάτων που ακολούθησε συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Τα ορυκτολογικά συστατικά που ανιχνεύθηκαν ήταν ασβεστίτης ($CaCO_3$), χαλαζίας (α-SiO_2) τομασίτης ($CA\overline{C}H$), ετρινγκίτης ($CA\overline{S}H$) και γύψος $C\overline{S}H$), επιβεβαιώνοντας την αναγνώρισή τους με την τεχνική SEM-EDX.
- Τα κονιάματα του δεύτερου και τρίτου στρώματος της υποδομής του ψηφιδωτού συνίστανται κυρίως από ασβεστίτη και χαλαζία, ενώ παρατηρείται η παρουσία μικρών ποσοτήτων τομασίτη και ετρινγκίτη. Η παρουσία του ασβεστίτη αποδίδεται, κυρίως, στο συνδετικό συστατικό του κονιάματος, δηλαδή, την υδράσβεστο και προέρχεται κυρίως από τη διαχρονική ενανθράκωση της. Ενώ, ο χαλαζίας οφείλεται στην κρυσταλλική πυριτία που περιεχόταν στα κεραμικά κλάσματα ή/και στην άμμο και η οποία δεν έχει αντιδράσει με την υδράσβεστο.
- Στο κονίαμα ψηφοθέτησης (τέταρτο στρώμα) ως κύριο συστατικό παρατηρείται ο ασβεστίτης με δευτερεύουσα φάση το χαλαζία.

Η εξέταση των κονιαμάτων με τη μέθοδο θερμικής ανάλυσης (TG-DTG) εστιάστηκε, κυρίως, στον προσδιορισμό της απώλειας βάρους που παρουσιάζουν τα συστατικά των κονιαμάτων στις θερμοκρασιακές περιοχές:

- ***μεταξύ 200-600 °C***, που αφορά στην απομάκρυνση χημικά δεσμευμένου νερού, στην προκειμένη περίπτωση, αφού δεν υπάρχει υδράσβεστος, σχετίζεται, κυρίως, με τις ένυδρες ασβεστο-αργιλοπυριτικές ενώσεις (CASH), και

- ***άνω των 600 °C***, που αφορά, κυρίως, στην αποδέσμευση του CO_2 από τη διάσπαση του ασβεστίτη και, δευτερευόντως, στην απομάκρυνση χημικά δεσμευμένου νερού σε τριχοειδή ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων (CSH).

Από την απώλεια βάρους στη θερμοκρασιακή περιοχή 200-600 °C, προσδιορίστηκε το νερό που ήταν δεσμευμένο στις υδραυλικές ενώσεις, ενώ από την απώλεια βάρους στην περιοχή άνω των 600 °C, η απομάκρυνση του CO_2. Κατόπιν, υπολογίστηκε ο λόγος (Hr) του κρυσταλλικού και χημικά ενωμένου H_2O/ CO_2, ο οποίος αντανακλά τον υδραυλικό χαρακτήρα των κονιαμάτων, δεδομένου, ότι σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με την υδραυλικότητα του εξεταζόμενου κονιάματος [10-17]. Ακόμη, από την απώλεια βάρους στην περιοχή άνω των 600 °C προσδιορίστηκε η περιεκτικότητα των κονιαμάτων σε $CaCO_3$ και υπολογίστηκε το ισοδύναμο ποσοστό $Ca(OH)_2$ από την οποία προήλθε.
Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, οδήγησε στα παρακάτω αξιόλογα συμπεράσματα, όσον αφορά στο χαρακτηρισμό των κονιαμάτων και την τεχνική σύνθεσής τους:

- Με βάση το λόγο υδραυλικότητας (Hr) που προσδιορίστηκε για το δεύτερο (rudus), το τρίτο (nucleus) και τέταρτο (supra nucleus) στρώμα και ήταν 8,62, 3,55 και 6,41, αντιστοίχως, εκτιμάται ότι και τα τρία κονιάματα στα στρώματα της υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου, χαρακτηρίζονται ως υδραυλικά κονιάματα. Συγκεκριμένα, το δεύτερο (rudus) και το τέταρτο (supra nucleus) στρώμα παρουσιάζουν ασθενή υδραυλικό χαρακτήρα, ενώ, το τέταρτο (supra nucleus) στρώμα χαρακτηρίζεται ως μετρίως υδραυλικό κονίαμα.
- Από τον υπολογισμό του $CaCO_3$ που περιείχαν τα τρία κονιάματα και το ισοδύναμο ποσοστό $Ca(OH)_2$, εκτιμάται ότι στο στρώμα ψηφοθέτησης (τέταρτο) η αναλογία $Ca(OH)_2$/ποζολανικό υλικό του κονιάματος ήταν της τάξης του 1/1. Η αυξημένη περιεκτικότητα υδρασβέστου και η λεπτότερη κατανομή των ποζολανικών υλικών, όπως διαπιστώθηκε από τις παρατηρήσεις με τις τεχνικές DM και SEM, εξασφάλιζε καλύτερη πλαστικότητα (εργασιμότητα) στο κονίαμα και διευκόλυνε στην επίστρωση του και στην υποδοχή των ψηφίδων.
- Στο ενδιάμεσο στρώμα (nucleus) η αναλογία $Ca(OH)_2$/ποζολανικό υλικό του κονιάματος ήταν της τάξης του 1/4. Στο στρώμα αυτό το κονίαμα περιείχε τα υψηλότερα ποσοστά ποζολανικών υλικών και παρουσιάζει μεγαλύτερη υδραυλικότητα, ώστε να υποστηρίζει επαρκώς το στρώμα ψηφοθέτησης.
- Προχωρώντας, στο δεύτερο στρώμα (rudus) της υποδομής η αναλογία $Ca(OH)_2$/ ποζολανικό υλικό του κονιάματος ήταν της τάξης του 1/2. Στο στρώμα αυτό το κονίαμα περιείχε υψηλά ποσοστά ποζολανικών υλικών, ώστε να εξασφαλίζει επαρκή υδραυλικότητά, αλλά και ικανή ποσότητα υδρασβέστου για να έχει καλύτερη πλαστικότητα, ώστε να εισχωρεί και να εξασφαλίζει καλύτερη πρόσφυση στα πλέον χονδρόκοκκα αδρανή αυτού του υποστρώματος.

Κεφάλαιο 2

Ψηφιδωτό δάπεδο αρχαίας οικίας στην περιοχή των "ανασκαφών *Dörpfeld*"

2.1 Περιγραφικά στοιχεία αντικειμένου

Πρόκειται για ψηφιδωτό δάπεδο αρχαίας οικίας στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld" (Εικόνα 2.1). Βρίσκεται στα ανατολικά της οδού Αποστόλου Παύλου, την οποία διασχίζει η οδός "Στενωπός Κολλυτός". Χρονολογείται στον 2ο αιώνα, είναι διακοσμημένο με γεωμετρικά μοτίβο και περιέχει το διάσημο ρωμαϊκό σχέδιο με τα παπαγαλάκια που πίνουν νερό. Το δάπεδο της οικίας έχει διαστάσεις 3,70 x 4,90 m και αποτελείται από δυο κατασκευαστικές φάσεις. Η πρώτη αφορά στο βοτσαλωτό, πιθανώς ελληνιστικού τύπου, και η δεύτερη στο ρωμαϊκό ψηφιδωτό που είναι ορατό σήμερα. Αυτό, φέρει ψηφίδες από λίθο και γυαλί [18].

Εικόνα 2.1: Άποψη του ψηφιδωτού στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld" (έτος 2003) [19].

2.2 Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης

Το ψηφιδωτό δάπεδο οικίας στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld", συντηρήθηκε τη δεκαετία του 60΄ με τη χρήση τσιμεντοκονιαμάτων, για την οποία δεν υπάρχει ιστορικό επεμβάσεων και φωτογραφικό υλικό. Το 2002 πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις συντήρησης για τον καθαρισμό της επιφάνειας από βιολογικές επικαθίσεις και την αφαίρεση τσιμέντου περιμετρικά του δαπέδου. Κατά τη διάρκεια των εργασιών εμφανίστηκε ένα κατώτερο επίπεδο βοτσαλωτού δαπέδου, πιθανώς ελληνιστικού τύπου. Πραγματοποιήθηκε περιμετρική στερέωση του ρωμαϊκού δαπέδου με κονίαμα και επιφανειακή στερέωση των ψηφίδων με ακρυλικό γαλάκτωμα. Μικρά αποσπασμένα τμήματα επανατοποθετήθηκαν σε νέο κονίαμα, όμως, η ακριβής τους θέση δεν είναι επαρκώς τεκμηριωμένη. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών τα κατώτερα τμήματα του βοτσαλωτού δαπέδου καλυφθήκαν με γεωύφασμα και ποταμίσια άμμο. Η δυτική

πλευρά αποτελεί μάρτυρα του κατώτατου επιπέδου. Όσον αφορά στα υλικά συντήρησης του υποστρώματος δεν αναφέρεται η σύσταση του κονιάματος. Οι αποκολλημένες ψηφίδες στερεώθηκαν με χρήση ακρυλικής ρητίνης. Ενώ, η στερέωση της ψηφιδωτής επιφάνειας πραγματοποιήθηκε με σιλάνια (Stone Strengthener H) [19].

2.2.1 Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης

Το ψηφιδωτό δάπεδο εξετάστηκε μετά από έγκριση της αρμόδιας υπηρεσίας του ΥΠΠΟΑ, κατά το έτος 2014. Ο μακροσκοπικός έλεγχος έδειξε απώλειες ψηφίδων και μικρής έκτασης εξάρσεις της ψηφιδωτή επιφάνεια. Επίσης, παρατηρήθηκε έντονος αποχρωματισμούς της επιφάνειας από επικαθήσεις.

(α)

(β)

Εικόνα 2.2: Μακροσκοπικός έλεγχος ψηφιδωτού δαπέδου (έτος 2014) με (α) ύπαρξη επικαθήσεων και απωλειών της ψηφιδωτής επιφάνειας στη περιοχή της κεντρικής παράστασης (β) επικαθήσεις και μικρής έκτασης εξάρσεις στην ανατολική περιοχή του δαπέδου.

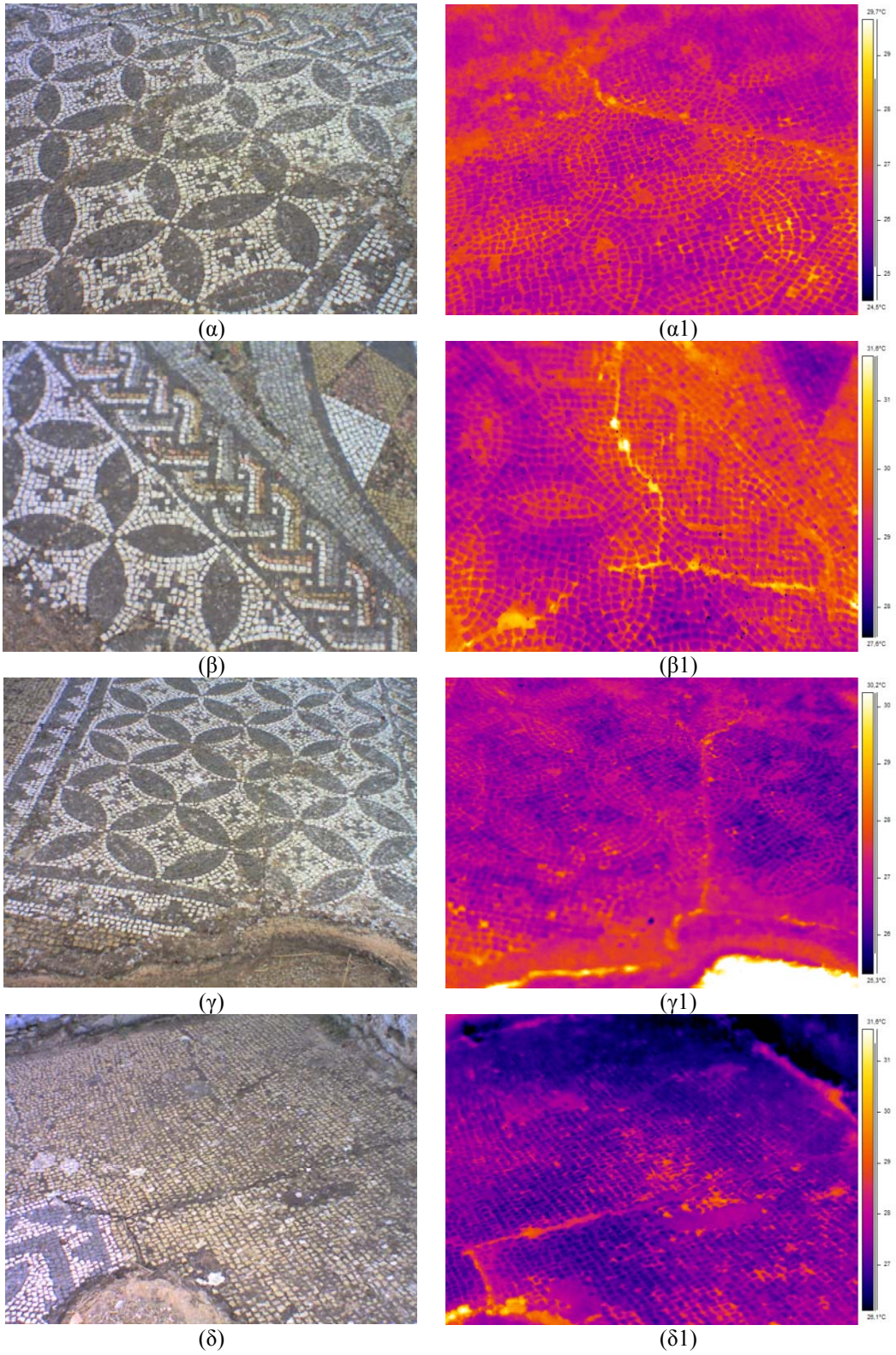
2.3 Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου του ψηφιδωτού δαπέδου αρχαίας οικίας "ανασκαφών Dörpfeld"

Η εξέταση του ψηφιδωτού δαπέδου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των μη καταστροφικών τεχνικών της Θερμογραφίας Υπερύθρου και του Γεωραντάρ. Ο μετρητικός εξοπλισμός και οι πειραματικές παράμετροι για κάθε μία από τις μεθόδους παρουσιάζονται στον Πίνακα Β.1. Σε αυτήν την περίπτωση, η μελέτη και ανάλυση του κονιάματος υποδομής δεν ήταν δυνατό να λάβει χώρα λόγω της μη αδειοδότησης για λήψη δειγμάτων.

2.3.1 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, με τη χρήση της τεχνικής IRT, εντοπίστηκαν ρωγμές στην επιφάνεια του ψηφιδωτού, κάποιες από τις οποίες ήταν δυνατό να ανιχνευθούν μέσω οπτικών ελέγχων. Βέβαια σε κάποιες περιπτώσεις που η έκτασή τους δεν εμφανής λόγω του μικρού πάχους τους, αυτές εντοπίστηκαν με το θερμογραφικό έλεγχο μέσω των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιακών διαφορών στο θερμογράφημα. Ενδεικτικά αποτελέσματα από την ψηφοθετημένη επιφάνεια, παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.3, η

δεξιά στήλη της οποίας παρουσιάζει τις εξεταζόμενες περιοχές στην επιφάνεια του ψηφιδωτού και η αριστερή στήλη, τις αντίστοιχες θερμικές εικόνες.



Εικόνα 2.3: Θερμογραφικός έλεγχος του ψηφιδωτού δαπέδου της αρχαίας οικίας "ανασκαφών Dörpfeld". Στη δεξιά στήλη παρουσιάζονται οι εικόνες των εξεταζόμενων επιφανειών και στην αριστερή στήλη οι αντίστοιχες θερμικές εικόνες, με (α1) και (β1) να αποκαλύπτουν μικρορωγμές ακανόνιστού σχήματος και (γ1) και (δ1) να παρουσιάζουν ρωγμές μεγαλύτερου εύρους.

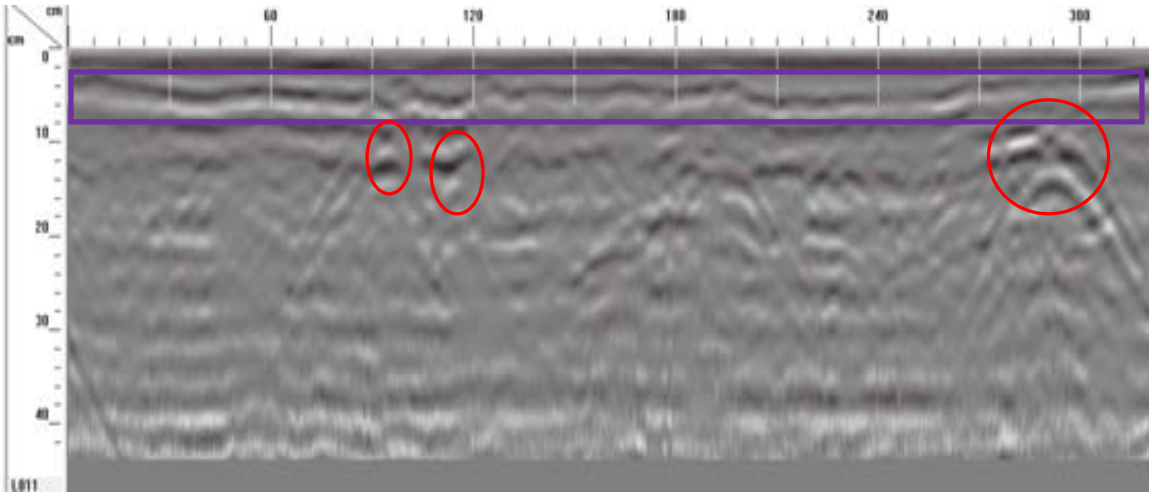
Οι ρωγμές που ανιχνεύτηκαν στην επιφάνεια του δαπέδου έχουν ακανόνιστο σχήμα και είναι πιθανό να προκλήθηκαν από τη χρήση ασύμβατων τσιμεντοκονιαμάτων συντήρησης, με αποτέλεσμα τη μηχανική καταπόνηση και την αστοχία του ψηφιδωτού στρώματος.

2.3.2 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Γεωραντάρ (GPR)

Η τεχνική του γεωραντάρ ήταν η δεύτερη μη καταστρεπτική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου. Η υπό διερεύνηση περιοχή είχε διαστάσεις 3.22 m x 4.80 m και η συλλογή των δεδομένων έγινε σε 13 παράλληλες οριζόντιες (κατά μήκος του άξονα x) και 9 κάθετες (κατά μήκος του άξονα y) σαρώσεις με βήμα καταγραφής 0.40 m. Η μετατροπή της κατακόρυφης κλίμακας του χρόνου (ns) σε κλίμακα βάθους (cm) έγινε ορίζοντας τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ίση με 16 που αντιστοιχεί σε ταχύτητα διάδοσης του σήματος στο μέσο, ίση με 0.07 m/ns. Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται η περιοχή του ψηφιδωτού και αντιπροσωπευτικές γραμμές σάρωσης.

Εικόνα 2.4: Συλλογή 2*D* δεδομένων κατά μήκος των γραμμών σάρωσης στον άξονα x και y, στο ψηφιδωτό δάπεδο της οικίας στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld".

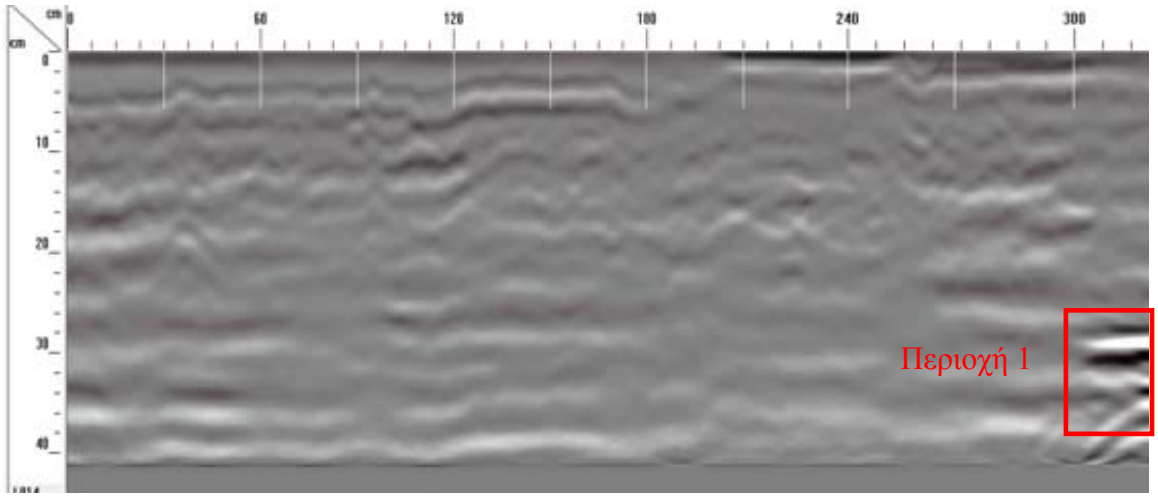
Με τη χρήση της τεχνικής GPR, ανιχνεύτηκε το όριο της υποδομής μεταξύ των δυο κατασκευαστικών φάσεων του δαπέδου, δηλαδή, του ελληνιστικού βοτσαλωτού και του ρωμαϊκού ψηφιδωτού. Ο διαχωρισμός των δυο δαπέδων ανιχνεύτηκε σε βάθος περίπου 0.07 m από την επιφάνεια της μέτρησης, στις περιοχές που σώζεται το ρωμαϊκό ψηφιδωτό, και επισημαίνεται με μωβ πλαίσιο στις Εικόνες 2.5, 2.6 και 2,7 που αντιστοιχούν στα 2*D* προφίλ διασκόπησης των γραμμών 11, 14 και 21 κατά μήκος του άξονα x. Η αλληλουχίας της πολικότητας του ανακλώμενου σήματος, σε αυτή την περιοχή, πιθανώς αποδίδεται στην ύπαρξη κενού στην διεπιφάνεια των δύο δαπέδων.



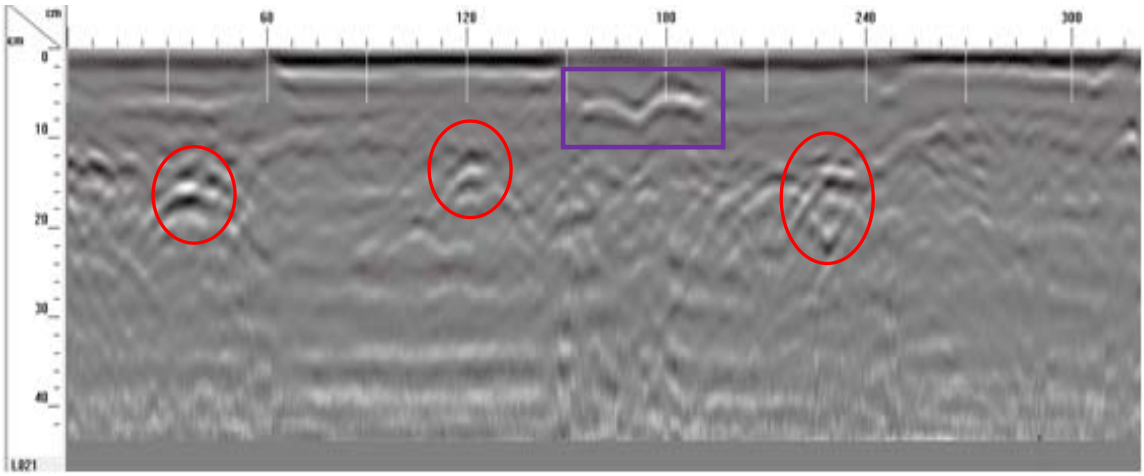
Εικόνα 2.5: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 11 του άξονα x. Το μωβ πλαίσιο αφορά στο όριο της υποδομής των δυο δαπέδων. Με κόκκινα πλαίσια ελλειπτικού σχήματος επισημαίνονται περιοχές στην ελληνιστική υποδομή που αποτελούνται από χονδόκοκκα υλικά.

Ακόμα, στα προαναφερθέντα ραδιογράμματα, παρατηρούνται ανακλάσεις του σήματος σε διάφορες θέσεις και μεγαλύτερα βάθη, οι οποίες επισημαίνονται με κόκκινο πλαίσιο ελλειπτικού σχήματος (Εικόνες 2.5, 2.6, 2.7). Οι ανακλάσεις αυτές είναι πιθανό να οφείλονται στην παρουσία χονδρόκοκκων υλικών ή/και αποσαθρωμένων περιοχών στην υποδομή του ελληνιστικού βοτσαλωτού.

Η ισχυρή ανάκλαση του σήματος που παρατηρείται στο 2*D* προφίλ διασκόπησης της γραμμής 14 στον άξονα x, που επισημαίνεται με κόκκινο πλαίσιο στην Εικόνα 2.6, μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη αποσαθρωμένης περιοχής στο υποκείμενο εδαφικό υλικό του ψηφιδωτού (Περιοχή 1). Η επεξεργασία των δεδομένων με την τεχνική migration, οδήγησε στην ανάκτηση αποτελέσματος γεωραντάρ, στο οποίο η αλληλουχία πολικότητας του σήματος είναι πιο ευκρινής και μαρτυρά την ταυτόχρονη παρουσία υγρασίας στο έδαφος.

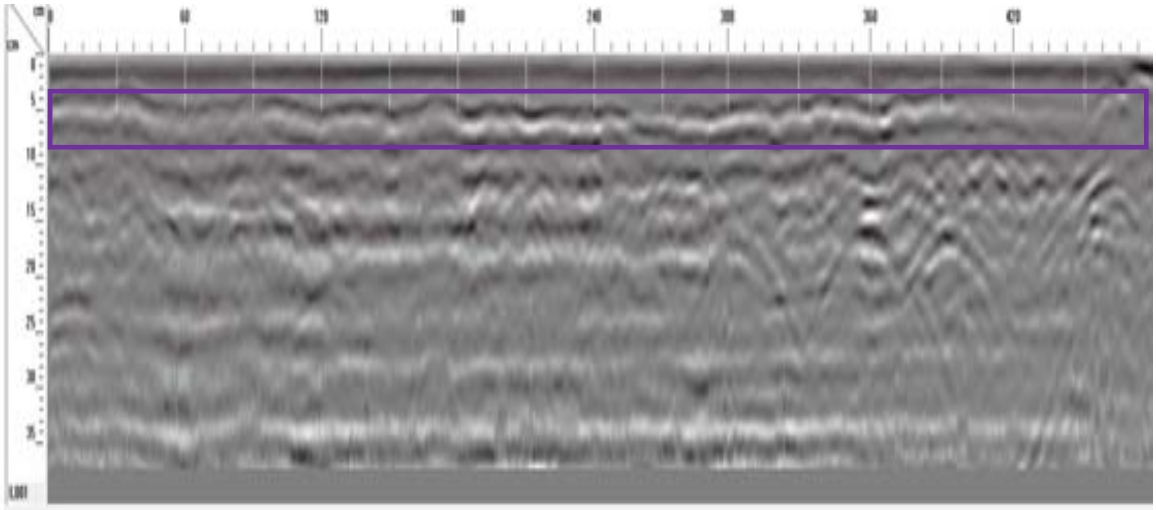


Εικόνα 2.6: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 14 του άξονα x μετά από επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με migration. Το κόκκινο πλαίσιο αφορά σε αποσαθρωμένη περιοχή του εδάφους με υψηλά ποσοστά υγρασίας.

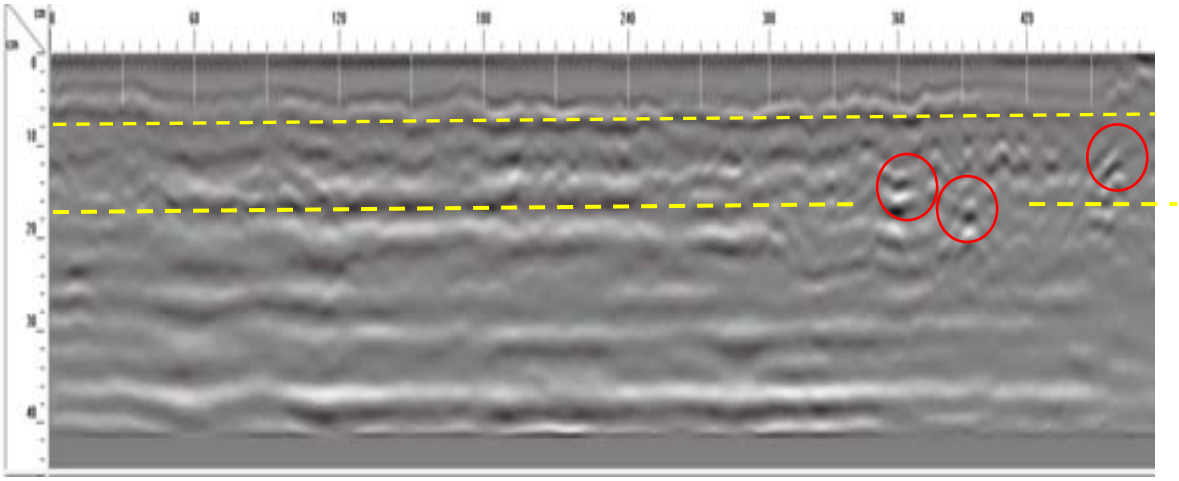


Εικόνα 2.7: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 21 του άξονα x μετά από επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με migration. Το μωβ πλαίσιο αφορά στο όριο της υποδομής των δυο δαπέδων. Με κόκκινα πλαίσια ελλειπτικού σχήματος επισημαίνονται περιοχές στην ελληνιστική υποδομή που αποτελούνται από χονδόκοκκα υλικά.

Το υπό-επιφανειακό κενό στο όριο του ψηφιδωτού με το βοτσαλωτό δάπεδο (μωβ πλαίσιο), ανιχνεύτηκε επίσης και στα 2*D* προφίλ σάρωσης των Εικόνων 2.8 και 2.9 που λήφθηκαν κατά μήκος των γραμμών διασκόπησης 1 και 4, αντιστοίχως, στον άξονα y. Στην Εικόνα 2.8β, με την εφαρμογή της τεχνικής επεξεργασίας migration, φαίνεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια η υποδομή του βοτσαλωτού δαπέδου, σε βάθος από 0.09 m έως 0.17 m από την επιφάνεια της μέτρησης (κίτρινη διακεκομμένη γραμμή). Οι μεταβολές του σήματος σε αυτή την περιοχή, πιθανώς οφείλονται σε κενά που υπάρχουν λόγω των χονδρόκοκκων υλικών κατασκευής της υποδομής (κόκκινα πλαίσια).

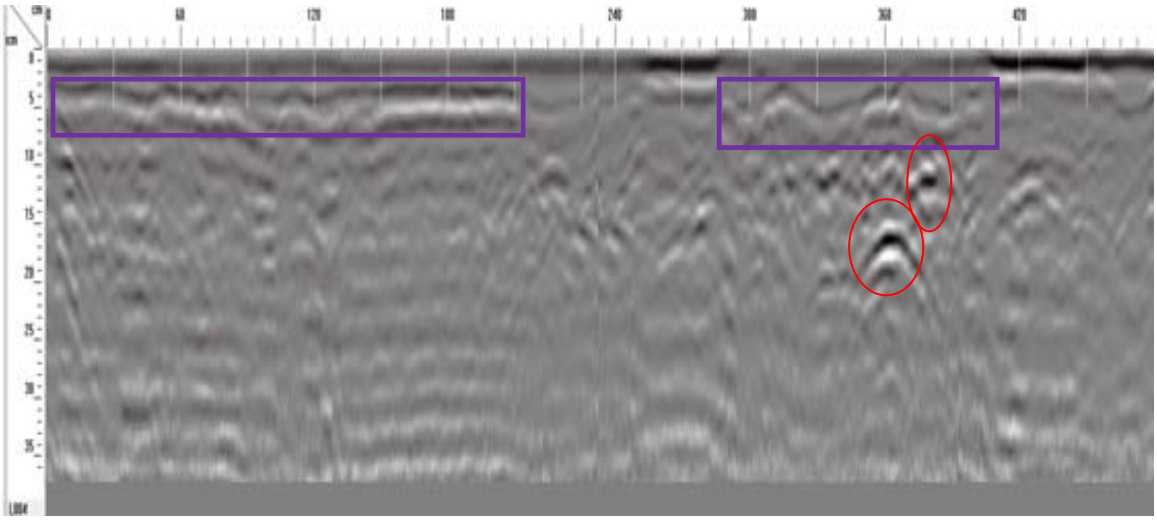


(α)



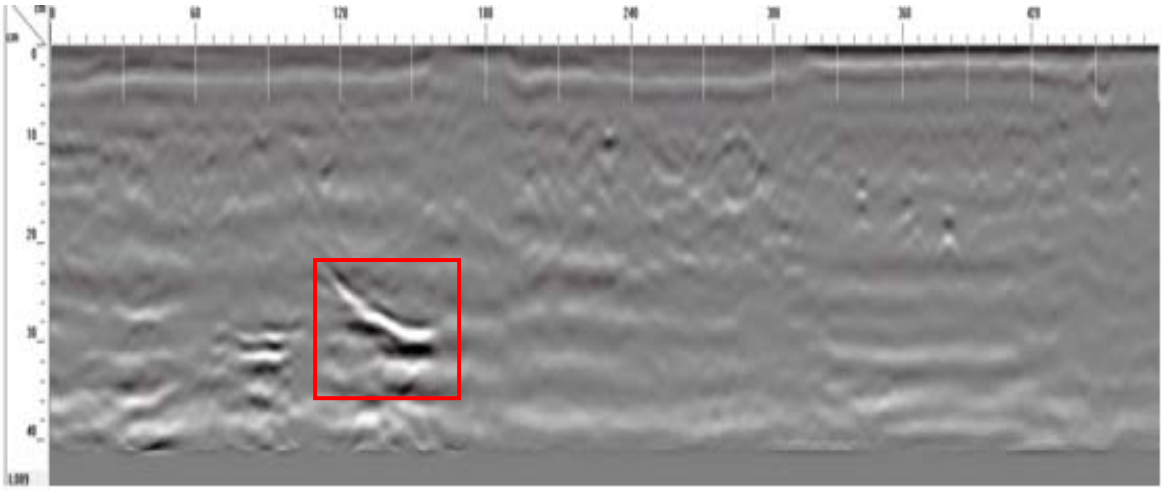
(β)

Εικόνα 2.8: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 1 του άξονα y, το μωβ πλαίσιο αφορά στο όριο της υποδομής των δυο δαπέδων (α), (β) μετά από επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με migration φαίνεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια η υποδομή του ελληνιστικού βοτσαλωτού που επισημαίνεται με κίτρινο διακεκομμένο πλαίσια ελλειπτικού, ενώ με κόκκινα πλαίσια ελλειπτικού σχήματος επισημαίνονται περιοχές με χονδόκοκκα υλικά.



Εικόνα 2.9: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 4 του άξονα y, το μωβ πλαίσιο αφορά στο όριο της υποδομής των δυο δαπέδων, ενώ με κόκκινα πλαίσια ελλειπτικού σχήματος επισημαίνονται περιοχές με χονδόκοκκα υλικά.

Ακόμα, στο προφίλ σάρωσης της γραμμής διασκόπησης 9 του άξονα y, ανιχνεύεται η αποσαθρωμένη Περιοχή 1 της Εικόνας 2.6. Οι ισχυρές ανακλάσεις που παρατηρούνται στην επεξεργασμένη με την μέθοδο migration δυσδιάστατη τομή της εικόνας 2.10 σε βάθος κυμαινόμενο μεταξύ 0.20-0.35 m, αποδίδονται στην αποσαθρωμένη περιοχή 1 που ανιχνεύτηκε στο προφίλ σάρωσης της γραμμής 14 (Εικόνα 2.6) και η οποία σημειώνεται με κόκκινο πλαίσιο.



