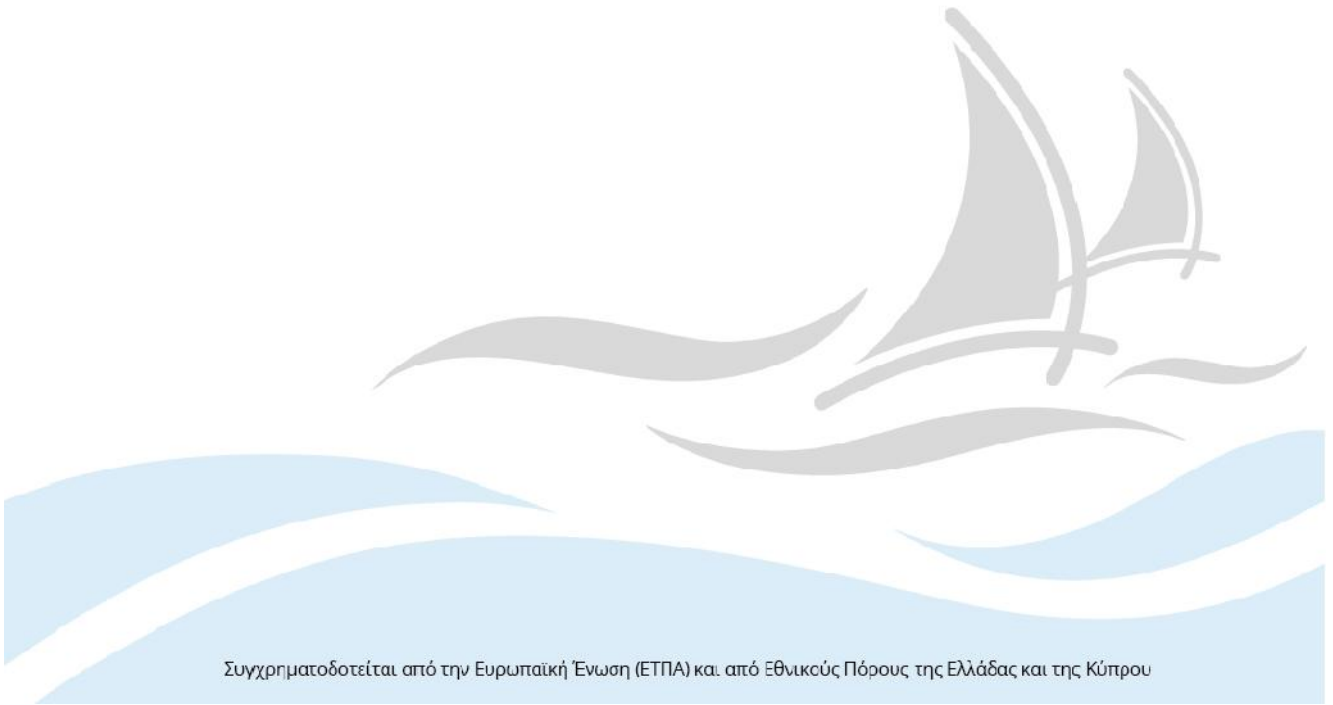


4.2.1, 4.4.1, 4.3.2, 4.3.3. :  
- 4 - 4.1.1-4.1.3,

---

**ΥΠΟΤΙΤΛΟΣ: 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

ΠΕ4: Φορητό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης .....	3
Α) Βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος .....	3
Β) Μελέτη επιλογής αισθητήρων φορητού συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. .....	4
Β1) Αισθητήρες μέτρησης αέριων ρύπων .....	4
Α2) Αισθητήρες μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων .....	7
Γ) Υλοποίηση του φορητού συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. ....	8
Γ1) Σχεδιασμός και Αρχιτεκτονική φορητού συστήματος .....	9
Δ) Αξιολόγηση καλής λειτουργίας αισθητήρων αιωρούμενων σωματιδίων. ....	11
Δ1) Αισθητήρας PMS 5003 της εταιρείας Plantower .....	12
Δ2) Αισθητήρας HPMA115S0-XXX της εταιρείας Honeywell .....	15
Δ3) Συμπεράσματα .....	16

## ΠΕ4: Φορητό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης

Στο πλαίσιο του ΠΕ4 αναπτύχθηκε φορητό σύστημα καταγραφής της ποιότητας του αέρα, που μπορεί να τοποθετηθεί αυτόνομα σε εσωτερικούς χώρους έκθεσης/φύλαξης ευπαθών υλικών ή να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και των επιπέδων ρύπανσης κατά τη διάρκεια μεταφοράς έργων τέχνης. Οι σύγχρονες απαιτήσεις για την προστασία των έργων τέχνης υψηλής πολιτιστικής αξίας, σύμφωνα και με τις τελευταίες ανανεωμένες πολιτικές της Ευρωπαϊκής ένωσης καθιστούν αναγκαία τη χρήση ανάλογων συστημάτων τόσο για μόνιμη, όσο και για περιοδική χρήση ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις κάθε χώρου έκθεσης ή φύλαξης. Το φορητό σύστημα αναπτύχθηκε παράλληλα από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου και από το Πολ. Κρήτης σε δύο διαφορετικές εκδόσεις με διαφορετική αρχή λειτουργίας. Η ανάπτυξη των δύο εκδοχών έγινε με συνεργασία των δύο ιδρυμάτων ώστε τα συστήματα να αλληλοσυμπληρώνονται και να μπορούν να αποτελέσουν ταυτόχρονα τμήμα του σταθερού συστήματος παρακολούθησης που εγκαταστάθηκε στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης (Ηράκλειο) και στο Βυζαντινό Μουσείο (Λεμεσός). Η παρούσα έκθεση αναφέρεται στο σύστημα που ανέπτυξε το Πολ. Κρήτης και για το αντίστοιχο σύστημα του ΤΕΠΑΚ υπάρχει ξεχωριστή αναφορά. Παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του συστήματος και η ανάπτυξη του (Παραδοτέα 4.1.2 και 4.3.2), ενώ η επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων (παραδοτέο 4.1.1, 4.2.1 και 4.4.1 αφορά και τα δύο συστήματα). Αναπτύσσεται επίσης η αξιολόγηση της λειτουργίας του (παραδοτέα 4.1.3 και 4.3.3). Για την ανάπτυξη του συστήματος εργάστηκαν οι Λαζαρίδης Μιχάλης (Καθηγητής, μόνιμο προσωπικό), Γλυτσός Θόδωρος (Ε.ΔΙ.Π, μόνιμο προσωπικό) και Ευσταθίου Διονύσης (MSc, επιστημονικός συνεργάτης). Σημαντική ήταν η συνεισφορά του προσωπικού του ΙΜΚ για την εγκατάσταση στο ΙΜΚ και την παρακολούθηση της λειτουργίας των αισθητήρων κατά την διαδικασία αξιολόγησης τους.

