

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ολοκληρωμένο Σύστημα Έξυπνης Περιβαλλοντικής Παρακολούθησης και Ανάλυσης σε Αστικές Περιοχές»

“Integrated Smart Environmental Monitoring and Analysis System in Urban Areas”

Ψαράκης Αλέξανδρος

Επιβλέπων: Δρ. Ρηγάκης Ηρακλής

Χανιά, Οκτώβριος 2025

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει σε βάθος τη δυναμική σχέση ανάμεσα στην αστικοποίηση και τις περιβαλλοντικές της συνέπειες, μέσα από μια διεπιστημονική προσέγγιση που συνδυάζει τη θεωρητική ανάλυση των αστικών φαινομένων με την πρακτική εφαρμογή τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT). Η αστικοποίηση, ως αποτέλεσμα της οικονομικής ανάπτυξης και της πληθυσμιακής συγκέντρωσης, έχει οδηγήσει σε μια σειρά σύνθετων περιβαλλοντικών προβλημάτων, τα οποία επιδρούν άμεσα στην υγεία, την ποιότητα ζωής και τη βιωσιμότητα των πόλεων. Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας διερευνάται η ιστορική εξέλιξη του φαινομένου της αστικοποίησης και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο αυτή συνδέεται με την ατμοσφαιρική ρύπανση, την ενεργειακή κατανάλωση και τις κλιματικές μεταβολές του αστικού περιβάλλοντος.

Ειδικότερα, εξετάζονται οι σημαντικότεροι περιβαλλοντικοί δείκτες που χαρακτηρίζουν το αστικό μικροκλίμα. Τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter - PM), αναγνωρίζονται ως ο βασικός παράγοντας εξωτερικής ρύπανσης, καθώς η μακροχρόνια έκθεση σε αυτά έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί σοβαρές αναπνευστικές και καρδιοαγγειακές παθήσεις. Αντίστοιχα, οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds - VOCs) αποτελούν τον κύριο δείκτη εσωτερικής ρύπανσης, επηρεάζοντας την ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους, όπου οι άνθρωποι περνούν το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους. Επιπλέον, εξετάζεται η ηχορύπανση ως ένας συχνά υποτιμημένος αλλά σημαντικός παράγοντας αστικής ενόχλησης, που συνδέεται με την ψυχική και σωματική κόπωση των πολιτών, καθώς και με μακροπρόθεσμες επιδράσεις στο καρδιοαγγειακό σύστημα.

Το θεωρητικό πλαίσιο συμπληρώνεται με την ανάλυση του φαινομένου της θερμικής αστικής νησίδας, το οποίο προκύπτει από τη μεταβολή της ενεργειακής ισορροπίας των πόλεων εξαιτίας της έντονης δόμησης, της έλλειψης πράσινου και της θερμικής αποθήκευσης στα αστικά υλικά. Το φαινόμενο αυτό δεν περιορίζεται μόνο στη μικροκλίμακα των πόλεων, αλλά συνδέεται άμεσα με τις ευρύτερες διαδικασίες της κλιματικής αλλαγής, καθώς η αυξημένη θερμοκρασία και η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου ενισχύουν την παγκόσμια ανισορροπία του κλίματος.

Παράλληλα, διερευνώνται οι παράμετροι του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), της θερμοκρασίας, της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), της υγρασίας και της βαρομετρικής πίεσης ως κρίσιμες μεταβλητές για τη μελέτη τόσο του αστικού μικροκλίματος όσο και της κλιματικής δυναμικής σε παγκόσμιο επίπεδο. Η αύξηση του CO_2 συμβάλλει στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, επιδρώντας στη θερμική ισορροπία της ατμόσφαιρας, ενώ οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας επηρεάζουν τον κύκλο της ενέργειας και των υδρατμών, καθορίζοντας τη βιωσιμότητα των αστικών περιοχών. Αντίστοιχα, οι διακυμάνσεις στην υπεριώδη ακτινοβολία και τη βαρομετρική πίεση αντικατοπτρίζουν μεταβολές στα μοτίβα ηλιακής ακτινοβολίας και ατμοσφαιρικής σταθερότητας, παρέχοντας πολύτιμα στοιχεία για τη μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.

Επιπλέον, η εργασία εξετάζει τη σεισμική δραστηριότητα ως έναν καθοριστικό γεωφυσικό παράγοντα που επηρεάζει άμεσα τόσο τη φυσική όσο και την ανθρωπογενή ισορροπία του περιβάλλοντος. Οι σεισμοί, ως φυσικά φαινόμενα που απορρέουν από την εσωτερική δυναμική της Γης,

προκαλούν εκτεταμένες αλλαγές στο γεωλογικό υπόβαθρο, διαταράσσουν τις εδαφικές και υδρολογικές συνθήκες, ενώ σε αστικές περιοχές μπορούν να επιφέρουν σοβαρές επιπτώσεις στις υποδομές, στο ανθρωπογενές περιβάλλον και στη συνολική κοινωνικοοικονομική δραστηριότητα.

Στο πρακτικό μέρος, η εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός Ολοκληρωμένου Συστήματος Έξυπνης Περιβαλλοντικής Παρακολούθησης και Ανάλυσης σε Αστικές Περιοχές, με την ονομασία UrbanSense. Το σύστημα αυτό συνδυάζει τεχνολογίες υλικού, λογισμικού και διαδικτύου, επιτρέποντας την αυτόνομη συλλογή, αποθήκευση, επεξεργασία και οπτικοποίηση περιβαλλοντικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Κεντρικό στοιχείο της υλοποίησης αποτελεί ο μικροελεγκτής ESP32-S3, ο οποίος λειτουργεί ως κόμβος IoT και συντονίζει ένα ολοκληρωμένο σύνολο αισθητήρων για τη μέτρηση φυσικοχημικών και μικροκλιματικών παραμέτρων του αστικού περιβάλλοντος.

Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία καταγράφονται μέσω του αισθητήρα AHT10, η βαρομετρική πίεση με τον BMP180, ενώ οι συγκεντρώσεις CO_2 και TVOC μετρώνται από τον αισθητήρα ENS160. Η ανίχνευση PM πραγματοποιείται μέσω του PPD42NS, ενώ η ένταση του ήχου μετράται από τον αναλογικό Sound Sensor V2. Επιπλέον, η UV καταγράφεται από τον αισθητήρα AS7331, παρέχοντας δεδομένα για την ηλιακή έκθεση. Τέλος, οι σεισμικές ή δονητικές μεταβολές καταγράφονται με τον επιταχυνσιόμετρο LIS2DW12, παρέχοντας δεδομένα για τη μηχανική δραστηριότητα του εδάφους.

Το firmware του μικροελεγκτή αναπτύχθηκε στο Arduino IDE, αξιοποιώντας το FreeRTOS για την υλοποίηση πολυδιεργασιακού προγραμματισμού, με στόχο τη σταθερότητα, τη χρονική ακρίβεια και τη βελτιστοποιημένη κατανάλωση ενέργειας.

Για τη διαχείριση και αποθήκευση των δεδομένων, αναπτύχθηκε υποδομή βασισμένη στο XAMPP, η οποία συνδυάζει τον Apache Server, τη MySQL Database και τη γλώσσα PHP. Μέσω ενός συνόλου PHP APIs, το σύστημα δέχεται μετρήσεις από τον μικροελεγκτή μέσω HTTP POST αιτημάτων, επεξεργάζεται τα δεδομένα και τα αποθηκεύει στη βάση με χρονολογική σήμανση. Παράλληλα, αναπτύχθηκε διαδικτυακή εφαρμογή με HTML, CSS και JavaScript, η οποία προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα να παρακολουθεί τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, να εξετάζει ιστορικές εγγραφές και να αναλύει τις μεταβολές τους μέσα από διαδραστικά γραφήματα.

Η ολοκλήρωση και αξιολόγηση του UrbanSense απέδειξε ότι η τεχνολογία IoT μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματικό εργαλείο για την περιβαλλοντική παρακολούθηση και διαφάνεια, ενισχύοντας την κατανόηση των αστικών φαινομένων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βιώσιμη ανάπτυξη των πόλεων. Μέσα από τη σύνθεση επιστημονικής γνώσης και τεχνολογικής καινοτομίας, το έργο αυτό προτείνει ένα λειτουργικό πρότυπο για τη δημιουργία “έξυπνων πόλεων”, όπου η περιβαλλοντική πληροφόρηση μετατρέπεται σε γνώση, και η γνώση σε εργαλείο κοινωνικής ευημερίας και συλλογικής δράσης.

ABSTRACT

This thesis explores in depth the dynamic relationship between urbanization and its environmental consequences through an interdisciplinary approach that combines the theoretical analysis of urban phenomena with the practical implementation of Internet of Things (IoT) technologies. Urbanization, as a result of economic development and population concentration, has led to a series of complex environmental problems that directly affect public health, quality of life, and the sustainability of cities. The theoretical part of the study investigates the historical evolution of urbanization and analyzes how it is linked to air pollution, energy consumption, and the climatic transformations of the urban environment.

In particular, the research examines the key environmental indicators that characterize the urban microclimate. Particulate Matter (PM) is identified as the main factor of outdoor pollution, as prolonged exposure has been shown to cause severe respiratory and cardiovascular diseases. Similarly, Volatile Organic Compounds (VOCs) are presented as the main indicator of indoor pollution, affecting air quality in indoor environments where people spend most of their lives. Moreover, noise pollution is examined as a frequently underestimated yet significant urban stressor, associated with psychological and physical fatigue as well as long-term cardiovascular effects.

The theoretical framework is further enriched by the analysis of the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, which results from the alteration of the energy balance of cities due to dense urbanization, lack of green areas, and the heat-retaining properties of construction materials. This phenomenon extends beyond the local urban scale and is directly linked to the broader processes of climate change, as increased temperature and greenhouse gas emissions exacerbate the global imbalance of the Earth's climate system.

In parallel, the study examines parameters such as carbon dioxide (CO_2), temperature, ultraviolet radiation (UV), humidity, and barometric pressure as critical variables for understanding both the urban microclimate and global climatic dynamics. The rise of CO_2 levels contributes to the intensification of the greenhouse effect, altering the thermal equilibrium of the atmosphere, while fluctuations in temperature and humidity affect energy and water vapor cycles, determining the livability of urban areas. Likewise, variations in UV radiation and barometric pressure reflect changes in solar irradiance and atmospheric stability, providing valuable insights into the localized impacts of climate change.

Additionally, the thesis addresses seismic activity as a fundamental geophysical factor that directly influences both the natural and anthropogenic balance of the environment. Earthquakes, as natural phenomena resulting from the Earth's internal dynamics, cause extensive alterations to the geological substrate, disturb soil and hydrological conditions, and in urban areas can have severe consequences on infrastructure, the built environment, and overall socio-economic activity.

The practical part of the study focuses on the development of an Integrated Smart Environmental Monitoring and Analysis System for Urban Areas, named UrbanSense. This system combines hardware,

software, and web technologies to enable autonomous collection, storage, processing, and visualization of environmental data in real time. At the core of the implementation lies the ESP32-S3 microcontroller, which functions as an IoT hub coordinating a comprehensive array of sensors for measuring physicochemical and microclimatic parameters of the urban environment. Specifically, temperature and relative humidity are recorded via the AHT10 sensor, barometric pressure through the BMP180, and CO_2 and TVOC concentrations via the ENS160. The detection of PM is performed by the PPD42NS sensor, sound intensity is measured using an analog Sound Sensor V2, while UV is recorded by the AS7331 sensor, providing data on solar exposure. Finally, vibrations and seismic activity are monitored by the LIS2DW12 accelerometer, providing data on ground motion and dynamic variations. Finally, vibrations and seismic activity are monitored by the LIS2DW12 accelerometer, providing data on ground motion and dynamic variations.

The firmware was developed in the Arduino IDE, utilizing FreeRTOS to enable multitasking execution, ensuring stability, temporal precision, and optimized energy consumption. For data management and storage, a local infrastructure based on XAMPP was implemented, combining the Apache Server, MySQL Database, and PHP language. Through a set of PHP APIs, the system receives measurements from the microcontroller via HTTP POST requests, processes the data, and stores them in the database with precise timestamps. In parallel, a web application built with HTML, CSS, and JavaScript allows users to monitor real-time measurements, review historical records, and analyze environmental variations through interactive visualizations.

The completion and evaluation of the UrbanSense system demonstrated that IoT technology can serve as an effective tool for environmental monitoring and transparency, enhancing the understanding of urban phenomena and supporting informed decision-making for sustainable urban development. By integrating scientific knowledge with technological innovation, this work proposes a functional model for the creation of “smart cities”, where environmental information is transformed into knowledge, and knowledge into a means of social well-being and collective resilience.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ 14
1.1 Ιστορική Εξέλιξη της Αστικοποίησης 14
1.2 Σύγχρονες Τάσεις και Προβλέψεις 17
2. ΣΧΕΣΗ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ 19
2.1 Ιστορία της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 19
2.2 Ατμοσφαιρικοί Ρύποι: Κατηγορίες και Χαρακτηριστικά 20
2.3 Κατηγοριοποίηση Ρύπων σε Εσωτερική και Εξωτερική Ρύπανση 22
3. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ 24
3.1 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά των Αιωρούμενων Σωματιδίων 24
3.2 Πηγές PM 25
3.3 Επιπτώσεις στην Ανθρώπινη Υγεία 26
3.3.1 Οξείες επιδράσεις 27
3.3.2 Χρόνιες Επιδράσεις 29
3.4 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και των PM 32
4. ΠΤΗΤΙΚΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ 34
4.1 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων 34
4.2 Πηγές VOC 36
4.3 Επιπτώσεις στην Ανθρώπινη Υγεία 37
4.3.1 Οξείες Επιδράσεις 37
4.3.2 Χρόνιες Επιδράσεις 38
4.3.3 Ευάλωτες Ομάδες 39
4.4 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα των VOC 40
5. ΗΧΟΡΥΠΑΝΣΗ 41
5.1 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά της Ηχορύπανσης 41
5.2 Πηγές Ηχορύπανσης 43
5.3 Επιπτώσεις της Ηχορύπανσης στον Άνθρωπο 44
5.3.1 Το Ανθρώπινο Ακουστικό Σύστημα και Ευπάθεια στον Θόρυβο 44
5.3.2 Σωματικές Επιδράσεις 45
5.3.3 Ψυχολογικές και Νοητικές Επιδράσεις 46
5.3.4 Ευάλωτες Ομάδες 47

5.4 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα της Ηχορύπανσης 48
6. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΑΣΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ 49
6.1 Ορισμός, Εξέλιξη και Σημασία της Αστική Θερμικής Νησίδας 49
6.2 Αίτια Δημιουργίας της UHI 49
6.3 Επιπτώσεις της Αστικής Θερμικής Νησίδας 51
6.3.1 Στην Ανθρώπινη Υγεία 51
6.3.2 Στην Ενεργειακή Κατανάλωση 52
6.3.3 Στην Ποιότητα Αέρα και τις Εκπομπές Ρύπων 52
6.3.4 Στο Τοπικό και Παγκόσμιο Κλίμα 52
6.4 Συμπεράσματα 53
7. ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΆΝΘΡΑΚΑ 54
7.1 Το CO_2 ως Δείκτης και Ρυθμιστής του Παγκόσμιου Κλίματος 54
7.2 Ιστορική Πορεία του Διοξειδίου του Άνθρακα στην Ατμόσφαιρα 55
7.3 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου 57
7.4 Δείκτης Συγκέντρωσης και Πηγές CO_2 57
7.5 Επιπτώσεις του Αυξημένου CO_2 59
7.5.1 Στο Κλίμα 59
7.5.2 Στο Περιβάλλον και τα Οικοσυστήματα 59
7.5.3 Στην Ανθρώπινη Υγεία 59
7.6 Παγκόσμιες και Τοπικές Τάσεις Εκπομπών 60
7.6.1 Προβλέψεις για το Μέλλον 61
8. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 62
8.1 Εισαγωγή 62
8.2 Μηχανισμοί Επίδρασης της Θερμοκρασίας στον Ανθρώπινο Οργανισμό 63
8.3 Θερμοκρασία, Νοσηρότητα και Θνησιμότητα 63
8.4 Ευάλωτες Ομάδες Πληθυσμού 65
8.5 Συνδυαστική Επίδραση Θερμοκρασίας και Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 66
8.6 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα των Θερμοκρασιακών Μεταβολών 67
9. ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 69
9.1 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά της Υπεριώδους Ακτινοβολίας 69
9.2 Πηγές και Μέτρηση 71
9.3 Βιολογικές Επιδράσεις 72

9.3.1 Ευεργετικές επιδράσεις 72
9.3.2 Επιβλαβείς επιδράσεις 73
9.4 Υπεριώδης Ακτινοβολία και Αστικά Οικοσυστήματα 76
9.5 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα της UV 77
10. ΥΓΡΑΣΙΑ 79
10.1 Η Σχέση Αστικοποίησης, Κλιματικής Αλλαγής και Ατμοσφαιρικής Υγρασίας 79
10.2 Ορισμός, Είδη και Ρόλος της Ατμοσφαιρικής Υγρασίας 79
10.3 Υγρασία και Ανθρώπινη Υγεία 81
10.3.1 Αναπνευστικό Σύστημα 81
10.3.2 Δερματοπάθειες και Αλλεργίες 82
10.3.3 Ευάλωτες Πληθυσμιακές Ομάδες 82
10.4 Αλληλεπίδραση Υγρασίας με Ατμοσφαιρικούς Ρύπους και Ποιότητα Αέρα 83
10.5 Κλιματική Αλλαγή και Προβλέψεις Υγρασίας 84
11. ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ 86
11.1 Η Δυναμική της Βαρομετρικής Πίεσης 86
11.2 Φυσική Έννοια και Ρόλος της Βαρομετρικής Πίεσης 86
11.3 Επιδράσεις της Βαρομετρικής Πίεσης στην Ανθρώπινη Υγεία 88
11.3.1 Καρδιαγγειακές και Αναπνευστικές Παθήσεις 88
11.3.2 Νευρολογικές και Εγκεφαλοαγγειακές Επιπτώσεις 88
11.3.3 Μυοσκελετικά και Ρευματικά Νοσήματα 89
11.3.4 Ψυχική και Νευρολογική Λειτουργία 90
11.3.5 Άλλες Φυσιολογικές Αντιδράσεις 90
11.4 Συνδυαστική Επίδραση Βαρομετρικής Πίεσης και Άλλων Παραγόντων 91
11.5 Συμπεράσματα 92
12. ΣΕΙΣΜΟΙ 94
12.1 Γεωδυναμικά Φαινόμενα και οι Πολυδιάστατες Επιπτώσεις των Σεισμών 94
12.2 Γεωφυσική Έννοια και Χαρακτηριστικά των Σεισμών 95
12.3 Επιδράσεις Σεισμών στην Ανθρώπινη Υγεία 98
12.3.1 Άμεσες Επιπτώσεις - Τραυματισμοί και Θάνατοι 98
12.3.2 Έμμεσες Επιπτώσεις - Δημόσια Υγεία και Ασθένειες 99
12.3.3 Ψυχολογικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις 99
12.4 Οικολογικές και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις των Σεισμών 100

12.5 Κοινωνικοοικονομικό, Περιβαλλοντικό και Οικολογικό Αποτύπωμα των Σεισμών 101
12.6 Σύνθεση Ευρημάτων και Αναγκαιότητα Ολιστικής, Προσβάσιμης Ενημέρωσης 104
13. ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΈΞΥΠΝΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ 106
13.1 Μεθοδολογία & Αρχιτεκτονική Συστήματος 106
13.1.1 Στόχοι & Απαιτήσεις 106
13.1.2 Επιλογή Υλικού 108
13.1.3 Συνδεσμολογία Συστήματος 114
13.1.4 Συνολική Αρχιτεκτονική 118
13.2 Υλοποίηση Firmware (ESP32-S3 / Arduino IDE) 120
13.2.1 Αρχικοποίηση και Ρυθμίσεις Περιβάλλοντος 120
13.2.2 Διαχείριση Αισθητήρων 124
13.2.3 Συλλογή και Προεπεξεργασία Δεδομένων 125
13.2.4 Επικύρωση Λειτουργίας 127
13.3 Υποδομή Δεδομένων (XAMPP/PHP/MySQL) 129
13.3.1 Ανάλυση Επικοινωνίας ESP32-PHP (Αποστολή-Εισαγωγή Δεδομένων) 129
13.3.2 Δομή Βάσης Δεδομένων (MySQL) 132
13.3.3 Ανάκτηση Δεδομένων (PHP API → Frontend) 135
13.4. Web Εφαρμογή (HTML/CSS/JavaScript + PHP) 135
13.4.1 Πληροφοριακή Αρχιτεκτονική & Ρόλοι Σελίδων 135
13.5 Συνολική Ενοποίηση και Αξιολόγηση Συστήματος 153
14. Βιβλιογραφία 155

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Ο αριθμός των ανθρώπων που ζουν σε αστικές και αγροτικές περιοχές παγκοσμίως [234] . 16
Σχήμα 2: Εξέλιξη του αριθμού των πόλεων με πληθυσμό άνω του ενός εκατομμυρίου κατοίκων (1960–2030) [235] 17
Σχήμα 3: Σύγκριση μεγέθους των PM2.5 και PM10 σε σχέση με τη μέση διάμετρο μιας ανθρώπινης τρίχας (~70 μm) και κόκκων λεπτής άμμου (~90 μm) [33] 24
Σχήμα 4: Κατηγορίες ποιότητας αέρα βάσει συγκέντρωσης PM2.5 (μg/m^3) [236] 25
Σχήμα 5: Ενδεικτικές δομές βιογενών VOC, όπως μονοτερπένια, φαινολικές ενώσεις, αλκοόλες και αλκαλοειδή [237] 34
Σχήμα 6: Κατηγοριοποίηση επιπέδων συγκέντρωσης TVOC (ppb) με βάση δείκτη ποιότητας αέρα [238] 36
Σχήμα 7: Τυπικές πηγές εκπομπής πτητικών οργανικών ενώσεων σε εσωτερικούς χώρους [53] 37
Σχήμα 8: Ενδεικτικά επίπεδα έντασης ήχου (dB) και αντίστοιχες κατηγορίες ηχητικής ρύπανσης [239]42
Σχήμα 9: Διαδικασία δημιουργίας του φαινομένου Αστικής Θερμικής Νησίδας [79] 50
Σχήμα 10: Προβολή των συγκεντρώσεων CO_2 και της αντίστοιχης αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας επιφάνειας κατά την επόμενη χιλιετία 54
Σχήμα 11: Εξέλιξη της τρύπας του όζοντος πάνω από την Ανταρκτική την περίοδο 1980–2001 [240].. 55
Σχήμα 12: Ενδεικτικά επίπεδα συγκέντρωσης CO_2 σε ppm και οι αντίστοιχες κατηγορίες ποιότητας αέρα [241] 58
Σχήμα 13: Μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας επιφάνειας (1880–2024) [96] 62
Σχήμα 14: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και η θέση της UV σε σχέση με τα υπόλοιπα μήκη κύματος [242] 69
Σχήμα 15: Φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας και χαρακτηριστικά των επιμέρους ζωνών UVA, UVB και UVC [124]..... 70
Σχήμα 16: Κλίμακα UV Index και αντίστοιχα επίπεδα προστασίας από την ηλιακή έκθεση [243] 71
Σχήμα 17: Κλίμακα Fitzpatrick για την ταξινόμηση των τύπων δέρματος με βάση τη μελανίνη της επιδερμίδας και την αντίδραση στην υπεριώδη ακτινοβολία [133] 75
Σχήμα 18: Ενδεικτική απεικόνιση των επιπέδων RH και της επίδρασής τους στην ποιότητα του αέρα και την ανάπτυξη μικροοργανισμών [244] 80
Σχήμα 19: Συσχέτιση μεταξύ RH εσωτερικού αέρα και περιστατικών γρίπης σε Νέα Υόρκη (a) και Τέξας (b) κατά την περίοδο 2010–2019 [154] 81
Σχήμα 20: Σχέση ατμοσφαιρικής πίεσης (mbar) και υψομέτρου (km) στην τροπόσφαιρα και στη στρατόσφαιρα [245]..... 87
Σχήμα 21: Οι κύριες τεκτονικές πλάκες της Γης, οι ωκεάνιες ράχες, οι τάφροι και τα ρήγματα ολίσθησης, σε συνδυασμό με την παγκόσμια σεισμική δραστηριότητα και την κατανομή των επικέντρων σεισμών [195]. 95
Σχήμα 22: Κλίμακα μεγέθους σεισμών Ρίχτερ και ενδεικτικές επιπτώσεις στην επιφάνεια [246] 96
Σχήμα 23: Κλίμακα Μερκάλι για την εκτίμηση της έντασης και των επιπτώσεων ενός σεισμού [247] .. 97
Σχήμα 24: Αισθητήρας AHT10 [248] 109
Σχήμα 25: Αισθητήρας ENS160 [249] 109

Σχήμα 26: Αισθητήρας BMP180 [250]..... 110
Σχήμα 27: Αισθητήρας LIS2DW12 [251] 110
Σχήμα 28: Αισθητήρας PPD42NS [252]..... 111
Σχήμα 29: Αισθητήρας AS7331 [253]..... 111
Σχήμα 30: Αισθητήρας Sound Sensor V2 [254] 112
Σχήμα 31: Υπολογιστική μονάδα ελέγχου ESP32-S3..... 113
Σχήμα 32: Κύκλωμα μικροελεγκτή ESP32-S3 (IC1) και σταθεροποιητή τάσης REG1117 (IC2) 115
Σχήμα 33: Κύκλωμα επικοινωνίας CP2102 (IC10) που μετατρέπει το πρωτόκολλο USB σε UART 117
Σχήμα 34: Διάγραμμα συνδεσμολογίας των περιβαλλοντικών αισθητήρων με το μικροελεγκτικό σύστημα..... 118
Σχήμα 35: Απεικόνιση της συνολικής αρχιτεκτονικής του συστήματος..... 119
Σχήμα 36: Διάγραμμα ροής ολοκληρωμένου συστήματος UrbanSense..... 119
Σχήμα 37: Διάγραμμα ροής λειτουργίας του firmware στο ESP32-S3..... 128
Σχήμα 38: Συνάρτηση αποστολής δεδομένων sendToDatabase(). 130
Σχήμα 39: Κώδικας PHP για την εισαγωγή δεδομένων στη βάση MySQL (insert.php) 131
Σχήμα 40: Δομή βάσης δεδομένων MySQL για αποθήκευση περιβαλλοντικών μετρήσεων 133
Σχήμα 41: Αυτοματοποιημένη διαδικασία καθαρισμού παλαιών δεδομένων στη MySQL 134
Σχήμα 42: Σελίδα “Home Page” της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense..... 137
Σχήμα 43: Διάγραμμα ροής λειτουργίας της γραμμής πλοήγησης (Navigation Bar) της ιστοσελίδας UrbanSense 138
Σχήμα 44: Διάγραμμα ροής αλληλεπίδρασης περιεχομένου (Content Interaction Flow) της ιστοσελίδας UrbanSense 139
Σχήμα 45: Σελίδα “Today’s Data” της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense 143
Σχήμα 46: Σελίδα “Old Data” της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense..... 147
Σχήμα 47: Σελίδα “Our Sensors” της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense..... 151
Σχήμα 48: Σελίδα “About Us” της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense 152
Σχήμα 49: Σελίδα “Contact Us” της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense 153

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Διεισδυτικότητα ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων 26
Πίνακας 2: Ταξινόμηση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) σύμφωνα με WHO 35

1. ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Η αστικοποίηση αποτελεί μία από τις πιο καθοριστικές διεργασίες στην ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού. Αντικατοπτρίζει τη σταδιακή μετάβαση των κοινωνιών από αγροτικούς και νομαδικούς τρόπους ζωής σε μόνιμες εγκαταστάσεις, οι οποίες εξελίχθηκαν σε οργανωμένα αστικά κέντρα. Η διαδικασία αυτή δεν αφορά μόνο τη συγκέντρωση πληθυσμού στις πόλεις, αλλά και τις βαθιές κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές αλλαγές που τη συνοδεύουν, τη δημιουργία νέων θεσμών, μορφών εργασίας και τρόπων οργάνωσης της ζωής.

Οι πόλεις, από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, υπήρξαν χώροι συνάντησης ανθρώπων, ιδεών και πολιτισμών. Σε αυτές αναπτύχθηκαν το εμπόριο, η τέχνη, η εκπαίδευση και η πολιτική σκέψη, μετατρέποντας τις σε πυρήνες προόδου και καινοτομίας. Η αστικοποίηση, έτσι, συνδέεται άμεσα με την εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού, καθώς μέσα από τις πόλεις διαμορφώθηκαν οι κοινωνικές δομές και οι αξίες που χαρακτηρίζουν τον σύγχρονο κόσμο.

Στη σημερινή εποχή, η αστικοποίηση συνεχίζει να επηρεάζει καθοριστικά την παγκόσμια ανάπτυξη. Οι πόλεις αποτελούν κέντρα οικονομικής δραστηριότητας και δημιουργικότητας, προσφέροντας ευκαιρίες και νέες δυνατότητες για τους ανθρώπους, αλλά ταυτόχρονα αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως η κοινωνική ανισότητα, η περιβαλλοντική πίεση και η ανάγκη βιώσιμης διαχείρισης των πόρων. Η κατανόηση της αστικοποίησης, τόσο ως ιστορικής πορείας όσο και ως σύγχρονου φαινομένου, είναι θεμελιώδης για την ανάλυση των κοινωνικών και οικονομικών μετασχηματισμών που διαμορφώνουν το μέλλον των ανθρώπινων κοινωνιών.

1.1 Ιστορική Εξέλιξη της Αστικοποίησης

Οι απαρχές: πρώιμοι οικισμοί και πρώτες πόλεις

Η αστικοποίηση ξεκινά ήδη από τη Νεολιθική εποχή (10.000-3.000 π.Χ.), όταν οι πρώτοι γεωργικοί οικισμοί εξελίχθηκαν σταδιακά σε αστικά κέντρα. Η μετάβαση από τη νομαδική ζωή των κυνηγών-τροφοσυλλεκτών σε μόνιμη εγκατάσταση βασίστηκε στη γεωργική επανάσταση, όπου η καλλιέργεια σιτηρών, η εξημέρωση ζώων και η ανάπτυξη αρδευτικών τεχνικών εξασφάλισαν πλεονάσματα τροφής. Αυτά τα πλεονάσματα αποτέλεσαν θεμέλιο για πληθυσμιακή αύξηση και για την εμφάνιση κοινωνικής διαφοροποίησης, καθώς κάποιοι απελευθερώθηκαν από την καλλιέργεια και ασχολήθηκαν με άλλες δραστηριότητες όπως η χειροτεχνία, το εμπόριο ή η διοίκηση [1-3].

Η διαδικασία κορυφώθηκε κατά την 5η και 4η χιλιετία π.Χ. στη Μεσοποταμία, με τη συγκέντρωση πληθυσμών γύρω από τον Τίγρη και τον Ευφράτη που οδήγησε στην εμφάνιση πραγματικών πόλεων. Η Ερίδου, που ιδρύθηκε γύρω στο 5400 π.Χ., θεωρείται ο αρχαιότερος οικισμός της περιοχής, αν και δεν πληρούσε ακόμη τα πλήρη κριτήρια πόλης. Κατά την περίοδο της Ουρούκ (4300-3100 π.Χ.) εμφανίζονται οι πρώτες ανεπτυγμένες μορφές αστικής ζωής, με οργανωμένες κοινότητες, συστήματα διαχείρισης και εμπορικές δραστηριότητες. Η Ουρ και άλλες πόλεις της περιοχής εξελίχθηκαν σταδιακά σε σημαντικά αστικά κέντρα, τα οποία αποτέλεσαν πυρήνες διοίκησης, θρησκείας και ανταλλαγών, θέτοντας τα θεμέλια της πρώτης μεγάλης αστικοποίησης στην ανθρώπινη ιστορία [4, 5].

Έπειτα, οι πόλεις αναπτύχθηκαν κατά μήκος των ποταμών και λειτούργησαν ως εμπορικά και διοικητικά κέντρα που υποστήριζαν μια γεωργία υψηλής παραγωγικότητας. Στην Ινδία, γύρω στο 2600-2500 π.Χ., οι πρώτοι μεγάλοι οικισμοί της κοιλάδας του Ινδού παρουσίασαν δείγματα οργανωμένου πολεοδομικού σχεδιασμού και λειτουργούσαν ως ξεχωριστά αστικά συστήματα. Τέλος, στην Κίνα, κατά την ίδια χιλιετία, αναπτύχθηκαν τειχισμένα κέντρα εξουσίας με σχεδιασμένη δομή, που συνδέθηκαν άμεσα με την πολιτική οργάνωση και τον έλεγχο των πόρων [2].

Οι πρώτες αυτές πόλεις μοιράζονταν κοινά χαρακτηριστικά: υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, κοινωνική και πολιτική ιεραρχία, καθώς και εξειδίκευση σε διάφορους τομείς πέραν της γεωργίας, όπως το εμπόριο και η χειροτεχνία. Παράλληλα, η ανάπτυξή τους στηρίχθηκε σε τεχνολογικές καινοτομίες, όπως η γραφή για τη διαχείριση των πόρων και των συναλλαγών, η μεταλλουργία, καθώς και τα μεγάλα αρδευτικά έργα που εξασφάλιζαν τη γονιμότητα των εδαφών και τη στήριξη πληθυσμών σε μεγάλη κλίμακα. Σε αυτές τις πρώιμες αστικές κοινότητες διαμορφώθηκαν θρησκευτικά και διοικητικά κέντρα, με μνημειακή αρχιτεκτονική και οργανωμένα πολεοδομικά πρότυπα, τα οποία ενίσχυσαν τη συγκέντρωση πληθυσμού και την πολιτική εξουσία. Παρόλο που ο πληθυσμός τους ήταν μικρός σε σύγκριση με τα σημερινά δεδομένα, αποτέλεσαν τον θεμέλιο λίθο για την πορεία της αστικοποίησης στους επόμενους αιώνες.

Η εξέλιξη κατά την ελληνική και ρωμαϊκή περίοδο

Στην κλασική Ελλάδα (5ος-4ος αιώνας π.Χ.), η πόλη-κράτος αποτέλεσε βασικό θεσμό. Η Αθήνα, στο απόγειό της τον 5ο αιώνα π.Χ., είχε πληθυσμό που υπολογίζεται μεταξύ 120.000 και 180.000 κατοίκων και αποτέλεσε κέντρο δημοκρατίας, εμπορίου και πολιτισμού. Παράλληλα, άλλες πόλεις όπως οι Συρακούσες και η Καρχηδόνα έφτασαν σε ακόμη μεγαλύτερα μεγέθη, δείχνοντας την έκταση της ελληνικής και μεσογειακής αστικοποίησης [1].

Η Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία (1ος αι. π.Χ.-5ος αι. μ.Χ.) πήγε την αστικοποίηση ένα βήμα παραπέρα. Μέσω της ικανότητάς τους να κατακτούν, να οργανώνουν και να διοικούν μια απέραντη αυτοκρατορία, οι Ρωμαίοι κατόρθωσαν να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες της αρχαιότητας για τη δημιουργία μεγάλων πόλεων. Η Ρώμη, τροφοδοτούμενη από την εντατική καλλιέργεια της ιταλικής ενδοχώρας και τον πλούτο που προερχόταν από τη δουλεία, το εμπόριο κ.τ.λ., έφτασε να γίνει η μεγαλύτερη πόλη του αρχαίου κόσμου με πληθυσμό που υπολογίζεται γύρω στο 1 εκατομμύριο κατοίκους τον 1ο αιώνα μ.Χ.. Τα ρωμαϊκά έργα υποδομής επέτρεψαν τη δημιουργία δικτύου πόλεων σε όλη την Ευρώπη, τη Βόρεια Αφρική και τη Μέση Ανατολή, θέτοντας τις βάσεις για τη μεσαιωνική και σύγχρονη πόλη [1, 2].

Μεσαίωνας και πρώιμη αναβίωση των πόλεων

Μετά την πτώση της Ρώμης (476 μ.Χ.) οι πόλεις της Ευρώπης άρχισαν να ανακάμπτουν κατά τον Μεσαίωνα, αν και παρέμειναν μικρές σε σύγκριση με τις μεγαλουπόλεις της σύγχρονης εποχής. Όπως δείχνουν και οι εκτιμήσεις πληθυσμού, η Φλωρεντία το 1338 είχε περίπου 90.000 κατοίκους, το Λονδίνο το 1377 μόλις 30.000, ενώ η Βενετία το 1422 έφτανε τους 190.000. Αντίστοιχα, η Φρανκφούρτη το 1440 μόλις 8.719, ενώ η Νυρεμβέργη το 1450 αριθμούσε 20.165 κατοίκους [1]. Τα στοιχεία αυτά

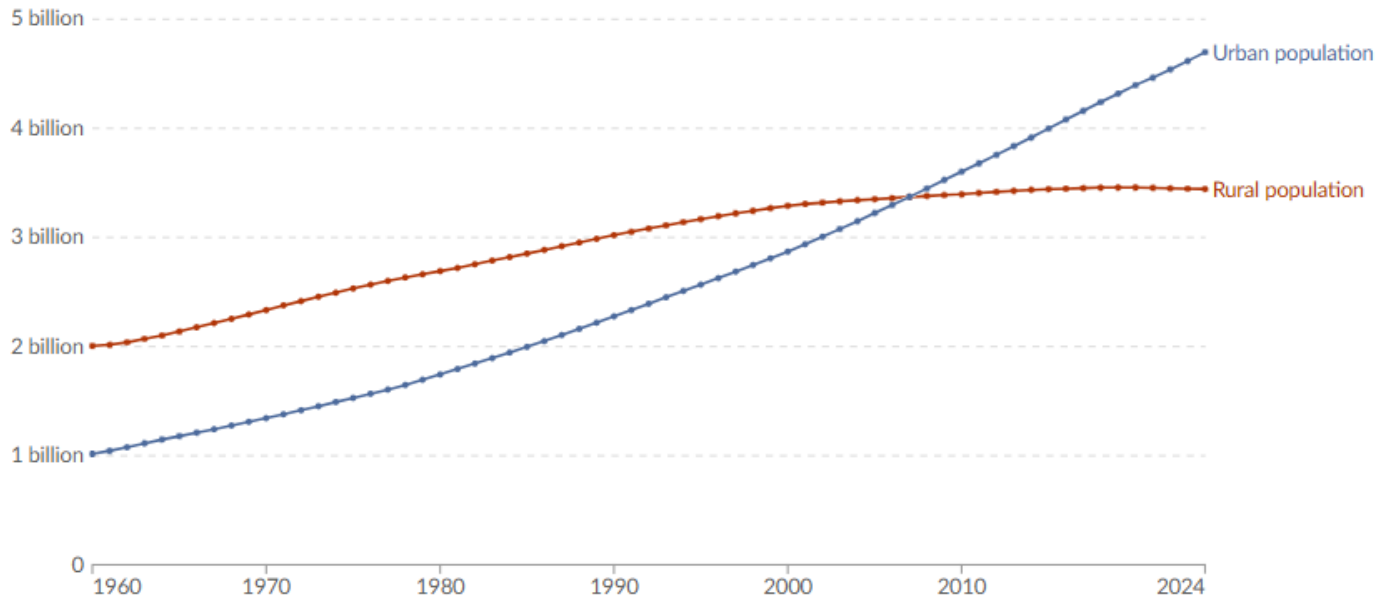
αποδεικνύουν ότι, παρόλο που οι μεσαιωνικές πόλεις αποτέλεσαν σημαντικούς κόμβους εμπορίου και πολιτισμού, το μέγεθός τους ήταν περιορισμένο σε σχέση με τις μετέπειτα αστικές συγκεντρώσεις.

Η Βιομηχανική Επανάσταση και η «Αστική Επανάσταση»

Η Βιομηχανική Επανάσταση (18ος-19ος αιώνας) αποτέλεσε τομή στην ιστορία της αστικοποίησης. Η χρήση ατμομηχανών (από το 1760), η ίδρυση εργοστασίων και η ανάπτυξη των σιδηροδρόμων (19ος αιώνας) επέτρεψαν τη μαζική συγκέντρωση πληθυσμών στις πόλεις. Η «Αστική Επανάσταση» που ακολούθησε άλλαξε ριζικά τον τρόπο ζωής. Οι πόλεις έγιναν πυκνοκατοικημένες, η κοινωνική κινητικότητα αυξήθηκε, αλλά παράλληλα ενισχύθηκαν και οι κοινωνικές ανισότητες. Στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι από τα μέσα του 19ου αιώνα έως το 1900, ο αστικός πληθυσμός της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής αυξήθηκε με πρωτόγνωρους ρυθμούς [5].

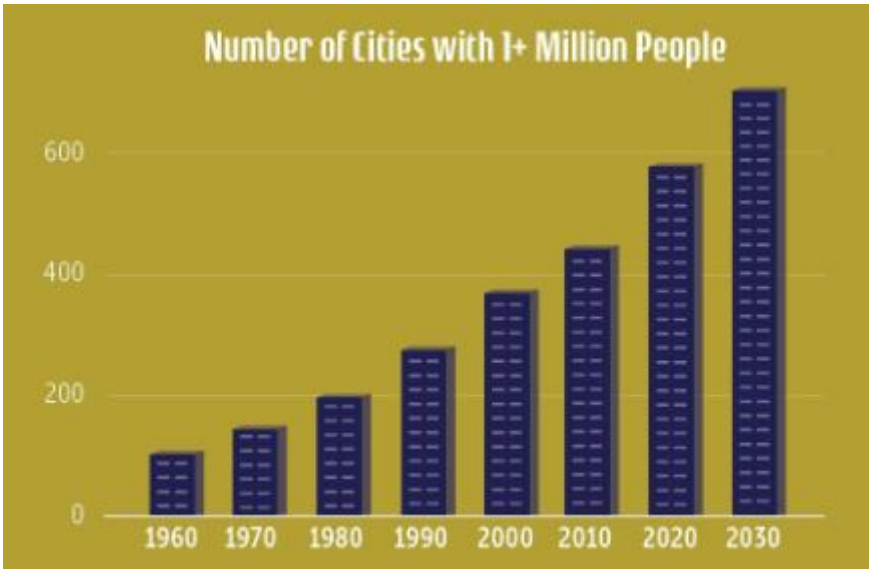
Η αστικοποίηση στον 19ο-20ο αιώνα

Ο 20ός αιώνας σημαδεύτηκε από εκρηκτική αύξηση του αστικού πληθυσμού. Στις αρχές του 20ου αιώνα, μόλις το 15% του παγκόσμιου πληθυσμού ζούσε σε πόλεις. Μέχρι το 1950, το ποσοστό αυτό είχε ανέλθει στο 35% [1], ενώ το 2008 καταγράφηκε ένα ιστορικό ορόσημο όπου για πρώτη φορά στην ανθρώπινη ιστορία, περισσότεροι άνθρωποι ζούσαν σε αστικά κέντρα παρά σε αγροτικές περιοχές, ξεπερνώντας το 50% [6]. Σήμερα, ο αριθμός των κατοίκων των πόλεων υπερβαίνει τα 4,7 δισεκατομμύρια, δηλαδή περίπου το 57% του παγκόσμιου πληθυσμού [7, 8].



Σχήμα 1: *Ο αριθμός των ανθρώπων που ζουν σε αστικές και αγροτικές περιοχές παγκοσμίως [234]*

Η τάση αυτή αντικατοπτρίζεται και στον αριθμό των μεγάλων πόλεων: το 1900 υπήρχαν μόλις 16 πόλεις με πληθυσμό άνω του 1 εκατομμυρίου, ενώ το 2005 ο αριθμός αυτός είχε ξεπεράσει τις 450 [6]. Ενδεικτικά, η συνολική αλλαγή στην αστική έκταση για την περίοδο 1970-2000 ανήλθε σε περίπου 58.000 km^2, δηλαδή έκταση 1,3 φορές μεγαλύτερη από τη Δανία [9]. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την εντυπωσιακή κλίμακα της παγκόσμιας αστικοποίησης κατά τον τελευταίο αιώνα.



***Σχήμα 2**: Εξέλιξη του αριθμού των πόλεων με πληθυσμό άνω του ενός εκατομμυρίου κατοίκων (1960–2030) [235]*

Αντίστοιχα, μέσα σε αυτό το διάστημα, ο αριθμός των μεγαλουπόλεων αυξήθηκε θεαματικά, όπου από το μοναδικό παράδειγμα του Λονδίνου στις αρχές του 20ού αιώνα, σήμερα οι μεγαλουπόλεις ξεπερνούν τις 20 με πληθυσμό άνω των 10 εκατομμυρίων [6]. Αντίστοιχα, μεγαλουπόλεις όπως το Τόκιο, το Δελχί και η Σαγκάη ξεπέρασαν τους 20 εκατομμύρια κατοίκους [10, 11].

Παράλληλα, η εξέλιξη της αστικοποίησης συνδέεται άμεσα με τη συνολική ανάπτυξη του ανθρώπινου πληθυσμού. Από μόλις 1 δισεκατομμύριο ανθρώπους το 1800, ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξήθηκε σε 2,5 δισεκατομμύρια το 1950, 6 δισεκατομμύρια το 2000 και ξεπέρασε τα 8 δισεκατομμύρια το 2022 [12]. Η αλματώδης αυτή πληθυσμιακή αύξηση άσκησε και εξακολουθεί να ασκεί έντονες πιέσεις στις πόλεις, καθώς ένα συνεχώς αυξανόμενο ποσοστό του πληθυσμού εγκαθίσταται σε αστικά κέντρα, ενισχύοντας τη διαδικασία της αστικοποίησης.

1.2 Σύγχρονες Τάσεις και Προβλέψεις

Οι μελλοντικές τάσεις δείχνουν ότι η αστικοποίηση θα συνεχιστεί αμείωτη. Εκτιμάται ότι έως το 2050 περίπου το 70% του παγκόσμιου πληθυσμού -δηλαδή σχεδόν 6,5 δισεκατομμύρια άνθρωποι- θα κατοικεί σε πόλεις [10], ενώ έως το 2100 ο αστικός πληθυσμός θα μπορούσε να ξεπεράσει τα 9 δισεκατομμύρια, αντιστοιχώντας στο 85% του συνολικού πληθυσμού της Γης, εφόσον συνεχιστούν οι σημερινές τάσεις [13].

Οι έρευνες καταγράφουν όχι μόνο αύξηση του πληθυσμού, αλλά και σημαντική επέκταση της αστικής γης σε βάρος γεωργικών εκτάσεων και φυσικών οικοσυστημάτων [9, 10, 14]. Οι προβλέψεις για την αστική γη μέχρι το 2030 είναι εξίσου εντυπωσιακές: εκτιμάται ότι η παγκόσμια αστική έκταση θα μπορούσε να αυξηθεί έως και 12.568.000 km^2, ανάλογα με τις παραδοχές για την πληθυσμιακή και οικονομική ανάπτυξη [9]. Οι αριθμοί αυτοί αναδεικνύουν τον τεράστιο αντίκτυπο που θα έχει η αστικοποίηση στη χρήση γης και στη διαχείριση του περιβάλλοντος.

2. ΣΧΕΣΗ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Η πορεία της αστικοποίησης, όπως αναδείχθηκε ιστορικά, δεν περιορίστηκε μόνο στη μεταβολή της χωρικής κατανομής του πληθυσμού, αλλά συνδέθηκε άμεσα με τη δημιουργία νέων προτύπων ζωής, οικονομικής δραστηριότητας και κοινωνικής οργάνωσης. Η ταχεία συγκέντρωση πληθυσμού στις πόλεις, ειδικά από τη Βιομηχανική Επανάσταση και έπειτα, πολλαπλασίασε τις ανάγκες σε στέγαση, ενέργεια, βιομηχανική παραγωγή και μεταφορές. Οι ανάγκες αυτές, που αποτέλεσαν κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη και την πρόοδο, συνοδεύτηκαν ταυτόχρονα από σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την ποιότητα ζωής, την κοινωνική ισότητα και -κυρίως- το περιβάλλον.

Σε αυτό το πλαίσιο, η ατμοσφαιρική ρύπανση εμφανίζεται ως η πλέον χαρακτηριστική συνέπεια της σύγχρονης αστικοποίησης. Η μαζική καύση ορυκτών καυσίμων για θέρμανση, ηλεκτρισμό, μετακινήσεις και βιομηχανία, σε συνδυασμό με την υψηλή πυκνότητα πληθυσμού και δόμησης, δημιουργούν ένα εκρηκτικό μίγμα που καθιστά τις πόλεις επίκεντρα περιβαλλοντικών πιέσεων. Η αστικοποίηση, που ιστορικά υπήρξε πηγή προόδου και καινοτομίας, μετατρέπεται ταυτόχρονα σε κρίσιμο παράγοντα που επιβαρύνει την ατμόσφαιρα και αναδεικνύει την ανάγκη για νέες μορφές βιώσιμης ανάπτυξης.

2.1 Ιστορία της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Ήδη από τη Βιομηχανική Επανάσταση, η εκτεταμένη χρήση άνθρακα για τη βιομηχανία, την παραγωγή ενέργειας και τη θέρμανση είχε ως αποτέλεσμα την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων καπνού και αιωρούμενων σωματιδίων. Οι εκπομπές αυτές, σε συνδυασμό με τις μετεωρολογικές συνθήκες, δημιούργησαν εκτεταμένα επεισόδια ομιχλώδους ατμόσφαιρας σε πολλές πόλεις της Ευρώπης, αναδεικνύοντας από νωρίς τον στενό δεσμό ανάμεσα στην αστική ανάπτυξη και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Η σοβαρότητα του προβλήματος έγινε εμφανής μέσα από μια σειρά καταστροφικών επεισοδίων τον 20ό αιώνα. Συγκεκριμένα, το 1930, στην κοιλάδα Meuse του Βελγίου, η υψηλή συγκέντρωση ρύπων προκάλεσε τον θάνατο περίπου 60 ανθρώπων και σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα σε χιλιάδες. Επιπλέον, το 1943, στο Λος Άντζελες καταγράφηκαν συχνά επεισόδια φωτοχημικού νέφους, αποτέλεσμα της ταχείας αύξησης των οχημάτων και της βιομηχανικής δραστηριότητας. Ακολούθησε το επεισόδιο στο Donora των ΗΠΑ το 1948, που συνδέθηκε με μαζικές αναπνευστικές παθήσεις. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα, ωστόσο, υπήρξε το «Μεγάλο Νέφος» του Λονδίνου το 1952, το οποίο οδήγησε σε περίπου 4.000 θανάτους τις πρώτες ημέρες και κορυφώθηκε με περισσότερους από 12.000 μέσα στους επόμενους μήνες [15-19].

Παρά τις παρατεταμένες προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών, η ατμοσφαιρική ρύπανση παραμένει μία από τις πιο δύσκολες και επίμονες προκλήσεις της σύγχρονης αστικοποίησης. Η συνεχιζόμενη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, τόσο για την παραγωγή ενέργειας όσο και για τις μεταφορές, διατηρεί υψηλά επίπεδα εκπομπών σε πολλές χώρες. Παράλληλα, η ταχεία αύξηση του αριθμού των οχημάτων και η συγκέντρωση βιομηχανικών δραστηριοτήτων σε αστικά κέντρα επιτείνουν το πρόβλημα [20-22]. Ωστόσο, το ζήτημα είναι ακόμη πιο σύνθετο, καθώς η ρύπανση προκύπτει από ένα πλέγμα πηγών, γεγονός που δυσχεραίνει τον έλεγχο ενός μόνο παράγοντα. Επιπλέον,

οι κοινωνικοοικονομικές ανισότητες εντείνουν τις διαφοροποιήσεις στην έκθεση και την προστασία των πληθυσμών, ενώ οι αποκλίσεις στην περιβαλλοντική πολιτική μεταξύ ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών καθιστούν δύσκολη την εφαρμογή ενιαίων και αποτελεσματικών στρατηγικών. Ως εκ τούτου, η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν αποτελεί μόνο τεχνικό πρόβλημα, αλλά και κοινωνικοοικονομικό και πολιτικό ζήτημα, γεγονός που εξηγεί γιατί εξακολουθεί να αντιστέκεται σε μακροπρόθεσμο και βιώσιμο έλεγχο [23, 26].

2.2 Ατμοσφαιρικοί Ρύποι: Κατηγορίες και Χαρακτηριστικά

Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η πολυπλοκότητα του προβλήματος, είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν οι βασικές κατηγορίες ατμοσφαιρικών ρύπων, οι οποίες συνθέτουν το φαινόμενο και επηρεάζουν με ποικίλους τρόπους την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν είναι ένα ενιαίο φαινόμενο, αλλά αποτελείται από ένα σύμπλεγμα ρύπων διαφορετικής φύσης, προέλευσης και χημικής σύστασης, που απελευθερώνονται τόσο από ανθρωπογενείς όσο και από φυσικές πηγές. Οι κυριότερες κατηγορίες περιλαμβάνουν:

- **Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter - PM):** Αποτελούν μείγμα οργανικών και ανόργανων σωματιδίων, σε στερεή ή υγρή μορφή, τα οποία προέρχονται από ένα ευρύ φάσμα πηγών. Οι πιο σημαντικές πηγές περιλαμβάνουν τις καύσεις καυσίμων, τις βιομηχανικές διεργασίες, τα εργοστάσια, τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, τα απορριμματοκαυστήρια, τα οχήματα, αλλά και δραστηριότητες όπως οι κατασκευές, η γεωργία, οι πυρκαγιές και φυσικά φαινόμενα όπως η αιολική μεταφορά σκόνης ή η ηφαιστειακή τέφρα [25, 27]. Είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα λόγω της δυνατότητάς τους να εισχωρούν βαθιά στους πνεύμονες και να φτάνουν μέχρι την κυκλοφορία του αίματος [23, 24]. Η χημική τους σύσταση -που συχνά περιλαμβάνει βαρέα μέταλλα, πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) και ανόργανα άλατα- ενισχύει περαιτέρω την τοξικότητά τους [23, 25].
- **Όζον (O_3):** Στη στρατόσφαιρα προστατεύει τους ζωντανούς οργανισμούς απορροφώντας τη βλαβερή υπεριώδη ακτινοβολία, όμως σε επίπεδο εδάφους είναι ιδιαίτερα τοξικό. Σχηματίζεται από φωτοχημικές αντιδράσεις που εμπλέκουν οξείδια του αζώτου και VOCs με καταλυτικό ρόλο του ηλιακού φωτός [23-25]. Η έκθεση προκαλεί ερεθισμό του αναπνευστικού, μείωση της πνευμονικής λειτουργίας και κρίσεις άσθματος [23, 24].
- **Μονοξείδιο του άνθρακα (CO):** Παράγεται από μη ολοκληρωμένη καύση ενεργειακού υλικού σε οχήματα, σταθμούς ενέργειας, βιομηχανίες και οικιακή θέρμανση [23, 25]. Η υψηλή συγγένειά του με την αιμοσφαιρίνη εμποδίζει τη μεταφορά οξυγόνου, οδηγώντας σε υποξία και καρδιαγγειακές δυσλειτουργίες. Η δηλητηρίαση από CO εκδηλώνεται με συμπτώματα όπως πονοκέφαλος, ζάλη, αδυναμία, ναυτία, έμετος και, σε υψηλότερες συγκεντρώσεις ή παρατεταμένη έκθεση, μπορεί να προκαλέσει απώλεια συνείδησης και θάνατο [23].
- **Οξείδια του θείου (SO_2, SO_3):** Εκπέμπονται κυρίως από την πρόχειρη καύση άνθρακα και πετρελαίου σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, από βιομηχανικές εγκαταστάσεις και διυλιστήρια. Προκαλούν έντονο ερεθισμό στο αναπνευστικό σύστημα, επιδεινώνοντας

παθήσεις όπως το άσθμα και η βρογχίτιδα, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στη δημιουργία όξινης βροχής, με σοβαρές συνέπειες στα οικοσυστήματα, στις καλλιέργειες και στις δομές [23, 25].

- **Οξείδια του αζώτου (NOx):** Παράγονται και αυτά από την καύση καυσίμων σε οχήματα, θερμικούς σταθμούς και βιομηχανικές διεργασίες, αλλά και από γεωργικές πηγές όπως η χρήση αζωτούχων λιπασμάτων. Τα NOx αποτελούν πρόδρομες ενώσεις για το σχηματισμό όζοντος και φωτοχημικού νέφους, ενώ η μακροχρόνια έκθεση έχει συσχετιστεί με αυξημένα περιστατικά αναπνευστικών και καρδιαγγειακών νοσημάτων [23-25].
- **Βαρέα μέταλλα:** Ο μόλυβδος (Pb), ο υδράργυρος (Hg), το κάδμιο (Cd), το Αρσενικό (As) και άλλα τοξικά μέταλλα εκπέμπονται από καύση άνθρακα, απορριμμάτων, από μεταλλευτικές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Ο μόλυβδος ειδικότερα έχει συνδεθεί με σοβαρές νευρολογικές βλάβες, καρδιαγγειακές επιπτώσεις και αναπτυξιακές διαταραχές στη γνωστική λειτουργία των παιδιών, καθιστώντας τον έναν από τους πιο επικίνδυνους ρύπους για την υγεία [23, 25].
- **Πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds - VOCs):** Πρόκειται για χημικές ουσίες που εξατμίζονται εύκολα και προέρχονται από καύσεις, πετροχημικές βιομηχανίες, διαρροές υδρογονανθράκων, φυτοφάρμακα, αλλά και από καθημερινά οικιακά προϊόντα. Οι VOCs συμμετέχουν σε φωτοχημικές αντιδράσεις που οδηγούν στο σχηματισμό όζοντος και νέφους, ενώ αρκετές ενώσεις της κατηγορίας αυτής είναι καρκινογόνες ή ιδιαίτερα τοξικές για τον άνθρωπο [23, 25].
- **Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - PAHs):** Παράγονται κυρίως από την ατελή καύση άνθρακα, πετρελαίου, βιομάζας και άλλων οργανικών καυσίμων. Οι PAHs αποτελούν ιδιαίτερα επικίνδυνους ρύπους, καθώς διαθέτουν καρκινογόνες και μεταλλαξιογόνες ιδιότητες, ενώ μπορούν να συσσωρευτούν στο περιβάλλον και στον ανθρώπινο οργανισμό με μακροχρόνιες επιπτώσεις [23-25].
- **Διοξίνες:** Παράγονται κυρίως από βιομηχανικές καύσεις, αποτεφρώσεις απορριμμάτων, καθώς και από φυσικές διεργασίες όπως οι δασικές πυρκαγιές. Οι διοξίνες είναι εξαιρετικά τοξικές ουσίες που προκαλούν δυσλειτουργίες στο ανοσοποιητικό, το ενδοκρινικό και το αναπαραγωγικό σύστημα, ενώ έχουν συνδεθεί με αυξημένο κίνδυνο καρκίνου ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις [23, 25].
- **Βιοαερολύματα (bioaerosols):** Περιλαμβάνουν μικροοργανισμούς όπως βακτήρια, μύκητες, ιούς, γύρη και άλλες αλλεργιογόνες ουσίες. Αν και έχουν φυσική προέλευση, σε υψηλές συγκεντρώσεις επιβαρύνουν σημαντικά τη δημόσια υγεία, επιδεινώνοντας αλλεργικές αντιδράσεις και κρίσεις άσθματος, ενώ παράλληλα μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς παθογόνων μικροοργανισμών [24, 25, 28]. Επιπλέον, τα αερολύματα που προέρχονται από αστικές περιοχές δεν επηρεάζουν μόνο την υγεία, αλλά και το κλίμα, καθώς συμμετέχουν άμεσα στη μεταφορά και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και έμμεσα στη διαμόρφωση των νεφών, τροποποιώντας τη διάρκεια ζωής τους, την αποδοτικότητα της βροχόπτωσης και τη χημεία της ατμόσφαιρας. Με αυτόν τον τρόπο υποβαθμίζουν την ποιότητα του αέρα σε τοπικό, περιφερειακό και παγκόσμιο επίπεδο και επηρεάζουν τον ενεργειακό προϋπολογισμό της Γης [17].

2.3 Κατηγοριοποίηση Ρύπων σε Εσωτερική και Εξωτερική Ρύπανση

Η ποικιλία των ατμοσφαιρικών ρύπων και των πηγών τους καθιστά σαφές ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν αποτελεί ένα ομοιογενές φαινόμενο αλλά ένα σύνθετο μίγμα χημικών και βιολογικών ουσιών, με διαφορετικές προελεύσεις και επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο γίνεται σαφής διάκριση ανάμεσα σε δύο βασικές μορφές: την εξωτερική (outdoor) και την εσωτερική (indoor) ρύπανση, οι οποίες, αν και συνδέονται στενά μεταξύ τους, παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, πηγές και συνέπειες [23].

- Η **εσωτερική ρύπανση** χαρακτηρίζεται από ρύπους που συσσωρεύονται σε κλειστούς χώρους λόγω περιορισμένου αερισμού και εκπομπών από καύσεις, υλικά και δραστηριότητες. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν κυρίως οι VOCs και το CO, που αποτελούν τους βασικότερους δείκτες της συγκεκριμένης κατηγορίας [23, 29, 30].
- Αντίθετα, η **εξωτερική ρύπανση** οφείλεται σε ρύπους που εκπέμπονται σε μεγάλες κλίμακες από βιομηχανικές διεργασίες, καύσεις και φυσικά φαινόμενα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα PM, το O_3, τα SO_2, SO_3, τα NOx, τα βαριά μέταλλα, οι PAHs, οι διοξίνες και τα βιοαερολύματα [23-25, 30].
    - ✓ Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένοι ρύποι εντοπίζονται και στις δύο κατηγορίες ρύπανσης. Ενδεικτικά, το CO, οι VOCs, οι διοξίνες και τα βιοαερολύματα μπορούν να βρεθούν τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Ωστόσο, η κυριαρχία τους διαφοροποιείται: το CO και οι VOCs σχετίζονται κυρίως με την εσωτερική ρύπανση λόγω των πηγών καύσης και της χρήσης οικιακών προϊόντων, ενώ οι διοξίνες και τα βιοαερολύματα απαντώνται περισσότερο στην εξωτερική ρύπανση, αν και σε ειδικές συνθήκες μπορούν να συσσωρευτούν και σε κλειστούς χώρους [30].

Στην εσωτερική ρύπανση, **οι πτητικές οργανικές ενώσεις** κατέχουν κεντρική θέση. Προέρχονται από οικοδομικά υλικά, έπιπλα, προϊόντα καθαρισμού και διεργασίες καύσης, ενώ οι συγκεντρώσεις τους είναι συνήθως πολλαπλάσιες από αυτές του εξωτερικού περιβάλλοντος, ιδίως σε χώρους με ανεπαρκή αερισμό [50]. Η έκθεση σε υψηλά επίπεδα έχει συνδεθεί με ερεθισμούς στα μάτια και το αναπνευστικό σύστημα, πονοκεφάλους, ναυτία, βλάβες στο ήπαρ και το νευρικό σύστημα, καθώς και με επιδείνωση αλλεργικών και αναπνευστικών νοσημάτων [50, 52]. Για τον λόγο αυτό, οι πτητικές οργανικές ενώσεις θεωρούνται ο πλέον αξιόπιστος δείκτης της εσωτερικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους για την υγεία σε κλειστούς χώρους.

Αντίστοιχα, στην εξωτερική ρύπανση, τα **αιωρούμενα σωματίδια** αναγνωρίζονται διεθνώς ως ο πιο κρίσιμος και επιβλαβής ρύπος [28, 31, 32]. Η ιδιότητα τους να διεισδύουν βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα, φτάνοντας μέχρι τις κυψελίδες και τελικά στην κυκλοφορία του αίματος [23, 24], τα καθιστά υπεύθυνα για ένα ευρύ φάσμα βλαβών: πρόωρη θνησιμότητα [16, 31, 33], ανοσολογικές και συστηματικές αντιδράσεις [16, 34], αναπνευστικές παθήσεις [16, 23], αλλά και χρόνιες επιπτώσεις όπως καρδιαγγειακά νοσήματα [16, 34, 35] αυξημένος κίνδυνος θρομβώσεων [34], δυσλειτουργίες του κεντρικού νευρικού συστήματος κ.α. [23]. Εξαιτίας αυτών των ιδιοτήτων, τα PM θεωρούνται ο πλέον αξιόπιστος δείκτης της εξωτερικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η σοβαρότερη απειλή για την υγεία του πληθυσμού.

Με βάση τα παραπάνω, στην ανάλυση που ακολουθεί θα εξεταστούν δύο κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζονται έμμεσα από την ταχεία αστικοποίηση και οι οποίοι επιδρούν άμεσα στην ανθρώπινη υγεία και ποιότητα ζωής:

1. **Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM)**, τα οποία αποτελούν τον σημαντικότερο και πιο επικίνδυνο παράγοντα εξωτερικής ρύπανσης.
2. **Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)**, που κυριαρχούν στην εσωτερική ρύπανση και σχετίζονται στενά με την ποιότητα ζωής σε κλειστούς χώρους.

Μέσα από αυτήν τη συνολική προσέγγιση, επιδιώκεται να αναδειχθεί το πώς οι διαφορετικές μορφές ρύπανσης -εσωτερική και εξωτερική- συνδέονται μεταξύ τους και συνθέτουν ένα ενιαίο, πολυπαραγοντικό περιβαλλοντικό φαινόμενο που επηρεάζει ποικιλότροπα την ανθρώπινη υγεία και την ποιότητα ζωής.

Αφού παρουσιαστούν αυτοί οι παράγοντες, η ανάλυση θα στραφεί στην εξέταση της ηχορύπανσης, ως μορφής περιβαλλοντικού θορύβου με σοβαρές σωματικές και ψυχολογικές επιπτώσεις, καθώς και στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας.

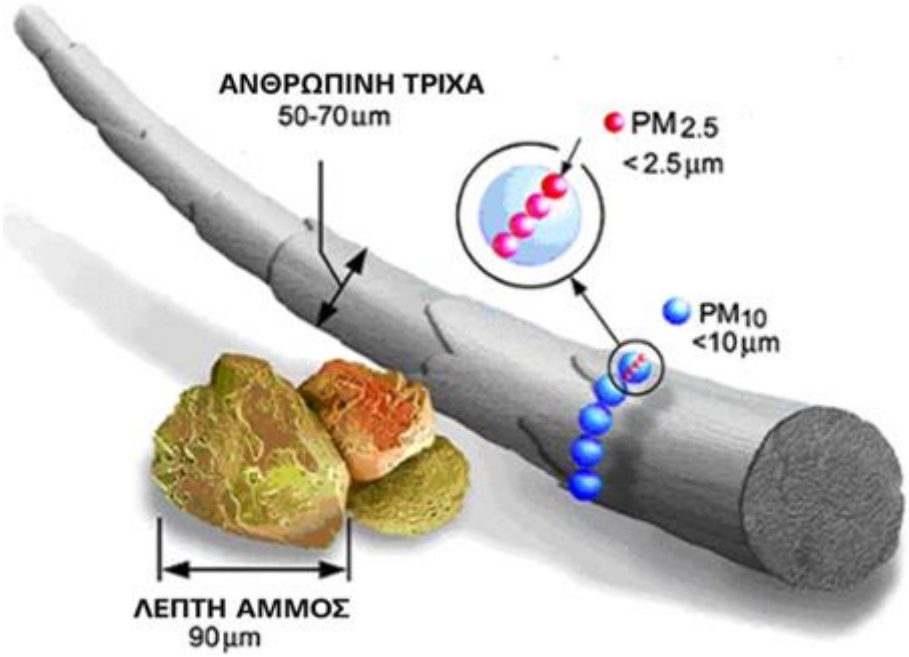
3. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

3.1 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά των Αιωρούμενων Σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter - PM) αποτελούν ένα ετερογενές μείγμα στερεών και υγρών σωματιδίων που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Η χημική τους σύσταση περιλαμβάνει ανόργανα ιόντα (θειικά, νιτρικά, αμμώνιο, χλωριούχα), οργανικό και στοιχειακό άνθρακα, μέταλλα (π.χ. χαλκό, νικέλιο, βανάδιο, ψευδάργυρο) καθώς και βιολογικά συστατικά όπως γύρη και βακτήρια [33].

Η βασική ταξινόμηση των PM γίνεται με βάση την αεροδυναμική τους διάμετρο:

- **PM10 (Coarse Particles):** Σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο έως 10 μm.
- **PM2.5 (Fine Particles):** Σωματίδια με διάμετρο ≤2.5 μm.
- **PM0.1 (Ultrafine Particles - UFP):** σωματίδια με διάμετρο ≤0.1 μm.



Σχήμα 3: *Σύγκριση μεγέθους των PM2.5 και PM10 σε σχέση με τη μέση διάμετρο μιας ανθρώπινης τρίχας (~70 μm) και κόκκων λεπτής άμμου (~90 μm) [33]*

Η συγκέντρωση των PM στην ατμόσφαιρα μετράτε συνήθως σε **μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο αέρα (μg/m^3)**. Η μονάδα αυτή δείχνει πόση μάζα σωματιδίων υπάρχει σε έναν συγκεκριμένο όγκο αέρα. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή, τόσο πιο επιβαρυμένος είναι ο αέρας και τόσο μεγαλύτερος ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία.

Ο δείκτης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5 (μg/m^3) χωρίζεται σε έξι βασικά επίπεδα ποιότητας αέρα, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του Air Quality Index (AQI):

- **Good (0-12 μg/m^3):** Αντιστοιχεί σε καθαρή ατμόσφαιρα με ελάχιστες συγκεντρώσεις σωματιδίων. Ο αέρας θεωρείται ασφαλής για το σύνολο του πληθυσμού, χωρίς αναμενόμενες επιπτώσεις στην υγεία.

- **Moderate (12-35 μg/m^3):** Υποδηλώνει μέτρια επιβάρυνση του αέρα. Δεν αναμένονται σημαντικά προβλήματα για τους περισσότερους, ωστόσο άτομα με ευαισθησία ενδέχεται να εμφανίσουν ήπια ενοχλήματα σε περίπτωση παρατεταμένης έκθεσης.
- **Unhealthy for Sensitive Individuals (35-55 μg/m^3):** Τα επίπεδα σωματιδίων θεωρούνται ανθυγιεινά για ευπαθείς ομάδες (παιδιά, ηλικιωμένους, ασθματικούς ή καρδιοπαθείς). Μπορεί να παρουσιαστούν ερεθισμοί και δυσφορία στο αναπνευστικό σύστημα.
- **Unhealthy (55-150 μg/m^3):** Η ποιότητα του αέρα είναι χαμηλή και ενδέχεται να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία ακόμη και σε υγιή άτομα, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια έντονης ή μακροχρόνιας έκθεσης.
- **Very Unhealthy (150-250 μg/m^3):** Οι συγκεντρώσεις σωματιδίων είναι πολύ υψηλές, με σοβαρούς κινδύνους για την υγεία του πληθυσμού και ανάγκη αποφυγής εξωτερικών δραστηριοτήτων.
- **Hazardous (>250 μg/m^3):** Εξαιρετικά επικίνδυνα επίπεδα PM2.5, που συνδέονται με άμεσες και σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία. Ο αέρας χαρακτηρίζεται τοξικός και απαιτούνται επείγοντα μέτρα προστασίας.

Συνολικά, η κλίμακα αυτή επιτρέπει την ποιοτική αξιολόγηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συνδέοντας τις τιμές συγκέντρωσης PM2.5 με σαφείς ενδείξεις για την επίδρασή τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

PM2.5 (μg/m3)	Remark
0-12	Good
12-35	Moderate
35-55	Unhealthy for Sensitive Individuals
55-150	Unhealthy
150-250	Very Unhealthy
>250	Hazardous

***Σχήμα 4**: Κατηγορίες ποιότητας αέρα βάσει συγκέντρωσης PM2.5 (μg/m^3) [236]*

3.2 Πηγές PM

Η προέλευση των PM είναι σύνθετη και πολυπαραγοντική, καθώς περιλαμβάνει τόσο ανθρωπογενείς όσο και φυσικές πηγές. Η κατανόηση των πηγών αυτών είναι καθοριστική, διότι επηρεάζουν άμεσα τη χημική σύσταση, το μέγεθος και συνεπώς τις τοξικολογικές ιδιότητες των PM.

- **Ανθρωπογενείς πηγές:** Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες αποτελούν τον κύριο παράγοντα εκπομπής PM, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Μεταξύ αυτών, η χρήση ορυκτών καυσίμων σε οχήματα, βιομηχανία, μονάδες παραγωγής ενέργειας και οικιακά συστήματα θέρμανσης συμβάλλει καθοριστικά στην απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων λεπτών και υπερλεπτών σωματιδίων [17, 25, 27, 34]. Σημαντική συνεισφορά έχει επίσης η σκόνη από

δρόμους, τα εργοτάξια, καθώς και οι εξορυκτικές, οι κατασκευαστικές και οι γεωργικές δραστηριότητες, οι οποίες απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες σκόνης, επιβαρύνοντας το τοπικό μικροκλίμα και την ποιότητα του αέρα [33]. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές χαρακτηρίζονται από αυξημένη τοξικότητα λόγω της χημικής τους σύστασης, που περιλαμβάνει βαρέα μέταλλα, πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, καθώς και οργανικό άνθρακα, ενώ η συνεχής παρουσία τους σε περιοχές υψηλής πυκνότητας πληθυσμού τις καθιστά κυρίαρχο παράγοντα κινδύνου για τη δημόσια υγεία [23, 25].

- **Φυσικές πηγές:** Παράλληλα, τα PM προέρχονται και από φυσικές διεργασίες, οι οποίες συχνά επηρεάζουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Η αιολική μεταφορά σκόνης, οι ηφαιστειακές εκρήξεις που απελευθερώνουν τέφρα και αέρια, καθώς και οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν κύριες φυσικές πηγές [25, 27, 34]. Επιπλέον, τα βιοαερολύματα, όπως γύρη, βακτήρια και μύκητες, μπορούν να συμβάλλουν στη συγκέντρωση PM, ιδίως σε εποχικές περιόδους ανθοφορίας ή αυξημένης βιολογικής δραστηριότητας [25].

3.3 Επιπτώσεις στην Ανθρώπινη Υγεία

Αυτό που καθιστά ιδιαίτερη την επικινδυνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων και τα επιτρέπει να διεισδύουν βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα, έγκειται πρωτίστως στο μικρό τους μέγεθος. Τα μεγαλύτερα σωματίδια συγκρατούνται σε μεγάλο βαθμό στο ανώτερο αναπνευστικό, ωστόσο τα λεπτότερα καταφέρνουν να φτάσουν μέχρι τις κυψελίδες των πνευμόνων, ενώ τα υπερλεπτά έχουν την ικανότητα να διαπερνούν το κυψελιδικό φραγμό και να εισέρχονται στην κυκλοφορία του αίματος [27, 33]. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, τα PM δεν περιορίζονται σε τοπικές βλάβες του αναπνευστικού συστήματος, αλλά μπορούν να προκαλέσουν επιδράσεις σε ολόκληρο τον οργανισμό. Οι μηχανισμοί αυτοί αποτελούν τη βάση για την εκδήλωση τόσο οξέων όσο και χρόνιων επιπτώσεων.

Πίνακας 1: *Διεισδυτικότητα ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων*

Μέγεθος σωματιδίου	**Βαθμός διείσδυσης στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα**
>11 μm	Διείσδυση στα ρουθούνια και στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα
7-11 μm	Διείσδυση στη ρινική κοιλότητα
4.7-7 μm	Διείσδυση στον λάρυγγα
3.3-4.7 μm	Διείσδυση στην τραχειοβρογχική περιοχή
2.1-3.3 μm	Διείσδυση στη δευτερογενή βρογχική περιοχή
1.1-2.1 μm	Διείσδυση στην τερματική βρογχική περιοχή
0.65-1.1 μm	Διείσδυση στα βρογχιόλια
0.43-0.65 μm	Διείσδυση στις κυψελίδες

3.3.1 Οξείες επιδράσεις

3.3.1.1 Αναπνευστικό Σύστημα

Η επαφή με αιωρούμενα σωματίδια έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί άμεσες επιδράσεις στο αναπνευστικό σύστημα, οι οποίες εκδηλώνονται με φλεγμονώδεις αντιδράσεις, επιδείνωση προϋφιστάμενων παθήσεων και αύξηση της ευαισθησίας σε λοιμώξεις. Οι οξείες αυτές επιδράσεις έχουν καταγραφεί τόσο σε παιδιά όσο και σε ενήλικες, με ιδιαίτερη βαρύτητα στις ευάλωτες ομάδες του πληθυσμού.

Ερεθισμός και φλεγμονή αναπνευστικών οδών: Τα PM που εισχωρούν βαθιά στους πνεύμονες προκαλούν ερεθισμό και φλεγμονώδη αντίδραση στο βρογχικό επιθήλιο. Η φλεγμονή αυτή επιδεινώνει τις προϋπάρχουσες πνευμονικές βλάβες και οδηγεί σε κλινικά σημαντική επιβάρυνση της αναπνευστικής λειτουργίας [16, 27, 33].

Κρίσεις άσθματος: Μελέτες δείχνουν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ βραχυχρόνιας αύξησης της συγκέντρωσης PM και αύξησης των επισκέψεων στα επείγοντα λόγω κρίσεων άσθματος, ιδιαίτερα σε παιδιά και ασθματικούς ενήλικες [16, 25].

Παροξύνσεις βρογχίτιδας και Χρόνια Αποφρακτική Πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ): Η έκθεση σε αυξημένα επίπεδα έχει συσχετιστεί με την επιβάρυνση χρόνιων αναπνευστικών παθήσεων, όπως η χρόνια βρογχίτιδα και η ΧΑΠ, καθώς μελέτες δείχνουν ότι σε περιόδους αυξημένης ρύπανσης καταγράφονται περισσότερες παροξύνσεις και νοσηλείες. [16, 23, 25].

Μειώσεις πνευμονικής λειτουργίας (FEV1, PEFR): Κλινικές μετρήσεις έχουν δείξει μείωση βασικών δεικτών πνευμονικής λειτουργίας, όπως ο FEV1 (Forced Expiratory Volume in 1 second) και η μέγιστη εκπνευστική ροή (PEFR), ύστερα από βραχυχρόνια υποβολή σε PM [16].

3.3.1.2 Καρδιαγγειακό Σύστημα

Η βραχυχρόνια έκθεση σε PM δεν επηρεάζει μόνο το αναπνευστικό αλλά και το καρδιαγγειακό σύστημα. Έχει συσχετιστεί με άμεσες δυσλειτουργίες, όπως αυξήσεις στην αρτηριακή πίεση, μεταβολές στον καρδιακό ρυθμό και μεγαλύτερο κίνδυνο εμφάνισης οξέων καρδιακών επεισοδίων και καρδιακής ανεπάρκειας, ιδιαίτερα σε άτομα που ήδη πάσχουν από καρδιοπάθειες.

Αύξηση καρδιαγγειακών επεισοδίων: Η υποβολή σε αυξημένες συγκεντρώσεις έχει συσχετιστεί με σημαντική αύξηση της συχνότητας καρδιαγγειακών επεισοδίων. Μελέτες σε διάφορες πόλεις έχουν δείξει ότι η αύξηση των επιπέδων PM10 και PM2.5 οδηγεί σε περισσότερες εισαγωγές σε νοσοκομεία για οξέα καρδιακά συμβάντα και καρδιακή ανεπάρκεια. Παράλληλα, η βραχυχρόνια παρουσία σε περιβάλλον με PM έχει συνδεθεί με αύξηση της καρδιοπνευμονικής θνησιμότητας, αναδεικνύοντας τον άμεσο κίνδυνο για την υγεία του πληθυσμού. Επιπλέον, αναλύσεις έχουν επιβεβαιώσει ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια αποτελεί κύριο παράγοντα για την εμφάνιση οξέων καρδιαγγειακών επεισοδίων, με τα λεπτότερα σωματίδια (PM2.5) να θεωρούνται τα πιο επιβαρυντικά [16, 25, 34, 35].

