



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
**ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



**Αυτοματοποιημένο Σύστημα Καταγραφής και Παρακολούθησης Αιωρούμενων
Σωματιδίων PM2.5**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : ΚΟΛΙΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΓΓΕΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΡΤΑ 2021

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

ΑΡΤΑ/...../20.....

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1.

2.

3.

‘Δηλώνω υπεύθυνα ότι το παρόν κείμενο αποτελεί προϊόν προσωπικής μελέτης και εργασίας και πως όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγγραφή της δηλώνονται είτε στις παραπομπές, είτε στη βιβλιογραφία. Γνωρίζω ότι η λογοκλοπή αποτελεί σοβαρότατο παράπτωμα και είμαι ενήμερος για την επίπτωση των νομικών συνεπειών’

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον κύριο Κωνσταντίνο Αγγέλη για τη βοήθεια που μου προσέφερε προκειμένου να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ABSTRACT

Although Europe's air quality has improved significantly in recent decades, air pollution remains the leading environmental factor associated with preventable diseases, with premature mortality in the European Union and still has significant negative effects to a large extent of the natural environment. According to the OECD, "air pollution in cities is to become the leading environmental cause of death worldwide by 2050, overcoming the lack of clean water and sanitation" [52].

Very small particles are suspended in the atmosphere which are not visible to the human eye. Unfortunately, however, they significantly damage the environment and human health. In particular, they are responsible for a number of respiratory and heart diseases such as worsening of asthma, increased respiratory symptoms (eg cough and respiratory pain), worsening of heart problems, bronchitis, and vision problems. In addition, suspended particles are harmful due to their very composition, as they may contain heavy metals and other toxic organic compounds [9].

In this work we create an automated system for measuring the suspended particles in the atmosphere. The system is based on the Arduino UNO microcontroller and the measuring sensor on which it is based is the DF ROBOT SN0177. This sensor manages to measure the concentration of suspended particles in the atmosphere using the phenomenon of light scattering.

The measurements of the concentrations were made in the city of Arta and specifically in the junction of Evzoni, a point with a particularly increased traffic load, for the data of the city. The purpose of the measurements was to determine whether the particulate load in the specific area is increased, above the limits established by law and whether it is a danger to the residents of the area.

ΣΥΝΟΨΗ

Αν και η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα της Ευρώπης έχει βελτιωθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, η ατμοσφαιρική ρύπανση παραμένει ο κύριος περιβαλλοντικός παράγοντας που συνδέεται με ασθένειες οι οποίες μπορούν να προληφθούν, με πρόωρη θνησιμότητα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και εξακολουθεί να έχει σημαντικές αρνητικές επιδράσεις σε μεγάλο μέρος του φυσικού περιβάλλοντος. Κατά τον ΟΟΣΑ, «η ατμοσφαιρική ρύπανση στις πόλεις πρόκειται να καταστεί η πρωταρχική περιβαλλοντική αιτία θνησιμότητας παγκοσμίως έως το 2050, ξεπερνώντας την έλλειψη καθαρού νερού και αποχέτευσης» [52].

Στην ατμόσφαιρα αιωρούνται σωματίδια πολύ μικρού μεγέθους τα οποία δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι. Δυστυχώς όμως βλάπτουν σημαντικά το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ειδικότερα, ευθύνονται για ένα πλήθος αναπνευστικών και καρδιακών ασθενειών όπως επιδείνωση του άσθματος, αύξηση των αναπνευστικών συμπτωμάτων (π.χ. βήχας και πόνος στην αναπνοή), επιδείνωση καρδιολογικών προβλημάτων, βρογχίτιδα, όπως και προβλήματα στην όραση. Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια βλάπτουν λόγω της ίδιας της σύστασής τους, γιατί μπορεί να περιέχουν βαριά μέταλλα και άλλες τοξικές οργανικές ενώσεις [9].

Στην εργασία αυτή δημιουργούμε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Το σύστημα βασίζεται στον μικροελεγκτή Arduino UNO και ο αισθητήρας μέτρησης πάνω στον οποίο βασίζεται είναι ο SN0177 της εταιρίας DF ROBOT. Ο αισθητήρας αυτός, καταφέρνει να μετρά τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας το φαινόμενο της σκέδασης του φωτός.

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων έγιναν στην πόλη της Άρτας και συγκεκριμένα στον κόμβο Ευζώνων, ένα σημείο με ιδιαίτερα αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο, για τα δεδομένα της πόλης. Σκοπός των μετρήσεων ήταν να διαπιστωθεί κατά πόσο το σωματιδιακό φορτίο στην συγκεκριμένη περιοχή είναι αυξημένο, πάνω από τα όρια που έχουν θεσπιστεί με βάση την νομοθεσία και αν αποτελεί κίνδυνο για τους κατοίκους της περιοχής.

Περιεχόμενα

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ.....	12
1.1 Κύριοι ατμοσφαιρικοί ρύποι.....	12
1.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση και αιωρούμενα σωματίδια	12
1.3 Αιωρούμενα σωματίδια και αναπνευστικό σύστημα.....	13
1.4 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων.....	14
1.4.1 Διασυνοριακή μεταφορά αιωρούμενων σωματιδίων.....	15
1.4.2 Μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα	16
1.5 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	18
1.6 Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο - Οριακές τιμές ρύπων	19
1.6.1 Ελληνική νομοθεσία.....	20
1.7 Δείκτης ποιότητας αέρα - Air Quality Index (AQI) στην Ευρώπη.....	21
1.8 Δείκτης ποιότητας αέρα - Air Quality Index (AQI) στην Αμερική.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ	24
2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Νομοθετικό Ευρωπαϊκό Πλαίσιο (ΟΔΗΓΙΑ 2008/50/ΕΚ).....	24
2.2.1 Χαρακτηριστικές κατευθύνσεις οδηγίας 2008/50/ΕΚ	25
2.2.2 Μέθοδος αναφοράς για τη δειγματοληψία και τη μέτρηση των PM10	26
2.2.3 Απόδειξη ισοδυναμίας.....	26
2.2.4 Διαχωρισμός σε Ζώνες/ Οικισμούς.....	26
2.2.5 Σημεία δειγματοληψίας.....	27
2.3 Σταθμική μέθοδος.....	29
2.4 Ενεργητικές μέθοδοι (αυτόματα συστήματα καταγραφής) πέραν της σταθμικής.....	30
2.4.1 Κυριότερα πλεονεκτήματα / μειονέκτημα των AMS	30
2.4.2 Αυτόματα συστήματα καταγραφής αιωρούμενων σωματιδίων (AMS).....	30
2.4.3 Ισοδυναμία / Βαθμονόμηση AMS με RM	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΚΕΔΑΣΜΟ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	33
3.1 Υπόβαθρο	33
3.2 Περίληψη.....	35
3.3 Τεχνική σκέδασης φωτός λέιζερ	35
3.3.2 Η ανάπτυξη των οργάνων μέτρησης.....	38
3.3.3 Αξιολόγηση αισθητήρων σκέδασης φωτός.....	40

Β. ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ – ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	41
4.1 Τι θέλουμε να φτιάξουμε	41
4.2 Τι υλικά θα χρειαστούμε	41
4.3 Υλοποίηση	58
4.4 Συνδεσμολογία	61
.....	61
4.5 Προγραμματισμός της διάταξης	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Σωματιδιακή ύλη PM10 και PM2.5 (Πηγή: [53]).....	13
Εικόνα 2: PM10 από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. (Πηγή: [6]).....	13
Εικόνα 3: Ταξινόμηση σωματιδίων με βάση την ικανότητα διείσδυσής τους σε σχέση με το μέγεθός τους. (Πηγή: [50]).....	14
Εικόνα 4: Πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων στην ΕΕ (Πηγή: [12])	14
Εικόνα 5: Αιωρούμενα σωματίδια γύρης και αιθάλης από αυτοκίνητα, όπως φαίνονται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. (Πηγή: [11])	15
Εικόνα 6: Σχηματική παρουσίαση της συνεισφοράς των διαφορετικών πηγών στα επίπεδα PM10 σε μια αστική περιοχή (προσαρμοσμένο από WHO, 2006). Η διάστικτη γραμμή παρουσιάζει την μέση τιμή της κυψελίδας η οποία θα αναμενόταν από την εφαρμογή ενός περιφερειακού μοντέλου ποιότητας του αέρα.....	16
Εικόνα 7: Χαρακτηριστική εικόνα ανεμοθύελλας. (Πηγή: [54])	16
Εικόνα 8: Επεισόδιο μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα στις 17 Απριλίου 2005 όπως αποτυπώθηκε από τον δορυφόρο MODIS	17
Εικόνα 9: Κύριες επιπτώσεις στην υγεία των PM, NO ₂ , SO ₂ και O ₃ . (Πηγή [22]).....	18
Εικόνα 10: Πρότυπα της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα και κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ (Πηγές: Κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ για την ποιότητα του αέρα (2005) και οδηγία 2008/50/ΕΚ (οδηγία ΠΑΑ)).	20
Εικόνα 11: Χάρτης σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. (Πηγή: [10])	21
Εικόνα 12: Κατάσταση ποιότητας αέρα σε σχέση με την τιμή του δείκτη ποιότητας αέρα σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα. (Πηγή: [4])	22
Εικόνα 13: Κατάσταση ποιότητας αέρα σε σχέση με την τιμή του δείκτη ποιότητας αέρα και τις 24ωρες μέσες συγκεντρώσεις των PM2.5 σύμφωνα με τα αμερικανικά πρότυπα.. (Πηγή: [U.S. Environmental Protection Agency])	23
Εικόνα 14: Διάταξη με παθητικό συλλέκτη σωματιδίων τοποθετημένη σε δημοτικό στύλο φωτισμού έπειτα από συνεννόηση με τις κατά τόπους δημοτικές αρχές (Εύοσμος, Θεσσαλονίκη). (Πηγή: [9]).....	28
Εικόνα 15: Σταθμός παρατήρησης Am Neckartor στη Στουτγάρδη. (Πηγή: [3]).....	28
Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση σταθμικού προσδιορισμού μάζας αιωρούμενων σωματιδίων. (Πηγή: [6]).....	29
Εικόνα 17: Σκέδαση ακτίνας φωτός από σωματίδιο προερχόμενη από Laser. (Πηγή: [57]) ..	31
Εικόνα 18: Τα διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν όταν φως προσπίπτει πάνω σε ένα σωματίδιο. (Πηγή: [34])	36
Εικόνα 19: Σχεδιάγραμμα σκέδασης από ένα μόνο σωματίδιο. (Πηγή: [47])	37
Εικόνα 20: Καμπύλες σκέδασης Mie για σωματίδια διαφόρων μεγεθών. (Πηγή: [44])	37
Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης που αναπτύχθηκε από τους Grimm και Eatough (Πηγή: [30])	39
Εικόνα 22: Η πλακέτα ARDUINO UNO (Πηγή: [64]).....	41
Εικόνα 23: Αρχιτεκτονική ARDUINO UNO (Πηγή: [8]).....	42
Εικόνα 24: Χαρακτηριστικά ARDUINO UNO (Πηγή: [8])	42
Εικόνα 25: Το block diagram του μικροελεγκτή ATMEGA 328 (Πηγή: [63])	43
Εικόνα 26: Ο αισθητήρας μέτρησης συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων SEN0177 (Πηγή: [20]).....	43
Εικόνα 27: Σχηματικό διάγραμμα της δομής του αισθητήρα (Πηγή: [20])	44
Εικόνα 28: Πίνακας με τις προδιαγραφές του αισθητήρα SEN0177 (Πηγή: [20])	45

Εικόνα 29: Συνδεσμολογία του αισθητήρα SN0177 με το ARDUINO UNO με τη βοήθεια μιας IO expansion shield (Πηγή: [20]).....	45
Εικόνα 30: Συνδεσμολογία του αισθητήρα SN0177 με το ARDUINO UNO χωρίς τη χρήση IO expansion shield (Πηγή: [20]).....	45
Εικόνα 31: Διαστάσεις του αισθητήρα SEN0177 (Πηγή: [20])	46
Εικόνα 32: Παράδειγμα αποτελεσμάτων, όπως προκύπτουν από τη σειριακή του αισθητήρα SN0177 (Πηγή: [20]).....	46
Εικόνα 33: Ρολόι πραγματικού χρόνου RTC DS3232 (Πηγή: [21])	47
Εικόνα 34: Συνδεσμολογία RTC DS3232 με Arduino Uno (Πηγή: [21]).....	47
Εικόνα 35: Κύκλωμα λειτουργίας RTC DS3232 (Πηγή: [21])	48
Εικόνα 36: Διαμόρφωση Pin του RTC DS3232 (Πηγή: [21]).....	48
Εικόνα 37: Block Diagram του RTC DS3232 (Πηγή: [21])	48
Εικόνα 38: Αισθητήρας Θερμοκρασίας – Υγρασίας AM2301 (Πηγή: [17])	49
Εικόνα 39: Χαρακτηριστικά λειτουργίας του αισθητήρα AM2301 (Πηγή: [17]).....	49
Εικόνα 40: Διαστάσεις του αισθητήρα AM2301 (Πηγή: [17])	50
Εικόνα 41: Διαμόρφωση Pin του αισθητήρα AM2301 (Πηγή: [17]).....	50
Εικόνα 42: Η οθόνη 3.2’’ microLCD PICASO Display μLCD-32PTU (Πηγή: www.4dsystems.com.au).....	51
Εικόνα 43: Ο επεξεργαστής PICASO (Πηγή: [51])	52
Εικόνα 44: Η Θύρα micro-SD (Πηγή: [51]).....	53
Εικόνα 45: Το ηχείο της Οθόνης (Πηγή: [51]).....	53
Εικόνα 46: Η τροφοδοσία της οθόνης (Πηγή: [51]).....	54
Εικόνα 47: Ό,τι χρειαζόμαστε για να χειριστούμε την οθόνη (Πηγή: [51]).....	54
Εικόνα 48: Το περιβάλλον ανάπτυξης Workshop4 IDE Software (Πηγή: https://4dsystems.com.au/workshop4)	55
Εικόνα 49: Με απλά βήματα μπορεί κάποιος να αρχίσει να χρησιμοποιεί την οθόνη (Πηγή: [51]).....	56
Εικόνα 50: Μηχανικές διαστάσεις οθόνης (Πηγή: [51]).....	57
Εικόνα 51: Ο Αισθητήρας Θερμοκρασίας - Υγρασίας AM2301	58
Εικόνα 52: Προαιρετική μονάδα εξωτερικής παροχής ενέργειας μέσω μπαταρίας 9V	58
Εικόνα 53: Το Ρολόι πραγματικού χρόνου RTC DS3232.....	59
Εικόνα 54: Ο Μικροελεγκτής ARDUINO UNO.....	59
Εικόνα 55: Ο Αισθητήρας SEN0177 μαζί με τον ειδικό αντάπτορά του	59
Εικόνα 56: Η Οθόνη 3.2’’ microLCD PICASO Display μLCD-32PTU	60
Εικόνα 57: Η ολοκληρωμένη διάταξη.....	60
Εικόνα 57: Η συνδεσμολογία της διάταξης.....	61
Εικόνα 58: Το σημείο όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (μαύρος κύκλος)	63
Εικόνα 59: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m ³) για την Τετάρτη 01/07/2020.....	64
Εικόνα 60: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Τετάρτη 01/07/2020	65
Εικόνα 61: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m ³) για την Πέμπτη 09/07/2020.	66
Εικόνα 62: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Τετάρτη 01/07/2020	67
Εικόνα 63: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m ³) για την Τρίτη 14/07/2020.	68

Εικόνα 64: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Τρίτη 14/07/2020.....	69
Εικόνα 65: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m ³) για την Κυριακή 02/08/2020.	70
Εικόνα 66: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Κυριακή 02/08/2020.....	71
Εικόνα 67: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m ³) για την Δευτέρα 03/08/2020.....	72
Εικόνα 68: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Δευτέρα 03/08/2020	73
Εικόνα 69: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m ³) για την Παρασκευή 07/08/2020.	74
Εικόνα 70: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Παρασκευή 07/08/2020.....	75
Εικόνα 71: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m ³) για το Σάββατο 08/08/2020.	76
Εικόνα 72: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για το Σάββατο 08/08/2020.....	77

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

1.1 Κύριοι ατμοσφαιρικοί ρύποι

- Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) απαρτίζονται από στερεά και υγρά σωματίδια αιωρούμενα στον αέρα. Αυτά περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα ουσιών, από θαλάσσιο αλάτι και γύρη έως καρκινογόνες για τον άνθρωπο ουσίες. Τα PM κατατάσσονται σε PM10 (αδρά σωματίδια) και PM2.5 (λεπτά σωματίδια), ανάλογα με το μέγεθός τους. Στις περιοχές της Ευρώπης στις οποίες για την οικιακή θέρμανση εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ακόμη συχνά στερεά καύσιμα, οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων (ιδίως PM) τείνουν να αυξάνονται όταν οι χειμώνες είναι πιο δριμείς [3].
- Το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) είναι τοξικό αέριο καφεκόκκινου χρώματος. Είναι ένα από τα οξείδια του αζώτου (NO_x).
- Το διοξείδιο του θείου (SO₂) είναι τοξικό άχρωμο αέριο με έντονη οσμή. Είναι ένα από τα οξείδια του θείου (SO_x).
- Το τροποσφαιρικό όζον (O₃) είναι άχρωμο αέριο, το οποίο σχηματίζεται σε στιβάδα της ατμόσφαιρας κοντά στο έδαφος από τη χημική αντίδραση ρύπων (όπως πτητικών οργανικών ενώσεων (ΠΟΕ) και NO_x) παρουσία ηλιακού φωτός.

1.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση και αιωρούμενα σωματίδια

Αν και η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα της Ευρώπης έχει βελτιωθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, η ατμοσφαιρική ρύπανση παραμένει ο κύριος περιβαλλοντικός παράγοντας που συνδέεται με ασθένειες οι οποίες μπορούν να προληφθούν και με πρόωρη θνησιμότητα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και εξακολουθεί να έχει σημαντικές αρνητικές επιδράσεις σε μεγάλο μέρος του φυσικού περιβάλλοντος της Ευρώπης. Κατά τον ΟΟΣΑ, «η ατμοσφαιρική ρύπανση στις πόλεις πρόκειται να καταστεί η πρωταρχική περιβαλλοντική αιτία θνησιμότητας παγκοσμίως έως το 2050, ξεπερνώντας την έλλειψη καθαρού νερού και αποχέτευσης» [52].

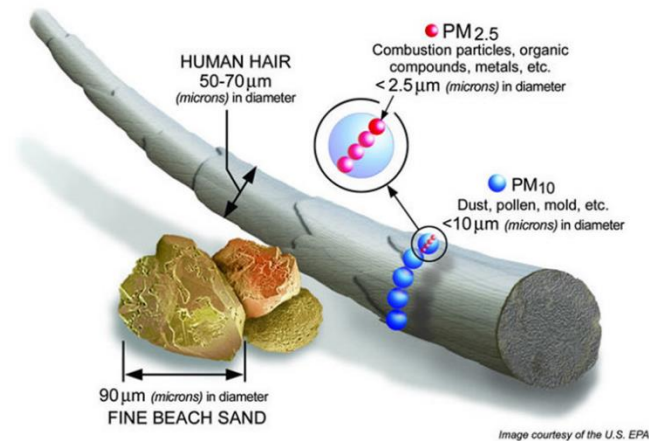
Στην ατμόσφαιρα αιωρούνται σωματίδια πολύ μικρού μεγέθους τα οποία δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι. Δυστυχώς όμως βλάπτουν σημαντικά το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ειδικότερα, ευθύνονται για ένα πλήθος αναπνευστικών και καρδιακών ασθενειών όπως επιδείνωση του άσθματος, αύξηση των αναπνευστικών συμπτωμάτων (π.χ. βήχας και πόνοι στην αναπνοή), επιδείνωση καρδιολογικών προβλημάτων, βρογχίτιδα, όπως και προβλήματα στην όραση. Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια βλάπτουν λόγω της ίδιας της σύστασής τους, γιατί μπορούν να περιέχουν βαριά μέταλλα και άλλες τοξικές οργανικές ενώσεις [9].

Ανάλογα με το μέγεθος τους, τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ως εξής [9]:

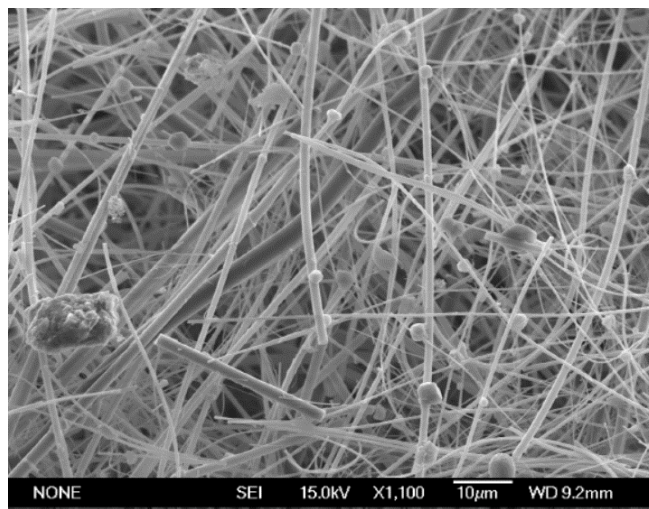
- TSP : Ολικά αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 100 μικρομέτρων.

- PM10 : Αιωρούμενα σωματίδια – ή πιο γνωστά ως PM (Particulate Matter) - με διάμετρο μικρότερη από 10 μικρόμετρα.
- PM2.5: Αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μικρόμετρα.

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων θεωρούνται από τους πιο επικίνδυνους αέριους ρύπους, καθώς - όπως ήδη αναφέρθηκε - προκαλούν ποικίλα προβλήματα, κυρίως σε ευπαθείς ομάδες πληθυσμού, όπως οι ηλικιωμένοι, οι ασθενείς και τα παιδιά [9].



Εικόνα 1: Σωματιδιακή ύλη PM10 και PM2.5 (Πηγή: [53])



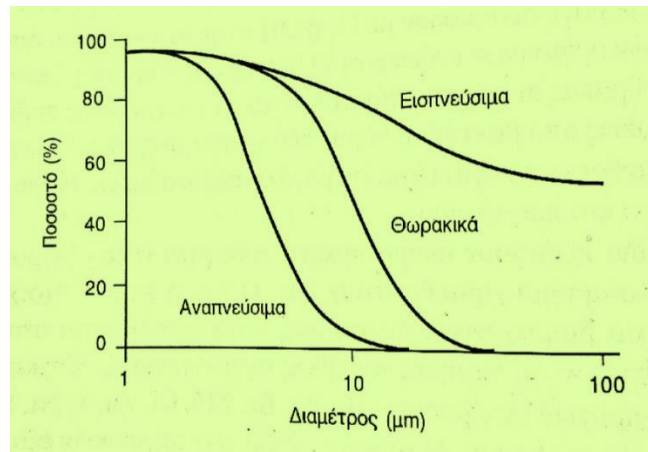
Εικόνα 2: PM10 από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. (Πηγή: [6])

1.3 Αιωρούμενα σωματίδια και αναπνευστικό σύστημα

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα με βάση την ικανότητα διείσδυσης στις διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Συγκεκριμένα [2]:

- Εισπνεύσιμα είναι αυτά που μπορούν να εισέλθουν και να αποθεθούν στο τμήμα του αναπνευστικού συστήματος της περιοχής του κεφαλιού.
- Θωρακικά αυτά που διασχίζουν το λάρυγγα και τους πνεύμονες.

- Αναπνεύσιμα είναι το μέρος των θωρακικών που φτάνει στην περιοχή όπου γίνεται η ανταλλαγή των αερίων.

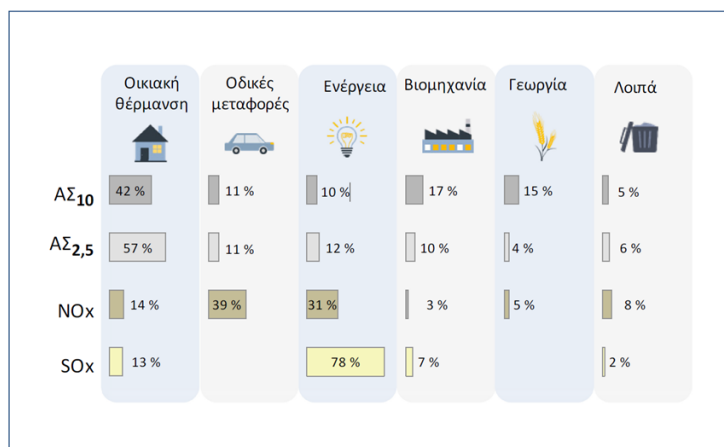


Εικόνα 3: Ταξινόμηση σωματιδίων με βάση την ικανότητα διείσδυσής τους σε σχέση με το μέγεθός τους. (Πηγή: [50])

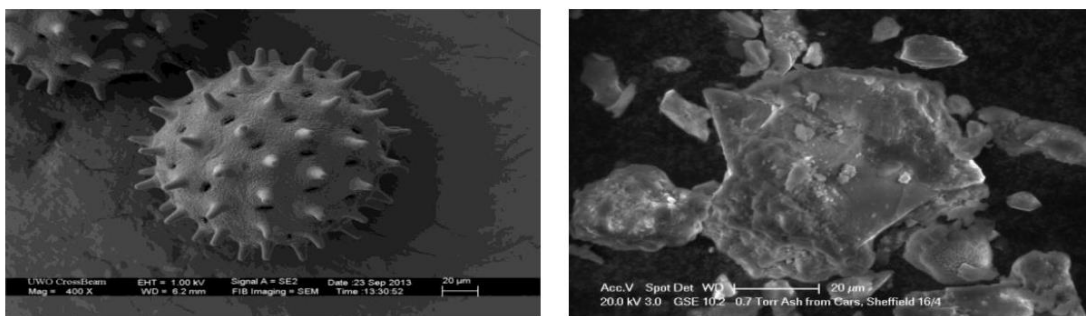
Τα μεγαλύτερα σωματίδια γενικά φιλτράρονται στη μύτη και το λάρυγγα και δεν προκαλούν προβλήματα, αλλά τα σωματίδια PM10 μπορούν να εγκατασταθούν στους βρόγχους και τους πνεύμονες και να προκαλέσουν προβλήματα υγείας. Σωματίδια με διάμετρο < 2,5μm (PM2.5), τείνουν να εισχωρήσουν σε περιοχές ανταλλαγής αερίων του πνεύμονα, ενώ τα πολύ μικρά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0,1μm (ultrafine particles) μπορεί να διαπεράσουν τους πνεύμονες να έχουν επιπτώσεις και σε άλλα όργανα. Παγκοσμίως υπάρχει η εκτίμηση ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση ευθύνεται για το 1,2% των συνολικών θανάτων στον πλανήτη μας, δηλαδή περίπου 0,8 εκατομμύρια κάθε χρόνο [2].

1.4 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων

Κυριότερες πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η κυκλοφοριακή κίνηση, η βιομηχανία και η κεντρική θέρμανση των κτιρίων. Παράλληλα, αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προέλθουν επίσης και από χημικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα [9].



Εικόνα 4: Πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων στην ΕΕ (Πηγή: [12])



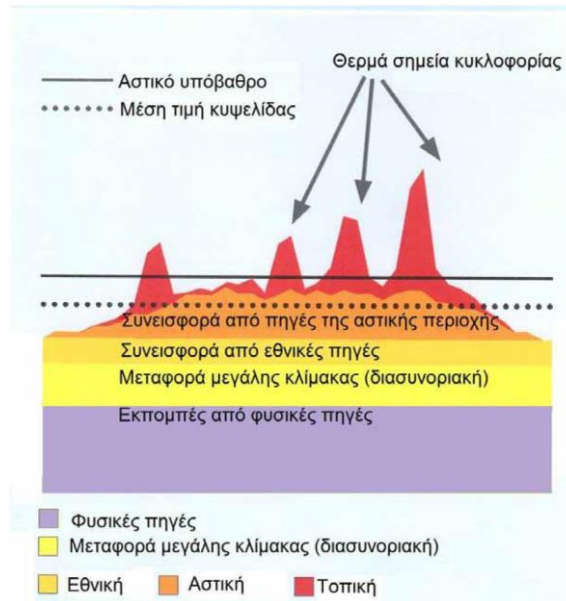
Εικόνα 5: Αιωρούμενα σωματίδια γύρης και αιθάλης από αυτοκίνητα, όπως φαίνονται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. (Πηγή: [11])

1.4.1 Διασυνοριακή μεταφορά αιωρούμενων σωματιδίων

Πολλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν μικρούς χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις τους να περιορίζονται σε τοπικό επίπεδο. Κατά συνέπεια, μέχρι πριν λίγες δεκαετίες, η έρευνα σε θέματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης εστιαζόταν σε προβλήματα τοπικής κλίμακας, όπου εμφανίζονται και οι μέγιστες συγκεντρώσεις. Παρ' όλα αυτά, πολλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μεταφορά τους για μεγάλες αποστάσεις. Το πρόβλημα φαίνεται να είναι ιδιαίτερα οξύμενο στις Μεσογειακές χώρες, όπου η μεγάλη ηλιοφάνεια διευκολύνει την παραγωγή δευτερογενών φωτοχημικών ρύπων, όπως είναι το όζον. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια κερδίζει συνεχώς έδαφος η άποψη ότι αποτελεσματικές στρατηγικές μείωσης της περιβαλλοντικής βλάβης, που προκαλείται από την ατμοσφαιρική ρύπανση, θα πρέπει να ενσωματώνουν την περιβαλλοντική επιβάρυνση από την μεγάλης κλίμακας μεταφορά αέριων ρύπων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η έρευνα και η διεθνής συνεργασία σε θέματα περιφερειακής ρύπανσης (συμπεριλαμβανομένης και της διακρατικής μεταφοράς) έχει τα τελευταία χρόνια εντατικοποιηθεί τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε διεθνές επίπεδο και αναμένεται να αποτελέσει πεδίο αιχμής και τα επόμενα χρόνια [9].

Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και τη χημική τους σύσταση. Για παράδειγμα, τα μεγαλύτερα σωματίδια, με διάμετρο 2.5–10 μm (PM_{coarse}) έχουν σχετικά μικρούς χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα και η μεταφορά τους περιορίζεται συνήθως σε μικρές ή μεσαίες κλίμακες. Εξαιρεση αποτελούν οι αμμοθύελλες οι οποίες μπορούν να μεταφέρουν σκόνη από τις ερημικές περιοχές σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 1000 km. Από την άλλη πλευρά, τα μικρά σωματίδια διαμέτρου 0.1–1 μm μπορούν να παραμείνουν στην ατμόσφαιρα για εβδομάδες και να μεταφερθούν σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων. Τυπικά, τα δευτερογενή οργανικά μπορούν να μεταφερθούν σε αποστάσεις 3000-4000 km, τα πρωτογενή μικρά σωματίδια σε αποστάσεις 2000-3000 km ενώ τα μεγάλα πρωτογενή σωματίδια περιορίζονται σε αποστάσεις μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων από την πηγή τους [9].

Πρόσφατες μελέτες έχουν επίσης δείξει ότι παρόλο που οι μέγιστες συγκεντρώσεις σωματιδίων εμφανίζονται σε θερμά σημεία κυκλοφορίας στις αστικές περιοχές, σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίζονται και σε περιοχές υποβάθρου και η διασυνοριακή μεταφορά είναι μεγάλη (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Σχηματική παρουσίαση της συνεισφοράς των διαφορετικών πηγών στα επίπεδα PM_{10} σε μια αστική περιοχή (προσαρμοσμένο από WHO, 2006). Η διάστικτη γραμμή παρουσιάζει την μέση τιμή της κυψελίδας η οποία θα αναμενόταν από την εφαρμογή ενός περιφερειακού μοντέλου ποιότητας του αέρα.

1.4.2 Μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα



Εικόνα 7: Χαρακτηριστική εικόνα ανεμοθύελλας. (Πηγή: [54])

Η ανόργανη σκόνη είναι μία από τις σημαντικότερες πηγές των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων από φυσικές πηγές καθώς, οι ετήσιες εκπομπές των 2150 Tg αποτελούν περίπου το 37% των συνολικών σωματιδίων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες μαζί [9].

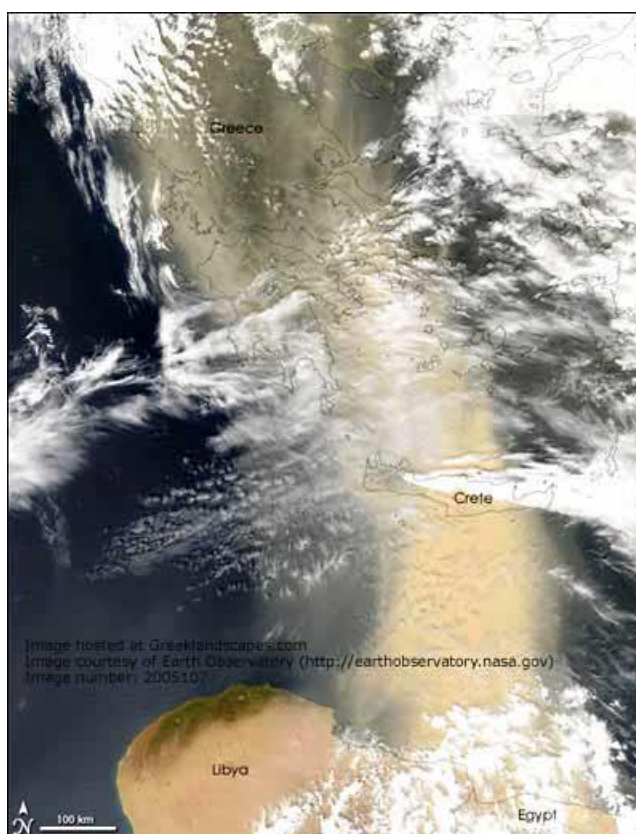
Οι έρημοι του πλανήτη είναι οι κυριότερες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και σε αυτές αποδίδεται το 35% των πρωτογενών εκπομπών αυτών. Το μισό του ποσοστού αυτού υπολογίζεται ότι οφείλεται στην έρημο Σαχάρα. Οι εκπομπές της Σαχάρας επηρεάζουν το συνολικό φόρτο αιωρούμενων σωματιδίων (aerosol) της ατμόσφαιρας της Αφρικής, του Ατλαντικού ωκεανού, της νότιας Αμερικής, της ανατολικής ακτής των ΗΠΑ και τέλος της Ευρώπης. Είναι προφανές ότι

οι χώρες της Μεσογείου που είναι και οι εγγύτερες στη Σαχάρα είναι κι αυτές που δέχονται το μεγαλύτερο φόρτο aerosol [9].

Με τη βοήθεια δορυφορικών παρατηρήσεων αναγνωρίστηκαν τρεις κύριες καταστάσεις που ευθύνονται για την μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα πάνω από τη Μεσόγειο [9]:

- Την άνοιξη υπάρχουν οι κυκλώνες Σαράφ (Sharav) οι οποίοι μετακινούνται ανατολικά, κατά μήκος της βόρειας αφρικανικής ακτογραμμής και μεταφέρουν μαζί τους σκόνη στην ανατολική Μεσόγειο.
- Το καλοκαίρι οι υψηλές πιέσεις πάνω από τη Λιβύη εμποδίζουν την περαιτέρω ανατολική διάδοση των κυκλώνων αυτών και η μεταφορά συντελείται στην κεντρική Μεσόγειο.
- Στο τέλος του καλοκαιριού οι χαμηλές πιέσεις κοντά στις Βαlearίδες νήσους έχουν ως αποτέλεσμα η μεταφορά σκόνης να γίνεται κυρίως στην δυτική Μεσόγειο.

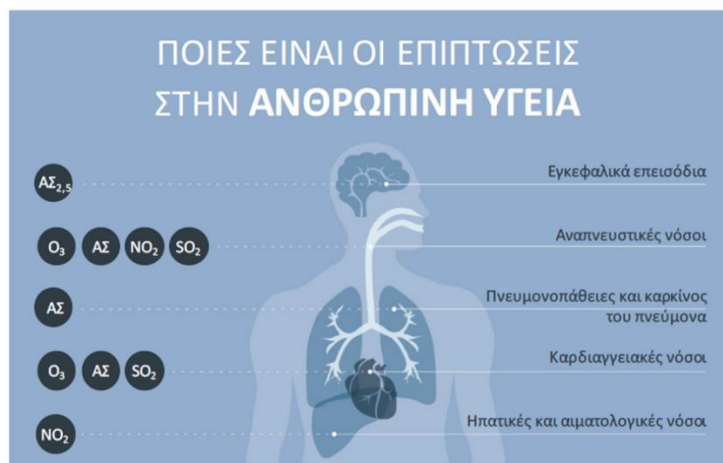
Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα μπορεί να είναι υπεύθυνη για το 10-20% των επεισοδίων σωματιδιακής ρύπανσης σε Μεσογειακές χώρες [29]. Κατά τη διάρκεια μάλιστα επεισοδίων μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα, η συμμετοχή της μεταφερόμενης σκόνης στα επίπεδα των PM10 σε Μεσογειακές χώρες μπορεί να ξεπεράσει και το 60% [9].



Εικόνα 8: Επεισόδιο μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα στις 17 Απριλίου 2005 όπως αποτυπώθηκε από τον δορυφόρο MODIS

1.5 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η πρώτη περιβαλλοντική αιτία πρόωρων θανάτων στην ΕΕ, καθώς τα θύματά της είναι δεκαπλάσια εκείνων των τροχαίων ατυχημάτων. Το 2010 προκάλεσε περισσότερους από 400 000 πρόωρους θανάτους, καθώς και σοβαρές ασθένειες και ταλαιπωρίες που θα μπορούσαν να αποφευχθούν, μεταξύ των οποίων παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος (όπως το άσθμα) και παρόξυνση καρδιαγγειακών προβλημάτων. Το συνολικό εξωτερικό κόστος των εν λόγω επιπτώσεων κυμαινόταν μεταξύ 330 και 940 δισ. ευρώ, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών παραγωγικότητας της εργασίας και άλλων άμεσων οικονομικών ζημιών που αποτιμώνται το 2010 σε 23 δισ. ευρώ ετησίως [1].



Εικόνα 9: Κύριες επιπτώσεις στην υγεία των PM, NO₂, SO₂ και O₃. (Πηγή [22])

Μελέτες έχουν βρει μια στενή σχέση ανάμεσα στην έκθεση σε λεπτά σωματίδια και τον πρόωρο θάνατο από καρδιακές και αναπνευστικές παθήσεις. Τα λεπτά σωματίδια είναι επίσης γνωστό ότι προκαλούν ή επιδεινώνουν χρόνιες ασθένειες όπως άσθμα, καρδιακή προσβολή, βρογχίτιδα και άλλα αναπνευστικά προβλήματα.

Μια μελέτη που δημοσιεύθηκε στην Εφημερίδα της Αμερικανικής Ιατρικής Ένωσης ([37]), υποδεικνύει ότι η μακροχρόνια έκθεση στα PM_{2.5} μπορεί να οδηγήσει σε εναποθέσεις πλάκας στις αρτηρίες, προκαλώντας αγγειακή φλεγμονή και σκλήρυνση των αρτηριών που μπορεί τελικά να οδηγήσει σε καρδιακή προσβολή και εγκεφαλικό επεισόδιο. Οι επιστήμονες στη μελέτη εκτιμούν ότι για κάθε 10 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (μg / m³) αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης των λεπτών σωματιδίων, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος θνησιμότητας 6% από καρδιαγγειακή πνευμονοπάθεια και 8% από καρκίνο των πνευμόνων [37].

Η American Heart Association ([39]) έχει επίσης προειδοποιήσει για τον αντίκτυπο των PM_{2.5} στην καρδιακή υγεία και θνησιμότητα:

‘‘Η έκθεση σε PM_{2,5} μm σε διάμετρο (PM_{2.5}) για λίγες ώρες έως εβδομάδες μπορεί να προκαλέσει θνησιμότητα που σχετίζεται με καρδιαγγειακά νοσήματα και μη θανατηφόρα συμβάντα. Η μακροπρόθεσμη έκθεση (π.χ. μερικά χρόνια) αυξάνει τον κίνδυνο καρδιαγγειακής θνησιμότητας σε ακόμη μεγαλύτερη έκταση από ότι οι εκθέσεις για λίγες μέρες και μειώνει το προσδόκιμο ζωής σε περισσότερο εκτεθειμένα τμήματα του πληθυσμού από μερικούς μήνες έως μερικά χρόνια.’’[39]

Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένοι από τους μακροπρόθεσμους κινδύνους που σχετίζονται με τα λεπτά σωματίδια:

- Σε μια μεγάλη μελέτη ενηλίκων χωρίς προϋπάρχουσα καρδιαγγειακή νόσο, τα άτομα με υψηλότερη έκθεση σε λεπτά σωματίδια βιώνουν ταχύτερο ρυθμό πάχυνσης των αρτηριών σε σύγκριση με άλλα άτομα που ζουν στην ίδια πόλη [26]. Αυτό συνεπάγεται ότι υψηλότερες μακροχρόνιες εκθέσεις σε PM2.5 θα μπορούσαν να προωθήσουν την ανάπτυξη αγγειακών ασθενειών.
- Η μακροχρόνια έκθεση σε ρύπους PM2.5 μπορεί να προκαλέσει αντίσταση στην ινσουλίνη, φλεγμονή και να συμβάλει στην ανάπτυξη διαβήτη [15][40]. Μια επιδημιολογική μελέτη των ΗΠΑ διαπίστωσε ότι για κάθε 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αύξηση της συγκέντρωσης PM2.5 θα μπορούσε να προκύψει αύξηση περίπου 10.000 διαγνωσμένων περιπτώσεων διαβήτη ή 1% αύξηση του διαβήτη [18]. Είναι ενδιαφέρον ότι υπάρχει αύξηση του κινδύνου για διαβήτη, ακόμη και σε περιοχές που βρίσκονται κάτω από τα νόμιμα όρια για τα PM2.5 (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Οι πληθυσμοί που ζουν σε περιοχές κοντά, αλλά ακόμα κάτω από τα όρια, επιδεικνύουν υψηλότερη επικράτηση σακχαρώδη διαβήτη κατά περισσότερο από 20% σε σύγκριση με αυτούς που βρίσκονται σε καθαρότερες περιοχές.
- Μια μελέτη που συγκρίνει την αναπνευστική υγεία των κοινών κατοίκων και των τροχονόμων, οι οποίοι εκτίθενται σε υψηλότερα επίπεδα PM2.5 λόγω των καθηκόντων τους, διαπίστωσε ότι οι τελευταίοι είναι πιο πιθανό να υποφέρουν από αναπνευστικά συμπτώματα και διαταραγμένη πνευμονική λειτουργία [23]. Άλλες μελέτες συνέδεσαν επίσης αυξημένες χρόνιες εκθέσεις σε PM2.5 με παραρρινοκολπίτιδα σε ενήλικες [25] και αναπνευστικές νόσους σε βρέφη [27].
- Μια αμερικανική μελέτη που δημοσιεύθηκε το 2015 [14] διαπίστωσε ότι η έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να επιταχύνει τη γήρανση του εγκεφάλου. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι για κάθε αύξηση 3,49 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ στην αθροιστική έκθεση στα PM2.5, παρατηρείται μείωση της λευκής ουσίας κατά 6,23 cm^3 . Αυτό ισοδυναμεί με περίπου 1 - 2 χρόνια γήρανσης του εγκεφάλου.

1.6 Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο - Οριακές τιμές ρύπων

Η Ευρωπαϊκή Ένωση στην προσπάθειά της για τον περιορισμό και την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μέσω των οδηγιών της για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, έχει θεσπίσει τιμές όρια (οριακές τιμές) και τιμές στόχους για όλες τις ρυπογόνες ουσίες, μεταξύ των οποίων και τα αιωρούμενα σωματίδια. Οι οριακές τιμές αναφέρονται σε επίπεδα συγκεντρώσεων πάνω από τα οποία είναι επιστημονικά τεκμηριωμένο ότι είναι δυνατή η συσχέτιση εμφάνισης επιβλαβών επιπτώσεων στον ανθρώπινο πληθυσμό και το περιβάλλον, ενώ οι τιμές στόχοι αναφέρονται σε επιθυμητά επίπεδα με σκοπό τη μακροπρόθεσμη αποφυγή επιβλαβών επιδράσεων. Ειδικά για τα εισπνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια (PM10), η ισχύουσα Ευρωπαϊκή Νομοθεσία (Κοινοτική Οδηγία 2008/50/ΕΚ) προβλέπει να μην υπερβαίνεται το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ περισσότερες από 35 φορές ανά έτος (ημερήσιες υπερβάσεις), ενώ ο ετήσιος μέσος όρος θα πρέπει να κυμαίνεται σε επίπεδα χαμηλότερα από 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η Κοινοτική Οδηγία 2008/50/ΕΚ που τέθηκε σε εφαρμογή (21 Μαΐου 2008) μετά από μακροχρόνια διαβούλευση αποτελεί φυσική συνέχεια της αντίστοιχης Κοινοτικής Οδηγίας 1999/30/ΕΚ, με μοναδική διαφοροποίηση ως προς τα αιωρούμενα σωματίδια,

τη θέσπιση οριακών τιμών και για τα PM_{2,5} για τα οποία δεν υπήρχε μεία στο παρελθόν.

Ρύπος	Περίοδος	Κατευθυντήριες γραμμές ΠΟΥ μg/m ³	Οριακές τιμές οδηγίας ΠΑΑ της ΕΕ μg/m ³	Αριθ. φορών ετησίως επιτρεπόμενης υπέρβασης των προτύπων της ΕΕ
NO ₂	1 έτος	40	40	--
	1 ώρα	200	200	18
O ₃	8 ώρες	100	120	25
A _{Σ10}	1 έτος	20	40	-
	24 ώρες	50 ^(a)	50	35
A _{Σ2,5}	1 έτος	10	25	-
	24 ώρες	25	-	-
SO ₂	24 ώρες	20	125	3
	1 ώρα	-	350	24
	10 λεπτά	500	-	-

Εικόνα 10: Πρότυπα της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα και κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ (Πηγές: Κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ για την ποιότητα του αέρα (2005) και οδηγία 2008/50/ΕΚ (οδηγία ΠΑΑ)).

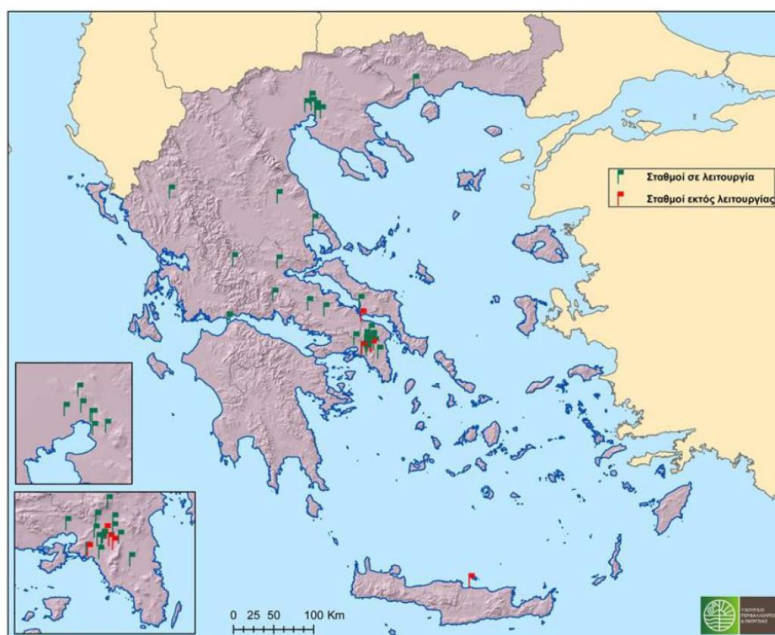
1.6.1 Ελληνική νομοθεσία

Στην Ελλάδα, ισχύουν τα όρια και στόχοι που ορίζονται από τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι ρύποι που παρακολουθούνται είναι το διοξείδιο του θείου, τα αιωρούμενα σωματίδια (PM₁₀ και PM_{2.5}), το διοξείδιο του αζώτου, το όζον, το μονοξείδιο του άνθρακα, το βενζόλιο, ο μόλυβδος, το αρσενικό, το κάδμιο, το νικέλιο και το βενζοπυρένιο. Τα όρια ή οι στόχοι που πρέπει να τηρούνται καθώς και όλο το νομοθετικό πλαίσιο παρουσιάζονται στις παρακάτω οδηγίες που αφορούν στην ποιότητα της ατμόσφαιρας είναι [55][10]:

1. Οδηγία 2008/50/EC, που σχετίζεται με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα με στόχο την επίτευξη καθαρότερου αέρα στην Ευρώπη και υιοθετείται στην Ελλάδα μέσω της ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103, ΦΕΚ 488B/30.3.11.
2. Οδηγία 2004/107/EC, που σχετίζεται με την παρακολούθηση των αρσενικό, κάδμιο, υδράργυρο, νικέλιο, πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα και υιοθετείται στην Ελλάδα μέσω της ΚΥΑ ΗΠ 22306/1075/Ε103, ΦΕΚ 920B/8.6.07.
3. Οδηγία 2015/1480/EC, όπου παρουσιάζει τις τροποποιήσεις ορισμένων παραρτημάτων των οδηγιών 2004/107/EC και 2008/50/EC. Στα παραρτήματα αυτά ορίζονται οι κανόνες σχετικά με τις μεθόδους αναφοράς, την επικύρωση των δεδομένων και την τοποθεσία των σημείων δειγματοληψίας για συλλογή στοιχείων που απαιτούνται, ώστε να γίνεται η εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Η οδηγία αυτή υιοθετείται στην Ελλάδα μέσω της ΚΥΑ 174505/607, ΦΕΚ 1311B/13.4.17

Σύμφωνα με την απαίτηση της ευρωπαϊκής ένωσης, η Ελλάδα, προχωρά ετησίως στην συγγραφή εκθέσεων, όπου τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τους σταθμούς μέτρησης, παρουσιάζονται και συγκρίνονται με τα ιστορικά δεδομένα, ώστε να παρακολουθείται η εξέλιξη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην χώρα. Στην εικόνα

παρακάτω, παρουσιάζονται οι σταθμοί μέτρησης που έχουν εγκατασταθεί στον ελλαδικό χώρο (τόσο ενεργοί όσο και ανενεργοί) [10].



Εικόνα 11: Χάρτης σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. (Πηγή: [10])

Οι σταθμοί που παρουσιάζονται στην εικόνα πέραν της συλλογής δεδομένων, για τις ετήσιες εκθέσεις, είναι συνδεδεμένοι και στο δίκτυο της Ευρωπαϊκής ένωσης, για την ενημέρωση του κοινού για την ποιότητα της ατμόσφαιρας, μέσω των δεικτών ποιότητας αέρα οι οποίοι παρουσιάζονται στην διαδικτυακή πλατφόρμα του “Air Quality Index”.

1.7 Δείκτης ποιότητας αέρα - Air Quality Index (AQI) στην Ευρώπη

Ο Ευρωπαϊκός δείκτης ποιότητας αέρα, επιτρέπει στο κοινό να καταλάβει περισσότερα για την ποιότητα του αέρα στην καθημερινότητά του. Μέσω του δείκτη ποιότητας αέρα, είναι ευκολότερη η κατανόηση της ημερήσιας κατάστασης της ποιότητας του αέρα σε περιοχές και πόλεις.

Ο δείκτης ποιότητας αέρα δηλώνει μόνο την βραχυπρόθεσμη κατάσταση της ποιότητας του αέρα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του είναι όλα τα αποτελέσματα των ωριαίων και ημερήσιων μετρήσεων από τα σημεία δειγματοληψίας.

Ο δείκτης, υπολογίζεται κάθε ώρα για δεδομένα από χιλιάδες σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε όλη την Ευρώπη. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που ανακοινώνονται από τα κράτη μέλη. Τα δεδομένα αυτά, δεν επαληθεύονται επισήμως από τις χώρες. Ο δείκτης δεν χρησιμοποιείται ώστε να ελεγχθεί η συμμόρφωση των χωρών με τα πρότυπα ποιότητας αέρα, άλλα για την ενημέρωση των πολιτών στην καθημερινότητα τους και την επαγρύπνηση τους σχετικά με τα θέματα ποιότητας του αέρα.

Για την ενημέρωση του κοινού, η Ευρωπαϊκή ένωση, έχει δημιουργήσει ιστοσελίδα στην οποία παρουσιάζεται η κατάσταση όλων των περιοχών ως προς την ποιότητα του αέρα [56].

Ο υπολογισμός πραγματοποιείται για πέντε διαφορετικούς ρύπους. Το όζον, το διοξείδιο του αζώτου, το διοξείδιο του θείου, το μονοξείδιο του άνθρακα, και τα PM10, PM2.5.

Τιμή δείκτη	Ποιότητα αέρα
0-50	Good (Αρκετά καλή)
51-100	Fair Καλή)
101-199	Moderate (Μέτρια)
200-299	Poor (Χαμηλή)
≤300	Very poor (Πολύ χαμηλή)

Εικόνα 12: Κατάσταση ποιότητας αέρα σε σχέση με την τιμή του δείκτη ποιότητας αέρα σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα. (Πηγή: [4])

1.8 Δείκτης ποιότητας αέρα - Air Quality Index (AQI) στην Αμερική

PM _{2.5}	Air Quality Index	PM _{2.5} Health Effects	Precautionary Actions
0 to 12.0	Good 0 to 50	Little to no risk.	None.
12.1 to 35.4	Moderate 51 to 100	Unusually sensitive individuals may experience respiratory symptoms.	Unusually sensitive people should consider reducing prolonged or heavy exertion.
35.5 to 55.4	Unhealthy for Sensitive Groups 101 to 150	Increasing likelihood of respiratory symptoms in sensitive individuals, aggravation of heart or lung disease and premature mortality in persons with cardiopulmonary disease and the elderly.	People with respiratory or heart disease, the elderly and children should limit prolonged exertion.
55.5 to 150.4	Unhealthy 151 to 200	Increased aggravation of heart or lung disease and premature mortality in persons with cardiopulmonary disease and the elderly; increased respiratory effects in general population.	People with respiratory or heart disease, the elderly and children should avoid prolonged exertion; everyone else should limit prolonged exertion.

150.5 to 250.4	Very Unhealthy 201 to 300	Significant aggravation of heart or lung disease and premature mortality in persons with cardiopulmonary disease and the elderly; significant increase in respiratory effects in general population.	People with respiratory or heart disease, the elderly and children should avoid any outdoor activity; everyone else should avoid prolonged exertion.
250.5 to 500.4	Hazardous 301 to 500	Serious aggravation of heart or lung disease and premature mortality in persons with cardiopulmonary disease and the elderly; serious risk of respiratory effects in general population.	Everyone should avoid any outdoor exertion; people with respiratory or heart disease, the elderly and children should remain indoors.

Εικόνα 13: Κατάσταση ποιότητας αέρα σε σχέση με την τιμή του δείκτη ποιότητας αέρα και τις 24ωρες μέσες συγκεντρώσεις των PM2.5 σύμφωνα με τα αμερικανικά πρότυπα.. (Πηγή: [[U.S. Environmental Protection Agency](#)])

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Η συγκέντρωση, η κατανομή του μεγέθους και η σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) είναι τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό της έκθεσης ενός ατόμου και το χαρακτηρισμό της επικινδυνότητάς τους. Από τα παραπάνω συνήθως η συγκέντρωση των PM είναι το μέγεθος το οποίο μετράτε και στο οποίο αναφέρονται τα κριτήρια επικινδυνότητας, δηλαδή τα μέγιστα όρια έκθεσης των ανθρώπων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της συγκέντρωσης PM διακρίνονται κυρίως σε **ενεργητικές (αυτόματα συστήματα καταγραφής)** και **παθητικές** ανάλογα με τη διαδικασία με την οποία “συλλέγονται” τα PM. Οι ενεργητικές μέθοδοι είναι οι πιο καθιερωμένες καθώς παρέχουν αποτελέσματα σε πραγματικούς χρόνους και με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην αναρρόφηση καθορισμένης ποσότητας αέρα και στον υπολογισμό των PM σε αυτόν. Ορισμένες από τις ενεργητικές μεθόδους είναι η βαρομετρική (σταθμική), η μέθοδος απορρόφησης ακτινοβολίας β, η μέθοδος δονούμενου στοιχείου (ταλάντωσης χορδής), η μέθοδος σκεδασμού φωτός (με την οποία ασχολούμαστε σε αυτή την εργασία). Αυτές αποτελούν τις αναγνωρισμένες μεθόδους μέτρησης PM από τους επίσημους οργανισμούς European Environmental Agency ([35]) και Environmental Protection Agency ([38]). Η βαρομετρική μέθοδος είναι η μόνη που λαμβάνεται ως μέθοδος αναφοράς.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ενεργητικών μεθόδων είναι το πάγιο και λειτουργικό κόστος των μετρητικών διατάξεων και η απαίτηση για συνεχή παροχή ενέργειας. Αντίθετα οι παθητικές μέθοδοι είναι πολύ χαμηλού κόστους και δεν απαιτούν παροχή ενέργειας, καθώς βασίζονται στη συλλογή των PM σε ειδικές επιφάνειες χωρίς τη χρήση αντλίας αναρρόφησης. Εξαιτίας αυτής της αρχής οι παθητικές μέθοδοι παρέχουν μέση συγκέντρωση για το χρονικό διάστημα που εφαρμόζονται, ενώ η ακρίβεια τους είναι μικρότερη από αυτή των ενεργών.

2.2 Νομοθετικό Ευρωπαϊκό Πλαίσιο (ΟΔΗΓΙΑ 2008/50/ΕΚ)

Η οδηγία ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία σύμφωνα με την. Η.Π. 14122/549/Ε.103 –ΦΕΚ 30/3/2011 Αρ.Φύλλου 488.

Το πρόβλημα των αιωρούμενων σωματιδίων, με το πέρασμα των χρόνων, γίνεται όλο και πιο έντονο και είναι συνεχώς στο επίκεντρο των συζητήσεων μεταξύ των επιστημόνων παγκοσμίως. Η σοβαρότητα του προβλήματος, αν και δεν αποτελεί σημερινό φαινόμενο, οδήγησε τους διεθνείς οργανισμούς να συνεργαστούν και να θεσπίσουν οδηγίες με σκοπό την αντιμετώπιση και τη μείωση του προβλήματος. Οι οδηγίες αυτές ενσωματώθηκαν πλήρως ή μερικώς από τα κράτη. Ένα τέτοιο νομοθετικό πλαίσιο έχει θεσπίσει και η Ευρωπαϊκή Ένωση για τις χώρες μέλη, το οποίο εισήχθη και στο ελληνικό δίκαιο με μια σειρά υπουργικών αποφάσεων, προεδρικών διαταγμάτων και κανονισμών της Ευρωπαϊκής Ένωσης τα οποία στηρίζουν τη διαχείριση της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Οι νόμοι και οι οδηγίες που έχει εκδώσει η Ευρωπαϊκή Κοινότητα, σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση διαπραγματεύονται διάφορα είδη προτύπων ελέγχου,

διαχείρισης και ορίων προκειμένου να εξασφαλιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η προστασία της ανθρώπινης υγείας και των οικοσυστημάτων ανάλογα με τον ρύπο, τα όρια εκπομπών για τους διάφορους ατμοσφαιρικούς ρύπους, τον πρότυπο τρόπο μέτρησης των ρύπων σε κάθε περίπτωση, καθώς και τις προδιαγραφές αυτών των συστημάτων μέτρησης.