### **A) Βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος**

Βασικά χαρακτηριστικά του φορητού συστήματος που αναπτύσσεται από το Πολυτεχνείο Κρήτης είναι:

- ) Το μικρό μέγεθος.
- ) Η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.
- ) Η αθόρυβη λειτουργία.
- ) Το χαμηλό κόστος.
- ) Η εύκολη τοποθέτηση και λειτουργία.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχουν προκύψει από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των χώρων που θα φιλοξενηθούν ανάλογα συστήματα καθώς πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη διατήρηση της

αισθητικής του χώρων έκθεσης και παράλληλα στο χαμηλό κόστος λειτουργίας. Στην πραγματικότητα, το φορητό σύστημα μετρήσεων αερίων ρύπων, είναι μια παραλλαγή των ασύρματων κόμβων που θα εγκατασταθούν μόνιμα σε χώρους των μουσείων και περιγράφονται αναλυτικά στο ΠΕ6. Οι διαφορές του με τους σταθερούς κόμβους είναι ότι τα δεδομένα που καταγράφονται στον κεντρικό εξυπηρετητή δεν αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο αλλά αντιθέτως αποθηκεύονται σε τοπικό αποθηκευτικό μέσο. Επίσης για την τροφοδοσία του διαθέτει συσσωρευτή (μπαταρία) για μακροχρόνια ενεργειακή αυτονομία.

Η ανάπτυξη διασυνδεδεμένων χαμηλού κόστους ανά αισθητήρα συστημάτων με δυνατότητα παρακολούθησης αέριων και σωματιδιακών σε πολλαπλά διαφορετικά σημεία κερδίζει συνεχώς έδαφος στις σύγχρονες πρακτικές της ποιότητας του αέρα τόσο σε εξωτερικά (Castell et al., 2017, Jonašević-Stojanović et al., 2015, Rai et al., 2017) όσο και σε εσωτερικά περιβάλλοντα (Lowther et al., 2019). Το σύστημα που αναπτύχθηκε από το Πολ. Κρήτης εκτός από τα μουσεία και τους χώρους φύλαξης έργων τέχνης μπορεί να βρει εφαρμογή σε οποιοδήποτε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο, πολλαπλασιάζοντας έτσι τη χρηστικότητα και τη βιωσιμότητα του καθιστώντας ένα πολύτιμο εργαλείο για τη χάραξη στρατηγικών προστασίας των ευπαθών εκθεμάτων αλλά και της δημόσιας υγείας.

## **B) Μελέτη επιλογής αισθητήρων φορητού συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.**

### **B1) Αισθητήρες μέτρησης αερίων ρύπων**

Κατά τη διάρκεια της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ\_I, που είχε προηγηθεί της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ\_II είχε αναπτυχθεί σύστημα παρακολούθησης της αέριας ρύπανσης με το οποίο γινόταν καταγραφή της συγκέντρωσης των σημαντικότερων αερίων ρύπων σε εσωτερικούς χώρους. Το σύστημα βασιζόταν στη χρήση παθητικών δοσιμετρικών σωλήνων, η αρχή λειτουργίας των οποίων στηρίζεται στην αλλαγή χρώματος ενεργού ουσίας που βρίσκεται στο εσωτερικό σωλήνα λόγω της διάχυσης του αέριου ρύπου μέσα σε αυτόν. Η διάχυση γίνεται μέσω των ρευμάτων του αέρα και χωρίς τη χρήση αντλίας. Η καταγραφή της μεταβολής του χρώματος πραγματοποιείται με χρήση κάμερας υψηλής ευκρίνειας. Για την ανάπτυξη του φορητού συστήματος εξετάστηκε καταρχήν η χρήση των παθητικών δοσιμετρικών σωλήνων με στόχο να υπάρχει συνέχεια και σύνδεση μεταξύ του σταθερού και του φορητού συστήματος. Διαπιστώθηκε όμως ότι η χρήση παθητικών δοσιμετρικών σωλήνων δεν ήταν δυνατή για τους παρακάτω λόγους:

- )] Σε περιπτώσεις χαμηλών συγκεντρώσεων απαιτείται οπωσδήποτε η λειτουργία κάμερας υψηλής ευκρίνειας για την αναγνώριση της χρωματικής αλλαγής της ενεργού ουσίας. Σε ένα φορητό σύστημα η τοποθέτηση της κάμερας αυξάνει σημαντικά τον όγκο της συσκευής καθώς απαιτείται η χρήση θήκης που δεν επιτρέπει την είσοδο φωτός με σύστημα

ελεγχόμενου εσωτερικού φωτισμού. Επιπλέον το ίδιο το μέγεθος των σωλήνων αυξάνει τις απαιτούμενες διαστάσεις της συσκευής.

- )] Σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων που οι χρωματικές αλλαγές μπορούν να εντοπιστούν από τον παρατηρητή, δεν υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς καταγραφής με ηλεκτρονικό τρόπο.
- )] Δεν παρέχεται η δυνατότητα παρακολούθησης των αιωρούμενων σωματιδίων, που μειώνει τη λειτουργικότητα της συσκευής σε εξωτερικούς ή αποθηκευτικούς χώρους που ενδέχεται να παρουσιάζονται αυξημένες ποσότητες σωματιδιακής ύλης.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, όσον αφορά τους αέριους ρύπους, ακολουθήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση που στηρίζεται στη χρήση ηλεκτρονικών αισθητήρων με δυνατότητες συνεχούς καταγραφής. Οι αισθητήρες αυτοί είναι είτε ηλεκτροχημικοί, είτε ημιαγωγών μεταλλικού οξειδίου. Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικού σήματος λόγω της χημικής αντίδρασης του αερίου με συγκεκριμένα υλικά. Το παραγόμενο ηλεκτρικό σήμα είναι ανάλογο της συγκέντρωσης του αερίου. Ένας τυπικός ηλεκτροχημικός αισθητήρας αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια που διαχωρίζονται από ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη. Τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται με ηλεκτρική αντίσταση. Το αέριο έρχεται σε επαφή (υπό ελεγχόμενη ροή) με ένα από τα δύο ηλεκτρόδια και αντιδρά χημικά μέσω μηχανισμών οξείδωσης ή αναγωγής. Στα ηλεκτρόδια επιλέγονται υλικά που δρουν καταλυτικά για τις παραπάνω αντιδράσεις.

Η λειτουργία των αισθητήρων αερίων που κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα οξείδια μετάλλων βασίζεται στο φαινόμενο της μεταβολής των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων, παρουσία ενός αερίου. Η μεταβολή της αγωγιμότητας στα ημιαγώγιμα οξείδια μετάλλων στηρίζεται στην παρουσία ή όχι οξυγόνου στο αέριο περιβάλλον τους. Δηλαδή αν η συγκέντρωση οξυγόνου στο περιβάλλον είναι διαφορετική από τη συγκέντρωση ισορροπίας του οξυγόνου στο κυρίως σώμα του οξειδίου, τότε πραγματοποιείται διάχυση οξυγόνου και η αγωγιμότητα αλλάζει. Οι μεταβολές στην αγωγιμότητα προκαλούν αλλαγές στην ηλεκτρική αντίσταση του αισθητήρα, που είναι ανάλογες της συγκέντρωσης του μετρούμενου αερίου.