Μεταβολές καρδιακού ρυθμού: Η σύντομη εισπνοή PM έχει συσχετιστεί με μεταβολές στη μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού και εμφάνιση αρρυθμιών. Η διαταραχή αυτή αντανακλά τη δυσλειτουργία του αυτόνομου νευρικού συστήματος, που αποτελεί έναν από τους κύριους μηχανισμούς με τους οποίους τα PM επηρεάζουν οξέως το καρδιαγγειακό [34-36].

Αυξήσεις αρτηριακής πίεσης: Έρευνες δείχνουν ότι η βραχυχρόνια επιβάρυνση με υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να οδηγήσει σε αυξήσεις της αρτηριακής πίεσης. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με την ενεργοποίηση φλεγμονωδών και οξειδωτικών μηχανισμών [16, 34, 37].

Προκλήσεις ισχαιμικών επεισοδίων: Ακόμα, συχνό φαινόμενο είναι η πρόκληση οξέων ισχαιμικών επεισοδίων. Μελέτες δείχνουν ότι τα PM μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτρική αστάθεια στο μυοκάρδιο και να αυξήσουν τον κίνδυνο απορρύθμισης της καρδιακής λειτουργίας. Παράλληλα, έχει καταγραφεί συσχέτιση με περισσότερες νοσηλείες λόγω ισχαιμικής καρδιοπάθειας, αρρυθμιών και καρδιακής ανεπάρκειας, με τα αποτελέσματα να εκδηλώνονται άμεσα μετά την αλληλεπίδραση. Επιπλέον, έχει τεκμηριωθεί ότι η ρύπανση συνδέεται με αυξημένο κίνδυνο θανατηφόρων και μη θανατηφόρων ισχαιμικών επεισοδίων, περιλαμβανομένων εγκεφαλικών. Συνολικά, τα PM δρουν ως παράγοντας αποσταθεροποίησης του καρδιαγγειακού συστήματος σε ευάλωτους πληθυσμούς [16, 25, 34, 36].

Καρδιακή ανεπάρκεια Ακόμα, η βραχυχρόνια έκθεση σε αυξημένα επίπεδα, ιδιαίτερα σε λεπτότερων PM, έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο παροξύνσεων και νοσηλειών για καρδιακή ανεπάρκεια [34].

3.3.1.3 Νευρικό Σύστημα

Η βραχυχρόνια υποβολή σε αιωρούμενα σωματίδια, ιδιαίτερα στα UFPs, έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί άμεσες επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα UFPs μπορούν να διεισδύσουν στον εγκέφαλο μέσω της ρινικής οδού και του οσφρητικού βολβού, παρακάμπτοντας τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό, ή μέσω της συστηματικής κυκλοφορίας. Τα σωματίδια αυτά ανευρίσκονται στον εγκέφαλο λίγες ώρες μετά την εισπνοή, δημιουργώντας οξείες παθήσεις [35, 38].

Διαταραχές αυτόνομου νευρικού συστήματος (ANS): Η έκθεση σε PM έχει συσχετιστεί με μεταβολές στη λειτουργία του αυτόνομου νευρικού συστήματος, οι οποίες αντικατοπτρίζονται σε μειώσεις της μεταβλητότητας καρδιακού ρυθμού. Αναλύσεις και επιδημιολογικές μελέτες δείχνουν ότι ακόμη και μικρές βραχυχρόνιες αυξήσεις PM2.5 οδηγούν σε μείωση παραμέτρων HRV, γεγονός που αντανακλά δυσλειτουργία στη ρύθμιση της καρδιακής λειτουργίας, αυξημένο κίνδυνο αρρυθμιών και αιφνίδιου καρδιακού θανάτου. Η οξεία αυτή διαταραχή του αυτόνομου ΝΣ θεωρείται βασικός μηχανισμός μέσω του οποίου τα PM επηρεάζουν ταυτόχρονα την καρδιαγγειακή και τη νευρική λειτουργία [35, 36, 38].

3.3.1.4 Ευάλωτες Ομάδες

Οι οξείες τους επιδράσεις δεν κατανέμονται ισομερώς στον πληθυσμό, αλλά πλήττουν ιδιαίτερα συγκεκριμένες ευάλωτες ομάδες, όπως τα παιδιά, τους ηλικιωμένους και τα άτομα με προϋπάρχουσες παθήσεις του αναπνευστικού ή του καρδιαγγειακού συστήματος.

Παιδιά: Η ανωριμότητα του αναπνευστικού συστήματος, ο ταχύτερος ρυθμός αναπνοών και η συχνότερη παραμονή σε εξωτερικούς χώρους καθιστούν τα παιδιά ιδιαίτερα εκτεθειμένα. Μελέτες έχουν δείξει αύξηση κρίσεων άσθματος και μείωση παραμέτρων πνευμονικής λειτουργίας σε συνθήκες αυξημένων συγκεντρώσεων [33].

Ηλικιωμένοι: Τα άτομα μεγαλύτερης ηλικίας εμφανίζουν αυξημένη ευπάθεια στις οξείες επιδράσεις λόγω της μειωμένης αντοχής των συστημάτων του οργανισμού και της συχνής παρουσίας χρόνιων νοσημάτων. Έχει καταγραφεί σημαντική αύξηση νοσηλειών σε ηλικιωμένους κατά τη διάρκεια υψηλών επεισοδίων, κυρίως λόγω επιδείνωσης καρδιαγγειακών και αναπνευστικών παθήσεων [23, 25, 33, 35].

Ασθενείς με χρόνια νοσήματα: Οι ασθενείς με ήδη υπάρχουσες παθήσεις, όπως καρδιοαγγειακά νοσήματα, άσθμα, διαβήτη κ.α., θεωρούνται πιο ευάλωτοι στις οξείες επιδράσεις των PM, επειδή το αναπνευστικό και το καρδιαγγειακό τους σύστημα είναι ήδη επιβαρυμένα και λιγότερο ικανά να ανταποκριθούν σε νέες περιβαλλοντικές προκλήσεις. Έρευνες έχουν δείξει ότι άτομα με ιστορικό εμφράγματος παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο θρομβώσεων έπειτα από βραχεία έκθεση σε ρύπανση οχημάτων [23, 35]. Παράλληλα, άτομα με άσθμα παρουσιάζουν αυξημένα επεισόδια κρίσεων και εισαγωγές σε νοσοκομεία μετά από επαφή με PM10 και PM2.5 [33]. Οι επιδράσεις αυτές καθιστούν τα PM ιδιαίτερα επικίνδυνα για ευπαθείς ομάδες, στις οποίες οι συνέπειες της ρύπανσης εκδηλώνονται ταχύτερα και με μεγαλύτερη ένταση.

3.3.2 Χρόνιες Επιδράσεις

3.3.2.1 Αναπνευστικό Σύστημα

Η παρατεταμένη εισπνοή PM έχει σημαντικές και μακροχρόνιες συνέπειες για το αναπνευστικό σύστημα. Οι χρόνιες αυτές επιδράσεις προκύπτουν από τη συνεχή φλεγμονώδη επιβάρυνση, την εναπόθεση τοξικών συστατικών των σωματιδίων στους πνεύμονες και την αλληλεπίδραση με προϋπάρχουσες παθήσεις, οδηγώντας σε μόνιμες βλάβες και αυξημένη νοσηρότητα.

Χρόνια βρογχίτιδα και ΧΑΠ: Η συνεχής έκθεση αποτελεί σημαντικό παράγοντα κινδύνου για την ανάπτυξη και επιδείνωση της χρόνιας βρογχίτιδας και της ΧΑΠ. [23, 35].

Μακροχρόνια επιδείνωση άσθματος: Σε άτομα με άσθμα, η διαρκής επιβάρυνση συνδέεται με επιμονή και επιδείνωση των συμπτωμάτων. Ασθενείς με άσθμα εμφανίζονται πιο ευάλωτοι στις επιδράσεις της ρύπανσης, καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια επιδεινώνουν σημαντικά την κλινική εικόνα, οδηγώντας σε μειωμένες τιμές μέγιστης εκπνευστικής ροής, αυξημένη χρήση ανακουφιστικών φαρμάκων και περισσότερες επισκέψεις σε τμήματα επειγόντων περιστατικών. Επιπλέον, η αναπνοή μέσω του στόματος -συχνή σε ασθενείς με άσθμα λόγω ταυτόχρονης ρινίτιδας- διευκολύνει τη

διείσδυση των σωματιδίων στους κατώτερους αεραγωγούς, ενισχύοντας την επιβλαβή δράση τους. Σε παιδιά, η έκθεση αυτή συνδέεται με αυξημένα περιστατικά βρογχίτιδας, σοβαρότερα επεισόδια άσθματος και περισσότερες ιατρικές επισκέψεις, με ενδείξεις ότι οι περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις PM συσχετίζονται άμεσα με την ανάγκη για νοσηλεία [16, 20, 25, 28, 33, 35].

Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου του πνεύμονα: Η επίμονη επαφή με PM, και ειδικότερα των λεπτών σωματιδίων, τα οποία περιέχουν καρκινογόνες ουσίες όπως πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες και βαρέα μέταλλα [23, 25], έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα. Επιπρόσθετα, οι μεγάλες επιδημιολογικές μελέτες επιβεβαιώνουν ότι η χρόνια έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις οδηγεί σε σημαντική αύξηση των περιστάσεων νοσηλείας για καρκίνο του πνεύμονα, καθώς και αυξημένης θνησιμότητας από αυτόν [15, 16, 33, 36].

3.3.2.2 Καρδιαγγειακό Σύστημα

Η μακροπρόθεσμη παρουσία σε αιωρούμενα σωματίδια έχει συσχετιστεί με σοβαρές χρόνιες βλάβες στο καρδιαγγειακό σύστημα. Η συνεχής επιβάρυνση οδηγεί με τον χρόνο σε μόνιμες αλλοιώσεις της καρδιάς και των αγγείων, αυξάνοντας τον κίνδυνο καρδιακών και αγγειακών νοσημάτων.

Υπέρταση: Επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι η συνεχής έκθεση σε PM συνδέεται με αυξημένη επίπτωση αρτηριακής υπέρτασης. Η υπέρταση που προκαλείται από την ατμοσφαιρική ρύπανση ενισχύει τον κίνδυνο εμφάνισης άλλων καρδιαγγειακών νοσημάτων όπως η αθηροσκλήρωση [34, 36, 37].

Αυξημένος κίνδυνος ισχαιμικής καρδιοπάθειας και στεφανιαίας νόσου: Η συστηματική εισπνοή σωματιδίων έχει συσχετιστεί με αυξημένη επίπτωση στεφανιαίας νόσου και ισχαιμικής καρδιοπάθειας και και καρδιαγγειακής θνησιμότητας. Μελέτες, έδειξαν ότι η αύξηση της συγκέντρωσης σχετίζεται με σημαντική αύξηση της γενικής και καρδιαγγειακής θνησιμότητας, με πιο έντονα αποτελέσματα στις παχύσαρκες γυναίκες, όπου ο κίνδυνος για θανατηφόρα επεισόδια ήταν μεγαλύτερος σε σχέση με τα μη θανατηφόρα. Επιπλέον, δεδομένα παρουσίασαν αυξημένο κίνδυνο θανάτου από στεφανιαία νόσο στις γυναίκες, αλλά όχι στους άνδρες, υποδεικνύοντας πιθανή ιδιαίτερη ευαλωτότητα του γυναικείου πληθυσμού [16, 33-36].

Εγκεφαλικά επεισόδια: Επιπλέον, η παρατεταμένη έκθεση έχει συνδεθεί με αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης αγγειακών εγκεφαλικών επεισοδίων. Αναλύσεις δείχνουν ότι η παρατεταμένη εισπνοή PM2.5 σχετίζεται τόσο με μη θανατηφόρα όσο και με θανατηφόρα εγκεφαλικά, ενώ παράγοντες όπως η εγγύτητα σε δρόμους με έντονη κυκλοφορία φαίνεται να επιβαρύνουν περαιτέρω τον κίνδυνο. Παράλληλα, έχει διαπιστωθεί ότι η συνεχής υποβολή σε αυξημένα επίπεδα σωματιδίων συνδέεται με υψηλότερα ποσοστά νοσηρότητας και θνησιμότητας από αγγειακά εγκεφαλικά, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ως παράγοντα κινδύνου για το καρδιαγγειακό σύστημα [25, 34, 37, 38].

Αυξημένη καρδιαγγειακή θνησιμότητα: Η συνεχής παραμονή σε περιβάλλον με υψηλές συγκεντρώσεις PM έχει καταγραφεί ότι αυξάνει σημαντικά τη θνησιμότητα από καρδιαγγειακές αιτίες.

Οι επιπτώσεις αυτές είναι σωρευτικές και συνδέονται με τη διαχρονική δράση των σωματιδίων στη λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος [39].

3.3.2.3 Νευρικό Σύστημα

Η εκτενής διαβίωση σε συνθήκες με υψηλά επίπεδα PM2.5 και UFPs έχει συνδεθεί με σοβαρές και εμμένουσες επιπτώσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα. Τα σωματίδια αυτά όχι μόνο διεισδύουν μέσω του οσφρητικού βολβού ή της κυκλοφορίας, αλλά παραμένουν και συσσωρεύονται στον εγκέφαλο, ενεργοποιώντας πολλαπλά νευρολογικά νοσήματα [38].

Μακροχρόνιες γνωστικές δυσλειτουργίες / νευροεκφυλιστικές επιπτώσεις: Μελέτες σε ζώα και ανθρώπους έχουν δείξει ότι η διαρκής έκθεση σχετίζεται με αρνητικές εγκεφαλικές δυσλειτουργίες όπως μειωμένη μνήμη, μαθησιακές ικανότητες και γνωστική απόδοση, καθώς και με δομικές αλλοιώσεις στον ιππόκαμπο και τον φλοιό [23, 38].

Συσχέτιση με άνοια ή άλλα νευρολογικά νοσήματα: Η χρόνια εισπνοή PM έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο άνοιας και νευροεκφυλιστικών νοσημάτων, συμπεριλαμβανομένης της νόσου Alzheimer, της άνοιας, της κατάθλιψης, της νόσου Parkinson κ.α.. Επιδημιολογικές μελέτες δείχνουν ότι η μακροχρόνια επαφή σε ατμοσφαιρική ρύπανση, ιδίως σε περιοχές με υψηλή κυκλοφοριακή ρύπανση, αυξάνει τη συχνότητα σχιζοφρένειας σε παιδιά [25, 37].

3.3.2.4 Ευάλωτες Ομάδες

Όπως και στις οξείες επιδράσεις, έτσι και οι χρόνιες επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι εντονότερες σε συγκεκριμένες ευάλωτες ομάδες του πληθυσμού, οι οποίες λόγω βιολογικών, ηλικιακών ή παθολογικών παραγόντων εμφανίζουν αυξημένη ευπάθεια στις μακροχρόνιες συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Παιδιά: Η παρατεταμένη έκθεση σε αυξημένα επίπεδα κατά την παιδική ηλικία έχει συσχετιστεί με μειωμένη ανάπτυξη της πνευμονικής λειτουργίας και μόνιμα αναπνευστικά προβλήματα. Μελέτες δείχνουν ότι παιδιά που ζουν σε περιοχές με υψηλή ατμοσφαιρική ρύπανση παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές ζωτικών παραμέτρων της αναπνευστικής ικανότητας σε σύγκριση με συνομηλίκους που ζουν σε καθαρότερο περιβάλλον. Η παρατεταμένη φλεγμονώδης αντίδραση και η επιβράδυνση της φυσιολογικής ωρίμανσης των πνευμόνων οδηγούν σε αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης νέων αναπνευστικών νοσημάτων, όπως άσθμα και βρογχίτιδα, ήδη από τη νεαρή ηλικία. Η μειωμένη αυτή ανάπτυξη κατά τα πρώτα χρόνια της ζωής ενδέχεται να συνοδεύει το άτομο και στην ενήλικη ζωή, αυξάνοντας την ευπάθεια σε χρόνια αναπνευστικά νοσήματα, όπως η ΧΑΠ. Επιπλέον, σε περιοχές όπου η καύση βιομάζας σε εσωτερικούς χώρους είναι εκτεταμένη, έχει αποδειχθεί ότι η χρόνια έκθεση σε σωματίδια κατά την παιδική ηλικία συνδέεται με αυξημένα περιστατικά λοιμώξεων του αναπνευστικού και με μόνιμη μείωση της πνευμονικής λειτουργίας [16, 33, 35, 40].

Ηλικιωμένοι: Τα άτομα μεγαλύτερης ηλικίας εμφανίζουν σημαντική επιβάρυνση από τη επίμονη επαφή, κυρίως λόγω της παρουσίας προϋπαρχόντων καρδιοαναπνευστικών νοσημάτων. Οι χρόνιες

επιδράσεις περιλαμβάνουν επιδείνωση των υπαρχουσών παθήσεων, αυξημένο κίνδυνο παροξύνσεων και συνολικά αυξημένη πιθανότητα πρόωρης θνησιμότητας [25, 35, 41].

Ευπαθείς ομάδες (καρδιοπαθείς, αναπνευστικά ασθενείς): Άτομα με ήδη διαγνωσμένες παθήσεις, όπως στεφανιαία νόσος, καρδιακή ανεπάρκεια, άσθμα ή ΧΑΠ, αποτελούν την πιο ευάλωτη κατηγορία. Η έκθεση σε αυξημένα επίπεδα PM για μεγάλα χρονικά διαστήματα οδηγεί σε συχνότερες παροξύνσεις, ταχύτερη εξέλιξη της νόσου και αυξημένο κίνδυνο θανάτου. Οι επιπτώσεις αυτές αναδεικνύουν την ανάγκη για ενισχυμένα μέτρα προστασίας των συγκεκριμένων πληθυσμιακών ομάδων [25, 28, 34, 35, 42].

3.3.2.5 Μεταβολικές και Συστηματικές Επιπτώσεις

Η παραμένουσα παρουσία PM στον αέρα δεν περιορίζεται στις βλάβες του αναπνευστικού και του καρδιαγγειακού συστήματος, αλλά συνδέεται και με σημαντικές μεταβολικές και συστηματικές επιδράσεις. Οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν την επίμονη ενεργοποίηση της συστηματικής φλεγμονής, το οξειδωτικό στρες και την ενδοθηλιακή δυσλειτουργία, που επηρεάζουν την ομοιόσταση σε ολόκληρο τον οργανισμό.

Συσχέτιση με διαβήτη: Πλήθος μελετών έχει καταδείξει ότι η παρατεταμένη έκθεση σε PM αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης διαβήτη. Ο βασικός μηχανισμός αφορά την πρόκληση χρόνιας συστηματικής φλεγμονής και ινσουλινοαντίστασης, που οδηγούν σε διαταραχή της γλυκαιμικής ρύθμισης. Επιπλέον, τα υπερλεπτά σωματίδια έχουν συνδεθεί με μεταβολικές δυσλειτουργίες, καθώς επηρεάζουν την ανοχή στη γλυκόζη και συμβάλλουν στη δυσλειτουργία του αυτόνομου νευρικού συστήματος, επιδεινώνοντας έτσι την πορεία του διαβήτη [23, 36, 38].

Αυξημένος κίνδυνος από παχυσαρκία / καρδιομεταβολικό σύνδρομο: Επιπρόσθετα, αυξημένος κίνδυνος στην εκτενή υποβολή έχει συσχετιστεί με άτομα που έχουν προβλήματα παχυσαρκίας και καρδιομεταβολικό σύνδρομο [34, 37, 39].

Χρόνια συστηματική φλεγμονή: Η πιο χαρακτηριστική συστηματική επίδραση της διαρκούς εισπνοής PM είναι η εμμένουσα φλεγμονώδης απόκριση. Τα σωματίδια ενεργοποιούν ανοσολογικούς μηχανισμούς και προάγουν την παραγωγή προ-φλεγμονωδών κυτοκινών, γεγονός που οδηγεί σε συνεχή καταπόνηση του οργανισμού. Η χρόνια φλεγμονή συνδέεται άμεσα με την πρόοδο πολλών νοσημάτων, συμπεριλαμβανομένων των καρδιομεταβολικών και νευροεκφυλιστικών [16, 38, 43].

3.4 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και των PM

Οι οξείες και χρόνιες επιδράσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό, το καρδιαγγειακό, το νευρικό σύστημα κτλ., δεν συνεπάγονται μόνο υγειονομικό βάρος αλλά και σημαντικό κοινωνικοοικονομικό κόστος. Το κόστος αυτό προκύπτει από την πρόωρη θνησιμότητα, την αυξημένη νοσηρότητα και τις απώλειες παραγωγικότητας, οι οποίες επιβαρύνουν τα συστήματα υγείας και μειώνουν την οικονομική ανάπτυξη [44].

Σε παγκόσμια κλίμακα, η ατμοσφαιρική ρύπανση εκτιμάται ότι προκάλεσε περίπου 800.000 πρόωρους θανάτους και 6,4 εκατομμύρια έτη ζωής χαμένα λόγω πρόωρης θνησιμότητας μόνο για το έτος 2000. Οι καρδιοπνευμονικές νόσοι σε ενήλικες άνω των 30 ετών αποτέλεσαν τη σημαντικότερη αιτία αυτού του φορτίου, ενώ καρκίνος του πνεύμονα και οξείες αναπνευστικές λοιμώξεις σε παιδιά συνέβαλαν επίσης ουσιαστικά [15]. Τα δεδομένα αυτά δείχνουν ότι η ρύπανση από PM ευθύνεται για ένα μετρήσιμο, αλλά και σημαντικό, τμήμα της παγκόσμιας νοσηρότητας και θνησιμότητας.

Η διάσταση του οικονομικού κόστους καθίσταται ακόμη πιο εμφανής όταν εξεταστεί σε επίπεδο κρατών. Σε χώρες όπως η Γαλλία, η Ελβετία και η Αυστρία, η ατμοσφαιρική ρύπανση υπολογίστηκε ότι προκαλεί ετησίως περισσότερους από 40.000 πρόωρους θανάτους, εκατοντάδες χιλιάδες περιστατικά βρογχίτιδας και άσθματος, καθώς και πάνω από 16 εκατομμύρια ημέρες περιορισμένης δραστηριότητας, με αποτέλεσμα σημαντικές οικονομικές απώλειες λόγω απουσιών από την εργασία και αυξημένων ιατρικών δαπανών [25]. Αντίστοιχα, σε ασιατικές μητροπόλεις, όπως η Μπανγκόκ, το κόστος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από PM10 υπολογίστηκε σε 644 εκατομμύρια δολάρια ετησίως το 2002, ενώ στην Κίνα η συνολική οικονομική επιβάρυνση εκτιμήθηκε ότι υπερβαίνει το 3,8% του ΑΕΠ [45]. Ακόμη, πιο πρόσφατες εκτιμήσεις ανεβάζουν το κόστος στο 6,5% του κινεζικού ΑΕΠ, ποσό που αντιστοιχεί σε $8,227 τρισεκατομμύρια δολάρια για το έτος 2012 [46].

Τα δεδομένα αυτά συνδέονται με τις εκτιμήσεις του *Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ)*, σύμφωνα με τις οποίες η ατμοσφαιρική ρύπανση από PM2.5 συμβάλλει σε περίπου 800.000 πρόωρους θανάτους ανά έτος παγκοσμίως, αποτελώντας την 13η αιτία θνησιμότητας [34]. Νεότεροι υπολογισμοί καταδεικνύουν ακόμη μεγαλύτερη επιβάρυνση: το 2015, η έκθεση σε PM2.5 συνδέθηκε με 4,2 εκατομμύρια θανάτους και περισσότερα από 103 εκατομμύρια χαμένα έτη ζωής, που αντιστοιχούν σε 7,6% της παγκόσμιας θνησιμότητας [37]. Παράλληλα, για το 2019 εκτιμήθηκαν 4,14 εκατομμύρια πρόωροι θάνατοι σε παγκόσμια κλίμακα [47].

Η Ευρώπη συγκεκριμένα εμφανίζει επίσης ιδιαίτερα ανησυχητικές διαστάσεις. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτίμησε ότι το συνολικό εξωτερικό κόστος της ρύπανσης στην υγεία κυμαίνεται μεταξύ 330 και 940 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως [26]. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, η μακροχρόνια έκθεση σε PM2.5 συνδέεται με απώλεια 7-8 μηνών στο προσδόκιμο ζωής και με οικονομικό κόστος περίπου 20 δισεκατομμυρίων λιρών ετησίως [48].

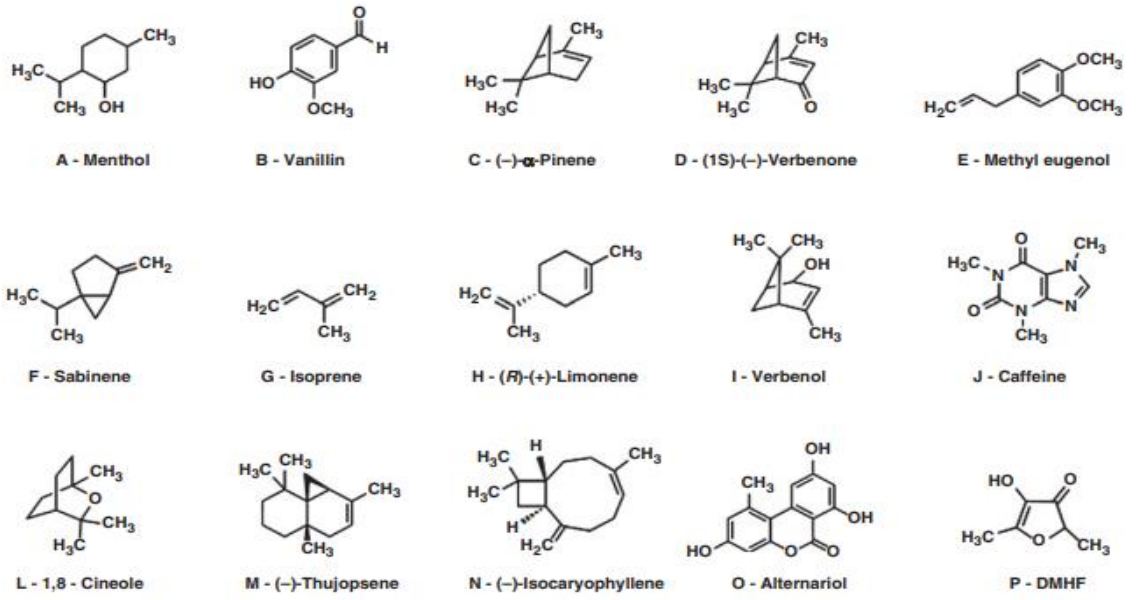
Συγκεκριμένα για την Κίνα, μελέτες έχουν δείξει ότι η ρύπανση οδηγεί σε περίπου 1,6 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους ετησίως, σε απώλεια 2,5 δισεκατομμυρίων ετών προσδόκιμου ζωής για 500 εκατομμύρια κατοίκους του βορρά, καθώς και σε 100 εκατομμύρια περιστατικά ΧΑΠ, με τεράστιο οικονομικό κόστος (περίπου 38 δισ. δολάρια ετησίως) [49]. Αυτά τα στοιχεία αναδεικνύουν το πλέγμα συνεπειών που ξεπερνούν τα όρια της υγειονομικής διάστασης και αγγίζουν άμεσα την οικονομική και κοινωνική βιωσιμότητα.

Συνολικά, οι συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα PM δεν αφορούν μόνο την υγειονομική διάσταση, όπως οι οξείες και χρόνιες επιπτώσεις που προαναφέρθηκαν, αλλά συνεπάγονται και ένα τεράστιο οικονομικό βάρος για τα συστήματα υγείας, τις εθνικές οικονομίες και τις κοινωνίες στο σύνολό τους.

4. ΠΤΗΤΙΚΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ

4.1 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds - VOCs) αποτελούν ευρύ φάσμα οργανικών ενώσεων με σχετικά χαμηλό σημείο ζέσεως (περίπου 50-260 °C), οι οποίες δύνανται να εκλύονται ως αέρια από στερεά ή υγρά υλικά. Στις κατηγορίες τους περιλαμβάνονται αλειφατικοί και αρωματικοί υδρογονάνθρακες, αλκοόλες, αλδεΰδες/κετόνες, εστέρες και αλογονούχες ενώσεις, με τη φορμαλδεΰδη να εξετάζεται συχνά ξεχωριστά λόγω ιδιαίτερης χημικής συμπεριφοράς [50]. Οι VOCs συμμετέχουν σε φωτοχημικές διεργασίες που οδηγούν στον σχηματισμό όζοντος και νέφους [51], ενώ αρκετές από αυτές έχουν τεκμηριωθεί ως καρκινογόνες ή ιδιαίτερα τοξικές για τον άνθρωπο [52].



Σχήμα 5: *Ενδεικτικές δομές βιογενών VOC, όπως μονοτερπένια, φαινολικές ενώσεις, αλκοόλες και αλκαλοειδή [237]*

Η ταξινόμηση που πρότεινε ο *ΠΟΥ* οργανώνει τις οργανικές ενώσεις του εσωτερικού αέρα με βάση το σημείο ζέσεως και τον αριθμό ατόμων άνθρακα [50, 53]:

- Οι **πολυ-πτητικές οργανικές ενώσεις (Very Volatile Organic Compounds - VVOCs)** εμφανίζουν σημείο ζέσεως μικρότερο από 0 έως 50-100 °C και συνήθως λιγότερα από έξι άτομα άνθρακα (π.χ. φορμαλδεΰδη)
- Οι **πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds - VOCs)** κυμαίνονται από 50-100 έως 240-260 °C με 5-16 άτομα άνθρακα (π.χ. βενζόλιο)
- Οι **ημι-πτητικές οργανικές ενώσεις (Semi-volatile Organic Compounds - SVOCs)** κατατάσσονται στο εύρος 240-260 έως 380-400 °C και περιλαμβάνουν ενώσεις με περισσότερα από 16 άτομα άνθρακα (π.χ. diisononyl phthalate)
- Οι **ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις (Total Volatile Organic Compounds - TVOCs)** εκφράζουν το συνολικό φορτίο VOCs σε έναν χώρο, αποτελώντας δείκτη της ποιότητας του εσωτερικού αέρα και εργαλείο αξιολόγησης πιθανών κινδύνων για την υγεία.

Πίνακας 2: Ταξινόμηση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) σύμφωνα με WHO

Κατηγορία	Ονομασία	Σημείο ζέσεως (°C)	Αριθμός ατόμων άνθρακα
VVOC	Πολυ-πτητική οργανική ένωση	< 0 έως (50-100)	$< C_6$
VOC	Πτητική οργανική ένωση	(50-100) έως (240-260)	C_6 έως C_{16}
SVOC	Ημι-πτητική οργανική ένωση	(240-260) έως (380-400)	$> C_{16}$
TVOC	Ολικές πτητικές οργανικές ενώσεις	Άθροισμα όλων των παραπάνω	

Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται συνήθως σε **μg/m^3** όπου πρόκειται -όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για τα PM- για μονάδα μάζας ανά όγκο αέρα. Δείχνει πόσα μικρογραμμάρια μιας χημικής ένωσης βρίσκονται σε έναν κυβικό μέτρο αέρα. Εναλλακτικά, σε ορισμένα πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται μονάδες όγκου όπως τα **ppb (particles per billion)** που εκφράζουν την αναλογία μορίων του ρύπου που αντιστοιχούν σε ένα δισεκατομμύριο μόρια αέρα [54].

Ο δείκτης επιπέδων TVOCs στον αέρα χωρίζεται σε έξι στάδια:

- **Good (0-220 ppb):** Αντιστοιχεί σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις TVOCs, οι οποίες θεωρούνται ασφαλείς και δεν αναμένεται να προκαλέσουν ερεθισμούς ή επιπτώσεις στην υγεία.
- **Moderate (221-660 ppb):** Αντιπροσωπεύει μέτριες συγκεντρώσεις, που υποδηλώνουν κάποιες πιθανές ενοχλήσεις σε ευαίσθητα άτομα ή σε περίπτωση μακροχρόνιας επαφής.
- **High (661-1430 ppb):** Υψηλά επίπεδα VOCs, στα οποία ενδέχεται να εμφανιστούν αισθητοί ερεθισμοί (π.χ. από το αναπνευστικό ή τα μάτια), ιδίως σε άτομα με ευαισθησία.
- **Very High (1431-2200 ppb):** Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις, με αυξημένη πιθανότητα δυσφορίας και επιπτώσεων στην υγεία σε μεγαλύτερο τμήμα του πληθυσμού.
- **Very High (2201-3300 ppb):** Σημαντικά υψηλά επίπεδα, που υποδηλώνουν σοβαρή επιβάρυνση του εσωτερικού αέρα και ανάγκη άμεσης παρέμβασης (π.χ. αερισμός, εντοπισμός πηγών).
- **Very High (3301-5500 ppb):** Εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις, που θεωρούνται επικίνδυνες για την υγεία και σχετίζονται με έντονη ρύπανση εσωτερικού χώρου.

Συνολικά, η κλίμακα αυτή χρησιμεύει ως οδηγός για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα σε κλειστούς χώρους, επιτρέποντας την κατηγοριοποίηση της έκθεσης σε VOCs από επίπεδα «ασφαλή» έως επίπεδα «επικίνδυνα».

Index Category	TVOC (ppb)
Good	0 - 220
Moderate	221 - 660
High	661 - 1430
Very High	1431 - 2200
Very High	2201 - 3300
Very High	3301 - 5500

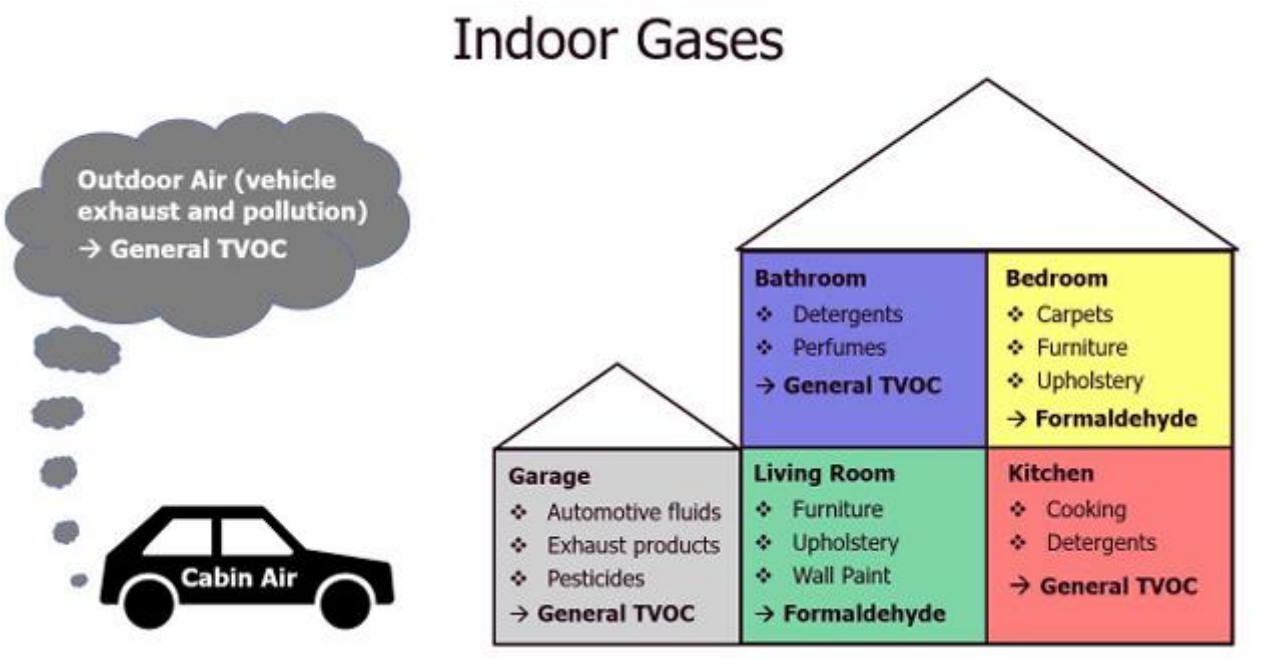
Σχήμα 6: *Κατηγοριοποίηση επιπέδων συγκέντρωσης TVOC (ppb) με βάση δείκτη ποιότητας αέρα [238]*

4.2 Πηγές VOC

1. **Εξωτερικές πηγές VOC:** Οι εξωτερικές πηγές χωρίζονται σε ανθρωπογενείς και φυσικές.
    - Οι **ανθρωπογενείς πηγές** περιλαμβάνουν κυρίως τις εκπομπές από καύσεις καυσίμων στις μεταφορές και τη βιομηχανία, καθώς και από χημικές διεργασίες. Το μεγαλύτερο μέρος των εξωτερικών VOC αποδίδεται στα καυσαέρια οχημάτων, όπου οι αλκάνες και οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Benzene-Toluene-Ethylbenzene-Xylenes - BTEX) αποτελούν βασικά συστατικά. Επίσης, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και οι διεργασίες καύσης ορυκτών καυσίμων εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες καρβονυλίων και αρωματικών ενώσεων, όπως φορμαλδεΰδη, βενζόλιο, τολουόλιο και ξυλένια [52].
    - Οι **φυσικές πηγές** περιλαμβάνουν τις εκπομπές από φυτά και εδάφη (π.χ. ισοπρένιο, τερπένια), καθώς και από δευτερογενείς φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα, που οδηγούν στον σχηματισμό όζοντος και σωματιδίων [55].
2. **Εσωτερικές πηγές VOC:** Οι εσωτερικές πηγές παρουσιάζουν μεγαλύτερη σημασία, καθώς οι συγκεντρώσεις VOC στους εσωτερικούς χώρους είναι συνήθως υψηλότερες από ό,τι στο εξωτερικό περιβάλλον και η ανθρώπινη έκθεση είναι πιο άμεση και μακροπρόθεσμη [56].
    - Οι **ανθρωπογενείς εσωτερικές πηγές** περιλαμβάνουν δομικά υλικά (π.χ. χρώματα, κόλλες, μοκέτες, ξύλινα έπιπλα), οικιακά προϊόντα (π.χ. καθαριστικά, καλλυντικά, αρωματικά χώρου), δραστηριότητες όπως το μαγείρεμα, την θέρμανση με καύση και το κάπνισμα, που απελευθερώνουν μεγάλο εύρος VOC, καθώς και το ίδιο το ανθρώπινο σώμα με συνολικές καταγραφές έως και 1.840 VOC [57]. Επιπρόσθετα, σημαντική συμβολή έχουν και τα συστήματα θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού, καθώς και οι προσωπικές πηγές (π.χ.

καλλυντικά, αρώματα) [50]. Τέλος, σημαντικός παράγοντας είναι και η χρήση συσκευών, όπως εκτυπωτές και φωτοτυπικά, που απελευθερώνουν αρωματικούς υδρογονάνθρακες [52].

- Οι **φυσικές εσωτερικές πηγές** είναι πιο περιορισμένες, αλλά περιλαμβάνουν εκπομπές VOC από μικροοργανισμούς και διαδικασίες αποσύνθεσης οργανικών υλικών μέσα στον χώρο.



Σχήμα 7: *Τυπικές πηγές εκπομπής πτητικών οργανικών ενώσεων σε εσωτερικούς χώρους [53]*

Αν και οι VOCs εντοπίζονται τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους, η επιστημονική βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι οι εσωτερικές συγκεντρώσεις είναι πολλαπλάσιες, με αναλογία εσωτερικού/εξωτερικού έως και 80:1 σε ορισμένες μελέτες. Δεδομένου ότι οι άνθρωποι περνούν το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους (κατοικίες, γραφεία, σχολεία) η υποβολή στις VOCs εντός αυτών είναι πιο κρίσιμη και έχει συσχετιστεί με το Σύνδρομο του Άρρωστου Κτιρίου (Sick Building Syndrom - SBS) [50, 56, 58]. Η υπεροχή των VOC στους εσωτερικούς χώρους δεν περιορίζεται μόνο σε ζητήματα ποιότητας αέρα, αλλά συνδέεται άμεσα με την ανθρώπινη υγεία, καθώς η χρόνια και οξεία έκθεση σε αυτά μπορεί να προκαλέσει πληθώρα βλαβών σε διαφορετικά συστήματα του οργανισμού.

4.3 Επιπτώσεις στην Ανθρώπινη Υγεία

4.3.1 Οξείες Επιδράσεις

Αναπνευστικό Σύστημα

Η βραχυπρόθεσμη επιβάρυνση από πτητικές οργανικές ενώσεις έχει συσχετιστεί με άμεσες επιβαρυντικές επιδράσεις στο αναπνευστικό σύστημα. Συγκεκριμένα, μπορούν να προκαλέσουν έντονο ερεθισμό των βλεννογόνων, που εκδηλώνεται με δακρύρροια, ξηρότητα και δυσφορία στη μύτη, τον λαιμό και τα μάτια [30, 59]. Επιπλέον, καταγράφονται περιπτώσεις άμεσων κρίσεων άσθματος ιδιαίτερα

σε άτομα που ανήκουν σε ευπαθείς ομάδες [52, 58]. Τέλος, σε περιβάλλοντα με αυξημένες συγκεντρώσεις ολικών VOC, η οξεία έκθεση έχει συνδεθεί με αυξημένη επίπτωση λοιμώξεων του αναπνευστικού, γεγονός που καταδεικνύει τη σημασία της συνεχούς παρακολούθησης των εσωτερικών χώρων [50].

Νευρικό Σύστημα

Η πρόσκαιρη επαφή σε αυξημένα επίπεδα συνδέεται επίσης άμεσα με δυσλειτουργίες του κεντρικού νευρικού συστήματος. Τα συνηθέστερα συμπτώματα περιλαμβάνουν ζάλη, πονοκεφάλους, κόπωση και μείωση της ικανότητας συγκέντρωσης, τα οποία καταγράφονται τόσο σε πειραματικές μελέτες όσο και σε πραγματικές συνθήκες κατοικιών και χώρων εργασίας [52, 59]. Παράλληλα, ορισμένες ενώσεις της κατηγορίας, όπως το τολουόλιο και το βενζόλιο, έχουν τεκμηριωθεί για την νευροτοξική τους δράση, επηρεάζοντας άμεσα τη νευρική λειτουργία και προκαλώντας πληθώρα διαταραχών [60].

Άλλες Άμεσες *Ε*πιδράσεις

Πέραν των αναπνευστικών και νευρολογικών επιβαρύνσεων, η άμεση εισπνοή VOC έχει συνδεθεί με μια σειρά από γενικευμένα συμπτώματα, όπως ναυτία, ατοπική δερματίτιδα, υπνηλία και ερεθισμούς του δέρματος [52]. Επιπλέον, η παρουσία του φαινομένου SBS, ενισχύει και επιτείνει τα παραπάνω φαινόμενα.

4.3.2 Χρόνιες Επιδράσεις

Αναπνευστικό Σύστημα

Η παρατεταμένη αλληλεπίδραση με VOCs συνδέεται με σημαντικές χρόνιες επιβαρύνσεις του αναπνευστικού συστήματος. Ειδικότερα, ενώσεις όπως η φορμαλδεΰδη και τα αρωματικά BTEX έχουν τεκμηριωθεί ότι συμβάλλουν στην ανάπτυξη ή επιδείνωση χρόνιας βρογχίτιδας και άσθματος, ιδίως σε πληθυσμιακές ομάδες με προϋπάρχουσες αναπνευστικές παθήσεις. Επιπλέον, η συνεχής υποβολή σε αυξημένα επίπεδα έχει συσχετιστεί με μακροχρόνια μείωση της πνευμονικής λειτουργίας, η οποία εκδηλώνεται μέσω πτώσης βασικών δεικτών αναπνευστικής ικανότητας [50, 52, 60].

Καρκινογένεση

Ιδιαίτερη ανησυχία εγείρουν οι καρκινογόνες ιδιότητες ορισμένων VOC, οι οποίες έχουν επιβεβαιωθεί από πλήθος επιδημιολογικών και τοξικολογικών μελετών. Το βενζόλιο αποτελεί έναν από τους πιο μελετημένους ρύπους της κατηγορίας, με σαφώς τεκμηριωμένη συσχέτιση με την εμφάνιση λευχαιμιών και άλλων κακοηθειών [61]. Η φορμαλδεΰδη, αντίστοιχα, έχει ταξινομηθεί ως καρκινογόνος ουσία για τον άνθρωπο, με ισχυρές ενδείξεις συσχέτισής της με τον καρκίνο του ρινοφάρυγγα και πιθανή

εμπλοκή σε άλλες μορφές καρκίνου του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος. Πέραν αυτών, αρκετές ακόμη VOCs έχουν αξιολογηθεί από τον Διεθνή Οργανισμό Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC) και έχουν ταξινομηθεί ως πιθανώς ή δυνητικά καρκινογόνες, γεγονός που καταδεικνύει τη σοβαρότητα των επίμονων επιπτώσεων της έκθεσης σε μίγματα VOC [50].

Νευρικό Σύστημα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ομάδα ενώσεων BTEX οι οποίες κατανέμονται εκτενώς στο κεντρικό νευρικό σύστημα, στο μυελό των οστών και σε ιστούς πλούσιους σε λιπίδια, ενώ μεταβολίζονται τόσο στο αναπνευστικό όσο και στο ήπαρ. Η βιομετατροπή αυτή μπορεί να παράγει ενδιάμεσα προϊόντα που οδηγούν σε κυτταρική τοξικότητα, ενισχύοντας τις νευροτοξικές τους επιδράσεις. Παράλληλα, η εισπνοή αυξημένων συγκεντρώσεων VOC έχει συνδεθεί με γνωστικές δυσλειτουργίες, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά την καθημερινή ζωή του ατόμου, περιορίζοντας την απόδοσή του στην εργασία ή στο σχολείο, και να δυσχεράνουν δραστηριότητες που απαιτούν πνευματική διαύγεια και σταθερή συγκέντρωση [60].

Άλλα Συστήματα

Πέρα από τις αναπνευστικές, καρκινογόνες και νευρολογικές επιδράσεις, η χρόνια διαβίωση σε VOCs μπορεί να επηρεάσει και άλλα ζωτικά συστήματα του οργανισμού. Ορισμένες ενώσεις έχουν τεκμηριωθεί για την ηπατοτοξικότητα και νεφροτοξικότητά τους, προκαλώντας συνεχής βλάβες στη λειτουργία του ήπατος και των νεφρών [52]. Επιπλέον, η συνεχής έκθεση σε τέτοια μίγματα έχει συνδεθεί με ανοσολογικές διαταραχές και με την ανάπτυξη αλλεργικών ευαισθητοποιήσεων [61].

4.3.3 Ευάλωτες Ομάδες

Όπως και τα PM, έτσι και οι επιπτώσεις της επιβάρυνσης από VOCs δεν κατανέμονται ισομερώς στον πληθυσμό, αλλά πλήττουν εντονότερα συγκεκριμένες ευάλωτες ομάδες, λόγω βιολογικών, ηλικιακών ή παθολογικών παραγόντων [56].

- Παιδιά: Η ανωριμότητα του αναπνευστικού και του ανοσοποιητικού συστήματος, σε συνδυασμό με τον υψηλότερο μεταβολικό ρυθμό και τη μεγαλύτερη έκθεση σε εσωτερικούς χώρους, καθιστούν τα παιδιά ιδιαίτερα επιρρεπή στις δυσμενείς συνέπειες των VOC. Η αλληλεπίδραση με υψηλά TVOC για βραχύχρονα διαστήματα έχει συσχετιστεί με αυξημένη εμφάνιση άσθματος, χρόνια αναπνευστικά συμπτώματα, καθώς και πνευμονική λοίμωξη [50, 58].
- Ηλικιωμένοι: Τα άτομα μεγαλύτερης ηλικίας εμφανίζουν αυξημένη ευπάθεια λόγω της φυσιολογικής μείωσης των αμυντικών μηχανισμών του οργανισμού, αλλά και της παρουσίας προϋπαρχόντων νοσημάτων, γεγονός που ενισχύει τη σοβαρότητα των επιδράσεων από τη μακροχρόνια υποβολή.

- Χρόνιοι ασθενείς: Άτομα που πάσχουν από σοβαρές παθήσεις αποτελούν την πιο επιβαρυμένη κατηγορία, καθώς η συνεχής έκθεση επιδεινώνει την κλινική εικόνα τους, αυξάνοντας τη συχνότητα των παροξύνσεων και την ανάγκη για ιατρική φροντίδα [50].

4.4 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα των VOC

Η παρουσία VOC στον εξωτερικό και κυρίως στον εσωτερικό αέρα επεκτείνονται άμεσα με σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες. Οι επιπτώσεις της έκθεσης εκδηλώνονται με αυξημένες ανάγκες ιατρικής περίθαλψης, συχνότερες απουσίες από εργασία και σχολείο, αλλά και με αισθητή μείωση της απόδοσης και της παραγωγικότητας. Ως εκ τούτου, οι VOCs δεν αποτελούν μόνο έναν υγειονομικό κίνδυνο αλλά και παράγοντα οικονομικής επιβάρυνσης για τα συστήματα υγείας και τις εθνικές οικονομίες.

Σύμφωνα με την *US EPA*, η κακή ποιότητα εσωτερικού αέρα επηρεάζει το 33-50% των κτιρίων γραφείων στις ΗΠΑ και ευθύνεται για περισσότερες από 125 εκατομμύρια χαμένες σχολικές ημέρες και 10 εκατομμύρια χαμένες εργάσιμες ημέρες κάθε χρόνο [53].

Σύμφωνα με εκτιμήσεις της *Lancet Commission on Pollution and Health*, οι απώλειες ευημερίας λόγω ρύπανσης -συμπεριλαμβανομένων και των VOC- ανέρχονται παγκοσμίως σε 4,6 τρισεκατομμύρια δολάρια ετησίως, ποσό που αντιστοιχεί σε 1,7-7% των ετήσιων δαπανών υγείας μιας χώρας, με υψηλότερα ποσοστά στα κράτη χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος [60]. Η οικονομική αυτή επιβάρυνση οφείλεται κυρίως στις χρόνιες εκφυλιστικές ασθένειες (71% των περιπτώσεων), που προκαλούν παρατεταμένη απώλεια υγείας και παραγωγικότητας.

Περαιτέρω, οι μελέτες για την ποιότητα του εσωτερικού αέρα σε κτίρια δείχνουν ότι η βελτίωση των συνθηκών αερισμού και η μείωση των επιπέδων TVOC μπορούν να αποφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη. Ειδικότερα, υπολογίζεται ότι η αναβάθμιση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα θα μπορούσε να αποφέρει: 6-14 δισ. δολάρια από μείωση αναπνευστικών νοσημάτων, 2-4 δισ. από λιγότερα περιστατικά άσθματος και αλλεργιών, 15-38 δισ. από μείωση συμπτωμάτων που σχετίζονται με το SBS, έως και 200 δισ. δολάρια από αύξηση της παραγωγικότητας [53]. Οι εκτιμήσεις αυτές υπογραμμίζουν ότι το οικονομικό όφελος της πρόληψης και της βελτίωσης της ποιότητας του αέρα υπερβαίνει κατά πολύ το κόστος των παρεμβάσεων.

Συνολικά, το κοινωνικοοικονομικό αποτύπωμα των VOC δεν αφορά μόνο την υγειονομική διάσταση αλλά και την ευρύτερη οικονομική και κοινωνική βιωσιμότητα, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για στρατηγικές μείωσης της έκθεσης και για πολιτικές βελτίωσης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα.

5. ΗΧΟΡΥΠΑΝΣΗ

5.1 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά της Ηχορύπανσης

Η αστικοποίηση, συνοδεύεται αναπόφευκτα από την αύξηση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και των περιβαλλοντικών πιέσεων. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά και διαδεδομένα φαινόμενα που απορρέουν από αυτήν είναι η ηχορύπανση. Οι πυκνοί κυκλοφοριακοί φόρτοι, οι εκτεταμένες βιομηχανικές και κατασκευαστικές δραστηριότητες, καθώς και οι συνεχείς κοινωνικές και πολιτιστικές εκδηλώσεις, δημιουργούν ένα ακουστικό περιβάλλον συχνά επιβαρυμένο με θορύβους που υπερβαίνουν τα φυσιολογικά όρια ανοχής του ανθρώπου. Η ηχορύπανση, αν και συχνά παραβλέπεται σε σχέση με άλλες μορφές ρύπανσης, αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους περιβαλλοντικούς κινδύνους στις σύγχρονες πόλεις, επηρεάζοντας άμεσα την ποιότητα ζωής, την υγεία και την κοινωνική ευημερία.

Η ηχορύπανση, γνωστή και ως περιβαλλοντικός ήχος ή ρύπανση από θόρυβο, ορίζεται ως η παρουσία ανεπιθύμητων ή επιβλαβών ήχων στο περιβάλλον, οι οποίοι διαταράσσουν την ακουστική ισορροπία και επηρεάζουν αρνητικά την υγεία και την ευημερία του ανθρώπου. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας την περιγράφει ως «ανεπιθύμητο ή επιβλαβή ήχο που παρεμβαίνει σε βασικές δραστηριότητες, όπως ο ύπνος, η επικοινωνία και η εργασία, και μπορεί να συμβάλει σε δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία» [62]. Μάλιστα, ήδη από το 1972 ο *ΠΟΥ* την αναγνώρισε επίσημα ως περιβαλλοντικό ρύπο [64].

Η επιβλαβής δράση του θορύβου εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την ένταση, τη διάρκεια και τη συχνότητα της έκθεσης [62, 63]. Η ένταση αποτελεί τον πιο άμεσο δείκτη, καθώς υψηλότερα επίπεδα ήχου σχετίζονται με μεγαλύτερη πιθανότητα ακουστικής βλάβης. Η διάρκεια έκθεσης παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο, αφού ακόμα και χαμηλότερα επίπεδα θορύβου, όταν παραμένουν σταθερά για μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορούν να οδηγήσουν σε μακροχρόνιες επιπτώσεις [65]. Τέλος, η συχνότητα συνδέεται με την ικανότητα του ανθρώπινου αυτιού να αντιλαμβάνεται ήχους στο φάσμα των 20-20.000 Hz, καθώς όταν οι τιμές κινούνται προς τα χαμηλότερα ή τα υψηλότερα όρια, ενδέχεται να προκαλέσουν σοβαρότερη βλάβη [63].

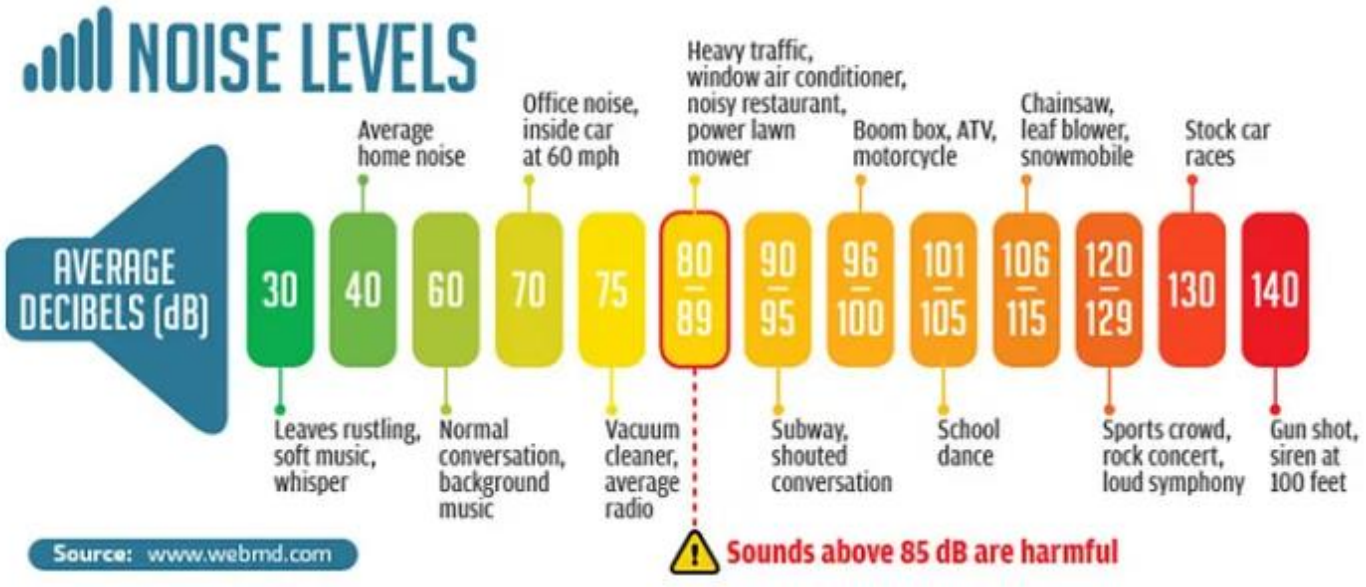
Η στάθμη του ήχου μετριέται σε decibel (dB), δηλαδή σε λογαριθμική μονάδα που αντιστοιχεί στη φυσική έννοια της ηχητικής πίεσης και αποδίδει το επίπεδο ενέργειας των ηχητικών κυμάτων στον χώρο. Η ονομασία αυτή δόθηκε προς τιμήν του εισηγητή της, Alexander Graham Bell [66]. Αποτελεί κρίσιμο δείκτη επικινδυνότητας, καθώς το ανθρώπινο αυτί μπορεί να αντιληφθεί ήχους από τα 0 dB (κατώφλι ακοής) έως περίπου τα 140 dB (κατώφλι πόνου). Παρατεταμένη έκθεση σε επίπεδα άνω των 85 dB θεωρείται επιβλαβής για την ακοή [63, 67].

Σύμφωνα με τα δεδομένα του *ΠΟΥ* και του *WebMD*, τα επίπεδα θορύβου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- **30-40 dB - Πολύ χαμηλός θόρυβος:** Αντιπροσωπεύει ήχους όπως το ψίθυρο ή το θρόισμα των φύλλων. Οι στάθμες αυτές είναι απόλυτα ασφαλείς και συμβατές με συνθήκες ησυχίας σε εσωτερικούς χώρους.

- **50-60 dB - Μέτριος θόρυβος:** Αντιστοιχεί σε φυσιολογική συνομιλία ή απαλή μουσική υπόκρουση. Δεν προκαλεί ενόχληση ή βλάβη, αλλά συνεχής έκθεση μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα συγκέντρωσης.
- **70-75 dB - Αυξημένος θόρυβος:** Περιλαμβάνει ήχους όπως ηλεκτρική σκούπα ή ραδιόφωνο σε μέτρια ένταση. Αν και δεν είναι επικίνδυνοι βραχυπρόθεσμα, παρατεταμένη έκθεση ενδέχεται να προκαλέσει κόπωση ή ερεθισμό.
- **80-89 dB - Οριακά επιβλαβής θόρυβος:** Αντιπροσωπεύει περιβάλλοντα με έντονη κυκλοφορία, εστιατόρια ή χλοοκοπτικά μηχανήματα. Επίπεδα πάνω από 85 dB θεωρούνται δυνητικά βλαβερά για την ακοή σε περιπτώσεις μακροχρόνιας έκθεσης.
- **90-105 dB - Επιβλαβής θόρυβος:** Περιλαμβάνει ήχους όπως το μετρό, δυνατή μουσική ή μηχανές (μοτοσικλέτες, ATV). Η συνεχής έκθεση μπορεί να προκαλέσει μόνιμη απώλεια ακοής.
- **110-129 dB - Πολύ υψηλός θόρυβος:** Αντιπροσωπεύει θορύβους όπως αλυσοπρίονα, συναυλίες ή αθλητικά πλήθη. Ακόμα και σύντομη έκθεση μπορεί να οδηγήσει σε πόνο στα αυτιά ή ακουστική βλάβη.
- **130-140 dB - Εξαιρετικά επικίνδυνος θόρυβος:** Περιλαμβάνει εκρήξεις, σειρήνες ή πυροβολισμούς σε κοντινή απόσταση. Η έκθεση ακόμη και για λίγα δευτερόλεπτα μπορεί να προκαλέσει άμεση βλάβη στο ακουστικό σύστημα.

Συνολικά, η κλίμακα αυτή επιτρέπει την ποιοτική αξιολόγηση του ακουστικού περιβάλλοντος, συνδέοντας τις μετρήσεις έντασης ήχου με αντικειμενικές ενδείξεις θορυβικής επιβάρυνσης και πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη ακοή και ευεξία.



Σχήμα 8: *Ενδεικτικά επίπεδα έντασης ήχου (dB) και αντίστοιχες κατηγορίες ηχητικής ρύπανσης [239]*

Η ανησυχία για τις επιπτώσεις του θορύβου δεν είναι πρόσφατη. Ήδη από τον 19ο αιώνα, η Florence Nightingale τόνιζε ότι «Ο περιττός θόρυβος είναι η πιο σκληρή μορφή κακομεταχείρισης της

φροντίδας που μπορεί να επιβληθεί είτε σε ασθενείς είτε σε υγιείς» [67]. Στις αρχές του 20ού αιώνα, ο Robert Koch προέβλεψε ότι «η ανθρωπότητα θα χρειαστεί να πολεμήσει τον θόρυβο με την ίδια αποφασιστικότητα όπως τη χολέρα και την πανούκλα» [68]. Οι ιστορικές αυτές αναφορές υπογραμμίζουν ότι η ηχορύπανση αναγνωριζόταν ήδη ως σοβαρός παράγοντας κινδύνου για την υγεία, πολύ πριν τεκμηριωθεί επιστημονικά η σύνδεσή της με καρδιαγγειακά, ψυχολογικά και κοινωνικά προβλήματα.

5.2 Πηγές Ηχορύπανσης

Η ηχορύπανση προέρχεται από ποικιλία πηγών, που σχετίζονται με τις μεταφορές, τη βιομηχανική και κατασκευαστική δραστηριότητα, τις κοινωνικές και οικιακές δραστηριότητες, αλλά και με φυσικά φαινόμενα. Οι βασικές κατηγορίες μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής:

Κυκλοφοριακός Θόρυβος

Ο κυκλοφοριακός θόρυβος αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και πιο διαδεδομένες πηγές ηχορύπανσης σε αστικές περιοχές [69].

- **Οδική κυκλοφορία:** Ο θόρυβος παράγεται κυρίως από τη λειτουργία των κινητήρων, την τριβή των ελαστικών με το οδόστρωμα, την αεροδυναμική κίνηση, αλλά και από κόρνες και φρεναρίσματα [62, 69, 70].
- **Αεροπορικός θόρυβος:** Τα αεροσκάφη δημιουργούν έντονα ηχητικά κύματα κατά την απογείωση και την προσγείωση. Οι περιοχές κοντά σε αεροδρόμια εκτίθενται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα ήχου, με τον θόρυβο να προέρχεται κυρίως από τους κινητήρες και τις δονήσεις [62, 69].
- **Σιδηροδρομικός θόρυβος:** Οφείλεται στην αλληλεπίδραση τροχών και ραγών, στη λειτουργία μηχανών και στα συστήματα σηματοδότησης. Ο θόρυβος είναι εντονότερος σε περιοχές κατοικίας που βρίσκονται δίπλα σε σιδηροδρομικές γραμμές [62, 69].
- **Θαλάσσιες μεταφορές:** Ο θόρυβος από πλοία και λιμενικές εγκαταστάσεις αποτελεί επίσης σημαντική πηγή ηχορύπανσης, ειδικά σε παράκτιες και λιμενικές περιοχές [69].

Βιομηχανία και Κατασκευές [62, 69]

Η βιομηχανική και κατασκευαστική δραστηριότητα συνιστά έναν ακόμη κύριο τομέα δημιουργίας θορύβου.

- **Βιομηχανικές δραστηριότητες:** Οι θόρυβοι προέρχονται από βαριά μηχανήματα, εξοπλισμό και διαδικασίες παραγωγής, δημιουργώντας συνεχή ηχητικά φορτία.
- **Εργοστασιακός θόρυβος:** Τα εργοστάσια με τις γραμμές παραγωγής και τις μηχανές αποτελούν σταθερές πηγές θορύβου.

- **Κατασκευαστικά έργα:** Η χρήση εκσκαφέων, κομπρεσέρ, μπουλντόζων και γερανών παράγει έντονο θόρυβο, ο οποίος μπορεί να παραμένει για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε περιοχές κοντά σε έργα.
- **Εξορύξεις και λατομεία:** Οι δραστηριότητες εξόρυξης και οι εκρήξεις δημιουργούν ισχυρά ηχητικά κύματα, τα οποία εξαπλώνονται σε μεγάλες αποστάσεις.

Κοινότητα και Κατοικίες

Πέρα από τις μαζικές υποδομές και τις βιομηχανικές δραστηριότητες, σημαντικό ποσοστό ηχορύπανσης παράγεται μέσα στις ίδιες τις κοινότητες.

- **Δημόσιες εκδηλώσεις:** Συναυλίες, φεστιβάλ και παρελάσεις χαρακτηρίζονται από έντονες ηχητικές εκπομπές, οι οποίες συχνά ξεπερνούν τα αποδεκτά όρια [62, 69].
- **Κοινωνικές συναθροίσεις:** Γάμοι, πάρτι και λοιπές συγκεντρώσεις αποτελούν πηγές θορύβου, κυρίως σε οικιστικές περιοχές [62, 69].
- **Οικιακές δραστηριότητες:** Η χρήση ηλεκτρικών συσκευών, ανακαινίσεις κατοικιών και ο θόρυβος από κατοικίδια (π.χ. σκυλιά) συνιστούν καθημερινές πηγές ηχορύπανσης στις γειτονιές [62, 69].
- **Χώροι αναψυχής και διασκέδασης**: Λούνα παρκ, θεματικά πάρκα, μπαρ και νυχτερινά κέντρα παράγουν σημαντική ηχορύπανση λόγω μηχανικών κατασκευών, παιχνιδιών, φωνών επισκεπτών και δυνατής μουσικής, με τις επιπτώσεις να είναι εντονότερες σε τοπικό επίπεδο και κατά τις βραδινές ώρες [69].

Περιβαλλοντικές και Φυσικές Πηγές

Εκτός από ανθρωπογενείς πηγές, η ηχορύπανση μπορεί να προέρχεται και από φυσικά φαινόμενα ή ζώα.

- **Θυελλώδη καιρικά φαινόμενα:** Καταιγίδες, κεραυνοί και έντονοι άνεμοι παράγουν ισχυρούς ήχους που μπορούν να θεωρηθούν περιβαλλοντικός θόρυβος [66, 69].
- **Ηφαίστεια και σεισμοί:** Τα γεωλογικά αυτά φαινόμενα παράγουν εκρήξεις και δονήσεις που συνοδεύονται από θόρυβο μεγάλης έντασης [66, 69].
- **Ζώα και οικοσυστήματα:** Οι φωνές βατράχων, πουλιών ή άγριων ζώων μπορούν να αποτελέσουν πηγές περιβαλλοντικού θορύβου, ιδιαίτερα σε αγροτικές ή δασικές περιοχές [66].

5.3 Επιπτώσεις της Ηχορύπανσης στον Άνθρωπο

5.3.1 Το Ανθρώπινο Ακουστικό Σύστημα και Ευπάθεια στον Θόρυβο [65]

Το ανθρώπινο αυτί αποτελεί το βασικό όργανο αντίληψης των ηχητικών ερεθισμάτων και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην επίδραση της ηχορύπανσης. Αποτελείται από τρία κύρια τμήματα: το **έξω**

αυτί, το **μέσο αυτί** και το **έσω αυτί**, τα οποία συνεργάζονται για τη μετατροπή των μηχανικών δονήσεων του ήχου σε νευρικά σήματα που γίνονται αντιληπτά από τον εγκέφαλο.

1. Το **έξω ους** περιλαμβάνει το πτερύγιο, τον έξω ακουστικό πόρο και την τυμπανική μεμβράνη. Ο ρόλος του είναι να συλλέγει τα ηχητικά κύματα από το περιβάλλον και να τα κατευθύνει προς την τυμπανική μεμβράνη, η οποία πάλλεται ανάλογα με την ένταση και τη συχνότητα του ήχου.
2. Το **μέσο ους** είναι ένας μικρός αεροφόρος θάλαμος μέσα στην τυμπανική μεμβράνη και περιέχει τα τρία ακουστικά οστάρια: τον σφύρα, τον άκμονα και τον αναβολέα. Αυτά τα μικροσκοπικά οστάρια αποτελούν τον μηχανισμό ενίσχυσης και ρύθμισης των ηχητικών δονήσεων, τις οποίες μεταδίδουν προς το έσω ους μέσω της ωοειδούς θυρίδας. Η στρογγυλή θυρίδα βοηθά στη συνέχεια τα ηχητικά κύματα να μετατοπίζουν ομαλά το υγρό στο έσω ους.
3. Το **έσω ους** περιλαμβάνει τον κοχλία, έναν ελικοειδή σωλήνα γεμάτο υγρό. Ο κοχλίας χωρίζεται από το όργανο του Corti, το οποίο περιέχει εξειδικευμένες δομές όπως η βασική μεμβράνη, η ενδόλεμφος και τα τριχωτά κύτταρα. Οι δομές αυτές μετατρέπουν τις μηχανικές δονήσεις σε ηλεκτρικά νευρικά σήματα. Τα σήματα μεταδίδονται μέσω του ακουστικού νεύρου στο κεντρικό νευρικό σύστημα, όπου ερμηνεύονται ως ήχος**.**

Η πολυπλοκότητα και η ευαισθησία του ακουστικού συστήματος καθιστούν τον άνθρωπο ιδιαίτερα ευάλωτο στις επιδράσεις της ηχορύπανσης. Η υπερέκθεση σε έντονους ή παρατεταμένους ήχους μπορεί να προκαλέσει βλάβες σε διαφορετικά σημεία της ακουστικής οδού, οδηγώντας σε μερική ή ολική απώλεια ακοής, εμβοές ή άλλες διαταραχές της ακουστικής λειτουργίας. Ωστόσο, οι συνέπειες του θορύβου δεν περιορίζονται αποκλειστικά στο ακουστικό σύστημα. Πλήθος ερευνών έχει δείξει ότι η ηχορύπανση επηρεάζει άμεσα και άλλα ζωτικά συστήματα του ανθρώπινου οργανισμού, συμβάλλοντας σε σωματικές, ψυχολογικές και γνωστικές διαταραχές. Στα επόμενα τμήματα εξετάζονται οι κυριότερες σωματικές επιπτώσεις, όπως η απώλεια ακοής, οι καρδιαγγειακές δυσλειτουργίες και οι διαταραχές ύπνου, καθώς και οι ψυχολογικές και νοητικές συνέπειες, που σχετίζονται με το άγχος, την κατάθλιψη, τις δυσκολίες συγκέντρωσης και την επίδραση στη μαθησιακή διαδικασία

5.3.2 Σωματικές Επιδράσεις

Απώλεια ακοής και εμβοές [62]:

Η μακροχρόνια έκθεση σε υψηλά επίπεδα θορύβου αποτελεί καλά τεκμηριωμένο αίτιο απώλειας ακοής. Οι εργαζόμενοι σε βιομηχανίες, εργοτάξια και ορυχεία είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένοι, καθώς η συνεχής έκθεση σε δυνατούς ήχους αυξάνει τον κίνδυνο μόνιμης βλάβης. Επίσης, η συμμετοχή σε ψυχαγωγικές δραστηριότητες με έντονη μουσική ή άλλες πηγές δυνατού θορύβου μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ακοής.

Ένα ακόμη συχνό επακόλουθο είναι οι εμβοές, δηλαδή η επίμονη αντίληψη ήχων όπως βουητό ή κουδούνισμα. Έχει αποδειχθεί ότι η χρόνια έκθεση σε θόρυβο μπορεί να προκαλέσει ή να επιδεινώσει τις εμβοές, ως αποτέλεσμα βλάβης στις νευρικές οδούς της ακοής.

Καρδιαγγειακά προβλήματα [62]:

Η έκθεση σε θόρυβο συνδέεται στενά με την ανάπτυξη υπέρτασης. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο παρατεταμένος θόρυβος από κυκλοφορία και βιομηχανικές πηγές αυξάνει την αρτηριακή πίεση και συμβάλλει στην εκδήλωση υπέρτασης. Σε αστικούς πληθυσμούς, όσοι ζουν κοντά σε δρόμους ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις εμφανίζουν υψηλότερο κίνδυνο υπέρτασης σε σύγκριση με άτομα που ζουν σε πιο ήσυχες περιοχές.

Επιπλέον, η χρόνια έκθεση σε θόρυβο έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο εμφράγματος του μυοκαρδίου. Τα επίπεδα θορύβου από την κυκλοφορία ή οι βιομηχανικές δραστηριότητες δρουν ως στρεσογόνος παράγοντας, αυξάνοντας τα επίπεδα κορτιζόλης και άλλων ορμονών του άγχους, γεγονός που ευνοεί την εμφάνιση καρδιακών επεισοδίων. Παρόμοια, έχει βρεθεί ότι η μακροχρόνια έκθεση σε θόρυβο αυξάνει τον κίνδυνο εγκεφαλικών επεισοδίων, καθώς ο θόρυβος επηρεάζει την αρτηριακή πίεση και το αγγειακό σύστημα.

Διαταραχές ύπνου:

Η ηχορύπανση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες αιτίες διαταραχών ύπνου. Έχει αποδειχθεί ότι συνεχής έκθεση σε περιβαλλοντικό θόρυβο, όπως από οδική κυκλοφορία και αεροπλάνα, οδηγεί σε αϋπνία, άπνοια, συχνές αφυπνίσεις και μείωση της συνολικής διάρκειας ύπνου. Οι επιπτώσεις αυτές μπορεί να έχουν δευτερογενείς συνέπειες, όπως μειωμένη απόδοση την ημέρα, κόπωση και αυξημένο κίνδυνο ατυχημάτων [62, 67].

Επιπλέον, μελέτες έχουν δείξει ότι ο θόρυβος κατά τη διάρκεια της νύχτας προκαλεί φυσιολογικές αντιδράσεις, όπως αύξηση της αρτηριακής πίεσης, της καρδιακής συχνότητας και εμφάνιση αρρυθμιών, ακόμη κι αν ο ύπνος δεν διακόπτεται πλήρως [67, 71]. Μακροχρόνια, οι διαταραχές ύπνου που σχετίζονται με θόρυβο συνδέονται με σοβαρά προβλήματα υγείας, περιλαμβανομένων καρδιαγγειακών νοσημάτων [72].

5.3.3 Ψυχολογικές και Νοητικές Επιδράσεις

Άγχος, κατάθλιψη και αλλά ψυχικά νοσήματα:

Η έκθεση σε υψηλά επίπεδα θορύβου έχει συσχετιστεί με αυξημένο άγχος, το οποίο εκδηλώνεται μέσω υψηλότερων επιπέδων κορτιζόλης, αδρεναλίνης και έντονων φυσιολογικών αντιδράσεων, λόγω ενεργοποίησης του άξονα υποθαλάμου υπόφυσης επινεφριδίων (HPA axis). Ο HPA άξονας αποτελεί τον κεντρικό μηχανισμό του οργανισμού για την αντιμετώπιση του άγχους, καθώς ρυθμίζει την απελευθέρωση ορμονών που προετοιμάζουν το σώμα να ανταποκριθεί σε απειλητικές ή απαιτητικές καταστάσεις [73]. Με άλλα λόγια, ενεργοποιεί το λεγόμενο «fight or flight» σενάριο, βοηθώντας τον άνθρωπο να προσαρμοστεί και να επιβιώσει σε δυσμενείς συνθήκες [74, 75]. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα άτομα που ζουν σε περιοχές με έντονο περιβαλλοντικό θόρυβο αναφέρουν υψηλότερα επίπεδα αντιλαμβανόμενου άγχους και μειωμένη ευεξία [62].

Επιπλέον, η χρόνια έκθεση σε θόρυβο σχετίζεται με αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης αγχωδών διαταραχών. Η *ΠΟΥ* το 2018 επιβεβαίωσε ότι η ηχορύπανση συνδέεται με διαταραχές άγχους, κυρίως λόγω διαταραχών ύπνου και της συνεχούς ενεργοποίησης του οργανισμού [62].

Η ηχορύπανση δεν θεωρείται άμεση αιτία ψυχικών νοσημάτων, ωστόσο ενισχύει και επιδεινώνει υποκείμενες διαταραχές, όπως νευρικότητα, συναισθηματική αστάθεια, αλλαγές διάθεσης, νευρώσεις ή ακόμη και ψυχωτικά επεισόδια, επιδρώντας κυρίως σε άτομα με προϋπάρχουσα ευαλωτότητα. Σε πληθυσμιακές μελέτες, η έκθεση σε θόρυβο έχει συσχετιστεί με αυξημένα ποσοστά χρήσης ψυχοφαρμάκων και μεγαλύτερα ποσοστά κατάθλιψης [62, 67].

Επιδράσεις στη μνήμη, μάθηση και απόδοση:

Ο θόρυβος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις γνωστικές λειτουργίες. Έρευνες σε παιδιά έχουν επιβεβαιώσει ότι η έκθεση σε υψηλά επίπεδα περιβαλλοντικού θορύβου (π.χ. κοντά σε δρόμους ή αεροδρόμια) οδηγεί σε χαμηλότερη σχολική απόδοση, μειωμένη ικανότητα συγκέντρωσης και προβλήματα μνήμης [62, 60].

Αντίστοιχα, σε ενήλικες έχει βρεθεί ότι η συνεχής έκθεση σε θόρυβο μειώνει την απόδοση σε σύνθετες γνωστικές εργασίες, όπως κατανόηση κειμένου ή αριθμητικά προβλήματα. Αυτό οφείλεται στο ότι ο θόρυβος καταλαμβάνει «γνωστικούς πόρους», με αποτέλεσμα λιγότερη προσοχή να διατίθεται στη βασική εργασία [62].

Διαταραχές επικοινωνίας και παραγωγικότητας:

Η ηχορύπανση παρεμβαίνει στην καθημερινή επικοινωνία οδηγώντας σε πτώση της παραγωγικότητας τόσο σε χώρους εργασίας όσο και σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα [66, 67, 69]. Οι συνέπειες περιλαμβάνουν κόπωση, μειωμένη αυτοπεποίθηση, ευερεθιστότητα και διαταραχές στις κοινωνικές σχέσεις [67].

Εργασιακές μελέτες έχουν δείξει ότι οι εργαζόμενοι σε θορυβώδη περιβάλλοντα εμφανίζουν αυξημένα ποσοστά ατυχημάτων, μειωμένη ακρίβεια σε καθήκοντα που απαιτούν συγκέντρωση και μεγαλύτερη συχνότητα απουσιών λόγω ψυχικής καταπόνησης [67].

5.3.4 Ευάλωτες Ομάδες

Παιδιά: Τα παιδιά, όπως έχει ήδη σημειωθεί, αποτελούν ομάδα εξαιρετικά ευαίσθητη στην έκθεση σε θόρυβο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βρίσκονται σε φάση ταχείας ανάπτυξης και γνωστικής ωρίμανσης, ενώ διαθέτουν λιγότερο ανεπτυγμένους αμυντικούς μηχανισμούς σε σχέση με τους ενήλικες για να αντιμετωπίσουν τον περιβαλλοντικό θόρυβο και μπορούν να τον ελέγξουν λιγότερο αποτελεσματικά [76]. Η έκθεση σε περιβαλλοντικό θόρυβο δεν επηρεάζει μόνο τη μάθηση αλλά και την ψυχοσυναισθηματική ισορροπία, οδηγώντας σε αυξημένα επίπεδα άγχους, διαταραχή διάθεσης και μειωμένη συγκέντρωση [62]. Η ευαλωτότητα αυτή καθιστά τον παιδικό πληθυσμό περισσότερο εκτεθειμένο στις αρνητικές συνέπειες της ηχορύπανσης σε σχέση με άλλες ηλικιακές ομάδες.