Θεμέλιο λίθο των κατευθυντήριων γραμμών αποτελεί η οδηγία 96/62/EK της 27ης Σεπτεμβρίου του 1996 η οποία κατόπιν συμπληρώθηκε και με μια σειρά άλλων που ακολούθησαν όπως η οδηγία 1999/30/EK του Συμβουλίου, της 22ας Απριλίου 1999, σχετικά με τις οριακές τιμές διοξειδίου του θείου, διοξειδίου του αζώτου, οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και του μόλυβδου, στον αέρα του περιβάλλοντος. Ακολουθώντας η οδηγία 2000/69/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 16ης Νοεμβρίου 2000, για τις οριακές τιμές του βενζολίου και του μονοξειδίου του άνθρακα στον αέρα, η οδηγία 2002/3/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 12^{ης} Φεβρουαρίου 2002, σχετικά με το όζον στην ατμόσφαιρα. Επίσης η απόφαση 97/101/EK του Συμβουλίου, της 27ης Ιανουαρίου 1997, καθιερώνει την διαδικασία για την αμοιβαία ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένων που προέρχονται από τα δίκτυα και τους μεμονωμένους σταθμούς μέτρησης της ρύπανσης του αέρα στα κράτη μέλη και επιβάλλει ουσιαστικά σε αυτά να ενσωματώσουν τις πλέον πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της υγείας και της επιστήμης. Τέλος εκδόθηκε την 21η Μαΐου 2008 η πιο πρόσφατη Οδηγία (2008/50/EK) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου όπου μερικά από τα σημαντικά σημεία της, παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2.1 Χαρακτηριστικές κατευθύνσεις οδηγίας 2008/50/EK

- Θα πρέπει να υπάρχει κοινή προσέγγιση όσον αφορά την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, με βάση κοινά κριτήρια εκτίμησης. Κατά την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το μέγεθος των πληθυσμών και των οικοσυστημάτων που εκτίθενται στη ρύπανση.

- **Για να εξασφαλιστεί ότι, οι συλλεγόμενες πληροφορίες όσον αφορά την ποιότητα του αέρα είναι επαρκώς αντιπροσωπευτικές και συγκρίσιμες, είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται τυποποιημένες τεχνικές μέτρησης και κοινά κριτήρια για τον αριθμό και την τοποθεσία των σταθμών μέτρησης όσον αφορά την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Δεδομένου ότι επιτρέπεται η χρησιμοποίηση και άλλων τεχνικών, για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, είναι απαραίτητο να καθοριστούν κριτήρια για τη χρήση και την απαιτούμενη ακρίβεια των εν λόγω τεχνικών.**

- Οι σταθερές μετρήσεις θα πρέπει να είναι υποχρεωτικές σε ζώνες και οικισμούς όπου παρατηρείται υπέρβαση των μακροπρόθεσμων στόχων για το όζον ή των ορίων εκτίμησης για άλλους ρύπους. Οι πληροφορίες από σταθερές μετρήσεις μπορούν να συμπληρώνονται με τεχνικές προσομοίωσης ή/και ενδεικτικές μετρήσεις προκειμένου να δίνεται η δυνατότητα ερμηνείας των στοιχείων του εκάστοτε σημείου ως προς τη γεωγραφική κατανομή της συγκέντρωσης. Η χρήση συμπληρωματικών τεχνικών εκτίμησης θα επιτρέψει επίσης τη μείωση του απαιτούμενου ελάχιστου αριθμού σταθερών σημείων δειγματοληψίας.

- Κρίνεται σκόπιμο να προβλεφθεί η δυνατότητα προσαρμογής στην επιστημονική και τεχνική πρόοδο τόσο των κριτηρίων και των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την

εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα όσο και των πληροφοριών που θα πρέπει να παρέχονται.

2.2.2 Μέθοδος αναφοράς για τη δειγματοληψία και τη μέτρηση των PM10

Η μέθοδος αναφοράς για τη δειγματοληψία και τη μέτρηση των σωματιδίων PM10 περιγράφεται στο πρότυπο EN 12341:1999 το οποίο αντικαταστάθηκε από την οδηγία EN 12341:2014 με τίτλο :

«Ποιότητα αέρα του περιβάλλοντος - Πρότυπη σταθμική μέθοδος μέτρησης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης μάζας αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης PM10 ή PM2,5» ή « Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM2,5 mass concentration of suspended particulate matter»

2.2.3 Απόδειξη ισοδυναμίας

• Κάθε κράτος-μέλος έχει το δικαίωμα να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε άλλη μέθοδο, εφόσον είναι σε θέση να αποδείξει ότι η μέθοδος αυτή καταλήγει σε αποτελέσματα ισοδύναμα με κάποια από τις μεθόδους που αναφέρονται στην οδηγία ή, όσον αφορά τα σωματίδια, οποιαδήποτε άλλη μέθοδο για την οποία το κράτος-μέλος μπορεί να αποδείξει ότι έχει συνεπή σχέση προς τη μέθοδο αναφοράς. Στις περιπτώσεις αυτές, οι μετρήσεις/αποτελέσματα που λαμβάνουμε με τη μέθοδο αυτή πρέπει να διορθώνονται ώστε να παράγονται αποτελέσματα ισοδύναμα προς τα προκύπτοντα με τη χρήση της μεθόδου αναφοράς.

- Η Επιτροπή μπορεί να απαιτεί από το κράτος-μέλος να εκπονεί και να υποβάλλει έκθεση σχετικά με την απόδειξη ισοδυναμίας.
- Εάν το κράτος-μέλος χρησιμοποιεί προσωρινούς συντελεστές για κατά προσέγγιση ισοδυναμία, αυτοί επιβεβαιώνονται ή/και τροποποιούνται βάσει των οδηγιών της Επιτροπής.
- Τα κράτη-μέλη μεριμνούν, ώστε ανάλογα με την περίπτωση, οι αντίστοιχες διορθώσεις να εφαρμόζονται και αναδρομικά για τα δεδομένα μετρήσεων του παρελθόντος, με στόχο να βελτιωθεί η συγκρισιμότητα των δεδομένων.

2.2.4 Διαχωρισμός σε Ζώνες/ Οικισμούς.

Τα κράτη μέλη καθορίζουν ζώνες και οικισμούς εντός της επικράτειάς τους. Η εκτίμηση και η διαχείριση της ποιότητας του αέρα, πραγματοποιούνται σε όλες τις ζώνες και σε όλους τους οικισμούς. Κάθε ζώνη και οικισμός κατατάσσονται σύμφωνα με τα όρια εκτίμησης που θεσπίζονται. Η κατάταξη είναι διαφορετική για τους υπό εξέταση ρύπους. Οι ζώνες, αναλύονται ως προς τα επίπεδα ρύπανσης μέσω μετρήσεων, μοντέλων και άλλων εμπειρικών τεχνικών και κοινοποιούνται στην ευρωπαϊκή επιτροπή.

Πιο αναλυτικά, οι περιοχές χωρίζονται σε σύγκριση με τα επίπεδα ρύπων της προηγούμενης πενταετίας, συγκριτικά με τα ανώτερα και κατώτερα όρια εκτίμησης, ως εξής:

- Περιοχές που τα επίπεδα ρύπων είναι πάνω από το ανώτερο όριο εκτίμησης. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτούνται σταθερές μετρήσεις για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και μπορούν να συμπληρώνονται από

τεχνικές προσομοίωσης ή/και ενδεικτικές μετρήσεις, ώστε να λαμβάνονται κατάλληλες πληροφορίες για τη χωροταξική κατανομή της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα.

- Περιοχές που τα επίπεδα ρύπων είναι μεταξύ ανώτερου και κατώτερου ορίου εκτίμησης. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να χρησιμοποιείται συνδυασμός σταθερών μετρήσεων και τεχνικών προσομοίωσης ή/και ενδεικτικές μετρήσεις για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα.
- Περιοχές που τα επίπεδα ρύπων είναι κάτω του κατώτερου ορίου εκτίμησης. Στις περιπτώσεις αυτές, αρκεί η χρήση για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, τεχνικών προσομοίωσης ή τεχνικών αντικειμενικής εκτίμησης των στόχων ή αμφοτέρως.

Όταν οι συγκεντρώσεις ξεπερνούν τα όρια συναγερμού ή τις τιμές στόχους, τα μέλη πρέπει να προετοιμάσουν ένα πλάνο, ώστε όλες οι πηγές ρύπων να παρακολουθούνται και να επιβεβαιωθεί η παραμονή των τιμών εντός των ορίων. Τέλος, όλες οι πληροφορίες της ποιότητας του αέρα θα πρέπει να ανακοινώνονται στο κοινό.

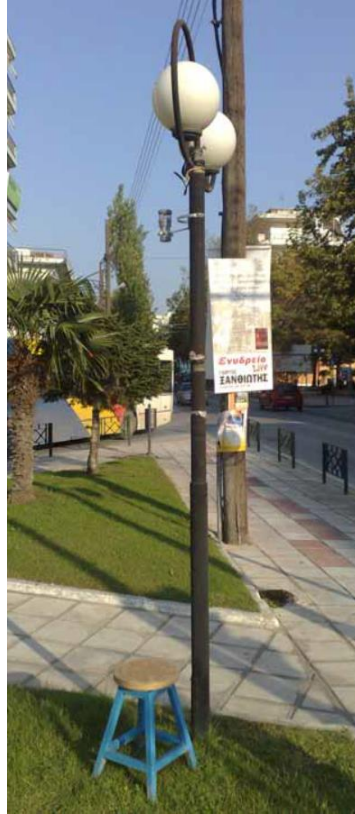
2.2.5 Σημεία δειγματοληψίας.

Η δεύτερη αρχή που θα πρέπει τα κράτη μέλη να εφαρμόζουν, περιγράφει τον τρόπο επιλογής των σημείων δειγματοληψίας για τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων των ρύπων. Στόχος αυτής της αρχής είναι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να μην είναι πλασματικά. Πιο συγκεκριμένα, οι οδηγίες που πρέπει να ακολουθούνται, παρουσιάζονται παρακάτω:

α) Τα σημεία δειγματοληψίας που προορίζονται για την προστασία της υγείας του ανθρώπου, τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν στοιχεία:

- για τις περιοχές μέσα σε ζώνες και οικισμούς, όπου απαντώνται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στις οποίες είναι ενδεχόμενο να εκτεθεί, άμεσα ή έμμεσα, ο πληθυσμός για χρονικό διάστημα που είναι σημαντικό σε σχέση με την περίοδο αναφοράς της ή των οριακών τιμών
- για τα επίπεδα σε άλλες περιοχές μέσα στις ζώνες και τους οικισμούς, που να είναι αντιπροσωπευτικές της έκθεσης του γενικού πληθυσμού.

β) Τα σημεία δειγματοληψίας τοποθετούνται κατά κανόνα, έτσι ώστε να αποφεύγεται η μέτρηση της κατάστασης στα μικροπεριβάλλοντα της άμεσης περιοχής. Αυτό σημαίνει ότι ένα σημείο δειγματοληψίας πρέπει να τοποθετείται με τέτοιο τρόπο, ώστε ο αέρας στον οποίο γίνονται οι δειγματοληψίες να είναι αντιπροσωπευτικός της ποιότητας του αέρα σε τμήμα οδού μήκους 100 m (τουλάχιστον για θέσεις με κυκλοφορία) ή με διαστάσεις τουλάχιστον 250 × 250 m (για θέσεις με βιομηχανία, όπου αυτό είναι εφικτό).



Εικόνα 14: Διάταξη με παθητικό συλλέκτη σωματιδίων τοποθετημένη σε δημοτικό στύλο φωτισμού έπειτα από συνεννόηση με τις κατά τόπους δημοτικές αρχές (Εύοσμος, Θεσσαλονίκη). (Πηγή: [9])



Εικόνα 15: Σταθμός παρατήρησης Am Neckartor στη Στουτγάρδη. (Πηγή: [3])

γ) Στις μη εκτεθειμένες αστικές τοποθεσίες, το σημείο δειγματοληψίας τοποθετείται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα αντίστοιχα επίπεδα ρύπανσης να επηρεάζονται από την ολοκληρωμένη συμβολή όλων των πηγών, του ανέμου ως προς το σταθμό. Το επίπεδο ρύπανσης δεν θα πρέπει να επηρεάζεται αποκλειστικά και μόνο από μία πηγή, εκτός των περιπτώσεων κατά τις οποίες ανάλογη κατάσταση θεωρείται τυπική για ευρύτερη

μη εκτεθειμένη αστική περιοχή. Τα εν λόγω σημεία δειγματοληψίας είναι, κατά κανόνα, αντιπροσωπευτικά για πολλά τετραγωνικά χιλιόμετρα.

δ) Όταν ο στόχος είναι η εκτίμηση των επιπέδων του μη εκτεθειμένου αγροτικού περιβάλλοντος, το σημείο δειγματοληψίας δεν πρέπει να επηρεάζεται από γειτονικούς οικισμούς ή βιομηχανικούς τόπους, δηλαδή τόπους που απέχουν λιγότερο από 5 km.

ε) Όταν επιχειρείται εκτίμηση της συμβολής βιομηχανικών πηγών, τουλάχιστον ένα σημείο δειγματοληψίας εγκαθίσταται πιο κάτω από τον άνεμο ως προς την πηγή, στην πλησιέστερη οικιστική περιοχή. Εάν δεν είναι γνωστή η συγκέντρωση στο μη εκτεθειμένο περιβάλλον, επιπλέον σημείο δειγματοληψίας εγκαθίσταται στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου.

στ) Τα σημεία δειγματοληψίας πρέπει επίσης να είναι κατά το δυνατό αντιπροσωπευτικά ανάλογα των τοποθεσιών που δεν βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με αυτά.

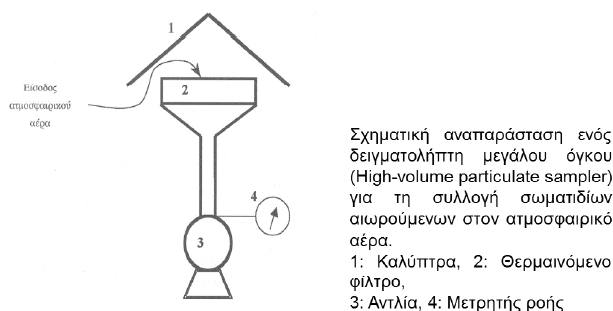
ζ) Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ανάγκη σημείων δειγματοληψίας σε νησιά, όταν απαιτείται η προστασία της ανθρώπινης υγείας.

2.3 Σταθμική μέθοδος

Η θυγατρική οδηγία (1999/30/ΕΚ) καθορίζει ότι μετρήσεις των PM10 θα πρέπει να πραγματοποιούνται με τη μέθοδο αναφοράς, όπως ορίζονται στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN12341/1999. Κατόπιν αυτό συμπληρώθηκε και με το πρότυπο EN14907/2006. Τέλος, τα παραπάνω πρότυπα αντικαταστάθηκαν από ένα πιο σύγχρονο (από όπου προέρχονται και οι αναφορές) το **Ευρωπαϊκό πρότυπο EN12341/20148**.

Το πρότυπο περιγράφει μια μέθοδο υπολογισμού των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα (PM10 ή τα PM2.5) μέσα από δειγματοληψία με φίλτρα και ζύγιση σε ισορροπία.

Ο σταθμικός προσδιορισμός της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων προϋποθέτει τη διαβίβαση, με τη χρήση αντλίας, γνωστού όγκου ατμοσφαιρικού αέρα από κατάλληλο φίλτρο, όπου συγκρατούνται τα αιωρούμενα σωματίδια και την ακριβή ζύγιση του φίλτρου πριν και μετά την δειγματοληψία. Προκειμένου να συλλεχθεί σημαντική ποσότητα αιωρούμενων σωματιδίων, χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι δειγματολήπτες μεγάλου όγκου [6].



Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση σταθμικού προσδιορισμού μάζας αιωρούμενων σωματιδίων. (Πηγή: [6])

2.4 Ενεργητικές μέθοδοι (αυτόματα συστήματα καταγραφής) πέραν της σταθμικής

Εκτός από το σταθμικό προσδιορισμό έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι συνεχούς καταγραφής (Automated Measuring System / AMS) της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, οι οποίες έχουν το πλεονέκτημα ότι δίνουν τη συγκέντρωση των PM σε συνάρτηση με το χρόνο. Η χρήση αυτών των αυτόματων μεθόδων καταγραφής διευρύνεται συνεχώς, όμως δεν είναι τόσο ακριβείς όσο η μέθοδος της σταθμικής ανάλυσης και για αυτό και χρειάζονται έλεγχο ισοδυναμίας με την αντίστοιχη σταθμική μέθοδο και calibration αν αυτό χρηστεί απαραίτητο [2].

2.4.1 Κυριότερα πλεονεκτήματα / μειονέκτημα των AMS

- Συνεχής καταγραφή και προσδιορισμός των PM.
- Μπορούν να δώσουν τη συγκέντρωση των PM σε συνάρτηση με το χρόνο.
- Δίνουν τα αποτελέσματα σε συντομότερο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα την άμεση ενημέρωση του κοινού και την άμεση λήψη μέτρων αν χρειαστεί.
- Χαμηλότερο κόστος λειτουργίας αφού δεν χρειάζεται συνεχής ενασχόληση ατόμου ή ατόμων με την συσκευή .

Ενώ τα κυριότερα μειονεκτήματα :

- Σημαντικό σφάλμα σε μετρήσεις γι' αυτό χρειάζονται την κατάλληλη βαθμονόμηση.
- Δεν μπορεί να γίνει χημική ανάλυση των φίλτρων σε αντίθεση με την σταθμική μέθοδο για τον ακριβή προσδιορισμό των χημικών ενώσεων που επικάθονται στα φίλτρα.

2.4.2 Αυτόματα συστήματα καταγραφής αιωρούμενων σωματιδίων (AMS)

- Μέθοδος Ταλάντωσης Χορδής TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance).
- Μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας (β-Attenuation Analysers).
- Πιεζοηλεκτρική ταλάντωση.
- Μεταβολή της πίεσης στο φίλτρο (Pressure Drop Tape Sampler, CAMMS).
- Ηλεκτροκινητικές Μέθοδοι.
- Μέθοδος σκεδασμού του φωτός (Optical analysers).

2.4.2.1 Μέθοδος σκεδασμού του φωτός

Η μέθοδος στηρίζεται στην ιδιότητα των αιωρούμενων σωματιδίων να προκαλούν σκεδασμό του φωτός. Η σχέση που συνδέει τον σκεδασμό με το σωματιδιακό φορτίο εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων. Γενικά, η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μια τυπική ατμόσφαιρα κατοικημένης περιοχής μπορεί να εκφραστεί από το σκεδασμό χωρίς σημαντικό σφάλμα [2].

Στην ίδια αρχή στηρίζεται και η λειτουργία των οργάνων καταμέτρησης σωματιδίων (optical particle counters), τα οποία προσδιορίζουν τον αριθμό των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθός τους. Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε καθαρούς χώρους, όπου υπάρχουν περιορισμοί όχι μόνο για το συνολικό σωματιδιακό φορτίο, αλλά και για το μέγεθος των σωματιδίων [2].

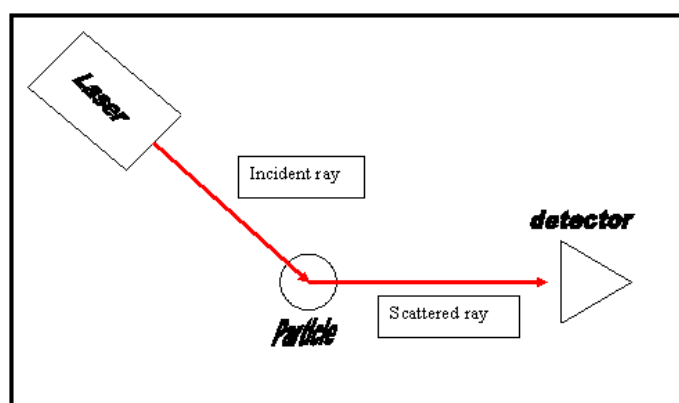
Είναι ευνόητο ότι με τη μέθοδο σκεδασμού του φωτός γίνεται απλώς μέτρηση του σωματιδιακού φορτίου, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω ανάλυσης της χημικής του σύστασης [2].

Υπάρχουν δύο είδη των συγκεκριμένων αναλυτών. Το πρώτο βασίζεται στην αλληλεπίδραση της δέσμης φωτός με τα σωματίδια θεωρώντας αυτά ως ένα ενιαίο σύνολο και γίνεται χρήση όταν μας ενδιαφέρει ένα συγκεκριμένο κλάσμα σωματιδίων όπως π.χ το εσπνεύσιμο κλάσμα σκόνης. Το δεύτερο στηρίζεται στη μέτρηση απόκρισης εξαιτίας κάθε ενός σωματιδίου χωριστά και γίνεται χρήση όταν μας ενδιαφέρουν επιμέρους συγκεντρώσεις για κάθε μέγεθος σωματιδίων [7].

Η βασική αρχή λειτουργίας αυτών των οργάνων, ανεξαρτήτου μοντέλου και εταιρίας κατασκευής, είναι ότι μια δέσμη φωτός εκπέμπεται και βομβαρδίζει σε ένα ειδικό κελί το ρεύμα των σωματιδίων. Η μείωση του εκπεμπόμενου φωτός μπορεί να οδηγήσει στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του αερολύματος στο κελί. Για την ανίχνευση και την μέτρηση της εξασθένησης της δέσμης χρησιμοποιείται ένα φωτοηλεκτρικό κύτταρο [2].

Μερικά ακόμα χαρακτηριστικά δίνονται παρακάτω:

- Οπτικοί αναλυτές χρησιμοποιούν την αλληλεπίδραση μεταξύ αερομεταφερόμενων σωματιδίων και ορατού φωτός ή υπέρυθρη ακτινοβολία ή ακτίνα λέιζερ.
- Συχνά αυτοί οι αναλυτές είναι μικροί, ελαφρείς με μπαταρία και ως εκ τούτου είναι φορητές μονάδες πολύ χρήσιμες για βραχυπρόθεσμες μετρήσεις και απεικόνιση (screening) από διάφορες θέσεις της κατανομής σωματιδίων στο χώρο και το χρόνο. Οι φορητές μονάδες χρησιμοποιούνται συχνά για μελέτες και παρακολούθηση των σωματιδίων, σε εσωτερικούς χώρους όπως χώρους εργασίας.
- Τα όργανα που στηρίζονται στην σκέδαση του φωτός από τα σωματίδια, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία και χρησιμοποιούνται για την μέτρηση μικρότερων συγκεντρώσεων με καλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 17: Σκέδαση ακτίνας φωτός από σωματίδιο προερχόμενη από Laser. (Πηγή: [57])

2.4.3 Ισοδυναμία / Βαθμονόμηση AMS με RM

Σε αντίθεση με τη σταθμική μέθοδο σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία για τον ακριβή τρόπο συλλογής και υπολογισμού των δεδομένων (συγκεντρώσεων) των αιωρούμενων

σωματιδίων PM10, δεν υπάρχει κάτι αντίστοιχο για τα αυτόματα συστήματα. Δηλαδή δεν υπάρχει ένα πρότυπο ισοδυναμίας (equivalence) του αυτόματου συστήματος καταγραφής με τη μέθοδο αναφοράς, και ένας οδηγός βαθμονόμησης των οργάνων αν αυτός κριθεί αναγκαίος. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει όμως ήδη αναθέσει αυτό το έργο στον αρμόδιο φορέα, την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) και αναμένεται [2].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΚΕΛΑΣΜΟ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

3.1 Υπόβαθρο

Ο όρος ατμοσφαιρική ρύπανση χρησιμοποιείται για την περιγραφή χημικών ουσιών που εκπέμπονται στον αέρα, σωματιδιακή ύλη (PM) και βιολογικά υλικά που έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον, ή την οικονομία. Οι κοινώς γνωστοί ρύποι είναι το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου και του θείου, πτητικές οργανικές ενώσεις και το όζον στο επίπεδο του εδάφους. Η ανθρώπινη δραστηριότητα συμβάλλει σε μια σημαντική μερίδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας και οι ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνουν βιομηχανικές εκπομπές και εκπομπές οχημάτων, χρήση ορυκτών καυσίμων και καύση ξυλείας για θέρμανση [58].

Αυτό που ονομάζουμε σωματιδιακή ύλη (PM) είναι ένα μείγμα στερεών σωματιδίων και σταγονιδίων υγρού που αιωρούνται στον αέρα. Τα PM ταξινομούνται συνήθως κατά μέγεθος σε χονδρά, λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια. Η ταξινόμηση αυτή αντιστοιχεί σε σωματίδια με αεροδυναμικές διαμέτρους μικρότερες από 10 μm (PM10), 2,5 μm (PM2.5) και 0,1 μm (νανοσωματίδια), αντίστοιχα. Τα δείγματα αέρα τυπικά περιέχουν πολυδιασκορπισμένα αερολύματα, τα οποία είναι σωματίδια διαφόρων μεγεθών σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Έρευνες όσον αφορά τη μακροπρόθεσμη έκθεση σε PM έδειξαν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης θνησιμότητας από χρόνιες καρδιαγγειακές και αναπνευστικές ασθένειες, καρκίνο του πνεύμονα και δυσμενείς επιπτώσεις στην αναπαραγωγικότητα [24]. Από το 2008 έως το 2013, μετρήσεις των συγκεντρώσεων των PM από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας σε 67 χώρες, έδειξαν μια αύξηση της παγκόσμιας αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης κατά 8% [59].

Η ικανότητα στο να μετρήσουμε την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων (Particle Size Distribution - PSD) σε μια περιοχή με την πάροδο του χρόνου είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της κατανόησης των αρνητικών επιπτώσεων στην υγεία, της ατμοσφαιρικής χημείας, των πηγών PM ([43]) και τον αντίκτυπο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην περιφερειακή ποιότητα του αέρα [28]. Οι πληροφορίες επιτρέπουν επίσης τη λήψη προληπτικών μέτρων, καθορίζοντας κυβερνητικές πολιτικές για τη μείωση της ατομικής έκθεσης. Όσον αφορά την υγεία, η δυνατότητα που έχει ο φυσικός μηχανισμός του ανθρώπινου σώματος, όσον αφορά το φιλτράρισμα σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 0.5 μm είναι πολύ χαμηλή [42]. Μελέτες έχουν δώσει κάποια στοιχεία ότι τα μικρότερα σωματίδια PM2.5 είναι περισσότερο τοξικά από τα PM10. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μικρότερα σωματίδια είναι πιο ικανά να διεισδύσουν στην κυψελιδική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Τα νανοσωματίδια βρέθηκε ότι είναι ακόμη πιο τοξικά ανά μονάδα μάζας, πιθανώς λόγω της ικανότητας που έχουν να διαπερνούν τα τοιχώματα των πνευμόνων [31].

Η μέτρηση της PSD είναι επίσης σημαντική για την τυποποίηση των ορίων εκπομπών και την εξασφάλιση αποδεκτών ορίων για την ποιότητα του αέρα [13]. Οι χώρες υιοθετούν πρότυπα ποιότητας του αέρα για την προστασία της δημόσιας υγείας, και το

κάνουν με την εξισορρόπηση των κινδύνων για την υγεία, την τεχνολογική κατάσταση, και λαμβάνοντας υπόψη διαφόρους οικονομικούς, κοινωνικούς και πολιτικούς παράγοντες. Σύμφωνα με την ικανότητα των διαφόρων κρατών στη διαχείριση της ποιότητας του αέρα, τα πρότυπα αυτά θα διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Με την υιοθέτηση των προτύπων, οι κυβερνήσεις θα θέλουν και θα μπορούν να παρακολουθούν την πρόοδο παρακολουθώντας τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει βοηθήσει κυβερνήσεις να καθορίσουν πρότυπα προσφέροντας τις κατευθυντήριες γραμμές όσον αφορά τα όρια έκθεσης που προορίζονται για παγκόσμια χρήση. Βασίζονται σε εκτεταμένες επιστημονικές μελέτες σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις συνέπειές της για την υγεία. Αν και οι δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία δεν μπορούν να εξαλειφθούν εντελώς κάτω από αυτά τα επίπεδα, οι κίνδυνοι μειώνονται σημαντικά και τα όρια έχουν αποδειχθεί ότι είναι εφικτά σε μεγάλες αστικές περιοχές σε ιδιαίτερα ανεπτυγμένες χώρες [49].

Δεδομένου ότι τα σωματίδια είναι πολύ μικρά, προκειμένου οι συγκεντρώσεις τους να μετρηθούν άμεσα, έχουν αναπτυχθεί όργανα που μετρούν έμμεσα άλλες ιδιότητες οι οποίες στη συνέχεια συσχετίζονται με την PSD. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα οργάνων τα οποία πραγματοποιούν τέτοιες μετρήσεις βασισόμενα σε διάφορες τεχνικές. Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα όσον αφορά το κόστος, την ακρίβεια, το εύρος μέτρησης του μεγέθους των σωματιδίων, τη χωρική και χρονική ανάλυση, καθώς επίσης και αντίστοιχους περιορισμούς.

Προκειμένου να ληφθούν ακριβείς αναφορές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων σε μια περιοχή, μπορεί να απαιτηθεί η χρήση πολλών οργάνων για να επιτευχθεί επαρκής χωρική ανάλυση. Ένας μόνο χώρος παρακολούθησης μπορεί να αντιπροσωπεύει μόνο τα επίπεδα μιας πολύ μικρής περιοχής λόγω των υψηλών βαθμίδων συγκέντρωσης. Τέτοιες μετρήσεις δεν θα είναι αρκετά λεπτομερείς για ορισμένες μελέτες ή δεν είναι αντιπροσωπευτικές των επιπέδων έκθεσης των κατοίκων που μένουν σε κοντινές περιοχές [46]. Τα όργανα μέτρησης PSD είναι τυπικά αρκετά δαπανηρά και στερούνται φορητότητας, γεγονός που περιορίζει τον αριθμό των οργάνων που μπορούν να αναπτυχθούν σε μια περιοχή. Φθηνοί αισθητήρες επιτρέπουν την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των μικροσωματιδίων με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση επιτρέποντας αρκετούς αισθητήρες να αναπτυχθούν ταυτόχρονα [32]. Ως εκ τούτου, υπάρχει η ανάγκη για ακριβή, χαμηλού κόστους και φορητά όργανα μέτρησης PSD.

