

3.3.1-3.3.3

:

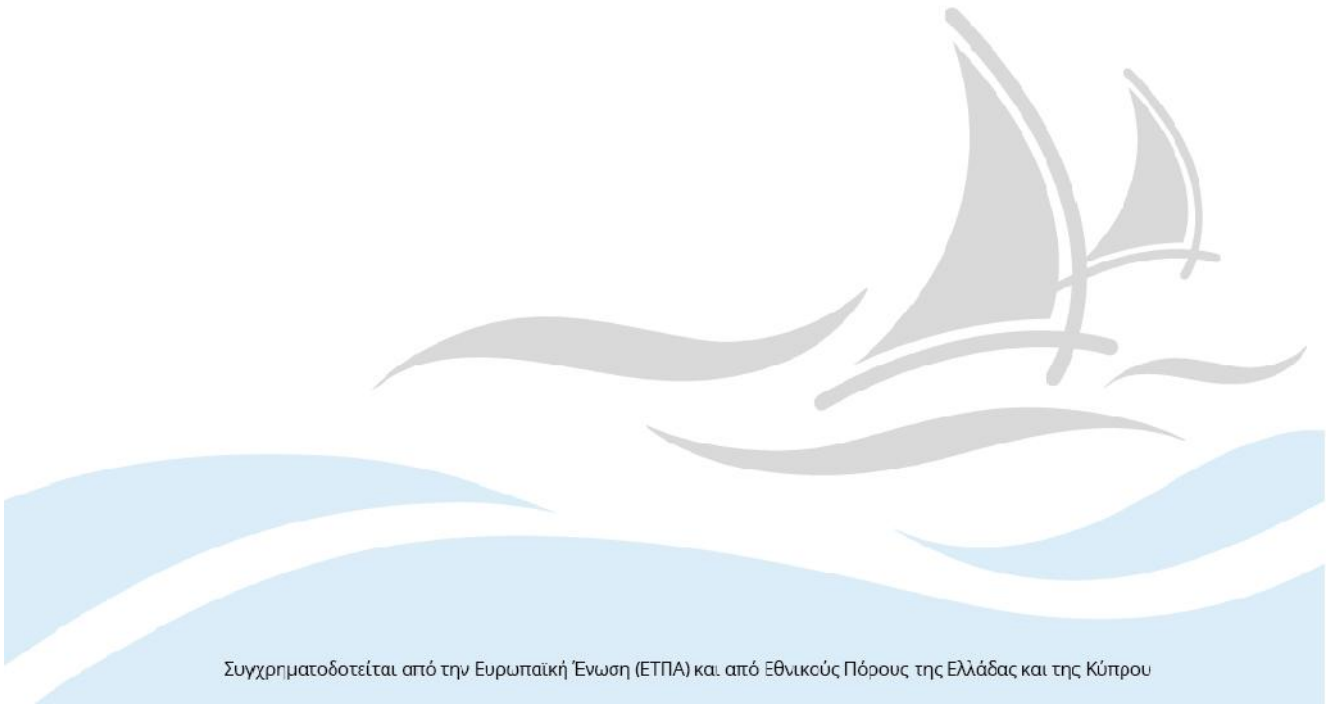
- 3-

3.1.1-3.1.3

---

**ΥΠΟΤΙΤΛΟΣ: Τελική έκθεση υλοποίησης φυσικού αντικειμένου της πράξης  
ΜΟΥΣΕΙΑ II**

21/01/2021



Συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΤΠΑ) και από Εθνικούς Πόρους της Ελλάδας και της Κύπρου

## Πίνακας Περιεχομένων

Π3: Προσδιορισμός αέριων ρύπων και επικαθίσεων .....	4
A) Μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό του ΙΜΚ .....	6
A1) Τοποθεσίες δειγματοληψιών. ....	6
A1.1) Χαρακτηριστικά του κτιρίου του ΙΜΚ .....	7
A1.2) Σημεία δειγματοληψιών εντός του ΙΜΚ.....	8
A1.3) Όργανα μέτρησης αέριων και σωματιδιακών ρύπων .....	10
A1.4) Χρονικές περίοδοι των δειγματοληψιών .....	17
A2) Αποτελέσματα μετρήσεων Αιωρούμενων Σωματιδίων .....	20
A3) Αποτελέσματα μετρήσεων Αέριων ρύπων .....	29
A3) Αποτελέσματα σωματιδιακών επικαθίσεων.....	32
A3.1) Εναποτιθέμενη μάζα στα φίλτρα .....	32
A3.2) Χημική ανάλυση της εναποτιθέμενης μάζας .....	36
A3.3) Χημική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων.....	38
B) Μετρήσεις αερομεταφερόμενων βιοαεροζόλ και μικροβιακών επικαθίσεων .....	42
B1. Προσδιορισμός Αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών σε χώρους του ΙΜΚ με μικροβιολογικές μεθόδους.....	42
B1.1 Μεθοδολογία μετρήσεων με μικροβιολογικές μεθόδους.....	42
B1.2 Αποτελέσματα μετρήσεων με μικροβιολογικές μεθόδους.....	44
B1.3 Συμπεράσματα μετρήσεων με μικροβιολογικές μεθόδους.....	51
B2) Προσδιορισμός αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών σε χώρους του ΙΜΚ με μοριακές μεθόδους .....	52
B2.1) Μεθοδολογία μετρήσεων με μοριακές μεθόδους .....	52
B2.2) Αποτελέσματα μετρήσεων με μοριακές μεθόδους .....	54
B2.3) Συμπεράσματα μετρήσεων αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών με μοριακές μεθόδους .....	58
Γ) Προσδιορισμός μικροβιακών επικαθίσεων σε ευπαθή υλικά. ....	59
Γ1) Μεθοδολογία μελέτης μικροβιακών επικαθίσεων .....	59
Γ2) Αποτελέσματα μελέτης μικροβιακών επικαθίσεων .....	62
Γ3) Συμπεράσματα μελέτης μικροβιακών επικαθίσεων .....	71



### **Π3: Προσδιορισμός αέριων ρύπων και επικαθίσεων**

Το ΠΕ3 περιλαμβάνει εντατικές μετρήσεις αέριων ρύπων, αιωρούμενων σωματιδίων, βιοαεροζόλ και μικροβιακού φορτίου στους χώρους του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης (IMK) και του Βυζαντινού Μουσείου Ιδρύματος Αρχιεπισκόπου Μακαρίου Γ' (BM). Επιπλέον στο ΠΕ3 πραγματοποιήθηκε μελέτη των σωματιδιακών και μικροβιακών επικαθίσεων, τόσο σε φίλτρα μέτρησης όσο και σε πραγματικά εκθέματα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν: α) Για την αποτύπωση της παρούσης κατάστασης της αέριας ρύπανσης στο εσωτερικό των δύο Μουσείων, β) Για την εκτίμηση του κινδύνου των ευπαθών υλικών που εκτίθενται στα δύο Μουσεία, γ) Για την επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων μέτρησης του συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και επιπλέον δ) Για την αξιολόγηση του συστήματος μετά την εγκατάσταση του και ε) Για τον εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων που δημιουργείται με δεδομένα αέριας ρύπανσης σε χώρους έκθεσης ευπαθών υλικών.

Στην παρούσα έκθεση γίνεται αναφορά στις εργασίες που πραγματοποίησε ο Κύριος Δικαιούχος στους χώρους του IMK, σε συνεργασία με τον Δικαιούχο 3 (Εταιρεία Κρητικών Ιστορικών μελετών). Οι μετρήσεις στο BM υλοποιήθηκαν από τους Δικαιούχους 3 και 4 (Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου και Ίδρυμα Αρχιεπισκόπου Μακαρίου Γ') και παρουσιάζονται σε ξεχωριστή έκθεση πεπραγμένων.

Πιο συγκεκριμένα όλες οι δειγματοληψίες οι χημικές και μικροβιακές αναλύσεις, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και η συγγραφή των εκθέσεων πραγματοποιήθηκαν από την επιστημονική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης στην οποία συμμετείχαν οι:

*Καθ. Λαζαρίδης Μιχάλης και Δρ Γλυτσός Θόδωρος (μόνιμο προσωπικό).*

*Αν. Καθ. Ελευθερία Κατσιβελα, Δρ Αγγελική Σαριδάκη, Δρ Κοπανάκης Ηλίας, MSc Γαλάνη-Μαμμή Ελένη, MSc Ραΐση Λουίζα.*

Σημαντική ήταν η συνεισφορά στην πραγματοποίηση των δειγματοληψιών του προσωπικού του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης που με επικεφαλής την Βιολάκη Βαγγελιώ και τον Καλουτσάκη Αγησίλαο μερίμνησαν για την ορθή τοποθέτηση των οργάνων και την παρακολούθηση της λειτουργίας τους σε όλη τη διάρκεια των δειγματοληψιών. Οι κα Βιολάκη και ο κ. Καλουτσάκης συμμετείχαν και στη συγγραφή των εκθέσεων των αποτελεσμάτων.

Τα παραδοτέα 3.1.1-3.1.3 και 3.3.1-3.3.3 παρουσιάζονται με τη μορφή ενιαίας έκθεσης όπου αρχικά γίνεται αναφορά στους χώρους και τις μεθοδολογίες των δειγματοληψιών αέριων ρύπων,

σωματιδίων και αερομεταφερόμενων οργανισμών και στη συνέχεια γίνεται αποτύπωση της ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους του ΙΜΚ μέσω αναλυτικής παρουσίασης των συγκεντρώσεων αέριων, σωματιδιακών και μικροβιακών ρύπων (παραδοτέα 3.1.1 και 3.3.1). Αναλύονται επίσης οι μεθοδολογίες συλλογής και τα αποτελέσματα των αναλύσεων σωματιδιακών (παραδοτέα 3.1.2 και 3.3.2) και μικροβιακών επικαθίσεων (παραδοτέα 3.1.3 και 3.3.3) σε φίλτρα και σε πραγματικά εκθέματα.

## **A) Μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων στο εσωτερικό του ΙΜΚ**

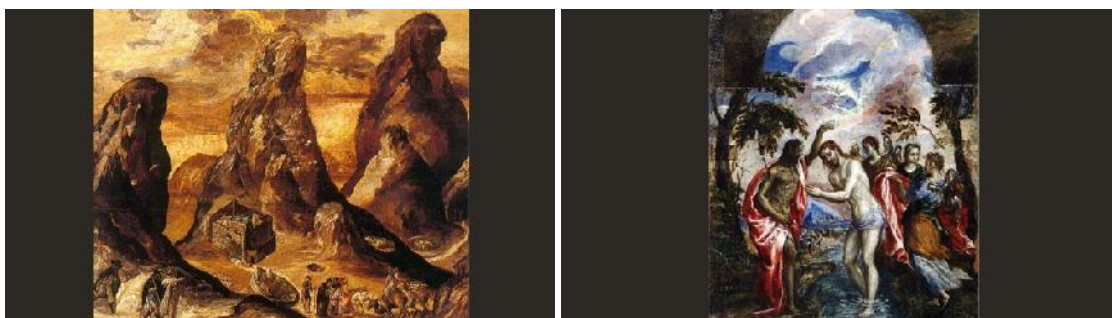
### **A1) Τοποθεσίες δειγματοληψιών.**

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο κτίριο του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης (ΙΜΚ) που βρίσκεται στο λιμάνι του Ηρακλείου (Σοφοκλή Βενιζέλου 27 / Λυσιμάχου Καλοκαιρινού 7). Το Ιστορικό Μουσείο Κρήτης απέχει 4 χιλιόμετρα από το Αεροδρόμιο Νίκος Καζαντζάκης, 1 χιλιόμετρο από το Λιμένα Ηρακλείου και 800 μέτρα από τον σταθμό των ΚΤΕΛ Ηρακλείου. Βρίσκεται στην παραλιακή οδό, μόλις 500 μέτρα από το κέντρο της πόλης.



***Εικόνα 3.1:** Το ΙΜΚ όπως φαίνεται από την παραλιακή οδό.*

Το μουσείο δέχεται επισκέπτες τη χειμερινή περίοδο (Νοέμβριος – Μάρτιος) από Δευτέρα έως Σάββατο μεταξύ 09:00 και 15:30 και τη θερινή περίοδο (Απρίλιος – Οκτώβριος) από Δευτέρα έως Σάββατο μεταξύ 09:00 και 17:00. Στο μουσείο διατηρεί μόνιμες εκθέσεις που περιλαμβάνουν εκθέματα από τη Βυζαντινή εποχή μέχρι σήμερα. Στα αντικείμενα που εκτίθενται περιλαμβάνονται κεραμικά, γλυπτά, νομίσματα ενώ διατηρείται και εθνογραφική συλλογή που περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικά αντικείμενα του 19ου και του 20ού αιώνα περισυλλεγμένα από διάσπαρτους οικισμούς του νησιού, ειδικότερα της ανατολικής και της κεντρικής Κρήτης. Στο ΙΜΚ εκτίθενται και δύο πίνακες του Δομήνικου Θεοτοκόπουλου ή Ελ Γκρέκο: Η Άποψη του Όρους και της Μονής Σινά (1570) και η Βάπτισμα του Χριστού (1569).



*Εικόνα 3.2: Η άποψη του Όρους και της Μονής Σινά (αριστερά) και η Βάπτιση του Χριστού (δεξιά)*

### **A1.1) Χαρακτηριστικά του κτιρίου του ΙΜΚ**

Το διατηρητέο νεοκλασικό κτίριο που αποτελεί την παλαιότερη πτέρυγα του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης κατασκευάστηκε το 1903 ως οικία του Ανδρέα Λυσιμάχου Καλοκαιρινού, σε σχέδιο του αρχιτέκτονα Κωνσταντίνου Τσαντηράκη. Οι οροφωγραφίες με παραστάσεις της Ιλιάδας και της Οδύσσειας είναι έργο του Αντ. Στεφανόπουλου, «διακοσμητή της εν Αθήναις οικίας Κέλλενεκ».

Στην ίδια ακριβώς θέση υπήρχε από το 1870 οικία της οικογένειας Καλοκαιρινού, έργο του αρχιτέκτονα Λύσανδρου Καυταντζόγλου, η οποία πυρπολήθηκε κατά τα γεγονότα της 25ης Αυγούστου 1898. Μεταξύ των θυμάτων ήταν ο Λυσίμαχος Α. Καλοκαιρινός και άλλα μέλη της οικογένειας.

Κατά τη δεκαετία του 1970 το Ιστορικό Μουσείο Κρήτης, μετά από δωρεά οικοπέδου από τον Ανδρέα Γ. Καλοκαιρινό και με χρηματοδότηση των Ιδρυμάτων Α. & Μ. Καλοκαιρινού, επεκτάθηκε με την ανέγερση νέας πτέρυγας, εγχείρημα συνδυασμού της μοντέρνας με την νεοκλασική αρχιτεκτονική.



*Εικόνα 3.3: Η νέα πτέρυγα του ΙΜΚ.*



Η πτέρυγα αυτή συμπληρώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 με προσθήκη ορόφου και ολοκληρώθηκε τον Μάιο του 2004 με τη διαρρύθμιση Αιθουσών Περιοδικών Εκθέσεων και του «Αμφιθεάτρου Γιάννης Περτσελάκης» (με χρηματοδότηση των Ιδρυμάτων Α. & Μ. Καλοκαιρινού και μέσω συγχρηματοδοτούμενων προγραμμάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης). Σήμερα η συνολική στεγασμένη εκθεσιακή επιφάνεια του Μουσείου είναι 1500 τ.μ. κατανεμημένη σε 25 χώρους, που καλύπτουν ιστορία δεκαεπτά αιώνων.

#### **A1.2) Σημεία δειγματοληψιών εντός του ΙΜΚ**

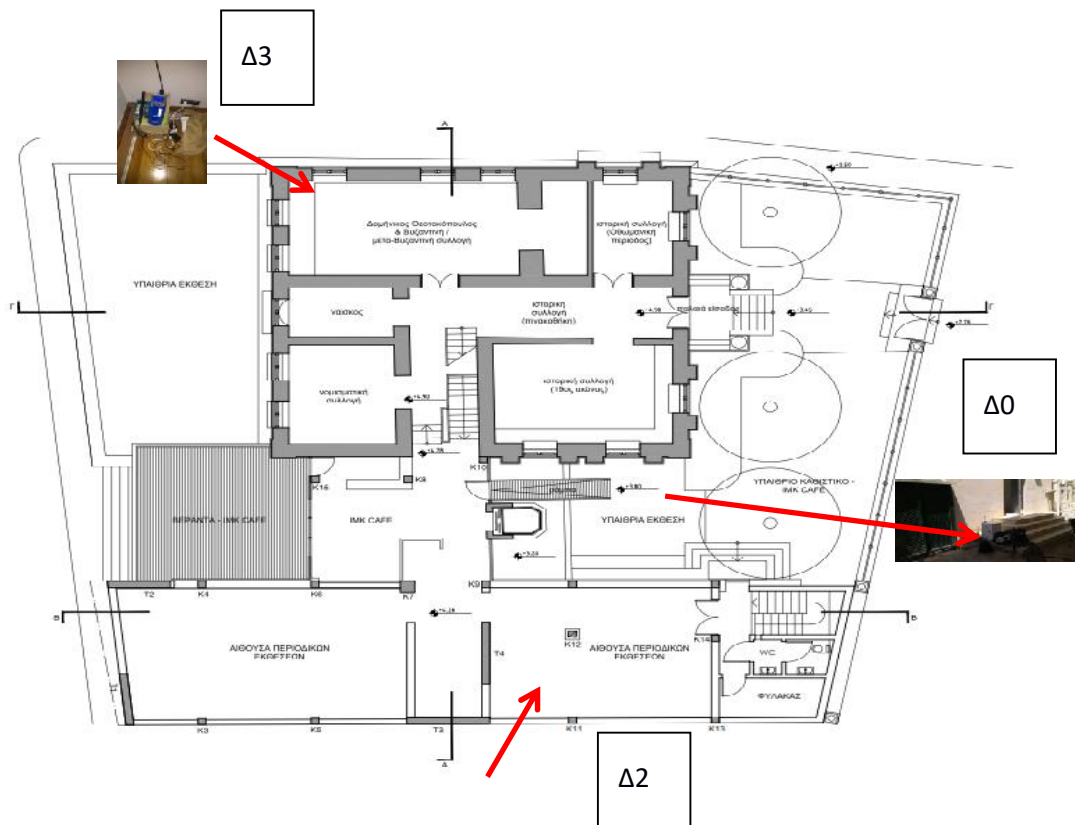
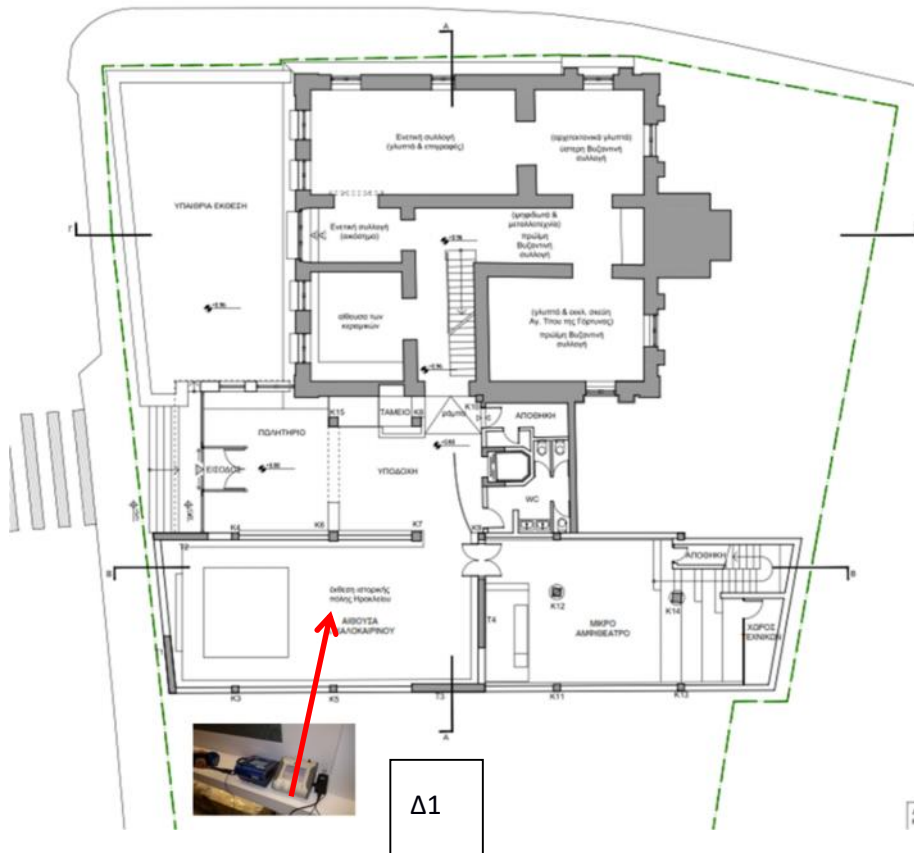
Για τις δειγματοληψίες επιλέχθηκαν, μετά από μελέτη των χώρων του μουσείου, τρία σημεία που βρίσκονται σε δύο διαφορετικούς ορόφους του κτιρίου. Πραγματοποιήθηκαν επίσης μετρήσεις μάζας αιωρούμενων σωματιδίων και μικροβιακού φορτίου στον εξωτερικό χώρο, στον 1<sup>ο</sup> όροφο του κτιρίου (Σημείο Δ0). Τα τρία βασικά σημεία δειγματοληψίας είναι:

1) Αίθουσα Α. Καλοκαιρινού, ισόγειο (Σημείο Δ1). Επιλέχθηκε γιατί βρίσκεται πολύ κοντά στην κεντρική είσοδο του μουσείου και δέχεται την επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος. Είναι ο εκθεσιακός χώρος στον οποίο εισέρχονται αρχικά σχεδόν όλοι οι επισκέπτες του μουσείου. Τοποθετήθηκαν όργανα συνεχούς καταγραφής μάζας σωματιδίων PM<sub>10</sub>, αριθμού ΑΣ σε διαφορά μεγέθη μεταξύ 0,3 – 10 μm, όζοντος, διοξειδίου του άνθρακα και πτητικών οργανικών ενώσεων.

2) Αίθουσα El Greco, 1<sup>ος</sup> όροφος (Σημείο Δ2). Στην αίθουσα αυτή εισέρχεται μεγάλο μέρος των επισκεπτών του μουσείου, καθώς εκτίθενται εκεί οι δύο πίνακες του Ελ Γκρέκο. Τους καλοκαιρινούς μήνες δέχεται την επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος λόγω της πόρτας που οδηγεί στο υπαίθριο καφέ και παραμένει για μεγάλα διαστήματα ανοικτή. Τοποθετήθηκαν όργανα συνεχούς καταγραφής μάζας σωματιδίων PM<sub>10</sub> και ελεύθερα φίλτρα για συλλογή σωματιδιακών και μικροβιακών επικαθίσεων.

3) Αίθουσα Ζ. Πορταλάκη, 1<sup>ος</sup> όροφος (Σημείο Δ3). Στην αίθουσα αυτή εισέρχεται ένας σημαντικός αριθμός επισκεπτών καθώς φιλοξενεί 65 φορητές εκκλησιαστικές εικόνες (μεταξύ 15ου-αρχές 20ου αιώνα), που δωρίστηκαν στο Μουσείο το 2014 από το Ζαχαρία Πορταλάκη. Πρόκειται για εκκλησιαστικά κειμήλια μεγάλης πολιτιστικής αξίας, που είναι ιδιαίτερα ευπαθή στους αερίους ρύπους και το φως. Λόγω της καταστροφικής επίδρασης του φωτός (αλλά και για αισθητικούς λόγους) η αίθουσα διατηρείται σκοτεινή και ανάβουν μικρής έντασης λαμπτήρες μόνο σε περίπτωση που πρέπει να πραγματοποιηθεί καθαρισμός ή εργασίες συντήρησης. Βρίσκεται πιο μακριά σε σχέση με τις άλλες αίθουσες από την εξωτερική πόρτα του ορόφου και δέχεται τη μικρότερη επίδραση από το εξωτερικό περιβάλλον. Τοποθετήθηκαν όργανα συνεχούς καταγραφής αριθμού και μάζας ΑΣ σε διαφορά μεγέθη μεταξύ 0,3 – 10 μm, όζοντος και πτητικών οργανικών ενώσεων και ελεύθερα φίλτρα για συλλογή σωματιδιακών και μικροβιακών επικαθίσεων.

Τα σημεία των δειγματοληψιών παρουσιάζονται στις παρακάτω κατόψεις του ισόγειου και του 1<sup>ου</sup> ορόφου του ΙΜΚ.



**Εικόνα 3.4:** Σημεία δειγματοληψίας στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης

Για την προστασία των χώρων του ΙΜΚ από τα αιωρούμενα σωματίδια, τοποθετήθηκαν στο πλαίσιο της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ, καθαριστές αέρα με δυνατότητα απομάκρυνσης σωματιδίων και παθογόνων μικροοργανισμών. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι φωτοκαταλυτικοί ιονιστές MC70L της εταιρείας Daikin. Οι ιονιστές λειτουργούν σε διάφορα επίπεδα παροχής αέρα (από 15,1 L/s έως 116,6 L/s) με αυξημένη κατανάλωση ρεύματος και επίπεδα θορύβου όσο αυξάνεται η παροχή αέρα. Κάθε ιονιστής μπορεί να ανανεώνει τον αέρα σε χώρο έως 46 m<sup>2</sup> σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Στις αίθουσες Α. Καλοκαιρινού (Δ1) και Ζ. Πορταλάκη (Δ3) ήταν τοποθετημένοι 4 ιονιστές ανά αίθουσα, που λειτουργούσαν μόνο τις ώρες που το μουσείο ήταν ανοικτό για τους επισκέπτες στο χαμηλότερο επίπεδο λειτουργίας για τη μείωση του θορύβου. Οι ιονιστές χρησιμοποιούνται όπως αναφέρθηκε στο χαμηλότερο επίπεδο δυνατότητας ανανέωσης του αέρα λόγω μείωσης του θορύβου αλλά και λόγω της μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης. Το Καλοκαίρι του 2019 τοποθετήθηκαν δοκιμαστικά στις αίθουσες El Greco και Πορταλάκη ιονιστές πλάσματος με δυνατότητα μείωσης των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών, αλλά χωρίς χρήση φίλτρων. Η λειτουργία τους επομένως δεν αναμενόταν να επηρεάσει τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Κατά τη δοκιμαστική περίοδο χρήσης τους δεν λειτουργούσαν οι ιονιστές της εταιρείας Daikin.

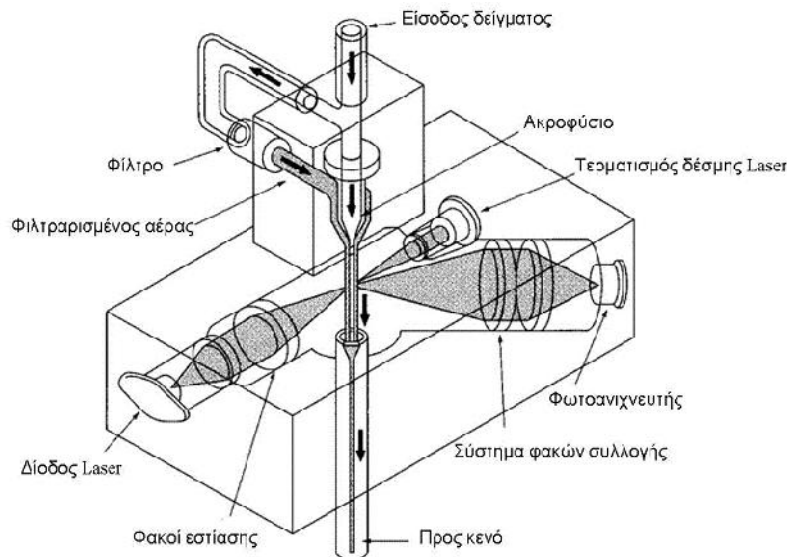
### **A1.3) Όργανα μέτρησης αέριων και σωματιδιακών ρύπων**

Για τις μετρήσεις των αέριων και σωματιδιακών ρύπων επιλέχθηκαν φορητά όργανα συνεχούς καταγραφής και όσο το δυνατόν μικρότερου μεγέθους, λόγω της ιδιαιτερότητας που παρουσιάζει το περιβάλλον των πειραματικών μετρήσεων. Η αισθητική των εκθεσιακών χώρων παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάδειξη των εκθεμάτων και καταβλήθηκε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν αναλυτές που θα εναρμονίζονται όσο το δυνατόν στο περιβάλλον και δεν θα αποσπούν την προσοχή των επισκεπτών. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει και η δυνατότητα συνεχούς καταγραφής δεδομένων ώστε να αποτυπωθούν οι διακυμάνσεις της ποιότητας του αέρα και να είναι δυνατός ο συσχετισμός τους με μεταβολές στο εσωτερικό ή εξωτερικό περιβάλλον (μικροκλιματικές συνθήκες, παρουσία επισκεπτών, χρήση ιονιστών, εργασίες συντήρησης). Παρουσιάζονται παρακάτω τα βασικά χαρακτηριστικά και η αρχή λειτουργίας των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν στις δειγματοληψίες των θερινών περιόδων 2018 και 2019.

#### **1) Όργανα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων συνεχούς καταγραφής:**

Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση των αναλυτών DustTrak II (8530, 8530EP, 8532 και 8534 DRX) οι οποίοι μετρούν συγκεντρώσεις μάζας και του αναλυτή OPS 3330 που μετράει συγκέντρωση αριθμού

σωματιδίων, της εταιρείας TSI. Η αρχή λειτουργίας όλων των παραπάνω οργάνων στηρίζεται στην ανίχνευση του σκεδαζόμενου φωτός από σωματίδια που εισέρχονται στο εσωτερικό του οργάνου. Δείγμα αέρα εισέρχεται με τη χρήση αντλίας στο όργανο και οδηγείται σε θάλαμο μέτρησης όπου ακτινοβολείται από ακτίνα μονοχρωματικού φωτός (Laser). Η ακτίνα αυτή παράγεται από δίοδο laser και εστιάζεται κατάλληλα πάνω στο δείγμα μέσα από ένα σύστημα φακών. Το σκεδαζόμενο φως κατευθύνεται σε έναν ανιχνευτή αφού πρώτα ανακλαστεί σε φακό επικαλυμμένο με χρυσό. Η τάση του ανιχνευτή είναι ανάλογη της μάζας των σωματιδίων στο δείγμα. Η τάση αυτή, πριν αντιστοιχιστεί στη συγκέντρωση, πολλαπλασιάζεται με μία σταθερά που προκύπτει από την απόκριση του οργάνου σε γνωστή συγκέντρωση συγκεκριμένου δείγματος αιωρούμενων σωματιδίων (Arizona Test Dust, A1). Η σταθερά αυτή χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιηθεί η εξάρτηση της σκέδασης από το συντελεστή σκέδασης, την κατανομή μεγέθους, το σχήμα και την πυκνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στο εξεταζόμενο δείγμα αέρα. Γενικά οι αναλυτές μάζας με λειτουργούν μέσω της σκέδασης του φωτός, παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια για δείγματα αιωρούμενων σωματιδίων που αποτελούνται από ίδιου μεγέθους σωματίδια (monodisperse aerosol). Κατά τη χρήση του σε πραγματικά περιβάλλοντα, συνίσταται η βαθμολόγηση του με βάση τα χαρακτηριστικά των μετρούμενων σωματιδίων. Περιγράφεται σχηματικά στην επόμενη εικόνα η διαδικασία μέτρησης από τα όργανα της οικογένειας DustTrak.