Ηλικιωμένοι: Οι ηλικιωμένοι είναι μια ακόμη ομάδα υψηλού κινδύνου [62, 67]. Η ήδη μειωμένη ακουστική ικανότητα λόγω ηλικίας επιδεινώνεται από την έκθεση σε θόρυβο, οδηγώντας σε περαιτέρω βαρηκοΐα και προβλήματα επικοινωνίας. Η διαταραχή του ύπνου, που προκαλείται από τον θόρυβο, επηρεάζει ιδιαίτερα τους ηλικιωμένους, καθώς συνδέεται με αυξημένο κίνδυνο καρδιαγγειακών και ψυχικών νοσημάτων [67].

Κάτοικοι χαμηλού εισοδήματος κοντά σε θορυβώδεις περιοχές: Οι κάτοικοι περιοχών χαμηλού εισοδήματος είναι δυσανάλογα εκτεθειμένοι στην ηχορύπανση, καθώς συχνά ζουν κοντά σε μεγάλους οδικούς άξονες, βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή αεροδρόμια. Η έλλειψη κατάλληλης ηχομόνωσης στις κατοικίες αυξάνει περαιτέρω την έκθεση. Αυτό το κοινωνικό-οικονομικό χάσμα έχει ως αποτέλεσμα οι πληθυσμοί αυτοί να υφίστανται εντονότερες επιπτώσεις στην υγεία, όπως υπέρταση, διαταραχές ύπνου και χαμηλότερη ποιότητα ζωής. Έτσι, η ηχορύπανση λειτουργεί και ως παράγοντας περιβαλλοντικής ανισότητας [62].

5.4 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα της Ηχορύπανσης

Η ηχορύπανση έχει παράλληλα σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές προεκτάσεις. Σύμφωνα με τον *ΠΟΥ*, η ηχορύπανση έχει πλέον κλιμακωθεί ώστε να θεωρείται η τρίτη πιο επικίνδυνη μορφή περιβαλλοντικής ρύπανσης, μετά την ατμοσφαιρική και την υδάτινη [66]. Η σοβαρότητα του φαινομένου αποτυπώνεται και ποσοτικά, καθώς εκτιμάται ότι η έκθεση σε περιβαλλοντικό θόρυβο αφορά περίπου 22 εκατομμύρια άτομα στην Ευρώπη [71], οδηγώντας ετησίως στην απώλεια περισσότερων από 1,5 εκατομμυρίων ετών υγιούς ζωής μόνο στη Δυτική Ευρώπη, εξαιτίας καρδιαγγειακών νοσημάτων, διαταραχών ύπνου, εμβοών, γνωστικών δυσλειτουργιών και ενοχλήσεων [68].

Ο θόρυβος από την κυκλοφορία αποτελεί την κυρίαρχη πηγή περιβαλλοντικού θορύβου, με περίπου 125 εκατομμύρια Ευρωπαίους να επηρεάζονται, οδηγώντας σε 900.000 περιπτώσεις υπέρτασης, 43.000 νοσηλείες και πάνω από 10.000 πρόωρους θανάτους ετησίως από στεφανιαία νόσο και εγκεφαλικά επεισόδια. Οι επιπτώσεις αυτές μεταφράζονται σε τεράστια οικονομική επιβάρυνση: μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το κόστος της ηχορύπανσης εκτιμάται ότι αγγίζει τα 40 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών υγειονομικής περίθαλψης. Επιπλέον, η ηχορύπανση έχει και άμεση επίπτωση στην οικονομία μέσω της μείωσης της αξίας των ακινήτων σε θορυβώδεις περιοχές. Μια εκτίμηση για την Ελβετία υπολόγισε τις απώλειες σε περίπου 1.050 εκατομμύρια ελβετικά φράγκα μέσα σε ένα έτος λόγω μείωσης των τιμών κατοικίας [76].

Συνοψίζοντας, η ηχορύπανση συνιστά έναν από τους πιο ύπουλους περιβαλλοντικούς κινδύνους της σύγχρονης εποχής. Οι κοινωνικές και οικονομικές της επιπτώσεις ξεπερνούν κατά πολύ το ατομικό επίπεδο υγείας, επηρεάζοντας τη δημόσια υγεία, την ποιότητα ζωής, την κοινωνική συνοχή αλλά και την οικονομική ανάπτυξη. Από τα χαμένα έτη υγιούς ζωής και τα καρδιαγγειακά νοσήματα, έως την υποβάθμιση της αξίας των ακινήτων και το δισεκατομμυρίων ευρώ κοινωνικό κόστος, η ηχορύπανση αποδεικνύεται ότι αποτελεί πρόβλημα με πολλαπλές διαστάσεις. Η αντιμετώπισή της απαιτεί συντονισμένη δράση, προκειμένου να περιοριστούν οι επιπτώσεις της και να διασφαλιστεί μια καλύτερη ποιότητα ζωής στις σύγχρονες πόλεις.

6. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΑΣΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ

6.1 Ορισμός, Εξέλιξη και Σημασία της Αστική Θερμικής Νησίδας

Το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας (Urban Heat Island - UHI) θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του 21ου αιώνα [77]. Περιγράφει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αστικού κέντρου και των γειτονικών αγροτικών ή ημιαστικών περιοχών, με τις πόλεις να εμφανίζουν συστηματικά υψηλότερες θερμοκρασίες. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφοροποίηση οφείλεται σε ένα σύνολο παραγόντων που μεταβάλλουν το ενεργειακό ισοζύγιο της πόλης [77-81].

Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μικροκλιματικά φαινόμενα, άρρηκτα συνδεδεμένο με την αστικοποίηση καθώς η ραγδαία αστική ανάπτυξη συνιστά έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες για τη δημιουργία και την ενίσχυσή της [82]. Ακόμα, η αύξηση του πληθυσμού που συγκεντρώνεται σε πόλεις, η άνοδος της πυκνότητας του δομημένου περιβάλλοντος και οι μεταβολές που επιφέρει η ανθρώπινη δραστηριότητα στο τοπικό περιβάλλον έχουν συμβάλει καθοριστικά στην αύξηση των θερμοκρασιών στα αστικά κέντρα [82].

Η μελέτη των διαφορών μεταξύ αστικού και περιφερειακού κλίματος ξεκίνησε ήδη από τον 19ο αιώνα, με το κλασικό έργο του Howard (1833) που περιέγραψε το θερμότερο κλίμα του Λονδίνου σε σχέση με την ύπαιθρο. Το ενδιαφέρον για την αστική κλιματολογία αυξήθηκε σταδιακά από τη δεκαετία του 1920 και εντάθηκε στις δεκαετίες 1930-1960, κυρίως στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο και ιδιαίτερα από τη δεκαετία του 1970, η επιστημονική έρευνα γνώρισε εκθετική ανάπτυξη, αποκτώντας πιο ποσοτικό και θεωρητικό χαρακτήρα [83]. Οι παρατηρήσεις εκείνης της περιόδου ανέδειξαν ότι οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ κέντρων πόλεων και περιφερειακών περιοχών δεν αποτελούν μεμονωμένη ιδιαιτερότητα, αλλά συνιστούν ένα καθολικό χαρακτηριστικό που συναντάται σε πλήθος μητροπολιτικών περιοχών διεθνώς.

Η εξέλιξη της μελέτης της αστικής θερμικής νησίδας ανέδειξε σταδιακά την πολυπλοκότητα του φαινομένου και την εξάρτησή του από πλήθος φυσικών και ανθρωπογενών παραμέτρων. Η διαφοροποίηση θερμοκρασίας μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών δεν αποτελεί απλώς μια στατιστική παρατήρηση, αλλά το αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων που συνδέονται με τον τρόπο δόμησης, τις χρήσεις γης, την ένταση της ανθρώπινης δραστηριότητας και τις μικροκλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής. Για τον λόγο αυτό, η κατανόηση των αιτίων που οδηγούν στη δημιουργία και ενίσχυση της UHI είναι απαραίτητη, καθώς προσφέρει τη βάση για την ερμηνεία των επιπτώσεών της αλλά και για τον σχεδιασμό στρατηγικών μετριασμού του φαινομένου.

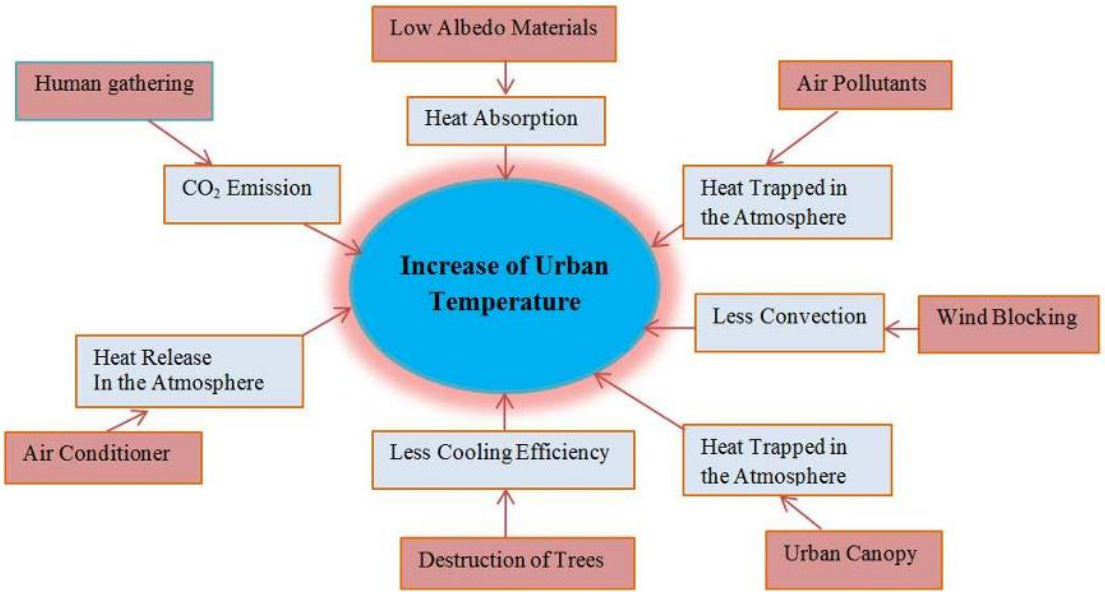
6.2 Αίτια Δημιουργίας της UHI

Η δημιουργία της αστικής θερμικής νησίδας οφείλεται σε έναν συνδυασμό φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων, οι οποίοι τροποποιούν την ενεργειακή ισορροπία του αστικού μικροκλίματος. Οι κυριότεροι παράγοντες είναι οι εξής:

1. **Μείωση φυσικής βλάστησης:** Η αποψίλωση δέντρων και η μείωση της ποιότητας των φυσικών χώρων στο πλαίσιο της αστικής ανάπτυξης μειώνουν δραστικά την εξάτμιση και διαπνοή,

διαδικασίες που συμβάλλουν στη φυσική ψύξη του περιβάλλοντος [78, 79, 82]. Η έλλειψη βλάστησης οδηγεί σε μικρότερη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα [79] και σε περιορισμό της σκίασης [78], με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στις πυκνοκατοικημένες περιοχές.

2. **Χρήση υλικών με χαμηλό αλμπέντο:** Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην αστική δόμηση, όπως το σκυρόδεμα και η άσφαλτος, χαρακτηρίζονται από χαμηλό αλμπέντο και υψηλή θερμοχωρητικότητα. Αυτό σημαίνει ότι απορροφούν μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας την ημέρα και επανεκπέμπουν θερμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας [77, 79, 80, 84]. Αυτή η διαδικασία αποτελεί βασικό μηχανισμό ενίσχυσης της UHI. Μελέτες δείχνουν ότι η εκτεταμένη χρήση τέτοιων υλικών μπορεί να οδηγήσει σε τοπικές αυξήσεις θερμοκρασίας της τάξης αρκετών βαθμών Κελσίου [82].
3. **Πυκνότητα και μορφολογία κτιρίων:** Η πυκνή δόμηση και η κατακόρυφη ανάπτυξη των πόλεων συμβάλλουν στον εγκλωβισμό θερμότητας μέσω του λεγόμενου «αστικού θόλου». Τα κτίρια αντανακλούν και παγιδεύουν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η διάταξή τους περιορίζει την κυκλοφορία του αέρα, μειώνοντας τον φυσικό αερισμό και τον δροσισμό μέσω μεταφοράς. Η μείωση της ταχύτητας του ανέμου στις αστικές χαράδρες ενισχύει περαιτέρω την κατακράτηση θερμότητας [77-79].
4. **Ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας:** Η κυκλοφορία και ο πολλαπλασιασμός των οχημάτων [21, 22], οι βιομηχανικές δραστηριότητες και η εκτεταμένη χρήση κλιματιστικών συμβάλλουν σημαντικά στην εκπομπή θερμότητας στο αστικό περιβάλλον [78]. Ειδικά τα κλιματιστικά, ενώ μειώνουν τη θερμοκρασία στο εσωτερικό των κτιρίων, αποβάλλουν θερμότητα στο εξωτερικό περιβάλλον, εντείνοντας το φαινόμενο [82]. Η συγκέντρωση μεγάλου αριθμού κατοίκων και δραστηριοτήτων στις πόλεις λειτουργεί ως πρόσθετη πηγή θερμικού φορτίου [77, 79].
5. **Ατμοσφαιρική ρύπανση και κατακράτηση θερμότητας:** Η αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση, συμβάλλει στην παγίδευση της ηλιακής ακτινοβολίας και στη μείωση της ακτινοβολιακής απώλειας κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η κατακράτηση θερμότητας από αιωρούμενα σωματίδια και αέρια ρύπανσης ενισχύει τον σχηματισμό της UHI, ειδικά στα κέντρα των μεγαλουπόλεων [77, 79].



Σχήμα 9: *Διαδικασία δημιουργίας του φαινομένου Αστικής Θερμικής Νησίδας [79]*

Η UHI δεν αποτελεί απλώς ένα θεωρητικό μικροκλιματικό ζήτημα, αλλά ένα πολυδιάστατο φαινόμενο με άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις που αγγίζουν κρίσιμους τομείς της αστικής ζωής. Η επίμονη αύξηση της θερμοκρασίας στα αστικά κέντρα δεν επιβαρύνει μόνο την ανθρώπινη υγεία, αλλά επηρεάζει και την ενεργειακή κατανάλωση, αυξάνοντας τις ανάγκες για ψύξη και συνεπώς το οικονομικό κόστος για νοικοκυριά και πόλεις. Παράλληλα, η επιδείνωση της ποιότητας του αέρα μέσω της συγκέντρωσης ρύπων και της ενίσχυσης των φωτοχημικών αντιδράσεων καθιστά το περιβάλλον λιγότερο βιώσιμο, ενώ σε μεγαλύτερη κλίμακα, το φαινόμενο αλληλεπιδρά με την κλιματική αλλαγή, ενισχύοντας τα θερμικά φορτία και μεταβάλλοντας το τοπικό αλλά και το παγκόσμιο κλίμα. Έτσι, η UHI συνιστά μια πρόκληση που υπερβαίνει τα στενά όρια της κλιματολογίας, αγγίζοντας ζητήματα κοινωνικής δικαιοσύνης, οικονομικής βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής σταθερότητας.

6.3 Επιπτώσεις της Αστικής Θερμικής Νησίδας

6.3.1 Στην Ανθρώπινη Υγεία

Θερμικό stress και θνησιμότητα: Η αυξημένη θερμοκρασία στο αστικό περιβάλλον οδηγεί σε έντονο θερμικό stress, το οποίο επηρεάζει άμεσα την ανθρώπινη υγεία. Ιδιαίτερα ευάλωτες ομάδες είναι οι ηλικιωμένοι, τα άτομα με χρόνιες παθήσεις και οι κοινωνικοοικονομικά μειονεκτούσες ομάδες [82, 84]. Η ένταση της UHI ενισχύει τα επίπεδα θνησιμότητας κατά τη διάρκεια καυσώνων, καθώς τα υψηλά θερμικά φορτία υπερβαίνουν τις φυσιολογικές δυνατότητες θερμορύθμισης του ανθρώπινου οργανισμού [83-85].

Καρδιαγγειακά και αναπνευστικά προβλήματα: Η παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες επιβαρύνει σοβαρά το καρδιαγγειακό και το αναπνευστικό σύστημα [86-90]. Μελέτες δείχνουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συνδέεται με άνοδο των περιστατικών υπέρτασης [91], εμφραγμάτων [86], εγκεφαλικών επεισοδίων [92] και αναπνευστικών δυσλειτουργιών [88].

Ευάλωτες πληθυσμιακές ομάδες: Πέρα από τους ηλικιωμένους και τα άτομα με υποκείμενες παθήσεις, ιδιαίτερα εκτεθειμένα είναι τα παιδιά και τα βρέφη, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα αφυδάτωσης, ηλεκτρολυτικών διαταραχών και νεφρικής δυσλειτουργίας κατά τη διάρκεια καυσώνων. Επίσης, έχει καταγραφεί αυξημένος κίνδυνος πρόωρου τοκετού και χαμηλού βάρους γέννησης σε εγκύους που εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, με συνέπειες στην υγεία του νεογνού [93].

Νυχτερινές θερμοκρασίες και ανάκαμψη του οργανισμού: Οι υψηλές νυχτερινές θερμοκρασίες, χαρακτηριστικό στοιχείο της UHI, δεν επιτρέπουν στον οργανισμό να αποφορτιστεί θερμικά κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το γεγονός αυτό συνδέεται με αυξημένη θνησιμότητα, καθώς ο οργανισμός παραμένει συνεχώς σε κατάσταση θερμικής καταπόνησης [84, 94].

Γνωστικές και ψυχολογικές επιπτώσεις: Η παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες δεν περιορίζεται μόνο σε σωματικές επιβαρύνσεις. Σύγχρονες έρευνες δείχνουν ότι μπορεί να επηρεάσει την ψυχική υγεία μέσω φυσιολογικών μεταβολών, όπως η μεταβολή της αιματικής ροής και η διατάραξη των επιπέδων νευροδιαβιβαστών, όπως η σεροτονίνη. Παράλληλα, η θερμική καταπόνηση ενδέχεται

να επιδρά αρνητικά στη γνωστική λειτουργία, ενώ συνδέεται με κοινωνικές συνέπειες όπως αυξημένη επιθετικότητα, άγχος που απορρέει από μειωμένες οικονομικές αποδόσεις, καθώς και αύξηση της κατανάλωσης αλκοόλ [94].

6.3.2 Στην Ενεργειακή Κατανάλωση

Αυξημένη ζήτηση για ψύξη: Η σημαντικότερη επίπτωση της UHI στην ενεργειακή κατανάλωση είναι η αύξηση της ζήτησης για ψύξη, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες [80, 83]. Έχει διαπιστωθεί ότι για κάθε άνοδο της θερμοκρασίας κατά 1°C, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται κατά 2-4% [79, 82]. Σε θερμές περιόδους, αυτό οδηγεί σε μαζικές καταναλώσεις που επιβαρύνουν τα δίκτυα ηλεκτροδότησης και αυξάνουν το κόστος για νοικοκυριά και επιχειρήσεις.

Εποχικές διαφοροποιήσεις: Αν και η UHI αυξάνει σημαντικά τη χρήση κλιματιστικών το καλοκαίρι, μειώνει μερικώς τις ανάγκες θέρμανσης τον χειμώνα [79]. Για παράδειγμα, σε μελέτη στο Τέξας, καταγράφηκε αύξηση 6% στη θερινή κατανάλωση για ψύξη, αλλά και μείωση 16% στη χειμερινή κατανάλωση για θέρμανση, με αποτέλεσμα μια οριακή συνολική μείωση κατά 1% [80]. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις οι θερινές αυξήσεις υπερκαλύπτουν τα χειμερινά οφέλη.

6.3.3 Στην Ποιότητα Αέρα και τις Εκπομπές Ρύπων

Σχηματισμός όζοντος και φωτοχημικού νέφους: Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της αστικής θερμικής νησίδας ενισχύει τις φωτοχημικές αντιδράσεις, άρα και το φωτοχημικό νέφος. Έχει βρεθεί ότι για κάθε αύξηση 1°C πάνω από τους 22°C, τα περιστατικά εμφάνισης νέφους αυξάνονται κατά περίπου 5% [80].

Αύξηση εκπομπών από την ενεργειακή κατανάλωση: Η μεγαλύτερη χρήση κλιματιστικών και η αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας εντείνουν την καύση ορυκτών καυσίμων, αυξάνοντας τις εκπομπές CO_2 και άλλων αερίων του θερμοκηπίου [79, 80, 82].

6.3.4 Στο Τοπικό και Παγκόσμιο Κλίμα

Τοπικές κλιματικές επιδράσεις: Η UHI μεταβάλλει το τοπικό μικροκλίμα αυξάνοντας τις θερμοκρασίες αέρα και επιφανειών στις πόλεις σε σχέση με τις αγροτικές περιοχές. Αυτό οδηγεί σε διαφοροποιήσεις στις εξατμισοδιαπνοή, και έπειτα στην βροχόπτωση, στη ροή ανέμων και στην κατανομή της υγρασίας [77-79]. Έχει παρατηρηθεί ότι σε συνθήκες χαμηλού ανέμου και μικρής νέφωσης η ένταση της UHI αυξάνεται, καθώς παγιδεύεται περισσότερη θερμότητα στο αστικό περιβάλλον [77, 81].

Επιπτώσεις σε παγκόσμια κλιματικά δεδομένα: Η ύπαρξη της UHI δημιουργεί προκλήσεις και στην ανάλυση των μακροχρόνιων κλιματικών τάσεων, καθώς τα αρχειακά δεδομένα θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της παγκόσμιας θέρμανσης επηρεάζονται από τις αστικές

επιδράσεις [83]. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της αύξησης θερμοκρασίας σε ορισμένα σημεία, αν δεν ληφθεί υπόψη η τοπική συμβολή της UHI.

Αλληλεπίδραση με κλιματική αλλαγή: Παρότι η UHI δεν αποτελεί αιτία της κλιματικής αλλαγής, εντείνει τα αποτελέσματά της. Η αύξηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως του CO_2, οδηγεί σε γενική άνοδο της θερμοκρασίας, η οποία είναι ισχυρότερη στις πόλεις λόγω του φαινομένου της UHI [78]. Μελέτες δείχνουν ότι η συνδυασμένη επίδραση αστικοποίησης και κλιματικής αλλαγής οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες από ό,τι αν ληφθεί υπόψη μόνο ένας από τους δύο παράγοντες. Για παράδειγμα, στο Πεκίνο η αστικοποίηση συνέβαλε κατά 13-17% στην προβλεπόμενη αύξηση θερμοκρασίας έως το 2050, ενώ το σενάριο RCP 8.5 της IPCC ήταν υπεύθυνο για πάνω από 80% της ανόδου [81].

Μακροπρόθεσμες προβολές: Σενάρια για το μέλλον δείχνουν ότι η συνεργασία αστικοποίησης και κλιματικής αλλαγής θα εντείνει το θερμικό stress σε παγκόσμια κλίμακα, ιδιαίτερα σε χώρες με ταχέως αυξανόμενο πληθυσμό και περιορισμένη δυνατότητα προσαρμογής, όπως στην Αφρική και την Ασία [81].

6.4 Συμπεράσματα

Το φαινόμενο της UHI συνιστά ένα από τα πιο σύνθετα και κρίσιμα μικροκλιματικά φαινόμενα του αστικού περιβάλλοντος. Η ανάλυση του κεφαλαίου ανέδειξε ότι η UHI είναι προϊόν της αλληλεπίδρασης φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων, με καθοριστικό ρόλο να παίζουν η μείωση της φυσικής βλάστησης, η εκτεταμένη χρήση υλικών χαμηλού αλμπέντο, η πυκνή δόμηση και οι ανθρωπογενείς εκπομπές θερμότητας. Τα αίτια αυτά, σε συνδυασμό με τις ιδιαίτερες τοπικές κλιματικές συνθήκες, συμβάλλουν στην αύξηση των θερμοκρασιών στα αστικά κέντρα και στη διαφοροποίησή τους από τις γειτονικές αγροτικές ή ημιαστικές περιοχές.

Οι επιπτώσεις της UHI είναι πολυδιάστατες, επηρεάζοντας την υγεία, την ενεργειακή κατανάλωση, την ποιότητα του αέρα αλλά και το τοπικό κλίμα. Σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, το φαινόμενο ενισχύει τα θερμικά φορτία στις πόλεις και επιβαρύνει περαιτέρω το αστικό περιβάλλον και την ποιότητα ζωής των κατοίκων.

Συνολικά, η UHI αποτελεί μια πρόκληση που υπερβαίνει τα όρια της κλασικής περιβαλλοντικής διαχείρισης και συνδέεται άμεσα με την κοινωνική δικαιοσύνη, την οικονομική βιωσιμότητα και τη δημόσια υγεία. Το αποτύπωμα της αποδεικνύει ότι δεν επηρεάζει όλους τους κατοίκους με τον ίδιο τρόπο, αλλά επιβαρύνει περισσότερο τις ευάλωτες ομάδες και τις φτωχότερες κοινότητες.

Η κατανόηση του φαινομένου είναι κρίσιμη στο πλαίσιο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, καθώς η αστικοποίηση λειτουργεί πολλαπλασιαστικά στην ήδη αυξανόμενη θερμοκρασία του πλανήτη. Επομένως, η UHI πρέπει να εξετάζεται όχι μόνο ως μεμονωμένο μικροκλιματικό φαινόμενο, αλλά ως μέρος ενός ευρύτερου συστήματος που συνδέει την αστική ανάπτυξη, την κλιματική αλλαγή και τις γενικότερες θερμοκρασιακές μεταβολές. Η σύνδεση αυτή καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση μέτρων προσαρμογής και μετριασμού, ώστε οι πόλεις να παραμείνουν βιώσιμες και ανθεκτικές στις μελλοντικές θερμικές προκλήσεις.

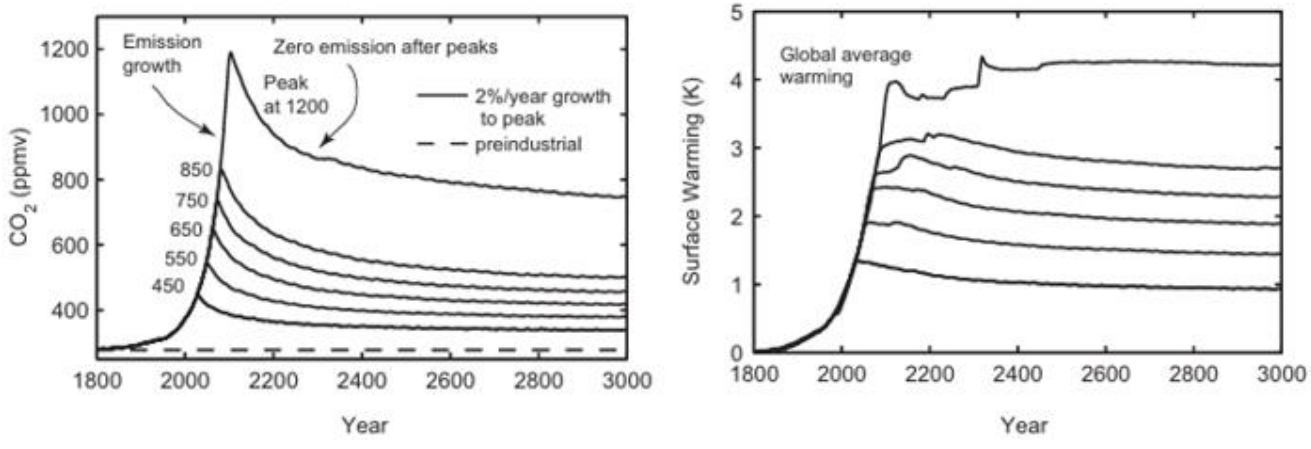
7. ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΆΝΘΡΑΚΑ

7.1 Το CO_2 ως Δείκτης και Ρυθμιστής του Παγκόσμιου Κλίματος

Η ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου επικεντρώθηκε στο φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας, το οποίο αναδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο η αστικοποίηση και η συγκέντρωση ανθρωπογενών δραστηριοτήτων επηρεάζουν το μικροκλίμα των πόλεων. Η συσσώρευση ανθρώπινων δραστηριοτήτων στις πόλεις, πέρα από τις άμεσες θερμοκρασιακές μεταβολές, συμβάλλει και στην αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, διαμορφώνοντας έναν κρίσιμο δεσμό ανάμεσα στο αστικό περιβάλλον και στις παγκόσμιες κλιματικές διεργασίες. Αυτοί οι παράγοντες, πέρα από τοπικές επιπτώσεις, συμβάλλουν στη γενικότερη διατάραξη του κλιματικού συστήματος, καθιστώντας την αστικοποίηση έναν από τους βασικούς επιταχυντές της κλιματικής αλλαγής. Επομένως, η μετάβαση από το επίπεδο του μικροκλίματος στο παγκόσμιο κλίμα καθίσταται αναγκαία για την κατανόηση του πλήρους φάσματος των επιπτώσεων. Η αστικοποίηση δεν ενισχύει μόνο την αποθήκευση θερμότητας, αλλά αποτελεί και σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με κυριότερο το διοξείδιο του άνθρακα (Carbon Dioxide - CO_2).

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα πολυδιάστατο φαινόμενο με παγκόσμια εμβέλεια, το οποίο συνδέεται με ένα σύνολο αλληλεπιδρώντων μηχανισμών που επηρεάζουν τόσο το φυσικό περιβάλλον όσο και την κοινωνικοοικονομική δραστηριότητα. Η μεταβολή της θερμοκρασίας, η αποσταθεροποίηση της ατμοσφαιρικής σύνθεσης, η ενίσχυση ακραίων καιρικών φαινομένων και οι επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου και στα οικοσυστήματα συνιστούν ορισμένες μόνο από τις εκφάνσεις αυτού του φαινομένου.

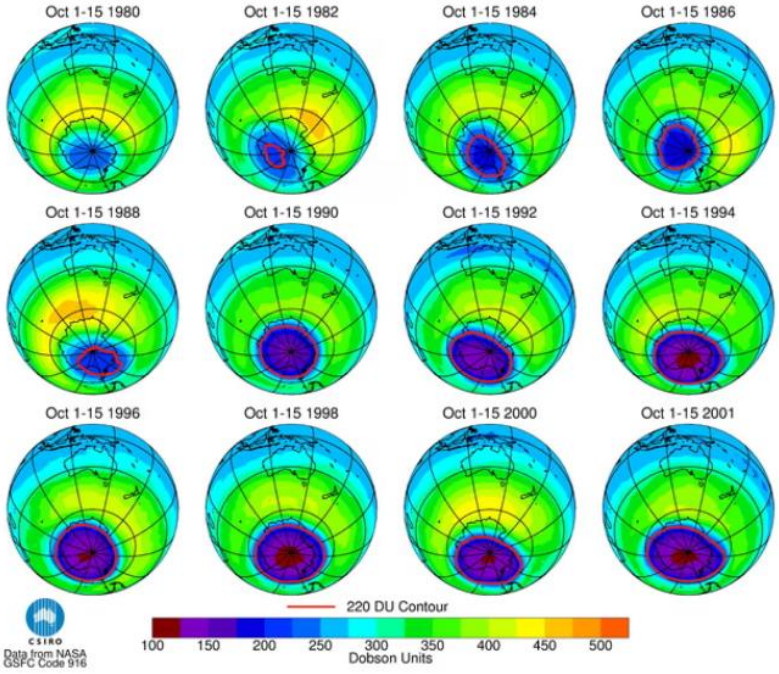
Στην καρδιά της κλιματικής αλλαγής βρίσκεται το CO_2, το οποίο αναγνωρίζεται ως ο σημαντικότερος ανθρωπογενής παράγοντας επιρροής του κλιματικού συστήματος. Το CO_2 αποτελεί το κύριο αέριο του θερμοκηπίου που παράγεται από ανθρώπινες δραστηριότητες, με ιδιαίτερα μεγάλη



Σχήμα 10: *Προβολή των συγκεντρώσεων CO_2 και της αντίστοιχης αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας επιφάνειας κατά την επόμενη χιλιετία. Στο αριστερό γράφημα παρουσιάζεται η προβλεπόμενη εξέλιξη των επιπέδων CO_2 (σε ppm) υπό σενάρια αύξησης εκπομπών κατά 2% ετησίως έως την κορύφωση και πλήρους μηδενισμού εκπομπών μετά από αυτήν. Στο δεξί γράφημα αποτυπώνεται η αντίστοιχη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης (σε Kelvin). Τα δεδομένα δείχνουν ότι, ακόμη και μετά τη διακοπή των εκπομπών, η παγκόσμια θερμοκρασία παραμένει αυξημένη για αιώνες, γεγονός που υποδηλώνει τη μακροχρόνια επίδραση του CO_2 στο κλιματικό σύστημα και την αδράνεια του πλανήτη απέναντι στις αλλαγές των εκπομπών [115]*

διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα - εκτεινόμενη σε εκατοντάδες έτη. Η ιδιότητα αυτή το καθιστά κρίσιμο δείκτη για την παρακολούθηση και κατανόηση της εξέλιξης της κλιματικής αλλαγής.

Η αυξημένη συγκέντρωση του CO_2 συνδέεται με μια σειρά από κρίσιμες επιδράσεις. Συμβάλλει στην άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, ενώ επηρεάζει τη σταθερότητα της στιβάδας του όζοντος, γεγονός που διευκολύνει τη διέλευση της υπεριώδους ακτινοβολίας και ενισχύει τις επιβλαβείς συνέπειές της στην ανθρώπινη υγεία. Παράλληλα, το CO_2 επιδρά στους κύκλους υγρασίας και βαρομετρικής πίεσης, ενώ έχει συσχετιστεί και με την ενίσχυση καταστροφικών φυσικών διεργασιών, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται και οι σεισμοί.



***Σχήμα 11**: Εξέλιξη της τρύπας του όζοντος πάνω από την Ανταρκτική την περίοδο 1980–2001 [240]*

Με βάση τα παραπάνω, το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται αποκλειστικά στο διοξείδιο του άνθρακα. Εξετάζεται αρχικά η ιστορική του πορεία και η εξέλιξη των συγκεντρώσεών του στην ατμόσφαιρα, από τις πρώιμες γεωλογικές περιόδους έως τη σύγχρονη εποχή, καθώς και οι πηγές και οι μηχανισμοί εκπομπής του. Στη συνέχεια, αναλύονται οι σύγχρονες τάσεις συγκέντρωσής του, όπως και οι περιβαλλοντικές, υγειονομικές και κοινωνικοοικονομικές συνέπειες της αυξημένης παρουσίας του στην ατμόσφαιρα. Βάση των παραπάνω, τα επόμενα κεφάλαια θα αναλύσουν άλλες παραμέτρους που επηρεάζει σημαντικά η κλιματική αλλαγή, όπως η θερμοκρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία, η υγρασία, η βαρομετρική πίεση και τα καταστροφικά φαινόμενα με έμφαση στους σεισμούς, με στόχο την ολοκληρωμένη παρουσίαση του φαινομένου.

7.2 Ιστορική Πορεία του Διοξειδίου του Άνθρακα στην Ατμόσφαιρα [104]

Το διοξείδιο του άνθρακα συνιστά έναν από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες διαμόρφωσης της ατμόσφαιρας και της εξέλιξης του κλίματος της Γης. Η παρουσία του στην ατμόσφαιρα ανάγεται στις πρώιμες γεωλογικές περιόδους, όταν η επιφάνεια του πλανήτη ψυχόταν και η εκτεταμένη ηφαιστειακή

δραστηριότητα απελευθέρωνε τεράστιες ποσότητες CO_2, υδρατμών, αμμωνίας και μεθανίου. Η συγκέντρωση του CO_2 στα αρχικά αυτά στάδια ήταν εξαιρετικά υψηλή, καθιστώντας το κυρίαρχο ατμοσφαιρικό συστατικό.

Με την εμφάνιση των πρώτων μορφών ζωής, και ιδίως μέσω της φωτοσύνθεσης, άρχισε σταδιακά η δέσμευση του CO_2 και η απελευθέρωση οξυγόνου (O_2) στην ατμόσφαιρα. Η διαδικασία αυτή οδήγησε σε δραστική μείωση της συγκέντρωσης του CO_2 και στην ταυτόχρονη αύξηση του O_2, γεγονός που ευνόησε τον σχηματισμό της στιβάδας του όζοντος. Η δημιουργία αυτής της προστατευτικής ασπίδας επέτρεψε τη μείωση της υπεριώδους ακτινοβολίας που έφθανε στην επιφάνεια της Γης και άνοιξε τον δρόμο για την ανάπτυξη πιο σύνθετων μορφών ζωής, αρχικά στις θάλασσες και στη συνέχεια στην ξηρά.

Κατά τη διάρκεια εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών, οι οργανικές ύλες που θάβονταν κάτω από γεωλογικά στρώματα, υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, μετατράπηκαν μέσω αναερόβιων διεργασιών σε ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας και οι υδρογονάνθρακες. Παράλληλα, σημαντικές ποσότητες CO_2 παγιδεύτηκαν στον λιθόσφαιρα υπό τη μορφή ανθρακικών πετρωμάτων, που αποτελούν το μεγαλύτερο αποθετήριο άνθρακα στον πλανήτη. Το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού αποθέματος άνθρακα της Γης βρίσκεται σε ανόργανες μορφές, ενώ μικρότερο μερίδιο καταλαμβάνουν οι οργανικές μορφές άνθρακα στη βιόσφαιρα και στο έδαφος.

Με την πάροδο των γεωλογικών περιόδων, η συγκέντρωση του CO_2 στην ατμόσφαιρα σταθεροποιήθηκε περίπου στο 0,02-0,03% και παρουσίαζε διακυμάνσεις εντός αυτού του εύρους για περίπου μισό εκατομμύριο χρόνια. Αυτές οι μεταβολές συσχετίστηκαν με τις μεγάλες κλιματικές διακυμάνσεις, όπως οι παγετωνικές και θερμές περίοδοι, επιβεβαιώνοντας τη στενή σχέση του CO_2 με τη θερμοκρασιακή ισορροπία του πλανήτη.

Η ιστορική αυτή πορεία διαφοροποιήθηκε ριζικά με την έλευση του ανθρώπινου παράγοντα. Η καύση βιομάζας υπήρξε η πρώτη ενεργειακή αξιοποίηση άνθρακα από τον άνθρωπο, η οποία σταδιακά εξελίχθηκε σε πιο αποδοτικές μορφές, όπως η χρήση του ξυλοκάρβουνου. Ωστόσο, η πραγματική τομή ήρθε με τη βιομηχανική επανάσταση, όταν ο άνθρακας αναδείχθηκε στο κατεξοχήν καύσιμο που τροφοδότησε τις τεχνολογικές και οικονομικές αλλαγές της εποχής, μέσω της ανάπτυξης της ατμομηχανής και αργότερα της παραγωγής ηλεκτρισμού.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, το πετρέλαιο κατέλαβε τη θέση του κυρίαρχου καυσίμου, χάρη στην υψηλή ενεργειακή του πυκνότητα και την ευκολία μεταφοράς και επεξεργασίας, ενώ αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των μηχανών εσωτερικής καύσης και την εκρηκτική άνοδο των μεταφορών. Σήμερα, η ευρεία χρήση ορυκτών καυσίμων (άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου) αποτελεί την κύρια αιτία της δραματικής αύξησης των συγκεντρώσεων CO_2 στην ατμόσφαιρα, με επιπτώσεις που ξεπερνούν κατά πολύ τις φυσικές διακυμάνσεις των γεωλογικών περιόδων.

Η ιστορική διαδρομή του διοξειδίου του άνθρακα, από κυρίαρχο στοιχείο της πρώιμης ατμόσφαιρας έως ρυθμιστή της σύγχρονης κλιματικής ισορροπίας, καταδεικνύει τη διπλή του φύση: αφενός θεμέλιο της ζωής και της ενεργειακής ανάπτυξης, αφετέρου κύριο παράγοντα της κλιματικής αποσταθεροποίησης.

7.3 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το CO_2 αποτελεί το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου που συνδέεται με την κλιματική αλλαγή. Η ιδιαιτερότητά του έγκειται στο γεγονός ότι απορροφά και επανεκπέμπει την υπέρυθρη ακτινοβολία, συμβάλλοντας στον εγκλωβισμό θερμότητας στην ατμόσφαιρα και δημιουργώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου [105]. Χάρη σε αυτήν την ιδιότητα, το CO_2 είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που εξηγούν τη διαφορά μεταξύ της θεωρητικής θερμοκρασίας ισορροπίας της Γης (περίπου -19 °C) και της πραγματικής μέσης θερμοκρασίας επιφάνειας (περίπου +14 °C). Η διαφορά αυτή, περίπου 33 °C, αποδίδεται στην παρουσία αερίων του θερμοκηπίου που παγιδεύουν τη θερμότητα στην ατμόσφαιρα, με κυριότερα το CO_2 και τους υδρατμούς, και σε μικρότερο βαθμό το μεθάνιο, το όζον και το υποξείδιο του αζώτου [104].

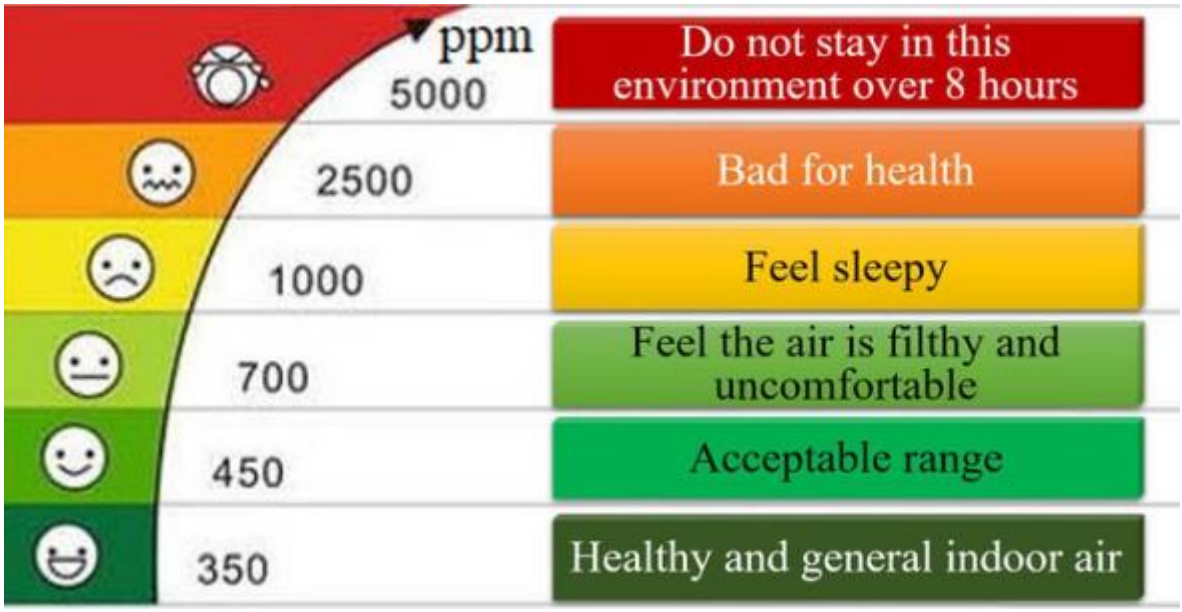
7.4 Δείκτης Συγκέντρωσης και Πηγές CO_2

Ο δείκτης συγκέντρωσης CO_2 στον αέρα εκφράζεται σε **ppm (parts per million)** και αποτελεί κρίσιμο δείκτη της ποιότητας του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα. Οι τιμές του αντικατοπτρίζουν το βαθμό ανανέωσης του αέρα και τη συγκέντρωση εκπνοών ή καύσεων σε έναν χώρο.

Η ποιοτική αξιολόγηση της συγκέντρωσης CO_2 χωρίζεται σε έξι χαρακτηριστικά επίπεδα:

- **350 ppm - Healthy and general indoor air:** Αντιπροσωπεύει καθαρή ατμόσφαιρα, παρόμοια με τον εξωτερικό αέρα. Θεωρείται ιδανικό επίπεδο για εσωτερικούς χώρους με επαρκή αερισμό.
- **450 ppm - Acceptable range:** Το CO_2 βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων. Οι συνθήκες είναι άνετες και δεν παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης ή της ευεξίας.
- **700 ppm - Feel the air is filthy and uncomfortable:** Ο αέρας αρχίζει να φαίνεται «βαρύς» και ελαφρώς δυσάρεστος, ένδειξη μειωμένου αερισμού και αυξημένης ανθρώπινης παρουσίας.
- **1000 ppm - Feel sleepy:** Οι συγκεντρώσεις CO_2 προκαλούν υπνηλία, δυσκολία συγκέντρωσης και μείωση γνωστικών επιδόσεων, ιδιαίτερα σε κλειστούς χώρους χωρίς επαρκή κυκλοφορία αέρα.
- **2500 ppm - Bad for health:** Οι υψηλές τιμές υποδεικνύουν κακή ποιότητα αέρα, που μπορεί να προκαλέσει πονοκέφαλο, ναυτία ή δυσφορία. Απαιτείται άμεση βελτίωση του αερισμού.
- **>5000 ppm - Do not stay in this environment over 8 hours:** Πολύ επικίνδυνες συγκεντρώσεις CO_2. Η παραμονή σε τέτοιο περιβάλλον για παρατεταμένο χρόνο είναι επιβλαβής για την υγεία, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υποξία ή απώλεια συνείδησης.

Συνολικά, η κλίμακα αυτή λειτουργεί ως δείκτης επάρκειας αερισμού και ανθρώπινης δραστηριότητας, προσφέροντας μια αξιόπιστη μέθοδο εκτίμησης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα και των πιθανών επιπτώσεών της στην ανθρώπινη υγεία.



Σχήμα 12: *Ενδεικτικά επίπεδα συγκέντρωσης CO_2 σε ppm και οι αντίστοιχες κατηγορίες ποιότητας αέρα [241]*

Οι συγκεντρώσεις CO_2 στην ατμόσφαιρα καθορίζονται από έναν συνδυασμό φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων.

- **Φυσικοί μηχανισμοί εκπομπής:** Στα πρώιμα στάδια της Γης, το CO_2 απελευθερώθηκε κυρίως μέσω εκτεταμένης ηφαιστειακής δραστηριότητας και της εκπομπής αερίων από το εσωτερικό του πλανήτη, μαζί με υδρατμούς, αμμωνία και μεθάνιο. Παράλληλα, οι ωκεανοί λειτουργούν ως τεράστιο αποθετήριο άνθρακα, όπου το CO_2 ανταλλάσσεται συνεχώς με την ατμόσφαιρα μέσω φυσικών διεργασιών διάλυσης και αποδέσμευσης. Σημαντική είναι επίσης η συμβολή της βιολογικής αναπνοής και της αποσύνθεσης οργανικής ύλης, που απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα πίσω στην ατμόσφαιρα [104].
- **Ανθρωπογενείς μηχανισμοί εκπομπής**: Η καύση ορυκτών καυσίμων αποτελεί τον κυριότερο ανθρωπογενή μηχανισμό εκπομπής CO_2 στην ατμόσφαιρα, απελευθερώνοντας δισεκατομμύρια τόνους ετησίως [106, 107].

  Η βιομηχανική παραγωγή, και ιδίως η παραγωγή τσιμέντου, αποτελεί επίσης μια από τις σημαντικότερες ανθρωπογενείς πηγές CO_2, καθώς η χημική διεργασία της ασβεστοποίησης απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα [106]. Παράλληλα, ο τομέας των μεταφορών, που στηρίζεται στην καύση πετρελαϊκών παραγώγων, επιδεινώνει περαιτέρω το πρόβλημα [108]. Επιπλέον, η γεωργία και η κτηνοτροφία συνεισφέρουν με έναν διπλό τρόπο: αφενός μέσω της καύσης βιομάζας και αφετέρου μέσω αλλαγών στη χρήση γης και στη διαχείριση του εδάφους, που οδηγούν στην απελευθέρωση αποθεμάτων οργανικού άνθρακα [109].

7.5 Επιπτώσεις του Αυξημένου CO_2

7.5.1 Στο Κλίμα

Η αυξημένη συγκέντρωση CO_2 στην ατμόσφαιρα ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου και οδηγεί σε άνοδο της θερμοκρασίας. Οι μέσες παγκόσμιες επιφανειακές θερμοκρασίες αυξάνονται κατά περίπου 0.13 °C ανά δεκαετία από το 1950 [110]. Αυτή η υπερθέρμανση συνδέεται άμεσα με την αύξηση της συχνότητας και της έντασης των φυσικών καταστροφών και ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως καύσωνες, ξηρασίες, καταιγίδες και πλημμύρες [104, 105, 110].

Η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει συχνότερους και εντονότερους καύσωνες, οι οποίοι ήδη προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και την οικονομία. Παράλληλα, καθώς το κλίμα γίνεται πιο απρόβλεπτο, αναμένεται να αυξηθεί ο κίνδυνος φυσικών καταστροφών, με εκατοντάδες χιλιάδες θανάτους να αποδίδονται σε αυτές τις συνθήκες ετησίως. Ενδεικτικά, η συχνότητα των πιο έντονων καταιγίδων προβλέπεται να αυξηθεί, απειλώντας ιδιαίτερα παράκτιες περιοχές και κοινότητες με χαμηλά εισοδήματα [110].

7.5.2 Στο Περιβάλλον και τα Οικοσυστήματα

Οι αλλαγές στη θερμοκρασία και στις βροχοπτώσεις έχουν σοβαρές επιπτώσεις στη γεωργία, μειώνοντας την παραγωγή βασικών καλλιεργειών. Για παράδειγμα, προβλέπεται μείωση αποδόσεων σε καλαμπόκι, σόγια και βαμβάκι έως και 30% μέχρι το τέλος του αιώνα. Επιπλέον, ξηρασίες μπορούν να μειώσουν την παγκόσμια γεωργική παραγωγή έως και 20%. Οι καλλιέργειες είναι επίσης ευάλωτες σε νέες ασθένειες και παράσιτα, των οποίων η εξάπλωση ευνοείται από τις κλιματικές μεταβολές [110].

Η βιοποικιλότητα πλήττεται σημαντικά, καθώς πολλά είδη χάνουν τους φυσικούς τους βιότοπους. Στην Ευρώπη, το 78% των ειδών πεταλούδας έχει μετακινηθεί λόγω θέρμανσης, ενώ παρόμοιες μετακινήσεις παρατηρούνται και σε φυτά και άλλα ζώα. Αυτές οι αλλαγές οδηγούν σε ανισορροπίες στα οικοσυστήματα, όπως η αναντιστοιχία μεταξύ φυτών και επικονιαστών τους, και αυξάνουν τον κίνδυνο εξαφάνισης ειδών, ιδιαίτερα αυτών με μικρή εξάπλωση ή εξειδικευμένες ανάγκες [110].

Τέλος, η αυξημένη συγκέντρωση CO_2 απορροφάται από τους ωκεανούς, προκαλώντας όξυνση, η οποία επηρεάζει σοβαρά τους θαλάσσιους οργανισμούς και επιφέρει αλυσιδωτές επιπτώσεις στην τροφική αλυσίδα και στο θαλάσσιο οικοσύστημα [104, 110].

7.5.3 Στην Ανθρώπινη Υγεία

Η αυξημένη συγκέντρωση CO_2 στην ατμόσφαιρα μπορεί να επηρεάσει άμεσα τον άνθρωπο, προκαλώντας τόσο βραχυπρόθεσμες όσο και μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία.

7.5.3.1 Οξείες Επιδράσεις

Η οξεία έκθεση σε αυξημένες συγκεντρώσεις CO_2 μπορεί να έχει άμεσες επιπτώσεις στη σωματική υγεία. Έρευνες δείχνουν ότι συγκεντρώσεις 2,000-4,000 ppm μπορούν να προκαλέσουν

φλεγμονώδεις αντιδράσεις, που οδηγούν σε αγγειακές βλάβες σε ιστούς του εγκεφάλου, των μυών και του εντέρου. Παράλληλα, έχει καταγραφεί πιθανή αύξηση της φλεγμονής στο αναπνευστικό σύστημα, με φαινόμενα όπως βρογχική φλεγμονή και ερεθισμός της ρινικής κοιλότητας [111].

Ακόμα, οι γνωστικές λειτουργίες επηρεάζονται επίσης σημαντικά. Συγκεντρώσεις CO_2 μεταξύ 1,000-3,000 ppm έχουν συσχετιστεί με μείωση της απόδοσης σε πολύπλοκα νοητικά τεστ, όπως λήψη αποφάσεων και επίλυση προβλημάτων. Επίσης, έχει βρεθεί αύξηση περιστατικών πονοκέφαλου, συμπτωμάτων του «Sick Building Syndrome» σε κτίρια με κακό αερισμό και αυξημένη απουσία μαθητών λόγω μειωμένης συγκέντρωσης [111]. Ακόμα και βραχυπρόθεσμες εκθέσεις σε επίπεδα κάτω από 5,000 ppm μπορούν να προκαλέσουν κόπωση, υπνηλία, και αίσθημα μειωμένης καθαρότητας σκέψης.

7.5.3.2 Μακροχρόνιες Επιδράσεις [111]

Η χρόνια ή επαναλαμβανόμενη έκθεση σε αυξημένα επίπεδα CO_2 (<5,000 ppm) μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βιολογικές επιδράσεις. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- **Αλλοιώσεις στο οστικό και νεφρικό σύστημα**, όπως απομετάλλωση οστών και ασβεστοποίηση νεφρών, που έχουν παρατηρηθεί σε πειραματόζωα με παρατεταμένη έκθεση σε 2,000-3,000 ppm.
- **Χρόνια, χαμηλού βαθμού αναπνευστική οξέωση**, η οποία αυξάνει το οξύ φορτίο του οργανισμού και σχετίζεται με κινδύνους για μη μεταδιδόμενα νοσήματα, όπως χρόνια νεφρική νόσος, διαβήτης τύπου 2, οστεοπόρωση και ηπατική νόσος.
- **Οξειδωτικό στρες και ενδοθηλιακή δυσλειτουργία**, που προκύπτουν από την υπερπαραγωγή ελευθέρων ριζών και μπορεί να συμβάλουν σε αγγειακές βλάβες.
- **Φυσιολογικές και ψυχολογικές επιδράσεις**, όπως αυξημένο άγχος και μειωμένο μεταβολισμό, που έχουν καταγραφεί σε μελέτες με τρωκτικά υπό συνεχή έκθεση σε 700-3,000 ppm.
- **Αλλαγές στη συμπεριφορά και το σωματικό βάρος**, με στοιχεία που συνδέουν την αυξημένη εισπνοή CO_2 με αλλαγές στη ρύθμιση της όρεξης και πιθανή συμβολή στην παχυσαρκία.

7.6 Παγκόσμιες και Τοπικές Τάσεις Εκπομπών

Οι εκπομπές CO_2 έχουν αυξηθεί δραματικά από τη Βιομηχανική Επανάσταση έως σήμερα. Το 1950 οι παγκόσμιες εκπομπές ανέρχονταν σε περίπου 6 δισεκατομμύρια τόνους CO_2, ενώ μέχρι το 1990 είχαν σχεδόν τετραπλασιαστεί, ξεπερνώντας τους 20 δισεκατομμύρια τόνους. Σήμερα, οι ετήσιες εκπομπές υπερβαίνουν τους 35 δισεκατομμύρια τόνους [107].

Αναλύοντας τις εκπομπές ανά τομέα, προκύπτει ότι η παραγωγή ενέργειας προκαλεί την μεγαλύτερη ρύπανση, με αύξηση +87% από το 1990 και +30% από το 2005. Σημαντική είναι επίσης η συνεισφορά της βιομηχανίας (+65% από το 1990), των μεταφορών (+66% από το 1990) και των λοιπών τομέων (+101% από το 1990) [112]. Συνολικά, οι παγκόσμιες εκπομπές από όλους τους τομείς αυξήθηκαν κατά +67% μεταξύ 1990-2021.

Η κατανομή των εκπομπών ανά χώρα δείχνει μεγάλες ανισότητες. Το 2022, η Κίνα ευθυνόταν για το 32,88% των παγκόσμιων εκπομπών, με 12,6 δισ. τόνους CO_2, ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες παρήγαγαν

το 12,6%. Ακολουθούν η Ινδία (6,99%), η Ρωσία (4,96%) και η Ιαπωνία (2,81%). Οι 10 μεγαλύτεροι ρυπαντές παράγουν σχεδόν το 70% του παγκόσμιου συνόλου [113].

Ιστορικά, οι εκπομπές ήταν κυρίως ευρωπαϊκό και αμερικανικό φαινόμενο. Στις αρχές του 20ού αιώνα, η Ευρώπη και οι ΗΠΑ ευθύνονταν για πάνω από το 90% των ετήσιων εκπομπών, ενώ ακόμη και το 1950 παρήγαγαν πάνω από το 85%. Σήμερα, ωστόσο, Ευρώπη και ΗΠΑ ευθύνονται για λιγότερο από το ένα τρίτο των παγκόσμιων εκπομπών, με την Ασία -και ειδικά την Κίνα- να έχει αναδειχθεί σε κύριο ρυπαντή [107].

Σημαντικό είναι επίσης το αποτύπωμα των σωρευτικών εκπομπών. Από το 1751, η ανθρωπότητα έχει εκπέμψει πάνω από 1,5 τρισεκατομμύριο τόνους CO_2. Οι ΗΠΑ έχουν ιστορικά τη μεγαλύτερη συνεισφορά με περίπου 400 δισ. τόνους, ποσοστό 1,5 φορές υψηλότερο από αυτό της Κίνας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι επίσης μεγάλος ιστορικός ρυπαντής, υπεύθυνη για περίπου το 20%. Αντίθετα, η Αφρική, λόγω χαμηλών εκπομπών ανά κάτοικο, έχει μικρότερη ιστορική συμμετοχή [107].

Η αστικοποίηση παίζει πλέον καθοριστικό ρόλο: αν και οι πόλεις καλύπτουν μονο 0.4-0.9% % της ξηράς, είναι υπεύθυνες για πάνω από το 70% των εκπομπών CO_2, καταναλώνοντας το 60-80% της παγκόσμιας ενέργειας [112, 114].

7.6.1 Προβλέψεις για το Μέλλον

Τα μελλοντικά σενάρια δείχνουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, αν οι εκπομπές συνεχίσουν να αυξάνονται κατά 2% ετησίως, οι συγκεντρώσεις CO_2 θα μπορούσαν να φτάσουν τα 450-1200 ppm μέχρι το 2100 [115]. Αντίθετα, σενάρια με περιορισμό των εκπομπών υποδεικνύουν σταθεροποίηση γύρω στα 670 ppm (RCP 6.0) ή και άνοδο μέχρι 936 ppm (RCP 8.5) [111].

Η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας (IEA) εκτιμά ότι χωρίς επιπλέον μέτρα, οι εκπομπές από άνθρακα θα φτάσουν τους 15,3 $GtCO_2$ το 2035, ενώ από πετρέλαιο τους 12,6 $GtCO_2$ την ίδια περίοδο [104]. Τα σενάρια της IPCC σε συνδυασμό με την IEA, δείχνουν ότι για να περιοριστεί η υπερθέρμανση στους 2°C, οι εκπομπές πρέπει να μειωθούν σε κάτω από 20 $GtCO_2$/έτος έως το 2050 και να γίνουν σχεδόν μηδενικές μέχρι το τέλος του αιώνα. Στον αντίποδα, αν οι εκπομπές συνεχίσουν την ανοδική πορεία τους, θα μπορούσαν να αγγίξουν τα 60 $GtCO_2$/έτος το 2050, οδηγώντας σε υπερθέρμανση περίπου 6°C [116].

8. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

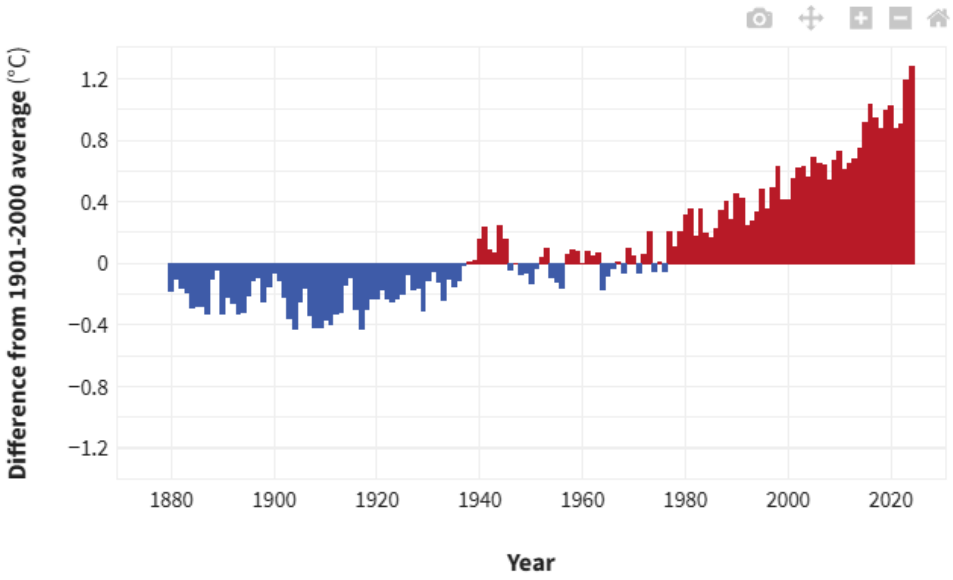
8.1 Εισαγωγή

Η αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα, όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που συμβάλλουν στη μεταβολή του παγκόσμιου ενεργειακού ισοζυγίου και στην επακόλουθη άνοδο της θερμοκρασίας του πλανήτη. Η συσσώρευση αερίων του θερμοκηπίου προκαλεί σημαντικές αλλαγές στο κλιματικό σύστημα, οδηγώντας σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης και σε μεταβολές στα πρότυπα των καιρικών φαινομένων [88, 95, 96]. Αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν όχι μόνο τα φυσικά οικοσυστήματα [110], αλλά και την ανθρώπινη υγεία [86-95, 97-101], τόσο άμεσα όσο και έμμεσα.

Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στη συχνότερη εμφάνιση ακραίων θερμικών επεισοδίων, όπως παρατεταμένοι καύσωνες ή περίοδοι έντονου ψύχους [105, 110], τα οποία αποτελούν πλέον σημαντική παράμετρο δημόσιας υγείας. Οι μεταβολές αυτές δεν περιορίζονται μόνο στην αύξηση της θερμότητας, αλλά περιλαμβάνουν και τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή μεταβλητότητα, δηλαδή τις απότομες διακυμάνσεις θερμοκρασίας σε μικρά χρονικά διαστήματα.

Οι ακραίες θερμοκρασίες, είτε υψηλές είτε χαμηλές, έχουν αποδειχθεί ότι προκαλούν αύξηση της νοσηρότητας και της θνησιμότητας [91], ιδίως μέσω καρδιοαγγειακών και αναπνευστικών μηχανισμών [86-95, 97-101]. Οι επιπτώσεις αυτές ενισχύονται από κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η πυκνότητα του πληθυσμού, οι συνθήκες στέγασης, η προσβασιμότητα σε κλιματισμό και υγειονομικές υπηρεσίες, καθώς και από την παρουσία άλλων περιβαλλοντικών πιέσεων, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση [87, 93, 101].

Για αυτούς τους λόγους, η κατανόηση των θερμοκρασιακών τάσεων και των επιπτώσεών τους στην υγεία αποτελεί θεμελιώδες βήμα για την αντιμετώπιση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των πληθυσμών.



Σχήμα 13: *Μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας επιφάνειας (1880–2024) [96]*

8.2 Μηχανισμοί Επίδρασης της Θερμοκρασίας στον Ανθρώπινο Οργανισμό

Η θερμοκρασία αποτελεί βασικό περιβαλλοντικό παράγοντα που επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού. Ο άνθρωπος διαθέτει έναν μηχανισμό θερμορρύθμισης, ο οποίος επιδιώκει να διατηρήσει σταθερή την εσωτερική θερμοκρασία του σώματος, μέσω διαδικασιών όπως η εφίδρωση, η αγγειοδιαστολή [89, 91] και η αύξηση της ροής του αίματος προς το δέρμα σε συνθήκες ζέστης, ή αντίστροφα, η αγγειοσύσπαση και η αύξηση του μεταβολισμού σε συνθήκες ψύχους [89].

Όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες υπερβαίνουν τα όρια προσαρμογής του οργανισμού, η θερμορρυθμιστική ισορροπία διαταράσσεται. Στην περίπτωση της υπερβολικής θερμότητας, η διαδικασία άντλησης περισσότερου αίματος από την καρδιά προς το δέρμα μπορεί να οδηγήσει σε καρδιακή εξάντληση ή θερμικό στρες [81, 85, 92]. Αντίθετα, σε χαμηλές θερμοκρασίες, η έντονη συστολή αγγείων και η αύξηση της αρτηριακής πίεσης, επιβαρύνει την καρδιακή λειτουργία και αυξάνει τον κίνδυνο σοβαρών καρδιαγγειακών επιπλοκών [89].

Επιπλέον, οι απότομες μεταβολές θερμοκρασίας έχουν συνδεθεί με φλεγμονώδεις αντιδράσεις [89] που μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς τη φυσιολογική λειτουργία του οργανισμού. Οι μηχανισμοί αυτοί εξηγούν γιατί, όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τα φυσιολογικά όρια αντοχής του ανθρώπου, μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη νοσηρότητα ή ακόμη και θνησιμότητα.

8.3 Θερμοκρασία, Νοσηρότητα και Θνησιμότητα

Νοσηρότητα

Η επίδραση της θερμοκρασίας επεκτείνεται σημαντικά στη νοσηρότητα, επηρεάζοντας τον αριθμό των εισαγωγών στα νοσοκομεία και των περιστατικών έκτακτης ιατρικής φροντίδας [84, 88, 98, 99]. Πλήθος μελετών έχει δείξει ότι τόσο η αύξηση όσο και η μείωση της θερμοκρασίας μπορούν να προκαλέσουν επιβάρυνση της υγείας του πληθυσμού, με διαφορετικούς μηχανισμούς και χρονικά πρότυπα.

Σε περιόδους υψηλών θερμοκρασιών, παρατηρείται αύξηση των νοσηλειών που σχετίζονται κυρίως με καρδιαγγειακές και αναπνευστικές παθήσεις. Η υπερβολική θερμότητα προκαλεί διαταραχές στην καρδιακή λειτουργία και αύξηση του καρδιαγγειακού φορτίου, οδηγώντας σε επεισόδια αρρυθμιών, εμφραγμάτων του μυοκαρδίου και καρδιακής ανεπάρκειας [87, 92]. Παράλληλα, η αναπνευστική λειτουργία επηρεάζεται αρνητικά, καθώς η αυξημένη θερμοκρασία και η αφυδάτωση δυσχεραίνουν τη μεταφορά οξυγόνου και εντείνουν τα συμπτώματα χρόνιων παθήσεων, όπως η Χρόνια Αποφρακτική Πνευμονοπάθεια [89]. Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες έχουν συνδεθεί με αύξηση περιστατικών εγκεφαλικών επεισοδίων [86, 98], καθώς και με μεταβολές στο επίπεδο της γλυκόζης, επιβαρύνοντας άτομα με σακχαρώδη διαβήτη [89].

Αντίθετα, οι χαμηλές θερμοκρασίες προκαλούν διαφορετικού τύπου επιβαρύνσεις. Το ψύχος, όπως έχει σημειωθεί, οδηγεί σε αγγειοσύσπαση, αύξηση της αρτηριακής πίεσης και του ρυθμού ροής του αίματος, καθώς και σε ενεργοποίηση φλεγμονωδών και θρομβωτικών μηχανισμών, επιβαρύνοντας τη λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος [89]. Παράλληλα, το ψύχος συνδέεται με αύξηση των

αναπνευστικών λοιμώξεων, όπως πνευμονία, καθώς και αλλεργιών, λόγω της μειωμένης άμυνας του οργανισμού και της ευκολότερης μετάδοσης ιών, καθώς οι άνθρωποι παραμένουν περισσότερο σε κλειστούς χώρους [89, 93].

Η θερμοκρασία έχει επίσης αποδειχθεί ότι επηρεάζει νεφρικές παθήσεις και μεταβολικές δυσλειτουργίες, καθώς η αφυδάτωση και οι διαταραχές ηλεκτρολυτών που προκαλούνται από τη ζέστη οδηγούν σε αυξημένη συχνότητα οξείας νεφρικής ανεπάρκειας. Ταυτόχρονα, οι μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχουν συσχετιστεί με λοιμώδη νοσήματα, ιδίως σε συνθήκες υψηλής θερμότητας, όπου ευνοείται η ανάπτυξη μικροοργανισμών και η ταχύτερη εξάπλωση επιδημιών [89, 93].

Πολλές μελέτες αναδεικνύουν τη σημασία της χρονικής καθυστέρησης στη σχέση θερμοκρασίας και νοσηρότητας. Συγκεκριμένα, η επίδραση της θερμότητας συνήθως εμφανίζεται άμεσα ή εντός μερικών ημερών από την έκθεση, ενώ οι επιδράσεις του ψύχους μπορεί να εκδηλώνονται με καθυστέρηση αρκετών ημερών [86, 88, 90]. Αυτή η διαφορά αποδίδεται στη διαφορετική φυσιολογική ανταπόκριση του οργανισμού και στη χρονική πορεία των παθήσεων που προκαλούνται από τις θερμικές μεταβολές. Οι μηχανισμοί αυτοί εξηγούν γιατί η θερμοκρασία αποτελεί πολυπαραγοντικό δείκτη κινδύνου για τη νοσηρότητα, επηρεάζοντας διαφορετικά όργανα και συστήματα του ανθρώπινου σώματος, ανάλογα με την ένταση και τη διάρκεια της θερμικής διακύμανσης.

Θνησιμότητα

Η ανάλυση της σχέσης μεταξύ θερμοκρασίας και νοσηρότητας οδηγεί αναπόφευκτα στη διερεύνηση των θανατηφόρων επιπτώσεων των θερμικών μεταβολών. Η θερμοκρασία, ως περιβαλλοντικός παράγοντας, μπορεί όχι μόνο να προκαλέσει αύξηση των περιστατικών νοσηρότητας, αλλά και να συμβάλει καθοριστικά στην αύξηση της θνησιμότητας, ιδίως σε περιόδους ακραίων θερμικών συνθηκών.

Πλήθος επιδημιολογικών ερευνών έχει τεκμηριώσει μια μη γραμμική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και των ποσοστών θνησιμότητας, με τη μορφή καμπύλης τύπου U, V ή J, όπου τόσο οι υψηλές όσο και οι χαμηλές θερμοκρασίες σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο θανάτου [93].

Κατά τη διάρκεια θερμών περιόδων, η νοσηρότητα λόγω καρδιαγγειακών, αναπνευστικών και εγκεφαλικών επεισοδίων, οδηγεί σε θνησιμότητα, καθώς ο οργανισμός δυσκολεύεται να διατηρήσει την ομοιόστασή του υπό συνθήκες θερμικού στρες [86]. Η προκαλούμενη αφυδάτωση, η αγγειοδιαστολή και το αυξημένο καρδιοαγγειακό φορτίο, οδηγεί σε καρδιακή ανεπάρκεια, αρρυθμίες και ισχαιμικά επεισόδια [92]. Από την άλλη πλευρά, οι χαμηλές θερμοκρασίες εμφανίζουν επίσης αύξηση της θνησιμότητας και είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την επιβάρυνση του καρδιαγγειακού συστήματος [89, 90, 93, 101]. Επιπρόσθετα, η πνευμονία και η γρίπη, προκαλούν με τη σειρά τους αυξημένα ποσοστά θανάτων, κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες [89, 93].

Ένα σημαντικό στοιχείο που διαφοροποιεί τη σχέση θερμοκρασίας και θνησιμότητας είναι οι γεωγραφικές διαφορές. Η ελάχιστη θερμοκρασιακή θνησιμότητα διαφοροποιείται ανάλογα με το τοπικό κλίμα και αντανακλά τον βαθμό προσαρμογής του πληθυσμού στις επικρατούσες θερμοκρασίες.

Συγκεκριμένα, το όριο αυτό είναι υψηλότερο σε περιοχές με θερμότερο κλίμα και χαμηλότερο σε περιοχές με ψυχρότερο κλίμα, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα των κατοίκων των βόρειων περιοχών στο ψύχος και αυξημένη προσαρμογή των πληθυσμών των νοτιότερων περιοχών στη ζέστη [101]. Ωστόσο, η προσαρμογή αυτή έχει όρια, καθώς τα ακραία θερμικά φαινόμενα, που υπερβαίνουν τις συνήθεις κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής, προκαλούν αιφνίδια αύξηση των θανάτων, ανεξαρτήτως γεωγραφικού πλάτους [99].

Τέλος, η σχέση θερμοκρασίας και θνησιμότητας παρουσιάζει και εδώ χαρακτηριστικά χρονικής υστέρησης. Όπως και στις νοσηλείες, έτσι και στην θνησιμότητα, οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν άμεση αύξηση των θανάτων εντός των πρώτων ημερών μετά την έκθεση, λόγω της οξείας επιβάρυνσης του οργανισμού. Αντίθετα, οι επιπτώσεις του ψύχους τείνουν να εμφανίζονται με καθυστέρηση αρκετών ημερών, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες συμβάλλουν στη σταδιακή επιδείνωση χρόνιων παθήσεων ή στην ανάπτυξη λοιμώξεων που οδηγούν τελικά σε θάνατο [89, 102]. Αυτή η χρονική διαφοροποίηση υπογραμμίζει τη δυναμική φύση της σχέσης θερμοκρασίας και θνησιμότητας και την ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση των θερμικών δεικτών ως προγνωστικών παραμέτρων για τη δημόσια υγεία.

8.4 Ευάλωτες Ομάδες Πληθυσμού

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ανθρώπινη υγεία δεν είναι ομοιόμορφη για όλους τους πληθυσμούς. Ορισμένες ομάδες εμφανίζουν αυξημένη ευπάθεια στις ακραίες θερμικές συνθήκες.

- **Ηλικιωμένοι:** Οι ηλικιωμένοι, ιδίως άνω των 65 ετών, αποτελούν την πιο ευάλωτη ομάδα στις ακραίες θερμοκρασίες [86-89, 91, 93, 98]. Η μειωμένη ικανότητα θερμορρύθμισης, η ύπαρξη χρόνιων παθήσεων και η χρήση φαρμάκων επηρεάζουν σημαντικά τον κίνδυνο κατά τη διάρκεια θερμών επεισοδίων όσο και σε περιόδους ψύχους [89, 101]. Επιπλέον, η ευπάθεια αυτή αναμένεται να αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες, καθώς ο αριθμός των ηλικιωμένων παγκοσμίως αυξάνεται ραγδαία - από 737 εκατομμύρια άτομα άνω των 60 ετών το 2009 σε περίπου 2 δισεκατομμύρια έως το 2050 [88].
- **Βρέφη και μικρά παιδιά:** Αντίστοιχα, τα βρέφη και τα μικρά παιδιά εμφανίζουν αυξημένο κίνδυνο [86, 87, 91, 93], καθώς τα φυσικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά τους, όπως η ατελής ανάπτυξη των μηχανισμών θερμορρύθμισης και η περιορισμένη ικανότητα προσαρμογής σε μεταβολές της θερμοκρασίας δεν είναι πλήρως ανεπτυγμένα [93].
- **Έγκυες γυναίκες, έμβρυα και νεογνά:** Οι εγκυμονούσες αποτελούν ιδιαίτερα ευαίσθητη ομάδα σε περιόδους αυξημένων θερμοκρασιών, καθώς η θερμότητα επιβαρύνει το καρδιαγγειακό και ενδοκρινικό τους σύστημα, επηρεάζοντας τόσο την υγεία της μητέρας όσο και του εμβρύου. Η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης υπερτασικών διαταραχών της κύησης, διαβήτη κύησης και πρόωρου τοκετού, ενώ παράλληλα μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ενδομήτρια ανάπτυξη, αυξάνοντας την πιθανότητα χαμηλού βάρους γέννησης ή περιγεννητικών επιπλοκών. Επίσης, τα νεογνά παρουσιάζουν αυξημένη ευπάθεια λόγω της ατελούς θερμορρύθμισης και της ευαισθησίας τους σε αφυδάτωση ή θερμική καταπόνηση, γεγονός που καθιστά αναγκαία την προστασία τους από ακραίες θερμικές συνθήκες [100].

- **Άτομα με παθήσεις:** Άλλη κρίσιμη κατηγορία αποτελούν τα άτομα με χρόνιες παθήσεις, όπως καρδιαγγειακές, αναπνευστικές και μεταβολικές [91-93, 98]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι φυσιολογικοί μηχανισμοί απόκρισης στις θερμικές διακυμάνσεις είναι ήδη επιβαρυμένοι, με αποτέλεσμα η έκθεση σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες να οδηγεί συχνότερα σε οξείες επιπλοκές ή επιδείνωση της υγείας
- **Κοινωνικά περιθωριοποιημένοι:** Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει η κοινωνικοοικονομική διάσταση της ευαλωτότητας. Άτομα με χαμηλό εισόδημα, περιορισμένη πρόσβαση σε υπηρεσίες υγείας, ανεπαρκείς συνθήκες στέγασης ή έλλειψη κλιματισμού είναι περισσότερο εκτεθειμένα στους κινδύνους που προκαλούν οι ακραίες θερμοκρασίες [87, 93, 101].

Συνολικά, οι διαφορές στην ανθεκτικότητα απέναντι στις θερμικές μεταβολές αντικατοπτρίζουν ένα πολυπαραγοντικό πλαίσιο ευπάθειας, όπου αλληλεπιδρούν βιολογικοί, κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες. Η κατανόηση αυτών των διαφορών είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό στοχευμένων παρεμβάσεων δημόσιας υγείας και για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των ακραίων θερμοκρασιών στους πλέον εκτεθειμένους πληθυσμούς.

8.5 Συνδυαστική Επίδραση Θερμοκρασίας και Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης [87]

Η θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελούν δύο στενά συνδεδεμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επιδρούν ταυτόχρονα στη δημόσια υγεία. Τα τελευταία χρόνια, πληθώρα επιδημιολογικών μελετών έχει εξετάσει τη σχέση μεταξύ αυξημένων θερμοκρασιών, επιπέδων ρύπων και θνησιμότητας, αναδεικνύοντας ότι οι δύο παράγοντες επιδρούν τόσο ανεξάρτητα όσο και συνεργιστικά.

Τα PM και το O_3 έχουν αναγνωριστεί ως οι βασικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι που επηρεάζουν τη σχέση θερμοκρασίας-θνησιμότητας. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι ρύποι αυτοί μπορούν να λειτουργούν είτε ως συνδυαστικοί είτε ως παράγοντες τροποποίησης της επίδρασης της θερμοκρασίας, κυρίως κατά τους θερμότερους μήνες. Η ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων ρύπων, λόγω εντονότερων φωτοχημικών διεργασιών και μειωμένου αερισμού της ατμόσφαιρας, δημιουργεί συνεργιστικά φαινόμενα, όπου η επίδραση της ζέστης ενισχύεται από τα αυξημένα επίπεδα O_3 και PM.

Επιδημιολογικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε ΗΠΑ, Ευρώπη και Ασία έδειξαν ότι η θνησιμότητα από καρδιαγγειακά και αναπνευστικά αίτια αυξάνεται σημαντικά όταν συνυπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες με αυξημένα επίπεδα O_3 ή PM10. Σε αρκετές από αυτές τις έρευνες, το O_3 φαίνεται να λειτουργεί ως παράγοντας ενίσχυσης, αυξάνοντας την επίδραση της θερμότητας στα ποσοστά θνησιμότητας, ιδιαίτερα σε περιόδους καύσωνα.