Στο υπό ανάπτυξη φορητό σύστημα παρακολούθησής της ποιότητας του αέρα εξετάστηκαν αισθητήρες με τους οποίους μετρούνται διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$  και  $\text{CO}$ ), αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ), διοξείδιο και μονοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$  και  $\text{NO}$ ), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), Φορμαλδεΐδη ( $\text{HCHO}$ ), οξικό και μυρμηκικό οξύ ( $\text{CH}_3\text{COOH}$  και  $\text{CH}_2\text{O}_2$ ), όζον ( $\text{O}_3$ ), διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Η επιλογή για τη μέτρηση των συγκεκριμένων αέριων ρύπων έγινε με οδηγό τα αποτελέσματα της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ, όπου πραγματοποιήθηκαν εντατικές μετρήσεις αέριων και

σωματιδιακών ρύπων στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης (Ηράκλειο) και στη Δημοτική Πινακοθήκη του Δήμου Λεμεσού. Οι επιλεγμένες ενώσεις είτε εμφάνισαν μετρήσιμες συγκεντρώσεις στα δύο μουσεία, είτε σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία παρατηρούνται σε εσωτερικούς χώρους έκθεσης και αποθήκευσης έργων τέχνης. Ειδικά το διοξείδιο του άνθρακα δε συνδέεται άμεσα με την καταστροφή ευπαθών υλικών, αλλά θεωρείται δείκτης της ποιότητας του αέρα καθώς αυξημένες τιμές σχετίζονται με την παρουσία μεγάλου αριθμού ατόμων σε εσωτερικούς χώρους.

Πραγματοποιήθηκε έρευνα των διαθέσιμων αισθητήρων και με βάση τα δεδομένα από την πράξη ΜΟΥΣΕΙΑ, αλλά και από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν σε Ελλάδα και Κύπρο στο πλαίσιο των εργασιών του ΠΕ3 και διαπιστώθηκε ότι στις περιπτώσεις των  $\text{NH}_4 \text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  και  $\text{CH}_2\text{O}_2$  τα όρια ανίχνευσης των υπαρχόντων αισθητήρων είναι σαφώς μικρότερα από τις μετρούμενες κατώτερες συγκεντρώσεις που μπορούν να ανιχνευθούν. Επομένως κρίθηκε ότι αισθητήρες για τις ενώσεις αυτές δεν μπορούν να αξιολογηθούν στους χώρους μετρήσεων της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ\_II και δεν θεωρήθηκε σκόπιμη η χρήση τους στο υπό ανάπτυξη σύστημα. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι επειδή ακολουθείται η ίδια διαδικασία σύνδεσης στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας με τους τελικά επιλεχθέντες αισθητήρες, μπορούν να προστεθούν σε μελλοντικές εκδόσεις του φορητού συστήματος παρακολούθησης. Τελικά στην υπάρχουσα μορφή του, το φορητό σύστημα παρακολούθησης θα έχει τη δυνατότητα ανίχνευσης και καταγραφής πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), Φορμαλδεΐδης ( $\text{HCHO}$ ) και διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει μικρός αριθμός διαθέσιμων αισθητήρων που να πληρούν τις προϋποθέσεις της χαμηλής τιμής, υψηλής αξιοπιστίας και δυνατότητας τοποθέτησης σε συσκευές μικρών συνολικά διαστάσεων.

Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις, αλλά και τη διαθεσιμότητα στην Ελληνική αγορά επιλέχθηκαν:

- ) Για τη μέτρηση της φορμαλδεΐδης ο αισθητήρας ο αισθητήρας **SEN0231 της εταιρείας DFrobot.**
- ) Ένας κοινός αισθητήρας για τη μέτρηση των διοξειδίου του άνθρακα και των πτητικών οργανικών ενώσεων, ο **CCS811 της εταιρείας Adafruit.**



*Εικόνα 4.1.α: Αισθητήρας CCS811*



*Εικόνα 4.1.β: Αισθητήρας SEN0231*

## **A2) Αισθητήρες μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων**

Στο φορητό σύστημα καταγραφής της ποιότητας του αέρα επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν και αισθητήρες μέτρησης της συγκέντρωσης μάζας ή αριθμού των αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς είναι γνωστές οι επιδράσεις της σωματιδιακής μάζας σε ευπαθή υλικά, που κυμαίνονται από μεταβολές στην αισθητική εικόνα έως μηχανικές βλάβες και μεταφορά επικίνδυνων χημικών ενώσεων. Οι αισθητήρες που μελετήθηκαν πληρούσαν τα χαρακτηριστικά που απαιτήθηκαν και για τους αισθητήρες αέριων ρύπων, δηλαδή μικρό μέγεθος, χαμηλό θόρυβο και χαμηλό κόστος. Πρέπει να σημειωθεί ότι αισθητήρες αιωρούμενων σωματιδίων χαμηλού κόστους και μεγέθους χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία πέντε χρόνια και οι εφαρμογές πολλαπλασιάζονται καθημερινά. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην ανίχνευση του σκεδαζόμενου φωτός από τα σωματίδια που εισέρχονται στο εσωτερικό του αισθητήρα. Οι αισθητήρες παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα σε μονάδες τάσης (αναλογική έξοδος) ή αναλογίας χρόνου που λαμβάνονται οι παλμοί από το σκεδαζόμενο φως (ψηφιακή έξοδος). Οι αισθητήρες δεν διαθέτουν αντλία και ο αέρας εισέρχεται και εξέρχεται από το εσωτερικό τους με χρήση μικρού ανεμιστήρα. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται θερμαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση για να βοηθηθεί η διάχυση του αέρα μέσα στον αισθητήρα.

Για την επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων εξετάστηκε η σχετική βιβλιογραφία στην οποία υπάρχει τα τελευταία χρόνια σημαντικός αριθμός αναφορών για τη χρήση, αξιολόγηση και καλή λειτουργία των χαμηλού κόστους αισθητήρων αιωρούμενων σωματιδίων. Οι εφαρμογές των αισθητήρων μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων αυξάνονται συνεχώς και έχουν γίνει αρκετές μελέτες αξιολόγησης τους κυρίως σε εξωτερικά περιβάλλοντα (Badura et al., 2018, Bai et al., 2020, Bullot e al., 2019, Feenstra et al., 2019, Johnson et al., 2018, Lee et al., 2020, Li et al., 2020, Liu et al., 2019, Markowicz et al., 2020, Sayahi et al., 2019) και λιγότερο σε εσωτερικά περιβάλλοντα (Zou et al., 2020), ενώ δεν λείπουν και οι αξιολογήσεις αποκλειστικά σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες



(Kuula et al., 2020, Manikonda et al., 2016). Τελικά με κριτήρια την αξιοπιστία, το κόστος, την διαθεσιμότητα στην Ελληνική αγορά και τη συμβατότητα με τα υπόλοιπα στοιχεία του φορητού συστήματος επιλέχθηκαν οι:

- ) **SEN0177 της εταιρείας DFRobot**
- ) **GP2Y1014AU της εταιρείας Sharp**



**Εικόνα 4.2.α:** Αισθητήρας GP2Y1014AU



**Εικόνα 4.2.β:** Αισθητήρας SEN0177

Για τη μέτρηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, (θερμοκρασία και υγρασία) επιλέχθηκε ο αισθητήρας DHT22 και AM2302 της εταιρείας Adafruit.