**Εικόνα 3.5:** Σχηματική αναπαράσταση του αναλυτή μάζας DustTrack (Morawska and Salthammer, 2003)

Παρουσιάζονται στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων της εταιρείας TSI που χρησιμοποιήθηκαν στις δειγματοληψίες.

**1α) DustTrakII 8530:** Είναι επιτραπέζιο μοντέλο, διαθέτει ενσωματωμένη αντλία, εσωτερική μνήμη

και καταγραφικό για την αυτόματη αποθήκευση των μετρούμενων τιμών σε καθορισμένα διαστήματα και τη δυνατότητα μετάδοσης των μετρούμενων τιμών σε υπολογιστή. Ανάλογα με την προσαρμοζόμενη κεφαλή μέτρησης, μετρά κλάσματα σωματιδίων  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_4$  ή  $PM_1$ . Στις δειγματοληψίες στο ΙΜΚ μετρήθηκαν σωματίδια  $PM_{10}$ . Στη βάση του υπάρχει φίλτρο 37 mm για την κατακράτηση των αιωρούμενων σωματιδίων που διέρχονται από το όργανο.



**Εικόνα 3.5α:** DustTrak II 8530 και κεφαλές δειγματοληψίας

**1β) DustTrakII 8530EP:** Πρόκειται για το ίδιο όργανο, με μοναδική διαφοροποίηση τη χρήση εξωτερικής αντλίας, που διευκολύνει τη δυνατότητα χρήσης σε εξωτερικό περιβάλλον για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Στις δειγματοληψίες χρησιμοποιήθηκε για μετρήσεις συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων  $PM_{10}$  σε εξωτερικό περιβάλλον, με χρήση κατάλληλου κλωβού για την προστασία του οργάνου.



**Εικόνα 3.5β:** DustTrak II 8530EP και κλωβός δειγματοληψίας

**1γ) DustTrakII 8532 handheld και DustTrak II DRX:** Είναι η πιο φορητές έκδοση της οικογένειας DusttrakII και μπορεί να μεταφερθούν ευκολότερα λόγω της χειρολαβής και του μικρότερου μεγέθους του. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και οι δυνατότητες του είναι ίδιες με τα υπόλοιπα μοντέλα, με μοναδική ουσιαστική διαφορά την έλλειψη φίλτρου κατακράτησης των αιωρούμενων σωματιδίων. Επιπλέον το DustTrak II 8534 DRX παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης των κλασμάτων  $PM_{10}$ ,  $PM_4$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$  και TSP, όπου TSP τα ολικά σωματίδια ανεξαρτήτου μεγέθους. Στο Dusttrak II 8534 DRX δεν χρησιμοποιείται κεφαλή δειγματοληψίας. Η βασική διαφοροποίηση στη λειτουργία ανίχνευσης των σωματιδίων είναι ότι μέσω της συνολικής τάσης στον φωτοανιχνευτή προσδιορίζεται

η συγκέντρωση μάζας των PM<sub>2.5</sub>, αλλά παράλληλα ανιχνεύονται και οι μεμονωμένοι παλμοί από κάθε σωματίδιο, τον οποίον η ένταση είναι ανάλογη του μεγέθους τους. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται με κατάλληλες διορθώσεις από ενσωματωμένο λογισμικό για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης μάζας των υπολοίπων κλασμάτων σωματιδίων.



**Εικόνα 3.5γ:** DustTrak II 8532

**1δ) OPS 3330:** Με το όργανο αυτό προσδιορίζεται αριθμητική συγκέντρωση σωματιδίων με μέγεθος 0,3-10 μm. Μεγάλο πλεονέκτημα του οργάνου είναι παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής σε 16 διαφορετικά κλάσματα μεγεθών, το εύρος των οποίων προσδιορίζεται από το χρήστη. Επιπλέον με εισαγωγή της πυκνότητας των σωματιδίων στο συνοδευτικό λογισμικό υπολογίζεται και η συγκέντρωση μάζας στα αντίστοιχα μεγέθη. Η αρχή λειτουργίας του οργάνου βασίζεται στην ανίχνευση των παλμών που σκεδάζονται από τα σωματίδια καθώς διέρχονται από ακτίνα μονοχρωματικού φωτός. Το όργανο παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης έως 30000 δειγμάτων και μπορεί να συνδεθεί με Η/Υ για απευθείας μετάδοση των δεδομένων.



**Εικόνα 3.5δ:** OPS 3330

## **2) Όργανα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων με χρήση φίλτρων:**

Η χρήση φίλτρων αποσκοπούσε στη συλλογή αιωρούμενων σωματιδίων για αναλύσεις προσδιορισμού της χημικής τους σύστασης. Οι συνήθεις προσκρουστήρες χρησιμοποιούν ισχυρές αντλίες για συλλογή μεγάλης μάζας πάνω στα φίλτρα σε μικρό χρονικό διάστημα (συνήθως

πραγματοποιούνται 24ωρες δειγματοληψίες). Στην περίπτωση των μετρήσεων στο ΙΜΚ δεν ήταν εφικτό λόγω του μεγάλου συνολικού μεγέθους (αντλία και προσκρουστήρας) αλλά και λόγω του υψηλού θορύβου. Έτσι επιλέχθηκαν δειγματολήπτες μάζας  $PM_{10}$  που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για υπολογισμό της προσωπικής έκθεσης σε σωματίδια σε ιδιαίτερα ρυπασμένα περιβάλλοντα. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι δειγματολήπτες PEM της εταιρείας SKC με συνοδευτική αντλία Universal Pump (SKC) ροής έως 4 L/min. Οι δειγματοληψίες έγιναν σε φίλτρα από πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) και ίνες χαλαζία (quartz) διαμέτρου 37 mm.



**Εικόνα 3.5ε:** Δειγματολήπτης  $PM_{10}$  PEM και αντλία Universal Pump

Παράλληλα τοποθετήθηκαν και φίλτρα για τη συλλογή σωματιδιακών επικαθίσεων μέσω διάχυσης κα βαρυτικής εναπόθεσης, στις αίθουσες Πορταλάκη και El Greco. Ορισμένα φίλτρα τοποθετήθηκαν μέσα σε προθήκες στην αίθουσα El Greco. Επιπλέον τοποθετήθηκαν φίλτρα PTFE ανάμεσα σε δύο μεταλλικές πλάκες από ανοξείδωτο ατσάλι, που απείχαν 1 cm ώστε να μελετηθεί η εναπόθεση σωματιδίων μόνο λόγω διάχυσης στις επιφάνειες. Επιλέχθηκε ανοξείδωτο ατσάλι γιατί παρουσιάζει μικρή εναπόθεση σωματιδίων στην επιφάνεια του. Τα φίλτρα ήταν PTFE ή quartz, ανάλογα με το είδος της χημικής ανάλυσης που θα πραγματοποιούνταν στη συνέχεια. Τα φίλτρα αρχικά τοποθετούνταν σε ξηραντήρα για 24 ώρες για αποβολή της υγρασίας και στη συνέχεια ζυγίζονταν σε κατάλληλο διαμορφωμένο εργαστηριακό χώρο του Εργαστηρίου Ατμοσφαιρικών αιωρούμενων Σωματιδίων (Πολ. Κρήτης) με χρήση ζυγού ακρίβειας 5 δεκαδικών ψηφίων. Έπειτα μεταφέρονταν στον χώρο της μέτρησης, ενώ ένα από τα φίλτρα παρέμενε στο εργαστήριο για να χρησιμεύσει ως «τυφλό» φίλτρο αναφοράς. Οι δειγματοληψίες διαρκούσαν 6 ως 9 μήνες, ενώ αμέσως μετά το πέρας τους μεταφέρονταν στο εργαστήριο και τοποθετούνταν σε ξηραντήρα για 24 ώρες πριν τη ζύγιση. Από τη διαφορά των μαζών πριν και μετά τη δειγματοληψία, προσδιορίστηκε η μάζα των επικαθίσεων στα φίλτρα. Τα φίλτρα στη συνέχεια υποβάλλονται σε χημική ανάλυση με χρήση ιοντικής χρωματογραφίας (IC) και φασματομετρίας μάζας επαγωγικώς συζευγμένου πλάσματος

(ICP/MS) για τον προσδιορισμό μετάλλων και ιόντων που περιέχονται στα αιωρούμενα σωματίδια των εσωτερικών χώρων του ΙΜΚ.

### **3) Όργανα μέτρησης αέριων ρύπων:**

Χρησιμοποιώντας την εμπειρία από την πράξη ΜΟΥΣΕΙΑ, που ολοκληρώθηκε το 2016, επιλέχθηκε να γίνουν μετρήσεις όζοντος ( $O_3$ ) και ολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC's), καθώς παρουσίασαν μετρήσιμες συγκεντρώσεις στους εσωτερικούς χώρους του ΙΜΚ και επιπλέον έχουν καταστροφικές επιδράσεις σε ευπαθή υλικά. Δεν υπήρχε η δυνατότητα μέτρησης μεμονωμένων οργανικών ενώσεων καθώς απαιτούνται εξειδικευμένα όργανα μεγάλου όγκου (φορητοί χρωματογράφοι μάζας). Τα οξείδια του αζώτου και το διοξείδιο του θείου παρουσιάζουν χαμηλές συγκεντρώσεις στο εσωτερικό του ΙΜΚ και επομένως δεν κρίθηκε σκόπιμη η παρακολούθησή τους. Επιπλέον των αέριων ρύπων έγιναν και μετρήσεις διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ), το οποίο δεν προκαλεί φθορές σε υλικά, αλλά είναι δείκτης της παρουσίας μεγάλου αριθμού ατόμων και σε αρκετές περιπτώσεις συνδέεται με υποβαθμισμένη ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν τα όργανα:

**3α) Tiger VOC detector (ION Science):** Πρόκειται για φορητό αναλυτή ολικών πτητικών οργανικών ενώσεων, η ανίχνευση των οποίων γίνεται με τη μέθοδο του φωτοϊονισμού (PID sensor). Παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης χαμηλών συγκεντρώσεων (1 ppb), έχει γρήγορη απόκριση και έτσι καθίσταται ιδανικός για μετρήσεις σε εσωτερικούς χώρους. Έχει τη δυνατότητα καταγραφής και αποθήκευσης σε εσωτερική μνήμη 120000 τιμών.



*Εικόνα 3.5στ: Tiger VOC detector*

**3β) ppbRAE 3000+ VOC detector (Honeywell):** Φορητός αναλυτής πτητικών οργανικών ενώσεων που λειτουργεί με τη μέθοδο του φωτοϊονισμού. Παρουσιάζει πολύ γρήγορη απόκριση (3 s) και μετράει χαμηλές συγκεντρώσεις (1 ppb). Διαθέτει εσωτερική μνήμη για αποθήκευση τιμών και δυνατότητα σύνδεσης με Η/Υ.





*Εικόνα 3.5ζ: ppb RAE 3000+ VOC detector*

**3γ) Aeroqual series 500 O<sub>3</sub> detector (Aeroqual):** Φορητός αναλυτής μέτρησης όζοντος με δυνατότητα χρήσης τεσσάρων διαφορετικών κεφαλών μέτρησης, ανάλογα με το εύρος των αναμενόμενων συγκεντρώσεων O<sub>3</sub>. Στην περίπτωση των μέτρησεων στους εσωτερικούς χώρους του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης επελέγη αισθητήρας με εύρος μέτρησης 0-0,15ppm. ανιχνευτής αερίων Aeroqual 500 αποτελεί συσκευή υψηλής ακρίβειας για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων του όζοντος στον αέρα. Ο ανιχνευτής μπορεί να φέρει 4 διαφορετικές κεφαλές ανάλογα με το αναμενόμενο εύρος συγκεντρώσεων. Για την περίπτωση μέτρησης στους εσωτερικούς χώρους του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης επελέγη αισθητήρας με εύρος μέτρησης 0-150 ppb με διακριτική ικανότητα 1 ppb και χρόνο απόκρισης 60 s. Οι μετρούμενες τιμές αποθηκεύονται σε εσωτερική μνήμη με δυνατότητα αποθήκευσης 8000 τιμών.



*Εικόνα 3.5η: Aeroqual series 500 O<sub>3</sub> detector*

**3δ) Q-Trak 7575 (TSI):** Φορητός αναλυτής με δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης διοξειδίου του άνθρακα και πτητικών οργανικών ενώσεων σε χαμηλές συγκεντρώσεις (ppb). Επιπλέον καταγράφονται και αποθηκεύονται οι τιμές της σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας, παρέχοντας έτσι μια αναλυτική εικόνα της ποιότητας του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον.



**Εικόνα 3.5θ:** Q-Trak 7575

#### **A1.4) Χρονικές περίοδοι των δειγματοληψιών**

Κατά τη διάρκεια της πράξης πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές εντατικών δειγματοληψιών, το Καλοκαίρι και το Φθινόπωρο των ετών 2018 και 2019. Επιλέχθηκαν οι δύο αυτοί περίοδοι καθώς συμπίπτουν με τις περιόδους που συναντάται στο ΙΜΚ η μεγαλύτερη προσέλευση επισκεπτών. Στις δειγματοληψίες:

- Τοποθετήθηκαν όργανα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων (συγκέντρωση μάζας και αριθμού) για εβδομαδιαία καταγραφή με χρονικό βήμα 2 λεπτών.
- Τοποθετήθηκαν όργανα μέτρησης πτητικών οργανικών ενώσεων και όζοντος για εβδομαδιαία καταγραφή με χρονικό βήμα 2 λεπτών.
- Πραγματοποιήθηκε συλλογή μικροβιακών επικαθίσεων από πραγματικά έργα τέχνης.
- Επιπλέον: Τοποθετήθηκαν «ελεύθερα» φίλτρα συλλογής σωματιδίων (εντός και εκτός προθηκών) με στόχο τον προσδιορισμό ιόντων, μετάλλων, στοιχειακού και οργανικού άνθρακα και μικροβιακών επικαθίσεων. Χρόνος έκθεσης 6-9 μήνες.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά οι περίοδοι των δειγματοληψιών και τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε χώρο.

**Πίνακας 3.1: Μετρήσεις Καλοκαίρι και Φθινόπωρο του 2019**

<b>Αίθουσα Καλοκαιρινού</b>			
Περίοδος μετρήσεων	15/7-23/7	17/9-24/9	24/9-2/10
Όργανο μέτρησης	DustTrakII, OPS, Q-Trak, Aeroqual, PEM	DustTrakII, OPS, Q-Trak, Aeroqual, PEM	DustTrakII, OPS, Q-Trak, Aeroqual, PEM
Παρατηρήσεις	Το Q-Trak παρουσίασε βλάβη	Το Q-Trak παρουσίασε βλάβη, Μετρήσεις μέχρι 21/9 με το DustTrakII	Το Q-Trak παρουσίασε βλάβη
<b>Αίθουσα El Greco</b>			
Περίοδος μετρήσεων	15/7-23/7	17/9-24/9	24/9-2/10
Όργανο μέτρησης	DustTrakII	DustTrakII	DustTrakII

Παρατηρήσεις	Ok	Μετρήσεις μόνο 17 και 18/9	Δεν έγιναν μετρήσεις
<b>Αίθουσα Πορταλάκη</b>			
Περίοδος μετρήσεων	15/7-23/7	17/9-24/9	24/9-2/10
Όργανο μέτρησης	Dustrak DRX, OPS, ppbRAE	Dustrak DRX, OPS, ppbRAE	Dustrak DRX, OPS, ppbRAE
Παρατηρήσεις	Ok	Ok	Ok
<b>Εξωτερικό Περιβάλλον (Κήπος Μουσείου)</b>			
Περίοδος μετρήσεων	15/7-23/7	17/9-24/9	24/9-2/10
Όργανο μέτρησης	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία
Παρατηρήσεις	Ok	Δεν έγιναν μετρήσεις	Δεν έγιναν μετρήσεις

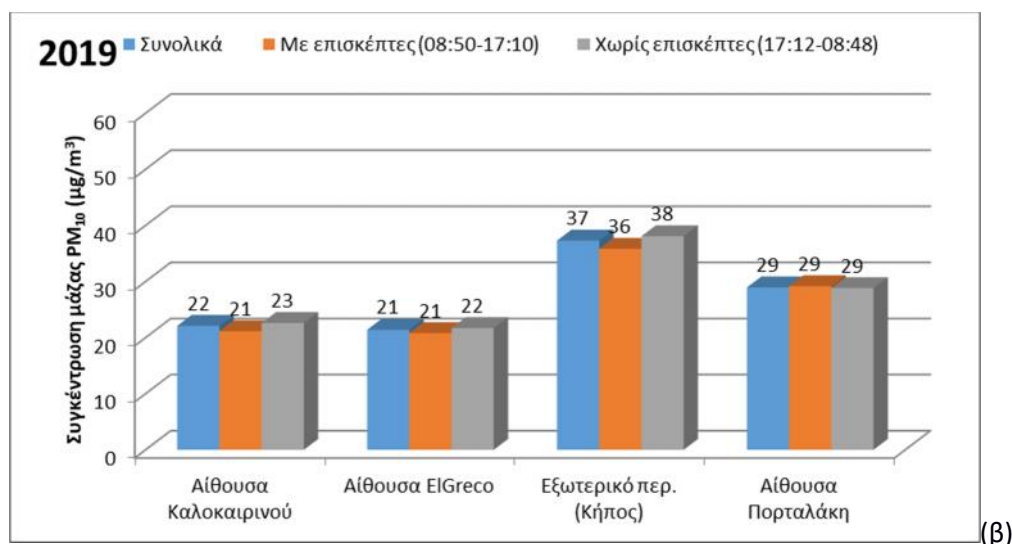
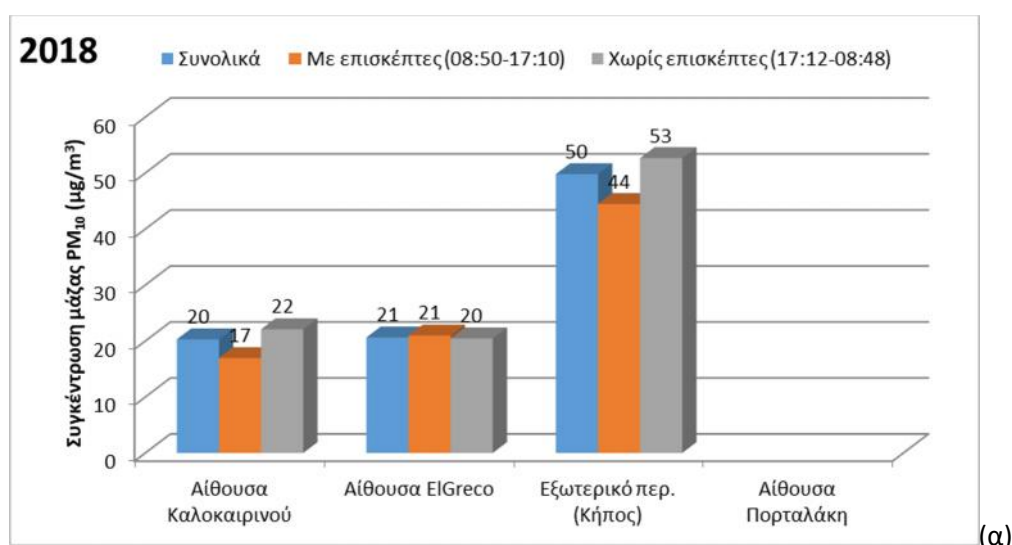
**Πίνακας 3.2: Μετρήσεις Καλοκαίρι και Φθινόπωρο του 2018**

	<b>Αίθουσα Καλοκαιρινού</b>					
Περίοδος μετρήσεων	20/6-27/6	9/7-16/7	24/7-31/7	28/8-5/9	18/9-24/9	2/10-9/10
Όργανο μέτρησης	DustTrakII, OPS, Q-Trak	DustTrakII, OPS, Q-Trak	DustTrakII, OPS, Q-Trak	DustTrakII, OPS	DustTrakII, OPS, Tiger	DustTrakII, OPS, Tiger
Παρατηρήσεις	Ok	Το Q-Trak κατέγραψε μόνο 9-10/7, το tiger είχε βλάβη	Ok	Ok	OK	OK
	<b>Αίθουσα El Greco</b>					
Περίοδος μετρήσεων	20/6-27/6	9/7-16/7	24/7-31/7	28/8-5/9	18/9-24/9	2/10-9/10
Όργανο μέτρησης	DustTrakII	DustTrakII	DustTrakII	DustTrakII	DustTrakII	DustTrakII
Παρατηρήσεις	Ok	Μετρήσεις μόνο 13/7-16/7	Ok	Ok	Ok	Ok
	<b>Αίθουσα Πορταλάκη</b>					
Περίοδος μετρήσεων	20/6-27/6	9/7-16/7	24/7-31/7	28/8-5/9	18/9-24/9	2/10-9/10
Όργανο μέτρησης	OPS, Tiger	OPS, Tiger	OPS, Tiger	OPS	OPS, Q-Trak	OPS, Q-Trak
Παρατηρήσεις	Ok	Μετρήσεις μόνο 13/7-16/7	Ok	Ok	Ok	Ok
	<b>Εξωτερικό Περιβάλλον (Κήπος Μουσείου)</b>					
Περίοδος μετρήσεων	20/6-27/6	9/7-16/7	24/7-31/7	28/8-5/9	18/9-24/9	2/10-9/10
Όργανο μέτρησης	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία	DustTrakII σε κλωβό με εξωτερική αντλία
Παρατηρήσεις	Ok	Ok	Ok	Δεν έγιναν μετρήσεις	Δεν έγιναν μετρήσεις	Δεν έγιναν μετρήσεις

Πρέπει επιπλέον να σημειωθεί ότι για να είναι άμεσα συγκρίσιμες οι μετρήσεις ανάμεσα στα όργανα προσδιορισμού απευθείας συγκέντρωσης μάζας (DustTrak), οι τιμές τους διορθώθηκαν με βάση μετρήσεις με αναλυτή μάζας με χρήση φίλτρων (Leckel LVS6-RV). Ο αναλυτής αυτός αποτελεί πρότυπο όργανο, πιστοποιημένο κατά CEN EN 12341 για περιβαλλοντικές μετρήσεις σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ . Ανάλογες μετρήσεις αέριων και σωματιδιακών ρύπων σε εσωτερικά περιβάλλοντα μουσείων, βιβλιοθηκών και αρχείων κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικές για τον προσδιορισμό της σχέσης ανάμεσα στην ποιότητα του αέρα, τον εξαερισμό και την ενεργειακή κατανάλωση, με τελικό στόχο τη δημιουργία κτιρίων που θα διασφαλίζουν την προστασία των εκθεμάτων, του προσωπικού και των επισκεπτών με μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση και χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Sharif-Askari and Abu-Hijleh, 2018).

## A2) Αποτελέσματα μετρήσεων Αιωρούμενων Σωματιδίων

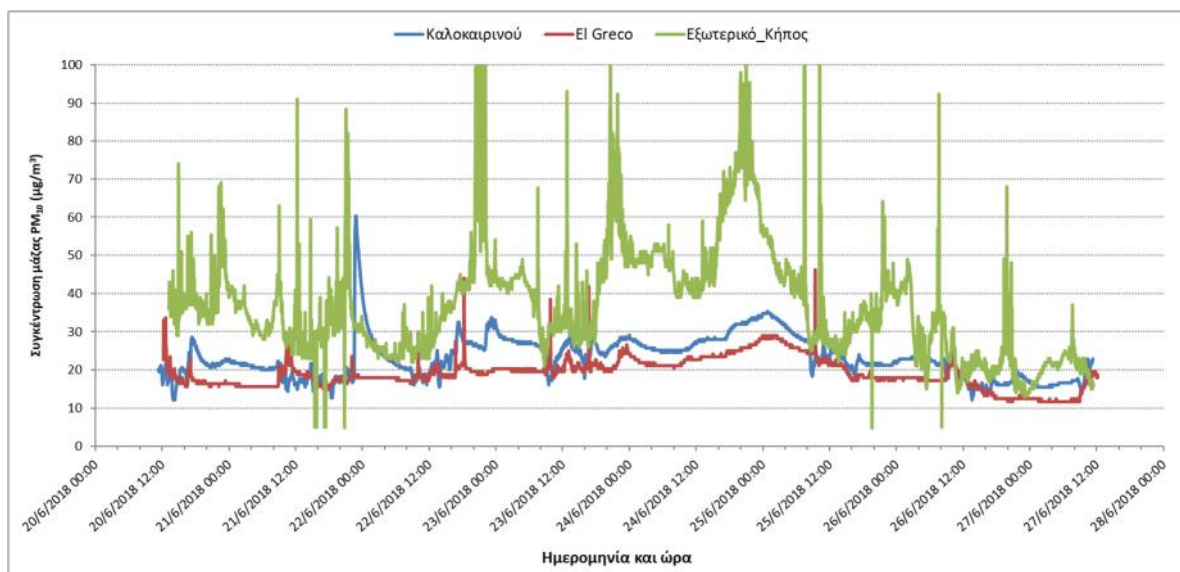
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η συνολική εικόνα των συγκεντρώσεων μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους που έγιναν δειγματοληψίες. Οι τιμές των συγκεντρώσεων αναφέρονται στις μέσες τιμές όλων των δειγματοληψιών (έξι το 2018 και τρεις το 2019) και επιπλέον έχει γίνει διαχωρισμός για τις χρονικές περιόδους που το μουσείο ήταν ανοικτό προς και το κοινό και όταν δεν υπήρχαν επισκέπτες στους εσωτερικούς χώρους. Όλες οι μετρήσεις έχουν γίνει με όργανα DustTrak II και DustTrak DRX και με χρήση κεφαλής για σωματίδια PM<sub>10</sub> στην περίπτωση του DustTrak II. Το 2018 δεν έγιναν μετρήσεις συγκέντρωσης μάζας στην αίθουσα Πορταλάκη.



**Διάγραμμα 3.1:** Μέση τιμή συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων PM<sub>10</sub>, στα σημεία δειγματοληψίας στις περιόδους εντατικών μετρήσεων για τα έτη 2018 (α) και 2019 (β).

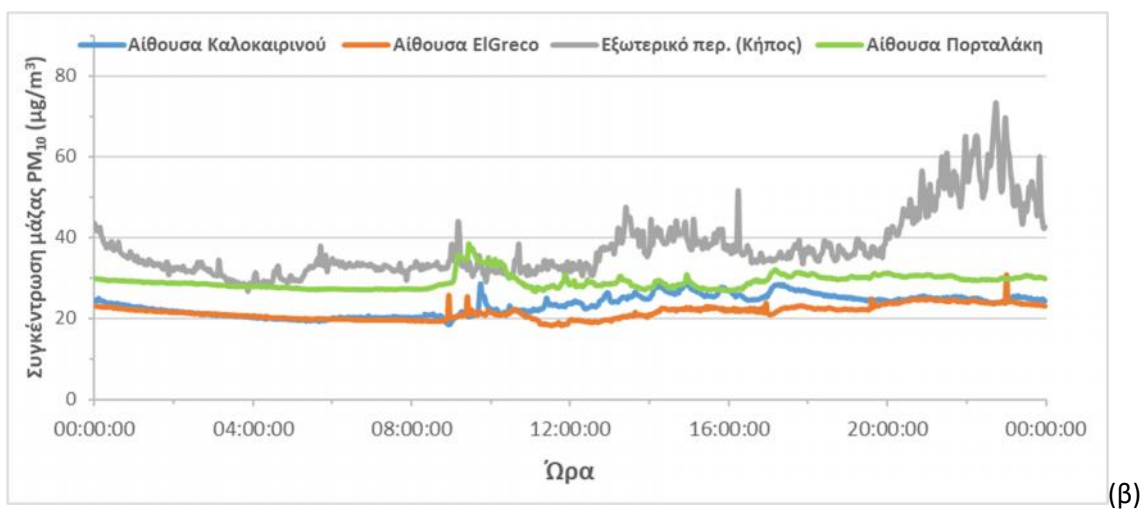
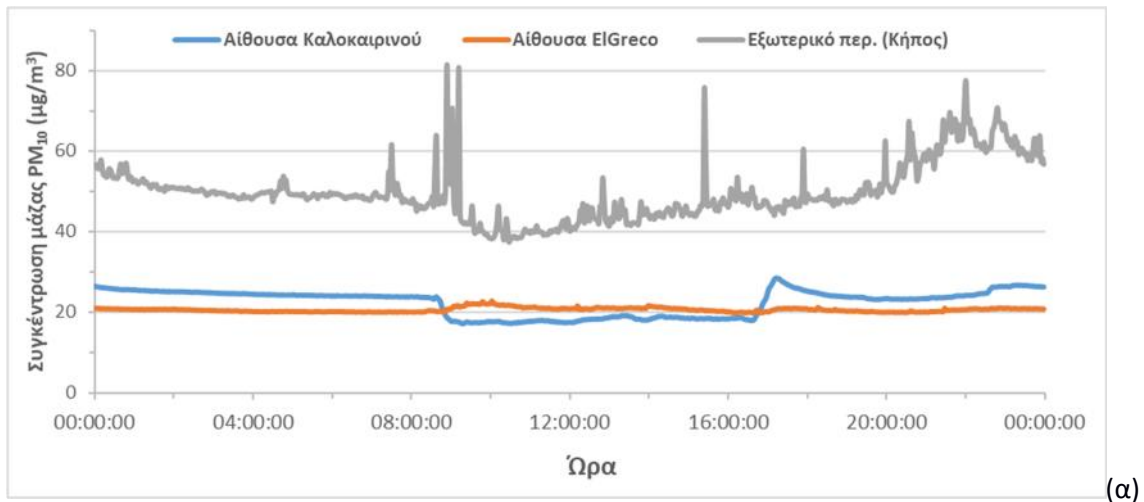
Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων είναι υψηλότερες στο εξωτερικό περιβάλλον, όπως είναι αναμενόμενο. Οι υψηλότερες τιμές στο εξωτερικό περιβάλλον τις απογευματινές και βραδινές ώρες αποδίδονται στην επίδραση εκπομπών από γειτονικά εστιατόρια, τα οποία συγκεντρώνουν περισσότερο κόσμο μετά τη δύση του ήλιου. Γενικά για τις αίθουσες Καλοκαιρινού και El Greco δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ανάμεσα για τις μέσες τιμές μεταξύ 2018 και 2019. Οι χαμηλότερες τιμές στην αίθουσα Καλοκαιρινού κατά τις ώρες που το μουσείο δεχόταν επισκέπτες αποδίδονται στη χρήση ιονιστών. Αντίθετα στην αίθουσα El Greco δεν υπήρχαν ιονιστές. Η επίδραση των ιονιστών φαίνεται και στις τιμές που αντιστοιχούν στο διαχωρισμό μεταξύ των ωρών που του μουσείου δεχόταν επισκέπτες και αυτών που δεν ήταν ανοικτό για το κοινό. Για την αίθουσα Καλοκαιρινού με ιονιστές η μέση τιμή για το 2018 ήταν  $17 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ χωρίς τη χρήση ιονιστών η αντίστοιχη τιμή ήταν  $22 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αντίθετα στην αίθουσα El Greco οι μέσες τιμές με και χωρίς τη λειτουργία ιονιστών ήταν  $21 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $22 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Το 2019 η διαφορά στην αίθουσα Καλοκαιρινού ήταν  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Διάγραμμα 3.1) σε μικρότερο όμως αριθμό δειγματοληψιών. Τα χαρακτηριστικά των κτιρίων, τα μέτρα προστασίας και οι εξωτερικές συγκεντρώσεις επηρεάζουν σημαντικά την εικόνα του σωματιδιακού φορτίου στους εσωτερικούς χώρους (Mašková et al., 2020). Οι Cao et al. (2020) πραγματοποίησαν μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων σε μουσείο (Emperor Qin's Terra-Cotta Museum) στην πόλη Χί'αν (Κίνα) και κατέγραψαν υψηλές μέσες τιμές  $\text{PM}_{2.5}$  και TSP, ( $108.4 \pm 30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $172.4 \pm 46.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα) κατά τη διάρκεια της Καλοκαιρινής περιόδου. Οι υψηλές συγκεντρώσεις συνδέονται με το επιβαρυνμένο εξωτερικό περιβάλλον και στα σωματίδια  $\text{PM}_{2.5}$  κυριαρχούσαν υλικά από το φλοιό της γης, θειικά, αμμωνιακά, νιτρικά και στοιχειακός άνθρακας. Αντίθετα οι Daher et al. (2011) διεξήγαγαν ταυτόχρονες μετρήσεις στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον για να εκτιμηθεί η χρήση ειδικής μικροπεριβαλλοντικής προθήκης για την προστασία πίνακα του Λεονάρντο Ντα Βίντσι που βρίσκεται σε μουσείο (Εκκλησία) στο κέντρο του Μιλάνου. Κατέγραψαν λόγω των αυξημένων μέτρων προστασίας σημαντική μείωση της επίδρασης εξωτερικού περιβάλλοντος (μείωση σωματιδίων 88%-94% σε ετήσια βάση). Παράλληλα η μελέτη τους οδήγησε αναγνώριση εσωτερικών πηγών σωματιδίων με μεγάλα ποσοστά οργανικών ενώσεων άνθρακα.

