

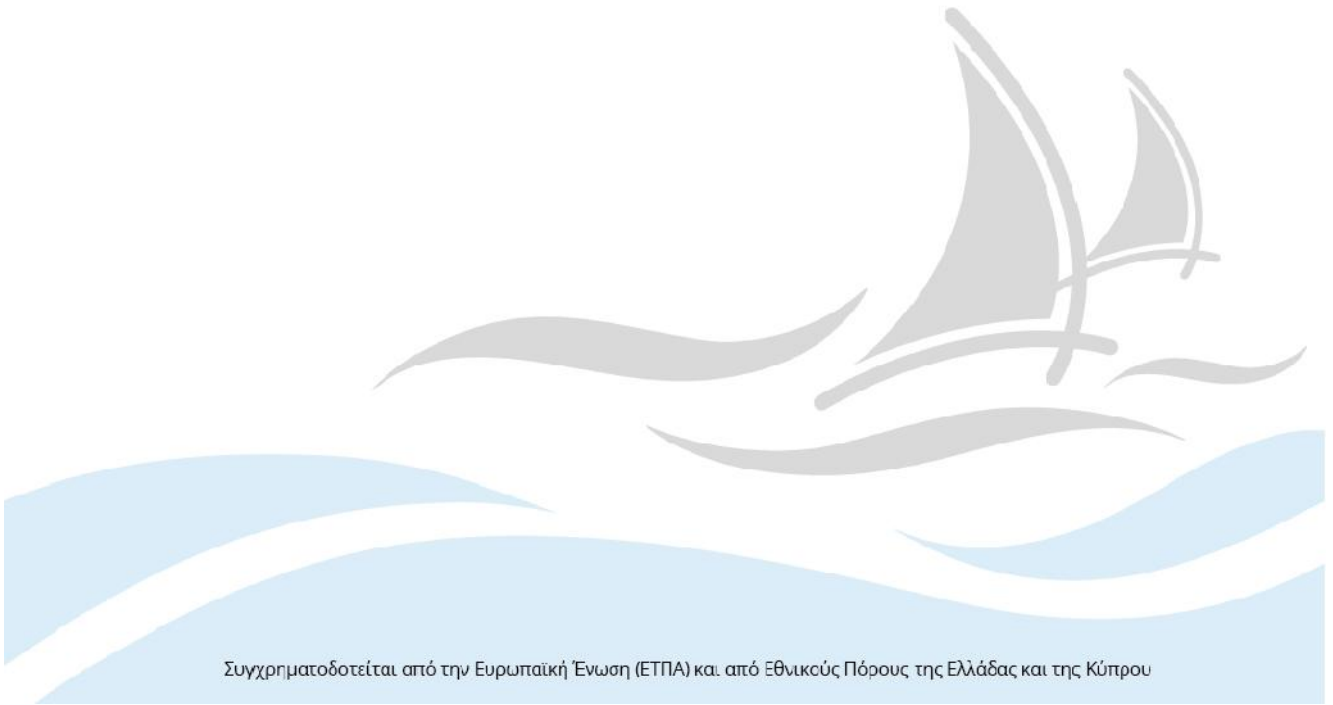
6.3.1.

:
- 6 -

6.1.1-6.1.5,

**ΥΠΟΤΙΤΛΟΣ: Τελική έκθεση υλοποίησης φυσικού αντικειμένου πράξης
ΜΟΥΣΕΙΑ_II**

21/02/2021



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

Περιεχόμενα

ΠΕ6: Διαδικτυακό σύστημα Ποιότητας αέρα	3
Εισαγωγή.....	3
A) Αρχιτεκτονική συστήματος μετρήσεων αερίων ρύπων και καταγραφής επισκεπτών.....	4
A1) Ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων	4
A2) Εξυπηρετητής – Server	6
A3) Σύστημα καταγραφής αέριας ρύπανσης.	7
A3.1) Σύστημα με παθητικούς αισθητήρες.	7
A3.2) Σύστημα με αισθητήρες συνεχούς καταγραφής.	9
A4) Ανάπτυξη βάσης δεδομένων μετρήσεων αερίων ρύπων και δραστηριοτήτων/αριθμού επισκεπτών	11
B) Εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης ποιότητας του αέρα στο ΙΜΚ.	12
Γ) Έκθεση αποτελεσματικότητας μέτρων προστασίας.....	17
Γ.1) Αποτύπωση υφιστάμενης κατάστασης ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους του ΙΜΚ.....	17
Γ.2) Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.....	19
Γ.3) Αναβάθμιση υφιστάμενων προθηκών και μετατροπή τους σε μικροκλιματικές προθήκες	21
Γ.4) Αναβάθμιση συστήματος εξαερισμού στις αίθουσες της Εθνογραφικής Συλλογής	22
Γ.5) Συμπεράσματα.....	23
Γ.6) Βιβλιογραφία.	24

ΠΕ6: Διαδικτυακό σύστημα Ποιότητας αέρα

Εισαγωγή

Οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στο ΠΕ6 περιλαμβάνουν την εγκατάσταση και λειτουργία μόνιμου συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους των δύο συνεργαζόμενων μουσείων (Ιστορικό Μουσείο Κρήτης, ΙΜΚ και Βυζαντινό Μουσείο Αρχιεπισκόπου Μακαρίου Γ', ΒΜ). Τα δύο συστήματα αναπτύχθηκαν με συνεργασία όλων των δικαιούχων, ώστε να έχουν κοινά χαρακτηριστικά και παράλληλα να μπορούν να επεκταθούν και σε άλλους χώρους έκθεσης και φύλαξης ευπαθών αντικειμένων. Τα συστήματα αυτά μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους απομακρυσμένα δημιουργώντας ένα καινοτόμο εργαλείο αντιμετώπισης του προβλήματος της καταστροφής έργων μεγάλης πολιτιστικής αξίας από τους αέριους και σωματιδιακούς ρύπους.

Η παρούσα έκθεση θα επικεντρωθεί στο σύστημα που εγκαταστάθηκε στο ΙΜΚ, με μικρή αναφορά στους αισθητήρες παρακολούθησης αέριων ρύπων, οι οποίοι μελλοντικά θα προστεθούν σε αυτό για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της διακύμανσης των συγκεντρώσεων των ρύπων στους εσωτερικούς χώρους. Η ανάπτυξη του συστήματος έγινε από την επιστημονική ομάδα του Πολ. Κρήτης, στην οποία συμμετείχαν οι:

Λαζαρίδης Μιχάλης (Καθηγητής, Πολ. Κρήτης)

Γλυτσός Θόδωρος (Ε.ΔΙ.Π, Πολ. Κρήτης)

Ευσταθίου Διονύσης (Επιστημονικός συνεργάτης, Πολ. Κρήτης).

Σημαντική ήταν η συνεισφορά του προσωπικού του ΙΜΚ στις διαδικασίες εγκατάστασης και αξιολόγησης του συστήματος παρακολούθησης.

Η έκθεση πεπραγμένων που ακολουθεί παρουσιάζει συνολικά την ανάπτυξη (χαρακτηριστικά και βάσεις δεδομένων) και εγκατάσταση του συστήματος στο ΙΜΚ καθώς και έκθεση αξιολόγησης των συνολικών μέτρων προστασίας που αναπτύχθηκαν πέραν του συστήματος παρακολούθησης για τη προστασία των ευπαθών εκθεμάτων και έργων τέχνης που φιλοξενούνται στο μουσείο.

A) Χαρακτηριστικά του συστήματος παρακολούθησης της Ποιότητας του Αέρα

Το σύστημα παρακολούθησης βασίζεται στη χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους, που τοποθετούνται σε διάφορα σημεία του εσωτερικού του ΙΜΚ, παρέχοντας δεδομένα για τις συγκεντρώσεις αέριων/σωματιδιακών ρύπων και των μικροπεριβαλλοντικών παραμέτρων (τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας), δημιουργώντας έτσι μια συνολική εικόνα της κατάστασης της

ποιότητας του αέρα σε όλους τους χώρους του μουσείου. Δύο κάμερες με ειδικό λογισμικό εγκαταστάθηκαν για την καταγραφή του αριθμού των επισκεπτών και τη συσχέτιση της παρουσίας τους σε συγκεκριμένους χώρους με τη διακύμανση των συγκεντρώσεων των αέριων και σωματιδιακών ρύπων. Τα παραπάνω στοιχεία συλλέγονται σε βάσεις δεδομένων σε διακομιστές στο ΙΜΚ και στο Πολ. Κρήτης. Στις ίδιες βάσεις υπάρχουν τα στοιχεία του αριθμού των επισκεπτών των προηγούμενων χρόνων και οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ΙΜΚ κατά τη διάρκεια της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ II. Οι βάσεις δεδομένων είναι διαθέσιμες καταρχήν στα δύο συνεργαζόμενα μουσεία και στο μέλλον σε άλλους επιλεγμένους άμεσους χρήστες (χώροι έκθεσης και αποθήκευσης που θα συνδεθούν) ή κρατικούς οργανισμούς χάραξης στρατηγικών προστασίας έργων τέχνης υψηλής πολιτιστικής αξίας. Η είσοδος στο σύστημα παρακολούθησης και στις βάσεις δεδομένων μπορεί να γίνει μέσω διαδικτύου μόνο για πιστοποιημένους χρήστες.