Επιπλέον μέσω της έρευνας αγοράς που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκε ότι οι αισθητήρες SEN0177 για αιωρούμενα σωματίδια και SEN0231 μπορούν να διατεθούν και συνδεδεμένοι μαζί και επιλέχθηκε να δοκιμαστεί το φορητό σύστημα και με αυτή τη συνδεσμολογία.

### **Γ) Υλοποίηση του φορητού συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.**

Η υλοποίηση του φορητού συστήματος θα πραγματοποιηθεί στην ιδιαίτερα διαδεδομένη πλατφόρμα μικροηλεκτρονικών συστημάτων ανοιχτού κώδικα Arduino. Οι μητρικές Arduino διαθέτουν μεγάλη γκάμα μικροϋπολογιστών και ελεγκτών και είναι εξοπλισμένες με αναλογικές και ψηφιακές θύρες εισόδου και εξόδου. Ο προγραμματισμός πραγματοποιείται σε γλώσσες C και C++ διευκολύνοντας σημαντικά την εύκολη σύνδεση και επικοινωνία πληθώρας συσκευών. Οι αισθητήρες που επιλέχθηκαν είναι συμβατοί με την πλατφόρμα Arduino. Οι μικροϋπολογιστές Raspberry Pi διαθέτουν όλα τα εξαρτήματα ενός πλήρους υπολογιστή (μικροεπεξεργαστές, μνήμες, θύρες εισόδου/εξόδου κλπ.) συνδεδεμένα σε μία μοναδική ηλεκτρονική πλακέτα.. Οι αισθητήρες συνδέονται με την εκάστοτε πλατφόρμα και πραγματοποιείται ο κατάλληλος προγραμματισμός για τη μετατροπή του ψηφιακού ή αναλογικού σήματος σε συγκέντρωση αέριων ρύπων ή σωματιδίων. Πριν από τη χρήση τους, οι αισθητήρες βαθμονομούνται σε διαφορετικές συνθήκες (εσωτερικό ή

εξωτερικό περιβάλλον, ποικίλες τιμές συγκεντρώσεων) με πρότυπα όργανα που διαθέτει το Πολ. Κρήτης. Οι εξισώσεις βαθμονόμησης παρέχονται στο εγχειρίδιο χρήσης κάθε ξεχωριστού συστήματος. Η διαδικασία της βαθμονόμησης συνίσταται να επαναλαμβάνεται τουλάχιστον μία φορά κάθε τρίμηνο.

### **Γ1) Σχεδιασμός και Αρχιτεκτονική φορητού συστήματος**

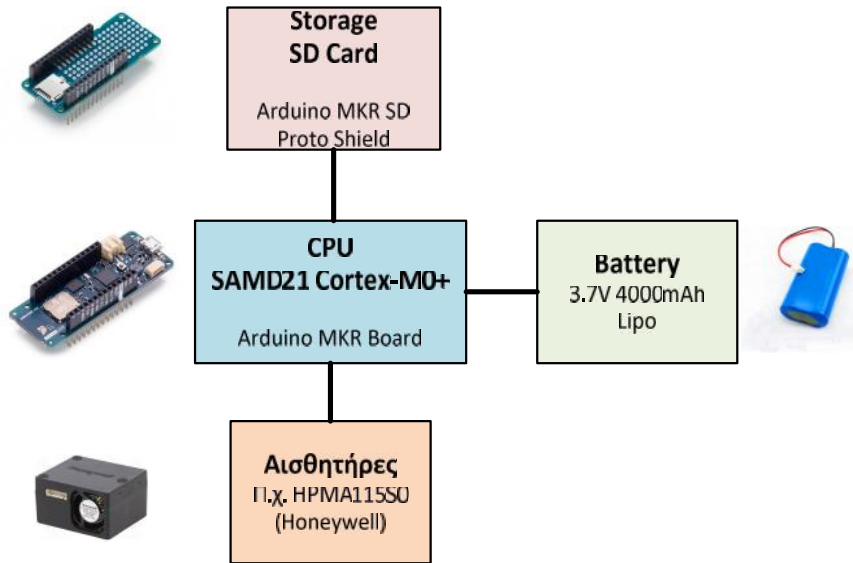
Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του φορητού συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα είναι η ενεργειακή του αυτονομία. Το σύστημα θα πρέπει να μπορεί λειτουργεί αυτόνομα (με μπαταρία) για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επίσης το σύστημα δεν απαιτείται να εκτελεί επεξεργαστικά ενεργοβόρες διεργασίες αλλά μόνο καταγραφή (read & store) των τιμών που λαμβάνει από τους συνδεδεμένους αισθητήρες σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Από άποψη υλικού (hardware) το φορητό σύστημα αποτελείται κύρια 2 υποσυστήματα (boards) που αποτελούν και τα βασικά δομικά μέρη του. Αυτά είναι:

- ) **Μονάδα ελέγχου (control unit).** Η μονάδα ελέγχου η οποία αναπτύχθηκε με χρήση του μοντέλου Arduino MKR και χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή “SAMD21 Cortex-M0+” ο οποίος είναι ένας ARM μικροελεγκτής 32bit χαμηλής κατανάλωσης.
- ) **Αποθηκευτικό μέσο.** Η μονάδα αποθήκευσης με τη χρήση της πλακέτας υλικού (hardware board) “Arduino MKR SD Proto Shield”. Με αυτό τον τρόπο το φορητό σύστημα αποκτά τη δυνατότητα της τοπικής αποθήκευσης των δεδομένων που συλλέγει από τους αισθητήρες οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μαζί του

Επιπρόσθετα διαθέτει και 2 αποσπώμενα υποσυστήματα:

- ) Τη **μπαταρία τροφοδοσίας** καθώς λόγω της φορητότητας του συστήματος δεν έχει συνεχή τροφοδοσία από εξωτερικό τροφοδοτικό
- ) Οι αισθητήρες που είναι συνδεδεμένοι στο σύστημα (πχ σωματιδίων, θερμοκρασίας, CO2 κτλ).



*Εικόνα 4.3: Βασικά μέρη φορητού συστήματος μέτρησης ποιότητας αέρα*

### Εξασφάλιση μικρού μεγέθους συστήματος

Ένας από τους βασικούς λόγους που επιλέχθηκε η χρήση του Arduino MKR έναντι άλλων λύσεων υλικού (όπως του Raspberry Pi), είναι οι μικρές διαστάσεις των πλακετών υλικού τους, καθιστώντας τα πολύ καλές λύσεις για φορητά συστήματα.