Ενώ οι μέσες τιμές της συγκέντρωσης στις διάφορες αίθουσες δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, οι διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι ιδιαίτερα σημαντικές για ένα εσωτερικό περιβάλλον όπου απαιτούνται όσο το δυνατόν σταθερότερες συνθήκες. Σε αρκετές περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις στους εσωτερικούς χώρους ακολουθούν τη διακύμανση της εξωτερικής συγκέντρωσης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα που αναφέρεται στην περίοδο δειγματοληψίας 20/6/2018-27/6/2018.



**Διάγραμμα 3.2:** Διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων  $PM_{10}$  για την περίοδο 20/6/2018-27/6/2018

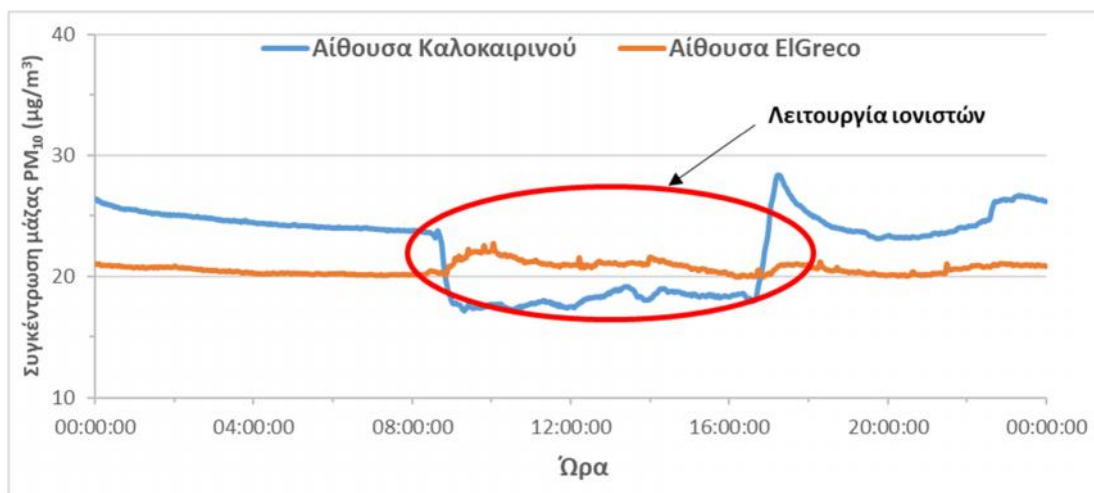
Παρόμοιες μεταβολές παρατηρήθηκαν σε όλες τις δειγματοληψίες, τόσο το 2018 όσο και το 2019. Γενικά το εξωτερικό περιβάλλον παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές στη συγκέντρωση των σωματιδίων  $PM_{10}$ , με υψηλότερες τιμές τις απογευματινές και βραδινές ώρες. Γενικότερα παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην αίθουσα Καλοκαιρινού σε σχέση με την El Greco, όπου η συγκέντρωση παρέμενε σχεδόν σταθερή σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα όπου παρουσιάζεται η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων μάζας για το σύνολο των δειγματοληψιών των ετών 2018 και 2019. Οι τιμές έχουν προκύψει ως η μέση τιμή των μετρήσεων τη συγκεκριμένη ώρα για κάθε ημέρα δειγματοληψίας. Ανάλογη εικόνα έχει καταγραφεί και από τους Cartechini et al. (2015), οποίοι πραγματοποίησαν μετρήσεις σωματιδίων και στοιχειακού άνθρακα (black carbon) με χρονική ανάλυση 1 min σε πινακοθήκη στο Ιστορικό κέντρο της Περούτζια (Ιταλία) και ανέδειξαν τη σημαντική επίδραση από τα γειτονικά εστιατόρια (χρήση ξυλόφουρνων), που οδηγούν σε αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων μικρού μεγέθους και αυξημένες τιμές στοιχειακού άνθρακα στο εσωτερικό του μουσείου.



**Διάγραμμα 3.3:** Ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων  $PM_{10}$ , στα σημεία δειγματοληψίας στις περιόδους εντατικών μετρήσεων για τα έτη 2018 (α) και 2019 (β) .

Συγκρίνοντας τις εντατικές δειγματοληψίες για τα έτη 2018 και 2019 παρατηρούμε διαφορές στην ημερήσια διακύμανση για την αίθουσα Καλοκαιρινού, ενώ αντίθετα στην αίθουσα El Greco η εικόνα είναι σχεδόν ίδια για τις δύο περιόδους. Αναφέρεται ξανά ότι στην αίθουσα Καλοκαιρινού λειτουργούσαν ιονιστές τις ώρες που το μουσείο ήταν ανοιχτό για το κοινό. Αντίθετα στην αίθουσα EL Greco δεν υπήρχαν ιονιστές. Η επίδραση των ιονιστών στη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι εμφανής το 2018, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα που παρουσιάζονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις στις δύο αίθουσες.





**Διάγραμμα 3.4:** Ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων  $PM_{10}$ , στις αίθουσες Καλοκαιρινού και El Greco για τις δειγματοληψίες του 2018.

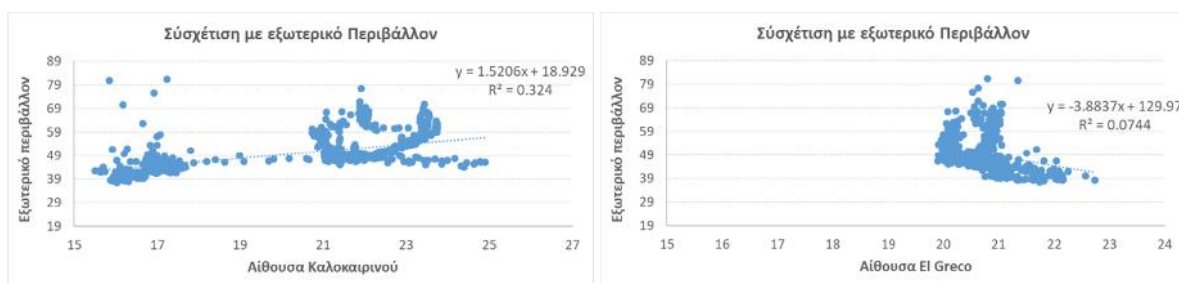
Η χρήση των ιονιστών μειώνει σημαντικά τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων και με την έναρξη της λειτουργίας τους στις 09:00 στην αίθουσα Καλοκαιρινού, οι τιμές της συγκέντρωσης μάζας πέφτουν κάτω από τα  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η εικόνα αυτή (με εντονότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τις ώρες που το μουσείο δεν δέχεται επισκέπτες) διατηρείται μέχρι την παύση της λειτουργίας τους στις 17:30, οπότε παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης η οποία πιθανότατα συνδέεται με τις διαδικασίες κλεισίματος του μουσείου από το προσωπικό και την επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος που πλέον δεν μειώνεται σημαντικά λόγω των ιονιστών. Αντίθετα στην αίθουσα El Greco οι συγκεντρώσεις αυξάνονται με την παρουσία επισκεπτών, αλλά γενικά δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές στη διάρκεια του 24ώρου. Οι διαφορές ανάμεσα στις δύο αίθουσες αποδίδονται: α) στο μέγεθος τους. Η αίθουσα Καλοκαιρινού είναι πολύ μεγαλύτερη, β) στην επισκεψιμότητα. Σχεδόν όλοι οι επισκέπτες του Μουσείου εισέρχονται στην αίθουσα Καλοκαιρινού, κάτι που δεν ισχύει για την αίθουσα El Greco, παρόλο που φιλοξενεί τα σημαντικότερα εκθέματα του Μουσείου, γ) στη χρήση ιονιστών, δ) στην εγγύτητα με το εξωτερικό περιβάλλον. Η αίθουσα Καλοκαιρινού είναι πολύ κοντά στην κεντρική είσοδο του Μουσείου και δέχεται μεγαλύτερη επίδραση από το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίστοιχα συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν για το έτος 2019, καθώς λόγω βλάβης των αντίστοιχων οργάνων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στις αίθουσες El Greco και Καλοκαιρινού για δύο από τις τρεις δειγματοληψίες. Όμως η επίδραση των ιονιστών μπορεί να διαπιστωθεί και στις δειγματοληψίες του 2019 στην αίθουσα Πορταλάκη (διάγραμμα 3.5). Η 1<sup>η</sup> δειγματοληψία (15/7-23/7) πραγματοποιήθηκε χωρίς τη λειτουργία των ιονιστών Daikin, ενώ στις δύο επόμενες (17/9-21/9 και 24/9-2/10) οι ιονιστές λειτουργούσαν κανονικά. Παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$  στην αίθουσα Πορταλάκη αυξάνονται τις ώρες που υπάρχουν επισκέπτες κατά την 1<sup>η</sup> δειγματοληψία, ενώ η

αντίθετη κατάσταση εμφανίστηκε στις δύο επόμενες δειγματοληψίες. επίσης σε όλες τις δειγματοληψίες παρατηρείται η από το μη αύξηση της συγκέντρωσης γύρω στις 08:30, πιθανότατα λόγω εργασιών καθαρισμού πριν την είσοδο των επισκεπτών.



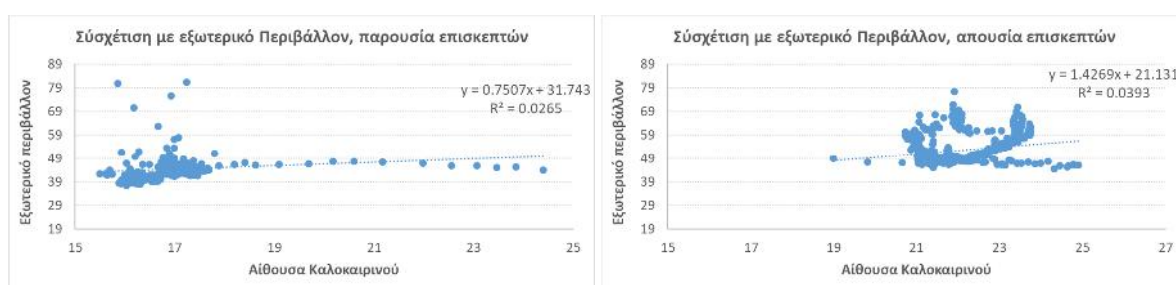
**Διάγραμμα 3.5:** Ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων  $PM_{10}$  στην αίθουσα Πορταλάκη για τις δειγματοληψίες του 2019.

Είναι δεδομένο ότι η βασική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου είναι το εξωτερικό περιβάλλον, καθώς δεν έχουν αναγνωριστεί σημαντικές εσωτερικές πηγές, πέρα από την παρουσία των επισκεπτών (πράξη ΜΟΥΣΕΙΑ). Στο διάγραμμα 3.6 παρουσιάζεται η συσχέτιση των συγκεντρώσεων στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον με βάση την ωριαία διακύμανση των συγκεντρώσεων μάζας. Δεν υπάρχει άμεση επίδραση των μεταβολών του εξωτερικού περιβάλλοντος στην αίθουσα El Greco ( $R^2=0.007$ ), ενώ όπως αναμένεται από τη θέση της αίθουσας η συσχέτιση είναι μεγαλύτερη για την αίθουσα Καλοκαιρινού ( $R^2=0.32$ ). Όμως οι αλλαγές στο εξωτερικό περιβάλλον δε φαίνεται να επηρεάζουν άμεσα τις εσωτερικές συγκεντρώσεις.



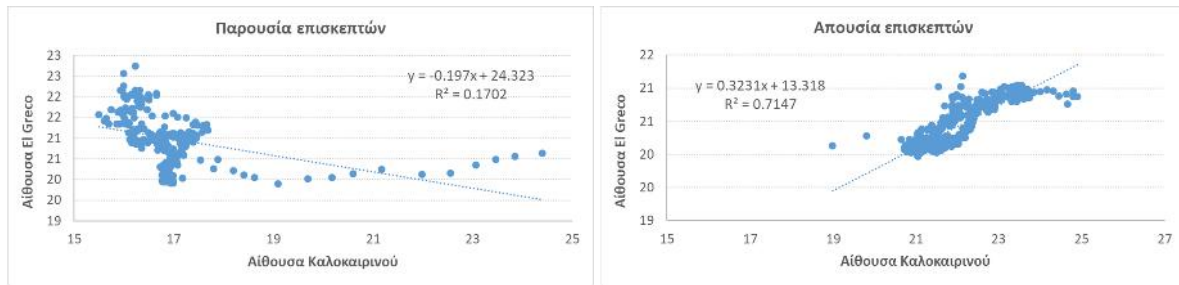
**Διάγραμμα 3.6:** Συσχέτιση συγκεντρώσεων μάζας σωματιδίων  $PM_{10}$  ανάμεσα στο εξωτερικό περιβάλλον και τις αίθουσες Καλοκαιρινού (αριστερά) και El Greco (δεξιά).

Η περαιτέρω ανάλυση για εύρεση συσχετίσεων μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος ξεχωριστά για τις ώρες που το μουσείο δέχεται επισκέπτες ή όχι, έδειξε ότι η παρουσία επισκεπτών δεν διαφοροποιεί τα παραπάνω συμπεράσματα (διάγραμμα 3.7). Παρατηρείται όμως επιπλέον μια σαφή διαφοροποίηση ανάμεσα στις ώρες το μουσείο είναι ανοικτό για το κοινό και τις υπόλοιπες ώρες, καθώς τα αντίστοιχα δεδομένα είναι κατηγοριοποιημένα σε διαφορετικές περιοχές, αναδεικνύοντας τις διαφορετικές συνθήκες που αποδίδονται τόσο την επίδραση των επισκεπτών όσο και τη χρήση των ιονιστών.



**Διάγραμμα 3.7:** Σύσχετιση συγκεντρώσεων μάζας σωματιδίων  $PM_{10}$  ανάμεσα στο εξωτερικό περιβάλλον και την αίθουσα Καλοκαιρινού, παρουσία επισκεπτών (αριστερά) και απουσία επισκεπτών (δεξιά).

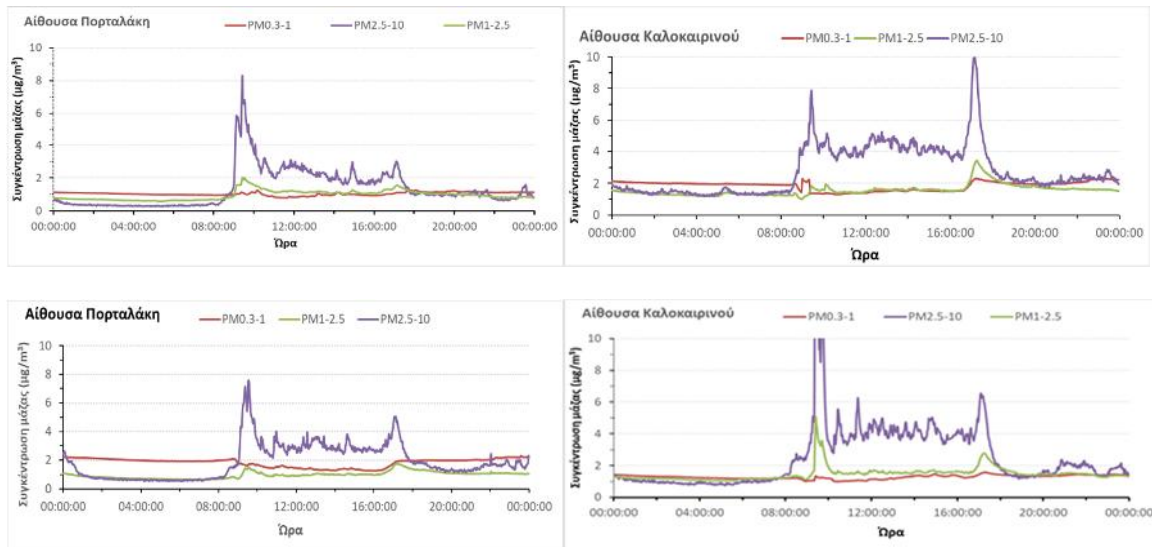
Η λειτουργία των ιονιστών σε συνδυασμό με την παρουσία επισκεπτών δημιουργεί και διαφορετικές συνθήκες ομοιογένειας των συγκεντρώσεων μάζας ανάμεσα στις υπό εξέταση αίθουσες του μουσείου. Τις χρονικές περιόδους που δεν λειτουργούν οι ιονιστές (απουσία επισκεπτών) οι συγκεντρώσεις ανάμεσα στις δύο αίθουσες εμφανίζουν ισχυρή συσχέτιση ( $R^2=0.71$ ), ενώ η κατάσταση διαφοροποιείται με τη χρήση των ιονιστών μόνο στην αίθουσα Καλοκαιρινού ( $R^2=0.17$ ). Δεν μπορεί να διαχωριστεί η επίδραση της παρουσίας μεγαλύτερου αριθμού επισκεπτών στην αίθουσα Καλοκαιρινού και η χρήση των ιονιστών, όμως θεωρείται ότι κυρίαρχο ρόλο στη διαφοροποίηση επιτελούν τα συστήματα καθαρισμού του αέρα., τουλάχιστον όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων  $PM_{10}$ . Στα διαγράμματα 3.8 παρατηρείται επιπλέον και η κατηγοριοποίηση των τιμών συγκεντρώσεων σε δύο διαφορετικές ομάδες, ανάλογα με την κατάσταση καθαρισμού του αέρα και την παρουσία επισκεπτών.



**Διάγραμμα 3.8:** Συσχέτιση συγκεντρώσεων μάζας σωματιδίων  $PM_{10}$  ανάμεσα στην αίθουσα Καλοκαιρινού και την αίθουσα El Greco, παρουσία επισκεπτών (αριστερά) και απουσία επισκεπτών (δεξιά).

Οι μετρήσεις των οργάνων OPS 3330, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης σωματιδίων σε διαφορετικά μεγέθη χρησιμοποιήθηκαν για να μελετηθεί η συμπεριφορά των διαφορετικών διαστάσεων σωματιδίων στο εσωτερικό περιβάλλον. Τα όργανα OPS ήταν τοποθετημένα στις αίθουσες Καλοκαιρινού και Πορταλάκη στις δειγματοληψίες του 2018 και 2019. Συλλέχθηκαν δεδομένα αριθμητικής συγκέντρωσης (αριθμός σωματιδίων/ $cm^3$ ) σε 16 διαφορετικά εύρη μεγεθών από 0.3  $\mu m$  έως 10  $\mu m$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα αναφορά ως συγκεντρώσεις μάζας ( $\mu g/m^3$ ) ώστε να εμφανίζονται καλύτερα οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα σωματίδια διαφορετικών μεγεθών. Η μετατροπή από αριθμητικές συγκεντρώσεις σε συγκεντρώσεις μάζας έγινε με χρήση του λογισμικού που συνοδεύει το όργανο και παρέχεται από την εταιρεία TSI. Στην εφαρμογή ο χρήστης δηλώνει την πυκνότητα των σωματιδίων και η μετατροπή πραγματοποιείται θεωρώντας όλα τα σωματίδια σφαιρικά. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε τιμή πυκνότητας ίση με 1.2  $g/cm^3$ . Επειδή δεν υπάρχει τρόπος προσδιορισμού της πυκνότητας στους συγκεκριμένους εσωτερικούς χώρους και επιπλέον τα σωματίδια δεν είναι σφαιρικά, οι απόλυτες τιμές συγκέντρωσης μάζας που παρουσιάζονται πρέπει να αντιμετωπιστούν με επιφύλαξη και συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν μόνο για τη συμπεριφορά και τη διακύμανση των σωματιδίων.

Τα σωματίδια χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες με μεγέθη 0.3-1  $\mu m$  ( $PM_{0.3-1}$ ), 1-2.5  $\mu m$  ( $PM_{1-2.5}$ ) και 2.5-10  $\mu m$  ( $PM_{2.5-10}$ ). Ο διαχωρισμός έγινε με βάση τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων και τον γενικά αποδεκτό διαχωρισμό σε λεπτά (<2.5  $\mu m$ ) και χονδρά (>2.5  $\mu m$ ). Επιπλέον τα λεπτά σωματίδια χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, καθώς τα πολύ μικρά σωματίδια (<1  $\mu m$ ) διαχέονται έντονα στις επιφάνειες των εσωτερικών χώρων και μπορούν να εισέλθουν ευκολότερα σε προθήκες με εκθέματα. Στο διάγραμμα 3.9 παρουσιάζεται η ωριαία κατανομή των παραπάνω κλασμάτων σωματιδίων για τα έτη 2018 και 2019.

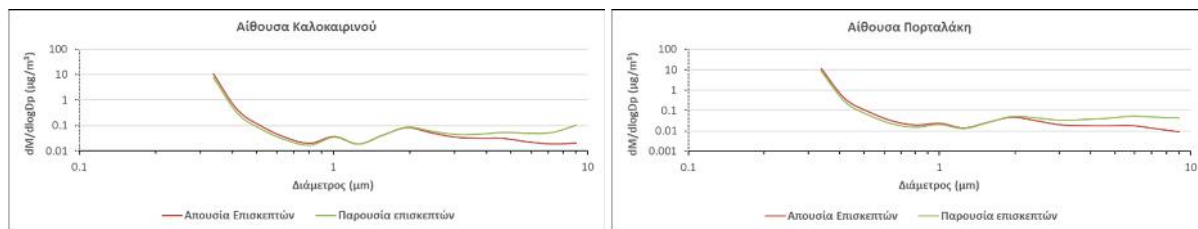


**Διάγραμμα 3.9:** Ωριαία διακύμανση συγκεντρώσεων μάζας σε τρεις κατηγορίες μεγεθών στις αίθουσες Πορταλάκη και Καλοκαιρινού το 2018 (πάνω) και 2019 (κάτω).

Είναι εμφανής η επίδραση της παρουσίας επισκεπτών στη συγκέντρωση των μεγαλύτερων σε μέγεθος (χονδρών) σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά είναι λίγα σε αριθμό, αλλά αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής μάζας και προέρχονται από την κίνηση των επισκεπτών, δηλαδή πρόκειται κυρίως για σωματίδια που έχουν εναποτεθεί στις επιφάνειες και επανέρχονται στον αέρα (επαναιώρηση σωματιδίων). Τα σωματίδια αυτά μεταφέρονται αρχικά στους εσωτερικούς χώρους είτε από ρεύματα αέρα, είτε κυρίως από τα παπούτσια και τα ρούχα των επισκεπτών. Η παρουσία είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί επικάθονται στα εκθέματα και αλλοιώνουν την όψη τους, ενώ μπορούν να αποτελέσουν φορείς μικροοργανισμών από το εξωτερικό περιβάλλον. Επιπλέον είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικές οι έντονες αυξήσεις στη συγκέντρωση των χονδρών σωματιδίων τις ώρες που ανοίγει και κλείνει το μουσείο και στις δύο υπό εξέταση αίθουσες. Τις ώρες αυτές παρατηρείται και αύξηση των σωματιδίων  $PM_{2.5-10}$ . Η επίδραση των ιονιστών φαίνεται περισσότερο στα μικρά σωματίδια ( $PM_{1-2.5}$ ) καθώς η συγκέντρωσή τους μειώνεται τις ώρες που το μουσείο δέχεται επισκέπτες.

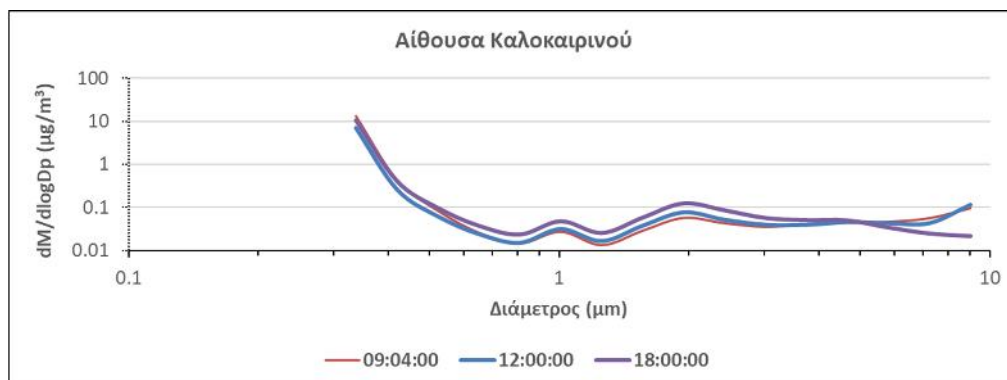
Η εξέταση του προφίλ των αιωρούμενων σωματιδίων για όλα τα μετρούμενα μεγέθη (διάγραμμα 3.10) δείχνει ότι τα μεγαλύτερα σωματίδια αυξάνονται τις ώρες που το μουσείο είναι επισκέψιμο. Αντίθετα η λειτουργία των ιονιστών περιορίζει τα μικρά σωματίδια των οποίων η συγκέντρωση μειώνεται σε σχέση με τις ώρες που το μουσείο είναι κλειστό. Παράλληλα και στις δύο αίθουσες η κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων έχει τα ίδια χαρακτηριστικά και εμφανίζει δύο κορυφές στα 1 µm και 2.5 µm. Επομένως και στις δύο αίθουσες υπάρχουν τα ίδια σωματίδια και λαμβάνοντας

υπόψη ότι οι δύο υπό εξέταση αίθουσες είναι σε διαφορετικούς ορόφους, εσωτερικός χώρος συνολικά του μουσείου μπορεί να θεωρηθεί σε μεγάλο βαθμό ομογενής.



**Διάγραμμα 3.10:** Κανονικοποιημένη λογαριθμική κατανομή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στις αίθουσες Καλοκαιρινού (αριστερά) και El Greco (δεξιά) για τις δειγματοληψίες του 2018, παρουσία επισκεπτών και απουσία επισκεπτών.

Τα παραπάνω συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων φαίνονται και στην αποτύπωση των κατανομών τους σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Οι δύο χαρακτηριστικές κορυφές εμφανίζονται σε όλες τις μέσες κατανομές, ενώ η παρουσία των μεγάλων σωματιδίων ενισχύεται με την παρουσία επισκεπτών. Στο διάγραμμα 3.10 παρουσιάζονται οι μέσες κατανομές για τις 09:04 (άνοιγμα του μουσείου), 12:00 (υψηλή επισκεψιμότητα) και 18:00 (χωρίς επισκέπτες). Οι κατανομές έχουν κανονικοποιηθεί ως προς το λογάριθμο της διαμέτρου ώστε να αποτυπωθεί καλύτερα η συνεισφορά όλων των σωματιδίων στη συνολική μάζα ανεξάρτητα από το μέγεθος τους. Ανάλογη συμπεράσματα προέκυψαν και για την αίθουσα Πορταλάκη.



**Διάγραμμα 3.11:** Κανονικοποιημένη λογαριθμική κατανομή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων στην αίθουσα Καλοκαιρινού για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές (μετρήσεις 2018).