A) Αρχιτεκτονική συστήματος μετρήσεων αερίων ρύπων και καταγραφής επισκεπτών

Η λειτουργία του συστήματος επιτελείται μέσω ενός κατανεμημένου (distributed) δικτύου από ασύρματους κόμβους αισθητήρων μέτρησης αέριων και σωματιδιακών ρύπων και μικροπεριβαλλοντικών παραμέτρων (θερμοκρασία και υγρασία) οι οποίοι επικοινωνούν με έναν κεντρικό εξυπηρετητή (server) για την προώθηση των μετρήσεων για αρχειοθέτηση και οπτικοποίηση. Μέσω της οπτικοποίησης των δεδομένων, το προσωπικό του μουσείου μπορεί κάθε στιγμή να ελέγχει τις τιμές των συγκεντρώσεων και να επεμβαίνει εφόσον αυτές είναι μεγαλύτερες από όρια ασφαλείας, που έχουν καθοριστεί με βάση την επίδραση των μετρούμενων ρύπων σε ευπαθή υλικά. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος παρακολούθησης.

A1) Ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων

Κάθε κόμβος λειτουργεί αυτόνομα και είναι επιφορτισμένος με την καταγραφή, επεξεργασία και μετάδοση των ποιοτικών παραμέτρων.

Από άποψη σχεδίασης και λειτουργικότητας, οι ασύρματοι κόμβοι διαφέρουν από το φορητό σύστημα μετρήσεων στο ότι:

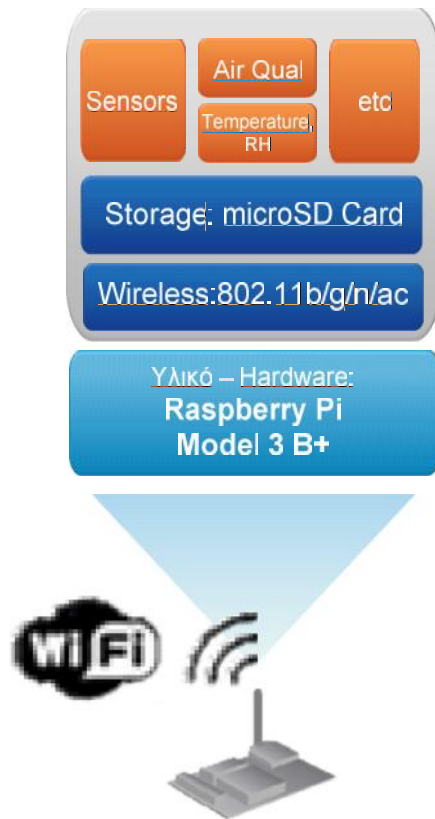
1. Δεν έχουν τον περιορισμό ως προς τις πηγές ενέργειας καθώς είναι συνδεδεμένα με πηγές μόνιμης τροφοδοσίας.
2. Δεν έχουν περιορισμό ως προς τις διαστάσεις τους, όπως σε ένα φορητό σύστημα.
3. Διαθέτουν τη δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης των μετρήσεων σε κεντρικό εξυπηρετητή.
4. Είναι σε θέση να εκτελέσουν πιο ενεργειακά και επεξεργαστικά απαιτητικές διεργασίες αν και όταν αυτό απαιτηθεί σε σχέση με ένα φορητό σύστημα.

Τα βασικά δομικά μέρη του συστήματος είναι τα ακόλουθα:

-) **Μονάδα ελέγχου (control unit).** Η μονάδα ελέγχου αναπτύχθηκε με χρήση του μοντέλου Raspberry Pi Model 3 B+. Διαθέτει επεξεργαστή “ Cortex-A53 quad core 64-bit @1.4GHz και μνήμη 1GB. Υποστηρίζει χρήση αποθηκευτικού μέσου micro SD το οποίο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των μετρήσεων τοπικά στον κόμβο (για λόγους redundancy). Η μετάδοση των δεδομένων στην κεντρική βάση δεδομένων του συστήματος γίνεται ασύρματα μέσω wifi (802.11b/g/n/ac).
-) **Τροφοδοσία.** Ο ασύρματος κόμβος τροφοδοτείται συνεχώς από τροφοδοτικό AC220V/DC5V. Για λόγους όμως απρόσκοπτης λειτουργίας θα υπάρχει και τροφοδοσία από συσσωρευτή (μπαταρία).
-) **Αισθητήρες.** Το σύστημα μπορεί να συνδεθεί με ποικίλους αισθητήρες καθώς υποστηρίζει πολλά είδη διεπαφών (I/O interfaces). Ειδικότερα, υποστηρίζει την τροφοδοσία και την ανάγνωση πολλαπλών σύγχρονων ψηφιακών αισθητηρίων (UART, I2C) ή αντίστοιχων με ψηφιακή έξοδο για την καταγραφή παραμέτρων ποιότητας αέρα (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, φορμαλδεΐδη, αιωρούμενα σωματίδια κτλ).

Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζεται σχηματικά η δομή ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων.

Με την προτεινόμενη κατανομημένη σχεδιαστική προσέγγιση, έναντι ενός κεντροκοποιημένου συστήματος (all in one), το σύστημά ακολουθεί μια αρθρωτή (modular) αρχιτεκτονική με βασικό πλεονέκτημα την ευκολία αντικατάστασης οποιουδήποτε υποσυστήματος (π.χ. αντικατάσταση κόμβου στα πλαίσια αναβαθμίσεως) χωρίς να χρειαστεί επανασχεδιασμός του συνολικού συστήματος.



Ασύρματος Κόμβος

Εικόνα 6.1: Δομή ασύρματου κόμβου αισθητήρων μέτρησης αέριων/σωματιδιακών ρύπων και μικροπεριβαλλοντικών παραμέτρων.

A2) Εξυπηρετητής – Server

Ο εξυπηρετητής (server) είναι υπεύθυνος για τη συλλογή των δεδομένων από τους κόμβους. Τα δεδομένα αυτά αρχειοθετούνται σε βάση δεδομένων και θα οπτικοποιούνται σε ειδική διαδικτυακή πλατφόρμα (web platform). Σε αυτόν βρίσκονται τα παρακάτω υποσυστήματα:

-) Data Broker: Το λογισμικό συγκέντρωσης των μετρήσεων και δεδομένων Data Broker είναι υπεύθυνο για την προώθηση μετρήσεων, συμβάντων και εντολών μεταξύ των κόμβων και του server. Μέσω του Data Broker θα είναι δυνατή η διαρκής διαπίστωση της σωστής λειτουργίας και της διαθεσιμότητάς των κόμβων.
-) Web πλατφόρμα: Είναι το υποσύστημα κεντρικής αρχειοθέτησης, απομακρυσμένης διαχείρισης των μετρήσεων, και των πληροφοριών από το πεδίο. Διαθέτει τη βάση δεδομένων και θα παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία για τη διαχείριση των μετρήσεων και τη χωρική απεικόνιση τους. Τέλος,

θα διαθέτει το κατάλληλο περιβάλλον οπτικοποίησης (visualization) των δεδομένων. Η πλατφόρμα θα βασίζεται σε τεχνολογία HTML5 για να μπορεί να εκτελείται σε browsers, έτσι ώστε να είναι εύκολη η χρήση της ακόμα και από μη εξειδικευμένο προσωπικό.

A3) Σύστημα καταγραφής αέριας ρύπανσης.

Για την καταγραφή της αέριας ρύπανσης και των μικροπεριβαλλοντικών παραμέτρων ακολουθείται μια συνδυαστική προσέγγιση που περιλαμβάνει παθητικούς αισθητήρες για τους αέριους ρύπους και αισθητήρες συνεχούς καταγραφής για τη θερμοκρασία και την υγρασία, τα αιωρούμενα σωματίδια και επιλεγμένους αέριους ρύπους. Το σύστημα με τους παθητικούς αισθητήρες αναπτύχθηκε από το Τεχνολογικό πανεπιστήμιο Κύπρου και είναι εγκατεστημένο στο ΒΜ (Λευκωσία). Μελλοντικά, το σύστημα θα εγκατασταθεί και στο ΙΜΚ, ενώ παράλληλα οι μονάδες με αισθητήρες συνεχούς καταγραφής θα προστεθούν στο σύστημα του ΤΕΠΑΚ, ώστε να παρέχεται μια ευρύτερη εικόνα της ποιότητας του αέρα στους χώρους των δύο μουσείων.

A3.1) Σύστημα με παθητικούς αισθητήρες.

Η υλοποίηση του συστήματος περιλαμβάνει δοσιμετρικούς σωλήνες μέτρησης αέριων ρύπων. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αλλαγή χρώματος ενεργού ουσίας στο εσωτερικό του σωλήνα λόγω της διάχυσης του αέριου ρύπου μέσα σε αυτόν. Για την επιλογή των αισθητήρων λήφθηκαν υπόψη η ευαισθησία των αισθητήρων στις μεταβολές της συγκέντρωσης των αέριων ρύπων, το μέγεθος, το κόστος, ο χρόνος απόκρισης τους, η ευκολία χρήσης (ακόμα και από ανειδίκευτο προσωπικό), αλλά και παράγοντες που δύναται να επηρεάσουν τις μετρήσεις των αισθητήρων, όπως θερμοκρασία, πίεση, υγρασία. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρέασε σε μεγάλο βαθμό την επιλογή των αισθητήρων ήταν η αποφυγή της ανάγκης βαθμονόμησής τους. Λόγω του ότι οι αισθητήρες θα έπρεπε να είναι τοποθετημένοι στην ίδια φορητή συσκευή, μελετήθηκαν επίσης τυχόν παρεμβολές από άλλους αέριους ρύπους ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία των μετρήσεών τους. Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης και στο Βυζαντινό Μουσείο Αρχιεπισκόπου Μακαρίου Γ', οι ρύποι που επελέγησαν να παρακολουθούνται είναι: υδρόθειο (H_2S), αμμωνία (NH_3), διοξείδιο του αζώτου (NO_2), διοξείδιο του θείου (SO_2), φορμαλδεΐδη (CH_2O) και οξικό οξύ (CH_3COOH).