	ARDUINO MKR	Raspberry Pi (Model 3 B+)
<b>Μήκος (mm)</b>	67.64	85
<b>Πλάτος (mm)</b>	25	56
<b>Βάρος (gr)</b>	32+13 (SD Shield)	50

## Εξασφάλιση ενεργειακής αυτονομίας συστήματος

Για τη διατήρηση της ενεργειακής αυτονομίας του συστήματος για μεγάλη διάρκεια, το σύστημα παραμένει ανενεργό και ενεργοποιείται “ξυπνά” μόνο όταν είναι να συλλέξει και να αποθηκεύσει μετρήσεις από τους αισθητήρες. Δεδομένου ότι ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα για να συλλέξει δεδομένα (wakeur, sensor warmup, readings, storage) είναι πολύ μικρός (~30 secs) αν υποθέσουμε ότι η απαιτούμενη συχνότητα δειγματοληψίας είναι 1 μέτρηση ανά 10 λεπτά, τότε το σύστημα παραμένει ανενεργό το 95% του χρόνου λειτουργίας του (χρόνος λειτουργίας:  $6 \cdot 30 / 3600$ )

Με αυτό τον τρόπο μειώνεται στο ελάχιστο η κατανάλωση ενέργειας και έτσι μεγιστοποιείται η ενεργειακή αυτονομία του.

Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται δύο βασικές λειτουργίες που προσφέρει η πλατφόρμα υλικού:

- )] **RTC (real time clock) “ρολόι πραγματικού χρόνου”**: η πλακέτα υλικού διαθέτει rtc ώστε να κρατάει την παρούσα ώρα χωρίς να υπάρχει η ανάγκη το σύστημα να συγχρονίζει την ώρα του (μέσω internet). Αυτό χρησιμοποιείται για να καταγράφεται η ώρα που γίνεται η καταγραφή των μετρήσεων αλλά και για να μπορεί να “ξυπνά” το σύστημα όταν είναι σε κατάσταση ύπνου (sleep mode)
- )] **Sleep mode “κατάσταση ύπνου”**, ο επεξεργαστής σε αυτή την κατάσταση, “απενεργοποιείται” (διατηρώντας μόνο τις πολύ βασικές λειτουργίες του) ελαχιστοποιώντας έτσι τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος. Για να επανέλθει σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, το ενσωματωμένο realtime clock λειτουργεί ως ξυπνητήρι.

## Δ) Αξιολόγηση καλής λειτουργίας αισθητήρων αιωρούμενων σωματιδίων.

Για να διαπιστωθεί όμως η λειτουργικότητα των αισθητήρων και να αξιολογηθεί η δυνατότητα επικοινωνίας τους με μικροϋπολογιστές Raspberry Pi και την πλατφόρμα Arduino, χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες σωματιδίων που διέθετε το εργαστήριο Ατμοσφαιρικών αιωρούμενων Σωματιδίων του Πολ. Κρήτης και χρησιμοποιούν την ίδια αρχή λειτουργίας με τους αισθητήρες του συστήματος παρακολούθησης της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ\_II. Συγκεκριμένα πρόκειται για τον αισθητήρα PMS 5003 της εταιρείας Plantower και το αισθητήρα HPMA115S0-XXX της εταιρείας Honeywell. Ο αισθητήρας PMS 5003 είναι κατασκευαστικά συνδεδεμένος σε Arduino (η συσκευασία του περιλαμβάνει έτοιμη τη σύνδεση καθώς και πρόγραμμα επικοινωνίας με H/Y). Ο αισθητήρας HPMA115S0-XXX συνδέθηκε με μικροϋπολογιστή Raspberry Pi και ο προγραμματισμός του έγινε στο Πολ. Κρήτης. Έχουν αναπτυχθεί

διάφορες μεθοδολογίες αξιολόγησης των αισθητήρων χαμηλού κόστους που περιλαμβάνουν συγκρίσεις με όργανα αναφοράς σε ποικίλα περιβάλλοντα ή θαλάμους ελεγχόμενων συνθηκών (Haridin et al., 2019, Kelly et al., 2017, Malings et al., 2020, Qin et al., 2020, Sayahi et al., 2019), καθώς και μελέτες βελτίωσης της απόδοσης τους (Brattich et al., 2020, Karagulian et al., 2019). Για τη συγκεκριμένη αξιολόγηση επιλέχθηκε η σύγκριση σε πραγματικό περιβάλλον με προτυπα όργανα αναφοράς για τη μέτρηση συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων.

#### **Δ1) Αισθητήρας PMS 5003 της εταιρείας Plantower**

Ο αισθητήρας παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής συγκέντρωσης μάζας και αριθμού για σωματίδια  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  και  $PM_{1.0}$ . Η μέτρηση των σωματιδίων αφορά μόνο τα σωματίδια  $PM_{2.5}$  και τα υπόλοιπα κλάσματα προσδιορίζονται με ειδικό λογισμικό και με βάση τη συνολική μάζα και αριθμό σωματιδίων που διέρχονται από το εσωτερικό του αισθητήρα.