Εικόνα 2.10: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 9 του άξονα y μετά από επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με migration. Το κόκκινο πλαίσιο αφορά σε αποσαθρωμένη περιοχή του εδάφους με υψηλά ποσοστά υγρασίας.

2.4 Συμπεράσματα από τη μελέτη του δαπέδου στην περιοχή των "ανασκαφών Dörpfeld"

Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για την τεχνολογία κατασκευής και την κατάσταση διατήρησης το ψηφιδωτού. Η εξέταση του δαπέδου με την τεχνική IRT και η μελέτη των αντίστοιχων θερμογραφημάτων παρείχε τη δυνατότητα παρακολούθησης της διάδοσης των επιφανειακών ρηγματώσεων στην ψηφοθετημένη επιφάνεια και ειδικότερα στις περιπτώσεις εκείνες που οι ρωγμές δεν ήταν εύκολα εμφανείς μέσω οπτικών έλεγχων.
Η επεξεργασία των δεδομένων όπως ανακτήθηκαν από τη σάρωση του ψηφιδωτού δαπέδου με την τεχνική του GPR, παρείχε τη δυνατότητα να προσδιοριστούν τα υποκείμενα στρώματα, όπως, επίσης και να ανιχνευθούν αποσαθρωμένες περιοχές στο εδαφικό υλικό. Συνοπτικά, με την εφαρμογή της τεχνικής GPR προσδιορίστηκαν:

- Το όριο της υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου να βρίσκεται περίπου στα 0.05 m-0.07 m από τη επιφάνεια της μέτρησης.
- Η θέση του υποκείμενου βοτσαλωτού δαπέδου, να βρίσκεται περίπου στα 0.09 m - 0.17 m από την επιφάνεια της μέτρησης.
- Η ύπαρξη υπό-επιφανειακού κενού στη διεπιφάνεια των δυο δαπέδων.
- Περιοχές στο εδαφικό υλικό με έντονη αποσάθρωση και υψηλά ποσοστά υγρασίας.

Κεφάλαιο 3

Ψηφιδωτό δάπεδο στο 'σπήλαιο του Πανός', Πνύκα

3.1 Περιγραφικά στοιχεία αντικειμένου

Η αρχαιολογική θέση του μνημείου είναι στην συμβολή των οδών Διον. Αεροπαγίτου και Απ. Παύλου, στις βορειοδυτικές παρυφές του λόφου της Πνύκας. Αποκαλύφθηκε το Σεπτέμβριο του 2001, όταν και εντοπίστηκε η ύπαρξη υπόσκαφου στο φυσικό βράχο θαλάμου με διαμορφωμένη θύρα στην είσοδο. Εξωτερικά του υπόσκαφου θαλάμου αποκαλύφθηκε ένα ορθογώνιο δωμάτιο του οποίου το δάπεδο είναι ψηφιδωτό με γεωμετρικό διάκοσμο (Εικόνα 3.1). Η σχέση του χώρου με το παρακείμενο «Ιερό του Πανός» δεν έχει ακόμη διευκρινιστεί πλήρως [20].

Εικόνα 3.1: Άποψη του ψηφιδωτού στο 'σπήλαιο του Πανός' στην Πνύκα μετά τις επεμβάσεις συντήρησης (έτος 2004) [21].

3.2 Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης

Το έτος 2004, και μετά την ολοκλήρωση των επεμβάσεων συντήρησης του ψηφιδωτού δαπέδου επανατοποθετήθηκαν τα δύο μεγαλύτερα αποσπασμένα τμήματα, τα οποία είχαν αποκαλυφθεί κατά την ανασκαφή του χώρου περιμετρικά του Ιερού. Κατά την επανατοποθέτηση έγινε προσπάθεια να κατασκευαστεί ένα σύστημα στρωμάτων, το οποίο να προσομοιάζει στα θεμέλια στρώματα του αρχαίου ψηφιδωτού.

Αρχικά, κατασκευάστηκε ένα είδος θεμέλιου στρώματος με την τοποθέτηση μικρών λίθων και την έκχυση κονιάματος. Ακολούθως, εφαρμόστηκε στρώμα κονιάματος το οποίο αποτελείται από τα εξής υλικά: υδραυλικός ασβέστης (chaux blance) : ορυκτή άμμος : θηραϊκή γη : νερό, σε αντίστοιχες αναλογίες 1 : $1^{1/2}$: 1/2: 1 [21].

Το όλο σύστημα λειτουργούσε ως φέρουσα επιφάνεια επί της οποίας, εγκαταστάθηκαν τα δύο αποσπασμένα τμήματα του ψηφιδωτού, διατηρώντας όλο το ύψος του βασικού υποστρώματος τους (5-7 cm). Η περιμετρική στήριξη του συνόλου του ψηφιδωτού έγινε με κονίαμα της ίδιας σύστασης, κατάλληλα χρωματισμένου και με μικρότερη κοκκομετρία των αδρανών συστατικών του. Σε μεταγενέστερη χρονική στιγμή, τον Οκτώβριο του 2006, ακολούθησε η επανατοποθέτηση άλλων τριών μικρότερων αποσπασμένων τμημάτων του ψηφιδωτού δαπέδου. Επίσης, λόγω καθίζησης του επανατοποθετημένου τμήματος το 2004, έγινε ελαφρά διόρθωση της κλίσης του και περιμετρική οριοθέτηση του ψηφιδωτού δαπέδου [21].

3.2.1 Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης

Το ψηφιδωτό δάπεδο εξετάστηκε μετά από έγκριση της αρμόδιας υπηρεσίας, το έτος 2014. Από το μακροσκοπικό έλεγχο παρατηρείται ότι η κατάσταση διατήρησης του είναι ικανοποιητική, καθώς δεν παρουσιάζει σημαντικές φθορές και μεγάλης έκτασης απώλεια ιστορικού υλικού. Ωστόσο, η δράση βιολογικών παραγόντων φθοράς είναι διακριτή σε κάποιες περιοχές της ψηφιδωτής επιφάνειας.

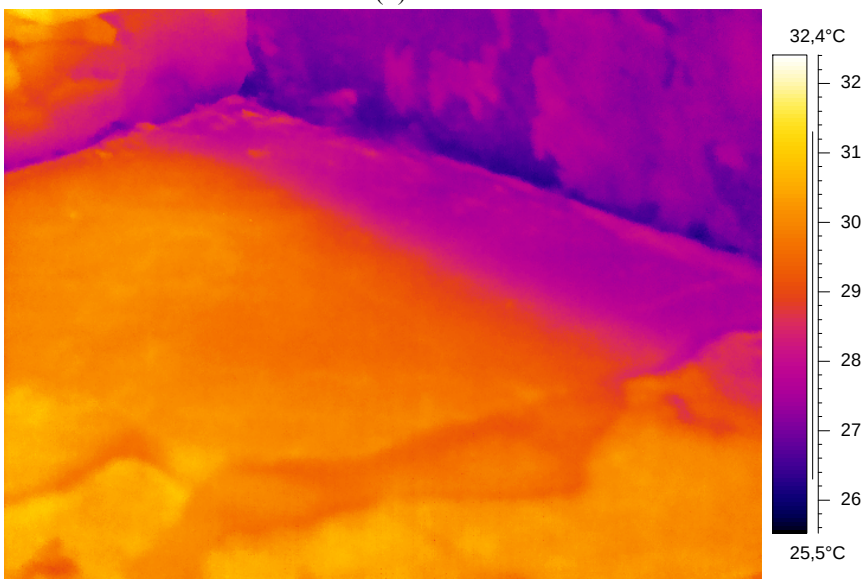
3.3 Μεθοδολογία διερεύνησης του ψηφιδωτού δαπέδου στο σπήλαιο του Πανός στο λόφο της Πνύκας

Για τη μελέτη και ανάλυση του ψηφιδωτού δαπέδου στο σπήλαιο του Πανός, στην Πνύκα, χρησιμοποιήθηκαν οι μη καταστρεπτικές τεχνικές της Θερμογραφίας Υπερύθρου και του Γεωραντάρ. Επιπλέον, έγινε ανάλυση του αρχαίου κονιάματος, με συνδυασμό των μεθόδων, Ψηφιακού Μικροσκοπίου, Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης με Μικροανάλυση, Περίθλασης Ακτίνων Χ και Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση. Ο μετρητικός εξοπλισμός και οι πειραματικοί παράμετροι που επιλέχθηκαν, αναφέρονται στον Πίνακα Β.1. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν.

3.3.1 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ανακτήθηκαν από τον θερμογραφικό έλεγχο. Όπως μπορεί να φανεί από το θερμογράφημα της Εικόνας 3.2, ψυχρές περιοχές (περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας) εντοπίστηκαν στην περιοχή του δαπέδου που γειτνιάζει με τον βράχο. Η παραπάνω θερμοκρασιακή διαφορά, μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη υγρασίας στην περιοχή του δαπέδου που βρίσκεται κατά μήκος του βράχου. Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται από την παρουσία βιολογικών επικαθήσεων στην ψηφιδωτή επιφάνεια.

(α)

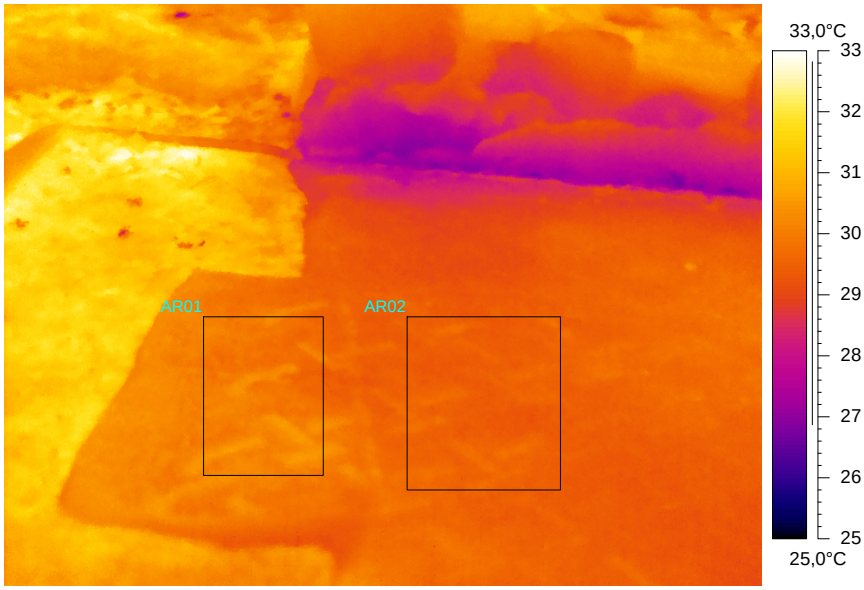


(β)

Εικόνα 3.2: Θερμογραφικός έλεγχος της περιοχής του ψηφιδωτού δαπέδου με (α) εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας και (β) αντίστοιχη θερμική εικόνα, στην οποία παρουσιάζεται η ύπαρξη υγρασίας στο δάπεδο κατά μήκος του βράχου.

Στην Εικόνα 3.3α επισημαίνεται με κίτρινο πλαίσιο (Α), η περιοχή που τμήμα του ψηφιδωτού δαπέδου έχει επανατοποθετηθεί σε νέο υπόστρωμα. Όπως μπορεί να φανεί από την αντίστοιχη θερμική Εικόνα 3.3β, παρατηρείται παρόμοια θερμική συμπεριφορά των δύο τμημάτων του ψηφιδωτού, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από την μέτρηση των αντίστοιχων θερμοκρασιών στις περιοχές AR01 και AR02 (Πίνακας 3.1). Η παραπάνω ομοιομορφία στη θερμική συμπεριφορά των δύο τμημάτων επιβεβαιώνει τη διατήρηση του ψηφιδωτού δαπέδου και την συμβατότητα των υλικών συντήρησης με αυτά της ιστορικής κατασκευής.

(α)



(β)

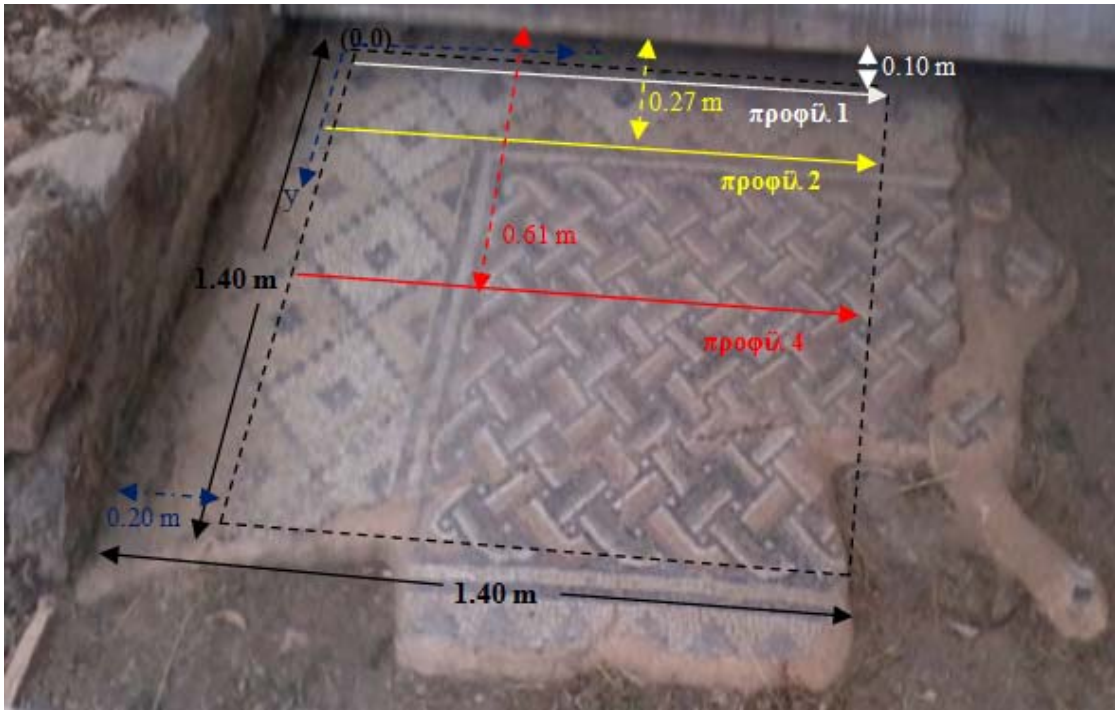
Εικόνα 3.3: Θερμογραφικός έλεγχος της περιοχής του ψηφιδωτού δαπέδου με (α) εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας και (β) αντίστοιχη θερμική εικόνα, η οποία αποκάλυψε την συμβατότητα μεταξύ ιστορικού και νέου υποστρώματος ψηφιδωτού.

Πίνακας 3.1: Θερμοκρασιακά δεδομένα από τις επιλεγμένες περιοχές εξέτασης στην επιφάνεια του δαπέδου.

Περιοχές ελέγχου	**Min. [°C]**	**Max. [°C]**	**Δ(Max-Min)**	**Μέση τιμή**
AR01	29,3	30,7	1,4	30,0
AR02	29,0	30,0	1,1	29,5

3.3.2 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Γεωραντάρ (GPR)

Η περιοχή του ψηφιδωτού δαπέδου που διερευνήθηκε με την τεχνική GPR ήταν διαστάσεων 1.20 m x 1.20 m. Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται η περιοχή του εξεταζόμενου ψηφιδωτού και αντιπροσωπευτικές γραμμές σάρωσης με GPR.

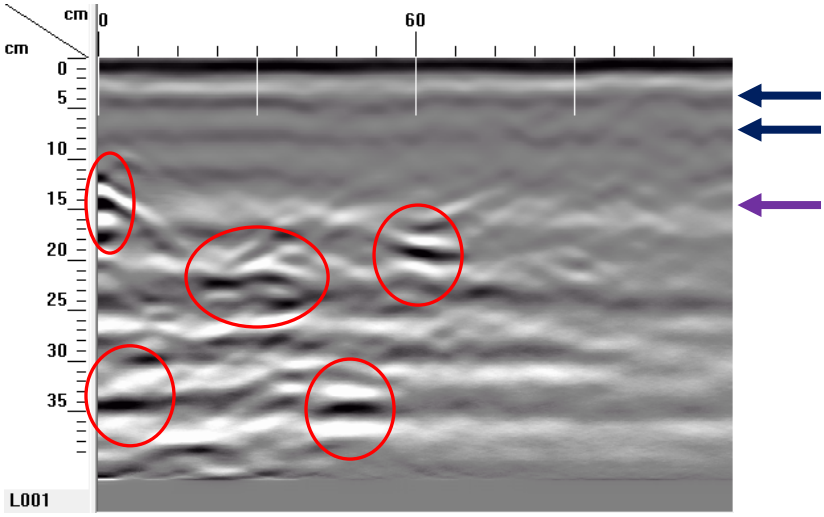


Εικόνα 3.4: Συλλογή 2*D* δεδομένων κατά μήκος των γραμμών σάρωσης στον άξονα x και y στο ψηφιδωτό δάπεδο στο λόφο της Πνύκας.

Η συλλογή των δεδομένων έγινε σε παράλληλες λήψεις, 7 οριζόντιες (κατά μήκος του άξονα x) και 7 κάθετες (κατά μήκος του άξονα y), με βήμα καταγραφής 0.17 m . Η μετατροπή της κατακόρυφης κλίμακας του χρόνου (ns) σε κλίμακα βάθους (cm) έγινε ορίζοντας τη σχετική διηλεκτρική σταθερά ίση με 16 που αντιστοιχεί σε ταχύτητα διάδοσης του σήματος στο μέσο ίση με 0.07 m/ns.

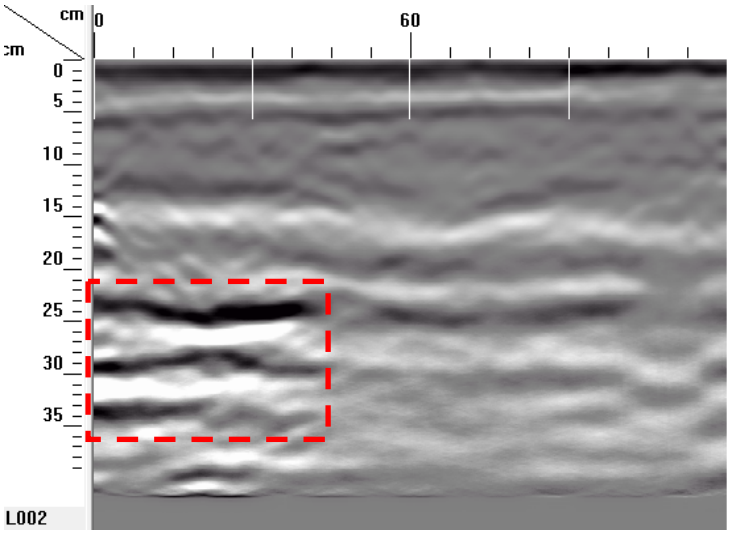
Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται το 2*D* προφίλ σάρωσης της γραμμής διασκόπησης 1 κατά μήκος του άξονα x. Από το ραδιόγραμμα της Εικόνας 3.5 εκτιμάται ότι το όριο της υποδομής του ψηφιδωτού βρίσκεται σε βάθος περίπου 0.15 m (μωβ βέλος), ενώ οι μεταβολές του σήματος που παρατηρούνται σε βάθος 0.05 m και 0.08 m προέρχονται από το όριο των διαφορετικών στρωμάτων του κονιάματος (μπλε βέλη).

Επίσης, στο ίδιο ραδιόγραμμα, παρατηρούνται ισχυρά ανακλώμενα σήματα στον οριζόντιο άξονα από την αρχή της μέτρησης έως τα 0.69 m, σε βάθος από 0.12 m έως 0.35 m (κόκκινα πλαίσια ελλειπτικού σχήματος, Εικόνα 3.5). Οι ανακλάσεις αυτές διακρίνονται εμφανέστερα μετά την επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική migration προφίλ σάρωσης και μπορούν να αποδοθούν στην παρουσία αποσαθρωμένων περιοχών του εδάφους με υψηλά ποσοστά υγρασίας.



Εικόνα 3.5: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 1 του άξονα x, μετά την επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με επεξεργασία migration. Το μωβ βέλος αφορά στο κατώτερο όριο της υποδομής του δαπέδου, ενώ τα μπλε βέλη επισημαίνουν διαφορετικές περιοχές στη στρωματογραφία του κονιάματος της υποδομής. Τα κόκκινα πλαίσια ελλειπτικού σχήματος αφορούν σε περιοχές του εδάφους με αποσάθρωση και υψηλά ποσοστά υγρασίας.

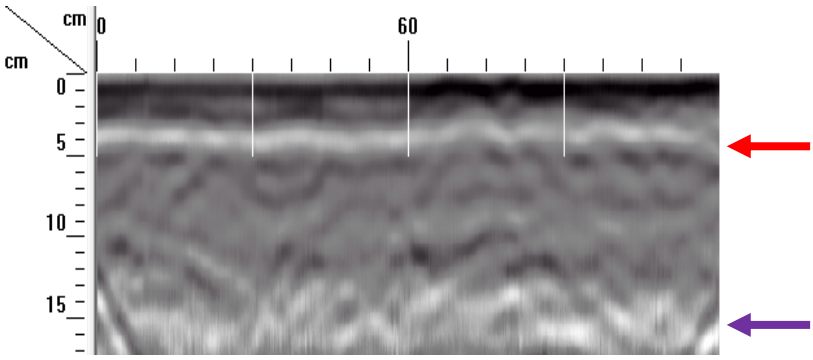
Αποσαθρωμένο εδαφικό υλικό με υψηλά ποσοστά υγρασίας ανιχνεύεται, επίσης, στο 2*D* προφίλ σάρωσης της γραμμής διασκόπησης 2 κατά μήκος του άξονα x (Εικόνα 3.6). Με την εφαρμογή της τεχνικής migration στο αρχικά ανακτώμενο 2*D* προφίλ σάρωσης, φαίνονται με μεγαλύτερη καθαρότητα οι ανακλάσεις του σήματος σε βάθος περίπου 0.25 - 0.35 m κάτω από την επιφάνεια, οι οποίες εκτείνονται περίπου έως τα 0.40 m κατά τον οριζόντιο άξονα της απόστασης (κόκκινο διακεκομμένο πλαίσιο, Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 2 του άξονα x, μετά την επεξεργασία των GPR δεδομένων με την τεχνική με επεξεργασία migration. Το κόκκινο διακεκομμένο πλαίσιο αφορά σε περιοχή του εδάφους με αποσάθρωση και υψηλά ποσοστά υγρασίας.

Το βάθος της στρωματογραφίας του ψηφιδωτού ανιχνεύεται, επίσης, στο 2*D* προφίλ σάρωσης της γραμμής διασκόπησης 4 κατά μήκος του άξονα x. Το προαναφερθέν ραδιόγραμμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7 όπου επισημαίνεται με κόκκινο και μωβ

βέλος το βάθος των στρωμάτων κονιάματος του ψηφιδωτού στα 0,05 και 0,15 m, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.7: *2D* προφίλ σάρωσης κατά μήκος της γραμμής 4 του άξονα x. Το κόκκινο βέλος αφορά στο κατώτερο όριο της υποδομής των στρωμάτων κονιάματος 'nucleus' και 'supra nucleus'. Το μωβ βέλος αφορά στο κατώτερο όριο της υποδομής του δαπέδου σε βάθος 0.15 m από την επιφάνεια της μέτρησης.

Στα παραπάνω ραδιογράμματα (γραμμές σάρωσης 1, 2 και 4 του άξονα x) η εξέταση της περιοχή που αντιστοιχεί στο υπόστρωμα του ψηφιδωτού, δηλαδή από την αρχή της μέτρησης έως τα 0,15 m βάθος, δεν έδειξε ισχυρές ανακλάσεις που να αντιστοιχούν σε κενά και αποσαθρωμένες περιοχές (Εικόνες 3.5, 3.6 και 3.7). Αυτό, μαρτυρά την ομοιογένεια του κονιάματος και την καλή κατάσταση διατήρησής του.

3.3.3 Μακροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων

Για την διερεύνηση της τεχνολογίας κατασκευής του ψηφιδωτού δαπέδου στην σπηλιά του Πανός στην Πνύκα, όπως επίσης και των μορφών φθοράς του, συλλέχτηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα κονιάματος από το υπόστρωμα του ψηφιδωτού, κατά τις επεμβάσεις συντήρησης που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο. Το δείγμα, που χαρακτηρίζεται ως "Pan_layer" παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.8. Η μακροσκοπική παρατήρηση του δείγματος δείχνει ότι παρουσιάζει την ίδια υφή και το ίδιο ανοιχτό ερυθρό χρώμα με τα δείγματα του ψηφιδωτού της Κρήνης. Από τη σχετικά μικρή διάμετρο των αδρανών του κονιάματος συμπεραίνεται ότι αντιστοιχεί στο τρίτο στρώμα της υποδομής του ψηφιδωτού (nucleus). Στον Πίνακα 3.2 δίνονται οι διαστάσεις και η περιγραφή του δείγματος.

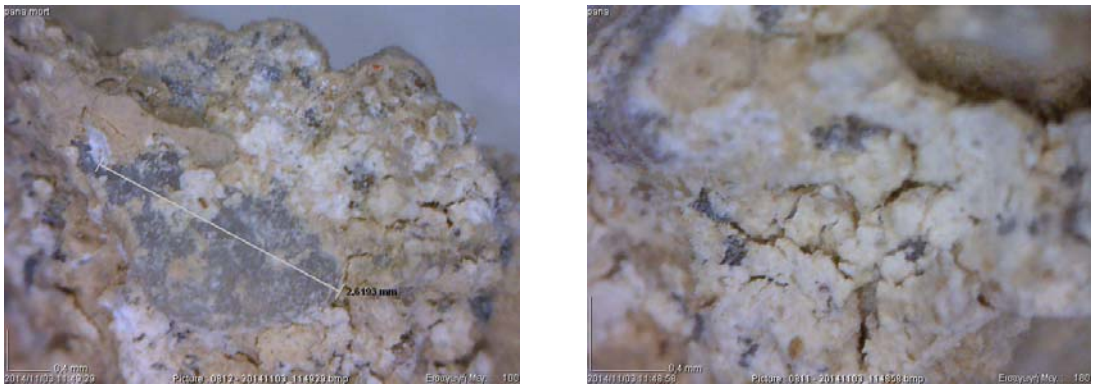
Εικόνα 3.8: Δείγμα κονιάματος Pan_layer που έχει περισυλλέγει και διαιρεθεί στα δυο.

Πίνακας 3.2: Ταξινόμηση και περιγραφή του δείγματος που λήφθηκε από το υπόστρωμα.

Δείγμα	**Διαστάσεις**	**Περιγραφή**
Pan_layer	μήκος→ 0,98 πλάτος→ 1,25 ύψος→ 0,51	Δείγμα κονιάματος από αποσπασμένο τμήμα του υποστρώματος του ψηφιδωτού.

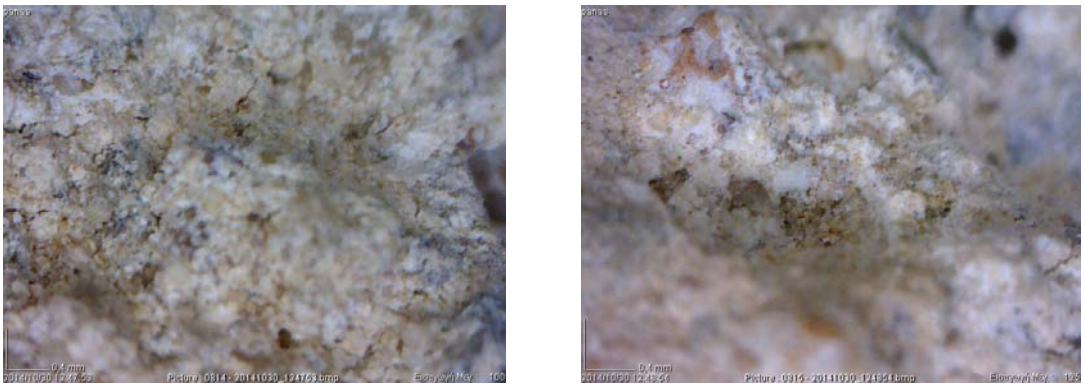
3.3.4 Μελέτη με φορητό Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM)

Το δείγμα Pan_layer διαχωρίστηκε σε δύο μικρότερα τμήματα για να μελετηθεί η επιφάνεια τους με DM. Στην Εικόνα 3.9α,β φαίνονται δύο χαρακτηριστικές περιοχές του δείγματος. Παρατηρείται ότι τα αδρανή με μεγαλύτερη διάμετρο παρουσιάζουν γκρι χρώμα και το μήκος των κόκκων τους φτάνει μέχρι τα 2.61 mm (Εικόνα 3.9α). Επίσης, στο ίδιο δείγμα (Εικόνα 3.9β) παρατηρείται ένα λεπτό υπόλευκο στρώμα, το οποίο εκτιμάται ότι αντιστοιχεί στο κονίαμα υποδοχής των ψηφίδων (supra nucleus).



X100 (α) **X180** (β)

Εικόνα 3.9: Μικροφωτογραφίες από τη μελέτη με DM της επιφάνειας που αντιστοιχούν στο δείγμα Pan_layer. Στις εξεταζόμενες περιοχές εντοπίστηκαν (α) με μεγαλύτερη διάμετρο που παρουσιάζουν γκρι χρώμα και το μήκος των κόκκων τους φτάνει μέχρι τα 2.61 mm, (β) λεπτό υπόλευκο στρώμα που αντιστοιχεί στο κονίαμα υποδοχής των ψηφίδων (supra nucleus).



X100 (α) **X190** (β)

Εικόνα 3.10: Μικροφωτογραφίες από τη μελέτη με DM της επιφάνειας που αντιστοιχούν στο δείγμα Pan_layer. Στις εξεταζόμενες περιοχές (α) και (β) παρατηρήθηκε η παρουσία διάσπαρτου κεραμικού υλικού, πολύ λεπτόκοκκου, που παραπέμπει σε ασβεστο-ποζολανικό κονίαμα.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 3.10α,β δίνονται δύο άλλες απόψεις του δείγματος, από τις οποίες παρατηρείται η παρουσία διάσπαρτου κεραμικού υλικού, πολύ λεπτόκοκκου, που παραπέμπει σε ασβεστο-ποζολανικό κονίαμα.

3.3.5 Μελέτη με Ηλεκτρονιακό Μικροσκόπιο-Μικροαναλυτή (SEM-EDX)

Η μελέτη της μικροδομής του κονιάματος που ελήφθη από το ψηφιδωτό του Πανός πραγματοποιήθηκε με την τεχνική του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) σε συνδυασμό με μικροανάλυση (EDX). Με τη δεύτερη τεχνική, έγινε χημική ανάλυση των στοιχείων σε διάφορα τμήματα του δείγματος, προκειμένου να διαπιστωθεί η σύνθεση των συστατικών του κονιάματος. Στην Εικόνα 3.11α,β,γ παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές μικροφωτογραφίες από τη μελέτη της μικροδομής του κονιάματος Pan_layer με τις αντίστοιχες χημικές αναλύσεις των στοιχείων στην παρατηρούμενη επιφάνεια. Οι στοιχειακές αναλύσεις εκφράζονται και με τη μορφή των οξειδίων των στοιχείων, ενώ ως υπολειπόμενο O_2 θεωρείται αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

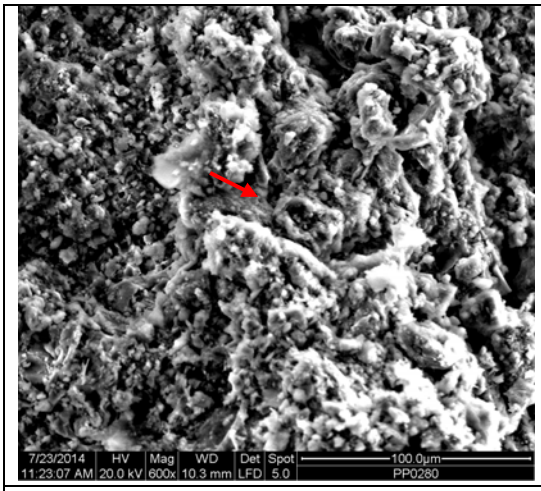
Στην πρώτη μικροφωτογραφία (α) της Εικόνας 3.11, παρατηρούνται προϊόντα ενυδάτωσης (λευκές περιοχές) τα οποία συνδέουν τους διεσπαρμένους κόκκους των αδρανών (σκουρόχρωμες περιοχές). Στη χημική σύσταση της επιφάνειας στην της (α) παρατηρείται ότι το αποτέλεσμα του υπολειπόμενου O_2 έχει θετική τιμή. Εκτιμάται ότι το ποσοστό αυτό του οξυγόνου βρίσκεται με τη μορφή του H_2O. Όμως δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα, γιατί το H_2 δεν ανιχνεύεται με το EDX. Αντίθετα, στον πίνακα της επιφάνειας (β) το υπολειπόμενο O_2 έχει αρνητική τιμή. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι μερικά στοιχεία, αντικαθιστούν άλληλα στο πλέγμα όπως, π.χ, στην περίπτωση Al και Si [7].

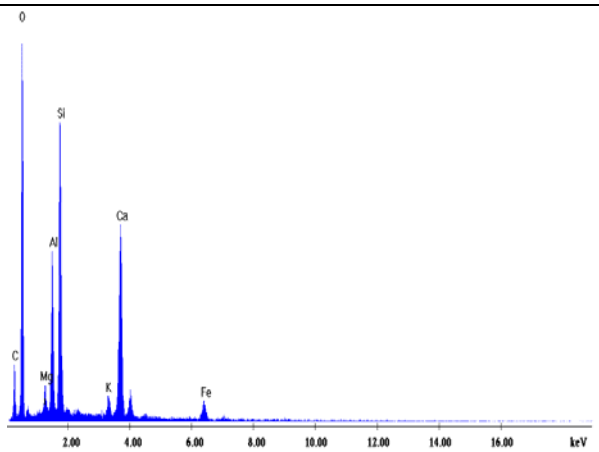
Στη φωτογραφία (β) που είναι εστιασμένη στο κέντρο, με μεγαλύτερη μεγέθυνση, παρατηρούνται εξαγωνικού σχήματος πλακίδια, που είναι χαρακτηριστικά της μικροδομής των ένυδρων ασβεστο-αργιλο-πυριτικών ενώσεων (CASH). Επίσης, μέσα σε οπές κόκκων που σχηματίστηκαν από αντίδραση της υδρασβέστου με το ποζολανικό υλικό παρατηρείται ο σχηματισμός ένυδρων προϊόντων.

Τα προϊόντα αυτά φαίνονται καθαρότερα στην μικροφωτογραφία (γ) όπου διακρίνονται χαρακτηριστικοί βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη ($CA\overline{C}H$) πάνω στην επιφάνεια ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων. Ακόμη, μέσα σε πόρους διακρίνονται αραχνοειδείς επικαλύψεις, που αποτελούν χαρακτηριστική απεικόνιση των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων (CSH) οι οποίες σχηματίστηκαν από την αντίδραση της άμορφης πυριτίας με την υδράσβεστο στο κονίαμα.