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτουν οι αισθητήρες των πιο πάνω αέριων ρύπων για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της ορθής παρακολούθησης της ποιότητας του εσωτερικού χώρου είναι:

A) Μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές της συγκέντρωσης των υπό παρακολούθηση αέριων ρύπων στον εσωτερικό χώρο του ΒΜ. Οι αισθητήρες που επιλέχθηκαν μπορούν να ανιχνεύσουν μεταβολές

συγκέντρωσης της τάξης μερικών ppm. Οι αισθητήρες που έχουν επιλεγεί διαθέτουν κατώτατο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης μερικών ppm.

Β) Γρήγορη απόκριση: είναι εύκολα αντιληπτό ότι πιθανή εστία ρύπανσης στο χώρο ενός μουσείου θα πρέπει να εντοπίζεται και να αντιμετωπίζεται όσο το δυνατό πιο γρήγορα. Ως εκ' τούτου, οι αισθητήρες θα πρέπει να καταγράφουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης ενός αέριου ρύπου εντός μερικών λεπτών, παράμετρος που ικανοποιείται από τους αισθητήρες που τελικά επιλέγηκαν να χρησιμοποιηθούν.

Γ) Αξιοπιστία αποτελεσμάτων: Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες θα πρέπει να είναι αξιόπιστα και διαθέτουν μεγάλη επαναληψιμότητα. Το γεγονός αυτό έχει επιβεβαιωθεί στους αισθητήρες που έχουν επιλεγεί, αφού μετά την τοποθέτησή τους στη φορητή συσκευή πραγματοποιήθηκαν επί τόπου μετρήσεις με τη χρήση φορητών οργάνων τα οποία επαλήθευσαν τις συγκεντρώσεις των συγκεκριμένων αέριων ρύπων στον εσωτερικό χώρο του ΒΜΚ.

Δ) Κόστος αισθητήρων: Θα πρέπει οι αισθητήρες να έχουν όσο το δυνατό χαμηλότερο κόστος, χωρίς αυτό να επηρεάζει τους τρεις προαναφερθέντες παράγοντες. Είναι σημαντικό το κόστος των αισθητήρων να είναι χαμηλό, αφού αυτό θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό και τη μελλοντική εμπορική χρήση του φορητού συστήματος. Οι αισθητήρες που έχουν επιλεγεί είναι χαμηλού κόστους με ευρύ φάσμα εφαρμογών στους τομείς της βιομηχανίας αλλά και της προστασίας της ανθρώπινης υγείας και της ποιότητας του αέρα κυρίως σε εσωτερικούς χώρους.

Ε) Ευκολία στη χρήση: Οι περισσότεροι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα ανά το παγκόσμιο για να διαθέτουν μεγάλη αξιοπιστία στα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων που καταμετρούν, είναι απαραίτητο να βαθμονομούνται τακτικά είτε από την κατασκευάστρια εταιρεία, είτε από διαπιστευμένα εργαστήρια. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει υψηλό κόστος, δυσκολία στο χειρισμό, ενώ ταυτόχρονα η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις νησιών (όπως η Κύπρος και η Κρήτη) όπου πολλές φορές χρειάζεται η αποστολή των αισθητήρων σε άλλες περιοχές. Επιπλέον, οι περισσότεροι αισθητήρες απαιτούν μια ηλεκτρική πηγή για να λειτουργήσουν. Αντίθετα, οι αισθητήρες που έχουν επιλεγεί να χρησιμοποιηθούν δεν απαιτούν βαθμονόμηση, ούτε χρειάζονται ηλεκτρική πηγή για να καταμετρούν, γεγονός που τους καθιστά πολύ εύχρηστους και δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να διαθέτουν ένα φορητό και όχι σταθερό σύστημα παρακολούθησης της αέριας ρύπανσης σε εσωτερικούς χώρους.

Με βάση τα πιο πάνω, έχουν επιλεγεί να χρησιμοποιηθούν δοσιμετρικοί αισθητήρες Gastec, οι οποίοι πληρούν τα ανωτέρω κριτήρια και είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του παρόντος έργου. Οι εν λόγω δοσιμετρικοί αισθητήρες δεν επηρεάζονται από την παρουσία άλλων

συναφών αέριων ρύπων στον εσωτερικό χώρο του Μουσείου, γεγονός που τους καθιστά εξαιρετικά αξιόπιστους. Η δυνατότητα αξιόπιστης μέτρησης αέριων ρύπων χαμηλών συγκεντρώσεων (της τάξης των ppb) με ταυτόχρονη γρήγορη απόκριση στις μετρήσεις (μερικά λεπτά) τους καθιστούν τους καταλληλότερους αισθητήρες, άμεσα διαθέσιμους στην αγορά.

Οι παθητικοί αισθητήρες τοποθετούνται σε κατάλληλη θήκη που έχει σχεδιαστεί ειδικά για το σκοπό αυτό. Η καταγραφή της συγκέντρωσης κάθε αέριου ρύπου γίνεται με χρήση κάμερας υψηλής ευκρίνειας με την χρήση της οποίας συγκρίνεται η χρωματική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών φωτογραφιών που λαμβάνονται με χρονική διαφορά 24 ωρών. Με χρήση κατάλληλου λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου γίνεται η μετατροπή σε συγκέντρωση του αέριου ρύπου (ppm ή $\mu\text{g}/\text{m}^3$).



Εικόνα 6.2.α: Σύστημα καταγραφής αέριων ρύπων



Εικόνα 6.2.β: Δοσιμετρικοί σωλήνες αέριων ρύπων

A3.2) Σύστημα με αισθητήρες συνεχούς καταγραφής.

Εκτός από τους αέριους ρύπους, σημαντικές επιδράσεις σε ευπαθή οργανικά υλικά (ξύλο, ύφασμα, χαρτί κλπ.) μπορούν να προκληθούν από την επικάλυψη σε αυτά αιωρούμενων σωματιδίων. Τα αιωρούμενα σωματίδια σχετίζονται με σημαντικές αλλοιώσεις στην εικόνα και την ανθεκτικότητα των υλικών και πιο συγκεκριμένα μπορούν να προκαλέσουν:

-) Αλλαγή της αισθητικής εικόνας μέσω επικαθίσεων μεγάλων σωματιδίων.
-) Μηχανικές βλάβες (αλλαγή ελαστικών ιδιοτήτων και τριβής).
-) Μεταφορά επικίνδυνων χημικών ουσιών στα έργα τέχνης.
-) Μεταφορά ζωντανών οργανισμών (μύκητες, βακτήρια κλπ).

Κρίθηκε επομένως σκόπιμο το φορητό σύστημα παρακολούθησης της αέριας ρύπανσης να περιλαμβάνει και αισθητήρες μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Πρέπει

να σημειωθεί ότι παρόλο που οι αρνητικές επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι γνωστές, ειδικά σε ευπαθή υλικά, η παρακολούθηση και καταγραφή τους δεν ήταν συνηθισμένη σε χώρους έκθεσης λόγω των δυσκολιών και ιδιαιτεροτήτων που υπάρχουν για τη μέτρηση τους. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων πραγματοποιείται με δύο βασικές μεθοδολογίες: α) Μέτρηση της μάζας που εναποτίθεται σε φίλτρα και β) ανίχνευσή του σκεδαζόμενου φωτός από την πρόσπτωση μονοχρωματικού φωτός.

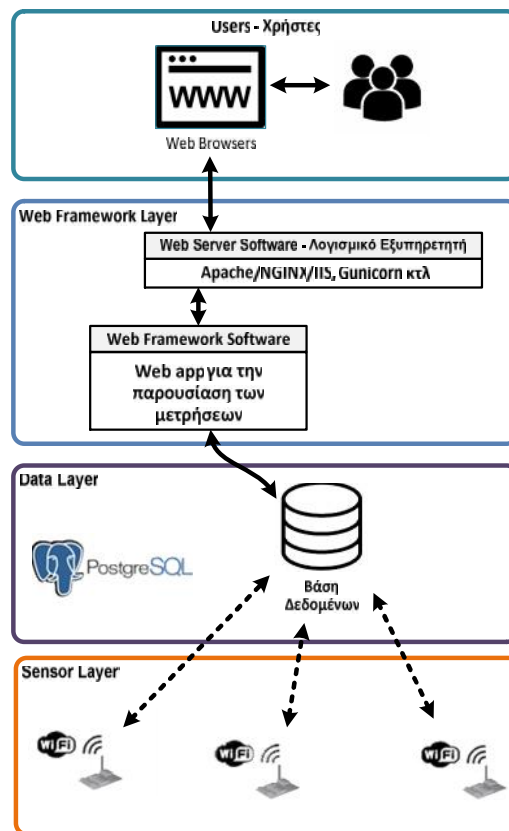
Στην πρώτη μεθοδολογία με τη χρήση αντλίας, το ρεύμα αέρα κινείται στο εσωτερικό του οργάνου, όπου διέρχεται από ένα ή περισσότερα φίλτρα, στα οποία επικάθονται τα αιωρούμενα σωματίδια. Το μέγεθος των σωματιδίων που συλλέγονται σε κάθε φίλτρο καθορίζεται από την ταχύτητα με την οποία κινείται το δείγμα στο εσωτερικό του οργάνου. Βασικά πλεονεκτήματα των οργάνων αυτών είναι ότι μετράται απευθείας η μάζα των σωματιδίων και ότι τα σωματίδια που συλλέγονται μπορούν στη συνέχεια να αναλυθούν περαιτέρω και να προσδιοριστεί η χημική τους σύσταση. Η χρήση τους όμως δεν ενδείκνυται σε χώρους έκθεσης καθώς έχουν θορυβώδεις αντλίες, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή καταγραφή και αποθήκευση δεδομένων (εκτός από εξειδικευμένες περιπτώσεις οργάνων πολύ υψηλού κόστους) και επιπλέον είναι απαραίτητη η ζύγιση των φίλτρων με χρήση ζυγών μεγάλης ακρίβειας. Επομένως για τον τελικό υπολογισμό της συγκέντρωσης απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό και συνολικά υψηλό κόστος χρήσης.