*Εικόνα 4.3.α: Πλαϊνή όψη αισθητήρα PMS 5003*

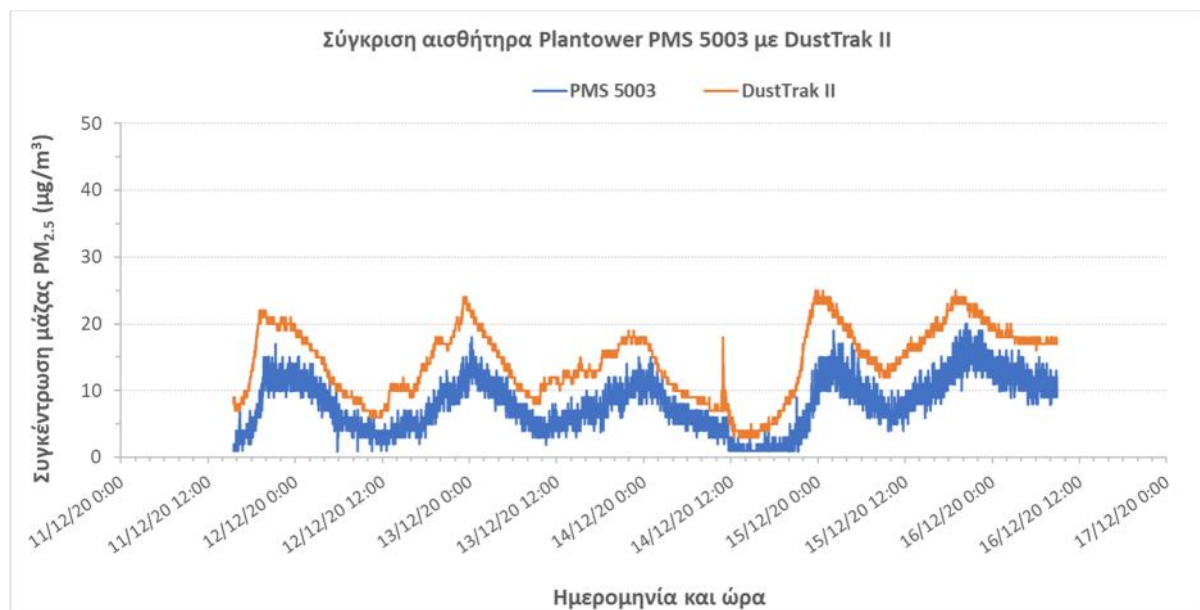


*Εικόνα 4.3.β: Άνω όψη αισθητήρα PMS 5003*

Η αξιολόγηση του αισθητήρα έγινε με σύγκριση των μετρήσεων που παρέχει με τους αναλυτές μάζας DustTrak II 8530 και 8530 EP και DustTrak DRX της εταιρείας TSI. Ο συγκεκριμένος αναλυτής χρησιμοποιήθηκαν για μέρος των πειραματικών μετρήσεων στο IMK και μελλοντικά δύναται να χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων που τοποθετήθηκαν στο IMK. Οι αναλυτές DustTrak II και DustTrak DRX είχαν βαθμονομηθεί με πρότυπο όργανο υπολογισμού συγκέντρωσης μάζας μέσω συλλογής σε φίλτρα (Leckel LVS6-RV). Διεξήχθησαν δύο διαφορετικές περιόδους συγκρίσεων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

### 1) Σύγκριση για 4 ημέρες – Νοέμβριος 2020.

Χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής DustTrak II με κεφαλή PM<sub>2.5</sub> και ο αισθητήρας με τον αναλυτή τοποθετήθηκαν σε εσωτερικό περιβάλλον και συγκεκριμένα σε εργαστήριο του Πολ. Κρήτης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.1. Διαπιστώθηκε ότι ο συγκεκριμένος αισθητήρας υποτιμά τις τιμές της συγκέντρωσης μάζας και απαιτείται διόρθωση των τιμών του με βάση τιμές πρότυπων οργάνων μέτρησης. Οι τιμές όμως που παρέχει ο αισθητήρας ακολουθούν την τάση των τιμών του αναλυτή μάζας παρουσιάζοντας τις ίδιες διακυμάνσεις.

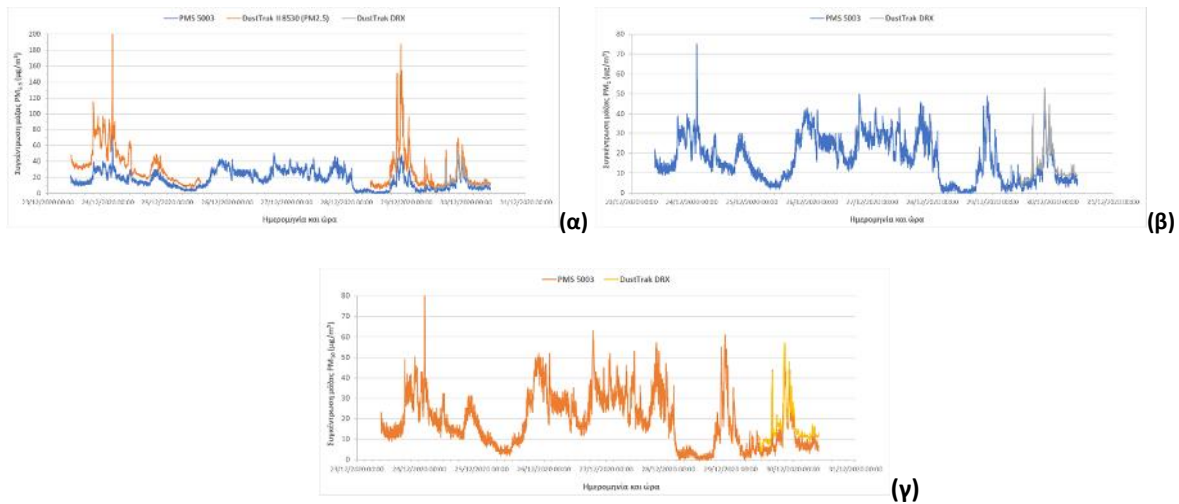


**Διάγραμμα 4.1:** Συγκριτικές μετρήσεις του αισθητήρα PMS 5003 (Plantower) με το φορητό αναλυτή μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων DustTrak II (TSI).

### 2) Σύγκριση για 2 εβδομάδες – Δεκέμβριος-Ιανουάριος 2020.

Η σύγκριση έγινε ανάμεσα στον αισθητήρα PMS 5003 και τους αναλυτές μάζας DustTrak II και DustTrak DRX. Τα όργανα τοποθετήθηκαν πάλι σε εργαστήριο του Πολ. Κρήτης αλλά σε αυτή την περίπτωση μετρούσαν στο εξωτερικό περιβάλλον. Τα παράθυρα στο εργαστήριο παρέμεναν κλειστά και μέσω ειδικών οπών και σωλήνων από ανοξείδωτο ατσάλι τραβούσαν αέρα στο εσωτερικό τους. Το PMS 5003 δεν διαθέτει αντλία και είχε προβλεφθεί μικρό άνοιγμα σε κάποιο από τα παράθυρα ώστε να δέχεται αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον. Κατά την πρώτη εβδομάδα ο αισθητήρας

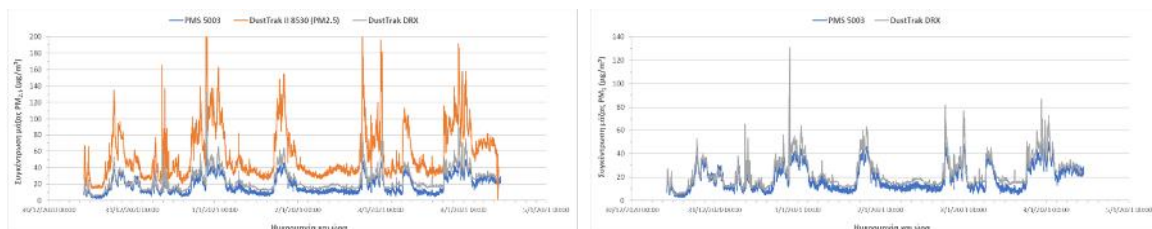
λειτούργησε παράλληλα με το DustTrak II για 50 ώρες και με το DustTrak DRX για 23 ώρες και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.2.

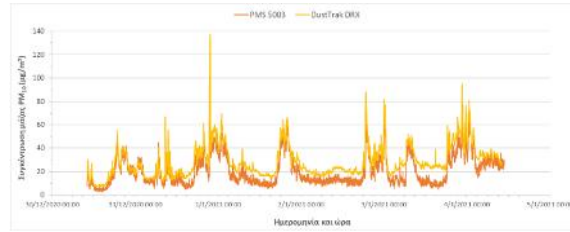


**Διάγραμμα 4.2:** Συγκριτικές μετρήσεις του αισθητήρα PMS 5003 (*Plantower*) με το φορητό αναλυτή μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων DustTrak II (*TSI*) για σωματίδια  $PM_{2.5}$  (α) και με τον αναλυτή DustTrak DRX για σωματίδια  $PM_{10}$  (β) και  $PM_1$  (γ) (1<sup>η</sup> εβδομάδα μετρήσεων).