Παράλληλα, η μεθοδολογική πρόκληση της απομόνωσης των επιδράσεων θερμοκρασίας και ρύπανσης παραμένει σημαντική, καθώς οι δύο παράμετροι συχνά συνδέονται χρονικά και χωρικά. Οι συγκεντρώσεις ρύπων επηρεάζονται από τις μετεωρολογικές συνθήκες, γεγονός που δυσχεραίνει τη διάκριση του ανεξάρτητου ρόλου κάθε παράγοντα στη συνολική επιβάρυνση της υγείας.

Συνοψίζοντας, τα διαθέσιμα επιστημονικά δεδομένα συγκλίνουν στο ότι η θερμότητα και η ατμοσφαιρική ρύπανση ασκούν ανεξάρτητες αλλά και συνέργουσες επιδράσεις στη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα. Οι επιπτώσεις είναι εντονότερες σε αστικά περιβάλλοντα, όπου τα φαινόμενα αστικής θερμικής νησίδας και οι υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων συνυπάρχουν. Η κατανόηση αυτής της αλληλεπίδρασης είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό πολιτικών πρόληψης και προσαρμογής, με στόχο την προστασία των πλέον ευάλωτων πληθυσμιακών ομάδων, όπως οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά και τα άτομα με χρόνιες παθήσεις

8.6 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα των Θερμοκρασιακών Μεταβολών

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές, όπως αυτές που παρατηρούνται τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής, δεν επιδρούν μόνο στη φυσική υγεία του ανθρώπου, αλλά παράγουν και πολλαπλές κοινωνικοοικονομικές συνέπειες σε παγκόσμιο επίπεδο. Η σταδιακή αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας έχει φτάσει περίπου τους 0.85°C μεταξύ 1880 και 2012 [89], και εκτιμάται ότι θα ανέλθει από 1.8 έως και 6.4°C μέχρι το 2100 [88, 101].

Αυτή η συνεχιζόμενη άνοδος της θερμοκρασίας έχει ήδη οδηγήσει σε σοβαρές απώλειες ζωών και παραγωγικότητας. Εκτιμάται ότι περισσότεροι από 150.000 θάνατοι ετησίως συνδέονται με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και των θερμικών μεταβολών [93], ενώ σύμφωνα με νεότερες εκτιμήσεις, μόνο το 2019, 365.000 θάνατοι αποδόθηκαν στην ακραία θερμότητα [95]. Συγκεκριμένα, η Εθνική Αρχή Διαχείρισης Καταστροφών της Ινδίας κατέγραψε 24.223 θανάτους από θερμικά κύματα μεταξύ 1992 και 2015 [78]. Στην Ευρώπη, το θερμικό κύμα του 2003 προκάλεσε περισσότερους από 35.000 επιπλέον θανάτους [97], ενώ παρόμοιες καταστροφές έχουν σημειωθεί στις Ηνωμένες Πολιτείες (1995), στη Ρωσία (2010), στην Ινδία (2015) και στην Ιαπωνία (2018) [98]. Αντίστοιχα, στη Νότια Κορέα, παρατηρήθηκε ότι κάθε 1°C αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το κατώφλι επιβλαβούς θερμότητας συνδέθηκε με 14.006 πρόσθετα έτη ζωής με αναπηρία και 27.211 χαμένα έτη ζωής από καρδιοαγγειακές και εγκεφαλικές νόσους [99].

Ιδιαίτερα ανησυχητικό είναι το κοινωνικοοικονομικό βάρος των θερμικών επιπτώσεων στη μητρότητα και τη βρεφική υγεία, όπως τεκμηριώθηκε σε πρόσφατες συστηματικές αναλύσεις. Η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες κατά την εγκυμοσύνη συνδέεται με αύξηση κατά 16% του κινδύνου υπέρτασης κύησης και κατά 14% του κινδύνου αποβολής ή εμβρυϊκής απώλειας για κάθε 1°C αύξηση της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, ο κίνδυνος χαμηλού βάρους γέννησης αυξάνεται κατά 29% σε συνθήκες ακραίας θερμότητας. Οι πρόωροι τοκετοί αυξάνονται δραματικά, με 78 από τις 84 επιδημιολογικές εκτιμήσεις να δείχνουν επιβλαβή επίδραση, ενώ μόνο στην Κίνα υπολογίζονται περίπου 4.600 επιπλέον πρόωροι τοκετοί ετησίως που σχετίζονται με την ανθρωπογενή κλιματική αλλαγή, με οικονομικό κόστος που υπερβαίνει το 1 δισεκατομμύριο δολάρια ετησίως [100].

Επομένως, το οικονομικό αποτύπωμα των θερμικών μεταβολών είναι επίσης τεράστιο. Στο πλαίσιο της παγκόσμιας οικονομίας των πόλεων, το συνολικό κόστος από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχει εκτιμηθεί ότι είναι 2,6 φορές υψηλότερο σε σύγκριση με ένα σενάριο χωρίς κλιματικές επιβαρύνσεις [103]. Η θερμότητα έχει επίσης επιπτώσεις στην παραγωγικότητα και την εργασία. Οι εργαζόμενοι σε εξωτερικούς χώρους και σε θερμά περιβάλλοντα παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση,

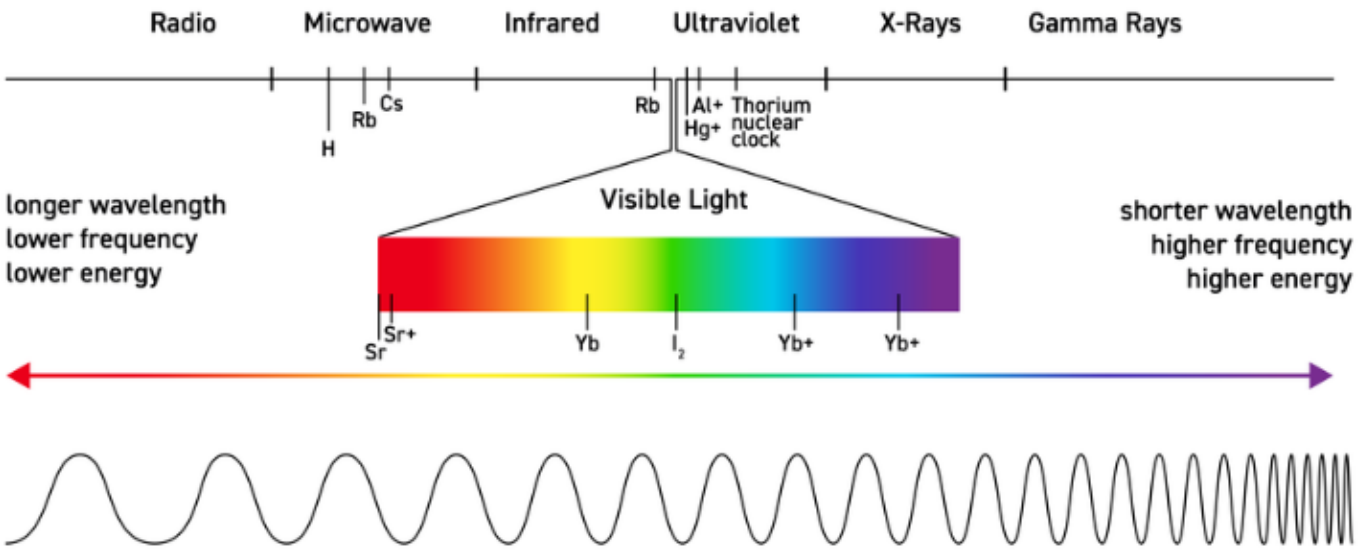
αυξημένες αναρρωτικές άδειες και συχνότερες περιπτώσεις θερμικής εξάντλησης, οδηγώντας σε σημαντικές απώλειες εισοδήματος και μείωση του χρόνου εργασίας, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες [85, 95].

Συνολικά, οι θερμοκρασιακές μεταβολές δεν αποτελούν μόνο περιβαλλοντικό ή υγειονομικό ζήτημα, αλλά και βαθύ κοινωνικοοικονομικό πρόβλημα. Το αυξανόμενο κόστος υγειονομικής περίθαλψης, οι απώλειες παραγωγικότητας, καθώς και οι επιπτώσεις στη γονιμότητα και τη μητρότητα, συνθέτουν ένα πολυεπίπεδο αποτύπωμα ανισότητας.

9. ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

9.1 Ορισμός και Βασικά Χαρακτηριστικά της Υπεριώδους Ακτινοβολίας

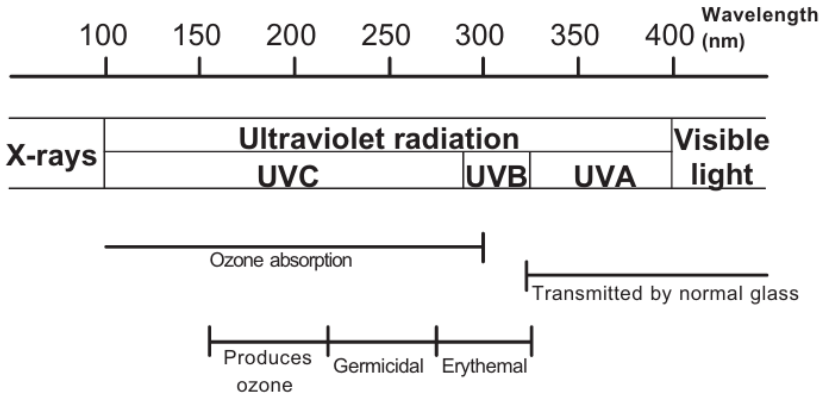
Η υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet Radiation - UVR) αποτελεί τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και καταλαμβάνει το φάσμα μεταξύ της ορατής και της ακτινοβολίας Χ, με μήκη κύματος από 100 έως 400 nm [117-122]. Παρά το γεγονός ότι αντιπροσωπεύει ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη, η επίδρασή της στην ατμόσφαιρα, στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία είναι καθοριστική. Η ενέργεια της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι ικανή να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις σε βιολογικά μόρια, γεγονός που εξηγεί τόσο τις ευεργετικές όσο και τις επιβλαβείς συνέπειές της.



Σχήμα 14: *Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και η θέση της UV σε σχέση με τα υπόλοιπα μήκη κύματος [242]*

Η UV ακτινοβολία υποδιαιρείται, σύμφωνα με το μήκος κύματος, σε τρεις κύριες περιοχές:

- **UVA (315-400 nm),** η οποία αποτελεί περίπου το 95% της υπεριώδους ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης [123] και έχει χαμηλότερη ενέργεια αλλά μεγαλύτερη διεισδυτικότητα στους ιστούς.
- **UVB (280-315 nm)**, που είναι πιο ενεργειακή [124], ευθύνεται για τις περισσότερες βιολογικές επιπτώσεις [117], όπως το ηλιακό έγκαυμα [119] και την σύνθεση της βιταμίνης D [119-121].
- **UVC (100-280 nm),** η οποία είναι ακόμα πιο ενεργειακή και δυνητικά η πιο επικίνδυνη μορφή υπεριώδους ακτινοβολίας.



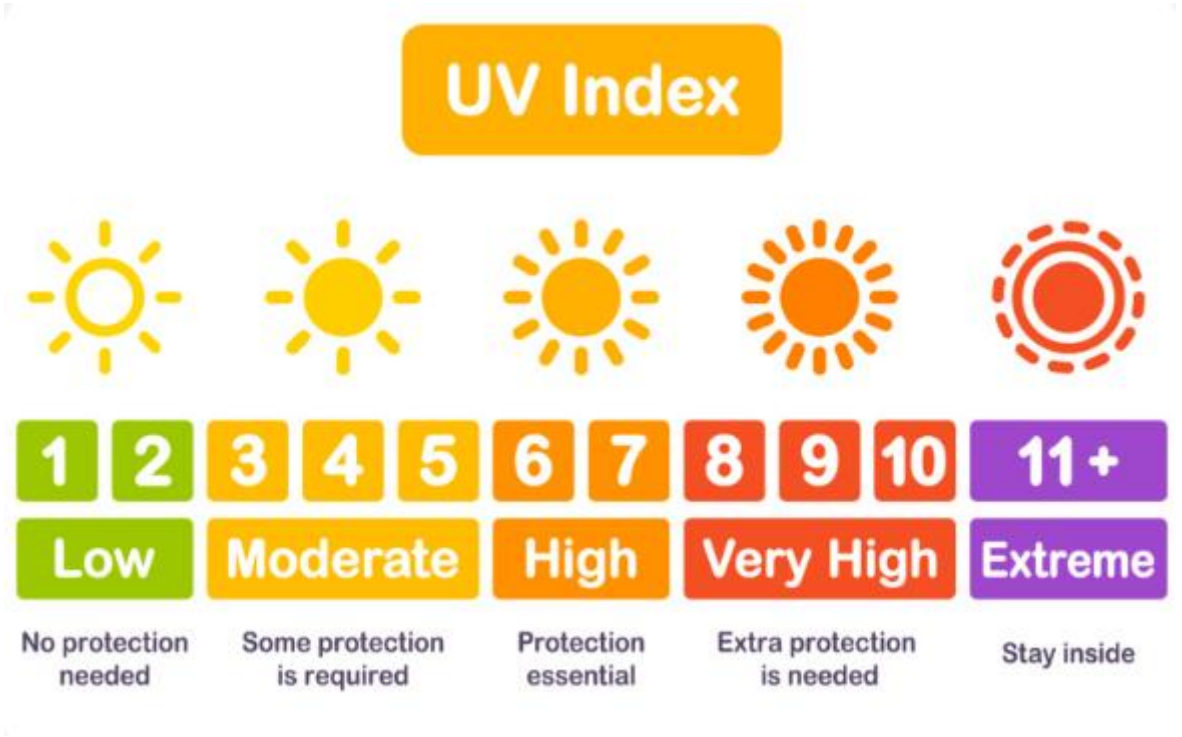
***Σχήμα 15**: Φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας και χαρακτηριστικά των επιμέρους ζωνών UVA, UVB και UVC [124]*

Για την ποσοτική εκτίμηση της υπεριώδους ακτινοβολίας έχει καθιερωθεί ο **Δείκτης Υπεριώδους Ακτινοβολίας (UV Index)**, ένας διεθνώς αναγνωρισμένος δείκτης που εκφράζει τη βιολογικά ενεργή υπεριώδη ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης. Ο δείκτης αυτός κυμαίνεται από **0 έως 11+** και αντιπροσωπεύει το δυνητικό κίνδυνο για το ανθρώπινο δέρμα σε σχέση με την ένταση της UV και χρησιμοποιείται ευρέως για την ενημέρωση του κοινού σχετικά με την ανάγκη προστασίας από την έκθεση στον ήλιο [125].

Η κατηγοριοποίηση του δείκτη UV έχει ως εξής:

- **1-2 (Low):** Πολύ χαμηλά επίπεδα UV. Δεν απαιτείται προστασία - η έκθεση στον ήλιο είναι ασφαλής για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας.
- **3-5 (Moderate):** Μέτρια ένταση υπεριώδους ακτινοβολίας. Συνιστάται βασική προστασία, όπως καπέλο, γυαλιά ηλίου και αντηλιακό, ιδίως σε ώρες αιχμής (10:00-16:00).
- **6-7 (High):** Υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Η προστασία είναι απαραίτητη, καθώς υπάρχει κίνδυνος εγκαύματος μετά από σύντομη έκθεση χωρίς αντηλιακή κάλυψη.
- **8-10 (Very High):** Πολύ υψηλή ένταση UV. Απαιτείται επιπλέον προστασία, όπως σκιά, ρούχα με UV φίλτρο και αποφυγή έκθεσης τις μεσημβρινές ώρες.
- **11+ (Extreme):** Εξαιρετικά επικίνδυνα επίπεδα UV. Η παραμονή σε εξωτερικό χώρο χωρίς προστασία μπορεί να προκαλέσει σοβαρά εγκαύματα ή μακροχρόνια βλάβη στο δέρμα και στα μάτια. Συνιστάται παραμονή σε εσωτερικούς χώρους.

Ο δείκτης αυτός συμβάλλει καθοριστικά στην αξιολόγηση της ηλιακής επικινδυνότητας και στην πρόληψη των επιπτώσεων της υπεριώδους ακτινοβολίας, όπως τα εγκαύματα, η φωτογήρανση και ο καρκίνος του δέρματος.



Σχήμα 16: *Κλίμακα UV Index και αντίστοιχα επίπεδα προστασίας από την ηλιακή έκθεση [243]*

Η συσχέτιση της υπεριώδους ακτινοβολίας με την κλιματική αλλαγή και το στρώμα του όζοντος είναι στενή και αμφίδρομη. Η UV επηρεάζεται άμεσα από τη μεταβολή του στρατοσφαιρικού όζοντος, το οποίο λειτουργεί ως φυσικό φίλτρο, απορροφώντας όλη την UVC και το μεγαλύτερο μέρος της UVB [121, 126]. Η αύξηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου, με κύριο το διοξείδιο του άνθρακα, ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συντελεί στην αποδόμηση του στρατοσφαιρικού όζοντος. Ως αποτέλεσμα, η αραίωση του όζοντος, σε συνδυασμό με τις μεταβολές του κλίματος, αυξάνει την ποσότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης [118]. Η ενισχυμένη έκθεση στην UV έχει συνδεθεί με αυξημένα ποσοστά καρκίνου του δέρματος, οφθαλμικών παθήσεων και ανοσολογικών διαταραχών, καθιστώντας την παρακολούθηση και τον έλεγχο των επιπέδων UV σημαντικό παράγοντα για τη δημόσια υγεία και τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη.

Η ιστορική ανακάλυψη της υπεριώδους ακτινοβολίας ανάγεται στις αρχές του 19ου αιώνα. Ο Νεύτωνας ήταν ο πρώτος που διέσπασε το φως σε διαφορετικά μήκη κύματος, ενώ ο Johann Ritter (1801) εντόπισε την ύπαρξη της αόρατης ακτινοβολίας πέρα από το ιώδες τμήμα του φάσματος, επιβεβαιώνοντας πειραματικά την ύπαρξη της υπεριώδους περιοχής [117].

9.2 Πηγές και Μέτρηση

Η υπεριώδης ακτινοβολία προέρχεται κυρίως από δύο είδη πηγών: φυσικές και τεχνητές [119].

Φυσικές Πηγές

Η κύρια φυσική πηγή είναι ο Ήλιος, του οποίου η ακτινοβολία αποτελείται από ορατό, υπέρυθρο και υπεριώδες φως. Η ποσότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, όπως [117, 118, 125]:

1. την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών,
2. το γεωγραφικό πλάτος,
3. το υψόμετρο,
4. τις ατμοσφαιρικές συνθήκες

Στις περιοχές κοντά στον ισημερινό, όπου ο Ήλιος βρίσκεται ψηλότερα στον ουρανό, η ακτινοβολία διανύει μικρότερη απόσταση μέσα από την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα η ένταση της UV να είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα, στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, η ακτινοβολία διασχίζει μεγαλύτερο πάχος ατμόσφαιρας και η απορρόφηση είναι αυξημένη, μειώνοντας έτσι την ποσότητα UV που φτάνει στο έδαφος [117]. Το υψόμετρο παίζει επίσης σημαντικό ρόλο, καθώς η ατμόσφαιρα γίνεται αραιότερη και η απορρόφηση της υπεριώδους μειώνεται. Έτσι, σε ορεινές περιοχές ή σε υψόμετρα άνω των 1000 μέτρων, η ένταση της UV είναι αισθητά αυξημένη [118].

Ακόμα, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά την ένταση της UV. Η παρουσία νεφών μπορεί να μειώσει την άμεση ακτινοβολία, ωστόσο τα λεπτά ή διάσπαρτα σύννεφα επιτρέπουν τη διέλευση σημαντικής ποσότητας διάχυτης UV [117, 123, 125, 127]. Η υγρασία, η θερμοκρασία και κυρίως η ρύπανση της ατμόσφαιρας μπορούν να απορροφούν ή να διασκορπίζουν την ακτινοβολία, μεταβάλλοντας το τοπικό ενεργειακό φορτίο [117]. Παράλληλα, η αντανάκλαση από επιφάνειες όπως το νερό, η άμμος, το χιόνι ή το τσιμέντο ενισχύει την τοπική δόση ακτινοβολίας, αυξάνοντας τη συνολική έκθεση του ανθρώπινου σώματος, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα με υψηλό ποσοστό ανακλαστικών υλικών [117, 118, 127, 128].

Τεχνητές πήγες

Εκτός από τη φυσική ηλιακή ακτινοβολία, υπάρχουν και τεχνητές πηγές υπεριώδους, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές. Στον ιατρικό τομέα, η UV αξιοποιείται σε θεραπευτικές διαδικασίες όπως η φωτοθεραπεία, κυρίως για δερματολογικές παθήσεις όπως η ψωρίαση ή η λεύκη [117, 124, 129].

9.3 Βιολογικές Επιδράσεις

9.3.1 Ευεργετικές επιδράσεις

Παρόλο που η υπεριώδης ακτινοβολία είναι περισσότερο γνωστή για τις επιβλαβείς της επιπτώσεις, η ελεγχόμενη και περιορισμένη έκθεση σε αυτήν έχει αποδεδειγμένα ευεργετικά αποτελέσματα για τον ανθρώπινο οργανισμό. Η σημαντικότερη και πιο τεκμηριωμένη θετική της δράση αφορά την παραγωγή της βιταμίνης D μέσω της επίδρασης της UVB ακτινοβολίας στο δέρμα [119-121, 130].

Κατά την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία, ειδικότερα στην περιοχή των UVB (280-315 nm), η 7-δεϋδροχοληστερόλη, ένα πρόδρομο μόριο που βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα της επιδερμίδας, μετατρέπεται φωτοχημικά σε προβιταμίνη D_3. Στη συνέχεια, μέσω θερμικής ισομερίωσης, η προβιταμίνη D_3 μετατρέπεται σε χοληκαλσιφερόλη (βιταμίνη D_3), η οποία μεταφέρεται στο ήπαρ και στα νεφρά, όπου υφίσταται περαιτέρω υδροξυλιώσεις για να αποκτήσει τη βιολογικά ενεργή της μορφή, την 1,25-διϋδροξυχοληκαλσιφερόλη [120, 131]. Η βιταμίνη D διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην οστική υγεία [119], καθώς και στη φυσιολογική λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος [120, 128]. Έχει παρατηρηθεί ότι άτομα με μέτρια έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία παρουσιάζουν μειωμένα ποσοστά ραχίτιδας [130] και οστεοπόρωσης [131], παθήσεων που σχετίζονται με ανεπάρκεια βιταμίνης D.

Πέρα από τη δράση της στην ομοιόσταση των ανόργανων στοιχείων, η υπεριώδης ακτινοβολία φαίνεται να συμβάλλει και σε δευτερογενή οφέλη, τόσο ψυχολογικά όσο και αντικαρκινικά, μέσω της επαγωγής της βιταμίνης D. Η έκθεση σε φυσικό φως, ιδιαίτερα σε χαμηλές έως μέτριες δόσεις UV, συνδέεται με βελτίωση της διάθεσης, λόγω αύξησης των ενδορφινών [132, 133]. Παράλληλα, ερευνητικά δεδομένα έχουν υποδείξει ότι η βιταμίνη D μπορεί να συμμετέχει στην αναστολή της κυτταρικής υπερπολλαπλασιαστικής δραστηριότητας, συμβάλλοντας έτσι σε αντικαρκινικές διαδικασίες, ιδιαίτερα όσον αφορά τους καρκίνους του παχέος εντέρου, του μαστού και του προστάτη [128, 120].

Ωστόσο, τα ευεργετικά αποτελέσματα της υπεριώδους ακτινοβολίας εξαρτώνται αυστηρά από τη δόση και τη διάρκεια της έκθεσης. Μικρές και ελεγχόμενες ποσότητες είναι επωφελείς, ενώ η υπερβολική ή παρατεταμένη έκθεση προκαλεί σημαντικές βιολογικές βλάβες. Συνεπώς, η διατήρηση μιας ισορροπίας μεταξύ ωφέλιμης και επικίνδυνης δόσης αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την αξιοποίηση των θετικών επιδράσεων της UV χωρίς την πρόκληση ανεπιθύμητων συνεπειών.

9.3.2 Επιβλαβείς επιδράσεις

9.3.2.1 Στο Δέρμα

Το δέρμα αποτελεί το κύριο όργανο-στόχο της υπεριώδους ακτινοβολίας, καθώς απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειάς της [134]. Η δράση της UV στο δέρμα εξαρτάται από το μήκος κύματος, τη διάρκεια και την ένταση της έκθεσης, καθώς και από το χρώμα δέρματος του ατόμου [119, 124, 133]. Οι επιδράσεις διακρίνονται σε μοριακές, οξείες και χρόνιες, με διαφορετικούς μηχανισμούς και επίπεδα βλάβης.

<u>Σε μοριακό επίπεδο</u> Η απορρόφηση της ενέργειας από το DNA των κυττάρων της επιδερμίδας οδηγεί στο σχηματισμό φωτοπροϊόντων, οπού διαταράσσουν τη φυσιολογική δομή της διπλής έλικας του DNA, προκαλώντας μεταλλάξεις και αποτυχία της κυτταρικής επιδιόρθωσης [124, 135]. Το κύτταρο, προκειμένου να διαχειριστεί τη βλάβη, ενεργοποιεί τον μηχανισμό p53, ο οποίος ελέγχει την επιδιόρθωση του DNA και την επαγωγή της απόπτωσης, δηλαδή του προγραμματισμένου κυτταρικού θανάτου, σε περιπτώσεις μη αναστρέψιμης βλάβης [124]. Ωστόσο, η υπερβολική ή επαναλαμβανόμενη

έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να υπερβεί τις δυνατότητες των μηχανισμών επιδιόρθωσης του DNA, οδηγώντας στη διατήρηση επιβλαβών κυττάρων στην επιδερμίδα [136].

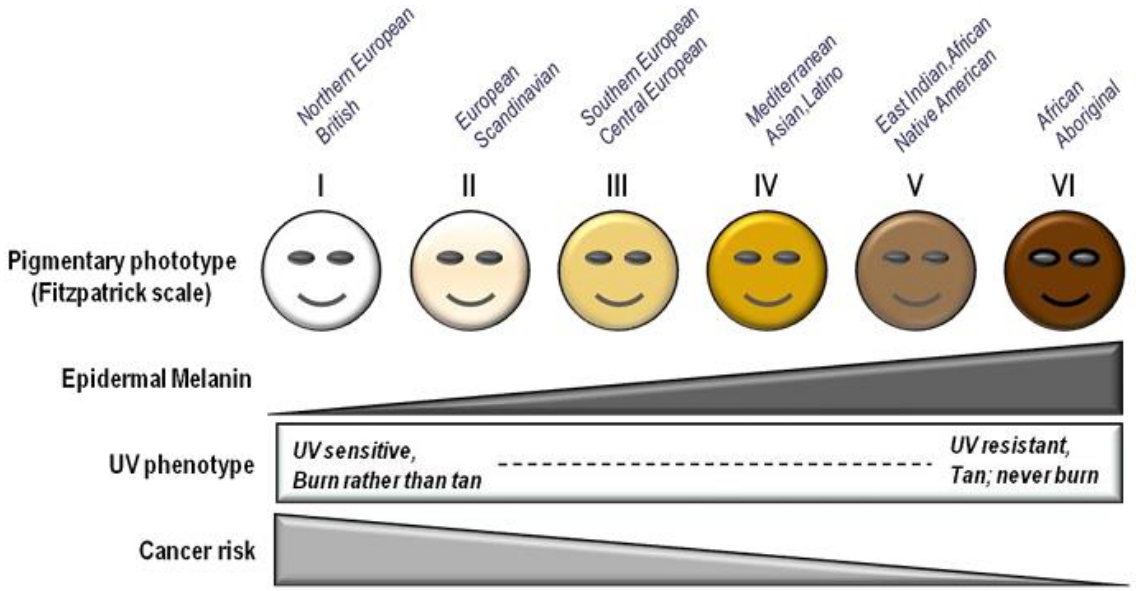
Σε οξείες συνθήκες έκθεσης: Η UV προκαλεί άμεσα φλεγμονώδη αντίδραση του δέρματος, η οποία εκδηλώνεται με ερύθημα, οίδημα και αίσθημα καψίματος. Παράλληλα, το δέρμα αντιδρά με αύξηση της μελανινογένεσης, διαδικασία που οδηγεί στο μαύρισμα ως αμυντικό μηχανισμό, αφού η μελανίνη δρα προστατευτικά απορροφώντας και διαχέοντας την υπεριώδη ενέργεια [124]. Αν και το μαύρισμα μειώνει εν μέρει τη διείσδυση της UV στα βαθύτερα στρώματα, δεν παρέχει πλήρη προστασία από τις κυτταρικές βλάβες.

Σε χρονιές συνθήκες έκθεσης: Οι χρόνιες επιπτώσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας στο δέρμα είναι σωρευτικές και εμφανίζονται ύστερα από χρόνια ή επαναλαμβανόμενη έκθεση. Οι πιο χαρακτηριστικές μορφές μακροχρόνιας βλάβης είναι η φωτογήρανση, η δερματική ελάστωση και η καρκινογένεση. Η φωτογήρανση εκδηλώνεται με απώλεια ελαστικότητας, ρυτίδωση, ξηρότητα και μεταβολή της χροιάς του δέρματος, αποτέλεσμα της καταστροφής του κολλαγόνου και της ελαστίνης στα δερματικά στρώματα από τις ακτίνες UVA. Η δερματική ελάστωση χαρακτηρίζεται από πάχυνση του δέρματος, απώλεια της φυσικής του υφής και εμφάνιση κιτρινωπών αλλοιώσεων [119, 124, 127, 129, 137].

Η πιο σοβαρή μακροχρόνια συνέπεια είναι η καρκινογένεση. Η υπεριώδης ακτινοβολία δρα ως πλήρης καρκινογόνος παράγοντας, ικανός να προκαλέσει μεταλλάξεις, να διεγείρει τον κυτταρικό πολλαπλασιασμό και να καταστείλει τους φυσιολογικούς ανοσολογικούς μηχανισμούς επιτήρησης. Οι τρεις κύριες μορφές καρκίνου του δέρματος που συνδέονται με την υπεριώδη έκθεση είναι [118, 127, 131, 138]:

1. **το βασικοκυτταρικό καρκίνωμα (Basal Cell Carcinoma)**, το οποίο προέρχεται από τα βασικά κύτταρα της επιδερμίδας**,**
2. **το ακανθοκυτταρικό καρκίνωμα (Squamous Cell Carcinoma)**, που αναπτύσσεται από τα κύτταρα της κερατίνης στοιβάδας, και
3. **το κακοήθες μελάνωμα (Cutaneous Melanoma)**, η πιο επιθετική και θανατηφόρα μορφή, που προέρχεται από τα μελανοκύτταρα, καθώς μπορεί να προέλθει και από οξεία υποβολή σε UV

Οι βλάβες αυτές σχετίζονται άμεσα με το συνολικό φορτίο υπεριώδους έκθεσης καθ’ όλη τη διάρκεια της ζωής και επιδεινώνονται από την επαναλαμβανόμενη έκθεση χωρίς προστασία, ιδιαίτερα κατά την παιδική και εφηβική ηλικία [119, 120, 123, 126, 134].



Σχήμα 17: *Κλίμακα Fitzpatrick για την ταξινόμηση των τύπων δέρματος με βάση τη μελανίνη της επιδερμίδας και την αντίδραση στην υπεριώδη ακτινοβολία [133]*

9.3.2.2 Στο Ανοσοποιητικό Σύστημα

Η υπεριώδης ακτινοβολία ασκεί σημαντική επίδραση στο ανοσοποιητικό σύστημα, προκαλώντας καταστολή της κυτταρικής ανοσίας και αυξημένη ευαισθησία σε λοιμώξεις. Η δράση αυτή, που αποδίδεται κυρίως στην ακτινοβολία UVB, σχετίζεται με φωτοχημικές διεργασίες που μεταβάλλουν τη λειτουργία των κυττάρων της επιδερμίδας και των κυττάρων Langerhans, μειώνοντας την ικανότητά τους να ενεργοποιούν τα Τ-λεμφοκύτταρα, τα οποία αναγνωρίζουν και καταστρέφουν μολυσμένα ή ανώμαλα κύτταρα. Παράλληλα, προκαλείται απελευθέρωση ανοσοκατασταλτικών κυτταροκίνων, οι οποίες ενισχύουν τη συστηματική ανοσοκαταστολή [126, 134].

Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε μειωμένη ανοσολογική επιτήρηση, αυξάνοντας την ευπάθεια του οργανισμού σε ιογενείς και βακτηριακές λοιμώξεις, καθώς και τον κίνδυνο εμφάνισης νεοπλασματικών βλαβών. Η μακροχρόνια έκθεση σε UV προκαλεί επίσης μεταβολές στους Τ-λεμφοκυτταρικούς πληθυσμούς, με επικράτηση των ρυθμιστικών Τ κυττάρων, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω την ανοσοκατασταλτική δράση. Έτσι, η υπεριώδης ακτινοβολία δρα όχι μόνο ως άμεσος μεταλλαξιογόνος παράγοντας, αλλά και ως ρυθμιστής της ανοσολογικής ισορροπίας, συμβάλλοντας στην απώλεια της φυσικής αντικαρκινικής άμυνας του οργανισμού [134, 136].

9.3.2.3 Στα Μάτια

Τα μάτια αποτελούν ένα από τα πλέον ευαίσθητα όργανα στην υπεριώδη ακτινοβολία, καθώς η οφθαλμική επιφάνεια είναι συνεχώς εκτεθειμένη στο ηλιακό φως και απορροφά σημαντικό ποσοστό της ακτινοβολίας. Η βλαπτική δράση της υπεριώδους στο οπτικό σύστημα εξαρτάται, όπως και στο δέρμα, από το μήκος κύματος, τη διάρκεια έκθεσης, αλλά και από τις συνθήκες αντανάκλασης, με το μεγαλύτερο μέρος της απορρόφησης να πραγματοποιείται από τον κερατοειδή και τον φακό του ματιού [118].

Σε οξείες συνθήκες έκθεσης: Η βραχυπρόθεσμη υποβολή στην υπεριώδη ακτινοβολία, ιδιαίτερα σε UVB, προκαλεί τη λεγόμενη φωτοκερατίτιδα. Η φωτοκερατίτιδα εκδηλώνεται μέσα σε λίγες ώρες από την έκθεση, προκαλώντας πολλαπλά συμπτώματα. Αν και συνήθως επουλώνεται εντός 8-12 ωρών, η επαναλαμβανόμενη οξεία έκθεση μπορεί να οδηγήσει σε χρόνιες μικροτραυματικές αλλοιώσεις του οφθαλμικού ιστού [118].

Σε χρονιές συνθήκες έκθεσης: Οι χρόνιες επιπτώσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας στον οφθαλμό είναι σωρευτικές και συχνά μη αναστρέψιμες. Η συνεχής έκθεση σε UVA και UVB οδηγεί σε εκφυλιστικές μεταβολές του κερατοειδούς, του επιπεφυκότα και του φακού, που συνδέονται με την ανάπτυξη παθολογικών καταστάσεων όπως το πτερύγιο [118, 119], τον καταρράκτη [118, 119, 121, 127, 128, 139, 140], και ίσως το οφθαλμικό μελάνωμα [118-120].

Η προστασία του οφθαλμού από την υπεριώδη ακτινοβολία είναι, επομένως, ζωτικής σημασίας, καθώς ακόμη και η υποκλινική, επαναλαμβανόμενη έκθεση μπορεί να οδηγήσει σε αθροιστική οφθαλμική βλάβη. Οι φυσικοί μηχανισμοί φιλτραρίσματος του ματιού, αν και αποτελεσματικοί έναντι μέτριων ποσοτήτων UV, δεν επαρκούν σε συνθήκες αυξημένης έντασης ή παρατεταμένης έκθεσης, γεγονός που καθιστά την υπεριώδη έναν από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους για την όραση.

9.4 Υπεριώδης Ακτινοβολία και Αστικά Οικοσυστήματα

Η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας μέσα στα αστικά οικοσυστήματα διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με τις αγροτικές ή φυσικές περιοχές, λόγω της μορφολογίας των πόλεων, της πυκνότητας δόμησης και των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται στο δομημένο περιβάλλον. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο UHI, οι πόλεις αποτελούν ιδιαίτερες μικροκλιματικές ενότητες, όπου η διάχυση, η αντανάκλαση και η απορρόφηση της ακτινοβολίας μεταβάλλουν την τοπική κατανομή της UV, δημιουργώντας ανισοκατανομή της έκθεσης μεταξύ επιφανειών και περιοχών.

Η αστική δομή επηρεάζει καθοριστικά την ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι αντανακλάσεις από κάθετες επιφάνειες, γυάλινες προσόψεις και ανοιχτόχρωμα υλικά αυξάνουν την ποσότητα της ανακλώμενης UV, η οποία μπορεί να φτάσει σε περιοχές που δεν εκτίθενται απευθείας στον ήλιο. Αντίθετα, η έλλειψη φυσικής σκίασης και πρασίνου οδηγεί σε αυξημένη έκθεση του ανθρώπινου σώματος, ιδίως κατά τους θερινούς μήνες. Σε ορισμένες περιοχές υψηλής ανακλαστικότητας, όπως πλατείες ή παραθαλάσσιες ζώνες με τσιμεντένιες και μαρμάρινες επιφάνειες, η τοπική δόση UV μπορεί να αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με ανοικτές, φυσικές περιοχές [128].

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ρυθμιστές της έντασης της UV στις πόλεις. Τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οξείδια του αζώτου και το διοξείδιο του θείου έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν και να διασκορπίζουν την ακτινοβολία, μειώνοντας την απευθείας συνιστώσα. Το αποτέλεσμα εξαρτάται από τη σύνθεση, τη συγκέντρωση και το ύψος του στρώματος ρύπανσης: σε ορισμένες περιπτώσεις, η UV μπορεί να μειωθεί σε επιφανειακό επίπεδο, ενώ σε άλλες, λόγω σκέδασης, μπορεί να ενισχυθεί η έκθεση σε περιοχές που βρίσκονται εκτός της άμεσης ηλιακής

ακτίνας. Αυτή η αντίρροπη επίδραση της ρύπανσης κάνει τη μέτρηση και την εκτίμηση της UV σε αστικά περιβάλλοντα ιδιαίτερα πολύπλοκη [117, 118, 125, 127 , 130].

Εν κατακλείδι, η υπεριώδης ακτινοβολία στα αστικά οικοσυστήματα δεν εξαρτάται μόνο από φυσικούς παράγοντες, αλλά και από ανθρωπογενείς μεταβολές στο περιβάλλον. Η αστική δόμηση, η ρύπανση και η έλλειψη σκίασης αλληλεπιδρούν, διαμορφώνοντας ένα δυναμικό ενεργειακό πεδίο που επηρεάζει τόσο τη μικροκλιματική ισορροπία όσο και τη δημόσια υγεία των κατοίκων.

9.5 Κοινωνικοοικονομικό Αποτύπωμα της UV

Η εκτεταμένη δράση της υπεριώδους ακτινοβολίας, πέρα από τις άμεσες βιολογικές επιπτώσεις στο δέρμα, στα μάτια και στο ανοσοποιητικό σύστημα, έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση ενός σημαντικού κοινωνικοοικονομικού αποτυπώματος. Η UV αποτελεί έναν από τους κυριότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες κινδύνου για την ανθρώπινη υγεία, με ολοένα αυξανόμενες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στα οικονομικά συστήματα. Οι καρκίνοι του δέρματος, που έχουν ήδη αναφερθεί ως οι πιο χαρακτηριστικές χρόνιες συνέπειες της υπερέκθεσης, αντιπροσωπεύουν τη συχνότερη μορφή κακοήθειας παγκοσμίως, με περισσότερα από ένα εκατομμύριο περιστατικά το 2002 μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες [127] και περίπου 2-3 εκατομμύρια ετησίως παγκοσμίως [126]. Από αυτά, το βασικοκυτταρικό καρκίνωμα αποτελεί περίπου το 80% των μη μελανωματικών καρκίνων, ενώ το ακανθοκυτταρικό το υπόλοιπο 20%, με τη θνησιμότητα να παραμένει σχετικά χαμηλή αλλά η νοσηρότητα υψηλή. Αντίθετα, το κακοήθες μελάνωμα, που ευθύνεται για περίπου 3% όλων των δερματικών καρκίνων, προκαλεί σχεδόν το 75% των θανάτων από αυτούς [126].

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο ετήσιος ρυθμός εμφάνισης μελανώματος αυξήθηκε από 6,8 ανά 100.000 άτομα το 1973 σε 17,4 ανά 100.000 το 1999 [128], ενώ το 2012 καταγράφηκαν 67.753 νέα περιστατικά και 9.251 θάνατοι, δηλαδή περίπου ένας θάνατος ανά ώρα [138]. Παράλληλα, παγκοσμίως καταγράφονται πάνω από 65.000 θάνατοι ετησίως που αποδίδονται σε μελανώματα προκαλούμενα από ηλιακή ακτινοβολία [126]. Αναλύσεις έχουν δείξει ότι 93% των καρκίνων του δέρματος και περίπου το ήμισυ των καρκίνων των χειλιών οφείλονται στην έκθεση σε ηλιακή UV ακτινοβολία [120]. Αυτές οι εκτιμήσεις καθιστούν την UV έναν από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς καρκινογόνους παράγοντες του σύγχρονου κόσμου.

Ακόμα, η αύξηση της UV έκθεσης έχει συμβάλει στην εκρηκτική αύξηση των καταρρακτών, οι οποίοι ευθύνονται για το 53% των περιπτώσεων τύφλωσης παγκοσμίως και αποτελούν σήμερα την πιο συχνή χειρουργική επέμβαση διεθνώς [128].

Το οικονομικό βάρος της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι εξαιρετικά υψηλό. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, περίπου πέντε εκατομμύρια άτομα υποβάλλονται ετησίως σε θεραπεία για καρκίνο του δέρματος, με συνολικό κόστος που υπερβαίνει τα 8,1 δισεκατομμύρια δολάρια [138]. Το πλήθος των δερματικών καρκίνων αυξήθηκε κατά 44% μεταξύ 2002 και 2011, ενώ ο αριθμός των ατόμων που υποβάλλονται σε θεραπεία αναμένεται να διπλασιαστεί τις επόμενες τρεις δεκαετίες [126, 138].

Σύμφωνα με μελέτες, μια μείωση 1% στο στρώμα του όζοντος, σε συνδυασμό με τη συνακόλουθη αύξηση της UVB ακτινοβολίας, συνεπάγεται αύξηση 1-2% στην θνησιμότητα από

μελανωματικούς καρκίνους του δέρματος. Αντίστοιχα, η αραίωση του στρατοσφαιρικού όζοντος κατά 10%, μπορεί να οδηγήσει σε περίπου 300.000 νέους μη μελανωματικούς και 4.500 μελανωματικούς καρκίνους [126]. Οι τάσεις αυτές καταδεικνύουν ότι το φαινόμενο έχει ισχυρή περιβαλλοντική, υγειονομική και οικονομική διάσταση, με άμεσο αντίκτυπο στη βιωσιμότητα των συστημάτων υγείας, την παραγωγικότητα και τη ποιότητα ζωής των πολιτών.

Συνοψίζοντας, η υπεριώδης ακτινοβολία έχει μετατραπεί από έναν φυσικό περιβαλλοντικό παράγοντα σε πολυδιάστατο κοινωνικό και οικονομικό ζήτημα, που εντείνεται από την κλιματική αλλαγή, την αστικοποίηση και την αραίωση του στρατοσφαιρικού όζοντος. Η διαρκής αύξηση της ανθρώπινης έκθεσης οδηγεί σε κλιμακούμενο φορτίο νοσηρότητας, θνησιμότητας και οικονομικών δαπανών, καθιστώντας αναγκαία την ενίσχυση των προληπτικών πολιτικών και την προαγωγή της ενημέρωσης του πληθυσμού.

10. ΥΓΡΑΣΙΑ

10.1 Η Σχέση Αστικοποίησης, Κλιματικής Αλλαγής και Ατμοσφαιρικής Υγρασίας

Η αστικοποίηση, όπως έχει ήδη αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, συνιστά έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που μεταβάλλουν το τοπικό μικροκλίμα μέσω των αλλαγών που επιφέρει στη θερμοκρασία, στη ρύπανση και επομένως στην ατμοσφαιρική υγρασία. Η πυκνή δόμηση, η απώλεια φυσικών επιφανειών, καθώς και η παρουσία εκτεταμένων σκληρών υλικών περιορίζουν την φυσική εξατμισοδιαπνοή, οδηγώντας σε μειωμένα επίπεδα σχετικής υγρασίας. Η μείωση αυτής της φυσικής διεργασίας οδηγεί σε ξηρότερα τοπικά μικροκλίματα, ενώ η θερμότητα που απορροφούν και εκπέμπουν οι αστικές επιφάνειες μειώνει περαιτέρω τη σχετική υγρασία, ιδίως κατά τους θερμούς μήνες. Αντίθετα, περιοχές με υψηλότερη παρουσία βλάστησης ή νερού σε συνδυασμό με κάποιες ανθρώπινες δραστηριότητες αυξάνουν τοπικά τη συγκέντρωση υδρατμών. Παρατηρούνται έτσι χωρικές διαφοροποιήσεις της σχετικής υγρασίας, με τα πυκνοδομημένα αστικά κέντρα να εμφανίζουν διαφορετικές τιμές σε σχέση με τις περιαστικές ή αγροτικές ζώνες. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αποτυπώνονται στα φαινόμενα των “Urban Dry Islands” και “Urban Moisture Islands”, που περιγράφουν την ανομοιογένεια της υγρασίας ως αποτέλεσμα διαφορών θερμοκρασίας, κάλυψης γης και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων [141].

Ωστόσο, οι μεταβολές αυτές δεν περιορίζονται στο επίπεδο της πόλης. Η αστικοποίηση και η κλιματική αλλαγή δρουν συνδυαστικά, ενισχύοντας η μία τις επιπτώσεις της άλλης. Οι πόλεις, ως κέντρα αυξημένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και θερμικής επιβάρυνσης, συμβάλλουν σημαντικά στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ ταυτόχρονα πλήττονται περισσότερο από αυτήν. Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη επιφέρει με τη σειρά της μεταβολές στο καθεστώς της ατμοσφαιρικής υγρασίας, καθώς η ικανότητα του αέρα να συγκρατεί υδρατμούς αυξάνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία [142]. Έτσι, οι αστικές περιοχές βιώνουν μια διπλή επίδραση: αφενός, οι τοπικές συνθήκες αστικοποίησης μεταβάλλουν το μικροκλίμα μειώνοντας ή αυξάνοντας την υγρασία, και αφετέρου, η κλιματική αλλαγή ενισχύει αυτές τις τάσεις μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας και της μεταβολής του υδρολογικού κύκλου.

10.2 Ορισμός, Είδη και Ρόλος της Ατμοσφαιρικής Υγρασίας

Η υγρασία αποτελεί έναν από τους πιο δυναμικούς και μεταβλητούς μετεωρολογικούς παράγοντες, ο οποίος παίζει κρίσιμο ρόλο τόσο στη φυσική ρύθμιση του κλίματος όσο και στην ανθρώπινη ευεξία. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μέτρησης της υγρασίας, ανάλογα με τη μεταβλητή που χρησιμοποιείται και τον στόχο της εκάστοτε μελέτης.

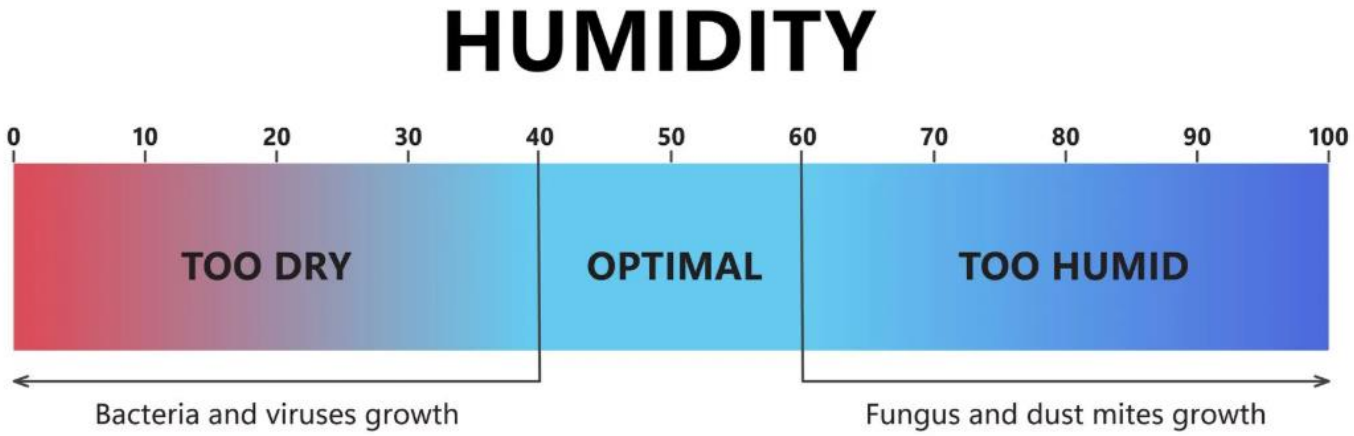
- **Απόλυτη Υγρασία (Absolute Humidity - AH):** Εκφράζει τη μάζα του υδρατμού ανά μονάδα όγκου αέρα (g/m^3). Αποτελεί άμεσο δείκτη της ποσότητας υδρατμών που περιέχονται σε συγκεκριμένο όγκο αέρα, όμως επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική πίεση [143-145].
- **Ειδική Υγρασία (Specific Humidity - SH)** και **Λόγος Ανάμειξης:** Εκφράζουν τη μάζα του υδρατμού ανά μονάδα μάζας αέρα ή ξηρού αέρα (g/kg), αντίστοιχα [145-147]. Οι δύο αυτές παράμετροι θεωρούνται πιο σταθερές, καθώς επηρεάζονται λιγότερο από τις μεταβολές της πίεσης και της

θερμοκρασίας, και χρησιμοποιούνται συχνά για τη μελέτη της ενεργειακής ισορροπίας της ατμόσφαιρας.

- **Σημείο Δρόσου (Dew Point):** Αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία στην οποία ο αέρας φτάνει σε κορεσμό και αρχίζει η συμπύκνωση των υδρατμών. Θεωρείται αξιόπιστος δείκτης της πραγματικής υγρασίας, καθώς εξαρτάται αποκλειστικά από τη συγκέντρωση υδρατμών στον αέρα και όχι από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος [144-146, 148, 149].
- **Σχετική Υγρασία (Relative Humidity - RH):** Είναι η πλέον γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή μέτρησης της υγρασίας. Εκφράζεται συχνά ως ποσοστό (%) και αποτυπώνει τον βαθμό κορεσμού του αέρα σε σχέση με το σημείο όπου αρχίζει η συμπύκνωση, υπολογιζόμενη ως ο λόγος της πραγματικής προς τη μέγιστη δυνατή ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας σε μια δεδομένη θερμοκρασία.

  Τα βέλτιστα επίπεδα σχετικής υγρασίας κυμαίνονται μεταξύ 40% και 60%, όπου οι συνθήκες θεωρούνται ιδανικές για την ανθρώπινη άνεση και υγεία. Τιμές κάτω από 40% χαρακτηρίζονται ως πολύ ξηρές (too dry) και ευνοούν την ανάπτυξη βακτηρίων και ιών, καθώς και την ξηρότητα του αναπνευστικού συστήματος. Αντίθετα, τιμές άνω του 60% υποδηλώνουν υπερβολική υγρασία (too humid), που μπορεί να οδηγήσει σε ανάπτυξη μυκήτων, μούχλας και ακάρεων σκόνης, επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Η διατήρηση της υγρασίας εντός του βέλτιστου εύρους (40-60%) είναι επομένως κρίσιμη για τη δημιουργία υγιεινού μικροκλίματος, τόσο σε κατοικίες όσο και σε αστικά περιβάλλοντα.

  Παράλληλα, η σχετική υγρασία εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία: αυξάνεται όταν ο αέρας ψύχεται και μειώνεται όταν θερμαίνεται, χωρίς να μεταβάλλεται η πραγματική ποσότητα υδρατμών [143-145, 147-151].



***Σχήμα 18**: Ενδεικτική απεικόνιση των επιπέδων RH και της επίδρασής τους στην ποιότητα του αέρα και την ανάπτυξη μικροοργανισμών [244]*

Η υγρασία διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στη θερμική άνεση και στη φυσιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού. Η εξάτμιση του ιδρώτα είναι ο βασικός μηχανισμός θερμορρύθμισης του σώματος, και η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται άμεσα από τη διαφορά μεταξύ της υγρασίας του δέρματος και της υγρασίας του περιβάλλοντος. Όταν η σχετική υγρασία του αέρα είναι υψηλή, η εξάτμιση δυσχεραίνεται και ο οργανισμός αδυνατεί να αποβάλλει θερμότητα, οδηγώντας σε θερμικό

στρες, λιποθυμία, κόπωση ή θερμοπληξία [146]. Αντιθέτως, πολύ χαμηλά επίπεδα υγρασίας προκαλούν ξηρότητα στους βλεννογόνους και στο δέρμα, αυξάνοντας την ευαισθησία σε λοιμώξεις και αναπνευστικά προβλήματα [143].

Η κατανόηση του ρόλου της υγρασίας στο περιβάλλον των πόλεων είναι απαραίτητη για την ολιστική προσέγγιση των μικροκλιματικών επιπτώσεων της αστικοποίησης και της κλιματικής αλλαγής. Η υγρασία, ως μεταβλητή που συνδέει τον ενεργειακό, τον υδρολογικό και τον βιολογικό κύκλο, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη διατήρηση της ισορροπίας ανάμεσα στη θερμική άνεση, την ποιότητα του αέρα και τη δημόσια υγεία.

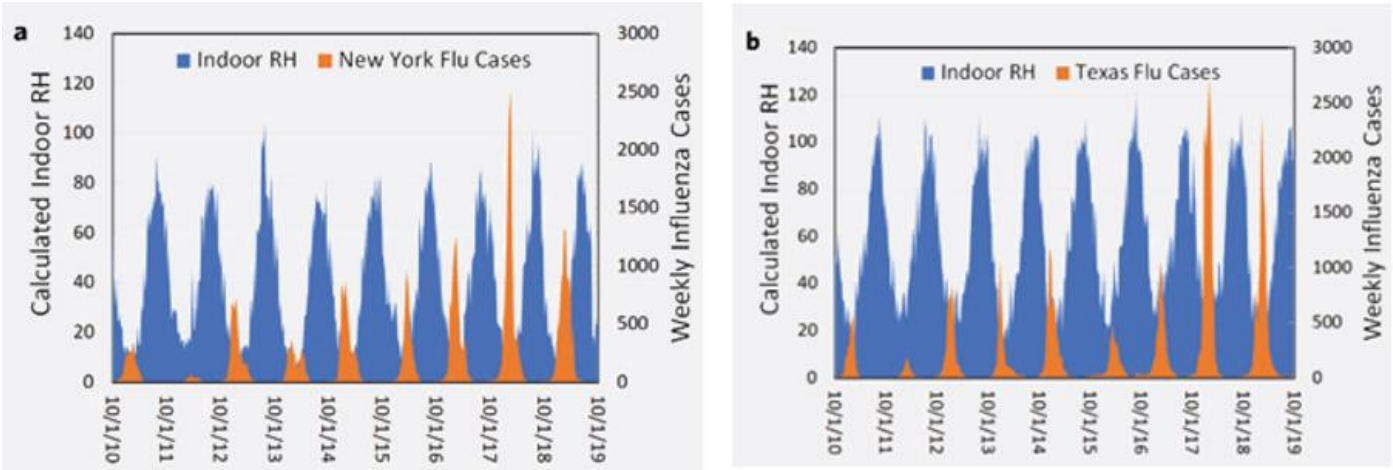
10.3 Υγρασία και Ανθρώπινη Υγεία

Η επίδραση της υγρασίας στην ανθρώπινη υγεία εκδηλώνεται σε πολλαπλά επίπεδα - από τη λειτουργία του αναπνευστικού και του δέρματος έως τη συνολική θερμική ισορροπία του οργανισμού.

10.3.1 Αναπνευστικό Σύστημα

Η σχετική υγρασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος [146, 147, 151-153], αυξάνοντας παράλληλα τις ιογενείς λοιμώξεις [141, 152-155, 157]. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι μεταβολές της υγρασίας επηρεάζουν άμεσα τόσο την επιβίωση των παθογόνων μικροοργανισμών όσο και την απόκριση των αεραγωγών στις εξωτερικές συνθήκες [146].

Σε χαμηλά επίπεδα υγρασίας, η εξάτμιση των σταγονιδίων αυξάνεται, δημιουργώντας μικρότερα σωματίδια που παραμένουν αιωρούμενα περισσότερο και διευκολύνουν τη μετάδοση ιών [154] όπως της γρίπης [146, 147, 155-157], του RSV [152, 155], του ανθρώπινου ρινοϊού και της γρίπης των πτηνών [155], καθώς και του SARS-CoV-2 [141]. Παράλληλα, η ξηρότητα των βλεννογόνων μειώνει τη φυσική άμυνα, καθιστώντας τον οργανισμό πιο ευάλωτο [156].



Σχήμα 19: *Συσχέτιση μεταξύ RH εσωτερικού αέρα και περιστατικών γρίπης σε Νέα Υόρκη (a) και Τέξας (b) κατά την περίοδο 2010–2019 [154]*

Αντίθετα, σε υψηλή σχετική υγρασία μειώνεται η μεταδοτικότητα, αλλά αυξάνεται η επιβίωση μικροοργανισμών και η ανάπτυξη μούχλας και μυκήτων σε εσωτερικούς χώρους [156]. Μαζί με τις ψυχρές συνθήκες εντείνουν τις εποχικές λοιμώξεις, καθώς μειώνουν τη λειτουργία του μηχανισμού που απομακρύνει βλέννα από τις αεροφόρες οδούς, και κατά συνέπεια εξασθενεί η τοπική ανοσολογική απόκριση [155].

Η διατήρηση επομένως της υγρασίας σε μέτρια επίπεδα είναι κρίσιμη για την προστασία της αναπνευστικής υγείας, τόσο μέσω της πρόληψης λοιμώξεων όσο και μέσω της μείωσης των φλεγμονωδών αντιδράσεων του αναπνευστικού συστήματος.

10.3.2 Δερματοπάθειες και Αλλεργίες

Η σχετική υγρασία επηρεάζει άμεσα τη δερματική και ανοσολογική ισορροπία του οργανισμού. Οι μεταβολές της συνδέονται με την εμφάνιση και επιδείνωση δερματοπαθειών και αλλεργικών νοσημάτων, όπως άσθμα [141, 146, 152, 158], αλλεργική ρινίτιδα [152] και ατοπικό έκζεμα [152, 150].

Μετα-ανάλυση του 2024 [158] κατέδειξε στατιστικά σημαντική συσχέτιση ανάμεσα σε αυξημένη υγρασία και επιβάρυνση των συμπτωμάτων άσθματος, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή ατμοσφαιρική υγρασία και περιορισμένο φυσικό αερισμό. Επιπρόσθετά, η χαμηλή υγρασία προκαλεί αυξημένη απώλεια νερού από το δέρμα και εξασθένηση της προστατευτικής λειτουργίας της επιδερμίδας, δηλαδή της ικανότητάς της να συγκρατεί την υγρασία και να εμποδίζει την είσοδο ερεθιστικών ή παθογόνων παραγόντων [150].

Η ισορροπία της υγρασίας είναι καθοριστική για τη διατήρηση της δερματικής υγείας και την πρόληψη αλλεργικών αντιδράσεων. Η ιδιαίτερη ευαλωτότητα ορισμένων πληθυσμών σε αυτές τις επιπτώσεις καθιστά απαραίτητη την εξέταση κοινωνικών και ηλικιακών διαφορών.

10.3.3 Ευάλωτες Πληθυσμιακές Ομάδες

Η επίδραση της υγρασίας στην ανθρώπινη υγεία διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με την ηλικία και τις κοινωνικές συνθήκες. Παιδιά, ηλικιωμένοι και άτομα με χρόνιες παθήσεις παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία στις μεταβολές της σχετικής υγρασίας, λόγω περιορισμένης θερμορύθμισης και ανοσολογικής απόκρισης.

Σύμφωνα με αναλύσεις, τα παιδιά είναι ιδιαίτερα ευάλωτα τόσο σε χαμηλή όσο και σε υψηλή υγρασία [152, 159]. Το αναπνευστικό τους σύστημα βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης και είναι πιο ευαίσθητο σε περιβαλλοντικούς παράγοντες και στις επιδράσεις της υγρασίας σε σχέση με των ενηλίκων [158].

Οι ηλικιωμένοι αντιμετωπίζουν αντίστοιχες δυσκολίες, καθώς έχουν μειωμένη αποτελεσματικότητα του βλεννοκροσσωτού μηχανισμού, με αποτέλεσμα σε συνθήκες χαμηλής σχετικής υγρασίας ο χρόνος κάθαρσης σακχαρίνης στους ανώτερους αεραγωγούς να είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σύγκριση με νεότερα άτομα, τα οποία εμφανίζονται λιγότερο ευαίσθητα. Το εύρημα

αυτό υποδηλώνει ότι οι ανώτεροι αεραγωγοί των ηλικιωμένων είναι λιγότερο αποτελεσματικοί στη διατήρηση της υγρασιακής ισορροπίας και στη βέλτιστη λειτουργία του μηχανισμού ανταπόκρισης [155]. Ακόμα, έχει βρεθεί ότι ακόμη και μικρή αύξηση της σχετικής υγρασίας (κατά 5% σε διάστημα επτά ημερών) συνδέεται με μείωση της ικανότητας εκπνοής και γενικότερα με επιβάρυνση της αναπνευστικής λειτουργίας [153], γεγονός που υποδηλώνει ότι ακόμη και βραχυχρόνιες μεταβολές της υγρασίας μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς το αναπνευστικό τους σύστημα [151].

Παράλληλα, οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες παίζουν κρίσιμο ρόλο, οπού στις ανεπτυγμένες χώρες ο τεχνολογικός έλεγχος του μικροκλίματος μειώνει τους κινδύνους, ενώ στις αναπτυσσόμενες η περιορισμένη πρόσβαση σε υγιεινή κατοικία και αερισμό αυξάνει τα περιστατικά λοιμώξεων και αλλεργιών [158].

Η αναγνώριση αυτών των διαφορών είναι απαραίτητη για τη χάραξη στοχευμένων πολιτικών δημόσιας υγείας, ικανών να περιορίσουν τις επιπτώσεις της υγρασίας στις ευπαθείς ομάδες και να ενισχύσουν τη συνολική ανθεκτικότητα των πληθυσμών.

10.4 Αλληλεπίδραση Υγρασίας με Ατμοσφαιρικούς Ρύπους και Ποιότητα Αέρα

Η υγρασία λειτουργεί ως ρυθμιστής της χημείας και της δυναμικής των ρύπων, τροποποιώντας τόσο τον σχηματισμό/μετασχηματισμό τους όσο και τις υγειονομικές τους επιδράσεις.

- **Σωματίδια & οργανικό αερόλυμα (OA):** Η αυξημένη RH ενισχύει σχηματισμούς/μεγέθυνση αερολυμάτων (υγροσκοπική αύξηση μεγέθους, αύξηση εσωτερικών VOC), ενώ η χαμηλή RH μπορεί να επηρεάζει άμεσα την υγεία ανεξάρτητα από την ποιότητα αέρα. Τα PM αποτελούν τον σοβαρότερο κίνδυνο για την υγεία και τα OA, υποσύνολο των PM, προκύπτουν από VOCs φυσικής και ανθρωπογενούς προέλευσης και τείνουν να αυξάνονται σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, ενισχύοντας τον σχηματισμό νέων σωματιδίων και την τοξικότητά τους [146, 155]. Επιπλέον, τα σωματίδια επηρεάζονται από την RH με εποχικές διαφοροποιήσεις (π.χ. μείωση PM2.5 τον χειμώνα με αύξηση RH, αντίστροφη τάση το καλοκαίρι) [155].
- **Προώθηση εσωτερικού όζοντος:** Παράλληλα, η χαμηλή σχετική υγρασία ευνοεί τον σχηματισμό όζοντος σε εσωτερικούς χώρους, το οποίο έχει ερεθιστική δράση στους βλεννογόνους, στα μάτια, στη ρινική και αναπνευστική οδό, επιδεινώνοντας την αίσθηση δυσφορίας και τα συμπτώματα ευαισθησίας [156].
- **Τροποποίηση επιδράσεων PM από την υγρασία:** Έχει βρεθεί ότι σε χαμηλή RH αυξάνεται η επίδραση αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία (π.χ. περισσότερες εισαγωγές για ΧΑΠ, ισχυρότερη σχέση PM10-θνησιμότητα) [146].
- **Εναπόθεση υγροσκοπικών σωματιδίων:** Σε υψηλή RH η εναπόθεση λεπτών σωματιδίων από παράγωγα καπνού στους ανώτερους αεραγωγούς μπορεί να γίνει 5-10 φορές εντονότερη σε σχέση με αδρανή σωματίδια [146].
- **Αεροαλλεργιογόνα:** Η χαμηλή RH διευκολύνει την απελευθέρωση/διασπορά γύρης και σε συνδυασμό με έντονα καιρικά φαινόμενα προκαλούν κρίσιμη αύξηση αλλεργικών εκδηλώσεων [146].

- **Εσωτερική ποιότητα αέρα (Indoor Air Quality - IAQ):** Υψηλή RH και θερμοκρασία επιβαρύνουν την άμεση αντίληψη της IAQ και αυξάνουν τις εκπομπές VOC από υλικά [155].
- **Κοινωνικο-περιβαλλοντικές ανισότητες:** Σε αναπτυσσόμενες χώρες/πόλεις η υψηλότερη ρύπανση αέρα και το φορτίο αλλεργιογόνων αλληλεπιδρούν με την υγρασία, αυξάνοντας την ευαισθησία και τον κίνδυνο παροξύνσεων άσθματος σε ασθενείς [158].
- **Λειτουργικές επιπτώσεις στην αναπνοή & συνέργειες με ρύπους:** Σε πληθυσμιακές μελέτες, η σχετική υγρασία συνδέεται με μειωμένη αναπνευστική απόδοση και φαίνεται να αλληλεπιδρά με βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι ο συνδυασμός υψηλής υγρασίας με αυξημένες συγκεντρώσεις SO_2 ή NO_2 σχετίζεται με μεγαλύτερη δυσκολία στην αναπνοή και περιορισμό του όγκου αέρα που μπορεί να εκπνευστεί, δηλαδή μειωμένη πνευμονική ικανότητα. Παρόμοια, η ταυτόχρονη αύξηση της υγρασίας και του O_3 φαίνεται να επιβαρύνει τη λειτουργία των μικρότερων αεραγωγών και να προκαλεί μεγαλύτερη αναπνευστική απόφραξη. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι η υγρασία δεν δρα απομονωμένα, αλλά μπορεί να ενισχύει ή να μεταβάλλει τον τρόπο με τον οποίο οι ρύποι επηρεάζουν το αναπνευστικό σύστημα [153].

Η υγρασία δεν είναι απλώς υπόβαθρο, αλλά συνδιαμορφώνει τον σχηματισμό, τη μεταφορά, την εναπόθεση και την τοξικότητα των ρύπων και των αλλεργιογόνων, με διπλής κατεύθυνσης επιπτώσεις ανάλογα με το επίπεδο RH, το είδος ρύπου, το πλαίσιο (εσωτερικό/εξωτερικό) και την εποχή.

10.5 Κλιματική Αλλαγή και Προβλέψεις Υγρασίας [142]

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, όπως έχει ήδη επισημανθεί στα προηγούμενα υποκεφάλαια, ενισχύει την ικανότητα του αέρα να συγκρατεί υδρατμούς, οδηγώντας σε μεταβολές τόσο στην απόλυτη όσο και στη σχετική υγρασία. Από το 1976 έως το 2004, οι παγκόσμιες μετρήσεις έδειξαν αύξηση της ειδικής υγρασίας κατά 0.06 g/kg ανά δεκαετία, με παράλληλη άνοδο της θερμοκρασίας κατά περίπου 0.16°C ανά δεκαετία. Στο ίδιο διάστημα, το Βόρειο Ημισφαίριο παρουσίασε ακόμη υψηλότερη αύξηση 0.08 g/kg ανά δεκαετία, ενώ η σχετική υγρασία αυξήθηκε έως και 2% ανά δεκαετία σε περιοχές όπως οι ανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες, η Ινδία και η δυτική Κίνα.

Η αύξηση της ειδικής και απόλυτης υγρασίας λειτουργεί ως θετική ανάδραση στο σύστημα του κλίματος. Μελέτες δείχνουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C συνοδεύεται από αύξηση της επιφανειακής ειδικής υγρασίας κατά περίπου 4-5%. Το φαινόμενο αυτό ενισχύει τις βροχοπτώσεις και τις συγκεντρώσεις υδρατμών στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας σε αύξηση των ακραίων επεισοδίων βροχόπτωσης, και οδηγεί σε μεγαλύτερη μεταβλητότητα του υδρολογικού κύκλου.

Η προβλεπόμενη άνοδος της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας αναμένεται να συνοδευτεί από έντονες χωρικές ανισορροπίες στην υγρασία. Οι τροπικές και υποτροπικές περιοχές προβλέπεται να βιώσουν αυξημένα επίπεδα απόλυτης υγρασίας, ενώ οι εύκρατες και ξηρές περιοχές πιθανόν να υποστούν μείωση της σχετικής υγρασίας, επιδεινώνοντας φαινόμενα ξηρασίας, θερμικής καταπόνησης και ενεργειακής ανισορροπίας.

Παράλληλα, οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία προβλέπεται να γίνουν εντονότερες. Η αύξηση της απόλυτης υγρασίας σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες περιορίζει την αποτελεσματικότητα

των μηχανισμών θερμορρύθμισης, οδηγώντας σε αύξηση των περιστατικών θερμικής καταπόνησης και αφυδάτωσης και, κατ' επέκταση, στις επιβλαβείς παθήσεις που αναφέρθηκαν. Αντιθέτως, η μείωση της σχετικής υγρασίας σε ορισμένες περιοχές ενδέχεται να προκαλέσει επιδείνωση δερματικών και αναπνευστικών προβλημάτων, καθώς και αύξηση της μεταδοτικότητας ιογενών λοιμώξεων.

Με βάση αυτά, προβλέπεται ότι τα φαινόμενα "Urban Moisture Islands" και "Urban Dry Islands" θα ενισχυθούν περαιτέρω κατά τις επόμενες δεκαετίες, οδηγώντας σε εντονότερες μικροκλιματικές αντιθέσεις εντός του αστικού ιστού, επιβαρύνοντας έντονα τους κάτοικους.

Συνοψίζοντας, η κλιματική αλλαγή επαναπροσδιορίζει τη δυναμική της υγρασίας σε πλανητικό και τοπικό επίπεδο, με συνέπειες που αγγίζουν τόσο τα φυσικά οικοσυστήματα όσο και τον άνθρωπο. Η ολοκληρωμένη κατανόηση των σχέσεων αυτών, μέσα από τη σύνδεση φυσικών διεργασιών και κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων, αποτελεί προϋπόθεση για τη βιώσιμη αντιμετώπιση των κλιματικών προκλήσεων και τη διασφάλιση της υγείας και της ποιότητας ζωής των πληθυσμών του μέλλοντος.

11. ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

11.1 Η Δυναμική της Βαρομετρικής Πίεσης

Η βαρομετρική πίεση, όπως και η σχετική υγρασία που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί έναν από τους βασικότερους ατμοσφαιρικούς παράγοντες που συμβάλλουν στη διαμόρφωση των μικροκλιματικών συνθηκών ενός περιβάλλοντος. Ενώ η υγρασία επηρεάζει σημαντικά τη θερμική άνεση, τη θερμοκρασία του αέρα και τη λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος, η βαρομετρική πίεση συνδέεται στενά με τη συνολική δυναμική της ατμόσφαιρας, καθορίζοντας την κυκλοφορία των αερίων μαζών, την ανάπτυξη καιρικών συστημάτων και, τελικά, τη μεταβολή άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων.

Οι μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης δεν είναι μόνο ενδεικτικές των καιρικών διακυμάνσεων αλλά και της γενικότερης κλιματικής αστάθειας που χαρακτηρίζει τα τελευταία χρόνια την εποχή της κλιματικής αλλαγής. Η πίεση αντικατοπτρίζει τη συμπεριφορά του ατμοσφαιρικού συστήματος, το οποίο υπό την επίδραση της αστικοποίησης και της θερμικής νησίδας παρουσιάζει τοπικές διαφοροποιήσεις, επηρεάζοντας τις συνθήκες διαβίωσης στις πόλεις. Η σταδιακή μεταβολή των μετεωρολογικών προτύπων, όπως η αυξημένη συχνότητα χαμηλών βαρομετρικών πιέσεων, συνδέεται με την αυξανόμενη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων και, κατ' επέκταση, με επιδράσεις στη δημόσια υγεία.

Αν και η βαρομετρική πίεση δεν είναι άμεσα αντιληπτή από τον άνθρωπο, οι διακυμάνσεις της έχουν αποδειχθεί ικανές να επηρεάσουν τη φυσιολογία του οργανισμού. Πολλές επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι τόσο οι απότομες πτώσεις όσο και οι αυξήσεις της πίεσης σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο νοσηρότητας [160, 164] και θνησιμότητας [160, 161] από διάφορες παθολογικές καταστάσεις. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί αύξηση των καρδιαγγειακών συμβάντων (όπως εμφράγματα [161-163] και στεφανιαίοι θάνατοι [160, 161]) σε περιόδους χαμηλής ή απότομα μεταβαλλόμενης πίεσης, αλλά και αυξημένα περιστατικά εγκεφαλικών επεισοδίων [162, 165-167] ή ρήξεων ανευρυσμάτων ύστερα από έντονες ημερήσιες μεταβολές άνω των 10 hPa [165]. Επιπλέον, η χαμηλή πίεση έχει συνδεθεί με αυξημένα ποσοστά θνησιμότητας λόγω καρδιακών νοσημάτων [161] καθώς και με την επιδείνωση ρευματικών [168] και αρθριτικών πόνων [169, 170], ιδιαίτερα σε περιόδους μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών.

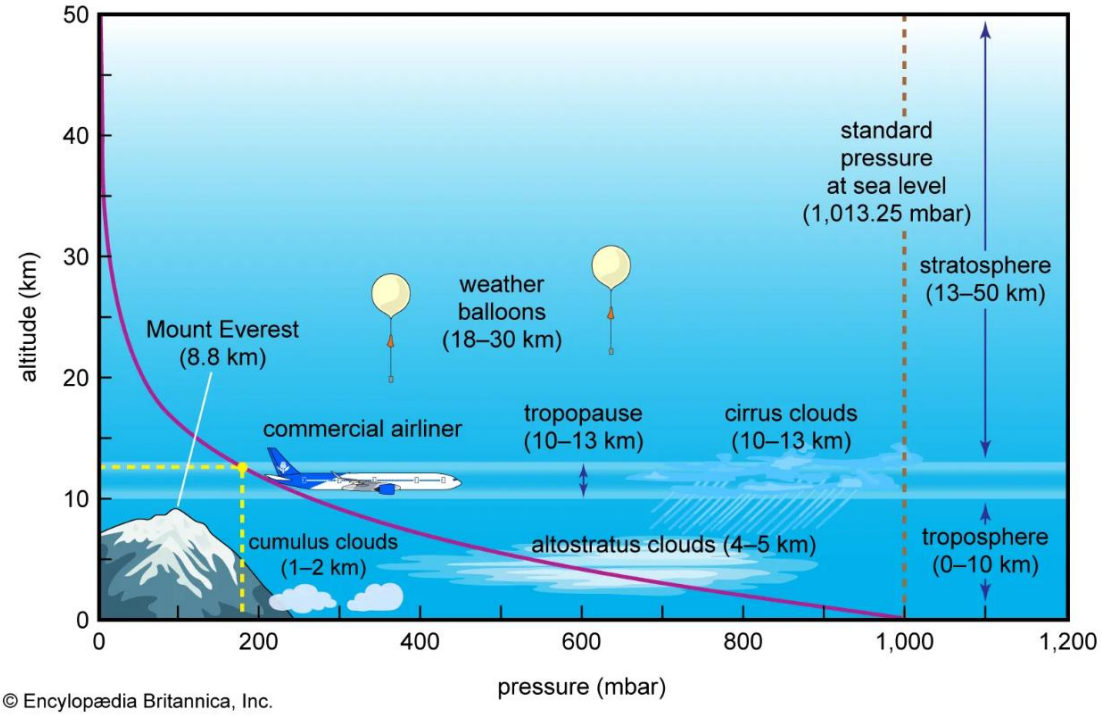
Συνολικά, η βαρομετρική πίεση, ως παράμετρος στενά συνδεδεμένη με την κλιματική μεταβλητότητα, φαίνεται να λειτουργεί ως κρίσιμος δείκτης των επιπτώσεων του κλίματος στην ανθρώπινη υγεία, αντικατοπτρίζοντας τόσο τις άμεσες φυσιολογικές αντιδράσεις του οργανισμού όσο και τις ευρύτερες περιβαλλοντικές μεταβολές που επηρεάζουν την καθημερινή ζωή στα αστικά κέντρα.

11.2 Φυσική Έννοια και Ρόλος της Βαρομετρικής Πίεσης

Η βαρομετρική πίεση πρόκειται για έναν από τους θεμελιώδεις μετεωρολογικούς και ορίζεται ως η δύναμη που ασκεί το βάρος της ατμόσφαιρας ανά μονάδα επιφάνειας στη γήινη επιφάνεια [171]. Η

μέτρησή της γίνεται συνήθως σε hectoPascal (hPa), και η μέση τιμή στο επίπεδο της θάλασσας θεωρείται περίπου 1013 hPa, που αντιστοιχεί στην πρότυπη ατμοσφαιρική πίεση [172].

Η πίεση μεταβάλλεται φυσιολογικά με το υψόμετρο [173], καθώς υπάρχει μικρότερη πυκνότητα και ποσότητα αερίων μορίων στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αντίστοιχα, επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, καθώς ο θερμός αέρας διαστέλλεται και γίνεται ελαφρύτερος, οδηγώντας σε μείωση της πίεσης, ενώ ο ψυχρός αέρας είναι πυκνότερος και αυξάνει την πίεση [174]. Αυτές οι διαφοροποιήσεις προκαλούν την οριζόντια μετακίνηση των αερίων μαζών, δηλαδή τη δημιουργία ανέμων, που τείνουν να εξισώσουν τις διαφορές πίεσης μεταξύ περιοχών υψηλής και χαμηλής βαρομετρικής τιμής.



Σχήμα 20: *Σχέση ατμοσφαιρικής πίεσης (mbar) και υψομέτρου (km) στην τροπόσφαιρα και στη στρατόσφαιρα [245]*

Οι διακυμάνσεις της βαρομετρικής πίεσης αποτελούν την κύρια κινητήρια δύναμη των καιρικών μεταβολών. Οι περιοχές χαμηλής πίεσης συνδέονται με ανοδικά ρεύματα αέρα, νεφοκάλυψη και αυξημένη πιθανότητα βροχοπτώσεων, ενώ οι περιοχές υψηλής πίεσης χαρακτηρίζονται από καθοδικά ρεύματα, ξηρό και σταθερό καιρό. Τα ψυχρά και θερμά μέτωπα, που αποτελούν τα όρια μεταξύ διαφορετικών αερίων μαζών, σχηματίζονται ακριβώς λόγω αυτών των διαφορών πίεσης και θερμοκρασίας, επηρεάζοντας τη ροή και την κατανομή της ενέργειας στην ατμόσφαιρα.