Από τις τιμές των πινάκων της Εικόνας 3.11, όπου δίδονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων (EDX) για τις επιφάνειες των μικροφωτογραφιών (α) και (β), εκφρασμένα σε οξείδια των στοιχείων, υπολογίζονται οι ακόλουθοι δείκτες υδραυλικότητας, σύμφωνα με τους τύπους του Boynton (παράγραφος 1.3.2.3) για το εξεταζόμενο κονίαμα: (α) CI = 4,22 και HI = 2,07 και (β) CI = 5,08 και HI = 2,42. Οι δείκτες αυτοί εμφανίζονται υψηλοί γιατί περιλαμβάνουν ένα ποσοστό του SiO_2 και του CaO που εμφανίζονται με τη μορφή του χαλαζία και του ασβεστίτη, αντίστοιχα, όπως διαπιστώθηκε από την ανάλυση με XRD. Όμως, από τους δείκτες αυτούς και τη

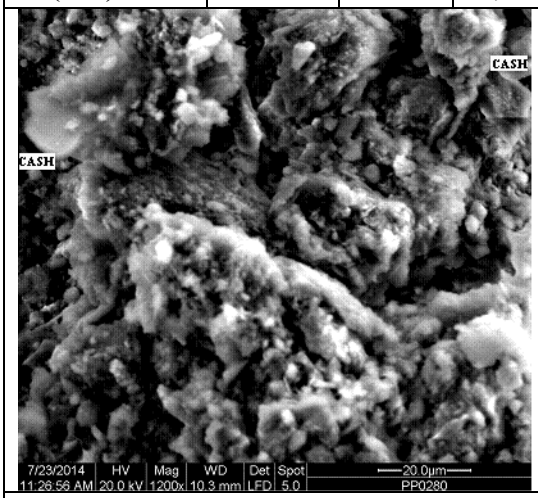
σύνθεση των οξειδίων, όπως προκύπτουν από την ανάλυση και τις παρατηρήσεις της μικροδομής με το SEM, μπορεί να εκτιμηθεί με βεβαιότητα ότι το εξεταζόμενο κονίαμα παρουσιάζει πολύ καλή υδραυλικότητα. Σε αυτό συνεπικουρούν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του κονιάματος με την τεχνική TG-DTG.

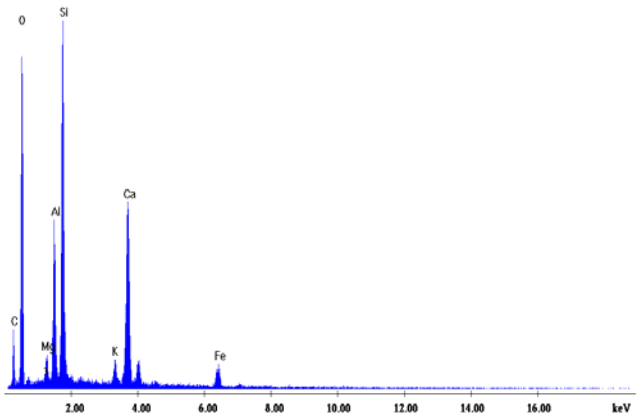




(α)

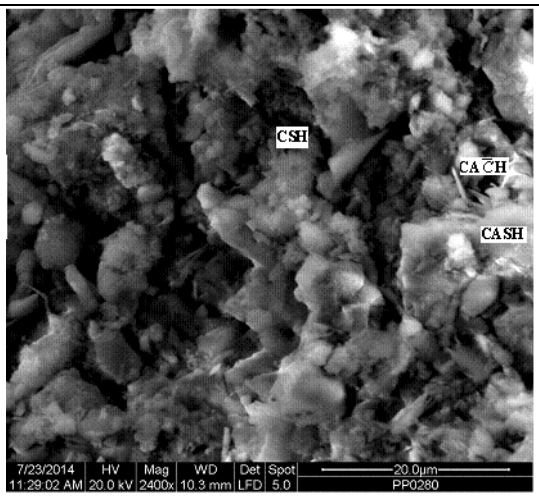
Στοιχεία	**C**	**O**	**Al**	**Si**	**Mg**	**K**	**Ca**	**Fe**	**Στοιχεία**
% (w/w)	10,71	51,63	5,78	12,58	1,40	1,20	13,05	3.27	**% (w/w)**
Οξείδια	**CO_2**	**Υπολ. O_2***	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**MgO**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**	**Οξείδια**
% (w/w)	39.27	-4.23	10,92	29,96	2,32	1,45	18,27	4,67	**% (w/w)**





(β)

Στοιχεία	**C**	**O**	**Al**	**Si**	**Mg**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	11,36	48,13	5,80	15,03	1,26	1,33	12,82	3,77
Οξείδια	**CO_2**	**Υπολ. O_2***	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**MgO**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)	41,65	-12,34	10,96	32,21	2,09	1,60	17,95	5,39



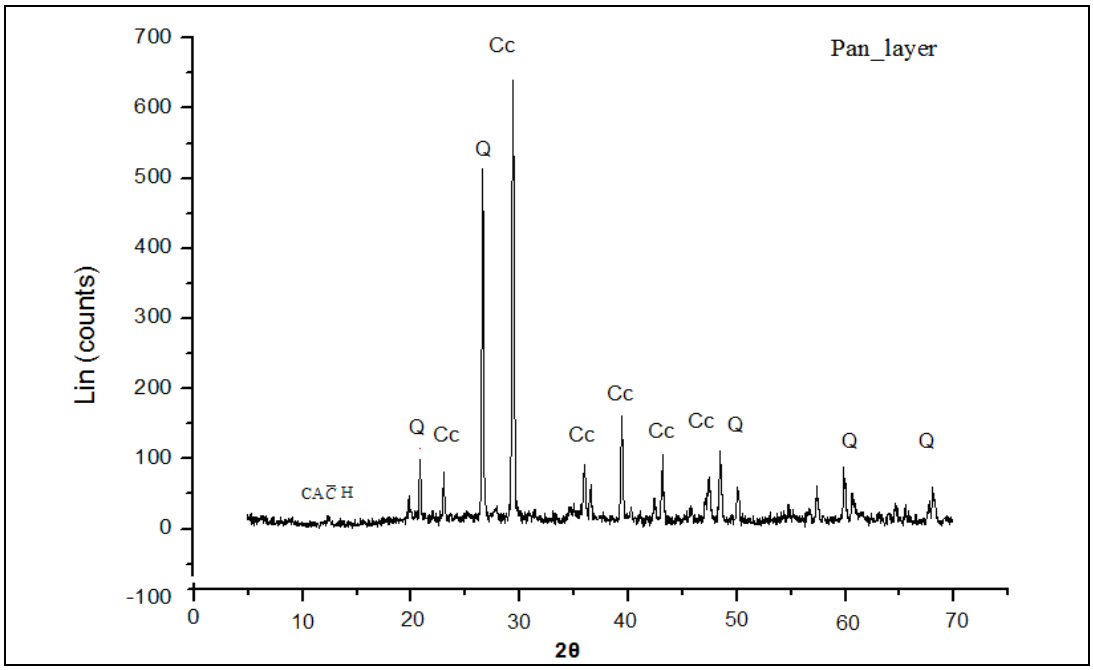
(γ)

*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

Εικόνα 3.11: Μικροφωτογραφίες SEM από τη μελέτη του δείγματος Pan_layer με χημική ανάλυση των επιφανειών (α) και (β) με EDX εκφρασμένη σε οξείδια. Στις μικροφωτογραφίες παρατηρούνται (α) προϊόντα ενυδάτωσης (λευκές περιοχές) τα οποία συνδέουν τους διεσπαρμένους κόκκους των αδρανών (σκουρόχρωμες περιοχές), (β) πλακίδια εξαγωνικού σχήματος (CASH) και (γ) κρύσταλλοι τομασίτη (CA$\overline{C}$H).

3.3.6 Μελέτη του δείγματος με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

Η μελέτη με περίθλαση ακτίνων Χ αποσκοπούσε στη διερεύνηση των κρυσταλλικών ενώσεων και την ταυτοποίηση των ορυκτολογικών συστατικών του κονιάματος.



Εικόνα 3.12: Ακτινογράφημα XRD από την εξέταση του δείγματος Pan_layer. Οι κορυφές που παρουσιάζονται στο ακτινογράφημα αντιστοιχούν σε ασβεστίτης (Cc), χαλαζίας (Q), τομασίτης (CA$\overline{C}$H).

Οι προσδιορισμοί εκτελέσθηκαν σε κονιοποιημένα δείγματα από τα αρχικό δοκίμιο Pan_layer που λήφθηκε από το υπόστρωμα του ψηφιδωτού. Οι συνθήκες του οργάνου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιες με εκείνες που αναφέρονται στην παράγραφο Β1. Στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται το ακτινογράφημα που λήφθηκε από τη εξέταση του δείγματος. Τα κρυσταλλικά συστατικά που προσδιορίστηκαν από την θέση (2θ) των κορυφών στο ακτινογράφημα XRD αναφέρονται στον Πίνακα 3.3 και αφορούν στην ποιοτική ορυκτολογική σύσταση των κονιαμάτων.

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα από τη μελέτη του ακτινογραφήματος XRD.

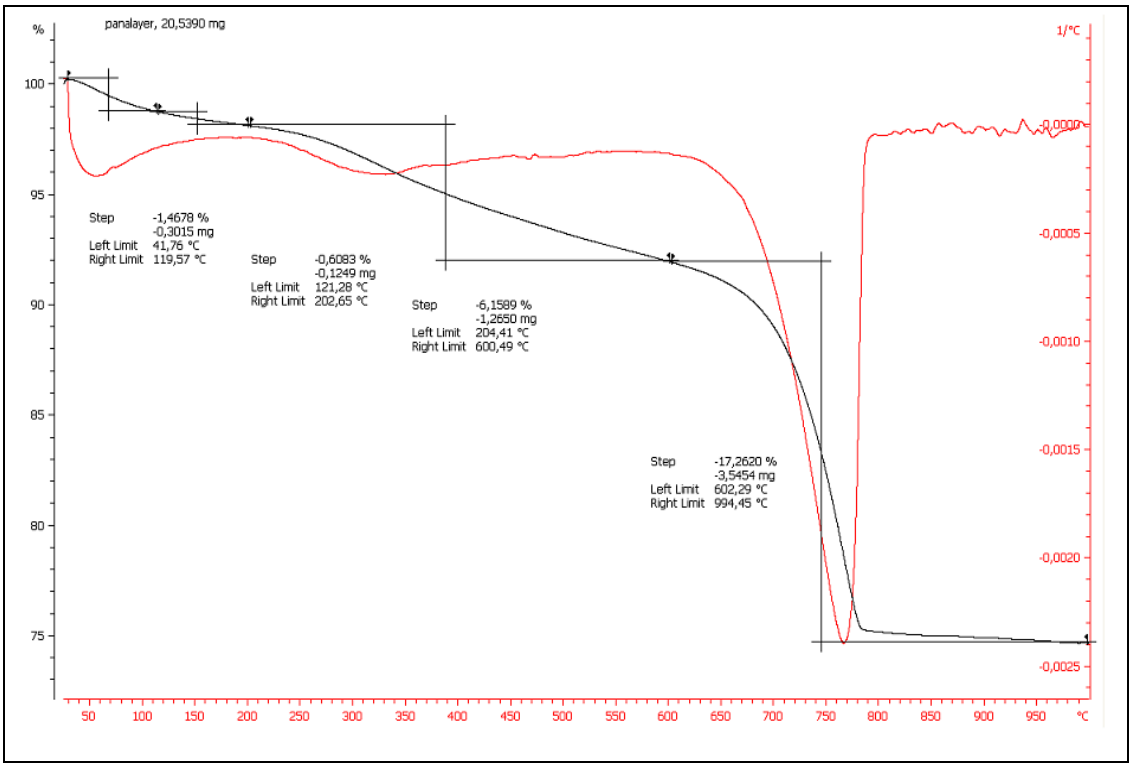
Δείγμα	**Σύσταση**
Pan_layer	Ασβεστίτης (Cc), Χαλαζίας (Q), Τομασίτης (CA$\overline{C}$H)

Η περαιτέρω μελέτη των εντάσεων των κορυφών που παρουσιάζονται στο ακτινογράφημα XRD, μπορεί να οδηγήσει σε μια ημιποσοτική εκτίμηση της παρουσίας των ορυκτολογικών συστατικών που προσδιορίστηκαν. Έτσι, σύμφωνα με τις εντάσεις των κορυφών που παρατηρούνται, εκτιμάται ότι τα συστατικά που επικρατούν στο κονίαμα του υποστρώματος είναι ο ασβεστίτης (Cc) και ο χαλαζίας (Q) με μικρή παρουσία τομασίτη (CA$\overline{C}$H).
Η παρουσία του ασβεστίτη αποδίδεται, κυρίως, στην κονία ($Ca(OH)_2$) του κονιάματος και στη διαχρονική ενανθράκωση της υδρασβέστου ($Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$). Ενώ, ένα μέρος του μπορεί να προέρχεται από αδρανή ασβεστολιθικής σύστασης. Ο χαλαζίας αποδίδεται στα κεραμικά κλάσματα ή και στην άμμο που ήταν συστατικά του κονιάματος. Η παρουσία του τομασίτη οφείλεται στην αντίδραση των ένυδρων ασβεστο-αργιλο-πυριτικών ενώσεων (CASH) που σχηματίστηκαν κατά την ενυδάτωση του κονιάματος, με το CO_2 και τα θειικά άλατα. Η παρουσία των ένυδρων αυτών ενώσεων (CASH) αποτελεί μια σοβαρή ένδειξη ότι έχει λάβει χώρα αντίδραση αργιλοπυριτικών ενώσεων με την υδράσβεστο, δηλαδή, δηλώνουν προϊόντα ποζολανικής δράσης.

3.3.7 Μελέτη του δείγματος με Θερμική Ανάλυση (TG-DTG)

Η μελέτη με την τεχνική της θερμικής ανάλυσης αποσκοπούσε στον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των διαφόρων συστατικών του κονιάματος και την ανίχνευση ενδεχόμενων προϊόντων φθοράς, όπως, επίσης, στον υπολογισμό του κρυσταλλικού και χημικά ενωμένου νερού, το οποίο αντανακλά τον υδραυλικό χαρακτήρα των κονιαμάτων. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν όμοια με εκείνη που περιγράφεται στην παράγραφο Β1. Στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται το θερμικό διάγραμμα TG-DTG του δείγματος Pan_layer.
Το ενδιαφέρον των μετρήσεων, όπως αναφέρθηκε και για τις προηγούμενες περιπτώσεις, εστιάστηκε στις θερμοκρασιακές περιοχές του διαγράμματος της θερμικής καμπύλης TGA κάτω από 120 °C, μεταξύ 120-200 °C, μεταξύ 200-600 °C και άνω των 600 °C, όπου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα κονιάματα. Στον Πίνακα 3.4 δίνονται τα αποτελέσματα της απώλειας βάρους που προσδιορίστηκαν στις θερμοκρασιακές περιοχές που ενδιαφέρουν, καθώς και ο λόγος CO_2/χημικά

δεσμευμένου νερού, που υπολογίζεται από τις απώλειες βάρους στα θερμοκρασιακά διαστήματα >600 °C και 200-600 °C, αντιστοίχως.



Εικόνα 3.12: Θερμοδιάγραμμα TG-DTG από την εξέταση του δείγματος Pan_layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό εύρος.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.4 παρατηρείται ότι η απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό εύρος από 120 – 200 °C, που αποδίδεται στο κρυσταλλικό νερό των ένυδρων αλάτων, κυρίως της γύψου, είναι μικρότερη από 0,61%. Στο θερμοκρασιακό εύρος 200-600 °C, παρατηρείται ότι η απώλεια βάρους είναι 6.16. Η απώλεια βάρους στην περιοχή αυτή αποδίδεται στο νερό που περιέχεται στις ένυδρες ασβεστο-αργιλο πυριτικές ενώσεις (CASH). Η παρουσία των ενώσεων αυτών, που προσδιορίστηκαν και κατά την ανάλυση με τη μέθοδο XRD, αποτελεί ένδειξη ποζολανικών δράσεων, που συμβάλλουν σημαντικά στην ανάπτυξη αντοχών του κονιάματος.

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα από τη θερμοβαρυμετρική ανάλυση του δείγματος Pan_layer.

Δείγματα	**(%) Απώλεια βάρους για κάθε θερμοκρασιακή περιοχή (^oC)**				**CO_2/H_2O**
	<120	**120-200**	**200-600**	**>600**	
	(%)				
Pan_layer	1.47	0.61	6.16	17.26	2,80

Στο θερμοκρασιακό εύρος από 600-1100 °C, υπάρχει μια απότομη μεταβολή στην κλίση της καμπύλης TG που οφείλεται στην χαρακτηριστική κορυφή στους 810 και 842 °C, που αντιστοιχεί στη διάσπαση του ασβεστίτη ($CaCO_3$). Από την απώλεια βάρους στη θερμοκρασιακή αυτή περιοχή (Πίνακα 3.4) και την αντίδραση διάσπασης του $CaCO_3$

υπολογίζεται η περιεκτικότητα του ασβεστίτη στο δείγμα και το ισοδύναμο ποσοστό υδρασβέστου ($Ca(OH)_2$) από την οποία προήλθε (Πίνακας 3.5). Ενώ, η ολική απώλεια πύρωσης (L.O.I) για το δείγμα είναι 25,50 %.
Τέλος, από την απώλεια βάρους (%) στις θερμοκρασιακές περιοχές 200-600 °C και > 600 °C, αντίστοιχα, προσδιορίζεται ο λόγος CO_2/H_2O, που ορίζεται ως λόγος υδραυλικότητας (Hr) όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.3.2.5. Η τιμή του λόγου υδραυλικότητας που υπολογίστηκε (Hr = 2,80) για το κονίαμα του ψηφιδωτού δαπέδου στο σπήλαιο του Πανός στο λόφο της Πνύκας, δείχνει ότι πρόκειται για σύνθεση ισχυρής υδραυλικότητας, επομένως, περιέχει υδράσβεστο με φυσική ποζολάνη.

Πίνακας 3.5: Υπολογιζόμενη περιεκτικότητα $CaCO_3$ και ισοδύναμου $Ca(OH)_2$ στο κονίαμα Pan_layer.

Στρώμα Κονιάματος	**$CaCO_3$ (%)**	**Ισοδύναμο $Ca(OH)_2$ (%)**
Pan_layer	39,23	29,03

Από το ποσοστό της ισοδύναμης υδρασβέστου του Πίνακα 3.5 εκτιμάται ότι η αναλογία υδρασβέστου/ποζολανικά υλικά κυμαίνεται μεταξύ του 1/2 και 1/3. Η διακύμανση αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι το δείγμα του κονιάματος Pan_layer περιλαμβάνει ένα μέρος του κονιάματος ψηφοθέτησης, το οποίο είναι πλουσιότερο σε υδράσβεστο.

3.4 Συμπεράσματα από τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου στο σπήλαιο του Πανός στην Πνύκα

Η διερεύνηση του ψηφιδωτού δαπέδου έγινε, κατ' αρχήν, επί τόπου με τις μη καταστρεπτικές τεχνικές IRT και GPR. Η σύνθεση των κονιαμάτων της υποδομής μελετήθηκε με τη συνδυαστική χρήση των μεθόδων DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG.
Η εφαρμογή της μεθόδου IRT στο ψηφιδωτό δάπεδο οδήγησε στο εντοπισμό υγρασίας στην ψηφιδωτή επιφάνεια κατά μήκος του βράχου της σπηλιάς του Πανός. Παράλληλα, η παρόμοια θερμική συμπεριφορά που παρατηρήθηκε στην επανατοποθετημένη και την αρχαία ψηφιδωτή επιφάνεια αποτελεί ένδειξη για τη σωστή τεχνική συντήρησης και τη συμβατότητα των υλικών κατασκευής του νέου υποστρώματος με την υπόλοιπη δομή του ψηφιδωτού δαπέδου.

Με την εφαρμογή της τεχνικής GPR:

- Προσδιορίστηκαν τα όρια των υποστρωμάτων 'nucleus' και 'supra nucleus' σε βάθος 0.05-0.08 m και της υποδομής 'rudus' σε βάθος 0.15 m, από την επιφάνεια του δαπέδου.
- Εντοπίστηκαν αποσαθρωμένες περιοχές στο εδαφικό υλικό στην περιοχή του ψηφιδωτού που βρίσκεται κατά μήκος του βράχου.
- Επιβεβαιώθηκε η καλή κατάστασης διατήρησης του κονιάματος της υποδομής του ψηφιδωτού, καθώς δεν ανιχνεύτηκαν κενά και αποσαθρωμένες περιοχές.

Από την εξέταση του δείγματος Pan_layer, το οποίο ελήφθη από το κονίαμα της υποδομής του ψηφιδωτού, με DM, εξάγονται οι εξής παρατηρήσεις:

- Εκτιμάται ότι το δείγμα αυτό αντιστοιχεί, κυρίως, στο στρώμα (nucleus).
- Το στρώμα αυτό φέρει μια λεπτή στρώση κονιάματος πλούσια σε ασβέστη, που αντιστοιχεί στο στρώμα υποδοχής των ψηφίδων (supra nucleus).
- Η άφθονη παρουσία κεραμικού υλικού παρέχει σοβαρές ενδείξεις ότι πρόκειται για κονίαμα ασβέστου-ποζολάνης Ρωμαϊκής εποχής.

Η μελέτη της μικροδομής των κονιαμάτων με το ηλεκρονιακό μικροσκόπιο SEM-EDX οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Εμφανίζονται εξαγωνικού σχήματος πλακίδια, που είναι χαρακτηριστικά της μικροδομής των ένυδρων ασβεστο-αργιλο-πυριτικών ενώσεων (CASH).
- Μέσα σε οπές κόκκων, που σχηματίστηκαν από αντίδραση της υδρασβέστου με το ποζολανικό υλικό, παρατηρείται ο σχηματισμός ένυδρων προϊόντων, με τη μορφή αραχνοειδών επικαλύψεων, που αποτελούν χαρακτηριστική απεικόνιση των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων (CSH).
- Διακρίνονται χαρακτηριστικοί βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη ($CA\overline{C}H$) πάνω στην επιφάνεια ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων.
- Ο προσδιορισμός των δεικτών υδραυλικότητας (CI) και (HI) δείχνει τον υδραυλικό χαρακτήρα του κονιάματος.

Η κρυσταλλογραφική μελέτη του κονιάματος με XRD έδειξε την παρουσία των παρακάτω ορυκτολογικών συστατικών:

- Ασβεστίτης ($CaCO_3$), Χαλαζίας (α-SiO_2) και Τομασίτης ($CA\overline{C}H$)
- Η παρουσία του τομασίτη αποτελεί ένδειξη ότι έχει λάβει χώρα αντίδραση αργιλοπυριτικών ενώσεων με την υδράσβεστο, δηλαδή, δηλώνουν προϊόντα ποζολανικής δράσης.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG-DTG), οδήγησε στα συμπεράσματα, που συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η τιμή του λόγου υδραυλικότητας που υπολογίστηκε (Hr = 2,80) για το κονίαμα του ψηφιδωτού δαπέδου, δείχνει ότι πρόκειται για ισχυρής υδραυλικότητας σύνθεση, επομένως, περιέχει υδράσβεστο με φυσική ποζολάνη.
- Από το ποσοστό της ισοδύναμης υδρασβέστου που υπολογίστηκε (29,03 %), εκτιμάται ότι η αναλογία υδρασβέστου/ποζολανικά υλικά κυμαίνεται μεταξύ του 1/2 και 1/3. Η διακύμανση αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι το δείγμα του κονιάματος Pan_layer περιλαμβάνει ένα μέρος του κονιάματος ψηφοθέτησης, όπως αναφέρθηκε και κατά την μελέτη του με το DM το οποίο είναι πλουσιότερο σε υδράσβεστο.

Κεφάλαιο 4

Ψηφιδωτό δάπεδο στην Κρήνη 'Καλλιρρόη' στο λόφο της Πνύκας

4.1 Περιγραφικά στοιχεία αντικειμένου

Κατά τις ανασκαφές του Γερμανικού Αρχαιολογικού Ινστιτούτου των ετών 1891– 1898, στη δυτική πλευρά της Ακρόπολης, ήρθε στο φως ένα πολυσύνθετο υδροδοτικό δίκτυο λαξευμένο στο φυσικό βράχο, αποτελούμενο από αγωγούς, κανάλια, φρεάτια, δεξαμενές και στοές. Η μελέτη του δικτύου αυτού από τους Dörpfeld και Gräber, αποτελεί έως σήμερα την μοναδική μελέτη του εκτεταμένου υδροδοτικού συστήματος που ανάγεται στην αρχαϊκή περίοδο και πραγματοποιήθηκε στα χρόνια του Πεισίστρατου. Πρόκειται για κρηναία εγκατάσταση, η οποία αποτελείται από συγκοινωνούντες δεξαμενές, φρεάτια και διαδρόμους προσπέλασης, διαμορφώνοντας ένα πολύπλοκο υδροδοτικό σύνολο το οποίο τροφοδοτούσε την, κατά Dörpfeld, 'Κρήνη Καλλιρρόη' [22].
Η είσοδος της κρήνης έχει πρόσοψη στην Απ. Παύλου, όπου υπάρχει μια κτιστή λίθινη κλίμακα, η οποία οδηγεί σε ένα τετράγωνο θάλαμο διαστάσεων περίπου 4.00 x 4.00 m λαξευμένο στο φυσικό βράχο με τοξωτή στέγη. Στη Ρωμαϊκή περίοδο η πηγή που τροφοδοτούσε τον αρχικό θάλαμο είχε ήδη στερέψει και ο θάλαμος κοσμήθηκε με ψηφιδωτό δάπεδο. Το ψηφιδωτό αυτό αντιστοιχεί με τα δάπεδα της εποχής του Αδριανού 117–138 μ.Χ. Στη Εικόνα 4.1β παρουσιάζεται άποψη του δαπέδου στον υπόσκαφο χώρο, όπως μπορεί να φανεί από μια κεντρική απώλεια της ψηφιδωτής επιφάνειας η υποδομή του ψηφιδωτού αποτελείται από κροκάλες, κομμάτια κεραμιδιών και μια λεπτή στρώση κονιάματος. Ωστόσο, οι αρχαιολογικές έρευνές δεν επιβεβαιώνουν ότι αυτή η περιοχή είναι αντιπροσωπευτική της κατασκευής της. Τα χρώματα των ψηφίδων είναι: μαύρο, ώχρα, λευκό, τουρκουάζ, κεραμιδί και γκρι μάρμαρο. Η επιφάνεια του ψηφιδωτού δαπέδου είναι 16,54 m^2 [22, 23].

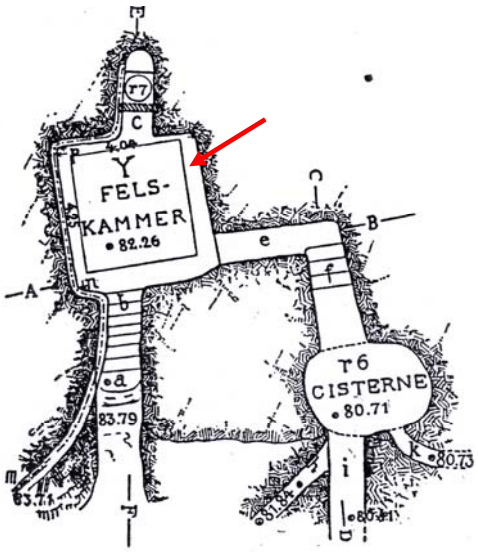


Abb. 1. Grundriss der älteren Wasseranlage.
Felskammer an der Pnyx.

(α)

(β)

Εικόνα 4.1: Αρχαιολογικός χώρος στην κρήνη Καλλιρρόης στην Πνύκα (α) σχεδιαστική αποτύπωση της κάτοψης του υπόσκαφου, η θέση του δαπέδου επισημαίνεται στο σχέδιο με κόκκινο βέλος [22], και (β) άποψη ψηφιδωτού δαπέδου όπου επισημαίνεται με κίτρινο βέλος κεντρική απώλεια της υποδομής (έτος 2014).

4.2 Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης

Οι πρώτες σωστικές εργασίες συντήρησης του ψηφιδωτού έγιναν το 1996, όπου κάποια τμήματα του ψηφιδωτού στερεώθηκαν περιμετρικά. Κατόπιν αυτού, έχουν πραγματοποιηθεί περιοδικά, καθαρισμοί της ψηφιδωτής επιφάνειας [23].

4.2.1 Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης

Το ψηφιδωτό δάπεδο εξετάστηκε μετά από έγκριση της αρμόδιας υπηρεσίας του ΥΠΠΟΑ, κατά το έτος 2014. Από το μακροσκοπικό έλεγχο της κατάστασης του ψηφιδωτού δαπέδου, παρατηρείται έντονη δράση βιολογικών παραγόντων φθοράς με αποτέλεσμα τον αποχρωματισμό της ψηφιδωτής επιφάνειας.

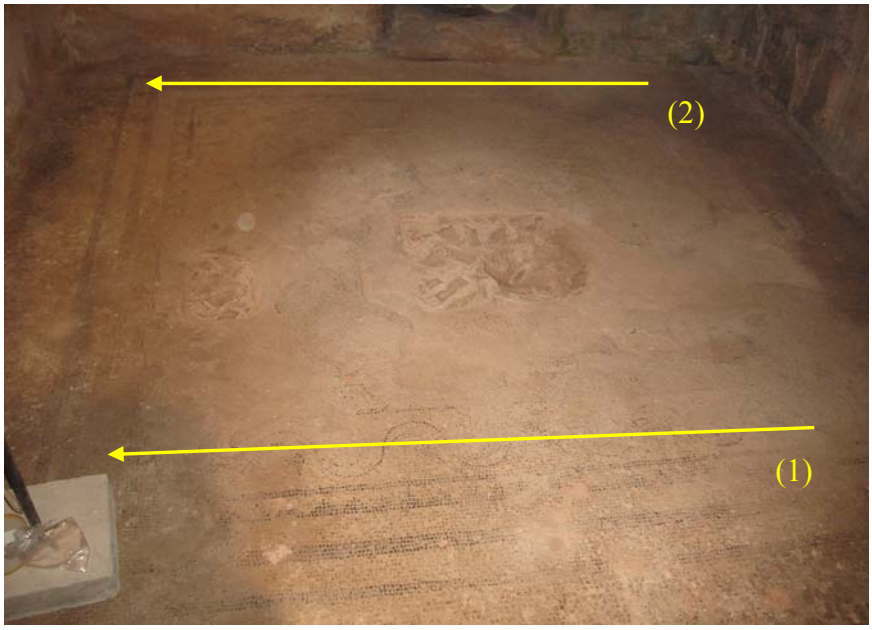
4.3 Μεθοδολογία διερεύνησης του ψηφιδωτού δαπέδου στην Κρήνη 'Καλλιρρόη' στην Πνύκα

Η διερεύνηση του ψηφιδωτού δαπέδου στην Κρήνη 'Καλλιρρόη' στην Πνύκα, πραγματοποιήθηκε, επί τόπου, με τη χρήση της NDT τεχνικής Μικροσεισμικών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Νανοεπιστημών και Νανοτεχνολογίας (ΙΝΝ) του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται πιλοτικά στην παρούσα εργασία, γιατί δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε μνημεία και ψηφιδωτά δάπεδα.

Η εφαρμογή των τεχνικών της θερμογραφίας υπερύθρου και γεωραντάρ δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί στην προκειμένη περίπτωση, επειδή τα ποσοστά υγρασίας στο μνημείο, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ήταν πολύ υψηλά. Η ανάλυση του αρχαίου κονιάματος έγινε με συνδυασμό των μεθόδων του Ψηφιακού Μικροσκοπίου, του Ηλεκτρονιακού Μικροσκοπίου με μικροανάλυση, της Περίθλασης ακτίνων Χ και της Διαφορικής Θερμικής ανάλυση με θερμοζυγό. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λήφθηκαν.

4.3.1 Μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου με την τεχνική των Μικροσεισμικών Κυμάτων (SASW - Impact Echo)

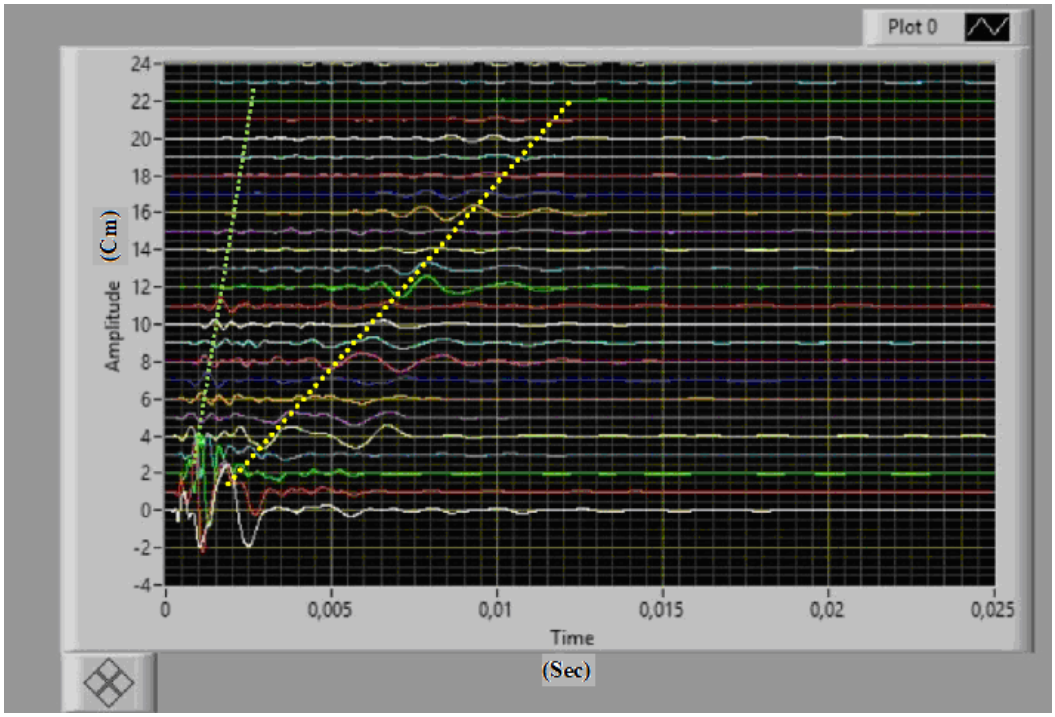
Η διερεύνηση του ψηφιδωτού δαπέδου με την τεχνική SASW - Impact Echo, περιελάμβανε την εξέταση δύο διαφορετικών αντιπροσωπευτικών περιοχών. Κατά τη διαδικασία της μέτρησης ελήφθησαν μικροσεισμογραφήματα σε δύο διαφορετικές θέσεις στο ψηφιδωτό δάπεδο (Εικόνα 4.2). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος δύο γραμμών, κάθε μία συνολικής έκτασης 4.40 m, και έγιναν πλησίον της εισόδου (1) και πλησίον του τοίχου απέναντι από την είσοδο (2).



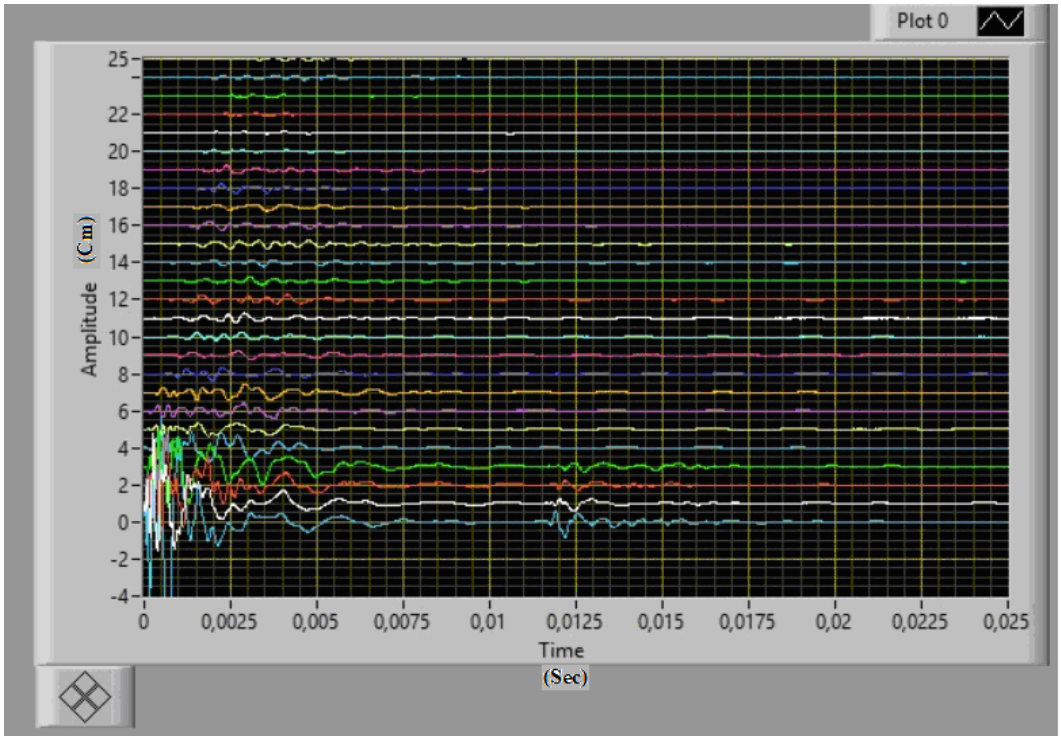
Εικόνα 4.2: Άποψη της περιοχής στο ψηφιδωτό δάπεδο που εξετάστηκε με την τεχνική των Μικροσεισμικών Κυμάτων. Με κίτρινο βέλος επισημαίνονται οι περιοχές που έγιναν οι μετρήσεις (1) πλησίον της εισόδου και (2) πλησίον του βράχου.