Σε όλες τις περιπτώσεις ο αισθητήρας PMS 5003 παρουσιάζει μικρότερες συγκεντρώσεις αλλά ακολουθεί πάντα τη διακύμανση των συγκεντρώσεων που καταγράφουν οι φορητοί αναλυτές μάζας DustTrak. Μάλιστα στην περίπτωση των σωματιδίων  $PM_{2.5}$  δεν καταγράφονται από τον αισθητήρα οι στιγμιαίες ακραίες τιμές που ξεπερνούν τα 200  $\mu g/m^3$  και πιθανότατα οφείλονται σε μη γρήγορη απόκριση του αναλυτή DustTrak II.

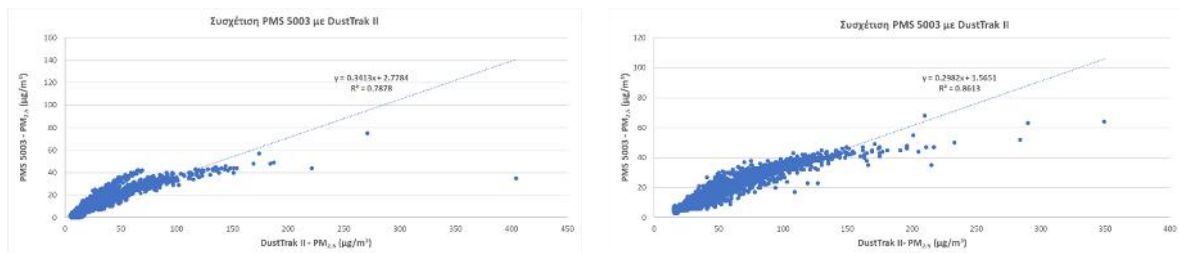
Κατά τη δεύτερη εβδομάδα, τα τρία όργανα λειτούργησαν ταυτόχρονα, χωρίς διακοπές για πέντε ημέρες (30/12/2020-04/01/2021). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.3.





**Διάγραμμα 4.3:** Συγκριτικές μετρήσεις του αισθητήρα PMS 5003 (Plantower) με το φορητό αναλυτή μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων DustTrak II (TSI) για σωματίδια  $PM_{2.5}$  (α) και με τον αναλυτή DustTrak DRX για σωματίδια  $PM_{10}$  (β) και  $PM_1$  (γ) 2<sup>η</sup> εβδομάδα μετρήσεων).

Σε μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων η εικόνα είναι η ίδια με την πρώτη εβδομάδα, με αποτέλεσμα η λειτουργία του αισθητήρα να μπορεί να χαρακτηριστεί ικανοποιητική. Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζεται η σύγκριση του PMS 5003 με το DustTrak II για σωματίδια  $PM_{2.5}$  και για τις κοινές χρονικές περιόδους μετρήσεων.



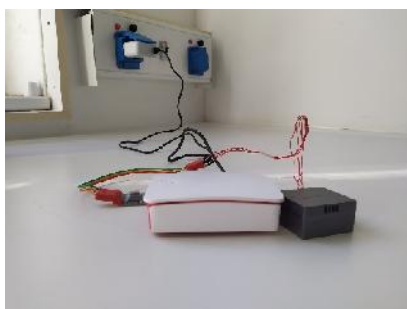
**Διάγραμμα 4.4:** Συσχέτιση του αισθητήρα PMS 5003 (Plantower) με το φορητό αναλυτή μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων DustTrak II (TSI) για σωματίδια  $PM_{2.5}$ .

Τα δύο όργανα παρουσιάζουν υψηλή γραμμική συσχέτιση με  $R^2=0.79$  για τις μετρήσεις της πρώτης εβδομάδας και  $R^2=0.86$  για τη δεύτερη εβδομάδα. Επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορθά βαθμονομημένοι φορητοί αναλυτές για διόρθωση των τιμών των αισθητήρων χαμηλού κόστους, με την προϋπόθεση περιόδων ταυτόχρονων κοινών μετρήσεων.

## Δ2) Αισθητήρας HPMA11550-XXX της εταιρείας Honeywell

Παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων  $PM_{2.5}$  και με χρήση κατάλληλου λογισμικού και προσδιορισμό συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων  $PM_{10}$ . Ο αισθητήρας συνδέθηκε με Raspberry Pi και χρησιμοποιήθηκε θύρα ethernet για μετάδοση των δεδομένων μέσω τοπικού δικτύου.



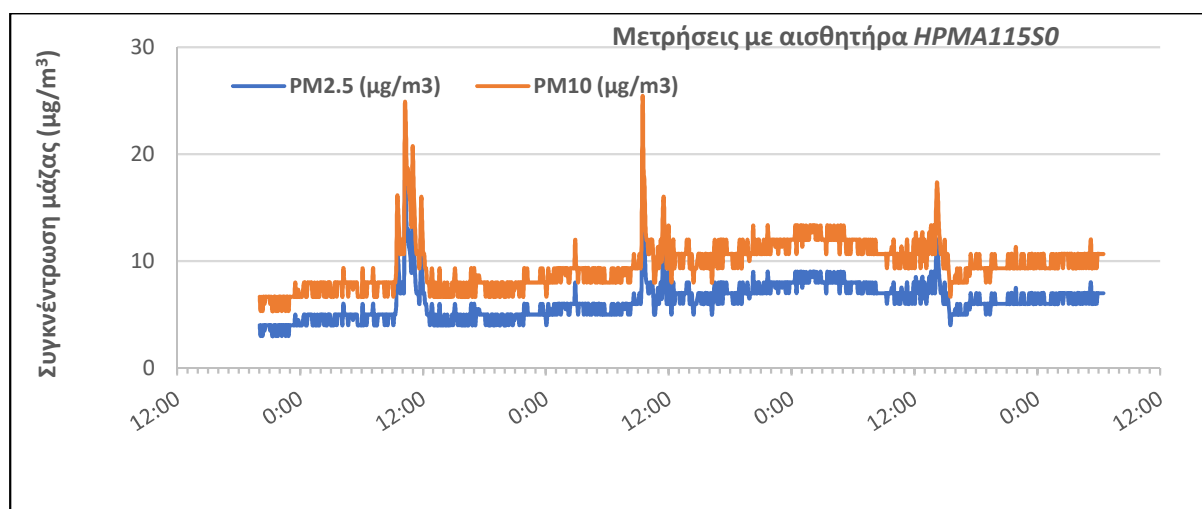


**Εικόνα 4.4.α:** Αισθητήρας HPMA11550 με Raspberry Pi



**Εικόνα 4.4.β:** Μέγεθος αισθητήρα HPMA11550

Το σύστημα εγκαταστάθηκε μόνιμα στην αίθουσα Πορταλάκη στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης για τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα χαρακτηριστικές συγκεντρώσεις μάζας σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub> για το χρονικό διάστημα 26/09/2019-30/09/2019. Συνολικά το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία για 17 μήνες, κάτι που δείχνει τη δυνατότητα λειτουργίας απρόσκοπτα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.