Μελέτες που εξετάζουν τη σχέση της πίεσης με την υγεία αναδεικνύουν ότι ακόμα και μικρές μεταβολές, της τάξης των 5-10 hPa, μπορούν να επιφέρουν φυσιολογικές αντιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, ενώ παράλληλα σηματοδοτούν αλλαγές στο μικροκλίμα και την ενεργειακή ισορροπία του περιβάλλοντος [172, 173, 175]. Έτσι, η βαρομετρική πίεση αποτελεί έναν κρίσιμο σύνδεσμο ανάμεσα στη φυσική λειτουργία της ατμόσφαιρας και στις ανθρωπογενείς επιπτώσεις.

11.3 Επιδράσεις της Βαρομετρικής Πίεσης στην Ανθρώπινη Υγεία

11.3.1 Καρδιαγγειακές και Αναπνευστικές Παθήσεις

Η βαρομετρική πίεση έχει αποδειχθεί ότι ασκεί σημαντική επίδραση στη λειτουργία του καρδιαγγειακού και αναπνευστικού συστήματος, με ποικίλες φυσιολογικές και παθολογικές συνέπειες. Οι μεταβολές της πίεσης μπορούν να επηρεάσουν τη ροή του αίματος [161, 164, 171, 172] και την οξυγόνωση των ιστών [173], οδηγώντας σε αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης οξέων καρδιαγγειακών επεισοδίων, όπως οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου και στεφανιαίο θάνατο.

Σε μεγάλες επιδημιολογικές μελέτες, παρατηρήθηκε ότι οι μεταβολές βαρομετρικής πίεσης συνδέονται με αύξηση της συχνότητας εμφράγματος του μυοκαρδίου και στεφανιαίων θανάτων έως και 12% σε σχέση με φυσιολογικά επίπεδα [160]. Επιπλέον, η μείωση της βαρομετρικής πίεσης συνδέεται με πτώση της οξυγόνωσης του αίματος, οδηγώντας σε υποξία, ταχυκαρδία και αυξημένο καρδιακό φορτίο, γεγονός που ενισχύει τον κίνδυνο οξέων καρδιοαναπνευστικών επεισοδίων [161].

Αναφορικά με το αναπνευστικό σύστημα, αρκετές μελέτες τεκμηριώνουν τη σύνδεση της βαρομετρικής πίεσης με την εμφάνιση ή επιδείνωση αναπνευστικών παθήσεων, όπως η πνευμονική εμβολή. Έρευνες δείχνουν ότι οι πτώσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης σχετίζονται με αυξημένη επίπτωση πνευμονικών εμβολών και βαθύτερη αναπνευστική δυσχέρεια, λόγω της μείωσης του κορεσμού οξυγόνου στο αίμα και της μεταβολής της ατμοσφαιρικής οξυγονικής πίεσης [163, 173]. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές υποδεικνύουν ότι η βαρομετρική πίεση δρα ως πολυπαραγοντικός περιβαλλοντικός δείκτης, ο οποίος επηρεάζει άμεσα την καρδιοαναπνευστική σταθερότητα του ανθρώπινου οργανισμού.

11.3.2 Νευρολογικές και Εγκεφαλοαγγειακές Επιπτώσεις

Οι επιπτώσεις της βαρομετρικής πίεσης δεν περιορίζονται μόνο στο καρδιαγγειακό και αναπνευστικό σύστημα, αλλά εκτείνονται και στο νευρολογικό πεδίο, επηρεάζοντας τη λειτουργία του εγκεφάλου και των αγγειακών δομών του. Η ατμοσφαιρική πίεση, ως παράμετρος που ρυθμίζει την οξυγόνωση του αίματος και την αιμοδυναμική σταθερότητα, φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση εγκεφαλοαγγειακών επεισοδίων.

Αρκετές επιδημιολογικές μελέτες έχουν αναδείξει ότι οι απότομες μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης συνδέονται με αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης εγκεφαλικών επεισοδίων, κυρίως αιμορραγικών. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι τόσο οι απότομες πτώσεις όσο και οι αυξήσεις της πίεσης μπορούν να λειτουργήσουν ως εκλυτικοί παράγοντες ρήξης ανευρυσμάτων, οδηγώντας σε υπαραχνοειδείς ή ενδοεγκεφαλικές αιμορραγίες [176]. Συγκεκριμένα, σε μια μελέτη [165], η πιθανότητα ρήξης ανευρύσματος αυξήθηκε έως και 2,7 φορές ύστερα από ημερήσια μεταβολή πίεσης μεγαλύτερη των 10 hPa.

Παράλληλα, οι υποξικές καταστάσεις μπορούν να διαταράξουν και την εγκεφαλική αιμάτωση και να προκαλέσουν ισχαιμικά επεισόδια, ιδιαίτερα σε άτομα με προϋπάρχουσα αγγειακή ευπάθεια [166].

Οι νευροφυσιολογικές διαταραχές που προκαλούνται από τις διακυμάνσεις της πίεσης φαίνεται να επηρεάζουν και άλλες εγκεφαλικές λειτουργίες, όπως την ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου, οδηγώντας σε επιληπτικές κρίσεις ή αύξηση της νευροαγγειακής διεγερσιμότητας [183].

Η σχέση της βαρομετρικής πίεσης με τη νευρολογική συμπτωματολογία είναι εμφανής και στις μελέτες που αφορούν πονοκεφάλους και ημικρανίες [172, 175, 180]. Έρευνες έχουν δείξει ότι η πτώση της πίεσης συχνά προηγείται της εμφάνισης κρίσεων ημικρανίας, ενώ οι απότομες αυξήσεις δύνανται επίσης να λειτουργήσουν ως πυροδοτικοί παράγοντες. Οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν την ενδοκράνια αιματική ροή και τη διαστολή των εγκεφαλικών αγγείων, γεγονός που εξηγεί τη συχνή εμφάνιση κεφαλαλγιών κατά τη διάρκεια έντονων μετεωρολογικών μεταβολών [172].

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η εποχικότητα που παρουσιάζουν τα εγκεφαλοαγγειακά περιστατικά. Μελέτες καταγράφουν αύξηση των περιστατικών κατά τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, περίοδοι κατά τις οποίες οι διακυμάνσεις της βαρομετρικής πίεσης είναι εντονότερες λόγω της μετάβασης μεταξύ ψυχρών και θερμών μετώπων [165, 176-179].

11.3.3 Μυοσκελετικά και Ρευματικά Νοσήματα

Οι διακυμάνσεις της βαρομετρικής πίεσης έχουν επίσης αποδειχθεί ότι επηρεάζουν σημαντικά το μυοσκελετικό σύστημα, με ιδιαίτερη έμφαση στα ρευματικά και εκφυλιστικά νοσήματα όπως η αρθρίτιδα και η οστεοαρθρίτιδα. Πολλές μελέτες έχουν αναδείξει τη συσχέτιση των μεταβολών της πίεσης με την ένταση του πόνου στις αρθρώσεις, την κινητικότητα και τη φλεγμονώδη αντίδραση των ιστών, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τη φυσιολογία των αρθρικών επιφανειών και των μαλακών ιστών.

Μελέτη του 2004 που πραγματοποιήθηκε στην Κόρδοβα της Αργεντινής εξέτασε τη σχέση μεταξύ καιρικών παραγόντων και ρευματικού πόνου σε 151 ασθενείς με ρευματοειδή αρθρίτιδα, οστεοαρθρίτιδα και ινομυαλγία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ασθενείς με ρευματοειδή αρθρίτιδα παρουσίαζαν αυξημένο πόνο σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, ενώ παρόμοια ευαισθησία σε μεταβολές του καιρού παρατηρήθηκε και στους ασθενείς με ινομυαλγία, οι οποίοι εμφάνιζαν εντονότερα συμπτώματα υπό τις ίδιες συνθήκες. Αντίθετα, οι υγιείς συμμετέχοντες δεν παρουσίασαν σημαντικές μεταβολές στα επίπεδα πόνου [168]. Επομένως, παρατηρείται ότι η υποκειμενική «ευαισθησία στον καιρό» είναι συχνότερη σε ρευματοπαθείς, επιβεβαιώνοντας ότι οι μετεωρολογικοί παράγοντες λειτουργούν ως περιβαλλοντικοί ρυθμιστές της αρθρικής λειτουργίας και της νευροαισθητικής αντίληψης του πόνου

Ακόμα, η μείωση της εξωτερικής πίεσης φαίνεται να οδηγεί σε αύξηση της ενδοαρθρικής πίεσης, καθώς οι ιστοί και τα αρθρικά υγρά διαστέλλονται, προκαλώντας μηχανική πίεση στους νευρικούς υποδοχείς της άρθρωσης και ενίσχυση της αίσθησης του πόνου. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της πίεσης μπορεί επίσης να προκαλέσει δυσφορία σε ορισμένες μορφές φλεγμονώδους αρθρίτιδας [168, 169].

Η παρατήρηση αυτή ενισχύει την άποψη ότι οι μυοσκελετικές διαταραχές επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της βαρομετρικής πίεσης, οι οποίες δρουν ως μηχανικός και αγγειακός παράγοντας πόνου.

Συνεπώς, η πίεση μπορεί να θεωρηθεί ως ένας περιβαλλοντικός ρυθμιστής της αρθρικής λειτουργίας και της αντίληψης του πόνου, ο οποίος συμβάλλει στην περιοδικότητα και την ένταση των ρευματικών συμπτωμάτων υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.

11.3.4 Ψυχική και Νευρολογική Λειτουργία

Πέρα από αυτές τις επιδράσεις, η βαρομετρική πίεση φαίνεται να επηρεάζει και τη ψυχική υγεία και τη γνωστική λειτουργία του ανθρώπου. Οι μεταβολές της πίεσης, ως μέρος των γενικότερων μετεωρολογικών διακυμάνσεων, μπορούν να επηρεάσουν τη νευροχημεία του εγκεφάλου, τη ρύθμιση των ορμονών και τη διάθεση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση καταθλιπτικών συμπτωμάτων, άγχους και διαταραχών ύπνου.

Πολλές μελέτες έχουν καταγράψει στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ χαμηλής βαρομετρικής πίεσης και αύξησης καταθλιπτικών επεισοδίων [161, 180-182]. Η μείωση της πίεσης συνδέεται με πτώση των επιπέδων οξυγόνου και επακόλουθη νευροχημική ανισορροπία, η οποία επηρεάζει τους νευροδιαβιβαστές που σχετίζονται με τη ρύθμιση της διάθεσης, όπως η σεροτονίνη και η ντοπαμίνη. Σε συνδυασμό με τις ψυχολογικές επιπτώσεις των καιρικών αλλαγών, η χαμηλή πίεση μπορεί να προκαλέσει αίσθημα κόπωσης, αρά και μειωμένα επίπεδα ενέργειας, εντείνοντας τα συμπτώματα σε άτομα με καταθλιπτικές ή αγχώδεις διαταραχές [181].

Επιπλέον, έχει αναφερθεί συσχέτιση των απότομων μεταβολών της πίεσης με αυξημένα ποσοστά αυτοκτονιών, ιδιαίτερα κατά περιόδους όπου οι βαρομετρικές τιμές παρουσιάζουν έντονη ημερήσια μεταβλητότητα. Οι ερευνητές επισημαίνουν ότι οι αλλαγές αυτές, μέσω του μηχανισμού της υποξίας και των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και της υγρασίας, μπορούν να μεταβάλλουν την ορμονική απάντηση στο στρες και να επηρεάσουν αρνητικά την ψυχολογική σταθερότητα. Παρόμοια ευρήματα καταδεικνύουν ότι οι ημερήσιες ή εποχικές πτώσεις πίεσης ενδέχεται να επιδεινώνουν τη συναισθηματική αστάθεια και να συνδέονται με αύξηση περιστατικών αυτοτραυματισμού [181, 182].

Η επίδραση της βαρομετρικής πίεσης επεκτείνεται και στις διαταραχές ύπνου. Έρευνες δείχνουν ότι οι χαμηλές τιμές πίεσης σχετίζονται με άπνοια και αϋπνία, δηλαδή μειωμένη ποιότητα ύπνου που πιθανώς οφείλεται σε μειωμένη οξυγόνωση του συστήματος [181, 183].

Επομένως, οι διακυμάνσεις της βαρομετρικής πίεσης, και ιδιαίτερα οι χαμηλές τιμές, φαίνεται να ασκούν πολυεπίπεδη επίδραση στην ψυχική υγεία, επηρεάζοντας τη διάθεση και τη συναισθηματική σταθερότητα. Η αλληλεπίδραση αυτή υπογραμμίζει τη σημασία των περιβαλλοντικών παραμέτρων στη διαμόρφωση της ψυχολογικής ευεξίας, ιδίως σε ένα μεταβαλλόμενο κλιματικό πλαίσιο όπου οι ατμοσφαιρικές διακυμάνσεις τείνουν να εντείνονται.

11.3.5 Άλλες Φυσιολογικές Αντιδράσεις

Επιπλέον, οι διακυμάνσεις της βαρομετρικής πίεσης φαίνεται να επηρεάζουν πολλαπλά συστήματα του ανθρώπινου οργανισμού, όπως το αισθητηριακό, το ωτορινολαρυγγολογικό και το στοματικό, ή ακόμα μέχρι και το γαστρεντερικό και το αναπνευστικό. Οι φυσιολογικές αντιδράσεις

ποικίλλουν ανάλογα με την ένταση και τη διάρκεια των μεταβολών, εκδηλώνοντας συμπτώματα που κυμαίνονται από ωτική δυσφορία και οδοντικό πόνο έως φλεγμονώδεις επιπλοκές και αυξημένη ευαλωτότητα σε λοιμώξεις.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εμφάνιση πόνου στα δόντια και ενόχλησης στα αυτιά κατά τις απότομες αλλαγές της βαρομετρικής πίεσης. Η πτώση της εξωτερικής πίεσης μπορεί να προκαλέσει διαφορά πίεσης μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής κοιλότητας του αυτιού, οδηγώντας σε πίεση στον τυμπανικό υμένα και δυσφορία, ειδικά σε άτομα με ιστορικό νόσου Meniere [174, 184]. Παράλληλα, η ίδια μεταβολή μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την στοματική κοιλότητα και την οδοντοστοιχία, προκαλώντας οδοντικό πόνο ή ευαισθησία, φαινόμενο που συχνά παρατηρείται σε ασθενείς με προϋπάρχουσες φλεγμονές ή περιοδοντικά προβλήματα [185].

Ακόμα, πρόσφατα επιδημιολογικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι οι μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης ενδέχεται να επηρεάζουν και την επίπτωση της οξείας σκωληκοειδίτιδας. Σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στην Ιαπωνία και στη Σερβία, παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές τάσεις συσχέτισης μεταξύ αύξησης της βαρομετρικής πίεσης και εμφάνισης επεισοδίων σκωληκοειδίτιδας, ιδίως κατά τις θερινές και φθινοπωρινές περιόδους. Τα αποτελέσματα της σέρβικης μελέτης έδειξαν ότι κάθε αύξηση της μέσης ημερήσιας πίεσης κατά 1 mBar συνδέεται με μεταβολή 2-3% στον κίνδυνο εμφάνισης σκωληκοειδίτιδας, ανάλογα με την ηλικιακή ομάδα και το φύλο, με εντονότερη επίδραση στους άνδρες κάτω των 30 ετών [186].

Επιπλέον, σημαντική είναι και η σύνδεση της βαρομετρικής πίεσης με τις αναπνευστικές λοιμώξεις και την εποχικότητα των ιογενών επιδημιών. Μελέτες καταγράφουν ότι η χαμηλή πίεση, σε συνδυασμό με χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή υγρασία, ευνοεί τη διασπορά ιών του αναπνευστικού, όπως του RSV [187].

Συνολικά, οι ποικίλες αυτές φυσιολογικές αντιδράσεις αποδεικνύουν ότι η βαρομετρική πίεση αποτελεί έναν πολυπαραγοντικό περιβαλλοντικό παράγοντα που επηρεάζει διαφορετικά συστήματα του ανθρώπινου οργανισμού.

11.4 Συνδυαστική Επίδραση Βαρομετρικής Πίεσης και Άλλων Παραγόντων

Η βαρομετρική πίεση σπάνια δρα μεμονωμένα ως παράγοντας επιβάρυνσης της ανθρώπινης υγείας. Αντίθετα, οι επιπτώσεις της εντείνονται όταν συνδυάζεται με άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία. Ο συνδυασμός αυτών των τριών παραμέτρων δημιουργεί ένα πολυπαραγοντικό πλαίσιο, το οποίο επηρεάζει τη φυσιολογική ομοιόσταση του οργανισμού και αυξάνει τον κίνδυνο νοσηρότητας και θνησιμότητας.

Πλήθος επιδημιολογικών μελετών επιβεβαιώνουν ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την κατανόηση των επιπτώσεων των μετεωρολογικών συνθηκών στη δημόσια υγεία. Παρατηρείται ότι τα ποσοστά θνησιμότητας αυξάνονται σημαντικά όταν οι απότομες μεταβολές της πίεσης συμπίπτουν με ακραίες θερμοκρασίες, είτε υψηλές είτε χαμηλές [161]. Αντίστοιχα, οι χαμηλές τιμές βαρομετρικής πίεσης σε συνδυασμό με χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή υγρασία έχουν συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο πνευμονικής εμβολής [163],

υποδεικνύοντας τη συστηματική επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών στην καρδιοαναπνευστική λειτουργία.

Η συνδυαστική δράση των τριών αυτών παραμέτρων δεν περιορίζεται στο καρδιοαναπνευστικό σύστημα, αλλά επηρεάζει και το νευρολογικό και αγγειακό πεδίο. Ερευνητικά δεδομένα δείχνουν ότι οι απότομες μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης και της σχετικής υγρασίας, σε συνδυασμό με χαμηλές θερμοκρασίες, αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο ισχαιμικών και αιμορραγικών εγκεφαλικών επεισοδίων [167]. Παράλληλα, σε ασθενείς με χρόνιες παθήσεις, όπως ρευματοειδή αρθρίτιδα και ινομυαλγία, έχει καταγραφεί αύξηση της έντασης του πόνου και της δυσκαμψίας υπό μεταβαλόμενες συνθήκες των παραμέτρων [168, 169, 188].

Επιπλέον, η συνδυασμένη μεταβολή βαρομετρικής πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας φαίνεται να επηρεάζει τη σοβαρότητα της άπνοιας, με τον δείκτη άπνοιας να συσχετίζεται αντίστροφα με τη θερμοκρασία και άμεσα με την ατμοσφαιρική πίεση και την υγρασία [189]. Το εύρημα αυτό ενισχύει την άποψη ότι οι μετεωρολογικές παράμετροι επηρεάζουν όχι μόνο τη λειτουργία του καρδιοαναπνευστικού συστήματος, αλλά και τη ρύθμιση της αναπνοής και της οξυγόνωσης.

Πέρα από τις φυσιολογικές επιδράσεις, η πολυπαραγοντική κλιματική αλληλεπίδραση έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει και την ψυχική υγεία επηρεάζοντας έμμεσα τη διάθεση και τη συμπεριφορά, καθώς και τα ποσοστά καταθλιπτικών και αυτοκτονικών επεισοδίων [182].

Συνολικά, η πολυπλοκότητα των συσχετίσεων μεταξύ βαρομετρικής πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας υποδηλώνει ότι η πίεση λειτουργεί ως ενδιάμεσος ρυθμιστής των επιδράσεων των υπόλοιπων μετεωρολογικών παραμέτρων στον ανθρώπινο οργανισμό. Η μεταβολή της επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας στο περιβάλλον, επιδρώντας έμμεσα στη θερμοφυσιολογία του σώματος και στη λειτουργία του καρδιοαναπνευστικού και νευροφυσιολογικού συστήματος. Επομένως, η παρατήρηση της συνδυαστικής αυτής δράσης είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής μεταβλητότητας στη δημόσια υγεία.

11.5 Συμπεράσματα

Η βαρομετρική πίεση αποτελεί έναν από τους πλέον καθοριστικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τη δυναμική της ατμόσφαιρας όσο και την ανθρώπινη φυσιολογία. Μέσα από τη μελέτη της προκύπτει ότι, παρότι πρόκειται για έναν παράγοντα μη άμεσα αντιληπτό από τον άνθρωπο, οι διακυμάνσεις της πίεσης αντικατοπτρίζουν τη λειτουργία του ατμοσφαιρικού συστήματος και συνδέονται με σημαντικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία.

Η ανάλυση των ερευνητικών δεδομένων δείχνει πως οι μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης, ιδιαίτερα οι απότομες πτώσεις ή αυξήσεις, μπορούν να επιφέρουν πολλαπλές φυσιολογικές αντιδράσεις. Οι χαμηλές τιμές πίεσης σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο καρδιαγγειακών επεισοδίων, αναπνευστικής δυσχέρειας, αλλά και νευρολογικών διαταραχών όπως εγκεφαλικά επεισόδια και ρήξη ανευρυσμάτων. Παράλληλα, οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν τη μυοσκελετική λειτουργία, επιδεινώνοντας ρευματικούς και αρθριτικούς πόνους, ενώ επεκτείνονται και στο πεδίο της ψυχικής υγείας, συνδεόμενες με καταθλιπτικά συμπτώματα, άγχος και διαταραχές ύπνου.

Επιπλέον, η βαρομετρική πίεση έχει συσχετιστεί με πληθώρα άλλων φυσιολογικών εκδηλώσεων, όπως ωτικές διαταραχές, οδοντικό πόνο, άπνοια, ακόμη και επιληπτικές κρίσεις, αναδεικνύοντας την πολυσυστημική της δράση. Οι επιδράσεις αυτές είναι εντονότερες σε περιόδους χειμώνα και φθινοπώρου, όταν οι ατμοσφαιρικές μεταβολές είναι συχνότερες και η κλιματική αστάθεια μεγαλύτερη.

Ιδιαίτερα κρίσιμη είναι η συνδυαστική επίδραση της πίεσης με άλλους μετεωρολογικούς παράγοντες που δημιουργούν ένα πολυπαραγοντικό περιβάλλον κινδύνου. Οι αλληλεπιδράσεις αυτών των στοιχείων ενισχύουν τη θνησιμότητα και τη νοσηρότητα, ιδίως σε ευάλωτες πληθυσμιακές ομάδες.0

Συνοψίζοντας, η βαρομετρική πίεση αποτελεί έναν δείκτη-κλειδί της κλιματικής μεταβλητότητας και έναν προγνωστικό παράγοντα περιβαλλοντικού κινδύνου για την ανθρώπινη υγεία. Η συστηματική διερεύνησή και δειγματοληψία της, σε συνδυασμό με άλλες ατμοσφαιρικές παραμέτρους, είναι απαραίτητη για την κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και την πρόληψη των κλιματικά επαγόμενων νοσημάτων.

12. ΣΕΙΣΜΟΙ

12.1 Γεωδυναμικά Φαινόμενα και οι Πολυδιάστατες Επιπτώσεις των Σεισμών

Μετά την ανάλυση των ατμοσφαιρικών και κλιματικών παραμέτρων που διαμορφώνουν το μικροκλίμα των αστικών περιοχών η μελέτη επεκτείνεται πλέον στα γεωδυναμικά φαινόμενα, τα οποία αντιπροσωπεύουν ένα διαφορετικό αλλά εξίσου κρίσιμο πεδίο περιβαλλοντικής επιρροής. Σε αντίθεση με τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, τα οποία συνδέονται με τη συμπεριφορά της αέριας μάζας και τη μεταβλητότητα του κλίματος, τα γεωδυναμικά φαινόμενα, όπως οι σεισμοί, προκύπτουν από την εσωτερική ενέργεια της Γης και εκδηλώνονται αιφνίδια, προκαλώντας έντονες φυσικές, κοινωνικές και οικολογικές ανακατατάξεις.

Οι σεισμοί αποτελούν μία από τις πιο χαρακτηριστικές και σύνθετες εκδηλώσεις αυτής της εσωτερικής γεωδυναμικής δραστηριότητας. Πρόκειται για φυσικές διεργασίες που οφείλονται στην απελευθέρωση ενέργειας μέσα στον γήινο φλοιό, η οποία συσσωρεύεται λόγω της κίνησης και της σύγκρουσης των τεκτονικών πλακών. Η ενέργεια αυτή διαδίδεται μέσω σεισμικών κυμάτων, προκαλώντας δονήσεις που επηρεάζουν τόσο τη φυσική γεωμορφολογία όσο και τις ανθρώπινες κατασκευές. Αν και αποτελούν ένα αναπόφευκτο φυσικό φαινόμενο στο πλαίσιο της εξέλιξης του πλανήτη, οι σεισμοί μετατρέπονται σε καταστροφικό γεγονός όταν εκδηλώνονται σε περιοχές με έντονη αστικοποίηση και ανεπαρκή ανθεκτικότητα υποδομών.

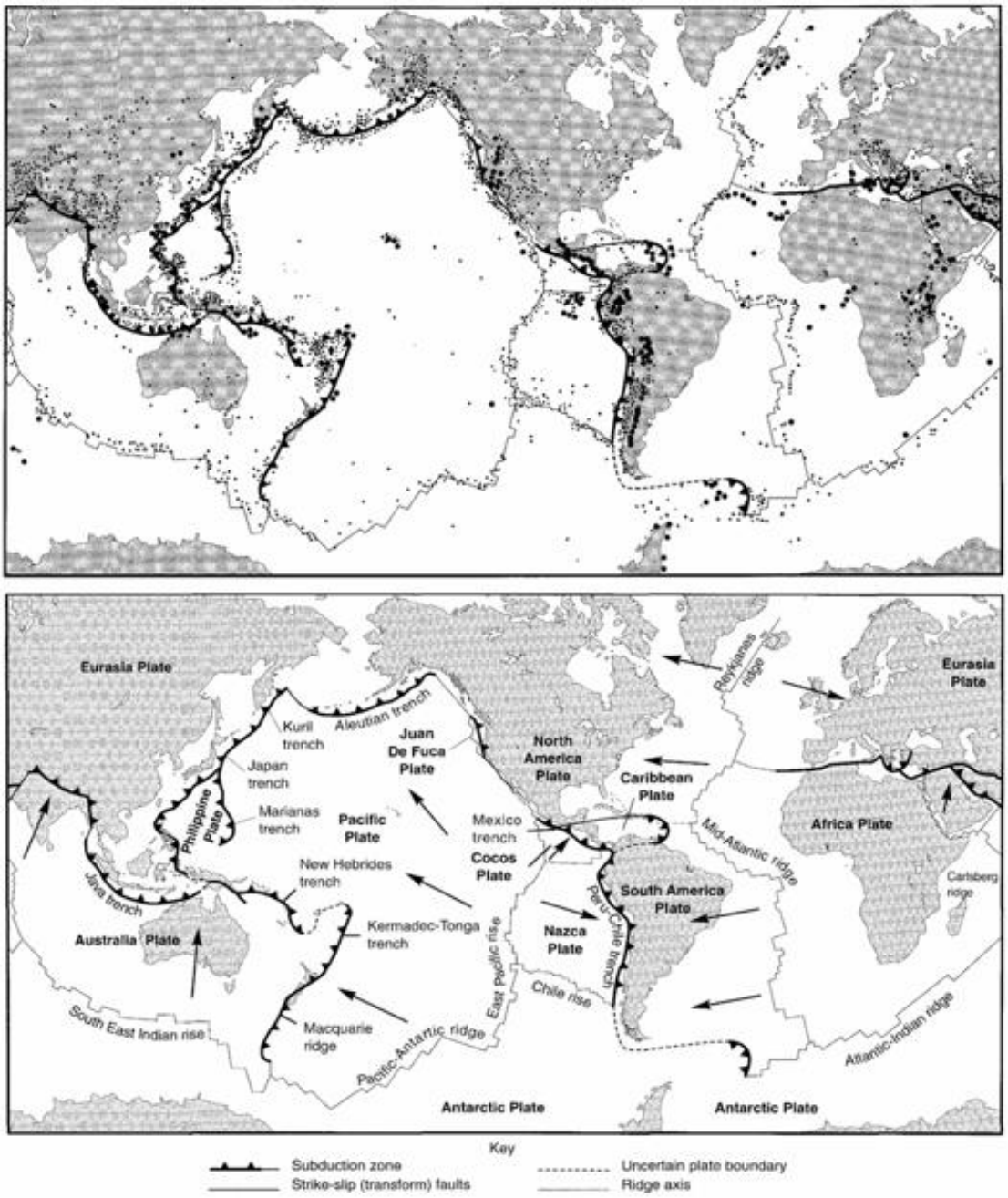
Η ιστορική και κοινωνική σημασία των σεισμών είναι βαθιά ριζωμένη στην ανθρώπινη εμπειρία. Από την αρχαιότητα έως σήμερα, οι σεισμοί έχουν διαμορφώσει πολιτισμούς, έχουν καθορίσει μορφές οικιστικής ανάπτυξης και έχουν αφήσει έντονο αποτύπωμα στη συλλογική μνήμη. Πέρα από την υλική καταστροφή, λειτουργούν ως παράγοντες φυσικού κινδύνου και κοινωνικής ευαλωτότητας, αποκαλύπτοντας τις ανισότητες μεταξύ διαφορετικών κοινωνικών ομάδων και περιοχών. Η ένταση των συνεπειών εξαρτάται όχι μόνο από τη γεωφυσική ισχύ του φαινομένου, αλλά και από την ανθρώπινη προετοιμασία, την ανθεκτικότητα των υποδομών, και την οργανωτική ικανότητα των κοινοτήτων να ανταποκριθούν και να ανακάμψουν [190-192].

Οι επιπτώσεις των σεισμών δεν περιορίζονται στις κατασκευές και τις υποδομές των αστικών περιοχών. Επεκτείνονται στους ίδιους τους κατοίκους, επηρεάζοντας την ανθρώπινη υγεία, τη ψυχολογία και τη συνοχή του κοινωνικού ιστού. Παράλληλα, οι σεισμοί προκαλούν εκτεταμένες περιβαλλοντικές και οικολογικές αλλαγές, επηρεάζοντας τη βιοποικιλότητα, τους οικοτόπους και την ισορροπία των φυσικών συστημάτων [193, 194]. Το οικοσύστημα, όπως και ο άνθρωπος, αποτελεί μέρος μιας αλληλένδετης δομής που δέχεται τα πλήγματα των γεωδυναμικών διεργασιών, με συνέπειες που εκτείνονται πέρα από την άμεση χρονική στιγμή του σεισμού, αγγίζοντας τη μακροχρόνια οικολογική σταθερότητα και την περιβαλλοντική ανθεκτικότητα.

Στο πλαίσιο αυτό, ο στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η διερεύνηση των επιδράσεων των σεισμών υπό μια διεπιστημονική οπτική, που συνδέει τις φυσικές, τις κοινωνικές και τις οικολογικές διαστάσεις του φαινομένου.

12.2 Γεωφυσική Έννοια και Χαρακτηριστικά των Σεισμών

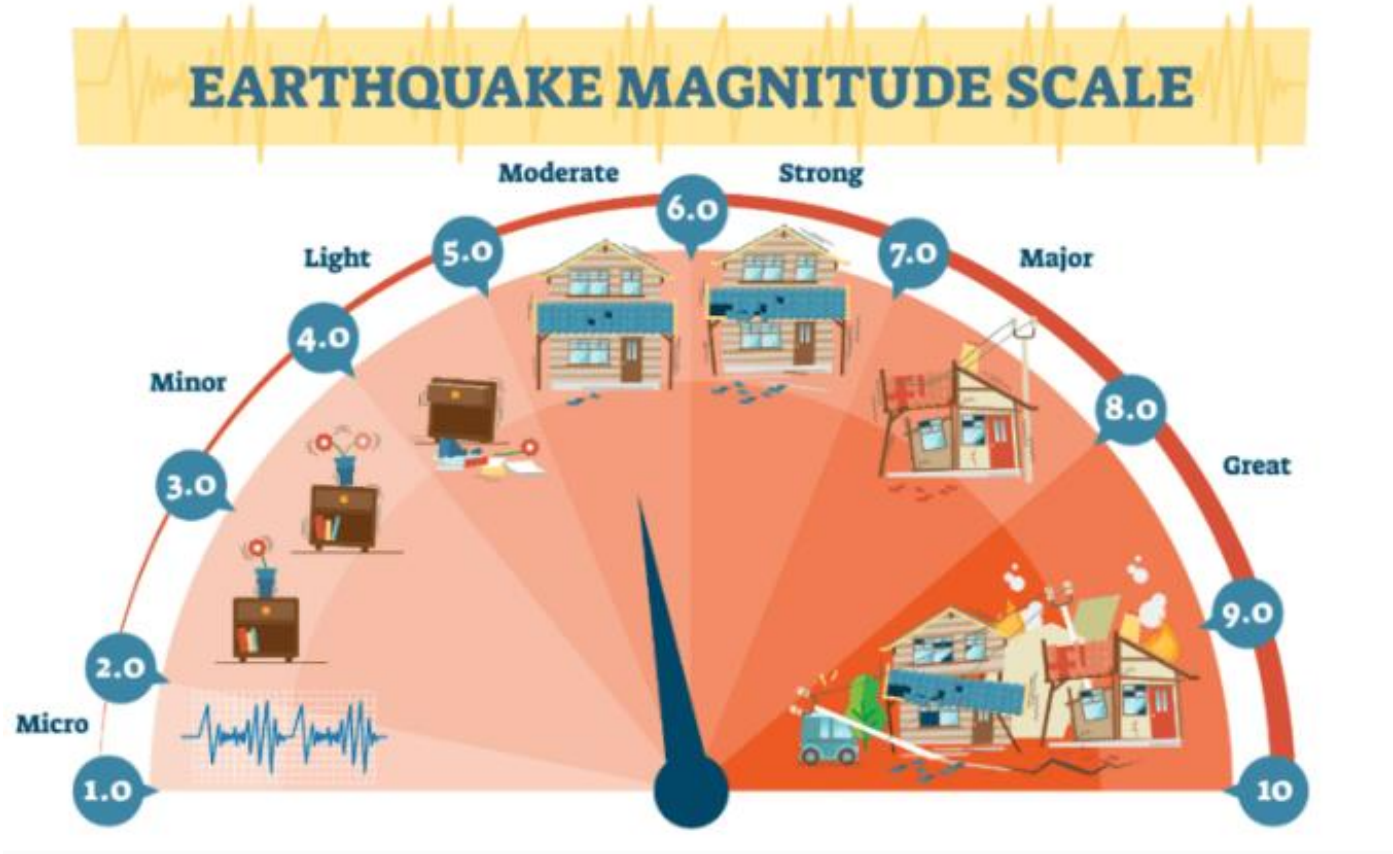
Οι σεισμοί αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα γεωδυναμικά φαινόμενα της Γης και συνδέονται άμεσα με τη συνεχή κινητικότητα της λιθόσφαιρας. Ορίζονται ως η αιφνίδια απελευθέρωση ενέργειας που έχει συσσωρευτεί στα πετρώματα του γήινου φλοιού εξαιτίας τεκτονικών τάσεων [195-199]. Η απελευθέρωση αυτή συμβαίνει συνήθως κατά μήκος ρηγμάτων, δηλαδή ζωνών αδυναμίας του φλοιού, όπου τα πετρώματα ολισθαίνουν το ένα σε σχέση με το άλλο [195, 196, 200, 205]. Η συσσωρευμένη ελαστική ενέργεια μετατρέπεται σε σεισμικά κύματα, τα οποία διαδίδονται στο εσωτερικό και την επιφάνεια της Γης, προκαλώντας τις χαρακτηριστικές δονήσεις που γίνονται αντιληπτές στην επιφάνεια [190, 195, 196].



Σχήμα 21: *Οι κύριες τεκτονικές πλάκες της Γης, οι ωκεάνιες ράχες, οι τάφροι και τα ρήγματα ολίσθησης, σε συνδυασμό με την παγκόσμια σεισμική δραστηριότητα και την κατανομή των επικέντρων σεισμών [195].*

Η σεισμικότητα ενός γεγονότος καθορίζεται από ορισμένες βασικές παραμέτρους, μεταξύ των οποίων το μέγεθος, η ένταση, το βάθος και η εστιακή απόσταση. Το μέγεθος αντιπροσωπεύει την ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια του σεισμού, ενώ η ένταση αναφέρεται στο βαθμό επιφανειακών επιπτώσεων και στη δυνατότητα καταστροφής σε μια δεδομένη περιοχή [190, 195]. Το βάθος καθορίζει την απόσταση του σεισμικού εστιακού σημείου από την επιφάνεια της Γης και επηρεάζει το μέγεθος των ζημιών: ρηχοί σεισμοί προκαλούν συνήθως εντονότερες καταστροφές από βαθείς, καθώς η ενέργεια μεταφέρεται πιο άμεσα στην επιφάνεια [195, 201].

Για τη μέτρηση και σύγκριση των σεισμών έχουν αναπτυχθεί διάφορες κλίμακες. Η πλέον γνωστή είναι η Κλίμακα Richter, η οποία εκφράζει το μέγεθος με βάση το λογάριθμο του πλάτους των σεισμικών κυμάτων που καταγράφονται από σεισμόμετρα [195, 202, 203]. Η Modified Mercalli Intensity (MMI), από την άλλη, αξιολογεί την ένταση του σεισμού μέσα από τις ανθρώπινες αντιδράσεις και τις υλικές καταστροφές που προκαλεί [196, 201-204].



Σχήμα 22: *Κλίμακα μεγέθους σεισμών Ρίχτερ και ενδεικτικές επιπτώσεις στην επιφάνεια [246]*

Intensity	Shaking	Description/Damage
I	Not felt	Not felt except by a very few under especially favorable conditions.
II	Weak	Felt only by a few persons at rest,especially on upper floors of buildings.
III	Weak	Felt quite noticeably by persons indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated.
IV	Light	Felt indoors by many, outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing motor cars rocked noticeably.
V	Moderate	Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. Pendulum clocks may stop.
VI	Strong	Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight.
VII	Very strong	Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable damage in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken.
VIII	Severe	Damage slight in specially designed structures; considerable damage in ordinary substantial buildings with partial collapse. Damage great in poorly built structures. Fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned.
IX	Violent	Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations.
X	Extreme	Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent.

Σχήμα 23: *Κλίμακα Μερκάλι για την εκτίμηση της έντασης και των επιπτώσεων ενός σεισμού [247]*

Οι σεισμοί δεν έχουν πάντοτε την ίδια αιτιολογία ή φυσική προέλευση. Υπάρχουν τρεις κύριες πηγές εκδήλωσής τους. Πρώτον και κύριον, είναι οι τεκτονικοί σεισμοί, που αποτελούν τη μεγάλη πλειονότητα, και προκαλούνται από κινήσεις των τεκτονικών πλακών. Δεύτερον, υπάρχουν οι ηφαιστειακοί σεισμοί, οι οποίοι συνδέονται με την κίνηση μάγματος στα ηφαιστειακά συστήματα, και τρίτον, συμβάλουν σημαντικά και οι ανθρωπογενείς σεισμοί, που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως εκρήξεις ορυχείων, υδραυλική ρωγμάτωση, υπόγεια αποθήκευση υδρογονανθράκων ή αντλήσεις υδάτων [196, 197, 199, 200, 205]. Αν και μικρότερης έντασης, οι ανθρωπογενείς σεισμοί αναδεικνύουν τη σημασία της ανθρώπινης παρέμβασης στις γεωφυσικές διεργασίες.

Η μετάδοση της σεισμικής ενέργειας γίνεται μέσω διαφόρων τύπων σεισμικών κυμάτων. Τα πρωτεύοντα (P) κύματα είναι διαμήκη, ταχύτερα και μπορούν να διαδίδονται τόσο στα στερεά όσο και στα υγρά μέσα, ενώ τα δευτερεύοντα (S) κύματα είναι εγκάρσια, διαδίδονται μόνο στα στερεά και προκαλούν μεγαλύτερες μετατοπίσεις [195].

Η κατανομή και η ένταση των σεισμών συνδέονται με τη τεκτονική δομή της Γης. Οι τεκτονικές πλάκες κινούνται συνεχώς, συγκρούονται ή απομακρύνονται, δημιουργώντας ρήγματα και σεισμογόνα πεδία όπου συσσωρεύονται τάσεις. Οι περιοχές που βρίσκονται στα όρια αυτών των πλακών χαρακτηρίζονται από υψηλή σεισμικότητα [195].

Μετά την κύρια σεισμική δόνηση, συχνά παρατηρείται μετασεισμική δραστηριότητα, δηλαδή μια σειρά από μικρότερους σεισμούς που προκύπτουν καθώς ο φλοιός επαναπροσαρμόζεται στη νέα του ισορροπία. Επιπλέον, οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή φαινόμενα, όπως

κατολισθήσεις, ρευστοποίηση εδάφους σε κορεσμένες περιοχές, πλημμύρες ή ακόμη και τσουνάμι, όταν η σεισμική ενέργεια μεταδίδεται στον ωκεανό [199, 201, 206-208].

Συνοψίζοντας, οι σεισμοί αντικατοπτρίζουν τη δυναμική φύση του πλανήτη και αποτελούν κεντρικό μηχανισμό αναδιαμόρφωσης της επιφάνειας της Γης. Ωστόσο, πέρα από το φυσικό τους υπόβαθρο, έχουν και βαθιά ανθρωπολογική και κοινωνική διάσταση, καθώς συνδέονται άμεσα με ζητήματα υγείας, ασφάλειας, ψυχολογικής ανθεκτικότητας και περιβαλλοντικής ισορροπίας.

12.3 Επιδράσεις Σεισμών στην Ανθρώπινη Υγεία

12.3.1 Άμεσες Επιπτώσεις - Τραυματισμοί και Θάνατοι

Οι σεισμοί, ως αιφνίδια και ισχυρά γεωδυναμικά γεγονότα, έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν εκτεταμένες άμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η κατάρρευση κτιρίων, η πτώση αντικειμένων, οι πυρκαγιές και οι δευτερογενείς πλημμύρες αποτελούν τους κυριότερους μηχανισμούς πρόκλησης τραυματισμών και θανάτων, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες και αστικοποιημένες περιοχές.

Κατάρρευση κτιρίων και δομική ευαλωτότητα: Η κατάρρευση των κτιρίων αποτελεί τη σημαντικότερη αιτία θνησιμότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι απώλειες προέρχονται από την πτώση, τη συμπίεση ή τον εγκλωβισμό ατόμων κάτω από συντρίμμια [190, 196]. Η ποιότητα των κατασκευών και η αντισεισμική θωράκιση είναι καθοριστικοί παράγοντες: οι περιοχές όπου επικρατούν ανεπαρκείς οικοδομικοί κανονισμοί ή αυθαίρετη δόμηση εμφανίζουν δυσανάλογα υψηλά ποσοστά θνησιμότητας σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού. Επομένως, περιοχές όπου επικρατούν ανεπαρκείς οικοδομικοί κανονισμοί, παλαιά ή αυθαίρετα κτίρια και έλλειψη ελέγχου των υποδομών παρουσιάζουν δυσανάλογα υψηλά ποσοστά θνησιμότητας σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού [196, 209].

Δευτερογενείς κίνδυνοι και πολλαπλές καταστροφές: Οι πυρκαγιές που εκδηλώνονται λόγω διαρροών φυσικού αερίου ή βραχυκυκλωμάτων συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση του αριθμού των θυμάτων, ενώ οι πλημμύρες ή η κατάρρευση φραγμάτων μετά από σεισμικά κύματα μπορούν να επιτείνουν την καταστροφή [190, 199, 202, 210, 211].

Πληθυσμιακή πυκνότητα και χωρική κατανομή: Η πυκνότητα του πληθυσμού και η χωρική κατανομή των κατοικιών αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την έκταση των συνεπειών. Στις μεγάλες αστικές περιοχές, όπου η συγκέντρωση ανθρώπων και κτιρίων είναι υψηλή, οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά, όπως καταδεικνύουν στατιστικά δεδομένα από μεγάλους σεισμούς [190, 212]. Αντίθετα, σε αγροτικές ή αραιοκατοικημένες περιοχές, παρότι οι ζημιές μπορεί να είναι εκτεταμένες, τα ποσοστά θνησιμότητας είναι συνήθως χαμηλότερα.

Ευάλωτες κοινωνικές ομάδες και κοινωνικοοικονομική ανισότητα: Ιδιαίτερη σημασία έχει η ευαλωτότητα ορισμένων κοινωνικών ομάδων, όπως τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι, τα άτομα με κινητικά ή αισθητηριακά προβλήματα, καθώς και οι νοσηλευόμενοι ή χρόνια ασθενείς. Οι ομάδες αυτές παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα αυτόνομης διαφυγής ή άμεσης απόκρισης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα τραυματισμού ή απώλειας ζωής. Παράλληλα, οι συνθήκες στέγασης και η κοινωνικοοικονομική κατάσταση επηρεάζουν την πιθανότητα επιβίωσης, καθώς τα

άτομα με χαμηλότερους πόρους κατοικούν συχνότερα σε κτίρια χαμηλής αντοχής ή περιοχές υψηλού κινδύνου [190, 196, 199, 208, 210, 213].

12.3.2 Έμμεσες Επιπτώσεις - Δημόσια Υγεία και Ασθένειες

Πέρα από τις άμεσες απώλειες που προκαλούν οι σεισμοί, εξίσου σημαντικές είναι οι έμμεσες επιπτώσεις τους στη δημόσια υγεία, οι οποίες συχνά εκδηλώνονται μέρες ή εβδομάδες μετά το αρχικό γεγονός. Οι επιπτώσεις αυτές προκύπτουν κυρίως από τη διατάραξη των υποδομών, την υγειονομική υποβάθμιση και τη γενικευμένη απορρύθμιση των συνθηκών διαβίωσης που ακολουθεί μια μεγάλη σεισμική δόνηση. Οι μετασεισμικές κρίσεις που δημιουργούνται δεν περιορίζονται στο πεδίο της φυσικής καταστροφής, αλλά εξελίσσονται σε πολυπαραγοντικά φαινόμενα που επηρεάζουν τη φυσιολογία, την υγιεινή και την κοινωνική σταθερότητα των πληγέντων πληθυσμών.

Μόλυνση πηγών ύδρευσης και έλλειψη βασικών αγαθών: Μία από τις πρώτες συνέπειες μετά από ισχυρούς σεισμούς είναι η μόλυνση των πηγών ύδρευσης και η έλλειψη πόσιμου νερού και τροφής [195, 197, 207, 210]. Οι ζημιές στα δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης οδηγούν σε ανάμειξη καθαρών και μολυσμένων υδάτων, αυξάνοντας δραματικά τον κίνδυνο εντερικών και γαστρεντερικών νοσημάτων [199]. Παράλληλα, η έλλειψη ψυκτικών υποδομών και η διακοπή ηλεκτρικού ρεύματος συμβάλλουν στην αλλοίωση των τροφίμων, επιτείνοντας τη διατροφική ανασφάλεια και τον υποσιτισμό σε πληθυσμούς που παραμένουν χωρίς επαρκή βοήθεια.

Αναπνευστικά νοσήματα λόγω περιβαλλοντικής ρύπανσης: Οι αναπνευστικές παθήσεις αποτελούν επίσης συχνό φαινόμενο μετά από μεγάλους σεισμούς. Η σκόνη, τα αιωρούμενα σωματίδια, καθώς και οι ρύποι που απελευθερώνονται από καταρρεύσεις κτιρίων και καύσεις υλικών, προκαλούν/εντείνουν αναπνευστικές παθήσεις ή ακόμα και θάνατο [190, 199, 211, 213, 214].

Διακοπή ιατρικών θεραπειών και επιδείνωση χρόνιων παθήσεων: Ιδιαίτερα κρίσιμη είναι η επιδείνωση χρόνιων παθήσεων λόγω της διακοπής ιατρικών θεραπειών ή της έλλειψης φαρμάκων. Άτομα με καρδιοαγγειακά, νεφρικά ή μεταβολικά νοσήματα αντιμετωπίζουν αυξημένο κίνδυνο επιπλοκών, καθώς οι σεισμοί συχνά καταστρέφουν νοσοκομεία, φαρμακεία και υποδομές υγείας [210]. Η απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας επιδεινώνει περαιτέρω την κατάσταση, εμποδίζοντας τη λειτουργία ιατρικού εξοπλισμού [195].

12.3.3 Ψυχολογικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις

Οι σεισμοί, εκτός από τις άμεσες σωματικές και υγειονομικές συνέπειες, προκαλούν βαθιές ψυχολογικές και κοινωνικές επιπτώσεις, που συχνά παραμένουν μακροχρόνιες και δύσκολα αντιμετωπίσιμες. Η εμπειρία της αιφνίδιας καταστροφής, η απώλεια ανθρώπων και περιουσίας, καθώς και η αίσθηση ανασφάλειας που ακολουθεί, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ψυχική υγεία και τη συνοχή των κοινοτήτων. Οι συνέπειες αυτές δεν περιορίζονται στο ατομικό επίπεδο, αλλά διαχέονται στο κοινωνικό σύνολο, μεταβάλλοντας τις δυναμικές των σχέσεων, τη συλλογική συμπεριφορά και την ανθεκτικότητα των πληθυσμών.

Μετατραυματικό στρες και αγχώδεις διαταραχές: Το μετατραυματικό στρες (PTSD) αποτελεί μία από τις πιο συχνές ψυχολογικές αντιδράσεις σε επιζώντες σεισμών. Οι πάσχοντες βιώνουν έντονο φόβο, επαναλαμβανόμενες αναμνήσεις του γεγονότος, υπερεπαγρύπνηση και αποφυγή ερεθισμάτων που θυμίζουν τον σεισμό. Συχνά συνοδεύεται από άγχος, ευερεθιστότητα και δυσκολία συγκέντρωσης, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρούνται και διαταραχές ύπνου, με επαναλαμβανόμενους εφιάλτες ή αϋπνία. Οι εκδηλώσεις αυτές είναι εντονότερες σε άτομα που βίωσαν εγκλωβισμό, απώλεια συγγενών ή σοβαρό τραυματισμό, καθώς και σε παιδιά, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία στα ψυχολογικά ερεθίσματα μετά από τραυματικά γεγονότα [199, 205, 210, 211, 215-218].

Κατάθλιψη και μακροχρόνιες ψυχολογικές συνέπειες: Πέρα από το άμεσο ψυχολογικό σοκ, πολλοί πληγέντες εμφανίζουν καταθλιπτικά συμπτώματα μετά από μεγάλα σεισμικά γεγονότα. Η απώλεια της κατοικίας, η οικονομική ανασφάλεια και η ανατροπή της καθημερινότητας οδηγούν σε αισθήματα απόγνωσης, απώλειας ελέγχου και μειωμένου κινήτρου. Σε πολλές περιπτώσεις, η κατάθλιψη συνδέεται με τη μακροχρόνια αδυναμία προσαρμογής, ιδίως όταν η διαδικασία αποκατάστασης καθυστερεί ή όταν οι κοινωνικές δομές στήριξης είναι ανεπαρκείς. Τα συμπτώματα αυτά μπορεί να επιμένουν μήνες ή και χρόνια μετά το γεγονός, υποδεικνύοντας ότι οι ψυχολογικές πληγές των σεισμών δεν θεραπεύονται με την αποκατάσταση των υλικών ζημιών [190, 199, 202, 205, 210, 211, 215, 216, 218, 219].

Αυτοκτονίες και χρήση ουσιών: Έρευνες έχουν δείξει ότι μετά από μεγάλα σεισμικά γεγονότα παρατηρείται αύξηση των ποσοστών αυτοκτονιών και χρήσης ψυχοδραστικών ουσιών [199, 210, 217]. Η απότομη απώλεια πολυτίμων αγαθών μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή ψυχική απορρύθμιση, ιδίως σε άτομα με προϋπάρχουσες ψυχιατρικές διαταραχές ή περιορισμένη κοινωνική υποστήριξη. Η χρήση αλκοόλ και ναρκωτικών λειτουργεί συχνά ως μηχανισμός προσωρινής διαφυγής, επιδεινώνοντας ωστόσο τη μακροπρόθεσμη ψυχολογική δυσφορία και αυξάνοντας την επικινδυνότητα αυτοκαταστροφικών συμπεριφορών. Η ύπαρξη δομών ψυχικής υγείας και προγραμμάτων κοινοτικής υποστήριξης είναι καθοριστική για την πρόληψη τέτοιων φαινομένων.

Συνολικά, οι σεισμοί επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία σε πολλαπλά επίπεδα αποδεικνύοντας ότι πρόκειται για φαινόμενο με βαθιά ανθρωποκεντρική διάσταση. Οι άμεσοι τραυματισμοί και θάνατοι, οι μετασεισμικές υγειονομικές κρίσεις και οι μακροχρόνιες ψυχολογικές επιπτώσεις συνθέτουν ένα σύνθετο πλαίσιο ευαλωτότητας που επιβαρύνει ιδιαίτερα τις ασθενέστερες κοινωνικές ομάδες. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση των συνεπειών απαιτεί έγκαιρες και συντονισμένες παρεμβάσεις πρόληψης, με στόχο τη μείωση του κινδύνου και την αποτροπή μελλοντικών τραγωδιών.

12.4 Οικολογικές και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις των Σεισμών

Η ανάλυση των επιδράσεων των σεισμών στην ανθρώπινη υγεία ανέδειξε τη βαθιά αλληλεξάρτηση ανάμεσα στο φυσικό και το κοινωνικό περιβάλλον. Ωστόσο, οι συνέπειες ενός σεισμού δεν περιορίζονται στον άνθρωπο, αλλά επεκτείνονται και στα οικοσυστήματα, διαμορφώνοντας νέες περιβαλλοντικές και οικολογικές ισορροπίες. Οι σεισμοί, ως γεωδυναμικά γεγονότα μεγάλης κλίμακας, ασκούν καταλυτικές επιδράσεις στη μορφολογία του εδάφους, στους βιοτόπους και στη βιοποικιλότητα, επηρεάζοντας τη λειτουργία των οικοσυστημάτων τόσο άμεσα όσο και μακροπρόθεσμα [193, 194].

Σε αντίθεση με τις ανθρωπογενείς επιπτώσεις, οι οποίες εξελίσσονται σταδιακά, οι σεισμοί επιφέρουν αιφνίδιες μεταβολές στο φυσικό τοπίο, προκαλώντας μετακινήσεις εδαφών, κατολισθήσεις, ρευστοποιήσεις και καταστροφή φυσικών εκτάσεων [194, 201]. Ιδιαίτερα ευάλωτα εμφανίζονται τα παράκτια και εκβολικά οικοσυστήματα, όπου η σεισμική δραστηριότητα μπορεί να οδηγήσει σε κατακόρυφες μεταβολές του εδάφους, επηρεάζοντας τη δυναμική των υδάτων. Σε περιοχές όπου οι σεισμοί συνοδεύονται από τσουνάμι, οι επιπτώσεις είναι ακόμα πιο εκτεταμένες, με καταστροφή δασών, θαλάσσιων συστημάτων, στοιχείων κρίσιμων για τη βιοποικιλότητα και τη σταθερότητα των παράκτιων ζωνών [193, 220].

Παράλληλα, οι σεισμοί μεταβάλλουν τη γεωμορφολογία και την οικολογική διάρθρωση των χερσαίων οικότοπων. Η αλλαγή στην κλίση και στη δομή του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή φυτοκαλύψεων, διατάραξη των κύκλων αναγέννησης και μεταβολή στη σύνθεση των βιοκοινοτήτων [193].

Επιπλέον, η σεισμική δραστηριότητα έχει άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή. Τα σεισμικά κύματα, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις και οι μεταβολές στη θερμοκρασία και στην αλατότητα του νερού μπορούν να προκαλέσουν μετακινήσεις πληθυσμών, μείωση της αναπαραγωγικής ικανότητας και διαταραχές στις τροφικές αλυσίδες [193, 220].

Επομένως, οι σεισμοί λειτουργούν ως καταλύτες περιβαλλοντικής μεταβολής, επιδρώντας ταυτόχρονα στη γεωλογία, στην οικολογία και στη βιοποικιλότητα.

12.5 Κοινωνικοοικονομικό, Περιβαλλοντικό και Οικολογικό Αποτύπωμα των Σεισμών

Οι σεισμοί αφήνουν ένα πολυεπίπεδο αποτύπωμα που εκτείνεται πέρα από τις άμεσες απώλειες, επηρεάζοντας μακροχρόνια την οικονομία, την κοινωνική συνοχή, το περιβάλλον και τα οικοσυστήματα. Σε παγκόσμια κλίμακα, την περίοδο 1998-2017, οι σεισμοί ευθύνονταν για πάνω από το 50% των θανάτων από φυσικούς κινδύνους (~750.000), με άνω των 125 εκατ. ανθρώπων να υφίστανται εκτοπισμό, τραυματισμούς ή απώλεια στέγης [199].

Οικονομικό αποτύπωμα και συστημικός κίνδυνος

Οι ζημιές σε “lifelines” (ύδρευση, ενέργεια, μεταφορές, τηλεπικοινωνίες) προκαλούν παρατεταμένη διακοπή λειτουργιών και έμμεσες απώλειες που συχνά υπερβαίνουν το κόστος άμεσης αποκατάστασης. Ενδεικτικά, οι σεισμοί Loma Prieta 1989 και Northridge 1994 προκάλεσαν οικονομικές απώλειες ~$8 δισ. και ~$30 δισ. αντίστοιχα στην Καλιφόρνια. Ο σεισμός Μανάγκουα 1972 οδήγησε σε απώλειες $2 δισ. (περίπου 40% του ΑΕΠ της Νικαράγουα), με αλυσιδωτές επιπτώσεις σε χρέος, πληθωρισμό και ανεργία. Ο σεισμός Hyo go-Ken Nan bu 1995 εκτιμάται ότι προκάλεσε ζημιές > $100 δισ. [195]. Στον Μεγάλο Σεισμό Ανατολικής Ιαπωνίας 2011, οι συνολικές άμεσες οικονομικές απώλειες εκτιμήθηκαν έως $237-303 δισ. (σεισμός-τσουνάμι) συν ~$65 δισ. λόγω του πυρηνικού συμβάντος με το CEDIM να αποτιμά το συνολικό οικονομικό αποτύπωμα στα $365 δις. Έπειτα, η κυβέρνηση κινητοποίησε πρόγραμμα ανοικοδόμησης 32 τρισ. γιεν για 2011-2020 [200, 220].

Κοινωνικές επιπτώσεις, εκτοπισμός και οικιστική ζημία

Το Haiti 2010 (M7.0) κατέγραψε ~316.000 θανάτους, ~300.000 τραυματίες και έως 3 εκατ. εκτοπισμένους, με 97.294 σπίτια κατεστραμμένα και 188.383 ζημιωμένα. Αντίστοιχα, στην Ινδία το 2001 (M7.6) σημειώθηκαν 20.085 θάνατοι, 166.836 τραυματίες, ~339.000 κτίρια κατεστραμμένα και 783.000 ζημιωμένα [210], με συνολική απώλεια $4,97 δισ. (~1% ΑΕΠ Ινδίας) και ~488.000 απώλειες θέσεων εργασίας στην περιοχή [221]. Στην Ιαπωνία το 2011, καταγράφηκαν >1,2 εκατ. κτίρια με βλάβες σε 20 νομαρχίες και εκτεταμένες διακοπές ηλεκτρισμού/αερίου/ύδρευσης. Μόνο 45% των επιχειρήσεων επανήλθαν στα επίπεδα πωλήσεων που είχαν, 6 έτη μετά [220].

Ο τουρισμός πλήττεται επίσης άμεσα σε σεισμογενή περιοχές: στην Ούμπρια για τον σεισμό του 1997 εκτιμήθηκαν $71 εκατ. απώλειες (Οκτ. 1997-Ιουν. 1998) λόγω “χαμένων αφίξεων” [222]. Στην Τουρκία 1999 (M7.4), οι διεθνείς αφίξεις μειώθηκαν αισθητά, με απώλειες $173 εκατ. στον κλάδο, 156.000 ακυρώσεις κρατήσεων και πτώση 27% του τουριστικού τομέα [223].

Περιβαλλοντικό-οικολογικό αποτύπωμα και πρωτογενείς/δευτερογενείς επιδράσεις

Η περιβαλλοντική ζημία από σεισμούς και δευτερογενή φαινόμενα (π.χ. τσουνάμι) είναι εκτεταμένη. Στην Ιαπωνία (2011) 23.600 ha γεωργικής γης πλημμύρισαν, με ~1.065 ha κατεστραμμένα δάση και σημαντικές απώλειες σε κτηνοτροφία και αλιεία. Επιπλέον, 90% των αλιευτικών σκαφών στις πληγείσες νομαρχίες τέθηκαν εκτός χρήσης, ενώ τα λιμάνια υπέστησαν σχεδόν καθολική καταστροφή. Τα απορρίμματα/μπάζα εκτιμήθηκαν σε ~20 εκατ. τόνους (συν ~10 εκατ. τόνους ιζημάτων τσουνάμι) σε 239 δήμους. Στις τρεις πιο πληγείσες νομαρχίες, τα απόβλητα/ιζήματα έφθασαν 22,63 εκατ. τόνους. Περίπου 5 εκ. τόνοι ξεβράστηκαν στη θάλασσα, οπού το 70% καθίζησε στον πυθμένα κατά μήκος των ιαπωνικών ακτών [220].

Επιπρόσθετα, η αιφνίδια καθετή μεταβολή του εδάφους μεταβάλλει την γεωμορφολογία του. Στη Χιλή (1960) η καθίζηση >1 m στον Rio Cruces δημιούργησε νέο υγρότοπο, ενώ στο Christchurch (2010-12) χάθηκαν αλατόβαλτοι λόγω «ακτοσυμπίεσης». Αντίστοιχα, στο Prince William Sound (Αλάσκα, 1964) οι κατακόρυφες μετατοπίσεις (έως 10 m) κατέστρεψαν παλιρροϊκές λάσπες, καλαμώνες, θέσεις για φωλιές και παρατηρήθηκαν «δάση-φαντάσματα» από υφαλμύρινση/ανύψωση στάθμης πόρων [193].

Ιστορικό αποτύπωμα μεγάλων γεγονότων

- **1556 - Shaanxi, Κίνα (~M8.0):** 530.000-830.000 θάνατοι και εκτεταμένες κατολισθήσεις [195, 224].
- **1923 - Μεγάλος Σεισμός Kanto, Ιαπωνία (M~7.9):** 142.807 θάνατοι (πολλοί λόγω μετασεισμικών πυρκαγιών) [224].

- **22 Μαΐου 1960 - Χιλή (M9.5):** Ο ισχυρότερος σεισμός του 20ού αιώνα. Συνολικά ~330-2.000 θάνατοι από το τσουνάμι στην ακτογραμμή Περού-Χιλής και επιπλέον ~2.000 από τις δονήσεις. Οικονομικές απώλειες ~USD 400-800 εκατ. [200, 209].
- **1976 - Tangshan, Κίνα (M7.8):** Αναφορές έως ~700.000 θανάτους [195], με 175.979 τραυματίες και οικονομικές απώλειες να προσεγγίζουν τα ~USD 9,1 δισ. σε περιουσιακά στοιχεία και >USD 1,2 δισ. σε εκπαίδευση-υγεία-πολιτισμό [200, 224].
- **17 Ιανουαρίου 1995 - Great Hanshin-Awaji (Kobe), Ιαπωνία (M7.3):** ~6.400 θάνατοι, ~300.000 άστεγοι, ~100.000 κατοικίες κατεστραμμένες, με οικονομικές απώλειες >USD 100 δισ. [200].
- **26 Ιανουαρίου 2001 - Gujarat, Ινδία (M7.6):** 20.085 θάνατοι, 166.836 τραυματίες· ~339.000 κτίρια κατεστραμμένα, 783.000 ζημιωμένα, καθώς και εκτεταμένες βλάβες σε γέφυρες/οδικό δίκτυο [200, 210].
- **21 Μαΐου 2003 - Boumerdes-Αλγέρι, Αλγερία (M6.8):** 2.271 θάνατοι, ~10.000 τραυματίες, ~20.000 κατοικίες με ζημιές, και περίπου 160.000 άστεγοι [209].
- **26 Δεκεμβρίου 2004 - Sumatra, Ινδονησία (M9.1):** 227.898 θάνατοι· ~1,7 εκατ. εκτοπισμένοι σε 14 χώρες λόγω τσουνάμι [210].
- **8 Οκτωβρίου 2005 - Κασμίρ, Πακιστάν (M7.6):** 87.351 θάνατοι, >69.000 τραυματίες [209].
- **12 Ιανουαρίου 2010 - Αϊτή (M7.0):** ~316.000 θάνατοι, ~300.000 τραυματίες, 1-3 εκατ. Εκτοπισμένοι, 97.294 κατοικίες κατεστραμμένες και 188.383 ζημιωμένες [210].
- **11 Μαρτίου 2011 - Μεγάλος Σεισμός Ανατολικής Ιαπωνίας (Tohoku, M9.0):** 15.839 θάνατοι, 3.642 αγνοούμενοι, 120.241 κτίρια ολικώς κατεστραμμένα, 189.822 μερικώς κατεστραμμένα, 598.587 με βλάβες και συνολικό οικονομικό αποτύπωμα έως USD 365 δισ. [200].

<u>Δημογραφικές τάσεις, προβλέψεις και μηχανισμοί κινδύνου</u>

Τα δεδομένα δείχνουν ότι οι παγκόσμιοι θάνατοι από σεισμούς εξαρτώνται από έναν σχεδόν σταθερό ρυθμό και από διαλείποντα καταστροφικά γεγονότα με πολύ υψηλούς απολογισμούς, των οποίων η συχνότητα αυξάνει με τον παγκόσμιο πληθυσμό. Για τον 21ο αιώνα προβλέπονται κατά μέσο όρο 8,7 ± 3,3 σεισμοί με >100.000 θανάτους, με ελάχιστους αναμενόμενους θανάτους να εκτιμώνται σε 1,76 ± 0,33 εκατ., ενώ με βάση τον μέσο μετα-1900 απολογισμό (193.000/γεγονός) οι συνολικοί θάνατοι εκτιμώνται σε 2,57 ± 0,64 εκατ.. Αν χρησιμοποιηθεί όριο >50.000 θανάτων, προβλέπονται 20,5 ± 4,3 τέτοια γεγονότα και 3,52 ± 0,60 εκατ. παγκόσμιοι θάνατοι [212]. Η τάση μεγάλων απολογισμών απαντά ήδη στον 20ό αιώνα, όπου ~80% των θανάτων προήλθαν από 25 σεισμούς σε 11 χώρες (Κίνα, Πακιστάν, Ιράν, Τουρκία, Ιταλία, Χιλή, Αρμενία, Γουατεμάλα, Ινδία, Τατζικιστάν, Νεπάλ) [225].

Βάση όλων των παραπάνω, το αποτύπωμα των σεισμών είναι συνδυαστικό και μακρόβιο: από τις άμεσες φυσικές ζημιές και τη διακοπή κρίσιμων υποδομών μέχρι τις παραγωγικές απώλειες, τον εκτοπισμό πληθυσμών, την περιβαλλοντική υποβάθμιση και τις οικολογικές διαταραχές. Η διεθνής τεκμηρίωση δείχνει ότι, καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός και η αστικοποίηση αυξάνονται, ο συστημικός κίνδυνος και οι καταστροφικοί απολογισμοί είναι πιθανό να ενταθούν, καθιστώντας αναγκαίες άμεσες πολιτικές δράσεις.

12.6 Σύνθεση Ευρημάτων και Αναγκαιότητα Ολιστικής, Προσβάσιμης Ενημέρωσης

Η θεωρητική ανάλυση ανέδειξε ότι η σύγχρονη αστικοποίηση συνδέεται με πολλαπλές, ταυτόχρονες πιέσεις στη δημόσια υγεία και στην ποιότητα ζωής. Κεντρικό ρόλο έχουν οι ρύποι και τα μικροκλιματικά φαινόμενα, με τα αιωρούμενα σωματίδια να ξεχωρίζουν ως ο σημαντικότερος και πιο επικίνδυνος δείκτης εξωτερικής ρύπανσης, ενώ οι πτητικές οργανικές ενώσεις κυριαρχούν στους εσωτερικούς χώρους, ιδίως όταν ο αερισμός είναι περιορισμένος. Παράλληλα, η ηχορύπανση και το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας επιβαρύνουν περαιτέρω τους κατοίκους, ενώ μεταβλητές όπως το διοξείδιο του άνθρακα, η θερμοκρασία, η υγρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία και η βαρομετρική πίεση συνδιαμορφώνουν το μικροκλίμα και την ανθρώπινη έκθεση, καθώς σε μακροσκοπικό επίπεδο, τροφοδοτούν το αποτύπωμα της κλιματικής αλλαγής, επηρεάζοντας τον πλανήτη μέσω αυξημένης ενεργειακής ζήτησης, εκπομπών και ενίσχυσης θερμικών ανισορροπιών.

Ωστόσο, οι πιέσεις αυτές δεν περιορίζονται στο ατμοσφαιρικό ή κλιματικό πεδίο. Η μελέτη ανέδειξε επίσης τη σημασία των γεωδυναμικών φαινομένων - και ειδικότερα των σεισμών - ως κρίσιμου παράγοντα περιβαλλοντικού και κοινωνικού κινδύνου. Οι σεισμοί, αν και δεν αποτελούν άμεση συνέπεια της αστικοποίησης, αποκτούν αυξημένη καταστροφικότητα στα πυκνοδομημένα αστικά κέντρα, όπου η χωρική συγκέντρωση πληθυσμού, οι ανεπαρκείς υποδομές και οι κοινωνικές ανισότητες εντείνουν την ευαλωτότητα. Επιπλέον, οι σεισμοί επιδρούν όχι μόνο στη φυσική και τεχνική ανθεκτικότητα των πόλεων, αλλά και στη δημόσια υγεία, την ψυχολογική ευστάθεια και την οικολογική ισορροπία, αποκαλύπτοντας την ανάγκη για συνδυασμένη θεώρηση φυσικών και ανθρωπογενών κινδύνων.

Παρά τη θεσμική πρόοδο και τις τεχνικές κατευθυντήριες γραμμές, οι συγκεντρώσεις ρύπων συνεχίζουν συχνά να υπερβαίνουν επιθυμητά επίπεδα, ενώ το κοινωνικοοικονομικό αποτύπωμα παραμένει υψηλό. Η θεωρία καταδεικνύει ότι απαιτείται εγγύτερη, συνεχής και πολυπαραμετρική παρακολούθηση, ικανή να αποτυπώνει όχι μόνο μεμονωμένους δείκτες αλλά και τις αλληλεπιδράσεις τους. Η ενίσχυση φαινομένων όπως οι «νησίδες υγρασίας/ξηρασίας» στις πόλεις, το εκρηκτικό μείγμα ανθρωπογενών και φυσικών πηγών PM, αλλά και το αποδεδειγμένα μεγάλο φορτίο δημόσιας υγείας από τον περιβαλλοντικό θόρυβο, καθιστούν επείγουσα την αξιόπιστη μέτρηση και άμεση ενημέρωση του κοινού.

Το βασικό κενό που αναδεικνύεται στην βιβλιογραφία είναι ο κατακερματισμός των λύσεων, δηλαδή συστήματα που επικεντρώνονται σε μεμονωμένους δείκτες, χωρίς να προσφέρουν μια ολιστική, συνδυαστική απεικόνιση των κρίσιμων παραγόντων έκθεσης και χωρίς να γεφυρώνουν ουσιαστικά το δίπολο εσωτερικού-εξωτερικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, απουσιάζει συχνά η μετάφραση των επιστημονικών μετρήσεων σε κατανοητή, δημόσια πληροφορία για τον μη ειδικό πολίτη. Τα δύσληπτά όρια, οι δυσνόητες και πολλαπλές μονάδες μέτρησης για την ίδια μεταβλητή, καθώς και η χρήση τεχνικής ορολογίας χωρίς απλά λόγια, οδηγούν τον πολίτη να αντικρίζει ασύνδετα νούμερα χωρίς πρακτικό νόημα και, τελικά, να μην προστατεύεται αναλόγως.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, αναδεικνύεται με επιτακτικό τρόπο η ανάγκη για κάτι ουσιαστικά νέο. Μια προσέγγιση που δεν θα προσθέτει απλώς ακόμη έναν πίνακα τιμών, αλλά θα

συνθέτει τα κρίσιμα σήματα του αστικού περιβάλλοντος σε ενιαία, κατανοητά μηνύματα. Ένα πλαίσιο ενημέρωσης που θα «μεταφράζει» την τεχνική πληροφορία σε σαφείς ενδείξεις, θα υποδεικνύει πράξεις πρόληψης σε πραγματικό χρόνο και θα καλλιεργεί εμπιστοσύνη μέσα από διαφάνεια.

Παράλληλα, μια τέτοια κατεύθυνση οφείλει να είναι συμπεριληπτική, εξυπηρετώντας τον μη ειδικό, τον ηλικιωμένο, τον γονέα, τον εργαζόμενο που κινείται καθημερινά στον δημόσιο χώρο, αλλά και τις ευάλωτες ομάδες που πλήττονται δυσανάλογα. Η προσβασιμότητα και η συνάφεια με τις πραγματικές ανάγκες του πολίτη αποτελούν τα θεμέλια για ενδυνάμωση και ουσιαστική προστασία. Συνολικά, αυτό που λείπει σήμερα δεν είναι μόνο περισσότερα δεδομένα, αλλά μια έξυπνη, ενιαία και ανθρώπινη γλώσσα που θα εστιάζει στη σύντομη και έγκυρη επιχειρησιακή ερμηνεία τους, ώστε να προκύπτουν σαφή μηνύματα πρόληψης και δράσης για τον πολίτη.

13. ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΈΞΥΠΝΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Η θεωρητική τεκμηρίωση κατέδειξε ότι οι αποσπασματικές προσεγγίσεις παρακολούθησης δεν επαρκούν για την έγκαιρη, κατανοητή και επιχειρησιακά χρήσιμη ενημέρωση του πολίτη. Στο πλαίσιο αυτό, το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τη μεθοδολογία και την αρχιτεκτονική ενός ολοκληρωμένου συστήματος έξυπνης περιβαλλοντικής παρακολούθησης για αστικές περιοχές: από την πολυπαραμετρική συλλογή δεδομένων σε επίπεδο συσκευής, έως την προεπεξεργασία, την ασφαλή μεταφορά, την αποθήκευση χρονοσειρών και την οπτικοποίηση σε διαδικτυακή διεπαφή φιλική προς μη ειδικούς. Ο στόχος είναι διπλός, με έμφαση αφενός στην αξιοπιστία και τη διαφάνεια στη ροή των δεδομένων και αφετέρου στην παραγωγή σαφών σημάτων και μηνυμάτων που υποστηρίζουν τεκμηριωμένες αποφάσεις στην καθημερινή ζωή της πόλης.

13.1 Μεθοδολογία & Αρχιτεκτονική Συστήματος

13.1.1 Στόχοι & Απαιτήσεις

Γενικός στόχος.

Η ανάπτυξη ενός επεκτάσιμου, αξιόπιστου και αποδοτικού συστήματος έξυπνης περιβαλλοντικής παρακολούθησης, ικανού να συλλέγει, να προεπεξεργάζεται και να διαχέει πολυπαραμετρικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα εστιάζει στη συνεχή μέτρηση κρίσιμων δεικτών (θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, συγκεντρώσεων CO_2 και TVOC, βαρομετρικής πίεσης, αιωρούμενων σωματιδίων PM2.5, επιπέδων θορύβου, δονήσεων/επιτάχυνσης και υπεριώδους ακτινοβολίας) ώστε να αποτυπώνει με ακρίβεια την περιβαλλοντική δυναμική σε αστικά πλαίσια.

Παράλληλα, επιδιώκεται η παροχή συνεπούς χρονικής σήμανσης, η ασφαλής αποθήκευση και ανάκτηση ιστορικών δεδομένων, καθώς και η παραγωγή ευανάγνωστης και ερμηνεύσιμης πληροφορίας προς τον τελικό χρήστη. Ο σχεδιασμός του συστήματος δεν περιορίζεται στη συλλογή τιμών, αλλά επεκτείνεται στη μετατροπή των μετρήσεων σε χρήσιμα νοήματα, επιτρέποντας στον πολίτη να αντιλαμβάνεται άμεσα τις περιβαλλοντικές συνθήκες που τον περιβάλλουν και να λαμβάνει προληπτικές αποφάσεις για την υγεία και την ασφάλειά του.

Επιπλέον, το σύστημα στοχεύει να αποτελέσει βάση για μελλοντική κλιμάκωση, τόσο μέσω ενσωμάτωσης επιπλέον αισθητήρων ή σημείων μέτρησης, όσο και μέσω διασύνδεσης με άλλες πλατφόρμες ή αστικά δίκτυα δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται μια ανοικτή, βιώσιμη και επαναχρησιμοποιήσιμη υποδομή, που μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο παρακολούθησης, έγκαιρης προειδοποίησης και υποστήριξης λήψης αποφάσεων σε επίπεδο πολιτών και τοπικών αρχών.

Λειτουργικές απαιτήσεις:

- **Πολυαισθητηριακή συλλογή**: Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, απαιτείται η ενσωμάτωση ενός συνόλου αισθητήρων περιβαλλοντικών παραμέτρων, ικανών να

καταγράφουν με αξιοπιστία τις κύριες φυσικοχημικές και κλιματικές μεταβλητές του αστικού περιβάλλοντος. Η επιλογή των συγκεκριμένων αισθητήρων θα βασιστεί σε κριτήρια ακρίβειας, σταθερότητας, ενεργειακής απόδοσης, διαλειτουργικότητας και κόστους, προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους.

- **Υπολογιστική μονάδα ελέγχου:** Για τη διαχείριση των αισθητήρων και την επεξεργασία των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, απαιτείται η χρήση ενός μικροϋπολογιστικού συστήματος με ενσωματωμένο μικροελεγκτή, ικανού να εκτελεί υπολογισμούς, να οργανώνει τη συλλογή δεδομένων, να πραγματοποιεί προεπεξεργασία να διαχειρίζεται τη μεταφορά τους προς τον διακομιστή. Η επιλογή της συγκεκριμένης πλατφόρμας θα πρέπει να εξισορροπεί υπολογιστική ισχύ, ενεργειακή αποδοτικότητα, ευκολία προγραμματισμού και συνδεσιμότητα, ώστε να υποστηρίζει αξιόπιστα την πολυαισθητηριακή λειτουργία του συστήματος.

- **Προγραμματισμός και λήψη μετρήσεων:** Η λειτουργία των αισθητήρων προϋποθέτει τον κατάλληλο προγραμματισμό του μικροελεγκτή, ώστε να διασφαλίζεται η σωστή επικοινωνία μέσω των επιλεγμένων πρωτοκόλλων και η τακτική ανάγνωση των δεδομένων σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

- **Αποθήκευση χρονοσειρών**: Η αποτελεσματική αξιοποίηση των μετρήσεων απαιτεί τη συστηματική αποθήκευση των δεδομένων σε μορφή χρονοσειρών, ώστε να είναι δυνατή η αναδρομική ανάλυση, η επεξεργασία και η απεικόνιση της περιβαλλοντικής εξέλιξης με την πάροδο του χρόνου. Για τον σκοπό αυτό, προβλέπεται η δημιουργία σχεσιακής βάσης δεδομένων, η οποία θα φιλοξενεί οργανωμένα τα αποτελέσματα από κάθε αισθητήρα, συνοδευόμενα από χρονική σήμανση. Η αρχιτεκτονική της βάσης θα πρέπει να υποστηρίζει εύκολη εισαγωγή, γρήγορη ανάκτηση και συνεχή ενημέρωση των δεδομένων, διασφαλίζοντας παράλληλα ακεραιότητα και συνέπεια στη ροή πληροφορίας. Παράλληλα, θα πρέπει να ενσωματώνει μηχανισμούς αυτόματης διαχείρισης του όγκου των δεδομένων, όπως τη διαγραφή παλαιότερων εγγραφών μετά από καθορισμένο χρονικό διάστημα, ώστε να αποτρέπεται ο κορεσμός του αποθηκευτικού χώρου και να διατηρείται η αποδοτικότητα του συστήματος. Η δομή αυτή επιτρέπει τόσο την πραγματικού χρόνου απεικόνιση των μετρήσεων στην ιστοσελίδα όσο και τη μακροχρόνια αποθήκευση για σκοπούς σύγκρισης, τάσεων ή έρευνας.