Στις Εικόνες 4.3 και 4.4, παρατίθενται τα σχετικά σεισμογραφήματα. Στα δυο γραφήματα παρατηρείται ότι η σκέδαση των επιφανειακών κυμάτων είναι εξαιρετικά υψηλή, λόγω της ιδιαίτερα πολύπλοκης δομής αλλά και των φθορών του ψηφιδωτού. Αυτό καθιστά αδύνατη την ανάλυση κατά Fourier. Στην Εικόνα 4.3 παρατηρούνται εμφανώς δύο κύματα με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά (η διάδοση τους φαίνεται με τις διακεκομμένες γραμμές). Η απόσταση μεταξύ των μετρήσεων είναι 10 cm. Το ασθενές υψηλής συχνότητας κύμα παρουσιάζει ταχεία απόσβεση, και έχει ταχύτητα κατ'

εκτίμηση 1000 m/sec, ενώ το δεύτερο χαμηλής συχνότητας ισχυρό κύμα έχει κατ' εκτίμηση ταχύτητα 110 m/sec Οι ταχύτητες αυτές είναι εξαιρετικά χαμηλές σε σύγκριση με το σκυρόδεμα, όπου η ταχύτητα των κυμάτων κυμαίνεται μεταξύ 2000-4000 m/sec, ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος [25].

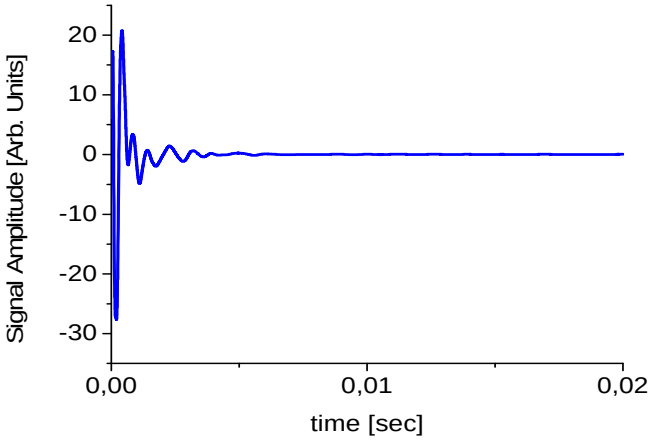


Εικόνα 4.3: Κύματα Lamb στη μέτρηση 1 (πλησίον εισόδου). Με κίτρινη και λευκή διακεκομμένη γραμμή επισημαίνονται η διάδοση δυο κυμάτων με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ο άξονας του χρόνου είναι σε sec.

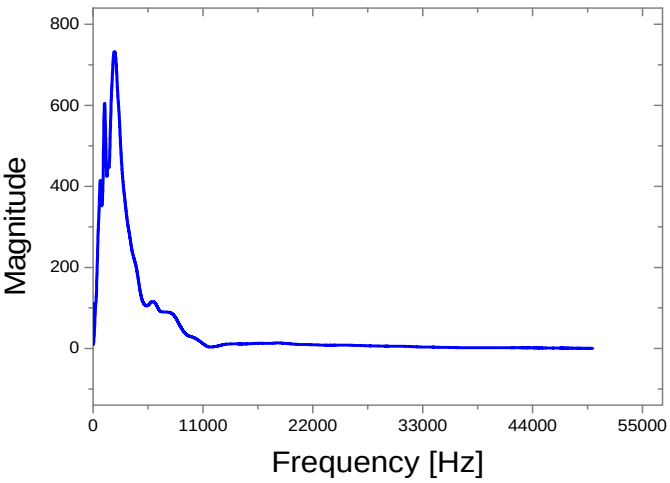


Εικόνα 4.4: Κύματα Lamb στη μέτρηση 2 (πλησίον τοίχου). Παρατηρείται στο διάγραμμα της μέτρησης ταχεία διασπορά και εξαφάνιση του κύματος. Ο άξονας του χρόνου είναι σε sec.

Σε αντίθεση με την θέση (1), οι μετρήσεις στην θέση (2) δείχνουν την διάδοση κυμάτων κυρίως της υψηλής συχνότητας, ενώ τα ισχυρά κύματα χαμηλής συχνότητας διασπείρονται εξαιρετικά γρήγορα και εξαφανίζονται. Έτσι, δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της ταχύτητας των επιφανειακών κυμάτων [26]. Αυτό το οποίο παρατηρείται είναι η παρουσία δύο κυμάτων τα οποία διαδίδονται σε δύο διαφορετικά μέσα (διαδοχικά στρώματα), με εντελώς διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες.
Το ασθενέστερο μηχανικά (σαθρό) στρώμα, χαμηλής ταχύτητας κυμάτων, υπέρκειται του στρώματος με τις μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές, όπως αυτό φαίνεται από την ισχύ του σήματος του. Η ταχεία διασπορά και εξαφάνιση του κύματος χαμηλής συχνότητας στην μέτρηση (2) υποδηλώνει ότι οι φθορές και δομικές ανωμαλίες είναι πολύ μεγαλύτερες στην θέση (2). Στην συνέχεια για να καταστεί δυνατή η εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων για την συγκεκριμένη διαστρωμάτωση του ψηφιδωτού, αναλύθηκαν σήματα πλησίον του σημείου κρούσης με το σφυρί, με την μέθοδο της ακουστικής ηχούς μετά από κρούση (impact echo). Με την μέθοδο αυτή καταγράφονται οι διαδοχικές ανακλάσεις των κυμάτων κάθετα προς την επιφάνεια κρούσης, και το καταγραφόμενο σήμα αναλύεται κατά Fourier (Εικόνα 4.5).



(α)

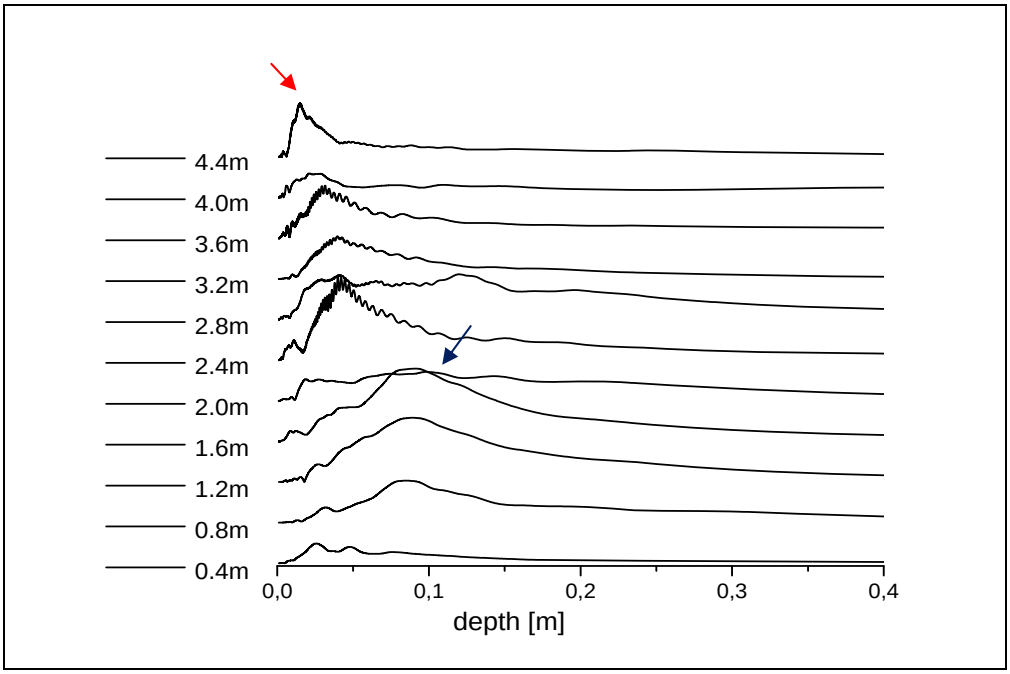


(β)

Εικόνα 4.5: Σήμα impact echo (α) και ο σχετικός μετασχηματισμός Fourier (β) από την θέση (1).

Το βάθος ανάκλασης δίνεται από την σχέση d=v/2f (όπου v η ταχύτητα του κύματος και f η συχνότητα). Είναι προφανές, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του σήματος πολλαπλών ανακλάσεων, τόσο πλησιέστερα βρίσκεται η επιφάνεια ανάκλασης στην εξωτερική επιφάνεια.

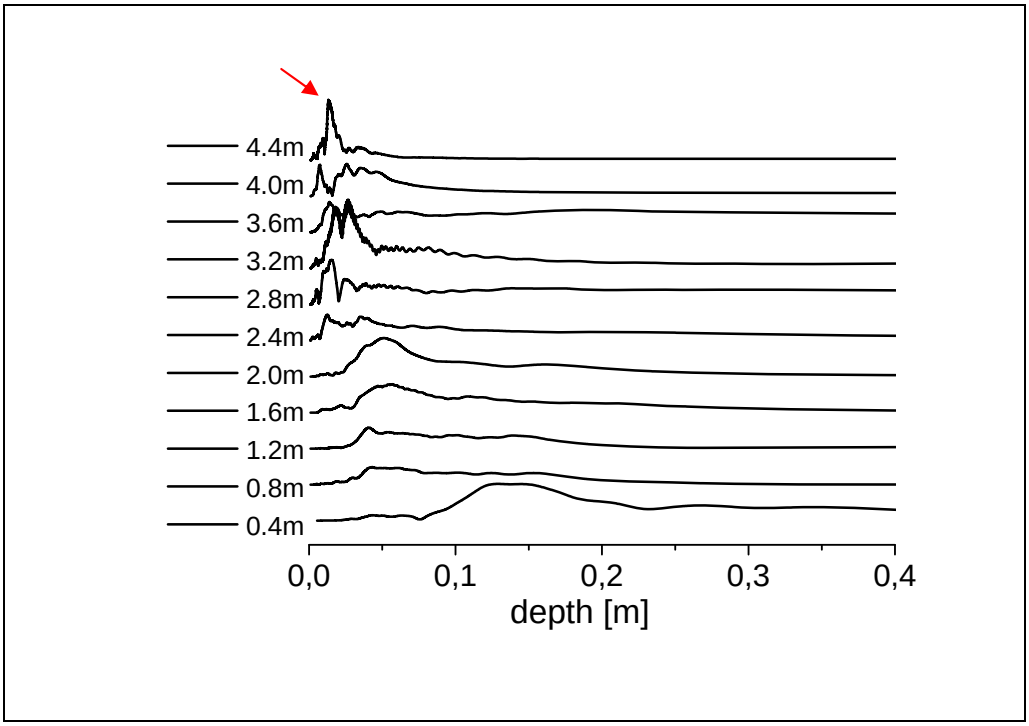
Στην Εικόνα 4.6 δίνεται η ανάλυση όλων των σημάτων από τις διαδοχικές μετρήσεις στην θέση (1) μετά από μετατροπή της συχνότητας σε βάθος ανακλάσεων, με την βοήθεια της σχέσης (d=v/2f). Το πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζεται είναι ότι με βάση τις μετρήσεις που φαίνονται στις εικόνες 4.6 και 4.7, υπάρχουν δύο στρώματα υλικού με διαφορετική ταχύτητα κυμάτων. Όμως, η αναγωγή σε βάθος των σημάτων δεν είναι προφανής, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν φθορές που αλλοιώνουν τις τοπικές μηχανικές ιδιότητες (άρα επηρεάζουν και την ταχύτητα) και στα δύο στρώματα.



Εικόνα 4.6: Βάθος ανακλάσεων από ασυνέχειες στις διαφορετικές θέσεις μετρήσεων της θέσης (1). Παρατηρούνται δύο κύριες ανακλάσεις οι οποίες επισημαίνονται με κόκκινο βέλος στο γράφημα στα 5cm, ενώ με μπλε βέλος επισημαίνεται μία επιπλέον ανάκλαση περίπου σε βάθος 10cm.

Λόγω της ισχύος του σήματος χαμηλής ταχύτητας και επειδή η βασική πρώτη ανάκλαση δημιουργείται από αυτό, θεωρούμαι την μετατροπή του χρόνου σε μήκος με βάση την ταχύτητα v=110m/sec. Έτσι, παρατηρούνται δύο κύριες ανακλάσεις στο γράφημα της Εικόνας 4.6, μία στα 5cm ενώ σε άλλες θέσεις παρατηρείται μία επιπλέον ανάκλαση περίπου σε βάθος 10cm. Αυτές αντιστοιχούν στη στρωματογραφία του ψηφιδωτού δαπέδου που αποτελείται από δύο επάλληλα στρώματα με εντελώς διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, πάχους 5 cm το καθένα. Το πρώτο φορά στο κονίαμα του ψηφιδωτού που εξετάστηκε και το δεύτερο σχετίζεται με τις κεραμικές πλάκες της υποδομής, όπως παρατηρείται από απώλεια στο κέντρο του δαπέδου. Το ακριβές βάθος της δεύτερης ανάκλασης, η οποία προφανώς προέρχεται από το όριο του δεύτερου (κατώτερου) στρώματος, δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί επακριβώς, επειδή τα δύο στρώματα, όπως αναφέρθηκε, έχουν διαφορετική ταχύτητα διάδοσης κυμάτων.

Η αντίστοιχη ανάλυση στην θέση (2) πραγματοποιήθηκε θεωρώντας, επίσης, την ταχύτητα των κυμάτων 110m/sec. Η ανάλυση αυτή δείχνει ανακλάσεις πολύ πλησίον της επιφάνειας σε μεγάλο αριθμό θέσεων μέτρησης, που είναι ενδεικτικό της ύπαρξης ασυνεχειών κοντά στο όριο της επιφάνειας (Εικόνα 4.7) [26].



Εικόνα 4.7: Βάθος ανακλάσεων από ασυνέχειες στις διαφορετικές θέσεις μετρήσεων της θέσης (2). Με κόκκινο βέλος επισημαίνονται ανακλάσεις σε μεγάλο αριθμό θέσεων μέτρησης πλησίον της επιφάνειας, που είναι ενδεικτικό της ύπαρξης ασυνεχειών κοντά στο όριο της επιφάνειας.

Γενικά, τα συμπεράσματα από αυτή την πρώτη μελέτη είναι ότι η μέθοδος των Μικροσεισμικών (επιφανειακών) Κυμάτων μπορεί να αποτυπώσει πληροφορίες σχετιζόμενες με την κατασκευαστική δομή του υποστρώματος του ψηφιδωτού δαπέδου, και να αποτελέσει ένα συμπληρωματικό ισχυρό εργαλείο στην αποτύπωση της κατάστασης αρχαίων κατασκευών, όπως το συγκεκριμένο ψηφιδωτού της Κρήνης Καλλιρρόης.

4.3.2 Μακροσκοπική παρατήρηση δειγμάτων

Τα δείγματα που συλλέχτηκαν από το υπόστρωμα του ψηφιδωτού δαπέδου παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.8. Η επιλογή των θέσεων έγινε με κριτήριο τα δείγματα να είναι αντιπροσωπευτικά και να αντιστοιχούν στις περιοχές των μετρήσεων (1) και (2) που πραγματοποιήθηκαν με την τεχνική SASW (Εικόνα 4.2), έτσι ώστε, να αξιολογηθεί συνδυαστικά η κατάσταση διατήρησης του υποστρώματος του ψηφιδωτού. Από τη μακροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων φαίνεται ότι και τα δύο δείγματα παρουσιάζουν την ίδια υφή και το ίδιο ανοιχτό ερυθρό χρώμα. Η συνεκτικότητα του κονιάματος είναι ασθενής και τα αδρανή υλικά που διακρίνονται εκτιμάται ότι είναι αργιλοπυριτικής σύστασης.

(α) (β)

Εικόνα 4.8: Δείγματα κονιάματος που λήφθηκαν από απώλεια του υποστρώματος πλησίον (α) της θέσης 1 και (β) της θέσης 2 της μέτρησης SASW.

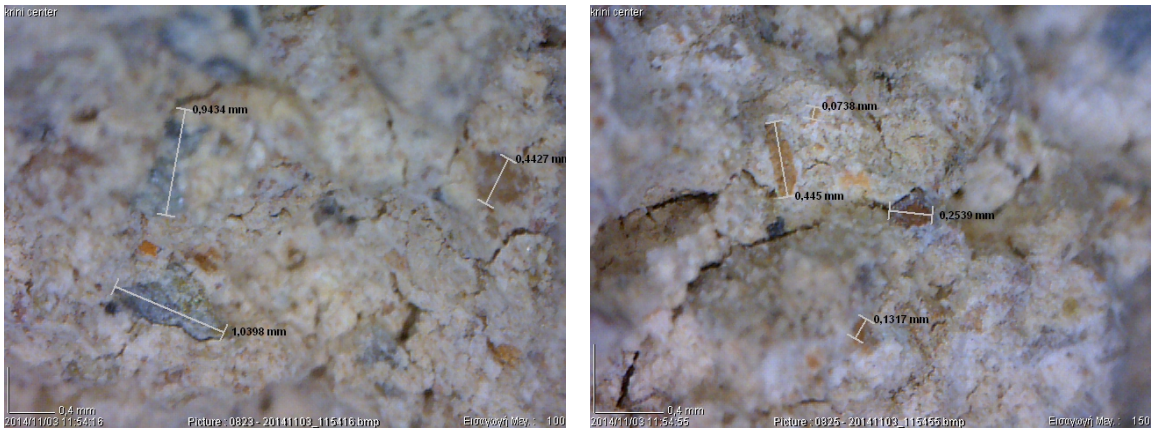
Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των δειγμάτων που λήφθηκαν από το ψηφιδωτό δάπεδο, με το χαρακτηρισμό "KR_Cen" και "KR_Cen", ενώ δίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και η περιγραφή τους.

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση και περιγραφή των δειγμάτων Akam

Δείγμα	**Διαστάσεις**	**Περιγραφή**
KR_Cen.layer	μήκος→ 1,10 πλάτος→ 0,95 ύψος→ 0,45	Δείγμα κονιάματος από αποσπασμένο τμήμα του υποστρώματος του ψηφιδωτού στην Κρήνη Καλλιρρόης το οποίο αντιστοιχεί στο στρώμα (nucleus) .
KR_Cor.layer	μήκος→ 1,00 πλάτος→ 1,05 ύψος→ 0,50	Δείγμα κονιάματος από αποσπασμένο τμήμα του υποστρώματος του ψηφιδωτού στην Κρήνη Καλλιρρόης το οποίο αντιστοιχεί στο στρώμα (nucleus) με ένα τμήμα του στρώματος (supra nucleus).

4.3.3 Μελέτη των δειγμάτων με φορητό Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM)

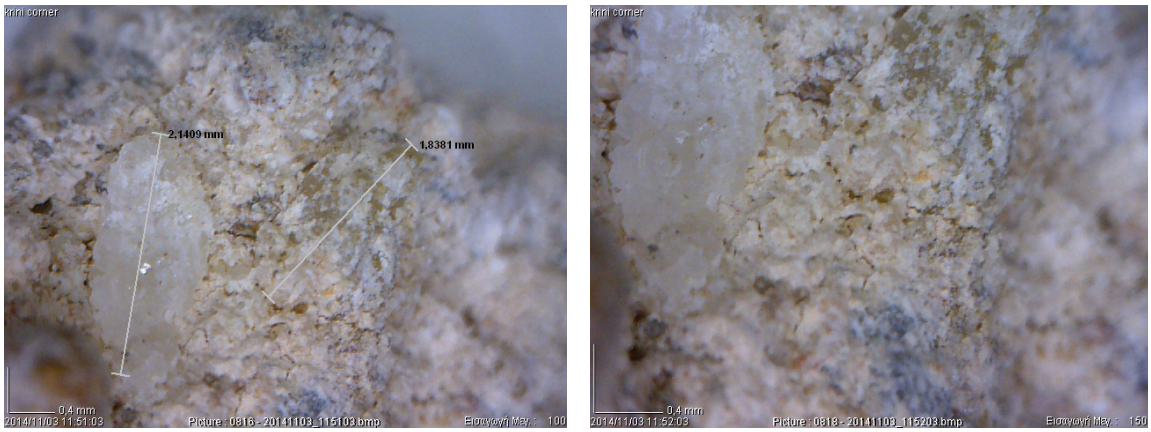
Τα δείγματα KR_Cen.layer και KR_Cor.layer μελετήθηκαν με τη χρήση φορητού μικροσκοπίου DM. Στην Εικόνα 4.9αβ παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιοχές εξέτασης με DM του δείγματος KR_Cen.layer. Στις μικροφωτογραφίες (α) και (β) διακρίνονται στο δείγμα αδρανή υλικά γκρι και ερυθρού χρώματος. Επίσης, παρατηρείται άφθονη σκόνη κεραμικού ομοιόμορφα κατανεμημένη. Το μήκος των κόκκων τους φθάνει τα 1,03 mm (Εικόνα 4.9αβ). Από τη διάμετρο των αδρανών εκτιμάται ότι το δείγμα αντιστοιχεί στο στρώμα (nucleus) του ψηφιδωτού δαπέδου.



X100 **X150**

(α) (β)

Εικόνα 4.9: Άποψη της επιφάνειας του δείγματος KR_Cen.layer στο μικροσκόπιο DM. Στις εξεταζόμενες περιοχές (α) και (β), εντοπίστηκαν κοκκινωπά και γκρι αδρανή υλικά, το μήκος των οποίων φθάνει τα 1,03 mm.



X100 **X150**

(α) (β)

Εικόνα 4.10: Άποψη της επιφάνειας του δείγματος KR_Cor.layer στο μικροσκόπιο DM. Στις εξεταζόμενες περιοχές (α) και (β), εντοπίστηκαν αδρανή υλικά υπόλευκου χρώματος, το μήκος φθάνει τα 2,14 mm.

Στο δείγμα KR_Cor.layer, τα αδρανή υλικά που διακρίνονται έχουν γκρι και υπόλευκο χρώμα. Το μήκος των κόκκων τους μετρήθηκε με επεξεργασία της εικόνας και βρέθηκε να κυμαίνεται μέχρι τα 2,14 mm (Εικόνα 4.10αβ). Παρατηρείται, επίσης και σε αυτό το δείγμα, σκόνη κεραμικού, η οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην ασβεστιτική μήτρα.

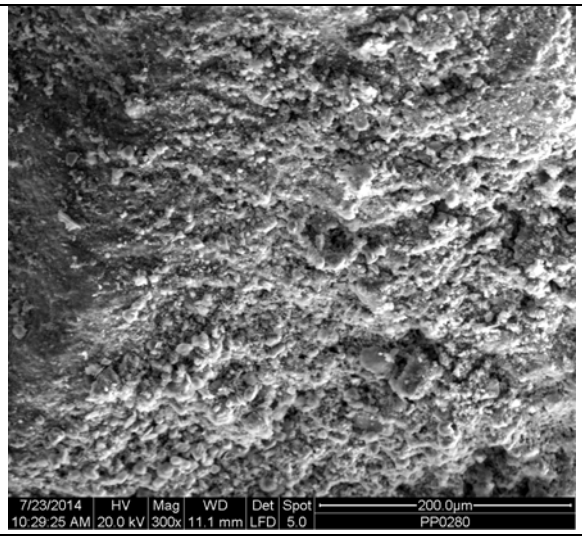
4.3.4 Μελέτη των δειγμάτων με Ηλεκτρονιακό Μικροσκόπιο Σάρωσης-Μικροαναλυτή (SEM-EDX)

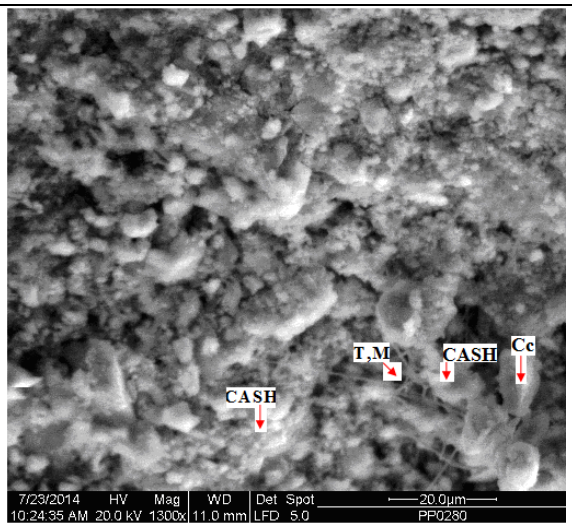
Η μελέτη της μικροδομής των δοκιμίων KR_Cen.layer και KR_ Cor.layer, που λήφθηκαν από το κονίαμα στο υπόστρωμα του ψηφιδωτού στην Κρήνη Καλλιρρόης, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ηλεκτρονιακού μικροσκοπίου σάρωσης. Στην εξεταζόμενη επιφάνεια ή σε επιλεγμένα σημεία της έγινε στοιχειακή χημική ανάλυση,

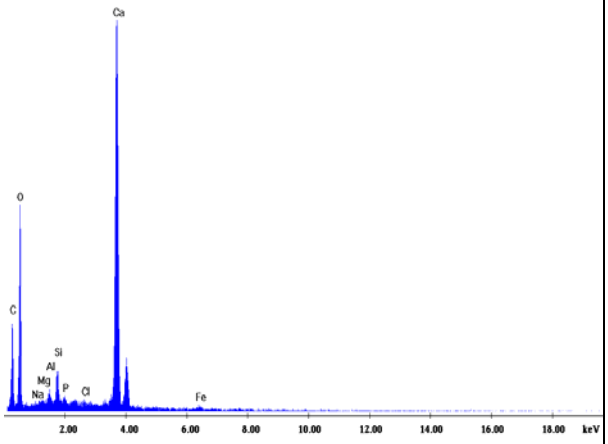
με τον ενσωματωμένο στο όργανο μικροαναλυτή EDX, με στόχο να διαπιστωθεί η σύσταση των υλικών.

Στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζονται τρεις αντιπροσωπευτικές μικροφωτογραφίες από τη μελέτη του δείγματος KR_Cor.layer με SEM. Στον ενσωματωμένο πίνακα δίνεται η στοιχειακή χημική ανάλυση για τις επιφάνειες (α) και (β) αντίστοιχα και για το σημείο όπου δείχνει το βέλος (NaCl) πάνω αριστερά στη φωτογραφία (γ). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εκφράζονται, επίσης και, με την μορφή των οξειδίων των στοιχείων.

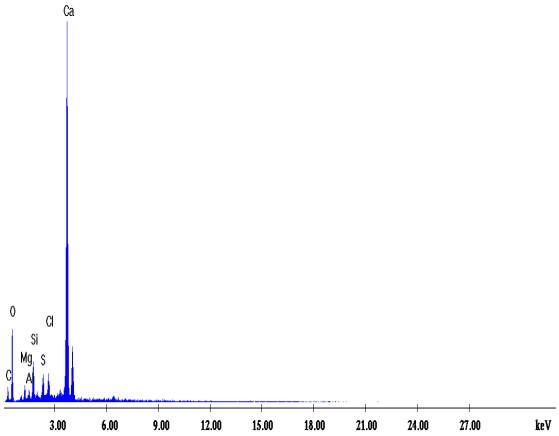
Στην Εικόνα 4.11α παρουσιάζεται η μορφολογία των προϊόντων ενυδάτωσης του κονιάματος. Παρατηρούνται κρύσταλλοι ασβεστίτη διασκορπισμένοι μέσα σε ένυδρες ασβεστο-αργιλοπυριτικές ενώσεις (CASH). Η λεπτομερής μικροδομή των προϊόντων αυτών φαίνεται με μεγαλύτερη μεγέθυνση στην Εικόνα 4.11β.



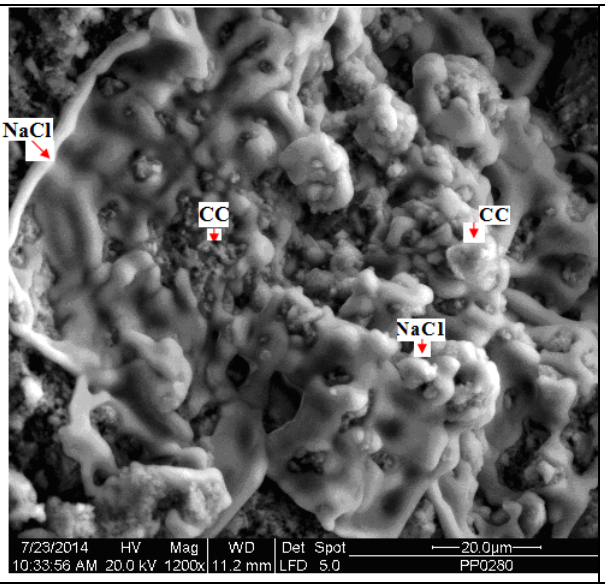


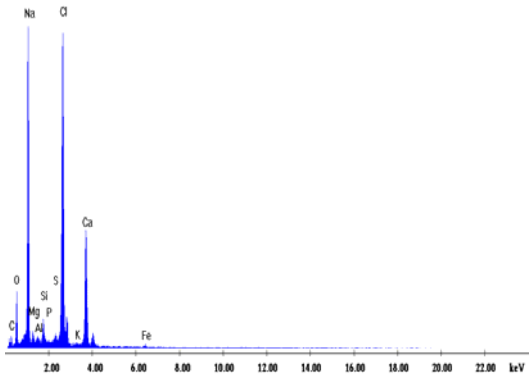


(α)



(β)





(γ)

Στοιχεία		**C**	**O**	**Na**	**Mg**	**Al**	**Si**	**S**	**P**	**Cl**	**K**	**Ca**	**Fe**
% W/W	**(α)**	8,06	41,33	1,13	1,45	1,34	3,91	2,79	0,58	1,51	1,03	35,10	1,78
	(β)	4,87	37,12	-	1,40	0,70	3,18	1,85	-	2,04	-	48,84	-
	(γ)	7,77	16,91	28,31	0,95	0,38	1,71	0,73	0,07	27,54	0,25	14,91	0,46
Οξείδια		**CO_2**	**Υπ. O_2**	**Na_2O**	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**SO_3**	**PO_3**	**Cl**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% W/W	**(α)**	29,55	-7,27	1,52	2,40	2,53	8,38	6,98	1.48	1,51	1,24	49,14	2,54
	(β)	17.86	-3.36	-	2.32	1.32	6.81	4.63	-	2.04	-	68.38	-
	(γ)	28,49	-23,99	38,16	1,58	0,72	3,66	1,83	0,18	27,54	0,30	20,87	0,66

*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

Εικόνα 4.11: Μικροφωτογραφίες από τη μελέτη του δείγματος KR_Cor.layer με SEM-EDX, με τη στοιχειακή ανάλυση στις επιφάνειες (α) και (β) παρατηρούνται κρύσταλλοι ασβεστίτη διασκορπισμένοι μέσα σε ένυδρες ασβεστο-αργιλοπυριτικές ενώσεις (CASH). Στην εξεταζόμενη επιφάνεια (γ) παρατηρείται μεγάλη συσσώρευση κρυστάλλων χλωριούχου νατρίου (NaCl) πάνω στα προϊόντα ενυδάτωσης. Στον πίνακα που ακολουθεί εκφράζονται με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων.

Στις περιοχές σχηματισμού CASH παρατηρούνται βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη (T) και του μονοχλωριούχου άλατος των ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων (M) του τύπου: $3CaO.Al_2O_3.CaCl.12H_2O$. Η παρουσία του άλατος αυτού είναι αποτέλεσμα της επίδρασης των χλωριόντων (Cl^-) δεδομένου ότι η περιεκτικότητα των τους είναι αυξημένη, όπως φαίνεται από τη χημική ανάλυση (EDX) στην επιφάνεια της εικόνας (β). Σε άλλο σημείο του δοκιμίου του ίδιου δείγματος (KR_Cor.layer) του κονιάματος παρατηρήθηκε μεγάλη συσσώρευση κρυστάλλων χλωριούχου νατρίου (NaCl) πάνω στα προϊόντα ενυδάτωσης, όπως φαίνεται στη Εικόνα 4.11γ. Η σημειακή χημική ανάλυση με EDX, (Πίνακας 4.11γ) έδειξε ότι συγκέντρωση των στοιχείων Na και Cl είναι 28,31 % και 27,54 %, αντίστοιχα. Η μεγάλη περιεκτικότητα των στοιχείων αυτών, όπως επίσης και η παρουσία των στοιχείων S και P αποδίδεται σε επικαλύψεις αλάτων από ρύπους, οι οποίες έχουν προκαλέσει στο κονίαμα εκτεταμένη διάβρωση.

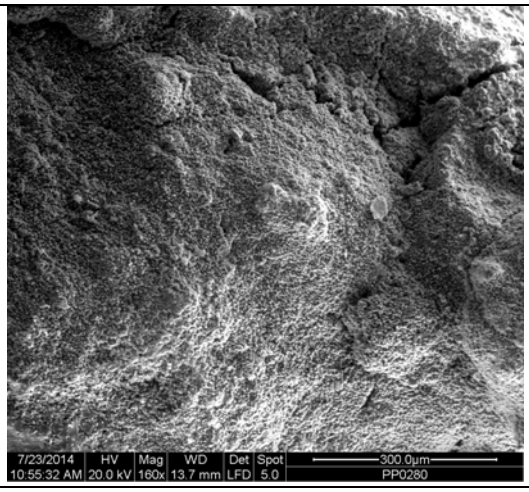
Τέλος, από τις περιεκτικότητες των στοιχείων εκφρασμένες σε οξείδια του Πίνακα 4.11α υπολογίζονται ενδεικτικά οι δείκτες υδραυλικότητας που βρέθηκαν (CI)=0,53 και

(HI)=0,26, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.2.3. Από τις τιμές των δεικτών αυτών εκτιμάται ότι η συνδετική κονία που χρησιμοποιήθηκε για το κονίαμα αυτό χαρακτηρίζεται οριακά υδραυλική.

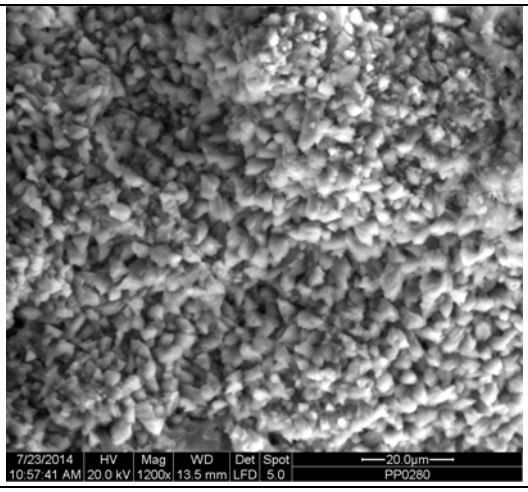
Στην Εικόνα 4.12α,β παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικές μικροφωτογραφίες από τη μελέτη του δείγματος KR_Cen.layer με SEM. Στον ενσωματωμένο πίνακα δίνεται η στοιχειακή χημική ανάλυση (EDX), εκφρασμένη και στα αντίστοιχα οξείδια, για την επιφάνεια της (α).