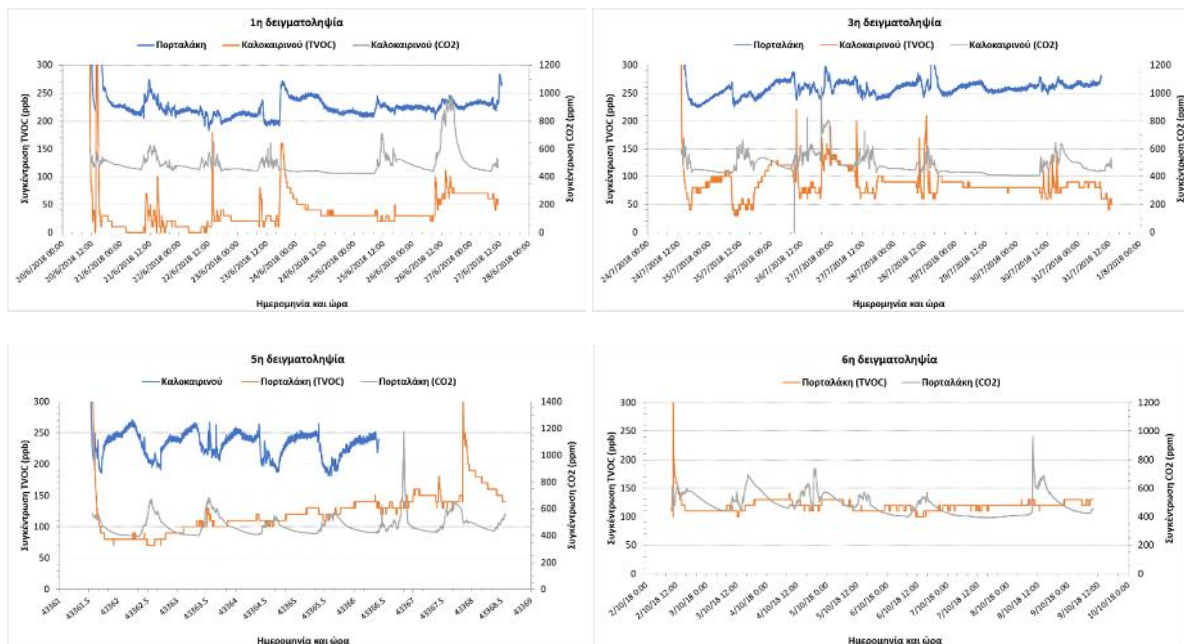
### A3) Αποτελέσματα μετρήσεων αέριων ρύπων

Οι μετρήσεις των πτητικών οργανικών ενώσεων πραγματοποιήθηκαν με φορητά όργανα τα οποία λειτουργούν μέσω του φωτοϊονισμού (PID sensors)) και ανιχνεύουν το σύνολο των πτητικών

οργανικών ενώσεων, χωρίς να είναι αξιόπιστος ο διαχωρισμός τους σε επιμέρους ενώσεις. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση κάποια ένωση αναφοράς και εξαρτάται έντονα από το επιμέρους λογισμικό του κάθε οργάνου. Με δεδομένο ότι χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά όργανα (βλέπε περιγραφή οργάνων δειγματοληψιών), από διαφορετικές εταιρείες με διαφορετικά λογισμικά, θα γίνει αναφορά μόνο στο σύνολο των πτητικών οργανικών ενώσεων. Επιπλέον ταυτόχρονες μετρήσεις που έγιναν στο παρελθόν με τους φορητούς αναλυτές για τις πτητικές οργανικές ενώσεις, έδειξαν ότι οι μετρήσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αρχική βαθμονόμηση των οργάνων που πρέπει να γίνεται σε «καθαρό» περιβάλλον και έτσι σε πολλές περιπτώσεις οι μεταξύ τους μετρήσεις παρουσίαζαν σημαντικές διαφορές. Με βάση τα παραπάνω, οι μετρήσεις που λήφθηκαν στο εσωτερικό του ΙΜΚ θα χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί κατά πόσο εμφανίζονται πτητικές οργανικές ενώσεις στις αίθουσες του μουσείου και όχι για να προσδιοριστούν οι «απόλυτες» τιμές τους. Οι μετρήσεις με αναλυτές συνεχούς καταγραφής δεδομένων δεν είναι συνηθισμένες σε εσωτερικούς χώρους μουσείων, καθώς προτιμάται η χρήση παθητικών αισθητήρων (Godoi et al., 2013). Οι Pagonis et al., (2019) διεξήγαγαν μετρήσεις 6 εβδομάδων με αναλυτές αερίων ρύπων ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ , και TVOCs) στο Art Museum του Κολοράντο (ΗΠΑ) και ανέφεραν συγκεντρώσεις στον αέρα εντός των ορίων που έχουν καθοριστεί από το μουσείο.

Στις δειγματοληψίες του 2018 χρησιμοποιήθηκαν οι αναλυτές rhocheck tiger (ION science) και Q-trak 7575 (TSI). Ο αναλυτής tiger έχει μεγαλύτερη ευαισθησία (όριο ανίχνευσης 1 ppb-Q-trak: 2 ppb) και ανιχνεύει καλύτερα τυχόν διακυμάνσεις της συγκέντρωσης. Στις τέσσερις πρώτες δειγματοληψίες, ο αναλυτής tiger είχε τοποθετηθεί στην αίθουσα Πορταλάκη και ο Q-trak στην αίθουσα Καλοκαιρινού. Στις δύο τελευταίες δειγματοληψίες οι αναλυτές άλλαξαν θέση. Επιπλέον ο αναλυτής Q-trak μετράει ταυτόχρονα και διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) το οποίο δεν προκαλεί φθορές στα υλικά, είναι όμως ενδεικτικό της παρουσίας πολλών ατόμων σε ένα χώρο και σε πολλές περιπτώσεις συνδέεται με επιβαρυμένο σε ρύπους εσωτερικό περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών παρουσιάστηκαν προβλήματα στη λειτουργία των οργάνων σε κάποιες περιόδους, τα οποία έχουν αναφερθεί στην ενότητα A1.4 (Χρονικές περιόδους δειγματοληψιών).

Στο διάγραμμα 3.12 παρουσιάζονται για τέσσερις χαρακτηριστικές δειγματοληψίες οι μεταβολές της συγκέντρωσης των TVOCs και του  $\text{CO}_2$  σε όλη την περίοδο της κάθε δειγματοληψίας. Στην 6<sup>η</sup> δειγματοληψία ο αναλυτής tiger παρουσίασε βλάβη.

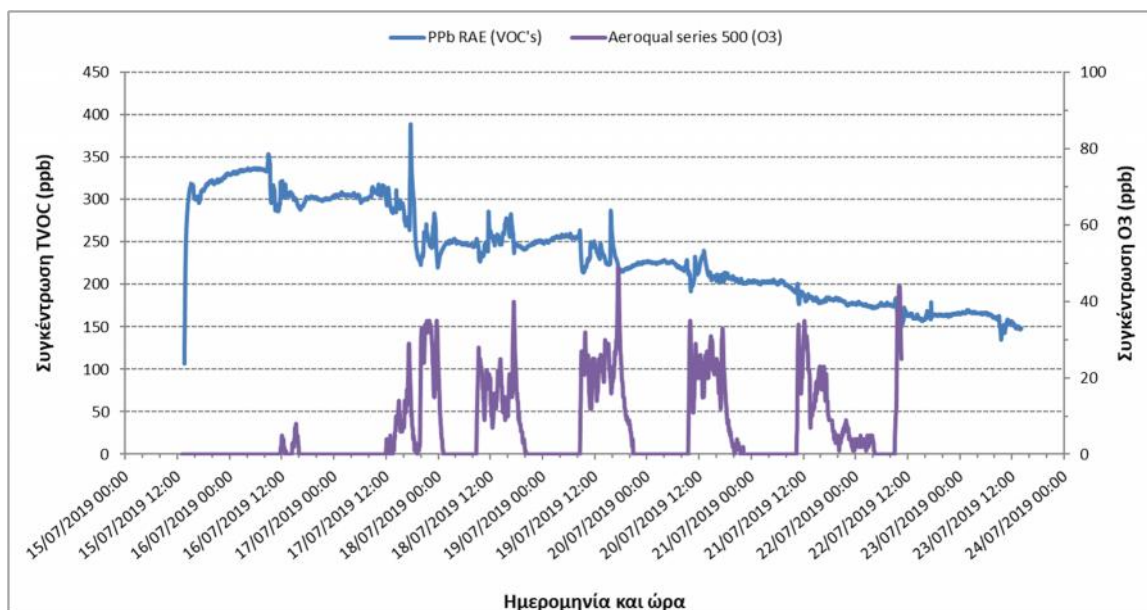


**Διάγραμμα 3.12:** Μεταβολή της συγκέντρωσης πηκτικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) κατά την περίοδο δειγματοληψίας. Το όργανο tiger (Ion Science) ήταν εγκατεστημένο στην αίθουσα Πορταλάκη στις δειγματοληψίες 1 και 3 και το όργανο Q-trak 7575 (TSI) στην αίθουσα Καλοκαιρινού. Στην δειγματοληψία 5 τα όργανα άλλαξαν αμοιβαία θέση και στην 6 λειτούργησε ο αναλυτής Q-trak 7575 στην αίθουσα Πορταλάκη.

Οι αυξημένες τιμές της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> είναι ενδεικτικές της παρουσίας ατόμων καθώς συμπίπτουν με τις ώρες που το μουσείο ήταν επισκέψιμο για το κοινό. Οι τιμές των TVOCs τις περισσότερες περιπτώσεις αυξάνονται παρουσία επισκεπτών αλλά κάποιες φορές μειώνονται. Επομένως δεν εξαρτώνται αποκλειστικά από την παρουσία ατόμων και πρέπει να αναζητηθούν και άλλες πηγές στους εσωτερικούς χώρους. Στις πρώτες δειγματοληψίες που παρουσιάζονται οι τιμές στην αίθουσα Πορταλάκη ήταν υψηλότερες, κάτι που άλλαξε στην 5<sup>η</sup> δειγματοληψία. Διαπιστώνεται επομένως η εξάρτηση των τιμών από το είδος του αναλυτή. Θεωρώντας πιο αξιόπιστο τον αναλυτή tiger, οι τιμές στις δύο αίθουσες κυμαίνονται μεταξύ 200-300 ppb.

Στις τρεις δειγματοληψίες του 2019 χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής ppb RAE 300+ για τη μέτρηση των TVOCs στην αίθουσα Πορταλάκη και ο αναλυτής Aeroqual 500 για τη μέτρηση του O<sub>3</sub> στην αίθουσα Καλοκαιρινού. Τα αποτελέσματα από την 1<sup>η</sup> δειγματοληψία, που είναι χαρακτηριστικά και των τριών παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.13.





**Διάγραμμα 3.13:** Μεταβολή της συγκέντρωσης πηθικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) και όζοντος ( $O_3$ ) στις αίθουσες Πορταλάκη και Καλοκαιρινού αντίστοιχα κατά την 1<sup>η</sup> δειγματοληψία του 2019.

Οι τιμές του όζοντος παρουσιάζουν αύξηση τις ώρες κοινού, πιθανότατα λόγω εισροής από το εξωτερικό περιβάλλον και ίσως και λόγω της λειτουργίας των ιονιστών. Οι μηδενικές τιμές είναι κάτω από τις δυνατότητες ανίχνευσης του οργάνου, που δεν μπορεί να ανταποκριθεί επαρκών για τιμές της τάξης των λίγων ppb για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η συγκέντρωση των TVOCs παρουσιάζει μείωση με την πάροδο του χρόνου που οφείλεται στην ανάγκη συνεχούς επαναβαθμονόμησης του οργάνου σε «καθαρό» περιβάλλον, το οποίο δεν ήταν εφικτό. Γενικά παρουσιάζονται εντονότερες μεταβολές παρουσία επισκεπτών, ενώ οι τιμές ήταν συγκρίσιμες με τα δεδομένα του 2018.

Συμπερασματικά στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου παρατηρούνται τιμές TVOCs μεταξύ 150-300 ppb. Οι εκπομπές δεν προέρχονται αποκλειστικά από το εξωτερικό περιβάλλον και πιθανές πηγές πρέπει να αναζητηθούν σε εκπομπές από τα βερνίκια και τα χρώματα των πινάκων ζωγραφικής και των εκκλησιαστικών εικόνων, καθώς και στα χρώματα και στις βαφές των τοίχων και των προθηκών φύλαξης των εκθεμάτων.

### **A3) Αποτελέσματα σωματιδιακών επικαθίσεων**

#### **A3.1) Εναποτιθέμενη μάζα στα φίλτρα**

Παράλληλα με τις μετρήσεις αερομεταφερόμενων σωματιδίων πραγματοποιήθηκε και μελέτη της σωματιδιακής μάζας που επικάθεται στις επιφάνειες του μουσείου και κατ' επέκταση στα

πραγματικά εκθέματα. Η διαδικασία συλλογής πραγματικής σωματιδιακής μάζας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα καθώς δεν είναι δυνατό να διαπιστωθεί αν τα σωματίδια επικάθονται κατά τη διάρκεια της περιόδου έκθεσης ή αν προϋπήρχαν στις επιφάνειες. Επιπλέον ήταν πολύ δύσκολη η μετέπειτα διαδικασία πραγματοποίησης χημικών αναλύσεων για τον προσδιορισμό της σύστασης των σωματιδίων. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν φίλτρα από ίνες χαλαζία (quartz), τα οποία τοποθετήθηκαν στις αίθουσες Πορταλάκη και El Greco. Τα φίλτρα αυτά θα χαρακτηρίζονται ως «ελεύθερα» και η εναπόθεση μάζας γινόταν τόσο μέσω διάχυσης, όσο και μέσω βαρυτικής εναπόθεσης. Επιπλέον για να διαπιστωθεί κατά πόσο τα μικρότερα σωματίδια μπορούν να διεισδύσουν ανάμεσα από ανοίγματα τοποθετήθηκαν φίλτρα μεταξύ δύο μεταλλικών πλακών απόστασης 1 cm από ανοξείδωτο ατσάλι (εικόνα 3.7) τα οποία θα αναφέρονται ως «καλυμμένα». Επιλέχθηκε το υλικό αυτό γιατί παρουσιάζει μικρή εναπόθεση σωματιδίων λόγω διάχυσης. Στα φίλτρα μεταξύ των πλακών θα επικάθονται σωματίδια κυρίως λόγω διάχυσης και πολύ λιγότερο λόγω βαρυτικής εναπόθεσης.



**Εικόνα 3.7:** Μεταλλικές πλάκες από ανοξείδωτο ατσάλι, ανάμεσα στις οποίες τοποθετήθηκαν φίλτρα από ίνες χαλαζία.

Επτά φίλτρα από ίνες χαλαζία τοποθετήθηκαν επιπλέον μέσα σε προθήκες στην αίθουσα El Greco. Τέσσερα από αυτά βρισκόταν μέσα στην προθήκη που εκτίθενται οι πίνακες του El Greco (εικόνα 3.8), η οποία διαθέτει σύστημα ελέγχου των μικροπεριβαλλοντικών παραμέτρων και παραμένει ανοιχτή όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο-πρακτικά μόνο για διαδικασίες συντήρησης των πινάκων.



Προθήκη πινάκων El Greco (4 φίλτρα)

Προθήκη βιβλίων (3 φίλτρα)

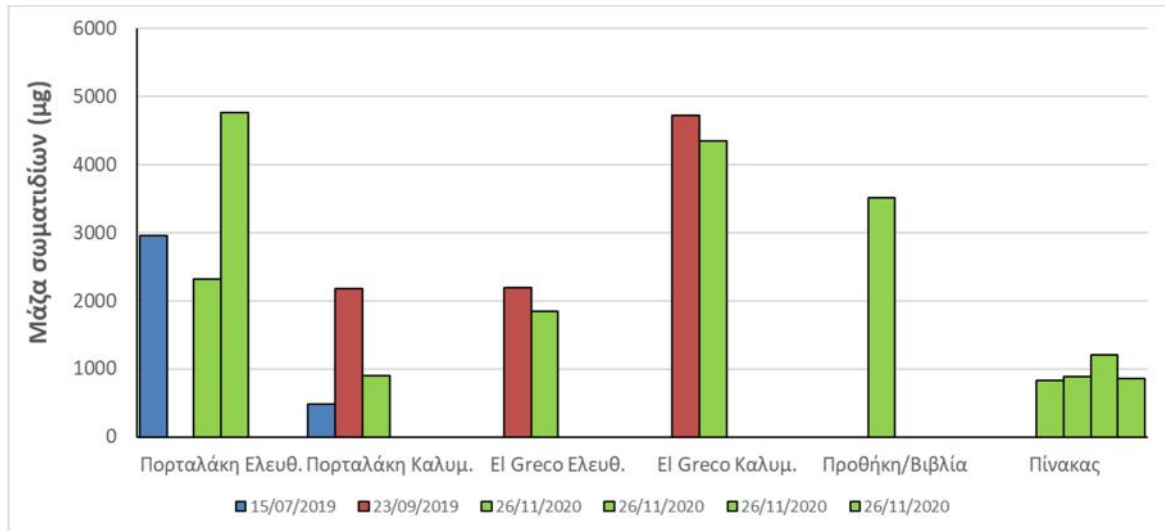


**Εικόνα 3.8:** Θέσεις τοποθέτησης φίλτρων από χαλαζία εντός προθηκών στην αίθουσα El Greco

Τα φίλτρα τοποθετήθηκαν αρχικά τον Φεβρουάριο του 2019 και συλλέχθηκαν σε τρεις διαφορετικές περιόδους: Τον Ιούλιο του 2019 (5 μήνες έκθεσης), τον Σεπτέμβριο του 2019 (7 μήνες έκθεσης) και τον Νοέμβριο του 2019 (9 μήνες έκθεσης). Στις πρώτες δύο ημερομηνίες συλλέχθηκαν από ένα ελεύθερο και ένα καλυμμένο φίλτρο από κάθε αίθουσα (συνολικά 4 φίλτρα). Τα υπόλοιπα φίλτρα μαζί με τα φίλτρα των προθηκών συλλέχθηκαν μετά από εννέα μήνες έκθεσης. Τα φίλτρα, πριν την τοποθέτησή τους, βρισκόταν σε δοχείο ξήρανσης για τη μείωση της υγρασίας για 24 ώρες και μετά ζυγίζονταν με ζυγό ακριβείας ( $10^{-5}$  g) πριν τη μεταφορά τους στο Ηράκλειο. Μετά τη συλλογή τους τοποθετούνταν σε ειδικό τριβλίο και μεταφερόταν σε εργαστήριο στο Πολ. Κρήτης όπου ζυγίζονταν μετά από 24ώρη ξήρανση. Η διαφορά μάζας μεταξύ των δύο ζυγίσεων αντιστοιχεί στη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων που εναποτέθηκαν στα φίλτρα κατά την περίοδο έκθεσης.

Τα αποτελέσματα των ζυγίσεων έδειξαν ότι σε κάποιες περιπτώσεις η διαφορά μάζας ήταν αρνητική. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε έντονη εξάτμιση πτητικών ενώσεων από τα σωματίδια των φίλτρων ή σε εναπόθεση μεγάλων σωματιδίων που μπλοκάρουν τους πόρους με αποτέλεσμα αλλοίωση των χαρακτηριστικών των φίλτρων. Επιπλέον μπορεί να υπήρξαν και αλλοιώσεις κατά τη μεταφορά από το Ηράκλειο στα Χανιά. Συνολικά 8 από τα 23 φίλτρα αλλοιώθηκαν και δεν περιλαμβάνονται στην παρακάτω ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τον Ιούλιο 2019 μόνο δύο φίλτρα από τα τέσσερα φίλτρα ήταν αξιοποιήσιμα και όπως ήταν αναμενόμενο η συγκέντρωση στο καλυμμένο φίλτρο ήταν πολύ μικρότερη από το ελεύθερο στην αίθουσα Πορταλάκη. Το Σεπτέμβριο παρατηρήθηκε το παράδοξο το καλυμμένο φίλτρο στην αίθουσα El Greco να έχει μεγαλύτερη μάζα από το ελεύθερο. Το ίδιο όμως παρατηρήθηκε και το Νοέμβριο και πιθανότατα να οφείλεται στο σημείο που ήταν τοποθετημένα τα φίλτρα. Ίσως κάποια ρεύματα αέρα να μεταφέρουν μικρά σωματίδια που εγκλωβίζονται ανάμεσα στις πλάκες και τελικά εναποτίθενται στα φίλτρα, αυξάνοντας έτσι τη συνολική μάζα. Επιπλέον πιθανότατα το σημείο τοποθέτησης των φίλτρων να μην επηρεάζεται από την επαναιώρηση μεγάλων σωματιδίων καθώς βρίσκεται πολύ κοντά στη θήκη των πινάκων του El Greco και δεν είναι κοντά σε σημεία που περπατάνε οι επισκέπτες. Σε όλα τα φίλτρα οι συγκεντρώσεις τον Νοέμβριο του 2019 ήταν μικρότερες. Αυτό ίσως να οφείλεται στην εναπόθεση αρκετής μάζας που έφραξε τους πόρους των φίλτρων και η επιπλέον μάζα δεν μπορούσε να συγκρατηθεί πάνω σε αυτά, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να επανέρχονται εύκολα στον αέρα. Επιπλέον ορισμένα έντονα πτητικά συστατικά των σωματιδίων ίσως να πέρασαν σε αέρια φάση, οδηγώντας σε μείωση της συνολικής μάζας. Τα δύο ελεύθερα φίλτρα στην αίθουσα Πορταλάκη που συλλέχθηκαν το Νοέμβριο 2019 παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στην εναποτιθέμενη μάζα (2320 g και 4770 g), παρόλο που βρισκόταν το ένα δίπλα στο άλλο. Αυτό σημαίνει ότι τα μεγάλα σωματίδια όπως είναι αναμενόμενο δεν εναποτίθενται ομοιόμορφα στις επιφάνειες και ίσως η δειγματοληψία σε συγκεκριμένα πάντα σημεία να οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Η εναπόθεση μεγάλων σωματιδίων στα εκθέματα είναι ιδιαίτερα

σημαντική και συνδέεται με αλλοιώσεις στη μορφή και τα χαρακτηριστικά των εκθεμάτων (Chatoutsidou and Lazaridis, 2019).

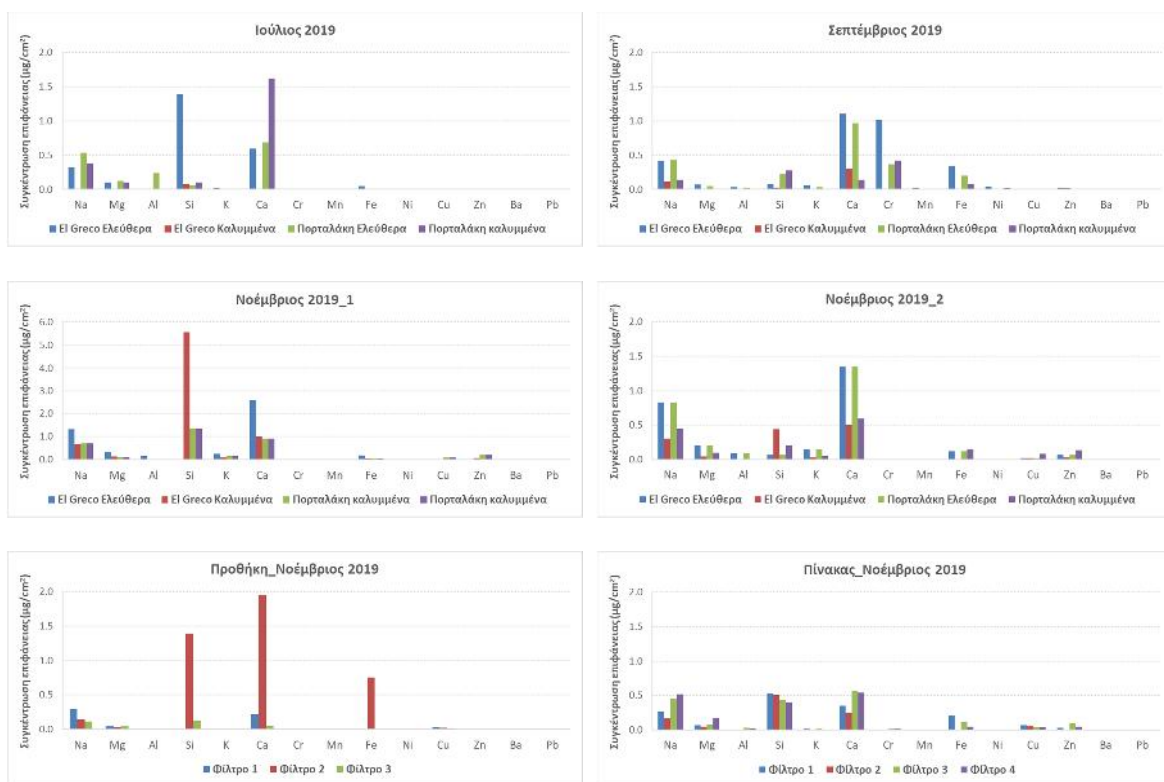


**Διάγραμμα 3.14:** Συνολική εναποτιθέμενη μάζα στα φίλτρα ινών χαλαζία στις αίθουσες Πορταλάκη και El Greco.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εναπόθεση σωματιδίων στα φίλτρα εντός των προθηκών. Στην προθήκη με τα βιβλία η σωματιδιακή ύλη στα φίλτρα είναι μεγαλύτερη από τα ελεύθερα φίλτρα. Επομένως μικρά σωματίδια μπορούν να εισέρθουν από τις οπές των προθηκών στο εσωτερικό τους. Στην προθήκη των πινάκων El Greco είχαμε εναπόθεση μικρότερης μάζας και έτσι ήταν αξιοποιήσιμα και τα τέσσερα φίλτρα. Οι συγκεντρώσεις στα τρία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους (830 µg-880 µg) και μόνο σε ένα ήταν αρκετά μεγαλύτερη (1200 µg). Η εναπόθεση εντός της προθήκης θεωρείται σημαντική και αναδεικνύει την ανάγκη μελέτης των μικρότερων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους.

### A3.2) Χημική ανάλυση της εναποτιθέμενης μάζας

Για τον προσδιορισμό των μετάλλων στα φίλτρα χρησιμοποιήθηκε φασματομετρία ατομικών μαζών σε επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry/ICP-MS), που είναι τεχνική η οποία επιτρέπει πολυστοιχειακή ανάλυση για όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα (εκτός από τα αλογόνα και τα αέρια) και ιδιαίτερα χαμηλά όρια ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης (στα περισσότερα μέταλλα, το όριο ανίχνευσης είναι από 2 έως 50 ng/l). Τα αποτελέσματα της εναποτιθέμενης μάζας ανά μονάδα επιφάνειας του φίλτρου παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.15. Αναφέρονται όλα τα στοιχεία τα οποία ανιχνεύθηκαν έστω και μία φορά σε κάποιο από τα φίλτρα. Επιπλέον τα στοιχεία Co, As, Se, Cd, Hg, V και Ti ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης του οργάνου. Παρουσιάζονται όλα τα φίλτρα, δηλαδή και αυτά που η ζύγιση έδωσε αρνητικές τιμές συνολικής εναποτιθέμενης σωματιδιακής μάζας. Τα ελεύθερα και καλυμμένα φίλτρα που συλλέχθηκαν το Νοέμβριο παρουσιάζονται σε δύο διαγράμματα για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

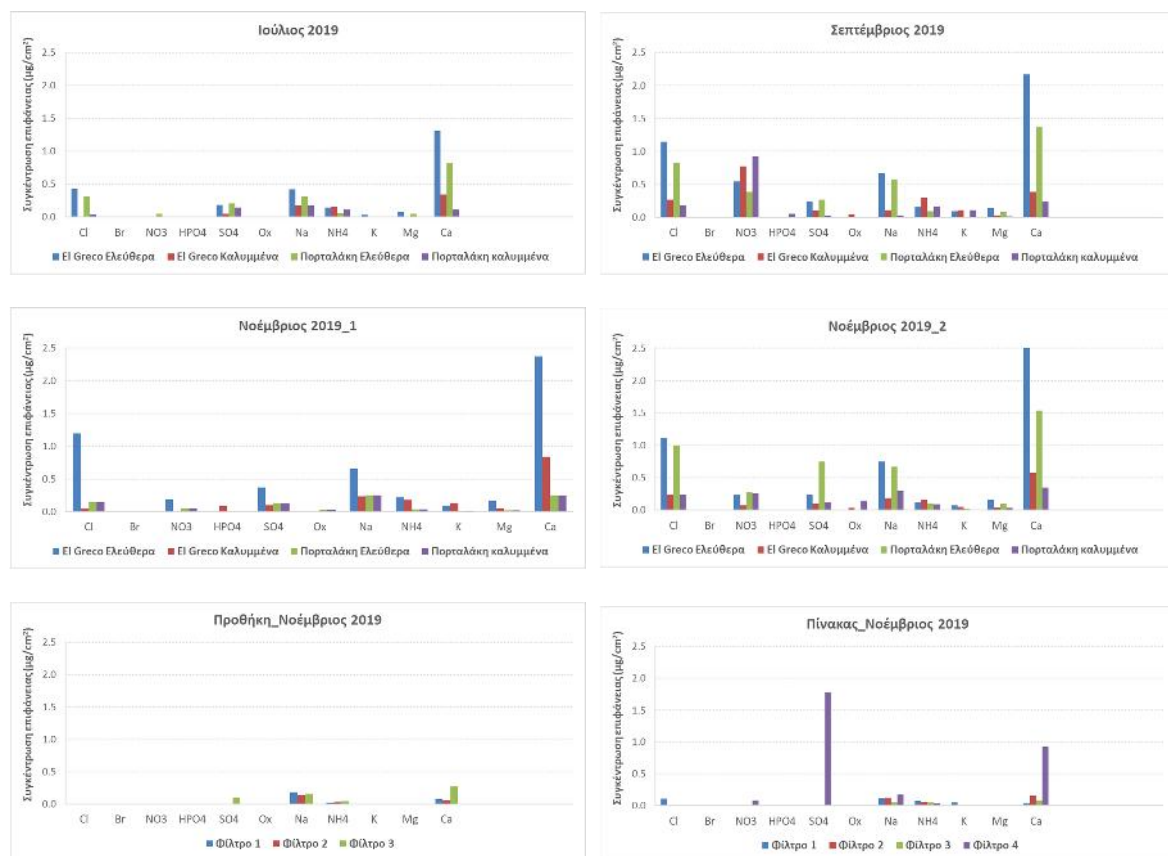


**Διάγραμμα 3.15:** Στοιχειακή ανάλυση της εναποτιθέμενης μάζας στα φίλτρα που τοποθετήθηκαν στους εσωτερικούς χώρους του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης.

Παρατηρούμε ότι όσον αφορά τα ελεύθερα και τα καλυμμένα φίλτρα τα στοιχεία που κυριαρχούν είναι Ca, Si, Na και σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζονται σε χαμηλότερες επιφανειακές συγκεντρώσεις Fe, Cu, Zn και Cr. Τα σωματίδια που περιέχουν Ca και Si προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον, περιέχουν στοιχεία που συναντώνται στο φλοιό της γης και στην άμμο και πιθανότατα

μεταφέρονται από τα ρεύματα αέρα και τους επισκέπτες. Ειδικά ένα από τα καλυμμένα φίλτρα της EI Greco που συλλέχθηκε το Νοέμβριο παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές Si, ενώ τα ελεύθερα φίλτρα της EI Greco παρουσιάζουν γενικά υψηλές τιμές Ca. Επιπλέον η παρουσία Na ισοδυναμεί με διείδυση σωματιδίων και σταγονιδίων από την επιφάνεια της θάλασσας, κάτι που αναμένεται λόγω της εγγύτητας του μουσείου με την ακτογραμμή της πόλης του Ηρακλείου. Ίδια χαρακτηριστικά έχουν και τα σωματίδια στα φίλτρα εντός της προθήκης των πινάκων, αλλά όπως είναι φυσιολογικό τα επιμέρους στοιχεία εμφανίζονται σε μικρότερες συγκεντρώσεις, αναδεικνύοντας την ανάγκη χρήσης σύγχρονων προθηκών για την προστασία των έργων τέχνης. Η εικόνα είναι διαφορετική για τα σωματίδια στα φίλτρα της προθήκης των βιβλίων. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι ουσιαστικά μόνο ένα από τα φίλτρα είναι αξιοποιήσιμο, το οποίο όμως παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις Ca, Si και Fe. Πρόκειται πιθανώς για επαναιωρούμενα σωματίδια που μεταφέρονται αρχικά από το εξωτερικό περιβάλλον και τα οποία μπορούν να διεισδύσουν στην προθήκη κοντά στο σημείο που τοποθετήθηκε το φίλτρο.