- **Οπτικοποίηση**: Η τελική φάση της ροής των δεδομένων αφορά την δυναμική οπτικοποίηση και παρουσίασή τους μέσω διαδικτυακής διεπαφής, σχεδιασμένης ώστε να προσφέρει σαφή, προσβάσιμη και διαδραστική εμπειρία στον τελικό χρήστη. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων πρέπει να ανακτώνται μέσω εξειδικευμένων διεπαφών και να μεταφέρονται στον φυλλομετρητή για περαιτέρω επεξεργασία.

- **Επεκτασιμότητα/διαλειτουργικότητα**: Η αρχιτεκτονική του συστήματος θα πρέπει να είναι αρθρωτή και επεκτάσιμη, επιτρέποντας την εύκολη ενσωμάτωση νέων αισθητήρων, κόμβων ή υποσυστημάτων χωρίς την ανάγκη ριζικής τροποποίησης του πυρήνα ή των υφιστάμενων διεπαφών. Η ίδια αρχή πρέπει να επεκτείνεται και στο frontend, το οποίο πρέπει να μπορεί να

εμπλουτίζεται με νέες ενότητες απεικόνισης, γραφήματα ή πίνακες δεδομένων, χωρίς να απαιτείται επανασχεδιασμός της βασικής δομής. Μέσω αυτής της φιλοσοφίας σχεδίασης, διασφαλίζεται ότι το προτεινόμενο σύστημα δεν αποτελεί στατικό προϊόν, αλλά μια εξελισσόμενη πλατφόρμα, ικανή να προσαρμόζεται σε νέες τεχνολογίες αισθητήρων, ανάγκες παρακολούθησης και αστικές εφαρμογές του μέλλοντος.

- **Ασφάλεια και αξιοπιστία δεδομένων:** Το σύστημα οφείλει να διασφαλίζει την προστασία, ακεραιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων καθ' όλη τη ροή τους, από τη συλλογή έως την αποθήκευση και την παρουσίασή τους. Η επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων, μικροελεγκτή και εξυπηρετητή θα πρέπει να πραγματοποιείται με ελεγχόμενα πρωτόκολλα ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα μετάδοσης, να διατηρείται η ακεραιότητα των δεδομένων και να εξασφαλίζεται συνεχής ροή πληροφορίας ακόμη και σε περιβάλλοντα με ασταθή συνδεσιμότητα.
- **Απόδοση και ενεργειακή αποδοτικότητα:** Η λειτουργία του συστήματος πρέπει να χαρακτηρίζεται από βέλτιστη χρήση πόρων και ελαχιστοποίηση ενεργειακής κατανάλωσης, ώστε να εξασφαλίζεται μακροχρόνια και σταθερή λειτουργία, ιδιαίτερα σε σενάρια απομακρυσμένης ή υπαίθριας εγκατάστασης. Η επιλογή μικροελεγκτή και αισθητήρων πρέπει να λαμβάνει υπόψη καταστάσεις χαμηλής ισχύος, ενώ ο προγραμματισμός τους οφείλει να αποφεύγει περιττές διεργασίες, διασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα δειγματοληψίας χωρίς υπερφόρτωση του συστήματος ή καθυστερήσεις στη μετάδοση.

Συνοψίζοντας, το σύνολο των λειτουργικών απαιτήσεων αποτυπώνει μια ολιστική και πολυεπίπεδη προσέγγιση στον σχεδιασμό του συστήματος. Η συνδυασμένη λειτουργία αξιόπιστων αισθητήρων, αποδοτικής υπολογιστικής μονάδας, σταθερής επικοινωνίας και προσεκτικά δομημένης βάσης δεδομένων συγκροτεί έναν ενιαίο μηχανισμό συλλογής, επεξεργασίας και διάχυσης περιβαλλοντικής πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, η ενσωμάτωση αρχών ασφάλειας, επεκτασιμότητας και ενεργειακής βελτιστοποίησης εξασφαλίζει τη μακροχρόνια βιωσιμότητα και την προσαρμοστικότητα του συστήματος σε μελλοντικές τεχνολογικές ή επιχειρησιακές εξελίξεις. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική, επομένως, δεν περιορίζεται στη μέτρηση φυσικοχημικών παραμέτρων, αλλά επιδιώκει να λειτουργήσει ως πλατφόρμα έξυπνης περιβαλλοντικής γνώσης, ικανή να υποστηρίξει επεκτάσεις, αναβαθμίσεις και προηγμένα εργαλεία ανάλυσης. Τα παραπάνω αποτελούν τη θεμελιώδη βάση για τη διαμόρφωση της συνολικής αρχιτεκτονικής του συστήματος.

13.1.2 Επιλογή Υλικού

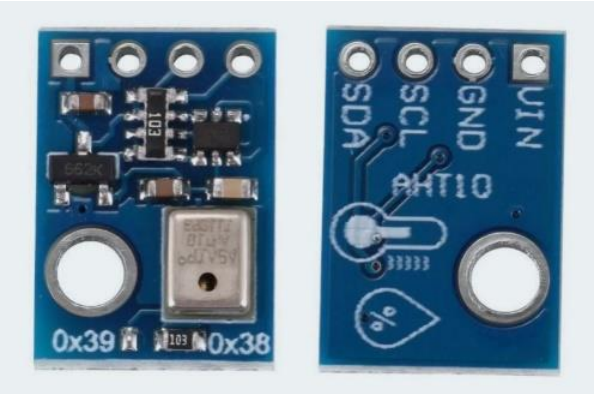
Η επιλογή του κατάλληλου υλικού αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο για την επιτυχία οποιουδήποτε συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης, καθώς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τόσο την ακρίβεια και αξιοπιστία των μετρήσεων όσο και τη λειτουργική αποδοτικότητα και επεκτασιμότητα της συνολικής πλατφόρμας. Σε ένα σύστημα όπου συνυπάρχουν πολλαπλές φυσικές, χημικές και ακουστικές παράμετροι, η ορθολογική επιλογή αισθητήρων, μικροελεγκτή και υποσυστημάτων διασύνδεσης διαμορφώνει την ποιότητα των δεδομένων που θα συλλεχθούν και, κατ' επέκταση, την εγκυρότητα των αναλύσεων που θα ακολουθήσουν.

13.1.2.1 Αισθητήρες

Η επιλογή των αισθητήρων πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την ακρίβεια, αξιοπιστία, ενεργειακή αποδοτικότητα και ευκολία ενσωμάτωσης σε μικροϋπολογιστικά συστήματα χαμηλής κατανάλωσης. Οι επιλεγμένοι αισθητήρες καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα φυσικών και χημικών παραμέτρων, επιτρέποντας την πολυπαραμετρική αποτύπωση της ποιότητας του αέρα και των περιβαλλοντικών συνθηκών τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους.

AHT10 - Θερμοκρασία & Σχετική Υγρασία [226]

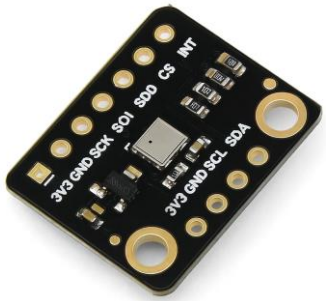
Ο AHT10 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας με ενσωματωμένο αισθητήρα CMOS και θερμίστορ, που επικοινωνεί μέσω διαύλου I2C (Inter-Integrated Circuit). Παρέχει ακρίβεια ±0.3 °C και ±2 % RH, ενώ χαρακτηρίζεται από γρήγορο χρόνο απόκρισης και χαμηλή κατανάλωση. Η απλότητα ενσωμάτωσης και η σταθερή απόδοση σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (-40 °C έως 85 °C) τον καθιστούν ιδανικό για συνεχή περιβαλλοντική παρακολούθηση.



Σχήμα 24: *Αισθητήρας AHT10 [248]*

ENS160 - Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (TVOC) και Εκτιμώμενο CO_2 [227]

Ο ENS160 είναι αισθητήρας τεχνολογίας MOX (Metal Oxide Semiconductor), σχεδιασμένος για τον προσδιορισμό συγκεντρώσεων TVOC και εκτιμώμενου CO_2. Ενσωματώνει ψηφιακή διεπαφή I2C και εσωτερική βαθμονόμηση, παρέχοντας σταθερή και αξιόπιστη απόδοση χωρίς εξωτερική παρέμβαση. Υποστηρίζει ευρύ εύρος μέτρησης για CO_2 από 400 έως 65.000 ppm και για TVOC από 0 έως 65.000 ppb, επιτρέποντας έτσι την ακριβή ανίχνευση τόσο τυπικών επιπέδων εσωτερικού αέρα όσο και ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών. Η υψηλή ευαισθησία και η γρήγορη απόκριση του ENS160 καθιστούν δυνατή τη λεπτομερή ανάλυση της ποιότητας του αέρα και τη συσχέτισή της με ανθρώπινες δραστηριότητες ή μεταβολές αερισμού σε αστικά και εσωτερικά περιβάλλοντα.



Σχήμα 25*: Αισθητήρας ENS160 [249]*

BMP180 - Βαρομετρική Πίεση [228]

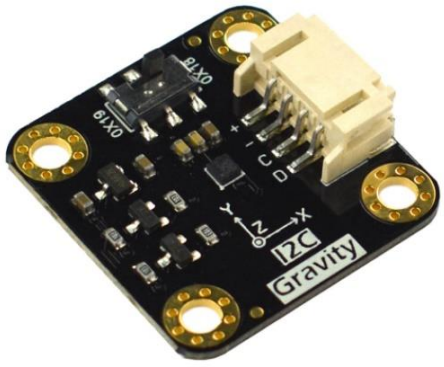
Ο BMP180 είναι αισθητήρας πίεσης βασισμένος σε μικρομηχανική τεχνολογία (MEMS). Επικοινωνεί μέσω I2C και προσφέρει ακρίβεια ±1 hPa και ανάλυση έως 0.02 hPa, επαρκή για τη συσχέτιση μικροκλιματικών μεταβολών με άλλες μεταβλητές όπως η υγρασία και η θερμοκρασία. Ακόμα, διαθέτει εύρος μέτρησης πίεσης από 300 έως 1100 hPa, που αντιστοιχεί σε υψομετρική διακύμανση περίπου από +9000 m έως -500 m σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (< 5 μA σε sleep mode) τον καθιστά κατάλληλο για φορητές ή συνεχείς μετρήσεις.



Σχήμα 26: *Αισθητήρας BMP180 [250]*

LIS2DW12 - Επιτάχυνση & Δονήσεις [229]

Ο LIS2DW12 είναι τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο MEMS με δυνατότητα λειτουργίας έως 1600 Hz και εύρος ±2g - ±16g. Επικοινωνεί μέσω I2C ή SPI (Serial Peripheral Interface), διαθέτει ενσωματωμένα φίλτρα χαμηλής διέλευσης και δυνατότητα διακοπών (interrupts) για ανίχνευση γεγονότων, όπως μικροδονήσεις ή σεισμικές μεταβολές. Η υψηλή του ευαισθησία και το χαμηλό επίπεδο θορύβου τον καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές μικροσεισμικής ανάλυσης και δομικής παρακολούθησης.



Σχήμα 27: *Αισθητήρας LIS2DW12 [251]*

PPD42NS - Σωματίδια PM2.5 [230]

Ο PPD42NS είναι οπτικός αισθητήρας σωματιδίων που βασίζεται στην αρχή της σκέδασης φωτός, χρησιμοποιώντας υπέρυθρη δέσμη και φωτοδίοδο για την ανίχνευση της παρουσίας και της

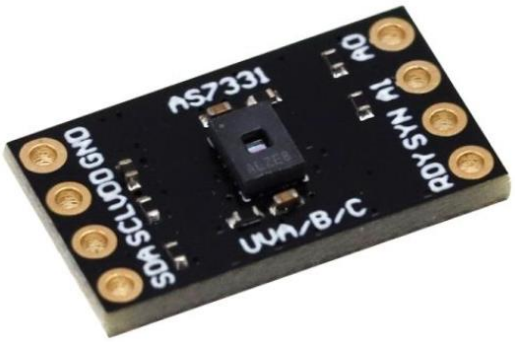
πυκνότητας αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα. Παράγει αναλογική έξοδο που συσχετίζεται με τη συγκέντρωση PM2.5, επιτρέποντας την εκτίμηση της ρύπανσης του αέρα σε πραγματικό χρόνο. Διαθέτει ανιχνεύσιμο εύρος συγκεντρώσεων από 0 έως 8.000 μg/m^3, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών.



***Σχήμα 28**: Αισθητήρας PPD42NS [252]*

AS7331 - Υπεριώδης Ακτινοβολία [231]

Ο AS7331 είναι φασματικός αισθητήρας φωτός υψηλής ευαισθησίας, σχεδιασμένος για την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση της UV σε τρεις διακριτές ζώνες: UVA, UVB και UVC. Διαθέτει φασματική ανάλυση 16 bit και δυναμικό εύρος έως 3,43*10^{10} lux, επιτρέποντας ακριβείς μετρήσεις ακόμα και σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού. Ο αισθητήρας βασίζεται σε τεχνολογία SiC-based photodiodes με ενσωματωμένο ADC και επικοινωνεί μέσω διαύλου I2C. Ο AS7331 παρέχει συνεχή και ταυτόχρονη παρακολούθηση των ζωνών UVA-UVB-UVC, καθιστώντας τον κατάλληλο για μελέτη της ηλιακής έκθεσης, εκτίμηση UV-index και περιβαλλοντικές εφαρμογές αστικής κλίμακας. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το μικρό του μέγεθος τον καθιστούν ιδανικό για συστήματα φορητής ή συνεχούς παρακολούθησης ακτινοβολίας.



***Σχήμα 29**: Αισθητήρας AS7331 [253]*

Sound Sensor V2 - Στάθμη Ήχου [232]

Ο αναλογικός αισθητήρας Sound Sensor V2 χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της σχετικής έντασης ήχου στο περιβάλλον. Ενσωματώνει μικρόφωνο και ενισχυτή, παρέχοντας αναλογική έξοδο που αντιστοιχεί στο επίπεδο πίεσης του ήχου. Διαθέτει εύρος συχνοτήτων από 50 Hz έως 20 kHz,

καλύπτοντας το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος της ανθρώπινης ακοής, γεγονός που επιτρέπει την αξιόπιστη αποτύπωση τόσο χαμηλών όσο και υψηλών ηχητικών συχνοτήτων. Η τιμή του σήματος μπορεί να επεξεργαστεί ψηφιακά για τον υπολογισμό δεικτών θορύβου (dB(A)) ή την ανίχνευση ηχητικών γεγονότων, προσφέροντας έναν απλό αλλά λειτουργικό τρόπο αξιολόγησης της ηχορύπανσης.



Σχήμα 30: *Αισθητήρας Sound Sensor V2 [254]*

Εγκυρότητα και πρωτόκολλα επικοινωνίας

Όλοι οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο σύστημα συμμορφώνονται με διεθνώς καθιερωμένα πρότυπα επικοινωνίας, κυρίως τα I2C και SPI, τα οποία αποτελούν τους πλέον διαδεδομένους διαύλους επικοινωνίας μεταξύ μικροελεγκτών και περιφερειακών μονάδων. Η χρήση αυτών των πρωτοκόλλων εξασφαλίζει υψηλή διαλειτουργικότητα, απλότητα στη συνδεσμολογία και σταθερότητα στη μετάδοση δεδομένων, ενώ επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση πολλαπλών αισθητήρων στην ίδια υπολογιστική πλατφόρμα χωρίς σημαντικές παρεμβάσεις στο υλικό ή το λογισμικό.

Επιπλέον, όλοι οι αισθητήρες διαθέτουν εργοστασιακή βαθμονόμηση και τεκμηριωμένες τεχνικές προδιαγραφές ακριβείας, γεγονός που εγγυάται τη συνέπεια και την εγκυρότητα των μετρήσεων εντός των καθορισμένων ορίων ανοχής που αναφέρονται στα επίσημα τεχνικά εγχειρίδια. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μονάδες ενσωματώνουν εσωτερικούς μηχανισμούς αυτοδιόρθωσης και αντιστάθμισης θερμοκρασίας, μειώνοντας την ανάγκη για εξωτερική επαναβαθμονόμηση και ενισχύοντας τη μακροχρόνια σταθερότητα των δεδομένων.

Η τυποποιημένη επικοινωνία και η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων αποτελούν προϋπόθεση για την ακεραιότητα της ροής πληροφορίας στο σύστημα, επιτρέποντας τον συγχρονισμό των μετρήσεων και τη συνδυαστική ανάλυση διαφορετικών φυσικών και χημικών μεταβλητών. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι το τελικό σύνολο δεδομένων είναι τεχνικά έγκυρο, επαναλήψιμο και επιστημονικά αξιοποιήσιμο τόσο για λειτουργική απεικόνιση όσο και για ερευνητική επεξεργασία.

13.1.2.2 Υπολογιστική μονάδα ελέγχου

Ως υπολογιστική μονάδα ελέγχου επιλέχθηκε το ESP32-S3. Η επιλογή αυτής της πλατφόρμας στο σύστημά δεν έγινε τυχαία αλλά στηρίχθηκε σε συγκεκριμένα τεχνικά πλεονεκτήματα που την καθιστούν κατάλληλη για πολυαισθητηριακές IoT εφαρμογές [233]:

1. **Ισχυρός διπύρηνος επεξεργαστής με SIMD/FP support:** Ενσωματώνει έναν διπύρηνο Xtensa LX7 στα 240 MHz, με ενσωματωμένες εντολές SIMD και υποστήριξη κινητής υποδιαστολής. Αυτό μας επιτρέπει να τρέχουμε υπολογισμούς στη συσκευή, μειώνοντας την εξάρτηση από τον server.

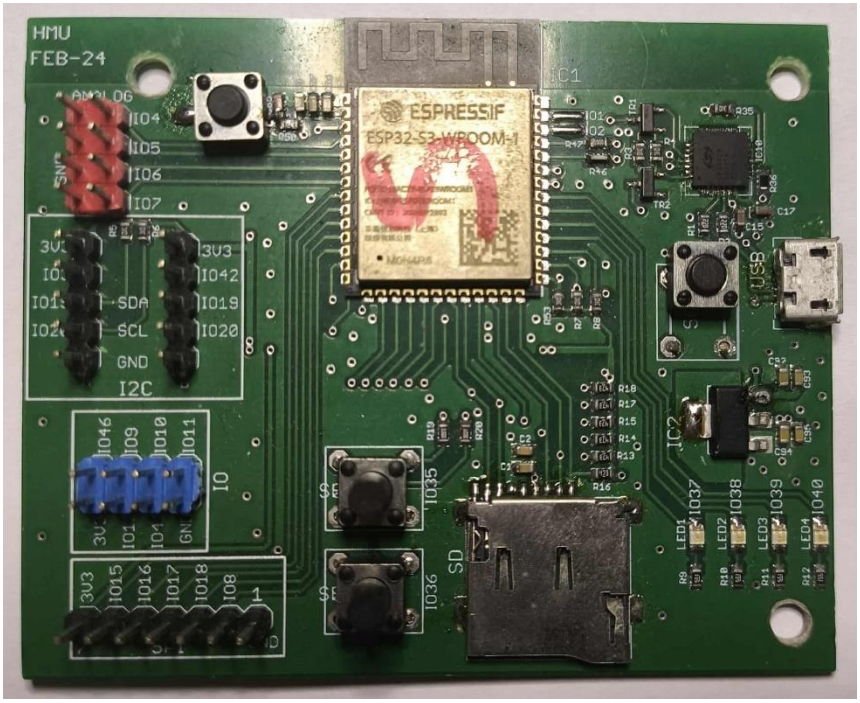
2. **Ενσωματωμένο Wi-Fi & Bluetooth LE:** Υποστηρίζει IEEE 802.11b/g/n σε 2,4 GHz και Bluetooth LE 5.0, με δυνατότητα συνύπαρξης Wi-Fi/BLE στο ίδιο chip. Αυτή η δυνατότητα δίνει ευελιξία για μελλοντικές επεκτάσεις χωρίς να χρειάζεται επιπλέον hardware.

3. **Πλήθος I/O και περιφερειακών:** Το chip διαθέτει έως 45 GPIOs, πολλαπλές διεπαφές SPI, I2C, UART, ADC, RMT, PWM, timers κ.ά. Αυτή η πληθώρα επιλογών προσφέρει επάρκεια για να συνδέσουμε πολλούς αισθητήρες ταυτόχρονα χωρίς να δεσμευτούμε από περιορισμένους πόρους.

4. **Αναλογική είσοδος / ADC:** Το ESP32-S3 ενσωματώνει δύο 12-bit SAR ADC με δυνατότητα χρήσης έως και 20 καναλιών. Η παρουσία αυτών των καναλιών καθιστά τη συσκευή ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή δειγματοληψία αναλογικών σημάτων και παράλληλη παρακολούθηση πολλαπλών αισθητήρων, χωρίς την ανάγκη εξωτερικού μετατροπέα ADC.

5. **Απόδοση σε κατανάλωση ενέργειας & modes χαμηλής ισχύος:** Υποστηρίζει πολλούς τρόπους ύπνου (Active, Modem-sleep, Light-sleep, Deep-sleep), με κατανάλωση μόλις ~7 μA στο Deep-sleep mode.

6. **Ασφάλεια (Secure Boot, Encryption, Cryptographic Accelerators):** Περιέχει χαρακτηριστικά ασφάλειας όπως secure boot, κρυπτογράφηση flash και επιτάχυνση αλγορίθμων AES, SHA και RSA. Αυτά επιτρέπουν την ασφαλή μετάδοση και αποθήκευση των δεδομένων, στοιχείο κρίσιμο για συστήματα παρακολούθησης περιβάλλοντος.



Σχήμα 31: *Υπολογιστική μονάδα ελέγχου ESP32-S3*

7. **Μνήμη / Flash / PSRAM:** Διαθέτει ενσωματωμένη μνήμη SRAM, υποστήριξη για εξωτερική flash/PSRAM, και cache controller. Αυτό επιτρέπει την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων σε buffers πριν την αποστολή τους.
8. **Κόστος / Κοινότητα / Διαθεσιμότητα:** Προσφέρει εξαιρετική σχέση απόδοσης/κόστους και υποστηρίζεται από μεγάλη κοινότητα ανάπτυξης (βιβλιοθήκες, forums). Αυτό διευκολύνει την υλοποίηση, τη συντήρηση και την επίλυση προβλημάτων.

13.1.3 Συνδεσμολογία Συστήματος

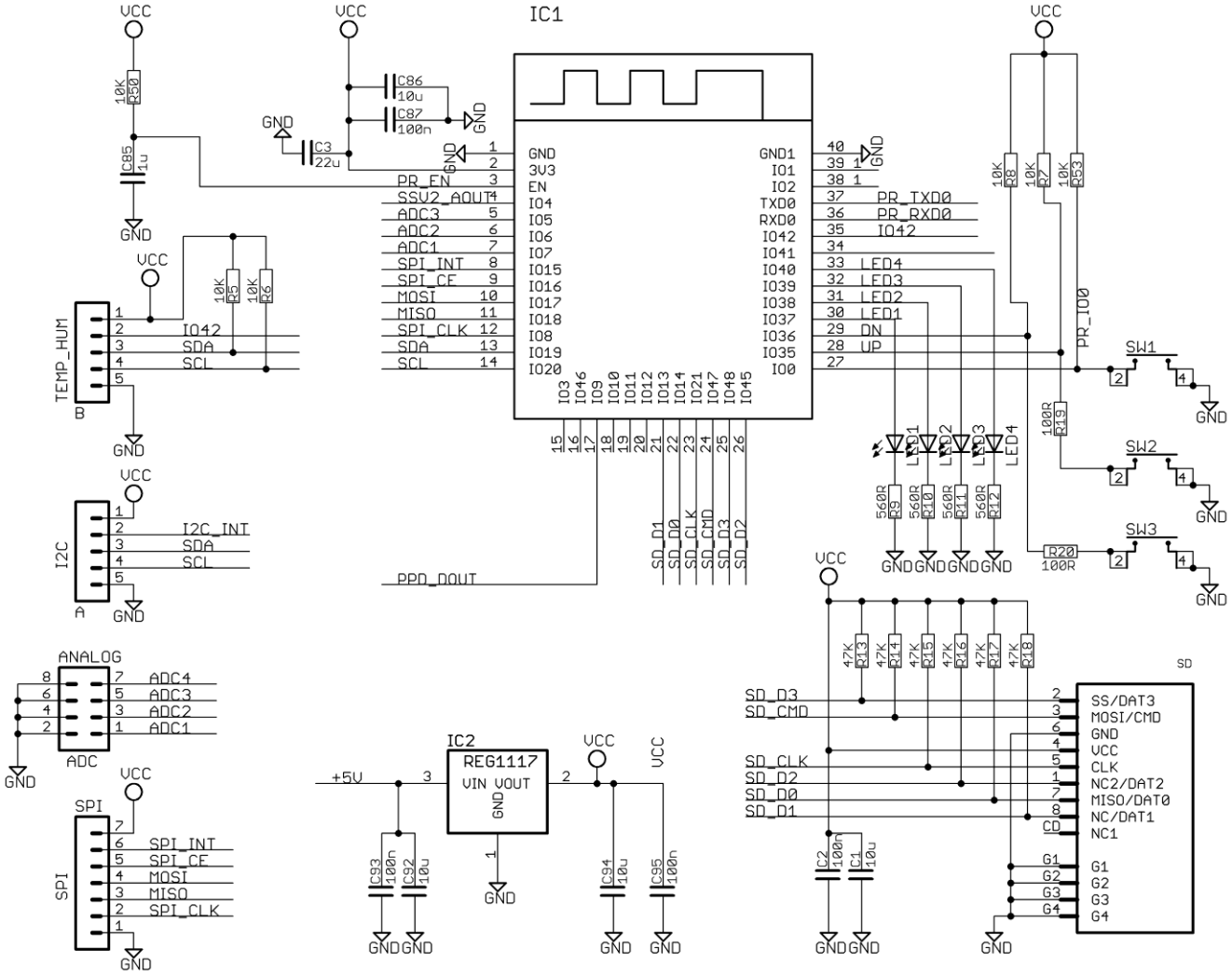
Η ενότητα αυτή εξετάζει τη συνδεσμολογία του συστήματος, παρουσιάζοντας τη λειτουργική διασύνδεση των βασικών ηλεκτρονικών υποσυστημάτων. Η σχεδίαση βασίζεται στο μικροελεγκτή ESP32-S3, ο οποίος συνδυάζεται με σταθεροποιητές τάσης, μονάδες επικοινωνίας USB-UART και πολυάριθμους αισθητήρες περιβαλλοντικών μετρήσεων. Μέσα από την ανάλυση των επιμέρους τμημάτων (IC1, IC2, IC10) και της διασύνδεσης των αισθητήρων, αναδεικνύεται η συνολική συνδεσμολογία που επιτρέπει την αξιόπιστη λειτουργία και τη δυναμική επεκτασιμότητα του συστήματος.

Κεντρικός Μικροελεγκτής (IC1/ESP32-S3)

Στο κύκλωμα, το ολοκληρωμένο IC1 αποτελεί το κεντρικό στοιχείο που διαχειρίζεται όλα τα σήματα ελέγχου και δεδομένων:

- Οι **ακροδέκτες IO19 και IO20** χρησιμοποιούνται για τον διαύλο I2C, μέσω του οποίου επικοινωνεί με τους περισσότερους αισθητήρες του συστήματος. Για τη σταθερότητα της επικοινωνίας, χρησιμοποιούνται αντιστάσεις pull-up
- Οι **ακροδέκτες TXD0 και RXD0** χρησιμοποιούνται για σειριακή επικοινωνία μέσω της μονάδας USB-UART, επιτρέποντας τον προγραμματισμό και την παρακολούθηση του ESP32 από υπολογιστή
- Οι **γραμμές SPI** είναι διαθέσιμες για πιθανή επέκταση ή επικοινωνία με εξωτερικές μονάδες αποθήκευσης
- Οι **ADC1-ADC4** παρέχουν τη δυνατότητα αναλογικών μετρήσεων, χρήσιμων σε περιπτώσεις αισθητήρων με αναλογική έξοδο
- Ο **ακροδέκτης EN (Enable)** χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του μικροελεγκτή - πρακτικά λειτουργεί ως είσοδος “reset”
- Η **γραμμή 3V3** παρέχει σταθερή τάση 3.3 V τροφοδοτώντας τόσο το ESP32 όσο και τους αισθητήρες που το απαιτούν
- Η **γραμμή 5V** χρησιμοποιείται κυρίως για την τροφοδοσία του ρυθμιστή και άλλων περιφερειακών
- Ο **ακροδέκτης GND** (γείωση) αποτελεί κοινό σημείο αναφοράς για όλο το κύκλωμα εξασφαλίζοντας σταθερή λειτουργία

- Οι **διακόπτες SW1-SW3** είναι συνδεδεμένοι σε GPIO pins και χρησιμοποιούνται για χειροκίνητες λειτουργίες, όπως επανεκκίνηση, ενεργοποίηση διαδικασίας μέτρησης ή διαγνωστικού ελέγχου
- Οι **γραμμές GPIO37-GPIO40** είναι αφιερωμένες σε ενδεικτικά LEDs, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για οπτική ενημέρωση σχετικά με την κατάσταση του συστήματος (π.χ. ενεργοποίηση Wi-Fi, αποστολή δεδομένων, σφάλμα επικοινωνίας)
- Στο κύκλωμα τροφοδοσίας έχουν τοποθετηθεί **πυκνωτές αποσύζευξης**, οι οποίοι εξομαλύνουν την τάση και μειώνουν τον ηλεκτρικό θόρυβο, διασφαλίζοντας τη σταθερή λειτουργία του συστήματος.
- Μέσω των **ακροδεκτών IO13, IO14, IO21, IO45, IO47, IO48** υποστηρίζεται η επικοινωνία με μονάδα κάρτας SD, παρέχοντας δυνατότητα τοπικής αποθήκευσης των περιβαλλοντικών δεδομένων



Σχήμα 32: *Κύκλωμα μικροελεγκτή ESP32-S3 (IC1) και σταθεροποιητή τάσης REG1117 (IC2)*

Από την ανάλυση του κυκλώματος προκύπτει ότι το IC1/ESP32-S3 αποτελεί τον κεντρικό πυρήνα του συστήματος, καθώς συντονίζει τη ροή των δεδομένων από τους αισθητήρες προς την εφαρμογή. Μέσω των διαθέσιμων διεπαφών του επιτυγχάνεται η ολοκληρωμένη επικοινωνία με αισθητήρες διαφόρων τύπων, εξασφαλίζοντας αξιοπιστία, ταχύτητα και ευελιξία στη διαχείριση των περιβαλλοντικών μετρήσεων. Συνολικά, το κύκλωμα IC1/ESP32-S3 συνδυάζει υψηλό επίπεδο

ενοποίησης και ενεργειακής αποδοτικότητας, παρέχοντας μια σταθερή πλατφόρμα πάνω στην οποία βασίζεται όλη η λειτουργία της εφαρμογής.

Κύκλωμα Τροφοδοσίας (IC2/REG1117)

Το ολοκληρωμένο IC2 αποτελεί τον σταθεροποιητή τάσης του συστήματος και είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή της εισόδου +5V σε σταθερή τάση 3.3V.

Η έξοδος του REG1117 συνοδεύεται από πυκνωτές φίλτρου, οι οποίοι μειώνουν τις αιχμές και τον ηλεκτρικό θόρυβο, εξασφαλίζοντας σταθερή και καθαρή παροχή ισχύος. Η ύπαρξη πυκνωτών και στην είσοδο του σταθεροποιητή συμβάλλει στην απορρόφηση διακυμάνσεων από την τροφοδοσία USB, προστατεύοντας τον μικροελεγκτή και τα υπόλοιπα κυκλώματα από πιθανές αστάθειες.

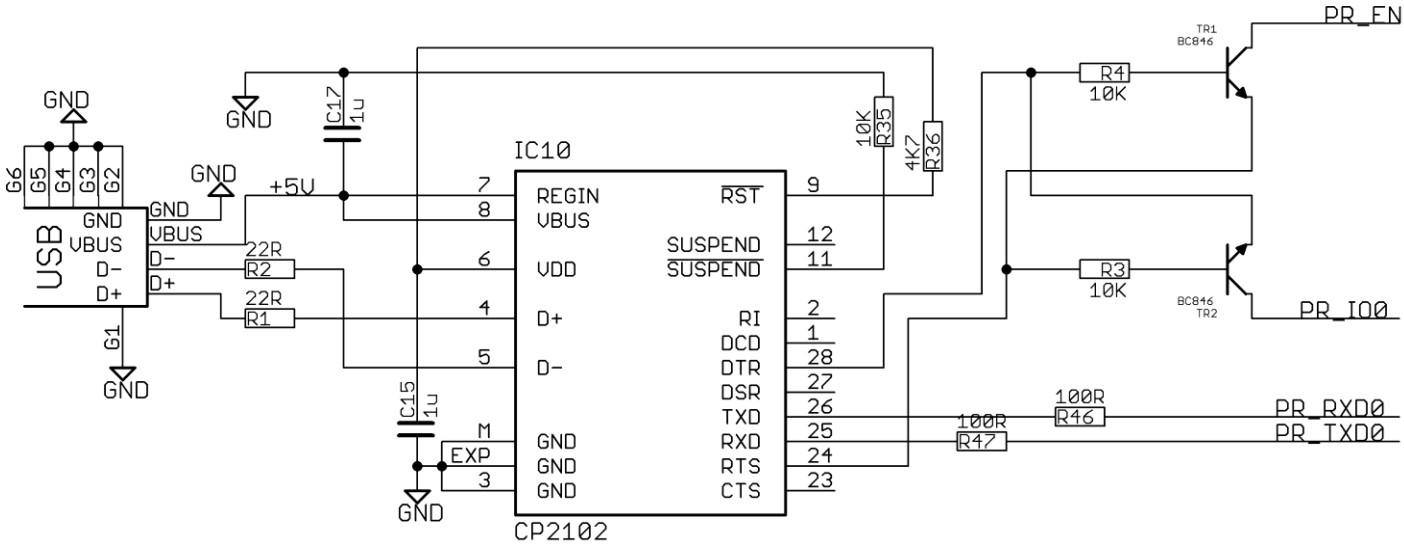
Συνολικά, το κύκλωμα IC2/REG1117 διασφαλίζει την ενεργειακή σταθερότητα και αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος, αποτελώντας κρίσιμο ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ της πηγής ισχύος και των ευαίσθητων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η σωστή σχεδίασή του συμβάλλει ουσιαστικά στη μακροχρόνια και απρόσκοπτη λειτουργία της συσκευής.

Κύκλωμα Επικοινωνίας USB-UART (IC10 /CP2102)

Το ολοκληρωμένο IC10 αποτελεί τη γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ του μικροελεγκτή ESP32-S3 και του υπολογιστή μέσω της θύρας USB. Ο ρόλος του είναι η μετατροπή του πρωτοκόλλου USB σε UART (σειριακή επικοινωνία).

- Η **θύρα USB** παρέχει την τάση +5V, εξασφαλίζοντας ενεργειακή αυτονομία κατά τη σύνδεση με τον υπολογιστή. Οι γραμμές D+ και D- διασυνδέονται με τους ακροδέκτες 4 και 5 του CP2102, μεταφέροντας τα δεδομένα USB, ενώ οι αντιστάσεις R1 και R2 περιορίζουν την παρεμβολή και βελτιώνουν την ποιότητα του σήματος.
- Η **έξοδος TXD και η είσοδος RXD** συνδέονται απευθείας με τους ακροδέκτες PR_TXD0 και PR_RXD0 του ESP32-S3, καθιστώντας δυνατή τη διπλή κατεύθυνση επικοινωνίας. Οι αντιστάσεις R46 και R47 λειτουργούν ως προστατευτικές για τα σήματα μετάδοσης και λήψης.
- Επιπλέον, το κύκλωμα περιλαμβάνει **τρανζίστορ TR1 και TR2**, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αυτόματη διαχείριση της διαδικασίας reset και προγραμματισμού του ESP32. Με τη βοήθεια των αντιστάσεων, επιτυγχάνεται η αποστολή σημάτων ενεργοποίησης χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης παρέμβασης κατά τον προγραμματισμό.
- Τέλος, οι **πυκνωτές C15 και C17** λειτουργούν ως πυκνωτές αποσύζευξης, εξομαλύνοντας την παρεχόμενη τάση και εξασφαλίζοντας σταθερή λειτουργία της θύρας USB ακόμη και σε περιβάλλον με ηλεκτρικό θόρυβο.

Συνολικά, το κύκλωμα επικοινωνίας IC10 /CP2102 παρέχει μια αξιόπιστη και αυτόνομη σύνδεση μεταξύ του μικροελεγκτή και του υπολογιστή, απλοποιώντας τον προγραμματισμό και επιτρέποντας τη συνεχή εποπτεία του συστήματος χωρίς εξωτερικές παρεμβολές.



Σχήμα 33: *Κύκλωμα επικοινωνίας CP2102 (IC10) που μετατρέπει το πρωτόκολλο USB σε UART*

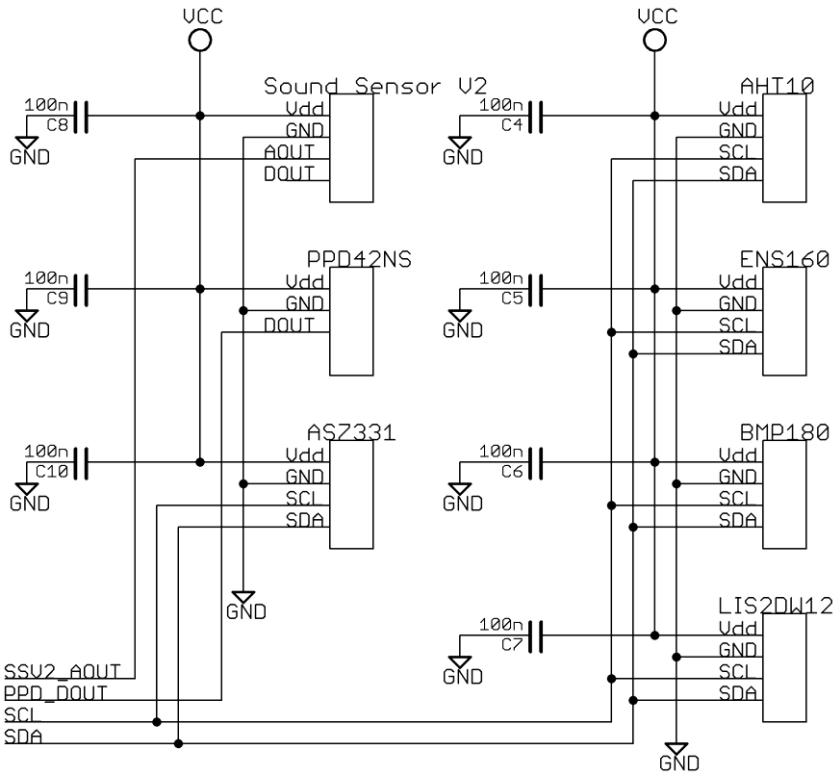
Συνδεσμολογία Αισθητήρων

Η σύνδεση των αισθητήρων με το σύστημα ESP32-S3 πραγματοποιείται με τρόπο που διασφαλίζει τόσο την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων όσο και την απλότητα της αρχιτεκτονικής. Οι αισθητήρες καλύπτουν διαφορετικές φυσικές παραμέτρους του περιβάλλοντος και χρησιμοποιούν ποικίλα πρωτόκολλα επικοινωνίας (I2C, αναλογική, ψηφιακή).

- Δίαυλος I2C: Οι περισσότεροι αισθητήρες της διάταξης συνδέονται μέσω του διαύλου I2C. Σε αυτόν τον δίαυλο επικοινωνούν οι : AHT10, ENS160,BMP180, LIS2DW12, AS7331 και τροφοδοτούνται με 3.3V
- Αναλογικές Συνδέσεις: Ο αισθητήρας θορύβου (Sound Sensor V2) συνδέεται μέσω της αναλογικής εξόδου AOUT στον ακροδέκτη IO4 (ADC1), επιτρέποντας στο ESP32 να μετρά την ένταση του ήχου σε πραγματικό χρόνο.
- Ψηφιακές Συνδέσεις: Ο αισθητήρας αιωρούμενων σωματιδίων (PPD42NS) λειτουργεί με 5V και συνδέεται με τον ακροδέκτη IO9 μέσω της γραμμής DOUT, από την οποία εξάγονται παλμοί διάρκειας που αντιστοιχούν στην πυκνότητα των σωματιδίων PM2.5. Η σύνδεση αυτή επιτρέπει την ψηφιακή μέτρηση με χαμηλή κατανάλωση και μεγάλη ακρίβεια

✓ Όλοι οι αισθητήρες διαθέτουν κοινή γραμμή γείωσης (GND), εξασφαλίζοντας σταθερή λειτουργία και αποφυγή διαφορών δυναμικού μεταξύ τους.

Η συνολική συνδεσμολογία του συστήματος συνδυάζει απλότητα, επεκτασιμότητα και σταθερότητα. Ο μικροελεγκτής ESP32-S3/IC1 λειτουργεί ως κεντρική μονάδα ελέγχου, ο σταθεροποιητής REG1117/IC2 παρέχει αξιόπιστη τροφοδοσία και ο μετατροπέας USB-UART (CP2102/IC10) εξασφαλίζει εύκολη επικοινωνία και προγραμματισμό. Οι αισθητήρες, συνδεδεμένοι με λογική διάταξη μέσω I2C, αναλογικών και ψηφιακών εισόδων, δημιουργούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής και μετάδοσης δεδομένων. Η χρήση κοινών γραμμών επικοινωνίας, η ύπαρξη απομονωτικών πυκνωτών και η σωστή τοπολογία γείωσης συμβάλλουν στη σταθερότητα και ηλεκτρική ασφάλεια της διάταξης. Το αποτέλεσμα είναι μια πλήρως λειτουργική και επεκτάσιμη πλατφόρμα, ικανή να συλλέγει αξιόπιστες περιβαλλοντικές μετρήσεις και να τις αποστέλλει σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 34: *Διάγραμμα συνδεσμολογίας των περιβαλλοντικών αισθητήρων με το μικροελεγκτικό σύστημα*

13.1.4 Συνολική Αρχιτεκτονική

Η συνολική αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος βασίζεται σε μια ιεραρχική, πολυεπίπεδη ροή δεδομένων, η οποία εξασφαλίζει τη συνεχή, αξιόπιστη και επεκτάσιμη παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Η σχεδίαση ακολουθεί μια end-to-end προσέγγιση, όπου η πληροφορία ρέει από το φυσικό επίπεδο των αισθητήρων έως τη διαδικτυακή οπτικοποίηση των μετρήσεων από τον τελικό χρήστη, μέσα από μια αλληλουχία έξι διακριτών επιπέδων που συνεργάζονται αδιάλειπτα.

Στο πρώτο επίπεδο, το υποσύστημα των αισθητήρων είναι υπεύθυνο για την πολυπαραμετρική συλλογή δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον. Η επικοινωνία τους με την υπολογιστική μονάδα ελέγχου βασίζεται σε καθιερωμένα πρωτόκολλα όπως I2C και αναλογικές εισόδους ADC, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων με ελάχιστο θόρυβο.

Στο δεύτερο επίπεδο, ο μικροελεγκτής ESP32-S3 αναλαμβάνει την συλλογή, την προεπεξεργασία και τη χρονική σήμανση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, διαχειρίζεται τη ροή δεδομένων από τους επιμέρους αισθητήρες, εφαρμόζει βασικούς ελέγχους εγκυρότητας και μετατρέπει τις αναλογικές και ψηφιακές τιμές σε μορφή κατάλληλη για αποστολή.

Στο τρίτο επίπεδο, μέσω της ενσωματωμένης συνδεσιμότητας Wi-Fi, το ESP32-S3 αποστέλλει τα δεδομένα στον διακομιστή XAMPP με τη μορφή HTTP POST αιτημάτων, χρησιμοποιώντας PHP scripts ως ενδιάμεσο κανάλι επικοινωνίας. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται μέσω των PHP scripts ελέγχονται για εγκυρότητα και ταξινομούνται ανά παράμετρο, πριν προωθηθούν για αποθήκευση. Το σύστημα αυτό εξασφαλίζει την ομαλή διασύνδεση μεταξύ του μικροελεγκτή και της βάσης δεδομένων,

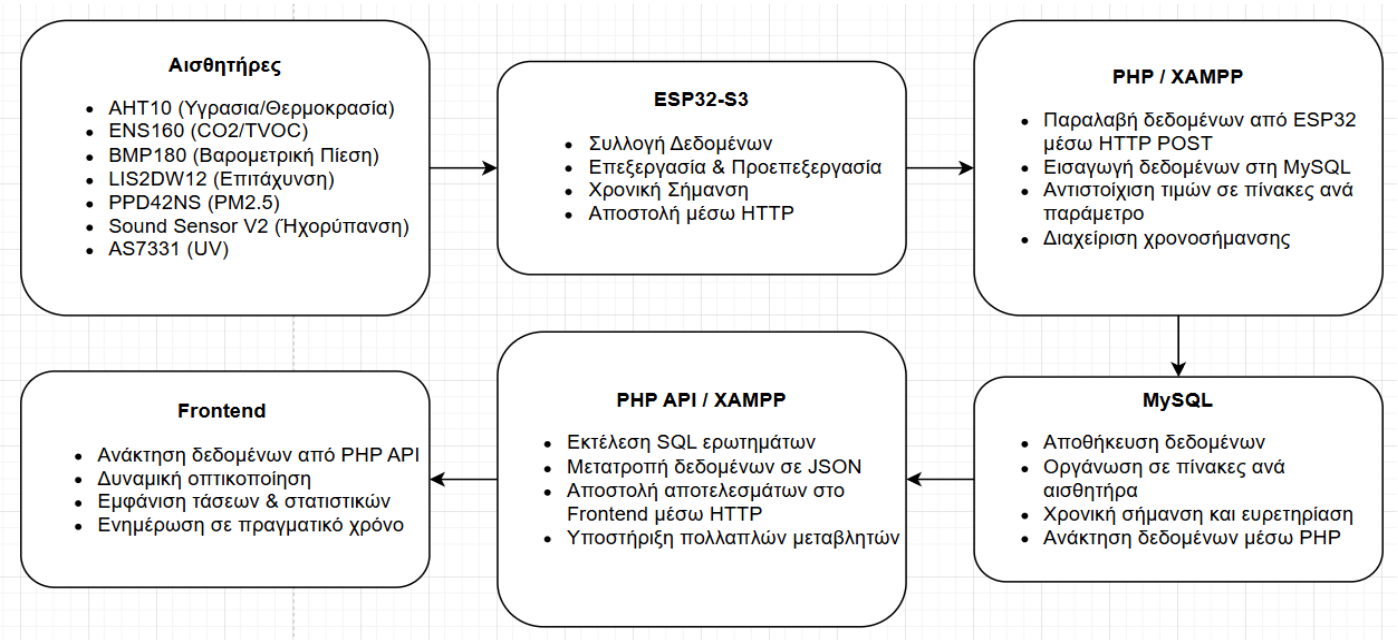
εφαρμόζοντας μηχανισμούς χρονοσήμανσης και χειρισμού σφαλμάτων, ώστε να αποτρέπονται ασυνέπειες και απώλειες δεδομένων.

Στο τέταρτο επίπεδο, τα δεδομένα αποθηκεύονται στη βάση MySQL, η οποία αποτελεί τον πυρήνα της υποδομής δεδομένων. Οι μετρήσεις οργανώνονται σε πίνακες ανά αισθητήρα και συνοδεύονται από χρονικά μεταδεδομένα για την εξασφάλιση συγκρισιμότητας και ιστορικής ανάλυσης. Η βάση υποστηρίζει μηχανισμούς αυτόματης διαχείρισης, όπως διαγραφή παλαιών εγγραφών και δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας, ενώ επιτρέπει ταχεία ανάκτηση και ευέλικτη επεξεργασία δεδομένων για μελλοντική ανάλυση ή οπτικοποίηση.

Στο πέμπτο επίπεδο, η πρόσβαση στα δεδομένα υλοποιείται μέσω PHP APIs που λειτουργούν ως διεπαφή ανάμεσα στη βάση και το περιβάλλον παρουσίασης. Τα APIs αυτά εκτελούν SQL ερωτήματα, ομαδοποιούν και εξομαλύνουν τις χρονοσειρές, μετατρέποντας τα αποτελέσματα σε μορφή JSON. Στη συνέχεια, αποστέλλουν τις πληροφορίες στο frontend μέσω HTTP, καθιστώντας δυνατή τη δυναμική φόρτωση και ενημέρωση των γραφημάτων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται πλήρης διαχωρισμός των επιπέδων δεδομένων, επεξεργασίας και οπτικοποίησης.

Τέλος, το έκτο επίπεδο βρίσκεται το frontend, δηλαδή το διαδικτυακό περιβάλλον οπτικοποίησης που προσφέρει την τελική διεπαφή στον χρήστη. Η ιστοσελίδα, υλοποιημένη με HTML, CSS και JavaScript, αντλεί τα δεδομένα και τα απεικονίζει με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης ApexCharts σε μορφή διαγραμμάτων, πινάκων και δεικτών. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέγει χρονικά διαστήματα, να συγκρίνει μεταβλητές και να παρακολουθεί την εξέλιξη των περιβαλλοντικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας έτσι τη διαδραστική κατανόηση και αξιολόγηση των συνθηκών.

Συνολικά, το σύστημα ακολουθεί μια πλήρως ολοκληρωμένη και αυτοματοποιημένη αρχιτεκτονική, στην οποία κάθε επίπεδο συμβάλλει στην ομαλή ροή πληροφορίας, από τη μέτρηση έως την οπτικοποίηση. Η δομή αυτή διασφαλίζει ακρίβεια, διαφάνεια, επεκτασιμότητα και επαναχρησιμότητα, καθιστώντας το σύστημα ευέλικτο για μελλοντικές αναβαθμίσεις ή προσαρμογές σε νέα σενάρια παρακολούθησης.



Σχήμα 35: *Απεικόνιση της συνολικής αρχιτεκτονικής του συστήματος*

13.2 Υλοποίηση Firmware (ESP32-S3 / Arduino IDE)

Η υλοποίηση του firmware για τον μικροελεγκτή ESP32-S3 αποτελεί το λειτουργικό υπόβαθρο του συστήματος και συνιστά το κατώτερο επίπεδο της συνολικής αρχιτεκτονικής. Στο στάδιο αυτό, επιτυγχάνεται η συλλογή, επεξεργασία και αποστολή των περιβαλλοντικών δεδομένων προς τη βάση δεδομένων MySQL. Το firmware καθορίζει τη συμπεριφορά όλων των αισθητήρων, τον ρυθμό δειγματοληψίας, την επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλων I2C και UART, καθώς και τη σταθερή μετάδοση δεδομένων μέσω WiFi.

Η ανάπτυξη του προγράμματος πραγματοποιήθηκε στο Arduino IDE, αξιοποιώντας τις διαθέσιμες βιβλιοθήκες του οικοσυστήματος ESP32 για δικτυακή συνδεσιμότητα και πολυνηματική λειτουργία. Η σχεδίαση του κώδικα βασίστηκε στη λογική του modular design, όπου κάθε αισθητήρας, υποσύστημα και διεργασία λειτουργούν ως ανεξάρτητες ενότητες, ενταγμένες σε ένα ενοποιημένο πρόγραμμα. Ο κύριος στόχος της φάσης αυτής είναι η αξιόπιστη λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, με ελάχιστο υπολογιστικό φορτίο και βέλτιστη διαχείριση ενέργειας, ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή επικοινωνία με τον εξυπηρετητή και συνεπής καταγραφή μετρήσεων.

13.2.1 Αρχικοποίηση και Ρυθμίσεις Περιβάλλοντος

Η φάση της αρχικοποίησης και ρύθμισης περιβάλλοντος αποτελεί το θεμέλιο της λειτουργίας του firmware του ESP32-S3, καθώς σε αυτό το στάδιο καθορίζεται η υποδομή πάνω στην οποία θα εκτελεστούν όλες οι επόμενες διεργασίες του συστήματος. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ενσωμάτωση και φόρτωση των απαραίτητων βιβλιοθηκών, τη διαμόρφωση των γραμμών επικοινωνίας I2C (SDA/SCL) για τη σωστή λειτουργία των αισθητήρων, τη ρύθμιση της ασύρματης σύνδεσης Wi-Fi και τον συγχρονισμό χρόνου μέσω NTP για την παραγωγή ακριβών χρονικών σημάνσεων σε κάθε μέτρηση.

Παράλληλα, ενεργοποιείται το λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου FreeRTOS (Free Real-Time Operating System), το οποίο επιτρέπει την πολυδιεργασιακή εκτέλεση του προγράμματος, εξασφαλίζοντας ότι η συλλογή, η επεξεργασία και η αποστολή δεδομένων πραγματοποιούνται ταυτόχρονα, χωρίς συγκρούσεις ή καθυστερήσεις. Η ορθή ρύθμιση των βιβλιοθηκών, των πρωτοκόλλων επικοινωνίας και των μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για τη σταθερή, αποδοτική και συγχρονισμένη λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης.

Βασικές Λειτουργίες

Κατά την εκκίνηση, πραγματοποιούνται οι εξής βασικές λειτουργίες:

- Ορισμός ρυθμού επικοινωνίας (Serial.begin) για τη σειριακή απεικόνιση δεδομένων και τον έλεγχο μέσω του monitor.
- Αρχικοποίηση του διαύλου I2C (Wire.begin), μέσω του οποίου επικοινωνούν οι περισσότεροι αισθητήρες.

- Ενεργοποίηση της συνδεσιμότητας WiFi.
- Διαμόρφωση των νημάτων εκτέλεσης FreeRTOS, τα οποία επιτρέπουν στον μικροελεγκτή να χειρίζεται ταυτόχρονες διεργασίες (π.χ. συλλογή δεδομένων, επικοινωνία, καθαρισμό buffer), διατηρώντας υψηλή σταθερότητα και αποδοτικότητα.

Βιβλιοθήκες

Το πρόγραμμα κάνει εκτεταμένη χρήση εξειδικευμένων βιβλιοθηκών που επιτρέπουν τη διαχείριση των αισθητήρων, του WiFi, και των χρονοπρογραμματισμένων διεργασιών. Συνοπτικά, οι σημαντικότερες βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούνται είναι:

- **Wire.h:** Διαχειρίζεται τον δίαυλο επικοινωνίας I2C, μέσω του οποίου το ESP32-S3 επικοινωνεί με αισθητήρες όπως οι AHT10, ENS160 και BMP180. Παρέχει χαμηλού επιπέδου εντολές για ανάγνωση και εγγραφή δεδομένων μέσω SDA/SCL pins.
- **WiFi.h:** Υπεύθυνη για τη σύνδεση του ESP32-S3 σε ασύρματο δίκτυο, επιτρέποντας την αποστολή δεδομένων μέσω HTTP προς τον εξυπηρετητή. Η βιβλιοθήκη χειρίζεται τη διαδικασία σύνδεσης, έλεγχο κατάστασης και αυτόματη επανασύνδεση σε περίπτωση απώλειας σήματος.
- **time.h:** Χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό ώρας του συστήματος και τη δημιουργία χρονικών σημάνσεων (timestamps) για κάθε μέτρηση. Επιτρέπει στον μικροελεγκτή να λαμβάνει την ακριβή ώρα μέσω NTP και να αποθηκεύει δεδομένα με σωστή χρονολογική σειρά, εξασφαλίζοντας συνέπεια και ακρίβεια στις εγγραφές της βάσης δεδομένων.
- **HTTPClient.h:** Επιτρέπει την εκτέλεση HTTP POST αιτημάτων προς το αρχείο που στέλνει τα δεδομένα στην βάση MySQL.
- **freertos/FreeRTOS.h:** Εισάγει το πολυνηματικό λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου FreeRTOS, ενσωματωμένο στο ESP32. Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ξεχωριστών tasks που εκτελούνται ανεξάρτητα και παράλληλα, αυξάνοντας τη σταθερότητα και την ταχύτητα του συστήματος.
- **Adafruit_AHTX0.h:** Υποστηρίζει τη λειτουργία του αισθητήρα AHT10. Η βιβλιοθήκη παρέχει υψηλού επιπέδου συναρτήσεις όπως getEvent() και readTemperature() για εύκολη πρόσβαση στις μετρήσεις.
- **ScioSense_ENS160.h:** Διαχειρίζεται τον αισθητήρα ENS160, υπεύθυνο για τη μέτρηση συγκεντρώσεων TVOC και CO_2 ισοδυνάμου. Επιτρέπει την ενεργοποίηση του αισθητήρα, τη βαθμονόμηση και την ανάκτηση των δεδομένων ποιότητας αέρα.
- **SFE_BMP180.h:** Βοηθάει στην διαχείριση της βαρομετρικής πίεσης για τον αισθητήρα BMP180.
- **ArduinoJson.h:** Η βιβλιοθήκη αυτή είναι καθοριστικής σημασίας για τη μορφοποίηση των δεδομένων σε JSON δομές, πριν από την αποστολή τους προς το backend.

Η οργάνωση όλων αυτών των βιβλιοθηκών επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί συγχρονισμένα, αποδοτικά και επεκτάσιμα.

Συνδέσεις I2C (SDA/SCL) και Δίαυλος Επικοινωνίας Αισθητήρων

Το σύστημα στηρίζεται σε δομή πολυαισθητηριακής αρχιτεκτονικής, όπου η επικοινωνία των περισσότερων μονάδων, όπως φάνηκε στην επιλογή υλικού και στη συνδεσμολογία, πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου I2C. Ο δίαυλος αυτός επιτρέπει την παράλληλη σύνδεση πολλών αισθητήρων πάνω στα ίδια δύο καλώδια, SDA (Serial Data) για τη σειριακή μεταφορά δεδομένων και SCL (Serial Clock) για τη χρονική παλμική σήμανση, διασφαλίζοντας ταυτόχρονη μεταφορά πληροφοριών με ελάχιστο αριθμό φυσικών συνδέσεων.

Σε ένα δίκτυο I2C, η επικοινωνία ακολουθεί αρχιτεκτονική master-slave. Ο master (στην περίπτωση αυτή το ESP32-S3) ελέγχει τον χρονισμό και ξεκινά κάθε επικοινωνία, ενώ οι slaves είναι οι επιμέρους αισθητήρες, οι οποίοι απαντούν μόνο όταν επιλεγούν από τον master. Κάθε slave διαθέτει μοναδική 7-bit διεύθυνση, η οποία καθορίζει την ταυτότητά του μέσα στο δίκτυο, επιτρέποντας στο ESP32 να επικοινωνεί επιλεκτικά με καθέναν ξεχωριστά, χωρίς παρεμβολές.

Η επικοινωνία ξεκινά με ένα σήμα έναρξης (Start Condition), όπου η γραμμή SDA μεταβαίνει από υψηλή σε χαμηλή κατάσταση ενώ η SCL παραμένει υψηλή. Ακολουθεί η αποστολή της διεύθυνσης του slave (7 bits) και ενός επιπλέον bit λειτουργίας (R/W) που καθορίζει αν το επόμενο βήμα θα είναι ανάγνωση (Read) ή εγγραφή (Write). Μετά από κάθε byte δεδομένων, ο παραλήπτης (είτε ο master είτε ο slave) απαντά με ένα bit επιβεβαίωσης (ACK), δηλώνοντας ότι η μετάδοση ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Η διαδικασία συνεχίζεται με τη μεταφορά ενός ή περισσότερων πακέτων δεδομένων, και ολοκληρώνεται με ένα σήμα τερματισμού (Stop Condition), όταν η SDA επιστρέψει σε υψηλή στάθμη ενώ η SCL είναι υψηλή. Στην πράξη, κάθε κύκλος επικοινωνίας I2C αποτελείται από:

- **1 bit έναρξης (Start Condition)**
- **7 bits διεύθυνσης Slave**
- **1 bit R/W** για τον καθορισμό της λειτουργίας
- **8 bits δεδομένων (Data Byte)** ανά μετάδοση
- **1 bit επιβεβαίωσης (ACK/NACK)**
- **1 bit τερματισμού (Stop Condition)**

Ο χρονισμός όλων αυτών των γεγονότων ρυθμίζεται αποκλειστικά από το ρολόι SCL που παρέχει ο master, επιτρέποντας στα συστήματα I2C να λειτουργούν με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Η αποδοτική αυτή δομή καθιστά το I2C ιδανικό για πολυαισθητηριακές εφαρμογές, όπου πολλοί διαφορετικοί αισθητήρες συνδέονται σε κοινό δίαυλο και αποστέλλουν δεδομένα χωρίς την ανάγκη ξεχωριστών γραμμών επικοινωνίας.

Στην περίπτωση του ESP32-S3, οι ακίδες GPIO 19 (SDA) και GPIO 20 (SCL) χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των αισθητήρων.

Κατά την αρχικοποίηση (Wire.begin()), το ESP32-S3 εκκινεί τον δίαυλο και ελέγχει την παρουσία των αισθητήρων, πραγματοποιώντας αυτόματο έλεγχο συνδεσιμότητας πριν τη συλλογή δεδομένων.

Επομένως, η χρήση του I2C μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της καλωδίωσης και εξασφαλίζει σταθερό ρυθμό επικοινωνίας (συνήθως στα 100kHz ή 400kHz), κρίσιμο για τη ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Διαμόρφωση Σύνδεσης Wi-Fi και Συγχρονισμός Χρόνου (NTP)

Για την αποστολή των δεδομένων στη βάση MySQL, το ESP32-S3 πρέπει να διαθέτει σταθερή και ακριβή δικτυακή συνδεσιμότητα. Κατά την εκκίνηση του συστήματος, η βιβλιοθήκη WiFi.h χρησιμοποιείται για τη σύνδεση στο τοπικό ασύρματο δίκτυο, με καθορισμένα SSID και password.

Μετά τη σύνδεση, πραγματοποιείται συγχρονισμός ώρας μέσω NTP (Network Time Protocol), χρησιμοποιώντας τους εξυπηρετητές χρόνου της Ευρώπης (π.χ. "pool.ntp.org", "time.google.com"), διασφαλίζοντας ότι κάθε μέτρηση συνοδεύεται από ακριβή χρονική σήμανση σε πραγματικό χρόνο.

Ο συγχρονισμός αυτός είναι κρίσιμος, καθώς επιτρέπει:

- Τη χρονολογική ταξινόμηση των μετρήσεων στη βάση δεδομένων,
- Τη σύγκριση διαφορετικών χρονικών παραθύρων (π.χ. μεταξύ ημερών ή εβδομάδων), και
- Την ευθυγράμμιση δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων που λειτουργούν παράλληλα.

Επιπλέον, η ρύθμιση του GMT+3 (ώρα Ελλάδας) πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου offset (10800 δευτερόλεπτα), εξασφαλίζοντας συνέπεια στην απεικόνιση των δεδομένων στο frontend και τη βάση.

Ενεργοποίηση FreeRTOS και Πολυδιεργασιακή Εκτέλεση

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του firmware είναι η αξιοποίηση του FreeRTOS, ενός ενσωματωμένου λειτουργικού συστήματος πραγματικού χρόνου που προσφέρει πολυδιεργασιακή λειτουργία.

Στο ESP32-S3, το FreeRTOS επιτρέπει τη δημιουργία παράλληλων tasks (π.χ. ανάγνωση αισθητήρων, αποστολή δεδομένων, ενημέρωση WiFi, έλεγχος σεισμικών συμβάντων), τα οποία εκτελούνται ανεξάρτητα και συγχρονίζονται μέσω timers και mutexes.

Η δομή αυτή παρέχει πολλαπλά πλεονεκτήματα:

- Αποφυγή συγκρούσεων κατά την πρόσβαση κοινών πόρων,
- Ακριβής χρονισμός των διεργασιών, μέσω προγραμματισμένων χρονικών διαστημάτων,
- Ανθεκτικότητα σε καθυστερήσεις ή αποτυχίες ενός επιμέρους task, χωρίς να επηρεάζεται το σύστημα συνολικά,
- Αποδοτική χρήση της διπύρηνης αρχιτεκτονικής του ESP32-S3, όπου κάθε task μπορεί να εκτελείται σε ξεχωριστό πυρήνα.

Τα mutexes εξασφαλίζουν ότι η πρόσβαση σε κοινές μεταβλητές πραγματοποιείται με ασφάλεια, ενώ οι timers καθορίζουν τον ρυθμό εκτέλεσης κάθε task. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα λειτουργεί

σε πραγματικό χρόνο, χωρίς καθυστερήσεις, επιτρέποντας ταυτόχρονη μέτρηση, αποστολή και παρακολούθηση.

Συνολικά, με βάση αυτά, δημιουργείτε ένα σταθερό λειτουργικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο θα στηριχθεί η διαχείριση και ο έλεγχος των επιμέρους αισθητήρων που συγκροτούν το δίκτυο μέτρησης. Η ομαλή ολοκλήρωση της φάσης αυτής αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχία του επόμενου σταδίου, τη συλλογή, επεξεργασία και προγραμματισμένη ενεργοποίηση των αισθητήρων.

13.2.2 Διαχείριση Αισθητήρων

Η διαχείριση των αισθητήρων στο σύστημα αποτελεί τον πυρήνα της λειτουργικότητας του firmware, καθώς μέσω αυτών υλοποιείται η συλλογή των πρωτογενών περιβαλλοντικών δεδομένων. Κάθε αισθητήρας είναι υπεύθυνος για τη μέτρηση μιας διαφορετικής φυσικοχημικής παραμέτρου, ενώ το ESP32-S3 αναλαμβάνει να συντονίζει, να χρονίζει και να αποστέλλει τα δεδομένα αυτά προς το backend με τρόπο αξιόπιστο, ενεργειακά αποδοτικό και χρονικά συγχρονισμένο.

Η αρχικοποίηση κάθε αισθητήρα πραγματοποιείται στο στάδιο εκκίνησης του συστήματος (setup), μέσω των αντίστοιχων βιβλιοθηκών που περιλαμβάνουν συναρτήσεις βαθμονόμησης, επιβεβαίωσης σύνδεσης και ρύθμισης ρυθμού δειγματοληψίας. Όπως αναφέρθηκε, η επικοινωνία των περισσότερων αισθητήρων βασίζεται στο πρωτόκολλο I2C, ενώ για αναλογικές μετρήσεις (όπως ο ήχος ή τα σωματίδια PM) αξιοποιούνται είσοδοι ADC.

Έλεγχος Αισθητήρων

Η λογική ελέγχου των αισθητήρων βασίζεται σε τακτικούς χρονιστές και λειτουργίες επανάκλησης (callback timers), οι οποίες ενεργοποιούν περιοδικά κάθε αισθητήρα, ανάλογα με το φυσικό ρυθμό απόκρισης και τη σταθερότητά του. Για παράδειγμα:

- Οι αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης ενημερώνονται κάθε 5-10 δευτερόλεπτα.
- Ο αισθητήρας αερίων ENS160 λειτουργεί με κύκλο 30 δευτερολέπτων, λόγω του χρόνου σταθεροποίησης.
- Οι σεισμικοί και ηχητικοί αισθητήρες λειτουργούν σε πιο σύντομα διαστήματα, ώστε να εντοπίζονται άμεσα δυναμικές μεταβολές.

Η χρήση των timers σε συνδυασμό με το FreeRTOS εξασφαλίζει ότι όλες οι μετρήσεις εκτελούνται παράλληλα και χωρίς αλληλοεπικάλυψη, επιτυγχάνοντας ομοιογενή και συνεχή ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Μέσω της συντονισμένης λειτουργίας των διαύλων I2C και ADC, της αυτόματης βαθμονόμησης και των προγραμματισμένων χρονομέτρων, το σύστημα εξασφαλίζει αξιόπιστη, ακριβή και ενεργειακά αποδοτική συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων. Η επιτυχής ενσωμάτωση όλων των επιμέρους αισθητήρων καθιστά το ESP32-S3 έναν ενιαίο κόμβο έξυπνης μέτρησης, ικανό να παρακολουθεί ταυτόχρονα ποικίλες παραμέτρους του αστικού μικροκλίματος με συνέπεια και σταθερότητα.

Παράλληλα, οι μετρήσεις καταγράφονται και αποθηκεύονται με χρονική συνέπεια, δημιουργώντας ένα οργανωμένο σύνολο δεδομένων έτοιμο για επεξεργασία. Η φάση αυτή ολοκληρώνει τον κύκλο της συλλογής πρωτογενούς πληροφορίας, θέτοντας τις βάσεις για το επόμενο στάδιο, τη συλλογή, προεπεξεργασία και προετοιμασία των δεδομένων πριν από την αποστολή τους στο backend.

13.2.3 Συλλογή και Προεπεξεργασία Δεδομένων

Η συλλογή και προεπεξεργασία δεδομένων αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο της λειτουργίας του firmware, όπου οι μετρήσεις των αισθητήρων μετατρέπονται σε οργανωμένες, συγχρονισμένες και έτοιμες προς αποστολή εγγραφές. Σε αυτό το επίπεδο, το ESP32-S3 αναλαμβάνει να συγκεντρώσει τις τιμές που προέρχονται από τους επιμέρους αισθητήρες και να τις αποθηκεύσει προσωρινά σε κατάλληλες δομές δεδομένων.

Δομή Δεδομένων και Οργάνωση Μετρήσεων

Για τη διαχείριση των δεδομένων χρησιμοποιείται μια ενιαία δομή εγγραφής (struct), η οποία συγκεντρώνει όλες τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που μετρώνται από το σύστημα, συνοδευόμενες από μία χρονική σήμανση η οποία λαμβάνεται μέσω συγχρονισμού NTP. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται διαδοχικά σε έναν πίνακα σταθερού μεγέθους, ο οποίος λειτουργεί ως κυκλικό buffer: όταν γεμίσει, οι νεότερες εγγραφές αντικαθιστούν τις παλαιότερες, επιτρέποντας συνεχή ροή δεδομένων χωρίς υπερχείλιση μνήμης. Με τον τρόπο αυτό, όλες οι εγγραφές ταξινομούνται με απόλυτη χρονική ακρίβεια, διευκολύνοντας τη συσχέτιση διαφορετικών περιβαλλοντικών μεταβλητών κατά την ανάλυση ή την αποστολή τους στο backend.

Χρήση Semaphores και Mutexes

Η συλλογή και αποθήκευση δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες απαιτεί παράλληλη επεξεργασία και ταυτόχρονη πρόσβαση σε κοινές μεταβλητές, όπως η δομή αποθήκευσης των μετρήσεων ή οι δείκτες καταγραφής. Στο πλαίσιο του FreeRTOS, η ασφαλής διαχείριση αυτών των κοινών πόρων επιτυγχάνεται μέσω μηχανισμών συγχρονισμού, κυρίως των mutexes (mutual exclusions) και semaphores. Αυτοί οι μηχανισμοί αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο της πολυδιεργασιακής εκτέλεσης, εξασφαλίζοντας ότι το σύστημα λειτουργεί χωρίς αλληλοεπικαλύψεις, αλλοιώσεις δεδομένων ή απώλειες πληροφοριών.

Mutexes - Εξασφάλιση αποκλειστικής πρόσβασης

Έπειτα από την ενεργοποίηση των αισθητήρων -για την λήψη των δεδομένων- μέσω των callback timers έρχονται να παίξουν σημαντικό ρολό τα mutexes. Τα mutexes λειτουργούν ως μηχανισμοί αποκλειστικής πρόσβασης σε κρίσιμες περιοχές του κώδικα. Κάθε φορά που μια διεργασία

επιχειρεί να γράψει στη δομή δεδομένων, πρέπει πρώτα να «κλειδώσει» το mutex, αποκτώντας προσωρινά μοναδικό δικαίωμα πρόσβασης στη συγκεκριμένη μεταβλητή, τμήμα μνήμης ή ακόμα και σε ολόκληρο τον I2C δίαυλο. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία εγγραφής ή ενημέρωσης, το mutex «ξεκλειδώνεται», επιτρέποντας στην επόμενη διεργασία να αποκτήσει πρόσβαση.

Αυτός ο μηχανισμός αποτρέπει το φαινόμενο race condition, όπου δύο ή περισσότερες διεργασίες επιχειρούν ταυτόχρονη εγγραφή στην ίδια περιοχή μνήμης, προκαλώντας ασυνέπειες ή αλλοίωση δεδομένων.

Στην πράξη, η λειτουργία των mutexes ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. **Αίτηση κλειδώματος**: Μια διεργασία ζητά από το λειτουργικό να αποκτήσει πρόσβαση στον κοινό πόρο μέσω της συνάρτησης.
2. **Αποκλειστική εκτέλεση**: Όσο το mutex είναι κατειλημμένο, καμία άλλη διεργασία δεν μπορεί να εισέλθει στην ίδια κρίσιμη ενότητα. Αν κάποια άλλη διεργασία ζητήσει πρόσβαση, παραμένει σε κατάσταση αναμονής.
3. **Απελευθέρωση πόρου**: Μετά την ολοκλήρωση της ενέργειας, το mutex απελευθερώνεται, επιτρέποντας σε άλλη διεργασία να συνεχίσει.

Ο μηχανισμός αυτός είναι ελαφρύς και αποδοτικός, με χρόνο απόκρισης της τάξης των μικροδευτερολέπτων, επιτρέποντας την ασφαλή διαχείριση των κοινών δομών δεδομένων χωρίς καθυστερήσεις ή επιβάρυνση του επεξεργαστή.

Semaphores - Συντονισμός διεργασιών

Τα semaphores χρησιμοποιούνται για συντονισμό μεταξύ διαφορετικών tasks, καθορίζοντας τη σειρά και τις συνθήκες εκτέλεσης των διεργασιών.

Σε αντίθεση με τα mutexes, τα semaphores δεν περιορίζουν την πρόσβαση σε μία μεταβλητή, αλλά λειτουργούν ως σήματα που ειδοποιούν ότι μια διεργασία έχει ολοκληρωθεί και η επόμενη μπορεί να ξεκινήσει. Αυτή η αλληλουχία δημιουργεί ένα αλυσιδωτό μοντέλο εκτέλεσης, όπου κάθε διεργασία ξεκινά μόνο όταν οι προηγούμενες έχουν τελειώσει, εξασφαλίζοντας έτσι σταθερή και προβλέψιμη ροή δεδομένων.

Συνδυαστική Λειτουργία

Στην πράξη, τα mutexes και τα semaphores λειτουργούν συμπληρωματικά:

- Τα mutexes εξασφαλίζουν ότι μόνο ένα task τροποποιεί ταυτόχρονα τις κοινές μεταβλητές.
- Τα semaphores καθορίζουν τη σωστή σειρά εκτέλεσης των tasks, διασφαλίζοντας λογική συνέχεια στη ροή δεδομένων.

Ο συνδυασμός τους επιτρέπει στο ESP32-S3 να εκτελεί πολλαπλές εργασίες σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να διακυβεύεται η ακεραιότητα των δεδομένων ή η σταθερότητα του συστήματος. Έτσι, η συλλογή και προεπεξεργασία δεδομένων πραγματοποιούνται ομαλά, συγχρονισμένα και χωρίς απώλειες, ανεξάρτητα από το πλήθος των αισθητήρων ή τη συχνότητα των μετρήσεων.

13.2.4 Επικύρωση Λειτουργίας

Η φάση της επικύρωσης λειτουργίας του firmware αποτελεί το τελικό στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης του συστήματος, με στόχο την επιβεβαίωση ότι όλες οι επιμέρους διεργασίες εκτελούνται σταθερά, συγχρονισμένα και χωρίς σφάλματα κατά τη μακροχρόνια λειτουργία. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσα από ένα σύνολο δοκιμών που ελέγχουν την επικοινωνία, τη χρονική συνέπεια, την αξιοπιστία μετάδοσης και τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Έλεγχος Συνδεσιμότητας και Συγχρονισμού Χρόνου

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες δοκιμές σύνδεσης στο ασύρματο δίκτυο Wi-Fi και συγχρονισμού χρόνου μέσω NTP. Το ESP32-S3 επιβεβαίωσε σταθερή πρόσβαση στο δίκτυο, με μέσο χρόνο επανασύνδεσης μικρότερο των 4 δευτερολέπτων σε περιπτώσεις απώλειας σήματος. Η διαδικασία συγχρονισμού μέσω των NTP servers εξασφάλισε χρονική ακρίβεια καλύτερη του 1 δευτερολέπτου, επιτρέποντας την ακριβή αντιστοίχιση χρονικών σημάνσεων μεταξύ των τοπικών μετρήσεων και των καταχωρίσεων στη βάση δεδομένων του server.

Έλεγχος Δειγματοληψίας και Συνέπειας Χρονικών Σημάνσεων

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών επιβεβαιώθηκε ότι οι αισθητήρες λειτουργούν με σταθερό ρυθμό δειγματοληψίας και ότι οι μετρήσεις συνοδεύονται από ακριβείς χρονικές σημάνσεις. Η χρήση των mutexes στο περιβάλλον FreeRTOS απέδειξε ότι κάθε καταγραφή δεδομένων πραγματοποιείται με αποκλειστική πρόσβαση στις κοινές μεταβλητές, αποτρέποντας επικαλύψεις ή απώλειες. Χάρη σε αυτόν τον μηχανισμό, τα δεδομένα αποθηκεύονται και διαχειρίζονται με πλήρη χρονική συνέπεια, διατηρώντας ευθυγράμμιση μεταξύ του τοπικού και του υπολοίπου συστήματος.

Σταθερότητα και Αντοχή σε Συνεχή Λειτουργία

Το firmware δοκιμάστηκε σε συνεχή λειτουργία 216 ωρών, με ενεργοποιημένους όλους τους αισθητήρες και τις FreeRTOS διεργασίες.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών:

- Δεν παρατηρήθηκε διαρροή μνήμης ή υπερφόρτωση των buffers.
- Οι μετρήσεις επεξεργάζονταν και αποστέλλονταν συνεχώς χωρίς καθυστερήσεις, επιβεβαιώνοντας ότι ο μηχανισμός πολυδιεργασιακής εκτέλεσης λειτουργεί σταθερά και αξιόπιστα σε παρατεταμένη λειτουργία.
- Η κατανάλωση ενέργειας παρέμεινε σταθερή, χωρίς ενδείξεις υπερφόρτωσης ή υπερθέρμανσης του κυκλώματος.

Έλεγχος Αξιοπιστίας Αποστολής Δεδομένων

Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συνεχούς αποστολής δεδομένων μέσω HTTP POST προς το PHP API του server. Η επικοινωνία αποδείχθηκε ιδιαίτερα σταθερή, με ελάχιστες απώλειες πακέτων που εντοπίστηκαν μόνο σε στιγμιαίες περιπτώσεις αποσύνδεσης από το δίκτυο Wi-Fi.