Ως συνέπεια της ανάγκης για αισθητήρες χαμηλού κόστους, οι εταιρείες έχουν σπεύσει να δημιουργήσουν τέτοια προϊόντα. Επί του παρόντος, οι αισθητήρες με βάση την τεχνική LLS (Laser Light Scattering - Σκέδαση Φωτός Λείζερ) είναι οι μόνοι που μπορούν να παραχθούν φτηνά. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή έχει χαμηλή ακρίβεια αφού οι μετρήσεις μπορούν να επηρεαστούν από το δείκτη διάθλασης των σωματιδίων, την πυκνότητα, το μέγεθος, το σχήμα ([48]), και την υγρασία ([33]). Επιπλέον, αυτοί οι νέοι αισθητήρες χαμηλού κόστους δεν έχουν υποστεί αυστηρούς ελέγχους όσον αφορά την ακρίβειά τους. Χωρίς σωστή επιστημονική μελέτη, οι τελικοί χρήστες καθώς επίσης και οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων κινδυνεύουν να λαμβάνουν μια πληθώρα από αμφίβολα δεδομένα για την ποιότητα του αέρα. Το κοινό δεν διαθέτει τα τεχνικά μέσα για την επαλήθευση της ακρίβειας και πρέπει να εμπιστευτεί τους εκάστοτε

κατασκευαστές των αισθητήρων όσον αφορά την ποιότητα των μετρήσεων [36]. Σωστά τεκμηριωμένη επικύρωση των υφιστάμενων αισθητήρων χαμηλού κόστους θα διασφαλίσει ότι τα όργανα είναι ακριβή και οι χρήστες μπορούν να συμμορφώνονται με τις ληφθείσες μετρήσεις.

3.2 Περίληψη

Η LLS είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της PSD μετρώντας την ένταση του φωτός που σκεδάζεται από τα σωματίδια. Η σκεδαζόμενη ένταση εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός, τη γωνία σκέδασης, το μέγεθος των σωματιδίων και το σχετικό δείκτη διάθλασης μεταξύ μέσου και σωματιδίου. Η θεωρία υπόκειται σε αρκετούς περιορισμούς που εισάγουν σφάλματα κατά τη μέτρηση των συγκεντρώσεων πραγματικών αερολυμάτων. Έχουν γίνει επίσης προσπάθειες βελτίωσης του σχεδιασμού αισθητήρων LLS.

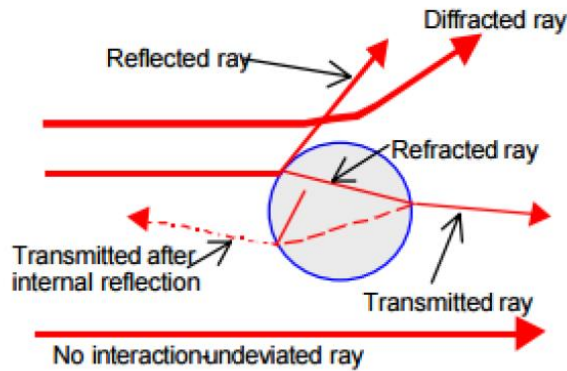
3.3 Τεχνική σκέδασης φωτός λείζερ

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται λεπτομερώς η τεχνική LLS για τη μέτρηση του PSD. Ο στόχος της μέτρησης PSD είναι να δημιουργηθεί ένα διάγραμμα της συγκέντρωσης των σωματιδίων σε σχέση με το μέγεθός τους για το υπό μελέτη δείγμα. Η συγκέντρωση μπορεί να εκφράζεται σε σχέση με τον αριθμό των σωματιδίων, τη μάζα τους, τον όγκο τους ή την επιφάνειά τους. Η απόκτηση μιας τέτοιας γραφικής παράστασης απαιτεί συνήθως την ταξινόμηση των σωματιδίων κατά το μέγεθος αρχικά και στη συνέχεια από τον αριθμό τους. Μιας και τα σωματίδια είναι πολύ μικρά για να μετρηθούν άμεσα, μια άλλη ιδιότητα μετριέται και σχετίζεται με το μέγεθος. Οι τεχνικές μέτρησης εκμεταλλεύονται τουλάχιστον μία από τις ακόλουθες ιδιότητες σωματιδίων:

- Διάχυση
- Αδράνεια
- Οπτικές ιδιότητες
- Ηλεκτρική κινητικότητα ([60])

3.3.1 Θεωρία της λειτουργίας

Η τεχνική LLS βασίζεται στο γεγονός ότι τα σωματίδια, με βάση το μέγεθός τους, σκεδάζουν το φως σε διάφορες γωνίες και εντάσεις. Όταν το φως χτυπά ένα σωματίδιο, είτε σκεδάζεται, είτε διαθλάται, είτε ανακλάται, είτε απορροφάται, όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Μικρότερα σωματίδια σκεδάζουν το φως πιο έντονα και σε μικρότερες γωνίες σε σχέση με τα μεγαλύτερα σωματίδια. Ένα δείγμα αερολύματος παράγει ένα μοτίβο σκεδαζόμενου φωτός με βάση την ένταση και τη γωνία, το οποίο μετράτε από έναν αναλυτή. Όλες οι πληροφορίες για την PSD περιέχονται σε αυτό το μοτίβο σκέδασης, και λαμβάνονται με βάση έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί τη θεωρία της σκέδασης Mie [47].



Εικόνα 18: Τα διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν όταν φως προσπίπτει πάνω σε ένα σωματίδιο. (Πηγή: [34])

Η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός είναι συνάρτηση του μήκους κύματος λ , της γωνίας σκέδασης θ , του μεγέθους του σωματιδίου d_p και του σχετικού δείκτη διάθλασης η μεταξύ του μέσου και του σωματιδίου.

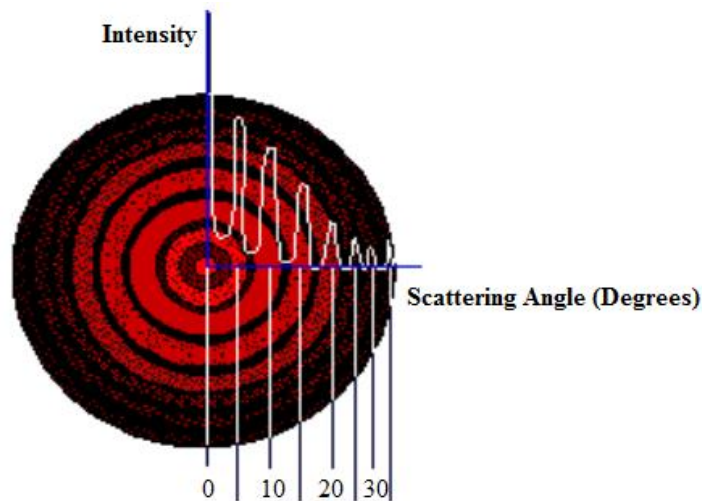
Έτσι, το μέγεθος του σωματιδίου μπορεί να υπολογιστεί εάν είναι γνωστά τα μεγέθη I_{sc} , I_{in} , θ , λ και n . Να σημειωθεί ότι η γωνία σκέδασης μετριέται σε σχέση με την κατεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης. Αυτή η συσχέτιση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$I_{sc} = I_{in}(\theta, \lambda, d_p, n) \quad (3.1)$$

Προκειμένου να συσχετιστεί το σχεδιάγραμμα των γωνιών σκέδασης με το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων, χρησιμοποιείται η θεωρία της σκέδασης Mie. Αυτό όμως γίνεται με την προϋπόθεση ότι όλες οι άλλες παράμετροι στην εξίσωση (3.1) είναι γνωστές. Η θεωρία αυτή προβλέπει με μεγάλη ακρίβεια τη γωνία και την ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που προκύπτει από σφαιρικά σωματίδια οποιουδήποτε μεγέθους σε οποιοδήποτε μέσο διάδοσης. Η γωνία σκέδασης καθώς και το μήκος κύματος λαμβάνουν σταθερές και προκαθορισμένες τιμές, μιας και εξαρτώνται από το σχεδιασμό του αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί. Πολλές φορές όμως είναι δύσκολο να υπολογιστεί ο δείκτης διάθλασης εάν ειδικά είναι άγνωστη η σύσταση του σωματιδίου. Οι περιορισμοί και οι συνθήκες της θεωρίας είναι οι ακόλουθοι.

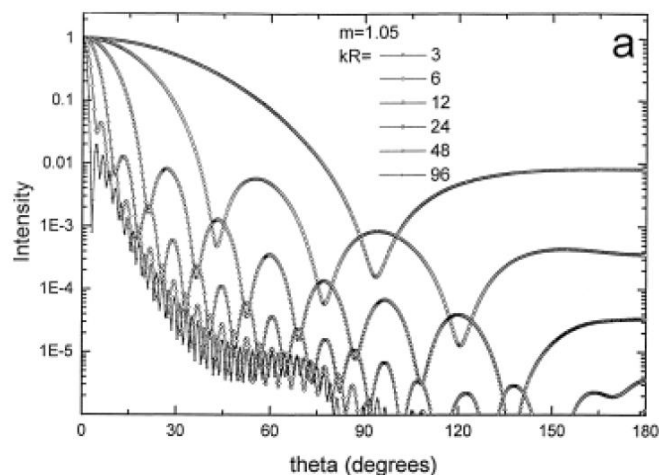
- Η προσπίπτουσα δέσμη αποτελείται από μονοχρωματικό και πολωμένο φως
- Το σωματίδιο είναι ισότροπο και σφαιρικό
- Λαμβάνονται υπόψη η σκέδαση και η απορρόφηση
- Λαμβάνεται υπόψη μόνο φως που σκεδάζεται κατευθείαν από το σωματίδιο και όχι φως που σκεδάζεται από το ένα σωματίδιο στο άλλο ([47]).

Ένα παράδειγμα ενός σχεδιαγράμματος σκέδασης ενός και μόνο σωματιδίου φαίνεται στην εικόνα 19. Το σχεδιάγραμμα δείχνει την ένταση του σκεδαζόμενου φωτός σε διάφορες γωνίες σκέδασης όπως προβάλλεται σε μια επίπεδη οθόνη καθώς επίσης και τη γραφική αναπαράσταση αυτών των μεγεθών.



Εικόνα 19: Σχεδιάγραμμα σκέδασης από ένα μόνο σωματίδιο. (Πηγή: [47])

Κάθε μέγεθος σωματιδίων παράγει ένα μοναδικό μοτίβο σκέδασης, για ένα καθορισμένο υλικό, μέσο διάδοσης, και μήκος κύματος του φωτός. Η εικόνα 20 δείχνει μοτίβα σκέδασης για διάφορα μεγέθη σωματιδίων ως συνάρτηση της γωνίας σκέδασης. Τα μοτίβα σκέδασης ακολουθούν επίσης την υπέρθεση. Όταν τα μοτίβα υπερτίθενται από τα ίδια μεγέθη σωματιδίων, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο μοτίβο αλλά φωτεινότερο. Η επικάλυψη διαφορετικών μοτίβων από διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων δημιουργεί ένα νέο σύνθετο μοτίβο [47].



Εικόνα 20: Καμπύλες σκέδασης Mie για σωματίδια διαφόρων μεγεθών. (Πηγή: [44])

Οι φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της έντασης του σκεδαζόμενου φωτός. Η ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν σε αυτές τις συσκευές προκαλεί απελευθέρωση ηλεκτρονίων. Αυτό παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα (ρεύμα) το οποίο είναι ανάλογο με την ένταση του ανιχνευμένου φωτός. Οι φωτοδιόδοι είναι ένας τύπος φωτοανιχνευτών κατασκευασμένες από μια ημιαγώγιμη σύνδεση. Μια σειρά από φωτοδιόδους τοποθετούνται στο εστιακό επίπεδο ενός αισθητήρα LLS και συλλέγουν πολλαπλά σήματα. Η περιοχή που καταλαμβάνει κάθε στοιχείο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπάρχει επαρκές προσπίπτων φως για την παραγωγή κατάλληλου σήματος προς τον θόρυβο του υποβάθρου [47].

Καθώς οι εξισώσεις του περιγράφουν τη σκέδαση Mie είναι αρκετά πολύπλοκες ([44]), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σκέδαση Rayleigh, που είναι μια απλούστευση που γίνεται όταν το μέγεθος του σωματιδίου είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Αρχικά καθορίζεται μια παράμετρος μεγέθους α

$$\alpha = \frac{\pi \cdot d_p}{\lambda} \quad (3.2)$$

Όταν ισχύει $\alpha \ll \lambda$, τότε λαμβάνει χώρα η σκέδαση Rayleigh. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η σκεδαζόμενη ένταση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

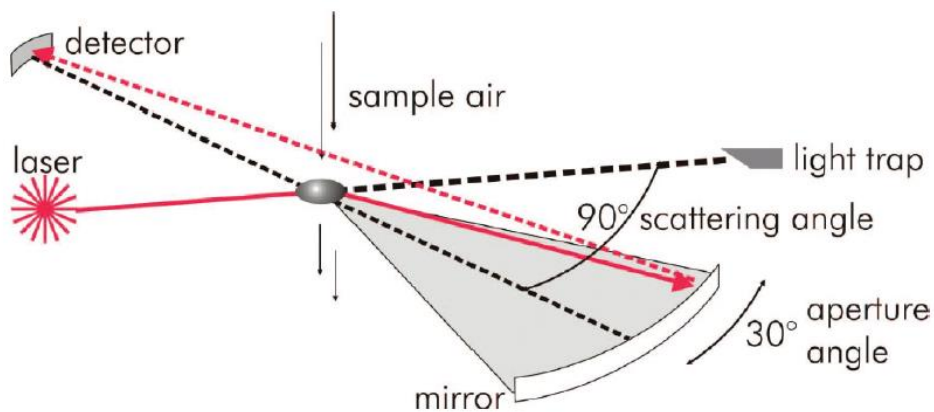
$$I_{sc} = I_{in} \cdot \frac{1 + \cos^2(\theta)}{2 \cdot L^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \left(\frac{d_p}{2}\right)^6 \quad (3.3)$$

Όπου L είναι η απόσταση από το σωματίδιο ([61]).

3.3.2 Η ανάπτυξη των οργάνων μέτρησης

Οι θεωρητικές καμπύλες σκέδασης της τεχνικής LLS δεν είναι πρακτικά χρήσιμες για τη μέτρηση της συγκέντρωσης PSD. Αντί αυτού, χρησιμοποιείται μια σειρά σωματιδίων βαθμονόμησης γνωστού μεγέθους για τον προσδιορισμό της απόκρισης του οργάνου σε όλο το εύρος μεγέθους των σωματιδίων. Στη συνέχεια προσαρμόζεται μία καμπύλη στις μετρήσεις για να επιτρέψει την ταξινόμηση των σωματιδίων που αντιστοιχούν μεταξύ των σημείων βαθμονόμησης [61]. Παρ' όλα αυτά, γίνονται προσπάθειες για τη βελτίωση του σχεδιασμού αισθητήρων βασισμένων στην τεχνική LLS.

Οι Grimm και Eatough (2009) ([30]) ανέπτυξαν ένα φασματοφωτόμετρο αιωρούμενων σωματιδίων με βάση τη σκέδαση του φωτός που αποτελείται από: (i) μια είσοδο για τα αιωρούμενα σωματίδια, (ii) μια διάταξη παραγωγής φωτός λέιζερ συνδεδεμένη με (iii) μια αντλία δειγματοληψίας υπό σταθερή ροή αέρα, (iv) αναλογική πλακέτα για την ταξινόμηση των σωματιδίων κατά μέγεθος, (v) ψηφιακή πλακέτα για τη μετατροπή, επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων και (vi) μια σειριακή θύρα. Η οπτική διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 21, που αποτελείται από μια φωτοδίοδο ανίχνευσης του σκεδαζόμενου φωτός υπό γωνία 90° σε σχέση με το προσπίπτον φως. Τα σωματίδια από 0,25 έως 32 μm μετρήθηκαν με τη χρήση μιας απλής διόδου λέιζερ και κατηγοριοποιήθηκαν σε 32 διαύλους μεγέθους. Το όργανο παράγει συνεχώς φρέσκο αέρα για να εξασφαλιστεί ότι η σκόνη δεν θα μολύνει την οπτική διάταξη λέιζερ.



Εικόνα 21: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης που αναπτύχθηκε από τους Grimm και Eatough (Πηγή: [30])

Η αποτελεσματικότητα συλλογής σωματιδίων έως 10-20 μm βρέθηκε ότι είναι ευαίσθητη από την ταχύτητα του ανέμου. Για ταχύτητες πάνω από 8 m/s, η αποτελεσματικότητα συλλογής μειώνεται. Καθιερώθηκε έτσι μια καμπύλη δειγματοληψίας με βάση την αποτελεσματικότητα προκειμένου να γίνουν οι αναγκαίες διορθώσεις. Προκειμένου να υπολογιστεί η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων, χρησιμοποιήθηκε ένας συντελεστής πυκνότητας που αντιστοιχεί σε ένα καθιερωμένο παράγοντα "αστικού περιβάλλοντος". Η μετατροπή ολοκληρώθηκε με βάση τις συγκρίσεις με την Federal Reference Method (FRM) σε διάφορα αστικά περιβάλλοντα, και υποθέτοντας ότι τα αερολύματα σε όλα τα αστικά περιβάλλοντα κυριαρχούνται από παρόμοιες ανθρωπογενείς εκπομπές. Αυτό επιτρέπει στο όργανο να χρησιμοποιήσει μια σταθερή πυκνότητα σωματιδίων σε όλο το εύρος μεγέθους σε όλες τις θέσεις για να υπολογίσει τη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων.

Ενώ τα αποτελέσματα των Grimm και Eatough ([30]) ήταν ευνοϊκά, οι ερευνητές έκαναν μια σημαντική υπόθεση ότι τα αερολύματα σε όλα τα αστικά περιβάλλοντα κυριαρχούνται από παρόμοιες ανθρωπογενείς εκπομπές. Αυτό μπορεί να είναι ικανοποιητικό για τη βαθμονόμηση του οργάνου όσον αφορά τη χρήση σε αστικά περιβάλλοντα, αλλά προφανώς περιορίζει τη χρήση της συσκευής οπουδήποτε αλλού. Επιπλέον, τυχόν αλλαγές στις πηγές εκπομπών στο αστικό περιβάλλον θα προκαλούσαν σφάλματα μέτρησης που δεν θα μπορούσαν να εντοπιστούν από τη συσκευή.

Οι αισθητήρες LLS μπορούν επίσης να παρέχουν μετρήσεις συγκέντρωσης με βάση τη μάζα εάν η πυκνότητα του σωματιδίου είναι γνωστή. Υποθέτοντας σφαιρικά σωματίδια, υπολογίζοντας τον όγκο κάθε μεγέθους σωματιδίων, ο πολλαπλασιασμός με την πυκνότητα αποδίδει τη μάζα. Ωστόσο, οι πυκνότητες των σωματιδίων ποικίλλουν σημαντικά από 700 kg/m^3 για τα έλαια σε αρκετές χιλιάδες kg/m^3 για τα μέταλλα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι Schrobrenhauser et al. ([41]) ανέπτυξαν ένα LLS αισθητήρα ικανό να προσδιορίζει τις πυκνότητες των σωματιδίων χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο κρουστικού εκκρεμούς.

Παρόλο που οι συσκευές σκέδασης φωτός είναι συνήθως βαθμονομημένες στο εργοστάσιο, είναι πιθανό να παρουσιάσουν σημαντική μεροληψία όταν

χρησιμοποιούνται στο πεδίο. Οι διαφορές στον δείκτη διάθλασης, την πυκνότητα, το μέγεθος και το σχήμα μεταξύ της βαθμονόμησης και των πραγματικών αερολυμάτων οδηγούν σε μετρούμενα σφάλματα [48].

3.3.3 Αξιολόγηση αισθητήρων σκέδασης φωτός

Οι αισθητήρες LLS είναι ευαίσθητοι στη σύνθεση των σωματιδίων, οπότε η διαφορά μεταξύ των αερολυμάτων που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση και των πραγματικών αερολυμάτων, εισάγουν μεγάλη αβεβαιότητα και σφάλματα στις μετρήσεις. Επιπλέον, άλλοι παράγοντες όπως η υγρασία και η θερμοκρασία έχουν βρεθεί ότι επηρεάζουν τις μετρήσεις [46]. Ωστόσο, μελέτες που αξιολογούν εμπορικά διαθέσιμους αισθητήρες έδειξαν ισχυρούς συσχετισμούς με καλά χαρακτηρισμένα όργανα. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν τη δυνατότητα για αισθητήρες LLS να παρακολουθούν την PM με μεγάλη χωρική και χρονική ανάλυση.

Β. ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ – ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

4.1 Τι θέλουμε να φτιάξουμε

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, σκοπός της εργασίας είναι η δημιουργία μιας διάταξης με την οποία θα γίνουν μετρήσεις της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM10, PM2.5 και PM1.0 σε ένα κεντρικό σημείο της πόλης της Άρτας με ιδιαίτερα αυξημένη κυκλοφοριακή κίνηση, για τα δεδομένα της πόλης, και μια στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, προκειμένου να βγουν συμπεράσματα για τον σωματιδιακό φόρτο στη συγκεκριμένη περιοχή.

4.2 Τι υλικά θα χρειαστούμε

Για την κατασκευή της διάταξης θα χρειαστούμε τα παρακάτω υλικά

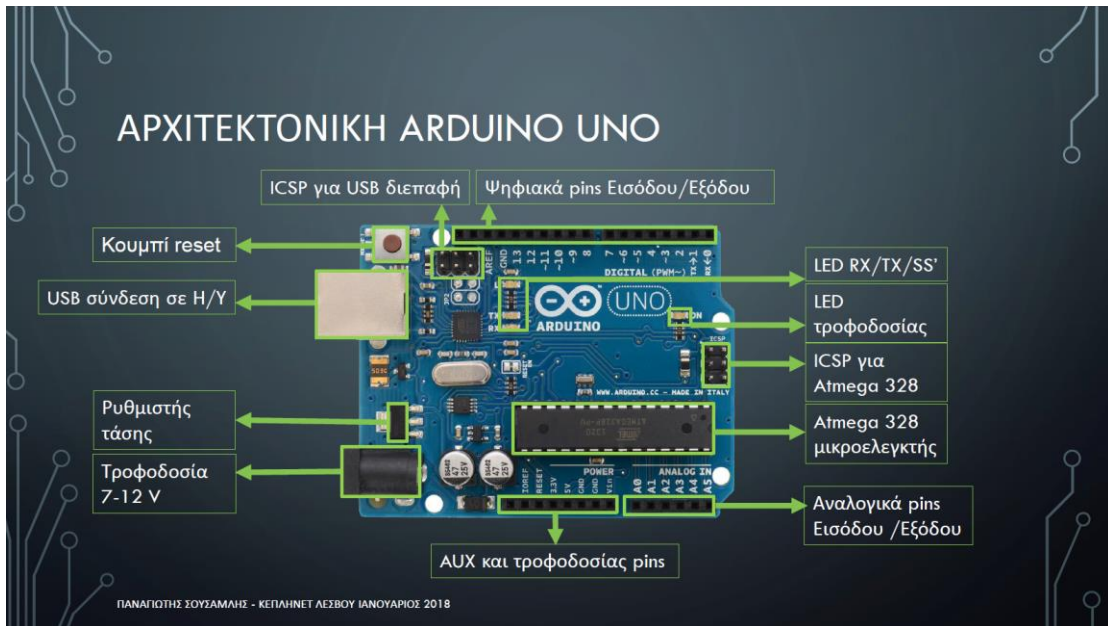
- **Μικροελεγκτής ARDUINO UNO**



Εικόνα 22: Η πλακέτα ARDUINO UNO (Πηγή: [64])

Το Arduino είναι μία οικογένεια μικροελεγκτών. Τον κάθε μικροελεγκτή μπορούμε να τον χαρακτηρίσουμε και ως μία μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα η οποία έχει ενσωματωμένο έναν μικροεπεξεργαστή, μία μνήμη και μία είσοδο / έξοδο. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να εκτελέσει λειτουργίες όπως ένας μικρός υπολογιστής (για παράδειγμα με το πάτημα ενός κουμπιού μπορεί να κάνει ένα μοτέρ να μπει σε λειτουργία). Τις ενέργειες αυτές, το Arduino μπορεί να τις υλοποιήσει μέσω του περιβάλλοντος Arduino IDE αλλά και όχι μόνο. Το Arduino είναι ένας εύκολος και ευχάριστος τρόπος να μάθει κάποιος να προγραμματίζει αν δεν γνωρίζει προγραμματισμό. Οι μικροελεγκτές Arduino είναι πολύ γνωστοί και πολύ αναγνωρισμένοι στον κλάδο διότι με αυτούς έχουν δημιουργηθεί πολλά διαφορετικά έργα από τα πιο απλά μέχρι και τα πιο σύνθετα.

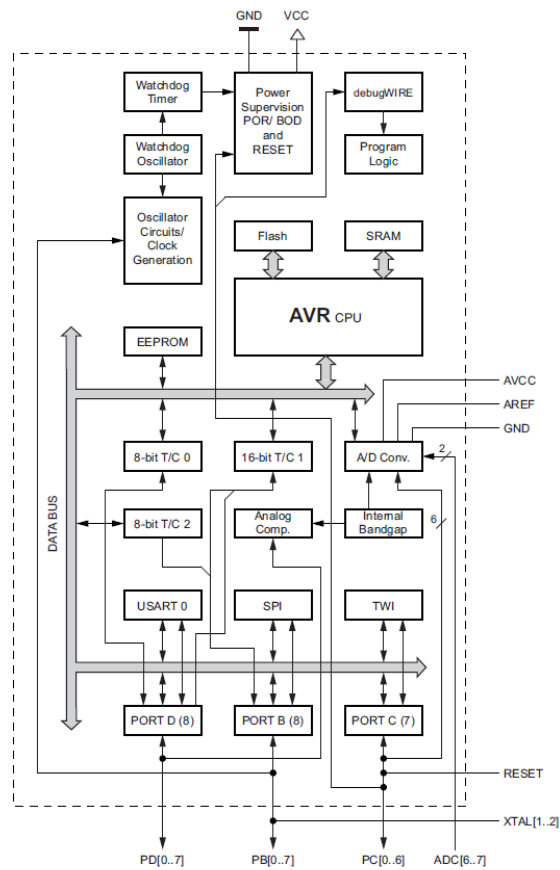
Το Arduino UNO έχει 14 ψηφιακούς ακροδέκτες Εισόδου/Εξόδου. Λειτουργούν στα 5 Volts και έχουν την δυνατότητα να παρέχουν ή να καταβυθίζουν ένταση της τάξεως των 40mA. Σε κάθε pin υπάρχει εσωτερικά ένας Pull-up αντιστάτης στα 20-50 ΚΩ. Επιπλέον, έχει 6 αναλογικούς ακροδέκτες Εισόδου. Αυτοί μπορούν να διαβάσουν αναλογικές τιμές όπως η τάση μιας μπαταρίας κτλ και να τις μετατρέψουν σε έναν αριθμό από 0-1023. Η μέτρηση της τάσης γίνεται από προκαθορισμένα από 0 έως 5 volts. Εκτός αυτού, 6 εκ των 14 ψηφιακών ακροδεκτών οι P3, P5, P6, P9, P10 και P11 έχουν την δυνατότητα να προγραμματιστούν ώστε να λειτουργούν ως αναλογικές Έξοδοι [62].



Εικόνα 23: Αρχιτεκτονική ARDUINO UNO (Πηγή: [8])



Εικόνα 24: Χαρακτηριστικά ARDUINO UNO (Πηγή: [8])



Εικόνα 25: Το block diagram του μικροελεγκτή ATMEGA 328 (Πηγή: [63])

- Αισθητήρας SEN0177



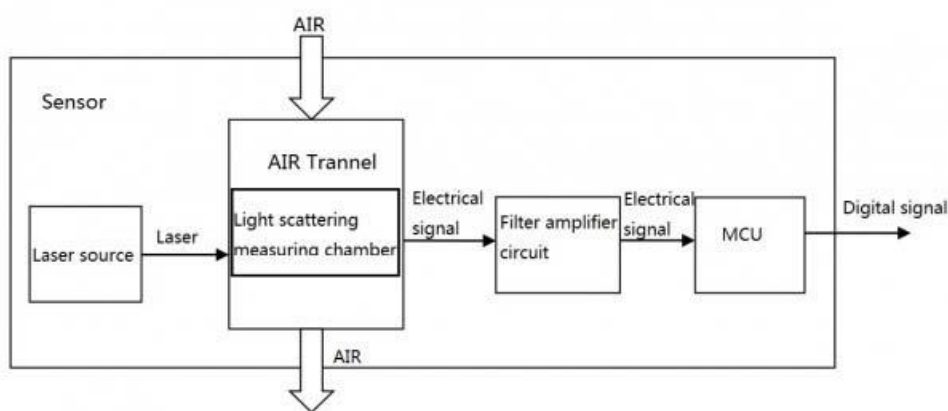
Εικόνα 26: Ο αισθητήρας μέτρησης συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων SEN0177 (Πηγή: [20])

Εισαγωγή

Ο αισθητήρας λέιζερ σωματιδίων σκόνης PM2.5 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας μέτρησης της συγκέντρωσης των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του αριθμού των αιωρούμενων σωματιδίων ύλης σε μια καθορισμένη μονάδα όγκου αέρα. Η διάμετρος των σωματιδίων μπορεί να κυμανθεί από 0.3 έως 10 μm . Μέσω ψηφιακής διεπαφής μπορεί να εξάγει αποτελέσματα για την ποιότητα του αέρα όσον αφορά τα εκάστοτε σωματίδια. Οι αισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν σε ποικίλα όργανα που χρησιμοποιούνται για περιβαλλοντικές μετρήσεις της αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης προκειμένου να παρέχουν ακριβή δεδομένα για τις συγκεντρώσεις [20].

Πώς λειτουργεί:

Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί τη μέθοδο της σκέδασης ακτινοβολίας λέιζερ. Και συγκεκριμένα τη σκέδαση της ακτινοβολίας λέιζερ στα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, ενώ συλλέγει το σκεδασμένο φως σε συγκεκριμένη γωνία, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα χρονικό διάγραμμα της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας. Μετά τη συλλογή των δεδομένων από τον μικροεπεξεργαστή, παίρνουμε τη σχέση που συνδέει το πεδίο του χρόνου με το πεδίο της συχνότητας της ακτινοβολίας με μετασχηματισμούς Fourier και έπειτα, μέσω μιας σειράς πολύπλοκων αλγοριθμικών πράξεων, λαμβάνουμε τον αριθμό των διαφόρων μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων στη μονάδα του όγκου [20].