Στην φωτογραφία SEM της Εικόνας 4.12α φαίνεται η μορφολογία του κονιάματος, με την στοιχειακή χημική ανάλυση (EDX) στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Όπως εκτιμάται από τον προσδιορισμό των στοιχείων και τη μετατροπή τους στα αντίστοιχα οξείδια, η επιφάνεια του δοκιμίου που εξετάζεται, καλύπτεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της από ασβεστίτη ($CaCO_3$). Η φωτογραφία (β) εστιάζεται, με μεγαλύτερη μεγέθυνση, στην περιοχή αυτή, όπου φαίνεται καθαρά η μικροδομή των κρυστάλλων του ασβεστίτη. Επίσης, παρατηρούνται μερικές μικρορωγμές στην επιφάνεια του δοκιμίου.

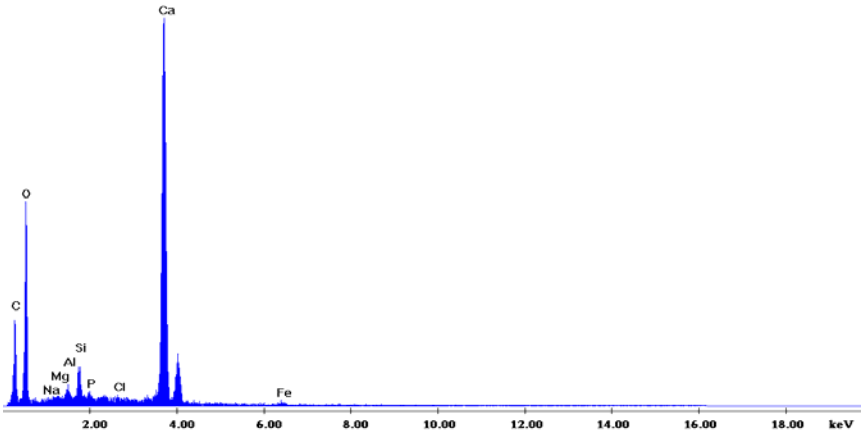
Ακόμη από τις περιεκτικότητες των στοιχείων εκφρασμένες σε οξείδια του Πίνακα 4.12α υπολογίζονται ενδεικτικά οι δείκτες υδραυλικότητας (CI)= και (HI)= που βρέθηκαν 0,53 και 0,26, αντίστοιχα. Από τις τιμές των δεικτών αυτών εκτιμάται ότι η συνδετική κονία που χρησιμοποιήθηκε για το κονίαμα KR_Cen.layer είναι οριακά υδραυλική.



(α)

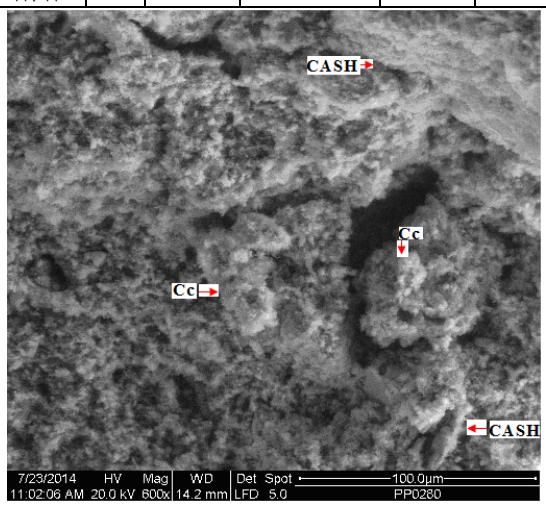


(β)

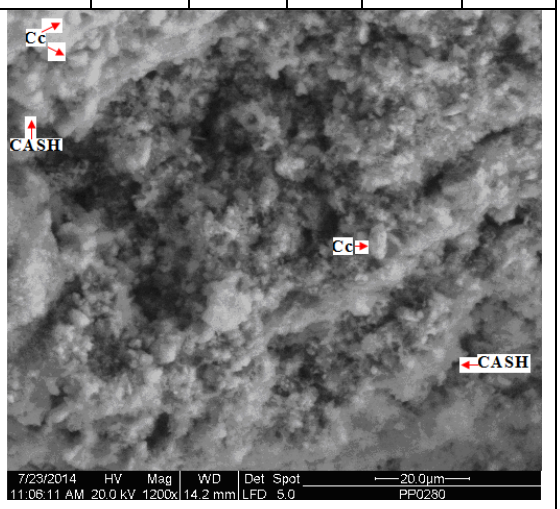


(α)

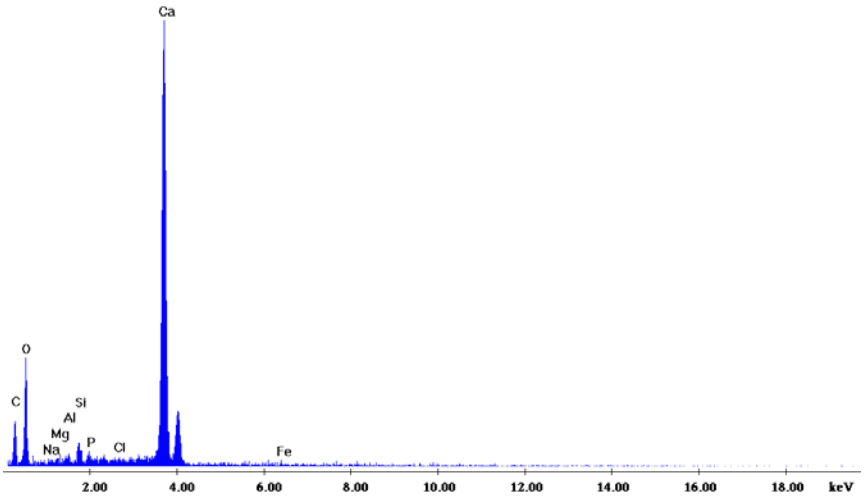
Στοιχεία		C	O	Na	Mg	Al	Si	P	Cl	Ca	Fe
% W/W	(α)	14,06	47,14	0,63	0,79	0,89	2,00	0.65	0.49	32,44	0.91
Οξείδια		**CO_2**	**Υπ. O_2**	**Na_2O**	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**PO_3**	**Cl**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% W/W	(α)	51,55	-8,54	0,85	1,31	1,68	4,29	1,66	0.49	45,42	1,30



(γ)



(δ)



(γ)

Στοιχεία		C	O	Na	Mg	Al	Si	P	Cl	Ca	Fe
% W/W	(γ)	9,55	38,89	0,51	0,57	0,60	1,43	0.52	0.39	46.89	0.66
Οξείδια		**CO_2**	**Υπ. O_2**	**Na_2O**	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**PO_3**	**Cl**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% W/W	(γ)	35,02	-9,14	0,69	0,95	1,13	3,06	1,32	0.39	65,65	0,94

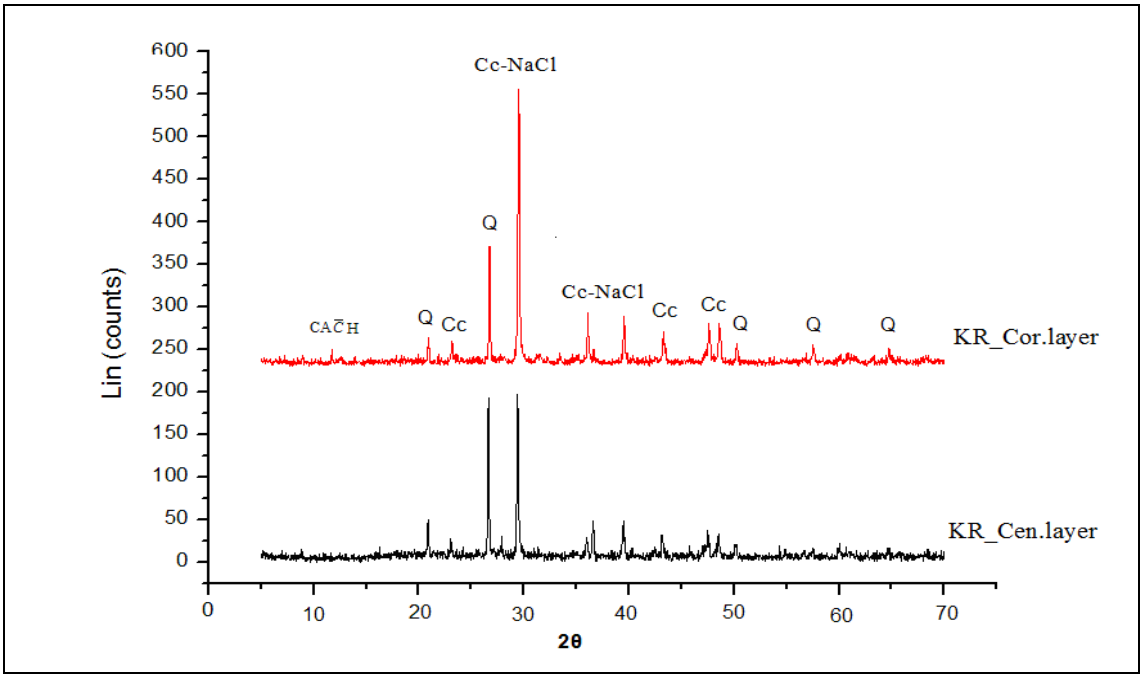
*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

Εικόνα 4.12: Μικροφωτογραφίες από τη μελέτη του δείγματος KR_Cen.layer με SEM-EDX, από τη στοιχειακή ανάλυση η επιφάνεια (α) και (β) καλύπτεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της από ασβεστίτη ($CaCO_3$). Στις περιοχές εξέτασης (γ) και (δ) εμφανίζονται πλακοειδείς κρύσταλλοι ένυδρων ασβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (CASH) πάνω και μεταξύ των οποίων βρίσκονται κρύσταλλοι ασβεστίτη (Cc). Στον πίνακα που ακολουθεί τις εικόνες (α) και (γ) εκφράζονται με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων.

Στην φωτογραφία SEM της Εικόνας 4.12α φαίνεται η μορφολογία του κονιάματος, με την στοιχειακή χημική ανάλυση (EDX) στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Όπως εκτιμάται από τον προσδιορισμό των στοιχείων και τη μετατροπή τους στα αντίστοιχα οξείδια, η επιφάνεια του δοκιμίου που εξετάζεται, καλύπτεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της από ασβεστίτη ($CaCO_3$). Η φωτογραφία (β) εστιάζεται, με μεγαλύτερη μεγέθυνση, στην περιοχή αυτή, όπου φαίνεται καθαρά η μικροδομή των κρυστάλλων του ασβεστίτη. Επίσης, παρατηρούνται μερικές μικρορωγμές στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ακόμη από τις περιεκτικότητες των στοιχείων εκφρασμένες σε οξείδια του Πίνακα 4.12α υπολογίζονται ενδεικτικά οι δείκτες υδραυλικότητας (CI)= και (HI)= που βρέθηκαν 0,53 και 0,26, αντίστοιχα. Από τις τιμές των δεικτών αυτών εκτιμάται ότι η συνδετική κονία που χρησιμοποιήθηκε για το κονίαμα KR_Cen.layer είναι οριακά υδραυλική.
Στη φωτογραφία (β) της Εικόνας 4.12 παρουσιάζεται μια άλλη άποψη της μορφολογίας του κονιάματος στο δοκίμιο. Η μικροδομή τους παρατηρείται καθαρότερα στην φωτογραφία (δ), με μεγαλύτερη μεγέθυνση. Εμφανίζονται πλακοειδείς κρύσταλλοι ένυδρων ασβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (CASH) πάνω και μεταξύ των οποίων βρίσκονται κρύσταλλοι ασβεστίτη (Cc). Κρύσταλλοι ασβεστίτη υπάρχουν, επίσης, διάσπαρτοι στην επιφάνεια.

4.3.5 Μελέτη με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

Η μελέτη με περίθλαση ακτίνων Χ χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση των κρυσταλλικών ενώσεων και την ταυτοποίηση των ορυκτολογικών συστατικών του κονιάματος. Στην Εικόνα 4.13 παρουσιάζονται τα ακτινογραφήματα που λήφθηκαν από τη εξέταση των δειγμάτων.



Εικόνα 4.13: Ακτινογραφήματα XRD από την εξέταση των δειγμάτων KR_Cor.layer, KR_Cen.layer. Οι κορυφές που παρουσιάζονται στο ακτινογράφημα αντιστοιχούν σε ασβεστίτη (Cc), χαλαζία (Q), τομασίτη (CA$\overline{C}$H), χλωριούχο νάτριο (NaCl).

Οι προσδιορισμοί εκτελέσθηκαν σε κονιοποιημένα δείγματα από τα αρχικά δοκίμια KR_Cor.layer και KR_Cen.layer που λήφθηκαν από το υπόστρωμα του ψηφιδωτού. Οι συνθήκες του οργάνου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιες με εκείνες που αναφέρονται στην παράγραφο 1.3.2.4.
Τα κρυσταλλικά συστατικά που προσδιορίστηκαν από τη μελέτη των ακτινογραφημάτων XRD αναφέρονται στον Πίνακα 4.2 και αφορούν στην ποιοτική ορυκτολογική σύσταση των κονιαμάτων.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα από τη μελέτη των ακτινογραφημάτων XRD.

Δείγμα	**Σύσταση**
KR_Cor.layer	Ασβεστίτης (Calcite, Cc, $CaCO_3$), Χαλαζίας (α-Quartz, Q, SiO_2), Τομασίτης (Taumasite, $Ca_3Si(OH)_6(CO_3)(SO_4)\cdot 12H_2O$, $CA\overline{C}H$), Χλωριούχο Νάτριο (NaCl).
KR_Cen.layer	Ασβεστίτης (Cc), Χαλαζίας (Q), Τομασίτης ($CA\overline{C}H$),

Η περαιτέρω μελέτη των εντάσεων των κορυφών που παρουσιάζονται στα διαγράμματα XRD, μπορεί να οδηγήσει σε μια ημιποσοτική εκτίμηση της παρουσίας των ορυκτολογικών συστατικών που προσδιορίστηκαν. Έτσι, σύμφωνα με τις εντάσεις των κορυφών που παρατηρούνται στα ακτινογραφήματα, εκτιμάται ότι το συστατικό που κυριαρχεί και στα δύο κονιάματα είναι ο ασβεστίτης. Ο παρουσία του ασβεστίτη αποδίδεται, κυρίως, στην κονία ($Ca(OH)_2$) του κονιάματος και στη διαχρονική ενανθράκωση της υδρασβέστου ($Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$). Ενώ, ένα μέρος του μπορεί να προέρχεται από αδρανή ασβεστολιθικής σύστασης.
Επίσης, ως δευτερεύουσα ορυκτολογική φάση παρατηρείται ο χαλαζίας και στα δύο κονιάματα. Η παρουσία του χαλαζία οφείλεται στην πυριτία (SiO_2) που περιεχόταν στα κεραμικά κλάσματα ή/και στην άμμο και δεν έχει αντιδράσει με την υδράσβεστο. Στο κονίαμα του δείγματος KR_Cor.layer η ένταση των κορυφών του ασβεστίτη εμφανίζεται αυξημένη γιατί συμπίπτουν με τις κορυφές του NaCl [27].
Στο κονίαμα του δείγματος KR_Cen.layer ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας εμφανίζονται ως κύρια συστατικά, ενώ, παρατηρείται και σε μικρά ποσοστά η παρουσία τομασίτη. Ο χαλαζίας οφείλεται στα κεραμικά κλάσματα ή και στην άμμο στο κονίαμα. Όμως, η παρουσία του τομασίτη αποδίδεται στην αντίδραση των ένυδρων ασβεσταργιλικών και ασβεστοπυριτικών ενώσεων που σχηματίστηκαν κατά την ενυδάτωση του κονιάματος με CO_2.

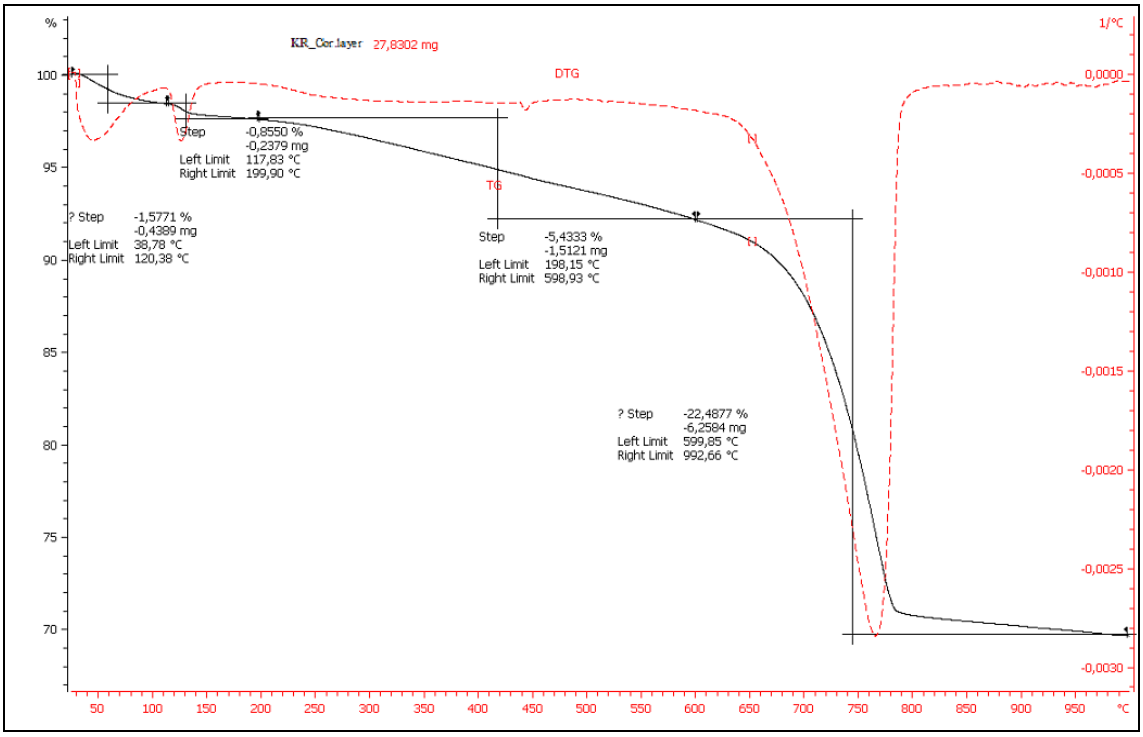
4.3.6 Μελέτη με Θερμική Ανάλυση (TG-DTG)

Η μελέτη με την τεχνική της θερμικής ανάλυσης αποσκοπεί στον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των διαφόρων συστατικών των κονιαμάτων και την ανίχνευση ενδεχόμενων προϊόντων φθοράς. Επίσης, στον υπολογισμό του κρυσταλλικού και χημικά ενωμένου νερού, το οποίο αντανακλά τον υδραυλικό χαρακτήρα των κονιαμάτων. Για τις μετρήσεις ακολουθήθηκε η συσκευή και η διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 1.3.2.5.

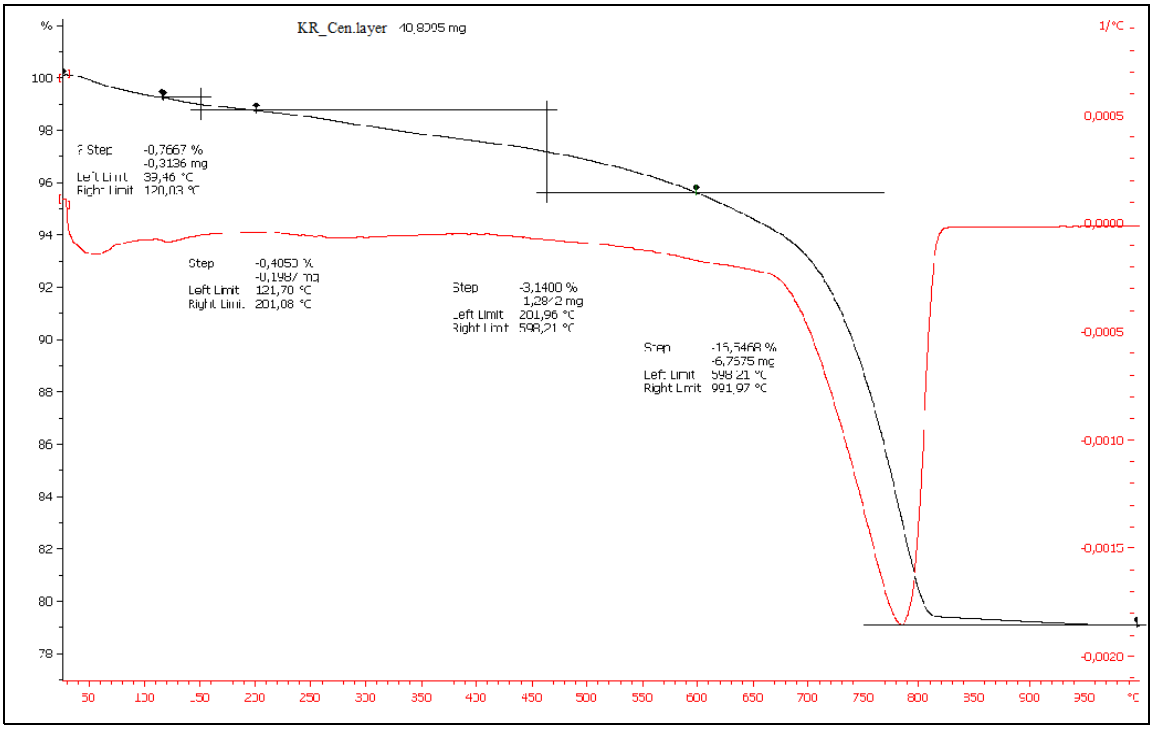
Το ενδιαφέρον των μετρήσεων εστιάστηκε στις θερμοκρασιακές περιοχές του διαγράμματος της θερμικής καμπύλης TGA κάτω από 120 °C, μεταξύ 120-200 °C, μεταξύ 200-600 °C και άνω των 600 °C, όπου παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα κονιάματα. Συγκεκριμένα, η απώλεια βάρους σε θερμοκρασία κάτω από 120 °C οφείλεται στην απώλεια κρυσταλλικού νερού κυρίως της γύψου, μεταξύ 120-200 °C συνδέεται με την απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού, ένυδρες ενώσεις, ενώ η απώλεια του χημικά δεσμευμένου νερού εμφανίζεται κυρίως μεταξύ 200-600 °C. Τέλος, από το λόγο της απώλειας βάρους του χημικά δεσμευμένου H_2O (200-600 °C) και του CO_2 που προέρχεται από τη διάσπαση του $CaCO_3$ (>600 °C) μπορεί να υπολογιστεί η υδραυλικότητα του κονιάματος, που ορίζεται ως αντιστρόφως ανάλογη του λόγου CO_2/χημικά δεσμευμένο νερό [28].

Στις Εικόνες 4.14 και 4.15 παρουσιάζονται τα θερμοδιαγράμματα TG-DTG για τα δείγματα KR_Cor.layer και KR_Cen.layer, αντίστοιχα. Στο θερμοδιάγραμμα DTG του δείγματος KR_Cor.layer παρατηρούνται τρεις κορυφές πάνω από τους 100 °C. Η πρώτη στους 133 °C αποδίδεται σε ένυδρες ασβεσταργιλικές ενώσεις που έχουν προσβληθεί από CO_2 (τομασίτης, $CA\overline{C}H$). Η δεύτερη μικρή κορυφή στους 457 °C είναι ενδεικτική της διάσπασης των ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων (CAH). Τέλος, η τρίτη κορυφή στους 766 °C είναι χαρακτηριστική της διάσπασης του $CaCO_3$.

Στο θερμοδιάγραμμα DTG του δείγματος KR_Cen.layer παρατηρούνται οι ίδιες κορυφές που αναφέρθηκαν παραπάνω για το δείγμα KR_Cor.layer, αλλά με πολύ μικρότερη ένταση.



Εικόνα 4.14: Θερμοδιάγραμμα DTG-TG από την εξέταση του δείγματος KR_Cor.layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό εύρος.



Εικόνα 4.15: Θερμοδιάγραμμα DTG-TG από την εξέταση του δείγματος KR_Cen.layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό εύρος.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της % απώλειας βάρους ανά θερμοκρασιακό εύρος, που υπολογίστηκαν από την καμπύλη TG, για τα δείγματα KR_Cor.layer, KR_Cen.layer, αντίστοιχα. Επίσης, αναφέρεται ο λόγος CO_2/χημικά δεσμευμένου νερού, που υπολογίζεται από την απώλεια βάρους στα θερμοκρασιακά διαστήματα >600°C και 200-600°C, αντιστοίχως.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα της θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης των κονιαμάτων KR_Cor.layer και KR_Cen.layer.

Δείγματα	**(%) Απώλεια βάρους για κάθε θερμοκρασιακή περιοχή (°C)**				**CO_2/H_2O**
	<120	**120-200**	**200-600**	**>600**	
	(%)				
KR_Cor.layer	1.58	0.86	5.43	22.49	4.14
KR_Cen.layer	0.77	0.49	3.14	16.55	5.26

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.3 παρατηρείται ότι η απώλεια βάρους στο θερμοκρασιακό εύρος από 120-200 °C, που αποδίδεται στο κρυσταλλικό νερό των ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων, CAH, είναι μεγαλύτερη για το δείγμα KR_Cor.layer, αλλά και στα δύο δείγματα είναι μικρότερη από 1 %. Στο θερμοκρασιακό εύρος 200-600 °C, παρατηρείται ότι η απώλεια βάρους για τα δείγματα KR_Cor.layer και KR_Cen.layer είναι 5,43 και 3,14, αντίστοιχα. Η απώλεια βάρους στην περιοχή αυτή αποδίδεται στο νερό των ένυδρων ασβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (CASH) η

παρουσία των οποίων αποτελεί μια ένδειξη προέλευσης τους από ποζολανική δράση. Η απώλεια αυτή παρατηρείται σημαντικά μεγαλύτερη στο δείγμα KR_Cor.layer.
Στο θερμοκρασιακό εύρος από 600-1000 °C, υπάρχει μια απότομη μεταβολή στην κλίση της καμπύλης TG, που οφείλεται στην χαρακτηριστική DTG κορυφή στους 763 °C, που αντιστοιχεί στη διάσπαση του ασβεστίτη ($CaCO_3$). Από τις απώλειες βάρους του Πίνακα 4.3, στη θερμοκρασιακή αυτή περιοχή και την αντίδραση διάσπασης του $CaCO_3$ υπολογίζεται η περιεκτικότητα του ασβεστίτη και το ισοδύναμο ποσοστό υδρασβέστου ($Ca(OH)_2$) από το οποίο προήλθε για τα δείγματα KR_Cor.layer και KR_Cen.layer (Πίνακας 4.4). είναι 51,11 % και 37,59 **%**, αντίστοιχα. Η ολική απώλεια πύρωσης (L.O.I) από τους 25 -1000 °C είναι για το δείγμα KR_Cor.layer 30,33% και για το KR_Cen.layer 19,10%.

Πίνακας 4.4: Υπολογιζόμενη περιεκτικότητα $CaCO_3$ και ισοδύναμου $Ca(OH)_2$ για τα κονιάματα που εξετάστηκαν.

Στρώμα Κονιάματος	**$CaCO_3$ (%)**	**Ισοδύναμο $Ca(OH)_2$ (%)**
KR_Cor.layer (nucleus)	51,12	37,78
KR_Cen.layer (supra nucleus)	37,62	27,80

Από το ποσοστό της ισοδύναμης υδρασβέστου του Πίνακα 4.4 εκτιμάται ότι η αναλογία υδρασβέστου/ποζολανικά υλικά είναι 1/1,5 για το δείγμα KR_Cor.layer και 1/2,5 για το δείγμα KR_Cen.layer.
Τέλος, από την απώλεια βάρους (%) στις θερμοκρασιακές περιοχές 200-600 °C και > 600 °C, αντίστοιχα, προσδιορίζεται ο λόγος CO_2/H_2O, που παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την υδραυλική φύση της κονίας. Συγκεκριμένα, αυτός ο λόγος σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα, με την υδραυλικότητα του κονιάματος. Με βάση τους λόγους υδραυλικότητας που υπολογίστηκαν (Πίνακας 4.3), όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.3.2.5, εκτιμάται ότι τα δείγματα και των δύο στρωμάτων της υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου στην Κρήνη Καλλιρρόης στην Πνύκα συνίστανται από υδραυλικά κονιάματα με φυσική ποζολάνη. Το δείγμα KR_Cor.layer παρουσιάζει μεγαλύτερη υδραυλικότητα από το δείγμα KR_Cen.layer. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι στο δείγμα περιλαμβάνεται μέρος του στρώματος ψηφοθέτησης (supra nucleus) το οποίο παρουσιάζει λεπτότερη κατανομή των υλικών σύνθεσης του κονιάματος και υψηλότερο ποσοστό ασβέστου. Η λεπτότερη κατανομή των κόκκων και η υψηλότερη περιεκτικότητα υδρασβέστου, ευνοεί την πλαστικότητα (εργασιμότητα) του κονιάματος και διευκολύνει την πορεία των ποζολανικών δράσεων.

4.4 Συμπεράσματα από τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου της Κρήνης Καλλιρρόης στην Πνύκα

Η διερεύνηση του ψηφιδωτού δαπέδου στην Κρήνη Καλλιρρόης πραγματοποιήθηκε, αρχικά επί τόπου, με τη χρήση της NDT τεχνικής Μικροσεισμικών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση. Ακολούθησε συνδυαστική προσέγγιση με τη χρήση των μεθόδων DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG για τη μελέτη της σύνθεσης των κονιαμάτων

υποδομής. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Η μέθοδος SASW - Impact Echo που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην παρούσα εργασία, έδειξε ότι είναι μια δυναμική τεχνική που μπορεί να αποτυπώσει πληροφορίες σχετιζόμενες με την κατασκευαστική δομή του υποστρώματος του ψηφιδωτού δαπέδου. Η αξιοποίησή της, μπορεί να αποτελέσει ένα συμπληρωματικό ισχυρό εργαλείο στην αποτύπωση της κατάστασης αρχαίων κατασκευών. Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την εφαρμογή της παρούσας τεχνικής στο ψηφιδωτό δάπεδο συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Διαπιστώθηκε ότι η στρωματογραφία του ψηφιδωτού δαπέδου συνίσταται από δύο επάλληλα στρώματα με εντελώς διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, πάχους 5 cm το καθένα. Το πρώτο φορά στο κονίαμα του ψηφιδωτού που εξετάστηκε και το δεύτερο σχετίζεται με τις κεραμικές πλάκες της υποδομής.
- Εντοπίστηκαν αποσαθρωμένες περιοχές και δομικές ανωμαλίες κατά μήκος του βράχου, απέναντι από τη είσοδο (σημείο λήψης δείγματος KR_Cor.layer).
- Ανιχνεύθηκαν ασυνέχειες κοντά στο όριο της επιφάνειας, που είναι ενδεικτικό της ύπαρξης εσωτερικών ρωγμών.

Από την εξέταση των δειγμάτων, τα οποίο ελήφθησαν από το κονίαμα υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου της Κρήνης, με DM, καταγράφονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Στο δείγμα KR_Cen.layer, τα αδρανή υλικά που διακρίνονται παρουσιάζουν γκρι και ερυθρά απόχρωση. Το μήκος των κόκκων τους, που μετρήθηκε με επεξεργασία της εικόνας, ποικίλει φθάνοντας τα 1,03 mm.
- Στο δείγμα KR_Cor.layer, τα αδρανή υλικά που διακρίνονται έχουν γκρι και υπόλευκο χρώμα, με το μήκος των κόκκων τους να κυμαίνεται μέχρι τα 2,14 mm.
- Από τη διάμετρο των κόκκων των αδρανών εκτιμάται ότι τα δείγματα αντιστοιχούν στο στρώμα (nucleus) του ψηφιδωτού δαπέδου.
- Σε αμφότερα τα δείγματα παρατηρείται λεπτόκοκκη διασπορά άφθονου κεραμικού υλικού ομοιόμορφα κατανεμημένου στην ασβεστιτική μήτρα, που παρέχει σοβαρές ενδείξεις για κονιάματα ασβέστου-ποζολάνης.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από τη μελέτη της μικροδομής των κονιαμάτων με SEM-EDX συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η μικροδομή και στα δύο δοκίμια του κονιάματος συνίστανται από αρκετούς κρυστάλλους ασβεστίτη, οι οποίοι είναι διασκορπισμένοι μέσα σε ένυδρες ασβεστο-αργιλοπυριτικές ενώσεις (CASH).
- Παρατηρούνται βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη (T) και μονοχλωριούχου άλατος των ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων (M) του τύπου: $3CaO.Al_2O_3.CaCl.12H_2O$.

- Υπάρχει έντονη διάβρωση του κονιάματος στην περιοχή του ψηφιδωτού (KR_Cor.layer), κυρίως από χλωριόντα (Cl^-), που εκδηλώνεται με τη συσσώρευση κρυστάλλων χλωριούχου νατρίου (NaCl) πάνω στα προϊόντα ενυδάτωσης, αλλά και την παρουσία των στοιχείων S και P.
- Η συνδετική κονία που χρησιμοποιήθηκε για το κονίαμα χαρακτηρίζεται ως οριακά υδραυλική, όπως προκύπτει από τις τιμές των δεικτών υδραυλικότητας, που υπολογίστηκαν και για τις δύο περιπτώσεις των δοκιμίων.

Η κρυσταλλογραφική μελέτη του κονιάματος με XRD έδειξε την παρουσία των παρακάτω ορυκτολογικών συστατικών:

- Στο δείγμα KR_Cor.layer προσδιορίστηκάν ως κύρια συστατικά ο ασβεστίτης και χαλαζίας, ενώ έντονη είναι η παρουσία τομασίτη, και χλωριούχου νατρίου (NaCl).
- Η παρουσία του NaCl μαρτυρά την έντονη προσβολή του κονιάματος από χλωριόντα (Cl^-).
- Το δείγμα KR_Cen.layer συνίσταται κυρίως από ασβεστίτη ($CaCO_3$), χαλαζία (α-SiO_2) ενώ παρατηρείται και η παρουσία τομασίτη ($CA\overline{C}H$).
- Η παρουσία του τομασίτη αποτελεί ένδειξη ότι έχει λάβει χώρα αντίδραση αργιλοπυριτικών ενώσεων με την υδράσβεστο, δηλαδή, δηλώνουν προϊόντα ποζολανικής δράσης.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG-DTG), οδήγησε στα συμπεράσματα, που συνοψίζονται στα ακόλουθα:

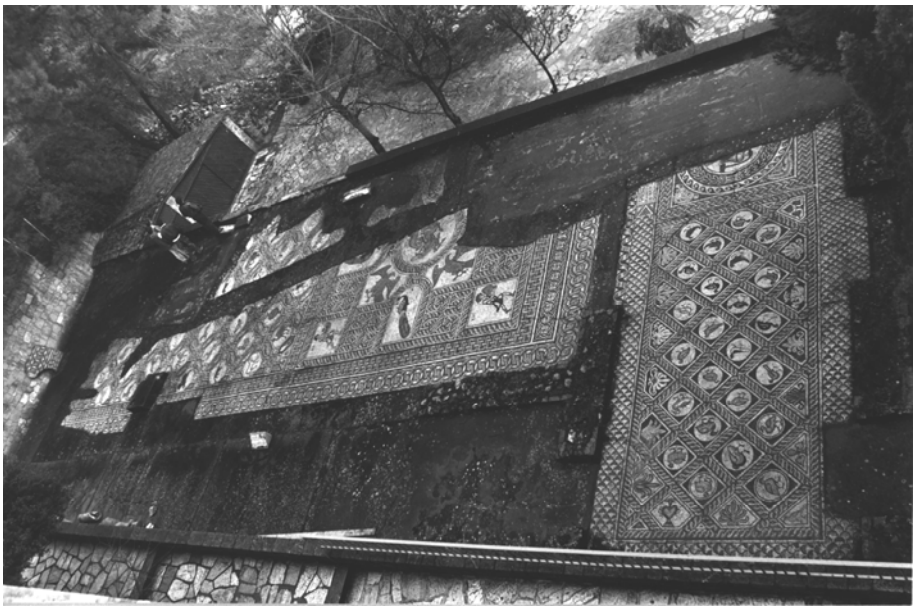
- Προσδιορίστηκε η παρουσία ένυδρων ασβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (CASH) και ένυδρων αλάτων των ασβεσταργιλικών ενώσεων με Cl^-, CO_3^{2-} και SO_4^{2-}.
- Η τιμή του λόγου υδραυλικότητας που υπολογίστηκε για τα δύο δείγματα κονιαμάτων ($Hr_{KR_Cor.layer}$=4,14 και $Hr_{KR_Cen.layer}$=5,26) δείχνει ότι πρόκειται για υδραυλικά κονιάματα που περιέχουν υδράσβεστο με φυσική ποζολάνη.
- Από το ποσοστό της ισοδύναμης υδρασβέστου που υπολογίστηκε εκτιμάται ότι η αναλογία υδρασβέστου/ποζολανικά υλικά είναι 1/1,5 για το δείγμα KR_Cor.layer και 1/2,5 για το δείγμα KR_Cen.layer.