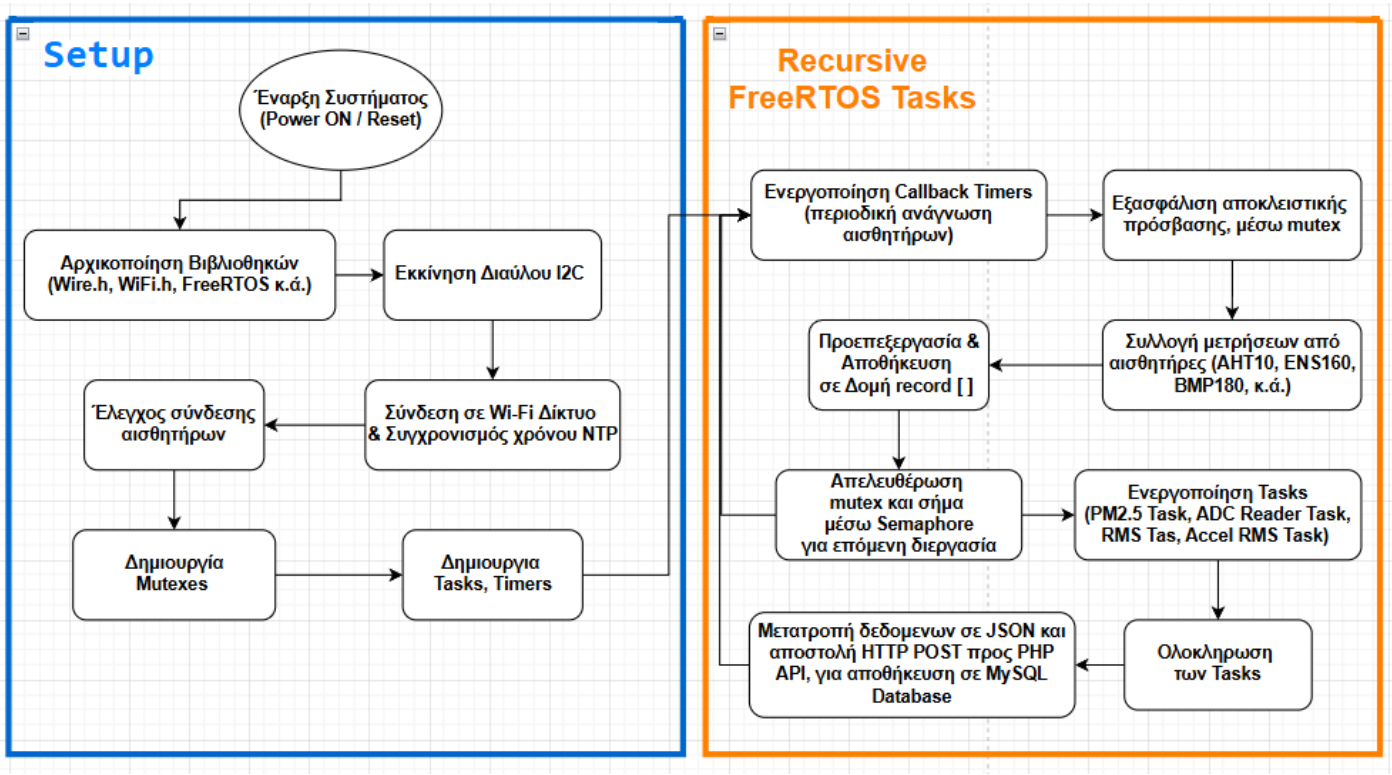
Συνολική Επικύρωση

Η ολοκλήρωση της διαδικασίας επικύρωσης κατέδειξε ότι το firmware του ESP32-S3:

- Εκτελεί τις προγραμματισμένες διεργασίες με ακρίβεια και χωρίς σφάλματα.
- Συγχρονίζει αποτελεσματικά τον χρόνο μέσω NTP.
- Διαχειρίζεται σωστά τα δεδομένα αισθητήρων και τα αποστέλλει με αξιοπιστία στο backend.
- Παραμένει λειτουργικό και σταθερό σε μακροχρόνια συνεχή λειτουργία.

Η επιτυχής επικύρωση της λειτουργίας του firmware αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η αξιόπιστη επικοινωνία με το πληροφοριακό σύστημα αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων.

Η ολοκλήρωση της υλοποίησης και επικύρωσης του firmware για το ESP32-S3 σηματοδοτεί την επιτυχή εγκαθίδρυση του φυσικού επιπέδου του συστήματος. Σε αυτό το στάδιο, η συσκευή λειτουργεί ως αυτόνομος κόμβος συλλογής και μετάδοσης περιβαλλοντικών δεδομένων, εξασφαλίζοντας σταθερή επικοινωνία και συγχρονισμό με τον εξυπηρετητή.



Σχήμα 37: *Διάγραμμα ροής λειτουργίας του firmware στο ESP32-S3*

Στην συνέχεια, θα εξεταστεί το λογισμικό υπόβαθρο του συστήματος, δηλαδή η υποδομή δεδομένων, η οποία αναλαμβάνει να παραλάβει, να αποθηκεύσει και να οργανώσει τις πληροφορίες που προέρχονται από το firmware.

13.3 Υποδομή Δεδομένων (XAMPP/PHP/MySQL)

Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης και παρουσίασης του firmware της υπολογιστικής μονάδας ESP32-S3, το επόμενο κρίσιμο στάδιο αφορά την αξιόπιστη αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων αυτών.

Η υποδομή δεδομένων λειτουργεί ως ο πυρήνας του πληροφοριακού συστήματος, εξασφαλίζοντας ότι οι μετρήσεις που προέρχονται από το φυσικό επίπεδο μετατρέπονται σε δομημένη, προσβάσιμη και αναλύσιμη πληροφορία.

Για τον σκοπό αυτό, υλοποιήθηκε μια τοπική υποδομή εξυπηρετητή, βασισμένη στο πακέτο XAMPP, το οποίο συνδυάζει τον Apache Web Server, τη γλώσσα PHP και τη βάση δεδομένων MySQL. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση όλων των απαιτούμενων υπηρεσιών σε ενιαίο περιβάλλον, διευκολύνοντας την επικοινωνία με το ESP32-S3 μέσω απλών HTTP αιτημάτων.

Στο πλαίσιο της υλοποίησης, ο μικροελεγκτής αποστέλλει τις μετρήσεις σε μορφή POST προς συγκεκριμένα PHP scripts, τα οποία αναλαμβάνουν την επεξεργασία, επαλήθευση και εισαγωγή των δεδομένων στη βάση MySQL. Αντίστοιχα, η ανάκτηση των μετρήσεων από τη βάση για απεικόνιση στο frontend πραγματοποιείται μέσω PHP APIs, τα οποία εκτελούν SQL ερωτήματα και επιστρέφουν τα αποτελέσματα σε μορφή JSON.

Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ένας συνεχής κύκλος ροής πληροφορίας: από τη συλλογή και αποστολή των δεδομένων από το ESP32-S3, στην αποθήκευση και επεξεργασία τους στον XAMPP server, και τελικά στην απεικόνισή τους στη διαδικτυακή διεπαφή.

Η υποδομή αυτή αποτελεί το ενδιάμεσο επίπεδο ολοκλήρωσης μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου του συστήματος, διασφαλίζοντας αξιοπιστία, επεκτασιμότητα και ασφάλεια στην αλυσίδα διαχείρισης δεδομένων.

13.3.1 Ανάλυση Επικοινωνίας ESP32-PHP (Αποστολή-Εισαγωγή Δεδομένων)

Η επικοινωνία ανάμεσα στη μονάδα ESP32-S3 και την υποδομή του διακομιστή επιτυγχάνεται μέσω ενός μηχανισμού ανταλλαγής δεδομένων HTTP, ο οποίος βασίζεται στην αρχή του client-server μοντέλου.

Το ESP32 λειτουργεί ως πελάτης (HTTP client), ενώ ο εξυπηρετητής XAMPP, μέσω της PHP, δρα ως server-side δέκτης που αναλαμβάνει την αποθήκευση των δεδομένων στη βάση MySQL.

```
void sendToDatabase(record r) {
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
    unsigned long start = millis();
    http.begin("http://192.168.1.223/Webpage-Code/ESP32-SQL-Connection/insert.php");
    http.addHeader("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded");

    int flag = r.event_flag;

    String postData = "temp=" + String(r.temp) +
                      "&hum=" + String(r.hum) +
                      "&tvoc=" + String(r.tvoc) +
                      "&co2=" + String(r.co2) +
                      "&bmp=" + String(r.bmp) +
                      "&pm25=" + String(r.pm25) +
                      "&snd=" + String(r.snd) +
                      "&accel=" + String(r.accel) +
                      "&uva=" + String(r.uva) +
                      "&uvb=" + String(r.uvb) +
                      "&uvc=" + String(r.uvc) +
                      "&timestamp=" + String(r.ts) +
                      "&event_flag=" + String(flag);


    int httpResponseCode = http.POST(postData);
    unsigned long duration = millis() - start;

    Serial.printf("[DB] POST code=%d, time=%lums\n", httpResponseCode, duration);
    http.end();
  } else {
    Serial.println("WiFi not connected");
  }
}
```

Σχήμα 38: *Συνάρτηση αποστολής δεδομένων sendToDatabase(), οποία είναι υπεύθυνη για την αποστολή των συλλεγμένων περιβαλλοντικών μετρήσεων από το ESP32-S3 προς τον εξυπηρετητή PHP/MySQL μέσω HTTP POST αιτήματος.*

Στο επίπεδο του firmware, η συνάρτηση sendToDatabase (record r) είναι υπεύθυνη για την αποστολή των μετρήσεων που καταγράφονται από τους αισθητήρες.

Αφού ελεγχθεί η ενεργή σύνδεση Wi-Fi, το ESP32 δημιουργεί ένα HTTP POST αίτημα, το οποίο αποστέλλεται στη διεύθυνση του script insert.php που φιλοξενείται στον XAMPP server. Οι τιμές θερμοκρασίας, υγρασίας, CO_2, TVOC, βαρομετρικής πίεσης, PM2.5, θορύβου και επιτάχυνσης συσκευάζονται σε μορφή URL-encoded δεδομένων και ενσωματώνονται στο σώμα του αιτήματος. Επιπλέον, προστίθεται και μια μεταβλητή event_flag, η οποία ενεργοποιείται όταν ανιχνεύεται σεισμικό γεγονός από τον αισθητήρα LIS2DW12. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε αποστολή αντιστοιχεί σε ένα πλήρες στιγμιότυπο περιβαλλοντικών παραμέτρων, συνοδευόμενο από ακριβή χρονική σήμανση.

Στην πλευρά του διακομιστή, το script insert.php αποτελεί το ενδιάμεσο επίπεδο που συνδέει την εφαρμογή του μικροελεγκτή με τη βάση δεδομένων MySQL.

Με την παραλαβή του αιτήματος, το script επαληθεύει την ύπαρξη όλων των αναμενόμενων πεδίων και μετατρέπει το timestamp σε συμβατή μορφή ημερομηνίας-ώρας.

Στη συνέχεια, εκτελεί σειρά από SQL εντολές INSERT για την αποθήκευση των τιμών στους αντίστοιχους πίνακες της βάσης δεδομένων.

insert.php

ESP32-SQL-Connection > insert.php > ...

```php
<?php
    $host = "localhost"; $user = "root"; $pass = ""; $db   = "diplomatikh";

    $conn = new mysqli($host, $user, $pass, $db, 3307);
    if ($conn->connect_error)
        die("Connection failed: " . $conn->connect_error);
    date_default_timezone_set('Europe/Athens');

    if (isset($_POST['temp'], $_POST['hum'], $_POST['tvoc'], $_POST['co2'],
              $_POST['bmp'],  $_POST['pm25'], $_POST['snd'],  $_POST['accel'],
              $_POST['uva'],  $_POST['uvb'],  $_POST['uvc'],
              $_POST['timestamp'], $_POST['event_flag'])) {

        $ts         = date("Y-m-d H:i:s", intval($_POST['timestamp']));
        $event_flag = intval($_POST['event_flag']);

        $queries = [
            ["temperature_data", $_POST['temp']], ["humidity_data",    $_POST['hum']],
            ["tvoc_data",        $_POST['tvoc']], ["co2_data",         $_POST['co2']],
            ["pressure_data",    $_POST['bmp']],  ["pm25_data",        $_POST['pm25']],
            ["sound_data",       $_POST['snd']],  ["uva_data",         $_POST['uva']],
            ["uvb_data",         $_POST['uvb']],  ["uvc_data",         $_POST['uvc']]
        ];

        foreach ($queries as [$table, $value]) {
            if ($value !== null && $value != 0) {
                $stmt = $conn->prepare("INSERT INTO $table (value, timestamp) VALUES (?, ?)");
                $stmt->bind_param("ds", $value, $ts);
                $stmt->execute();
                $stmt->close();
            }
        }

        if ($_POST['accel'] !== null && $_POST['accel'] != 0) {
            $stmt = $conn->prepare("INSERT INTO earthquake_data (value, timestamp, event_flag) VALUES (?, ?, ?)");
            $stmt->bind_param("dsi", $_POST['accel'], $ts, $event_flag);
            $stmt->execute();
            $stmt->close();
        }

        echo "OK";

    } else {  echo "Missing POST data"; }
    $conn->close();
?>
```

Σχήμα 39: *Κώδικας PHP για την εισαγωγή δεδομένων στη βάση MySQL (insert.php)*

Κάθε πίνακας περιλαμβάνει δύο βασικά πεδία, τη μετρούμενη τιμή και τη χρονική στιγμή καταγραφής, ενώ ο πίνακας των σεισμικών δεδομένων διαθέτει επιπλέον το πεδίο event_flag, το οποίο χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και κατηγοριοποίηση σεισμικών γεγονότων.

Η χρήση προετοιμασμένων εντολών μέσω της mysqli βιβλιοθήκης ενισχύει την ασφάλεια και την αξιοπιστία της διαδικασίας, αποτρέποντας φαινόμενα όπως το SQL injection και μειώνοντας τα σφάλματα εισαγωγής.

Με αυτόν τον μηχανισμό, κάθε νέα μέτρηση που αποστέλλεται από το ESP32 καταγράφεται με ασφάλεια και χρονική συνέπεια στο σύστημα, ολοκληρώνοντας τη ροή πληροφορίας από το επίπεδο των αισθητήρων έως το επίπεδο αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το θεμέλιο της υποδομής δεδομένων, πάνω στην οποία βασίζεται ολόκληρη η λειτουργία του συστήματος.

Στην επόμενη ενότητα, αναλύεται λεπτομερώς η εσωτερική αρχιτεκτονική της βάσης, οι πίνακες που δημιουργούνται και ο τρόπος με τον οποίο οι μετρήσεις οργανώνονται, αποθηκεύονται και καθίστανται διαθέσιμες για επεξεργασία και ανάλυση.

13.3.2 Δομή Βάσης Δεδομένων (MySQL)

Η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα ολοκληρώνεται με την αποθήκευσή τους στη βάση δεδομένων MySQL, η οποία αποτελεί το κεντρικό σημείο οργάνωσης και διαχείρισης των μετρήσεων του συστήματος. Η βάση λειτουργεί ως ένα σχεσιακό σύστημα αποθήκευσης, όπου κάθε τύπος αισθητήρα αντιστοιχεί σε έναν ξεχωριστό πίνακα, διασφαλίζοντας έτσι καθαρό διαχωρισμό, επεκτασιμότητα και αποδοτική αναζήτηση. Η επικοινωνία με τη MySQL πραγματοποιείται μέσω του αρχείου insert.php, το οποίο, όπως αναφέρθηκε, δέχεται τις μετρήσεις από το ESP32-S3 και τις εισάγει στους κατάλληλους πίνακες χρησιμοποιώντας εντολές INSERT.

Η δομή της βάσης δεδομένων σχεδιάστηκε με γνώμονα την απλότητα και την ευκολία επεξεργασίας. Κάθε πίνακας διαθέτει κοινά πεδία: ένα πρωτεύον κλειδί (id), ένα πεδίο χρονικής σήμανσης (timestamp), και το πεδίο της μετρούμενης τιμής (value). Με αυτόν τον τρόπο, όλες οι μεταβλητές αποθηκεύονται σε ανεξάρτητους αλλά ομοιόμορφα δομημένους πίνακες, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά τόσο την προσθήκη νέων δεδομένων όσο και την ανάπτυξη πολύπλοκων ερωτημάτων. Ο πίνακας που αφορά τη σεισμική δραστηριότητα (earthquake_data) περιλαμβάνει επιπλέον το πεδίο event_flag, το οποίο χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και κατηγοριοποίηση σεισμικών γεγονότων (1 σε περίπτωση σεισμού, αντίθετα 0), επιτρέποντας την αυτόματη σήμανση περιπτώσεων αυξημένης επιτάχυνσης χωρίς πρόσθετη επεξεργασία.

```sql
-- Θερμοκρασία
CREATE TABLE temperature_data (
  id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,
  timestamp DATETIME DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  value FLOAT
);

-- Υγρασία/Πίεση/Ηχητική Ρύπανση/PM2.5/UVA-UVB-UVC
CREATE TABLE humidity_data LIKE temperature_data;
CREATE TABLE pressure_data LIKE temperature_data;
CREATE TABLE sound_data    LIKE temperature_data;
CREATE TABLE pm25_data     LIKE temperature_data;
CREATE TABLE uva_data      LIKE temperature_data;
CREATE TABLE uvb_data      LIKE temperature_data;
CREATE TABLE uvc_data      LIKE temperature_data;

-- TVOC
CREATE TABLE tvoc_data (
  id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,
  timestamp DATETIME DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  value INT
);

-- CO₂
CREATE TABLE co2_data LIKE tvoc_data;

-- Σεισμική Δραστηριότητα
CREATE TABLE earthquake_data (
  id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,
  timestamp DATETIME DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
  value FLOAT,
  event_flag TINYINT(1) DEFAULT 0
);
```

Σχήμα 40: *Δομή βάσης δεδομένων MySQL για αποθήκευση περιβαλλοντικών μετρήσεων*

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και ευελιξίας, καθώς επιτρέπει την ανεξάρτητη διαχείριση κάθε τύπου δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί κοινό χρονικό πλαίσιο αναφοράς για τη συσχέτιση των μετρήσεων μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων. Επιπλέον, ο τρόπος δημιουργίας των πινάκων με χρήση της εντολής CREATE TABLE ... LIKE επιτρέπει την εύκολη επέκταση της βάσης με νέους τύπους αισθητήρων, χωρίς να απαιτείται ανασχεδιασμός της υπάρχουσας δομής.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερή λειτουργία της βάσης, η αποφυγή υπερφόρτωσης από μεγάλο όγκο δεδομένων και επειδή στο frontend οπτικοποιούνται δεδομένα μέχρι και 9 ημέρες πριν, προστέθηκε ένας μηχανισμός αυτόματης διαχείρισης παλαιών εγγραφών. Ο μηχανισμός αυτός υλοποιήθηκε μέσω ενός προγραμματισμένου event, το οποίο εκτελείται αυτόματα κάθε 24 ώρες και διαγράφει όλες τις εγγραφές που είναι παλαιότερες των εννέα ημερών από κάθε πίνακα. Το event δημιουργείται με την εντολή:

```
71    DELIMITER $$
72
73 •  CREATE EVENT delete_old_records
74    ON SCHEDULE EVERY 1 DAY
75    DO
76    BEGIN
77        DELETE FROM temperature_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
78        DELETE FROM humidity_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
79        DELETE FROM pressure_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
80        DELETE FROM sound_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
81        DELETE FROM pm25_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
82        DELETE FROM tvoc_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
83        DELETE FROM co2_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
84        DELETE FROM uva_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
85        DELETE FROM uvb_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
86        DELETE FROM uvc_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
87        DELETE FROM earthquake_data WHERE timestamp < NOW() - INTERVAL 10 DAY;
88    END$$
89
90    DELIMITER ;
```

Σχήμα 41: *Αυτοματοποιημένη διαδικασία καθαρισμού παλαιών δεδομένων στη MySQL*

Η αυτόματη αυτή διεργασία μειώνει το μέγεθος της βάσης, διατηρεί μόνο τα πιο πρόσφατα και χρήσιμα δεδομένα, και εξασφαλίζει τη μακροχρόνια σταθερότητα του συστήματος χωρίς ανάγκη χειροκίνητης συντήρησης. Σε συνδυασμό με την προσεκτικά σχεδιασμένη δομή των πινάκων, η MySQL υποδομή προσφέρει αξιόπιστη και επεκτάσιμη αποθήκευση που ανταποκρίνεται πλήρως στις απαιτήσεις ενός συστήματος παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Με την ολοκλήρωση της σχεδίασης και υλοποίησης της βάσης δεδομένων, η ροή δεδομένων από το ESP32-S3 έως τη MySQL καθίσταται πλήρως λειτουργική και σταθερή. Το σύστημα είναι πλέον ικανό όχι μόνο να αποθηκεύει τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, αλλά και να υποστηρίζει την ανάκτηση και ανάλυσή τους μέσω των PHP API scripts, τα οποία θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα, όπου αναλύεται η διαδικασία εξαγωγής των δεδομένων και η επικοινωνία με το frontend περιβάλλον.

13.3.3 Ανάκτηση Δεδομένων (PHP API → Frontend)

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αποθήκευσης των μετρήσεων στη βάση δεδομένων, το επόμενο κρίσιμο στάδιο αφορά την ανάκτηση και παροχή των δεδομένων προς το επίπεδο οπτικοποίησης. Το στάδιο αυτό υλοποιείται μέσω των PHP API scripts, τα οποία λειτουργούν ως ενδιάμεσο επίπεδο επικοινωνίας ανάμεσα στη MySQL και στο frontend της εφαρμογής. Τα API αυτά είναι υπεύθυνα για την εκτέλεση εξειδικευμένων ερωτημάτων, την προεπεξεργασία των αποτελεσμάτων και τη μετατροπή τους σε μορφή JSON, ώστε να μπορούν να αναγνωστούν και να απεικονιστούν από το περιβάλλον της ιστοσελίδας.

Η διαδικασία ανάκτησης βασίζεται σε δύο κύριους μηχανισμούς: ο πρώτος αφορά την εξαγωγή δεδομένων της τρέχουσας ημέρας, ενώ ο δεύτερος επεκτείνεται στην προβολή ιστορικών δεδομένων των προηγούμενων εννέα ημερών. Στην πρώτη περίπτωση, το API εκτελεί δυναμικά ερωτήματα που επιλέγουν όλες τις μετρήσεις της ημέρας από τους πίνακες της βάσης. Αντίστοιχα, στην δεύτερη περίπτωση, το API που αφορά τα ιστορικά δεδομένα υλοποιεί μια παρόμοια λογική, επεκτείνοντας το χρονικό εύρος των ερωτημάτων ώστε να καλύπτει έως και εννέα συνεχόμενες ημέρες, δηλαδή το διάστημα που διατηρείται ενεργό στη βάση δεδομένων πριν ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αυτόματης διαγραφής. Με τη χρήση παραμέτρων URL, ο χρήστης ή το frontend μπορεί να ζητήσει δεδομένα για συγκεκριμένο αισθητήρα και ημερομηνία, επιτυγχάνοντας έτσι ευέλικτη πρόσβαση και ενοποιημένη διαχείριση όλων των χρονοσειρών. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα διαμορφώνονται σε πίνακες συντεταγμένων τύπου {x: timestamp, y: value}, ώστε να είναι άμεσα συμβατά με τις βιβλιοθήκες γραφημάτων που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση.

Η προσέγγιση αυτή δημιουργεί ένα αποδοτικό και ασφαλές μοντέλο επικοινωνίας ανάμεσα στο επίπεδο αποθήκευσης και στο επίπεδο παρουσίασης. Τα PHP API λειτουργούν ως “γέφυρα” που ενώνει το υποσύστημα της βάσης με τη διεπαφή του χρήστη, εξασφαλίζοντας ταχύτητα, τυποποίηση και αξιοπιστία στη ροή πληροφορίας.

Με την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου, η ροή δεδομένων από το ESP32-S3 έως το frontend καθίσταται πλήρως λειτουργική και σταθερή. Το σύστημα είναι πλέον σε θέση να παρέχει, επεξεργάζεται και διαμοιράζει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, ολοκληρώνοντας τον κύκλο ζωής της πληροφορίας, από τη φυσική μέτρηση έως τη διαδικτυακή παρουσίαση. Η υποδομή αυτή αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η λειτουργία της web εφαρμογής, η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

13.4. Web Εφαρμογή (HTML/CSS/JavaScript + PHP)

13.4.1 Πληροφοριακή Αρχιτεκτονική & Ρόλοι Σελίδων

Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης της υποδομής δεδομένων, όπου καθορίστηκε ο μηχανισμός αποστολής, αποθήκευσης και ανάκτησης των μετρήσεων, το επόμενο στάδιο αφορά τη δημιουργία του επιπέδου αλληλεπίδρασης με τον τελικό χρήστη, δηλαδή τη σχεδίαση και υλοποίηση της Web Εφαρμογής. Το επίπεδο αυτό αποτελεί το ανώτερο στρώμα της συνολικής αρχιτεκτονικής του

συστήματος και έχει ως κύριο σκοπό τη μετατροπή των συλλεγμένων δεδομένων σε κατανοητή και χρήσιμη πληροφορία μέσω ενός σύγχρονου και λειτουργικού διαδικτυακού περιβάλλοντος.

Η Web εφαρμογή με όνομα *UrbanSense* αναπτύχθηκε με τη χρήση HTML, CSS, JavaScript και PHP, αξιοποιώντας πλήρως τις δυνατότητες της ήδη υλοποιημένης υποδομής XAMPP/MySQL. Μέσω των PHP API που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο στάδιο, η εφαρμογή αντλεί δεδομένα από τη βάση σε πραγματικό χρόνο και τα αποδίδει οπτικά με τη χρήση δυναμικών γραφημάτων και διαδραστικών στοιχείων διεπαφής. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα ολοκληρώνει τη ροή πληροφορίας που ξεκινά από το φυσικό επίπεδο των αισθητήρων και καταλήγει στην οπτικοποίηση και ανάλυση από τον τελικό χρήστη, κλείνοντας τον κύκλο της πληροφορίας από τη μέτρηση έως την κατανόηση.

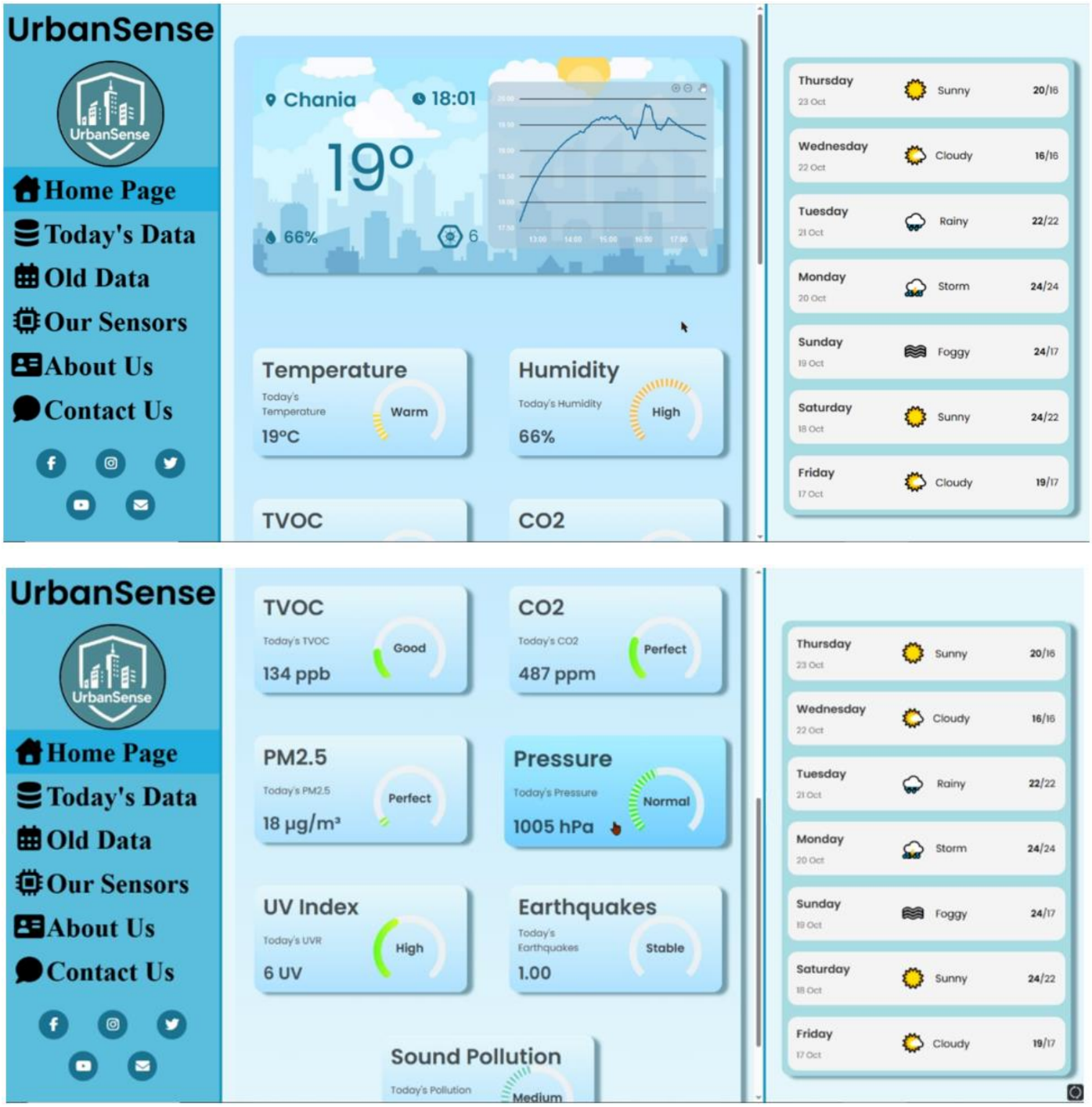
Η σχεδίαση της εφαρμογής βασίστηκε σε αρχές πληροφοριακής αρχιτεκτονικής και ευχρηστίας, ώστε η διάταξη των σελίδων να υποστηρίζει τόσο τη ροή της πληροφορίας όσο και τη λειτουργική συνοχή του συστήματος. Για τον σκοπό αυτό, η Web εφαρμογή οργανώθηκε σε έξι βασικές σελίδες, καθεμία εκ των οποίων εξυπηρετεί διακριτό ρόλο στο σύνολο του περιβάλλοντος:

- **Home:** κεντρική σελίδα εισόδου που παρουσιάζει συνοπτικά την τρέχουσα θερμοκρασία, υγρασία και συνθήκες καιρού της πόλης, συνοδευόμενες από εβδομαδιαία επισκόπηση προηγουμένων δεδομένων και δυναμικό γράφημα θερμοκρασιακής μεταβολής.
- **Today's Data:** σελίδα ζωντανής απεικόνισης των μετρήσεων της τρέχουσας ημέρας. Εμφανίζει τιμές για όλους τους αισθητήρες μέσα από διαδραστικά γραφήματα που ενημερώνονται αυτόματα με δεδομένα από το PHP API.
- **Old Data:** σελίδα πρόσβασης σε ιστορικά δεδομένα έως και εννέα ημερών πίσω. Ο χρήστης επιλέγει συγκεκριμένη ημερομηνία για να προβάλλει τις καταγραφές εκείνης της ημέρας σε γραφήματα, διευκολύνοντας τη σύγκριση και την ανάλυση των περιβαλλοντικών τάσεων.
- **Our Sensors:** ενημερωτική σελίδα που παρουσιάζει αναλυτικά τους αισθητήρες του συστήματος (AHT10, ENS160, PPD42NS, BMP180, UV, LIS2DW12, AS73310 και Sound Sensor V2). Για κάθε έναν παρέχονται εικόνα, περιγραφή και ο ρόλος του στην περιβαλλοντική παρακολούθηση.
- **About Us:** σελίδα που περιγράφει το έργο *UrbanSense*, το σκοπό του στην περιβαλλοντική παρακολούθηση, την αποστολή της ομάδας ανάπτυξης και τη σημασία του συστήματος για τις έξυπνες πόλεις. Περιλαμβάνει πληροφορίες για την τεχνολογική φιλοσοφία και τα επιτεύγματα του έργου.
- **Contact Us:** σελίδα επικοινωνίας που περιλαμβάνει πλήρη στοιχεία επικοινωνίας (email, τηλέφωνο), συνδέσμους προς μέσα κοινωνικής δικτύωσης, καθώς και φόρμα υποβολής μηνύματος για υποστήριξη πελατών, αποστολή ανατροφοδότησης ή αιτήματα συνεργασίας.

Στις επόμενες υποενότητες αναλύεται διεξοδικά η λειτουργία κάθε σελίδας, η αλληλεπίδρασή της με το backend σύστημα, καθώς και τα τεχνολογικά εργαλεία που αξιοποιούνται για την απεικόνιση και διαχείριση των δεδομένων. Μέσα από αυτή τη δομημένη παρουσίαση καθίσταται σαφής ο ρόλος της Web Εφαρμογής ως τελικού κρίκου της αλυσίδας ροής δεδομένων, όπου το τεχνολογικό υπόβαθρο μετασχηματίζεται σε εργαλείο πληροφόρησης και κατανόησης για τον χρήστη.

13.4.1.1 Σελίδα Home

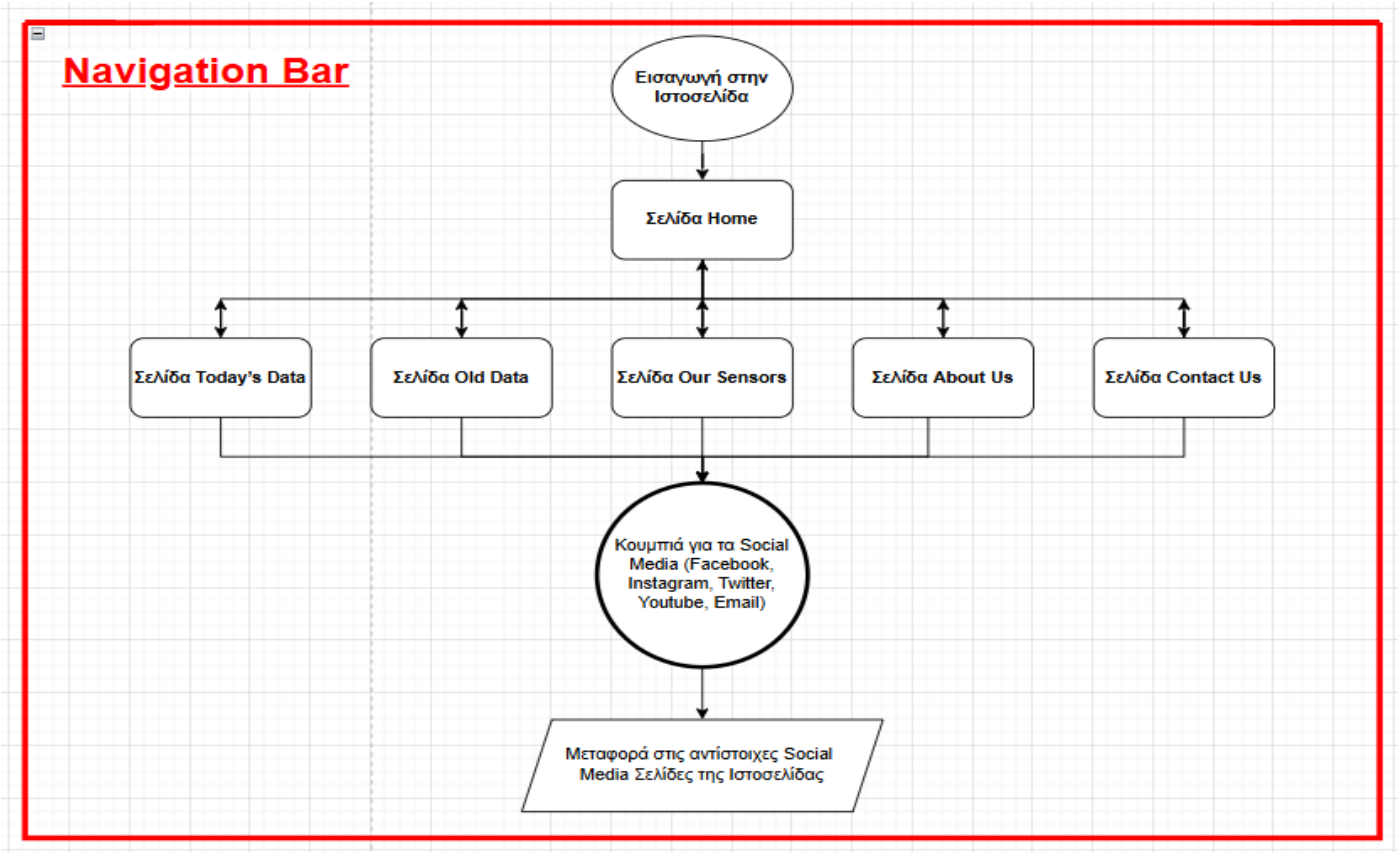
Η σελίδα *Home* αποτελεί το αρχικό σημείο πρόσβασης του χρήστη στο διαδικτυακό περιβάλλον του συστήματος *UrbanSense* και λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος προσανατολισμού και συνοπτικής ενημέρωσης. Σχεδιάστηκε με σκοπό να παρέχει μια άμεση, φιλική και εποπτική παρουσίαση του συστήματος, των δυνατοτήτων του και των επικρατουσών περιβαλλοντικών συνθηκών. Η σελίδα αξιοποιεί τεχνολογίες HTML, CSS και PHP για τη δυναμική φόρτωση δεδομένων και την προσαρμογή περιεχομένου, ενώ ενσωματώνει JavaScript scripts για διαδραστικότητα και αυτόματη ενημέρωση πληροφοριών (όπως ημερομηνία, ώρα και καιρικές συνθήκες).



Σχήμα 42: *Σελίδα "Home Page" της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense*

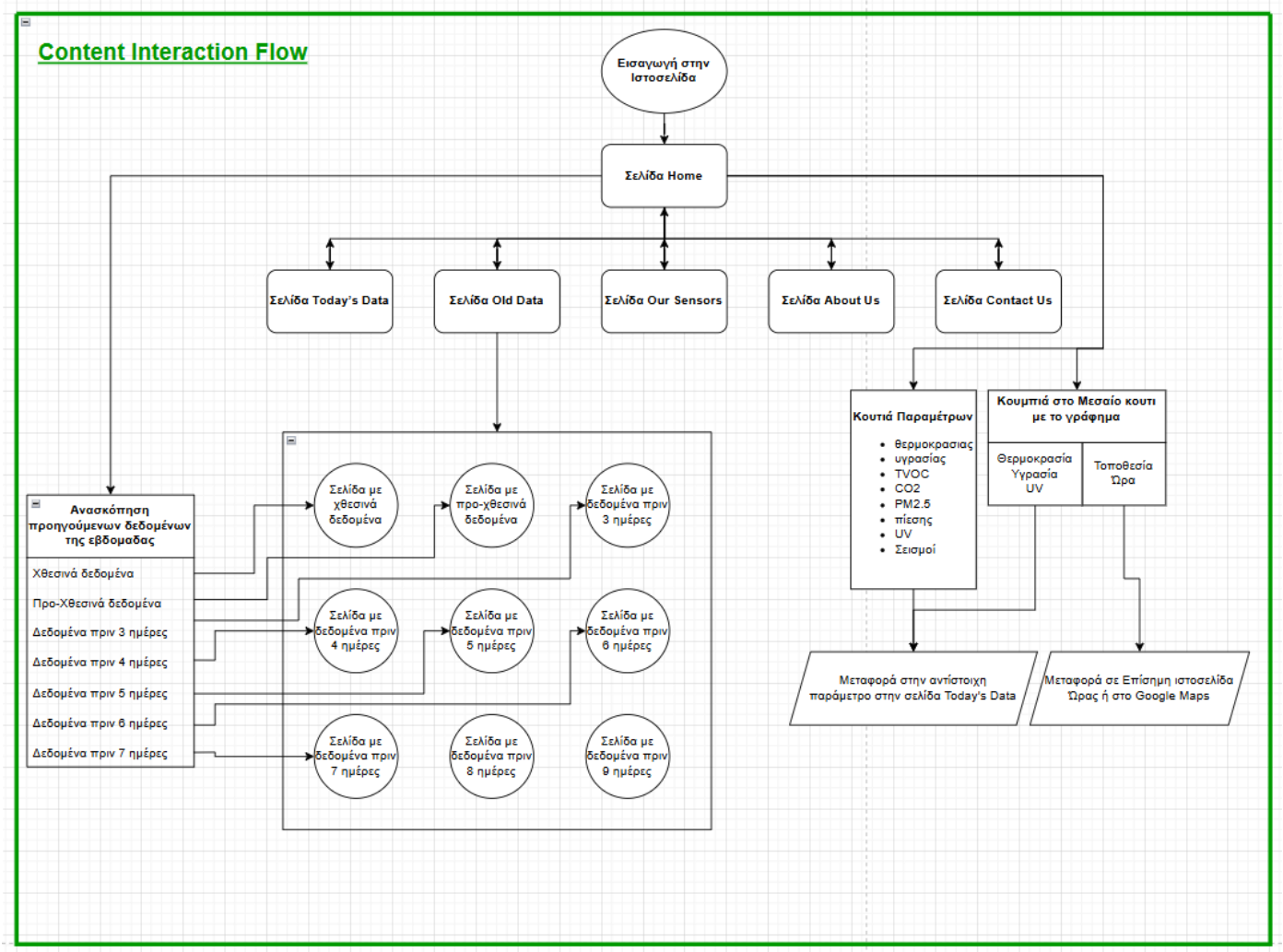
Συνοπτικά, η σελίδα *Home* εξυπηρετεί τους ακόλουθους σκοπούς:

- **Κεντρική πλοήγηση:** Παρέχει πρόσβαση σε όλες τις επιμέρους σελίδες του συστήματος μέσω του *Navigation Bar*, επιτρέποντας τη μετάβαση στις ενότητες *Today's Data*, *Old Data*, *Our Sensors*, *About Us* και *Contact Us*. Επιπλέον, ενσωματώνονται διαδραστικά εικονίδια κοινωνικών δικτύων (Facebook, Instagram, Twitter, YouTube και Email), τα οποία επιτρέπουν την άμεση μετάβαση στις αντίστοιχες διαδικτυακές σελίδες ή την επικοινωνία με την ομάδα. Η διάταξη και αισθητική τους ευθυγραμμίζονται με την ταυτότητα του έργου, ενισχύοντας τη διαδραστικότητα και τη συνδεσιμότητα της πλατφόρμας.
- **Διεπαφή και εμπειρία χρήστη:** Περιλαμβάνει το λογότυπο και τον τίτλο του έργου UrbanSense, πλαισιωμένα από ένα λειτουργικό και ελκυστικό περιβάλλον διεπαφής (UI), σχεδιασμένο έτσι ώστε να εξασφαλίζει εύκολη, κατανοητή και άμεση πλοήγηση του χρήστη σε όλα τα μέρη της ιστοσελίδας.
- **Σύνοψη τρέχουσων συνθηκών:** Εμφανίζει πληροφορίες πραγματικού χρόνου, επιτρέποντας στον χρήστη να αποκτήσει μια γρήγορη επισκόπηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων χωρίς να χρειάζεται να μεταβεί στις επιμέρους σελίδες δεδομένων.
- **Επισκόπηση καιρού:** Περιλαμβάνει ενότητα εβδομαδιαίας επισκόπησης προηγουμένων δεδομένων, προσφέροντας μια ευρύτερη εικόνα των επικείμενων κλιματικών συνθηκών, ώστε να υποστηρίζεται η ανάλυση μακροχρόνιων τάσεων.



Σχήμα 43: *Διάγραμμα ροής λειτουργίας της γραμμής πλοήγησης (Navigation Bar) της ιστοσελίδας UrbanSense*

Η σελίδα Home συνδυάζει έτσι αισθητική απλότητα με λειτουργική πληρότητα, αποτελώντας το βασικό σημείο αναφοράς του χρήστη και τον πυρήνα της εμπειρίας πλοήγησης στο περιβάλλον *UrbanSense*. Η οργάνωσή της αποσκοπεί στη διευκόλυνση της κατανόησης της συνολικής λειτουργίας του συστήματος και στη διασύνδεση των επιμέρους τμημάτων της εφαρμογής, λειτουργώντας ταυτόχρονα ως κεντρικό dashboard και ως ενημερωτική πύλη.



Σχήμα 44: *Διάγραμμα ροής αλληλεπίδρασης περιεχομένου (Content Interaction Flow) της ιστοσελίδας UrbanSense*

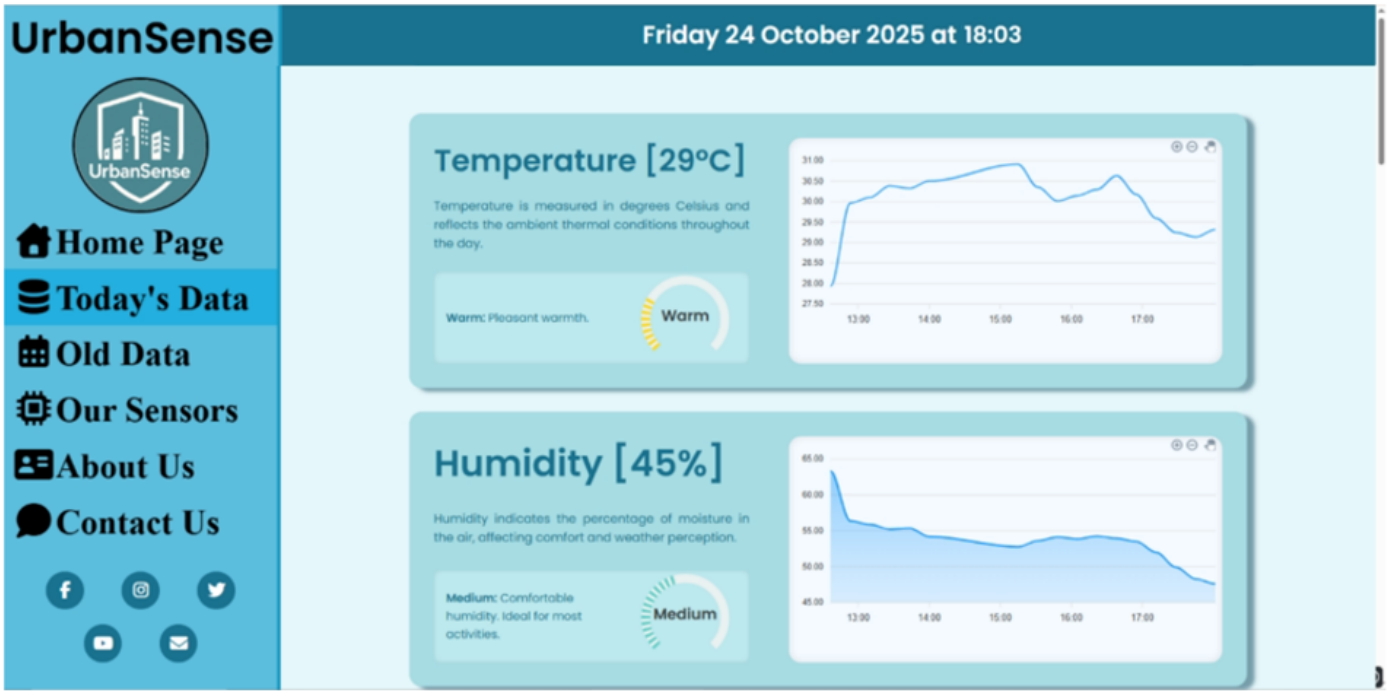
13.4.1.2 Σελίδα Today’s Data

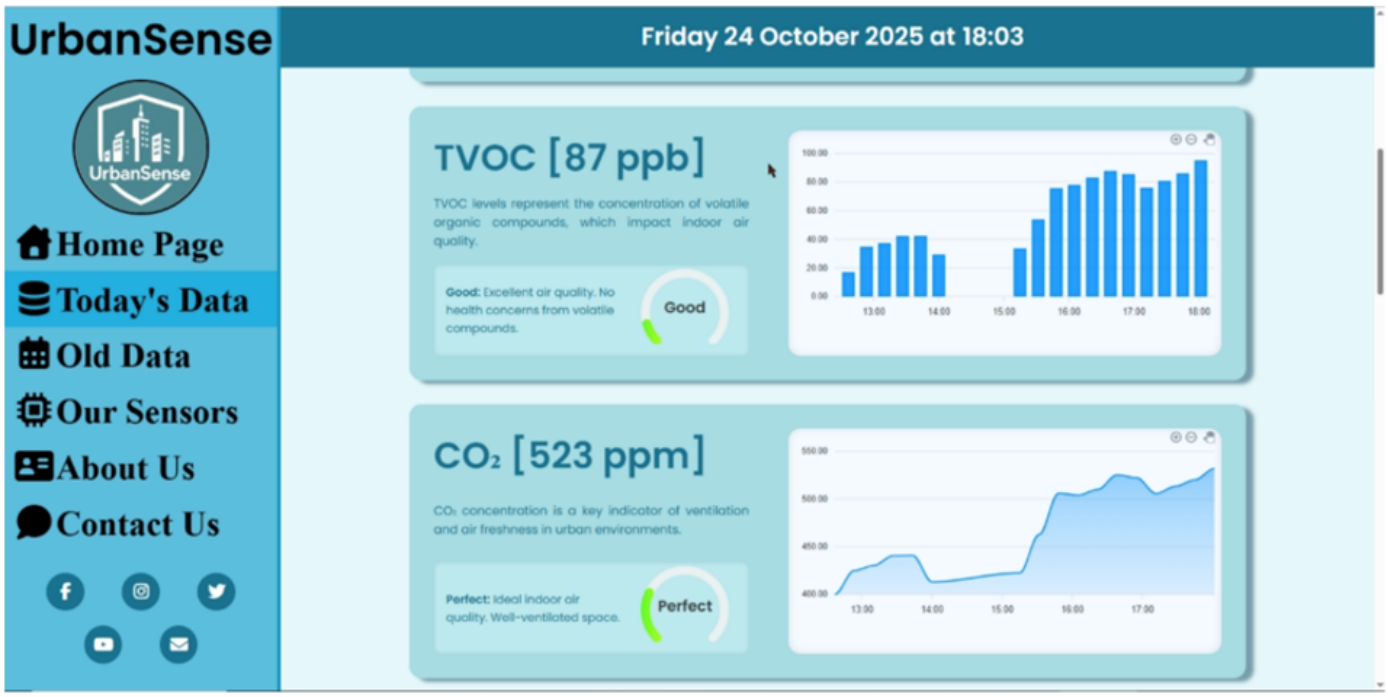
Η σελίδα Today’s Data αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα και λειτουργικά τμήματα της διαδικτυακής εφαρμογής *UrbanSense*, καθώς προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα παρακολούθησης των μετρήσεων της τρέχουσας ημέρας σε πραγματικό χρόνο. Αποτελεί τη φυσική συνέχεια της σελίδας *Home*, επεκτείνοντας την εισαγωγική επισκόπηση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε ένα πλήρως δυναμικό και ενημερωμένο περιβάλλον παρουσίασης δεδομένων.

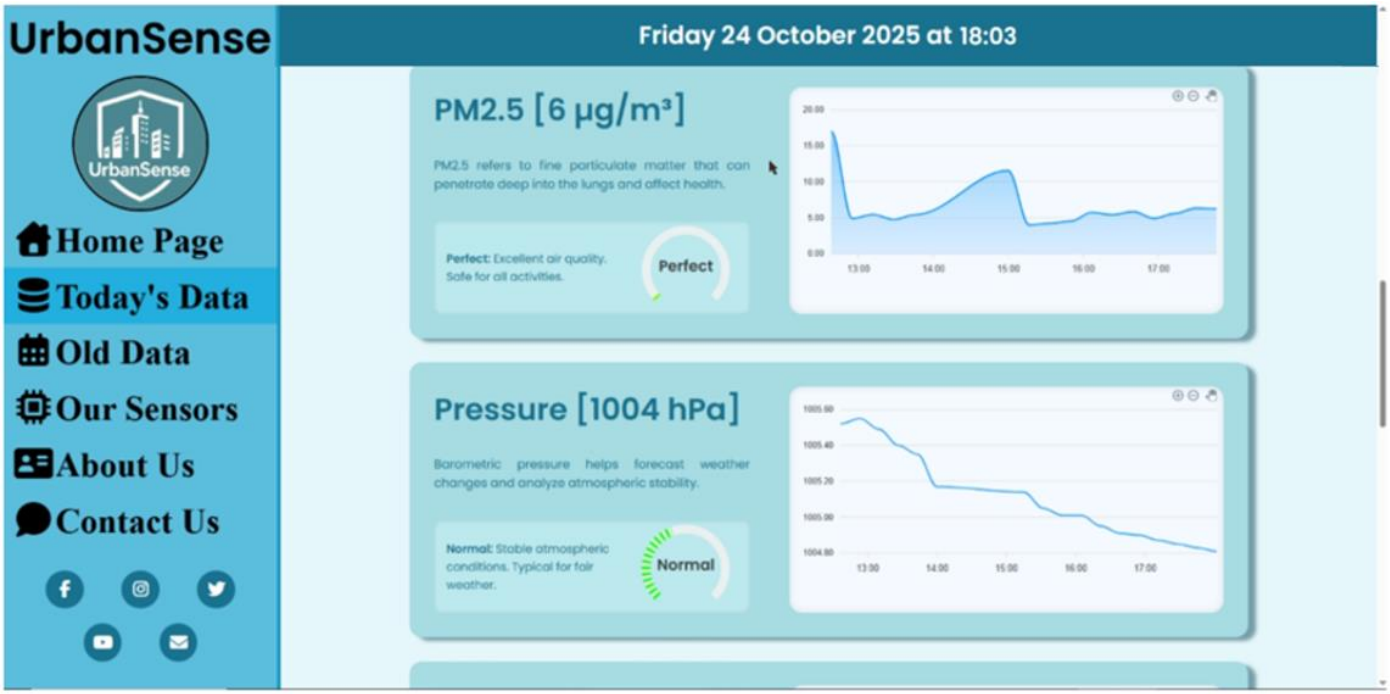
Η λειτουργία της σελίδας εστιάζει στα εξής βασικά σημεία:

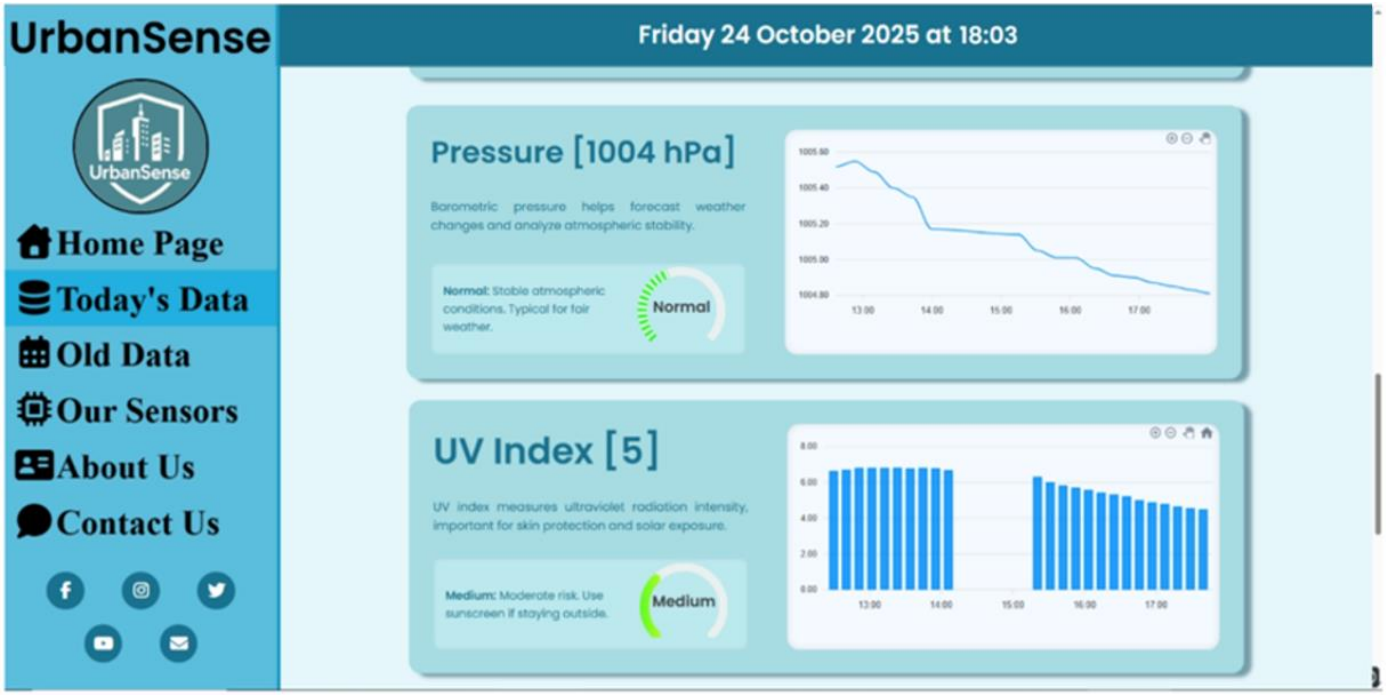
- **Δυναμική φόρτωση δεδομένων πραγματικού χρόνου:** Η σελίδα καλεί αυτόματα δεδομένα από τη βάση μέσω των PHP API endpoints, παρουσιάζοντας για κάθε αισθητήρα πιο πρόσφατες μετρήσεις. Ο μηχανισμός ενημέρωσης είναι πλήρως αυτοματοποιημένος, εξασφαλίζοντας συνεχή ροή πληροφορίας.
- **Κατηγοριοποίηση και παρουσίαση περιβαλλοντικών παραμέτρων:** Κάθε αισθητήρας παρουσιάζεται με ξεχωριστή ενότητα, η οποία περιλαμβάνει βασική περιγραφή του τι μετρά η εκάστοτε παράμετρος και συνοδευτικές πληροφορίες για την ερμηνεία της. Με τον τρόπο αυτό, η σελίδα δεν περιορίζεται μόνο στην παρουσίαση αριθμητικών τιμών, αλλά προάγει και την ερμηνευτική κατανόηση των δεδομένων.
- **Ενσωμάτωση πλοήγησης και συνέχειας εμπειρίας:** Το Navigation Bar παραμένει το ίδιο σε όλες τις σελίδες, επομένως ο χρήστης μπορεί πάλι σε οποιαδήποτε στιγμή επιθυμεί να μεταβεί σε άλλες ενότητες (όπως *Old Data* για ιστορική αναδρομή και σύγκριση δεδομένων ή *Our Sensors* για τεχνική ενημέρωση). Η συνοχή αυτή διασφαλίζει τη συνεχή ροή πληροφορίας και τη φυσική μετάβαση από τα δεδομένα της ημέρας σε ευρύτερα πλαίσια ανάλυσης.
- **Ενημερωτικά μηνύματα κατάστασης:** Για κάθε παράμετρο εμφανίζεται και μια λεκτική κατηγοριοποίηση της ποιότητας (π.χ. Perfect, Normal, Medium, Light), προσφέροντας στον χρήστη μια ποιοτική ερμηνεία των τιμών, χωρίς να απαιτείται τεχνική εξειδίκευση.

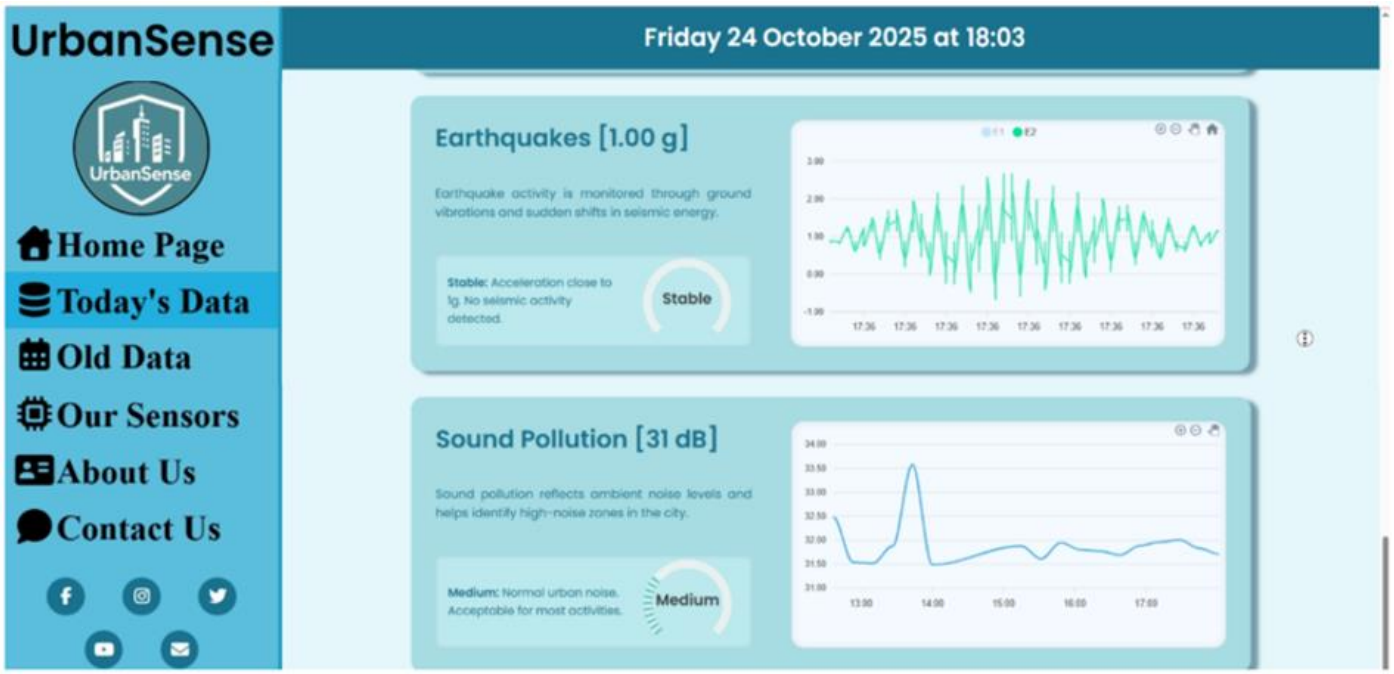
Η σελίδα *Today’s Data* έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την απλότητα, την ταχύτητα και τη διαδραστικότητα, ώστε να λειτουργεί ως το πρωτεύον περιβάλλον παρακολούθησης του συστήματος. Μέσα από αυτήν, ο χρήστης αποκτά άμεση εικόνα της τρέχουσας περιβαλλοντικής κατάστασης, συμβάλλοντας στη γρήγορη κατανόηση και λήψη αποφάσεων σχετικά με την ποιότητα του αέρα, τις κλιματικές συνθήκες και τους δείκτες υγείας του αστικού περιβάλλοντος. Η ενότητα αυτή αποτελεί επομένως το λειτουργικό πυρήνα της εφαρμογής, γεφυρώνοντας το επίπεδο δεδομένων με τη διαδραστική εμπειρία του χρήστη.


UrbanSense
Friday 24 October 2025 at 18:03
Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us
Temperature [29°C]
Temperature is measured in degrees Celsius and reflects the ambient thermal conditions throughout the day.
Warm: Pleasant warmth.
Warm
Humidity [45%]
Humidity indicates the percentage of moisture in the air, affecting comfort and weather perception.
Medium: Comfortable humidity. Ideal for most activities.
Medium


UrbanSense
Friday 24 October 2025 at 18:03
Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us
TVOC [87 ppb]
TVOC levels represent the concentration of volatile organic compounds, which impact indoor air quality.
Good: Excellent air quality. No health concerns from volatile compounds.
Good
CO₂ [523 ppm]
CO₂ concentration is a key indicator of ventilation and air freshness in urban environments.
Perfect: Ideal indoor air quality. Well-ventilated space.
Perfect


UrbanSense
Friday 24 October 2025 at 18:03
Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us
PM2.5 [6 µg/m³]
PM2.5 refers to fine particulate matter that can penetrate deep into the lungs and affect health.
Perfect: Excellent air quality. Safe for all activities.
Perfect
Pressure [1004 hPa]
Barometric pressure helps forecast weather changes and analyze atmospheric stability.
Normal: Stable atmospheric conditions. Typical for fair weather.
Normal


UrbanSense
Friday 24 October 2025 at 18:03
Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us
Pressure [1004 hPa]
Barometric pressure helps forecast weather changes and analyze atmospheric stability.
Normal: Stable atmospheric conditions. Typical for fair weather.
Normal
UV Index [5]
UV index measures ultraviolet radiation intensity, important for skin protection and solar exposure.
Medium: Moderate risk. Use sunscreen if staying outside.
Medium



Σχήμα 45: *Σελίδα "Today's Data" της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense*

13.4.1.3 Σελίδα Old Data

Η σελίδα Old Data αποτελεί τη φυσική συνέχεια της λειτουργίας παρακολούθησης δεδομένων της εφαρμογής *UrbanSense*, επεκτείνοντας τη δυνατότητα του χρήστη πέρα από τη ζωντανή απεικόνιση της τρέχουσας ημέρας που προσφέρει η σελίδα *Today's Data*. Ο κύριος σκοπός της είναι να παρέχει πρόσβαση σε ιστορικά δεδομένα, επιτρέποντας τη χρονολογική ανάλυση και τη συγκριτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων σε βάθος εννέα ημερών.

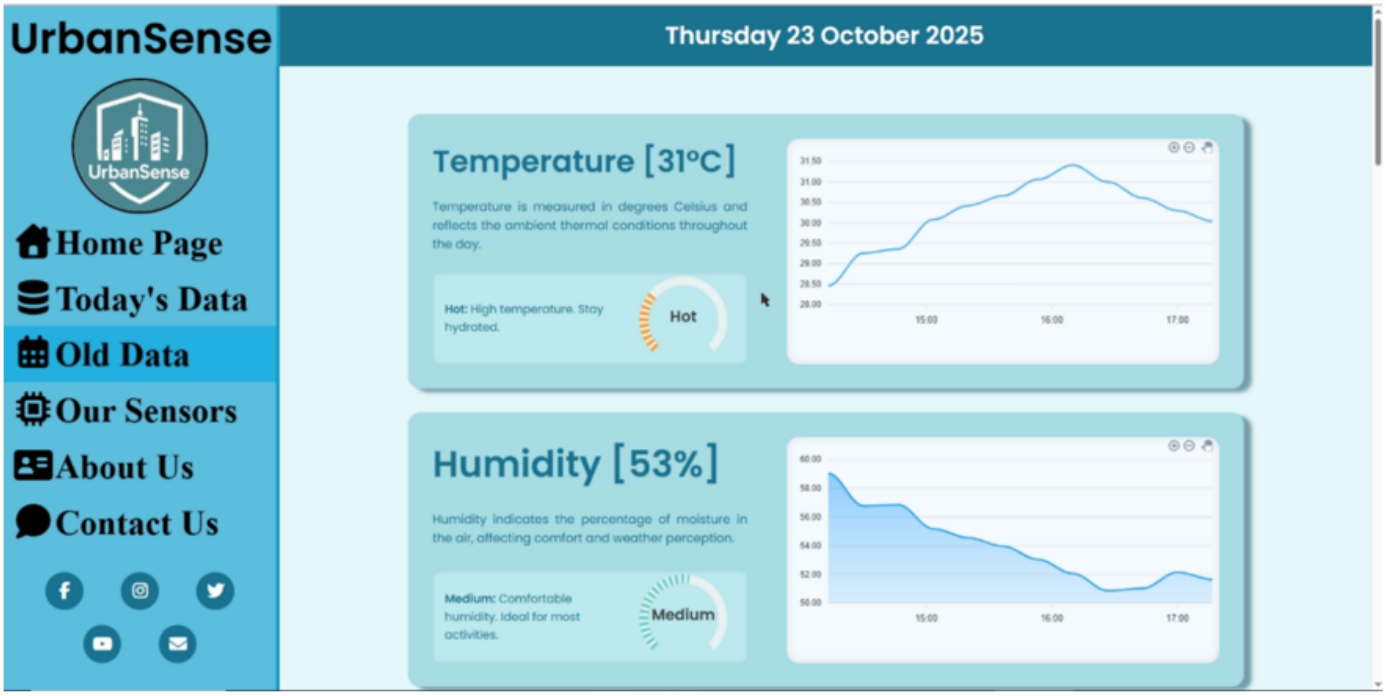
Οι βασικές λειτουργίες και χαρακτηριστικά της σελίδας περιλαμβάνουν:

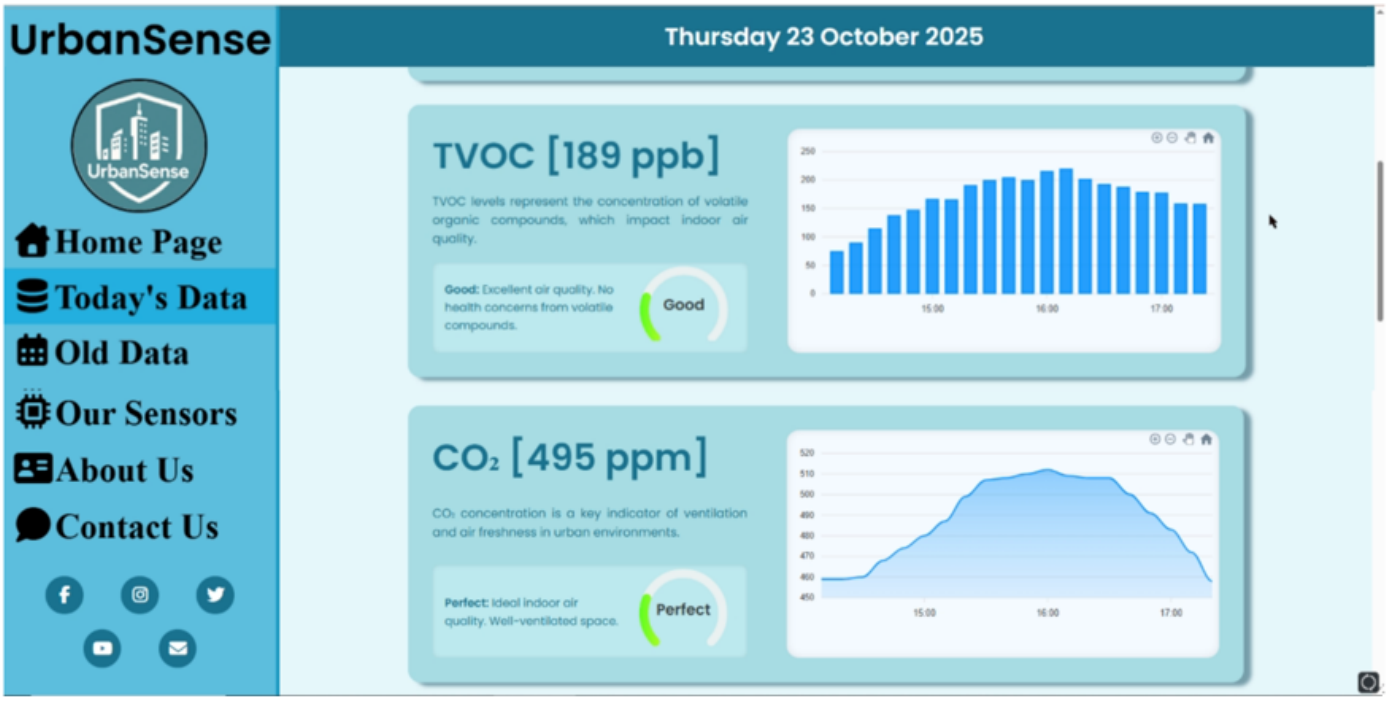
- **Επιλογή ημερομηνίας και ανάκτηση δεδομένων:** Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει συγκεκριμένη ημέρα μέσα από λίστα επιλογών, ώστε να εμφανιστούν οι αντίστοιχες μετρήσεις που είναι αποθηκευμένες στη βάση. Η επιλογή ενεργοποιεί PHP scripts τα οποία εκτελούν SQL ερωτήματα για την ανάκτηση των δεδομένων κάθε αισθητήρα.
- **Δυναμική φόρτωση και ομαδοποίηση μετρήσεων:** Για κάθε επιλεγμένη ημέρα, τα δεδομένα φορτώνονται δυναμικά και οργανώνονται ανά τύπο αισθητήρα. Ο σχεδιασμός της σελίδας εξασφαλίζει ομοιομορφία και συνοχή με τη σελίδα *Today's Data*, διευκολύνοντας την εναλλαγή μεταξύ πραγματικού χρόνου και ιστορικής αναδρομής.
- **Επεκτασιμότητα χρονικού ορίζοντα:** Η σελίδα επιτρέπει την πρόσβαση σε δεδομένα έως εννέα ημερών πίσω, χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στη διάρκεια διατήρησης των εγγραφών στη βάση, σύμφωνα με τον μηχανισμό αυτόματης διαγραφής που έχει περιγραφεί στην ενότητα 13.3.3. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η αποδοτικότητα του συστήματος χωρίς υπερφόρτωση δεδομένων.

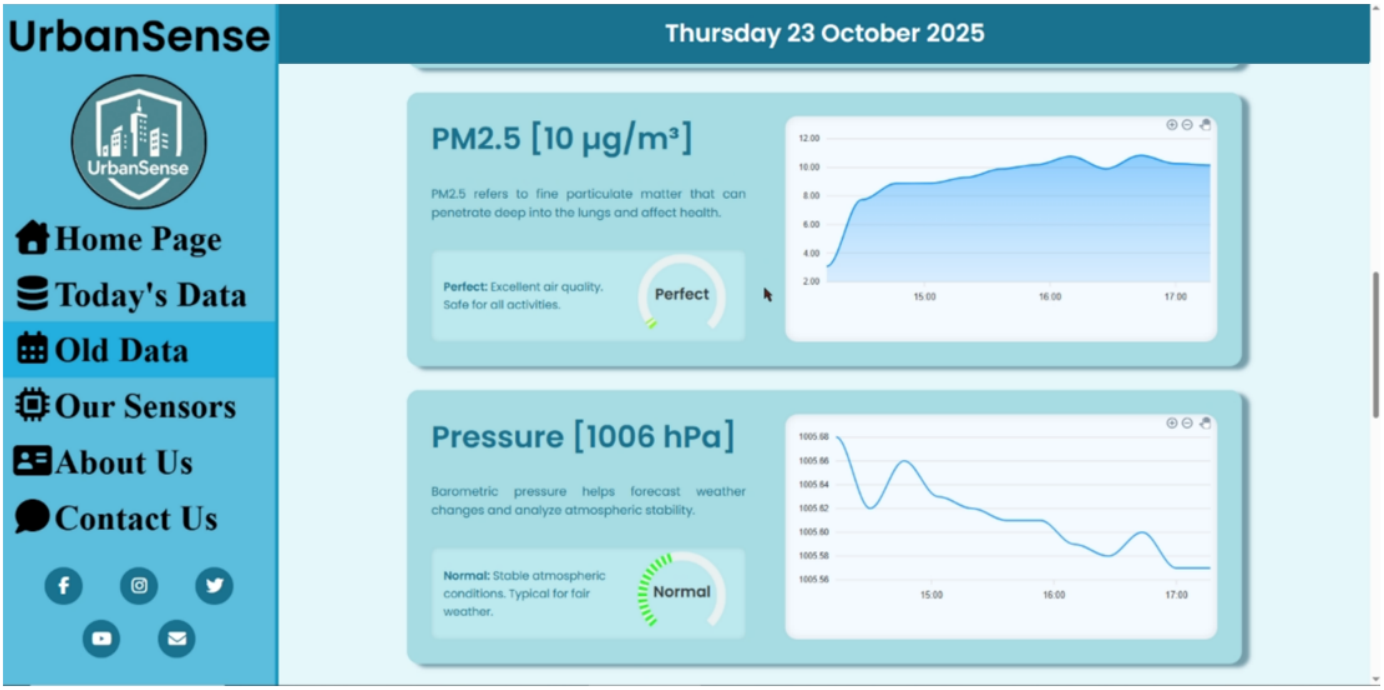
- **Ερμηνευτική υποστήριξη:** Όπως και στις υπόλοιπες σελίδες, κάθε κατηγορία δεδομένων συνοδεύεται από περιγραφική ετικέτα, η οποία βοηθά στην ποιοτική αξιολόγηση των συνθηκών χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένη γνώση.

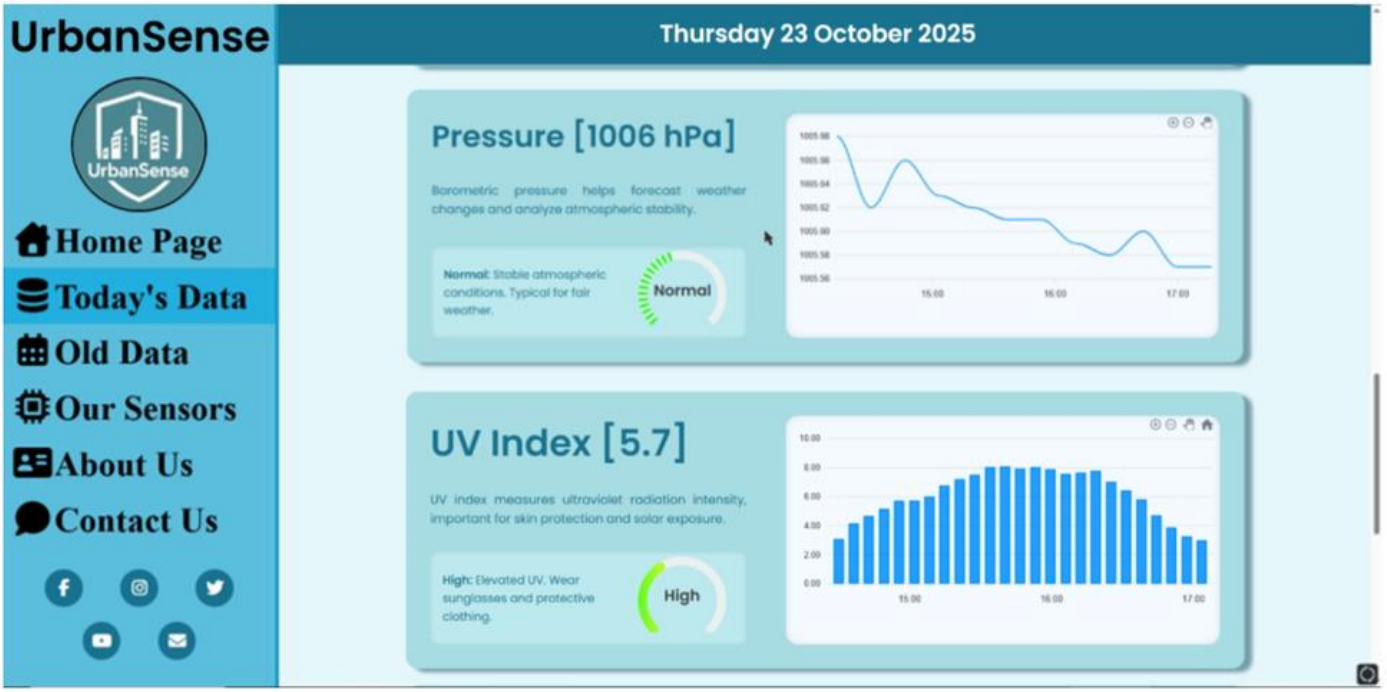
Η σελίδα *Old Data* επιτελεί έναν ουσιαστικό αναλυτικό ρόλο μέσα στο σύστημα *UrbanSense*. Δεν περιορίζεται απλώς στην προβολή παλαιότερων τιμών, αλλά λειτουργεί ως εργαλείο χρονικής διερεύνησης της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς. Μέσω αυτής, ο χρήστης μπορεί να εντοπίσει τάσεις, επαναλαμβανόμενα μοτίβα ή ακραίες τιμές σε διάφορες χρονικές περιόδους, συμβάλλοντας έτσι στην κατανόηση της δυναμικής του αστικού μικροκλίματος. Η *Old Data* επομένως ενισχύει τον αναλυτικό και επιστημονικό χαρακτήρα της εφαρμογής, προσφέροντας έναν αξιόπιστο μηχανισμό αναδρομικής παρακολούθησης που συμπληρώνει τη ζωντανή ενημέρωση του *Today's Data* και ολοκληρώνει τη λειτουργική συνέχεια της Web εφαρμογής.