Τα όργανα που βασίζονται στην ανίχνευσή του σκεδαζόμενου φωτός από τα αιωρούμενα σωματίδια στα οποία προσπίπτει μονοχρωματική δέσμη φωτός κατά τη διέλευση του δείγματος από το εσωτερικό του οργάνου παρέχουν τη δυνατότητα συνεχούς καταγραφής με μικρό χρονικό βήμα, αποθήκευσης και αποστολής ενσύρματα ή ασύρματα των μετρούμενων τιμών. Βασικά τους μειονέκτημα είναι η χρήση αντλίας (θόρυβος), το σχετικά μεγάλο μέγεθος και το υψηλό κόστος που καθιστά απαγορευτική την προμήθεια ικανού αριθμού οργάνων για ταυτόχρονη παρακολούθηση σε πολλά διαφορετικά σημεία. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες σωματιδίων που λειτουργούν με την ίδια βασική αρχή (ανίχνευση σκεδαζόμενου φωτός από τα σωματίδια) αλλά είναι μικροί σε μέγεθος και δεν χρησιμοποιούν αντλία (λειτουργία σε πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου). Οι αισθητήρες αυτοί έχουν περιγραφεί με λεπτομέρειες στο ΠΕ4 και στο σταθερό σύστημα κάθε εσωτερικού χώρου (δωματίου) εγκαθίστανται σε διαφορετική πλακέτα που είναι στον ίδιο χώρο, αλλά όχι απαραίτητα στο ίδιο ακριβώς σημείο (οι εσωτερικοί χώροι σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν ανοιχτά ανοίγματα προς το εσωτερικό περιβάλλον θεωρούνται ομογενείς). Για τα συστήματα των δύο συνεργαζόμενων μουσείων επιλέχθηκαν για την καταγραφή της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων οι αισθητήρες SEN0177 (DFRobot). Παράλληλα για λόγους αξιολόγησης του συστήματος εγκαταστάθηκαν στο ΙΜΚ και οι αισθητήρες αέριων ρύπων SEN0231

της εταιρείας DFRobot (Φορμαλδεΐδη) και CCS811 της εταιρείας Adafruit (Πτητικές οργανικές ενώσεις και διοξείδιο του άνθρακα). Οι παραπάνω αισθητήρες παρουσιάζονται αναλυτικά στο ΠΕ4.

A4) Ανάπτυξη βάσης δεδομένων μετρήσεων αέριων ρύπων και δραστηριοτήτων/αριθμού επισκεπτών

Η βάση δεδομένων των μετρήσεων αερίων ρύπων και του αριθμού επισκεπτών υλοποιήθηκε σε PostgreSQL που ανήκει στην κατηγορία των εργαλείων ανοιχτού κώδικα (open source). Η δομή της βάσης, πέραν από τις τιμές των παραμέτρων ποιότητας αέρα που καταχωρεί (χρόνος εγγραφής (timestamp) και τιμή) και της κίνησης/πλήθος επισκεπτών στις αίθουσες, καταγράφει και παραμέτρους κατάστασης (status) των ασύρματων κόμβων. Η δομή του συστήματος και η διαδραστικότητα των βάσεων δεδομένων με τους τελικούς χρήστες παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3.



Εικόνα 6.3: Αρχιτεκτονική διαδικτυακού συστήματος ποιότητας αέρα, μορφή βάσεων δεδομένων και αλληλεπίδραση με τους χρήστες του συστήματος.

Στη βάση δεδομένων αποθηκεύονται όλες οι μετρήσεις αέριων και σωματιδιακών ρύπων και υπάρχει δυνατότητα πρόσβασης από εξουσιοδοτημένους χρήστες του προσωπικού των μουσείων και των πανεπιστημιακών ιδρυμάτων. Η βάση δεδομένων είναι σχεδιασμένη ώστε να είναι επεκτάσιμη, για τη μελλοντική προσθήκη και άλλων ποιοτικών παραμέτρων, ενώ επικοινωνεί με την πλατφόρμα

οπτικοποίησης των δεδομένων για την παρουσίασή τους στους χρήστες μέσα από γραφικό περιβάλλον.

Παράλληλα σε κεντρικό εξυπηρετητή του Πολ. Κρήτης θα υπάρχει βάση δεδομένων με όλες τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στα δύο μουσεία κατά τη διάρκεια της πράξης. Στη βάση περιλαμβάνονται μετρήσεις μάζας και αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων με όργανα ακριβείας, μετρήσεις αέριων ρύπων και τα αποτελέσματα των χημικών και μικροβιακών αναλύσεων των επικαθίσεων σε φίλτρα και υλικά. Επιπλέον θα μεταφέρονται όλες οι μελλοντικές μετρήσεις στα δύο μουσεία (π.χ. για εκ' νέου βαθμονόμηση των αισθητήρων). Η βάση δεδομένων θα εμπλουτίζεται με μετρήσεις που θα γίνουν και σε άλλα ενδιαφερόμενα μουσεία και θα είναι διαθέσιμη σε κρατικούς και ιδιωτικούς φορείς που εργάζονται στον τομέα της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς Ελλάδας και Κύπρου.

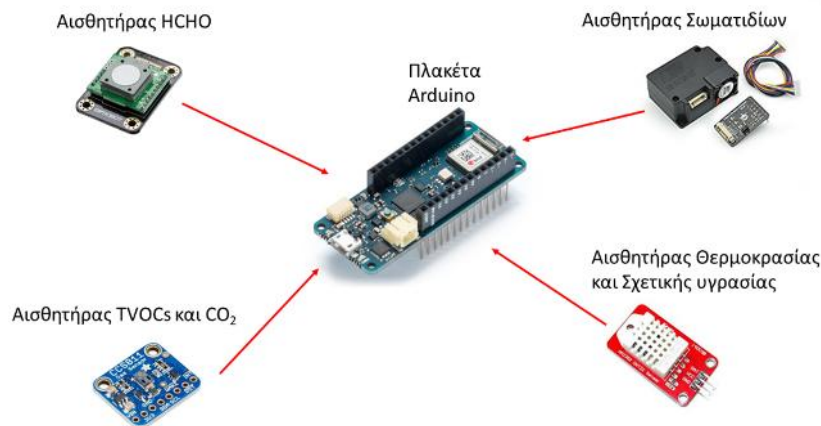
B) Εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης ποιότητας του αέρα στο ΙΜΚ.

Πριν την εγκατάσταση του συστήματος παρακολούθησης πραγματοποιήθηκε εκτενής αναβάθμιση του ασύρματου δικτύου στους εσωτερικούς χώρους του ΙΜΚ. Πιο συγκεκριμένα αναβαθμίστηκαν/δημιουργήθηκαν 14 σημεία πρόσβασης (access points) με σύγχρονο εξοπλισμό σε διάφορα σημεία των κτιρίων και 2 στο εξωτερικό περιβάλλον για να εξασφαλιστεί η ασύρματη κάλυψη σε όλους τους χώρους, καθώς και η απρόσκοπτη αποστολή δεδομένων από τους κόμβους του συστήματος παρακολούθησης. Παρέχεται επιπλέον, μέσω της αναβάθμισης, η δυνατότητα χρήσης φορητών συσκευών (κινητά, tablets, φορητοί Η/Υ) τόσο από το προσωπικό (για την παρακολούθηση του συστήματος), όσο και από τους επισκέπτες (για ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο). Εγκαταστάθηκαν 2 κάμερες με σύγχρονο λογισμικό στις αίθουσες Καλοκαιρινού και El Greco για την καταγραφή των επισκεπτών και τη συσχέτιση τους με τα επίπεδα ρύπανσης σε κάθε χώρο. Υπενθυμίζεται ότι τα δεδομένα της καταγραφής των επισκεπτών στην είσοδο δεν μπορούν να συνδεθούν άμεσα με τις συγκεντρώσεις των ρύπων, καθώς δεν υπάρχουν στοιχεία για τους χώρους που βρίσκονται οι επισκέπτες και τους χρόνους παραμονής σε αυτούς. Μελλοντικά θα εγκατασταθούν κάμερες και σε άλλες αίθουσες. Τα δεδομένα από τους αισθητήρες συλλέγονται, επεξεργάζονται και αποθηκεύονται σε σταθμό εργασίας που εγκαταστάθηκε στον τελευταίο όροφο της νέας πτέρυγας του ΙΜΚ.