Ο προσδιορισμός των ιόντων έγινε με ιοντική χρωματογραφία και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.16.



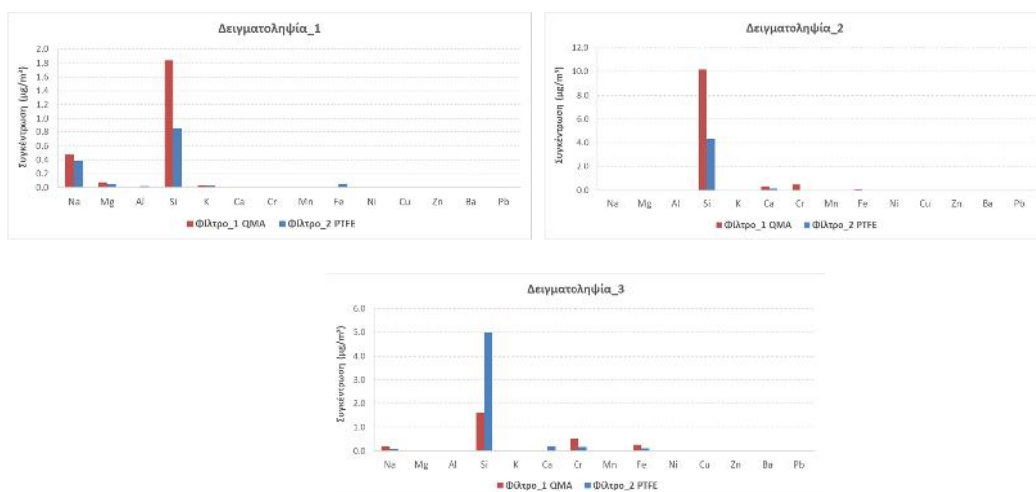
**Διάγραμμα 3.16:** Ιοντική ανάλυση της εναποτιθέμενης μάζας στα φίλτρα που τοποθετήθηκαν στους εσωτερικούς χώρους του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης.

Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με τα αντίστοιχα της ICP-MS υψηλότερες συγκεντρώσεις Ca, Si Cl και Na και σε συγκεντρώσεις πολύ κοντά για τις δύο μεθόδους. Επιπλέον ανιχνεύονται ιόντα  $\text{NO}_3^-$  που αντιστοιχούν σε εκπομπές από τα αυτοκίνητα. Ανιχνεύονται επίσης μικρές ποσότητες  $\text{SO}_4^{2-}$  λόγω εκπομπών από καύσεις. Μοναδική διαφοροποίηση είναι στο φίλτρο μέσα στην προθήκη όπου ανιχνεύθηκε ουσιαστικά μόνο  $\text{Ca}^{2+}$  σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Παθητικές μετρήσεις ολικής μάζας σε φίλτρα που τοποθετήθηκαν με διάφορους προσανατολισμούς σε τέσσερα μουσεία στο Βέλγιο με ελεγχόμενες ή όχι μικροκλιματικές συνθήκες πραγματοποίησαν οι Anaf et al. (2015). Υπολόγισαν ρυθμούς εναπόθεσης σωματιδιακής ύλης που κυμάνθηκαν από 10-200  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  έτος και σημαντικά υψηλότερες εναποθέσεις σε μουσεία χωρίς ελεγχόμενες συνθήκες. Σε όλες τις περιπτώσεις τα ιόντα  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  εμφάνισαν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις.

### A3.3) Χημική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων

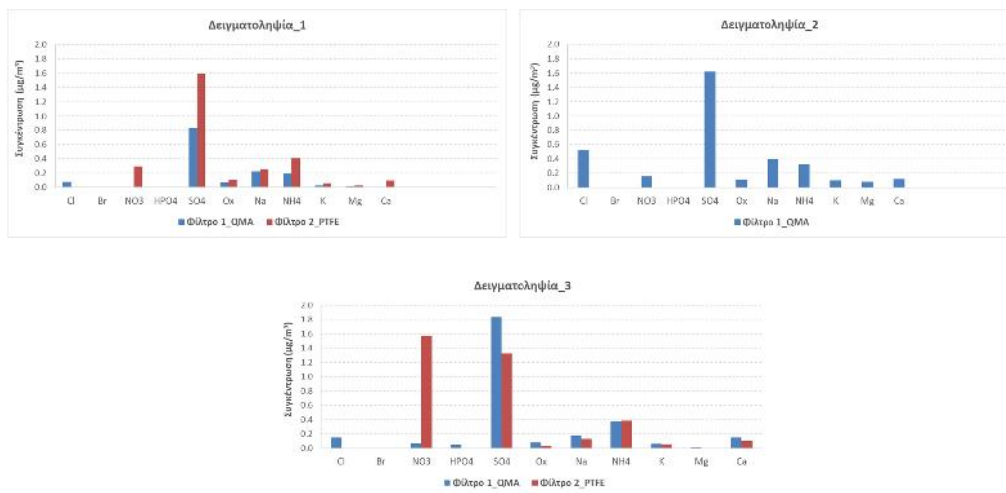
Τα αιωρούμενα σωματίδια που συλλέχθηκαν από τους δειγματολήπτες  $\text{PM}_{10}$  PEM (SKC) σε φίλτρα από πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) και ίνες χαλαζία (quartz-QMA) διαμέτρου 37 mm αναλύθηκαν επίσης με χρήση ICP-MS και ιοντικής χρωματογραφίας. Τα αποτελέσματα για τα μέταλλα (ICP-MS) παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.17. Η αναγωγή έχει γίνει με βάση τον όγκο αέρα που εισήλθε στις αντλίες και οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  αέρα. Μετρήσεις έγιναν κατά τη διάρκεια των τριών δειγματοληψιών του 2019 και τα φίλτρα συλλέχθηκαν μετά από μια εβδομάδα παραμονής στις 23/7/2019, 17/9/2019 και 24/9/2019 για την 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> δειγματοληψία αντίστοιχα.

Τα αιωρούμενα σωματίδια εμφάνισαν υψηλή περιεκτικότητα σε Si, ειδικά στη 2<sup>η</sup> δειγματοληψία. Ανιχνεύθηκαν επίσης Na, Ca, Fe και Cr σε μικρότερες συγκεντρώσεις.



**Διάγραμμα 3.17:** Στοιχειακή ανάλυση της εναποτιθέμενης μάζας στα φίλτρα των δειγματοληπτών PM<sub>10</sub> PEM στην αίθουσα Καλοκαιρινού του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης.

Μέσω της ιοντικής χρωματογραφίας ανιχνεύθηκαν Cl<sup>-</sup> και Na<sup>+</sup> που συνδέονται με σωματίδια που προέρχονται από τη θάλασσα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αυξημένες συγκεντρώσεις NO<sub>3</sub><sup>-</sup> που συνδέονται με τις εκπομπές από αυτοκίνητα και SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> που συνάδει με εκπομπές από καύσεις.



**Διάγραμμα 3.18:** Ιοντική ανάλυση της εναποτιθέμενης μάζας στα φίλτρα των δειγματοληπτών PM<sub>10</sub> PEM στην αίθουσα Καλοκαιρινού του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης.

Οι Godoi et al. (2008) διεξήγαγαν μετρήσεις μίας εβδομάδας με προσκρουστήρα για συλλογή φίλτρων στο Ruben's House Museum στην Αντβέρπ (Βέλγιο) και παρατηρήσαν μείωση των στοιχειακών συγκεντρώσεων σε αίθουσες με κλιματισμό (μεταφορά σε άλλες αίθουσες) και παρόμοια στοιχειακή σύνθεση εσωτερικών και εξωτερικών σωματιδίων. Οι Kruprińska et al. (2012) πραγματοποίησαν Στοιχειακή ανάλυση σωματιδίων που συλλέχθηκαν στο μουσείο Plantin-Moretus στην Αντβερπ (Βέλγιο) και ανέδειξαν την προστασία που προσφέρει το κτίριο στα εκθέματα καταγράφοντας μειωμένες τιμές χονδρών σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους. Ανέδειξαν όμως παράλληλα την παρουσία εσωτερικών πηγών σε σωματίδια που εμφανίζονται ιδιαίτερα πλούσια σε άνθρακα και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για τα εκθέματα. Οι Wang et al. (2014) με μετρήσεις αριθμητικής συγκέντρωσης σωματιδίων, στοιχειακού και οργανικού άνθρακα σε μουσείο σε κεντρικό σημείο της Σαγκάη (Κίνα) και στη συνέχεια με στοιχειακή ανάλυση των συλλεχθέντων σωματιδίων, παρατηρήσαν υψηλές συγκεντρώσεις Ca, Si, Al, Na, C, O, S, Mg στα χονδρά σωματίδια και κυρίως S στα λεπτά. Οι Worobiec et al. (2010) έκαναν μετρήσεις στο μουσείο του Wawel Castle, στην Κρακοβία (Πολωνία) και υπολόγισαν υψηλές επιφανειακές συγκεντρώσεις στο εσωτερικό περιβάλλον για τα



στοιχεία Al (0.24  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), Si (0.48  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), S 0.13  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , Cl (0.40  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), K (0.10  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) και Ca (0.75  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

### **Βιβλιογραφία ενότητας Α**

Anaf, W., Bencs, L., Van Grieken, R., Janssens, K., & De Wael, K. (2015). Indoor particulate matter in four Belgian heritage sites: Case studies on the deposition of dark-colored and hygroscopic particles. *Science of the Total Environment*, 506, 361-368.

Cao, J. J., Li, H., Chow, J. C., Watson, J. G., Lee, S., Rong, B., ... & Ho, K. F. (2010). Chemical composition of indoor and outdoor atmospheric particles at Emperor Qin's Terra-cotta Museum, Xi'an, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(1), 70-79.

Cartechini, L., Castellini, S., Moroni, B., Palmieri, M., Scardazza, F., Sebastiani, B., ... & Cappelletti, D. (2015). Acute episodes of black carbon and aerosol contamination in a museum environment: results of integrated real-time and off-line measurements. *Atmospheric Environment*, 116, 130-137.

Chatoutsidou, S. E., & Lazaridis, M. (2019). Assessment of the impact of particulate dry deposition on soiling of indoor cultural heritage objects found in churches and museums/libraries. *Journal of Cultural Heritage*, 39, 221-228.

Daher, N., Ruprecht, A., Invernizzi, G., De Marco, C., Miller-Schulze, J., Heo, J. B., ... & Sioutas, C. (2011). Chemical characterization and source apportionment of fine and coarse particulate matter inside the refectory of Santa Maria Delle Grazie Church, Home of Leonardo Da Vinci's "Last Supper". *Environmental science & technology*, 45(24), 10344-10353.

Godoi, R. H. M., Potgieter-Vermaak, S., Godoi, A. F. L., Stranger, M., & Van Grieken, R. (2008). Assessment of aerosol particles within the Rubens' House Museum in Antwerp, Belgium. *X-Ray Spectrometry: An International Journal*, 37(4), 298-303.

Godoi, R. H., Carneiro, B. H., Paralovo, S. L., Campos, V. P., Tavares, T. M., Evangelista, H., ... & Godoi, A. F. (2013). Indoor air quality of a museum in a subtropical climate: The Oscar Niemeyer museum in Curitiba, Brazil. *Science of the total environment*, 452, 314-320.

Krupińska, B., Worobiec, A., Rotondo, G. G., Novaković, V., Kontozova, V., Ro, C. U., ... & De Wael, K. (2012). Assessment of the air quality ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  and particulate matter) in the Plantin-Moretus Museum/Print Room in Antwerp, Belgium, in different seasons of the year. *Microchemical Journal*, 102, 49-53.

Mašková, L., Smolík, J., Ondráček, J., Ondráčková, L., Travnickova, T., & Havlica, J. (2020). Air quality in archives housed in historic buildings: Assessment of concentration of indoor particles of outdoor origin. *Building and Environment*, *180*, 107024.

Pagonis, D., Price, D. J., Algrim, L. B., Day, D. A., Handschy, A. V., Stark, H., ... & Ziemann, P. J. (2019). Time-resolved measurements of indoor chemical emissions, deposition, and reactions in a university art museum. *Environmental science & technology*, *53*(9), 4794-4802.

Sharif-Askari, H., & Abu-Hijleh, B. (2018). Review of museums' indoor environment conditions studies and guidelines and their impact on the museums' artifacts and energy consumption. *Building and Environment*, *143*, 186-195.

Wang, L., Xiu, G., Chen, Y., Xu, F., Wu, L., & Zhang, D. (2014). Characterizing Particulate Pollutants in an Enclosed Museum in Shanghai, China. *Aerosol and Air Quality Research*, *15*(1), 319-328.

Worobiec, A., Samek, L., Krata, A., Van Meel, K., Krupinska, B., Stefaniak, E. A., ... & Van Grieken, R. (2010). Transport and deposition of airborne pollutants in exhibition areas located in historical buildings—study in Wawel Castle Museum in Cracow, Poland. *Journal of Cultural Heritage*, *11*(3), 354-359.

## **B) Μετρήσεις αερομεταφερόμενων βιοαεροζόλ και μικροβιακών επικαθίσεων**

Στόχος αυτής της ενότητας εργασίας ήταν ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός του αερομεταφερόμενου μικροβιακού φορτίου σε διαφορετικές αίθουσες του ΙΜΚ. Οι αερομεταφερόμενοι μικροοργανισμοί καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του αέρα, ειδικά σε εσωτερικούς χώρους με μεγάλη επισκεψιμότητα όπως είναι τα μουσεία. Εκτός από τις σχετιζόμενες με την υγεία επιπτώσεις ενός μικροβιακά επιβαρυμένου περιβάλλοντος, οι αερομεταφερόμενοι μικροοργανισμοί καθορίζουν σε μεγάλο ποσοστό τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των μικροβιακών επικαθίσεων στα ευπαθή υλικά όπως είναι τα εκτιθέμενα έργα τέχνης.

### **B1. Προσδιορισμός Αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών σε χώρους του ΙΜΚ με μικροβιολογικές μεθόδους**

#### **B1.1 Μεθοδολογία μετρήσεων με μικροβιολογικές μεθόδους**

Προκειμένου να γίνει προσδιορισμός των ζώντων και καλλιεργήσιμων μικροοργανισμών σε αέρια δείγματα, πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες με τους δειγματολήπτες MAS-100 και Andersen 6 σταδίων (Εικόνα 3.9). Ο δεύτερος έχει τη δυνατότητα να διαχωρίζει τα βιοαεροζόλ βάσει της αεροδυναμικής διαμέτρου τους σε 6 επίπεδα.



MAS-100



Andersen 6 σταδίων

*Εικόνα 3.9: Δειγματολήπτες αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών*

Μετά τη δειγματοληψία ακολουθούσε καλλιέργεια των μικροοργανισμών σε επιλεγμένα θρεπτικά μέσα και υπολογισμός της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών σε μονάδες CFU/m<sup>3</sup> αέρα. Με τη μεθοδολογία αυτή προσδιορίστηκε η συγκέντρωση α) δυνητικά παθογόνων, ετερότροφων

βακτηρίων, β) χημειοαυτότροφων, ολιγότροφων βακτηρίων, γ) οξεογόνων, ετερότροφων βακτηρίων και δ) μεσόφιλων, ταχέως αναπτυσσόμενων μυκήτων.

Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν σε 4 αίθουσες του ΙΜΚ και στον εξωτερικό χώρο του μουσείου (κήπος). Οι ημερομηνίες των δειγματοληψιών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

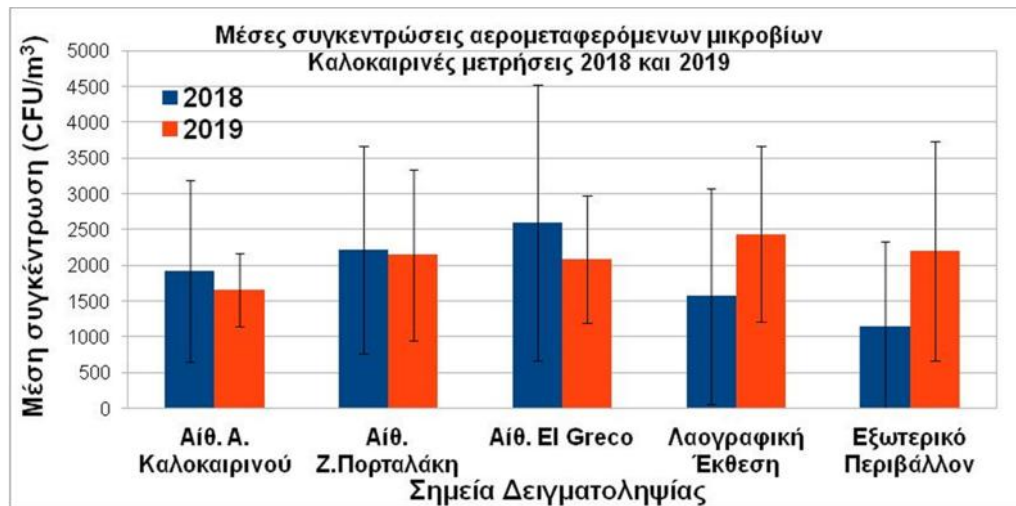
	27/3/18	20/6/18	9/7/18	24/7/18	28/8/18	18/9/18	8/10/18	25/6/19	9/7/19	23/7/19	3/9/19	17/9/19
<i>Εξωτερικός χώρος</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Αιθ. El Greco</i>		+	+	+	+	+	+	+	+			
<i>Αιθ. Ζ. Πορταλάκη</i>		+	+	+	+	+	+	+	+			
<i>Αιθ. Α. Καλοκαιρινού</i>	+									+	+	+
<i>Αιθ. Λαογρ. Έκθεσης</i>			+	+	+	+	+		+	+	+	+

Οι αίθουσες Α. Καλοκαιρινού, Ζ. Πορταλάκη και Λαογραφικής Έκθεσης διέθεταν φωτοκαταλυτικούς ιονιστές Daikin με διακοπόμενη λειτουργία. Επιπλέον, στις αίθουσες Ζ. Πορταλάκη και El Greco εγκαταστάθηκε σύστημα καθαρισμού αέρα με τεχνολογία πλάσματος Nonaerus, με συνεχόμενη λειτουργία, από τις 02/07/2019 – 05/09/2019.

## **B1.2 Αποτελέσματα μετρήσεων με μικροβιολογικές μεθόδους**

### Μέσες συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών

Το διάγραμμα 3.19 παρουσιάζει τη συγκριτική ανάλυση των μέσων συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μικροβίων των καλοκαιρινών μετρήσεων των ετών 2018 και 2019.

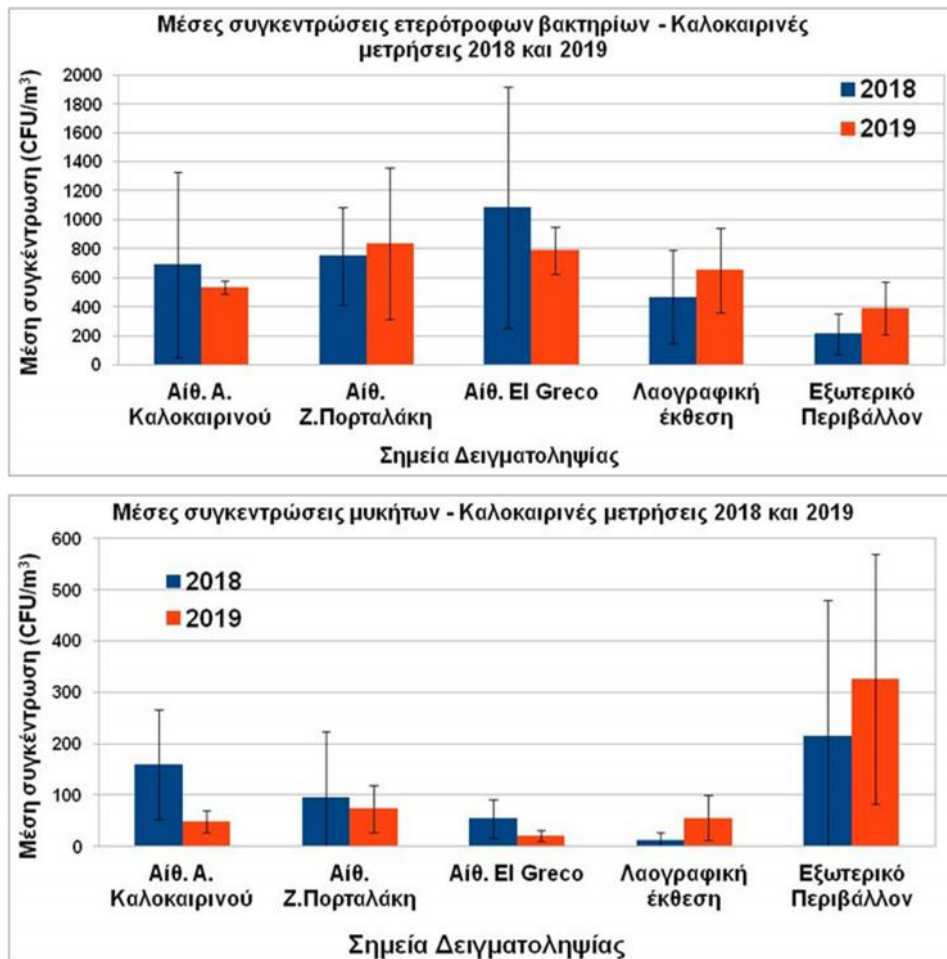


**Διάγραμμα 3.19:** Συγκριτική ανάλυση των μέσων συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μικροβίων των καλοκαιρινών μετρήσεων των ετών 2018 και 2019.

Οι συγκεντρώσεις των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στους εσωτερικούς χώρους ήταν υψηλότερες του εξωτερικού περιβάλλοντος κατά το έτος 2018, λόγω διακοπτόμενης λειτουργίας ή έλλειψης συστημάτων καθαρισμού του αέρα. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν στην αίθουσα El Greco, η οποία δεν διέθετε σύστημα καθαρισμού αέρα. Κατά το έτος 2019, όπου υπήρχε διακοπτόμενη ή συνεχής λειτουργία των συστημάτων καθαρισμού, οι συγκεντρώσεις των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στους εσωτερικούς χώρους ήταν χαμηλότερες ή ίσες με αυτές του εξωτερικού περιβάλλοντος, με εξαίρεση τη λαογραφική αίθουσα, όπου λειτουργούσαν τα 5 από τα 7 συστήματα.

### Μέσες συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων ετερότροφων βακτηρίων και μυκήτων

Το διάγραμμα 3.20 παρουσιάζει τη συγκριτική ανάλυση των μέσων συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων ετερότροφων βακτηρίων και μυκήτων των καλοκαιρινών μετρήσεων των ετών 2018 και 2019.

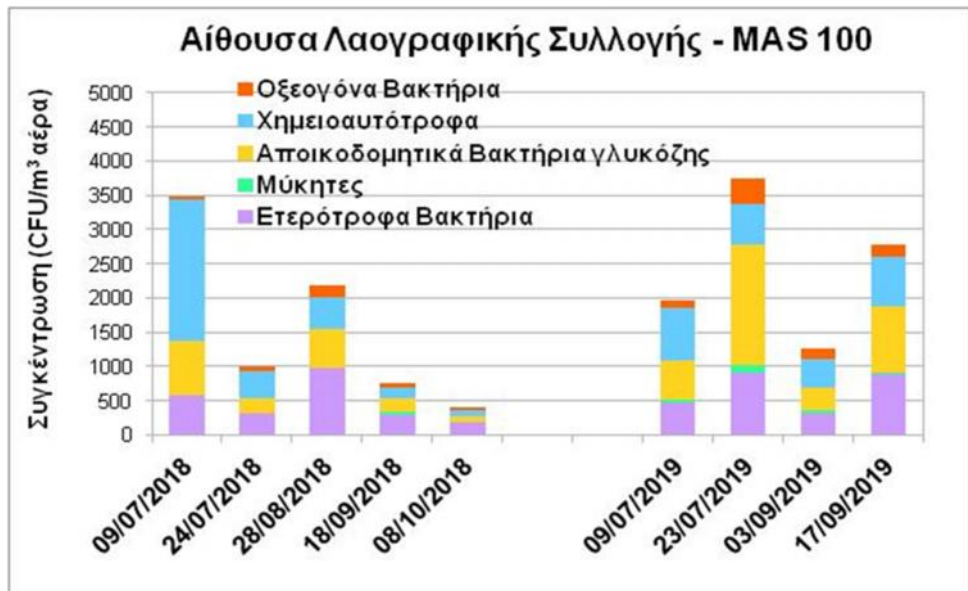
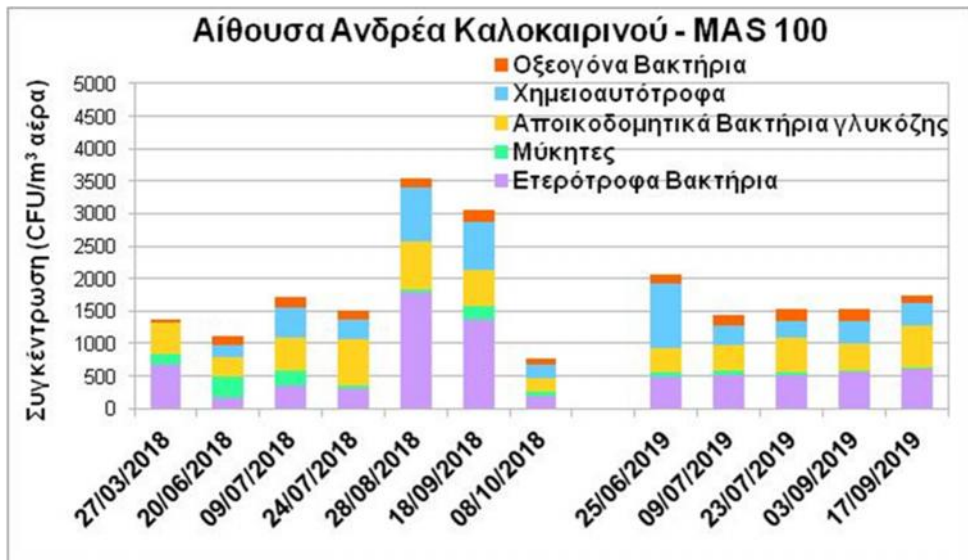


**Διάγραμμα 3.20:** Συγκριτική ανάλυση των μέσων συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων ετερότροφων βακτηρίων και μυκήτων των καλοκαιρινών μετρήσεων των ετών 2018 και 2019.

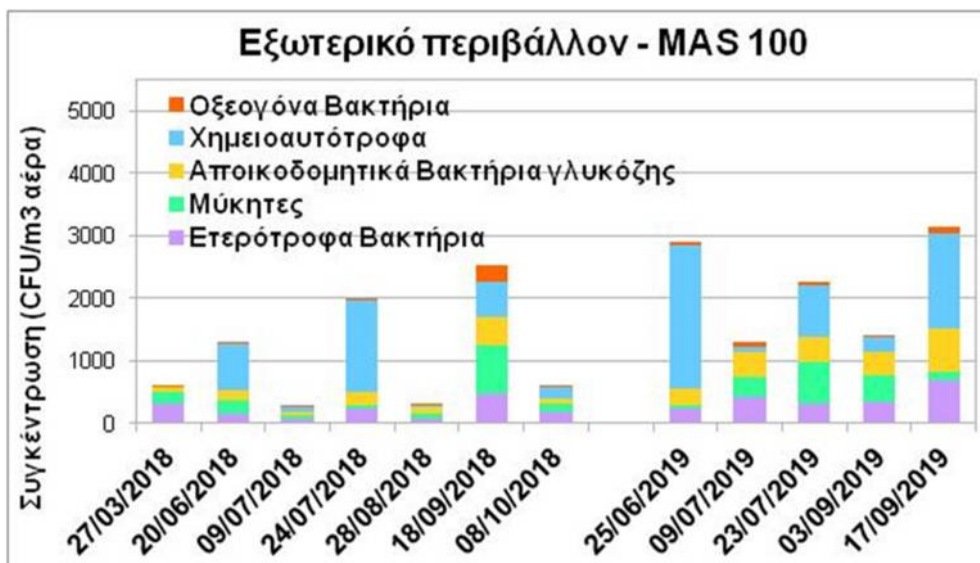
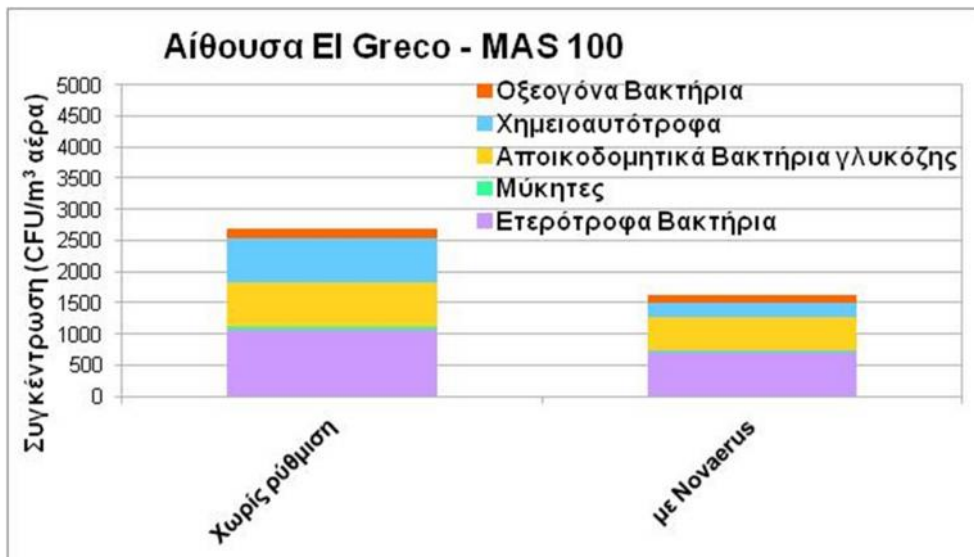
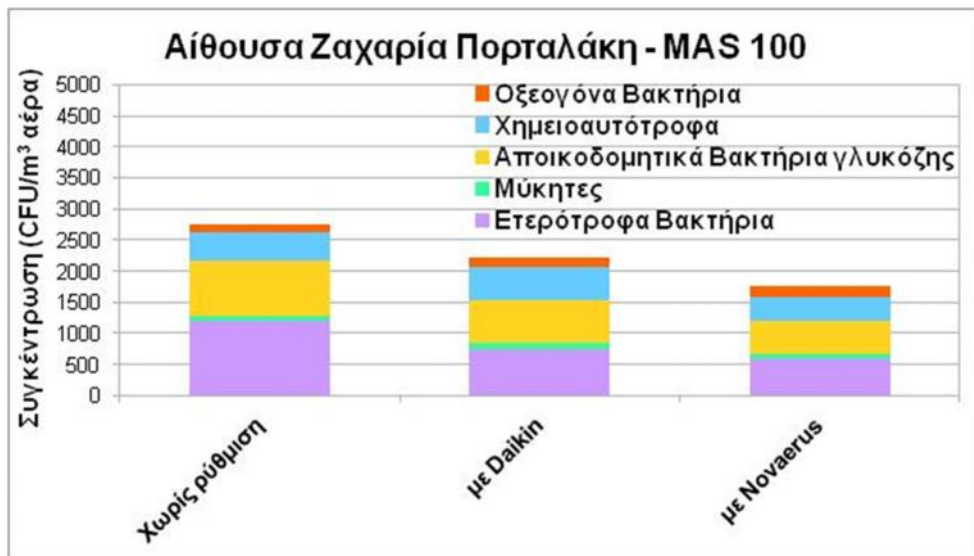
Παρατηρήθηκε μεγάλη ποικιλομορφία τόσο στις συγκεντρώσεις των μυκήτων, όσο και στις συγκεντρώσεις των βακτηρίων μεταξύ των διαφορετικών αιθουσών. Η μέση συγκέντρωση των ετερότροφων βακτηρίων ήταν υψηλότερη στους εσωτερικούς χώρους σε σύγκριση με το εξωτερικό αέρα, δηλαδή υπήρχε εμπλουτισμός ετερότροφων βακτηρίων. Αντίθετα, η μέση συγκέντρωση των μυκήτων ήταν χαμηλότερη στους εσωτερικούς χώρους σε σύγκριση με το εξωτερικό αέρα, δηλαδή υπήρχε παρεμπόδιση εμπλουτισμού των μυκήτων. Κατά το έτος 2019, παρατηρήθηκε βελτίωση της ποιότητας αέρα των εσωτερικών χώρων, παρόλο που οι συγκεντρώσεις στο εξωτερικό περιβάλλον ήταν υψηλότερες, λόγω της χρήσης και της βελτιωμένης ρύθμισης των συστημάτων καθαρισμού του αέρα.

### Συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών ανά κατηγορία και ανά αίθουσα

Παρουσιάζεται παρακάτω η συγκριτική ανάλυση των διαφορετικών κατηγοριών μικροοργανισμών ανά αίθουσα.



Διάγραμμα 3.21: Συγκριτική ανάλυση των διαφορετικών κατηγοριών μικροοργανισμών ανά αίθουσα (α).



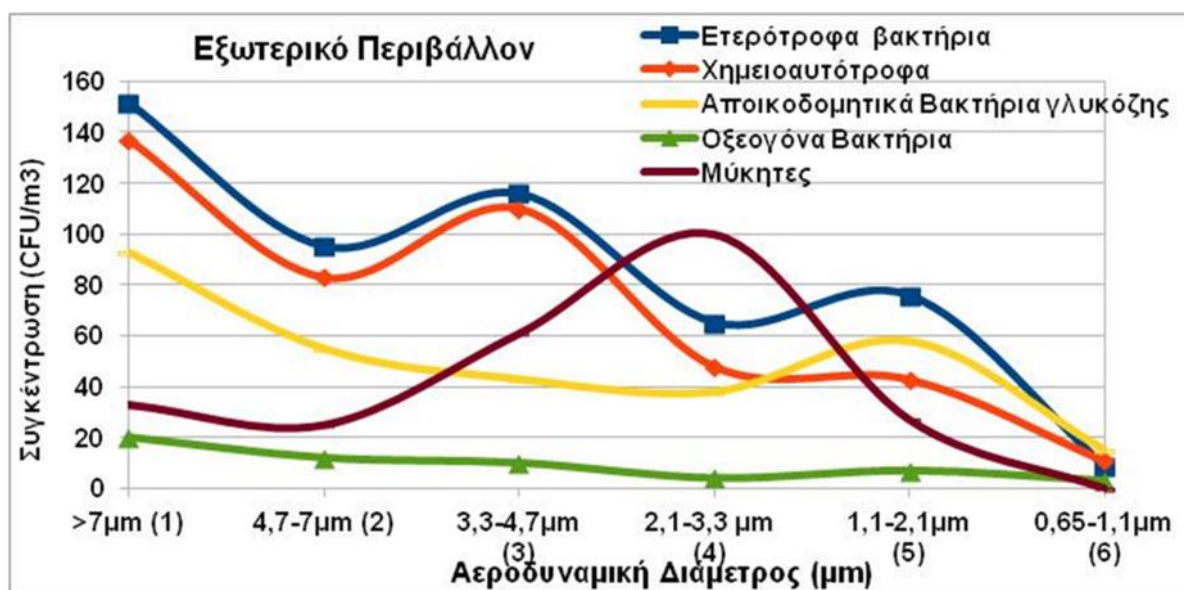
Διάγραμμα 3.22: Συγκριτική ανάλυση των διαφορετικών κατηγοριών μικροοργανισμών ανά αίθουσα (β).



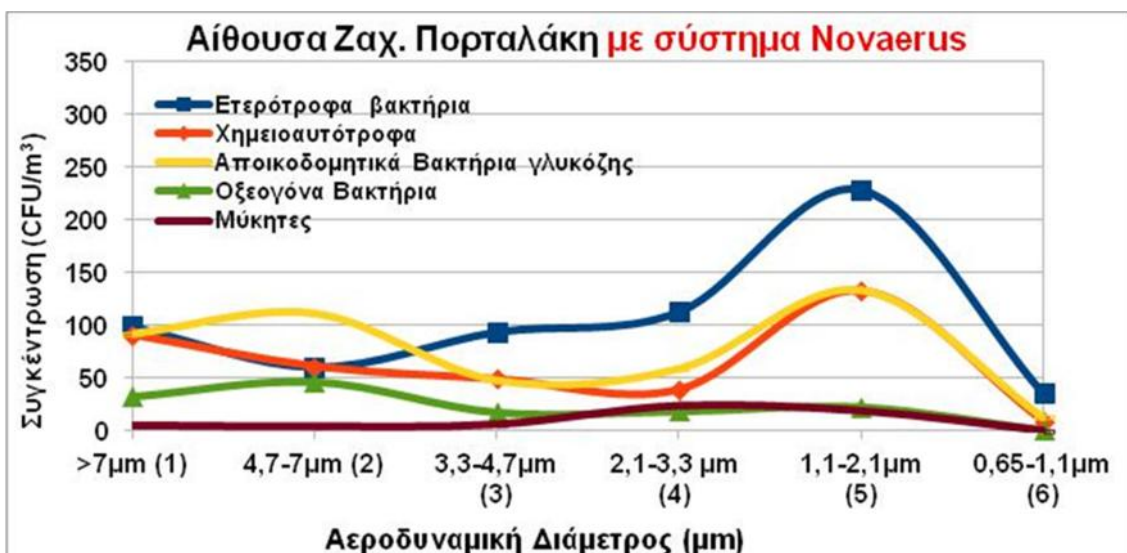
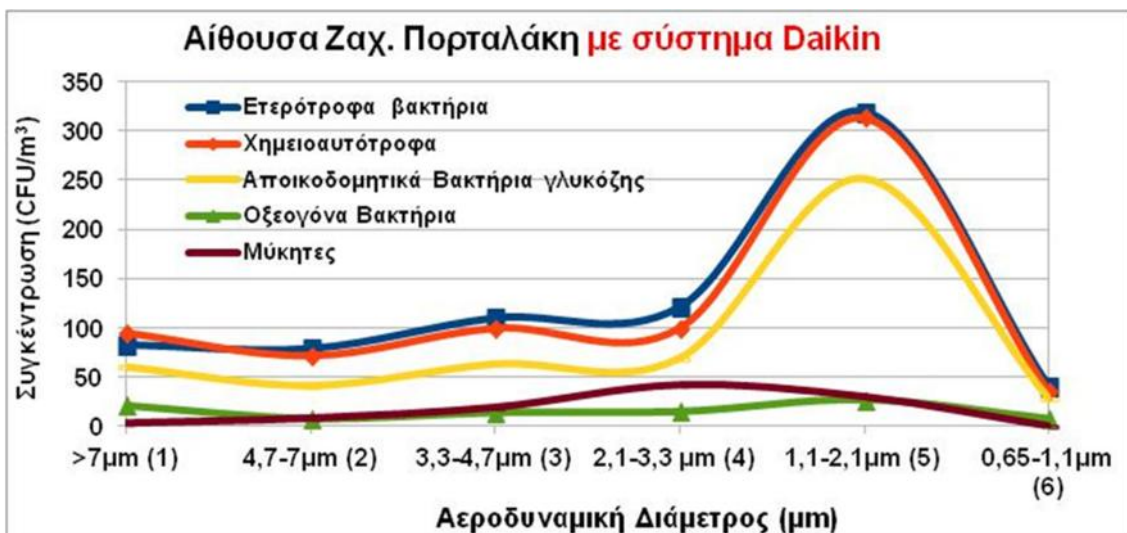
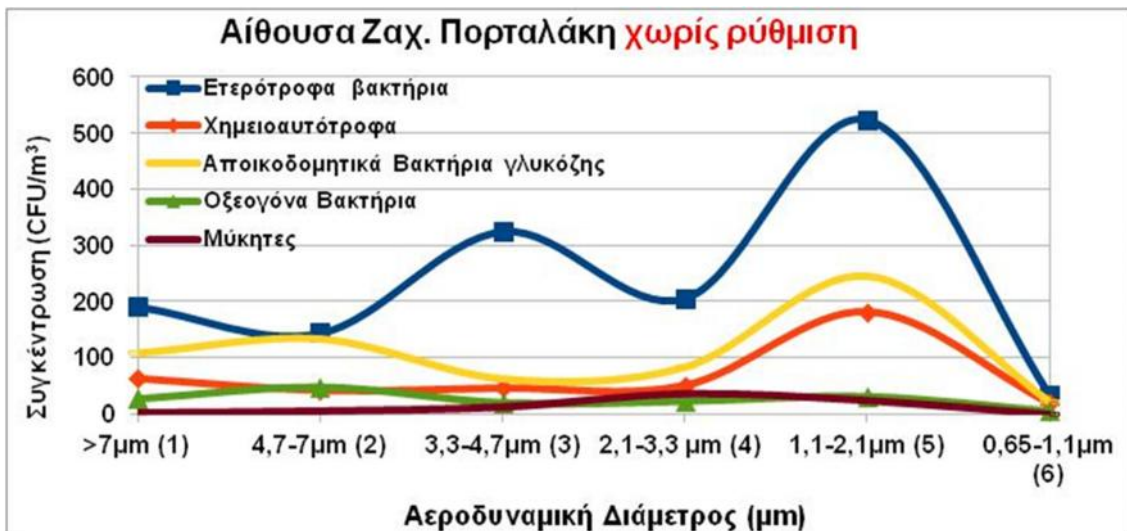
Παρατηρήθηκε υψηλή μεταβλητότητα αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στους εσωτερικούς χώρους με συστήματα καθαρισμού αέρα με διακοπτόμενη λειτουργία, όπως επίσης και στον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Παράλληλα, καταγράφηκε εμπλουτισμός των ετερότροφων, των χημειοαυτότροφων και των οξεογόνων βακτηρίων στους εσωτερικούς χώρους. Στην αίθουσα Ζ. Πορταλάκη υπολογίστηκε 38% μέση μείωση επί του συνόλου των μετρηθέντων αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών με 24-ωρη λειτουργία του συστήματος καθαρισμού. Αντίθετα, με λειτουργία του συστήματος καθαρισμού μόνο τις ώρες λειτουργίας μουσείου, η μέση μείωση των μικροοργανισμών ήταν 25%. Στην αίθουσα El Greco, η μέση μείωση επί του συνόλου των μετρηθέντων αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών με συνεχόμενη 24-ωρη λειτουργία του συστήματος καθαρισμού ήταν 49%.

### Κατανομή μεγέθους των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών

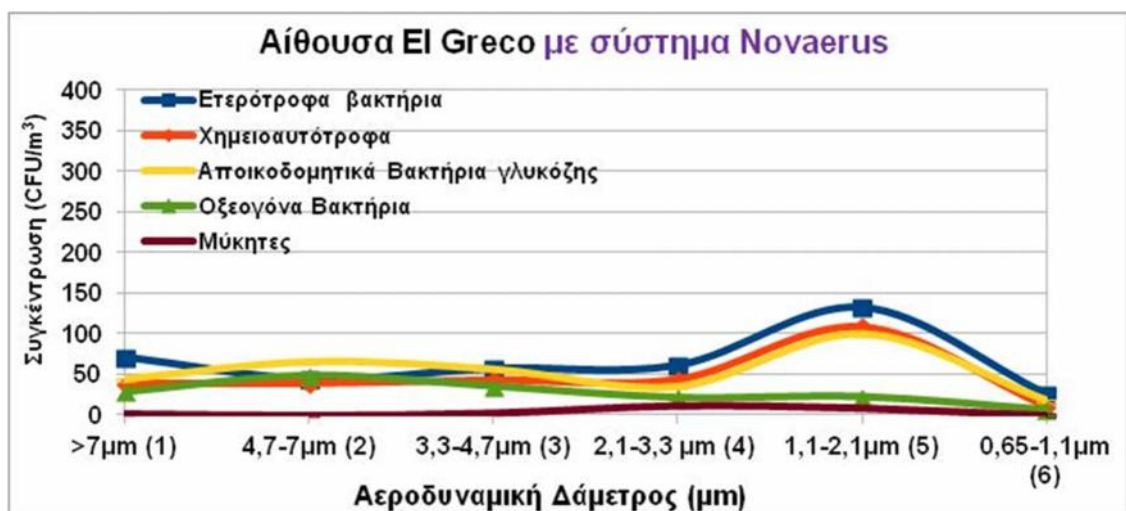
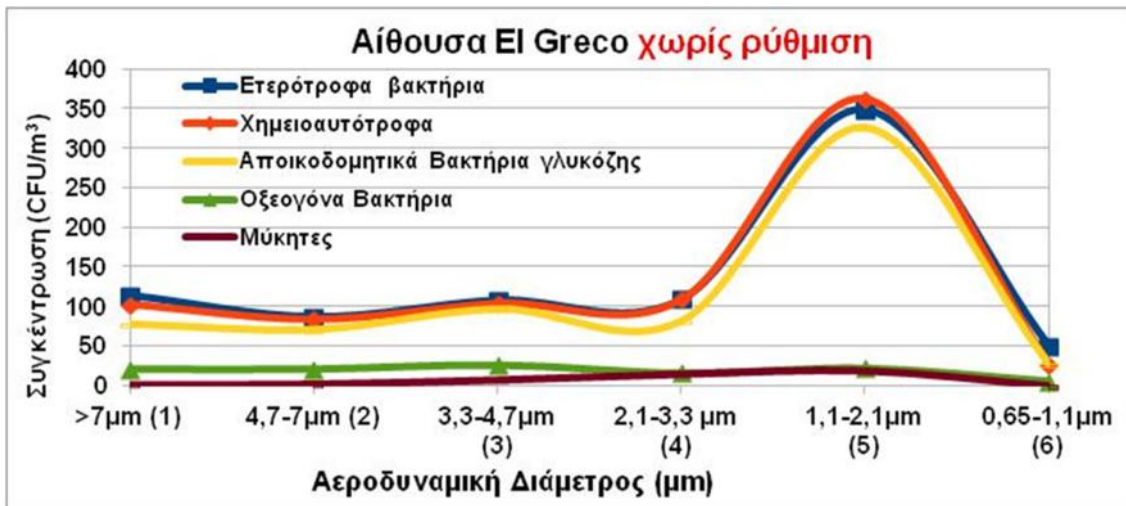
Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν την κατανομή του μεγέθους των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στο εξωτερικό περιβάλλον, όσο και στις αίθουσες του μουσείου.



**Διάγραμμα 3.23:** Κατανομή του μεγέθους των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στο εξωτερικό περιβάλλον.



Διάγραμμα 3.24: Κατανομή του μεγέθους των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στις αίθουσες του μουσείου (α).



**Διάγραμμα 3.25:** Κατανομή του μεγέθους των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στις αίθουσες του μουσείου (θ).

Στο εξωτερικό περιβάλλον, παρατηρήθηκε ασύμμετρη, δικόρυφη ή τρικόρυφη κατανομή μεγέθους των βακτηρίων με μέγιστο  $> 7 \mu\text{m}$ , ενώ η αντίστοιχη κατανομή των μυκήτων ήταν σχεδόν συμμετρική, με μέγιστο  $2,1-3,3 \mu\text{m}$ .

Στην αίθουσα Z. Πορταλάκη, χωρίς συστήματα καθαρισμού του αέρα, καταγράφηκε μετακίνηση του μεγίστου της κατανομής των βακτηρίων σε μικρότερα κλάσματα ( $1,1-2,1 \mu\text{m}$  και  $4,7-7 \mu\text{m}$  για τα οξεογόνα), ενώ η κατανομή του μεγέθους των μυκήτων ήταν όμοια με αυτή του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στην ίδια αίθουσα, με διακοπτόμενη λειτουργία του συστήματος Daikin, παρατηρήθηκε μείωση των βακτηρίων κατά 25% και εξαφάνιση του μεγίστου των οξεογόνων βακτηρίων, ενώ η κατανομή του μεγέθους των μυκήτων δεν επηρεάστηκε. Αντίθετα, με συνεχόμενη λειτουργία του συστήματος Novaerus, τα βακτήρια της αίθουσας Z. Πορταλάκη μειώθηκαν κατά 38%, ενώ τα οξεογόνα εμπλουτίστηκαν και διατηρήθηκε το μέγιστο της κατανομής τους.

Στην αίθουσα El Greco, με συνεχόμενη λειτουργία του συστήματος Nonaerus, τα βακτήρια μειώθηκαν κατά 49%, αλλά δεν επηρεάστηκε το μέγιστο της κατανομής των βακτηρίων και των μυκήτων και διατηρήθηκε το μέγιστο των οξεογόνων βακτηρίων, τα οποία εμπλουτίστηκαν.

### **B1.3 Συμπεράσματα μετρήσεων με μικροβιολογικές μεθόδους**

Κάθε αίθουσα του Ιστορικού Μουσείου Κρήτης παρουσίαζε διαφορετικές συγκεντρώσεις και διακυμάνσεις αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από:

- 1) *Εσωτερικές πηγές εκπομπής* (χημική σύσταση / εμβασμόν και πορώδες / ενεργή επιφάνεια εκθεμάτων, φύλαξη σε προθήκες, παρουσία/ δραστηριότητες επισκεπτών)
- 2) *Εξωτερικές πηγές εκπομπής* (μικροβιακή σύσταση εξωτερικού αέρα / ροή φυσικού αερισμού, μικροβιακή σύσταση αέρα ανακυκλοφορίας)
- 3) *Συστήματα καθαρισμού αέρα* (μηχανισμοί - απόδοση συστημάτων, διακοπτόμενη – συνεχής λειτουργία, ορθή ή ελλιπή χρήση).

Η μελέτη της κατανομής μεγέθους των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στους εσωτερικούς χώρους του ΙΜΚ και στον εξωτερικό αέρα έδειξε ότι:

- 1) Οι μύκητες παρουσίαζαν σταθερό μέγιστο στο κλάσμα 2,1-3,3 μm τόσο στο εξωτερικό περιβάλλον όσο και στους εσωτερικούς χώρους. Η κατανομή μεγέθους ήταν σχεδόν συμμετρική με μία κορυφή.
- 2) Τα αερομεταφερόμενα βακτήρια παρουσίαζαν τελείως διαφορετική κατανομή μεγεθών στο εξωτερικό περιβάλλον και στους εσωτερικούς χώρους του Μουσείου. Η κατανομή στο εξωτερικό περιβάλλον είχε δύο ή τρεις κορυφές με μέγιστη τιμή στο μεγαλύτερο κλάσμα > 7 μm. Αντίθετα η κατανομή στο εσωτερικό περιβάλλον παρουσίαζε κυρίως μία μόνο κορυφή με μέγιστη τιμή σε μικρότερο κλάσμα μεγέθους 1,1-2,1 μm. Τα οξεογόνα βακτήρια παρουσίαζαν σχεδόν μια ισοκατανομή με μία χαμηλή κορυφή στο κλάσμα 4,7-7 μm.

Παράλληλα, ελέγχθηκε η απόδοση των συστημάτων καθαρισμού αέρα Daikin και Nonaerus των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών στους εσωτερικούς χώρους του ΙΜΚ. Παρατηρήθηκε ότι:

- 1) Τα συστήματα καθαρισμού του αέρα, παρόλο που διαφέρουν ως προς τη τεχνολογία και λειτουργία, μείωσαν αισθητά το κλάσμα των αερομεταφερόμενων βακτηρίων μεγέθους 1,1-2,1 μm.
- 2) Το σύστημα Daikin, με διακοπτόμενη λειτουργία, μείωσε στην αίθουσα Ζ. Πορταλάκη τα αερομεταφερόμενα μικρόβια κατά 25% και εξάλειψε την κορυφή των οξεογόνων βακτηρίων στο κλάσμα μεγέθους 4,7-7 μm.

3) Το σύστημα Novaerus, με συνεχή 24-ωρη λειτουργία, μείωσε στην αίθουσα Ζ. Πορταλάκη τα αερομεταφερόμενα μικρόβια κατά 38%, αλλά δεν μείωσε την συγκέντρωση και την κορυφή των οξεογόνων βακτηρίων στο κλάσμα μεγέθους 4,7-7  $\mu\text{m}$ .

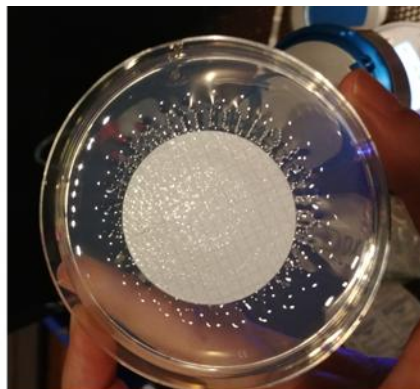
## **B2) Προσδιορισμός αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών σε χώρους του ΙΜΚ με μοριακές μεθόδους**

### **B2.1) Μεθοδολογία μετρήσεων με μοριακές μεθόδους**

Οι δειγματοληψίες των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών σε χώρους του ΙΜΚ για τη μελέτη με μοριακές μεθόδους έγιναν με χρήση του δειγματολήπτη MAS-100 NT (Εικόνα 3.10). Ένα αποστειρωμένο φίλτρο μικτών εστέρων κυτταρίνης (ME 25/21 ST, Whatman) προσαρμοζόταν κάθε φορά πάνω σε ένα τριβλίο με άγαρ και το τριβλίο εισαγόταν στον δειγματολήπτη. Μετά το πέρας της δειγματοληψίας, γινόταν απομόνωση του μικροβιακού DNA από το φίλτρο με συνδυασμό χημικής και μηχανικής λύσης των κυττάρων (DNeasy PowerSoil kit, Qiagen). Στα δείγματα DNA έγινε αλληλουχία περιοχών του 16S rRNA και του ITS2 με τη μέθοδο MiSeq της εταιρείας Illumina με σκοπό την ταυτοποίηση των αερομεταφερόμενων βακτηρίων και μυκήτων.



Δειγματολήπτης MAS-100 NT



Αποστειρωμένο φίλτρο πάνω σε τριβλίο με άγαρ

***Εικόνα 3.10:** Δειγματολήπτης MAS-100 NT και συλλεχθέν δείγμα αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών προς μοριακή ανάλυση*

Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν σε 4 αίθουσες του ΙΜΚ και στον εξωτερικό χώρο του μουσείου (κήπος). Οι ημερομηνίες των δειγματοληψιών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (στο κόκκινο πλαίσιο τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέθοδο MiSeq):

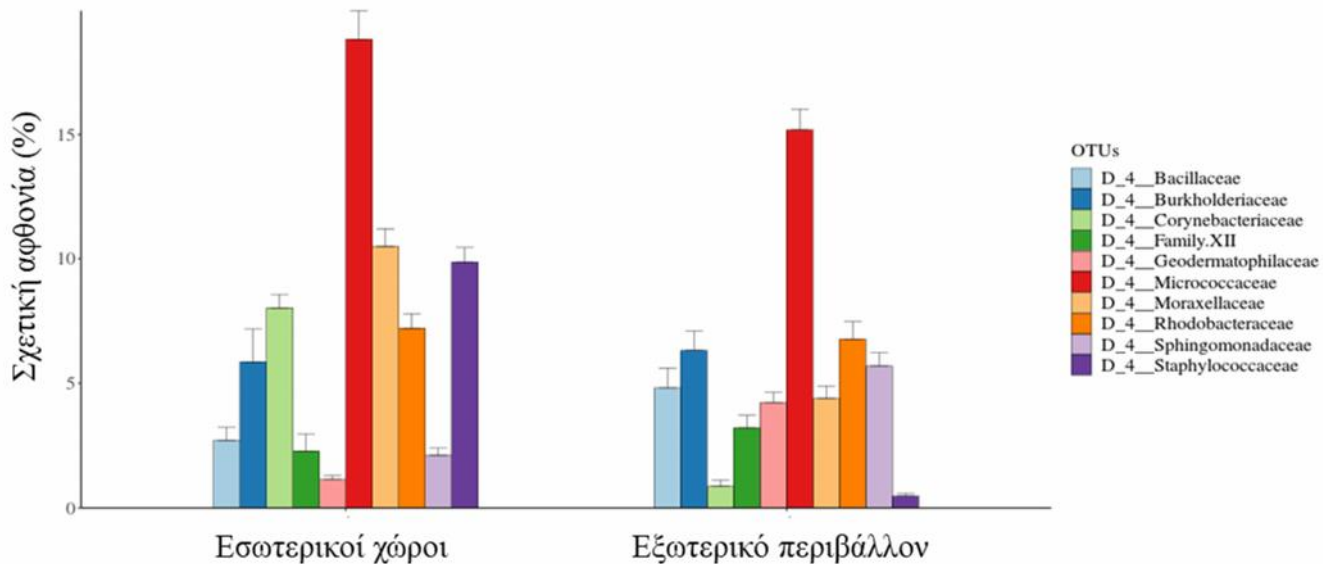
	27/3/18	20/6/18	9/7/18	24/7/18	28/8/18	18/9/18	8/10/18	25/6/19	9/7/19	23/7/19	3/9/19	17/9/19
Εξωτερικός χώρος	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Αιθ. El Greco		+	+	+	+	+	+	+	+			
Αιθ. Ζ. Πορταλάκη		+	+	+	+	+	+	+	+			
Αιθ. Α. Καλοκαιρινού	+									+	+	+

Οι αίθουσες Α. Καλοκαιρινού, Ζ. Πορταλάκη και Λαογραφικής Έκθεσης διέθεταν φωτοκαταλυτικούς ιονιστές Daikin με διακοπτόμενη λειτουργία. Επιπλέον, στις αίθουσες Ζ. Πορταλάκη και El Greco εγκαταστάθηκε σύστημα καθαρισμού αέρα με τεχνολογία πλάσματος Nonaerus, με συνεχόμενη λειτουργία, από τις 02/07/2019 – 05/09/2019.

## B2.2) Αποτελέσματα μετρήσεων με μοριακές μεθόδους

### Ταυτοποίηση οικογενειών βακτηρίων

Το διάγραμμα 3.26 δείχνει τη σχετική αφθονία (%) των αερομεταφερόμενων βακτηρίων σε εσωτερικούς χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον σε επίπεδο οικογενειών.

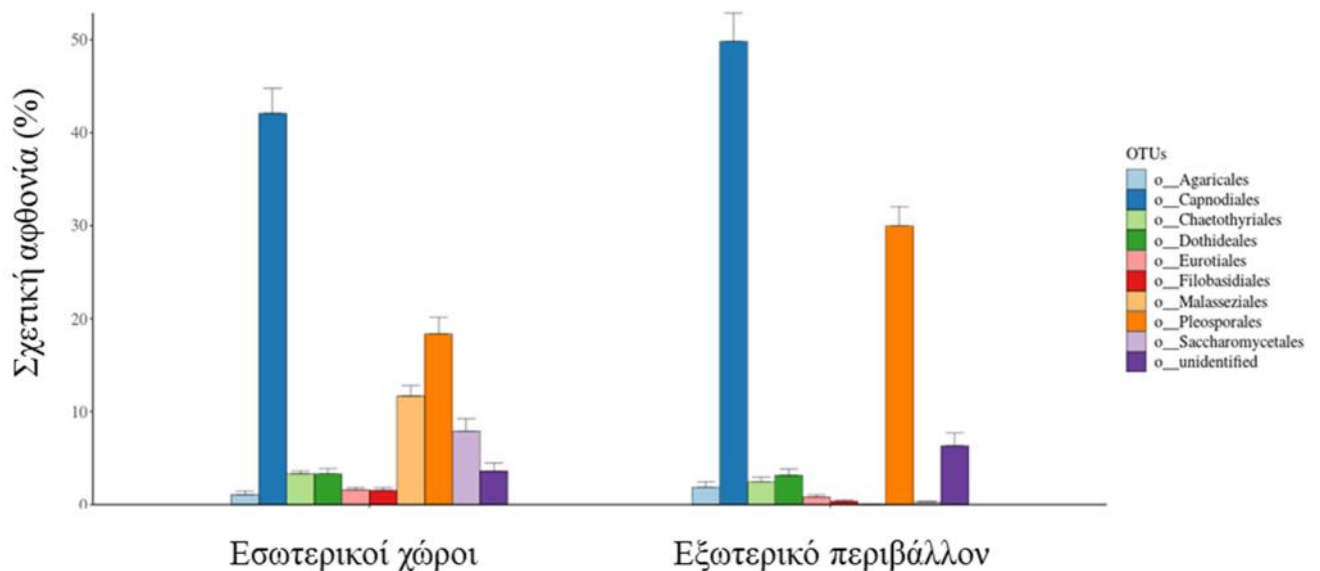


**Διάγραμμα 3.26:** Σχετική αφθονία (%) των αερομεταφερόμενων βακτηρίων σε εσωτερικούς χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον σε επίπεδο οικογενειών.

Οι πιο συχνά απαντώμενες οικογένειες βακτηρίων ήταν οι οικογένειες Bacillaceae, Burkholderiaceae, Corynebacteriaceae, Family XII, Geodermatophilaceae, Micrococcaceae, Moraxellaceae, Rhodobacteraceae, Sphingomonadaceae και Staphylococcaceae. Ορισμένες από αυτές εμφάνισαν αυξημένο ποσοστό σχετικής αφθονίας στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον, όπως οι οικογένειες Micrococcaceae, Corynebacteriaceae, Moraxellaceae, και Staphylococcaceae. Αντίθετα, άλλες οικογένειες βακτηρίων ανιχνεύθηκαν με υψηλότερη σχετική συχνότητα στον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος (Bacillaceae, Geodermatophilaceae, Sphingomonadaceae).

### Ταυτοποίηση τάξεων μυκήτων

Το διάγραμμα 3.27 δείχνει τη σχετική αφθονία (%) των αερομεταφερόμενων μυκήτων σε εσωτερικούς χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον σε επίπεδο τάξεων.