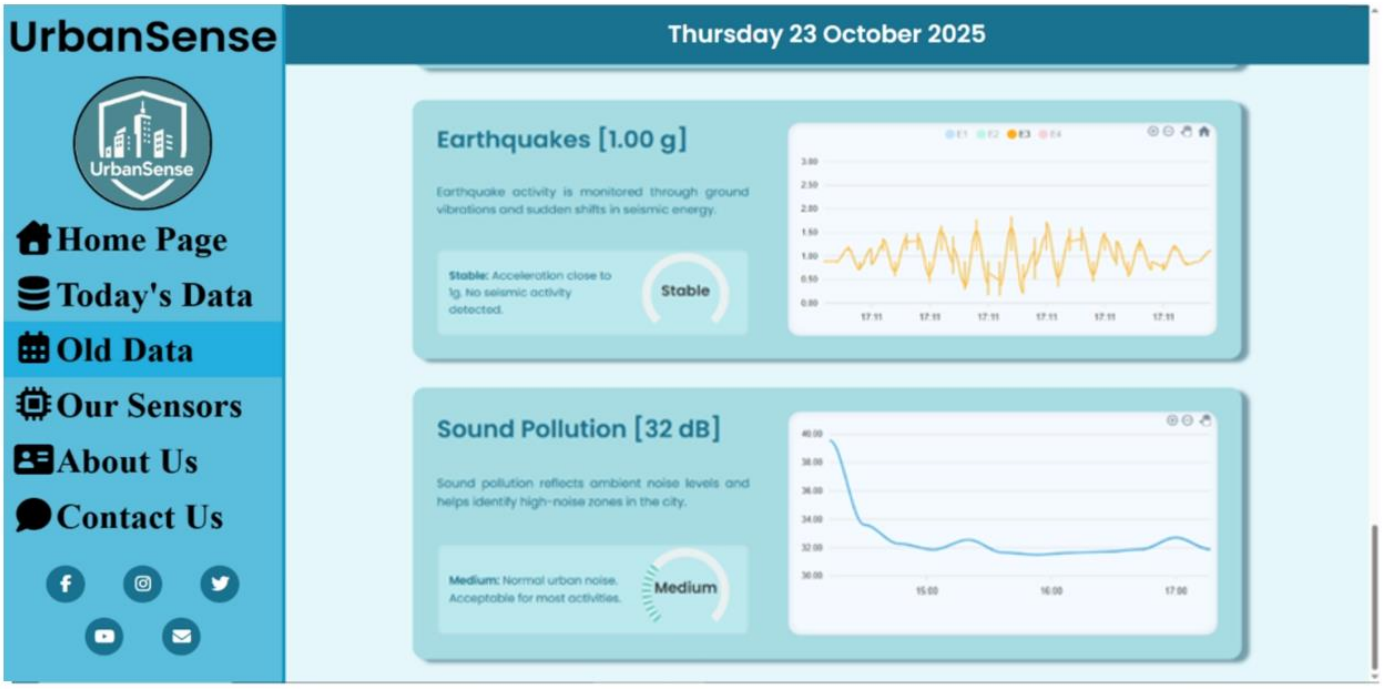



UrbanSense
Thursday 23 October 2025
Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us
Temperature [31°C]
Temperature is measured in degrees Celsius and reflects the ambient thermal conditions throughout the day.
Hot: High temperature. Stay hydrated.
Hot
Humidity [53%]
Humidity indicates the percentage of moisture in the air, affecting comfort and weather perception.
Medium: Comfortable humidity. Ideal for most activities.
Medium


UrbanSense
Thursday 23 October 2025
Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us
TVOC [189 ppb]
TVOC levels represent the concentration of volatile organic compounds, which impact indoor air quality.
Good: Excellent air quality. No health concerns from volatile compounds.
Good
CO₂ [495 ppm]
CO₂ concentration is a key indicator of ventilation and air freshness in urban environments.
Perfect: Ideal indoor air quality. Well-ventilated space.
Perfect


UrbanSense
Thursday 23 October 2025
Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us
PM2.5 [10 µg/m³]
PM2.5 refers to fine particulate matter that can penetrate deep into the lungs and affect health.
Perfect: Excellent air quality. Safe for all activities.
Perfect
Pressure [1006 hPa]
Barometric pressure helps forecast weather changes and analyze atmospheric stability.
Normal: Stable atmospheric conditions. Typical for fair weather.
Normal


UrbanSense
Thursday 23 October 2025
Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us
Pressure [1006 hPa]
Barometric pressure helps forecast weather changes and analyze atmospheric stability.
Normal: Stable atmospheric conditions. Typical for fair weather.
Normal
UV Index [5.7]
UV index measures ultraviolet radiation intensity, important for skin protection and solar exposure.
High: Elevated UV. Wear sunglasses and protective clothing.
High



Σχήμα 46: *Σελίδα "Old Data" της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense*

Οπτικοποίηση Δεδομένων (Today's Data & Old Data)

Η οπτικοποίηση δεδομένων αποτελεί ένα από τα πιο καθοριστικά στάδια της λειτουργίας της εφαρμογής *UrbanSense*, καθώς μετατρέπει τις ακατέργαστες μετρήσεις των αισθητήρων σε κατανοητή, διαδραστική και χρηστική πληροφορία για τον τελικό χρήστη. Μέσω της ενσωμάτωσης τεχνολογιών PHP, JavaScript και της βιβλιοθήκης ApexCharts.js, η εφαρμογή επιτυγχάνει τη δυναμική απεικόνιση των δεδομένων τόσο για την τρέχουσα ημέρα (*Today's Data*) όσο και για παλαιότερες ημερομηνίες (*Old Data*), διασφαλίζοντας τη συνέχεια της πληροφορίας και την ομοιογένεια της εμπειρίας χρήσης.

Η διαδικασία βασίζεται στην επικοινωνία μεταξύ του backend και του frontend μέσω PHP APIs. Ειδικά αρχεία ανακτούν δεδομένα από τη βάση MySQL και τα επιστρέφουν στη μορφή JSON. Η JavaScript αναλαμβάνει στη συνέχεια να τα επεξεργαστεί, να τα μορφοποιήσει χρονικά και να τα αποδώσει οπτικά με χρήση της βιβλιοθήκης ApexCharts. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει δυναμική ενημέρωση των γραφημάτων χωρίς επαναφόρτωση της σελίδας, διασφαλίζοντας ρευστότητα και απόκριση στην παρουσίαση των μετρήσεων.

Τα γραφήματα της ApexCharts χρησιμοποιούνται για την οπτικοποίηση διαφορετικών τύπων δεδομένων, επιλέγοντας τον κατάλληλο τρόπο απεικόνισης ανάλογα με τη φύση κάθε παραμέτρου:

- ***Γραμμικά διαγράμματα (line)*** για συνεχείς μετρήσεις, όπως θερμοκρασία, πίεση και ήχο.
- ***Διαγράμματα περιοχής (area)*** για παραμέτρους που εμφανίζουν διακυμάνσεις στον χρόνο, όπως υγρασία, CO_2 και PM2.5.
- ***Ραβδογράμματα (bar)*** για πιο διακριτές τιμές, όπως TVOC και δείκτης UV.

Η λειτουργία των γραφημάτων ενισχύεται από δυνατότητες μεγέθυνσης (zoom), αυτόματης κλιμάκωσης αξόνων (autoScaleYaxis), διαδραστικών εργαλείων πλοήγησης (toolbar) και εργαλείων tooltip που εμφανίζουν τιμές με σωστή μονάδα μέτρησης. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να εξετάζει λεπτομερώς τις μεταβολές κάθε παραμέτρου και να αντιλαμβάνεται με σαφήνεια την πορεία των τιμών μέσα στην ημέρα.

Η φόρτωση και ενημέρωση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω JavaScript loops που εκτελούν την ίδια διαδικασία για κάθε αισθητήρα. Πίνακας περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά κάθε αισθητήρα (το *id* του γραφήματος, το *όνομα*, τον *τύπο* και τη *μονάδα μέτρησης*), εξασφαλίζοντας αυτοματοποιημένη δημιουργία όλων των γραφημάτων. Επιπλέον, μέσω της μεταβλητής offsetMillis, τα δεδομένα μετατοπίζονται χρονικά κατά UTC+3, ώστε να αποδίδονται στην τοπική ώρα Ελλάδας, επιτυγχάνοντας ορθό συγχρονισμό με τη ροή των πραγματικών μετρήσεων.

Για τη σελίδα *Old Data*, η διαδικασία είναι αντίστοιχη, με τη διαφορά ότι ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ημερομηνία, ενεργοποιώντας την ανάκτηση των αντίστοιχων χρονοσειρών.

Συνολικά, η οπτικοποίηση δεδομένων στις σελίδες *Today's Data* και *Old Data* δεν αποτελεί απλώς αισθητικό στοιχείο, αλλά πυρηνικό μηχανισμό πληροφορικής αρχιτεκτονικής. Ενοποιεί τη ροή δεδομένων από τη βάση έως τον χρήστη, μετατρέποντας τις μετρήσεις των αισθητήρων σε κατανοητή, ερμηνεύσιμη και επιχειρησιακά χρήσιμη πληροφορία. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, το *UrbanSense* επιτυγχάνει τον βασικό του στόχο: να μεταφράζει την τεχνική πληροφορία σε απτά, κατανοητά και έγκυρα μηνύματα για τον πολίτη, ενισχύοντας τη γνώση, τη διαφάνεια και τη συμμετοχική κατανόηση του αστικού περιβάλλοντος.

13.4.1.4 Σελίδα Our Sensors

Η σελίδα *Our Sensors* αποτελεί το ενημερωτικό και εκπαιδευτικό τμήμα της εφαρμογής *UrbanSense*, προσφέροντας στον χρήστη μια ολοκληρωμένη παρουσίαση των αισθητήρων που απαρτίζουν το σύστημα και των φυσικών παραμέτρων που αυτοί καταγράφουν. Ενσωματώνεται στη συνολική αρχιτεκτονική της εφαρμογής, λειτουργώντας ως γέφυρα κατανόησης ανάμεσα στα τεχνικά δεδομένα που παρουσιάζονται στις σελίδες *Today's Data* και *Old Data* και στο ευρύτερο πλαίσιο της περιβαλλοντικής παρακολούθησης.

Ο βασικός σκοπός της είναι να ενημερώνει τον επισκέπτη για τη λειτουργία, τον ρόλο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε αισθητήρα που χρησιμοποιείται στο σύστημα.

Κάθε αισθητήρας παρουσιάζεται με:

- **Φωτογραφική απεικόνιση**,
- **Σύντομη περιγραφή λειτουργίας**, και
- **Ρόλο στο συνολικό σύστημα παρακολούθησης**.

Η σελίδα *Our Sensors* δεν λειτουργεί μόνο ως στατική παρουσίαση τεχνικών στοιχείων αλλά ως μέσο κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του συστήματος. Επιτρέπει στον χρήστη να αναγνωρίσει πώς κάθε αισθητήρας συμβάλλει στη συλλογή των δεδομένων που εμφανίζονται στις υπόλοιπες σελίδες της

εφαρμογής. Έτσι, δημιουργεί μια εννοιολογική σύνδεση ανάμεσα στο φυσικό επίπεδο (υλικό σύστημα αισθητήρων) και στο ψηφιακό επίπεδο (βάση δεδομένων και οπτικοποίηση). Με αυτόν τον τρόπο, η *Our Sensors* συμβάλλει καθοριστικά στην εκπαιδευτική και επεξηγηματική διάσταση του έργου *UrbanSense*, ενισχύοντας τη διαφάνεια, την κατανόηση και την αξιοπιστία του συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης.



UrbanSense

Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us



PPD42NS – Particulate Matter (PM2.5)

The PPD42NS sensor detects fine particulate matter (PM2.5) suspended in the air. These particles are linked to respiratory issues and urban smog. Monitoring PM2.5 levels helps assess air quality and supports public health interventions in polluted zones.

BMP180 – Barometric Pressure

The BMP180 sensor measures atmospheric pressure, which is vital for weather forecasting and altitude estimation. In urban settings, it helps track pressure changes that may influence air movement, pollutant dispersion, and even early storm detection.





AS7331 – Ultraviolet Radiation

UrbanSense

Home Page
Today's Data
Old Data
Our Sensors
About Us
Contact Us



AS7331 – Ultraviolet Radiation

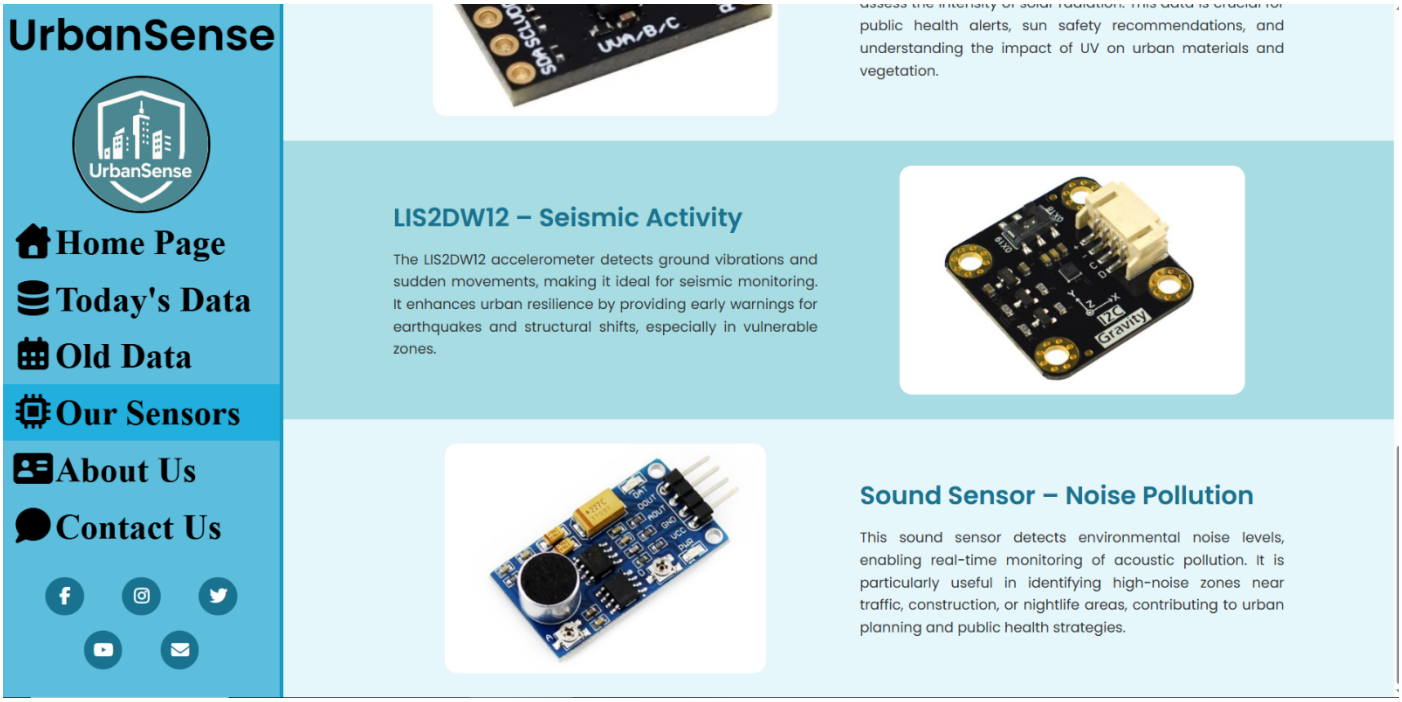
The UV sensor measures ultraviolet light exposure, helping assess the intensity of solar radiation. This data is crucial for public health alerts, sun safety recommendations, and understanding the impact of UV on urban materials and vegetation.

LIS2DW12 – Seismic Activity

The LIS2DW12 accelerometer detects ground vibrations and sudden movements, making it ideal for seismic monitoring. It enhances urban resilience by providing early warnings for earthquakes and structural shifts, especially in vulnerable zones.







Σχήμα 47: *Σελίδα "Our Sensors" της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense*

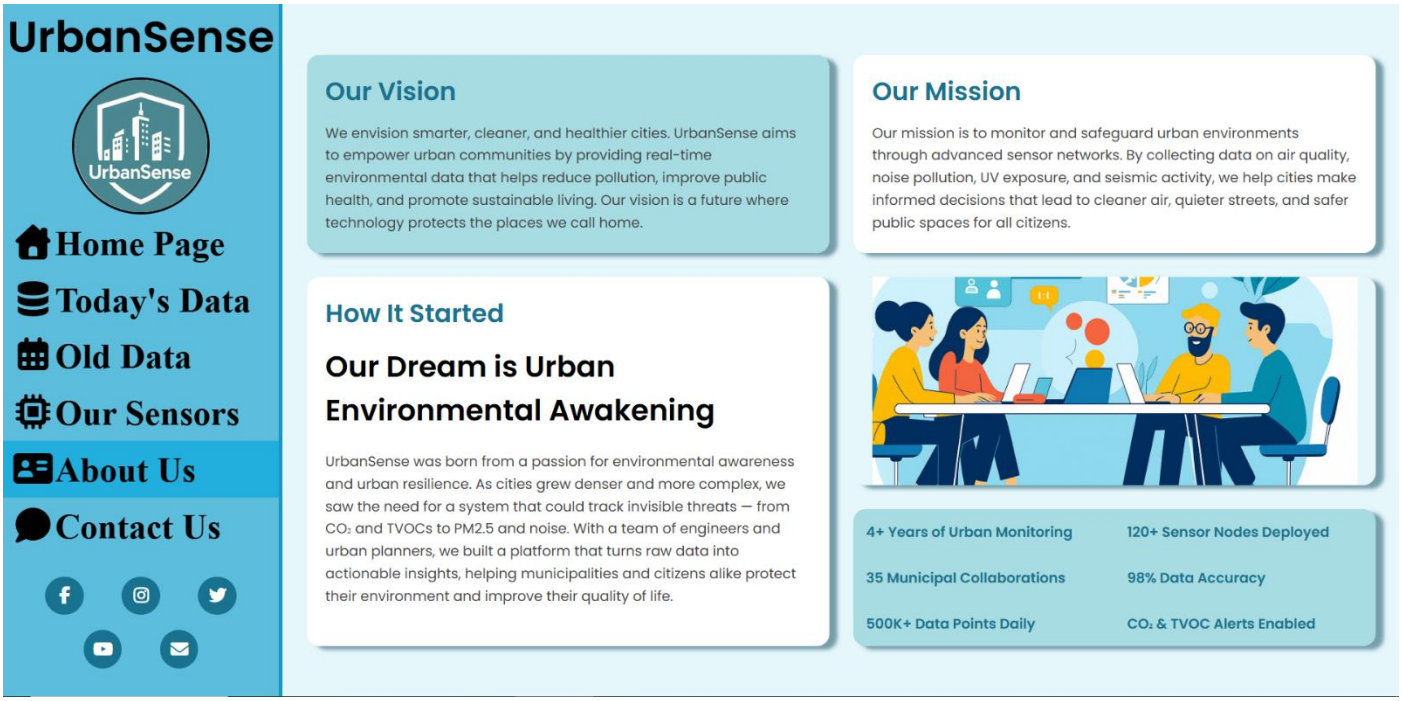
13.4.1.5 Σελίδα About Us

Η σελίδα *About Us* αποτελεί το ενημερωτικό και θεσμικό τμήμα της εφαρμογής, καθώς παρουσιάζει το όραμα, τους στόχους και τη φιλοσοφία ανάπτυξης του έργου. Η ενότητα αυτή αποσκοπεί στην ανάδειξη της αποστολής του συστήματος ως εργαλείου περιβαλλοντικής παρακολούθησης και βελτίωσης της ποιότητας ζωής στις σύγχρονες "έξυπνες πόλεις".

Η λειτουργία και η δομή της σελίδας οργανώνονται γύρω από τέσσερις κύριους άξονες:

- **Παρουσίαση του έργου UrbanSense:** Περιγράφεται η ταυτότητα και η αποστολή του συστήματος, με έμφαση στη συμβολή του στην παρακολούθηση και κατανόηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο το έργο ενσωματώνει τεχνολογίες αισθητήρων, μικροελεγκτών και διαδικτυακών εφαρμογών για τη συλλογή, ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
- **Αποστολή και όραμα:** Γίνεται αναφορά στη φιλοσοφία ανάπτυξης του συστήματος, που επικεντρώνεται στην περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση, στη βιωσιμότητα και στη δημιουργία προσβάσιμων τεχνολογικών λύσεων για τη διαχείριση δεδομένων αστικού περιβάλλοντος. Το *UrbanSense* προσεγγίζει την τεχνολογία ως μέσο κοινωνικής ωφέλειας, συμβάλλοντας στην ευρύτερη κατανόηση των περιβαλλοντικών μεταβολών.
- **Στατιστικά και συνοπτικές πληροφορίες:** Περιλαμβάνονται βασικά στοιχεία για την απόδοση και τη λειτουργικότητα του συστήματος, όπως αριθμός αισθητήρων, καταγεγραμμένες μετρήσεις και διάρκεια λειτουργίας, τα οποία προσδίδουν τεκμηριωμένο και ποσοτικό χαρακτήρα στην παρουσίαση.

Η σελίδα *About Us* λειτουργεί έτσι ως κεντρικό σημείο αναφοράς για την ταυτότητα του έργου, ενισχύοντας την αξιοπιστία του και αναδεικνύοντας τη συμβολή της τεχνολογίας στην περιβαλλοντική επιστήμη και βιωσιμότητα. Συνολικά, η σελίδα *About Us* προσδίδει στο *UrbanSense* μια ανθρωποκεντρική και επεξηγηματική διάσταση, μετατρέποντας το τεχνικό εγχείρημα σε μια ολοκληρωμένη ταυτότητα έργου με περιβαλλοντική, κοινωνική και επιστημονική αξία.



Σχήμα 48: *Σελίδα "About Us" της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense*

13.4.1.6 Σελίδα Contact Us

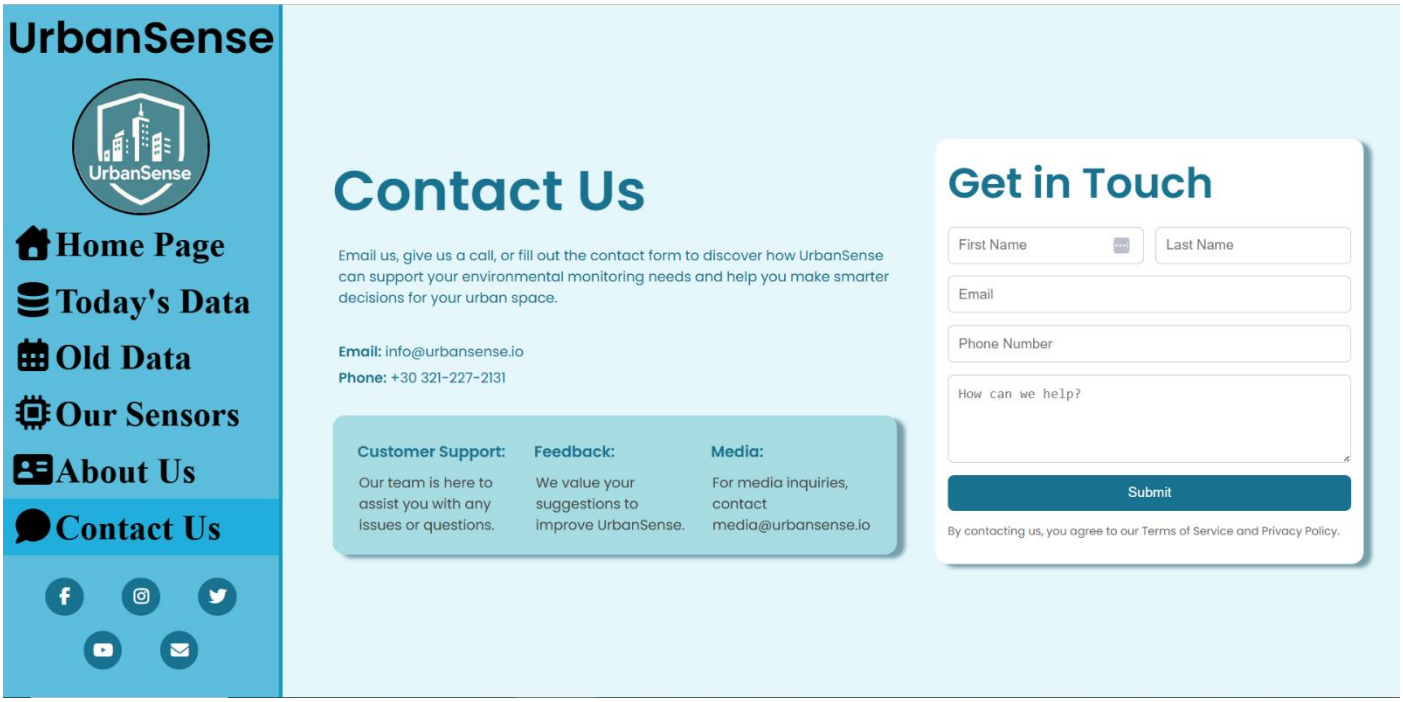
Η τελευταία σελίδα, Contact Us, αποτελεί το κανάλι επικοινωνίας και αλληλεπίδρασης του έργου *UrbanSense* με τους χρήστες του. Ενσωματώνεται οργανικά στη συνολική δομή της εφαρμογής, λειτουργώντας ως τελικό σημείο επαφής ανάμεσα στην ομάδα ανάπτυξης και την κοινότητα των επισκεπτών, χρηστών ή συνεργατών.

Οι κύριες λειτουργίες και στοιχεία της σελίδας περιλαμβάνουν:

- **Στοιχεία επικοινωνίας:** Παρέχονται αναλυτικά στοιχεία, όπως διεύθυνση email και αριθμός τηλεφώνου, τα οποία δίνουν στον χρήστη τη δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας με την ομάδα ανάπτυξης.
- **Φόρμα επικοινωνίας:** Στο δεξιό τμήμα της σελίδας υπάρχει διαδραστική φόρμα αποστολής μηνύματος, μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να συμπληρώσει το όνομά του, τη διεύθυνση email και το περιεχόμενο του μηνύματος. Η υποβολή πραγματοποιείται μέσω PHP, που αναλαμβάνει την επεξεργασία και προώθηση του αιτήματος προς τον εξυπηρετητή. Η φόρμα αυτή καθιστά τη σελίδα *Contact Us* ένα ενεργό εργαλείο επικοινωνίας, προσφέροντας τη δυνατότητα για ερωτήσεις, σχόλια, αναφορές προβλημάτων ή προτάσεις συνεργασίας.

- **Οπτική συνέπεια και πλοήγηση:** Η σελίδα διατηρεί τη γενική αισθητική και δομή του *UrbanSense*. Η διάταξή της είναι σχεδιασμένη ώστε να εξασφαλίζει άνετη εμπειρία χρήστη, με ισορροπία ανάμεσα στη λειτουργικότητα και την οπτική καθαρότητα.

Η σελίδα *Contact Us* ενισχύει τη διαδραστική διάσταση της εφαρμογής και συμβάλλει στη δημιουργία μιας ανοιχτής και συμμετοχικής σχέσης με το κοινό. Μέσω αυτής, το έργο *UrbanSense* υπερβαίνει τον ρόλο ενός τεχνολογικού συστήματος και μετατρέπεται σε πλατφόρμα επικοινωνίας, διάδοσης γνώσης και συνεργασίας.



Σχήμα 49: *Σελίδα "Contact Us" της διαδικτυακής ιστοσελίδας UrbanSense*

13.5 Συνολική Ενοποίηση και Αξιολόγηση Συστήματος

Μετά την ολοκλήρωση όλων των επιμέρους σταδίων -υλικού, firmware, βάσης δεδομένων και διαδικτυακής εφαρμογής-, το σύστημα λειτουργεί πλέον ως ενιαία πλατφόρμα έξυπνης περιβαλλοντικής παρακολούθησης, ικανή να συλλέγει, αποθηκεύει, επεξεργάζεται και οπτικοποιεί δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Η λειτουργική αξιολόγηση επιβεβαίωσε ότι:

- Η επικοινωνία ESP32 → PHP → MySQL είναι σταθερή και αξιόπιστη, χωρίς απώλειες πακέτων ή καθυστερήσεις.
- Η δομή της βάσης δεδομένων υποστηρίζει γρήγορη ανάκτηση και δυναμική οπτικοποίηση, χωρίς υπερφόρτωση.
- Η Web εφαρμογή ανταποκρίνεται άμεσα στις αλλαγές των δεδομένων, ενώ παρέχει φιλικό και προσιτό περιβάλλον διεπαφής για τον τελικό χρήστη.

Επιπλέον, η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος πληροί τις αρχές επεκτασιμότητας, διαλειτουργικότητας και βιωσιμότητας. Η υποδομή μπορεί να προσαρμοστεί σε νέα σενάρια, να δεχθεί πρόσθετους αισθητήρες ή νέες τοποθεσίες εγκατάστασης, καθώς και να διασυνδεθεί με εξωτερικές πλατφόρμες δεδομένων ή εφαρμογές έξυπνων πόλεων.

Επομένως, η ολοκλήρωση του *UrbanSense* αποδεικνύει ότι η τεχνολογία IoT μπορεί να αποτελέσει πρακτικό εργαλείο περιβαλλοντικής διαφάνειας και κοινωνικής ευαισθητοποίησης. Μέσα από τη σύνθεση υλικού, λογισμικού και διεπαφής, το σύστημα μετατρέπει τα δεδομένα του αστικού μικροκλίματος σε γνώση, δημιουργώντας τις βάσεις για μια πιο ενημερωμένη, βιώσιμη και ανθεκτική πόλη. Η συμβολή του *UrbanSense* υπερβαίνει τον τεχνικό του ρόλο, καθώς απαντά σε κρίσιμες ανάγκες που αναδείχθηκαν στο θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Οι μετρήσεις επιτρέπουν την έγκαιρη αναγνώριση περιβαλλοντικών κινδύνων που συνδέονται αποδεδειγμένα με αυξημένα ποσοστά νοσηρότητας και θνησιμότητας στις αστικές περιοχές. Η διάχυση τέτοιων δεδομένων συμβάλλει στην ενδυνάμωση του πολίτη, στη διαφάνεια και στη δημόσια συμμετοχή στη λήψη αποφάσεων, ενώ ενισχύει την επιστημονική και κοινωνική προσπάθεια για μείωση της ρύπανσης, προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή και προαγωγή της δημόσιας υγείας.

14. Βιβλιογραφία

[1] Davis, K. (1955). The origin and growth of urbanization in the world. *American journal of sociology*, *60*(5), 429-437.

[2] Blockmans, W. (2016). Urban systems and urbanization in world history. In *Explorations in History and Globalization* (pp. 113-137). Routledge.

[3] Mumford, L. (1961). *The city in history: Its origins, its transformations, and its prospects* (Vol. 67). Houghton Mifflin Harcourt.

[4] Cartwright, M. (2023, May 10). Urbanization. World History Encyclopedia. https://www.worldhistory.org/urbanization/

[5] Noori, M. Q. (2022). The study of the history and development of ancient cities around the world. *Journal of Humanities and Social Sciences Studies*, *4*(4), 197-203.

[6] Peng, X., Chen, X., & Cheng, Y. (2011). Urbanization and its consequences. *Paris, France: Eolss Publishers*, *2*(5754), 1-16.

[7] Ritchie, H., Samborska, V., & Roser, M. (2024). Urbanization. Our World in Data. https://ourworldindata.org/urbanization

[8] Worldometer. (n.d.). World population clock: 8.2 billion people (live, 2025). Retrieved October 18, 2025, from https://www.worldometers.info/world-population/

[9] Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PloS one*, *6*(8), e23777.

[10] Seto, K. C., Parnell, S., & Elmqvist, T. (2013). A global outlook on urbanization. In *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: challenges and opportunities: a global assessment* (pp. 1-12). Dordrecht: Springer Netherlands.

[11] Ewen, S. (2016). *What is urban history?*. John Wiley & Sons.

[12] Worldometer. (n.d.). World population by year. Retrieved October 18, 2025, from https://www.worldometers.info/world-population/world-population-by-year/

[13] European Commission. (2020, June 25). Urbanisation worldwide. Retrieved October 18, 2025, from https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/topic/continuing-urbanisation/urbanisation-worldwide_en

[14] Li, X., Zhou, Y., Hejazi, M., Wise, M., Vernon, C., Iyer, G., & Chen, W. (2021). Global urban growth between 1870 and 2100 from integrated high resolution mapped data and urban dynamic modeling. *Communications Earth & Environment*, *2*(1), 201.

[15] Cohen, A. J., Anderson, H. R., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., ... & Smith, K. R. (2004). Urban air pollution. *Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors*, *2*, 1353-1433.

[16] Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2012). Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *Journal of medical toxicology*, *8*(2), 166-175.

[17] Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M. L., Ying, Q., Lin, Y., ... & Wang, Y. (2015). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical reviews*, *115*(10), 3803-3855.

[18] Zheng, H., Wu, D., Wang, S., Li, X., Jin, L. N., Zhao, B., ... & Li, Q. (2025). Control of toxicity of fine particulate matter emissions in China. *Nature*, *643*(8071), 404-411.

[19] Harrison, R. M., & Yin, J. (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?. *Science of the total environment*, *249*(1-3), 85-101.

[20] Cacciola, R. R., Sarva, M., & Polosa, R. (2002). Adverse respiratory effects and allergic susceptibility in relation to particulate air pollution: flirting with disaster. *Allergy*, *57*(4), 281-286.
[21] Dargay, J., Gately, D., & Sommer, M. (2007). Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030. *The energy journal*, *28*(4), 143-170.
[22] Sturgeon, T. J., Memedovic, O., Van Biesebroeck, J., & Gereffi, G. (2009). Globalisation of the automotive industry: main features and trends. *International Journal of Technological learning, innovation and development*, *2*(1-2), 7-24.
[23] Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, *8*, 14.
[24] D'Amato, G., Cecchi, L., D'amato, M., & Liccardi, G. (2010). Urban air pollution and climate change as environmental risk factors of respiratory allergy: an update. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, *20*(2), 95-102.
[25] Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E., & Pan, Y. (2006). Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environment international*, *32*(6), 815-830.
[26] European Court of Auditors. (2018, April). Air pollution: Our health still insufficiently protected (Special Report No. 23/2018). https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/sr18_23/sr_air_quality_en.pdf
[27] Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, *151*(2), 362-367.
[28] D'Amato, G. (2011). Effects of climatic changes and urban air pollution on the rising trends of respiratory allergy and asthma. *Multidisciplinary respiratory medicine*, *6*(1), 28.
[29] World Health Organization. (2022). Air pollution. In *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment 2022 update* (pp. 9-35). World Health Organization. http://www.jstor.org/stable/resrep56916.8
[30] Bernstein, J. A., Alexis, N., Barnes, C., Bernstein, I. L., Nel, A., Peden, D., ... & Williams, P. B. (2004). Health effects of air pollution. *Journal of allergy and clinical immunology*, *114*(5), 1116-1123.
[31] Southerland, V. A., Brauer, M., Mohegh, A., Hammer, M. S., Van Donkelaar, A., Martin, R. V., ... & Anenberg, S. C. (2022). Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM2· 5) and attributable health burdens: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*, *6*(2), e139-e146.
[32] Sydbom, A., Blomberg, A., Parnia, S., Stenfors, N., Sandström, T., & Dahlen, S. E. (2001). Health effects of diesel exhaust emissions. *European Respiratory Journal*, *17*(4), 733-746.
[33] Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, *74*, 136-143.
[34] Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope III, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., ... & Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, *121*(21), 2331-2378.
[35] Rückerl, R., Schneider, A., Breitner, S., Cyrys, J., & Peters, A. (2011). Health effects of particulate air pollution: a review of epidemiological evidence. *Inhalation toxicology*, *23*(10), 555-592.
[36] Franklin, B. A., Brook, R., & Pope III, C. A. (2015). Air pollution and cardiovascular disease. *Current problems in cardiology*, *40*(5), 207-238.
[37] Rajagopalan, S., Al-Kindi, S. G., & Brook, R. D. (2018). Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review. *Journal of the American College of Cardiology*, *72*(17), 2054-2070.

[38] Schraufnagel, D. E. (2020). The health effects of ultrafine particles. *Experimental & molecular medicine*, *52*(3), 311-317.
[39] Miller, K. A., Siscovick, D. S., Sheppard, L., Shepherd, K., Sullivan, J. H., Anderson, G. L., & Kaufman, J. D. (2007). Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women. *New England Journal of Medicine*, *356*(5), 447-458.
[40] Gauderman, W. J., Avol, E., Gilliland, F., Vora, H., Thomas, D., Berhane, K., ... & Peters, J. (2004). The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. *New England Journal of Medicine*, *351*(11), 1057-1067.
[41] Shah, A. S., Langrish, J. P., Nair, H., McAllister, D. A., Hunter, A. L., Donaldson, K., ... & Mills, N. L. (2013). Global association of air pollution and heart failure: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet*, *382*(9897), 1039-1048.
[42] Donaldson, K., Stone, V., Clouter, A., Renwick, L., & MacNee, W. (2001). Ultrafine particles. *Occupational and environmental medicine*, *58*(3), 211-216.
[43] Lekkas, T. D. (2008). Ultrafine particles (UFP) and health effects. Dangerous. Like no other PM? Review and analysis. *Glob. Nest J*, *10*, 439-452.
[44] Smith, R., & McDougal, K. (2017). POLLUTION AND ITS COSTS. In *COSTS OF POLLUTION IN CANADA: Measuring the impacts on families, businesses and governments* (pp. 6-13). International Institute for Sustainable Development (IISD). http://www.jstor.org/stable/resrep14774.5
[45] Shah, J. J. (2008). Copenhagen Consensus 2008 Perspective Paper.
[46] Crane, K., & Mao, Z. (2015). Costs of Reducing Air Pollution. In *Costs of Selected Policies to Address Air Pollution in China* (pp. 18-22). RAND Corporation. http://www.jstor.org/stable/10.7249/j.ctt14bs468.11
[47] Sicard, P., Agathokleous, E., Anenberg, S. C., De Marco, A., Paoletti, E., & Calatayud, V. (2023). Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective. *Science of The Total Environment*, *858*, 160064.
[48] Kumar, P., Morawska, L., Birmili, W., Paasonen, P., Hu, M., Kulmala, M., ... & Britter, R. (2014). Ultrafine particles in cities. *Environment international*, *66*, 1-10.
[49] SANDALOW, D., MEIDAN, M., ANDREWS-SPEED, P., HOVE, A., QIU, S. Y., & DOWNIE, E. (2022). URBAN AIR POLLUTION. In *GUIDE TO CHINESE CLIMATE POLICY 2022* (pp. 162-170). Oxford Institute for Energy Studies. http://www.jstor.org/stable/resrep45372.21
[50] Rumchev, K., Brown, H., & Spickett, J. (2007). Volatile organic compounds: do they present a risk to our health?. *Reviews on environmental health*, *22*(1), 39.
[51] Fernandez-Villarrenaga, V., López-Mahıa, P., Muniategui-Lorenzo, S., Prada-Rodrıguez, D., Fernandez-Fernandez, E., & Tomas, X. (2004). C1 to C9 volatile organic compound measurements in urban air. *Science of the Total Environment*, *334*, 167-176.
[52] Soni, V., Singh, P., Shree, V., & Goel, V. (2017). Effects of VOCs on human health. In *Air pollution and control* (pp. 119-142). Singapore: Springer Singapore.
[53] Meyer, C. (2018). Overview of TVOC and indoor air quality. *Renesas Electronics Corporation: Tokyo, Japan*.
[54] Salthammer, T. (2022). TVOC-revisited. *Environment international*, *167*, 107440.
[55] Kesselmeier, J., & Staudt, M. (1999). Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology. *Journal of atmospheric chemistry*, *33*(1), 23-88.
[56] Mečiarová, Ľ., Vilčeková, S., Krídlová Burdová, E., & Kiselák, J. (2017). Factors effecting the total volatile organic compound (TVOC) concentrations in Slovak households. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *14*(12), 1443.

[57] Drabińska, N., Flynn, C., Ratcliffe, N., Belluomo, I., Myridakis, A., Gould, O., ... & Costello, B. D. L. (2021). A literature survey of all volatiles from healthy human breath and bodily fluids: the human volatilome. *Journal of breath research*, *15*(3), 034001.
[58] Rumchev, K., Spickett, J., Bulsara, M., Phillips, M., & Stick, S. (2004). Association of domestic exposure to volatile organic compounds with asthma in young children. *Thorax*, *59*(9), 746-751.
[59] Wolkoff, P. (1995). Volatile organic compounds. *Indoor Air, Suppl*, *3*, 1-73.
[60] Montero-Montoya, R., López-Vargas, R., & Arellano-Aguilar, O. (2018). Volatile organic compounds in air: sources, distribution, exposure and associated illnesses in children. *Annals of global health*, *84*(2), 225.
[61] Liu, N., Bu, Z., Liu, W., Kan, H., Zhao, Z., Deng, F., ... & Zhang, Y. (2022). Health effects of exposure to indoor volatile organic compounds from 1980 to 2017: A systematic review and meta-analysis. *Indoor air*, *32*(5), e13038.
[62] Hassan, N. E. (2024). Noise Pollution and its Effects on Human Health: A Review. *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR)*, *10*(11), 1-1.
[63] Aluko, E. O., Nna, V. U., & Adekunbi, D. A. (2015). The possible mechanisms through which dietary protein increases renal blood flow and glomerular filtration rate.
[64] de Paiva Vianna, K. M., Cardoso, M. R. A., & Rodrigues, R. M. C. (2015). Noise pollution and annoyance: An urban soundscapes study. *Noise and Health*, *17*(76), 125-133.
[65] Gupta, A., Gupta, A., Jain, K., & Gupta, S. (2018). Noise pollution and impact on children health. *The Indian Journal of Pediatrics*, *85*(4), 300-306.
[66] Shirzad, W., Mohammad Mukhlis, B., Samiullah, S., & Samsoor, P. (2022). A comprehensive review of noise pollution and its impact on the urban environment. *Kardan Journal of Engineering and Technology. https://doi. org/10.31841/KJET*.
[67] Jariwala, H. J., Syed, H. S., Pandya, M. J., & Gajera, Y. M. (2017). Noise pollution & human health: a review. *Noise and Air Pollutions: Challenges and Opportunities, Ahmedabad: LD College of Eng*.
[68] Hahad, O., Prochaska, J. H., Daiber, A., & Muenzel, T. (2019). Environmental noise-induced effects on stress hormones, oxidative stress, and vascular dysfunction: Key factors in the relationship between cerebrocardiovascular and psychological disorders. *Oxidative medicine and cellular longevity*, *2019*(1), 4623109.
[69] Hemmat, W., Hesam, A. M., & Atifnigar, H. (2023). Exploring noise pollution, causes, effects, and mitigation strategies: a review paper. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, *1*(5), 995-1005.
[70] Harris, L. (2024). Noise Pollution in Cityscapes: Health Implications and Ways to Tackle It.
[71] Münzel, T., Molitor, M., Kuntic, M., Hahad, O., Röösli, M., Engelmann, N., ... & Sørensen, M. (2024). Transportation noise pollution and cardiovascular health. *Circulation research*, *134*(9), 1113-1135.
[72] Münzel, T., Sørensen, M., & Daiber, A. (2021). Transportation noise pollution and cardiovascular disease. *Nature Reviews Cardiology*, *18*(9), 619-636.
[73] Arregi, A., Vegas, O., Lertxundi, A., Silva, A., Ferreira, I., Bereziartua, A., ... & Lertxundi, N. (2024). Road traffic noise exposure and its impact on health: evidence from animal and human studies-chronic stress, inflammation, and oxidative stress as key components of the complex downstream pathway underlying noise-induced non-auditory health effects. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(34), 46820-46839.
[74] Goines, L., & Hagler, L. (2007). Noise pollution: a modem plague. *South Med J*, *100*(3), 287-94.

[75] Münzel, T., Gori, T., Babisch, W., & Basner, M. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European heart journal*, *35*(13), 829-836.
[76] Münzel, T., Sørensen, M., Schmidt, F., Schmidt, E., Steven, S., Kröller-Schön, S., & Daiber, A. (2018). The adverse effects of environmental noise exposure on oxidative stress and cardiovascular risk. *Antioxidants & redox signaling*, *28*(9), 873-908.
[77] Rizwan, A. M., & Dennis, L. Y. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of environmental sciences*, *20*(1), 120-128.
[78] Baruah, M., & Nulkar, G. (2025). *Heat in the city: Investigating urban heat islands, drivers, and their impacts*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28350.40004
[79] Nuruzzaman, M. (2015). Urban heat island: causes, effects and mitigation measures-a review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, *3*(2), 67-73.
[80] Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva III, H., & Taylor, R. A. (2015). Urban heat island: mechanisms, implications, and possible remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, *40*(1), 285-307.
[81] Chapman, S., Watson, J. E., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, *32*(10), 1921-1935.
[82] Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of environmental management*, *197*, 522-538.
[83] Heisler, G. M., & Brazel, A. J. (2010). The urban physical environment: Temperature and urban heat islands. *Urban ecosystem ecology*, *55*, 29-56.
[84] Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The urban heat island: implications for health in a changing environment. *Current environmental health reports*, *4*(3), 296-305.
[85] Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., & Endlicher, W. (2016). Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Science of the Total Environment*, *569*, 527-539.
[86] Basu, R., & Samet, J. M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic reviews*, *24*(2), 190-202.
[87] Basu, R. (2009). High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental health*, *8*(1), 40.
[88] Ye, X., Wolff, R., Yu, W., Vaneckova, P., Pan, X., & Tong, S. (2012). Ambient temperature and morbidity: a review of epidemiological evidence. *Environmental health perspectives*, *120*(1), 19-28.
[89] Bunker, A., Wildenhain, J., Vandenbergh, A., Henschke, N., Rocklöv, J., Hajat, S., & Sauerborn, R. (2016). Effects of air temperature on climate-sensitive mortality and morbidity outcomes in the elderly; a systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. *EBioMedicine*, *6*, 258-268.
[90] Moghadamnia, M. T., Ardalan, A., Mesdaghinia, A., Keshtkar, A., Naddafi, K., & Yekaninejad, M. S. (2017). Ambient temperature and cardiovascular mortality: a systematic review and meta-analysis. *PeerJ*, *5*, e3574.
[91] Casas, A. L. F., Santos, G. M. D., Chiocheti, N. B., & de Andrade, M. (2016). Effects of temperature variation on the human cardiovascular system: a systematic review. *Climate change and health: Improving resilience and reducing risks*, 73-87.
[92] Liu, J., Varghese, B. M., Hansen, A., Zhang, Y., Driscoll, T., Morgan, G., ... & Bi, P. (2022). Heat exposure and cardiovascular health outcomes: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Planetary Health*, *6*(6), e484-e495.

[93] Song, X., Wang, S., Hu, Y., Yue, M., Zhang, T., Liu, Y., ... & Shang, K. (2017). Impact of ambient temperature on morbidity and mortality: an overview of reviews. *Science of the Total Environment*, *586*, 241-254.
[94] Thompson, R., Lawrance, E. L., Roberts, L. F., Grailey, K., Ashrafian, H., Maheswaran, H., ... & Darzi, A. (2023). Ambient temperature and mental health: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Planetary Health*, *7*(7), e580-e589.
[95] Faurie, C., Varghese, B. M., Liu, J., & Bi, P. (2022). Association between high temperature and heatwaves with heat-related illnesses: a systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, *852*, 158332.
[96] Lindsey, R., & Dahlman, L. (2020). Climate change: Global temperature. *Climate. gov*, *16*, 1-5.
[97] Thompson, R., Hornigold, R., Page, L., & Waite, T. (2018). Associations between high ambient temperatures and heat waves with mental health outcomes: a systematic review. *Public health*, *161*, 171-191.
[98] Cheng, J., Xu, Z., Bambrick, H., Prescott, V., Wang, N., Zhang, Y., ... & Hu, W. (2019). Cardiorespiratory effects of heatwaves: A systematic review and meta-analysis of global epidemiological evidence. *Environmental research*, *177*, 108610.
[99] Cheng, J., Xu, Z., Bambrick, H., Su, H., Tong, S., & Hu, W. (2019). Impacts of exposure to ambient temperature on burden of disease: a systematic review of epidemiological evidence. *International journal of biometeorology*, *63*(8), 1099-1115.
[100] Lakhoo, D. P., Brink, N., Radebe, L., Craig, M. H., Pham, M. D., Haghighi, M. M., ... & HIGH Horizons Study Group Luchters Stanley 7 9 Maimela Gloria 2 Radebe Lebohang 2 Chersich Matthew 1 2 Lakhoo Darshnika P. 1 2 Solarin Ijeoma 1 2 Brink Nicholas 1 2. (2025). A systematic review and meta-analysis of heat exposure impacts on maternal, fetal and neonatal health. *Nature Medicine*, *31*(2), 684-694.
[101] Yu, W., Mengersen, K., Wang, X., Ye, X., Guo, Y., Pan, X., & Tong, S. (2012). Daily average temperature and mortality among the elderly: a meta-analysis and systematic review of epidemiological evidence. *International journal of biometeorology*, *56*(4), 569-581.
[102] Guo, Y., Gasparrini, A., Armstrong, B., Li, S., Tawatsupa, B., Tobias, A., ... & Williams, G. (2014). Global variation in the effects of ambient temperature on mortality: a systematic evaluation. *Epidemiology*, *25*(6), 781-789.
[103] Varquez, A. C., & Kanda, M. (2018). Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960-2009). *Npj climate and atmospheric Science*, *1*(1), 32.
[104] Muradov, N. (2014). *Liberating energy from carbon: introduction to decarbonization* (Vol. 22, pp. 330-332). New York: Springer.
[105] Ritchie, H., & Roser, M. (2017). CO_2 and other greenhouse gas emissions. *Our world in data*.
[106] Yang, S., Wang, X., Ge, Z., Dong, G., Ma, M., & Han, X. (2023). Global Per Capita CO2 Emission Trends. *Atmosphere*, *14*(12), 1797.
[107] Hannah Ritchie and Max Roser (2020) - "CO_2 emissions" Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/co2-emissions' [Online Resource]
[108] Abdullah, S. M. (2017). Carbon dioxide emissions causing global warming. *New Straits Times*, *13*.
[109] Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental science and pollution research*, *29*(28), 42539-42559.

[110] Rawat, A., Kumar, D., & Khati, B. S. (2024). A review on climate change impacts, models, and its consequences on different sectors: a systematic approach. *Journal of Water and Climate Change*, *15*(1), 104-126.
[111] Jacobson, T. A., Kler, J. S., Hernke, M. T., Braun, R. K., Meyer, K. C., & Funk, W. E. (2019). Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*, *2*(8), 691-701.
[112] Crippa, M., Guizzardi, D., Banja, M., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., ... & Vignati, E. (2022). CO2 emissions of all world countries. *JRC Science for Policy Report, European Commission, EUR*, *31182*.
[113] Worldometer. (n.d.). CO_2 Emissions by Country. Retrieved October 19, 2025, from https://www.worldometers.info/co2-emissions/co2-emissions-by-country/
[114] Ribeiro, H. V., Rybski, D., & Kropp, J. P. (2019). Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. *Nature communications*, *10*(1), 3204.
[115] Solomon, S., Plattner, G. K., Knutti, R., & Friedlingstein, P. (2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the national academy of sciences*, *106*(6), 1704-1709.
[116] Mac Dowell, N., Fennell, P. S., Shah, N., & Maitland, G. C. (2017). The role of CO2 capture and utilization in mitigating climate change. *Nature climate change*, *7*(4), 243-249.
[117] Diffey, B. L. (2002). Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, *28*(1), 4-13.
[118] Oliva, M. S., & Taylor, H. (2005). Ultraviolet radiation and the eye. *International ophthalmology clinics*, *45*(1), 1-17.
[119] Gallagher, R. P., & Lee, T. K. (2006). Adverse effects of ultraviolet radiation: a brief review. *Progress in biophysics and molecular biology*, *92*(1), 119-131.
[120] Gallagher, R. P., Lee, T. K., Bajdik, C. D., & Borugian, M. (2010). Ultraviolet radiation. *Health Promotion and Chronic Disease Prevention in Canada*, *29*.
[121] Yu, S. L., & Lee, S. K. (2017). Ultraviolet radiation: DNA damage, repair, and human disorders. *Molecular & Cellular Toxicology*, *13*(1), 21-28.
[122] Gröbner, J. (2012). Ultraviolet radiation: distribution and variability. In *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (pp. 11149-11158). Springer, New York, NY.
[123] Young, C. (2009). Solar ultraviolet radiation and skin cancer. *Occupational medicine*, *59*(2), 82-88.
[124] Matsumura, Y., & Ananthaswamy, H. N. (2004). Toxic effects of ultraviolet radiation on the skin. *Toxicology and applied pharmacology*, *195*(3), 298-308.
[125] Fioletov, V., Kerr, J. B., & Fergusson, A. (2010). The UV index: definition, distribution and factors affecting it. *Canadian journal of public health*, *101*(4), I5-I9.
[126] Narayanan, D. L., Saladi, R. N., & Fox, J. L. (2010). Ultraviolet radiation and skin cancer. *International journal of dermatology*, *49*(9), 978-986.
[127] Godar, D. E. (2005). UV doses worldwide. *Photochemistry and photobiology*, *81*(4), 736-749.
[128] Heisler, G. M. (2005). Health impacts of ultraviolet radiation in urban ecosystems: a review. *Ultraviolet Ground-and Space-based Measurements, Models, and Effects V*, *5886*, 180-196.
[129] Debacq-Chainiaux, F., Leduc, C., Verbeke, A., & Toussaint, O. (2012). UV, stress and aging. *Dermato-endocrinology*, *4*(3), 236-240.
[130] Heisler, G. M., Grant, R. H., Gao, W., & Slusser, J. R. (2004). Solar Ultraviolet-B Radiation in Urban Environments: The Case of Baltimore, Maryland. *Photochemistry and photobiology*, *80*(3), 422-428.
[131] Berwick, M., & Kesler, D. (2005). Ultraviolet radiation exposure, vitamin D, and cancer. *Photochemistry and photobiology*, *81*(6), 1261-1266.

[132] MacKie, R. M. (2000). Effects of ultraviolet radiation on human health. *Radiation Protection Dosimetry*, *91*(1-3), 15-18.
[133] D'Orazio, J., Jarrett, S., Amaro-Ortiz, A., & Scott, T. (2013). UV radiation and the skin. *International journal of molecular sciences*, *14*(6), 12222-12248.
[134] Bernard, J. J., Gallo, R. L., & Krutmann, J. (2019). Photoimmunology: how ultraviolet radiation affects the immune system. *Nature Reviews Immunology*, *19*(11), 688-701.
[135] Sinha, R. P., & Häder, D. P. (2002). UV-induced DNA damage and repair: a review. *Photochemical & Photobiological Sciences*, *1*(4), 225-236.
[136] Clydesdale, G. J., Dandie, G. W., & Muller, H. K. (2001). Ultraviolet light induced injury: immunological and inflammatory effects. *Immunology and cell biology*, *79*(6), 547-568.
[137] Gromkowska-Kępka, K. J., Puścion-Jakubik, A., Markiewicz-Żukowska, R., & Socha, K. (2021). The impact of ultraviolet radiation on skin photoaging-review of in vitro studies. *Journal of cosmetic dermatology*, *20*(11), 3427-3431.
[138] Watson, M., Holman, D. M., & Maguire-Eisen, M. (2016, August). Ultraviolet radiation exposure and its impact on skin cancer risk. In *Seminars in oncology nursing* (Vol. 32, No. 3, pp. 241-254). WB Saunders.
[139] Robaa, S. M. (2004). A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar energy*, *77*(2), 251-259.
[140] World Health Organization. (2022). Radiation. In *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment 2022 update* (pp. 84-96). World Health Organization. http://www.jstor.org/stable/resrep56916.12
[141] Huang, X., & Song, J. (2023). Urban moisture and dry islands: spatiotemporal variation patterns and mechanisms of urban air humidity changes across the globe. *Environmental Research Letters*, *18*(10), 103003.
[142] Dai, A. (2006). Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *Journal of Climate*, *19*(15), 3589-3606.
[143] Reinikainen, L. M., & Jaakkola, J. J. K. (2003). Significance of humidity and temperature on skin and upper airway symptoms. *Indoor air*, *13*(4).
[144] Dyer, I. (2012). Measurement of humidity. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, *13*(3), 121-123.
[145] Onabanjo, A. A., Olanipekun, L. O., & Olanipekun, D. O. (2023). EFFECTS OF INDOOR AIR QUALITY, HUMIDITY AND TEMPERATURE ON EMPLOYEES HEALTH AND PERFORMANCE. *Web of Humanities: Journal of Social Science and Humanitarian Research*, *1*(6), 8-18.
[146] Davis, R. E., McGregor, G. R., & Enfield, K. B. (2016). Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health. *Environmental research*, *144*, 106-116.
[147] Barreca, A. I. (2012). Climate change, humidity, and mortality in the United States. *Journal of Environmental Economics and Management*, *63*(1), 19-34.
[148] Chen, Z., & Lu, C. (2005). Humidity sensors: a review of materials and mechanisms. *Sensor letters*, *3*(4), 274-295.
[149] Lee, C. Y., & Lee, G. B. (2005). Humidity sensors: A review. *Sensor Letters*, *3*(1-2), 1-2.
[150] Goad, N., & Gawkrodger, D. J. (2016). Ambient humidity and the skin: the impact of air humidity in healthy and diseased states. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, *30*(8), 1285-1294.
[151] Nassikas, N. J., Ni, W., Rifas-Shiman, S. L., Luttmann-Gibson, H., Synn, A., Oken, E., ... & Rice, M. B. (2025). Short-term exposure to relative humidity and lung health in early adolescents. *Environmental Epidemiology*, *9*(2), e371.

[152] Gao, J., Sun, Y., Lu, Y., & Li, L. (2014). Impact of ambient humidity on child health: a systematic review. *PloS one*, *9*(12), e112508.
[153] Seok, J., Lee, B. Y., & Yoon, H. Y. (2024). Association between humidity and respiratory health: the 2016-2018 Korea National Health and Nutrition Examination Survey. *Respiratory Research*, *25*(1), 424.
[154] Davidse, A., & Zare, R. N. (2021). Effect of relative humidity in air on the transmission of respiratory viruses. *Molecular Frontiers Journal*, *5*(01n02), 5-16.
[155] Wolkoff, P. (2018). Indoor air humidity, air quality, and health-An overview. *International journal of hygiene and environmental health*, *221*(3), 376-390.
[156] Guarnieri, G., Olivieri, B., Senna, G., & Vianello, A. (2023). Relative humidity and its impact on the immune system and infections. *International journal of molecular sciences*, *24*(11), 9456.
[157] Mäkinen, T. M., Juvonen, R., Jokelainen, J., Harju, T. H., Peitso, A., Bloigu, A., ... & Hassi, J. (2009). Cold temperature and low humidity are associated with increased occurrence of respiratory tract infections. *Respiratory medicine*, *103*(3), 456-462.
[158] Gu, W., Xie, D., Li, Q., Feng, H., Xue, Y., Chen, Y., ... & Liu, S. (2024). Association of humidity and precipitation with asthma: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Allergy*, *5*, 1483430.
[159] Hayes, Jr, D., Jhaveri, M. A., Mannino, D. M., Strawbridge, H., & Temprano, J. (2013). The effect of mold sensitization and humidity upon allergic asthma. *The clinical respiratory journal*, *7*(2), 135-144.
[160] Danet, S., Richard, F., Montaye, M., Beauchant, S., Lemaire, B., Graux, C., ... & Amouyel, P. (1999). Unhealthy effects of atmospheric temperature and pressure on the occurrence of myocardial infarction and coronary deaths: A 10-year survey: The Lille-World Health Organization MONICA project (Monitoring trends and determinants in cardiovascular disease). *Circulation*, *100*(1), e1-e7.
[161] Ou, C. Q., Jun, Y. A. N. G., Ou, Q. Q., Liu, H. Z., Lin, G. Z., Chen, P. Y., ... & Guo, Y. M. (2014). The impact of relative humidity and atmospheric pressure on mortality in Guangzhou, China. *Biomedical and Environmental Sciences*, *27*(12), 917-925.
[162] Dawson, J., Weir, C., Wright, F., Bryden, C., Aslanyan, S., Lees, K., ... & Walters, M. (2008). Associations between meteorological variables and acute stroke hospital admissions in the west of Scotland. *Acta Neurologica Scandinavica*, *117*(2), 85-89.
[163] Brown, H. K., Simpson, J. A., & Murchison, J. T. (2009). The influence of meteorological variables on the development of deep venous thrombosis. *Thrombosis and haemostasis*, *102*(10), 676-682.
[164] Huang, Q., Sun, Y., Lu, J., Huang, Q. Y., Zeng, Y. L., Liu, B., ... & Wu, S. Y. (2021). Associations between meteorological variation and rupture of intracranial aneurysm in Fujian, China: A 5-year multicenter study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *223*, 112609.
[165] Landers, A. T., Narotami, P. K., Govender, S. T., & Van Dellen, J. R. (1997). The effect of changes in barometric pressure on the risk of rupture of intracranial aneurysms. *British journal of neurosurgery*, *11*(3), 191-195.
[166] Guan, W., Clay, S. J., Sloan, G. J., & Pretlow, L. G. (2019). Effects of barometric pressure and temperature on acute ischemic stroke hospitalization in Augusta, GA. *Translational Stroke Research*, *10*(3), 259-264.
[167] Vencloviene, J., Radisauskas, R., Kranciukaite-Butylkiniene, D., Tamosiunas, A., Vaiciulis, V., & Rastenyte, D. (2021). Association between stroke occurrence and changes in atmospheric circulation. *BMC Public Health*, *21*(1), 42.

[168] Strusberg, I., Mendelberg, R. C., Serra, H. A., & Strusberg, A. M. (2002). Influence of weather conditions on rheumatic pain. *The Journal of rheumatology*, *29*(2), 335-338.
[169] McAlindon, T., Formica, M., Schmid, C. H., & Fletcher, J. (2007). Changes in barometric pressure and ambient temperature influence osteoarthritis pain. *The American journal of medicine*, *120*(5), 429-434.
[170] Wang, L., Xu, Q., Chen, Y., Zhu, Z., & Cao, Y. (2023). Associations between weather conditions and osteoarthritis pain: a systematic review and meta-analysis. *Annals of medicine*, *55*(1), 2196439.
[171] Mohamed Ahmed Neama Hamid, Baneen Haitham Abed Jaafar, Hanin Hani Hamzah Rashid, Tiba Salim Habeeb Timoz, & Raghad Raied Naji Wadi. (2024). REVIEW ARTICLE ABOUT BLOOD PRESSURE AND ATMOSPHERIC PRESSURE. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.13735900
[172] Okuma, H., Okuma, Y., & Kitagawa, Y. (2015). Examination of fluctuations in atmospheric pressure related to migraine. *Springerplus*, *4*(1), 790.
[173] Dohmen, L. M., Spigt, M., & Melbye, H. (2020). The effect of atmospheric pressure on oxygen saturation and dyspnea: the Tromsø study. *International Journal of Biometeorology*, *64*(7), 1103-1110.
[174] Chen, Y. J., Wang, Y. H., & Young, Y. H. (2023). Correlating atmospheric pressure and temperature with Meniere attack. *Auris Nasus Larynx*, *50*(2), 235-240.
[175] Maini, K., & Schuster, N. M. (2019). Headache and barometric pressure: a narrative review. *Current Pain and Headache Reports*, *23*(11), 87.
[176] de Steenhuijsen Piters, W. A. A., Algra, A., Van Den Broek, M. F. M., Dorhout Mees, S. M., & Rinkel, G. J. E. (2013). Seasonal and meteorological determinants of aneurysmal subarachnoid hemorrhage: a systematic review and meta-analysis. *Journal of neurology*, *260*(2), 614-619.
[177] Houck, P. D., Lethen, J. E., Riggs, M. W., Gantt, D. S., & Dehmer, G. J. (2005). Relation of atmospheric pressure changes and the occurrences of acute myocardial infarction and stroke. *The American journal of cardiology*, *96*(1), 45-51.
[178] Jimenez-Conde, J., Ois, A., Gomis, M., Rodriguez-Campello, A., Cuadrado-Godia, E., Subirana, I., & Roquer, J. (2008). Weather as a trigger of StrokeDaily meteorological factors and incidence of stroke subtypes. *Cerebrovascular Diseases*, *26*(4), 348-354.
[179] Honig, A., Eliahou, R., Pikkel, Y. Y., & Leker, R. R. (2016). Drops in barometric pressure are associated with deep intracerebral hemorrhage. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, *25*(4), 872-876.
[180] Kimoto, K., Aiba, S., Takashima, R., Suzuki, K., Takekawa, H., Watanabe, Y., ... & Hirata, K. (2011). Influence of barometric pressure in patients with migraine headache. *Internal Medicine*, *50*(18), 1923-1928.
[181] Kious, B. M., Kondo, D. G., & Renshaw, P. F. (2018). Living high and feeling low: altitude, suicide, and depression. *Harvard review of psychiatry*, *26*(2), 43-56.
[182] Dumenčić, B., Rajc, J., Marjanović, K., Požgain, I., & Pavoković, D. (2019). Impact of meteorological factors on suicide attempts and completed suicides in Croatia, Osijek-Baranja county. *Psychiatria Danubina*, *31*(4), 405-412.
[183] Doherty, M. J., Youn, C. E., Haltiner, A. M., & Watson, N. F. (2010). Do weather-related ambient atmospheric-pressure changes influence sleep disordered breathing?. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, *6*(2), 152-156.
[184] Gürkov, R., Strobl, R., Heinlin, N., Krause, E., Olzowy, B., Koppe, C., & Grill, E. (2016). Atmospheric pressure and onset of episodes of Menière's disease-a repeated measures study. *PloS one*, *11*(4), e0152714.

[185] Kloss-Brandstätterl, A., Hächll, O., Leitgebl, P. C., Buchnerl, A., Coassinl, S., Rassel, M., ... & Klossl, F. R. (2011). Epidemiologic evidence of barometric pressure changes inducing increased reporting of oral pain. *European Journal of Pain*, *15*(8), 880-884.
[186] Karanikolić, A., Karanikolić, V., Đorđević, L., & Pešić, I. (2016). Correlation between the season, temperature and atmospheric pressure with incidence and pathogenesis of acute appendicitis. *Srpski arhiv za celokupno lekarstvo*, *144*(7-8), 402-407.
[187] Lim, D. K., Jeon, J. S., Jang, T. S., & Kim, J. K. (2022). Association between climatic factors and respiratory syncytial virus detection rates in Cheonan, Korea. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(9), 13315-13322.
[188] Fagerlund, A. J., Iversen, M., Ekeland, A., Moen, C. M., & Aslaksen, P. M. (2019). Blame it on the weather? The association between pain in fibromyalgia, relative humidity, temperature and barometric pressure. *PLoS One*, *14*(5), e0216902.
[189] Cassol, C. M., Martinez, D., da Silva, F. A. B. S., Fischer, M. K., Lenz, M. D. C. S., & Bós, Â. J. G. (2012). Is sleep apnea a winter disease?: meteorologic and sleep laboratory evidence collected over 1 decade. *Chest*, *142*(6), 1499-1507.
[190] Naghii, M. R. (2005). Public health impact and medical consequences of earthquakes. *Revista Panamericana de Salud Pública*, *18*, 216-221.
[191] Ripoll Gallardo, A., Pacelli, B., Alesina, M., Serrone, D., Iacutone, G., Faggiano, F., ... & Allara, E. (2018). Medium-and long-term health effects of earthquakes in high-income countries: a systematic review and meta-analysis. *International journal of epidemiology*, *47*(4), 1317-1332.
[192] Aksoy, C. G., Chupilkin, M., Koczan, Z., & Plekhanov, A. (2024). Unearthing the impact of earthquakes: A review of economic and social consequences. *Journal of Policy Analysis and Management*.
[193] Marsden, I. D., Hart, D. E., Reid, C. M., & Gomez, C. (2016). Earthquake disturbances. In *Encyclopedia of Estuaries* (pp. 207-214). Springer, Dordrecht.
[194] Nazaretyan, S. N., & Igityan, H. A. (2022). Possible environmental impact of a destructive earthquake. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, *58*(Suppl 1), S111-S124.
[195] Kramer, S. L. (1996). GEOTECHNICALEARTHQUAKE ENGINEERINGKRAMER 1996. pdf.
[196] Doocy, S., Daniels, A., Packer, C., Dick, A., & Kirsch, T. D. (2013). The human impact of earthquakes: a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. *PLoS currents*, *5*, ecurrents-dis.
[197] Agarwal, R. (2020). Effects of earthquakes on environment. *Van Sangyan*, *7*(3), 21-26.
[198] Freund, F., & Stolc, V. (2013). Nature of pre-earthquake phenomena and their effects on living organisms. *Animals*, *3*(2), 513-531.
[199] Kormacher, M., & Moore, A. (2025). Earthquake Factsheet. Cascadia Disaster Research Center. https://cdrc.uw.edu/wp-content/uploads/2025/10/CDRC-Earthquake-Factsheet-Accessible.pdf
[200] Oluwafemi, J. O., Ofuyatan, O. M., Sadiq, O. M., Oyebisi, S. O., Abolarin, J. S., & Babaremu, K. O. (2018). Review of world earthquakes. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, *9*(9), 440-464.
[201] Choudhury, M., Verma, S., & Saha, P. (2016, December). Effects of earthquake on the surrounding environment: an overview. In *Proceedings of international conference on recent advances in mechanics and materials*.
[202] Nola, I. A. (2018). Earthquakes and their environmental, medical and public health impacts. *salud pública de méxico*, *60*, 16-22.
[203] Porcelli, F., & Trezzi, R. (2019). The impact of earthquakes on economic activity: evidence from Italy. *Empirical Economics*, *56*(4), 1167-1206.

[204] Valensise, G., & Guidoboni, E. (2000). Earthquake effects on the environment: from historical descriptions to thematic cartography. *Annals of Geophysics*, *43*(4).
[205] Ovuga, E. (Ed.). (2012). *Post Traumatic Stress Disorders in a Global Context*. BoD-Books on Demand.
[206] Tatevossian, R. E., Rogozhin, E. A., Arefiev, S. S., & Ovsyuchenko, A. N. (2009). Earthquake intensity assessment based on environmental effects: principles and case studies.
[207] Gauchan, D., Joshi, B. K., & Ghimire, K. (2017). Impact of 2015 earthquake on economy, agriculture and agrobiodiversity in Nepal. *Rebuilding Local Seed System of Native Crops in Earthquake Affected Areas in Nepal. Proceedings of National Sharingshop*.
[208] Mavroulis, S., Mavrouli, M., Lekkas, E., & Tsakris, A. (2017, April). Impact of earthquakes and their secondary environmental effects on public health. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 3884).
[209] Jaiswal, K., Wald, D. J., & Hearne, M. (2009). Estimating casualties for large earthquakes worldwide using an empirical approach.
[210] Bartels, S. A., & VanRooyen, M. J. (2012). Medical complications associated with earthquakes. *The Lancet*, *379*(9817), 748-757.
[211] Bayram, H., Rastgeldi Dogan, T., Şahin, Ü. A., & Akdis, C. A. (2023). Environmental and health hazards by massive earthquakes. *Allergy*, *78*(8), 2081-2084.
[212] Holzer, T. L., & Savage, J. C. (2013). Global earthquake fatalities and population. *Earthquake Spectra*, *29*(1), 155-175.
[213] Sherchand, J. B. (2015). Earthquake disaster-associated health effects and the need for improved preventive measures. *Journal of Institute of Medicine Nepal*, *37*(1), 1-3.
[214] Alexander, D. (1996). The health effects of earthquakes in the mid-1990s. *Disasters*, *20*(3), 231-247.
[215] Harada, N., Shigemura, J., Tanichi, M., Kawaida, K., Takahashi, S., & Yasukata, F. (2015). Mental health and psychological impacts from the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster: a systematic literature review. *Disaster and military medicine*, *1*(1), 17.
[216] Beaglehole, B., Mulder, R. T., Frampton, C. M., Boden, J. M., Newton-Howes, G., & Bell, C. J. (2018). Psychological distress and psychiatric disorder after natural disasters: systematic review and meta-analysis. *The British Journal of Psychiatry*, *213*(6), 716-722.
[217] Bertinelli, L., Mahé, C., & Strobl, E. (2023). Earthquakes and mental health. *World Development*, *169*, 106283.
[218] Majumder, J., Saha, I., Bagepally, B. S., Munikrishnappa, D., Kalita, M., Ray, S., ... & Chakrabarti, A. (2025). Mental Health Following Earthquake in South-east Asia: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Mental Health and Human Behaviour*, *30*(1), 13-26.
[219] Kario, K., Bruce, S. M., & Thomas, G. P. (2003). Disasters and the heart: a review of the effects of earthquake-induced stress on cardiovascular disease. *Hypertension Research*, *26*(5), 355-367.
[220] Bachev, H., & Ito, F. (2017). Agricultural impacts of the great east Japan earthquake-six years later. *Available at SSRN 2977972*.
[221] Sinha, A. K., & Kumar, S. (2017). Economic consequences of earthquakes. *Rehabilitation*, *8*, 28-21.
[222] Mazzocchi, M., & Montini, A. (2001). Earthquake effects on tourism in central Italy. *Annals of Tourism Research*, *28*(4), 1031-1046.
[223] Çiftci, G., & Bayram, S. (2021). The effects of earthquakes on tourism: Evidence from Turkey. *Journal of Tourism Leisure and Hospitality*, *3*(2), 82-94.
[224] Badal, J., Vazquez-Prada, M., & González, Á. (2005). Preliminary quantitative assessment of earthquake casualties and damages. *Natural Hazards*, *34*(3), 353-374.

[225] Jaiswal, K., & Wald, D. (2010). An empirical model for global earthquake fatality estimation. *Earthquake Spectra*, *26*(4), 1017-1037.
[226] Handson Technology. (2021). AHT10 High-Precision Digital Temperature & Humidity Sensor Module. Robu.in.. https://robu.in/wp-content/uploads/2021/01/AHT10.pdf
[227] ScioSense B.V. (2020). ENS160: Digital Metal Oxide Multi-Gas Sensor (Rev. 0.95). Mouser Electronics. https://www.mouser.com/datasheet/2/1081/SC_001224_DS_1_ENS160_Datasheet_Rev_0_95-2258311.pdf
[228] Bosch Sensortec GmbH. (2013). BMP180: Digital Pressure Sensor (Rev. 2.5). Adafruit. https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf
[229] STMicroelectronics. (2024). LIS2DW12: MEMS digital output motion sensor - high-performance ultralow-power 3-axis “femto” accelerometer. STMicroelectronics. https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis2dw12.pdf
[230] Seeed Technology Inc. (2015). Grove - Dust Sensor: User Manual (Version 1.0). Mouser Electronics. https://www.mouser.com/datasheet/2/744/Seeed_101020012-1217636.pdf
[231] ams AG. (2022). AS7331: Spectral Analog Front End for Optical Measurements. Mikroe. https://download.mikroe.com/documents/datasheets/AS7331_datasheet.pdf
[232] Waveshare. (n.d.). Sound Sensor. Waveshare Wiki. https://www.waveshare.com/wiki/Sound_Sensor
[233] Espressif Systems. (2025). ESP32-S3 Series Datasheet (Version 2.0). https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf
[234] Hannah Ritchie, Veronika Samborska, and Max Roser (2024) - “Urbanization” Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/urbanization'
[235] Population Education. (2025). Increasing number of large cities [Infographic]. Population Education. Retrieved from https://populationeducation.org/resource/increasing-number-large-cities-infographic/
[236] Talhelm, T. (2019). What is PM2.5 AQI and how is it calculated? Smart Air. Retrieved from https://smartairfilters.com/en/blog/difference-pm2-5-aqi-measurements/?srsltid=AfmBOootOs--1Vr7neF_fFONJbZtRB8FVyWc_VKa3m6u8FeIBVoLEALO smartairfilters.com
[237] ScienceDirect Topics. (n.d.). Volatile organic compound - an overview. In ScienceDirect. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/volatile-organic-compound
[238] Smith, D. (2022). Understanding TVOC: What you need to know about volatile organic compounds. Kaiterra. Retrieved from https://learn.kaiterra.com/en/resources/understanding-tvoc-volatile-organic-compounds/
[239] Tse, V. (2025). How Loud is Too Loud? Understanding Decibel Levels with Decibel Chart. Cearvol. Retrieved from https://cearvol.com/blogs/hearing-aids/understand-decibel-levels-with-decibel-chart
[240] Milman, O. (2023). Earth’s ozone layer on course to be healed within decades, UN report finds. The Guardian. Retrieved from https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/09/ozone-layer-healed-within-decades-un-report
[241] Sung, W. T., & Hsiao, S. J. (2021). Building an indoor air quality monitoring system based on the architecture of the Internet of Things. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, *2021*(1), 153.

[242] N. Hanacek/NIST. (n.d.). Electromagnetic spectrum graphic. National Institute of Standards and Technology. Retrieved October 20, 2025, from https://www.nist.gov/image/electromagnetic-spectrum-graphic
[243] Prevent Cancer Foundation. (2024). Clearing the haze about the UV Index. Retrieved https://preventcancer.org/article/uv-index/
[244] Roberts, S. (2025). What is the proper humidity level to prevent mold, equipment damage and discomfort? Tom's Commercial. Retrieved from https://www.tomscommercial.com/blog/what-is-the-proper-humidity-level
[245] Britannica Editors (2025, September 24). *atmospheric pressure*. *Encyclopedia Britannica*. https://www.britannica.com/science/atmospheric-pressure
[246] GeoVera. (2023, April 27). The history of the Richter scale. https://geovera.com/2023/04/27/history-richter-scale/
[247] U.S. Geological Survey. (n.d.). Modified Mercalli Intensity Scale. https://www.usgs.gov/media/images/modified-mercalli-intensity-scale
[248] The Engineering Projects. (2025). AHT10 High-Precision Digital Temperature and Humidity Measurement Module. https://www.theengineeringprojects.com/2025/01/aht10-high-precision-digital-temperature-and-humidity-measurement-module.html
[249] Botland. (n.d.). Fermion ENS160 air quality sensor - DFRobot SEN0515. https://botland.store/air-quality-sensors/20980-fermion-ens160-air-quality-sensor-dfrobot-sen0515-6959420921690.html
[250] Elecrow. (n.d.). BMP180 Barometer Pressure/Temperature/Altitude Sensor. https://www.elecrow.com/bmp180-barometer-pressuretemperaturealtitude-sensor-p-1088.html
[251] Grobotronics. (n.d.). Gravity: Triple Axis Accelerometer I2C - LIS2DW12. https://grobotronics.com/gravity-triple-axis-accelerometer-i2c-lis2dw12.html
[252] Botland. (n.d.). Grove Dust Purity Air Sensor PM2.5 - PPD42NS 5V PWM. https://botland.store/grove-gas-dust-sensors/13331-grove-dust-purity-air-sensor-pm25-ppd42ns-5v-pwm-5903351246583.html
[253] Elecrow. (n.d.). AS7331 UVA/B/C Light Sensor Breakout. https://www.elecrow.com/as7331-uva-b-c-light-sensor-breakout.html?idd=2
[254] Waveshare. (n.d.). LM386 Sound Sensor, Sound Detector, Compatible with Arduino. https://www.waveshare.com/sound-sensor.html