Εικόνα 27: Σχηματικό διάγραμμα της δομής του αισθητήρα (Πηγή: [20])

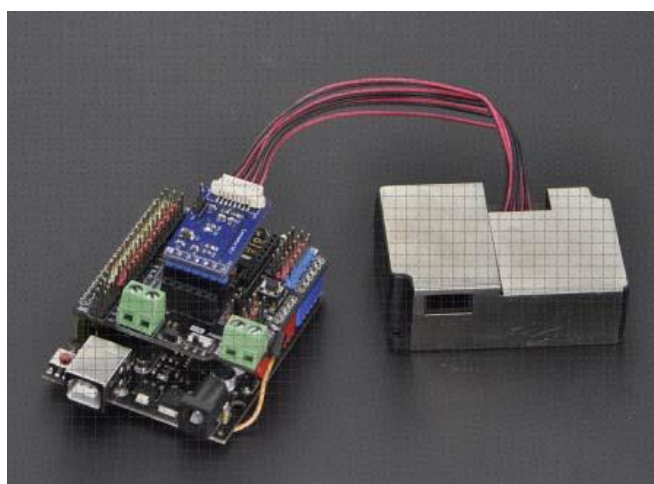
Προδιαγραφές

Basic	Feature
Operating voltage :4.95 ~ 5.05V Maximum electric current: 120mA Measuring pm diameter: 0.3~1.0、1.0~2.5、2.5~10 (um) Measuring pm range : 0~500 ug/m ³ Standby current: ≤200 uA Response time: ≤10 s Operating temperature range: -20 ~ 50C Operating humidity range: 0 ~ 99% RH Maximum size: 65 × 42 × 23 (mm) MTBF: >= 5 years	Quick response Standard serial input word output Second-order multi-point calibration curve The minimum size of 0.3 micron resolution

Εικόνα 28: Πίνακας με τις προδιαγραφές του αισθητήρα SEN0177 (Πηγή: [20])

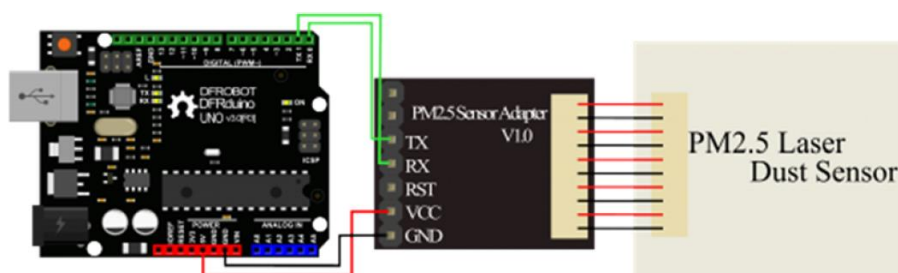
Διάγραμμα σύνδεσης

Αν έχετε μια επέκταση IO expansion shield, μπορείτε απλά να εισάγετε τον αντάπτορα του αισθητήρα PM2.5 επάνω σε αυτή, και μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τη σειριακή θύρα για την παρακολούθηση των δεδομένων.



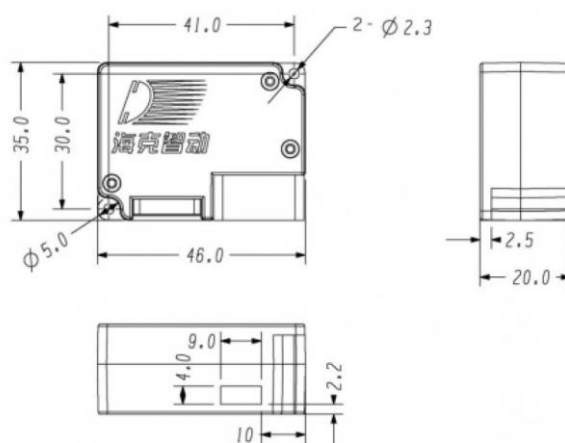
Εικόνα 29: Συνδεσμολογία του αισθητήρα SN0177 με το ARDUINO UNO με τη βοήθεια μιας IO expansion shield (Πηγή: [20])

Εάν δεν έχετε μια επέκταση IO expansion shield, μπορείτε να ακολουθήσετε το επόμενο διάγραμμα συνδεσμολογίας.



Εικόνα 30: Συνδεσμολογία του αισθητήρα SN0177 με το ARDUINO UNO χωρίς τη χρήση IO expansion shield (Πηγή: [20])

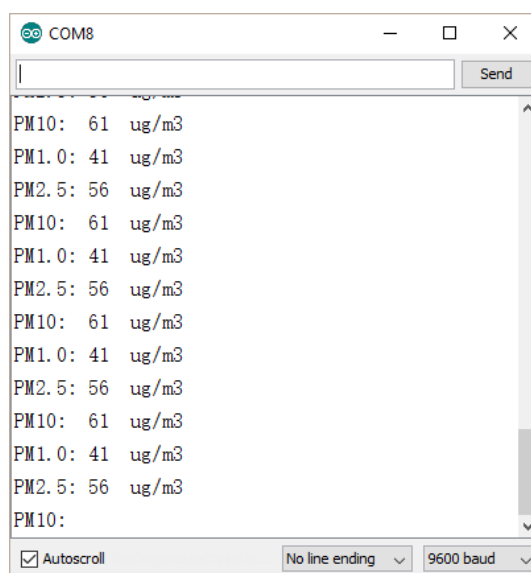
Διαστάσεις



Εικόνα 31: Διαστάσεις του αισθητήρα SEN0177 (Πηγή: [20])

Αποτελέσματα

Απαιτείται αναμονή 30 δευτερολέπτων για τα δεδομένα



Εικόνα 32: Παράδειγμα αποτελεσμάτων, όπως προκύπτουν από τη σειριακή του αισθητήρα SN0177 (Πηγή: [20])

• Ρολόι πραγματικού χρόνου RTC DS3232

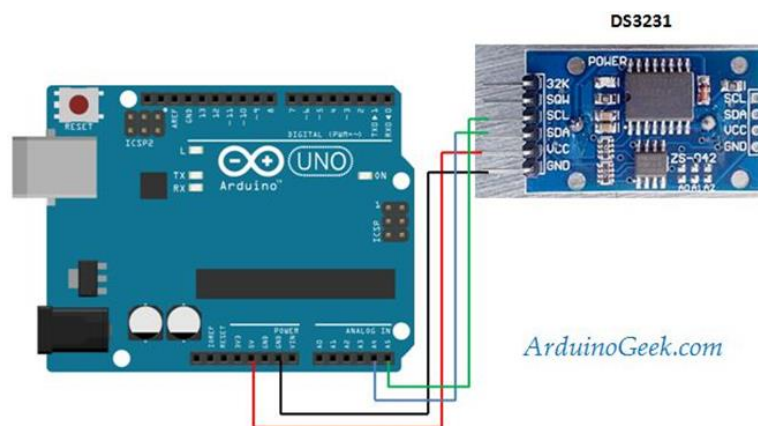
Γενική περιγραφή

Το DS3232 είναι ένας χαμηλού κόστους κρυσταλλικός ταλαντωτής (temperature compensated crystal oscillator (TCXO)) που διαθέτει ένα πολύ ακριβές ενσωματωμένο ρολόι πραγματικού χρόνου (real-time clock (RTC)) και 236 byte μνήμης SRAM που υποστηρίζεται από μπαταρία. Επιπλέον, το DS3232 ενσωματώνει μια είσοδο μπαταρίας και διατηρεί ακριβή χρονομέτρηση όταν διακόπτεται η κύρια τροφοδοσία της συσκευής [21].

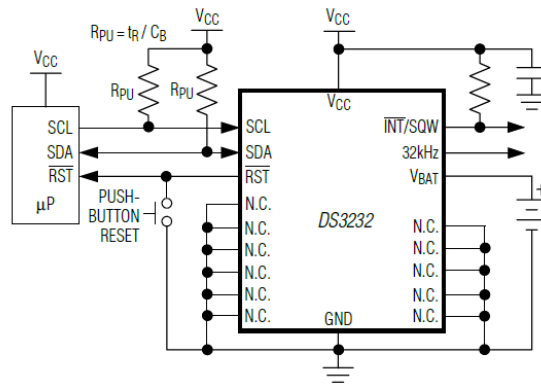
Το RTC διατηρεί πληροφορίες για δευτερόλεπτα, λεπτά, ώρες, ημέρα, ημερομηνία, μήνα και έτος. Η ημερομηνία στο τέλος του μήνα προσαρμόζεται αυτόματα για μήνες με λιγότερες από 31 ημέρες, συμπεριλαμβανομένων των διορθώσεων για τα δίσεκτα έτη. Το ρολόι λειτουργεί είτε σε 24ωρη είτε σε 12ωρη μορφή με ένδειξη AM / PM. Οι διευθύνσεις και τα δεδομένα μεταφέρονται σειριακά μέσω ενός αμφίδρομου διαύλου I2C [21].



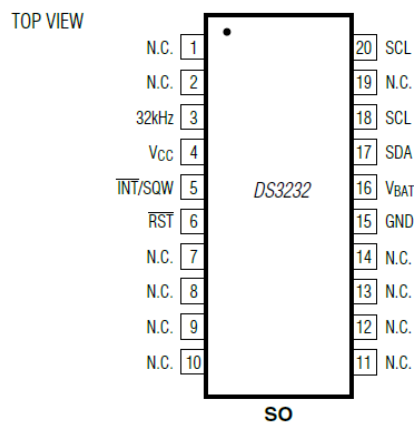
Εικόνα 33: Ρολόι πραγματικού χρόνου RTC DS3232 (Πηγή: [21])



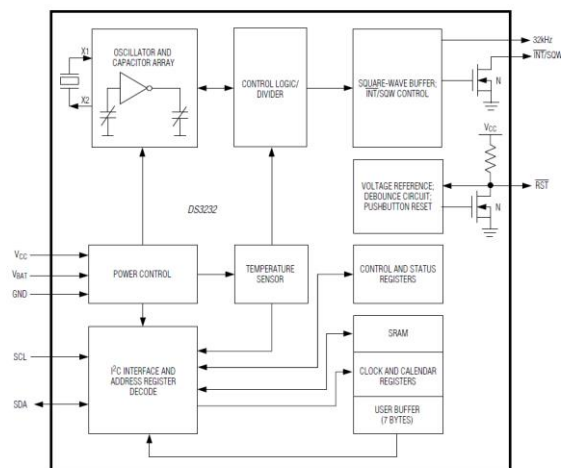
Εικόνα 34: Συνδεσμολογία RTC DS3232 με Arduino Uno (Πηγή: [21])



Εικόνα 35: Κύκλωμα λειτουργίας RTC DS3232 (Πηγή: [21])



Εικόνα 36: Διαμόρφωση Pin του RTC DS3232 (Πηγή: [21])



Εικόνα 37: Block Diagram του RTC DS3232 (Πηγή: [21])

- **Αισθητήρας Θερμοκρασίας - Υγρασίας AM2301**

Ο AM2301 αισθητήρας ψηφιακής ανίχνευσης υγρασίας και θερμοκρασίας έχει ρυθμισθεί ώστε να παρέχει ακριβή ψηφιακή μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας. Εφαρμόζεται σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις υψηλής τεχνολογίας για μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας, και διασφαλίζει υψηλή πιστότητα και μεγάλης διάρκειας σταθερότητα. Η μονάδα περιλαμβάνει έναν capacitive sensor για μέτρηση της υγρασίας και μεγάλης ακρίβειας συσκευή μέτρησης θερμοκρασίας, και συνδέεται με έναν υψηλής απόδοσης 8-bit microcontroller. Το προϊόν είναι εξαιρετικής ποιότητας, παρέχει γρήγορη αντίδραση, ικανότητα αντι-μπλοκαρίσματος και χαμηλό κόστος. Κάθε αισθητήρας περιλαμβάνει θάλαμο εξαιρετικής ακρίβειας ρύθμισης της υγρασίας. Με το τυπικό single-bus interface, η εγκατάσταση είναι γρήγορη και εύκολη. Το μικρό μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση, η αποστολή σήματος σε αποστάσεις έως και 20 μέτρα, το κάνουν ιδανική επιλογή για όλα τα είδη των εφαρμογών, ακόμα και των πιο δύσκολων [17].



Εικόνα 38: Αισθητήρας Θερμοκρασίας – Υγρασίας AM2301 (Πηγή: [17])

Measuring range:

Temperature: -40~80

Humidity: 0-99.9% RH

Accuracy: (in 25)

Temperature: 0.5

Humidity: 3% RH (10...90RH)

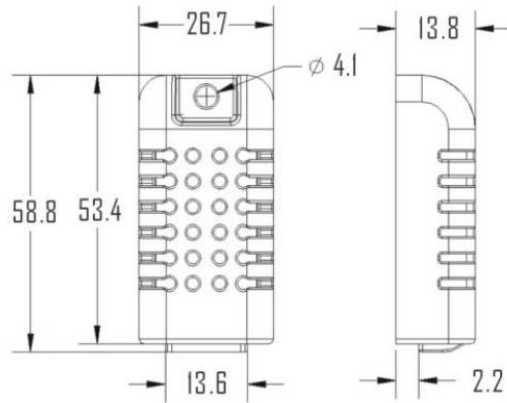
Sensor type: Temperature resistive sensor, Humidity capacitive sensors

Operating temperature range: 40~80

Power supply: 3.3V~5.2V

DC (5V recommended)

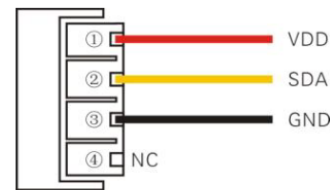
Εικόνα 39: Χαρακτηριστικά λειτουργίας του αισθητήρα AM2301 (Πηγή: [17])



Dimensions (unit: mm)

Εικόνα 40: Διαστάσεις του αισθητήρα AM2301 (Πηγή: [17])

Pin	Color	Name	Description
1	Red	VDD	Power (3.3V–5.2V)
2	Yellow	SDA	Serial data, Dual-port
3	Black	GND	Ground
4		NC	Empty



Εικόνα 41: Διαμόρφωση Pin του αισθητήρα AM2301 (Πηγή: [17])

- Οθόνη 3.2'' microLCD PICASO Display μLCD-32PTU



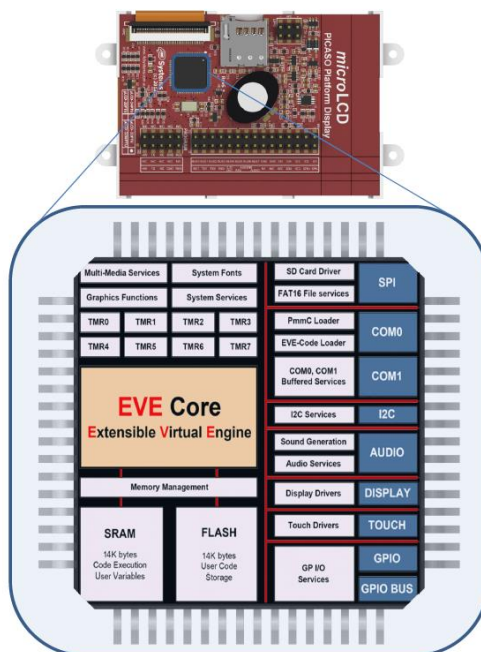
Εικόνα 42: Η οθόνη 3.2'' microLCD PICASO Display μLCD-32PTU (Πηγή: www.4dsystems.com.au)

Επισκόπηση

Η οθόνη μLCD-32PTU είναι ένα Intelligent Display Module γεμάτο με πολλές δυνατότητες, έτοιμο να γίνει το GUI (Graphical User Interface) για την επόμενη εφαρμογή έχετε θέσει ως στόχο. Είναι η τέλεια επιλογή για πολλές εφαρμογές που απαιτούν μια έξυπνη διεπαφή γραφικών. Ενσωματωμένος στην καρδιά του σχεδιασμού είναι ο επεξεργαστής PICASO Graphics Processor, ο οποίος οδηγείται από μια εξαιρετικά βελτιστοποιημένη μηχανή εικονικού πυρήνα - EVE (Extensible Virtual Engine - Επεκτάσιμη εικονική μηχανή). Η οθόνη μLCD-32PTU είναι ένας κομψός συνδυασμός μιας οθόνης LCD 3,2 '' (240x320), ενός ενισχυτή και ηχείου, υποδοχή κάρτας micro-SD, υποστήριξη μπαταρίας Lithium Polymer (LiPo), μαζί με μια ομάδα ακίδων εισόδου / εξόδου γενικής χρήσης (GPIO's), συμπεριλαμβανομένων των I2C και των σειριακών επικοινωνιών. Η μLCD-32PTU μπορεί να προγραμματιστεί στη

μητρική της γλώσσα 4DGL (παρόμοια με τη C), χρησιμοποιώντας τη σουίτα εργαλείων λογισμικού Workshop4 IDE ή μπορεί να διαμορφωθεί ως σειριακή εξαρτημένη συσκευή (slave) για χρήση με τον αγαπημένο σας κεντρικό ελεγκτή [51].

Ο επεξεργαστής PICASO



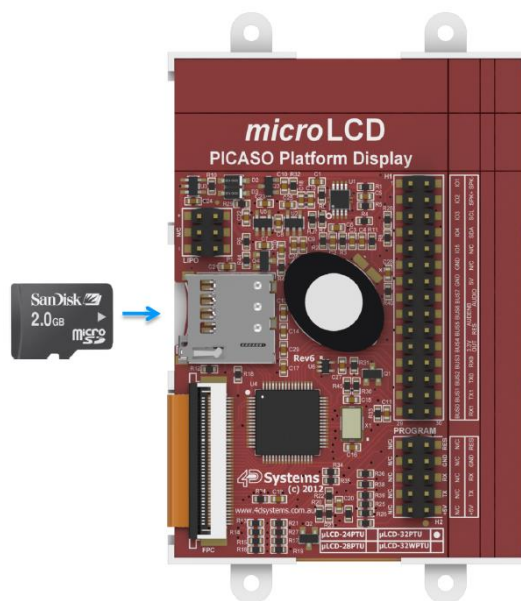
Εικόνα 43: Ο επεξεργαστής PICASO (Πηγή: [51])

Ο PICASO είναι ένας προσαρμοσμένος ενσωματωμένος επεξεργαστής γραφικών σχεδιασμένος για διασύνδεση με πολλές δημοφιλείς οθόνες OLED και LCD. Ισχυρά γραφικά, κείμενο, εικόνα, κινούμενα σχέδια και αμέτρητα περισσότερα χαρακτηριστικά ενσωματώνονται ακριβώς μέσα στο τσιπ. Προσφέρει μια απλή διεπαφή plug-n-play σε πολλές έγχρωμες οθόνες LCD και OLED 16bit 80-Series. Ο PICASO προσφέρει μια ολοκληρωμένη σουίτα χαρακτηριστικών, σχεδιασμένη να βρίσκεται στην πρώτη γραμμή οποιουδήποτε προϊόντος που απαιτεί χρώμα, κινούμενα σχέδια, εικόνες και ήχο. Ο PICASO είναι επίσης αρκετά ισχυρός για έλεγχο και επικοινωνία με περιφερειακές συσκευές μέσω SPI, I2C ή Serial Port [51].

Η οθόνη 3.2'' TFT LCD

Το μLCD-32PTU διαθέτει οθόνη TFT LCD 3,2 ιντσών στην πρώτη γραμμή του σχεδιασμού που προβάλλει τη δύναμη και τις δυνατότητες του επεξεργαστή PICASO. Συνδυάζοντας ανάλυση 240x320 εικονοστοιχείων με 65K χρώματα True to Life, το μLCD-32PTU προσφέρει μια εκπληκτική πληθώρα χρωμάτων ιδανικών για κινούμενες εικόνες, προβολές διαφανειών και πολλές παρουσιάσεις πολυμέσων [51].

Θύρα για κάρτα micro-SD



Εικόνα 44: Η Θύρα micro-SD (Πηγή: [51])

Το μ LCD-32PTU υποστηρίζει κάρτες μνήμης micro-SD μέσω της ενσωματωμένης υποδοχής micro-SD. Αυτό παρέχει στον χρήστη επεκτάσιμο χώρο μνήμης κατάλληλο για όλη την ανάκτηση αρχείων πολυμέσων, όπως εικόνες, κινούμενα σχέδια και κλιπ ταινιών, καθώς και εφαρμογές καταγραφής δεδομένων. Υποστηρίζει έως και 2 GB micro-SD καθώς και κάρτες μνήμης micro-SDHC ξεκινώντας από 4 GB και άνω [51].

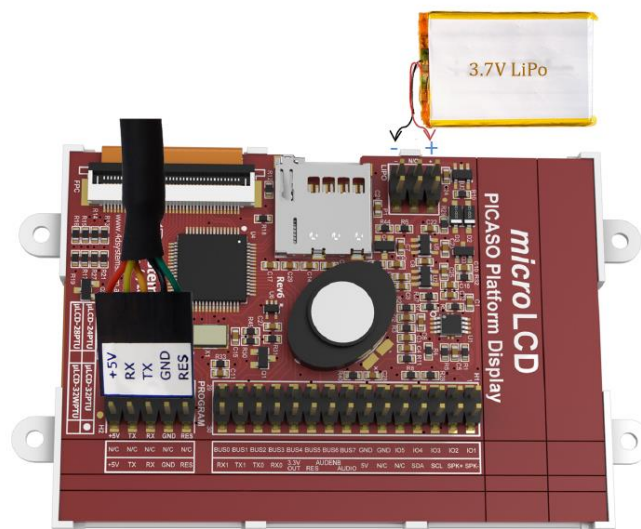
Ήχος



Εικόνα 45: Το ηχείο της Οθόνης (Πηγή: [51])

Η υποστήριξη αναπαραγωγής ήχου στον επεξεργαστή PICASO επιτρέπει στη μονάδα μ LCD-32PTU να αναπαράγει αρχεία WAV ήχου που είναι αποθηκευμένα στην κάρτα μνήμης micro-SD. Το PWM και ένας ενσωματωμένος ενισχυτής ήχου με ηχείο 8 Ω εξασφαλίζουν άφθονη ικανότητα εξόδου ήχου. Μια απλή οδηγία επιτρέπει στο χρήστη να αναπαράγει / παύσει / σταματά αρχεία ήχου ενώ συνεχίζει την εκτέλεση του κώδικα των χρηστών, όπως ενημερώσεις οθόνης, αναγνώριση αφής, επικοινωνίες κ.λπ. Το σύστημα ήχου επιτρέπει επίσης αλλαγή σε πραγματικό χρόνο των δειγμάτων ήχου [51].

Τροφοδοσία



Εικόνα 46: Η τροφοδοσία της οθόνης (Πηγή: [51])

Η τροφοδοσία του μ LCD-32PTU είναι τόσο απλή όσο η σύνδεση σε υπολογιστή μέσω καλωδίου προγραμματισμού 4D. Η τροφοδοσία μπορεί επίσης να παρέχεται από μια ρυθμισμένη πηγή 5V DC. Εναλλακτικά, υπάρχει ένα επαναφορτιζόμενο κύκλωμα μπαταρίας LiPo επί της οθόνης, με υποδοχή 2x3Pin. Μια μπαταρία 3.7V LiPo συνδεδεμένη με τη μονάδα παρέχει μια τέλεια λύση για εφαρμογές χειρός [51].

Τι χρειαζόμαστε για να λειτουργήσει η οθόνη



Εικόνα 47: Ό,τι χρειαζόμαστε για να χειριστούμε την οθόνη (Πηγή: [51])

Το περιβάλλον ανάπτυξης



Workshop4 is a comprehensive software IDE for Microsoft Windows that provides an integrated software development platform for all of the 4D family of processors and modules. The IDE combines the Editor, Compiler, Linker and Downloader to develop complete 4DGL application code. All user application code is developed within the Workshop4 IDE.

DOWNLOAD

Εικόνα 48: Το περιβάλλον ανάπτυξης Workshop4 IDE Software (Πηγή: <https://4dsystems.com.au/workshop4>)

Το Workshop4 είναι μια ολοκληρωμένη σουίτα εργαλείων IDE λογισμικού που παρέχει μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα ανάπτυξης λογισμικού για όλη την οικογένεια των 4D επεξεργαστών και modules. Το Workshop4 IDE υποστηρίζει τέσσερα διαφορετικά περιβάλλοντα ανάπτυξης για τον χρήστη, για να καλύψει διαφορετικές απαιτήσεις και επίπεδα δεξιοτήτων [51].

1. Designer

Το περιβάλλον Designer επιτρέπει στο χρήστη να γράψει κώδικα 4DGL στη φυσική του μορφή για να προγραμματίσει το μLCD-32PTU [51].

2. ViSi

Μια οπτική εμπειρία προγραμματισμού, που ονομάζεται κατάλληλα ViSi, επιτρέπει την τοποθέτηση αντικειμένων τύπου drag-and-drop για να βοηθήσει στη δημιουργία κώδικα 4DGL και επιτρέπει στο χρήστη να απεικονίσει πώς θα φαίνεται η οθόνη ενώ αναπτύσσεται [51].

3. ViSi-Genie

Ένα προηγμένο περιβάλλον που ονομάζεται ViSi-Genie δεν απαιτεί καθόλου κωδικοποίηση 4DGL, όλα γίνονται αυτόματα για εσάς. Απλώς απλώστε την οθόνη με τα αντικείμενα που θέλετε, ρυθμίστε τα συμβάντα για να τα οδηγήσετε και ο κώδικας

γράφεται για εσάς αυτόματα. Το ViSi-Genie παρέχει την πιο πρόσφατη εμπειρία ταχείας ανάπτυξης από τα 4D Systems [51].

4. Serial

Παρέχεται επίσης ένα σειριακό περιβάλλον για τη μετατροπή του μLCD-32PTU σε μια βοηθητική σειριακή μονάδα, επιτρέποντας στο χρήστη να ελέγχει την οθόνη από οποιονδήποτε μικροελεγκτή κεντρικού υπολογιστή ή συσκευή με σειριακή θύρα [51].

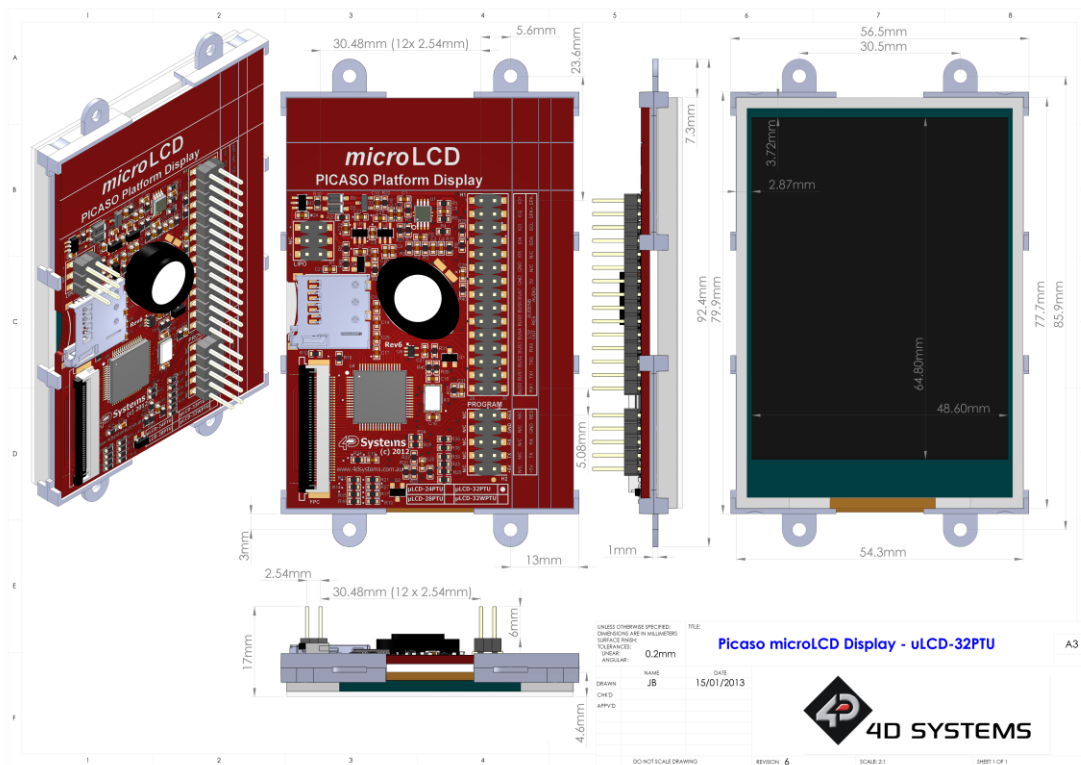
Αρχίζοντας με την οθόνη



Εικόνα 49: Με απλά βήματα μπορεί κάποιος να αρχίσει να χρησιμοποιεί την οθόνη (Πηγή: [51])

Η έναρξη είναι τόσο απλή όσο η σύνδεση του καλωδίου προγραμματισμού 4D με τη μονάδα οθόνης και η επιλογή του προϊόντος και του περιβάλλοντος ανάπτυξης στο 4D Workshop4 IDE. Το 4D Workshop4 IDE σας καθοδηγεί στα σχετικά εργαλεία βοήθειας με επαρκή εξήγηση για να ξεκινήσει η εφαρμογή σας σε σύντομο χρονικό διάστημα [51].