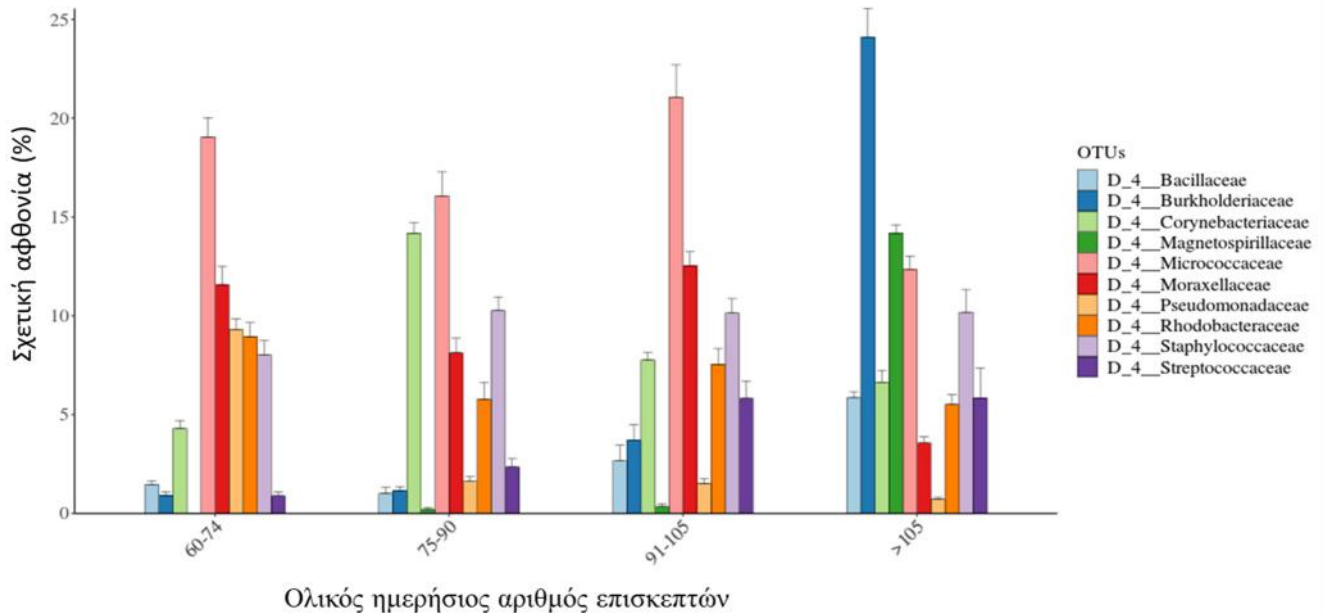
**Διάγραμμα 3.27:** σχετική αφθονία (%) των αερομεταφερόμενων μυκήτων σε εσωτερικούς χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον σε επίπεδο οικογενειών.

Παρόλο που οι αερομεταφερόμενοι μύκητες ανιχνεύθηκαν με χαμηλότερη συγκέντρωση στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου σε σχέση με τον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος, έγινε ταυτοποίηση πολλών διαφορετικών μυκήτων και στις δύο περιπτώσεις. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η σχετική αφθονία των τάξεων που ταυτοποιήθηκαν διέφερε μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, καταγράφηκε εμπλουτισμός στους εσωτερικούς χώρους δύο συγκεκριμένων τάξεων μυκήτων που ανήκουν στην ανθρώπινη χλωρίδα (*Malasseziales* και *Saccharomycetales*), οι οποίες εμφανίζονταν σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα στον αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Αντιστοίχως, οι τάξεις *Capnodiales* και *Pleosporales* εμφάνισαν υψηλότερη σχετική αφθονία στο εξωτερικό περιβάλλον από ότι στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου.



### Χαρακτηρισμός των βακτηρίων σε σχέση με τον αριθμό των επισκεπτών

Το διάγραμμα 3.28 παρουσιάζει τη σχετική αφθονία (%) των αερομεταφερόμενων βακτηρίων σε εσωτερικούς χώρους σε επίπεδο οικογενειών σε συνάρτηση με τον ολικό ημερήσιο αριθμό επισκεπτών του μουσείου.

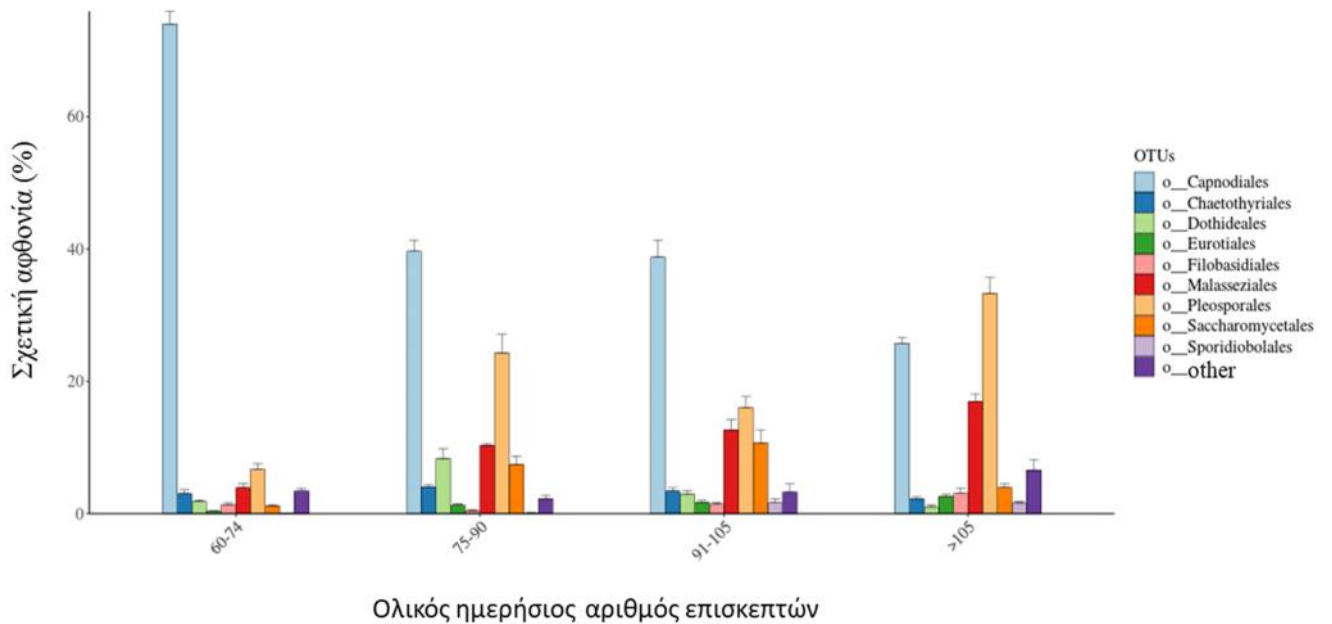


**Διάγραμμα 3.28:** σχετική αφθονία (%) των αερομεταφερόμενων βακτηρίων (%) σε εσωτερικούς χώρους σε επίπεδο οικογενειών σε συνάρτηση με τον ολικό ημερήσιο αριθμό επισκεπτών.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι παρατηρήθηκε σαφής εμπλουτισμός συγκεκριμένων οικογενειών βακτηρίων (Bacillaceae, Burkholderiaceae, Magnetospirillaceae, Streptococcaceae) στον αέρα των εσωτερικών χώρων του μουσείου με αυξανόμενο αριθμό επισκεπτών.

Χαρακτηρισμός των μυκήτων σε σχέση με τον αριθμό των επισκεπτών

Το διάγραμμα 3.29 παρουσιάζει τη σχετική αφθονία (%) των αερομεταφερόμενων μυκήτων σε εσωτερικούς χώρους σε επίπεδο τάξης σε συνάρτηση με τον ολικό ημερήσιο αριθμό επισκεπτών.



**Διάγραμμα 3.29:** σχετική αφθονία (%) των αερομεταφερόμενων μυκήτων (%) σε εσωτερικούς χώρους σε επίπεδο τάξης σε συνάρτηση με τον ολικό ημερήσιο αριθμό επισκεπτών.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι δεν παρατηρήθηκε μια σαφής τάση συσχέτισης της σχετικής αφθονίας των αερομεταφερόμενων μυκήτων με αυξανόμενο αριθμό επισκεπτών στον αέρα των εσωτερικών χώρων του μουσείου. Σημαντικό ποσοστό επί του συνόλου της σχετικής αφθονίας των μυκήτων καταλαμβάνουν οι τάξεις Capnodiales, Pleosporales και Malasseziales, ενώ σε μικρότερο ποσοστό ανιχνεύονται οι τάξεις Chaetothyriales, Dothideales, Eurotiales, Filobasidiales, Saccharomycetales και Sporidiobolales.

### **B2.3) Συμπεράσματα μετρήσεων αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών με μοριακές μεθόδους**

Η ανάλυση των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών με μοριακές τεχνικές έδειξε ότι οι μικροοργανισμοί ποικίλλουν ποιοτικά ανάλογα με το χώρο και την ημερομηνία δειγματοληψίας. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζει τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, που καθορίζουν ως ένα βαθμό το αερομεταφερόμενο μικροβιακό φορτίο (Nazaroff, 2016). Πολλά από τα βακτήρια που ταυτοποιήθηκαν στον αέρα προσδιορίστηκαν και στις μικροβιακές επικαθίσεις των έργων τέχνης, το οποίο υποστηρίζει την σημασία της ποιότητας του αέρα ως προς την προστασία των ευπαθών αντικειμένων της πολιτιστικής κληρονομιάς (Lazaridis et al., 2018, Lazaridis et al., 2015). Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι μικροοργανισμοί που ανήκουν στην ανθρώπινη μικροβιακή χλωρίδα εμφανίζονταν σε υψηλότερα ποσοστά στα δείγματα των εσωτερικών χώρων από ότι στον εξωτερικό χώρο. Η διαπίστωση αυτή είναι σε συμφωνία με το κοινώς αποδεκτό δεδομένο ότι οι αερομεταφερόμενοι μικροοργανισμοί των εσωτερικών χώρων καθορίζονται σε μεγάλο ποσοστό από τους επισκέπτες (Lax et al., 2014, Hospodsky et al., 2012). Τέλος, παρατηρήθηκε ότι τα κύρια αποτελέσματα των μοριακών αναλύσεων είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των μικροβιολογικών καλλιιεργειών.

### **Βιβλιογραφία ενότητας Β**

- 1) Hospodsky D., Qian J., Nazaroff W.W., Yamamoto N., Bibby K., Rismani-Yazdi H., Peccia J. Human occupancy as a source of indoor airborne bacteria. *PLoS One*, 2012, 7(4), e34867.
- 2) Lax S., Smith D.P., Hampton-Marcell J., Owens S.M., Handley K.M., Scott N.M., Gibbons S.M., Larsen P., Shogan B.D., Weiss S., Metcalf J.L., Ursell L.K., Vázquez-Baeza Y., Van Treuren W., Hasan N.A., Gibson M.K., Colwell R., Dantas G., Knight R., Gilbert J.A. Longitudinal analysis of microbial interaction between humans and the indoor environment. *Science*, 2014, 345(6200): 1048-1052.
- 3) Lazaridis M., Katsivela E., Kopanakis I., Raisi L., Mihalopoulos N., Panagiaris G. Characterization of airborne particulate matter and microbes inside cultural heritage collections. *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 30, 136-146.
- 4) Lazaridis M., Katsivela E., Kopanakis I., Raisi L., Panagiaris G. Indoor/outdoor particulate matter concentrations and microbial load in cultural heritage collections. *Heritage science*, 2015, 3 (1), 1-13.
- 5) Nazaroff W.W. *Indoor Air*, 2016, 26(1): 61-78.

### **Γ) Προσδιορισμός μικροβιακών επικαθίσεων σε ευπαθή υλικά.**

Στόχος αυτού του πακέτου εργασίας ήταν η μελέτη του μικροβιακού φορτίου που επικάθεται σε ευπαθή υλικά που εκτίθενται σε διαφορετικές αίθουσες του ΙΜΚ. Οι μικροοργανισμοί είναι γνωστό ότι αλληλεπιδρούν με τις επιφάνειες επικαθίσης, είτε χρησιμοποιώντας το υλικό ως μεταβολικό υπόστρωμα, είτε εκκρίνοντας προς το περιβάλλον προϊόντα των βιοχημικών διεργασιών τους. Η παρουσία τους πάνω σε ευπαθή υλικά όπως έργα τέχνης ή αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί παράγοντα κινδύνου για χημική διάβρωση, βιοαποικοδόμηση και μηχανική καταπόνηση της επιφάνειας (Sterflinger και Piňar, 2013).

#### **Γ1) Μεθοδολογία μελέτης μικροβιακών επικαθίσεων**

Προκειμένου να συλλεχθούν δείγματα των μικροβιακών επικαθίσεων προς μελέτη, χρησιμοποιήθηκε ο αποστειρωμένος συλυεός SK-2S (Cell Projects Ltd., Εικόνα 3.10), ο οποίος εμβαπτίζεται σε αποστειρωμένο νερό πριν από κάθε δειγματοληψία. Κάθε φορά γινόταν συλλογή των μικροβιακών επικαθίσεων από επιφάνεια 100 cm<sup>2</sup>.

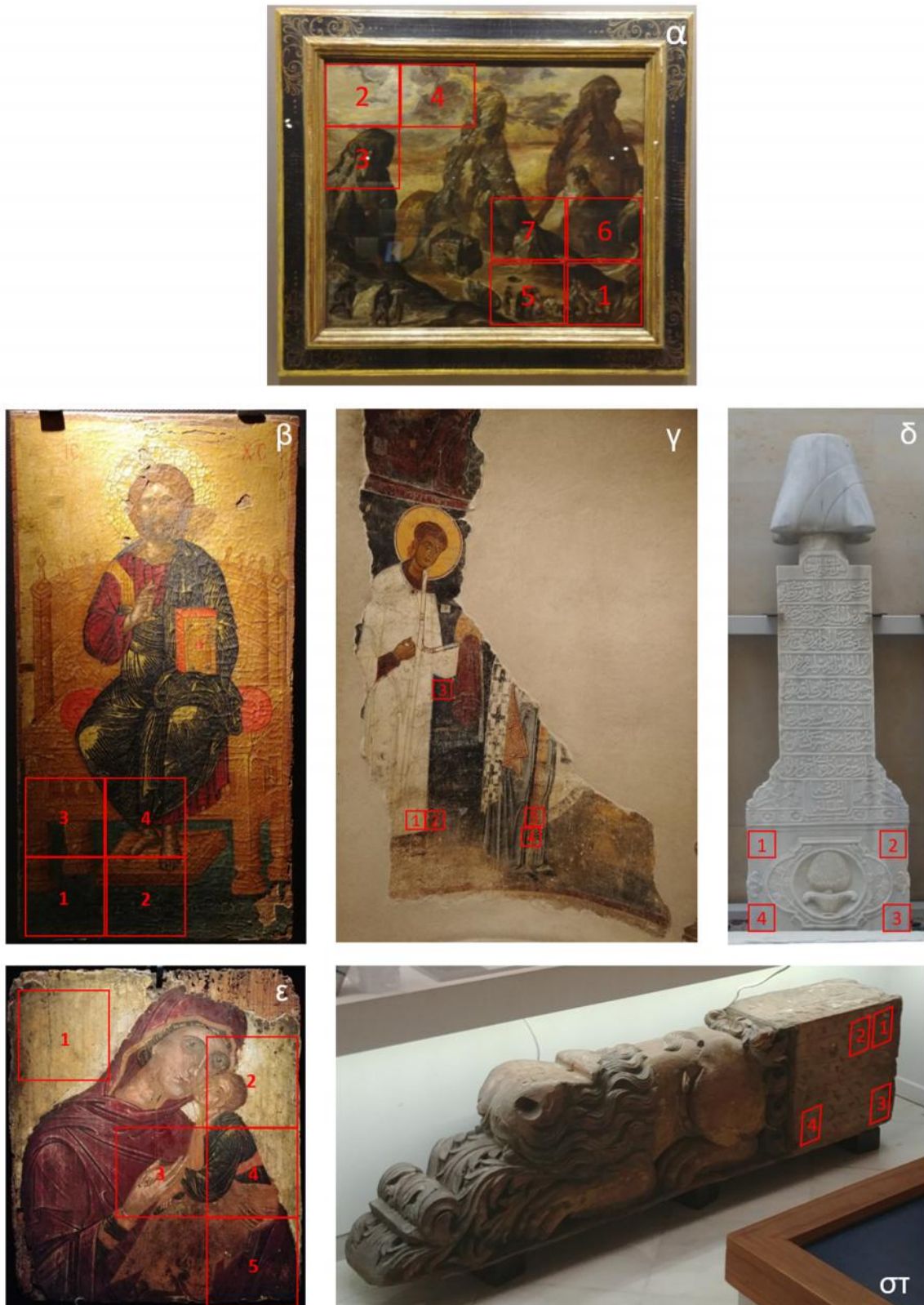


**Εικόνα 3.10:** Δειγματολήπτης μικροβιακών επιχρισμάτων

Συνολικά έγινε συλλογή 29 δειγμάτων από 6 έργα τέχνης από διαφορετικούς χώρους του μουσείου, τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και στην εικόνα 3.11:

**Στοιχεία δειγματοληψίας μικροβιακών επικαθίσεων από ευπαθή υλικά.**

<b>Αντικείμενο/ έργο τέχνης</b>	<b>Υλικό επιφάνειας</b>	<b>Χώρος έκθεσης</b>	<b>Αριθμός δειγμάτων</b>
<b>Άποψη του Όρους και της Μονής Σινά, El Greco, 1570</b>	Συνθετική (βερνίκι)	ρητίνη Αίθουσα El Greco	7
<b>Παναγία Γλυκοφιλούσα, τέλη 15ου αιώνα</b>	Συνθετική (βερνίκι)	ρητίνη Αίθουσα Ζ. Πορταλάκη	5
<b>Χριστός Ένθρονος, 17ος αιώνας</b>	Συνθετική (βερνίκι)	ρητίνη Αίθουσα El Greco	4
<b>Τοιχογραφία, 13-14ος αιώνας</b>	Φρέσκο (τέμπερα σε σοβά)	Αίθουσα Ζ. Πορταλάκη	5
<b>Ακρόπρωρο πλοίου, 18ος αιώνας</b>	Ξύλο	Αίθουσα Α. Καλοκαιρινού	4
<b>Επιτύμβια στήλη, τέλη 18ου αιώνα</b>	Μάρμαρο	Εξωτερικός χώρος (κήπος)	4



**Εικόνα 3.11:** Έργα τέχνης από τα οποία έγινε συλλογή μικροβιακών επικαθίσεων. Με κόκκινο πλαίσιο σημειώνονται οι επιφάνειες δειγματοληψίας. α) Αποψη του όρους και της Μονής Σινά, β) Χριστός Ένθρονος, γ) Τοιχογραφία, δ) Επιτύμβια στήλη, ε) Παναγία Γλυκοφιλούσα, στ) Ακρόπρωρο πλοίου.

Παράλληλα, έγινε έκθεση αποστειρωμένων φίλτρων μικτών εστέρων κυτταρίνης (ME 25/21 ST, Whatman) στις αίθουσες Z. Πορταλάκη και El Greco (Εικόνα 3.12). Τα φίλτρα συλλέχθηκαν μετά από ένα χρόνο και οι μικροοργανισμοί που επικάθησαν σε αυτή την περίοδο αναλύθηκαν παράλληλα με τις επικαθίσεις των έργων τέχνης.



Αίθουσα Z. Πορταλάκη



Αίθουσα El Greco

**Εικόνα 3.12:** Έκθεση αποστειρωμένων φίλτρων στις αίθουσες Z. Πορταλάκη και El Greco.

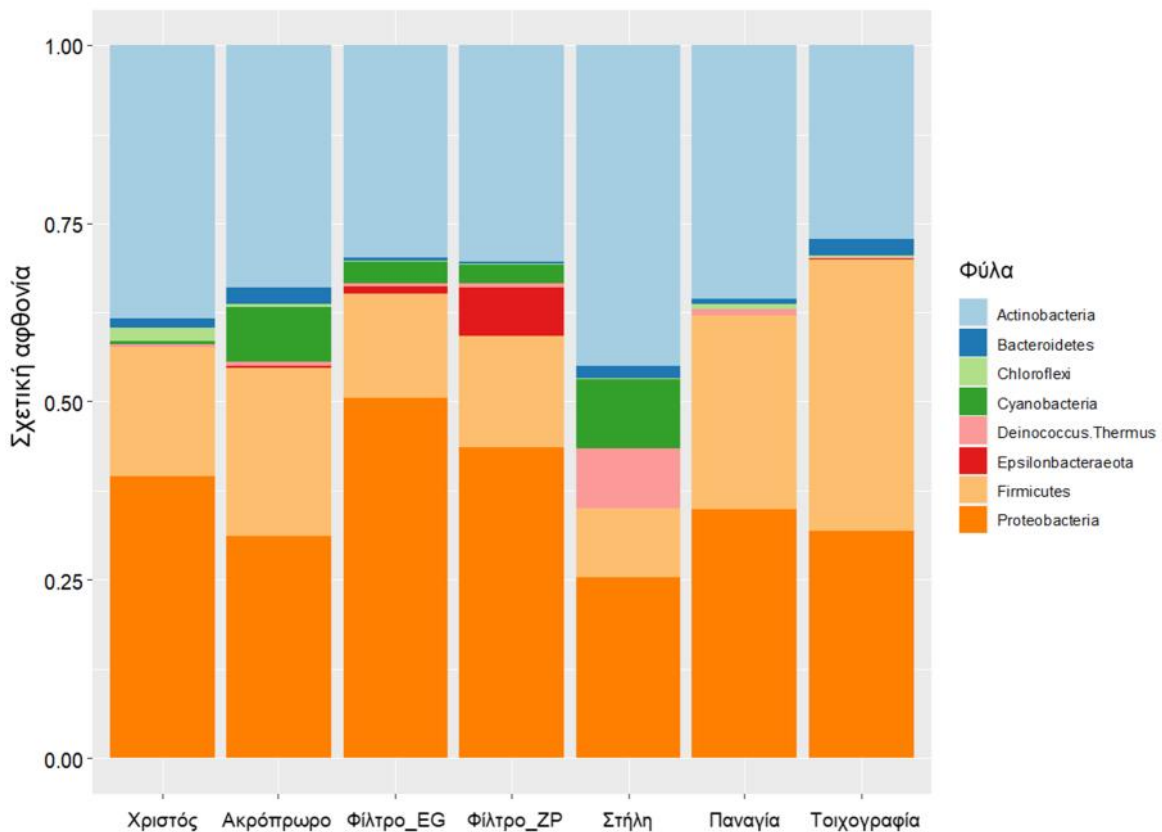
Τα δείγματα που συλλέχθηκαν από τις επιφάνειες των προαναφερόμενων έργων τέχνης και των φίλτρων υποβλήθηκαν σε εξαγωγή DNA με συνδυασμό χημικής και μηχανικής λύσης των κυττάρων (DNeasy PowerSoil kit, Qiagen) και στη συνέχεια έγινε αλληλούχιση της περιοχής V3-V4 του γονιδίου 16S rRNA με τη μέθοδο MiSeq της εταιρείας Illumina με σκοπό την ταυτοποίηση των βακτηριακών επικαθίσεων.

## Γ2) Αποτελέσματα μελέτης μικροβιακών επικαθίσεων

Σύνθεση των βακτηριακών πληθυσμών μικροβιακών επικαθίσεων

Στα δείγματα των μικροβιακών επικαθίσεων του πίνακα El Greco δεν ανιχνεύθηκαν βακτήρια με τη μέθοδο που ακολουθήθηκε, πιθανότατα λόγω της ύπαρξης προστατευτικής προθήκης και της εκτεταμένης συντήρησης του συγκεκριμένου έργου τέχνης. Στα υπόλοιπα δείγματα μικροβιακών επικαθίσεων ανιχνεύθηκαν συνολικά 155 λειτουργικές ταξινομικές μονάδες, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε 8 φύλα, 14 ομοταξίες και 101 διαφορετικά βακτηριακά γένη (Διαγράμματα 3.26-3.28). Τα περισσότερα βακτήρια που ταυτοποιήθηκαν ανήκαν στα Πρωτεοβακτήρια (μέση σχετική αφθονία 25.3-50.6%), στα Ακτινοβακτήρια (27.2-45.0%) και στα Firmicutes (14.5-38.1%). Τα

υπόλοιπα βακτηριακά φύλα, δηλαδή τα Κυανοβακτήρια και τα βακτήρια *Deinococcus Thermus*, Bacteroidetes, Epsilonbacteraeota και Chloroflexi, παρουσίασαν μέση σχετική αφθονία μικρότερη από 3% ανά αντικείμενο, εκτός από τα Κυανοβακτήρια στην επιτύμβια στήλη ( $9.7 \pm 1.9\%$ , μέση σχετική αφθονία  $\pm$  τυπικό σφάλμα), στο ακρόπρωρο ( $7.8 \pm 2.4\%$ ) και στα φίλτρα της αίθουσας El Greco ( $3.1 \pm 1.4\%$ ), τα βακτήρια *Deinococcus Thermus* στην επιτύμβια στήλη ( $8.4 \pm 1.3\%$ ) και τα Epsilonbacteraeota στα δείγματα των φίλτρων της αίθουσας Ζ. Πορταλάκη ( $6.8 \pm 0.9\%$ ) (Διάγραμμα 3.26).

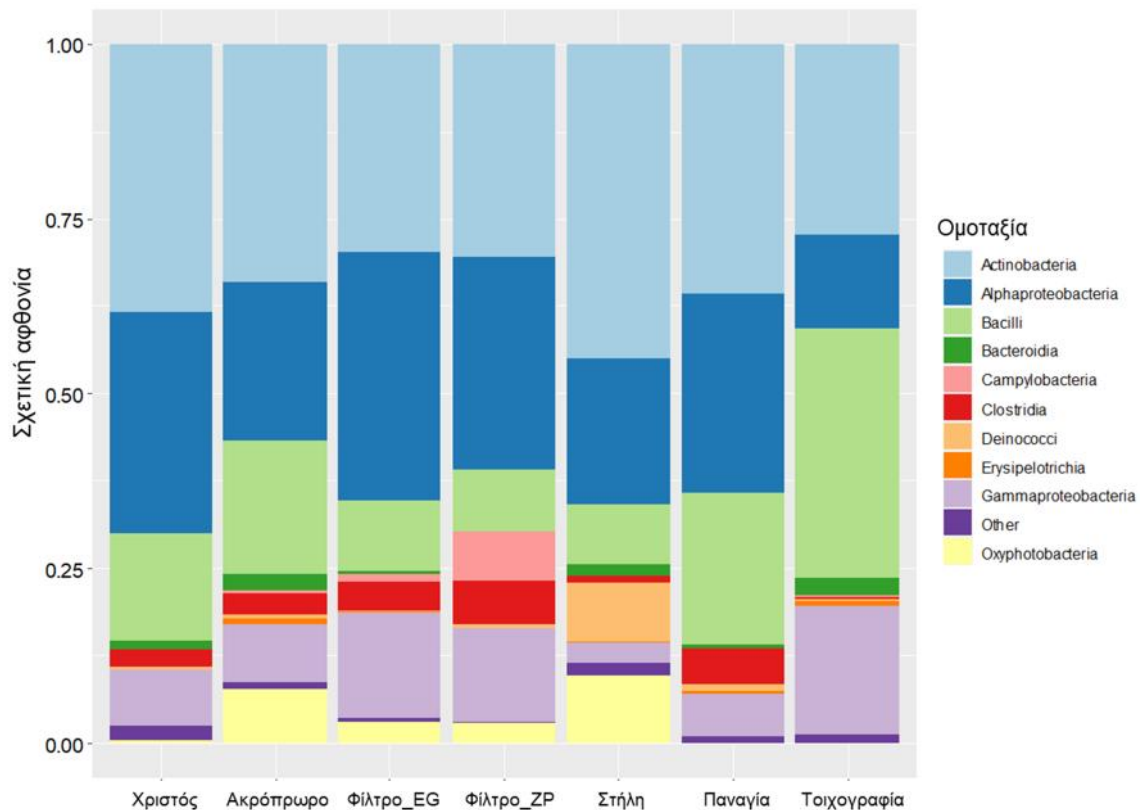


**Διάγραμμα 3.26:** Ραβδόγραμμα κατανομής της σχετικής αφθονίας των βακτηριακών φύλων των μικροβιακών επικαθίσεων.

Στο επίπεδο της ομοταξίας, τα πιο συχνά απαντώμενα βακτήρια ήταν τα Ακτινοβακτήρια (27.2–45.0%), τα α-Πρωτεοβακτήρια (13.4–35.6%), οι Βάκιλλοι (8.6-35.9%) και τα γ-Πρωτεοβακτήρια (3.0-18.3%). Οι ομοταξίες αυτές αθροιστικά αντιστοιχούσαν στο 77.5-94.8% του συνόλου των βακτηρίων. Οι υπόλοιπες ομοταξίες εμφάνισαν σχετική αφθονία <5%, εκτός από τα Ochryphotobacteria στην επιτύμβια στήλη ( $9.7 \pm 1.9\%$ ) και στο ακρόπρωρο ( $7.8 \pm 2.4\%$ ), τα Clostridia στην Παναγία Γλυκοφιλούσα ( $5.2 \pm 1.5\%$ ) και στα φίλτρα της αίθουσας Ζ. Πορταλάκη ( $6.3 \pm 2.1\%$ ), τα βακτήρια

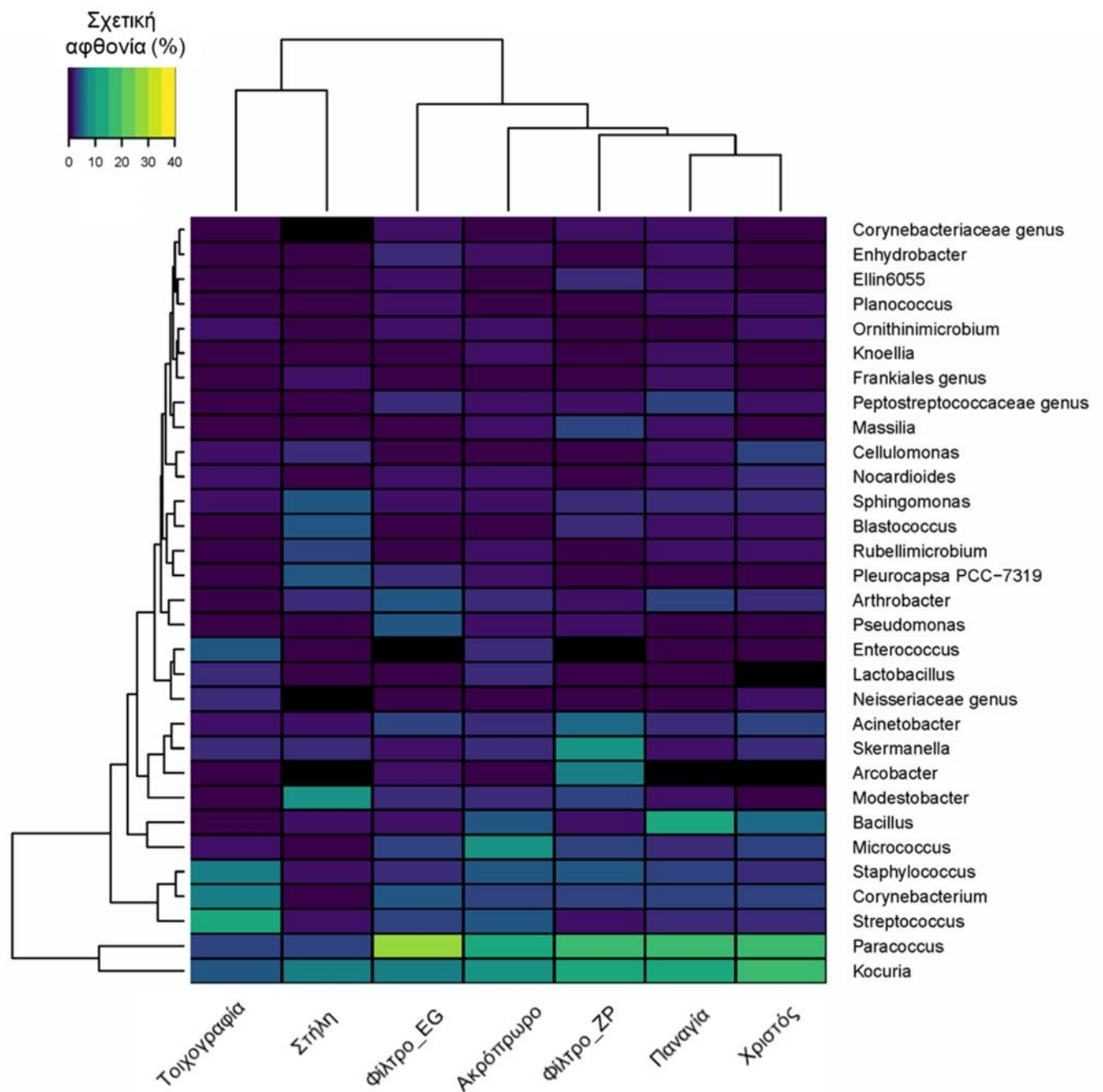


Deinococci στην επιτύμβια στήλη ( $8.4 \pm 1.3\%$ ) και τα Campylobacteria στα δείγματα των φίλτρων της αίθουσας Ζ. Πορταλάκη ( $6.8 \pm 0.9\%$ ) (Διάγραμμα 3.27).