Έχουν εγκατασταθεί συνολικά 6 κόμβοι (εικόνα 6.4) που ο καθένας αποτελείται από:

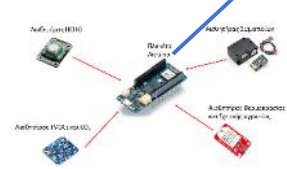
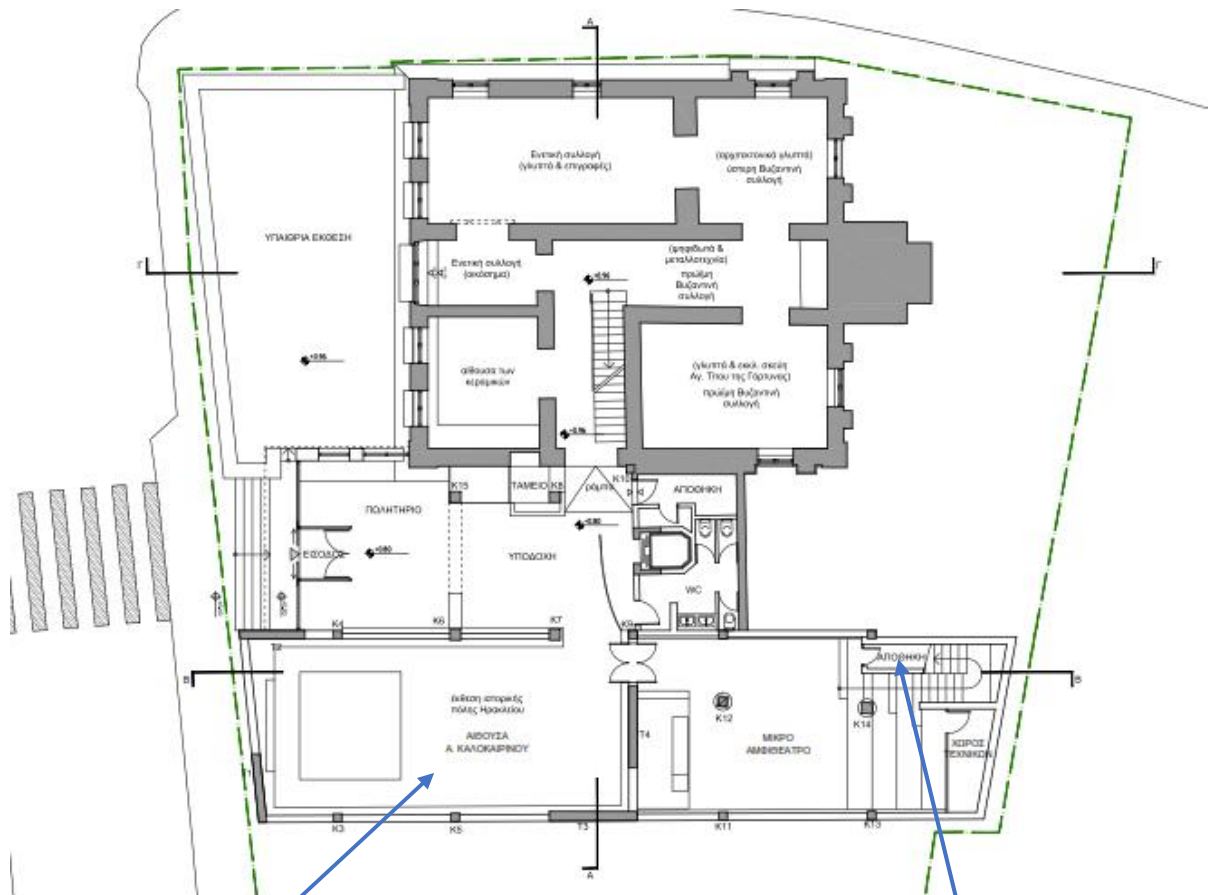
-) Πλακέτα Arduino πάνω στην οποία έχει γίνει η σύνδεση όλων των αισθητήρων μέτρησης αέριων και σωματιδιακών ρύπων. Η πλακέτα περιλαμβάνει επιπλέον μπαταρία, κάρτα μνήμης και τις απαραίτητες θύρες σύνδεσης με τα υπόλοιπα εξαρτήματα.

-) Αισθητήρα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων SEN0177 (DFRobot).
-) Αισθητήρα μέτρησης φορμαλδεΐδης SEN0231 (DFRobot).
-) Αισθητήρα μέτρησης ολικών πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOCs) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), CCS811 (Adafruit).
-) Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας.

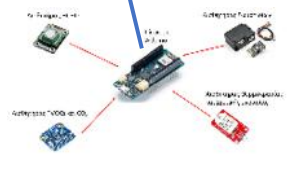


Εικόνα 6.4: Στοιχεία των κόμβων που εγκαταστάθηκαν στο IMK.

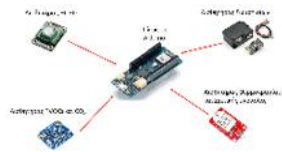
Οι κόμβοι εγκαταστάθηκαν στην αίθουσα Καλοκαιρινού, στην αίθουσα El Greco, στο χώρο της εθνογραφικής συλλογής, στην αίθουσα Πορταλάκη, στην αποθήκη φύλαξης έργων τέχνης και στο χώρο του εξωτερικού καφέ (εικόνα 6.5). Μελλοντικά και ανάλογα με την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται θα εγκατασταθούν και άλλοι κόμβοι σε άλλους χώρους του IMK. Επιπλέον θα εγκατασταθούν και τα συστήματα μέτρησης αέριων ρύπων με παθητικούς αισθητήρες που βρίσκονται στο ΒΜ και θα συνδεθούν με τον εξυπηρετητή του IMK. Οι θέσεις των κόμβων μέσα στους χώρους του IMK παρουσιάζονται στις παρακάτω κατόψεις των κτιρίων του μουσείου.



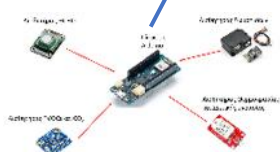
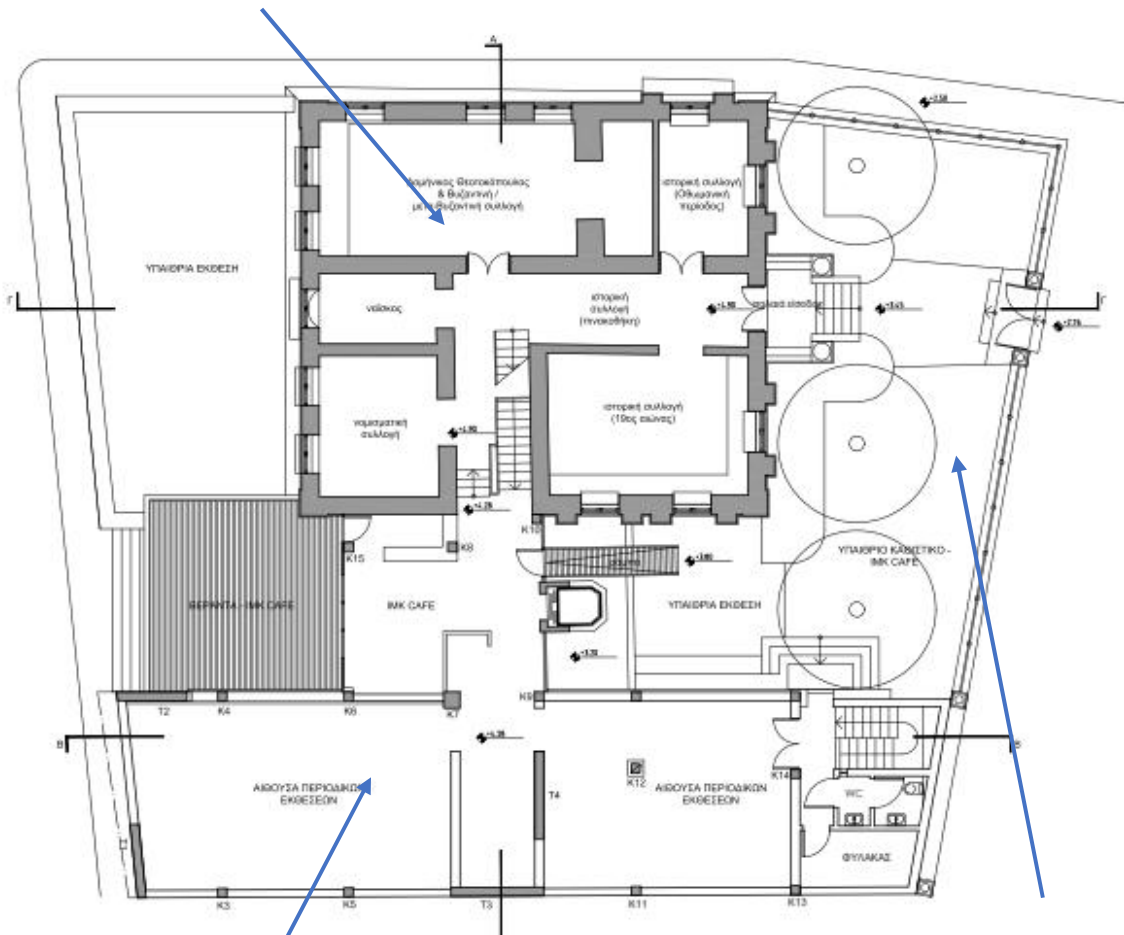
Κόμβος 1: Αίθουσα Καλοκαιρινού



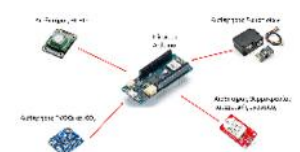
Κόμβος 2: Αποθήκη



Κόμβος 3: Αίθουσα EL Greco



Κόμβος 4: Αίθουσα Πορταλάκη



Κόμβος 5: Εξωτερικό καφέ

Γ) Έκθεση αποτελεσματικότητας μέτρων προστασίας.