Διαστάσεις



Εικόνα 50: Μηχανικές διαστάσεις οθόνης (Πηγή: [51])

4.3 Υλοποίηση



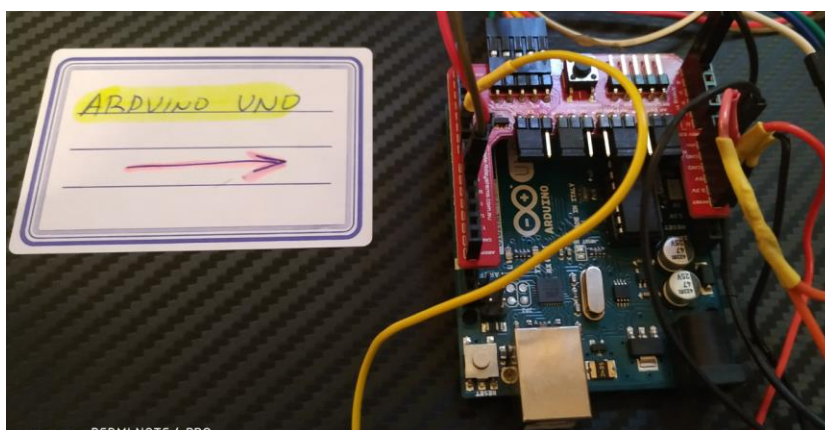
Εικόνα 51: Ο Αισθητήρας Θερμοκρασίας - Υγρασίας AM2301



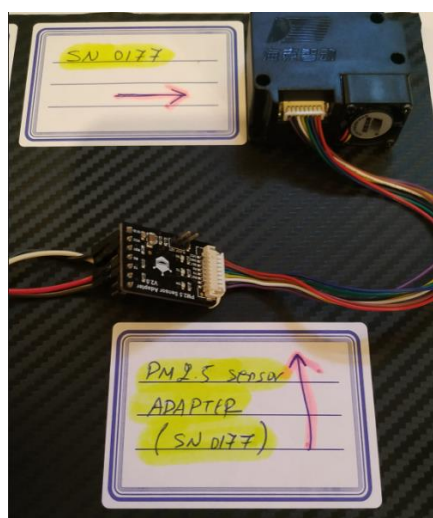
Εικόνα 52: Προαιρετική μονάδα εξωτερικής παροχής ενέργειας μέσω μπαταρίας 9V



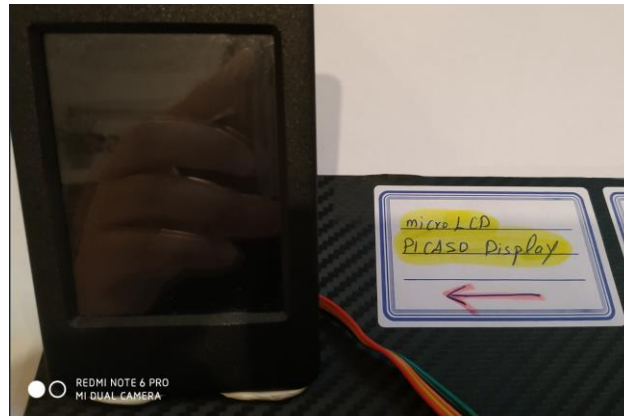
Εικόνα 53: Το Ρολόι πραγματικού χρόνου RTC DS3232



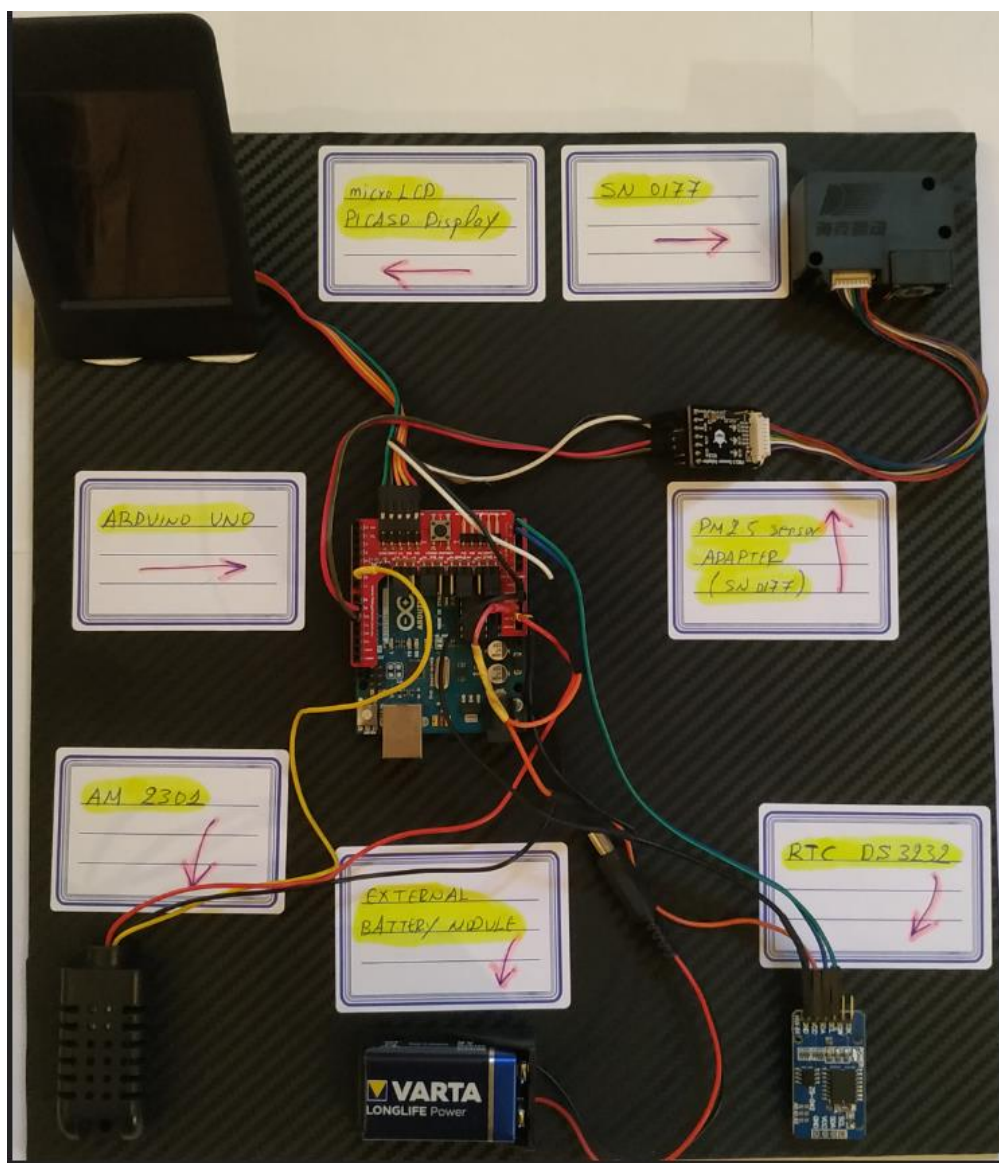
Εικόνα 54: Ο Μικροελεγκτής ARDUINO UNO



Εικόνα 55: Ο Αισθητήρας SEN0177 μαζί με τον ειδικό αντάπτορά του



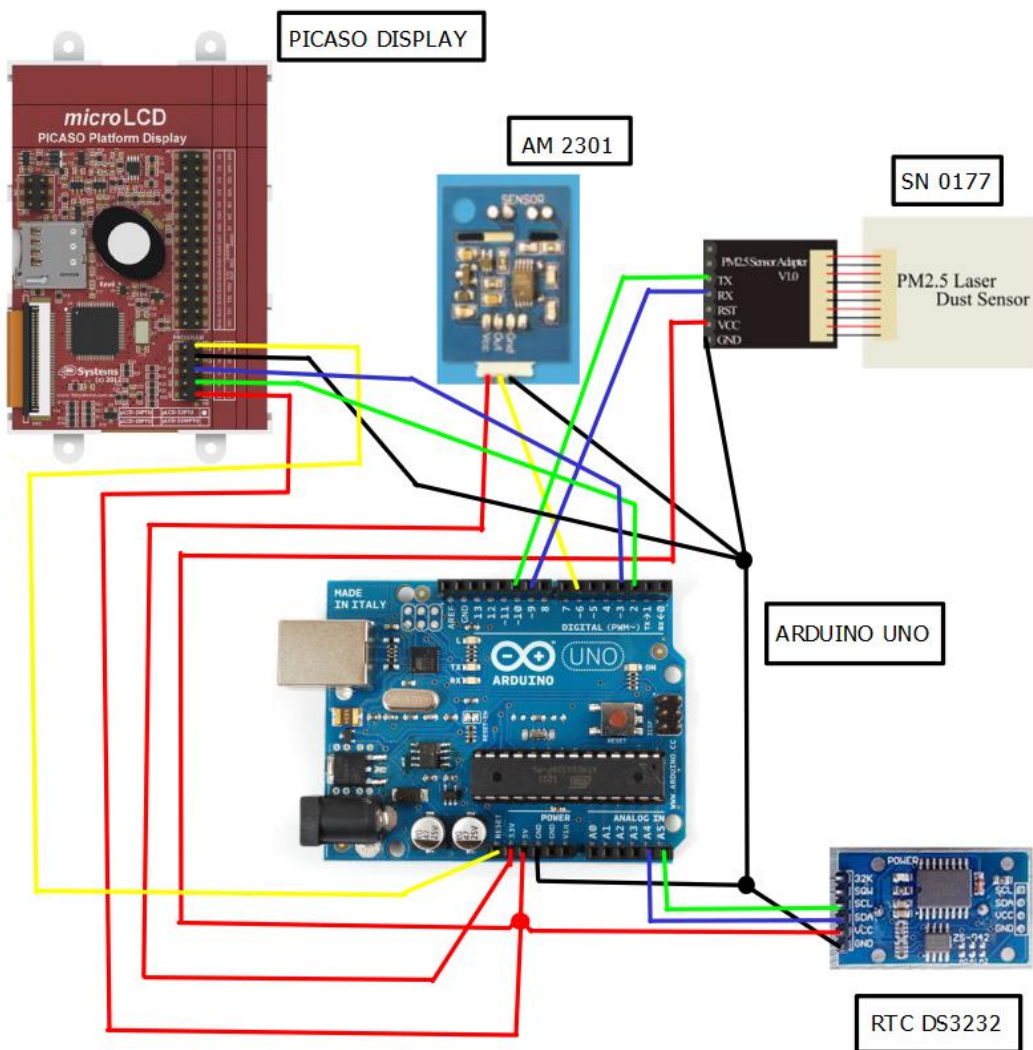
Εικόνα 56: Η Οθόνη 3.2'' microLCD PICASO Display μ LCD-32PTU



Εικόνα 57: Η ολοκληρωμένη διάταξη

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η βάση της διάταξης είναι κομμάτι χοντρό πλαστικό διαστάσεων 30x30 cm. Πάνω στο πλαστικό τοποθετήθηκε μαύρο αυτοκόλλητο σε στύλ ανθρακονήματος (carbon). Τα στοιχεία της διάταξης κολλήθηκαν με εύπλαστη κόλλα σε στύλ πλαστελίνης.

4.4 Συνδεσμολογία



Εικόνα 58: Η συνδεσμολογία της διάταξης

4.5 Προγραμματισμός της διάταξης

Ο κώδικας που αναπτύξαμε παρουσιάζεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ στο τέλος της εργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

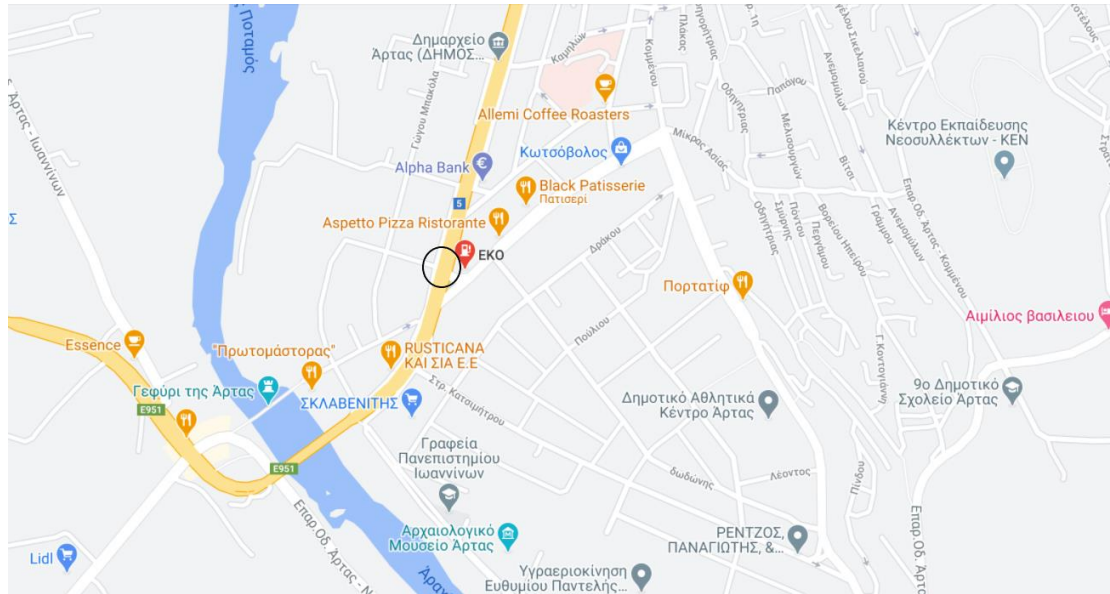
Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων πραγματοποιήθηκαν επί επτά, μη συνεχόμενες ημέρες, μέσα στον Ιούλιο και Αύγουστο του 2020. Οι μετρήσεις καλύπτουν συνολικά μια εβδομάδα (Δευτέρα – Κυριακή). Ξεκινούσαν συνήθως περί τις 9 το πρωί και ολοκληρωνόταν περί τις 9 το βράδυ.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι οι μετρήσεις δεν είναι συνεχόμενες. Γίνονται περίπου για μία με μιάμιση ώρα, διακόπτονται για άλλο τόσο περίπου και συνεχίζονται έτσι μέσα στην ημέρα, στο ίδιο πάντα σημείο.

Αυτό συμβαίνει διότι το σύστημα δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένο, αλλά παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς. Αυτοί οι περιορισμοί είναι οι εξής:

1. Παρόλο που το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει με τη χρήση μιας μπαταρίας των 9 Volt, αυτό συμβαίνει για πάρα πολύ λίγο χρόνο, περίπου μια ώρα. Η χωρητικότητα της μπαταρίας εξαντλείται μετά από μία περίπου ώρα εξαιτίας της μεγάλης κατανάλωσης που απαιτεί η οθόνη για να λειτουργήσει. Αυτό έχει ως συνέπεια, μετά από μία περίπου ώρα, η οθόνη να αρχίζει να τρεμοπαίζει και ο αισθητήρας σωματιδίων να δίνει είτε μηδενικές τιμές, είτε εξωφρενικά μεγάλες, της τάξης των $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Έτσι κρίθηκε σκόπιμο η σύνδεση της διάταξης σε φορητό υπολογιστή (λάπτοπ) για την παροχή ενέργειας μέσω της θύρας usb.
2. Η κάρτα sd στην οποία αποθηκεύονται τα δεδομένα πρέπει, από τον κατασκευαστή της οθόνης, να είναι υποχρεωτικά διαμορφωμένη σε αρχεία FAT 16. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, ανεξαρτήτως της χωρητικότητας της κάρτας, αυτή να μη δέχεται πάνω από περίπου πεντακόσια αρχεία csv. Δεδομένου ότι παίρνουμε δύο μετρήσεις κάθε λεπτό, καταλαβαίνουμε ότι μιλάμε για λίγο πάνω από τέσσερις συνεχόμενες ώρες. Μετά την παρέλευση αυτού του χρονικού διαστήματος, παρόλο που η οθόνη δείχνει ότι νέες μετρήσεις εγγράφονται κανονικά στην κάρτα, στην ουσία δεν καταγράφεται καμία καινούργια μέτρηση. Συνεπώς η κάρτα μετά από ένα σετ μετρήσεων (μία με μιάμιση ώρα περίπου), έπρεπε να αποσυνδεθεί, να αποθηκευτούν εξωτερικά οι μετρήσεις σε άλλο μέσο, να διαγραφεί και να ξανασυνδεθεί.
3. Ο ανθρώπινος παράγοντας. Είναι πρακτικά αδύνατο για το μελετητή να αφήσει μόνη της τη διάταξη σε ένα σημείο για προφανείς κινδύνους κλοπής, βροχής κτλ.
4. Για όλους τους προηγούμενους παράγοντες ήταν απαραίτητη η συνεχής φυσική παρουσία του μελετητή στο σημείο των μετρήσεων, πράγμα που καθιστά αδύνατη τη συνεχόμενη δωδεκάωρη μέτρηση.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην πόλη της Άρτας στη διασταύρωση του κόμβου Ευζώνων. Είναι ένα σημείο με ιδιαίτερα αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο, για τα δεδομένα της πόλης.



Εικόνα 59: Το σημείο όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (μαύρος κύκλος)

Τέλος να αναφέρουμε ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τις εξής ημέρες:

- Τετάρτη 01/07/2020
- Πέμπτη 09/07/2020
- Τρίτη 14/07/2020
- Κυριακή 02/08/2020
- Δευτέρα 03/08/2020
- Παρασκευή 07/08/2020
- Σάββατο 08/08/2020

- **Τετάρτη 01/07/2020**

	PM2.5	PM1.0	PM10
AVERAGE	12.11994	8.364318	14.76162
MIN	7	4	8
MAX	21	15	25

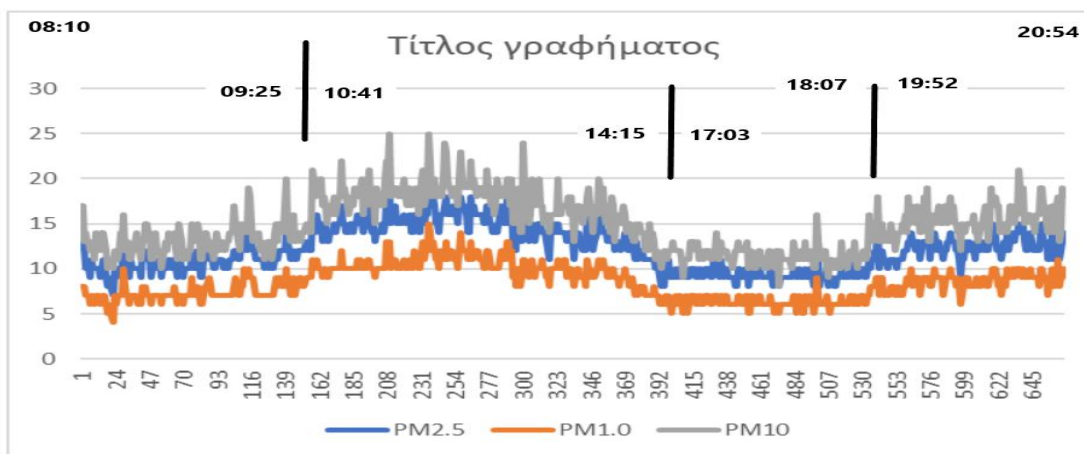
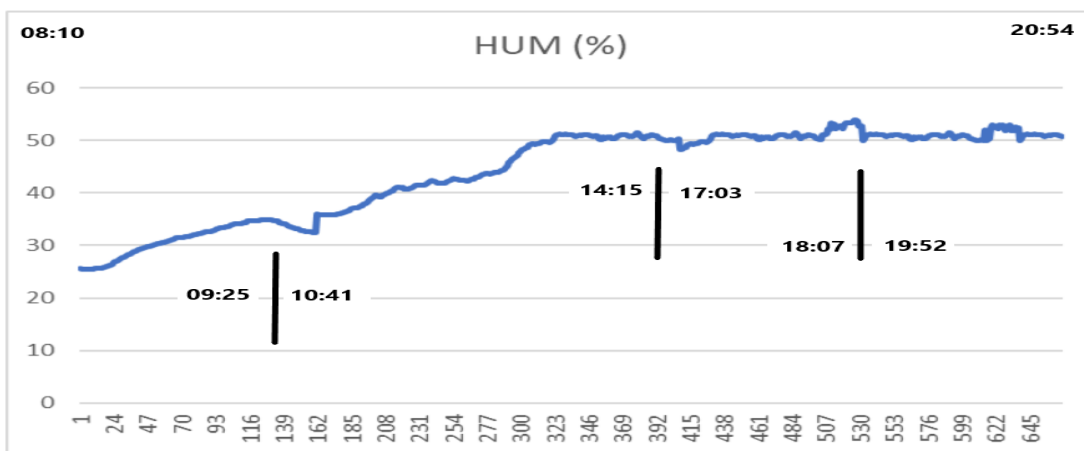
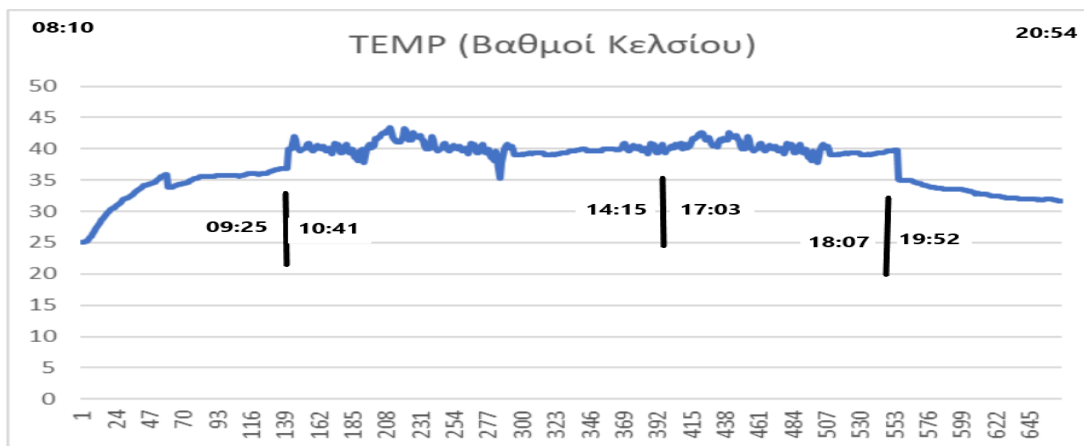
Εικόνα 60: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) για την Τετάρτη 01/07/2020.

Από τον προηγούμενο πίνακα, παρατηρούμε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5 και PM10 βρίσκονται **εντός** των οριακών τιμών της οδηγίας 2008/50/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης , καθώς επίσης και των κατευθυντηρίων γραμμών του ΠΟΥ (εικόνα 10).

Ο δείκτης ποιότητας αέρα για τα σωματίδια PM2.5, σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [[U.S. Environmental Protection Agency](https://www.epa.gov/)], είναι ακριβώς στο όριο μεταξύ καλού (**GOOD**) – **καθόλου κίνδυνος, δεν απαιτείται κανένα μέτρο προστασίας** - και μετρίου (**MODERATE**) – **εξαιρετικά ευαίσθητα άτομα μπορεί να αντιμετωπίσουν αναπνευστικά προβλήματα και έτσι πρέπει να περιορίσουν την παρατεταμένη έκθεση** - , (εικόνα 13).

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας, οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων, παρουσιάζουν μια αύξηση μεταξύ των ωρών 10:41-14:15 και 19:51-20:54.

Οι αυξημένες τιμές των συγκεντρώσεων μεταξύ 10:41-14:15, φαίνεται να συνάδουν με χαμηλές τιμές της ατμοσφαιρικής υγρασίας μεταξύ των ίδιων ωρών, κάτι όμως που δεν επαληθεύεται και για τις ώρες 19:51-20:54, όπου έχουμε ταυτόχρονα υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας, σε σχέση με την υπόλοιπη ημέρα, αλλά ταυτόχρονα παρατηρούμε αύξηση των συγκεντρώσεων.



Εικόνα 61: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Τετάρτη 01/07/2020

- Πέμπτη 09/07/2020

	PM2.5	PM1.0	PM10
AVERAGE	14.14408	9.701544	17.72899
MIN	9	5	11
MAX	22	16	27

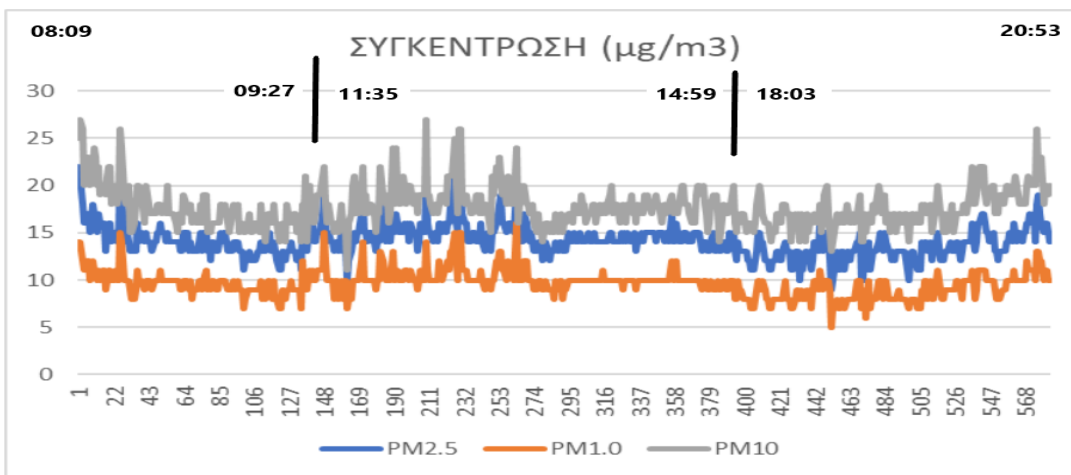
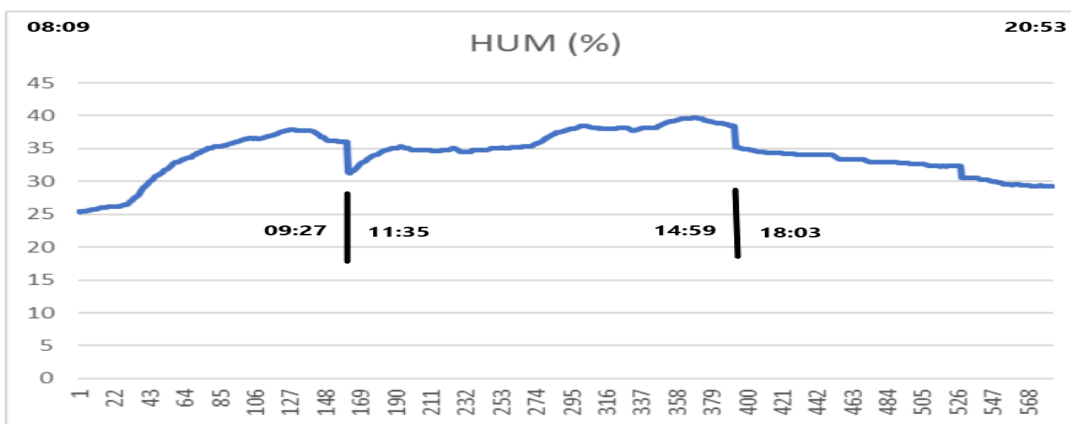
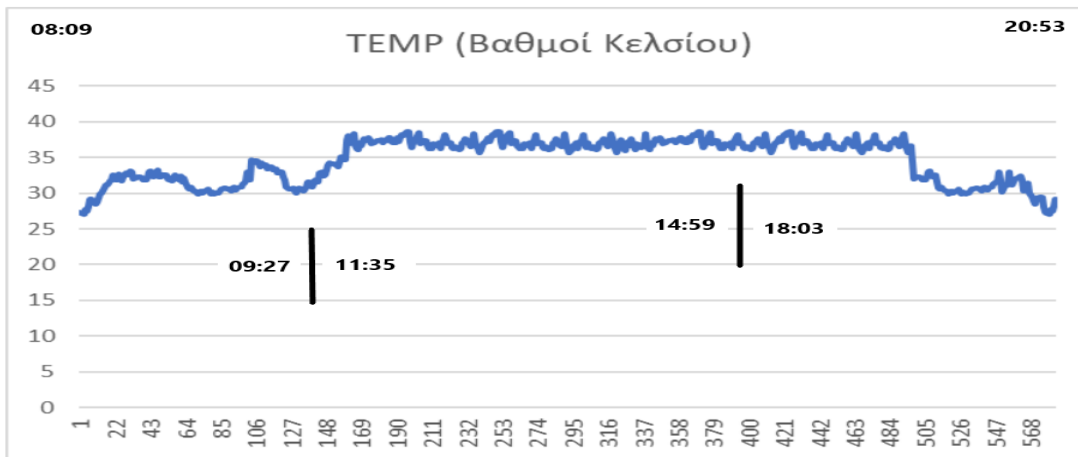
Εικόνα 62: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m³) για την Πέμπτη 09/07/2020.

Από τον προηγούμενο πίνακα, παρατηρούμε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5 και PM10 βρίσκονται **εντός** των οριακών τιμών της οδηγίας 2008/50/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης , καθώς επίσης και των κατευθυντηρίων γραμμών του ΠΟΥ (εικόνα 10).

Ο δείκτης ποιότητας αέρα για τα σωματίδια PM2.5, σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [[U.S. Environmental Protection Agency](#)], χαρακτηρίζεται ως μέτριος (MODERATE) – **εξαιρετικά ευαίσθητα άτομα μπορεί να αντιμετωπίσουν αναπνευστικά προβλήματα και έτσι πρέπει να περιορίσουν την παρατεταμένη έκθεση** - , (εικόνα 13).

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας, οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων καθώς επίσης και της σχετικής υγρασίας φαίνεται να παραμένουν σταθερές, με μικρές αυξομειώσεις και χωρίς καμιά σημαντική μεταβολή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Οι μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων εμφανίζονται το πρωί, μετά τις 08:00, μετά τις 11:30 και μέχρι περίπου τις 12:30. Τέλος υψηλές συγκεντρώσεις παρατηρούνται και προς το τέλος της ημέρας, περί τις 21:00 το βράδυ.