**Διάγραμμα 4.5:** Μετρήσεις συγκέντρωσης μάζας του αισθητήρα HPMA11550 (Honeywell) στο Ιστορικό Μουσείο Κρήτης για το χρονικό διάστημα 26/09/2019-30/09/2019.

### **Δ3) Συμπεράσματα**

Α) Η χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία συστημάτων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και μεγέθους που μπορούν να τοποθετηθούν σε πολλά διαφορετικά σημεία στο εσωτερικό χώρων φύλαξης ευπαθών έργων τέχνης. Το μικρό μέγεθος καθιστά δυνατή την

τοποθέτηση και εντός μικροπεριβαλλοντικών προθηκών ή σε κιβώτια κατά τη μεταφορά έργων τέχνης.

Β) Το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα αποστολής δεδομένων είτε ασύρματα είτε ενσύρματα. Επιπλέον διατίθεται η δυνατότητα χρήσης καρτών μνήμης για αποθήκευση των δεδομένων όταν το φορητό σύστημα είναι εκτός δικτύου.

Γ) Απαιτείται βαθμονόμηση του συστήματος με πρότυπα όργανα, στο χώρο εγκατάστασης ή λειτουργίας του εφόσον είναι αυτό εφικτό. Οι αισθητήρες χαμηλού κόστους μπορούν να βαθμονομηθούν με αναλυτές μάζας συνεχούς καταγραφής δεδομένων καθώς εμφανίζουν ικανοποιητική συμφωνία σε παράλληλες μετρήσεις.

Δ) Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να διαπιστωθεί ο χρόνος ζωής των αισθητήρων. Οι μετρήσεις στα πλαίσια της πράξης ΜΟΥΣΕΙΑ II έδειξαν ότι ο χρόνος ζωής τους είναι αρκετός ώστε να διατηρείται διαχειρίσιμο το κόστος χρήσης και λειτουργίας συστημάτων με παρόμοιους αισθητήρες.

## **Βιβλιογραφία**

Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient PM<sub>2.5</sub> monitoring. *Journal of Sensors*, 2018.

Bai, L., Huang, L., Wang, Z., Ying, Q., Zheng, J., Shi, X., & Hu, J. (2020). Long-term field evaluation of low-cost particulate matter sensors in Nanjing. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(2), 242-253.

Brattich, E., Bracci, A., Zappi, A., Morozzi, P., Di Sabatino, S., Porcù, F., ... & Tositti, L. (2020). How to get the best from low-cost particulate matter sensors: Guidelines and practical recommendations. *Sensors*, 20(11), 3073.

Bulot, F. M., Johnston, S. J., Basford, P. J., Easton, N. H., Apetroaie-Cristea, M., Foster, G. L., ... & Loxham, M. (2019). Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment. *Scientific reports*, 9(1), 1-13.

Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., ... & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?. *Environment international*, 99, 293-302.

Feenstra, B., Papapostolou, V., Hasheminassab, S., Zhang, H., Der Boghossian, B., Cocker, D., & Polidori, A. (2019). Performance evaluation of twelve low-cost PM<sub>2.5</sub> sensors at an ambient air monitoring site. *Atmospheric Environment*, 216, 116946.

Hapidin, D. A., Saputra, C., Maulana, D. S., Munir, M. M., & Khairurrijal, K. (2019). Aerosol chamber characterization for commercial particulate matter (PM) sensor evaluation, *Aerosol Air Qual. Res.*, 19, 181-194.

- Johnson, K. K., Bergin, M. H., Russell, A. G., & Hagler, G. S. W. (2018). Field test of several low-cost particulate matter sensors in high and low concentration urban environments, *Aerosol Air Qual. Res.*, *18*, 565–578.
- Jovašević-Stojanović, M., Bartonova, A., Topalović, D., Lazović, I., Pokrić, B., & Ristovski, Z. (2015). On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter. *Environmental Pollution*, *206*, 696-704.
- Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., ... & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, *10*(9), 506.
- Kelly, K. E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., ... & Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental pollution*, *221*, 491-500.
- Kuula, J., Mäkelä, T., Aurela, M., Teinilä, K., Varjonen, S., González, Ó., & Timonen, H. (2020). Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, *13*(5), 2413-2423.
- Lee, H., Kang, J., Kim, S., Im, Y., Yoo, S., & Lee, D. (2020). Long-term evaluation and calibration of low-cost particulate matter (pm) sensor. *Sensors*, *20*(13), 3617.
- Li, J., Mattewal, S. K., Patel, S., & Biswas, P. (2020). Evaluation of nine low-cost-sensor-based particulate matter monitors. *Aerosol and Air Quality Research*, *20*(2), 254-270.
- Liu, H. Y., Schneider, P., Haugen, R., & Vogt, M. (2019). Performance assessment of a low-cost PM<sub>2.5</sub> sensor for a near four-month period in Oslo, Norway. *Atmosphere*, *10*(2), 41.
- Lowther, S. D., Jones, K. C., Wang, X., Whyatt, J. D., Wild, O., & Booker, D. (2019). Particulate matter measurement indoors: A review of metrics, sensors, needs, and applications. *Environmental science & technology*, *53*(20), 11644-11656.
- Malings, C., Tanzer, R., Haurlyuk, A., Saha, P. K., Robinson, A. L., Presto, A. A., & Subramanian, R. (2020). Fine particle mass monitoring with low-cost sensors: Corrections and long-term performance evaluation. *Aerosol Science and Technology*, *54*(2), 160-174.
- Manikonda, A., Zíková, N., Hopke, P. K., & Ferro, A. R. (2016). Laboratory assessment of low-cost PM monitors. *Journal of Aerosol Science*, *102*, 29-40.
- Markowicz, K. M., & Chiliński, M. T. (2020). Evaluation of two low-cost optical particle counters for the measurement of ambient aerosol scattering coefficient and Ångström exponent. *Sensors*, *20*(9), 2617.
- Qin, X., Hou, L., Gao, J., & Si, S. (2020). The evaluation and optimization of calibration methods for low-cost particulate matter sensors: Inter-comparison between fixed and mobile methods. *Science of The Total Environment*, *715*, 136791.
- Rai, A. C., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A. N., Di Sabatino, S., Ratti, C., ... & Rickerby, D. (2017). End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of The Total Environment*, *607*, 691-705.
- Sayahi, T., Butterfield, A., & Kelly, K. E. (2019). Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*, *245*, 932-940.

Sayahi, T., Kaufman, D., Becnel, T., Kaur, K., Butterfield, A. E., Collingwood, S., ... & Kelly, K. E. (2019). Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*, 255, 113131.

Zou, Y., Young, M., Wickey, M., May, A., & Clark, J. D. (2020). Response of eight low-cost particle sensors and consumer devices to typical indoor emission events in a real home (ASHRAE 1756-RP). *Science and Technology for the Built Environment*, 26(2), 237-249.