Βασικός στόχος της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ II ήταν η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την προστασία ευπαθών έργων τέχνης από την αέρια ρύπανση η οποία θα είχε άμεση εφαρμογή σε εκθεσιακούς χώρους της Ελλάδας και Κύπρου. Στο πλαίσιο όλων των δράσεων της πράξης εφαρμόστηκαν σύγχρονα και καινοτόμα μέτρα προστασίας στα δύο συνεργαζόμενα μουσεία που δημιουργούν ένα δίκτυο προστασίας για τα πολύτιμα εκθέματα λειτουργώντας παράλληλα τόσο στο επίπεδο της πρόληψης, όσο και μέσω του άμεσου περιορισμού επικίνδυνων ρύπων που δύναται να ανιχνευθούν σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Στην παρούσα έκθεση θα αναλυθούν τα μέτρα προστασίας που αναπτύχθηκαν στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης (IMK) και θα γίνει αναφορά στο συνδυασμό τους με προγενέστερες δράσεις στο πλαίσιο της συναφούς πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ.

Γ.1) Αποτύπωση υφιστάμενης κατάστασης ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους του IMK

Πριν από την επιλογή και εγκατάσταση των μέτρων προστασίας των ευπαθών εκθεμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω εντατικών μετρήσεων αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης της ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους του IMK. Συγκεκριμένα κατά τη θερινή περίοδο των ετών 2018 και 2019 πραγματοποιήθηκαν εντατικές δειγματοληψίες συνολικής διάρκειας 12 εβδομάδων. Επιλέχθηκε η θερινή περίοδος καθώς συμπίπτει με την περίοδο υψηλής επισκεψιμότητας του IMK. Οι δειγματοληψίες περιλάμβαναν συνεχείς μετρήσεις διάρκειας 9 εβδομάδων (6 εβδομάδες το 2018 και 3 εβδομάδες το 2019) μάζας και αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων και αέριων ρύπων (CO₂, VOCs το 2018 και CO₂, VOCs, O₃ το 2019). Επιπλέον διεξήχθησαν 12 δειγματοληψίες (6 το 2018 και 6 το 2019) μέτρησης αιωρούμενων μικροοργανισμών (βακτήρια και μύκητες). Παράλληλα μελετήθηκαν τόσο οι σωματιδιακές, όσο και μικροβιακές επικαθίσεις σε φίλτρα και πραγματικά υλικά, καθώς και η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα. Η μεθοδολογία των μετρήσεων και τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην έκθεση των παραδοτέων 3.1.1-3.1.3 και 3.3.1-3.3.3. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα σημαντικότερα ευρήματα, που οδήγησαν στην επιλογή και ανάπτυξη των κατάλληλων μέτρων προστασίας.

Οι μέσες τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ ήταν υψηλότερες στο εξωτερικό περιβάλλον, όπως είναι αναμενόμενο. Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων γύρω από τα κτίρια του IMK επηρεάζονται τόσο από ανθρωπογενείς πηγές (εκπομπές από τα γειτονικά εστιατόρια, κίνηση των αυτοκινήτων) αλλά και φυσικές πηγές (μεταφορά από τη θάλασσα, σκόνη από τις γειτονικές παραλίες). Στους εσωτερικούς χώρους του IMK οι στιγμιαίες συγκεντρώσεις σπάνια υπερβαίνουν τα 30 μg/m³ και συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 15-25 μg/m³. Πρέπει να σημειωθεί ότι από την Ελληνική νομοθεσία δεν έχουν θεσπιστεί όρια συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων (αλλά και αέριων

ρύπων) σε κανένα μη βιομηχανικό εσωτερικό χώρο (Settimo et al., 2020). Παρόλο που οι πιθανές επιπτώσεις των αιωρούμενων (ανάλογα το σχήμα, τη χημική σύσταση, το πιθανό μικροβιακό φορτίο) είναι καταγεγραμμένες από πολλές μελέτες, σε ελάχιστες περιπτώσεις έχουν τεθεί σαφή κατώτερα όρια συγκέντρωσης και γενικά συστήνεται να διατηρούνται οι τιμές χαμηλά, κοντά στις συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν στο ΙΜΚ. Ακόμα όμως και σε αυτές τις συγκεντρώσεις, οι μακροχρόνιες επιδράσεις σε ευπαθή έργα τέχνης μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστροφικές (Din et al., 2016).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η μείωση των τιμών των PM_{10} στις αίθουσες που ήταν εγκατεστημένοι φωτοκαταλυτικοί ιονιστές με χρήση ηλεκτροστατικών φίλτρων (Daikin MC70L). Η χρήση τους, για λόγους μείωσης του κόστους λειτουργίας τους, περιοριζόταν στις ώρες που το μουσείο ήταν ανοικτό για τους επισκέπτες. Η μείωση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν εμφανής, ακόμα και με τη λειτουργία των ιονιστών στο μικρότερο επίπεδο παροχής αέρα. Μετά το πέρας της λειτουργίας τους όμως οι συγκεντρώσεις αυξανόταν και σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσίαζαν τις υψηλότερες ημερήσιες τιμές μετά τις 21:00 λόγω της διείσδυσης σωματιδίων από το εξωτερικό περιβάλλον που προερχόταν από εκπομπές από τα γειτονικά εστιατόρια. Η μελέτη της αριθμητικής συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων έδειξε ότι η παρουσία επισκεπτών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά μεγάλου μεγέθους σωματιδίων (χονδρά σωματίδια, $>2.5 \mu m$) από το εξωτερικό περιβάλλον και επαναιώρηση ήδη εναποτιθέμενων σωματιδίων λόγω της κίνησης των ατόμων. Το γεγονός ότι δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση του συνολικού ημερήσιου αριθμού των επισκεπτών με τις μέσες τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων δείχνει ότι πρέπει να μελετηθεί ο αριθμός των ατόμων σε κάθε αίθουσα σε συνάρτηση με στιγμιαίες αυξήσεις της συγκέντρωσης, ειδικά των χονδρών σωματιδίων.

Οι σωματιδιακές επικαθίσεις σε φίλτρα έδειξαν ότι ακόμα και εντός των προθηκών έχουμε εναπόθεση σωματιδίων σε επιφάνειες εκθεμάτων. Γενικά τα σωματίδια στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου έχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε Na και Cl και επομένως προέρχονται από τη θάλασσα που είναι κοντά στο μουσείο. Διαπιστώθηκε επίσης η παρουσία υλικών από το φλοιό της γης που σχετίζεται με χονδρά σωματίδια από τις γειτονικές παραλίες. Στα μικρά σωματίδια ανιχνεύθηκαν νιτρικές ενώσεις που σχετίζονται με σωματίδια από εκπομπές αυτοκινήτων και θειικές ενώσεις, των οποίων η πηγή πρέπει να προσδιοριστεί.

Οι αέριοι ρύποι που μελετήθηκαν ήταν το όζον (O_3) και οι ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs). Το όζον παρουσίασε υψηλές τιμές μόνο κοντά την είσοδο του μουσείου, η οποία δέχεται σημαντική επίδραση από το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίθετα σε όλους τους χώρους του μουσείου που έγιναν μετρήσεις, οι τιμές των TVOCs ήταν σε πολλές περιπτώσεις σταθερά μεγαλύτερες από 200 ppb.

Διάφοροι διεθνείς οργανισμοί και ινστιτούτα έχουν προτείνει συγκεντρώσεις TVOCs σε χώρους με ευπαθή υλικά μικρότερες από 100 ppb (Grzywacz, 2006).

Συμπερασματικά, η ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους του ΙΜΚ είναι καλή και οι τιμές των αέριων και σωματιδιακών ρύπων κυμαίνονται εντός ορίων που προτείνονται από διεθνείς οργανισμούς. Επιπλέον τα μέτρα που λήφθηκαν στο πλαίσιο της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ που προηγήθηκε του ΜΟΥΣΕΙΑ II συνέβαλλαν στη μείωση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων και των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών. Όμως λόγω των ιδιαίτερα ευπαθών υλικών που φιλοξενούνται στο ΙΜΚ, κρίθηκε να γίνουν στοχευμένες βελτιώσεις και επιπλέον να επεκταθεί η προστασία των αντικειμένων υψηλής πολιτιστικής αξίας στον τομέα της πρόληψης με την εγκατάσταση καινοτόμου συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Το σύστημα παρακολούθησης και τα μέτρα προστασίας παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Γ.2) Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα

Οι διαδικασίες που συνδέονται με την προστασία των εκθεμάτων σε χώρους έκθεσης διακρίνονται α) σε ενέργειες που αφορούν τον έλεγχο των μικροπεριβαλλοντικών συνθηκών και την απευθείας μείωση της συγκέντρωσης αέριων ρύπων σε εσωτερικούς χώρους, β) στη δημιουργία χώρων προστασίας από τους αέριους ρύπους (προθήκες, ειδικά δωμάτια) γ) σε δράσεις που συνδέονται με την παρακολούθηση επικίνδυνων ρύπων και δημιουργία προειδοποιήσεων σε περιπτώσεις υπερβάσεων προκαθορισμένων ορίων. Λόγω των ιδιομορφιών που έχουν οι χώροι έκθεσης, υπάρχουν απαιτήσεις σχετικά με το μέγεθος, την εμφάνιση και τη λειτουργία (χαμηλά επίπεδα θορύβου) των συστημάτων παρακολούθησης με αποτέλεσμα αυτά να περιορίζονται στη χρήση παθητικών αισθητήρων μικρού μεγέθους (Blades, 2004, Grzywacz, 2006. Σημαντικά μειονεκτήματα παρόμοιων συστημάτων είναι α) η ακρίβεια που παρέχουν αναφορικά με τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων, β) η έλλειψη δυνατοτήτων συνεχούς καταγραφής δεδομένων, γ) η έλλειψη δυνατότητας μετάδοσης των τιμών των αέριων ρύπων. Τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί σημαντικά οι δυνατότητες ενσύρματης και ασύρματης μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων, ενώ υπάρχει η τάση της δικτύωσης μεγάλου αριθμού συσκευών και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο της λειτουργίας τους μέσω αποστολής πληροφοριών που συλλέγουν (Internet of things). Οι εξελίξεις αυτές επηρεάζουν και τον τρόπο με τον οποίο μελετάται η ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους και έχουν πολλαπλασιαστεί οι προσπάθειες δημιουργίας σύγχρονων συστημάτων παρακολούθησης που εκμεταλλεύονται τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις (Schieweck, 2018). Επιπλέον έχουν αναπτυχθεί σύγχρονοι αισθητήρες χαμηλού κόστους και μικρού μεγέθους με δυνατότητες συνεχούς καταγραφής δεδομένων και αποστολής σε πραγματικό χρόνο (Kumar et al., 2016, Morawska et al., 2018). Τα συστήματα παρακολούθησης που αναπτύχθηκαν στην πράξη

ΜΟΥΣΕΙΑ II εκμεταλλεύονται τις σύγχρονες τεχνολογίες και αποτελούν καινοτόμες λύσεις που δεν έχουν εφαρμοστεί σε άλλους εκθεσιακούς χώρους σε Ελλάδα και Κύπρο. Πιο συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν παράλληλα δύο συστήματα (από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου και το Πολυτεχνείο Κρήτης) τα οποία έχουν εγκατασταθεί στο Βυζαντινό Μουσείο (BM) και στο ΙΜΚ. Τα δύο συστήματα στηρίζονται στη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και στην αποθήκευση τους σε βάσεις δεδομένων, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους. Η διαφορά των δύο συστημάτων έγκειται στο είδος των αισθητήρων που χρησιμοποιούν. Το σύστημα του ΤΕΠΑΚ χρησιμοποιεί δοσιμετρικούς σωλήνες αλλαγής χρώματος για την παρακολούθηση των σημαντικότερων αέριων ρύπων. Στο σύστημα του Πολ. Κρήτης έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων και βασικών αέριων ρύπων. Μελλοντικά θα γίνει τοποθέτηση και των δύο συστημάτων και στα δύο μουσεία. Η αξιολόγηση του συστήματος του ΤΕΠΑΚ γίνεται σε διαφορετική έκθεση. Αναφέρεται όμως ότι η βασική καινοτομία είναι ο τρόπος καταγραφής της μεταβολής των συγκεντρώσεων με χρήση κάμερας υψηλής ευκρίνειας και η δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, ακόμα και μέσω κινητού τηλεφώνου των περιβαλλοντικών συνθηκών και των τιμών των αέριων ρύπων εντός του BM.

Στο σύστημα του ΙΜΚ χρησιμοποιούνται αισθητήρες των οποίων η λειτουργία στηρίζεται είτε στη μεταβολή κάποιας ηλεκτρικής ιδιότητας (χωρητικότητας, αγωγιμότητας, αντίστασης) και την παραγωγή ηλεκτρικού σήματος για την παρακολούθηση των αέριων ρύπων, είτε στην ανίχνευση της σκεδαζόμενης μονοχρωματικής ακτινοβολίας για την παρακολούθηση των μεταβολών της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι αέριοι ρύποι που καταγράφονται είναι οι ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs) και η φορμαλδεΐδη (HCHO). Ειδικά για τα TVOCs, οι δειγματοληψίες που προηγήθηκαν έδειξαν συγκεντρώσεις υψηλότερες των 100 ppb με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η παρακολούθησή τους. Οι επιπτώσεις της HCHO σε ευπαθή υλικά έχουν αποτυπωθεί σε πολλές μελέτες (Brimblecombe 1990, Sharif-Askari, H. και Abu-Hijleh, B., 2018). Επιπλέον παρακολουθείται και καταγράφεται το CO₂, το οποίο δεν αποτελεί ρύπο αλλά συνδέεται σε επιβαρυνμένο εσωτερικό περιβάλλον, ειδικά για τους εργαζόμενους σε αυτό (Satish et al., 2012). Καταγράφονται επίσης οι τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Για τους υπόλοιπους αέριους ρύπους που δύναται να απαντηθούν σε υψηλές συγκεντρώσεις σε εσωτερικά περιβάλλοντα, είτε δεν υπήρχαν διαθέσιμοι ανάλογοι αισθητήρες (π.χ. οξικό και μυρμηκικό οξύ), είτε τα κατώτερα όρια ανίχνευσης των υπαρχόντων αισθητήρων ήταν υψηλότερα από τις συνήθεις συγκεντρώσεις στο ΙΜΚ (οξείδια του αζώτου, SO₂, NH₃, H₂S). Το πρόβλημα αυτών των ρύπων θα αντιμετωπιστεί μελλοντικά με την ενσωμάτωση του συστήματος παθητικών αισθητήρων του BM.

Η αξιολόγηση των αισθητήρων με πρότυπα όργανα σε εργαστηριακούς χώρους του ΙΜΚ

(περιγράφεται αναλυτικά στα παραδοτέα του ΠΕ3) έδειξε ότι αποτυπώνουν με ακρίβεια την τάση των μεταβολών των συγκέντρωσης των ρύπων. Απαιτείται διόρθωση στις τιμές της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, η οποία θα παρέχεται από το Πολ. Κρήτης μέσω προγραμματισμένων εξαμηνιαίων μετρήσεων με φορητά όργανα στο ΙΜΚ. Οι διορθώσεις γίνονται άμεσα στη βάση δεδομένων όπου αποθηκεύονται όλες οι τιμές.

Η χρήση της πλατφόρμας Arduino για την υλοποίηση του συστήματος, παρείχε σταθερότητα στη λειτουργία και εξαιρετική επικοινωνία των κόμβων με τους αισθητήρες με τον εξυπηρετητή (server) όπου συλλέγονται οι τιμές. Σημαντικό ρόλο στην εξαιρετική ασύρματη σύνδεση έπαιξε και η εκτεταμένη αναβάθμιση του ασύρματου δικτύου στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της πράξης. Ο κόμβος αισθητήρων που τοποθετήθηκε εκτός του μουσείου παρέχει και την εικόνα του εξωτερικού περιβάλλοντος, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων αναφορικά με άμεσες πρωτοβουλίες του προσωπικού του ΙΜΚ για την προστασία των εκθεμάτων από την αέρια ρύπανση.

Τέλος η χρήση καμερών με λογισμικό αποτύπωσης του αριθμού των επισκεπτών σε συγκεκριμένους χώρους του μουσείου βοηθάει στη σύνδεση της κίνησης των επισκεπτών με στιγμιαίες μεταβολές των τιμών των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων και των πτητικών οργανικών ενώσεων. Οι πληροφορίες αυτές βοηθούν στην άμεση διαχείριση των επισκεπτών εντός του μουσείου και στη μείωση των βραχυχρόνιων επεισοδίων ρύπανσης, τα οποία δεν ήταν δυνατό να ανιχνευθούν με χρήση παλαιότερων τεχνολογιών.

Γ.3) Αναβάθμιση υφιστάμενων προθηκών και μετατροπή τους σε μικροκλιματικές προθήκες

Τα αποτελέσματα των εντατικών δειγματοληψιών με όργανα συνεχούς μέτρησης, αλλά και η ανάλυση των σωματιδιακών επικαθίσεων σε φίλτρα έδειξαν τη μεταφορά από το εξωτερικό περιβάλλον αιωρούμενων σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους του μουσείου αλλά και εντός των προθηκών έκθεσης ευπαθών αντικειμένων. Η μεταφορά γίνεται είτε μέσω των σχισμών και των ανοιγμάτων των κτιρίων, είτε μέσω των επισκεπτών του μουσείου. Ανιχνεύθηκαν επίσης σχετικά υψηλές για το είδος των χώρων συγκεντρώσεις TVOCs, οι εκπομπές των οποίων μπορεί να προέρχονται και από εσωτερικές πηγές, όπως υλικά κατασκευής, βαφές κλπ. (Que et al., 2013). Επιπλέον οι παρακολούθηση της σχετικής υγρασίας με τους μετρητές που είχαν αποκτηθεί στην πράξη ΜΟΥΣΕΙΑ δείχνει ότι η παύση της λειτουργίας του εξαερισμού οδηγεί σε αύξηση της σχετικής υγρασίας, όχι σε ανησυχητικά επίπεδα κατά τη διάρκεια των βραδινών ωρών. Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα επιλέχθηκε να μετατραπούν επιλεγμένες προθήκες σε μικροπεριβαλλοντικές μέσω τοποθέτησης συστημάτων ελέγχου της υγρασίας (η θερμοκρασία εντός του ΙΜΚ δε μεταβάλλεται σημαντικά) και ταυτόχρονα να «θωρακιστούν» από την εισροή σωματιδίων και την επίδραση αέριων

ρύπων. Η αναλυτική παρουσίαση της αναβάθμισης των προθηκών καλύφθηκε στις εκθέσεις του ΠΕ5. Παρουσιάζονται παρακάτω περιληπτικά οι δράσεις και η επίδραση που αναμένεται να έχουν στην προστασία των έργων τέχνης.