Εικόνα 63: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Τετάρτη 01/07/2020

- **Τρίτη 14/07/2020**

	PM2.5	PM1.0	PM10
AVERAGE	13.03012	8.941767	16.53012
MIN	8	5	11
MAX	25	17	27

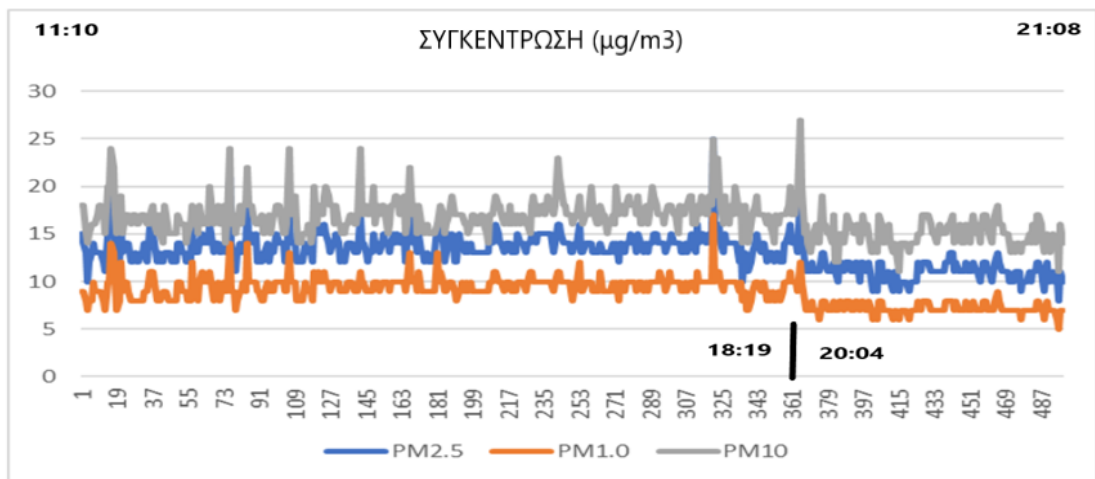
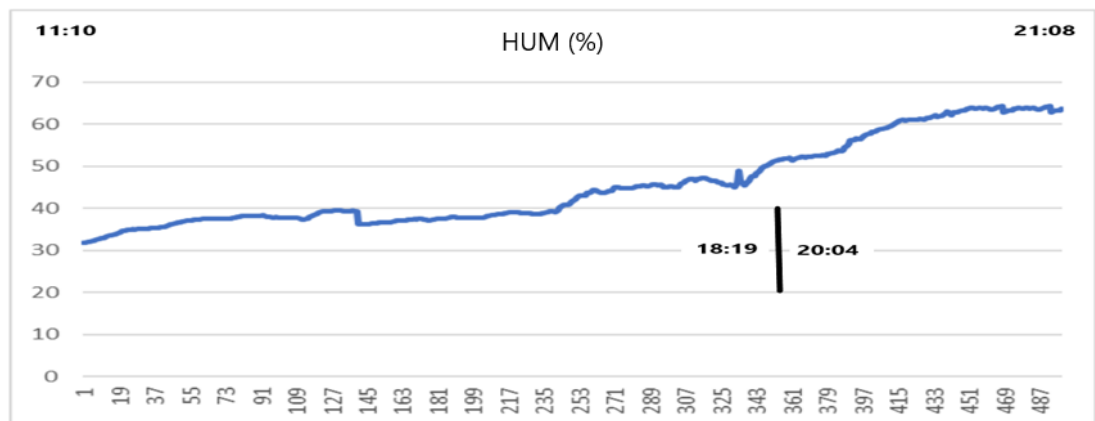
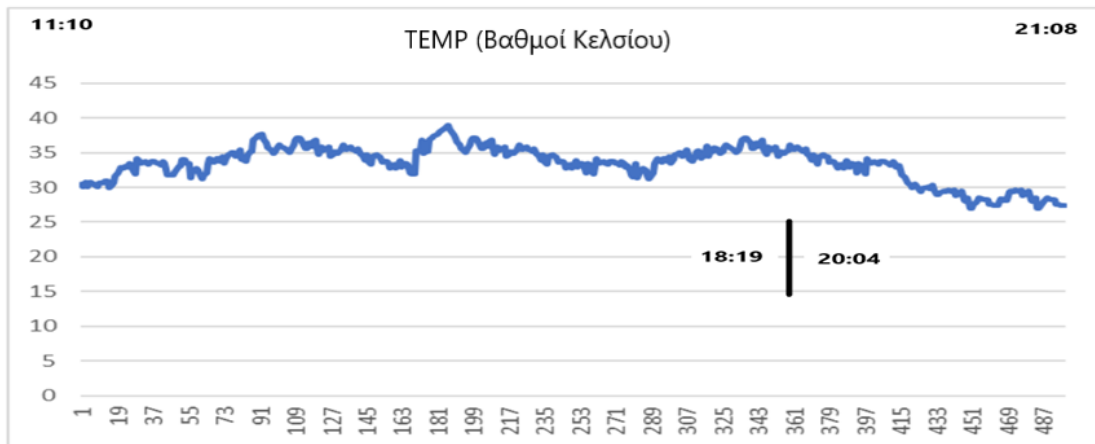
Εικόνα 64: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m³) για την Τρίτη 14/07/2020.

Από τον προηγούμενο πίνακα, παρατηρούμε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5 και PM10 βρίσκονται **εντός** των οριακών τιμών της οδηγίας 2008/50/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης , καθώς επίσης και των κατευθυντηρίων γραμμών του ΠΟΥ (εικόνα 10).

Ο δείκτης ποιότητας αέρα για τα σωματίδια PM2.5, σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [[U.S. Environmental Protection Agency](#)], χαρακτηρίζεται ως μέτριος (MODERATE) – **εξαιρετικά ευαίσθητα άτομα μπορεί να αντιμετωπίσουν αναπνευστικά προβλήματα και έτσι πρέπει να περιορίσουν την παρατεταμένη έκθεση** - , (εικόνα 13).

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας, οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων καθώς επίσης και της σχετικής υγρασίας φαίνεται να παραμένουν σταθερές, με μικρές αυξομειώσεις και χωρίς καμιά σημαντική μεταβολή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Μεταξύ των ωρών 20:04-21:08 παρουσιάζονται οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις της ημέρας, με μια αντίστοιχη αύξηση της σχετικής υγρασίας.



Εικόνα 65: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Τρίτη 14/07/2020

- **Κυριακή 02/08/2020**

	PM2.5	PM1.0	PM10
AVERAGE	12.17628	8.407051	14.8766
MIN	7	4	9
MAX	22	16	27

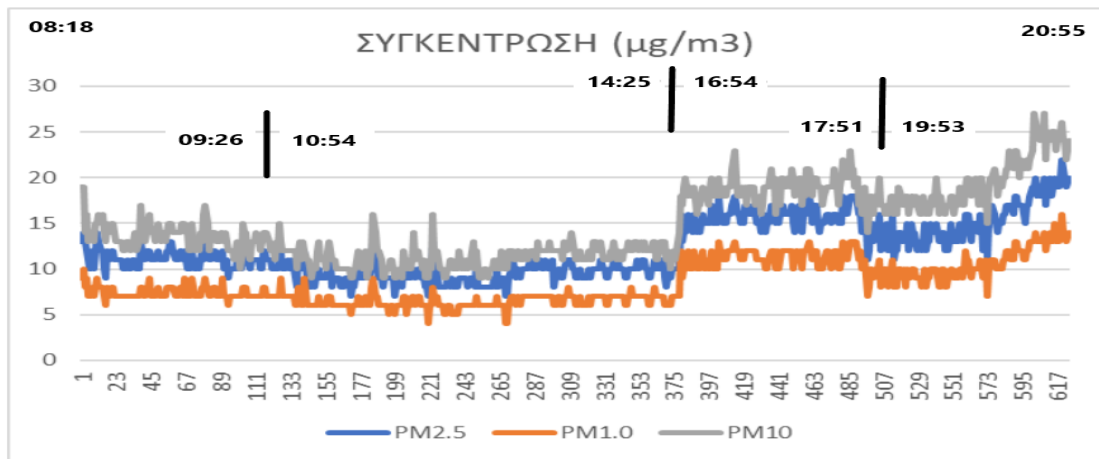
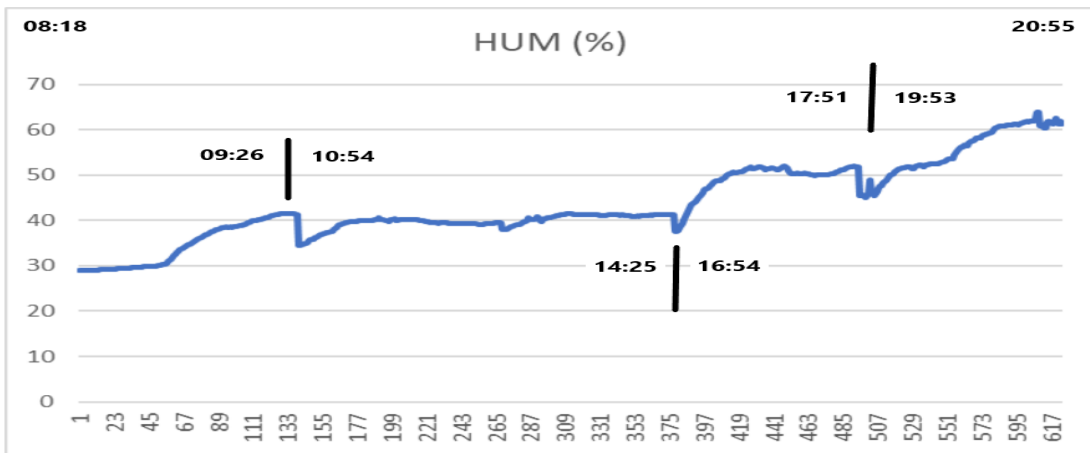
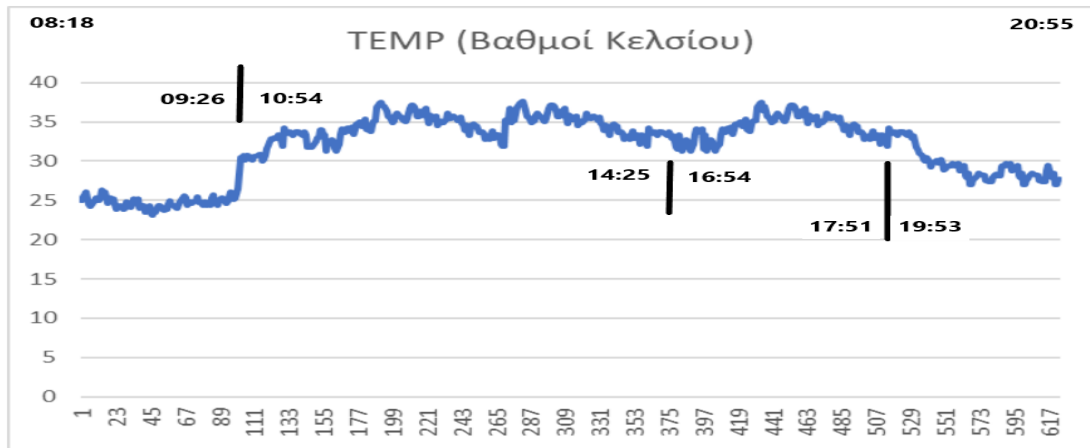
Εικόνα 66: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) για την Κυριακή 02/08/2020.

Από τον προηγούμενο πίνακα, παρατηρούμε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5 και PM10 βρίσκονται **εντός** των οριακών τιμών της οδηγίας 2008/50/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς επίσης και των κατευθυντηρίων γραμμών του ΠΟΥ (εικόνα 10).

Ο δείκτης ποιότητας αέρα για τα σωματίδια PM2.5, σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [[U.S. Environmental Protection Agency](http://www.epa.gov)], χαρακτηρίζεται ως μέτριος (MODERATE) – **εξαιρετικά ευαίσθητα άτομα μπορεί να αντιμετωπίσουν αναπνευστικά προβλήματα και έτσι πρέπει να περιορίσουν την παρατεταμένη έκθεση** - , (εικόνα 13).

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας, οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων αυξάνονται μετά τις 16:54 μέχρι το τέλος της ημέρας. Παράλληλα, τις ίδιες ώρες έχουμε μια αντίστοιχη αύξηση της σχετικής υγρασίας.

Οι αυξημένες τιμές των συγκεντρώσεων προς το τέλος της ημέρας της Κυριακής, μπορεί να ερμηνευθούν από το γεγονός της επιστροφής στην πόλη των κατοίκων από τις καλοκαιρινές δραστηριότητες της ημέρας (κοντινές εκδρομές στις παραλίες κτλ).



Εικόνα 67: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Κυριακή 02/08/2020

- Δευτέρα 03/08/2020

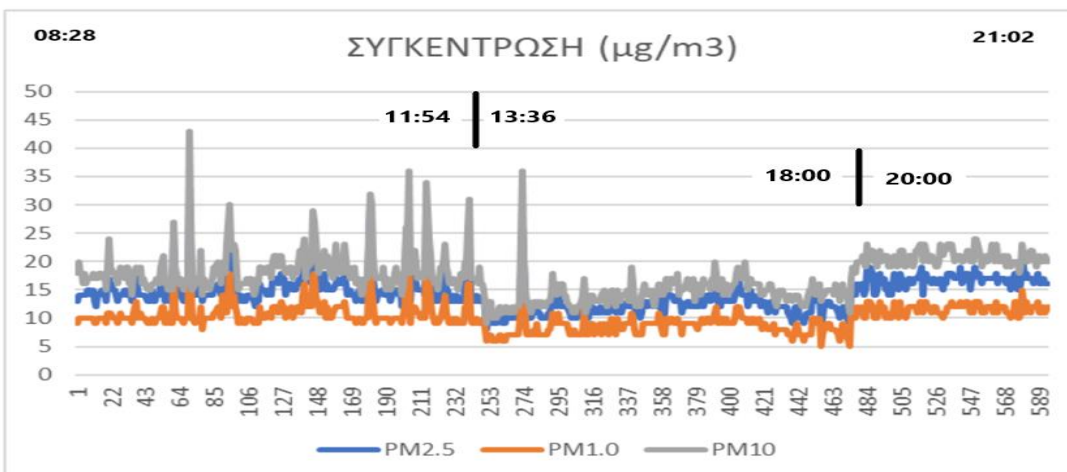
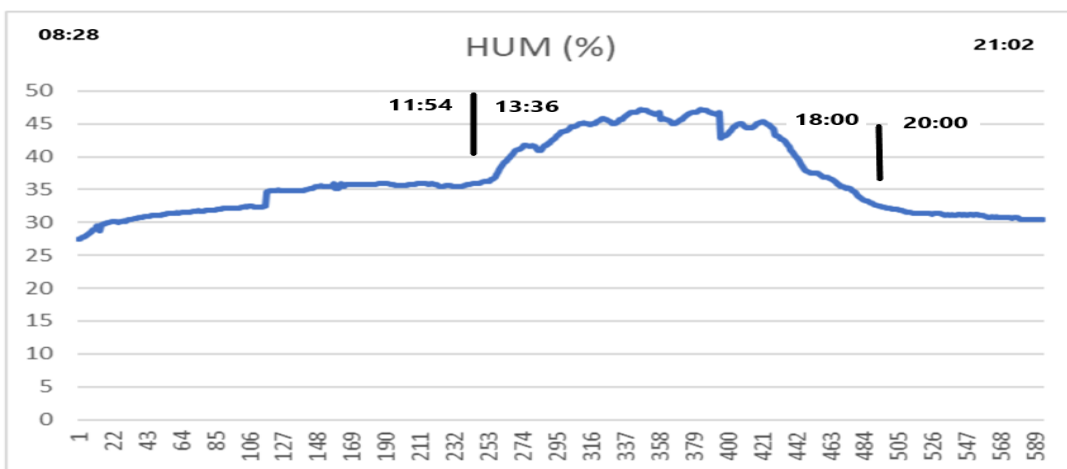
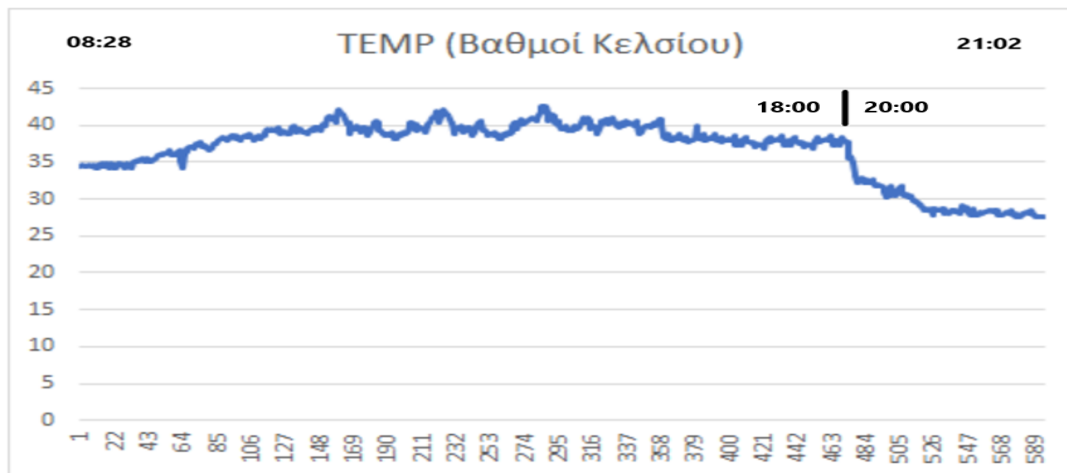
	PM2.5	PM1.0	PM10
AVERAGE	14.39899	10.1431	17.39226
MIN	8	5	9
MAX	33	25	43

Εικόνα 68: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m³) για την Δευτέρα 03/08/2020.

Από τον προηγούμενο πίνακα, παρατηρούμε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5 και PM10 βρίσκονται εντός των οριακών τιμών της οδηγίας 2008/50/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς επίσης και των κατευθυντηρίων γραμμών του ΠΟΥ (εικόνα 10).

Ο δείκτης ποιότητας αέρα για τα σωματίδια PM2.5, σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [[U.S. Environmental Protection Agency](#)], χαρακτηρίζεται ως μέτριος (MODERATE) – **εξαιρετικά ευαίσθητα άτομα μπορεί να αντιμετωπίσουν αναπνευστικά προβλήματα και έτσι πρέπει να περιορίσουν την παρατεταμένη έκθεση** - , (εικόνα 13).

Από τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας, παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται κυρίως τις πρωινές ώρες, μεταξύ 08:28-11:54. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μεταξύ 13:36-18:00, εμφανίζονται οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις της ημέρας με μια αντίστοιχη χαρακτηριστική και σημαντική αύξηση της σχετικής υγρασίας.



Εικόνα 69: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Δευτέρα 03/08/2020

- **Παρασκευή 07/08/2020**

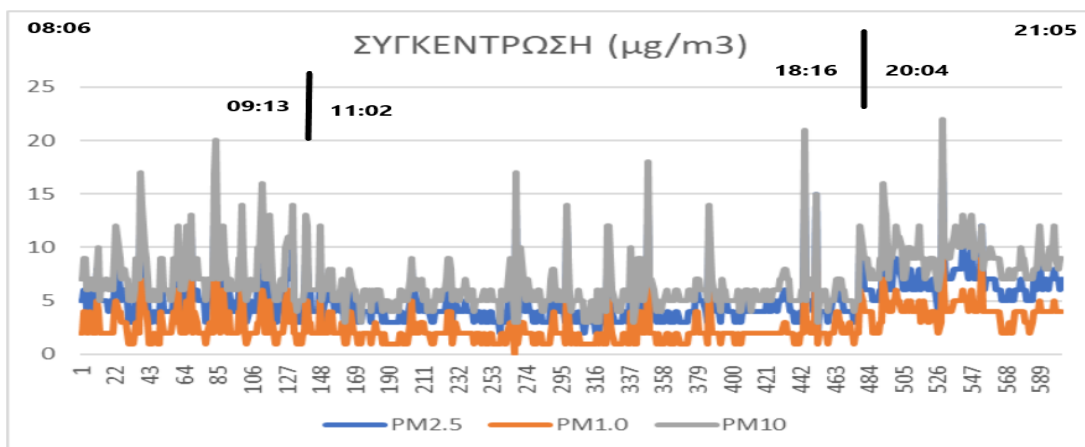
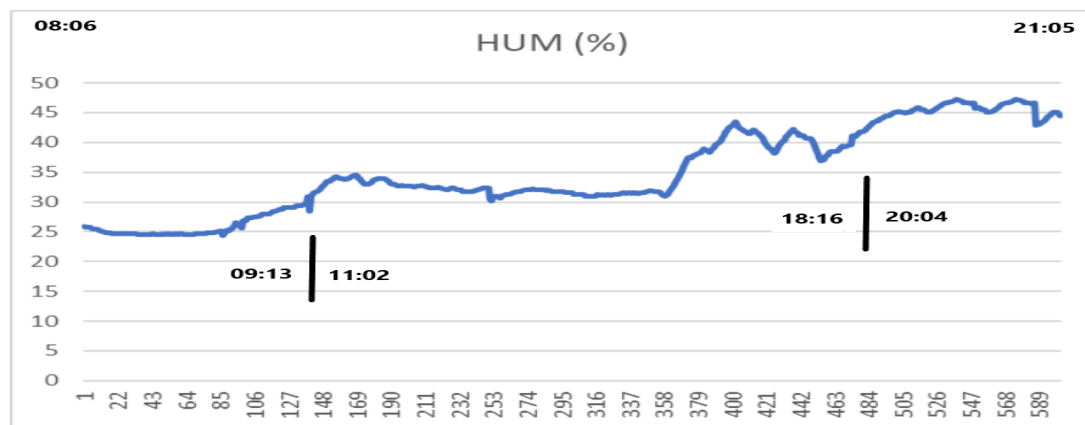
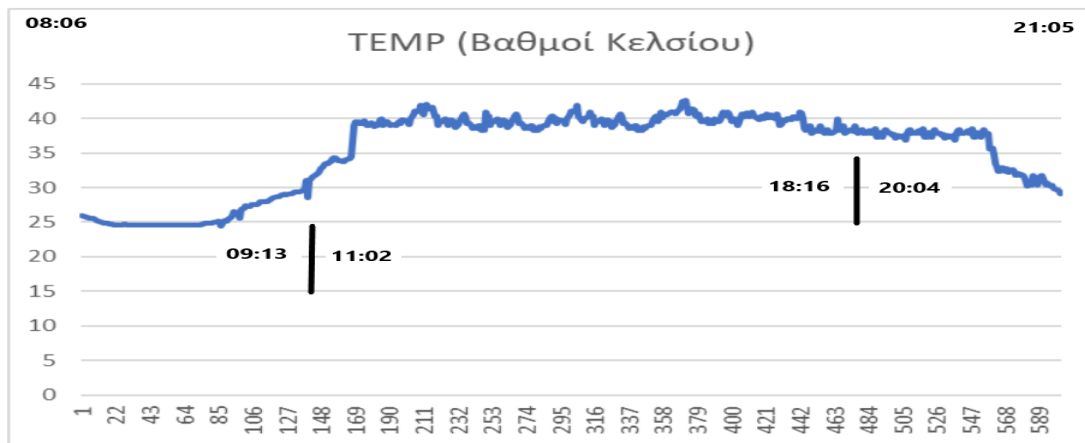
	PM2.5	PM1.0	PM10
AVERAGE	5.094684	2.669435	6.990033
MIN	2	0	3
MAX	17	11	22

Εικόνα 70: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m³) για την Παρασκευή 07/08/2020.

Από τον προηγούμενο πίνακα, παρατηρούμε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5 και PM10 βρίσκονται **εντός** των οριακών τιμών της οδηγίας 2008/50/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης , καθώς επίσης και των κατευθυντηρίων γραμμών του ΠΟΥ (εικόνα 10).

Ο δείκτης ποιότητας αέρα για τα σωματίδια PM2.5, σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [[U.S. Environmental Protection Agency](#)], μπορεί να χαρακτηριστεί ως καλός (**GOOD**) – **καθόλου κίνδυνος, δεν απαιτείται κανένα μέτρο προστασίας** - , (εικόνα 13).

Από τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας, παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων παραμένουν χωρίς ιδιαίτερη μεταβολή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η σχετική υγρασία από τα μέσα της ημέρας, βαίνει αυξανόμενη.



Εικόνα 71: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για την Παρασκευή 07/08/2020

- **Σάββατο 08/08/2020**

	PM2.5	PM1.0	PM10
AVERAGE	7.865248	5.102837	9.787234
MIN	5	3	6
MAX	14	10	16

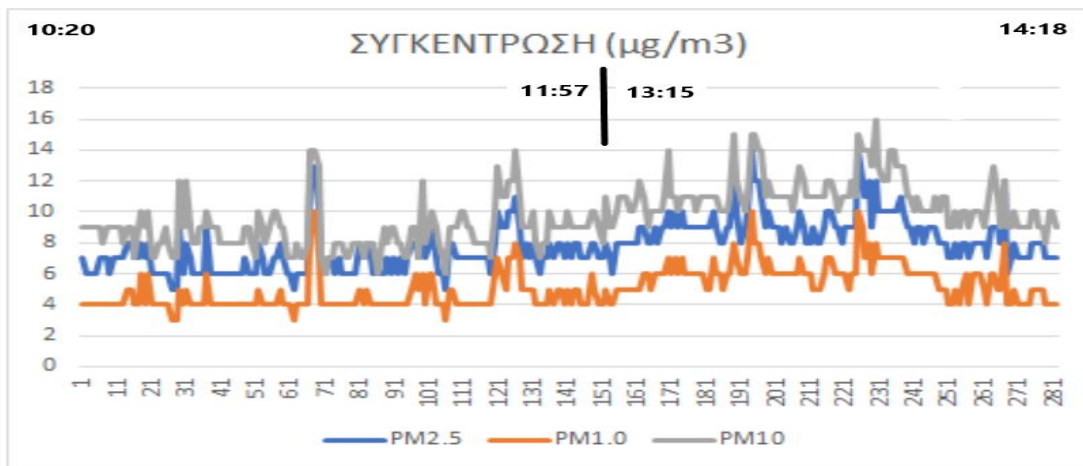
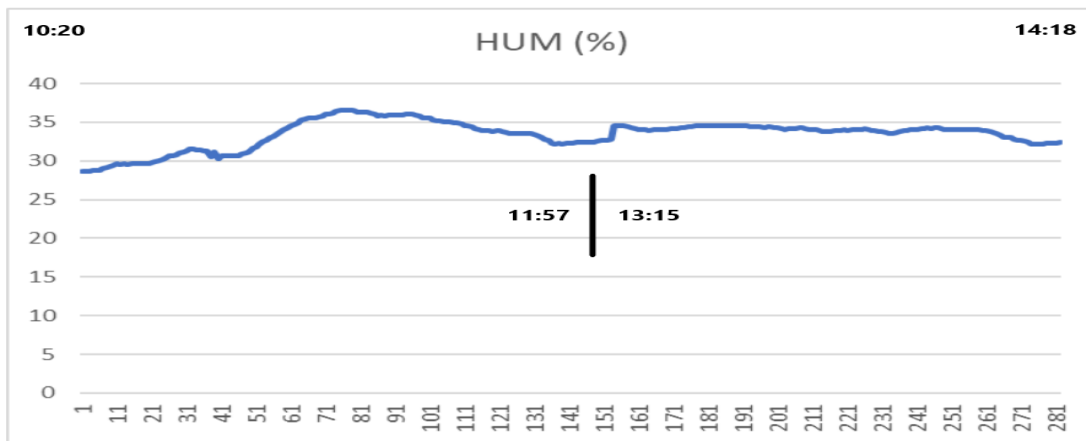
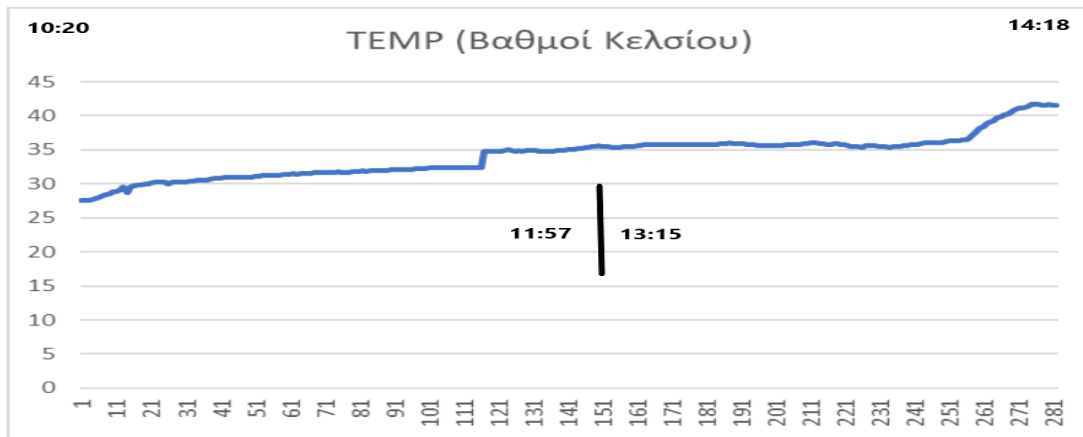
Εικόνα 72: Πίνακας με τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5, PM1.0 και PM10 (μg/m³) για το Σάββατο 08/08/2020.

Από τον προηγούμενο πίνακα, παρατηρούμε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM2.5 και PM10 βρίσκονται **εντός** των οριακών τιμών της οδηγίας 2008/50/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης , καθώς επίσης και των κατευθυντηρίων γραμμών του ΠΟΥ (εικόνα 10).

Ο δείκτης ποιότητας αέρα για τα σωματίδια PM2.5, σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [[U.S. Environmental Protection Agency](#)], μπορεί να χαρακτηριστεί ως καλός (**GOOD**) – **καθόλου κίνδυνος, δεν απαιτείται κανένα μέτρο προστασίας** - , (εικόνα 13).

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι λόγω βροχής, οι μετρήσεις σταμάτησαν στις 14:18.

Όπως βλέπουμε από τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας, τόσο οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων, όσο και οι τιμές της σχετικής υγρασίας δεν μεταβάλλονται σημαντικά.