Κεφάλαιο 5

Ψηφιδωτό δάπεδο στο Νέο Μουσείο Δελφών

5.1 Περιγραφικά στοιχεία ψηφιδωτού δαπέδου στο Νέο Μουσείο Δελφών

Το ψηφιδωτό δάπεδο σήμερα εκτίθεται σε εξωτερικό χώρο στο Νέο Μουσείο των Δελφών. Πρόκειται για δάπεδο παλαιοχριστιανικής τρίκλιτης βασιλικής του 5ου αι. μ.Χ., το οποίο βρέθηκε κατά τη διάρκεια σωστικής ανασκαφής στο σύγχρονο οικισμό των Δελφών, το 1959. Κατόπιν αποσπάστηκε και επανατοποθετήθηκε στον αύλειο χώρο του μουσείου, ανατολικά της κεντρικής εισόδου, σε εξωτερικό αστέγαστο χώρο (Εικόνα 5.1). Το 2002 μεταφέρθηκε στο δώμα του κτιρίου IV της επέκτασης του μουσείου [29].



Εικόνα 5.1: Το ψηφιδωτό στη θέση όπου είχε τοποθετηθεί από το 1962 έως το 1996 [29].

Η ψηφιδωτή επιφάνεια είναι 91 m^2 και αποτελείται από το κεντρικό κλίτος και το νάρθηκα, μεταξύ των οποίων μεσολαβεί λίθινος τοίχος καθώς και από ένα τρίτο τμήμα που αντιστοιχεί στο ΒΑ κλίτος της εκκλησίας. Η τυπολογία του ψηφιδωτού δαπέδου ανήκει στον τύπο opus tessellatum [29].

Στο κεντρικό κλίτος τα πλαίσια περιλαμβάνουν κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους, με τη μορφή σηρικών τροχών και πιόσχημο μαίανδρο που τον διαπερνούν δύο ευθείες γραμμές (Εικόνα 5.2α). Το κύριο θέμα περιλαμβάνει δύο διάχωρα, τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με το πλαίσιο του μαιάνδρου και παραστάσεις από ζώα, πτηνά, αγγείο και νεαρό βοσκό. Στο νάρθηκα τα πλαίσια περιλαμβάνουν κυματοειδή ταινία και φολιδωτό κόσμημα το οποίο διακόπτεται από επιγραφή μέσα σε tabula ansata, μπροστά από τη βασίλειο πύλη (Εικόνα 5.2β). Το κύριο θέμα περιλαμβάνει δύο διάχωρα, όπου μέσα σε τετράγωνο χώρο εγγράφονται επάλληλοι κύκλοι οι οποίοι κοσμούνται στην περιφέρεια τους με σπειροειδή μαίανδρο και φυλλοφόρο στεφάνι [1].

(α)

(β)

Εικόνα 5.2: Ψηφιδωτό δάπεδο στο Νέο Μουσείο Δελφών με (α) άποψη του ψηφιδωτού που αντιστοιχεί στο ανατολικό διάχωρο του κεντρικού κλίτους της εκκλησίας και (β) άποψη του ψηφιδωτού που αντιστοιχεί στο νάρθηκα της εκκλησίας (έτος 2013).

5.1.1 Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης

Το 1959 το ψηφιδωτό αποκαλύφθηκε σε σωστική ανασκαφή και μεταφέρθηκε στο Μουσείο Δελφών. Το 1962 επανατοποθετήθηκε στον προαύλιο χώρο του μουσείου, ανατολικά της κεντρικής εισόδου, σε εξωτερικό αστέγαστο χώρο. Κατά την διάρκεια των επεμβάσεων αυτών, τα τεμάχια καθαρίστηκαν από το αρχαίο κονίαμα του υποστρώματος. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν φορητές κατασκευές από τσιμεντοκονίαμα χρώματος γκρι, πάχους 4 cm, ενισχυμένο με μεταλλικό οπλισμό από πλέγμα σιδερένιων ράβδων πάχους περίπου 5 mm. Οι ράβδοι του οπλισμού τοποθετήθηκαν τυχαία. Η τοποθέτηση των ράβδων έγινε σε επιφάνεια η οποία είχε καλυφθεί με πίσσα και συγκρατήθηκαν σε αυτή με αραιό τσιμεντοκονίαμα, το οποίο διοχετεύτηκε μέσα από τα κενά των σειρών των ψηφίδων που είχαν αφαιρεθεί. Το 1996, το ψηφιδωτό αποκολλήθηκε για δεύτερη φορά. Το σύνολο των αποκολλημένων τεμαχίων ήταν 102. Το 2002, το ψηφιδωτό επανατοποθετήθηκε στο δώμα του κτιρίου IV της επέκτασης του μουσείου, επάνω σε ειδικό υπόβαθρο. Το υπόβαθρο κατασκευάστηκε από τούβλα τοποθετημένα και στο εσωτερικό των τούβλων τοποθετήθηκε φελιζόλ και καλύφθηκε με μεταλλικό πλέγμα. Όλη αυτή η διαστρωμάτωση καλύφθηκε με τσιμεντοκονία. Τα τμήματα τοποθετήθηκαν πάνω στην υποδομή και τα κενά συμπληρώθηκαν με κονίαμα. Το πάχος της συνολικής κατασκευής του βάθρου αυτού είναι περίπου 25 cm. Η όλη κατασκευή φέρει εσωτερικά σωλήνες, ανά 1 m, για την απορροή των υδάτων περιμετρικά της βάσης. Τέλος, κατασκευάστηκε αναπαράσταση τοιχίου, το οποίο όριζε τη θεμελιώδη περίμετρο της βασιλικής, όπως είχε γίνει και κατά την πρώτη επανατοποθέτηση του 1959. [29]

5.1.2 Μακροσκοπική παρατήρηση - Κατάσταση διατήρησης

Κατά τη μακροσκοπική παρατήρηση του ψηφιδωτού δαπέδου, εντοπίστηκαν ρηγματώσεις στο νέο κονίαμα καθώς και αποσάθρωση και απώλεια ψηφίδων του παλαιού τσιμεντοκονιάματος (Εικόνα 5.3α,β). Ακόμα, παρατηρήθηκαν εξάρσεις και

καθιζήσεις σπαραγμάτων στο νότιο τμήμα του κεντρικού κλίτους (Εικόνα 5.4) όπως επίσης, στο βόρειο τμήμα του κεντρικού κλίτους, στο τμήμα που φέρει τη μορφή παγωνιού.

(α) (β)

Εικόνα 5.3: (α) Πλέγμα ρωγμών στο νέο κονίαμα συμπλήρωσης. (β) Απώλεια υλικού με ψηφίδες (ετός 2012).

Εικόνα 5.4: Εξάρσεις και καθιζήσεις σπαραγμάτων του στρώματος ψηφοθέτησης, στο κεντρικό κλίτος (έτος 2012).

5.2 Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου του ψηφιδωτού δαπέδου στο Νέο Μουσείο Δελφών

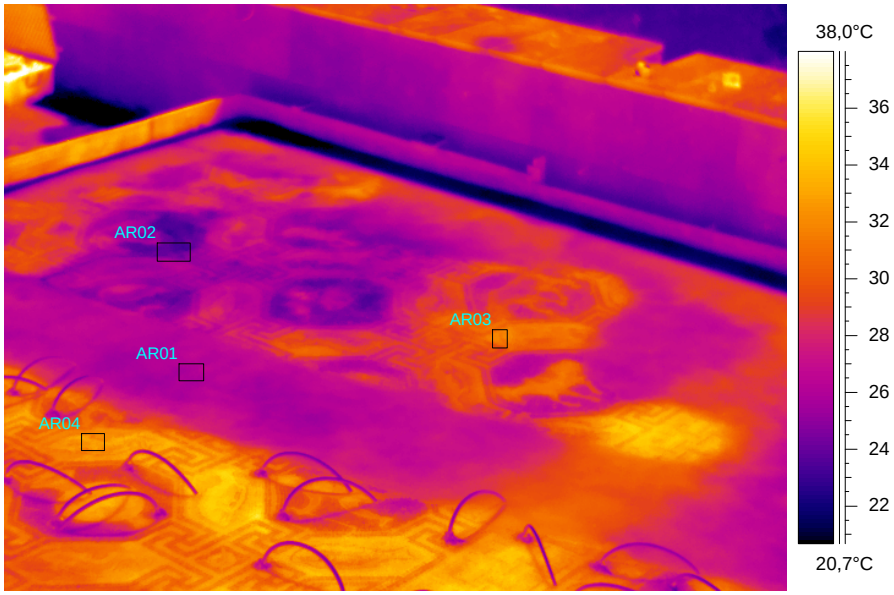
Ο έλεγχος του ψηφιδωτού δαπέδου πραγματοποιήθηκε το 2013 με τη χρήση της μη καταστρεπτικής τεχνικής της Θερμογραφίας Υπερύθρου, ο εξοπλισμός και οι παράμετροι των μετρήσεων αναφέρονται στον Πίνακα Β.1. Η εφαρμογή της τεχνικής του γεωραντάρ δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί λόγω του μεγάλου αριθμού τοποθέτησης σωληνίσκων για την έκχυση ενέματος στερέωσης. Επίσης, η μελέτη και ανάλυση του κονιάματος υποδομής δεν έγινε, γιατί δεν σώζονται δείγματα από το αρχαίο κονίαμα του υποστρώματος.

5.2.1 Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)

Στην Εικόνα 5.5α παρουσιάζεται η περιοχή του ψηφιδωτού που εξετάστηκε, η οποία αντιστοιχεί στο ανατολικό διάχωρο του κεντρικού κλίτους της παλαιοχριστιανικής εκκλησίας. Στην αντίστοιχη θερμική Εικόνα 5.5β, εντοπίστηκαν ψυχρές περιοχές (περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας) κυρίως στο ΒΑ τμήματα του δαπέδου. Παράλληλα κατά εξέταση της συγκεκριμένης περιοχής, επιλέχθηκαν χαρακτηριστικές

περιοχές πάνω στην θερμική εικόνα για την εξαγωγή συμπερασμάτων παρατηρώντας τα δεδομένα θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.1. (η ακριβής θέση των περιοχών ελέγχου μπορούν να φανούν στο αντίστοιχο θερμογράφημα), η μέση φαινόμενη θερμοκρασία στις περιοχές AR01 και AR02 μετρήθηκε να είναι 26.0 °C και 24.3 °C αντίστοιχα, εν αντιθέσει με τις περιοχές AR03 και AR04, όπου η μέση θερμοκρασία μετρήθηκε να είναι 31.2 °C και 32.4 °C αντίστοιχα. Η παραπάνω θερμοκρασιακή διαφορά αποδίδεται στα υψηλά ποσοστά υγρασίας στην περιοχή του δαπέδου που εξετάστηκε. Αυτό, οφείλεται στην κακή λειτουργία των απορροών όμβριων υδάτων στο ΒΑ τμήμα της οροφής του Μουσείου.

(α)



(β)

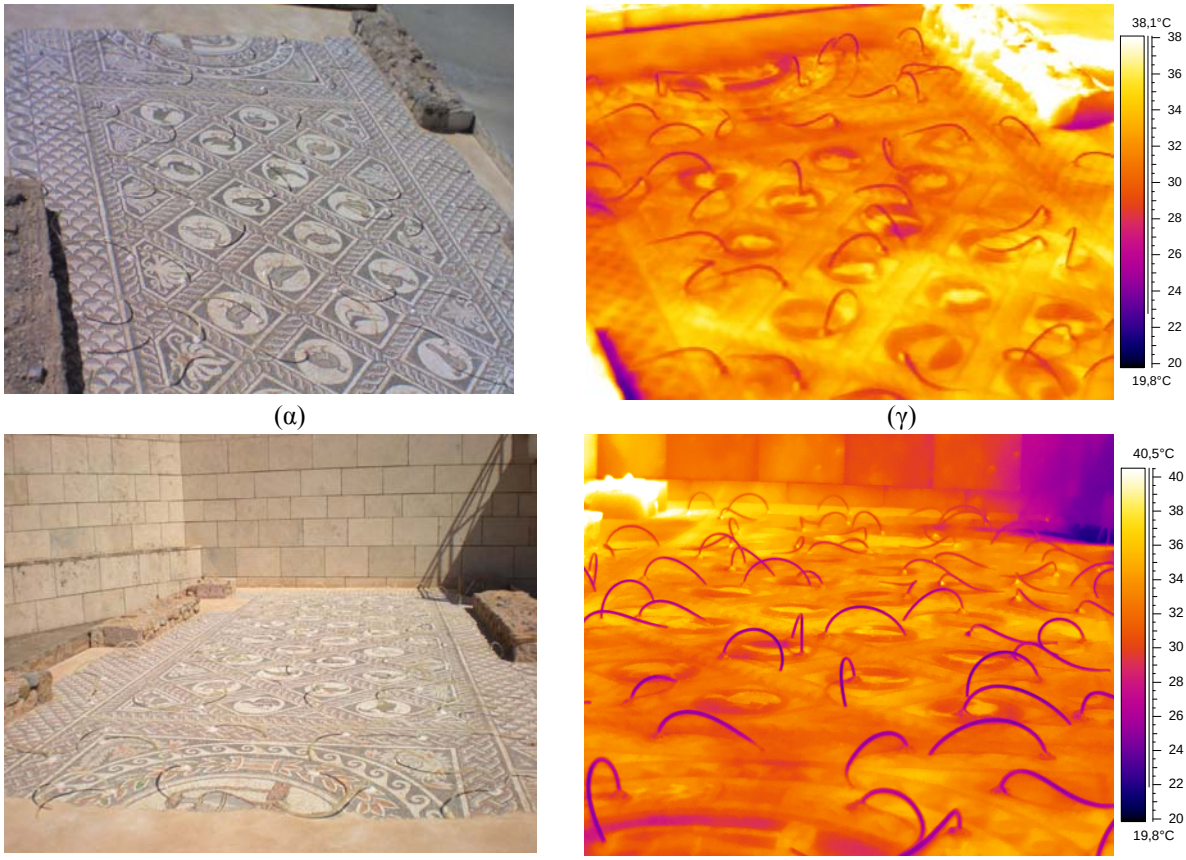
Εικόνα 5.5: Θερμογραφικός έλεγχος της περιοχής του ψηφιδωτού δαπέδου στο ανατολικό διάχωρο με (α) εικόνα της εξεταζόμενης επιφάνειας και (β) αντίστοιχη θερμική εικόνα, η οποία αποκάλυψε την ύπαρξη υγρασίας στο κονίαμα συμπλήρωσης των απωλειών και στην ψηφοθετημένη επιφάνεια.

.

Πίνακας 5.1: Θερμοκρασιακά δεδομένα από τις επιλεγμένες περιοχές εξέτασης στην επιφάνεια του δαπέδου.

Περιοχές ελέγχου	**Min. [°C]**	**Max. [°C]**	**Δ(Max-Min)**	**Μέση τιμή**
AR01	25,6	26,7	1,1	26,0
AR02	23,1	26,2	3,1	24,3
AR03	29,0	32,2	3,2	31,2
AR04	31,3	33,2	1,9	32,4

Η εξέταση του ψηφιδωτού στην περιοχή που αντιστοιχεί στον νάρθηκα της εκκλησίας παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.6α,β. Όπως μπορεί να φανεί από τα αντίστοιχα θερμογραφήματα της Εικόνας 5.6γδ, η περιοχή αυτή, εμφανίζει μεγαλύτερη θερμοκρασιακή ομοιομορφία σε σχέση με την προαναφερθείσα περιοχή του δαπέδου στο ανατολικό κλίτους. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι σε αυτή την περιοχή λειτουργεί το σύστημα απορροής των υδάτων.



Εικόνα 5.6 : Θερμογραφικός έλεγχος του ψηφιδωτού δαπέδου που αντιστοιχεί στον νάρθηκα της εκκλησίας. Στη δεξιά στήλη παρουσιάζονται οι εικόνες των εξεταζόμενων επιφανειών (α) και (β), ενώ στην αριστερή στήλη οι αντίστοιχες θερμικές εικόνες, με (γ) και (δ) να αποκαλύπτουν ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του ψηφιδωτού.

5.3 Συμπεράσματα από τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου στο νέο μουσείο των Δελφών

Από την εξέταση με την τεχνική IRT και τη μελέτη των αντίστοιχων θερμογραφημάτων, προσδιορίστηκε η περιοχή με παραμένουσα υγρασία στο ψηφιδωτό δάπεδο. Από εκτεταμένη παρατήρηση του χώρου της οροφής που είχε τοποθετηθεί το ψηφιδωτό, διαπιστώθηκε ότι υπήρχε πρόβλημα στο σύστημα απορροής των όμβριων υδάτων λόγω της αποκόλλησης των ψηφίδων από το δάπεδο οι οποίες συμπαρασύρονταν με το νερό και απέκλειαν την ομαλή απορροή του. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα λιμνάζοντα νερά να εισχωρούν στην υποδομή του ψηφιδωτού προκαλώντας φθορά στα δομικά του υλικά.

Κεφάλαιο 6

Ψηφιδωτό δάπεδο της ανασκαφής στην οδό Ακάμαντος 24, στο Θησείο

6.1 Περιγραφικά στοιχεία αντικειμένου

Το ψηφιδωτό βρέθηκε το 2010 σε ανασκαφή στην οδό Ακάμαντος 24, στο Θησείο (Εικόνα 6.1α). Σώζεται ακέραιο και φέρει διάφορα γεωμετρικά σχήματα. Το κεντρικό θέμα του απεικονίζει το Γανυμήδη, τη στιγμή που τον αρπάζει ο Δίας με τη μορφή αετού. Στην περιοχή του Θησείου έχουν βρεθεί πολλές παρόμοιες οικίες του τέλους των κλασικών χρόνων (4ος-3ος αι. π.Χ.) που συνεχίζουν να είναι σε χρήση με κάποιες μετασκευές ως τα Ρωμαϊκά χρόνια. Το δωμάτιο, που διατηρεί τους τοίχους του σε χαμηλό ύψος, χρονολογείται κατά πάσα πιθανότητα στο 2ο αι. μ.Χ., όμως, οι τοιχογραφίες του ήταν κατεστραμμένες. Η πολυτελής εικόνα του δίνει την αίσθηση ότι πρόκειται για επίσημο χώρο υποδοχής, δεδομένου ότι συνήθως τέτοιου είδους ψηφιδωτά τοποθετούνταν σε επίσημους χώρους. Σε ορισμένες περιπτώσεις υπήρχε βοτσαλόστρωση, ενώ, άλλες φορές απλό κονίαμα [30].
Το ψηφιδωτό δάπεδο αποσπάστηκε από τη θέση του, το έτος 2010, προκειμένου να τοποθετηθεί μελλοντικά το Μουσείο της πόλης των Αθηνών, όταν ανεγερθεί στην περιοχή της Ακαδημίας Πλάτωνος (Εικόνα 6.1) [31].

6.2 Ιστορικό επεμβάσεων συντήρησης

Το ψηφιδωτό αποσπάστηκε από την ΕΦΑ Αθηνών, τέως Γ΄ ΕΠΚΑ. Η εργασία της αποκόλλησης έγινε τμηματικά με την αφαίρεση των ενδιάμεσων ψηφίδων [31].

Εικόνα 6.1: Άποψη του ψηφιδωτού δαπέδου στο χώρο της ανασκαφής πρίν την επέμβαση της απόσπασής του το έτος 2010 [30].

6.3 Μεθοδολογία διερεύνησης της ανασκαφής Ακάμαντος στο Θησείο

Τα δείγματα κονιάματος λήφθηκαν από τα στρώματα της υποδομής του ψηφιδωτού της ανασκαφής στην Ακάμαντο στο Θησείο, κατόπιν εγκρίσεως της αρμόδιας υπηρεσίας του ΥΠΠΟΑ, το έτος 2014. Η διερεύνηση του κονιάματος, πραγματοποιήθηκε, στο εργαστήριο με συνδυασμό των τεχνικών DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λήφθηκαν.
Η εφαρμογή των μη καταστρεπτικών τεχνικών της Θερμογραφίας Υπερύθρου και του Γεωραντάρ, δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί στην προκειμένη περίπτωση, επειδή τα τμήματα του ψηφιδωτού είναι αποσπασμένα.

6.3.1 Μακροσκοπική παρατήρηση δειγμάτων

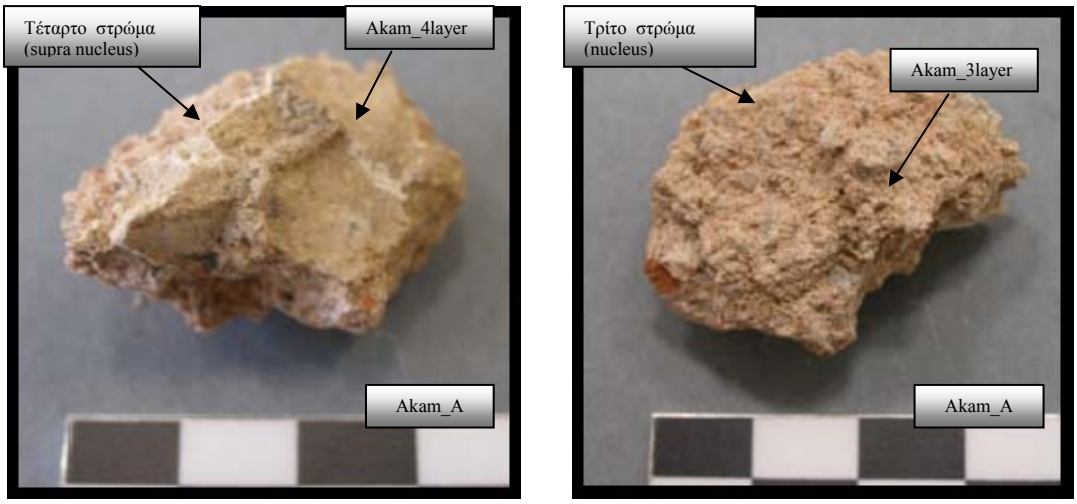
Για την διερεύνηση της τεχνολογίας κατασκευής και των μορφών φθοράς του ψηφιδωτού δαπέδου της οικίας της ανασκαφής Ακάμαντος στο Θησείο, ελήφθησαν δείγματα κονιάματος από το υπόστρωμα, τα οποία είχαν συλλεχθεί κατά τις εργασίες συντήρησης στους χώρους.
Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η ταξινόμηση, με το πρόθεμα Akam, και ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων που λήφθηκαν από το ψηφιδωτό δάπεδο της ανασκαφής Ακάμαντος, ενώ δίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και η περιγραφή τους.

Πίνακας 6.1: Ταξινόμηση και περιγραφή των δειγμάτων Akam

Δείγμα	**Διαστάσεις**	**Περιγραφή**
Akam_A	μήκος→ 2,90 πλάτος→ 2,12 ύψος→ 1,20	Κομμάτι κονιάματος το οποίο έχει ληφθεί από αποσπασμένο τμήμα του υποστρώματος ψηφιδωτού. Φέρει στρώματα κονιάματος και αποτύπωμα στην επιφάνεια από ψηφίδες.
Akam_B	μήκος→ 4,10 πλάτος→ 2,95 ύψος→ 2,20	Κομμάτι κονιάματος το οποίο έχει ληφθεί από αποσπασμένο τμήμα του υποστρώματος ψηφιδωτού. Φέρει δυο στρώματα κονιάματος.
Akam_2layer	μήκος→ 1,10 πλάτος→ 0,95 ύψος→ 0,45	Δείγμα κονιάματος που αντιστοιχεί στο δεύτερο στρώμα της υποδομής.
Akam_3layer	μήκος→ 1,10 πλάτος→ 0,95 ύψος→ 0,45	Δείγμα κονιάματος που αντιστοιχεί στο τρίτο στρώμα της υποδομής.
Akam_4layer	μήκος→ 0,30 πλάτος→ 0,92 ύψος→ 0,20	Δείγμα κονιάματος που αντιστοιχεί στο πρώτο στρώμα ψηφοθέτησης.

Τα δείγματα Akam_A και Akam_B αφορούν σε αποσπασμένα τμήματα του ψηφιδωτού δαπέδου της οικίας που βρέθηκε στην ανασκαφή της οδού Ακάμαντος 24 στο Θησείο. Μακροσκοπικά στο δείγμα Akam_A παρατηρείται το υπόλευκο στρώμα ψηφοθέτησης (supra nucleus) που φέρει το αποτύπωμα τριών ψηφίδων. Το υποκείμενο στρώμα κονιάματος (nucleus) έχει ανοιχτό ερυθρό χρώμα το οποίο εκτιμάται ότι οφείλεται στη χρήση αργιλοπυριτικών αδρανών κατά την παρασκευή του (Εικόνα 6.2α,β). Για την εργαστηριακή εξέταση των στρωμάτων αποσπάστηκαν δύο δείγματα, από το στρώμα

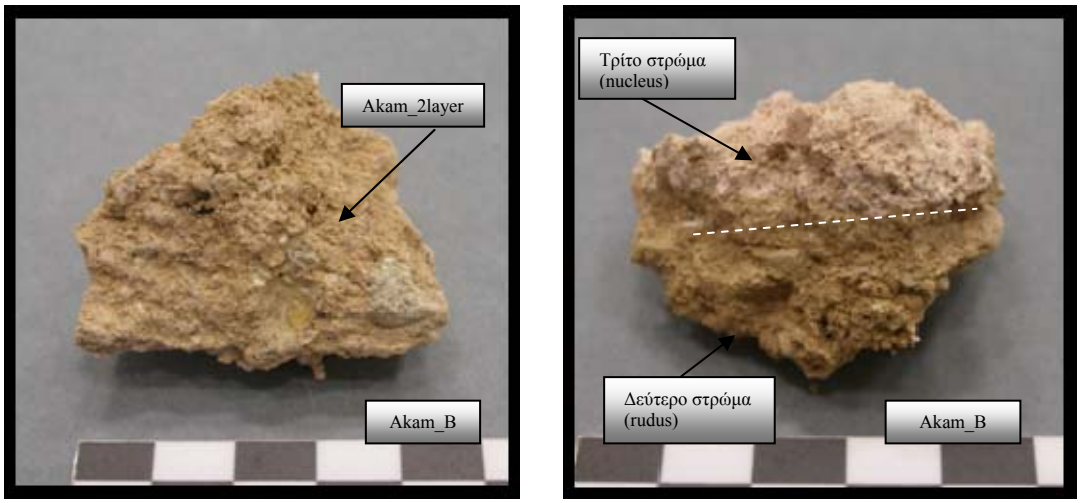
ψηφοθέτησης (Akam_4layer) και το υποκείμενο στρώμα κονιάματος (Akam_3layer), οι διαστάσεις των οποίων περιγράφονται στον Πίνακα 6.1.



(α) (β)

Εικόνα 6.2: Άποψη τμήματος ψηφιδωτού Akam_A, (α) με βέλος επισημαίνεται το στρώμα ψηφοθέτησης (supra nucleus) που φέρει αποτύπωμα από τις ψηφίδες και η περιοχή λήψης του δείγματος Akam_4layer, (β) επισημαίνεται το τρίτο στρώμα από το υπόστρωμα (nucleus) και η περιοχή λήψης του δείγματος Akam_3layer.

Στο δείγμα Akam_B, παρατηρούνται δύο συνθέσεις κονιαμάτων ερυθρού χρώματος, που εκτιμάται ότι αντιστοιχούν στο τρίτο (nucleus) και στο δεύτερο (rudus) στρώμα υποδομής (Εικόνα 6.3α,β). Οπτικά είναι εμφανής η διαφορά κοκκομετρίας των αδρανών ανάμεσα στα δύο στρώματα, με τα αδρανή του δεύτερου στρώματος να έχουν μεγαλύτερη διάμετρο. Για την εργαστηριακή εξέταση αποσπάστηκε ένα δείγμα (Akam_2layer) από το δεύτερο στρώμα, οι διαστάσεις του οποίου περιγράφονται στον Πίνακα 6.1.



(α) (β)

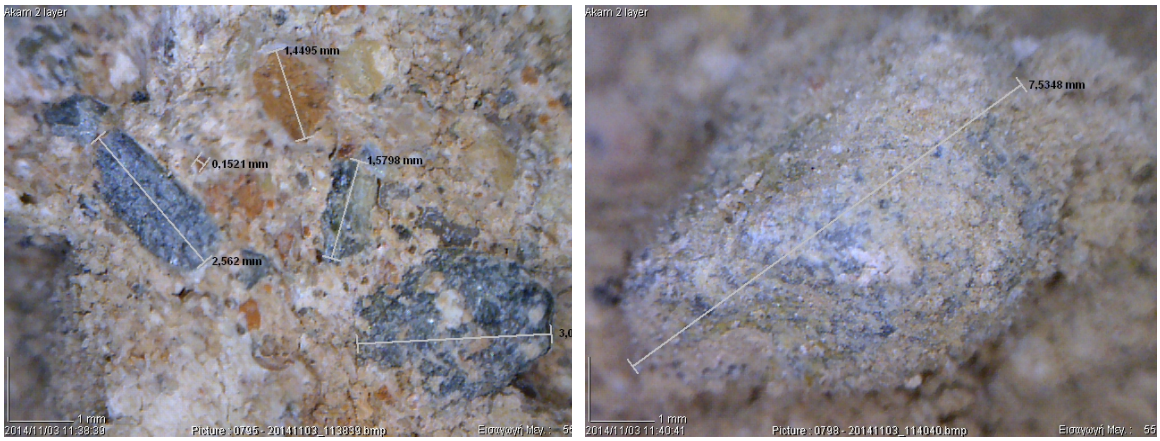
Εικόνα 6.3: Άποψη τμήματος ψηφιδωτού Akam_B (α) με βέλος επισημαίνεται η περιοχή λήψης του δείγματος Akam_2layer, (β) άποψη του τρίτου και του τέταρτου στρώματος του ψηφιδωτού.

Οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από τη μακροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Το σωζόμενο υπόστρωμα του ψηφιδωτού αποτελείται από τρία στρώματα κονιάματος, τα οποία αντιστοιχούν στο τέταρτο στρώμα (supra nucleus), το τρίτο στρώμα (nucleus) και στο δεύτερο στρώμα (rudus) των ρωμαϊκών ψηφιδωτών. Παρατηρείται διαφορά μεταξύ τους ως προς το χρώμα, τη σύνθεση και την υφή.
- Το στρώμα ψηφοθέτησης (supra nucleus) αποτελείται από λεπτόκοκκο κονίαμα υπόλευκου χρώματος. Το υποκείμενο στρώμα (nucleus), εκτιμάται ότι περιέχει αργυλοπυριτικά αδρανή στα οποία οφείλεται το κοκκινωπό χρώμα του. Με τα ίδια αδρανή υλικά, αλλά σε μεγαλύτερη κοκκομετρία, εκτιμάται ότι έχει κατασκευαστεί και το δεύτερο στρώμα της υποδομής (rudus).
- Παρατηρήθηκε πολύ καλή συνάφεια μεταξύ των στρωμάτων, όπως διαπιστώθηκε από την ισχυρή πίεση που χρειάστηκε να ασκηθεί, με μηχανικό τρόπο, για την αφαίρεση των δειγμάτων.

6.3.2 Μελέτη των δειγμάτων με φορητό Ψηφιακό Μικροσκόπιο (DM)

Τα στρώματα του κονιάματος μελετήθηκαν από τα δείγματα Akam_A και Akam_B με φορητό ψηφιακό μικροσκόπιο του τύπου Dino-Lite Universal. Το πρώτο δείγμα περιλαμβάνει μέρη του τρίτου και τέταρτου στρώματος, ενώ, το δεύτερο δείγμα περιέχει μέρη του δεύτερου και τρίτου στρώματος. Οι φωτογραφίες που ελήφθησαν κατά την εξέταση των στρωμάτων παρουσιάζονται στις Εικόνες 6.4, 6.5 και 6.6 για το δεύτερο, τρίτο και τέταρτο στρώμα αντίστοιχα. Κατά την εξέταση της περιοχής του κονιάματος, που αντιστοιχεί στο δεύτερο στρώμα του υποστρώματος (nucleus) εντοπίστηκαν τεμάχια αδρανών ερυθρού, κίτρινου και γκρι χρώματος, με το μέγεθός τους να κυμαίνεται γύρω στα 0,15 mm, ενώ, το μεγαλύτερο να έχει μήκος περίπου 7,53 mm. Επίσης, παρατηρείται άφθονη σκόνη κεραμικού (Εικόνα 6.4α,β).



X55 (α) **X55** (β)

Εικόνα 6.4: Μελέτη με DM της επιφάνειας που αντιστοιχεί στο δεύτερο στρώμα υποδομής (nucleus) εντοπίστηκαν (α) τεμάχια αδρανών ερυθρού, κίτρινου και γκρι χρώματος, με το μέγεθός τους να κυμαίνεται γύρω στα 0,15 mm, ενώ (β) το μεγαλύτερο να έχει μήκος περίπου 7,53 mm. Επίσης, παρατηρείται άφθονη σκόνη κεραμικού.

Κατά την εξέταση της περιοχής του κονιάματος που αντιστοιχεί στο τρίτο στρώμα του υποστρώματος (rudus) παρατηρήθηκαν αδρανή ίδιου χρώματος σε μικρότερη κοκκομετρία, μήκους 0.50 - 1.00 mm (Εικόνα 6.5α,β).

X50 (α) **X200** (β)

Εικόνα 6.5: Μελέτη με DM της επιφάνειας που αντιστοιχεί στο τρίτο στρώμα υποδομής (rudus) εντοπίστηκαν στις περιοχές (α) και (β) άφθονη σκόνη κεραμικού ομοιόμορφα κατανεμημένη και τεμάχια αδρανών ερυθρού, κίτρινου και γκρι χρώματος με κυμαινόμενο μήκος 0.50 - 1.00 mm.

Το τέταρτο στρώμα ψηφοθέτησης παρουσιάζει πλούσια περιεκτικότητα σε ασβέστη με τα αδρανή να είναι δύσκολο να εντοπιστούν, επειδή είναι λεπτόκοκκα (Εικόνα 6.6α,β).