Στην προθήκη που φιλοξενούνται τα σημαντικότερα εκθέματα του μουσείου (οι πίνακες του Δομήνικου Θεοτοκόπουλου) τοποθετήθηκαν ρυθμιστές της σχετικής υγρασίας (πλακίδια Art Sorb), ύφασμα κατακράτησης αέριων ρύπων (charcoal cloth) και κόκκοι ενεργού άνθρακα. Με τις παραπάνω δράσεις ελέγχονται οι μεταβολές της σχετικής υγρασίας και μειώνονται οι επιδράσεις των αέριων ρύπων στους πίνακες του μεγάλου Κρητικού ζωγράφου. Επιπλέον στην προθήκη έγιναν ενέργειες στεγανοποίησης που μείωσαν την εισροή μικρών αιωρούμενων σωματιδίων, τα οποία είχαν ανιχνευθεί σε φίλτρα που είχαν τοποθετηθεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Έλεγχος της ποιότητας του αέρα εντός της προθήκης θα πραγματοποιείται με το φορητό σύστημα μετρήσεων, ενώ η αίθουσα παρακολουθείται συνεχώς με κόμβο αισθητήρων που έχει τοποθετηθεί μέσα σε αυτή. Στις υπόλοιπες προθήκες της αίθουσας El Greco (μικροτεχνία και χειρόγραφα) τα μέτρα που λήφθηκαν μείωσαν σημαντικά την επαφή επικίνδυνων πτητικών οργανικών ενώσεων με τα εκθέματα μέσω α) χρήσης ειδικών απορροφητών VOCs (ύφασμα charcoal cloth και φάκελος zinc oxide) β) απομόνωσης ύποπτων υλικών για εκπομπές (π.χ. σανίδες από ακατέργαστο MDF) και γ) χρήση επιστρώσεων χαμηλών εκπομπών πάνω από τις ήδη υπάρχουσες βαφές. Ο αισθητήρας TVOCs της αίθουσας ελέγχει την επίδραση των μέτρων και βοηθάει στην σωστή αντικατάσταση των υλικών απορρόφησης μετά τον κορεσμό τους.

Ο έλεγχος της υγρασίας πραγματοποιείται και σε άλλες 13 προθήκες (δύο προθήκες υφασμάτων και 11 εντοιχισμένες) με χρήση κασετών Pro sorb gel ή δισκίων silica gel. Ο έλεγχος της υγρασίας συντελεί και στη μείωση των επικίνδυνων μικροοργανισμών που ανιχνεύθηκαν πάνω σε πραγματικά εκθέματα κατά τη διενέργεια των δειγματοληψιών. Στις παραπάνω προθήκες τοποθετήθηκαν και μειωτές των TVOCs. Επειδή δεν έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες οργανικών πτητικών ενώσεων σε όλες τις αίθουσες του μουσείου, θα πραγματοποιούνται από το προσωπικό του Πολ. Κρήτης προγραμματισμένοι περιοδικοί έλεγχοι της συγκέντρωσης των TVOCs με φορητά όργανα, ώστε να αποτυπώνεται η εικόνα τους εντός του μουσείου, να ανιχνεύονται τυχόν νέες πηγές και να ελέγχεται παράλληλα η ορθή λειτουργία των αισθητήρων.

Γ.4) Αναβάθμιση συστήματος εξαερισμού στις αίθουσες της Εθνογραφικής Συλλογής

Η αναβάθμιση αφορά το σύστημα κλιματισμού της εθνογραφικής συλλογής, που βρίσκεται στον 3^ο όροφο του ΙΜΚ και επικοινωνεί με σκάλα με το 2^ο όροφο. Δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην εθνογραφική συλλογή καθώς η κατάσταση των συγκεκριμένων χώρων έχει αποτυπωθεί με λεπτομέρεια κατά τη διάρκεια της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ, αλλά και σε προγενέστερα Ευρωπαϊκά έργα. Οι

συγκεντρώσεις των αέριων και σωματιδιακών ρύπων επηρεάζονται έντονα από το εξωτερικό περιβάλλον, λόγω της γειτνίασης με την εξωτερική πόρτα προς το υπαίθριο καφέ και του υπερυψωμένου χώρου σε σχέση με το 2^ο όροφο. Η αναβάθμιση του συστήματος κλιματισμού ωφελεί συνολικά την ποιότητα του αέρα εντός του ΙΜΚ και οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Επιπλέον το σύστημα κλιματισμού της εταιρείας Daikin που εγκαταστάθηκε διαθέτει μικροεπεξεργαστές για έλεγχο της θερμοκρασίας κάθε ξεχωριστού μικροπεριβάλλοντος και ρύθμιση σταθερής θερμοκρασίας εξατμίσης για καλύτερο έλεγχο των επιπέδων σχετικής υγρασίας. Οι ενέργειες αυτές μειώνουν αισθητή το μικροβιακό φορτίο στους εσωτερικούς χώρους. Τέλος όλες οι επιμέρους μονάδες της Daikin έχουν δυνατότητα διασύνδεσης είτε με κεντρικά συστήματα ελέγχου BMS (Modbus, Bacnet, Lonworks), είτε με εξειδικευμένα κεντρικά συστήματα ελέγχου της ίδιας εταιρείας Daikin όπως Intelligent Touch Manager, Intelligent Touch Control, Central Control δίνοντας μελλοντικά τη δυνατότητα διασύνδεσης της λειτουργίας του κλιματισμού με το σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.

Γ.5) Συμπεράσματα.

Συμπερασματικά αναφέρουμε πως τα μέτρα που λήφθηκαν βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους του ΙΜΚ καθώς:

- Ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας εντός των προθηκών μειώνει σημαντικά τις συγκεντρώσεις επικίνδυνων μικροοργανισμών που ευνοούνται από υψηλά επίπεδα υγρασίας.
- Το αναβαθμισμένο σύστημα κλιματισμού μειώνει την εισροή σωματιδίων από το εξωτερικό περιβάλλον και συμβάλλει στον έλεγχο της σχετικής υγρασίας στον 2^ο και στον 3^ο όροφο του μουσείου.
- Η τοποθέτηση συστημάτων απορρόφησης των επικίνδυνων πτητικών οργανικών ενώσεων εντός των προθηκών σε συνδυασμό με τη χρήση υλικών χαμηλών εκπομπών μειώνουν αισθητά το κίνδυνο φθοράς των ευπαθών υλικών.
- Η τοποθέτηση αεροστεγών ταινιών στην προθήκη των πινάκων του El Greco μειώνει την εισροή μικρών σωματιδίων και την επικάθηση τους στα εκθέματα.
- Το σύστημα παρακολούθησης με αισθητήρες χαμηλού κόστους δίνει τη δυνατότητα άμεσης επέμβασης σε περιπτώσεις υπερβάσεων ορίων και αναγνώρισης βραχυχρόνιων επεισοδίων ρύπανσης που στο παρελθόν δεν ήταν ανιχνεύσιμα. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα παρακολούθησης αέριων ρύπων με χρήση δοσιμετρικών σωλήνων μέσω του συστήματος του ΒΜ.

Ειδικότερα η εγκατάσταση του συστήματος παρακολούθησης καθιστά το ΙΜΚ πρότυπο όσον αφορά

την παρακολούθηση των επιπέδων της αέριας ρύπανσης, όχι μόνο σε μουσεία, αλλά γενικότερα σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Η μελλοντική σύνδεση και άλλων χώρων έκθεσης στην κοινή βάση δεδομένων θα βοηθήσει σημαντικά στην ανάπτυξη κοινών στρατηγικών προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς σε Ελλάδα και Κύπρο και θα ανοίξει νέους δρόμους συνεργασίας ανάμεσα στις επιστημονικές κοινότητες των δύο κρατών.

Γ.6) Βιβλιογραφία.

Blades, N. (2004). Pollutants in the Museum Environment-Practical Strategies for Problem Solving in Design, Exhibition and Storage.

Brimblecombe, P. (1990). The composition of museum atmospheres. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 24(1), 1-8.

Din, S. M., Husin, N. B. M., Othman, R., & Bagul, A. H. B. P. (2016). A Review of the Literature on the Effect of Airborne Particulates Matter Towards Museum Visitors and Museum Artefact. *World Applied Sciences Journal*, 34(12), 1659-1666.

Grzywacz, C. M. (2006). Monitoring for gaseous pollutants in museum environments. Getty Publications.

Kumar, P., Skouloudis, A. N., Bell, M., Viana, M., Carotta, M. C., Biskos, G., & Morawska, L. (2016). Real-time sensors for indoor air monitoring and challenges ahead in deploying them to urban buildings. *Science of the Total Environment*, 560, 150-159.

Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., ... & Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?. *Environment international*, 116, 286-299.

Que, Z. L., Wang, F. B., Li, J. Z., & Furuno, T. (2013). Assessment on emission of volatile organic compounds and formaldehyde from building materials. *Composites Part B: Engineering*, 49, 36-42.

Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671-1677.

Schieweck, A., Uhde, E., Salthammer, T., Salthammer, L. C., Morawska, L., Mazaheri, M., & Kumar, P. (2018). Smart homes and the control of indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 705-718.

Settimo, G., Manigrasso, M., & Avino, P. (2020). Indoor air quality: A focus on the European legislation and state-of-the-art research in Italy. *Atmosphere*, 11(4), 370.

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.