Εικόνα 73: Διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης σωματιδίων για το Σάββατο 08/08/2020

Γενικά συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις που λάβαμε και αναλύσαμε, μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια γενικά συμπεράσματα. Αυτά είναι:

1. Η ποιότητα του αέρα στην πόλη είναι σε γενικές γραμμές πάρα πολύ καλή. Οι μέσες συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM_{2.5} και PM₁₀ βρίσκονται **εντός** των οριακών τιμών της οδηγίας 2008/50/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς επίσης και των κατευθυντηρίων γραμμών του ΠΟΥ (εικόνα 10). Ο δείκτης ποιότητας αέρα για τα σωματίδια PM_{2.5}, σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος [[U.S. Environmental Protection Agency](#)], χαρακτηρίζεται μεταξύ καλού (**GOOD**) – καθόλου κίνδυνος, **δεν απαιτείται κανένα μέτρο προστασίας** - και μετρίου (**MODERATE**) – **εξαιρετικά ευαίσθητα άτομα μπορεί να αντιμετωπίσουν αναπνευστικά προβλήματα και έτσι πρέπει να περιορίσουν την παρατεταμένη έκθεση** - , (εικόνα 13). Αυτό φυσικά μπορούμε να πούμε ότι είναι αναμενόμενο, μιας και η Άρτα είναι μια μικρή επαρχιακή πόλη, χωρίς ιδιαίτερα αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο και, το σημαντικότερο, χωρίς βιομηχανική περιοχή, αφού οι οικονομία της στηρίζεται κυρίως στον αγροτικό τομέα.
2. Δεν φαίνεται τελικά να υπάρχει κάποια σημαντική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων των σωματιδίων και της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας. Παρουσιάστηκαν περιπτώσεις που η αυξημένη σχετική υγρασία συσχετίζεται με χαμηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων, αλλά έχουμε και περιπτώσεις που συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Φυσικά δεν λαμβάνουμε υπόψη τις μεταβολές των συγκεντρώσεων λόγω κυκλοφοριακού φόρτου στη διάρκεια της ημέρας. Μια μελέτη για τη συσχέτιση των συγκεντρώσεων με τη σχετική υγρασία θα απαιτούσε, όπως γίνεται αντιληπτό, σταθερό φόρτο σωματιδίων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.
3. Οι τιμές της θερμοκρασίας παρουσιάζονται αρκετά υψηλές, μερικές φορές και πάνω από τους 40 βαθμούς Κελσίου. Είναι ένα τυπικό καλοκαίρι στη δυτική Ελλάδα και ιδιαίτερα μέσα σε πόλη, όπου παρουσιάζεται το φαινόμενο της **αστικής νησίδας θερμότητας**.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟ, ΤΟ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ, ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΩΝ. Πρόγραμμα «Καθαρός αέρας» για την Ευρώπη. Βρυξέλλες, 18.12.2013 COM(2013) 918 final*
2. *Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών. Σύγκριση πρότυπης σταθμικής μεθόδου με μέθοδο αυτόματης μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων PM10. ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του Γκικούδη Χρήστου «Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»*
3. *Ειδική έκθεση Ατμοσφαιρική ρύπανση: Η προστασία της υγείας μας παραμένει ανεπαρκής (υποβαλλόμενη δυνάμει του άρθρου 287, παράγραφος 4, δεύτερο εδάφιο, ΣΛΕΕ) Ευρωπαϊκό ελεγκτικό συνέδριο*
4. *ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΧΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ. ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ. ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ. ΘΕΜΑ: Δείκτες ατμοσφαιρικής ποιότητας και η σχέση τους με το Ευρωπαϊκό και Διεθνές Νομοθετικό πλαίσιο. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Χρυσούλα Μπίμη. Ιούλιος 2019*
5. *Καματάκη, Ε., 2009. Μεγάλης κλίμακας μεταφορά σωματιδιακής ύλης στη Θεσσαλονίκη. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.Τμήμα Φυσικής / Αριστοτέλειο Παν/μιο. Ψηφιακή βιβλιοθήκη Αριστοτελείου Παν/μιου.*
6. *Καμπετζίδης Χ. και ΜατραλήςΧ., 2004, Ατμοσφαιρικοί Ρύποι και Τεχνολογία Ελέγχου Εκπομπής τους, Τόμος Ι και ΙΙ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.*
7. *Λαζαρίδης, Μ., 2010. Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας. 2η Έκδοση ,Εκδόσεις Τζιόλα.*
8. *ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΟΥΣΑΜΛΗΣ - ΚΕΠΛΗΝΕΤ ΛΕΣΒΟΥ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2018: ARDUINO για αρχάριους*
9. *ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ «Καταγραφή & Μελέτη αιωρούμενων σωματιδίων στο Πολεοδομικό Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης» Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του*

ΤΕΕ/ΤΚΜ, όπως εγκρίθηκε με την υπ' αριθμ. Α261α/Σ20/09 απόφαση της Διοικούσας Επιτροπής. Μέλη Ομάδας Εργασίας: Μάρκος Ασσαέλ, Χημικός Μηχανικός (καθηγητής ΑΠΘ), Δημήτρης Μελάς, Φυσικός (αναπλ. καθηγητής ΑΠΘ), Κωνσταντίνος Καρατζάς, Μηχανολόγος Μηχανικός (επικ. καθηγητής ΑΠΘ), Χαρίσιος Αχιλλιάς, Μηχανολόγος Μηχανικός, Κωνσταντίνος Κακοσίμος, Χημικός Μηχανικός

10. Υπουργείο περιβάλλοντος και ενέργειας, Γεν. Δ/ση Περιβαλλοντικής πολιτικής, Δ/ση κλιματικής αλλαγής & Ποιότητας ατμόσφαιρας. "Ετήσια έκθεση ποιότητας της ατμόσφαιρας 2018" Μάιος 2019
11. Χαϊνά Ευαγγελία. 2014. Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικά αστικά κέντρα. Η επίδραση της οικονομικής κρίσης στα επίπεδα της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

12. «Air quality in Europe – 2017 report», 2017, σ. 22.
13. Amaral, S., de Carvalho, J. A., Costa, M., and Pinheiro, C. An overview of particulate matter measurement instruments. *Atmosphere*, 6:1327{1345, 2015.
14. *Ambient air pollution and neurotoxicity on brain structure: Evidence from women's health initiative memory study.* Jiu-Chiuan Chen MD, MPH, ScD Xinhui Wang MS Gregory A. Wellenius ScD Marc L. Serre PhD Ira Driscoll PhD Ramon Casanova PhD John J. McArdle PhD JoAnn E. Manson MD, DrPH Helena C. Chui MD Mark A. Espeland PhD
15. *Ambient Air Pollution Exaggerates Adipose Inflammation and Insulin Resistance in a Mouse Model of Diet-Induced Obesity.* Qinghua Sun, MD, PhD, Peibin Yue, MD, PhD, Jeffrey A. Deiuliis, PhD, Carey N. Lumeng, MD, Thomas Kampfrath, MS, Michael B. Mikolaj, MD, Ying Cai, MD, Michael C. Ostrowski, PhD, Bo Lu, PhD, Sampath Parthasarathy, MBA, PhD, Robert D. Brook, MD, Susan D. Moffatt-Bruce, MD, PhD, Lung Chi Chen, PhD, and Sanjay Rajagopalan, MD
16. Anderson, W. A. *ChE 572: Air Pollution Control.* 2016.
17. AOSONG Temperature and humidity module AM2301 Product Manual www.aosong.com

18. *Association Between Fine Particulate Matter and Diabetes Prevalence in the U.S.. John F. Pearson, BS Chethan Bachireddy, BS, Sangameswaran Shyamprasad, MS, Allison B. Goldfine, MD, and John S. Brownstein, PHD*
19. *Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet*
20. *DFROBOT PM2.5 laser dust sensor SKU: SEN0177*
21. *DS3232 Extremely Accurate I2C RTC with Integrated Crystal and SRAM Maxim Intergrated TM*
22. *EEA Report No 9/2013. Air quality in Europe — 2013 report. ISSN 1725-9177*
23. *[Effects of Airborne Fine Particulate Matter on Human Respiratory Symptoms and Pulmonary Function]. [Article in Chinese]. Zhi-Yi Gao , Peng-Kun Li, Jin-Zhuo Zhao, Rong-Fang Jiang, Bin-Jie Yang, Min-Hua Zhang, Wei-Min Song*
24. *Engel-Cox, J., Oanh, N. T. K., van Donkelaar, A., Martin, R. V., and Zell, E. Toward the next generation of air quality monitoring: Particulate matter. Atmospheric Environment, 80:584{590, 2013.*
25. *Exposures to Fine Particulate Air Pollution and Respiratory Outcomes in Adults Using Two National Datasets: A Cross-Sectional Study. Keeve E Nachman , Jennifer D Parker*
26. *Fine Particulate Air Pollution and the Progression of Carotid Intima-Medial Thickness: A Prospective Cohort Study from the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis and Air Pollution. Sara D. Adar , Lianne Sheppard, Sverre Vedal, Joseph F. Polak, Paul D. Sampson, Ana V. Diez Roux, Matthew Budoff, David R. Jacobs, Jr, R. Graham Barr, Karol Watson, and Joel D. Kaufman*
27. *Fine Particulate Matter Pollution Linked to Respiratory Illness in Infants and Increased Hospital Costs. Perry Sheffield , Angkana Roy, Kendrew Wong, Leonardo Trasande*

28. Gao, J., Wang, T., Zhou, X., Wu, W., and Wang, W. *Measurement of aerosol number size distributions in the yangtze river delta in china: Formation and growth of particles under polluted conditions. Atmospheric Environment*, 43:829{836, 2008.

29. Goudie, A. S. and Middleton, N. J. (2006) *Desert Dust in the Global System. Springer Berlin*

30. Grimm, H. and Eatough, D. J. *Aerosol measurement: The use of optical light scattering for the determination of particulate size distribution, and particulate mass, including the semi-volatile fraction. Journal of the Air & Waste Management Association*, 59: 101{107, 2009.

31. Harrison, R. and Yin, J. *Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? The Science of the Total Environment*, 249: 85{101, 2000.

32. Holstius, D. M., Pillarisetti, A., Smith, K. R., and Seto, E. *Field calibrations of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in california. Aerosol Measurement Techniques*, 7:1121{1131, 2014.

33. Huang, C. H. *Field comparison of real-time pm2.5 readings from a beta gauge monitor and a light scattering method. Aerosol and Air Quality Research*, 7:239{250, 2007.

34. *Laboratory Evaluation of Low to Medium Cost Particle Sensors By Ben Kinh Tan. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Mechanical and Mechatronics Engineering. Waterloo, Ontario, Canada, 2017 © Ben Kinh Tan 2017*

35. Leeuw, F. d. (2005). *PM10 measurement methods and correction factors in AIRBASE 2004 status report (No. Technical Paper 2005/6): European Topic Centre on Air and Climate Change.*

36. Lewis, A. and Edwards, P. *Validate personal air-pollution sensors. Nature*, 535:29{31, 2016.

37. *Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-Term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. C Arden Pope 3rd, Richard T Burnett, Michael J Thun, Eugenia E Calle, Daniel Krewski, Kazuhiko Ito, George D Thurston*

38. NARSTO. (2006). *Measurement Methods Compendium: Particulate Matter Methods*, 2009, from <http://narsto.ornl.gov/Compendium/methods/pm.shtml>
39. *Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease: An Update to the Scientific Statement From the American Heart Association*. Robert D Brook, Sanjay Rajagopalan, C Arden Pope 3rd, Jeffrey R Brook, Aruni Bhatnagar, Ana V Diez-Roux, Fernando Holguin, Yuling Hong, Russell V Luepker, Murray A Mittleman, Annette Peters, David Siscovick, Sidney C Smith Jr, Laurie Whitsel, Joel D Kaufman, American Heart Association Council on Epidemiology and Prevention, Council on the Kidney in Cardiovascular Disease, and Council on Nutrition, Physical Activity and Metabolism
40. *Risk of Incident Diabetes in Relation to Long-term Exposure to Fine Particulate Matter in Ontario, Canada*. Hong Chen, corresponding author Richard T. Burnett, Jeffrey C. Kwong, Paul J. Villeneuve, Mark S. Goldberg, Robert D. Brook, Aaron van Donkelaar, Michael Jerrett, Randall V. Martin, Jeffrey R. Brook, and Ray Copes
41. Schrobenauser, R., Strzoda, R., Fleischer, M., Hartmann, A., and Amann, M. C. *Detection of the mass of μm particulate matter using light scattering and inertial filtering in a miniaturized sensor setup*. *Measurement Science and Technology*, 25:035103, 2014.
42. Schwab, J. and Zenkel, M. *Filtration of particulates in the human nose*. *The Laryngoscope*, 108:120{124, 1998.
43. Solomon, P. A. and Sioutas, C. *Continuous and semicontinuous monitoring techniques for particulate matter mass and chemical components: A synthesis of findings from epa's particulate matter supersites program and related studies*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58:164{195, 2008.
44. Sorensen, C. M. and Fischbach, D. J. *Patterns in mie scattering*. *Optics Communications*, 173:145{153, 2000.
45. Tan, Z. *Air Pollution and Greenhouse Gases*. Springer, 2014.
46. Wang, Y., Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J., and Biswas, P. *Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement*. *Aerosol Science and Technology*, 49:1063{1077, 2015.

47. Webb, P. A. *A Primer on Particle Sizing by Static Laser Light Scattering*. Micromeritics, 2000.
48. Winkel, A., Rubio, J. L., Veld, J. W. H., Vonk, J., and Ogink, N. W. *Equivalence testing of laser-based, beta-attenuation, teom, and light-scattering devices for measurement of pm10 concentration in animal houses*. *Journal of Aerosol Science*, 80:11{26, 2015.
49. World Health Organization. *Who air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Technical report, 2005.
50. Zogou, O. & Stamatelos, A., 2012. *Analysis of data from ambient PM10 concentration monitoring in Volos in the period 2005-2010*. *American Journal of Environmental Engineering* , Volume 2, Issue 4, 97-108.
51. 3.2” microLCD Intelligent PICASO Display Module μ LCD-32PTU 4D SYSTEMS www.4dsystems.com.au

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

52. http://www.oecd.org/document/11/0,3746,en_2649_37465_49036555_1_1_1_37465,00.html
53. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
54. www.forecastweather.gr
55. http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=493&language=el-GR&fbclid=IwAR3EcOGPpzIzGOkvk09bRTfpwx1RKIJ3_x98NFDDDDz09PB RkvMSzInHVurA
56. <https://airindex.eea.europa.eu/>
57. http://www.physics.ucc.ie/nicchormaic/Tyndall_EF.html

58. *The David Suzuki Foundation. The air we breathe, 2014. URL <http://www.davidsuzuki.org/issues/health/science/air-quality/the-air-we-breathe/>.*
59. *World Health Organization. Air pollution levels rising in many of the world's poorest cities, 2016a. URL <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/air-pollution-rising/en/>.*
60. *Dhaniyala, S. Aerosol measurement techniques, 2017. URL http://webpace.clarkson.edu/projects/crcd/me637/downloads/P_Aerosol_Meas_Suresh.pdf.*
61. *The University of Manchester. Optical particle counters, 2016. URL <http://www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/aerosol/opc/>.*
62. <http://mcuhq.com/17/getting-started-arduino>
63. <https://el.wikipedia.org/wiki/Arduino>
64. https://www.aliexpress.com/wholesale?catId=0&initiative_id=SB_20170725012303&SearchText=arduino+uno

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```
1 // ----- BIBΛΙΟΘΗΚΕΣ -----
2 #include <SoftwareSerial.h> //δήλωση βιβλιοθήκης για τη σειριακή επικοινωνία του sen0177, picaso display με το arduino
3 #include "DHT.h" //δήλωση βιβλιοθήκης για τη λήψη δεδομένων θερμοκρασίας και υγρασίας από τον am2301
4 #include <DS3232RTC.h> // δήλωση βιβλιοθήκης για τη χρήση του rtc ds3232 http://github.com/JChristensen/DS3232RTC
5 #include <Time.h> // δήλωση βιβλιοθήκης για τον ορισμό του χρόνου http://www.arduino.cc/playground/Code/Time
6 #include <Wire.h> // http://arduino.cc/en/Reference/Wire (included with Arduino IDE) Δήλωση βιβλιοθήκης για την
7 // ενεργοποίηση και την επικοινωνία του I2C πρωτοκόλλου μεταξύ του rtcds 3232 sensor και του arduino
8 #include "Picaso_Serial_4DLib.h" // δήλωση βιβλιοθήκης για την οθόνη
9 #include "Picaso_const4D.h" // δήλωση βιβλιοθήκης για την οθόνη
10 // ----- DEFINES -----
11 #define PMArrayLenth 31 //δήλωση του καταχωρητή εκκίνησης 0x42 με packet length 32byte του αισθητήρα sen0177
12 #define DHTPIN 6 // σύνδεση δεδομένων στο ψηφιακό pin 6
13 #define DHTTYPE DHT21 //
14 // ----- ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ -----
15 SoftwareSerial DisplaySerial(2, 3) ; //αρχικοποίηση της σειριακής επικοινωνίας της οθόνης στα ψηφιακά pin 2,3
16 SoftwareSerial pm2_5_sensor(10, 9) ; // αρχικοποίηση της σειριακής επικοινωνίας του αισθητήρα sen0177στα ψηφιακά pin 10, 9
17 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // καλούμε τη συνάρτηση dht που δέχεται τα ορίσματα DHTPIN, DHTTYPE
18 Picaso_Serial_4DLib Display(&DisplaySerial); // καλούμε τη συνάρτηση Display με όρισμα DisplaySerial για την επικοινωνία της οθόνης
19 // ----- ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ -----
20 unsigned char buf[PMArrayLenth]; // δήλωση πίνακα χαρακτήρων με όνομα buf και μέγεθος PMArrayLenth δηλαδή 32 byte
21 word handle; //μεταβλητή τύπου δεδομένων word
22
23 // δήλωση μεταβλητών για τον αισθητήρα sen0177
24 int PM01Value = 0;
25 int PM2_5Value = 0;
26 int PM10Value = 0;
27
28 //Insert Variables Here
29 int disk, il;
30
31
32
33
34
35
36
37
38 //enable message logging
39 //#define LOG_MESSAGES // <-- to disable message logging, comment out this line
40 #ifdef LOG_MESSAGES
41 #define HWLOGGING Serial
42 #else
43 #define HWLOGGING if (1) {} else Serial
44 #endif
45
46
47 // ----- ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ -----
48 // Στην setup γίνονται οι αρχικοποιήσεις των συναρτήσεων των αισθητήρων, της οθόνης, του rtc, του txt
49 void setup() {
50
51 // παίρνουμε την ώρα από το rtc
52 setSyncProvider(RTC.get);
53 // ελέγχουμε αν έχει συγχρονιστεί η ώρα του rtc με την πραγματική ώρα.
54 if (timeStatus() != timeSet)
55 HWLOGGING.println("Unable to sync with the RTC");
56 else
```

```

57     HWLOGGING.println("RTC has set the system time");
58
59
60     delay(200);
61     dht.begin(); // λειτουργία αναζήτησης των συνδεδεμένων αισθητηρίων dht
62     delay(200);
63
64     //For handling errors
65     //Display.Callback4D = mycallback ;
66     //
67     //5 second timeout on all commands
68     Display.TimeLimit4D = 10000 ;
69
70 #ifdef LOG_MESSAGES
71     HWLOGGING.begin(115200);
72     HWLOGGING.println(F("\nDisplay Images using an Arduino Host Demo w/ Message Logging"));
73 #endif
74
75 // Γενικές ρυθμίσεις οθόνης
76 Display_Open();
77 Display.gfx_ScreenMode(PORTAIT);
78 Display.gfx_Cls(); //clear the screen
79 Display.gfx_BGcolour(LIGHTGOLD) ; // to check CLS works with different bg color
80 Display.gfx_Cls() ;
81 Display.txt_BGcolour(LIGHTGOLD) ; // to ensure text goesn look odd
82 Display.txt_FGcolour(RED) ;
83


---


84 // Έλεγχος αν είναι συνδεδεμένη η κάρτα sd, αλλιώς περιμένει μέχρι να συνδεθεί
85 Display.putstr("Mounting...\n"); //print a string
86 if (!(Display.file_Mount()))
87 {
88     while (!(Display.file_Mount()))
89     {
90         Display.putstr("Drive not mounted...");
91         delay(200);
92         Display.gfx_Cls();
93         delay(200);
94     }
95 }
96
97
98 Display_Close(); //απενεργοποίηση οθόνης
99
100 }
101
102 //η loop είναι η συνάρτηση στην οποία εκτελείται ο ατέρμων βρόχος.
103 //Σε αυτή τη συνάρτηση λαμβάνουμε τις μετρήσεις από τους αισθητήρες και τις εξάγουμε σε αρχεία txt
104 void loop()
105 {
106     unsigned long currentMillis = millis(); // μέτρηση χρόνου με τη χρήση της συνάρτησης millis
107
108     float h = dht.readHumidity(); // λήψη μέτρησης υγρασίας
109     float t = dht.readTemperature(); //λήψη μέτρησης θερμοκρασίας
110     PM 2 5 Reading();

```

```

111 delay(200);
112
113 // έλεγχος αν ο dht αισθητήρας βγάζει εσφαλμένες τιμές μέσω της συνάρτησης isnan
114 if (isnan(t) || isnan(h))
115 {
116     Display_Open();
117     Display.putstr("Failed to read from DHT");
118     Display_Close();
119 }
120 else
121 {
122 // εκτύπωση μετρήσεων στην οθόνη
123     Display_Open();
124     Display.gfx_Cls();
125     delay(200);
126     Display.println(F(" \r"));
127     Display.println(F(" New Readings ... \r"));
128     Display.println(F("=====\r"));
129     Display.println(F(" \r"));
130     Display.print(year()); Display.print("-");
131     Display.print(month()); Display.print("-");
132     Display.print(day()); Display.print(" ");
133     Display.print(hour()); Display.print(":");
134     Display.print(minute()); Display.print(":");
135     Display.print(second()); Display.println("");
136     Display.println(F(" \r"));
137
138     Display.print(F(">Hum. : "));
139     Display.print(h);
140     Display.println(F(" % "));
141     Display.print(F(">Temp.: "));
142     Display.print(t);
143     Display.println(F(" °C"));
144
145     Display.print(F("\n>PM2.5 = "));
146     Display.print(PM2_5Value);
147     Display.println(F(" ug/m3 \t"));
148
149     Display.print(F(">PM1.0 = "));
150     Display.print(PM10Value);
151     Display.println(F(" ug/m3 \t"));
152
153     Display.print(F(">PM 10 = "));
154     Display.print(PM10Value);
155     Display.println(F(" ug/m3 \t"));
156
157     Display.println(F(" \r"));
158     Display.println(F("*****"));
159     Display.println(F(" > ANDREAS KOLIOS PROJECT < ")); // prompts string
160     Display.println(F("*****"));
161
162 // Έλεγχος αν είναι συνδεδεμένη η κάρτα sd, αλλιώς περιμένει μέχρι να συνδεθεί
163 Display.putstr("Mounting...\n"); //print a string
164 if (!(Display.file Mount()))

```



```

165     {
166         while (!(Display.file_Mount()))
167         {
168             Display.putstr("Drive not mounted...");
169             delay(200);
170             Display.gfx_Cls();
171             delay(200);
172         }
173     }
174
175     char* date_, hum_, temp_, pm_1, pm_2, pm_3;
176     counter_++;
177
178     // δημιουργία του ονόματος κάθε αρχείου με βάση τον αύξοντα αριθμό της ημέρας και τα δευτερόλεπτα
179     int DoY = calculateDayOfYear(day(), month(), year());
180     String str_filename;
181     str_filename = String(DoY);
182
183     String str_filename2;
184     word seconds_ = hour() * 3600 + minute() * 60 + second();
185     str_filename2 = String(seconds_) + ".csv"; // from terminal(DOS) use : type 120*.csv > day120.csv
186     String full_fname;
187     full_fname = str_filename + str_filename2;
188
189     char* temp_filename = (char*) (full_fname.c_str());
190     // if (counter_==1)
191     {
192
193         handle = Display.file_Open(temp_filename, 'w'); // άνοιγμα αρχείου με δικαιώματα write για την εγγραφή δεδομένων στο αρχείο
194     }
195     //else
196     // { handle = Display.file_Open(temp_filename,'a');}
197
198     Display.putstr("Writing to uSD... \n");
199     Display.putstr("----> ");
200     Display.putstr(temp_filename);
201
202     // σε αυτό το κομμάτι κώδικα κάνουμε τις μετατροπές των μετρήσεων σε string προκειμένου να αποθηκευθούν στο αρχείο
203     String ttt;
204     ttt = String(year()) + ";";
205     char* t_chr = (char*) ttt.c_str();
206     Display.file_PutS(t_chr , handle);
207
208     ttt = String(month()) + ";";
209     t_chr = (char*) ttt.c_str();
210     Display.file_PutS(t_chr , handle);
211
212     ttt = String(day()) + ";";
213     t_chr = (char*) ttt.c_str();
214     Display.file_PutS(t_chr , handle);
215
216     ttt = String(hour()) + ";";
217     t_chr = (char*) ttt.c_str();
218     Display.file_PutS(t_chr , handle);

```

```

219 ttt = String(minute()) + ";";
220 t_chr = (char*) ttt.c_str();
221 Display.file_PutS(t_chr , handle);
222
223 ttt = String(second()) + ";";
224 t_chr = (char*) ttt.c_str();
225 Display.file_PutS(t_chr , handle);
226
227
228 String hum_str, tmp_str;
229 hum_str = String(h) + ";";
230 tmp_str = String(t) + ";";
231 t_chr = (char*) hum_str.c_str();
232 Display.file_PutS(t_chr , handle);
233 char* t_chr2 = (char*) tmp_str.c_str();
234 Display.file_PutS(t_chr2 , handle);
235
236
237 ttt = String(PM2_5Value) + ";";
238 t_chr = (char*) ttt.c_str();
239 Display.file_PutS(t_chr , handle);
240
241 ttt = String(PM10Value) + ";";
242 t_chr = (char*) ttt.c_str();
243 Display.file_PutS(t_chr , handle);
244
245 ttt = String(PM10Value) + "\n";

```

```

246 t_chr = (char*) ttt.c_str();
247 Display.file_PutS(t_chr , handle);
248
249 delay(200);
250 Display.file_Close(handle); // κλείνει το αρχείο
251 delay(200);
252 Display.file_Unmount();
253 delay(6000);
254 Display.putstr("\nfile unmounted..... \n");
255 Display_Close(); // πλέον μπορούμε να εξαγάγουμε χωρίς πρόβλημα την sd card
256 // *****
257 delay(20000);
258 }
259 }
260
261 // αυτή η συνάρτηση τυπώνει μηνύματα λάθους σε περίπτωση που υπάρχει σφάλμα στο αρχείο
262 //Error-handling routine
263 //this will execute when a communication error occurs
264 void mycallback(int ErrCode, unsigned char Errorbyte)
265 {
266 #ifdef LOG_MESSAGES
267 const char *Error4DText[] = {
268 "OK\0", "Timeout\0", "NAK\0", "Length\0", "Invalid\0"
269 }
270 ;
271 HWLOGGING.print(F("Serial 4D Library reports an error: "));
272 HWLOGGING.print(Error4DText[ErrCode]) ;

```

```

273 HWLOGGING.print(F("\n"));
274
275 if (ErrCode == Err4D_NAK)
276 {
277     HWLOGGING.print(F("returned data = "));
278     HWLOGGING.print(Errorbyte);
279 }
280 else
281     HWLOGGING.println(F(""));
282
283 HWLOGGING.println(F("Program cannot proceed further. Please reset the display.));
284 while (1); // you can return here, or you can loop
285
286 #else
287 // Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards. Just give it a name
288 int led = 13;
289 pinMode(led, OUTPUT);
290 while (1)
291 {
292     digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
293     delay(200); // wait for 200 ms
294     digitalWrite(led, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
295     delay(200); // wait for 200 ms
296 }
297 #endif
298
299


---


300
301 }
302
303
304 // αυτή η συνάρτηση κάνει έλεγχο στον πίνακα που καταχωρούνται οι μετρήσεις από τους καταχωρητές του αισθητήρα sen0177
305 char checkValue(unsigned char *thebuf, char leng) {
306     char receiveflag = 0;
307     int receiveSum = 0;
308     for (int i = 0; i < (leng - 2); i++) {
309         receiveSum = receiveSum + thebuf[i];
310     }
311     receiveSum = receiveSum + 0x42;
312     if (receiveSum == ((thebuf[leng - 2] << 8) + thebuf[leng - 1]))
313     { //check the serial data
314         receiveSum = 0;
315         receiveflag = 1;
316     }
317     return receiveflag;
318 }
319
320 // παίρνουμε τις τιμές από τους καταχωρητές του αισθητήρα sen1077
321 //και τις αποθηκεύουμε στον πίνακα που ορίσαμε στην αρχή του προγράμματος
322 //count PM1.0 value of the air detector module
323 int transmitPM01(unsigned char *thebuf) {
324     int PM01Val;
325     PM01Val = ((thebuf[3] << 8) + thebuf[4]);
326     return PM01Val;

```

```

327 }
328
329 //count PM2.5 value of the air detector module
330 int transmitPM2_5(unsigned char *thebuf) {
331     int PM2_5Val;
332     PM2_5Val = ((thebuf[5] << 8) + thebuf[6]);
333     return PM2_5Val;
334 }
335
336 //count PM10 value of the air detector module
337 int transmitPM10(unsigned char *thebuf) {
338     int PM10Val;
339     PM10Val = ((thebuf[7] << 8) + thebuf[8]);
340     return PM10Val;
341 }
342
343 //σε αυτή τη συνάρτηση παίρνουμε τις τιμές από τον πίνακα και τις θέτουμε
344 //σε μεταβλητές για να τις εκτυπώσουμε στην οθόνη και στο αρχείο txt στη βασική συνάρτηση loop
345 void PM_2_5_Reading(void) {
346     pm2_5_sensor.begin(9600); //configure the baudrate
347     pm2_5_sensor.setTimeout(1500); //set the Timeout to 1500ms, longer
348     delay(500);
349     if (pm2_5_sensor.find(0x42)) {
350         pm2_5_sensor.readBytes(buf, PMArrayLenth);
351         if ( buf[0] == 0x4d ) {
352             if (checkValue(buf, PMArrayLenth)) {
353                 PM01Value = transmitPM01(buf);
354
355                 PM2_5Value = transmitPM2_5(buf);
356                 PM10Value = transmitPM10(buf);
357             }
358         }
359     }
360     pm2_5_sensor.end();
361 }
362
363 // συνάρτηση που ενεργοποιεί την οθόνη για μετάδοση δεδομένων μέσω σειριακής επικοινωνίας
364 void Display_Open(void)
365 {
366     DisplaySerial.begin(9600) ;
367 }
368 // συνάρτηση που απενεργοποιεί την οθόνη
369 void Display_Close(void)
370 {
371     DisplaySerial.end();
372 }
373
374
375 // αυτή η συνάρτηση υπολογίζει τον αύξοντα αριθμό της ημερομηνίας
376 int calculateDayOfYear(int day, int month, int year) {
377
378     // Given a day, month, and year (4 digit), returns
379     // the day of year. Errors return 999.
380

```

```

381 int daysInMonth[] = {31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31};
382
383 // Verify we got a 4-digit year
384 if (year < 1000) {
385     return 999;
386 }
387
388 // Check if it is a leap year, this is confusing business
389 // See: https://support.microsoft.com/en-us/kb/214019
390 if (year % 4 == 0) {
391     if (year % 100 != 0) {
392         daysInMonth[1] = 29;
393     }
394     else {
395         if (year % 400 == 0) {
396             daysInMonth[1] = 29;
397         }
398     }
399 }
400
401 // Make sure we are on a valid day of the month
402 if (day < 1)
403 {
404     return 999;
405 } else if (day > daysInMonth[month - 1]) {
406     return 999;
407 }

```

```

408
409 int doy = 0;
410 for (int i = 0; i < month - 1; i++) {
411     doy += daysInMonth[i];
412 }
413
414 doy += day;
415 return doy;
416 }

```