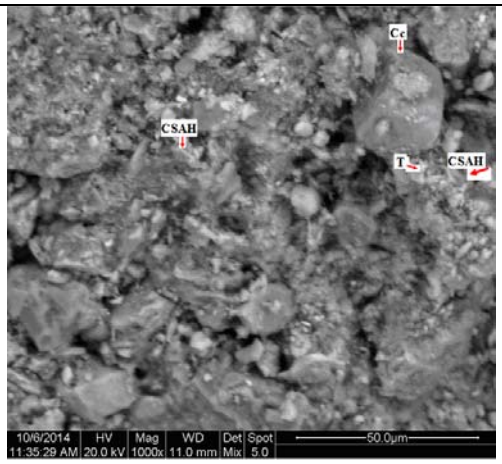
X180

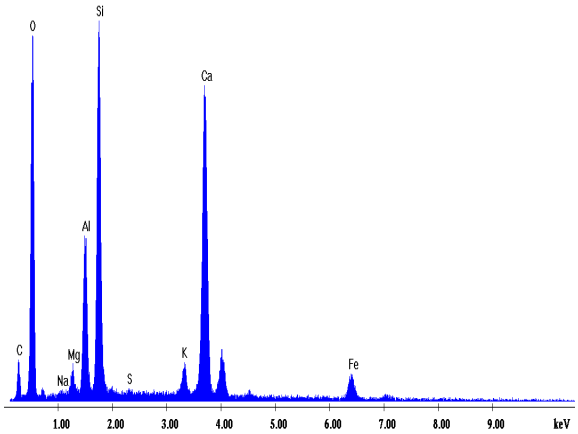
Εικόνα 6.6: Μελέτη με DM της επιφάνειας που αντιστοιχεί στο στρώμα ψηφοθέτησης, το οποίο παρουσιάζει πλούσια περιεκτικότητα σε ασβεστίτη, ενώ τα αδρανή είναι δύσκολο να εντοπιστούν.

6.3.3 Μελέτη με Ηλεκτρονιακό Μικροσκόπιο-Μικροαναλυτή (SEM-EDX)

Η μορφολογία της μικροδομής των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε με την τεχνική του ηλεκτροναικού μικροσκοπίου σε συνδυασμό με μικροανάλυση (EDX). Με τη δεύτερη τεχνική, έγινε χημική ανάλυση των στοιχείων σε διάφορα τμήματα των δοκιμίων, με σκοπό να διαπιστωθεί η σύνθεση των υλικών που συμμετέχουν στη μικροδομή των κονιαμάτων.

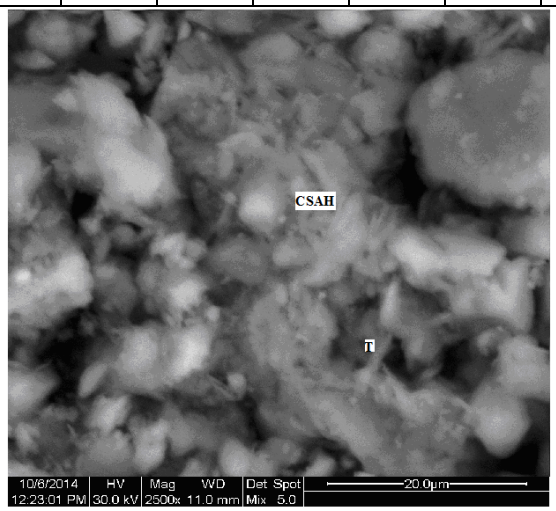
Στην Εικόνα 6.7αβ παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες (SEM) από τη μελέτη του δοκιμίου του κονιάματος από το δεύτερο στρώμα υποδομής (rudus) με τη στοιχειακή χημική ανάλυση (EDX). Στον πίνακα που ακολουθεί την (α) αναφέρονται τα ποσοστά περιεκτικότητας των στοιχείων, όπως προσδιορίστηκαν από την τεχνική (EDX), για τη μικροδομή που παρουσιάζεται στην επιφάνεια της φωτογραφίας. Επίσης τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης εκφράζονται και σε ποσοστά των οξειδίων των αντίστοιχων στοιχείων.





(α)

Στοιχεία	**C**	**O**	**Na**	**Mg**	**Al**	**Si**	**S**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	7,01	48,04	0,19	1,06	5,25	14,16	0,17	1,54	18,70	3,88
Οξείδια	**CO_2**	**Υπ. O_2***	**Na_2O**	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**SO_3**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)	25,70	-1,98	0,26	1,76	9,92	30,34	0,43	1,86	26,18	5,54



(β)

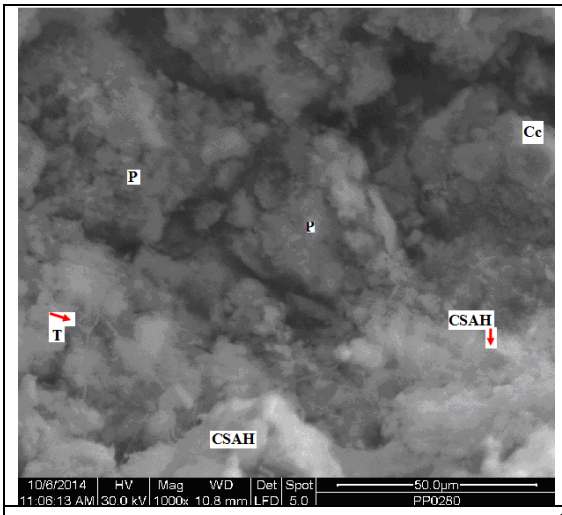
*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

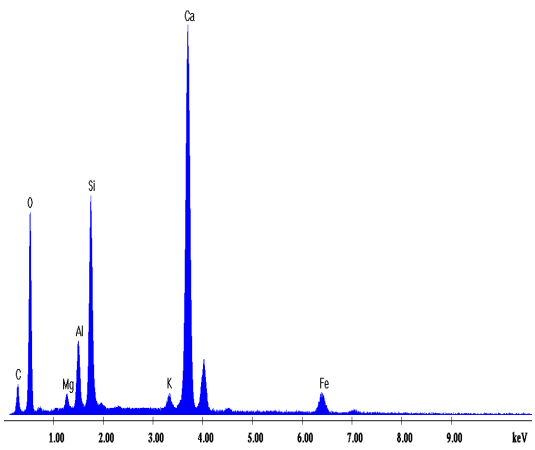
Εικόνα 6.7: Μικροφωτογραφίες SEM από τη μελέτη του δείγματος που αντιστοιχεί στο δεύτερο στρώμα υποδομής (rudus) με τη στοιχειακή ανάλυση (EDX) της επιφάνειας. Στις περιοχές εξέτασης (α) και (β) παρατηρείται κρύσταλλος ασβεστίτη (Cc) πλακοειδείς κρύσταλλοι ένυδρων άσβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (CASH) και βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη (T). Στον πίνακα που ακολουθεί την εικόνα (α) εκφράζονται με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων.

Στη φωτογραφία (α) παρατηρείται κρύσταλλος ασβεστίτη (Cc) πλακοειδείς κρύσταλλοι ένυδρων άσβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (CASH) και βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη (T) που αποτελούν προϊόντα ενυδάτωσης. Λεπτομέρεια των προϊόντων ενυδάτωσης απεικονίζονται στη φωτογραφία (β), όπου παρατηρείται σφαιρικού σχήματος κόκκος αργιλοπυριτικού υλικού (ποζολάνης) ο οποίος έχει αντιδράσει με την υδράσβεστο, ενώ τα προϊόντα ενυδάτωσης εμφανίζονται μέσα και γύρω από αυτόν.

Από τα αποτελέσματα της περιεκτικότητας των οξειδίων του πίνακα υπολογίζονται οι δείκτες υδραυλικότητας (CI) και (HI), όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.3.4. Από τον προσδιορισμό των δεικτών αυτών που βρέθηκαν 3,48 και 1,64, αντίστοιχα, εκτιμάται ότι το κονίαμα του δεύτερου στρώματος υποδομής (rudus) του ψηφιδωτού συντίθεται από καλή υδραυλική κονία.

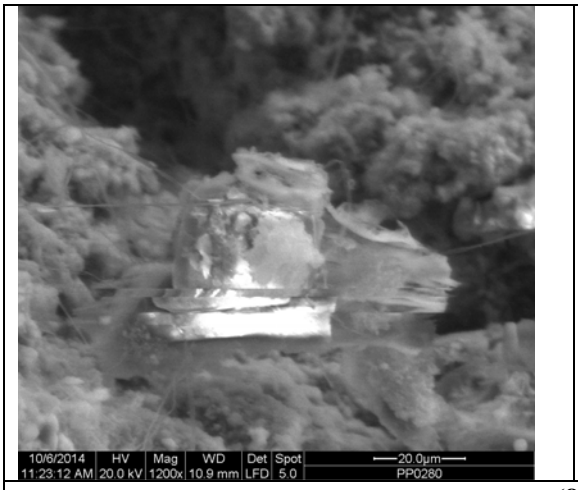
Στην Εικόνα 6.8 παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες (SEM) με τις αντίστοιχες στοιχειακές αναλύσεις (EDX) στην επιφάνειά τους από τη μελέτη του κονιάματος του τρίτου στρώματος υποδομής (nucleus) του ψηφιδωτού. Όπως προκύπτει από την χημική ανάλυση στην επιφάνεια της φωτογραφίας (α) και τη μελέτη της μικροδομής, παρατηρούνται κρύσταλλοι ασβεστίτη (Cc), τομασίτη (T) και κόκκοι ποζολάνης (P) με διεσπαρμένα προϊόντα ενυδάτωσης (CASH). Οι δείκτες υδραυλικότητας (CI) και (HI) που υπολογίστηκαν από την περιεκτικότητα σε οξείδια, είναι 2,42 και 1,09, αντίστοιχα. Οι τιμές των δεικτών αυτών δείχνουν ότι και για το κονίαμα του τρίτου στρώματος χρησιμοποιήθηκε συνδετική κονία με πολύ καλή υδραυλικότητα. Στην δεύτερη (β) φωτογραφία (SEM) το ενδιαφέρον εστιάζεται, με μεγαλύτερη μεγέθυνση, στα προϊόντα ενυδάτωσης, στα οποία πραγματοποιήθηκε στοιχειακή χημική ανάλυση με την τεχνική EDX. Παρατηρείται καθαρά η μικροδομή των ένυδρων άσβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (CASH) μέσα από τις οποίες εκφύονται βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη και ετρινγκίτη.

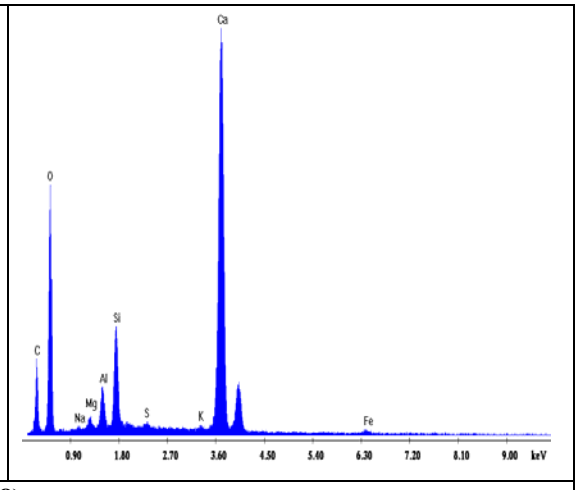




(α)

Στοιχεία	**C**	**O**	**Na**	**Mg**	**Al**	**Si**	**S**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	9,69	52,65	-	1,06	3,46	10,62	-	0,72	19,77	2,05
Οξείδια	**CO_2**	**Υπ. O_2***	**Na_2O**	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**SO_3**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)	35,53	1,97	-	1,76	6,54	22,76	-	0,87	27,68	2,93



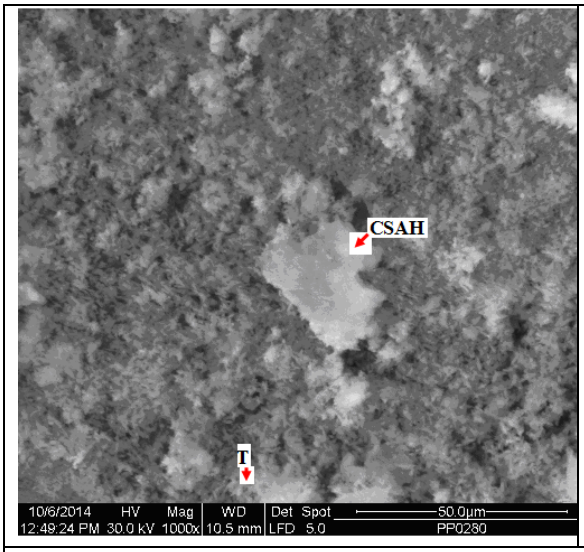


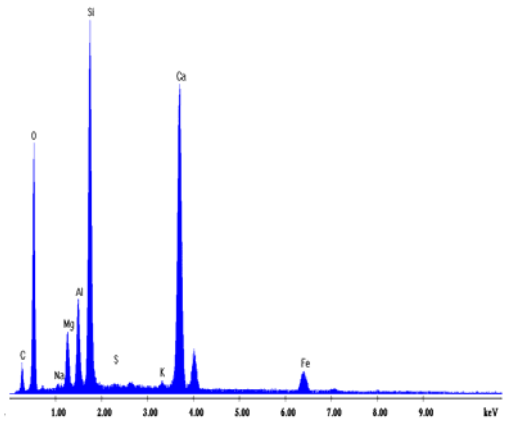
(β)										
Στοιχεία	**C**	**O**	**Na**	**Mg**	**Al**	**Si**	**S**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	10,88	49,48	0,31	0,75	1,86	4,73	0,26	0,34	30,56	0,83
Οξείδια	**CO_2**	**Υπ. O_2***	**Na_2O**	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**SO_3**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)	39,89	-7,80	0,42	1,24	3,51	10,14	0,65	0,41	69,27	1,19

*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

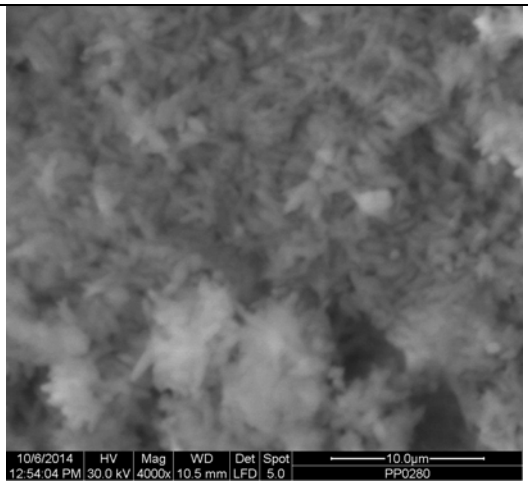
Εικόνα 6.8: Μικροφωτογραφίες SEM από τη μελέτη του δείγματος που αντιστοιχεί στο τρίτο στρώμα (nucleus) με σημειακή στοιχειακή ανάλυση (EDX). Παρατηρούνται (α) κρύσταλλοι ασβεστίτη (Cc), τομασίτη (T) και κόκκοι ποζολάνης (P) με διεσπαρμένα προϊόντα ενυδάτωσης (CASH) και (β) η μικροδομή των ένυδρων άσβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (CASH). Στον πίνακα που ακολουθεί εκφράζονται με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων.

Η Εικόνα 6.9 αφορά στη μελέτη της μικροδομής του κονιάματος του τέταρτου στρώματος της υποδομής του ψηφιδωτού με την τεχνική SEM-EDX.





(α)										
Στοιχεία	**C**	**O**	**Na**	**Mg**	**Al**	**Si**	**S**	**K**	**Ca**	**Fe**
% (w/w)	9,68	49,31	0,41	3,69	4,03	16,15	0,16	0,29	14,36	1,91
Οξείδια	**CO_2**	**Υπ. O_2***	**Na_2O**	**MgO**	**Al_2O_3**	**SiO_2**	**SO_3**	**K_2O**	**CaO**	**Fe_2O_3**
% (w/w)	35,49	-7,98	0,55	6,12	7,61	34,61	0,40	0,35	20,10	2,73



(β)

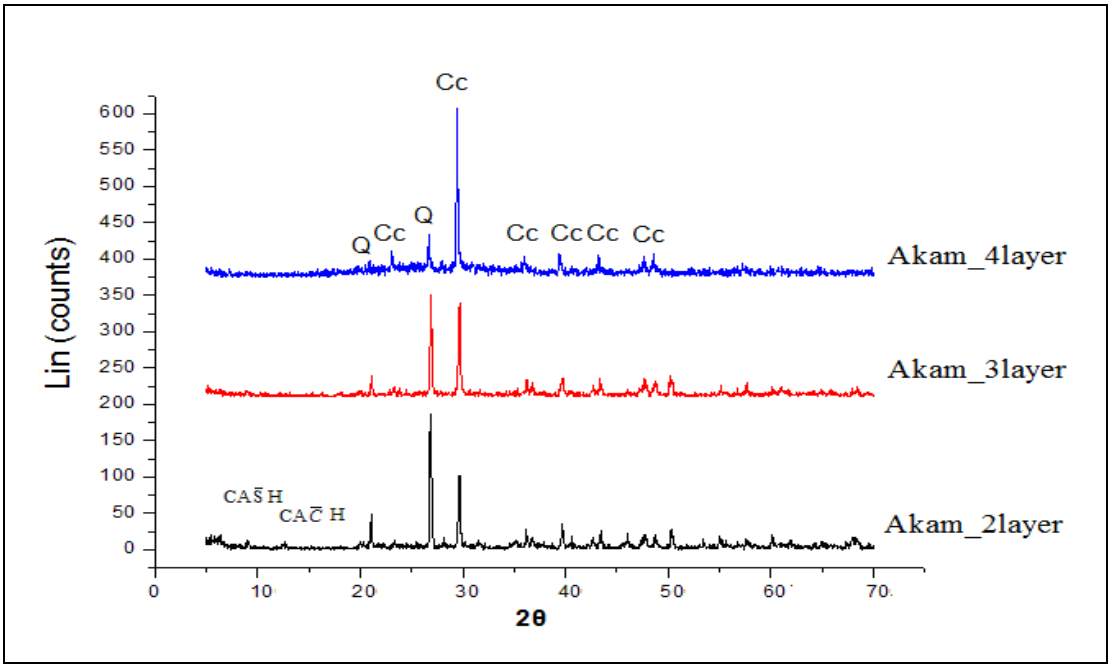
*Υπολειπόμενο O_2: Αυτό που παραμένει όταν αφαιρεθεί από το αρχικό το οξυγόνο που αντιστοιχεί στα οξείδια.

Εικόνα 6.9: Μικροφωτογραφίες SEM από τη μελέτη του δείγματος που αντιστοιχεί στο τέταρτο στρώμα (supra nucleus) με σημειακή στοιχειακή ανάλυση (EDX). Παρατηρούνται (α) βελονοειδής κρύσταλλοι τομασίτη (T) και πλακοειδής κρύσταλλοι (CASH) και (β) βελονοειδής κρύσταλλοι τομασίτη (T). Στον πίνακα που ακολουθεί την εικόνα (α) εκφράζονται με τη μορφή των αντίστοιχων οξειδίων τα αποτελέσματα των στοιχειακών αναλύσεων.

Στη φωτογραφία (α) παρουσιάζεται η μικροδομή των προϊόντων ενυδάτωσης με την αντίστοιχη χημική ανάλυση των στοιχείων. Παρατηρούνται, εμφανώς, πλακοειδείς κρύσταλλοι (CASH) και βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη (T). Στην φωτογραφία (β) της εικόνας παρατηρείται καθαρότερα η μορφολογία των κρυστάλλων του τομασίτη.
Από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης, εκφρασμένα σε οξείδια, στην εικόνα 6(α) υπολογίζονται οι δείκτες υδραυλικότητας (CI) = 3,74 και (HI) = 1,74. Οι τιμές των δεικτών αυτών είναι ενδεικτικές για την καλή υδραυλικότητα της κονίας που παρασκευάστηκε το κονίαμα και του τέταρτου στρώματος του ψηφιδωτού.

6.3.4 Μελέτη με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

Η μελέτη των δειγμάτων με την τεχνική της περίθλασης ακτίνων Χ αποσκοπούσε στη διερεύνηση των κρυσταλλικών ενώσεων και ακολούθως στην ταυτοποίηση των ορυκτολογικών συστατικών του κονιάματος. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε αντιπροσωπευτικά κονιοποιημένα δείγματα που προήλθαν από καθένα από τα δοκίμια που αναφέρονται στον Πίνακα 6.1. Οι συνθήκες του οργάνου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιες με εκείνες που αναφέρονται στην παράγραφο 1.3.2.4. Στην Εικόνα 6.10 παρουσιάζονται, ενδεικτικά, τα ακτινογραφήματα XRD που αφορούν στα δείγματα Akam_4layer Akam_3layer και Akam_2layer τα οποία αντιστοιχούν στο κονίαμα του τρίτου στρώματος και του δεύτερου στρώματος από το υπόστρωμα του ψηφιδωτού.



Εικόνα 6.10: Ακτινογραφήματα XRD από την εξέταση των δειγμάτων Akam_4layer, Akam_3layer, Akam_2layer. Οι κορυφές που παρουσιάζονται στο ακτινογράφημα αντιστοιχούν σε ασβεστίτη (Cc), χαλαζία (Q), τομασίτη (CA$\overline{C}$H), ετρινγκίτη (CA$\overline{S}$H).

Τα κρυσταλλικά συστατικά που προσδιορίστηκαν από την ανάλυση των δειγμάτων με τη μέθοδο XRD, αφορούν στην ποιοτική ορυκτολογική σύσταση των κονιαμάτων και αναφέρονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.2. Η περαιτέρω μελέτη των εντάσεων των κορυφών που παρουσιάζονται στα ακτινογραφήματα XRD, μπορεί να οδηγήσει σε μια ημιποσοτική εκτίμηση της παρουσίας των κρυσταλλικών συστατικών που προσδιορίστηκαν.

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα από τη μελέτη των ακτινογραφημάτων XRD.

Δείγμα	**Σύσταση (ορυκτολογικά συστατικά)**
Akam_4layer	Ασβεστίτης (Calcite, $CaCO_3$), Χαλαζίας (α-Quartz, SiO_2),
Akam_3layer	Ασβεστίτης , Χαλαζίας,
Akam_2layer	Ασβεστίτης , Χαλαζίας, Τομασίτης (CA$\overline{C}$H), Ετρινγκίτης (CA$\overline{S}$H).

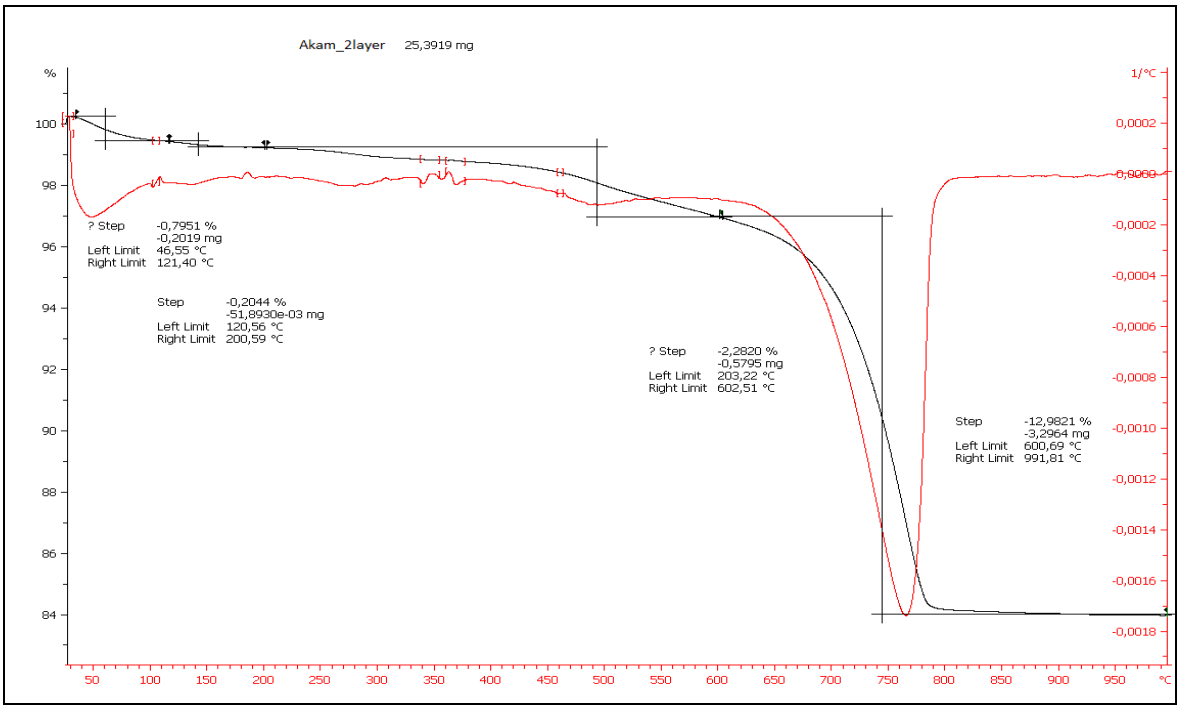
Σύμφωνα με τις εντάσεις των κορυφών που παρατηρούνται στα ακτινογραφήματα, εκτιμάται ότι το κύριο συστατικό του κονιάματος του στρώματος ψηφοθέτησης (Akam_4layer) είναι ο ασβεστίτης, στον οποίο οφείλει και το υπόλευκο χρώμα του. Ο ασβεστίτης αποδίδεται κυρίως στην κονία του κονιάματος και στη διαχρονική ενανθράκωση της υδρασβέστου ($Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$) ενώ, ένα μέρος του μπορεί να προέρχεται από αδρανή ασβεστολιθικής σύστασης. Ως δευτερεύουσα ορυκτολογική φάση παρατηρείται ο χαλαζίας, η παρουσία του οποίου οφείλεται στην πυριτία (SiO_2) που περιεχόταν στα κεραμικά κλάσματα ή/και στην άμμο και δεν έχει αντιδράσει με την υδράσβεστο.

Η περιεκτικότητα του ασβεστίτη, στα κονιάματα, μειώνεται σταδιακά, προχωρώντας προς τα κατώτερα στρώματα της υποδομής του ψηφιδωτού (Akam_3layer) και (Akam_2layer), αντίστοιχα, ενώ αυξάνεται η παρουσία του χαλαζία. Ειδικότερα, στο δεύτερο στρώμα ο χαλαζίας εμφανίζεται ως κύρια φάση, με δευτερεύουσα τον ασβεστίτη. Ακόμη, στο στρώμα αυτό παρατηρείται η παρουσία τομασίτη και ετρινγκίτη. Η παρουσία αυτών των φάσεων, τομασίτη και ετρινγκίτη, αποδίδεται στην αντίδραση των ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων που σχηματίστηκαν κατά την ενυδάτωση του κονιάματος με το CO_2 και τα θειικά άλατα, αντίστοιχα.

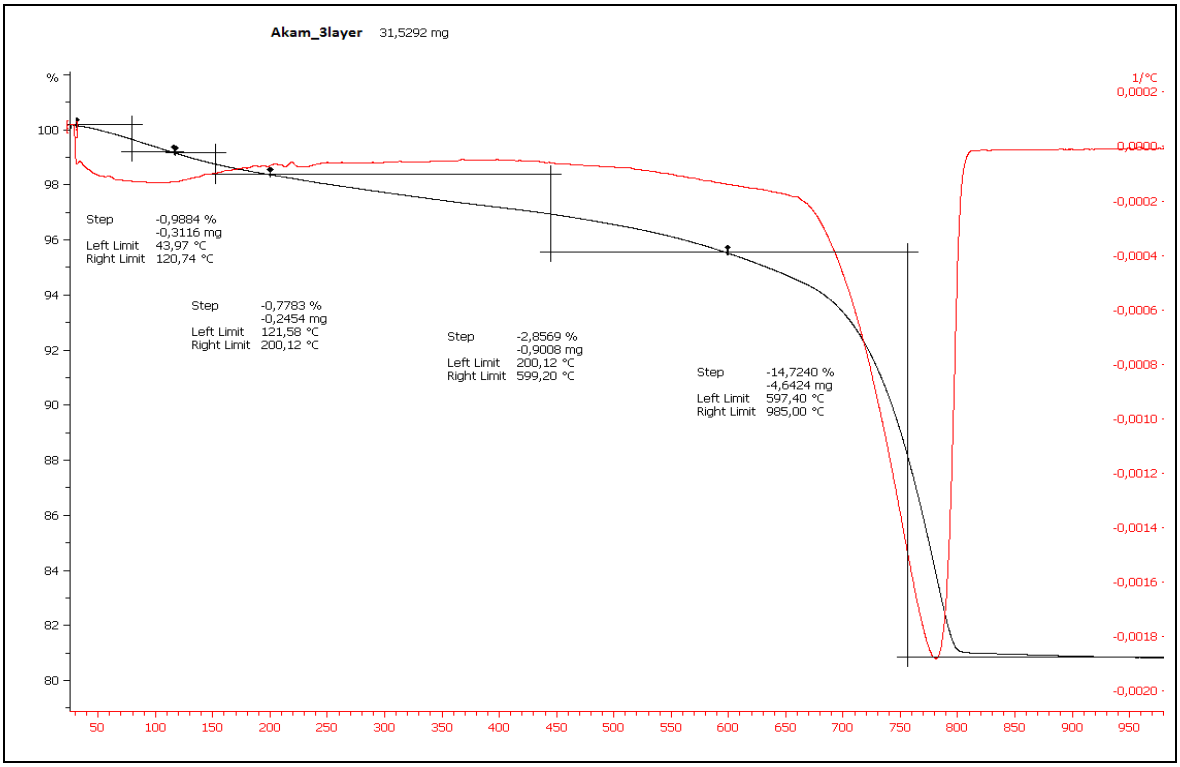
6.3.5 Μελέτη με Θερμική Ανάλυση (DTG-TG)

Η μελέτη με την τεχνική της DTG-TG αποσκοπεί στον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ενώσεων που υφίστανται απώλεια μάζας διαφόρων σε συνάρτηση με την άνοδο της θερμοκρασίας. Ειδικότερα, στοχεύει στον υπολογισμό του κρυσταλλικού και χημικά ενωμένου νερού, το οποίο αντανακλά τον υδραυλικό χαρακτήρα των κονιαμάτων. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν εκείνη που περιγράφεται στην παράγραφο 1.2.2.4.

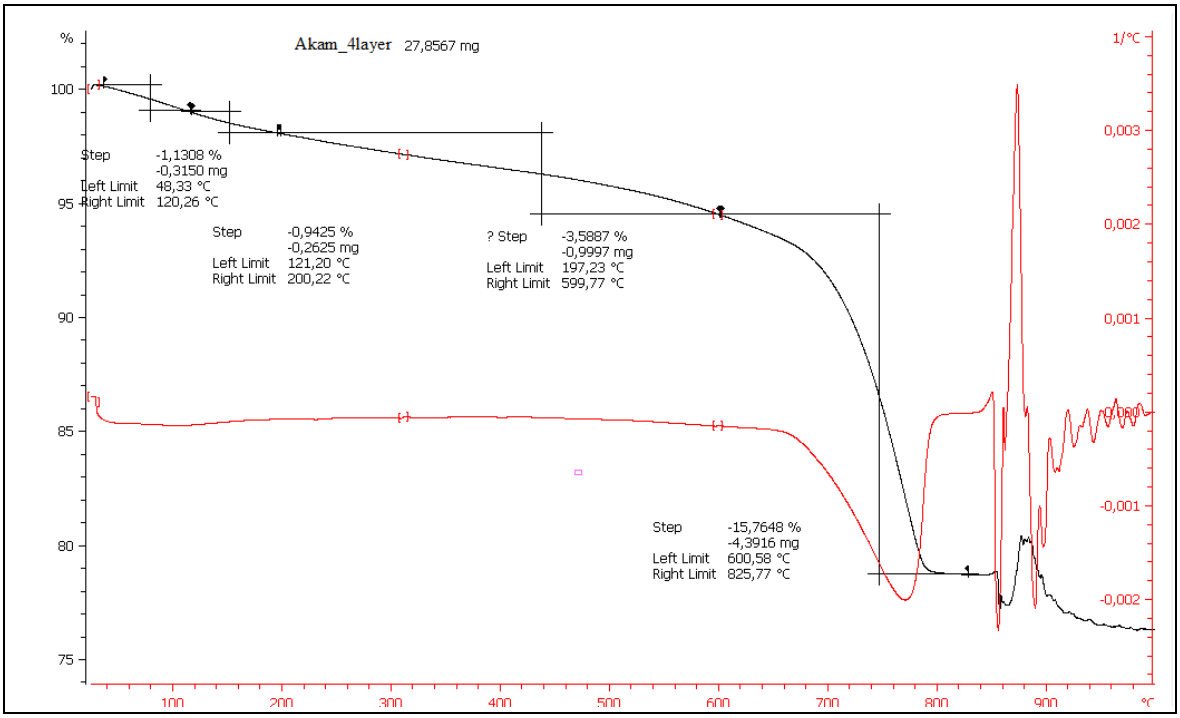
Στις Εικόνα 6.11, 6.12 και 6.13 παρουσιάζονται τα θερμοδιαγράμματα τα οποία ελήφθησαν από την μελέτη των δειγμάτων Akam_2layer Akam_3layer και Akam_4layer, αντίστοιχα. Ενώ, στον Πίνακα 6.3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό της απώλειας μάζας σε κάθε θερμοκρασιακό εύρος και ο λόγος CO_2/χημικά δεσμευμένο νερό, που προσδιορίζεται από την απώλεια μάζας στα θερμοκρασιακά διαστήματα >600 °C και 200-600 °C, αντίστοιχα.



Εικόνα 6.11: Θερμοδιάγραμμα DTG-TG από την εξέταση του δείγματος Akam_2layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό εύρος.



Εικόνα 6.12: Θερμοδιάγραμμα DTG-TG από την εξέταση του δείγματος Akam_3layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό εύρος.



Εικόνα 6.13: Θερμοδιάγραμμα DTG-TG από την εξέταση του δείγματος Akam_4layer. Στο διάγραμμα της θερμικής καμπύλης TGA προσδιορίζεται η απώλεια βάρους του δείγματος ανά επιλεγμένο θερμοκρασιακό εύρος.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (TG) των δειγμάτων Akam.

Δείγματα	**(%) Απώλεια βάρους για κάθε θερμοκρασιακή περιοχή (^oC)**				**CO_2/H_2O**
	<120	**120-200**	**200-600**	**>600**	
Akam_2layer	0,80	0,20	2,28	12,98	5,69
Akam_3layer	0,99	0,78	2,86	14,72	5,15
Akam_4layer	1,13	0,94	3,59	15,76	4,40

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.3 παρατηρείται ότι η απώλεια μάζας (0,20-0,94) στο θερμοκρασιακό εύρος 120-200 °C, η οποία αποδίδεται στο κρυσταλλικό νερό των ένυδρων ανθρακικών και θειικών αλάτων των ασβεσταργιλικών ενώσεων (τομασίτη και ετρινγκίτη), είναι μικρότερη από 1% σε όλα τα δείγματα, αλλά αυξάνεται, σταδιακά, από το δεύτερο προς το τέταρτο στρώμα. Με τον ίδιο τρόπο αυξάνεται, επίσης, η απώλεια μάζας (2,28-3,59 %) στο θερμοκρασιακό εύρος 200-600 °C, όπου εμφανίζεται, κυρίως, η αποδέσμευση του χημικά ενωμένου νερού. Η απώλεια αυτή αποδίδεται στη διάσπαση των ένυδρων ασβεσταργιλικών και ασβεσταργιλικών ενώσεων (CSAH). Οι απώλειες μάζας στις δύο παραπάνω περιοχές είναι ενδεικτικές της παρουσίας υδραυλικών ενώσεων, δηλαδή, προϊόντων ποζολανικής δράσης, όπως διαπιστώθηκε και κατά τη μελέτη των κονιαμάτων με το SEM-EDX.

Στη θερμοκρασιακή περιοχή 600-1100 °C, παρατηρείται μια απότομη μεταβολή της κλίσης της καμπύλης του βάρους (TG) που οφείλεται στη διάσπαση του ασβεστίτη ($CaCO_3$) στους 810 - 842 °C και την απώλεια CO_2. Από την απώλεια μάζας στην περιοχή αυτή υπολογίζεται η περιεκτικότητα του ασβεστίτη, για τα δείγματα των κονιαμάτων και δίνεται Πίνακα 6.4. Στον ίδιο Πίνακα, αναφέρεται, επίσης, το ποσοστό της ισοδύναμης υδρασβέστου, δηλαδή το ποσοστό εκείνο από το οποίο υπολογίζεται ότι σχηματίστηκε ο ασβεστίτης. Ενώ η ολική απώλεια πύρωσης (L.O.I) για τα δείγματα Akam_2layer, Akam_3layer και Akam_4layer είναι 16,28 %, 19,39 % και 21,42 %, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.4: Υπολογιζόμενη περιεκτικότητα $CaCO_3$ και ισοδύναμου $Ca(OH)_2$ στα κονιάματα του ψηφιδωτού δαπέδου της Ακάμαντος.