**Διάγραμμα 3.27:** Ραβδόγραμμα κατανομής της σχετικής αφθονίας των βακτηριακών ομοταξιών των μικροβιακών επικαθίσεων.

Υψηλή ποικιλότητα παρατηρήθηκε επίσης μεταξύ των διαφορετικών βακτηριακών γενών που ανιχνεύθηκαν στα δείγματα των έργων τέχνης (Διάγραμμα 3.20). 5 βακτηριακά γένη (*Paracoccus*, *Kocuria*, *Bacillus*, *Orbus* και *Streptococcus*) εμφάνισαν μέση σχετική αφθονία >10% σε τουλάχιστον ένα αντικείμενο. Μεταξύ αυτών, το γένος *Paracoccus* ήταν το πιο συχνά απαντώμενο γένος στα φίλτρα των δύο αιθουσών, στο ακρόπρωρο και στους δύο πίνακες (μέση σχετική αφθονία 11.2-25.9%), αλλά παρουσίασε μικρότερη σχετική αφθονία στην επιτύμβια στήλη και στην τοιχογραφία (3.8 και 4.0% αντιστοίχως). Το γένος *Modestobacter* ήταν το πιο συχνά απαντώμενο γένος στην επιτύμβια στήλη ( $9.3 \pm 2.1\%$ ) και το γένος *Streptococcus* στα δείγματα της τοιχογραφίας ( $11.9 \pm 6.5\%$ ). Το γένος *Kocuria* ήταν δεύτερο σε όλα τα έργα τέχνης (6.4-15.4%) εκτός από την τοιχογραφία ( $4.2 \pm 1.8\%$ ). Εκτός από τα παραπάνω γένη, 7 ακόμα εμφάνισαν μέση σχετική αφθονία >5% σε τουλάχιστον ένα αντικείμενο (*Micrococcus* στο ακρόπρωρο, ένα γένος της οικογένειας *Chroococcidiopsaceae* στην επιτύμβια στήλη, *Staphylococcus* και *Corynebacterium* στην τοιχογραφία, *Skermanella*, *Arcobacter* και *Acinetobacter* στα φίλτρα της αίθουσας Ζ. Πορταλάκη) (Διάγραμμα 3.28).

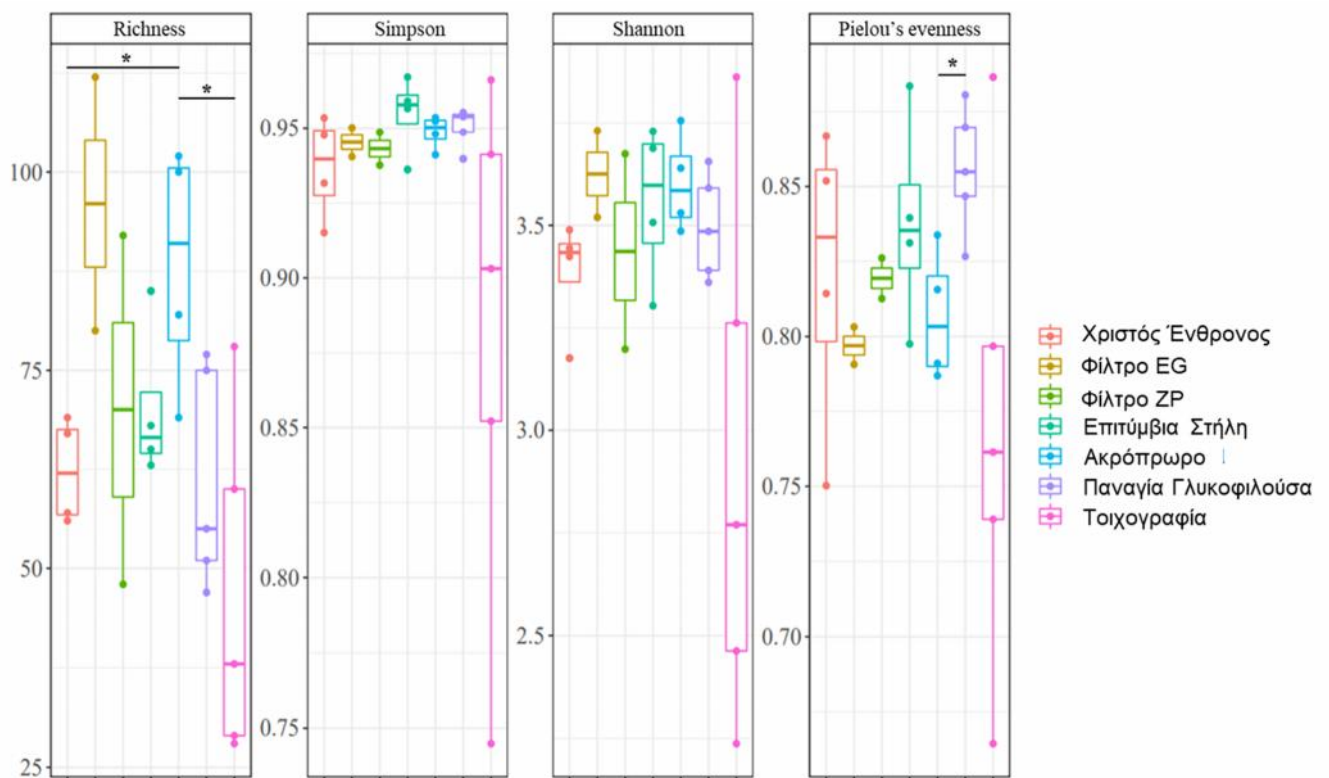


**Διάγραμμα 3.28:** Σύσταση των βακτηριακών κοινοτήτων των δειγμάτων μικροβιακών επικαθίσεων. Τα δεδομένα παρουσιάζονται αθροιστικά σε επίπεδο γένους. Λόγω της μεγάλης ποικιλότητας, απεικονίζονται μόνο τα γένη με μέση σχετική αφθονία >1% σε πάνω από ένα αντικείμενο. Τα μαύρα κελιά υποδηλώνουν μέση σχετική αφθονία =0.

### Βακτηριακή ποικιλότητα

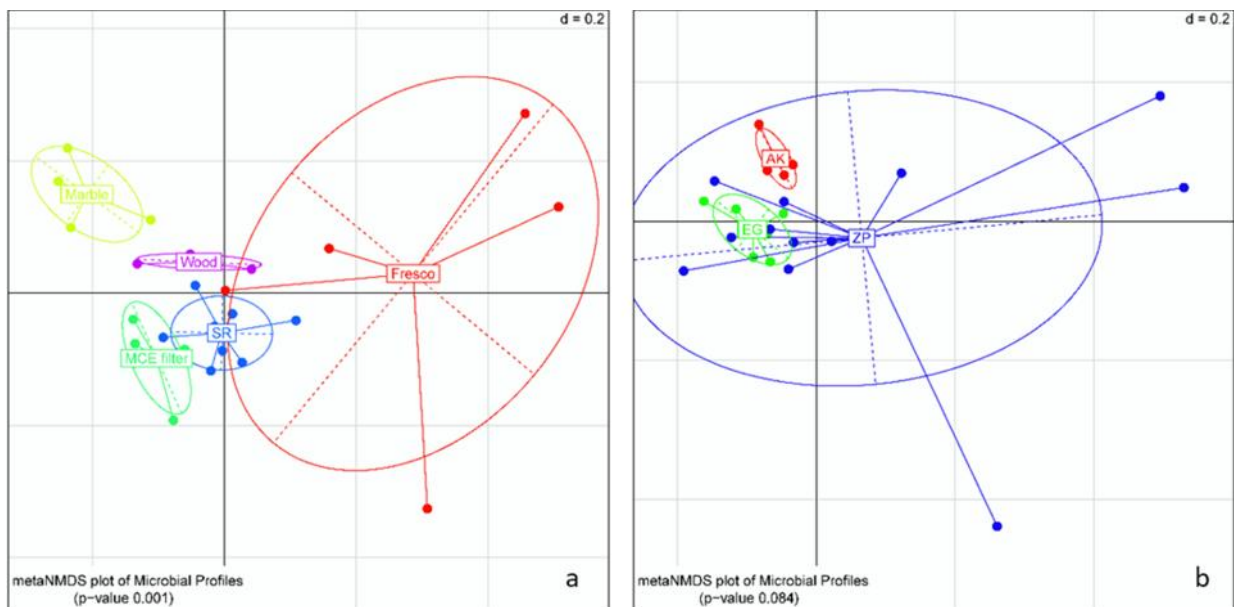
Η ποικιλότητα των βακτηριακών πληθυσμών που ανιχνεύθηκαν προσδιορίστηκε με υπολογισμό του δείκτη αφθονίας (richness) και των δεικτών α-ποικιλότητας Simpson, Shannon και Pielou's evenness

σε όλα τα δείγματα που μελετήθηκαν (Διάγραμμα 3.29). Μεγαλύτερη αφθονία ειδών παρατηρήθηκε στα δείγματα του φίλτρου που εκτέθηκε στην αίθουσα El Greco και στα δείγματα του ξύλινου ακρόπρωρου. Στατιστικά σημαντική ήταν η διαφορά της αφθονίας των ειδών μεταξύ ακρόπρωρου / τοιχογραφίας και ακρόπρωρου / Χριστού Ένθρονου. Η ομοιομορφία της κατανομής των βακτηριακών ειδών ήταν συγκρίσιμη μεταξύ των διαφορετικών δειγμάτων όπως δείχνουν οι δείκτες Simpson, Shannon και Pielou, με εξαίρεση τη στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ του δείκτη Pielou των δειγμάτων του ακρόπρωρου και της Παναγίας (Διάγραμμα 3.21).



**Διάγραμμα 3.29:** Δείκτες α-ποικιλότητας των δειγμάτων που μελετήθηκαν. Τα πλαίσια υποδηλώνουν το εύρος IQR (interquartile range) και η γραμμή στη μέση τη διάμεσο τιμή. Με αστερίσκο σημειώνονται οι στατιστικά σημαντικές διαφορές με επίπεδο σημαντικότητας  $p < 0.05$  (τεστ Wilcoxon rank sum).

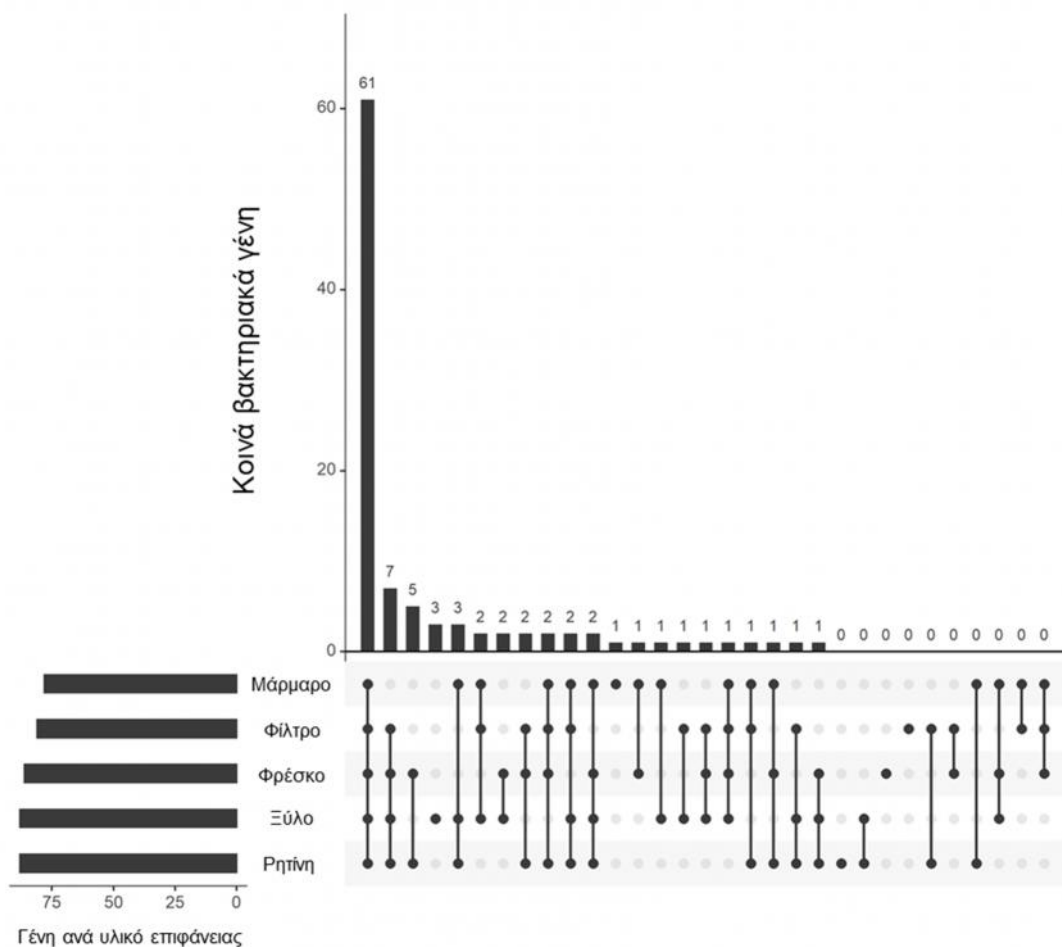
Παράλληλα, προκειμένου να οπτικοποιηθεί ο βαθμός ομοιότητας μεταξύ διαφορετικών ενδαιτημάτων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της μη-μετρικής πολυδιάστατης διευθέτησης NMDS (Non-metric Multidimensional Scaling) με βάση τον πίνακα των γενικευμένων φυλογενετικών αποστάσεων (generalized UniFrac distances) των δειγμάτων. Με τη μέθοδο αυτή, τα δείγματα αναπαριστώνται ως σημεία σε ένα σύστημα αξόνων αναφοράς με στόχο την οπτικοποίηση των πολυμεταβλητών δεδομένων, ώστε να διακριθούν σημαντικά πρότυπα ή διαβαθμίσεις. Όσο μικρότερη είναι η απόσταση των σημείων στο γράφημα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ομοιότητα μεταξύ των δειγμάτων. Η αξιολόγηση του βαθμού ομοιότητας των ομάδων των δειγμάτων έγινε με τη δοκιμασία PERMANOVA (permutational multivariate analyses of variance). Τα δείγματα κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με το υλικό της επιφάνειας (Διάγραμμα 3.30α) και το χώρο της δειγματοληψίας (Διάγραμμα 3.30β).



**Διάγραμμα 3.30:** Μη-μετρική πολυδιάστατη διευθέτηση NMDS των γενικευμένων φυλογενετικών αποστάσεων της β-ποικιλότητας. Η ομαδοποίηση των δειγμάτων έγινε με βάση το υλικό της επιφάνειας (α) ή το χώρο έκθεσης (β). AK: Αίθουσα Α. Καλοκαιρινού, EG: αίθουσα El Greco, ZP: αίθουσα Ζ. Πορταλάκη. SR: συνθετική ρητίνη.

Η δοκιμασία PERMANOVA έδειξε ότι τα δείγματα κατηγοριοποιούνται σε στατιστικά διαφορετικές ομάδες με βάση το υλικό της επιφάνειας (τιμή  $p = 0,001$ ). Με βάση το χώρο έκθεσης, τα δείγματα των αντικειμένων που εκτίθενται σε διαφορετικούς εσωτερικούς χώρους δεν διαφέρουν σημαντικά ( $p > 0,05$ ). Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την κύρια επίδραση του υλικού της επιφάνειας στα χαρακτηριστικά των βακτηριακών κοινοτήτων και τη δευτερεύουσα επίδραση του χώρου έκθεσης.

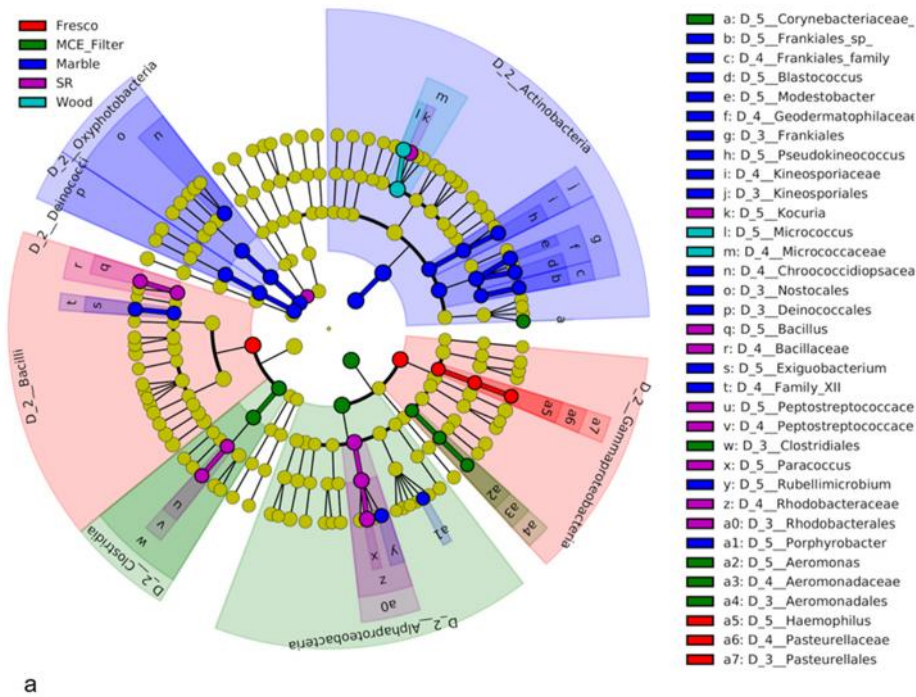
Με δεδομένη τη σημασία του υλικού επιφάνειας, προσδιορίστηκαν τα κοινά βακτηριακά γένη μεταξύ όλων των συνδυασμών των υλικών επιφάνειας ανά 2, 3, 4 και 5 (Διάγραμμα 3.31).



**Διάγραμμα 3.31:** Απεικόνιση του αριθμού των κοινών βακτηριακών γενών μεταξύ των υλικών επιφάνειας.

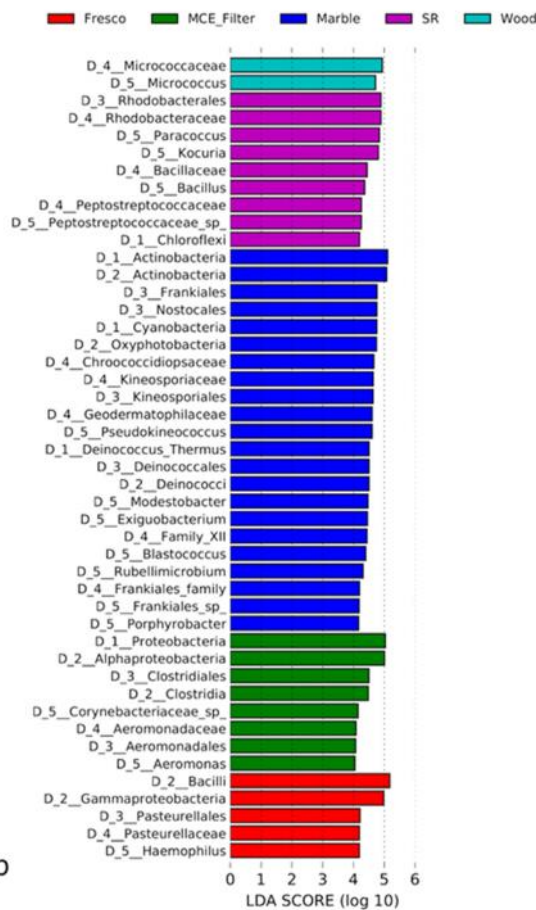
Συνολικά προσδιορίστηκαν 61 κοινά βακτηριακά γένη μεταξύ και των 5 υλικών επιφάνειας και 7 γένη (Neisseriaceae genus, Ammoniphilus, Corynebacteriaceae genus, Alloprevotella, Aeromonas, Rhodobacteraceae genus 3, Haemophilus) μεταξύ του φίλτρου, της τοιχογραφίας (φρέσκο), του ξύλου και της συνθετικής ρητίνης. Σχετικά μεγάλη ομοιότητα παρουσίαζε το φρέσκο με τη ρητίνη (5 κοινά γένη: Alkalibacterium, Pedobacter, Xanthomonadaceae genus, Elizabethkingia, Jeotgalibaca) και το μάρμαρο με το ξύλο και τη ρητίνη (3 κοινά γένη: Craurococcus, Deinococcus, Microbacteriaceae genus). Το ξύλο διέθετε 3 γένη που δεν εμφανίζονταν σε άλλο υλικό επιφάνειας (Weeksellaceae genus, Calothrix PCC-6303, Microcystis PCC-7914) και το μάρμαρο ένα μοναδικό γένος (Sandaracinaceae genus).

Προκειμένου να αναγνωριστούν διακριτές λειτουργικές ταξινομικές μονάδες που χαρακτηρίζαν τα διαφορετικά υλικά επιφάνειας εφαρμόστηκε η ανάλυση γραμμικών διακρίσεων (Linear Discriminant Analysis – LDA) με την εφαρμογή LEfSe μέσω της διαδικτυακής πλατφόρμας LEfSe Galaxy platform (<http://huttenhower.sph.harvard.edu/galaxy>), με την οποία δημιουργήθηκαν και ταξινομικά κλαδογράμματα (Διάγραμμα 3.32). Η ανάλυση LEfSe αποκάλυψε την ύπαρξη 2, 9, 22, 8 και 5 ταξινομικών ομάδων που χαρακτηρίζουν το ξύλο, τη συνθετική ρητίνη, το μάρμαρο, το φίλτρο και το φρέσκο αντίστοιχα. Ως προς τα βακτηριακά γένη, τα δείγματα του ξύλου χαρακτηρίζονταν από τα βακτήρια *Micrococcus*, της συνθετικής ρητίνης από τα γένη *Paracoccus*, *Kocuria*, *Bacillus* και ένα γένος της οικογένειας *Peptostreptococcaceae*, τα φίλτρα από ένα γένος της οικογένειας *Corynebacteriaceae* και από το γένος *Aeromonas*, η τοιχογραφία από το γένος *Haemophilus* και το μάρμαρο από *Pseudokineococcus*, *Modestobacter*, *Exiguobacterium*, *Blastococcus*, *Rubellimicrobium*, ένα γένος *Frankiales* και *Porphyrobacter*. Συνολικά, οι πιο διακριτές ταξινομικές μονάδες με τιμές LDA > 5.0 ήταν τα φύλα Ακτινοβακτήρια (μάρμαρο,  $p = 0.010$ ) και Πρωτεοβακτήρια (φίλτρα,  $p = 0.037$ ) και οι ομοταξίες Βάκιλλοι (τοιχογραφία,  $p = 0.041$ ), Ακτινοβακτήρια (μάρμαρο,  $p = 0.010$ ) και  $\alpha$ -Πρωτεοβακτήρια (φίλτρα,  $p = 0.006$ ) (Διάγραμμα 3.32).



a

Διάγραμμα 3.32: Α) Κλαδόγραμμα που συνοψίζει την ταξινομική κατανομή των μικροοργανισμών που



b

συσχετίζονται με τα διαφορετικά υλικά επιφάνειας. Β) Ταξινομικές ομάδες που χαρακτηρίζουν τα διαφορετικά υλικά επιφάνειας (LDA>4, p<0.05).

### **Γ3) Συμπεράσματα μελέτης μικροβιακών επικαθίσεων**

Με την παρούσα μελέτη προσδιορίστηκαν λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά των βακτηριακών κοινοτήτων των μικροβιακών επικαθίσεων σε ευπαθή υλικά. Παρατηρήθηκε μεγάλη ποικιλομορφία μεταξύ των δειγμάτων, καθώς μόνο το 60% των ταυτοποιημένων βακτηριακών γενών ήταν κοινά σε όλα τα έργα τέχνης που μελετήθηκαν. Η υψηλή επισκεψιμότητα, όπως αυτή που χαρακτηρίζει τα μουσεία, αποτελεί σημαντικό παράγοντα καθορισμού του βακτηριακού προφίλ των εσωτερικών χώρων, καθώς τόσο ο αέρας όσο και η σκόνη του πατώματος αποτελούν σημαντικές δεξαμενές ανθρωπογενών βακτηρίων (Hosprodsky et al., 2012). Πράγματι, πολλά από τα πιο συχνά απαντώμενα γένη της παρούσας μελέτης όπως *Kocuria*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Streptococcus* και *Paracoccus*, είναι γνωστά βακτήρια ανθρωπογενούς προέλευσης (Kasmanas et al., 2021).

Τα φύλα Ακτινοβακτήρια, Firmicutes και Πρωτεοβακτήρια ήταν τα τρία πιο συχνά απαντώμενα φύλα που ταυτοποιήθηκαν. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σε άλλες προηγούμενες μελέτες (πέτρινα μνημεία: Li et al., 2018, πίνακας: López-Miras et al., 2013, τοιχογραφία: Diaz-Herraiz, 2014). Παράλληλα, το ξύλινο ακρόπρωρο ήταν το αντικείμενο με τα περισσότερα βακτηριακά γένη. Τα ξύλινα έργα τέχνης είναι γνωστό ότι ευνοούν τον εποικισμό των βακτηρίων λόγω της πορώδους δομής τους και του διαθέσιμου οργανικού άνθρακα (Clausen 1996).

Η έκθεση πανομοιότυπων φίλτρων σε διαφορετικές αίθουσες έδωσε τη δυνατότητα της μελέτης των περιβαλλοντικών επιδράσεων στις μικροβιακές επικαθίσεις. Παρόλο που παρατηρήθηκαν διαφορές στη σχετική αφθονία συγκεκριμένων ταξινομικών μονάδων, τα δείγματα των φίλτρων από τις αίθουσες El Greco και Z. Πορταλάκη δεν μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν σε στατιστικά διακριτές ομάδες. Το ίδιο παρατηρήθηκε για τα δείγματα της συνθετικής ρητίνης από τις ίδιες αίθουσες. Επιπλέον, στατιστικά σημαντική ομαδοποίηση των δειγμάτων παρατηρήθηκε μόνο ανά υλικό επιφανείας και όχι ανά αίθουσα. Τα αποτελέσματα αυτά συνηγορούν υπέρ της σημασίας του υποστρώματος στο προφίλ των βακτηριακών μεταγονιδιωμάτων όταν μελετώνται εσωτερικοί χώροι με συγκρίσιμα χαρακτηριστικά.

Τέλος, ενδιαφέρουσα ήταν η μη απομόνωση ανιχνεύσιμης ποσότητας μικροβιακού DNA από τα δείγματα της επιφάνειας ενός πίνακα El Greco που φυλάσσεται σε προθήκη. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της ποιότητας του αέρα στη συντήρηση των ευπαθών έργων τέχνης και την προστασία που παρέχουν οι προθήκες σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς.



## Βιβλιογραφία ενότητας Γ

- 1) Clausen, C.A. Bacterial associations with decaying wood: a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 1996, 37:101–107.
- 2) Diaz-Herraiz, M., Jurado, V., Cuezva, S., Laiz, L., Pallecchi, P., Tiano, P., Sanchez-Moral, S., Saiz-Jimenez, C. Deterioration of an Etruscan tomb by bacteria from the order Rhizobiales. *Scientific Reports*, 2014, 4:3610.
- 3) Hospodsky, D., Qian, J., Nazaroff, W.W., Yamamoto, N., Bibby, K., Rismani-Yazdi, H., Peccia, J. Human occupancy as a source of indoor airborne bacteria. *PLoS One*, 2012, 7(4): e34867.
- 4) Kasmanas, J.C., Bartholomäus, A., Corrêa, F.B., Tal, T., Jehmlich, N., Herberth, G., von Bergen, M., Stadler, P.F., Carvalho, A.C.P.L.F., Nunes da Rocha, U. HumanMetagenomeDB: a public repository of curated and standardized metadata for human metagenomes. *Nucleic Acids Research*, 2021, 49(D1): D743-D750.
- 5) Li, Q., Zhang, B., Yang, X., Ge, Q. Deterioration-associated microbiome of stone monuments: structure, variation, and assembly. *Applied and Environmental Microbiology*, 2018, 84(7), e02680-17.
- 6) López-Miras, M.d.M., Martín-Sánchez, I., Yebra-Rodríguez, A., Romero-Noguera, J., Bolívar-Galiano, F., et al. Contribution of the microbial communities detected on an oil painting on canvas to its biodeterioration. *PLoS ONE*, 2013, 8(11): e80198.
- 7) Sterflinger, K., Piñar, G. Microbial deterioration of cultural heritage and works of art — tilting at windmills? *Applied Microbiology Biotechnology*, 2013, 97:9637–9646.