Στρώμα Κονιάματος	**$CaCO_3$ (%)**	**Ισοδύναμο $Ca(OH)_2$ (%)**
Akam_2layer	29,50	21,83
Akam_3layer	33,46	24,76
Akam_4layer	35,82	26,51

Από το ποσοστό της ισοδύναμης υδρασβέστου του Πίνακα 6.3 εκτιμάται ότι η αναλογία υδρασβέστου/ποζολανικά υλικά, για το κονίαμα του δεύτερου στρώματος (Akam_2layer) κυμαίνεται μεταξύ του 1/2 και 1/3, ενώ, για τα κονιάματα του τρίτου (Akam_3layer) και τέταρτου (Akam_4layer) στρώματος είναι 1/2. Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί ότι το κονίαμα ψηφοθέτησης είναι το πλουσιότερο σε υδράσβεστο.

Τέλος, από το άθροισμα της απώλειας μάζας (%) στις θερμοκρασιακές περιοχές 200-600°C και > 600°C προσδιορίζεται ο λόγος CO_2/H_2O. Ο λόγος αυτός παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την υδραυλική φύση του κονιάματος, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.2.5. Έτσι, με βάση τους λόγους υδραυλικότητας, που αναφέρονται στον Πίνακα 6.3, εκτιμάται ότι τα δείγματα όλων των στρωμάτων υποδομής του ψηφιδωτού της Ακαμάντου, που εξετάστηκαν, είναι υδραυλικά κονιάματα με φυσική ποζολάνη, με το κονίαμα του στρώματος (4°) ψηφοθέτησης να παρουσιάζει καλύτερη υδραυλικότητα.

6.4 Συμπεράσματα από τη μελέτη του ψηφιδωτού δαπέδου από την ανασκαφή Ακάμαντος στο Θησείο

Η μελέτη της σύνθεσης των κονιαμάτων που ελήφθησαν από την υποδομή του ψηφιδωτού δαπέδου πραγματοποιήθηκε με τη συνδυαστική χρήση των μεθόδων DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG. Στις παραγράφους που ακολουθούν συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή κάθε μιας τεχνικής, ώστε να διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα της σύνθεσης του ψηφιδωτού δαπέδου της Ακάμαντος.

Οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από την εξέταση των δειγμάτων με το DM συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Το κονίαμα του δεύτερου (nucleus) και του τρίτου στρώματος (rudus) της υποδομής παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, που παραπέμπει σε ίδια υλικά κατασκευής. Η άφθονη παρουσία κεραμικού υλικού δείχνει ότι πρόκειται για κονιάματα σύνθεσης ασβέστη-ποζολάνης, τα οποία συναντάμε ευρέως σε μνημεία που χρονολογούνται στους ρωμαϊκούς χρόνους.
- Το υπόλευκο χρώμα του στρώματος ψηφοθέτησης είναι ενδεικτικό της απουσίας κόκκινου αργιλοχώματος και της υψηλή περιεκτικότητα του σε ασβέστη.
- Το πάχος των στρώσεων, αλλά και το μέγεθος των αδρανών μειώνεται στις ανώτερες στρώσεις, ενώ, ο λόγος συνδετικής κονίας αδρανών αυξάνεται.
- Τα πρόσθετα υλικά (κεραμικά αδρανή) εκτιμάται ότι έχουν πολύ καλή πρόσφυση στην ασβεστιτική μήτρα.

Η μελέτη της μικροδομής των κονιαμάτων με το ηλεκρονιακό μικροσκόπιο SEM-EDX οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Εμφανίζονται εξαγωνικού σχήματος πλακίδια, που είναι χαρακτηριστικά της μικροδομής των ένυδρων άσβεστο-άργιλο-πυριτικών ενώσεων (CASH).
- Μέσα σε οπές κόκκων, που σχηματίστηκαν από αντίδραση της υδρασβέστου με το ποζολανικό υλικό, παρατηρείται ο σχηματισμός ένυδρων προϊόντων, με τη μορφή αραχνοειδών επικαλύψεων, που αποτελούν χαρακτηριστική απεικόνιση των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων (CSH).

- Διακρίνονται χαρακτηριστικοί βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη ($CA\overline{C}H$) πάνω στην επιφάνεια ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων.
- Ο προσδιορισμός των δεικτών υδραυλικότητας (CI) και (HI) δείχνει τον υδραυλικό χαρακτήρα του κονιάματος.

Από την ορυκτολογική ανάλυση των κονιαμάτων με XRD προέκυψαν, συνοπτικά τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρήθηκε η παρουσία των παρακάτω ορυκτολογικών συστατικών: ασβεστίτης ($CaCO_3$), Χαλαζίας (α-SiO_2) και Τομασίτης ($CA\overline{C}H$) και ετρινγκίτης ($CA\overline{S}H$).
- Η περιεκτικότητα του ασβεστίτη στο κονίαμα μειώνεται σταδιακά από το τέταρτο προς το δεύτερο στρώμα, ενώ, αυξάνεται, αντίστοιχα, η περιεκτικότητα του χαλαζία.
- Η παρουσία του τομασίτη και ετρινγκίτη, κυρίως, στο στρώμα ψηφοθέτησης, αποτελεί ένδειξη ότι έχει λάβει χώρα αντίδραση αργιλοπυριτικών ενώσεων με την υδράσβεστο, δηλαδή, δηλώνουν προϊόντα ποζολανικής δράσης.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG-DTG), οδήγησε στα συμπεράσματα, που συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Παρατηρείται σταδιακή αύξηση της περιεκτικότητας των ένυδρων άσβεστο-αργιλοπυριτικών ενώσεων (θερμοκρασιακές περιοχές 120-600 °C) και του ασβεστίτη (>600 °C) στα κονιάματα, από το δεύτερο προς το τέταρτο στρώμα της υποδομής.
- Η τιμή του λόγου υδραυλικότητας (Hr) που υπολογίστηκε για τα κονιάματα του δεύτερου, τρίτου και τέταρτου στρώματος ήταν 5,69, 5,15 και 4,40, αντίστοιχα, δείχνοντας ότι πρόκειται για καλής υδραυλικότητας συνθέσεις, που περιέχουν υδράσβεστο με φυσική ποζολάνη.
- Από τον υπολογισμό του ποσοστό της ισοδύναμης υδρασβέστου εκτιμάται ότι η αναλογία υδρασβέστου/ποζολανικά υλικά στα κονιάματα ήταν για το δεύτερο στρώμα 1:2,5, ενώ για το τρίτο και τέταρτο ήταν 1:2.

Βιβλιογραφία Πειραματικού Μέρους

1. Π. Ασημακοπούλου-Ατζακά με της συνεργασία της Έλλης Πελεκανίδου, *Σύνταγμα των παλαιοχριστιανικών ψηφιδωτών της Ελλάδος ΙΙ Πελοπόννησος-Στερεά Ελλάδα*, Κέντρο Βυζαντινών Ερευνών, Θεσσαλονίκη, (1987), σ. 129-133.

2. Σ. Χλουβεράκη, *Τεκμηρίωση και Συντήρηση Ψηφιδωτών Δαπέδων in situ*, *Πρ. Σεμιναρίου*, Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Σχολή Γραφικών Τεχνών και Καλλιτεχνικών Σπουδών, Εργαστήριο Συντήρησης Αρχιτεκτονικών Στοιχείων, Αθήνα, (2016).

3. Δ. Χρυσόπουλος, *Τεχνική έκθεση συντήρηση – αποκατάσταση ψηφιδωτό δαπέδου ρωμαϊκής έπαυλης,* Τεχνική έκθεση ΔΣΑΝΜ, ΥΠΠΟ, Αθήνα, (2005).

4. Δ. Χρυσόπουλος, Λ. Αναματερού, *Ψηφιδωτό δάπεδο εθνικού κήπου*, Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Σχολή Γραφικών Τεχνών και Καλλιτεχνικών Σπουδών, Τμήμα Συντήρησης Αρχαίων και Έργων Τέχνης, Αθήνα, (2006).

5. Δ. Χρυσόπουλος, Λ. Αναματερού, Σ. Χλουβεράκη, *Εθνικός Κήπος – Επεμβάσεις Συντήρησης,* Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Σχολή Γραφικών Τεχνών και Καλλιτεχνικών Σπουδών, Τμήμα Συντήρησης Αρχαίων και Έργων Τέχνης, Αθήνα, (2008).

6. D. J. Daniels (ed.), *Ground Penetrating Radar – 2nd Edition*, Publ. The Institution of Electrical Engineers, (2004), p. 353-656.

7. J. Valek, J. J. Hughes, Caspar J. W. P. Groot, *Historic Mortars, Characterisation, Assessment and Repair*, Springer Dordrecht Heidelberg, New York, London, (2012).

8. E. C. Eckel, *Cement, Limes and Plasters*, Wiley, New York, (1922).

9. R. S. Boynton, *Chemistry and technology of lime and limestone*, John Willey & Sons Inc. NY (1980).

10. Χ. Φτίκος, *Μελέτη της Δράσεως της Θηραϊκής Γής κατά την Ενυδάτωσιν Τσιμέντων μετ' Αυτής,* Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, (1977), Διδακτορική διατριβή.

11. V. Kasselouri, Ch. Ftikos, G. Parissakis, *DTA-TG Study on the $Ca(OH)_2$-Pozzolan Reaction on Cement Pastes Hydrated up to Three Years*, Cem. Concr. Research, V 13, (1983), p. 649-154.

12 A. Moropoulou, A. Bakolas, K. Bisbikou, Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques, Thermochimica Acta 269/270 (1995), p. 779–795.

13. G. Biscontin, M. Pellizon Birelli, E. Zendri, *Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars,* Journal of Cultural Heritage 3 (2002), p. 31–37.

14. A. Moropoulou, A. Bakolas, S. Anagnostopoulou, *Composite materials in ancient structures*, Cement and Concrete Composites 27 (2005), p. 295–300.

15. S. F. Marques, R. A. Ribeiro, L. M. Silva, V. M. Ferreira, J. A. Labrincha, *Study of rehabilitation mortars: Construction of a knowledge correlation matrix*, Cement and Concrete Research 36 (2006), p. 1894–1902.

16. J. Pires and A. J. Cruz, *Techniques of thermal analysis applied to the study of cultural heritage*, J. Therm. Anal. Cal., 87 (2007), p. 411-415.

17. J. Valek, J. J. Hughes, Caspar J. W. P. Groot, *Historic Mortars, Characterisation, Assessment and Repair*, Springer Dordrecht Heidelberg, New York, London, (2012).

18. The American School of Classical Studies at Athens (eds.), The Agora of Athens: The History, Shape and Uses of an Ancient City Center, Vol. 14, (1972), Issue Stable URL: http://www.jstor.org/stable/i285188

19. Α΄ΕΠΚΑ-ΥΠΠΟ, Αρχαία Αγορά Αρείου Πάγου, Ημερολόγιο συντήρησης Νο 5, (αδημοσίευτο).

20. Γ. Κουτσουφλάκης, *Αρχαιολογική τεκμηρίωση του Ιερού του Πανός*, 2001, αρχείο ΕΦΑ Αθηνών (ανασκαφικό ημερολόγιο 40/2001 Ιούλιος 2001-Μάρτιος 2003).

21. Β. Μυλωνά, *Στοιχεία τεχνολογίας και συντήρησης του ψηφιδωτού δαπέδου του Ιερού του Πανός,* ΕΦΑ Αθηνών, (ημερολόγιο συντήρησης).

22. B. Forsén, G. R. Stanton (eds.), *The Pnyx in the History of Athens*, Proceedings of an International Colloquium organised by the Finnish Institute at Athens, 7-9 October 1994. Papers and Monographs of the Finnish Institute at Athens, vol. II, (1996), p. 117-129.

23. Β. Μυλωνά, *Στοιχεία τεχνολογίας του ψηφιδωτού δαπέδου στη "κρήνης της Πνύκας",* ΕΦΑ Αθηνών. "*Αρχαιολογική τεκμηρίωση της Κρήνης Καλιρόης*", αρχαιολόγος Τατιάνα Πούλου, 2011, αρχείο ΕΦΑ Αθηνών.

24. Κ. Σ. Βουτσά, Β. Μυλωνά, *Συνοπτική αναφορά των εργασιών που αφορούν στα κονιάματα και στο ψηφιδωτό δάπεδο της "κρήνης της Πνύκας" που πραγματοποιήθηκαν κατά τα προηγούμενα έτη έως και το 2010*, Α΄ΕΠΚΑ –ΥΠΠΟ.

25. R. Al Wardany, G. Ballivy, J. L. Gallias, K. Saleh, and J. Rhazi, *Assessment of Concrete Slab Quality and Layering by Guided and Surface Wave Testing,* ACI Materials Journal, 104, No. 3, (2007), p. 268.

26. D. E Newcomb and B. Birgisson, *Measuring in situ mechanical properties of pavement subgrade soils*, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council (U.S.) Transportation Research Board Washington, DC National Academy Press, (1999), p. 6-48.

27. H. S. Park, J. S. Lee, J. Y. Han, S. Park, J. Park and B. R. Min, *CO2 Fixation by Membrane Separated NaCl Electrolysis*, Energies 2015, 8, p. 8704-8715.

28. S. Holmes and M. Wingate, *Building with Lime: A practical introduction (revised edition),* ITDG Publishing, London, (2002).

29. Φ. Γεωργανής, Κ. Πανταζίδου, *Κατάσταση διατήρησης και προτάσεις συντήρησης-αποκατάστασης παλαιοχριστιανικού ψηφιδωτού δαπέδου μουσείο Δελφών*, Τεχνική έκθεση, ΔΣΑΝΜ-ΥΠΠΟ, Αθήνα, (2010).

30. http://www.artnews.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=679:2010-04-16-11-10-38&catid=104:archaiologia&Itemid=525. : 10/09/2014

31. Γ'ΕΠΚΑ-ΥΠΠΟ, Εργαστήριο συντήρησης ψηφιδωτών, Ημερολόγιο συντήρησης, (2010).

Γενικά Συμπεράσματα

Τα γενικά συμπεράσματα που εξάγονται από τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση, σε διαφορετικές περιπτώσεις ψηφιδωτών δαπέδων, με την επί τόπου εφαρμογή κατάλληλα επιλεγμένων **Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων** είναι:

- Η τεχνική της **Θερμογραφίας Υπερύθρου (IRT)** σε συνδυασμό με λεπτομερή μακροσκοπική παρατήρηση του ψηφιδωτού είναι δυνατό να συμβάλλει στα ακόλουθα:

  - Στην ανίχνευση υγρασίας στην επιφάνεια του ψηφιδωτού, η οποία συνοδεύεται, όπως επιβεβαιώθηκε και από τους μακροσκοπικούς ελέγχους, από τη δράση βιολογικών παραγόντων φθοράς (Εθνικός κήπος χώροι α΄ και γ΄, Σπήλαιο του Πανός).
  - Στην ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών και απωλειών στο ψηφιδωτό, οι οποίες δεν είναι πάντα εμφανείς με μακροσκοπική παρατήρηση, συμβάλλοντας στον έγκαιρο εντοπισμό περιοχών υψηλής πιθανότητας αστοχίας υλικού (Οικία "ανασκαφών Dörpfeld").
  - Στην αξιολόγηση παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης, ως προς την συμβατότητα των υλικών συντήρησης και την καταλληλότητα της τεχνικής/κατασκευής επανατοποθέτησης του ψηφιδωτού (Εθνικός κήπος χώροι α΄ και γ΄, Σπήλαιο του Πανός, Μουσείο Δελφών).
  - Στον εντοπισμό υγρασίας στη διεπιφάνεια των επανατοποθετημένων τμημάτων, σε περιπτώσεις τμηματικής συντήρησης του ψηφιδωτού δαπέδου με τη μέθοδο των φορητών υποδομών (Εθνικός κήπος χώρος α΄).

- Η διασκόπιση με την τεχνική του **Γεωραντάρ (GPR)**, παρέχει τη δυνατότητα λεπτομερούς διερεύνησης της υποδομής του ψηφιδωτού και συμβάλλει στα ακόλουθα:

  - Στην ανάκτηση πληροφοριών σε σχέση με την τεχνολογία κατασκευής της στρωματογραφίας του ψηφιδωτού δαπέδου (Εθνικός κήπος χώροι γ΄, Σπήλαιο του Πανός, Οικία "ανασκαφών Dörpfeld").
  - Στην αποτίμηση της κατάστασης και της δομικής ακεραιότητας των υποκείμενων στρωμάτων (Εθνικός κήπος χώροι α΄ και γ΄, Σπήλαιο του Πανός, Οικία "ανασκαφών Dörpfeld").
  - Στον έλεγχο της κατάστασης του εδάφους, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες απαραίτητες για την αξιολόγηση της στέρεας έδρασης του ψηφιδωτού δαπέδου (Εθνικός κήπος χώροι α΄ και γ΄, Σπήλαιο του Πανός, Οικία "ανασκαφών Dörpfeld").

- Η τεχνική **των Μικροσεισμικών Επιφανειακών Κυμάτων και της ηχούς από κρούση (SASW-Impact Echo)**, η οποία εφαρμόζεται για πρώτη φορά σε μνημεία,

παρέχει τη δυνατότητα διερεύνησης της υποδομής ψηφιδωτών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που δεν ανταποκρίνεται η τεχνική του Γεωραντάρ (GPR), π.χ., περιοχές με έγκλειση υπογείων υδάτων, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες που συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Εντοπισμός της στρωματογραφίας του ψηφιδωτού δαπέδου (Υπόσκαφος χώρος της Κρήνης).
- Εντοπισμός αποσαθρωμένων περιοχών και δομικών αστοχιών στην υποδομή του ψηφιδωτού δαπέδου (Υπόσκαφος χώρος της Κρήνης).

Τα γενικά συμπεράσματα που εξάγονται από τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την **Εργαστηριακή Μελέτη** των αρχαίων κονιαμάτων, με συνδυασμό των τεχνικών: Ψηφιακής Μικροσκοπίας (DM), Ηλεκρονιακής Μικροσκοπίας Σάρωσης με Μικροαναλυτή (SEM-EDX), Περίθλασης Ακτίνων-Χ (XRD) και Θερμικής-Βαρυμετρικής Ανάλυσης (TG-DTG) συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Συνδυάζοντας τις παρατηρήσεις από την εξέταση των δειγμάτων με τη μέθοδο DM και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν από την επί τόπου εξέταση των δαπέδων με την τεχνική GPR, διαπιστώνεται η διαστρωματική δομή των ψηφιδωτών opus tessellatum. Αυτή εμφανίζει τρεις στρώσεις κονιάματος και μία στρώση υποδομής, η οποία αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά. Το πάχος των στρώσεων, καθώς και το μέγεθος των αδρανών μειώνεται στις ανώτερες στρώσεις, ενώ ο λόγος συνδετικής κονίας αδρανών αυξάνεται.
- Από τη μελέτη της μικροδομής των αρχαίων κονιαμάτων και τη στοιχειακή χημική ανάλυση των επιφανειών με τη μέθοδο SEM-EDX διαπιστώθηκε, σε όλα τα κονιάματα, η παρουσία υδραυλικών ενώσεων, δηλαδή, ένυδρων άσβεστο-αργιλο-πυριτικών ενώσεων, του τύπου CSH, CASH, οι οποίες εδράζονται, κυρίως, πάνω σε κόκκους αργιλοπυριτικού υλικού. Η παρουσία και η θέση αυτών των ενώσεων, αποδίδεται, εμφανώς, σε αντίδραση της υδρασβέστου με ποζολανικό υλικό. Ακόμα, βρέθηκαν βελονοειδείς κρύσταλλοι τομασίτη ($CA\overline{C}H$) και ετρινγκίτη ($CA\overline{S}H$) που αποτελούν προϊόντα προσβολής των ένυδρων ενώσεων (CAH) από CO_2 και SO_4^{-2} ιόντα, αντίστοιχα.
- Υπολογίστηκαν οι δείκτες υδραυλικότητας (CI) και (HI) με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της χημικής ανάλυσης EDX, όπως αυτοί θεσπίστηκαν από τους (Eckel, 1922, Boynton, 1980). Οι δείκτες αυτοί δείχνουν ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, τα κονιάματα των στρωμάτων της υποδομής του ψηφιδωτού δαπέδου παρουσιάζουν υδραυλικότητα, η οποία εκτιμάται από πολύ καλή έως μέτρια.
- Η ανάλυση των κονιαμάτων με τη μέθοδο XRD αποκάλυψε την ορυκτολογική σύσταση των κονιαμάτων. Συνοπτικά, διαπιστώθηκε ότι τα κύρια συστατικά των κονιαμάτων είναι ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας. Από την ημιποσοτική εκτίμηση που έγινε, διαπιστώθηκε ότι η περιεκτικότητα του ασβεστίτη αυξάνεται σταδιακά από το κατώτερο στρώμα του ψηφιδωτού δαπέδου (rudus) προς το ανώτερο στρώμα ψηφοθέτησης (supra nucleus). Αντίστροφα, στη σειρά αυτή μειώνεται η περιεκτικότητα του χαλαζία. Ακόμα, σε μικρά ποσοστά παρατηρείται η παρουσία

τομασίτη ($CA\overline{C}H$), ετρινγκίτη ($CA\overline{S}H$) και γύψου $C\overline{S}H$). Η παρουσία των συστατικών, τομασίτη και ετρινγκίτη, αποτελεί σοβαρή ένδειξη ότι έχει λάβει χώρα αντίδραση αργιλοπυριτικών ενώσεων με την υδράσβεστο, δηλαδή, δηλώνουν προϊόντα ποζολανικής δράσης.

- Η εξέταση των κονιαμάτων με τη μέθοδο θερμικής ανάλυσης (TG-DTG) εστιάστηκε, κυρίως, στον προσδιορισμό της απώλειας μάζας που παρουσιάζουν τα συστατικά των κονιαμάτων στις ακόλουθες θερμοκρασιακές περιοχές: ***μεταξύ 200-600 °C*** και ***άνω των 600 °C***. Η πρώτη περιοχή αφορά στην απομάκρυνση κρυσταλλικού και χημικά δεσμευμένου νερού. Στην προκειμένη περίπτωση, αφού δεν υπάρχει υδράσβεστος, η απώλεια αυτή σχετίζεται, κυρίως, με τις ένυδρες άσβεστο-άργιλο-πυριτικές ενώσεις (CASH). Η δεύτερη περιοχή σχετίζεται, κυρίως, με την αποδέσμευση του CO_2 από τη διάσπαση του ασβεστίτη και, δευτερευόντως, με την απομάκρυνση χημικά δεσμευμένου νερού σε τριχοειδή ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων (CSH).
- Από τις απώλειες μάζας στις παραπάνω θερμοκρασιακές περιοχές υπολογίστηκε ο λόγος (Hr) = CO_2/(κρυσταλλικού και χημικά ενωμένου H_2O), ο οποίος αντανακλά τον υδραυλικό χαρακτήρα των κονιαμάτων. Οι τιμές του λόγου υδραυλικότητας (Hr) που υπολογίστηκε για τα κονιάματα των ψηφιδωτών δαπέδων που εξετάστηκαν, δείχνουν ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, πρόκειται για συνθέσεις με καλή υδραυλικότητα, που αποδίδεται σε αντίδραση υδρασβέστου και φυσικής ποζολάνης. Παρατηρείται, επίσης, σταδιακή αύξηση της περιεκτικότητας των ένυδρων άσβεστο-άργιλο-πυριτικών ενώσεων (θερμοκρασιακές περιοχές 120-600 °C) και του ασβεστίτη (>600 °C) στα κονιάματα, προχωρώντας από το δεύτερο προς το τέταρτο στρώμα της υποδομής. Από τον υπολογισμό του ποσοστού του $CaCO_3$ και τη μετατροπή του στο ισοδύναμο ποσοστό υδρασβέστου από την οποία προήλθε, γίνεται η εκτίμηση της αναλογίας υδρασβέστου/πρόσμικτα (ποζολανικά υλικά) στα στρώματα των κονιαμάτων.

Συνοψίζοντας, η συνδυαστική εφαρμογή των IRT, GPR, SASW μη καταστρεπτικών τεχνικών συμβάλει στη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας αποτίμησης για την έγκαιρη διάγνωση και αντιμετώπιση της φθοράς του υποστρώματος των ψηφιδωτών δαπέδου, οριοθετώντας άμεσα τα κριτήρια επιλογής των επεμβάσεων για την αποκατάσταση τους.

Παράλληλα η μελέτη του αρχαίου κονιάματος με συνδυασμό των μεθόδων DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG οδηγούν στην αναγνώριση της σύνθεσης κονιαμάτων και συμβάλουν στην επιλογή συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης των ψηφιδωτών δαπέδων. Πρέπει να τονιστεί ότι κάθε νέα επέμβαση συντήρησης/αποκατάστασης πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα επανεπέμβασης στο ψηφιδωτό δάπεδο.

Προοπτικές για συνέχιση της σχετικής έρευνας

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα διδακτορική διατριβή διαπιστώνεται ότι, η συνδυαστική χρήση των Μη Καταστρεπτικών Μεθόδων και των Μεθόδων Ανάλυσης που επελέγησαν και εφαρμόστηκαν στις διαφορετικές περιπτώσεις ψηφιδωτών δαπέδων, αποδείχτηκαν αποτελεσματικές και αξιόπιστες για τον έλεγχο της δομικής τους κατάστασης και το χαρακτηρισμό των υλικών της υποδομής τους. Επομένως, προτείνεται η συνέχιση της έρευνας σε παρόμοιες περιπτώσεις ψηφιδωτών δαπέδων όπως και σε άλλα ψηφιδωτά διαφορετικών χρονικών περιόδων και τεχνολογίας κατασκευής.

Ειδικότερα, η έρευνα θα μπορούσε να συνεχιστεί ως εξής:

- **Όσον αφορά την διερεύνηση της υποδομής των ψηφιδωτών:**

Διεξαγωγή επί τόπου μετρήσεων με τη μέθοδο των Μικροσεισμικών Επιφανειακών Κυμάτων (SASW - Impact Echo) στα ψηφιδωτά δάπεδα που διερευνήθηκαν με Γεωραντάρ (GPR), προκειμένου να αποτυπωθούν συμπληρωματικές πληροφορίες σχετιζόμενες με πιθανές επιφανειακές φθορές του υποστρώματος τους.

Περαιτέρω έρευνα της υποδομής ψηφιδωτών δαπέδων που έχουν κατασκευαστεί σε διαφορετικές ιστορικές περιόδους με την τεχνική του Γεωραντάρ (GPR), προκειμένου να μελετηθεί η μορφολογία της στρωματογραφίας τους. Παράλληλα, θα πρέπει να γίνει εξέταση του κονιάματος κατασκευής με τη συνδυαστική χρήση των μεθόδων ανάλυσης (DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG), προκειμένου να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα της εξέλιξης της τεχνολογίας κατασκευής των ιστορικών δαπέδων στο χρόνο.

- **Όσον αφορά στην επιλογή των υλικών αποκατάστασης των ψηφιδωτών που διερευνήθηκαν:**

Παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης του υποστρώματος των ψηφιδωτών δαπέδων που διερευνήθηκαν. Αποτίμηση των νέων συνθέσεων κονιάματος στο εργαστήριο με τη συνδυαστική χρήση των μεθόδων ανάλυσης (DM, SEM-EDX, XRD, TG-DTG) και συσχέτιση αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων.

Πιλοτική εφαρμογή των νέων κονιαμάτων συντήρησης στο υπόστρωμα των ψηφιδωτών και αξιολόγηση της συμβατότητας της επέμβασης με τη συνδυαστική χρήση των τεχνικών IRT και GPR. Συσχέτιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν πριν και μετά την επέμβαση συντήρησης, σε κάθε περίπτωση ψηφιδωτού δαπέδου.

Διερεύνηση υλικών και μεθοδολογίας κατασκευής φορητών υποδομών έδρασης ψηφιδωτών που έχουν αποσπαστεί από τον αρχαιολογικό χώρο και πρόκειται να εκτεθούν σε Μουσεία.

Βιογραφικό Σημείωμα

Η Αικατερίνη-Ζωή Φτίκου είναι Π.Ε. Συντηρήτρια Αρχαιοτήτων, κάτοχος του διπλώματος BA on Conservation and Restoration, De Montfort University, UK και των μεταπτυχιακών τίτλων MA on Conservation of Architectural Materials, Bournemouth University, UK και MSc στην "Προστασία Μνημείων, Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης", του ΔΠΜΣ της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Αρχιτεκτόνων του Ε. Μ. Πολυτεχνείου.

Το 2006 προσλήφθηκε με εξετάσεις του ΑΣΕΠ στο Υπουργείο Πολιτισμού στον Κλάδο ΠΕ Συντηρητών Αρχαιοτήτων και Έργων τέχνης, όπου εργάζεται μέχρι σήμερα.

Ειδικότερα, από το 2006 έως το 2010, απασχολήθηκε στη Θ΄ Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων Θήβας. Στο διάστημα αυτό ήταν υπεύθυνη για το σχεδιασμό και τη συντήρηση των λίθινων αρχαιοτήτων που εντάσσονταν στο έργο με τίτλο "Β΄ Φάση επανέκθεσης προϊστορικών, κλασικών και βυζαντινών αρχαιοτήτων του Αρχαιολογικού Μουσείου Θήβας". Επίσης, ανέλαβε την εκπόνηση μελετών και εργασιών συντήρησης μνημείων, που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή των αρχαιολογικών χώρων της Βοιωτίας, όπως αρχαία ταφικά μνημεία στην Τανάγρα, στον Ορχομενό και στο Δήλεσι, καθώς, και τα ψηφιδωτά δάπεδα σε αρχαιολογικές ανασκαφές στην πόλη της Θήβας..

Από το 2010 εργάζεται στη Διεύθυνση Συντήρησης Αρχαίων και Νεοτέρων Μνημείων του Υπουργείου Πολιτισμού, στο Τμήμα Εφαρμοσμένης Έρευνας και στο εργαστήριο Συντήρησης Λίθου. Στα πλαίσια της εργασίας της, έχει ασχοληθεί με το σχεδιασμό, την εκπόνηση και την επίβλεψη μελετών και εργασιών σε μνημεία, που βρίσκονται σε όλο τον Ελλαδικό χώρο. Ως αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις αναφέρονται οι εργασίες του αρχαίου θεάτρου της Θάσου, ρωμαϊκών ταφικών μνημείων στον αρχαιολογικό χώρο της αρχαίας Κορίνθου και τα ψηφιδωτά δάπεδα στην αρχαία Δημητριάδα στο Βόλο. Επίσης, συμμετέχει στην ομάδα συντήρησης των ψηφιδωτών δαπέδων και των λίθινων αρχιτεκτονικών μελών στο ταφικό μνημείο του λόφου - τύμβου Καστά στην Αμφίπολη Σερρών. Ακόμη, έχει εκτελέσει χρέη υπολόγου σε έργα συντήρησης και ανάδειξης μνημείων του Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού, τα οποία ήταν ενταγμένα στα ευρωπαϊκά προγράμματα ΕΣΠΑ.

Παράλληλα, από το 2008 είναι Υποψήφια Διδάκτωρ του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου και εκπονεί τη διατριβή της στο Εργαστήριο μη Καταστρεπτικού Ελέγχου του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής Υλικών. Η διατριβή της εντάχθηκε στο Ερευνητικό πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ με τίτλο: "Ανάπτυξη Ολοκληρωμένου Περιβάλλοντος Αποτίμησης και Τεκμηρίωσης των Επεμβάσεων Συντήρησης Πολιτισμικών Έργων με μη Καταστρεπτικές Μεθόδους" του Επιχειρησιακού Προγράμματος "Εκπαίδευση και δια Βίου Μάθηση" (ΟΠΣ 379472) και επιστημονική Υπεύθυνη την Καθηγήτρια κ. Μαρία Κουή.

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής της, στο πλαίσιο του προγράμματος "ΘΑΛΗΣ", συμμετείχε στην υποστήριξη της διεξαγωγής 2 προπτυχιακών και 2 μεταπτυχιακών (ΔΠΜΣ) διπλωματικών εργασιών. Τέλος, από το ερευνητικό υλικό που εκπονήθηκε στη διατριβή, μέχρι σήμερα, προέκυψαν οι ακόλουθές δημοσιεύσεις σε περιοδικά και διεθνή συνέδρια, ενώ υπάρχει ακόμη ικανό υλικό προς δημοσίευση.

Ekaterini Zoi Ftikou

Ekaterini Zoi Ftikou holds a BA degree on Conservation and Restoration (De Montfort University, Leicester), a MA on Conservation of Architectural Materials (Bournemouth University, U.K) and a M.Sc. in the "Protection of Monuments: Interventions Materials and Techniques" of NTUA. Since 2006 she is working at the Hellenic Ministry of Culture. In the framework of work and research projects, she has been involved with the study, characterization and conservation of cultural heritage objects and monuments (i.e. mosaics, sculptures, historic building materials etc).

Επικοινωνία / Personal Contact:
Email: kftikou@gmail.com

Δημοσιεύσεις / Publications:

1. P Theodorakeas, E Cheilakou, E Ftikou, M Koui, Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures, Journal of Physics, (2015), Vol. 655, pp. 12061-12070. DOI: 10.1088/1742-6596/655/1/012061.
2. E Ftikou, P Theodorakeas, E Cheilakou, M Koui, Substrate analysis and preservation state assessment of Roman mosaic pavements located at the ancient hill of Pnyka towards the Acropolis of Athens, In Proc. TECHNART 2015, Catania, Italy, April 27 - 30, 2015.
3. P Theodorakeas, E Cheilakou, E Ftikou, M Koui , Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures'', In Proc. the 33rd UIT Heat Transfer Conference, L'Aquila, Italy, 22-24 June (2015), CD ROM.
4. E Ftikou, P Theodorakeas, E Cheilakou, M Koui, Non-Destructive techniques (NDT) as rapid and cost-efficient tools for mosaic conservation, Presented on the 12th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics (ICCM), 27-31 October, 2014, Sardinia (Italy).(in press)
5. E Ftikou, E Cheilakou, P Theodorakeas, NP Avdelidis, K Roumpopoulos, M Koui, (2010), The Mycenaean tomb 'Treasury of Minyas: Conservation problems and evaluation of deterioration phenomena, In Proc. of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin- MONUBASIN8, Patras, Greece, Vol.1, pp 207-222.
6. P Theodorakeas, NP Avdelidis, M Koui, C Ibarra – Castanedo, E Cheilakou, A Bendada, K Ftikou, XPV Maldague, (2010), Active Thermographic NDT approaches for the assessment of plastered mosaics, In Proc. of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin-MONUBASIN8, Patras, Greece, 31 May- 2 June, Vol. 2, 442-456.
7. Αικ. Φτίκου, Ε Χειλάκου, Π Θεοδωρακέας, Μ Κουή, Μη καταστρεπτικός έλεγχος (NDT) μνημείων με τη χρήση των τεχνικών της Θερμογραφίας (IRT), της Υπερηχοσκόπησης (US) και του Γεωραντάρ (GPR), Ημερίδα ΠΕΣΑ 2014

Συντηρητών Αρχαίων και Έργων Τέχνης, με τίτλο ‘Στην μνήμη του Τάσου Μαργαριτώφ’, 24 Νοεμβρίου 2014, CD ROM.

8. Αικ. Φτίκου, Ν. Τόλης, Ε. Αναματερού, Μ. Δεληπρίμη, Φ. Γετίμογλου, Αποτίμηση υλικών υποστρώματος ψηφιδωτών σε φορητές κατασκευές, Ημερίδα ΠΕΣΑ 2015 Συντηρητών Αρχαίων και Έργων Τέχνης, 12 Δεκεμβρίου 2015, CD ROM.